

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：12614

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14711

研究課題名（和文）リソース最適運用における単調性解析手法の開発

研究課題名（英文）Development of monotonicity analysis method for optimal resource operation

研究代表者

小池 雅和（KOIKE, Masakazu）

東京海洋大学・学術研究院・准教授

研究者番号：70756337

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）：本研究では太陽光発電（PV）の不確かさを適切に考慮しながら、前日に供給者側のリソース（火力機と蓄電池）の最適な運用計画を立てる問題に着目する。特徴はPVと需要の予測が信頼区間（幅）として与えられている点である。信頼区間内の無数のプロファイルに対応する無数の最適運用計画プロファイルが存在する。その運用計画の取り得る領域（幅）を厳密に求めるためには、解の単調性が成立する必要がある。本研究では、様々な問題設定において、単調性が成立するかを検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はより現実的な問題設定において、単調性が成り立つことを明らかにした点である。これにより、充放電効率が変動する場合や、火力機のランプレイト制約が問題になる場合、蓄電池が複数存在する場合、さらには、ネットワーク構造を有している場合などにも適用の道を開いた。この点において社会的意義がある。また、理論解析の結果、蓄電池の周期制約が単調性パターンに大きな影響を与えていることを示したことが学術的に意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this research, we focus on the problem of obtaining an optimal operation plan for the supplier's resources (thermal power plant and storage battery), while appropriately considering the uncertainty of photovoltaic power generation (PV). The feature is that the forecast of PV and demand is given as a confidence interval (width). There are an infinite number of optimal operating plan profiles corresponding to an infinite number of profiles within the confidence interval. In order to strictly determine the possible area (width) of the operation plan, the solution must possess the monotonicity. In this research, we verified whether monotonicity holds in various problem settings.

研究分野：制御工学

キーワード：単調性 解の候補 二次計画問題 前日計画 電力 蓄電池 不確かさ 区間解析

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

二酸化炭素排出による環境汚染が世界的に問題視されており、石炭火力発電機をいかに減らすかが日本にとって大きな課題になっている。これの解となりうるのが太陽光発電に代表される再生可能エネルギーの利用である。しかしながら、再生可能エネルギーは発電量を自由に調整することができないので、そのまま火力機の代替として使用することは難しい。そこで、考えるアプローチとしては、少量の火力機と再生可能エネルギーと蓄電池を組み合わせることである。ただし、火力機は起動するのに時間がかかるため、再生可能エネルギーの発電量と需要家の消費量(正味の需要)を前日に予測し、火力機と蓄電池の最適な運用計画を立てたうえで、運用することになる。ただし、再生可能エネルギーの発電予測の困難さに起因して正味需要予測には不確かさが大きい。そこで、最近では、正味需要予測を一本のプロファイルではなく、信頼区間(幅)として扱うのがトレンドとなっている。このような正味需要が幅で与えられたとき、信頼区間内の任意の正味需要プロファイルが当日起こりえたとしてもその正味需要プロファイルに対する火力機・蓄電池の最適な運用計画プロファイルが実現できるような最適な計画プロファイルの幅を求めたい。この幅を事前に知ることが出来れば、最適な運用が必ず実現できる。エネルギー資源の乏しい日本にとって経済的に最適な運用を担保できることは有益であり、この幅を厳密に求める手法の開発が強く求められている。この幅を厳密に求めるためには信頼区間内に存在する無限本の正味需要プロファイルに対して最適化問題を無限回解く必要があり、原理的には非常に難しい。厳密な幅を求めるために、解のパラメータに対する単調性に着目した手法が開発されている。これは最適解がパラメータに対して単調に増加もしくは減少するという性質が保存されている場合にのみ適用できる手法であるが、有限回の試行で最適解の厳密な幅を求めることができる現時点で唯一の方法である。つまり、単調性が満たされる問題か否かが解の厳密な幅を算出できるための条件であり、非常に重要になってくる。今まで、火力機の出力行制約や蓄電池のインバータ制約などの基本的な制約を考慮した場合にのみ、単調性が保存されていることが証明されている。一方、他の制約も加えた、複雑な制約の場合は、解析が困難なため単調性が保存されるかは明らかにされていない。また、単調性が保存されない可能性も十分にある。そこで、単純な制約だけではなく、複雑な制約にも対応できるような、単調性の有無を判断する画一的な解析手法が求められている。

### 2. 研究の目的

大目的は単調性の有無を判断する画一的な解析手法を開発し、単調性が保存されるような制約条件の集合を明らかにすることである。さらに、可能であれば、行列の構造によってその制約条件の集合を特徴付けする。その第一段階として、様々な問題設定における単調性パターンを解析する。

