

No. **35**

▼
2021

■ **高砂熱学** ■

■ **イノベーションセンター報** ■

高砂熱学イノベーションセンター報

No. 35 2021

目 次

【巻頭言】

ゼロ・ウォーター・ビル実現への期待 (関東学院大学 大塚雅之) 1

【イノベーションセンター特集】

エネルギー自立型サステナブル研究施設

1. 空調システムの夏期・冬期性能評価と最適化への提言

(柴田克彦・平原美博・清水昭浩・木村健太郎・羽鳥大輔・武藤友香・滝澤知史・田辺新一) 5

2. 二次側空調機器の性能評価および執務者の環境満足度

(木村健太郎・相澤直樹・平原美博・羽鳥大輔・武藤友香・竹原大暉・渡邊円・鶴飼真成・田辺新一) 17

3. 再生可能エネルギーの活用状況および運用実績

(相澤直樹・平原美博・清水昭浩・大迫孝輔・羽鳥大輔・武藤友香) 36

4. ZEB 達成状況の評価と対策

(清水昭浩・平原美博・松浪佑宜・羽鳥大輔・高正明・武藤友香・田辺新一) 44

5. Development of a Grid Independent Energy System Using Energy Supply and Demand Prediction (Part 1) Concept and Problem Identification from Operational Data

(Yuki Matsunami, Yuan Gao, Shohei Miyata, Yasunori Akashi

Katsuhiko Shibata, Kenichiro Katayama, Yoshihiro Hirahara) 50

【技術論文】

1. アルミ冷媒配管システムの開発 -アルミ冷媒配管と銅冷媒配管との施工検証- (込山治良・権田勝美) 57

2. 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発 -塗装工程の空調機での除湿利用-

(鎌田美志・川上理亮・谷野正幸・山内一正・井守正隆・佐藤雄・名和博之・松田聡・佐藤陽一) 68

3. Performance Verification of a Sub-Cooling System for a Refrigeration Showcase

(Daisuke Baba, Yoshiaki Kawakami, Shuichi Ishii, Katsuhiko Shibata, Toshikazu Saburi,

Kazunari Nishikata, Junichi Shimoie, Tsutomu Watanabe, Takuya Abe, Masao Takekura) 77

4. 吸着材蓄熱の蓄放熱運転の計算モデル

(鎌田美志・川上理亮・谷野正幸) 84

【レビュー】

1. サーマルマイニングによる月面水採取(第一報) レゴリス内の伝熱解析と水採取方法の検討

(内田浩基・川上理亮・松風成美・森田健) 98

2.建物エネルギー管理システム(BEMS)概説 (柴田克彦) 116

3.空調における新型コロナウイルス対策 (五味弘) 133

【技術紹介】

1.資源作物のエネルギー利用可能性ーエリアンサスの特徴と栽培・利用実態ー
(元田治・朝倉梓・土肥哲哉・蝦名真澄) 143

Report of Innovation Center
of Takasago Thermal Engineering Co., Ltd.

No. 35 2021

CONTENTS

【Preface】

Expectations for Realization of Zero Water Buildings

(Kanto Gakuin University)

(Masayuki Otsuka) 1

【Special Issue of Innovation Center】

The Energy Self-Sufficient Innovation Center

1. Performance Evaluation of an Air Conditioning System in Summer and Winter Operations and
Recommendations for Optimization

(Katsuhiko Shibata · Yoshihiro Hirahara · Akihiro Shimizu · Kentaro Kimura · Daisuke Hatori

Yuka Mutoh · Tomofumi Takizawa · Shin-ichi Tanabe) 5

2. Evaluation of Secondary Air Conditioner Performance and its Influence on Environmental
Satisfaction of Workers

(Kentaro Kimura · Naoki Aizawa · Yoshihiro Hirahara · Daisuke Hatori · Yuka Mutoh

Daiki Takehara · Tsubura Watanabe · Masanari Ukai · Shin-ichi Tanabe) 17

3. Operational Results in the Use of Renewable Energy System

(Naoki Aizawa · Yoshihiro Hirahara · Akihiro Shimizu

Kosuke Osako · Daisuke Hatori · Yuka Muto) 36

4. Evaluation of ZEB Achievement Status and Countermeasures

(Akihiro Shimizu · Yoshihiro Hirahara · Yuuki Matsunami

Daisuke Hatori · Masaaki Taka · Yuka Mutoh · Shin-ichi Tanabe) 44

5. Development of a Grid Independent Energy System Using Energy Supply and Demand Prediction (Part

1) Concept and problem identification from operational data

(Yuki Matsunami, Yuan Gao, Shohei Miyata, Yasunori Akashi

Katsuhiko Shibata, Kenichiro Katayama, Yoshihiro Hirahara) 50

【Technical Papers】

1. Development of Aluminum Refrigerant Plumbing System ~ Construction Verification of the aluminum refrigerant plumbing and the copper refrigerant plumbing ~
(Haruyoshi Komiyama・Katsumi Gonda) 57
2. Development of an Adsorption Thermal Storage System Utilizing Low-temperature Waste Heat: Utilizing of Dehumidification Function of Air conditioners for Painting Processes
(Haruyuki Kamata・Yoshiaki Kawakami・Masayuki Tanino・Kazumasa Yamauchi・Masataka Imori・Yu Sato・Hiroyuki Nawa・Satoru Matsuda・Yoichi Sato) 68
3. Performance Verification of a Sub-Cooling System for a Refrigeration Showcase
(Daisuke Baba, Yoshiaki Kawakami, Shuichi Ishii, Katsuhiko Shibata, Toshikazu Saburi, Kazunari Nishikata, Junichi Shimoie, Tsutomu Watanabe, Takuya Abe, Masao Takekura) 77
4. Calculation Model for Charging and Discharging Operation of an Adsorption Thermal Storage System
(Haruyuki Kamata・Yoshiaki Kawakami・Masayuki Tanino) 84

【Review】

1. Thermal Mining of Water on Lunar Regolith Part 1 - Thermal Analysis of Regolith and Examination of Lunar Water Mining Method
(Hiroki Uchida・Yoshiaki Kawakami・Narumi Matsukaze・Ken Morita) 98
2. Overview of Building and Energy Management System
(Katsuhiko Shibata) 116
3. Countermeasures Against COVID-19 with Respect to the Air Conditioning System
(Hiroshi Gomi) 133

【New Technologies】

- Energy availability of resource crops Characteristics of Erianthus and actual cultivation and utilization -
(Osamu Motoda・Azusa Asakura・Tetsuya Doi・Masumi Ebina) 143

ゼロ・ウォーター・ビル実現への期待

Expectations for Realization of Zero Water Buildings

関東学院大学 建築・環境学部長
教授 工学博士 大塚 雅之

Kanto Gakuin University
Masayuki Otsuka



はじめに

2015年の国連サミットで採択され、加盟国が達成目標として掲げたSDGs（持続可能な開発目標）の実現に向けて様々な取り組みが活発に行われている。その一環として、建築・環境分野でも2050年カーボンニュートラル化の実現に向けて総合的な対策が必要とされている。特に、エネルギー消費量の削減を目的としたZEBやZEHに関する技術開発とその普及が、最優先課題である。一方、都市人口の増加、開発途上国の経済成長、気候変動の影響などにより世界規模で水資源問題も多発している。都市・建築における使用水量の削減、水のリサイクル利用は、水資源の維持保全とともにインフラへの負荷も削減でき、地球環境問題を改善する上で重要なテーマである。このような背景から諸外国では、建物と敷地内の水量の収支を総合的にゼロとするゼロ・ウォーター・ビル（ZWB: Zero Water Buildings）への関心が高まっている。ZWBとは「雨水・井水・排水再生水等の代替水量（Alternative Water Use）と敷地内の排水処理水・グリーンインフラ等より集水し、地下水等に戻される還元水量（Water Returned）の和が、対象となる建物での総水消費量（Total Water Use）に等しいとすること」と定義され、その実現に向けて、わが国としてのシナリオが必要とされている（図1）。

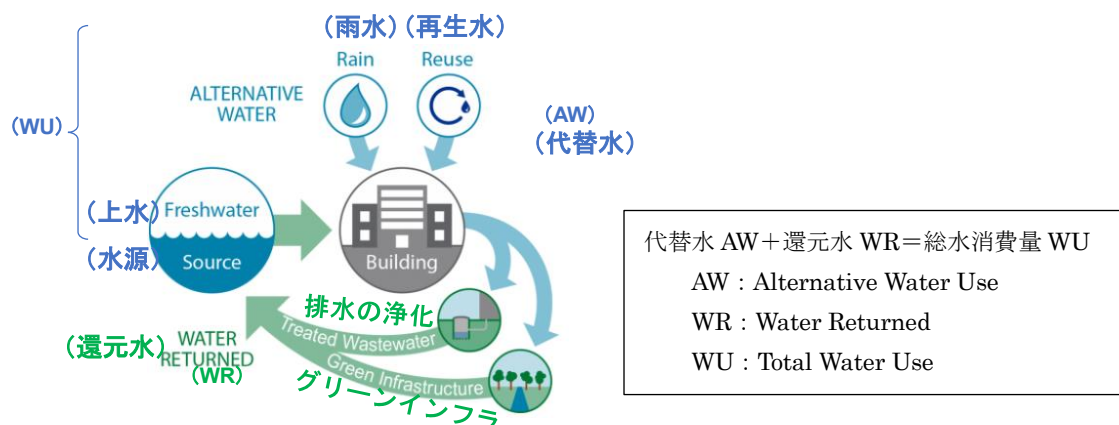


図1 Zero Water Building の概念図

（アメリカ合衆国エネルギー省ホームページ, 連邦エネルギー管理計画, Net Zero Water Building Strategies）

■使用水量（Total Water Use）の削減—節水型機器の普及と設計用給水単位水量の刷新

現在、われわれが日常使用している各種衛生器具、例えば大・小便器、シャワーなどの国際標準化（ISO化）に向けた作業が進められている。その中では製品試験法、節水効果評価、ラベリングなどの基準が盛り込まれることになるが、各国の事情は様々であり統一した基準の策定は難しく、国情に合わせた基準を包括的に認めて行く方向に向かっている。水問題は水資源が豊富な国々、乏しい国々によって節水化への認識や捉え方にも温度差がある。1992年にアメリカでエネルギーアクト法が制定され、その一環として大便器の洗浄水量が6.0Lに規制されたのを契機に世界的に節水化が促進されてきた（図2）。わが国でも節水型機器の普及に伴い大・小便器の洗浄水量、シャワー使用湯量が削減されており、従来の普及品と比べ大便器で30～50%、節水節湯型水栓で20～30%の削減効果が期待できる。

高砂熱学イノベーションセンター報 No.35 2021.

その影響もあり、今や給排水設備の設計に使用される給水単位水量も見直しの時期を迎えている。例えば事務所ビル
の設計用給水単位水量は、現在は一人当たり 1 日 60~100L とされているが、現状はほぼ半分の 40~60L、病院にお
いては規模によるばらつきはあるが一床当たり 1 日 1,500~3,500L が 750L 程度と半分以下の値であることが調査結
果よりわかってきている。節水形機器の普及に伴い、設計の基本となる給水単位水量を刷新することで、建物総使用
水量の大幅な削減が期待できる。

ZWB の実現には、旧態依然として改定されなかった設計用の給水単位水量を見直し、新たな単位水量を策定し、
使用水量を削減した設計を行うことが必要であり、機器容量もコンパクト化でき運転時のエネルギー削減にも繋がる。
官公庁、自治体の設計要領やガイドラインの規定値へのインパクトも大きく、その役割は、学術面からも情報発信力、
影響力の強い空気調和・衛生工学会が担うべきで、数値提言は実務的に極めて貢献度が高く、ZWB 達成への一歩で
ある。

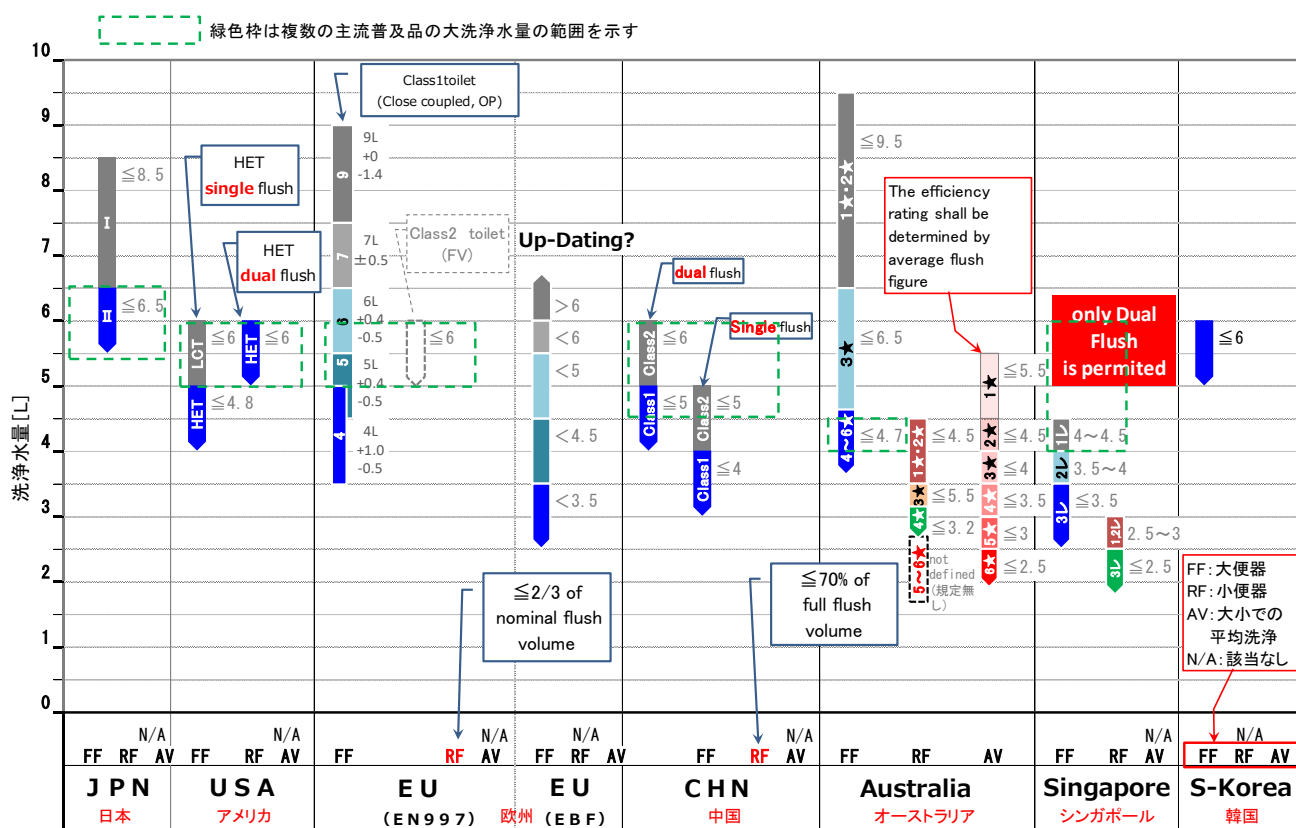


図 2 各国の節水形大便器の洗浄水量

(日本レストルーム工業会資料)

■代替水量(Alternative Water Use)の供給—雨水・井水の積極利用と再生水の可能性

わが国の首都圏と地方圏における 2010 年から 2040 年までの人口と水道料金の推移をみると、人口の変化は都市圏
では大きな変化がなくほぼ横ばいであるのに対し、地方圏では人口減少の傾向を示す中、両圏とも上水道料金は増加
の一途をたどるため、住民の上水への負担額は増加することが予見される。今や地方公共団体でも水道事業の運営・
維持管理にはコストがかかるため、民営化に踏み切る自治体もある。飲用以外への上水への利用を軽減するには、上
水の代替水として、雨水、井水などの代替水源を積極的に利用することが ZWB の実現へは欠かせない。

先般、オーストラリアのタスマニア島を訪れた際、南極大陸から運ばれるきれいな空気と雨雲がもたらす雨水を飲
用に用いている施設を訪問し、飲用体験をした。まさに自然の恩恵、サステナブルな雨水利用である。わが国では
そうは行かず、雨水は雑用水として、トイレ洗浄水、修景・散水、清掃用水などに用いる程度である。また、2014 年
に施行された「雨水の利用の推進に関する法律」により、国及び独立行政法人などが整備する建物については、雨水
利用施設の設置率 100%とすることとなったが、一般に雨水利用によるトイレ洗浄水や散水・清掃用水としての上水
代替率は 30 から 45%であり、ZWB の達成への寄与には限界がある。前述したオーストラリアなどの国土の多くが砂

漠で水資源の逼迫した国々では節水化の一環として、上水の使用後の汚水・雑排水も膜処理技術を用いて排水処理し、積極的に利用している。わが国では、上水使用後に個々の建物での個別循環利用はコストもかかるため建物は限定されるが、今後は複数の建物からの排水を処理し活用する地区循環方式や下水終末処理場などでの二次処理水や高度処理水を地域や都市で再利用する広域循環方式などの普及も考え、使用水量の削減を試みることも必要である。

最近、井水は、非常時には浄化し飲用水として、また純水製造用途などへも用いられており、海水の淡水化など造水技術も進んでいる。排水の膜処理装置や造水装置の維持管理・コスト等は、雨水利用設備よりかかるため、一般ビルでの普及が難しいが、高度な処理も一つの挑戦的技術として、ZWB 普及を促す意味で評価すべきであると思う。ZWB の達成に向けての代替水源の確保を地域・都市といった広域を視野に入れ考えなければならない。

■災害対策への貢献も ZWB 要素—BCP 対応とグリーンインフラの活用を

国土交通省では、2019 年に防災拠点となる建築物に係る機能継続ガイドラインをまとめている。その中では、大地震時に防災拠点となる建築物（庁舎、避難所、病院等）については安全性確保に加え、地震後も機能維持できるように高い性能が求められている。建築設備に要求させる項目として、平時と共にインフラの途絶時に対する水源の確保、システムの並列化、冗長性を基本とした対策を講ずることが指針とされている。

阪神淡路の震災、東日本大震災においてもインフラの途絶、そして給水と排水に支障を来した避難所での生活は、人体が機能不全を起こすのと同様に生活に大きな影響を与えた。特に電気、ガスの復旧に比べ、脆弱な上下水道管の復旧には時間を要したことも報じられている。改めて建物における BCP（事業継続計画）と LCP（生活継続計画）を維持するには給水と排水の機能は不可欠なものであることが再認識された。直近では、2016 年の熊本地震発生時において、トイレ洗浄水として雨水貯留を行っていたために、上水道の供給が停止した 6 日間でも継続してトイレ使用ができたことも報告されており、生活用水の確保の必要性を示した事例とも言える。

国総研総合技術開発プロジェクトでも、BCP、LCP に対応した給排水設備として、先ず上水と雑用水の二系統給水とし、飲用に加えトイレ洗浄水などを確保し 7～10 日間程度の使用に耐えうる機能を確保することも提案されている。また、津波・洪水等による浸水被害に対し、排水の排除を考慮した排水設備や機能維持のための水密コアスペース、常設の消防設備となる連結送水管を活用した高層化への臨時送水システムの提案などもなされている。災害時の BCP、LCP への対策を講ずることに対し、持続可能な保有水量の確保を評価するとともに、上下水道が途絶した際に復旧までの間、機能低下を防ぐための非常用設備の装備も ZWB の認定項目の一つに加えていくべきである。

また、都市部においては気候変動による豪雨対策としてグリーンインフラの活用、雨水の浸透施設や貯留施設などの雨水抑制施設の設置、集中豪雨により都市型洪水の抑制を図ることなど、使用水量、代替水量、還元水量のバランスだけでは評価できない水害対策項目も ZWB の付加価値として考慮していくことが必要である。

■新たな ZWB への展開のシナリオの提案に向けて

わが国でも、実在の幾つかの建物での水使用、雨水等のデータを用いて ZWB の達成への可能性が検討されている。実現に向けては、節水器具を採用し上水使用量を削減すること、雨水利用により雑用水を削減すること、敷地内の降雨の地下浸透させることでの対応となるが、トイレ洗浄等への雑用水の寄与率は、前述の通り上水代替率として 30 から 45%程度、狭小な敷地に建つ建物では雨水の地下水への還元量はそれほど期待できない。代替水源を雨水に頼るため、季節変動が大きく安定した水源とならないことが課題である。検討結果を俯瞰すると年間を通じての ZWB の達成率は 20 から 50%と評価され、パーフェクトな達成は現状では難しいと考えられる。

現実を踏まえ、わが国として研究者、実務家、行政が協議し、新たなシナリオを示すべきである。先ず評価項目となる使用水量の削減効果、代替水量、還元水量はモデル建物に対し、単独に必須項目としレベル評価してみる。次に、災害時の BCP、LCP 対策として寄与できる非常用水量や非常用設備の装備もオプションとしてレベルカウントし、それらも含めて総合的にポイント化して評価することも現実的ではないか。それに、適宜、節湯・排熱利用や汚泥バイオマスなど未利用エネルギーなどの熱的な側面から見た省エネルギー性も加味する(図3)。

また、水環境は人への健康影響も大きいので、建築物衛生法に規定する上水、雑用水は水の水質基準、安全性・衛生性などを遵守することも大切である。ZWB を単に一律に水量のみで評価するのではなく、他の要素を加えつつ、わが国の現状ににあった新たな ZWB の定義、構築のシナリオを提案することが水環境、給排水衛生設備の戦略ではないかと考える。

	評価項目	手法	レベル設定
【必須】	(1) 使用水量（上水）	[WU] 節水形器具使用	S・A・B・C
	(2) 代替水量	[AW] 雨水・井水・再生水	S・A・B・C
	(3) 還元水量	[WR] 地下浸透・ビオトープ グリーンインフラ	S・A・B・C
【オプション】	(4) 災害対策水量と設備	[WD] 災害時排水貯留 雨水抑制施設・2系統給水 マンホールトイレ	S・A・B・C
	(5) エネルギー削減量	[ES] 高効率給湯器 排水排熱利用・ミスト散水 汚泥バイオマス	S・A・B・C

※[WU]、[AW]、[WR]は前述
[WD: Water for disaster prevation mesures]
[ES: Enegy Saving]

[総合評価]

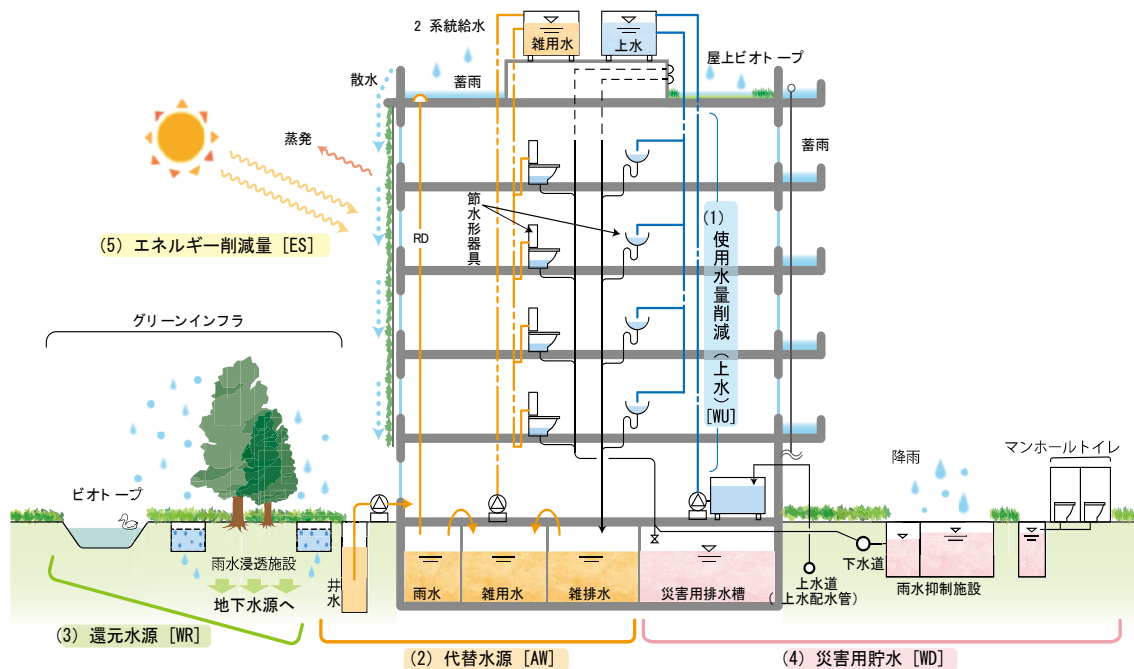


図3 ZWBの評価要素と評価イメージ

■おわりに

水環境、給排水衛生設備分野が取り組むべき新たなテーマとして、ゼロ・ウォーター・ビルの実現への課題と可能性について述べた。地球温暖化対策は、省エネルギーと省資源化の両輪で臨む必要があり、前者を空調設備、後者を給排水衛生設備が担うとすれば、ZWBのあり方を議論し、実建物における評価法を提案すること、ZWBの普及に努めることは国際社会の中でも重要な意味を持つものと考え。これからの自立循環型の建物を創造する建築設備業は、エネルギー問題のみではなく、水問題にも注力し、総合的に地球環境問題に取り組んでゆく必要があると思う。

エネルギー自立型サステナブル研究施設 —空調システムの夏期・冬期性能評価と最適化への提言—

柴田克彦・平原美博・清水昭浩
木村健太郎・羽鳥大輔^{*1}・武藤友香^{*1}
滝澤知史^{*1}・田辺新一^{*2}

Energy Self-Sufficient and Sustainable Innovation Center Performance Evaluation of an Air Conditioning System in Summer and Winter Operations and Recommendations for Optimization

Katsuhiko Shibata・Yoshihiro Hirahara・Akihiro Shimizu
Kentaro Kimura・Daisuke Hatori^{*1}・Yuka Mutoh^{*1}
Tomofumi Takizawa^{*1}・Shin-ichi Tanabe^{*2}

高砂熱学イノベーションセンターの空調システムは、ミニマム設計の実証の場として計画された。室内の空気質維持と潜熱負荷を外調機からの給気で処理し、顕熱負荷の未処理分を放射空調で賄う潜顕分離空調システムからなる。さらに個人の温熱感への対応として個別空調機を備えている。施設の運用開始時から、空調システムの特性を把握しながらトライアンドエラーで運転方法を最適化し、夏期・冬期における空調システムの性能を評価してきた。さらに、ZEB 建築としての熱的特性や従来熱負荷からの変化に対して、空調システムの特性を生かした運転方法や設計に関する新たな知見を得ている。

1. はじめに

高砂熱学イノベーションセンターでは、地球環境負荷削減と知的生産性向上を両立したエネルギー自立型のサステナブル研究施設を目指してシステム実証に取り組んでいる。これまでに施設概要（以下、本施設と呼ぶ）と設計計画を報告した^{1)~9)}。特に、二次側の空調方式は、ミニマム設計の実証として外調機により空気質の維持とベース負荷を処理し、顕熱の不足分を放射空調や個別空調の組合せで処理する潜顕分離空調システムを採用している。

本報では、夏期運転データから潜顕分離空調システムの外調機の除湿性能と放射空調の冷却能力を評価し、それらの組合せについて考察したので報告する。

2. 潜顕分離空調システムの評価方法

2.1 外気負荷

近年の ZEB 化に伴い、排熱の有効活用が進行している。その適例が、CGS の排熱を再生熱に利用したデシカント空調機である。高分子吸着剤の開発により低温再生が可能となってきた一方で、除湿性能の確保には、吸着剤からの脱着を十分に行う必要があり、温熱源の確保が鍵となる。本施設では、自立型電源としてバイオマスガス化発電機があるため、この排熱を温熱源として活用できる。

※本論文は、2021 年度空調冷凍連合講演会講演論文¹⁰⁾、空気調和・衛生工学会大会講演論文^{11),14)}を加筆修正したものである。

*1 株式会社三菱地所設計 *2 早稲田大学

高砂熱学イノベーションセンター報 No.35 2021.

他方、除湿器入口の空気温度で出口温度がほぼ決まるため、給気温度制御には予冷が重要である。本施設では、**図 1** に示す還気と取入外気との全熱交換器をデシカントロータの前段に組み込んだデシカント外調機を採用した。また、外調機からの給気と放射空調を併設した執務室向けには、冷熱源の地下水熱や排熱供給が停止しても除湿できるように**図 2** に示す全熱交換器組込型冷却除湿の外調機を採用した。両者の仕様は既報の通りである⁴⁾。ここでは、除湿方式の異なる両者の除湿性能、ならびに外調機に組み込んだ全熱交換機の効率について評価した¹⁰⁾。また、外調機からの給気と放射空調を併設した執務室向けには、冷熱源の地下水熱や排熱供給が停止しても除湿できるように**図 2** に示す全熱交換器組込型冷却除湿の外調機を採用した。両者の仕様は既報の通りである⁴⁾。ここでは、除湿方式の異なる両者の除湿性能、ならびに外調機に組み込んだ全熱交換機の効率について評価した¹⁰⁾。

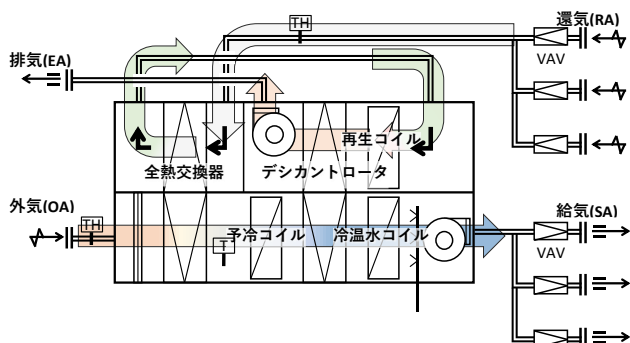


図 1 全熱交換器組込型デシカント外調機

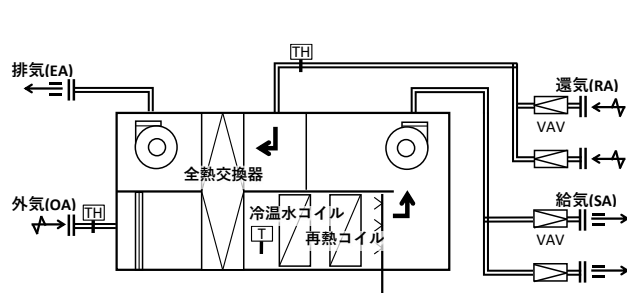


図 2 全熱交換器組込型冷却除湿外調機

2.2 空調システム

本施設の空調システムは、多様な空調方式から働き方に呼応した組合せが可能なタスク&アンビエント型の潜顕分離空調を採用している。本報では、フリーアドレス制で運用している二階主執務室(床面積623.5m²)の空調システムを評価対象とする。**図 3**に、空調システムの概要を示す。室内温湿度は、人体・内部発熱負荷、北側ガラス面・屋根面からの外皮負荷と、外調機からの給気、放射パネルとの熱・物質収支で成立する開ループ型である。なお、放射パネルは、執務室の長手方向両端を定流量、内部を電動弁の開閉でパネル表面が所定の温度となるように変流量制御している。

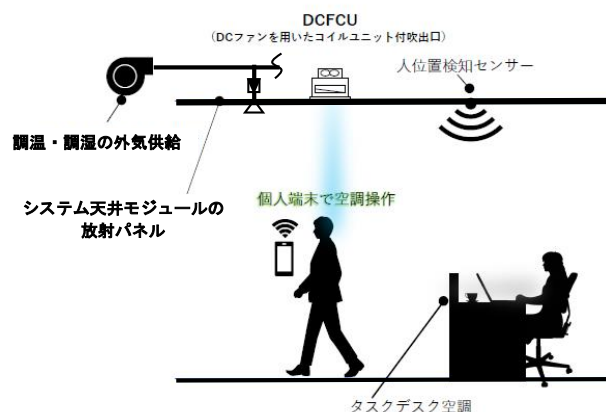


図 3 潜顕分離の二次側空調システム

本施設の運用開始直後から新型コロナウイルスの感染対策として、外調機の運転は居室内の人員や二酸化炭素濃度に関わらず最大風量である 6,850 m³/h で定風量制御を行った。ベース空調として吹出温度は夏期凡そ 21℃、冬期凡そ 38℃とした。

さらに、執務室 2-1 については冬期北側ガラス面からのコールドドラフト対策として、窓面から 60cm 程度に床暖房を設置した。明け方は建物躯体が冷え切っていることを考慮し、明け方から室内温度が安定するまで天井放射パネルによるウォーミングアップを実施した。

2.3 評価の要点

本施設開ループ型制御の室内温湿度は、外調機からの給気、放射パネルの通水量・温度によって決まる。ここでは、空調システムの性能評価を以下の項目とした。

①外調機の除湿性能

除湿方式による除湿量、制御精度、除湿負荷変動への応答性、および除湿への投入熱量を評価した。

②放射パネルの放熱性能

放射パネルを変流量とすることで、過冷却の抑止や部分負荷に対する熱源水搬送動力の削減効果が期待できる。そこで、電動弁の開閉頻度、パネルへの通水時間、居室への放熱量について評価した。

③空調システムの負荷分担

アンビエント空調としての顕熱処理の内、外調機の給気と放射パネルの負荷分担を評価した。なお、デスク用パーソナル空調機の性能は既報で評価している¹²⁾。

④室内環境の評価

2020/7/27～9/4 のお盆休みを除く夏期 5 週間、2021/1/4～2021/2/5 冬期 6 週間、室内温熱環境とパーソナル空調機の有効性を主眼として集中検証を行い、室内環境快適性と生産性を物理環境とアンケートで評価した^{13),14)}。

3. 外調機の性能評価

3.1 夏期の運転状況

外調機の給気状態は、露点温度と給気温度を制御している。以下、2020 年 6～9 月の夏期除湿性能を評価する。

図 4 に給気温度と露点温度の推移を示す。冷却除湿方式(OHU-201)は、夏期集中検証での運用変更、ピーク時の顕熱処理で、低めの給気設定温度もあったが、デシカント方式(OHU-101)ともども、ほぼ設定温度を維持していた。図 5 に除湿量の推移を示す。外気状態や露点温度設定により除湿量が多少変化しているものの、両者ともほぼ同量の除湿能力を発揮していた。

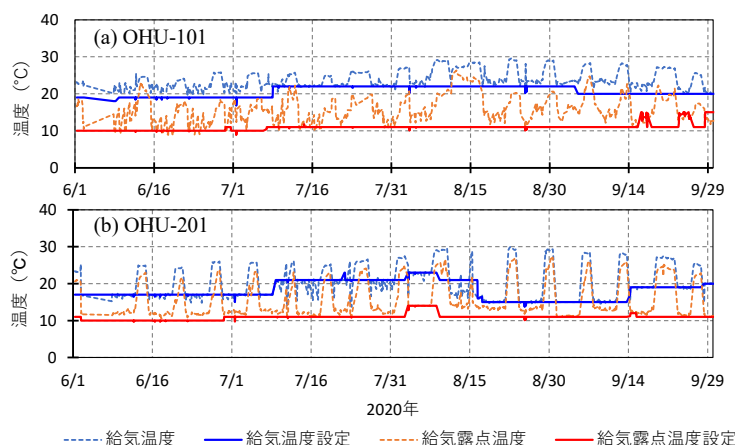


図 4 夏期給気温度と露点温度

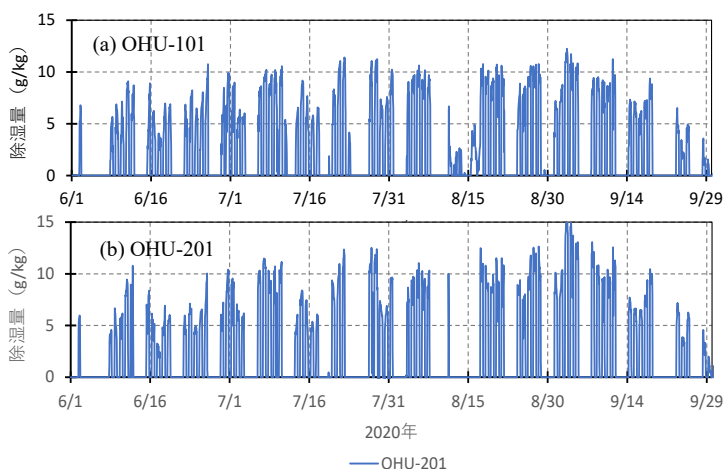


図 5 夏期除湿量

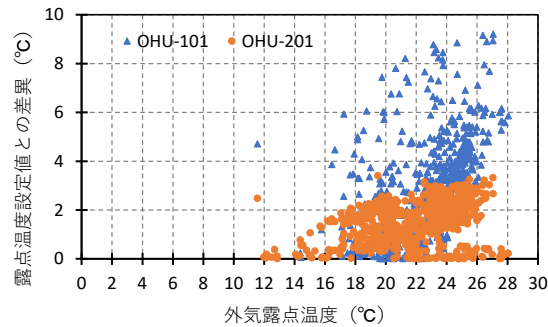


図 6 外気露点温度と露点温度設定値の差異

図 6 に外気露点温度と給気露点温度の設定値と状態値との差異を示す。これは、除湿制御の応答性の評価を意図したものである。図より、OHU-101 はピーク時に近い外気露点温度 24°C において差異が幅広く分布し、制御目標値に至るまでに時間を要していたと思われる。一方、OHU-201 は、ピーク時においても差異が 3°C 程度に収まり、制御応答性が良好であったと考えられる。

3.2 冬期の運転状況

図 7 に冬期代表週の給気温度と給気露点温度の推移を示す。OHU-101 の設定値は、給気温度が 28°C で露点温度が 15°C と、低温高湿での運転であった。一方、OHU-201 の設定値は、給気温度 38°C で露点温度が 11°C と、高温低湿での運転であった。両機器とも給気温度はほぼ設定値通りに制御されていたが、露点温度は、気化式加湿のため OHU-101 で設定値より低い状態となっていた。図 8 に加湿量の推移を示す。給気露点温度で見られた通り、OHU-101 が 1~2g/kg 程度少なめであった。

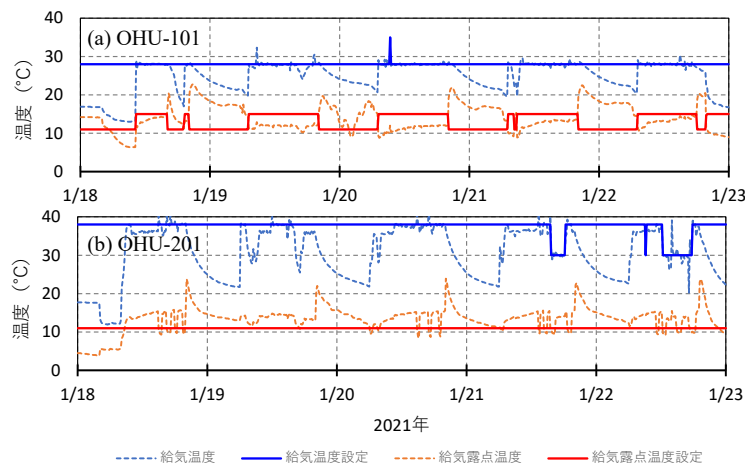


図 7 冬期給気温度と露点温度

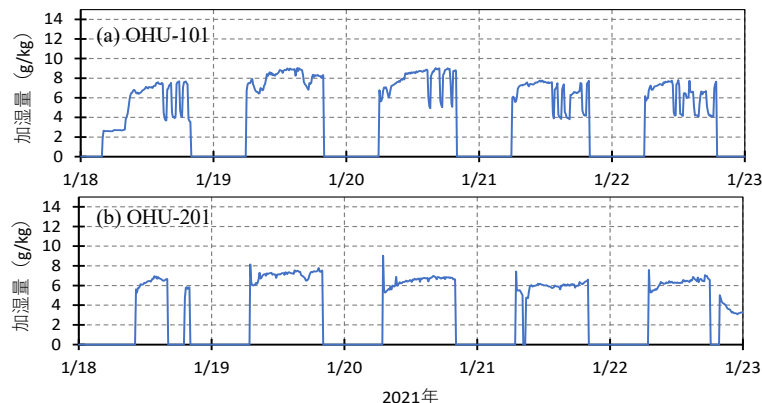


図 8 冬期加湿量

3.3 エネルギー効率

外調機に投入している熱エネルギーは次の通りである。

・デシカント方式：予冷＋冷却＋再生 ・冷却除湿方式 ：冷却＋再熱

単位除湿量当たりの投入した熱量を算出することでエネルギー効率が評価できるが、排熱からの温熱、地下水からの冷熱がある場合は、その分省エネルギーとなる。図 9 に、除湿量と投入熱量の相関を示す。図中の縦軸の熱量は、コイル水側の出入口温度差と流量から算出した熱量を風量で除した値である。デシカント方式(OHU-101)では、冷熱量と温熱量がほぼ同じであった。これは、デシカント方式に全熱交換器を組込むことで、デシカントロータへの予冷を凝縮手前までの設計とし、湿分の吸脱着に必要な加熱と、それに見合う冷却で熱収支が取られた結果と思われる。一方、冷却除湿方式では、除湿量に伴い冷熱量は増加するが、ピーク時の給気温度を低くしたことで再熱がほぼ一定となり合計熱量の変化が小さい。除湿量 10g/kg における合計熱量を見ると、OHU-101 で 46.5kJ/kg(冷熱 24.1kJ/kg、温熱 22.4kJ/kg)、OHU-201 で 34.3kJ/kg(冷熱 29.7kJ/kg、温熱 4.6kJ/kg)であった。熱量では冷却除湿方式の OHU201 が少ないが、冷熱製造に熱源機の動力を必要とするため、一概に省エネルギーとは言えない。

これらの結果、全熱交換器組込型のデシカント方式は除湿負荷に応じた同量の冷温熱が必要で、排熱や地下水熱があれば省エネルギー運用が可能となる。冷却除湿方式はピーク負荷時に給気温度を低くすることで投入温熱量を低く抑えることが可能となる。ただし、本施設では冷却除湿の冷熱に冷凍機の動力が必要なことから、今後水搬送動力を加味した省エネルギー性検討を行う予定である。

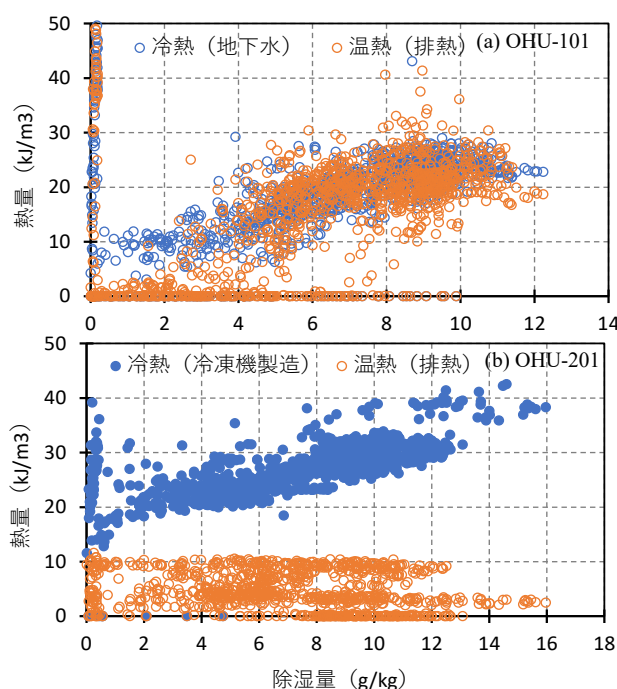


図 9 除湿量と投入熱量

3.4 全熱交換機の交換効率

(1) 運転状況

図 10 に冷却減湿型外気調和機 OHU-201 の夏期ピーク時の運転データを示す。外気調和機はウォーミングアップの 7 時から夜間 20 時まで運転していた。還気風量、給気風量はほぼ同じで、式 (1) に示す風量比 R_a が 1.0 に近い運転であった。還気温度は 28℃程度で推移し、外気的全熱交換器出口温度は外気温度に応じて変化しているものの、ほぼ還気温度まで低下していた。式(2)に示す顕熱の交換効率 η は、起動時から午前中に高い値を示し、外気と還気との温度差が小さくなる夕刻にかけて徐々に低下している。

$$Ra = Vsa/Vra \quad (1)$$

$$\eta = (Tsa - Toa) / (Tra - Toa) \times 100 \quad (2)$$

ここに Ra : 風量比、V : 風量(m³/h)、η : 交換効率、T : 空気温度(°C)、

添字 oa : 外気、ra : 還気、sa : 給気

図 11 に冬期の運転データを示す。冬期も夏期と同様の運転スケジュールであるが、給気風量過多の運転で、風量比 Ra は 1.05～1.15 で日によって異なっていた。これは、室内環境の検証時期と重なり、日々運転条件を変更していたことも一因としてある。還気温度は 21°C 程度で推移し、外気の全熱交換器出口温度は外気温度に関わらずほぼ還気温度近くまで昇温していた。交換効率は、風量比および外気と還気の温度差に応じて変動している様子が観察できる。

なお、図示はないがデシカント方式の OHU-101 も同様の運転状況であった。

(2) 交換効率による性能

全熱交換器の性能を顕熱の交換効率で表す。図 12 に OHU-101 の還気と外気の温度差と交換効率の相関を風量比で区別して示す。ここで、夏期とは 2020 年 6 月 1 日～9 月 30 日、冬期とは 2020 年 12 月 1 日～2021 年 1 月 29 日の期間である。図より、夏期、冬期ともに風量比 Ra が大きくなると交換効率が減少し、夏期平均で 5.6%、冬期平均で 4.4% の減少が確認できた。図 12(1) 夏期の場合は、温度差の拡大に伴い交換効率が上昇し、温度差が 8°C 程度で交換効率 η が 80% 程度に達している。なお、温度差が小さい時に交換効率が低下するのは全熱交換器エネメントの熱容量の影響と思われる。一方、図 12(2) 冬期の場合は、温度差に関わらず交換効率 η は 90% 程度を示している。冬期の交換効率が安定しているのは、夏期に比べ温度差が付いているためと思われる。

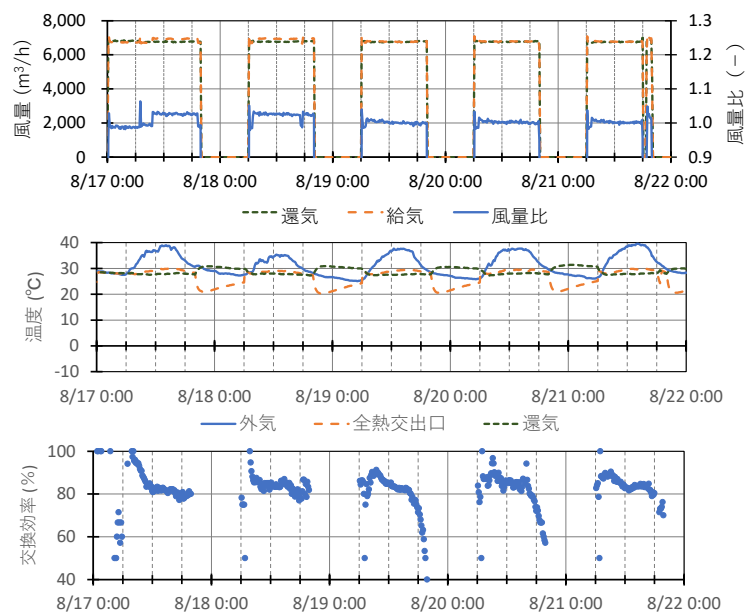


図 10 夏期ピーク時の運転状況(2020/8/17-8/21)

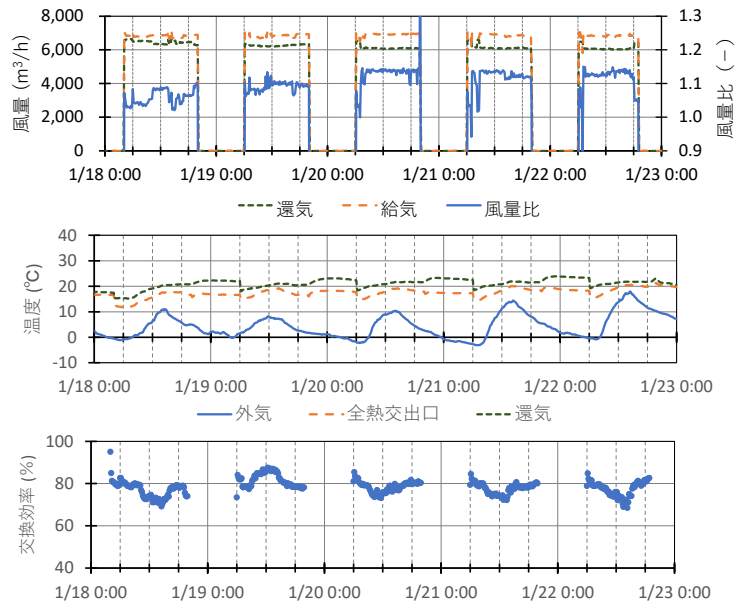


図 11 冬期ピーク時の運転状況(2021/1/18-22)

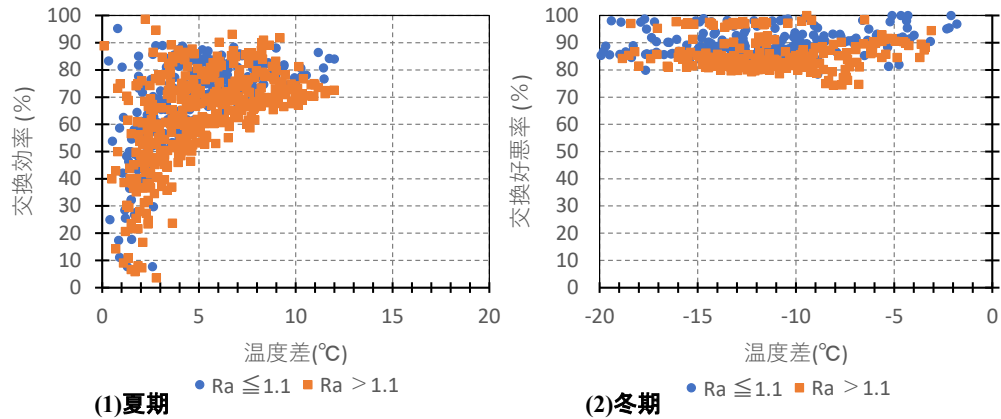


図 12 温度差と交換効率の相関(OHU-101)

図 13 に OHU-201 の温度差と交換効率の相関を示す。OHU-201 は、夏期において風量比 Ra がほぼ 1.0 の運転であったため、図 13(1)夏期の風量比区分のみ 1.02 とした。図より、風量比 Ra による交換効率の差異は、OHU-101 に比べ僅かであり、特に冬期において交換効率の差異は見られない。温度差と交換効率の相関では、図 13(1)夏期の場合で OHU-101 と同様に 8°C 程度で安定し 85% 程度に達している。また、図 13(2)冬期の場合は、温度差の拡大に伴う交換効率の安定が OHU-101 より顕著であり、ほぼ 80% 程度に収束している。

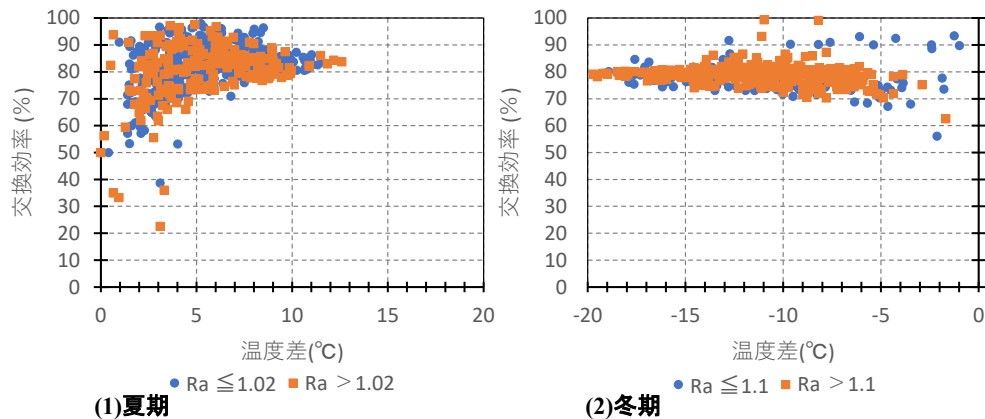


図 13 温度差と交換効率の相関(OHU-201)

(3) 交換効率の性能評価

全熱交換器の交換効率をメーカーカタログ値と比較し、実測で得られた性能を評価する。図 14 にメーカーカタログ値と設計時の計算値、および今回の運転実績を示す。図中、今回の実測値は風量比で区分した交換効率の内、JISB8639 の熱交換効率の測定**7) に準じて、夏期は温度差 8℃以上、冬期は温度差-10℃以下の平均値である。図より、設計時の計算値は、カタログ値とほぼ同様の値を示しているものの、運転実績では設計値を上回る高い性能が得られた。また、全熱交換器のロータ面風速の上昇に伴う交換効率の減少も、設計性能と同様の結果を得た。OHU-201 の冬期実測値(図中の■記号の橙塗りつぶし)を除くと、面風速と交換効率に負の相関が見られる。OHU-201 夏期実測値の相関が他のデータと異なる理由については引き続きの解析と、潜熱を加えた全熱交換効率についての性能評価で考察する。なお、風量比 1.0 で懸念される空気質については、夏期集中検証で行った執務者へのアンケート調査から、居室のニオイなど空気質の悪化を示す回答が無いことを確認している。

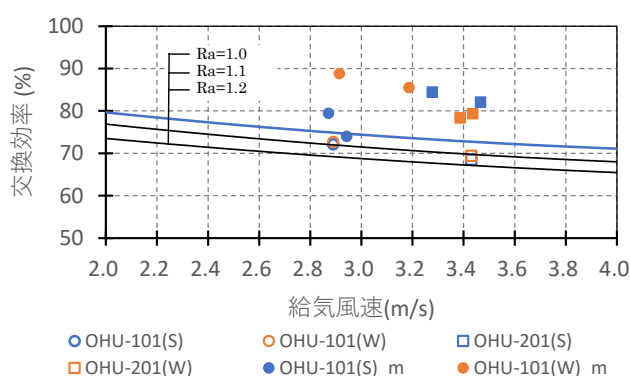


図 14 顕熱交換効率の特性

4. 放射空調の性能評価

4.1 冷水流量制御の特性

主執務室内側の放射パネルは、6 枚のパネルを 1 セットとして表面温度で電動弁を開閉する変流量制御である。図 15 に、パネル表面温度と電動弁開閉動作の一例を示す。図より、起動後の高負荷時には電動弁開閉後の温度上昇が早いので開閉の間隔が短く、低負荷時には開閉の間隔が長くなっている。放射パネルの稼働状態を、一日当たりの弁開時間と動作回数の弁開閉頻度で表す。図 16 にサーバ機器などがある高負荷エリアとロッカーなどがある低負荷エリアの稼働状態を示す。図より高負荷エリアでは弁開時間が長く弁開閉頻度が大きい。低負荷エリアでは弁開時間が短く弁開閉頻度が小さくなり、負荷分布に見合った変流量制御が行われていた。

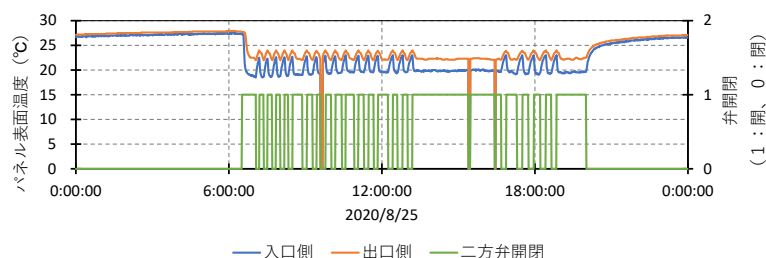


図 15 変流量放射パネルの制御動作

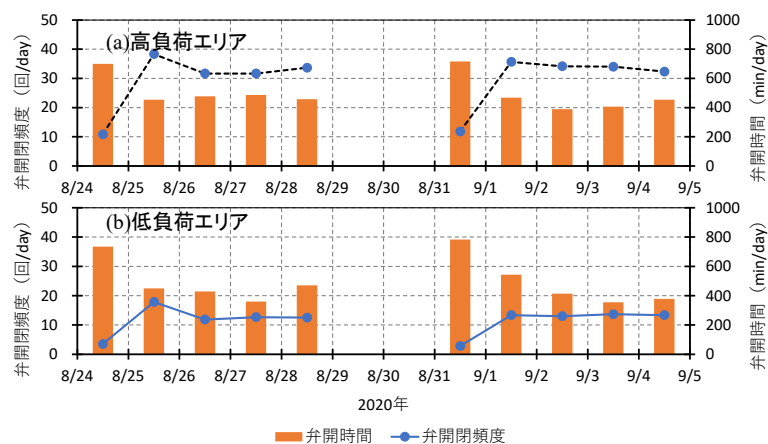


図 16 放射パネルの開閉頻度と開時間

4.2 パネル熱量

今回採用した放射パネルの仕様は、天井裏面に断熱が無いタイプであることから、天井裏への放熱を含めてパネル放熱量となる。本タイプの放熱量については、既往の実験から凡そ 70w/m^2 であり⁵⁾、その3割程度は天井裏へ放熱していると想定される。そこで、以下の仮定のもと、放射パネルの放熱量を推算した。

①放熱量

放射パネルシステムの冷水出入口温度と通水量から算出

②居室内への放熱量

対流成分は ASHRAE の簡易式から熱伝達率 α_c を算出し、放射成分は既往の研究から熱伝達率 $\alpha_r = 5.5\text{w/m}^2/\text{K}$ とする。

$$\text{居室への放熱量} = \alpha_c \times (T_a - T_s) + \alpha_r \times (T_r - T_s) \quad (2)$$

ここで、 T_a ：室内空気温度、 T_s ：パネル表面温度、 T_r ：室内放射温度、室内放射温度はインテリア部代表点における PMV 計での計測値、パネル表面温度は、室内全パネルの冷水入口側と出口側表面温度の平均値

図 17 に夏期集中検証期間で放射パネルが稼働していた 2020/8/24～9/4 の室内放熱量の内訳を示す。8/24 の週は外調機の給気風量を設計値、8/31 の週は外調機の給気風量を設計値の 50% に削減していた。設定値の変更で吐出している時間があるが給気風量に関わらず、放熱量の対流成分はほぼ同様であった。放射パネルの熱量収支から、居室内と天井裏の放熱量の割合を算出すると、67:33 となり、既往の研究とほぼ一致したことから放熱量の推算が妥当と考えられる。以上の結果、放射パネルの居室への放熱量は約 31W/m^2 となり、ほぼ設計値 35W/m^2 の能力を発揮していた。

4.3 冬期の運転状況

図 18 に年始の温熱環境経時変化を示す。1 月 4 日は、明け方の室内温度は 12°C 程度となっており、4 時より放射空調の稼働を行った。9 時の室内温度は 16.5°C 程度であり、目標温度である 22°C になったのは 11 時半頃であった。スラブ表面温度は天井内温度とほぼ同じ温度で推移していた。

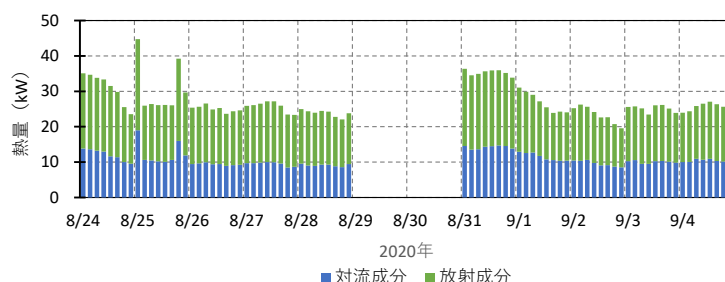


図 17 放射パネルの室内側冷却熱量(9:00～17:00)

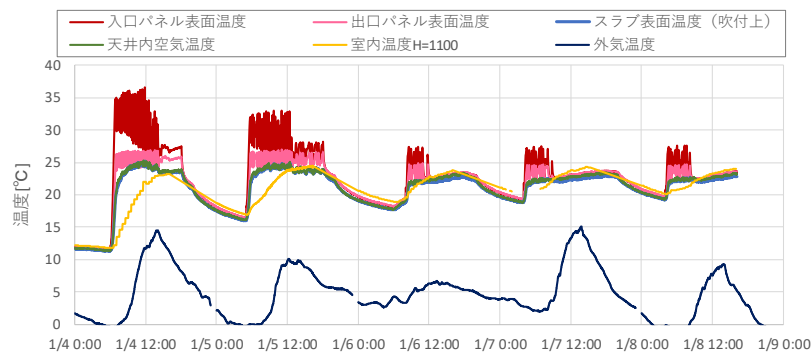


図 18 年始の温熱環境

5. 潜顕分離空調システムの負荷分担と高効率化

5.1 居室冷却能力の寄与率

外調機の顕熱量と前章で推算した放射パネルの居室内放熱量から、室内冷却能力の負荷分担を評価する。図 19 は、両者の冷却能力の推移である。設計意図通り、外調機がベース負荷を処理し、不足分を放射パネルが処理している様子が確認できた。また、評価時の運転条件では、外調機と放射パネルの冷却能力の平均寄与率は、48:52 となっていた。本施設では、地下水熱とバイオマスガス化発電の排熱を活用していることから、今後、搬送動力を含めて空調システムの消費エネルギーを評価する予定である。

5.2 天井裏放熱の影響

天井裏放熱は、還気を冷却することから有効との意見があるものの、空調機負荷の削減効果は不明である。そこで、放射パネルの稼働有無における室内温度と天井裏温度の温度差から、外調機負荷の削減効果を考察する。図 20 は、居室と天井裏温度の推移を示す。図より、外気温度の違い、かつ非定常ではあるものの、放射パネルの起動により天井下と天井裏の温度差が 0.1℃ほどの低下であり、外調機負荷の削減効果は僅かと思われる。

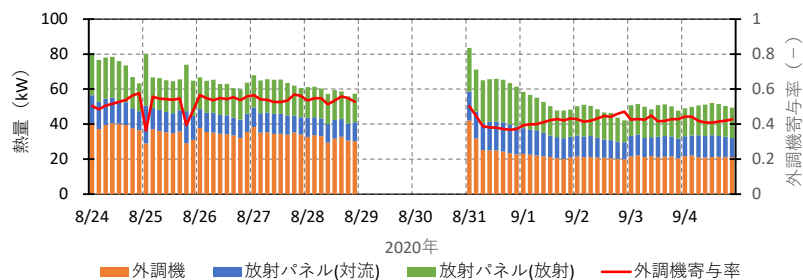


図 19 外調機給気と放射パネルの冷却能力(9:00~17:00)

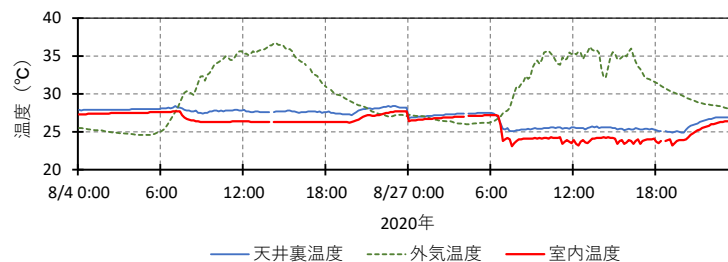


図-20 放射パネル無し(8/4)、有り(8/27)時の室内、天井裏温度

5.3 高効率化への提言

以上の評価結果を踏まえて、空調システムへの投入熱量を効率的に室内環境に反映させるには、①外調機と放射パネルの適正な負荷分担、②放射パネルの天井裏放熱の削減、③放射パネルの変流量の活用が上げられる。さらに、空調システムのライフサイクルで考えると、使用頻度による劣化の影響を受ける制御機器の長寿命化が重要であり、制御幅を維持しながらの電動弁開閉頻度の縮小に対する検討が重要と考える。

5.4 暖房負荷の考え方

本建物は、外調機でベース負荷を処理する計画となっていたが、冬期は外調機に加え放射空調を稼働させることで執務時間中の目標室内温度を確保した。本建物は高断熱となっているにも関わらず、夜間の躯体温度低下により、室内温度が下がり、計算上の暖房最大負荷に対する暖房能力のみでは不足することがわかった。特に外装面積が大きい低層建物において、ミニマム設計をする場合や最上階で天井レタン方式を用いている場合は躯体の蓄熱を含めた必要暖房負荷を検討する必要がある。

5.5 放射パネルでのウォーミングアップ

建物の立上げに放射空調を使用した。放射パネル上部に断熱材を敷設していないことから、放射パネルからの上部放熱が大きく、室内の温度上昇までに時差が生じたことが推測される。放射パネル上部に断熱材を敷設することで、早急な暖房立上げができると予測する。一方で、本建物の屋上スラブは外断熱ではなくスラブ室内側にも断熱材を吹付けており、スラブ表面温度と天井内空気温度がほぼ同じ温度で推移している。内断熱を行うことで放射パネルの断熱材がない状態であっても天井裏への熱ロスが少なかったことが推測できる。今後、天井内への放熱や放射空調の適切な稼働時間について検証する必要がある。

6. おわりに

今回の夏期、冬期検証から、外調機の除湿性能について、方式による特性を示した。さらに、放射パネルの放熱特性を実測値ベースで評価し、潜顕分離空調での寄与率を推算した。これらの知見をもとに、方式のさらなる高効率化に向けた提言を示すことができた。

今後、安定した運転データを蓄積し、潜顕分離空調の性能実態を示し、脱炭素化に寄与するシステム設計の一方針としてまとめるつもりである。

文 献

- 1) 武藤ほか、エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第1報)全体計画及びコンセプト、空衛学会講論、B-14, pp. 185-188(2019.9)
- 2) 羽鳥ほか、エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第2報)ZEBに向けた建築・設備計画、空衛学会講論、J-31, pp. 149-152(2020.9)
- 3) 元田ほか、エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第3報)木質バイオマスガス化 CHP を利用したエネルギー自立型自家消費システム、空衛学会講論、J-32, pp. 153-156(2020.9)
- 4) 清水ほか、エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第4報)二次側空調システム及びセンシングシステムの概要、空衛学会講論、J-33, pp. 157-160(2020.9)
- 5) 木村ほか、エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第5報)二次側空調機器の開発、空衛学会講論、J-34, pp. 161-164(2020.9)
- 6) 鈴木ほか、エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第6報)クラウド中央監視システムと無線通信システムの構築、空衛学会講論、J-35, pp. 165-168(2020.9)
- 7) 鈴木ほか、エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第7報)新素材とBIM活用による施工合理化、空衛学会講論、J-36, pp. 169-172(2020.9)

- 8) 湯浅ほか, エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第8報)新素材による施工の合理化, 空衛学会講論, J-37, pp. 173-176(2020.9)
- 9) 武藤ほか, エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第9報)建物環境性能の評価, 空衛学会講論, J-38, pp. 177-180(2020.9)
- 10) 柴田ほか, 外気調和機の高性能化に関する研究(その1)全熱交換器の性能評価, 空気調和・冷凍連合講演会, 2, pp. 15-18(2021.4)
- 11) 柴田ほか, エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第10報)潜顕分離空調の夏期性能評価とシステム最適化, 空衛学会講論, J-49, pp. 197-200(2021.9)
- 12) 木村ほか, エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第11報)置換空調とパーソナル空調機の性能評価, 空衛学会講論, J-50, pp. 201-204(2021.9)
- 13) 竹原ほか, エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第12報)夏季におけるパーソナル空調の使用状況と温熱環境満足度, 空衛学会講論, J-51, pp. 205-208(2021.9)
- 14) 武藤ほか, エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第14報)冬期熱源、空調システムと室内環境の評価, 空衛学会講論, J-53, pp. 213-216(2021.9)

ABSTRACT

The air conditioning system of Takasago Innovation Center is a minimal design that maintains indoor air quality and processes latent heat load by supplying air from outdoor air conditioning units. Moreover, it is a latent heat separation air conditioning system that covers the untreated portion of the sensible heat load with radiant air conditioning. Furthermore, it is equipped with an individual air conditioner as a response to the feeling of warmth of the individual. From the start of operation of the facility, the operation method was optimized by trial and error while grasping the characteristics of the air conditioning system. Subsequently, the performance of the air conditioning system in summer and winter was evaluated. Consequently, we obtained new knowledge on the method of operation and design that best utilizes the characteristics of the air conditioning system against the changes in the thermal characteristics of the zero energy building (ZEB) and the heat load from the conventional system.

