

**投稿論文(和文)**

**PAPERS**

# 航空機材スケジューリングのための ニューラルネットワークアルゴリズムの開発

稲村 肇<sup>1</sup>・久永健一郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 東北大学教授 情報科学研究科 (〒980 宮城県仙台市青葉区青葉)

<sup>2</sup>正会員 工修 東海旅客鉄道株式会社

本研究は地域航空の機材運行の効率化とその導入可能性を検討するため、ニューラルネットワークアルゴリズム航空機材のスケジューリング問題に適用し、その妥当性、拡張性、実用性を検討している。本研究の結果需要を所与とした場合のスケジュールジューリング問題は2次整数計画問題として定式化され、効率よく近似解が得られることがわかった。また、演算を効率化するためのアルゴリズムの開発を行い、その効果を検証した。

**Key Words :** airline scheduling, neural network, hopfield circuit, gaussian machine

## 1. 本研究の背景と目的

近年の高速交通需要の増大をうけて、地域航空の検討が進められている。採算的に不利な地域航空事業の導入を可能にするためには、需要にあった適切な機材選定、複数航空路線のネットワーク化による効率的な機材運航計画の立案が重要な要件となる<sup>1), 2), 3), 4), 5)</sup>。従来の研究、現在の研究の動向については徳永らに詳しい<sup>15), 16), 6)</sup>。

航空機材のスケジューリング問題を組合せ最適化問題としてとらえる限りNP完全であり、規模に対する制限は必ずしも解決されてない。すなわち、この問題は解空間のかかなりの部分(指数関数的に増加する個数の解)を列挙する以外の厳密な解法は存在しないと考えられる。したがって、この困難を越えるために、比較的よい解を得ることができれば十分であるとする近似解法や、常に最適解が得られなくとも確率的に保証された形で最適解が得られればよいとする確率アルゴリズムのアプローチ、また近年では、物理学や生物学にその発想の原点を求めた近似解法が提案され、一般にモダンヒューリスティックと呼ばれ脚光を浴びている。その代表的なものとしては、ニューラルネットワーク、遺伝的アルゴリズム、シミュレーテッドアニーリング、禁断探索法が挙げられる。いずれも現段階では確立された手法ではないが、近未来における有効な解法として期待されている<sup>7)</sup>。

本研究は地域航空の機材運航の効率化とその導入可能性の向上を目指し、ニューラルネットワークを航空機材スケジューリング問題に適用し、その適用可能性および最適化アルゴリズムについて検討を行うことを目的とす

る。また、制約条件を満足する収束解を得るための方法も提案し考察を行う。本研究は最適化問題への適用法およびその最適化アルゴリズムに関する考察を主とし、理論自身の問題点は対象外とする。

## 2. 航空機材スケジューリング問題

### (1) 概要

Simpson<sup>8)</sup>は航空機材スケジューリングモデルを次のようなサブモデルに大別している。

- ①航空機材の保有・リースの計画に関するモデル
- ②各航空路線の最適運航頻度を決定するモデル
- ③各航空路線の最適出発時刻を決定するモデル
- ④各機材について最適運航計画を決定するモデル
- ⑤機団全体について最適運航計画を決定するモデル

このうち②, ③, ④については数理計画法を用いたモデルが数多く構築されている。例えば線形計画法を用いたモデルにはDantig<sup>9)</sup>による航空機材の各路線への最適配分数を求めるモデル、Handlerら<sup>10)</sup>によるハブ&スポーク型ネットワーク<sup>11)</sup>による乗り継ぎ利用を考慮した運航頻度決定モデルなどがある。動的計画法を用いたモデルも数多く提案されている。しかし、これらのモデルは個々のサブモデルを対象としたものであり、全体のスケジュール作成のためにはフィードバックを繰り返す必要がある(段階法)<sup>12)</sup>。しかし、わが国のように鉄道などの競合交通と競合した状態にあり、出発時刻に敏感であると考えられる業務目的旅客の需要が多い状況においてはフライト選択を直接行う「直接法」<sup>12)</sup>を用いるべきで

あると考えられる。「直接法」により②、③のモデルを統合したものとして田村ら<sup>13)</sup>による列挙法に分枝限定法概念を用いた機材のスケジューリングモデルや、Daskinら<sup>14)</sup>による線形計画法を用いた機材のスケジューリングモデルなどがあげられる。しかし、これらはいずれもネットワークをハブ&スポーク型に限定しており、ラウンド&ロビン型ネットワークには対応していない。

以上より、地域航空の実際の運航およびその導入可能性の向上において航空機材スケジューリングモデルに要求される要件は以下に要約される<sup>15), 16)</sup>。

- ① 運航利益が最大化される。
- ② ラウンド&ロビン型ネットワークに対応できる。
- ③ 最適な出発時刻および運航路線を直接選択できる。
- ④ 適切な機材定員や機材数を求めることができる。
- ⑤ 機材運航に必要な種々の制約条件を満たす。

著者らは以上の要件を考慮した整数二次計画法によるモデルを提案し、数理計画法の代表的手法である線形計画法・動的計画法との比較、分析を行い、整数二次計画法の優位性を示している<sup>17), 18)</sup>。

## (2) 本研究における定義と定式化

本研究では、地域航空ネットワークの採算性を重要視し、「最適スケジュール」を「各フライトが運航された場合の運航利益および運航コストを所与として、航空会社の総運航利益が最大となるような機材（機団全体）のスケジュール」と定義し、フライト案を変数とする組合せ最適化問題を解く。この際の需要は潜在需要を所与とし、乗り継ぎによる需要の増加、および近接フライトによる需要の重複を考慮する。

定式化に際し、空港運用時間を単位時間 $\Delta$ で分割し、フライトは分割された各時刻毎に運航可能であるものと仮定した。以降、時刻は $\Delta$ を基準とする単位時刻を用いる。本節 a), b) に関しては参考文献17)に詳しい<sup>17)</sup>。

(図-1参照)

### a) 決定変数

決定変数  $X_{ij}^{gk}$  は機材  $g$  の  $k$  時  $i$  空港発  $j$  空港行きのフライト案を表す。(  $X_{ii}^{gk}$  は機材  $g$  の時刻  $k$  における  $i$  空港単位時間居座りを表す。)

$$X_{ij}^{gk} = \begin{cases} 1 & (\text{フライト案を運行する}) \\ 0 & (\text{フライト案を運行しない}) \end{cases} \quad (1)$$

本節以降、以下の添字および定数を用いる。

- $g, h$  : 機材を表す添字 (機材数:  $G$ )
- $i, j, m, n$  : 空港を表す添字 (空港数:  $N$ )
- $k, l$  : 出発時刻を表す添字 (営業終了時刻:  $F$ )

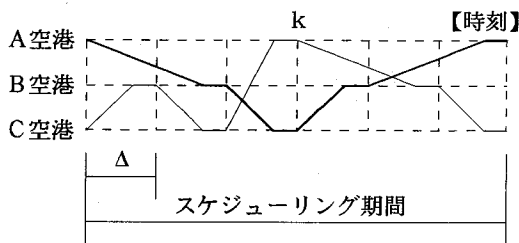


図-1 航空機材スケジューリングの考え方

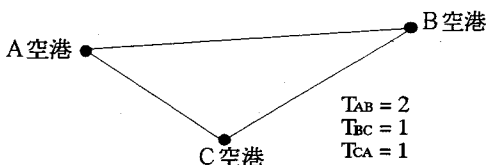


図-2 空港ネットワークの例

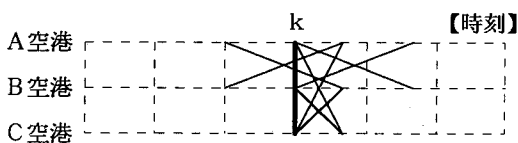


図-3 時刻kに関するフライト案の例

各空港間の所要時間が異なることから、各路線の運航可能なフライト案の最遅出発時刻は式(2)で設定する。

$$K_{ij} = F - T_{ij} \quad (2)$$

$K_{ij}$  : 各路線の最遅出発時刻 (以降  $K$  と表記する。)

