

## 付録

モデルの式体系を式 1 から式 28 に示す。式中の添字および内生変数、外生変数は表 1 から表 3 の通りである。

表 1 式中の添字

	内容
$n \in N$	地域（例、北海道エリア）
$i \in I$	部門（例、交流）
$l \in L$	ブランチ（例、インバータ）
$t \in T$	時点
$r \in R$	発電技術（例、大規模 PV）
$s \in S$	蓄電技術（例、リチウムイオン蓄電池）
$k \in K$	エネルギー種（例、天然ガス）
$y \in Y$	年
$MT_t$	時点グループ（エネルギー需給バランス制約）
$MK_k$	エネルギー種グループ（エネルギー供給制約）
$ME_n$	地域グループ（エネルギー供給制約）
$MQ_n$	地域グループ（CO <sub>2</sub> 排出制約）

表 2 式中の内生変数

	単位	内容
$VG_{n,i,r,t}$	MW	地域 $n$ 、部門 $i$ 、時点 $t$ における発電技術 $r$ の出力
$VGS_{n,i,r}$	MW	地域 $n$ 、部門 $i$ における発電技術 $r$ の設備容量
$VGR_{n,i,r}$	MW	地域 $n$ 、部門 $i$ における発電技術 $r$ の新規導入量
$VF_{l,t}^+$	MW	ブランチ $l$ 、時点 $t$ における順方向のエネルギーフロー
$VF_{l,t}^-$	MW	ブランチ $l$ 、時点 $t$ における逆方向のエネルギーフロー
$VFS_l$	MW	ブランチ $l$ の設備容量
$VFR_l$	MW	ブランチ $l$ の新規導入量
$VH_{n,i,s,t}$	MW	地域 $n$ 、部門 $i$ 、時点 $t$ における蓄電技術 $s$ の充放電
$VE_{n,i,s,t}$	MWh	地域 $n$ 、部門 $i$ 、時点 $t$ における蓄電技術 $s$ の貯蔵量
$VES_{n,i,s}$	MWh	地域 $n$ 、部門 $i$ における蓄電技術 $s$ の設備容量
$VER_{n,i,s}$	MWh	地域 $n$ 、部門 $i$ における蓄電技術 $s$ の新規導入量
$VP_{n,i,k}$	MWh	地域 $n$ 、部門 $i$ におけるエネルギー種 $k$ の供給量
$VQ_{n,i}$	tCO <sub>2</sub>	地域 $n$ 、部門 $i$ における CO <sub>2</sub> 排出量
$VTC$	\$	目的変数
$\delta_{n,i,MT_t}$	-	地域 $n$ 、部門 $i$ 、時点グループ $MT_t$ におけるエネルギー需給 均衡のスラック変数

