

## 1.4. 航空機監視応用システム（ASAS）の研究開発状況

航空交通管理領域 ※伊藤 恵理, 上島 一彦, 福島 幸子  
監視通信領域 大津山 卓哉

### 1. はじめに

ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast:放送型自動従属監視) を介して航空機が発信した監視情報を機上で受信し運航に利用するシステムを ASAS (Aircraft Surveillance Applications System:航空機監視応用システム) という。ASAS を応用した運航の方式を ASAS 応用方式と呼び、実運用に向けた研究開発が進行中である。これまでに運用要件が公式に発表された ASAS 応用方式として、航空機が航行中に行う高度変化の規制を緩和する ITP (In-Trail Procedure) 応用方式<sup>[1][2]</sup>が代表的である。現在も RTCA と EUROCAE の合同会議が定期的に開催されており、2014 年までに運用要件をまとめて機上監視応用 (ASA) 公式文書<sup>[3]</sup>に追加する ASAS 応用方式を検討している。その中で、最も具体的な議論と研究開発が進んでいるものが FIM (Flight-deck Interval Management) 応用方式<sup>[4]</sup>である。

そこで、電子航法研究所では 2007 年から ASAS と FIM 応用方式の調査および研究を開始した。まず、欧米を中心に進められていた ASAS 応用方式の研究開発動向を調査した<sup>[2]</sup>。2008 年からはオランダ航空宇宙研究所 (NLR) と共同研究を実施し、FIM 応用方式の数学モデルを設計して数値シミュレーションによる基礎評価を行った<sup>[5-9]</sup>。これらの基礎研究の結果、FIM 応用方式を適用すると複数の到着機がアイドリングに近い状態で滑走路に連続降下するエネルギー効率の良い運航 (CDO (Continuous Descent Operation):連続降下運航) が実現可能であると示唆された。2010 年には国土交通省が将来の航空交通システムに関する長期ビジョン・CARATS<sup>[10]</sup>を発行し、その中に ASAS 応用方式が導入された。そこで、さらなる ASAS 研究を進めるため、2011 年に “Joint Airborne-spacing Design Evaluation (JADE)” プログラムという国内外の研究機関や大学と連

携した ASAS の研究プロジェクトを立ち上げ、東京国際空港への CDO に FIM 応用方式を適用する運用を模擬したシミュレーション評価を開始した<sup>[11-13]</sup>。2012 年より、NASA Ames 研究所と NASA Langley 研究所が共同で実施している ATD-1 (Air Traffic Management Technology Demonstration-1) プロジェクト<sup>[14]</sup>との連携研究を開始し、FIM 応用方式の近い将来の実運用を仮定して、ASAS を搭載した航空機と搭載していない航空機が同じ空域に混在する交通流を模擬した評価研究を実施している。

本研究発表では、ASAS と FIM 応用方式の概要を説明する。そして、FIM 応用方式を東京国際空港への CDO に適用した評価研究<sup>[12, 13]</sup>および ATD-1 プロジェクトとの連携研究を紹介し、今後の展開を述べる。

## 2. ASAS と FIM 応用方式

### 2.1 ASAS

ASAS とは ADS-B という航空用放送サービスを利用して、機上で周囲の交通流の監視を可能にするシステムのことである。図 1 に ASAS の概要を示す。ADS-B 送信機を搭載した航空機は、機上で ID、高度、速度、位置情報を放送する (ADS-B OUT)。ADS-B 受信機を搭載した航空機は、それらの放送情報を受信し (ADS-B IN)、コックピットに表示したり航空機の制御に利用したりできる。地上では管制官が、ASAS を搭載していない航空機との交通流を監視したり、緊急事態のバックアップ操作を行ったりするために、航空交通流を監視する。ADS-B 受信機の地上局があれば航空機が放送した情報を得ることができる。また、従来通り、レーダーの情報を利用することもできる。

### 2.2 FIM 応用方式

最も研究開発が進んでいる ASAS 応用方式の一つが FIM である。FIM 応用方式は、滑走路

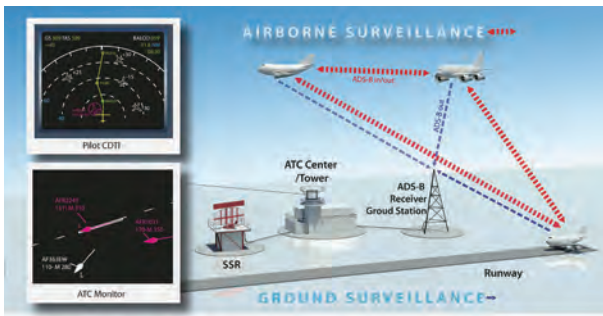


図 1 ASAS の概要



図 2 FIM 応用方式

に到着する際に先行機との間に指定された時間間隔を達成するよう、エンルートやターミナル空域で航空機の速度制御を行う運用である。FIM 応用方式を実行する航空機を FIM 機と呼ぶ。FIM の実行にあたり、まず、FIM 機のパイロットが FIM 応用方式の実行を許可するよう地上の航空管制官にリクエストする。航空管制官は、FIM の実行が可能だと判断すると FIM の実行を許可し、FIM 実行に必要な先行機の情報（ID、予定飛行経路など）と滑走路での目標時間間隔を伝える。FIM 機のパイロットは、航空管制官の指示に従い、FIM 機の速度制御を開始する。FIM 機が搭載している速度制御コマンドの自動生成アルゴリズムは第 4 章で解説する。FIM の実行中は、航空管制官は FIM 機には管制指示を与えない。しかし、何らかの理由で FIM を終了しなければいけない場合、航空管制官が FIM 機のパイロットに FIM の終了を指示することができる。