### 3. 研究の方法

本研究においては、次の5つの基礎研究に取り組んだ。

#### (1) 複数蓄電池を考慮した問題における単調性解析

従来研究では、リソースである蓄電池は一つとして問題設定しており、現実問題とは乖離していた。そこで、複数の蓄電池を供給者が有する状況に問題設定を拡張した。具体的には、第一段階として、二つの蓄電池を供給者側が有していると想定して理論解析を進めた。次に、 $n$ 個の蓄電池を供給者側が有していると想定して理論解析を進めた。

#### (2) 火力機のランプレイト制約を加えた問題における単調性解析

現状の電力の前日計画ではサンプリング周期 1 時間ごとの最適な発電出力計画を立てている。しかしながら、将来はサンプリング周期が 10 分間など、より細かい時間間隔での計画が必要となる可能性が高い。その場合、出力のランプレイト制約を考慮しなければ、実際に立てた計画を実現できない。そこで、火力機のランプレイト制約を加えた問題設定に拡張し、理論解析を進めた。

#### (3) 充放電効率における単調性解析

蓄電池は使用頻度に応じて劣化するため、充放電効率が変動する。また、将来、需要者側の複数の蓄電池を供給者側が一次的に一部を借りて、運用する可能性もある。その場合、需要家の充放電効率を全て把握するのは難しい。そのため、充放電効率にも不確かさが存在することを前提に問題設定を拡張した。

#### (4) ネットワーク構造つきの問題における単調性解析

従来研究では電力ネットワーク構造を考慮していなかった。そこで、ネットワーク構造を考慮した問題設定に拡張した。具体的には、第一段階として、二つのエリアを設け、互いに電力を融通しあえる問題設定に拡張した。

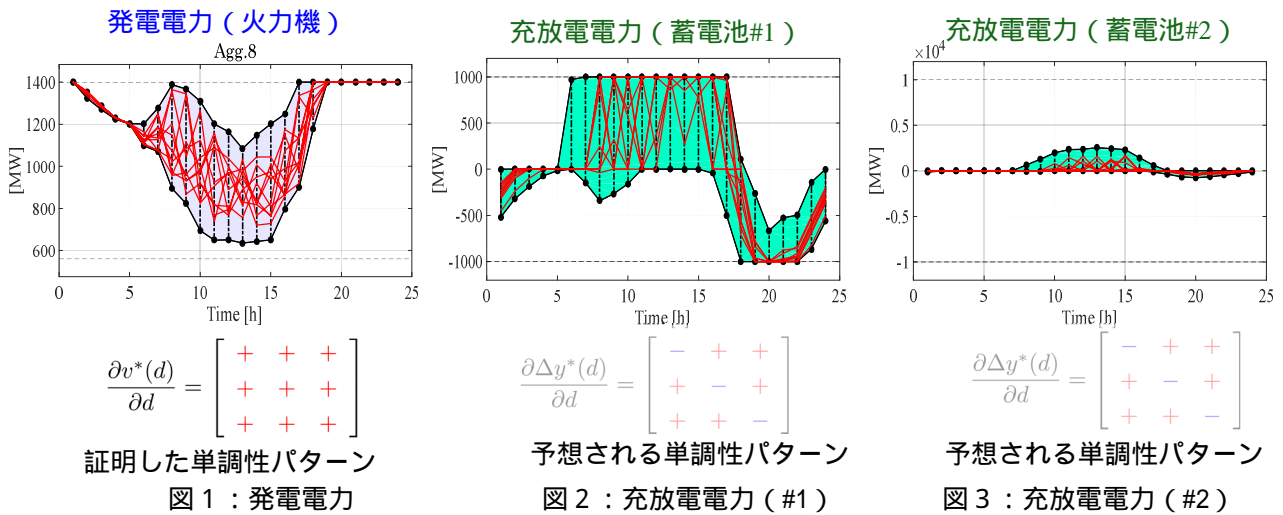
(5) 単調性が保存されるような制約不等式の共通する行列構造の抽出

(1)から(4)については、様々な需要プロファイルに対して最適化問題を複数回解き、単調性パターンを予想する。その後、KKT条件に基づく解の候補を用いて射影行列の性質を使い、予想した単調性パターンが理論的に成立するか検証する。もし、解析が困難だった場合には、M行列の性質などを使い、単調性パターンが成立するための十分条件を導く。

