

【技術論文】

本稿は、スマートビルシステム社会連携講座を通じて実施した研究成果として、  
空気調和・衛生工学会大会学術講演論文を加筆・再掲したものである。

# スマートビルアプリケーションの市場調査とエミュレータを 活用した次世代アプリケーション要件の提案※

青山剛士・宮田翔平\*1・村澤 達\*2  
田中勝彦\*3・赤司泰義\*1

## Market Research on Smart Building Applications and Proposal for Next-Generation Application Requirements Utilizing Emulators

Takeshi Aoyama・Shohei Miyata・Itaru Murasawa  
Katsuhiko Tanaka・Yasunori Akashi

近年、建物に対してエネルギー効率の向上やCO<sub>2</sub>削減など、より広範で持続可能な要求が高まっており、建物のインテリジェントな運用を実現するスマートビルが期待されている。本研究では、サイバー空間上にデジタルツインとしてHVACシステムを構築し、詳細にエミュレートする技術と、それを基盤としたアプリケーション開発について検討した。空調システムのアプリケーション市場調査の結果、AI技術の活用は最適制御など一部機能に限定されており、今後の拡大が見込まれることが明らかとなった。さらに、エミュレータを活用したアプリケーションの要件を整理し、現状とのギャップを分析した結果、AI技術とエミュレータ技術の組み合わせにより、従来は困難であった高度な最適制御、不具合検知・診断、試運転調整支援などの機能が実現可能となることを示した。

### 1. はじめに

近年、建物価値向上に対する要求は、エネルギー消費量削減だけでなく、CO<sub>2</sub>排出量削減、居住環境の質向上、デマンドレスポンスなど多様化している。これらの要求に応えるため、建物の効率的でインテリジェントな運用を実現するスマートビルが期待されている。しかし、スマートビルが提供するアプリケーション機能については様々な研究がなされているものの、技術的・構造的な課題により普及には至っていない<sup>2)</sup>。

本研究では、これらの課題に対する解決策として、サイバー空間に設備システムを構築し、物理的制約を受けることなくアプリケーションを開発する手法を提案する(図1)。筆者らは、空調設備を詳細にシミュレーションするエミュレータと、それを基盤としたアプリケーション開発に取り組んでいる。本稿では、現在の空調システムアプリケーション市場の調査分析と、エミュレータを活用したアプリケーションの要件整理を行い、次世代空調システムアプリケーションに必要な要件を提案する。

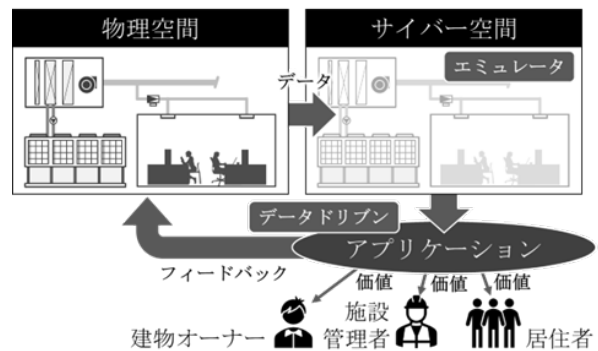


図1 デジタルツインによる建物サービス

※ 本論文は、2025年度空気調和衛生工学会大会講演論文<sup>14)</sup>を加筆修正したものである。

\*1 東京大学、\*2 東洋熱工業株式会社、\*3 東京電力ホールディングス株式会社

## 2. スマートビルに向けたアプリケーションの調査

エミュレータを用いたアプリケーションを検討するうえで、現在のスマートビルに向けたアプリケーションにどのようなものがあるかを調査した。その調査結果を世界の4つの地域に分けて、それぞれの地域の特徴を考察した。

### 2.1 調査方法

最初に、Web 検索エンジンおよび生成 AI (ChatGPT) を用いて、表 1 に示すキーワードまたはプロンプトに基づいてスマートビル向けに提供されているアプリケーションをリストアップした。次に、それらのアプリケーションについて、Web 上で公開されている情報を収集した。収集した情報を4つの地域に分類し、表 2 に示すように、提供価値、機能、事業形態、および AI の活用有無の観点から整理・分類した。