図 2 に FIM の運用例を示す。FIM 応用方式は、先行機と FIM 機のペアに対して実行する。図 2 では、A 機と B 機、B 機と C 機、C 機と D 機は、それぞれ先行機と FIM 機のペアである。つまり、複数の FIM 機が同じ先行機に対して FIM を実行することはない。先行機と FIM 機

が同じ経路を飛行する必要はなく、それぞれが別々の飛行経路から合流してもよい。先行機には ADS-B を介して飛行情報を送信する ADS-B OUT、FIM 機には ADS-B を介して飛行情報を受信する ADS-B IN の機能が必要である。

FIM 応用方式を実行するために求められる各種性能要件は、現在 RTCA/EUROCAE の合同会議で議論が進んでおり、2014 年に公式文書として発表される予定である。また、2014 年以降も RTCA/EUROCAE 合同会議において FIM 応用方式の発展形(FIM version 2)の議論が進められる予定である。

### 3. 東京国際空港の CDO への FIM の適用

#### 3.1 エネルギー効率の良い降下

東京国際（羽田）空港は、利用者数が国内最大、世界で有数の規模を誇っており、現在は 44.7 万回の発着枠に対応している<sup>[15]</sup>。このような混雑空港において、到着機の定時性を保ちながらエネルギー効率のよい降下を実現できれば、運航コストの大幅な削減が期待できる。

エネルギー効率のよい降下として、航空機がアイドリングに近い状態で滑走路まで連続的に降下する CDO があげられる。（ただし最近では、各々の航空機が理想的なプロファイルで連続降下する意味合いで、Optimized Profile Descent (OPD) と呼ばれる場合が多い。）現行の航空管制システムでも CDO は実施可能であるが、連続降下中は航空機の速度を予測することが難しいため、周囲の航空機との安全性を確保するように航空管制官が機体間隔にマージンを与える可能性が指摘されている。これが単位時間当たりに到着する機数を減らす原因になると懸念されるため、複数機に CDO を適用する状況には至っていない。一方で FIM 応用方式を適用すると、複数の航空機がアイドリングに近い状態で先行機と時間間隔を維持しながら滑走路に到着する、航空交通流全体にとってエネルギー効率の良い降下が実現すると期待されている。そこで本研究では、FIM 応用方式を東京国際空港の到着機に適用した場合に到着の機数を減らさずにエネルギー効率の良い降下を実現できるか、シミュレーション評価を実施している<sup>[12, 13]</sup>。

