

小型自律分散型環境センサーを用いた実測と CFD 解析 による「きぼう」内キャビンの流れ場分析※

柴田克彦・齋藤雅浩・永野秀明*¹
阿部麻紀*²・友部俊之*²・木村真一*³

Analysis of the Air Flow inside the 'KIBO' using Measurement and CFD Analysis

Katsuhiko Shibata・Masahiro Saito・Hideaki Nagano
Maki Abe・Toshiyuki Tomobe・Shinichi Kimura

我々は国際宇宙ステーション内の「きぼう」の室内環境を簡便に予測する環境評価モデルの構築に取り組んでいる。これまで、既往の文献等からキャビン形状や地上での実験データを参照しながら簡易 CFD モデルを構築してきた。本報では、小型自律分散型環境センサーによる軌道上実証データと CFD 解析のフィッティングを行い、代表断面における CO₂ 濃度の妥当性を検証した上で、キャビンの流れ場を推定した。

1. はじめに

国際宇宙探査協働グループ ISECG が定めた、国際協働による有人宇宙探査に関する国際宇宙探査ロードマップでは、2040 年代に数 10 人規模の月面上の活動を想定している¹⁾。活動は、官需のみならず観光等の民需もあり、従来の生命維持に加え QOL (Quality of Life) 向上も満足する環境制御システム ECLSS への要求が高まると考える。

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。これまでは、既往の文献等を参考に CFD 解析による温熱・空気質環境の予測モデルを構築してきた²⁾³⁾。本報では、小型自律分散型環境センサーの実測値を元にモデルを改良し、キャビン内の流れ場を推定したので報告する。

2. キャビン内環境の実測

2.1 小型自律分散型環境センサー

キャビン内の温熱・空気質環境測定には、**写真 1** に示す小型自律分散型環境センサー（以降、TEM と呼ぶ）を用いた⁴⁾。TEM は、温湿度に加え CO₂ 濃度や 5 種類のニオイ成分など空気質の測定が可能である。主な仕様を**表 1** に示す。2025 年 4 月に ISS に向けて打ち上げ、その後「きぼう」キャビン内にて軌道上の環境を測定した⁵⁾。

※ 本論文は、2025 年度宇宙科学技術連合講演会論文⁵⁾を加筆修正したものである。

*1 東京都市大学 理工学部 機械システム工学科、*2 有人宇宙システム株式会社 宇宙システム開発ユニット、*3 東京理科大学 創域理工学部 電気電子情報工学科



©東京理科大学 スペースシステム創造研究センター

写真1 小型自律分散型環境センサー(TEM)の外観

表1 小型自律分散型環境センサー(TEM)の仕様

外形寸法	本体 85mm×55mm×35mm
温度	0～65°C、精度±0.5°C
湿度	0～100%、精度±3%
CO ₂ 濃度	非分散型赤外線式
ニオイ	標準選定5種類のニオイ
9軸	加速度・角速度・磁方位
画像	カメラモジュール

2.2 環境測定

今回は2台のTEMで測定を行った。1台はISS本体から「きぼう」に給気されるIMV (Inter-Module Ventilation)システムへの流出口近傍での定点測定、もう1台はクルーが船内に順次移設する多点測定である。

データのサンプリング周期は10秒で、センサー本体のSDカードに保存するとともに、無線にて準リアルタイムに地上で観測した。

図1に、キャビン断面でのセンサー設置位置と測定時のクルーの待機位置を概念的に示す。クルーは、センサー設置後センサー横のキャビン中央に移動し、データ収集の5分間程度静穏状態にて待機していた。

図2に、代表断面(実験ラック3列目)の天井(O)、床(D)、Aft(A)側実験ラック前とForward(F)側実験ラック前での測定結果を示す。値は、センサーを設置して測定値が安定した後の60秒間平均である。図より、O面、A面の濃度が多少高く、IMVシステムの流入口から流出口に向けて濃度勾配が見られる。

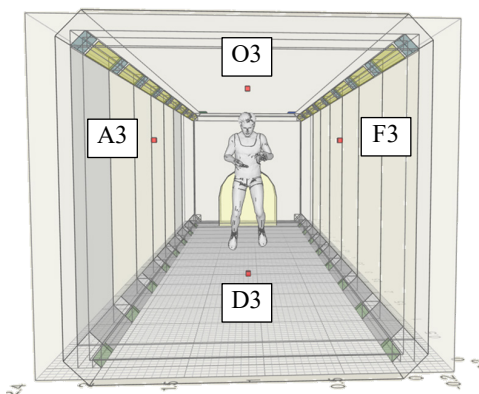


図1 センサーの設置位置とクルーの待機位置

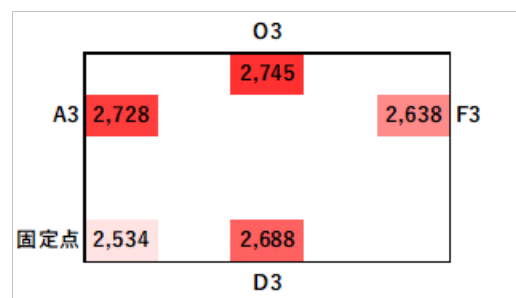


図2 代表断面のCO₂濃度(ppm)

3. CFD 解析モデル

3.1 既存モデルでの知見

XYZ 方向の重力加速度がゼロ（無重力）以外、地上と同じ条件で解析した既存モデルからは、これまでに次の知見を得ている。

- ・自然対流が生じないため、発熱や汚染物質の発生は強制対流と拡散に依存している
- ・クルーの位置による換気効率（SVE3：空気齢）への影響はほぼ無視できる
- ・キャビン内の壁面上部に設置されている温湿度調整のための循環系統吹出し口の羽根角度は SVE3 に影響を及ぼす

以上から、キャビン内の流れ場が環境制御に重要な影響を及ぼすことを認識した。なお、流れ場に寄与する境界条件としては、上記知見に加え IMV 系統の「吹出し噴流の風向」、「吹出し噴流の風速」、「流入量と流出量の風量収支」がある。これらの境界条件を加味しながら、今回の CO₂ 濃度測定結果から、解析モデルの改良点を検討した。

3.2 実測値から推定するモデル改良のポイント

(1) IMV 系統流出口近傍 CO₂ 濃度の低減

図 2 に示したキャビン内代表断面の CO₂ 濃度に比べ、固定点の IMV 系統流出口近傍の濃度が低い。この要因として、隣接するノード 2 からの自然流入による希釈が考えられる。具体的には、IMV 系統の風量収支が、流入量より流出量が多いため、自然流入の流れ場が流出口近傍のセンサー周りで生じ、濃度が低下したと推定するのが妥当である。

(2) クルーの呼気と CO₂ 濃度

静穏状態にある人体の呼気の CO₂ 濃度は約 4% である。一方、今回の測定結果は数 1,000 ppm のオーダーであり、呼気に比べ桁低い。これは、呼気への誘引空気によって CO₂ が速やかに希釈されたと推定できる。ただし、呼気の CO₂ 濃度の分布に関する既往の研究が見当たらないため、今回の解析モデルでは、CO₂ 発生ノードの 0.9 m 四方（呼気の風速約 0.6 m/s、呼吸サイクルで安定した呼気の時間 1.5 秒⁶⁾ から算出した呼気到達範囲）を評価の対象外とした。

(3) CO₂ 濃度の均一化

キャビン内の CO₂ 濃度分布が小さいことから、キャビン内循環系統による CO₂ の拡散および IMV 系統の換気による希釈が作用している。また、ISS の環境基準では壁面から 0.15 m 内側の風速が 0.035～1.02 m/s の範囲と規定されていることから、IMV 系統流入口からの噴流は、到達距離を延ばしてキャビン内を攪拌させるよりは、循環系統の流れ場と混合し、キャビン内を希釈させると考えた方が合理的である。

(4) 代表断面での濃度勾配

キャビン断面の温度勾配から、実験ラック 3 列目断面では、A 側、O 面への緩やかな流れ場が形成されている。

3.3 CFD 解析モデルの改良

前節で示したポイントと「きぼう」の空調システムに関連する資料の見直しから、CFD 解析モデルについて次の改良を加えた。

Step1：循環系統吹出し口の羽根角度

実測時にクルーが撮影した循環系統吹出し口の写真から、羽根角度を観察し、実態に合わせて調整した。調整後の羽根角度を図 3 に示す。実態では、羽根が比較的正面を向き、キャビン奥ではエアロック方向を向いていた。

Step2：IMV の流入量、流出量の風量収支

流入経路、流出経路の各々に送風機が設置されていることから、両者の風量は必ずしも同量ではない。そこで、ノード 2 からの自然流入を 0.1 m/s とし、流入量と流出量の風量収支を取った。風量の妥当性については、濃度分布の再現性から検証した。

Step3 : IMV 系統流入口の気流性状

ダクトの収まりが厳しい中で送風機を設置しているため、流入口にて偏流が生じやすい。さらに、流入口からの噴流は、キャビン内にて循環系統の気流と混合するとの仮定から、流入口の気流を斜め下方向とした。

