

令和元年6月25日現在

機関番号：50104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06981

研究課題名(和文) 広域連系による平滑化効果を用いた再生可能エネルギーの最適分散配置の研究

研究課題名(英文) Study on optimum distributed arrangement of renewable energy using smoothing effect by wide area interconnection

研究代表者

岡田 昌樹 (OKADA, MASAKI)

旭川工業高等専門学校・機械システム工学科・教授

研究者番号：40455100

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：広域連系された再生可能エネルギーの平滑化効果を用いることで、再生可能エネルギーの最適分散配置を求める解析方法を検討した。結果として、多くの非線形変数を同時に扱える遺伝的アルゴリズムに基づいた電源配置の最適化アルゴリズムを開発した。提案アルゴリズムでは送電網による電力融通と複数のエネルギー貯蔵方式が考慮されており、システムの経済性と環境負荷に関する目的関数の下で電源の配置が計画される。また、本研究で開発したアルゴリズムを北海道に適用して、各設備の設置場所と設置容量、送電網による電力の融通量を調査した。その結果、季節間の熱需要の変動が課題であり、その容量と経済性、環境負荷の影響を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電力変動の平滑化が計画されていない電力システムでは、再生可能エネルギーの導入量と導入場所がランダムとなるため、電力会社は電力需給のバランスを制御できない場合、風力発電や太陽光発電を一方向的に解列することとなり、再生可能エネルギー設備の稼働効率が悪くなる。これに対し、本研究で開発した広域連系による出力変動の平滑化効果を用いたプログラムを用いると、遺伝的アルゴリズムによる解析から、それぞれの地域に導入する再生可能エネルギーの種類と設備容量を明らかにでき、電力システム全体に導入する各設備を最適に配置できる。その結果、出力変動の補償用電源と電力貯蔵装置の設備コストが低減でき、環境負荷の低減も図れる。

研究成果の概要(英文)：We examined the analysis method to find the optimal distributed arrangement of renewable energy by utilizing the smoothing effect of the wide area interconnected renewable energy. As a result, we developed an optimization algorithm of power supply arrangement based on genetic algorithm that can handle many non-linear variables simultaneously. The proposed algorithm considers the power interchange by the transmission network and multiple energy storage schemes, and plans the placement of the power source under the objective function of the system's economy and environmental load. In addition, the algorithm developed in this research was applied to Hokkaido, and the installation location and installation capacity of each facility, and the amount of power exchange by the power transmission network were investigated. As a result, the fluctuation of heat demand between seasons is an issue, and the effects of capacity, economy and environmental load are clarified.

研究分野：エネルギー学

キーワード：再生可能エネルギー 広域連系 分散配置 遺伝的アルゴリズム

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 電力会社では電力の需要と供給を絶えず一致させる制御を行っている。この理由は電力の需給バランスが崩れると周波数変動や停電など甚大な影響が電力システム全体へ及ぶためである。これに対し、風力発電と太陽光発電の再生可能エネルギーは、図1に示すとおり、風速や日射量に応じて出力が変動する。この再生可能エネルギーが大量に導入された場合、現状の電力会社の設備では需給調整を行う制御が追いつかなくなる。

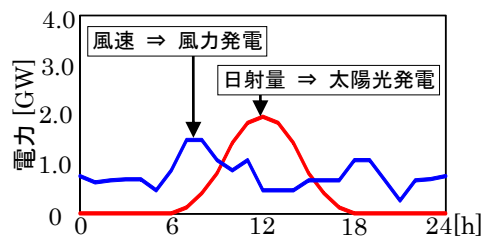


図1 再生可能エネルギーの出力

(2) この対策として、これまでに蓄電池を導入する方法や制御技術を導入する方法が多く調査されているが、広域連系による平滑化効果を用いて再生可能エネルギーの最適分散配置の探索アルゴリズムを開発した例はない。

