

6. RNP AR と従来方式の混在環境の管制リアルタイムシミュレーション

航空交通管理領域 ※天井 治, 松岡 猛

1 はじめに

航空交通管制（以下、航空管制）では、計器気象状態（Instrument Meteorological Conditions : IMC）においても航空機が滑走路に安全に着陸できるように計器進入方式が定められている。計器着陸装置（Instrument Landing System : ILS）を用いた進入方式は計器進入方式の一つである。

近年、新しい計器進入方式として、航空機の優れた性能を十分に生かせる RNP AR (Required Navigation Performance - Authorization Required : 特別許可を要する航法性能要件) 進入方式¹⁾が開発され、米国では 100 を超える空港に設定されている。日本でも効果が見込まれる空港から順次導入され、平成 27 年 4 月現在 16 空港に設定されている。山などの地形的な制約から ILS 進入方式を設定出来ない場合でも、RNP AR 進入方式では曲線進入を用いて経路を設定できる。また、最低降下高度を低くでき、より低視程時でも着陸が可能となる。有視界気象状態（Visual Meteorological Conditions : VMC）時しか着陸できなかった滑走路にも IMC 時も着陸が可能となり、就航率向上に寄与している。RNP AR 進入方式では自由度の高い経路設定が可能となり、経路短縮による燃料削減や飛行時間の短縮、騒音を考慮した経路設定等が期待できる。

安全で効率的な航空機の運航のために航空機相互間の最小安全間隔（管制間隔）の基準が定められている。管制官がレーダ画面上で航空機の交通状況を把握して間隔を確保するレーダ間隔の基準は、レーダアンテナから 40 NM

(Nautical Mile : 海里 (1 NM=1,852 m)) 以内では 3 NM, それ以遠では 5 NM である。後方乱気流を考慮した場合には最大で 8 NM 必要となる。

ターミナル管制官はレーダ画面上で航空機の動きを把握することにより、通常、時間的余裕のある進入の初期～中間段階でレーダ誘導などの方法で順序付けと間隔設定を行い、滑走路近傍の最終段階では航空機同士の前後間隔のみに注意すれば良いように航空機を実際に線上に並べて管制を行う。ここで、レーダ誘導とは、管制官がレーダ画面上で航空機の動きを見ながらパイロットに飛行方向等を指示することによって、航空機を誘導することである。

ILS 進入方式では、空港に設置された装置からの電波を用いて、パイロットは水平および垂直方向のガイダンスを得ることができる。原理上 ILS 進入方式では滑走路手前で 6 NM 程の直線飛行を必要とする。一方、RNP AR 進入方式は、全地球航法衛星システム (Global Navigation Satellite System : GNSS) の高精度測位情報と気圧高度を用い、横方向の経路誤差 0.3 NM (95% 値) 以下の航法精度と RF (Radius to Fix) Leg と呼ばれる円弧旋回を有する航法機能に基づく進入方式で、航空機の要件、運用手順、乗員訓練等の要件について特別な航行許可を要する。RF Leg は ILS 進入方式では実現できない滑走路近傍における曲線進入を可能とする。図 1 に ILS 進入方式と RNP AR 進入方式のイメージを示す。

