航空交通流管理における管制作業量についての一検討

住谷 美登里*・福島 幸子**・福田 豊*

A Study of a Controller Workload for Air Traffic Flow Management

Midori SUMIYA, Sachiko FUKUSHIMA and Yutaka FUKUDA

Abstract

ATFM (Air Traffic Flow Management) is introduced for safe and effective flight at each sector and to satisfy demand for air traffic increase. ATFM is conducted by “traffic management index” that represents a controller workload. This paper describes the relationship traffic conditions and the index based on parameter of controller workload at 15 sectors. The definition of parameter was based on the measurement, analysis and classification of the controller’s task of each aircraft. It is time consuming to analyze controller’s task.

Therefore, this paper proposes improved method that provides an index for ATFM without analyzing the controller’s tasks. We propose methods for index based on the number of proximity aircraft. Then, the close relationship between the proposed index and the current index has been shown.

Keywords: Air Traffic Control, Air Traffic Flow Management, Controller Workload, Proximity aircraft

キーワード: 交通管制、航空交通流管理、管制作業量、近接機数

1. はじめに

近年、航空交通需要が増加してきている。そのため、航空交通流管理 (ATFM: Air Traffic Flow Management) を実施し、安全かつ効率的な航空機の運航、空域の有効利用を行っている。航空機は出発から到着までいくつかの分割されたセクタとよばれる管制空域を通過する。この各々の管制空域において航空管制官 (以下、管制官) は、交通の安全と円滑な流れを維持するため航空交通管制業務を行っている。ATFM において、各管制空域では安全で効率的な運航をするために航空機の出発前に交通量の指標値を予測計算し、規定値を超えると予測した場合、出発時刻等の調整 (管理) を行う。我が国では、航空交通管理 (ATM) センタで、航空交通管制部の全セクタおよび主要空港に対して ATFM が実施されている。

我が国では ATFM で用いられている交通量の指標として、2 種類の考え方が利用されている。1 つ

めは、空域に航空機が何機存在できるか、という物理的な値で、主要空港では、単位時間あたりの離着陸可能機数を用いている。2 つめは、管制官の航空管制業務の作業負荷を基本とする指標値で、航空路管制セクタに利用されている。

この作業負荷を基本とする指標値は、管制作業量と呼ばれる。管制作業量とは、まず航空機の出発前に各空域の飛行時間を求め、次に管制官の作業を表す係数である管制負荷係数を重み付けして時間推移を予測計算した値である。管制官は、その時々々の天候、交通量、パイロットの要求等を考慮して航空管制業務を行っている。この航空管制業務を各空域で計測、分類してあらかじめ管制負荷係数という係数を設定する。各管制セクタの管制官による管制指示等の航空管制業務の分析は、膨大な労力を要する。また空域再編時は、交通流を設定し、管制官参加の実時間シミュレーション実験等を実施して、管制作業の分析が必要となる。

* 正会員 独立行政法人 電子航法研究所 (〒182-0012 東京都調布市深大寺東町 7-42-23)

** 非会員 独立行政法人 電子航法研究所 (〒182-0012 東京都調布市深大寺東町 7-42-23)

著者らは ATFM の指標値を求める方法の提案として、管制官参加のシミュレーション実験を実施し、セクタ内を飛行している各航空機の高度変更量に着目した。管制作業を空域への入域、出域高度による分類をして計算したが、分類方法にさらなる検討が必要であることがわかった⁽¹⁾。

今回は管制官の航空管制業務の作業分析をせずに交通シミュレーションでより簡単に計算して ATFM の指標値を求めたい。そのために現行で求める ATFM の指標値である管制作業量と、実データによる交通状況を比較し、交通流から ATFM の指標値を求める方法を提案する。交通流としてセクタ内で近接する航空機数に着目したところ現行方法と相関が見いだされた⁽²⁾。本稿では 15 セクタにおいて交通状況と比較し、近接する航空機数に着目し、指標値を求める方法を提案する。

まず、調査対象について述べる。次に現行の ATFM の指標として用いられている管制作業量の求め方を説明する。そしてセクタごとの交通流と指標値との関係を示す。更に近接する航空機数に着目し、指標値を求める方法を提案する。

