

国際宇宙ステーション内日本実験棟「きぼう」の 室内温熱環境解析※

柴田克彦・齋藤雅浩・友部俊之^{*1}・木村真一^{*2}

Study on Indoor Environment Modeling of the JEM(KIBO) on the ISS

Katsuhiko Shibata・Masahiro Saito・Toshiyuki Tomobe・Shinichi Kimura

宇宙開発競争が激化する中、有人宇宙の環境制御に求められる要件が厳しさを増す。我々は、国際宇宙ステーション ISS の日本実験棟 JEM の室内環境を予測するために、その環境評価モデルの構築に取り組んでいる。本報では、CFD による温熱、気流の解析モデルを構築し、既存の実測データを用いて妥当性を検証した。また、重力の有無による自然対流の影響について確認した。さらに、キャビン内の吹出し方向、クルーの位置、実験機材の有無など運用状態の違いによる温熱、空気質環境についてケーススタディし、キャビン内環境をまとめた。

1. はじめに

国際的な宇宙開発競争が激化する中、我が国では宇宙基本計画にて中核的宇宙開発機関である宇宙航空研究開発機構 JAXA の役割・機能を強化し、スペース・トランスフォーメーションの加速を目的に大型の基金が創設された¹⁾。また、2019 年に発表されたアルテミス計画では²⁾、2020 年代に月面周回軌道にゲートウェイを建設し月面活動を行う計画で、日本人宇宙飛行士の月面着陸が予定されている。さらには、民間企業による宇宙旅行ビジネスも現実となり、一部で実現されている。これらの活動は、宇宙での滞在期間の長期化や長距離移動に加えて、非宇宙訓練者の滞在も伴うため、有人宇宙の環境制御に求められる要件が厳しさを増すと想定される。この対応策として、既存の生命維持に加え、QOL (Quality of Life) 向上も満足する環境制御システム ECLSS の開発が進められている。

このような背景のもと、筆者らは現在稼働中の国際宇宙ステーション ISS の日本実験棟 JEM、通称「きぼう」の室内環境の実態を予測するために、環境評価モデルの構築に取り組んでいる。本報では、JEM の環境基準を概説した上で、CFD (数値流体力学) による温熱、気流の解析モデルを構築し、既存の地上実験データを用いて妥当性を検証した。さらに、無重力環境の解析結果を考察し、キャビン内の吹出し方向、クルーの位置、機材の有無など運用状態の違いによる温熱、空気質環境のケーススタディについて報告する。

2. きぼうの環境基準

有人宇宙の経験がない我が国では、JEM 建設時の要求仕様を NASA の環境基準に準拠してまとめた³⁾。**表 1**に環境基準の中から、空気に関連する代表的な項目を示す。なお、表中には、JEM と NASA の環境基準、および参考として地上での建築物衛生管理の環境基準を併記する。JEM の環境基準の妥当性については、既報にて NASA などの文献や関連資料を元に検証した⁴⁾。ここでは、代表的な環境因子である温度、CO₂濃度について次に示す。

※ 本論文は、2024 年度空気調和・衛生工学会大会講演論文¹⁴⁾、2024 年度宇宙科学技術講演会論文¹⁵⁾を加筆修正したものである。

*1 有人宇宙システム株式会社 ISS 利用運用部 *2 東京理科大学創域理工学部電気電子情報工学科

表1 ISS-JEM の環境基準の一部

項目	JEM規定範囲	U.S ECLS	ビル管法
全圧 (kPa)	97.9～102.7	97.9～102.7	—
O ₂ 分圧 (kPa)	19.51～23.1	19.51～23.1	—
CO ₂ 分圧 (kPa)	日平均 0.707 ピーク 1.01	日平均 0.705 ピーク 1.01	1,000 ppm
有害ガス濃度	個別成分ごとに最大許容濃度	—	—
温度 (°C)	18.3～26.7	17.8～26.7	17～28
露点温度 (°C)	4.4～15.6	4.4～15.6	—
相対湿度 (%)	25～70	25～70	40～70
微生物 (CFU/m ³)	<1,000	—	—
微粒子	日平均 3,530,000個/m ³ ピーク 70,600,000個/m ³	日平均0.05mg/m ³ (100,000個/ft ³) ピーク1.0mg/m ³ (2,000,000個/ft ³)	0.15 mg/m ³
循環空気風速 (m/s)	平均 0.067～0.203 最低 0.035 最高 1.02	平均 0.051～0.2 最低 0.036 最高 1.02	0.5 m/s以下
騒音	NC-50以下	—	—

2.1 温度基準

NASA などの公開写真からキャビンでの滞在の様子を推察すると、着衣量は地上における夏期着衣量と同等、代謝量は静穏状態と思われる。図 1 に示す NASA-STD-3000 の温度基準⁵⁾から、暴露時間を 8 時間とすると、許容温度 18℃程度、快適域は 25℃前後となる。これは、表 1 に示した JEM の温度基準が許容温度の低温から快適域までの範囲であることが分かる。地上での代表的な基準 ASHARE Standard 55 と比較しても、JEM の温度基準は低温側に位置する。このような低温側の温度範囲で、かつ呼気からの CO₂ が顔付近に滞留しないように、吹出し噴流が人体に直接当たる気流性状を加味すると、現行の温度基準は特に東洋人にとって寒いと想定される。

