

10. 管制機数と作業負荷に関する一検討

航空交通管理領域 ※住谷 美登里、福島 幸子、福田 豊、瀬之口 敦

1. はじめに

航空交通管制では、安全かつ、効率的に航空機を運航するため、また近年の交通需要の増加に対処するため、航空交通流管理（ATFM: Air Traffic Flow Management）を実施している。これは、航空機の出発前に各管制空域で交通量を計算し、あらかじめ決められた容量を超えるると予測した場合、出発時刻の調整を行うものである。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の容量として、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、という物理的な容量で、主要空港で利用されている。2つめは、航空管制官（以下、管制官）の作業負荷を基本とする容量で、航空路管制セクタに利用されている。航空路管制セクタの管制作業量（以下、作業量）の予測には、管制作業を計測し、分析、分類することが必要である^[1]。

各セクタの管制作業を分析するには膨大な実測データの解析が必要であり、空域再編のたびに再計測が必要となる。飛行経路やその時の交通状況によって管制作業が異なる場合がある。著者らはセクタ内の高度変更量に着目した計算方法を提案している^[2]。管制するセクタの交通状況を反映し、各セクタの管制作業の分析をせずに作業量が求められることを目指している。

今回は、空域の交通状況に着目する方法として各航空機に関連する航空機数を考慮した作業量を求める方法を提案する。実データを利用して、国内で交通量が多い関東西セクタの管制機数、作業量、関連する航空機数について検討した結果を報告する。

2. 調査対象

2.1 調査空域とデータ

ATMセンタでは飛行情報管理システムの飛行計画情報を利用してATFMを実施しているが、本稿ではセクタの出域地点の位置情報を利

用するため2006年8月24日（木）の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。

調査対象空域は、国内の中で交通量が多い関東西セクタとする。このセクタは羽田空港、成田空港から出発する航空機が多い。

2.2 対象便

0:00:00 から 23:59:59（日本標準時：JST）までに関東西セクタを通過した航空機は658便あった。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 とし通過時間 ($OT_i - IT_i$) を調査した。通過時間が1分以下の便が40便あったが、今回の解析対象から外す。618便の通過時間の最大値は30分46秒、平均値は12分31秒であった。

3. 管制作業負荷

3.1 管制作業

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、航空機を監視し、航空機（パイロット）に必要な指示をし、予め定められた条件（高度、速度、航空機間の間隔等）で次のセクタに移管しなければならない。代表的な管制作業には、レーダ画面をみてセクタ内の航空機の位置を監視すること、航空機に速度、高度等の管制指示をするためパイロットと通信をすること、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とがあげられる。

3.2 管制作業量

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（以下、滞在時間）を $ST_T(t, i)$ とする。時刻 t における作業量 $TASK_T(t)$ は

$$TASK_T(t) = \sum_i ST_T(t, i) C_i \quad (1)$$

で表される。

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、通信の確認や、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。この係数は、管制官の作業分析結果^[1]に基づいてセクタごとに定義される。

TASK_T(t)が1800秒(容量)を超えるとATMセンタは出発遅延等の調整を行う。

3.3 管制負荷係数

実際の管制作業は、その管制の状況(経路、交通量等)に応じて航空機ごとに異なる。現在ATMセンターで用いられている方法は、各セクタの航空機を出発機、到着機、通過機、域内機の4種類に分類し、各々の種類(CAT)に対応した管制負荷係数 C_{CAT} を定義している。これは、各セクタの管制作業が4種類に分類できるという仮定に基づいている。

3.4 滞在時間

航空機 a_i の時刻 t の滞在時間 ST_T(t, i) を求める。現在 ATM では、出発前に作業量を予測計算するため、滞在時間を求める際セクタ境界通過予定時刻を利用している。本稿では、レーダデータを用いて航空機 a_i のセクタへの入域時刻 IT_i、セクタからの出域時刻 OT_i を用いて滞在時間を求める。

各航空機 a_i の滞在時間 ST_T(t, i) は(2)式のようにになる。

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

4. 現行の方法

4.1 分類

関東西セクタでは、羽田空港、成田空港、厚木飛行場、横田飛行場の4つの空港から出発した航空機を出発機、到着する航空機を到着機とする。これ以外は全て通過機となる。各分類の便数と滞在時間の合計を表1に示す。

出発機は最も多く全体の64.9%を占める。出発機のうち66%が成田空港出発機で、30%が羽田空港出発機であった。到着機はほとんどいない。通過機は仙台空港と伊丹、中部空港を結ぶ

表1 各分類の便数

	出発	到着	通過
便数	401	12	205
割合(%)	64.9	1.9	33.2
滞在時間(分)	5321.9	97.7	2314.4
割合(%)	68.8	1.3	30.0

