

連載解説



最近のシミュレータ開発

1. 航空管制シミュレータの開発事例とその応用について†

東 福 寺 則 保††

1. ま え が き

東京国際空港の新ターミナルビルが1993年9月に運用を始め、1994年9月には関西国際空港が開港し、公共輸送における航空輸送の比重はますます高まっている。航空交通は他の輸送手段と比べて非常に高速であり、かつ、空中では止まらないという特徴を有するが、この航空交通の安全性や流れの効率を維持するシステムが航空管制である。我が国の航空管制は1950年代に開始されたが、その後、航空需要の増加とともに、新しい電子技術や情報処理技術を活用して発展してきた。現在は我が国の国土全域をレーダで監視し、全国規模のレーダ情報処理システムや飛行計画情報処理システムという実時間計算機システムを用いて、交通管制が行われている。しかし、レーダ情報や飛行計画に基づく交通予測やどのように交通整理を行うかの判断、および判断結果をパイロットに伝達するという交通管制の中核機能は依然航空管制官がすべてを行っている。このため、航空管制のシステム解析や新しい管制方式と空域設計にともなう評価では、解析モデルや高速シミュレーション・モデルによる検討に加えて、航空管制シミュレータを用いた航空管制官を系に含む実時間シミュレーション実験が必須とされている。そこで、筆者らは日本の航空管制の特徴に合った試験研究用航空管制シミュレータの開発研究を行い、さらに、同シミュレータを用いた各種の実験を行ってきた。

本稿では、まず航空管制の概要を説明し、シミュレータ開発で必要になるモデル化について述べ

る。次に、シミュレータの性能や機能、および解析機能について概説する。さらに、同シミュレータの応用性に関して、シミュレーション実験事例を説明し、最後に、今後の技術課題を展望する。

2. 航空管制の概要とモデル化

2.1 航空管制の概要

航空管制は空港面や空港の周辺空域を管制するターミナル管制、および空港と空港の中間の部分の管制する航空路管制に大きく分かれる。現在はレーダを用いた管制が主流であり、一般にレーダ管制と呼ばれる。レーダ管制は空港の周辺空域や日本の国土上空とその周辺洋上の広い空域に対して行われる。この広い空域は一カ所で一元的に管制しているのではなく、空港ごと、また、航空路管制では約30のセクタと呼ばれる単位に空域を細分化して、それぞれに管制官チームを配置し、隣接する他の空域の管制官と連絡調整を行いながら、自己の責任空域内の航空交通を独自の判断で管制する。一方、航空機は予定経路や巡航高度・速度などを大まかに定めた飛行計画に基づき、さらに細かい高度や速度や針路などの管制指示を管制官から受けて、出発空港から目的空港まで飛行する。

図-1はあるセクタのレーダ管制を制御系の形で示したものである。風、温度、および密度が変化する大気の中を飛行する航空機の位置情報をレーダで取得し、さらに計算機で処理して、実時間のレーダ表示情報を管制官に提供する。管制官は時々刻々変化する航空機の位置や飛行計画情報を記載した運航票をもとに将来の交通状況を予測し、セクタの責任空域に待ち行列論というランダム到着に近い形で入域する航空機間に安全を維持するために必要な機間間隔を付けるため、また、効率的な流れを維持するためにどのようにしたら

† A Development of Air Traffic Control Simulator and its Applications by Noriyasu TOFUKUJI (Evaluation Division, Electronic Navigation Research Institute, Ministry of Transport).

