

## 演習+レポートについて

## 1 線形計画法

ベクトル  $x$  を変数として、(1),(2) 式

$$Ax \leq b \quad (1)$$

$$x \geq 0 \quad (2)$$

の制約条件もとで (3) 式

$$cx \rightarrow \min \quad (3)$$

の目的関数を最小化（または最大化）する。なお、 $x, b$  は縦ベクトル、 $c$  は横ベクトルである。

この問題を解く確立された手法としてシンプレックス法があり、必ず最適解を見つけられるのが特徴である。また、計算機上で線形計画法を解くことのできるツールはいろいろあり、例えば Excel, Mathematica, MATLAB (+ Optimization Toolbox), LPSolve (C Program) などがある。これらは、不等号制約だけではなく、等号制約や整数変数もそのまま扱えるものもある。

本演習では、どこにでもある Excel を使うのが最も簡単であろう。ここでは解説しないが、もちろん他の方法でも構わない。

Excel は、ソルバーという機能を用いる。「ツール」メニュー内に「ソルバー」という項目があるはずである。なければ、「ツール」メニュー内の「アドイン」メニューで「ソルバー」のチェックをオンにする。使い方の詳細は、

[http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/takagi/CL4\\_98/LP.html](http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/takagi/CL4_98/LP.html)

などを参照のこと。

## 2 演習問題に用いるコージェネレーションモデル

図 1 に示すコージェネレーションシステムを考え、線形計画法を用いることにより設備規模および運用の最適化を行う。このモデルでは、吸収式冷凍機部分の使用を前提とし、熱需要は温熱+冷熱と考えている。また、燃料電池をマイクロガスタービンに置き換えることも想定する。

### 2.1 使用する変数・定数

まず、ここで使用する変数や定数を表 1 にまとめる。(i) が付いているものは時間帯数の分だけ変数があることを示す。ここでは、1日を昼と夜の2つに分けるだけで、季節による変化等を考慮しないため、 $i = 1, 2$  であり、それぞれ昼・夜を表す。

### 2.2 制約条件式

#### 2.2.1 需要と供給のバランス

電力の供給量は需要量以上でなくてはならない。左辺を供給、右辺を需要として、(4) 式の関係が得られる。

表 1: 変数・定数の説明

変数	単位	説明	ここでの値
$P_{cf}$	kW	燃料電池の設備容量 (最大発電量)	–
$H_{cb}$	Mcal / h	ボイラの設備容量 (最大熱出力)	–
$P_{cp}$	kW	太陽電池の設備容量 (最大発電量)	–
$Q_{cp}$	kWh	バッテリーの設備容量 (最大貯蔵量)	–
$Q_{ch}$	Mcal	蓄熱槽の設備容量 (最大貯蔵量)	–
$C_f$	円 / kW	燃料電池の単位容量あたり設備コスト (マイクロガスタービン)	250,000 (150,000)
$C_b$	円 / (Mcal/h)	ボイラの単位容量あたり設備コスト	10,000
$C_p$	円 / kW	太陽電池の単位容量あたり設備コスト	700,000
$C_{qp}$	円 / kWh	バッテリーの単位容量あたり設備コスト	100,000
$C_{qh}$	円 / Mcal	蓄熱槽の単位容量あたり設備コスト	37,000
$P_s(i) = P_e(i)$	kWh / h	電力会社から購入する電力量 (1時間平均)	–
$G_s(i)$	Mcal / h	ガス会社から購入するガス量 (1時間平均)	–
$C_p$	円 / kWh	電力会社の電気料金	16
$C_g$	円 / Mcal	ガス会社のガス料金	9
$P_d(i)$	kWh / h	電力需要 (1時間平均)	表 2
$H_d(i)$	Mcal / h	熱需要 (1時間平均)	表 2
$G_f(i)$	Mcal / h	燃料電池に供給するガス量 (1時間平均)	–
$G_b(i)$	Mcal / h	ボイラに供給するガス量 (1時間平均)	–
$P_f(i)$	kWh / h	燃料電池で発電した電力量 (1時間平均)	–
$P_p(i)$	kWh / h	太陽電池で発電した電力量 (1時間平均)	–
$P_i(i)$	kWh / h	バッテリーに充電された電力量 (1時間平均)	–
$P_o(i)$	kWh / h	バッテリーが放電した電力量 (1時間平均)	–
$Q_p(i)$	kWh	バッテリーが蓄えている電力量	–
$H_f(i)$	Mcal / h	燃料電池から回収した熱 (1時間平均)	–
$H_b(i)$	Mcal / h	ボイラで発生した熱 (1時間平均)	–
$H_i(i)$	Mcal / h	蓄熱槽に供給された熱 (1時間平均)	–
$H_o(i)$	Mcal / h	蓄熱槽が放出した熱 (1時間平均)	–
$Q_h(i)$	Mcal	蓄熱槽が蓄えている熱	–
$\eta_p$	–	燃料電池効率 (電力) (マイクロガスタービン)	0.4 (0.3)
$\eta_h$	–	燃料電池効率 (熱) (マイクロガスタービン)	0.4 (0.5)
$\eta_b$	–	ボイラ効率	0.9
$\alpha_p$	–	$T$ 時間後のバッテリー残量比	0.8
$\alpha_h$	–	$T$ 時間後の蓄熱槽残量比	0.7
$T$	h	1時間帯分の時間	12
$K$	kWh / Mcal	Mcal を kWh に換算	1.16

