

エネルギーシステム構成・運用最適化のための 数理モデルとアルゴリズム

Mathematical Optimization Model and Algorithm for Energy System Configuration and Operation

小 熊 祐 司 技術開発本部技術基盤センター数理工学グループ 博士(工学)

稲 村 彰 信 技術開発本部プロジェクトセンター CO2フリープロジェクトグループ 主査

本稿では、工場やプラントなどエネルギーを大量に消費する施設に対し、エネルギーコスト低減の観点から、蓄電池や太陽光発電システム、自家発電機などを組み合わせた最適なエネルギーシステムの構成とその運用方法を求める最適化手法を提案する。エネルギーシステムの構成・運用の検討においては、導入候補となる個々のエネルギー設備の性能やコストのみならず、各設備の長所を最大限に活かしつつ短所を互いに補う設備の組合せを考慮する必要があるため、その最適化は容易ではない。さらに近年では再生可能エネルギーの利用が活発であり、選択肢が多様化しつつあることから、最適なエネルギーシステムの構成や運用の決定は今後ますます複雑なものとなっていくと予想される。この課題に対して本稿では、さまざまな案件に利用できる最適化システムとしての実装・提供を意識した、エネルギーシステム構成・運用最適化のための汎用性の高い数理モデルと最適化アルゴリズムを提案する。

This paper proposes an optimization method to find an optimal configuration and operation of energy system for facilities including factories and plants that consume energy in large quantities from the viewpoint of energy cost reduction with combining batteries, photovoltaic generation systems, and private power generators. It is not easy to optimize configuration and operation of energy systems since it is necessary to consider synergistic and complementary effects between pieces of energy equipment as well as the performance and the cost of the individual equipment. In addition to this, recent lively utilization of renewable energies increases options of configuration and it causes the problem to be more complicated. For this issue, we propose a general-purpose mathematical model and algorithm for optimization of energy system configuration and operation that considers implementation and provision as an optimization system that can be used for various projects.

1. 緒 言

工場やプラントなど、エネルギーを大量に消費する施設においては、エネルギーコスト低減や環境負荷低減の観点から、独自に発電機や蓄電池、太陽光発電システムなどからなるエネルギーシステムを構成・運用する例がしばしばみられる。エネルギーシステムの構成・運用の検討においては、導入候補となる個々のエネルギー設備の性能やコストのみならず、各設備の長所を最大限に活かしつつ短所を互いに補う設備の組合せを考慮する必要があるため、その最適化は容易ではない。さらに近年では再生可能エネルギーの利用が活発であり⁽¹⁾、選択肢が多様化しつつあることから、最適なエネルギーシステムの構成や運用の決定は今後ますます複雑となっていくと予想される。

エネルギーシステムの構成や運用についての最適化に関する研究は膨大であり、詳細についてはサーベイ論文に譲ることとする。例えば、目的関数や制約条件、定式化などの観点から整理されたものとして参考文献(2)が、エネ

ルギー設備のモデリングについては参考文献(3)が詳しい。運用最適化という観点では、エネルギーとして電力、設備として蓄電池に特化したもの⁽⁴⁾、⁽⁵⁾から、多様なエネルギー・設備を考慮したもの⁽⁶⁾など多岐にわたる。設備の運用方法を考慮した構成最適化についても、求解性とモデル精度を両立した手法が提案されている⁽⁷⁾、⁽⁸⁾。

一方で、実務としてのエネルギーシステムの設計担当者は必ずしも数理最適化の知見を有する専門家とは限らないため、設計担当者自身が案件に応じて直接モデリングやアルゴリズム実装を行うことは現実的ではない。一連の最適化技術は、エネルギー設備の効率値、コスト情報といった値を入力すれば最適解が得られるような最適化システムとして提供されることが望ましい。この点に着目した検討は数少ない。

この課題に対して本稿では、さまざまな案件に利用できる最適化システムとしての実装・提供を意識した、汎用性の高いエネルギーシステム構成・運用最適化の数理モデルと、それを効率的に解くためのアルゴリズムを提案する。

これらに基づく最適化システムを用いることで、案件に応じたモデル・アルゴリズム開発が不要となり、エネルギーシステム構成・運用最適化に関する検討の効率向上が期待できる。また新しい再生可能エネルギーや、それを利用したエネルギー設備が登場した場合でも、直ちにこれらを効果的に組み合わせた提案が可能となる。

本稿で提案するモデルは、電力、熱、ガス、燃料、CO₂など、エネルギー設備の入出力となる物質やエネルギーをリソースと総称したうえで、さまざまな種類のエネルギー設備の特性を、リソースの入出力特性に関する数値パラメータとして表現することを特徴としている。これにより、パラメータの数値を変えることで、新しい設備やリソース種類にも容易に対応できる。また、パラメータの位置付けの明快さゆえ、最適化システムの利用に際して必ずしも数理最適化の知識を要求しないことも提案モデルの特長の一つである。

提案モデルは混合整数計画問題として定式化される。小規模な問題例であれば数理計画ソルバで解くことも可能であるが、汎用モデルとしての性質上、比較的大規模な問題となる場合もある。そこで大規模な問題例に対する近似解法として、Benders 分解法⁽⁹⁾に基づく、問題構造の特徴を利用したアルゴリズムを提案する。

本稿の構成は以下のとおりである。2章では、本稿で議論するエネルギーシステム構成・運用最適化問題の概要について述べたのち、3章では最適化の用途や求められる精度、拡張性など、最適化技術としての要件を明確にしよう。4章では、最適化問題の定式化を行う。4章では、3章で定式

化した最適化問題の構造について考察し、Benders 分解法に基づく効率的な最適化アルゴリズムを設計する。5章では本稿で提案したモデル・アルゴリズムに基づく最適化システムについて述べつつ、これを利用したエネルギーシステム構成・運用最適化の計算例を示す。最後に6章では本稿の内容をまとめ、今後の課題について述べる。

