

# 主観評価による航空管制官の作業負担の計測

管制システム部 ※蔭山 康太 青山 久枝 三垣 充彦

## 1. はじめに

レーダ機器や計算機などから構成される複雑で大規模な人間機械系である航空交通管制システムにおいて、航空管制官（以下、管制官と記す）は航空交通の監視や判断、および管制指示のパイロットへの発出など主要な機能を担っている。

空域容量の推定には、管制官が系に含まれる実時間シミュレーションの実施が必要とされる [1]。これは、管制官の作業負担を考慮しない数学モデルなどでは正確な容量値を得ることが困難なためである。このように、管制官の作業負担は航空管制システムにおいて非常に重要な要素である。諸外国の研究機関などでは、管制官の作業負担に影響を与える交通流の状態や空域条件が検討されている [2]。

文献 [3] によると、作業負担はシミュレーションにおいて「管制官役の生理的・心理的状态を乱すように作用する空域条件や交通流などによる要求の総量」、作業負担は「作業負担が管制官役の特性や能力と関連して管制官役へ与える影響」と定義される。

本稿では、後者の作業負担値の実時間シミュレーションによる取得を目的として製作した作業負担記録装置（以下、記録装置と記す）について述べる。記録装置は、作業負担の主観評価値を実時間で取得し、記録する機能を有する。また、記録装置を使用した実時間シミュレーションの結果より得られた作業負担値について、負担値が入力された各時点における管制機数などの各要素との相関を検討するとともに、回帰方程式への当てはめを行うことで、各要素が作業負担値の変動へ与える影響を検討した。

## 2. 作業負担記録装置の製作

米国連邦航空局技術センタなどで使用されている ATWIT (Air Traffic Workload Input Technique) 装置 [4] に基づいて記録装置を製作した。記録装置の対象はターミナル管制であり、実時間シミュレーション中に作業負担値の取得・記録を行う。記録装置は図 1 に示すように当所の航空管制シミュレータのターミナル・レーダ表示装置上に設置され、入力デバイスとプロンプト表示デバイスより構成される。



図 1 作業負担記録装置の外観

プロンプト表示デバイスには一定時間間隔毎に点滅を開始するランプが備えられており、入力デバイスには '1' (最も低い負担値に対応) から '10' (最も高い負担値に対応) までの数値キーが備えられている。管制官役は、プロンプト表示デバイスのランプの点滅開始を合図として、各時点における作業負担値を表すのに適していると考えられる数値を選択し、入力デバイス上の数値キーを押下する。

当所の近年の実時間シミュレーションでは、調査票の記入などにより、試行終了後に全体的な交通流を対象とした負担値を取得してきた。試行終了後に全体の交通流を対象として評価を行う場合、試行中の交通流の一時的なピークなど印象に残りやすい事項が全体の評価に与える影響が大きいという欠点が存在する [5]。

一方、試行中にリアルタイムに負担値を取得する場合、評価・入力により管制官役の作業負担が増大する可能性も存在するが、試行中の負担値の変動の検討などが可能となる。

記録装置は、航空管制シミュレータと接続され、航空管制シミュレータのサーバからシミュレーション時刻を取得する。シミュレーションの実施中には、

- ランプの点滅が開始されたシミュレーション時刻
- 数値キーが押下されたシミュレーション時刻
- 押下された数値キーの値

が記録される。

作業負担値の評価基準は、ATWIT で使用されたものに基づき 10 段階に定め、負担の大きさに応じて数値が増大するものとした。定義される作業負担値は、下記のように大きく 4 つの階層に分類されるものとした。

- 非常に低負荷 … 全ての業務を容易に実行可能である（負荷値：1, 2）。
- 適度な負荷 … 業務の誤りの可能性は非常に低い（負荷値：3, 4, 5）。
- やや高負荷 … 業務の誤りが生じる可能性が存在する（負荷値：6, 7, 8）。
- 非常に高負荷 … 全ての業務（運航票への管制指示記入なども含む）を遂行できない（負荷値：9, 10）。