エネルギー自立型サステナブル研究施設 —二次側空調機器の性能評価および執務者の環境満足度—

木村 健太郎・相澤 直樹・平原 美博
羽鳥 大輔^{*1}・武藤 友香^{*1}・竹原 大暉^{*2}
渡邊 円^{*2}・鵜飼 真成^{*2}・田辺 新一^{*2}

Energy Self-Sufficient and Sustainable Innovation Center Evaluation of Secondary Air Conditioner Performance and its Influence on Environmental Satisfaction of Workers

Kentaro Kimura・Naoki Aizawa・Yoshihiro Hirahara
Daisuke Hatori^{*1}・Yuka Mutoh^{*1}・Daiki Takehara^{*2}
Tsubura Watanabe^{*2}・Masanari Ukai^{*2}・Shin-iti Tanabe^{*2}

高砂熱学イノベーションセンターの執務室では、外皮や照明などのベース負荷に対しては外調機と放射空調で処理し、個人の行動や好みで随時変化する人体負荷に対してはパーソナル空調機で顕熱処理を行うタスクアンドアンビエント空調システムを採用している¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。本報では、間仕切りの少ない吹抜け空間に導入した置換空調やパーソナル空調機、OAフロア床暖房、カウンター空調など二次側空調機器の性能評価結果、並びにアンビエント環境の運用条件とパーソナル空調の使用状況の関係やアンケート調査による執務者の熱的快適性と作業効率の評価結果を示す。また、自然換気を実施した中間期におけるオフィスの物理環境評価と執務者満足度について報告する。

1. 置換空調の性能評価

1.1 設備概要

図1に、置換空調の測定概要を示す。図中黒枠で囲まれたエリアが置換空調エリアとなっており、給気は巡回流誘引型の置換空調用給気ユニット（SWIT）を大会議室とカフェにそれぞれ三台設置し、エントランスホールの階段部では、階段側面（0.7mH）から低速給気を行い、二階天井部（FL+8m）より還気することで置換空調を行っている。吹抜け部の垂直温度測定は、吹抜けほぼ中央部に熱電対を1mピッチで設置し、1分間隔でデータロガーに保存した。

平面温度分布の測定は、赤外線により表面温度を測定するサーモパイル（日本セラミック株式会社製・TSUP-A3A01S-au-50-60・視野角22度）を採用した。図2にサーモパイルの測定概要を示す。天井高3mの天井面にサーモパイルを設置した場合、センサ直下を中心とする直径2.4mの平均床表面温度に加え、センサ周囲の空気温度が測定できる。大空間の温度分布を詳細に把握するため、天井面に1.8mグリッド（システム天井3枚ピッチ）でサーモパイルを設置し（オフィス棟内で計550点）1分間隔でサーバに保存した。なお、吹抜け部では、45度傾斜した両壁面からセンサの設置角度を変えることで床表面温度を測定した。

※本論文は、2021年度空気調和・衛生工学会大会講演論文^{1,2,3)}を加筆修正したものである。

*1 株式会社三菱地所設計 *2 早稲田大学

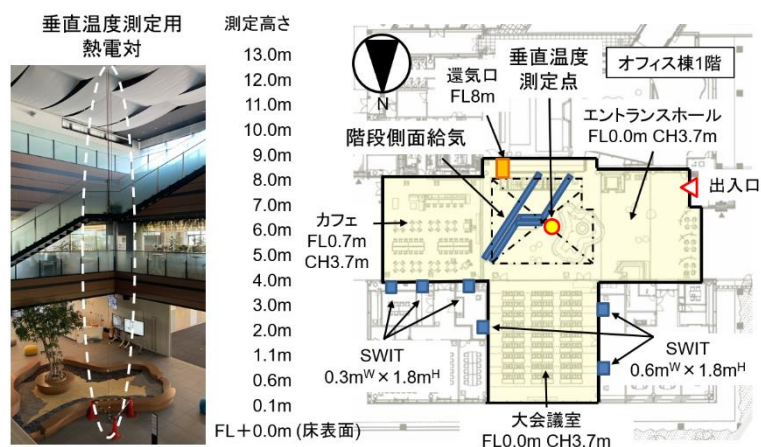


図1 置換空調の測定概要

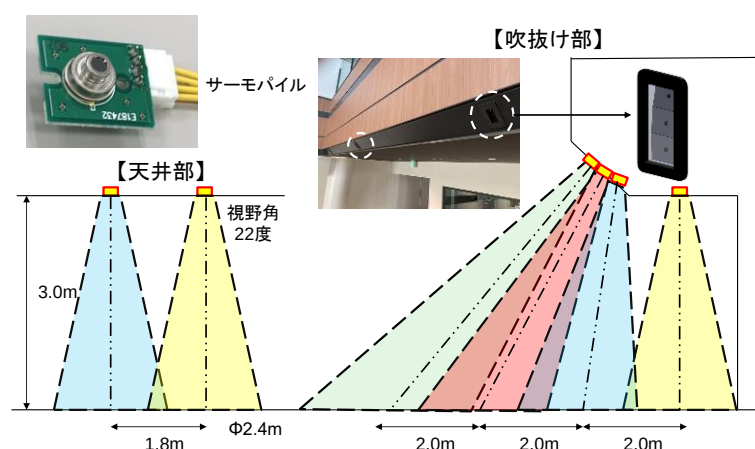


図2 サーマパイルの測定概要

1.2 測定結果

図3に夏期代表日(2020年8月27日)における吹抜け部垂直温度分布を時刻別(10分平均値)に示す。外気温が25~34℃程度で推移する中、外皮負荷などに応じて9mより上部の室温が変動するものの居住域温度は各時刻とも26℃程度で安定し、置換空調により室下部が効率よく冷却されていることを確認した。

図4、5に夏期代表日15時(10分平均値)の床表面と天井高さの平面温度分布をフロア別に示す。一階では、置換空調により部屋の隅々までばらつきの少ない温度分布を確認した。一方、二階では、執務者が好みの温度域に合わせて執務するABW(Activity Based Working)のコンセプト通り、執務室2-1の放射空調エリアは25~26℃、執務室2-2、2-3の在来天井エリアは26~27℃、ワイガヤの直天エリアは27~28℃と異なる環境のアンビエント空間を創ることができた。直天エリアは、西日の影響に加え、躯体蓄熱が室内へ直接放射されるため温度が高くなる一方、放射空調エリアは、蓄熱負荷を放射パネルで除去する効果もあり快適な室内環境であることを確認した。

図6に冬期代表日(2021年1月28日)の吹抜け部垂直温度分布を時刻別に示す。外気温が0~6℃程度で推移する中、空調立ち上りの8時以降から徐々に室温が上昇している。室温より高い温度で給気される冬期は、浮力により室上部へ熱が搬送されるため置換空調での暖房は不向きとされているが、本建物では周囲空気の誘引を強化した吹出口(SWIT)の採用に加え、年間を通して17℃程度で安定している床下の井水貯留層による効果もあり、極端な温度低下は見られない結果となった。

図7、8に冬期代表日15時の床表面と天井高さの平面温度分布をフロア別に示す。一階では、床下に井水貯留層のあるエントランスホールと外壁に面する床表面エリアで温度低下が見られる。快適性を更に向

上させるには、大会議室北面のペリメータ対策が必要になることがわかる。一方、二階北面の主執務室は後述する OA フロア床暖房の効果により、部屋全域で 22℃以上の室内環境を確認した。なお、天井温度で散見される局所的な温度偏差は、外調機からの給気の影響である。

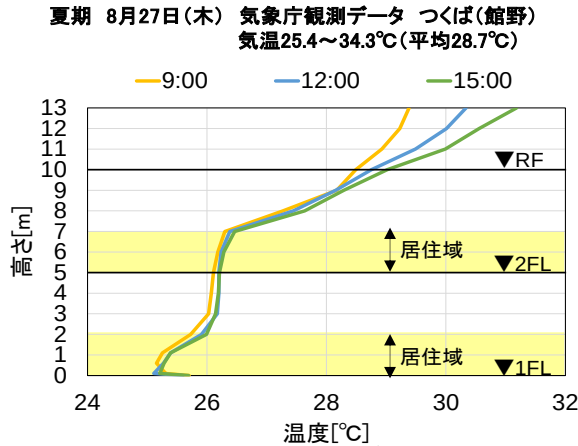


図3 吹抜け部垂直温度分布(8月27日)

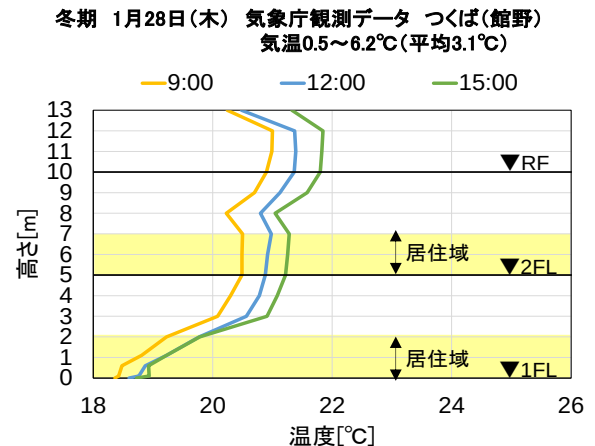


図6 吹抜け部垂直温度分布(1月28日)

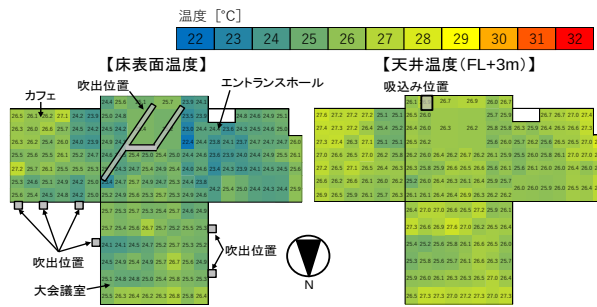


図4 1階平面温度分布(8月27日15時)

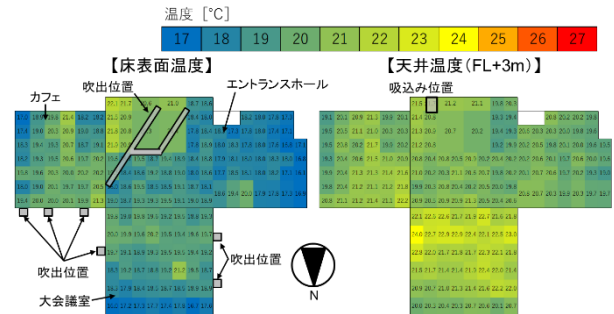


図7 1階平面温度分布(1月28日15時)

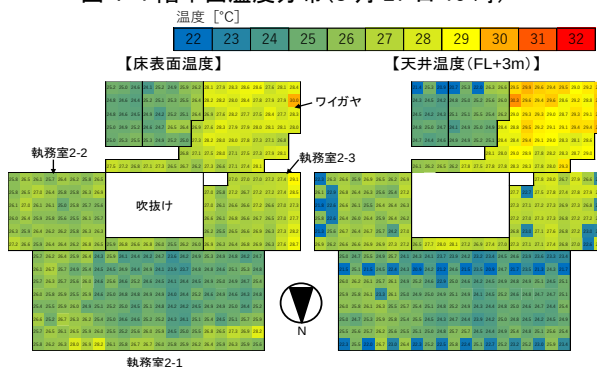


図5 二階平面温度分布(8月27日15時)

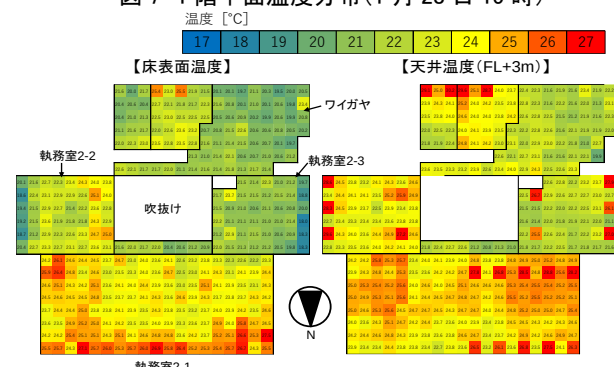


図8 二階平面温度分布(1月28日15時)

2. 二次側空調機器の性能評価

2.1 OA フロア床暖房

日射負荷の削減と自然採光を考慮して北面配置された執務室 2-1 では、外壁面が全面ガラスとなっており冬期のコールドドラフトによる室内環境の悪化が懸念された。そこで、OA フロアに対応した床暖房パネルを外壁ガラスの室内側に一列配置し、冬期には終日排温水 (60℃程度) を供給した。図9に、20時の空調停止から8時間経過したOAフロア床暖房の稼働時と非稼働時の床表面温度分布を比較して示す。床暖

房を行った2月25日は、外気温が高い24日同時刻よりも執務室2-1の室内温度が上昇する結果となった。これは、暖房負荷の過半を占める外壁ガラスからのコールドドラフトを防止した影響である。なお、執務室2-1以外での温度上昇は、床下で断熱されていない排温水配管からの放熱による影響である。

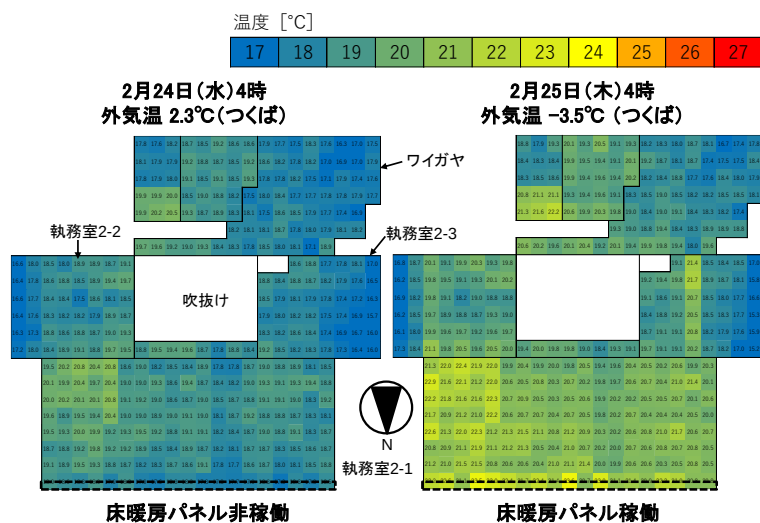


図9 OAフロア床暖房稼働・非稼働時の比較

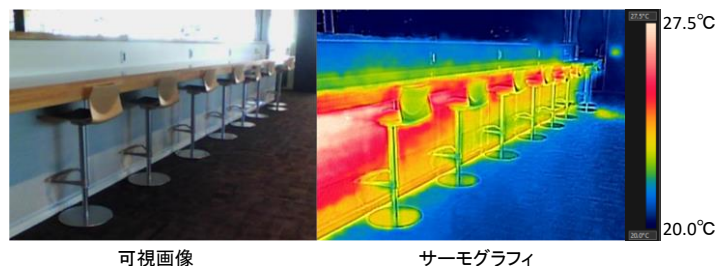


図10 カウンター空調(加熱)のサーモグラフィ

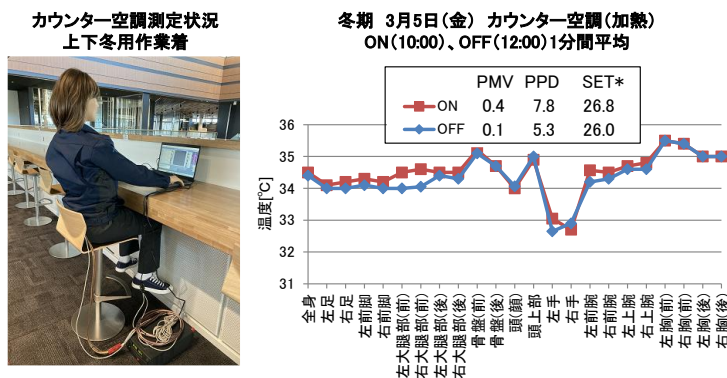


図11 カウンター空調の部位別温度分布と環境評価

2.2 カウンター空調

二階吹抜けに面し、アルミ三層管で構成したカウンター空調について、加熱性能の定量評価を行った。図10にカウンター空調のサーモグラフィ、図11にサーマルマネキンの部位別温度分布と環境評価を示す。サーマルマネキン(P.T.Teknik社製TM3-22)は、女性形状で22部位毎の温熱環境を定量評価できる。同日のほぼ同じ環境下において、カウンター空調を稼働した場合、主に下半身温度が上昇し、全身の予想平均温冷感申告(PMV)は0.3上昇した。なお、22~23°C程度の還水をカスケード熱利用した冷却運転時は、アンビエント温度(24°C程度)との温度差が小さいため、PMV値に明確な差は見られなかった。

2.3 DCFCU(天井吹出型)

天井吹出型パーソナル空調機である DCFCU について、サーマルマネキンにより冷却性能の定量評価を行った。図 12 に、DCFCU 稼働・非稼働時の部位別温度分布と温熱環境評価を比較して示す。同日のほぼ同じ環境下において、DCFCU を稼働した場合、ほぼ全部の温度が低下し、全身の PMV は 0.7 低下した。なお、DCFCU の加熱運転は、浮力の影響で座位まで給気が到達せず、PMV 値に明確な差は見られなかった。

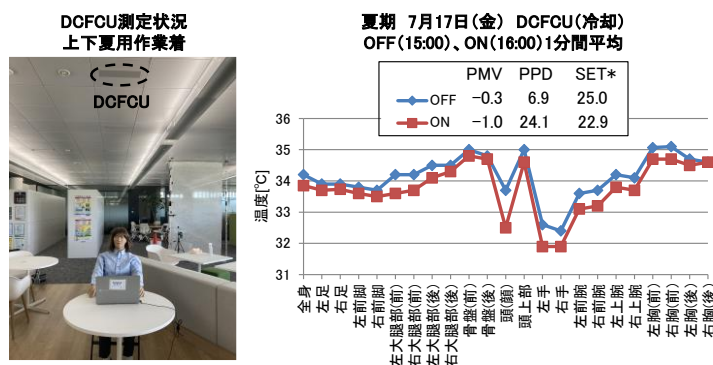


図 12 DCFCU の部位別温度分布と環境評価

2.4 前面吹出型デスク空調機

前面吹出型デスク空調機について、サーマルマネキンにより冷却性能の定量評価を行った。図 13 に前面吹出型デスク周囲のサーモグラフィ、図 14 に部位別温度分布と環境評価を示す。同日のほぼ同じ環境下において、デスク空調機を稼働することで全身の温度が低下し、全身の PMV は 0.9 低下した。図 15 に前面吹出型デスク空調の送風量と PMV の関係を示す。送風量を増やすほど PMV が下がり、個人の好みに合わせ手元のボリュームスイッチで快適性を安易に調整できることを確認した。

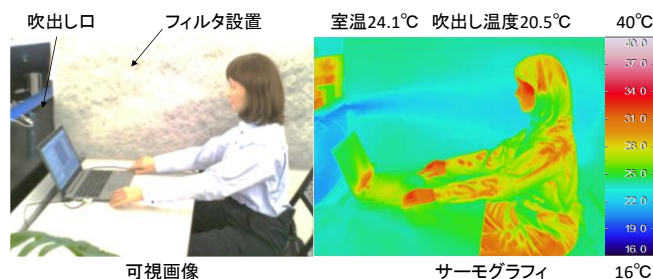


図 13 前面吹出型デスク空調のサーモグラフィ



図 14 前面吹出型デスク空調機の部位別温度分布と環境評価

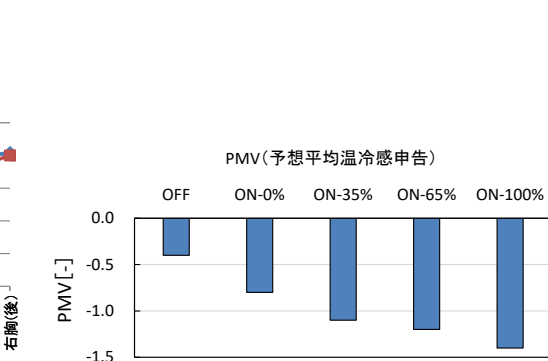


図 15 前面吹出型デスク空調機送風量と PMV の関係

2.5 腹部吹出型デスク空調機

腹部吹出型デスク空調機について、サーマルマネキンにより加熱性能の定量評価を行った。図 16 に腹部吹出型デスク周囲のサーモグラフィ、図 17 に部位別温度分布と環境評価を示す。同日でほぼ同じ環境下において、デスク空調機を稼働することで下半身や腕の温度が上昇し、全身の PMV が 0.3 上昇した。

2.6 パーソナル空調機性能まとめ

パーソナル空調機は、夏期には冷涼感、冬期には温かさを個別に与えられることを確認した。今回の夏期検証では、アンビエント温度が 24℃程度と低温の環境下であったが、アンビエント温度を 26℃程度と高めに設定し、パーソナル空調機と併用することで、個人の快適性を確保しながら、さらなる省エネルギー運転が可能なが示された。

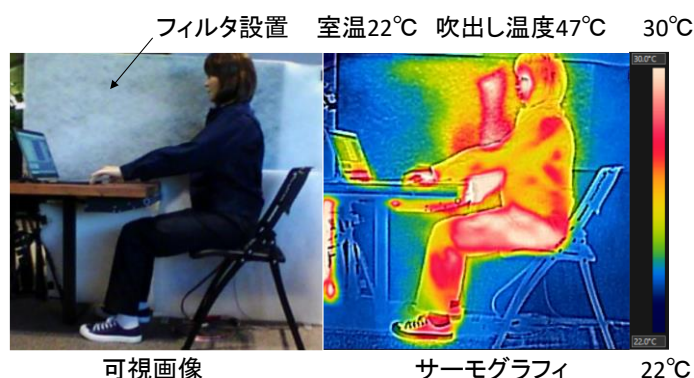


図 16 腹部吹出型デスク空調機のサーモグラフィ

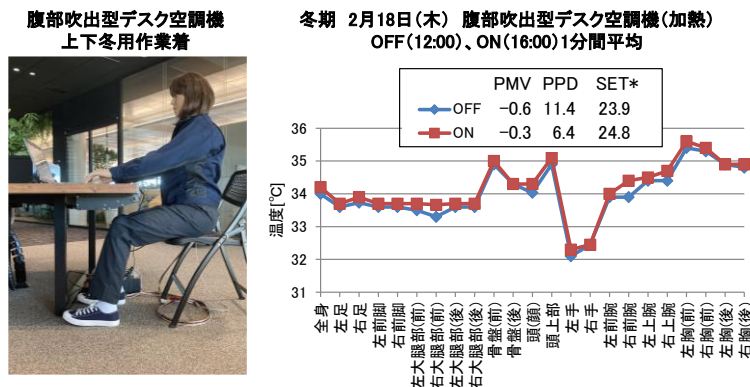


図 17 腹部吹出型デスク空調機の部位別温度分布と環境評価

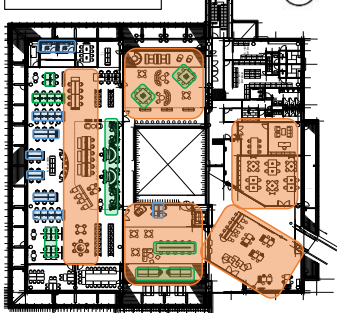
3. 夏期実測調査概要

3～5 章では、実運用時におけるアンビエント環境の運用条件とパーソナル空調の使用状況の関係、並びにアンケート調査による執務者の熱的快適性と作業効率の評価結果について報告する。

3.1 パーソナル空調機設置状況

表 1 にパーソナル空調設置状況を示す。オフィス棟二階は、執務者が自由に席を選択することが可能な Activity Based Working を導入した執務空間となっている。二階の執務空間では、個人操作可能な、前面吹出型デスク空調機（以下前面吹出型）・腹部吹出型デスク空調機（以下腹部吹出型）・DCFCU（以下天井吹出型）のパーソナル空調を全座席付近に導入している。各パーソナル空調設置状況に関して、前面吹出型が 22 台、腹部吹出型が 54 台、天井吹出型が 198 台と、天井吹出型の設置数が最も多い。

表 1 パーソナル空調設置状況

パーソナル空調		
種類	設置台数	執務フロア
前面吹出型 	22台	
腹部吹出型 	54台	
天井吹出型 	198台	

3.2 運用条件概要

夏季測定の間は、2020 年 7 月 27 日（月）～9 月 4 日（金）の夏季休業を除く 5 週間で実施し、対象エリアはオフィス棟二階の執務室 2-1 とした。

表 2 に空調運用条件の概要を示す。運用条件は 1 週間毎に条件を変更した五条件のうち、パーソナル空調の快適性評価のため、三条件に焦点を当てた。運用 A（2020 年 8 月 3 日（月）～8 月 7 日（金））は、「アンビエント域の目標作用温度を 28℃、パーソナル空調を使用許可」とする条件とした。運用 B（2020 年 8 月 17 日（月）～8 月 21 日（金））は、「アンビエント域の目標作用温度を 26℃、パーソナル空調を使用許可」とする条件とした。運用 C（2020 年 7 月 27 日（月）～7 月 31 日（金））は、「アンビエント域の目標作用温度を 26℃、パーソナル空調を使用禁止」とする条件とした。各運用のアンビエント域は、外調機のみで空調を行い、一定風量で吹出温度を変更した。

運用 A と運用 C の比較により「アンビエント環境緩和時におけるパーソナル空調使用効果」を、運用 A と運用 B の比較により「異なるアンビエント環境のパーソナル空調使用効果」を、運用 B と運用 C の比較により「類似したアンビエント環境のパーソナル空調使用効果」を検証した。

表 2 空調運用条件の概要

条件		運用A	運用B	運用C
目 標	パーソナル空調	ON	ON	OFF
	放射空調	OFF	OFF	OFF
	作用温度（アンビエント域）	28℃	26℃	26℃
設 定	相対湿度（アンビエント域）	45%	50%	50%
	外調機吹出露点温度	14℃	11℃	11℃
	外調機吹出温度	23℃	21℃	21℃
	パーソナル空調送水温度	18℃	18℃	18℃
比 較 検 証	異なるアンビエント環境の パーソナル空調使用効果	●	●	
	類似したアンビエント環境の パーソナル空調使用効果		●	●
	アンビエント環境緩和時における パーソナル空調使用効果	●		●

3.3 物理環境測定概要

表 3 に測定項目、図 18 に測定点を示す。測定項目は、空気温度、グローブ温度、相対湿度とし、いずれも 10 分間隔で測定した。

表 3 測定項目

測定項目	凡例	測定点数	測定機器	測定間隔
空気温度	●	6点 (机上面600mm)	TR-5X (ティアンドデイ)	10min
グローブ温度	◆	4点 (机上面600mm)	RTR-502 (ティアンドデイ)	10min
相対湿度	▲	2点 (机上面600mm)	TR-74Ui (ティアンドデイ)	10min

表 4 アンケート調査項目

評価項目	調査項目
室内温熱環境の印象	温冷感、快不快感、 温熱環境満足度、不満要因
作業効率	仕事効率 主観作業能力
パーソナル空調の印象	使用の有無、 満足度、不満の要因

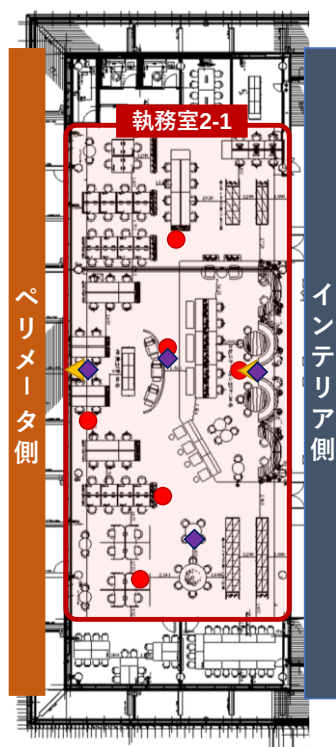


図 18 測定点

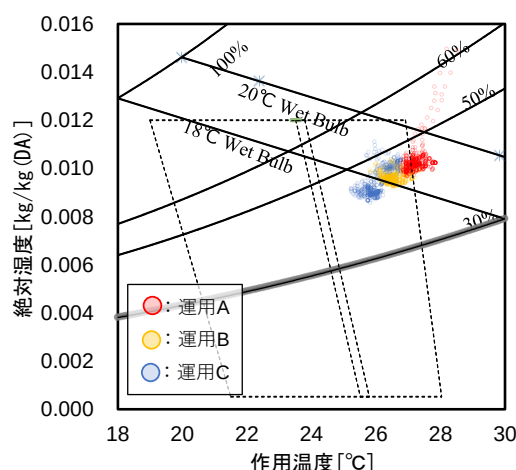


図 19 執務時間中の温熱環境分布

3.4 アンケート調査概要

表 4 にアンケート調査項目を示す。本研究では、2020 年 7 月 27 日（月）～8 月 21 日（金）の夏季休業を除く 3 週間、99 名の執務者を対象に各運用間で各一回アンケート調査を実施した。回収率は運用 A、B、C の各条件において 40%、61%、58%であった。調査内容は、室内温熱環境の印象、作業効率、パーソナル空調の印象とし、空調運用変更による温熱環境およびパーソナル空調に関する執務者の心理量の変化の把握を目的とした。

3.5 パーソナル空調使用調査概要

パーソナル空調の使用調査は、三種類のパーソナル空調を操作するスマートフォン端末内のアプリの履歴を用いて行った。調査項目は、使用者、使用日時、使用場所および使用したパーソナル空調の種類の計四項目とした。

4. 夏期実測結果

4.1 物理環境測定結果

図 19 に執務時間中の温熱環境分布を示す。図 19 は、実測期間中の執務時間（8：45～17：30）における各運用時の温熱環境を 10 分間隔でプロットしたものであり、点線で囲まれた範囲は ASHRAE55⁹基準の熱的快適域である。執務時間中のインテリア側の作用温度に関して、平均作用温度は運用 A、B、C の各条件

において 27.3℃、26.6℃、26.1℃であった。また、運用 A、B、C の各条件において 25.9%、92.3%、99.8% が熱的快適域内に分布していた。運用 B、C はほとんどの時間において熱的快適域内であった。一方、運用 A は作用温度が高く、熱的快適域外に分布する時間が多い傾向であった。運用 B と運用 C の目標作用温度は 26℃としたが、運用 B と比較して運用 C の方が各期間中の平均作用温度が 0.5℃低い結果となった。運用 B と比較して運用 C の期間における平均外気温が 6.7℃低かったことが影響したと考えられる。

4.2 温熱環境評価

図 20 に温冷感、図 21 に快不快感、図 22 に温熱環境満足度の各運用比較を示す。運用 A、B、C の順に、温冷感に関して「やや暖かい」「暖かい」「暑い」申告が減少、快不快感に関して「不快ではなく気持ちよい」申告が増加、温熱環境満足度に関して「不満」「非常に不満」申告が減少した。アンビエント環境が運用 A、B、C の順に涼しくなったことで、暑い温熱環境に不満を訴える執務者が減少したことが要因として考えられる。

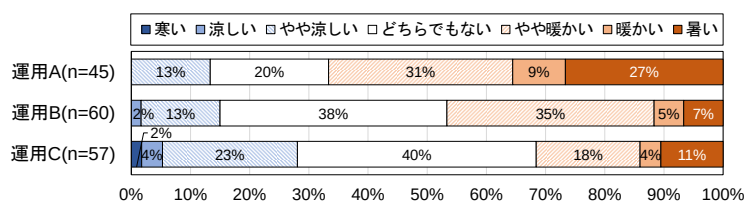


図 20 温冷感の各運用比較

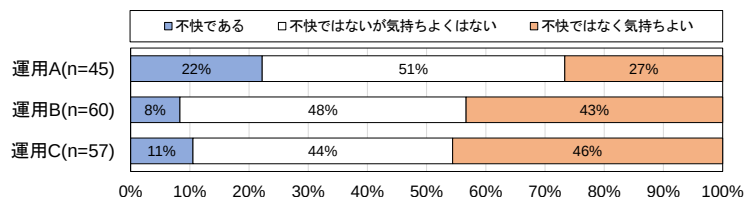


図 21 快不快感の各運用比較

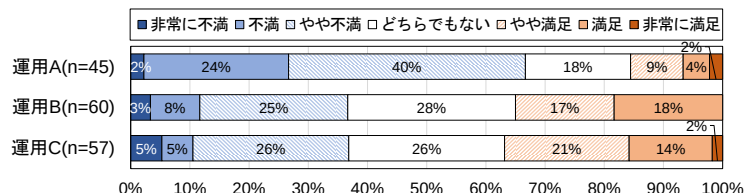


図 22 温熱環境満足度の各運用比較

4.3 知的生産性評価

図 23 に仕事効率への影響の各運用比較を示す。運用 A と比較して、運用 B および C の条件で「やや低下させている」「低下させている」「非常に低下させている」（以下低下させている側）申告が減少した。温熱環境満足度の不満側が減少したことが影響している可能性が考えられる。

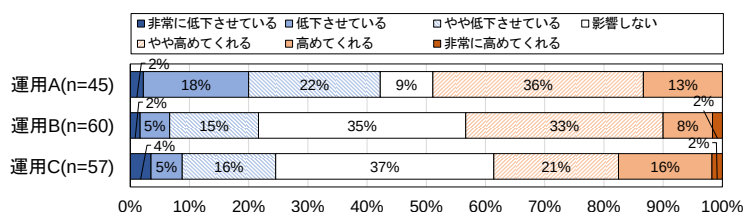


図 23 仕事効率への影響の各運用比較

4.4 パーソナル空調評価

図 24 に各パーソナル空調の満足度を示す。全運用におけるパーソナル空調の満足度に関して、前面吹出型では 35%、腹部吹出型では 40%、天井吹出型では 50%が「やや不満」「不満」「非常に不満」（以下不満側）と回答した。特に天井吹出型では、気流の弱さの項目に不満を訴える執務者が多く、操作性や性能を改善することで、パーソナル空調の満足度が向上する可能性があると考えられる。

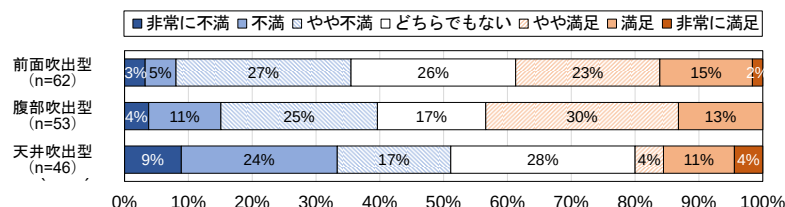


図 24 各パーソナル空調の満足度

4.5 パーソナル空調機使用調査結果

図 25 にパーソナル空調使用状況を示す。一週間のうち一人当たりのパーソナル空調全体の使用回数は、運用 A では 6.2 回、運用 B では 4.5 回となった。前面吹出型、腹部吹出型、天井吹出型に関して、運用 A では 1.7 回、1.6 回、2.9 回、運用 B では 1.2 回、1.5 回、1.9 回であった。いずれのパーソナル空調もアンビエント環境の涼しい運用 B で使用回数が減少した。また、各運用ともに天井吹出型の使用回数が最も多い結果になった。設置台数の多さや設置範囲の広さが影響していると考えられる。

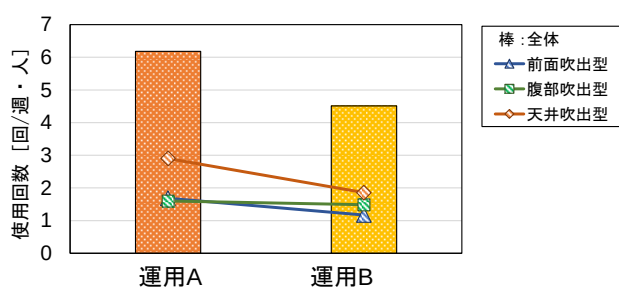


図 25 パーソナル空調使用状況

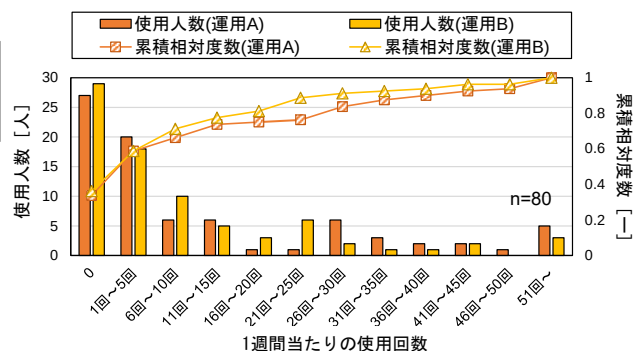


図 26 パーソナル空調の使用頻度と累積相対度数

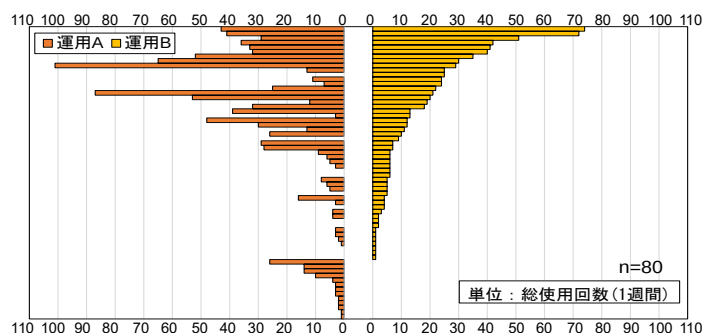


図 27 個人別パーソナル空調の使用頻度

図 26 にパーソナル空調の使用頻度と累積相対度数、図 27 に個人別パーソナル空調の使用頻度を示す。

図 26 よりいずれの運用も使用回数が 10 回以下である執務者は 7 割程度であった。図 27 よりアンビエント環境の涼しい運用 B において、使用回数が 10 回以上の執務者は、アンビエント環境の暖かい運用 A においても、概ね使用回数が 10 回以上であった。また、アンビエント環境の暖かい運用 A において、使用回数が 10 回未満の執務者は、アンビエント環境の涼しい運用 B においても、概ね使用回数が 10 回未満であった。アンビエント環境に影響されずに使用頻度が高い執務者や低い執務者がいることが分かった。

5. パーソナル空調の使用頻度別分析

パーソナル空調の使用回数の個人データを用いて、パーソナル空調の使用頻度による分類を行い、アンケートの回答と紐づけることで、各運用におけるパーソナル空調使用頻度別の温熱環境満足度・知的生産性の比較を行った。アンビエント環境作用温度が 27.3℃の運用 A において、1 週間当たりの使用回数が 10 回未満の執務者を「パーソナル空調の使用少群」（以下使用少群）とした。一方、アンビエント環境作用温度が 26.6℃の運用 B において、1 週間当たりの使用回数が 10 回以上の執務者を「パーソナル空調の使用多群」（以下使用多群）に分類した。

5.1 パーソナル空調の使用と熱的快適性

図 28 に使用頻度別の温熱環境満足度の比較を示す。使用少群における不満側申告の割合は運用 A、B、C の各条件において 56%、39%、25%であり、アンビエント環境の条件が涼しくなるに従い不満側申告が減少した。使用少群は、運用期間によらずパーソナル空調の使用頻度が低い傾向にあるため、アンビエント環境の涼しさが温熱環境満足度に大きく影響を及ぼしていると考えられる。一方、使用多群における不満側申告の割合は運用 A、B、C の各条件で 88%、18%、66%であった。使用少群と比較し使用多群では、運用 A、C において多くの不満が発生した。運用 A ではアンビエント環境緩和に対する本パーソナル空調の冷却効果が十分でなかったことが考えられる。運用 C の結果から、一般的な快適環境であってもパーソナル空調による温熱環境満足度への影響が非常に大きいことが分かった。一方、運用 B において使用多群の方が使用少群より不満側申告が少ない結果となった。運用 B のアンビエント環境においてパーソナル空調を使用することで十分な冷却効果が得られた可能性が示唆された。

運用 A と比較し運用 C において、パーソナル空調の使用頻度によらず、不満側申告が少ない結果となった。パーソナル空調の使用頻度よりアンビエント環境条件の方が温熱環境満足度に大きく影響したと考えられる。

運用 A と比較し運用 B ではパーソナル空調の使用頻度によらず、不満側申告が少ない結果となったが、使用多群では満足側申告も多く発生した。作用温度が 27.3℃から 0.7℃低下したアンビエント環境において、使用多群がパーソナル空調を使用することでさらに温熱環境の不満を解消したと考えられる。

運用 C と比較し運用 B では使用少群では不満側申告が多い一方、使用多群では少ない結果となった。使用多群がパーソナル空調を使用することで、温熱環境満足度の低下を抑制した可能性が考えられる。

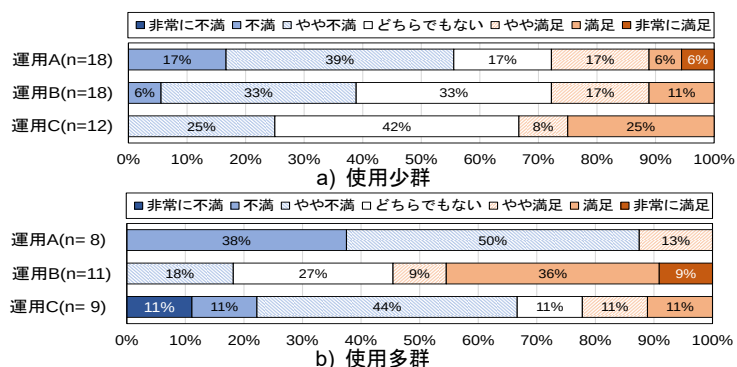


図 28 使用頻度別の温熱環境満足度の比較

5.2 パーソナル空調の使用と作業効率

図 29 に使用頻度別の仕事効率への影響の比較を示す。低下させている側申告の割合は運用 A、B、C の各条件において使用少群では 28%、23%、17%であり、使用多群では 75%、9%、33%であった。使用少群は、温熱環境満足度の向上に従い、低下させている側申告が減少した。使用少群と比較し使用多群では、温熱環境に関する不満が多い運用 A、C において低下させている側申告が多く発生した。温熱環境満足度が作業効率に影響した可能性が考えられる。一方、運用 B において使用多群の方が使用少群よりも低下させている側申告が少ない結果となった。運用 B のアンビエント環境においてパーソナル空調を使用することで作業効率が向上する可能性が示唆された。

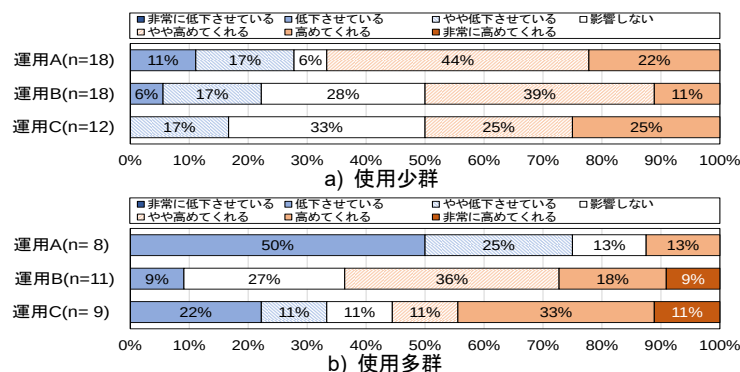


図 29 使用頻度別の仕事効率への影響の比較

運用 A と比較し運用 C において、パーソナル空調の使用頻度によらず、低下させている側申告が少ない結果となった。作用温度が 27.3℃から 1.2℃低下したアンビエント環境では、仕事効率の低下を抑制する可能性があると考えられる。使用多群では高めてくれる側申告が多い一方で、使用少群では少ない結果となった。使用多群に暑がり、使用少群に寒がりの執務者が多いことが影響した可能性が考えられる。

運用 A と運用 B の比較において、パーソナル空調の使用頻度によらず、低下させている側申告が少ない結果となったが、特に使用多群では、高めてくれる側申告が非常に多く発生した。作用温度が 27.3℃から 0.7℃低下したアンビエント環境において、使用多群がパーソナル空調を使用することで仕事効率が向上する可能性が示された。

運用 C と比較し運用 B において、使用少群では低下させている側申告がやや多い一方で、使用多群では、少ない結果となった。使用多群がパーソナル空調を使用することで、仕事効率の低下を抑制する可能性が示唆された。

6. 中間期の実測調査

6～7 章では、本施設で自然換気を実施した中間期における、実測調査、アンケート調査および BEMS データから、オフィスの物理環境と執務者満足度について報告する。

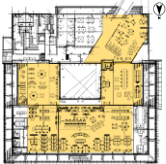
6.1 実測調査概要

ISO7730:2005⁷⁾では熱的快適性の推奨値が三段階に分類されており、カテゴリ A では $0.2 < PMV < +0.2$ (不満足者率 6%未満)、カテゴリ B では $0.5 < PMV < +0.5$ (不満足者率 10%未満)、カテゴリ C では $0.7 < PMV < +0.7$ (不満足者率 15%未満) をそれぞれ快適環境としている。ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.) のスタンダード 55-2013⁸⁾では、空調設備の導入された室内環境について不満足者率の観点から定められた Graphic Comfort Zone Method および Analytical Comfort Zone Method の 2 つの手法から熱的快適性の選択が可能である。このように、ISO と ASHRAE による熱的快適性の基準がいずれも不満足者率で定義されている理由には「最大多数の最大幸福」の視点が

存在しており、従来のオフィス等の空気調和は複数の居住者を普遍的集団として捉えることで、その包括的特性を満足させる均一かつ一定の環境提供を目指してきた。

一方で、近年より自由に働き方を選ぶことができるワークスタイルが重視され、Activity Based Working（以下、ABW）が普及している。また、実際のオフィスの居住者は普遍的な集団ではなく、各個人が持つ体質により、知的生産性が向上しやすい温熱環境は異なることが示されてきた⁹⁾。作業内容に合わせた場所選びに加えて、自身が快適性を向上させやすい場所選びができるオフィスが求められている。そのため、これまでの包括的特性を満足させる均一かつ一定の環境提供よりも、温熱環境の不均一性がより知的生産性を向上させる可能性がある¹⁰⁾。

表 5 自然換気運用条件

条件		条件A (10/12~10/16)	条件B (10/19~10/23)	条件C (10/26~10/30)
外調機	パーソナル空調			
	放射空調	ON	ON	ON
	外調機			
	外調機風量	CO2制御	CO2制御	CO2制御
	執務室2-1	在室人数制御	CO2制御	CO2制御
	執務室2-2・2-3・ワイガヤ	在室人数制御	在室人数制御	在室人数制御
	外調機給気温度SP	23℃	22℃（暖房）	23℃
目標値	外調機露点温度SP	11℃	11℃	11℃
	作用温度（アンビエント域）	24～25℃	なりゆき	なりゆき
	相対湿度（アンビエント域）	50%	なりゆき	なりゆき
自然換気運用	執務室2-1		自然換気(上窓のみ)	通常（自然換気なし）
	執務室2-2・2-3・ワイガヤ	OFF	自然換気(上窓のみ)	自然換気(上窓のみ)
	エリア			
				

6.2 運用変更概要

表 5 に自然換気運用条件を示す。2020 年 10 月 12 日（月）～2020 年 10 月 30 日（金）の計三週間で自然換気の運用変更を行った。運用条件は、自然換気を行わない条件 A、共創執務室（図 30 参照）を除く二階全執務室で自然換気を行う条件 B、共創執務室および執務室 2-1 を除く全執務室で自然換気を行う条件 C の三条件行った。

自然換気の自動開閉条件は、外気露点温度≧3℃かつ、室温≧外気温≧16℃かつ、室内エンタルピー≧外気エンタルピーとなる範囲である。なお、外気粉塵濃度、外気風速がそれぞれ 0.03 mg/m³、3.0 m/s を超えた場合や雨天時は、その他の外気条件が自然換気有効範囲であっても自然換気を行わない設定とした。

6.3 物理環境測定概要

表 6 に物理環境測定項目、図 30 に物理環境測定ポイントを示す。測定項目は、温湿度、グローブ温度、放射温度とした。また、二階全執務室でサーモパイルを用いた床表面温度および天井付近の空気温度の計測を行った。

表 6 物理環境測定項目

測定項目	凡例	測定点数・測定高さ				測定 間隔	測定機器
		執務室2-1	執務室2-2	執務室2-3	ワイガヤ エリア		
温湿度	●	2点	1点	2点	-	10min	RTR-574 (ティアンドデ イ)
		700mm					
グローブ 温度	●	8点	2点	2点	1点	10min	RTR-502 (ティアンドデ イ)
		700mm×5 600mm×3	700mm×1 600mm×1	700mm×1 600mm×1	600mm		
放射温度	●	1点	-	-	-	10min	輻射センサー RFシリーズ (CAPTEC)
		700mm					

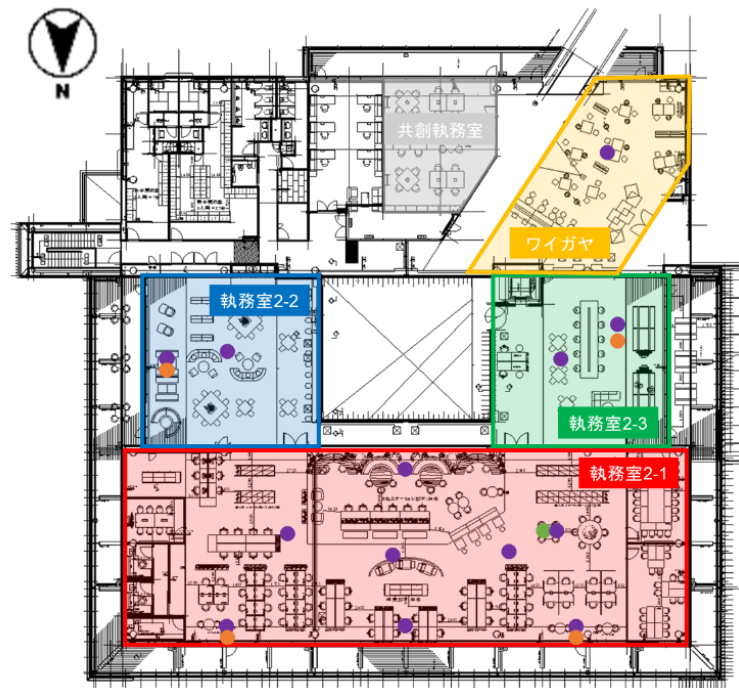


図 30 物理環境測定ポイント

6.4 アンケート調査概要

表 7 に 1 週間アンケートの質問項目、表 8 に毎日アンケートの質問項目を示す。アンケートは、1 週間アンケートと毎日アンケートの二種類行った。1 週間アンケートは基本項目（着座時間/場所・現在の業務内容・着衣量）、室内環境の印象（快不快感・温冷感・各種環境満足度など）、知的生産性評価（主観作業能力・作業効率へ与える影響）、パーソナル空調の評価（使用の有無・満足度・不満の要因）を質問項目とし、実測期間中週に一回回答するアンケート（毎週木曜日配信）である。毎日アンケートは基本項目（着座場所）、室内環境の印象（快不快感・温冷感・温熱環境満足度・空気質・温熱環境の不満の要素）を質問項目とし、実測期間中金曜日を除き毎日回答する簡易的なアンケートである。1 週間アンケートは条件ごとの心理量評価、毎日アンケートは日ごとの心理量評価が主な目的である。自然換気は外気条件に左右されるため、簡易的なアンケートを毎日行った。

表 7 1 週間アンケートの質問項目

項目	項目
基本項目	着座時間/場所、現在の業務内容、着衣量
室内環境の印象	快不快感、机上面の明るさ、室全体の明るさ 室内のうるささ、温冷感、乾湿感、気流感 各種環境満足度（温熱・光・空気質・音・IT・空間・総合） 不満の要因
知的生産性評価	作業効率へ与える影響、主観作業能力
自然換気に関する項目	自然換気は快適性を向上させると思うかどうか 自然換気を知覚したかどうか、気流感、足元の冷え 換気窓を開めたことがあるか、不満を感じたか 満足/不満足の原因、自然換気によって行動を変化させたか
パーソナル空調の評価	使用の有無、満足度、期間中使用しなかった理由

表 8 毎日アンケートの質問項目

項目	項目
基本項目	着座場所
室内環境の印象	快不快感、温冷感、温熱環境満足度/不満の要素、空気質

7 実測調査結果

7.1 物理環境

図 31 に各代表日の自然換気実施前後の床表面温度を示す。条件 B および C における代表日は、各条件

の自然換気実施時間が最も長い日である 10 月 20 日（火）および 10 月 29 日（木）とした。自然換気開始時刻は、それぞれ 10 時 30 分と 10 時 37 分であった。サーモパイルの測定データのうち、より居住域に近い床表面温度を用いた。全執務室で自然換気を行う条件 B に関して、自然換気実施開始 10 分程度で全執務室における床表面温度が 1.0～2.0℃程度急激に低下した。一方で、執務室 2-1 以外で自然換気を行う条件 C に関して、執務室 2-1 以外における床表面温度が 0.5～1.5℃程度急激に低下した。条件 B より条件 C の床表面温度の低下幅が小さいのは、外気温が高かったことが要因と考えられる。

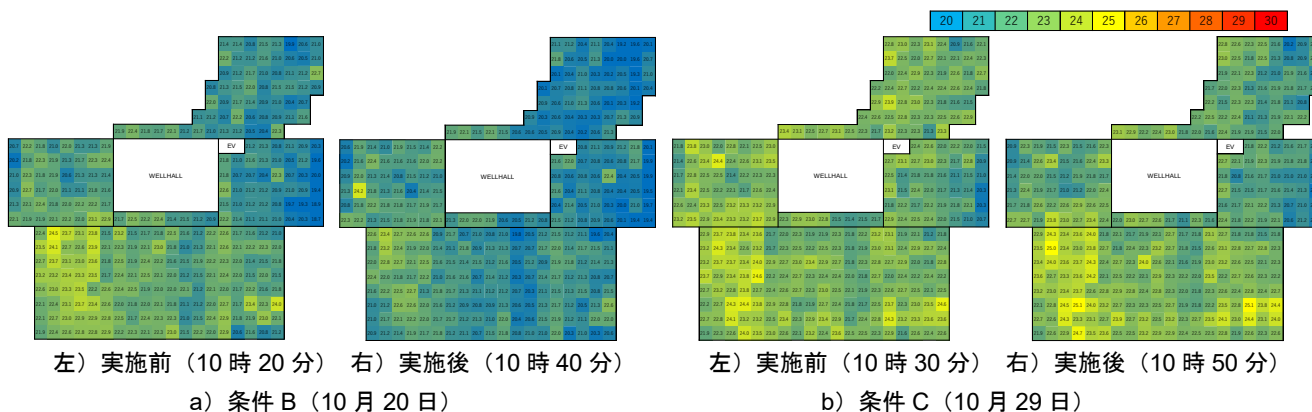


図 31 各代表日の自然換気実施前後の床表面温度

図 32 に各条件の執務時間におけるエリアごとの温熱環境を示す。各条件 1 週間の 9:00～18:00 における各執務室の温熱環境を空気線図上に示した。破線で示す領域は着衣量 0.5[clo]の条件における SET*基準の熱的受容域である。自然換気を行わない条件 A に関して、全執務室における温熱環境が安定していた。ワイガヤエリアでは、他の執務室に比べて絶対湿度が高い傾向にあった。執務室 2-1 以外で自然換気を行う条件 C に関して、自然換気を行わない執務室 2-1 のみが安定した温熱環境であった。一方で、全執務室で自然換気を行う条件 B に関して、全ての時間帯において熱的受容領域内にあるものの、温熱環境が広く分布していることがわかった。自然換気を行うことにより各室内で様々な温熱環境が存在していた。

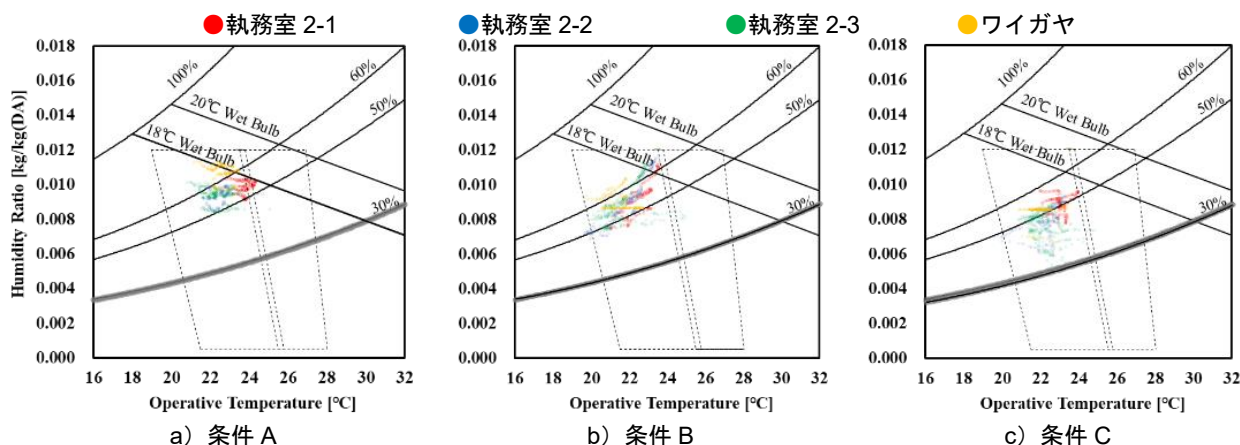


図 32 各条件の執務時間におけるエリアごとの温熱環境

図 33 に各代表日のエリアごとの平均床表面温度を示す。執務空間の温熱環境をより平面的に確認するため、測定点の多い床表面温度を用いた。条件 A における代表日は、外気温が 1 週間を通しての平均に最も近い 10 月 14 日（水）とした。自然換気を行わない条件 A に関して、1 日を通して急激な温度変化はなく、日中に 1.0℃程度緩やかに上昇した。全執務室で自然換気を行う条件 B に関して、始業時刻より床表

面温度が 1.0℃程度緩やかに上昇したが、自然換気開始と同時に全執務室において 1.0℃程度急激に低下した。執務室 2-1 以外で自然換気を行う条件 C に関して、執務室 2-1 以外で条件 B と同様の傾向が見られた。執務室 2-1 と他の執務室においては、床表面温度が 0.5℃～1.0℃程度の差があり、二階の執務エリア全体で不均一な温熱環境が形成されていたと言える。

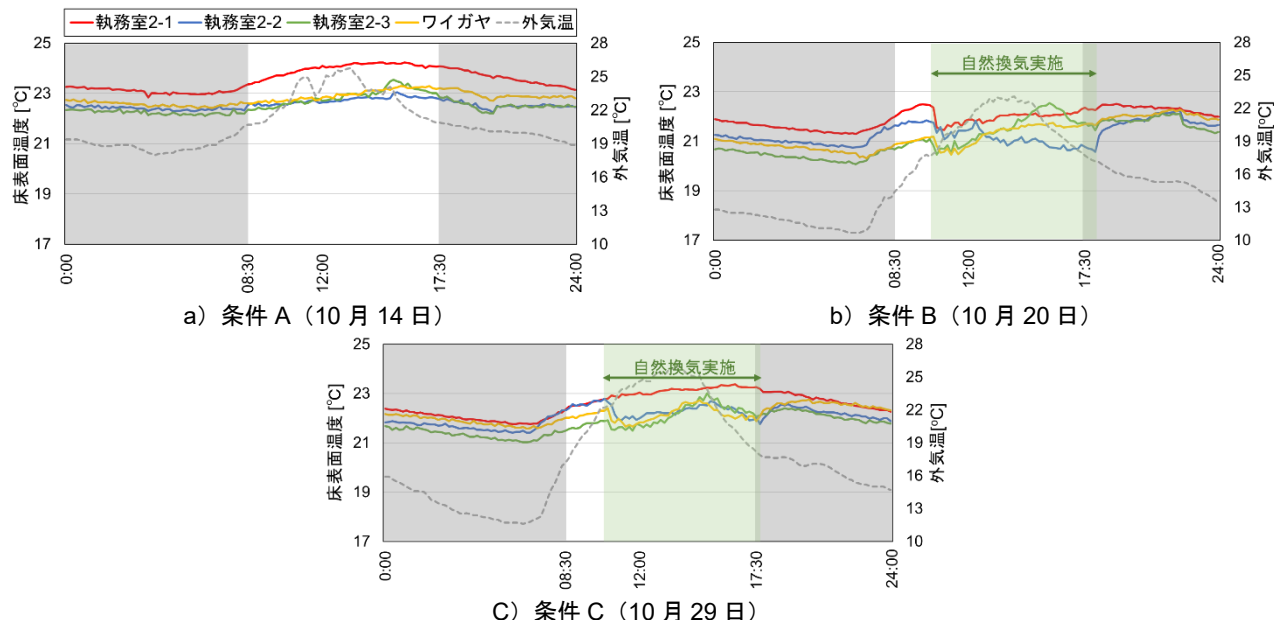


図 33 各代表日のエリアごとの平均床表面温度

図 34 に各代表日の執務室 2-1 における温熱環境の空間分布と時間変動の経時変化を示す。横軸に 9:00～18:00 の床平均温度と実温度の乖離、縦軸に床表面温度の標準偏差を示している。プロットは 10 分間隔で行った。自然換気を行わない条件 A および執務室 2-1 以外で自然換気を行う条件 C に関して、9:00～18:00 には時間的変動が少ない安定した温熱環境であった。一方で、全執務室で自然換気を行う条件 B に関して、条件 A および C と比較して、平均値との乖離の幅（左右の振れ幅）が大きく、時間的変動が大きい温熱環境であったことがわかった。

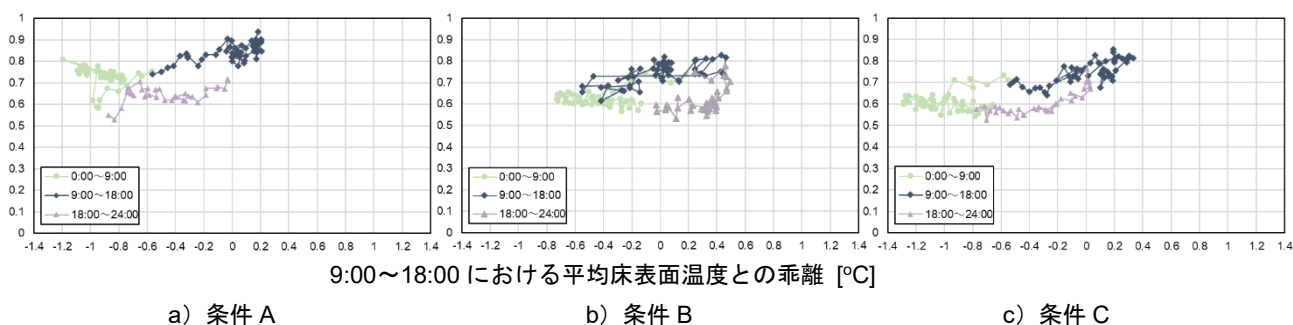


図 34 各代表日の執務室 2-1 における温熱環境の空間分布と時間変動の経時変化

7.2 アンケート結果

図 35 に各条件の温熱環境満足度、図 36 に各条件の主観作業能力、図 37 に各条件の温冷感を示す。一週間アンケートの結果より作成した。温熱環境満足度に関して、全執務室で自然換気を行う条件 B で不満側が 6 割弱と最も多く、主観作業能力に関して、条件 B を除いていずれの条件でも主観作業能力 7 以上の執務者が 8～9 割と高い値を示していた。また、温冷感申告に関して、全執務室で自然換気を行う条件 B

で寒い側が 8 割以上を占めた。自然換気によって形成された寒い温熱環境が不満要因となり、温熱環境満足度の不満側増加および主観作業能力が低下したと考えられる。

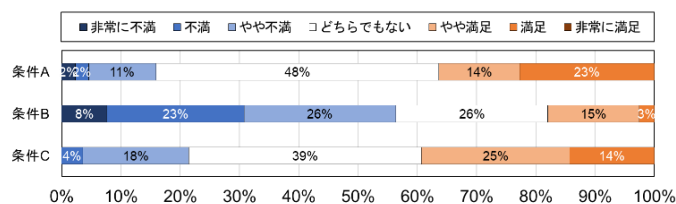


図 35 各条件の温熱環境満足度

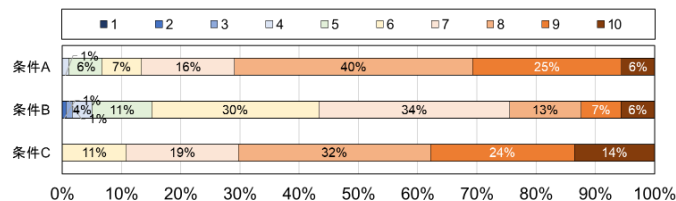


図 36 各条件の主観作業能力

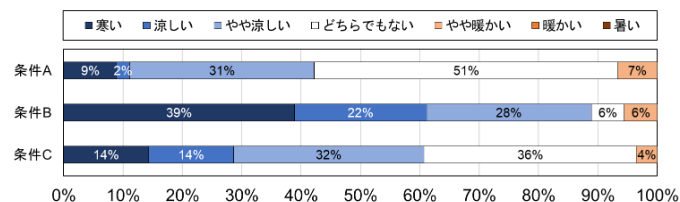


図 37 各条件の温冷感

図 38 に自然換気実施下における座席選択位置を示す。条件 B および C の 1 週間のうち、実際に自然換気が行われた日のみで、毎日アンケートの結果より作成した。外気温および執務室 2-1 の空気温度は 9:00～18:00 の平均値を示している。外気温に関して、条件 B では比較的低かったことがわかった。執務室 2-1 以外で自然換気を行う条件 C に関して、外気温が比較的高い日に自然換気を行っていない執務室 2-1 の選択率が低下した。執務者は比較的温暖な外気温で自然換気が行われた時に、自然換気実施の執務室を選ぶ傾向にあることがわかった。

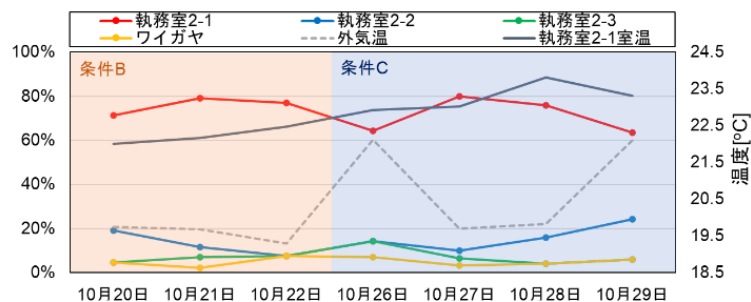


図 38 自然換気実施下における座席選択位置

アンケート結果より、比較的外気温が低く温冷感申告で寒い側が 8 割を占めた条件 B に関して、温熱環境への不満側増加および主観作業能力が低下したことから、外気条件を考慮せずに自然換気を行うことが、執務者満足度の低下要因となることがわかった。外気条件を考慮しながら自然換気を行うことで、執務者満足度や知的生産性向上に寄与する可能性が示された。

8 まとめ

本報では、オフィス棟吹抜け部に導入した置換空調や執務室に導入したパーソナル空調機などの二次側空調システムについて、物理環境測定やアンケートおよびパーソナル空調使用調査を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 夏期には、置換空調により室下部が隅々まで効率よく冷却されていることを確認した。
- 2) 冬期には、誘引を強めた給気ユニットと床下井水貯留槽の影響により、極端な温度低下は見られなかった。
- 3) OAフロア床暖房は、外壁ガラスからのコールドドラフトを防止でき、快適な温熱環境を構築できることを確認した。
- 4) 前面吹出型デスク空調機は、送風量を増すほどPMVが低下し、個人の好みで安易に快適性を調整できることを確認した。
- 5) アンビエント環境条件が28℃の運用Aと比較し26℃の運用B、Cは温熱環境満足度が高い結果となった。
- 6) アンビエント環境の作用温度が27.3℃から26.6℃になるとパーソナル空調の使用回数が減少するが、作用温度に影響されずパーソナル空調の使用頻度が高い執務者や低い執務者がいることが分かった。
- 7) パーソナル空調の使用が多い執務者は、一般的にいわれる快適環境であっても、パーソナル空調による温熱環境満足度への影響がとて大きいことが分かった。
- 8) パーソナル空調の使用が多い執務者は、作用温度が27.3℃から0.7℃低下したアンビエント環境において、パーソナル空調を使用することで、作業効率が向上し、さらに温熱環境の不満を解消する可能性が示唆された。
- 9) パーソナル空調の使用が多い執務者は、パーソナル空調を使用することで、温熱環境満足度および仕事効率の低下を抑制する可能性が示された。
- 10) 中間期における自然換気の実施で、即時的に床表面温度が1.0～2.0℃程度低下した。外気温により床表面温度の低下幅は変動した。
- 11) 自然換気を行ったエリアで、平面的に不均一な温熱環境が形成された。自然換気により時間的変動が大きくなり、1日を通して温熱環境が変動しやすくなった。
- 12) 外気条件を考慮しながら自然換気を行うことで、執務者の温熱環境満足度や知的生産性向上に寄与する可能性が示された。

今後は、今回の性能検証やアンケート結果などで抽出された課題を精査し、快適性や省エネルギー性を高めるためにさらなる機器の改良や運用改善を図っていきたい。

文 献

- 1) 木村ら，エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第11報)置換空調とパーソナル空調機の性能評価，2021年度空衛学会大会（オンライン），J-50，pp.201~204，(2021)
- 2) 竹原ら，エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第12報)夏期におけるパーソナル空調の使用状況と温熱環境満足度，2021年度空衛学会大会（オンライン），J-51，pp.205~208，(2021)
- 3) 渡邊ら，エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第13報)中間期の自然換気実施下における物理環境および執務者満足度，2021年度空衛学会大会（オンライン），J-52，pp.209~212，(2021)
- 4) 清水ら，エネルギー自立型サステナブル研究施設 全体概要およびZEBに向けた建築・設備計画と環境評価，高砂熱学イノベーションセンター報，N0.34，pp.5~16，(2021)
- 5) 木村ら，エネルギー自立型サステナブル研究施設 二次側空調システム及びセンシングシステムの概要，高砂熱学イノベーションセンター報，N0.34，pp.25~36，(2021)
- 6) P.O. Fanger: Thermal Comfort, Robert E. Krieger Publishing Company, (1982)
- 7) ISO7730, Moderate thermal environments, Determination of the PMV and PPD indices and specification of

the conditions for thermal comfort, ISO, (2005)

- 8) ASHRAE, Thermal environmental conditions for human occupancy, ANSI/ASHRAE Standard 55-2013, (2013)
- 9) P.O.Fanger, Thermal Comfort, Robert E. Krieger Publishing Company, (1982)
- 10) 鶴飼ら, 事務所ビルにおける温熱環境の不均一性に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 82 巻, 第 738 号, pp. 739~746, (2017)

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the performance of a personal comfort system (PCS) and its influence on thermal comfort of workers and workplace productivity in different ambient environments. The performance of a displacement ventilation system installed in an atrium space was evaluated both in summer and winter. The system included few partitions on the first floor and a personal air conditioner, floor heater, and counter air conditioner on the second floor. Frequent use of the PCS mitigated decreased thermal comfort levels and workplace productivity associated with increase in ambient temperature. Workers who frequently used the PCS reported high levels of thermal comfort and workplace productivity, especially at an interior operating temperature of 26.6°C. Finally, an actual measurement survey was performed in an energy-independent sustainable research facility equipped with natural ventilation systems to verify operational methods that contribute to improved intellectual productivity. Operational changes related to natural ventilation systems were made during the intermediate period, and each operation was evaluated. The room was found to be rapidly cooled by natural ventilation in proportion to the outside temperature, creating an uneven thermal environment. It was confirmed that natural ventilation needs to be implemented under appropriate outdoor air conditions.