提供価値とは、各アプリケーションが提供するソリューションの内容を指す。一般に、省エネルギーは省 CO<sub>2</sub> やコスト削減にも寄与するが、本調査では、該当するアプリケーションにおいて提供価値として明示的に訴求されている内容のみを対象として整理した。このように提供価値を分類することで、各地域において重視されている価値の傾向を把握することが可能となる。

機能は、各アプリケーションが有する具体的な機能を指し、どのような機能が実用化され、普及しているかを把握することを目的として整理した。

事業形態については、アプリケーションの導入形態に着目し、クラウドベースのアーキテクチャを活用して設備の運転データを取得・解析し、エネルギー最適化や運用効率向上といった機能的価値を提供する「プラットフォーム事業」、設備の新設・更新に併せてアプリケーションを組み込む「設備エンジニアリング事業」、およびアプリケーションのソフトウェアを単体で提供する「ソフトウェア販売事業」の3類型を対象として整理した。

各分類項目については、該当するアプリケーション数の割合を算出し、定量的に整理した。

### 2.2 調査結果

#### (1) 調査対象

最初に、Web 検索エンジンと生成 AI によって 139 件のアプリケーションがリストアップされた。次に、それらのアプリケーションに関する公開情報を Web ベースで収集し、実際に提供されているアプリケーションに限定して絞り込んだ結果、最終的に表 3 に示す 99 件が対象となった。これらのアプリケーションを北米、欧州、日本、その他アジアの4つの地域に分類した。生成 AI (ChatGPT) は、Web 上の広範囲な公開情報をもとにアプリケーションを自動抽出できるというメリットがある一方で、実際には提供されていない構想段階のものや、誇張・虚偽を含む情報も混在するため、情報の事実確認をしながら整理することが不可欠である。その一方で、生成 AI は検索単語が曖昧でも広範に情報を提供可能であるため、スマートビルのアプリケーションという多義的な探索において有用と判断した。また、生成 AI (ChatGPT) の学習データの大部分が Web 上で情報量の多い英語圏由来となるため、欧米地域のアプリケーションが相対的に

表 1 検索条件

Web 検索エンジン	生成 AI (ChatGPT)
Keywords : Smart building, application	Prompt : Find out what services actually exist for smart building/AI applications in HVAC systems. Please research companies headquartered in "Area/Country". At least 20 services. Please output in Excel. Column A: Country Column B: Reference URL Column C: Company Name Column D: Service/Application Name Column E: Service/Application Description

調査時期：2024年8月～10月

表 2 調査結果の分類項目

提供価値	機能	事業形態
省エネルギー 省 CO <sub>2</sub> 快適性向上 生産性向上 安心・安全性向上 運用コスト削減	状態可視化、遠隔監視・操作、警報監視・アラート、エネルギー分析・レポート、デマンド等の予測、HVAC 最適制御、不具合・故障検知・予兆診断、電力デマンドピーク管理、デマンドレスポンス	プラットフォーム 設備エンジニアリング ソフトウェア販売

表3 地域別調査対象アプリケーション数

地域	調査対象数
北米	38
欧州	37
日本	15
その他アジア	9
合計	99

多く抽出される傾向が見られた。

(2) 提供価値

地域別のアプリケーションが市場にアピールしている提供価値を図2に示す。主な特徴は以下の通りである。

- ・全地域共通：省エネルギーが主要な提供価値
- ・北米：運用コスト削減と居住者快適性を重視
- ・欧州：省CO<sub>2</sub>への関心が高い
- ・日本：居住者快適性への関心が高い
- ・全体的に生産性向上や安心・安全性向上を謳うものは少ない

(3) システム機能

図3に調査したアプリケーションに実装されているシステム機能を示す。スマートビル向けのアプリケーション機能は状態可視化やHVAC最適制御が主流となっている。また、欧米では、遠隔監視・操作やエネルギー分析・レポートまで提供することが多い。北米では不具合・故障検知/予兆診断も実装されてきているが、世界的にはまだ少ない。不具合・故障検知/予兆診断について、秒単位で現実世界を再現するエミュレータによって、詳細な実データとエミュレータの理想的な運転データを比較することで精度の高い診断の実現の可能性がある、さらなる普及が期待できる。また、デマンドの予測や管理、レスポンスは世界的にもまだ少ない。日本としても制度として容量市場が開始されたばかりで、これから普及されていくと考えられる。

