

4. 単純な空域モデルにおける交通密度と管制空域デザイン要件

航空交通管理領域 ※岡 恵 山本 哲士

1. はじめに

現在、羽田空港周辺等の混雑している空域では、ピークの時間帯に遅延が発生しているが、昨今の航空需要の高まりから、今後更なる航空交通量の増加が見込まれている。一方で、航空機が使用する滑走路や、空域、航空路やスロット（時間枠）等はすべて限られた資源であり、交通量の増加に対応するためには、それらを有効に活用しなければならない。

一般に航空管制においては、空域をある程度の広さに区切り、管制官が分担して管制を行っている。この分割した管制空域は、従来、航空路に沿い、経験上効率的と考えられる形に設定されていた。また航空路は、以前は航空機の航法として、地上の航行援助施設（以下、NAVAIDs）からの電波に頼ることが主であったためNAVAIDsを繋ぐ形で設定されていた。

しかし、航法技術の進歩に伴いNAVAIDs以外の任意の地点を経由して航行する航法（RNAV: Area Navigation）が可能になり、現在では一部RNAVルートが設定されている。RNAVルートは、地上からの制約がないため経済的にも効率が良く、今後も整備が進められる予定である。そのような状況において、空域を有効に活用するために管制空域をどのようにデザインすればよいのか、様々な検討が進められている。

ここで、管制空域デザインの前提となる条件とは、ある空域に入域する航空機をその空域内で処理できるようにすることである。しかし、空域は限られた資源であることから、必要最小限の広さに設定しなければならない。それでは、どのようにして空域の最適化を行うのか。本稿では交通量に適した空域デザインかどうか計算により確認する1つの手法を提案し、実時間シミュレーションの結果と比較することで、簡単な検証を行った。

2. 待ち時間

2.1 算出方法

一つの空域において、入域する航空機の時間間隔が出域する航空機の時間間隔より短い時、その空域内における待ち時間が生じる。n機の航空機が出域点を1,2,...,nという順序で通過すると仮定すると、i番目の航空機の待ち時間 t_{w_i} は、以下の式で表される（添え字iはi番目の航空機についての値を意味する）。Sは出域点毎に決まる固定値で管制移管間隔と呼ばれる。

$$t_{w_i} = t_{c_i} - t_{e_i} \quad \Lambda \quad (1)$$

$$t_{c_i} = t_{a_{i-1}} + \frac{S}{v_i} \quad \Lambda \quad (2)$$

t_w : 待ち時間

t_c : 出域点通過算出時刻

t_e : 出域点通過予定時刻

t_a : 実際の出域点通過時刻

v : 出域点通過時の対地速度

S : 出域点での航空機間隔（距離）

この待ち時間に対処するために、主に以下の管制処理が行われる。

- 1) レーダ誘導による迂回飛行
- 2) 待機旋回
- 3) 速度調整

この中で、最も一般的に行われるのはレーダ誘導による迂回飛行である。速度調整は、航空機毎に速度変更の可能な範囲が決まっているため、わずかな時間幅にしか対応できない。逆に、待機旋回は微調整が出来ないため、大幅に待機が必要な場合に行われる。

2.2 提案手法

ある空域を仮定した時、迂回飛行の条件を設定すれば、幾何学的にその中で飛行することが出来る最大の迂回距離が求められる。その迂回距離と航空機の速度から、この空域で対処可能な待ち時間が求まる。

(1),(2)式から、その空域を通過する航空機の

待ち時間が求まる。その中で最大の待ち時間となる航空機が最も長い迂回距離が必要となる航空機である。その最大の待ち時間と、空域から導き出した待ち時間とを比較すれば、その空域が交通量に見合った空域であるかどうか判断できると考えた。

具体的な検証の手順は以下のようになる。

- 1) 空域モデル、各種条件の設定
- 2) 迂回飛行の条件の設定（迂回路）
- 3) 迂回距離、待ち時間の計算
- 4) 交通量から求まる待ち時間との整合性確認

当提案手法の有効性を調べるために、まず、単純な空域モデルを設定し、空域の広さや形状、その他の条件により待ち時間や、迂回距離がどのように変化するかを調べた。次に、実時間シミュレーションにより、実際に管制官が管制処理を行った結果と比較することで、計算値が“その空域内で処理することが出来るかどうか”という指標となり得るかを確認した。

3. 単純な空域モデル

3.1 空域モデル・迂回路の設定

今回設定した、空域モデルを図1に示す。

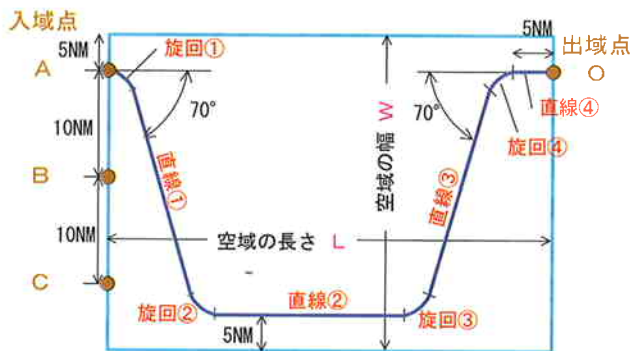


図1 空域モデル

空域については以下のように設定した。

- ・ 空域形状は幅 W、長さ L の長方形（図中水色の線が境界線）
- ・ 幅 W、長さ L は可変
- ・ 経路は、図1に示すように入域点が A～C の3点、出域点が O の1点