2. 研究の目的

(1) 風力発電と太陽光発電の再生可能エネルギーの出力が、気象条件の異なる複数地点の広域連系による平滑化効果で緩和することに着目し、再生可能エネルギーの分散配置を経済性と低環境負荷から最適化するアルゴリズムを開発する。

(2) 開発したアルゴリズムを用い、北海道を対象としたケーススタディを行い、再生可能エネルギーを広域連系する電力システムについての解析結果を検証し、課題抽出と改善策を提案する。

3. 研究の方法

(1) 広域連系する複数地点の探索

図2に示すように、広域連系に有効な地点を明らかにするため、各地の気象データから発電に係る条件（風速、日射量）が異なる地点を探索するプログラムを開発する。プログラムへの入力データは、気象庁から入手可能な地上気象観測値資料を用い、すべての地点の1分間データを合計し、風速の場合は日単位、日射量の場合は分単位の出力振幅がより小さくなる組み合わせを最適解とする。

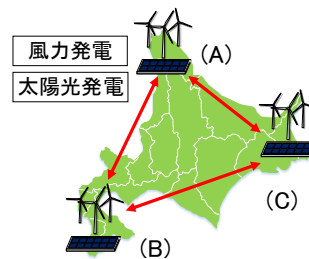


図2 広域連系の例

(2) 最適化アルゴリズムの開発

本研究で用いる広域連系における需要と供給の構成を図3に示す。広域連系する各地点は(1)の探索結果を参考に、ある程度需要の大きな都市を中心とし、風力発電所 (Pwp) と太陽光発電所 (Ppv) を設置できるエリアとする。また、この複数のエリア間は送電線でつながれ、互いの電力を融通可能とする。各エリアで発電された再生可能エネルギーの電力は、まずはそのエリア内で消費する電力に供給され、余剰分は他エリアへ送電 (Ptp) できるほか、系統に配置された揚水発電 (Pph) へ貯蔵できるものとする。一方、各エリアの需要電力が不足する場合は、他エリアからの融通電力と電力会社の制御可能な調整電力 CPS : Controllable Power Source of Output Power (Pcps) で補充し、CPS の出力で調整できない変動は揚水発電で対応する。なお、経済性 (発電コスト) と環境面 (CO2 の排出量) の関係を明らかにするために、需要予測のもと、燃料費の安い石炭火力発電を需要の 0~70% (10%刻み) で固定出力する。

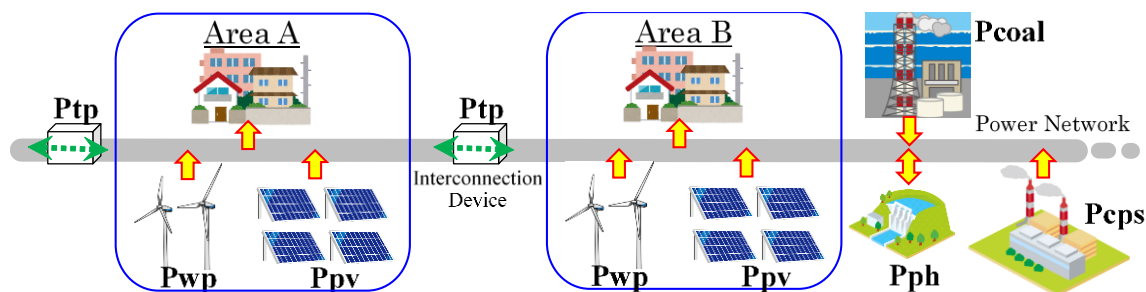


図3 広域連系における需要と供給の構成

また、本研究で用いる電力需給の特性例を図4に示す。横軸に1日の時間を示し、縦軸に電力値を示す。グラフ下側の黄色の塗面 Pcps (FIX) は、再生可能エネルギーの変動に対応するため待機運転 (アイドル) させておく CPS の出力 (定格の 15%以上) である。その上の灰色の塗面 Pcoal は、経済性と環境面の関係を明らかにするために意図的に出力する石炭火力発電量である。黒太線の ΔP_{need} が全需要で、赤太線が Pcps (FIX) と Pcoal に再生可能エネルギー (Ppv+Pwp) を加えた出力である。需要に対し再生可能エネルギーの出力が余剰となる部