(4) 事業およびサービス

スマートビル向けのアプリケーションを提供している企業の事業形態として、図4に示すように、設備エンジニアリング事業だけでなく、プラットフォーム事業、ソフトウェア事業の大きく3つの形態について整理した。特に、通信を構築してデータのみを受領し、それを分析して付加価値を提供するプラット

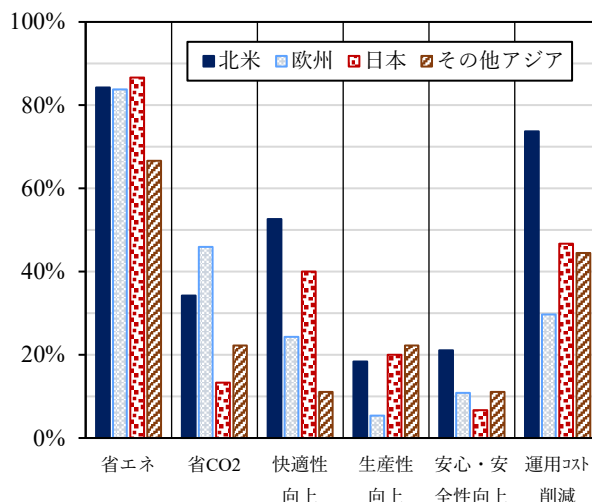


図2 地域別アプリケーションの提供価値

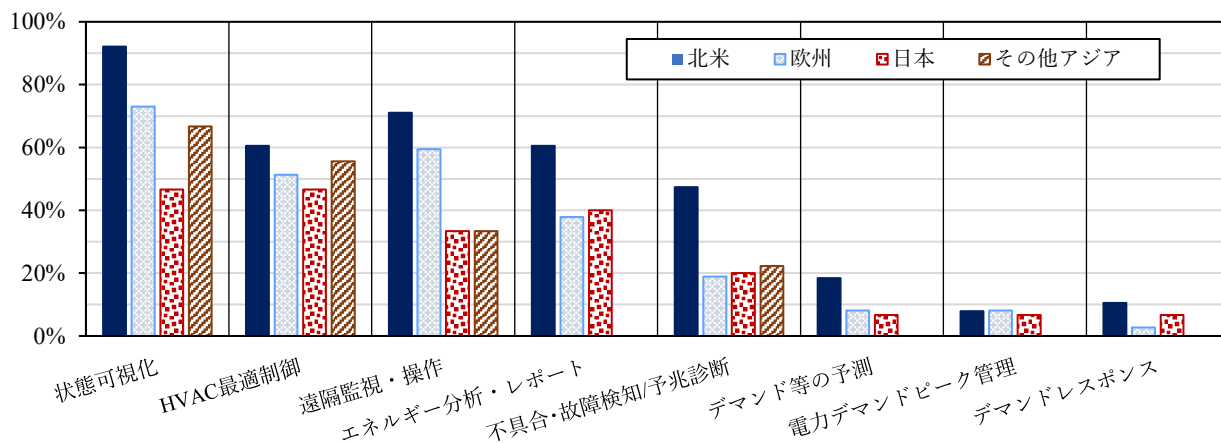


図3 地域別アプリケーションのシステム機能

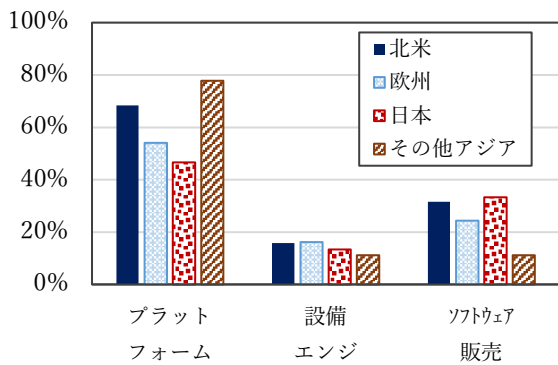


図4 地域別アプリケーションを導入する企業の事業形態

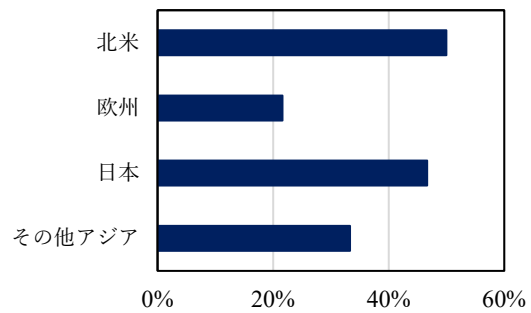


図5 地域別アプリケーションのAI活用率

ホーム事業のみの企業も多く、従来の監視設備と組み合わせることで建物全体の最適化、快適性と省エネルギーの両立などさらに建築価値の向上することをアピールしており、建物設備分野への新規参入が増えてきている。また、複数企業が共通のプラットフォームやソフトウェアを使って、それぞれサービス提供している事例も見られた。

#### (5) AI の活用度

図5に、機械学習などのAIが活用されているアプリケーションの数の割合となるAI活用度を地域別に示す。AIの活用度は北米、日本が高く、欧州は低い。スマートビル向けの空調システムのアプリケーションを導入する企業について、北米はプラットフォームやITをルーツにもつところが多く、日本においても通信・IT系の企業の参入が見られ、一方で欧州は計装機器メーカーが多いことが考えられる。総じて、今回の結果では空調システム分野へのAI活用は現在のところ最適制御などの一部の機能に限定されていた。しかし、生成AIを用いたデータの分析支援が技術的に可能となっており<sup>3)</sup>、商業化もされていることから<sup>4)</sup>も、最適化や不具合検知・診断のアルゴリズムといった個別開発が必要なAI技術以外の分野も含めAIの活用普及がすすんでいくものと思われる。

