

## 2.1. 管制処理プロセス可視化ツールを用いた訓練支援の可能性

航空交通管理領域 ※狩川 大輔、青山 久枝、東北大学大学院 高橋 信、  
 東京大学大学院 古田 一雄、安全マネジメント研究所 石橋 明、テムス研究所 北村 正晴

### 1. はじめに

近年の航空交通量の増大に伴って、航空交通の安全性・効率性の一層の向上が求められている。そのための重要な課題の1つとして、航空管制システムの中核を担う管制官の効率的な養成が挙げられる。本研究グループでは、航空管制のヒューマンファクタに関する研究を約7年間にわたって継続してきているが、それを通じて得られた知見に基づけば、より効率的な管制官養成訓練の実現には、少なくとも以下のような困難さや課題があるものと考えている。

#### (1) タスク処理プロセスの不可視性

管制業務の中核部分、すなわち「安全かつ効率的な交通流を形成するために、各航空機をどのように飛行させるか？」という戦術の決定は認知的なものであり、外部から観察することができない。また、タスク処理の過程において経験に基づく直感的な判断が多用されるため、教官（熟練管制官）が、実務経験を持たない訓練生に対して「なぜ、ある特定の時点において、そのような管制処理を行う必要があるのか？」を明快に説明することは困難である。そのため、現状の管制官養成訓練は、シミュレータ訓練やOJT等の実践を通じたスキルの体得が中心となっている。この種の実践訓練は今後も必要不可欠であると考えられるが、それに加えて、訓練効率化の観点からはタスク処理プロセスの可視化を通じた体系的・理論的なスキル伝承の支援が望まれる。

#### (2) 相克する複数の目標とそのマネジメント

航空管制業務を行うにあたっては、将来の航空交通状況の予測が非常に重要である<sup>[1]</sup>。その一方で、航空機の飛行状態や、気象条件の変化等の他の人間や自然環境が影響する要因を精密に予測することは現実的に不可能であり、管制官は、常に状況が変動する可能性を考慮に入れた上で業務を行う必要がある。つまり、管制官

は、「現状の航空交通状況に対して、より高い安全性・効率性を確保すること」と、「状況が変動した場合でも、それらが大きく損なわれないようにすること」のバランスを適切に保つことにより、変動条件下で安全かつ円滑な交通流を維持し続けることを求められていると言える。このような時としてトレードオフの関係にある複数目標のマネジメント能力の獲得をいかにして支援していくか？という点も重要な課題であると考えている。

以上の問題認識に基づいて、本研究グループでは、管制官養成訓練支援を目的とした管制処理プロセス可視化ツールCOMPASi (COMPAS in interactive mode / COMPAS: COgnitive system Model for simulating Projection-based behaviors of Air traffic controller in dynamic Situations)の開発を行っている。本稿では、COMPASiの概要を述べると共に、それを用いた管制処理戦術の可視化・分析の試行事例について報告する。

### 2. 航空路管制業務の概要

航空管制業務は、航空機同士の衝突を防止するために航空機間に安全な間隔（管制間隔）を設定すると共に、航空交通の秩序ある流れを維持・促進することを目的としている。航空管制業務は、その業務範囲によって飛行場管制業務、ターミナルレーダー管制業務など5つに分類されるが、このうち本研究が対象とするのは航空路管制業務である。航空路管制の対象となる管制区は、セクターと呼ばれる空域に分割されており、通常、航空機との交信を担当する管制官（レーダー席）と、他のセクターや他官署との調整を担当する管制官（調整席）の2名のチームによって管制業務が行われている。

現在、本研究が対象としている空域（セクター）は、①関東南A (T-09) セクターおよび湘

南（T-14）セクター、②航空保安大学校岩沼研修センターで用いられている訓練用仮想空域、③関東北（T-03）セクター<sup>1</sup>である。このうち、T-03セクターは、図1および表1に示すような多様な航空機が飛行し、様々な管制処理が行われるセクターであること、また過去に8名の管制官の協力を得て実施した業務シミュレーション実験<sup>2</sup>のデータを当研究所が保有しており、それらとの比較を通じた妥当性検証が可能であることから、COMPASiの機能開発と基礎的評価にあたっての主な対象セクターとしている。

