

認知モデルに基づく航空管制シミュレーションに関する研究

The Research on Air Traffic Control Simulation Based on Cognitive Model

加納拓貴* 狩川大輔* 高橋信* 石橋明** 古田一雄***

Hiroki Kano, Daisuke Karikawa, Makoto Takahashi, Akira Ishibashi and Kazuo Furuta

* 東北大学大学院工学研究科

* Graduate School of Engineering, Tohoku University

** 日本ヒューマンファクタ研究所

** Japan Institute of Human Factors

*** 東京大学大学院工学研究科

*** Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

Keywords: 航空管制(Air traffic control), ベイジアンネットワーク(Bayesian network), 認知モデル
(Cognitive Model)

連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01 東北大学大学院 工学研究科 量子エネルギー工学
専攻 若林研究室 加納拓貴, Tel/Fax(022)795-7921, E-mail:hiroki.kano@luke.qse.tohoku.ac.jp

1. 序論

1.1 背景

2003 年一年間における世界の航空旅客輸送量は 17 億人に上り、1993 年から過去 10 年間の需要の伸び率は 41%を越えている。今後アジア・アフリカ地区における需要の増大に伴って輸送量の大幅な伸びは、当分の間続くと予測されている。その一方で、航空輸送の安全性に関する指標に目を向けると、状況は必ずしも楽観的なものではない。例えば、航空機 100 万回出発あたりの事故件数(事故率)を見てみると、その値は 1970 年代後半以降下げ止まりの傾向が続いている^[1]。今後この事故率の低減が図られなければ、需要の増大に伴って、事故件数も大幅に増加すると指摘されている。

航空機のハード的な信頼性が大幅に改善された一方で、事故率の低減が達成されていない要因として、ヒューマンエラーによる事故が減少していないことが指摘されている^[2]。その一つの対策として航空機においてはコックピットのインタフェースの改善等が行われている。一方で航空管制においてもレーダーの導入や、地上設備の拡充などを通じて、信頼性の向上が実現されてきた。しかし、近年、航空管制に関連した航空機事故が連続して発生している。その例として本邦における焼津市上空ニアミス事故、海外においてはドイツ南部上空空中衝突事故といったものが挙げられる。これらはパイロットと管制官の不適切なコミュニケーションによって引き起こされたと考えられており^[3] 航空機の安

全に対するシステム全体としての複合的な繋がりを検証する必要があると指摘されている。しかし、従来からの研究では、航空機と航空管制は別々に研究されてきており、それらを連携した研究例は少ない。

航空システムの安全性を向上させるためには、航空システム全体としての検討が必要であるが、従来はシステムの一部の改善を行うことが、全体としての安全性にどのような影響を与えるかについての評価方法が存在していないという問題がある。例えば、焼津市上空ニアミス事故を契機にパイロットのみに提供されていた航空機同士の衝突防止警報装置 (TCAS) の情報を管制官側に提供するという試みが行われているが^[4]、警報作動時に管制官が採るべき行動を規定していないといった問題があることから、管制官側はその取り組みに対して反対の立場を表明している。このように航空管制を取り巻く環境において様々な問題があるにも関わらず、それを適切に評価する手法が確立されていないというのが現状である。

1.2 目的

本研究では、前項で提示した航空管制を取り巻く様々な問題をシミュレーションベースで評価する手法として、航空管制官とパイロットを含む航空運航時のタスク環境を模擬したシミュレーションの構築を行う。本稿においては、その第一段階として以下の目標を設定している。

管制官の認知モデル (状況認識、行動決定モデル) に基づくシミュレーションの枠組みを構築し、通常時に管制官がパイロットに対する指示などの基本的なインタラクションのシミュレーションを行う。

シミュレーションにおいて飛行シナリオを変化させることで、管制官とパイロットのインタラクションの内容・頻度の

変化を解析し、シミュレーションの基礎的有効性を評価する。

2. 航空管制システム

本章では航空管制業務の概要について述べる。

航空機の運航に際しては、出発空港において飛行計画の承認を受ける段階から、到着空港において駐機場に停止するまで常に航空管制官の指示を受ける。しかしながら、運航中の全ての飛行フェーズにおいて常に同一の管制官から航空管制業務が提供されるわけではない。航空管制業務は空港内、空港周辺、航空路上等、地理的に分割された領域 (空域) ごとに異なる管制官によって行われている。

以下の項では、飛行フェーズに順じて管制業務の詳細を述べる。

2.1 飛行場管制業務

主に管制圏 (空港の標点から半径 9km の円内) において当該空港を離発着する航空機に対して行われる業務である。離発着の順序や方式、時刻等の指示を行う。またその他に空港内の誘導 (グラウンド) や管制承認の中継 (デリバリー) などの業務も行われる。