### 3. エミュレータを活用したアプリケーションの要件

前章において、すでに市場に見られるスマートビル向けのアプリケーションについて整理した結果、省エネルギー制御や遠隔監視といった従来からのアプリケーションが多くみられた。現在の空調システムのアプリケーションは、省エネルギーや快適性といった社会的ニーズと、制御精度やコストといった技術的課題のバランスの中で設計されている。しかし、ここでは将来的に技術が進展し、空調システムの挙動を高精度に模擬できるエミュレーションが可能になると仮定する。このエミュレーション技術は、複雑な環境条件下での性能検証や異常時の挙動予測を可能とし、空調システムアプリケーションの高度化に大きく寄与する。その前提のもと、エミュレーション技術を導入した空調システムアプリケーションの高度化について検討した。

#### 3.1 想定されるアプリケーション機能

ここでは、空調システムの挙動を秒単位で高精度に模擬できるエミュレーション技術を前提として、その技術を活用したアプリケーションの高度化について検討する。想定するアプリケーションは、エミュレータから得られる情報を単独で利用、または実設備のリアルタイムデータと組み合わせることで、新たな機能価値を提供するものである。表4にアプリケーションの

表4 想定されるアプリケーション機能

機能	概要
最適制御	空調システムを設定した目的に応じて最適に制御
不具合検知・診断	システムの異常や故障を早期に発見
試運転調整支援	机上検討により現地でのトライ&エラーを低減
建物性能評価	建物性能の認証における評価と乖離状況
執務環境評価	執務者の快適性や省エネ性評価、行動変容促進
データ活用	AIを用いたアプリケーションの学習データなど

様々な機能価値を想定し、それぞれの機能に対して必要な要件、望ましい要件を抽出して、エミュレータの可能性を検討した。本稿では、特に可能性がみられた最適制御、不具合検知・診断、試運転調整支援の機能について記述する。

### 3.2 アプリケーションに必要な共通の要件

本節では、まずエミュレータを活用したアプリケーションに共通して求められる基本的な要件について整理した。これらの要件は、個々のアプリケーションの機能に依存せず、すべてのアプリケーションに共通して必要となるものである。

