

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601  
研究種目：基盤研究(A)（一般）  
研究期間：2020～2022  
課題番号：20H00273  
研究課題名（和文）建築エネルギーシステムを最適化するAIと物理モデルを融合したデジタルツインの構築

研究課題名（英文）Construction of digital twin that fuses AI and physical model to optimize building energy system

研究代表者  
大岡 龍三（Ooka, Ryoza）  
東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：90251470  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では建物エネルギーシステムのデジタルツインの構築を目指し、モデリング手法の開発、完全自動制御手法の汎用化、それらの統合プラットフォームの開発、以上の3項目について研究を行った。のモデリング手法についてはリアルタイム予測を目指して人工ニューラルネットワーク（ANN）に基づく手法を開発した。完全自動制御手法の汎用化については最適解の探索が必要になるが、メタヒューリスティクスと強化学習に基づく手法の検討を行い、それらの特性を確認した。統合プラットフォームの開発については、実在の建物の建物エネルギーシステムのデジタルツインを構築することで仮想と現実をつなぐ統合プラットフォームとした。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
人工知能の特性とその建築設備応用可能性の検討を行った。また開発されたデジタルツインにおいては、設計業務効率等の改善とともに自動的かつ継続的な省エネ化や省CO2化、在室者の快適性向上といった効果が多様な建物で期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, in order to build a digital twin that mimics the energy system in a real building, the following three items have been investigated: (1) development of modeling methods for building components, (2) development of fully automatic control methods based on optimization tools, and (3) development of an integrated platform for the above, i.e. a digital twin. Regarding the modeling method (1), we developed a method based on artificial neural networks (ANN) with the aim of real-time prediction. Regarding (2), we investigated methods based on metaheuristics and reinforcement learning, and confirmed their characteristics. As to (3), the development items (1) and (2) were combined, and a digital twin of the building energy system of an actual building was constructed to create an integrated platform that connects virtuality and reality.

研究分野：建築環境工学

キーワード：デジタルツイン 人工ニューラルネットワーク 最適化システム メタヒューリスティクス

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、デジタルツインと呼ばれる概念が製造業を中心に注目を集めている。現実空間の計測データをサイバー空間に集約し、現実世界を模したシミュレーション環境を構築することで製品の設計業務効率等の改善が期待されている。一方、研究代表者は以前よりこの概念に基づく技術を建物設備へ転用し、設計段階のみならずシステム運用の自動的かつ安定的な高効率化を実現するために研究を続けてきた。

### 2. 研究の目的

本研究では、本技術の理論構築および実用化を最終的な到達点に据え、モデリング手法の開発、完全自動制御手法の汎用化、それらの統合プラットフォームの開発、以上の3項目について研究を行う。これにより、自動的かつ継続的な省エネ化や省CO<sub>2</sub>化、在室者の快適性向上といった効果が多様な建物で期待できる。

### 3. 研究の方法

#### モデリング手法の開発

本研究ではヒートポンプ等の熱源機器や空調機器、照明機器などの設備機器と室内環境の2つをモデリング対象とする。具体的には蓄熱槽を有する中央熱源の建物を模したモックアップ実験装置を構築し、冷房実験運転を実施しその運転データを得た。図1に実験システムの概要図を示す。その運転データを人工ニューラルネットワーク(Artificial Neural Network: ANN)で学習することにより、実験システムを構成する各機器の運転特性と室内環境のモデル化を行う。