### 3. 実時間シミュレーションの実施

#### 3.1 設定条件

到着機処理の作業負担値の取得を目的として、実時間シミュレーションを実施した。到着機処理の主目的は、各方向から進入する到着機を 1 本の流れにまとめ、滑走路に至る最終進入経路上で定められた基準値を維持するように通過間隔を調整することである。空港に近くなるほどに到着機間の近接は生じやすくなるなどの理由により、到着機 1 機あたりで考えた場合、空港に近い到着機に対する作業負担値は大きくなると考えられる。

交通流シナリオはシミュレーションにおける交通流を定義するデータであり、各航空機の便名や空港などでの発生時刻、ターミナル空域への進入方向や進入時の高度・速度などが定義される。

シミュレーションにおいて、到着機はターミナル空域の境界線に近づくまでは交通流シナリオに定義された通りに飛行し、境界線近傍で管制官役が管制権を受領することで当該到着機に対する管制指示の発出が可能となる。

全ての試行では同一の交通流シナリオを使用し、交通流シナリオでは 1 時間に 27 機の到着機がターミナル空域に進入するものとした。また、シナリオを 20 分間ずつに 3 つに分割し、各時間帯において以下のような交通流のピークが出現するようにした。

- 主要な方向のみから進入（ピーク 1）
- 主要な方向に加えて多方向から進入（ピーク 2）
- 主要な方向のみから進入（ピーク 3）

表 1 に、それぞれの交通流のピークにおける到着機の進入方向毎の機数を示す。

表 1 交通流のピークにおける到着機数

	主要な方向	その他	合計
ピーク 1	10	0	10
ピーク 2	5	5	10
ピーク 3	7	0	7

#### 3.2 実施要項

シミュレーションにおいて管制官役は到着機の管制処理の模擬を行うとともに、プロンプト表示デバイスのランプ点滅開始に応じて主観評価による作業負担値を評価し、対応する数値キーを押下した。ランプは基本的に 2 分間の間隔で点滅を開始するものとし、前後 30 秒間のばらつきを与えた。

ランプの点滅開始から一定時間（30 秒間）内に数値キーの押下が行われなかった場合、最高値の‘10’が押下されたものとした。

各試行では疲労による影響の軽減を目的として、休憩時間を 20 分間毎に設けた。

管制官役として、合計 5 名の航空管制業務経験者の参加を得てシミュレーションを実施したが、その中で円滑に航空管制業務が行われた 3 名の管制官役を本稿では解析の対象とする。

同一の管制官役は 2 回の試行を担当した。全ての試行で同一の交通流シナリオおよび空域条件を使用したために、1 回目の試行による学習効果が 2 回目の管制処理の作業負担に影響を与える可能性が存在した。そこで、学習効果による影響の低減のために、1 回目と 2 回目の使用シナリオでは各航空機の便名を変更した。

以下、本稿で解析の対象とする 3 名の管制官役をそれぞれ管制官役 A、管制官役 B、管制官役 C とする。また、各試行を参加した管制官役と対応づけて、それぞれ試行 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> とする。試行名に付与された数字は、当該試行が 1 回目の試行か 2 回目の試行かを意味する。

### 4. シミュレーション結果

#### 4.1 作業負担値の比較

図 2 に各試行より得られた作業負担値の平均値を示す。棒グラフは、各試行での 3 つの交通流ピークにおけるそれぞれの作業負担値の平均値を表す。また、棒グラフ上の箱ひげは、平均値に標準偏差を加えた値を示す。

表 2 各要素と作業負担値の相関係数

試行	同時管制機数①	同時管制機数②	周辺機数	受領済み機数	受領待ち機数
A1	0.45	0.59	0.84	-0.01	0.13
A2	0.65	0.55	0.68	-0.11	0.03
B1	0.86	0.17	0.45	-0.25	0.25
B2	0.59	0.08	0.46	-0.34	0.16
C1	0.71	0.33	0.54	-0.30	0.20
C2	0.50	0.42	0.63	-0.21	0.10

