

電力調達計画最適化とシミュレーションによる電力小売事業支援システムの開発

47-196692 城野 裕大

指導教員 稗方 和夫 准教授

In this study, the optimization of electricity procurement plan and the development of a business support simulation system were conducted to support the preparation of annual electricity procurement plans for electricity retailers. From the case studies, a set of Pareto-optimal annual negotiated trading plans was found by optimizing the annual negotiated trading plans. In addition, the subject experiments showed that the subjects' understanding of the optimized annual negotiated trading plan improved before and after using the business support system.

Key words: Electricity Market, Decision Support System, Optimizing, Simulator

1 緒言

日本では 2016 年から電力自由化が行われ、発電・送電設備を持つ電気事業者だけでなく、一般企業も電力取引が可能となり、電力小売事業者の小売電力市場でのシェアは増え続けている。電力は貯蔵が困難であることから、同時刻の需要と供給を一致させることが求められている。そのため電力自由化制度下では小売事業者は事前に電力の調達計画を電気事業法に規定された広域機関に提出せねばならず、実需給時の実績量と計画量の差をペナルティ（インバランス）として精算することを定められている¹⁾。

電力小売事業者の電力の調達方法には発電事業者との 1 対 1 の取引で固定価格による取引である相対取引、相場変動制の JEPX(卸市場)による取引、また、東京電力などの旧一般電気事業者との取引である常時バックアップなどがある。電力小売事業者はこれらの中から調達方法を組み合わせることで電力調達計画を作成している²⁾。

他方、近年では環境問題に対する世間の関心が高まっており、電力業界にも波及している。小売事業者、電気事業者別に CO₂ 排出係数が公表されており、環境配慮契約法などから国や独立行政法人は価格以外の多様な要素をも考慮して、温室効果ガス等の排出削減に配慮した契約の推進に努めなければならないとされている。電力小売事業者の中には、環境負荷の低い電源を使用することで、価格だけでなく環境負荷を需要家にアピールする事業者もある。

これらのことから、電力小売事業者には、電力コストを低く抑える、環境負荷の低い電力調達を行うというニーズが存在する。しかし電力需要の不確実性、電力調達手段の多さから、環境負荷が低く、かつ安価に電力を調達できるような電力調達計画の作成は難しいとされている。

本研究では電力小売事業者の年間電力調達計画作成の支援のために電力調達計画の最適化とコスト及び CO₂ 排出量を算出するシミュレーションにより業務を支援する電力小売事業支援システムの開発を行う。

2 提案手法

2.1 はじめに

本研究の提案手法では、過去のデータから収益性、環境負荷の観点で相対取引年間計画の多目的最適化を行う。また、最適化によって得られた相対取引年間計画について UI を用いてシミュレーションの経過などの中間出力、他の年間計画との比較などを表示することで、ユーザーの相対取引の年間計画への理解を深め、事業者ごとの個別の業務を支援する電力小売事業支援システムを開発する

2.2 概要

本研究の提案手法のフローチャートを Fig.1 に示す。

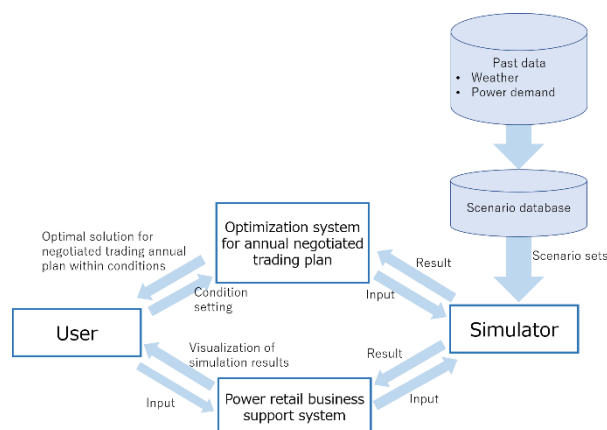


Fig.1 Flow chart of proposed method

本研究の提案手法では、まず、過去のデータから仮定の 1 年間のシナリオを複数格納するシナリオデータベースを作成する。シナリオとは参照年と天気推移が類似した模擬の 1 年間のことであり、年間のデータとして 30 分刻みの天気実績値、電力実需要量、実スポット電力価格が含まれる。電力需要、電力価格の不確実性を表現するために、複数のシナリオを準備する。