再生可能エネルギーの活用状況および運用実績※

相澤直樹・平原美博・清水昭浩

大迫孝輔・羽鳥大輔*・武藤友香*

Operational Results in the Use of Renewable Energy System

Naoki Aizawa・Yoshihiro Hirahara・Akihiro Shimizu
Kosuke Osako・Daisuke Hatori*・Yuka Muto*

本建物は、100%再生可能エネルギーによるエネルギー自立型施設を目指し、木質チップを燃料としたバイオマスガス化熱電併給システム（Combined Heat & Power、以降バイオマス CHP と記す）、太陽光発電システム、蓄電システム、地下水熱利用システムを採用している^{1)・3)}。本報では、再生可能エネルギーの活用状況と運用実績として、これらのシステムの2020年度（2020年4月～2021年3月）の実績を中心に述べる。

1. はじめに

本建物は、100%再生可能エネルギーによるエネルギー自立型施設を目指し、木質チップを燃料としたバイオマスガス化熱電併給システム（Combined Heat & Power、以降バイオマス CHP と記す）、太陽光発電システム、蓄電システム、地下水熱利用システムを採用している^{1)・3)}。2020年3月から本建物の業務運用を開始し、その後、半年ほど経過する中でほぼ全てのシステムが稼働を開始した。2020年度（2020年4月～2021年3月）は、施設としての立ち上がり期間として、稼働させたシステムの運転状況の把握と課題抽出を行った。また、2021年3月に夜間や休日の発電電力を蓄えるための蓄電池の増設を行い、各システムの24時間運転を開始した。

本報では、再生可能エネルギーの利用状況と運用実績として、バイオマス CHP、太陽光発電、ならびに、バイオマス CHP の排熱利用、地下水利用について、2020年4月から2021年3月までの実績を中心に述べる。

2. バイオマス CHP、太陽光発電の運転実績

2.1 年間の発電状況

本建物は、24時間稼働させる可能性がある研究施設であり、発電システムとして、太陽光発電（最大発電能力 200kW）に加え、連続運転可能で夜間も電力と排温水利用が可能なバイオマス CHP（発電量 40kW×2、排熱量 100kW×2）を導入した。計画における年間の発電量の内訳は、バイオマス CHP が 76%、太陽光発電が約 24%である。また、本建物は現在のところ商用系統への逆潮流（売電）が不可能であることから、運用開始当初は 430kWh の蓄電池が導入されており、さらに 2021年3月からは夜間や休日の発電電力を蓄えるためにリチウムイオン電池約 3,390kWh、NAS 電池約 1,200kWh を増設して、蓄電容量の合計約 4,590 kWh で運用している。

※空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.217-220（2021）の再掲

* 株式会社三菱地所設計 機械設備設計部

図 1 に、2020 年 4 月～2021 年 3 月の太陽光発電の運転実績を示す。図中には発電量の計画値および計画値に対する実績値の割合が示されている。実績値から 8 月が発電量のピークで約 25,000 kWh/月が得られた。施設の立上げにおける試験運転等の影響から、7 月までは太陽光発電量を絞った運転を行っていたが、8 月以降は計画値の 80%以上の発電量が得られた。

図 2 に、2020 年 4 月から 2021 年 3 月までのバイオマス CHP と太陽光発電および受電の電力量を示す。8 月以降のバイオマス CHP の安定稼働は、4 月から 7 月にかけての試験運転における課題把握と対策、ならびにメンテナンスの習熟によるところが大きいと考える。2020 年 9 月以降は、バイオマス CHP が太陽光の発電量を上回っている。蓄電池を増設した 2021 年 3 月以降は、バイオマス CHP を連続運転する運用方針に変えており、今後の発電量の増加で受電電力量の減少が可能と考える。

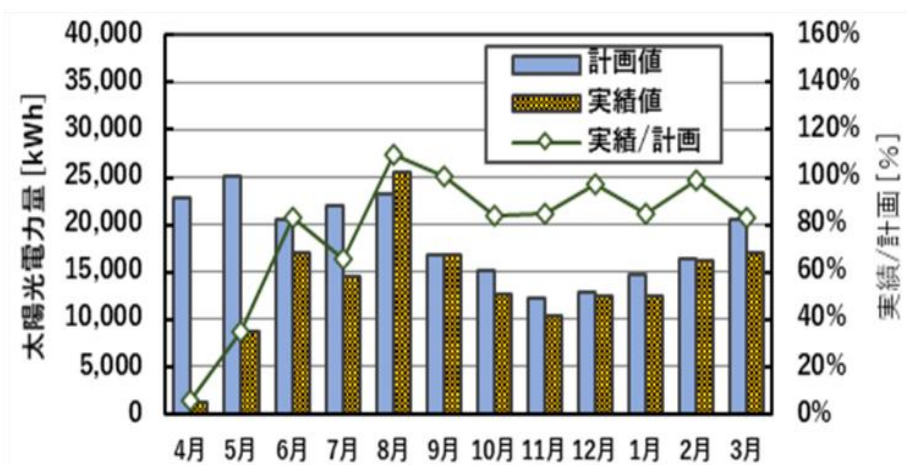


図 1 太陽光発電の運転実績 (2020.4~2021.3)

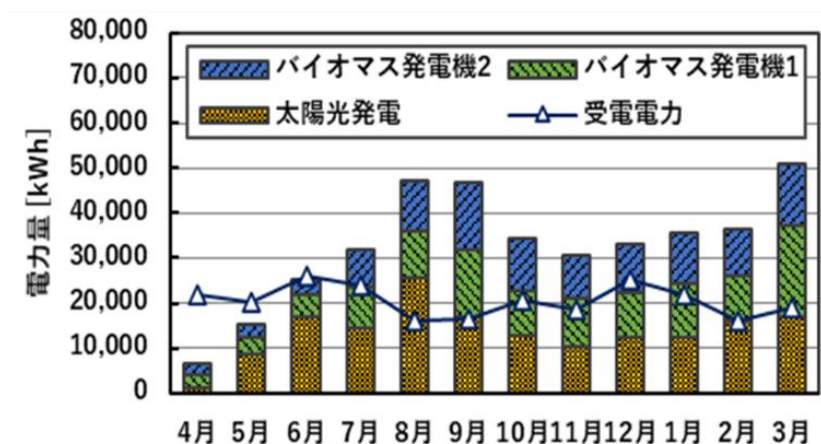


図 2 バイオマス CHP と太陽光発電および受電量 (2020.4~2021.3)

図 3 にバイオマス CHP の運転時間を示す。3 月の蓄電池増設までは、消費電力の少ない休日には蓄電容量を超える発電量となるため、土日や祝日、長期休暇中はバイオマス CHP を停止する運用としていたため、運用初年度の発電目標を 5,000 時間/(年・台)とした。これは月間平均で約 420 時間/(月・台)に相当するが、2020 年 9 月には、目標時間の 9 割を超える 400 時間/(月・台)となった。2021 年 3 月には一台が上記目標の 420 時間/(月・台)を超える約 500 時間/(月・台)を達成した。

再生可能エネルギーによるエネルギー自立に向けた目標としては、まず 2021 年度には、受電量は約 9 万 kWh として、太陽光発電が 2020 年度実績値および計画値から約 21 万 kWh、バイオマス CHP が約 56 万 kWh を賄う 7,000 時間/(年・台) (月平均で約 580 時間/(月・台)) の発電を目標とする。これにより、2020 年度実績⁴⁾の約 1.2 倍と仮定した 2021 年度の予想消費電力量 77 万 kWh を賄えることを実証したいと考えている。

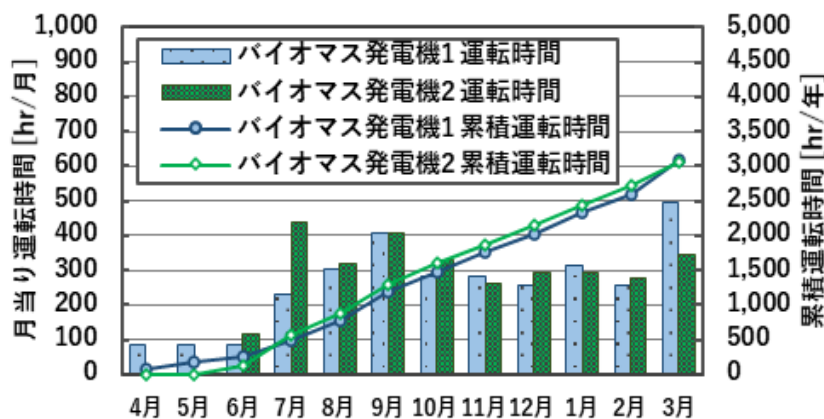


図 3 バイオマス CHP の運転時間 (2020.4～2021.3)

2.2 バイオマス CHP の排熱利用

バイオマス CHP の排熱は、既報³⁾で述べたように平日の日中は空調に利用し、空調の熱需要が低い夜間や休日は燃料チップの乾燥や貯湯槽の加熱に利用可能である。

図 4 に、バイオマス CHP の排熱利用について、2020 年 8 月～2021 年 3 月における積算の排熱量の割合を示す。

排熱の約半分が空調用、残りは木質チップの乾燥工程に使われており、空調以外でも排熱が有効利用されていることがわかる。給湯の割合は、空調やチップ乾燥に比べて低かった。今後、別の排熱利用先として、地下水貯水槽の水の冷却用に設置された吸着式冷凍機についても運用において検証していく予定である。

図 5 に、バイオマス CHP の補機類および本建物の空調におけるバイオマス CHP からの月別の排熱利用熱量を示す。バイオマス CHP からの排熱量は、バイオマス CHP の運転時間を月間 420 時間/(月・二台)と仮定した場合、84,000 kWh/(月・二台)である。これに対して図中で熱量が最も少なかった 2020 年 11 月においても約 6 割の排熱が得られ、補機類および空調に利用された。各月の排熱量の内訳として、デシカント空調の再生需要が大きくなる 8 月、9 月や加熱需要の大きくなる冬期 12 月～2 月が多くなっていることが見てとれる。今後は施設の稼働率が高まると予想されることから、バイオマス CHP の運転時間を増やすことが可能と考える。

2.3 バイオマス CHP の補機動力

バイオマス CHP が発電した電力の一部は、バイオマス CHP を稼働させるための木質チップの搬送、ファンを含む各乾燥機、灰の排出、施設の換気ファンといった各種の補機類が消費する。

図 6 の上側に 2020 年 4 月～2021 年 3 月における補機の消費電力量、下側にバイオマス CHP の発電量および発電量に対する補機の消費電力量の割合 (補機比率) の月変動を示す。補機比率は、30%～90%で、6 月から 9 月にかけて低下し、10 月以降は 30%～40%であった。これはチップのプレ乾燥や換気ファンの設定値の調整など必要な補機を無駄なく動かす運転管理の習熟が要因と考える。

図 7 に、2020 年 4 月～2021 年 3 月におけるバイオマス CHP における補機類の積算電力量の割合を示す。

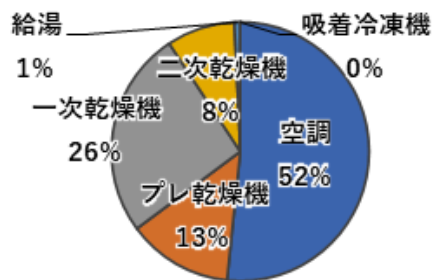


図4 バイオマス CHP の排熱量の割合
(2020.8～2021.3)

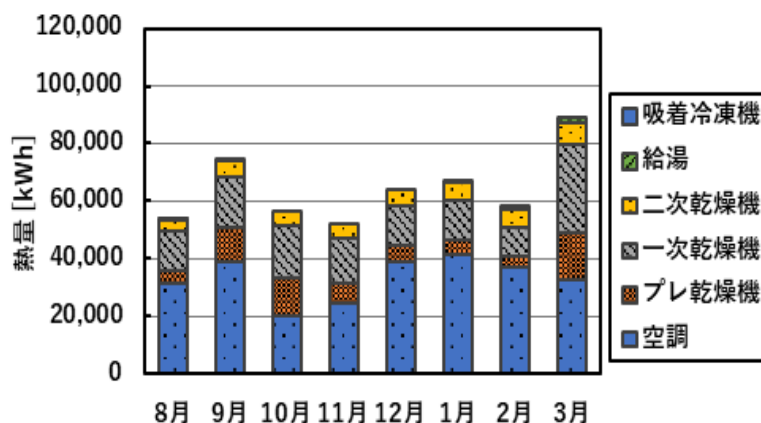


図5 月別のバイオマス CHP からの排熱利用熱量
(2020.8～2021.3)

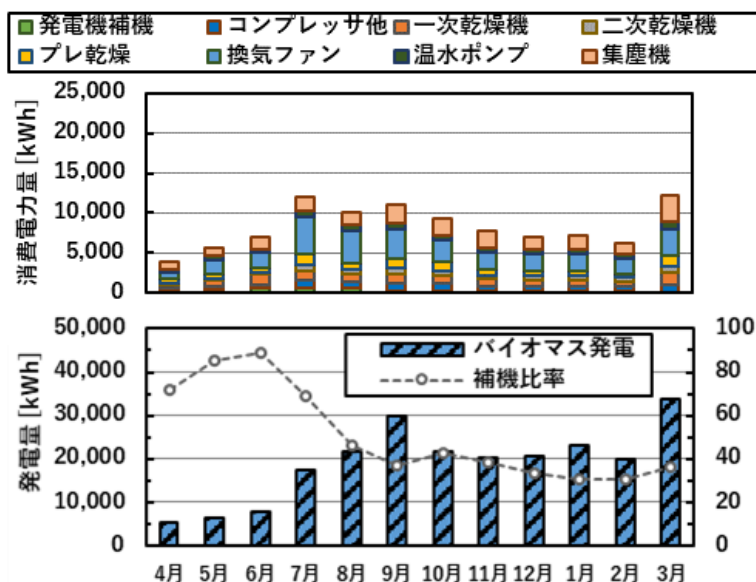


図6 バイオマス CHP の補機電力量

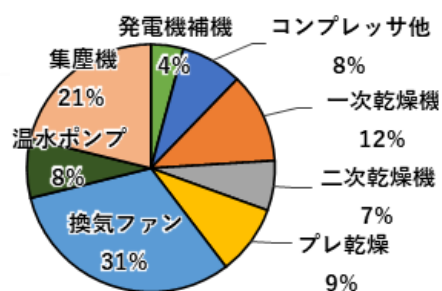


図7 バイオマス CHP の各種補機類の
積算電力量の割合

バイオマス発電機を設置した施設の換気ファンの占める割合が大きく、次いで集塵機、一次乾燥機であった。補機類の省電力化も重要であり、今後、対策と検証を行っていく予定である。

前述のとおりバイオマス CHP は基本的に連続運転を目的とすることから、2021 年 3 月以降、夜間や土日祝日も継続して運転させてその状況を調べた。図 8 に、バイオマス CHP の一台を 17 日間連続運転したときの発電量、排温水の温度および排熱量を示す。この図より、運転中の発電量は約 40 kW、排熱量は約 100 kW でほぼ一定で、計画値との一致を確認した。また、期間の中盤に発電量の低下が数回見られるが、これはバイオマス CHP への還りの排温水温度が高くなったため、排温水温度を下げるために発電機の自己抑制機能として発電を抑制したためである。連続運転期間の後半は、排熱利用先を追加したことで排温水温度が下がり、発電量が約 40 kW に戻っている。また、4 月 8 日の発電量の低下は運転停止であり、この停止は発電機内ガス化炉での木質チップのブリッジ（詰まり）によるものである。

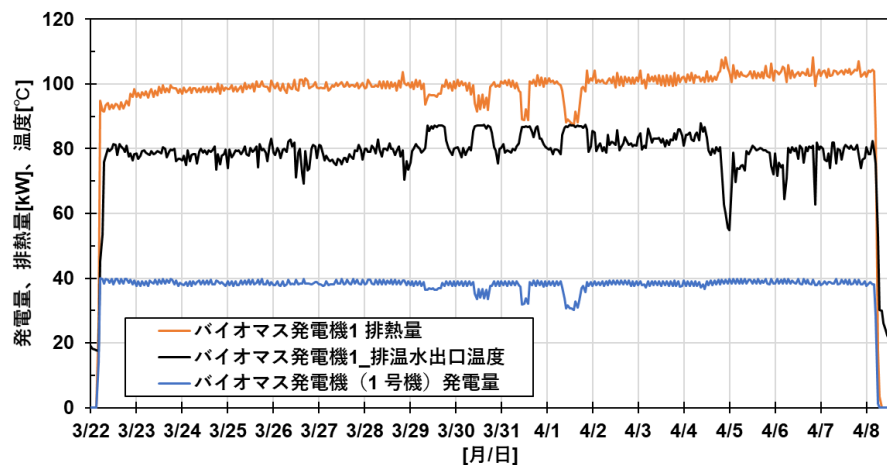


図 8 バイオマス CHP の運転状況 (2021.3.22~4.8)

3. 地下水および地下水熱利用の実績

3.1 地下水の使用量および還水量

本建物は、既報¹⁾に示したように地下水のカスケード利用システムを実装している。2020 年 5 月から 2021 年 4 月の水（汲み上げた地下水と引き込み水道水）の使用量は、合計約 13,300 m³、内訳は上水約 700 m³（5%）、地下水約 12,600 m³（95%）で、図示は割愛するが 2 ヶ月毎の計量でも地下水の使用量は最低でも水全体の 85%であった。

図 9 に、汲み上げた地下水のうち、空調利用した地下水量、空調利用後に散水など雑用水として再利用した水量およびその割合を示す。5 月から 10 月は、地下水を空調利用後に地下に戻す還水量が多くなり、空調利用後の再利用率は約 20%以下と低く、空調利用のみが多い。11 月から 4 月は、5 月から 10 月と比較して全体の汲み上げ水量が少なく、再利用率は 35%~100%と高くなって、散水等の使用に応じて地下水の汲み上げが行われていた。

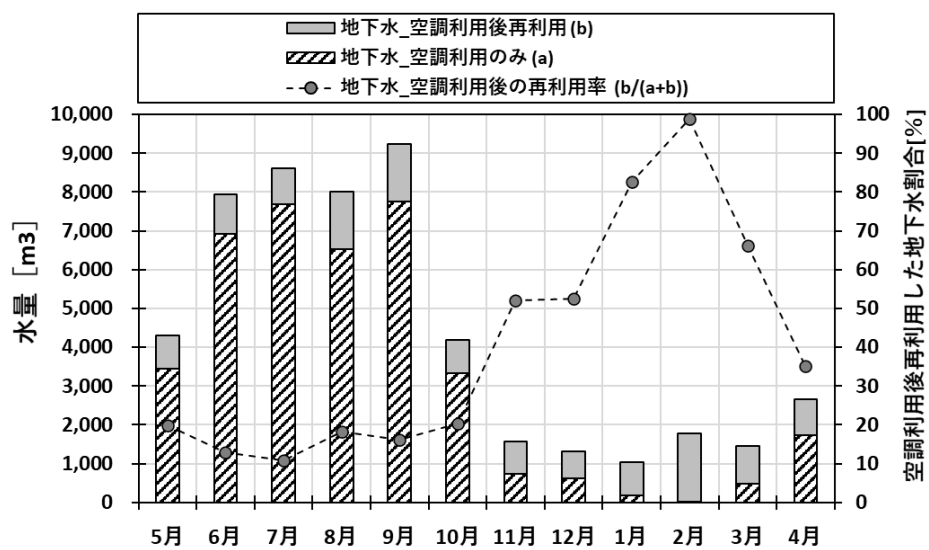


図 9 地下水の空調利用量、再利用量、再利用率

3.2 地下水の熱利用

図 10 に、地下水温度を把握する目的から、地下水を一旦貯水して利用するための貯水槽内の水温を示す。ここでは、貯水中もしくは完了後となる午前 3 時の瞬時温度で示した。図中には日平均の外気温度も示す。この図より、地下水温度は年間を通じて $16^{\circ}\text{C}\sim 18^{\circ}\text{C}$ で平均 17°C 程と安定しており、空調利用が可能であることがわかる。

図 11 に、地下水の直接利用系統と間接利用系統の日ごとの水量および熱量を示す。図から、5 月から 10 月初旬にかけて直接利用の地下水の水量ならびに熱量がかなり多く、10 月中旬から 4 月中旬にかけては比較的少ない。これは地下水の空調への熱利用によるもので、直接利用系統を主に外気処理に、間接利用系統を主に室内負荷処理に利用しているためである。

直接利用系統の水量および熱量が間接利用系統より多く、単位水量あたりの熱量でもピーク時期（図中の 8/29 頃）で、直接利用系統が約 24 MJ/m^3 、間接利用系統が約 17 MJ/m^3 であった。間接利用系統の熱量に対する水量が直接利用系統と比べて多く、水量を低減できる可能性がある。

図 12 に、日最高気温と間接利用地下水の熱量の関係を示す。日最高気温が高くなると間接利用地下水の熱量が増加している。地下水の汲み上げ量を必要最低限とできれば水資源、地下水汲み上げの電力の無駄を削減できることから、日最高気温から地下水の必要量を予測することも重要となる。現状ではデータのバラつきが大きいですが、今後、空調負荷や運転条件を層別するなど予測方法について検討する予定である。

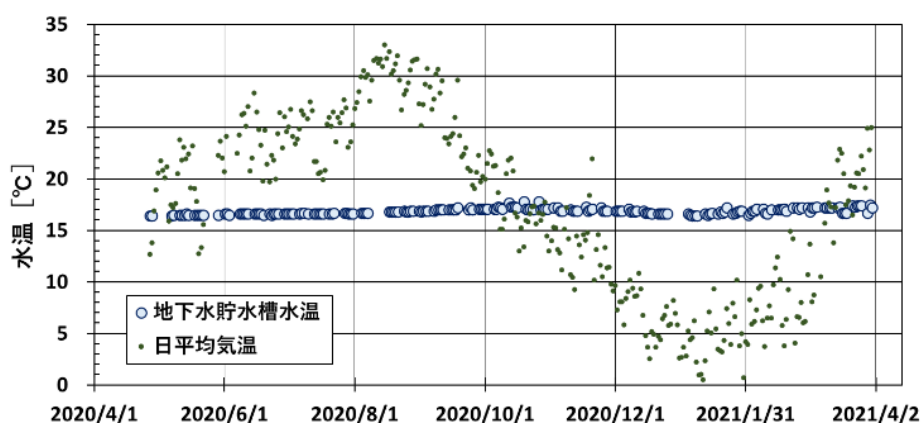


図 10 地下水貯水槽内の水温

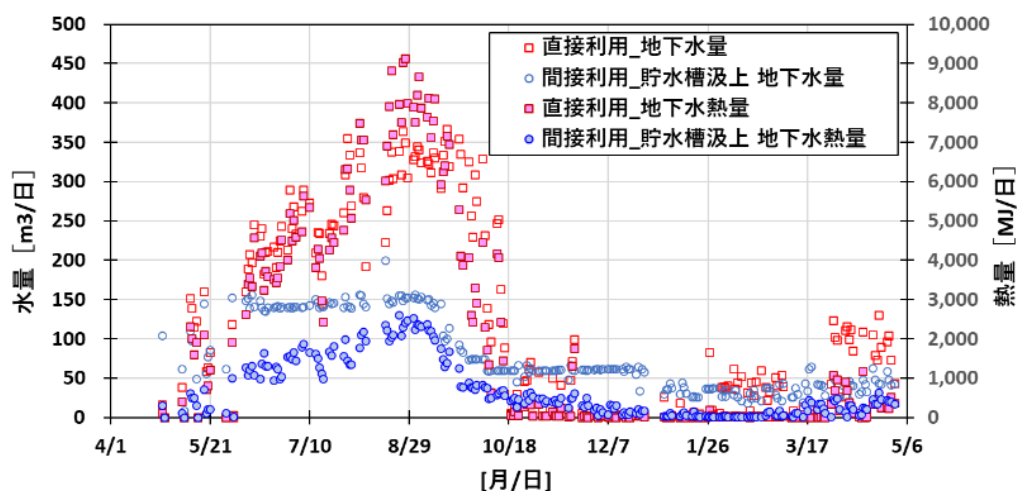


図 11 地下水の直接利用と間接利用系統の水量および熱量

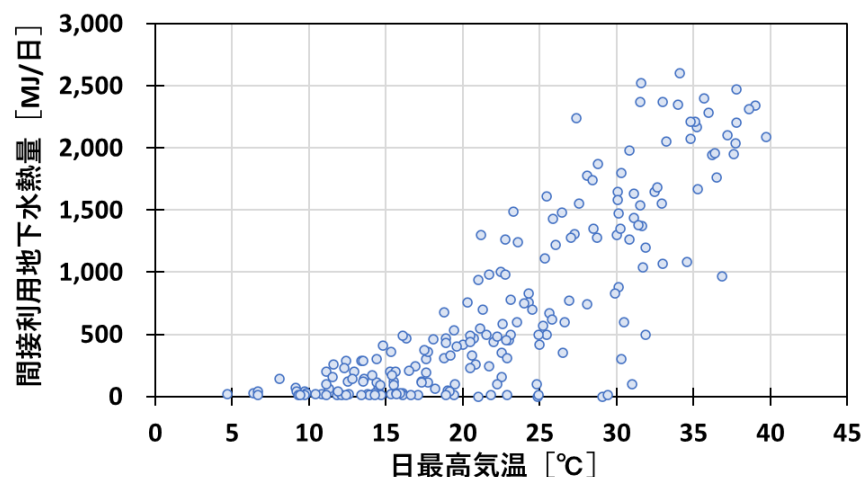


図 12 日最高気温と間接利用システムの地下水熱量

4. おわりに

再生可能エネルギーによるエネルギー自立を目指す本建物での太陽光発電、バイオマス CHP、地下水およびその熱利用の運転実績を述べた。

- ① バイオマス CHP では、初年度の発電 5,000 時間が可能な月間約 420 時間の目標に対し約 7 割の 300 時間以上の運転ができた。2021 年 3 月には一台が 500 時間を達成した。
- ② 再生可能エネルギーによるエネルギー自立型施設の実現に向け、本建物の消費電力の仮定から、2021 年度は、バイオマス CHP で年間 7,000 時間以上を発電目標とする予定である。
- ③ 今後、発電施設の補機電力削減、排熱先としての吸着冷凍機を加えた運用等を加えて検証する予定である。
- ④ 地下水およびその熱の利用では、地下水の汲み上げ量を必要量にすることが省エネルギー、水資源対策に重要である。今後、外気温度や空調条件から地下水の必要量を予測する方法を検討する。

文 献

- 1) 武藤ら：エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証（第 1 報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp185-188，2019
- 2) 羽鳥ら：エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証（第 2 報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp149-152，2020
- 3) 元田ら：エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証（第 3 報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp153-156，2020
- 4) 清水ら：エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証（第 16 報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp. 221-224，2021

ABSTRACT

This building was built with the aim of becoming an energy-independent facility with 100% renewable energy. It uses a compact woody biomass gasification Combined Heat & Power, solar power generation, and a cascade heat utilization system for groundwater. Business operation of the facility started in March 2020, and each energy system started operation. We are continuing to grasp the operational status, identify issues, and take countermeasures and verify them. In this paper, we reported on operational results of biomass power generation and solar power generation as the renewable energy, and operational results of using the groundwater and the waste heat from biomass power generation as the energy consumption.

エネルギー自立型サステナブル研究施設 ーZEB 達成状況の評価と対策ー

清水昭浩・平原美博・松浪佑宜
羽鳥大輔^{*1}・高正明^{*1}・武藤友香^{*1}・田辺新一^{*2}

the Energy Self-Sufficient Innovation Center - Evaluation of ZEB Achievement Status and Countermeasures -

Akihiro Shimizu・Yoshihiro Hirahara・Yuuki Matsunami
Daisuke Hatori^{*1}・Masaaki Taka^{*1}・Yuka Mutoh^{*1}・Shin-ichi Tanabe^{*2}

高砂熱学イノベーションセンターは、環境負荷低減と知的生産性を両立したエネルギー自立型研究施設を目指して、2020年1月に竣工、2020年3月より運用を開始した。本報では、まずBEMSに蓄積された運用データ解析による建物の年間供給／消費エネルギーをもとにしたZEBの達成状況及びCO₂排出量の削減効果について述べる。次に、発電電力の余剰電力が電力会社の配電網へ逆潮流（売電）できない制約がある中で、再生可能エネルギーの有効活用を目的として、竣工後に実施した蓄電池設備増設の概要とその運用結果について報告する。

1. はじめに

本施設は、既報²⁾で報告したように環境負荷低減と知的生産性向上を両立したエネルギー自立型研究施設を目指している。環境負荷低減を達成するために、オフィス棟は実績値にて一次エネルギー消費量が正味0となる『ZEB』を、施設全体としてはZEB Ready以上を目標としている（図1参照）。

一般的なZEBの建物では、再生可能エネルギーで発生した余剰電力を電力会社に売電することにより『ZEB』を達成している。一方、本施設の立地する茨城県南部は、電力会社の配電網が逼迫しており、竣工2ヶ月前に余剰電力の逆潮流（売電）が不可であることが判明した。そのため運用段階では、逆潮流を防止

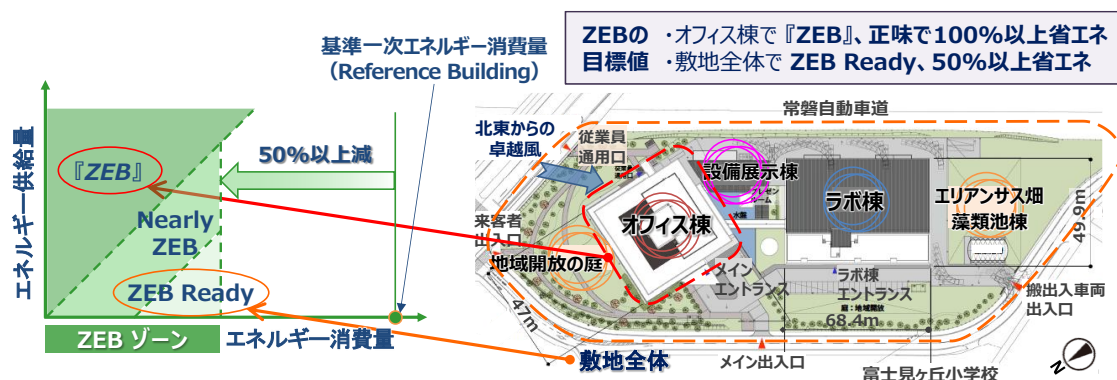


図1 本施設の配置図とZEBの目標

※ 2021年度空気調和・衛生工学会大会講演論文¹⁾を加筆修正したものである。

^{*1} 株式会社三菱地所設計, Mitsubishi Jisho Sekkei Inc., ^{*2} 早稲田大学, Waseda University

するため受電電力が 10kW 程度に安定するように蓄電池の充放電を抑制させている。蓄電容量が満蓄の場合は、太陽光発電の抑制制御、さらにバイオマスガス化発電（以下、バイオマス発電）の出力抑制を行っている。本施設を目指すエネルギーバランスの概要を図 2 に示す。

本報では、BEMS に蓄積された運用データ解析による建物の年間供給／消費エネルギーをもとにした ZEB の達成状況の評価と再生可能エネルギーの有効活用を目的として竣工後に実施した蓄電池設備増設の概要について報告する。

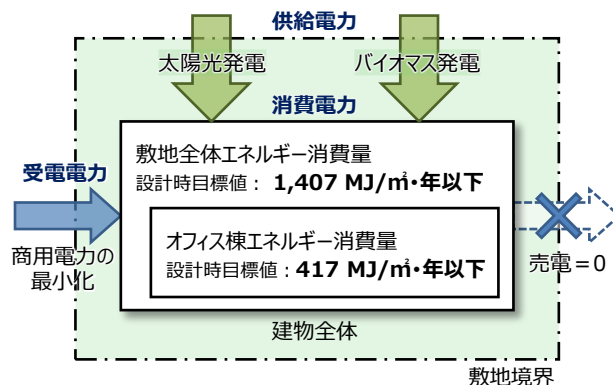


図 2 エネルギーバランスの概要

2. 年間供給／消費エネルギーによる ZEB 評価

2.1 年間受電電力量及び供給電力量の評価

2020 年 4 月から 2021 年 12 月までの受電電力量及び太陽光、バイオマス発電での供給電力量（詳細は前報³⁾参照）の推移を図 3 に示す。2020 年 4～5 月は、コロナ禍の影響で従業員の出社人数も制限されていたため、供給電力も小さめの数値となっている。5 月後半以降は徐々に通常の業務体制に戻っていったため、全体の電力量（受電電力量+供給電力量）も増えるとともに太陽光やバイオマスの発電量も増加している。

2020 年度年間と 2021 年度 4～12 月の 9 ヶ月間の電力内訳の比較を図 4 に示す。2020 年度は、受電電力が全体の 38%に対して太陽光が 26%、バイオマスが 36%の比率となり、逆潮流防止の目的で発電量の抑制を行っていたため、再生可能エネルギーを最大限利用することができなかった。2021 年度の 4 月からは、蓄電池を増設した効果が表れ、バイオマス発電機や太陽光発電による発電量が増加し、受電電力量の比率を 21%まで減少させることができています。

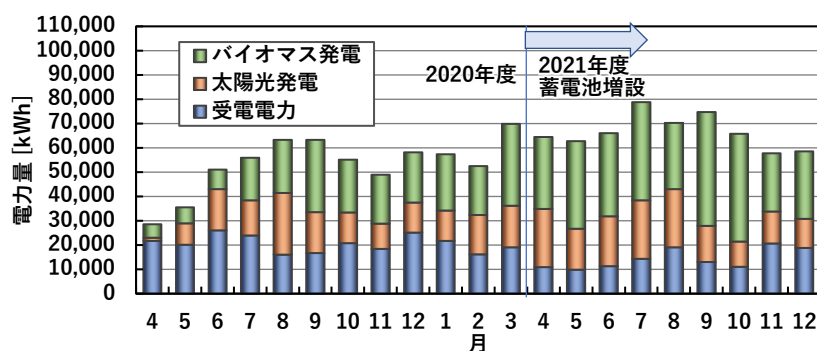


図 3 受電電力量及び供給電力量の推移（'20/4～'21/12）

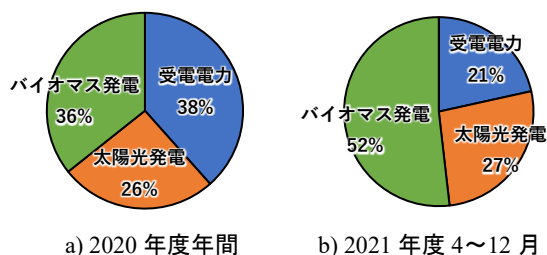


図 4 電力内訳の比較

2.2 年間消費電力量の評価

負荷単位の電力量より算出したオフィス棟及びラボ棟（設備展示棟等を含む）の消費電力量の推移を図5に示す。図3と同様の年間変動となっている。図中の蓄電ロス+補機電力は、蓄電池の充電電力量と放電電力量の差及びNAS電池の補機電力を足し合わせたものである。参考のために図3より求めた受電電力を含めた供給電力の合計を折れ線グラフで表す。折れ線グラフ（受電電力量+供給電力量）と積上げ棒グラフ（消費電力量）との間に約5%の差がみられるのは、測定誤差や送電ロス等によるものと考えられる。

ラボ棟に関しては、2020年度は一部の実験装置しか稼働していないため当初の想定よりかなり少ない結果となっているが、年度末の3月頃より装置の稼働が増加し電力消費量も増加しておりその傾向は2021年度も続いている。そのため、敷地全体では2021年12月の時点では10%の増加になっているが、オフィス棟のみで見ると22%の減少となっている。オフィス棟でのエネルギー消費量の削減の内訳については次節で説明する。

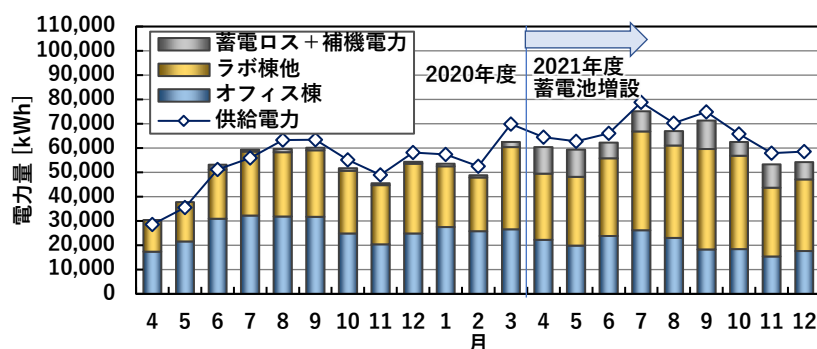


図5 消費電力量の推移('20/4~'21/12)

2.3 ZEBの達成状況の評価

年間の一次エネルギー消費量の目標値と2020年度の実績値の比較を表1に、ZEBの達成状況を図6に示す。図6は文献4)のZEBの評価方法に基づき、エネルギー消費量と供給量を基準値（既存研究所の実績値）で指数化し表したものである。

一次エネルギー消費量原単位で見ると敷地全体では、目標を大きく下回る結果となっており Nearly ZEBを達成できている。一方、オフィス棟は『ZEB』を達成しているが、消費量原単位としては629MJ/m²・年と目標値の約1.5倍となっており目標未達の結果となっている。

オフィス棟の一次エネルギー消費量原単位の内訳を設計試算値と2020年度の実績値で比較した結果を図7に示す。設計試算値は、設計段階においてBELS認証とは別途に建築物総合エネルギーシミュレーションツールBESTを用いて試算した結果（詳細は文献5参照）である。なお、試算値では地域交流を主目的とした展示施設での消費を含んでおらず、実績値からこれを除くと583MJ/m²・年となるが、まだ目標値の約1.4倍であり、引き続き運用改善を行っていく。

表1 年間エネルギー消費量の目標値と2020年度の実績値の比較

		エネルギー消費量 [MJ/年]	延床面積 [㎡]	エネルギー消費量原単位 [MJ/(㎡・年)]
敷地全体	既存研究所	16,340,000	5,187	3,150 (100%)
	目標値(設計段階)		11,610	1,407 (44.7%)
	実績値(初年度)	5,899,556	11,764	501 (15.9%)
オフィス棟	既存研究所	2,451,000	1,764	1,389 (100%)
	目標値(設計段階)	1,979,974	4,750	417 (30.0%)
	実績値(初年度)	3,078,273	4,897	629 (45.2%)

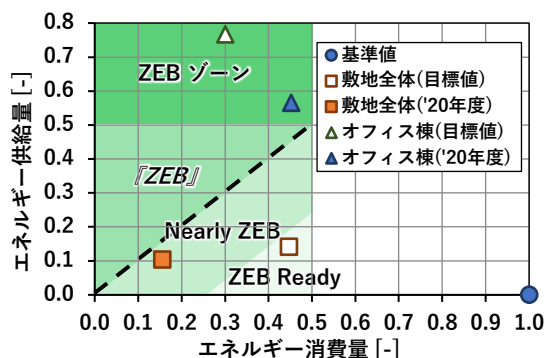


図 6 ZEB の達成状況(2020 年度)

展示用以外で試算値と実績値の差が大きいのは、熱源、空調、給湯・衛生の項目である。熱源、空調の数値が大きいのは、運用段階ではコロナの感染防止を考慮して年間を通じて外調機を最大風量運転としたことが一因として挙げられる。給湯・衛生設備では試算値では見込んでいなかった井水汲上・還水ポンプ動力の数値が大きくなっている。

2021 年度はこれらの結果をもとに、中間期の自然換気の積極的利用や外調機、井水汲上ポンプの運転方法の見直し等により消費電力量の削減を進めているところである。図 8 に 2020 年度と 2021 年度の 4 月から 12 月の系統別エネルギー消費量の比較を示す。熱源、熱源補機で約 4 割、空調、給湯・衛生で約 3 割、照明で約 1 割と減少しており、設計時の試算値に近づいて行っている。

2.4 CO₂ 排出量での評価

CO₂ 排出量の基準値（既存研究所の実績値）と 2020 年度の実績値の比較を図 9 に示す。基準値に対しては 97%と大幅な削減となった。これは、バイオマス発電、太陽光発電に加え、水力発電由来のグリーン電力（東京電力、アクアプレミアム）を 2020 年 7 月から購入開始したためである。2021 年度は、化石燃料を一切使用しないカーボンニュートラルを達成する見通しである。

3. 蓄電池設備の増設

3.1 蓄電池設備増設の概要

逆潮流を防止しながら再生可能エネルギーを安定的かつ有効に活用するために、竣工後に①太陽光発電の出力制御機能の追加、②大容量蓄電池の増設を段階的に実施した。蓄電池の増設は、土日で快晴の場合でも余剰電力を全て蓄電できる容量を運用実績から推測し蓄電容量を決定した。また、充放電効率の高いリチウムイオン電池と低コストでエネルギー密度が大きい NAS 電池の組合せとし、比較検証を兼ねて両者を採用した（写真 1、表 2 参照）。蓄電池増設後の電源系統図を図 10 に示す。この増設により、既設と合わせて蓄電容量は合計で 4,594.8kWh と竣工時の約 10 倍に増設され、2021 年 4 月より運用を開始した。

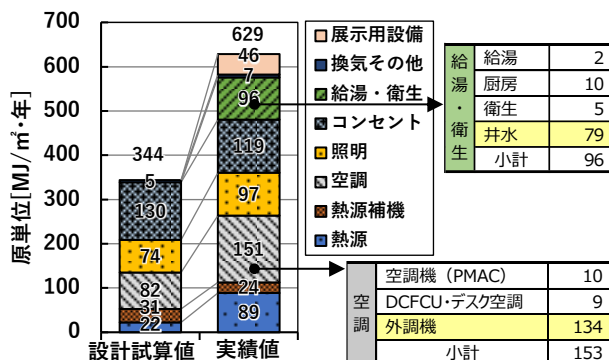


図 7 オフィス棟の一次エネルギー消費量原単位の内訳 (2020 年度)

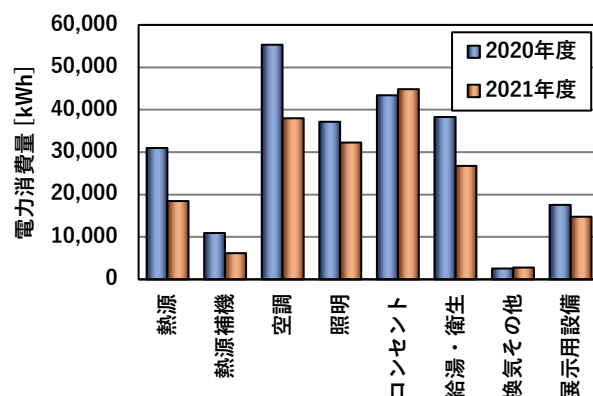


図 8 オフィス棟の系統別エネルギー消費量の比較 (2020 年度と 2021 年度の 4 月～12 月の集計値)

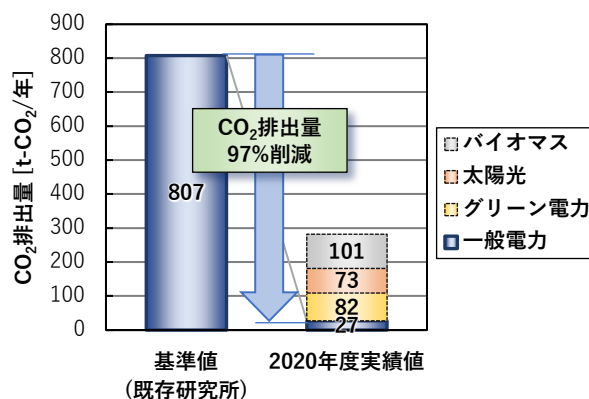


図 9 CO₂ 排出量の基準値と実績値の比較(2020 年度)



写真1 蓄電池設置状況

表2 蓄電池機器仕様

	種 類	能 力
既存	リチウムイオン電池	入出力 216kW
		蓄電容量 430kWh
増設	リチウムイオン電池	入出力 429kW
		蓄電容量 2,964.8kWh
	NAS電池	入出力 200kW
		蓄電容量 1,200kWh

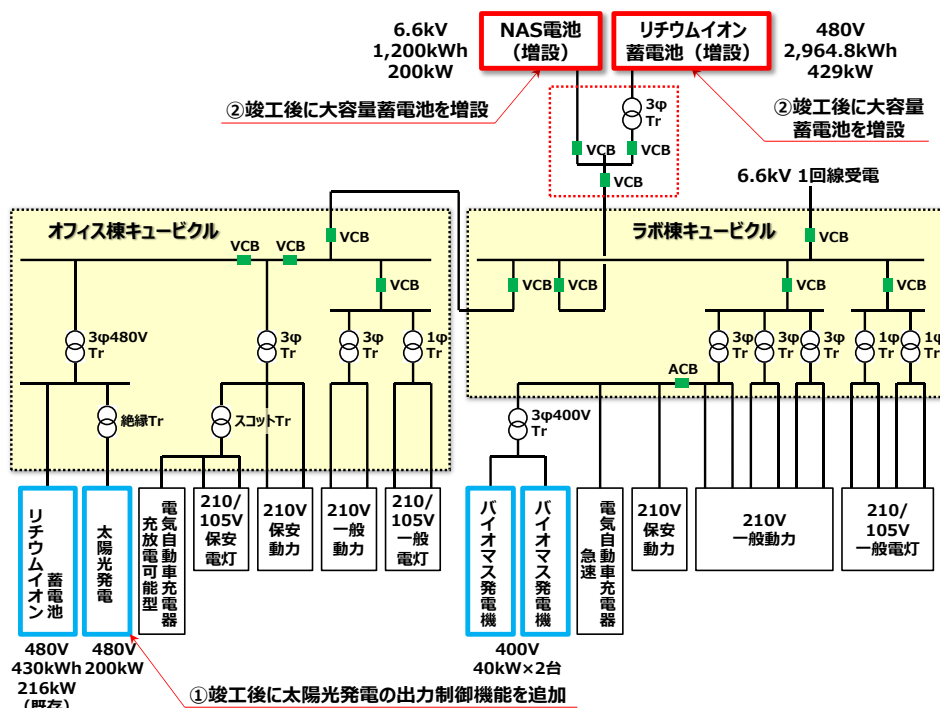


図10 電源系統図

3.2 蓄電池用エネルギー管理システム

EMS の開発

再生可能エネルギーの発電機や蓄電池を最適運転するために、蓄電池用エネルギー管理システム (EMS、図 11) を合わせて開発した。本 EMS では、逆潮流防止と再生可能エネルギーの有効活用を目的に、施設全体の消費電力量や天気予報をもとにした太陽光発電量を予測しながら蓄電池の充放電の最適運転支援を行っている。なお、EMS の詳細については次報⁹⁾で記載する。

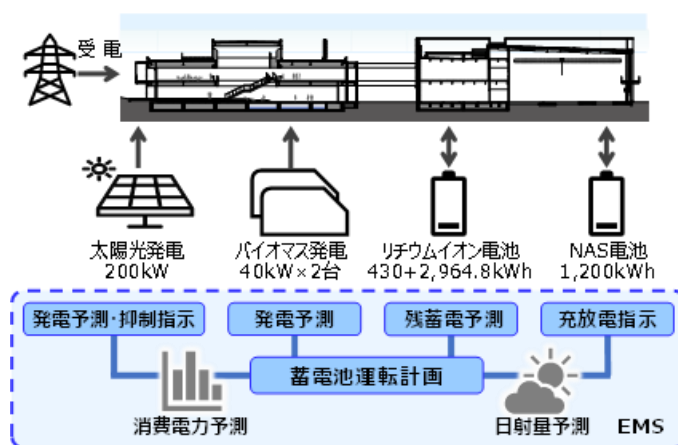


図11 EMS の概要

3.3 蓄電池設備増設の評価

二章で記述したように、蓄電池を増設したことにより再生可能エネルギーの利用が増え、受電電力量の比率が減少する効果が確認された。また、ピーク電力（最大需要電力）に関しては、2020年度は190kWに対し、2021年度は12月末時点では156kWまで減少しており蓄電池設備増設によるピークシフトの効果も見られるが、最終的な評価は2021年度末まで待つこととする。蓄電池の運用により得られた知見は、今後EMSのアルゴリズムに取り込んでいく予定である。

4. おわりに

地球環境負荷低減と知的生産性向上を両立したサステナブル建築として建設された研究施設の運用開始後の取組みについて紹介した。今後ZEBの普及に伴い、計画・設計段階では再生可能エネルギー等の供給側と空調・照明等の負荷側を一体としたエネルギー計画が、運用段階では電源を含めた建築・設備一体のエネルギー管理が重要となってくる。本報がZEBの今後の普及促進の参考になれば幸いである。

謝 辞

本プロジェクトの計画から設計、施工、運用・検証段階で多数の方々にご協力頂きました。関係者の皆様には、誌面を借りてお礼を申し上げます。

文 献

- 1) 清水ほか：エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証（第16報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，p. 221-224（2021）
- 2) 清水ほか：エネルギー自立型サステナブル研究施設－全体概要およびZEBに向けた建築・設備計画と環境評価－，2020年度イノベーションセンター報，p. 49-60（2021.3）
- 3) 相澤ほか：エネルギー自立型サステナブル研究施設－再生可能エネルギー評価－，2021年度イノベーションセンター報，（2022.3）
- 4) 空気調和・衛生工学会：「ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）の定義と評価方法」，p. 5（2015）
- 5) 武藤ほか：エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証（第1報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，p. 185-188（2019）
- 6) 松浪ほか：Development of a grid independent energy system using energy supply and demand prediction（Part 1）Concept and problem identification from operational data，2021年度イノベーションセンター報，（2022.3）

ABSTRACT

The Takasago Innovation Center was completed in January 2020 and began operations in March 2020 with the aim of becoming an energy-sufficient research facility that achieves both reduced environmental impact and intellectual productivity. In this report, we first describe the achievement of the zero energy building (ZEB) status and the effect of reducing CO₂ emissions based on the annual energy supply/consumption of the building by analyzing operational data gathered through the building energy management system (BEMS). Next, as there is a restriction on the reverse flow of the surplus power generated (sale of power) to the distribution network of the electric power company, we report the design and operation of the expansion of battery storage equipment implemented after completion for the effective utilization of renewable energy.

DEVELOPMENT OF A GRID INDEPENDENT ENERGY SYSTEM USING ENERGY SUPPLY AND DEMAND PREDICTION

(Part 1) Concept and problem identification from operational data

Yuki MATSUNAMI ¹, Yuan GAO ², Shohei MIYATA ², Yasunori AKASHI ²
Katsuhiko SHIBATA ¹, Kenichiro KATAYAMA ¹, Yoshihiro HIRAHARA ¹

ABSTRACT

In this research, we aim to develop an energy self-sufficient system by applying model predictive control. The objective of this research is to construct a model which can predict both the amount of energy load and renewable energy generation in a building. We will aim to verify the validity and effects of both the models and the predictive control, at the Takasago Innovation Center. In this paper, the yearly power balance and transition of power generation and battery power in the building is estimated by operational data. As a result, for self-sufficiency of electricity, it was shown that it's necessary to suppress the Photovoltaic output from an early stage by predicting energy balance, and to optimize the operation plan of combined heat and power system.

1. INTRODUCTION

As the Japanese government declared to aim for a carbon neutral society by 2050, attention for ZEBs (Net Zero Energy Buildings) is higher than ever. But along with the diffusion of renewable energy sources, the conventional power grid has become so strained that reverse power flow is being limited in some areas [1]. Furthermore, due to the rise of natural disasters such as typhoons and earthquakes, the importance of a grid independent, energy self-sufficient system is increasing.

To achieve an energy self-sufficient system by renewable energy sources, we need enough energy to satisfy the load and appropriate allocation of power by batteries etc. However, in areas where reverse power flow is restricted, it is necessary to either suppress the amount of power generation or, convert the surplus power to other energy sources such as thermal energy, when the battery storage reaches full charge. Whichever method we choose, it is required to optimally control the system with respect to the ever-changing energy consumption and the amount of power generated from renewable energy sources, represented by solar power generation (PV).

Therefore, in this study, we adopt model predictive control (MPC), using models of energy consumption, renewable energy power generation and the energy system. Furthermore, we aim to implement the MPC in 高砂熱学工業イノベーションセンター (Takasago Innovation Centers: TICs) energy management system (EMS) [2] and, verify the validity of both the models and the MPC. In constructing prediction models, we plan to study the latest method of GCN (Graph Convolutional Network) [3], in addition to the conventional ANN (Artificial Neural Network) and Bayesian neural network.

Specifically, we plan to carry out our research through the following steps.

- 0) Step 0 Concept and problem identification (This report)
- 1) Step 1: Constructing models

We will select model construction methods that predicts energy consumption, power generation such as PVs for a certain period, and verify its accuracy. At this step, both the target accuracy and period of each prediction models are set through energy simulations. The next report (Part 2) is included in this step.

This article is an update of a technical paper, submitted to the 2021 annual meeting of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan (SHASE), September 8-30, 2021, Online conference”

¹ Takasago Thermal Engineering Co., Ltd.

² The University of Tokyo

2) Step 2: Verification of MPC

We will verify the validity and effect of MPC, in which the models developed in step 1 is implemented.

3) Step 3: Implementation of MPC into the TIC EMS

We will implement the prediction model and MPC constructed in steps 1 and 2, into the TIC EMS, and demonstrate their validity and effectiveness.

In this report, the outlines of the following are illustrated: the building of TIC, its power source and storage equipment, the conventional operation plan, the actual values of energy consumption and supply, the actual values of received power from the grid (August 2020 to April 2021). In addition, after showing the calculation results of annual power balance and stored energy, operational issues are described.

In the next report (Part 2), on the construction of the prediction models (step 1), the outline of GCN and the case study results on the prediction of solar radiation using this method is described.

2. OVERVIEW OF TIC

2.1 Building overview

As previously reported [3], TIC was established in April 2020. It is divided into an office, a laboratory, an equipment exhibition building, a presentation room, and a planting / R&D area (Fig. 1). In the estimation with BEST, it is expected to achieve ZEB for the office building, and Nearly ZEB for the entire building.

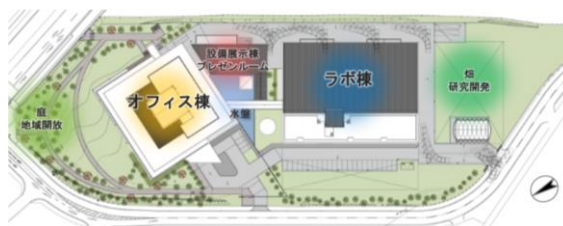


Fig. 1 Overview of TIC

2.2 System overview of energy sources

TIC has an energy system based on power supply from PV, power and thermal energy supply from biomass gasification generators (CHP: Combined Heat & Power) and redistributed surplus power by storage batteries [4] (Fig. 2). By the way, since the building is located where reverse power flow is restricted, batteries were added in March 2021, where the capacity of Li-ion battery was significantly increased, and Sodium-sulfur battery (NAS) was additionally installed. Table 1 shows the specifications of related equipment.

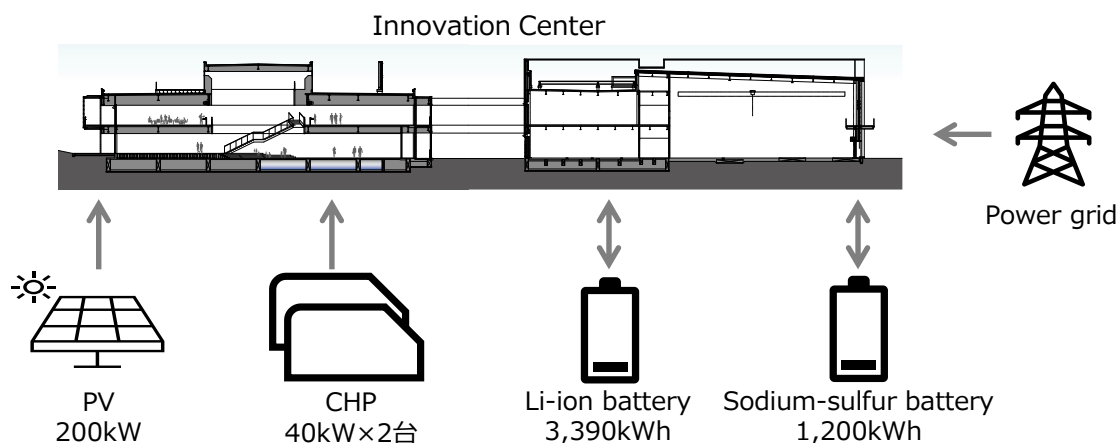


Fig. 2 TIC energy system

Table 1 Equipment specifics

Name	Item	Specifics
PV	Maximum Output	200.64kW (285W×704 panels)
CHP	Type	CHP (Fuel:Wood chips of pellets)
	Electricity Output	45 kW × 2
	Heat Output	100 kW × 2
Battery (Li-ion)	Type	Lithium-ion battery
	Capacity	430 kWh
		2,965 kWh (Newly-established)
	Maximum Output	± 429 kWh
	Overall Efficiency	89.5%
Battery (NAS)	Auxiliary	3 kW
	Type	Sodium-sulfur Battery (NAS)
	Capacity	1,277 kWh (Newly-established)
	Maximum Output	±200 kWh
	Overall Efficiency	80% (Heater excluded)
	Heater Input	6 kW
	Auxiliary	4 kW

3. ENERGY OPERATIONAL PLAN

3.1 Operation of CHP

Base operation of CHP is planned with the goal of operating 7,800 hours a year for both units [5].

3.2 Operation of storage batteries

(1) Li-ion battery

At the time of establishment, the rated capacity of the Li-ion battery was 430kWh, but it was expanded in March 2021 to a total of 3,390kWh. From the viewpoint of preventing deterioration, the lower limit is set to about 50kWh before expansion, and about 300kWh after expansion, and it is set so that discharge cannot be performed beyond that. For charging and discharging of the Li-ion battery, constant power reception control is applied. The controller installed in the product constantly monitors the power receiving point. When the power in the building is surplus (when reverse power flow occurs), the Li-ion battery is charged. When the power is insufficient (when power flows from the grid), the Li-ion battery is discharged. This control method is mainly installed in general power storage systems. Because the current system cannot generate reverse power flow, the set value of power reception from the grid is set to 10 kW, in anticipation of safety. In other words, even while aiming for power self-sufficiency, power will be constantly received around 10kW.

(2) NAS battery

NAS battery was newly installed in March 2021 as a subsidiary storage capacity for the Li-ion battery [2].

3.3 Operation of PV

For the concept of power generation, CHPs which can provide stable power supply are used as base power source, in contrast to the PV which is easily affected by the weather. Therefore, PV is targeted for suppression. Since surplus power cannot be converted into other energy sources with the current equipment, PV output is suppressed when the storage capacity approaches full charge. Specifically, the PV suppression rate (control level) increases when the amount of electricity stored exceeds a certain percentage of the preset maximum storage capacity. Fig. 3 shows the control diagram, and Table 2 shows the current setting values. In this study, we will proceed with the PV as the target for suppression for the time being.

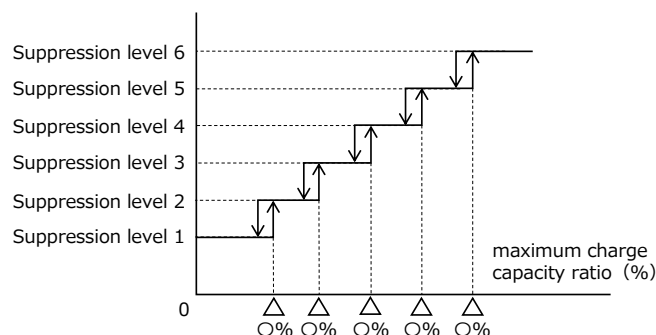


Fig. 3 PV output and suppression control

Table 2 Set values of PV suppression control

Battery charged amount (%) (Maximum capacity SP ratio)	Suppression level	PV output(%) (PV maximum output ratio)
79	Level 2	100
84	Level 3	100
89	Level 4	90
94	Level 5	60
99	Level 6	0

4. ACTUAL POWER GENERATION AND POWER CONSUMPTION

To show the validity of inputs for the annual estimation described in chapter 5, this chapter explains the measured data, such as the power generated from CHPs and PVs, the power received from the grid, and the amount of power consumption from August 2020 to April 2021.

4.1 Actual power generated from CHPs

When both CHPs operated stably, the actual generated power was approximately 74kWh per hour on average, against the rated 80kWh (40kWh x 2), confirming that the power generation was almost as rated.

4.2 Actual power generated from PV

During the measurement period (August 2020 to April 2021), the daily average of power generation from PV was approximately 538kWh, about 94% of the estimated value at the time of design (572kWh/day). The 6% difference can be considered that power generation from PV was suppressed when the Li-ion battery approached the maximum storage amount, as described in Section 3.3.

4.3 Actual received power from grid

The hourly average of received power from the grid was approximately 25 kWh, over 1.5 times the assumed value (10 kWh). This can be considered that received power increased when the power storage reached the bottom limit, due to lack of storage capacity.

4.4 Actual power consumption

The daily average of power consumption during the measurement period (August 2020 to April 2021) was approximately 1,720kWh for the whole building, and about 866kWh for the office. For the whole building, target power consumption at the time of design was about 4,590kWh, so it was quite less than the target. During the measurement period, it can be considered that the occupancy rate of the laboratory was significantly lower than the normal operation state. For the office, it was approximately 1.5 times the initial target (556kWh). For this, 2 causes are considered: 1. Power for special equipment for exhibition is included, 2. Operation rate of rooftop units where higher than expected [2].

5. CALCULATION OF ANNUAL POWER BALANCE AND TARGET SETTING

In this chapter, the target value for annual suppression amount of PV output is shown, based on annual power balance calculation for 2021. Annual power balance calculation is based on simple models such as power consumption model of TIC, power supply models of CHP and PV, which are based on current operating conditions previously explained. In addition, the issues in PV suppression and CHP operation is shown, based on calculation results of annual stored electricity and power received from the grid.

5.1 Annual power consumption

The time average was calculated from measured values, divided into four categories: winter (December-March), summer (June-September), intermediate period (April-May, October-November), and holidays. For holidays however, data from March to April 2021 was used, when power usage of the laboratory was near normal operation.

5.2 Annual power generation from PV

Since there is no actual measurement data of both PV output and solar radiation from May to July, and since some of the actual measurement data includes the result of suppression control, the annual solar radiation presented by the Meteorological Agency (Observatory: Tateno) and a simple estimation formula [6] were used to estimate the annual PV output.

5.3 Annual power generation from CHP

CHP is assumed to operate for 7800 hours a year, generating 74 kWh per hour, as shown in 4.1. In addition to the year-end and New Year holidays, the year-end and New Year holidays, the long holidays in May, and the “Obon” period, maintenance days were set on weekends between these consecutive holidays, for a total of 960 hours.

5.4 Charged power of storage battery

Storage capacity is set to 4,100kWh, which is the sum of 2,900kWh for the Li-ion battery (about 85% of the rated capacity), and 1,200kWh for the NAS battery. As for the Li-ion battery, a margin of about 15% is set, from the viewpoint of preventing deterioration and as a subsidiary capacity.

5.5 Power for auxiliary equipment

For CHP auxiliary equipment such as chip dryer, circulation pump etc., the average value 8.2kWh was used. For storage battery auxiliary equipment, the specification value (Table 1) was used.

5.6 Annual power balance

Table 3 shows the calculation results of the power balance in 2021. By subtracting total power consumption from the total power supply (PV, CHP and received power from the grid), the annual surplus power 27,039 kWh is calculated. But if we set the storage capacity to 4100kWh, it can be considered that a maximum of 4100 kWh of surplus power is capable of charge.

Thus, it can be considered that the surplus power minus the charging capacity is necessary to be suppressed in total (approximately 23,000kWh). Therefore, for 2021, the target of maximum output suppression of PV was set to 23,000 kWh. By the way, “maximum output suppression” is defined as suppressed PV output, which would have been generated if it was not suppressed.

5.7 Annual charged power and power received from grid

Annual calculation results of charged power and received power from grid are shown in Fig. 4 and 5, respectively. Through calculation, it was assumed that the charge / discharge efficiency was 0.8 (charge: 0.89, discharge: 0.89). On the other hand, PV suppression control was calculated on the premise of the current control described in 3.3.

As a result, the total suppressed PV output was approximately 36,300kWh, about 1.6 times higher than the target (23,000kWh). On the other hand, it was confirmed that the maximum storage capacity of 4,100kWh was frequently exceeded, especially from April to July. Therefore, it can be considered that while the current

PV suppression control works excessively, it is insufficient to keep the storage capacity below the set value, and that the policy of using MPC mentioned at the beginning is expected to be effective.

As for power received from the grid, there were still some periods in which the expected value (10kWh) was exceeded, although it was significantly reduced after the addition of batteries. Therefore, since the power supply is insufficient during these periods, to aim power self-sufficiency, the following solutions can be considered: 1. Reduce the amount of PV output suppression, 2. Either change CHPs maintenance period, or increase its operating time in some cases.

On the other hand, it should be avoided as much as possible to suppress PV output in the first place and therefore, it is necessary to consider capacity control of CHPs in the future.

Table 3 Estimated yearly power balance

	±	Item	Power
Power supply	+	PV	224,312 kWh
	+	CHP	577,200 kWh
	+	Grid	87,600 kWh
Power load	-	Week days	558,629 kWh
	-	Holidays	125,994 kWh
	-	Auxiliaries	177,450 kWh
Surplus power			27,039 kWh
Battery capacity	-	Li-ion / NAS	4,100 kWh
Suppress target		22,939 kWh (10% of total PV output)	

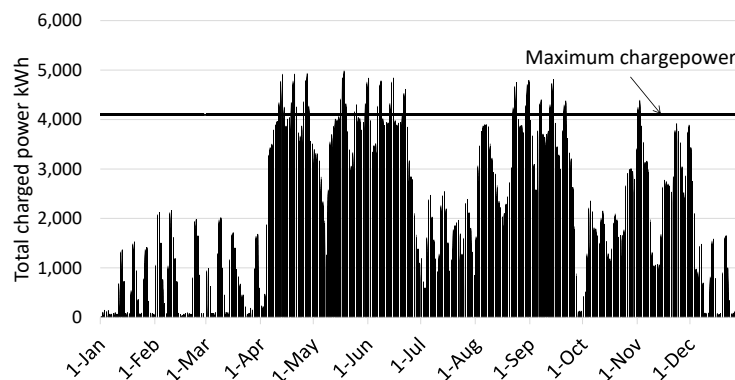


Fig.4 Annual charged power (estimation)

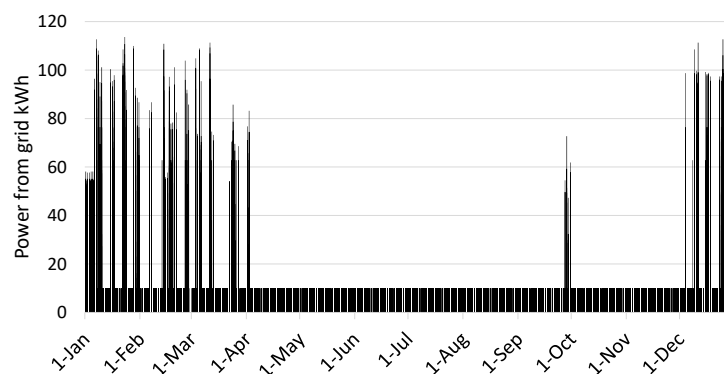


Fig.5 Annual received power from grid (estimation)

6. CONCLUSIONS

This report illustrated the outline of TIC's building, power source equipment, and its energy operation states. In addition, by calculation of annual power balance and storage, it was shown that predictive control of power generation and power consumption is necessary, and that detailed verification of CHP's annual operation plan is also necessary. In the next report (Part 2), on the first step in constructing a prediction model, the outline of GCN (Graph Convolutional Network) and the result of a case study on solar radiation prediction using this method is described.