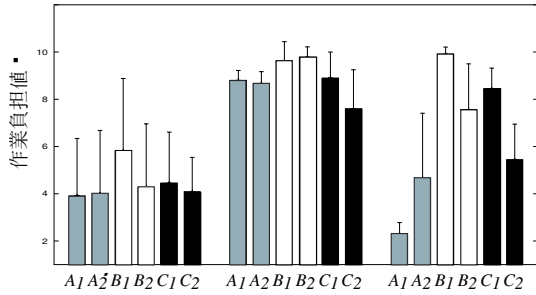


図 2 作業負担値の平均値

## 4.2 各要素と作業負担値の相関

各試行において、作業負担値が入力された各時点における以下のような項目の変数の値を調べ、作業負担値との相関を検討した。

- 同時管制機数① … 空港からの距離が 20NM 未満に位置する機数
- 同時管制機数② … 空港からの距離が 20NM 以遠に位置する機数
- 周辺件数 … 相互の距離が 10NM 以内となる到着機の組み合わせの件数。
- 受領済み機数 … 過去 2 分間の範囲でターミナル空域の境界線近くで管制権を受領した到着機数。
- 受領待ち機数 … ターミナル空域境界線近くまで到達して受領が可能であるが、受領待ちの状態にある到着機数。

同時管制機数の計算には、管制機数の平均値を単位時間毎に算出するなどの方法が考えられるが、本稿では、単純に数値キーを押下した各時刻における管制対象機数の瞬間値を同時管制機数として扱った。表 2 に各変数の作業負担値との相関係数を示す。

表からは、

- 受領済み機数は作業負担値と負の相関を有するが、その相関値は小さい。
- 受領待ちの機数と作業負担値の相関値は小さい。

という 2 点が全ての試行で共通して認められる。受領済み機数が作業負担値と負の相関を有するという事は、他の原因により作業負担値が低くなった結果として、管制官役に管制権を受領する余裕が生じたと解釈することが合理的である。受領待ち機数と作業負担の相関が小さいことから、航空路管制からの管制権受領に関する要素の作業負担へ与える影響は小さかったと考える。

## 4.3 重回帰分析の実施

4.2 の相関係数の検討に基づき、各試行について、作業負担値に影響を与えると考えられる以下の要素、

- 同時管制機数①
- 同時管制機数②
- 周辺件数

を説明変数、作業負担値を応答変数として次の回帰方程式に当てはめることで、各要素が作業負担値の変動へ与える影響を検討した。

$$WL = a_1 c_{d < 20} + a_2 c_{d \geq 20} + b c_c \quad (1)$$

上式においては管制機数が 0 の場合の作業負担値を 0 とした。このため、左辺の WL は入力された作業負担値から 1 を減じた値とした。また、 $c_{d < 20}$ 、 $c_{d \geq 20}$  は、それぞれ同時管制機数①、同時管制機数②を、 $c_c$  は周辺件数を表す。

表 3 回帰方程式 (1) における係数

試行	$R^2$	$a_1$	$a_2$	$b$
A <sub>1</sub>	.77	0.32	<u>0.16</u>	0.53
A <sub>2</sub>	.66	0.44	0.28	0.35
B <sub>1</sub>	.91	1.14	<u>0.54</u>	-0.05
B <sub>2</sub>	.63	0.76	0.52	<u>0.10</u>
C <sub>1</sub>	.70	0.80	0.38	<u>0.11</u>
C <sub>2</sub>	.54	0.47	0.38	<u>0.23</u>

式 (1) より得られた各説明変数の偏回帰係数を、回帰方程式の決定係数  $R^2$  とともに表 3 に示す。決定

係数は、データに対する回帰方程式のあてはまりの度合いを表す指標であり、値が1に近いほど当てはまりが良いことを意味する。値に下線が引かれた偏回帰係数は、該当する説明変数が作業負担値の変動へ影響を与えないとする仮説が有意水準5%で棄却されないものを示す。周辺件数に関する係数 $b$ について3つの試行で仮説が棄却されず、係数値も試行により大きく異なる。

