

## 航空管制システムにおける状況認識支援のための 段階的警報に関する研究

### Study on Graded Alert for Supporting Situation Awareness in Air Traffic Control System

○金田知剛, 狩川大輔, 高橋信

KANEDA Tomotaka, KARIKAWA Daisuke, TAKAHASHI Makoto

東北大学

Tohoku University

キーワード: 航空管制(Air Traffic Control), 段階的警報(Graded Alert), ヒューマンインタフェース(Human Interface)

連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01-2 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・高橋(信)研究室 金田知剛,  
Tel./Fax. : (022)-795-7921, E-mail: t.kaneda@luke.qse.tohoku.ac.jp

#### 1. 序論

現在, 世界的に航空需要が増加しており, 航空交通システムのさらなる安全性・効率性の向上が必要とされている<sup>1)</sup>. 安全かつ円滑な航空交通流を維持する上で重要な役割を果たしているのが, 航空管制官によって行われる航空管制業務である. 航空管制業務の主な特徴としては, 同時に 10 機以上の航空機を扱うことも珍しくないマルチタスクである点が挙げられる. また, 管制業務は, 将来の航空交通状況の予測に基づいて, 各航空機に対して必要な指示を発出する予測ベースの認知的タスクである. その一方で, 航空交通状況や気象状況は常に変化を続けており, 管制官は状況の変化が予測通りであるかを常にモニタリングし, 必要に応じ

て, さらなる指示の発出等を行わなければならない. このようなモニタリングのプロセスは, 管制官の間では「追尾」と呼ばれ, 特に重視される基本スキルの 1 つとなっている.

現在, 実際に導入されている管制官のモニタリング支援システムとしては, 航空機間の管制間隔欠如が発生する約 3 分前にレーダ画面上に警告を表示する異常接近警報(Conflict Alert: CA)がある. CA は, 航空交通の安全性向上に重要な役割を果たしているが, 特に多数の管制処理が必要な高ワークロード条件下における安全性と効率性の両立を考えた場合, より早い段階での状況認識支援の実現が必要であると考えられる. また管制業務の場合, 管制官が直接航空機を操作することはできず, 遠隔地にい

るパイロットに指示内容を伝達し、パイロットが必要な操作を行うことではじめて管制官が想定した航空交通状況が達成される、という特徴がある。従って、管制官はコミュニケーションに要する時間や、航空機や気象等の状況からパイロットが管制官の指示に従えない可能性も考慮しつつ対応しなければならず、時間的余裕が特に重要であると考えられる。

以上のような考えに基づき、本研究グループでは、CAのような警報システムが作動する以前のより早い段階において、状況認識を支援することを目的とした段階的異常接近警報(Graded Conflict Alert: GCA)に関する研究・開発を行っている。本稿においては、航空管制業務の特徴である「マルチタスク」「変化し続ける状況下における継続的なモニタリングを必要とする」という2つの特徴を備えた実験タスクおよび実験用シミュレータの開発を行うと共に、GCAのプロトタイプシステムを開発し、その有効性と問題点について予備的な検証を行った結果について報告する。

## 2. 航空管制システム

航空管制業務とは、航空機同士の衝突を防止するために各航空機に対し安全な間隔(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・促進するための業務である。航空管制業務は、その業務範囲によって5つに分類されるが<sup>2)</sup>、本研究の対象となるのは航空路管制業務である。航空路管制業務とは、主に巡航中やその前後のフェーズの航空機に対する管制業務である。業務の対象となる空域は、セクターという単位で分割され、それぞれに航空機との交信を担当する管制官(レーダ席)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名のチームが割り当てられて管制業務が行われる。

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それぞれ取り決めが行われており、例えば移管時の高度や同経路を飛行する他機との水平間隔が、常に確保しなければならない管制間隔とは別に設定されている。これらの規定を達成するために、管制官は航空機に対して速度の指示、高度の指示、経路の指示を必要に応じて発出する。

