

3. 安全かつ効率的な航空管制手法の研究

航空交通管理領域 ※青山 久枝
 労働科学研究所 飯田 裕康
 機上等技術領域 塩見 格一

1. はじめに

航空交通管制業務においては、航空交通量の増加、新空港の開港、運用方式の変更等により交通流の輻輳化が進行し、航空管制官（以下、管制官）にも処理能力（パフォーマンス）の高度化が望まれている。

本稿では、航空路管制業務のレーダー対空席（以下、対空席）を対象に、実時間シミュレーション実験を行い、管制処理過程の分析結果を報告する。管制処理過程で必須の要素である状況認識、方法手段の選択、指示内容及びその発出タイミングについて、管制官の個人差が管制処理過程・処理結果に及ぼす影響を調べた。

各管制官の指示内容・発出タイミングの違いが、交通状況自体を変化させ、それに伴い処理の「問題解決のし易さ」を変えていく。いかに安全に、合理的に、確実に処理をするかが管制官の時間的余裕に影響を与えている。

2. 管制業務における意思決定

2.1 管制官の経験とパフォーマンス

管制業務は飛行場管制・進入管制・航空路管制等に分けられるが、それぞれの業務に特色がある。しかし、どの業務においても管制官は取り扱う航空機の情報を取得し、その情報を基に定められた管制間隔を取るための経路・高度・速度に関して意思決定を行い、指示・許可・承認等の形でパイロットに伝達する。ただし、この指示等は航空機の動きに直接働きかけるものではなく、パイロットに対して発出され、パイロットが航空機を動かしている。人間が人間に指示し、航空機の状態を変化させているため、管制官のパフォーマンス評価は大変困難なことでされている。

管制官が取得する航空機に関する情報は、各業務とも目視による位置情報、レーダーによる位置や高度情報、飛行計画に基づく運航票、パイロットへの問い合わせによるものなどである。管制官は通常同時に複数の航空機を扱うため、各航空機の情報だけでなく、担当エリア全体の

交通流についても予測、意思決定している。

管制官は、レーダー画面や運航票により航空機の現在位置・飛行経路・速度・高度等2次元の情報を取得して、頭の中で立体的な構造に組み立てるよう訓練されている。飛行中の航空機は停止することができないため、常に情報を更新し、精度の高い予測をした上で確実に管制間隔を取る方法を選択する。また、気象状況によっては承認を受けた経路を飛行できない、あるいは通常より多くの高度変更を必要とする事態も発生する。管制官には、緊急事態か否かに関わらず、安全を考慮したに迅速な対応が要求される。従来から、この確実性・迅速性を獲得する大きな要因は、「多様な事態の経験」だとされている。

2.2 RPD (Recognition-Primed Decision) モデル

経験などの再認による実践的な意思決定として RPD(Recognition-Primed Decision)^[1]がある（図1）。

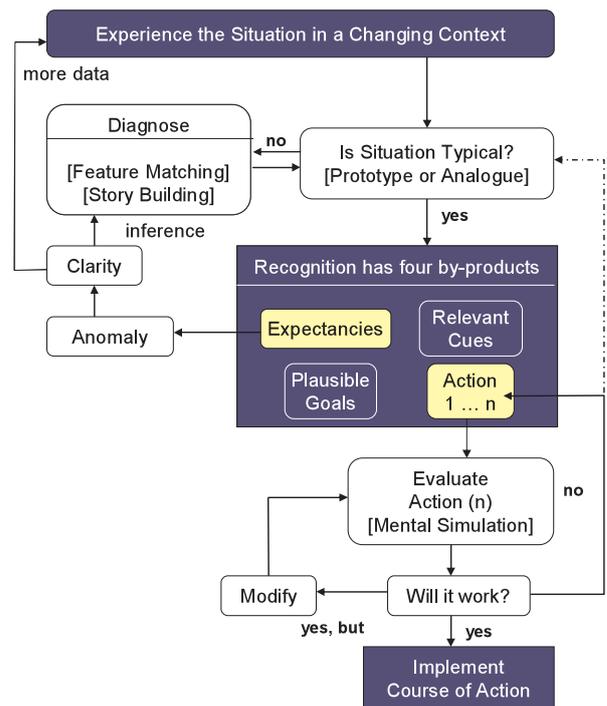


図 1. 再認先導型意思決定モデル(Integrated version of recognition-primed decision model)

