燃料制約を考慮したユニットコミットメントのための新アルゴリズムの開発

課題番号 07455118

平成7年度～平成9年度科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)）研究成果報告書

平成10年3月

研究代表者　大山　力
（横浜国立大学工学部助教授）

はしがき

電力供給に対する規制緩和が話題になっている。そのような状況で、従来からの（供給義務を負う）電力会社が電力供給の信頼性を犠牲にせずに経済性を向上させていくための大切な技術として、発電所の起動停止問題（ユニットコミットメント）がある。種々の制約を満足しながら最も経済的な運用ができるようなユニットコミットメントがおこなえれば、電力システムの信頼性を向上させることができる。

しかし、実際の系統に含まれる発電所の数が多いこともあり、対象とする期間が長くなると最適解を探索することは容易でなかった。これまでのところ最も有望とされるラグランジュ緩和法を用いても、長期間にわたる制約（燃料の使用総量制約など）が含まれる場合には求解が困難であった。

そのため、電力系統の実運用者にとっては現状のユニットコミットメントプログラムは必要な制約が織り込まれていない不完全なものとなっている。長期にわたる燃料消費量制約を満足するために、まず、燃料消費量制約を考慮せずに解をもとめ、その解を修正して制約を満足する解を求めるといったことが行われてきた。そのため、より良い解を求めるアルゴリズムの開発が求められている。

一方、ワークステーションに代表される計算機の高速化には近年めざましいものがある。また超並列計算機も話題となっている。それらの計算機の能力に合わせた新しい最適化手法も開発されてきている。例えばホップフィールド型ニューラルネットや遺伝的アルゴリズムなどである。特に遺伝的アルゴリズムは柔軟な評価関数の設定が可能であるため、様々な問題への適用が可能であると考えられる。

本研究では、長期間にわたる制約（特に燃料使用量制約）に着目し、そのような制約を含む実規模系統のユニットコミットメントを決定できるアルゴリズムの開発をおこなった。その際、通常の手法とは発送を転換し、先に燃料消費量制約を満たす可能性の高い解候補を各時間帯ごとに求め、それを組み合わせるという手法を考案した。

この手法では、如何に効率の良い解候補を作成できるかが重要なポイントとなる。ここでは、従来から用いられており計算量の割に良解を求められることで知られる優先順位法をベースとして、燃料消費量の大小によって補正を加えて解候補を作成する手法を開発した。また、作成した解候補を組み合わせて最適解（または準最適解）を求める手法としては、遺伝的アルゴリズムをベースとした手法を用いた。

そして、開発した手法を発電機数5機、期間10期間のモデル、10機20期間のモデルおよび20機24期間のモデルを用いて検証した。その結果、従来からの優先順位法（本手法のように遺伝的アルゴリズムと組み合わせないもの）、単純な遺伝的アルゴリズム（優先順位法などと組み合わせないもの）、およびラグランジュ緩和法と比較してより良い解を求めることができ、本手法が有効であることが明らかになった。

研究組織

研究代表者：大山　力　（横浜国立大学工学部助教授）

研究経費

平成7年度：	3,500千円
平成8年度：	1,200千円
平成9年度：	800千円
計	5,500千円

研究発表（口頭発表）

(1) 狐塚幹貴、大山力、「燃料消費量制約を含む火力機の起動停止問題に対する一考察」、平成9年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集（論文II）、no. 180、pp. 158-159、1997年7月

(2) 狐塚幹貴、大山力、「燃料消費量制約を考慮した火力機起動停止問題の一解法」、電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会、PE-97-16、pp. 1-6、1997年10月

研究成果

目次

図目次

表目次

第1章

はじめに

現在日本では、電力の需要の大部分を火力発電によって賄っているが、わずかな種類の燃料にだけ依存するということは困難であり、電源構成のベース電源としての原子力発電の占める割合が大きくなってきている。またそれに伴い、火力発電機に対して、負荷調整機能を生かしたミドル電源、ピーク電源への要請が高くなり、火力発電機の起動停止が頻繁に行なわれるようになってきた。

また、電力需要の方も年々増加しており、また、需給調節の効率化という点から、大容量火力発電機の高頻度起動停止 (Daily Start-up and Shut-down) なども考慮されて導入されてきている。このように、電力システムにおいて、発電機の起動停止問題は経済性の向上のための重要な問題の一つとなっている。

このような起動停止問題というのは、電力需要と各種の運転制約を満足させながら、発電機の経済的な期間毎の運転計画の集合を求める問題である。即ち考察期間内で最適な各時間帯毎の発電機の起動停止及び発電出力を求める問題であり、本質的に組合せ最適化問題として定式化され、これまでに数多くの研究が実施されている。

しかし、運転制約には需給制約や出力上下限制約、最小運転・停止時間制約などといった多くの制約を考慮しなければならない。また、この起動停止問題は、考慮すべき制約の数が増えるほど、より複雑な組合せ最適化問題となり、非常に難解な問題となっている。

さらに燃料消費量制約といった長期間にわたる制約が含まれる場合は最適解を求めることがより困難となる。今までのところ、燃料消費量制約を含む問題を扱っているものは少なく、また扱っているものでも先に燃料消費量制約以外の制約を満たす解を求め、それからその解を燃料消費量制約を満たすように修正して燃料

消費量制約を考慮しているものが多い。

そこで本稿ではそれとは逆に先に燃料消費量制約を考慮して、時間毎に解の候補を作成し、それを組み合わせることによって全ての制約を満たす解を求めるという手法を提案した。

以下、本稿では第 2 章で起動停止問題の定式化について、第 3 章では問題の解法について説明し、第 4 章で遺伝的アルゴリズムの概要と本手法への適用法を述べた。そして第 5 章で実際に何種類かのモデルで計算を行ない、第 6 章でまとめ、および今後の課題について考察する。

第 2 章

起動停止問題の定式化

2.1　ユニットコミットメント

考察期間内で系統の電力需要を満たしながら、総運転費を最小にするために火力機の起動停止をどのように行えば良いかを決定する問題がユニットコミットメントである。

ユニットコミットメントでは以下のことを考慮する必要がある。

(1) 各火力機の最大、最小出力

(2) 各火力機が停止してから再び並列するのに必要な最小停止時間、および並列してから再び停止するまでに必要な最小起動時間

(3) 並列する際に必要な起動費

(4) 埋火する際に必要な埋火コスト

2.2　目的関数

ここで対象とする電力システムはN台の燃料消費量制約を含まない火力発電機とM台の燃料消費量制約を含む火力発電機で構成されるシステムである。このシステムに対して考察期間をT期間に分割して検討を行う。

ここでは以下の条件のもとで、目的関数(2-1)を定式化する。

(1) 需要電力と供給電力は各期間内で一定

(2) 各期間での電力需要は既知

(3) 送電損失は考慮しない

(4) 燃料費は出力の関数

(5) 起動費は自然冷却ならば停止時間の関数、埋火ならば0とする

(6) 埋火コストは停止時間の関数

$$F = \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{N+M} \left\{ f_i(p_i^t) + s_i(u_i^t, x_i^{t-1}) \right\} \tag{2-1}$$

ただし
- T考察期間
- $N+M$発電機台数
- f_i発電機 i の燃料費関数
- p_i^t発電機 i の期間 t における出力
- s_i発電機 i の起動費関数
- u_i^t発電機 i の期間 t における状態 ($u=1$ 運転、$u=0$ 停止)
- x_i^{t-1}発電機 i の期間 t-1 までの運転状態

2.3 制約条件

制約条件には個々の発電機の特性から生じる発電機制約と対象とする電力システム全体に起因する系統制約などがある。本論文では以下の制約を考慮している。

(1) 需給制約 (発電機の合計出力=需要)

$$\sum_i p_i^t = D^t \tag{2-2}$$

ただし、D^tは期間 t における電力需要を表す

(2) ユニットの出力の上下限制約

$$u^t \cdot p_{min} \leq p^t \leq u^t \cdot p_{max} \tag{2-3}$$

ただし
- p_{max}発電機 i の最大出力
- p_{min}発電機 i の最小出力

(3) 最小運転、停止時間制約

$$\begin{cases} u^t = 0 & (MDT \leq x^t < 0) \\ u^t = 1 & (0 < x^t \leq MUT) \end{cases}$$

$$\text{ただし}\begin{cases} MDT(MinimumDownTime)\ \text{最小停止時間} \\ MUT(MinimumUpTime)\ \text{最小運転時間} \end{cases}$$

(4) 燃料消費量制約

$$\sum_{i=1}^{M}\sum_{t=1}^{T} c_i(p_i^t) = C_j \tag{2-4}$$

$$\text{ただし、}\begin{cases} M: \text{燃料制約を持つ発電機台数} \\ c_i: \text{発電機}\ i\ \text{の燃料消費量関数} \\ C_j: \text{燃料}\ j\ \text{の使用規定量} \end{cases}$$

2.4 燃料費特性

2.4.1 燃料消費率

タービン、ボイラを含めた火力発電所の入出力特性において、出 $P[MW]$ を出すのに必要な燃料を $H[kcal/h]$ とすると、燃料消費率 (Heat Rate)HR は式 (2-5) で定義される。

$$HR = \frac{H}{P} \tag{2-5}$$

燃料消費率は一般に図 1のような特性を示し、ほぼ定格出力のあたりで最低とな

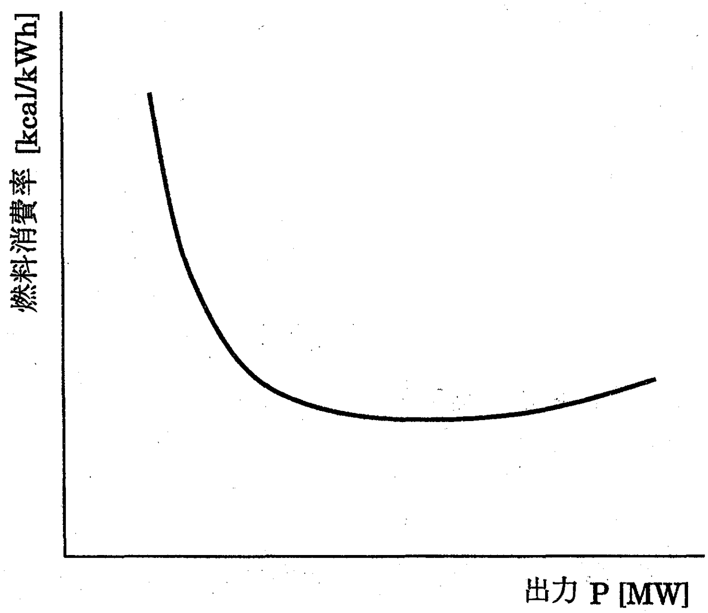


図 1: 燃料消費率

る。なお、燃料消費率の逆数は各出力電力 P に対する発電の効率ηを示す。

$$\eta = \frac{P}{H} \tag{2-6}$$

また、ある出力 P で発電機が運転しているとき、出力を微小量δP増加するのにどのくらい燃料δHを増加させる必要があるかを示す値を増分燃料消費率 (incremental heat rate,IHR) という。増分燃料消費率は一般的に図 2のような下に凸で右上がりの直線になる。