†† 運輸省電子航法研究所電子航法評価部

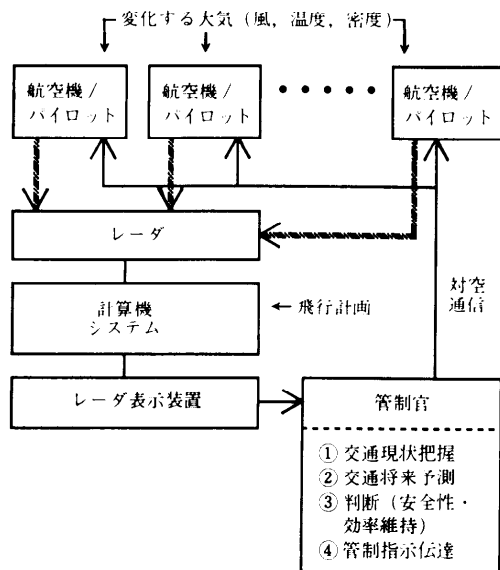


図-1 航空管制におけるレーダ管制の制御系

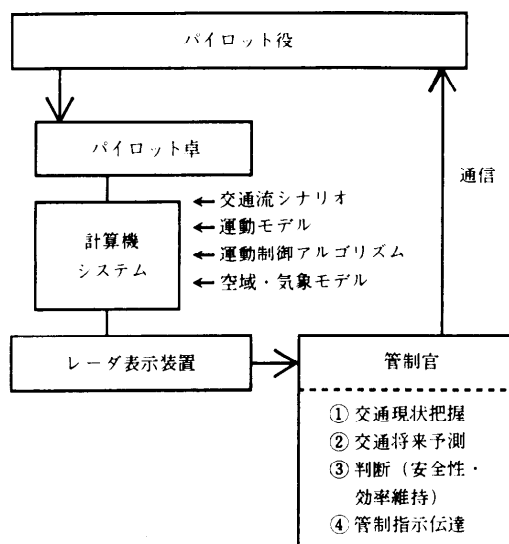


図-2 航空管制シミュレータの制御系

よいかを判断し、対空通信でパイロットに管制指示を伝達する。機間隔を航空管制では管制間隔と呼び、水平距離間隔 5 NM や 10 NM (NM は “Nautical Mile,” 日本語で海里の略語で、1 NM $\approx$ 1.85 km), および垂直間隔 1000 ft (1 ft $\approx$ 0.3 m) などが用いられる。

2.2 モデル化

航空管制シミュレータの開発では、図-1 に示した制御系を計算機システムを中心として実現す

航空機呼び出し符号		機種	
ANA 260		B 747	
定点列	予定通過時刻 (時：分)	予定通過高度 ($\times 100$ ft)	指示対気速度 (ノット)
P_1	T_1	Z_1	V_1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
P_i	T_i	Z_i	V_i
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
P_{n-1}	T_{n-1}	Z_{n-1}	V_{n-1}
P_n	T_n	Z_n	V_n

図-3 交通流シナリオの例

ることになる。図-2 はシミュレータの制御系を示したものである。現実には多数機を飛行させることは不可能であるので、計算機内でターゲットを発生させ、その移動を制御し、レーダ表示画面に表示する。管制官はレーダ表示画面から航空交通の現状把握を行い、管制作業を模擬することになる。また、実際のパイロットに代わりパイロット役が配置し、管制官からの管制指示を受けて、パイロット卓からターゲットの操縦指示を入力する。

(1) 交通流シナリオ

計算機でターゲットを発生させて、その動きを制御し、レーダ表示画面に表示するときに基本となるものが交通流シナリオである。交通流シナリオは、図-1 の飛行計画に相当するモデルである。図-3 に 1 機分の交通流シナリオ・モデルの一部を示す。飛行経路は、飛行計画データと同様に定点列 ($P_1 \sim P_n$) で定義し、定点ごとに予定通過時刻 T_i 、予定通過高度 Z_i や指示対気速度 V_i などが与えられる。シミュレーションでターゲットは P_1 で発生し、以後、 P_i で定める Z_i と V_i を順次目標値として P_n まで移動する。この間にターゲットは直線運動、また、進路方向が変化する部分では曲線運動を行うことになる。ターゲットの位置更新は航空路管制用では 10 秒ごと、ターミナル管制用では 4 秒ごとに行われる。図-2 に示したように、シミュレータでは交通流シナリオに加えて、航空機の運動モデルや運動制御アルゴリズム、空域・気象モデルなどが必要になる。

