

17. 日本上空における垂直方向の近接通過頻度

電子航法開発部 ※天井 治 長岡 栄

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、航空交通管制官が確保すべき航空機相互間の最小間隔の基準を定めている。これは管制間隔基準と呼ばれる。

日本と北米を結ぶ北太平洋の洋上航空路では、航空機の運航量の増大および運航者の経済的要望に対応するため、2000年2月24日からRVSM（Reduced Vertical Separation Minima：短縮垂直間隔）承認機に対し、フライトレベル（FL）290（29,000 ft に相当）以上 390 以下の高度で 1,000 ft の短縮垂直間隔を用いている。

我が国では、現在 FL290 以上の高度での垂直間隔が 2,000 ft である陸上の空域でも短縮垂直間隔を適用する可能性の検討が望まれている。

国際民間航空機関（International Civil Aviation Organization: ICAO）が作成した手引き書^[1]では、RVSM の適用に際し、衝突危険度モデル^[2]のパラメータの事前評価が必要とされている。このパラメータは考察する空域を飛行する航空機の航法精度や航空交通流の特性に依存する量である。その値は航空交通量の増加とともに変わるので実測データによる推定を要する。

RVSM の適用可能性の検討には、日本の管轄空域全体を対象とした近接通過頻度の推定を要する。この推定値は1ヶ月分の飛行計画情報に基づく値が 1991 年に報告されている^[3]が、最近の推定値はない。そこで、最近の6ヶ月分の飛行計画情報を用いて、日本の管轄空域内の全経路に対し垂直方向の近接通過頻度を計算し、日本の陸上空域における短縮垂直間隔の適用可能性を調べた。

本稿では、まず垂直方向の近接通過頻度および衝突危険度の定義を示す。次いで使用データおよび調査空域を示す。更に飛行便数の調査結果、そして調査空域における垂直方向の近接通過頻度の計算方法および結果を示す。最後にこの値の評価について述べる。

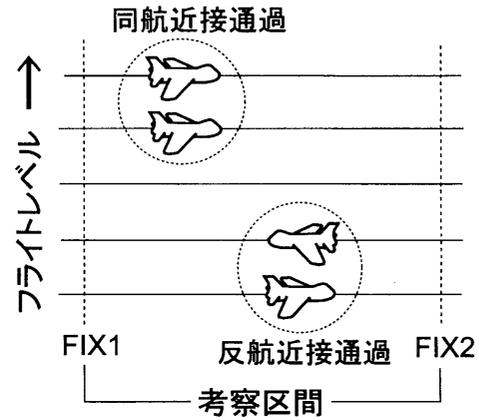


図1 垂直方向の近接通過の概念

2. 垂直方向の近接通過頻度^[4]

ある航空機が同一経路上の隣接フライトレベルを飛行する航空機と進行方向で重なる事象を垂直方向の近接通過と呼ぶ。両機の進行方向が同じ場合を同航近接通過、異なる場合を反航近接通過と呼ぶ。図1にその概念を示した。

近接通過頻度は、単位飛行時間あたりの近接通過機数の期待値である。観測時間内に考察区間内で起こる垂直方向の近接通過の回数を N_p^z 、各航空機が考察区間内の通過に要した時間の総和を H とすると、垂直方向の近接通過頻度 N_x^z は次式で求められる。

$$N_x^z = \frac{2N_p^z}{H} \quad (1)$$

N_x^z の単位は[機/飛行時間]で、一回の近接通過には2機が関与するため2を掛けてある。本稿では N_x^z を単に近接通過頻度と呼ぶ。

3. 垂直方向の衝突危険度

ここでは、同一経路上で垂直間隔 S_z だけ離れた高度を割り当てられた航空機対の垂直方向の衝突危険度 N_{az} を考える。これは考察空域内の航空機が単位飛行時間あたりに垂直間隔を喪

