

## 26. A-SMGC システム経路設定機能の開発 —推奨経路生成のための空港面地上走行モデル化 その2—

航空交通管理領域 ※山田 泉、青山 久枝  
通信・航法・監視領域 二瓶 子朗、角張 泰之、宮崎 裕己  
機上等技術領域 古賀 禎

### 1. はじめに

空港面を航空機や車両が走行する際の安全管理は、管制官の目視による監視と無線を用いた音声通信による走行指示、パイロットや運転者の目視による危険回避によって行われている。この管理形態は、夜間や霧の発生時といった低視程の状況で地上走行の円滑性が損なわれやすい。また、交通量の増加や空港面レイアウトの複雑化に伴って管制負荷が増大する。

視程の低下、離着陸数の増加、空港面レイアウトの複雑化といった条件下で、管制負荷を軽減し、空港面運用の安全と効率を維持もしくは増進することを目的に ICAO（国際民間航空機関）で A-SMGC (Advanced Surface Movement Guidance and Control: 先進型地上走行誘導管制) システムの概念と要求性能が提唱されている<sup>[1]</sup>。ICAO の提唱する A-SMGC システムは監視、経路設定、誘導、管制の4つの基本機能によって構成され、具体的には誤進入の防止、経路誘導、航空機間の間隔確保、衝突防止等を実現することを目的としている。

電子航法研究所では、国土交通省に対するニーズ調査等に基づき、平成16年度から「A-SMGC システムの研究」を実施しており、4つの基本機能を検証する実験システムの開発を進めている<sup>[2]</sup>。このうち、経路設定機能については、タッチパネルを用いた走行指示経路の手動入力装置の開発<sup>[3]</sup>、東京国際空港における地上走行パターンの分析<sup>[4]</sup>等を行っている。

本研究では、航空機（管制対象）に対する推奨走行経路を自動生成するアルゴリズムを開発するための基礎として、航空機の地上走行を計算機上に模擬する空港面地上走行モデルの開発を行っている<sup>[5]</sup>。本稿では、提案するモデル化手法を仙台空港のモデル化に適用し、誘導路走行時間について実測データとの比較検討を行った。この比較を元に、本手法の課題について述べる。

### 2. 空港面地上走行モデル化

#### 2.1 モデルの概要

ICAO の A-SMGC システムマニュアル<sup>[1]</sup>では、大規模混雑空港における A-SMGC システムの導入に関して、経路設定を自動的に行う手段の必要性を述べている。また、経路設定機能の性能に関して、以下の要件を定めている<sup>[1]</sup>。

- ・ 空港面の運用が最適となる最短距離の経路を設定すること。
- ・ 指示する走行経路の妥当性を検証する手段を設けること。

上記の要件を満たすために、本研究では、空港面内の各移動区間の長さを値とするエッジ（辺）をノード（節点）によって結合したネットワークとして空港面をモデル化する。このネットワークモデル上で、最短経路探索法を基礎として推奨経路生成アルゴリズムを構築することを目指している。

また、このネットワークモデル上で航空機モデルを走行させるシミュレーション機能を開発する。本機能により、経路指示を行った後の交通状況を予測することが可能となり、走行経路の妥当性を確認することが可能となる。この交通状況予測を妥当なものとするために、地上走行モデルには航空機の地上走行を精度よく模擬する性能が求められる。

#### 2.2 モデル化の手法

##### 2.2.1 空港面のマップモデル化

実際の空港面レイアウトに対応してエッジとノードで構成される空港面モデルを構築するため、図1に例示するように、特定の通過地点や停止位置にノードを配置し、対応する走行区間が実際の空港面にあるノード間をエッジで結合することとした。

エッジの値として、実際の空港面に対応する走行区間の距離値を設定することとした。次節で述べるように、航空機モデルの走行は等速走行を仮定するため、誘導路等の旋回部分に対応するエッジについては、実際の運航では当該区

