

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01485

研究課題名（和文）大規模地中蓄熱を伴う第5世代地域熱供給の計画・設計・最適運用に関する研究

研究課題名（英文）Research on planning, design, and optimal operation of 5th generation district heating with large-scale underground thermal energy storage

研究代表者

長野 克則（Nagano, Katsunori）

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：80208032

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：太陽光発電システムを有する建物単体やコミュニティを対象にAIを用いた気象予測システムを組み込み、最適化計画手法を用いて再生電力利用を最大化してCO2排出量が最小化になる冷暖房・給湯ヒートポンプ、蓄電池充放電などの最適運用システムを構築した。これを適用した場合のCO2排出量削減量やピーク負荷削減効果、負荷平準化効果などを明らかにした。同時に、大規模BTESの設計・性能予測ツールも開発した。3次元確率補完法の一つであるインジケータ・クリギング法を適用し、平面分解能250mメッシュ、深さ1m毎で各深度の地質構成割合を示し日本全国大深度3次元地質情報データベースを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は地域環境、建物、設備、人間という生活環境において近年日本の一次エネルギー消費量の約40%を占める民生用エネルギー消費量を、地域の再生可能エネルギーで発電された電力よび地中熱など地域の再生可能エネルギー熱を最大限利用して我々の生活の質を落とすことなく大幅にCO2排出量を最小化し削減する冷暖房・給湯ヒートポンプ、蓄電池充放電などの最適運用システムを構築した。また、地中熱利用に必要な日本全国大深度3次元地盤物性データベースも構築した。これらを公開することによる地中熱・地下水熱利用などを含めた再生可能エネルギー利用熱供給システムの普及拡大に大きく貢献するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：An AI-based weather forecasting system was incorporated for individual buildings and communities with photovoltaic power generation systems, and an optimal operation system for heating, cooling, and hot water heat pumps, storage battery recharge/discharge, etc. was constructed to maximize the use of renewable electricity and minimize CO2 emissions by using optimization planning methods. The CO2 emission reduction, peak load reduction, and load leveling effects of applying this system were clarified. At the same time, we developed design and performance prediction tools for large-scale BTES, and applied the indicator kriging method, one of the 3D probability completion methods, to construct a database of 3D geological information at great depths throughout Japan, showing the percentage of geological composition at each depth with a planar resolution of 250 m mesh and at each depth of 1 m.

研究分野：再生可能エネルギー利用，都市環境，建築環境，建築設備

キーワード：地中蓄熱 地域熱供給 ヒートポンプ 太陽光発電 蓄電池 地盤物性 ネットゼロエネルギービル 最適化

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

ドイツでは太陽光発電や風力発電により生み出される電力量が電力需要に比べて大きくなる時間帯が出現している。このとき再エネ電力料金は0円、さらにマイナスとなり、蓄電や蓄熱によるエネルギーマネジメント(EM)が非常に重要となってくる。我が国でも地下蓄熱と熱源ネットワーク、需要家側にヒートポンプをもつ第5世代地域熱供給が大幅なCO₂削減とEMのために有効であり、導入検討のための手法、データの整備や評価プログラムの開発が急務である。

2. 研究の目的

そこで、本研究の目的は、(1) 大深度地中熱利用計画のため深さ300mまでの大深度3次元地質構造データベース構築、(2) 電力負荷と太陽光発電システムの発電量の予測プログラムの開発、(3)再エネ発電・蓄電池と各種ヒートポンプを有する建物の最適運用プログラムの開発、(4) 第5世代地域熱供給を考えたエネルギーシステムの最適運用プログラムの開発である。