2.2 CO₂ 濃度基準

分圧標記の CO₂ 濃度基準は、全圧 1 気圧で濃度換算すると約 7,000 ppm に相当する。これは、地上での建築物衛生管理の環境基準に比べかなり高濃度である。一方、既往の文献では^{6,7)}、健康への影響が現れ始める濃度について 7,000 ppm との記述があり、JEM の環境基準とほぼ合致する。表 2 に示す地上での各国許容濃度からは⁸⁾、労働環境で 5,000 ppm を上限とするが、執務環境では概ね 1,000 ppm、CO₂ 単独の指標は 3,500 ppm となっている。

図 2 に、CO₂ 濃度と不快者率の関係を示す⁸⁾。図の実験は、生体発散物質により CO₂ 濃度が上昇した時の不快者率であることから、キャビン内の環境も同様と考えられる。日本人の実験結果では⁹⁾、外気 CO₂ 濃度 370 ppm における居室内 CO₂ 濃度が約 1,000 ppm で 20%の不快者率となり、JEM の現行基準 7,000 ppm では不快者率が 70%を超える。日本人と欧米人で感覚に多少違いがあるものの^{10,11)}、少なくとも不快者率を 50%程度に抑えるには、3,000 ppm～3,500 ppm を CO₂ 濃度の管理基準とすべきである。

表 2 CO₂ 濃度の各国ガイドライン

諸外国(公表年)	室内濃度の指針値	対象
ノルウェー厚生省(1999)	1,000 ppm(最大値) ※室内空気汚染の指標	居住空間
カナダ保険省(1995)	1,000 ppm ※換気の指標	オフィス環境
カナダ保険省(1987)	3,500 ppm以下 (許容可能な長期暴露範囲)	居住空間
シンガポール環境省(1996)	1,000 ppm(8時間平均) ※換気の指標	空調設備を有するオフィスビル
中国香港特別行政区(2003)	最良質： 800 ppm(8時間平均) 良 質：1,000 ppm(8時間平均)	機械換気や空調設備を有する建物や閉鎖空間
中国環境保護総局(2002)	1,000 ppm(24時間平均)	住宅とオフィス
韓国環境部(2003)	1,000 ppm	大規模店舗、医療機関等
台湾環境保護庁(2012)	1,000 ppm(8時間平均)	—

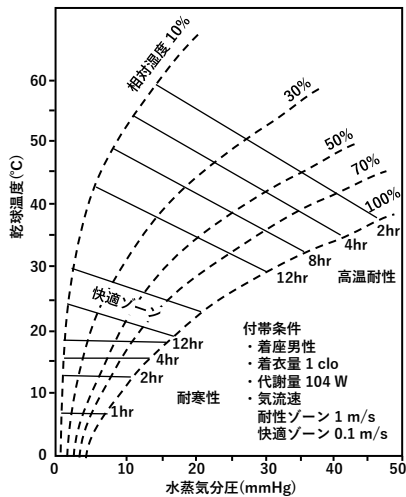


図 1 温湿度と暴露時間の環境要求基準(NASA)

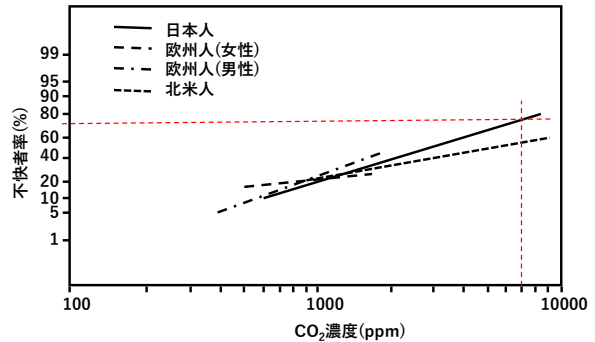


図 2 CO₂ 濃度と不快者率

3. CFD 解析モデルの構築

3.1 解析モデルの形状

JEM は、船内実験室、船内保管室、船外実験プラットフォーム、ロボットアーム、船外パレットの 5 つのエリアで構成されている。今回解析対象とした一辺 2.2 m のほぼ正方形断面の空間からなるキャビンは、外筒 4.4 mφ×11.2 m の船内実験室にある。便宜上、視覚的に上下を決め、天井側に照明を配置している。キャビン断面の左右には実験ラック、上下には通信系・環境制御系の機器や保管庫が組み込まれている。CFD 解析モデルの形状作成には、CAD 図面が無い場合 NASA、JAXA の公開写真、筑波宇宙センターのスペースドームの実物大モデルを参照した。図 3 に構築した解析モデルを示す。実験ラックの形状は発熱パネルとし、実験によるキャビンへの放熱を再現できるようにした。長手方向の片端には JEM に隣接する第 2 接合部「ハーモニー」との連絡口（空気は自然流出入）、もう一方の端部にはエアロック（断熱条件）、エアロック手前の天井面には保管庫との通路を設けた。