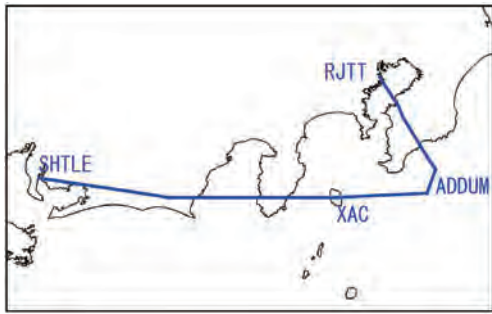


図 3 現行の RNAV 経路<sup>[12]</sup>

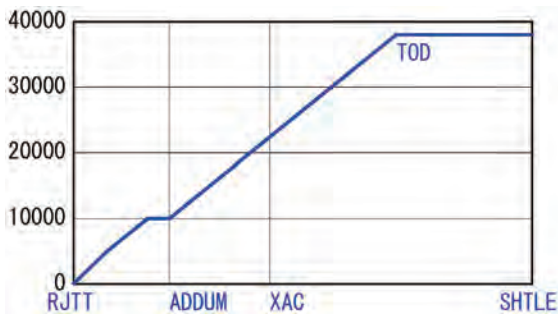


図 4 ADDUM での高度制約<sup>[12]</sup>

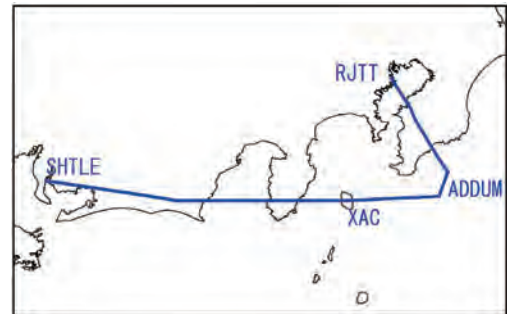


図 5 CDO 飛行経路 1<sup>[12]</sup>

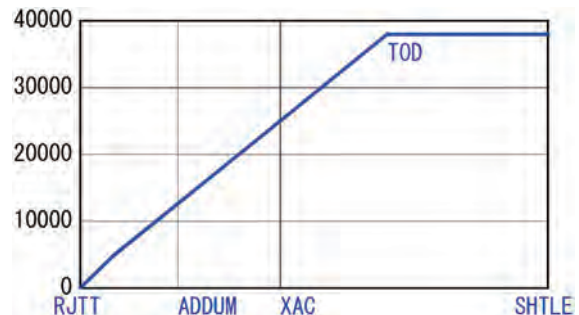


図 6 降下パス（CDO 飛行経路 1）<sup>[12]</sup>

### 3.2 FIM 応用方式を適用した CDO

本研究では、冬の北風運用を仮定し、滑走路 RW34L に着陸する西からの交通流に FIM 応用方式を適用したシミュレーション評価を行った。今回は、FIM を CDO に適用した際の降下性能を評価するために出発機や通過機などの影響は考慮していない。図 3 に、現行の飛行経路の一例を示す。航空機は、西からこの飛行経路に入り、大島から房総半島の上空を降下して羽田空港の滑走路 RW34L に到着する。図 4 に、到着機が ILS（ここでは、滑走路からの 3 度の降下角での誘導を仮定）を受信するまで 2.5 度の降下角で連続降下した場合の高度プロファイルを示している。現行の運用では、ADDUM というターミナルゲートで高度 10,000 フィート、という制約があるため、ADDUM 通過後に巡航飛行が現れてしまい、完全な連続降下にならない。そこで、本研究では新たな到着経路を仮定した。

一つ目は、図 5、6 に示すように、ウェイポイントの位置を変えずに ADDUM での高度制約を省いたものである。二つ目は、図 7、8 に示すように、大島から東京湾を横切って空港に着陸する経路、そして三つ目は、図 9、10 に示すように二つ目の飛行経路に南から合流する飛行経路を追加したものである。この飛行経路上

で FLUTE から RW34L までの飛行距離は 178.182NM である。先行機と FIM 機は高度 38,000 フィートから 2.5 度の降下角を保ちながら連続的に降下する。FIM 機が FLUTE または SHTLE を通過時に、FIM 応用方式による速度制御を開始する。FIM 開始地点を通過する 10～15 分以上前に、航空管制官は FIM 機のパイロットに、先行機と目標とする時間間隔づけを指示する。パイロットは管制官の指示を満たすよう、FIM を実行する。FIM が終了するまで、管制官は FIM 機に指示を与えない。

FIM 応用方式の評価シミュレーションを実施する前に、航空管制官とパイロットにインタビューを行った。まず、管制官の意見を取り入れ、先行機と FIM 機は最大で 3 ペア（4 機）とした。これは、滑走路の閉鎖等の緊急事態が起こった場合に、航空管制官が FIM を中止して管制指示に切り替える際に処理できる最大数だというコメントがあったからである。また、パイロットのコメントを参考に、フラップやギアダウンの操作タイミングを、次節以降に解説するシミュレーション評価に反映した。

### 3.3 SPICA シミュレーターの開発

本研究では、東京国際空港への CDO に FIM

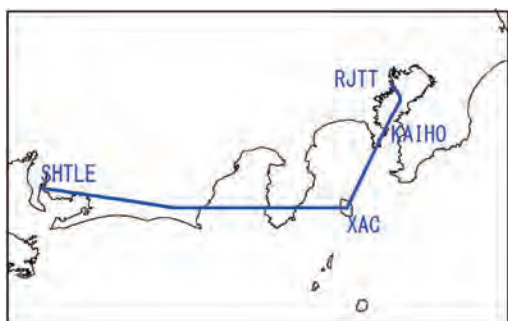


図 7 CDO 飛行経路 2<sup>[12][13]</sup>

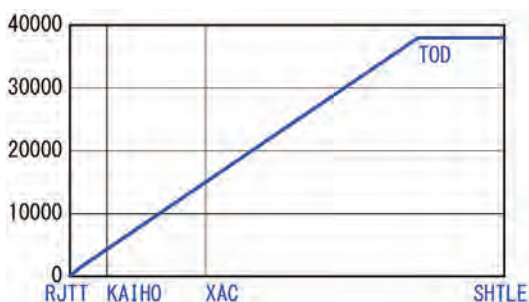


図 8 降下パス（CDO 飛行経路 2）<sup>[12][13]</sup>

応用方式を適用した運航を評価するために、SPICA シミュレーターを開発した。SPICA シミュレーターは、航空交通管理システムにおける将来の運用を模擬した数学モデルをプログラムに組み込み、コンピュータの中でシミュレーションを完結して評価する“ファストタイムシミュレーション”というシミュレーション方法をとっている。一方で、もうひとつのシミュレーション方法は、ヒューマンインザループという、パイロットや管制官が実験に参加し、実際の運用を模擬して操縦や操作を行うシミュレーションである。このシミュレーションを実施するためには、コックピット環境を模擬したフライトシミュレータや管制官のレーダー卓を備えた実験環境が必要である。これを“リアルタイムシミュレーション”と呼んでいる。FIM 応用方式の評価について、SPICA シミュレーターを利用したファストタイムシミュレーションとリアルタイムシミュレーションの連携研究は第 4 章で説明するので、本章ではまず SPICA シミュレーターについて紹介する。

