

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04968

研究課題名（和文）低炭素エネルギーネットワークの変数と制約に基づく多段階分解手法を用いた設計最適化

研究課題名（英文）Design Optimization of Low Carbon Energy Network Using Multi-stage Decomposition Based on Variables and Constraints

研究代表者

涌井 徹也（WAKUI, TETSUYA）

大阪公立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：40339750

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：再生可能エネルギーにより生成した電力と熱を複数の需要家間で融通する低炭素エネルギーネットワークの最適設計は大規模な数理最適化問題に帰着する。高性能な商用最適化ソルバーを用いても合理的な設計解を探索することが困難であることから、本研究では最適化問題における決定変数と制約問題の関係に着目し、複数の小規模な最適化問題に多段階で分解して準最適解を探索する近似解法を構築した。また、この解法を用いて、経済性とエネルギー供給の自立性を評価指標とした低炭素エネルギーネットワークの設計指針を提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低炭素エネルギーネットワークの最適設計問題は混合整数線形問題として表すことができるが、システム構成機器の候補数や運転性能を評価する計画区間のサンプリング時間数が増えると大規模な問題となり、高性能な商用最適化ソルバーを用いても合理的な設計解を探索することができない。本研究では、最適化問題における決定変数と制約条件の関係を利用して、複数の小規模な最適化問題に分解し、相互に問題を解くことで最適解に近い設計解を高速で探索することができる。また、この解法を用いた設計分析を行うことで低炭素エネルギーネットワークの設計指針を提示することが可能となり、脱炭素社会構築に大きく貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Optimal design problems of low-carbon energy networks, in which the electric power and heat are mainly generated from renewable energy resources and shared among multiple demands, result in mixed-integer linear programming problems. As the problem scale, represented by the number of equipment candidates and sampling times in the planning horizon, increases, it becomes difficult to find a rational feasible solution in a practical computation time and memory usage. The present study developed a near-optimal solution method for optimal design problems of low-carbon energy networks using multi-stage decomposition based on decision variables and constraints. The developed method was applied to an optimal design of a low-carbon energy network, and a design strategy from the perspective of economic benefits and energy supply autonomy.

研究分野：エネルギーシステム工学

キーワード：エネルギーシステム 最適化 分解法 再生可能エネルギー 蓄エネルギー エネルギー融通

## 1. 研究開始当初の背景

「エネルギー基本計画」に掲げられたように、再生可能エネルギーは蓄電や蓄熱に加え、長期間水素貯蔵などを地域レベルで組み合わせることで、低炭素社会を構築する基盤となる。再生可能エネルギー機器の出力やエネルギー需要量は不確実に変動するため、エネルギー供給時に余剰や不足が生じうるが、電気事業者による余剰電力の買取価格は年々低下している。よって、再生可能エネルギーの導入をさらに進めるためには自己利用割合を向上させることが重要となる。エネルギー貯蔵機器の大容量化は解決策の一つであるが、設備コストが大幅に増加することから、生成した電力や熱を需要家間で融通するエネルギーネットワークが注目されている。低炭素化を目指したエネルギーネットワークでは、図1に示すように、再生可能エネルギー機器、水素貯蔵も含めたエネルギー貯蔵機器、高効率電熱源機器などの分散型エネルギーシステム間で電力や熱の融通を行う。その導入効果を高めるためには、再生可能エネルギー源やエネルギー需要量の季節的および時間的变化に応じた運用を考慮し、機器の種類、容量、台数、融通構成などを最適に設計する必要がある。