表 3 式中の外生変数

	単位	内容
$w_t$	h	時点 $t$ の重みづけ
$int$	year	計算年の間隔
$\underline{g}_{n,i,r,t}$	MW/MW	地域 $n$ 、部門 $i$ 、時点 $t$ における電源 $r$ の設備容量あたりの最小出力
$\bar{g}_{n,i,r,t}$	MW/MW	地域 $n$ 、部門 $i$ 、時点 $t$ における電源 $r$ の設備容量あたりの最大出力
$\underline{gs}_{n,i,r}$	MW	地域 $n$ 、部門 $i$ における電源 $r$ の最小設備容量
$\bar{gs}_{n,i,r}$	MW	地域 $n$ 、部門 $i$ における電源 $r$ の最大設備容量
$\underline{gr}_{n,i,r}$	MW	地域 $n$ 、部門 $i$ における電源 $r$ の最小新規導入量
$\bar{gr}_{n,i,r}$	MW	地域 $n$ 、部門 $i$ における電源 $r$ の最大新規導入量
$\eta_{n,i,r,k}$	MW/MW	地域 $n$ 、部門 $i$ における電源 $r$ の発電効率
$rd_{n,i,r}$	(MW/MW)/h	地域 $n$ 、部門 $i$ における電源 $r$ の 2 時点間の最大出力減少率
$ru_{n,i,r}$	(MW/MW)/h	地域 $n$ 、部門 $i$ における電源 $r$ の 2 時点間の最大出力増加率
$c_{n,i,r}$	\$/MW/year	地域 $n$ 、部門 $i$ における電源 $r$ の年換算初期費用
$fo_{n,i,r,t}$	\$/MW/year	地域 $n$ 、部門 $i$ における電源 $r$ の固定運転維持費用
$vo_{n,i,r,t}$	\$/MWh	地域 $n$ 、部門 $i$ における電源 $r$ の変動運転維持費用
$sc_{n,i,r,y}$	MW	地域 $n$ 、部門 $i$ 、年 $y$ における電源 $r$ の新規導入量
$lt_{n,i,r}$	year	地域 $n$ 、部門 $i$ における電源 $r$ の耐用年数
$\underline{f}_{l,t}^+$	MW/MW	ブランチ $l$ の時点 $t$ における設備容量あたりの順方向の最小エネルギーフロー
$\bar{f}_{l,t}^+$	MW/MW	ブランチ $l$ の時点 $t$ における設備容量あたりの順方向の最大エネルギーフロー
$\underline{f}_{l,t}^-$	MW/MW	ブランチ $l$ の時点 $t$ における設備容量あたりの逆方向の最小エネルギーフロー
$\bar{f}_{l,t}^-$	MW/MW	ブランチ $l$ の時点 $t$ における設備容量あたりの逆方向の最大エネルギーフロー
$\underline{fs}_l$	MW	ブランチ $l$ の最小設備容量
$\bar{fs}_l$	MW	ブランチ $l$ の最大設備容量
$\underline{fr}_l$	MW	ブランチ $l$ の最小新規導入量
$\bar{fr}_l$	MW	ブランチ $l$ の最大新規導入量
$\eta_{l,t}$	MW/MW	ブランチ $l$ の時点 $t$ における効率
$K_{n,i,l,t}^+$	-	ノード $(n,i)$ およびブランチ $l$ の接続行列（順方向）
$K_{n,i,l,t}^-$	-	ノード $(n,i)$ およびブランチ $l$ の接続行列（逆方向）
$c_l$	\$/MW/year	ブランチ $l$ の年換算初期費用
$fo_l$	\$/MW/year	ブランチ $l$ の固定運転維持費用
$vo_l$	\$/MWh	ブランチ $l$ の変動運転維持費用
$sc_{l,y}$	MW	ブランチ $l$ の年 $y$ における新規導入量
$lt_l$	year	ブランチ $l$ の耐用年数
$\underline{e}_{n,i,s,t}$	MWh	地域 $n$ 、部門 $i$ 、時点 $t$ における蓄電技術 $s$ の設備容量あたりの最小貯蔵量
$\bar{e}_{n,i,s,t}$	MWh	地域 $n$ 、部門 $i$ 、時点 $t$ における蓄電技術 $s$ の設備容量あ

		たりの最大貯蔵量
$\underline{eS}_{n,i,s}$	MWh	地域 $n$ 、部門 $i$ における蓄電技術 $s$ の最小設備容量
$\overline{eS}_{n,i,s}$	MWh	地域 $n$ 、部門 $i$ における蓄電技術 $s$ の最大設備容量
$\underline{er}_{n,i,s}$	MWh	地域 $n$ 、部門 $i$ における蓄電技術 $s$ の最小新規導入量
$\overline{er}_{n,i,s}$	MWh	地域 $n$ 、部門 $i$ における蓄電技術 $s$ の最大新規導入量
$\eta_{n,i,s}$	(MWh/MWh)/h	地域 $n$ 、部門 $i$ における蓄電技術 $s$ の自己放電率
$c_{n,i,s}$	\$/MWh/year	地域 $n$ 、部門 $i$ における蓄電技術 $s$ の年換算初期投資
$fo_{n,i,s}$	\$/MWh/year	地域 $n$ 、部門 $i$ における蓄電技術 $s$ の固定運転維持費用
$d_{n,i,MT_t}$	MW	地域 $n$ 、部門 $i$ における時点グループ $MT_t$ におけるエネルギー需要
$\epsilon_k$	tCO <sub>2</sub> /MWh	エネルギー種 $k$ の CO <sub>2</sub> 排出係数
$QMAX_{MN_n}$	tCO <sub>2</sub>	地域グループ $MN_n$ における CO <sub>2</sub> 排出制約
$EMAX_{ME_n,MK_k}$	MWh	地域グループ $ME_n$ におけるエネルギー種グループ $MK_k$ の供給制約

