

8. RNP AR 機最優先方式での従来機との混合運用の可能性

航空交通管理領域 ※天井 治, 松岡 猛

1 はじめに

近年の航空機の優れた性能を十分に生かせる計器進入方式として 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, 日本では効果が見込まれる空港から順次導入され, 平成 28 年 4 月現在 17 空港に設定されている。

RNP AR (以降, 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。一方, AR 運航には航空機の要件, 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し, パイロットの訓練, 機体の整備等のコストが掛かるため, 運航対価が期待できない場合は AR 運航の導入が躊躇されている。

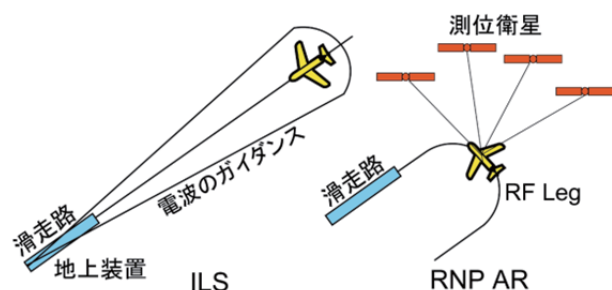


図1 ILS 進入方式と RNP AR 進入方式

従来の ILS (Instrument Landing System : 計器着陸装置) 進入方式では, パイロットは空港に設置された装置からの電波により水平および垂直方向のガイダンスを得る。原理上 ILS 進入方式では滑走路手前で 6 NM (Nautical Mile, 1 NM=1,852 m) 程の直線飛行を要する。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

方式である。RF Leg は ILS 進入方式では不可能な滑走路近傍での曲線進入を可能とする。図 1 にこれらの方式のイメージを示した。

ターミナル航空管制官 (以下, 管制官) はレーダ画面上で航空機の動きを把握し, 通常, 時間的余裕のある進入の初期から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。レーダ誘導は, 管制官がレーダ画面上で航空機の動きを見ながら針路指示を行って航空機を誘導することである。

ILS 進入方式と 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で同時に実施される場合は, 管制官は異なる方向から飛来し滑走路の手前で合流する航空機の到着時刻を予測して順序付けを行い, 航空機同士の安全な間隔を確保することになる。これは時間的余裕が少ない滑走路近傍での線上ではなく平面に対する思考となり, 飛行時間の誤差による予測性の低下も考えられ, 処理機数が増えると管制の困難度が増すと考えられる。図 2 にイメージを示す。

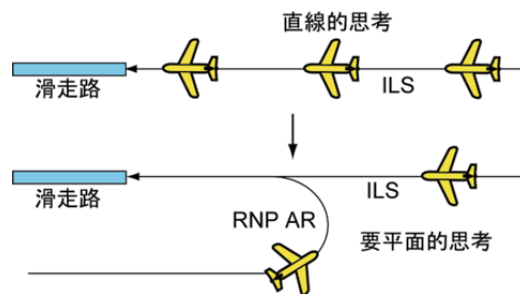


図2 管制の困難度

先行研究には平行滑走路における ILS 進入方式と 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、単一滑走路での運用のシミュレーションが現実的と考える。後者は同一滑走路での同時運用のようであるが、単一滑走路ではなく平行滑走路におけるものであり詳細も不明なため、単一滑走路にそのまま適用するのは無理があると考え。このため我々は単一滑走路での複数の進入方式の混合運用の安全性と実現方法を研究^{[4],[10]}している。

平成26年度に、単一滑走路にILS進入方式とAR進入方式と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^[7]を行った。平成27年度には平成26年度の実験で得られた知見を基に到着機密度20機/時、AR機の混合率30%、AR機最優先（AR運航の要求は必ず許可、レーダ誘導不可、速度調整は可）の条件にて総計80回程の試行を行った。本稿では、その実験の方法と得られた知見等を示す。

2 混合運用について

混合運用の概念を図3に示す。図のように、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や3のような直線進入実施機と方式2のような滑走路近傍における曲線進入実施機とが同時に出現する運用を混合運用と呼ぶ。

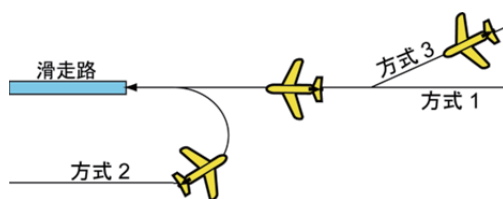


図3 混合運用の概念

3 RNP AR 機最優先

平成26年度の実験中にAR機最優先での運用の必要性に気付いた。当初はAR運航の要求はできるだけ許可し、AR機となる可能性のある飛行便への針路指示も許可する、という条件で実験を行っていた。しかし、この条件ではAR機も従来運用（ILS）機と同様に扱われる場合が多く、AR運航の利点を生かせないことが分かった。そこで