失して発生する衝突事故件数（1衝突＝2事故）の期待値で、次式で計算できる。

$$N_{az} = P_z(S_z)P_y(0)[N_x^z(opp)K(o) + N_x^z(same)K(s)] \quad (2)$$

ここで、x, y, z はそれぞれ進行方向、横方向、垂直方向を表す。また $K(o)$ 、 $K(s)$ は航空機の平均寸法や相対速度に関係する無次元の量で、その値はそれぞれ 1、2 程度である。各記号の意味は次の通りである。

$P_z(S_z)$ ：垂直方向重畳確率（同一経路で S_z だけ離れた高度を割り当てられた航空機対が垂直方向で重なる確率）

$P_y(0)$ ：横方向重畳確率（同一経路同一高度を割り当てられた航空機対が横方向で重なる確率）

$N_x^z(opp/same)$ ：垂直方向の反航／同航の近接通過頻度

4. 使用データと調査空域

近接通過頻度の計算には、2000年9月1日から2001年2月28日までの6ヶ月分の飛行計画情報を用いた。これには、便名、機種名、経路上の各定点（FIX と呼ぶ）の通過時刻、飛行高度など航空機の運航に必要な情報が記載されている。

調査空域は、日本の管轄空域内の全経路とした。日本の空域内には、札幌、東京、福岡、那覇の4つの航空交通管制センター（Area Control Center：ACC）がある。図2に各ACCの位置と管轄空域を示す。

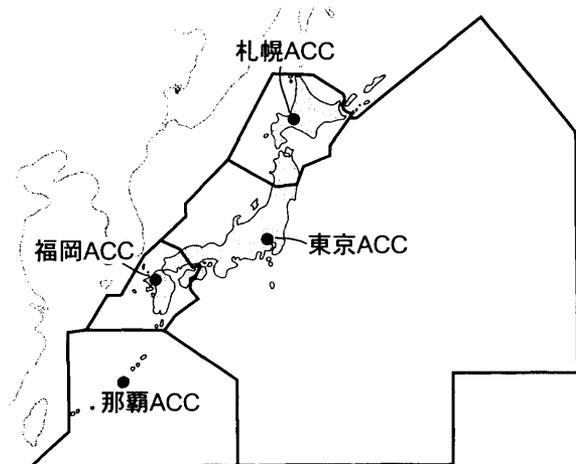


図2 各ACCの位置と管轄空域

表1 出発・目的空港別に調べた飛行便数（分類毎に飛行便の多い順に列挙）

分類	出発空港	目的空港	平均飛行便数 [便/日]
国内便	羽田	千歳	45.1
	千歳	羽田	45.0
	福岡	羽田	40.8
	羽田	福岡	40.8
	羽田	大阪	19.4
	大阪	羽田	19.4
	那覇	羽田	18.9
	羽田	那覇	18.0
出域便	成田	ソウル	13.0
	成田	香港	11.4
	関西国際	ソウル	10.9
	成田	アアンジェム	9.0
	成田	台北	8.7
	成田	アカレッジ	8.7
入域便	ソウル	成田	12.3
	アカレッジ	成田	11.7
	香港	成田	11.5
	ソウル	関西国際	11.5
	アアンジェム	成田	9.4
通過便	香港	ソウル	10.4
	ソウル	香港	10.4
	台北	アカレッジ	8.9
	ソウル	アカレッジ	7.9
	アカレッジ	ソウル	7.2
	アカレッジ	台北	7.2

5. 調査期間内の飛行便数

まず、調査期間内に日本の管轄空域を飛行した航空機の便数を調べた。飛行便数は6ヶ月間で総計528,382便あり、これを調査日数（181日）で除算すると、一日に平均2,919便が飛行していることが分かる。

5.1 出発・目的空港別の飛行便数

表1に出発空港、目的空港別に4つに分類して調べた飛行便数を示した。ここで入域便は日本国外から国内への飛行便を、出域便は国内か

ら国外への飛行便を表す。また、通過便は日本国内の空港を離着陸することなく日本の管轄空域内を飛行する便を表す。

異なる出発空港・目的空港対は調査期間中に4,579 対あり、表1には分類毎に飛行便の多い順にそのごく一部を示した。

全分類の中で、国内便の羽田-千歳間（45 [便/日]）が最も多い。出域便では、成田発ソウル行き便（13 [便/日]）が、入域便では、ソウル発成田行き便（12.3 [便/日]）が最も多い。また通過便では香港-ソウル間の飛行便（10.4 [便/日]）が最も多い。