3. 研究の方法

- (1) 大深度地中熱利用計画のため深さ300mまでの大深度3次元地質構造データベース構築
国土交通省国土情報整備局より新たに全国の深井戸データの提供を受け、多様な地質記載を8つの地質に整理デジタル化し推定のためのデータとして追加した後、インディケータクリギング推定により、対象とする札幌平野、東京平野、大阪平野を含む全国の平面分解能250mメッシュ、深さ5m毎、深度300mまでの各地質の分布確率を推定し、データベース化する。
- (2) 電力負荷と太陽光発電システムの発電量の予測プログラムの開発
AIの一つであるLSTMモデルを用いた電力負荷と太陽光発電システム(PV)の発電量の予測プログラムを開発した。現在までの観測データを用いて一時間ステップ未来の値を予測し、それを繰り返して進めるLSTMのオープンループ予測について推定精度の検討を行う。
- (3)再エネ発電・蓄電池と各種ヒートポンプを有する建物の最適運用プログラムの開発
太陽光発電と蓄電池、冷暖房ヒートポンプや給湯ヒートポンプなどをもつ建物や施設の設備システムに対してCO₂排出量が最小となる最適運用プログラムを、混合整数線形計画(MILP)を用いて開発する。
- (4) 第5世代地域熱供給を考えたエネルギーシステムの最適運用プログラムの開発
第5世代地域熱供給を考慮してPV、蓄電池、給湯HP、GSHPを有する独立住宅87500軒、集合住宅12500軒、事務所ビル1600軒、店舗500軒の大規模地域を想定し、この地域エネルギーシステムにおいてCO₂排出量が最小となる運用スケジュールを計算し、ピークカット効果や最適化によるCO₂排出量削減効果などを検討する。

4. 研究成果

- (1) 大深度地中熱利用計画のため深さ300mまでの大深度3次元地質構造データベース構築
全国の分布の一例として深度100mにおける10kmグリッド毎での日本全国の有効熱伝導率分布を図1に示す。有効熱伝導率は地形に堆積物の傾向を反映し、平地で1.5~2.0W/(m・K)、山地で2.5~3.0W/(m・K)以上の値を示す。図2に既往研究と本研究で更新した深度50, 100, 150m別での有効熱伝導率の値の比較をボックスプロットで示す。ボックスで示す中間値の変化は0.1W/(m・K)以下に留まり、ボックスおよびひげの変化も大きくない。データ量が大きくなることで個々には推定精度が向上しつつ、全体的には既往研究と整合する結果と得られことを確認した。

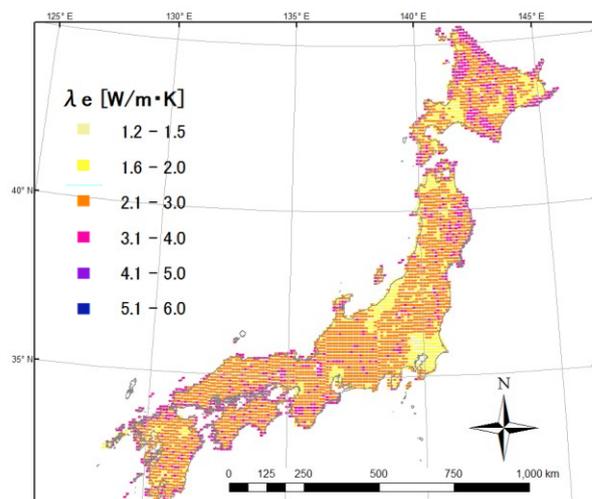


図1 本研究で推定した有効熱伝導率 λ_a (深度100mの例)

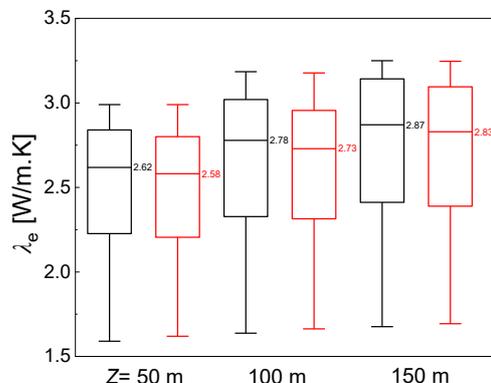


図2 日本全国における深度50, 100, 150mの推定有効熱伝導率のボックスプロット (黒: 既往研究, 赤: 本研究)

(2) 電力負荷と太陽光発電システムの発電量の予測プログラムの開発

図3, 図4に2010年5月1日から48時間分の電力負荷, および96時間分のPV発電量のオープンループによる予測結果を示す. 二乗平均平方根誤差 (RMSE) はそれぞれ0.1838と0.2260であり, 両者精度の高い推定結果が得られた. 観測値など入力データが時間ステップ毎に更新されてその値が入力されれば長期予測においても高精度な予測が可能といえる.