次に年間の電力調達取引のシミュレータを構築する。シミュレータは相対取引年間計画を入力とし、その計画に沿って 1 年間取引を行った場合のシミュレーションを行う。その結果として年間の平均電力調達コストと平均 CO₂ 排出係数を出力する。シミュレーションに用いる 1 年間の電力需要、電力価格データはシナリオデータベースに格納されたシナリオとする。

次に、相対取引年間計画の最適化システムを開発する。相対取引年間計画の最適化システムではユーザーが相対取引の条件を設定する。相対取引の条件とは電力単価、CO₂ 排出係数などの各社との相対取引の契約条件のことである。相対取引年間計画の最適化システムはシミュレータに相対取引年間計画を入力し、シミュレータから返ってくるシミュレーション結果を基に設定された条件下での相対取引年間計画の最適解を探索する。

次に電力小売事業支援システムの開発を行う。電力小売事業支援システムではシミュレーションの可視化により、相対取引年間計画の最適化システムにより発見された最適解へのユーザーの理解度を向上させる。ユーザーは電力小売事業支援システムに相対取引年間計画を入力する。電力小売事業支援システムはシミュレータに相対取引年間計画を入力し、シミュレータから返ってくるシミュレーション結果を基にユーザーへの出力として、入力された相対

取引年間計画で電力調達を行ったシミュレーション結果の電力コスト、CO₂ 排出係数や、各月、各日の電力需要量や、電力コストなどの中間出力をUIに表示する。また、最適解の相対取引年間計画で電力調達を行ったシミュレーション結果も事前に格納しており、ユーザーは、自分の入力した相対取引年間計画のシミュレーション結果と最適解のシミュレーション結果を見比べることができる。

2.3 シナリオデータベース

シナリオデータベース構築の手順を Fig.2 に示す。

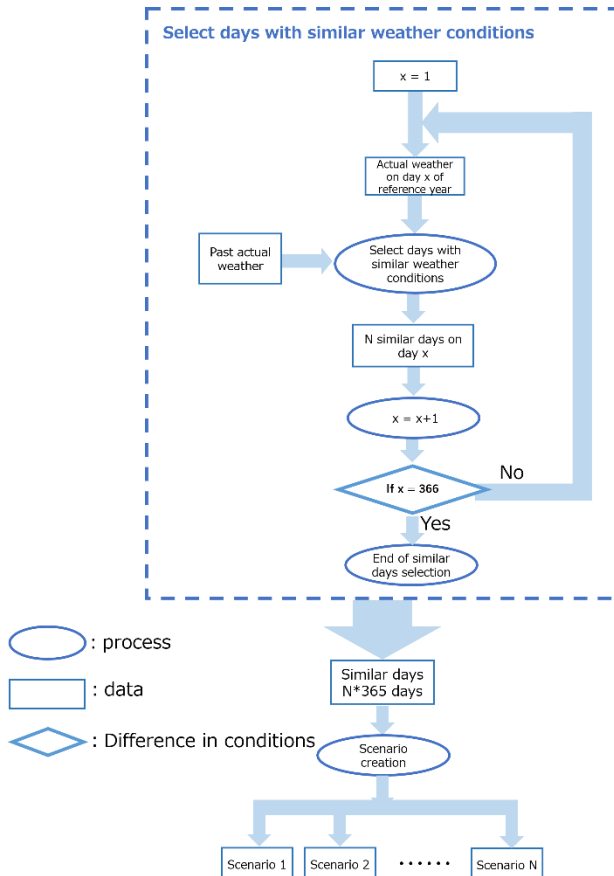


Fig.2 Flow chart of Scenario creation

シナリオデータベース構築では、初めにシナリオ数 N と参照年を決め、その年と 1 日ごとの天気推移が類似した 1 年分のデータを作成する。具体的には、参照年のある 1 日と天気の類似した日を N 日分選択する。これを参照年の 1 月 1 日から 12 月 31 日まで行う。次に選択した類似日をランダムに 365 日分つなげたものを仮想のシナリオとして出力する。シナリオは N 個出力される。

2.4 シミュレータ

2.4.1 概要

シミュレータは、相対取引の年間計画を入力とし、その計画に沿って、1 年間取引を行った場合のシミュレーションを行う、その結果として年間の平均電力調達コストと平均 CO₂ 排出係数を出力する。