RPDは、複雑な背景状況の中で総合的な状況判断を行い、経験（記憶）の中から適合する有効な行為系列をすばやく引き出す実践的な意思決定であるとされている。

管制業務も RPD モデルに該当していると思われる。継続的に現れる航空機の性能、扱う航空機の管制処理実行結果、交通流、空域特性など総合的な状況判断を行い、経験の中から類似処理パターンを引き出してきていると推測される。その結果、ルールベースでの処理やマルチタスクの処理が可能となっていると考えられる。

しかし、現状では経験は管制官から管制官への口頭による技能伝承となっているため、実際の管制処理過程分析による技能レベルの調査を行ってはいない。また、管制官全員がすべての状況に対する処理を習得しているものでもない。それぞれの管制官が経験した状況、訓練時の監督者の指導内容、経験官署等がパフォーマンスの個人差がうまれる要因である。

このような理由から、既存の経験を100%伝承し、一定以上のスキルを習得・維持することが、管制官養成教育・訓練の課題となっている。

FAA Academy（米国）では、AT-SAT(Air Traffic Selection and Training)²⁾や POWER（Performance and Objective Workload Evaluation Research）³⁾など管制官採用や教育・訓練から管制官のパフォーマンス、ワークロードに関する研究・調査・測定等についてのプロジェクトを行っている。日本でもこのようなプロジェクトが必要になってきている。

ここでは、管制官のパフォーマンスを評価する要素として、状況認識と手段選択の違い、管制指示の内容と指示するタイミングを取り上げた。

3. 実時間シミュレーション実験^{4)[5][6]}

3.1 実験概要

管制官個人のパフォーマンスの差を調べるため、2006年11月に当研究所において、以下の要領で実時間シミュレーション実験を行った。

- ①対象空域：東京航空交通管制部 関東北セクター（図2）
- ②被験者：上記①の有資格現役管制官 8名
- ③対象席：レーダー対空席（以下、対空席）

④シナリオ：約30分（3:15:00～3:45:00）、合計30機

⑤規程等：現場で運用のとおり（表1）

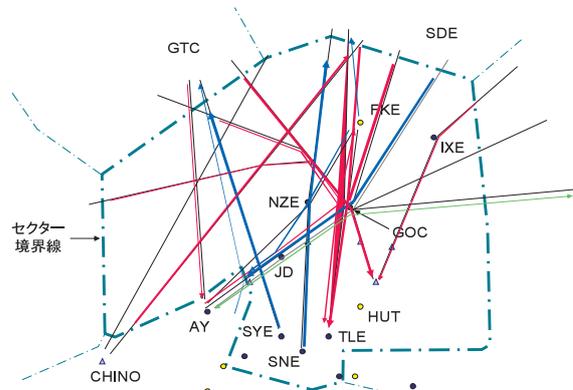


図2. 関東北セクター

表1. セクター内での主な処理

入域航空機	入域時の状態	セクター内での処理
羽田出発	FL210までの上昇中	要求した高度まで上昇
羽田到着	巡航中	13,000ft(@TLE)まで降下 10NMイントレイル
成田出発	GTCTR:FL250までの上昇中	GTCTR:FL250までの上昇中
成田出発	YMZTR:要求高度までの上昇中	YMZTR:要求高度までの上昇
成田到着	FL280までの降下指示済み	FL150(@MILKY・GLAXY)まで降下 10NMイントレイル
福島・宇都宮出発		ノンリーダーからリーダー管制へ、 要求した高度まで上昇
福島到着	FL170(@JD)の降下中	アプローチクリアランス発出、 レーダーからノンリーダー管制へ
百里出発	指示高度までの上昇中	要求した高度まで上昇
百里到着	巡航中	調整した高度・ヘディング
横田エリア出発	FL150あるいは13,000ftまで上昇	要求した高度まで上昇
横田エリア到着	横田到着:規程 上記以外:調整	横田到着:規程の高度まで降下 上記以外:調整した高度まで降下
仙台出発	指示高度まで上昇中	要求した高度まで上昇
仙台・新潟到着	FL150まで降下指示	FL150まで降下指示
その他	巡航中	要求がない限り指示なし