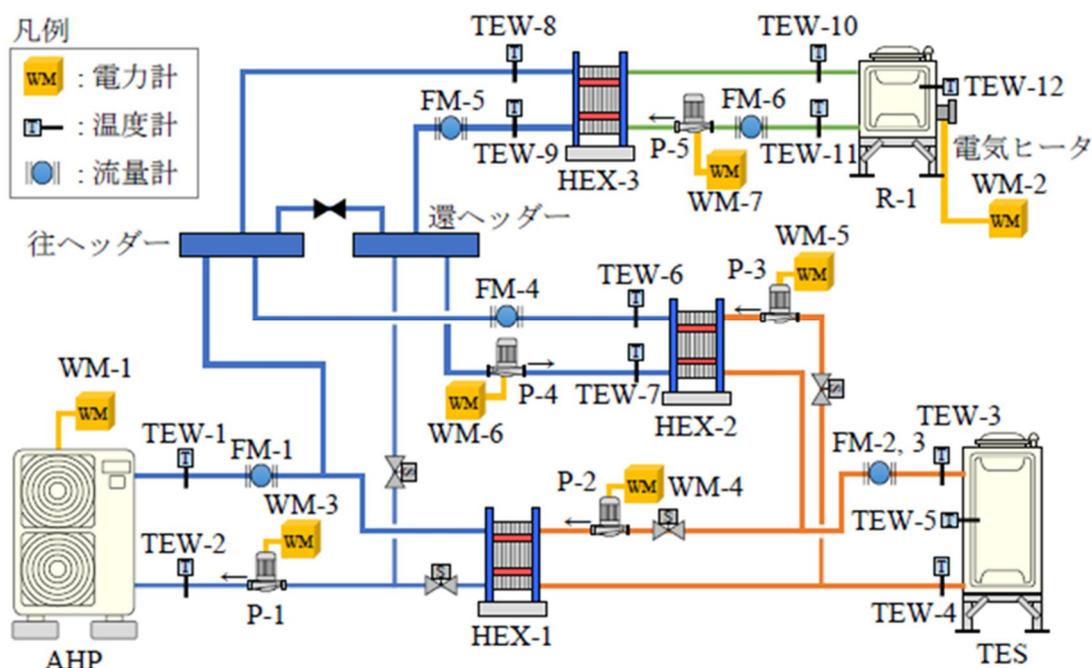


図1 実験システムの構成

#### 完全自動制御手法の汎用化

完全自動制御手法を実現するためには、定められた時間内に最も適切な制御信号を送る必要がある。そのためには、高速で精度の高い最適探索手法の開発が必須である。ここでは、上記モックアップ実験装置を対象に、最適手法として近年注目を集めているメタヒューリスティクスと強化学習を適応し、その特性の比較を行う。

#### 各要素の統合プラットフォームの開発

建物情報をサイバースペースに再現したものがデジタルツインであるが、ここではそのデジタルツインに上記2つの要素、ANNによる各機器と室内環境のモデリングとメタヒューリスティクスによる最適化システムを組み込み、デジタルツイン上で最適運用が実現できるシステムの構築を行った。具体的には愛知県に建設された展示場を対象にデジタルツインを構築し、最適運用の結果を評価した。図2にデジタルツインの概念図を示す。