そこで説明変数の対象から周辺件数を外し、同時管制機数のみとした回帰方程式を当てはめた。

$$WL = a_1 c_{d < 20} + a_2 c_{d \geq 20} \quad (2)$$

表4に、各説明変数について、式(2)より得られた偏回帰係数を方程式の決定係数とともに示す。式(2)では、該当する説明変数が作業負担値の変動へ影響を与えないとする仮説は、全ての偏回帰係数について有意水準1%で棄却される。

表4 回帰方程式(2)における係数

試行	$R^2$	$a_1$	$a_2$
$A_1$	.55	0.47	0.54
$A_2$	.56	0.64	0.41
$B_1$	.91	1.12	0.51
$B_2$	.60	0.86	0.54
$C_1$	.66	0.91	0.42
$C_2$	.51	0.54	0.52

表4では試行間で決定係数、偏回帰係数ともに値のばらつきが大きい。試行 $B_1$ を除いて決定係数は0.5から0.7の範囲となり、作業負担値の変動の説明に十分に大きな値ではない。これは式(2)で説明変数とした同時管制機数以外の要素による作業負担値への影響が大きいと考える。

また、同一の管制官役による試行間でも1回目と2回目での差異が大きい。これは試行の繰り返しによる学習効果を反映するものと考えられる。

試行 $A_1$ 以外の全ての試行で $a_1 > a_2$ となるが、これは、3.1に示したとおりに空港近くに位置する管制機の方が、空港より遠くに位置する管制機よりも作業負担値の変動へ与える影響が大きく、その比率は同等から2倍程度となる可能性を示す。

なお、シミュレーションでは全ての到着機処理を1名の管制官役で担当したが、用いた交通流シナリオのように取り扱い機数が多い場合、ターミナル空域における到着機処理は複数の管制官で担当空域を分担することが一般的である。

## 5. おわりに

本稿では、実時間シミュレーション中の作業負担値の取得を目的として製作した作業負担記録装置について、その概要を示した。また、記録装置を使用した実時間シミュレーションの結果として得られた作業負担値について、負担値が入力された各時点における管制機数などとの相関を検討した。

管制機数には、作業負担値との比較的大きな相関が認められる一方で、管制権の受領済み機数、および受領待ち機数については作業負担値との相関は全般的にほとんど現れなかった。これは、管制官役の作業の重点が現在の管制機の処理に集中し、管制権の受領に対する割合が小さかったことを表す。

また、空港からの距離に基づいて管制機数を区分し、回帰方程式へ当てはめることで、作業負担値の変動へ管制機数が与える影響を検討した。各試行より得られた回帰方程式は作業負担値の変動の説明に十分ではないと考えられるが、回帰方程式からは、全般的に空港から近くに位置する管制機数の影響が大きい可能性が示された。

今後、航跡データに基づいて各作業負担値入力時の空域条件や交通流をさらに詳細に解析することで、作業負担値との相関について検討を進める予定である。また、航空路管制を対象とした実時間シミュレーションを実施することで航空路管制における作業負担値の変動を検討する予定である。

## 参考文献

- [1] 東福寺：“航空交通管制シミュレーション実験による交通容量推定手法”，電子情報通信学会論文誌 B-II, Vol. J77-B-II No.7, pp.406-413, 1994.
- [2] Majumudar, Ochieng: “Factors affecting Air Traffic Controller Workload”, Transportation Research Record, No.1788, pp.58-69, 2002.
- [3] 芳賀：“メンタルワークロードの理論と測定”，日本出版サービス，2001.
- [4] Stein: “Air Traffic Controller Workload: An Examination of Workload Probe”, DOT/FAA/CT-TN84/24, 1985.
- [5] Manning, Mills, Fox, Pfeleiderer, and Mogilka: “The Relationship Between Air Traffic Control Events and Measures of Controller Taskload and Workload”, 4th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, 2001.
- [6] Flury, Riedwgl (田畑訳)：“多変量解析とその応用”，現代数学社，1990.