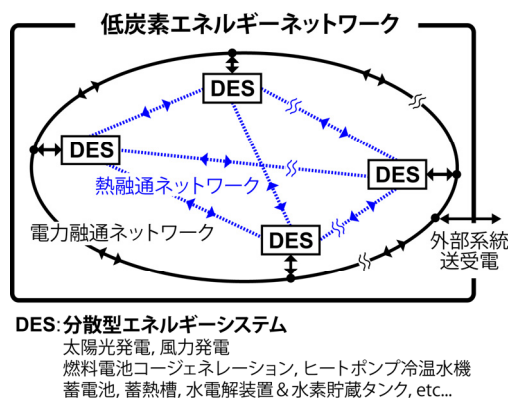


図1 低炭素エネルギーネットワーク

低炭素エネルギーネットワークの最適設計は、数理計画問題（混合整数線形計画問題）として表すことができる。しかし、候補機器の数やエネルギー貯蔵の評価期間が長くなると問題の規模（変数、制約の数）が飛躍的に増大するため、高性能な最適化ソルバーを用いてもメモリ使用量の制限を受けて候補解すら求められないことが多い。エネルギーネットワークの最適設計問題を効率良く解くための解法の研究はこれまでも行われてきており、機器構成を決定する設計問題と機器の運用を決定する運用問題とに分解する手法が報告されていた。しかし、分解されたエネルギーネットワークの運用問題は空間的（接続システム数）にも時間的（計画期間数）にも大規模であることから、運用制約の緩和や評価期間数の縮小が必要となり、最適解から乖離した近似解を得るに留まっていた。また、進化的計算により機器構成や運用計画の候補を網羅的に探索する手法も報告されているが、解の最適性（理論的な下界値からどの程度離れた解なのか）を評価できず、多くの計算時間を必要とする。よって、設計や運用の自由度が高いエネルギーネットワークの大規模設計問題を高速かつメモリ使用量の少ない計算機環境で解くことのできる最適化手法は未だ確立されていないという課題があった。

## 2. 研究の目的

低炭素エネルギーネットワークの大規模設計問題に対して、変数と制約に基づく分解法を多段階で導入した最適化手法を構築する。変数分解により得られた運用問題をさらに時間領域において多数の小規模問題に分解することで、実用的な計算時間かつ少メモリ使用量下において解の最適性を評価できる準最適解を得る解法を構築する。さらに、メタヒューリスティック手法による設計変数の探索と組み合わせることで、大規模設計問題の近似解法を構築する。構築した手法を用いた設計分析を通して、経済性に加えてエネルギー供給の自立性にも着目した低炭素エネルギーネットワークの設計指針も明らかにする。

## 3. 研究の方法

### (1) 運用計画問題に対する時間領域での分解解法

まず、システム構成および機器容量・台数を固定したエネルギーネットワークを対象に、その最適運用計画問題を定式化した。エネルギーネットワークの運用計画は、計画区間のエネルギー需給と、電熱源機器およびエネルギー貯蔵機器の運転制約を満たした上で、運転コストが最小と

なるように決定する。運用計画問題は混合整数線形計画（MILP）問題として表現することができる。

MILP 運用計画問題（元問題）は、サンプリング時刻間で接続する 0-1 整数変数や連続変数の数が多いために、最適化問題の規模が大きくなる。そこで本研究では、図 2 に示すように、計画区間を  $N$  個の短期間区間に分割する時間領域分解に着目する。元問題における制約条件では、蓄エネルギー量と機器の運転状態変化に関する制約条件が隣接する分割区間で接続する。一方、システムのエネルギー需給および蓄エネルギーに関する制約条件は各分割区間で独立している。したがって、元問題の制約条件は特徴的なブロック構造を有する。

本研究では、Dantzig-Wolfe 分解法を用いることで、元問題における分割区間同士の変数接続制約条件を扱う主問題と、各分割区間でのエネルギー貯蔵・需給に関する制約条件を扱う  $N$  個の副問題に分解する。分解された問題に列生成計算に基づく反復計算を適用することで元問題の下界値を得ることができる。その上で、最終決定問題において、列生成計算で生成した各副問題の部分解から一つを選択して元問題の 0-1 整数変数値に割り当てる。分割区間同士の変数接続制約を満たすように、分割サンプリング時刻近傍の一部の機器の運転状態を決定変数（0-1 整数変数）とすることで、元問題の準最適解を算出する。副問題は商用最適化ソルバーによって短時間で解ける規模にまで分解する。さらに、最終決定問題における 0-1 整数変数の数は元問題に比べて大幅に削減されることから、MILP 長期間運用計画問題に対する計算効率と求解能力の向上が期待できる。