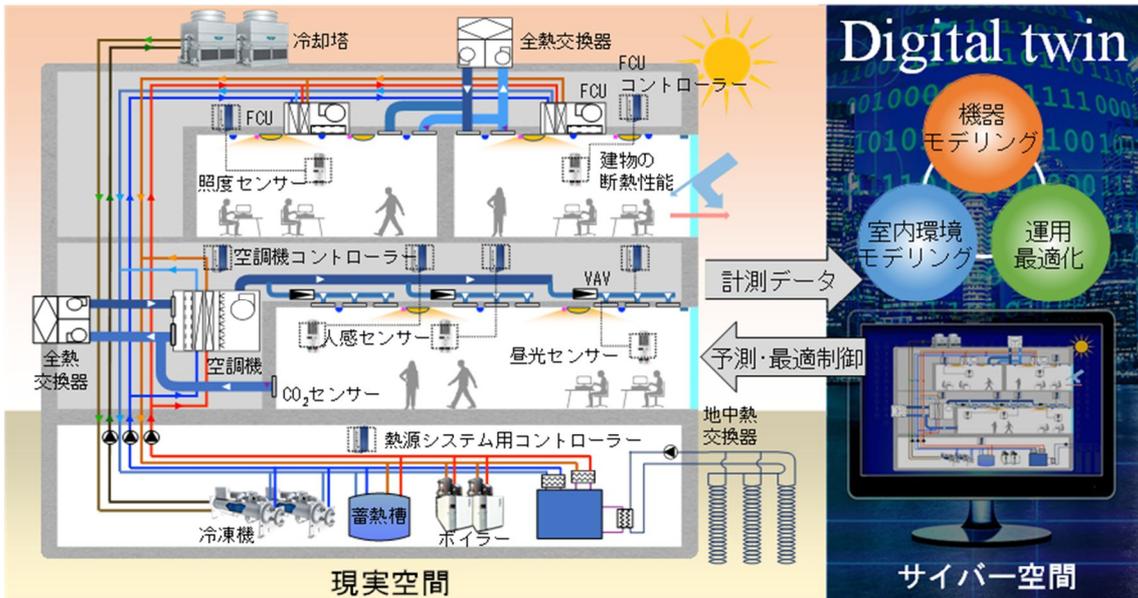


図2 デジタルツインの概念図

#### 4. 研究成果

##### モデリング手法の開発

ANN を用いてモックアップ実験結果の 室内模擬水槽温度、蓄熱槽内温度（3点）、チラー出入口温度、チラー消費電力、1次ポンプの消費電力をモデル化した。その結果を図3に示す。相関図において縦軸が予測値、横軸が実験値である。すべての結果において決定係数は0.95以上を示しており、非常に高い予測精度を示している。

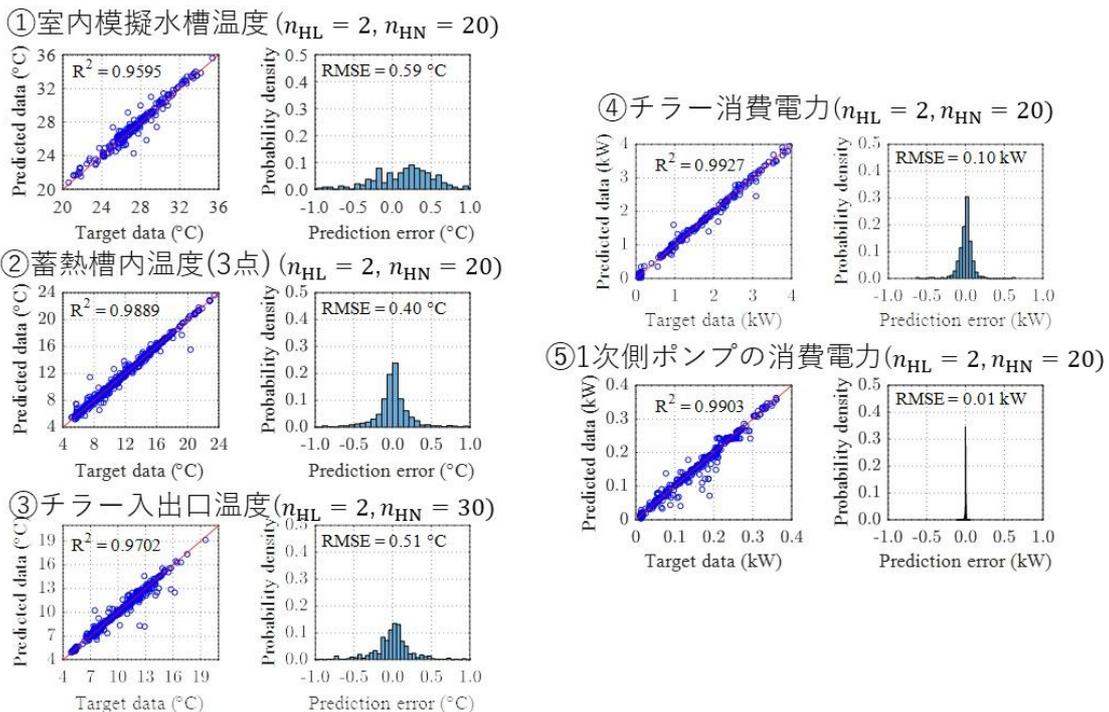


図3 ANNによる各機器の運転特性と室内環境のモデル化

##### 完全自動制御手法の汎用化

最適制御としてメタヒューリスティクス的一种であるεεDE-RJ3)を適用した。目的関数はエネルギーコストとしている。最適制御のための強化学習として、モデルベース型深層Qネットワーク法(DQN)を適用した。

メタヒューリスティクスの場合は最適化計算が必要となるため、計算時間を確保する観点から制御周期は仮想時間における60分に設定した。しかし、強化学習の場合の実行フェーズにおいては最適化計算が不要であるため、流量の制御周期は計算時間間隔と同じ仮想時間における10分に設定した。ただし、運転モードの頻繁な変更は機器保護や機器劣化の観点から避けるべ