2.4.2 シミュレータ計算手順

Fig.3 にシミュレータ内の計算の手順を示す。

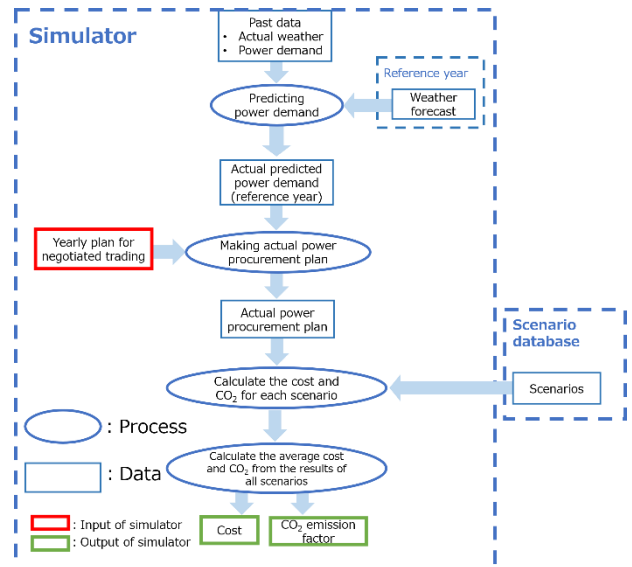


Fig.3 Simulator

シミュレータでは、まず、参照年の年間の電力需要量の予測を行う。電力需要量の予測では過去のデータから機械学習により需要予測モデルを学習し³⁾、そのモデルを用いて参照年の電力需要量の予測を行う。次に、入力された相対取引年間計画と、予測された電力需要量から年間電力調達計画を作成する。最後にシナリオデータベースに格納された各シナリオに対して、年間電力調達計画に沿って電力調達のシミュレーションを行い、年間平均電力コスト、年間平均 CO₂ 排出係数を算出してシミュレータの出力とする。

2.4.3 相対取引年間計画

相対取引年間計画とは各月の昼夜毎に毎時何万 kw をどこの会社との相対取引によって調達するかを定めたものである。Table.1 に年間計画の例を示す。

Table.1 Actual Negotiated trading plan

	Time	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
A	Day	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	Night	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
B	Day	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	Night	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
C	Day	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	Night	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
D	Day	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	Night	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

Table.1 の例では相対取引を 4 社(A,B,C,D)から選択して電力を調達すると仮定したときの相対取引年間計画を示している。

2.5 相対取引年間計画の最適化システム

2.5.1 概要

相対取引年間計画の最適化システムではユーザーが相対取引の条件を設定する。相対取引の条件とは電力単価、CO₂ 排出係数などの各社との相対取引の契約条件のことである。相対取引年間計画の最適化システムはシミュレータに相対取引年間計画を入力し、シミュレータから返ってくるシミュレーション結果を基に設定された条件下での相対取引年間計画の最適解を探索する。

2.5.2 定式化

相対取引年間計画の最適化は各月の昼夜ごとの相対取引比率の組合せ最適化問題とみなすことができる。この問題は式(1),(2)において C, E が最適な値をとるような X を求めることに等しい。 $F(x), G(x)$ は x を入力としたシミュレーションを、 X は相対取引年間計画を示す。 C は年間の平均電力コストを、 E は年間の平均 CO_2 排出係数を示す。目的変数は C, E の 2 軸を持つため、目標計画法で多目的最適化を行う⁴⁾。また、探索は一定以上改善しなくなった時点で打ち切りとする。

$$C = F(X) \quad (1)$$

$$E = G(X) \quad (2)$$

2.6 電力小売事業支援システム

2.6.1 概要

相対取引の年間計画は多くの情報を含むため、人間が解釈することが難しい。そのため、UI によるシミュレーションの可視化により最適化された相対取引年間計画へのユーザーの理解を深めるツールとして、電力小売事業支援システムを開発する。

ユーザーは電力小売事業支援システムに相対取引年間計画を入力する。電力小売事業支援システムはシミュレータに相対取引年間計画を入力し、シミュレータから返ってくるシミュレーション結果を基にユーザーへの出力として、入力された相対取引年間計画で電力調達を行ったシミュレーション結果の電力コスト、 CO_2 排出量、各月、各日の電力需要量などの中間出力を UI に表示する。また、最適解の相対取引年間計画で電力調達を行ったシミュレーション結果も事前に格納しており、ユーザーは自分の入力した相対取引年間計画のシミュレーション結果と最適解のシミュレーション結果を比較することができる。

