

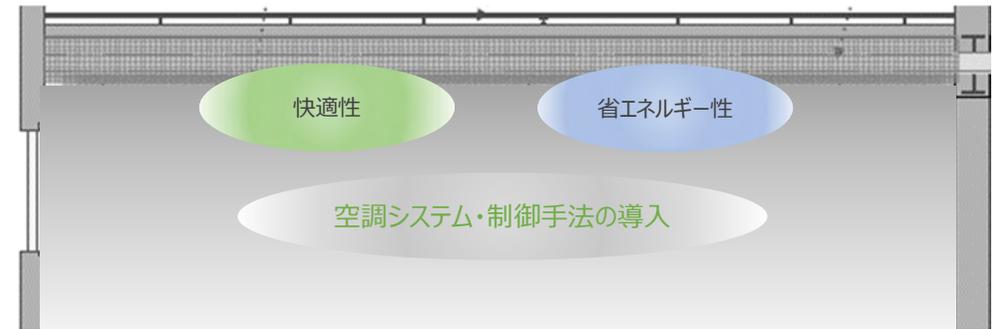
躯体蓄熱放射空調を対象としたリアルタイム最適制御手法の提案とその検証

大成学術財団 第5回 研究成果発表会
2023. 10. 16



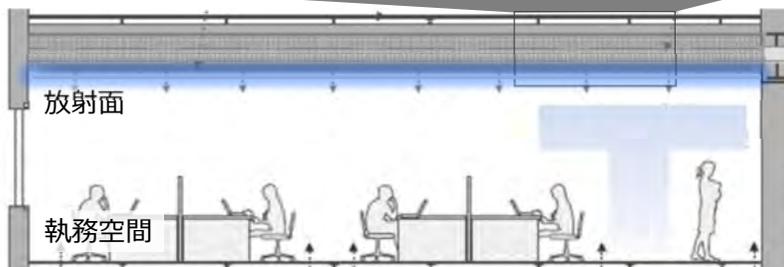
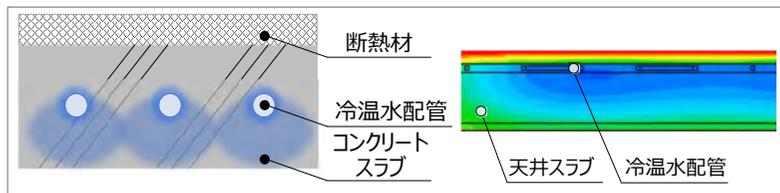
研究背景・目的

ZEBの社会的要求と知的生産性の配慮が重要視されており、快適性と省エネルギー性を両立させる空調システム・制御手法の導入が急務

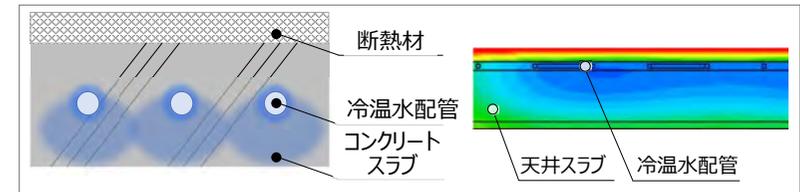


TABS(Thermo Active Building System)の導入が試みられている
躯体蓄熱型放射空調システム

研究背景・目的



研究背景・目的



省エネ性
 快適性 → 上下温度差の緩和、ドラフトの軽減
 大きい熱容量 → ピークシフト、熱源容量の縮小、インisialコスト削減
 躯体利用による天井仕上げなし・階高軽減 → コスト削減

熱容量の大きさ故に熱的応答が遅く制御上の問題が考えられるため、
空調制御の最適化が必要不可欠*

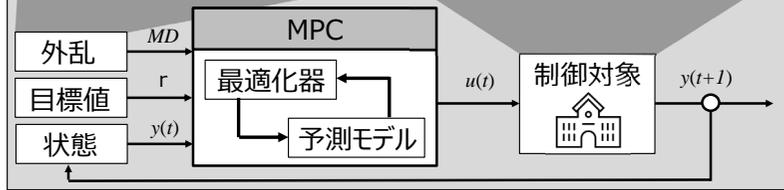
*参考文献: Yongjun Sun etc, Peak load shifting control using different cold thermal energy storage facilities in commercial buildings

モデル予測制御 (Model predictive control)