2. 航空管制

2.1 航空管制業務

国内の航空路管制セクタを飛行する航空機の位置を把握するために航空路監視レーダ (ARSR : Air Route Surveillance Rader) が国内に約 16 箇所設置されている。これらのレーダで得られた航空機の位置情報 (レーダデータ) は 10 秒ごとに各航空交通管制部のレーダ画面上に表示される。航空路管制セクタを管制する管制官は、セクタ内を飛行している航空機が効率よく安全に運航するよう、レーダ画面を見て航空機の状況を監視する。そして管制官は航空機 (パイロット) と通信し、他の航空機と予め定められた管制間隔 (航空機間の最低間隔) を保つように速度、高度、針路等の管制指示を出し、飛行経路等が記載されている運航票に管制指示を記入する。これが代表的な航空管制業務である。

2.2 航空交通流管理

各航空機は飛行前に飛行計画を提出する。飛行計画は ATM センタの飛行情報管理システム (FDMS : Flight Data Management System) にて管理されている。

ATM センタの飛行情報管理システムの飛行計画情報には、通過予定地点名、各地点の通過予定時刻や通過予定高度、出発・到着空港等が含まれている。これを利用して各航空機の各セクタの境界通過予定

時刻からセクタ内飛行時間を予測する。それをもとに ATFM の指標値を出発前に予測して出発時刻等の調整を実施している。

3. 調査対象

3.1 調査空域

ATM センタでは飛行計画情報をもとに飛行前に管制作業量という指標値を予測して ATFM を実施しているが、本稿では実際の飛行状況を把握するため航跡データであるレーダデータを利用した。

レーダデータには、約 10 秒ごとの各航空機の位置 (緯度、経度)、高度、出発空港、到着空港、管制セクタ名等の情報が含まれる。

2006 年 8 月 24 日 (木) の 00:00:00 から 23:59:59 (日本標準時 : JST) までは東京航空交通管制部の 15 セクタ (T01 から T27) を飛行した航空機を対象とした。Fig.1 に当時のセクタの構成図を示す。

Fig.1 Geometry of sector configuration

3.2 便数

レーダデータより航空機 a_i ($i=1, \dots, N$) のセクタへの入域時刻、セクタからの出域時刻をそれぞれ IT_i , OT_i とする。通過時間 ($OT_i - IT_i$) が 1 分以下の便は、平均通過時間と比較して小さくレーダデータのエラー値と考えられるので今回の解析対象から外す。各セクタ通過便数と各セクタの通過時間 (Flight time) の平均値を Table1 に示す。

Table 1 Number of aircraft and average flight time for each sector

Sector	Number of aircraft	Average flight time
T01 (Joetsu)	414	14m42s
T02 (Tohoku)	400	9m48s

T03 (Kanto North)	545	13m42s
T04 (Kanto East)	340	26m45s
T09 (Kanto South A)	633	14m18s
T10 (Kanto South B)	395	14m00s
T11 (Kanto South C)	103	14m23s
T12 (Kanto West)	618	12m33s
T17 (Kii)	439	12m21s
T21 (Kinki West)	421	16m54s
T22 (Sanyo)	494	8m18s
T23 (Harima)	302	8m37s
T24 (Mikawa)	672	8m1s
T26 (Tokai)	672	7m50s
T27 (Hokuriku)	544	16m18s

m:minute s:second

3.3 管制機数

ある時刻 t にセクタ内を飛行している航空機数 $CN(t)$ を管制機数 (Controlled aircraft) とする。管制機数を各航空機のセクタの入域時刻より 1 分ごとに 24 時間分求めた。その管制機数の最大値と平均値を求め、Table2 に示す。1 日 (24 時間分) の平均管制機数は、T04 (関東東) セクタが 6.33 便と一番多い。これは、平均通過時間が長いためと考えられる。1 日の平均管制機数は通過便数と平均通過時間の積に比例する。

Table 2 Number of controlled aircraft for each sector

Sector	Max	Average
T01 (Joetsu)	20	4.20
T02 (Tohoku)	12	2.71
T03 (Kanto North)	17	5.19
T04 (Kanto East)	18	6.33
T09 (Kanto South A)	17	6.29
T10 (Kanto South B)	15	3.83
T11 (Kanto South C)	5	1.03
T12 (Kanto West)	16	5.37
T17 (Kii)	12	3.77
T21 (Kinki West)	17	4.94
T22 (Sanyo)	12	2.86
T23 (Harima)	9	1.81
T24 (Mikawa)	13	3.74
T26 (Tokai)	13	3.65
T27 (Hokuriku)	23	6.16