管制間隔は、レーダを用いて航空管制業務を行なっている場合、5NM(Nautical Mile)の水平間隔と1,000ftの垂直間隔が適用される。将来的に3分以内に航空機の間隔が管制間隔を保てないと管制システムが予測した場合、異常接近警報(Conflict Alert: CA)が発生し、レーダ画面に警告が表示される<sup>3)</sup>。

## 3. 実験用シミュレータ

GCAによる支援システムの検証するために、PCベースの実験用シミュレータを開発した。Fig. 1にその操作画面を示す。このシミュレータは、実験時においては航空管制官以外の被験者によって操作されることを想定しているため、航空路管制業務を行う航空管制官のタスクをベースとして、マルチタスク環境および継続的なモニタリングを必要とする状況変化の模



Fig. 1 シミュレータ操作画面

擬に特化した簡略型のタスクとなっている。操作画面には、航空管制官が受け持つ空域の境界線、航空機の経路を示す航空路、そして各航空機の位置を表すシンボルおよび航空機の個別のデータを表すデータブロックが表示される。操作者のタスクは、各航空機の動きを監視し、航空機同士の間隔を適切に保ちながら、航空機を目標高度に誘導することである。Fig. 1 に示すように、本シミュレータで模擬されるタスクは、複数の航空機を同時に扱うマルチタスクであり、かつ航空路の一部には速度が変化する領域が設けられており(風による航空機の変速変化を模擬したものであり、本稿ではこれを「風の影響」と呼ぶこととする)、継続的なモニタリングを必要とする状況変化の不確実性が盛り込まれている。

### 3.1.シミュレータ上に提示される情報

航空機のシンボルおよびデータブロックを Fig. 2 に示す。二等辺三角形が航空機の位置を表し、シンボルから伸びた線分が航空機の進行方向、および速度を表す。線分の終端位置は、航空機が現在の速度を維持したまま、シミュレータ内時間で 1 分後の航空機の位置を意味する。シンボルの後方にある短い線は、シミュレータ内時間で 20 秒前、40 秒前、60 秒前にいた位置を表す。シンボルを囲っている白い円は、航空機から 5NM の距離を表す。

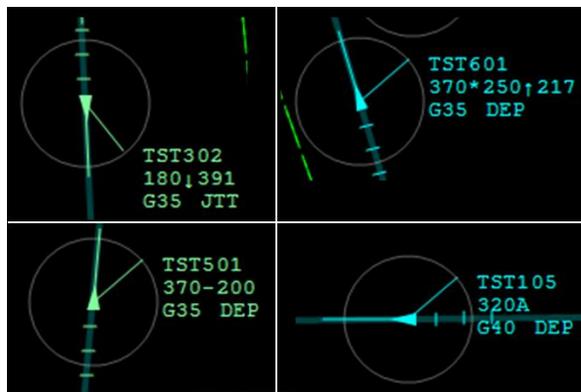


Fig.2 航空機シンボルとデータブロック

データブロックはシンボルわきにある三段構成の文字情報のことである。一段目は、航空機の呼び名であるコールサイン、二段目は高度に関する情報を示している。高度の単位はフィート(ft)で表されており、例えば”300”と示されている場合、30,000ftを意味する。左側の数字が最終的に到達しなければならない目標高度、右側の数字が現在高度を表す。真ん中の数字の間の記号は航空機の昇降状態を表しており、上昇中の場合”↑”が、下降中の場合”↓”，水平飛行中の場合”-”と表示される。また、現在高度が目標高度もしくは暫定維持高度に到達した状態で、かつ水平飛行を行っている場合は”A”と表示される。暫定維持高度を入力した場合、目標高度と昇降表示の間に”\*”と数字が表示される。この数字は入力した暫定維持高度を表している。三段目は、航空機の速度および目標を表している。左側の”G”という表示の横に表示される数字は、航空機の速度を表している。速度の単位はノット(kt)で表されており、例えば”G40”と示されている場合、400ktを意味する。右側に表示される3文字のアルファベットは、航空機の目標情報を表している。”APP”は下降を要する到着機、”DEP”は上昇を要する出発機、および”OVR”は高度変更を要しない空域通過機であることを表す。

