

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 7日現在

機関番号：11301  
 研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2009～2011  
 課題番号：21310103  
 研究課題名（和文）  
 予防安全支援のための創発型認知シミュレーションの開発とその適用手法に関する研究  
 研究課題名（英文）  
 Research on Development of Emergence-oriented Cognitive System Simulation and Its Application Method for Supporting Preventive Safety  
 研究代表者  
 狩川 大輔（KARIKAWA DAISUKE）  
 東北大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号：40436100

研究成果の概要（和文）：

航空管制分野を対象として、創発型認知シミュレーションおよびチーム認知シミュレーションのプロトタイプを開発すると共に、その一部を改良・高度化した実践適用型の認知シミュレーションツールを開発した。それを、教育・訓練支援を目的とした安全性・効率性向上のための管制官の実践知可視化、および新たな航空運用方式の予備的評価等の予防安全に関する現実的課題に対して試行的に適用し、基本的有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：

Prototype systems of an emergency-oriented cognitive system simulation and a team cognitive simulation have developed for Air Traffic Control (ATC) domain. Based on the prototype systems, cognitive system simulation tool has been constructed as of a test bench for practical use. The basic validity and effectiveness of the proposed simulation tool for supporting preventive safety has been evaluated through simulation experiments for the purposes of visualization of practical knowledge of air traffic control officers for training support and of preliminary evaluation of new air traffic operation system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
総計	5,400,000	1,620,000	7,020,000

研究分野：社会システム工学・安全システム

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学、細目：社会システム工学・安全システム

キーワード：ヒューマンファクタ、予防安全、認知モデリング、航空管制

1. 研究開始当初の背景

事故やインシデント発生後の安全対策のみならず、それらを未然に防止する「予防安全」の実現が求められている。しかし、事故やインシデントは、システムを構成する多数

の人間・機械・環境の動的かつ複雑な相互作用の結果、当事者の予期に反して生じる「創発現象」であり、従来手法による発生可能性の予測と事前対策は困難な場合が多い。従来型の安全対策としては、エラーやパフォーマンス

ンスの逸脱等、「失敗事象」に対するバリアの設定が従来多く行われてきた。しかし実際には、多重のバリアを備えたシステムにおいても想定外の事象による事故やインシデントが発生しており、それらの決定的な減少にまでは至っていない。このような現状を踏まえ、近年新たに「機能共鳴事故モデル」が提案されている。機能共鳴事故モデルは、「人間-機械系システムの各機能のパフォーマンスは常に揺らいでおり、単体では安全上重要ではない程度の揺らぎであっても、特定の揺らぎが重なって増幅されること（機能共鳴）により、システムの安全保護機能喪失が発生し得る」とし、パフォーマンス変動管理による予防的安全対策を提唱している点で画期的である。

本研究では、機能共鳴を再現可能な創発型認知シミュレーションモデルを開発すると共に、現場熟練者と共同の有効性検証プロセスを通じて、認知シミュレータ実用上の課題とその解決策について実践的な研究を行う。以上により、安全工学分野・認知工学分野に寄与しうる知見の蓄積を目指す。

## 2. 研究の目的

事故の発生を未然防止する予防安全を支援することを目的として、航空管制業務を対象例に、複雑系解析等で用いられるマルチエージェント・シミュレーションを認知モデリングに応用し、人間-機械系相互作用の逐次的分析が可能な創発型チーム認知シミュレーションの設計方法論を構築する。さらに、その基盤的実用手法として、「熟練者の『気づき』を促すシミュレータ」という実用モデルを提案し、複数の人間とシステムが関わる創発的不具合事象（思いがけないトラブルやパフォーマンス低下）のシミュレータを用いた予見的分析支援手法を構築すると共に、予防安全研究分野における研究手段としての認知シミュレータの基本的有効性を検証する。