4. 現行の指標

4.1 管制作業量の求め方

ATFM の指標値である管制作業量の求め方について説明する。ATFM の指標値である管制作業量 (Controller Workload) $TASK_T(t)$ は、 i 番目の航空機 a_i の時間区間 $[t, t+T]$ におけるセクタ内の飛行時間 $ST_T(t, i)$ と管制官の航空管制業務を表す管制負荷係数 C_{ij} を用いて

$$TASK_T(t) = \sum_{i=1}^N ST_T(t, i) C_{ij} \quad (1)$$

で表される。

ここで i 番目の航空機 a_i の時間区間 $[t, t+T]$ におけるセクタ内の飛行時間 $ST_T(t, i)$ は航空機 a_i のセクタの入域時刻 IT_i 、セクタからの出域時刻 OT_i を用いて (2) 式のようになる。

$$ST_T(t, i) = \begin{cases} OT_i - IT_i & (t < IT_i, OT_i < t+T) \\ t+T - IT_i & (t < IT_i < t+T < OT_i) \\ OT_i - t & (IT_i < t < OT_i < t+T) \\ T & (IT_i < t, t+T < OT_i) \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (2)$$

一方管制負荷係数 C_{ij} は、各セクタの航空機 (i) の分類 (j) に応じて設定する。各航空機の出発、到着空港に応じて出発機 (departure)、到着機 (arrival)、通過機 (over-flight)、域内機 (in-sector) の 4 つに分類される。これは各セクタの管制作業に必要な時間がこれら 4 種類に属するためである。

ATFM では、 $T=30$ 分として時間推移の $TASK_T(t)$ を求める。30 分間に作業可能な上限値 (1800s : 容量) を超えると ATM センタは出発遅延等の調整を行う。

4.2 管制作業を表す係数

管制作業時間を分析・分類して、平均値に基づいて前もって管制負荷係数を定める。管制作業に必要な時間とは、航空機に対して、通信設定や、高度・速度・方位等を指示するための通信時間や考慮時間、運航票の記入等の作業時間のことである。各セクタの分類された各係数値を Fig.2 に示す⁽²⁾。

この図から、各分類の係数値はセクタごとに大幅に異なっていることがわかる。特に到着機の管制負荷係数値は他の分類の係数値より大きめである。これは、到着機に対する管制作業時間が他より多いことを示している。

Fig. 2 Parameters classified by category for each sector

4.3 分類

各セクタの航空機を、第 4.2 節のような種類で分類した便数を Fig. 3 に示す。各航空機の出発、到着空港と各セクタの空港によって分類を行う。例えば T01 セクタでは、庄内、新潟、佐渡の各空港を出発している航空機は出発機、この 3 空港を到着空港としている航空機は到着機、この 3 空港を出発し、到着する航空機を域内機、その他を通過機とする。

Fig. 3 Number of aircraft classified by each category and each sector

出発機の割合が最も多いセクタは T12 (関東西) セクタである。T12 セクタは羽田空港から出発する便が通過するセクタなので出発機の割合が多い。T12 セクタの出発機は全体の 65% を占めている。T09 (関東南 A)、T10 (関東南 B) セクタは羽田空港へ到着する便が通過するセクタなので到着機の割合が多い。T03 (関東北) セクタは、出発機、到着機、通過機の割合はほぼ同等である。その他のセクタは通過機の割合が多い。

4.4 指標値

ATFM では、 $T=30$ 分として時間推移の $TASK_T(t)$ を求める。 $T=30$ 分、 t を 10 分おきに (1) 式より管制作業量という指標値を求める。例として T01 (上越) セクタの指標値を Fig. 4 の棒グラフで示す。

Fig. 4 Current index (controller workload) and average number of controlled aircraft in 30 minutes (T01 sector)

ATFM ではセクタ内飛行時間を予測して管制作業量という指標値を求めている。各時刻における指標値が容量 (1800) を超えている場合は、容量を超えないように出発前に出発遅延等で調整してから飛行することになっている。しかし、セクタの入出域時刻は出発前の予測と実際の運航では異なることもあるので、本稿のように運航後のデータをもとに指標値を求めると、容量を超えることもある。