### 3.2.シミュレータの操作方法

タスク遂行に必要なシミュレータに対する操作はすべてマウスで行うことができる。可能な操作は以下に記す4項目である。

#### (i) 航空機の目標航路の表示

航空機のシンボルを左クリックすると、赤色の線分が表示される。その線分は、クリックした航空機の今後の進路を示している。

#### (ii) データブロックの位置変更

航空機のデータブロックは、マウスの左ボタンでドラッグでき、任意の位置に配置すること

が可能である。

### (iii) 高度の変更

高度の変更は、Fig. 3 の左図に示すように、高度に関するデータブロックの情報が白くなった時点で可能となる。この状態で、航空機のシンボル、コールサインおよび高度情報のいずれかを右クリックすると、Fig. 3 の右図に示すような数字、英字のリストが表示される。数字をダブルクリックすると、その数字が暫定的な目標高度に設定される。"PLANNED"をダブルクリックすると、最終目標高度が目標高度に設定される。一度高度変更を行うと、高度情報の文字情報は元の色に戻り、以降は随時高度変更が可能となる。

### (iv) 操作のキャンセル

航空機シンボル、データブロック以外の箇所を左クリックすると、航空機の目標航路や、高度選択リストの表示を消すことができる。

## 3.3. 接近警報システム

本シミュレータの接近警報は、レーダから取得した航空機の対地速度および昇降速度を用いて一定時間後における航空機の平面座標及び垂直高度を算出し、他の航空機の予測位置との距離を計算することで干渉の有無を判定している。風の影響による航空機の速度の不確実性を吸収するために、対地速度に±20kntの速度変動を考慮し、変動による最低速度で飛行し

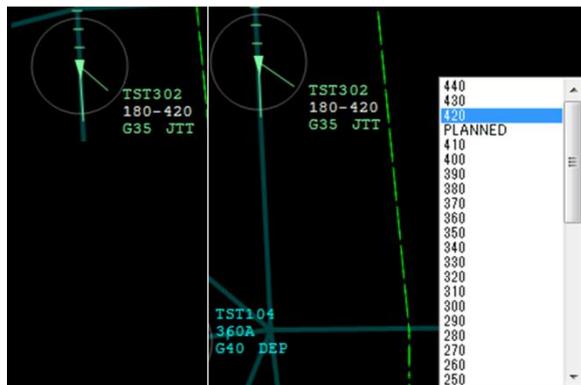


Fig. 3 高度変更画面

た場合の位置と最高速度で飛行した場合の位置を結ぶ線分を予測時間における航空機の存在範囲とする。その存在範囲から5NM以内に別の航空機の存在範囲が含まれると測定された場合、それらの航空機の水平間隔は欠如すると判定される。Fig. 4に、接近警報が発生する場合の航空機の位置関係の例を示す。

垂直間隔に関しても、昇降速度に±200ft/minの速度変動を考慮し、水平間隔と同様の方法で存在範囲を算出し、1,000ft以内に別の航空機の存在範囲が含まれると測定された場合、それらの航空機の垂直間隔は欠如すると判定される。また、予測に用いる昇降速度で予測時間分航空機が昇降し、目標高度を超過してしまう場合は、目標高度に達すると予測される時間以降は存在範囲と目標高度は一致する。

### (i) 異常接近警報

実際の航空管制システムで実装されている警報を模擬したものである。航空機がシミュレータ内時間で3分以内に水平間隔5NM未満、垂直間隔1,000ft未満という、異常接近状態になると判定された場合、異常接近警報(Conglict Alert: CA)が発生する。Fig. 5に示すように、コールサインの右側に"CNF"という赤色の文字が点滅し、航空機の予測位置を表す線分の終端が3分後の位置に変更される。暫定維持高度を再設定し、安全な間隔が確保されると判定された場合、CAは自動的に停止する。