## 3. 研究の方法

フェーズ1では、「環境やチームとの認知的相互作用の実態解明と、それに基づく認知シミュレーション技術の高度化」を行う。様々な要因の重なりによって創発的に発生する不具合事象をシミュレーションするためには、環境やチームとの動的な相互作用のモデリングと、その相互作用に応じて多様な行動を生成可能なヒューマンモデルが必要となる。このためフェーズ1では、まず管制現場のデータをエスノメソロジーの方法論に従って分析し、複雑システムにおける認知的相互作用の実態を解明する共に、定性的な認知的相互作用影響モデルを構築する。さらに、認知的相互作用影響モデルをシミュレ

ータに実装する手法について、人工知能分野・認知工学分野の知見を用いながら検討し、複雑な人間-機械系相互作用の逐次的分析が可能な創発型チーム認知シミュレーションの設計方法論の構築を図る。

フェーズ2の主たる目的は、フェーズ1で提案した創発型チーム認知シミュレーション手法の実践的妥当性検証と、その利点と限界を踏まえた基盤的実用手法を提案することである。ここでは、機能共鳴事故モデルの分析的研究への適用と、「熟練者の『気づき』」を促し、効果的な予防安全対策の立案・実施に有益な実践知を引き出す認知シミュレータ」という実用モデルを提案すると共に、その基本的有効性について、熟練者（管制官・パイロット）と共同のシミュレーション実験を通じて実践的に検証する。

## 4. 研究成果

### (1) 創発型認知シミュレーション・プロトタイプの開発

航空管制現場におけるレーダー画面映像、実時間シミュレーション実験のデータ、管制官に対するインタビュー結果等を複数のケースについて総合的に分析し、管制官の行った行動を構成論的に説明することを通じて、管制官の認知プロセスに影響を与える要因について検討を行った。その結果、明示的な管制処理タスクの存在のみならず、「状況に潜在する不確実性」が管制官のモニタリング・パターン等の認知プロセスに影響を与える主要な要因の1つであり、管制官が不確実性の低減と効率的な航空交通流の実現を両立させるような管制処理戦術を選択していることが確認された。

また、本研究グループで開発した管制官認知シミュレータ COMPAS (COgnitive system Model for simulating Projection-based behaviors of Air traffic controller in dynamic Situations) をテストベンチとして、マルチエージェント・シミュレーション手法を活用した認知モデリング技術の改良・洗練化を進め、「状況の不確実性の影響により、管制官モデルの認知プロセスや管制タスクパフォーマンスが影響を受ける状況」のシミュレーション実験を行った。実験で用いた航空交通流シナリオは図1のとおりである。本シナリオでは、BBB542便、AAA573便、AAA736便、NNN88便の4機の航空機が飛行しており、以下の6つの管制処理を行う必要がある。

#### ①BBB542便の高度処理（降下）

BBB542便をTLEポイント（図1参照）までに13000feetに降下させる。

#### ②AAA573便の高度処理（上昇）

AAA573便をエリア内で巡航高度37000feetまで上昇させる。

- ③AAA736 便の高度処理（上昇）  
AAA736 便を空域内で巡航高度 32000feet まで上昇させる。
- ④NNN88 便の高度処理（降下）  
NNN88 便を、図 1 弧線(a)で示す地点までに 15000feet まで降下させる。
- ⑤AAA736 便と BBB542 便の干渉処理  
AAA736 便の飛行計画ルートは、GOC ポイント（図 1 参照）を經由して、一点鎖線で示したルートを通して西方方面に向かうものであり、BBB542 便および AAA573 便の飛行経路を横切るように飛行することとなる。上述の高度処理を行う上でこれらの航空機間に水平 5 Nautical Mile (NM) または垂直 1000feet の管制間隔が維持されるよう必要な処理を行わなければならない。
- ⑥AAA736 便と AAA573 便の干渉処理  
AAA736 便は、GOC ポイント付近で BBB542 便と交差した後、さらに巡航高度 37000feet に向かって上昇中の AAA573 便の妨げとなる可能性がある。従って、AAA736 便と AAA573 便の干渉についても処理が必要である。

以上に述べた実験シナリオについて、次の 2 つの処理戦術をとった場合のタスク処理効率、および COMPAS 中の管制官モデルによる情報獲得（モニタリング）のパターンの観点から分析を行った。なお、処理戦術①②のタ

