

6. 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

航空交通管理領域 ※福島 幸子, 福田 豊, 住谷 美登里, 瀬之口 敦

1. はじめに

航空需要の増加に伴い、航空交通流は増加している。そのため、航空交通流管理（ATFM; Air Traffic Flow Management）を行い航空交通の円滑な流れと安全を確保している。ATFMは航空機の出発前に各管制空域内の滞在時間を計算し、容量を超えると予測されると、出発時刻の調整を行い、交通量の過度な集中を分散させる。

わが国では、ATM センターにおいて、航空交通管制部の全セクタ及び主要空港に対してATFMが実施されている。空域の容量には多くの考え方があり^[1]が、わが国では2種類が採用されている。

1つは物理的な容量で、空域に航空機が何機存在できるかで表される。空港のターミナル空域では、30分に着陸可能な機数と、レーダ誘導により余分に空域内に存在できる時間が、容量として空港ごとに定義されている。

もう1つは管制官の作業負荷量を基本とする容量である。これは、英国のDORA法^[2]とドイツのMBB法^[3]を元にしたMMBB法(Modified MBB Method)^[4]を基本としており、航空路管制セクタではこの方法が用いられている。

航空路管制セクタにおける管制作業量の計算では、航空機を出発機、到着機、通過機、域内機の4種類に分類し、管制空域ごとに4種類に対応した数値を定義している。しかし、4種類の分類では、同じ分類のものでも管制作業量が大きく異なる場合がある。また、空域再編時には数値を再計測、計算する必要がある。そこで、空域内での高度変更量に着目し、セクタに依存しない分類方法を提案する。

本稿ではまず現行手法を述べる。次に提案手法を述べ、現行手法と提案手法をシミュレーションによって比較・検討する。

2. 航空交通流管理

2.1 管制作業量

管制作業負荷は管制官の作業量としてどの

程度が適正であるかの数値で、

管制作業負荷 = 管制作業時間 + 考慮時間
で表わされる。

管制作業時間 = 通信作業時間 + 手作業時間
考慮時間 = 通信作業時間 × 困難度指数
であり、困難度指数は0.25~2.00の数値で、管制通信、運航票記入などの作業内容毎に定義される。セクタごとに、航空機を出発機、到着機、通過機、域内機の4種類にわけ、それぞれの管制処理に1分あたりどの程度の作業が必要かという数値が定義される。そして、30分間に作業可能な上限値が容量となっている。

対象セクタを通過する航空機が N 機あったとして、航空機 $a^i \{i=1\dots N\}$ の空域への入域時刻、空域からの出域時刻をそれぞれ IT_i , OT_i とする。このとき、区間 $[t, t+T]$ における a^i の滞在時間 $ST_T(t, i)$ は、

$$ST_T(t, i) = \begin{cases} OT_i - IT_i & (t < IT_i, OT_i < t+T) \\ t+T - IT_i & (t < IT_i < t+T < OT_i) \\ OT_i - t & (IT_i < t < OT_i, \\ & OT_i < t+T) \\ T & (IT_i < t, t+T < OT_i) \\ 0 & other \end{cases} \quad (1)$$

となる。

区間 $[t, t+T]$ における作業量 $TASK_T(t)$ は

$$TASK_T(t) = \sum_i ST_T(t, i) \cdot C_{CAT} \quad (2)$$

で表される。 C_{CAT} は、出発、到着、域内、通過機毎に設定される係数で、管制官の作業分析結果^[4]に基づいてセクタごとに定義される。

容量値を CAP とし、 $TASK_T(t) > CAP$ となった場合は、 i を1から順番に

$$IT_i \rightarrow IT_i + delay_i$$

$$OT_i \rightarrow OT_i + delay_i$$

とし、遅延 $delay_i$ を1分ずつ加算し、

$$TASK_T(t) < CAP \quad (3)$$

となるまで繰り返す。

航空機の順番 i (スロット決定の優先順位) は、まず国外からの入域機の当該空域への入域順である。次に国内空港からの出発機で、当該空域への入域順である。入域時刻が等しいときは、出域時刻の早いものが先になる。計算された遅延を元に出発制御時刻 (EDCT; Expected Departure Clearance Time) が割り当てられる。