個々のアプリケーションに共通して必要な要件を表 5 に示す。エミュレータの設定変更やフィードバックを行うためのエミュレータとの入出力、建物データやその他設備データなどのその他のアプリケーションとの入出力は共通に必要な要件である。また、アプリケーションとしての冗長性やフェールセーフ機能、履歴や関連するフィールド層の情報管理などはアプリケーション機能によらず必要となる。さらには、データの精度やデータへのアクセスの容易性、直感的でわかりやすいこと、ノーコードでの操作などの構築の容易性が望まれる。特に、エミュレータの構築は従来の建築プロセスではなく、構築の省力化は重要な課題のひとつである。

### 3.3 各アプリケーションに必要な要件

#### (1) 最適制御

空調システムの最適制御を行うアプリケーションは建物の運用コストに直結するため、従来から多くの研究開発がなされてきており、近年では IoT・AI 技術を活用してリアルタイムで最適化する制御技術が発達してきている。居住者に応じた室内環境の最適化<sup>5),6)</sup>や、再生可能エネルギー利用を最大化するためのエネルギーシステム制御の最適化<sup>7),8)</sup>、省エネ・脱炭素のための空調・熱源システムの最適化<sup>9),10)</sup>、AI による制御の自動化<sup>11),12)</sup>などが主な目的として定められている。これらは何らかの物理ベースのモデルやデータ駆動のシミュレーションと、最適化のアルゴリズムが組み合わせられており、モデルやシミュレーションが目的設定やその解決におけるボトルネックとなっている可能性がある。

エミュレータを活用した最適制御に必要な要件を表 6(a) に示す。システムオペレーションやエネルギー管理機能に対して、エミュレーションによりそれぞれのサブシステムが連携して有機的に動作することで、設備の全体最適化がより詳細かつ高精度に実現できると考えられる。秒単位のエミュレーションにより、需要の急な変化に対応するために正確で迅速な予測を求められるデマンドレスポンスや機器の立ち上がり性能の最適化などの従来のアプリケーションではハードルが高い機能の実現が可能となると考えられる。

表 5 アプリケーション共通の要件

要件項目	
必要な要件	<b>エミュレータとの入出力</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>エミュレータの管理               <ul style="list-style-type: none"> <li>エミュレーションのタイムステップの変更</li> <li>機器特性の標準データやメーカーから提供されたデータの更新</li> <li>ラフなモデルに対する実データからの補正</li> </ul> </li> <li>エミュレータの自動精度向上               <ul style="list-style-type: none"> <li>現状の機器性能の実測値からのフィードバック</li> <li>フィールド層データを活用したエミュレータのチューニング</li> </ul> </li> <li>フィールド層とエミュレータのデータ比較</li> </ul> <b>外部との入出力</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>BIM/CIM データとの連携（既存建物データの読み込み）</li> <li>空調ドメインと照明などの他ドメインとの接続</li> <li>手動や他アプリケーションで行われた設定変更の反映</li> </ul>
	<b>フィールド層の管理</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>機器メンテナンスやセンサ校正などの状態管理</li> <li>各センシングデータの同期/変換/通信等による時間遅れの反映</li> </ul> <b>アプリケーション機能</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>サイバー攻撃に対する冗長性</li> <li>エミュレータやビル OS にエラーが発生した際のフェールセーフ機能</li> <li>パラメータ管理（チューニング履歴、定格値など）</li> <li>各アプリケーションのギャップ評価</li> <li>ケーススタディやフェーズによる情報管理</li> </ul> <b>操作性</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>改修対応の容易性</li> <li>操作しやすい直感的にわかる GUI</li> <li>ほしいデータへのアクセスの簡易性</li> </ul>
望ましい要件	<b>アプリケーション機能</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>エミュレータの計算誤差やセンサ誤差、機器の個体差を反映</li> <li>エミュレータの状態可視化               <ul style="list-style-type: none"> <li>設備の 3D 表示、フレキシブルに操作可能な可視化</li> <li>配管やダクト内流体のコンター化や簡易的な CFD 機能</li> </ul> </li> </ul> <b>操作性</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>ノーコードでの操作</li> <li>センサの簡易な移動、追加</li> </ul>