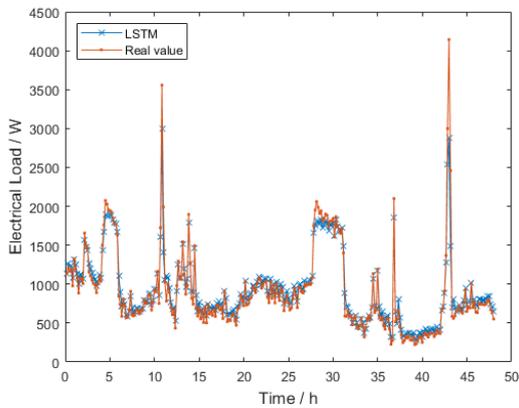


図3 オープンループによる電力負荷の予測

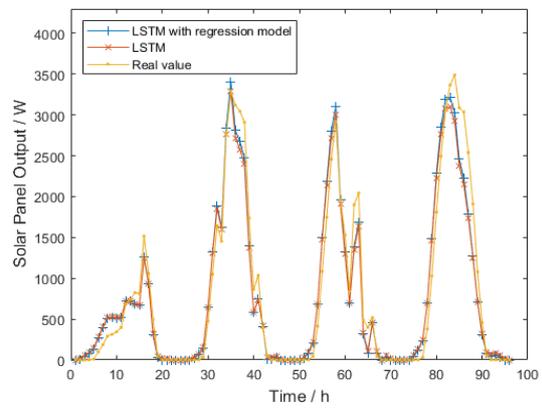


図4 オープンループによるPV発電量の予測結果

(3) 再エネ発電・蓄電池と各種ヒートポンプを有する建物の最適運用プログラムの開発¹⁾

図5に対象とするエネルギーシステムを示す. 太陽光発電 (以下PV) システム・リチウムイオン蓄電池・給湯ヒートポンプ (以下HP)・地中熱HPを有しており, 蓄電・蓄熱を伴うシステムであり, 暖冷房の地中熱HPの運転については熱源水温度の変化, および室内の非常時の暖冷房負荷も考えている. 図6に室温制御における室内外の熱収支モデルを示す. 室内温度が $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ とする制約条件の下で混合整数線形計画法 (MILP) を用いて CO_2 排出量が最小となる最適運転スケジュールを計算した. 図7に最適化計算による1日の各エネルギー機器の運転状況を示す. 黄が購入電力量, ピンクが給湯HP消費電力量, 緑が暖冷房地中熱HP(GSHP)の消費電力量, 紫が蓄電池からの放電量を表している. 朝7時ごろの電気料金が安い時間帯で給湯HPやGSHPが稼働して貯湯や積極的な暖房運転が行われている. 電気料金が安い時間帯と太陽光発電量が多い日中にGSHPで暖房がなされ, 電気料金が安い時間帯に蓄電池から放電されている.