図1にATFMのイメージを示す。空域内に出発機 (Dep1, Dep2), 到着機 (Arr1, Arr2) の4機が存在し、作業量を計算する。容量を超えている時間帯があるので、ATFMを実施する。優先順位の速い順 (Arr1, Dep2, Dep1, Arr2) にスロットを確定していく。優先順位の最も遅い Arr2 は遅延しないと、容量を超えるため、遅延する。

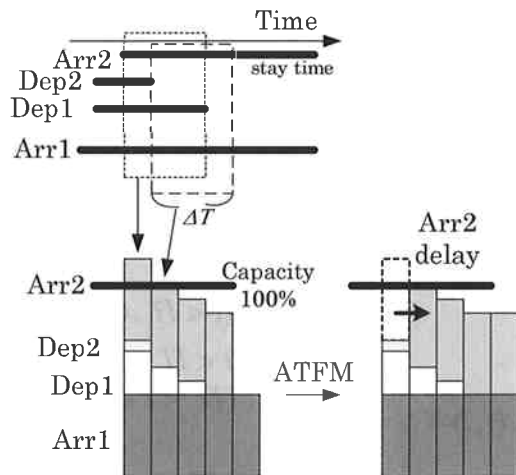


図1 ATFMのイメージ

2.2 パラメータの設定

ある分類の航空機 $a^i \{i=1...N\}$ について、代表的な15種類の管制指示 $EVENT_j \{j=1...15\}$ の1回にかかる作業時間 (秒) を $EVENT_j^i$ とする。 $EVENT_j^i$ は、通信時間 $COMM_j^i$, 運航票の操作時間 STP_j^i , RDP (Radar Data Processing; レーダデータ処理装置) の操作時間 RDP_j^i , 考慮時間 $THINK_j^i$ の和で表される。

$$EVENT_j^i = COMM_j^i + STP_j^i + RDP_j^i + THINK_j^i \quad (4)$$

$EVENT_j$ の発生確率 (以下、頻度) を $Freq_j$ とし、管制指示に関する作業の計に、管制指示には関係しない作業の時間 NON を加えて航空機 a^i の C_{CAT}^i を得る。

$$C_{CAT}^i = \sum_{j=1}^{15} EVENT_j^i \cdot Freq_j + NON \quad (5)$$

実際は、管制の実測データ (レーダデータや通信記録、運航票など) から、これらの平均値を算出している。航空機が N 機あった場合には、

$$C_{CAT} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{CAT}^i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^{15} EVENT_j^i \cdot Freq_j \right) + NON \quad (6)$$

として、作業負荷係数 C_{CAT} を得る。

CAT ごとに算出される機数換算値は、もしも当該セクタを通過する航空機がすべて CAT (例: 通過機) であった場合、30分間 (=1800秒) に何機通過したら、管制官の作業が100%になるかを表す数値で、種類 CAT の機数換算値 A_{CAT} は、

$$A_{CAT} = \frac{1800}{C_{CAT}} \quad (7)$$

で表される。処理容量 CAP_{CAT} は、機数換算値 A_{CAT} に平均飛行時間 FLY_{CAT} (実際の飛行時間の平均は管制移管の時刻から算出) をかけたもので、

$$CAP_{CAT} = A_{CAT} \cdot FLY_{CAT} \quad (8)$$

で表される。

単価 U_{CAT} は、ATFMシステムで使用するパラメータである。航空機が対象セクタを1分通過するとき、管制官は何秒その航空機の処理にかかるかを表す数値である。本来なら、作業負荷 C_{CAT} を FLY_{CAT} で割るべきであるが、ATFMシステムでは管制移管時刻は予測できないため、 FLY_{CAT} ではなく、空域境界線通過