SPICA シミュレーターに搭載している数学モデルは以下の通りである。

● FIM アルゴリズム

FIM を実施中に FIM 機が実行する速度制

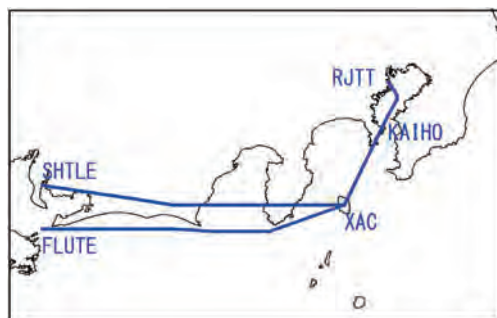


図 9 CDO 飛行経路 3<sup>[12][13]</sup>

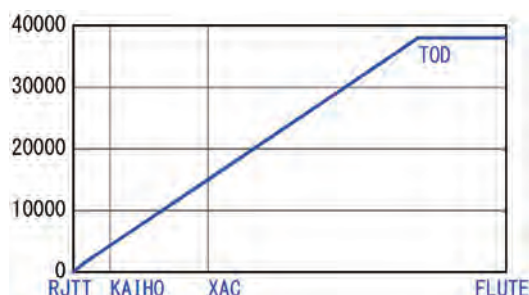


図 10 降下パス（CDO 飛行経路 3）<sup>[12]</sup>

御コマンドの生成アルゴリズムとして、NASA Langley 研究所が開発した ASTAR アルゴリズム<sup>[16][17]</sup>を搭載した。ASTAR アルゴリズムは、トラジェクトリ予測計算と FIM 速度制御則から構成されている。トラジェクトリ予測部分では、先行機と FIM 機の到着時刻を FIM 機の機上で予測するために、現在の位置から飛行計画に基づく到着地点までの経路（トラジェクトリ）を生成し、このトラジェクトリに沿って到着時刻を予測する。そして、トラジェクトリに沿って予測した到着時刻を利用して、先行機と指定された到着時間間隔を満たすように速度制御を行う。このように、到着予測時刻を利用して FIM 機の実行速度制御を行う FIM 速度制御則を Time-to-Go(TTG) 制御則と呼んでいる<sup>[18]</sup>。TTG 速度制御則については、4.2 章で解説する。

● 航空機ダイナミクスと各種制御システム

FIM 機と FIM を搭載していない航空機、両方の飛行をシミュレーションするよう、航空機の 6 軸自由度運動を模擬する中程度の忠実性を持たせたダイナミクス、垂直と水平方向の運動を制御する飛行制御系（VNAV/PATH、VNAV/SPD、LNAV）、エ



図 11 SPICA GUI



図 12 SPICA Viewer (飛行経路表示画面)

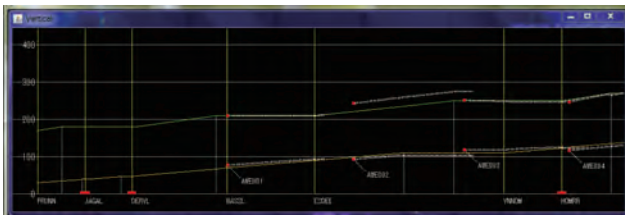


図 13 SPICA Viewer (降下パス/速度表示画面)

ンジンを搭載したモデル [19]を利用した。揚力と抗力の係数は表から読み取り、フラップやギアのアップダウンの影響も考慮している。ボーイング 777、747、737、767、787、エアバス 320 の運動を模擬することができる。

- **航空管制官の指示とパイロットの入力**  
航空管制官の指示および FIM を実行するパイロットの操作を模擬して入力することができる。
- **風**  
風が航空機運動に与える影響を模擬することができる。GSM(Global Spectral Model) から任意の位置と高度に対応する風速と風向を呼び出すことができる。
- **燃料消費量と性能計算**  
燃料消費量および滑走路端で到着機が達成

した時間間隔を算出することができる。

SPICA シミュレーターは、将来的な FIM 応用方式の発展に対応できるよう、設計に工夫を凝らしている。具体的には、パイロットや航空管制官の手順の変更、新しいデータリンクシステムの追加、および新しい FIM アルゴリズムが開発された際などに、モデルを変更してシミュレーション評価を行うことができる。FIM 実行時に必要な情報を入力する GUI(Graphic User Interface)画面(図 11)、シミュレーション実行後にシミュレーション結果を再生できる Viewer 画面(図 12、13)も利用できる。モンテカルロシミュレーションにも対応しており、FIM 実行の際に各種要件を選択し、確率的シミュレーションで到着地での時間間隔付けの性能や燃料効率を評価することができる。