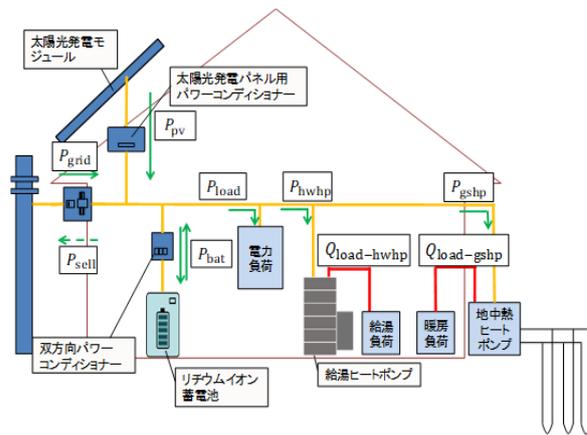


図5 対象とする建物エネルギーシステム

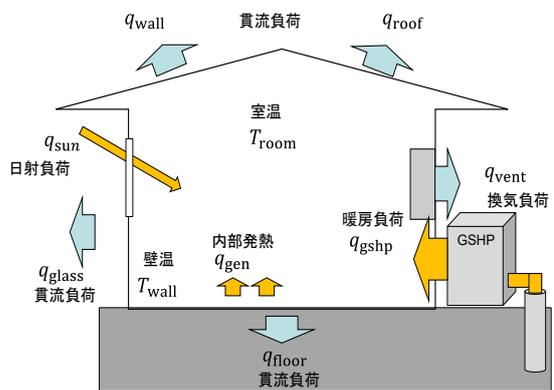


図6 室温制御における室内外の熱収支モデル

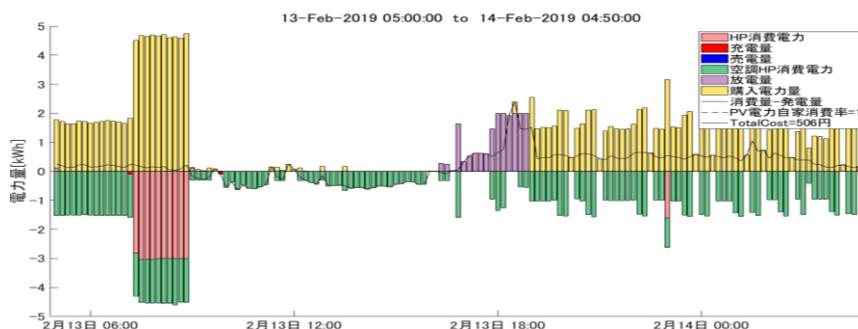


図7 最適化計算による1日の各エネルギー機器の運転状況

(4) 第5世代地域熱供給を考えたエネルギーシステムの最適運用プログラムの開発¹⁾

図8に対象とする地域エネルギーシステムを示す。最適化時期、天気、目的関数、CO₂排出量係数をパラメーターとして、表1に示す8条件について年間計算を行った。結果を図9に示す。CASE3-1とCASE4-1を比べると、CO₂排出量を目的関数とすることでCO₂排出量は11222t(2.8%)減少するが電気料金は1301百万円(6.9%)増加している。CASE2-1とCASE4-1より時間帯別電気料金を用いるとCO₂排出量は同じ値であるが、電気料金は3098百万円(13.3%)削減できることが示された。これより、電気料金プランを2時間帯別に設定し、目的関数を電気料金とし、昼夜別のCO₂排出量排出原単位を用いることで、現実的に環境面を考慮した経済的に有利な運転が行えることが示された。

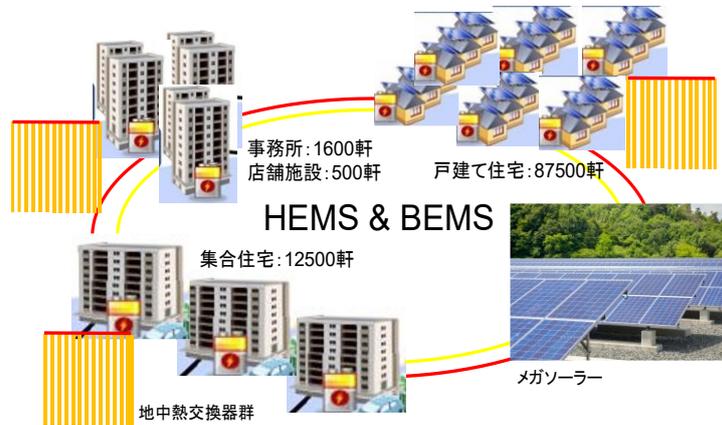


図8 対象とする地域エネルギーシステム

表1 長期計算ケーススタディ

CASE	目的関数	CO ₂ 排出量係数 [kg-CO ₂ /kWh]	電気料金
CASE1-1	電気料金	0.453	3時間帯別
CASE1-2	電気料金	昼(8~22時)0.462 夜(22~8時)0.435	3時間帯別
CASE2-1	CO ₂ 排出量	0.453	3時間帯別
CASE2-2	CO ₂ 排出量	昼(8~22時)0.462 夜(22~8時)0.435	3時間帯別
CASE3-1	電気料金	0.453	2時間帯別
CASE3-2	電気料金	昼(8~22時)0.462 夜(22~8時)0.435	2時間帯別
CASE4-1	CO ₂ 排出量	0.453	2時間帯別
CASE4-2	CO ₂ 排出量	昼(8~22時)0.462 夜(22~8時)0.435	2時間帯別