REFERENCES

- [1] Ministry of Economy, Trade and Industry. 再生可能エネルギー低圧事業用発電設備の系統連携長期化について. Available online: https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/keito_wg/pdf/020_04_00.pdf (accessed 29 April 2021)
- [2] A. Shimizu, Y. Hirahara, Y. Matsunami, D. Hatori, M. Taka, S. Tanabe, Planning and evaluation of the Energy Self-Sufficient Innovation Center (Part 16): Evaluation of ZEB Achievement Status and Countermeasures, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集, 2021
- [3] Y. Gao, Y. Matsunami, S. Miyata, Y. Akashi, K. Shibata, K. Katayama, Y. Hirahara, Development of a grid independent energy system using energy supply and demand prediction (Part 1): Concept and problem identification from operational data, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2021
- [4] D. Hatori, Y. Mutoh, Y. Hirahara, A. Shimizu, K. Kimura, T. Takizawa, Planning and evaluation of the Energy Self-Sufficient Innovation Center (Part 2): Plan of Architecture and Equipment for ZEB, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集, Vol.10, pp149-152, 2020
- [5] O. Motoda, Y. Hirahara, A. Shimizu, K. Kimura, D. Hatori, Y. Mutoh, , Planning and evaluation of the Energy Self-Sufficient Innovation Center (Part 3): Energy Self-Sufficient System, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集, Vol.10, pp153-156, 2020
- [6] The JAPAN ELECTRICAL MANUFACTURER'S ASSOCIATION, 公共用・産業用 太陽光発電システム計画ガイドブック, Available online: https://www.jema-net.or.jp/jema/data/PV_GuideBook.pdf, (accessed 29 April 2021)

要 約

本研究は、建物内の自家発電で得た再生可能エネルギーにより自給自足することを目指した「エネルギー自立型システム」の開発に向け、電気・熱エネルギーの消費量と供給量の予測手法、またこれらを用いたモデル予測制御の妥当性や効果を実証することを目的としている。本稿では、実証を行う高砂熱学イノベーションセンターにおける発電、蓄電設備の概要と現状の運用状況を示し、年間の蓄電量を試算した。その結果、電力を自給自足するにはエネルギー収支を予測し、早い段階から太陽光発電の出力を抑制する必要があることと、熱電併給システムの運用計画を最適化する必要があることを確認した。

アルミ冷媒配管システムの開発

～アルミ冷媒配管と銅冷媒配管との施工検証～

込山 治良・権田 勝美

Development of Aluminum Refrigerant Plumbing System ～Construction Verification of the aluminum refrigerant plumbing and the copper refrigerant plumbing～

Haruyoshi Komiyama・Katsumi Gonda

アルミ冷媒配管システムの施工性のメリットを定量的に把握するために、同じ施工規模にて従来工法である銅冷媒配管と施工工数の比較・検証を行った。本稿では、その内容を「検証条件」、「施工検証」と「考察」に分けて報告する。^{1) 2)}

1. 検証概要

2019年9月24日～28日、当社グループ会社の敷地内にて、以下の条件でアルミ冷媒配管と銅冷媒配管の施工時間の比較・検証を行った。

(1) 設備概要

- ・所在地：埼玉県北本市 ・冷媒配管総長：約 240m
- ・施工レベル：FL+3500mm ・機器： 室外機 1 台、室内機 4 台
- ・検証場所：大実験室 592m² (図-1)

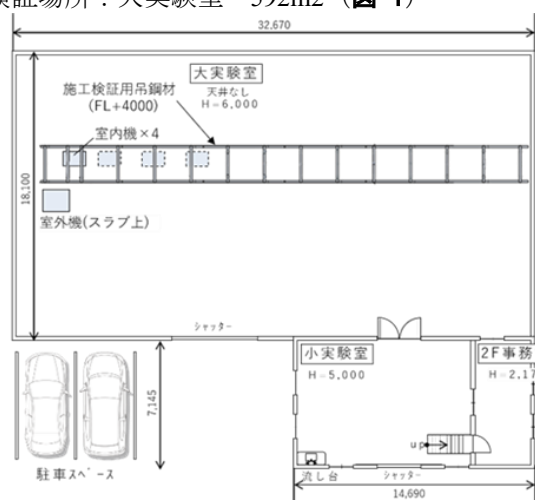


図 1 検証場所

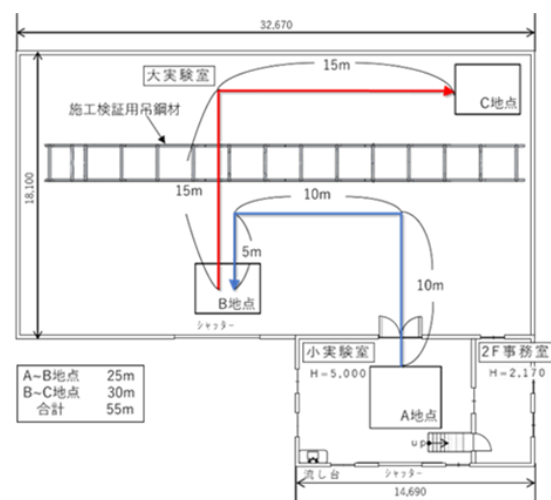


図 2 搬入運搬経路図

(2) 施工手順と日々の施工サイクル

施工手順は、アルミ配管と銅配管とで同じ手順とし、施工前の搬入運搬も含め、以下とした。

0) 搬入運搬

- 1) 吊り金物取付
- 2) 配管施工
- 3) 耐圧試験
- 4) 保温補修
- 5) 完了

検証は、銅冷媒配管を先に行い施工完了後、銅冷媒配管を撤去したあとに、アルミ冷媒配管を施工した。

2. 検証条件

施工は、**図 1** の大実験室で行った。大実験室は天井がなく上方のスペースを利用して、仮想の天井スラブとして、「施工検証用吊鋼材」を製作し、この鋼材から施工を行った。

作業人員は 2 名で、各々高所作業車を使用した。

2.1 搬入運搬

アルミ冷媒配管は、銅冷媒配管に比べて約 1/3 の重さであるので、搬入運搬においてアルミ冷媒配管の方が有利であることを定量的に示す。

検証は**図 2** のように、搬入車両から降ろした場所（A 地点）から仮置き場所（B 地点）に移動し、さらに施工場所（C 地点）へ移動する時間を比較した。

材料は、直管（サイズ 28.58 mm、長さ 4m、本数 5 本）を六箱、コイル管（サイズ 15.88 mm、長さ 20m）四箱を、作業員 2 名で運搬した時間を比較した。搬入運搬経路は、約 55m である。

2.2 冷媒配管の支持間隔

表 1、2 にそれぞれアルミ冷媒配管、銅冷媒配管の横走り配管の支持間隔を示す。この支持間隔は一般社団法人アルミ配管設備工業会の施工指針（APEA3001：2020）³⁾ からの抜粋であり、特記に「同径の銅管と同等のたわみ量として計算」とある。

今回の施工検証のメイン配管のサイズは、 $\phi 15.88 \times 28.58$ なので、メイン配管の支持間隔はアルミ冷媒配管は 2.5m、銅冷媒配管は 2m とした。

表 1 冷媒用アルミ合金管の支持間隔(横走管) (APEA3001:2020 より抜粋)

管径(mm)	6.35	9.52	12.70	15.88	19.05	22.22	25.40	28.58	31.75	38.10
支持間隔(m)	1.5	2.0	2.5							

表 2 冷媒配管用銅管の支持間隔(横走管) (日空衛ガイドブックより抜粋)

管径(mm)	6.35	9.52	12.70	15.88	19.05	22.22	25.40	28.58	31.75	38.10
支持間隔(m)	1.5			2.0						

2.3 接続方法

アルミ冷媒配管は、一般社団法人アルミ配管設備工業会の施工指針 別添資料③ (8.2 ろう付接続)⁴⁾ にもとづき、コイル管 ($\phi 6.4 \sim \phi 15.55$) はろう付継手、直管 ($\phi 19.05 \sim \phi 38.1$) はアルミ機械式継手⁵⁾ を使用した。アルミろう付作業⁶⁾ は、当社が開発したアルミろう付ガイダンスアプリ⁷⁾ を用いた。このアプリは、スマートフォンにダウンロードさせて使用する。ろう付の加熱時間やろう材の挿入タイミン

グを音声で知らせてくれるもので、誰でも容易にろう付ができる。図3に、スマートフォンでこのアプリを起動させたときの画面サンプルを示す。

機器接続は銅管でフレア接続し、アルミ冷媒配管と銅冷媒配管の接続可能なアルミ－銅機械式継手でアルミに変換した。この継手は、異種金属接触腐食が起きない構造となっている。図4にその構造を示す。

また、アルミ冷媒配管表面はすでに、酸化被膜に覆われているので、配管表面を加熱しても、剥離性酸化被膜は生成しないので、窒素置換は不要である。



図3 スマートフォン上の画面

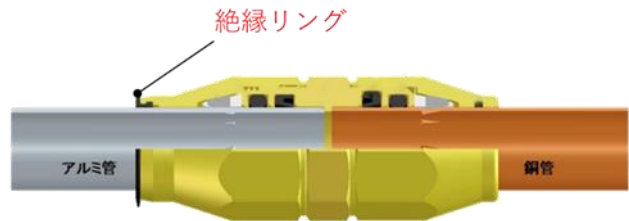


図4 アルミ機械式継手の構造

銅冷媒配管は、コイル管・直管ともろう付継手接続とし、機器接続はフレア接続、窒素置換は、省力化工法の局所窒素置換工法⁸⁾を採用した。図5に、局所窒素置換工法の概要を示す。

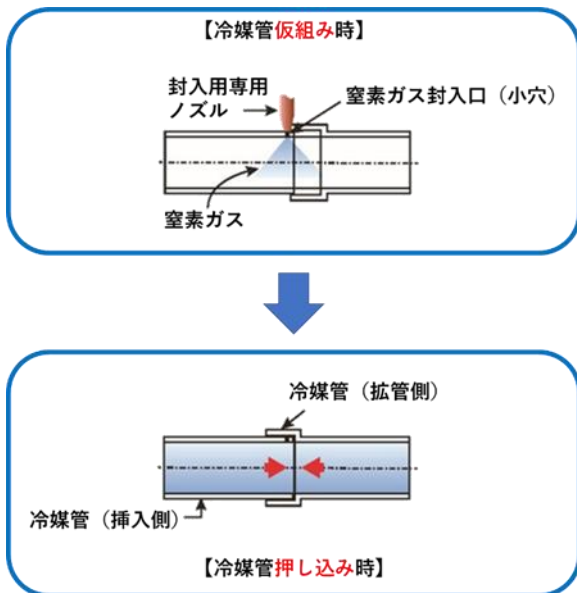


図5 局所窒素置換工法の概要

表3 配管接続方法の比較表

		アルミ冷媒配管	銅
接続方法	コイル管	ろう付継手	ろう付継手
	直管	アルミ機械式継手	
機器接続		銅管でフレア接続し、機械式継手でアルミに変換	フレア接続
窒素置換		なし	あり
分岐管	コイル管	ろう付継手	ろう付継手
	直管	アルミ機械式継手	

室内機廻りの分岐管は、アルミ冷媒配管はアルミ分岐管を使用し、銅冷媒配管はメーカー純正の分岐管を使用した。銅冷媒配管は、ろう付継手を使用した。アルミ冷媒配管配管は、配管サイズによって、ろう付継手とアルミ機械式継手を使用した。

表3に配管接続方法の比較表を示す。

2.4 施工検証用吊鋼材

施工検証用吊鋼材を、**図6**のように、ダクターチャンネルとリップ溝形鋼にて、約4mの高さにつくった。この鋼材に配管吊鋼材を取り付けて施工を行った。また、アルミ冷媒配管と銅冷媒配管の支持間隔が違うので、前段取り時にダクターチャンネルの位置を支持間隔に合わせて変更した（**写真1**）。

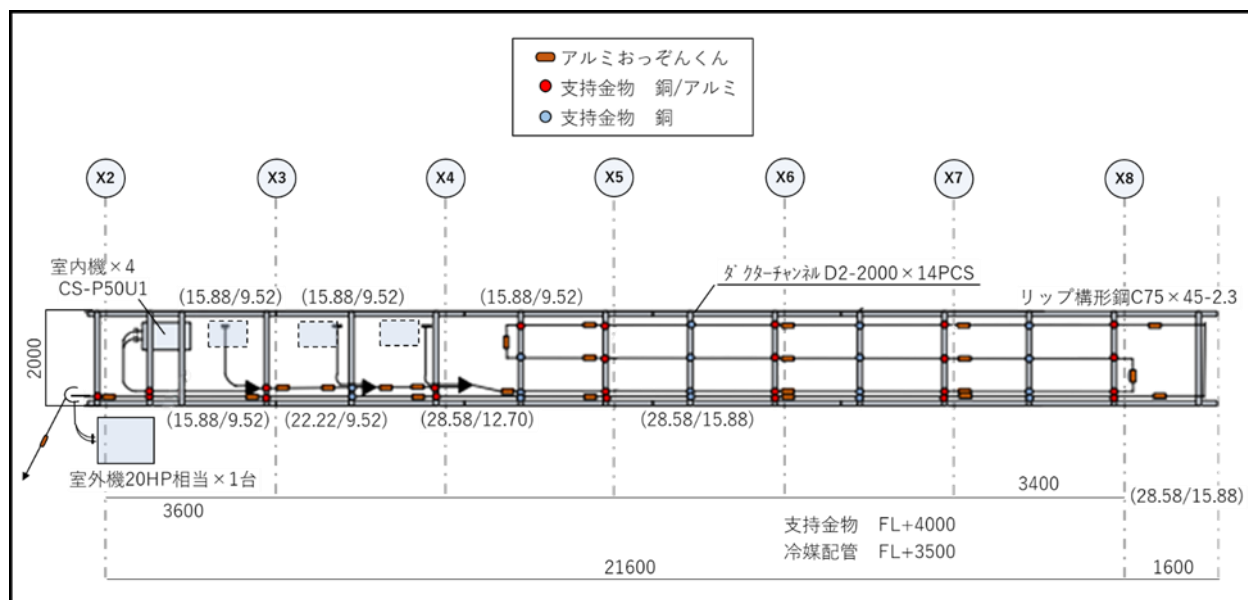


図6 施工検証用吊鋼材

また、あらかじめインサート工事は完了している状態として、ダクターチャンネルに短い吊棒と長ナットを付けた状態で、施工開始点はこの長ナット以降に吊棒をつなげることにした。長ナットがインサートの代わりとした（**写真1**）。



写真1 ダクターチャンネルの位置調整と施工開始点



写真2 室内機の施工開始点

機器の取付作業は、今回はアルミと銅の冷媒配管の施工検証であるので割愛した。よって、室外機はあらかじめ床スラブ上に取付けた状態で、室内機は1台は実物をあらかじめ吊った状態、残りの3台は接続配管を約1mほど用意した状態で施工検証を始めた（**写真2**）。

機器と配管の接続方法は、2.3. 接続方法 で説明したとおりで、施工開始は**写真2**の通りである。

2.5 配管施工

配管は図6のように、X2通りにセットした室外機廻りから施工して、X8通りまで施工した。その後、X4通り近くまで折り返し、またX8通りまで配管した。配管長をできるだけ長く確保するためにこのような配置とした。

室内機廻りの施工は、アルミ冷媒配管はアルミ分岐管を使用し、銅冷媒配管はメーカー純正の分岐管を使用した。

2.6 耐圧試験

耐圧試験に関しては、同じ冷媒長であり、今回の目的はあくまでも配管施工時間の比較であるので、アルミ冷媒配管、銅冷媒配管ともに同じ時間とした。

当然、ガス漏れがないことを確認してから、保温補修作業を行った。

2.7 保温補修

保温補修は以下の通りとした。

- ① ろう付継手廻り：アルミ冷媒配管と銅冷媒配管ともに、従来の断熱方法と同じく、配管の被覆を補修材として使用した。
- ② 機械式継手廻り：アルミ冷媒配管の配管サイズ 15.88mm 以上はアルミ機械式継手を使用したもので、専用の断熱施工法で行った。
- ③ 分岐管廻り：アルミ冷媒配管は、アルミ分岐管を使用したもので、専用の断熱施工法で行った。銅冷媒配管は、メーカー純正の分岐管を使用したもので、付属の専用断熱材を使用した。

3. 施工検証

3.1 搬入運搬

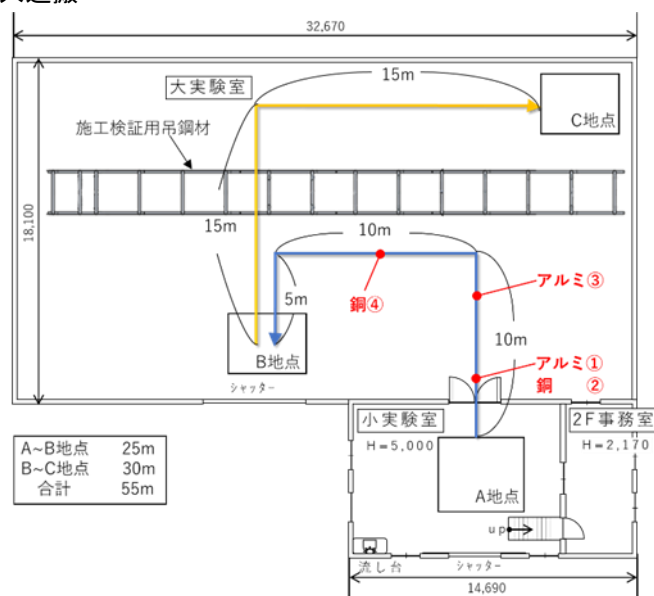


図7 搬入運搬経路図



アルミ①



銅②

写真3 直管の搬入運搬

搬入運搬経路図を図7に示す。直管は2人で手運びで行った。アルミ冷媒配管は3箱、銅冷媒配管は2箱を、同時に運んだ。図7に写真3のアルミ①と銅②の場所を示す。アルミ冷媒配管と銅冷媒配管の直管1箱とコイル管1箱の重量を表4に示す。

2人の手運びで無理なく運べるのは、アルミ冷媒配管3箱で24.78kg、銅冷媒配管2箱で34.24kgであり、アルミ冷媒配管の方が1箱多く運べて、銅冷媒配管よりも軽いことがわかる。

コイル管は台車を使ったので、アルミも銅も 4 箱同時に移動した。図 7 に写真 4 のアルミ③、銅④の場所を示す。

表 4 直管1箱とコイル管 1 箱の重量表

直管1箱	合計重量 (kg)	本数 (本)	配管重量 (kg/本)	断熱材重量 (kg/本)
アルミ	8.26	5	1.33	0.32
銅	17.12	5	3.1	0.32
コイル管1箱	合計重量 (kg)	m数 (m)	配管重量 (kg/m)	断熱材重量 (kg/m)
アルミ	5.6	20	0.22	0.06
銅	9.6	20	0.42	0.06



アルミ③



銅④

写真 4 コイル管の搬入運搬

3.2 配管吊り金物の取付

配管吊り金物の取付作業の段取りとして、配管吊用の吊バンドや保護プレート等の配管吊支持材を用意し、吊棒を所定の長さに切断する等の準備を行い、写真 5 のように「施工検証用吊鋼材」に長ナットに切断した短い吊棒や配管吊金物を取り付けた。



写真 5 吊り金物の取付状況

3.3 配管施工

配管施工は、銅冷媒配管を先に行い、そのあとにアルミ冷媒配管を施工した。

写真 6 に示すようにメイン配管の直管（定尺 4m）を吊ってから、室外機廻りを配管した。その次に、メイン配管から室内機廻りの配管を行った。



写真 6-1 室外機廻り配管施工状況(銅)



写真 6-2 室外機廻り配管施工状況(アルミ)

写真 7 は、銅冷媒配管のメイン管のろう付接続作業の状況を、写真 8 は、分岐管廻りの施工の状況を示す。



写真 7 銅配管のメイン管施工状況



写真 8 銅配管の分岐管廻り施工状況

写真 9 に地組によるアルミ冷媒配管分岐管ユニット廻りの配管施工状況を示す。配管サイズに合わせて、アルミろう付継手とアルミ機械式継手を併用する。また、アルミ配管は、銅配管に比べて質量が約 1/3 と軽く、写真 10 のように約 3m の地組で組んだ配管を一人で高所作業車にのせて、施工が可能である。

また、アルミ配管の施工において、配管サイズφ15.88 以下のコイル管の接続は、写真 11 のようにアルミろう付工法にて接続を行った。



写真 9 地組によるアルミ分岐管廻り配管施工状況



写真 10 アルミ分岐管廻り配管施工状況



写真 11 アルミろう付施工状況

アルミ冷媒配管は、もともとアルミ配管の表面に強固な酸化被膜で覆われているため、ろう付しても配管表面に剥離性酸化被膜が発生することはないと、窒素置換が不要である。このため、アルミ冷媒配管のろう付作業は、大幅に施工時間が短縮できる。

3.4 断熱補修

一般的に冷媒配管は、断熱材が被覆された状態で市場で販売されている。配管の接続は、接続部分の断熱材を施工できる長さカットして接続する。そのあと、ガス漏れ防止として、既定の耐圧試験で合格であることを確認してから、断熱補修を行う。銅配管の場合は、**写真 12** のように、接続部に保温筒を切断したものをはめ込んで断熱補修を行う。また、分岐管廻りも、耐圧試験後、漏れがないことを確認した後に、断熱を行うが、この断熱材はメーカーの分岐管に付属している専用の保温材を使用する。



写真 12 銅配管の継手まわりの断熱材の補修作業

一方、配管サイズがφ19.05～38.1 のアルミ冷媒配管のアルミ冷媒配管用機械式継手を採用し、指定の断熱工法にて施工した。以下に要領を示す。

断熱材の種類は、厚みが 10mm と 20mm の二種である。配管断熱材 10mm の場合は、配管断熱材の外側に円筒状の継手断熱材を予め挿入して継手を接合する (**写真 13** 上部写真)。次に継手断熱材を継手上にスライドさせて、専用テープにて接着固定する (**写真 13** 下部写真)。

配管断熱材 20mm の場合は、配管断熱材の外側に円筒状の継手断熱材を予め挿入し、継手を接合後、背割れ形状の断熱材を設置する (**写真 14** 上部写真)。次に、継手断熱材の背割れ部及び配管断熱材との突き合わせ部を隙間の無いように専用テープを用いて接着固定する。最後に円筒状の継手断熱材を継手上にスライドさせて、専用テープにて接着固定する (**写真 14** 下部写真)。





写真 13 断熱材の厚み 10 mm の場合の施工状況



写真 14 断熱材の厚み 20 mm の場合の施工状況

写真 15 (左) に、断熱補修の断熱状況を示す。銅管とアルミ管の断熱補修については、アルミ管の方が施工時間を要する。分岐管廻りは、写真 15 (右) のように、分岐管の中央部分を弾性に富んだ材料で断熱し、配管に関しては通常の断熱材を用いた。付き付け部は、専用のテープを用いて、隙間なく接着した。



写真 15 アルミ機械式継手(左写真)とアルミ分岐管(右写真)の断熱状況

4. 施工検証の考察

施工時間の比較結果を表 5 に表す。

4.1 搬入運搬

アルミ冷媒配管の方が、銅配管よりも、52 秒早く運搬できた。これは、アルミ冷媒配管は、2 人で三箱、銅配管は 2 人で二箱運んだためである。

4.2 配管吊金物の取付

アルミ冷媒配管は、9 分施工時間が短い結果となった。これは、メイン配管の吊支持間隔が、アルミ管が 2.5m、銅管が 2.0m であるため、吊支持数が少ないためである。

4.3 配管施工

アルミ配管の方が、施工時間が 1 時間 34 分短い結果となった。この原因は以下の三つである。

- 1) 吊支持間隔が大きいので吊金物の数が少なくて済む
 - 2) アルミ配管は軽いので、床面で地組してユニット化した部材を一人で高所作業車にのせ吊り込むことができる
 - 3) ろう付作業において、窒素置換作業が不要
- 以上より、大幅な作業が短縮できた。

4.4 耐圧試験

アルミ配管も銅配管も同作業のため同じ結果となった。

4.5 断熱補修

銅配管の方が、6 分短い結果となった。これは、銅配管の断熱は、写真 12 のように、配管の被覆管をそのまま、利用するのに比べ、アルミ配管は専用の断熱工法を採用している。3.4 断熱補修の写真 13～15 の通り、アルミ冷媒配管の方は手間のかかる工法となっていることが原因である。このことから、今後、分

岐管廻りの断熱方法は、通常の銅の分岐管の断熱方法のように、専用の断熱部材を使用した単純かつ容易な工法が有効である。

5. まとめ

表 5 内の搬入運搬時間を含めない、①配管吊金物の取付から④断熱補修作業の合計は、アルミ冷媒配管が 419.8 分、銅冷媒配管が 517.3 分となり、アルミ冷媒配管の方が 97.5 分、短い結果となった。よって、アルミ冷媒配管の方が銅冷媒配管よりも約 20%の作業時間が削減できた。

表 5 施工時間の比較

	作業内容	アルミ冷媒配管の施工		銅冷媒配管の施工	
		作業時間	累計時間	作業時間	累計時間
①	搬入運搬	3分45秒	銅よりも52秒早い	4分37秒	
①	配管吊金物取付	14分	－	23分	－
②	配管施工	5時間20分20秒	5時間34分20秒	6時間54分50秒	7時間17分50秒
③	耐圧試験	4分	5時間38分20秒	4分	7時間21分50秒
④	断熱補修	1時間21分30秒	6時間59分50秒	1時間15分30秒	8時間37分20秒
	①～④合計		419.8分(81%)		517.3分(100%)

6. 今後の展開

施銅の価格は 2021 年も上昇は継続し、アルミの価格の約 3 ～4 倍になっている^{9) 10)}。今後の銅の価格上昇は、アルミ冷媒配管システムの展開に追い風となり、より建築業界への普及に拍車をかけることになるだろう。

検証の結果、アルミ冷媒配管システムの方が、銅冷媒配管よりも、施工時間が削減でき、「現場作業の効率化」は「働き方改革への寄与」として、政府が打ち出した環境対策に大きく貢献する工法として、広く普及するように尽力していきたい。

文 献

- 1) 権田勝美、込山治良：アルミ冷媒配管システムの開発－第 6 報－アルミ冷媒配管と銅冷媒配管との施工検証(1)「施工条件」、令和 3 年度空気調和衛生工学会大会、(2021. 9. 15-17)
- 2) 込山治良、権田勝美：アルミ冷媒配管システムの開発－第 7 報－アルミ冷媒配管と銅冷媒配管との施工検証(2)「施工検証と考察」、令和 3 年度空気調和衛生工学会大会、(2021. 9. 15-17)
- 3) アルミ冷媒配管施工指針 (APEA3001 : 2020)、一般社団法人アルミ配管設備工業会(2020. 4)
- 4) アルミ冷媒配管施工指針 別添資料③ (APEA3001 : 2020)、一般社団法人アルミ配管設備工業会(2020. 4)
- 5) 権田勝美、込山治良、山本一郎、五味弘、黒木祥児：アルミ冷媒配管システムの開発－第 1 報－アルミろう付の建設施工現場への実用化、平成 30 年度空気調和衛生工学会大会、(2018. 9. 12-14)
- 6) 権田勝美、込山治良：アルミ冷媒配管システムの開発－第 3 報－アルミ冷媒配管用ろう付工法の開発、令和元年空気調和衛生工学会大会、(2019. 9. 18-20)
- 7) 権田勝美、込山治良：アルミ冷媒配管システムの開発－第 4 報－アルミろう付作業ガイダンスシステムの開発、令和元年空気調和衛生工学会大会、(2019. 9. 18-20)
- 8) 湯浅憲、権田勝美、込山治良、山本一郎：局所窒素置換型銅配管ろう付け工法の開発、平成 30 年度空気調和衛生工学会大会、(2018. 9. 12-14)

- 9) 銅価格の推移, ゴールドマンサックス報告, https://www.ig.com/jp/news-and-ideas/_21_8625_22_1_copper-price-to-test
- 10) アルミニウム価格の推移、世界経済のネタ帳—World Bank —Commodity Markets, <https://ecodb.net/commodity/aluminum.html>

ABSTRACT

The building number of days is compared with the same construction conditions and construction verification of the aluminum refrigerant plumbing and the copper refrigerant plumbing is conducted. The purpose is to understand the merits of The Aluminum Refrigerant System quantitatively.

It was concluded that a person working on the aluminum refrigerant plumbing could reduce their working hours by approximately 20% as compared to the copper refrigerant plumbing.

The aim of this study is to extensively propagate the “efficiency of ” site work as the method of construction which can contribute to the policy proposed by the government as “how to work, contribution to reform “ for futures development.

低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発

ー塗装工程の空調機での除湿利用ー*

鎌田 美志・川上 理亮・谷野 正幸
山内 一正^{*1}・井守 正隆^{*1}・佐藤 雄^{*2}
名和 博之^{*3}・松田 聡^{*4}・佐藤 陽一^{*5}

Development of an Adsorption Thermal Storage System Utilizing Low-temperature Waste Heat: Utilizing of Dehumidification Function of Air conditioners for Painting Processes

Haruyuki Kamata・Yoshiaki Kawakami・Masayuki Tanino
Kazumasa Yamauchi・Masataka Imori・Yu Sato
Hiroyuki Nawa・Satoru Matsuda・Yoichi Sato

我々は HAS-Clay 吸着材を用いて、低温廃熱が利用できるオープンサイクル形式の吸着材蓄熱システムを開発し、日野自動車工場内でのオフライン熱輸送システムの実証試験を実施した。コージェネレーションシステムで蓄熱し、小型牽引車で蓄熱材を充填した蓄熱槽を輸送し塗装工程の空調機へ除湿空気を供給することで、既設設備における冷却除湿、再加熱に要する冷水・温水の使用エネルギーの削減を図った。その結果、CO₂削減効果およびエネルギー削減費について、既設設備のみ稼働時と比較して 57%の削減効果を確認し、本システムを導入した際の投資回収年数が 8 年以下になる見通しを得た。

1. はじめに

各種工場等では省エネ・環境意識の高まりにより、高温廃熱の発電・蒸気利用が推進されているが、低温廃熱は発生場所における用途が限定されることから大部分が捨てられているのが現状である¹⁻³⁾。そこで、高砂熱学工業(株)、石原産業(株)、東京電力エナジーパートナー(株)、森松工業(株)、日野自動車(株)、(国研)産業技術総合研究所は、産業技術総合研究所が 2008 年に開発したハスクレイ^{4,5)} [注 1] をベースに、2015 年度から(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業において、100℃程度の低温廃熱が利用可能な吸着材蓄熱システムを開発し⁶⁻⁶⁴⁾、実際の工場に蓄熱槽を搬送して放熱性能の現地検証試験を行った。2018 年 7 月～2020 年 2 月の NEDO の実証開発フェーズの助成事業である「低温廃熱利用を目的としたハスクレイ蓄熱材及び高密度蓄熱システムの開発」において、石原産業四日市工場で定置型蓄熱槽での産業プロセスに対する実証試験と、日野自動車の羽村工場内および工場近くのプール施設へのオフライン熱輸送型での実証試験を行った。本報では、羽村工場内の自動車製造における塗装工程の空調機での除湿利用について報告する。

※2021 年度空気調和衛生工学会講演論文⁶⁰⁾を修正したものである。

*1 日野自動車 *2 東京電力エナジーパートナー工学院大学 *3 森松工業 *4 産業技術総合研究所 *5 トリニティ工業

2. 塗装工程の空調機における実証試験の概要

日野自動車羽村工場内のコージェネレーションシステム（CGS）の廃熱で吸着材を乾燥（蓄熱）し、同工場内の塗装工程における空調機に高温低湿空気を供給した。

2.1 蓄熱槽および搬送トラックの概要

写真 1 に、蓄熱槽と搬送用の小型牽引車の外観を示す。蓄熱槽には、蓄熱材としてハスクレイ造粒体が乾燥重量で 2.2ton 充填されている。廃熱源の CGS から数百 m 離れた塗装工程の空調設備までは、小型牽引車で運搬する。通常この小型牽引車は、場内で資材や完成部品の運搬用に使用されている。



写真 1 蓄熱槽と小型牽引車

2.2 廃熱源と蓄熱設備

蓄熱材を乾燥する廃熱は、日野自動車羽村工場内のコージェネレーションシステム（CGS）からの 100℃以上の排ガスと 88℃のジャケット温水である。**写真 2** に日野自動車(株)羽村工場内の CGS・蓄熱設備の外観を、**図 1** に系統図を示す。熱回収・蓄熱設備は、空気／水と空気／空気の熱交換器、ポンプ、配管・ダクトなどから成る蓄熱システム、接続ユニット、および蓄熱槽から構成されている。蓄熱運転おい

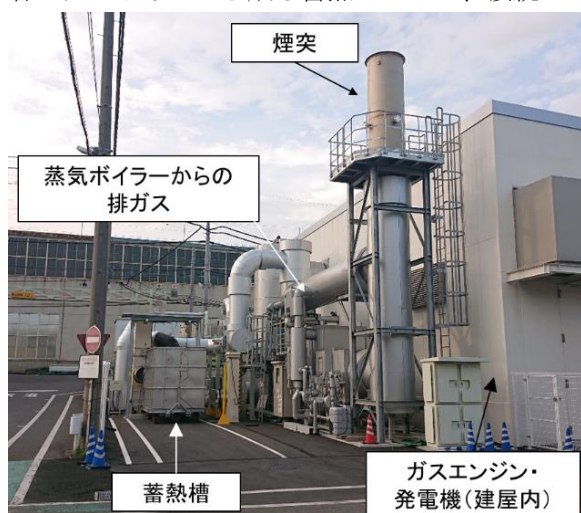


写真 2 蓄熱サイト

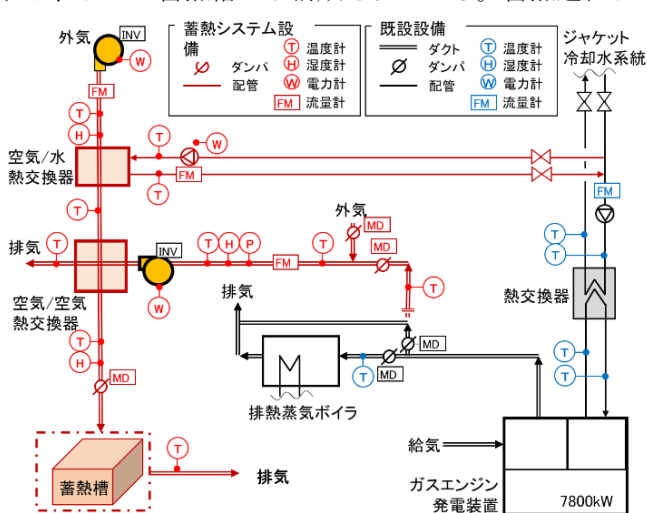


図 1 蓄熱設備の系統図

ては、**図 1** の左上のファンによって外気が蓄熱システムに送られ、空気／水熱交換器で昇温され、さらに空気／空気熱交換器で昇温され、100℃程度の空気が蓄熱槽に供給される。既設からの温水を、工場で熱利用後 CGS 設備への戻りから分岐している。このように、通常の運転では利用されない 88℃のジャケット温水と 100℃以上の排ガスから熱回収し蓄熱する。この蓄熱槽での蓄熱に要する時間は、約 2 時間である。

2.3 塗装工程・放熱設備概要

写真 3 に、日野自動車榑羽村工場内の塗装工程における空調設備（リサイクル空調）の外観を示す。写真右側の既設空調機内部には各種フィルター、冷水コイル、温水コイルが設置されている。フィルター下流の高湿空気の一部を蓄熱槽に供給し、蓄熱槽からの空気を空調機に戻すための矩形ダクトが写真のように増設されている。

図 2 に塗装工程の空調設備および実証設備の系統図を示す。空調対象は、フレッシュブースとリサイクルブースに分けられ、図では模式的に示している。外気を既設の空調機（外調機）で温湿度を調節し、フレッシュブースに給気する。このフレッシュブースの排気は、塗装ミスト等を除去するためブース下部で散水され、相対湿度が 90%RH と高湿になっている。そのため、フレッシュブースの排気をリサイクル空調機で冷却除湿・加熱し、リサイクルブースに給気する。図のように今回設置した放熱設備では、高湿空気であるフレッシュブースの排気の一部を蓄熱槽に供給し、槽内で吸湿・発熱反応により昇温した高温低湿度の空気がリサイクル空調機に戻される。空調機での冷却除湿・加熱のための冷水と温水のエネルギー消費量は非常に大きく、ここではそのエネルギーの大幅な低減を見込んだ。



写真 3 放熱サイト

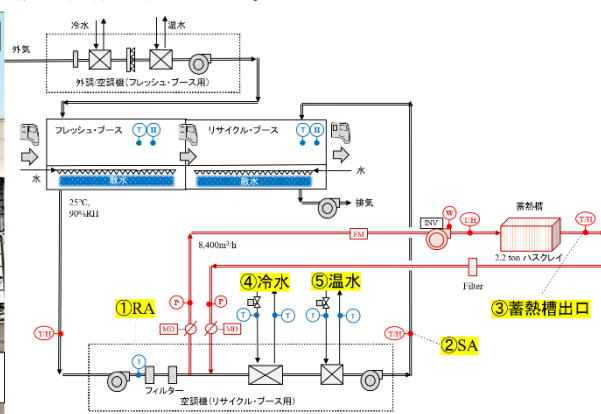


図 2 放熱設備の系統図

3. 実証試験結果

図 3 に放熱運転における空気温度とエネルギー消費量の経時変化を、**図 4** に絶対湿度の経時変化を示す。温度および絶対湿度はリサイクルブースへの給気の設定値を基準とし、それからの差異を示す。冷水および温水のエネルギー消費量は、各々の行き還りの温度差に水の比熱と流量を乗じて算出した。また、仕様書に記載の定格運転での状態を 100%として示す。(a)で赤い実線が表示されている時間は本システムが稼働している状態であり、(b)は休止している状態、つまり既設設備のみが稼働している状態である。今回の一回あたりの放熱運転時間は、200 分である。(a)と(b)は同日であり、(a)が終了してから約 1 時間後に(b)が開始する。グラフ中の凡例の①から④までは、**図 2** に黄色で示す測定箇所に対応している。本システムが稼働すると蓄熱槽から高温低湿の空気がリサイクル空調機へ供給され、直ちに温水のエネルギー消費量が減少し始める。運転開始から 30 分間程度は、除湿負荷が減少しているものの、蓄熱槽出口の空気温度が高いため冷水のエネルギー消費量は減少しない。その後、蓄熱槽出口の空気温度が低下するととも

に、冷水のエネルギー消費量も減少し始める。運転開始から約 100 分経過後、(a)の図中では 2 時間を過ぎたあたりで温水、冷水共にエネルギー消費量がほぼ 0 となる。その後、蓄熱槽出口空気の絶対湿度が定格値に達した時点から、徐々に風量を減らし運転を停止した。

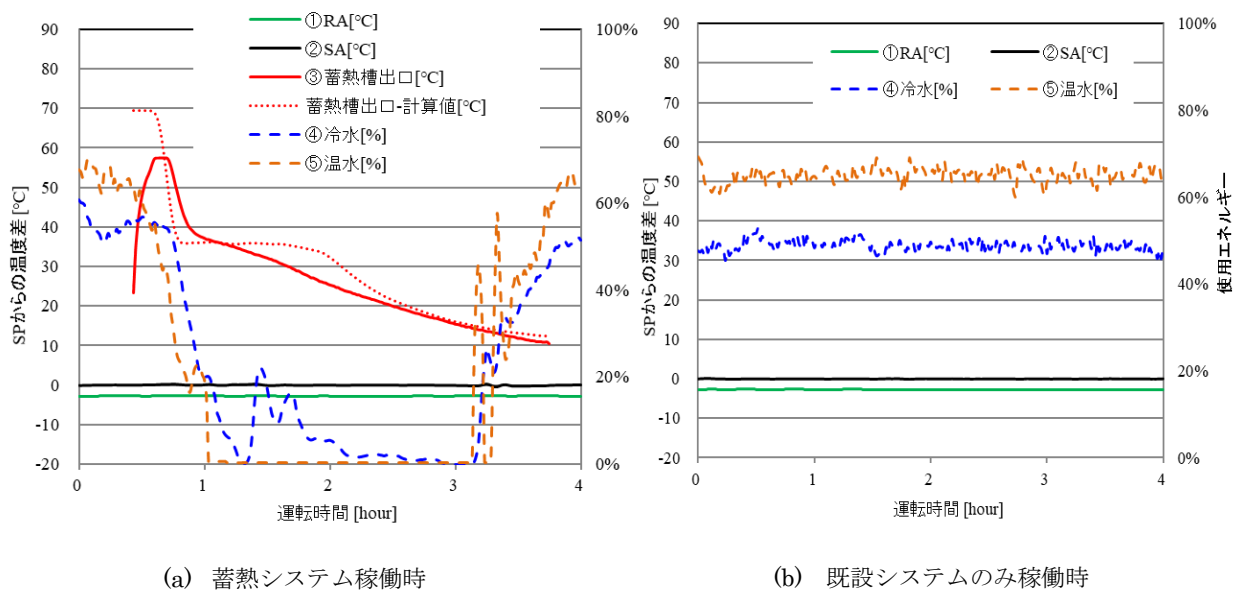


図 3 空気温度・エネルギー消費量の経時変化

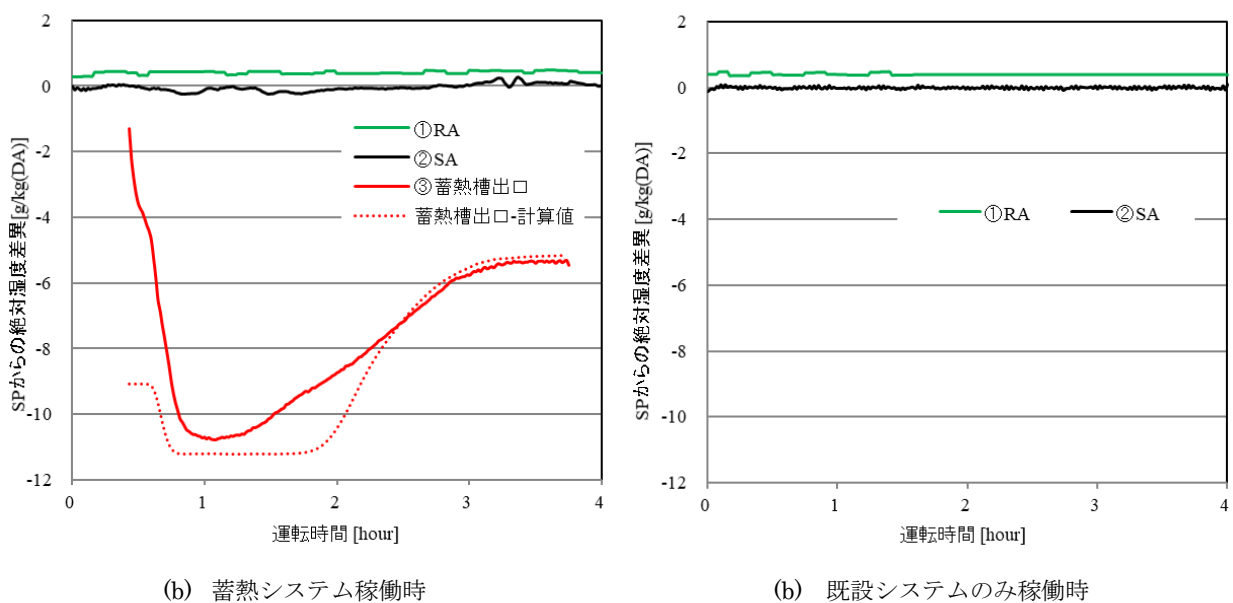


図 4 湿度の経時変化

図 5 に、図 2(a)での 3 時間後における温湿度を空気線図上に示す。本システムが稼働し蓄熱槽出口空気温度もある程度低下している状態では、一部の①RA が蓄熱槽を通過し、高温低湿となった空気(③出口)が元々の①RA と混合された後(×混合後)に、ファンによる加熱でちょうど設定値(SP)に調節されている。したがって、この状態では冷水および温水のエネルギー消費量はほとんど無い。

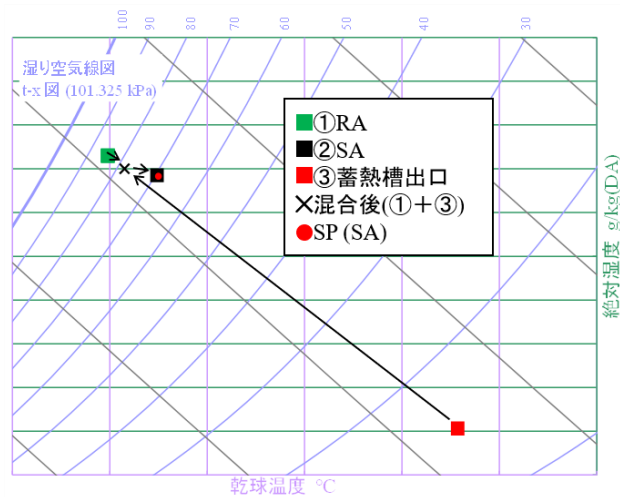


図 5 蓄熱システム稼働時の空気線図

4. CO₂・コスト削減効果

図 6 に本システムが一回稼働した場合の CO₂ 削減効果を示す。既設設備のみで稼働した場合のエネルギー消費を図 3(b)の平均値とし、本システム稼働時間に相当する CO₂ 排出量を 100%とした。本システム稼働における冷水および温水のエネルギー消費量に相当する CO₂ 排出量は 28%までに抑制された。ただし、本システム稼働によるファンなどの消費電力や小型牽引車の燃料消費による CO₂ 排出量は 15%に相当する。そのため、本システム稼働による正味の CO₂ 削減効果は、既設設備のみが稼働している状態と比較して 57%となる。また、エネルギー削減費についても CO₂ 削減効果と同じく、既設設備のみの稼働時と比較して 57%のコストダウンとなった。本システム稼働によりエネルギーコストは、既設設備のみの運転と比較し 28%まで低減するものの、ファンなどの消費電力などのコストが 15%発生する。ただし、輸送による人件費は含まれていない。この結果、本システムを場内運搬で除湿利用として導入した際の投資回収年数は 8 年以下になる見通しを得た。

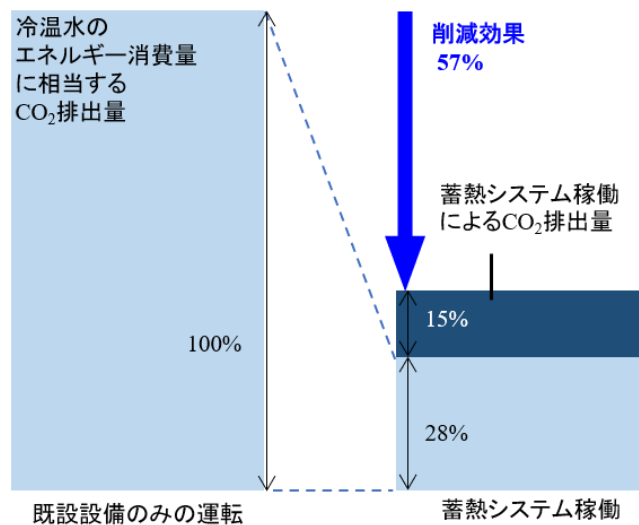


図 6 CO₂削減効果

5. おわりに

以上のように、塗装工程での実証試験により、除湿での廃熱利用における大きな CO₂ 削減効果を確認した。さらに、実装可能な費用対効果も確認できたことから、今後は定置型除湿利用も含めた本システムの普及展開に努め、省エネの推進、ならびにカーボンニュートラルの実現に貢献したいと考えている。

謝 辞

本成果は、(国研) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業「低温廃熱利用を目的としたハスクレイ蓄熱材及び高密度蓄熱システムの開発」の結果得られたものである。関係各位に御礼申し上げます。

[注 1] ハスクレイ (HAS-Clay) ;

安価な工業用原料から合成される、非晶質アルミニウムケイ酸塩 (HAS : Hydroxyl Aluminum Silicate) と低結晶性粘土 (Clay) からなる複合体の無機系吸放湿材である。繰り返し使用した場合の耐久性が高く、また相対湿度 40%RH 以上に於いて他の吸着材より吸着量が多いことが特長である。

文 献

- 1) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合 技術開発センター, 産業分野の排熱実態調査報告書, (accessed Apr. 30th 2020), <https://thermatdb.securesite.jp/HainetsuChousa/HainetsuReport.pdf>
- 2) 平野聡: 産業分野の排熱実態調査の紹介, 動力エネルギーシステム部門ニュースレター, 日本機械学会, (2020. 5. 15).
- 3) 平野聡: 工場における未利用熱の排出・活用状況, クリーンエネルギー, 日本工業出版, (2020. 8).
- 4) 産業技術総合研究所 HP, http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2008/pr20081008_2/pr20081008_2.html.
- 5) 鈴木正哉, 前田雅喜, 犬飼恵一; 高性能吸着剤ハスクレイ®の開発, 学術誌「Synthesiology」, 産総研, Vol. 9 No. 3, pp. 154-164 (2016. 8).
- 6) 電気新聞「低温排熱で高効率蓄熱」, (2016. 8. 17).
- 7) Sorption Thermal Storage System by using Exhaust Heat of International Linear Collider (国際リニアコライダー排熱利用の吸着材蓄熱システム), リニアコライダー国際会議 LCWS2016 (企業展示ブース/ポスター発表), 盛岡, (2016. 12. 6-8).
- 8) NEDO ニュースリリース「100℃以下の廃熱を利用可能なコンパクト型高性能蓄熱システムを開発—低温廃熱を工場間でオフライン輸送する実用化検証試験を開始—」, (2017. 3. 13).
- 9) 山内一正, 馬込英明, 井守正隆, 川上理亮, 谷野正幸: 100℃以下の廃熱利用が可能な吸着材蓄熱システムの開発, 自動車技術, (公社)自動車技術会, (2017. 7).
- 10) 川上理亮, 鎌田美志, 大山孝政, 鈴木美穂, 谷野正幸, 宮原英隆, 平井恭正, 川村正行, 小室匠, 名和博之, 丸毛謙次, 山内一正, 馬込英明, 井守正隆, 鈴木正哉, 森本和也, 松田聡, 鈴木善三, 永井恒輝: 100℃以下の廃熱を利用可能なコンパクト型高性能蓄熱システムの開発, クリーンエネルギー, 日本工業出版, (2017. 8).
- 11) 川上理亮, 鎌田美志, 鈴木美穂, 谷野正幸, 大山孝政, 宮原英隆, 平井恭正, 川村正行, 小室匠, 名和博之, 丸毛謙次, 山内一正, 馬込英明, 井守正隆, 鈴木正哉, 森本和也, 松田聡, 鈴木善三: 100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの開発, 建築設備と配管工事, 日本工業出版, (2017. 8).
- 12) 谷野正幸: 排熱回収技術, 先端加速器科学技術推進協議会 (AAA) グリーン ILC・WG, (2017. 5. 17).
- 13) 小久保孝, 吉岡正和: 吸着材蓄熱技術を活用した ILC の排熱利用の提案, 第 14 回日本加速器学会年会, WEP139, (2017. 8. 1-3).
- 14) 鈴木正哉, 森本和也, 前田雅喜, 犬飼恵一, 宮原英隆, 平井恭正, 川村正行, 谷野正幸: 蓄熱材ハスクレイの性能

評価, 化学工学会第 49 回秋季大会, EB114, (2017. 9. 20).

- 15) 松田聡, 鈴木善三, 名和博之, 井守正隆, 谷野正幸: 蓄熱材粒子充填層の振動試験, 化学工学会第 49 回秋季大会, EB115, (2017. 9. 20).
- 16) 鈴木美穂, 大山孝政, 鎌田美志, 川上理亮, 谷野正幸, 松田聡, 鈴木正哉, 名和博之, 山内一正, 宮原英隆, 川村正行: 低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの実験による評価-第 1 報, 化学工学会第 49 回秋季大会, DA101, (2017. 9. 20).
- 17) 大山孝政, 鈴木美穂, 鎌田美志, 川上理亮, 谷野正幸, 松田聡, 鈴木善三, 鈴木正哉, 名和博之, 馬込英明, 宮原英隆: 低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの数値解析による評価-第 2 報, 化学工学会第 49 回秋季大会, DA102, (2017. 9. 20).
- 18) 川上理亮: 100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの開発, Energy Storage Summit Japan 2017, (2017. 11. 8).
- 19) 谷野正幸: 廃熱回収のための蓄熱技術, 日本粉体工業技術協会/第 2 回乾燥分科会, (2017. 11. 17).
- 20) 鈴木正哉: 吸着で熱を運ぶ技術: コンパクト型高性能蓄熱システム, INCHEM 産学官マッチングフォーラム/化学工学会, (2017. 11. 20).
- 21) 名和博之, 松田聡, 鈴木善三, 井守正隆, 川上理亮: 搬送時における蓄熱材粒子充填層内の対流現象, 第 23 回流動化・粒子プロセッシングポジウム/化学工学会, (2017. 12. 7-8).
- 22) 谷野正幸, 川上理亮, 鎌田美志, 大山孝政, 鈴木美穂・宮原英隆, 川村正行, 名和博之, 山内一正, 鈴木正哉, 松田聡, 永井恒輝: 100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システム, 高砂熱学工業技術研究所報, 31, 25-30(2017).
- 23) 大山孝政, 鈴木美穂, 鎌田美志, 川上理亮, 谷野正幸, 松田聡, 鈴木善三, 鈴木正哉, 名和博之, 馬込英明, 山内一正, 宮原英隆, 川村正行: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの研究-吸着材蓄熱槽の数値解析モデル, 高砂熱学工業技術研究所報, 31, 31-38(2017).
- 24) 鎌田美志: Development of adsorption thermal storage system utilizing waste heat, 第 7 回 NEDO-CDTI 合同ワークショップ, (2018. 2. 13-14).
- 25) 鎌田美志: 100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの開発, ENEX2018, (2018. 2. 14-16).
- 26) 川上理亮, 宮原英隆, 川村正行, 丸毛謙次, 山内一正, 鈴木正哉, 陶昇, 谷野正幸: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発-第 1 報-システムの開発コンセプトと蓄熱材の検討, 平成 30 年度空気調和衛生工学会大会, (2018. 9. 12-14).
- 27) 鎌田美志, 川上理亮, 森本和也, 松田聡, 鈴木善三, 谷野正幸: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発-第 2 報-吸着材蓄熱槽の蓄放熱特性と数値解析モデル, 平成 30 年度空気調和衛生工学会大会, (2018. 9. 12-14).
- 28) 鈴木美穂, 大山孝政, 名和博之, 井守正隆, 馬込英明, 川上理亮, 井上正憲, 谷野正幸: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発-第 3 報-実際の工場・設備で蓄放熱特性の検証試験, 平成 30 年度空気調和衛生工学会大会, (2018. 9. 12-14).
- 29) 名和博之, 川上理亮, 宮原英隆, 川村正行, 山内一正, 鈴木正哉, 松田聡, 100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの開発, 第 8 回潜熱工学シンポジウム, 潜熱工学研究会, (2018. 12. 3-4).
- 30) 鈴木美穂, 川上理亮, 鎌田美志, 谷野正幸, 大山孝政, 宮原英隆, 名和博之, 川村正行, 山内一正, 鈴木正哉, 松田聡: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発-工場の実設備における蓄放熱特性の検証試験-, 高砂熱学工業総合研究所報, 32, 15-24(2018).
- 31) 松田聡, 鈴木善三, 鈴木美穂, 鎌田美志, 川上理亮, 谷野正幸, 名和博之: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発-吸脱着の過渡特性, 化学工学会 第 84 年会, F302, (2019).
- 32) 谷野正幸: ハスクレイ蓄熱材を活用した低温廃熱の活用, ENEX2019, 東京ビックサイト, (2019. 1. 30-2. 1).
- 33) 谷野正幸: ハスクレイ蓄熱材を活用した低温廃熱の活用, モノづくり日本会議, 日刊工業, (2019. 3. 4).
- 34) 谷野正幸, 高砂熱学工業の熱エネルギー貯蔵システム 技術研究所の開発技術を中心に, Energy Storage Summit Japan ESSJ, (2019. 6. 3).
- 35) 谷野正幸: 熱エネルギー貯蔵システムの先端研究について, 生態工学会年次大会, 6. 29 (2019).

- 36) NEDO ニュースリリース「100℃以下の廃熱を利用可能な蓄熱システムの本格実証試験を開始—オフライン熱輸送型と定置型での通年実証—」, (2019. 7. 25).
- 37) 谷野正幸: オフライン輸送型と定置型の HAS-Clay を用いた吸着蓄熱システムの実証開発 Development and demonstration of offline transportation type and stationary type adsorption thermal storage system applying HAS-Clay, 第10回 日独エネルギー環境フォーラム, NEDO, (2019. 10. 29-30).
- 38) 川上理亮・鎌田美志・鈴木美穂・中田拓司・谷野正幸: 100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの開発, 「ヒートポンプとその応用」, ヒートポンプ研究会, No. 93, (2019. 11).
- 39) 川上理亮, 鎌田美志, 鈴木美穂, 中田拓司, 谷野正幸, 大山孝政, 宮原英隆, 山内一正, 名和博之, 松永克也, 鈴木正哉, 松田聡: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発—定置型とオフライン熱輸送型の実証試験での設備概要—, 高砂熱学工業総合研究所報, 33, 41-50(2019).
- 40) 鎌田美志, 川上理亮, 鈴木美穂, 中田拓司, 谷野正幸, 宮原英隆, 平井恭正, 松永克也, 久保滋, 原田浩司, 柿内秀介, 名和博之, 山内一正, 井守正隆, 岩下真輝, 鈴木正哉, 松田聡, 森本和也, 鈴木善三: 100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの開発, クリーンエネルギー, 日本工業出版, (2020. 1).
- 41) 鎌田美志, 川上理亮, 大山孝政, 松田聡, 鈴木正哉, 丸毛謙次, 山内一正, 宮原英隆, 松永克也, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発—第1報小型装置の実験結果と吸着材蓄熱槽の計算モデル—, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 281(2020. 8).
- 42) 川上理亮, 鈴木美穂, 宮原英隆, 鈴木正哉, 谷野正幸: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発 (第4報) 産業プロセスに対する定置型蓄熱槽の蓄放熱特性の実証試験, 2020年度空気調和衛生工学会大会, (2020. 9. 9-30(オンライン)).
- 43) 鎌田美志, 中田拓司, 松永克也, 名和博之, 山内一正, 松田聡, 谷野正幸: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発 (第5報) トレーラー型蓄熱槽によるオフライン蓄放熱特性の実証試験, 2020年度空気調和衛生工学会大会, (2020. 9. 9-30(オンライン)).
- 44) 鎌田美志, 鈴木美穂, 川上理亮, 谷野正幸, 宮原英隆, 松永克也, 久保滋, 名和博之, 丸毛謙次, 山内一正, 井守正隆, 鈴木正哉, 松田聡: 低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの実証試験<定置型蓄熱システムおよびトレーラー型蓄熱によるオフライン熱輸送の実証試験>, 建築設備と配管工事, 日本工業出版, (2020. 9).
- 45) 谷野正幸, 川上理亮, 鎌田美志, 宮原英隆, 松永克也, 山内一正, 井守正隆, 名和博之, 鈴木正哉, 松田聡: ハスクレイを用いた吸着材蓄熱システムの開発, 動力エネルギーシステム部門ニュースレター, 日本機械学会, (2020. 9. 15).
- 46) 川上理亮, 鎌田美志, 谷野正幸, 山内一正, 井守正隆, 丸毛謙次, 宮原英隆, 松永克也, 鈴木正哉, 松田聡: 100℃以下の低温廃熱を利用可能なハスクレイ吸着材蓄熱・オフライン熱輸送システムの実証開発, クリーンエネルギー, 日本工業出版, (2020. 9).
- 47) 鎌田美志, 中田拓司, 川上理亮, 谷野正幸, 丸毛謙次, 名和博之, 宮原英隆, 松永克也, 山内一正, 松田聡: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発—コンテナ型蓄熱槽によるオフライン熱輸送の実証試験, 化学工学会第51回秋季大会, J116, (2020. 9. 24(オンライン)).
- 48) 丸毛謙次, 名和博之, 谷野正幸, 鎌田美志, 宮原英隆, 松永克也, 井守正隆, 松田聡: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発—コンテナ型蓄熱槽の槽内熱挙動の検証, 化学工学会第51回秋季大会, J117, (2020. 9. 24(オンライン)).
- 49) 川上理亮: Development of adsorption thermal storage system utilizing low-temperature wasteheat about 100℃, IEA Energy Storage TCP Annex 35, (2020. 9. 30).
- 50) 川上理亮, 鎌田美志, 鈴木美穂, 中田拓司, 大山孝政, 谷野正幸, 宮原英隆, 山内一正, 名和博之, 佐藤敦史, 鈴木正哉, 松田聡: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発—定置型とオフライン熱輸送型の実証試験—, 高砂熱学イノベーションセンター報, 34, 95-105(2020).
- 51) 宮原英隆, 鈴木正哉, 松田聡, 森本和也, 万福和子, 川上理亮, 名和博之, 山内一正, 松永克也, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発—第2報低温再生型蓄熱材における水蒸気吸着自の発熱量について—, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 285(2020. 12).

- 52) 川上理亮：100℃以下の廃熱を利用可能なコンパクト型高性能蓄熱システム，低温排熱利用機器調査研究会（2020. 12. 15）
- 53) 川上理亮：100℃以下の廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの開発，山口 R&D ラボ 工場排熱利用セミナー（2020. 12. 17）
- 54) 川上理亮：ヒートマネジメントのための設備会社の取組み，東京湾岸ゼロエミッション推進協議会第7回ゼロエミッション活動紹介セミナー（2021. 2. 19）.
- 55) 山内一正：カーボンニュートラルに向けた日野自動車の生産の取組み，東京湾岸ゼロエミッション推進協議会第7回ゼロエミッション活動紹介セミナー（2021. 2. 19）.
- 56) 川上理亮，鎌田美志，谷野正幸，宮原英隆，佐藤敦史，名和博之，山内一正，井守正隆，鈴木正哉，松田聡：100℃程度の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システム，BE 建築設備 2021 年 3 月号，建築設備総合協会，（2021. 3）.
- 57) 谷野正幸：Development of Adsorption Thermal Storage System Utilizing Low-temperature Waste Heat, Industrial Waste Heat Usage German - Japanese Expert Workshop, （2021. 4. 20）.
- 58) 川上理亮，鈴木美穂，鎌田美志，山内一正，名和博之，松田聡，鈴木正哉，宮原英隆，佐藤敦史，谷野正幸：ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発－第3報吸着材蓄熱槽の実際の工場での性能評価－，空気調和・衛生工学会論文集，No. 290（2021. 5）.
- 59) 中田拓司，鎌田美志，川上理亮，谷野正幸，宮原英隆，佐藤敦史，名和博之，井守正隆，山内一正，松田聡，鈴木正哉：100℃程度の低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発－コンテナ型蓄熱槽によるオフライン熱輸送の実証試験－，第31回環境工学総合シンポジウム 2021，423，（2021. 7. 8-7. 9）.
- 60) 鎌田美志，川上理亮，佐藤雄，山内一正，名和博之，松田聡，佐藤陽一，谷野正幸：低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発（第6報）塗装工程の空調機での除湿利用，2021 年度空気調和衛生工学会大会，（2021. 9. 15-17（オンライン））.
- 61) 川上理亮，鎌田美志，宮原英隆，平井恭正，名和博之，松田聡，鈴木正哉，山内一正，佐藤敦史，谷野正幸：ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発－第4報定置型蓄熱システムの実証試験－，空気調和・衛生工学会論文集，No. 297（2021. 12）.
- 62) 川上理亮：活用困難な低温排熱を再利用する吸着材蓄熱システム「メガストック」，月刊省エネルギーVol. 73，省エネルギーセンター，（2021. 12）.
- 63) 山内一正，井守正隆：排熱回収技術による工場 CO2 排出量削減の取組み，HINO TECHNICAL REVIEW No. 71，（2022. 1）.
- 64) 鎌田美志，川上理亮，山内一正，井守正隆，名和博之，松田聡，鈴木正哉，宮原英隆，佐藤敦史，谷野正幸：ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発－第5報オフライン熱輸送システムの実証試験－，空気調和・衛生工学会論文集，投稿中.

ABSTRACT

We have developed an open-cycle type adsorbent thermal storage system. Based on an adsorbent of HAS-Clay, this thermal storage system can utilize the low-temperature waste heat. We carried out a demonstration of the offline heat transportation from the charged thermal storage in the co-generation system to the air handling unit (AHU) of painting process by the tractor. The energy consumption of the cold and hot water used in the AHU was decreased by dehumidifying the air that flowed into AHU from the thermal storage tank. The results confirmed a 57% CO₂ reduction effect.

PERFORMANCE VERIFICATION OF A SUB-COOLING SYSTEM FOR A REFRIGERATION SHOWCASE

Daisuke BABA¹, Yoshiaki KAWAKAMI¹, Shuichi ISHII², Katsuhiko SHIBATA¹
Toshikazu SABURI¹, Kazunari NISHIKATA³, Junichi SHIMOIE³
Tsutomu WATANABE³, Takuya ABE³, Masao TAKEKURA³

ABSTRACT

Owing to the concerns regarding global warming and ozone depletion, the development of high-performance energy-saving technologies and equipment for refrigeration systems has become increasingly crucial in international communities. In 2009, we developed a sub-cooling apparatus called the Eva-chilled unit for application in multi-type building air conditioners (PAC) and module chillers [1], [2], [3]. This unit resembles a small-scale cooling tower, and the sprinkling water cools the liquid refrigerant along the refrigerant pipes using the latent heat of vaporization of the water, thereby reducing the peak power consumption and overall energy consumption. Furthermore, it reduces the heat island effect. This energy-saving technology does not depend on the capacity of the air-cooled PAC and is effective only when installing PAC. In this study, with a focus on the refrigerant system of the grocery supermarket, we verified the cycle performance of the refrigerant systems in grocery supermarkets in Japan by adding experimental equipment to the developed unit and presented the results. The experiment was conducted using refrigerant R410A at a thermal load rate from 0.25–1.0 °C and outside air temperature ranging from 4.1–34 °C. We investigated the hourly electric power consumption and peak value. As a result, we confirmed that the system COP rate improved by 21% on adding the developed unit at an outside air temperature of 34 °C. Furthermore, we found that the pressure of the high-pressure side during the operation of the Eva-chilled unit was lower than that when the operation of the Eva-chilled unit had stopped, considering the refrigeration effect per unit flow rate improved due to the supercooling of the Eva-chilled unit.

1. INTRODUCTION

In 2019, as a measure to prevent global warming, the regular report of the revised energy saving law, Japan, suggested the food supermarket industries to prepare performance reports indicating whether the target benchmark indicator, obtained by dividing the amount of energy used in supermarkets by the specified value of an item (calculated from the total floor area, annual business hours, and the size of the cold equipment), was met. Refrigeration equipment consume in supermarkets account for approximately 56% of the total annual electric power consumption of the entire supermarket facility. Therefore, energy saving is an urgent problem that needs to be addressed. In 2005, we developed a sub-cooling system for multi-type building air conditioners using HCFC refrigerants as an energy-saving technology with a heat exchange function between the refrigerant and the cooling water from outside. In 2009, we developed an Eva-chilled unit comprising a small cooling unit in the outdoor unit for installation in small-scale properties. In this study, we conduct a performance verification test to evaluate the energy-saving performance of the Eva-chilled unit with a refrigerated showcase and report the results.

This article is update of “2nd Asian Conference on Thermal sciences (2nd ACTS), October 3-7, 2021, Online conference”

1 R&D center, TTE Co., Ltd.

2 Design Division of Tokyo Main Branch, TTE Co., Ltd.

3 TMES Corporation

2.2. OUTLINE OF THE EVA-CHILLED UNIT

The Eva-chilled unit integrated heat exchanger and cooling tower were incorporated in the cold system of the vapor compression refrigeration cycle of HCFC refrigerants of the sub-cooling system, which further subcooled the refrigerant at the outlet condenser. Because the refrigerant temperature was higher than the outside air temperature, it would be possible to contribute to energy saving, reduce electricity charges, and improve the refrigeration capacity if tap water or well water were used as a water supply source. Figures 1 and 2 show the actual photograph and schematic representation of the Eva-chilled unit, respectively. Table 1 shows the specifications of the unit. This system connects to only one unit in the applicable range of 5–50 HP when applied to a multiple-air conditioner. The unit can be carried through a single door and easily transported by an elevator. Furthermore, it is easy to install owing to the small refrigerant ($\Phi 22.2\text{mm}$) and water supply (15 A) pipes. It also comprises a refrigerant pipe coil inside the unit, flowing in the liquid refrigerant condensed in the existing outdoor unit. The control operation of the Eva-chilled unit automatically sprinkles and ventilates when the pressure in the refrigerant pipe exceeds a predetermined level.

Table 1 Specifications of the Eva-chilled unit.

Equipment body	Outside dimension	500W × 650D × 1100H
	Weight	About 90 kg (includes water and refrigerant)
	Air volume	2,400 CMH
	water sprinkling volume	24 L/min
	Heat exchanger	CUP (C1220) $\Phi 9.53$ 22 row × 5 stage × 480L
Power supply	Voltage	3 Φ 200V
	Power consumption	250 / 295W (50 / 60Hz)
Water supply	Amount of water consumption	Maximum continuous water consumption 0.25 L/min
	Pressure	0.01 ~ 0.5 MPa
	Quality	Follow guideline of water quality for refrigeration and air conditioning equipment (JSA-GL 02)
Pipe connection	Refrigerant liquid pipe	CUP $\Phi 22.22 \times 2$ places
	Water supply pipe	15A female screw (brass)
	Drain pipe	VP15A single pipe



Fig. 1 Eva-chilled unit when installed in the PAC's outdoor unit.

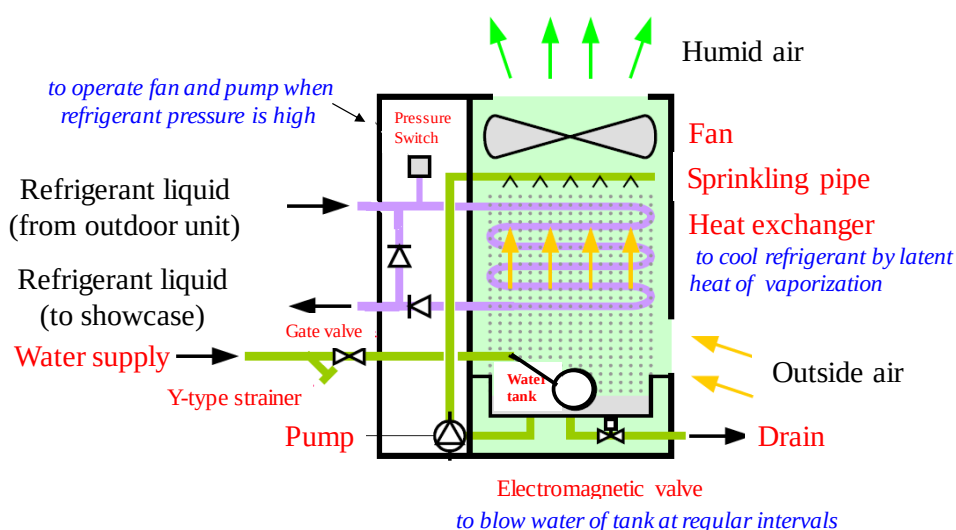


Fig. 2 Schematic of the Eva-chilled unit.

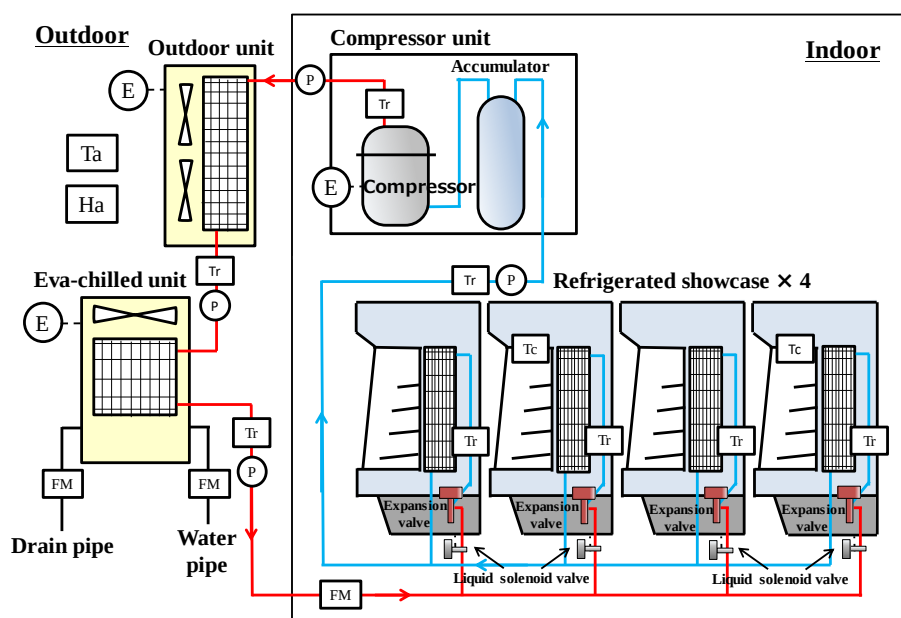


Fig. 3 Schematic of the experimental apparatus.