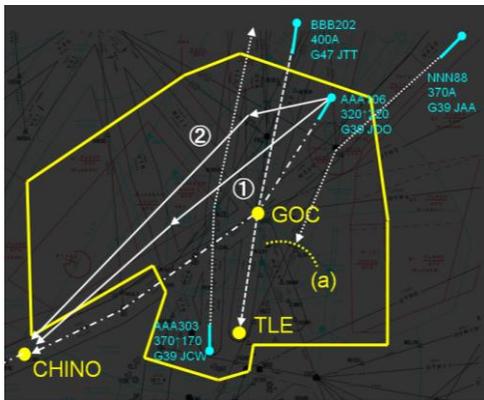


図 1 実験用交通流シナリオ

表 1 タスクレベルの定義

Lv.	タスクの状況	表示色
1	管制処理タスクは完了	緑
2	巡航高度 or 規定の高度への上昇/降下指示	黄
3	他機との干渉を解消する処理(管制間隔設定)、および規定に基づく+αの間隔設定(干渉機1機)	橙
3*	他機との干渉を解消する処理(管制間隔設定)、および規定に基づく+αの間隔設定(干渉機複数機)	赤紫
4	Level 3の中で時間的制約を強く受けるもの	赤

スク処理効率の分析・可視化にあたっては、各航空機に対して必要な管制処理を表すタスク指標であるタスクレベルを用いた。

戦術①:

AAA736 便に対して、ルート上の先のポイントである CHINO ポイント（図 1 参照）への直行を指示する戦術

戦術②:

AAA736 便を一旦西側にレーダ誘導し、BBB542 便と早期に交差させた後、CHINO ポイントへの直行を指示する戦術

COMPAS によって出力された戦術①②におけるタスクレベルの時系列グラフを図 2、図 3 に示す。シミュレーション開始時点での各航空機のタスクレベルは様々であるが、必要な管制処理が行われることにより、全ての航空機はタスクレベル Lv.1 となって、管制権が次の空域の担当管制官に引き継がれる。ここでは詳細な説明は割愛するが、両図に見られるとおり、戦術②をとった場合のほうが、管制処理がより早期に完了できている。特に AAA736 と AAA573 の干渉処理が完了した時点は、戦術①に比べてかなり早くなっていることが分かる。

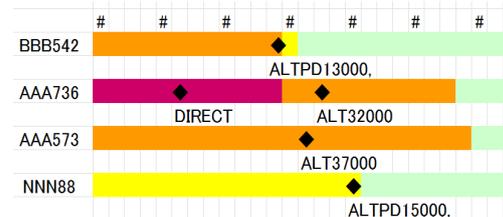


図 2 タスクレベルの時系列グラフ (戦術①)

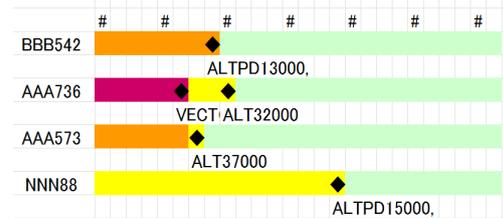


図 3 タスクレベルの時系列グラフ (戦術②)

