

自前の再生可能エネルギー熱を 活用するZEBシミュレーターの開発

長野 克則
北海道大学大学院 工学研究院 教授



北海道古平町複合施設 “かなえーる”

1. 太陽光発電システムと蓄電池が導入された建物における蓄電池充放電と給湯ヒートポンプ運転の最適制御システムの開発

発表論文1:
鄭肖陽, 長野克則: 積雪寒冷地に建つネットゼロエネルギーを目指した役場庁舎の実態調査と躯体蓄熱型放射冷暖房の最適運用に関する研究, 2024年度日本冷凍空調学会年次大会 B341, pp.1-6, 2024.9 福岡

2. 快適性と省エネ性を両立する地中熱利用ヒートポンプ放射冷暖房システムの最適制御システムの開発

～古平町複合施設“かなえーる”を対象として～

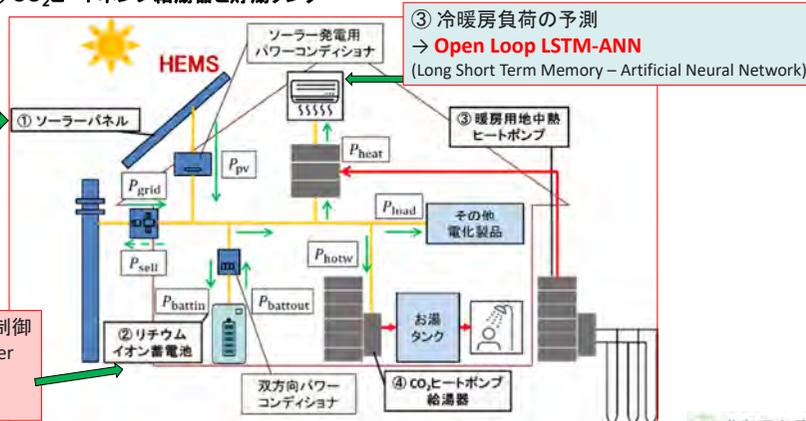
発表論文2:
三浦広成, 長野克則: 積雪寒冷地に建つネットゼロエネルギーを目指した役場庁舎の実態調査と躯体蓄熱型放射冷暖房の最適運用に関する研究, 空調調和・衛生工学会 北海道支部第58 回学術講演会C-5, pp.1-4, 2024.3 札幌

以下の再生可能エネルギー設備が導入された建物を対象に蓄電池・給湯HP最適運転制御システムを開発

- ① ソーラー発電システム
- ② 蓄電池
- ③ 暖房用 地中熱ヒートポンプ (Ground source heat pump, GSHP)
- ④ CO₂ヒートポンプ給湯器と貯湯タンク

① 太陽光発電システムの発電量の予測
→ K-means clustering
Open Loop LSTM-ANN
(Long Short Term Memory – Artificial Neural Network)

② Li-ion蓄電池の充放電制御
→ MILP (Mixed Integer Linear programming)
(混合整数線形計画法)

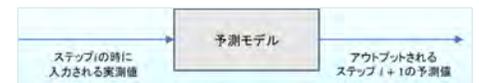


• LSTM-ANN (Long Short-Term Memory, 長短期記憶)

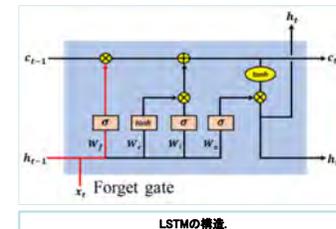
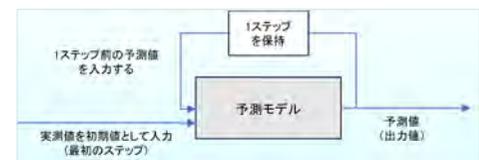
• オープンループとクローズドループ予測

- 忘却ゲート、入力ゲートと出力ゲートが含まれた特殊な構造
- 学習を中断させないために、各ステップに忘却と保持する情報を決める
- 勾配消失問題を回避できる
- 時系列データ予測に適する

オープンループ



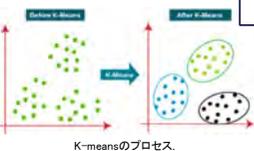
クローズドループ



LSTMの構造

• K-meansを用いたクラスター分析

n個の観測値をk個のクラスターに分割する。各観測値は、平均値が最も近いクラスターに属する。



K-meansのプロセス

$$W^d = [T_{1-8}^d, T_{9-17}^d, T_{18-24}^d, H_{1-8}^d, H_{9-17}^d, H_{18-24}^d]$$

1日の特徴ベクトル

$$D_H^{d,k} = \sqrt{(T_{cp1-8}^{nk} - T_{1-8}^d)^2 + (H_{cp1-8}^k - H_{1-8}^d)^2}$$

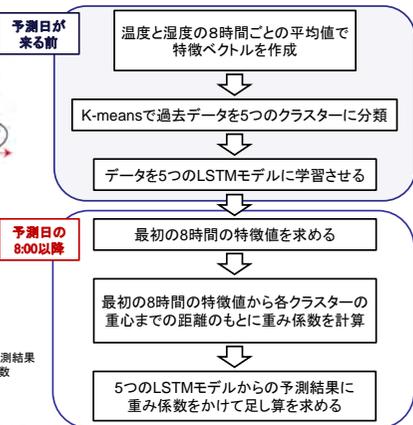
最初の8時間の特徴値から各クラスターの重心までの距離

$$c_k^d = \left(\frac{D_T^{d,k^2}}{\sum_{k=1}^5 D_T^{d,k^2}} + \frac{D_H^{d,k^2}}{\sum_{k=1}^5 D_H^{d,k^2}} \right) / 2$$

5つのLSTMモデル予測結果にかける重み係数

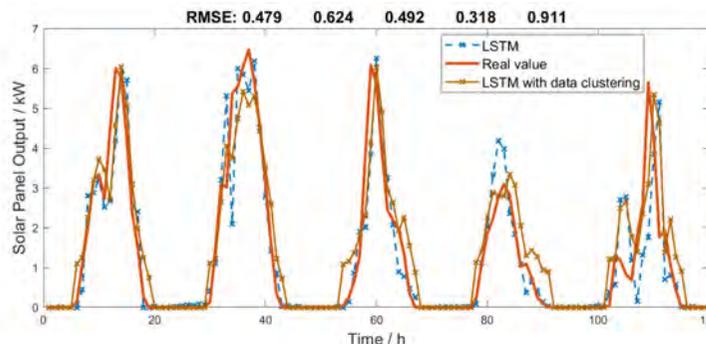
$$R_{pre}^{i,d} = \sum_{k=1}^5 c_k^d R_k^i$$

5つのLSTMモデルから最終の予測結果を求める



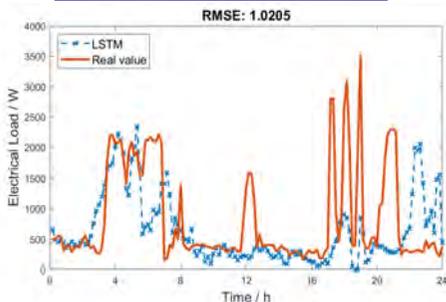
予測日の8:00以降

データクラスタリング付きのオープンループ予測と通常のオープンループ予測の5日間結果比較



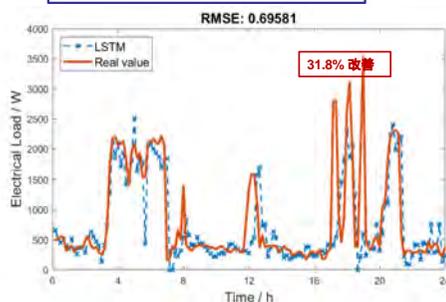
標準偏差:
0.1335 → **0.1148**
14%改善
RMSE平均値:
0.4534 → **0.4401**
3%改善

クローズドループによる計算結果



クローズドループ予測を使った24時間の電気負荷予測結果比較 (2010年4月3日)

オープンループによる計算結果



オープンループ予測を使った24時間の電気負荷予測結果比較 (2010年4月3日)



- ✓ 電気負荷データ: 札幌に建つ4人家族が住むオール電化住宅のもの(北海道電力提供)
- ✓ この電力負荷の予測結果はこの後の最適化で使用する

• 最適問題の解法: 混合整数線形計画法 (Mixed-Integer Linear Programming, MILP)

目的関数 f : 今回は1日の支払い電力料を最小化

$$f = \sum_{i=1}^N (P_{grid}^i \cdot T_{int} \cdot C_E^i - P_{sell}^i \cdot T_{int} \cdot C_S^i)$$

買電料金 売電料金

- 制約条件:
- 条件1: $P_{grid} + P_{pvt} + P_{batout} = P_{load} + P_{batin} + P_{sell} + P_{hpt} + P_{hw}$
 - 条件2: $0 \leq P_{batin} + P_{batout} \leq P_{batm}$
 - 条件3: $S_{min} \leq S \leq S_{max}$
 - 条件4: $0 \leq P_{grid} \leq P_{gridm}$
 - 条件5: $P_{batin} \leq (1-b)P_{batm}$
 - 条件6: $P_{batout} \leq b \cdot P_{batm}$

電気料金	単価
買電価格, C_E	38.04 円/kWh
	(8:00 ~ 22:00)
売電価格, C_S	29.06 円/kWh
	(22:00 ~ 8:00)
売電価格, C_S	16 円/kWh

計算条件:

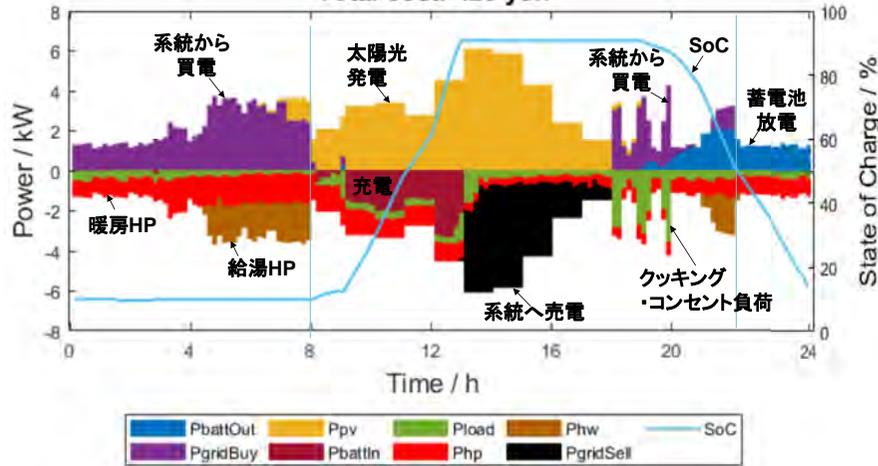
- 蓄電池容量: 9.8 kWh
- 蓄電池最大蓄放電量: 4.0 kW
- 蓄電池充放電効率: 0.95
- SoC許容範囲: 10%~90%
- 系統から最大受電量: 10 kW

逐次更新される実測値を入力して、最適化計算を1時間毎に実行し直し、24時間分の充放電指令パターンを修正していく計算アルゴリズムを取り入れる

1日分の購入電力量が最小となる最適充放電パターンを計算 (4月3日)

* 太陽光発電システム
定格発電容量: 6.75kW

Total cost: 420 yen



1. 太陽光発電システムと蓄電池が導入された建物における蓄電池充放電と給湯ヒートポンプ運転の最適制御システムの開発

発表論文1:

鄭肖陽, 長野克則: 積雪寒冷地に建つネットゼロエネルギーを目指した役場庁舎の実態調査と躯体蓄熱型放射冷暖房の最適運用に関する研究, 2024年度日本冷凍空調学会年次大会 B341, pp.1-6, 2024.9 福岡

2. 快適性と省エネ性を両立する地中熱利用ヒートポンプ放射冷暖房システムの最適制御システムの開発

~古平町複合施設“かなえーる”を対象として~

発表論文2:

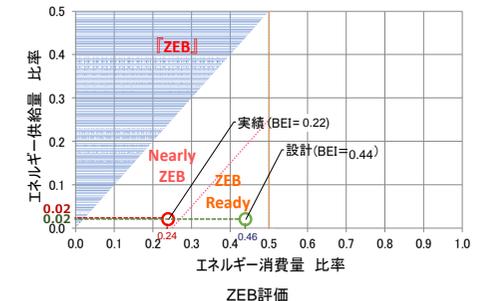
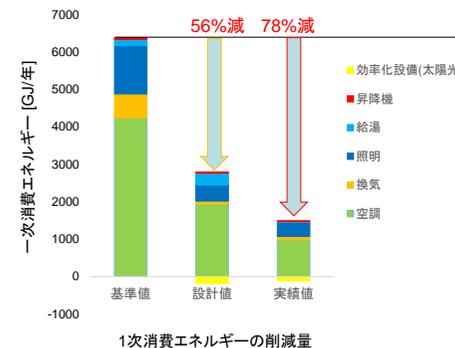
三浦広成, 長野克則: 積雪寒冷地に建つネットゼロエネルギーを目指した役場庁舎の実態調査と躯体蓄熱型放射冷暖房の最適運用に関する研究, 空気調和・衛生工学会 北海道支部第58 回学術講演会C-5, pp.1-4, 2024.3 札幌

建物情報	
所在地	北海道古平町
施設名	古平町複合施設 かなえーる
用途	庁舎、集会所、図書館
規模	地上3階
延床面積	3,887.03 m ²
建築面積	1,323.59 m ²



導入された代表的な省エネ・再エネ技術

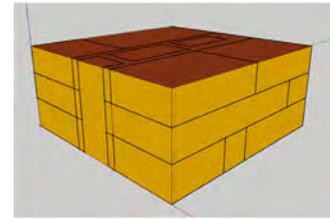
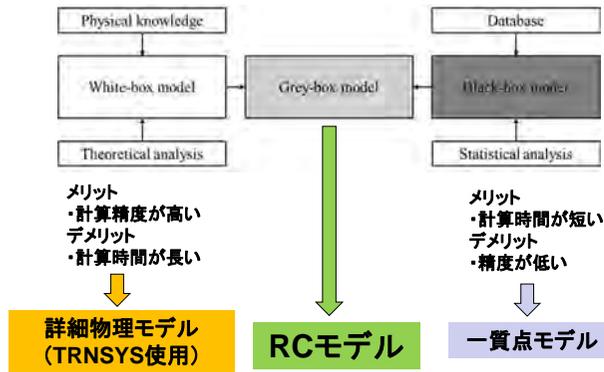
- 地中熱ヒートポンプ (ポアホール: 75m×36本)
- 床・壁の躯体放射冷暖房
- アースチューブ・クールピット
- 外断熱工法 (断熱材厚さ: 150 mm)
- 外壁熱貫流率: 0.223 W/m²K
- タスクアンビエント照明
- 自然換気
- 窓一体型太陽光発電ガラス



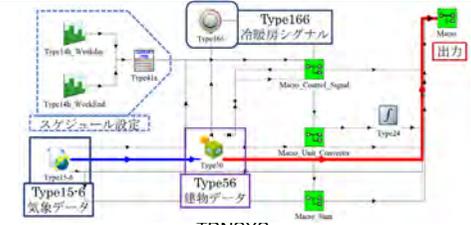
様々な技術導入により、北海道の自治体の建築物としては初めてZEB readyを取得。また、設計段階ではZEB readyであったが、実績値ではBEIが0.2となりNearly ZEBであった

運用段階において、全一次エネルギー消費量に対して空調の占める割合は約7割であった。
 地中熱利用ヒートポンプ放射冷暖房システムの最適制御システムを開発し、さらなる省エネを目指す

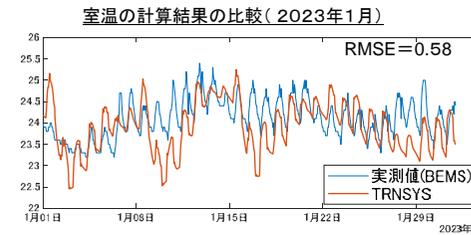
シミュレーションモデルの種類



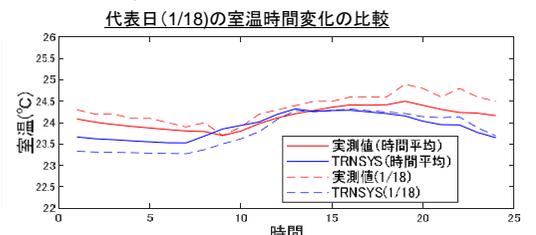
ZEB(古平町役場庁舎)の3次元モデル



TRNSYS (空調システム、内部発熱など)

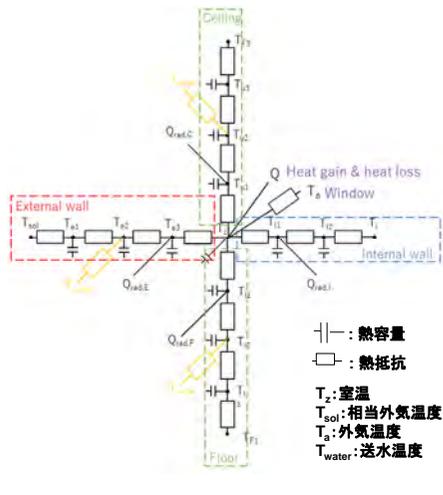


室温の計算結果の比較(2023年1月)



代表日(1/18)の室温時間変化の比較

RMSE=0.58となり、実測値とよく一致した。
 一日の気温変動は1℃程度の範囲となっている



RC熱回路網モデル

微分方程式

$$C_{e1} \frac{dT_{e01}}{dt} = \left(\frac{T_{sol,E} - T_{e1}}{R_{conv,E}} \right) - \left(\frac{T_{e1} - T_{e2}}{R_{cond,E1}} \right)$$

$$C_{e2} \frac{dT_{e2}}{dt} = \left(\frac{T_{e1} - T_{e2}}{R_{cond,E1}} \right) + \left(\frac{T_{pipe} - T_{e2}}{R_{cond,pipe}} \right) - \left(\frac{T_{e2} - T_{e3}}{R_{cond,E2}} \right)$$

$$C_{e3} \frac{dT_{e3}}{dt} = \left(\frac{T_{e2} - T_{e3}}{R_{cond,E2}} \right) + \left(\frac{T_{u3} - T_{e3}}{R_{rad,u}} \right) + \left(\frac{T_{f3} - T_{e3}}{R_{rad,f}} \right) - \left(\frac{T_{e3} - T_z}{R_{conv,i,E}} \right)$$

- 熱量変化量
- 熱伝導
- 放射熱伝達
- 対流熱伝達
- C: 熱容量 [J/K]
- T: 温度 [K]
- R: 熱抵抗 [K/W]

状態空間表現

状態方程式: $x(t) = Ax(t) + Bu(t)$
 出力方程式: $y(t) = Cx(t) + Du(t)$
 $x(t)$: 状態ベクトル(各壁面・壁内温度) (26 × 1)
 $y(t)$: 出力ベクトル
 $u(t)$: 入力ベクトル(境界温度・送水温度・熱量) (15 × 1)
 A: 状態行列 (26 × 26)
 B: 入力行列 (26 × 15)
 C: 出力行列 (26 × 26)
 D: 直連行列(本研究では零行列)

温熱快適性と省エネルギー(コスト、環境性)を同時に満たす様に
 目的関数Jが最小となる24時間のHPからの送り出し温水(冷水)温度の運転パターンを求める

$$J = m(T_z - T_{set})^2 + nE_{HP}$$

快適性 (設定室温との差) HP消費電力量

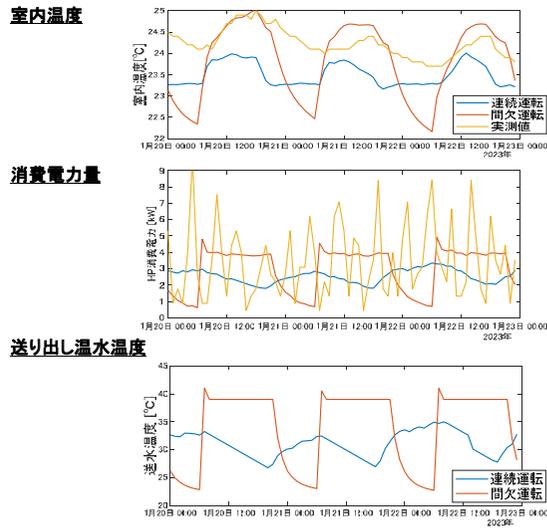
- T_z : 室温 [°C]
- T_{set} : 設定室温 [°C]
- E_{HP} : HP消費電力量 [kW]
- m, n : 快適性と電力量の重み係数(今回は6:1)
- Q_{HP} : HP放熱量 [kW]
- T_{1in} : HP1次側入口温度 [°C]
- T_{2out} : HP2次側出口温度 [°C]

- ✓ ここで、室内設定温度 $T_{set} = 24^\circ\text{C}$
- ✓ ヒートポンプ消費電力量 E_{HP} は実測で得られた以下の地中熱利用ヒートポンプシステムの成績係数COPの近似式から求める:

$$COP = 1.4349 + 1.9464 * Q_{HP} - 0.2723Q_{HP}^2 + 0.0118Q_{HP}^3 + 0.0203T_{1in} - 0.0340T_{2out}$$
- ✓ ヒートポンプ電力消費量 $E_{HP} = Q_{HP}/COP$

開発した古平町役場庁舎のRCモデルを用いて、温熱快適性と省エネルギー(コスト、環境性)を同時に満たす地中熱利用ヒートポンプ放射冷暖房の運転パターンを求める。
 → 最適化問題の解法: 双対内点法を用いた

代表3日間(1月20日～1月22日)

1か月間のHP消費電力量と電力料金
(2023年1月)

	消費電力量	電力料金
実測値	9.56 GJ	86,279 円
連続運転	8.11 GJ	72,925 円
間欠運転	8.15 GJ	75,929 円

- 最適運転計算による連続運転の電力料金は間欠運転よりも約4%低くすることができる結果となった。また、実測値よりも約15%低い結果が示された。
- 最適運転計算による連続運転の送水温度は日中は低下させることができていた。

1. 太陽光発電システムと蓄電池が導入された建物における蓄電池充放電と給湯ヒートポンプ運転の最適制御システムの開発

→1日毎の購入電力量(CO2排出量、支払い電力料金など)が最小となる最適充放電パターンを毎時、更新しながら連続的に計算が可能であり、実システムの制御に即適用できる

2. 快適性と省エネ性を両立する地中熱利用ヒートポンプ放射冷暖房システムの最適制御システムの開発

～古平町複合施設“かなえーる”を対象として～

→地中熱ヒートポンプ放射冷暖房システムの実COPを考慮した快適性と省エネ性を両立するヒートポンプの送水水温制御による最適運転制御システムを構築した。