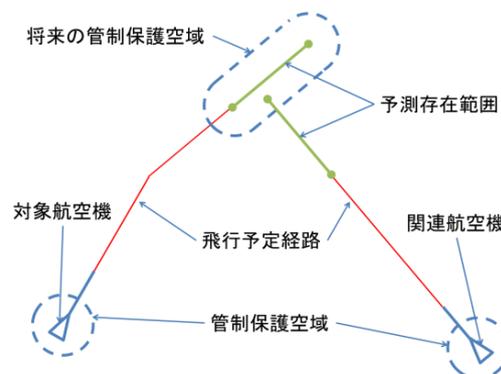


Fig. 4 接近探知方法の概要

## (ii) 段階的異常接近警報

本シミュレータにて効果の検証を行うために、開発された警報である。航空機がシミュレータ時間内で10分以内に異常接近状態になると判定された場合、段階的異常接近警報(Graded Conflict Alert: GCA)が発生する。Fig. 6に示すように、この警報が発生するとデータブロック横に黄色のバーが表示される。

GCAは、現状では、CAと同様に航空機が安全な間隔を確保できると判定されると自動的に停止する仕様となっている。

## 4. 実験

### 4.1. 実験概要

前章で述べた実験用シミュレータを用いて、GCAの支援効果を検証する実験を行った。被験者は20代男性2名である。

実験ではまず練習課題を数回実施し、被験者をタスクに対して十分に習熟させた後、本課題を実施した。本課題の数は6シナリオであり、シナリオ1~3はGCAの支援なし、シナリオ4~6はGCAの支援ありで行った。各シナリオには、航空機の風による速度の変動といった状況の不確実性が盛り込まれており、継続的に監視を行わなければ適切な状況認識を維持できないような課題設計となっている。本課題では、各シナリオ終了時にシナリオの難易度に関する主観評価をFig. 7に示すようにフリースケール方式の評価シートに記入してもらった。すべての課題が終了したあとに、GCAの有効性、GCAの支援による戦略の変化の有無、タスク全体としての難易度と、自由感想をインタビューした。

### 4.2. 結果

実験中に測定したデータは、シナリオ毎のCAおよびGCAの発生時刻、各航空機への指示高度およびその時刻、各航空機への指示開始

可能時刻、各航空機の挙動データ、そして被験者の主観的難易度である。それらのデータから、被験者のパフォーマンスをシナリオ間で比較するために、コンフリクト誘起率、CA発生率、および過剰高度停止率の3つの指標を算出した。

コンフリクト誘起率( $CN_{rate}$ )は、干渉の可能性

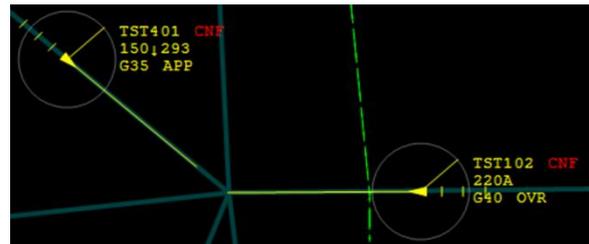


Fig. 5 CA発生時のレーダ画面



Fig. 6 GCA発生時のレーダ画面

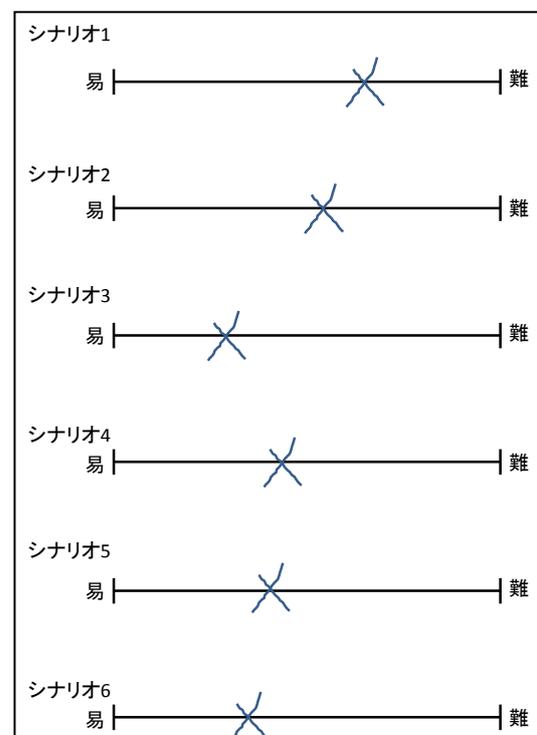


Fig. 7 主観評価シート記入例

のある機に対する被験者の予測精度を表している。シナリオ作成時に設定した航空機の干渉総数を  $CN_{all}$ 、干渉の恐れのある高度に航空機に降下または上昇させた回数を  $CN_{num}$  とすると、以下の式で表される。

