

エネルギープラント運用及び導入計画の確率計画法による最適化

福場 智紀 椎名 孝之 所 健一
早稲田大学 電力中央研究所

(受理 2019 年 4 月 25 日; 再受理 2019 年 10 月 15 日)

和文概要 本研究では、太陽光発電と蓄電池を導入した場合の大規模施設でのエネルギープラント運用計画の最適化モデルを開発する。太陽光発電の出力の不確実性を、確率計画法を用いて離散シナリオで表現し、運用費用の期待値を最小化する。本研究モデルは、現実的な運用計画のために必要な非線形制約を含むため、大規模な非線形混合整数計画問題となる。その非線形制約に対して区分線形近似を導入することで、大規模な混合整数計画問題として定式化し、厳密解を得ることを可能にしている。数値実験により、従来の確定的なモデルと比較することで、開発したモデルの有用性を示す。さらに、経済的評価として、初期投資費用回収年数の計算を行い、実用的な問題に応用できることを示す。

キーワード: エネルギー, 最適化, 数理計画, 環境問題, 確率計画法

1. 研究背景と目的

環境問題を背景に、再生可能エネルギーの普及は世界的に喫緊の課題である。2016年に発行されたパリ協定では、世界の平均気温上昇を産業革命前から2℃以内に抑えることが長期目標となった。そのため、世界各地でスマートコミュニティの実現に向けた取り組みが行われている。また、日本では、電力自由化によりエネルギー費用の再検討が経営工学的な課題として取り扱われるようになった。これらをふまえて、工場やショッピングセンターなどの大規模施設では、新たなエネルギー供給形態として再生可能エネルギーの導入が検討されている。しかし、再生可能エネルギーの出力は天候などに左右されて不安定であるため、それらの導入時には不確実な状況下での意思決定が求められる。

本研究では、大規模施設である工場のエネルギープラントに、再生可能エネルギーとして太陽光発電を導入した場合の運用計画最適化モデルを確率計画法により開発する。確率計画法によるモデルが、従来の確定的な線形計画法のモデルよりも現実的な運用計画として適していることを示し、導入計画について経済的評価を行う。

2. 先行研究

まず、不確実性を考慮した数理計画法である確率計画法について紹介する。一般的な数理計画法では、実際は不確実である情報までもが、既知だという前提の下で考慮されている。そのため、現実の状況を正当に反映できていない場合がある。確率計画法では、その問題を解消するために、不確実性を確率変数で表現している。確率計画法の多くのモデルでは、不確実性が離散的なシナリオを用いて表現されている。確率計画法の詳細は Birge and Louveaux[1], 椎名 [8] に掲載されている。本研究に関連した確率計画問題としては、発電機起動停止問題 [8] がある。発電機起動停止問題は、発電機の電力供給への関与を決定するスケジュール問題であり、電力需要の不確実性などが考慮されている。

次に，エネルギープラントに関する研究について述べる．所・福山 [10] は，スマートコミュニティのエネルギーコストなどの定量評価が行える基本モデルの概要を示し，そのモデルの最適化に関する研究事例を紹介している．基本モデルは，7分野（電力，ガス，水道，鉄道，産業，業務，家庭）の相互作用を考慮しながら，スマートコミュニティ全体でのエネルギーコストなどを評価する．そのモデルは，基本モデルの利用者が入力したエネルギー機器の運転計画などに関する決定変数に応じて，コミュニティ全体でのエネルギーコストなどを計算しているが，最適化機能を有していない．

基本モデルの中で主要となる工場でのエネルギー消費をモデル化している産業モデルは，Suzuki and Okamoto[9]，Inui and Tokoro[2] が提示している工場のエネルギープラントの最適運用計画を求めるベンチマーク問題に基づいてモデル化されている．Suzuki and Okamoto[9] は，そのベンチマーク問題を非線形制約式を含む混合整数計画問題として定式化し，近似解法で解いている．Inui and Tokoro[2] は，ベンチマーク問題の非線形制約式に対して，区分線形近似を行っている．

本研究では，大規模施設におけるベンチマーク問題 [2, 9] を太陽光発電と蓄電池を含む問題に拡張する．起動停止制約に関しては，発電機起動停止問題 [8] に基づいて一次式で表している．太陽光発電の出力の不確実性に対しては，確率計画法を用いて離散シナリオで表現することによって考慮する．

3. 太陽光発電導入モデルの概要

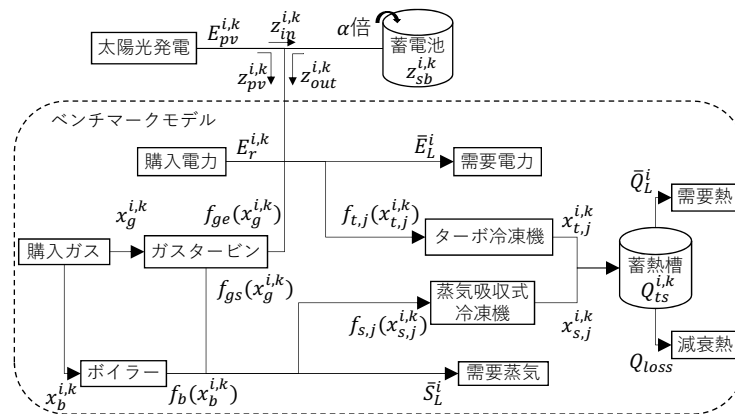


図 1: 太陽光発電導入後のエネルギープラント概要図

本研究で開発したモデルの概要を述べる．太陽光発電導入モデルは，ベンチマーク問題 [2, 9] を太陽光発電と蓄電池を含む問題に拡張したものである．ベンチマーク問題のエネルギープラントは，図 1 の点線枠内のように，電力とガスを購入して，需要を満たすように電力，熱，蒸気を生成している．設備機器としては，ガスタービン，ボイラー，2種の冷凍機，蓄熱槽がある．ベンチマーク問題の目的は，機器に関する制約，エネルギーバランスを満たしながら，電力，ガスの購入費用を最小化する運用計画を立てることである．決定変数は，エネルギーの購入量，生成量に関する変数と，各機器の起動停止に関する変数で構成される．

太陽光発電導入モデルでは，ベンチマーク問題に対して，生成された電力が需要とターボ冷凍機に流れるように，[MW] 級の太陽光発電設備を設置した．太陽光発電は，自家発電のために設置し，売電は行わないとする．蓄電池は太陽光発電の電力のみ貯蓄でき，充電した