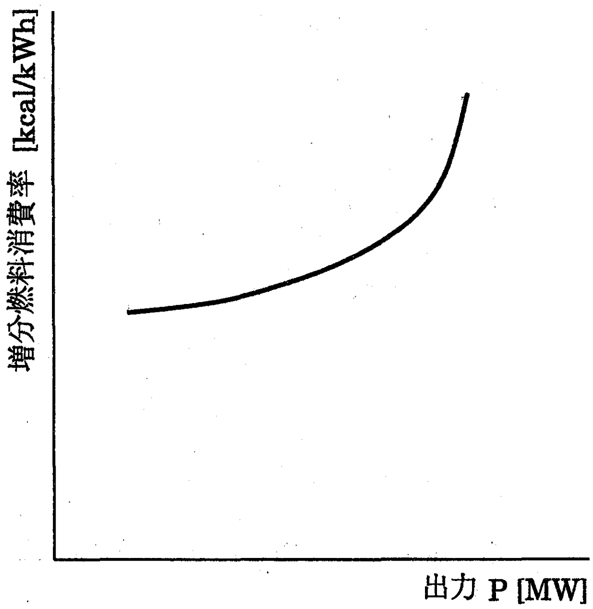


図 2: 増分燃料消費率

2.4.2 増分燃料費

燃料 1[$kcal$] を購入するのに必要な金額を C[¥/$kcal$] とすると、出力 P[MW] を単位時間出すのに必要な燃料費 F[¥] は、

$$F = C \cdot H \tag{2-7}$$

で表される。燃料消費率、増分燃料消費率に燃料単価 Cを乗じたものを、それぞれ発電単価μ、増分燃料費λと呼ぶ。

$$\mu = \frac{F}{P} \tag{2-8}$$

$$\lambda = \frac{dF}{dP} \tag{2-9}$$

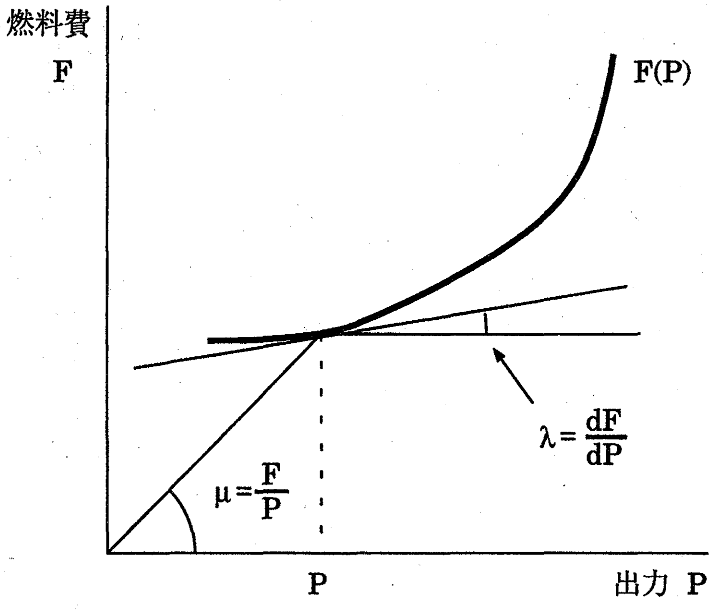


図 3: 燃料費特性

一般に燃料費特性 (図 3) は単調増加で下に凸の曲線となり、増分燃料消費率特性もふつう右上がりの単調増加曲線を示す。

しかし、発電所個々をとって考えると、火力発電所では出力が増加するにつれて数個のバルブを順次開いていくので、バルブのつなぎ目で特性が不連続に変わり、実際にはこのようなきれいな曲線にならないことがある。しかし、このような場合も増分燃料費は右上がりの単調増加曲線となるので、1 次あるいは 2 次曲線で近似したりして扱われる場合が多い。

ここでは燃料費関数 F を出力 P の 2 次式で近似して表す。

$$F(P) = aP^2 + bP + c \tag{2-10}$$

したがって、増分燃料費は 1 次式で近似される。

$$\frac{dF}{dP} = 2aP + b \tag{2-11}$$

2.5 起動費特性

火力発電機を起動するには、ボイラに点火してから蒸気を発生し、ボイラ·タービンに通気して温度を上げ、タービンを規定速度まで上げた後、並列させる。したがって起動するまでにかなりの時間がかかり、また一旦停止すると起動するに

はかなりの費用がかかる。運転していた火力機を停止してから再起動する場合も、停止後の時間によって起動に要する費用、時間も変化し、その関係は図 4のように表される。図 4の横軸は停止してから再起動するまでの時間τ、縦軸はその場合

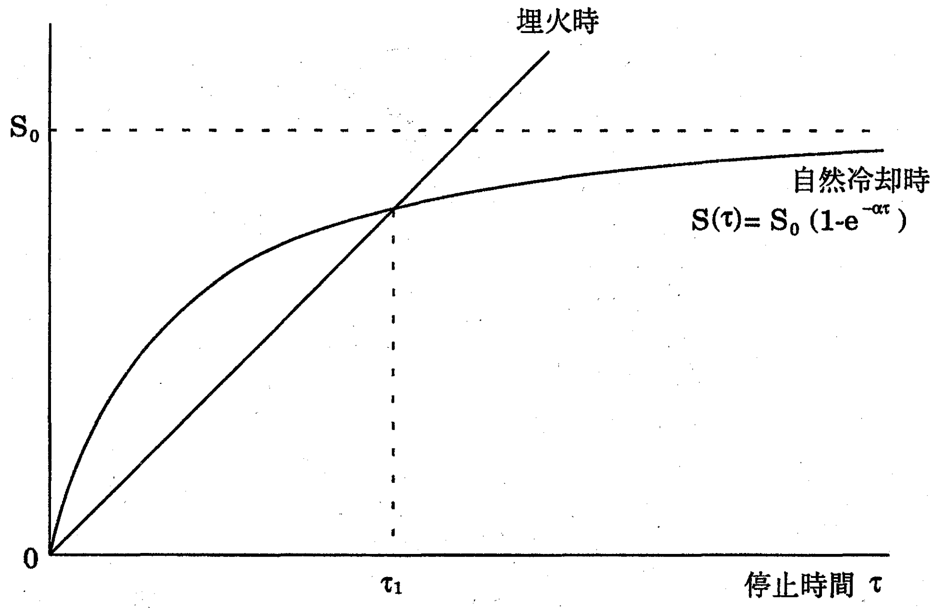


図 4: 起動費関数

に必要な起動費 $s(\tau)$ で、一般に、

$$s(\tau) = s_0(1 - e^{-\alpha\tau})\text{ただし}\alpha\text{は定数} \tag{2-12}$$

と表される。

停止後あまり時間がたたないうちに再起動する場合には、ボイラの火を消さずにわずかの火をたいて、ボイラ·タービンが冷却するのを防ぐようにしている。このような状態を埋火 (Banking) とよび、起動費は図 4の原点を通る直線で表される。このことを考慮すると、起動費は式 (2-13) のように表される。

$$s(\tau) = \begin{cases} \beta\tau & (0 \leq \tau \leq \tau_1) \\ s_0(1 - e^{-\alpha\tau}) & (\tau_1 \leq \tau) \end{cases} \quad \text{ただし、}\beta\text{は定数} \tag{2-13}$$

2.6 燃料消費量制約

燃料消費量制約とは、対象とする機関内でのある特定の燃料消費量を規定するものである。この制約には以下の 2 種類の場合が考えられる。

(1) 燃料費の高い燃料を必要以上に消費しなければならない場合

(2) 燃料費の安い燃料が必要量確保できない場合

(1) は LNG 火力の運用で見られることである。すなわち、長期エネルギー政策として産出国と 10 年から 20 年の長期契約で take or pay の取引義務が課せられているため需要が減退しても引き取り量は消費せねばならず、場合によっては燃料費の安いベース電源の出力を絞って、燃料費の高い LNG 火力を焚き増しするケースがでてきている。

(2) については、燃料費の安い石炭火力の運用がこれにあたる。すなわち、石炭火力の場合、炭坑の出炭能力、輸送能力などから年間連続フル運転に相当する石炭が確保できない場合がある。このときに、燃料費の安い石炭火力の出力を抑制し、燃料費の高い燃料で賄うことがある。

燃料消費量制約は長期間にわたる制約であるため、一般にこの制約を含む起動停止問題を解くことは難しいとされている。

本稿では、以下のように燃料消費量制約を扱う。

$$\sum_{i=1}^{M}\sum_{t=1}^{T} c_i(p_i^t) = C_j \tag{2-14}$$

ただし、$\begin{cases} M : \text{燃料制約を持つ発電機台数} \\ c_i : \text{発電機 } i \text{ の燃料消費量関数} \\ C_j : \text{燃料 } j \text{ の使用規定量} \end{cases}$

発電機 i について考えると、燃料費関数 $f(p)$ が各時間帯の出力 p の 2 次関数 ($f(p) = ap^2 + bp + c$) となると近似した場合、燃料消費関数は、

$$c(p) = a'p^2 + b'p + c' \tag{2-15}$$

と表すことができる。$a' = a/\alpha, b' = b/\alpha, c' = c/\alpha$ とおくと、燃料費関数と燃料消費量関数の関係は、

$$f(p) = \alpha \cdot c(p) \tag{2-16}$$

と表すことができる。αは燃料消費係数 (fuel cost coeficient) といい、燃料 1[ton] あたりのコストを表す。

第 3 章

起動停止問題の解法

本章では、起動停止問題の効率的探索法について説明する。

3.1 概要

3.1.1 背景

$$f = \sum_{i}^{N} \sum_{t}^{T} \{(a_i p_i^2 + b_i p_i + c_i) + s_i^t\} \qquad (3\text{-}1)$$

前章でも述べたが、火力機の起動停止問題の目的は火力機の燃料コストの最小化(3-1式)である。この問題では実運用では様々な制約が科せられるため、一般に解くことが難しくなる。制約として考えられるのは、

- 需給制約

$$\sum_{i} p_i^t = D^t \qquad (3\text{-}2)$$

- ユニットの出力の上下限制約

$$u^t \cdot p_{min} \leq p^t \leq u^t \cdot p_{max} \qquad (3\text{-}3)$$

- 最小運転、停止時間制約

$$\begin{cases} u^t = 0 & (MDT \leq x^t < 0) \\ u^t = 1 & (0 < x^t \leq MUT) \end{cases}$$

- 燃料消費量制約

$$\sum_{i=1}^{M}\sum_{t=1}^{T} c_i(p_i^t) = C_j \tag{3-4}$$

ただし、$\begin{cases} M: \text{燃料制約を持つ発電機台数} \\ c_i: \text{発電機}\, i\, \text{の燃料消費量関数} \\ C_j: \text{燃料}\, j\, \text{の使用規定量} \end{cases}$

等がある。この内、需給制約、出力上下限制約等は各時間毎に独立した制約であるため、比較的容易に最適解を求めることができることが知られている。しかし、最小運転、停止時間制約や燃料消費量制約は時間帯にまたがった制約であるため、解くことが難しくなる要因となっている。

特に燃料消費量制約は長期間にまたがる制約であるため、解くことが難しいものである。この制約に関してはこれまでも様々な手法が考案されてきているが、基本的には次のような方法を採用しているものが多い。