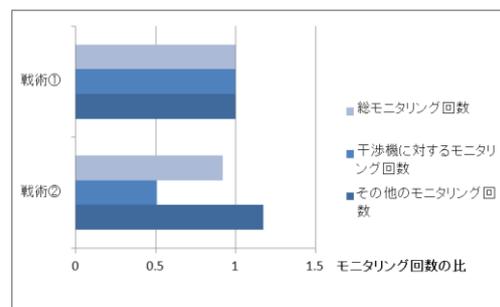


図 4 モニタリング・パターンの比較

次に、管制官モデルの認知プロセスや行動が記録されたシミュレーション・ログを用いて、両戦術をとった場合の管制官モデルのモニタリング・パターンについて比較を行った。図4は、管制官モデルの各航空機に対する単位時間あたりのモニタリング回数の比を、戦術①②それぞれについて表したものである。上段より、総モニタリング回数、干渉機に対するモニタリング（干渉する複数の航空機の状況およびその相互関係の確認）、その他のモニタリング（高度処理のための指示発出のタイミングの確認や、各航空機の追尾など）の回数を示しており、各々戦術①の場合を1として規格化している。図4に示すとおり、先の述べた戦術の差異に起因する航空交通状況の違いに応じて、管制官モデルのモニタリング・パターンが異なっていることが分かる。戦術②をとった場合、各航空機の干渉関係が早期に解消されることによって、「干渉機に対するモニタリング」は戦術①の場合よりも大幅に減少している。これに対して、高度指示発出のタイミング確認や各航空機の追尾のためのモニタリングを意味する「その他のモニタリング回数」は増加傾向が見られる。これは、干渉の早期解消によって生じた余裕を利用して、管制官モデルが各航空機に対するよりきめ細かなモニタリングを行っていることを示す結果であると考えられる。

以上のように、状況の変化に対して適応的に動作を変える創発型認知シミュレーションのプロトタイプを開発すると共に、その基本的妥当性を確認した。

## (2) チーム認知シミュレーション・プロトタイプの開発

相互信念モデルに基づき、管制官チーム（レーダー席、調整席）のチーム協調プロセスにおける相互作用をシミュレーションするプロトタイプ・シミュレータとその妥当性検証を行った。菅野によって提案された相互信念モデルは、A、Bの2人から成るチームのチーム認知を3層構造によって記述している。例えば、Aが持つ信念の体系は、「Aの認知（第1層）」「Bの認知に対するAの信念（第2層）」「Aの認知に対するBの信念に対するAの信念（第3層）」によって構成されている<sup>(\*)</sup>。開発した管制官チームのチーム認知シミュレーションは、2名の管制官の信念体系における認知的な相互作用を Observation / Completion / Assumption / Inference / Perception / Transmission として表現し、与えられた状況に応じた動的な相互作用の過程をシミュレーションするものである。実際の現場観察を通じて得られた3つのケースについて、現場観察データから推定可能な認知的相互作用と、シミュレーションによって再現された認知的相互作用を比較したとこ

ろ、概ね80%程度の整合性が示され、チーム認知シミュレーションの基本的妥当性が確認された。

(\*)Kanno T., The Notion of Sharedness based on Mutual Belief, Proc. 12th. Int. Conf. Human-Computer Interaction (Beijing, China), 2007年, 1347-1351.

## (3) 実践適用型認知シミュレーションツールの開発

認知シミュレーションの予防安全に関する現実的課題への適用可能性について検討するために、管制官認知シミュレータCOMPASの実用上のニーズについて実務者に対する聞き取り調査を行った。その結果、以下の2つのニーズが抽出された。

①高度な認知的タスクであり、従来は不可視であった管制業務の処理プロセスを、業務負荷やタスク処理効率の観点から可視化すること。それにより、管制官養成課程における技能伝承支援ツールとしての応用が期待される。

②時間制御など航空交通システムにおける新たな運用方式について、管制官の業務負荷の観点からその有効性を評価すること。

これらのニーズに対応するために、COMPASに実装されている管制官の状況認識プロセスモデルをベースに、それを改良・高度化したCOMPAS<sup>i</sup> (COMPAS in interactive mode) を構築した。以下では、上記①の技能伝承支援ツールとしての妥当性・有効性を検証するために行ったシミュレーション実験について詳細に述べる。

本シミュレーション実験では、現実的な実験用航空交通流シナリオとそれに対する2パターンの処理戦術(基準となる処理戦術Bと、管制官がより合理的であると判断する処理戦術E)を用意し、COMPAS<sup>i</sup>によるシミュレーション結果を以下の観点から検証した。

- COMPAS<sup>i</sup>によるシミュレーション結果と、管制官の見解(処理戦術Eのほうが合理性が高い)との整合性
- 合理性の差異の原因となっている管制処理上のポイントがCOMPAS<sup>i</sup>によって適切に可視化され、それが管制官による分析結果と一致しているか?