$T_{ij}$  :  $i-j$  間の所要時間 (飛行時間, 整備時間)

$$T_{ij} = T_{ji}, \quad T_{ii} = 1$$

図-2の3空港のネットワークを例に航空機材スケジューリング問題の定式化を行う。

### b) 制約条件

#### ・物理的機材制約

実行可能なスケジュールは時刻  $k$  に関する全フライト案のうち1フライト案のみ運航する制約条件式(3)を考える。図-3中の斜線は  $k$  に関するフライトを示す。

$$\sum_{i,j,k'} X_{ij}^{gk'} = 1 \quad (k - T_{ij} + 1 \leq k' \leq k) \quad (3)$$

#### ・飛行の連続性に関する制約

スケジュールは各機材について飛行の連続性が保証されなければならない。図-4に回送時間の不足による同時運航不可能なフライト案の組合せの例を示す。例えば、フライト案  $X_{CB}^{gk-1}$  とフライト案  $X_{CB}^{gk}$  は時刻  $k$  における発着空港が異なるため、同一機材で同時に運航すること

は不可能である。また、フライト案  $X_{CB}^{g,k}$  とフライト案  $X_{AB}^{g,k+1}$  は  $T_{AB} = 2$  であることから、回送時間の不足によって同時運航不可能である。

航空機材のメンテナンスや乗務員繰りのため、夜間駐機させる空港を母空港と呼ぶ。図-5において、フライト案  $X_{CB}^{g,1}$  および  $X_{CB}^{g,F-1}$  は運航開始空港と運航終了空港が一致しないため、母空港駐機が保証されない。また、フライト案  $X_{CB}^{g,2}$  とフライト案  $X_{CB}^{g,F-1}$  は回送時間の不足によって母空港駐機が保証されない組合せの例である。

以上より、飛行の連続性および母空港駐機に関する制約を式(4)をもって定式化する。式(4)を満たすことによって、飛行の連続性および母空港駐機が保証されると同時に最適な母空港の選定が可能である。

$$\sum_i \sum_j \sum_m \sum_n \sum_k \sum_l R_{ij,mm}^{kl} X_{ij}^{gk} X_{mm}^{gl} = 0 \quad (4)$$

$$R_{ij,mm}^{kl} = \begin{cases} 1 & (X_{ij}^{gk} \text{ と } X_{mm}^{gl} \text{ が同時運行不可能}) \\ 0 & (X_{ij}^{gk} \text{ と } X_{mm}^{gl} \text{ が同時運行可能}) \end{cases}$$

・その他の制約

本研究では地域航空ネットワークを対象としているため各路線の需要は小さいと考えられ、同一時刻同一路線には複数の機材を運航しないものとする。

$$\sum_g \sum_{h=g}^G X_{ij}^{gk} X_{ij}^{hk} = 0 \quad (i \neq j) \quad (5)$$

c) 目的関数

・直行便による利益

$$f_1 = \sum_g \sum_i \sum_j \sum_k p_{ij}^k X_{ij}^{gk} \quad (6)$$

$p_{ij}^k$  : k時 i 空港発 j 空港行きのフライトが運航された場合の運航利益

・乗り継ぎ利用旅客による利益増分に対する考慮

図-6に乗り継ぎ利用の想定される空港ネットワークの例を示す。時刻kに出発を希望するA→B間の需要(旅客)について考える。希望時刻kにフライトA→Bが運航されないとしても同時刻にC空港を経由するフライトA→C→Bが運航されれば、A→B間の需要の一部は乗り継ぎ便としてフライトA→C→Bを利用すると考えられる。

本モデルは乗り継ぎ利用に関して以下の仮定を設けた。

1) 直行便希望時刻に直行便が運航されず、かつ同時刻に任意の空港を1度だけ経由して目的空港に向かうフライトの組合せ(乗り継ぎ便)が運航されている場合のみ、乗り継ぎ利用旅客は発生する。

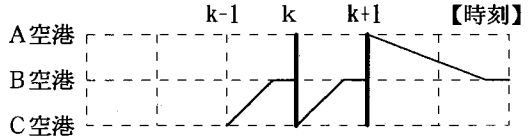


図-4 回送時間が不足しているフライト案の組合せの例

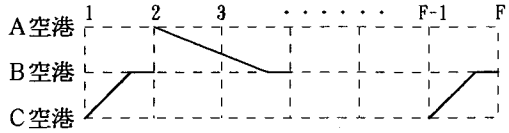
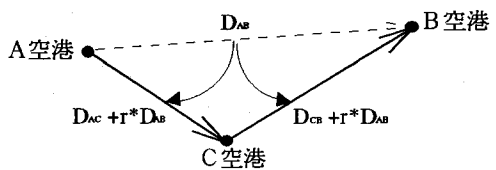


図-5 母空港帰還が保証されないフライト案の組合せの例



$D_{ij}$  : i-j 間の需要  
r : 乗り継ぎ利用率

図-6 乗り継ぎ利用

- 2) 経由空港での乗り換えやタイムラグを伴う乗り継ぎ利用は考慮しない。
  - 3) 所要時間差など抵抗の少ない路線にのみ乗り継ぎ利用は発生すると仮定し、あらかじめ乗り継ぎ利用を考慮する路線を設定する。
  - 4) 乗り継ぎ利用率 (r) は乗り継ぎ利用を考慮する全路線について一定とする。
  - 5) 直行便として利用する旅客に対して、乗り継ぎ利用する旅客を優先する。
- 以上の仮定より、乗り継ぎ利用旅客による利益増分の総和を式(7)をもって定式化する。

$$f_2 = \sum_g \sum_i \sum_j \sum_k \sum_n q_{ijn}^k X_{ij}^{gk} X_{jn}^{g,k+T_{ij}} \quad (7)$$

$q_{ijn}^k$  : k時 i 空港発 j 空港経由 n 空港行きの乗り継ぎ利用旅客による利益増分 ( $q_{ijn}^k \geq 0$ )

・近接フライトの需要の重複に対する考慮

同一路線のフライトが連続して運航された場合の需要の重複分を式(8)の定式化によって除去する。

$$f_3 = \sum_g \sum_i \sum_j \sum_k \sum_{h=g}^G S_{ij}^k X_{ij}^{gk} X_{ij}^{g,h,k+1} \quad (8)$$

$S_{ij}^k$  : 同一路線の近接する異機材のフライト間 ( $X_{ij}^{gk}$  と  $X_{ij}^{g,h,k+1}$ ) の需要のダブルカウントによる利益重複分 ( $S_{ij}^k \geq 0$ )

以上、式 (6)、式 (7)、式 (8)より式 (9)の目的関数を定式化する。

$$\begin{aligned} \max. f = f_1 + f_2 + f_3 \\ = \sum_g \sum_i \sum_j \sum_k p_{ij}^k X_{ij}^{gk} \\ + \sum_g \sum_i \sum_j \sum_k \sum_n q_{ijn}^k X_{ij}^{gk} X_{jn}^{g,k+T_i} \\ + \sum_g \sum_i \sum_j \sum_k \sum_{h=g}^G s_{ij}^k X_{ij}^{gk} X_{ij}^{h,k+1} \end{aligned} \quad (9)$$

### 3. ニューラルネットワークアルゴリズム

ニューラルネットワーク理論と応用に関しては文献に詳しく(19), 20), 21), 22), 23), 24), 25)。ここでは、ニューラルネットワークの航空機材スケジューリング問題への適用に関して述べるとともに、制約条件を満足する解への収束性を高めるための方法を提案する。