$$CN_{rate} = \frac{CN_{num}}{CN_{all}} \quad (1)$$

CA 発生率( $CA_{rate}$ )は、継続的な監視の失敗による安全性低下の割合を表している。実際に CA が発生した回数を  $CA_{num}$  とすると、以下の式で表される。

$$CA_{rate} = \frac{CA_{num}}{CA_{all}} \quad (2)$$

過剰高度停止率( $UNAM_{rate}$ )は、継続的な監視の失敗による効率性低下の割合を表している。GCA は作動するものの最終的に干渉しない航空機の組の総数を  $UNAM_{all}$ 、その中から実際に被験者が昇降を停止するに至った回数を  $UNAM_{num}$  とすると、以下の式で表される。

$$UNAM_{rate} = \frac{UNAM_{num}}{UNAM_{all}} \quad (3)$$

各シナリオに対する被験者別のコンフリクト誘起率, CA 発生率, 過剰高度停止率を Fig. 8, Fig. 9 に、被験者別の各シナリオに対する主観的難易度評価結果を Fig. 10 に示す。

### 4.3.考察

#### (i) 被験者 1 に関する考察

シナリオ 1~3 とシナリオ 4~6 を比較すると、CA 発生率が低下していることがわかる。これは、航空機を干渉高度に降下/上昇させても、GCA が早期に発生することで CA が発生する前に干渉処理をすることが可能であったためと考えられる。また、主観評価からも GCA 支援がある場合における主観的難易度の低下が確認できることや、インタビューにて「GCA を利用して航空機が干渉するかどうかを確認するように戦略を変更し、作業負荷が減った」