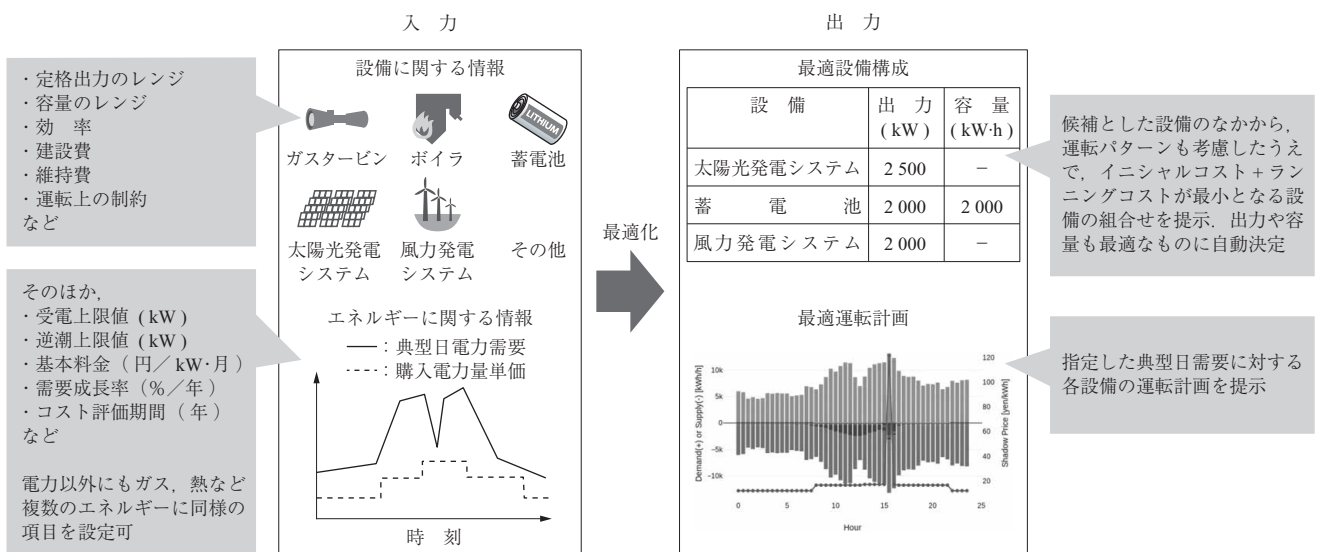
2. エネルギーシステム構成・運用最適化問題

工場やプラントなどを対象に、電力や熱などのエネルギー需要に対してコスト最適化を実現するエネルギーシステムの構成やその運用方法を求めることを考える。第1図に、本最適化問題の概要を示す。エネルギーシステム構成・運用の最適化に際して、定格出力・容量のレンジ、効率、建設費、維持費といった導入候補設備に関する情報や、典型日の需要パターンやその年間成長率、コストといったエネルギーに関する情報が利用可能であるとする。本稿で議論する最適化は、上述の情報を所与としたもとの、イニシャルコストと所定年数のランニングコストの和を最小化するエネルギーシステムの構成（候補設備の導入要否や出力・容量）を、典型日に対する運転計画を考慮したうえで求める問題である。

3. モデリング

3.1 要件定義

本最適化は、エネルギーシステムの設計初期段階において、想定エネルギー需要に対する最適なエネルギー設備の種類や規模感・コストの概算に利用するものとし、以下の



第1図 エネルギーシステム構成・運用最適化問題 概念図
Fig. 1 Conceptual drawing of energy system configuration and operation optimization problem

4点を要件とする。

- (1) 多様な設備やエネルギー（電力、熱、水素など）を考慮でき、またこれらの新規追加時、プログラムの修正を必要としない高い拡張性を備えること
- (2) 多様な制約条件（契約電力、CO₂排出量、設備運転時間帯など）を考慮できること
- (3) 高速に計算可能であること（数秒～1分程度）
- (4) 得られた解に対する説明が可能であること

本稿では、これらの要件を考慮し、本問題を混合整数計画問題として定式化する。これにより、高い拡張性を実現でき、かつ問題構造を利用したアルゴリズムの設計により高速な最適化計算が可能となる。また(4)について、適当な双対問題を定義して解くことで、需要の不確実性に対する感度や、クリティカルとなっている制約条件とそのコストへの寄与など、解の要点に関する情報を得ることもできる。混合整数計画問題としての具体的な定式化については3.3節に譲る。

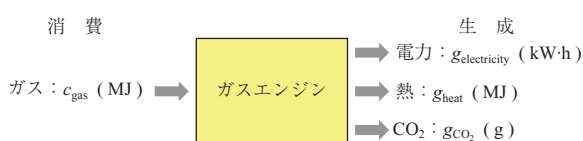
3.2 計算モデルの基本的な考え方

3.2.1 リソースバランス

本稿では、3.1節で掲げた要件のうち、拡張性に配慮するため、電力、熱、ガス、燃料、CO₂など、エネルギー設備の入出力となる物質やエネルギーをリソースと総称したうえで、エネルギー設備を

- (1) コンバータ：リソースをほかのリソースに変換するもの（ガスタービン、水電解装置など）
- (2) ストレージ：リソースを蓄えるもの（蓄電池など）
- (3) 再生可能エネルギー：入力なしにリソースを生成するもの（太陽光発電システムなど）

の3種類に分類しつつ、各設備の特性を数値パラメータとして表現するモデルを採用する。例えばガスエンジンはガスというリソースを消費し、電力、熱、CO₂というリソースを生成する設備とみなし、その特性を、単位出力で単位時間運転したときのガス消費量と電力、熱、CO₂の生成量という数値データで表現する。ガスエンジンを例とした具体的な設備モデリングの概念図を第2図に示す。第2



第2図 エネルギー設備モデリングの概念図
Fig. 2 Conceptual drawing of modeling of energy equipment

図におけるガスの消費量 c_{gas} と、電力、熱、CO₂の生成量 $g_{electricity}$, g_{heat} , g_{CO_2} の数字がエネルギー設備としてのガスエンジンの特性を定義するものとなる。このようなモデルを採用することにより、数値パラメータを変更することで、新しい設備やリソースにも容易に対応できるという利点がある。

エネルギーシステムの運転では、各リソースに対し、各時間断面で、

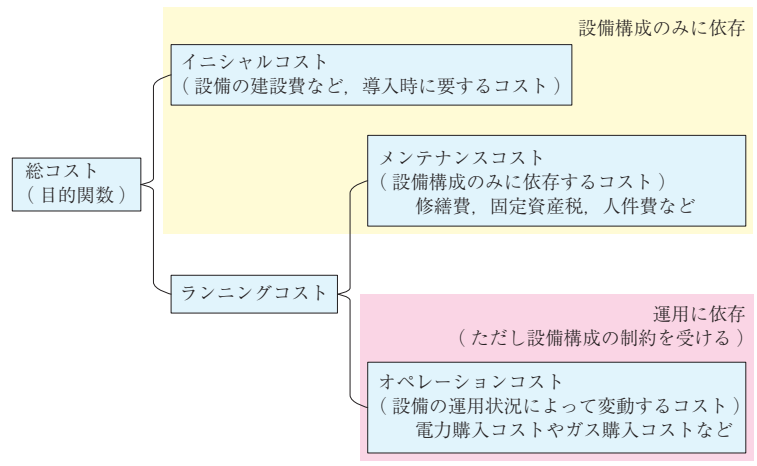
$$\begin{aligned} & (\text{システム外部からの入力}) + (\text{設備による生成}) \\ & = (\text{設備による消費}) + (\text{需要}) + (\text{システム外部} \\ & \quad \text{への出力}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

の釣り合い（バランス）の式が成立している。(1)式は最適化問題において等式制約条件として記述される。提案モデルでは、エネルギーシステムのオペレーションコストはこれらのうち、システム外からの入力とシステム外への出力の多寡によって決まるものとする。前者に相当するものとして、例えば電力会社からの電力購入コストやガス会社からのガス購入コスト、後者に相当するものとして、事業所外へのCO₂排出コストなどが挙げられる。入力や出力は規定値を超えるとペナルティのコストが発生する場合や、運転中の入出力最大値に応じたコストが掛かる場合もある。本稿では議論を簡単にするため、これらは数理モデルのなかで考慮されていないが、いずれも本稿の数理モデルとの簡単な拡張で反映させることが可能であり、アルゴリズムとしても本稿で提案するものをそのまま適用可能である。

3.2.2 コスト

本最適化では、導入したエネルギー設備のインisialコスト、および適当な年数分のランニングコストの総和を目的関数とし、その最小化を考える。ここでインisialコストは、例えば設備の建設費などに相当する。ランニングコストは、さらにメンテナンスコストとオペレーションコストに分類して考える。前者は、設備を保有している限り、その運用状況によらず計上されるものであり、例えば修繕費、固定資産税、人件費などが該当する。後者は設備の運転状況によって変動し得るもので、3.2節で述べたとおりエネルギーシステムのシステム外からの入力とシステム外への出力により定まるものであり、電力購入コストやガス購入コストが該当する。

第3図に、上述の議論をまとめたコスト内訳の概念図を示す。第3図に記載のとおり、インisialコストとメ



第3図 コスト構造の概念図
Fig. 3 Conceptual drawing of cost structure

メンテナンスコストは設備構成のみに依存し、オペレーションコストは（導入された設備のもとでの）各設備の運転状況に依存する。4章では、このコスト分類と依存関係を利用して効率的な最適化アルゴリズムを設計する。

3.3 定式化

3.2節の考え方にに基づき、エネルギーシステム構成・運用最適化問題を以下の混合整数計画問題として定式化する。

$$(P): \underset{x, y, z, p, p^+, p^-, q_0, h, s^+, s^-}{\text{minimize}} f^1(x, y, z) + \sum_{k \in \mathcal{K}} f_k^R(x, y, z, s_k^+, s_k^-) \dots (2)$$

subject to

$$x_i^{\min} z_i \leq x_i \leq x_i^{\max} z_i \quad (i \in \mathcal{E}), \dots (3)$$

$$y_i^{\min} z_i \leq y_i \leq y_i^{\max} z_i \quad (i \in \mathcal{S}), \dots (4)$$

$$r_{il}^{\min p} x_i - (1 - h_{ikl}) x_i^{\max} \leq p_{ikl} \leq r_{il}^{\max p} x_i \quad (i \in \mathcal{C}, k \in \mathcal{K}, l \in \mathcal{L}), \dots (5)$$

$$0 \leq p_{ikl} \leq r_{il}^{\max p} x_i^{\max} h_{ikl} \quad (i \in \mathcal{C}, k \in \mathcal{K}, l \in \mathcal{L}), \dots (6)$$

$$0 \leq p_{ikl}^+ \leq r_{il}^{\max p} x_i \quad (i \in \mathcal{S}, k \in \mathcal{K}, l \in \mathcal{L}), \dots (7)$$

$$0 \leq p_{ikl}^- \leq r_{il}^{\max p} x_i \quad (i \in \mathcal{S}, k \in \mathcal{K}, l \in \mathcal{L}), \dots (8)$$

$$p_{ikl}^+ \leq r_{il}^{\max p} x_i^{\max} h_{ikl} \quad (i \in \mathcal{S}, k \in \mathcal{K}, l \in \mathcal{L}), \dots (9)$$

$$p_{ikl}^- \leq r_{il}^{\max p} x_i^{\max} (1 - h_{ikl}) \quad (i \in \mathcal{S}, k \in \mathcal{K}, l \in \mathcal{L}), \dots (10)$$

$$r_{il}^{\min q} y_i \leq q_{ikl} (p_{ik}^+, p_{ik}^-, q_{ik0}) \leq r_{il}^{\max q} y_i \quad (i \in \mathcal{S}, k \in \mathcal{K}, l \in \mathcal{L}), \dots (11)$$

$$q_{ik|L-1} (p_{ik}^+, p_{ik}^-, q_{ik0}) = q_{ik0} \quad (i \in \mathcal{S}, k \in \mathcal{K}), \dots (12)$$

$$0 \leq s_{nkl}^+ \leq s_n^{\max} \quad (n \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K}, l \in \mathcal{L}), \dots (13)$$

$$0 \leq s_{nkl}^- \leq s_n^{\max} \quad (n \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K}, l \in \mathcal{L}), \dots (14)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{C}} g_{in} p_{ikl} + \sum_{i \in \mathcal{S}} g_{in} p_{ikl}^- + \sum_{i \in \mathcal{R}} g_{in} \bar{r}_{il} x_i + s_{nkl}^- = \sum_{i \in \mathcal{C}} c_{in} p_{ikl} + \sum_{i \in \mathcal{S}} c_{in} p_{ikl}^+ + s_{nkl}^+ + d_{nkl} \quad (n \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K}, l \in \mathcal{L}), \dots (15)$$

$$z_i \in \{0, 1\} \quad (i \in \mathcal{E}), \dots (16)$$

$$h_{ikl} \in \{0, 1\} \quad (i \in \mathcal{C} \cup \mathcal{S}, k \in \mathcal{K}, l \in \mathcal{L}), \dots (17)$$

ただし、各記号の意味は第1表～第5表に示すとおりである。第5表の単位の欄における「u_n」は、ガスや燃料であれば MJ、水であれば m³ など、リソースに応じた単位とする。第4表に記載の各従属変数はそれぞれ

$$f^1(x, y, z) = \sum_{i \in \mathcal{E}} (\alpha_i^0 x_i + \gamma_i^0 z_i) + \sum_{i \in \mathcal{S}} \beta_i^0 y_i, \dots (18)$$

$$f_k^R(x, y, z, s_k^+, s_k^-) = f_k^M(x, y, z) + f_k^O(s_k^+, s_k^-) \quad (k \in \mathcal{K}), \dots (19)$$

第1表 記号の定義 (集合)
Table 1 Definitions of Symbols (Sets)

記号	説明
\mathcal{E}	設備の集合
\mathcal{C}	設備のうちコンバータの集合 ($\mathcal{C} \subseteq \mathcal{E}$)
\mathcal{S}	設備のうちストレージの集合 ($\mathcal{S} \subseteq \mathcal{E}$)
\mathcal{R}	設備のうち再生可能エネルギーの集合 ($\mathcal{R} \subseteq \mathcal{E}$)
\mathcal{K}	年の集合 ($\mathcal{K} = \{1, \dots, \mathcal{K} \}$)
\mathcal{L}	時刻の集合 ($\mathcal{L} = \{0, 1, \dots, \mathcal{L} -1\}$) (代表的な需要パターン日の 0 ~ 24 時に対応)
\mathcal{N}	リソースの集合

第2表 記号の定義 (定数)
Table 2 Definitions of Symbols (Constants)

記号	単位	説明
D	日/年	1年の日数 (365日/年)
ΔT	h	1時刻ステップ当たりの時間幅

第3表 記号の定義 (決定変数)
Table 3 Definitions of Symbols (Decision Variables)

記号	単位	説明
x_i	kW	設備 i の出力
y_i	kW·h	設備 i の容量 ($i \in S$)
z_i	-	設備 i を導入するとき 1, そうでないとき 0
p_{ikl}	kW	k 年目典型日時刻 l における設備 i の運転出力 ($i \in C$)
p_{ikl}^+	kW	k 年目典型日時刻 l における設備 i の運転出力 (貯蔵側) ($i \in S$)
p_{ikl}^-	kW	k 年目典型日時刻 l における設備 i の運転出力 (放出側) ($i \in S$)
q_{ik0}	kW·h	k 年目典型日における設備 i のエネルギー残量初期値 ($i \in S$)
h_{ikl}	-	k 年目典型日時刻 l における設備 i の稼働状況 (運転: 1, 停止: 0 ($i \in C$), 貯蔵: 1, 放出: 0 ($i \in S$))
s_{nkl}^+	kW	k 年目典型日時刻 l におけるリソース n のシステム外部への出力速度
s_{nkl}^-	kW	k 年目典型日時刻 l におけるリソース n のシステム外部からの入力速度

第4表 記号の定義 (従属変数)
Table 4 Definitions of Symbols (Dependent Variable)

記号	単位	説明
f^I	円	設備投資などのイニシャルコスト
f_k^R	円	k 年目のランニングコスト
f_k^M	円	k 年目のメンテナンスコスト
f_k^O	円	k 年目のオペレーションコスト
q_{ikl}	kW·h	k 年目典型日時刻 l における設備 i エネルギー残量 ($i \in S$)

第5表 記号の定義 (パラメータ)
Table 5 Definitions of Symbols (Parameters)

記号	単位	説明
x_i^{\min}	kW	設備 i の定格出力下限値
x_i^{\max}	kW	設備 i の定格出力上限値
y_i^{\min}	kW·h	設備 i の容量下限値 ($i \in S$)
y_i^{\max}	kW·h	設備 i の容量上限値 ($i \in S$)
$r_{il}^{\min p}$	-	時刻 l における設備 i の運転出力下限値 (定格出力に対する比) ($i \in C$)
$r_{il}^{\max p}$	-	時刻 l における設備 i の運転出力上限値 (定格出力に対する比) ($i \in C$)
$r_{il}^{\min q}$	-	時刻 l における設備 i のエネルギー残量下限値 (容量に対する比) ($i \in S$)
$r_{il}^{\max q}$	-	時刻 l における設備 i のエネルギー残量上限値 (容量に対する比) ($i \in S$)
$s_n^{+\max}$	u_n /h	リソース n のシステム外部への出力速度上限値
$s_n^{-\max}$	u_n /h	リソース n のシステム外部からの入力速度上限値
g_{in}	u_n /kW·h	設備 i を単位出力で単位時間運転したときのリソース n 生成量
c_{in}	u_n /kW·h	設備 i を単位出力で単位時間運転したときのリソース n 消費量
d_{nkl}	u_n /h	k 年目典型日の時刻 l におけるリソース n の需要
\bar{r}_{il}	-	時刻 l における設備 i の運転出力 (設備出力に対する比) ($i \in R$)
α_i^0	円/kW	設備 i の設備投資コスト (定格出力に対する比例係数)
β_i^0	円/kW·h	設備 i の設備投資コスト (容量に対する比例係数) ($i \in S$)
γ_i^0	円	設備 i の設備投資コスト (出力・容量の規模によらず発生するコスト)
α_i^k	円/kW	k 年目における設備 i のメンテナンスコスト (定格出力に対する比例係数)
β_i^k	円/kW·h	k 年目における設備 i のメンテナンスコスト (容量に対する比例係数) ($i \in S$)
γ_i^k	円	k 年目における設備 i のメンテナンスコスト (導入時に出力・容量の規模によらず発生するコスト)
ϕ_{nl}^+	円/ u_n	時刻 l においてリソース n をシステム外部へ単位量出力するときのコスト
ϕ_{nl}^-	円/ u_n	時刻 l においてリソース n をシステム外部から単位量入力するときのコスト

$$f_k^M(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \sum_{i \in \mathcal{E}} (\alpha_i^k x_i + \gamma_i^k z_i) + \sum_{i \in \mathcal{S}} \beta_i^k z_i$$

$$(k \in \mathcal{K}), \dots\dots\dots (20)$$

$$f_k^O(\mathbf{s}_k^+, \mathbf{s}_k^-) = D\Delta T \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{n \in \mathcal{N}} (\phi_{nl}^+ s_{nkl}^+ + \phi_{nl}^- s_{nkl}^-)$$

$$(k \in \mathcal{K}), \dots\dots\dots (21)$$

$$q_{ikl}(\mathbf{p}_{ik}^+, \mathbf{p}_{ik}^-, q_{ik0}) = q_{ik0} + \Delta T \sum_{m \in \mathcal{L}, m \leq l} (p_{ikm}^+ - p_{ikm}^-)$$

$$(i \in \mathcal{S}, k \in \mathcal{K}, l \in \mathcal{L}) \dots\dots\dots (22)$$

で計算されるものとする。なお、(2)～(22)式、および本稿の以降において、第1表～第5表に記載のものから下付き添字の一部あるいは全部を省略して書かれている太字の記号は、省略された添字に関する情報をすべて含んだベクトルであることを意味する。目的関数および制約条件を記述する(2)～(17)式の意味は以下のとおりである。

- (2)式 : 目的関数は、イニシャルコストおよび| \mathcal{K} |年間のランニングコストの和である。
- (3)式 : 設備の定格出力は定められた上下限範囲のなかで決定される。
- (4)式 : 設備の容量は定められた上下限範囲のなかで決定される。
- (5), (6)式 : 各コンバータの運転出力は0か、定められた上下限範囲のなかで決定される。
- (7), (8)式 : 各ストレージの出力(貯蔵側・放出側)は所定の上下限範囲のなかで決定される。
- (9), (10)式 : 各ストレージはエネルギーの貯蔵と放出を同時にできない。
- (11)式 : 各ストレージは所定の上下限エネルギー残量の範囲で運転される。
- (12)式 : 各ストレージのエネルギー残量は1日運転後初期値に戻る。
- (13), (14)式 : 各リソースのシステム外部出力(入力)は所定の上下限範囲のなかで決定される。
- (15)式 : 各年の各時刻において各リソースの生成量・入力量・消費量・出力量・需要のバランス式が成立している。
- (16), (17)式 : 決定変数 z_i および h_{ikl} は 0, 1 いずれかの値を取る。

最適化問題(P)は具体的なリソースや設備を定めずモデル化されており、かつこれらに関するスケラビリティを有している。本モデルを4章で提案するアルゴリズムと

併せて最適化システムとして実装すれば、考慮するリソースや設備の種類と数に応じて第5表に掲げたパラメータを設定することにより、案件に応じた都度のモデル・アルゴリズムの実装を要することなく最適化計算を実行できる。また各パラメータはいずれも物理的な解釈が容易な値であり、数理最適化に関する知見がない設計担当者であっても最適化計算を実行できる。

4. 最適化アルゴリズム

最適化問題(P)は混合整数計画問題で記述されていることから、汎用の数理計画ソルバでの求解を試みることができる。比較的小規模の問題例に対しては数理計画ソルバでの最適化も可能であるが、例えばコスト考慮期間| \mathcal{K} |が大きく、かつ年次に応じた需要の増減を考慮するケースなどでは比較的大規模な問題例となり、数理計画ソルバの単純適用では、1日以上長い計算時間を要する場合もある。一方で本最適化は、想定されるエネルギー需要に対して適したエネルギー設備の種類や規模感・コストの概算に利用するものであるから、必ずしも厳密な最適化は必要ではない。この点を踏まえ、本章では最適化問題(P)を高速に近似的に解く、Benders 分解法に基づくアルゴリズムを提案する。提案アルゴリズムを用いることで、大規模な問題例に対しても数秒～1分という短い時間での近似的な最適化が可能となる。

最適化問題(P)の目的関数の構造に着目してみると、設備構成 $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ にのみ依存する項(イニシャルコスト f^I 、メンテナンスコスト f_k^M)と設備構成 $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ のもとで運転計画のうち $(\mathbf{s}_k^+, \mathbf{s}_k^-)$ に依存するオペレーションコスト f_k^O ($k \in \mathcal{K}$) の和の形をとっており、しかも f_k^O は設備構成 $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ を固定すれば各年で独立していることが分かる。そこで、

- ① まず設備構成を何らかの方法で定めて $(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}, \bar{\mathbf{z}})$ とし、
- ② $(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}, \bar{\mathbf{z}})$ のもとで各年の運転計画最適化問題を独立に解き(並列計算で解いてもよい)、
- ③ 得られた解情報を設備構成最適化にフィードバックする(①に戻る)、

という手続きを考える。このような問題の分解手続きをとるアルゴリズムとしては Benders 分解法が知られている⁽⁹⁾。Benders 分解法は、元の目的関数と制約条件が線形関数項とそのほかの項(非線形関数や0-1変数を含む項)に分離でき、非線形関数を構成する変数や0-1変数を固定することで残りの部分が線形計画問題として解ける

場合に、線形計画問題の双対最適解をもとに下界を逐次強化していくことで原問題の最適解が有限回の反復で得られる手法である。これに対して、本問題は設備構成の決定と運転計画最適化の分離に際し、個々の運転計画最適化問題に 0-1 変数が残るため、典型的な Benders 分解は適用できない。そこで本稿では、運転計画最適化問題の連続緩和問題をもとに下界を得る方法を検討する。本方法に基づくアルゴリズムを採用する場合、原問題 (P) の最適解が得られる保証はないが、短時間で良好な実行可能解を得ることが期待できる。

設備構成を $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ として固定したときの k 年目の運転計画最適化問題

$$(P_k(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})) : \underset{p_k, p_k^+, p_k^-, q_{ik0}, h_k, s_k^+, s_k^-}{\text{minimize}} f_k^0(s_k^+, s_k^-) \dots (23)$$

subject to

$$r_{il}^{\min} p \bar{x}_i - (1 - h_{ikl}) x_i^{\max} \leq p_{ikl} \leq r_{il}^{\max} p \bar{x}_i \quad (i \in C, l \in \mathcal{L}), \dots (24)$$

$$0 \leq p_{ikl} \leq r_{il}^{\max} p x_i^{\max} h_{ikl} \quad (i \in C, l \in \mathcal{L}), \dots (25)$$

$$0 \leq p_{ikl}^+ \leq r_{il}^{\max} p \bar{x}_i \quad (i \in S, l \in \mathcal{L}), \dots (26)$$

$$0 \leq p_{ikl}^- \leq r_{il}^{\max} p \bar{x}_i \quad (i \in S, l \in \mathcal{L}), \dots (27)$$

$$p_{ikl}^+ \leq r_{il}^{\max} p x_i^{\max} h_{ikl} \quad (i \in S, l \in \mathcal{L}), \dots (28)$$

$$p_{ikl}^- \leq r_{il}^{\max} p x_i^{\max} (1 - h_{ikl}) \quad (i \in S, l \in \mathcal{L}), \dots (29)$$

$$r_{il}^{\min} q \bar{y}_i \leq q_{ikl} (p_{ik}^+, p_{ik}^-, q_{ik0}) \leq r_{il}^{\max} q \bar{y}_i \quad (i \in S, l \in \mathcal{L}), \dots (30)$$

$$q_{ik|L-1} (p_{ik}^+, p_{ik}^-, q_{ik0}) = q_{ik0} \quad (i \in S), \dots (31)$$

$$0 \leq s_{nkl}^+ \leq s_n^{\max} \quad (n \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K}, l \in \mathcal{L}), \dots (32)$$

$$0 \leq s_{nkl}^- \leq s_n^{\max} \quad (n \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K}, l \in \mathcal{L}), \dots (33)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in C} g_{in} p_{ikl} + \sum_{i \in S} g_{in} p_{ikm} + \sum_{i \in \mathcal{R}} g_{in} \bar{r}_{il} \bar{x}_i + s_{nkl}^- \\ &= \sum_{i \in C} c_{in} p_{ikl} + \sum_{i \in S} c_{in} p_{ikm}^+ + s_{nkl}^+ + d_{nkl} \\ & \quad (n \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K}, l \in \mathcal{L}), \dots (34) \end{aligned}$$

$$z_i \in \{0, 1\} \quad (i \in \mathcal{E}). \dots (35)$$

を考える。 $(P_k(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}))$ は 1 年 (の典型日) 分のみの小規模な最適化問題であり、適当な数値計画ソルバを用いて比較的短時間で解くことができる。以降の議論では、任意の設備構成 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ に対して、 $(P_k(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}))$ の最適解の存在が保証されているものと仮定する。

運転計画最適化問題 $(P_k(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}))$ の結果を設備構成 (x, y, z) にフィードバックさせる方法を考える。表記の煩雑さを避けるため、 $(P_k(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}))$ を

$$(P_k(\bar{w})) : \underset{u_k, v_k}{\text{minimize}} c_k^\top u_k \dots (36)$$

subject to

$$A_k u_k + B_k v_k \geq d_k(\bar{w}), \dots (37)$$

$$u_k \geq 0, \dots (38)$$

$$v_{ki} \in \{0, 1\} \quad (i \in 1, \dots, N_{v_k}). \dots (39)$$

と書くこととする。ただし \bar{w} は設備構成 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ をまとめたもの、 u_k は N_{u_k} 次元の非負連続変数ベクトル、 v_k は N_{v_k} 次元の 0-1 変数ベクトル、 $A_k, B_k, c_k, d_k(\bar{w})$ は適当なサイズの行列あるいはベクトルであり、 $d_k(\bar{w})$ を除いてその値は設備構成 \bar{w} に依存しないことに注意されたい。

運転計画最適化問題 $(P_k(\bar{w}))$ の連続緩和問題

$$(\tilde{P}_k(\bar{w})) : \underset{u_k, v_k}{\text{minimize}} c_k^\top u_k \dots (40)$$

subject to

$$A_k u_k + B_k v_k \geq d_k(\bar{w}), \dots (41)$$

$$u_k \geq 0, \dots (42)$$

$$0 \leq v_k \leq 1. \dots (43)$$

およびその双対問題

$$(\tilde{D}_k(\bar{w})) : \underset{\lambda_k, \mu_k}{\text{maximize}} d_k^\top(\bar{w}) \lambda_k - \mathbf{1}^\top \mu_k \dots (44)$$

subject to

$$A_k^\top \lambda_k \leq c_k, \dots (45)$$

$$B_k^\top \lambda_k - \mathbf{1}^\top \mu_k \leq 0, \dots (46)$$

$$\lambda_k \geq 0, \dots (47)$$

$$\mu_k \geq 0. \dots (48)$$

を考える。仮定より $(P_k(\bar{w}))$ は最適解をもつことから、その緩和である $(\tilde{P}_k(\bar{w}))$ も明らかに最適解をもち、また双対定理より $(\tilde{D}_k(\bar{w}))$ も最適解をもつ。ここで、 $(P_k(\bar{w}))$, $(\tilde{P}_k(\bar{w}))$, $(\tilde{D}_k(\bar{w}))$ の最適値をそれぞれ $f^*(P_k(\bar{w}))$, $f^*(\tilde{P}_k(\bar{w}))$, $f^*(\tilde{D}_k(\bar{w}))$ とすると、

$$f^*(\tilde{D}_k(\bar{w})) = f^*(\tilde{P}_k(\bar{w})) \leq f^*(P_k(\bar{w})) \dots (49)$$

の関係にあることに注意する。

連続緩和双対問題 $(\tilde{D}_k(\bar{w}))$ の実行可能解集合

$$\mathcal{D}_k = \left\{ (\lambda_k, \mu_k) \left| \begin{array}{l} A_k^\top \lambda_k \leq c_k, \\ B_k^\top \lambda_k - \mu_k \leq 0, \\ \lambda_k \geq 0, \\ \mu_k \geq 0 \end{array} \right. \right\} \dots (50)$$

は設備構成 \bar{w} に依存しないことから、任意の \bar{w} および $(\lambda_k, \mu_k) \in \mathcal{D}_k$ に対して、

$$d_k^\top(\bar{w}) \lambda_k - \mathbf{1}^\top \mu_k \leq f^*(\tilde{D}_k(\bar{w})) \leq f^*(P_k(\bar{w})) \dots (51)$$

が成り立つ。つまり、 \bar{w} の決定に際して、(51) 式を f_k^0 の下界を強化する切除平面として利用することができる。特に $(\tilde{D}_k(\bar{w}))$ の最適解 $(\lambda_k^*(\bar{w}), \mu_k^*(\bar{w}))$ に対して、

$$d_k^\top(\bar{w}) \lambda_k^*(\bar{w}) - \mathbf{1}^\top \mu_k^*(\bar{w}) = f^*(\tilde{D}_k(\bar{w})) \dots (52)$$

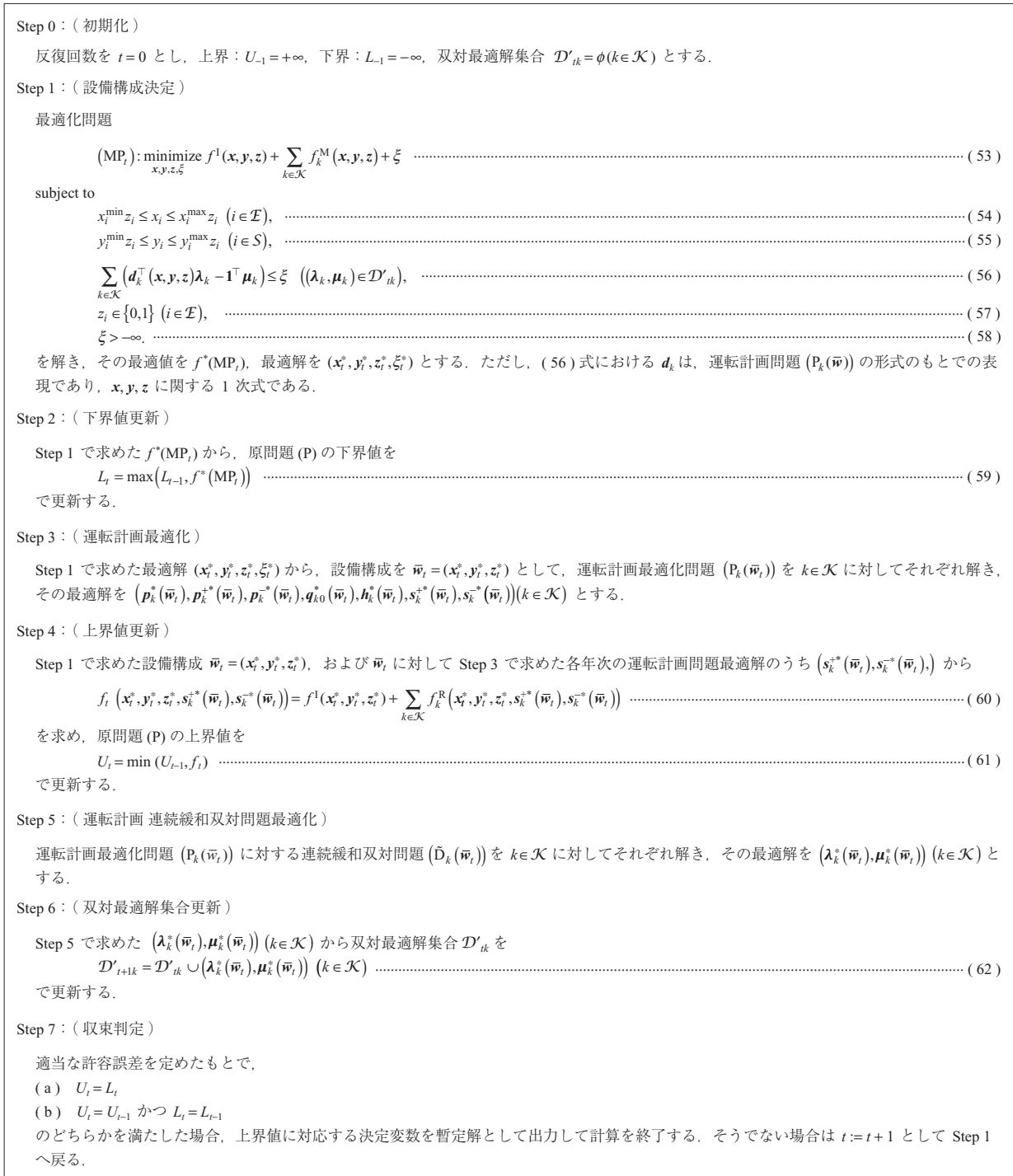
となることから、最適解 $(\lambda_k^*(\bar{w}), \mu_k^*(\bar{w}))$ に基づく切除平

面が最強の下界を与える。本稿で提案するアルゴリズムは、設備構成 \bar{w} を定め、そのもとで $(\bar{D}_k(\bar{w}))$ を解き切除平面を得て下界を強化する、という過程を繰り返すことで原問題 (P) の良質な近似解の取得を図るものである。提案アルゴリズムを第 4 図にまとめる。また、第 5 図にフローチャートを示す。

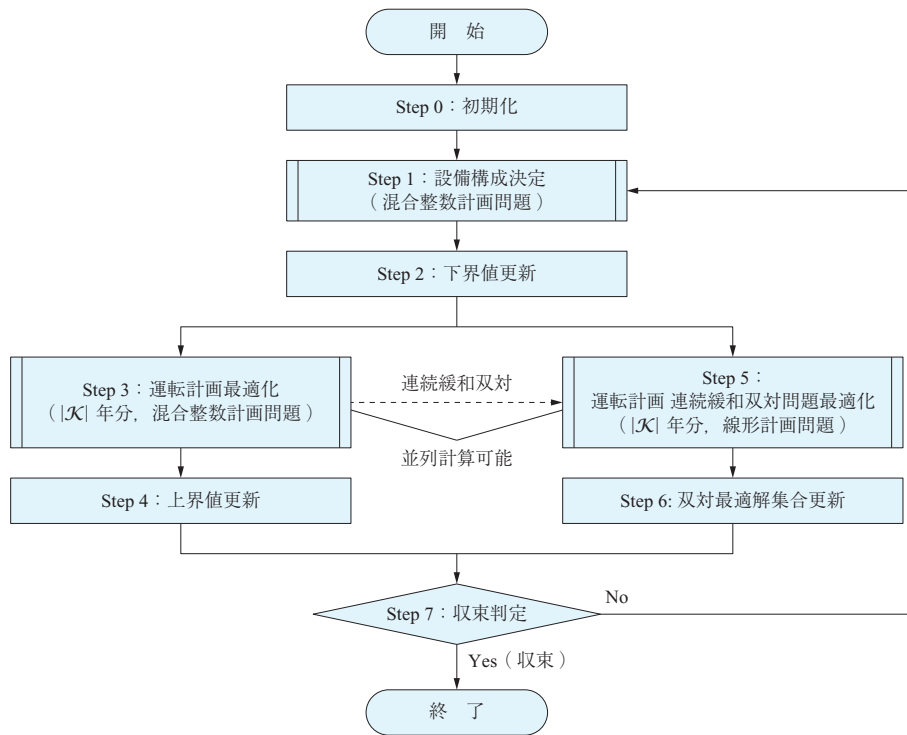
5. 数値実験

5.1 条件

本章では、仮想的な工場における電力コスト削減を目的としたリチウムイオン蓄電池、ガスエンジン発電機の導入検討を例題として、提案モデルおよびアルゴリズムの数値実験を行う。