分が朱色の塗面で、不足するところが黄色とピンク色と緑色の塗面である。緑色の塗面は揚水発電からの出力で、広域連系後の再生可能エネルギーの出力変化率が CPS の LFC（負荷周波数制御）調整力を超えた場合に出力するものとする。

この特性による電力収支式を式①に示す。左辺が電力供給で、右辺が電力需要である。電力供給の各項は、各エリアにおける再生可能エネルギーの発電量 ($P_{pv} + P_{wp}$) と他エリアからの受電量 (P_{tp}) の合計に、石炭火力発電量 (P_{coal}) と CPS の電力量 (P_{cps})、揚水発電の放電量 (P_{ph}) を加えたものである。一方、電力需要の各項は、各エリアにおける電力消費量 (ΔP_{need})、他エリアへ送電する電力量 (ΔP_{tp}) と送電損失量 (ΔP_{loss}) の合計に、揚水発電の汲み上げ電力量 (ΔP_{ph}) を加えたものである。すべてのエリアは送電網を介して連系しているため、この式全体で電力収支を満たす必要がある。目的関数は、式②に示す経済的なコストと式③に示す CO_2 の排出量である。式②は、発電コスト (C_{gen}) とエリア間の送受電コスト (C_{tp})、エネルギー貯蔵コスト (C_{strage}) の合計が最小となる発電所の組み合わせを遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) で探求し、式③は、そのときの各発電所 (太陽光、風力、石炭火力、CPS、揚水) における CO_2 排出量の合計値を求める。

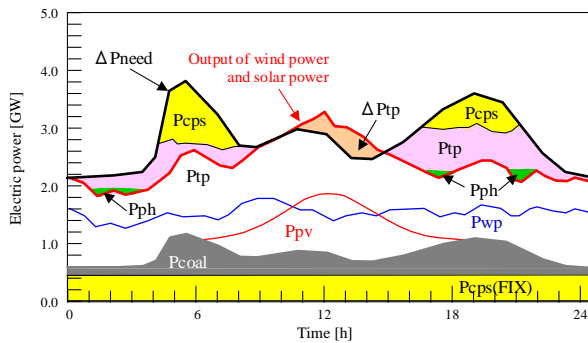


図4 電力需給の特性例

$$\sum_{i=1}^{N_{area}} \left(\sum_{j=1}^{N_{pv}} P_{pv,i,j} + \sum_{k=1}^{N_{wp}} P_{wp,i,k} + \sum_{l=1}^{N_m} P_{tp,i,l} \right) + P_{coal} + P_{cps} + P_{ph} = \sum_{i=1}^{N_{area}} \left\{ \Delta P_{need,i} + \sum_{m=1}^{N_{area}} (\Delta P_{tp,i \rightarrow m} + \Delta P_{loss,i \rightarrow m}) \right\} + \Delta P_{ph} \quad ①$$

$$F_{cost} = C_{gen,period} + C_{tp,period} + C_{storage,period} \quad ②$$

$$F_{environment} = E_{pv,period} + E_{wp,period} + E_{coal} + E_{cps} + E_{ph} \quad ③$$