迂回路は、なるべく現実に即した条件で設定する必要がある。今回は以下のように設定した。

- ・ 旋回は円弧
- ・ 飛行パターンは台形
- ・ 航空機は入域後すぐに旋回するものとし、旋回角度は進行方向から 70°（直線①）
- ・ 直線②では境界線と平行に飛ぶ事とし、境界線との距離は 5NM
- ・ 直線③では、入域時同様旋回角 70° で会合
- ・ 出域点手前では 5NM の直線飛行（直線④）

総飛行距離は旋回①～④及び直線①～④の各距離を足し合わせたものとし、経路長は入域点から出域点までの直線距離とした。また、迂回距離を総飛行距離と経路長との差とした。

なお、速度の設定については、入域速度を 450kt とし、出域速度は 320kt と 280kt の2つの場合について計算した。空域内の航空機の速度変化は、一般的には一律ではないが、空域内の総飛行時間を求める際には、簡単化して入域速度と出域速度の平均値を用いた。

3.2 旋回半径

旋回時（旋回①～④）は以下に示す式で旋回半径を求め、飛行距離を円弧で計算した。^[1]

$$r = \frac{v^2}{g \tan \theta} \quad \Lambda \quad (3)$$

- r [m] : 旋回半径
- v [m/s] : 航空機の対地速度
- g [m/s²] : 重力加速度
- θ : 航空機のバンク角

$g=9.8$ [m/s²], $\theta=25^\circ$ とすると V [kt]の時の旋回半径 R [NM]は以下の式で表される。

$$R = 3.12 \times 10^{-5} V^2 \quad \Lambda \quad (4)$$

現実には、定期運航便の旋回時のバンク角は概ね 20° ～25° とされている。表1にそれぞれの速度における、バンク角に対応した旋回半径を示す。

表1 バンク角に対する旋回半径[NM]

バンク角	入域速度	出域速度	
	450kt	320kt	280kt
20°	8.1	4.1	3.1
25°	6.3	3.2	2.5

今回は、バンク角は 25° とし、旋回①と旋回②では入域時の速度、旋回③と旋回④では出域時の速度を用いて旋回半径を計算した。

3.3 計算結果

空域の長さ L 及び幅 W を変化させた場合の、空域内での総飛行距離及び迂回距離を図 2 に示す（入域点は A）。入域点 A においては、空域の長さ L と経路長が等しいため、迂回距離は空域の長さに関わらず一定となる。今回の値の設定においては、総飛行距離 D [NM]、空域の幅 W [NM]、空域の長さ L [NM] の関係は以下のようになった。

$$D = 1.40W + L - 17.7 \quad (\text{入域点A}) \quad \Delta \quad (5)$$

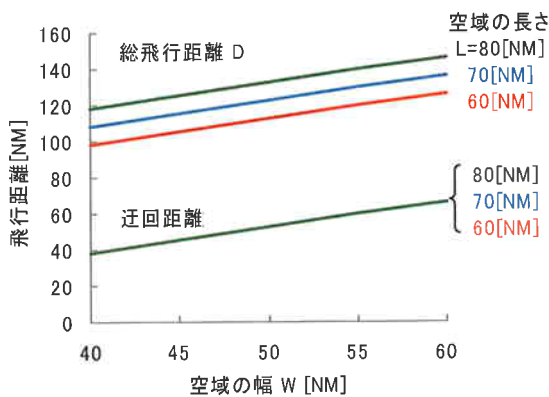


図 2 空域の長さによる比較（入域点 A）

次に、入域点を変えた場合の総飛行距離、迂回距離を図 3 に示す。

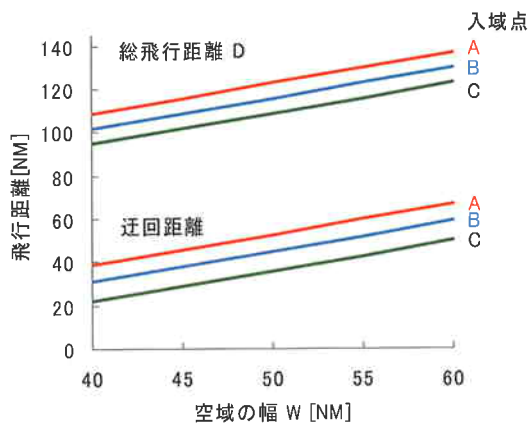


図 3 入域点による比較（空域の長さ L=70NM）

入域点 B、C では総飛行距離 D [NM] は、以下のような式になった。

$$D = 1.40W + L - 24.7 \quad (\text{入域点B}) \quad \Delta \quad (6)$$

$$D = 1.40W + L - 31.7 \quad (\text{入域点C}) \quad \Delta \quad (7)$$

同じ空域でも入域する地点の違いで迂回距離が変わるが、今回のモデルでは、B の場合は A の場合より約 7NM 短く、C の場合は A の場合より約 14NM 短くなった。