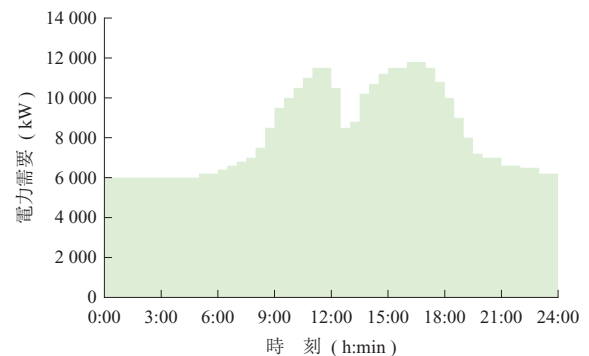
第 4 図 最適化アルゴリズム
Fig. 4 Optimization Algorithm



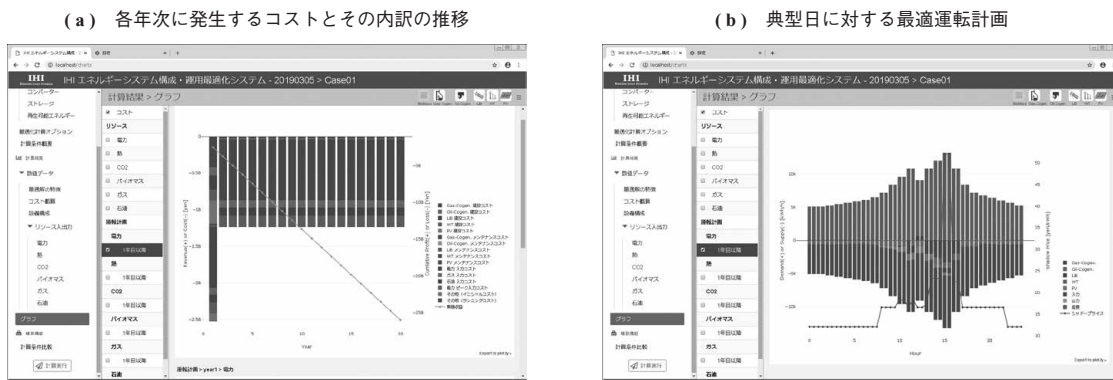
第 5 図 提案アルゴリズムのフローチャート
Fig. 5 Flow-chart of the proposed algorithm

本数値実験では、3章で述べたモデルおよび4章で述べた最適化アルゴリズムに基づき開発したエネルギーシステム構成・運用最適化システムを使用する。第6図にシステム画面の例を示す。本システムを利用することで、数理モデルを意識せず、考慮するリソースや機器の追加、パラメータ設定、最適化計算の実行、結果の可視化といった一連の検討が可能である。以降で述べる本数値実験の条件はすべて本システム画面上から設定できる。

第7図に、想定する電力需要パターンを示す。日中の勤務時間(8:30~17:30)の間は電力の需要が高く、また12:00~13:00の昼休み時間帯は一時的に電力需要が低くなるものとする。電力需要を賄う手段としては系統か



第 7 図 電力需要パターン
Fig. 7 Electricity demand profile



第 6 図 エネルギーシステム構成・運用最適化システム画面例
Fig. 6 Screen shots of the optimization system for energy system configuration and operation

らの電力購入が挙げられるが、日中と夜間の購入電力量単価が異なる場合、単価の安い時間帯に蓄電池に充電を行い、高い時間に放電することで購入電力量料金の低減が期待できる。また、ガスエンジン発電機による kW・h 発電当たりのコストが購入電力量単価より安ければガスエンジン導入のメリットが見込まれる。ただし、これらはいずれも設備導入に関わる初期投資が必要であり、耐用年数を踏まえたうえで採算性を考える必要がある。そのほかの計算条件を第 6 表に示す。コストや効率の情報は参考文献(10)～(12)を参考に設定した。購入電力量単価は時間帯によって異なり、

- ・ 12.77 円/kW・h (夜間：0:00～8:00, 22:00～24:00)
- ・ 18.54 円/kW・h (昼間：8:00～13:00, 16:00～22:00)
- ・ 19.20 円/kW・h (ピーク：13:00～16:00)

という単価設定としている。

最適化計算に利用した計算機環境を第 7 表に示す。

5.2 結果

5.1 節で述べた条件のもとで、提案手法を適用して得られた設備構成を第 8 表に示す。また第 8 図に、提案手法を用いて得られた、最終年度の電力需要に対する各設備の運転計画を示す。

5.3 考察

5.3.1 設備構成・運転パターン

第 8 表に示すとおり、最適化の結果、ガスエンジンのみを導入する解が得られている。蓄電池が導入されない理由として、(この条件設定のもとでは)購入電力量単価の

第 7 表 計算機環境

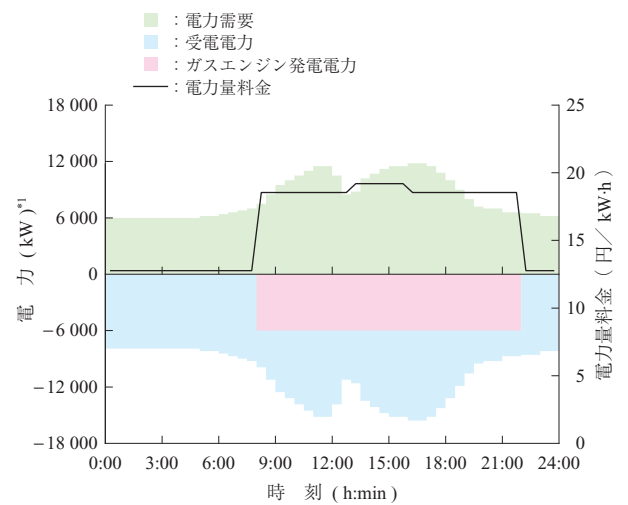
Table 7 Calculation Environment

項目	値
OS	Windows 7 Enterprise 64bit SP1
CPU	Intel® Xeon® CPU E-1505M v5
メモリ	64 GB
数値計画ソルバ	Cbc 2.9.0 ⁽¹³⁾

第 8 表 最適化計算結果

Table 8 Optimization Result

項目	単位	値	
蓄電池	出力	kW	0
	容量	kW・h	0
ガスエンジン	出力	kW	6 000
計算時間	s	27	
総コスト	万円	2 369 098	



(注) *1: 需要側を正, 供給側を負とした。

第 8 図 最終年度電力需要に対する最適運転計画

Fig. 8 Optimal operation plan for the electricity demand of the final year

第 6 表 計算条件

Table 6 Calculation Condition

項目	単位	値	
蓄電池	出力レンジ	kW	500～3 000
	容量レンジ	kW・h	500～3 000
	効率	%	95 (片側)
	イニシャルコスト ⁽¹⁰⁾	万円/kW・h	15 9
	メンテナンスコスト	万円/kW・h・年 千円/kW・年	1.5 9
	SOC 運用レンジ	%	10～90
ガスエンジン	出力レンジ	kW	3 000～6 000
	発電効率 ⁽¹¹⁾	%	44.0
	イニシャルコスト ⁽¹¹⁾	万円/kW	1.21
	メンテナンスコスト ⁽¹¹⁾	万円/年	1.0
	最低出力	%	100 (定格運転のみ)
電力	購入電力量単価 ⁽¹²⁾	円/kW・h	12.77～19.20 (時間帯依存)
	基本料金単価 ⁽¹²⁾	円/kW・月	1 815
	需要成長率	%/年	2
ガス	購入単価 ⁽¹¹⁾	円/MJ	1.85
コスト考慮年数	年	15	