### 3.4 SPICA シミュレーターを利用した評価

SPICA シミュレーターを利用したモンテカルロシミュレーション結果より、東京国際空港への CDO に FIM 応用方式を適用した将来の航空交通を検討した[12][13]。これらのシミュレーション結果より、FIM 応用方式を利用すると複数の航空機が CDO を実行して滑走路に到着したとき、正確な時間間隔付けを達成することが示唆された。これらの評価結果の詳細は、文献[12][13]を参照されたい。

FIM 応用方式を CDO に利用した場合の燃料消費量についても、興味深い考察を得た。図 14 は、ボーイング 777 の実データとシミュレーション結果の燃料消費量を比較したものである[13]。横軸は降下開始地点から滑走路に到着するまでの燃料消費量 (lbs)、縦軸は降下開始地点から滑走路に到着するまでの時間 (seconds) である。図 14 上の AC0、AC1、AC2、AC3 はそれぞれ SPICA シミュレーターを走らせた結果得られた燃料消費量と降下時間の平均値を示しており、先行機と FIM 機の 3 ペアが一つの列を形成しながら到着する際の、先頭を AC0、AC0 機に続く FIM 機を AC1、2 機目の FIM 機を AC2、3 機目の FIM 機を AC3、と表している。他のドットは、日本の空港に理想的な降下で到着したボーイング 777 の降下開始地点から

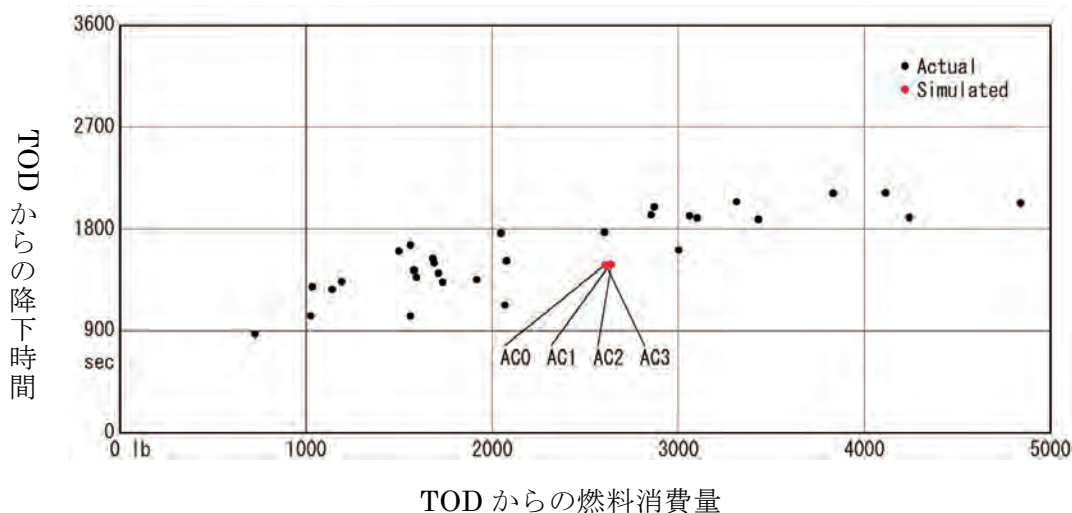


図 14 シミュレーションデータと実データによる B777 の燃料消費量の比較<sup>[12]</sup>

の燃料消費量と降下時間を示している。これらのシミュレーションデータと実データを比較すると、まず、FIM 応用方式を適用した場合も理想的な範囲の燃料消費量を達成することがわかる。FIM 機は、指定された飛行経路上をアイドリングに近い状態で降下しながら、エンジン出力を調整して先行機との時間間隔を速度で制御する。このため、降下開始地点からアイドリングで滑走路まで降下する個々の航空機にとって最適な（燃料消費量を最小化する）飛行にはならないが、それでも理想的な値の範囲内で燃料消費量をおさえている。次に、シミュレーション結果の 4 機の燃料消費量のばらつきは、実データよりばらつきより小さい。これは、FIM 応用方式を適用すると、特定の航空機のみならず、FIM を実行するすべての航空機が燃料消費量を削減する恩恵を受けることを示唆している。FIM 応用方式を利用して複数機の CDO を実行すると、到着時間間隔付けを達成して滑走路の容量を有効活用しながら、交通流全体の燃料消費量の削減につながる可能性があることがわかった。

#### 4. FIM 機と FIM を搭載していない航空機が混在する航空交通流の評価

##### 4.1 ATD-1 プロジェクトとの連携研究

FIM 応用方式を導入する初期の段階では、FIM を搭載した航空機と搭載していない航空機が同じ空域に混在して飛行する状況が現れる。

このような、FIM 機と FIM を搭載していない航空機が混在する近い将来の航空交通管理を評価するため、NASA Ames 研究所と NASA Langley 研究所が共同で実施している ATD-1 プロジェクトにおいて、パイロットや航空管制官が参加したシミュレーション実験が現在進行中である<sup>[14]</sup>。