間を減速して通過することを考慮し、直進する場合に比した走行時間の増加分を距離に置き換えた値を加えることとした。旋回部分をノードとして設定する場合については、ノードに同様の距離値を設定することとした。

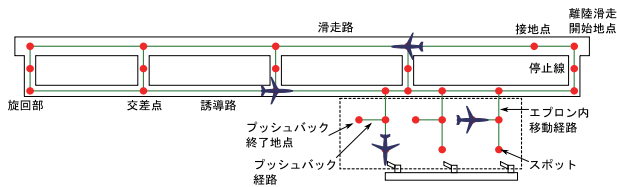


図1：実際の空港面移動経路とマップモデルの対応例

### 2. 2. 2 航空機のモデル化

航空機モデルについては、通過箇所や運航のフェーズに応じて、図2および図3に示す速度、加速度、停止時間を属性パラメータとして設定することとした。誘導路およびエプロンにおける走行については等速走行を仮定し、プッシュバック速度、エプロン走行速度、誘導路走行速度はいずれも定数とした。

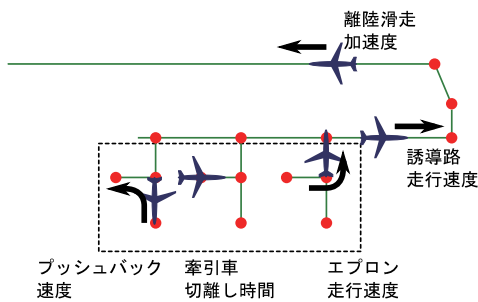


図2：出発機の属性パラメータ

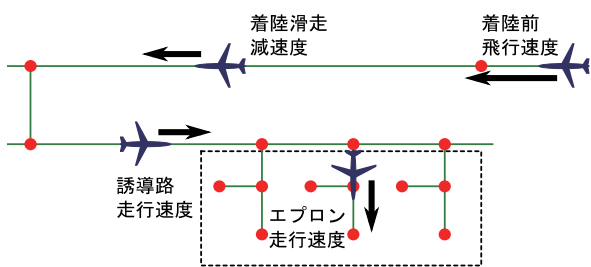


図3：到着機の属性パラメータ

### 2. 2. 3 管制処理および衝突回避行動のモデル化

実際の運航では、滑走路使用等に関する管制処理、縦列走行時等での航空機側の判断による衝突回避のため、航空機が走行中に一時停止を行う。この動態を模擬するため、鉄道の信号機

制御における「閉塞制御」の概念を参考として交通状況による一時停止をモデル化した。本研究で用いた閉塞制御は、エッジが航空機モデルにより占有されている場合には他の航空機モデルが当該エッジを通過しないよう、端点のノードで一時停止させる処理である。閉塞制御の動作概要を図4に示す。

滑走路使用に関する管制処理やエプロンの出入りの競合に関する管制処理については、滑走路やエプロン内移動経路を構成する複数のエッジを一括して閉塞することとした。また、実際の運航で縦列走行が多く行われる区間については、縦列走行の間隔に応じた長さのエッジを配置することとした。

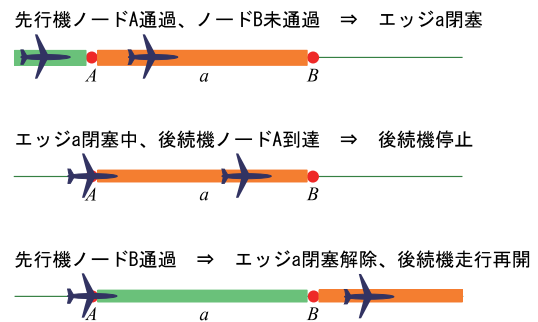


図4：閉塞制御の動作概要

## 3. 仙台空港モデル化による検証

### 3. 1 検証の概要

本研究で用いた空港面地上走行モデル化手法の妥当性を検証するため、以下の流れで実際の空港のモデル化を行い、実際の運航とシミュレーションの比較を行うこととした。

- ① 運航状況調査による実際の運航状況の把握とデータの取得
- ② 運航状況調査で得られた経路情報に基づく空港面地上走行モデルの作成
- ③ シナリオ作成、パラメータ調整
- ④ シミュレーションと実際の運航との比較による性能検証