時間帯差を考慮した蓄電池充放電による購入電力量料金削減量が蓄電池導入によるイニシャルコストよりも小さいためと考えられる。

最適化の結果得られたガスエンジンの運転パターンについて考察する。第 8 図より、ガスエンジンは 8:00 ~ 22:00 の間のみ運転するパターンとなっている。これは購入電力単価が昼間およびピークの時間帯に一致する。第 6 表からガスエンジンの発電電力量単価は 15.49 円/kWh と計算できる。一方、購入電力量単価は 8:00 ~ 22:00 の間は 18.54 円以上、22:00 ~翌 8:00 は 12.77 円である。最適化の結果得られたガスエンジンの運転パターンは、その発電電力量単価が購入電力量単価より安い時間帯だけ運転する合理的なものであることが分かる。

次に、最適化の結果得られたガスエンジンの出力 (6 000 kW) について考察する。上述の議論を踏まえると、ガスエンジンの発電電力量単価が購入電力量単価より安い時間帯があることから、その経済性のアドバンテージを最大化するために、出力レンジの上限である 6 000 kW のガスエンジンを導入するのが妥当である。なお、この場合の関心事として、ガスエンジンの出力レンジをより大きくとった場合の総コストの変化が挙げられ、これに対しては、適当な双対問題を定義し解くことで感度分析に有用な情報を得ることができる。第 9 表に、各設備の出力・容量上下限を制約 1 kW (1 kW・h) 広げたときのコスト改善感度を示す。表中の値は、原問題 (P) の各 0-1 変数の値を暫定解の値で固定することで得られる線形計画問題における制約条件 (3), (4) 式に対応する双対最適解の値である。第 9 表は、ガスエンジンの出力レンジの上限側を 1 kW 高くすることで総コストを 7 万円低減できることを示している。

5.3.2 最適化アルゴリズムの計算時間

本計算に要した時間は 27 秒であり、3.1 節で示した要件に対して妥当な計算時間である。なお、本計算例は比較的単純な問題設定であり、数理計画ソルバの単純適用でも同等の計算時間で最適解が得られることを確認している。

第 9 表 各設備の出力・容量上下限を 1 kW (1 kW・h) 広げたときのコスト改善感度

Table 9 Cost improvement sensitivity when the upper and lower limits of output and capacity of each facility are enlarged by 1 kW (1 kW・h)

項	目	単 位	下限側	上限側
蓄 電 池	出 力	円/kW	0	0
	容 量	円/kWh	0	0
ガスエンジン	出 力	万円/kW	0	7

提案手法との差は、より大規模・複雑な問題において顕著となる。設備数やリソース種類数が増加すると、数理計画ソルバの単純適用では 2 日以上 of 計算時間を要する場合もあるが、このような場合でも、提案手法を用いることにより、1 分程度で合理的な解が求められることを経験的に確認している。

6. 結 言

本稿では、さまざまな案件に対して利用可能な最適化システムとしての実装・提供を意識した、汎用性の高いエネルギーシステム構成・運用最適化の数理モデルと、同モデルに基づく最適化問題を効率的に解くためのアルゴリズムを提案し、シミュレーションを通じて提案モデル・アルゴリズムの有効性を確認した。提案モデルおよびアルゴリズムは最適化システムとして実装されており、案件に応じたモデル・アルゴリズム開発が不要となり、エネルギーシステム構成・運用最適化に関する検討効率の向上が期待できる。また、新しい再生可能エネルギーや、またそれを利用したエネルギー設備が登場した場合でも、直ちにこれらを効果的に組み合わせる提案が可能となる。

今後の課題としては、例えば設備構成が決まり、各エネルギー設備の詳細な運用方法の検討を行うなど、フェーズが進んだ案件に対して広く適用可能な運用最適化モデル・アルゴリズムの開発が挙げられる。本稿で提案したモデルは、運用を考慮しつつも、主に設備構成検討の補助として活用することを目的としたものであり、例えば、出力に応じた効率の変化や応答性など、各エネルギー設備の詳細な特性は考慮していない。詳細な運用最適化モデルの構築においては、これらのハード面の特性に加え、設備の運用ルールなどのソフト面についても考慮が必要である。特に後者については工場やプラントなど適用先によって考え方はさまざまであり、完全な汎用化は容易ではない。例えば、ある程度典型的なルールを網羅したモデルを用意しつつも、案件ごとに制約条件式を追加可能とするなど、ソフトウェア設計上の工夫が必要と考えている。

参 考 文 献

- (1) J. Twidell and T. Weir : Renewable Energy Resources, Third Edition, Routledge, (2015.1)
- (2) A. A. Khan, M. Naeem, M. Iqbal, S. Qaisar and A. Anpalagan : A Compendium of optimization objectives, constraints, tools and algorithms for energy

- management in microgrids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, (2016. 5), pp. 1 664 – 1 683
- (3) A. H. Fathima and K. Palanisamy : Optimization in Microgrids with Hybrid Energy Systems - A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 45, (2015. 5), pp. 431 – 446
- (4) I. Ranaweera and O. M. Midtgård : Optimization of Operational Cost for a Grid-Supporting PV System with Battery Storage, *Renewable Energies*, Vol. 88, (2016. 4), pp. 262 – 272
- (5) A. S. Hassan, L. Cipcigan and N. Jenkins : Optimal Battery Storage Operation for PV Systems with Tariff Incentives, *Applied Energy*, Vol. 203, (2017. 10), pp. 422 – 441
- (6) 所 健一, 福山良和 : エネルギー効率活用のためのスマートコミュニティモデルの開発と拡張, *オペレーションズ・リサーチ*, Vol. 62, No. 1, 2017 年 1 月, pp. 44 – 49
- (7) 横山良平, 長谷川泰士, 伊東弘一 : 混合整数線形計画法の一分解法によるエネルギー供給システムの機器構成最適化, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 66, No. 652, 2000 年 12 月, pp. 4 016 – 4 023
- (8) R. Yokoyama, Y. Shinano, S. Taniguchi, M. Ohkura and T. Wakui : Optimization of Energy Supply Systems by MILP Branch and Bound Method in Consideration of Hierarchical Relationship between Design and Operation, *Energy Conversion and Management*, Vol. 92, (2015. 3), pp. 92 – 104
- (9) J. F. Benders : Partitioning Procedures for Solving Mixed-Variables Programming Problems, *Numerische Mathematik*, Vol. 4, Iss. 1, (1962. 12), pp. 238 – 252
- (10) 資源エネルギー庁新エネルギーシステム課 : 定置用蓄電池の価格低減スキーム, https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/energy_resource/pdf/005_08_00.pdf, (参照 2019. 9. 3)
- (11) 経済産業省資源エネルギー庁 : 各電源の諸元一覧, https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/pdf/cost_wg_03.pdf (参照 2019. 9. 3)
- (12) 東京電力エナジーパートナー : 高圧季節別時間帯別電力 (契約電力 500 kW 以上) 2019 年 10 月 1 日以降, http://www.tepco.co.jp/ep/corporate/plan_h/plan09.html, (参照 2019. 9. 3)
- (13) GitHub, Inc. : COIN-OR Branch-and-Cut solver, <https://github.com/coin-or/Cbc>, (参照 2019. 9. 3)