T-03セクターを飛行する各航空機に対する処理内容は、管制移管先である隣接する他セクター／進入管制区との間で取り決めが行われている。例えば、羽田空港への到着機に関しては、他機との水平5NM(Nautical Mile)または垂直1000feetのレーダー間隔を常に確保しつつ、当該機前後の羽田到着機との間に10NMの水平間隔を設定し（以下、到着機間の管制間隔以上

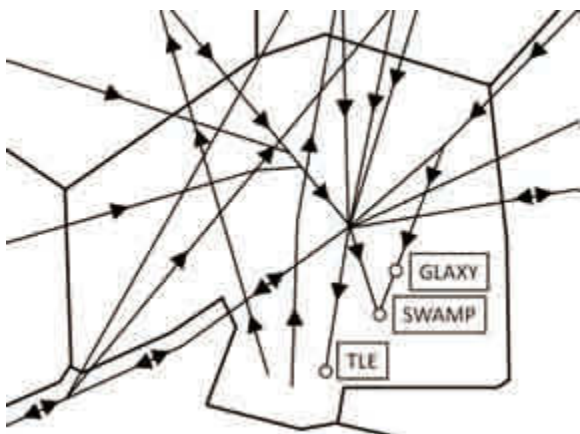


図1 T-03セクターの構造と主な交通流

表1 T-03セクターの主なトラフィック

➤ 羽田空港・成田空港から北方面への出発機・到着機
➤ 福島空港の出発機、到着機
➤ 仙台空港・山形空港の出発機、到着機
➤ セクター域内および周辺エリアにある宇都宮、百里、横田、入間、厚木等の各飛行場の出発機・到着機
➤ セクターを東西方向に横切るオーバーフライト機

<sup>1</sup> 本研究では、2006年当時のT-03セクターの空域・航空路・交通流を用いている。このため、以降のT-03セクターにおける業務内容に関する記述は全て2006年当時のものである。

の水平間隔設定タスクを指して「イントレイル・スペーシング」という)、かつTLEポイント（図1参照）を13000feetで通過するように指示を発出した上で、当該機の管制権をセクター境界線までに東京アプローチに移管することを求められている。これらの規程を達成するために管制官がとる手段としては、航空機に対する速度の指示、高度の指示、経路の指示（ヘディング、および先のポイントへの直行）がある。

### 3. 管制処理プロセス可視化ツール COMPASi

本章では、管制処理プロセス可視化ツールCOMPASiの概要について述べる。

#### 3.1 全体構成

図2にCOMPASiの概念図を示す。COMPASiは、管制官の状況認識モデルを備えたシミュレーション・ツールである。シミュレータ訓練等で用いられた航空交通流シナリオの初期状態と発出された管制指示のログを入力すると、COMPASi上で航空機の挙動計算や管制指示の発出が行われ、交通流が再現されていく。この時、実装されている管制官の状況認識モデルを用いて航空交通状況が分析され、その状況下において必要な管制処理（タスク）が自動的に抽出・記録される。これにより発出された管制指示とそれに伴うタスクの時間的変化、すなわち、管制処理プロセスが可視化されることとなる。COMPASiの詳細は、参考文献[3][4]に詳しい。

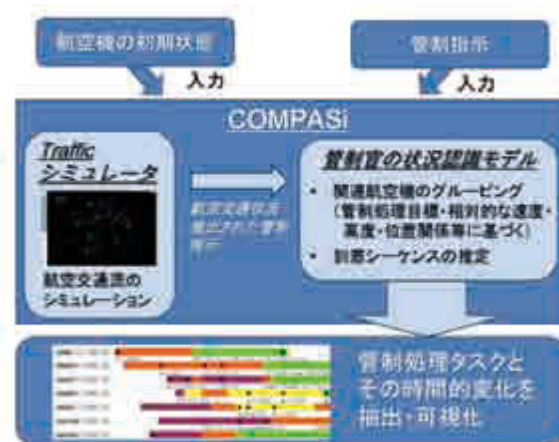


図2 COMPASiの概念図

### 3.2 タスク指標

航空交通流を分析し、タスクの自動抽出を行うためには、その基準となるタスク指標が必要となる。COMPASiでは、タスク指標として青山らによるタスクレベル<sup>2)</sup>（Task Demand Level: 以下、TDL）を用いている。TDLは、各航空機に対して必要な管制処理とその時間的制約を表2に示す5つのレベル（Lv.）として表現したものである。TDLを用いることにより、以下のような観点からの管制処理プロセスの分析が可能となる。