4.5 平均管制機数と指標値との関係

交通流の時間推移と比較するために (3) 式で求められる T 分間の平均管制機数と比較する。

$$\sum_{\tau=t}^{t+T} \frac{CN(\tau)}{T} \quad (3)$$

ATFM の指標値と同じ時間間隔 $T=30$ 分として 30 分間の平均管制機数 (average number of controlled aircraft in 30 minutes) を求める。例として T01 (上越) セクタの 10 分おきに求めた 30 分間の平均管制機数を Fig. 4 の折れ線で示す。Fig. 4 より指標値と 30 分間の平均管制機数は相関があることがわかった。

Fig. 5 Current index (controller workload) to average number of controlled aircraft in 30 minutes

T01（上越）セクタと T02（東北）セクタの指標値と 30 分間の平均管制機数との相関関係を Fig.5 に示す。

各時刻の 30 分間の平均管制機数と指標値は T01 セクタだけでなく、T02 セクタでも比例することがわかった。比例係数は T02 セクタのほうが大きい。これは、同一機数を管制するとき、T02 セクタの指標値が大きい、つまり管制官の作業が大きいことを意味している。

(1)式で求められる現行の指標値 $TASK_T(t)$ は、30 分間の平均管制機数に対する近似係数 A 、管制機数 $CN(t)$ 、セクタ内飛行時間 $ST_T(t,i)$ を用いて以下のようになる。

$$TASK_T(t) = \sum_{i=1}^N ST_T(t,i) C_{ij}$$

$$\cong A \sum_{\tau=t-T}^{\tau=t+T} \frac{CN(\tau)}{T} \quad (4)$$

$$= \frac{A}{T} \sum_{\tau=t-T}^{\tau=t+T} CN(\tau) \quad (5)$$

$$= \frac{A}{T} \sum_i ST_t(t,i) \quad (6)$$

$$\cong \frac{1}{N} \sum_i C_{ij} \sum_i ST_t(t,i) \quad (7)$$

セクタ内管制機数とセクタ内飛行時間の関係より (5)式と(6)式は成り立つ。各セクタの T ($=30$) 分間の平均管制機数に対する指標値の近似係数 A の $1/T$ の値と第 4.2 節の各セクタにおける各分類の管制負荷係数値 C_{ij} の平均値を Fig.6 に示す。Fig.6 より式 (7)が成り立つ。

Fig.6 Approximation coefficient and average of parameter classified by category for each sector

15 セクタにおいて、ATFM の指標値である管制作業量は 30 分間の平均管制機数に比例することがわかった。その比例定数は各セクタで異なることがわかった。平均管制機数が同じでも、T11（関東南 C）セクタが一番指標値が大きく、T04（関東東）セクタが一番小さいことがわかった。

5. 提案する指標

5.1 目的

管制官の各航空機への管制作業の分析を行うことなしに、交通流をもとに ATFM の指標値を求めたい。現行の指標値を求める際に利用する管制負荷係数が同じ分類の航空機でも、その時の管制官や交通量によって管制指示等の管制作業が異なる場合がある。交通流をもとに、共通の係数をもとに指標値を求めたい。

管制官は航空機相互間に定められた管制間隔（航空機同士の最低間隔）を保つように管制を行う。管制（監視）をしている航空機に対して近接する航空機（近接機）が増加すると管制官は近接機と管制間隔を確保するために監視する必要があり、管制指示を出す場合もある。従って、現行の指標値を求める際に利用する管制作業に基づく管制負荷係数は近接機数と関係があると考えられる。

そこで、航空機の位置等から近接している航空機の数（近接機数）に着目し、航空機 a_i の近接機数 PA_i とセクタ内飛行時間を用いて指標値を求める方法を提案する。

