

## 一次エネルギーの供給制約を考慮した 電力系統の最適運用方式\*

仲 村 宏 一\*\*  
中 村 陽一\*\*  
山 城 迪\*\*  
奈 良 宏 一\*\*

(昭和57年4月30日受理)

### Optimum Operation Method of A Power System Under Limited Supply of Primary Energy

by Koichi NAKAMURA, Yoichi NAKAMURA, Susumu YAMASHIRO  
and Koichi NARA

We propose an optimum operation method of a power system under limited supply of primary energy to the thermal power plants.

In this investigation, we developed a theory and algorithm which decide the economical load dispatch during a time domain and the optimum start-up and shut-down time of generators.

We apply this method to a model system, and discuss its usefulness.

#### 1. ま え が き

電力系統の運用計画、特に日間の火力機の最適運用計画を決定する場合に問題となる点は第1に時々刻々変動する電力需要に応じて系統内の火力発電機の起動・停止時期を決定することであり第2点は並列発電機間の最適負荷分担を決定することである。後者については従来より火力機の燃料費に基づく経済性の面から負荷配分を行う、いわゆる ELD が確立されてきている。

しかし、一方で昭和48年の石油危機以来安価にして多量に入手できた石油は、電力供給者にとっては単に価格の上昇問題に止まらずもはや量的にも確たる保証の得られないエネルギー源となってきたと言わざるを得ない。このような、一次エネルギー供給量の不安に対処するためにエネルギー源の多様化が積極的に推進されているが、また与えられた系統運用条件下で

\* 電気四学会北海道支部連合大会 (昭和55年9月) において口頭発表

\*\* 北見工業大学電気工学科

系統の運用制御による対応策も考える必要がある。

本稿では、運用期間中に発電所で使用可能な燃料に量的制約が加えられた場合を想定し、この制約下での経済性の追求を可能にする系統運用決定に必要な理論、アルゴリズムについての考察を行う。

## 2. 瞬時の負荷配分法

### (a) ELD

$N$  台の火力発電機が系統負荷  $P_L$  を分担する場合、送電損失を無視すると (1) 式の等増分燃料費則に基づく負荷配分が最も経済的な火力出力となる。

$$\lambda = -\frac{df_i}{dG_i} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

ここで、 $f_i = a_i + b_i G_i + c_i G_i^2$  で、 $i$  火力機の燃料費、 $a, b, c$  は定数、 $G$  は出力を示す。

また、 $\lambda$  は (2) 式の需給バランスに係るラグランジュ乗数である。

なお、(1) 式は、次の評価関数の  $G_i$  に関する微分から得られる。

$$\Phi = \sum_{i=1}^N f_i + \lambda \left( P_L - \sum_{i=1}^N G_i \right) \quad (2)$$

### (b) FLD

次に、最適化の目的を、経済性でなく燃料消費量におくと、(4) 式の評価関数から (5) 式的最適出力分担法を得る。我々は、これを燃料消費量最小負荷配分 (Fuel Minimum Load Dispatch; FLD) と呼ぶことにする。

$$\Phi = \sum_{i=1}^N f_i / \alpha_i - \lambda \left( P_L - \sum_{i=1}^N G_i \right) \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{1}{\alpha_i} \frac{df_i}{dG_i} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

(5) 式による負荷配分によって、与えられた系統負荷の  $P_L$  下で、実現可能な最小燃料消費量が得られ、従って、運用期間中、需給バランスを満足するために、火力発電所に対して供給されるべき、燃料供給量の最小値が求まる。(5) 式は (1) 式の ELD に比べ、燃料単価の大きいユニット程、相対的に出力の大きい負荷配分となることを示している。

### (c) 燃料消費量に制約 (R) のある場合の負荷配分法

この場合の負荷配分では、需給バランスの他に、(6) 式の燃料消費量の制約も考慮に入れて、(7) 式の評価関数に関する最適化が要求される。

$$R = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{\alpha_i} \quad (6)$$

$$\Phi = \sum_{i=1}^N f_i + \lambda \left( P_L - \sum_{i=1}^N G_i \right) + \mu \left( R - \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{\alpha_i} \right) \quad (7)$$