時刻から、空域内飛行予定時間 FLY_{CAT_E} を算出し、それで C_{CAT} を割り、 U_{CAT} を求める。

$$U_{CAT} = \frac{C_{CAT}}{FLY_{CAT_E}} \quad (9)$$

3. 提案手法

3.1 分類方法

現行手法では航空機を4つに分類する。しかし、セクタによっては同じ分類の航空機でも、高度処理によって管制作業負荷が大きく異なる場合がある。

一般的に管制官は、出発機や到着機に対しては巡航高度まで上昇させる、あるいは巡航高度から降下させる高度処理を行う。通過機に対しては、一時的な管制間隔欠如の回避のためのみ、レーダ誘導や高度変更を行うので、管制間隔が保たれている限り、通信設定と監視が主な作業となる。

しかし、空域によってはターミナル空域の隣接空域で巡航高度までの上昇もしくは、巡航高度からの降下ができない場合がある。その場合は、さらに隣接するセクタである程度の高度処理を行う必要がある。しかし、従来の分類法ではそれらの航空機も通過機として分類されてしまう。

経路と高度ごとに分類すると、より現実に近い詳細な分類ができるが、それは数値の定義にかかる作業量を増やすことになる。そこで、全セクタに共通の定義として、入域高度と出域高度の組み合わせで分類して、それぞれに管制作業量を定義することを提案する。

セクタへの入域高度 ia と出域高度 oa の組み合わせに対して、行列を定義して、式(2)を

$$TASK_T(t) = \sum_i ST_T(t, i) \cdot CAT(ia, oa) \quad (10)$$

とする。

CAT は空域ごとに定義する行列で、入域高度 ia 、出域高度 oa によって定義する。

入域高度と出域高度について、 $\{IA_i, i=1 \dots m_i\}$ 、 $\{OA_j, j=1 \dots n_j\}$ とし、 $C = \{C_{ij}\}$ の $m_i \times n_j$ 行列を作成する。

$$C_{ij} \text{ は } IA_{i-1} \leq \text{入域高度} < IA_i \\ OA_{j-1} \leq \text{出域高度} < OA_j \quad (11)$$

の場合の単価と定義する。

なお、 $IA_0 = OA_0 = 0$ とする。

この手法は、空域が複数のターミナル空域に隣接している場合にも、移管高度の差を利用して、それぞれのターミナル空域に関する出発機、到着機の管制作業量を異なる数値で定義することができる。また、運用上の取り決めで、事前に高度処理を行う場合も、その作業を考慮した数値を設定することができる。

3.2 数値の設定方法

平成16年～17年にかけて、当所ではRVSM (Reduced Vertical Separation Minima ; 垂直間隔短縮) の導入効果に関するリアルタイムシミュレーション実験を行った^[6]。その結果からセクタでの管制指示の発生頻度を求め、提案手法に反映させる。セクタを通過する航空機を分類し、管制指示数の平均をそれぞれ求める。

現行手法による分類では、分類ごとの管制作業量は CAT_j であり、それは式(5)によるが、式(5)での発生頻度 ($Freq_j$) の値を高度指示、針度指示、直行指示について実験結果を反映させて再計算する。

現行でのある分類 CAT がさらに m 種類に分類されると仮定する。分類 CAT の管制指示 $EVENT_j$ の発生頻度 (設定値) を $Freq_curr_j$ とする。また実験での発生頻度を $Freq_exp_j$ とする。

分類 CAT を m 種類に分類し、実験結果から改めて算出した発生頻度を発生頻度を $Freq_exp_m_j$ とすると、提案手法での CAT の種類 m の管制指示 $EVENT_j$ の発生頻度 $Freq_m_j$ は、

$$Freq_m_j = Freq_curr_j \frac{Freq_exp_m_j}{Freq_exp_j} \quad (12)$$

とする。

これで式(6)を再計算する。

3.3 対象セクタ

RVSM の導入効果に関するリアルタイムシミュレーション実験は特徴的な3つのセクタについて行った。本稿では、そのなかの上越セクタを対象とした。このセクタは新潟上空を中心とする通過機の多いセクタである。成田空港の出発・到着機 (現行手法では通過機に分類される) に対する高度処理を行う必要があり、これ