2.2 進入管制業務

大きく分けて出発 (ディパーチャー) と進入 (アプローチ) の 2 つがあり、当該空域内の航空機に対して、順序、経路、針路、高度等の指示を行う。

2.3 航空路管制業務

主に進入、飛行場の各管制業務の空域以外を飛行する航空機に対して、経路、針路、高度等の指示を行う。空域は複数のセクターに分割され、セクターごとに管制が行われる。また、管制承認も行う。

航空管制業務の流れを図 1 に示す。



図 1 航空管制業務の流れ

3. 手法

本章では、シミュレーションの構築方法、それに用いた手法について述べる。本研究では、航空路管制業務を対象として、シミュレーションの構築を行った。

3.1 システム構成

本システムは空域モデル、ヒューマンモデル及び航空機モデルから構成されておりヒューマンモデルは更に管制官モデルとパイロットモデルからなるシステムとした。

システム全体の構成を図 2 に示す。

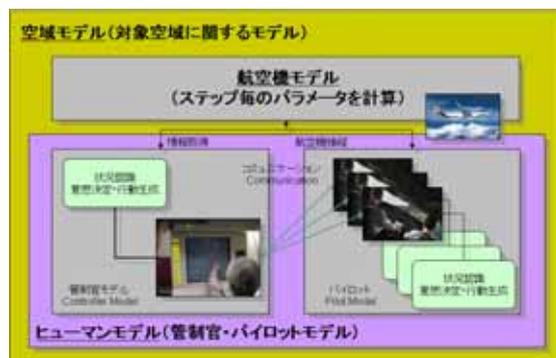


図 2 システム構成

3.2 空域モデル

空域モデルとは空域における無線航法援助施設・FIX(無線航法援助施設からの距離及び方位で定められた地上の特定点)及び航空路の位置に関するモデルである。

本研究では対象空域として東京航空交通管制部(東京 ACC)が管轄する関東北セクタ

ー(T03 セクター)を対象とした。

当該セクターは本邦有数の航空管制量を有しており、そのタスクも多岐にわたる複雑な空域である。更に、現在、独立行政法人電子航法研究所と東京大学の共同研究として関東北セクター担当の管制官に対するタスク分析が行われている^[5]。今後、同研究の成果や担当管制官に対するインタビューなどから、当該セクターに関するより詳細な見聞が得られることが期待されている。以上の理由により本研究では対象空域として関東北セクターを扱うこととした。

関東北セクターの位置を図 3 に示す。



図 3 関東北セクター(赤枠)

3.3 ヒューマンモデル

ヒューマンモデルとは空域、航空機の各モデルから情報を取得することで状況を認識し、意思決定したのち行動を行うモデルである。更に、ヒューマンモデルは管制官モデルとパイロットモデルに分けられ、互いに相手のモデルから影響を受ける。管制官モデルは航空機モデル及び空域モデルからシステム全体の様子を把握し、必要な指示をパイロットモデルに対して行う。

現段階において、パイロットモデルは定型的な管制官への応答及びそれに応じた航空機操作を行う簡易モデルとしている。ここで

は管制官モデルの概要について述べる。

3.3.1 管制官モデルの基本構成

管制官の認知プロセスは図4に示すようなループ構造になっているとの主張がなされている^[6]。本研究においても航空路管制業務にあたる管制官の認知プロセスを下記のループとして表現した。