#### (1) 航空機材スケジューリングへの適用

ニューラルネットワークの適用は変数マトリックス(以降、変数をニューロンと呼ぶ)の設定とニューロン間の結合の重みおよび各ニューロンの特性値(入力バイアス)の設定に集約される。先の定式化を基に航空機材のスケジューリング問題を制約条件を含んだ 0-1の二次最小化問題として定式化する。式 (10)に定式化した評価関数 $\phi$ を示す。第1項は式 (3)の制約を満たした状態が最小となるよう2乗して定式化した。第4項は式 (7)、式 (8)の目的関数を拡張したものであり、ニューロン間の結合の重みが対称性を保持するよう定式化した。

$$\begin{aligned} \phi = \frac{A}{2} \sum_g \sum_k \left( \sum_i \sum_j \sum_k X_{ij}^{gk} - 1 \right)^2 \\ + \frac{B}{2} \left( \sum_g \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l R_{ij,mm}^{kl} X_{ij}^{gk} X_{mm}^{gl} \right. \\ \left. + \sum_g \sum_{h=g}^G \sum_i \sum_{j=i}^K X_{ij}^{gk} X_{ij}^{hk} \right) \\ - \frac{C}{1} \sum_g \sum_i \sum_j \sum_k p_{ij}^k X_{ij}^{gk} \\ - \frac{D}{2} \left( \sum_g \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m q_{ijn}^{k-T_m} X_{ij}^{gk} X_{mi}^{g,k+T_m} \right. \\ \left. + \sum_g \sum_i \sum_j \sum_k \sum_n q_{ijn}^k X_{ij}^{gk} X_{jn}^{g,k+T_i} \right. \\ \left. + \sum_g \sum_{h=g}^G \sum_i \sum_{j=k-1}^{K-1} s_{ij}^k X_{ij}^{gk} X_{ij}^{h,k+1} \right. \\ \left. + \sum_g \sum_{h=g}^G \sum_i \sum_{j=k-2}^{K-1} s_{ij}^{k-1} X_{ij}^{gk} X_{ij}^{h,k-1} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

A,B,C,D : 正の重み係数

式 (10)を展開することによってニューロン間の結合の重み ( $W_{ij}^{gk,hl}$ ) および各ニューロンの入力バイアス ( $I_{ij}^{gk}$ ) を定義する。実際には評価関数 $\phi$ を展開し二次項、一次項、定数項それぞれについてまとめ、拡張したエネルギー関数と比較することによって定義する。この際、評価関数 $\phi$ をエネルギー関数として表現するためには二次項は多重一次形式である必要がある<sup>26)</sup>。式 (11)、式 (12)に定義された結合の重みおよび入力バイアスを示す。ただし、次章における適用例に即して、空港間所要時間は1単位時間もしくは2単位時間と仮定した。

$$\begin{aligned} W_{ij}^{gk,hl} = -A \delta_{hg} * \{ \delta_{lk} * (1 - \delta_{mi} * \delta_{nj}) (\tau_{ij} * \tau_{mn} + 1) \\ + \delta_{l,k+1} * (1 - \delta_{kf}) * \tau_{ij} \\ + \delta_{l,k-1} * (1 - \delta_{kl}) * \tau_{mn} \} \\ - B * \{ \delta_{hg} * R_{ij,mm}^{kl} \\ + (1 - \delta_{hg}) * \delta_{lk} * \delta_{mi} * \delta_{nj} * (1 - \delta_{ij}) \} \\ + D * \{ \delta_{hg} * (\delta_{l,k-T_m} * \delta_{ni} * q_{mij}^l \\ + \delta_{l,k-T_m} * \delta_{ni} * q_{mij}^l) \\ + (1 - \delta_{hg}) * \delta_{mj} * \delta_{nj} \\ * (\delta_{l,k-1} * (1 - \delta_{kl}) * S_{ij}^l \\ + \delta_{l,k+1} * (1 - \delta_{kl}) * S_{ij}^k) \} \end{aligned} \quad (11)$$

$$I_{ij}^{gk} = A \{ (1 - \delta_{kf}) \tau_{ij} + 1 \} + C * p_{ij}^k \quad (12)$$

$$\text{ここで、} \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases}$$

$$\tau_{ij} = \begin{cases} 1 & (T_{ij} = 2) \\ 0 & (T_{ij} = 1) \end{cases}$$

式 (15)、式 (16)に連続時間Tにおける動的方程式を示す。これをエネルギー最小化原理でシミュレートする。

$$\frac{du}{dT} = \sum_h \sum_m \sum_n \sum_l W_{ij}^{gk,hl} * X_{mm}^{hl} + I_{ij}^{gk} \quad (15)$$

$$X_{ij}^{gk} = f(u_{ij}^{gk}) \quad (16)$$

$u_{ij}^{gk}$  : ニューロンの内部状態

$X_{ij}^{gk}$  : ニューロンの出力

#### (2) 解法

##### a) 数値適用計算

モデルは連続時間モデルで記述されているため、時間軸に関して離散化した離散時間モデルに置き換える。Takeda and Goodmanは離散時間モデルにおいて解の振幅が減少するという点で同期変化モードに対する非同期変

化モードの優位性を示している<sup>27)</sup>。本研究ではTakeda and Goodmanの提案した直接非同期変化モードの考え方を採用した。

式 (17), 式 (18)に離散化した直接変化モードの動的方程式を示す。すなわち, 離散時間  $\xi$  に任意に抽出された1つのニューロンは離散時間  $\xi-1$  における他のニューロンの情報を用いて状態変化を行う。離散時間にはただ1つのニューロンが状態変化を行うものとする。

$$u_{ij}^{gk}(\xi) = \sum_b \sum_m \sum_n \sum_k W_{ij}^{gk}{}_{mn}^{hl} * X_{lm}^{hk}(\xi-1) + I_{ij}^{gk} \quad (17)$$

$$X_{ij}^{gk}(\xi) = f(u_{ij}^{gk}(\xi)) \quad (18)$$

非同期変化モードの状態変化の順序について, 日高は順次抽出がランダム抽出よりよい結果が得られたと報告しているが, 本研究では本来の「任意かつ非同期的な状態変化」の仮定及びTSPにおける適用実験を基にランダム抽出を採用した<sup>28)</sup>。Takeda and Goodmanモデルは全てのニューロンの状態変化の回数が均一であるが, 本モデルではランダムに抽出を行うため均一ではない。状態変化の進行状況を把握するため, 総数個のニューロンが状態変化を行う期間を1サイクルとした。離散時間とサイクルの関係を表式 (19)に示す。

$$\xi = (\text{ニューロンの総数}) * t \\ = \left\{ G * \left( N^2 * F - \sum_i \sum_j (T_{ij} - 1) \right) \right\} * t \quad (19)$$

図-7は離散時間とサイクルの関係を模式的に示した図である。以降, 離散時間とサイクルを同時に用いる場合には, 離散時間におけるサイクルとしてを用いる。離散時間を用いない場合にはサイクルを用いる。

### b) 最適化アルゴリズム

本研究では最適解への収束性を高める方法として秋山らの提案したガウシアンマシンを採用した<sup>29)</sup>。ガウシアンマシンはシャープニングおよびアニーリングと呼ばれる技法がその特徴である。ガウシアンマシンの動的方程式を表式 (20), 式 (21)に示す。

$$u_{ij}^{gk}(\xi) = \sum_b \sum_m \sum_n \sum_k W_{ij}^{gk}{}_{mn}^{hl} * X_{lm}^{hk}(\xi-1) + I_{ij}^{gk} + \varepsilon(\xi) \quad (20)$$

$$X_{ij}^{gk}(\xi) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \tanh \left( \frac{u_{ij}^{gk}(\xi)}{\mu(t(\xi))} \right) \right\} \quad (21)$$

$\varepsilon(\xi)$  : ランダムノイズ

$$\varepsilon(\xi) = \left[ 0, \alpha(t(\xi)) \sqrt{\frac{8}{\pi}} \right] \quad (22)$$

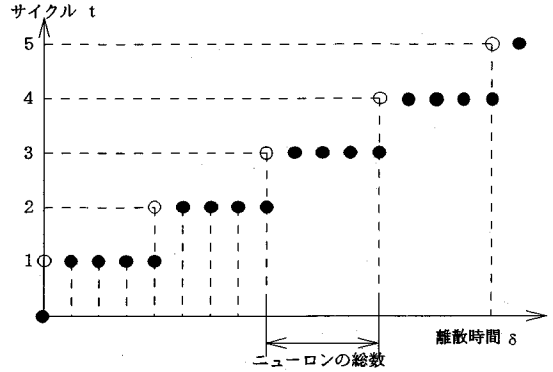


図-7 サイクル数の定義の概念図

$\mu(t(\xi))$  : 感度パラメータ

$\alpha(t(\xi))$  : 温度パラメータ

シャープニングは感度パラメータを大きな値から徐々に下げることによって状態変化の初期段階であいまいな探索を行う技法であり, 模擬焼き鈍し法とも呼ばれる。アニーリングとは式 (22)に従うランダムノイズを内部状態に加えることによって局所解からの脱出を図る技法である。シャープニングおよびアニーリングのスケジュールにはそれぞれ式 (23), 式 (24)を用いた。

$$\mu(t(\xi)) = \frac{\mu_0}{1 + \frac{t(\xi)}{\tau}} \quad (23)$$

$$\alpha(t(\xi)) = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{t(\xi)}{\tau}} \quad (24)$$