### 3. 2 運航状況調査の概要

平成17年10月27日、28日に、仙台空港において運航状況調査を実施し、旅客機エプロンを使用するエアラインの出発機72機、到着機60機の観測を行った。調査時は滑走路27方向

の運用が行われていた。

調査は電子航法研究所岩沼分室 ASDE 鉄塔からの目視により航空機の運航を観測する方法を用い、以下の項目を記録した。

- ・ 出発機：便名、型式、使用スポット、プッシュバック開始／終了時刻、走行開始時刻、走行経路、滑走路進入時刻、離陸滑走開始時刻、離陸時刻
- ・ 到着機：便名、型式、着陸時刻、滑走路離脱時刻、平行誘導路進入時刻、走行経路、エプロン進入時刻、スポット到着時刻、使用スポット

また、走行中に一時停止があった場合には、停止時刻および走行再開時刻を記録した。

調査当日は晴天であり、エアラインの旅客機のほかに、訓練機等の小型機による離着陸が多く行われていた。これらについては、滑走路使用の開始および終了時刻を記録した。

図5および図6に、運航状況調査時に観察された代表的な走行経路、および、経路上で航空機の通過等の時刻を記録した箇所（図中星印）の例を示す。

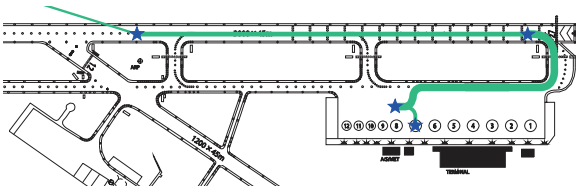


図5：出発機走行経路と時刻計測箇所の例

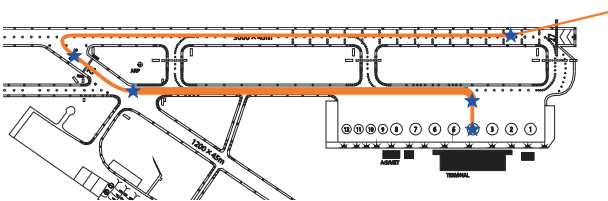


図6：到着機走行経路と時刻計測箇所の例

### 3.3 製作した仙台空港モデル

マップモデルについては、空港面の地図を元に、滑走路および誘導路のエッジとノードの配置を行った。エプロンについては、実際の運航で観察されたプッシュバック経路やエプロン内走行経路に基づいて、エプロン内のエッジとノードの配置を行った。製作した仙台空港マップモデルを図7に示す。

航空機モデルについては、図2および図3に

示す航空機属性パラメータを型式ごとに設定することとした。また、仙台空港が滑走路27方向で運用される場合には、出発機と到着機で誘導路走行速度に違いが生じることが明らかとなったため、誘導路走行速度については出発機と到着機に別個の値を設定することとした<sup>5)</sup>。

このようにして製作した仙台空港モデル上で、プッシュバック開始時刻、着陸時刻、走行経路を実際の運航と同一としたシナリオにより地上走行シミュレーションを行い、実際の運航とシミュレーションの比較により、モデル化手法の妥当性について検証を行うこととした。