電力の一部は放電時までには失われるとする。太陽光発電と蓄電池を導入したときのエネルギープラントのエネルギーのフローを図1に示す。

太陽光発電の出力の不確実性は、離散シナリオを用いて表す。太陽光発電の出力の不確実性は、全体のエネルギーフローにも影響するため、エネルギーの購入量、生成量に関する決定変数もシナリオごとに定義する。その結果、決定変数の数はシナリオ数に応じて増加する。太陽光発電導入前の決定変数の数は、連続変数が96個、0-1変数が96個で、計192個である。一方、太陽光発電導入後の決定変数の数は、シナリオ数が30の場合、2段階決定変数である連続変数が5730個、1段階決定変数である0-1変数が96個で、計5826個になる。

太陽光発電導入モデルの目的は、機器と蓄電池に関する制約とエネルギーバランスを満たしながら、電力、ガスの購入費用の期待値を最小化する運用計画を立てることである。

4. 太陽光発電導入モデル

太陽光発電導入モデルを示す。まずは、太陽光発電導入モデルの定式化に用いる記号の定義を表1に示す。

表 1: 太陽光発電導入モデルの記号

定数	
N_t	ターボ冷凍機の数
N_s	蒸気吸収式冷凍機の数
I	期間数
a_{ge}	ガスタービンのガスと電力の入出力関係式の係数 [MWh/m ³]
a_{gs}	ガスタービンのガスと蒸気の入出力関係式の係数 [t/m ³]
a_b	ボイラーのガスと蒸気の入出力関係式の係数 [t/m ³]
$a_{t,j}$	ターボ冷凍機 j の電力と熱の入出力関係式の係数 [MWh/GJ]
$a_{s,j}, b_{s,j}, c_{s,j}$	蒸気吸収式冷凍機 j の蒸気と熱の入出力関係式の係数 [1/(GJ·t)], [1/t], [GJ/t]
$Q_{t,j}^{\min}$	ターボ冷凍機 j の熱生成量の下限 [GJ]
$Q_{t,j}^{\max}$	ターボ冷凍機 j の熱生成量の上限 [GJ]
$Q_{s,j}^{\min}$	蒸気吸収式冷凍機 j の熱生成量の下限 [GJ]
$Q_{s,j}^{\max}$	蒸気吸収式冷凍機 j の熱生成量の上限 [GJ]
E_g^{\min}	ガスタービンの電力生成量の下限 [MWh]
E_g^{\max}	ガスタービンの電力生成量の上限 [MWh]
S_b^{\min}	ボイラーの蒸気生成量の下限 [t]
S_b^{\max}	ボイラーの蒸気生成量の上限 [t]
Q_{ts}^{\min}	蓄熱槽の蓄熱量の下限 [GJ]
$Q_{ts}^{\max 1}$	第1～($I-1$)時間帯の蓄熱槽の蓄熱量の上限 [GJ]
$Q_{ts}^{\max 2}$	第 I 時間帯の蓄熱槽の蓄熱量の上限 [GJ]
Q_{ts}^{init}	初期の蓄熱槽の蓄熱量 [GJ]
Q_{loss}	蓄熱槽の熱の減衰量 [GJ]
$L_{t,j}$	ターボ冷凍機 j の最小起動停止時間

$L_{s,j}$	蒸気吸収式冷凍機 j の最小起動停止時間
L_g	ガスタービンの最小起動停止時間
L_b	ボイラーの最小起動停止時間
C_{Er}^i	第 i 時間帯の電力の購入費用 [円/MWh]
C_{Fr}^i	第 i 時間帯のガスの購入費用 [円/m ³]
\bar{E}_L^i	第 i 時間帯の電力の需要 [MWh]
\bar{Q}_L^i	第 i 時間帯の熱の需要 [GJ]
\bar{S}_L^i	第 i 時間帯の蒸気の需要 [t]
E_{rm}^i	第 i 時間帯の余剰電力量 [MWh]
\tilde{S}_{rm}^i	第 i 時間帯の余剰蒸気量 [t]
K	シナリオ数
Pr_k	シナリオ k が発生する確率
$E_{pv}^{i,k}$	シナリオ k の第 i 時間帯における太陽光発電の発電量 [MWh]
z_{sb}^{init}	初期の蓄電池の蓄電量 [MWh]
E_{sb}^{max}	蓄電池の容量 [MWh]
α	充放電効率
決定変数	
$x_{t,j}^{i,k}$	シナリオ k の第 i 時間帯におけるターボ冷凍機 j の熱生成量 [GJ]
$x_{s,j}^{i,k}$	シナリオ k の第 i 時間帯における蒸気吸収式冷凍機 j の熱生成量 [GJ]
$x_g^{i,k}$	シナリオ k の第 i 時間帯におけるガスタービンのガス消費量 [m ³]
$x_b^{i,k}$	シナリオ k の第 i 時間帯におけるボイラーのガス消費量 [m ³]
$y_{t,j}^i$	第 i 時間帯におけるターボ冷凍機 j の状態 (起動状態なら 1, 停止状態なら 0)
$y_{s,j}^i$	第 i 時間帯における蒸気吸収式冷凍機 j の状態 (起動状態なら 1, 停止状態なら 0)
y_g^i	第 i 時間帯におけるガスタービンの状態 (起動状態なら 1, 停止状態なら 0)
y_b^i	第 i 時間帯におけるボイラーの状態 (起動状態なら 1, 停止状態なら 0)
$z_{in}^{i,k}$	シナリオ k の第 i 時間帯における太陽光発電から蓄電池に向かう電力量 [MWh]
$z_{out}^{i,k}$	シナリオ k の第 i 時間帯における蓄電池の放電量 [MWh]
$z_{pv}^{i,k}$	シナリオ k の第 i 時間帯における太陽光発電から直接消費される電力量 [MWh]
$z_{sb}^{i,k}$	シナリオ k の第 i 時間帯における蓄電池の蓄電量 [MWh]
関数	
$Q_{ts}^{i,k}(x_t^{i,k}, x_s^{i,k}, Q_{ts}^{i-1,k}, \bar{Q}_L^i)$	シナリオ k の第 i 時間帯における蓄熱槽の蓄熱量 [GJ]

$E_r^{i,k}(x_g^{i,k}, \mathbf{x}_t^{i,k}, z_{pv}^{i,k}, z_{out}^{i,k}; \bar{E}_L^i, E_{rm}^i)$	シナリオ k の第 i 時間帯における 電力の購入量 [MWh]
$S_{rm}^{i,k}(x_g^{i,k}, x_b^{i,k}, \mathbf{x}_s^{i,k}; \bar{S}_L^i)$	シナリオ k の第 i 時間帯における 蒸気の余剰量 [t]
$f_{ge}(x_g^{i,k})$	ガス消費量 $x_g^{i,k}$ に対する ガスタービンの電力生成量 [MWh]
$f_{gs}(x_g^{i,k})$	ガス消費量 $x_g^{i,k}$ に対する ガスタービンの蒸気生成量 [t]
$f_b(x_b^{i,k})$	ガス消費量 $x_b^{i,k}$ に対する ボイラーの蒸気生成量 [t]
$f_{t,j}(x_{t,j}^{i,k})$	熱生成量 $x_{t,j}^{i,k}$ に対する ターボ冷凍機 j の電力入力量 [MWh]
$f_{s,j}(x_{s,j}^{i,k})$	熱生成量 $x_{s,j}^{i,k}$ に対する 蒸気吸収式冷凍機 j の蒸気入力量 [t]