Step4 : 循環系統の吹出し風量

循環系統は 2 台の空調機からの送風が集合ダクトで合流し、各吹出し口に分流している。今回はダクトの動圧を考慮して、簡易的に送風機に近い両サイドと中央とで 20%の風量差を設けた。

Step5 : 保管庫の換気

「きぼう」の空調システムに関連する資料から、IMV 系統の送風が、換気のために一部保管庫へ流入していることを新たに把握した。そこで、IMV 系統の風量をキャビン内（船内実験棟）と保管庫の容積比に応じて按分し、保管庫への流出入経路を設けた。

以上の改良を踏まえた CFD 解析モデルを **図 4** に示す。計算モデルおよび与条件は、従来の解析モデルを踏襲している。

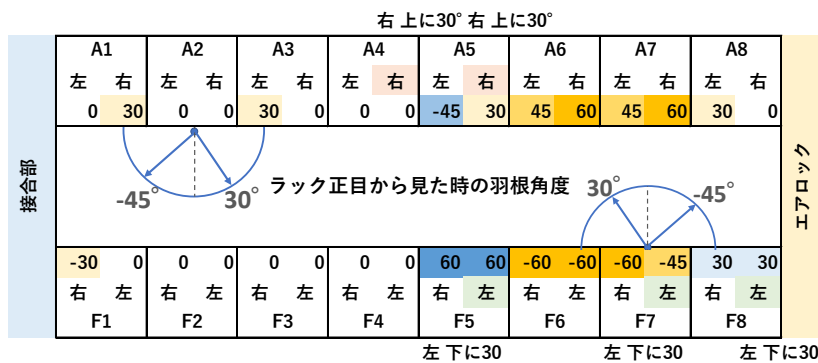


図 3 循環系統吹出し口の羽根角度

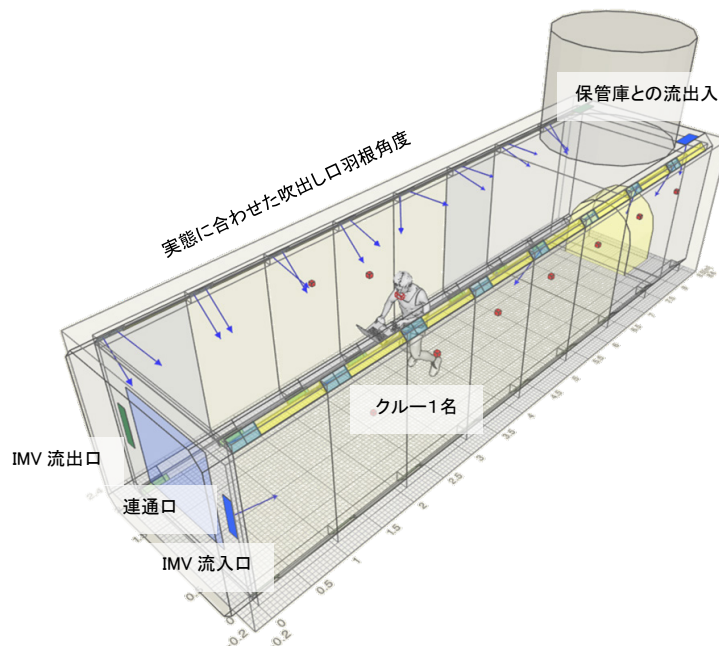


図 4 改良版 CFD 解析モデル

4. 実測と解析結果の比較による検証

4.1 羽根角度による換気効率 SVE3 の改善

羽根角度が換気効率に影響を及ぼすことは前述のとおりである。図 5 に従来の羽根角度と今回の実態による SVE3 のヒストグラムを示す。図 5(a) から、換気効率の低下を示す SVE3 の増加がみられる。

この結果を踏まえ、ラック列前面の実験装置やケーブル類の抵抗をモデル化した模擬抵抗の厚みを削減し、IMV 系統の流入空気の流れ場を確保した。これによる SVE3 の改善効果は図 5(b) のとおりである。