きであると判断し、運転モードの制御周期は仮想時間における 60 分間隔とした。

また比較のためにルールベース制御（RBC）を合わせて実行した。RBC では仮想時間における 20:00~翌 7:00 は定格流量による蓄熱運転とし、7:00 以降は放熱運転とした。放熱運転完了後は AHP 単独運転とした。

ベースラインとなる RBC を基準とし、メタヒューリスティクスの最適解および強化学習の仮想時間における 1 日を通じた電気料金の結果について比較する。積算電気料金の推移を図 4 に示す。積算電気料金は最終的にメタヒューリスティクスが最も安く 1,165 円、DQN が 1,409 円、ベースとなる RBC が 1,465 円であった。つまり、メタヒューリスティクスは、RBC に対して 20.5%、DQN は 3.8%のエネルギーコストを削減したといえる。

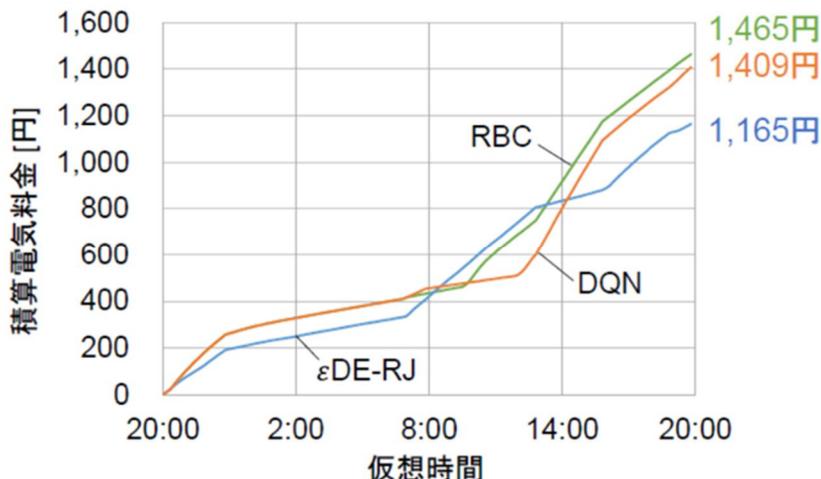


図 4 エネルギーコストの比較

各要素の統合プラットフォームの開発

愛知県に建設された展示場を対象にデジタルツインを構築した。図 5 におけるデジタルツインにおける最適運用システムを示す。

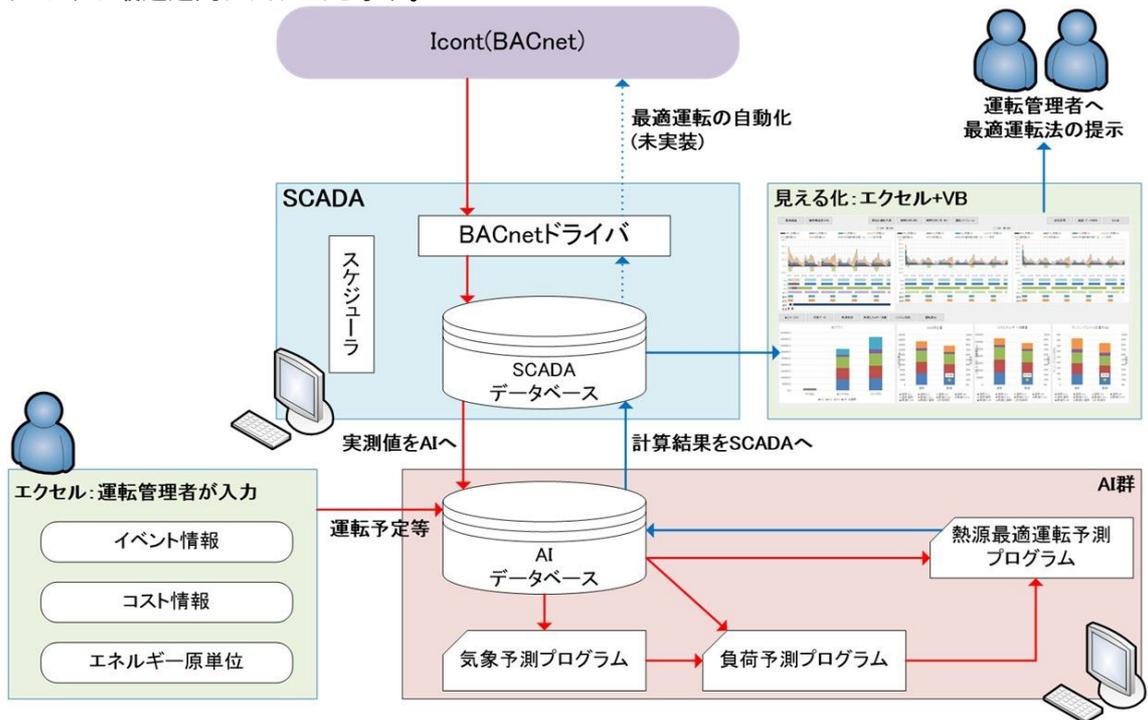


図 5 デジタルツインにおける最適運用システム

図 6 に従来制御と最適化演算結果の期間分析比較を示す。熱源廻りの運用コストは従来制御と比較して 18.9%の削減となった。運用コストと同時に期間一次エネルギー消費量、二酸化炭素排出量ともにそれぞれ 14.8%、12.9%の削減を実現している。

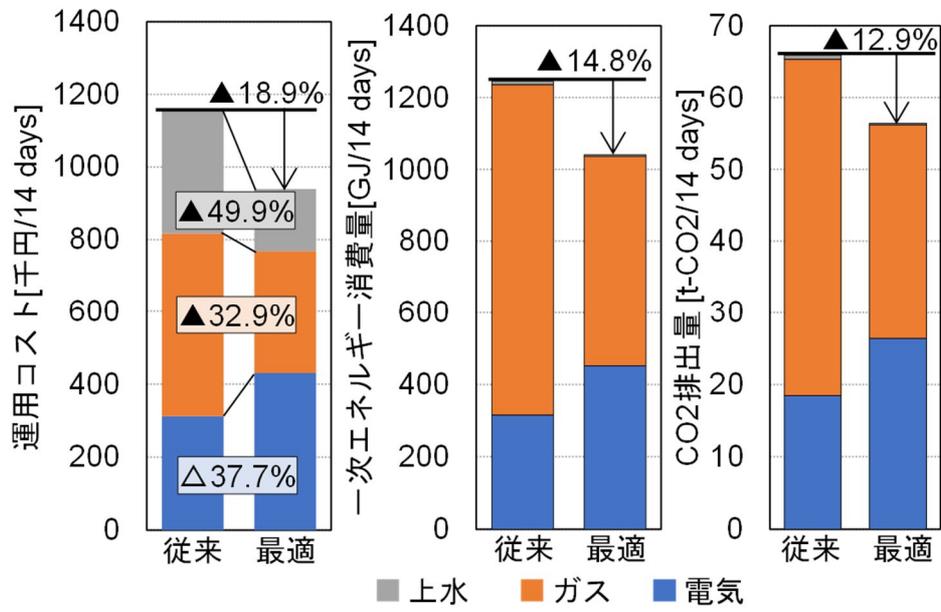


図6 従来制御と最適化演算結果の期間分析比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Wei Chenghao, Ooka Ryozi, Zhou Qi	4. 巻 5
2. 論文標題 Performance comparison using different multilayer perceptron input/output formats to predict unsteady indoor temperature distribution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW	6. 最初と最後の頁 661 ~ 671
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/2475-8876.12294	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 高橋健、大岡龍三、池田伸太郎、岡本哲也	4. 巻 2022
2. 論文標題 需要予測誤差を用いた建物データの異常値検知に関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 2091-2092
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 魏誠浩、大岡龍三、周琦、田村夏美、太田恵大、金子洋介	4. 巻 2022
2. 論文標題 人工知能を用いた室内環境の予測・制御に関する研究（その1）冷暖房期における空調実験室温度分布の実測実験	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 1407-1408
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 周琦、大岡龍三、魏誠浩、田村夏美、太田恵大、金子洋介	4. 巻 2022
2. 論文標題 人工知能を用いた室内環境の予測・制御に関する研究（その2）CFDを用いた空調吹出風量・風向・温度変更の上下温度に与える影響の分析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 1409-1410
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 中井麻友香, 李度胤, 大岡龍三, 池田伸太郎, 尾崎空奈, 高橋健, 崔元準, 岡本哲也	4. 巻 2022
2. 論文標題 建物の熱負荷予測のための転移学習手法の効果検証	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 2087-2088
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 尾崎空奈, 大岡龍三, 池田伸太郎, 岡本哲也	4. 巻 2022
2. 論文標題 建物エネルギー需要予測におけるベイズ最適化を用いたオートチューニングに関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 2083-2084
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高橋健, 大岡龍三	4. 巻 2022
2. 論文標題 次世代シミュレーションエンジン: Spawn-of-EnergyPlusの開発過程と従来ツールとの比較	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 空調調和・衛生工学会大会学術講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhou Qi, Ooka Ryoza	4. 巻 13
2. 論文標題 Comparison of different deep neural network architectures for isothermal indoor airflow prediction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Building Simulation	6. 最初と最後の頁 1409 ~ 1423
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12273-020-0664-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhou Qi, Ooka Ryoza	4. 巻 230
2. 論文標題 Influence of data preprocessing on neural network performance for reproducing CFD simulations of non-isothermal indoor airflow distribution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energy and Buildings	6. 最初と最後の頁 110525 ~ 110525
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enbui.2020.110525	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Lee Doyun, Ooka Ryoza, Ikeda Shintaro, Choi Wonjun, Kwak Younghoon	4. 巻 225
2. 論文標題 Model predictive control of building energy systems with thermal energy storage in response to occupancy variations and time-variant electricity prices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Energy and Buildings	6. 最初と最後の頁 110291 ~ 110291