次に、太陽光発電導入モデルの定式化を以下に示す。ただし、 $\forall i (i = 1, \dots, I), \forall k (k = 1, \dots, K)$ において、 $\mathbf{x}_t^{i,k} = (x_{t,1}^{i,k}, \dots, x_{t,N_t}^{i,k})^\top$ 、 $\mathbf{x}_s^{i,k} = (x_{s,1}^{i,k}, \dots, x_{s,N_s}^{i,k})^\top$ とする。

$$\min \sum_{k=1}^K \left[Pr_k \sum_{i=1}^I \left\{ C_{Er}^i E_r^{i,k}(x_g^{i,k}, \mathbf{x}_t^{i,k}, z_{pv}^{i,k}, z_{out}^{i,k}; \bar{E}_L^i, E_{rm}^i) + C_{Fr}^i (x_g^{i,k} + x_b^{i,k}) \right\} \right] \quad (4.1)$$

s.t.

$$Q_{ts}^{\min} \leq Q_{ts}^{i,k}(\mathbf{x}_t^{i,k}, \mathbf{x}_s^{i,k}; Q_{ts}^{i-1,k}, \bar{Q}_L^i) \leq Q_{ts}^{\max 1}, i = 1, \dots, I-1; k = 1, \dots, K \quad (4.2)$$

$$Q_{ts}^{\min} \leq Q_{ts}^{i,k}(\mathbf{x}_t^{i,k}, \mathbf{x}_s^{i,k}; Q_{ts}^{i-1,k}, \bar{Q}_L^i) \leq Q_{ts}^{\max 2}, i = I; k = 1, \dots, K \quad (4.3)$$

$$S_{rm}^{i,k}(x_g^{i,k}, x_b^{i,k}, \mathbf{x}_s^{i,k}; \bar{S}_L^i) = \tilde{S}_{rm}^i, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K \quad (4.4)$$

$$Q_{t,j}^{\min} y_{t,j}^i \leq x_{t,j}^{i,k} \leq Q_{t,j}^{\max} y_{t,j}^i, i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_t; k = 1, \dots, K \quad (4.5)$$

$$Q_{s,j}^{\min} y_{s,j}^i \leq x_{s,j}^{i,k} \leq Q_{s,j}^{\max} y_{s,j}^i, i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_s; k = 1, \dots, K \quad (4.6)$$

$$E_g^{\min} y_g^i \leq f_{ge}(x_g^{i,k}) \leq E_g^{\max} y_g^i, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K \quad (4.7)$$

$$S_b^{\min} y_b^i \leq f_b(x_b^{i,k}) \leq S_b^{\max} y_b^i, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K \quad (4.8)$$

$$y_{t,j}^i - y_{t,j}^{i-1} \leq y_{t,j}^\tau, \tau = i+1, \dots, \min\{i + L_{t,j} - 1, I\}; i = 2, \dots, I; j = 1, \dots, N_t \quad (4.9)$$

$$y_{t,j}^{i-1} - y_{t,j}^i \leq 1 - y_{t,j}^\tau, \tau = i+1, \dots, \min\{i + L_{t,j} - 1, I\}; i = 2, \dots, I; j = 1, \dots, N_t \quad (4.10)$$

$$y_{s,j}^i - y_{s,j}^{i-1} \leq y_{s,j}^\tau, \tau = i+1, \dots, \min\{i + L_{s,j} - 1, I\}; i = 2, \dots, I; j = 1, \dots, N_s \quad (4.11)$$

$$y_{s,j}^{i-1} - y_{s,j}^i \leq 1 - y_{s,j}^\tau, \tau = i+1, \dots, \min\{i + L_{s,j} - 1, I\}; i = 2, \dots, I; j = 1, \dots, N_s \quad (4.12)$$

$$y_g^i - y_g^{i-1} \leq y_g^\tau, \tau = i+1, \dots, \min\{i + L_g - 1, I\}; i = 2, \dots, I \quad (4.13)$$

$$y_g^{i-1} - y_g^i \leq 1 - y_g^\tau, \tau = i+1, \dots, \min\{i + L_g - 1, I\}; i = 2, \dots, I \quad (4.14)$$

$$y_b^i - y_b^{i-1} \leq y_b^\tau, \tau = i+1, \dots, \min\{i + L_b - 1, I\}; i = 2, \dots, I \quad (4.15)$$

$$y_b^{i-1} - y_b^i \leq 1 - y_b^\tau, \tau = i + 1, \dots, \min\{i + L_b - 1, I\}; i = 2, \dots, I \quad (4.16)$$

$$z_{sb}^{i-1,k} + \alpha z_{in}^{i,k} = z_{sb}^{i,k} + z_{out}^{i,k}, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K; z_{sb}^{0,k} = z_{sb}^{I,k} = z_{sb}^{init} \quad (4.17)$$

$$z_{sb}^{i,k} \leq E_{sb}^{\max}, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K \quad (4.18)$$

$$E_{pv}^{i,k} = z_{pv}^{i,k} + z_{in}^{i,k}, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K \quad (4.19)$$

$$x_{t,j}^{i,k} \geq 0, i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_t; k = 1, \dots, K \quad (4.20)$$

$$x_{s,j}^{i,k} \geq 0, i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_s; k = 1, \dots, K \quad (4.21)$$

$$x_g^{i,k}, x_b^{i,k}, z_{in}^{i,k}, z_{out}^{i,k}, z_{pv}^{i,k} \geq 0, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K \quad (4.22)$$

$$z_{sb}^{i,k} \geq 0, i = 1, \dots, I - 1; k = 1, \dots, K \quad (4.23)$$

$$y_{t,j}^i \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_t \quad (4.24)$$

$$y_{s,j}^i \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_s \quad (4.25)$$

$$y_g^i, y_b^i \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, I \quad (4.26)$$