本稿では、誘導路走行部分（図5および図6に示した走行経路のうち太線部分）に関して、走行時間の再現性を検証した結果を示す。

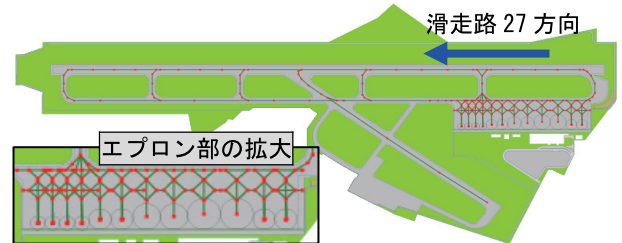


図7：製作した仙台空港マップモデル

## 4. 観測結果とシミュレーション結果の比較

### 4.1 到着機の誘導路走行時間の再現性

到着機60機分について、平行誘導路進入後、エプロン進入のための旋回を完了するまでの走行時間（途中に一時停止した場合には、停止時間を除いた時間）について、実測値とシミュレーション再現値を散布図にプロットし、回帰直線を付したものを図8に示す。

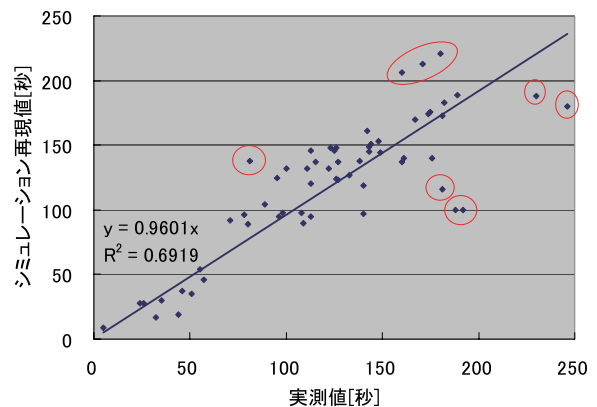


図8：到着機の平行誘導路走行時間の再現性

図8から示されるように、散布図は傾き1の

直線にほぼ沿っているため、再現性は良好といえる。大きな外れ値は9件観察された（図中、丸で囲ったもの）。このうち5件は実測値より再現値が小さく、4件は実測値の方が大きい。前者のうち3件は、実際の運航で走行中の一時停止が発生した場合であった。一時停止を伴わない場合の外れ値については、要因と考えられる特徴が抽出されなかった。

4. 2 出発機の誘導路走行時間の再現性

出発機72機分について、プッシュバック終了位置から離陸滑走開始地点までの誘導路走行時間（途中に一時停止した場合には、一時停止を除いた時間）について、実測値とシミュレーション再現値を比較したものを図9に示す。

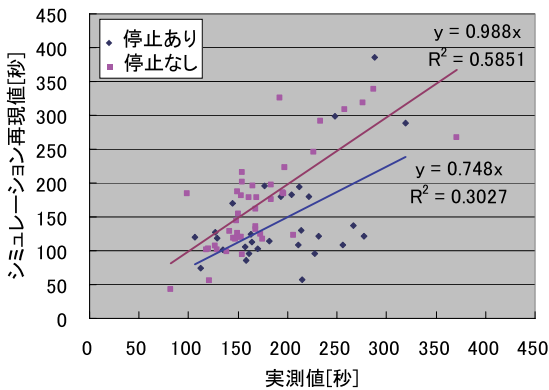


図9：出発機の誘導路走行時間の再現性

図9から示されるように、停止せずに走行した場合については散布図が傾き1の直線に沿うものの、外れ値が多い。走行中に一時停止した場合については、全般的に再現値が実測値を下回る傾向となった。

5. 考察

5.1 実際の運航における速度プロファイル

運航状況調査では、空港面の目視により地上運航の観測を行ったため、詳細な位置ごとの通過時刻を目視により得ることは困難であった。このため、航空機の色速度変化に関する詳細な情報は得られなかった。

参考のため、東京国際空港において取得したマルチラレーション監視システム<sup>6)</sup>の評価データを元に、J2およびJ3連絡誘導路を走行した航空機の色速度変化を解析した例を図10に示

す。これは、図11に示すような、連絡誘導路進入旋回終了からC滑走路の平行誘導路への進入旋回開始までの直進走行経路での速度変化のプロファイルである。

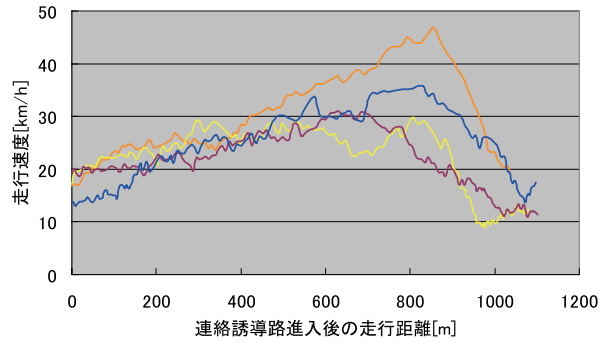


図10：東京国際空港マルチラレーションにより得られた直進時の走行速度プロファイル例

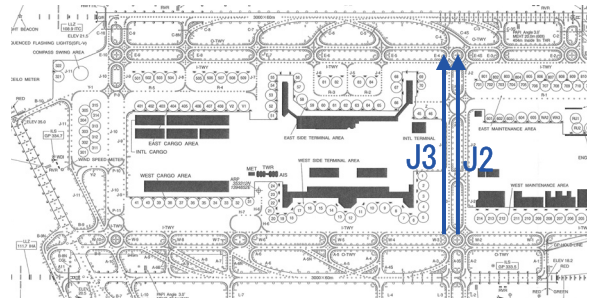


図11：図10の走行データに対応する走行経路

図10から示されるように、実際の運航では、航空機は緩やかな加速と、加速よりも比較的急な減速を繰り返して地上走行を行う。図10の例では、加速に数百m、減速に100m以上の距離を要している。

5.2 出発機と到着機の走行速度の差異

本研究で製作した空港面地上走行モデルでは、走行時間の再現性向上のために、同一の型式の航空機であっても出発機と到着機に別個の地上走行速度を設定する必要が生じた<sup>5)</sup>。

仙台空港が滑走路27方向で運用される際、到着機がエプロンに到達するまでの直進距離は、図12に黄褐色の線で示すように、A滑走路を用いて滑走路を離脱した場合で700m以上、B3誘導路を用いて離脱した場合で1200m以上となる。このため、平行誘導路進入後、エプロン進入のための旋回を完了するまでの間の走行経路については、直進区間の占める割合が大きい。

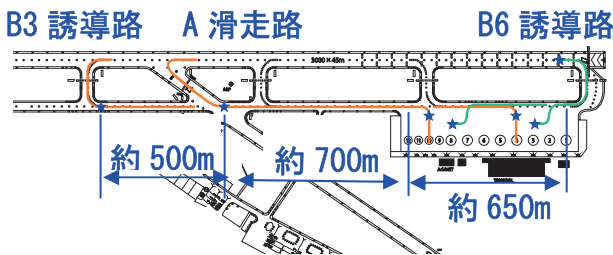


図 12：仙台空港滑走路 27 運用時の走行経路の例と直進走行距離

一方、出発機の走行経路は、図 12 に緑色の線で示すように、平行誘導路に進入するための旋回や B6 誘導路での旋回の占める割合が大きい。直進を継続する距離は最長で約 650m となり、出発スポットによって大きく異なる。

到着機の平行誘導路走行は直進距離が長いいため、加速を持続できる時間が長くなり、結果として各航空機の直進時の平均速度は大きな値となると考えられる。一方、出発機は、旋回を経て平行誘導路に進入したのち、B6 誘導路での旋回を行うまでの直進距離が短いため、直進における加速を行う時間が短くなり、結果として各航空機の直進時の平均速度は小さくなると考えられる。出発機と到着機で走行速度に異なる値を設定する必要があるのは、このことが要因と考えられる。

次に、実測値を元に到着機と出発機のプロファイルの性質を比較するため、走行中に一時停止を伴わなかった運航に注目して、実際の運航における誘導路走行距離と走行時間の関係をプロットしたものを、到着機（A 滑走路または B3 誘導路を用いて滑走路を離脱した 45 機）について図 13 に、出発機（37 機）について図 14 に示す。誘導路走行距離は、図 5 および図 6 に例示した走行経路を空港面地図上に作図して求めた概算値である。

到着機については、図 13 から、誘導路走行距離と走行時間はほぼ比例の関係にあることが観察される。実際の運航におけるこのような傾向により、到着機の誘導路走行時間については、等速走行を仮定した地上走行モデルによって良好な再現性を得られたと考えられる。

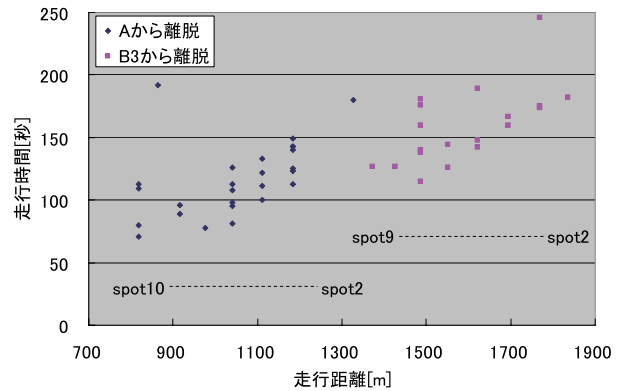


図 13：実際の運航における到着機の誘導路走行距離と走行時間の関係（一時停止を伴う運航を除く）

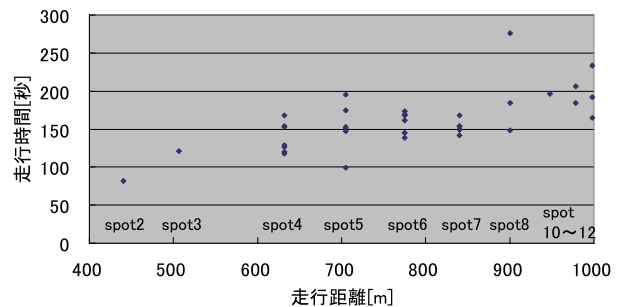


図 14：実際の運航における出発機の誘導路走行距離と走行時間の関係（一時停止を伴う運航を除く）

一方、出発機については、図 14 から観察されるように、走行距離と走行時間の関係を比例関係に当てはめることは困難である。特に、走行距離が 600m～850m となる 4 番～7 番スポットからの出発機については、走行距離の増加に対して走行時間がほとんど増加しない傾向にある。このことは、走行距離の増加に伴って平均走行速度が増加することを意味している。

4 番～7 番スポット出発機はエプロン内走行経路の形状と長さがほぼ同じであるため、走行距離の差は、平行誘導路での直進距離の差による。よって、平均走行速度の増加は直進距離の増加に起因している。このことは、加速を継続できる直進距離の違いが走行時間に影響することを示す。等速走行を仮定した地上走行モデルでは上記の傾向を再現することは困難である。

このように、直進距離が短い走行に関して走行時間の再現性を向上するためには、直進区間での加減速を考慮したモデル化を行うことが必要と考えられる。



### 5.3 一時停止を伴う走行と伴わない走行の走行時間の差異

多くの出発機、また、数機の到着機において見られたように、走行中に一時停止を伴う場合には、停止せずに走行する場合に比べて走行時間の再現性が低下し、実際の運航に比べてシミュレーション上の走行時間（停止時間を除いた走行時間）が短くなる傾向が確認された。

そこで、利用機の多かった4番～7番スポットの出発機について、走行中に一時停止した運航（20機、使用スポットはそれぞれ4番—6機、5番—5機、6番—6機、7番—3機）と一時停止しなかった運航（26機、使用スポットはそれぞれ4番—7機、5番—6機、6番—6機、7番—7機）の、実際の運航における誘導路走行時間の分布を図15に示す。

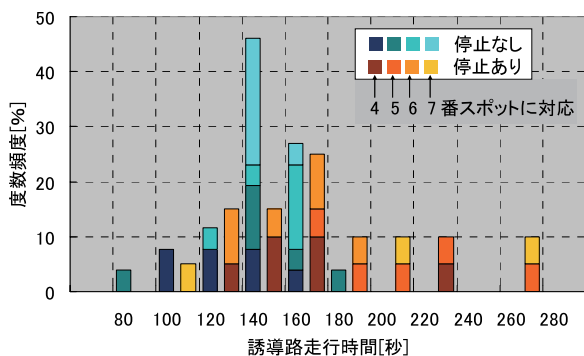


図15：実際の運航における出発機の誘導路走行時間分布の走行状況による違い（4～7番スポット出発分）

図15から示されるように、走行中に一時停止を行った場合には、停止せずに走行した場合に比べ、ほぼ同一の経路でも走行時間が長くなり、また、走行時間の変動の幅も大きくなる傾向にある。この傾向は、走行中に一時停止する場合に、停止せずに走行する場合と比べて、停止前の減速と走行再開時の加速の時間が加わるためと考えられる。本研究で用いたモデル化手法では等速走行を仮定しているため、実際の運航において見られるこのような性質を再現することが困難である。

### 6. おわりに

本稿では、A-SMGC システム経路設定機能において推奨経路生成の基礎となる空港面地上走行モデルについて、本研究で用いた手法を

仙台空港のモデル化に適用した結果を述べた。実際の運航とシミュレーションの走行時間を比較した結果、航空機が等速走行を行うことを仮定したモデル化手法では、直進を継続する距離が長い場合については実際の運航における走行時間を精度よく再現することが可能であるが、一方で、直進距離の短い経路を走行する場合や走行中に一時停止を伴う場合など、直進を継続する距離が短い場合については、加減速の時間が走行時間に及ぼす影響を模擬できないため、再現性が低下することが明らかとなった。

今後は、実際の運航に見られる速度プロファイルを参考として、直進距離や周辺交通状況に応じた加減速を考慮した航空機モデル化手法を取り入れることにより、東京国際空港等の大規模混雑空港の地上走行を精度よく模擬することが可能な空港面地上走行モデルの実現を目指す。

### 謝辞

最後に、運航状況調査を実施するにあたってご協力いただいた東京航空局仙台空港事務所、東京航空局東京空港事務所、当研究所岩沼分室の関係各位に感謝の意を表します。

### 参考文献

- [1] ICAO: A-SMGC System Manual, ICAO Doc. 9830, 1st ed., 2004.
- [2] 二瓶, 宮崎他: “先進型地上走行誘導管制 (A-SMGC) 実験システムの連携試験について”, 第7回電子航法研究所研究発表会講演概要, pp. 89-96, 2007.
- [3] 松久保, 二瓶他: “A-SMGC 経路設定用インターフェイス装置について”, 第8回電子航法研究所研究発表会講演概要, 2008.
- [4] 青山, 二瓶他: “A-SMGC システム経路生成機能の開発—地上走行パターンの解剖について—”, 第47回飛行機シンポジウム予稿集, 2G7, 2007.
- [5] 山田, 二瓶他: “A-SMGC システム経路設定機能の開発—推奨経路生成のための空港面地上走行のモデル化—”, 第8回電子航法研究所研究発表会講演概要, pp. 57-62, 2008.
- [6] 二瓶, 宮崎他: “マルチラテレーション監視システムの導入調査(2)—ASDE との連携による相互補完機能について—”, 第6回電子航法研究所研究発表会講演概要, pp. 105-112, 2006.