(2) 航空機の運動モデルなど

図-1 や図-2 に示したように管制官はレーダ表示画面のターゲットの動きを見ながら管制しているので、まず、航空機を質点と見なす。次に、速度に関しては種々の定義がある¹⁾。航空機は速度

計は空気に対する相対速度，すなわち，対気速度を測定する。対気速度は，ピトー静圧管と対気速度計を組み合わせた装置で測定される。速度計の値が指示対気速度であるが，同じ指示値でも空気密度により，高度が高くなるほど，攪乱されていない大気との相対速度を表す真対気速度は速くなる。真対気速度に風成分が加わり，地面に対する速度，すなわち，対地速度となる。レーダ表示画面に表示されるターゲットの動きは対地速度により変化する。管制官はパイロットに指示対気速度を指示するが，指示対気速度と真対気速度の関係は，標準大気条件において，高度が1000 ft上がるごとに真対気速度が約2%増加するという近似式が使用できる。シミュレータでは標準大気の近似式を用いている。風モデルは最大10層の高度層ごとに風向・風速データを与えるものである。

速度指示を含み航空機の運動に介入する管制指示はある目標値を設定し，それを実現する操作を指示する形をとる。例として，「高度 z が16,000 ftになるように降下，針路 θ が60度になるように右旋回，または指示対気速度 v が250ノットになるように減速」という形で管制指示が伝達される。これらの指示は以上のことから明らかなように，いずれも航空機の世界速度ベクトルを制御することに関係する。

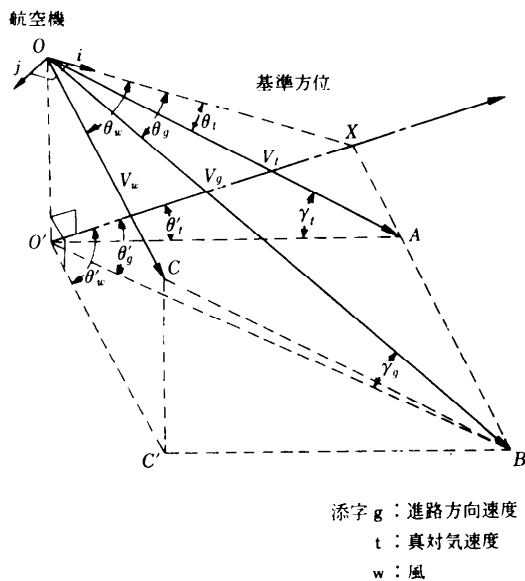


図-4 航空機の運動に関するベクトル²⁾

図-4は，航空機の運動に関する速度ベクトルを示したもので，ベクトル表示 V_g は進路方向速度ベクトル， V_t は真対気速度ベクトル，および V_w は風ベクトルを表す。 V_w は地表面に平行として，その大きさと方向は高度により変化すると仮定する。いま，便宜上OABCと同一平面で基準方位（航空管制では磁北を用いる）を $\overline{OX}$ とし，その方向の単位ベクトルを i ，直交方向の単位ベクトル j とすると， V_g ， V_t ，および V_w は次式で表される。

$$V_g = v_g \cos \theta_g \cdot i + v_g \sin \theta_g \cdot j \quad (1)$$

$$V_t = v_t \cos \theta_t \cdot i + v_t \sin \theta_t \cdot j \quad (2)$$

$$V_w = v_w \cos \theta_w \cdot i + v_w \sin \theta_w \cdot j \quad (3)$$

ここで， v （添字 g, t, w ）は速度ベクトルの大きさ， θ （添字 g, t, w ）は平面OABC上での $\overline{OX}$ からの方位角を表す。図中の θ' （添字 g, t, w ）は水平面上での方位角， γ_g は対大地の径路角， γ_t は対対気径路角である。