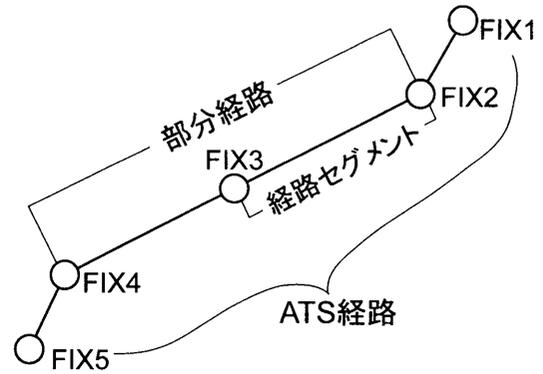


図3 経路セグメントと部分経路

5.2 飛行高度帯毎の飛行便数

飛行高度帯毎の飛行便数を表2に示す。「FL450を越える」および「FL290未満」の欄には、全ての飛行経路においてその範囲の高度を飛行した便数を示した。また「FL290以上FL450以下」の欄には、それ以外の飛行便数を示した。国内便が全体の67%を占め、通過便は全体の8%である。FL290以上FL450以下の高度を飛行した便数は、6ヶ月間で316,644便あった。

6. 経路セグメントと部分経路

経路上の2つのFIXを結ぶ線分を経路セグメントと呼ぶ。ACCが管轄する経路はATS (Air Traffic Services) 経路と呼ばれ、これは一つ以上の経路セグメントにより構成される。以下では一直線上に載る連続した経路セグメントを部分経路と呼ぶ。図3にその概念を示す。

現在、日本の管轄空域内には87本（洋上：36本、陸上：51本）の航空路、洋上から陸上への橋渡しとなる23本の洋上転移経路、29本のRNAV (Area Navigation：広域航法) 経路がある^[5]。以下ではその他を全て直行経路と呼ぶ。

表2 飛行高度帯毎の飛行便数

分類	FL290未満	FL290以上FL450以下	FL450を超える	総計
国内便	199,251	153,384	3	352,638
入域便	4,610	62,101	13	66,724
出域便	7,035	59,003	1	66,039
通過便	819	42,156	6	42,981
総計	211,715	316,644	23	528,382

7. 近接通過頻度の計算方法

近接通過頻度はすべて経路セグメント単位で(1)式により計算した。但し、RVSM適用空域内の経路セグメントは計算から除いた。

部分経路および各ACCにおける近接通過頻度は次式により求めた。

$$N_x^z = \frac{2 \sum_i (N_p^z)_i}{\sum_i H_i} \tag{3}$$

ここで $(N_p^z)_i$ 、 H_i はそれぞれ経路セグメント*i*における近接通過回数と総飛行時間を表し、 $\sum_i (N_p^z)_i$ は考察する空域に含まれる経路セグメントの近接通過回数の総和、 $\sum_i H_i$ は各経路

セグメントにおける飛行時間の総和を表す。

飛行計画情報に記載されている飛行高度の情報は、各FIX通過時の飛行高度のみである。このため高度の変更があった場合、FIX間のどこで高度変更があったのか分からない。本稿では、高度変更があった場合には、始めのFIXで高度が変更されたと見なして計算した。

8. 近接通過頻度の計算結果

日本の管轄空域をFL290以上FL450以下の高度で飛行した全ての航空機を近接通過頻度の計算対象とした。対象飛行便数は5.2節に示した通り316,644便、対象経路セグメントは2,388本あった。

図4に日本の管轄空域内のATS経路における反航近接通過頻度 $N_x^z(opp)$ の分布を示す。図には最新の航空路誌^[5]に基づいてRVSM空域以外の経路を示した。RNAV経路については $N_x^z(opp)$ の高い経路（佐渡-美保(0.74)、CELLO

