

航空管制における客観的ワークロード評価指標に関する研究

Evaluation of Workload for the Air Traffic Control Task

○金田知剛*、濱辺裕之*、狩川大輔*、高橋 信*、若林利男*、青山久枝**、古田一雄***

○KANEDA Tomotaka*, HAMABE Hiroyuki*, KARIKAWA Daisuke*,

TAKAHASHI Makoto*, WAKABAYASHI Toshio*,

AOYAMA Hisae**, FURUTA Kazuo***

*東北大学, **(独)電子航法研究所, ***東京大学

*Tohoku University, **Electric Navigation Research Institute,

***The University of Tokyo

キーワード: 航空管制(Air Traffic Control)、ワークロード(Workload)、航空交通流管理(Air Traffic Flow Management)

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・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. 緒言

近年の航空交通量の増大に伴って、航空運航システムのより高い安全性の実現が必要とされている。技術の進歩に伴って、機械システムの性能や信頼性は向上し、それらの問題に伴う事故の割合は減少してきているが、相対的に人的要因の関係する事故が顕在化しており、人的側面を含めた安全対策、つまりヒューマンファクタ的視点からのアプローチの重要性が指摘されている。

我が国の航空管制分野においても、管制業務の根幹を担う管制官に対する過度の業務負荷(ワークロード)は、安全性および効率性の観点から問題があるとの考えに基づき、管制官のワークロードを考慮して航空交通

流を調整する航空交通流管理(Air Traffic Flow Management: ATFM、第3章参照)が開始されている。しかしながら、そこで用いられているワークロード評価手法には、さらなる改善の余地があり、各国で評価手法の一層の高度化・洗練化を目指した研究が進められているのが現状である。そこで、本稿においては、より高い航空安全の実現に寄与することを目的として、航空交通流管理を適用分野として想定した客観的ワークロード評価手法について、現場の管制官の協力を得ながら研究を行った。

2. 目的

本稿の目的は以下のとおりである。

- ① 現場の管制官によるワークロードの主観的評価実験の実施と、その結果と従来のATFM用ワークロード評価手法の結果を比較・検討を通じた既存手法の改善すべきポイントの特定
- ② ①の結果に基づく半定量的ワークロード評価手法の構築と、それを用いた試行的ワークロード評価を通じた基本的妥当性の検証

3. 航空管制業務の種類

航空機の運航に際しては、出発空港において飛行計画に基づく経路、高度等の出発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管制官の指示を受けている。しかしながら、運航中の全ての飛行フェーズにおいて同一の管制官が航空管制業務を行っているわけではない。空港内、空港周辺、航空路上等、地理的・高度的に分割された領域(空域)ごとにそれぞれの担当管制官が管制間隔を確保している。

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。

3.1 飛行場管制業務

主に管制圏(空港の標点から半径 5NM (9km)の円で囲まれる区域の上空)において当該空港を離着陸する航空機に対して行われる業務である。離着陸時の許可、空港の走行地域内の誘導(グラント)や管制承認の中継(デリバリー)などの業務も行われる。

3.2 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、速度、針路、高度等の指示や進入許可を行う。

3.3 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、速度、針

路、高度等の指示、進入許可等を行う。また、出発機等に対して、進入許可等を行う。

空域は複数のセクターに分割され、セクターごとに複数の管制官によって管制が行われる。

3.4 着陸誘導管制業務

着陸する航空機に対し、精測進入レーダー、あるいは空港監視レーダーを用いてコースと高さを指示して滑走路への誘導を行う業務である。通常は空港から約 10NM(19km)の位置から誘導を始める。

4. 航空交通流管理

安全かつ、効率的に航空機を運航し、航空交通量増加に対処するために、航空交通管理(Air Traffic Management : ATM)センターでは航空交通流管理(Air Traffic Flow Management : ATFM)が行われている。ATFM とは、航空機の出発前に各管制区域における交通量を計算し、予め決められた容量を超えると判断された場合に航空機の出発時刻を遅らせる等の調整を行うものである。本研究の対象となる航空路管制セクターでは、管制官のワークロードを基本とする容量を利用している。