Table 2 Specifications of the Eva-chilled unit.

Table 3 Measurement item and measurement equipment

Experimental period		May 2019 to February 2020
Refrigerant		R410A
Equipment	Existing unit	Showcase, 4 units 2.51kW (@ 27°C 70RH%) Inverter compressor unit, 1 unit 4HP (@ Evaporation temp. sets to -10°C) Outdoor unit, 1 unit
	Additional unit	Eva-chilled unit, 1 unit
Condition of operation		No control start/stop of compressor and outdoor air temp.
Thermal load factor		25, 50, 75, 100%
Interval of measurement and calculation		Measurement time : 1 sec. Calculation : average of 1 hour
Water supply		Without temperature control Blow one time 5 hours

Symbol	Measurement item	Measuring equipment	Point
ⓔ	Power consumption	Watt hour meter	3
Ta	Outside air temperature	Weather measurement device	1
Ha	Outside air relative humidity		1
Tw	Water supply temperature	Pipe insertion type RTD	1
Tr	Refrigerant temperature	Film-type RTD	8
Tc	Temperature in showcase	Film-type RTD	2
FM	Refrigerant flow rate	Coriolis flow meter	1
	Water supply / Drain flow rate	Electromagnetic flow meter	2
P	Refrigerant pressure	Pressure gage	4

3. EXPERIMENTAL EQUIPMENT AND PERFORMANCE VERIFICATION

Figure 3 shows a schematic of the experimental apparatus, a vapor compression-type refrigeration cycle comprising four refrigerated showcases, a compressor unit, an outdoor unit, and the Eva-chilled unit. The refrigerated showcases and compressor units were installed indoors, whereas the outdoor and Eva-chilled units were installed outdoors. Owing to the workability of the piping connection of the Eva-chilled unit and the actual condition of the customer store, we installed a refrigeration system separately from the compressor and outdoor units. The refrigerant was discharged by the compressor at high temperature and pressure, and condensed by the outdoor unit. The refrigerant then enters the Eva-chilled unit and is further supercooled. Subsequently, it passes through the Coriolis flow meter and is decompressed by the expansion valve in the returns to the compressor. To prevent heat exchange with the indoor air, the thermal load of the refrigerated showcase was covered with heat-insulating material. Furthermore, a variable-simulated load heater was installed in the showcase. The temperature of the refrigeration showcase was set to 2 °C,

whereas the evaporation temperature of the compressor unit was set to $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. The refrigerant pressure control, compressor frequency control, and expansion valve opening control conform to the manufacturer's standards. As described in the previous section, the operation of the Eva-chilled unit was controlled in a way that it operated automatically when the refrigerant pressure exceeded a predetermined level.

Tables 2 and 3 show the experiment duration and conditions and the measurement items and equipment, respectively. We conducted a performance verification test from May 2019 to February 2020 and measured parameters such as the power consumption of the compressor, outdoor unit, and Eva-chilled unit during operation, the outside air temperature and air relative humidity, the temperature of the water supply, refrigerant, and in the showcase, the refrigerant flow rate, amount of water supply/drain, and the refrigerant pressure. The performance verification was performed using the data that was obtained by averaging the data measured for 1 h at 1 s intervals. Based on the experimental conditions, the thermal load rates of the variable heater in the refrigerated showcase were changed to 25, 50, 75, and 100%. The thermal load rate is the value obtained by dividing the refrigeration capacity by the rated capacity of the compressor under experimental conditions, which is a product of the refrigerant flow rate and difference in enthalpy from the inlet of the compressor to the outlet of the expansion valve. The outside air temperature, outside air relative humidity, and the water supply temperature to the Eva-chilled were not controlled. Furthermore, the cycle COP and system COP were stopped were examined during the operation of the Eva-chilled unit to verify the performance. The cycle COP is the value obtained by dividing the calculated refrigeration capacity by the compressor power consumption, whereas the system COP is the value obtained by dividing the refrigeration capacity by the total power consumption of the compressor, outdoor unit, and Eva-chilled unit. The refrigerant enthalpy was calculated using the REFPROP Ver. 10 [4].

4. RESULT AND DISCUSSION

4.1 Operation trend of each measurement value

Fig. 4 shows the time change of each measured value (inlet pressure of compressor P_{in} , the outlet pressure of compressor P_{out} , outside air temperature T_a , the representative temperature in showcase T_c , refrigerant flow rate W_r) on August 28, 2019, when the thermal load rate was 88% and during the operation of the Eva-chilled unit. The measurement time was 1 h, starting from 11:00. The representative temperature in the showcase was between $3 - -1\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the refrigerant flow rate increased as the representative temperature increased. Moreover, due to an increase in the refrigerant flow rate, the inlet and outlet pressures of the compressor decreased and increased, respectively. In contrast, when the representative temperature approached the minimum value (-1°C), the refrigerant flow rate decreased. Therefore, we can conclude that the refrigerant flow rate was adjusted by the expansion valve opening control against the showcase temperature. At a low thermal load rate, the start and stop frequency increased owing to the rapid temperature change in the representative showcase. The changes in the flow rate with time were attributed to the capacity control of the inverter compressor based on the superheat at the compressor inlet. Moreover, by comparing the changes during and after operation of the Eva-chilled unit with time, it was confirmed that it had no influence on the operation control on the showcase side (evaporator side) during the operation of the Eva-chilled unit.

4.2 Comparison of the P-h cycle diagrams

Figures 5 (a), (b), and (c) compare the P-h cycle diagram during and after the operation of the Eva-chilled unit, respectively, at outside air temperatures of approximately 9.5 , 23.5 , and $33.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and high thermal load rates ranging from 80–93%. P is the refrigerant pressure, and h is the enthalpy in the figures. Each section represents the operation of each piece of equipment, where the compressor is between a and b (A and B), the outdoor unit is between b and c (B and C), the Eva-chilled unit is between c and c', the expansion valve is between c'–d (C–D), the refrigerated showcase is between d and a (D and A). Note that the lower-case and upper-case letters show each equipment section during and after the operation of the Eva-chilled unit,

respectively. It can be confirmed that the supercooling effect (between c and c') was greater during the Eva-chilled unit operation compared to after the operation, at any outside air temperature. Furthermore, the

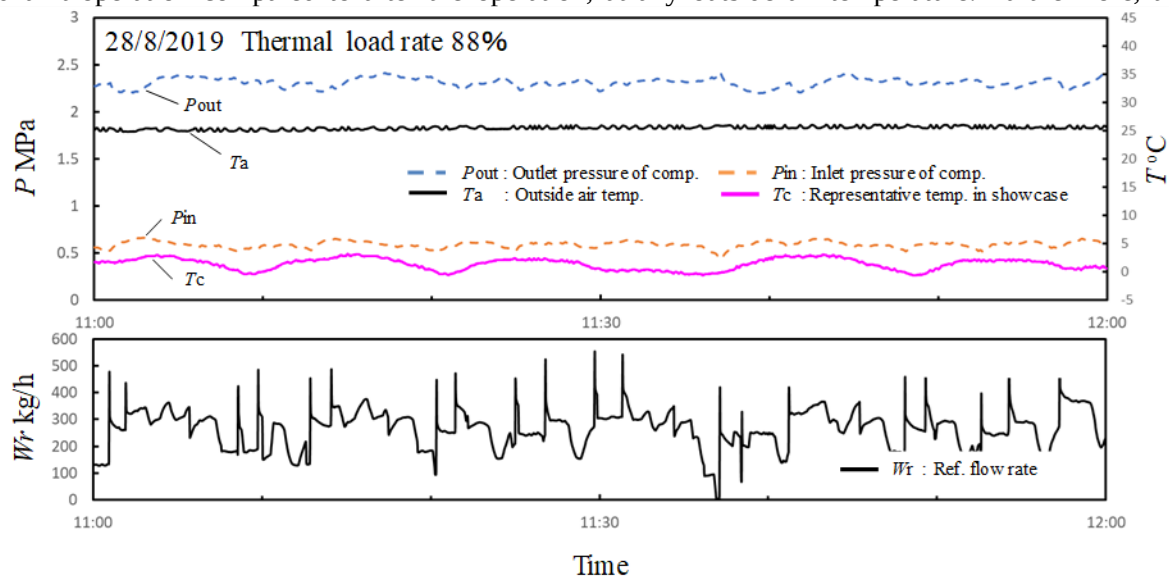


Fig. 4 System operation results during operation of the Eva-chilled unit.

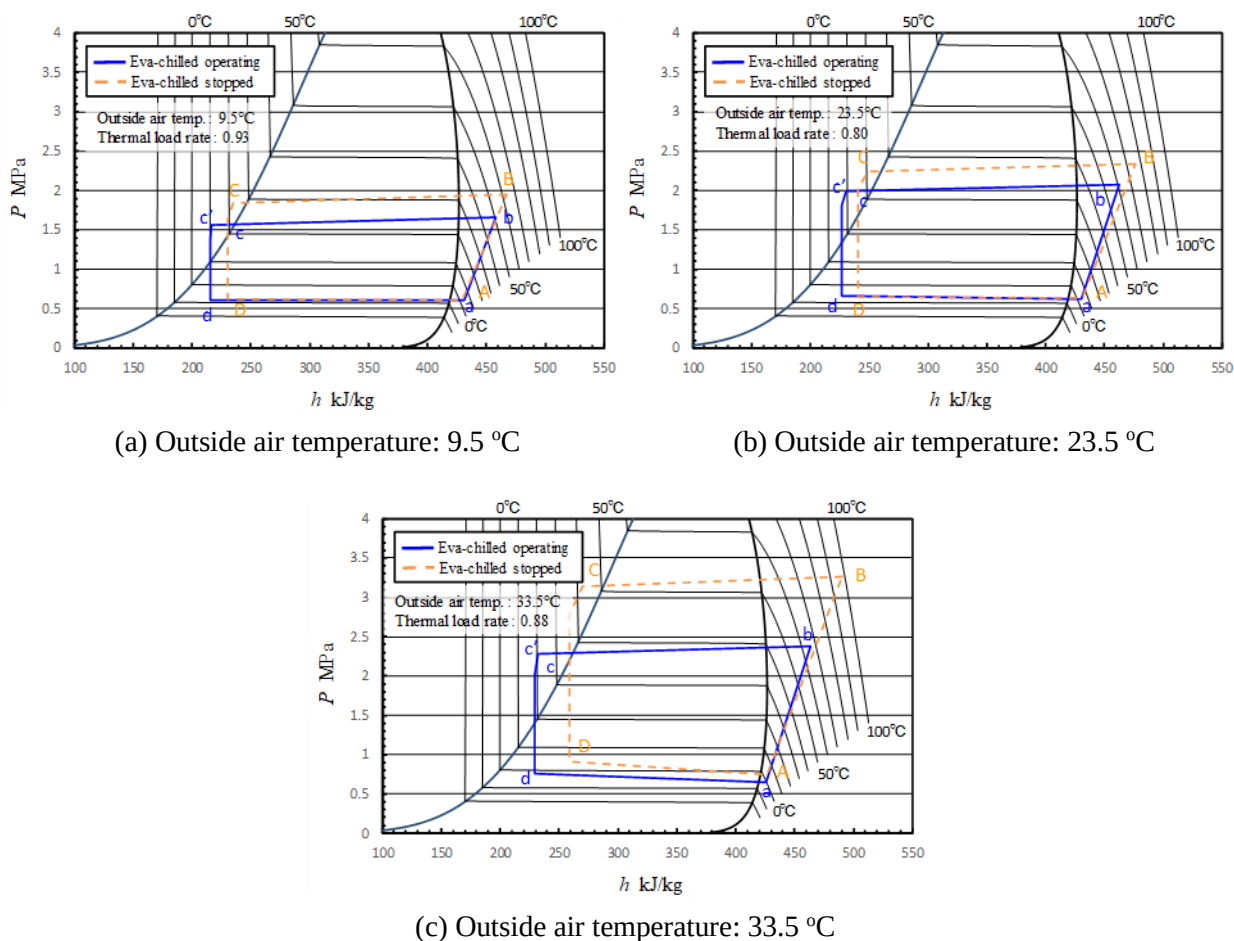


Fig. 5 Comparison of the P-h cycle diagrams during and after the operation of the Eva-chilled unit..

pressure on the high-pressure side was lower during the operation of the Eva-chilled unit compared to after operation. The drop in the high-pressure side pressure can be attributed to the fact that the refrigerating effect per unit flow rate (between d and a) is improved by supercooling the Eva-chilled unit, and the heat load can be processed even at a low flow rate. Note that the pressure on the low-pressure side was almost the same during and after the operation, considering the showcase internal temperature was 2 °C and the compressor unit evaporation temperature was -10 °C, which enabled constant control over the low-pressure side of the cycle.

4.3 Energy saving effect by the Eva-chilled unit

Table 4 shows the effect of energy saving when the Eva-chilled unit operates and stops at almost the same outside air temperature and thermal load rate. All results showed that both the cycle COP and system COP were higher during the operation of the Eva-chilled unit than after operation. Furthermore, it can be seen that the energy-saving effect of some data at intermediate temperatures is lower than that of the other data, considering the energy-saving effect is low in the intermediate temperature range when comparing the performance curves of cycle COP and outside temperature of the Eva-chilled unit when it operates and stops. In the high-temperature range, the energy saving effect of the data increased as the outside air temperature increased. In this experiment, the cycle COP and system COP rates improved by 25% and 21%, respectively, when the Eva-chilled unit operated at an outside air temperature of 34 °C and a load rate of 89%. Generally, in a refrigeration cycle, as the thermal load rate and outside air temperature increase, the refrigerant flow rate is increased to increase the difference between the refrigerant temperature and outside air temperature to increase the amount of heat radiation in the outdoor unit. As a result, the pressure on the high-pressure side increases, thereby increasing the power consumption. In this experiment, the refrigeration effect was improved owing to the operation of the Eva-chilled unit and the equivalent load could be processed even at reduced refrigerant flow rates. Therefore, it is considered that the COP can be improved by reducing the power consumption owing to the decrease in the compressor frequency.

Table 4 Energy saving effect by the Eva-chilled unit.

Outside air temp. °C	Thermal heat rate %	Operating state —	COP _{cycle} —	COP _{system} —	Effect of energy saving of COP _{cycle} %	Effect of energy saving of COP _{system} %
4.8	63	Stopped	3.86	3.69	11	2
		Operating	4.27	3.75		
15	61	Stopped	3.04	2.93	16	6
		Operating	3.54	3.11		
25	54	Stopped	2.45	2.32	14	6
		Operating	2.8	2.47		
34	46	Stopped	2.08	1.95	23	14
		Operating	2.56	2.22		
5.1	77	Stopped	3.73	3.59	18	9
		Operating	4.42	3.9		
15	93	Stopped	2.99	2.88	16	10
		Operating	3.48	3.16		
24	86	Stopped	2.62	2.43	11	8
		Operating	2.9	2.62		
34	89	Stopped	1.74	1.66	25	21
		Operating	2.18	2.01		

4. CONCLUSIONS

In this study, we connected an Eva-chilled unit to a refrigerated showcase and conducted a performance verification experiment from May 2019 to February 2020 (outside air temperature 4.8–34 °C). The

following results were obtained:

- (1) Based on the cycle diagrams at outside air temperatures of 9.5, 23.5, and 33.5 °C during and after the operation of the Eva-chilled unit, the pressure on the high-pressure side was found to be lower during the operation of the Eva-chilled unit, which was attributed to the supercooling of the Eva-chilled unit.
- (2) We confirmed that the energy-saving effect was higher when at high outside air temperature values . At an outside air temperature of 34 °C and thermal load rate of 89%, we observed 25% and 21% improvement in cycle COP and system COP. Furthermore, the energy-saving effect of some data at intermediate temperatures was lower than the other data, considering the energy-saving effect was found to be low in the intermediate temperature range on comparing the performance curves of cycle COP and the outside temperatures during and after the Eva-chilled operation.

REFERENCES

- [1] Ishii, S. et al., “Sub-cooling system for multiple packaged air conditioners“. *Transactions of the Society of Heating Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, 35-42 (in Japanese) , (2008). **Journal Paper**
- [2] Mao'o, T. et al., “Sub-cooling system on multiple packaged air conditioner by adding external cold heat / a proposal of cooling capacity estimation method for onsite performance verification of inverter-drive packaged air conditioner“, *Proceedings of the 7th Asian conference on Refrigeration and Air Conditioning*, Taipei, 081, (2009). **Conference Proceedings**
- [3] Ishii, S. et al., “Performance verification of sub-cooling system in Thailand“, *Proceedings of the 7th Asian conference on Refrigeration and Air Conditioning*, Jeju, Korea, (2014). **Conference Proceedings**
- [4] NIST, “Reference fluid thermodynamic and transport properties (REFPROP) version 10”, (2018).

要 約

地球温暖化の観点から、冷凍空調システムの省エネ化はますます重要になってきている。当社は 2009 年に、ビル用マルチエアコンやモジュールチラーの省エネ技術としてエバチルドシステムと呼ばれる過冷却装置を開発した。本機は小型冷却塔のようなものであり、主に散水による蒸発潜熱を利用して、冷媒配管内の液体冷媒を冷却することで、ピーク時の消費電力やシステム全体のエネルギー消費量の削減に貢献できる。そこで本研究では、食料品スーパー業の冷凍冷蔵ショーケースに着目し、開発したユニットをそのシステムに付加することで、サイクル性能が向上することを実験的に検証した。本実験は、冷媒 R410A を使用し、外気温度 4.8～34°C、熱負荷率 25～100%、エバチルドユニット運転時と停止時の条件で実施した。その結果、エバチルドユニットを運転した時のシステム COP は、外気温度 34°C、負荷率 89%時に 21%向上することを確認した。また、エバチルドユニットの運転時の高圧側の圧力は、エバチルドユニットの停止時のときよりも低いことがわかった。

吸着材蓄熱の蓄放熱運転の計算モデル

鎌田 美志・川上 理亮・谷野 正幸

Calculation Model for Charging and Discharging Operation of an Adsorption Thermal Storage System

Haruyuki Kamata・Yoshiaki Kawakami・Masayuki Tanino

我々は、低温排熱が利用できるオープンサイクル形式の吸着材蓄熱システムを開発してきた。実験的に、蓄熱槽の吸着材充填層の蓄放熱特性を検討した。また、定置型蓄熱システムとオフライン熱輸送システムの実証試験を実施した。さらに、小型試験装置での蓄放熱の試験結果を基に吸着材蓄熱槽の数値解析モデルを開発し、実証設備での蓄放熱運転データによって検証しながら、設計ツールを完成させた。本報では、数値解析モデル、各種の吸着材の吸着等温線と吸着熱、数値解析モデルの計算例、および設計ツールについて説明する。このような吸着材蓄熱の設計ツールを活用した熱マネジメントによって、排熱利用や未利用熱利用を促進させ、喫緊の課題である二酸化炭素の排出量の削減に貢献したい。

1. はじめに

我々は、石原産業(株)、東京電力エナジーパートナー(株)、森松工業(株)、日野自動車(株)、(国研)産業技術総合研究所、大塚セラミックス(株)とともに、産業技術総合研究所が2008年に開発した吸着材「ハスクレイ」^[注1]をベースに、2015年度から(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業において、100℃程度の低温廃熱が利用可能な吸着材蓄熱システムを提案し、実用化開発^[注2]と実証開発^[注3]を行ってきた¹⁻²⁶⁾。実用化開発において、小型試験装置での蓄放熱運転の実験結果を基に数値解析モデル^{2,9,15)}を開発し、熱利用性能の現地評価試験^{10,12,22)}によって評価した。さらには、実証開発^{14,16-20,23-26)}において、設計ツールとして開発して検証してきた。

本報では、数値解析モデルの概要、各種の吸着材の吸着等温線と吸着熱の概要、数値解析モデルの計算例、および設計・提案ツールとその適用について説明する。

2. 数値解析モデル

本数値解析モデルは、吸着材蓄熱システムの蓄熱槽の簡便な設計ツールや提案ツールを開発することを目的とし、**図1**の左側図のような蓄熱槽内の吸着材充填部を解析対象にした。蓄熱運転では約100℃の高温空気が吸着材充填部に供給され、蓄熱材の含水率が低下し、約40℃以下の低温の高湿空気が排出される。放熱運転では湿潤空気が吸着材充填部に供給され、蓄熱材に水分が吸着し、吸着熱によって高温の低湿空気が排出される。

本数値解析モデルは**図1**の左側図の吸着材充填部を、右側図のように吸着材の固相と空気の気相の二相に分離した、いわゆる集中定数モデル(lumped parameter model)である。ここでは、円筒座標系での半径方向の熱・物質移動を考慮せずに、**図1**の右側図での軸方向(z 方向)の通風方向に対する一次元モデルとした。図では z 方向で、 n 個に分割している。

まず、以下を仮定した。

- 1) 空気中の吸着質は水蒸気のみを対象とする。
- 2) 吸着材内部での温度と水分の分布は考慮せず、各々は吸着材内部で一様とする。
- 3) 蓄熱槽での通風の圧力損失は極めて小さく、空気の熱物性値には圧力依存性を考慮せず、温度依存性のみを考える。

吸着材蓄熱システムの基本設計において、蓄熱槽での通風の圧力損失^[注 4]は極めて小さいため、上記 3) のように空気の熱物性値に圧力依存性を考えない。

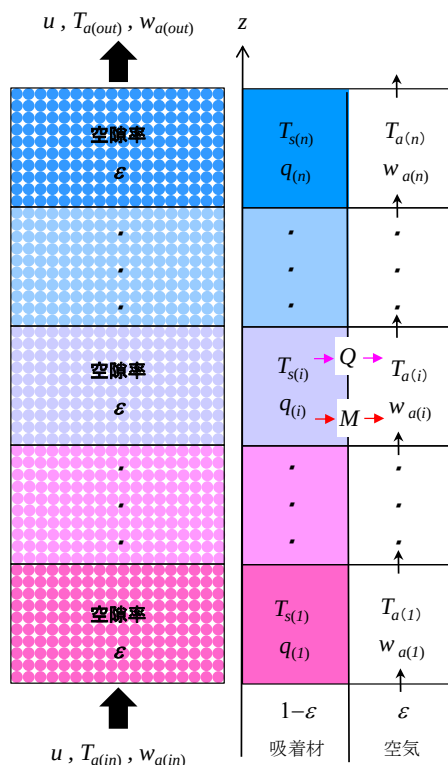


図 1 数値解析モデルの概要(左側の吸着材充填部を右側の2相に分離)^{2,9,15)}

まず、図 1 の右側図の気相（空気）の物質収支式（空気中の水分の質量保存式）²⁷⁾は下記の式(1)である。

$$\frac{\partial w_a}{\partial t} = D \frac{\partial^2 w_a}{\partial z^2} - \dot{m}_a \frac{\partial w_a}{\partial z} - M(1 - w_a) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、基本設計の空塔速度 u は 0.5 m/s 程度であり、充填高さ L が 300 mm で空隙率 ε が 0.5 程度の吸着材充填部の通過時間は約 0.3 s と極小であるため、式(1)の左辺の非定常項（時間項）は考えない。また、一般に対流項に比べて拡散項は小さく、本解析モデルの目的が設計ツールの開発であるため、ここで式(1)の右辺の第一項の拡散項は省略する。その結果、気相での物質収支式としては、式(1)の右辺の第二項を左辺に移動して、下記の式(2)を得る。

$$\dot{m}_a \frac{dw_a}{dz} = -M(1 - w_a) \quad \dots\dots\dots(2)$$

また、図 1 の右側図の気相（空気）の熱収支式^{27,28)}は下記の式(3)である。

$$\rho_a C_a \frac{\partial T_a}{\partial t} = \lambda_a \frac{\partial^2 T_a}{\partial z^2} - \dot{m}_a C_a \frac{\partial T_a}{\partial z} - Q - C_v M (T_s - T_a) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、上記の物質収支と同様に 式(3)の左辺の非定常項（時間項）は考えない。また、一般に対流項や発生項に比べて伝導項は小さいので、ここで式(3)の右辺の第一項の伝導項は省略する。その結果、気相での熱収支式としては、式(3)の右辺の第二項を左辺に移動して、下記の式(4)を得る。

$$\dot{m}_a C_a \frac{dT_a}{dz} = -Q - C_v M (T_s - T_a) \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 M は固相と気相の間での体積あたりの水蒸気移動量（水蒸気移動速度）であり、 Q は固相と気相の間での体積あたりの熱移動量（熱移動速度）である。

つぎに、図 1 の右側図の固相（吸着材）での物質収支式（吸着材中の水蒸気の質量保存式）^{27,28)}は下記の式(5)である。

$$(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial q}{\partial t} = D \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} + M \quad \dots\dots\dots(5)$$

同様に、式(5)の右辺の第一項の拡散項を省略し、固相（吸着材）での物質収支式としては、下記の式(6)を得る。

$$(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{dq}{dt} = M \quad \dots\dots\dots(6)$$

また、固相（吸着材）での熱収支式^{27,28)}は下記の式(7)である。

$$(1 - \varepsilon) \rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + H_A M + Q \quad \dots\dots\dots(7)$$

同様に、式(7)の右辺第 1 項の拡散項を省略し、固相での熱収支式として下記の式(8)を得る。

$$(1 - \varepsilon) \rho_s C_s \frac{dT_s}{dt} = H_A M + Q \quad \dots\dots\dots(8)$$

本数値解析モデルにおいて、固相と気相の間での物質の移動速度 M と固相と気相の間での熱の移動速度 Q を見積もることが重要である。

この物質移動速度 M は、下記の式(9)の構成方程式で示される。ここで、吸着材表面の水蒸気濃度は平衡状態とし、吸着材の含水率と吸着等温線^{7,21)}から、下記の式(9)での表面の水蒸気質量分率 w_s を算出することにした。ここでの M の駆動力は水蒸気質量分率の差分である。

$$M = h_m a_s (w_a - w_s) \quad \dots\dots\dots(9)$$

また、熱移動速度 Q は下記の式 (10) で示される。ここでの Q の駆動力は温度差である。

$$Q = ha_s(T_a - T_s) \dots\dots\dots(10)$$

この式 (10) の熱伝達率 h には、下記の式(11)と式(12)の宮内の式 ²⁹⁾を採用した。

$$Nu = 1.3 \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{Re}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{Ca\mu}{\lambda_a}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{at } \frac{Re}{\varepsilon} \leq 7.5 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \dots\dots\dots(11)$$

$$Nu = 0.92 \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{Re}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{Ca\mu}{\lambda_a}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{at } \frac{Re}{\varepsilon} > 7.5 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \dots\dots\dots(12)$$

これらの式(11)と式(12)で計算される Nu 数より h を定めた。また、ルイス数を 1 として、物質移動係数 h_m も同様に定めた。

参考文献 ³⁰⁾によると、充填層の粒子・流体間の境膜物質移動係数や熱移動係数は、設計上の大切な基礎数値とされ、多くの研究がなされて相関式が提案されているが、相関式が研究者によって異なっており、相関の適用範囲に不明確さの残る傾向が散見される。宮内は多くの流動層に関する実測値の相関と物質移動機構の考察から、充填層の粒子・流体間の境膜物質移動や熱移動の相関図と相関式を整理した ²⁷⁾。

以上のような式(2)と式(4)の気相の収支式（保存則）と、式(6)と式(8)の固相の収支式（保存則）に基づき、式(9)と式(10)の構成方程式から、吸着材の含水率と温度の軸方向の分布の時間変化を計算し、吸着材を通過した空気中の水蒸気濃度（湿度）と温度の軸方向の分布を計算することができる。

なお、**図 1** と式(1)～式(12)の数式の主な記号の定義を、**表 1** に纏めて示す。吸着材の比熱や密度の熱物性値は後述する。初期条件とともに、流入空気の温湿度と流量は与条件である。

表 1 主な記号の定義 ^{2,9,15)}

a_s	単位体積あたりの吸着材の表面積 $[\text{m}^2 \text{m}^{-3}]$	q	含水率 $[\text{kg kg}^{-1}]$
C	比熱 $[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$	$Re :$	レイノルズ数 $(= dup/\mu)$ $[-]$
D	拡散係数 $[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$	T	温度 $[\text{K}]$
H_A	吸着熱 $[\text{J kg}^{-1}]$	t	時間 $[\text{s}]$
h	熱伝達係数 $[\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$	u	空塔速度 $[\text{m s}^{-1}]$
h_m	物質移動係数 $[\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}]$	w	水蒸気質量分率 $[-]$
L	充填高さ $[\text{m}]$	λ	熱伝導率 $[\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}]$
M	単位体積あたりの物質移動量 $[\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}]$	μ	粘度 $[\mu\text{Pa S}]$
$\dot{m}$	質量流束 $[\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}]$	ε	空隙率 $[-]$
Nu	ヌッセルト数 $(= hd/\lambda)$ $[-]$	ρ	密度 $[\text{kg m}^{-3}]$
Q	単位体積あたりの熱移動量 $[\text{W m}^{-3}]$		

添え字 a :空気, s :吸着材-粒子表面, v :水蒸気

3. 吸着等温線と吸着熱

前述のように本数値解析モデルにおいて、重要な物質移動速度 M を定める式(9)での表面の水蒸気質量分率 w_s を算出するには、吸着材の水分の吸着等温線が必要である。一定温度における、吸着質の濃度および圧力と吸着量の関係を吸着等温線と呼び、吸着材の吸脱着性能を把握する上で重要である。吸着等温線は典型的には**図 2** のように、Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型、Ⅳ型、Ⅴ型、およびⅥ型の、六種類に分類される ^{31,32)}。

図 3 に種々の吸着材の吸着等温線を示す ^{8,21)}。一般に吸着等温線の温度依存性は小さく、ここでは室温・大気圧の条件下で、ハスクレイ、シリカゲル、高分子収着剤、およびゼオライトについて、相対湿度と吸着

量の関係が示されている。図 2 と図 3 のように、ゼオライトは典型的な I 型の吸着等温線であり、シリカゲルはIV型の吸着等温線である。また、近年、低温再生型デシカントロータのために研究開発されてきた、高分子収着剤とハスクレイは、図 3 のように相対湿度の増加とともに吸着量は単調に増加するため、広範な湿度領域で吸脱着が行われる特性を有する吸着材であることがわかる。

表 2 にゼオライトとハスクレイの吸着熱や、密度、比熱などの熱物性値を示す²¹⁾。本数値解析モデルの吸着熱は、含水率に依らず一定とした。

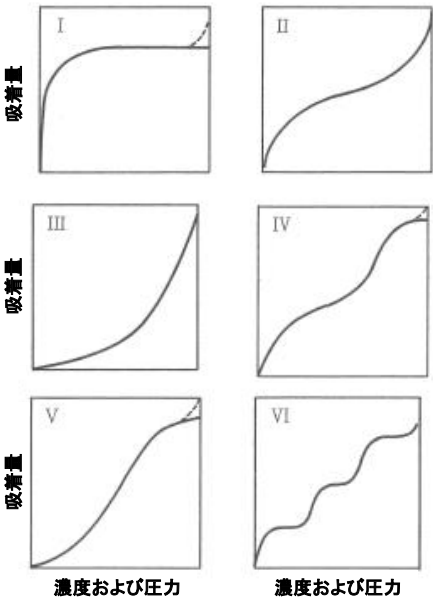


図 2 吸着等温線の分類^{31,32)}

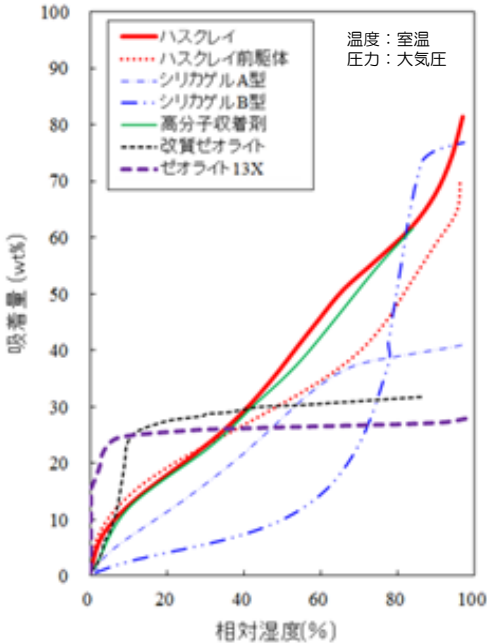


図 3 種々の吸着材の吸着等温線^{8,21)}

表 2 吸着熱

	ゼオライト	ハスクレイ
吸着熱 H_A	3,340 kJ/kg	3,000 kJ/kg
密度 ρ_s	1,043 kg/m ³	833 kg/m ³
比熱 C_s	1.05 kJ/kg K	1.05 kJ/kg K

4. 数値解析モデルの計算例

ここでは、本数値解析モデルの妥当性を確認するために、ハスクレイとゼオライトの二種類の吸着材の場合について、蓄熱と放熱の各々の運転での計算結果を実験結果と比較する。実験は 10kg の吸着材が充填できる蓄熱槽などで構成される、小型の試験装置（10kg 級）^{〔注 5〕}で行ったが、詳細は引用文献を参照されたい^{2,9,15)}。

4.1 ハスクレイの計算例^{2,9,15)}

図 4 にはハスクレイ造粒体を用いた場合の、蓄放熱運転の計算結果を実験結果と比較して示す。蓄熱槽の充填高さは 300mm であり、供給空気流量は 250 NL/min（空塔速度は約 0.48 m/s）である。

図 4 の（a）の蓄熱運転では、上図のように供給空気の入口温度 T_{in} は約 110℃一定に加熱され、供給空気の顕熱量が吸着材の水分の脱着の反応熱として奪われたため、運転開始直後から約 0.7 時間の間、空気の出口温度 T_{out} の実験値と計算値は 44℃一定であった。また、下図のように、空気の出口湿度 H_{out} の実験値と

計算値は約 60 %RH 以上の高い値で維持されていた。この運転開始直後から約 0.7 時間の間に、供給空気によって吸着材の水分の脱着が進捗し、充填層内の入口側から順に乾燥が終了して、上図のように充填層内温度（計算値）は空気の入口側から順に急上昇し、下図のように充填層内湿度（計算値）は空気の入口側から順に急低下した。約 1 時間後には、全ての吸着材の水分脱着が終了して、上図のように T_{out} の実験値と計算値が上昇し T_{in} に漸近した。また、同時に H_{out} の実験値と計算値が急激に低下し、供給空気の入口湿度 H_{in} に漸近した。

図 4 の (b) の放熱運転では、上図のように T_{in} が約 30℃で一定 (H_{in} が約 73 %RH で一定) の空気が供給され、運転開始直後から吸着材の水分吸着の反応熱が発生（発熱）して充填層内の温度が上昇し、約 0.14 時間後には T_{out} の実験値と計算値は最高値の約 68℃に達した。また、下図のように、 H_{out} の実験値と計算値は運転開始直後に極小の値を示した。その後、入口側から水分吸着が徐々に進行して、上図のように充填層内温度（計算値）が入口側から順に低下して、 T_{out} の実験値と計算値も徐々に低下した。また、下図のように、運転開始直後に極小の値を示した H_{out} の実験値と計算値は徐々に増加した。この下図のように徐々に増加するような充填層内湿度と H_{out} の経時変化から、蓄熱槽全体の水分の吸着量は運転開始直後に最大となり、それ以降は徐々に減少していくことが確認できる。発熱量は水分の吸着量に比例するため、吸着量の減少に応じて上図のように T_{out} の実験値と計算値も低下して、4.0 時間後には約 32℃になった。なお、上図のような充填層内温度（計算値）の経時変化の形状から、放熱運転時の水分の吸着は蓄熱時の脱着に比べて、充填層高さ方向の広範囲で進捗することが確認できる。

以上のように、ハスクレイ造粒体を用いた場合の蓄放熱特性の実験結果は、本数値解析モデルによってトレースすることができた。

4.2 ゼオライトの計算例

図 5 には、ゼオライト造粒体を用いた場合の、蓄放熱運転の計算結果を実験結果と比較して示す。蓄熱槽の充填高さは 300mm であり、供給空気流量は 250 NL/min（空塔速度は約 0.48 m/s）である。

図 5 の (a) の蓄熱運転では、上図のように供給空気の入口温度 T_{in} は約 130℃一定に加熱され、供給空気の顕熱量が吸着材の水分の脱着の反応熱として奪われたため、運転開始直後から約 0.4 時間の間、空気の出口温度 T_{out} の実験値と計算値は 40℃一定であった。また、下図のように、空気の出口湿度 H_{out} の実験値と計算値は約 60 %RH 以上の高い値で維持されていた。この運転開始直後から約 0.4 時間の間に、供給空気によって吸着材の水分の脱着が進捗し、充填層内の入口側から順に乾燥が終了して、上図のように充填層内温度（計算値）は空気の入口側から順に急上昇し、下図のように充填層内湿度（計算値）は空気の入口側から順に急低下した。約 0.5 時間までには、全ての吸着材の水分脱着が終了して、上図のように T_{out} の実験値と計算値が上昇し T_{in} に漸近した。また、同時に H_{out} の実験値と計算値が急激に低下し、供給空気の入口湿度 H_{in} に漸近した。

図 5 の放熱運転では、上図のように T_{in} が約 30℃で一定 (H_{in} が約 65 %RH で一定) の空気が供給され、運転開始直後から吸着材の水分吸着の反応熱が発生（発熱）して充填層内の温度が上昇し、約 0.7 時間後までの T_{out} の実験値と計算値は約 80℃を示した。また、下図のように、 H_{out} の実験値と計算値は運転開始直後に極小の値を示した。その後、入口側から水分吸着が徐々に進行して、上図のように充填層内温度（計算値）が入口側から低下して、 T_{out} の実験値と計算値も低下した。また、下図のように、運転開始直後に極小の値を示した H_{out} の実験値と計算値は増加した。この下図のような充填層内湿度と H_{out} の経時変化は、前述の図 5 の (b) のハスクレイの放熱運転の H_{out} の経時変化に比べて急激に増加することから、比較的、急速な吸着量の減少に応じて、上図のように 4.0 時間後には T_{out} の実験値と計算値も低下して T_{in} と同等の約 30℃になった。

以上のように、典型的な I 型の吸着等温線を有する、汎用のゼオライト造粒体を用いた場合の蓄放熱特性の実験結果は、本数値解析モデルによってトレースすることができた。

なお、本試験装置と温湿度計の測定精度^[注5]から、放熱運転の終盤での低温で高湿度の H_{out} の実験値には比較的、大きな誤差が含まれていることから、 H_{out} の実験値と計算値の相違には留意されたい。

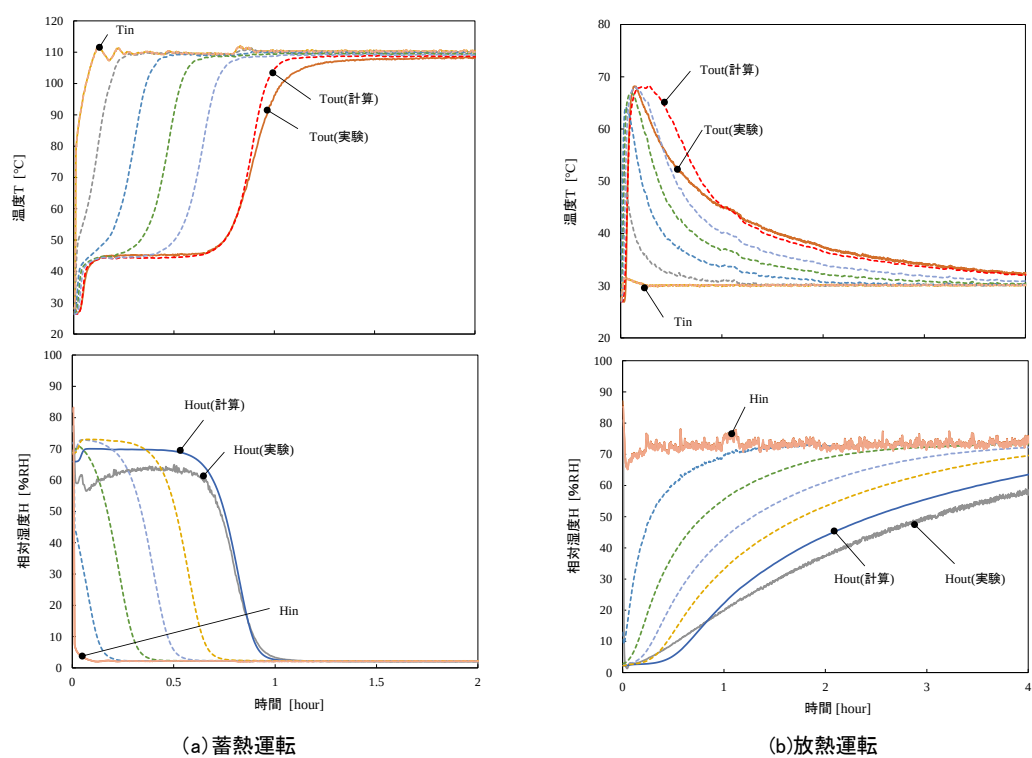


図4 ハスクレイでの蓄放熱運転の温湿度の経時変化(実験と計算結果)^{2,9,15)}

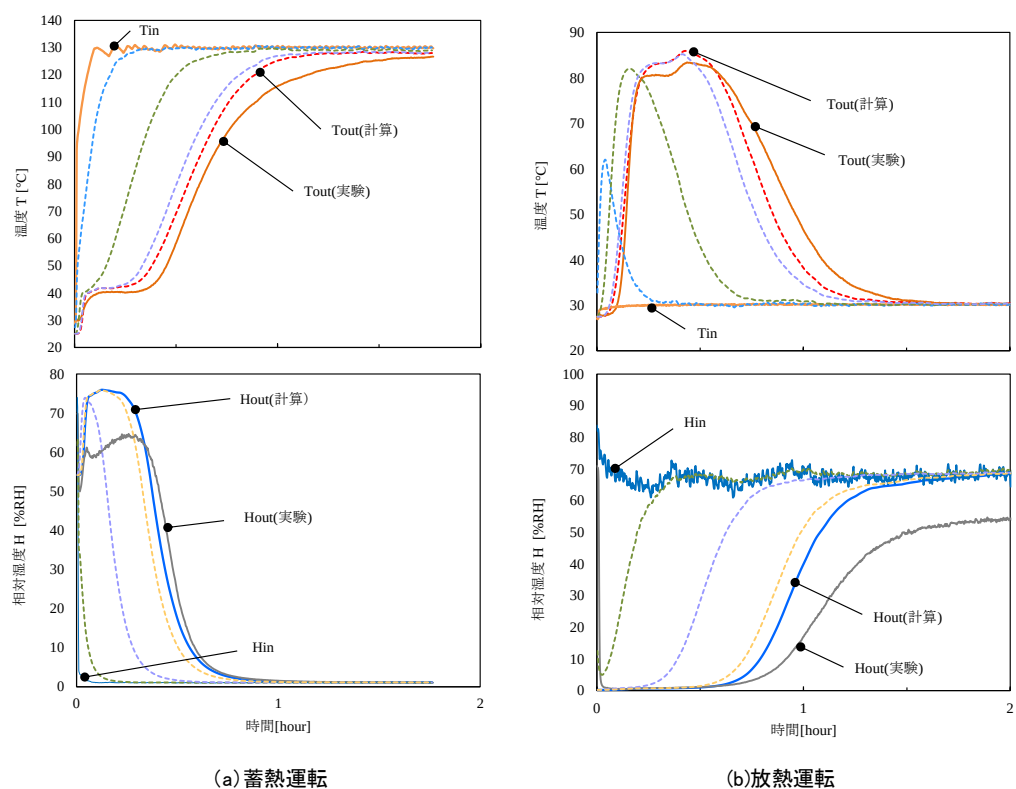


図5 ゼオライトでの放熱運転の温湿度の経時変化(実験と計算結果)

5. 設計・提案ツールと適用

簡便な設計・提案ツールを開発することを目的とし、前述の本数値解析モデルをエクセルベースで設計ツール化したので、その概要を説明する。

5.1 設計・提案ツール

エクセルベースの設計・提案ツールは、**図 6** のように主に入力画面と出力画面のシートで構成され、差分計算はエクセルの VBA (Visual Basic for Applications) でコード化した。入力画面において、蓄熱槽の形状や寸法、蓄熱材の種類、運転時間、初期条件を入力し、蓄熱槽の入口空気温湿度と流量（の時間変化）を与えることで、出口空気温湿度の時間変化などが計算できる。出力画面は、出口空気温湿度のプロットされた空気線図や、蓄熱槽の充填層内温湿度や出口空気温湿度の経時変化グラフなどが表示される。

この設計ツールでは**図 7** のように蓄熱温度域によってハスクレイとゼオライトの使い分けが可能であり、双方の吸着材でも計算できるように、それぞれの吸着等温線の多項式近似式が格納されている。

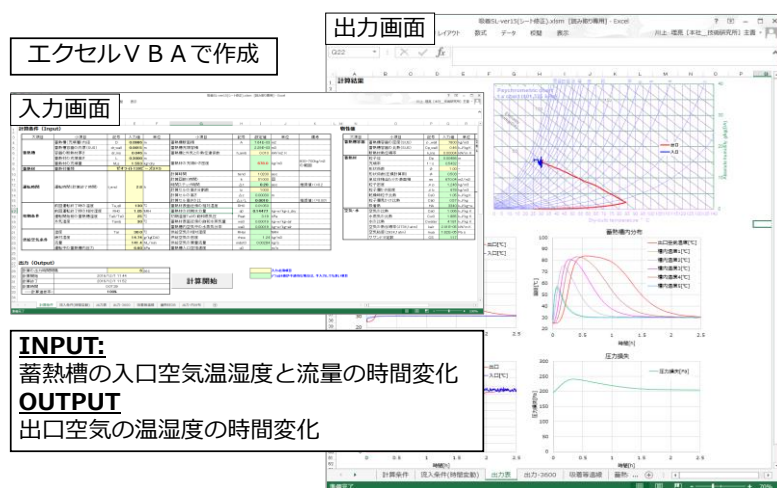


図 6 エクセル設計・提案ツール



図 7 ハスクレイとゼオライトの適用範囲

オープンサイクル形式の吸着材蓄熱システムは、ハスクレイなどの吸着材造粒体が充填された蓄熱槽、蓄熱・放熱設備、ダクトなどで構成され、その蓄熱・放熱設備はエアハンドリングユニットと同様にファンや熱交換器などにより構成される。蓄熱・放熱設備の仕様としては過大なファン動力にならないよう、蓄熱槽での通風の圧力損失 1 kPa 以下を目標にして、吸着材造粒体の粒径、流速、充填高さを決定される。また、蓄熱槽内での吸着材造粒体の固定方法とともに、吸着材造粒体自体の吸脱着性能を発揮させるための均一通風の風路設計により、小型および大型蓄熱槽を作製して、蓄熱密度 500 kJ/L 以上を放熱試験で確認されている。とくに、蓄熱密度 500 kJ/L 以上は経済的な蓄熱システムとしての実用化するために必要な目標値である。

昨今のコンピュータの性能向上により、通風方向に対する一次元モデルを採用している本設計ツールを、三次元モデルに拡張することも考えられる。しかし、上述のように、吸着材造粒体の粒径、流速、充填高さを決定するような蓄熱槽の基本設計が、物理的に通風方向の一次元性を担保するため、現在は三次元モデルへの拡張は考えていない。同様に、大規模な建築設備分野の温度成層型水蓄熱槽を対象にして、三次元モデルの CFD(Computational Fluid Dynamics)を活用した研究が関連学協会で発表されてきたが、水蓄熱槽内のディストリビュータの圧力損失による水の均一分配の基本設計が、水深方向に一次元性が保たれた温度分布と蓄熱槽効率を保証するのであり、設計ツールとして三次元 CFD の活用は必須ではないと考える。

5.2 オフライン熱輸送

本蓄熱システムは蓄熱と放熱の時間的なギャップ³³⁾を埋める定置型とともに、**図 8**に示すような排熱発生と熱需要の空間的なギャップ³³⁾も埋めるオフライン熱輸送も対象である。A 工場は排熱発生サイトであり、**図 8**の①のように工場の排熱で蓄熱材を乾燥（蓄熱）させる。A 工場での蓄熱完了後、アームロール搭載の運搬トラックによって、**図 8**の②のように乾燥した蓄熱材を熱の利用先まで運搬する。B 工場は熱需要サイトであり、**図 8**の③のように蓄熱材に水蒸気を吸着させて吸着熱を発生（熱利用）させる。B 工場での熱利用（放熱）完了後、同運搬トラックによって、**図 8**の④のように水蒸気を吸着した蓄熱材を排熱サイトまで運搬する。これらの①～④の工程を繰り返すことで、オフラインの熱輸送を実現できる。

前述の設計・提案ツールによって 1 回の蓄熱時間と放熱時間を定めることができ、各サイトでの蓄熱槽の接続時間、輸送距離、および輸送速度から、1 日の蓄放熱回数などの熱輸送システムを計画することができる。

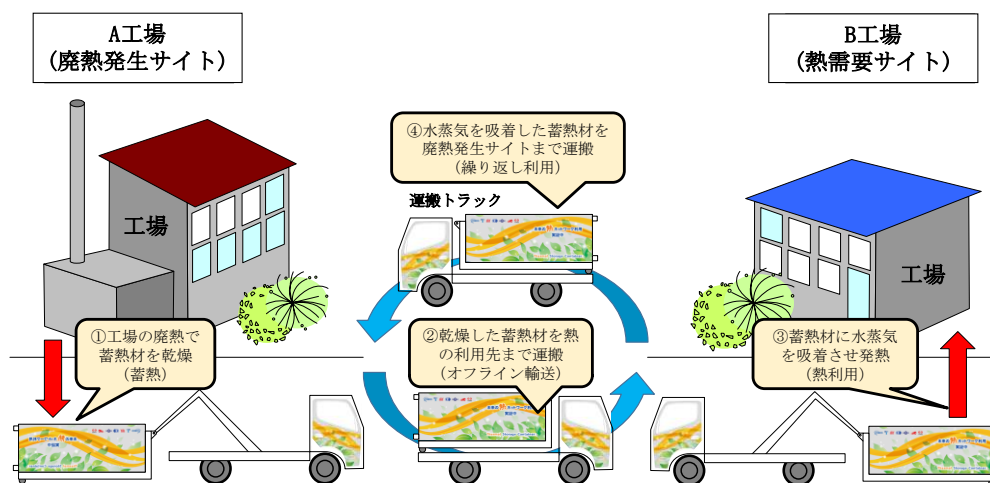


図 8 オフライン熱輸送システムにおける熱利用イメージ(工場間)

6. おわりに

ここでは、吸着材蓄熱システムの簡便な設計・提案ツールを開発することを目的とし、その蓄熱槽内の吸着材充填層の数値解析モデルの概要を説明した。本設計・提案ツールは吸着材蓄熱システムの放熱特性の工場現地での性能確認試験の結果と比較検証して²²⁾、石原産業の四日市工場での定置型の吸着材蓄熱システムや日野自動車の羽村工場や羽村市スイミングプールでのオフライン熱輸送型の吸着材蓄熱システム蓄放熱運転の実証データによっても検証してきた^{25,26)}。

吸着材蓄熱システムは工場やコージェネレーションなどで発生する未利用低温廃熱を、各種の乾燥工程や除湿・暖房の温水製造などの用途へ再生させることが可能である。排熱と熱需要の時間的なギャップを埋める定置型として展開が期待できるとともに、オフライン熱輸送システムとして地方自治体の汚泥・ごみ焼却場廃熱や工場廃熱などの広域熱利用システムの中核装置としての市場展開が期待できる。今後も本設計・提案ツールを活用して、本吸着材蓄熱システムの実導入に向けた、各種の熱マネジメント検討を実施していく予定である。

謝 辞

本成果の一部は、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業「80℃以上の低温廃熱を用いる革新的蓄熱材及びシステムの開発」と「低温廃熱利用を目的としたハスクレイ蓄熱材及び高密度蓄熱システムの開発」の結果得られたものである。関係各位に御礼申し上げます。

[注1] ハスクレイ (HAS-Clay) ;

安価な工業用原料から合成される、非晶質アルミニウムケイ酸塩 (HAS : Hydroxyl Aluminum Silicate) と低結晶性粘土 (Clay) からなる複合体の無機系吸放湿材である^{34,35)}。繰り返しの耐久性が高く、また相対湿度 40%RH 以上に於いて他の吸着材より吸着量が多いことが特長である。

[注2] 実用化開発 ;

2015年7月～2016年3月に、NEDO 戦略的省エネルギー技術革新プログラム／インキュベーション研究開発フェーズ「革新的蓄熱材を用いた大規模地域熱ネットワーク (メガストック) の開発」の助成事業を行った。NEDO からの助成先は高砂熱学工業(株)と大塚セラミックス(株)、共同研究先は(国研)産業技術総合研究所であった。引き続き、2016年4月～2018年3月に、NEDO 戦略的省エネルギー技術革新プログラム／実用化開発フェーズ「80℃以上の低温廃熱を用いる革新的蓄熱材及びシステムの開発」の助成事業を行った。NEDO からの助成先は高砂熱学工業(株)、森松工業(株)、石原産業(株)、大塚セラミックス(株)、共同研究先は日野自動車(株)と(国研)産業技術総合研究所であった。

[注3] 実証開発 ;

2018年7月～2020年2月に、NEDO 戦略的省エネルギー技術革新プログラム／実証開発フェーズ「低温廃熱利用を目的としたハスクレイ蓄熱材及び高密度蓄熱システムの開発」の助成事業を行った。NEDO からの助成先は高砂熱学工業(株)、石原産業(株)、東京電力エナジーパートナー(株)、共同研究先は日野自動車(株)、森松工業(株)、(国研)産業技術総合研究所であった。石原産業四日市工場で定置型蓄熱槽での産業プロセスに対する実証試験と日野自動車の羽村工場周辺でオフライン熱輸送型での実証試験を行った。

[注4] ハスクレイなどの造粒体充填層の圧力損失 ;

蓄熱槽の圧力損失 ΔP [kPa]は下記の(13)式の Ergun の式³⁶⁾に示すように、充填部の空隙率 ε 、吸着材の粒径 d_s と形状係数 Ψ 、通風の粘度 μ と流速 u から計算される。

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu u}{\varepsilon^3 \Psi^2 d_s^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon) \rho u^2}{\varepsilon^3 \Psi d_s} \dots\dots(13)$$

実際のハスクレイ吸着材は円筒形であるが、ここでは球形として体積相当粒径 d_s と Ψ を与えた。高さ L が約 300 mm の蓄熱材を充填した蓄熱槽での通風の圧力損失は極めて小さいため、前述の仮定 3) のように、空気の状態値に圧力依存性を考えない。

[注 5] 小型の試験装置^{2,9,15)}；

小型の性能試験装置の構成を図 9 に、装置の外観を図 10 に示す。本装置は給気部、調温/湿部、および蓄熱槽部で構成されている。蓄熱槽は直径 100 mm、高さ 500 mm、容積 4 l の円筒形である。図に示すように、この内部に吸着材の造粒物（相当径：約 5 mmφ）を充填高さ L が 300 mm で充填した。なお、主な構成機器の仕様を表 3 に、温湿度、温度、流量の各センサーの測定精度を表 4 まとめて示す。

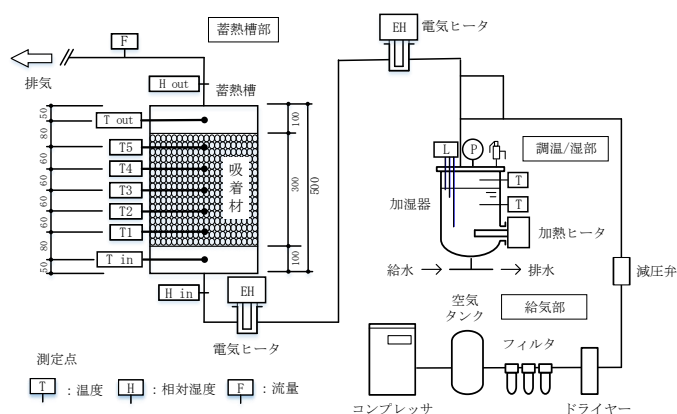


図 9 試験装置の構成¹⁵⁾

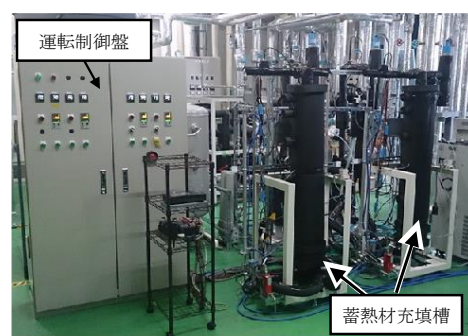


図 10 試験装置の外観^{2,9,15)}

表 3 主な構成機器^{2,9,15)}

機器名称	台数	仕様	備考
コンプレッサ	1	670 L/min, 0.8 MPa	空気は過供給
空気タンク	1	120 L, Max 1.4 MPa	
フィルタ	3	エアフィルタ×2, 活性炭	
電気ヒータ	6	1 kW, 0.2 kW	ねじ込み式
加湿器	2	外形: 200A × 414 mmH	1 台のみ図示
蓄熱槽	2	100φ × 500 mmH	1 台のみ図示

表 4 温湿度計, 温度計, 流量計の測定精度^{2,9,15)}

センサー		測定精度	温度範囲
温湿度計	温度	±0.1K	30℃～
		0.1+0.1/50×(温度－30℃)	30℃～
	湿度	±1.3 %RH	30℃～50℃
		±1.8 %RH	50℃～70℃
		±2.8 %RH	70℃～
温度計		±0.5K	-40℃～125℃
流量計		±3 %RD	-

文 献

- 1) 鈴木美穂, 大山孝政, 鎌田美志, 川上理亮, 谷野正幸, 松田聡, 鈴木正哉, 名和博之, 山内一正, 宮原英隆, 川村正行: 低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの実験による評価-第 1 報, 化学工学会第 49 回秋季大会, DA101, (2017. 9. 20).
- 2) 大山孝政, 鈴木美穂, 鎌田美志, 川上理亮, 谷野正幸, 松田聡, 鈴木善三, 鈴木正哉, 名和博之, 馬込英明, 宮原英隆: 低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの数値解析による評価-第 2 報, 化学工学会第 49 回秋季大会, DA102, (2017. 9. 20).
- 3) 鈴木正哉, 森本和也, 前田雅喜, 犬飼恵一, 宮原英隆, 平井恭正, 川村正行, 谷野正幸: 蓄熱材ハスクレイの性能評価, 化学工学会第 49 回秋季大会, EB114, (2017. 9. 20).
- 4) 松田聡, 鈴木善三, 名和博之, 井守正隆, 谷野正幸: 蓄熱材粒子充填層の振動試験, 化学工学会第 49 回秋季大会,

EB115, (2017. 9. 20).

- 5) 名和博之, 松田聡, 鈴木善三, 井守正隆, 川上理亮: 搬送時における蓄熱材粒子充填層内の対流現象, 第 23 回流動化・粒子プロセッシングポジウム/化学工学会, (2017. 12. 7-8).
- 6) 谷野正幸, 川上理亮, 鎌田美志, 大山孝政, 鈴木美穂・宮原英隆, 川村正行, 名和博之, 山内一正, 鈴木正哉, 松田聡, 永井恒輝: 100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システム, 高砂熱学工業技術研究所報, 31, 25-30(2017).
- 7) 大山孝政, 鈴木美穂, 鎌田美志, 川上理亮, 谷野正幸, 松田聡, 鈴木善三, 鈴木正哉, 名和博之, 馬込英明, 山内一正, 宮原英隆, 川村正行: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの研究ー吸着材蓄熱槽の数値解析モデルー, 高砂熱学工業技術研究所報, 31, 31-38(2017).
- 8) 川上理亮, 宮原英隆, 川村正行, 丸毛謙次, 山内一正, 鈴木正哉, 陶昇, 谷野正幸: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発ー第 1 報ーシステムの開発コンセプトと蓄熱材の検討, 平成 30 年度空気調和衛生工学会大会, (2018. 9. 12-14).
- 9) 鎌田美志, 川上理亮, 森本和也, 松田聡, 鈴木善三, 谷野正幸: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発ー第 2 報ー吸着材蓄熱槽の蓄放熱特性と数値解析モデル, 平成 30 年度空気調和衛生工学会大会, (2018. 9. 12-14).
- 10) 鈴木美穂, 大山孝政, 名和博之, 井守正隆, 馬込英明, 川上理亮, 井上正憲, 谷野正幸: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発ー第 3 報ー実際の工場・設備で蓄放熱特性の検証試験, 平成 30 年度空気調和衛生工学会大会, (2018. 9. 12-14).
- 11) 名和博之, 川上理亮, 宮原英隆, 川村正行, 山内一正, 鈴木正哉, 松田聡, 100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの開発, 第回潜熱工学シンポジウム, 潜熱工学研究会, (2018. 12. 3-4).
- 12) 鈴木美穂, 川上理亮, 鎌田美志, 谷野正幸, 大山孝政, 宮原英隆, 名和博之, 川村正行, 山内一正, 鈴木正哉, 松田聡: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発ー工場の実設備における蓄放熱特性の検証試験ー, 高砂熱学工業総合研究所報, 32, 15-24(2018).
- 13) 松田聡, 鈴木善三, 鈴木美穂, 鎌田美志, 川上理亮, 谷野正幸, 名和博之: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発ー吸脱着の過渡特性, 化学工学会 第 84 年会, F302, (2019).
- 14) 川上理亮, 鎌田美志, 鈴木美穂, 中田拓司, 谷野正幸, 大山孝政, 宮原英隆, 山内一正, 名和博之, 松永克也, 鈴木正哉, 松田聡: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発ー一定置型とオフライン熱輸送型の実証試験での設備概要ー, 高砂熱学工業総合研究所報, 33, 41-50(2019).
- 15) 鎌田美志, 川上理亮, 大山孝政, 松田聡, 鈴木正哉, 丸毛謙次, 山内一正, 宮原英隆, 松永克也, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発ー第 1 報小型装置の実験結果と吸着材蓄熱槽の計算モデルー, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 281(2020. 8).
- 16) 川上理亮, 鈴木美穂, 宮原英隆, 鈴木正哉, 谷野正幸: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発 (第 4 報) 産業プロセスに対する定置型蓄熱槽の蓄放熱特性の実証試験, 2020 年度空気調和衛生工学会大会, (2020. 9. 9-30(オンライン)).
- 17) 鎌田美志, 中田拓司, 松永克也, 名和博之, 山内一正, 松田聡, 谷野正幸: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発 (第 5 報) トレーラー型蓄熱槽によるオフライン蓄放熱特性の実証試験, 2020 年度空気調和衛生工学会大会, (2020. 9. 9-30(オンライン)).
- 18) 鎌田美志, 中田拓司, 川上理亮, 谷野正幸, 丸毛謙次, 名和博之, 宮原英隆, 松永克也, 山内一正, 松田聡: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発ーコンテナ型蓄熱槽によるオフライン熱輸送の実証試験, 化学工学会第 51 回秋季大会, J116, (2020. 9. 24(オンライン)).
- 19) 丸毛謙次, 名和博之, 谷野正幸, 鎌田美志, 宮原英隆, 松永克也, 井守正隆, 松田聡: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発ーコンテナ型蓄熱槽の槽内熱挙動の検証, 化学工学会第 51 回秋季大会, J117, (2020. 9. 24(オンライン)).
- 20) 川上理亮, 鎌田美志, 鈴木美穂, 中田拓司, 大山孝政, 谷野正幸, 宮原英隆, 山内一正, 名和博之, 佐藤敦史, 鈴木正哉, 松田聡: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発ー一定置型とオフライン熱輸送型の実証試験ー, 高砂熱学イノベーションセンター報, 34, 95-105(2020).

- 21) 宮原英隆, 鈴木正哉, 松田聡, 森本和也, 万福和子, 川上理亮, 名和博之, 山内一正, 松永克也, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発ー第 2 報低温再生型蓄熱材における水蒸気吸着自の発熱量についてー, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 285 (2020. 12).
- 22) 川上理亮, 鈴木美穂, 鎌田美志, 山内一正, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発ー第 3 報吸着材蓄熱槽の実際の工場での性能評価ー, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 290 (2021. 5).
- 23) 中田拓司, 鎌田美志, 川上理亮, 谷野正幸, 宮原英隆, 佐藤敦史, 名和博之, 井守正隆, 山内一正, 松田聡, 鈴木雅哉: 100℃程度の低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発, コンテナ型蓄熱槽によるオフライン熱輸送の実証試験, 第 31 回環境工学総合シンポジウム 2021, 日本機械学会, 423 (2021. 7. 8-7. 9).
- 24) 鎌田美志, 川上理亮, 佐藤雄, 山内一正, 名和博之, 松田聡, 佐藤陽一, 谷野正幸: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発 (第 6 報) 塗装工程の空調機での除湿利用, 2021 年度空気調和衛生工学会大会, (2021. 9. 15-17 (オンライン)).
- 25) 川上理亮, 鎌田美志, 宮原英隆, 平井恭正, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 山内一正, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発ー第 4 報定置型蓄熱システムの実証試験ー, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 297 (2021. 12).
- 26) 鎌田美志, 川上理亮, 山内一正, 井守正隆, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発ー第 5 報オフライン熱輸送システムの実証試験ー, 空気調和・衛生工学会論文集, 投稿中.
- 27) 小竹進, 土方邦夫: 「パソコンで解く熱と流れ」, pp. 1-20, 丸善, (1988. 9. 5) .
- 28) 森康夫, 土方邦夫: 「流れと熱の工学 I, II」, 共立出版, (1976. 6. 1) .
- 29) 改訂六版化学工学便覧, 化学工学会, 丸善, pp. 376, 平成 11 年 2 月 25 日.
- 30) 宮内照勝: 希釈充填層における粒子・流体間境界膜物質移動係数, 化学工学, 36, 633 (1961).
- 31) 近藤精一, 石川達雄, 安部郁夫: 第 2 版「吸着の科学」, 丸善出版, (2001. 2. 25) .
- 32) 小野嘉夫, 鈴木勲: 「吸着の科学と応用」, pp. 19-38, 講談社, (2003. 11. 1) .
- 33) 鈴木洋: 「潜熱蓄熱・化学蓄熱・潜熱輸送の最前線, ー未利用熱利用に向けたサーマルギャップソリューションー」, シーエムシー出版, (2016).
- 34) 産総研 HP, http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr_2008/pr20081008_2/pr20081008_2.html.
- 35) 鈴木正哉, 前田雅喜, 犬飼恵一: 高性能吸着剤ハスクレイ®の開発, 学術誌「Synthesiology」, 産総研, Vol. 9 No. 3, pp. 154-164 (2016. 8) .
- 36) 改訂五版化学工学便覧, 化学工学協会, 丸善, pp. 242, 昭和 63 年 3 月 18 日.

ABSTRACT

We developed an open-cycle type adsorbent thermal storage system that can utilize low-temperature waste heat. We investigated experimentally the charging and discharging characteristics of the packed bed of adsorbent in a thermal storage tank. We also conducted demonstration tests of a stationary heat storage system and an off-line heat transport system. Furthermore, the results of the charging and discharging operation in the small-sized test equipment were used to develop a calculation model for an adsorption thermal storage tank, and the design tool was completed based on verification of data from the charging and discharging operation at the demonstration facilities. In this paper, the numerical analysis model, adsorption isotherms and heat of adsorption for various adsorbents, calculation examples of the numerical analysis model, and design tools are described. We hope to contribute to the reduction of carbon dioxide emissions, which is an urgent issue, by promoting the use of waste and unused heat through thermal management using these design tools for adsorption thermal storage systems.

【レビュー】

サーマルマイニングによる月面水採取 (第一報) レゴリス内の伝熱解析と水採取方法の検討

内田 浩基・川上 理亮・松風 成美^{*1}・森田 健^{*1}

Thermal Mining of Water on Lunar Regolith Part 1 - Thermal Analysis of Regolith and Examination of Lunar Water Mining Method

Hiroki Uchida・Yoshiaki Kawakami・Narumi Matsukaze・Ken Morita

近い将来、人類は月近傍や月面に生存圏を拡大し、月と地球が一体となった新たな経済システムが実現すると予想される。当社は、株式会社 ispace とコーポレートパートナー契約を結び、民間月面探査プログラム「HAKUTO-R」にて、月面着陸船に搭載した水電解装置により世界で初めて月面環境下で水から水素と酸素を作り出すことを目指している。近年の観測によれば月面の土砂（Regolith、以下レゴリス）中には水が存在することが明らかになっており、将来は、月面での水電解には月のレゴリスから採取した水を使用する予定である。そこで当社はレゴリスから水を直接採取する「サーマルマイニング」技術の新規開発に取り組んでいる。

月面レゴリスからの水採取の実現に至るまでには、月面上で水（氷）の存在が有望視される地域での地質学的調査や水氷の正確な位置、含有量、範囲などを確定するための分析など、いくつかのステップが必要になると考えられる。本報では、これらのステップを経た後、月の水資源を実際に採取することを考えながら、水氷の状態を予想するとともに、世の中で検討されている月面水資源の採取方法について考察した。また水資源の採掘に多くの重機を必要とせず、レゴリスをその場で加熱して水採取できるサーマルマイニング技術に注目し、当社独自の新しい手法を考案した。更に、月の真空レゴリス内の熱伝導や対流熱伝達、凝縮・凝固潜熱を加味した伝熱計算を行い、レゴリスを効率よく加熱する方法について検討したので報告する。

1. はじめに

有史以来、人類は新たなフロンティアを開拓することで、生存圏や経済圏を拡大してきた。近い将来、人類は月近傍や月面にも生存圏を拡大し、月と地球が一体となった新たな経済システムが実現すると予想される。世界各国の政府や先駆的な民間企業はこの機運をすでに捉えはじめている。我が国では、米国が推進するアルテミス計画¹⁾（図 1）への参画を決定し、欧州やカナダなどと共に月面開発の基本設計を開始した。またアルテミス計画に参画しない国々でも独自に月面探査計画を立ち上げるなど開発・検討が進められている²⁾。

当社が宇宙関連の技術開発を行う目的は、①宇宙事業開発のパートナーシップの強化、②宇宙事業開発の成果を応用した地上向けビジネスの展開、③当社本業の成長に向けた知見獲得などである³⁾。宇宙産業に無縁である当社が宇宙関連の技術開発をはじめるとは業界に精通したパートナーが必要であった⁴⁾。そこで宇宙産業に精通し世界的に知名度が高いスタートアップ企業である株式会社 ispace（アイスペース）を協業先として選定しコーポレートパートナー契約を締結した³⁾。ispace 社への出資を通じて事業パートナー関係を構築するとともに、同社と繋がる海外の宇宙開発機関や企業と連携し、宇宙関連の事業創出機会を獲得していく計画である。ispace 社は HAKUTO-R⁵⁾

^{*1} 本社 経営企画部

と呼ばれる日本初の民間月面探査プログラムを推進しており、独自の月着陸船「ランダー」と月面探査車「ローバー」を開発し 2022 年の月面着陸（Mission 1）と 2023 年の月面探査（Mission 2）を目指している。我々は HAKUTO-R プログラムの Mission 2 にて、当社が開発する月面環境下での作動信頼性を高めた水電解装置により月面で世界初となる水素と酸素の生成を目指す。

HAKUTO-R プログラムでランダーに搭載する水電解装置は、水から酸素と水素を生成する装置である。将来、月面で水電解により生成した水素はロケットの推進燃料として使用でき、酸素は空気がない月面で人間が生存する上で欠かせない元素である。月面水電解において電気エネルギーと水は必須であり、このうち電気エネルギーに関しては、月面の太陽光が当たる場所にソーラーパネルを設置して発電することや将来的には月面での原子力発電が考えられている⁷⁾。一方の水に関しては、近年の月軌道衛星や地上レーダーからの観察により月面には水が存在することが明らかになっており、月面のレゴリスから直接採取できると考えられている。月面レゴリスから水資源を採取する方法として、地上と同様に重機を使って機械的に採掘する技術⁸⁾や太陽光により月面レゴリスを直接加熱して水を取り出す「サーマルマイニング」技術が考えられている⁹⁾。

これらの取り組みに関連し、当社は政学産連携のワーキンググループ「月面産業ビジョン協議会」のメンバーとして 2021 年 7 月に月面ビジネスのエコシステム構築に向けた「月面産業ビジョン ～Planet 6.0 時代に向けて～」を共同で取りまとめ日本政府に提出した¹⁰⁾。また新たなチャレンジとして、月面に存在する水資源を当社の熱マネジメント技術を応用して採取する「サーマルマイニング」技術の開発、および採取した水資源をエネルギー利用するための「月面エコシステム」の構築に向けた検討を開始している⁹⁾。

本報告では、近い将来に月面の水資源を実際に採取することを目的として、想定される月面の水の状態を予想するとともに、現在世の中で検討されている月面水資源の採取方法について考察した。また水資源の採掘に多くの重機を必要とせず、レゴリスをその場で加熱して水採取を行うサーマルマイニング技術に注目し、当社独自の新しい手法を考案した。更に、月面の真空レゴリス内の熱伝導や対流熱伝達、凝縮・凝固潜熱を加味した伝熱計算を行い、サーマルマイニングによる月面水採取においてレゴリスを効率よく加熱できる方法について検討した。

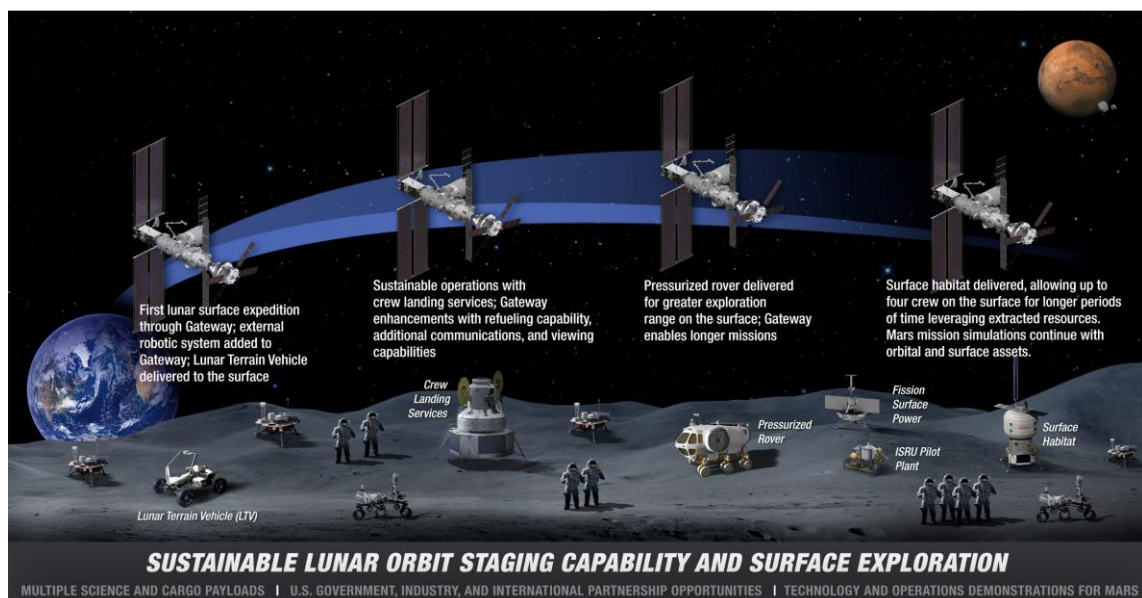


図 1 米国アルテミス計画(拠点活動要素)¹⁾

2. 月面水資源の存在の可能性について

2.1 アポロ計画で持ち帰った月面サンプル¹⁰⁾

1961～1972 年にかけて行われた米国アポロ計画において、アポロ 11 号, 12 号, 14～17 号の計六回で、合計 381.7 kg のサンプルが持ち帰られた（表 1）。また月の表面に露出しているサンプルだけでなく、アポロ 15～17 号では筒状ドリルにより月表面から 2.21～2.92 m の深さの位置のサンプルも持ち帰られた。サンプルを取得した緯度は 0～26° と赤道付近であり、極地に近い緯度のサンプルは持ち帰られなかった（図 2）。

これらの米国アポロ計画で、地上に持ち帰られた月面サンプルからは明確な水の痕跡は見つからなかった。サンプル中から検出されたわずかな水の痕跡は地球上で汚染された結果だと結論付けられた。このため、一般には月の表面の大部分は完全に乾燥していると考えられた¹¹⁾。

表 1 米国アポロ計画で持ち帰られた月面サンプル¹⁰⁾

	Apollo 11	Apollo 12	Apollo 14	Apollo 15	Apollo 16	Apollo 17	Total
サンプル数	58	69	227	370	731	741	2196
サンプル重さ	21.6 kg	34.3 kg	42.3 kg	77.3 kg	95.7 kg	110.5 kg	381.7 kg
採取地名	静かの海 (Mare Tranquillitatis)	嵐の大洋 (Oceanus Procellarum)	フラ・マウロ・ク レーター (Fra Mauro)	ハドリー・アペニン (Hadley–Apennine)	デカルト高地 (Descartes Highlands)	タウルス・リットロ ウ (Taurus Littrow)	---
緯度	0.67408°N	3.01239°S	3.42°S	26.1322°N	8.97301°S	20.1908°N	---
月面地表か らの最大深さ	---	---	---	237 cm	221 cm	292 cm	---

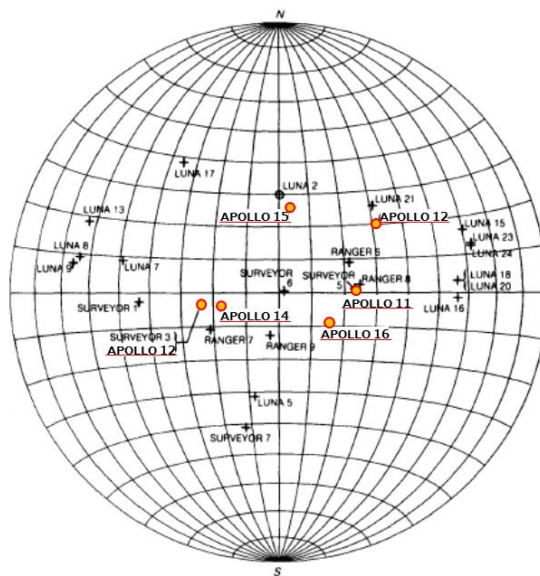


図 2 米国アポロ計画で持ち帰られた月面サンプル採取場所¹⁰⁾

2.2 月周回軌道からの月面レゴリスの分析^{12), 13)}

1972 年までの米国アポロ計画では、月面における水の存在は確認されなかったが、近年になって月軌道周回衛星や月面探査機などにより、極地付近の永久影（永続的に太陽光が当たらない日陰の領域）に水が存在する可能性が高い証拠が見つかった。インド宇宙研究機関（ISRO : Indian Space Research Organisation）の「チャンドラヤーン 1 号」ミッションにおいては、NASA の月面鉱物マッピング装置（Moon Mineralogy Mapper: M(3)）を用いて、高い山やクレーター壁面で乱反射し永久影に到達する太陽光の近赤外線を検出した三色合成により、世界ではじめて地球に面する月の側面全体に各種物質のマッピングが行われ、さまざまな場所で少量の水とヒドロキシル分子（図 3 の青色）を検出した¹²⁾。また M(3) で水氷が検出された領域について、米国の月周回無人衛星 LRO（Lunar Reconnaissance Orbiter）に

搭載された LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter) による月表面の反射率測定、DLRE (Diviner Lunar Radiometer Experiment) による年間の月地表最高温度分布、および LAMP (Lyman-Alpha Mapping Project) による紫外線検出マッピングなどの結果が比較・分析され、水氷が存在する可能性が高い位置 (緑シアン色の部分) の分布図 (図 4) が作成された^{13,14)}。

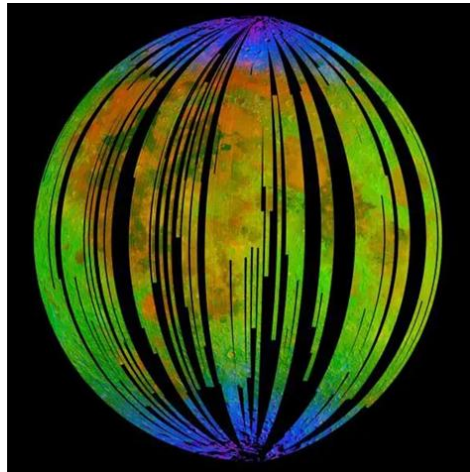


図 3 インド「チャンドラヤーン 1 号」ミッションにおける月側面の鉱物マッピング¹²⁾

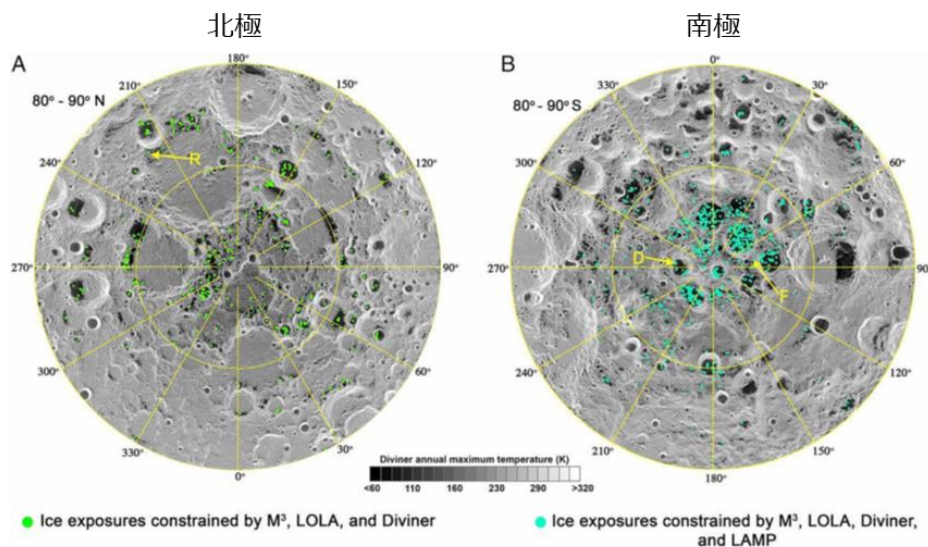


図 4 米国「LRO」搭載機器の測定結果による月極地付近の水氷分布¹³⁾

2.3 航空機からの月面分析結果¹⁵⁾

NASA の成層圏赤外線天文機 (SOFIA) は、永久影以外の太陽があたる月の表面で水を初めて確認した。水が月面全体に分布している可能性があり、低温の永久影に限定されないことを示した。今回の観測では、一立方メートルの月面レゴリスに 100～412ppm の濃度の水 (350mL ボトルの飲料水相当) が存在している可能性があることがわかった。

過去の米国「LRO」やインド「チャンドラヤーン 1 号」の分析結果では、月面の水素 (H) は、水 (H_2O) の状態で存在するか、水酸化物 (OH) の状態で存在するか、いずれかであるが判別が困難であった。今回、SOFIA の調査結果から、一地域 (クラビウスクレーター) のレゴリスではあるが、月面の水素が水の状態であるとの分析結果から、

極地の水素も水 H_2O の状態で存在する可能性が高まったと考えられる。

月面レゴリス内の水氷の存在の形態に関しては、① 微小隕石衝突時の高熱によって水がレゴリス内に閉じ込められているカプセル状態、② レゴリス粒子間の空隙に挟まれ太陽光が届かず低温に保たれ昇華していない状態の二通りが考えられている¹⁵⁾。アポロの調査結果では、北緯 20° の月面下 2.9 m の深さのレゴリスを持ち帰っているが、水の痕跡がほとんど見られなかった。もし、水氷がレゴリス内にカプセル状態で閉じ込められているのであれば、アポロ計画で地中から持ち帰ったサンプルに関しても、レゴリス内にカプセル状態で閉じ込められた水氷の痕跡は残ると考えられる。アポロ計画でのサンプル取得方法はオーガードリル（筒状ドリル）でサンプルを収集する方法であり、ドリルの回転により多くの摩擦熱が発生したと記載されている¹⁰⁾。レゴリス表面に水氷が付着している状態の場合はオーガードリルの摩擦熱により水氷は昇華するため、サンプルから水氷の痕跡を見つけるのは難しいのではと考えられる。

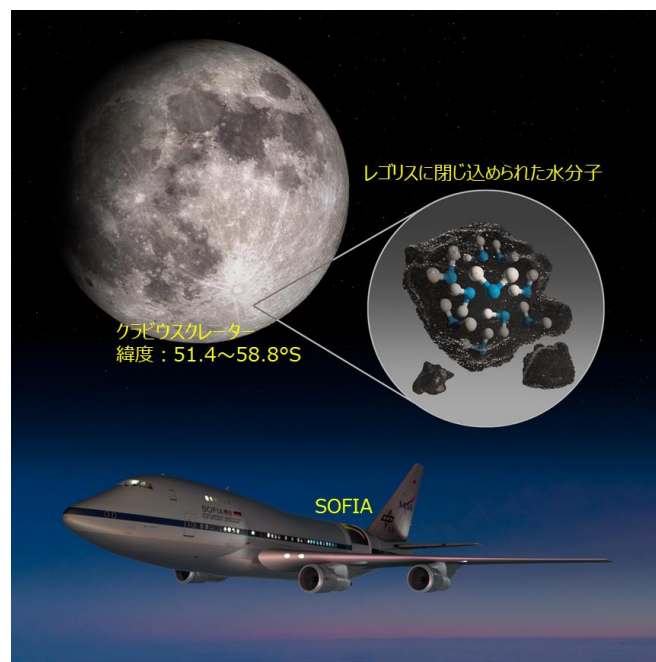


図5 成層圏を飛行する航空機に搭載された赤外線天文台「SOFIA」による月面観測¹⁵⁾

2.4 月面の水資源の状態について

月面において、多量の水が存在すると考えられている主な領域は、月の北極や南極にあるクレーター内など、永続的に太陽光が当たらない日陰の領域であり、永久影、または PSR (Permanently Shadowed Regions) と呼ばれている。永久影内は、月面の年間の最高温度が 110 K 未満と非常に低い温度に保たれており、かつ大気が存在しない真空状態 ($10^{-7}\sim 10^{-10}\text{ Pa}$) である。月面の水は真空下の氷の状態が存在しており、飽和水蒸気圧がほぼゼロの昇華温度以下の氷の状態と考えられる。アポロ計画で水（氷）の痕跡が見つからなかった原因の一つとして、月面レゴリスのサンプル採取が永久影内で行われなかったためと考えられる。

水が存在する場合の月面レゴリスは氷とソイル (Soil) が混じり合った状態と考えられるが、ソイルに氷が付着しているか、ソイルの中に氷がカプセル状に取り込まれているか、或いはソイルと氷の粒が入り混じった状態であるかは明らかになっていない¹⁵⁾。レゴリス中の水氷の存在量に関しては、月面に水は存在する可能性はない、又はあっても数%程度¹⁶⁻¹⁸⁾といった観測結果の分析から $5\sim 10\text{ wt\%}$ ^{19, 20)}、或いは $20\sim 30\text{ wt\%}$ ^{21, 22)}の水氷が存在する証拠について考察した文献もあり様々である。直近の報告²²⁾では、スペクトルデータの詳細な分析結果から走査範囲の一部において約 $30\text{ wt\%}$ の水を含む可能性が示されたように、比較的豊富な量の水氷が存在するという議論が多いように見受けられる。しかし、これらの水資源が存在する（或いは存在しないとする）証拠はいずれも月軌道衛星や地上からの遠隔

的な観測であり、月面において直接的な現地調査は行われていない。未だ月面上で水が存在する位置や存在量、範囲や堆積物の分布、形態、組成などの詳細は十分に明らかになっておらず、月面水採取に至る次のステップとしては、水の存在が有望視される地域での地質学的調査と考えられる。

3. 月面の水採取方法

月面の水採取は、前章の月面における地質学的調査が行われ水が確実に存在する地域が判明したのち行われると考えられる。当社独自の伝熱技術や熱エネルギー利用技術を活用した月面水採取も水の存在が確実視される地域において可能となる。月面水資源の採掘方法として、地上と同様に、月面レゴリスを機械採掘・運搬した後、プラントで水を抽出する方法が考えられている（図6）⁸⁾。この場合、極低温、真空、低重力で作動する重機やプラントが必要となる。月面は重力が地上の1/6と小さいため、機械採掘時に微細なガラス状レゴリスが中空にとどまりやすく、重機の作動部に粉塵が入り込み、動作不良を引き起こす問題なども考えられ、解決すべき課題が多い。またこれらの機械採掘用の重機は地上から大型ロケットにより月面に持ち込む必要があるため、長期的に採掘システムの構築や展開を行っていく必要があり、メンテナンスにかかるコストが大きい。

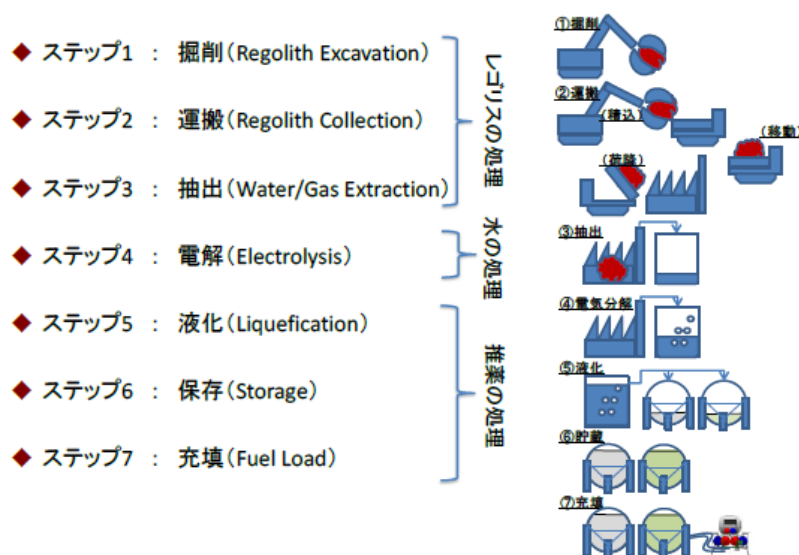


図6 月面の水利用プロセス(JAXA)⁸⁾

月面レゴリスを機械的に掘り返すなどの採掘を行わず、レゴリスに直接熱を加えて水採取を行う「サーマルマイニング」は、採掘システム全体の簡略化、軽量化が可能であり、多くの重機を稼働させる必要がないため、コスト低減や信頼性、保守性を向上できる可能性が高い⁹⁾。

「サーマルマイニング」の考え方による月面水採取方法の検討は、コロラド鉱山大学(米国)⁹⁾が行っている(図7)。この方法は、月面に直接太陽光を照射し、太陽光の熱により月面を加熱する方法であり、図7の装置例では浅く入射する太陽光を反射ミラーで向きを変えて月面レゴリス上に直接照射している。月の極地付近の大きなクレーター内の永久影は更に太陽光が届きにくいいため、クレーター外縁部にも反射ミラーを設けて水採取を行う位置に太陽光を送り届ける必要がある。太陽光で加熱する月面はドーム状のテントで覆うことで、レゴリス中の氷が昇華して発生した水蒸気が真空中に放散しないようにする。太陽光の加熱によりレゴリスから発生しテント内を満たした水蒸気は、テント側面に設置したコールドトラップで収集される仕組みである。この方法により月面の広い面積のレゴリスの中から水資源を採取できれば、図6のように多くの採掘用重機を用いることがないためより低コストな月面水資源の採取が可能となる。

一方、この方法の問題点として、月の地表表面から深い位置に存在する水を採取できないことが挙げられる。月面レゴリス表面に太陽光の熱を照射した場合、最表面から昇温し表面レゴリスにある氷が昇華するため、最表面のレゴリスから乾燥していくと考えられる。月表面の乾燥したレゴリスの熱伝導率は $7 \times 10^{-3} \text{ W/m/K}$ ²³⁾ と非常に小さくほとんど断熱である。このため一旦レゴリスの表面が乾くと太陽光により表面を加熱してもレゴリスの深さ方向に熱がほとんど伝わらず、深い位置にある氷を加熱して水を採取することができない。

図8にコロラド鉱山大学において行われた模擬の月面レゴリスを加熱して、水蒸気を採取する実験の様子を示す。この実験は月面同様の真空状態に保たれたチャンバー内で行われ、氷と混合した模擬レゴリスは液体窒素により 100 K (-173℃) 以下に冷却されている。太陽光を模したハロゲンランプで氷を混合した模擬レゴリスの表面を 20 時間加熱した結果、表面から 1~1.5 cm の厚さのレゴリスは氷が昇華し乾燥したが、それよりも深い位置の氷は昇華せず水の採取はできていない⁹⁾。

月面レゴリスに氷として存在する水資源はレゴリスの最表面だけに存在するのではなく、隕石衝突により月表面が掘り返されていることから地表面から深い部分にも存在する可能性も考えられている。同一の地表面積からより多くの水資源を採取するためには、レゴリスの深い位置に氷として存在する水資源を何らかの方法で加熱して効率よく採取していく必要があると考えられる。

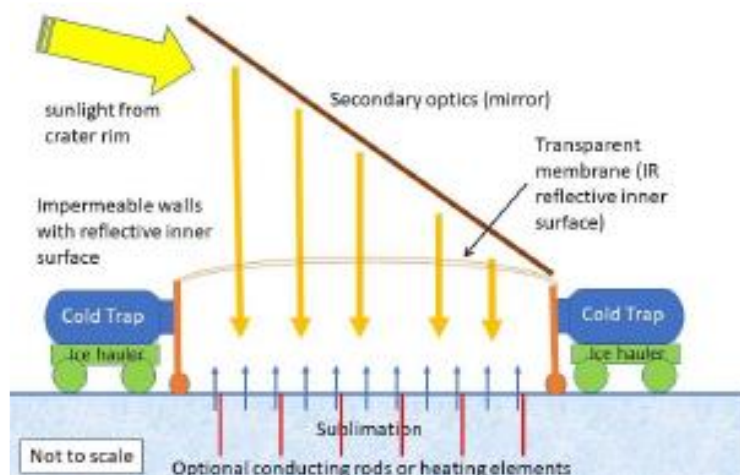


図7 コロラド鉱山大学の「サーマルマイニング」⁹⁾



図8 模擬月面レゴリスの加熱・水採取実験(コロラド鉱山大学)⁹⁾

4. 新規サーマルマイニング方法の提案

4.1 レゴリス内のソイルの加熱方法

サーマルマイニングによる月面水採取においては、水氷が含まれるレゴリスを平面方向、及び深さ方向に広い範囲を効率よく加熱する必要がある。しかし、レゴリス内のソイル間は真空であることから、レゴリス内の伝熱はソイル固体内の熱伝導とソイル間の接触のみのため、月面レゴリスの熱伝導率は $7 \times 10^{-3} \text{ W/m/K}$ （表層から深い位置、水氷を含まない状態）²³⁾と空気の熱伝導率 $26.2 \times 10^{-3} \text{ W/m/K}$ （@300 K, 0.1 MPa）²⁴⁾の 1/4 程度とほぼ断熱である。このため、広い範囲の月面レゴリスを熱伝導だけで加熱することは難しいと考えられる。そこで月面レゴリスを効率よく加熱する方法として、レゴリス内に水蒸気や窒素、或いは月面で水電解により調達可能な水素や酸素などのガスを注入して循環させ、対流熱伝達や水蒸気の凝縮・凝固の潜熱により加熱する方法を考えた。月面レゴリスは、乾燥レゴリスのかさ密度^{23, 25)}とソイルの比重¹⁰⁾から空隙率が 0.4 程度の多孔質体と考えられるため、ソイル間の空隙に気体を流通させることができると予想している。しかし、月面レゴリスの内部においてもソイル以外の空隙は真空であるから、気体を注入しても拡散・消失すると予測される。レゴリス内部に気体を流通・循環させるためには、気体を閉じ込める“容器”をレゴリス内に形成する必要がある。レゴリス内に気体を閉じ込める容器として、以下のような方法で氷の壁をレゴリス内に作製することを考えている。

4.2 氷の壁の作製方法

図 9 に月面レゴリス内部に氷の壁を作成する方法を示す。レゴリス地表面からある程度深い位置までドリルで穴を開け、例えば電気ヒーターを穴の中のレゴリス壁面に押し付け熱伝導により加熱する。ヒーターに接触する部分を起点にして狭い範囲のレゴリス中の氷は加熱され昇華し水蒸気になると考えられる。発生した水蒸気は、飽和水蒸気圧が低い低温側、すなわちヒーターから離れる方向に向かって移動するはずである。ヒーターから離れた位置のレゴリスは温度が低いため、水蒸気は低温のソイル表面に接触し、ソイル間の空隙内で再び凝縮・凝固すると考えられる。この予想と同じ現象はコロラド鉱山大学の実験でみられた⁹⁾。この実験結果によれば、赤外線により加熱されるレゴリス表面から 1~1.5 cm の範囲の氷は昇華して乾燥した層が現れる。この乾燥層の下は氷レンズ（ice lense）と呼ばれる初期の氷含有率よりも高い氷リッチな層であり、乾燥層の水蒸気が移動して凝縮・凝固したと考えられる。コロラド鉱山大学の実験と同様に、レゴリス内部を電気ヒーターを接触させて加熱することで、電気ヒータ表面から少し離れた位置に氷リッチな層が作成できると考えている。更に、この層の内側を水蒸気の供給による凝縮・凝固や対流熱伝達により加熱することで氷リッチな層の気密性を高め、内部に気体を留め置くことが可能な氷の壁を作製できると予想している。

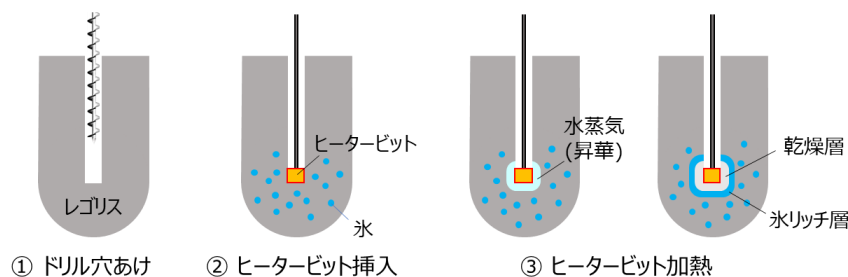


図 9 月面レゴリス内部の氷壁形成方法の例

4.3 新規サーマルマイニング装置の概要

月面レゴリス内部の水採取を行う新規サーマルマイニング装置の概要を図 10 に示す。前節の方法で形成したレゴリス内の氷壁の中心部に乾燥気体を送り込む注入ノズルと高湿気体を還流させる抽出ノズルを差し込んで使用する。

月面レゴリス内に氷の壁に囲まれた空間（球ではないかもしれないが、ここでは氷球と呼ぶ）が形成できれば、氷球内部を氷球外部の真空低温の空間から切り離して水採取が容易にできるのではと予想している。氷球内部のソイル間の空隙を（ソイルに対して反応しにくい）不活性な気体で満たすことで、熱伝導のみの熱拡散によらず、対流熱伝達による熱拡散が可能となり、より広範囲のレゴリスを容易に加熱できると考えている。熱を拡散する媒体としては、水蒸気や窒素、或いは月面水電解で容易に入手可能な水素や酸素などの気体を考えているが、いずれのガスも低圧力・低密度の場合は希薄気体であり、熱輸送の効率が低下するため、できるだけ高圧・高密度である気体を熱媒体としたい。ソイルの平均粒径 $D_p = 30 \text{ mm}$ である粒子充填層の多孔質体を飽和水蒸気が通過する場合、 263 K (-10°C) 以上の飽和蒸気圧であればクヌーセン数は $1/1000$ 以下であり、連続体として熱輸送が可能であると考えられる²⁶⁾。 263 K における飽和水蒸気圧は 290 Pa であり、真空の氷球の外部と内部を隔てる氷壁はこの内圧によっても壊れない必要がある。氷のみの強度から考えて 290 Pa の飽和水蒸気圧に耐える氷壁の厚さは数 mm 程度が必要と考えている。

レゴリス内に安定した氷壁が形成できた後、氷球内部の水採取を行う場合、氷球内に水蒸気ではなく乾燥気体（窒素ガスや水電解で生成できる酸素や水素を想定）を循環させることを考えている。図 10 の気体加熱器で乾燥気体を加熱して飽和水蒸気量を高めた後、注入ノズルを介してレゴリス内の氷球内部に送り込む。乾燥気体は氷球内部を循環し、氷球の内部の水蒸気を吸湿すると考えられる。この吸湿した高湿度の気体を抽出ノズルを介して水分凝縮器に取り込む。水分凝縮器の内部で低温コンデンサにより気体中の水分が除湿されることで、レゴリス内の水を装置内に取り込む仕組みである。

上述のように氷球内部のレゴリスから十分に水を取り込み内部レゴリスが乾燥した時点で、氷球を大きくしてレゴリス内で水採取可能な範囲を拡大するよう制御する。この方法としては、氷球内の水蒸気を飽和状態とし加熱した気体を循環する（凝縮器を冷却せず水分を取り込まない）ことで氷球の内側を加熱する。氷球の内側から熱伝導によりは氷球の最外表面が昇温する。氷球の最外表面の温度が昇華温度を越えた時点で、最外表面の氷は水蒸気となり外側に向かって移動、レゴリス細孔内で再凝縮し、結果氷球サイズの拡大が可能と考えている（初期の氷壁形成と同様のメカニズム）。このように氷球内側の水分取り込みと氷球サイズの拡大を繰り返すことで月面下の広い範囲のレゴリスの水分を採取可能と考えている。この方法で月面レゴリス中の水採取が可能であれば、レゴリス中の氷含有率 $4 \text{ wt\%}$ とした場合、直径 1 m の氷球の内部からは $35 \sim 40 \text{ kg}$ 程度の水の採取が可能であると予測している。

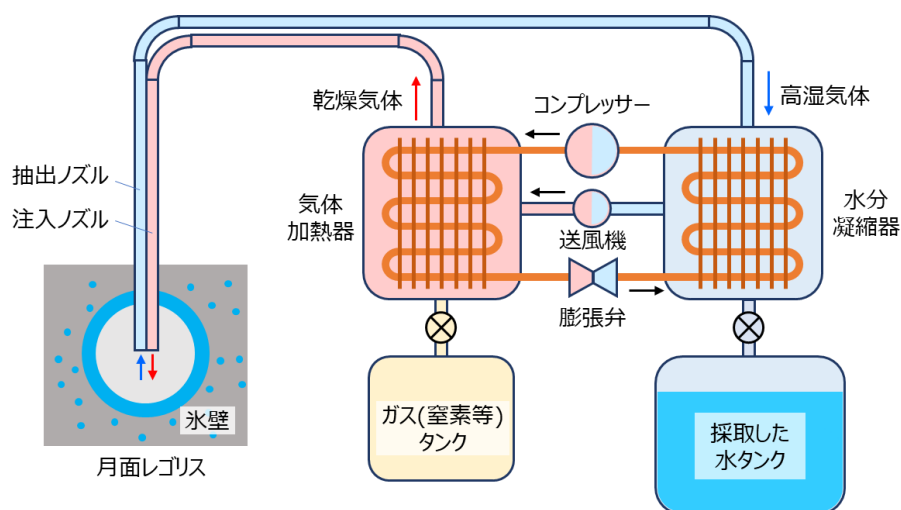


図 10 新規サーマルマイニング装置の概要

5. 月面レゴリス内の伝熱計算

前章の新しいサーマルマイニング方法は、真空レゴリスを熱伝導のみにより加熱するのではなく、対流熱伝達や水蒸気の凝縮・凝固の潜熱により効率よく加熱することの特徴とする。そこで、新規サーマルマイニング方法の効果の見通しを得るため、まずは真空レゴリス内の伝熱解析を行い、伝熱手段として熱伝導のみにより加熱した場合と対流熱伝達、及び水蒸気の凝縮・凝固の潜熱移動により加熱した場合の昇温状態を比較した。

5.1 計算方法

月面レゴリス内の伝熱計算を行うにあたってレゴリス内の状態を図 11 のように仮定した。レゴリスは不定形のソイル粒子の充填層と考えられ多孔質体とみなした。熱伝導のみの伝熱計算においてはソイル間の空隙は真空と考えた。また対流熱伝達や水蒸気の凝縮・凝固潜熱を計算する場合はソイル間の空隙を気体（水蒸気）が流動すると仮定した。

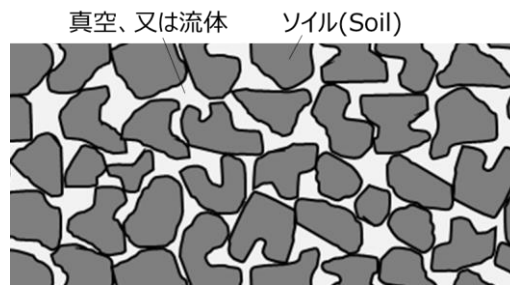


図 11 レゴリスの計算モデル

(a) 月面レゴリス内の熱伝導計算

レゴリス内の熱伝導による移動熱量の計算は、以下の式から計算した²⁷⁾。レゴリス内の空隙率 ε や比熱、密度、熱伝導率などの熱物性は場所によらず一定と仮定した。

$$\rho_{reg}(1-\varepsilon)Cp_{reg}\frac{\partial T_{soi}}{\partial t} = k_{reg}(1-\varepsilon)\left(\frac{\partial^2 T_{soi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{soi}}{\partial y^2}\right) + Q \quad \dots (1)$$

ここで、 T_{soi} はソイルの温度[K]、 ρ_{reg} はレゴリスのかさ密度[kg/m³]、 Cp_{reg} は比熱[J/kg/K]、 k_{reg} は熱伝導率[W/m/K]である。 ρ_{reg} や k_{reg} は固体ソイルの密度と熱伝導率ではなく、固体ソイルとソイル間の空隙を複合したレゴリスのかさ密度と熱伝導率である。表 2 に乾燥レゴリスの熱物性値の算出方法を示す。レゴリスは月面の重力により深さ方向にかさ密度が大きくなる^{23, 25)}。本計算において密度は 0.5 m 相当の深さのレゴリスを想定し $\rho_{reg} = 1,800 \text{ kg/m}^3 \text{ (const.)}$ とした。乾燥レゴリスの比熱、熱伝導率に関しては温度依存の値を用いた。

また、式(1)の Q はレゴリス内の空隙に流体がある場合にソイルと流体間で授受する熱量であり、以下の式から計算した。

$$Q = ha(T_{soi} - T) \quad \dots (2)$$

ここで h は流体とソイル間の対流熱伝達係数[W/m²/K]、 a は流体とソイル間の接触面積[m²]、 T は流体温度[K]である。熱伝達係数や接触面積はレゴリスを粒子充填層と仮定した近似式²⁷⁾や実験式²⁸⁾により計算した。ソイル間の空隙

が真空の場合は流体との熱のやり取りはないため $Q = 0$ とした。

表 2 伝熱計算で用いた月面レゴリスの熱物性値

物性値	記号	単位	値	参考
密度	ρ_{reg}	kg/m ³	1,800	Deep layer density ^{23, 25)}
比熱	$C_{p_{reg}}$	J/kg/K	$C_0 + C_1T + C_2T^2 + C_3T^3 + T_4T^4$	文献 ²³⁾ より
比熱計算の係数	C_0	J/kg/K	-23.173	"
	C_1	J/kg/K ²	2.127	"
	C_2	J/kg/K ³	0.01501	"
	C_3	J/kg/K ⁴	-7.3699×10^{-5}	"
	C_4	J/kg/K ⁵	9.6552×10^{-8}	"
熱伝導率	k_{reg}	W/m/K	$k_s + (k_d - k_s)\rho_{reg}(1 + X(T/350)^3)/(\rho_d - \rho_s)$	文献 ²³⁾ より
	k_s	W/m/K	0.0006	loose surfical soil ²³⁾
	k_d	W/m/K	0.007	dense soil ²³⁾
熱伝導率計算に使用した値	ρ_s	kg/m ³	1,300	loose surfical soil ^{23, 25)}
	ρ_d	kg/m ³	1,800	dense soil ^{23, 25)}
	X		2.7	Radiative conductivity parameter ^{23, 25)}

(b) レゴリス内の対流熱伝達の計算

レゴリス内の空隙に流体を通過させた場合の対流熱伝達計算における二次元流れは以下の方程式により計算した ^{29, 30)}。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \dots (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad \dots (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} = F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad \dots (5)$$

ここで、 u 、 v は x 方向 y 方向の流速の無次元化数、 p は圧力の無次元化数、 Re はレイノルズ数である。 F_x 、 F_y は x 軸および y 軸方向の単位質量あたりに働く体積力の無次元化数である。レゴリス内の流れが粒子充填層の多孔質体内の流れと仮定した場合、流体に働く力 F_x 、 F_y は多孔質内を流れる圧力損失と考えられる。多孔質体内流れの圧力損失 ΔP は以下の Ergun の式から計算した ³¹⁾。

$$\Delta P = \frac{150\mu Lu\varepsilon(1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75L\rho(u\varepsilon)^2(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} \quad \dots (6)$$

ここで、 D_p はソイルの平均的な直径[m]、 μ は流体の粘性係数[Pa s]、 L は流体の移動距離[m]、 u は流体速度[m/s] (層内速度) である。式(4)と式(5)の F_x 、 F_y は式(6)により x 、 y 方向の流速 u 、 v から圧力損失を求め無次元の体積力に換算した。

流体温度はソイルとの熱の授受を考慮して以下の方程式により計算した。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{RePr} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q \quad \dots (7)$$

ここで Pr はプラントル数、 Q は式(2)により計算したソイルと流体間の対流熱伝達による伝熱量である。

(c) レゴリス内の凝縮・凝固反応を伴う熱伝達計算

レゴリス内のソイル間を飽和水蒸気が通過する場合の凝縮・凝固反応を伴う対流熱伝達の計算に関しては、水蒸気の潜熱エネルギー E が流体の持つエネルギーであり水蒸気の流れによって運ばれると考え、以下の方程式を用いた。

$$\frac{\partial E}{\partial t} + u \frac{\partial E}{\partial x} + v \frac{\partial E}{\partial y} = Q_{ex} \quad \dots (8)$$

レゴリスはソイル間に空隙を持つ多孔質体であり、飽和水蒸気が空隙を通過すると仮定した。解析領域の入口の飽和水蒸気は 100% 気相であり、凝縮熱 (2,442 kJ/kg) と凝固熱 (334 kJ/kg) の合計 2,776 kJ/kg の潜熱量を持つと仮定した。レゴリス内の多孔質体内を通過するに従い、ソイルと水蒸気間で熱交換が行われ水蒸気流の潜熱エネルギー E が減少し、 E がゼロとなった時点で水蒸気はすべて凝縮・凝固し氷になると考えた。またソイルが水蒸気から受けるエネルギー Q_{ex} は全てソイルの温度上昇に消費されると仮定した。水蒸気からソイル表面に移動する熱量 Q_{ex} は以下の式から計算した。

$$Q_{ex} = Q_1 + Q_2 \quad \dots (9)$$

ここで Q_1 は水蒸気の顕熱移動量、 Q_2 は水蒸気が氷となる際の潜熱移動量である。 Q_1 、 Q_2 は以下の式から計算した³²⁾。

$$Q_1 = \alpha_f A (T_{vapor} - T_{ice}) \quad \dots (10)$$

$$Q_2 = W (E_{vapor} - E_{ice}) \quad \dots (11)$$

α_f はソイル表面の熱伝達率 [W/m²/K]、 A はソイル表面積 [m²]、 T_{vapor} は水蒸気温度 [K]、 T_{ice} は氷の表面温度 [K]、 W は単位時間の氷結 (凝縮・凝固) 量 [kg/s]、 E_{vapor} 、 E_{ice} はそれぞれ水蒸気と氷の潜熱エネルギー [J/kg] である。単位時間の氷結量は以下の式から計算した³²⁾。

$$W = kA (X_{vapor} - X_{ice}) \quad \dots (12)$$

k は物質移動速度 [m/s]、 X_{vapor} 、 X_{ice} はそれぞれ水蒸気温度における飽和水蒸気量 [kg/m³] とソイル温度における飽和水蒸気量 [kg/m³] である。物質移動速度 k は真空中の飽和水蒸気の密度差による物質移動であり、弾性媒質中の微小な圧力変動と考えられることから 0 °C 付近の飽和水蒸気の音速 (約 410 m/s) を用いた。また本計算においては、ソイル表面へ霜の付着による空隙率の変化、氷結によるソイルの熱伝導率の変化は無視して計算した。

(d) レゴリス内伝達計算モデル

上述の計算方法により、月面レゴリスをソイルの熱伝導のみで加熱した場合、ソイル間の空隙に水蒸気を通過させ対流熱伝達により加熱した場合、更に水蒸気の凝縮・凝固による潜熱により加熱した場合のレゴリス内の伝熱計算を

行った。図 12 に各加熱方式の計算モデルを示す。対流熱伝達（図中②）と凝縮・凝固熱（図中③）による加熱方法に関しては、レゴリスを多孔質体と仮定し、ソイル間の空隙に熱媒体として水蒸気を浸透・流通させることでレゴリスを加熱することを考えた。月面レゴリス内は真空であるため、月の水氷は液相として存在せず、温度が低い場合は固体（氷）として、温度が高い場合は気体（飽和水蒸気）として存在すると考えられる。飽和水蒸気と氷の境界となる温度は昇華温度であり、170～200 K と考えられている⁵⁾。また飽和水蒸気である場合も昇華温度に近い低温の場合は低圧・低密度の希薄気体であり、分子振動である熱エネルギーを輸送できないと考えられる。一般的に気体を連続体として扱うことができナビエーストックス方程式が成り立つのはクヌーセン数が 1 より十分に小さい必要があるため²⁶⁾、飽和水蒸気の温度はクヌーセン数<0.001 である 263 K (-10 °C) 付近と仮定した。

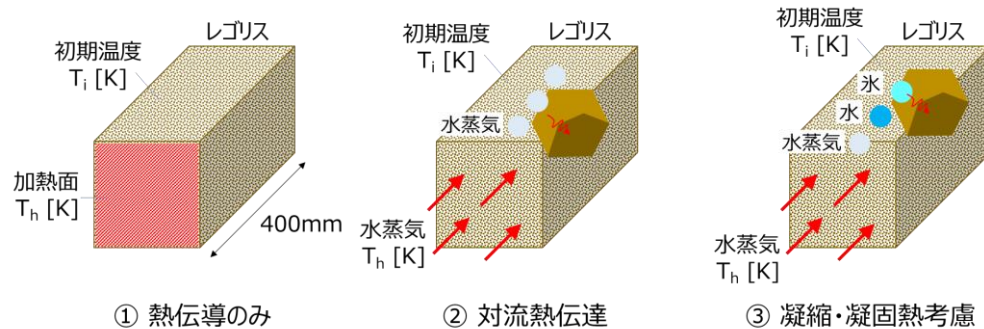


図 12 レゴリス内の伝熱計算モデル

5.2 計算結果

各加熱方式のレゴリスの昇温状態を比較・評価するための値として、計算結果から $(T-T_i)/(T_h-T_i)$ を算出した。ここで、 T_h は加熱源の温度であり熱伝導の計算では加熱面の温度、対流と凝縮・凝固の計算では水蒸気の流入温度、 T_i はレゴリスの初期温度、 T はある経過時間後のレゴリスの温度（計算結果）である。 $(T-T_i)/(T_h-T_i)$ の値が 1 に近いほど加熱源温度に近くよく加熱された状態であり、0 に近い場合はほとんど加熱されない状態である。

各加熱方式によるレゴリスの昇温状態を比較するため、加熱面（水蒸気流入面）からの距離 $D=10, 20, 50$ mm における 150 sec 間の昇温状態を図 13 (a)～(c) にプロットした。レゴリスを熱伝導のみで加熱した場合、加熱面から近い $D=10$ mm においては、時間と共にレゴリスが昇温するが、加熱面から $D=50$ mm と離れた位置においては昇温しない。対流熱伝達の場合は水蒸気流入面からの位置によらず、各位置のレゴリスはほぼ一定の傾きで昇温した。凝縮・凝固を考慮した加熱方法に関しては、 $D=10\sim 50$ mm のいずれの位置においても、レゴリスの温度は非常に短い時間で水蒸気の流入温度とほぼ等値になり、対流熱伝達や熱伝導による加熱方法に比べて短時間でレゴリスが昇温した。熱伝導のみの加熱の場合、150 sec 間と短い時間では 20 mm 以内の近い距離であれば加熱できるが、50 mm 以上と距離が離れた位置は加熱できないと考えられる。対流熱伝達に関しては、50 mm 以内の範囲であればほぼ均一にレゴリスを加熱できる。また凝縮・凝固反応を伴う熱伝達においては、ソイルへの水蒸気の付着と凝縮・凝固の大きな潜熱量 (2,776 kJ/kg) により非常に短い時間 (1 sec 以内) で昇温できることがわかった。

レゴリスを熱伝導のみで加熱した場合の加熱面からの距離と時間による昇温状態を知るため、加熱開始から 60 min 間の各距離における昇温状態のプロファイルを図 14 にプロットした。時間経過と共に加熱面から 120～130 mm 以内の範囲であればレゴリスは昇温していくが、60 min 経過しても $D=100$ mm の位置のレゴリスの昇温状態は 0.1 未満であり、昇温速度は遅い。また加熱面からの距離 $D=130$ mm 以上の位置では 60 min 経過してもほとんど昇温しないことがわかった。これらの計算結果から、月面レゴリスの広い範囲を熱伝導のみで加熱することは難しく、対流熱伝達や凝縮・凝固反応を伴う熱伝達による加熱が必要と考えられる。

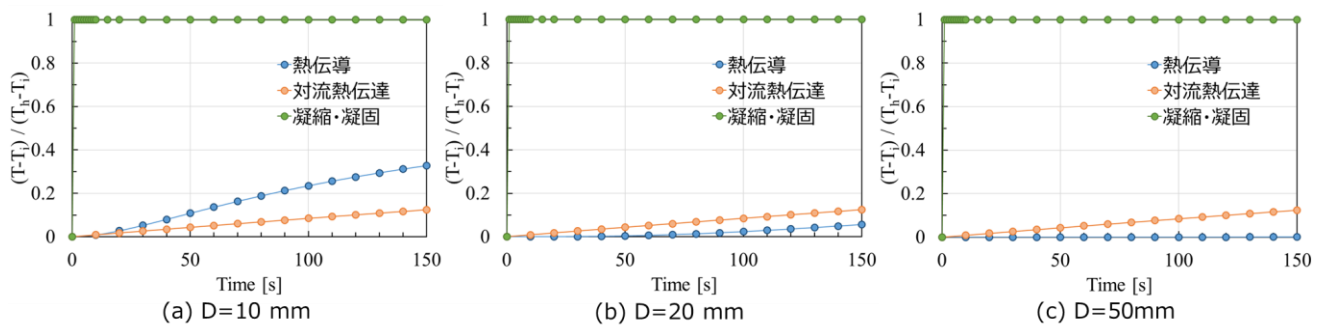


図 13 各位置における加熱方法による温度変化の比較

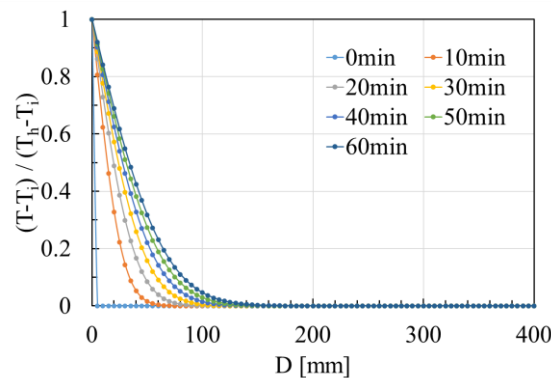


図 14 熱伝導加熱による各位置のレゴリス昇温状態の計算結果

ソイル粒子間の空隙を飽和水蒸気が通過し、ソイル表面で水蒸気が凝縮・凝固した場合のレゴリスの昇温の様子を計算した。ソイル間の空隙率が 0.4、ソイル粒径が 10～30 mm の場合の計算結果を図 15 に示す。

本計算においては、真空レゴリス内の水蒸気の流れは水蒸気の温度差による飽和蒸気圧差によって生ずると考えた。例えば、高温側の水蒸気温度が 273 K (0℃)、低温側の水蒸気温度が 173 K (-100℃) の場合、水蒸気の流れは飽和水蒸気圧差 611 Pa であり、水蒸気流はこの圧力差によって生ずる。この圧力差によって、水蒸気がソイル間の多孔質を通過する流速は、空隙率 0.4、ソイル粒径 10～30 mm の場合、約 32～85 m/s (空塔速度) であり、水蒸気は非常に短い時間 (0.3 sec 前後) で多孔質内 1 m の距離を通過する。一方、粒径が大きい充填層においては圧力損失が小さいため流速は大きくなる。そこで計算では、レゴリスの解析モデルの入口と出口に水蒸気温度に相当する飽和蒸気圧を設定して予めレゴリス内の水蒸気流速を求め、この水蒸気流速におけるレゴリス内の凝縮・凝固を伴う伝熱計算を行った。

図 15 のグラフではいずれの粒径サイズにおいても、水蒸気入口からの距離 D が 80～300 mm 以内の範囲で距離 D に対してレゴリス昇温状態が直線的に低下する範囲が見られた。この範囲 (直線範囲と呼ぶ) は水蒸気がレゴリス内に流入を開始する加熱初期において、流入した水蒸気がすべて凝縮・凝固し氷に相変化する範囲であり、ソイルの温度が流入する水蒸気の温度と等しくなるまで、水蒸気の潜熱エネルギーはソイルの昇温に使われる。ソイル粒径が大きいほど直線範囲が広がる理由として、ソイル間の空隙を通過する水蒸気の手が早いことが挙げられる。水蒸気の流速が小さい場合、ソイル間の空隙に水蒸気が留まる時間が長いため、狭い範囲で凝縮・凝固が完了すると考えられる。直線範囲でソイルの温度が水蒸気の流入温度と等しくなると水蒸気の潜熱エネルギーは下流に持ち越される。直線範囲の下流においてソイルは水蒸気の潜熱エネルギーによって加熱され、ソイルが昇温する範囲は下流に向かって拡大すると考えられる。今回の計算結果では、いずれのソイル粒径においても D=800 mm の位置の温度は 0.3 sec で水蒸気の流入温度とほぼ同温まで昇温しており、水蒸気の凝縮・凝固潜熱により加熱することでより広い範囲のレゴリスを非常に短い時間で加熱できることがわかった。

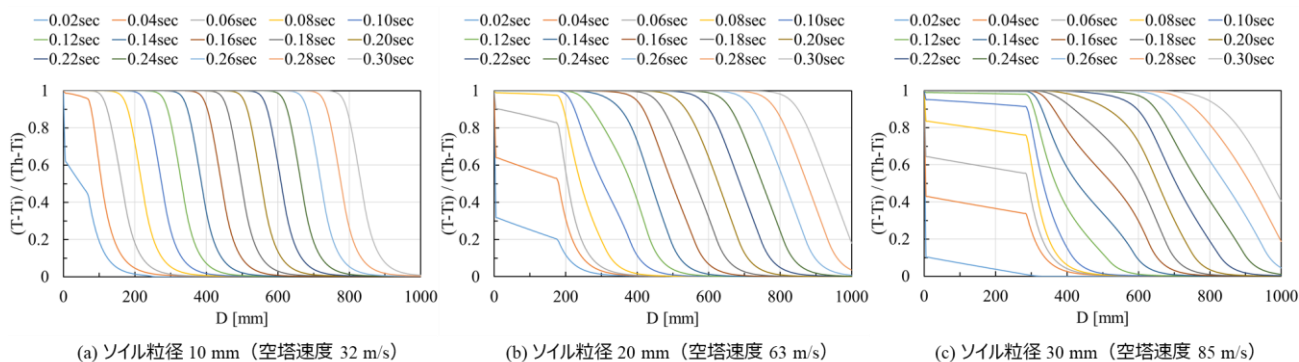


図 15 水蒸気の凝縮・凝固潜熱を加味した計算によるレゴリス昇温状態

今回の計算においては、ソイル表面へ霜の付着による空隙率の変化や氷結によるソイル表面の熱伝導の変化は無視して計算を行った。実際にソイル間に飽和水蒸気を流通させた場合、ソイル表面に水蒸気が氷結・着霜することでソイル表面への熱伝導は氷層を介した伝熱となり、見かけの熱伝達量が減少しソイルの昇温は緩やかになると考えられる。またソイル表面に氷結・着霜する氷の量は時間と共に増加するので、ソイル間の空隙が狭められて流動抵抗が増加し、やがて空隙が閉塞され水蒸気が流れなくなることも考えられる。今後、これらの現象も加味した月面レゴリス内の伝熱計算方法を検討していく。

6. まとめ

近い将来、月面の水資源を採取することを目的に、月面での水の状態を予想するとともに世の中で検討されている月面水資源の採取方法について考察した。また月面の真空レゴリス内の熱伝導や対流熱伝達、凝縮・凝固潜熱を加味した伝熱計算を行い、レゴリスを効率よく加熱する方法について検討した。更に、水資源の採掘に多くの重機を必要とせず、レゴリスをその場で加熱して水採取できるサーマルマイニング技術に注目し、当社独自の新しい手法を考案した。得られた知見は以下の通り。

- ① 近年の月軌道衛星や地上レーダーからの観察により月面には多量の水が存在することが明らかになってきた。特に太陽光があたらない月の北極や南極にあるクレーター内に多くの水があると考えられている。
- ② 月面レゴリスから水資源を採掘する方法として、地上と同様に重機を使って機械的に採掘する技術、月面レゴリスを太陽光などにより直接加熱して水を取り出す「サーマルマイニング」技術が考えられている。
- ③ 月面レゴリスを機械的に掘り返すなどの採掘を行わず、レゴリスに直接熱を加えて水採取を行うサーマルマイニングは、採掘システム全体の簡略化、軽量化が可能であり、多くの重機を稼働させる必要がないため、コスト低減や信頼性、保守性を向上できる。
- ④ サーマルマイニングの具体的な方法として、太陽光を利用して月表面を加熱する方法が考えられている。しかし、月表面を加熱して最表面の水を採取できても、最表面のレゴリスが乾燥した場合、熱伝導率が非常に小さくなるため、深さ方向のレゴリスをほとんど加熱できなくなる。このため、深い位置の水を採取することができない。
- ⑤ 広い範囲の月面レゴリスを熱伝導だけで加熱することは難しいことから、月面レゴリス内の空隙に水蒸気、又は月面で水電解により調達可能な水素や酸素などのガスを注入して循環させ、対流熱伝達や水蒸気の凝縮・凝固の潜熱によりレゴリスを加熱する方法について検討した。レゴリス内にガスを注入したときに真空レゴリス中にガスが拡散・消失しないようレゴリス内に氷の隔壁を設ける方法、及び月面の深い位置にある水資源を採取可能な独自のサーマルマイニング方法、及び装置を考案した。
- ⑥ 月面の真空レゴリス内の熱伝導や対流熱伝達、凝縮・凝固潜熱を加味した伝熱シミュレーションを行った結果、

レゴリス内の熱伝導による加熱では、加熱面から 10 mm の位置のレゴリスは時間と共に昇温するが、50 mm 程度離れると 150 秒程度の短時間では温度が変化しない。加熱面から 150 mm 離れると 1 hr.程度加熱してもほとんど昇温しない。一方、対流熱伝達の場合は、加熱面からの距離にかかわらず、150 秒で加熱面温度に対して 10%程度の昇温が見られた。また、凝縮・凝固潜熱による加熱の場合、加熱源（水蒸気入口）から 800 mm 離れた位置のレゴリスを 0.3 秒程度の非常に短い時間で水蒸気入口温度と同温度まで昇温できる。

以上から、考案した新規サーマルマイニング方法により、月面レゴリスを効率よく加熱できる可能性を見出した。今後、更にレゴリス内のソイル表面への着霜の様子を加味した詳細な伝熱計算や本サーマルマイニングを実現した場合の水採取に要する電力や時間などの見積もりを行っていく。また本サーマルマイニング方法は未だ概念段階であるため、地上において真空・極低温な月面レゴリスを模した実験装置を作製し、動作原理を検証する実験を行う予定である。2030 年頃の有人滞在開始フェーズ⁴⁾に合わせて本サーマルマイニングによる月面水採取が可能となるよう技術開発を進めていきたい。

文 献

- 1) NASA, FY2020 Budget Request, https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/fy2022_budget_summary.pdf (2021)
- 2) 文部科学省宇宙開発利用部会，国際宇宙ステーション・国際宇宙探査小委員会（第 42 回）会議資料，https://www.mext.go.jp/kaigisiryō/mext_00241.html (2021. 6. 30)
- 3) 高砂熱学工業プレスリリース，高砂熱学工業、民間月面探査プログラム「HAKUTO-R」運営の株式会社 ispace が実施するシリーズ B 投資ラウンドに新規出資，https://www.tte-net.com/topics/2020/pdf/20200820_1.pdf (2020. 8. 20)
- 4) 加藤敦史，森田健，フロンティアビジネス創出への挑戦-宇宙事業に関する取り組み-，高砂熱学工業イノベーションセンター報，No. 34，https://www.tte-net.com/lab/report/pdf/2020_17.pdf (2020).
- 5) HAKUTO-R HP，<https://ispace-inc.com/hakuto-r/jpn/about/>.
- 6) 高砂熱学工業プレスリリース，月面産業ビジョン政学産連携で日本政府に提出，https://www.tte-net.com/topics/2021/pdf/20210713_1.pdf (2021. 7. 13).
- 7) David K, Angel A, Jared A, Jonathan B, Gary B, Dallas B, Brad B, Vanessa C, Justin C, Blair DW, Chris D, Barry F, Jonathan G, Koki H, Laura K, Jim K, Bernard K, Philip M, Laura M, Phillip M, Clive N, Erica O, Gordon R, Jim S, Brandon S, George S, Paul S, Mark S, Kris Z, Guangdong Z, Commercial lunar propellant architecture: A collaborative study of lunar propellant production, REACH - Reviews in Human Space Exploration 13 (2019).
- 8) 日本の国際宇宙探索シナリオ(案) 2019，宇宙航空研究開発機構，国際宇宙探査センター，宇宙探査システム技術ユニット(2019)
- 9) George Sowers, Thermal Mining of Ices on Cold Solar System Bodies, Colorado School of Mines, NIAC Phase I Final Report (2020).
- 10) Grant H. Heiken, David T. Vaniman, Bevan M. French, Lunar Source Book A User's Guide to the Moon, Cambridge university press (1991).
- 11) Andrea Thompson, "It's Official: Water Found on the Moon", <https://www.space.com/7328-official-water-moon.html>, Space.com, 23 September 2009
- 12) <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA12237>
- 13) Li, S, Lucey, P.G., Milliken, R.E., Hayne, P.O., Fisher, E., Williams, J.P., Hurley, D.M., Elphic, R.C., Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions. PNAS (2018). <https://doi.org/10.1073/pnas.1802345115>

- 14) E. A. Fisher, P. G. Lucey, M. Lemelin, B. T. Greenhagen, M. A. Siegler, E. Mazarico, O. Aharonson, J. Williams, P. O. Hayne, G. A. Neumann, D. A. Paige, D. E. Smith, M. T. Zuber, Evidence for surface water ice in the lunar polar regions using reflectance measurements from the Lunar Orbiter Laser Altimeter and temperature measurements from the Diviner Lunar Radiometer Experiment, Lunar Polar Volatiles Conference, volume:5011 (2018).
- 15) Felicia Chou, Alison Hawkers, <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-s-sofia-discovers-water-on-sunlit-surface-of-moon>, NASA Release 20-105, Oct 27 (2020).
- 16) 春山純一, 月周回衛星「かぐや (SELENE)」搭載の地形カメラによる南極シャクルトンクレータ内の永久影領域の水氷存在に関する論文のサイエンスへの掲載についてー水氷がクレータ底部の表面に露出した形で多量に存在する可能性がないことを明らかにー, https://www.jaxa.jp/press/2008/10/20081024_kaguya_j.html (2008).
- 17) 春山純一, 月の居住に向けての科学的知見 (月の極の水氷), 宇宙環境利用シンポジウム 第31回 (2016).
- 18) G. Randall Gladstone, Kurt D. Retherford, Anthony F. Egan, David E. Kaufmann, Paul F. Miles, Joel W. Parker, David Horvath, Paul M. Rojas, Maarten H. Versteeg, Michael W. Davis, Thomas K. Greathouse, David C. Slater, Joey Mukherjee, Andrew J. Steffl, Paul D. Feldman, Dana M. Hurley, Wayne R. Pryor, Amanda R. Hendrix, Erwan Mazarico, S. Alan Stern, Far-ultraviolet reflectance properties of the Moon's permanently shadowed regions, J. of Geophysical Research, vol 117, E00H04, doi:10.1029/2011JE003913 (2012).
- 19) B. J. Thomson, D. B. J. Bussey, C. D. Neish, J. T. S. Cahill, E. Heggy, R. L. Kirk, G. W. Patterson, R. K. Raney, P. D. Spudis, T. W. Thompson, E. A. Ustinov, An upper limit for ice in Shackleton crater as revealed by LRO Mini-RF orbital radar, Geophysical Research Letters, vol 39, L14201, doi:10.1029/2012GL052119 (2012).
- 20) Anthony Colaprete, Peter Schultz, Jennifer Heldmann, Diane Wooden, Mark Shirley, Kimberly Ennico, Brendan Hermelyn, William Marshall, Antonio Ricco, Richard C. Elphic, David Goldstein, Dustin Summy, Gwendolyn D. Bart, Erik Asphaug, Don Korycansky, David Landis, Luke Sollitt, Detection of Water in the LCROSS Ejecta Plume, www.sciencemag.org, SCIENCE, Vol 330, pp.463-468 (2010).
- 21) Maria T. Zuber, James W. Head, David E. Smith, Gregory A. Neumann, Erwan Mazarico, Mark H. Torrence, Oded Aharonson, Alexander R. Tye, Caleb I. Fassett, Margaret A. Rosenburg, H. Jay Melosh, Constraints on the volatile distribution within Shackleton crater at the lunar south pole, NATURE, Vol 486, pp.378-381 (2012).
- 22) Shuai Li, Paul G. Lucey, Ralph E. Milliken, Paul O. Hayne, Elizabeth Fisher, Jean-Pierre Williams, Dana M. Hurley, Richard C. Elphic, Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions, PNAS, vol. 115, no. 36, 8907- 8912 (2018).
- 23) P. T. Metzger, Modeling the Thermal Extraction of Water Ice from Regolith, Earth and Space 2018, pp.481-489 (2018).
- 24) 熱物性ハンドブック編集委員会, 第一版 熱物性ハンドブック, 養賢堂 (1990).
- 25) Paul O. Hayne1, Joshua L. Bandfield, Matthew A. Siegler, Ashwin R. Vasavada1, Rebecca R. Ghent, Jean-Pierre Williams, Benjamin T. Greenhagen, Oded Aharonson7, Catherine M. Elder1, Paul G. Lucey, and David A. Paige, Global regolith thermophysical properties of the Moon from the Diviner Lunar Radiometer Experiment, AGU J. of Geophysical Research: Planet (2017)
- 26) 曾根良夫, 青木一生, 希薄気体力学, 応用物理 第54巻 第5号, pp.436-447 (1985).
- 27) (社)日本流体力学会, 第2版 流体力学ハンドブック, 丸善, pp.1053-1060 (1998).
- 28) 宮内照勝, 稀釈球充填層における粒子・流体間境膜物質移動係数, 化学工学 36, pp.633-640 (1972).
- 29) 八田夏夫, 流れの計算, 森北出版 (1994).
- 30) 河村哲也, 流体解析の基礎, 朝倉書店 (2014).
- 31) 竹内雍, 多孔質体の性質とその応用技術, フジテクノシステム (1999).
- 32) 細田泰生, 埋橋英夫, 熱伝達率に及ぼす霜の影響, 日立評論 第49巻 第6号, pp.647-651 (1967).

ABSTRACT

It is anticipated that humans will colonize planetary bodies including the Moon. Thus, a new economic system that integrates the Moon and the Earth will likely be developed in the near future. We have signed a corporate partner contract with ispace Co., Ltd. Our aim is to generate hydrogen and oxygen from water that might be present under the lunar surface, for the first time, using the water electrolyzer in the “HAKUTO-R” private lunar exploration program promoted by ispace. Recent observations have increased the possibility that water is present in the lunar regolith. If so, it may be possible to use this water for water electrolysis on the lunar surface in the future. Anticipating this, we have commenced the development of a novel "thermal mining" technology that collects water directly from regolith.

Details including the location, amount, and range of water within the lunar surface have not been clarified fully. The next step required before lunar water mining can become possible is a geological survey in areas where the presence of water is promising. In this study, we went through those steps and then predicted the state of lunar water while considering actual lunar water mining. We also considered the method being studied globally to mine lunar water and focused on thermal mining technology that can heat the regolith at a particular spot and collect water without the need for heavy machinery. We then devised a unique new method for the latter, in connection with which we calculated heat transfer by considering heat conduction, convection, and the latent heat of condensation and solidification in the vacuum regolith and examined how to efficiently heat the lunar regolith.