4. 研究成果

(1) 複数蓄電池を考慮した問題における単調性解析

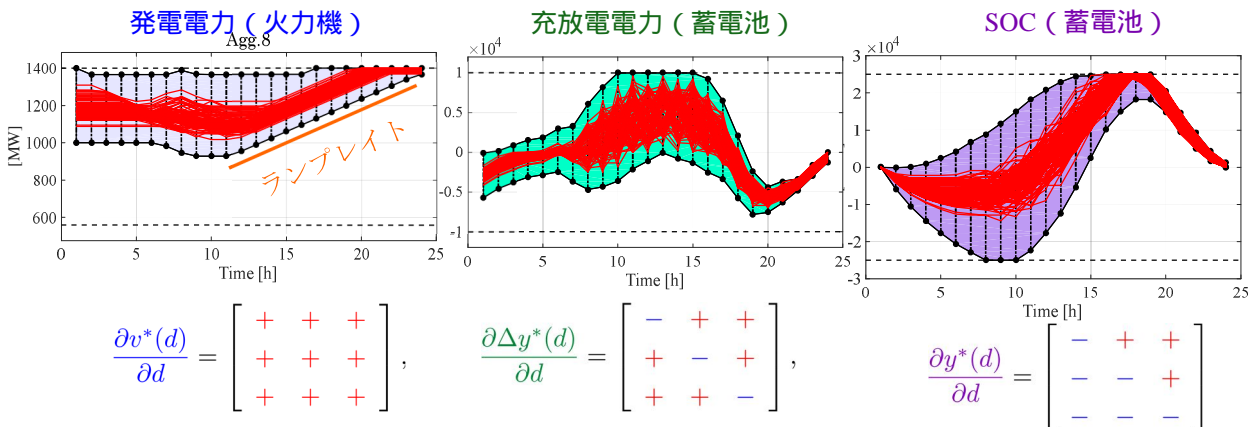
二つの蓄電池を供給者側が有していると想定して、理論解析を進めた。その結果、蓄電劣化費に比べ、火力発電機の燃料費が安いような状況では解(火力機の最適な発電電力プロファイル)の単調性(需要プロファイルに対する)が理論的に保存されること示した。その単調性パターンは正となることが分かった。つまり、「i時刻の火力機の発電電力はすべての時刻の需要に関して正の単調性を有する」ことになる。n個の蓄電池を供給者側が有しているとした場合にも、同様の結果が得られた。なお、図2から図4はある信頼区間(需要)が与えられた時の、発電電力、充放電電力(蓄電池#1)、充放電電力(#2)の最適解の幅を表示したものである。また、単調性パターンも載せた。



証明した単調性パターンは火力機の最適な発電電力プロファイルのものであり、最適な充放電電力プロファイルのものは予想されるパターンである。

(2) 火力機のランプレイト制約を加えた問題における単調性解析

既存の理論解析を用いた場合には、解の単調性を示すことはできなかった。ただし、数値シミュレーションを用いて、解の候補(16777216パターン存在する)の単調性パターンを計算した結果、単調性パターンには特定の傾向があることが分かった。それは「i時刻の火力機の発電電力はすべての時刻の需要に関して同符号の単調性を有する」である。この情報があれば、厳密な解の幅は見積もれなくても、解の幅を包含するような幅を見積もることが可能である。



なお、図2から図4はある信頼区間(需要)が与えられた時の、発電電力、充放電電力(蓄電池)

SOC (蓄電池) の最適解の幅を表示したものである。いずれも予想される単調性パターンから見積もった幅である。

### (3) 充放電効率における単調性解析

火力機の最適な発電電力の充放電効率に関する単調性を調査した。数値シミュレーションベースで様々な需要曲線において調査した結果、充放電効率は需要曲線に対する依存性が強く、一般的には単調性が保存されないことを明らかにした。図6, 図7は充放電効率を単調増加させた場合の最適な発電電力プロファイル, 最適なSOCプロファイルである。色の薄い線が充放電効率が高い時の最適解を示しており、色の濃い線が充放電効率が低い時の最適解を示している。SOCプロファイルの12時に着目すると単調性が成立していない事がわかる。