表2. イベント内容

イベント発生順	イベント内容	イベント処理のポイント
1	成田空港到着機3機の10NMイントレイル	同一経路で入域する3機を10NM間隔。
2	羽田空港到着機3機の10NMイントレイルと仙台空港出発機	1機が西側から、別の2機は北側から入域する3機を10NM間隔。上記の成田到着機と同時に処理。また、仙台空港出発機がこれらの航空機と同じような経路で上昇しながら入域。
3	百里基地からの自衛隊機出発	経路が定期便と異なるため、影響を受けるTRAFFICを予測。
4	羽田空港到着機3機の10NMイントレイル	西側、北側、東側から入域する3機を10NM間隔。入域して来る方向が異なるため、西南西の風による影響大。
5	羽田空港到着機2機追加	先行の羽田空港到着機3機の10NMイントレイルが確実に処理されなければ、この2機が先行の3機に追いつくため、5機のイントレイル処理になる。
6	成田空港出発機と福島空港出発機との間隔設定	成田空港出発機の経路とイベント1の福島空港出発機の経路交差を予測。
7	後続の成田空港出発機、横田エリアからの出発機、仙台空港到着機の間隔設定	後続の成田空港出発機と合流する経路の横田エリアからの出発機、この2機と交差する経路の仙台到着機3機がほぼ同時に同一地点を通過することを予測。3機の通過予定高度は同高度である。

また、シナリオに組み込んだイベント内容は表2のとおりである。ここでいうイベントとは、

表1のような複数機管制処理に必要な作業課題の複合事態である。それぞれのイベントについては、被験者は同時に異なる処理を行わなければならない。シナリオでは、干渉する航空機を存在させることで、干渉機が存在しない場合より処理の手間を増やしている。そのため、管制官は安全で合理的な処理方法を再構築しなければならない。さらに、各航空機への指示のタイミングを計り、適切な指示内容を発出しようとしている。実際の管制業務も、時間帯や地域による特性、セクター内に入域してくる航空機のタイミングによって様々な組み合わせとなるが、処理の手間を多く必要とする状況では繁忙な管制処理を行うことになる。

3.2 実験結果

各被験者が行った試行結果を分析した。ここでは2名の管制官を例にとった。どちらの被験者も同じような方法でイベントを処理したが、処理過程において指示の内容やタイミングが異なり、同時刻に扱っている航空機の位置関係等が異なっている様子を図示した。

図では、丸印が航空機の位置、矢印が進行方向を示し、色分けは表3のとおりである。

表3. ターゲットの色分け内容

ターゲットの色	内容
赤	成田空港到着機
緑	羽田空港到着機
橙	処理に干渉する航空機
紫	上記の3つ以外に扱っている航空機
黄	これから管制する予定の航空機
白	管制移管を終了した航空機

3.2.1 イベント1・2について

図3、図4は実験開始から約10分後の3:25:00頃、イベント1及び2の処理途中を示している。扱っている機数は11~12機で、イベント1及び2の7機についてはレーダー誘導等定型以上の処理を行っているが、その他の航空機は干渉するとは予測されないので、定型処理だけを行っている。