アルゴリズムのフローチャートを図5に示す。広域連系の場合、再生可能エネルギーの種類と数、対象とする地域全ての1分ごとの気象データなど、大量のデータを用いることから、工学的なアプローチとしての GA (遺伝的アルゴリズム) で解析する。フローチャートの概要は、①初期データと解析条件を入力する。②染色体を生成し、それらを再生可能エネルギーの基準データに掛け合わせる。③指定した需給量の割合に応じて、石炭火力発電の出力を設定する。④サンプリング時間ごとに再生可能エネルギーの出力変化を計算し、LFC 調整できない部分を補てんするエネルギー貯蔵装置から出力する電力量を計算する。⑤再生可能エネルギーとエネルギー貯蔵装置だけでは不足する部分を補う CPS の供給量、および他エリアと融通し合う電力量を計算する。⑥再生可能エネルギーとエネルギー貯蔵装置、CPS による発電コスト、エリア間で融通する送電コストを計算する。⑦計算結果をコストの低い順に並べる。⑧適応度の高い遺伝子を残し、低い遺伝子を淘汰する。⑨答えが極値解に陥るのを防ぎ、また、多様性を保つために交叉と突然変異を与える。これらの操作を予め与えた世代数分繰り返す。再生可能エネルギーの導入容量、CPS の容量、エネルギー貯蔵量、送電コストを求め、最適解を探求する。なお、GA の主なパラメータは表1のとおりである。

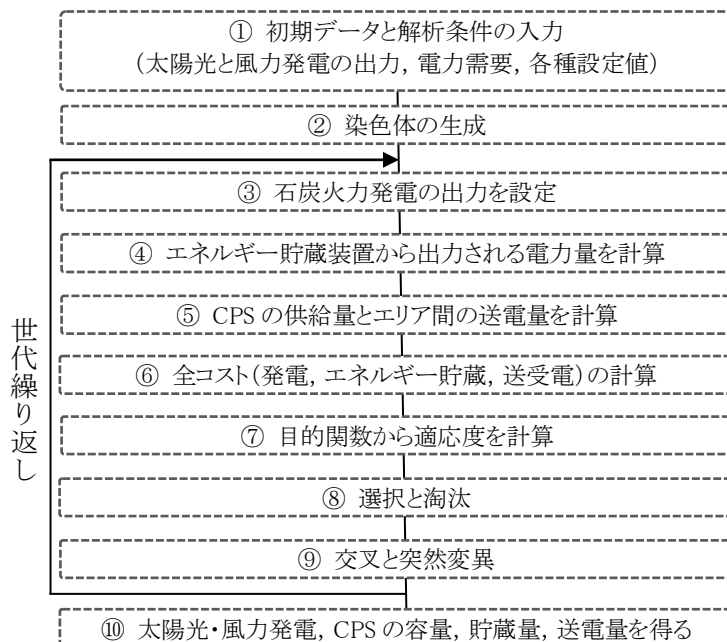


図5 アルゴリズムのフローチャート

表1 GA パラメータ

個体数	3000
染色体数 (PV, WP)	21 (7, 14)
世代数	500
サンプリング時間	1min
交叉率	80%
突然変異率	1%
選択適応度 (入替)	1位 15% 2~5位 5%
コーディング	Gray コード

(3) 北海道を対象としたケーススタディ

北海道に整備された送電線と各エリアの気象特性および人口分布を考慮して、図 6 に示す Area A~G の 7 つに分割したエリアで、A~N の 14 都市を送電線で接続した電力システムを事例とする。本解析では、全ての都市に風力発電所を設置し、都市 A, C, E, H, I, K, N の 7 ヶ所に太陽光発電所を設置する。風速と日射量の気象データは気象庁の地上気象観測 1 分値資料を用い、発電にかかるコストと CO₂ 排出量、送受電コストは、表 2 に示すとおり経済産業省や北海道電力、電力中央研究所などが公表している値を用いる。一方、電力需要は、北海道電力による電力供給量と熱負荷に関する電力需要量 (2012 年に北海道が調査したものを一般的な空気熱源ヒートポンプの電力消費に換算) の合計とし、表 3 に示す各種初期設定値も北海道電力などの公表値を用いる。これらの条件で、軽負荷日の 6 月代表日と重負荷日の 1 月代表日を解析する。なお、本解析では接続系統の事故等がないものとして、再生可能エネルギーの出力変化が LFC 調整力を超えた場合は、容量制限をしない揚水発電で対応することとする。