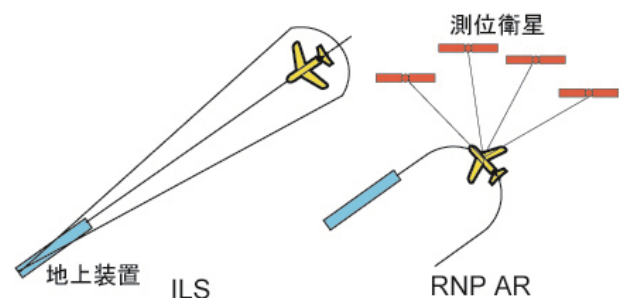


図 1 ILS 進入方式と RNP AR 進入方式

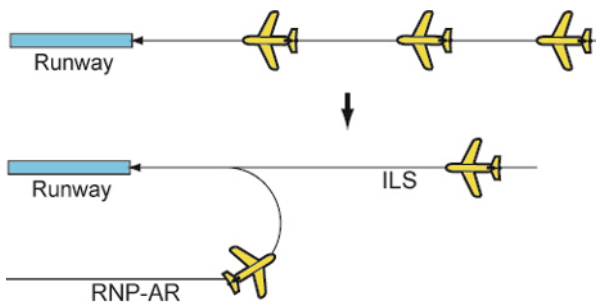


図2 管制の困難度

これらの ILS 進入方式と RNP AR 進入方式による滑走路近傍での曲線進入とが同一滑走路に対して同時に実施される場合は、管制官は、異なる方向から現れて滑走路の手前で合流する各航空機の到着時刻を予測して順序づけを行い、管制間隔を確保することになる。これは、着陸までに時間的余裕が少ない滑走路近傍においての従来の線上ではなく平面に対する思考となり、また飛行時間の誤差による予測性の低下もあり、処理機数が増えると管制の困難度が上がると考えられる。図2にイメージを示した。

先行研究として、平行滑走路における ILS 進入方式と RNP AR 進入方式の同時運用^[2]に関する研究や米国の Phoenix 空港を模擬した同時運用のシミュレーション^[3]の報告等がある。前者に関し、日本には平行滑走路のある空港は少なく、現在のところ、単一滑走路での運用を模擬すべきと考える。後者に関しては同一滑走路での同時運用であるが、平行滑走路におけるシミュレーションであり、詳しいシナリオ等が不明なこともあり、単一滑走路にそのまま適用するのは無理があると考えられる。このため我々は、幾つかの進入方式の同一滑走路における混合運用の安全性と実現方法を研究している^{[4],[5]}。

2014 年度後半に、同一滑走路に対して ILS 進入方式と RNP AR 進入方式が同時に出現する運用の可能性について、航空管制リアルタイムシミュレーション実験を行った。本稿では、その

実験の方法と得られた知見等を報告する。

2 混合運用について

混合運用の概念を図3に示す。図の様に、同一滑走路に、例えば方式1~3の3つの進入方式が設定され、方式1または方式3のような直線進入を実施する航空機と、方式2のような滑走路近傍における曲線進入を実施する航空機とが同時に出現するような運用を混合運用と呼ぶ。

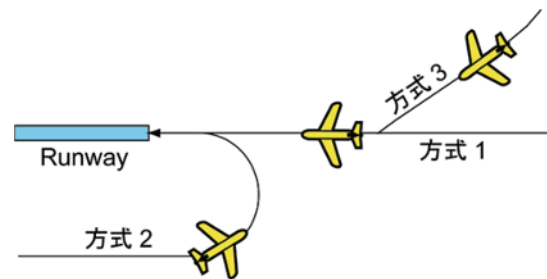


図3 混合運用の概念

第1章で述べたように、混合運用においては、管制官は合流地点における各航空機の到着時刻を正確に予測して航空機の順序付けを行い、必要に応じて航空機の色度調整、針路指示等を行い、合流地点での管制間隔を確保しなければならない。

3 航空管制リアルタイムシミュレーション

混合運用において、実際にどの程度の交通流密度、混合率に対する処理が可能か不明である。また、どのような運用形態が必要か、何に注意すべきか分からない。



図4 シミュレーションの概要

このため、航空管制リアルタイムシミュレーションを行い、混合運用時の1時間当たりの機数や混合率などを変化させて管制官のワークロードに関する情報を収集することにした。シミュレーションは複数台のパソコンを用いた簡易形シミュレータで行った。低コストのシミュレータ開発は文献[6]等で行われているが、本シミュレータはシナリオを混合運用に特化したことに特徴がある。図4にシミュレーションの概要を示した。サーバ・パソコンではシナリオに従った航空機の出現、航空機の軌道計算等を行わせた。また、管制官役とパイロット役とにそれぞれクライアント・パソコンを割り当てた。管制官役はターミナル管制業務の経験者が行った。

管制業務上、一方が滑走路近傍での曲線進入である場合でもターミナル管制官が責任を持って飛行場管制席（タワー）移管時の間隔付けを行うとのことであり、ここではターミナル管制官の業務のみを対象とした。また、出発機と到着機は安全に分離できていると仮定し、出発機は無視した。

管制官役には事前に用意したシナリオに従って画面に表示される交通流を処理し、評価を行ってもらった。複数人の管制官役に実験に参加してもらった。パイロット役には、管制官役の発出する管制指示を復唱し、シミュレータに管制内容伝えるために管制指示をコマンドとして入力してもらった。また、RNP AR 運航に対するパイロットリクエストも行ってもらった。