航空機 a_i の時間区間 $[t, t+T]$ におけるセクター内の飛行時間(以下、滞在時間)を $ST_T(t, i)$ とする。時刻 t における管制官のワークロード $TASK_T(t)$ は、

$$TASK_T(t) = \sum_i ST_T(t, i) \cdot C_i$$

で表される^[1]。

ここで C_i は航空機 a_i が 1 分間飛行する際にどの程度の管制作業が必要かという時間を表す数値で管制負荷係数と呼ぶ。管制作業に必要な時間とは、航空機に対して、高度・速度・磁針路などの指示や許可をするための通信時間や管制間隔を取るために必要な処理方法の考慮時間、運航票(フライトストリ

評価シート

①	low ————— X ————— high
②	low ————— X ————— high
③	low ————— X ————— high
④	low ————— X ————— high
⑤	low ————— X ————— high
⑥	low ————— X ————— high
⑦	low ————— X ————— high

Fig. 2 主観評価実験に用いた評価シート

各シナリオに対して、既存手法のワークロードと主観評価を比較した結果、3つのシナリオの相対的な大小関係が異なっており、既存手法と主観評価では必ずしも一致していないことが分かった。既存手法では、機数の多いシナリオ2が最もワークロードが高かったが、主観評価ではシナリオ1が最も負荷が高く、シナリオ2は機数の少ないシナリオ3と同程度のワークロードであった。このことから、機数だけでは表現できない管制官の負荷に影響を与える要素があることが推定される。

次に、シナリオ内でのワークロードのピーク位置を比較する。

[シナリオ 1]

既存手法のピーク位置は、セクション9にあるのに対して、被験者の主観評価は、多くの場合、セクション5、6にピークがあることが分かる。またセクション9については、多くの被験者がワークロードは低いと評価し

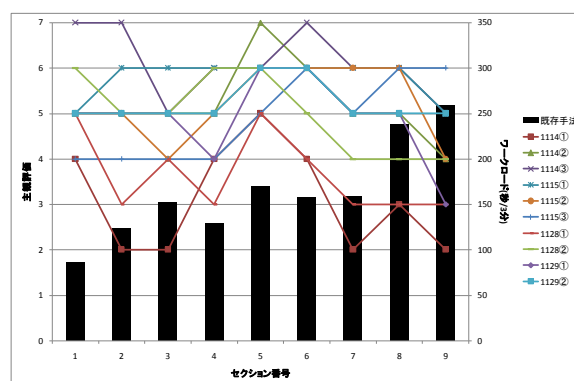


Fig. 3 既存手法と主観評価のワークロード
ピーク位置比較(シナリオ 1)

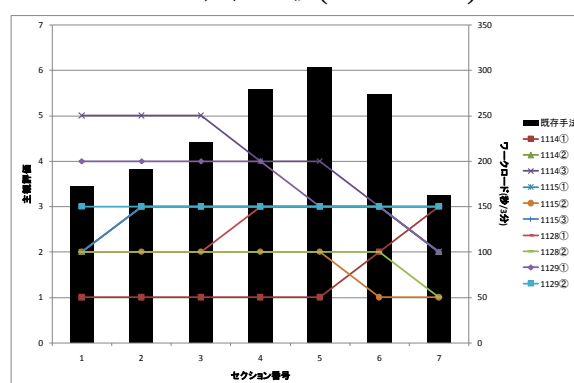


Fig. 4 既存手法と主観評価のワークロード
ピーク位置比較(シナリオ 1)

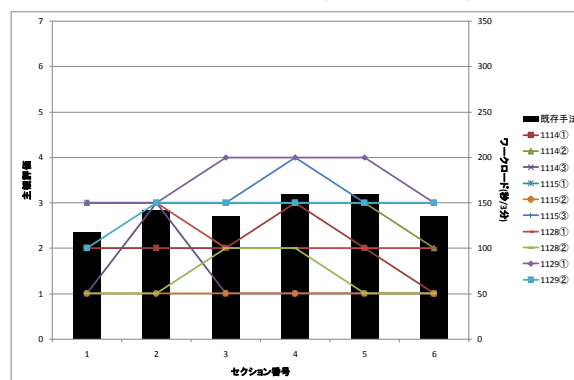


Fig. 5 既存手法と主観評価のワークロード
ピーク位置比較(シナリオ 3)

ている。

[シナリオ 2]

