

## 16 北米便に対する上空通過機と日本出発機のモデリング

電気通信大学 ※村田 晓紀, 高玉 圭樹  
航空交通管理領域 ブラウン マーク, 平林 博子, 虎谷 大地

### 1はじめに

世界の航空需要は将来的にも増加が見込まれる。日本の上空も海外からの上空通過機の増加が見込まれており、北米方面の日本出発機、アジアからの出発機の混雑により、日本出発機が希望する高度を巡航出来ないことや、出発時刻の遅延が発生する恐れがある[1]。現在の管制運用では、長距離飛行の航空機間に間隔が維持できない場合は主に高度変更を実施することで対応を行っているが、今後の状況では時間帯によっては高度の変更のみでは対応できない可能性がある。

日本からの北米に向けた航空機は積載している燃料が日本周辺ではそれほど減少していないため、予定している巡航高度に到達できるまでに時間がかかる。仮に上空通過機と日本出発機が、洋上空域における航空機間に必要な間隔（管制間隔）を維持できない状態（コンフリクト）におちいる可能性があれば巡航中の航空機の高度は変更せず、日本の出発機の出発時刻の調整や、巡航高度の変更を航空管制官は行う。この時、上空通過機は燃料消費量の観点で不利益は生じないが、日本出発機は出発時間の遅延や高度を低く割り当てられたことによる燃料消費量の増大に伴う不利益を生じる可能性がある。

今後の軌道ベース運用（Trajectory-Based Operations: TBO）の導入により、航空機運用の不確定性が減り、現在の上空通過機を優先する first-come first-served の空域（経路）、巡航高度の割り当てをより戦略的に行い、便益をよりバランスよくできると考えられる。本研究では、北米行きの日本出発機、上空通過機の便益のバランスシングを目指すため、現在の NOPAC (North Pacific route system) エリアのシミュレーションモデルを構築し、モデルの妥当性評価を目的とする。具体的には、航空機の時間、割り当て高度を制御するために最適化法の一つである進化計算を用い、コンピュータシミュ

レーションを通して適切な管制間隔が維持された交通流を獲得する。ここで管制間隔とは、航空機相互間の間隔のことを指し、この間隔は一定値以上の距離が必要となる。

本論文は以下、2章では現在の管制運用について述べ、3章ではシミュレーションを構築するためのモデリング方法、4章では最適化法である遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm:以下 GA）および、洋上の交通流最適化への適用方法を説明する。5章では提案手法の妥当性を検証するための実験の説明をし、6章で結果、考察を述べ、7章で本研究をまとめる。

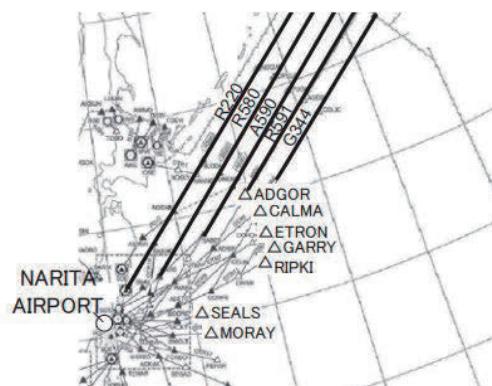


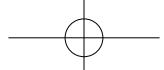
図1 北米方面の洋上経路

### 2 従来の運用

航空管制官は航空機の識別符号（便名）、型式、出発地、飛行経路、到着地等が表示されるストリップ（運航票）を参考に航空機を管理する。

図1は北太平洋上の航空路を表しており、北米便が通過する経路は NOPAC と呼ばれる 5 本の固定経路であり、50NM 以上の横間隔を保持している。

現運用では東経 170 度まで監視し、高度の割り当てを決定しており、この範囲において管制間隔を考慮している。仮に、要求する高度を割り当てられない場合において、東行きは原則奇