$\mu_0$  : シャープニングの初期値

$\alpha_0$  : アニーリングの初期値

$\tau$  : 時定数

### c) 収束性に対する改善策

収束性を高めるためには適切な重み係数およびパラメータの設定が必要である。清水らは拡張ラグランジュ関数に基づいて定式化し, 乗数法の考え方に従って係数を改訂する方法を提案している<sup>30), 31)</sup>。また, ネットワークの状態はパラメータ間の比に大きく影響を受けることが日高によって示されている<sup>32)</sup>。本問題は制約条件を完全に満足する必要があり, また多目的関数であることから以下の方法を提案し検討を行う。

#### ① 周期的改訂 (改善策1)

1-a) 制約条件の係数について

1-a-1)  $1 \leq t \leq A_2$

状態変化の初期段階においては, 制約条件の係数を目的関数の係数と比較して徐々に減少させることによって, Global Optimumへの状態変化を促進する。この期間はネ

ネットワークがあいまいな探索を行い、0-1の2値状態への収束を抑制するよう感度パラメータおよび温度パラメータの時定数を設定する。

1-a-2)  $A_2 < t \leq 2A_2$

制約条件の係数を徐々に増加させることによって、制約条件を完全に満たす解への収束を促進する。

1-a-3)  $2A_2 < t$

式(25)の基準の基に、係数をだけ増加させ、かつ感度パラメータおよび感度パラメータを再び上昇させることによって制約条件を完全に満たす解への収束を促進する。

$$\sum_i \sum_j \sum_{k=k_0}^k X_{ij}^{gk} \geq 2 \quad (X_{ij}^{gk} = 1 \text{ if } X_{ij}^{gk} \geq 0.8) \quad (25)$$

1-b) 目的関数の係数について

多目的関数であることから、それぞれの係数を頻繁に変化させ偏った解への収束を抑制する。

② 非周期的改訂 (改善策2)

式(25)の基準の基に、制約条件の2次項の係数(特に  $A_w$ 、 $B_w$  とする)を  $(1+n*\lambda)$  倍することによって、制約条件を完全に満たす解への収束を促進する。ただし、は改訂の回数を表す。

以上より、係数の変化を図-8に図示し、式(26)から式(29)に定式化する。

$$A(t) = B(t) = \begin{cases} A_0 + A_1 * \left\{ -1 + \cos\left(\frac{\pi}{A_2} * t\right) \right\} & (t \leq 2A_2) \\ (1+n*\lambda) * A_0 & (t > 2A_2) \end{cases} \quad (26)$$

$$C(t) = C_0 + C_1 * \cos\left(\frac{\pi}{C_2} * t\right) : 1 \text{ 次項} \quad (27)$$

$$D(t) = D_0 + D_1 * \cos\left(\frac{\pi}{D_2} * t\right) : 2 \text{ 次項} \quad (28)$$

$A_0, A_1, A_2, C_0, C_1, C_2, D_0, D_1, D_2$  : 定数

ただし、 $C_0 = D_0, C_1 = -D_1, C_2 = D_2$

$$A_w(t) = B_w(t) = (1+n*\lambda) * A(t) \quad (29)$$

$A_w(t), B_w(t)$  : 2次の項の係数

③ 感度パラメータ、温度パラメータの初期値の設定 (改善策3)

シャープニングおよびアニーリングのパラメータを適切に設定する。(図-8参照)

4. 適用例

(1) 概要

本研究では東北の主要4空港とその主要相手空港(千

表-1 航空潜在需要と所要時間

|     | 青森  | 秋田  | 仙台  | 新潟  | 名古屋 | 大阪 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 青森  |     | 1   | 2   | 2   | 2   | 2  |
| 秋田  | 200 |     | 1   | 1   | 2   | 2  |
| 仙台  | 520 | 280 |     | 1   | 2   | 2  |
| 新潟  | 54  | 124 | 182 |     | 2   | 2  |
| 名古屋 | 70  | 109 | 308 | 332 |     | 1  |
| 大阪  | 252 | 201 | 260 | 793 | 0   |    |

潜在需要: 人/日 (左下), 所要時間: 時間 (右上)

表-2 乗り継ぎ利用を考慮する路線

| 起点空港   | 中継空港   | 到着空港            |
|--------|--------|-----------------|
| 青森     | 秋田     | 仙台, 新潟, 名古屋, 大阪 |
| 青森, 秋田 | 仙台, 新潟 | 名古屋, 大阪         |

表-3 各パラメータの値

|            |      |
|------------|------|
| $\alpha_0$ | 3.0  |
| $\mu_0$    | 2.0  |
| $\tau$     | 10.0 |
| $\lambda$  | 0.1  |

表-4 所与とした係数の初期値

|       | i=0 | i=1   | i=2  |
|-------|-----|-------|------|
| $A_i$ | 2.0 | 0.5   | 10.0 |
| $C_i$ | 6.0 | 0.05  | 2.5  |
| $D_i$ | 6.0 | -0.05 | 2.5  |

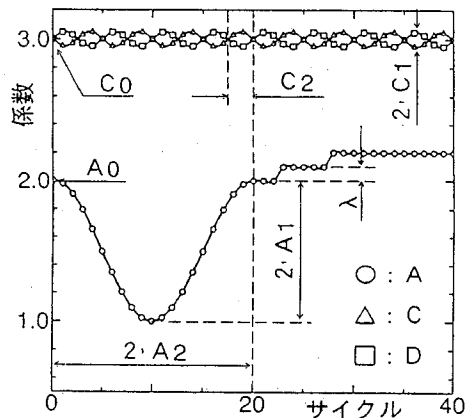


図-8 係数A, Cの改訂方法  
<サイクル毎の係数値の変化>

歳を除く)を考慮して、青森、秋田、仙台、新潟、名古屋、大阪の6空港のネットワークにおける航空機材の1日スケジューリングに本モデルを適用する。空港運用時間は8:00~18:00とし、フライトは1時間間隔で運航可能とした。航空需要および所要時間を表-1に示す。

乗り継ぎ利用は表-2に示す24路線(往路復路含む)について考慮し、乗り継ぎ利用率は50%と仮定した。

適用計算におけるデータ項 ( $p_{ij}^k, q_{ij}^k, S_{ij}^k$ ) はそれぞれ  
 直行便利益の最大値 ( $\max\{p_{ij}^k\}$ ) で除した値を用い、ニ  
 ューロンの初期値は式 (30) をもって設定した。  
 また、各係数およびパラメータは、表-3、表-4の値  
 を用いた。

$$X_{ij}^{gk}(0) = \begin{cases} p_{ij}^k & (p_{ij}^k \geq 0) \\ 0 & (p_{ij}^k < 0) \end{cases} \quad (30)$$

本モデルは50サイクル以上で収束するケースが極めて  
 希なことから、50サイクル以内に制約条件を完全に満  
 たす状態に収束した解を収束解と見なし、それ以降の解へ  
 の収束は無効として評価を行う。

## (2) 適用計算結果

### a) 4空港のネットワーク

空港数や機材数は演算時間や解の精度に大きな影響を  
 与えるため、本研究では空港数を4、6、機材数を1か  
 ら4と変化させ計算を行った。

4空港のネットワークにおいて1機材を投入した場合  
 のスケジューリングおよび2機材を投入した場合のスケ  
 ジューリングに対し、それぞれ100回の適用計算を行っ  
 た。結果を表-5に示す。また、図-9は総当たり計算  
 による最適解を図示したものである。2機材のスケジ  
 ューリングは、1機材の上位100スケジュールの組合せに  
 よって算出した。厳密解の上位2解に需要の重複がない  
 ことからこの組合せを2機材のスケジューリングにおけ  
 る最適解と見なした。

1機材のスケジューリングにおいては全ての適用計算  
 で50サイクル以内に制約条件を満足する解に収束し10%  
 以上の確率で最適解の95%以上の高い近似解を得られ  
 ることが分かる。2機材のスケジューリングにおいても95%  
 以上の確率で最適解の90%以上の近似解が得られた。