2.6.2 入力の UI

電力小売事業支援システムの入力画面を Fig.4 に示す。



Fig.4 Input UI (Negotiated trading annual list)

スライダーを用いてシミュレータの入力である各社、各月、昼夜ごとの調達比率を決定し、Calculation ボタンを押すことでシミュレータの出力である、平均年間電力コスト、平均 CO_2 排出係数を表示する。

2.6.3 出力の UI

電力小売事業支援システムの出力画面を Fig.5 に示す。



Fig.5 UI of simulation output (predicted and actual)

出力の UI では、シミュレータの最終出力として平均年

間電力コスト、平均 CO_2 総排出量の数値を表示する。また、入力タブに応じたグラフを表示する。

グラフに出力するデータの種別としては、シミュレータの中間出力、もしくは参照情報として、電力コスト、各社ごとの調達量、 CO_2 排出係数、インバランス損失額、実電力需要、電力価格、気温、湿度、降雨量、降雪量を表示できる。グラフに出力するデータの期間としては、1-12月の各月、1月1日-12月31日の各日を表示できる。

また、UI 上でのシミュレータの入力を逐次変化させて出力結果を比較するという用途を考慮して、過去の出力結果との比較のグラフを表示する。過去の出力結果との比較のグラフを表示する UI を Fig.6 に示す。

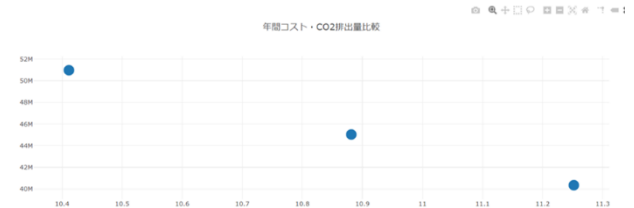


Fig.6 UI for tradeoff between cost and co2 emission

3 ケーススタディ

3.1 概要

本章では、ケーススタディとして、まずシナリオデータベースとシミュレータを構築した。その後、設定された条件の下で相対取引年間計画の最適化を行った。また、電力小売事業支援システムによる最適化された年間計画の可視化を行い、可視化による理解度の向上について評価した。

3.2 シナリオデータベース・シミュレータ構築

東京電力を仮定の電力小売事業者とし、電力調達を外部からの購入により賄っていると仮定してシミュレータを構築した。また、シナリオ作成、シミュレーションの参照年は 2019 年、シナリオの個数は 4 個とした。

相対取引の取引先は 4 社と仮定し Table.2 のように取引条件を設定した⁵⁾。また、JEPX の CO_2 排出係数は 4860[kg/10000kwh]とした。単価の安いもののほど、 CO_2 排出係数は高くなっている。

Table.2 Negotiated trading list

	Price [yen/kwh]	CO_2 emission factor [kg/10000kwh]	Power source
A	12	9430	Thermal power generation (coal)
B	14	4740	Thermal power generation (LNG)
C	17	380	Solar power generation
D	21	260	Water power generation

3.3 相対取引年間計画の最適化

3.3.1 探索の条件設定

本ケーススタディでは、目標計画法の目標の設定について、2つの目的関数、平均年間電力コストと平均年間 CO_2 排出係数をそれぞれ 0 に近づけるように探索を行った。

3.3.2 結果

探索の結果のプロットを Fig. 5 1 に示す。

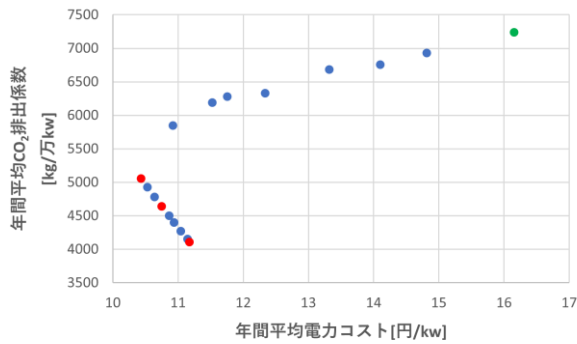


Fig.7 Result of optimization search

縦軸は平均年間 CO₂ 排出係数、横軸は平均年間電力コストを示す。グラフ内の緑のプロットが探索開始のプロットを示す。(10.4,5200)から(11.2,4100)にかけてのプロット群はそれぞれの結果に比べて 2 つの目的関数が共に優れるようなプロットは存在しないが、一つの目的関数を改善しようとするとは他方の目的関数を改悪せざるを得ないような、パレート最適解の集合となっている。このことから、多目的最適化により、CO₂ 排出係数、電力コストをトレードオフとした、複数の最適な相対取引の年間計画があると言える。