表 6 個別のアプリケーションの要件  
(a) 最適制御アプリケーション

		要件項目	
必要な要件	システムオペレーション	エネルギー管理	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>運転モード選択 (省エネ運転/快適運転/省 CO2 運転/契約電力を抑えるなど)</li> <li>デマンド抑制要望に対する返答とデマンド指令</li> <li>個々のシステムと連携可能なデータ群による建物全体の最適制御</li> <li>立ち上がり性能/回復性能の最適設定</li> <li>システム運転の予測や事前動作確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>気象情報の読み込み</li> <li>消費エネルギーや CO<sub>2</sub> 排出量、コストの積算、年間の試算および予測</li> <li>ベースラインと削減量の算出、評価 (基準/設計/運用ベースライン)</li> <li>最適運転や運転モードごとの省エネルギー効果試算とリスクの評価</li> <li>設備更新/機器リプレースの効果予測</li> </ul>	
望ましい要件	システムオペレーション	エネルギー管理	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>運転モードや効率的な運転計画の自動作成</li> <li>リアルタイムでの運転計画の自動補正 (オートチューニング)</li> <li>機器トラブルや故障時における改善のシステム運転の自動作成</li> <li>リアルタイム負荷予測とそれに基づく省エネ AI 自動運転</li> <li>経年劣化による性能変化の可視化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>契約電力に基づく運用最適化/システムスペックから最適契約の提案</li> <li>室内環境を緩和した際の省エネルギー効果試算 (快適性 vs 省エネ)</li> </ul> <b>外部との入出力</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>人の位置や人数、室内 OA 機器類の位置や稼働状況などの室内状況データの活用</li> <li>人の服装、性別、体格、その他 (発汗など) のパーソナルデータの活用</li> </ul>	

(b) 不具合検知・診断アプリケーション		(c) 試運転調整支援アプリケーション	
		要件項目	
必要な要件	不具合検知・診断	必要な要件	システム設定のチューニングと評価
	運用支援		システム設定のチューニングと評価
望ましい要件	不具合検知・診断	望ましい要件	システム設定のチューニングと評価
	運用支援		システム設定のチューニングと評価

さらには、従来の流量や熱収支、所要動力といったシステムの物理的指標だけではなく、室内状況や居住者のパーソナルデータに対する最適化を求められている。居住者の位置や人数、服装、性別、体格、さらには発汗量や活動量などの情報を活用することで、個々の居住者にとって快適かつ効率的な空調制御が可能となり、省エネルギーと快適性の両立を図ることが可能となる。エミュレータを用いることで、こうした多様なパーソナルデータをリアルタイムに反映したシミュレーションが可能となり、従来の一律制御では実現困難であったきめ細かな環境制御が可能となる。

### (2) 不具合検知・診断

空調システムの不具合検知・診断は、不具合や異常を検知してその原因を自動的に診断し、適切な対策を提案する機能で、最適な制御パラメータ設定による効率的な運転や速やかな復旧によるダウンタイムの低減を可能とする。近年では、機械学習やディープラーニングなどの AI を活用することで、検知の精度が大幅に向上している<sup>13)</sup>。しかしながら、そのためには大量の高品質なデータが必要で、データの収集やクレンジングにかかる時間とコストが課題となっている。一方で、エミュレータを活用した不具合検知・診断では、表 6(b) に示すように、不具合や劣化まで再現したり、理想的な動作のエミュレータと実設備の短周期の過渡データを比較してデータの乖離を分析したりすることによって、従来は対象にすることができなかった不具合をも検知可能となる可能性がある。具体的には、機器の目詰まりや汚れによる性能低下、ダクトや保温の劣化によるダクトリークや放熱ロス、インバータの加減速時間や PID 調節器のパラメータまで再現した短周期で詳細な動作データによるチューニング不足 (パラメータ不具合) などの検知・診断が挙げられる。設備運用におけるメンテナンスや機器更新、修繕での機能回復や性能低下の予測が可能となる。