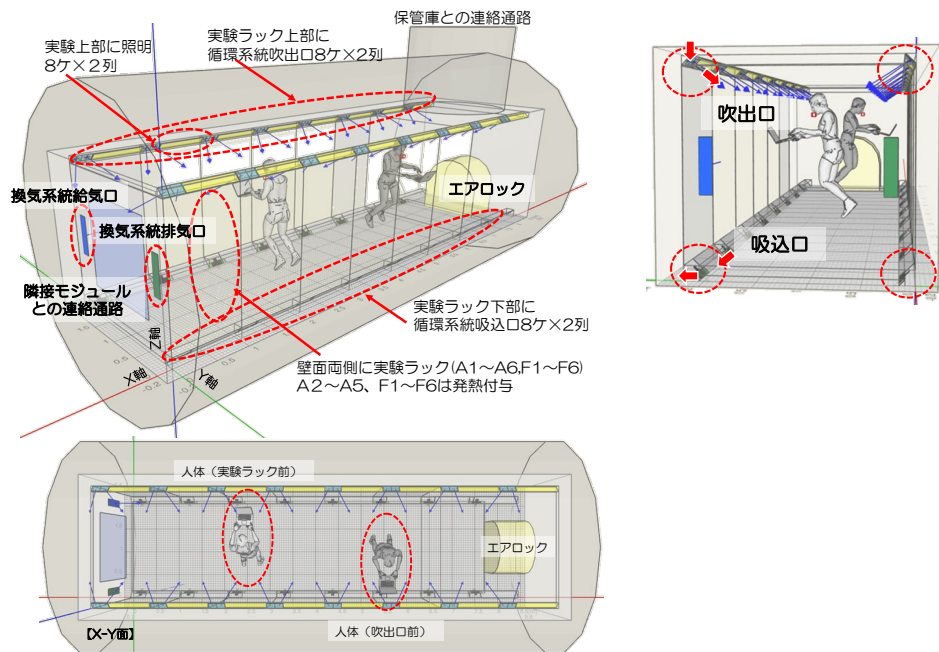


図 3 CFD 解析モデル

3.2 キャビンの空調方式

キャビンの空調は、IMV（Inter-Module Ventilation）にて再生された空気を供給する換気系統と、JEM に装備されている空気調和機でキャビン内の温湿度を調整する循環系統からなる。換気系統は、ハーモニー連絡口の左右に給気口と排気口があり、定格 238 m³/h の再生空気をキャビン内に供給し、同量をキャビン外へ排出している。循環系統は、左右のラック上部に縦横の羽根角度が可変な角型の吹出し口、ラック下部にパンチングパネル形状の吸込み口がある。気流性状は、図 4 に示すとおり、吹出し口からの気流がキャビン中央で対向し、吸込み口に流れ込む一方向流となる¹²⁾。換気系統と循環系統の気流を組み合わせることで、再生空気と循環空気をキャビン内で混合攪拌させている。

3.3 計算モデル

ISS は、地上 400 km の軌道を約 90 分で周回しているため、キャビン内には 10⁻⁶G 程度の微小重力が働く。一方、キャビン内では淀みが生じないよう、壁面から 0.15 m を除く空間で平均風速 0.076 m/s～0.203 m/s の気流が規定されている。そこで、本解析では過大に評価しないよう自然対流が生じない強制対流のみの無重力空間とした。無重力空間の計算には、今回用いた CFD 解析の汎用ソフトウェア（アドバンスドナレック研究所製 FlowDesigner）の特殊コマンドから、xyz 方向の重力加速度をゼロと設定した。また、発熱体からの輻射は輸送方程式による輻射強度を用いて計算した。

3.4 解析条件の設定

キャビン内の室圧は 1 気圧に維持され、N₂/O₂ ガスがボンベなどから再生空気に添加されている。これにより空気の組成は地上と大差ないことから、空気の物性値は地上と同様とした。乱流モデルも標準的な高レイノルズ数型 k-ε モデルを用いた。

解析境界条件は、断熱された外筒の内側に装置が組み込まれているので、床、天井を断熱条件、壁面の実験ラックを発熱パネルとした。

人体からの負荷は、発熱と呼吸による CO₂ 発生とした。発熱は人体の表面温度を一律 33℃とした。CO₂ の発生量は平均的な呼吸頻度と呼吸の CO₂ 濃度 4%から 35 g/h とし、人体の口近傍を発生源とした。

キャビン内の表面は実験装置や機材、ケーブルなどで凹凸のある空間となっている。この形状を解析モデルに再現するのは困難であるため、壁面に抵抗体を付与し凹凸をモデル化した。

以上の要件を基に CFD 解析モデルを構築し、メッシュ分割数約 300 万（x:362 y:91 z:91、最大メッシュ幅 0.05 m）で解析を行なった。

3.5 解析ケースとパラメータ

運用状態の違いによる温熱、空気質環境のケーススタディとして複数の解析ケースを設定した。キャビンの運用状態は非公開情報であるため、発熱や流れ場など想定しにくい。そこで、実験の様子が紹介されている公開写真を参照に、流れ場に影響を及ぼす循環系統吹出し口の羽根角度、クルーの人数と位置、実験機材など障害物の有無を解析パラメータとした。表 3 に解析ケースとパラメータを示す。

表 3 CFD 解析ケースとパラメータ

パラメータ ケース	羽根角度 (正面0°)		クルー位置 (2人)			機材有無	
	左	右	A3※1	F6※2	A_L※3	A3※1	A_L※3
CASE-1	45	45	○	○	－	－	－
CASE-2	7	47	○	○	－	－	－
CASE-3	0	60	○	○	－	－	－
CASE-2 -2	7	47	○	○	－	○	－
CASE-2 -3	7	47	○	－	○	－	○
CASE-3 -2	0	60	○	○	－	○	－
CASE-3 -3	0	60	○	－	○	－	○