本実験におけるCOMPAS<sup>i</sup>によるシミュレーション結果を図5~8に示す。戦術B(図5, 7)と戦術E(図6, 8)の処理プロセスや結果の間には複数の違い見られるが、ここでは羽田到着機(ANA882, ANA50, JAL1002)に関する違いについて述べる。羽田到着機に対する管

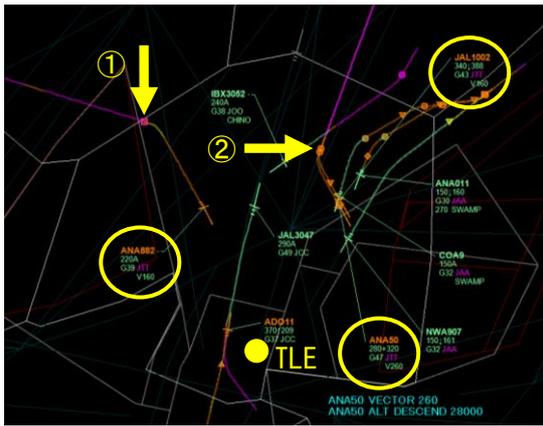


図5 各航空機の航跡（戦術B）

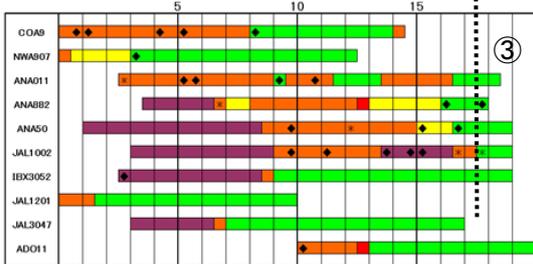


図6 タスクレベルの時間変化（戦術B）

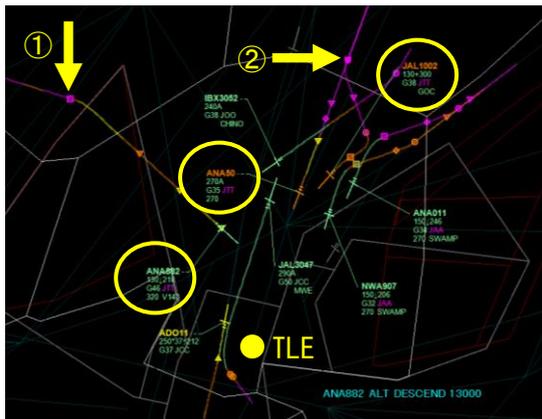


図7 各航空機の航跡（戦術E）

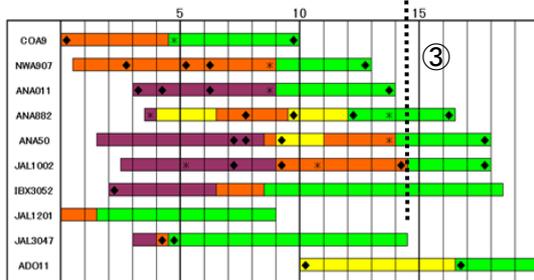


図8 タスクレベルの時間変化（戦術E）

制処理の内容は、TLEポイント（図5,7参照）までに各航空機間に10NMの間隔をつけ一列に並べ、かつ13000feetまでの降下指示を发出して管制権を引き継ぐことである。戦術B、戦術E共に、羽田到着機に対する基本的な処理戦術（ANA882をショートカットさせて1番

機とし、その後ろにANA50, JAL1002をつける）は同一である。しかし、管制官がより合理的であると判断する戦術Eにおいては、各航空機に対する指示発出のタイミングが戦術Bよりも早くなっている（図5,図7中の矢印①②参照）。その結果として、羽田到着機に対する処理完了時刻（羽田到着機3機のタスクレベルが全てLv.1になった時刻）は、戦術Bの17分半（図6破線③）に対して、戦術Eが14分半（図8破線③）となっていることが分かる。以上のことから、COMPAS<sup>i</sup>による可視化を通じて、羽田到着機の処理に関する戦術Eの相対的な合理性が確認され、管制官の見解と一致する結果が得られた。また、指示発出のタイミングが管制処理の安全性・効率性に影響を与える重要なポイントである可能性が示唆された。これは、管制業務を安全かつ成功裏に遂行するための管制官の熟練に基づく実践知の一端を可視化されたものであると言え、実践知に対する気づきと客観的分析を支援すると共に、COMPAS<sup>i</sup>の管制官訓練支援ツールとしての有効性を強く示唆する結果であると考えられる。

