Genetic Algorithms による航空スケジュール Airline Schedule Planning by Genetic Algorithms

佐藤 眞木彦
Makihiko Sato

富士通 計算科学技術センター 知的システム研究部
Intelligent Systems Laboratory, Computational Science and Engineering Center, Fujitsu LTD.
maki@strad.se.fujitsu.co.jp

安達 統衛
Nobue Adachi

富士通研究所 コンピュータシステム研究所 知能システム研究部
Intelligent Systems Laboratory, Computer Systems Laboratories, Fujitsu Laboratories LTD.
adachi@iias.flab.fujitsu.co.jp

keywords: genetic algorithms, schedule planning, fleet assignment, maintenance routing

Summary

Schedule planning is one of the most crucial issues for any airline company, because the profit of the company directly depends on the efficiency of the schedule. This paper presents a novel scheduling method which solves problems related to time scheduling, fleet assignment and maintenance routing simultaneously by Genetic Algorithms. Every schedule constraint is embedded in the fitness function, which is described as an object oriented model and works as a simulator developing itself over time, and whose solution is executable without human correction. The scheduler is able to solve the problems involving several hundred flights in a few hours, and the solutions are superior or equivalent to those by human experts in terms of the estimated profit.

1. はじめに

航空スケジュール問題は、航空機の運航ダイヤを作成する問題で、航空会社の経営計画の要となる仕事である。ダイヤは航空会社の商品そのものであり、顧客数を増大させ総費用を縮小したダイヤを作ることができれば、その収益効果は非常に大きい。この問題は、一日周期のダイヤにおいて、運航対象便の出発時刻や運航機種を設定し、収益などを最適化するものである。人や従来手法では、航空スケジュール問題を部分問題に分けて逐次的に解いているため、良い解が常に得られているか懸念が残っていた。

本稿では、実用レベルの規模の航空スケジュール問題に GA を適用し、最適化する手法をしめす。GA の評価関数に、オブジェクト指向モデルを適用したシミュレーションを用いることで、従来手法では分割されて解かれていた航空スケジュール問題を、一括して扱うことが可能となった。このシミュレーションでは制約条件の省略を行っていないため、得られた解は直接運用可能である。さらに、シミュレーションを利用して、未割当便についての説明機能も併せて実現している。

2. 運航スケジュール問題

2.1 問題定義

本稿では、ある周期で同一の運航を繰り返し行なう運航スケジュール問題を取り扱う。これは、与えられた基

礎ダイヤの各便に出発時刻を決め、輸送機を割当て、全体の収益などの最適化を行なう問題である。基礎ダイヤとは、運航すべき便についての枠を指定したもので、各輸送機種の機材数はこの基礎ダイヤ毎に与えられ、これを越える割当は行なえない。輸送機種の運航は、各発着場所の港/駅の制約や、接続のための制約条件を満足さなければならぬ。

運航スケジュールは所定の期間毎に同一の運航を繰り返すため、その期間の開始時と終了時に各発着場所での各輸送機種の停留数が同一になるという制約条件が課される。輸送機のメンテナンスのため、全ての輸送機は、整備基地との接続可能性を考慮する必要がある。

2.2 運航スケジュール問題の詳細と研究事例

上記の問題設定は一般的なものであるが、このような問題の代表例として航空スケジュール問題が挙げられる。航空ダイヤには、1 週間を周期とする国際線のような問題もあるが、本稿では、1 日を周期とする国内線や近距離の国際線の問題を例題として取り上げる。

この航空スケジュール問題は OR で多くの研究事例があるが、実用規模の問題をまとめて解くことが非常に難しいため、図 1 に示したように全体を小さい部分問題に分割し、それを逐次的に解くのがこれまでのアプローチであった。これらの概要は [Gopalan 98b, Barnhart 97b] にまとめられている。航空会社の専門家でも、同様に部分問題を順次解いていく手法が取られている。

図 1 航空スケジュール問題

以下では、従来の例に沿って航空スケジュール問題を各段階について説明する。

i. 出発時刻設定 (Time Scheduling)

出発時刻設定は基礎ダイヤで与えられた各便に出発時刻を設定するものである。便によっては出発時刻の許容時間幅がなかったり、逆に時間幅が広いものがある。これまでの研究事例の多くでは、出発時刻は所与のものとして扱われている。

ii. 機種設定 (Fleet Assignment)

機種設定は、各便に基礎ダイヤで指定されている使用可能機種を割当の問題で、基礎ダイヤに設定されている全ての便について、機種を割当しなければならない(便宜的に航空機が割当られない便を、未割当便と呼ぶ。)。図 2 は、この機種割当を示したもので、横軸が時間、各横の線は空港を、斜線は便を表しており、各便にそれぞれの機種 (Type X, Type Y) が割当られた様子を示している。ここではさらに、航空機・空港の制約条件や、最小ステイ時間 (航空機がスポットに到着してから出発可能になるまでの時間) を満たしながらそれぞれの便を航空機で接続しなければならない。図 3 は、その様子を示したものである。機種設定の結果と航空機の接続により、各空港での夜間駐機 (朝の始発便前、及び、夜の最終便後の空港の駐機) が定まる。

同一の運航ダイヤで連日の運航を継続するためには、各空港での航空機の出入のバランスが完全に均衡していなければならない。これは、図 4 のように、全ての空港で全ての機種の夜の状態で、次の朝の状態が完全に一致しているという条件である。これを朝夜の夜間駐機の一致と呼ぶ。未割当便がなく、朝夜の夜間駐機の一致が満たされた解を、実行可能なダイヤと呼ぶ。

機種と路線により、搭乗客数と運航コストが大きく異なるので、割り当てる機種はその便の需要予測に合わせて設定することが望ましいが、便の需要は路線や運航時間帯で大きく異なるため、機種設定は問題全体を見渡して決める必要がある。費用や需給に関連する部分は機種設定だけなので、これによってその航空スケジュール全体の収益などが決まる。

図 2 機種設定と経路便設定

図 3 航空機の接続

図 4 朝夜の夜間駐機の一致

iii. 経路便設定 (Through-Path Assignment)

経路便設定は、1つの航空機で連続して運航する便を設定する問題である (図 2: Through-Path). この問題は航続距離の問題で直接飛べない距離の空港間の便に設定したり、北米でのハブ-アンド-スポーク型の運用システムにおいて、航空機の乗換え無しで結ぶ空港を設定/最適化するために用いられる [Gopalan 98b]. (後に述べるが、本稿でのスケジュール問題では、この部分の最適化は対象としていない。)

iv. 整備経路評価 (Maintenance Routing)

整備経路評価は、機種設定における一日の航空機の接続 (図 3) と、それらの数日に渡る接続を調整しながら、整備基地 (大規模な整備場を備えている空港) から出発した航空機が所定の日数以内に整備基地に戻れるようにする問題である。整備基地を含まない空港だけで巡回している航空機 (孤立航空機) が生じてはならない [Clarke 96]. 航空スケジュール問題においては、他の条件は 1 日で完結するが、整備経路評価は数日に跨る条件であり、問題を一層複雑にしている。

整備経路評価は、航空機の整備上の要請から生じる条件である。航空機には、安全上かつ法規上の要請から様々なレベルの整備が課せられるが、ここで考慮する整備は整備基地において夜間に航空機を入れ換えて行なわれるものである。そのため、整備基地からある朝出発した全ての航空機が、夜にその整備基地に戻るまでの日数が問題となる。

図 5 既約な LOF グラフと整備経路評価

この問題を扱うため“LOF”，“LOF グラフ”，“経路”を導入する。LOF (Line Of Flight) とは、ある航空機の 1 日の動きを表し、その航空機の始発の出発空港から最終の到着空港への流れである。複数の LOF から作られる集合を LOF グラフと呼ぶ。ある航空機が整備基地から出て整備基地へ戻る一連の LOF を経路と呼ぶ。

ダイヤ全体の LOF グラフは、機種毎に独立しており、さらに同一機種内で整備基地から LOF を次々と辿っても最後の整備基地以外の空港を共有しない、互いに無関係な LOF グラフに分割できる。これを“既約な LOF グラフ”と呼ぶ。整備基地からの LOF を辿っても、到達しない LOF が孤立航空機である。整備経路評価は、この既約な LOF グラフについて個々に考えればよい。

以下では既約な LOF グラフについて考える。ある航空機が既約な LOF グラフの中で一つの経路を取った場合、それに対応する LOF はグラフから取り除かれ、残った LOF グラフがその他の航空機の経路の候補となる。各空港での航空機の入出は完全にバランスしているの、既約な LOF グラフ内の全ての LOF は、必ずある経路に割当てられる。経路の各航空機への割当て方は一つの既約な LOF グラフに複数あるが、その中から“経路の最大日数が最も短い組合せ”がその LOF グラフの整備経路評価となり、ダイヤ全体でこの整備経路評価を最小化するのが整備経路評価問題である。

図 5 は、ある航空スケジュールの整備基地 A を起点とした 1 つの既約な LOF グラフ (細い直線の矢印の集合) と、その LOF グラフの中の最適な経路の組合せ (太めの曲線矢印、矢印の側の数はその経路に要する日数を表

す。)を示した図である。LOF グラフには、ある航空機がその経路以外に取り得ない“自明な経路”があり、この例の場合、 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 、 $A \rightarrow D \rightarrow A$ 、 $A \rightarrow J \rightarrow A$ である。この LOF グラフから自明な経路を取り除き、それ以外の部分を調べると、最適な経路の組合せ (太めの曲線矢印) は 5 日であることが判る。一方、この LOF グラフの場合、最大 10 日の経路 (図 5 の右下の小さい図) を取り得る。LOF グラフから最適な経路の組合せを見つけることは NP-complete な問題であることが示されている [Gopalan 98a]。

図 6 単純な整備経路評価

LOF は機種設定だけではなく、各空港での航空機のつながり方によって決まるため、整備経路評価の最適化はこれらを変化させることで行なわれる。図 6 は、出発時刻と機種設定が同一でも航空機の異なる接続により、整備経路評価が変化する例である。接続 α では朝出発した航空機は、それぞれ夜に出発空港に戻っている (図の右: LOF)。一方、接続 β のように接続を変えれば、それぞれの航空機は異なる空港に移動する。従って同一の機種設定の解からでも、空港での航空機の接続次第で、整備経路評価の調整が可能である。

一方、ここでの整備経路評価はあくまで計画段階のものである。実際の整備経路評価では、専門家が航空スケジュールを作成しても、機種設定を優先させるため孤立航空機が 0 にならない場合があり、その際の現実の整備は運用段階で柔軟な調整がなされている (例えば、整備対象の孤立航空機と整備直後の同一機種の航空機とを、日中の整備基地で入れ換えてしまえばよい)。従ってここでは、整備経路評価の問題は、制約条件ではなく、ある日数以内に整備基地に戻る“整備の機会”が提供されれば十分で、可能なら満足させたい条件として扱われている。

2.3 これまでの解法

これまでの多くの研究事例では出発時刻を所与のものとして、機種設定単独 [Hane 95, Gu 94]、又は、整備経路評価単独 [Clarke 96, Gopalan 98a] で、問題を逐次的に解いている。これらのアプローチでは、問題の簡略化に加えて、相互に関連した部分問題を別個に解いており、大域的に良い解が得られているか明確ではない。例えば、多くの事例では出発時刻を固定し、最小ステイ時間を全ての機種で同一にしているが、出発時刻には許容

幅がある便があり、最小ステイ時間は機種と空港毎に大きく異なり、それらが航空機の接続に大きく絡んでいる。したがって、出発時刻と機種設定は関連させて決める必要がある。また前述のように機種設定と整備経路評価にも密接な関係がある。尚、[Barnhart 97a]では、機種設定と整備経路評価を同時に解く近似法を論じている。

既存事例での最適化手法としては、整数計画法、内点法、カラムジェネレーション等の線形計画法を用いられている [Gopalan 98b] が、実用的な規模の問題を正確に描写すると、メモリーや計算時間を大量に消費し、実際の計算には困難が生じる。したがって定式化の際に、全ての機種で同一の最小ステイ時間を用いる等、問題の大幅な簡略化がなされており、そのため直接実行可能解が得られるわけではない。

航空会社の専門家でも、部分問題を逐次解いていくアプローチがなされており、手戻りを重ねながら実行可能な解を探している。特に機種設定は、各路線毎の往復を 1 単位として機種を割当てて手法を取っているため、最適な機種設定を行っていないという認識から、より良い自動スケジュールシステムへの要請が専門家からも挙げられていた。尚、これらの解を得るには、航空会社の専門家でも 1 週間程度かかっていた。

3. GA のアプローチ

3.1 本論文でのアプローチ

本稿の GA スケジューラの優れたところは、①大規模な実問題を、現実的な計算時間で、有効な最適化を行なっている点、②出発時刻設定まで決定変数にしている点、③これまで逐次的に解かれてきた出発時刻設定、機種設定、整備経路評価の全てを同時に解いている点、④問題の詳細な制約条件を満たし、実際に運用可能な解が得られる点、⑤収益・売上・費用・総搭乗客数など複数の目的関数から一つを選択できる点である。

航空スケジュール問題の入力データは基礎ダイヤと機種毎の投入航空機数である。問題の基本的な制約条件は、1) 基礎ダイヤの全ての便に航空機の物理的な制約を満たしながら機種を割り当てること、2) 朝夜の夜間駐機の一致を満たすこと、であり、その詳細は 2 章で記述した通りである。

整備経路評価に関しては、前述の理由から、ここでは制約とせず最適化の対象としている。一つの航空機で連続した便の運航を明示的に指定する機能はあるが、経路便設定に関しては最適化対象とはしていない。2 日に跨る便の接続指定、日によって異なる運航をする便は考慮していない。各空港毎に夜間駐機の最小数/最大数を指定できるが、それ以外の夜間駐機する航空機数は解の一部として得られる。

3.2 GA 適用にあたって

GA で最適化を行なうためには、対象となる問題の評価関数が必要である。この評価関数は、

$$\boxed{\text{評価関数}} = \boxed{\text{対象モデル}} + \boxed{\text{評価}}$$

と捉えることができ、実問題を GA で効果的に取り扱うには、対象モデルをどのようにインプリメントするかがキーポイントである。実際に大規模かつ複雑な問題をモデリングをする際、互いに関連した詳細な条件を書き下していく作業は、繁雑で間違いの生じ易い工程である。一方、モデルの各部分は、似ているが内部の条件や値が少しずつ異なる部分を多く含み、各部分について状態の変化を記述し評価する必要がある。このような問題記述の際に生じる問題点を解決する手法としては、オブジェクト指向が最適である。更に本システムのように、詳細な制約条件を全て織り込んだ評価関数を記述する場合は、経時的シミュレーションによるモデリングを行ない、航空スケジュールの物理的・論理的制約の充足状況をチェックできる手法が望ましい。また、後述のスケジュールがうまくいかない場合の説明機能を盛り込むことも当初から検討された。

そこで本システムでは、対象モデルをオブジェクト指向で記述し、対象モデルの経時的なシミュレーションを GA と組み合わせることで、上記の要請を実現した。

3.3 フライトオブジェクトモデルと GA

図 7 フライトオブジェクトと GA

図 7 は、フライトオブジェクトモデルと GA のスケジューリング部の概念図である。フライトオブジェクト (図 7 左側) は、各空港のスポットや航空機を、与えられた制約条件に従ってシミュレートするオブジェクト指向モデルである。フライトオブジェクトは対象期間の最初に航空機が何処にも配置されていない状態で初期化され、スケジュールに従って経時的に内部状態を変えていく。

スケジューリング部 (図 7 右側) は、GA の染色体をデコードしてスケジュールを生成しフライトキューを設定し、適応度の計算をしたり、スケジュール結果の出力を行なう部分である。

個体のデコードでは、基礎ダイヤの各便の出発時間枠と使用可能機種の範囲の中から、具体的な値が割当られ、フライトキューに積まれる。さらにそれがフライトオブジェクトへのメッセージとして送られ、具体的な航空機

図 8 染色体

が割り当てられることで個々の航空機のスケジュールが作られる。

フライトオブジェクトモデルは、以下のようなオブジェクトをその要素として持つ。

空港オブジェクト 空港のオブジェクトであり、内部にはスポットオブジェクトを持つ。各空港オブジェクトの状態は、持っている停留所オブジェクトの数や状態、運用可能時間帯など、それぞれの条件に合わせて設定されている。配下にあるスポットの管理も行なっている。

スポットオブジェクト 航空機を空港に駐機するためのオブジェクトである。駐機可能機種、航空機の出発後の準備時間など、それぞれのスポットの状況に合わせた設定がなされている。航空機が駐機している場合は、航空機情報、再出発が可能になる時刻などを保持する。

夜間スポットオブジェクト 航空機を夜間の空港に駐機するためのオブジェクトである。空港によっては、このための特別なスポットを用意している場合もあり、夜間駐機の最小数を設定したり、朝夜の夜間駐機の一致をチェックする役割も持たせている。

3.4 コーディング/デコード

本 GA スケジューラでのコーディングは、図 8 のように 1 便当たり 3 つの遺伝子で、出発時刻 (g_t)、割当機種 (g_f)、機材繋ぎ (g_r) を指定しており、染色体はこれが便数分連なる。例えば、ある便に関しては以下のようなになる。ある便の希望出発時刻を 10 時 0 分、前の時間帯を 10 分、後の時間帯を 20 分とする。問題定義によれば最小単位時間は 5 分なので、出発時刻 T_g は、 $T_g = 9:50 + 5分 \times (g_t \bmod 7)$ 、ここで 7 は $(10分 + 20分)/5分 + 1$ から得られ、 g_t は遺伝子の値で $0 \leq g_t < GENE_MAX$ 、 $GENE_MAX = 65536$ 、のように対応させる。また割当可能機種が A320, B767, B777, B747 の 4 つとすれば、このリストの順に 0 から 3 までの数を対応させて、割当機種 A_f を $A_f = g_f \bmod 4$ 、ここで g_f は遺伝子の値、で指定する。

機材繋ぎは図 6 のような繋ぎ換えを制御するために用いられる。ある便に割り当てられた機種で、 n 機の航空機がスポットにある場合、用いられる航空機 S_r は $S_r = g_r \bmod n$ のように選択される。このデコード処理は実行可能解が出た後に有効となるが、これは整備経路評価以外に全く影響を与えない。