#### (1) タスク処理効率

管制業務の基本的な流れは、セクターに入域してきた航空機に対して必要な管制処理を行い、隣接する他セクター／進入管制区との間で取り決められた管制処理目標を達成した上で、管制権を移管することである。このため、入域してきた航空機は、必要な処理が行われることによってTDLが下がり、Lv.1で出域していくこととなる。従って、TDL低下の時間的なタイミングを比べることにより、異なる管制処理戦術のタスク処理効率を比較することが可能となる。

#### (2) 潜在的なリスクの低減

Lv.3以上は、航空機間の管制間隔（5NMまたは1000feet）欠如につながる可能性のある他機との干渉関係が存在することを意味している（表2参照）。よって、Lv.3以上の継続時間が短い処理戦術は、安全上のリスク低減の観点から有利であるものと考えられる。

表2 タスクレベル  
(Task Demand Level: TDL)

Lv.	必要な処理	表示色
1	管制処理目標を達成するために必要な処理は完了	緑
2	高度に関する処理	黄
3	・他機との干渉を解消する処理 ・イントレイル・セパレーションの設定	オレンジ
3+	・他機との干渉を解消する処理 ・イントレイル・セパレーションの設定 (相手機が複数機の場合)	マゼンタ
4	Level 3の中で時間的制約を強く受けるもの	赤

※参考文献[2]に基づき、筆者が作成

#### (3) 管制官のワークロードの定性的比較

一般的には、TDLの高いタスクほど難易度が高く、処理にあたる管制官のワークロードも高いものと考えられる。従って、未完了タスク（Lv.2以上）の蓄積とその時系列的な変化を比較することにより、異なる管制処理戦術をとった場合の管制官のワークロードの定性的な比較を行うことが可能である。

### 3.3 入出力データ

COMPASiを用いた分析を行う際に必要となる入力データは以下のとおりである。

- 各航空機の初期状態（シナリオ開始時点における各航空機の位置、速度、高度、フライトプラン、セクター内における管制処理目標などの初期設定値）
- 各航空機に対して発出された管制指示の内容および発出時刻

各航空機の初期状態をCOMPASiに設定すると、COMPASiは、実装されている航空機のパフォーマンスモデルを用いて各航空機の水平方向・垂直方向の航跡および速度の変化をシミュレー

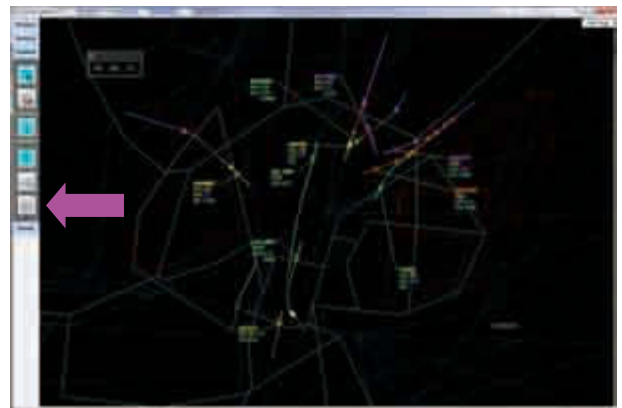


図3 COMPASiの画面例

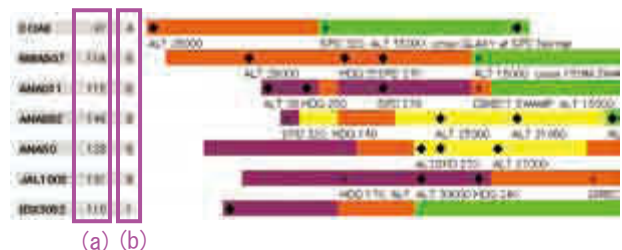


図4 TDLの時系列グラフ (CAPS)