Where

$$Q_{ts}^{i,k}(\mathbf{x}_t^{i,k}, \mathbf{x}_s^{i,k}; Q_{ts}^{i-1,k}, \bar{Q}_L^i) = - \sum_{j=1}^{N_t} \{x_{t,j}^{i,k}\} - \sum_{j=1}^{N_s} \{x_{s,j}^{i,k}\} + Q_{ts}^{i-1,k} + \bar{Q}_L^i + Q_{loss},$$

$$i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K; Q_{ts}^{0,k} = Q_{ts}^{init} \quad (4.27)$$

$$E_r^{i,k}(x_g^{i,k}, \mathbf{x}_t^{i,k}, z_{pv}^{i,k}, z_{out}^{i,k}, \bar{E}_L^i, E_{rm}^i)$$

$$= \sum_{j=1}^{N_t} \{f_{t,j}(x_{t,j}^{i,k})\} + \bar{E}_L^i - f_{ge}(x_g^{i,k}) + E_{rm}^i - z_{pv}^{i,k} - z_{out}^{i,k} \geq 0,$$

$$i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K \quad (4.28)$$

$$S_{rm}^{i,k}(x_g^{i,k}, x_b^{i,k}, \mathbf{x}_s^{i,k}, \bar{S}_L^i) = f_{gs}(x_g^{i,k}) + f_b(x_b^{i,k}) - \sum_{j=1}^{N_s} \{f_{s,j}(x_{s,j}^{i,k})\} - \bar{S}_L^i,$$

$$i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K \quad (4.29)$$

$$f_{ge}(x_g^{i,k}) = a_{ge} x_g^{i,k}, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K \quad (4.30)$$

$$f_{gs}(x_g^{i,k}) = a_{gs} x_g^{i,k}, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K \quad (4.31)$$

$$f_b(x_b^{i,k}) = a_b x_b^{i,k}, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K \quad (4.32)$$

$$f_{t,j}(x_{t,j}^{i,k}) = a_{t,j} x_{t,j}^{i,k}, i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_t; k = 1, \dots, K \quad (4.33)$$

$$f_{s,j}(x_{s,j}^{i,k}) = \frac{x_{s,j}^{i,k}}{-a_{s,j} \{x_{s,j}^{i,k}\}^2 + b_{s,j} x_{s,j}^{i,k} + c_{s,j}}, i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_s; k = 1, \dots, K \quad (4.34)$$

(4.1) は、電力とガスの購入費用の期待値最小化を表した目的関数値である。(4.2), (4.3) は蓄熱槽の容量制約を表す。(4.2) が第1時間帯～第(I-1)時間帯の場合を表し, (4.3) が第I時間帯の場合を表す。(4.4) は、蒸気の余剰量に関する制約式である。(4.5)～(4.8) は、2種の冷凍機, ガスタービン, ボイラーのエネルギー生成量の容量制約を表す。(4.9)～(4.16) は、各機器の起動停止に関する制約であり、発電機起動停止問題 [8] をもとに1次式で表している。機器ごとに二つの制約を用いて表し、一つ目は、機器が一旦起動すると、一定期間は

起動状態を保たなければならないことを表す．二つ目は，停止の場合を表す．(4.17)は，蓄電池の蓄電量に関する制約である．充放電時に一部の電力が失われること考慮するために， $z_{in}^{i,k}$ に充放電効率 α を乗じている．初期の蓄電量と第 I 時間帯の蓄電量は同じにしている．(4.18)は，蓄電池の容量制約を表す．(4.19)は，太陽光発電で発電された電力が，需要などに送られる電力と蓄電池に充電される電力に分かれることを表す．(4.20)～(4.26)は，決定変数の非負制約と0-1制約を表す．(4.27)は，蓄熱槽の蓄熱量を表す．(4.28)は，電力の購入量を表すが，売電を考慮していないため，非負制約を課している．(4.29)は，蒸気の余剰量を表す．(4.30)～(4.34)は，ガスタービン，ボイラー，2種の冷凍機の入出力量の関係式を表す．(4.34)は，蒸気吸収式冷凍機の入出力量の関係を表しているが，実用的な運転計画を考慮するために，非線形制約の形で表す．

5. 非線形制約式の区分線形近似

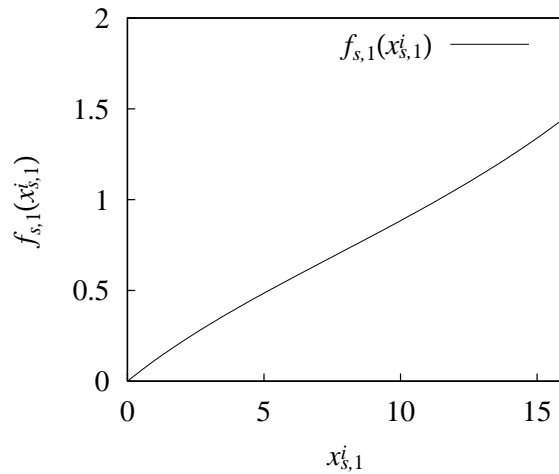


図 2: 蒸気吸収式冷凍機 1 の蒸気入力量 $f_{s,1}(x_{s,1}^i)$

太陽光発電導入モデルは，図 2 のような蒸気吸収式冷凍機の入出力量の関係を表す非線形制約式 (4.34) を含む．このモデルを線形計画問題として扱うために，(4.34) に対し区分線形近似 [2, 5] を行い線形化する． $f_{s,j}(x_{s,j}^{i,k})$ の近似を $\bar{f}_{s,j}(x_{s,j}^{i,k})$ とし，格子点を $(x_{s,j,l}, f_{s,j}(x_{s,j,l}))$ とすると， $\forall i, j, k (i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_s; k = 1, \dots, K)$ に対して $x_{s,j}^{i,k}, \bar{f}_{s,j}(x_{s,j}^{i,k})$ は以下のように表される．(5.1)，(5.2) は， $\lambda_{j,l}^{i,k}$ のうち正となるのはたかだか相隣りあう二つのみであることを要求する SOS2 (Special Order Set of type 2) 制約 [2] を表す．区分線形近似を導入したことにより，新たな決定変数 $\lambda_{j,l}^{i,k}, \mu_{j,l}^{i,k} (i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_s; k = 1, \dots, K; l = 1, \dots, p_j)$ が追加されている．そのため，決定変数の数はさらに増加し，非常に大規模な混合整数計画問題になる．

$$\begin{aligned} x_{s,j}^{i,k} &= \sum_{l=1}^{p_j} \lambda_{j,l}^{i,k} x_{s,j,l} \\ \bar{f}_{s,j}(x_{s,j}^{i,k}) &= \sum_{l=1}^{p_j} \lambda_{j,l}^{i,k} f_{s,j}(x_{s,j,l}) \\ \sum_{l=1}^{p_j} \lambda_{j,l}^{i,k} &= 1, \lambda_{j,l}^{i,k} \geq 0, l = 1, \dots, p_j \end{aligned}$$