個体のデコードでは、各便について上記のようにデコードし、出発時刻順に従ってフライトキューに前詰めされ、

フライトオブジェクトのシミュレーションの準備がなされる。

3.5 シミュレーションの動き

フライトキューには便情報が時間順に並んでおり、これを先頭から取り出してフライトオブジェクトに送ることによってシミュレーションを行っていく。フライトオブジェクトに、ある便の出発メッセージを送ると、指定機種の中から割当可能な航空機を出発空港のスポットオブジェクトから取り出して出発させる。その時にスポットオブジェクトに指定機種の航空機が無い場合、その機種で夜間駐機として割当可能な航空機があるか調べられ、あればその航空機が割り当てられる。それが無い場合は、この便は未割当となり、フライトオブジェクトの状態は変わらない。出発できた便の情報は、航空機情報、行き先の空港への到着時刻などが設定された到着便情報として、フライトキューに再登録される。

到着便の処理は、その航空機が使用可能な空きスポットがあれば空港に到着させ、スポットにその航空機を入れる。空きスポットが無ければ、その便は未割当となり、フライトオブジェクトの整合性を保つため、その航空機はそれ以降は使われない。

上記の一連の過程で、問題の制約条件が満たされる航空機だけが割り当てられるため、便が割り当てられた部分のスケジュールには制約違反がない。ある便が割り当てられないため、後続の便が波及的に未割当になることも起こり得る。フライトオブジェクトではシミュレーションを行ないながら、スケジュールされたダイヤでの未割当便数、適応度、整備経路評価の評価も同時に行なっている。

3.6 整備経路評価の近似評価

最短の整備経路評価を見つけるには LOF グラフを探索する必要があるが、正確な計算は時間がかかるため、近似計算法を用いた。これは、既約な LOF グラフから自明な経路を取り除き、残りの LOF グラフ内の滞留している航空機数を流入航空機数で割った航空機の平均滞留日を、整備経路評価の近似値として用いるもので、この計算は比較的高速に行なえるため、GA の個体の評価に組み込むことができる (付録 A 参照)。

近似の精度について、正確な見積りは出来ないが、例えば図 5 の例の場合、LOF グラフ内の航空機数は 22 機で、そこから自明な経路の航空機を取り除くと 15 機である。それを自明な経路以外の流入機数 3 で割った値は、5.0 であり、これは正確な整備経路評価に (たまたま) 一致している。他の数十例試みたが、特殊なケースを除けば概ね 1 日～2 日以内に正しい評価と一致しており、ここでの目的には十分であると考えられる。

3.7 評価関数

評価関数 *Fitness* は以下の式で、最小化問題として扱われる。

$$\begin{aligned}
 Fitness &= A \cdot \sum_{\text{便}} (2 - \frac{i}{F}) \delta(f_i) \\
 &+ B \cdot \sum_{\text{空港}} \sum_{\text{機種}} \text{朝夜の夜間駐機不一致数} \\
 &+ \rho(Feasible) \{ \alpha \cdot \text{目的関数} \\
 &+ \beta \cdot \text{孤立航空機数} + \gamma \cdot \text{整備経路評価} \} \\
 \delta(f_i) &= \begin{cases} 1 & \text{朝から } i \text{ 番目の便が未割当の場合} \\ 0 & \text{割当られた場合} \end{cases} \\
 \rho(Feasible) &= \begin{cases} 1 & \text{第 1,2 項が 0 の場合} \\ 0 & \text{第 1,2 項が 0 でない場合} \end{cases}
 \end{aligned}$$

F は総割当便数

A, B はペナルティー用の重み付の調整係数

α, β, γ は各項目の重み付の調整係数

第 1 項は、未割当便についてのペナルティーで、早い時間の便の未割当により大きなペナルティーを課し、朝から徐々に便が割当られて行くよう誘導している。第 2 項は、朝夜の夜間駐機の一致の制約条件についてのペナルティーである。第 3 項の目的関数は、収益、売上、費用、搭乗客数などの設定項目の中から 1 つを指定する。最小化問題として扱うため、適宜負号がかけられている。第 4 項の孤立航空機数や、第 5 項の整備経路評価の評価は、簡易評価を用いても計算に比較的時間がかかる (個体の評価時間が 50% 増となる) ことから、実行可能な解 (未割当便数が 0、及び、朝夜の夜間駐機の一致が満たされた解) がでるまでは計算を行わず、実行可能な解が導出された後の世代から実際に計算を行ない、評価関数の計算に組み入れられるようになっている。