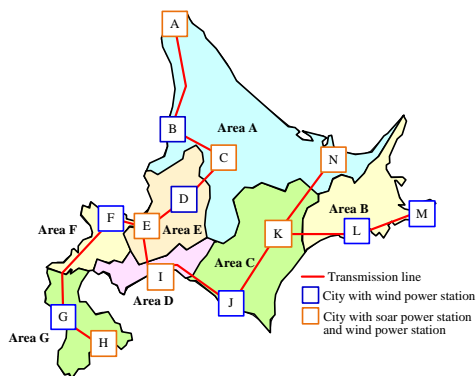


図 6 エリア分割と設備配置

表 2 発電・送受電コスト, CO₂ 排出量

発電方式	コスト	CO ₂ 排出量
風力発電	21.6 円/kWh	25 gCO ₂ /kWh
太陽光発電	21.6 円/kWh	38 gCO ₂ /kWh
CPS (石油)	30.6 円/kWh	738 gCO ₂ /kWh
石炭火力発電	12.3 円/kWh	943 gCO ₂ /kWh
揚水発電	53.1 円/kWh	11 gCO ₂ /kWh
送電	4.1 円/kWh	—

表 3 各種設定値

揚水発電の効率	70%
送電損失率	7% (平均)
CPS の待機出力	定格出力の 15%
CPS の LFC 調整力	待機出力の 10%

4. 研究成果

(1) 広域連系する複数地点の探索

南北 400km, 東西 500km の北海道を対象とした場合, 各地点間のデータが異なる傾向は, 距離として, 風速は 50km 以上, 日射量は 100km 以上と算出された。図 7 の (a)~(g) に風速の解析から選定された 14 地点のうちの 7 地点のデータを示す。これらの合計値を図 7 の (h) に示すが, 1 日の出力変動は最大地点の 30% 以下に低減されている。図 8 の (a)~(c) に日射量の解析から選定された 7 地点のうちの 3 地点のデータを示す。これらの合計値を図 8 の (d) に示すが, 1 分間の出力変動は最大値比較で 20% 以下に低減される。

また, 実証実験を行った結果, 傾向的には本解析との違いはあまりなかった。ただし, 各地の観測場所の違いによって, 風速値は 30% 以上の違いが出ていた時間帯もあった。

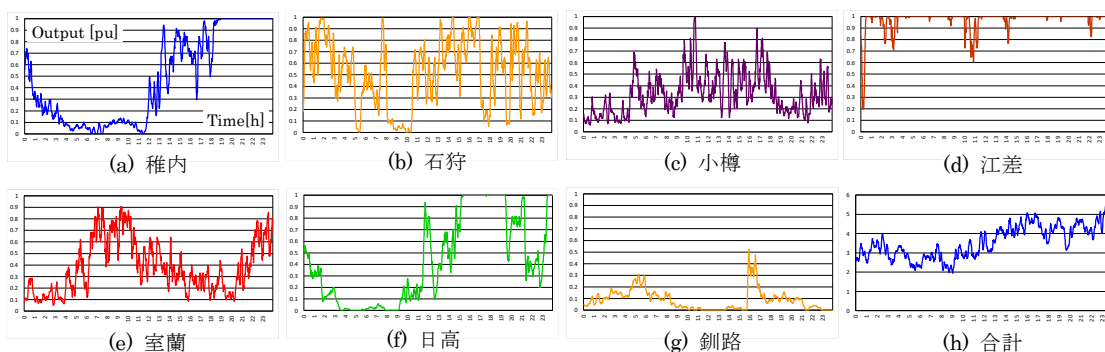


図 7 各地の風速データと合計値 (2012 年 1 月 18 日)