### (3) 試運転調整支援

空調システムの試運転調整は、多くの作業者を配置してダンパやバルブ、制御設定などをトライ&エラー

を繰り返して調整する。システム動作を詳細に再現するエミュレータを用いた試運転調整では、実際には半日や1日かかる調整を、10倍速、100倍速で再現して試行錯誤を行っておおよその見当をつけることができるため、チューニングの省力化を実現できると考えられる(表6(c))。また、コストの大部分が人件費で構成される試運転調整における省力化、短工期化は、エミュレータ構築費用の採算を十分にとることができる可能性がある。さらには、従来の建築プロセスでは確認できないことの多い夏期や冬期のピーク負荷における運転チューニングも試運転調整段階で想定することが可能となる。

### 3.4 コミッショニングツールとしてのエミュレータ

前節において、エミュレータを活用したアプリケーション機能の高度化について考察した。エミュレータを活用すると、建築設備の初期性能の把握や設備運用におけるメンテナンスや機器更新、修繕での機能回復や性能低下の予測が可能となる。研究開発や実プロジェクトの各フェーズにおける、アプリケーションの類型とそれに活用されるエミュレータの情報粒度・情報量を図6に表す。実プロジェクトでの設計から運用までの各フェーズにおいて入手できる情報の解像度(情報粒度)は異なる。設計フェーズでは、主に概略的かつ低解像度の情報に基づいて省エネルギー効果などの初期の性能評価が行われる。施工フェーズおよび運用フェーズへと移行するにつれて、取得可能な情報粒度は次第に高まり、より精緻かつ実態に即した計算や分析が可能となる。また、エミュレータには様々なパラメータが必要となるが、既知のパラメータなどの情報量も設計から運用にわたって徐々に増加する。そして、フェーズが変化する瞬間に意思決定やデータの実測結果によって初期値や運転点などからパラメータが決定することにより、情報量がステップ的に増加する。これに応じてエミュレータ自身のモデル粒度も高められ、さらにフェーズの進んだアプリケーションの提供が可能となる。運用時に得られた情報は研究開発におけるエミュレータにもフィードバックがなされ、さらなる制御・システム開発に貢献し、それにより開発されたアプリケーションは実プロジェクトの各フェーズにさらなる価値を提供する、技術的および研究的な価値のスパイラルアップが期待される。

## 4. おわりに

スマートビル向け空調システムアプリケーションの市場調査を通じて、以下の知見を得た。

- 1) AI技術の活用は最適制御など一部機能に限定されており、今後の拡大余地が大きい
- 2) エミュレータ技術により、従来困難であった高度な機能(高精度な最適制御、不具合検知・診断、試運転調整支援など)の実現が可能
- 3) 次世代に向けたアプリケーションの高度化には、AI技術とエミュレーション技術の融合が重要

エミュレータに基づくアプリケーションの実装はほとんど例がなく、技術的な課題に加えてエミュレータ構築における実務的な課題も多いと考えられる。これらの課題解決に向けた検討を進める必要がある。

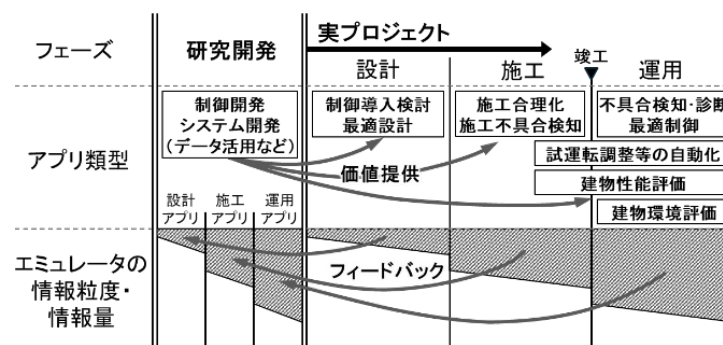


図6 フェーズごとのアプリケーションの類型と適用されるエミュレータの情報粒度・情報量

## 謝 辞

本研究は「スマートビルシステム社会連携講座」の一環として実施したものである。東京大学ならびに参画企業である株式会社関電工、株式会社九電工、新菱冷熱工業株式会社、株式会社大気社、ダイダン株式会社、高砂熱学工業株式会社、東京電力ホールディングス株式会社、東洋熱工業株式会社、および三菱重工サーマルシステムズ株式会社の皆様への謝意をここに期して表す。