らへの管制指示数は他の通過機に比べて多い。

空域内での管制指示数が多いものについては、従来の通過機の作業負荷係数よりも大きい係数とし、管制指示数が少ないものについては、従来の通過機の作業負荷係数よりも低くした。

なお、実験データを使用するため、実験時（2004年7月）の空域構成、容量値を使用する。

シナリオは、実際の交通量の1.5倍程度の2種類のシナリオA、Bを用意した。

上越セクタを通過する航空機を表1の7種類に分類する。例として、シナリオAの入域高度と出域高度を表2に示す。

表1 航空機の分類

区分	現行手法での分類	提案手法での分類
a	出発機	新潟空港*1の出発機
b	到着機	新潟空港の到着機
c	出発機	レディオ空港*2の出発機
d	到着機	レディオ空港の到着機
e	通過機	成田空港*3の出発機
f	通過機	成田空港の到着機
g	通過機	通過機（成田の除く）

*1 新潟空港はターミナル空域を持つ。

*2 庄内空港などのレディオ空港で、ターミナル空域を持たない空港

*3 成田空港は上越セクタに隣接していないが、出発・到着それぞれに対して高度の受け渡し条件が設定されている。

表2 通過航空機の高度（×100ft）シナリオA

区分	機数	入域高度		出域高度	
		最小	最大	最小	最大
a	9	85	145	90	310
b	5	250	310	85	85
c	4	0	0	110	310
d	1	240	240	210	210
e	21	190	260	240	350
f	10	280	410	230	375
g	121	110	410	105	410

現行手法での単価を表3に示す。そして、表2、表3、実験結果⁶⁾及び式(12)を基に、入域高度と単価を割り当てる。提案手法での入域高度と単価の割り当て表を表4に示す。

ターミナル空港とレディオ空港では到着機

や出発機に対する作業量が異なる。しかし、今回は実験データとして、レディオ空港からの出発機や到着機は少なかったため、出発機の分類は行いが、どちらの空港でも数値は現行手法での数値を使用した。

表3 現行手法での単価

	出発機	到着機	通過機	域内機
単価	8.07	15.13	4.00	-(4.01)

表4 提案手法での単価

		出域高度(FL)					
		85	140	210	240	310	999
入域高度(FL)	80	(g)	(c) 8.07				
	160	(d)	(a) 8.07				
	180	15.13	(b)				
	240		15.13	(g) 3.78	(e) 5.11		
	360				(f) 5.03		
999							

注:表中の数値999は計算上の数値で、入域高度FL360以上、出域高度FL310以上であることを示す。

4. シミュレーション結果

シミュレーションでは、現行手法と提案手法において、管制作業量とATFMを行った時の出発遅延について比較する。シナリオは0で述べたA、Bである。

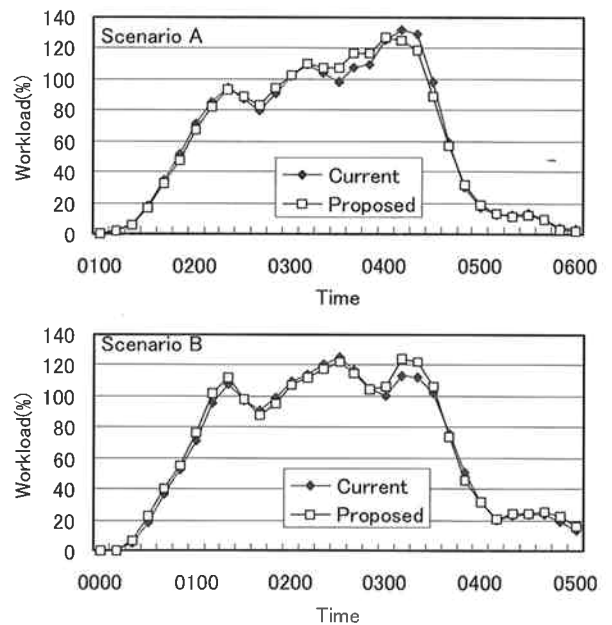


図2 管制作業量

4.1 管制作業量

2つのシナリオについて管制作業量を図2に示す。

シナリオAではピーク時の作業量は提案手法の方が低いが、シナリオBでは、1番目と3番目のピークは提案手法の方が高い。ピーク時の管制作業量が異なっている。ピーク時以外はほぼ等しい。