3.3 節で述べたように、ATD-1 プロジェクトで実施しているようなパイロットや航空管制官が実験に参加して実際の運用を模擬した操縦や操作を行うシミュレーションを“リアルタイムシミュレーション”、SPICA シミュレーターのようにパイロットや航空管制官の操縦や操作を介さず数学モデルを利用したシミュレーションを“ファストタイムシミュレーション”という。リアルタイムシミュレーションの利点は、運用を模擬する忠実性の高さであり、パイロットや管制官の操作性やワークロードコメントを考慮して運用を評価できることである。一方で、シミュレーション回数が限られる点や、個々の構成要素の働きを抽出して評価するのが難しい点が欠点としてあげられる。ファストタイムシミュレーションの利点は、モンテカルロ法を適用して確率的シミュレーションを走らせ、より多くのデータを取得できる点、またモデルを抽出したり各パラメータの値を変更したりしながら運用要素の働きを解析できる点である。しかし、パイロットや管制官の柔軟な意思決定や操作をモデル化することは難しいので、実際の運



図 15 FIM 機のパイロット卓の様子



図 17 FIM 機パイロット卓のディスプレイ



図 16 航空管制卓の様子

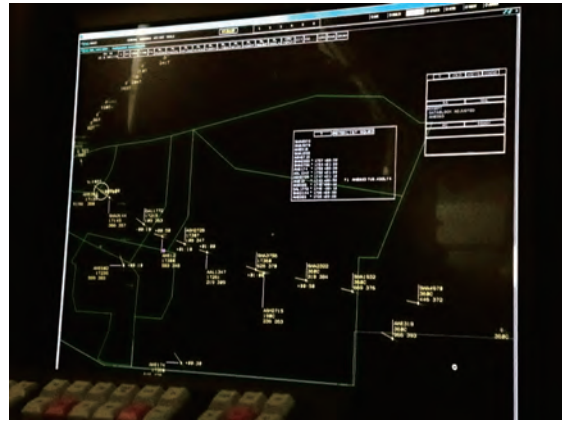


図 18 管制卓（エンルート）のディスプレイ

用を模擬する忠実性は低くなる。そこで、両者を補完するためにリアルタイムシミュレーションとファストタイムシミュレーションの両方を実施して FIM 応用方式を適用した将来の航空管制システムを評価するため、ATD-1 プロジェクトと SPICA シミュレーターを利用したシミュレーションとの連携研究を実施している。

#### 4.2 “Time-to-Go” FIM 速度制御則

図 15-18 に ATD-1 プロジェクトで実施している実験の様子を示す。実験室には、管制卓、コックピットの計器類を模擬した FIM 機のパイロット卓、および FIM を搭載していない航空機のパイロット卓が備え付けられている。FIM 機のパイロットと管制官の音声通信用に開発されたフレゾロジー(管制用語)を利用し、FIM を実施する。図 19 に、FIM 機のパイロット卓のディスプレイとして開発されたフライトシミュレータである ASTOR を説明する。FIM

機には、Electronic Flight Bag(EFB)という外付けのタブレットが搭載されている。この EFB には、FIM 速度制御則が搭載されており、FIM 機の世界速度コマンドを計算して表示する。パイロットは、EFB が計算した速度コマンドに機体の速度を合わせるよう、速度調整のつまみを操作する。将来的に EFB に搭載する FIM 速度制御則は現在研究開発が進んでいる段階であり、ATD-1 プロジェクトでは ASTAR<sup>[16][17]</sup>を利用して評価を進めている。

FIM 速度制御則の設計はまだ発展途上の段階にあるが、現状では Time-to-Go(TTG)速度制御則が主流である。TTG 速度制御則の基本アルゴリズムは下の通りである<sup>[17][18]</sup>。

$$V_{CAS} = V_{CAS}^N + k\{(TTG_{Target} + \Delta) - TTG_{IM}\} \quad (1)$$

(1)式の各パラメータの定義は表 1 の通りである。

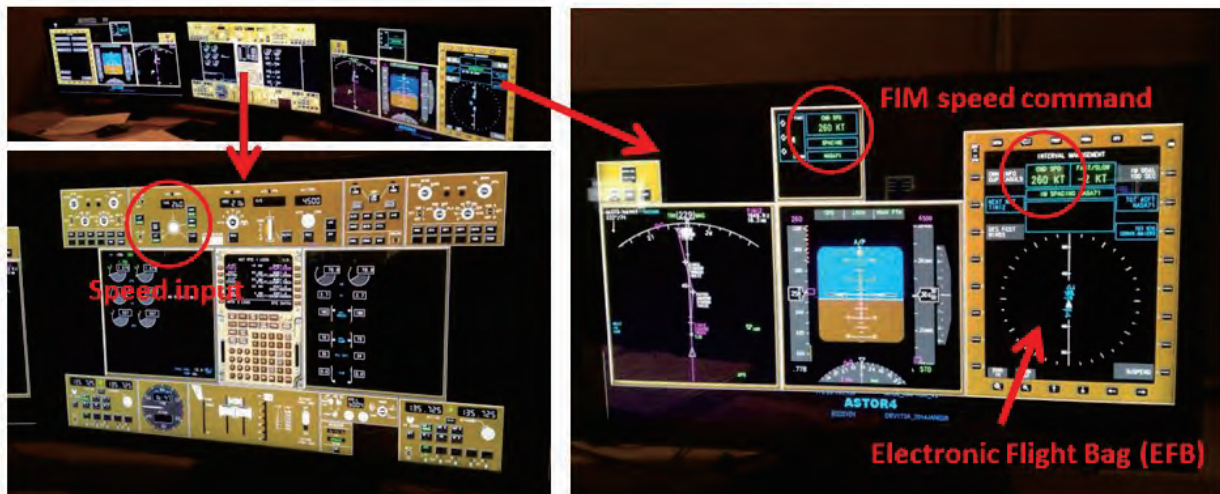


図 19 FIM機のパイロット卓 (ASTOR)