電力システムモデルは各技術の新規導入ならびに運転に係る費用の総和として表現される総システム費用  $VTC$  を最小化するように、年間の新規導入量ならびに毎時の運転状況を最適化する（式 1）。前者の新規導入に係る費用は各技術の新規導入量に年換算初期費用を乗じたものの総和として表現される。後者の運転維持に係る費用は各技術の設備容量に固定運転維持費用を乗じたものと各技術の稼働量に変動運転維持費用を乗じたものの総和として表現される。

$$\begin{aligned}
VTC = & \sum_{n,i,r} c_{n,i,r} \cdot VGR_{n,i,r} + \sum_l c_l \cdot VFR_l + \sum_{n,i,s} c_{n,i,s} \cdot VER_{n,i,s} \\
& + \sum_{n,i,r} fo_{n,i,r} \cdot VGS_{n,i,r} + \sum_l fo_l \cdot VFS_l + \sum_{n,i,s} fo_{n,i,s} \cdot VES_{n,i,s} \\
& + \sum_{n,i,r,t} w_t \cdot vo_{n,i,r,t} \cdot VG_{n,i,r,t} + \sum_{l,t} w_t \cdot vo_l \cdot (VF_{l,t}^+ + VF_{l,t}^-) \rightarrow \min
\end{aligned} \tag{1}$$

ここで、 $w_t$ （単位：h）は式 2 のように定義される時点  $t$  の重みづけのための変数であり、例えば式 1 では発電電力（単位：W）を発電電力量（単位：Wh）に変換している。 $w_t$  はモデル内の時間解像度に応じて定義され、本研究のように時間解像度が年間 8760 時間である場合は  $w_t = 1$  となる。

$$\sum_t w_t = 8760 \tag{2}$$

地域  $n$ 、部門  $i$ 、時点グループ  $MT_t$  におけるエネルギー需給均衡に関する制約は式 3 のようにして課される。左辺はエネルギーの発生、貯蔵ならびに放出、正味の流入の総和であり、右辺  $d_{n,i,MT_t}$  は地域  $n$ 、部門  $i$ 、時点グループ  $MT_t$  におけるエネルギー需要を表している。 $\delta_{n,i,MT_t}$  は非負のスラック変数である。交流（送電・配電）部門に関しては、 $\delta_{n,i,MT_t} = 0$  である。

あり、エネルギー需給均衡が常に維持される一方、その他の部門に関しては、過剰供給が許容される。

$$\sum_{t \in MT_t} \left( \sum_r VG_{n,i,r,t} + \sum_s VH_{n,i,s,t} - \sum_l K_{n,i,l,t}^+ VF_{l,t}^+ + \sum_l K_{n,i,l,t}^- VF_{l,t}^- \right) = d_{n,i,MT_t} + \delta_{n,i,MT_t} \quad (3)$$

$$\delta_{n,i,MT_t} \geq 0$$

ここで、ノード（地域  $n$ 、部門  $i$ ）およびブランチ  $l$  の順方向の接続行列  $K_{n,i,l,t}^+$  ならびに逆方向の接続行列  $K_{n,i,l,t}^-$  は式 4 のように定義される。

$$K_{n,i,l,t}^+ = \begin{cases} 1, & \text{if } l \text{ starts at } n, i \\ -\eta_{l,t}, & \text{if } l \text{ ends at } n, i \end{cases}, \quad K_{n,i,l,t}^- = \begin{cases} \eta_{l,t}, & \text{if } l \text{ starts at } n, i \\ -1, & \text{if } l \text{ ends at } n, i \end{cases} \quad (4)$$

ブランチ  $l$  は有向であり、各ブランチの既定の方向に基づいて、順方向のエネルギーフロー  $VF_{l,t}^+$  と逆方向のエネルギーフロー  $VF_{l,t}^-$  が定義される。接続行列  $K_{n,i,l,t}^+$ 、 $K_{n,i,l,t}^-$  の各要素はノード（地域  $n$ 、部門  $i$ ）とブランチ  $l$  の接続状況を表しており、ブランチ  $l$  の効率  $\eta_{l,t}$  によって、エネルギーの流出入に伴う損失を考慮している。図 1 のような部門  $i$  および時点  $t$  を省略した 3 ノード・2 ブランチの簡易的な例では、順方向および逆方向の接続行列は 3 行・2 列の行列として定義される。

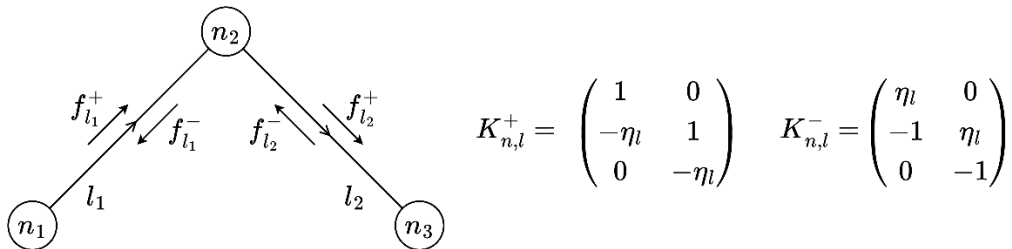


図 1 3 ノード・2 ブランチでの例

電源  $r$  の出力は設備容量ならびに設備容量あたりの最小・最大出力により制約される（式 5）。出力調整が可能な電源については、設備容量あたりの最大出力  $\bar{g}_{n,i,r,t}$  として 1 が与えられ、毎時の出力  $VG_{n,i,r,t}$  は設備容量  $VGS_{n,i,r}$  以下に制約される。一方で、太陽光・風力発電等に関しては、外生的に毎時の出力パターン  $\bar{g}_{n,i,r,t}$  が与えられる。例えば、日射が得られない夜間には、太陽光発電の設備容量あたりの最大出力として  $\bar{g}_{n,i,r,t} = 0$  が与えられる。また、太陽光・風力発電の毎時の出力抑制量は  $\bar{g}_{n,i,r,t} \cdot (VGS_{n,i,r} - VG_{n,i,r,t})$  と表現される。

$$\underline{g}_{n,i,r,t} \cdot VGS_{n,i,r} \leq VG_{n,i,r,t} \leq \bar{g}_{n,i,r,t} \cdot VGS_{n,i,r} \quad (5)$$

さらに、電源  $r$  の 2 時点間の出力変化  $VG_{n,i,r,t} - VG_{n,i,r,t-1}$  は式 6 により制約される。 $rd_{n,i,r}$  および  $ru_{n,i,r}$  は最大出力減少および増加率であり、出力調整可能な電源の負荷追従能力を表現するパラメータである。

$$-w_t \cdot rd_{n,i,r} \cdot VGS_{n,i,r} \leq VG_{n,i,r,t} - VG_{n,i,r,t-1} \leq w_t \cdot ru_{n,i,r} \cdot VGS_{n,i,r} \quad (6)$$

ブランチ  $l$ 、時点  $t$  における順方向のエネルギーフロー  $VF_{l,t}^+$  および逆方向のエネルギーフロー  $VF_{l,t}^-$  は設備容量  $VFS_l$  と設備容量あたりの最小・最大エネルギーフローにより制約される（式 7、式 8）。ここで、電解槽のような単方向のブランチに関しては、 $\overline{f_{l,t}^-} = 0$  が与えられ、逆方向のエネルギーフローは許容されない。

$$\underline{f_{l,t}^+} \cdot VFS_l \leq VF_{l,t}^+ \leq \overline{f_{l,t}^+} \cdot VFS_l \quad (7)$$

$$\underline{f_{l,t}^-} \cdot VFS_l \leq VF_{l,t}^- \leq \overline{f_{l,t}^-} \cdot VFS_l \quad (8)$$

エネルギー貯蔵技術  $s$  の充放電量  $VH_{n,i,s,t}$  自体に制約は課されず、充放電はエネルギー貯蔵技術  $s$  が属するノードが接続されるブランチの設備容量により制約される（式 9）。ここで、式 3 の通り、モデル内では充放電量  $VH_{n,i,s,t}$  はエネルギーの放出を正、貯蔵を負として扱う。

$$-\infty \leq VH_{n,i,s,t} \leq +\infty \quad (9)$$

エネルギー貯蔵技術  $s$  の貯蔵量  $VE_{n,i,s,t}$  は設備容量ならびに設備容量あたりの最小・最大貯蔵量により制約される（式 10）。ここで、本モデルではエネルギー貯蔵技術  $s$  の出力に関する設備容量  $VFS_l$ （単位：MW）と貯蔵量に関する設備容量  $VES_{n,i,s}$ （単位：MWh）はそれぞれ独立して最適化されることに留意されたい。

$$\underline{e}_{n,i,s,t} \cdot VES_{n,i,s} \leq VE_{n,i,s,t} \leq \bar{e}_{n,i,s,t} \cdot VES_{n,i,s} \quad (10)$$

さらに、時点  $t$  におけるエネルギー貯蔵技術  $s$  の貯蔵量  $VE_{n,i,s,t}$  は、時点  $t-1$  の貯蔵量  $VE_{n,i,s,t-1}$  および時点  $t$  の充放電量  $VH_{n,i,s,t}$  に依存する（式 11）。ここで、 $\eta_{n,i,s}$  はエネルギー貯蔵技術  $s$  の自己放電率である。また、計算開始時の貯蔵量  $VE_{n,i,s,0}$  および計算終了時の貯蔵量  $VE_{n,i,s,|T|}$  について式 12 を課す。これは計算開始時に設備容量の上限までエネルギーを貯蔵し、計算終了時にはそれらを全て放出するという挙動を抑制するためである。

$$VE_{n,i,s,t} = \eta_{n,i,s}^{w_t} \cdot VE_{n,i,s,t-1} - w_t \cdot VH_{n,i,s,t} \quad (11)$$

$$VE_{n,i,s,0} = VE_{n,i,s,|T|} \quad (12)$$

各技術の設備容量（ $VGS_{n,i,r}$ 、 $VFS_l$ 、 $VES_{n,i,s}$ ）、新規導入量（ $VGR_{n,i,r}$ 、 $VFR_l$ 、 $VER_{n,i,s}$ ）は式 13 から式 18 により制約される。特に、電源  $r$  の最大の設備容量  $\overline{gs}_{n,i,r}$  は再生可能エネルギー電

源の導入ポテンシャル、電源  $r$  やブランチ  $l$  の最大の新規導入量  $\overline{gr}_{n,i,r}$ 、 $\overline{fr}_l$  は 2015 年以前の既存・計画容量の設定と関連している。

$$\underline{gs}_{n,i,r} \leq VGS_{n,i,r} \leq \overline{gs}_{n,i,r} \quad (13)$$

$$\underline{gr}_{n,i,r} \leq VGR_{n,i,r} \leq \overline{gr}_{n,i,r} \quad (14)$$

$$\underline{fs}_l \leq VFS_l \leq \overline{fs}_l \quad (15)$$

$$\underline{fr}_l \leq VFR_l \leq \overline{fr}_l \quad (16)$$

$$\underline{es}_{n,i,s} \leq VES_{n,i,s} \leq \overline{es}_{n,i,s} \quad (17)$$

$$\underline{er}_{n,i,s} \leq VER_{n,i,s} \leq \overline{er}_{n,i,s} \quad (18)$$