被験者5（図3）はイベント1の処理を該当機がセクター境界線近くに来てから開始し、レーダー誘導と速度調整を併用している。

これに対し被験者2（図4）は、イベント1の該当機がセクター境界線の約20NM外側から処理し始め、レーダー誘導だけによる処理をしている。

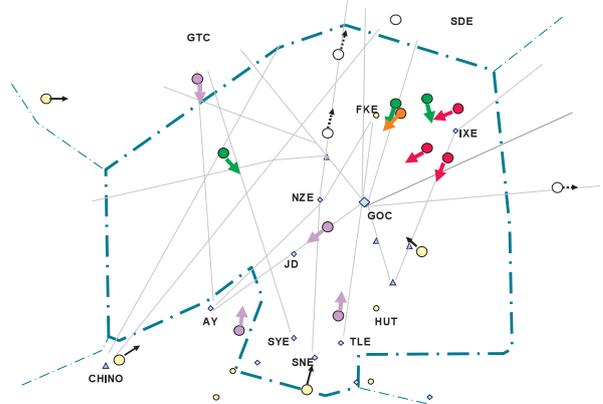


図3. 被験者5の3:25:00頃

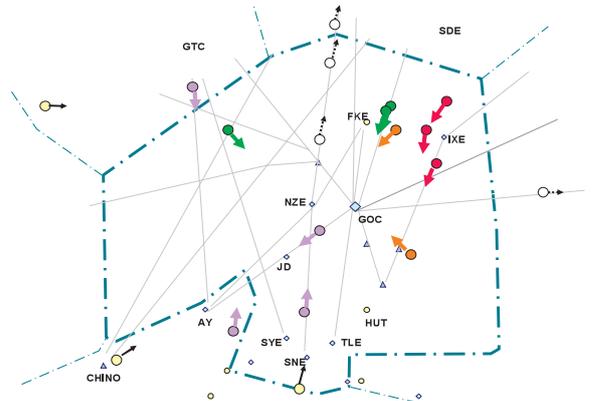


図4. 被験者2の3:25:00頃

どちらの被験者もイベント1に対して10NMイントレイルの処理をしているが、処理を先に始めた被験者2は3機をほぼ一列に並べていることから、処理が進んでいると言える。

しかし、被験者5はこの時点でイベント2についてもレーダー誘導を始めており、重なって入域して来た2機を5NM以上離している。2つのイベント処理を同時に行っている。

さらに5分後（3:32:00頃）の様子を図5（被験者5）、図6（被験者2）に示した。

図5では、被験者5がイベント2の処理を終了した上、1番機はすでに移管を済ませている。

しかし、図6ではイベント2の3番機がGOC（大子 VORTAC）の南東へ大きくルートを外れている。これは、被験者2がイベント1の処理は終了したが、イベント2はまだ処理途中であったことを示している。

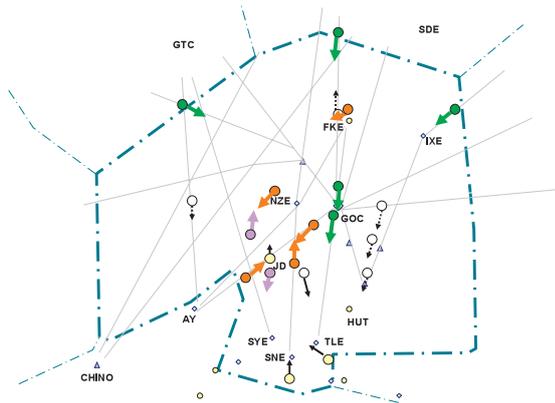


図5. 被験者5の 3:32:00 頃

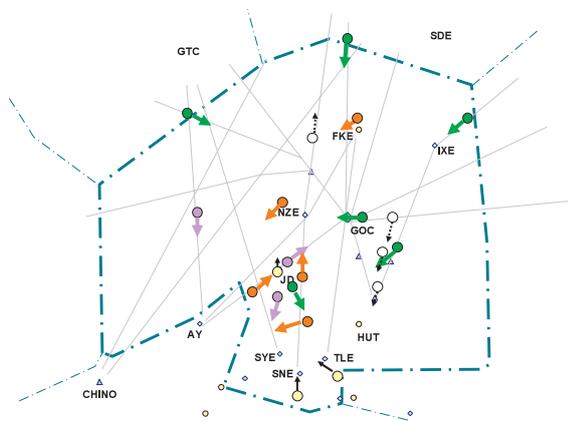


図6. 被験者2の 3:32:00 頃

被験者2のイベント2処理終了の遅れは、その処理開始が遅れたことに起因している。図4ではイベント2の2機は同じような位置にいて、10NM イントレイルの処理を開始していない。図3では、被験者5がすでにレーダー誘導によってこの2機の間隔を取り始めている。