ここで、 $\mu$  は (6) 式の等式制約に関するラグランジュ乗数である。(7) 式から、負荷分担則は次のようになる。

$$\frac{df_i}{dG_i} \left(1 - \frac{\mu}{\alpha_i}\right) - \lambda = 0 \tag{8}$$

上式は、適当なラグランジュ乗数  $\mu$  の選定により、指定の燃料を消費することになるが、これは、火力機  $i$  の燃料費特性を、実際の  $f_i$  から  $f_i(1 - \mu/\alpha_i)$  に置き換えた場合の ELD に一致する。

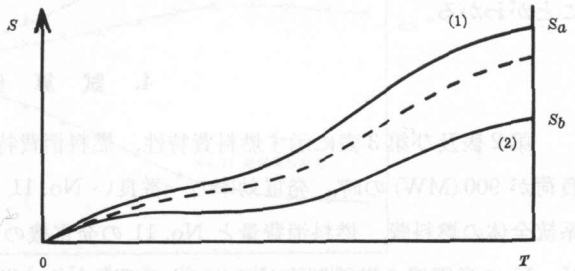
以上、(a), (b), (c) の負荷配分法を第 1 表にまとめて示す。

第 1 表 瞬時の負荷配分法

	ELD	FLD	燃料消費量に制約のある ELD
評価関数	$\sum f_i + \lambda(P_L - \sum G_i)$	$\sum f_i/\alpha_i + \lambda(P_L - \sum G_i)$	$\sum f_i + \lambda(P_L - \sum G_i) + \mu \left(R - \sum \frac{f_i}{\alpha_i}\right)$
最小化条件	$\frac{df_i}{dG_i} - \lambda = 0$	$\frac{1}{\alpha_i} \frac{df_i}{dG_i} - \lambda = 0$	$\frac{df_i}{dG_i} \left(1 - \frac{\mu}{\alpha_i}\right) - \lambda = 0$

### 3. 火力発電機群の最適起動・停止時期の決定

第 1 図は考察期間  $T$  について、系統で消費される累積燃料消費量  $S$  の概念図である。図中、曲線 (1) は 2 章 (a) の ELD を行った場合の消費量を、また、曲線 (2) は、2 章 (b) の FLD に



第 1 図 累積燃料消費量

よる負荷配分を行った場合の燃料消費量である。いま、ELD, FLD のそれぞれについて、期間末での累積燃料消費量を  $S_a, S_b$  とすると、期間中需給バランスを 100% 満足するという条件で我々が制御可能な燃料消費量の幅は  $(S_a - S_b)$  となるから問題は「考察期間中の燃料使用可能量が、 $S_a$  より少ない場合に、発電機の起動・停止も含めて系統の運用制御によってこの制約を満足させるにはどうすればよいか？」を決定し得る運用方式を求めることになる。系統で消費可能な燃料  $S$  が  $S_b$  より少ない場合にはもはや運用制御によって対処することは不可能となるので負荷制限などの別の対策が必要となるが、これは我々の考察の対象外とする。

いま、 $N$  台の火力発電機について系統に並列する種々の発電機の組合せを考え、これを集合  $U$  で表わすものとする。次に考察期間をいくつかの時間帯に分割し隣り合う 2 つの時間帯  $i$  及び  $j$  における並列発電機群をそれぞれ  $U_i, U_j$  とする。また、考察期間の初期より時間帯  $i$  及び  $j$  までの系統で消費される燃料の累積値をそれぞれ  $S_i, S_j$  とすると、時間帯  $i$  末までの系統の累積燃料費  $\phi^i$  は

$$\phi^i(U_i, S_i) = F^i(U_i, S_i, S_j) + FS^i(U_i, U_j) + \Phi^j(U_j, S_j) \tag{9}$$

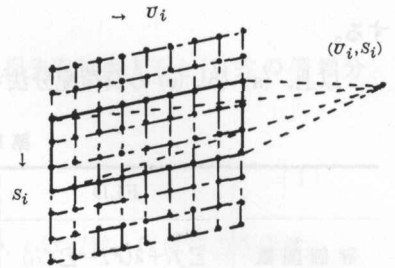
$$\Phi^i(U_i, S_i) = \min_{U_j, S_j} \left\{ \phi^i(U_i, S_i) \right\} \tag{10}$$