(1) まず燃料消費量制約を考慮せずに起動停止問題を解く

(2) 次に燃料消費量制約を満足するように解を修正する

しかし、2. の修正をどのように行うかが問題となっている。

そこでここでは発想を逆にして次のような手順で問題を解くことを提案する。

(1) まず燃料消費量制約を満足するような解の候補（複数個）を選出する

(2) 次にその解候補を組み合わせ、燃料消費量制約以外の制約も満足するような最適解を求める

3.1.2 時間帯毎の解候補の選定

各時間帯毎に最適解を求める方法は様々な手法が考案されてきた。優先順位法に基づくものやＤＰ法によるもの、あるいはヒューリスティックな探索を行うことがある。どの方法を採用しても良いが、最適解一つだけでなく、準最適な解も複数個見つけられるように配慮を行う。

ただ、単純に各時間帯毎に解を求めたのでは燃料消費量制約を満足する良解を求めることはできない。燃料消費量制約を満足する解を求める一つの方法としては、制約のある燃料の価格を（仮想的に）変化させ、全期間を通じて燃料消費量制約が満足されるように調整するというものが考えられる。そこでここでは各時

間帯のみの制約だけを考慮し、燃料消費量制約は価格を変えることによって満足させるということを考える。(ここで使う仮想的な価格を調整価格と呼ぶ)

その上で(その調整価格に基づき)最適解および準最適解を複数個えらんで時間毎の解候補とする。

以上のアルゴリズムを図5に示す。なお、ここで用いた調整価格を図中の P で表した。

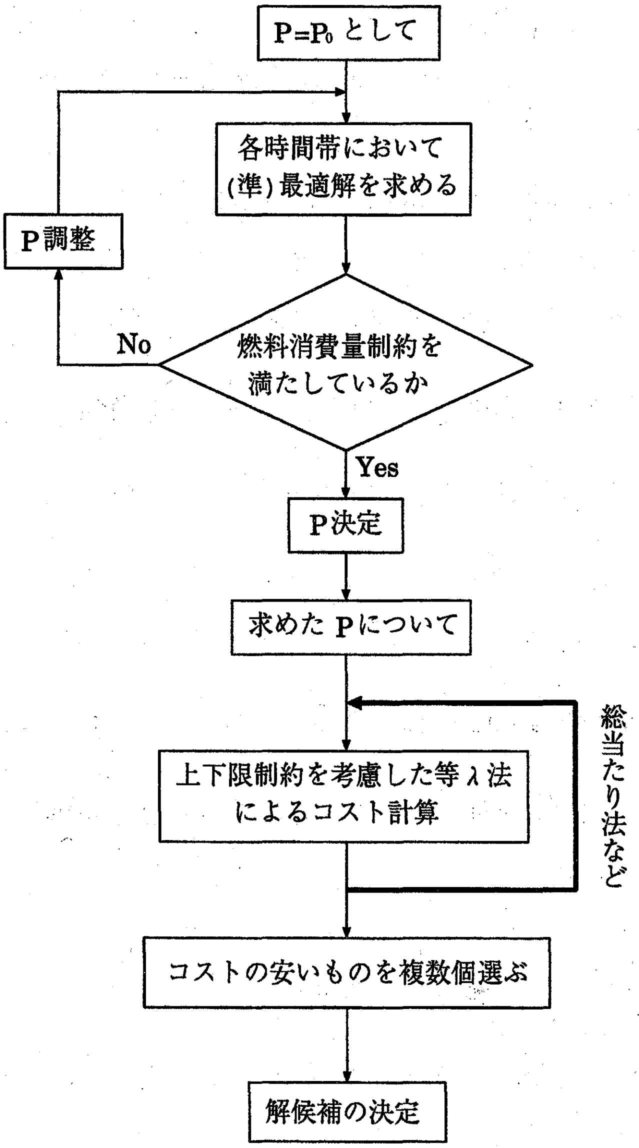


図 5: 解候補選出アルゴリズム

3.1.3　解候補の組み合わせによる最適化

そのように選んだ解候補を組み合わせ、すべての制約（最小運転、停止時間制約も含む）を満足する最適解を求める。この際、ＤＰ法、ＧＡ等様々な手法を使うことが考えられるが、あらかじめ解候補を絞ってあるため探索は容易になるものと期待される。本稿のモデルへの適用ではGAを用いた。

3.2　調整価格の決定法

まず、最初に各時間帯毎の制約と燃料消費量制約を満たした解で調整価格を決定するが、その際には優先順位法を用いた。また、本稿では、調整価格を、未定乗数γを用いて決定した。

3.2.1　ラグランジュ関数

ここで、需給制約についてλ^t、燃料消費量制約についてγ_jなるラグランジュ乗数を導入し、ラグランジュ関数を構成すると、式（3-5）のようになる。

$$\phi^t = \sum_{j}^{N+M} f_j(p_j^t) + \lambda^t(\sum_{j}^{N+M} p_j^t - D^t) + \sum_{j}^{M}[\gamma_j s f_j(p_j^t)] \tag{3-5}$$

このラグランジュ関数より、不等式制約条件のもとで式（3-6）を最小化するp_jを求めれば良い。

$$L = \sum_{t}^{T} \phi^t \tag{3-6}$$

また、最適運用は式（3-7)、(3-8）を解けば良い。

$$\frac{df_j(p_j^t)}{dp_j^t} = \lambda^t(\text{燃料消費量制約なし}) \tag{3-7}$$

$$\frac{df_j(p_j^t)}{dp_j^t} + \gamma_j \frac{dsf_j(p_j^t)}{dp_j^t} = \lambda^t(\text{燃料消費量制約あり}) \tag{3-8}$$

ここで、γ_jは「増分燃料費等価調整係数」とでも呼ばれるべき関数で、ds/dpは正であるから、もしγ_jが正であれば燃料消費量に制約を持った発電機の増分燃料費を高く見積もることになり、燃料消費量を減らすように働き、もしγ_jが負であれば逆に燃料消費量を増やすように働く。

3.2.2 燃料使用量の評価方法

各期間の出力 p_j^tの 2 次関数近似による評価を行なう。

$$sf_j(p_j) = a'_j p_j^2 + b'_j p_j + c'_j [ton] \tag{3-9}$$

この近似式を用いた場合、燃料 1[ton] あたりの発電コストをα_jとすると、

$$f_j(p_j^t) = \alpha_j s f_j(p_j^t) [円] \tag{3-10}$$

であるから、$a'_j = a_j/\alpha_j$、$b'_j = b_j/\alpha_j$、$c'_j = c_j/\alpha_j$とすることにより、$sf_j = f_j$[円]とすることができる。即ち式（3-8）は次式のようになる。

$$(1+\gamma_j)\frac{df_j(p_j^t)}{dp_j^t} = \lambda^t \tag{3-11}$$

これより、式（3-7）（3-8）から

$$2a_j p_j^t + b_j = \lambda^t (\text{燃料消費量制約なし}) \tag{3-12}$$

$$(1+\gamma_j)(2a_j p_j^t + b_j) = \lambda^t (\text{燃料消費量制約あり}) \tag{3-13}$$

を導出できる。

3.2.3 γによる出力調整

式（3-13）を積分すると、

$$f'_j = (1+\gamma_j)(a_j p_j^2 + b_j p_j + c_j) \tag{3-14}$$

となり、この式は「仮想燃料費関数」とでも呼ばれるべき関数である。前にも述べたように、γ_jが正であれば仮想燃料費関数は実燃料費関数よりも大きくなるので、燃料消費量を減らすように働く。またγ_jが負であれば仮想燃料費関数は実燃料費関数よりも小さくなるので、燃料消費量を増やすように働く。ゆえに、運用パターンが燃料消費量制約を満たすように未定乗数γ_jを修正し、負荷配分を行なう。コストの計算には実燃料費関数を用いる。

3.2.4 γの修正方法

γの修正方法のアルゴリズムは以下のようになる。

(1) (3-14) 式より、γ の探索範囲は $(-1 \leq \gamma \leq \infty)$ であるが、初期値として $\gamma = 0)$ とする。

(2) 対象となる運転パターンで燃料消費量制約を満たせるなら次の手順へ進む。

(3) 燃料消費量をオーバーした場合、γ の値を一定量増やし、燃料消費量に満たない場合は γ の値を一定量減らす。

(4) 手順 3 へ戻り、制約を満たすまで繰り返す。ただし、燃料消費量がオーバー→マイナス、またはその逆になった場合は γ の値の変化を少し小さくする。

3.3 解候補の作成方法

3.3.1 時間帯毎の発電機の出力決定

1 時間帯における制約として需給制約と出力上下限制約の 2 つがある。以下に需給制約を考慮した最適負荷配分法と、そのときの出力上下限制約の導入方法について述べる。

ラグランジュ未定乗数法

一般に非線形計画問題は次のように定式化される。

$$\text{目的関数} : f(x) \rightarrow \text{最小}$$

$$\text{制約条件} : g_j(x) \leq 0$$

ただし、$x = (x_1, x_2, \cdots, x_n), j = 1, \cdots, m$

ここで、関数 $g_j(x), j = 1, \cdots, m,$ および $f(x)$ は凸関数 (convex function) である。特に上の定式化において、制約条件が $g_j(x) = 0, j = 1, \cdots, m$ のように全て等式である場合は、ラグランジュの未定乗数法により最適解が求められる。それぞれの制約条件に対応づけてラグランジュ乗数という m 個の変数 $\lambda_j, j = 1, \cdots, m$ を導入し、ラグランジュ関数を作る。

$$L(x, \lambda) \equiv f(x) + \sum_{j=1}^{m} \lambda_j g_j(x) \tag{3-15}$$

次式を連立させて、x,λについて解き、最適解を求める。

$$\begin{cases} \dfrac{\partial L}{\partial x_i} = \dfrac{\partial f(x)}{\partial x_i} + \displaystyle\sum_{j=1}^{m} \lambda_j \dfrac{\partial g_j(x)}{\partial x_j} = 0 & i = 1,2,\cdots,n \\ \dfrac{\partial L}{\partial \lambda_j} = g_j(x) = 0 & j = 1,2,\cdots,m \end{cases}$$

等増分燃料費則

図6のように、n 機の発電機が Dの電力を負荷に供給している場合について、燃料費が最小になる経済負荷配分 (ELD:Economical Load Dispatch) を考える。

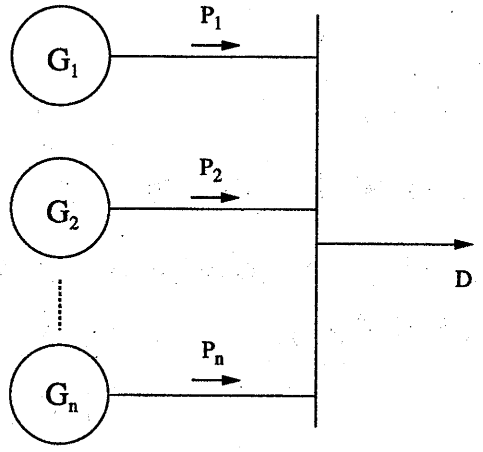


図 6: n 機系負荷配分

n 機の発電機の出力を $P_1,P_2,\cdots,P_n$とし、燃料費を $F_1(P_1),F_2(P_2),\cdots,F_n(P_n)$ とした場合、

$$F = F_1(P_1) + F_2(P_2) + \cdots + F_n(P_n) \tag{3-16}$$

を最小にする出力が求める解となる。ここでラグランジュ乗数λを導入すると、ラグランジュ関数は、

$$L = F_1(P_1) + F_2(P_2) + \cdots + F_n(P_n) - \lambda(P_1 + P_2 + \cdots + P_n - D) \tag{3-17}$$