さて，航空機の位置は対地速度により変化する。図-4の関係から対地速度は V_g の水平成分 $\overline{OB}$ であり，次のようにして求められる。

$\overline{OB} \equiv v_g'$ として，三角形O'ABに余弦公式を適用すると，

$$v_g' = \{v_t^2 \cos^2 \gamma_t + v_w^2 - 2v_t v_w \cos \gamma_t \cos(\pi + \theta_t' - \theta_w')\}^{1/2} \quad (4)$$

さらに， $v_t' \equiv v_t \cos \gamma_t$ ，速度比 $\chi' \equiv v_w / v_t'$ とすると，

$$v_g' = v_t' \{1 + \chi'^2 + 2\chi' \cos(\theta_t' - \theta_w')\}^{1/2} \quad (5)$$

となる。また，式(5)の θ_t' は三角形O'ABに正弦公式を適用して，

$$v_t \cos \gamma_t \sin(\theta_g' - \theta_t') = v_w \sin(\theta_w' - \theta_g') \quad (6)$$

となり，変形すると，

$$\theta_t' = \theta_g' - \sin^{-1} \{ \chi' \sin(\theta_w' - \theta_g') \} \quad (7)$$

と表される。式(7)で得られた θ_t' を式(5)に代入して対地速度が求まる。式(5)と式(7)はターゲットの運動を表すモデル式である。運動制御アルゴリズムでは，大気条件が変化する3次元空間の中で，交通流シナリオの2点間の方向に V_g が沿うように， V_t を制御することになる。これらの計算処理は前述のように一定時間間隔（最大10秒）で行われる。

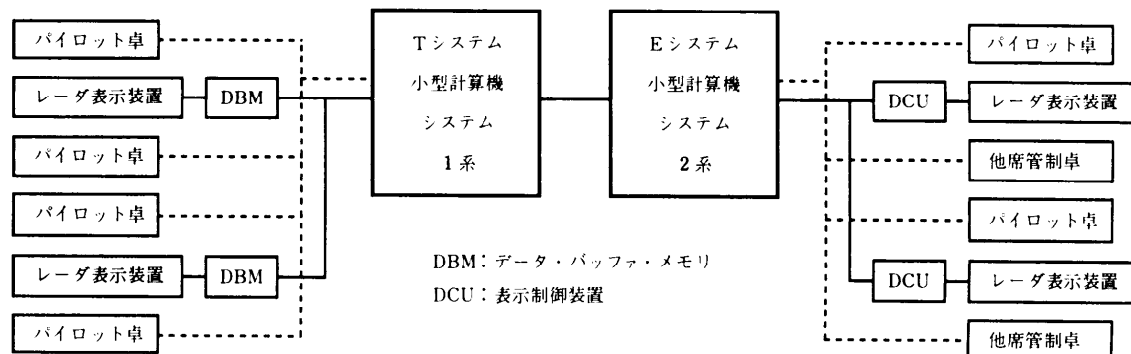


図-5 試験研究用航空管制シミュレータのシステム構成

3. シミュレータの性能・機能

3.1 システム構成

試験研究用シミュレータは航空路管制シミュレータ（以下、Eシステム）とターミナル管制シミュレータ（以下、Tシステム）で構成される。図-5にシミュレータのシステム構成を示す。いずれもレーダ表示装置2系、パイロット卓を有する。2.2で述べたようにレーダ表示装置の前には管制官が配置し、パイロット卓に配置したパイロット役に管制指示を伝達する。パイロット役はパイロット卓からターゲットの操縦指示を入力する。Eシステムのレーダ表示装置は1つのセクタに対応し、他席管制卓はそのセクタの周辺空域であたかも管制が行われているように管制官役が配置し、ターゲットを制御するものである。Eシステムは航空路レーダ管制、Tシステムはターミナル・レーダ管制の運用方式に適合するように設計した。それぞれ異機種の計算機システム（演算処理速度：約1 MIPS）を使用しており、E・Tシステムの単独と同時運用のシミュレーションが行える。