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_{j,1}^{i,k} \leq \mu_{j,1}^{i,k} \\ \lambda_{j,2}^{i,k} \leq \mu_{j,1}^{i,k} + \mu_{j,2}^{i,k} \\ \vdots \\ \lambda_{j,p_j}^{i,k} \leq \mu_{j,p_j-1}^{i,k} + \mu_{j,p_j}^{i,k} \end{array} \right\} \quad (5.1)$$

$$\sum_{l=1}^{p_j} \mu_{j,l}^{i,k} = 1, 0 \leq \mu_{j,l}^{i,k} \in Z, l = 1, \dots, p_j \quad (5.2)$$

区分線形近似を用いた厳密解法のアルゴリズムは以下ようになる．反復ごとに，格子点数を増加させ，区分線形近似の精度を上げている．これにより，大規模な非線形混合整数計画問題を解くことが可能になった．

区分線形近似のアルゴリズム

Step 0 初期値 (初期格子点数, ε) 所与

Step 1 初期格子点設定

Step 2 制約式 (4.34) を区分線形近似した問題を解く

Step 3 各最適解 $\hat{x}_{s,j}^{i,k}$ ($i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_s; k = 1, \dots, K$) で，
 $|f_{s,j}(\hat{x}_{s,j}^{i,k}) - \bar{f}_{s,j}(\hat{x}_{s,j}^{i,k})| > \varepsilon$ ならば， $(\hat{x}_{s,j}^{i,k}, f_{s,j}(\hat{x}_{s,j}^{i,k}))$ を格子点に加える

Step 4 追加した格子点があるならば Step 2 に戻り，
 追加した格子点が一つもなければ終了

6. 確率計画法の解の評価

確率計画法の解の評価においては，確率計画問題の解の価値 VSS: value of the stochastic solution (Birge and Louveaux[1]，椎名 [8]) を用いる．確率変数を ξ としたとき，ある実現値 ξ に関する最適化問題を次のように定義する．

$$\begin{array}{ll} \min & z(x, \xi) = c^\top x + \min\{q^\top y \mid Wy = h - Tx, y \geq 0\} \\ \text{s.t.} & Ax = b, x \geq 0 \end{array}$$

確率計画問題の最適目的関数値 RP: recourse problem は次のように定義される．

$$\text{RP} = \min_x E_\xi z(x, \xi)$$

確率変数 ξ をその平均値 $\bar{\xi}$ に置き換えた確定的な問題の最適目的関数値 EV: expected value problem を次のように定義し，最適解は $\bar{x}(\bar{\xi})$ とする．

$$\text{EV} = \min_x z(x, \bar{\xi})$$

その最適解 $\bar{x}(\bar{\xi})$ を確率計画問題に適用したときの目的関数値 EEV: expected result of using the EV solution は次のように定義される．

$$\text{EEV} = E_\xi(z(\bar{x}(\bar{\xi}), \xi))$$

VSS は，次のように定義される．

$$\text{VSS} = \text{EEV} - \text{RP}$$

理論的に，EEV を求める問題で得られる最適解は RP を求める問題の実行可能解となるので，次の関係が成立する．

$$RP \leq \text{EEV}, \text{VSS} \geq 0$$

RP を求める問題は確率計画法によるモデルであり，EEV を求める問題は，確率変数を平均値に固定して考慮した確定的モデルになる．本研究における RP を求める確率計画問題の定式化は，太陽光発電導入モデルの (4.1) ~ (4.34) である．一方，EV を求める確定的な問題は，不確実性を伴う確率変数の太陽光発電の出力を平均値で固定した問題になる．そして，EEV を求める問題は，EV を求める問題で得られた起動停止の計画が，出力の不確実性の下でどのくらいの費用になるかを求める問題になる．EV，EEV を求める問題で用いる記号を表 2 に示す．

表 2: EV，EEV を求める問題で用いる記号

定数	
\bar{E}_{pv}^i	第 i 時間帯の太陽光発電の発電量の平均値 [MWh]
決定変数	
$x_{t,j}^i$	第 i 時間帯におけるターボ冷凍機 j の熱生成量 [GJ]
$x_{s,j}^i$	第 i 時間帯における蒸気吸収式冷凍機 j の熱生成量 [GJ]
x_g^i	第 i 時間帯におけるガスタービンのガス消費量 [m^3]
x_b^i	第 i 時間帯におけるボイラーのガス消費量 [m^3]
z_{in}^i	第 i 時間帯における 太陽光発電から蓄電池に向かう電力量 [MWh]
z_{out}^i	第 i 時間帯における蓄電池の放電量 [MWh]
z_{pv}^i	第 i 時間帯における 太陽光発電から直接消費される電力量 [MWh]
z_{sb}^i	第 i 時間帯における蓄電池の蓄電量 [MWh]
関数	
$Q_{ts}^i(x_t^i, x_s^i, Q_{ts}^{i-1}, \bar{Q}_L^i)$	第 i 時間帯における蓄熱槽の蓄熱量 [GJ]
$E_r^i(x_g^i, x_t^i, z_{pv}^i, z_{out}^i; \bar{E}_L^i, E_{rm}^i)$	第 i 時間帯における電力の購入量 [MWh]
$S_{rm}^i(x_g^i, x_b^i, x_s^i; \bar{S}_L^i)$	第 i 時間帯における蒸気の余剰量 [t]
$f_{ge}(x_g^i)$	ガス消費量 x_g^i に対するガスタービンの電力生成量 [MWh]
$f_{gs}(x_g^i)$	ガス消費量 x_g^i に対するガスタービンの蒸気生成量 [t]
$f_b(x_b^i)$	ガス消費量 x_b^i に対するボイラーの蒸気生成量 [t]
$f_{t,j}(x_{t,j}^i)$	熱生成量 $x_{t,j}^i$ に対するターボ冷凍機 j の電力入力量 [MWh]
$f_{s,j}(x_{s,j}^i)$	熱生成量 $x_{s,j}^i$ に対する蒸気吸収式冷凍機 j の蒸気入力量 [t]

EV を求める問題の定式化は以下のようなになる．ただし， $\forall i(i = 1, \dots, I)$ において， $x_t^i =$

$(x_{t,1}^i, \dots, x_{t,N_t}^i)^\top, \mathbf{x}_s^i = (x_{s,1}^i, \dots, x_{s,N_s}^i)^\top$ とする .

$$\text{EV} = \min \sum_{i=1}^I \{ C_{Er}^i E_r^i(x_g^i, \mathbf{x}_t^i, z_{pv}^i, z_{out}^i; \bar{E}_L^i, E_{rm}^i) + C_{Fr}^i(x_g^i + x_b^i) \}$$

s.t.