次に、出域速度を 320kt と 280kt に設定した時の総飛行時間、迂回時間（すなわち対処可能な待ち時間）を図 4 に示す。280kt の方が距離は約 0.3NM 長くなり、迂回時間は約 30 秒長くなった。

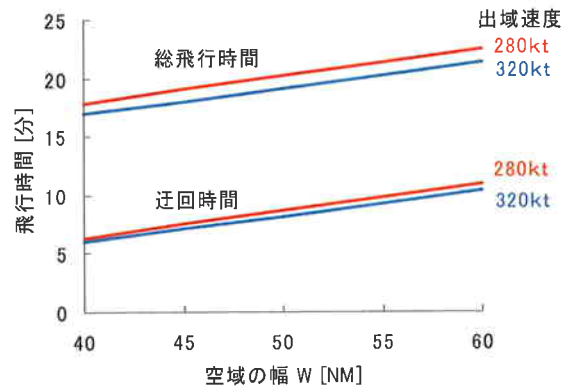


図 4 出域速度による比較
（空域の長さ L=70NM、入域点 A）

4. 実時間シミュレーション結果との比較

実時間シミュレーションにおいて計算に使用した値を表 2 に示す。また、対象とした空域及び経路と、設定した迂回路を図 5 に示す。迂回路の設定では、図 1 の直線③に対応する部分は入域点 C からの経路に沿う形とし、出域点の位置が境界線北限にあるので、旋回④、直線④に対応する部分は設けなかった。また、空域の東側（図中網掛け部分）には迂回路は設定しなかった。

表 2 計算に使用した値

バンク角	25°	振り出し角	70°
入域速度	430kt	空域の幅	40.87 NM
出域速度	300kt	空域の長さ	60.29 NM

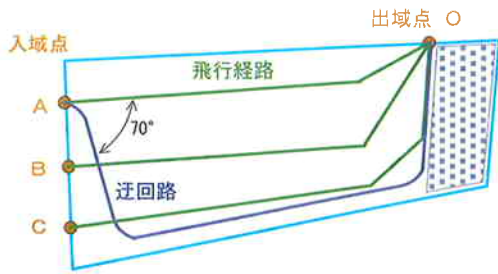


図5 対象空域及び設定迂回路

計算の結果、空域から求まる迂回距離及び待ち時間は表3のようになった。

表3 迂回距離及び待ち時間

入域点	経路長 [NM]	総飛行距離 [NM]	迂回距離 [NM]	待ち時間 [分:秒]
A	65.01	103.63	38.63	6:21
B	72.12	96.96	24.84	4:05
C	86.05	90.90	4.84	0:48

シミュレーション結果から得られた総飛行時間と空域モデルから算出した計算値との比較を表4に示す。入域点Aを経由する航空機に計算値より長く飛行しているものが3機見られた。これらの航空機をi~iiiとして、具体的にどのような空域内を飛行したかを表5にまとめた。

表4 計算値との比較

入域点	機数 [機]	総飛行時間[分:秒]			計算値以上 [機]
		計算値	シミュレーション		
			最小値	最大値	
A	14	17:02	9:12	18:52	3
B	2	15:56	11:36	12:12	0
C	2	14:57	10:40	10:48	0

総飛行時間が計算値以上だった3機の中で、空域の東側を飛行したものは2機、空域を南側に逸脱したものは2機だった。また3機とも、出域時の速度が空域モデルの設定値である300ktを大きく下回っていた。総飛行時間が計算値以下だったにも関わらず空域の東側の部分を飛行した2機は、最初の振り出し角が30°前後であった。空域の西側を使用できなかった分、東側の部分を使用したと考えられる。空域を南

側に逸脱して飛行したものは総飛行時間が計算値以下のグループには見られなかった。

表5 空域内の飛行

総飛行時間	空域の東側	空域の逸脱	出域時速度
計算値以下	2機	0機	平均311kt
計算値以上	i	○	285kt
	ii	○	272kt
	iii	○	270kt

5. おわりに

単純な空域モデル及び迂回飛行の条件を設定し、迂回距離を幾何学的に計算することで、その空域で対処可能な待ち時間を求める方法を示した。更に、実時間シミュレーションにより取得したデータを使用し、交通量から求めた航空機毎の待ち時間と空域から求めた待ち時間の比較を行った。比較の結果、空域から計算した飛行時間が、概ね空域の実際の最大飛行時間を示していることが確かめられた。

今後は、様々な形状の空域においても同様の確認を行い、汎用性を高めていく必要がある。また、空域をデザインするための要件として、他にどのような指標があるのか、検討を進めていく予定である。

参考文献

- [1] 翼 醇、航空力学 第3版、日本航空整備協会発行