※1：A3ラック前、※2：F6ラック前、※3：エアラック前

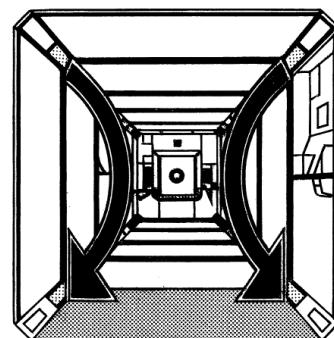


図 4 キャビン内の循環系統の流れ場

(1) 吹出し口の羽根角度

循環系統の吹出し口は縦方向、横方向とも羽根角度が調整可能である。クルーによる調整は不明であるが、横方向の羽根は水平位置で固定とし、縦方向の角度をパラメータとした。

(2) クルーの人数

JEM の定員は 4 名であるが、日常の業務を想定して 2 名とした。

(3) クルーの位置

クルーはラック前もしくはエアロック近傍に位置し静穏状態とした。クルーの移動に関しては、使用したソフトウェアでは移動体解析が不可能なため、移動中の遷移を省略し、クルーの位置ごとに解析モデルを作成し定常解析とした。

(4) 機材等の障害物

ラック正面には PC やケーブルなど流れ場の障害となる機材がある。しかしこれらをモデル化するのは現実的ではないので、操作盤など一辺 0.5 m 程度の装置の有無のみパラメータとした。

4. 解析モデルの妥当性検証

4.1 気流性状の検証

宇宙空間でのキャビン内実測データの入手が困難なため、本報では地上機の実験データ¹³⁾を参照し、無人・発熱負荷なしの解析条件の結果から気流性状の妥当性を検証した。

図 5 に、実験値と CFD 解析結果の風速コンターを示す。なお、解析結果の断面位置は、実験の様子を撮影した写真から推定したものである。実験ではラックなどが未装着な状態であったため、解析対象としたキャビンの壁面と境界条件が異なることから、壁面近傍を除外して検討した。図より、両者とも左右の吹出し口から斜め下に吹出した気流が中央で対向し、下部の吸込み口へと流れる気流分布が見られた。壁面の境界条件が異なるものの、実験値で見られるラック近傍の低風速領域は、CFD 解析でも再現されている様子が見られた。

これらの結果から、本解析モデルはキャビン内循環系統の気流性状をほぼ再現しているものと考ええる。

4.2 無重力環境の検証

無重力環境で自然対流が生じないことの再現性を確認するために、鉛直方向の重力加速度 1G（地上）と無重力について計算した。なお、今回は両者の差が顕著に表れるように実験ラック 10 台中 1 台のみ発熱量 300 W の高発熱負荷ラックとした。図 6 に、高発熱負荷ラックを組込んだ壁面近傍の速度ベクトルと温度コンターを示す。図より、地上では、発熱により壁面近傍にブルームが発生し、対流熱伝達が促進することでラック表面の温度上昇が 35℃程度に抑えられている。一方、無重力では壁面近傍のブルームが観察されず、放射による熱授受のみで表面温度が 50℃近くまで上昇している。高発熱負荷ラック近傍の上下平均温度では、無重力で 6.3℃高くなっている。これらの結果、今回作成した解析モデルでは、無重力において自然対流が発生せず、強制対流と放射で温度場が形成される様子を再現しているものと考ええる。