3.2 シミュレーション空域と同時処理機数

図-6はシミュレーション空域、すなわち、計算機内の仮想空域の例を示す。Eシステムは最大半径で400 NM、Tシステムは最大半径で100 NMである。図-6の例は関西国際空港を中心としたシミュレーション空域を示す。同時処理機数はEシステムが最大200機、Tシステムが最大60機であり、目安として、現状の交通量の2倍程度までのシミュレーションを行えることを考えた。最大処理機数の条件の中で最大1000機まで

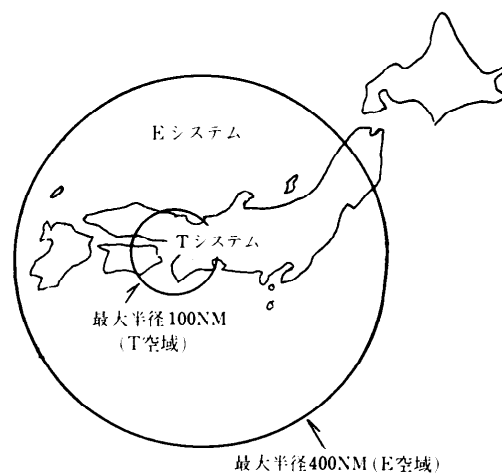
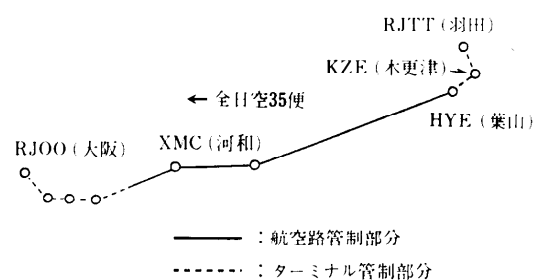
図-6 シミュレーション空域の例³⁾

図-7 交通流シナリオの飛行経路例

ターゲットを連続的に発生できる。

3.3 環境データ

シミュレーション環境を設定するデータとしては、交通流シナリオのほかに、

- ① 定点データ
- ② 空域境界線データ
- ③ 航空機特性データ

④風データ

などが必要になる。①は飛行経路の位置決め、②は航空路やセクタ境界線などのレーダ表示マップ、および③と④は航空機の運動制御に用いられる。

3.4 交通流シナリオとターゲット制御

図-7は交通流シナリオの飛行経路の例を示したものである。全日空35便は羽田空港を出発して、羽田ターミナル管制の管制を受けて、第2定点である木更津に向かう。次に木更津の手前で葉山に向けて旋回し、上昇・加速を続ける。以後、前述のように各定点の高度や速度を目標値として飛行し、航空路レーダ管制の管轄下に入る。そして、河和（知多半島上空）を通過後に、大阪空港のターミナル管制の管轄下に入り、最終的に大阪空港に着陸する。このようなシナリオに従う自動制御をシナリオ制御と呼ぶ。高度・針路・速度制御は実際に近い飛行を模擬するため、目標値を実現する制御順などで複雑になる。基本的には、上昇・降下、旋回、加減速は一定変化率の制御であり、航空機特性データで機種または機種グループごとに標準変化率や最大変化率を定めている。

さて、空港や航空路の合流点に向けて複数の方向から航空機が飛来するが、その交通整理のために管制官は管制指示をパイロット役に伝えて、パイロット役は操縦指示を入力するが、そのターゲットはそのときにシナリオ制御モードから手動制御モードに代わる。以後、管制指示に従った操縦指示により、ターゲットの動きが制御される。図-5のシステム構成でセクタやターミナル管制の組合せは立ち上げ時にパラメータで設定できるが、一例を示すと、E・Tシステムの組合せで、大阪湾上空から羽田空港への着陸までの管制作業を模擬できる。

3.5 解析機能

シミュレータでは、

①航跡データ

②管制官のレーダ表示装置入力

③パイロット卓の操縦指示入力

などのデータを実時間で磁気媒体に記録できる。そこで、航跡の4次元（3次元空間+時間）解析、操縦指示数や管制官の入力数などの解析を行えるソフトウェアを各種開発している。これらにより、単位時間当たりや同時に管制した機数、操縦