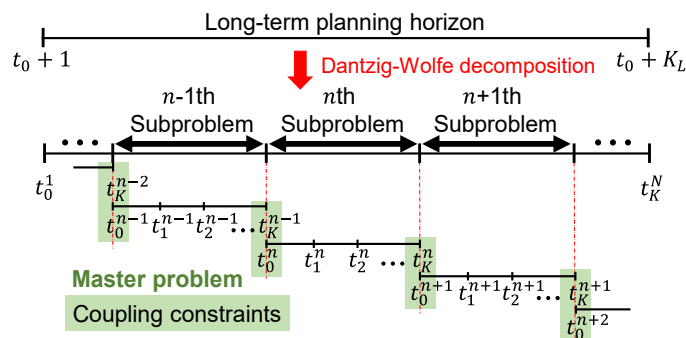


図 2 時間領域分解法

## (2) メタヒューリスティック手法を用いた近似解法

計画区間の運用計画に基づいて、システム構成および機器容量・台数を決定する最適設計問題を定式化する。エネルギーネットワークの性能として、経済性を代表する年間総コストと、エネルギー供給の自立性を評価する。年間総コストは、機器容量より算出される年間相当設備コストと年間運用コストの和で表される。年間運用コストは計画区間（年間）の運転コストより算出され、各サンプリング時刻での買電費用および売電利益に基づく。エネルギー供給の自立性は、計画区間の買電費用と売電利益（ともに非負）の和で評価する。最適設計を行うための目的関数は、年間総コストと自立性評価関数の加重和とし、これを最小化する。

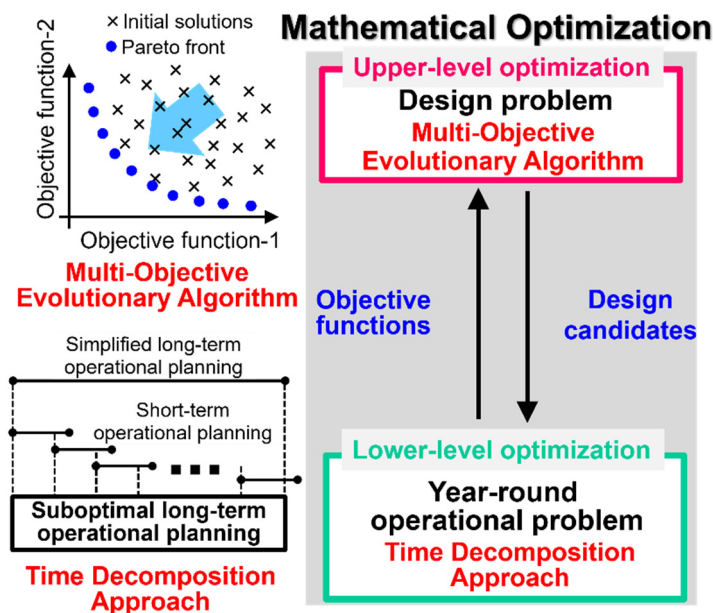


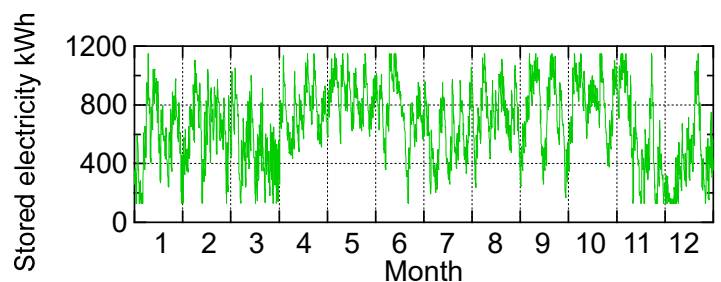
図 3 変数分解に基づく近似解法

多目的最適設計問題は設計変数の数や運用計画区間数とともに問題の規模が増大するため、実用的な計算時間でパレート最適解を得ることは困難である。そこで、決定変数における設計変数および運用変数間の階層的関係に着目し、多目的最適設計問題（以下、元問題）を設計変数の候補解を探索する設計問題と運用変数を決定する運用計画問題に分解する。図3に示すように、それぞれを交互に解いて準最適解を算出する近似解法を構築する。設計問題の解法として多目的進化アルゴリズムを導入することで、多様なパレート設計解集合を探索する。また、混合整数線形計画法を適用する運用計画問題においては、2つの目的関数に対する重み係数を決定する必要がある。本研究では、この重み係数を多目的運用方策を表す設計変数の一つと見なし、機器容量と併せて上位レベルで探索する。下位レベルの運用計画問題では、上位レベルで生成された設計変数の候補解を与条件として、時間領域での分解解法を用いて運用変数を決定する。設計変数を固定することで、運用計画問題は設計候補ごとに独立して解くことができるため、最適化計算の効率を向上させることができる。多目的進化アルゴリズムによって設計変数の候補解は複数生成されるが、それぞれの候補解に対応する運用計画問題を並列して解くことができる。設計問題と運用計画問題を交互に解く反復計算を行い、計算終了条件を満たした時に得られたパレート設計解集合を原問題の準最適解集合と見なす。