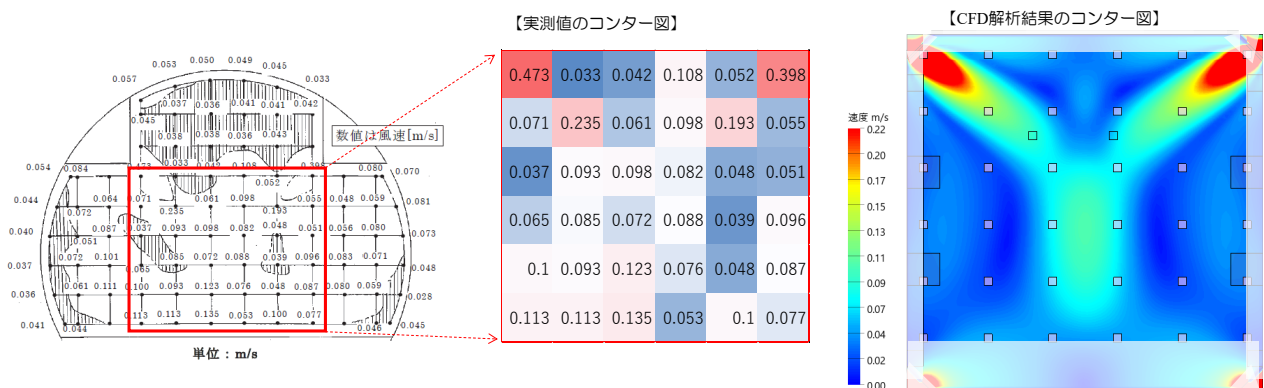


図 5 風速分布の実測値と CFD 解析との比較

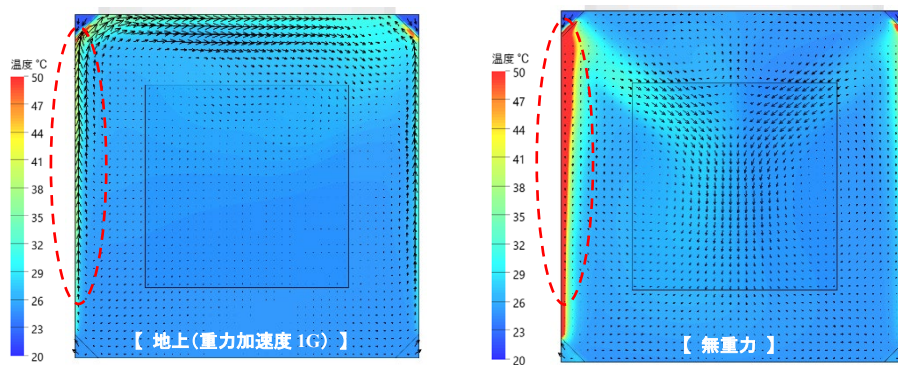


図 6 重力による壁面近傍の風速ベクトルと温度コンターの違い

5. 運用状態の違いによるケーススタディ

有人宇宙解析モデルの検証を踏まえ、表 3 に示した運用状態の違いによるキャビン内環境の変化についてケーススタディした。

5.1 風速分布

解析結果の一例として、循環系統吹出し口の羽根角度が異なる CASE-1、CASE-2、CASE-3 の風速分布をベクトルとコンターで図 7 に示す。図は、換気系統の給気と循環系統の吹出し気流が混合した状態が把握できるように、給気口中心の XZ 断面(Y=1.975 m)である。図の左側から噴出している換気系統の給気はキャビン中央まで到達し、以降拡散している様子が見える。また、図の上部から吹出している循環系統の気流は、吹出し口の羽根角度によって気流の性状が異なる。吹出し口中央から左右に 45° で吹出す CASE-1 では、循環気流のプロファイルが小さいのに対し、吹出し角度が左右で異なる CASE-2、CASE-3 では吹出し気流のプロファイルが大きくなっている。特に CASE-3 は斜め方向の吹出し気流が途中でマージすることで到達距離が延び、換気系統の給気を下方へ押し下げている。この様子から、換気系統の再生空気が循環系統の吸込み口からダクトを介して吹出し口へと循環し、汚染物質の希釈促進が期待できる。次に、キャビン内部発熱と CO₂ 発生量の拡散状況について考察する。

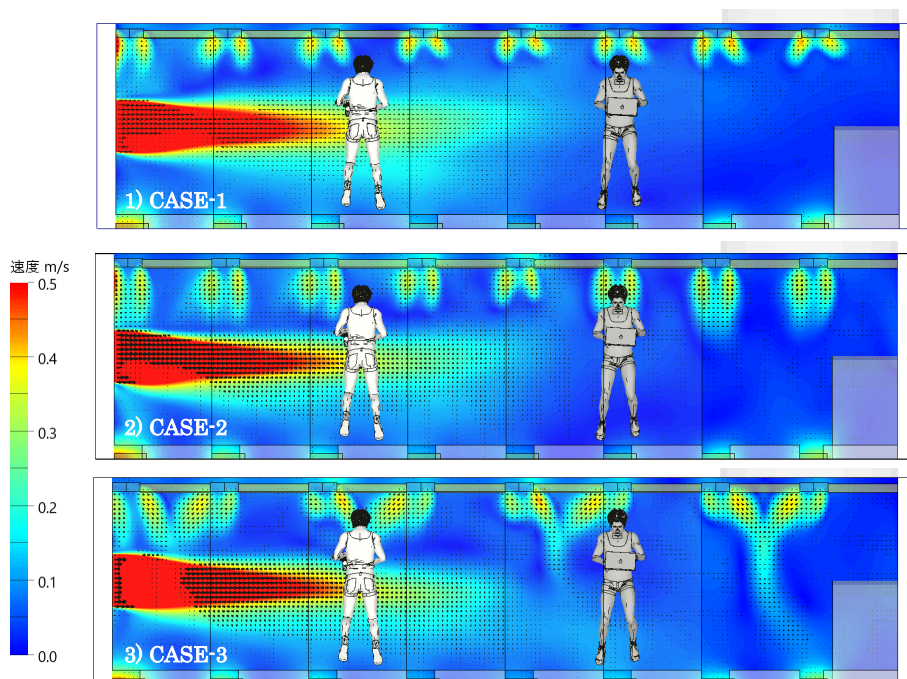


図 7 吹出口羽根角度による風速分布の違い

5.2 負荷の拡散状況

人体などの内部発熱と CO₂ 発生の拡散状況をクルー位置断面における温度、CO₂ 濃度を用いて図 8、図 9 に示す。図 8 より CASE-1、CASE-2 ではクルーに循環システムの気流が直接当たる様子がみられ、熱的不快感が想定される。しかし、CASE-3 ではクルーの居住域において顕著な温度ムラがみられなく、ほぼ均一な温熱環境が形成されることが分かる。また、図 9 より CASE-1 では呼気の拡散が弱く、クルーの呼吸空気の汚染が懸念される。しかし CASE-2、CASE-3 では呼気が速やかに拡散されている様子が分かる。