ションする。そして、図3に示す管制卓のレーダー画面を模擬した Traffic Display (TD) 上に刻々と変化する交通状況を再現していく。さらに管制指示の内容と発出時刻が記録されたログファイルからデータを読み込み、各航空機に対して、管制指示を自動的に発出していく。

シミュレーションの結果として COMPASi から出力されるデータは、①タスクレベル、②管制指示の数、③シミュレーション開始時点からの各航空機の飛行距離、である。TDL については、図3に示す TD 上の各航空機のシンボルおよび便名上に色を使って重畳表示される。また図3中の矢印で示すボタンをクリックすることにより、各機の TDL を時系列で記録したグラフ (Chart of ATC task Processing State: CAPS) が表示される (図4)。管制指示の数および各航空機の飛行距離に関しても、この CAPS と呼ばれるグラフ上に数値で示される (図4中の(a)が飛行距離、(b)が管制指示数)。

さらに、第1章で述べたような動的かつ不確実性が存在する環境下で業務を行う管制官は、不可避免的に発生する予測の誤差に対応して一定の安全マージンを設けた予測を行っているが、COMPASi に実装されている状況認識モデルは、このような管制官の予測の特徴を模擬している。COMPASi は、この状況認識モデルの安全マージンをより大きく設定することにより、状況が変動した場合 (航空機の対地速度が予想よりも早かった/遅かった、出発機が出てくるタイミングが異なった等) に新たに発生する可能性の

ある干渉処理タスクを可視化する機能 (状況変動の影響可視化機能) を有している。

#### 4. シミュレーション実験

本章では、COMPASi を用いた管制処理プロセスの可視化実験について述べる。実験1 (4.3(1)参照) では、同一のトラフィック・シナリオに対する異なる2つの管制処理戦術について、安全性・効率性の観点から分析を行った。また、実験2 (4.3(2)参照) では、両戦術の状況変動に対する許容性について可視化を試みた。

##### 4.1 シナリオ

本実験で用いたシナリオの概要を図5に示す。本シナリオは、2006年に実施された業務シミュレーション実験図の一部を抽出したものである。図5に示すように、シナリオ開始時点では、3機の成田空港到着機 (COA9、NWA907、ANA011) と3機の羽田空港到着機 (ANA882、ANA50、JAL1002)、および2機の出発機 (羽田空港より JAL1201、仙台空港より IBX3052) が T-03 セクターに入域しようとしている。また、開始約2分半後 (以下、時間は全てシミュレータ内時間とする) に成田出発機が、約4分半後に羽田出発機が T-03 セクター南側より現れ、JAL1201 と同じルートを通して北方面に向かう。管制官は、これらの航空機間の管制間隔を維持しながら、各機の管制処理目標を達成する必要がある。本シナリオは表3に示すタスク

表3 シナリオ中のタスク

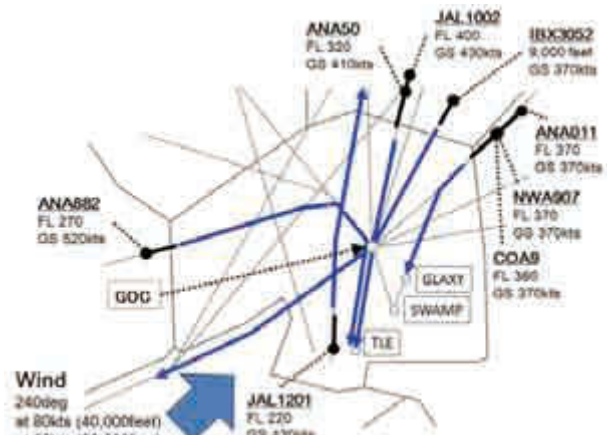


図5 トラフィック・シナリオ

<p>(1) <b>高度に関する処理</b>：成田到着機については、GLAXY (図5参照)、もしくは SWAMP から 15NM 手前の地点までに 15000feet、羽田到着機は TLE までに 13000feet に到達できるよう降下指示を発出する。また、出発機に関しては、T-03 セクター内で各々の巡航高度まで上昇させる必要がある。</p>
<p>(2) <b>イントレイル・セパレーションの設定</b>：成田到着機間、羽田到着機間にそれぞれの間、10NM のイントレイル・セパレーションを設定する。羽田到着機は異なる方向から向かってきており、各機の色や航跡に対する風の影響を考慮する必要がある。</p>
<p>(3) <b>干渉処理</b>：本シナリオにおいては、航空機の飛行経路同士が交錯しているものがあり、それらの航空機間の管制間隔を確実に維持しながら、他の管制処理を行う必要がある。</p>