図5と図6にそれぞれ管制官役とパイロット役に対する表示画面（模擬管制卓およびパイロット卓と呼ぶ）のスクリーンショットを示す。

模擬管制卓の右側の部分は、地図等の表示非表示、レンジマーク切り替え、2点間の距離の測定など管制に必要と考えられる様々な機能を付けた。尚、距離の測定結果は、管制画面から目を離さなくて済むように管制画面上（右下な

ど）に表示して欲しいという要望があった。

パイロット卓には、コマンド入力・履歴表示・エラー表示のためのウィンドウを設けてある。左下のウィンドウに管制指示をコマンドとして入力する。画面の例はENR567というコールサインの航空機に対して、高度9,000 ft（フィート（1 ft=0.3048 m））まで下降し高度を維持するという管制指示をコマンドとして入力している。「WP（Waypoint）1に到着したら針路80度で飛行」、「WP2までは速度200 kts（ノット）で飛行」などの複雑な指示にも対応してある。

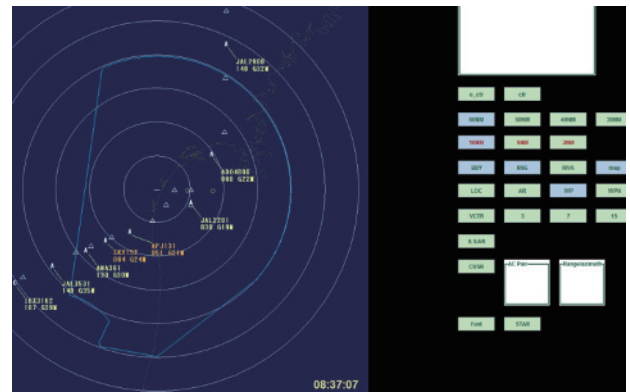


図5 模擬管制卓の表示例

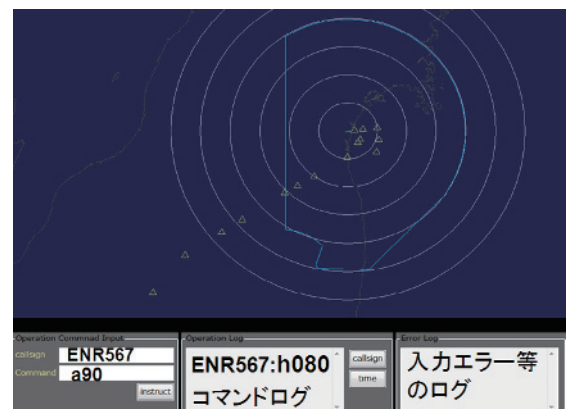


図6 パイロット卓操作例

尚、作成したシミュレータと現実の航空交通との差異として以下が挙げられる。

- ・ 風向・風速を変化させられない。
- ・ 航空機の種類が1種類のみ

4 シナリオ・条件設定

図7に経路構成を示した。南西からのRNP AR便と南西および北からのILS便により構成されている。この構成は仙台空港をベースにして作成した。また、着陸までの速度/高度のプロファイルは仙台空港における実測データに基づいて作成した。

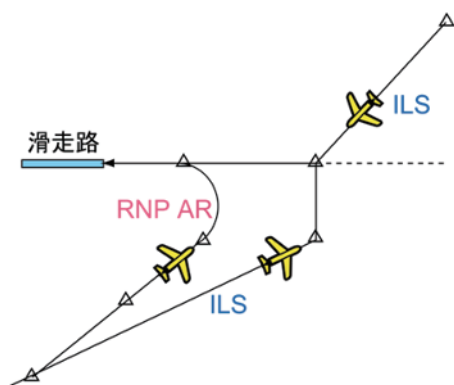


図7 経路構成

シナリオ上の設定は以下の通りとした。ここでは機数、混合率、タワーへの移管時の航空機間隔（タワー移管間隔と呼ぶ）等を変化させて管制官の負荷を調べ、イメージポジションや速度指定の効果も調べることを目的とする。

- ・ 1時間当たりの機数（15機～25機）
- ・ RNP AR 便と ILS 便の混合率(20%～50%)
50%=RNP AR 便と ILS 便半々
- ・ タワー移管時の航空機間隔(5, 7, 10 NM)
- ・ イメージポジションの表示(Iと略す)の有無
- ・ 入域 FIX における速度指定(Sと略す)の有無