途中からAR運航の要求は必ず許可し、AR機への針路指示は許可しないという条件に変更した。

この考え方はBEBS（Best-Equipped, Best-Served: 良い機材を搭載した便を優先）^{[11]-[15]}として知られ、米国のNextGen（Next Generation Air Transportation System）や欧州のSESAR（Single European Sky ATM Research）もこの方針を支持している^{[16],[17]}。ILS機とAR機の混在状況に対してもAR機が優先されるべき^{[2],[3]}という報告がある。

4 航空管制リアルタイムシミュレーション

4.1 平成26年度の実験で得られた知見

平成26年度は、どのような運用形態でどの程度の交通流密度・混合率なら混合運用での管制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。以下に得られた知見の一部を示す。

- 1) AR運航の利点を生かすためにはAR機最優先の条件が必要。
- 2) AR機の割合を30%と50%とに違えた場合、管制の難しさは管制官の考え方の違いにより異なり、どちらが難しいとは一概に言えない。
- 3) 1時間当たりの到着機が25機の場合等は、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AR機とILS機との表示色を違えることは大変効果的。

これらの知見を平成27年度の実験に活用した。

4.2 シミュレータの概要

航空管制リアルタイムシミュレーションは3台のパソコンを用いた簡易シミュレータで行った。図4に実験概要を示す。サーバではシナリオに従う航空機の出現や航空機の軌道計算等を行わせた。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経験者に依頼した。

出発機と到着機は安全に分離できていると仮定して出発機は無視し、ターミナルレーダ管制官

の業務のみを対象とした。



図4 実験概要



図5 模擬管制卓の表示例



図6 パイロット卓の操作例

管制官役はシナリオに従って画面に表示される交通流を管制し、評価する。パイロット役は管制官役の発出する管制指示を復唱し、シミュレータに指示内容を伝えるために管制指示をコマンドとして入力する。AR 運航の要求等も行う。

図5, 6に管制官役とパイロット役に対する表示画面（それぞれ模擬管制卓およびパイロット卓と呼ぶ）の表示例を示した。模擬管制卓の右側の部分には管制に必要な様々な機能を付けた。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た。図の例では「便名 ENR724 の航空機に対して、高度 6,000 ft（フィート（1 ft=0.3048 m））まで下降し高度を維持、210 kts（ノット）の速度で飛行」を入力している。

尚、作成したシミュレータでは、現在のところ風向・風速を変化することができない。

5 シナリオ・条件設定

図7に経路構成を示す。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。仙台空港の経路構成を基にした。着陸までの速度/高度のプロファイルも仙台空港での実測データに基づいて作成した。

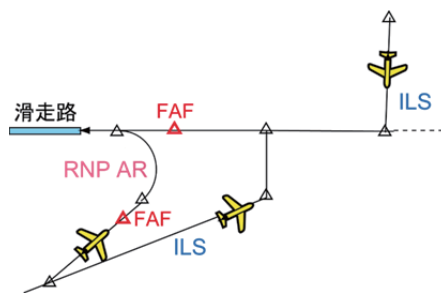


図7 経路構成

シナリオ上の設定は以下とした。

- ・ 1時間当たりの到着機数：20機固定。
- ・ RNP ARの混合率：30%固定
- ・ 管制塔（タワー）移管時の航空機間隔：7 NM（出発機を考慮した間隔）
- ・ イメージポジションの表示および入域 FIXにおける速度指定（ISと略す）の有無

その他の条件は以下の通りとした。

- ・ AR 運航の要求は必ず許可
- ・ タワーへは FAF（Final Approach FIX：最終進入 FIX）までに移管
- ・ タワー移管後の進入復行機は無視。

イメージポジションの概略を図8に示す。WP（Way Point）nから滑走路までの距離に相当する位置をILSのローライザコースや標準到着経路（Standard Arrival Route：STAR）上に投影した固定点である。