これらの結果から、人体の温熱感、呼吸空気の CO₂ 濃度の上昇抑制には循環系統の吹出し口の羽根角度が有効であることが示唆された。

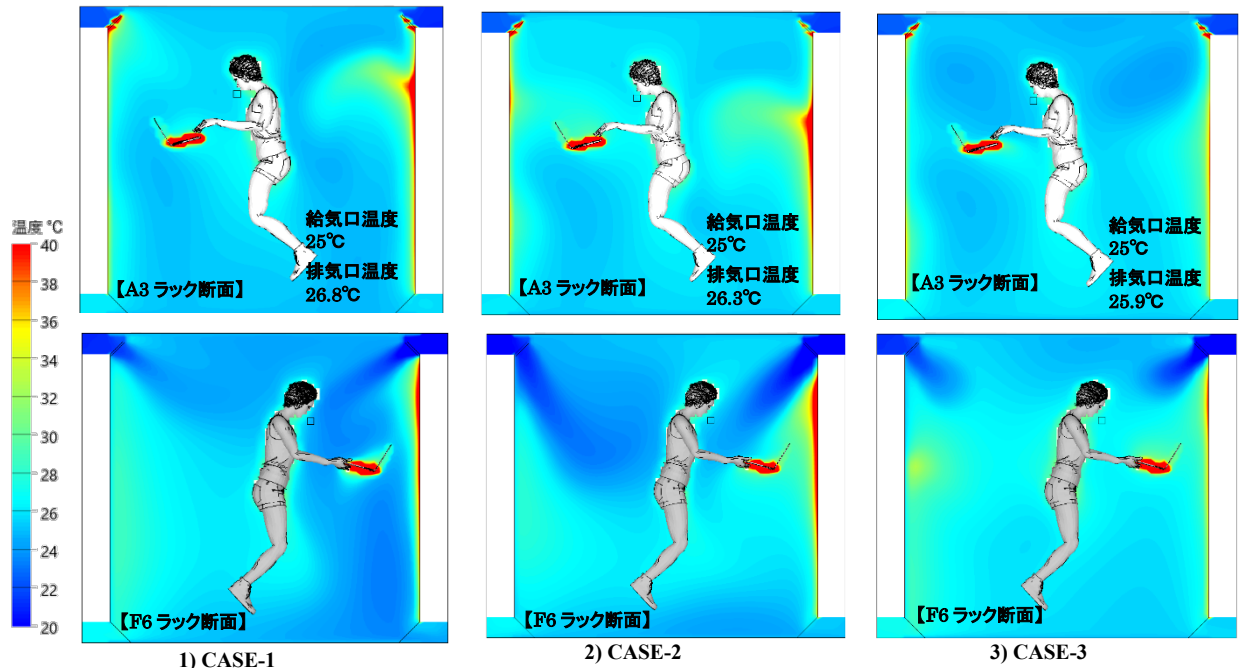


図 8 吹出口羽根角度による温度分布の違い

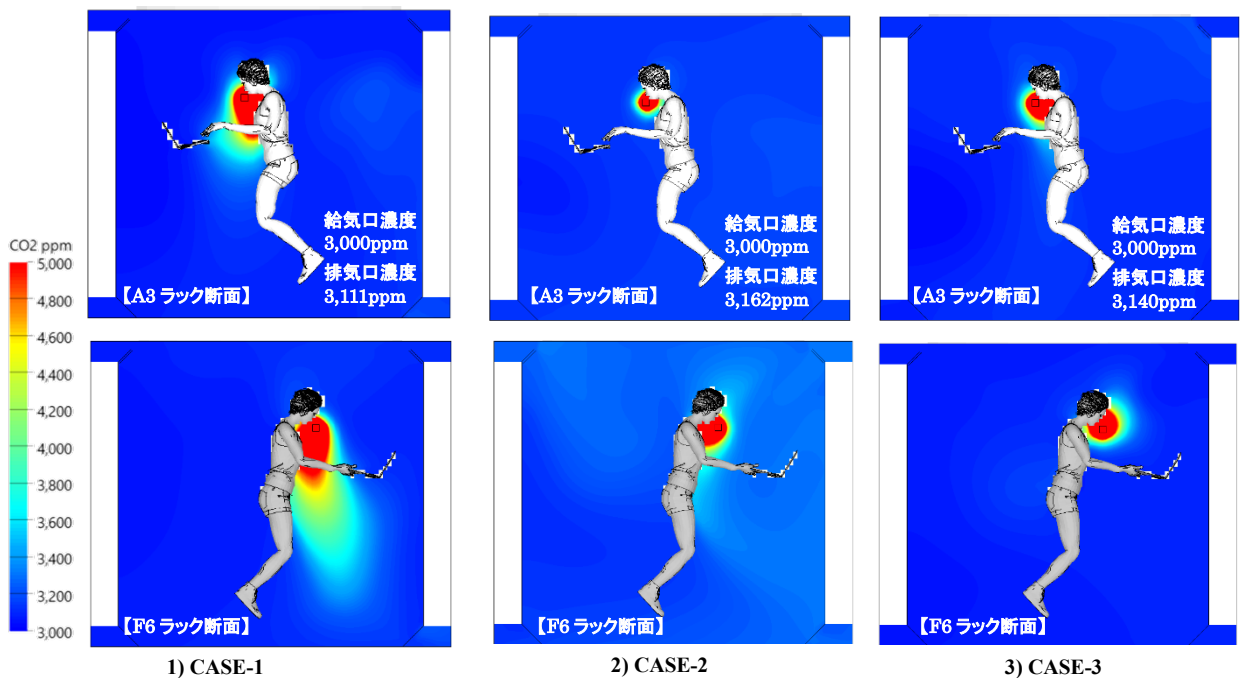


図 9 吹出口羽根角度による CO₂ 濃度分布の違い

5.3 キャビン内環境の評価

キャビン内環境の最大の懸案事項は、換気不良による汚染空気滞留である。換気に関する国内基準としては公益社団法人空気調和・衛生工学会の換気規格 SHASE-S 102-2022 がある。本基準では、空気の滞留を評価する指標として空気齢 SVE3 を規定している。ここで、SVE3 とは IMV からの給気が届くまでの時間を表す基準化した値で、値が小さいほど給気口からの新鮮な空気に包まれているといえる。図 10 に SVE3 の解析例として CASE-3 における代表面の分布を示す。図より、給気の主流では SVE3 が小さいものの、エアロックや IMV への排気口近傍では大きくなっている様子が分かる。そこで、各種パラメータによる SVE3 の空間分布について評価した。