$$Q_{ts}^{\min} \leq Q_{ts}^i(\mathbf{x}_t^i, \mathbf{x}_s^i; Q_{ts}^{i-1}, \bar{Q}_L^i) \leq Q_{ts}^{\max 1}, i = 1, \dots, I-1$$

$$Q_{ts}^{\min} \leq Q_{ts}^i(\mathbf{x}_t^i, \mathbf{x}_s^i; Q_{ts}^{i-1}, \bar{Q}_L^i) \leq Q_{ts}^{\max 2}, i = I$$

$$S_{rm}^i(x_g^i, x_b^i, \mathbf{x}_s^i; \bar{S}_L^i) = \tilde{S}_{rm}^i, i = 1, \dots, I$$

$$Q_{t,j}^{\min} y_{t,j}^i \leq x_{t,j}^i \leq Q_{t,j}^{\max} y_{t,j}^i, i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_t$$

$$Q_{s,j}^{\min} y_{s,j}^i \leq x_{s,j}^i \leq Q_{s,j}^{\max} y_{s,j}^i, i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_s$$

$$E_g^{\min} y_g^i \leq f_{ge}(x_g^i) \leq E_g^{\max} y_g^i, i = 1, \dots, I$$

$$S_b^{\min} y_b^i \leq f_b(x_b^i) \leq S_b^{\max} y_b^i, i = 1, \dots, I$$

$$(4.9) - (4.16)$$

$$z_{sb}^{i-1} + \alpha z_{in}^i = z_{sb}^i + z_{out}^i, i = 1, \dots, I; z_{sb}^0 = z_{sb}^I = z_{sb}^{init}$$

$$z_{sb}^i \leq E_{sb}^{\max}, i = 1, \dots, I$$

$$\bar{E}_{pv}^i = z_{pv}^i + z_{in}^i, i = 1, \dots, I$$

$$x_{t,j}^i \geq 0, i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_t$$

$$x_{s,j}^i \geq 0, i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_s$$

$$x_g^i, x_b^i, z_{in}^i, z_{out}^i, z_{pv}^i \geq 0, i = 1, \dots, I$$

$$z_{sb}^i \geq 0, i = 1, \dots, I-1$$

$$(4.24) - (4.26)$$

Where

$$Q_{ts}^i(\mathbf{x}_t^i, \mathbf{x}_s^i; Q_{ts}^{i-1}, \bar{Q}_L^i) = - \sum_{j=1}^{N_t} \{x_{t,j}^i\} - \sum_{j=1}^{N_s} \{x_{s,j}^i\} + Q_{ts}^{i-1} + \bar{Q}_L^i + Q_{loss},$$

$$i = 1, \dots, I; Q_{ts}^0 = Q_{ts}^{init}$$

$$E_r^i(x_g^i, \mathbf{x}_t^i, z_{pv}^i, z_{out}^i; \bar{E}_L^i, E_{rm}^i)$$

$$= \sum_{j=1}^{N_t} \{f_{t,j}(x_{t,j}^i)\} + \bar{E}_L^i - f_{ge}(x_g^i) + E_{rm}^i - z_{pv}^i - z_{out}^i \geq 0,$$

$$i = 1, \dots, I$$

$$S_{rm}^i(x_g^i, x_b^i, \mathbf{x}_s^i; \bar{S}_L^i) = f_{gs}(x_g^i) + f_b(x_b^i) - \sum_{j=1}^{N_s} \{f_{s,j}(x_{s,j}^i)\} - \bar{S}_L^i, i = 1, \dots, I$$

$$f_{ge}(x_g^i) = a_{ge} x_g^i, i = 1, \dots, I$$

$$f_{gs}(x_g^i) = a_{gs} x_g^i, i = 1, \dots, I$$

$$f_b(x_b^i) = a_b x_b^i, i = 1, \dots, I$$

$$f_{t,j}(x_{t,j}^i) = a_{t,j} x_{t,j}^i, i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_t$$

$$f_{s,j}(x_{s,j}^i) = \frac{x_{s,j}^i}{-a_{s,j} \{x_{s,j}^i\}^2 + b_{s,j} x_{s,j}^i + c_{s,j}}, i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_s$$

この問題の起動停止に関する決定変数の最適解を, $\hat{y}_{t,j}^i (i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_t), \hat{y}_{s,j}^i (i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_s), \hat{y}_g^i, \hat{y}_b^i (i = 1, \dots, I)$ とする. EEV を求める問題を以下に示す. 太陽光発電導入モデルとの違いは, 起動停止に関する 1 段階決定変数が固定されて, 定数となっていることである. そのため, 1 段階決定変数だけを含む起動停止に関する制約 (4.9) ~ (4.16) が取り除かれている.

$$\text{EEV} = \min \sum_{k=1}^K \left[Pr_k \sum_{i=1}^I \left\{ C_{Er}^i E_r^{i,k}(x_g^{i,k}, \mathbf{x}_t^{i,k}, z_{pv}^{i,k}, z_{out}^{i,k}; \bar{E}_L^i, E_{rm}^i) + C_{Fr}^i (x_g^{i,k} + x_b^{i,k}) \right\} \right]$$

s.t.

$$(4.2) - (4.4)$$

$$Q_{t,j}^{\min} \hat{y}_{t,j}^i \leq x_{t,j}^{i,k} \leq Q_{t,j}^{\max} \hat{y}_{t,j}^i, i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_t; k = 1, \dots, K$$

$$Q_{s,j}^{\min} \hat{y}_{s,j}^i \leq x_{s,j}^{i,k} \leq Q_{s,j}^{\max} \hat{y}_{s,j}^i, i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, N_s; k = 1, \dots, K$$

$$E_g^{\min} \hat{y}_g^i \leq f_{ge}(x_g^{i,k}) \leq E_g^{\max} \hat{y}_g^i, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K$$

$$S_b^{\min} \hat{y}_b^i \leq f_b(x_b^{i,k}) \leq S_b^{\max} \hat{y}_b^i, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K$$

$$(4.17) - (4.23)$$

Where

$$(4.27) - (4.34)$$

7. 数値実験

ベンチマーク問題のデータを参考に, 各月の 1 日の運用計画を立てる数値実験を 12 ヶ月分行う. 昼間の電力, 熱, 蒸気の需要は, それぞれ約 20[MWh], 20[GJ], 10[t] である. 太陽光発電の容量は 4[MW] とし, 蓄電池の容量は 0.5, 1, 1.5, 2[MWh] の 4 通りで比較する. 初期の蓄電池の蓄電量 z_{sb}^{init} は, 蓄電池容量の 3 割とし, 充放電効率 α は 0.8 とした. 蒸気吸収式冷凍機は, 1 台目のみ使用している. 太陽光発電の発電量のシナリオ生成においては, NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) のデータベース (METPV-11) [7] を参考にした. NEDO の日射量データベースは, 20 年間 (1990 年 ~ 2009 年) のデータから平均年データを作成している. 本研究では, 平均年における東京での水平面全天日射量にもとづいて, 月ごと 1 日分のデータを 1 シナリオとして作成した. 経済産業省資源エネルギー庁 [3] によると, 太陽光発電の年間発電量は容量 1[kW] あたり約 1100[kWh] である. この容量と年間発電量の関係を満たすように, 水平面全天日射量を定数倍してシナリオを生成した. シナリオは, 図 3 のように扇 (ファン) 状に生成されている. シナリオ数は月の日数とし, 各シナリオの確率は $1/(\text{月の日数})$ とする.