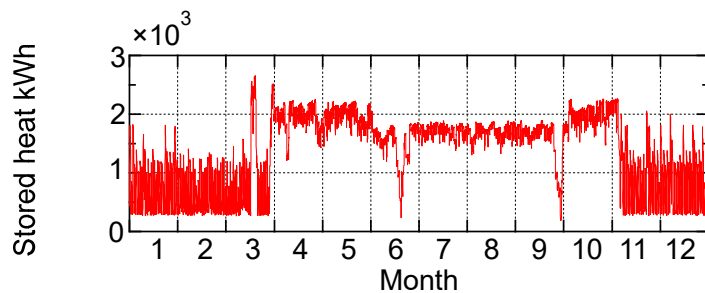
#### 4. 研究成果

##### (1) 運用計画問題に対する時間領域での分解解法

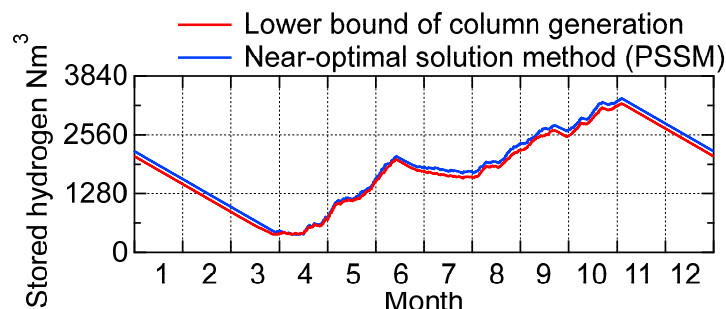
太陽光発電の中間期に発生する余剰電力で水素を製造し、季節間貯蔵を行うエネルギーネットワークの年間運用計画に時間領域での分解解法を適用した結果の一例を図4に示す。蓄エネルギー機器として、蓄電池と貯湯槽（太陽光発電の余剰電力でヒートポンプ給湯機を稼働）に加えて、水素吸蔵合金を導入している。蓄電池の充電量と貯湯槽の蓄熱量は1日～数日周期で変化する。貯湯槽の蓄熱量に関しては、中間期と夏期の給湯需要が少ないため、満蓄に近い状態が継続する。一方、水素吸蔵合金に貯蔵される水素量は太陽光発電の余剰電力が増加する中間期（4, 5, 9, 10月）に増加し、電力需要が増加する冬期（11～3月）に燃料電池の燃料として利用する計画が得られている。1年周期での水素貯蔵計画が得られていることがわかる。



(a) 蓄電池充電計画



(b) 貯湯槽蓄熱計画



(c) 水素吸蔵合金貯蔵計画

図4 時間領域分解解法に基づく長期間蓄エネルギー計画

## (2) メタヒューリスティック手法を用いた近似解法

メタヒューリスティック手法による設計解探索と時間領域での分解法による運用計画立案を組み合わせた近似解法によって得られたパレート設計解集合を図5に示す。多目的最適設計問題において運用方策を表す重み係数を固定し、商用最適化ソルバーを用いて直接解いた場合の結果を従来手法として併せて示す。ここでは年間総コストとエネルギー供給の自立性評価関数との関係を表しているが、構築した近似解法によって多様なパレート最適解（これ以上、一方の目的関数値を減少させようとすると、もう一方の目的関数値が増加する）が得られていることがわかる。従来手法では重み係数を10通りに設定して個別に計算を行ったが、計算時間上限値（120時間）を経過しても実行可能解が得られたのは4通りの重み係数のみであった。また、得られた目的関数値も近似解法で得られた値に比べて大きいことがわかる。これは構築した近似解法の大規模設計問題に対する探索能力が高いことを示している。