$\rho(Feasible)$ のために、実行不可能解の *Fitness* は 0 以上の値をとり、実行可能解は係数 A, B の影響を全く受けずに一段低い *Fitness* をとる (図 9 参照) ため、係数 A, B と係数 α, β, γ は互いに影響を与えない。係数 A, B は、実行可能解が出る直前での振舞いが良くなるよう調整する。また、係数 β, γ は可能なら満たしたい制約条件であるため、係数 α より 1 桁多くの寄与を *Fitness* に与えるように設定しており、多少目的関数値が下がっても制約を満足する解を選定するようになっている。

3.8 未割当便の説明機能

フライトオブジェクトの採用は、未割当便の説明機能を実現するためでもある。この説明機能は出発/到着メッセージをフライトオブジェクトに送った際の、出発航空機が割当られない、到着空港でスポットがないなどの応答を捉え、この空港の状況を提示することで実現されて

表 1 未割当便の説明例

> 0835 NoShip	684 YWR E JH 0805 -30 +30 bt:60 A320 A319 B737
余剰航空機情報	12(rsv 0/ free 12 A321/2 A314/5 CRJ/5)
空港情報	— YWR —
夜間スポット	AB6 A321 A314 A320 A319 B737 ARJ CRJ 16/20
始発航空機	16 : AB6 2 A321 1 B737 7 ARJ 2 CRJ 4
空 spot 情報	0835(0835,0) 0810(0810,0)
A321 駐機情報	0850(0805,45) 0835(0750,45)
A319 駐機情報	0840(0805,35)

いる。

表 1 は、この説明例の一部である。この例では、基礎ダイヤで YWR 発 E JH 行 684 便は、出発時刻が 08:05 を中心に ± 30 分の時間幅、所要時間 (bt) 60 分、使用可能機種は A320, A319, B737 と指定されており、それがデコードの結果、出発 08:35 に出発時刻が割当られたが、適切な航空機がない旨の通知である。基礎ダイヤの便情報と共に、08:35 時点での、余剰航空機情報、出発空港 (YWR) の夜間スポットの空き状況、その空港の始発航空機情報、空きスポット状況、駐機スポットの航空機が使用可能になる時間など、スケジュールに関連する情報が提示される。

4. 実験

4.1 実験のデータ、条件

表 2 運航ダイヤの諸元

ダイヤ	便数	路線数	空港数	機種数	航空機数
T1	1268	208	78	8	199
T2	543	92	38	6	98

本手法の有効性を検証するため実験をおこなった。実験に用いたデータは 2 種類で、航空会社が実際に運用したデータを基にしている。これらのテストデータの主な諸元を表 2 に示す。データの特徴として、T1 は便数が多く、出発時刻の取りうる時間範囲は 20 分から 60 分、平均 30 分で、使用可能機種も各便に複数あり、比較的制約が緩い問題となっている。また、使用する航空機の機種もその多くがエアバスで、搭乗可能客数は大きな差がない。出発時刻は 5 分刻みで設定されるので、平均 7 通りの時刻が取り得る。また、機種の範囲は平均 3 機種なので、探索空間の大きさはおよそ $7^{1268} \times 3^{1268} = 10^{1677}$ 程度である。一方、T2 は便数は相対的に少ないが、取りうる時間範囲は 0 分から 120 分と幅広く、かつその内の多くが 0 分で、かつ、機種が固定されているものも多いなどと制約が厳しく、航空会社の専門家ですら解を得るのが難しいと評している問題である。また、T2 の使用可能機種は、幅広い構成となっている。

実験に用いた GA は、個体数 512、突然変異率 0.3% (各遺伝子座)、2 点交叉で、新しい個体を 128 個作り、親集団と合わせて上位 512 個体を次の親集団とする選択手法をとった。初期解は、乱数で作成している。プログラムは C++ で記述され、総量は 2 万行未満である。計算には、Pentium II 333MHz、Linux 上で gcc を用いた。

4.2 実験結果

表 3 T1 における 20 試行の結果

項目	最大	最小	平均	標準偏差
実行可能解 (世代)	2300	900	1500	375
航空機数	201	198	199.4	1.16
総乗客数 (総需要数 162957)	151519	151183	151398	

表 3 は、T1 の試行結果 20 例をまとめたもので、搭乗客数最大を目的関数として 3000 世代 (計算時間で約 100 分) の実行を行なった結果である。この結果では、未割当便 0、朝夜の駐機が一致した実行可能解が全ての試行において得られている。また、目的関数値は、総需要数が 162957 人、実稼働解が 92.5% で、最大 92.9%、最小 92.7% であった。T1 では投入航空機の最大搭乗客数が同じような大きさあるため、良い解と悪い解、更に実稼働解との差異があまりない結果となっている。このように GA スケジューラでは規模がかなり大きな問題にたいしても比較的短い時間でスケジュール結果を得ることができる。