数高度（FL310, FL330, FL350等）とされているが、西行き高度（FL300, FL320, FL340等）が運用上の取り決めで使用できる場合においては土1,000 ft, 使用できない場合においては土2,000 ftの範囲でパイロットと巡航高度の交渉を行い、割り当てる。また、空域が混雑していない場合には洋上空域へ出域するポイントへの直行を指示する場合があり、航空機にとってはショートカットと同義である。

洋上航行に関しては、通常、洋上セクタとの境界線の約50NM手前で巡航高度に到達する傾向にある。

### 3 モデリング

先に述べた運用に対応するために、本研究ではリンク・ノードモデルを採用した。その理由は、対象とする空域は事前に設定されている経路に従って航行するため、経路はノード同士を結ぶことで表現でき、コンフリクトの有無をノード（Waypoint）と経路より判別できることである。

本研究ではEUROCONTROLが開発したBADA（Base of Aircraft Data）のPerformance Table Dataに基づいて、航空機の軌道と燃料消費量を計算する[2]。また、位置、高度情報を用いてコンフリクトの有無を検知、決定変数の評価をおこなう。具体的な決定変数は上空通過機の高度、日本出発機の巡航高度とする。決定変数に従って航空機を航行させるが、実際の航行と同様に、Waypointに沿って航行する。これは実際の航空路がWaypointを結んで定義されているからである。

#### 3.1 コンフリクト検知

交通流制御において適切な管制間隔が必要となるが、本研究ではWaypoint間のリンクコンフリクトとWaypoint毎のノードコンフリクトを対象とする。この検知方法は空港周辺でのコンフリクト検知に用いられている[3, 4]。ノードコンフリクトはWaypointを通過する時刻が基準となり、この通過時刻とその時の航空機の速度によって航空機間の間隔を評価する。

Waypointを通過する時刻を使うため、その時点での相対的な距離を見積もることは本来はでき

ないが、Waypointを通過した速度の遅い航空機と通過時刻の差分を用いて疑似的に距離を見積もる。

ここで、コンフリクト検知を行う条件について説明する。コンフリクトは同一高度の他に、上昇時に高度が交差する場合にもコンフリクトが発生する可能性があるため、この二つの条件において検知を行う。

コンフリクトの検知はWaypointと二つの航空機で行う。一つの航空機*i*を基準の航空機にし、もう一つの航空機はWaypointとの関係で前方にある（leading）または後方にある（trailing）とする。下記の式（1）と（2）はコンフリクトの際の速度の選択条件を示す。*v<sub>i</sub>*は基準となる航空機の速度、*v<sub>leading</sub>*、*v<sub>trailing</sub>*はそれぞれその前方、後方に位置する航空機の速度を示す。これらの速度を比較し、基準となる航空機の速度*v<sub>i</sub>*が前後の航空機より遅い場合には、基準となる航空機の速度を選択し、早い場合には前、あるいは後の航空機の速度を選択し、この速度が*v<sub>slow</sub>*となる。この選択条件を用いることで、航空機の間隔は小さく見積もられるため、この時の間隔でも管制間隔が維持されることが求められる。

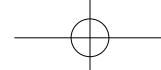
$$v_{slow} \begin{cases} v_i & (\text{if } v_{leading} \geq v_i) \\ v_{leading} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

$$v_{slow} \begin{cases} v_i & (\text{if } v_{trailing} \geq v_i) \\ v_{trailing} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

以下の式（3）と（4）に示す条件式の中で、同高度での*i*は航空機の通過順を表しており、*k*はWaypointの番号を示している。*v*は対地速度を表しており、（1）、（2）式に従い値が選択される。TimeはWaypointを通過する時刻を表し、対地速度と通過する時刻の差分の積により疑似的な距離関係となり、これを維持すべき管制間隔であるintervalと比較することでコンフリクトを評価する。コンフリクトの評価においては、最低限の間隔が維持されていることが条件となる。

$$v_{slow}(time_{k,i} - time_{k,leading}) > interval \quad (3)$$

$$v_{slow}(time_{k,trailing} - time_{k,i}) > interval \quad (4)$$



### 3.1.1 リンクコンフリクト

Waypoint間におけるコンフリクトの有無を検知する。通例、航空機同士の追い越しがないか、Waypointの通過時刻を比較するが、経路上での高度変更が行われる場合があるため、航空機同士の関係が交差するかどうかを判定する必要がある。この条件としては、リンクの端のノードにおいて、航空機同士の高度の関係が逆転している場合にコンフリクトが発生していないかを確認する。

### 3.1.2 ノードコンフリクト

図2はノードコンフリクトの例をあらわしており、線が経路、点がWaypoint、点線の円が保持すべき航空機の間隔を示している。本来は全ての時間帯で管制間隔を判定すべきだが、計算コストの観点で困難である。ただし、航行する航空機の速度は常時変化するわけではないため、各Waypointにおいて管制間隔が維持されていれば全体の管制間隔が維持されているとみなした。リンクコンフリクトによって交差、追い越しの判定を行うが、ノードコンフリクトの場合には適切な管制間隔が維持されているかを判定する。

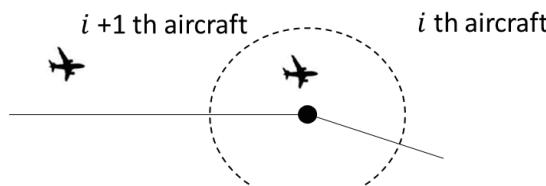


図2 ノードコンフリクト概要

## 4 アルゴリズム

本研究は進化計算と呼ばれる最適化手法の一つであるGAを用いて、コンフリクトのない最適解の獲得を目指す[5]。遺伝的アルゴリズムは設定した目的に対して最適な解を保証するものではないが、出力結果を常時改善するよう更新するため、短時間でコンフリクトのない交通流を獲得できる可能性が高い。また、GAは柔軟にモデリングが可能であることも特徴として挙げられる[6]。以下、フレームワークを本問題に適用するための詳細を記述する。

### 4.1 遺伝的アルゴリズム (GA)

GAは生物の進化を模倣した最適化手法の一種であり、個体（解）であるIndividualとPopulation（解集団）を用い、集団の情報を活用しながら集団内の個体の質を更新させていく。この時、個体の質はFitness（適用度）に基づいて計算をするが、Fitnessは問題設定者が定義できる。問題の出力結果である解を集団として捉え、交叉、突然変異、淘汰を繰り返すことで最終的な結果を得る。

図3は左にフローチャート、右側に具体的な作用を示している。初めに個体の初期化を行うが、これは遺伝子内部（具体的には、出発機の遅延時間と割り当て高度）の値を与える。値は乱数により選択される。次に個体の評価を行う。評価は個体が持つ値の組み合わせによって算出するが、本研究では全航空機に対する割り当て高度の差異の合計と出発機の遅延時間により評価する。解集団全ての個体の評価を終えると、評価が高いものを優先的に親として選択し、交叉を行う。交叉によって遺伝子が組み替えられた個体は2個体生成され、親の遺伝子情報を受け継いだ子個体となる。ここで、子個体は一定の確率で乱数によって値を変更する。

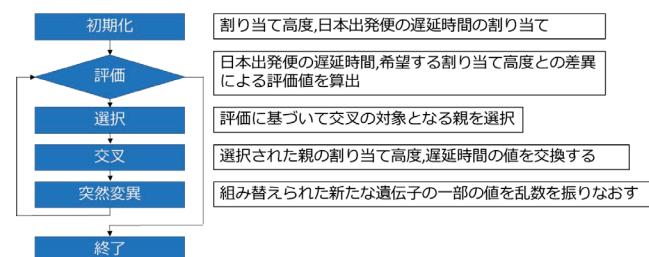
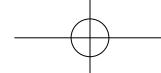


図3 フローチャート及び内部の説明

### 4.2 個体設計

個体は決定変数である航空機の制御値を持ち、制御値は航空機の属性によって異なる。属性は2種類設定されており、一つは日本出発機、もう一方は上空通過機である。属性が日本出発機の場合には、出発時間及び巡航高度、上空通過機の場合には巡航高度が遺伝子として保持される。遺伝子の並びは番号が小さい方から順に入域する。

図4は遺伝子構造を示しており、すべての航空機の制御値が遺伝子に格納されている。図



では、航空機が  $N$  機のときの決定変数が並べられ、一つの航空機にそれぞれ、二つの変数がある。 $\alpha$  は高度の変数であり、割り当て予定の巡航高度が格納される。 $t$  は遅延時間を示し、出発機に関する遅延を決定する。変数である巡航高度は、日本出発機の場合には最低限の巡航高度から希望する巡航高度までを変数として選択することが出来る。遅延時間に関しては、日本出発機においてのみ遅延を発生させることが可能で、上空通過機は常に 0 となる。この変数によって制御される交通流を評価することで、異なる評価の優劣が定まる。

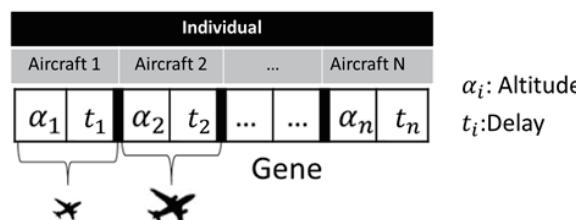


図 4 遺伝子構造

### 4.3 交叉

個体集団は世代ごとに優良な個体の情報を引き継ぐために交叉という作用をさせ、遺伝子情報を組み替えることで現世代より良い遺伝子の生成を促す。

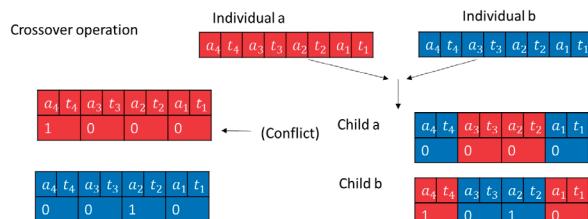


図 5 交叉の作用例

図 5 には二つの個体の遺伝子が示されているが、線により遺伝子が区切られている。この区切りによって遺伝子情報が組み替えられ、新たな遺伝子となるが、交叉の対象となる遺伝子集団の中でも優良と評価された個体となっている。

通常の交叉の場合には組み替えという形がとられるが、本研究の組み換えは各航空機のコンフリクトの数が基準となる。これは Zuniga らが空港周辺での航空機の合流に GA を適用した場合の交叉を参考にしている[7]。図の交叉例

では、親のコンフリクトの数が少ない遺伝子が子 a に引き継がれ、もう一方は子 b に引き継がれる。これにより子 a にはコンフリクトの少ない遺伝子が引き継がれるよう優劣を定める形で交叉を行う。

### 4.4 突然変異

親世代から選択され、交叉によって生成された子個体は一定の確率で突然変異を行う。具体的には、遺伝子内の変数を乱数により変更する。本問題においては、巡航高度と日本出発機の出発時間が突然変異による変更の対象となる。

一般的な突然変異法は遺伝子長の逆数を取る。例えば、遺伝子長が 10 の場合、0.1 の確率で値を変える。本手法ではコンフリクトの有無により突然変異の作用を変える。コンフリクトがない場合には遺伝子長の逆数の割合で遺伝子を乱数により変更するが、コンフリクトがある場合には以下の作用により変更する。

$$S(k) = \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{C} \quad (5)$$

$C$  は全航空機合計のコンフリクト数、 $c_i$  は  $i$  番目の航空機に対するコンフリクトの数をそれぞれ表しており、この式は  $k$  番目のまでのコンフリクトの蓄積割合を示している。この割合と乱数によって選択された  $p$  を比較し、 $p$  の値が  $S(k)$  よりも小さい場合には  $k$  番目の航空機の制御値を変更する。

### 4.5 評価関数

本研究では、適切な管制間隔を維持しつつ、各航空機が希望高度で巡航する交通流を獲得することを目標とする。そこで個体の評価は、交通流におけるコンフリクト数、全航空機の希望巡航高度と割り当てられた巡航高度との差を考慮し、適応度を算出する。

$$\text{Fitness} = \sum_{i=1}^N |Alt_i - Alt'_i| + \gamma C \quad (6)$$

$\gamma$  は係数で、基本的には高度の差分で使用する

桁よりも大きくなる。このような評価は、コンフリクトが少ない個体が高い評価を得られ、同じコンフリクトの場合には全航空機の高度の差分の合計が小さいほど高い評価を得る。この評価方法により、できるだけ早い世代で管制間隔の維持された交通流を獲得し、その後、交通流の最適性を高めるよう更新されていくことが期待される。

## 5 シミュレーション

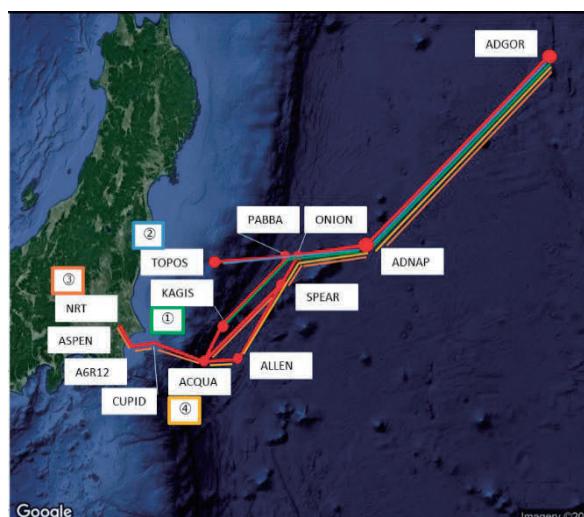


図 6 対象となる経路

提案手法の有効性をコンピュータシミュレーション実験により検証する。対象空域は、北米方面の洋上経路である NOPAC とする。NOPAC を構成する航空路 R220, R580, A590, R591, G344 のうち R220 と R580 はほぼ西行きのみに使用する。主に東行に使用することのある経路は、A590, R591 及び G344 である。この中で R591 から出域する航空機に着目し、シミュレーションを行った。今回は基礎検討という位置づけで、アルゴリズムの妥当性を評価するため、全経路での検証ではなく、部分的な経路の集合で検証とした。アジア便の航空機は、3 つの空域から入域し、R591 へと出域する航空機を対象とし、実際の交通流を参考に疑似的に作成した。航空機の型式はすべて同じものとし、各航空機には入域時の時刻、入域時の速度、高度、要求する高度、通過する Waypoint を設定した。

コンフリクトの条件となる管制間隔はレーダーのカバレッジ（覆域）では 10NM、カバレッジ外の範囲では 80NM 以上の間隔が必要とした。今回、使用する高度は奇数高度を対象とし、偶数高度は西方向へ航行する航空機が使用すると仮定し、奇数高度のみ変更可能とした。変更できる高度は、割り当てる高度が低い場合には実際の運用とかけ離れてしまうので、FL310 以上の高度を割り当てるものとした。

Waypoint は航空路誌 (Aeronautical Information Publication: AIP) に記載されている座標情報を参考にした[8]。

提案手法の GA を用いたパラメータは以下のとおりである。

表 1 GA のパラメータ

パラメータ	値
世代数	100
交叉率	1.0
突然変異率 (コンフリクトがない場合)	$1/l$ ( $l$ は遺伝子長)
$\gamma$	100,000
集団数	100

### 5.1 シナリオ設定

現運用では出発時刻を遅延させることなく日本出発機に対して高度を割り当てる。そこで、交通流を密にした際のコンフリクトについて評価を行う。具体的には、単位時間当たりの航空機数を実際の交通流よりも増やした場合にコンフリクトのない交通流を生成できるかを検証する。各航空機の情報は以下に記載する。

表 2 はそれぞれ、入域時刻 (秒)、経路番号、入域高度 (FL)、要求高度 (FL)、入域対気速度 (kt) を表している。経路は、日本出発機(本研究では成田便のみ)と 3 つのアジアからの上空通過機を表している。航空機は Route3 が成田からの出発機、それ以外が中国、韓国からの上空通過機である。

本研究ではおよそ 45 分間の間に同じ経路で 15 機の航空機が通過する状況での実験を行った。これらの値は実際の航跡データを参考に乱数により疑似的に作成した。

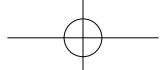


表 2 航空機の詳細

Time	Route	Ini. FL	Req. FL	Ini. TAS
600	1	290	350	488
1500	2	350	350	487
1200	2	250	250	493
600	4	310	310	493
2100	3	0	370	0
1200	3	0	350	0
0	4	300	350	490
300	3	0	370	0
2500	4	310	350	485
800	2	280	370	486
1800	1	300	350	487
2700	3	0	370	0
900	3	0	350	0
1100	4	290	330	490
1000	2	290	370	487
1200	1	350	350	488

## 6 結果・考察

図 7, 8 はそれぞれ、全航空機の要求した高度と割り当てられた高度の差分の合計と、コンフリクト数の合計を示している。横軸は世代数である。世代数は一つの解の評価回数と同義であり、値が大きくなるほど最適解に近づいていく。

図 7 は 30 試行のうち 1 試行の結果であり、要求高度との差の関係はこの値が低ければ低いほど、要求した高度を航行出来ていることを示す。初期の世代で低い値を示しているが、これは航空機間でコンフリクトが生じているため、コンフリクトが生じている中で値が低い個体が最優良として選択されるからである。ただし、この状態は初期で解消されており、世代を重ねる毎に値が低くなっていることがわかる。この結果からコンフリクトのない解を獲得し、さらに高度差の総和の値が良くなっていることがわかる。次に図 8 は 30 試行の平均コンフリクトを示しており、世代数が大きくなるとコンフリクトの値も小さくなっていくことがわかる。ただし、全 30 試行でコンフリクトが解消されたわけではなく、いくつかの試行でコンフリクトが解消されておらず、早期にコンフリクトを解

消する GA 上での工夫が必要であると考えられる。

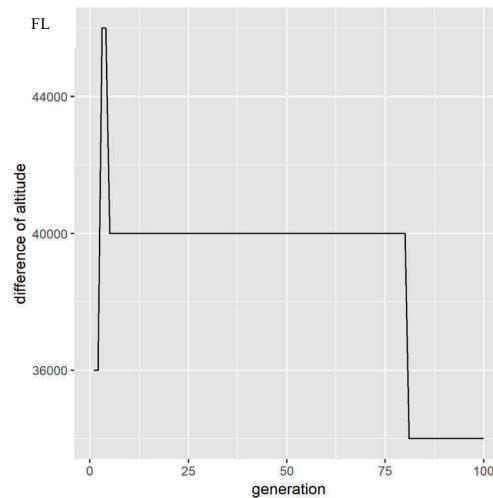


図 7 全航空機の高度差の総和の推移

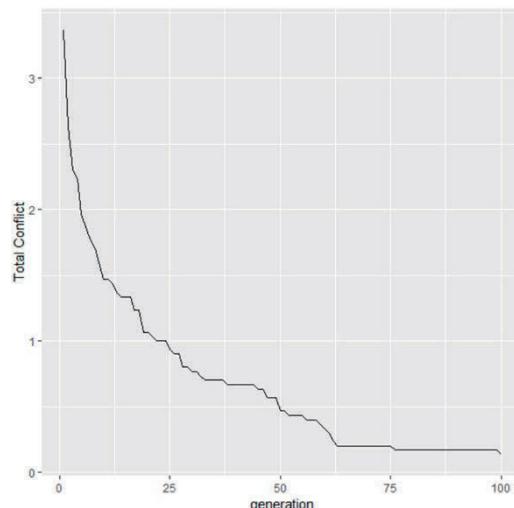


図 8 総コンフリクト数の推移

## 7まとめ

本研究では北米便に対する日本出発機と上空通過機の便益バランスを達成するために、現運用をモデル化しモデルの妥当性を検証した。

シミュレーション結果より、コンフリクトを解消するような高度の割り当ての組み合わせを、GA によって獲得できることが明らかになった。

便益バランスを行う場合、運航者の要望（目的）をトレードオフに反映すること、いわゆる協調的意意思決定（Collaborative Decision Making: CDM）を実施することが望ましい。今

後の展望としては、GA は複数目的に対するトレードオフ解集団を同時に獲得できるため、管制官の意思決定のために、便益バランスングされた交通流の候補を獲得する。具体的には、遺伝的アルゴリズム中の多目的最適化手法である NSGA-II を用いる[9]。この手法は、今までの多くの最適化手法がある一つの評価値に従って最適化を行っていた一方、複数の評価値に対する複数の最適な選択肢（トレードオフ解）を提示することが可能である。このようなトレードオフ解を獲得することで、管制官にとって様々な評価軸に基づいた選択肢を提示することが出来る。これにより多様な交通流の状況に対応できることが期待される。例えば、多くの航空機が洋上を航行する場合には、最適性よりも安全性を重視し、日本出発機の出発時間を遅延するような選択を行う選択を行う可能性がある。また、航空管制官の思考に似た選択肢や、管制官が想定していなかった選択肢も提示できる可能性があるため、このような選択肢の提示は意思決定の支援に役立つことが考えられる。

### 謝辞

モデル作成にあたり、ヒアリングに協力頂いた、東京航空交通管制部の関係各位に感謝いたします。

### 参考文献

- [1] 木下, 平田, 我が国からの国際線出発機と上空通過機のコンフリクト分析, 第 52 回飛行機シンポジウム, 2E04 (JSASS-201405141), 2014 年 10 月
- [2] Eurocontrol Experiment Center, "User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.11," EEC Technical/Scientific Report No.13/04/16-01, 2013.
- [3] M. Liang, D. Delahaye, and P. Maréchal, "Integrated sequencing and merging aircraft to parallel runways with automated conflict resolution and advanced avionics capabilities," Transportation Research. Part C, Emerging technologies, vol. 85, pp. 268–291, Dec. 2017
- [4] J. Ma, D. Delahaye, M. Mohammed, P. Scala, A. Miguel, M. Mujica, "Integrated Optimization of Terminal Maneuvering Area and Airport at the Macroscopic Level," Transportation research. Part C, Emerging technologies, vol. 85, pp. 268–291, Dec. 2017
- [5] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning," Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- [6] N. Durand, D. Ginazza, J.B. Gotteland, J.M. Alliot, "Metaheuristics for Air Traffic Management," WILEY.
- [7] C. Zuniga, D. Delahaye, M.A. Piera, "Integrating and sequencing flows in terminal maneuvering area by evolutionary algorithms", 30th IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2011, pp. 2A1–1.
- [8] 国土交通省航空局, eAIP Japan, <https://aisjapan.mlit.go.jp/> (参照, Apr.2019)
- [9] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm," NSGA-II IEEE Transactions on Evolutionary Computation 6.2 : 182-197, 2002