既存手法のピーク位置は、セクション5にあるのに対して、被験者の主観評価は、ピークの位置が分散している。機数が少なく、客観

的ワークロードが少ないセクションのところでは、同様に主観評価も低めに評価されている。

[シナリオ 3]

既存手法のピーク位置は、セクション 2、3 にあるのに対して、主観評価のピーク位置は分散しているが、セクション 4 に若干のピークがあり、その後減少傾向にある被験者が多い。

全体を通して、既存手法によるワークロード評価と主観評価を比較すると、多くの場合においてピークの位置が異なっており、これは既存手法によるワークロード評価が現場の管制官が主観的に感じる負荷と必ずしも一致していないことを示唆していると考えられる。この原因としては、既存手法が機数や滞在時間を基に管制官のワークロードを算出しているのに対して、管制官が主観的に感じるワークロードは、各機に対する処理内容の違いや状況に応じた付加的な処理の必要性など、機数や滞在時間以外の要因（以下、「トラフィックの質的特徴」とする）の影響を受けている可能性がインタビュー結果から示唆された。

6. 客観的ワークロード評価手法

第 4 章で確認されたように、既存の ATFM 用評価手法によるワークロード評価は、各機に対する処理内容の違いや状況に応じた付加的な処理の必要性など、機数や滞在時間以外の要因を十分に反映できていない可能性がある。その結果、現場の管制官による主観的ワークロード評価の結果との間に差異が見られるケースがあった。そこで本章においては、トラフィックの質的特徴を反映した客観的ワークロード評価手法の構築に向けて、主観評価実験の被験者に対して行ったイン

タビュー結果を負荷モデルとして整理すると共に（5.1 節）、評価対象となる負荷の定義と評価指針の決定を行った（5.2 節）。

6.1 負荷モデル

主観評価実験の被験者に行ったインタビューの結果より、管制官が感じる負荷の種類を以下のように大別した。

① 存在負荷

管制業務には、通信設定やハンドオフなど、自セクターが管制権を持つ航空機が存在した場合に必ず行わなければならない処理がある。また全ての管制対象機に対して一定レベルのモニタリングを行わなければならない。これらの処理に伴う負荷は、一般的には機数が多くなるほど増大するものと考えられる。一方で、軍用機等の非定期便など、業務内容が異なる場合もあることから、存在負荷は全機一律かつ単純に機数に比例するものではないと考えられる。しかしながら、現段階では定量評価の基盤となる半定量的な負荷モデルの構築とその基本的妥当性評価を目的としており、仮にすべての航空機に対して存在負荷が一定であると仮定することとする。

また主観評価実験を通じて、管制官が、管制対象機が自セクターに入域して初めてそれを認識し、必要な処理の検討を始めるわけではなく、入域前から対象機を認識しており、モニタリングや戦略検討を始めていることが分かった。このことから、現場の管制官の見解に基づき、存在負荷の開始点をセクター境界ではなく、Fig. 6 のように経路ごとに定義した。

② タスク負荷

各航空機に対する管制処理の目標は、規定によって定められている。タスク負荷はこれらの処理目標に伴う負荷である。つまり、目

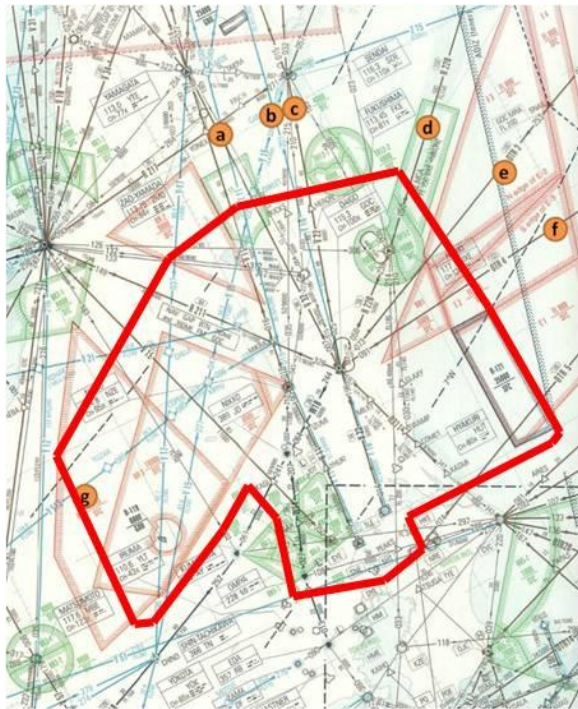


Fig.6 存在負荷開始位置
(赤枠内が関東北セクター)