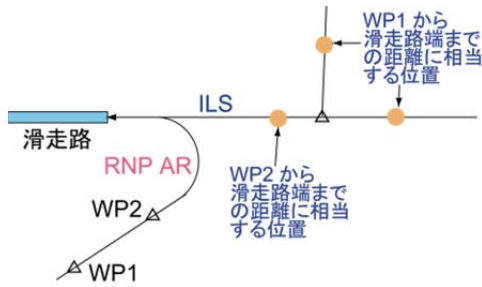


図8 イメージポジションの概略

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。速度指定有りでは、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した。速度指定をしない時の速度のパラッ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。

入域間隔については経路構成の関係上 ILS 機の後には AR 機が続く場合には 20 NM の間隔とした。その他の場合は最小 10 NM とした。

尚、南西からの飛行便と北からの飛行便の到着時刻を恣意的にずらしたり、意図的に合わせたりすることはしなかった。

6 評価指標

シミュレーション実験では以下の指標を調べる。定量的評価量は以下とする。

- ・ **平均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。それ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] である。この値は管制官役のシミュレータへの慣れの度合いとして使用した。

- ・ **最大同時取扱機数**

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。

- ・ **平均同時取扱機数**

同時取扱機数の平均値。

- ・ **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 [NM]**

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。

- ・ **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。

- ・ **平均タワー移管間隔**

タワー移管時の管制間隔の平均値。

NASA TLX^[18]を基にしたアンケートを実施し、管制官役自身への主観的評価を行い、これを定性的評価量とした。アンケートは各試行の終了後に直ちに行い、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を必要としたか。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。

質問票

日付	シミュレーションシナリオ番号	氏名
----	----------------	----

時間的負担 作業はどの程度急がされ、あるいは慢しかったですか？
10段階評価で○印もしくは✓印を必ず付けて下さい。

低い 高い

慢ただしさを感じた場合、どのような場面で特に慢ただしさを感じましたか？

評価尺度の定義

時間的負担 作業頻度あるいは作業ペースにより、どの程度の時間的圧力を感じましたか。ペースはゆっくりでのんびり、あるいは急速で慢ただしかったですか。

図9 質問票の一部

各項目を10段階で評価した。記述形式の自由回答欄も設けた。図9に質問票の一部を示した。

7 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8週間を要した。

- ・ 管制官役 4名
- ・ 1人5日（2週間、約25試行）
- ・ 1回のシナリオの試行時間 40分～60分
次の3つのシナリオに絞って、可能な限り多くのシナリオを試行した。

- ・ AR 便無し A0（従来運用）
- ・ AR 便30% A30（混合運用）
- ・ AR 便30%、IS 有り A30-IS（混合運用）

これらのシナリオにて従来運用と混合運用との定量的／定性的評価量の差異等を調べた。

その他、従来運用と混合運用とで異常接近検知率にどの程度の差があるかを調べるためのシナリオ^[10]（毎日一回40分程）や、連続する2機のAR機の間にはILS機を入れる場合、2機の間隔が何NMなら7NMのタワー移管間隔を確保しつつILS機を入れられるかを調べるシナリオを実施したが、紙面の都合上これらの詳細は述べない。

7.1 定量的評価量について

7.1.1 被験者毎の差異

図10～13に定量的評価量を被験者毎にレーダチャートで示す。値は各定量的評価量の（算術）平均値である。尚、初回など実験に慣れていない

状況（平均ハンドオフ対応時間が閾値より大きい場合）やパイロット役のコマンドの入力ミス等により管制が困難になった場合などは平均値の計算対象外とした。平均ハンドオフ対応時間を判定に使用したのは何度かの試行を行うとどの被験者もこの値が大きく減少する傾向があったためである。閾値は値をみて30秒とした。

平均迂回距離での差が目立つ。被験者Aでは従来運用（A0）の方が平均迂回距離は短く、被験者B～Dでは混合運用（A30、A30-IS）の方が短くなっており、どちらの方が短くなるとは言えない。A30とA30-ISの比較でも、被験者BはA30の方が短い、被験者DはA30-ISの方が短い。被験者A、Cでは殆ど差が無い。