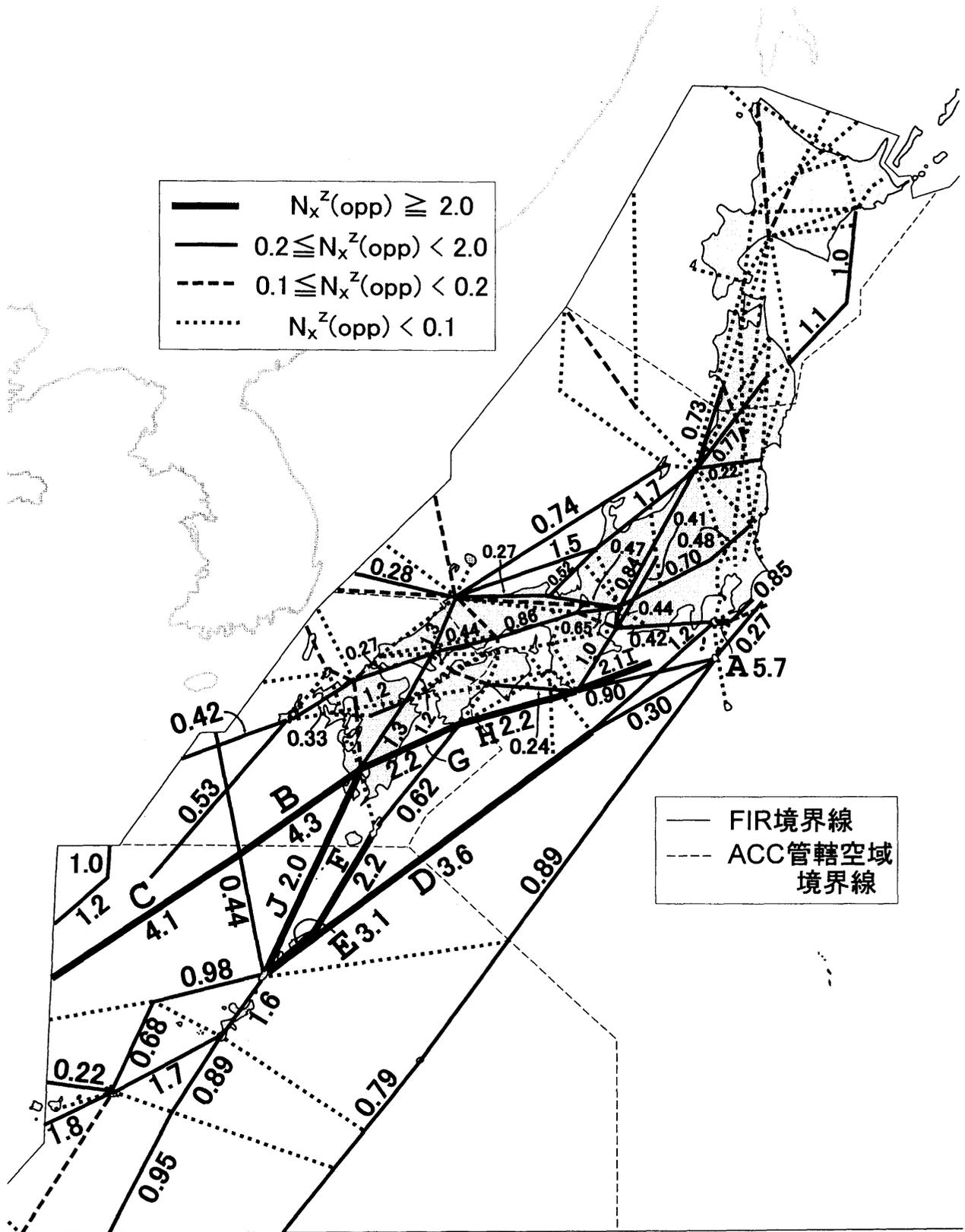


図4 日本の管轄空域内のATS経路における反航近接通過頻度の分布
 図中の英文字は表3の英文字に対応

一串本(2.1)のみを示した。直行経路はすべての経路に対して計算したが、スペースの関係上図中には示さなかった。

図中の点線は $N_x^z(opp)$ が 0.1 未満の部分経路を、波線は $N_x^z(opp)$ が 0.1 以上 0.2 未満の部分経路を表す。また、細線は $N_x^z(opp)$ が 0.2 以上 2.0 未満の部分経路を、太線は $N_x^z(opp)$ が 2.0 以上の部分経路を表している。スペースの都合上、 $N_x^z(opp)$ が 0.2 以上の部分経路のみ図中にその値を示した。