モデリング言語は AMPL, ソルバーは Gurobi 7.5.0 を使用した. Gurobi のパラメータについては, MIPGAP = 10^{-7} とした. 区分線形近似のパラメータについては, 初期格子点数を 256 とし, $\varepsilon = 10^{-6}$ とした.

8. 結果

まずは, 確率計画法を用いた太陽光発電導入モデルの評価のために RP と EEV の比較を行う. 蓄電池容量 0.5, 1, 1.5, 2[MWh] の場合の RP と EEV の比較の結果を表 3 ~ 表 6 に示す. ただし, 導入前つまりベンチマーク問題の 1 日の運用費用は, 4,042,763 円であり, 割

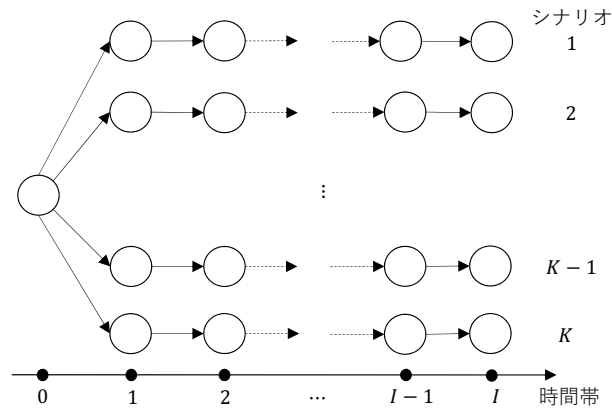


図 3: 太陽光発電の出力のシナリオファン

合は次のように定義している。

$$\text{割合} = \frac{\text{VSS}}{\text{ベンチマーク問題の最適目的関数値} - \text{EEV}} \times 100[\%]$$

太陽光発電導入モデルの方が確定的なモデルよりも運用費用が小さくなり、VSS の値が非負となった。VSS の最大値は、蓄電池容量 1[MWh] の 11 月で 2.3% であった。VSS が 0 の箇所では、太陽光発電導入モデルと確定的なモデルで同じ起動停止の最適解が得られた。確定的な問題において、実行不可能になった箇所がいくつかある。それらの箇所では、確定的な問題で得られた起動停止に関する変数の最適解を用いた計画では、容量制約などに違反し、太陽光発電の発電量の不確実性に対応できなかったと言える。

次に、蓄電池容量を変化させたときの年間費用の比較を表 7 に示す。ただし、年間費用、導入前との差額、差額の割合はそれぞれ以下のように計算する。

$$\begin{aligned} \text{年間費用} &= (1 \text{ 月の RP}) \cdot (1 \text{ 月の日数}) + (2 \text{ 月の RP}) \cdot (2 \text{ 月の日数}) \\ &+ \cdots + (12 \text{ 月の RP}) \cdot (12 \text{ 月の日数}) [\text{円}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{導入前との差額} &= \text{ベンチマーク問題の最適目的関数値} \times 365 - \text{年間費用} [\text{円}] \\ &= \text{ベンチマーク問題の年間費用} - \text{年間費用} [\text{円}] \end{aligned}$$

$$\text{差額の割合} = \frac{\text{導入前との差額}}{\text{ベンチマーク問題の年間費用}} \times 100[\%]$$

表 7 から、差は微小ではあるが蓄電池の容量が大きいほど、年間費用が小さくなった。

最後に、初期投資費用回収年数の計算を行う。初期投資費用としては、太陽光発電と蓄電池の費用を考える。経済産業省 [3], [4] よると、容量 1[MW] 以上の太陽光発電の初期投資費用は 27.5[万円/kW] であり、大型蓄電池として使われる NAS 電池の費用は 4[万円/kWh] である。初期投資費用回収年数は、内部収益率 [6] をもとに、割引率 r を与えたときの回収年数 n を求めて計算する。確定的なモデルについても、太陽光発電導入モデルと同様に計算する。ただし、実行不可能になった EEV は、残りの月の VSS の平均値を RP に加えて計算

している。

$$\text{初期投資費用} = \sum_{i=1}^n \frac{\text{導入前との差額}}{(1+r)^i}$$

割引率 r が 0 及び 1[%] の計算結果を表 8, 9 に示す。太陽光発電導入モデルと確定的なモデルで回収年数を比較すると、太陽光発電導入モデルの方が初期投資費用回収年数は小さい。そのため、太陽光発電導入モデルの方が、太陽光発電の導入を前向きに検討できると言える。また、蓄電池容量で比較すると、容量が大きいほど回収年数が大きくなる。そのため、本研究モデルでは、蓄電池の容量を大きくすることによって得られる費用の減少分は、蓄電池の初期費用に対して小さいと言える。最後に、割引率 r が 0 及び 1[%] と小さい値でも、初期投資費用を回収するのに約 25~30 年かかると言える。したがって、自家発電を目的とした太陽光発電を導入するには、まだ初期投資費用が高価であると考えられる。

表 3: RP と EEV の比較 (蓄電池容量 0.5 [MWh])

月	RP[円]	EEV[円]	VSS[円]	割合 [%]
1	3,946,356	3,946,356	0	0
2	3,921,801	3,921,801	0	0
3	3,906,804	3,908,387	1,584	1.2
4	3,881,846	3,883,335	1,489	0.9
5	3,869,210	3,870,449	1,239	0.7
6	3,897,088	3,898,978	1,890	1.3
7	3,872,626	3,874,121	1,495	0.9
8	3,880,509	3,881,601	1,092	0.7
9	3,925,914	3,925,914	0	0
10	3,939,039	3,939,039	0	0
11	3,954,060	3,954,060	0	0
12	3,956,902	3,956,902	0	0

表 4: RP と EEV の比較 (蓄電池容量 1 [MWh])