4.2 ATFMによる出発遅延

2つのシナリオについて、遅延の平均値および16分以上の遅延となった航空機数を表5に示す。

表5 遅延の比較

シナリオA：総機数 173機		
	現行手法	提案手法
平均	6.93分	11.57分
16分以上	20機	25機
シナリオB：総機数 186機		
	現行手法	提案手法
平均	8.54分	7.24分
16分以上	28機	19機

シナリオAでは、遅延、遅延機数とも増加した。時刻0300から0500までの間、提案手法の方が作業負荷が高く、さらにその値が100%を超えていたためと推察される。

シナリオBでは、平均遅延では若干の減少であるが、遅延機数が大幅に減少している。

5. 考察

上越セクタは、ヨーロッパ方面と日本を結ぶ航空機が通過する。飛行距離の長い国際線は出発時刻が短い時間帯に限られるため、航空機の経路が時間帯によって大きく異なる。

前半のピークにはヨーロッパ線が多く通過するが、後半のピークである夕方時間帯にはヨーロッパ線はほとんど通過しない。

5.1 実データでの比較

2005年8月の上越セクタを通過する航空機の多い日をもとにシナリオを再現した。そして、現行手法と提案手法での管制作業量の最大値を図3に示す。なお、最大値をとった時間帯はどちらも同じ時間帯であった。そのなかで、

0801(8月1日)について現行手法と提案手法による管制作業量の時間推移を図4に示す。

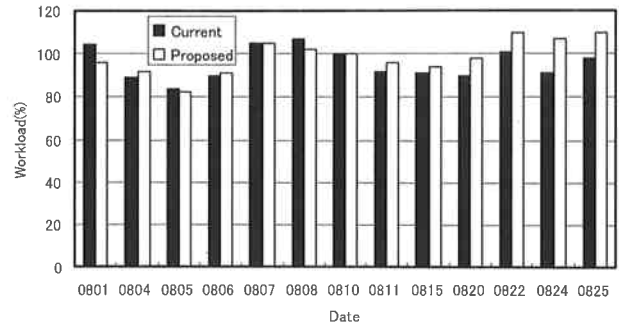


図3 管制作業量最大値の比較

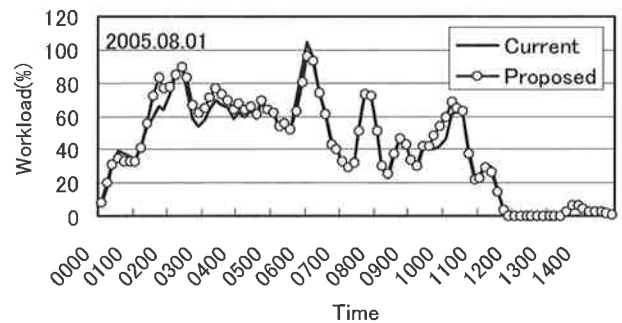


図4 管制作業量の推移(2005年8月1日)

時刻0100から0600頃までは現行手法による作業量の方が低い。また時刻0630頃のピークは提案手法による作業量が低い。

5.2 分類法の検討

現行手法と提案手法の数値の差が大きい時間帯について、表1の分類として検出できなかった航空機の数について考察する。

時刻0130~0200には空域を通過する航空機が21機あり、そのうち6機については、表1で仮定したような検出はできなかった。しかし検出できなかった5機の通過機はいずれも近くの空港(小松、富山など)の出発機もしくは到着機で、成田空港の出発機もしくは到着機として検出された。また、検出できなかった1機の成田の出発機は通過機として検出された。