を含んでいる。

#### 4.2 管制処理戦術

4.1節で述べたシナリオに対する異なる2つの管制処理戦術（戦術Aと戦術B）を、COMPASiを用いて分析した。戦術Aと戦術Bにはいくつかの違いが見られるが、その1つが羽田到着機（ANA882、ANA50、JAL1002）の到着順の違いである。戦術Aでは、ANA882を経路上の先のポイントであるTLEポイントに向かって直線的に飛行させることにより、ANA882を一番機とし、以降、ANA50、JAL1002の順に並べている（図6①～③参照）。これに対して、戦術Bでは、ANA882をほぼ真東方向に誘導して遠回りさせることにより、ANA50、JAL1002、ANA882の順に並べている（図7①～③参照）。両戦術に対する教官資格を有する管制官の見解は、「戦術Aは早期に処

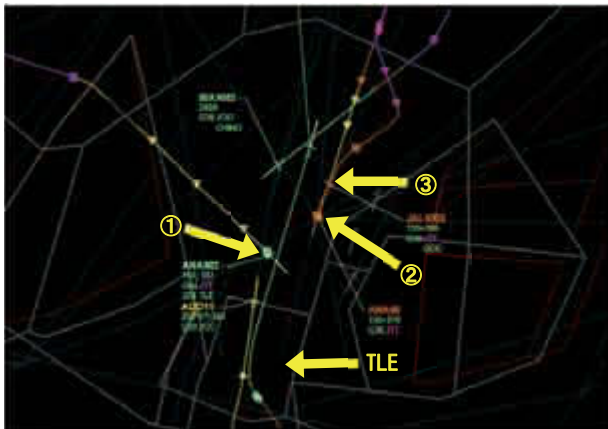


図6 シミュレーション中の画面例（戦術A）

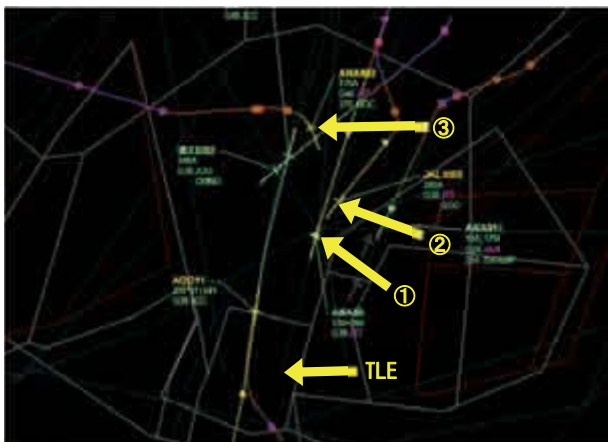


図7 シミュレーション中の画面例（戦術B）

理が完了するが、リスクのあるやり方」「戦術Bはより負荷が低い、時間のかかるやり方」というものであった。以下の実験では、上述の3機とその関連機（ADO11）に絞り、管制官の見解に見られるような各戦術の特徴がCOMPASiによって適切に可視化されるかを検証した。

#### 4.3 結果

##### (1) 実験1

実験1における羽田到着機3機とADO11のCAPSを図8、図9に示す。羽田到着機3機のイントレイル・スペーシングタスク完了時刻（3機のタスクレベルが全てLv.1になった時刻）については、戦術Aでは約14分（図8(a)）、戦術Bでは約16分半（図9(a)）となっており、戦術Bと比較して戦術Aのほうが早期に必要な処理を完了できている。これは「戦術Aのほうが早く処理が完了する」という管制官の見解と整合する結果である。