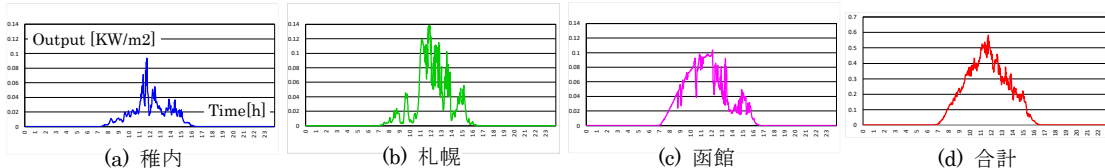


図 8 各地の日射量データと合計値 (2012 年 1 月 18 日)

(2) ケーススタディにおける解析結果

図 9 にコストと CO₂ 排出量の関係の解析結果を示す。縦軸がコストで横軸が CO₂ 排出量である。また, 各点の % 表示値は需要に対する石炭火力発電の導入比率を示す。このグラフは, 重負荷日, 軽負荷日とも比例に近い関係となり, グラフ下の近似式から, 1 gCO₂/kWh に対するコストは,

重負荷日で約 19.5 円，軽負荷日で約 22.5 円となった。この結果は，重負荷日の需要が大きい
ため（軽負荷日の 3 倍以上）である。

図 10 は，重負荷日における石炭火力発電の導入比率 0% 時の各発電設備の最適容量を求めた
解析結果である。黒太線が全需要で，赤色の塗面が太陽光発電，青色の塗面が風力発電，黄色
の塗面が CPS，緑枠白色の塗面が揚水発電の出力である。全需要に対する各設備の最大出力量
を図 11 に示す。最大需要 12.9GW に対し，風力発電と太陽光発電の最大出力は 9GW であるため，
70% の設備容量である一方，CPS の最大出力は 10.4GW で 80% 以上となり，合わせて 150% となり，
非効率的な結果となった。図 12 は，このときに必要とされる太陽光発電と風力発電の各地点の
設備容量である。軽負荷日の結果は掲載していないが，CPS の最大出力は 70% 程度となり，結論
として，冬季における時間別の熱負荷が CPS の最大出力を増加していると考えられる。