モデル内で各技術の設備容量は計算期間を通して動的に扱われる。式 19 から式 21 のように、計算年  $y^*$  における設備容量 ( $VGS_{n,i,r}$ 、 $VFS_l$ 、 $VES_{n,i,s}$ ) は新規導入量 ( $VGR_{n,i,r}$ 、 $VFR_l$ 、 $VER_{n,i,s}$ ) およびある年  $y$  に導入された既存容量 ( $sc_{n,i,r,y}$ 、 $sc_{l,y}$ 、 $sc_{n,i,s,y}$ ) の総和として表現される。この際、各技術の耐用年数 ( $lt_{n,i,r}$ 、 $lt_l$ 、 $lt_{n,i,s}$ ) が考慮される。さらに、式 22 から式 24 のように、ある年  $y$  の新規導入量 ( $VGR_{n,i,r}^y$ 、 $VFR_l^y$ 、 $VER_{n,i,s}^y$ ) は次の計算年にて既存容量として与えられる。

$$VGS_{n,i,r} = VGR_{n,i,r} \cdot \text{int} + \sum_y sc_{n,i,r,y} \quad (\forall y \in \{y | y + lt_{n,i,r} \leq y^*\}) \quad (19)$$

$$VFS_l = VFR_l \cdot \text{int} + \sum_y sc_{l,y} \quad (\forall y \in \{y | y + lt_l \leq y^*\}) \quad (20)$$

$$VES_{n,i,s} = VER_{n,i,s} + \sum_y sc_{n,i,s,y} \quad (\forall y \in \{y | y + lt_{n,i,s} \leq y^*\}) \quad (21)$$

$$sc_{n,i,r,y}^{y+1} = VGR_{n,i,r}^y \quad (22)$$

$$sc_{l,y}^{y+1} = VFR_l^y \quad (23)$$

$$sc_{n,i,s,y}^{y+1} = VER_{n,i,s}^y \quad (24)$$

地域  $n$ 、部門  $i$  におけるエネルギー種  $k$  の年間総供給量  $VP_{n,i,k}$  は電源  $r$  の毎時の出力  $VG_{n,i,r,t}$  および発電効率  $\eta_{n,i,r,k}$  を用いて式 25 のように表現される。さらに、年間総供給量  $VP_{n,i,k}$  は式 26 のように、地域  $n$  およびエネルギー種  $k$  のグループ、 $ME_n$  および  $MK_k$  ごとに上限  $EMAX_{MN_n,MK_k}$  が課される。

$$VP_{n,i,k} = \sum_{r,t} \frac{1}{\eta_{n,i,r,k}} \cdot w_t \cdot VG_{n,i,r,t} \quad (25)$$

$$\sum_{n \in ME_n} \sum_i \sum_{k \in MK_k} VP_{n,i,k} \leq EMAX_{MN_n,MK_k} \quad (26)$$

地域  $n$ 、部門  $i$  による年間総  $\text{CO}_2$  排出量  $VQ_{n,i}$  はエネルギー種  $k$  の年間総供給量  $VP_{n,i,k}$  ならびに排出係数  $\epsilon_k$  を用いて、式 27 のように表現される。 $\text{CO}_2$  排出制約  $QMAX_{MN_n}$  は地域  $n$  のグループ  $MQ_n$  ごとに式 28 のように課される。

$$VQ_{n,i} = \sum_k V^{P_{n,i,k}} \epsilon_k \quad (27)$$

$$\sum_{n \in MQ_n} \sum_i VQ_{n,i} \leq QMAX_{MN_n} \quad (28)$$

以上