標を達成するために現在の高度や航空機間隔の変更が必要とされる場合に発生する。

1) 高度処理

管制処理の目標として高度に関する目標が含まれており、それを達成するために対象機の高度を変更する必要がある場合に生じる負荷である。つまり、入域時と同高度でセクターを通過する巡航機に対しては生じないタスクである。

2) スペーシング

管制処理の目標として先行機との水平間隔に関する目標が含まれており、そのための間隔設定処理を必要とする場合に生じる負荷である。

③ 状況負荷

管制処理目標を達成するにあたって必要な他機との干渉を解決する処理に伴う負荷である。ワークロード主観評価実験におけるインタビューから、この種の処理は管制官に

とって大きな負荷の要因となり得るものと考えられる。

1) 交差

管制処理目標を達成する上で、異なる経路を飛行する複数の航空機の水平方向の飛行経路および垂直方向の飛行パスが互いに干渉し、それを解決する必要がある場合に生じる負荷である。このような場合、管制官は高度差によって両機の間隔を確保するための高度指示か、水平間隔で管制間隔を確保するためのベクター指示を発出する。

2) キャッチアップ

同経路を飛行する航空機のうち、後続機の速度が先行機より速い場合、そのまま放置すると両機間の間隔が徐々に狭まるため、イントレイル設定や高度処理の際に干渉する可能性が出てくる。このような場合、事前にキャッチアップ状態であることを勘案した処理が必要となり、付加的な負荷要因となり得るものと考えられる。

6.2 負荷の定義と評価指針

前項で提案した負荷モデルおよびワークロード主観評価実験のインタビュー結果、ならびに現場の管制官とのディスカッションに基づき、負荷導出に用いる各負荷とその評価指針を次のように定義した。

存在負荷

セクター内に入ってくる全ての航空機にかかる負荷と定義する。

Fig. 6 に示した経路ごとの位置、目的地ごとに定めた時刻にて負荷を開始し、出域予定時刻に負荷を終了する。

タスク負荷(高度処理)

高度変更が必要な出発機と到着機にかかる負荷と定義する。

開始時刻、終了時刻は存在負荷と同様とする。

タスク負荷(スペーシング)

同目的地に向かう到着機であり、イントレイルのスペーシングが必要な航空機のペア(交差ポイント通過予定時刻差が3分以内)にかかる負荷と定義する。

ペアの内、後続機の存在負荷が開始した時刻に負荷を開始し、終了時刻は存在負荷と同様とする。

状況負荷(交差)

他経路同士の航空機が経路上交差し、交差ポイントにおいて垂直間隔、あるいはベクターによる水平間隔確保の必要な航空機のペア(交差ポイント通過予定時刻差が3分以内)にかかる負荷と定義する。

ペアの内、後続機の存在負荷が開始した時刻に負荷を開始し、交差ポイントを両機が通過した時刻に負荷を終了する。

状況負荷(キャッチアップ)

同経路同士の航空機で後続機の速度の方が速い航空機(15NM(28km)で30kt(56km/h)以上の速度差)にかかる負荷と定義する。
開始時刻、終了時刻は存在負荷と同様とする。

6.3 評価結果

提案手法を用いてワークロードを評価した結果をTable 1に示す。入域時刻と出域時刻は、最終的には飛行計画等のデータから事前に算出する必要があるが、今回は撮影時間帯の航空機の挙動などを記録したジャーナルデータで代用した。また、各ポイント通過時間は飛行計画データを用いて評価した。既述の通り、現時点では各負荷に対する重み付けは行わない。

シナリオ1とシナリオ2の両シナリオとも存在負荷、タスク負荷(高度処理)の数はほぼ同程度であったのに対して、シナリオ3は他のシナリオよりも存在負荷、タスク負荷(高度処理)が少なかった。また、タスク負荷(スペーシング)は、シナリオ1とシナリオ2には発生していたが、シナリオ3には生じていなかった。状況負荷(交差)は全シナリオにおいて発生しており、特にシナリオ1における負荷の数が多くなっている。また、キャッチアップに関しては、シナリオ3においてのみ生じている、という結果になった。