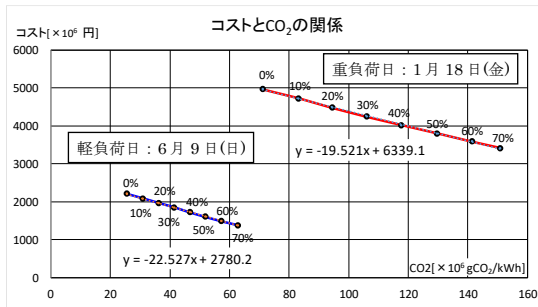


図 9 コストと CO2 排出量の関係

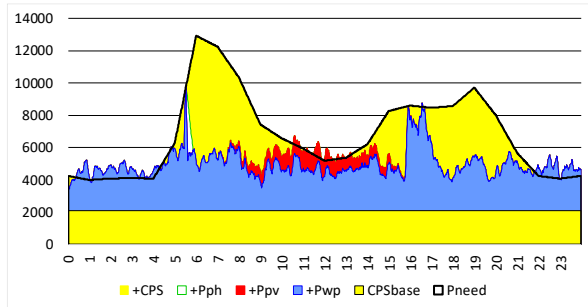


図 10 重負荷日における供給計画

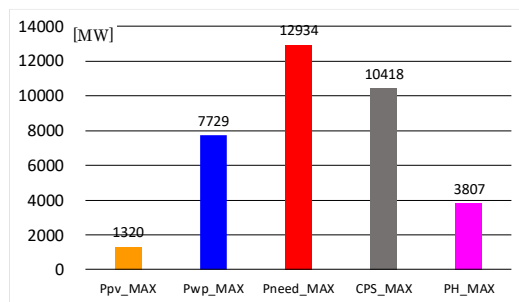


図 11 需要に対する各供給設備の出力量

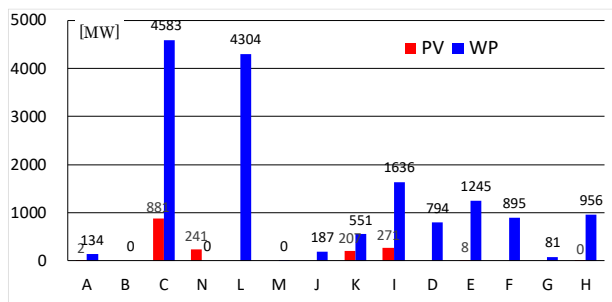


図 12 各地における供給設備の最大出力量

(3) ヒートポンプ設備を導入した 1 年間の解析結果

図 13 に各月代表日での北海道全体の電力需要パターンを示す（北海道電力，2017b）。需要の
最大値は冬季に大きく，夏季に小さく，1.5GW 程度の差がある。図 14 に各月代表日での北海道
全体の熱需要パターンを示す。需要の最大値は冬季に大きく，夏季に小さいが，時間比較にお
いて，朝と昼では 20GW 程度の差がある。そこで，冬季・重負荷日の朝晩における熱負荷（暖房
及び給湯用の熱供給）への対策として，再生可能エネルギーの余剰電力を電動ヒートポンプへ
供給し，この熱を蓄熱することで時間シフトして需要側へ供給するシステムを 1 年間解析した。
詳細は，雑誌論文①に記載の「再生可能エネルギーの広域連系による平準効果を考慮した北海
道の電力・熱供給ネットワーク」に示すが，結果として，CPS の設備容量は最大需要の 98.7%
必要となった。この原因は，再生可能エネルギーによる電力をほとんど得ることができない気
象条件の日が数日あったため，CPS がフル稼働状態になったためである。

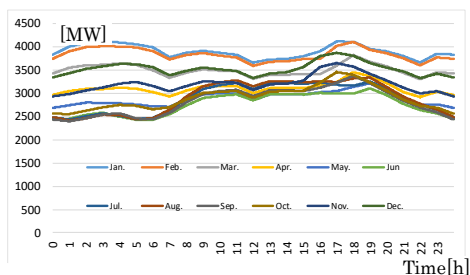


図 13 北海道の電力使用状況

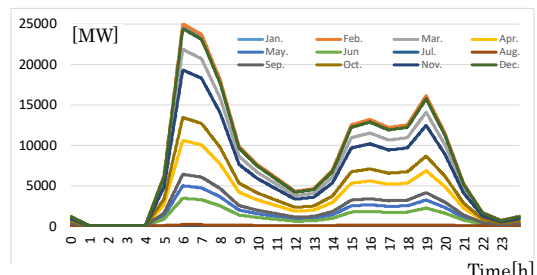


図 14 北海道全体の熱需要パターン

(4) 再生可能エネルギー由来の水素を用いた結果

これまでの調査で，再生可能エネルギーの出力を得られない日があると，CPS の設備容量を
削減できない結果となった。また，北海道では冬季の熱負荷が大きいことから，CPS の設備容
量を冬季に合わせることになるが，その結果，冬季以外における CPS の設備利用率が低下して，1
年を通した電力供給設備の効率化に偏りを生じる結果となった。

そこで，北海道における季節間の熱需要の変動と再生可能エネルギーの出力不足を，再生可
能エネルギー由来の水素燃料（H2）で調整し，再生可能エネルギーの出力変動と日間（平日と

休日) や時間 (朝晩と昼夜) の需要変動を電動ヒートポンプ (HP) と電気自動車 (EV) で調整するシステムを用いて経済性と CO2 排出量の削減効果について解析した。なお、H2 は再生可能エネルギーの安定出力部から製造する。その理由は、電解装置の設備利用率を高められることで、水素製造コストを大幅に削減できるためである。なお、水素製造原単位は 5kWh/Nm³ とした。