定型処理より手間のかかる処理は、その開始が遅れることにより実行すべき処理が残されて、後になるほど別な処理と重なっていく可能性をもつ。

この実験でも、図5あるいは図6で複数の航空機が新たに入域して来ている。イベント3の航空機、ノンレーダー管制からレーダー管制へ移行する機、レーダー管制からノンレーダー管制へ移行する機、干渉する航空機、さらにイベント4の航空機も入域して来ている。つまり、遅れている処理に加え、新たな処理を必要とする状況が発生している。単位時間当たりの処理は増えていくことになる。

また、出域地点に近づいてからの 10NM イン

トレイル処理では、時間の余裕が少なくなり、管制官の負担も大きくなる。さらに、担当空域内で処理を終了させるためには、航空機に指示する旋回角度が大きくなり、運航者側にも負担をかけることになり兼ねない。

3.2.2 イベント4・5について

イベント4は3.2.1と同じような10NMイントレイル処理である。3:32:00頃にはすでにイベント4の航空機がセクター境界線上に来ている。さらに、イベント5の2機がイベント4の3機を追いかけるように入域して来る。イベント5はイベント4の航空機と十分な距離をもって入域して来るように見える。しかし、イベント4について一番早く処理を終える方法で、無駄なく終了しなければ、イベント5の航空機が追いつくことになる。

これに関しても、同じ被験者での比較をしてみた。両者とも同じ方法を使って処理を行っていた。

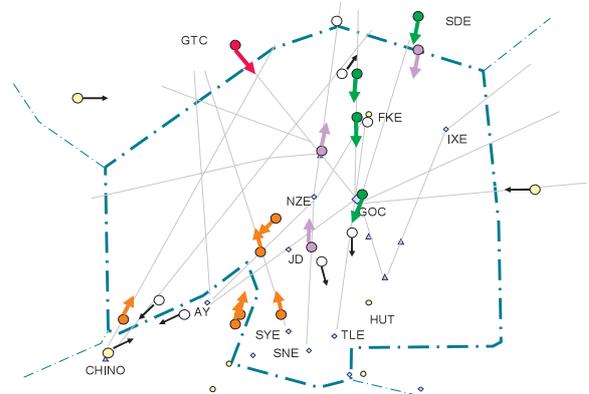


図7. 被験者5の 3:42:30 頃

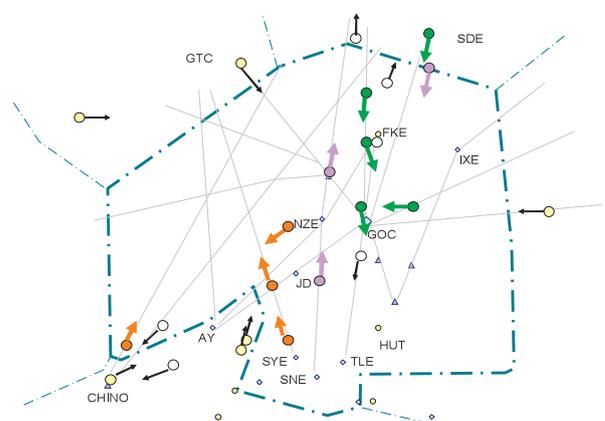


図8. 被験者2の 3:42:30 頃

3:42:30頃の様子を図7（被験者5）、図8（被験者2）に示した。

図7から、被験者5はイベント4の対象機3機を経路上一列に並べており、10NM以上の間隔を取っていることから、処理を終了していると言える。

図8は、イベント4の1機がGOCの東側にいて、まだ経路上に戻っていないことを示している。イベント4の3機がまだ一列に並んでいないことから、被験者2がイベント4の処理を終了できていないことになる。さらに、イベント5の2機もレーダー誘導の対象となった。これらのイベント処理に追われ、入域して来る航空機の移管を受けるタイミングも遅れ、処理開始自体が遅れていく傾向が窺える。