担当セクター内の航空機の動きをレーダー画面と無線通信によりモニターし、必要に応じて、近い将来の交通状況を予測する。

新たな航空機がセクター内に入域した場合に、当該機を含めた近い将来の状況を予測する。

近い将来においても全ての航空機に定められた管制間隔が維持されると判断された場合は、引き続きモニターを実行する。

近い将来において管制間隔が維持できないと判断された場合は、新たな針路・速度・高度を管制指示としてパイロットに伝達する。

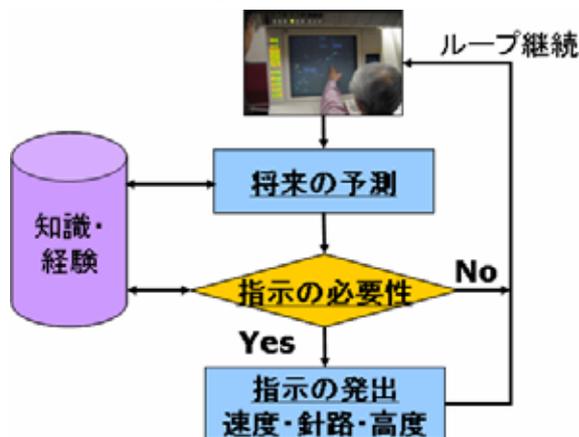


図4 管制官の認知プロセス

3.3.2 注意配分のモデル化

図4で示すとおり、管制官は航空機の色度や高度などの基本的パラメータを知覚し、状況を認識している。ここでは、知覚されたパラメータより詳細な情報を獲得するために

管制官が行う注意配分についてモデル化を行う。

通常、管制官はモニター上の航空機を知覚して状況を把握する際、単純な航空機間隔や位置関係に基づいて行うのではなく、セクター固有の「イベント」ごとにその状況を把握していることが知られている^[7]。イベントとは無線航法支援施設やFIX等、特定の地点における航空機間隔、新たにセクターへ進入する航空機が与える影響、空港へ着陸するために必要な指示等、管制業務を行う上で必要なタスクに関する一定の「まとめり」を指す。管制官はイベントごとに関連する航空機の状態を把握し、必要ならば回避のための指示を行うことになる。通常、管制官は一つのイベントに対して状況をモニターするのではなく、複数のイベントを同時にモニターすることになるため、適切な注意配分が必要となる。

本シミュレータではこの管制官の注意配分に関するモデルを構築する上で、ベイジアンネットワークと呼ばれる手法を用いた。

3.3.3 ベイジアンネットワーク

ベイジアンネットワークとは不確実性の高い対象領域において、限られた情報からでも合理的な推論を行うことができる手法である。具体的には統計学におけるベイズの定理を応用したものであり、対象領域を「状態仮説」ノードと、仮説を裏付ける「証拠」ノード及びノード間の条件付確率で表現したものである。

本研究におけるベイジアンネットワークの利用方法とその理由について述べる。本研究において、モデリング対象領域は管制官のイベントに対する注意配分の決定であり、証拠(ノード)として各イベントに関連するパラメータ(高度差、水平間隔、交通量等)を獲得することで状態仮説(ノード)である「どのイベントに対して注意を配分すべきか」

という信念を得ることができるモデルとして用いている。管制官のイベントに対する注意配分の決定にベイジアンネットワークを用いた理由は、不確実性の高い状況においても信念を定量的に求められ、更には過去からの連続性を表現できるといった観点からである。

本研究で構築したベイジアンネットワークを図5に示す。管制官が注意を配分するイベントとして航法支援施設 GOC、TLE、SWAMP（図7、8参照）を設定した。更に、証拠となる各イベントの基本的パラメータとして「高度差」、「水平間隔」、「交通量」及び「経過時間」を設定した。経過時間とは管制官が当該イベントにおいて最後に行動をとってから経過した時間を意味し、これは通常、管制官が各イベントに対して周期的に注意を配分しながらモニタリングを行っていることを模擬したものである。

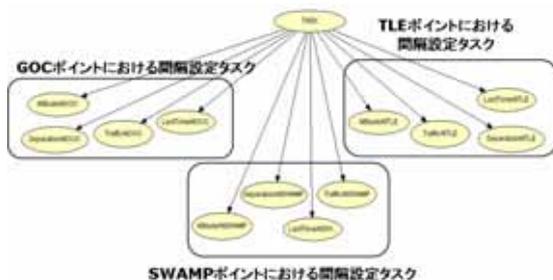


図5 ベイジアンネットワーク

3.4 航空機モデル

航空機モデルは空域中を飛行する航空機に関するモデルである。航空機の物理的特性を模擬し、ステップ毎にパラメータ（速度、高度、磁針路及び垂直速度）の計算を行うモデルである。航空機モデルは、管制官モデルから指示を受けたパイロットモデルによる操縦に対して応答するものである。

4. 実装

図6に構築したシミュレータのGUI

(Graphical User Interface) 画面を示す。GUI表示では実際の航空機の挙動とリアルタイムで行われるコミュニケーションの関係を見ることができるよう両者を同時に表示可能なものにした。更に、シミュレーション終了時に、シミュレーション中に行われたコミュニケーションをログファイルとして保存することで、シナリオや設定パラメータを変更した場合に、発生したコミュニケーションの違いを検査することができるものとした。