北海道・東北方面から

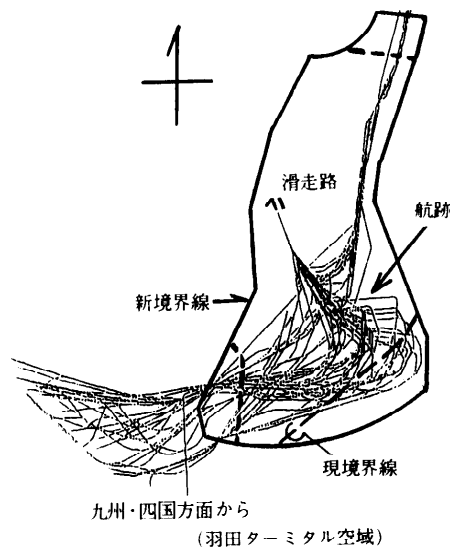


図-8 航跡図の例

指示に対応する管制指示数などを求めることができる。

4. 応用性について

他の交通システムと同様に、航空管制でも交通容量、すなわち、単位時間当たりでどの程度まで交通量を処理できるかは非常に重要な問題である。また、航空需要の増加に対処した関西国際空港の新設や羽田空港の機能拡張などの空港整備計画にともない空域や飛行経路を検討・設計し、事前にその妥当性を評価する必要がある。そのため、航空管制シミュレータを各種のシミュレーション実験に用いてきた。実験は、実験対象の空域の管制業務資格を有する管制官の参加・協力を得て行う。E・Tシステムの同時運用のときは、管制官やパイロット役などの実験支援者が約20名ほどで1つの交通流シナリオに従ってシミュレーションを行う。交通流シナリオは現実的で、かつ、将来に想定される交通環境を生成するため、実際の飛行計画データを入力データとして、計算機処理で作成する。これにより、数百機分のシナリオや新しい空域・飛行経路のシナリオを数分程度で生成できる⁹⁾。

航跡データはシミュレーションでどのような管制処理が行われたかを的確に表すデータであり、実験後のデータ解析は主に航跡データをもとに行

う。図-8は羽田空港のターミナル空域の実験結果で羽田空港への到着機の航跡を1機ずつ重ね書きしたものである。交通流シナリオは羽田空港の機能拡張が完了後（2000年頃に年間23万回の離着陸が計画されている{1993年は約20万回}）を想定したものを使用した。外側の実線は機能拡張後を想定して設計した羽田ターミナル空域の責任分担空域の境界線を表す。実線内部の太い破線は現行の同空域の境界線を表す。より多くの航空機を管制するために、実線では南側空域などが拡張されている。羽田空港へは南北2方向から到着機が飛来する。同一方向からは前述のように前後機で一定機間間隔が付けられているが、2方向間は独立であり、同時にターミナル空域に入域できる。そして、最後は1本の滑走路に着陸する。着陸直前の最終進入時には連続する2機間に5NM程度の機間間隔を付ける必要がある。このため、レーダ表示画面を見ながら管制官は迂回経路などを指示し、到着機を誘導する。

図-8は機能拡張後の到着機を拡張された空域を目一杯に使用して、きれいに誘導されていること、また、機能拡張後は拡張された空域が必須であることを明確に示す。もし、交通量と空域の大きさが適合しないと、境界線を逸脱してしまう到着機が生じて、その場合は空域の再検討が必要となる。

このように実験では航跡データを解析・検討し、空域・飛行経路を再設計し、評価するという作業を繰り返して行う。これまでに航空路管制やターミナル管制に関して、種々の空域環境を設定して400回（500時間以上）以上の実験・評価を行ってきた。シミュレーションのモデル化の妥当性や有効性は航空管制の場合は、管制官の評価によることが一般的である⁶⁾。実験に参加した管制官からは高密度で新しい空域・飛行経路の実験を効果的に行えるとの評価を得ている。