建物エネルギー管理システム(BEMS)概説

柴田 克彦

Overview of Building and Energy Management System

Katsuhiko Shibata

1970年代からミニコンによる中央監視制御装置が大規模ビルを中心に試用され始め、建物エネルギー管理システム(BEMS)が導入されるようになった。以降、学協会による技術の標準化、性能検証(コミッショニング)の適用、補助事業による導入普及により性能評価や省エネルギー効果の数値化が進められ、BEMS導入効果への認知度が高まってきた。半世紀を経た今日では、多くのビルにて設備管理に実用されるに至っている。この間のBEMSの変遷と、空気調和・衛生工学会の取組みを既往の文献を通してまとめ、当社における既開発技術からカーボンニュートラルに資する取組について概説した。

1. はじめに

1970年代からミニコンによる中央監視装置が大規模ビルを中心に試用され始め、1980年代のインテリジェントビルの建設など構内通信網、各種ビル内情報サービスが進んだ。これに伴い、建物エネルギー管理システム(BEMS)が導入され、その守備範囲もエネルギーの需給に加え、監視、制御、維持管理、テナントサービス、診断と建物内の管理全般に及んできた。BEMSは、情報通信技術(ICT)の進化に大きく影響を受けている。コンピュータの進化ではBEMSの処理機能が向上し、ネットワークのオープン化では管理データの設置範囲・項目・点数が増加し、インターネットの普及では遠隔からの監視操作が可能となった。また、時代の潮流により求められる機能が変化してきている。エネルギー問題と少子高齢化では、省エネルギーと省力化・省人化が繰り返され、震災を経験して頑健性がBCP対応に、今ではレジリエンスへと概念が拡張してきている。これらを通して、建物の管理にBEMSは必須のツールとなっている。

そこで本報では、これまでの空気調和・衛生工学会(SHASE)の大会発表、委員会活動を中心としたBEMSの変遷と高砂熱学工業における関連技術の開発、そしてカーボンニュートラルに向けての取組について概説する。

2. BEMSの定義

1980年代後半、建物の制御機器と操作端末との間でデータ通信機能を持つ自動制御、監視システムとして International Energy Agency (IEA) から ANNEX16 において Building Energy Management Systems (BEMS) という用語がもたらされた。既往の文献では、中原信生(当時、名古屋大学教授)らの国内委員会は、Annex16の研究会において BEMS を Building and Energy Management System と読み替えて定義すること、さらには E の中に Environment の意味も含める事を提案し、受け入れられ、国際共通用語として BEMS が定義されたとある¹⁾。その後、BEMS の概念は拡張され、図 1 に示す建物のエネルギーの需給に加え、設備の自動制御・最適化、設備運用、予防保全など建物を統合的に管理するシステムとなり、基本機能から建物群管理まで 9 機能に分類された²⁾。

なお、BEMS の主管学会である SHASE の便覧に「BEMS」が掲載されたのは、2010 年発行の第 14 版³⁾

が最初である。そこには「大規模・複合化された建築で効率的なビル管理を行うためには、中央監視設備はもとより、モニタリングシステムを活用して収集したデータを分析・評価して運用にフィードバックさせる BMS(Building Management System)、さらに環境配慮・エネルギー消費の分析に特化した BEMS(Building Energy Management System)を導入する事例も増えてきている」とある。

3. BEMS の普及展開

1973 年大阪大林ビルに逸早く導入された BEMS は ICT の発展に伴い進化を続け、半世紀を迎えようとしている。図 2 に、BEMS の歴史的発展のプロセスを示す。以下に、1985 年頃の汎用コンピュータ導入以降の BEMS の普及展開を四つの視点で整理して概要を述べる。

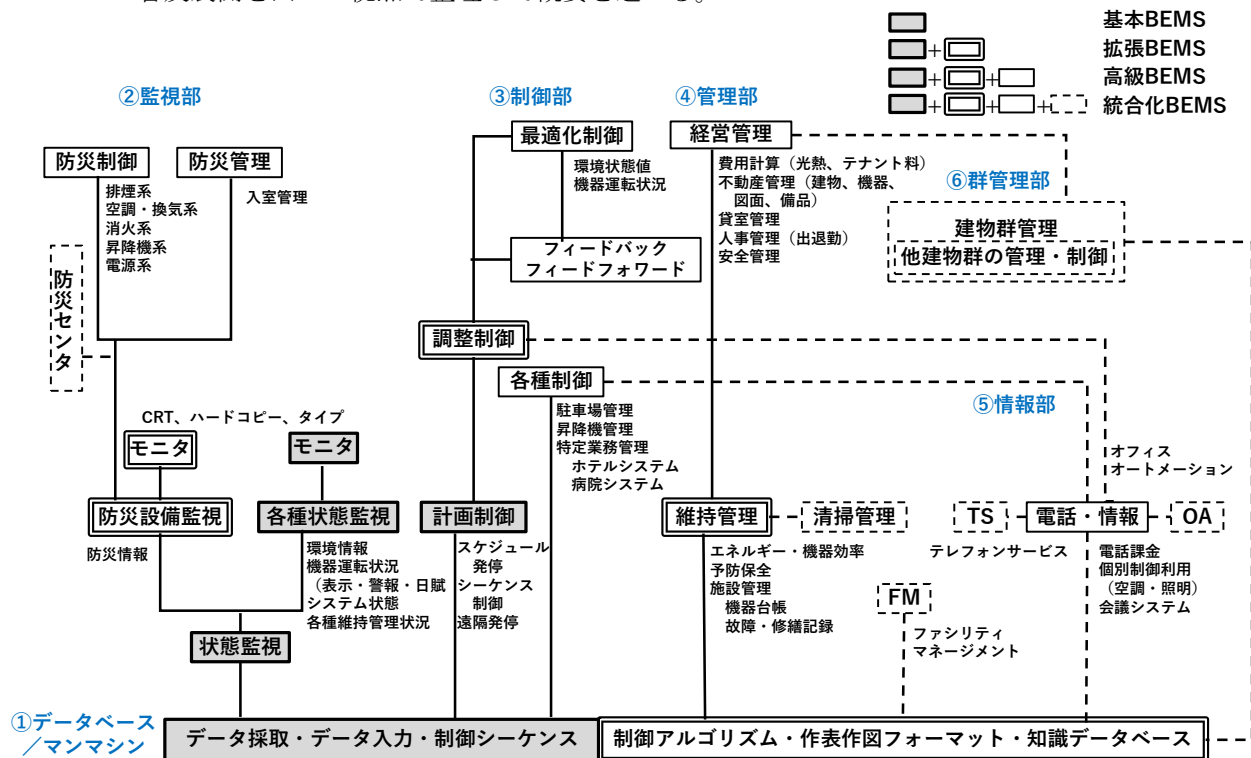


図 1 BEMS の構成と階層

1965以前	信号伝送距離の制限
リレーシーケンス全盛	信号伝送線数の低減努力
1965～1975	ミニコンによる集中システム、データロギング、スケジュール制御、熱源台数制御など部分的省エネルギー制御
1975～1985	ミニコンによる集中システム能力向上、リモートIO (RS)通信技術、空調DDC
1985～1995	分散統合化、通信技術応用 (情報統合) テナントサービスとユーザーオペレーション、BAS(Building Automation System),FMS(Facility Management System)
1995～1999	中央の汎用PC化、ネットワークのTCP/IP活用、水平分散、自律分散、BACnet、LonWorksの出現
1999～	マルチベンダー対応のシステム構成、BACnetとLonWorksによるオープン化、インターネット活用
2004～	BACS(Building Automation and Control System)とBACnetのISO規格化、Lon通信のISO/IEC規格化、BACS技術のインフラ化
2004～	インターネットWeb利用の遠隔管理技術の確立、IPアドレス枯渇問題から、IPv6アドレス対応の研究
2011～	電力の供給と需要の安定化に向けたスマートグリッド技術 再生可能エネルギー

図 2 BEMS の歴史的発展プロセス

3.1 導入黎明期(1980年代後半)

BEMS 普及の初期は、コンピュータの演算処理能力が低く、メモリ容量が少ないため、一度に多量のデータを扱うことができなかった。また、外部記憶装置もコンピュータ本体とバスで接続されているため、コンピュータ間でのファイル共有が不可能で、シーケンシャル処理となった。加えて、グラフィック表示が脆弱で、データのトレンドグラフを表示するにも苦労していた。

この段階における BEMS 導入の実態調査としては、1987 年建設省(当時)の後援で「建築物の環境・エネルギー管理システム研究委員会」(委員長: 中原信生)が発足され、日本独自の調査・研究に加え、IEA のもとに建築物およびコミュニティシステム省エネルギー実施協定に関する国際研究活動の一課題として BEMS に関する調査研究が行われた^{5),6),7),8),9),10)}。

当時のアンケートの内容を表 1 に示す⁹⁾。設置されている BEMS の方式、規模、機能などとその使われ方、日常の管理体制、建物・設備の特性など多岐に渡っている。基本的に建物の管理者を対象とした調査で、BEMS を有していると思われる 112 件の建物を抽出し、アンケートを 1989 年 3 月発送、同年 8 月を目途に 60 件の回収を得ていた。調査対象は事務所ビルで過去 5 年以内に竣工したビルを基準に抽出している。回収できた建物の地域は東京 44 件、愛知 8 件、大阪 7 件、福岡 1 件であった。

アンケートでの環境評価の項目について、温熱環境は現在とほぼ同じ内容であった。空気環境では、喫煙対策が異なり、無制限の建物があることが当時を思わせる。視環境については、照度分布が 500~1,000 lx、平均 676lx となっていた。音環境では、BGM による能動的対策が 20%で行われていたことが興味深い。

図 3 に BEMS 導入の期待値と導入後に効果を発揮している項目を示す⁹⁾。「省力」「省エネルギー」「環境の快適性向上」に対する期待が高く、「省力」が効果を発揮している。図 4 に建物規模と管理点数の関係を示す。単位面積 m^2 当りおおよそ 0.05 点となり、最近の事務所建築¹¹⁾の管理点数 0.117 点/ m^2 に比べ 4 割程度である。基本機能の実装状況、活用状況を表 2 に示す。表示、計測記録、状態監視、スケジュールが多く、の建物で導入されているが、稼働状況は非常に低く半数に満たない。また、主な省エネルギー項目を表 3 に示す。現在も活用されている項目が多いものの、インバータによる回転数制御はまだ導入されていないことが分かる。

表 1 調査項目の概要

調査項目	質問事項
1 建物について	建物の概要(用途・構造・竣工年など) 省エネ面での特徴(PAL・CEC・断熱配慮の有無など) 設備面での特徴(熱源・空調方式・冷暖房能力)
2 環境について	温熱・空気環境・視音環境・臭気対策・飲料水・中水・有害生物・オフィス空間 (設定・目標値・所見・BEMSによる管理の有無)
3 BEMSのシステム構成について	システム名・製造者名・管理範囲・制御方式・点数・記憶容量・入出力装置 導入目的
4 BEMSの機能について	基本機能・省エネ制御機能・管理支援機能 システム間の連携状態 導入効果
5 管理態勢について	管理項目(管理の仕方・今後の予定など) 報告事項(頻度・利用法など) 管理要員(主任・事務係・電気・機械係など)
6 管理の経過から	保証期間・引渡図書・運転時間・期間など 年間維持費(保守契約・部品消耗品) 年間エネルギー消費量(電気・ガス・油・地域熱供給)
7 不具合調査	不具合の概要(系統・設備・装置など) 原因・対策・管理領域など

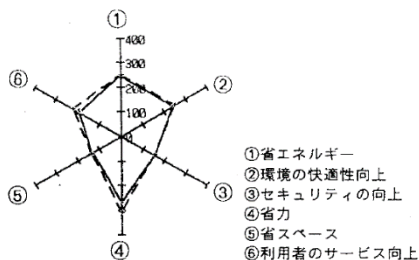


図 3 BEMS 導入目的と実際に効果を発揮している領域(全体)⁶⁾

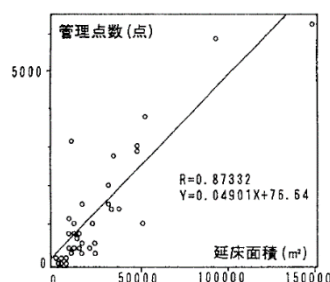


図 4 建物規模と管理点数の関係⁶⁾

表 2 基本管理機能の適用状況

	運 転 状 態	計 測	警 報	操 作 記 録	計 測	量 テ ナ ン ト 計	警 報	状 連 監 視	上 下 限 監 視	設 定 変 更	制 御 ス ケ ジ ュー ル	ス ケ ジ ュー ル	台 数 制 御	御 間 欠 運 転 制	御 予 測 学 習 制
適用率 (%)															
冷熱源	82	68	78	57	58	5	70	73	38	42	18	65	43	10	18
温熱源	77	65	70	55	53	5	65	67	37	37	18	58	35	7	10
蓄熱槽	67	75	67	50	75	0	67	83	58	50	17	33	0	8	17
ポンプ	85	23	82	62	25	2	72	72	15	12	23	53	32	7	2
空調機	88	58	87	68	52	12	77	83	33	55	13	82	12	20	28
全熱交換器	76	22	56	41	20	0	59	68	7	17	17	44	5	24	5
換気	80	15	68	52	13	0	60	70	7	12	7	60	2	17	2
有効活用率 (%)															
冷熱源	27	29	38	9	23	33	12	18	13	20	9	31	38	0	18
温熱源	24	28	12	9	22	33	13	18	14	18	9	31	33	0	17
蓄熱槽	38	33	13	17	33	0	13	30	29	33	0	75	0	0	50
ポンプ	22	7	20	5	13	0	12	18	0	43	21	34	58	0	100
空調機	28	31	25	10	19	71	13	16	30	33	25	39	0	25	24
全熱交換器	13	22	9	6	13	0	0	4	0	29	14	33	0	10	0
換気	10	0	10	3	0	0	3	7	0	29	25	25	0	30	100
適用有効率 (%)															
冷熱源	22	20	13	7	17	2	8	13	5	8	2	20	17	2	3
温熱源	18	18	8	5	13	2	8	12	5	7	2	18	12	2	2
蓄熱槽	25	25	8	8	25	0	8	25	17	17	0	25	0	0	8
ポンプ	18	2	17	3	3	0	8	13	0	5	5	18	18	0	2
空調機	25	18	22	8	13	12	10	13	10	22	3	32	0	7	7
全熱交換器	10	5	5	2	2	0	0	2	0	5	2	15	0	2	0
換気	8	0	7	2	0	0	2	5	0	3	2	15	0	7	2

表 3 省エネルギー制御機能の適用状況

省エネルギー制御機能	適用率 (%)	有効活用率 (%)	適用有効率 (%)
デマンド制御	45.0	37.0	20.0
力率制御	76.7	23.9	18.3
停復電制御	65.0	20.5	15.0
発電機負荷制御	36.7	13.6	5.0
外気冷房制御	56.7	20.6	16.7
最小外気取入制御(CO2)	25.0	33.3	10.0
立上時外気シャットオフ制御	50.0	26.7	15.0
VAV制御	38.3	30.4	13.3
VWV制御	10.0	33.3	3.3
節水制御 (中水)	13.3	25.0	5.0
節水制御 (その他)	10.0	16.7	1.7
熱回収制御 (全熱交換器)	50.0	33.3	18.3
熱回収制御 (その他)	6.7	33.3	11.7
窓際照明制御	5.0	33.3	11.7
ブラインド制御	8.3	0.0	6.7
ソーラー制御	6.7	25.0	1.7

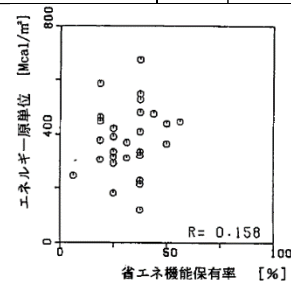


図 5 省エネ機器保有率とエネルギー消費原単位¹⁰⁾

また、全体的に省エネルギー管理・制御機能を有することが有効であるとの意識はかなり低い。これは当時「省エネルギー」による利益が管理者に直接的に還元されない体制上の事情によるのではと考察されている。さらに、省エネルギー効果の定量化で表示面の不十分さが要因ともいえる。まだまだ BEMS 設計者と管理者に大きなギャップがあった時代である。また、省エネルギー機能とエネルギー消費原単位との相関を図 5 に示す¹⁰⁾。省エネルギー機能を多く有するほどエネルギー消費量が少ないという結果は導かれていなく、省エネルギー機能がまだ十分に発揮されていなかったことが伺える。

一方、1987 年頃から中、大規模ビルにおける空調熱源では、複合エネルギー源を用いた熱源システムが導入され始めた。これは、建物用途の複合化や社会状況の変化などの要因により各種エネルギー源を使用するメリットや多様な熱源システムとの組合せにより得られるメリットを享受しようとするものである。これにより、評価指標の選定によっては熱源の組合せ、負荷分担を一義的に決定するのが困難となり、BEMS を用いた解析、評価、判断が不可欠となってきた¹²⁾。

3.2 コミッショニングの導入(2000 年頃)

1990 年代後半になると欧米からコミッショニング (性能検証、以下 Cx と記す) の概念が入り^{13),14),15)}、検証業務への投資による建物のエネルギー消費量の削減効果が示された。国内においても、空気調和・衛生工学会 (SHASE) に Cx の指針作成に関する委員会が立ち上がり、実在建物で Cx が試行され始めた¹⁶⁾。

その中で、設計の企画段階から引渡し段階までの各プロセスにおいて、Cx で必要とされる文章化と技術検証を行った最初のケーススタディが、都内に新築された某環境技術センターである¹⁷⁾。このケーススタディでは、先の SHASE の委員会でもとめられた性能検証基本指針¹⁸⁾から「環境・エネルギー並びに使い易さの観点から、使用者にとって最適な状態に保たれるように性能を診断・検証し、性能改善法を提示すること、さらに建物オーナーの事業に関連し BEMS に必要とされる機能と被検証の対象として、どのような試験が適用されるかの課題解決」を目的とした。

また、筆者が最初に Cx に接したのは都内に新築された某超高層ビルである¹⁹⁾。当時の設計図書では、「試運転調整にて性能検証を行うこと」の一文が記載されているだけであった。Cx については当社での経

験も未だ少なく、技術部門（設計、施工）、計装部門、開発部門が集まった全社横断のプロジェクトながら、各種設備の性能検証と、BEMS で常設されているセンサの不足分を精度検証した表面計測で行った。また、性能評価の見える化として、評価目的に好適なグラフ表現を整理した。これは後に当社の見える化ツールの要件作成に大いに役立った²⁰⁾。

3.3 補助事業による導入普及(2002 年～2009 年)

住宅・建築物高効率エネルギーシステム導入促進事業が 1999 年度に創設され、3 年後の 2002 年度に BEMS 導入支援事業が始まった²¹⁾。本事業では、補助事業者に対し事業終了後 3 年間のデータ収集とその公表が義務付けられたが、これを契機に、BEMS による省エネルギー効果が数値で示されるようになり、BEMS の普及が進んだ。表 4 に、導入事業物件の推移を示す。2002（H14）年度から 2009（H21）年度までの間に合計 456 件の受託事業者があった。事業者の 90%は既築建物であり、新築建物の割合が少なかった。これは補助事業の 2 つの形態の内、新築建物は「BEMS 導入補助事業」より「建築物に係るもの」の事業利用に適していたことによる。建物用途別の受託事業者を図 6 に示す。事務所、物販店舗、病院、学校、宿泊が多く、これは産業分野を除く既存ストック建築物の用途別割合と同じ傾向であった。導入建物の規模は平均延床面積が 35,620m² となり、大規模建物への BEMS 導入が多かった。事業者数の推移は、事業初期の導入が多く、以降緩やかな減少傾向であった。この背景には、BEMS 導入効果が認知され始め、大規模建物では民間事業者による自発的導入が進展してきたためと思われる。

補助事業の最も大きな成果は、一次エネルギー消費量の削減であった。各事業所とも導入後 3 年間の実施状況を報告しているが、図 7 に、事業所全体の省エネルギー効果を示す。計画段階で 5.8%の削減が、実績段階では 11.2%の削減となり、計画値を 2 倍近く上回る効果が報告されている。なお、事業年度ごとの削減率は低下傾向にあった。これは、開始当初に比べ建物の省エネルギー化が進んだことでベースラインが低くなり、いわゆる乾いた雑巾を絞るような省エネルギー対策を実施してきた結果と言える。

図 8 に、2011 年度夏季の節電対策実施状況を示す。東日本大震災直後の夏季対策アンケートであったことから、前年度と比較して「積極的に取り組んでいる」の回答が増加している。空調対策では、冷房温度の適正化、未使用エリアの空調停止など、BEMS による実態把握とそれに基づく運用の見直しが多かった。このような取り組みは、運用の基本的な考え方として現在に引き継がれている。

表 4 新築・既築別の補助事業者数

年度	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	合計
新築	60	88	59	53	86	28	24	13	411
既築	11	16	6	3	4	5	0	0	45
計	71	104	65	56	90	33	24	13	456

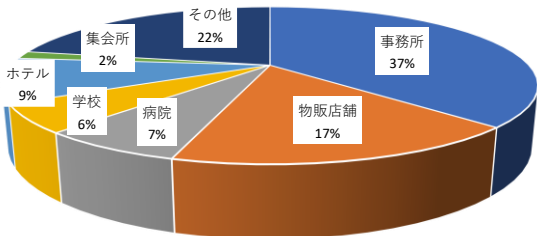


図 6 建物用途別の補助事業者

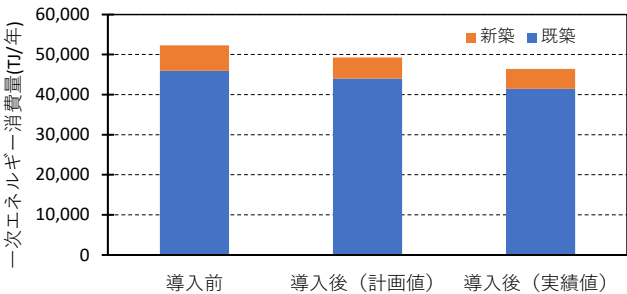


図 7 事業所全体の一次エネルギー消費量

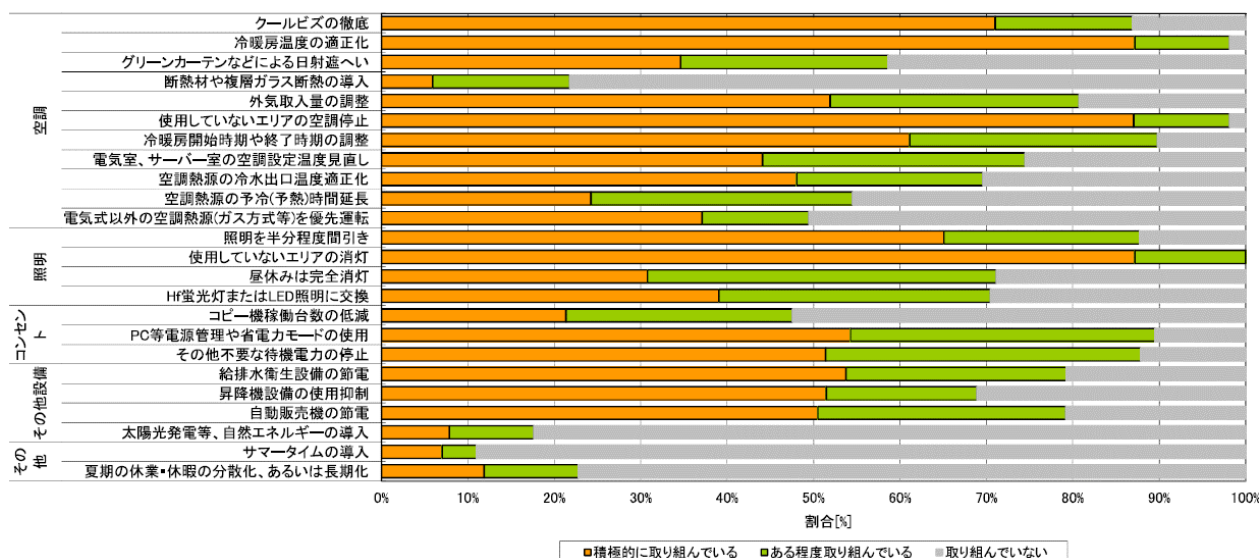


図 8 2011 年度夏季の節電対策実施状況結果 ²¹⁾

3.4 空気調和・衛生工学会（SHASE）での活動(1990 年～現在)

BEMS の主管学会である SHASE での活動として、年次の大会論文数と BEMS 委員会について以下に示す。

3.4.1 年次大会での発表状況

BEMS の展開状況は、SHASE 年次大会の論文数から推定可能と考える。論文検索サイト ²²⁾を用いて、1990 年以降の発表論文から「BEMS」をキーワードに検索した結果を図 9 に示す。1990 年代は、試験的導入が多いためか発表件数が数件程度であった。2000 年代に入ると、先に述べた補助事業などの導入普及効果により急激に発表件数が増加した。一旦減少するものの、東日本大震災以降急激に増加し 50～60 本/年の発表数で推移している。2010 年以前と以降で、論文の題目および概要から分類した BEMS の用途を図 10 に示す。2010 年以前の普及導入期はエネルギー環境管理、制御・最適化が多かったが、2010 年以降は運用実績が多くなり BEMS が日常化した様子が伺える。

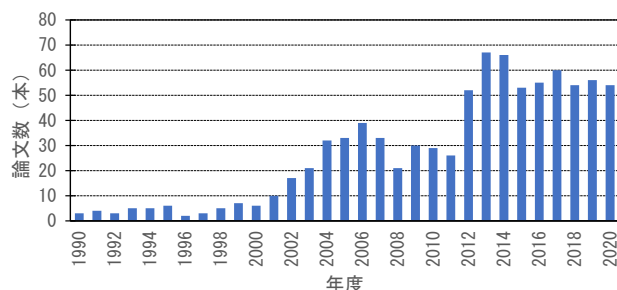


図 9 BEMS 関連論文の発表の推移

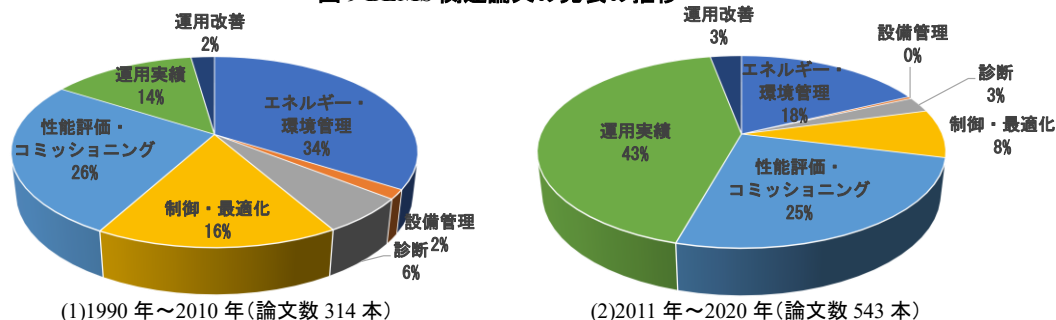


図 10 論文題目および概要から分類した BEMS の用途

3.4.2 BEMS 委員会活動

SHASE のビル管理システム委員会が 1995 年に発足し、その後 2000 年度から現在まで時代の技術トレンドや社会ニーズに適合すべく 25 の小委員会が設置されてきた。表 5 に現在のビル管理システム委員長（東京電機大学百田教授）のまとめによる小委員会の名称と設置期間を示す²³⁾。表中の小委員会から、SHASE ホームページの会員専用サイトでダウンロード可能な報告書を元に、時代を象徴したと思われる小委員会の概要を示す。

表 5 ビル管理システム委員会活動の変遷

年度	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
委員長	船津正義		田中良彦				平岡雅哉		佐々木邦治		村上公哉		大島一夫		栢川依士夫		百田真史							
No. 小委員会名																								
1 オープン化時代における設備技術者のBEMS対応																								
2 改正省エネ法に対応したBEMSのあり方																								
3 エネルギーデータ解析・評価																								
4 ライフサイクルマネジメントの為にBEMS																								
5 ビル設備ネットワークオープン化ガイドライン作成																								
6 BEMS計測評価手法																								
7 ベテラン技術者の技術力活用中小ビル省エネ推進検討																								
8 優良ストック形成																								
9 BEMS衛生計測評価手法																								
10 BEMS改善手法																								
11 カーボンニュートラル構築																								
12 BEMS活用標準化																								
13 改正省エネ法(H20)対応BEMS																								
14 BEMSポイント名称標準化																								
15 BEMS「エネルギーの見える化」																								
16 スマートBEMS・クラウド活用																								
17 ビックデータ活用BEMS																								
18 サブシステム情報連動制御検討																								
19 既存BEMS保全・更新検討																								
20 BCP対応型BEMS検討																								
21 建物エネルギーシステムの運用最適化検討																								
22 在室者情報活用BEMS検討																								
23 AI活用による建物システムの運用最適化検討																								
24 BEMSの活用によるBCPのあり方検討																								
25 建物の管理・運用におけるAI活用																								

(1) No.5_ビル設備ネットワークオープン化ガイドライン作成(2004 年,2005 年)²⁴⁾

本小委員会は、ビル設備の通信ネットワークのオープン化に伴い 2001 年～2002 年に開かれた BEMS 対応小委員会の検討成果に適用事例を加え、オープン化 BEMS の動向や内容を整理し、快適環境のもと実効性の高い省エネルギー施策の実現を目的としていた。ここでオープン化とは、①設備制御系通信ネットワークの標準化・開放性、②通信プロトコルの標準化、③マルチベンダー環境、④空調制御アプリケーションの開放性、⑤運転データ情報の収集およびデータベースの開放性、が挙げられた。

図 11 にオープン化 BEMS の構成例を示す。ネットワークの主幹線に BACnet、機器やセンサなど端末のネットワークに LonWorks、Web 型による遠隔監視が盛り込まれている。当時の課題として、①汎用環境の利用による信頼性、②通信での応答性、③PC の OS バージョン変更が示され、情報収集と発信の継続性について言及されている。これは、現在も課題となっている情報セキュリティに繋がる。

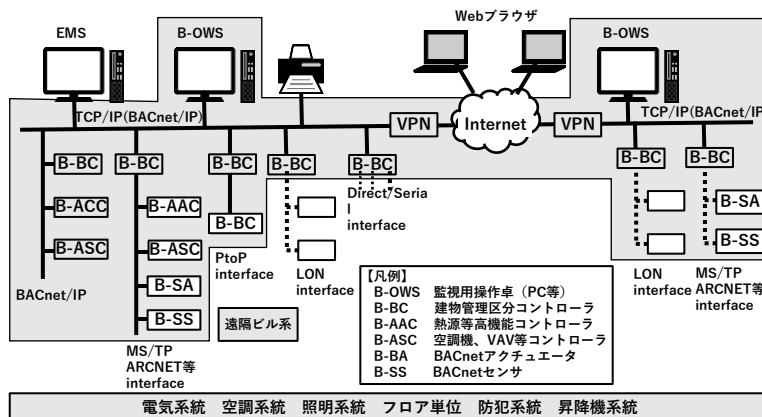


図 11 オープン化 BEMS の構成例

(2) No.6_BEMS 計測評価手法 (2004-2005) ²⁵⁾

BEMS におけるデータの確からしさは不可欠である。本小委員会は、計測評価手法をより深く検討するために設置された。BEMS の普及や性能検証のニーズに伴い、各種評価指標や計測ポイントが提示されているが、用途によって計測範囲、計測ポイントが統一されていなかった。また、計測データの保存状態（帳票、デジタル値、積算値、瞬時値）に適合したデータの活用方法や各種評価指標別の具体的な評価手法の事例が少なかった。そこで、用途に合った計測ポイント、評価指標の整理と管理実務者や中小ビルへの普及を目的に設置された。

図 12 に代表的な空調システムの機器構成と性能指標を示す。性能は、システムのプロセス性能、システムの性能、機器の性能と階層化することで、俯瞰からマクロ評価まで一元的に管理できる。評価に必要なデータ項目も整理しており、一例として表 6 に電動冷凍機を示す。また、表 7 に熱源機の評価項目を示す。ここで整理された手法は、評価の基準が例示されているため合理的な評価が可能となる。また本報での図示は無いが、データ項目とサンプリング周期、評価シートも掲載されて、実用的な報告書となっている。

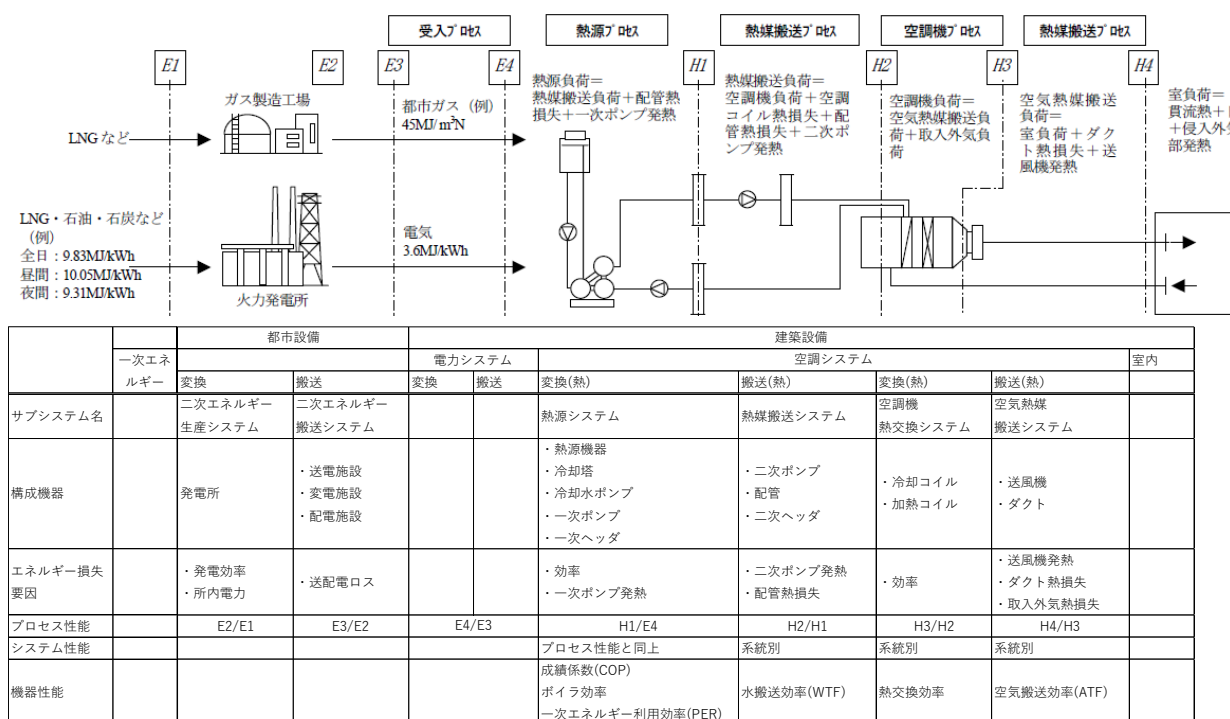


図 12 空調システムのサブシステムおよび機器構成と性能指標

表 6 電動冷凍機の評価に必要なデータ項目

評価項目	冷水入口温度	冷水出口温度	冷水流量	冷凍機電力	冷水一次ポンプ電力	冷却水ポンプ電力	冷却塔ファン電力	冷却水入口温度	冷却水出口温度	冷却水流量	冷凍機運転状態	外気湿度	外気温度
機器単体COP (二次エネルギー基準・一次エネルギー基準)	○	○	○	○				△	△	△	○	△	△
システムCOP (二次エネルギー基準・一次エネルギー基準)	○	○	○	○	○	○	△	△	△	○	○	△	△
冷水一次ポンプWTF	○	○	○		○				○	○	○		
冷却水ポンプWTF						○		○	○	○			
機器出力								△	△	△	△	△	△

○：必須計測ポイント △：参考計測ポイント

表 7 熱源機の評価項目

評価シートNo.	評価対象機器	評価項目	評価目的
A-R-001	電動冷凍機	冷凍機単体COP	COPを算出して、機器単体として適正な運転状態にあるか、メンテナンス時期にないかなどを確認する
A-R-002	電動ヒートポンプ	冷凍機単体COP	同 上
A-R-003	吸収冷凍機	吸収冷凍機単体COP	同 上
A-R-004	吸収冷凍機	吸収冷凍機能力	冷凍機能力を算出し、本来の能力が出ているか、メンテナンス時期にないかなどを確認する
A-R-005	直たき吸収冷温水機	吸収冷温水機単体COP	COPを算出して、機器単体として適正な運転状態にあるか、メンテナンス時期にないかなどを確認する
A-R-006	直たき吸収冷温水機	吸収冷温水機能力	冷凍機能力を算出し、本来の能力が出ているか、メンテナンス時期にないかなどを確認する
A-B-001	ボイラ	ボイラ効率	ボイラ効率を算出し、適正な運転状態にあるか、メンテナンス時期にないかなどを確認する
A-CT-001	冷却塔	冷却塔補給水量と冷却水水質	冷却水の水質と補給水量を評価し、電気伝導度(濃縮倍率)の設定値を確認する
A-R-S-001	熱源システム	システムCOP	補機を含むシステムCOPを算出して、冷却水や台数制御などの問題を含め、適正な運転状態にあるか、メンテナンス時期にないかなどを確認する
A-R-S-002	熱源システム	熱源システム負荷率	熱源機負荷率や運転台数の関係の評価し、台数分りや運用方法の適否を確認する

(3) No.12_BEMS 活用標準化 (2009-2011) ²⁶⁾

本小委員会は、BEMS の普及促進として BEMS 活用者の立場からニーズを把握し、その提供を検討の起点に BEMS の機能に付属されるグラフ画面の標準化を目的とした。建築物の関係者と各々が活用する BEMS データの関係を図 13 に示す。例えば、建物所有者の役割は、法令対策、建物運営・維持に様々な省エネルギー・省コスト対策、さらに社会貢献の実践である。それらの目的遂行のため BEMS を活用していることから、建物所有者用には、建物全体の状況が俯瞰できるグラフ画面を標準とした。また、建設当初は「設計者」、「施工者」と「建物所有者」の関連、建物の稼働後は「建物所有者」と「設備管理者」との関連など、その建物のライフサイクルにおいて様々な関係者の間でその関係に見合った BEMS データを継承できるグラフ画面を標準とした。さらには、管理に従事する者の立場ごとに目的が異なることから、それらに合致した画面表示を標準化する考え方を図 14 に示す階層的グラフ表示で提言している。これは、後述する表面計測技術での解析評価手法として、当社が検討していた階層化表現の思考と合致するものである。

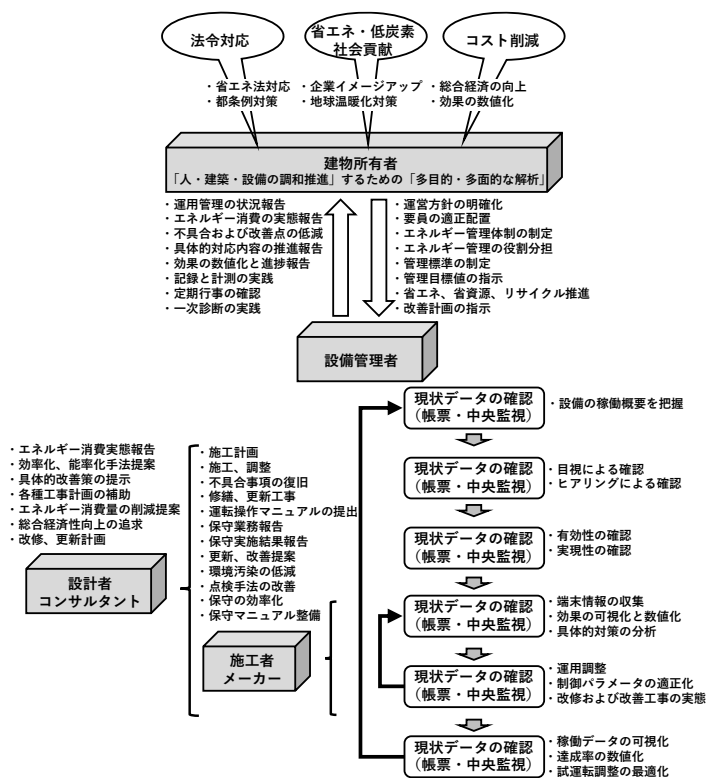


図 13 建築物の関係者と BEMS データの活用項目

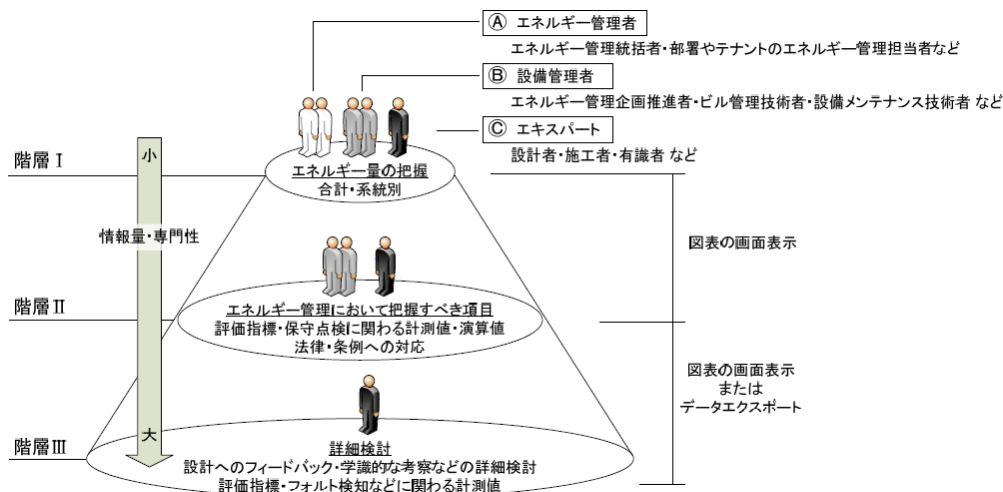


図 14 BEMS の活用者別の階層化 ⁴⁾

(4) No.15, No.17_BEMS 「エネルギーの見える化」とビックデータの活用 BEMS (2011-2015) ^{27), 28)}

トヨタの製造現場から生まれた言葉に「見える化」がある。BEMS を効果的に活用する上でも、データを平易に、問題の所在を視覚に訴えられるように数値化・グラフ化することが重要で、誰に、何を、どうやって見える化するかの検討を目的に本委員会が設置された。さらに、この延長としてビックデータの活用が検討された。BEMS に活用可能なビックデータを図 15 に示す。単にデータ量が多いだけでなく、データの

種類、更新頻度が多い特徴を持つため、従来型 BEMS では取り扱いが困難であった。本小委員会では異業種での活用事例を調査研究することで、BEMS への好適な応用を検討している。ポイントは、欲しい情報を理解できる形で提示する「可視化」、データに基づく「予測」、需給・無駄の削減・リスクとリターンの「最適化」としている。

(5) No.20_BCP 対応型 BEMS 検討 (2016-2018) ³⁰⁾

東日本大震災以降、災害拠点の建物では、機能を維持する BCP (Business Continuity Plan) が策定されている。BCP の観点から BEMS がどうあるべきかが重要なテーマとなり、本委員会にて検討が進められた。BCP 対応型 BEMS の例示として計測点配置の考え方を図 16 に示す。リソースを特定エリアに集中することで、事業継続の時間を長期化するという考え方で、従来の計量計測の計画と異なる。また、防災拠点としてのまちづくりの概念も登場し、図 17 に示す統合モニタリングの事例は特徴的な適用と言える。



図 15 ビッグデータを構成する各種データ(例) ²⁹⁾

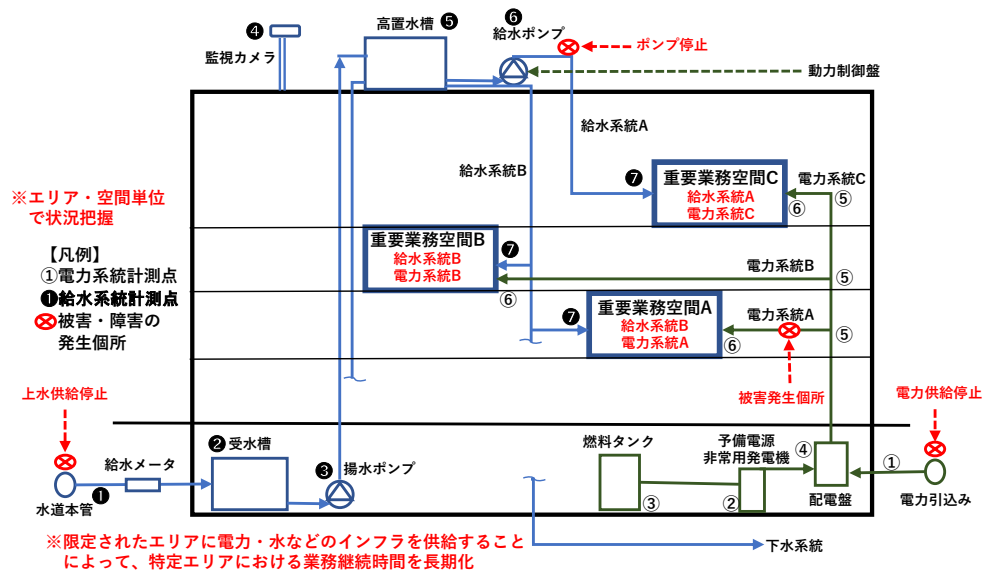


図 16 計測点配置の考え方

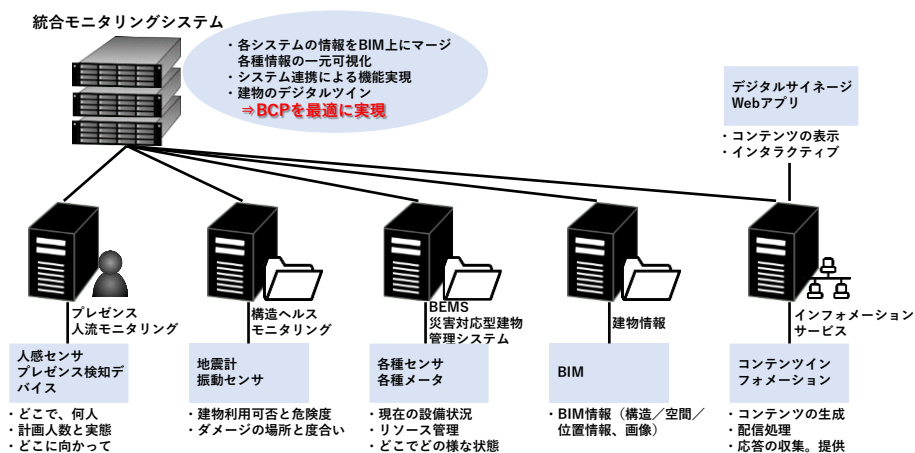


図 17 統合モニタリングシステムのイメージ

(6) No.23_AI 活用による建物システムの運用最適化検討（2018-2020）³¹⁾

第三世代の人工知能（AI）は、一時的なブームからシステムの中核プロセスとなりつつある。このような時流の下、建物システム運用に対して AI に何ができるのか、できないのか、何が期待されているのか、何が解決されて、何ができないのか、実用化するためにどのような課題があるのかの洗い出しを目的に本委員会が設置された。報告書では多くの実例を含め、内容の議論において得られた知見が盛り込まれている。一例としてエネルギー管理への AI 適用を図 18 に示す。実際の建物とサイバー空間の設備を連携し、実際に試験困難な運用を事前検証した上で実設備に適用するものである。一世代前の第二世代 AI では、専門家の知識をルールベース化して推論することで、専門家の代替を狙ったものであったが^{32)~36)}、次の第四世代では教師なし学習など未経験の事象に対しても適用するデジタルツイン型の BEMS の実装が予想され、AI の活用がますます期待される。

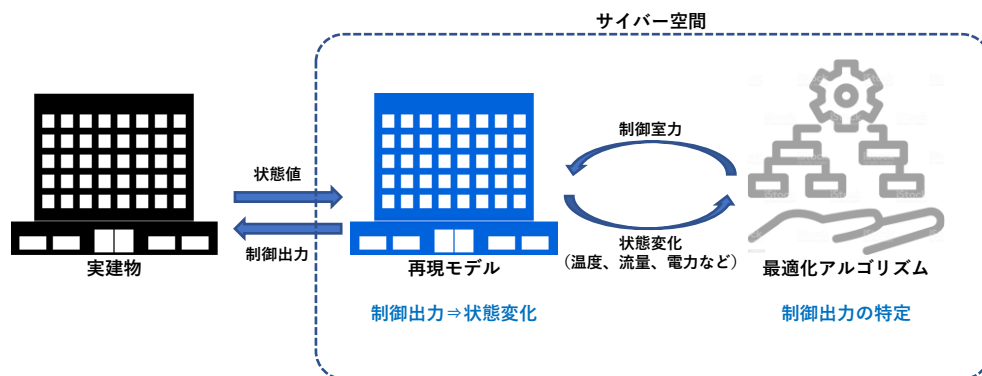


図 18 エネルギー管理における IoT と AI の連携例

4. 当社の既開発技術と今後の取組

図 19 に、拡張 BEMS（最適制御、監視、診断、エネルギー管理）の位置付けに相当する当社開発技術の変遷を示す。開発は 3 つのステージから成る。第 1 ステージでは「TIS（タカサゴ・インテリジェント・システム）」を構成する省エネルギー制御（SECTAT[®]）・高精度制御（DELTAT[®]）・管理システム（SIGMAT[®]）の 3 つのシリーズを中心に開発を進めてきた。第 2 ステージでは「ネットワーク」をキーテクノロジーとしてサービス事業への展開を目的とした技術開発を行ってきた。第 2 ステージまでは、ソフトウェアの全てを自社開発としてきたが、機能の社会的劣化、OS のバージョンアップ対応などフォローアップが業務負荷となってきたため、現在に至る第 3 ステージでは「ICT」を要素技術として、技術の進化に迅速に追従できるように汎用ソフトウェアを適用した開発形態となっている。以下に、特徴ある開発技術を示す。

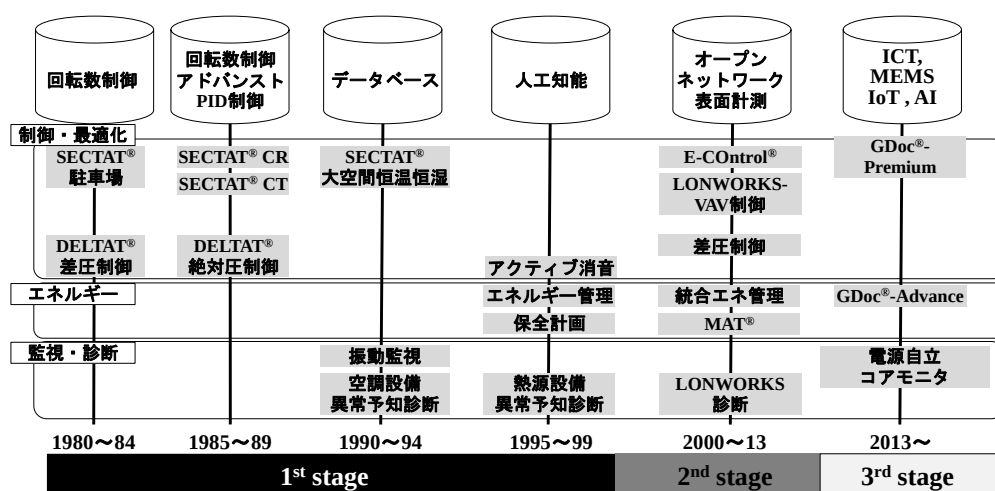


図 19 BEMS に関連する研究開発の系譜

4.1 AI（エキスパートシステム）を活用した設備異常診断

第二世代 AI 全盛期、当社業務への適用として、設計、施工計画、試運転調整、運用計画、劣化診断、社員教育が検討される中、参考になった事柄は、米国のロングビーチで開催されたエキスパートシステムに関する講演会で発表された概念設計で、戦闘機エンジンの状態値を地上で監視し、エキスパートシステムで異常を診断するというものであった³⁷⁾。これにヒントを得て、当時ミニコンから派生した EWS（Engineering Work Station）を用いて設備異常診断システムの研究開発を 1985 年から開始した。空調設備の異常予知診断機能を実験検証するために、1988 年には、御茶ノ水の当時社屋の空調設備を厚木の研究所で遠隔監視して診断するといった実証を行った。診断ルールの構築は、FMEA（Failure Mood and Effects Analysis）及び FTA（Fault Tree Analysis）の信頼性解析法を活用して、機器メーカーや保守員など専門家の持つ設備機器の知識から異常現象と異常原因の因果関係を整理し、EWS に収納した。空調設備を構成する機器の膨大な組み合わせについては、階層構造型のデータベースを研究開発し、設備機器に関する知識ベースとして EWS に収納した。図 20 にシステム構成を示す通り、1 台の EWS で最大 20 カ所の施設までを遠隔で監視・診断できる設計とした。当時としては画期的な技術開発で空気調和・衛生工学会技術賞開発賞を受賞した³⁸⁾。

4.2 建物全体最適化を狙った運転管理・制御システム

本システム開発以前の省エネルギー制御は、主に単一制御ループを対象とした個別機器の最適化制御であった。この開発事例として、パワー半導体に伴って実現したインバータを用いた送風機の変風量制御³⁹⁾、マイクロコンピュータを用いた分散型デジタル制御（DDC）⁴⁰⁾、さらには通信ネットワークのオープン化に伴い情報の相互運用性を用いた個別分散型制御がある⁴¹⁾。しかし、個別機器の最適化では設備全体のエネルギー収支に不均衡が生じ、省エネルギー効果が得られない場合がある。

そこで当社は、熱源設備と二次側空調機の熱収支から現在の運転方法を評価し、最適な運転計画を支援するエネルギー管理支援システムを開発し、1991 年には業界に先駆けて実在設備に導入した⁴²⁾。これらの実績を踏まえて、設備全体のエネルギー消費量が少なくなるように制御目標値を設定する設備全体の最適化制御システム「E-COntrl®」を開発した⁴³⁾。E-COntrl®の制御動作を図 21 に示す。動的に制御目標値を設定し、かつ機器の運転停止を指令することで、時々刻々変化する負荷変動に伴い最適な運転条件に移行する。また、一品生産に近い空調設備に対応するため、図 22 に示すモジュール構造のソフトウェアを開発した。ソフトウェアのパッケージは、データ処理に関する共有部分と制御目標値の特定に関する個別部分からなる。個別部分はプロシジャと呼ぶ手続き宣言によって演算を実行させることで、制御フローに応じたプログラム（制御ロジック）の作成がパラメータ設定で可能となる拡張性の高い物とした。

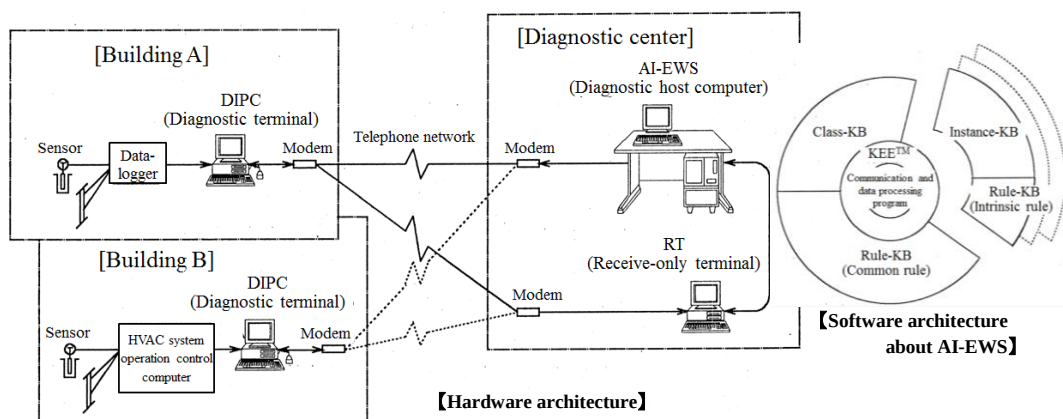


図 20 空調設備異常予知診断システムの構成³⁸⁾

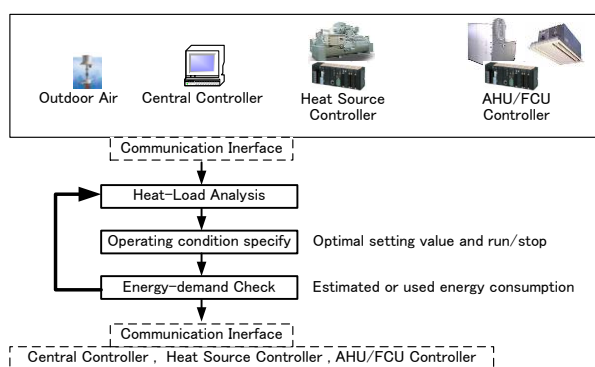


図 21 E-Control の処理フロー⁴³⁾

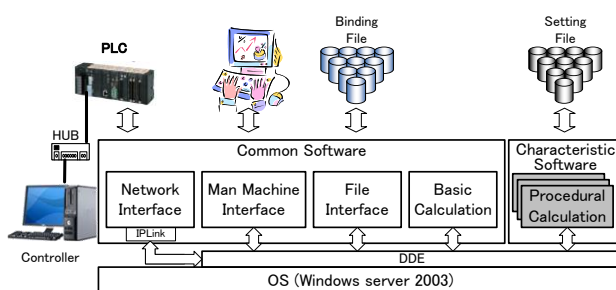


図 22 E-Control のソフトウェア構成⁴³⁾

4.3 精度検証した外表面計測技術

建築設備の性能検証は、高価な計測機器を多数取り付けるのであれば、開発当時の技術で誰にでも出来るが、費用対効果の面から、限定した範囲しか計測していないのが実態である。また、既設建物において新たなセンサを取り付けるには、営業中止、火災、漏水などのリスクを負わなければならない。そこで、配管やダクトに穴を開ける挿入型センサを使わずに、安価なセンサで計測精度が確保できれば、これらの客先の費用とリスクの負担を根本的に解決できる。つまりは、「顧客に負担をかけない・設備を遊休させない・顧客を待たせない」運用者主体の技術になる。このコンセプトの下、センサ仕様と設置方法などの使い勝手が適正な表面計測センサの選定と、得られた計測値を補正して、管内部の状態を推定する外表面計測技術 (MAT[®]) を開発した⁴⁴⁾。図 23 に表面計測の概要を示す。この計測手法では、センサ本体の誤差の校正、および配管内部と周囲との熱伝導計算と実験を基に整理した補正を加えることで、配管表面の温度計測から内部の流体温度を $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ (屋内配管測定時) の確からしさが得られる。これは丸形温度計に比べて一桁高い精度であり、業務用建築の温度計測に用いる白金測温抵抗体(Pt100 Ω —JIS 0.3 級) とほぼ同等である。本技術は、これまで当社 BEMS の基盤技術として多くの熱源機器の性能評価に活用してきている。

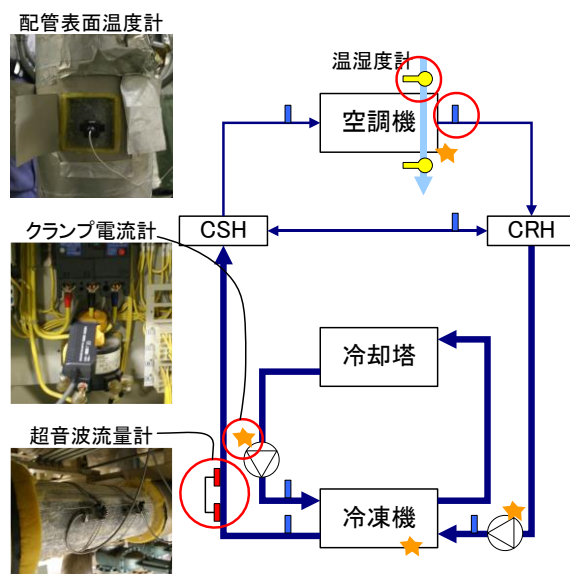


図 23 表面計測の概要⁴⁴⁾

4.6 今後の取組

カーボンニュートラルに向けて、当社では二つの人工知能技術を活用した管理システムに取り組んでいる。以下にそれらの開発状況を紹介する。

4.6.1 汎用推論エンジンを用いた運転支援システム

推論エンジンは人工知能技術の一つで、業務知識をルールベースとして蓄積し、推論機能による判断で意思決定の自動化を行うシステムである。当社では、この推論エンジンを搭載したクラウド対応 BEMS の開

発^{45)・46)}と熱源システムの運用最適化技術を開発⁴⁷⁾し、その普及展開を進めている。図 24 にシステムの最適化に対する概念を示す。空調に係る熱源・冷却塔・搬送・二次側の全設備を対象に推論エンジンを用いて、空調設備全体のエネルギー消費量をミニマムにする空調設備の全体最適化を目指している。現在、熱源システムの運用最適化技術の開発と実装を進めている。本技術で採用した推論技術は、当社が長年培ってきた熱源の運用ノウハウを整理・体系化して構築したルールベースを基に、推論エンジンを用いて最適解を推論する技術である⁴⁸⁾。これにより、熱源の運転条件を網羅的に検証し、熱源および二次側の諸条件を満たす現実的で最適な運転条件を自動的に特定可能としている。

人工知能(ルールエンジン)による

- ・全体最適化(エネルギー消費量ミニマム運転ポイント抽出)
- ・運用ノウハウ・機器性能の機械学習・活用

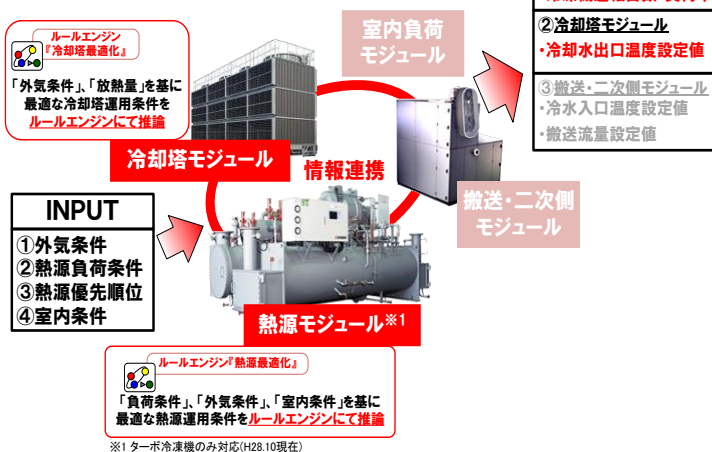


図 24 推論エンジンによる空調システムの最適化の概念⁴⁷⁾

4.6.2 モデル予測制御を用いた電力エネルギー管理システム

カーボンニュートラルに向けて、エネルギー管理はこれまでの熱・空気に加え、発電、蓄電、電力利用を含む電力需給バランスの最適化が重要となる。当社では、現在再生可能エネルギーによる電力を有効活用するためにモデル予測制御を取り入れたデータドリブン型のエネルギーマネジメントシステム (EMS) を研究開発している^{49)・50)}。現在、高砂熱学イノベーションセンターにて機能検証を進めている最中である⁵¹⁾。今後カーボンニュートラルに向けた電化推進で導入が見込まれる自立型エネルギーシステム (オフグリッド)、電力の FIP (Feed in Premium) 制度などにおいて、その運用には不可欠のシステムと考える。図 25 にモデル予測制御の概念を示す。モデル予測制御とは、各時刻で未来の応答を予測しながら最適化を行う手法で、複雑な系に対して、より高性能な制御が期待される。変動の大きな再生可能エネルギーと急峻または緩やかな負荷変動を伴う需要側、そしてバッファの蓄エネルギーのバランスを保ち、高効率点での運用を実現するには、EMS の高度な制御技術への要望が高まる。

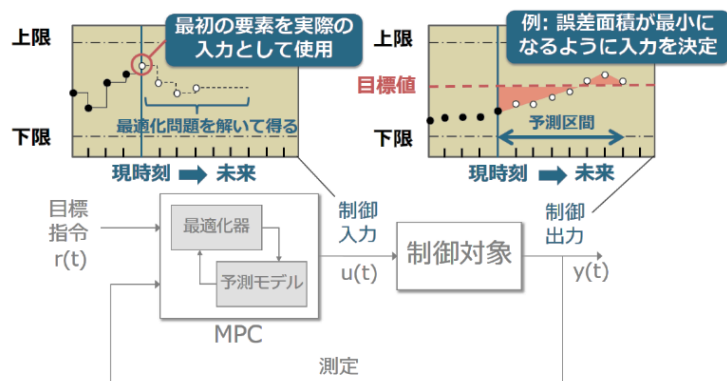


図 25 モデル予測制御の概念⁴⁴⁾

5. おわりに

最初の導入から半世紀が経過する BEMS について、黎明期での導入状況から、コミッショニング・補助事業による導入普及、そして空気調和・衛生工学会での活動について俯瞰した。この間、空調設備は、中央方式から個別方式そして熱融通へと管理対象の範囲が変わってきている。また、熱利用も 7°C/45°C の冷温水から、液化天然ガスの -160°C～燃焼の 1,700°C までのカスケード利用へと広範になり、エネルギー管理も電力・熱・水と領域が広がり、BEMS の導入が不可欠となっている。

これまで当社の BEMS 関連の開発はもっぱら空調に軸足を置いてきたが、これからは電力・熱・水そして環境の統合管理を目指したシステムへ進化できればと思う。

文 献

- 1) 中原信生：省エネルギーと BEMS、IBEC(1992.9)
- 2) 中原信生：BEMS の発達、機能と課題、IMES(1988.9)
- 3) 空機調和・衛生工学便覧、第 14 版、第 2 章 統合計画の実際、p.38(2010.4)
- 4) BEMS ビル管理システムの計画・設計と運用の知識、空気調和・衛生工学会、p.3、173(2016.3)
- 5) 伊藤尚寛、柴田義隆、村上公哉、田中建美、中原信生：建築物の環境・エネルギー管理システムに関する調査研究 その 1 建物の建築的・設備的特性と室内環境の実態について、日本建築学会東海支部研究報告、pp.281-284(1990.2)
- 6) 伊藤尚寛、柴田義隆、村上公哉、田中建美、中原信生：建築物の環境・エネルギー管理システムに関する調査研究 その 2 BEMS 導入の目的・効果およびシステム構成・機能について、日本建築学会東海支部研究報告、pp.285-288(1990.2)
- 7) 西村英樹、佐藤文人、村上公哉、伊藤尚寛、中原信生、尾島敏雄：建築物及びエネルギー管理システム(BEMS)に関する基礎調査研究(その1)、日本建築学会梗概集、4615、pp.1229-1230(1990.10)
- 8) 佐藤文人、西村英樹、村上公哉、伊藤尚寛、中原信生、尾島敏雄：建築物及びエネルギー管理システム(BEMS)に関する基礎調査研究(その2)、日本建築学会梗概集、4616、pp.1231-1232(1990.10)
- 9) 柴田義隆、伊藤尚寛、村上公哉、佐藤文人、西村英樹、中原信生、尾島敏雄：建物の環境・エネルギー管理システム(BEMS)の実態に関する基礎調査 その1 BEMS の機能と管理実態に関する分析、空衛講論、D-47、pp.973-976(1990.10)
- 10) 中井一夫、伊藤尚寛、中原信生：建物の環境・エネルギー管理システム(BEMS)の実態に関する基礎調査 その2 環境・エネルギー管理の実態と BEMS の効果に関する分析、空衛講論、E-2、pp.997-1000(1991.10)
- 11) 2019 建築設備情報年鑑、事務所建築における竣工設備データ、建築設備士(2019.12)s
- 12) 松縄堅、伊香賀俊治：第 27 回学会賞受賞物件 伊藤忠横浜湖北ビルの空気調和設備、空気調和・衛生工学、No.63、Vol.12(1989.12)
- 13) ASHRAE GUIDELINE 1-1996: The HVAC Commissioning Process(1996)
- 14) Portland Energy Conservation, Inc., Model Commissioning Plan and Guide Specifications, Ver.2.05、(1998)
- 15) インタビュー中原信生：建築設備の真の性能保証実現へ、日経アーキテクチャー(2000.9.4)
- 16) 清水昭浩、佐々木邦治、村上俊博、松田浩康：事務所ビル(Nビル)での BEMS を活用した空調機廻りの実測結果、空衛講論、C-35、pp.701-704(1999.9)
- 17) 廣岡正、玉置進、末岡直彦、中原信生：空気調和設備の当初性能検証(コミッショニング)の実践研究：(第一報)性能検証実施の目的・実施体制、空衛講論、E-10、pp.309-312(2001.9)
- 18) 委員会報告：建築設備の性能検証(コミッショニング)基本指針(案)、空気調和・衛生工学会ビル管理システム委員会コミッショニングワーキンググループ(1997)
- 19) 清水昭浩、佐々木 邦治、田中 良彦、柴田 克彦、池田 昌弘、高玉 守之：事務所ビル(Sビル)でのコミッショニング結果、空衛講論、E-18、pp.341-344(2001.9)
- 20) GODA(ゴオーダ)クラウド、<https://www.tte-net.com/solution/goda.html>(2022.1 検索)
- 21) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：住宅・建築物高効率エネルギーシステム導入促進事業(建築

物に係るもの)・(BEMS 導入支援事業) 平成 11～21 年度補助事業における成果の総合的分析、平成 23 年度成果報告書(平成 24. 2)

- 22) J-STAGE : <https://www.jstage.jst.go.jp/browse/-char/ja> (2022. 1 検索)
- 23) 百田真史：シンボジウム BEMS の新たな活用を目指して～ニューノーマル社会に向けた在室者情報の活用と課題～趣旨説明(2021. 8)
- 24) ビル管理システム委員会：空調制御アプリケーションから見たオープン化 BEMS ガイド、空気調和・衛生工学会(H18. 3)
- 25) ビル管理システム委員会：BEMS の普及と活用促進に向けて、空気調和・衛生工学会(H18. 3)
- 26) ビル管理システム委員会：BEMS の活用に向けたグラフ画面とデータエクスポートの標準仕様の提案、空気調和・衛生工学会(H23. 12)
- 27) ビル管理システム委員会：BEMS-エネルギーの見える化に関する調査研究、空気調和・衛生工学会(H24. 11)
- 28) ビル管理システム委員会：BEMS におけるビッグデータの活用に関する調査研究、空気調和・衛生工学会(H27. 10)
- 29) 総務省情報通信白書平成 24 年版：第 1 部 ICT が導く震災復興・日本再生の道筋、p. 154(平成 24. 7)
- 30) ビル管理システム委員会：災害時の建物の機能維持を支援するためのビル管理システム-BCP 対応型 BEMS の検討、空気調和・衛生工学会(H31. 2)
- 31) ビル管理システム委員会：AI・IoT 時代のエネルギーマネジメント～基礎知識の整理と最先端事例、空気調和・衛生工学会(2020. 11)
- 32) 柴田克彦、清水昭浩、伊東民雄、高橋惇：空調設備の故障予知診断用エキスパートシステム、空衛講論、pp. 1029-1031(1988. 9)
- 33) 柴田克彦、清水昭浩、伊東民雄、高橋惇：空調設備の故障予知診断用エキスパートシステム (第 2 報)、空衛講論、pp. 185-190(1989. 10)
- 34) 柴田克彦、清水昭浩、伊東民雄、高橋惇：設備診断システムの開発 (第 1 報) システム概要、空衛講論、pp. 993-996(1990. 10)
- 35) 清水昭浩、柴田克彦、伊東民雄、高橋惇：設備診断システムの開発 (第 2 報) 実施例の紹介、空衛講論、pp. 997-1000(1990. 10)
- 36) 柴田克彦、清水昭浩、伊東民雄、高橋惇：設備診断システムの開発 (第 3 報) 実用型診断システムの稼働状況、空衛講論、pp. 1041-1044(1991. 11)
- 37) Leonald Chesler et.al, Applications of Expert System to Classical Issues of Defense, The 4th Annual Artificial Intelligence & Advanced Computer Technology Conference, 197 (1988)
- 38) 高橋惇、伊東民雄、柴田克彦、清水昭浩：第 30 回空気調和・衛生工学会学会賞技術賞／技術開発部門の受賞物件報告「空調設備異常予知診断エキスパートシステム」、空気調和・衛生工学、第 66 巻第 12 号、pp. 47-56(1992. 12)
- 39) 高橋惇：駐車場換気設備の省動力制御システム、建築設備と配管工事、12, 55(1983. 5)
- 40) 柴田克彦、高橋惇、大神龍幾、木山昌良：微差圧制御システムの開発、空衛講論、pp. 129-132(2004. 9)
- 41) 友田衛、八田康之、柴田克彦：過冷を抑止する VAV 空調システムの開発、空衛講論、pp. 1953-1956(2002. 9)
- 42) 孔鉄男、清水昭浩、伊東民雄、高橋惇、高瀬知章：空調設備のエネルギー管理支援システムの開発、空気調和・衛生工学、第 67 巻第 3 号(1993. 9)
- 43) 柴田克彦、米澤仁、津田譲二、茂森昭博、今野一富：設備全体の最適化制御システム「E-C0ntrol」、高砂熱学工業総合研究所報、No. 22、pp. 7-12(2008. 11)
- 44) 柴田克彦、石塚圭一、友田衛、相澤直樹、米澤仁、山田哲司：計測＋解析＋評価の統合化技術の開発、高砂熱学工業総合研究所報、No. 18、pp. 13-26(2004. 11)
- 45) 米澤仁、寺岡慎介、金田純一、片山健一郎、岡本英之、清水昭浩、柴田克彦：次世代空調システムの実現に向けた「8 つのトライ」—情報通信技術の空調設備への導入事例—、空衛講論、pp. 33-36(2016. 9)
- 46) 米澤仁、岡本英之、入部真武、清水昭浩、柴田克彦：人工知能を搭載したクラウド対応 BEMS の開発、空衛講論、pp. 165-168(2016. 9)
- 47) 岡本英之、米澤仁、柴田克彦、入部真武：人工知能を用いた熱源システムの運用最適化技術の開発、空衛講論、pp. 313-

316(2016.9)

- 48) ルールエンジンとは、<https://www.nau.co.jp/rule-engine/> (2022.1 検索)
- 49) Yuki MATSUNAMI, Yuan GAO, Shohei MIYATA, Yasunori AKASHI, Katsuhiko SHIBATA, Kenichiro KATAYAMA, Yoshihiro HIRAHARA: Development of a grid independent energy system using energy supply and demand prediction (Part 1) Concept and problem identification from operational data、空衛講論、IS-8、pp.1-4(2021.9)
- 50) Yuan GAO, Yuki MATSUNAMI, Shohei MIYATA, Yasunori AKASHI, Katsuhiko SHIBATA, Kenichiro KATAYAMA, Yoshihiro HIRAHARA: Development of a grid independent energy system using energy supply and demand prediction (Part 2) Solar radiation prediction based on Graph neural network and long short-term memory network、空衛講論、IS-9、pp.5-8(2021.9)
- 51) 清水昭浩、平原美博、松浪佑宜、羽鳥大輔、高正明、田辺新一: エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価 (第16報) ZEB 達成状況、空衛講論、J-55、pp.221-224(2021.9)

ABSTRACT

In the 1970s, trials of a centralized supervisory control system using a minicomputer began, primarily in large-scale buildings. Moreover, a building and energy management system (BEMS) was introduced. Thereafter, its performance evaluation and energy saving effect have been quantified owing to the standardization of technology by the academic society, application of performance verification (commissioning), and introduction and dissemination by subsidized projects; awareness of effects of introducing BEMS has increased. Now, half a century later, it has been applied practically to equipment management in several buildings. The transition of BEMS during this period and the efforts made by the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan are summarized with the aid of past literature. Furthermore, the prospective path to carbon neutrality, using the developed technology in Takasago Thermal Engineering, is outlined.