便が多い。滞在時間の合計で比較すると、出発機の割合が増え、通過機の割合が減っている。

4.2 管制作業量

本稿では関東西セクタの C_{CAT} の係数値は、出発機は3.70 到着機は8.65 通過機は5.36 域内機は5.90 を用いた。

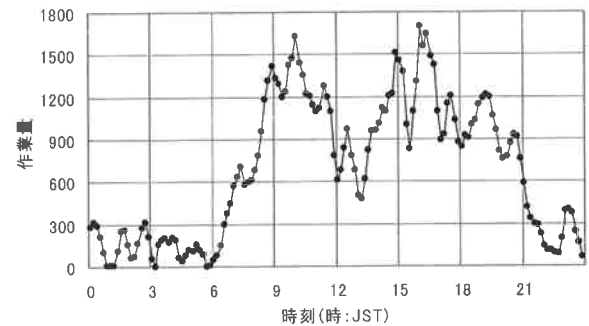


図1 管制作業量

10分ごとの作業量 TASK_T(t) (T=30分) を図1に示す。作業量は16時、16時20分、10時の順に多く1600以上である。30分間に作業可能な上限値(容量値=1800秒)と比較すると16時の作業負荷の割合は94.4%で最も多い。

4.3 管制作業量と滞在時間、管制機数

管制官が管制を行っている機数を管制機数と呼ぶ。1分ごとの管制機数を図2に示す。

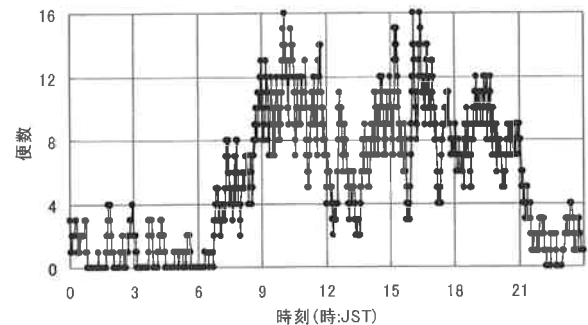


図2 管制機数(1分ごと)

最大は16便/分で10:03、16:05、16:24の3回あった。10時から10時30分の間が平均12.9便/分で最も多い。

時間区間 $[t, t+T]$ の滞在時間の和（ $\sum ST_T(t, i)$ ）と作業量の関係を図3に示す。

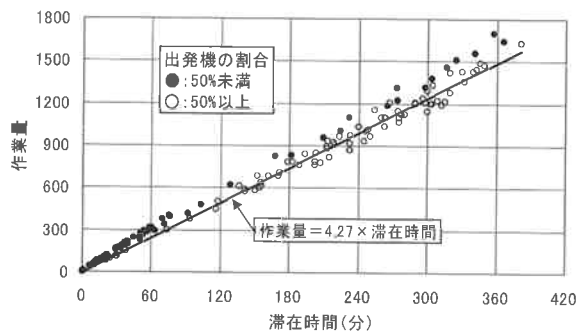


図3 滞在時間と作業量

滞在時間と作業量が強い相関があることがわかった。また時刻 t にセクタに入域している航空機がその時点から1分間滞在すると仮定すると、時間区間 $[t, t+T]$ の管制機数の和と滞在時間の和は等しいので、作業量は管制機数とも相関があることがわかる。

管制負荷係数 C_i を滞在時間の割合で平均した値は4.27である。直線は作業量 $=4.27 \times$ 滞在時間を示しているがほぼ一致していることがわかる。滞在時間が一番多いのは10時の381.5分であるが、作業量が一番多いのは、滞在時間が357.1分の16時である。16時の方が出発機の割合が多いため、10時より滞在時間が少ないのに、作業量が多くなっている。これは本稿で仮定した C_{CAT} の数値が出発機より到着機、通過機より大きいためである。

5. 提案方法

5.1 目的

4章で述べたように、現在は管制作業量を、出発機、通過機といった航空機の種類に分類して求めている。その結果管制作業量は航空機の滞在時間、セクタの管制機数に関係していることがわかった。

同じ分類の出発機でも飛行経路やセクタの交通状況によって管制作業量が異なる場合もある。そこでセクタの交通状況を表す指標として、管制機数（滞在時間）だけでなく、管制をする航空機の周辺に何機航空機が飛行しているかという点を考慮して作業量を求める。

本稿ではセクタの出域地点での航空機の位置等から関連する航空機（以下、関連機）に着目

し、作業量との関係を報告する。なお、セクタ内部での関連機については本稿では対象としていない。

5.2 関連機の定義

航空機 a_i の出域時刻 OT_i における航空機の位置を $(X_i(OT_i), Y_i(OT_i), Z_i(OT_i))$ とする。以下の条件を全て満たす便を航空機 a_i の関連機と定義した。

$$\begin{aligned} |OT_j - OT_i| &\leq M \\ |Z_j(OT_j) - Z_i(OT_i)| &\leq H \end{aligned} \quad (4)$$

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

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=1852m) 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パラメータは $M=2$ 分 (480knot で飛行する航空機では16NM に相当)、5分 (40NM に相当)、 $H=1,000\text{ft}, 2,000\text{ft}$ 、 $D=10\text{NM}, 20\text{NM}$ の6種類とした。(5,2000,20) は $M=2$ 分、 $H=2000\text{ft}$ 、 $D=20\text{NM}$ を示す。以下 (M, H, D) で表す。