図-10に総当たりによる1機材の上位100スケジュー  
 ルの総運航利益のヒストグラム、図-11に適用計算によ  
 るスケジュールの1例を示す。図-10中の①は図-11の  
 スケジュールの位置を示している。ここで最適解も、適  
 用計算解も新潟便が実現していないが所与とした需要が  
 現実と相違しているためである。

1機材の場合と同様に総運航利益のヒストグラムとニ  
 ューラルネットワークによる1例をそれぞれ図-12、図-  
 13に示す。図-12中の②は図-13のスケジュールの位置  
 を示している。図-13のスケジュールは図-10の最適解  
 と15時以降のフライトが異なるだけであるが運行利益は  
 6%以上減少している。

### b) 6空港のネットワーク

6空港のネットワークにおいて、1機材および4機材

表-5 適用計算結果<4空港>

|         | 1 機材      | 2 機材      |
|---------|-----------|-----------|
| 収束率     | 100%      | 95%       |
| 平均サイクル数 | 25.8      | 26.7      |
| 解の最大値   | 4108(99%) | 7864(95%) |
| 解の最小値   | 2859(69%) | 5397(65%) |
| 解の平均値   | 3536(85%) | 6959(84%) |
| 標準偏差    | 310.9     | 657.6     |

注：( )内は最適解に対する比率

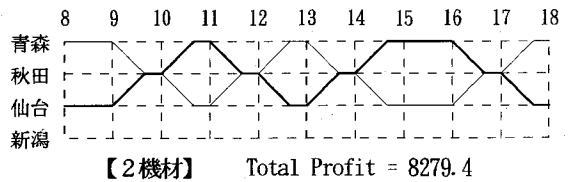
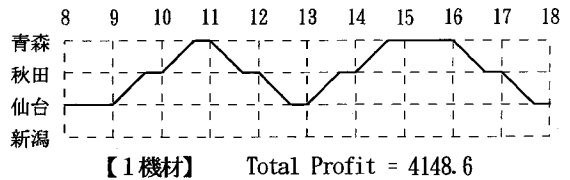


図-9 最適スケジュール<4空港>

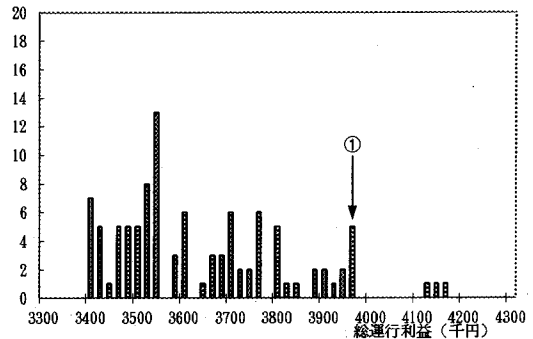


図-10 総運航利益のヒストグラム  
 <4空港1機材の上位100スケジュール>

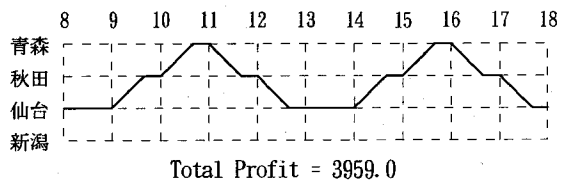


図-11 ニューラルネットワークにより得られるスケジュール例  
 <4空港1機材>

を使用した場合の適用計算をそれぞれ100回行った(表  
 -6)。また、図-14は総当たり計算による最適解を示  
 している。4機材を投入した場合、総当たり計算は演算  
 時間上不可能なため(組合せ数:  $23.53 \times 10^{24}$ 、予測演算



表-6 適用計算結果<6空港>

|         | 1 機材      | 4 機材  |
|---------|-----------|-------|
| 収束率     | 99        | 71    |
| 平均サイクル数 | 35.4      | 33.6  |
| 解の最大値   | 4912(98%) | 17918 |
| 解の最小値   | 3250(65%) | 14205 |
| 解の平均値   | 4315(86%) | 16117 |
| 標準偏差    | 278.3     | 640.6 |

注：( )内は最適解に対する比率

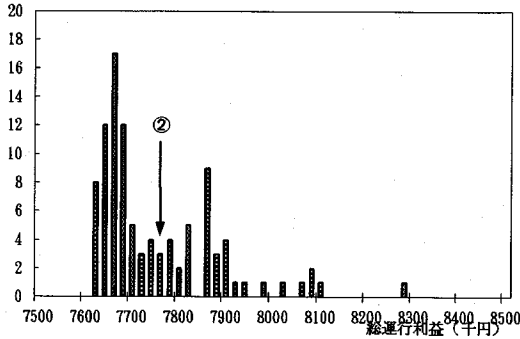
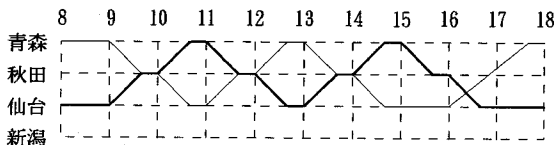
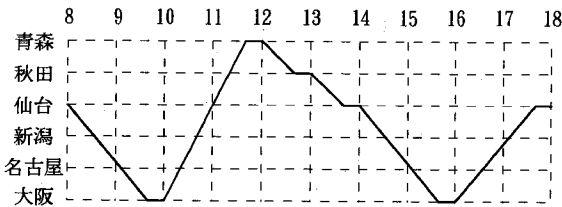


図-12 総運航利益のヒストグラム  
<4空港2機材上位100スケジュール>



Total Profit = 7768.9

図-13 ニューラルネットワークにより得られるスケジュール例  
<4空港2機材>

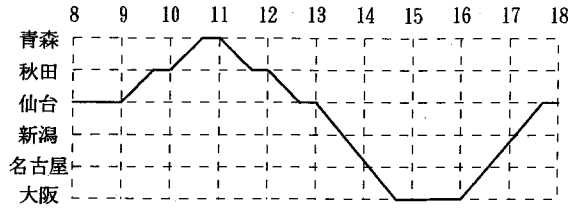


Total Profit = 4997.9

図-14 最適スケジュール<6空港1機材>

時間 $392.18 \times 10^{18}$ 時間 $=44.8 \times 10^{12}$ 世紀, 47FROPSのWS) 厳密解の算定は行ってない. 4空港と比較して収束に要する平均サイクル数が増加している. また, 規模に応じたパラメータ設定の必要性が示唆される.

図-15にニューラルネットワークによる近似解を示す. また図-16に総当たり計算による厳密解上位100スケジュールの総運航利益のヒストグラムを示す. 図-16中の③は図-15のスケジュールの位置を示している. これは, 最適解の94%程度の利益の近似解であり, 100回の計算で90%以上の利益の解が11回得られている.



Total Profit = 4709.2

図-15 ニューラルネットワークにより得られるスケジュール例  
<6空港1機材>

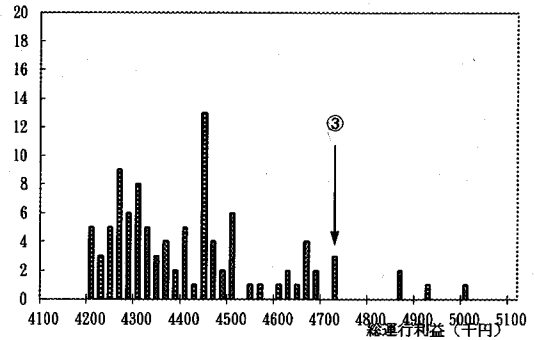


図-16 総運航利益のヒストグラム  
<6空港1機材上位100スケジュール>

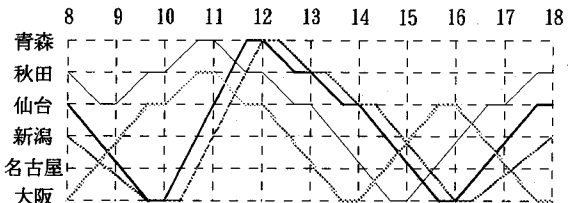
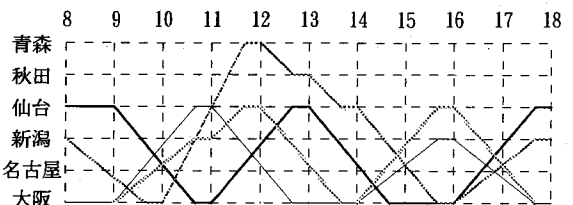