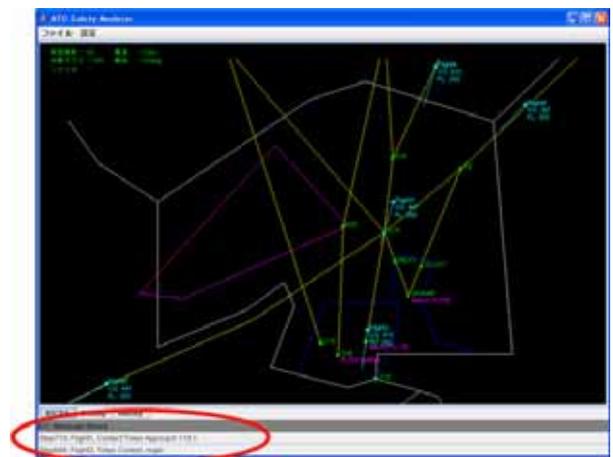


図6 シミュレータのGUI
(赤枠はコミュニケーション内容)

5. シミュレーションの評価

本シミュレーションの基礎的有効性を検証するために簡単なシナリオに基づいた交通流を再現し、管制官モデルの検証を行った。

5.1 シナリオ

シナリオは図7、8に示した2種類の航空路に対して、異なる密度の交通量（単位時間当たりの航空機発生数）を3種類、合計6通り作成した。2種類のルートとそのシナリオは次の通りである。

[ルート1及びそのシナリオ]

図7で示したルートは北日本方面から羽田空港への到着機が利用するルートでありこのルートをルート1とする。図中のGOC、

TLE という各無線航法支援施設で間隔設定が必要となる。このルートで用いたシナリオでは、航空機の発生間隔を 60、100、140 秒、発生航空機数を 5 機とした。

[ルート 2 及びそのシナリオ]

ルート 2 はルート 1 に加えてヨーロッパ方面から成田空港への到着機が GOC ポイントにおいて交差するルートを設定した。ルート 1 のポイントに加えて SWAMP という FIX においても間隔設定が必要となる。このルートを用いたシナリオでは、航空機の発生間隔を 30、50、70 秒（30 秒の場合は 30 秒間隔で異なる方向からの航空機の発生。同一方向からは 60 秒間隔）発生航空機数を 10 機（GOC-TLE 方面 5 機、GOC-SWAMP 方面 5 機）とした。

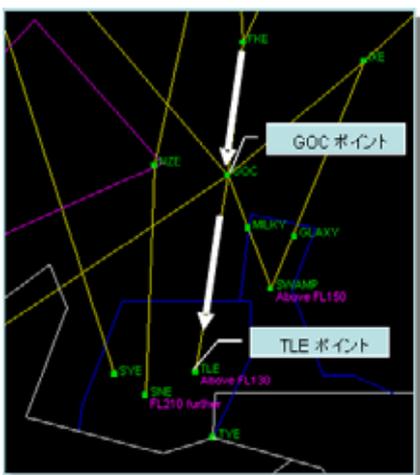


図 7 ルート 1

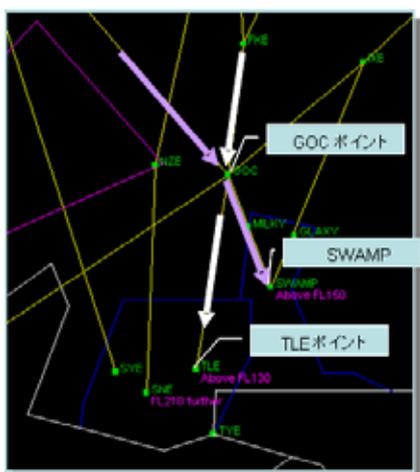


図 8 ルート 2

5.2 検証結果

ルート 1 を用いた結果を表 1 に示す。また、ルート 2 を用いた結果を表 2 に示す。

表 1 ルート 1 の結果

航空機数	航空機発生間隔 [sec]	管制指示回数	内訳
5	60(高頻度)	4回	GOC×2 TLE×2
5	100	3回	GOC×2 TLE×1
5	140(低頻度)	0回	---

表 2 ルート 2 の結果

航空機数	航空機発生間隔 [sec]	管制指示回数	内訳
10	30(高頻度)	15回	GOC×7 TLE×5 SWAMP×3
10	50	13回	GOC×6 TLE×4 SWAMP×3
10	70(低頻度)	1回	GOC×1

5.3 考察及び基礎的有効性の評価

[ルート 1]

ルート 1 の場合では、交通量が多い二つのシナリオにおいて航空機間隔を保つための指示が多く出されている。レーダー管制における管制間隔（安全確保のために維持されなくてはならない最低航空機間隔）は 5NM（約 9km）とされており、航空機の通常の速度の場合、約 1 分の距離となる。つまり 60 秒間隔で発生する交通量は実際の業務において非常に多い交通量となる。