同様に、COMPAS<sup>i</sup>を用いて、航空機の経路上のポイントの通過時刻を指定する新たな航空運用方式（時間制御）の実施を模擬した交通流シナリオのシミュレーションを行ったところ、業務負荷の低減効果が確認された。このことから、航空運用方式に関する管制官の認知的負荷の観点からの事前評価用途に対してCOMPAS<sup>i</sup>が適用できる可能性が示された。

以上の結果は、認知モデルを実装したシミュレーション・ツールを用いることにより、管制官の実践知や認知的負荷の一端を可視化し客観的に分析可能にしたものと言え、認知シミュレーションの実践的適用の事例ならびにその方法論につながるものであると考える。

これまでに述べてきたように、本研究においては、創発型認知シミュレーションならびにチーム認知シミュレーションのプロトタイプを構築すると共に、それをベースとして、現実的課題への適用可能性検証を目的とした認知シミュレーションツールCOMPAS<sup>i</sup>の開発を行った。COMPAS<sup>i</sup>においては、チーム認知プロセスのシミュレーション機能を統合するまでには至らなかったが、管制官のタスク処理プロセスの可視化による技能伝承支援や、新たな航空運用方式導入に伴う認知的負荷の事前評価等の現実レベルの予防安全上の課題に対する適用可能性が示された。これらの結果に関しては実務者からも高く評価されており、国土交通省・航空局、航空保安大学校・岩沼研修センターの協力を得て、今後も研究を継続する計画である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

1. Furuta, K., Ohno, K., Kanno, T., Inoue, S., Simulation of Team Cooperation Processes in En-Route Air Traffic Control, Air Traffic Control, InTech (ISBN 979-953-307-795-5), 査読有, 2012年, 印刷中
2. Karikawa, D., Aoyama, H., Takahashi, T., Furuta, K., Wakabayashi, T., and Kitamura, M., A visualization tool of en route air traffic control tasks for describing controller's proactive management of traffic situations, Int. J. Cognition, Technology, and Work, 査読有, DOI: 10.1007/s10111-012-0222-y, 2012年 (電子版のためページ数なし)
3. Nonose, K., Kanno, T., and Furuta, K., A team cognition model derived from an analysis of reflection about cooperation, Int. J. Cognition, Technology, and Work, 査読有, 14-1巻, 2012年, 83-92
4. Ohno, K., Kanno, T., Furuta, K., Inoue, S., Simulation of Team Cooperation Processes in En-Route Air Traffic Control, Proc. 29th Conf. of European Assoc. Aviation Psychology, 査読有, 2010年, 130-134

[学会発表] (計13件)

1. 狩川大輔, Resilience Engineering の視点に基づく航空路管制業務の分析, 第4回横幹連合カンファレンス, 2011年11月28日, 北陸先端科学技術大学院大学
2. Aoyama, H., An Expression of Air Traffic Controller's Workload by Recognition-Primed Decision Model, 27th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences, 2010年9月23日, Nice, France
3. Furuta, K., Multi-scale Human Modeling for Society Design, Int. Conf. Social Intelligence Design 2010, 2010年9月14日, London, UK (招待講演)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

狩川 大輔 (KARIKAWA DAISUKE)  
東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 40436100

(2) 研究分担者

高橋 信 (TAKAHASHI MAKOTO)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 00243098

青山 久枝 (AOYAMA HISAE)  
電子航法研究所・航空交通管理領域・  
主幹研究員

研究者番号: 40392790

古田 一雄 (FURUTA KAZUO)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 50199436

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号: