デジタルツインとLLMベースエージェントを活用した空調運用支援システム

- 柏の葉KOILパークにおける自律的な空調条件探索と運用提案の実証 -

1. 研究の背景と目的

背景・課題

- 室内の快適性と省エネルギーの両立にはデジタルツイン活用が期待される
- しかしCFD解析は計算負荷が高く，実運用への適用が困難
- 空調運用は管理者の経験や利用者の申告に依存しがち

目的

- CFDベースのデジタルツインとLLMを統合し，熱環境評価から空調探索，運用提案までを自動化する

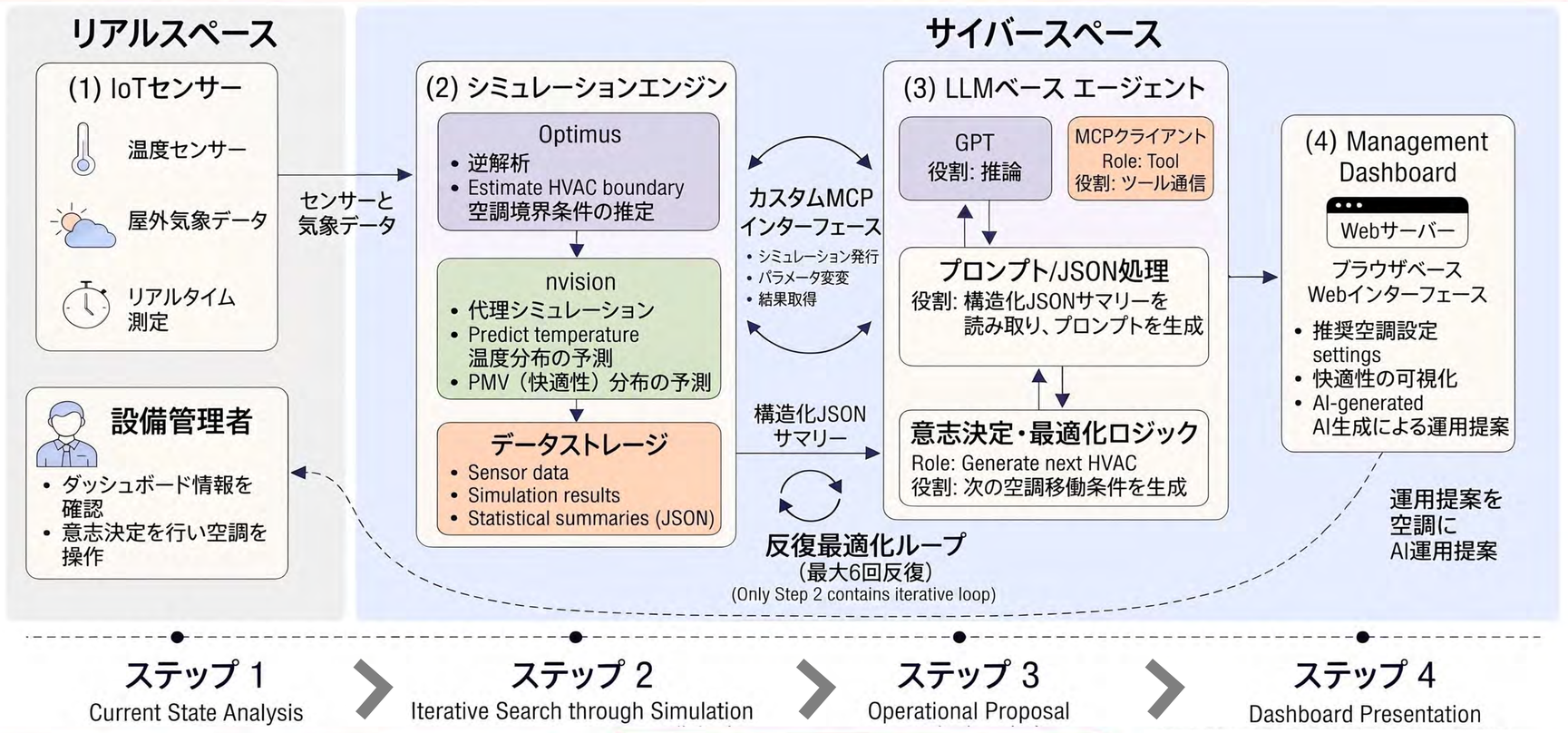
2. 提案システム

IoTセンサー
室内温度を計測

シミュレーション（逆解析・サロゲート）
室内環境の再現と空調条件探索を高速化

LLMエージェント
解析結果に基づく空調条件の自律探索

管理者ダッシュボード
評価結果と運用提案を提示



システムの流れ 現況把握 → 空調条件の探索 → 運用提案

評価指標 $J = C + \alpha U + \beta F$

C: 快適性評価値（PMVに基づく）
U: 温度ムラ（温度分布の偏り）
F: 給気風速増加量（現状からの増加量）

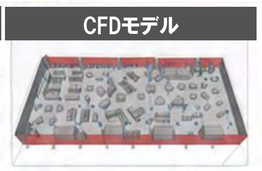
3. 実証フィールドとデジタルツイン構築

- 実証フィールド：柏の葉KOILパーク by 三井不動産
- 実証条件：夏季実運用環境で評価
- 計測：温度センサー14箇所（室内温度を計測）
- CFDモデル：外気温・給気温度/風速・内部発熱等を入力した3次元モデル
- サロゲートモデル：CFD 320ケース（学習300/検証20）
- 逆解析：14箇所の実測温度を用いて境界条件と内部発熱量を推定し，現況再現