JAXA の環境規定では壁面から 0.15 m 離れた空間について気流の許容範囲がある。これに準じ、壁面から 0.15 m 内側における空気齢の累積割合を図 11、図 12 に示す。ここで、図 11 は循環システムの吹出し口の羽根角度、図 12 はクルーの位置、機材等の障害物の有無による違いを比較したものである。図 11 より、前項に示した負荷の拡散状況の評価と同様に、CASE-3 が最も SVE3 が小さく、空間の 65% が完全混合に近い SVE=1 以下の状態であることが分かる。また、図 12 より、クルーの位置、障害物によって SVE3 は多少悪化するものの、その差は SVE3=1 において 10% 以内であることがわかる。なお、図示は無いが CASE2-2、CASE-2-3 においても同様の結果が得られた。これは、図 11 での循環システムの吹出羽根角度による差異が卓越していることから、羽根角度を再調整することで十分に改善可能な範囲と考えられる。また、IMV からの換気システムの給気をさらに効果的にエアロック近傍まで到達させることができれば、本解析で扱ったサイズの障害物による影響はさらに緩和できると思われる。

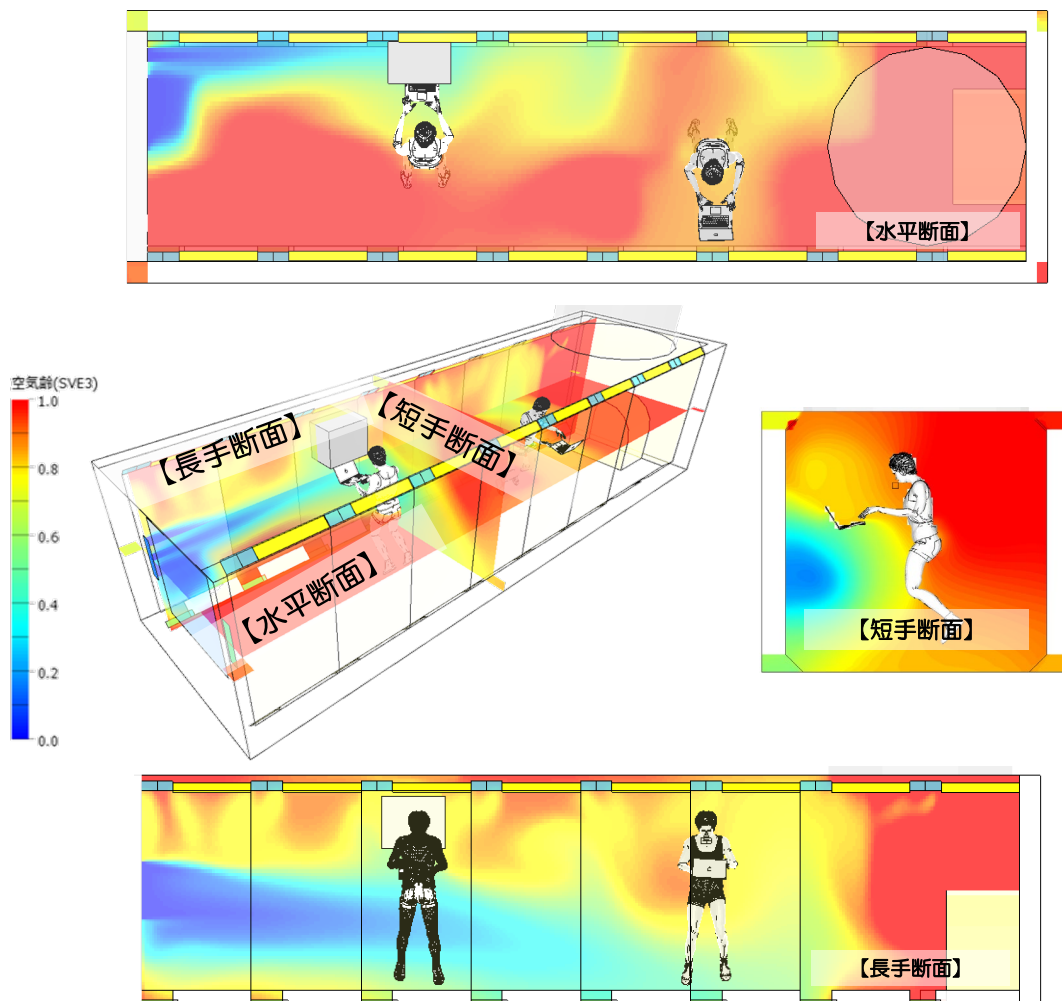


図 10 換気効率 SVE3 の分布例

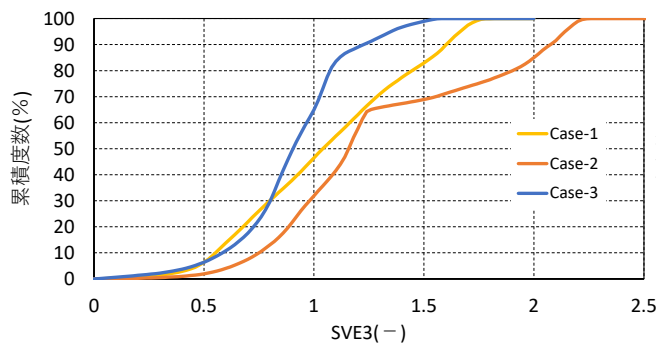


図 11 吹出角度による換気効率 SVE3 の違い

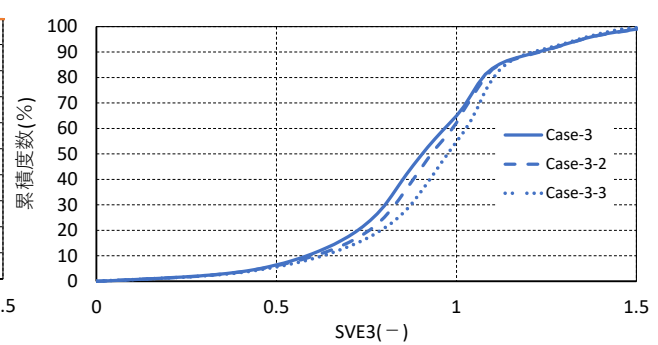


図 12 クルー位置, 障害物による換気効率 SVE3 の違い

6. おわりに

2010 年から各種実験及び実測で活躍し続けている国際宇宙ステーション ISS の日本実験棟 JEM にあるキャビン内の温熱、空気質環境について、基準値を概説した上で、CFD 解析を用いた環境評価を行った。吹出し口の羽根角度、クルーの位置、機材の有無など運用状態によるケーススタディから、循環系統の吹出し口羽根角度による室内環境への影響と、クルーの位置やキャビン内の障害物に対して羽根角度による調整が有効であることが示唆された。

謝 辞

本研究は(株)バンダイナムコホールディングスが主催するガンダムオープンイノベーションの公認プロジェクト「TEAM SPACE LIFE」の活動の一環として行ったものである。ここに関係の皆様へ謝意を表します。

文 献

- 1) 内閣府:宇宙開発基金の創設, <https://www8.cao.go.jp/space/committee/dai108/siryou3.pdf>,(2025.1)
- 2) <https://www.cnn.co.jp/fringe/35196185.html>,(2025.1)
- 3) JAXA JEM 開発プロジェクトチーム:日本実験棟「きぼう」総合報告書～本編(第1巻),p.232(2010.3)
- 4) 柴田克彦,中村泰:低重力下での快適環境に関する調査研究, 第 66 回宇科連,4M11(2022.11)
- 5) NASA-STD-3000, NATIONAL AERONAUTICS and SPACE ADMINISTRATION
- 6) 空気調和・衛生工学会規格、SHASE-S102-2011 換気基準・同解説
- 7) Federal-Provincial Advisory Committee on Environmental and Occupational Health; Exposure Guidelines for Residential Indoor Air Quality, p.8(1989)
- 8) SHASE, 必要換気量算定のための室内二酸化炭素設計基準濃度の考え方,(2021.5)
- 9) 岩下剛,木村健一,田辺新一,吉沢晋,池田耕一:人間の嗅覚に基づく室内空気質の評価に関する基礎的研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 410 号,pp.9-19(1990)