5.2 指標値の求め方

セクタ内に航空機が多数存在しても全ての航空機の近接機数が 0 の場合もある。この場合でも各航空機に対してセクタの入出域地点でパイロットとの通信や監視等の管制作業は生じる。指標値は、セクタ内飛行時間に比例し、かつ航空機 a_i の近接機数 PA_i が増えたとさらに増えるので、係数としてパラメータ K ($K>0$: 定数) を用いて、式(1)の管制作業を表す係数 C_{ij} を $(K+PA_i)$ とした。 PA_i の求め方は第 5.3 節で、 K の求め方は第 5.5 節で述べる。その結果求められる値 $TASK_P_T(t)$ を式(8)のように提案する。

$$TASK_P_T(t) = \sum_{i=1}^N ST_T(t,i) (PA_i + K) \quad (8)$$

5.3 近接機の定義

今回は出域地点で航空機の位置等から近接する航空機に着目し、セクタ内部での近接機については対象としていない。航空機 a_i のセクタの出域時刻 OT_i

における航空機の水平位置を $(X_i(OT_i), Y_i(OT_i))$ 、高度を $(Z_i(OT_i))$ とし、航空機 a_j の出域時刻 OT_j における航空機の水平位置を $(X_j(OT_j), Y_j(OT_j))$ 高度を $(Z_j(OT_j))$ とする。航空機 a_i において以下の条件を同時に満たす便を近接機と定義した。

$$|OT_j - OT_i| \leq M \quad (9)$$

$$|Z_j(OT_j) - Z_i(OT_i)| \leq H \quad (10)$$

$$\sqrt{(X_i(OT_i) - X_j(OT_j))^2 + (Y_i(OT_i) - Y_j(OT_j))^2} \leq D \quad (11)$$

航空交通管制では、安全を保ちつつ効率よく航空機を運航するため、航空機相互間に管制間隔の基準を設けている。国内の航空路の高さ方向の管制間隔は 1,000ft (1ft=0.3048m) (同方向では 2,000ft) で、水平方向の管制間隔は 5NM (1NM=1,852m) である。また出域地点では同高度の航空機の水平方向の間隔は 20NM となっている。この点を考慮して今回の近似条件は 5 分 (480knot で飛行する航空機では 40NM に相当)、 $H=2,000\text{ft}$ 、 $D=20\text{NM}$ とした。(5,2000,20) は $M=5$ 分、 $H=2000\text{ft}$ 、 $D=20\text{NM}$ を示す。以下 (M,H,D) で表す。 (M,H,D) の値が大きくなれば、近接機数が多くなる。

5.4 出域便数と近接機数との関係

各便の出域時刻をもとに時間帯ごとの便数を求めた。T01 セクタの各時間帯の出域便数を (5,2000,20) の時の近接機の便数(number of proximity aircraft) PA_i で区分してみた。T01 セクタを例として Fig.7 に示す。

Fig.7 Number of aircraft passing over sector boundary (T01 sector)

T01 セクタにおいて一番便数が多い時間帯は 12 時で 50 便である。そのうち近接機が 2 便であったのが 1 便、近接機が 1 便であったのが 12 便で残り 37 便は近接機がなかった。T01 セクタでは、1 機あたりの近接機数の平均値は 0.25 便であった。出域便数が 1 時間あたり 15 便以下の時間帯では全ての航

空機で PA_i が 0 であった。他のセクタでも同様に調査してみると近接機数が多いのは T09 (関東西) セクタで、近接機の最大値は 6 便で、平均は 1.4 便であった。

5.5 現行の方法と提案方法の指標の比較

T01 セクタの出域地点での近接条件 (5,2000,20) において近接機数を求め、(8)式でパラメータ K を変化させて提案した指標値を求めた。現行の指標値である(1)式で求めた指標値と提案した指標値の相関を Fig.8 に示す。今回は $K=3, 4, 5$ の 3 パターンを示す。

Fig.8 Relationship proposed index and current index (T01 sector)

Fig.8 より現行の指標値と提案した指標値は K の値にかかわらず比例関係があることがわかる。現行の指標値と各 K に対する提案した指標値との回帰式を求め、そのときの比例係数を求めた。この比例係数が 1 のとき、現行の指標値と提案した指標値がほぼ一致する。 $K=3$ の時は比例係数が 0.6788、同様に $K=4$ は 0.8847、 $K=5$ は 1.0906 であった。 K と比例係数との関係より T01 セクタでは $K=4.5$ のとき、比例係数が 1 となり現行の指標値と提案した指標値がほぼ一致する。