図 9 T2 の世代変化

表 4 T2 における 6 試行の結果

項目	最大	最小	平均	標準偏差
実行可能解 (世代)	25000	3500	15633	7515
孤立航空機数	3	0	0.67	1.21
整備経路評価	18	12	14.2	2.04
収益増 (%)	1.24	0.81	1.12	0.162

図 9 は、T2 の最適化の様子を表したもので、収益を目的関数とし他の条件は同一で乱数の初期値が異なる 6 回の試行の、世代数と Fitness のグラフである。グラフが見易いよう、世代数をログスケールで書いており、Fitness が 0 付近から一段下がっている所が実行可能解が得られた世代である。表 4 は、この試行結果のデータである。制約条件が満たされる世代は、3500 世代～2 万 5 千世代

に渡っており、この世代数が試行によって大きく変わることは、この問題の制約解消が難しいことを示している。整備経路評価は、スケジュール結果内での最大数を比較したものである。収益増は、航空会社の専門家が作った実稼働ダイヤと、T2 の結果とを比較したものである。

5. 考察

T2 では実稼働ダイヤより 1% 程度の良い結果が得られているが、この収益増の額は年間で航空機一機分のリース代に匹敵するものになる。2 章で述べたが、収益の評価は機種設定で決まるが、専門家は機種設定の総合的な最適化は行っていない。一方、GA スケジューラでは機種設定を含めた全体の最適化を行っており、これが収益増の源泉となっている。GA スケジューラでは、T1 の例から、かなり大規模な問題についても、比較的安定して実行可能解が得られていると言える。この問題は、基礎ダイヤの内容次第で、問題の難易度が大きく異なり、解が存在しない場合や、求解時間が長大になる場合もある。T2 はそのような問題に属し、制約条件を満足する解を GA スケジューラが見出すまでの時間には大幅な差がある。問題次第では制約充足解が得られ難いという点は、制約充足問題につきもので、他の手法でもこれを解消するのは困難であると思われる。このような問題においても、バラツキがあるが限られた時間内に GA スケジューラが解を見出していることは、本手法の有効性を示していると思われる。この例では、完全に人手は介さずスケジュールを行なったが、クリティカルな部分のスケジュールを予め航空会社の専門家が指定するなどの作業を、GA スケジューラでのスケジュール結果を見ながら繰り返し行うことで、作業の効率を高めることは可能である。

GA スケジューラの性能を試すため、専門家が特定の組合せでなければ運航ダイヤが成立しないような試験問題を試みたところ、GA スケジューラは問題の設定者でも想定していなかった解まで見つけ出すことができた。具体的には、搭乗客数が少ない基幹路線での始発などに、実稼働ダイヤでは大型機を就航させたのに対し、GA 解では中型機を A 空港→B 空港→C 空港→A 空港のように三角に用いて就航させ、収益を改善させていた。これは専門家は 1 往復を単位にダイヤを作るが、GA では個々の便単位でダイヤを組むため生じた結果であると推測される。

このようにさまざまな場合において、GA スケジューラは、問題の詳細な条件を満足する解を直接評価し、得ることができる点は本手法の大きなメリットであると考えている。本来、出発時刻設定、機種設定、整備経路評価は実際には相互に密接に関連した分離不可能な問題であり、これらをまとめて解いたために良い結果が得られたと思われる。

一般にこの種の問題では、解が存在するかを判定した

り、更にデータの修正情報を示唆することは出来ないが、本システムの未割当便の説明機能はそのような機能を補佐するもので、これを用いることでスケジュールが出来ない場合の状況を提示することは基礎ダイヤの整合性や変更箇所の推測などに極めて有用であった。

6. ま と め

GAスケジューラでは、従来手法では段階的に解かれていた出発時刻設定、機種設定、整備経路評価をGAを適用して同時に扱うことで、制約条件を満たしつつ質的にも満足できる解を得ることができた。専門家が1週間要する数百便～千便の運航ダイヤがGAスケジューラでは2時間程で得られ、専門家の労力を大幅に削減すると同時に、専門家と同等かより収益が得られる運航ダイヤを作成する。

出発時刻設定、機種設定を同時に解く[安達 01]は、同じ問題に対して航空機数の最小化を目的に作成された、姉妹プロジェクトである。これ以外には、実用規模で、運航スケジュール問題に含まれる複数の問題を同時に最適化するものを見つけることが出来なかった。

本手法に適用した、評価関数にオブジェクト指向モデリングを用いたシミュレーションと解の評価を行なう手法や、未割当便の説明機能などは、この問題以外のスケジュール問題に適用していくことが可能であり、それらについては今後の研究課題としたい。