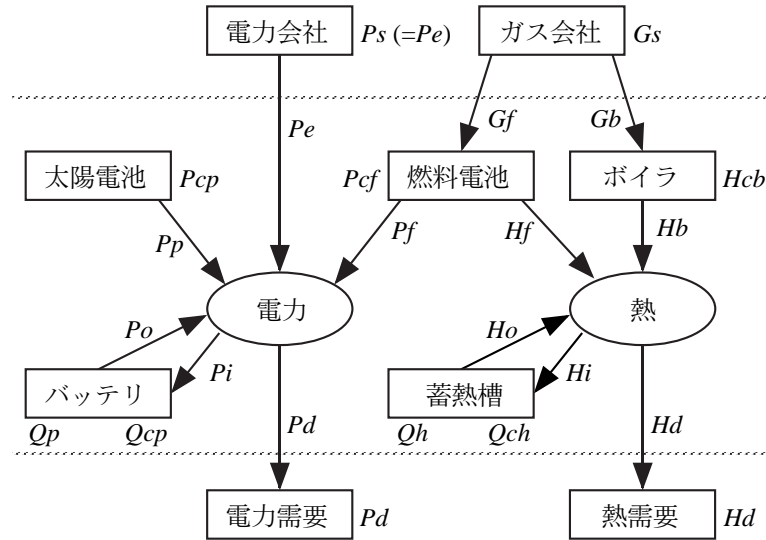


図 1: 電気・熱エネルギーの流れ

$$P_e(i) + P_f(i) - P_i(i) + P_o(i) + P_p(i) \geq P_d(i) \quad (4)$$

熱の供給量は需要量以上でなくてはならない。左辺を供給、右辺を需要として、(5) 式の関係が得られる。

$$H_f(i) + H_b(i) - H_i(i) + H_o(i) \geq H_d(i) \quad (5)$$

ガス会社からの購入量は、燃料電池とボイラの使用量以上でなくてはならないので、(6) 式の関係が得られる。

$$G_s(i) \geq G_f(i) + G_b(i) \quad (6)$$

### 2.2.2 設備容量

燃料電池の電気出力は、設備容量を超えてはならないので、(7) 式の関係が得られる。

$$P_f(i) \leq P_{cf} \quad (7)$$

燃料電池の熱出力も、設備容量を超えてはならないので、(8) 式の関係が得られる。燃料電池は電氣的出力で容量を表すので、(8) 式では  $\frac{\eta_h}{K\eta_p}$  をかけて熱出力を出している。

$$H_f(i) \leq \frac{K\eta_h}{\eta_p} P_{cf} \quad (8)$$

ボイラの出力は、設備容量を超えてはならないので、(9) 式の関係が得られる。

$$H_b(i) \leq H_{cb} \quad (9)$$

バッテリーの貯蔵量は、設備容量を超えてはならないので、(10) 式の関係が得られる。

$$Q_p(i) \leq Q_{cp} \quad (10)$$

蓄熱槽の貯蔵量は、設備容量を超えてはならないので、(11) 式の関係が得られる。

$$Q_h(i) \leq Q_{ch} \quad (11)$$

太陽電池の発電量に関しては、昼間の平均出力を設備容量の半分以下とし、夜は発電できないと仮定する。したがって、(12) 式の関係が得られる。

$$\left. \begin{array}{l} P_p(1) \leq 0.5P_{cp} \\ P_p(2) \leq 0 \end{array} \right\} \quad (12)$$

### 2.2.3 エネルギー変換装置

燃料電池のガス入力と電気出力には、(13) 式の関係がある。

$$P_f(i) \leq K\eta_p G_f(i) \quad (13)$$

燃料電池のガス入力と熱出力には、(14) 式の関係がある。

$$H_f(i) \leq \eta_h G_f(i) \quad (14)$$

ボイラのガス入力と熱出力には、(15) 式の関係がある。

$$H_b(i) \leq \eta_b G_b(i) \quad (15)$$

バッテリーの入出力と貯蔵量には、(16) 式の関係がある。

$$\left. \begin{array}{l} Q_p(1) \leq \alpha_p Q_p(2) + T\{P_i(1) - P_o(1)\} \\ Q_p(2) \leq \alpha_p Q_p(1) + T\{P_i(2) - P_o(2)\} \end{array} \right\} \quad (16)$$

蓄熱槽の入出力と貯蔵量には、(17) 式の関係がある。

$$\left. \begin{array}{l} Q_h(1) \leq \alpha_h Q_h(2) + T\{H_i(1) - H_o(1)\} \\ Q_h(2) \leq \alpha_h Q_h(1) + T\{H_i(2) - H_o(2)\} \end{array} \right\} \quad (17)$$

### 2.2.4 変数そのものの制約

全変数は非負であるので、(18) 式が成り立つ。

$$(\text{全変数}) \geq 0 \quad (18)$$

## 2.3 目的関数

全設備を 20 年間使用するとし、設備の導入コストと 20 年間の運用コストの和を最小化する。目的関数は (19) 式の通りとなる。

$$\begin{aligned} E = & \underbrace{C_f P_{cf} + C_p P_{cp} + C_b H_{cb} + C_{qp} Q_{cp} + C_{qh} Q_{ch}}_{\text{設備コスト}} \\ & + \underbrace{T \cdot 365 \cdot 20 \cdot \sum_{i=1}^2 \{C_e P_e(i) + C_g G_s(i)\}}_{\text{運用コスト}} \end{aligned} \quad (19)$$

## 2.4 需要データ

オフィスビル・ホテルの電力・熱需要例を表 2 に示す。

表 2: 1 時間あたりの需要

	昼電力 $P_d(1)$	夜電力 $P_d(2)$	昼熱 $H_d(1)$	夜熱 $H_d(2)$
	[kWh / h]	[kWh / h]	[Mcal / h]	[Mcal / h]
オフィスビル	1460	346	1030	105
ホテル	1040	779	20600	16100

### 3 演習問題

#### 3.1 必修

表 1, 2 等に与えられた初期条件で最適化を行ってみよ。需要データは、表 2 のいずれかを用いよ。

#### 3.2 選択必修

次の中から最低 1 つの項目を選び、各要因に対する感度分析を行ってみよ。

1. 燃料電池の価格を表 1 の値から変えていくと、解にどのような変化があるかを調べよ。
2. 太陽電池価格を表 1 の値から変えていくと、解にどのような変化があるかを調べよ。
3. バッテリ価格を表 1 の値から変えていくと、解にどのような変化があるかを調べよ。
4. 電気料金を表 1 の値から変えていくと、解にどのような変化があるかを調べよ。
5. ガス料金を表 1 の値から変えていくと、解にどのような変化があるかを調べよ。

さらに、燃料電池をマイクロガスタービンのデータに置き換えて、同じように感度分析を行ってみよ。

#### 3.3 選択

余裕があれば、下記の項目について、各要因に対する感度分析を行ってみよ。

- 蓄熱槽の価格を表 1 の値から変えていくと、解にどのような変化があるかを調べよ。
- ボイラの価格を表 1 の値から変えていくと、解にどのような変化があるかを調べよ。
- 各式は不等号制約のため、等号が成立しないと途中でエネルギーが捨てられてしまう可能性がある。そこで、各式を等号にするとどのようなことが起こるかを調べよ。
- 選択必修の条件をいくつか組み合わせて変えて、変化を調べよ。

#### 3.4 計算結果のまとめ方

計算結果は、目的関数（総コスト）だけではなく、各変数の値にも着目して考察せよ。特に、各設備の導入量 ( $P_{cf}, H_{cb}, P_{cp}, Q_{cp}, Q_{ch}$ ) や、購入電力量 ( $P_e$ )、購入ガス量 ( $G_g$ ) は重要である。

また、昼と夜の電力・熱需要が何で賄われているかも確かめよ。場合によっては、貴重なエネルギーが捨てられていることもあり得る。

演習の計算結果は、レポートとしてまとめること。まとめる際は、棒グラフや折れ線グラフ等を用い、横軸と縦軸を何にすべきかを考えてわかりやすく結果を示すこと。結果だけではなく、例えば「太陽電池が安い場合は燃料電池よりもマイクロガスタービンの方が効果的」などの考察も忘れないこと。

### 3.5 問題の割当

需要データと選択必修問題の割当は、表3のように、学生番号の下1桁で指定する。

表 3: 問題の割当

学生番号下1桁	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
需要データ	Hotel	Hotel	Hotel	Hotel	Hotel	Office	Office	Office	Office	Office
選択必修 問題番号	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5

## 4 Excel ファイルの配布

本演習を自力で短時間のうちにこなすのは難しいと考え、予め各数値や式を作成して線形計画問題を解けるような状態にした Excel ファイルを配布する。指定された場所の数値を変更してソルバーで計算させるだけで、最低限の最適化計算ができるはずである。

ファイルは下記のアドレスからダウンロードできる。2002年度版を使用すること。

<http://power.ee.sophia.ac.jp/~miyatake/lecture/energy/>

間違いがあるかもしれないので、念のため確認して用いること。

なお、変数の値はソルバー起動前に消去しておかないと、最適解が見つけれられない可能性があるようである。

## 5 レポートの提出

締切は、2003年1月31日(金)の13:00とする。3-243B室に直接紙で提出してもよいし、ファイルを電子メールで [miyatake@power.ee.sophia.ac.jp](mailto:miyatake@power.ee.sophia.ac.jp) 宛に送ってもよい。対応できるファイル形式は、Word, PDF, PostScript 等である。

## 6 大まかな採点基準

演習と出席が8割以上の場合は…

- 配布する Excel ファイルを使わず自力で解いた場合 A (ただし宮武研以外)
- 選択必修を2問以上または選択問題まで解いた場合 A
- 必修・選択必修のみの場合 A～B
- 軽微な締切遅れやレポート不備などの場合 C～D

演習と出席が8割未満の場合は…

- 配布する Excel ファイルを使わず自力で解いた場合 A～B (ただし宮武研以外)
- 選択必修を2問以上または選択問題まで解いた場合 A～B
- 必修・選択必修のみの場合 B～C
- 軽微な締切遅れやレポート不備などの場合 D or F

演習と出席が5割未満の場合はF