また、パレート最適解集合の中から、代表的な点として Fig.7 の赤いプロットを抜き出した表を Table.3 に示す。

Table.3 Pareto optimal solutions

	Annual electricity cost [yen/kwh]	Average annual CO ₂ emission factor [kg/10000kwh]
Optimal solution 1	10.43	5058
Optimal solution 2	10.75	4641
Optimal solution 3	11.17	4108

それぞれの結果は CO₂ 総排出量、電力コストをトレードオフとしていることが確認された。

3.4 電力小売事業支援システムの検証

3.4.1 概要

電力小売事業支援システムによる、3.3 の最適化によって得られた最適解へのユーザーの理解度の向上を検証する。具体的には、数名の被験者に協力してもらい、電力小売事業支援システムを使う前と後で最適解の相対取引年間計画について理解度が向上したかどうかの評価を行う。

3.4.2 評価手順

本実験では 2 名のシステムエンジニア、2 名の大学院生に協力のもと実験を行った。実験の手順としては、電力小売業界に関する知識、電力調達業務に関する知識を簡単に説明した後、本研究で行った最適化の説明と、得られた最適解の提示を行い、その時点での最適解の相対取引年間計画の理解度について 5 段階評価(1:分からない-5:よく分かる)で質問した。次に、電力小売事業支援システムの概要と使い方について、簡単にデモンストレーションを交えてレクチャーした後、実際に電力小売事業支援システムを操作してもらい、シミュレーション結果などについて確認してもらった。その後に再度最適解の相対取引年間計画の理解度について 5 段階評価で質問した。

3.4.3 結果

実験の結果を Table.4 に示す。

Table.2 Negotiated trading list

被験者	アンケート1	アンケート2
被験者1 (システムエンジニア)	2	4
被験者2 (システムエンジニア)	2	3
被験者3	1	3
被験者4	1	2

各被験者とも電力小売事業支援システムの使用後に、相対取引年間計画の最適解に対する理解度が向上しているというアンケート結果が得られた。また、理解度が向上した要因としては、年間コスト・CO₂ 排出係数の比較のグラフによる最適解同士の結果を確認できたこと、グラフの操作による直観的な理解ができたことが挙げられた。

4 結論

本研究では電力小売事業者の年間電力調達計画作成の支援を目的として電力調達計画に対するコスト及び CO₂ 排出量を算出するシミュレータを構築し、過去のデータによる電力需要の不確実性を想定した条件下での相対取引年間計画の最適化を行った。また、業務を支援するシミュレーションシステムとして、最適化された計画へのユーザーの理解度をシミュレーションの可視化により向上させる電力小売事業支援システムを開発した。

ケーススタディとして東京電力を対象としたシミュレータの構築を行った。シミュレータを用いてそれぞれ違う電力コスト、CO₂ 排出係数を持つ 4 社からの相対取引年間計画の最適化を行い、パレート最適な相対取引年間計画の集合を発見した。その後被験者実験により、電力小売事業支援システムを使う前後で最適化された相対取引年間計画への被験者の理解度が向上するというアンケート結果を得られた。ケーススタディの結果から提案手法が有効であることが分かった。

文献

- 1) 資源エネルギー庁:インバランス料金の当面の見直しについて 2019.
- 2) 日本卸売電力取引所取引ガイド.
- 3) Taehoon Kim, Dongeun Lee, Jaesik Choi, C. Anna Spurlock, Alex Sim, Annika Todd, Kesheng Wu : Predicting Baseline for Analysis of Electricity Pricing, International Journal of Big Data Intelligence, Vol. 5, No. 1-2, pp. 3-20, 2018.
- 4) 玉木久,森正勝,荒木光彦: 遺伝アルゴリズムを用いたパレート最適解集合の生成法, 計測自動制御学会論文集 Vol. 31, No. 8, pp1185-1192 1995
- 5) 電力中央研究所 | 日本における発電技術のライフサイクル CO₂ 排出量総合評価 平成 28 年 7 月