図-17 1機材上位4スケジュールによる4機材のスケジュール



Total Profit = 17918.8

図-18 ニューラルネットワークにより得られるスケジュール例  
<6空港4機材>

図-17に1機材の厳密解上位4スケジュールを4機材のスケジュールとして示す. 総運航利益は単純和で約2千万円となる.

$$4997.9 + 4912.8 + 4841.0 + 4840.6 = 19592.3 \text{ [千円]} \quad (31)$$

しかし, 同一時刻同一路線のフライトや同一路線で時間

的に隣接するフライトが多数運航されていることから、実利益は式(31)に対して需要の重複分を除去したものであり、図-18ニューラルネットワークモデルによる解(100回の計算の最大解)の利益はその91%であり、かなり高い精度の近似解であると推測される。

なお、解空間の内容に関しては1機材、4機材においても同程度の大きさの目的関数値に対応する解のパターンは互いに大きく異なる。このことは解空間に様々な大きく独立した局所解が存在することを示している。これは実用面でいえば利益を損なわない多くのスケジュール代替案(厳密な最適ではないが)を用意できることを意味し、意義が大きいと考える。

## 5. モデルの適用性の検討

### (1) モデルの仮定の一般化

本モデルでは以下の仮定の基に定式化を行った。

- a) 機種はFokker F. 28 Fellowship (座席数79) 程度の1機種のみ。
- b) フライトは1時間毎に運航可能とする。
- c) 各空港間の所要時間は1時間もしくは2時間。
- d) 経由空港における乗り換えやタイムラグを伴う乗り継ぎ利用は考慮しない。
- e) 乗り継ぎを考慮する路線を予め設定する。
- f) 母空港となる空港は予め設定しない。
- g) 同一時刻同一路線には複数の機材を割り当てない。
- h) 3機以上の需要の重複は無視する。

- a) 複数機種の取扱いには各機種の座席数毎に機材数を定め、以下のように拡張することによって適用可能である。

$$\text{ex.) } p_{ij}^k \rightarrow p_{ij}^{gk}, \quad q_{ij}^k \rightarrow q_{ij}^{gk}, \quad S_{ij}^k \rightarrow S_{ij}^{gk} \\ (g: \text{先発機材}, h: \text{後発機材})$$

- b), c) 出発可能時間間隔および空港間所要時間の拡張は本モデルと同一の定式化で適用可能である。ただし、物理的機材制約および飛行の連続性に関する制約に関して定式化を拡張する必要がある。

- d) 乗り換えおよびタイムラグを伴う乗り継ぎの拡張はデータを拡張することによって適用可能である。

$$\text{ex.) } q_{ij}^k \rightarrow q_{ij}^{gk} \quad (g: \text{先発機材}, h: \text{後発機材})$$

乗り継ぎ利用率は希望路線の前後のフライトの有無に大きく影響を受けるため、調査結果などを参考に設定することが望ましい。

- e) 乗り継ぎ路線は多くなっても演算上の制約はない。
- f) 母空港制約の導入・解除は容易である。
- g) 同一時間のフライトは時間間隔の短縮により導入する必要はないが、本モデルでは需要の重複が2機までであるため実用上は大きな問題である。
- h) 3機以上の需要の重複は、本定式化では考慮できない。

### (2) 規模の拡大と収束性の向上の検討

#### a) 収束の定義

ニューラルネットワークは制約条件を含んだ目的関数(評価関数)を最小化(極小化)することから、その収束状態は次の3点に大別される。

- ① 制約条件を満足し目的関数が最小(最適解)
- ② 制約条件は満足し目的関数は最小化されていない(局所解)
- ③ 制約条件を満足しないもの。

このうち①もしくは②が近似解法に求められる収束状態である。本研究では、全てのニューロンが式(32)を満たした状態で0-1の2値の状態と判断し、これが制約条件式(33)を満たした場合に収束解と見なした。式(32)の基準は経験的に設定し、収束の判別は各サイクル毎に行った。シャープニングにより式(32)を満たした場合は、ほぼ0-1の状態へ収束しており式(32)の基準は妥当と考える。

$$X_{ij}^{gk} < 0.20, \quad 0.95 < X_{ij}^{gk} \quad (32)$$

$$\phi = \sum_g \sum_k \left( \sum_i \sum_j \sum_{k'} X_{ij}^{gk'} - 1 \right)^2 \\ + \left( \sum_g \sum_i \sum_j \sum_m \sum_n \sum_k \sum_l R_{ij,mm}^{kl} X_{ij}^{gk} X_{ij}^{gl} \right. \\ \left. + \sum_{g=h} \sum_i \sum_j \sum_{k=i} \sum_{l=k} X_{ij}^{gk} X_{ij}^{hl} \right) \\ = 0 \quad (33)$$

#### b) 収束性に影響を与える要因

本モデルではパラメータなど経験的に設定しているため、以下に収束性に影響を与える要因を示す。

##### ・定式化および適用法

Takeda and Goodman<sup>27)</sup>は計算およびプログラミングの複雑性の概念を導入することにより、数理計画法などの従来解法に対するニューラルネットワークの優位性は問題の定式化および変数の設定に依存することを示している<sup>28)</sup>。本モデルにおいても物理的機材制約式(3)は式(34)をもっても記述可能である。式(3)が各機材の時刻に関する物理的機材制約であるのに対し、式(34)は各機材の総飛行時間が一定(F: 空港運用時間)となることを示しており、ネットワーク全体に影響を与える定式化となっている。本モデルでは式(34)を用いた適用計算においては良い結果は得られなかったため式(3)を採用した。

$$\sum_i \sum_j \sum_{k=k+T_{ij}-1}^k X_{ij}^{gk} = 1 \quad (\text{for } g, k) \quad (\text{式(3)より})$$

$$\sum_{i,j,k}^{N,N,K} T_{ij} X_{ij}^{gk} = F \quad (\text{for } g) \quad (34)$$

状態変化を行うニューロンの抽出方法に関しては、ランダムに抽出する方法の有効性が示唆された。

収束性を高めるためにさまざまな技法が提案されており、本研究ではその内の一つであるガウシアンマシンを採用した。

・初期値、係数、パラメータの設定

適用計算におけるニューロンの初期値も収束性に影響を与える。一般的に、0に近い値をランダムに与えた場合に収束性が良いことが知られている。他に、制約条件を満たした状態における全発火数を全ニューロン数で除した値を用いる<sup>23)</sup>、各ニューロンの特性値で与える<sup>31)</sup>などの方法が提案されているが、いずれも確認はない。

適切な係数およびパラメータの設定は収束性の向上に対して、直接的に影響を及ぼす<sup>32)</sup>。本研究では試行錯誤の上で適用例で挙げた値に設定した。本モデルにおける初期設定係数とパラメータを表-7に示す。本研究では表-7のうち  $C_1 = -D_1$ 、 $C_2 = D_2$ 、 $\tau\mu = \tau\alpha = \tau$  と仮定したため、11個の係数およびパラメータの初期を設定した。目的関数は所与のデータを含むため、係数  $C_0, D_0$  は用いるデータの大きさに応じて設定する必要がある。

c) 収束性に対する改善策の評価

3章で提案した改善策を用いた場合と用いない場合8通りの組合せに対して適用計算を行い、その有効性を比較評価する。有効性は相対的に収束までのサイクルが少なく、かつ高い収束率で精度の高い近似解が得られる方法として評価する。近似解の精度は最適値に対する最悪値もしくは平均値の比率をもって評価する。但し、適用計算の条件は4空港のネットワークに対して1機材を投入する場合のスケジューリングとし、係数およびパラメータは適用例の値を用いる。ここで他の条件は全ての適用計算に対して一定にして分析を行う。

表-8にそれぞれ100回の適用計算を行った結果を示す。また表-9は表-8におけるそれぞれの解の最適値に対する比率である。

改善策1) 周期的改訂を用いた適用計算においては想定した20サイクル ( $2 * A_2$ ) 前後での収束が観測された。周期的改訂を用いた適用計算は用いない場合と比較して、少ないサイクル数でかつ高い確率で収束している。また、解の最小値、平均値の比率がともに大きいことから、有効な解法であると評価できる。