月	RP[円]	EEV[円]	VSS[円]	割合 [%]
1	3,946,209	3,947,316	1,107	1.2
2	3,921,607	3,921,607	0	0
3	3,906,488	3,908,086	1,597	1.2
4	3,881,487	3,882,983	1,495	0.9
5	3,868,814	3,870,060	1,245	0.7
6	3,896,726	3,898,624	1,898	1.3
7	3,872,237	3,873,733	1,496	0.9
8	3,880,117	3,881,212	1,096	0.7
9	3,925,601	3,925,601	0	0
10	3,938,757	3,938,757	0	0
11	3,953,877	3,955,884	2,007	2.3
12	3,956,763	3,956,763	0	0

表 5: RP と EEV の比較 (蓄電池容量 1.5 [MWh])

月	RP[円]	EEV[円]	VSS[円]	割合 [%]
1	3,946,088	3,946,088	0	0
2	3,921,477	3,923,273	1,796	1.5
3	3,906,315	3,907,925	1,611	1.2
4	3,881,188	3,882,690	1,502	0.9
5	3,868,477	3,869,732	1,255	0.7
6	3,896,431	3,898,341	1,910	1.3
7	3,871,885	3,873,391	1,506	0.9
8	3,879,794	3,880,901	1,107	0.7
9	3,925,367	実行不可能	—	—
10	3,938,612	実行不可能	—	—
11	3,953,780	3,955,055	1,275	1.5
12	3,956,665	3,956,665	0	0

表 6: RP と EEV の比較 (蓄電池容量 2 [MWh])

月	RP[円]	EEV[円]	VSS[円]	割合 [%]
1	3,946,019	3,946,019	0	0
2	3,921,389	3,922,620	1,231	1.0
3	3,906,215	実行不可能	—	—
4	3,880,977	3,882,486	1,509	0.9
5	3,868,213	3,869,478	1,266	0.7
6	3,896,202	3,898,119	1,917	1.3
7	3,871,603	3,873,122	1,519	0.9
8	3,879,569	3,880,686	1,118	0.7
9	3,925,202	実行不可能	—	—
10	3,938,533	3,940,058	1,524	1.5
11	3,953,723	3,953,723	0	0
12	3,956,604	3,956,604	0	0

表 7: 各蓄電池容量の年間費用

蓄電池容量	年間費用 [円]	導入前との差額 [円]	差額の割合 [%]
0.5[MWh]	1,428,092,483	47,516,038	3
1[MWh]	1,427,986,692	47,621,828	3
1.5[MWh]	1,427,907,228	47,701,293	3
2[MWh]	1,427,851,436	47,757,085	3

表 8: 初期投資費用回収年数 (割引率 $r = 0$ [%])

蓄電池容量	太陽光発電導入モデル	確定的モデル
0.5[MWh]	23.57	23.71
1[MWh]	23.94	24.12
1.5[MWh]	24.32	24.54
2[MWh]	24.71	24.90

表 9: 初期投資費用回収年数 (割引率 $r = 1$ [%])

蓄電池容量	太陽光発電導入モデル	確定的モデル
0.5[MWh]	27.02	27.19
1[MWh]	27.50	27.74
1.5[MWh]	28.00	28.30
2[MWh]	28.52	28.78

9. 結論

本研究では、ベンチマーク問題を拡張することで、太陽光発電と蓄電池を導入した場合の大規模施設でのエネルギープラント運用計画の最適化モデルを開発した。太陽光発電の出力の不確実性を確率計画法により考慮した。大規模な非線形混合整数計画問題となったモデルに対して、区分線形近似を導入することで、厳密解を得ることを可能にした。そして、従来の確定的なモデルと比較することで、確率計画法による本研究モデルが有用であることを示した。また、経済的評価を行うことで、開発したモデルが実用的な課題に応用できる可能性を示した。

今後の課題としては、蓄電池の使用目的の改善やコミュニティ全体の最適化などがある。いずれにおいても、本研究モデルより大規模な数理計画問題になると考えられる。そのため、効率的な解法の適用が求められる。

参考文献

- [1] J.R. Birge and F. Louveaux: *Introduction to Stochastic Programming* (Springer, New York, 1997).
- [2] N. Inui and K. Tokoro: Finding the feasible solution and lower bound of the energy plant operational planning problem by an MILP formulation. *IEEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control*, (2015).
- [3] 経済産業省資源エネルギー庁: 太陽光発電フィールドテスト事業に関するガイドライン基礎編 (2013 年度版). http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/ohisama_power/common/pdf/guideline-2013.pdf (2017 年 12 月 18 日閲覧).
- [4] 経済産業省 蓄電池戦略プロジェクトチーム: 蓄電池戦略. http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_problem_committee/028/pdf/28sankou2-2.pdf (2017 年 12 月 18 日閲覧).
- [5] 今野浩: 整数計画法 (産業図書, 1981).

- [6] デービッド・G・ルーエンバーガー: 金融工学入門. 今野浩, 鈴木賢一, 枇々木規雄 (訳): (日本経済新聞社, 2002).
- [7] NEDO: 日射に関するデータベース. <http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html> (2017年11月3日閲覧).
- [8] 椎名孝之: 確率計画法 (朝倉書店, 2015).
- [9] R. Suzuki and T. Okamoto: An introduction of the energy plant operational planning problem: a formulation and solutions. *IEEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control*, (2015).
- [10] 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*, 62-1 (2017), 44–49.

椎名孝之
早稲田大学
創造理工学部経営システム工学科
〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1
E-mail: tshiina@waseda.jp

ABSTRACT

ENERGY PLANT OPERATION AND INSTALLATION PLANNING VIA
STOCHASTIC PROGRAMMING

Tomoki Fukuba Takayuki Shiina
Waseda University

Ken-ichi Tokoro
Central Research Institute of Electric Power Industry

An optimization model of energy plants operational planning when installing photovoltaic generation and a storage battery is developed via two-stage stochastic programming. This determines the operational planning while considering the uncertainty of the output of the photovoltaic generation. The uncertainty is represented by a set of discrete scenarios. The decisions indicating the states of the devices are made in the first stage, and the amounts of the energy flow are determined in the second stage for each scenario. The objective is the minimization of the expected value of the operational cost. Including a nonlinear constraint for a practical operational planning, the model becomes a large-scale nonlinear mixed integer programming problem. In order to obtain an exact solution, we reformulate it as a large-scale mixed integer programming problem by introducing piecewise linear approximation. Computational results show the effectiveness of our stochastic model by comparing it with the conventional deterministic model. We also calculate recovery periods of the investment cost for the photovoltaic generation and the storage battery and make an economical evaluation of installing them in Japan.