## 文 献

- 1) Adrian Taboada-Orozco : Smart Buildings: A Comprehensive Systematic Literature Review on Data-Driven Building Management Systems, *Sensors* 2024, 24, 4405.
- 2) 宮田翔平ほか2名 : ZEBにおける建築設備分野の業務に関するヒアリング調査とスマートビル実現における課題提起, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, Vol. 10, pp.337-340 (2024)
- 3) Ya Bing Hou, et al.: Enhancing Building Services Management Systems with AI and Semantic Modeling: A Case Study on Improving System Efficiency through an AI-based Knowledge Library, *Proceedings of ASim Conference 2024: 5th Asia Conference of IBPSA*, pp.340-347, 2024.
- 4) <https://datafluct.com/news/bix6z8txjq6/> (2025年6月24日閲覧)
- 5) Lei, Yue, et al. "A practical deep reinforcement learning framework for multivariate occupant-centric control in buildings." *Applied Energy* 324 (2022): 119742.
- 6) 谷口景一朗, 石浦皓平, 宮田翔平, 赤司泰義, 室内温熱環境分布に基づく座席移動が在室者全体の熱的満足度に及ぼす影響, *日本建築学会環境系論文集*, Vol.88, No.808, pp.511-520, 2023.
- 7) Zhang, Yi, and Vic I. Hanby, Model-based control of renewable energy systems in buildings, *HVAC&R Research*, Vol.12, S1, pp.739-760, 2006.
- 8) 松浪佑宜, 宮田翔平, 高原, 川上理亮, 柴田克彦, 赤司泰義, 再エネと蓄電池を有する建築物エネルギーシステムにおける負荷平準化モデル予測制御 固定料金制に基づく蓄電池充放電による再エネの最大活用, *空気調和・衛生工学会論文集*, Vol. 48 No. 315, pp.1-11, 2023.
- 9) Xiupeng Wei, Andrew Kusiak, Mingyang Li, Fan Tang, Yaohui Zeng, Multi-objective optimization of the HVAC (heating, ventilation, and air conditioning) system performance, *Energy*, Vol.83, pp.294-306, 2015.
- 10) 宮田翔平, 桑原康浩, 林鍾衍, 赤司泰義, 吉本尚起, 動的 CO2 排出係数に基づいたモデル予測制御による熱源機器の低炭素制御. *日本建築学会環境系論文集*, Vol.85, No.777, pp.827-835, 2020.
- 11) Khalil Al Sayed, Abhinandana Boodi, Roozbeh Sadeghian Broujeny, Karim Beddiar, Reinforcement learning for HVAC control in intelligent buildings: A technical and conceptual review, *Journal of Building Engineering*, Vol.95, 110085, 2024.
- 12) Chenxin Liao, Shohei Miyata, Ming Qu, Yasunori Akashi, Year-round operational optimization of HVAC systems using hierarchical deep reinforcement learning for enhancing indoor air quality and reducing energy consumption, *Applied Energy*, Vol.390, 125816, 2025.
- 13) CHEN, Zhelun, et al. A review of data-driven fault detection and diagnostics for building HVAC systems. *Applied Energy*, 2023, 339: 121030.
- 14) 青山剛士ほか4名 : スマートビルにおける建築設備の高度化に関する研究 (第2報) アプリケーションの市場調査とエミュレータを活用した次世代アプリケーション要件の検討, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, Vol. 10, pp.545-548 (2025)

## ABSTRACT

In recent years, higher and more sustainable demands on building values are expected to the smart buildings that enable more efficient and intelligent operation of buildings. We are developing emulators that builds HVAC systems in cyberspace and emulates them in extreme detail, as well as applications based on this emulator. Through research on the current air conditioning system application market, it has become clear that the use of AI technology is currently limited to certain functions such as optimal control, but its adoption is expected to expand in the future. Furthermore, we summarized the requirements for emulator-based applications and discussed the gaps from the current situation. This will enable the use of emulator technology in addition to AI technology in the future to provide advanced functions that have been difficult to achieve with conventional operation data alone — for example, advanced optimal control, fault detection and diagnosis, and support for TAB (Testing, Adjusting, and Balancing).— We confirmed that emulation technology is important for the sophistication of applications, as it makes it possible to perform these functions.

---