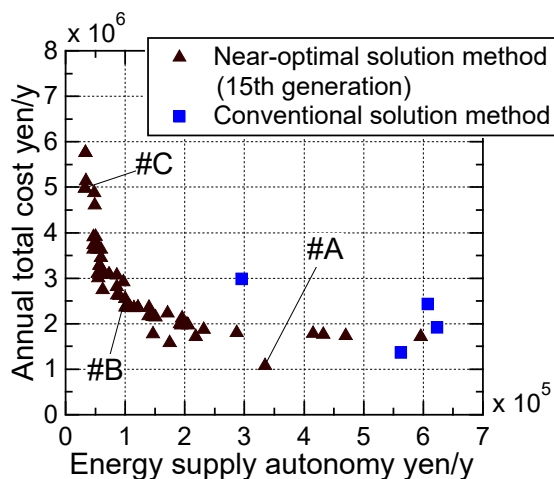


図5 近似解法によるパレート設計解集合

近似解法で得られたパレート設計解集合の内、年間総コストに重きを置いたシステム設計解（#A）、エネルギー供給の自立性に重きを置いたシステム設計解（#C）、そして2つの目的関数値のバランスを重視したシステム設計解（#B）における目的関数値およびシステム機器構成の容量を表1に示す。年間総コストの最小化を重視した設計解#Aでは、蓄エネルギー機器として貯湯槽のみが選択され、太陽光発電パネル面積も候補の中で最小値となる。購入電力量が多くなることで自立性評価関数値は大きくなる。一方、自立性評価関数値が小さい設計解#Cでは、太陽光発電パネル面積が大きく、蓄エネルギー機器として蓄電池と水素吸蔵合金タンクも選択される。水素吸蔵合金タンクの機器コストが高いことから、年間総コストは大幅に増加する。これより、年間総コストとエネルギー供給の自立性のトレードオフ関係を確認できる。

表1 エネルギーネットワークのパレート設計解分析

Item		Pareto solution index		
		#A	#B	#C
Annual total cost	yen/y	1,076,862	2,364,894	4,975,024
Energy supply autonomy	yen/y	334,367	100,705	32,530
Weight coefficient	$W$	0.9	0.5	0.3
<i>Units capacity</i>				
Photovoltaic panel area	m <sup>2</sup>	120	240	320
Battery unit capacity	kWh	30	120	300
Water electrolyzer output	Nm <sup>3</sup> /h	0	3	3
Metal hydride tank capacity	Nm <sup>3</sup>	0	50	200
Pure hydrogen fuel cell output	kW	0	0.7	1.4
Heat pump water-heating unit output	kW	18	18	18
Storage tank capacity	m <sup>3</sup>	1,600	1,600	1,600