7. 妥当性検証・考察

7.1 実験結果と提案手法とのシナリオ間の比較

提案手法を用いて評価した結果と主観評価のシナリオ間の比較を行うことで、提案手法の妥当性を検証する。シナリオ毎の検証結果をFig. 7～Fig. 9に示す。

主観評価は折れ線グラフで、提案手法は棒線グラフで表示する。管制官による主観評価の結果は、シナリオ1が最も負荷を感じると評価しており、シナリオ2とシナリオ3はシナリオ1よりはワークロードが低く、同程度の評価であった。それに対して提案手法を用いて評価した客観的評価では、シナリオ1が

Table 1 各シナリオ負荷内訳

	セクション番号	存在	高度処理	スペーシング	交差	キャッチアップ	合計
シナリオ1	1	7	8	1	5	0	19
	2	9	8	2	7	0	26
	3	10	8	2	11	0	31
	4	15	13	3	15	0	46
	5	15	13	4	20	0	52
	6	15	14	3	24	0	56
	7	17	18	2	28	0	61
	8	20	19	2	22	0	63
	9	21	19	1	11	0	52
シナリオ2	1	12	9	1	1	0	23
	2	13	11	4	8	0	36
	3	14	11	5	8	0	38
	4	17	13	5	9	0	44
	5	19	18	6	11	0	52
	6	17	14	4	8	0	43
	7	15	12	4	4	0	35
シナリオ3	1	11	9	0	3	0	23
	2	12	10	0	5	0	27
	3	12	9	0	5	0	26
	4	13	10	0	5	1	29
	5	11	9	0	4	1	25
	6	11	8	0	3	1	23

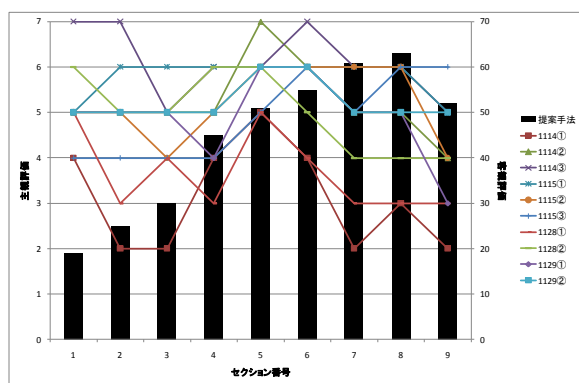


Fig. 7 提案手法と主観評価のワークロードの比較(シナリオ 1)

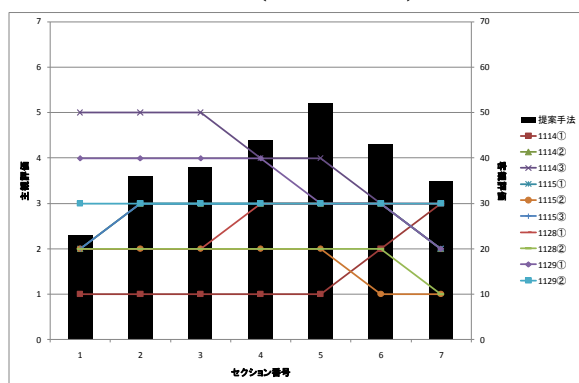


Fig. 8 提案手法と主観評価のワークロードの比較(シナリオ 2)

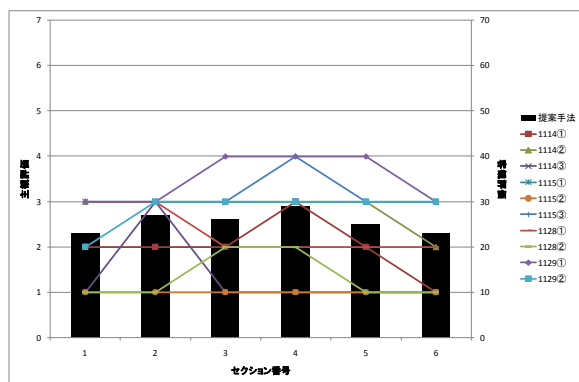


Fig. 9 提案手法と主観評価のワークロードの比較(シナリオ 3)