施設（点群データ）



CFDモデル



温度センサー設置位置



4. LLMによる空調条件の自律探索

- 快適性，温度ムラ，給気風速増加を考慮した評価指標に基づき，空調設定を逐次探索 （最大6回）

$$J = C + \alpha U + \beta F$$

C：快適性評価値
U：温度ムラ
F：給気風速増加量

5. 実証結果

※三井不動産株式会社および三井不動産ビルマネジメント株式会社の協力のもと2026年7月末に実証を行った。

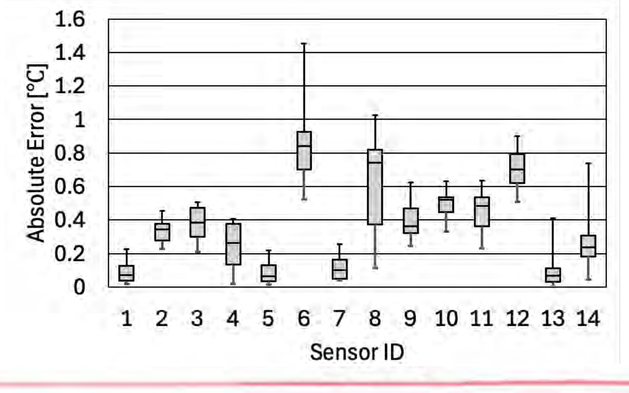
数秒 | 温度・PMV予測（CFD 約90分）

0.37 ℃ | 実測温度とのMAE

約88% | 目的関数Jの低減率

① デジタルツインによる再現

- 温度MAE 0.025℃，PMV MAE 0.029
- 逆解析による現況再現では，MAE 0.371℃，RMSE 0.464℃を達成



② LLMによる条件探索

- 7/30 14時の条件で，設定温度を24.17℃→26.0℃に変更
- 目的関数J：0.7073→0.084に低減
- 9-18時の全時間帯で，提案条件により快適性スコアの改善を確認

ケース	設定温度 [°C]	風速 [m/s]	目的関数 J	総合スコア [pt]	LLMベースエージェントの意図と行動
初期（現状）	24.17	3.61	0.7073	78	[現状分析] 全エリアで過冷却（冷えすぎ）の傾向を確認（PMV < 0）。
試行 1	24.50	3.61	0.6010	81	[わずかな温度引き上げ (+0.33°C)] 不快な気流によるペナルティを避けるため風速は維持しつつ、過冷却を緩和するために設定温度を引き上げた。
試行 2	25.00	3.61	0.4169	87	[段階的な探索 (+0.50°C)] さらに設定温度を0.50°C引き上げ、熱的な不均一性を増大させることなく、快適性スコアを大幅に改善した。
試行 3	25.50	3.61	0.2332	92	[継続的な温度引き上げ (+0.50°C)] 優先度の高いエリア（ソロワーク、フォーカス）のPMV を0に近づけるため、引き続き設定温度を引き上げた。
試行 4	26.00	3.61	0.0840	96	[最良候補の選択と探索終了] 主要ゾーン（ソロ：+0.03、フォーカス：+0.01）でPMVがほぼゼロに達した。最高スコアに到達したため、探索を終了した。

③ 運用提案の自動生成

- 推奨設定・期待される改善効果・運用上の注意事項を自然言語で提示

現在の室内状況
室内環境は全体的にやや肌寒い状態です。ポップアップ(Popup)、ソロワーク(Solo Work)、およびチャット(Chat)エリアは、熱的快適性が比較的低い状態にあります。フォーカス(Focus)、リラックス(Relax)、ハドル(Huddle)エリアの周辺には局所的な暖かさが残っており、温度分布が不均一であることを示しています。

推奨空調設定

温度	**26.0 °C**（現在：24.2 °C）
風速	**3.61 m/s**（現状維持）

3. 期待される改善効果

- 全体のPMV (予測温冷感申告) が熱的中立 (PMV ≈ 0) に近づく
- 快適性スコアが +34 ポイント向上
- 熱の均一性の向上
- 気流によるペナルティ (不快感) の増加なし

4. 運用上の注意点
設定温度を変更した後は、室温を監視してください。チャットエリアの周辺には、わずかに暖かい領域が残る可能性があります。利用者が引き続き不快感を訴える場合は、局所的な気流調整を検討してください。

6. 考察と結論

考察

- 管理者からは，提案内容は概ね妥当と評価
- 判断根拠の提示方法の改善が必要
- 実際の空調制御への適用と効果検証が必要

結論

- デジタルツインとLLMの統合による，自動化された空調運用支援システムの実現可能性を確認した

西村香純
インテリジェントプラットフォーム研究部門
未来コア・デジタル技術共創ラボ（ソフトバンク株式会社）
連絡先：kazumi.nishimura@aist.go.jp

25TH ANNIVERSARY
産総研
ともに挑む。つぎを創る。