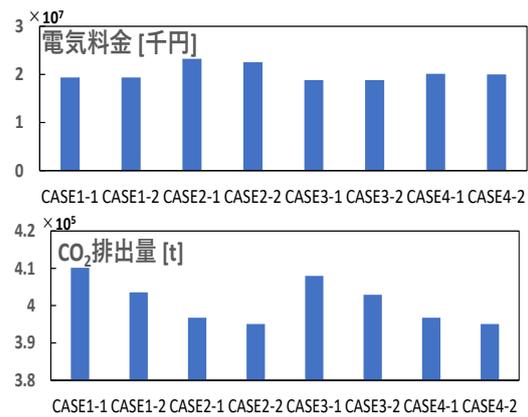


図9 計算結果

参考文献

- 1) 北海道電力, 料金メニュー, <http://www.hepco.co.jp/home/price/ratemenu/ratemenu.html> (2024)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Ahmed A. Serageldin , Katsunori Nagano	4. 巻 in press
2. 論文標題 A Novel Oscillatory Thermal Response Test Method for Efficient Characterization of Ground Thermal Properties: Methodology and Data Analysis	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Renewable Energy	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) 10.1016/j.renene.2024.120674	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 Kunning Yang, Takao Katsura, Shigeyuki Nagasaka, Katsunori Nagano	4. 巻 291
2. 論文標題 Development and application of a new calculation method for double spiral ground heat exchangers	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Energy and Buildings	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enbuild.2023.113144	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 -

1. 著者名 Minzhi Ye, Katsunori Nagano, Ahmed A. Serageldin, Hideki Sato	4. 巻 67
2. 論文標題 Field studies on the energy consumption and thermal comfort of a nZEB using radiant ceiling	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Building Engineering	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jobee.2023.105999	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 -

1. 著者名 Hobyung Chae, Katsunori Nagano, Takao Katsura, Yoshitaka Sakata, Ahmed A. Serageldin	4. 巻 261
2. 論文標題 Life cycle cost analysis of ground source heat pump system based on multilayer thermal response test	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Energy and Buildings	6. 最初と最後の頁 178-186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enbuild.2021.111427	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 -

1. 著者名 Yoshitaka Sakata , Yuma Akeyama , Takao Katsura , Katsunori Nagano	4. 巻 16
2. 論文標題 Evaluating Long-Term Performance of a Residential Ground-Source Heat Pump System under Climate Change in Cold and Warm Cities of Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 2742-2750
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/en16062742	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 -

1. 著者名 阪田義隆 , 明山雄真 , 葛隆生 , 長野克則	4. 巻 78
2. 論文標題 異なる気候変動シナリオに基づく 地中熱ヒートポンプシステムの100年性能予測	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集 (環境)	6. 最初と最後の頁 I_179-I_187
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 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 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 楊世博、長野克則、安皓辰、葛隆
2. 発表標題 ヒートポンプを核としたスマートコミュニティに関する研究 (その 14) ヒートポンプと蓄電池の最適制御
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会北海道支部第56回学術講演会論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安皓辰、長野克則、楊世博、葛隆生
2. 発表標題 ヒートポンプを核としたスマートコミュニティに関する研究 (その 15) LSTMモデルに基づく日射量予測
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会北海道支部 第56回学術講演会論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小司優陸、葛隆生、長野克則
2. 発表標題 モデル誤差を考慮したアンサンブルシミュレーションによる地中熱ヒートポンプシステム性能予測の不確実性評価
3. 学会等名 令和3年度空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鎌田泰地、葛隆生、大原知哉、長野克則
2. 発表標題 ZEHに導入する低コスト地中熱ヒートポンプシステムのシミュレーションによる検討
3. 学会等名 令和3年度空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小司優陸、葛隆生、長野克則
2. 発表標題 アンサンブルカルマンフィルタを用いたデータ同化による地中熱利用システム運転データからの土壌有効熱伝導率推定
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会北海道支部第56回学術講演会論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 二村孝平、小司優陸、葛隆生、長野克則
2. 発表標題 盤熱物性値の推定誤差が地中熱ヒートポンプシステムの性能予測に与える影響評価
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会北海道支部第56回学術講演会論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長野克則、葛隆生、阪田義隆
2. 発表標題 ヒートポンプを核としたスマートコミュニティに関する研究 (その13)モデル予測型EMSを有する建物群で構成されるコミュニティの環境負荷削減効果
3. 学会等名 令和3年度空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阪田義隆, 葛隆生, 長野克典
2. 発表標題 確率論的アプローチに基づく全国地盤物性推定データベースの構築と次の展開に向けて
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
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	阪田 義隆 (Yoshitaka Sakata) (10754236)	金沢大学・地球社会基盤学系・准教授 (13301)	
研究分担者	葛 隆生 (Takao Katsura) (60552411)	北海道大学・工学研究院・准教授 (10101)	

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
---------	---------