時間区間の大部分において他のシナリオよりもワークロードが高いという結果になっている。一方、既存の ATM で使用されているワークロード評価手法では、シナリオ 2 の負荷が最も高いという結果になっている。よって、提案手法による評価結果の方が、管制官の見解により近い結果を示しており、基

本的な妥当性を有していると共に、既存手法に比して改善がなされているものと考えられる。

7.2 実験結果と提案手法とのピーク位置の比較

提案手法を用いて評価した結果と主観評価のピーク位置の比較を行うことで、提案手法の妥当性を検証する。

[シナリオ 1]

主観評価のピーク位置は、第 5、6 セクションに来ている被験者が多い。それと比較して提案手法では、第 5、6 セクションの値も大きく評価されているが、ピーク位置は、第 7、8 セクションに来ている。既存手法では、第 9 セクションにピーク位置が来ていたのに対して、提案手法では、主観評価と同様に第 8 セクションと比較して負荷が下がっていることから、既存手法に比べて改善されているものと考えられる。

[シナリオ 2]

主観評価のピーク位置が、被験者によって分散しているのに対して、提案手法では、ピーク位置が、第 5 セクションに来ている。シナリオ 2 ではワークロードが全体を通じてほぼ一定レベルであるとの評価なされており、ピーク位置を比較するのは困難であるが、第 5 セクションから第 6、7 セクションにかけて多くの被験者の主観評価値が減少している傾向と同様の傾向が提案手法による評価結果でも見られ、一定の妥当な評価ができていると考えられる。

[シナリオ 3]

多くの被験者の主観評価のピーク位置が第 4 セクションに来ているのに対して、提案手法のピーク位置も第 4 セクションに来ている。また、既存手法で評価した場合において、第 6 セクションでの管制官のワークロー

ドがシナリオ3の中では、6セクション中2番目に小さい値を示していた。それに対して、提案手法では最も低いワークロードであると評価されている。これは、多くの被験者が第6セクションのワークロードが最も低いと評価された主観評価の結果とよく一致している。これらのことから、シナリオ3においても提案手法の基本的妥当性が確認されたものと考えられる。

7.3 考察

6.1節における評価の結果、本稿において提案した客観的ワークロード評価手法は、シナリオ間のワークロード比較という点においては、管制官の見解により近い結果を出すことができた。一方、各シナリオにおけるワークロードのピーク位置という点では、既存手法に比べて一定の改善は見られるものの、差異が残る結果となった。その原因としては以下の様な点が考えられる。

- ・管制官に対するインタビュー中では、状況負荷（交差）の負荷については比較的高い場合があるとの趣旨の言及がしばしば得られた。しかしながら、提案手法では、現時点では各負荷の重みづけを行っていないため、存在負荷やタスク負荷(高度処理)の影響が相対的に大きくなり、管制官による主観的ワークロード評価との差異を生じる一因になっているものと考えられる。

- ・提案手法では、タスク終了点の多くが対象機の出域時となっている。しかしながら、現場の管制官は移管・出域前にある程度の余裕を持って必要な処理を終えていることが多い。このため、管制官の主観評価に比して、提案手法は時系列に後ろのセクションにおける負荷を相対的に高く算出する傾向があるものと考えられる。

8. 結言

本研究では、航空交通流管理への適用を想定した定量的なワークロード評価手法開発の第一段階として、トラフィックの質的特徴を考慮したワークロード評価指標の開発と、それを用いた半定量的なワークロード評価手法の提案をおこなった。提案する評価手法を用いた試行的ワークロード評価の結果、シナリオ間のワークロード比較という点においては、管制官の見解により近い結果を得るとともに、各シナリオにおけるワークロードのピーク位置という点でも、既存手法に比べて一定の改善が見られた。以上の結果から、提案手法は現状では半定量的評価に留まっており、今後各負荷に対して適切な係数を与えた上での詳細な検討が必要ではあるものの、トラフィックの質的特徴を考慮したワークロード評価手法としての基本的妥当性と十分な応用可能性を有しているものと考えられる。

今後は、各負荷に対して適切な重みづけを行うための手法を検討すると共に、更に詳細な妥当性検証と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」による研究の一環として実施された。

参考文献

- [1] 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

- [2] 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(2007)