ここで、 $F^i(U_i, S_i, S_j)$  は、 $i$  時間帯の燃料使用量を  $R^i = S_i - S_j$  とした場合の並列発電機群  $U_i$  の燃料費である。ELD による  $U_i$  の燃料消費量を  $\bar{R}_i$ 、FLD によるそれを  $\underline{R}_i$  とすると  $R^i$  は次式を満足する。

$$\underline{R}_i \leq R^i \leq \bar{R}_i \tag{11}$$

また、(9) 式右辺第 2 項は、隣り合う時間帯における並列発電機群の変化  $U_j \rightarrow U_i$  によって停止する火力機の起動費を表わす。

(9) 式、(10) 式を  $i=1$  から最終時間帯まで逐次計算することにより、最適運用を決定することができるが (10) 式の最小化操作は (11) 式の範囲だけを対象とすればよく、実際には第 2 図に示す操作領域だけをサーチすればよいので計算量の短縮が期待できることがわかる。



第 2 図 操作領域

#### 4. 試算例

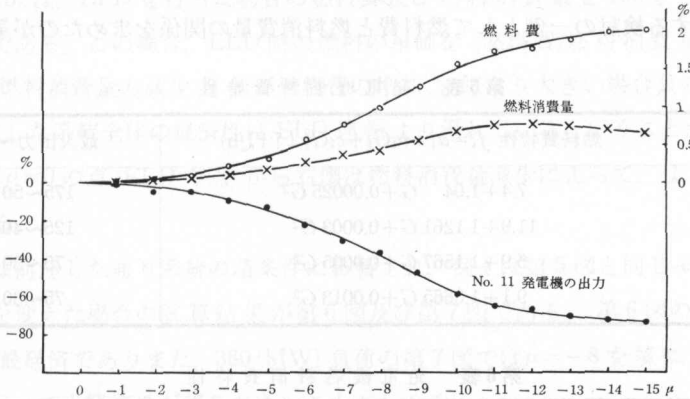
第 2 表及び第 3 表に示す燃料費特性、燃料消費特性を持つ 11 台の火力系統について系統負荷が 900 (MW) の時、発電効率の一番良い No. 11 の発電機のみ燃料制約を加えた場合の系統全体の燃料費、燃料消費量と No. 11 の発電機の出力の変化を第 3 図に示す。同図より、No. 11 の発電機の燃料制約が厳しくなる程、全体の燃料費及び燃料消費量が増加することがわかる。また、No. 11 の発電機の出力の変化に伴う他の 10 台の発電機の出力分担の変化を  $\mu$  と

第 2 表 発電機燃料費特性

No. $i$	燃料費特性 $f_i = a_i + b_i G_i + c_i G_i^2$ (千円/h)	最大出力～最低出力
1	$151.7 + 5.47071 G + 0.00117 G^2$	250～90 (MW)
2	$64.8 + 4.07649 G + 0.033 G^2$	35～20 ( // )
3	$59.7 + 3.91251 G + 0.0367 G^2$	35～20 ( // )
4	$85.6 + 4.81337 G + 0.0025 G^2$	125～40 ( // )
5	$53.5 + 5.57073 G + 0.00008 G^2$	125～40 ( // )
6	$56.1 + 5.59776 G + 0.00022 G^2$	125～40 ( // )
7	$54.5 + 5.45438 G + 0.00034 G^2$	125～40 ( // )
8	$45.6 + 5.00892 G + 0.00627 G^2$	75～30 ( // )
9	$61.5 + 4.78169 G + 0.00567 G^2$	75～30 ( // )
10	$36.9 + 5.49127 G + 0.00022 G^2$	75～30 ( // )
11	$61.3 + 4.68576 G + 0.00047 G^2$	175～45 ( // )

第3表 発電機燃料消費特性

No. <i>i</i>	燃料消費特性 (kcal/h)	燃料単価 $\alpha_i$ (円/kcal)
1	$51815.0 + 1868.358 G + 0.399 G^2$	$2.928 \times 10^{-3}$
2	$29888.9 + 1880.568 G + 15.224 G^2$	$2.168 \times 10^{-3}$
3	$27561.1 + 1804.917 G + 16.93 G^2$	〃
4	$39476.3 + 2220.504 G + 1.173 G^2$	〃
5	$23876.4 + 2459.945 G + 0.037 G^2$	$2.239 \times 10^{-3}$
6	$25074.7 + 2500.352 G + 0.096 G^2$	〃
7	$24357.0 + 2436.307 G + 0.152 G^2$	〃
8	$21462.5 + 2356.195 G + 2.949 G^2$	$2.126 \times 10^{-3}$
9	$28947.6 + 2249.306 G + 2.666 G^2$	〃
10	$17368.6 + 2583.093 G + 0.104 G^2$	〃
11	$30302.7 + 2317.059 G + 0.233 G^2$	$2.022 \times 10^{-3}$



第3図 第11 発電機出力と燃料費及び燃料消費量特性

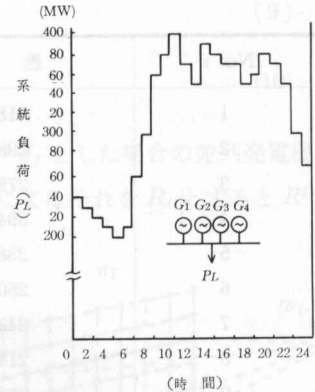
第4表 μと各発電機出力の変化 (μ=0の時の比較)

No. <i>i</i>	$\mu$	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13	-14	-15
1		90.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.7	7.3	10.3
2		22.1	0	0.3	0.6	0.8	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	2.1	2.4	2.5	2.6
3		22.1	0	0.3	0.5	0.7	1.0	1.2	1.3	1.3	1.4	1.5	1.6	1.9	2.2	2.2	2.3
4		125.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5		125.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6		40.0	0	0	0	0	0	15.0	26.9	38.8	57.0	75.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0
7		117.5	1.8	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
8		41.9	0.1	1.6	2.9	4.2	6.1	7.0	7.4	7.8	8.4	9.0	9.6	10.9	12.6	13.1	13.7
9		66.4	0.1	1.8	3.2	4.6	6.8	7.7	8.1	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6
10		75.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11		175.0	△2.0	△11.5	△14.7	△17.8	△22.6	△39.6	△52.6	△65.5	△84.5	△103.3	△114.1	△116.0	△123.0	△126.2	△130.0

但し、出力の単位は MW で、△は減少を表わす。

ともに第4表に示す。

第4図に示す系統負荷と4台の石炭火力系統について種々の計算を行った。第5表及び第6表は、火力の燃料費特性及び燃料消費量特性を示す。第7表は、ELDとFLDの負荷配分及び燃料消費量の相異を280(MW)について示したものである。燃料費の面ではELDの方が2.399(千円/h)コスト節減になっているが、一方燃料消費量についてはFLDの方が1.307(ton/h)だけ節減となっている。このことは、FLDによる燃料消費の節減分を負の燃料費と考えれば発電機燃料費特性、燃料単価、並列発電機群の構成、系統負荷等の諸条件によってはFLDの方がELDよりも系統全体としての経済性の点でメリットが得られることの可能性を示しており興味深い。



第4図 系統日負荷曲線

この点に関する検討の一例として燃料費と燃料消費量の関係を求めたのが第5図である。

第5表 発電機燃料費特性

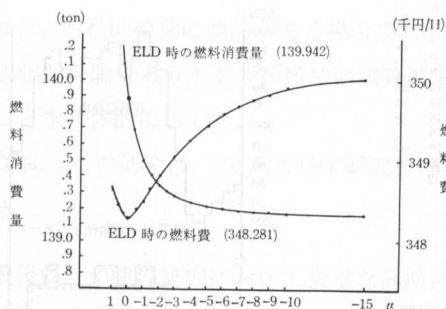
No. <i>i</i>	燃料費特性 $f_i = a_i + b_i G_i + c_i G_i^2$ (千円/h)	最大出力～最低出力
1	$7.4 + 1.04 G + 0.00025 G^2$	175～50 (MW)
2	$11.9 + 1.1261 G + 0.0003 G^2$	125～40 ( // )
3	$5.9 + 1.1567 G + 0.0005 G^2$	75～30 ( // )
4	$9.1 + 1.0665 G + 0.0013 G^2$	75～30 ( // )

第6表 発電機燃料消費特性

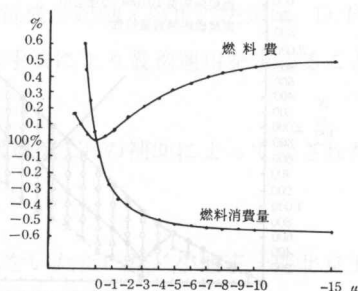
No. <i>i</i>	燃料消費特性 (ton/h)	燃料単価 $\alpha_i$ (円/ton)
1	$3.079 + 0.4328 G + 0.00010 G^2$	2.403
2	$4.577 + 0.4331 G + 0.00015 G^2$	2.600
3	$2.309 + 0.4554 G + 0.000201 G^2$	2.540
4	$3.592 + 0.4199 G + 0.000512 G^2$	2.540

第7表 280(MW) 負荷時のELDとFLDの比較

No. <i>i</i>	ELD			FLD		
	$G_i$ (MW)	$f_i$ (千円/h)	燃料消費 (ton/h)	$G_i$ (MW)	$f_i$ (千円/h)	燃料消費 (ton/h)
1	6.734	85.007	32.695	125.701	153.736	59.129
2	80.871	103.081	40.583	86.158	109.234	43.006
3	69.742	84.218	35.047	30.000	38.813	16.152
4	62.047	75.975	31.617	38.132	48.897	20.348
合計	280.0	348.281	139.942	279.991	350.680	138.635



第5図(a) 燃料費及び燃料消費量特性 280 MW (負荷)

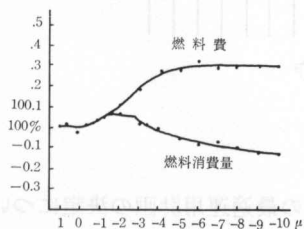


第5図(b)

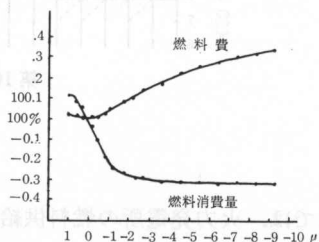
同図(a)は、燃料消費量に制約のある負荷配分法(8)式を用いて求めた計算結果の一例で横軸にラグランジュ乗数 $\mu$ 、縦軸に280(MW)負荷に対する4台の火力運転による燃料消費量及び燃料費を示している。

また同図(b)は、ELDを行った場合の燃料費及び燃料消費量を100%として(a)図を%表示したものである。この場合、ELD時の燃料の単価を(燃料費/燃料消費量)と考えるなら(b)図において燃料消費量の減少%値が燃料費の増加%値より大きい場合負の燃料費(消費量減少分)を考慮した系統全体の経済性はELD運転より優れているといえることができる。従って、第5図では $\mu=0$ の点(ELDの点)から右側は燃料消費量減少によって、より経済性が得られる領域となる。

この特性は前述した通り系統の諸条件に影響され、例えば第5図と同じモデル系統について負荷レベルを変えた場合の試算結果が第6図及び第7図である。第6図の180(MW)負荷では、ELDが最経済でありまた、380(MW)負荷の第7図では $\mu=-8$ を境にしてこれ以上の燃料費減少を行っても経済性が得られないことがわかる。

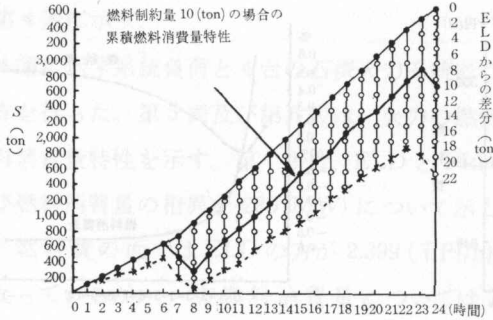


第6図 180(MW)負荷時の燃料費及び燃料消費量特性

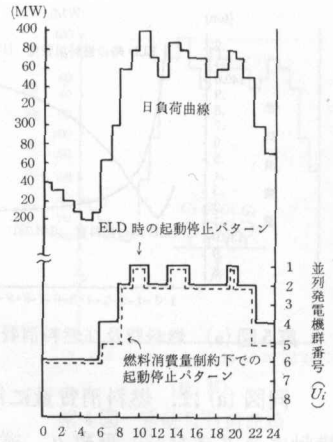


第7図 380(MW)負荷時の燃料費及び燃料消費量特性

次に、第4図に示す日間の系統負荷について一定の燃料消費量制約下での火力の起動停止計画の決定について検討を行った。第8表には並列発電機群の構成を示す。第8図はELDとFLDによる燃料消費量の差の累積値を示したもので、まず、各時間帯においてELDにより最も燃料費の小さい並列発電機群を求め、同時にその時消費される燃料消費量の累積値を算定しておく(図中の実線)。また、FLDにより燃料消費量最小になる並列発電機群を各時間帯



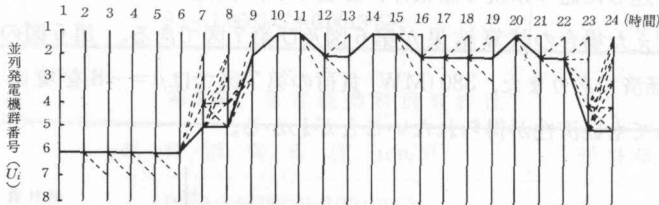
第8図 累積燃料消費特性



第9図 最適起動停止パターン

について求め、同時に燃料消費量の累積値（図中の点線）を算定する。従って、3章の制御可能な燃料消費量の幅は  $(S_a - S_b) \div 21$  (ton) である。前章で述べたように、D・Pを用いた(9)、(10)式による最適運用の決定は第8図の実線と点線に囲まれた領域について検討すればよいことになる。

(9)、(10)式による運用決定の有効性を検討するために燃料消費量をFLDによる消費量に対して日間で10 (ton) 節減する場合について試算を行った。累積燃料消費量の格子点を第8図の様にとった場合の火力発電機の起動・停止パターンを第9図に示す。また第10図はこの場合のD・Pによる最適化操作の状態を示したものである。



第10図 最適化操作

### 5. 結 言

本章では、火力発電所の燃料供給量に制約がある場合の最適運用計画の決定について論じた。需給バランス制約に対してラグランジュ乗数を用いた従来のELDによる発電機間の負荷分担に対して燃料消費量を最小化する負荷配分法 (FLD) を求め、また需給バランスに加えて燃料消費量制約を考慮した場合の負荷配分法を導き、それぞれの手法についてモデルシステムにより種々の検討を試みた。

その結果、ELDによる発電機運転時の燃料消費量を基準にとりそれ以下の燃料消費による燃料の節減量を負の燃料費とみなすなら、系統全体の経済性からみて従来の負荷配分法 (ELD) は必ずしも最経済な負荷配分にならないことが明らかになった。



また、燃料供給量に制約がある場合の日間の火力発電機の起動・停止の決定は、D.P.による定式化が可能でありモデル系統での試算結果から、本手法により最適運用を求めることができることを具体的に示した。

なお、この研究は、文部省科学研究費補助金（一般研究C）の補助によってなされたものである。

最後に、一連の研究において貴重な御助言、御指導をいただいた、小池東一郎北見工業大学長に深く感謝申し上げます。

## 文 献

- 1) 山城 迪, 仲村宏一, 中村陽一, 奈良宏一, 小池東一郎: 「一次エネルギー供給制約を考慮した電力系統の最適運用計画」. 電気四学会北海道支部連合大会講演論文集, No. 55, 昭和55年9月.

## し ま と り

まず SIC を用いた最適化手法は、最適解を正確に求め得るという利点がある。しかし、この手法は、最適解を求めるのに多くの計算時間を要する。また、この手法は、最適解を求めるのに多くの計算時間を要する。また、この手法は、最適解を求めるのに多くの計算時間を要する。

次に、最適解を求めるのに多くの計算時間を要する。また、この手法は、最適解を求めるのに多くの計算時間を要する。また、この手法は、最適解を求めるのに多くの計算時間を要する。

また、最適解を求めるのに多くの計算時間を要する。また、この手法は、最適解を求めるのに多くの計算時間を要する。また、この手法は、最適解を求めるのに多くの計算時間を要する。