未来の制御量を予測しつつ、現時刻の操作量を決定する制御手法

課題として

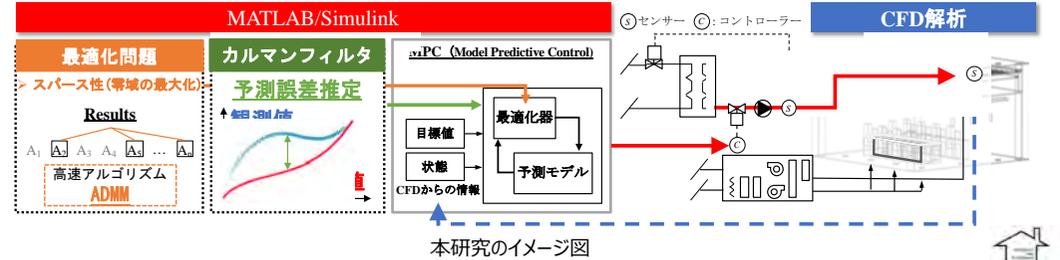
- ① 不確定外乱の予測と補正
- ② 制御性能の向上と計算負荷の低減



そこで、本研究ではTABSを導入した一般的なオフィス空間を対象に、

- ① 不確定外乱の予測と補正 → 機械学習+データ同化
- ② 制御性向上と計算負荷の低減 → スパースモデリング+ADMM

これらを組み込んだ最適制御手法(MPC)を提案し、その有効性をCFDとMATLAB/Simulinkの連成解析により検討する。



北九州市に実在するオフィスビルのBEMSデータをニューラルネット(NN)、サポートベクター回帰(SVR)、LSTM及びランダムフォレスト(RF)の学習データとして使用した。

夏季を想定し、教師データとして使用していない1週間のデータを用いて検証を行った。

負荷予測手法を用いたRMSE値[W]及びR2値

	NN		SVR		LSTM		RF	
	OA	LIGHT	OA	LIGHT	OA	LIGHT	OA	LIGHT
R ² 値	0.89	0.85	0.94	0.95	0.90	0.91	0.97	0.96
RMSE値	214.6	234.7	182.2	224.9	35.1	84.0	28.8	77.4

→OA機器、照明機器の双方の消費電力量に対して、ランダムフォレスト(RF)の予測精度が最も高いことが確認された。

シミュレーションと実現象の差を修正し、解析の精度を向上させる手法
気象学や環境工学など、多様な分野における解析に活用されている。



データ同化による予測値の補正

建物の運用の初期段階は、十分なBEMSデータが収集できるわけではない。
→代替手段+データ同化の組み合わせも検討

■解析ケース

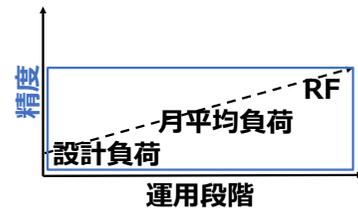
負荷予測（3種類）とデータ同化による補正の組み合わせ

Case0

Case1

Case2

➤ 一般的な週：内部発熱が最大値に近い1週間を対象



ケース

- Case0-1：設計負荷
- Case0-2：月平均負荷
- Case0-3：RF



データ同化による予測値の補正

建物の運用の初期段階は、十分なBEMSデータが収集できるわけではない。
→代替手段+データ同化の組み合わせも検討

■解析ケース

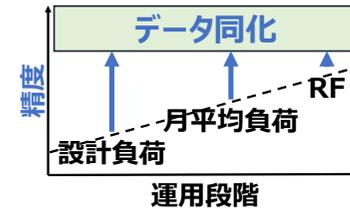
負荷予測（3種類）とデータ同化による補正の組み合わせ

Case0

Case1

Case2

➤ 一般的な週：内部発熱が最大値に近い1週間を対象



ケース

- Case1-1：設計負荷
- Case1-2：月平均負荷
- Case1-3：RF



データ同化による予測値の補正

建物の運用の初期段階は、十分なBEMSデータが収集できるわけではない。
→代替手段+データ同化の組み合わせも検討

■解析ケース

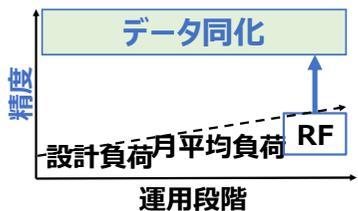
負荷予測（3種類）とデータ同化による補正の組み合わせ

Case0

Case1

Case2

➤ 不規則な週：内部発熱が70%以下となる1週間を対象



ケース

- Case2-1：RF
- Case2-2：RF+KF



データ同化による予測値の補正

データ同化による負荷予測値の補正結果

ケース	照明負荷		OA 機器負荷		
	RMSE 値 [W]	R ² 値	RMSE 値 [W]	R ² 値	
Case0-1	195.7	0.76	94.2	0.72	データ同化 無し
Case0-2	111.8	0.92	61.3	0.87	
Case0-3	77.4	0.96	28.8	0.97	
Case1-1	78.1	0.96	38.5	0.95	データ同化 有り
Case1-2	56.0	0.98	22.4	0.98	
Case1-3	47.9	0.99	18.3	0.99	
Case2-1	159.9	0.83	144.4	0.90	RF
Case2-2	54.1	0.96	31.0	0.94	

Case0シリーズとCase1シリーズの比較…

- 設計負荷、月平均負荷を用いた場合、データ同化により予測精度は向上
- KFを用いた場合、予測精度は向上するが、概ね同等

Case2シリーズの結果…

- RFの予測精度が低下しても、データ同化により改善

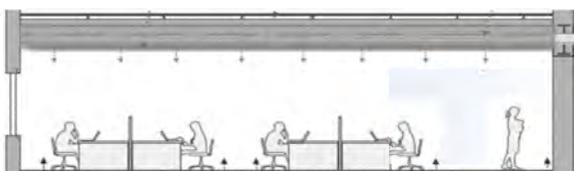


スパースモデリングの導入

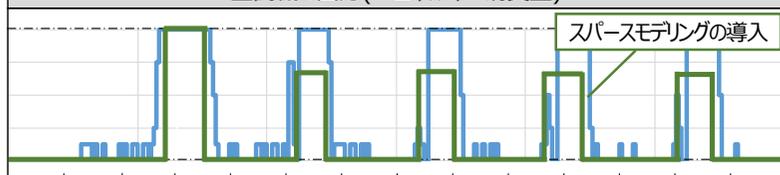
■スパースモデリングの概要

スパース性とはベクトルのサイズに比べて非零の要素が少ないことを指す。
(非零の最小化 = 零の最大化)

空調機器・熱源機



空調機の出力量 (= エネルギー消費量)



スパースモデリングの導入

スパースモデリングの導入

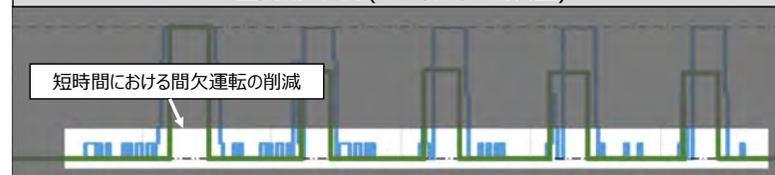
■スパースモデリングの概要

スパース性とはベクトルのサイズに比べて非零の要素が少ないことを指す。
(非零の最小化 = 零の最大化)

空調稼働時間の削減による省エネルギーの可能性
(非零の最小化, 零の最大化)

空調機器の使用頻度の削減による耐久性の向上に繋がる

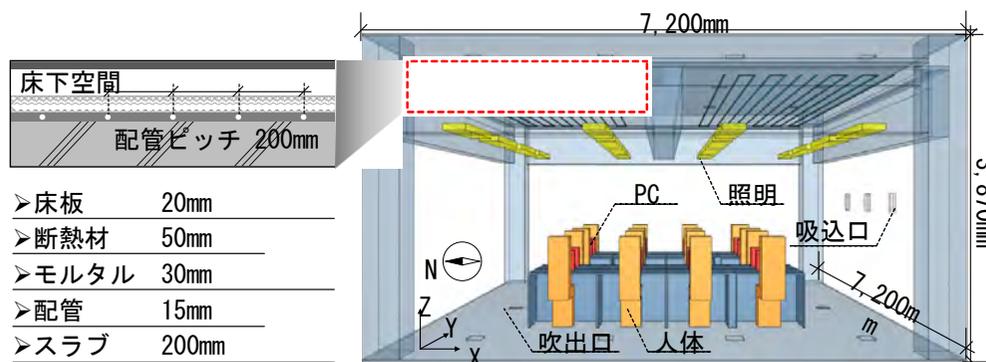
空調機の出力量 (= エネルギー消費量)



短時間における間欠運転の削減

解析対象

■TABSを導入した一般的なオフィス空間の1スパンモデル

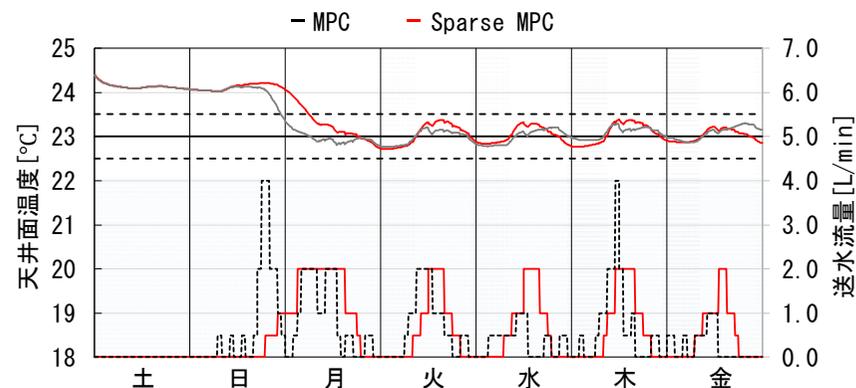


CFD解析モデル

→ この解析モデルを用いて、
MPC+スパースモデリングの制御性能 等の検証を行う。

スパースモデリングによる制御・省エネ性能検討結果

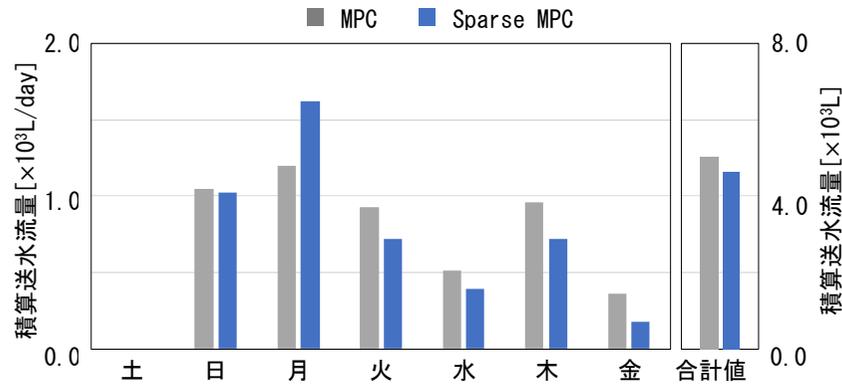
■天井面温度及び送水流量の時系列変化



→ 設定温度と天井面温度との制御誤差は同程度
→ 送水のゼロ域が拡大傾向

スパースモデリングによる制御・省エネ性能検討結果

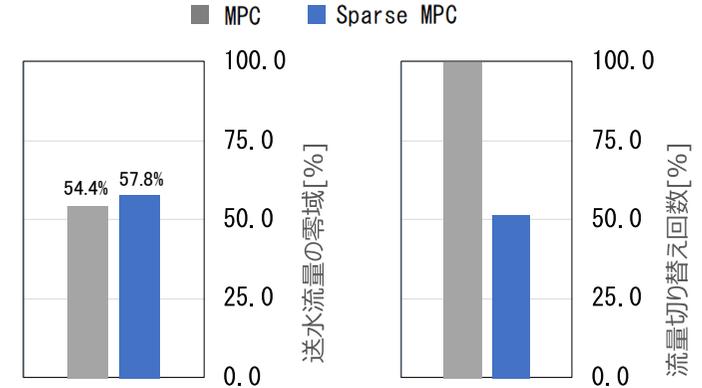
■積算送水流量



→積算送水流量の合計値が360L削減された。

スパースモデリングによる制御・省エネ性能検討結果

■送水流量の零域及び切り替え回数



→ADMMを用いることで解の導出に要する計算時間は従来手法の3%以下(2.47%)となった。

まとめ

- 1) 負荷の予測精度としては、RFが最も高い
- 2) データ同化により、設計負荷、月平均負荷の予測精度が向上
- 3) RF等を用いても負荷予測精度が低下する場合でも、データ同化を併用することで、予測精度が向上
- 4) スパースモデリングの導入により、省エネルギー性能が向上、送水流量の零域が拡大、流量切り替え回数が減少
- 5) ADMMを最適化問題の解法として使用することで、従来手法と比較して、97%以上の計算負荷が削減

■今後の課題

正則化パラメータの調整による送水流量の零域拡大やより大規模なモデルを用いた検証、実装等。