## (3) まとめ

低炭素エネルギーネットワークの大規模な多目的最適設計問題に対して、変数と制約に基づく分解法を多段階で導入した最適化手法を構築した。変数分解により得られた運用問題をさらに時間領域において多数の小規模問題に分解することで、準最適運用計画を得ることができるようになった。さらに、メタヒューリスティック手法による設計変数の探索と組み合わせることで、元設計問題のパレート設計解集合を計算できるようになり、経済性に加えてエネルギー供給の自立性にも着目した低炭素エネルギーネットワークの設計指針を明らかにすることができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Zhang B., Wakui T.	4. 巻 338
2. 論文標題 Optimal Design of Energy Storage and Supply Systems Using Multi-Objective Evolutionary Algorithm and Mixed-Integer Linear Programming with Rolling Horizon Approach	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proc. of the 37th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS-2024)	6. 最初と最後の頁 1-12
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 Wakui T., Yamahata T.	4. 巻 330
2. 論文標題 Demand Response of a Vapor-compression Type Air-Conditioning System Based on Model Predictive Control and Multiple Feedback Controls	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proc. of the 37th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS-2024)	6. 最初と最後の頁 1-13
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 Zhang B., Wakui T., Yokoyama R.	4. 巻 1278
2. 論文標題 Column Generation-based Time-Domain Decomposition for Seasonal Operation Planning Problems of Energy Storage and Supply Systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. of the International Conference on Power Engineering-2023 (ICOPE-2023)	6. 最初と最後の頁 1-4
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 Zhang B., Wakui T., Yokoyama R.	4. 巻 -
2. 論文標題 Time-domain decomposition for MILP-based long-term operational planning problems of energy storage and supply systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. of the 36th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS-2023)	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 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 Wakui T., Matsumoto T., Yokoyama R.	4. 巻 -
2. 論文標題 Optimal Operation of Vapor-compression Type Air-Conditioning System Based on Hierarchical Utilization of Model Predictive Control and Multiple Feedback Controls	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. of the 35th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS-2022)	6. 最初と最後の頁 2127-2138
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 Wakui T., Akai K., Yokoyama R.	4. 巻 239
2. 論文標題 Shrinking and receding horizon approaches for long-term operational planning of energy storage and supply systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Energy	6. 最初と最後の頁 1-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.energy.2021.122066	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 Wakui T., Zhang B., Yokoyama R.	4. 巻 191
2. 論文標題 Long-term operational planning of energy storage and supply systems based on time-domain decomposition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of the International Conference on Power Engineering-2021 (ICPE-2021)	6. 最初と最後の頁 1-4
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 青地駿太, 張博雲, 涌井徹也
2. 発表標題 サロゲートモデルを援用したエネルギー貯蔵・供給システムの多目的最適設計 (実行不可能領域を含めた設計解探索の有効性評価)
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第99回定時総会講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 大塚直弥, 張博雲, 涌井徹也
2. 発表標題 分散最適化手法を用いた電力融通ネットワークの協調運用計画
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第99回定時総会講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 青地駿太, 張博雲, 涌井徹也
2. 発表標題 サロゲートモデルを援用したエネルギー貯蔵・供給システムの多目的最適設計
3. 学会等名 第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 張博雲, 涌井徹也
2. 発表標題 時間領域分解に基づくエネルギー貯蔵・供給システムの長期間運用計画（機器容量の感度分析への適用）
3. 学会等名 第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 大塚直弥, 張博雲, 涌井徹也
2. 発表標題 分散蓄電池を活用した電力融通ネットワークの協調運用計画
3. 学会等名 第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
4. 発表年 2024年



1. 発表者名 Aoji S., Zhang B., Wakui T.
2. 発表標題 Optimal Design of PV-P2G-hydrogen Storage Systems Based on Multi-Objective Evolutionary Algorithm and Mixed-Integer Linear Programming
3. 学会等名 3rd Joint Symposium on Advanced Mechanical Science and Technology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Zhang B., Wakui T.
2. 発表標題 Column generation-based time-domain decomposition for seasonal operation planning problems of energy storage and supply systems
3. 学会等名 International Symposium of the Graduate School of Engineering, Osaka Metropolitan University (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Wakui T.
2. 発表標題 Energy Management of Low-Carbon Energy Supply Networks Based on Optimization Approaches
3. 学会等名 International Symposium of the Graduate School of Engineering, Osaka Metropolitan University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 張博雲, 涌井徹也, 横山良平
2. 発表標題 時間領域分解に基づく近似解法を用いたエネルギー貯蔵・供給システムの長期間運用計画
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第98期定時総会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 張博雲, 涌井徹也, 横山良平
2. 発表標題 時間領域分解に基づくエネルギー貯蔵・供給システムの長期間運用計画 (列生成に基づく準最適解算出方法の検討)
3. 学会等名 エネルギー・資源学会第39回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 青地駿太, 涌井徹也, 横山良平
2. 発表標題 多目的進化アルゴリズムと混合整数線計画法に基づくエネルギー貯蔵・供給システムの最適設計
3. 学会等名 第40回エネルギー・資源学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大塚直弥, 涌井徹也, 横山良平
2. 発表標題 時間帯別融通価格を考慮した電力融通ネットワークの協調運用計画
3. 学会等名 第40回エネルギー・資源学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 涌井徹也, 張博雲, 横山良平
2. 発表標題 時間領域分解に基づくエネルギー貯蔵・供給システムの長期間運用計画
3. 学会等名 日本機械学会第25 回動力・エネルギー技術シンポジウム
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
研究協力者	張 博雲  (Zhang Boyun)	大阪公立大学・大学院工学研究科機械系専攻・博士後期課程	
研究協力者	青地 駿太  (Aoji Shunta)	大阪公立大学・大学院工学研究科機械系専攻・修士課程	
研究協力者	大塚 直弥  (Otsuka Naoya)	大阪公立大学・大学院工学研究科機械系専攻・修士課程	

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