となる。この L を最小にするため、$P_1,P_2,\cdots,P_n$について偏微分し 0 とおくと、

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{\partial L}{\partial P_1} = \dfrac{dF_1}{dP_1} - \lambda = 0 \\ \dfrac{\partial L}{\partial P_2} = \dfrac{dF_2}{dP_2} - \lambda = 0 \\ \qquad\vdots \\ \dfrac{\partial L}{\partial P_n} = \dfrac{dF_n}{dP_b} - \lambda = 0 \end{array}\right\} \tag{3-18}$$

となり、

$$\frac{dF_1}{dP_1} = \frac{dF_2}{dP_2} = \cdots = \frac{dF_n}{dP_n} = \lambda \tag{3-19}$$

の関係が成り立つ。このλの値は各ユニットについてのその運転出力における出力の増分に対する燃料コストの増分の割合を表している。全てのユニットの増分燃料費が等しくなるように負荷Lを各ユニットに配分すれば最適な負荷配分になる。この方法による負荷配分を等増分燃料費則 (equal incremental fuel cost method) という。

出力上下限制約の導入

各発電機の出力上下限制約を考慮すると、算出した出力p_iの値がその発電機の出力上限p_{imax}を越えたり、出力下限p_{imin}を下回ったりした場合、出力p_iの値を出力上下限制約を満足するように修正し、その他の発電機の出力を制約を満たす範囲内で調整する必要がある。まず最初に各発電機の最大・最小増分燃料費を計算する

$$\begin{aligned} \lambda_{imax} &= 2a_i p_{imax} + b_i \\ \lambda_{imin} &= 2a_i p_{imin} + b_i \end{aligned} \tag{3-20}$$

等増分燃料費則によって算出した出力が出力上限越えている、または出力下限を下回っている場合にその出力p_iの値を固定する。

(1) $p_i > p_{imax}$のとき

$$p'_i = p_{imax}$$

(2) $p_i < p_{imin}$のとき

$$p'_i = p_{imin}$$

固定した出力を総需要から引いて固定していない発電機で増分燃料費を求める。そして、固定した発電機に関して

(1) の場合は、新たに求めたλの値がλ_{imax}を下回っていたならば固定化を解除し、その出力を総需要に足す。

(2) の場合は、新たに求めたλの値がλ_{imin}を上回っていたならば固定化を解除し、その出力を総需要に足す。

上記２つに相当しない場合は出力を固定したままとし、等増分燃料費則によって需給制約を満たすように出力を再配分する。

上記の出力の固定化、固定化の解除及び出力の再配分を需給制約を満たすまで繰り返し行う。

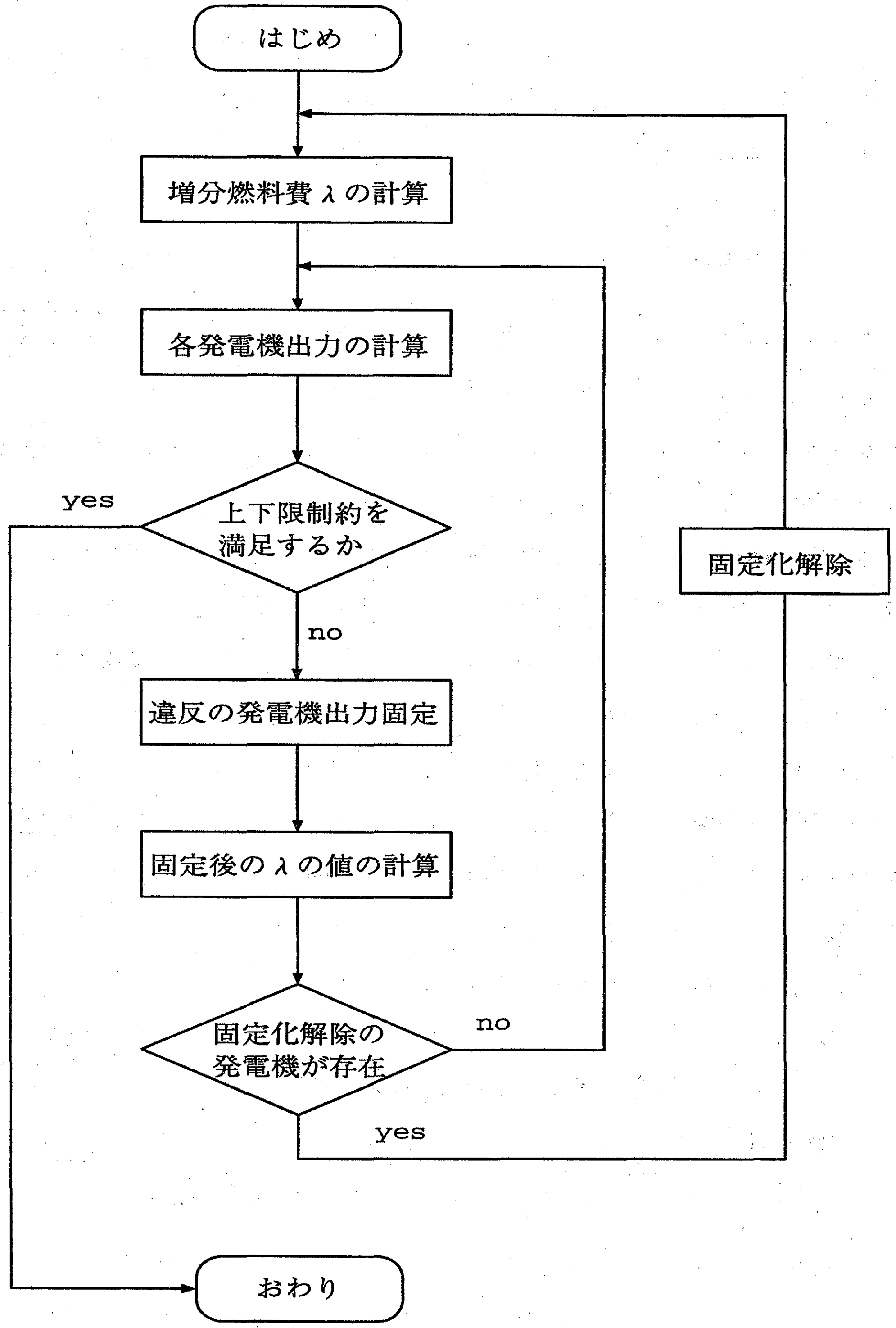


図 7: 1時間帯における制約導入のアルゴリズム

3.3.2 小規模モデル

各時間帯毎に前記のような出力配分をしていくのだが、その際に調べる並列パターンをどうするかが問題である。比較的小規模なモデルでは、解候補を求める場合に、総当たり法で良いのではないかと思われる。需給制約を満たす全ての並列パターンについて出力配分を行ない、その並列パターンでの仮想コストの安いものから解候補に位置付けていく方法を取った。

3.3.3 大規模モデル

解候補を求める際に総当たり法で全ての並列パターンを試せればよいのだが、規模が大きくなれば、総当たり法は時間がかかり過ぎてしまう。そこで、総当たり法に変わる何らかの手法を考えなければならないが、本論文では調整価格を決定する際に行なった優先順位法での並列パターンに着目した。

最初に調整価格を決定する際に優先順位法を行なうが、この時作成した起動停止パターンは発電機の優先順位に基づいて並列を決定しているので、最小起動停止時間制約の違反が少ない。実際に手作業で少し並列する発電機を修正すると、全ての制約を満たす解を求めることができる。

この事を考慮して、優先順位法で決定した各時間帯毎の並列パターンから、特定の発電機の起動停止を入れ変える事を行なった。(図 8) その中で従来から用いている優先順位に基づき重みをつけて高いものから並べた解候補と、単純にコストの安い組合せを並べた解候補を作成した。

また、起動停止の入れ変えは 3 箇所以内で行なった。

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	
優先順位法	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	
パターン1	$\boxed{0}$	1	1	0	0	1	1	0	1	1	#1を変換
パターン2	1	1	$\boxed{0}$	$\boxed{1}$	0	1	1	0	1	1	#3・#4を変換
パターン3	1	$\boxed{0}$	1	0	$\boxed{1}$	1	1	0	1	$\boxed{0}$	#2・#5 ・#10を変換

図 8: 解候補の作成

3.3.4 最小起動停止時間の考慮

また、需要が増加→減少→増加のような変化をしている所では、減少している所で最小起動停止制約を満たさない解候補を作成する場合がある。(図 9) このような時間帯の解候補はその前の時間帯の解候補をそのまま用いて制約違反をなくすようにした。

また、さらに大規模モデルでは、発電機によって最小起動停止時間がかなり長いものも存在し、単純にこの手法では制約を満たせない場合もあるので、そのようなモデルでは最初に優先順位法で調整価格を決定する際に最小起動停止制約を満たした解より解候補を作成し、さらに、各時間帯毎にその時間帯の並列パターンだけではなく、数時間前後の並列パターンも解候補として組み入れた。

期間																					需要
t=12	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	5413
t=13	1	1	1	1	1	1	1	1	0	$\boxed{0}$	1	1	$\boxed{0}$	$\boxed{0}$	$\boxed{0}$	0	1	1	1	1	4812
t=14	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	5446

図 9: 制約を満たさない点の一例 (20 機 24 期間)

3.3.5 解の妥当性の検査

本手法は特に大規模システムにおいて特に実用性があると思われる。

また、本稿のような小規模モデルでは得られた解が最適解あるいは準最適解であるかどうかは比較的容易に確認できるが、大規模モデルではなかなか困難である。

そこで先に述べた手続きで求まった解が最適解（あるいは準最適解）であることを確認するためには以下の手順が必要である。

(1) 各時間帯毎の制約のみを満たす最適解からかけ離れた解となっているかどうかを確認する。もしそうなっていれば、その時間帯では解候補の数を増加させて計算し直した方が良いかもしれないのでその検討が必要である。

第 4 章

GA による解法

解候補が決定したら、最後にその解候補を組み合わせて全ての制約を満足する並列パターンを決定するわけだが、ここでは、その際に用いた遺伝的アルゴリズムについて説明する。

4.1 GA の基本的動作

GA の基本的の動作は

初期状態の設定 ⟶ 適合度の評価 ⟶ 再生（リプロダクション） ⟶ 交叉（クロスオーバー） ⟶ 突然変異（ミューテーション） ⟶ 終了判定

という手順になる。これを終了条件を満たすまで、適合度の評価から終了判定まで繰り返す。

4.2 GA の本手法への適用

4.2.1 初期個体の作成

総当たり法で得られた組合せからそれぞれの時間帯でその中の１つをランダムに選択し、全期間での起動停止パターンを初期個体として作成する。この方法によって、この段階では需給制約と上下限制約を満たした個体が得られることになる。(図 11)