60 秒間隔の場合、5 機の航空機に対して 4 回の管制指示が出され、GOC 及び TLE での管制間隔のためにそれぞれ 2 回の減速指示が発出された。また、100 秒間隔の場合では、60 秒間隔の場合ほど厳しい状況ではないが、60 秒間隔の場合と同様に考えることができる。140 秒間隔の場合では、常に十分な管制間隔

が保たれているため、管制指示は出されていない。このような管制指示回数の変化は実際の管制官の場合と同様の傾向を示しており、本シミュレーション結果は妥当であると考えられる。

[ルート2]

ルート2の場合では、交通量の多い二つのシナリオにおいて極端に指示回数が増えている。30秒間隔の場合では、ルート1の検証からもわかるように同一ルート上の航空機が非常に混雑していることに加えて、更にGOCポイントにおける他方向からの交通流と交差することになる。このため、ルート1で行われた同一ルート上での回避と共にGOCの交差のための回避が同時に行われていると考えられる。TLEにおける指示が5度行われているが、これはルート1で航空機を60秒間隔で発生させた場合、2回であったのに比べ、大きく増加している。GOC-TLE方向だけを考えた場合、どちらも60秒間隔で5機の航空機を発生させるという条件は同じであるが、GOC-SWAMP側のルートが加わることでその影響がGOC-TLE側のルートにも波及していることがわかる。このシナリオも実際にはやや過剰な数の航空機数ではあるが、起こりうる管制指示の変化を示しているといえる。50秒間隔の場合も、30秒間隔の場合と同様な解釈を与えることが可能である。70秒間隔で発生する場合は同一方向においても、またGOCにおける対抗機に関しても十分な管制間隔が維持されており指示を出す必要がほとんどなかったと考えられる。ルート1と同様に、このような管制指示回数の変化より、本シミュレーション結果の妥当性が得られたと考える。

以上の結果より、管制官の最も基本的な業務である管制間隔の確保に関しては、実際状況に即した妥当な判断が行われていると

結論付けることができる。

6. 結論及び今後の展開

本研究では、管制官とパイロットからなる航空管制システムの安全性向上のため、その複雑なタスク環境を模擬可能なシミュレーションの構築を目標とした。具体的には航空管制官の認知モデルをベイジアンネットワークにより表現し、交通状況等に応じて管制官が持つ注意配分をシミュレーションすることを試みた。さらにシナリオに基づいたシミュレーション結果から管制指示の発生回数の変化の点で現実の管制官と同様の傾向が確認でき、本シミュレーションの基礎的有効性を確認した。

ただし、現段階では、本シミュレーションは非常に限定的なものであると考えられる。今後、本シミュレーションをより現実に即したものとし、最終的な目標である、人間を含む複雑な航空管制タスク環境を再現するためには次の点を考慮する必要があると考えている。

実際の航空管制業務は非常に複雑で多岐にわたる。現在は限定的に実装している航空管制業務を更に広範囲に広げ、より精密な作業環境を再現する。

本研究では管制官のモデル化に重点を置き、パイロットモデルに関しては非常に限定的なものであった。今後は、パイロット側のモデル化も行い通常行われている航空機側からのリクエスト業務等についても検討が必要である。

ヒューマンエラーや時間制約下における管制官・パイロットの思考の変化など、ヒューマンファクタに関するモデル化が必要である。

本研究は文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(B))「航空管制業務の安全性に関する認

知システム工学研究」(課題番号 17310091)により行われている。

7. 参考文献

- [1] Boeing, Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents World Wide Operation 1995-2003, Airplane Safety Boeing Commercial Airplanes.(<http://www.boeing.com/news/techissues/>), 10-12, 2003
- [2] 遠藤浩、ハイテク機はなぜ落ちるか、講談社、1998
- [3] 国土交通省 航空・鉄道事故調査委員会、航空事故調査報告書 日本航空株式会社所属 JA8904(同社所属 JA8546との接近)、2002
- [4] 全運輸労働組合、シリーズ・空の安全を守る大運動 これが良いのか再発防止「日本航空 907 便事故の再発防止に向けた安全対策について」の検証、2002
- [5] 井上、青山、蔭山、古田、航空管制業務のタスク分析に関する研究、ヒューマンインタフェースシンポジウム 2004 論文集、887~889、2004
- [6] 佐藤祐喜、航空路管制業務のタスク分析、電子航法研究所研究所報告 第 87 号、1997
- [7] Mark W. Smolensky & Earls S. Stein, Human Factors in AIR TRAFFIC CONTROL, Academic Press, 1977