表 1 (1)式中のパラメータ定義

パラメータ	定義
$V_{CAS}$	FIM 機に与える速度制御コマンド
$V_{CAS}^N$	FIM 機に与えられた飛行計画上の速度プロファイル
$k$	ゲイン値
$TTG_{Target}$	先行機が FIM 終了地点に到着するまでの予測飛行時間
$\Delta$	FIM 機が FIM 終了地点に到着する際の先行機と FIM 機の目標時間間隔
$TTG_{IM}$	FIM 機が FIM 終了地点に到着するまでの予測飛行時間

(1)式に示すように、TTG 速度制御則は、FIM 終了地点における先行機と FIM 機の時間間隔付けの予測誤差の項である  $(TTG_{Target} + \Delta) - TTG_{IM}$  を最小にするように FIM 機に与える速度制御コマンド  $V_{CAS}$  を計算する。この誤差項が 0 に近づくと  $V_{CAS}$  は飛行計画上の速度プロファイル  $V_{CAS}^N$  に近づく。

(1)式の解釈を図 20 に補足する。ただし、図 20 は(1)式のゲイン値  $k$  が十分に大きく、かつ  $V_{CAS}$  の上下限值に制限を設けた場合の一例を示している。図 20 に示すように、時間間隔の予測誤差の項がマイナスになれば  $V_{CAS}$  は  $V_{CAS}^N$  より小さい値をとり、プラスになれば  $V_{CAS}^N$  より大きい値をとる。誤差項が 0 に近づけば、 $V_{CAS}$  は  $V_{CAS}^N$  の値にもどる。

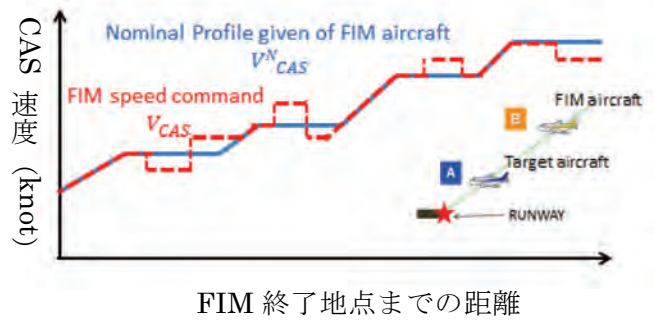


図 20 TTG 速度制御則

#### 4.3 新たな FIM 速度制御則の設計

TTG 速度制御則は、FIM 終了地点において正確な時間間隔付けを達成するように設計されているが、ATD-1 プロジェクトで実施したリアルタイムシミュレーションにおいて、FIM 機のパイロットや専門家により実運用の観点から改良が必要だという指摘を受けた。

まず、FIM 速度制御コマンドの更新頻度が多いケースが報告された。FIM 機のパイロットは FIM 速度制御コマンドが更新される度にスピードつまみを調整するが、これに伴い降下パスが変動するため、スピードブレーキやスラストレバーを調整しながら高度制約を満たす操作も行う。このため、FIM 速度制御コマンドの更新回数が増えると、ワークロードが増え、またエンジンの操作上も理想的ではない。さらに、飛行速度を減速してから増速する操作は、パイ



ロットの操作性の問題だけでなく、燃料消費量が増加するため、好ましくない。

特に、ATD-1 プロジェクトで仮定している FIM 機と FIM を搭載していない航空機が混在する近い将来の運用においては、航空管制官は周りの交通流との影響を考慮しながら FIM 機の先行機に管制指示を与えるため、(1)式中の  $TTG_{Target}$  が変化する機会が多くなる。これに伴う頻繁な FIM 速度制御コマンドの更新を防ぐよう、本研究では NASA Ames 研究所と共同で新たな FIM 速度制御則を設計した。SPICA シミュレーターに設計した FIM 速度制御則を搭載し、評価シミュレーションを継続中である。

## 5. おわりに

本研究発表では、ASAS と FIM 応用方式の概要と、FIM 応用方式を東京国際空港への CDO に適用した研究結果の一部を解説した。そして、本研究が開発した SPICA シミュレーターと、NASA Ames 研究所と NASA Langley 研究所が合同で実施している ATD-1 プロジェクトとの連携研究を紹介した。FIM 速度制御則として、先行機と FIM 機の予測到着時間を利用して FIM 機の速度制御を行う TTG 速度制御則を解説し、本研究が現在取り組んでいる新たな FIM 速度制御則設計の背景を説明した。