- 10) Berg-Munch, B., Clausen G., and Fanger, P.O., Ventilation Requirements for the Control of Body Odor in Spaces Occupied by Women, Environment International, Vol.12, pp.195-199(1986)
- 11) Cain, W.S., Leaderer, B.P., Isseroff, R., Bergland, L.G., Ventilation Requirements in Buildings-I :Control of Occupancy Odor and Tobacco Smoke Odor, Atmospheric Environment, Vol.17(6),pp.1183-1197(1983)
- 12) 上妻充幸:宇宙ステーションの空調, 空気調和・衛生工学会, vol.78, No.1, pp.45-51(2004)
- 13) JAXA:第9章 生命維持技術, JAXA 特別資料 JAXA-SP-12-015,pp.84-95
- 14) 柴田克彦,齋藤雅浩,友部俊之,木村真一,国際宇宙ステーション内日本実験棟「きぼう」の室内温熱環境解析 第 1 報 CFD 解析モデルの構築と環境評価,2024 年度空衛講論,I-48,pp.425-428(2024.9)

- 15) 柴田克彦,齋藤雅浩,友部俊之,木村真一,国際宇宙ステーション内日本実験棟「きぼう」の室内温熱環境解析 第2報 運用条件による環境の変化,第68回宇科連,IF-13(2024.11)

ABSTRACT

As the space race intensifies, the need for stringent environmental control in manned space missions has become increasingly critical. This study focuses on the development of an environmental assessment model designed to predict the indoor environment within the Japanese Experiment Module (JEM) of the International Space Station (ISS). The research involved developing analytical models of temperature, heat transfer, and airflow using computational fluid dynamics (CFD), which were subsequently validated against existing measured data. Furthermore, the impact of natural convection with and without the presence of gravity was examined. Case studies were also conducted to evaluate the thermal and air quality environments under varying operational conditions, including changes in the cabin air outlet direction, crew positioning, and the presence or absence of experimental equipment. The findings highlight the contributions of these factors to the overall cabin environment.