時刻0530~0600に空域を通過する航空機についても表1の仮定と同様の検出ができなかったものは、近くの空港の出発機であった。

表4による高度の分類で、どの程度表1の分類ができたかを考察する。

表4の出発機、到着機を検出すべきところ

近隣の空港からの出発機, 到着機が検出された。それらは, 小松空港, 富山空港などである。実際これらの空港の出発機は目標高度に到達していないことがある。また到着機について高度処理を行うこともある。しかし, それらとそのほかの通過機を区別することは難しい。式(10)の $CAT(i_a, o_a)$ に通過機と出発機(もしくは到着機)との中間値を入れることで計算結果としては, 現実の作業量に近づけることができる。

5.3 他セクタへの転用

今回検討を行った上越セクタと, 関東南 A セクタ, 関東西セクタを比較する。それぞれのセクタでの単価は表 6 のように定義されている^[4]。

表 6 ATFM での単価

	出発機	到着機	通過機	域内機
上越	8.07	15.13	4.00	—
関東南 A	3.43	7.59	5.80	19.7
関東西	4.19	5.43	6.75	—

単価は平均滞在時間に依存するため, セクタによってかなり数値が異なる。しかし, 1機が平均滞在時間分で何秒の管制作業負荷をかけるか(=単価×平均滞在時間)で比較すると, 表 7 のようになる。

表 7 管制作業負荷

	出発機	到着機	通過機	域内機
上越	106.67	102.87	69.67	—
関東南 A	69.19	100.19	69.69	88.49
関東西	67.84	89.14	61.64	—

通過機の作業負荷には大きな変化がない。しかし, 出発機や到着機の数値は異なる。ターミナル空域をもつ空港かどうかで, 航空路管制での作業が異なる。

入域高度, 出域高度が 0 に近いかどうかで, レディオ空港は検出できる。

しかし, 羽田空港などの, レーダ誘導を頻繁に行う空港に隣接するセクタでは, 管制作業量はかなり多い。マイルイントレイル(あるウェイポイントで高度に関係なく一定の縦間隔を保持するよう滞在時間を調整する)などを使用した滞在時間に応じて, 共通の指標を使用することを検討したい。

6. まとめ

ATFM の管制作業量の計算手法(航空機の分類方法)について現行の 4 種類をより細かくする計算方法を提案した。これは空域への入域高度と出域高度の組み合わせで作業量を定義する方法である。そして, 提案手法の現行手法との比較を行った。

その結果, 高度による分類でより現実に近い分類が可能であることがわかったが, 管制作業量に見合った分類にはさらなる工夫が必要であり, 課題が残された。

さらに, 今後は, 他セクタと同一基準で定義できる方法を検討したい。

研究を進めるに当たり, 航空交通流管理のデータをご提供くださった航空交通管理センターの管理管制官各位, 及び, FDP データをご提供くださるとともに, シミュレーション実験に参加いただきました, 東京航空交通管制部の航空管制官各位に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] J.M. Alliot, J.F. Bosc, N. Durand, L. Maugis, "An experimental study of ATM capacity," USA/Europe ATM Seminar, Saclay, France, 1997.
- [2] I.G.Parker, "A Review of some sector capacity estimation techniques," Civil Aviation authority DR Report 8703, 1987, Aug.
- [3] R. Seifert, K.Brauser and G. Och, "Untersuchungen zur Luftraumnutzung Band 1 Zusammenfassung," Messerschmitt-Blokow-Blohm GmbH, 1977.8.
- [4] (財)航空保安研究センター, "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.
- [5] N. Tofukuji, "An Enroute ATC Simulation Experiment for Sector Capacity Estimation," IEEE Trans. on Control, Systems Technology, 1(3), September 1993.
- [6] S. FUKUSHIMA, Y. FUKUDA, M. SUMIYA and A. SENOGUCHI, "Prediction of Sector Capacity under RVSM by Real Time Simulation", 2005 JSASS-KSAS Joint International Symposium on Aerospace Engineering, pp.236-239, Oct.2005.