改善策2) 非周期改訂を用いなかった4通りの適用計算では物理的機材制約を完全に満たす収束解が全く得られなかった。制約条件を満足するという観点において非周期改訂は有効な方法であると考えられる。上記4通り

表-7 係数およびパラメータ

|            |                 |
|------------|-----------------|
| 係数初期値      | $A_0, C_0, D_0$ |
| 係数振動周期     | $A_1, C_1, D_1$ |
| 係数振動幅      | $A_2, C_2, D_2$ |
| 係数改訂値      | $\lambda$       |
| シャープニング初期値 | $\mu_0$         |
| シャープニング時定数 | $\tau\mu$       |
| アニーリング初期値  | $\alpha_0$      |
| アニーリング時定数  | $\tau\alpha$    |

表-8 改善策の有効性<4空港1機材>

| 改善策     | 2)   | 2)3) | 1)2) | 1)2)3) |
|---------|------|------|------|--------|
| 収束率     | 69   | 72   | 100  | 100    |
| 平均サイクル数 | 38.8 | 37.6 | 25.8 | 25.8   |
| 最大値     | 3946 | 3946 | 3946 | 3946   |
| 最小値     | 2300 | 2587 | 2587 | 2859   |
| 平均値     | 3364 | 3540 | 3412 | 3535   |

表-9 最適解に対する比率<4空港1機材>

| 改善策 | 2)   | 2)3) | 1)2) | 1)2)3) |
|-----|------|------|------|--------|
| 最大値 | 95.1 | 95.1 | 95.1 | 95.1   |
| 最小値 | 55.5 | 52.4 | 62.4 | 68.9   |
| 平均値 | 81.1 | 85.4 | 82.2 | 85.2   |

[%]

の適用計算は収束率0%であったため表記は省略した。

改善策3) については収束率および収束サイクルが同程度であるのに対して、解の最小値および平均値が増加しているのが特徴である。改善策の目的である局所解の回避がより実現されていると考えられる。

以上より、本研究で提案した改善策は有効であると評価する。

d) 規模の拡大に対する考慮

・パラメータの設定に関する考察

規模の異なるスケジューリングの例として、適用例で示した4空港のネットワークに1機材もしくは2機材を投入する場合のスケジューリング、6空港のネットワークに1機材もしくは4機材を投入する場合と比較する。(表-10、表-11参照)

4空港の場合には  $(A_0, C_0) = (2, 6)$  を用いた場合の適用計算において最大値、最小値、平均値の全てにおいて最も高い値が得られていることが分かる。その最適解に対する比率は1機材のスケジューリングにおいて、99.0%、68.9%、85.2%、2機材のスケジューリングにおいて95.0%、65.2%、84.1%である。また、6空港の場合には  $(A_0, C_0) = (2, 7)$  を用いた場合の適用計算において最小値、平均値ともに最も高い値が得られていることが分かる。その最適解に対する比率は1機材のスケジューリングにおいて、70.7%、86.4%である。本研究では4空港の

ネットワークに1機材または2機材を投入した場合の適用計算より  $(A_0, C_0) = (2, 6)$  を推賞値として用いたが、空港数の異なるネットワークにおいては適切な係数が異なることが示唆される。

収束に要するサイクルに着目すると、空港数が同一の適用計算においてはほぼ同程度である一方、空港数が増加した場合には収束に要するサイクルも増加していることが分かる。空港数の増加に伴い、制約条件に起因する同時運航不可能なフライト案からの影響が増加し、ニューロンの発火が抑制されるものと思われる。また、0-1の状態への収束に限れば、シャープニングの初期値およびスケジュールに空港数に応じた設定の必要性が示唆される。

収束率に着目すると、同一空港数の場合には収束に要するサイクルが機材数に関わらずほぼ同程度であるのに対して、収束率は機材数の増加に伴って減少していることが分かる。機材数の増加により異機材間の影響が強く反映されることが示唆され、機材数に応じたパラメータ設定が必要と考えられる。6空港のネットワークの4機材のスケジューリングにおいては、目的関数の係数の増加により収束率が向上している。制約条件の大きな係数は収束率に寄与すると想定されたが、相反する結果が得られた。これは発火の抑制による影響がより大きいものと推測される。

#### ・演算時間に関する考察

規模を拡大に対する、その演算時間は用いるニューロンの総数に比例する。表-12に規模に応じて必要となるニューロンの総数を示す。ただし、出発可能時刻数は本研究と同一の10とした。SunのWS(CPU:47FROPS)上での適用計算によれば演算時間は約  $3.57 \times 10^4$  [sec./Neuron] である。これから、収束に要するサイクルを仮定すれば、規模を拡大した場合の平均演算時間は算出される。

現在、地域航空を対象としているエアニッポンでは27空港に対して15機材を運航している(1989現在)。この規模おける1日スケジューリングに対して本モデルを適用した場合、約  $10^5$  個のニューロンが必要となる。収束に要する平均サイクルを30サイクルと仮定すれば、約 17.9 [min.] (1071.3 [sec.]) である。また、JASにおいては対象空港43、機材数60(1989現在)であることから、約  $1.1 \times 10^6$  個のニューロンが必要であり、約 3.27 [hour] (196.35 [min.]) で理論的には実行可能である。

## 6. 結論

本研究ではニューラルネットワークを用いた最適路線

表-10 適用計算結果<4空港のネットワーク>

【Max.Profit】1機材:4148.6 2機材:8279.4

|   |      | A <sub>0</sub> ,C <sub>0</sub> | 2,4  | 2,5  | 2,6  | 2,7  | 2,8  |
|---|------|--------------------------------|------|------|------|------|------|
| 1 | 機材   | 収束率                            | 99   | 100  | 100  | 99   | 100  |
|   |      | サイクル                           | 25.5 | 24.9 | 25.8 | 26.8 | 28.0 |
|   |      | 最大値                            | 4108 | 4108 | 4108 | 3946 | 3946 |
|   |      | 最小値                            | 2559 | 2756 | 2859 | 2679 | 2587 |
|   |      | 平均値                            | 3507 | 3512 | 3536 | 3525 | 3499 |
|   | 標準偏差 | 349                            | 340  | 310  | 323  | 321  |      |
| 2 | 機材   | 収束率                            | 99   | 96   | 95   | 97   | 97   |
|   |      | サイクル                           | 25.5 | 25.8 | 26.7 | 26.6 | 28.1 |
|   |      | 最大値                            | 7849 | 7864 | 7864 | 7864 | 7864 |
|   |      | 最小値                            | 4873 | 5277 | 5397 | 5397 | 5158 |
|   |      | 平均値                            | 6780 | 6885 | 6959 | 6933 | 6877 |
|   | 標準偏差 | 730                            | 678  | 657  | 652  | 673  |      |

注:サイクルは収束に要した平均サイクル数を示す

表-11 適用計算結果<6空港のネットワーク>

【Max.Profit】1機材:4997.9

|   |      | A <sub>0</sub> ,C <sub>0</sub> | 2,4   | 2,5   | 2,6   | 2,7   | 2,8   |
|---|------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 機材   | 収束率                            | 97    | 100   | 99    | 100   | 100   |
|   |      | サイクル                           | 37.2  | 36.0  | 35.4  | 35.5  | 32.9  |
|   |      | 最大値                            | 4709  | 4709  | 4436  | 4436  | 4465  |
|   |      | 最小値                            | 2533  | 3189  | 3250  | 3536  | 3471  |
|   |      | 平均値                            | 4202  | 4285  | 4315  | 4320  | 4165  |
|   | 標準偏差 | 398                            | 317   | 278   | 266   | 309   |       |
| 4 | 機材   | 収束率                            | 52    | 62    | 71    | 74    | 81    |
|   |      | サイクル                           | 35.2  | 34.2  | 33.6  | 34.6  | 35.7  |
|   |      | 最大値                            | 17393 | 17918 | 17918 | 17787 | 17563 |
|   |      | 最小値                            | 13646 | 12785 | 14205 | 14977 | 14798 |
|   |      | 平均値                            | 15781 | 16049 | 16117 | 16324 | 16294 |
|   | 標準偏差 | 819                            | 840   | 640   | 578   | 568   |       |