その他の条件は以下の通り。

- ・ RNAV AR 進入を可能な限り許可(実験の途中から必ず許可に変更)
- ・ タワーへの移管は FAF (Final Approach FIX : 最終進入 FIX) までに行う。
- ・ タワー移管後の進入復行機は無視。
- ・ STAR (Standard Terminal Arrival Route : 標

準到着経路) 上での上空待機は行わない。

イメージポジションの説明図を図8に示す。

WP_nからの平均飛行時間に相当する位置を ILS のローカライザコース上に投影した固定点である。ここで、平均飛行時間は仙台空港におけるレーダデータの解析により求めた。

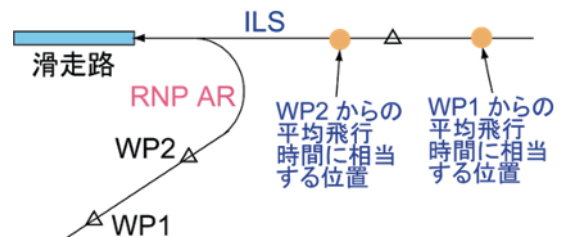


図8 イメージポジションの説明

入域 FIX は南西と北に設け、滑走路端までの飛行距離が 60 NM 程になるようにした。速度指定については、RNP AR 便および北/南西からの ILS 便のそれぞれに対して入域 FIX での速度が一定値となるように設定した。速度指定をしない時の速度のバラツキは最大値と最小値の差で、北からの便が 40 kts、南西からの便が 20 kts である。図9に指定地点を示す。青線内が管制空域、中央の白線が滑走路である。

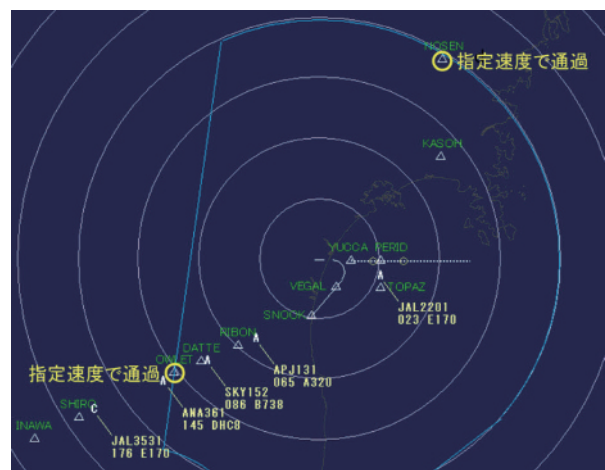


図9 速度指定地点（中央が滑走路）

南西からの RNP AR 便の経路と ILS 便の経路

差は12 NM ある。このため、RNP AR 便と ILS 便の入域時の間隔が10 NM ではRNP AR 便と ILS 便の間隔が滑走路近傍にて2 NM 以下となってしまう。ILS 便を迂回させた場合にはRNP AR 便と ILS 便の着陸順序が逆転し、また ILS 機に対しても少なくとも9 NM 以上の迂回距離が必要となる。これは効率的ではない。このため、ILS 便の後にRNP AR 便が続く場合には20 NM の間隔を付けて入域させるようにした。その他の場合は最低10 NM の間隔を付けて入域させるようにした。

尚、南西からの飛行便と北からの飛行便の到着時刻については特に恣意的にずらしたり、意図的に合わせたりすることしなかった。

5 評価指標

シミュレーション実験では以下の指標を調査する。定量的評価量としては以下を調べる。

- ・ **同時最大取扱機数**
管制官役が航空路管制から管制を引き継いだ航空機をタワーに渡すまでを取扱機とする。管制官役が瞬間的に同時に取り扱っている機数の最大値である。
- ・ **ハンドオフ応答時間**
航空路管制からの移管時、模擬管制卓上の航空機シンボルがブリンクする。そのシンボルをマウスでクリックするとブリンクは消える。消した時点で移管処理終了と判断する。ブリンク開始から終了までの時間の平均値 [秒] を表す。
- ・ **平均針路指示回数**
「fly heading○○」などの針路指示の発出回数を管制機数で割った値。試行毎に管制機数が異なるために正規化している。
- ・ **平均迂回距離**
針路指示により迂回された航空機の総飛行距離と迂回されない通常経路における

飛行距離との差を管制機数で割った値。
単位は NM。

- ・ **平均速度指示回数**
「reduce speed△△」などの速度指示が行われた回数を管制機数で割った値。
- ・ **指定間隔未満回数**
タワー移管時に7 NM などの指定間隔未満となった回数。

定性的評価量を得るためにNASA TLX アンケートを実施し、管制官役自身に主観的評価をしてもらった。これは各試行の終了後に直ちにを行い、以下の項目について質問した。

- ・ **時間的負担**
作業はどの程度急がされ、慌ただしかったか。慌ただしさを感じた場面。
- ・ **努力**
試行にどの程度の努力が必要としたか。どのような技量を必要としたか。
- ・ **欲求不満度**
どの程度ストレスや苛立ちを感じたか。ストレスを感じた場合、どのような状況で何に対しストレスを感じたか。
- ・ **達成感**
試行は納得がいくようにできたか。納得がいかなかった理由。
- ・ **交通流について**
交通流は難しかったか。順序付け等の判断に苦しんだ箇所。イメージポジションを表示したシナリオについて、イメージポジションは役に立ったか。

各項目について5段階評価を付けてもらい、記述形式の自由回答欄も設けた。

6 実験結果

実験は以下のように実施された。実験期間は準備期間を含めないで実質5週間であった。

- ・ 管制官役 5名

- ・ 1人連続3日（約15試行）
- ・ 1回のシナリオの試行時間 40分～60分
以下に実験結果を詳しく示す。

6.1 イメージポジションと速度指定の効果

イメージポジションと速度指定（IS）の効果に関する結果を表1に示す。イメージポジションの表示と速度指定を共に行った場合が「IS有」で、共に行わなかった場合が「IS無」である。1時間当たりの機数は20機で、数値は混合率30%と50%の両方の場合の平均値である。「IS無」の値が「IS有」より小さい項目を赤字で、2倍以上の差異がある項目を太字で示した。

表1 イメージポジションと速度指定（IS）の効果

項目	被験者A		被験者B		被験者C	
	有	無	有	無	有	無
ISの有無						
平均迂回距離[NM]	4.2	4.6	5.1	6.1	5.0	4.4
同時最大取扱機数	7.5	7.0	6.5	7.0	6.5	6.7
平均針路指示回数	1.7	2.3	1.0	1.1	1.2	1.2
平均ハンドオフ応答時間 [秒]	32.7	28.1	39.9	33.9	27.9	30.3
平均速度指示回数	1.0	1.2	0.4	0.5	0.8	1.0
指定間隔未満回数	3.0	2.0	2.5	1.5	0.5	2.0

「IS有」の値より「IS無」の方が大きくなっている項目が幾つかあるが、概ね「IS有」の方が大きな値となっている。しかし、顕著な差異は見られない。アンケートでは、ISは効果を感じなかったという趣旨の回答が多かったが、それが数値で現れていると考える。

アンケートにはイメージポジションについて「最終確認には使えるが、位置的に順序付けには使えない」、「滑走路からより遠いWPに対するイメージポジションをSTAR上に付けられれば効果的」等のコメントを頂いた。尚、より遠いWPのイメージポジションについては、遠くなると時刻予測誤差が大きくなることも考慮し

て対応すべきと考える。

6.2 混合率30%と50%との比較

混合率が30%の場合と50%の場合の各項目の値を比較した。1時間当たりの機数は20機で、IS有とIS無の場合を分けず一括して求めた平均値を使用した。

表2 混合率30%と50%との比較

項目	被験者A		被験者B		被験者C	
	30	50	30	50	30	50
混合率 [%]	30	50	30	50	30	50
平均迂回距離[NM]	3.6	5.1	7.1	4.1	2.5	5.2
同時最大取扱機数	7.5	7.0	7.0	6.5	6.5	6.5
平均針路指示回数	2.1	1.8	1.3	0.7	1.0	1.3
平均ハンドオフ応答時間 [秒]	22.2	38.5	39.4	34.4	25.3	30.0
平均速度指示回数	1.0	1.1	0.5	0.5	0.3	1.4
指定間隔未満回数	4.5	0.5	1.5	2.5	2.0	1.3

表2に結果を示した。表中の赤字および太字の使い方は6.1節と同様である。アンケートには、被験者Bは「RNP AR機の割合が多い方がレーダ誘導すべき航空機の機数が減るために楽と感じた」とのコメントがあった。一方、被験者CはRNP AR機がレーダ誘導できないことにストレスを感じ、機数が増えるとその分ストレスが増えるとのコメントがあった。被験者BはRNP AR機の割合が増えると多くの項目で値は減少し、被験者Cは殆どの項目で増え、2倍以上増えている項目もあることから、アンケート結果と数値は対応していると考えられる。

図10に混合率30%時と50%時の値の関係をグラフで示した。横軸に混合率30%時の値を、縦軸に50%時の値を示した。●、■、▲は各被験者の値を表す。数値は表2に記載したものと同一である。尚、平均ハンドオフ応答時間は値が大きく、他の部分が比較し難くなるため省いた。両方の値が同じになるところに線を引いた。線より上にあれば50%の方が難しい、下にあれば

ば30%の方が難しいと考えられる。値は上下に散らばっており、この結果はどちらが難しいとは言えないことを示唆していると考える。

混合率に関しては、管制官役の考え方により結果が異なり、一概に混合率を高くすると難しくなるとは言えないことが分かった。

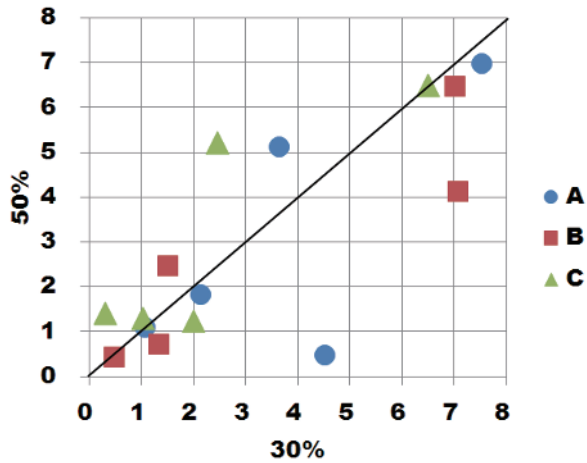


図10 混合率30%と50%との比較

6.3 指定間隔 10 NM での管制

表3にタワー移管間隔が7NMの場合と10NMの場合を比較した。1時間当たりの機数は20機で、混合率は50%である。一般に移管間隔が大きい程管制は難しくなるとされている。7NM時より10NM時の方が小さな値になっている項目は赤字で、両者に2倍以上の差異がある項目を太字で示した。また、同時最大取扱機数が8機以上のものは紫色の太字で示した。これは8機が理論上の限界^[7]とされているためであ

る。

平均ハンドオフ対応時間と平均針路指示回数、平均速度指示回数が一部の被験者で10NM時の方が小さくなっている以外は全ての項目で等しいか増加し、2倍以上増加している項目も見られる。この結果は10NM時の方が難しい管制となることを示唆していると考える。尚、移管間隔10NMの場合も入域間隔は7NMの場合と違っていない。アンケートには、「タワー移管間隔が10NMの場合は、入域間隔は15NMでないと辛い」、「10NM間隔の場合はILSのSTAR上に待機経路が必要」などのコメントがあった。

6.4 1時間当たりの機数による比較

管制機数が1時間当たり20機の場合と25機の場合とを比較した。混合率は30%である。タワー移管間隔は、20機の場合には7NM、25機の場合には5NMとした。表4に結果を示す。尚、被験者Cは25機での試行を行わなかった。

25機の場合にはタワー移管間隔が5NMと短いことも影響してか、被験者毎に増減は異なる。しかし25機の場合には最大取扱機数は、どの被験者の場合も9機となっており限界とされる8機を超えている。アンケートには「25機の時もILSのSTAR上に待機経路が必要」、「タワー移管間隔5NMは同方向の交通流のみなら楽になるが混在すると困難」、「プリプランニングをしっかりとる必要がある」等のコメントを頂いた。

表3 タワー移管間隔が7NMと10NMの場合の比較（1時間当たりの機数20機）

項目	被験者 A		被験者 B		被験者 C		被験者 D		被験者 E	
	7	10	7	10	7	10	7	10	7	10
タワー移管間隔[NM]	7	10	7	10	7	10	7	10	7	10
平均迂回距離[NM]	6.4	32.3	3.9	7.7	5.3	8.7	6.7	7.3	6.1	21.9
同時最大取扱機数	7.0	8.0	6.0	6.0	6.5	7.0	7.0	7.0	6.0	7.0
平均針路指示回数	2.0	5.3	0.6	1.4	1.4	0.6	1.1	1.3	1.5	2.8
平均ハンドオフ応答時間 [秒]	48.1	26.6	31.6	20.9	28.1	35.1	11.0	29.6	10.3	19.5
平均速度指示回数	1.1	2.2	0.2	1.8	1.4	1.3	1.5	1.6	1.2	1.9
指定間隔未満回数	0	2	4	9	1	7	3	7	0	0

表4 1時間当たりの機数が20機と25機の場合の比較（混合率30%）

項目	被験者 A		被験者 B		被験者 D		被験者 E	
	20	25	20	25	20	25	20	25
1時間の取扱機数 [機]	20	25	20	25	20	25	20	25
平均迂回距離[NM]	1.9	10.3	6.4	21.8	11.1	5.1	3.4	17.0
同時最大取扱機数	8.0	9.0	7.0	9.0	7.5	9.0	6.0	9.0
平均針路指示回数	1.3	3.1	1.3	2.0	7.4	3.0	1.7	3.7
平均ハンドオフ応答時間 [秒]	17.2	63.8	48.1	43.5	15.6	15.6	41.2	9.8
平均速度指示回数	0.9	1.0	0.6	0.4	1.2	1.7	1.4	0.8
指定間隔未満回数	6	3	1	1	2	3	0	1

6.5 その他のコメント

以下に、実験中のその他の感想や管制官役に対するアンケートにて得られたコメントを示す。

- ・ レーダ画面上でRNP AR 便と ILS 便との表示色を違えることは大変効果的。
- ・ 混合運用での RNP AR 便の優先は、First come, first serve の仮定を崩す。
- ・ RNP AR 便を優先させるためには、ILS 便の迂回が必要。
- ・ 取扱機数を増やすためには、ILS 機に対する待機経路が必要。

7 まとめ

どの程度の交通量で、どのような交通流に対して混合運用が可能かを調べるために、航空管制リアルタイムシミュレーション実験を行った。その結果、次の知見が得られた。

- 1) イメージポジションの表示や速度指定について、現在の方法では効果が薄い。
- 2) RNP AR 機の割合を30%と50%とに違えた場合、管制官により管制の難しさは異なり、どちらが難しいとは一概に言えない。
- 3) タワー移管間隔10NMの場合や1時間当たりの機数が25機の場合には、待機経路の設定なしでは管制処理は困難。
- 4) レーダ画面上でRNP AR 便と ILS 便との表示色を違えることは大変効果的。

今後は風や機種毎の速度プロファイル等に対応し、より実際の交通流に近いシミュレーション

を実施して更なる解析を行う予定である。

文 献

- [1] Required Navigation Performance Authorization Required (RNP AR) Procedure Design Manual, ICAO Doc 9905, First Edition, 2009.
- [2] Christopher Devlin et al., “Applications and Benefits of RNP Approaches in the United States National Airspace System”, MITRE Corporation, McLean, VA 22102, USA.
- [3] Jane Thipphavong et al., “Evaluation of the Terminal Sequencing and Spacing System for Performance-based Navigation Arrivals”, 31st Digital Avionics System Conference, Oct. 2012.
- [4] 藤田 雅人, 天井 治, “混合進入方式とその安全性解析手法の初期検討”, 電子情報通信学会安全性研究会, SSS2013-1, 2013年5月.
- [5] 天井 治, 藤田 雅人, 松岡 猛, “Safety Case の作成による RNP AR (特別許可を要する航法性能要件) 進入方式等と従来方式との混合運用に関する安全性分析について”, 電子情報通信学会安全性研究会, SSS2014-3, 2014年4月.
- [6] 屋井 鉄雄, 平田 輝満, 高田 潤一郎, “ターミナルレーダ管制シミュレータの開発と管制指示方法に関する基礎的分析”, 土木学会論文集 D, Vol.65 No.2, pp.88-100, 2009年4月.
- [7] 園山 耕司, 「くらべてわかる航空管制 図解」, 秀和システム, 2011年12月.