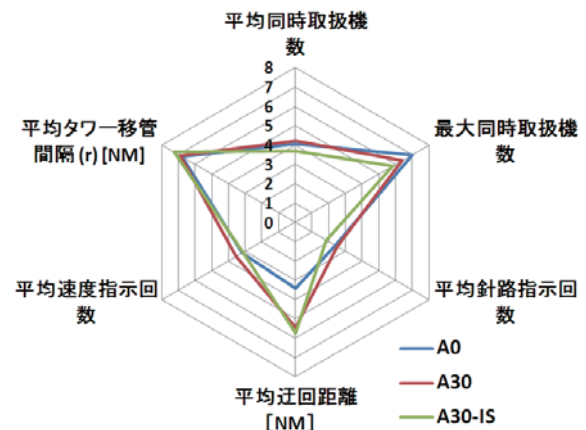


図10 被験者Aの定量的評価量の差異

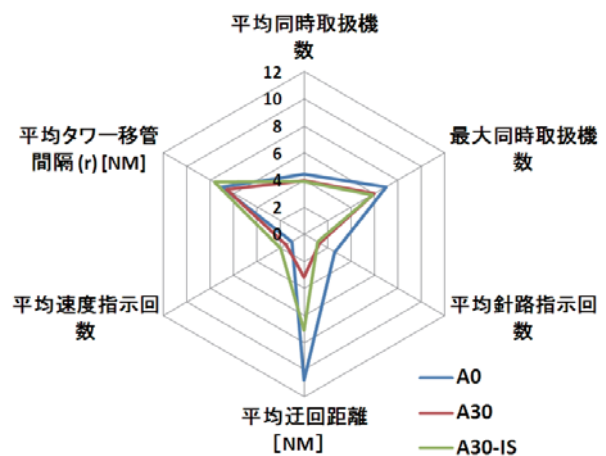


図11 被験者Bの定量的評価量の差異

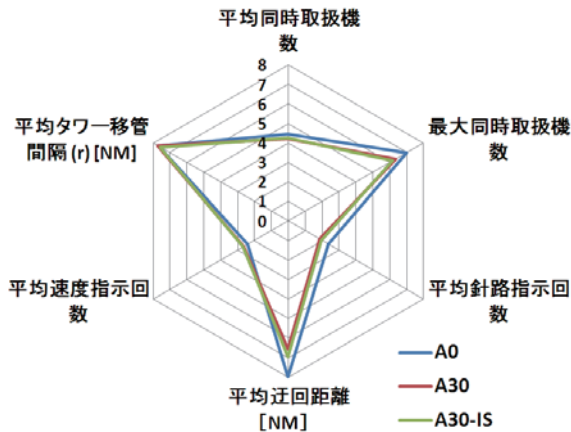


図 12 被験者 C の定量的評価量の差異

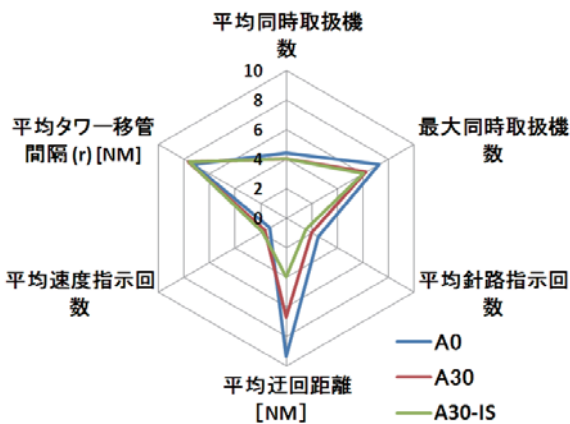


図 13 被験者 D の定量的評価量の差異

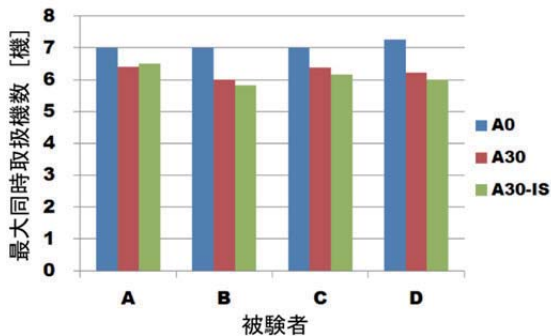


図 14 最大同時取扱機数の差異

7.1.2 最大同時取扱機数

図 14 に各シナリオにおける被験者毎の最大同時取扱機数の平均値のグラフを示した。この値に関してはどの被験者も従来運用（A0）シナリオが混合運用（A30, A30-IS）のシナリオより大きな値となっている。4人の被験者の結果を併せて t 検定を行ったところ $t(38)=4.67$ となり有意水準 0.1% で有意な差が認められた。これは混合運用