注:サイクルは収束に要した平均サイクル数を示す

表-12 ニューロンの総数および演算時間

|     | 4空港       | 6空港         |
|-----|-----------|-------------|
| 1機材 | 156(1.67) | 336(3.60)   |
| 2機材 | 312(3.34) | 672(7.20)   |
| 3機材 | 468(5.01) | 1008(10.80) |
| 4機材 | 624(6.68) | 1344(14.40) |

注:○内は演算時間[sec./30cycle]

便数、最適出発時刻を同時決定する航空機材スケジューリングモデルを開発し、その適用可能性および最適化アルゴリズムに対して検討を行った。

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 需要を所与とした場合の航空機材スケジューリング問題をフライト案を変数とする二次の整数最適化問題として定式化した場合、乗り継ぎ旅客やその需要の増減を評価可能となった。
- 2) 航空機材スケジューリング問題に対するニューラルネットワークの適用可能性、近似解法としての有効

性を示した。しかし、航空機材スケジューリング問題は極めて非線形性が高く、最適解の近傍において次善解が存在するとは限らない事実が観察された。このため、シャープニング、アニーリングといった一般的な局所解からの脱出法では十分でなく、いくつかの改善策を提案したが、それでも大規模ネットワークになるにしたがい最適解を求めることが困難となっている。

- 3) 制約条件を完全に満足する収束解をより効率的に得るための方法を提案し、その有効性を示した。
- 4) ニューラルネットワークの問題点であるパラメータの設定、初期値の設定法について方向性を示唆した。
- 5) 実際問題への適用に関しては、需要の重複問題の解決に係っている。これが解決されれば少なくとも小規模ネットワークに関しては実用可能と考える。

実用化に対する今後の課題は以下にまとめられる。

- 1) 本研究は定式化が二次であるため、3機以上の相互関係は考慮できない。これを考慮するためには全く異なった定式化が望まれる。
- 2) 解が初期値に依存するため、初期値を遺伝的アルゴリズム(GA)で探索する方法が期待されている。しかし、GAは広域探索が可能という利点を持つが、収束性から大規模問題への適用は困難で、それ自身が局所最適解になるため、ニューラルネットワークの初期値探索にもそのままでは使えない。しかしクロスオーバーやミューテーションといった考え方はそれなりに有効であり、今後試みる価値はある。
- 3) ネットワークが大規模化するにしたがい収束率も最適解に対する計算解の近似も悪化するため、大規模問題に対する問題点を残した。また大規模問題に関しては最適解を知る手段がないため、計算精度を知り得ない。これが実用化の最大の問題点であるが、解決が困難なためローカルネットワークに適用するのが適当であろう。
- 4) パラメータの設定法に改善を行ったが、これはあくまでも改善であり、決定的な方法は現在のところ開発されてない。OR自体の発達が見られる分野である(数学的最適化は現在のところ不可能)。
- 5) 実用上不可欠な問題として需要の推定がある。潜在需要および競合交通機関による需要の増減に関する研究が未だ確立されていないため、応用面ではそれが最大の課題である。今後はこうした研究も進めていきたい。

#### 参考文献

- 1) 日本航空コンサルタンツ(株)：東北地域航空整備調査報告書，航空振興財団，1992。
- 2) 日本航空協会：航空宇宙年鑑，pp.184-191，1991。
- 3) 全国地域航空システム推進協議会：研究調査報告書，1983，1984，1985，1986，1987，1988，1989，1990，1991，1992。
- 4) 井上：航空会社におけるダイヤデータシステムの活用，オペレーションズ・リサーチ，Vol.35，No.9，pp.517-521，1990。
- 5) 吉村：地域航空システム，酣燈社，1986。
- 6) M.M.Etchmaier & D.F.Mathaisel: Airline Scheduling: An Overview, *Transportation Science*, Vol.19, No.2, 1985.
- 7) (社)日本オペレーションズ・リサーチ学会：モダンヒューリスティックスの新展開，1994. 1.
- 8) R.W.Simpson: Scheduling and Routing for Airline Systems, *MIT Flight Transportation Laboratory Report*, R68-3, 1969.
- 9) G.B.Danzig (小山訳)：線形計画法とその周辺，ホルト・サウンダース，pp.705-731，1983。
- 10) G.Handler and R.W.Simpson: A Fleet Assignment Model Incorporating-Connecting Services, *MIT Flight Transportation Laboratory Memorandum*, M74-4, 1974.
- 11) C.F.Wheeler: Strategies for Maximising the Profitability of Airline Hub-and Spoke Networks, *Transportation Research Record*, No.1214, pp.1-9, 1989.
- 12) M.M.Etchmaier & D.F.Mathaisel: Airline Scheduling: An Overview, *Transportation Science*, Vol.19, No.2, 1985.
- 13) 田村，稲野：地域航空における機材の最適スケジューリング，土木計画学研究論文集，No.5，pp.155-162，1966。
- 14) M.S.Daskin and N.D.Panayotopoulos: A Lagrangian Relaxation Approach to Assigning Aircraft to Routine Hub and Spoke Network, *Transportation Science*, Vol.23, No.2, pp.91-99, 1989.
- 15) 徳永，稲村：多空港間航空ネットワークのスケジューリング-L PモデルとD Pモデルの比較-，土木計画学研究講演集，No.13，pp.607-614，1990。
- 16) 徳永，稲村：ダイナミック・プログラミングによる航空ネットワークのスケジューリングモデル，土木学会論文集，No.440/IV-16，pp.109-116，1992.1。
- 17) 鬼柳，徳永，稲村：整数2次計画法による航空機材のスケジューリングモデル，土木計画学研究・講演集，No.15，pp.597-602，1992。
- 18) 鬼柳：地域航空における機材スケジューリング最適化手法の比較分析，東北大学大学院修士学位論文，1992。
- 19) 麻生：「ニューラルネットワーク情報処理」，産業図書，1988。
- 20) 合原：「ニューラルコンピュータ」，東京電気図書，1988。
- 21) J.J.Hopfield: Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 79, pp. 2554-2558, 1982.
- 22) J.J.Hopfield, Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons, *Proc.Natl.Acad.Sci. USA* 81, 3088-3092(1984)
- 23) D.W.Tank & J.J.Hopfield: Neural Computation of Decisions in Optimization Problems, *Biol. Cybern.*

- 52,(141-152),1985.
- 24)武藤：ニューラルネットワークの組合せ最適化への応用，オペレーションズ・リサーチ，Vol. 37, No. 7, pp. 324-330, 1992.
- 25)赤松，土屋：交通ネットワーク均衡問題への神経回路モデルによるアプローチ，土木計画学研究・論文集，No. 7, pp. 227-234, 1989.
- 26)（社）日本工業技術振興協会ニューロコンピュータ研究部会編：ニューロコンピューティングの基礎理論，海文堂出版，pp. 76-97, 1990.
- 27)M.Takeda and J.W.Goodman：Neural networks for computation: number representations and programming complexity, *Applied Optics*, Vol.25, No.18, pp.3033-3046, 1986.
- 28)日高，湯沢，須田：ニューラルネットワークのスケジューリング問題への適用，土木計画学研究・講演集，No. 14, pp. 433-440, 1991.
- 29)秋山，山下，梶浦，安西，相磯：ガウシアンマシンによる組合せ最適化，電子情報通信学会技術報告，MBE-88-183, 1989.
- 30)清水，河合：土地分級結果に基づく用途地域の配置問題，土木計画学研究・講演集，No. 13, pp. 425-430, 1990.
- 31)清水，河合：分級結果に基づく最適ゾーニング問題，土木計画学研究・講演集，No. 14, pp.441-446, 1991
- 32)日高：ニューラルネットワークモデルの工程計画への適用に関する研究，東北大学大学院修士学位論文，1991.

(1994. 7. 11受付)

## DEVELOPMENT OF A NEURAL NETWORK ALGORITHM FOR AIRCRAFT SCHEDULING

Hajime INAMURA and Kenichirou HISANAGA

In order to promote a efficient utilization of local airport in Japan, an aircraftscheduling model for commuter services is discussed in this paper. The paper proposes a quadratic integer programming model and solved it by using the Hopfieldtype neural network algorithm which is expected to find out quasi optimal solutions. The validity, applicability, and tranferbility of the model was confirmed from a series of results. Moreover, several algorithms to get a better solution within realistic calculation time were proposed and tested.