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enbui.2020.110291	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhou Qi, Ooka Ryoza	4. 巻 246
2. 論文標題 Performance of neural network for indoor airflow prediction: Sensitivity towards weight initialization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energy and Buildings	6. 最初と最後の頁 111106 ~ 111106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enbui.2021.111106	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 MATSUDA Yuki, OOKA Ryoza	4. 巻 85
2. 論文標題 DEVELOPMENT OF THE DIGITAL-TWIN FOR BUILDING FACILITIES (PART 1): VERIFICATION OF PREDICTIVE ACCURACY OF ANN MODELS FOR HEAT SOURCE SYSTEM BASED ON OPERATION DATA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 267 ~ 275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aije.85.267	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 MATSUDA Yuki、OOKA Ryoza	4. 巻 86
2. 論文標題 DEVELOPMENT OF THE DIGITAL-TWIN FOR BUILDING FACILITIES (PART 2): THE EVALUATION OF ANN MODELS TO SIMULATE ALL AIR CONDITIONING SYSTEM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 175 ~ 183
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aije.86.175	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhou Qi、Ooka Ryoza	4. 巻 246
2. 論文標題 Performance of neural network for indoor airflow prediction: Sensitivity towards weight initialization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energy and Buildings	6. 最初と最後の頁 111106 ~ 111106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enbui.2021.111106	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 市川 裕幸, 大岡龍三, 李度胤
2. 発表標題 モデル予測制御に基づくデマンドレスポンスの基礎的研究
3. 学会等名 空気調和・冷凍連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 魏誠浩, 大岡龍三
2. 発表標題 PINN を用いた室内気流予測に関する研究
3. 学会等名 流体力学学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chenghao Wei, Ryozo Ooka, Bingchao Zhang, Qi Zhou
2. 発表標題 Predicting Unsteady Indoor Temperature Distributions by POD-DNN
3. 学会等名 The 16th ROOMVENT Conference (ROOMVENT 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 周琦, 大岡龍三
2. 発表標題 深層学習による室内気流予測手法の開発(その3)二次元非等温流れ予測の実現
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 李度胤, 大岡龍三, 松田侑樹, 池田伸太郎, 崔元準
2. 発表標題 空調熱源システムにおける人工知能を用いたモデル予測制御に関する研究(その2)実運転データを用いたANN予測モデルの構築
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 文可, 大岡龍三, 崔元準
2. 発表標題 ニューラルネットワークによる熱容量が異なる建物の自然室温の予測データ量とデータノイズによる ANN と RNN の予測性能の比較
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 李度胤, 大岡龍三, 松田侑樹, 池田伸太郎, 崔元準
2. 発表標題 空調熱源システムにおける人工知能を用いたモデル予測制御に関する研究(その3)モデル予測制御の実システムへの適用に関する先行実験
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 周琦, 大岡龍三
2. 発表標題 深層学習による室内気流予測手法の開発(第4報)異なる前処理手法が予測精度に及ぼす影響
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 文可, 大岡龍三, 崔元準
2. 発表標題 ニューラルネットワークによる熱容量が異なる建物の自然室温の予測学習曲線による ANN と LSTM に必要な学習データ量の推定