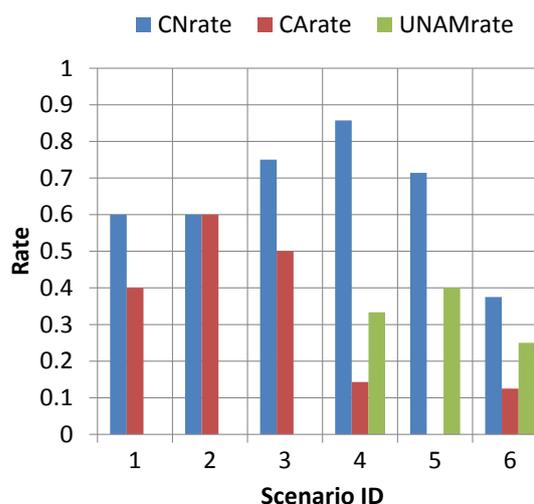


Fig. 8 被験者 1 の実験結果

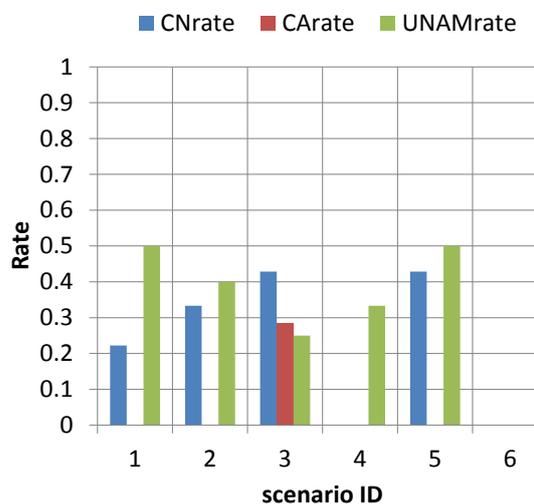


Fig. 9 被験者 2 の実験結果

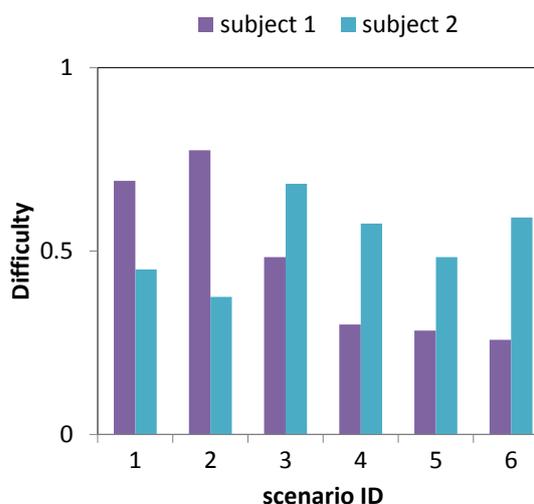


Fig. 10 各シナリオの主観的難易度評価

と回答していることから、GCA による早期の支援が被験者の認知的な負荷を軽減する可能性が示唆されたものと考えられる。

その一方で、過剰高度停止率に関しては、GCA 支援のある方が増加していることが確認できる。これは、被験者が GCA に受動的に対応することによってコンフリクトを防止する戦略に戦略変更したにより、実際には上昇/降下の一時的な中断が必要ない航空機に対しても上昇/降下を止める指示を発生するケースが増加したためと考えられる。

#### (ii) 被験者 2 に関する考察

被験者 2 については、シナリオ 6 から被験者 1 とは逆の順序で本課題を行ってもらった。シナリオ 4-6 では、シナリオ 1-3 と比較して、コンフリクト誘導率、CA 発生率が低くなっていることがわかる。シナリオ 4, 6 に関してはコンフリクト誘導率、CA 発生率ともに 0 となっているが、これらのシナリオで被験者 2 は GCA が作動する前に、コンフリクトが予測される航空機に対して、途中の高度までの降下/上昇を暫定的に指示することにより、コンフリクトを未然に防止していたことを意味している。従って、この結果は GCA による支援の効果ではなく、被験者自身の予測および処理戦術に起因するものであると考えられる。このため、被験者 2 に関しては、GCA による支援効果を CA 発生率から判断することは難しい。しかしながら、インタビューにおいて「GCA による支援効果があった」との回答が得られており、かつ「GCA あり」から「GCA なし」の条件に変わったシナリオ 3 において CA 発生が見られたことから、被験者 2 に関しても GCA は一定の支援効果有していた可能性が考えられる。

過剰高度停止率に関しては、GCA 支援の有無にかかわらず同程度の頻度で発生していることがわかる。インタビューにて「GCA の支

援による戦略の変化はなかった」と述べていることから、被験者 1 と比較して干渉の処理が全体的に慎重になっていたことが寄与したと考えられる。また、主観的難易度評価を見ても被験者 1 と比べて GCA の支援による難易度の変化が乏しいことも、戦略が一定であったことを裏付ける結果であるものと考えられる。

## 5. 結論

本研究においては、CA よりも早い段階における管制官の状況認識支援を目的として GCA を提案すると共に、その基礎的な実験環境を構築し、GCA の有効性および問題点の予備的検証を目的とした認知実験を行った。その結果、GCA による早期の状況認識支援効果について一定の有効性が確認された一方で、GCA に受動的に従う戦術をとる被験者も見られた。危険が顕在化する前のより早い段階において支援情報の提示を行った場合、状況変化の不確実性を含む環境下においては、その情報の確度が相対的に低下する可能性が考えられる。今後は、変化する状況下における誤報や情報提示の遅れなど、より現実的な条件を想定した詳細な検証実験を進めると共に、GCA の設計改良ならびに表示方法の改善について検討していく予定である。

## 参考文献

- 1) Boeing Commercial Airplanes: Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents, Worldwide Operations 1959-2010, (2011)
- 2) 中野秀夫: 航空管制のはなし(五訂版), 成山堂書店 (2005)
- 3) 福田豊, 瀬之口敦: 航空管制卓における異常接近警報機能の研究開発, 信学技報, SSS2006-18, Vol. 106, pp.17-20 (2006)