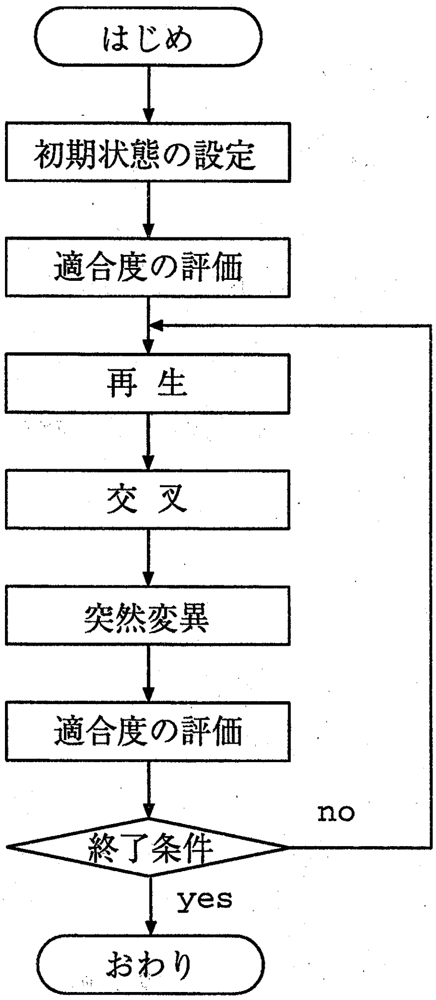


図 10: GA の基本的動作

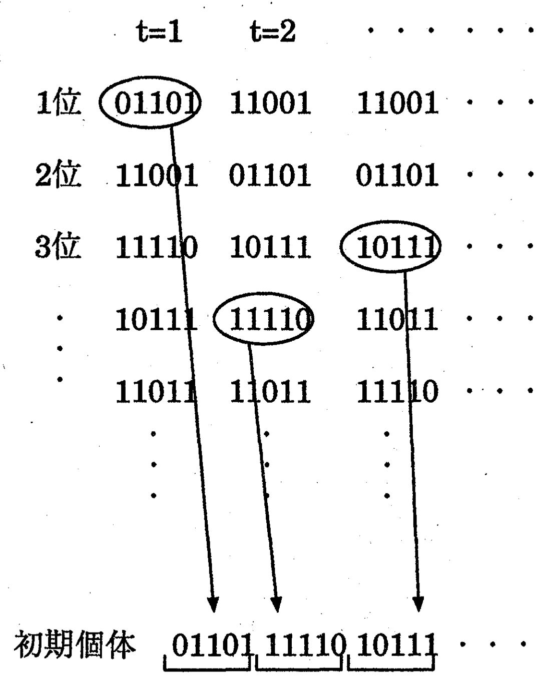


図 11: 初期個体の作成法

4.2.2 遺伝的オペレーター

再生方法について

再生とは、適合度の高い個体は次の世代により多くの子孫を残すことができるように個体を増殖させ、適合度の低い個体は逆に淘汰することである。本論文ではルーレット選択を行う。ルーレット選択とは、個体群の中の各個体の適合度とその総計を求めて、適合度の総計に対する各個体の割合を選択確率として個体を乱数によりランダムに選択する方法である。この方法では適合度が高い個体が次世代の個体として選ばれる可能性が大きいが、適合度の低い個体でも次世代の個体として選ばれる可能性が残されている。このことにより、個体群の多様性を維持し、局所解に陥るのを防ぐことになる。

交叉方法について

本稿では一点交叉で行った。解候補の集合は、それぞれの時間帯での需給制約と出力上下限制約をすでに満たしているので、わざわざそれを壊すことのないように交叉する場所は時間帯の端点で行なう。(図 13)

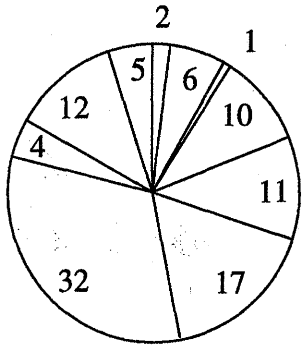


図 12: ルーレット選択

親 A　11101 11101 11101 11111·····
親 B　11111 11101 11101 11101·····

↓

子 A　11101 11101 11101 11101·····
子 B　11111 11101 11101 11111·····

図 13: 交叉

突然変異

一般的に、突然変異は親個体からは得られないような新しい個体を得るために行うものであるが、本稿では初期個体の特徴を壊さないように進化させて行く必要があるので、突然変異は行わない。

4.2.3　適合度の評価

ＧＡは最大最適化のアルゴリズムであるので、適合度の評価は目的関数の逆数とする。目的関数は燃料費と起動費からなる式（4-2）で表される。

$$f = \frac{1}{F} \tag{4-1}$$

$$F(p_i^t, u_i^t) = \sum_t^T \sum_i^N \{f_i(p_i^t) + s_i \cdot u_i^t(1 - u_i^{t-1})\} \tag{4-2}$$

目的関数は式（4-2）で表せるが、これとは別に制約を満たさない場合にはペナルティーを与えることによって、適合度を低くする必要がある。一般にペナルティーはそれぞれの制約に対して違反した場合に課さなければならないが、本稿のアルゴリズムでは最初に総当たり法で求めた需給制約、上下限制約の組合わせは壊さないように進化させていくので、ここでは、最小起動停止時間と燃料消費量制約についてペナルティーを与えるものとする。

- 複数時間帯における制約を満たさない場合

  運転履歴より最小運転、停止時間制約を調べ、違反があった場合はその違反個所の数に応じてペナルティーを与え、適合度を低くする。

$$f = \frac{1}{F + \text{違反個数} \times \text{ペナルティー}} \tag{4-3}$$

- 燃料消費量制約の適合度への反映

  １時間帯における制約や、複数時間帯における制約を満たしている解で燃料消費量制約を満たすことができないような個体の場合には、ペナルティーを課し適合度を下げる。このペナルティーは目的関数そのものにかけ合わせるので、他の制約を満たしていても燃料消費量制約を満たしていない場合は適合度が低くなることになる。 逆に、燃料消費量制約を満たしている場合はアドバンテージを与え、適合度を若干高めるようにする。

このことによって燃料消費量制約を満たす解を効率的に探索させることができる。

$$適合度 = \frac{1}{F} \times advantage \tag{4-4}$$

本論文では、このような方針でいろんなモデルへの適用を計ったわけであるが、この手法の全体のフローチャートを図 14に示す。

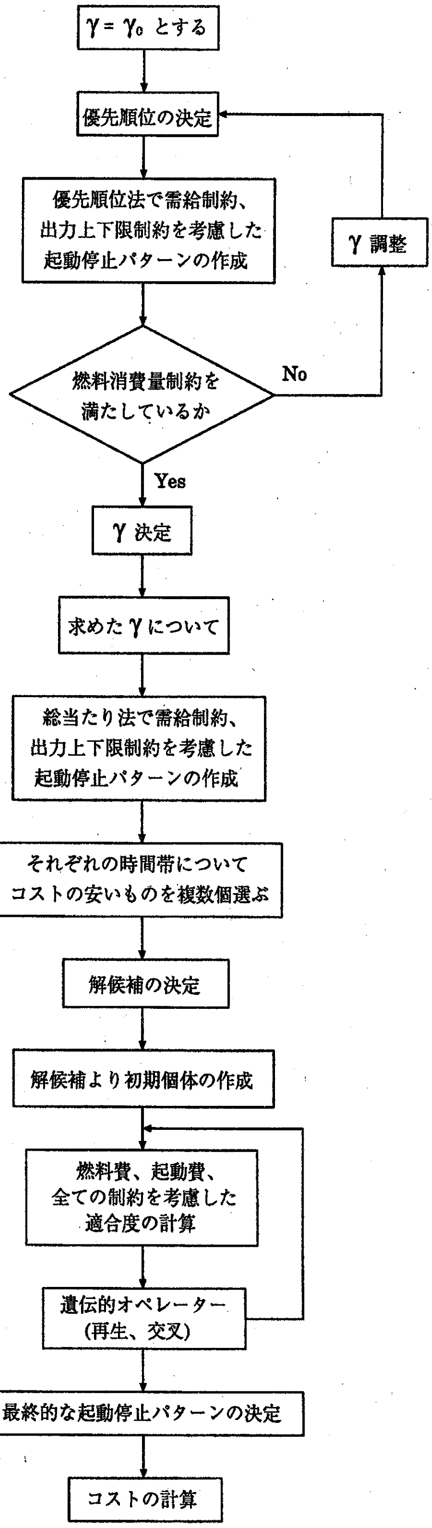

γ = γ₀ とする
優先順位の決定
優先順位法で需給制約、出力上下限制約を考慮した起動停止パターンの作成
燃料消費量制約を満たしているか
No
γ 調整
Yes
γ 決定
求めた γ について
総当たり法で需給制約、出力上下限制約を考慮した起動停止パターンの作成
それぞれの時間帯についてコストの安いものを複数個選ぶ
解候補の決定
解候補より初期個体の作成
燃料費、起動費、全ての制約を考慮した適合度の計算
遺伝的オペレーター(再生、交叉)
最終的な起動停止パターンの決定
コストの計算

図 14: 全体の流れ

第 5 章

計算結果

5.1 モデル 1

表 1 に示す発電機 5 機、期間 10 期間のモデルを用いて計算を行なった。各期間の電力需要は図 15のように与えられているものとした。 また、全ての発電機の

表 1: 発電機の性能

	燃料消費量関数			出力上下限		燃料消費量制約
	a	b	c	min	max	
1	0.82501	4928.59	199852.2	40	350	無
2	1.78016	4178.21	201902.2	50	250	無
3	0.73410	4448.28	158639.2	50	250	無
4	1.18225	4327.19	181392.6	35	125	有
5	1.62872	3256.26	265035.4	125	350	有

最小運転・停止時間を 2 期間とし、運転履歴の初期値は 2 期間以上運転しているものとした。各発電機が停止状態にある時は埋火状態であるとし、起動費 $s(t)$ は停止時間に比例する関数で表す。

$$s(t) = \beta \cdot t \tag{5-1}$$

ただし、定数$\beta = 5000$ とした。燃料の規定消費量 $C = 3600000$[kg]、収束条件は燃料消費逸脱量が全体の燃料消費量の 1%以内とした。この場合の運用パターン

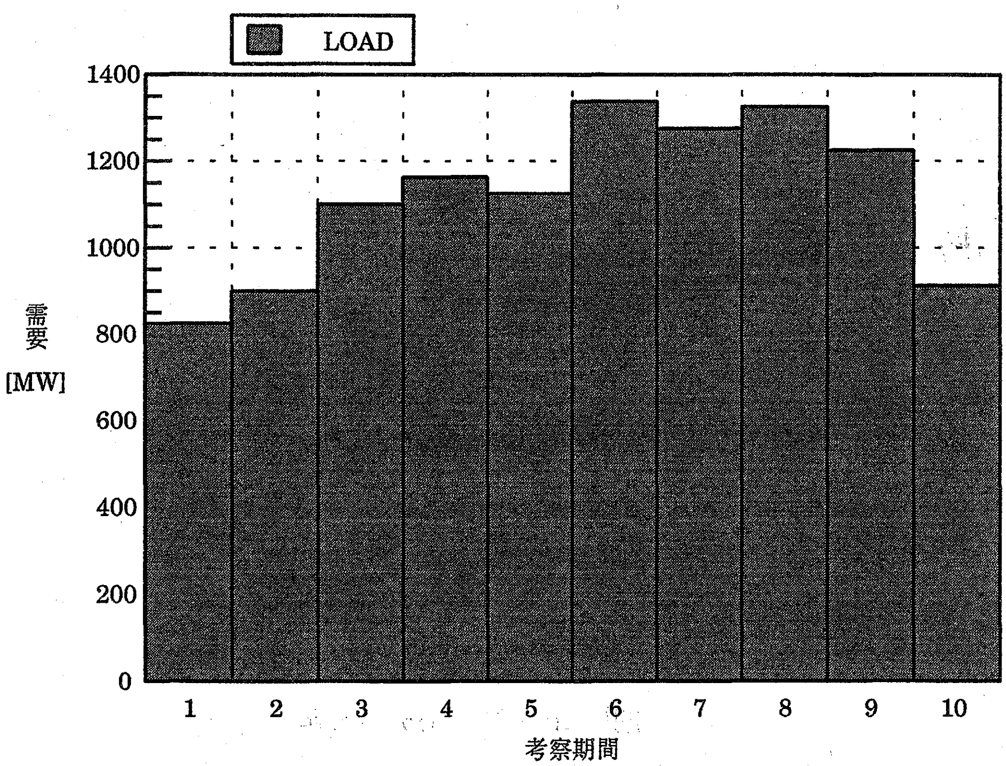


図 15: 需要

を図16に示す。また、総コストと燃料使用量を表2に示す。

表 2: 結果

総コスト	59054083 [円]
燃料使用量	3588202 [kg]

この手法で、燃料消費量制約を満たす良解が得られた。計算時間はSilicon Graphics INDY で30 秒程度であった。

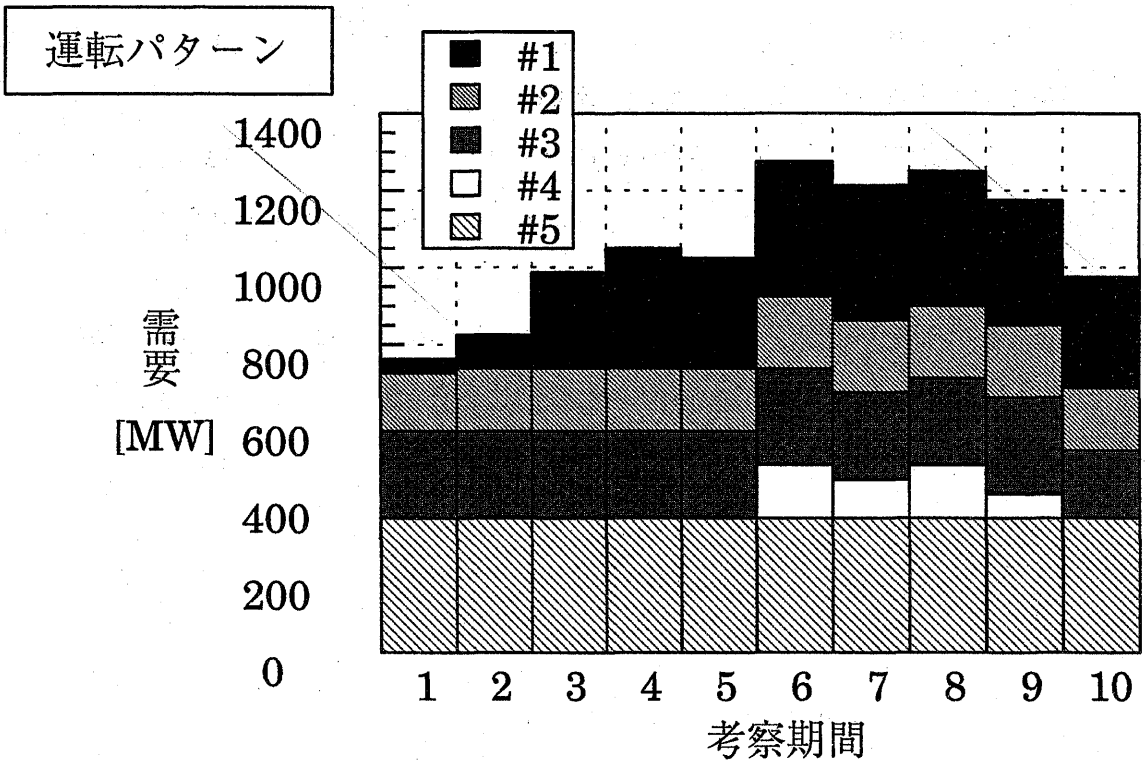

運転パターン
#1
#2
#3
#4
#5
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
需要
[MW]
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
考察期間

図 16: 運用パターン

5.2 モデル2

5.2.1 シミュレーション条件と結果

発電機10機、期間20期間のモデルを用いて計算を行なった。また、全ての発電機の最小運転・停止時間を3期間とし、運転履歴の初期値は3期間以上運転しているものとした。各発電機が停止状態にある時は埋火状態であるとし、起動費 $s(t)$ は停止時間に比例する関数で表す。

$$s(t) = \beta \cdot t \tag{5-2}$$

ただし、定数 $\beta = 56250$ とした。燃料の規定消費量 $C = 26000000$[kg]、収束条件は燃料消費逸脱量が全体の燃料消費量の1%以内とした。

この手法で、燃料消費量制約を満たす良解が得られた。計算時間はSUN Spark Station 5で1分程度であった。表4に結果を、表5に燃料使用量を示す。計算時間は2分程度であった。

表4での優先順位法の結果は、調整価格を決定する際に用いた優先順位法の結果を最小起動停止時間制約を満たすように修正したものの解である。

NO.	燃料費係数 a	b	c	最大出力 [MW]	最小出力 [MW]	最小継続時間 MUT	MDT	燃料制約
1	2.57481	6042.82	136884.3	175	50	3	3	無
2	0.69239	6485.86	105349.9	175	45	3	3	無
3	1.61117	5679.14	178947.6	125	35	3	3	無
4	1.18225	5827.19	181392.6	125	35	3	3	無
5	1.62872	3256.26	265035.4	350	105	3	3	無
6	0.72614	4983.01	200783.3	350	75	3	3	有
7	1.42183	4725.61	221517.6	350	75	3	3	有
8	0.82501	4928.59	199852.2	350	40	3	3	有
9	1.78016	4178.21	201902.2	250	50	3	3	有
10	0.73410	4448.28	158639.2	250	50	3	3	有

表 3: 発電機特性 2

表 4: 結果 (10 機 20 期間)

本手法	181809595 [円]
優先順位法	181925681 [円]

表 5: 燃料使用量

本手法	25986870 [kg]
優先順位法	26157872 [kg]

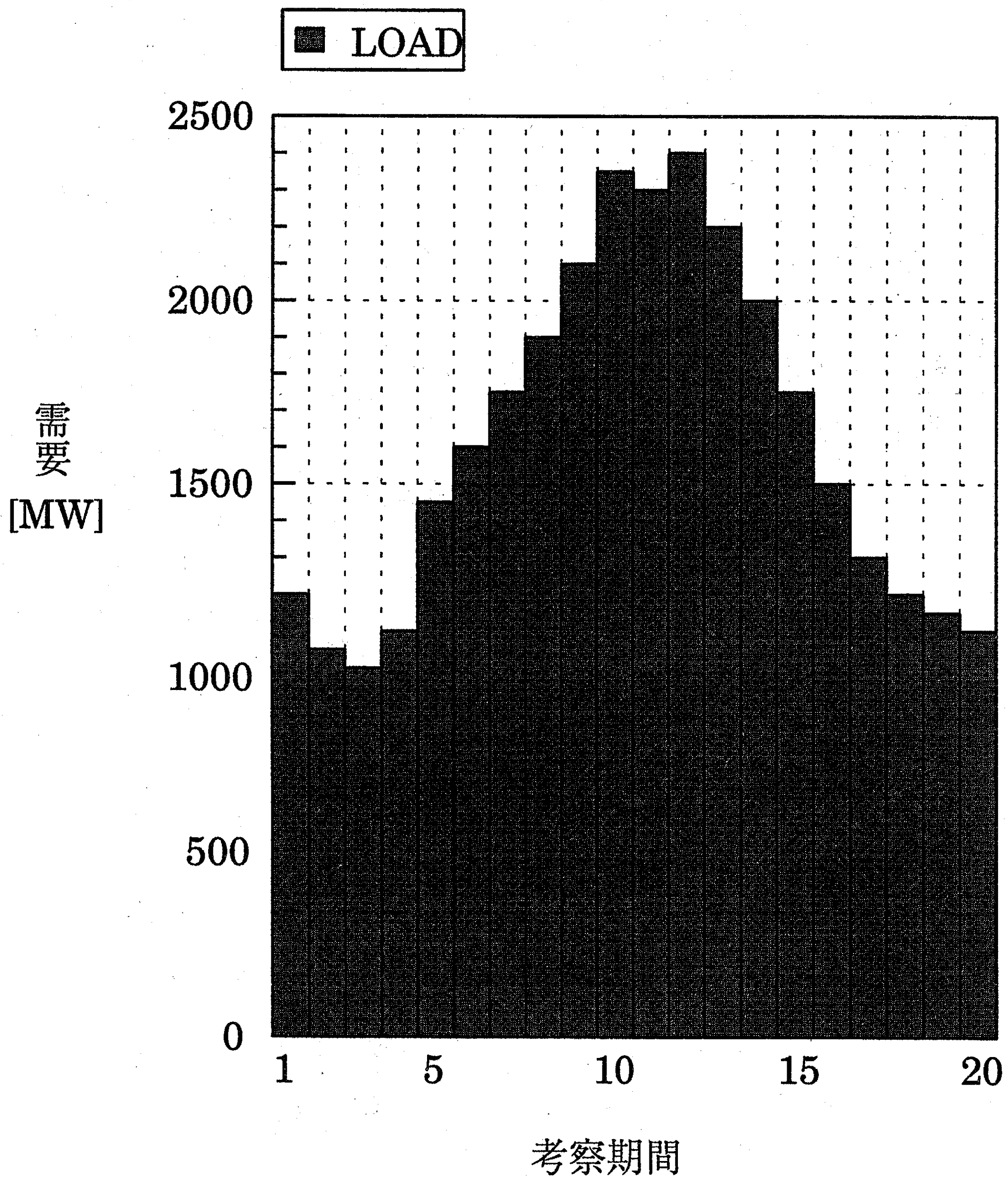


図 17: 需要特性

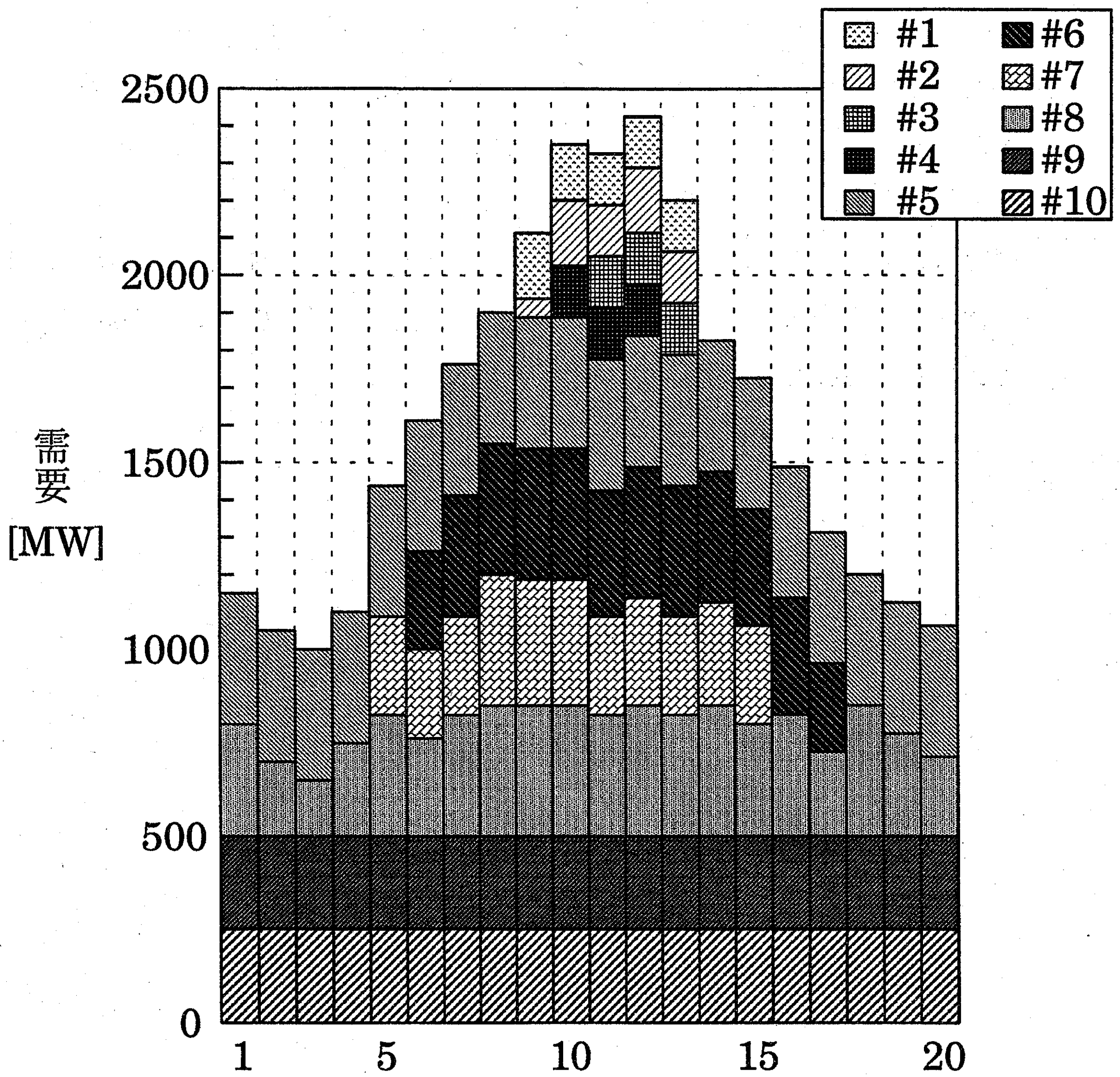


図 18: 運用パターン

5.2.2 解の妥当性の検査

この結果に最適性があるかどうかを各時間帯毎の解候補の一番安い値と比べることによって調べてみた。

表6より、GAで求めた最終的な起動停止パターンはそれぞれの時間帯の解候補のなかで一番安いものを集めたものより、0.23%しか上回っておらず、最適解に近いものが選ばれていることがわかる。また、GAで解候補の中から一番安いものを選んでない時間帯が何箇所かあるが、それらは、一番安い解候補を選ぶと最小起動停止時間制約を満たさない点であることがわかる。特に期間3,17などは、一番安い解候補よりも1%以上高くなっているが、その解候補では最小起動停止時間制約を満たさないためである。また、最小起動停止時間制約とは関係ない点で、一番安い解候補を用いてない場合があるが、それは、仮想コストは高いが、実際のコストは安いものを選んでいる。

期間	GA で求めた並列パターンの仮想コスト (A)	解候補の中で一番安いものの仮想コスト (B)	A/B
1	7338522	7338522	1.0
2	6353553	6353553	1.0
3	6035295	5960705	1.01251
4	6676844	6676844	1.0
5	9157842	9153629	1.00046
6	10315505	10233279	1.00883
7	11305375	11305375	1.0
8	12320324	12320324	1.0
9	13853209	13814329	1.00028
10	15609844	15595595	1.00091
11	15340428	15250780	1.00587
12	16011185	16011185	1.0
13	14579323	14495919	1.00575
14	13068192	13060936	1.00055
15	11305375	11305373	1.0
16	9485488	9485488	1.0
17	8172190	8085230	1.01075
18	7338522	7338522	1.0
19	7005167	7005167	1.0
20	6676844	6676844	1.0
合計	207949025	207467601	1.00232

表 6: 最適性の検査

5.3 モデル3

5.3.1 シミュレーションと条件

これまで述べてきた手法を用いて、規模を大きくした場合についての結果を求めた。ここでは、以下に示すようなうな発電機特性をもつ発電機で構成させる系統のモデルで燃料消費量制約を考慮した最適運用計画を求める。各期間の需要電力は図19のように与えるものとする。また、運転履歴の初期値は3とし、起動費 $s(t)$ は停止時間に比例する関数で表す。ただし、βは56250.0とした。燃料の規定消費量 $C = 36000000$[kg]、収束条件は燃料消費逸脱量が全体の燃料消費量の1%以内とした。

結果は表8のようになった。また、燃料消費量を表9に示す。計算時間は8分程度であった。

NO.	燃料費係数			最大出力	最小出力	最小継続時間		燃料
	a	b	c	[MW]	[MW]	MUT	MDT	制約
1	0.72614	4983.01	200783.3	350	75	3	3	無
2	1.42183	4725.61	221517.6	350	75	3	3	無
3	0.82501	4928.59	199852.2	350	40	3	3	無
4	1.78016	4178.21	201902.2	250	50	3	3	無
5	0.73410	4448.28	158639.2	250	50	3	3	無
6	0.66183	3016.58	162727.4	350	175	3	3	無
7	0.15383	3185.84	158293.6	600	180	3	3	無
8	0.85059	5041.15	157939.3	350	53	3	3	無
9	2.57823	6700.31	137263.7	125	50	3	3	無
10	0.66908	7152.32	105244.5	125	50	3	3	無
11	0.65053	6683.58	164127.1	175	70	3	3	無
12	1.13931	6541.22	181577.4	175	70	3	3	無
13	2.57481	6542.82	136884.3	175	50	3	3	有
14	0.69239	6985.86	105349.9	175	45	3	3	有
15	1.61117	6179.14	178947.6	125	35	3	3	有
16	1.18225	6327.19	181392.6	125	35	3	3	有
17	1.62872	3256.26	265035.4	350	105	3	3	有
18	0.15948	3292.67	164429.8	600	90	3	3	有
19	1.59592	4797.86	223677.1	350	105	3	3	有
20	1.39197	4679.48	217102.2	350	105	3	3	有

表 7: 発電機特性

表 8: 結果

本手法	522593968 [円]
優先順位法	522748300 [円]
GA 法	527729091 [円]
ラグランジュ緩和法	527292500 [円]

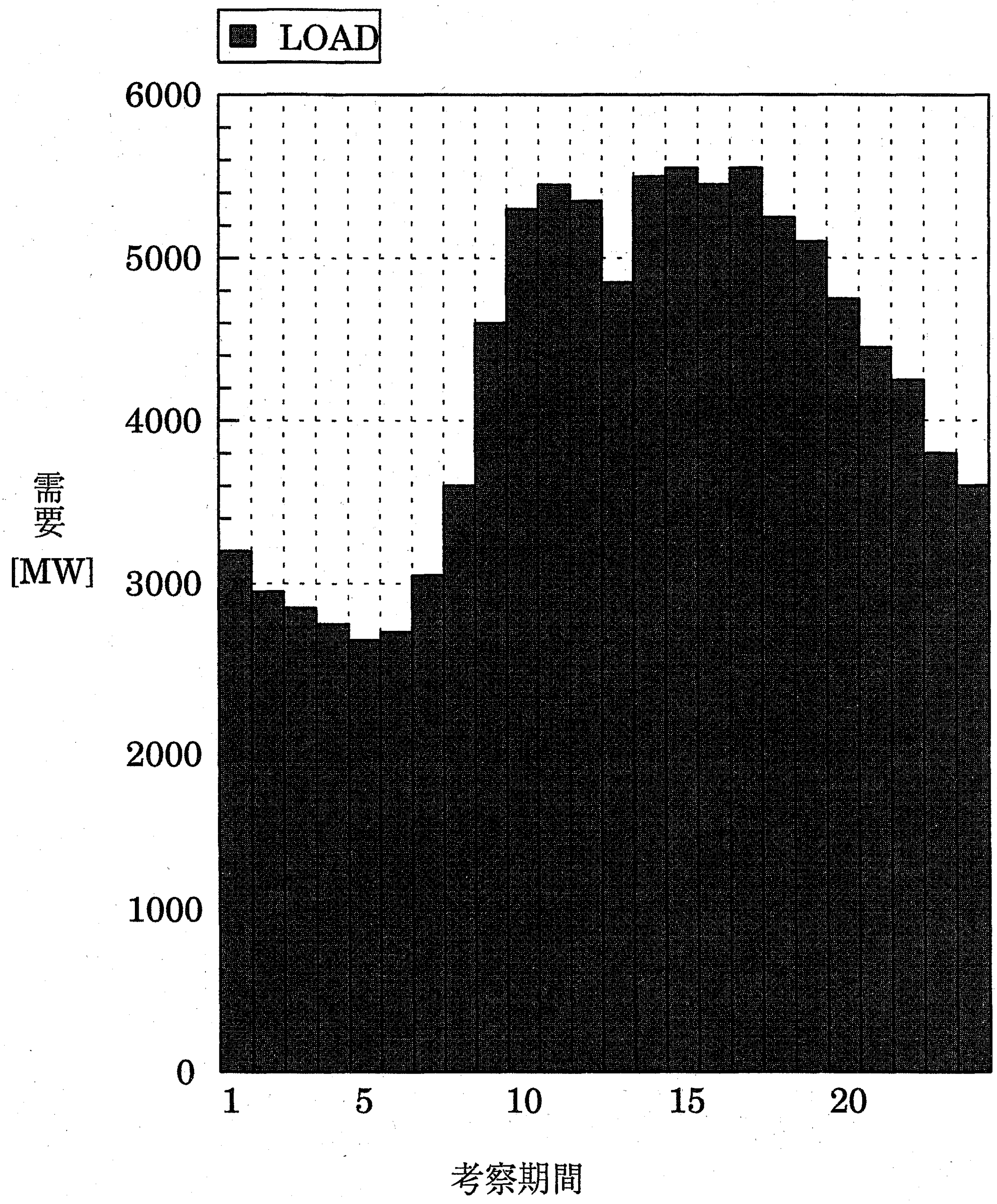
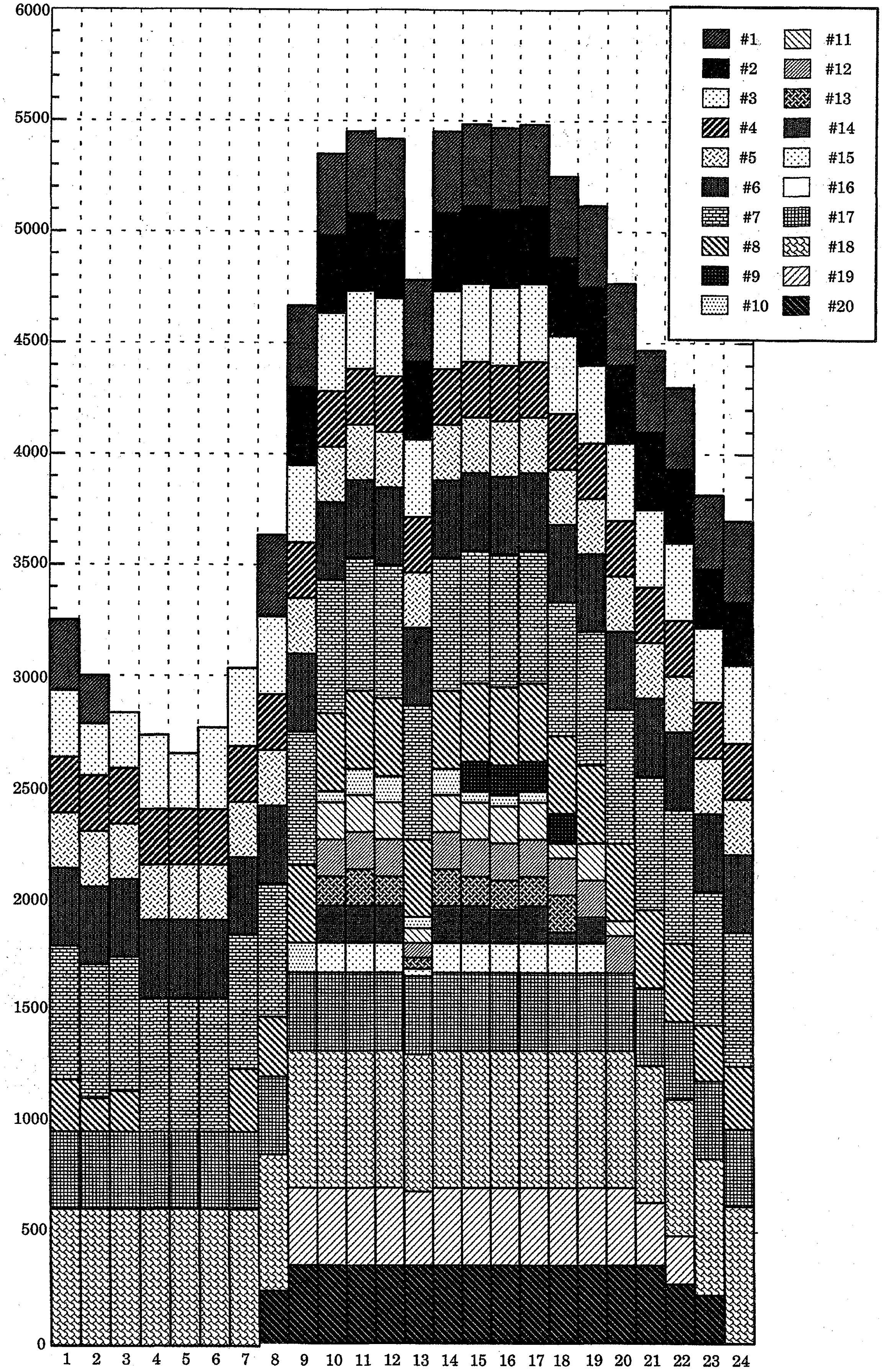


図 19: 需要特性

表 9: 燃料使用量

本手法	359945640 [kg]
優先順位法	357684200 [kg]



6000
5500
5000
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
#1 #2 #3 #4 #5 #6 #7 #8 #9 #10
#11 #12 #13 #14 #15 #16 #17 #18 #19 #20

図 20: 運用パターン

5.3.2 解の妥当性の検査

この結果に最適性があるかどうかを各時間帯毎の解候補の一番安い値と比べることによって調べてみた。

表10より、GAで求めた最終的な起動停止パターンはそれぞれの時間帯の解候補のなかで一番安いものを集めたものより、0.18%しか上回っておらず、最適性の保証がされていることがわかる。また、GAで解候補の中から一番安いものよりも比較的高い解候補を選んでいる時間帯(期間2,13)があるが、それらは、最小起動停止時間制約を満たさない点である。その他の点でも一番安いものを選んでない時間帯が何箇所かあるが、それらに関しても、最小起動停止時間制約を満たさない点であるか、仮想コストは高いが、実際のコストが安いものを燃料消費量制約を満たすように選んでいるかである。

期間	GA で求めた並列パターンの仮想コスト (A)	解候補の中で一番安いものの仮想コスト (B)	A/B
1	14900419	14900419	1.0
2	13539717	13389970	1.01118
3	12568743	12568743	1.0
4	11891270	11888124	1.00026
5	11545321	11534026	1.00097
6	11863999	11860209	1.00031
7	13702960	13702960	1.0
8	17054527	17024661	1.00175
9	23354736	23354736	1.0
10	29055687	29032710	1.00079
11	29879897	29879897	1.0
12	29668115	29668115	1.0
13	25444772	24978043	1.01868
14	29918154	29918154	1.0
15	30167996	30151495	1.00054
16	30055859	30040953	1.00049
17	30152986	30136738	1.00053
18	28231550	28054449	1.00631
19	27052079	27052079	1.0
20	24352106	24315828	1.00149
21	21975214	21975214	1.0
22	20787215	20787215	1.0
23	18342967	18342967	1.0
24	17426062	17426062	1.0
合計	522932351	521983767	1.00181

表 10: 最適性の検査

第6章

おわりに

本論文においては、一般にいろいろな制約の中でも一番最後に修正されることの多い燃料消費量制約に対し、燃料消費量制約を先に考慮して解を複数個求め、その解候補の組み合わせによって他の制約も満足するような手法を提案した。また、小規模なモデルから実規模なモデルまでシミュレーションを行ない、実用性を試した。

また、解候補を先に求めた優先順位法の並列パターンから求め、最小起動停止時間制約を満たしやすい解候補を作成し、計算時間の短縮につなげることができた。

その反面、解候補が優先順位法の解に近いものになってしまい、GA 法で最終的な起動停止パターンを求めた時に、優先順位法での結果に比べてものすごい安い解にはならないということがあげられる。また、計算時間の高速化に重点をおいた結果、最後の GA の中で γ の値について、微調整を行なわなかったが、さらに良い解を時間をかけて求める場合は、そのような調整も必要と思われる。

今後の課題としては、

- 実規模系統でのシミュレーション
- 最小起動停止時間制約の非常に大きいものの考慮
- 最終的な調整価格の微調整

などが挙げられる。

参考文献

[1] 高橋一弘　“電力システム工学”　コロナ社

[2] 坂和正敏、田中雅博　“遺伝的アルゴリズム”　朝倉書店,1995

[3] 関根泰次　“電力系統工学”　電気書院,1966

[4] 永田、多、佐々木、藤田、高山
“燃料消費制約を考慮した発電機起動停止計画問題の解法”　電気学会研究会資料 PE-95-35

[5] 七原俊也　“火力発電機群の起動停止計画手法の開発（その１）”　電力中央研究所報告 185027 天野、田村、福井ら　“ニューラルネットを用いた発電機起動停止計画”　平成２年電気学会全国大会 1030

[6] 川上潤三、福井千尋ほか　“ホップフィールド型ニューラルネットの電力系統への応用”　電気学会情報処理研究会資料 IP88-1

[7] 佐々木博司、横山隆一
“組合せ最適化問題”　平成６年電気学会全国大会 S.13-5

[8] 森啓之、堀口卓也
“Genetic Algorithm の発電機起動停止問題への適用”　平成６年電気学会全国大会

[9] 平井泰司
“燃料制約を含む火力機起動停止問題の解法に関する研究”　横浜国立大学電子情報工学科平成８年修士論文

[10] 中野 聡
“火力機の起動停止問題における効率的探索法”　横浜国立大学電子情報工学科平成８年卒業論文

[11] 富樫施哉

“ラグランジュ緩和による火力機起動停止問題の解法”　横浜国立大学電子情報工学科平成 9 年卒業論文

[12] 福岡雄二

“遺伝的アルゴリズムによる火力機起動停止問題の解法”　横浜国立大学電子情報工学科平成 9 年卒業論文

発表文献

[1] 狐塚幹貴、 大山力
“燃料消費量制約を含む火力機の起動停止問題に対する一考察”
平成 9 年電気学会電力・エネルギー部門大会 180 pp158-159

[2] 狐塚幹貴、 大山力
“燃料消費量制約を考慮した火力機起動停止問題の一解法”
平成 9 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会 PE-97-16 pp1-6

付録 A

優先順位法

優先順位法とは、なるべく効率の高い発電機ほど優先させて運転させるという方法である。効率は、出力を p、燃料費を $f(p)$ と表す場合、次式で定義される。

$$\mu = \frac{f(p)}{p} \tag{A-1}$$

また、増分燃料費は次式で表される。

$$\lambda = \frac{df(p)}{dp} \tag{A-2}$$

効率μが最も小さくなる出力は原点からこの曲線に接線を引いた時の接線となっている。この点では、

$$\lambda = \mu_{min} \tag{A-3}$$

の関係が成り立つ。

$\lambda - \mu$特性は図 22のようになる。発電機を運転する際は、各発電機の増分燃料費が等しくなるように運転されるので（等増分燃料費則）、同じλに対してμの小さい方から運転させていく。したがって、μ_{min}の小さい方から順に起動優先順位を決定していけばよい。

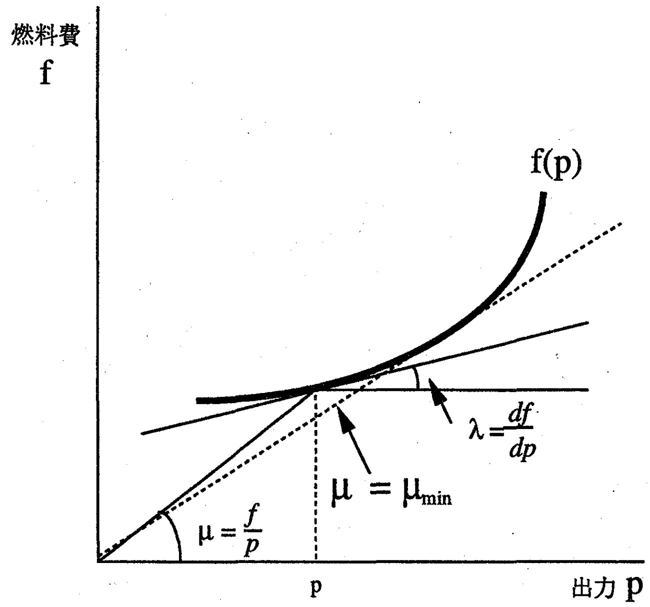


図 21: 効率

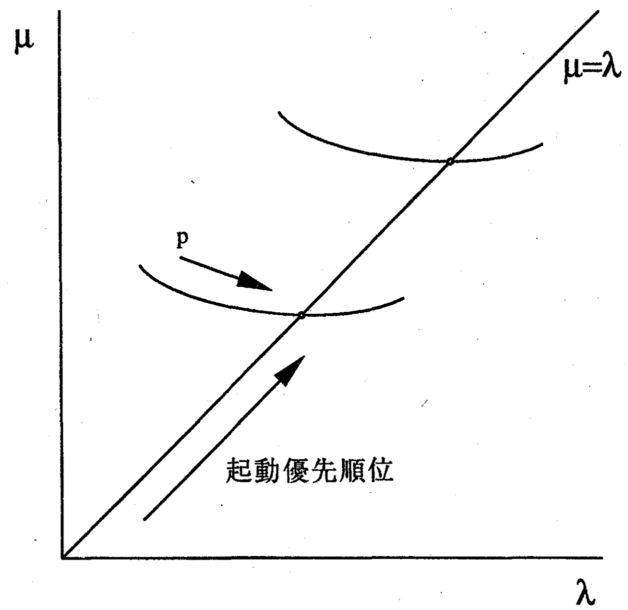


図 22: $\lambda - \mu$特性