5.3 関連機数

各航空機 a_i の関連機数 CA_i を求めた。出域時刻を横軸に、一番関連機数が多い (5,2000,20) の時の関連機数を図4に示す。●は1便を示す。

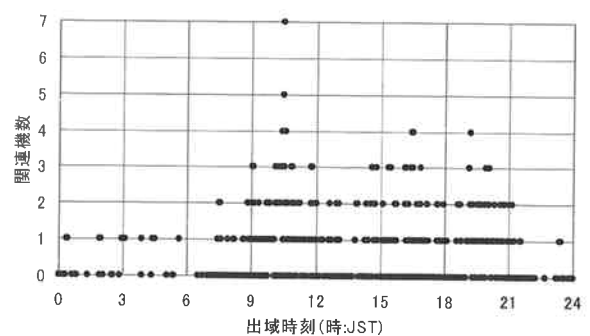


図4 関連機数 (5,2000,20)

(5,2000,20) のパターンにおいて最も関連機数が多いのは、出域時刻が10:47:45の便に対する関連機数7機であった。各パターンにおいて、1便あたりの平均関連機数を表2に示す。平均関連機数をみると、 D が2倍になっても平均関連機数は2倍にならないが、 H が2倍にな

表2 パラメータと平均関連機数

M (分)	H(ft)	D (NM)	平均値
2	1000	10	0.03
		20	0.06
	2000	10	0.15
		20	0.24
5	1000	10	0.17
		20	0.24
	2000	10	0.49
		20	0.72

ると平均関連機数は2倍以上になる。

5.4 関連機数と作業量

関連機が増加すると管制官は関連機と管制間隔を確保するために管制指示を出す必要がある。従って、管制負荷係数は関連機数と関係があると仮定する。

セクタ内に航空機が多数存在しても全ての航空機の関連機数が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等の管制作業は生じる。そこで、各航空機 a_i の管制負荷係数 C_i を $(CA_i + 1)$ とし、関連機を考慮した予測作業量 $W(t)$ を

$$W(t) = \sum_i ST_T(t, i) \cdot (CA_i + 1) \quad (5)$$

と仮定する。4章で求めた作業量と関連機を考慮した予測作業量(3パターン)を図5に示す。

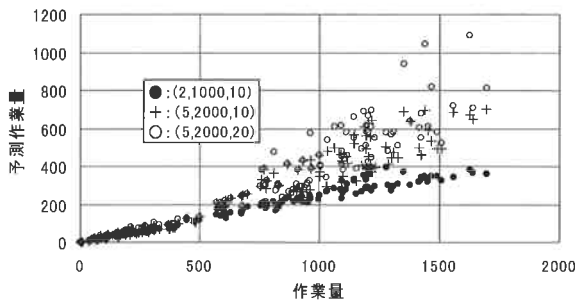


図5 予測作業量と現行の方法との比較

(2,1000,10)のパターンは関連機が少なく、予測作業量は滞在時間にほとんど等しい。作業量が多くなると関連機数も多くなり予測作業量がより大きくなっている。

図1より作業量が大きい9時から21時までの予測作業量を図6で比較する。現行の作業量は10時頃と16時頃の作業量がほぼ等しいが、(5,2000,20)のパターンでは10時頃の予測作業量が、16時頃の作業量よりかなり大きくなっ

ている。(5,2000,10)のパターンは作業量の増減、変化傾向が似ている。つまり、管制作業負荷係数として出発機や通過機といった航空機の種類による4分類ではなく、各航空機の関連機数でも作業量の傾向を予測できることがわかった。ただし、そのままの値では現行の作業量と異なるのでその点についてさらに検討する必要がある。

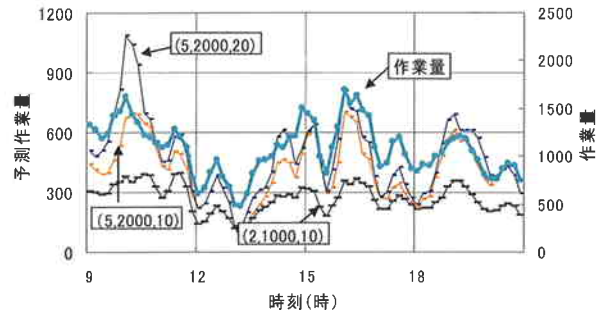


図6 予測作業量(9時から21時)

6. まとめ

現在の航空交通流管理センタで実施されている航空交通流管理の管制作業量の求め方について述べた。実データをもとに関東西セクタの管制機数、滞在時間、管制作業量を求めた。関東西セクタでは、現行の方法で分類して求めた作業量は、滞在時間(管制機数)と高い相関があることがわかった。

管制するセクタの交通状況を反映するため、各航空機に関連する航空機数を考慮した作業量を求める方法を提案した。その結果現行の作業量の傾向を予測できることがわかった。

今回は関東西セクタの出域地点の関連機数に着目したので、今後は他のセクタや経路の交差点の関連機数や、管制作業との関係や遅延も含め検討したい。

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] (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.
- [2] 福島幸子他, “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”, 電子航法研究所発表会(第6回), pp.27-32