次に、戦術Aと戦術BにおけるANA882の飛行ルートの違いが直接的に影響するANA882とADO11の干渉関係に着目して、リスク低減の観点から両戦術を比較した。図8(b)と図9(b)から、ADO11に関してLv.3以上は見られず、共にANA882とADO11の干渉関係を十分に早い段階で処理できていることが分かる。



図8 戦術AのCAPS（実験1）



図9 戦術BのCAPS（実験1）

表4 羽田到着機の飛行距離（NM）

	ANA882	ANA50	JAL1002	合計
戦術A	146	136	148	430
戦術B	181	136	147	464

以上のことから、早期のリスク低減という観点からは両戦術は共に有効であったと考えられる。

一方、羽田到着機3機のシミュレーション開始時点からの飛行距離に関しては、戦術Bのほうが合計で34NM程度長くなっている(表4)。その原因は、表4に見られるとおり、戦術BにおけるANA882の飛行距離の延長である。従って、航空機の経済性の点では、戦術Aのほうが有利である可能性が高いものと考えられる。

## (2) 実験2

実験2では、3.3節で述べた状況変動の影響可視化機能を用いて、状況が変動した場合に新たに発生する可能性のある干渉処理タスクの有無の観点から両戦術の分析を行った。図10、図11に実験2の結果を示す。実験1の結果(図8、図9)と比較すると、戦術Bの結果には大きな影響は表れていない一方で、戦術AではANA882とADO11について実験1では見られなかったLv.4(図10(a))が発生している。この結果から、戦術Bのほうが状況変動に関する許容性が高いことが確認された。このことはまた、戦術Aをとった場合、管制官がANA882とADO11の干渉可能性に対して重点的なモニタリングを行う必要があることを意味しており、「戦術Aは(中略)リスクのあるやり方」「戦術Bはより負荷が低い(略)」という管制官の評価と整合する結果であると考えられる。

## 5. まとめ

本稿では、管制官養成訓練支援を目的とした管制処理プロセス可視化ツールCOMPASiの概

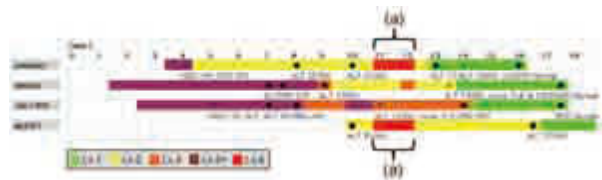


図10 戦術AのCAPS(実験2)



図11 戦術BのCAPS(実験2)

要について述べた。また、同一の航空交通状況に対する異なる2つの管制処理戦術について、COMPASiを用いて安全性・効率性・状況変動に対する許容性の観点から可視化を試み、教官資格を有する管制官による両戦術の評価と整合する結果を得た。このことは、COMPASiの管制処理プロセス可視化ツールとしての基本的妥当性を示す結果であると考えられる。現在、航空保安大学校岩沼研修センターの航空路管制の教官を対象としたアンケート調査を実施し、訓練支援におけるCOMPASiの有効性についてさらなる評価を進めている途上である。今後は、アンケート結果を詳細に分析すると共に、それに基づくCOMPASiの改良を行っていく予定である。

## 謝辞

本研究は、独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」、および科学研究費補助金(課題番号: 21310103)の支援により実施された。

## 文献

- [1] 河野龍太郎: 航空管制におけるヒューマンエラーの実相, ヒューマンインタフェース学会誌, Vol.3 No.4, pp.11-18 (2001).
- [2] 青山他: 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IV(1)-管制パフォーマンス評価指標の改良と評価-, ヒューマンインタフェースシンポジウム2010論文集, pp.209-212 (2010).
- [3] Karikawa et al.: A visualization tool of en route air traffic control tasks for describing controller's proactive management of traffic situations, *Cognition, Technology & Work*, DOI: 10.1007/s10111-012-0222-y (2012).
- [4] 狩川他: レジリエンス工学に基づく複雑システムの安全研究(4) -管制官の実践知伝承支援インタフェース-, ヒューマンインタフェースシンポジウム2011論文集, pp.55-60 (2011).