FIM 応用方式の実運用に向けた各種要件は 2014 年に公式文書として RTCA/EUROCAE から発行予定であるが、2014 年以降も FIM Version 2 と呼ばれる FIM 応用方式のさらなる発展形の検討が進められる予定である。FIM Version2 では、先行機と FIM 機の到着時間の予測精度を改善するために地上のデータコムの利用が提案されている。データの更新頻度や精度なども考慮し、FIM 速度制御の有効性について SPICA シミュレーターによる検証を続けた。また、東京国際空港に FIM 応用方式による CDO を適用した場合の有効性をさらに評価するため、フライトシミュレータを利用し、パイロットの操作を考慮したより忠実性の高い検証を進めたい。

## 謝辞

本研究を実施するにあたり多大なご協力をいただいた NASA Ames 研究所の Harry Swenson さん、Kevin Witzberger さん、Jane Thippavong さん、NASA Langley 研究所の William Johnson さん、Terry Abbott さん、Bryan Barmore さんを始めとする ATD-1 プロジェクトメンバーの皆様に感謝いたします。

## 参考文献

- [1]RTCA, “DO-312 Safety, Performance and Interoperability Requirements Document for the In-Trail Procedure in the Oceanic Airspace (ATSA-ITP) Application”, June 2008.
- [2]伊藤恵理, “ASAS に関する調査報告書 1 ASAS の概念と Package 1 の応用方式”, 電子航法研究所技術資料, 2009.
- [3]RTCA, “DO-317A Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for Aircraft Surveillance Applications (ASA) System”, December, 2011.
- [4]RTCA, “DO-328 Safety, Performance and Interoperability Requirements Document for Airborne Spacing – Flight Deck Interval Management (ASPA-FIM)”, June 2011.
- [5]Itoh, E., van der Geest, P. and Blom, H., Improved Airborne Spacing Control for Trailing Aircraft, Proc. The 2009 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT2009), 2009.
- [6]Itoh, E., Everdij, M., Bakker, G.J. and Blom, H., Speed Control for Airborne Separation Assistance in Continuous Descent Arrivals, Proc. 9th American Institute of Aeronautics and Astronautics Aviation Technology, Integration, and Operations (AIAA ATIO), 2009.
- [7]Itoh, E., Everdij, M., Bakker, G.J. and Blom, H., Speed Control for Airborne Separation Assistance in Continuous Descent Arrivals, R&D report published by National Aerospace Laboratory NLR Air Transport Safety Institute,

NLR-TP-2010-328, September, 2010.

[8] Itoh, E., Everdij, M., Bakker, G.J. and Blom, H., The Impacts of Surveillance Failure on Airborne Separation Assistance System Based Continuous Descent Approach, Proc. 27th International Council of the Aeronautical Science (ICAS2010), 2010.

[9] Itoh, E., Everdij, M., Bakker, G.J., and Blom H., Effects of Surveillance Failure on Airborne-based Continuous Descent Approach, Journal of Aerospace Engineering, doi:10.1177/09544 1001 142 1995, 226(11), 1470-1480, November 2012.

[10] Japan Civil Aviation Bureau (JCAB), Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems (CARATS), 2010, (<http://www.mlit.go.jp/common/000128185.pdf>).

[11] Itoh, E., Chida, H., Uejima, K., Nishinari, K., Everdij, M., Bakker, B., Blom, H., An Overview of Airborne Time-spacing Research in JADE program, Proc. International Conference on Application and Theory of Automation in Command and Control Systems (ATACCS 2012), 2012.

[12] Itoh, E. and Uejima, K., Applying Flight-deck Interval Management Based Continuous Descent Operation for Arrival Air Traffic to Tokyo International Airport, ATM seminar 2013, 2013.

[13] Itoh, E., Uejima, K., Kakichi, U. and Suzuki, S., Modeling and Simulation Study on Airborne-based Energy Saving Arrivals to Tokyo International Airport, AIAA Guidance, Navigation, and Control(GNC) 2013, 2013.

[14] Thipphavong, J., Swenson, H., Jung, J., Witzberger, K., etc., “Evaluation of the Controller-Managed Spacing Tools, Flight-deck Interval Management and Terminal Area Metering Capabilities for the ATM technology Demonstration #1”, ATM seminar 2013, 2013.

[15] 国土交通省ホームページ

<http://www.mlit.go.jp/common/000235283.pdf>

[16] Abbott, T., “A Trajectory Algorithm to Support En Route and Terminal Area Self-Spacing Concepts”, NASA/CR-2007-214899, 2007.

[17] Abbott, T., “An Overview of a Trajectory-based Solution for En Route and Terminal Area Self-Spacing to Include Parallel Runway Operations”, NASA/CR-2011-217194, 2011.

[18] RTCA SC-186 WG 4/EUROCAE WG51 SG3, “WP207-11 Sample Algorithm Appendix”, revision 0.1, 2013.

[19] Van der Geest, P. J. The AMAAI modeling toolset for the analysis of in-trail following dynamics. Deliverable D2: description and user guide, NLR/CR-2002-112, 2002.