Fig.9 に T01 セクタの現行と提案した指標値を時系列に示す。現行の方法による指標値を棒グラフに、(5,2000,20) の近接条件の時の近接機数を求め $K=4.5$ のときの提案した指標値を折れ線グラフに示す。

Fig.9 Each index (T01 sector)

Fig.9 より時間推移がほぼ一致していることがわかる。管制作業を分析せずに交通流をもとに指標値が求められた。

15 セクタにおいて各々現行の指標値と提案した指標値を比較して各セクタで K の値が求められた。 K をセクタによらずある値に設定、またはセクタの特徴や交通流でいくつかの値に分類して設定したいと考え、今回は 1 日 (24 時間) 平均管制機数と K の関係に着目しその関係を Fig.10 に示す。

Fig. 10 Parameter K to average of controlled aircraft for each sector

(● : The number of arrival aircraft ≤ 100)

(○ : The number of arrival aircraft > 100)

1 日の平均管制機数が 1.03 便と一番小さい T11 (関東南 C) セクタは $K=7.1$ 、1 日の平均管制機数が 6.33 便と一番大きい T04 (関東東) セクタは $K=2.8$ と定められた。

Fig.2 より到着機の管制作業が多いため、到着機が多いと指標値も大きくなると考えられる。各セクタの到着機数の 1 日あたりの平均値は 100 便であり、100 便より少ないセクタにおいて K と平均管制機数との関係の回帰式を求めたところ、一次式であることがわかった。到着機数が多いセクタは平均管制機数と回帰式で求める値より指標値が大きいことがわかる。

現行の指標値はセクタごとにパラメータを算出しなければならないが、近接条件を (5,2000,20) に設定し、到着機数が少ないセクタでは Fig.10 より平均管制機数と K の関係があることがわかった。その条件下においては共通のパラメータで提案式を用いて指標値を推定できることがわかった。

今後セクタの交通流、特徴、近接条件等さらに調査し指標値との関係を検討していきたい。

6. まとめ

航空交通管制において、安全で効率的な運航のため航空交通流管理が実施されている。航空交通流管

理の指標値は、管制官の航空管制業務の分析に基づく管制負荷係数を用いて求められる。東京航空交通管制部の 15 セクタの航跡データにより現行の指標値である管制作業量の時間推移を求めた。交通流として管制機数を調査し、指標値との関係について調べた。現行の指標値は、30 分間の平均管制機数と比例することがわかった。その比例係数は、管制負荷係数の平均値であった。

管制作業を分析せずに交通流をもとに指標値を求める方法として各航空機に近接する航空機数を利用して求める方法を提案した。その結果、近接機数とパラメータ K を用いて提案した指標値と現行の方法で求めた指標値がほぼ一致した。各セクタでパラメータ K の値は異なるが、 K の値は各セクタの 1 日の平均管制機数と関係があることがわかった。

今後、セクタの交通流、特徴等と指標値との関係についてさらに詳細に検討していきたい。近接機条件としてセクタの出域地点だけでなく、セクタ内での経路の交差点にも着目したり、近接条件を複数設定したりしていきたい。

謝辞

レーダデータの収集にご協力いただきました国土交通省東京航空交通管制部の関係各位に感謝いたします。

参考文献

- (1) 福島幸子、福田豊、住谷美登里、瀬之口敦、“高度変更量に着目した航空交通流管理における容量値計算方法の検討”、平成 18 年度電子航法研究所研究発表会講演概要、pp.27-32、平成 18 年 6 月
- (2) (財)航空保安研究センタ、“航空交通流管理における交通容量算定方式の高度化に関する調査報告書”、2002.3
- (3) 住谷美登里、福島幸子、福田豊、“近接航空機数を考慮した管制作業量の予測”、電子情報通信学会技術研究報告、SANE2007-52、2007.7

質疑応答

河合雅司 (富山商船高専) :

近接機数を求める条件を、5 分、2000ft、20 海里 (NM) に設定された理由を教えてください。

住谷美登里 :

航空交通管制では、予め航空機間の最小間隔 (管制間隔) が定められており、例えば同一方向での高さ方向の管制間隔基準は 2,000ft となっています。また出域地点での同高度の航空機

の水平方向は 20NM となっています。これらの
点を考慮して今回はこのように設定しました。