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 周琦, 大岡龍三
2. 発表標題 深層学習による室内気流予測手法の開発(その5)ニューラルネットワークにおける重みの初期化による影響の検討
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 Doyun Lee, Ryozo Ooka, Yuki Matsuda, Shintaro Ikeda, and Wonjun Choi
2 . 発表標題 Experimental Investigation of Model Predictive Control for Thermal Energy Storage System Using Artificial Intelligence
3 . 学会等名 Mediterranean Conference on Control and Automation (MED) 2021 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Yuki Matsuda, Ryozo Ooka, Shintaro Ikeda
2 . 発表標題 The Development of Cloud-based Building Automation System and Creating Predictive Models of HVAC System with Machine Learning
3 . 学会等名 Mediterranean Conference on Control and Automation (MED) 2021 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Doyun Lee, Ryozo Ooka, Yuki Matsuda, Shintaro Ikeda, and Wonjun Choi
2 . 発表標題 Experimental study of AI-based model predictive control strategy for thermal energy storage system
3 . 学会等名 EnerStock2021 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Yuki Matsuda, Ryozo Ooka, Doyun Lee
2 . 発表標題 Building a predictive model for a heat source system with thermal energy storage using machine learning
3 . 学会等名 EnerStock2021 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 Qi Zhou, Ryozo Ooka
2. 発表標題 INDOOR AIRFLOW SIMULATION VIA DEEP NEURAL NETWORK ON THE BASIS OF CFD DATABASE
3. 学会等名 ROOMVENT2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Qi Zhou, Ryozo Ooka
2. 発表標題 Neural network for indoor airflow prediction with CFD database
3. 学会等名 IBPC2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李度胤、大岡龍三、松田侑樹、池田伸太郎、崔元準
2. 発表標題 空調熱源システムにおける人工知能を用いたモデル予測制御に関する研究 (その4) 異なる負荷パターンによる検証実験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 文可、大岡 龍三、塩谷正樹、崔 元準
2. 発表標題 天空熱源ヒートポンプシステムのライフサイクルに亘るコスト低減と性能向上技術の開発 (その5) Modelica による天空熱源ヒートポンプシステムのモデリング
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 周琦、大岡龍三
2. 発表標題 深層学習による室内気流予測手法の開発（その6）エネルギーシミュレーションツールとの連成解析フレームワークの構築
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李度胤、大岡龍三、松田侑樹、池田伸太郎、崔元準
2. 発表標題 空調熱源システムにおける人工知能を用いたモデル予測制御に関する研究（その5）蓄熱槽運転を優先とする従来制御とモデル予測制御の比較実験
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 文可、大岡龍三、崔元準、塩谷正樹、下泰蔵
2. 発表標題 天空熱源ヒートポンプシステムのライフサイクルに亘るコスト低減と性能向上技術の開発（第6報）ANNによる天空熱源ヒートポンプシステムのモデル予測制御手法の開発
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 周琦、大岡龍三
2. 発表標題 深層学習による室内気流予測手法の開発（その7）三次元非等温流れの予測に関する検討
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	長井 達夫 (Nagai Tatsuo)  (00316001)	東京理科大学・工学部建築学科・教授  (32660)	
研究分担者	池田 伸太郎 (Ikeda Shintaro)  (00843525)	東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授  (12608)	
研究分担者	菊本 英紀 (Kikumoto Hideki)  (80708082)	東京大学・生産技術研究所・准教授  (12601)	
研究分担者	崔 元準 (Choi Wonjun)  (30817458)	東京大学・生産技術研究所・助教  (12601)	削除：2021年8月17日

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------