でも従来運用よりワークロードは増えず、むしろ小さくなっていることを示唆していると考える。

7.1.3 平均速度指示回数

平均速度指示回数のグラフを図 15 に示す。図から従来運用（A0）より混合運用（A30, A30-IS）の方が大きな値となっているのが分かる。今回の条件では AR 機は速度調整しか行えないため、混合運用で速度調整が増えるのは道理である。混合運用では AR 機に合わせて ILS 機に対しても速度調整を多用する手法が目立った。被験者により値に最大で 3 倍程の差異が見られる。

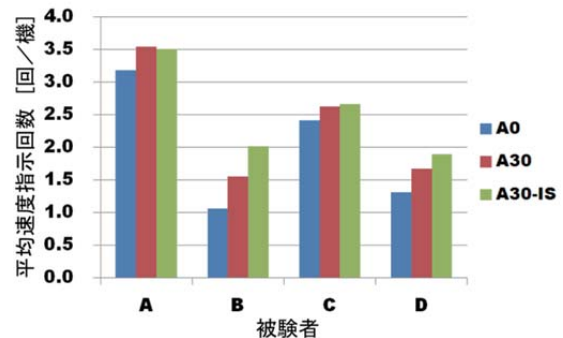


図 15 平均速度指示回数の差異

7.1.4 その他の項目

上記以外の項目でも同様の解析を行ったが、被験者による差異が大きく、特定の傾向は見られなかった。一例として平均針路指示回数のグラフを図 16 に示す。

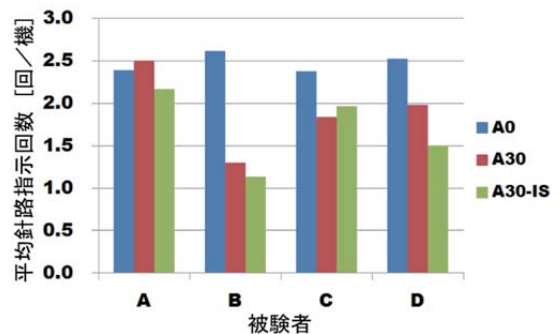


図 16 平均針路指示回数の差異

混合運用（A30, A30-IS）では AR 機への針路指示が出来なくなる分、針路指示回数が減るのは道理である。被験者 B~D ではそうになっているが、

被験者 A ではそうになっていない。図 15 を見ると被験者 A は従来運用に対しても速度指示を多用している。その結果このようになったと考える。尚、被験者 B,C,D には速度指示回数と針路指示回数との間にそれぞれ相関係数 $r=-0.69,-0.47,-0.69$ の負の相関が認められた。

7.1 節で述べてきたことから、定量的評価量の結果は混合運用が従来運用に比べて困難であるとは言えないことを示唆していると考えられる。

7.2 定性的評価量について

6章に示した質問票に記載してもらった値の平均値を図 17~20 にレーダチャートで示す。値が大きい程困難さが増すことを表すように、達成感是非達成感 = (11 - 達成感) として示した。