手順は、電力需要に「熱需要の平均値」を加えたものを需要合計として再生可能エネルギーの出力を算出し、この熱需要分の H2 を製造し、実際の熱需要の変化に応じた H2 を出力した。この解析結果を図 15 (冬季 1 月分) に示す。この図において、灰色に塗り潰された面上の側部郭の赤線が電力需要+熱需要の平均値である。下部の茶色線が PV、青線が WP の出力である。赤線からはみ出ている緑線の部分が余剰電力になり、HP や EV への出力となる。

図 16 は、最大需要に対する PV、WP、CPS、EV の最大出力である。最大需要 8.4GW に対し、CPS の最大出力は 4.4GW で 53%程度 の設備容量に削減できる。また、風力発電設備は 10.1GW、太陽光発電設備は 1.5GW 程度 の設備容量となるが、これは水素燃料を製造することも含むためである。なお、図 15 と図 16 より、H2 の設備利用率は 80%以上を確保できると推測できる。

本解析にて得られた成果は、国内外において、再生可能エネルギー由来の水素燃料を導入する際の指標となり、インパクトがある。今後は、EV 連系における動的解析にて量的検証を行う。

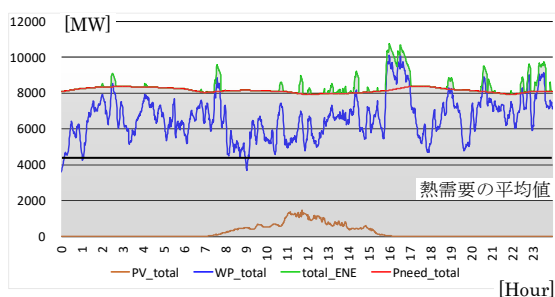


図 15 熱需要を平均値とした場合の供給計画

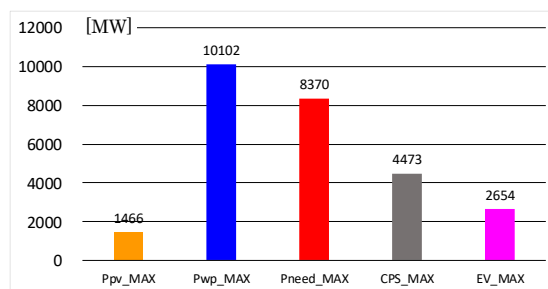


図 16 需要に対する各供給設備の出力量

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

- ① 小原伸哉, 伊藤優児, 岡田昌樹, 再生可能エネルギーの広域連系による平準効果を考慮した北海道の電力・熱供給ネットワーク, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol. 83, No. 856, pp. 17-00266-00266.
DOI:10.1299/trans. jsme. 17-00266

〔学会発表〕 (計 4 件)

- ① 岡田昌樹, 小原伸哉, 宇都木裕太, 伊藤優児, 広域連系による平滑化効果を用いた再生可能エネルギーの最適分散配置の研究, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016 年 9 月 11 日 (日) ~14 日 (水), 九州大学伊都キャンパス (福岡市)
- ② Masaki Okada, Shinya Obara, Yuji Ito, Study on the Arrangement Optimization Method of Renewable Energy using the Smoothing Effect by the Wide Area Interconnection, Power and Energy Engineering 2016, September 29-30, 2016 London, UK
- ③ 岡田昌樹, 小原伸哉, 大西輝弥, 北海道における平滑化効果を用いた再生可能エネルギーの最適分散配置の研究, 日本機械学会北海道支部第 55 回講演会, 2017 年 9 月 22 日 (金) ~23 日 (土), 釧路工業高等専門学校 (釧路市)
- ④ 岡田昌樹, 小原伸哉, 大西輝弥, 北海道における再生可能エネルギーの広域連系による平準化効果を考慮した電力需給システム, 日本機械学会 2018 年度年次大会, 2018 年 9 月 9 日 (日) ~12 日 (水), 関西大学千里山キャンパス (大阪府吹田市)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 小原 伸哉

ローマ字氏名: Shinya OBARA

所属研究機関名: 北見工業大学

部局名: 工学部

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 10342437

※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、研究者個人に帰属されます。