処理の遅れによって、扱っている航空機の中でも特定の航空機に注意配分が集中し、その他の航空機へ注意配分が減少してしまうと考えられる。そのため、さらに処理開始の遅れや優先順位の低いタスクの失念等が生じてくると推測される。

また、処理の遅れが後続機の処理に必要なタスク数を増加させてしまうこともあり得る。

3.3 タスク数のグラフ表示

航空路管制では、セクター毎に扱う機数の多い定期便の経路、セクターの形状、制限空域の場所や高度、航空路の設定等が異なる。また、入域して来る航空機の位置関係、軍用機を扱うか否かによっても状況の違いができる¹⁷⁾。管制官は、表1のような定型的な処理するとき、干渉する航空機が存在するとタスクが増える。

3.2の実験から、処理を早めに手がけることで、同じ処理方法でも効率に差が生じるといえる。したがって、管制官は、まずタスクが増えていくことをできるだけ早く状況認識する必要がある。取り扱い予定機のセクター入域前に、他の航空機との今後の状況を予測し、必要情報を取得して、処理方法の思考から最終結果を出すまでの指示、機影の追尾を適確に行う。これらは管制官教育や訓練の基本である。被験者5は基本に忠実な管制を行っていると見える。

3.2の実験結果から、時系列で扱っている航空機毎に必要な処理タスクの残数を時系

列上に示した（図9）。

処理タスクの数の基準は、以下のとおりとする。また、タスクバーの長さは管制移管を受けた時刻から、周波数移管を指示するまでを表わし、長いほどタスクの継続時間が長いことを示す。

- ①レベル1（緑）：当該セクター内でパイロットからの要求以外に指示を出す必要のない時間帯。RPDモデルのVariation 1に相当。
- ②レベル2（黄）：定型的な処理（高度変更）を必要とするが干渉する航空機がない時間帯。RPDモデルVariation 2に相当。
- ③レベル3（橙）：定型的な処理（高度変更）を必要とし、さらに干渉する航空機がいる時間帯。RPDモデルVariation 3あるいはVariation 2と3の統合型に相当。
- ④レベル4（赤）：レベル3の中で、時間的な制約を多く受け、処理が間に合わない等警告段階。

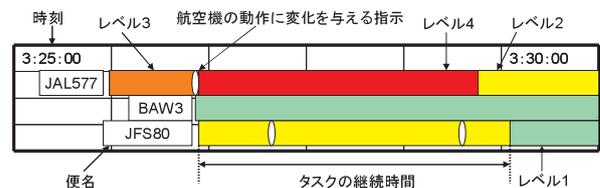


図9．タスク数のグラフ表示例

図10（被験者5）、図11（被験者2）は3.2の実験結果を上記の基準でグラフ化したものである。

被験者2は1機の航空機に対してレベル3の状態が被験者5に比べ長く続く航空機が多いことがわかる。また、実験前半からレベルの高い処理が実験後半まで続き、後半に出現するほとんどの航空機が高いレベルとなっている。また、被験者2は各航空機の管制対象時間が被験者5より長いことも示している。この原因として、処理が終了しても移管のような優先順位の低いタスクを残しているためと考えられる。処理開始の遅れがこのような影響を及ぼしていることが見て取れる。

さらに、実験中撮影したビデオから被験者の機器操作等も調べた結果、被験者2はレーダー画面上で複数のターゲットが近づき、データブ

ロックが重なって読み難いケースが多かった。それを解除する操作はしていたが、ターゲットの距離測定や経路の確認などの操作はほとんど見られなかった。これに対して被験者5は、指示を出している時間帯と出していない時間帯がある程度分かれており、指示を出していない時間にはターゲットの距離測定や予測位置の表示などの操作をして、必要な情報を積極的に取得して予測の精度を高めていたと思われる。