被験者により従来運用 (A0) と混合運用 (A30, A30-IS) との差異は様々であり、従来運用の方が困難と感じた被験者がいることも分かる。

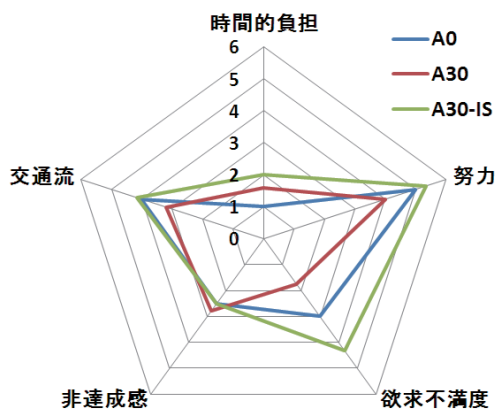


図 17 被験者 A の定性的評価量の差異

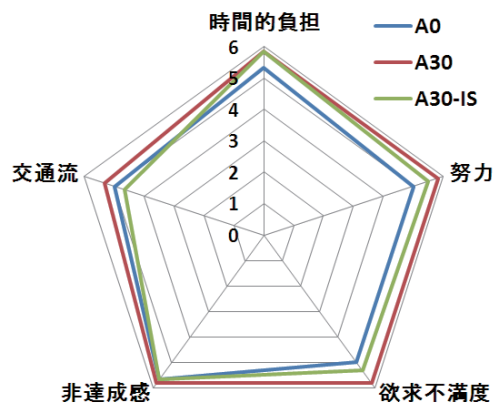


図 18 被験者 B の定性的評価量の差異

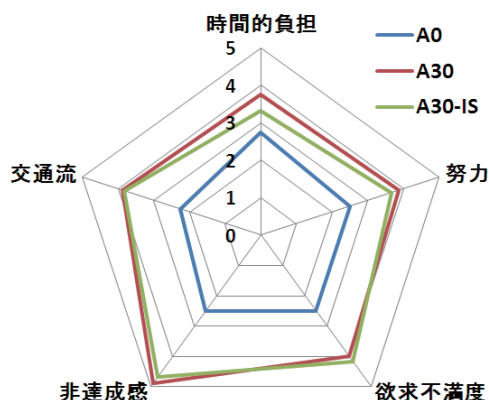


図 19 被験者 C の定性的評価量の差異

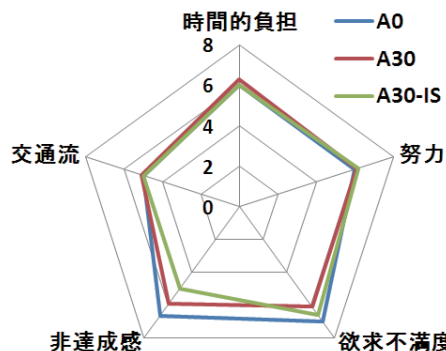


図 20 被験者 D の定性的評価量の差異

8 まとめ

RNPAR 機最優先, 到着機 20 機/時, AR 機 30% の条件で航空管制リアルタイムシミュレーション実験を行い、従来運用と混合運用との管制の困難度の差異を調べた。次の知見が得られた。

- 1) 定量的評価量は混合運用が従来運用より困難度が増すことを示唆しない。
- 2) 最大同時取扱機数の平均値は従来運用の方が大きい。
- 3) 定性的評価量は被験者による差異が大きいが、従来運用の方が困難と感じた被験者もいる。

安全性に関しては、Safety Case に基づく安全文書の作成^[5]および独自のハザード解析手法^{[6],[8]}により別途調査中である。

今後は関西国際空港を対象にした現実的な状況でのシミュレーション実験を予定している。

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] 松岡 猛, 天井 治, “航空管制における混合進入方式の安全性評価のためのヒューマンエラー確率の推定法”, 電子情報通信学会安全性研究会, SSS2015-2, 2015年5月.
- [7] 天井 治, 松岡 猛, “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”, 電子航法研究所第15回研究発表会講演概要, 2015年6月.
- [8] 天井 治, 松岡 猛, “単一滑走路における RNP AR と ILS 進入方式の混合運用の安全性について, 日本信頼性学会誌”, 2015 Vol.37, №5, 2015年9月.
- [9] O.Amai and T.Matsuoka, “Air Traffic Control Real-time Simulation Experiment Regarding the Mixed Operation between RNP AR and ILS Approach Procedures”, 2015 IAIN World Congress, Prague, Czech Republic, Oct. 2015.
- [10] 天井 治, 松岡 猛, “RNP AR と ILS 進入方式との混合運用における異常接近予測”, 2016年電子情報通信学会総合大会, 2016年3月.
- [11] T. Nikoleris and M. Hansen, “EVALUATION OF PRIORITY QUEUE DISCIPLINES FOR AIRCRAFT OPERATIONS IN NEXTGEN”, 12th WCTR, Lisbon, July 2010.
- [12] A. M. Churchill, M. O. Ball, A. D. Donaldson and R. J. Hansman, “Integrating best-equipped best-served principles in ground delay programs”, ATM2011, Berlin, June 2011.
- [13] H. S. Cho and R. J. Hansman, “Understanding the Impact of Potential Best-Equipped, Best-Served Policies on the En-route Air Traffic Controller Performance and Workload”, MIT, Report No.ICAT-2012-2, Feb. 2012.
- [14] “PERFORMANCE OF AIR NAVIGATION SERVICES”, ICAO ATConf/6-WP/52, Montreal, Mar. 2013.
- [15] N. Almog and T. Kotegawa, “Incentivizing Aircraft Equipped Upgrade Through Preferential Merging: A Phoenix Case Study”, 2013 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Los Angeles, Aug., 2013.
- [16] Richard Jehlen, “Best Equipped-Best Served (BEBS)”, FAA, Mar. 2012.
- [17] Michael Standar, “BEBS – What does it mean? ”, ICNS, Washington DC, May 2013.
- [18] S. G. Hart, and L. E. Staveland, “Development of the NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research”, Amsterdam, P. Hancock & N. Meshkati (Eds.), Human mental workload, pp.139-183, 1988.