空調における新型コロナウイルス対策

五味 弘

Countermeasures Against COVID-19 with Respect to the Air Conditioning System

Hiroshi Gomi

新型コロナウイルス感染症 COVID-19 が世界に拡散してから約 2 年間が経過し、まだ不明な点が多いながら多くの知見も得られている。その知見を空気調和設備もしくはシステムに関わる視点で整理し、空調におけるコロナ対策として記述する。

1. はじめに

2019 年 12 月に中国湖北省武漢市で原因不明の肺炎患者が確認され、翌 2020 年 1 月 7 日には新種のコロナウイルスと特定され、同月 WHO (World Health Organization: 世界保健機関) が「国際的に懸念される公衆衛生上の緊急事態」と警告してから、このウイルスによる感染症 COVID-19 は瞬く間に全世界に拡散した。それから約 2 年間、波状の感染拡大を繰り返したが、ワクチン接種の効果もあってか 2021 年 12 月現在、国内では小康状態を保っている。一方で海外ではワクチン接種率の高い国でも再び感染拡大の兆候を示すなどコロナ禍収束のための要件は明確ではない。さらに新たな変異株のオミクロン株の出現など、予断を許さない状況にある。このように COVID-19 は未曾有の災禍で現時点でも不明なことも多いが、この 2 年間で多くの知見も得られている。その知見を空気調和設備もしくはシステム(以後、単に空調と記す)に関わる視点で整理することは重要である。本報では、これまでに発表された COVID-19 に関する文献等を空調の観点でレビューし、空調における新型コロナウイルス対策として記述する。

2. 感染経路と空調

感染経路には主に、A.飛沫感染、B.エアロゾル感染、C.接触感染がある。当初 COVID-19 の感染は従来のインフルエンザ等の感染と同様に飛沫感染と接触感染が主体と考えられたが、それでは説明のつかないエアロゾルによると思われるクラスター感染も発生した。感染経路に関しては疫学的調査を含めて各種の検証が継続的になされ、2020 年 3 月からの世界的な流行から約半年が経過した 2020 年 10 月には、CDC(Centers for Disease Control and Prevention: 米国疾病予防管理センター)は、COVID-19 の感染経路についてホームページに以下のようなコメントを掲載している¹⁾。

- 1) 人と人の密接な接触の際に最も一般的に広がる(A.飛沫感染)。
- 2) ときに空気を伝播して感染することがある(B.エアロゾル感染もしくは飛沫核感染)。
- 3) 汚染された表面との接触を通してはあまり広がらない(spreads less commonly)(C.接触感染)。

A.飛沫感染が主感染ルートであることは明らかである。飛沫感染対策は、人と人の離隔距離の確保、マスクやフェイスシールドの着用、アクリル板等の設置、大声を出さないなどであり、特殊な一方向流の清浄気流形成装置などを除いて基本的に空調(換気)によって対策できるものではない。

B.エアロゾル感染は、 $5\mu\text{m}$ 程度以下のウイルスを含む粒子が重力沈降等せずに気中に浮遊するものを呼吸時に吸込み、感染するものである。この対策は、空調(換気)が主となる。この感染の代表的な事例に、中国広州のレストランの事例があり、ファンコイルユニットの循環気流によってウイルスの高濃度領域が局所的に形成され、感染者から離れたテーブルで二次感染が

発生している²⁾。詳細な調査の結果、換気回数として 0.56～0.77 回/h(一人あたりの換気量 2.70～3.74m³/h)と外気がほとんど導入されておらず、新鮮外気による希釈がなされていなかったことが集団感染発生の原因と考えられている³⁴⁾。国内では 2020 年 3 月 9 日に 厚生労働省の新型コロナウイルス感染症対策専門家会議が示した「新型コロナウイルス感染症対策の見解」⁹⁾で 集団感染リスクの高い3つの「密」を避ける呼びかけをしており、その一つに世界に先駆けてエアロゾル感染を意識した「換気の悪い密閉空間」を挙げている。さらに 2020 年 3 月 30 日には、「一人あたりの必要換気量を満たすだけで感染を確実に予防できるということまで明らかになっているわけではないが」と前置きしながらも、『ビル管理法における空気環境の調整に関する基準に適合していれば必要換気量(一人あたり毎時 30m³)を満たすことになり、「換気が悪い空間」には当てはまらないと考えられる。』との見解⁹⁾を示した。

C.接触感染に関しては、表面接触による感染の事例はほとんど報告されないこと、感染者が滞在した部屋の表面でウイルスの RNA(存在の痕跡)は検出されるが感染力価を持つウイルスはめったに検出されないことから、主感染経路ではないと考えられている⁷⁾。また、2020 年 3 月に発表された Neeltje らによる新型コロナウイルスの生存期間に関わる著名な論文⁹⁾では、ステンレス表面で 2 日、プラスチック表面で 3 日間もウイルス感染力価を維持するとし、接触感染の可能性があることの裏付けとされてきたが、試験濃度が非現実的に高濃度であることが指摘されている⁷⁾。確かにその他のウイルスの生存期間に関わる報告文⁹⁾でも、濃度 10 の 5～6 乗オーダーのウイルスを各種材料表面に塗布し、滅菌レベルに近い 10 の 1～2 乗になる時間を生存期間として最長で 7 日間とするなど、生存期間だけが独り歩きしているところもある。これらの測定方法の妥当性、特に実際の表面でのウイルスの状況を再現しているのかに関しては疑問視されている¹⁰⁾。ただし、接触感染のリスクが小さいからといって、直ぐに手洗いや手指の消毒、感染者が滞在した部屋等の除菌作業を止める状況にはない。まだまだ COVID-19 においては不明なところが多いので、リスク低減の努力は続けられるべきと言えよう。

3. 空調における対策

空調におけるウイルス対策技術には、大別すると①新鮮外気(外気中にはウイルスは通常存在しない)の希釈効果によるウイルス濃度低下、②循環系でのエアフィルタや紫外線照射によるウイルス除去および殺菌がある。なお、温湿度による感染防止に関しては、COVID-19 に関しては十分な知見が得られていない¹¹⁾¹²⁾。厚生労働省の『冬場における「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気の方法」¹³⁾においても、呼吸器系疾患等への影響を考慮に入れて 18℃以上、RH40%以上を推奨しており、特に COVID-19 に関するデータに基づくものではない。ASHRAE(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers:アメリカ暖房冷凍空調学会)、空気調和・衛生工学会(SHASE:The Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan)でも、呼吸器系疾患および従来のウイルスにおけるデータを考慮して、温度 18～28℃、相対湿度 40～60%を推奨しており¹⁴⁾、ビル空調において特に厳しい温湿度範囲ではない。したがって、空調における対策としては、上記①②が基本であり、併せて居室の換気効率の向上を図ることが換気によるウイルス汚染制御技術として有効である。

換気の効果を把握するために換気量と感染リスクの基本的関係を理解することは重要である。ここでは、感染確率モデルを紹介して、換気によるウイルス汚染制御について説明する。

3.1 感染確率モデル

室内にウイルスの発生源(一次感染者)が存在する場合に、換気量と感染リスクの関係を表すものに Wells-Riley 感染確率モデル¹⁴⁾があり、(1)式で表される。

$$\frac{n}{N} = 1 - \exp\left(-\frac{Iqpt}{Q}\right) \approx \frac{Iqpt}{Q} \quad (1)$$

ここで、n [-]:イベント後の二次感染者数

N [-]:感受性の高い在室者数

I [-]:在室する一次感染者数

q [1/h]:時間当たりの quanta 生成率

p [m³/h]:時間あたりの呼吸量

t [h]:滞在時間

Q[m³/h]:実効換気量

すなわち、感染確率 n/N は、一次感染者数、quanta 生成率(後述)、呼吸量(活動の強度に依存)、滞在時間に正比例し、換気量に反比例する。

3.2 quanta 生成率について

quanta 生成率(以後、quanta 値)とは、単なるウイルスの発生量ではなくて、(2)式に示す感染確率 P_i に関わる指標で、1 quanta は「密閉空間において在室者の $1-e^{-q}$ 、すなわち 63%が感染する感染性ウイルスの発生量」と定義される¹⁵⁾。

$$P_i = 1 - e^{-q} \quad (2)$$

Buonanno らは、発生者の呼吸(安静、静座)、会話、歌唱等の各種動作や受動者の呼吸量(安静、静座、軽い運動、激しい運動)の条件を変えて、モンテカルロ法によって quanta 値を求めた¹⁵⁾。それを中国広州のレストランや米国スカジットバレーでの合唱団⁹⁾等の集団感染事例に適用して妥当性を検証している。REHVA(Federation of European Heating Ventilation and Air Conditioning Associations:欧州空調換気設備協会)は、Buonanno らの①～④の各種動作等での quanta 値を重みづけ平均して、事務作業、会議、レストランでの会食などの日常的行動に対する感染リスク評価のために想定すべき quanta 値を提案している。表1に Buonanno と REHVA の quanta 値を示す¹⁶⁾。REHVA の quanta 想定値は、会議や会食などの会話が伴う行動では大きく、授業や事務などの会話の少ない行動では小さくなっている。この考えを応用すれば種々の行動状況に応じた quanta 値や感染リスクが想定可能である。例えば、映画館などでは視聴中はほとんど会話も無いので quanta 値は 5.0 以下で、また滞在時間も 3 時間程度なので感染リスクは比較的小さい。

表 1 Buonanno と REHVA の想定する quanta 値¹⁶⁾

Buonanno らの quanta 値					
各種動作等	① 休息 口呼吸	② 軽作業 会話	③ 軽作業 歌唱	④ 重作業 口呼吸	
90 パーセンタイル値	3.1	42	270	21	
REHVA による quanta 想定値(h ⁻¹)					
教室 5.0	事務所 5.0	会議 18.7	レストラン 14.8	ショッピング 10.9	スポーツ 21.0
0.95① +	0.95① +	0.60① +	0.70① +	0.80① +	④
0.05②	0.05②	0.40②	0.30②	0.20②	

筆者注) REHVA 下段は各種動作による重みづけの内訳

3.3 外気量 30m³/(h・人)の持つ意味

厚生労働省指針の外気量 30m³/(h・人)⁹⁾は、建築物衛生法(いわゆるビル管法)を踏襲したものではあるが、Menzies らのカナダの医療従事者に対する病院の換気と結核の院内感染リスクに関する報文¹⁷⁾において、換気回数 2 回/h 以下で感染リスクが高く、それ以上で感染リスクは低いことなどを根拠としている。倉淵は、事務所を想定し、(1)式に一次感染者数 $I=1$ 、quanta 値 $q=7$ 、呼吸量 $p=0.53$ 、滞在時間 $t=8$ を代入し、二次感染者を 1 人以内にするための一人当たりの外気量 Q を計算し、約 30m³/(h・人)であることを示した¹⁸⁾。これより、一人当たりこの外気量を確保すれば在室者 N が何人でも二次感染者 n は 1 を超えない、すなわち、エアロゾル感染でクラスターを発生させない換気量と考えることができるとしている。ただし、可能な限り実効換気量を多くして安全率を高めることが望まれるとも述べている¹⁹⁾。ここで、Buonanno らの quanta 値は、感染拡大当初に武漢株に対して求められたものである。最近のデルタ株の感染力上昇の影響は盛り込まれておらず、またマスクは装着していない条件のものである。武漢株に対するデルタ株の感染力は 2 倍以上²⁰⁾とのことではあるが、不織布マスクの感染抑制効果は発生側と受動側双方がマスクを装着すれば約 75%の低減効果²¹⁾があるので、マスク着用が徹底している日本では両者の影響は相殺される可能性を倉淵は示唆している¹⁹⁾。ちなみに、マスクの効果に着目して(1)式を考えた場合、quanta 値が 75%削減されるとすると換気で同じ効果を出すには 4 倍の実効換気量 Q が必要で、後述する対策でこの実効換気量を得るのはかなり困難を伴う。マスクの効果は絶大であることがこのことから分かる。

3.4 実効換気量について

感染リスクを低減するための実効換気量 Q は、外気量 Q_{OA} だけではなく(3)式の要素が含まれる¹⁹⁾。

$$Q = Q_{OA} + \eta Q_r + Q_{de} + Q_{inact} \quad (3)$$

ここで

Q :実効換気量(m^3/h) Q_{OA} :外気量(m^3/h)
 Q_r :還気量(m^3/h) η :還気系統の除去装置のウイルス除去効率 (-)
 Q_{de} :壁面沈着によるウイルス濃度低減を換気量換算したもの (m^3/h)
 Q_{inact} :自己の不活化によるウイルス濃度低減を換気量換算したもの (m^3/h)

各換気量の大きさを Q_{OA} と比べて表 2 に示す。なお、 Q_{de} と Q_{inact} は文献 19 を参考にして求めた。 Q_{de} と Q_{inact} はウイルス濃度の自然減衰に関わる相当換気量であるが、不明確な点もあり、かつ空調において制御できる Q_{OA} や ηQ_r に比べて小さいので、安全側としてここでは考慮しないこととする。なお、小型の空気清浄機等の性能試験において濃度減衰カーブから除去効率を求める場合などは、循環風量が小さく、相対的にこれらの影響が大きいと言えるので自然減衰項も考慮する必要がある。

セントラル空調方式の場合、一般的には循環空気量(還気量) Q_r は、外気量 Q_{OA} の 2~3 倍程度ある。そのため適切なウイルス除去効率 η を持つ除去装置を還気系統に用いれば、外気量と同等以上の実効換気量を得ることが出来る。この除去装置に該当するものがエアフィルタと紫外線殺菌装置(UVGI: Ultraviolet Germicidal Irradiation)である。ただし、これらの除去装置は CO_2 や VOC(揮発性有機物)等は除去できないので、外気導入との併用に限られる。なお、空気清浄機に多用される光触媒技術は、光触媒機能を持つエアフィルタ等にウイルスを付着させ、光を照射して活性酸素や OH ラジカルによって表面のウイルスを不活化するものである。粒子性のウイルス除去に関してはエアフィルタ技術の範疇と言える。

表 2 セントラル空調方式を想定した外気量 Q_{OA} と Q_r , Q_{de} , Q_{inact} の比率

項目	換気量(m^3/h)	Q_{OA} 比率	還気系への中高性能フィルタ設置時	
			比色法 65%	比色法 90%
Q_{OA}	600	1	1	1
ηQ_r	$1,200\eta$	2η	1	1.6
Q_{de}	36	0.06	-	-
Q_{inact}	170	0.28	-	-

想定条件: 用途:事務所ビル、サイズ:10m×10m×天井高さ 2.7m、在室人数:20 人(専有面積 $5m^2$ /人)

$2 \times Q_{OA} = Q_r$ 、中高性能フィルタの捕集効率 η は $0.5 \mu m$ 以上に対する実測定データを使用

4. 除去装置

4.1 エアフィルタ

当初 REHVA が空気循環系の還気を停止することを推奨していた²²⁾のに対して、ASHRAE は、適切な外気量が導入された空調システムにおいて還気が感染に繋がったというエビデンスは無く、循環系にエアフィルタを設置して積極的に還気を活用することを推奨している²³⁾。SHASE も ASHRAE と同様な考えである²⁴⁾。還気をせずに外気のみ供給する場合、 $30m^3/(h \cdot \text{人})$ では風量が少なすぎて輻射方式でもない限り適切な温湿度調節が難しいこと、外気量を増やすと外気処理に要するランニングコストの増加が生じること、また、日本で採用されることが多いビル用マルチエアコンを用いた個別分散空調では基本的に還気を停止することは不可能なことから、SHASE や ASHRAE の指針が現実的と考える。

ASHRAE では、新型コロナウイルス対策として、ANSI/ASHRAE Standard 52.2 のエアフィルタ性能規格において、MERV13 以上のエアフィルタを推奨している²⁵⁾。日本の中高性能エアフィルタの規格には JIS B 9908 があり、2011 年及び 2019 年に同規格は改定されてはいるが慣例として 2001 年制定の旧 JIS の比色法捕集効率で中高性能エアフィルタの性能を呼ぶことが多い。ASHRAE と JIS 規格では規定する粒子径等が違うので完全に一致はしないが、おおよそ MERV13 に相当するものは比色法捕集効率 90%の中高性能エアフィルタである²⁶⁾。

さて、制御すべき粒径として、何 μm 以上をターゲットにするのかという問題があるが、結論から先に述べると現状では一定のコンセンサスは得られていない¹⁹⁾。G.R. Jonson らは人の呼吸、会話、咳等で生じるエアロゾルの粒径を測定し、口腔内での粒径分布として $1 \mu m$ 程度と $200 \mu m$ 程度にピークがあることを示した(図 1-1)²⁷⁾。空調においては直径 $5 \mu m$ 程度以下のエ

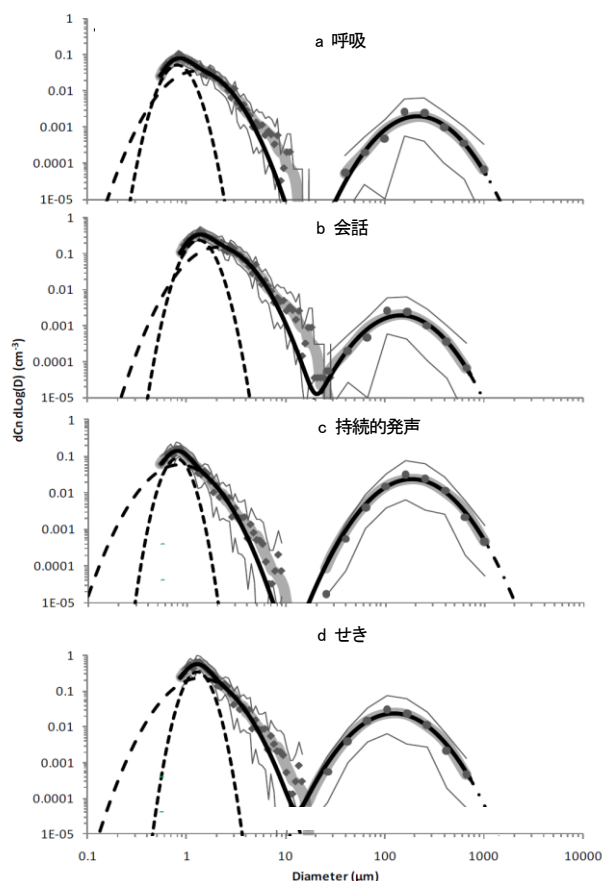


図 1-1 口腔内でのエアロゾル粒径分布(補正後)

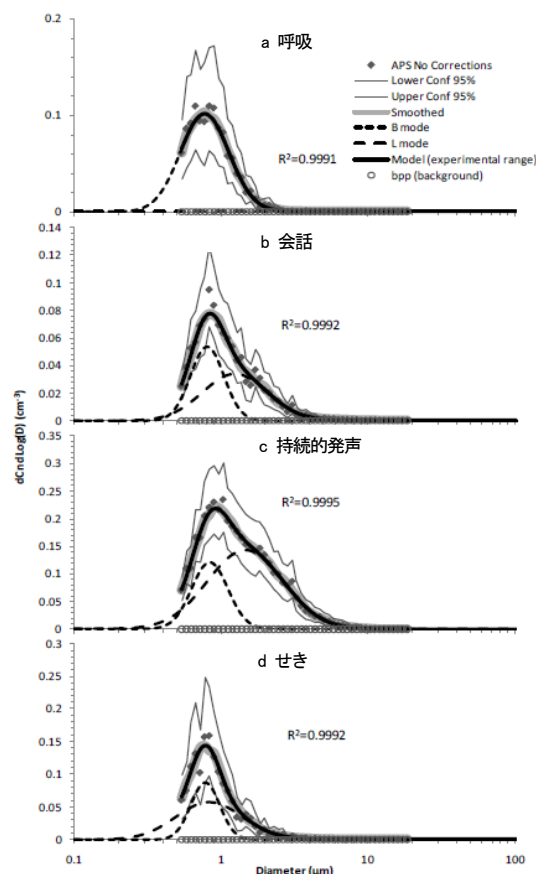


図 1-2 放出後のエアロゾル粒径分布測定値

図 1 呼吸、会話、持続的発声、せきで発生したエアロゾルの粒径分布²⁷⁾

アロゾルが重力沈降せずに長時間室内に浮遊するので制御対象となるが、その中でどの粒径区分に新型コロナウイルスが多く存在するかに関しては、多くの調査事例²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾が報告されているが、これまでのところ一定の傾向は見いだせていない。この理由としては、微量のウイルスを粒径別に捕集し、ウイルス感染力価を測定するという技術的な難しさや P3 レベルの封じ込め施設を持つ特定の研究機関でしか実証できないことが考えられる。

新型コロナウイルス単体のサイズは $0.05 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 程度である³¹⁾が、一般に微生物粒子は単体では存在せず、微生物同士の集合体や大気中に多量に存在する非生物粒子に付着したりして、粒径が単体より大きくなっている³²⁾。新型コロナウイルスも人の粘液と混合したエアロゾルとして気中に放出される。これらのエアロゾルの粒径は、放出された直後に乾燥によって水分を失い発生時の直径から $40 \sim 50\%$ になる³³⁾とのことである。図 1-2 は、人から放出された直後に粒径測定器で得られた $1 \mu\text{m}$ 前後のエアロゾル粒径分布の実測値である。図 1-1 はその値を用いて乾燥等の影響を加味して、口腔内の状態として補正したものである。フィルタの選定に関しては、図 1-2 の分布の方を考慮する必要がある。エアロゾル数の多い粒径がウイルス数も多いと平易に仮定すれば、 $0.1 \mu\text{m}$ の粒子を制御対象とする必要はなく、 $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 程度が制御対象になると筆者は考える。

$0.5 \mu\text{m}$ 以上のエアロゾルを捕集すると仮定すると、中高性能エアフィルタの粒子捕集効率の実力値は、比色法 65% フィルタで 50% 以上、比色法 90% フィルタで 80% 以上ある³⁴⁾ので、表 2 の η にこの捕集効率を代入すれば、セントラル空調方式では外気のみの場合と比べて実効換気量比は、比色法 65% フィルタを設置した場合で 2 倍、同 90% フィルタを設置した場合で 2.6 倍となる。したがって、(1)式の感染リスクはフィルタ無しに比べて、それぞれ 50%、38% となる。また、HEPA フィルタ付きの空気清浄機やファン・フィルタ・ユニットも有効である。HEPA フィルタの捕集効率はほぼ 100% (粒径 $0.3 \mu\text{m}$ 以上で 99.97% 以上) なので、フィルタと送風機間のリークが無い限り、実効換気量にこれらの機器の送風量を加えることができる。ただし、これらの機器は局所的に設置することになるので、使用にあたっては換気効率等の分布を考慮する必要がある。

フィルタの特性として、エレクトレット(静電気利用)では無い機械的な捕集機構(慣性、さえぎり、拡散等)を利用した一

般のエアフィルタは、経時的に粉塵負荷の増加とともに捕集効率は良くなる。一方で、粉塵負荷の増加に伴って圧力損失は増加し、システムの送風量が低下するので、エアフィルタの運用においては圧力損失の確認や定期交換等が必要になる。

4.2 UVGI

空調における微生物汚染対策としての紫外線殺菌技術(以後、UVGI)は、WHO、CDC、REHVA、ASHRAE などから認知され、その技術も確立されており ASHRAE のハンドブック³⁹⁾にも掲載されている。さて、微生物汚染源としては真菌、細菌、ウイルスがあるが、真菌の発生源/由来は主に外気であり、細菌のそれは人間である³⁶⁾。これらは空調機内で増殖したりもするので UVGI はドレンパンや温調コイル等の表面殺菌に主に用いられて来た。新型コロナウイルスも発生源は人間であるが、細菌との違いは生細胞内以外では増殖できないところにある。したがって、空調における新型コロナウイルス対策においては、空調機器およびダクト等の部材表面の殺菌はあまり重要ではないと考える。前記新型コロナウイルスの生存期間に関わる文献⁸および⁹によれば、高濃度の実験ながらウイルス感染力価が2桁減衰するのに要する時間はほとんどの場合で24時間程度かそれ以内であり、またエアロゾルとしてのウイルス感染力価の半減期は1.1時間と短い。さらに論文としては未発表ながら、岩附はエアロゾル中の新型コロナウイルスの感染力価を測定し、発生から1時間後に1/100、2時間後に1/1000に減少した(ただし、3時間後でも2時間後とほぼ同じレベル)と報告³⁷⁾している。還気中のエアロゾルがフィルタや温調コイルに付着した場合を想定すれば、エアロゾルとしてのウイルスの感染力価の減衰率は大きく、部材表面で活性をもつウイルスは高濃度に蓄積されず、かつ増殖しないので再飛散の恐れもほとんど無いと言える。なお、一部にウイルスが付着したフィルタの交換時に感染することを懸念する考えがあるが、これに対しては空調のフィルタは不特定多数の人が扱うものではないので、作業標準等の運用における対策で対応可能であり、ウイルスの表面殺菌の目的だけでUVGIを設置することは少し過剰であると考えられる。

以上の理由により、空調でのウイルス対策におけるUVGIの使命は、空気中のウイルスを殺菌することにあると言える。UVGIにとって都合なことに、ウイルスは真菌や細菌に比べて紫外線に弱い傾向がある³⁵⁾³⁹⁾。UVGIの殺菌力の波長特性は一般に波長265nm程度にピークを持つ山形の特性を持つ³⁵⁾が、深紫外線UV-C(波長100~280nm)の内でもそのピーク近辺の波長253.7nmに中心を持つ光源が利用できる。UVGIの殺菌効果は(4)式で表され、殺菌力は積算光量(mJ/cm²)=紫外線強度(mW/cm²)×照射時間(s)、すなわち I と t の積に相関する。

$$\eta_u = 1 - e^{-kIt} \quad (4)$$

ここで、 η_u :殺菌効率(-) k :殺菌係数[cm²/(mW・s)]
 I :紫外線強度(mW/cm²) t :照射時間(s)

波長253.7nmに中心を持つUVGIが、多くのウイルス種に対して99.9%死滅させることが出来る積算光量³⁷⁾は数mJ/cm²で、新型コロナウイルスに関しては3mJ/cm²(文献39)、3.7mJ/cm²(文献40)、約4.3mJ/cm²(文献41)などの報告がある。空調で空中のウイルスを殺菌する場合は、気流速度が空調機内で2~3m/s、ダクト内で5~10m/s程度と速いため、照射時間を長く確保することが難しく、積算光量を確保して殺菌効率を良くすることは比較的難しい⁴²⁾のであるが、一方で空調では滅菌レベル(10の-6乗)の殺菌効率が求められるわけではない。空調機内で紫外線ランプの本数や設置場所の最適化を図り、エアフィルタ無しのワンパスで80%程度の殺菌効率が期待できる使い方が提案されている⁴³⁾⁴⁴⁾。

空調の技術領域に入るかは微妙であるが、ASHRAE HANDBOOK Chapter62には、Upper-Air UVCというユニークなUVGI技術が示されている。ルーバーを利用して居住域の人には直接照射されないようにして、部屋の天井付近の空間に水平方向に紫外線を照射するものである(図2)。上記ハンドブックには2回程度以上の換気回数に相当するとの記載があるが、筆者がメーカカタログ⁴⁵⁾の浮遊菌減少曲線から相当換気回数を求めたところでは、1.1回/h程度(浮遊菌の種類は不明)であった。成らは、4床病室においてUpper-Air UVCの設置位置、排気口の個数を変えて気流シミュレーションを行い、室内平均で0.24~0.48mJ/cm²の紫外線積算光量を受けることを示した⁴⁶⁾。前述の3.7mJ/cm²で99.9%の新型コロナウイルスの殺菌効率の値を使って(4)式で殺菌係数 k を求め、成らのシミュレーションによって得られた積算光量を使って同じく(4)式から殺菌効率を計算すると36~59%となり、この程度の殺菌効果はあるものと考えられる。

この技術は室内空気中にウイルスが滞留するほど照射時間が増加し、積算光量は大きくなるので殺菌効率は良くなるが、なるべく換気回数及び換気効率を向上して滞留を短くするという換気設計の考えとは基本的に相反するところがあると言える(CDCのガイドライン⁴⁷⁾では換気回数6回までは影響を受けないとの記述があるが)。かつ、室内の気流形状とUpper-Air UVC

の配置によって効果が変わる⁴⁶⁾ので殺菌効率の予測が難しいという点が挙げられる。空調システム的设计・施工者の立場からは、例えば、在室人数が設定される居室は外気導入とエアフィルタや空調機内 UVGI 設置による実効換気量で主に対策し、居室の換気経路ではない廊下や附室は Upper-Air UVC を用いるなど使い分けするのが良いと考える。

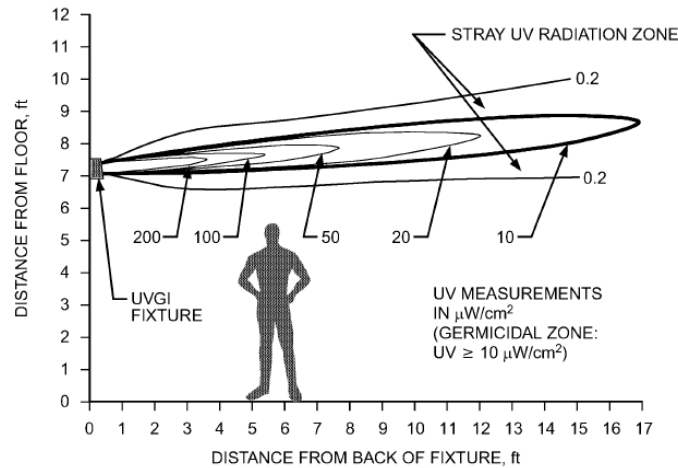


図2 Upper-Air UVC の典型的な立面³⁵⁾

5. 空調システムにおける対策の動向

5.1 換気状況の見える化

(1)式の Wells-Riely 感染確率モデルは汚染粒子(値としては quanta)が瞬時一様拡散するとした場合の感染確率を表しているが、実際においては換気効率が一樣ではなく、ウイルス発生場所が局在することにより、局所的換気量と quanta 値には分布があり、感染確率も一樣ではない。最近の空気調和・衛生工学会や建築学会の大会においては、より実際に近い状態で部屋の換気状況を見える化する取り組みが発表されている。吉澤らは個別分散空調機に中高性能フィルタを追加設置した効果について空気齢を指標として実効換気量の分布を評価している³⁴⁾。金ら⁴⁶⁾、山本ら⁴⁹⁾はそれぞれ CO₂ も感染性粒子も人が発生するものであるから両者の濃度に相関性があると仮定して、多点の CO₂ 濃度計の値を用いて quanta 値を予測し、感染確率の分布を予測する手法を提案している。

5.2 換気効率を高める空調システム

置換換気空調方式は、室内の発熱源が発塵源でもある場合に、発熱で生じる上昇流に塵埃を乗せて速やかに部屋上部に移動させることができ、温度成層の上層に塵埃の高濃度領域が形成され、逆に居住域は低濃度領域になるので、居住域は混合空調方式に比べて同じ換気量ではより清浄になる⁵⁰⁾⁵¹⁾。これと同じことが人からの感染性粒子の発生に関しても言える。居室において居住者の周りには、いわゆるブルーム(体温による上昇流)が生じている。会話などによって発生する感染性粒子はそのブルームに乗って上方向に拡散する傾向がある。特にマスクをしている場合にはマスク無しに比べて、感染性粒子は水平方向の速度ベクトルが小さくなっているため、その傾向は顕著である。天井吹き出しの場合は、上昇した感染性粒子が吹き出し気流によって再度押し下げられ居住域に戻る。したがって、置換換気空調方式の方が天井吹き出し方式よりも感染性粒子の排出特性は良い。山中らは病室において置換換気空調の有効性を実験により確認している⁵²⁾。人から発生して上方向に拡散するウイルスを天井からの吹き出し気流によって室内で極力再循環させないためには、気流はアップフローで部屋の上部に吸込み口がある方が好ましく、その点では床吹き出し空調あるいは床からのいわゆる「染み出し」空調も同様な効果がある⁵³⁾と言える。

6. おわりに

with コロナ、after コロナにおいては、空調においても安全・安心と脱炭素の両立を図る必要がある。単純に外気の導入量を増加することは中間期以外では外気処理に多くのエネルギーを要する。そのため今後の空調では、適正な外気量を導入しつつ、

循環系にエアフィルタやUVGIの除去装置を導入することによって空気の処理コストを下げ、実効換気量を増加する方向に進むものと思われる。さらに、換気効率を向上させることによって、感染確率を低下させる工夫も求められる。そして、これらの取り組みがウイルス対策だけでなく、快適性あるいはウェルネスを向上する空調にも繋がることを期待する。

最後に、COVID-19は現在進行形であり、まだ多くのことが明確になっていない中で、2021年12月現在入手できる情報を基に本稿を執筆したが、オーソライズされていない情報も含まれていることをご容赦頂きたい。また、レビューと言いながら、かなり個人的見解まで言及してしまったことも併せてご容赦頂ければ幸いである。

文 献

- 1) CDC: How COVID-19 Spreads, (Updated Oct. 28, 2020),
<https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/prevent-getting-sick/how-covid-spreads.html>.
- 2) Lu J et al.: COVID-19 Outbreak Associated with Air Conditioning in Restaurant, Guangzhou, China, 2020. Emerg Infect Dis, 26(7), pp.1628-1631(2020), <https://dx.doi.org/10.3201/eid2607.200764>.
- 3) Li Y et al.: Evidence for probable aerosol transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant, medRxiv preprint, 20067728(2020.04.16), doi, <https://doi.org/10.1101/2020.04.16.20067728>.
- 4) 尾方壮行:空気調和・衛生工学会ワークショップ,「新型コロナウイルス対策としての空調・衛生設備の運用」国外の集団感染事例, p.87(2021.09.15 Web).
- 5) 厚生労働省新型コロナウイルス感染症対策専門家会議: 新型コロナウイルス感染症対策の見解, (2020.3.9 公表),
<http://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000606000.pdf>.
- 6) 厚生労働省:商業施設等における「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気について, (2020.3.30),
<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000616069.pdf>.
- 7) Dyani Lewis: COVID-19 rarely spreads through surfaces. So why are we still deep cleaning?, Nature, (January 29,2021),
<https://www.nature.com>.
- 8) Neeltje van Doremalen et al.: Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1, The New England Journal of Medicine, (April 16, 2020).
- 9) Y. Liu et al.: Stability of SARS-CoV-2 on environmental surfaces and in human excreta, PMC Labes ,Nov 01,2020,
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7603996/>.
- 10) E. Goldman: Exaggerated risk of transmission of COVID-19 by fomites, THE LANCET, (July 03,2020),
[https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30561-2](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30561-2).
- 11) 空気調和・衛生工学会新型コロナウイルス対策特別委員会:新型コロナウイルス感染対策としての空調・衛生設備の運用について, (2021.4.1), <http://www.shasej.org/recommendation/covid-19/2021.05.07%20kaite3.pdf>.
- 12) 厚生労働省:冬場における「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気について(参考資料), (2020.11.27),
<https://www.mhlw.go.jp/content/10906000/000698849.pdf>.
- 13) 厚生労働省,冬場における「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気の方法, (2020.11),
https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_15102.html.
- 14) EC Riley, G Murphy, RL Riley: Airborne spread of measles in a suburban elementary school, Am. J. Epidemiol, 107(5), pp.421-432(May 1978).
- 15) G. Buonanno et al.: Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection:Prospective and retrospective applications, Environment International, 145 (September 6 ,2020).
- 16) 倉渕隆:空気調和・衛生工学会令和 2 年度セミナー,「新型コロナウイルスによる建築設備の変化とは」新型コロナウイルス感染対策としての空調・換気設備の運用について, p.25(2021.02.19 Web).
- 17) D. Menzies et al.: Hospital ventilation and risk for tuberculous infection in Canadian health care workers.,Annals of Internal Medicine, 133(10):pp.779-789(2000).
- 18) 倉渕隆:新型コロナウイルス感染症の現状とその対策(2) 新型コロナ対策として換気量はどうやって決めるべきか?,空気調和・衛生工学 第95巻6号, pp.3-9(2021.6)
- 19) 倉渕隆:感染症対策を考慮した空調・換気設備のあり方について,建築設備士 10, pp.10-15(2021).

高砂熱学イノベーションセンター報 No.35 2021.

- 20) CDC: Delta Variant, What We Know About the Science, (Updated Aug. 26, 2021),
<https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/variants/delta-variant.html>.
- 21) Hiroshi Ueki et al.: Effectiveness of Face Masks in Preventing Airborne Transmission of SARS-CoV-2, *Clinical Science and Epidemiology*, vol.5 Issue 5, (Sep/Oct 2020).
- 22) REHVA: COVID-19 guidance document, (April 3, 2020),
https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_ver2_20200403_1.pdf.
- 23) ASHRAE: Can HVAC Systems Spread COVID-19?, (May 31, 2020),
<https://www.achrnews.com/articles/143255-can-hvac-systems-spread-the-covid-19-virus>.
- 24) 空気調和・衛生工学会新型コロナウイルス対策特別委員会: 空調・換気による COVID-19 の拡散はあるのか,
(2020.6.15), <http://www.shasej.org/recommendation/covid-19/2020.06.15%20covid19v2.pdf>.
- 25) ASHRAE Position Document on Infectious Aerosols, (April 14, 2020),
https://www.ashrae.org/file%20library/about/position%20documents/pd_infectiousaerosols_2020.pdf.
- 26) 大垣豊:各国の一般換気用エアフィルタの捕集率の比較に関する指針(JACA No.53),空気清浄第 56 巻 1 号,
pp.36-40(2018.5.31).
- 27) G.R. Johnson et al: Modality of human expired aerosol size distributions. *Journal of Aerosol Science*, 42, pp.839-851(2011).
- 28) J.L. Santaripa et al.: The Infectious Nature of Patient-Generated SARS-CoV-2 Aerosol, medRxiv preprint doi:
<https://doi.org/10.1101/2020.07.13.20041632>.
- 29) W.G. Lindsley: Distribution of airborne influenza virus and respiratory syncytial virus in an urgent care medical clinic,
Clinical Infectious Diseases, (Mar 1,2020).
- 30) Yuan Liu et al.: Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals, *Nature* Vol.582, pp.557-561(June 25, 2020).
- 31) Chen N et al.: Epidemiological and clinical characteristics of 99 cases of 2019 novel coronavirus pneumonia in Wuhan,
China: a descriptive study. *Lancet*, 395,pp.507-513 (2020).
- 32) 柳宇:「バイオフィーム環境の知識」環境科学フォーラム編, p.9,日本工業出版, (2021.9.30).
- 33) Yang W, Marr LC: Dynamics of Airborne Influenza A Viruses Indoors and Dependence on Humidity, *PLoS ONE* 6(6)
e21481 , (2011), doi:10.1371/journal.pone.0021481.
- 34) 吉澤 他:活動に伴う飛沫発生量とその捕集効率に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,G-1
pp.5-8(2021.9).
- 35) ASHRAE Handbook 2019-HVAC Applications, CHAPTER 62, ULTRAVIOLET AIR AND SURFACE TREATMENT.
- 36) 柳 他:オフィスビルにおける浮遊微生物の挙動に関する研究,日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.893-894(2006.9).
- 37) 岩附研子:インフルエンザウイルスは空気感染するのか?,JACA 第 354 回クリーンテクノロジー研究会資料,(2021.12.9).
- 38) 柳宇:「バイオフィーム環境の知識」環境科学フォーラム編,日本工業出版(株), p.22(2021.9).
- 39) 岩崎電気ホームページ, <https://www.iwasaki.co.jp/optics/sterilization/CoV-2.html>.
- 40) M. Biasin et al.: UV-C irradiation is highly effective in inactivating SARS-CoV-2 Replication, *nature Scientific Reports*11:6260(2021), <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85425-w>.
- 41) N. Storm et al.: Rapid and complete inactivation of SARS-CoV-2 by ultraviolet-C irradiation, *nature Scientific Reports*
10:22421(2020), <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79600-8>.
- 42) 瓜生 他: 紫外線ランプによる空調機内部の殺菌効果の検討(第 1 報),(第 2 報), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論
文集,(2019.9 および 2020.9).
- 43) 新晃工業:健康空調カタログ, <https://www.sinko.co.jp/product/download/>.
- 44) 井田 他: UVGI を組み込んだ空調システムの感染対策例, 臨床環境医学第 27 巻第 1 号, pp.28-34(2018).
- 45) AND SHIELD 社ホームページ,
https://andshield.jp/product/aero/?gclid=Cj0KCQiA2NaNBhDvARIsAEw55hg3EtyjKfzxfHOuww_cnARPS2TPeMsgFPk-2OC5DE6AhJa4BBgzaw0aAsY5EALw_wcB.
- 46) 成 他: UR-UVGI の殺菌性能評価方法 第1報)室内気流と紫外線強度の連成解析による紫外線照射量の評価方法に
関して,日本建築学会環境系論文集 第 74 巻 第 639 号, pp.621-627(2009.5).

- 47) P.A. Jensen et al.: Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium tuberculosis in Health-Care Settings (CDC), (2005), <https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/rr5417a1.htm>.
- 48) 金 他: オフィス空間における執務者の位置情報および CO2 濃度に基づく感染リスク予測に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, G-6 pp.25-28(2021.9).
- 49) 山本 他: CO2 濃度センサーと測位システムを用いた感染確率分布と外気負荷の予測, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, G-9 pp.37-40(2021.9).
- 50) 遠藤 他: 高効率換気システムの導入による喫煙室内空気室環境の改善に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.775-776(2009.8).
- 51) 守屋 他: 誘引型置換換気空調システムを用いた非一方向流型クリーンルームに関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, D-18 pp.389-392(2012.9).
- 52) Toshio Yamanaka et al.: BEHAVIOR OF DROPLETS AND DROPLET NUCLEI FROM COUGHING SIMULATOR IN SICKROOM WITH DISPLACEMENT VENTILATION, ROOMVENT 2021, (2021.2).
- 53) 田辺 他: 新しいワークスタイルにおける安全安心な“かけ流し空調”の考察, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, C-15 pp.61-64(2021.9).

ABSTRACT

In December 2019, a case of pneumonia of unknown cause was reported in Wuhan City, China. On January 7, 2020, a new type of coronavirus—severe acute respiratory syndrome coronavirus 2—was identified; it caused coronavirus disease (COVID-19) that spread worldwide rapidly. In the 2 years since its onset, despite several unclear aspects, research has progressed in this front. It is important to understand the role of air conditioning equipment or systems in the transmission of this viral disease. Therefore, in this report, we will review the literature on COVID-19 published so far from the viewpoint of air conditioning and describe “Countermeasures against COVID-19 with Respect to the Air Conditioning System”.

資源作物のエネルギー利用可能性 ーエリアンサスの特徴と栽培・利用実態ー

元田 治・朝倉 梓・土肥 哲哉^{*1}・蝦名 真澄^{*2}

Energy availability of resource crops - Characteristics of Erianthus and actual cultivation and utilization -

Osamu Motoda・Azusa Asakura・Tetsuya Doi・Masumi Ebina

高砂熱学イノベーションセンター（以後、イノベーションセンターと呼ぶ）の圃場（以後、IC 圃場と呼ぶ）では、現在資源作物の一つであるエリアンサスを栽培し自家消費の循環を目指している。資源作物は、近年耕作放棄地や荒廃農地に係る問題を解決できる、新たなエネルギー資源としての可能性が注目されている。しかし、法や制度整備が不十分なこともあり、栽培事例は増えているものの、ビジネスとしての事例は限られている。当社技術やノウハウを起点に、地域の材を有効活用した資源循環とエネルギー循環を構築するビジネス展開を目指す中、資源作物の利活用に向けた取組みについて報告する。

1. はじめに

再生可能エネルギーの中で、動植物に由来する有機物で化石資源を除いた再生可能な資源であり、その利用が大気中の二酸化炭素を増加させないカーボンニュートラルな資源を、バイオマスエネルギーと呼んでいる。バイオマスは、廃棄物系、未利用系、資源作物に分けられる（図 1 参照）。

京都議定書締結以降、温暖化対策推進に関する法律（温対法）が制定、2002 年 12 月にはバイオマス政策の基礎となるバイオマス・ニッポン総合戦略が閣議決定された（2006 年 3 月改定）。バイオマスからエネルギーやバイオプラスチックの生産を長期目標とし、資源作物についてもバイオ燃料への可能性があるとして、バイオエタノール利用研究が各所で進められた。現在 BDF（Bio Diesel Fuel：バイオディーゼル燃料）等段階的な市場化が進んでおり、将来的には大規模市場である SAF（Sustainable Aviation Fuel：代替航空燃料）へとつながるロードマップが描かれている。一方、資源作物の中でも草本系について、直接燃焼によるエネルギー利用は栃木県さくら市での温水ボイラ利用など実用例が出始めており、木質バイオマスと比較すると利用は進んでいないものの木質バイオマスを補完する役割として期待されている。

本報では、イノベーションセンターでの栽培・利用の実態と、資源作物全般の特徴とそのエネルギー利用可能性について説明する。

*1 一般社団法人 日本有機資源協会

*2 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 畜産研究部門・畜産飼料作物研究拠点 畜産研究部門・飼料作物研究領域 飼料作物ゲノムユニット



図 1 バイオマスとは¹⁾

2. イノベーションセンター園場での栽培

2.1 植付状況

図 2 に、イノベーションセンター園場の植付状況を示す(図 2、写真 1)。栽培品種はエリアンサス、ジャイアントミスカンサスの 2 種類とし、エリアンサスは 2020 年 5 月に、ジャイアントミスカンサスは 2021 年 5 月に定植して合わせて 1,500 株超を栽培している。エリアンサスは、国立研究開発法人国際農林水産業研究センター(国際農研 JIRCAS)と国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構(農研機構 NARO)が共同で育成した品種「JES1(第 27533 号)」であり、種子で増殖する品種として 2019 年に品種登録されたものである(2019 年 8 月 16 日官報告示)。また、ジャイアントミスカンサスは国内外で広く普及されているイリノイ種である。

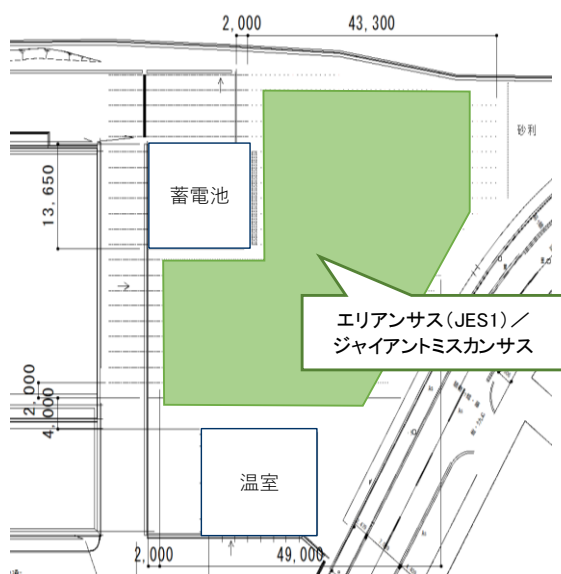


図 2 植付状況



写真 1 園場概況(2021 年 10 月撮影)

2.2 イノベーションセンターのバイオマス循環フロー

自家消費の循環を目指した、イノベーションセンター内でのバイオマス循環フローを図3に示す。エريانサスおよびジャイアントミスカンサスは、毎年冬季には立毛乾燥という「立ち枯れ」状態となり、この時期に収穫を行う。2月～3月に膝下の高さで刈り取った資源作物は10月頃には4mの高さまで生育する。収量は定植3年目以降が最大となり、以降十数年にわたっての長期収穫が可能となる。収穫作業には飼料栽培で使用するハーベスタ（収穫機）を用いて収穫と同時にピンチップ状に細断後、ペレット成型し、バイオマスボイラの燃料として直接燃焼による熱利用を行っている。

イノベーションセンターの主電源であるバイオマス CHP（Combined Heat and Power：バイオマス熱電併給設備）には燃料となる木質チップのうち細かい木屑や粉は機器に投入せず、燃料から除外される。これらの除外された木屑や粉は産廃処分せずペレット成型の原料にすることで再利用することができる。イノベーションセンターではバイオマス CHP の点検時等停止時のバックアップ用として、またラボ棟での蒸気利用にバイオマスペレットを燃料としたバイオマス蒸気ボイラを設置している。このバイオマスボイラ燃料に、常時発生するバイオマス CHP の木屑等と場内栽培している資源作物を混合したペレットを使用することで、効率的な施設内利用を図っている。



図3 イノベーションセンターのバイオマス循環フロー

2.3 栽培と利用の経過と今後の評価

イノベーションセンター圃場は工場残土の礫の多い土壌であり、2020年5月にエريانサスを定植した時期は降雨量も少なく生育が心配されたものの、梅雨入り前に散水、施肥を実施、梅雨入り後に除草を実施、夏季以降順調に生育した（写真2）。2021年3月に初めての収穫を行い、約600kgの収量を得た。イノベーションセンターに植え付けた品種（JES1）および栽培方法では3年目以降には1ヘクタールあたり年間20,000kg～25,000kgの収量が得られる予定であり、イノベーションセンター圃場では3,000kg～3,750kg程度の収量が見込まれる。これは、仮にエريانサスを30%、木質を70%配合したペレットを製造した場合10,000～12,500kg/年の製造量となる。イノベーションセンターのバイオマスボイラで利用した場合、バイオマスボイラは常時稼働を想定していないため、場内で発生する木屑等と栽培するエريانサスを配合したペレットを製造できれば、年間を通して燃料を外部調達することなくイノベーションセンター内で循環利用できる量が賄えるものと見ている。定植後2年目にあたる今年度のエريانサスは、2021年10月には身丈は平均で3m超、中には4mに達する株もあり順調に生育している（写真3）。一般的に定植3年目以降は安定した高収量が確保でき、施肥や除草剤散布など栽培コストを抑えた管理が可能となる。各外部機関と連携して評価データを蓄積し独自の知見やノウハウに結び付ける予定である（表1）。

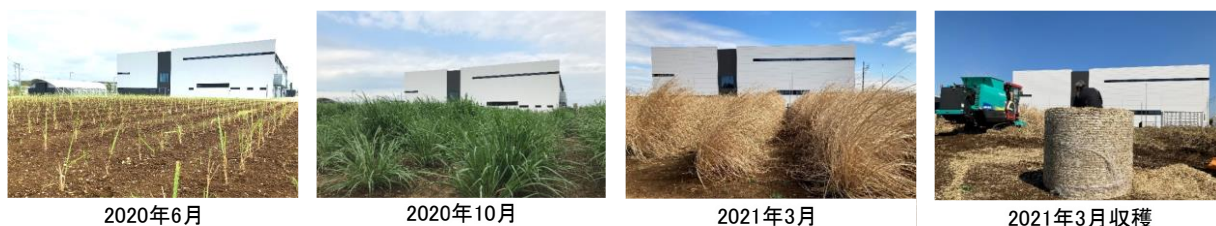


写真2 定植初年度の栽培状況

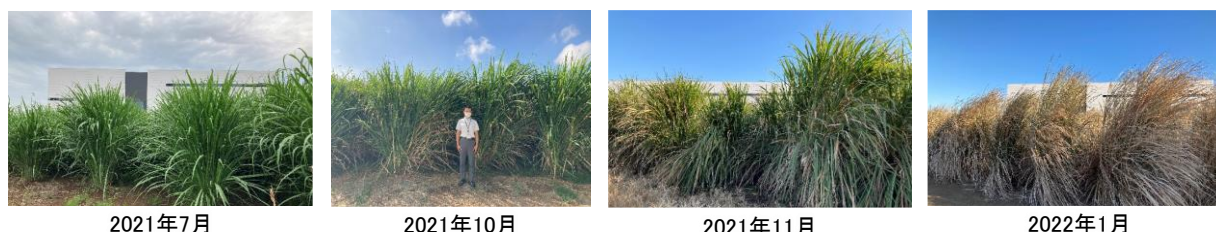


写真3 定植2年目の栽培状況

表1 評価内容

No.	項目	評価内容
1	成育調査	定点観測、ドローン撮影、個体調査、株周・直径測定、左記の経年データ蓄積
2	栽培管理	施肥、除草剤散布、機械除草等栽培管理の効率化・低コスト化
3	土壌分析	土壌分析(化学性)、炭素貯留量測定、左記の経年データ蓄積
4	収穫調査	収量データ蓄積
5	性状分析	成分分析データ蓄積
6	ペレット分析	ペレット性状分析、燃焼データ蓄積、木質その他配合ペレットの利用データ蓄積

協力機関：(一社)日本有機資源協会、(国研)農業・食品産業技術総合研究機構、株式会社タカノ、東京大学

3. 資源作物の特徴と可能性

3.1 資源作物の特徴²⁾

資源作物は、糖質系、デンプン系、セルロース系の三種類に大別され、エリアンサスやジャイアントミスカンサスは、セルロース系の多年草である。セルロース系は、糖化しなければバイオエタノールができず、糖質系やデンプン系よりもコストがかかるというデメリットがあるためバイオエタノール製造には向いていない。国内栽培事例の多い四種を表2に示す。中でも多年草で収量があるエリアンサスおよびジャイアントミスカンサスは国内栽培に適している。燃料品質としての特徴を表3に示す。木質（表中ではスギ木粉）とほぼ同等の発熱量を持つことや、草本系の中では比較的灰分の低いことから、ボイラー等の燃料として利用することに向いていると言える。栽培適地として、エリアンサスは九州以北～東北南部が、東北南部以北は寒さに強いジャイアントミスカンサスがそれぞれ有望である。エリアンサス、ジャイアントミスカンサスの特徴を表4に示す。

表 2 資源作物の比較³⁾

名称	エリアンサス	ジャイアントミスカンサス	ネピアグラス	ソルガム
写真				
種類	イネ科多年草	イネ科多年草	イネ科多年草	イネ科一年草
栽培適地	九州以北、北関東以南で栽培可能	九州以北北海道西部まで	熱帯・亜熱帯のみで永年栽培可能。 九州以北では単年利用。	全国(夏季のみ、沖縄は通年)
利用	宿根性で移植後は10年以上継続利用可	宿根性で移植後は10年以上継続利用可	宿根性で移植後は10年以上継続利用可	毎年種まきが必要で手間がかかる
収量 注)	50t/ha	40t/ha	50t/ha	18t/ha
施肥	低肥料で持続的利用が可能	低肥料で持続的利用が可能	適切な施肥管理によって収量が維持できる	適切な施肥管理によって収量が維持できる
乾物率	冬季は乾物率が70%となる	2月以降乾物率が80%を超える	年中生育期間であるため乾物率は50%以下	立毛乾燥条件では倒伏しない品種は限定
雑草化	九州以北では種子は稔実しない	開花するが種子ができず、雑草化しない	種子稔性は乏しいが沖縄では繁茂	種子は穀類として利用できる
資源作物適性	◎(福島沿岸部以南・九州以北)	◎(寒冷地で高い適性)	○(熱帯、亜熱帯のみ)	△(高い栽培管理が必要)

注)収量は小プロットでの栽培試験のデータ(実収量は概ね半分程度となるので注意)

表 3 エリアンサス、ジャイアントミスカンサスの燃料品質³⁾

原料	高位発熱量 (kcal/kg乾物)	低位発熱量 (kcal/kg乾物)	灰分 (乾物ベース%)
エリアンサス	4403~4650	4015~4168	2.9~5.6
ジャイアントミスカンサス	4368	3984	4.4
スギ木粉	4570	4220	0.3
稲藁	3080	2780	22.6
籾殻	3390	3080	14.6
シバ「朝萌」	4440	4100	6.4
ソルガム「風立」	4070	3720	6.2
ライムギ「春一番」	4200	3720	6.2

表 4 エリアンサス、ジャイアントミスカンサスの特徴⁴⁾

1.非常に効率的な非食用作物	・多年生草:一度植えて、20年以上持続 ・最小限の栄養素、水、除草剤(農薬)の要件、熱と干ばつに強い
2.土地利用、農地の維持	・荒地を防ぎ、農地を守る ・耕作放棄地等食用に向かない条件の良くない土地での生育が可能 (国内耕地440万haのうち約10%42万haが耕作放棄地で年々増加。担い手不足対策のない状況)
3.土壌、水質への効果	・土壌中に高い炭素を蓄積(BECCS(Bioenergy with Carbon Capture Storage:二酸化炭素の回収・有効利用・貯留)の可能性) ・土壌や水質の改良効果(硝酸塩の浸出削減、土壌侵食が作物の中では少ない)
4.生産性、ビジネスへの利用	・安定した長期計画生産が可能 ・低水分、高吸収性、低灰分、ミネラル含有量 ・高収量:20トン~25トン/ha・年 ・稔実しないため雑草化しない(生態系かく乱がない) ・木質と同等の発熱量、他の草本と比べて低い灰分

3.2 資源作物の利用事例と可能性

国内では国や大学等の研究機関、自治体や民間企業等多くの栽培事例があり、九州以北ではエリアンサスやソルガム、東北以北ではジャイアントミスカンサス等が栽培されているが、どれも小規模な試験栽培がほとんどである。バイオエタノールやバイオガス（メタン発酵）利用等バイオ燃料については、研究段階から市場化段階へと進んでいる状況であるが、直接燃焼によるボイラ利用は栃木県さくら市で官民連携の実用化が行われている。株式会社タカノが農研機構技術支援のもと栽培・燃料化を行い、2016年にさくら市が市の温浴施設で灯油ボイラの代替にバイオマスペレットボイラを導入、年間約250 t-CO₂の地域脱炭素に貢献している（図4）。栽培種はエリアンサス（一部ジャイアントミスカンサス）である。現在の栽培面積は約10 haに拡大しており、国内先行事例として広くメディア紹介され、最近では自治体や民間企業等の見学者が急増している。2018年～2019年に、さくら市事例を参考にバイオマス導入FSをNEDO事業⁵⁾で実施したことが、当社が資源作物に関与したきっかけとなった。



図4 栃木県さくら市事例⁶⁾

バイオマスは地域の材をいかに有効利用するかが重要である。資源作物は木質バイオマスと比較すると短期間で高収量の計画栽培が可能であり、栽培面積と事業性のバランスが必要ではあるが木質バイオマスの補完燃料としての可能性がある。国内普及には、施設単位での利用を想定した数百kWクラスの小型ボイラ（温水または蒸気）導入が考えられる。また、東南アジアで生産した資源作物を輸入して大型バイオマス発電所で利用する計画も出て来ている（新潟県北蒲原郡聖籠町）。その他にも、燃料以外の用途では、国内で高騰し入手が困難となっているオガ粉の代替としての畜産農家向けの敷料利用の普及が進み、資源作物にとって新たな市場が獲得できつつある。

海外においては、資源作物はヨーロッパやアメリカで既に普及しており、数千～万ha単位での大規模生産が行われている。大型発電所の燃料として利用され、また、畜産農家向けの敷料利用も多い。大規模生産農家にとって、干ばつに強く水資源を不要とする点や化学肥料や除草剤をほぼ使わないため地力を損なわない有機農業生産はメリットが大きい。

今後の用途拡大として、上記の他にバイオプラスチック原料やリグニン利用等のマテリアル利用が期待できる。バイオプラスチックはヨーロッパでは実用化され民間企業が参入を始めている状況である。また、炭化利用やCO₂回収としてのネガティブエミッション技術との融合も研究段階から一段先へと進む勢

いであり、市場を待たずに進める研究機関や民間企業の競争が既に始まっている。

国内の施策では、農林水産省が「バイオマス利用技術の現状とロードマップ」を2年ごとに見直す、ここ数年はエリアンサスが「今後実用化が期待される技術事例」としてトップ紹介されている（図5）。また、2021年5月に「みどりの食料システム戦略」が新たに策定された。この中で「地球にやさしいスーパー品種等の開発・普及」が掲げられ、資源作物の更なる品種改良があげられている。利用の推進に向けた新たな施策が増えているものの、食料競合の議論が解決されておらず米や他の農作物のような転作奨励対象にはなっていない等の問題もある。エネルギーの面からは、固定価格買取制度（FIT）の対象外となっている。法整備や制度支援等インフラ整備が当面の課題とされる。

Ⅲ-1. 新たな「バイオマス利用技術の現状とロードマップ」(概要)

○ 平成24年9月、「バイオマス事業化戦略」と併せて決定された「バイオマス利用技術の現状とロードマップについて」（以下、「技術ロードマップ」という。）について、関係府省、国立研究開発法人等からの情報を基に見直しを行い、新たな技術ロードマップは令和元年5月に決定。

○ バイオマスの利用技術の到達レベルを一覧性をもって俯瞰して見ることができる技術ロードマップを産学官共通のプラットフォームとして、技術開発の進展状況に応じ、効率的かつ効果的に研究・実証を進め、実用化段階にある技術は事業化に活用。

新たな技術ロードマップのポイント

- 新規追加した技術 7件
更新・見直した技術 31件
変更なし 17件
- 実用化、実証、研究の技術レベル毎に一覧表で技術を整理
- 期待される技術ロードマップの利用方法等についてFAQで整理
- ◆ 追加された「実用化」段階の技術事例
熱化学的変換／ガス化（発電・熱利用）
原料：籾殻
製造物：ガス・熱・電気（副産物：くん炭）
現状：籾殻を原料にしたガス化において、高温で生成する結晶質シリカと低温で発生するタールの抑制を両立することが可能。

今後実用化が期待される技術事例

○ 国産リグニンのマテリアル利用（内閣府（SIP次世代農林水産業創造技術））
【技術概要】
日本固有の樹木であるスギから、木質の25～35%を占める成分であるリグニンを無毒の水性高分子のPEG（ポリエチレングリコール）を用い、加工性の高い改質リグニンを製造することが可能。幅広い用途の製品が開発中。

○ 資源作物（エリアンサス）のエネルギー利用
（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構）
【技術概要】
エリアンサスは、多年生・高収量の資源作物で、ペレット等のバイオ燃料の原料としてエネルギー利用が期待。日本に適した新品種を開発し、その栽培法及びペレット燃料加工・利用法を確立。

図5 今後実用化が期待される技術事例(農林水産省)⁷⁾

4. 今後に向けて、課題

今後の普及展開に向けて、生産面では現業農作物との区分や生産者確保、栽培面積と収量のバランスの問題、燃料化では少量生産では収益性が見込めないペレット製造の問題、利用面では木質バイオマスと比較して灰分が多くボイラのクリンカ対策が必要となる等課題も多い。単一事業では必要収益を得るのに、10ha以上の栽培面積が必要である。生産・燃料化・利用それぞれのフェーズでコスト優位性を発揮できる企業や自治体と連携し、地域ネットワークを構築しないと事業採算性上成り立たない。このような厳しいビジネス成立の条件はあるものの、地域内で資源と経済が循環でき、雇用の創出や産業振興につながるといった地域の課題解決の手段としての可能性は十分に有する。国内耕地の10%を占め年々増え続ける耕作放棄地に対して、担い手がない状況下では具体的な対策が打てない中、資源作物栽培は地域で上手く仕組みが作れば、地域の抱えているエネルギー課題と農業課題を解決できる可能性がある。当社にとって、地域の様々なバイオマスを有効に資源活用、エネルギー循環に利用できる技術やノウハウを構築することは、再エネを活用したエネルギーバリューチェーンの構築、資源循環から地域の地産地消に寄与するビジネス展開に役立つものと考えている。敷地内で資源作物を栽培し自家消費まで実施するイノベーションセ

ンターの事例は極めて珍しく、長期的な運用事例はほぼないため、圃場での栽培運用データを有効活用できるようにノウハウを蓄積し社外展開へと進めたい。

謝 辞

本取組みは、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のFS事業「栃木県におけるエリアンサスを含めたバイオマス資源を利活用した公共施設への地域自立システム化の事業性評価」⁵⁾で得られた知見をもとに実施している。関係各位に御礼申し上げます。

文 献

- 1) 農林水産省 大臣官房環境バイオマス政策課「バイオマスの活用をめぐる状況(2021年12月)」P3
- 2) 森田茂紀編著「エネルギー作物学」第2章 エネルギー作物の分類と特徴, 朝倉書店
- 3) 蝦名真澄、小林真、高野誠(2019) バイオマス作物エリアンサスを用いた農地における原料生産とバイオ燃料利用、生態工学会、シンポジウム
- 4) AGgrow Bedding ホームページ: <https://aggrowtech.com/sustainable-agriculture/> を参考に編集
- 5) 2018～2019年度(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のFS事業「バイオマスエネルギーの地域自立システム化実証事業/地域自立システム化実証事業/栃木県におけるエリアンサスを含めたバイオマス資源を利活用した公共施設への地域自立システム化の事業性評価(FS)」, 事業者: 高砂熱学工業・日本有機資源協会
- 6) 農林水産省 大臣官房環境バイオマス政策課「バイオマスの活用をめぐる状況(2021年12月)」P47
- 7) 農林水産省 大臣官房環境バイオマス政策課「バイオマスの活用をめぐる状況(2021年12月)」P26

ABSTRACT

In recent years, resource crops have been attracting much attention as a new energy source and as a countermeasure against abandoned cultivated land, which is becoming an increasingly serious issue in Japan. However, most resource crops are under small-scale trial cultivation and verification testing, with limited cases as of their use in a business. At the Innovation Center farm, we are currently cultivating *Erianthus*, a resource crop, to encourage self-consumption. Based on our technology and know-how, we will report on resource crops, as an effort for utilization while aiming for business development to build resource and energy circulation to effectively utilize local materials.

高砂熱学イノベーションセンター報 NO.35 2021

発行日 2022年3月

発行所 高砂熱学イノベーションセンター
〒300-2417 茨城県つくばみらい市
富士見ヶ丘2-19

TEL：0297-55-1337

発行者 山分 弘史



高砂熱学工業株式会社

高砂熱学イノベーションセンター 〒300-2417 茨城県つくばみらい市富士見ヶ丘2-19			☎0297(55)1337
本社	〒160-0022	東京都新宿区新宿6-27-30(新宿イーストサイドスクエア)	☎03(6369)8212
東京本店	〒160-0022	東京都新宿区新宿6-27-30(新宿イーストサイドスクエア)	☎03(6369)8221
横浜支店	〒220-8126	神奈川県横浜市西区みなとみらい2-2-1(横浜ランドマークタワー)	☎045(224)1570
関信越支店	〒330-0854	埼玉県さいたま市大宮区桜木町1-10-16(シーノ大宮ノースウイング)	☎048(637)3500
東北支店	〒980-0811	宮城県仙台市青葉区一番町2-4-1(読売仙台一番町ビル)	☎022(227)9552
札幌支店	〒060-0003	北海道札幌市中央区北3条西4-1-1(日本生命札幌ビル)	☎011(261)2531
大阪支店	〒530-0013	大阪府大阪市北区茶屋町19-19(アプロースタワー)	☎06(6377)2800
名古屋支店	〒450-6037	愛知県名古屋市中村区名駅1-1-4(JRセントラルタワーズ)	☎052(582)8400
九州支店	〒812-0011	福岡県福岡市博多区博多駅前2-19-24(大博センタービル)	☎092(431)8050
中四国支店	〒730-0017	広島県広島市中区鉄砲町10-12(広島鉄砲町ビルディング)	☎082(221)2871
エンジニアリング部	〒160-0022	東京都新宿区新宿6-27-30(新宿イーストサイドスクエア)	☎03(6369)8230