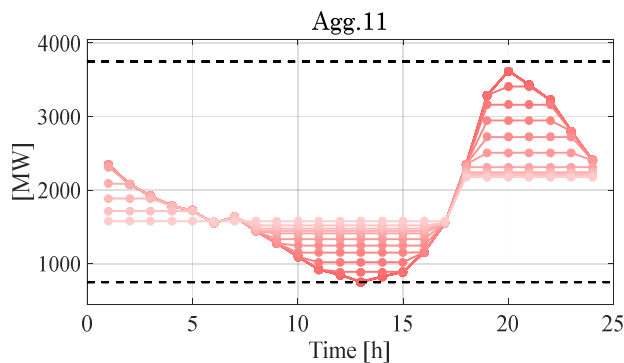


図6：発電電力

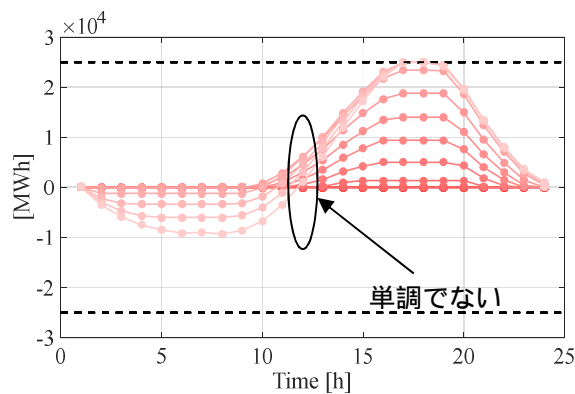


図7：SOC

### (4) ネットワーク構造つきの問題における単調性解析

二つのエリア(AとB)を有する簡単なネットワーク構造を想定し、エリアAとBで電力を融通しあうことが出来る状況で、火力機の最適な発電電力の単調性を調査した。需要に関して単調性を有するための理論的な十分条件を導出した。理論解析においては、出力制約のない特別な火力機を想定する必要があるが、メリットオーダーによる複数火力機への配分を想定すれば、現実的な問題への適応は可能であり、その出力配分によって単調性が崩れないことも証明している。図8, 図9はある信頼区間(需要#1と需要#2)が与えられた時のエリアAとエリアBの最適な発電電力プロファイルを示している。

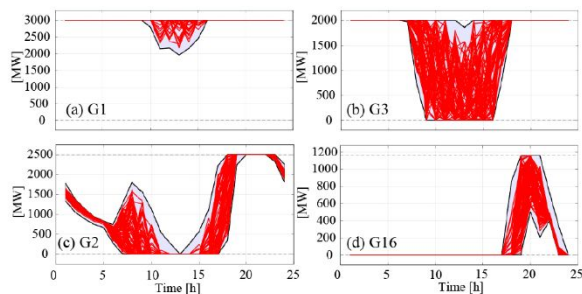


図1：エリアAの発電電力

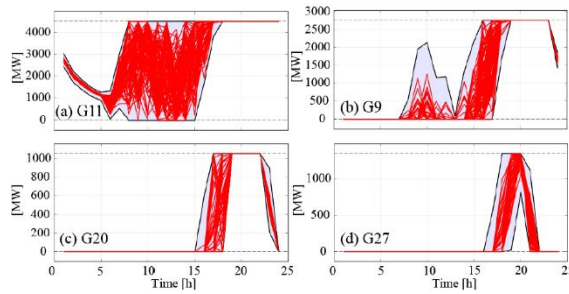


図2：エリアBの発電電力

### (5) 単調性が保存されるような制約不等式の共通する行列構造の抽出

単調性の保存に大きな影響を与える制約式がSOC(蓄電量)の周期制約であることを明らかにした。この制約は一日の始めのSOCと一日の終わりのSOCを一致させる制約条件である。この制約の存在により、解の候補のヤコビ行列内部に射影行列が現れることが分かった。これに起因して、単調性が保存されることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 小池雅和, 石崎孝幸
2. 発表標題 前日エネルギースポット市場における蓄電池普及ダイナミクスの解析
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小池雅和, 石崎孝幸
2. 発表標題 計画値同時同量市場制度の適応型ロバスト最適化モデリングによる不確かな再エネとピークシフト電源の価値解析
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masakazu Koike, Takayuki Ishizaki, Jun-ichi Imura
2. 発表標題 Monotonicity Analysis for Optimal Scheduling of Storage Batteries and Power Generators -Considering Ramp Limit of Thermal Power Plant -.
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masakazu Koike, Takayuki Ishizaki, Nacim Ramdani, Jun-ichi Imura
2. 発表標題 Monotonicity Analysis of Day-Ahead Power Scheduling of Two Storage Batteries Based on PV Interval Prediction
3. 学会等名 60th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuga Kojima, Masakazu Koike
2. 発表標題 Monotonic Analysis of Charge/discharge Efficiency of Optimal Operation Plan in Storage Battery and Thermal Power Machine
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masakazu. Koike, Yuga. Kojima, Takayuki Ishizaki
2. 発表標題 Monotonicity Analysis of Day-Ahead Power Scheduling in Power Network System
3. 学会等名 Grand Renewable Energy 2022 International Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuga Kojima, Masakazu Koike, Takayuki Ishizaki, Nacim Randani, Jun-ichi Imura
2. 発表標題 Monotonicity Analysis of the Optimal Operation Schedule Taking into Account Power Network Structure
3. 学会等名 The 22nd IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------------------------	-----------------------	----

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