状況認識の遅れは、必要な情報の取得、確認などの時間的余裕も、予測の精度も低下させる原因と推測される。

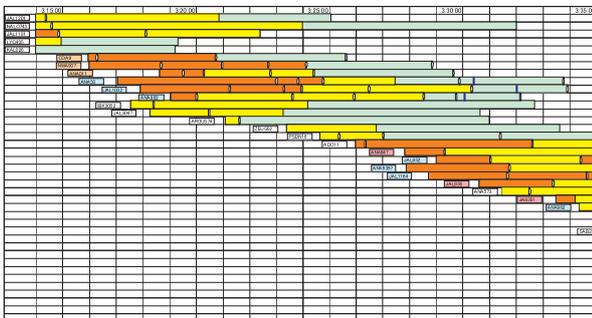


図 10. タスク数のグラフ（被験者5）

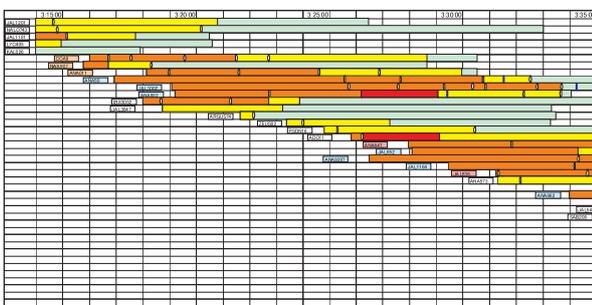


図 11. タスク数のグラフ（被験者2）

4. まとめ

管制官の同一状況に対する状況認識、方法手段の選択等について、航空路管制業務の対空席を対象としたシミュレーション実験を行った。

各管制官が、継続的に発生する状況を認識し、処理方法等を意思決定した結果、発出する指示内容やタイミングによっていかに効率的な管制処理を行っているかを検証した。また、管制処理結果及びその処理過程についても指示の内容やタイミングが影響を与えることを確認した。

さらに、時系列上で各航空機に対するタスク

の量によるレベル分けをして、簡単なグラフで表した。任意の時刻における必要タスクの量やその継続性の違い等が表現できた。

これが管制官個人のパフォーマンス評価の参考として、管制官養成の教育・訓練に利用できると考えている。現在、このようなグラフを自動生成できる認知タスクシミュレータを東北大学大学院において開発中である^[8]。

謝辞

本実験にご協力いただいた東京航空交通管制部の航空管制官各位に感謝いたします。

文献

- [1]G. Klein : ” Source of Power” ,1998
- [2]Ramos, R. A. ,Heil, M. C. ,Manning, C. A. : Documentation of Validity for the AT-SAT Computerized Test Battery, Volume I, 2001
- [3]S. H. Mills, E. M. Pfleiderer, C. A. Manning: POWER: Objective Activity and Taskload Assessment in En Route Air Traffic Control, Report No. DOT/FAA/AM-02/2, 2002
- [4] 井上幸一：航空路管制官のワークロード評価手法とタスクプランニング分析に関する研究、東京大学大学院修士論文、2007
- [5]青山、塩見、飯田：認知工学的手法に基づく航空管制システムに関する研究(2)―管制官の思考過程に関する分析―、ヒューマンインタフェースシンポジウム 2007 pp. 547-552 2007
- [6]井上、安藤、青山、大和：認知工学的手法に基づく航空管制システムに関する研究(3)―航空路管制官のタスクプランニング分析に関する研究―、ヒューマンインタフェースシンポジウム 2007 pp. 553-556 2007
- [7]濱辺：大規模システムにおける客観的ワークロード評価指標に関する研究、東北大学大学院修士論文、2008
- [8]狩川、青山、高橋、古田：認知工学的手法に基づく航空管制システムに関する研究(4)―管制官の認知タスクシミュレーション―、ヒューマンインタフェースシンポジウム 2007 pp. 557-560 2007