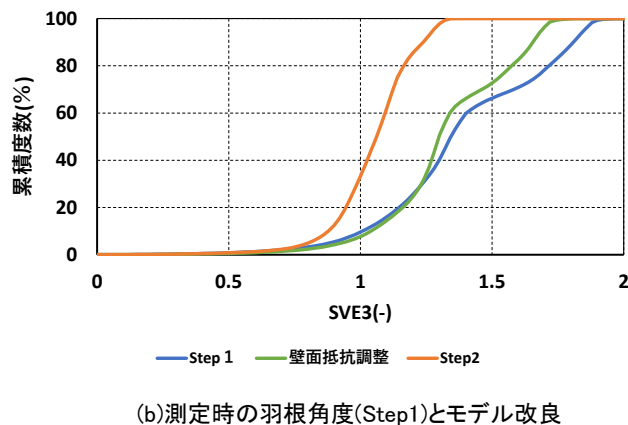
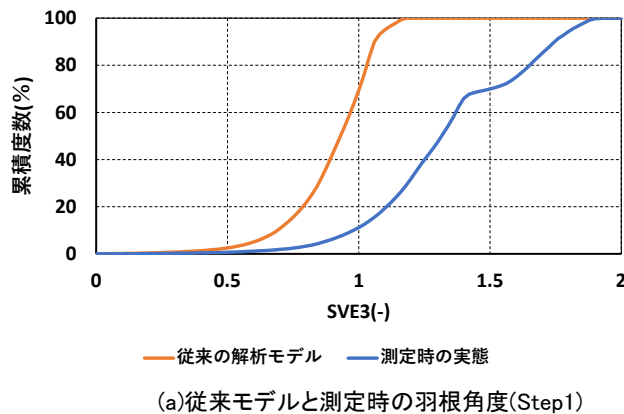


図 5 換気効率 SVE3 の比較

4.2 CO₂ 濃度の代表断面比較

モデル改良の Step ごとによる代表断面の CO₂ 濃度のコンターを図 6 に示す。(a)Step1&Step2 の改良では中央から各面にほぼ同様な濃度勾配が形成されていたが、モデルの改良を進めることで、図 2 に示した測定値に近い A 側、O 面への濃度勾配が得られた。

4.3 キャビン内の流れ場

代表断面の濃度勾配がほぼ再現できたことから、キャビン内の流れ場を図 7 の流線で推定する。JEM の流入口から吹出された新鮮空気はキャビン内を斜め下方向に進みながら、循環系統の吸い込み口を介して、キャビン上部の循環系統吹出し口から供給され、キャビン内の汚染物質を希釈する。また、一部は保管庫へと流入し、保管庫を換気する。