◇ 付 録 ◇

A. 整備経路の簡易評価法

LOFの簡易評価は、以下のように行なわれる。

- (1) スケジュール結果のLOFグラフを機種毎に分割する。
- (2) 個々の機種について、整備基地空港からLOFを辿り、互いに無関係な部分に分割する。これを既約なLOFグラフと呼ぶ。
- (3) 既約なLOFグラフから、以下のような手順で、自明な経路を取り出す。(図5の“自明な経路”参照)

- 既約なLOFグラフの空港について、以下の縮退を行なう。
合流がなく、分岐もない空港 前後の空港を同一視する。
合流があり、分岐がない空港 次の空港と同一視する。
合流がなく、分岐がある空港 前の空港と同一視する。

- このようにすれば、“合流と、分岐がある空港”について考えるだけで十分である。ある空港において、 i から入るLOFの数を LOF_{in}^i 、 j に出ていくLOFの数を LOF_{out}^j とすると、 α から入って β へ出ていく自明な経路をとるLOFの数 $LOF_{trivial}^{\beta}$ は、以下のように表すことができる。

$$LOF_{trivial}^{\beta} = LOF_{in}^{\alpha} - \sum_{i \neq \beta} LOF_{out}^i$$

和は β 以外の全ての出ていくLOFを表している。

例えば図A.1で、Aからの自明な経路をとるLOFを考える。AからのLOFが2、そこからC-空港への出力が1、D-空港への出力が2である。この時、Aからの2つのLOFのうち必ず1つがDに出ていく(図の太い矢印)。これが自明な経路となる。上の式に当てはめると、Dへの自明なLOF数は $2 - 1 = 1$ であり、またC-空港への自明なLOFは $1 - 1 = 0$ である。

図 A.1 空港とLOF

- 自明なLOFが0になり、辿れなくなれば、次のLOFを辿る。

- (4) このようにして整備基地まで辿れたLOFは、自明な経路であり、既約なLOFグラフから取り除く。
- (5) 残ったグラフ中の滞留航空機数を、基地空港からの残ったLOF数(流量)で割った数が、残ったLOFグラフの平均滞留日数であり、自明な経路の滞留日数と比較して大きい方をこのグラフの整備経路日数とする。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Barnhart 97a] Barnhart, C., Boland, N. L., Clarke, L. W., and Sheno, R. G.: Flight String Models for Aircraft Fleeting and Routing, <http://tli.ISyE.gatech.edu>, Vol. LEC9701.pdf, (1997).
- [Barnhart 97b] Barnhart, C., Lu, F., and Sheno, R.: *Operations Research in the Airline Industry, chapter 13, Integrated Airline Schedule Planning*, Kluwer Academic Publishers (1997).
- [Clarke 96] Clarke, L., Johnson, E., and Zhu, Z.: The Aircraft Rotation Problem, *Annals of Operation Research*, Vol. 69, pp. 33-46 (1996).
- [Gopalan 98a] Gopalan, R. and Talluri, K. T.: The Aircraft Maintenance Routing Problem, *Operations Research*, Vol. 46, No. 2, pp. 260-271 (1998).
- [Gopalan 98b] Gopalan, R. and Talluri, K. T.: Mathematical models in airline schedule planning: A survey, *Annals of Operations Research*, Vol. 76, pp. 155-185 (1998).
- [Gu 94] Gu, Z., Johnson, E. L., Nemhauser, G. L., and Wang, Y.: Some Properties of the Fleet Assignment Problem, *Operations Research Letters*, Vol. 15, pp. 59-71 (1994).
- [Hane 95] Hane, C. A., Barnhart, C., Johnson, E. L., Marsten, R. E., Nemhauser, G. L., and Sigismondi, G.: The Fleet Assignment Problem: Solving a Large-Scale Integer Program, *Mathematical Programming*, Vol. 70, pp. 211-232 (1995).
- [安達 01] 安達, 佐藤, 小林: 航空機スケジューリング問題への遺伝アルゴリズムの応用, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J84-D-I, No. 6 (2001).

[担当委員: 溝口理一郎]

2001年3月29日 受理

—— 著 者 紹 介 ——

佐藤 眞木彦(正会員)

1982 東北大学理学部物理学科卒業。1984 理学部原子核理学博士課程前期修了。1986 理学部原子核理学博士課程後期中退。富士通株式会社入社。プログラム相談システム/ルールベースシステム/暗号/ニューラルネットワーク/GAシステム、バイオインフォマティクス等の研究開発に従事。

安達 統衛

1975 年 東京工業大学工学部制御工学科卒業。1977 年 東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年富士通株式会社入社。計算機科学/生物情報/進化アルゴリズム等の研究開発に従事。情報処理学会、電子情報通信学会、日本物理学会会員。