5. 今後の技術課題について

航空管制シミュレータによる実験は多数の実験要員を必要とする。特に、パイロット役は同時に10機程度のパイロットの役割を受け持ち、それぞれのターゲットに対する操縦指示を入力するため、作業負荷が高い。その意味では、音声認識技術を応用して、管制官の管制指示を直接計算機シ

ステムに直接入力できれば、パイロット役なしで実験をより効率的に行える。航空管制シミュレータの開発当初に音声認識技術をシミュレータに応用する試みも行った⁷⁾。単語単位の認識率は90%を超したが、文章として英文で連続する数字（便名や指示高度など）を含み、かつ、航空機の安全に直結する管制指示の場合には、文章単位で99%以上が望まれる。この意味で、より認識率の高い音声認識装置の出現が望まれる。

本稿では空域のレーダ管制に関するシミュレータについて述べたが、航空管制では管制塔から空港面を目視で管制する飛行場管制業務がある。飛行場管制のシミュレーションを考えると、管制塔から見える風景と航空機が離着陸する状況の模擬が必要になる。従来は風景画像処理が難しく、良いシミュレータがなかったが、近年仮想現実生成技術が発展し、スクリーンに風景画像を投影できるようになった。当所では飛行場管制シミュレーションのため、360度の視界を有する仮想現実生成施設を開発・整備中であり、1995年前半頃からその試験的運用を始める計画である⁸⁾。

6. ま と め

本稿では、航空管制シミュレータの開発事例や応用実験事例について解説した。航空管制は非常に複雑で大規模システムであり、かつ、航空管制官という人間要素が中枢機能を担っているため、人間を系に含むシミュレーション実験は必須である。社会的・経済的な発展にともなう航空需要の増加に備えて、航空管制システムを改善して行くには、さらに試験研究用シミュレータの拡充と有効利用が必要である。シミュレータとしては電子技術や情報処理技術の成果を積極的に応用し、より高性能化・高機能化を図って行く必要がある。

おわりにシミュレータ開発では日本電気(株)と三菱電機(株)の技術者の方々に多大な協力をいただいた。多くの航空管制官には高密度な交通環境で過負荷な実験に積極的に参加・協力をいただいた。これらの関係各位に厚く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 比良二郎：飛行の理論，廣川書店，pp. 83-85 (July 1979)。
- 2) 東福寺則保：進入管制シミュレーション・モデルの一検討，信学論B Vol. J 65-B, No. 5, pp.

- 547-554 (May 1982).
- 3) 東福寺則保: 航空管制ダイナミック・シミュレーションと交通容量推定, 日本航海学会誌, 第103号, pp. 406-413 (Mar. 1990).
- 4) 東福寺則保: 航空管制ダイナミック・シミュレーションのためのターゲット制御法, 信学論B-II, Vol. J 76-B-II, No. 1, pp. 38-44 (Jan. 1993).
- 5) 東福寺則保, 上野 徹, 山口昌孝: 航空管制ダイナミック・シミュレーションのための交通流シナリオ作成法, 日本シミュレーション学会誌, 第8巻第3号, pp. 45-52 (Sep. 1989).
- 6) Tobias, L., Volckers, U. and Erzberger, H.: Controller Evaluation of the Descent Advisor Automation Aids, NASA-TM-102197 (June 1989).
- 7) 沖重芳久, 東福寺則保: 航空管制シミュレーションへの音声処理技術の応用について, 電子航法研究所報告, No. 50 (Oct. 1985).
- 8) 塩見格一: 仮想現実感を利用した飛行場管制シミュレーション施設の構成と運用計画, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 42, No. 491, pp. 710-717 (Dec. 1994).
- (平成7年1月12日受付)

**東福寺則保**

昭和43年電通大・電気通信・電波通信学科卒業, 昭和47年同大大学院修士課程修了。同年運輸省電子航法研究所入所。以来, 航空管制システムの解析・評価に関する研究に従事。現在, 同所電子航法評価部長。工博。電子情報通信学会, 日本航空宇宙学会, 日本航海学会, 日本シミュレーション学会各会員。