これらの流れ場が形成されることにより、キャビン内の環境が極端な滞留域を生成することなく、維持されていると考えられる。

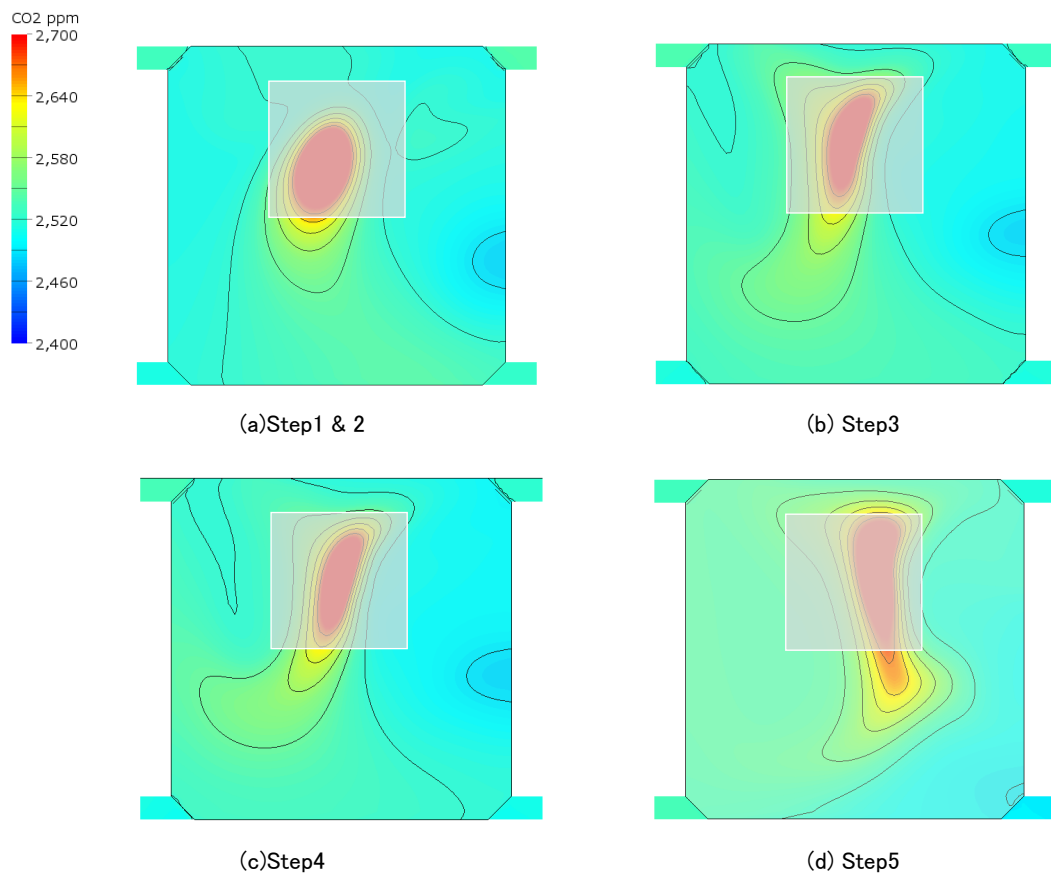


図6 モデル改良と代表断面のCO₂濃度

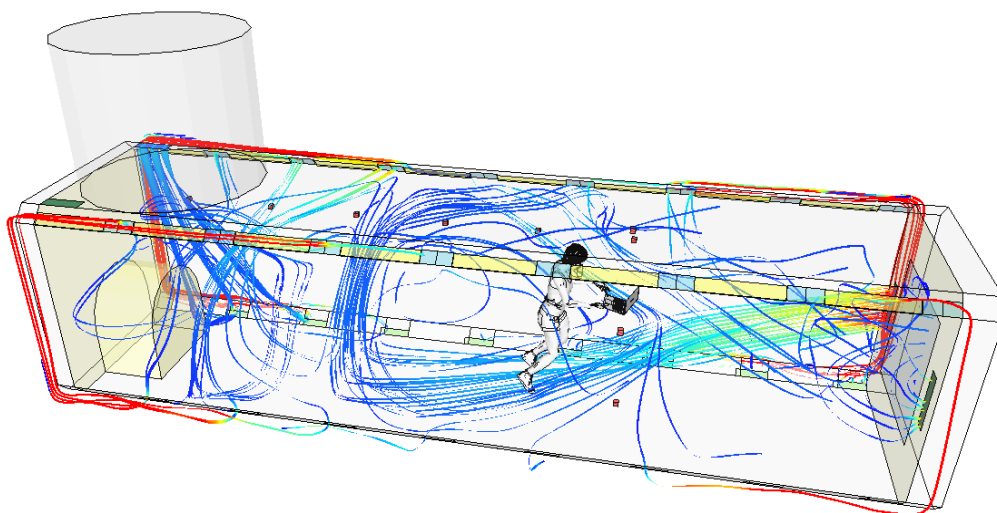


図7 キャビン内の流れ場

5. おわりに

本報では、スモークやミストによる可視化が不可能なため、流れ場の実態を把握することができない。今回は CO₂ 濃度から二次的に検討したことで、影響因子を把握し、各項目が寄与することは濃度分布の再現性で確認できている。今後、さらなる適正解に向けて解析を進める。

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す。

文献

- 1) 日本の国際宇宙探査シナリオ（案）改訂の実施状況, JAXA, 2025.6
- 2) 柴田克彦, 斎藤雅治, 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)
- 3) 柴田克彦, 斎藤雅治, 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, 1F13 (2024. 11)
ガンダムカラーの環境センサー(TEM)が宇宙へ, https://www.tte-net.com/article_source/data/news/files/20250422_1.pdf (2026. 1)
- 4) 木村真一, 植田国男, 福島広暉, 高久雄一, 柴田克彦, 黒住献, 瀧澤玲央, 天野健作, 福田美紀, 立花晃, 石井源久, 小野圭, 吉川敬, 石田周平, 友部俊之, 阿部麻紀: 自律分散環境センサを用いたきぼう実験棟での局所多点環境計測実験, 第69回宇科連, 4Q05 (2025. 11)
- 5) 柴田克彦, 斎藤雅治, 永野秀明, 阿部麻紀, 友部俊之, 木村真一: 小型自律分散型環境センサーを用いた実測と CFD 解析 による「きぼう」内キャビンの流れ場分析, 第69回宇科連, 4Q04 (2025. 11)
- 6) 朱晟偉, 林立也, 加藤信介, 村上周三: 可視化実験と数値解析による静穏室内の人体呼吸域流れの性状の検討, 日本建築学会環境系論文集, 第583号, pp. 37-41 (2004. 9)

ABSTRACT

We have developed an environmental assessment model that can efficiently predict the indoor environment of the Kibo module on the International Space Station. A simplified computational fluid dynamics (CFD) model has previously been constructed based on reported cabin geometry and ground-based experimental data. In this study, we integrate on-orbit demonstration data obtained from small autonomous distributed environmental sensors with CFD simulations through a fitting approach. After validating the CO₂ concentration distribution at a representative cross-section, we estimate the global airflow field within the cabin.