$N_x^z(opp)$ が 2.0 以上の部分経路を表3に示す。 $N_x^z(opp)$ の最も高い部分経路は FIX 名 SPENS、XAC（伊豆七島の大島）間で、航空路 G597 の一部であり、東京 ACC の管轄空域内にある。この部分の飛行便数は1日平均 191 便であり、全調査空域中で最も交通量が多かった。図4から $N_x^z(opp)$ が 2.0 以上の部分経路は伊豆大島から沖縄にわたる空域に集中していることが分かる。

表4に各 ACC の管轄空域毎に求めた反航近接通過頻度および同航近接通過頻度を示した。但し、経路セグメントが2つの ACC の管轄空域にまたがる場合は、その経路セグメントをより多く含む ACC にすべての経路セグメントがあるものとして計算した。

9. 衝突危険度モデルのパラメータの評価

1章で述べた手引き書^[1]では、短縮垂直間隔の適用にあたり、衝突危険度を許容値以下に抑えるための方法が記述されている。この許容値は、目標安全度（Target Level of Safety : TLS）と呼ばれ、現在 2.5×10^{-9} を用いている。

衝突危険度が TLS 以下になるように以下に示す条件を考え、これを全て満足するとき短縮垂直間隔の適用は可能であるとしている。

(a) $P_z(1000) \leq 1.7 \times 10^{-8}$

(b) $P_y(0) \leq 0.058$

(c) 近接通過頻度に関する条件

航空機の平均的大きさや相対速度に関する条件もあるが、これらは大きく異ならない限り衝突危険度の値にほとんど影響しない。

(a)の条件については、それを満足する性能を持った機体（RVSM 承認機）のみを飛行させることにより満足させる。

(b)については、1993年5月1日から1994年4月30日までの鉤路航空路監視レーダのデータを用いて計算した $P_y(0)$ の推定値は 0.020 であり^[6]、この条件を満たす。

(c)の条件については次章で詳しく述べる。

表3 $N_x^z(opp)$ が 2.0 以上の部分経路

部分経路	位置	$N_x^z(opp)$	H [時間]	経路	ACC
SPENS-XAC	A	5.7	1178.6	G597	東京
HKC-RUSAR	B	4.3	8776.5	A1	福岡
RUSAR-BULAN	C	4.1	12863.4	A1	那覇
TAPOP-ONC	D	3.6	17812.6	G581	東京
ALC-ONC	E	3.1	2185.8	B597	那覇
TJE-ALC	F	2.2	2840.2	B597	那覇
SUC-HKC	G	2.2	4612.0	A1	福岡
KEC-SUC	H	2.2	4487.8	A1	東京
CELLO-KEC	I	2.1	2314.3	Y21	東京
HKC-ONC	J	2.0	4957.2	A582	那覇

註：位置の欄の英文字は図4中の英文字に対応

表4 各 ACC の管轄空域毎の近接通過頻度

ACC	経路種	$N_x^z(opp)$	$N_x^z(same)$	H [時間]
札幌	航空路	0.16	0.030	17,183.7
	RNAV	0.000	0.037	7,799.5
	直行経路	0.13	0.005	1,492.2
	総計	0.11	0.031	26,475.4
東京	航空路	1.11	0.035	80,883.9
	洋上転移	0	0.050	787.4
	RNAV	0.20	0.020	28,055.7
	直行経路	0.14	0.030	31,366.0
	総計	0.71	0.031	141,093.0
福岡	航空路	1.80	0.059	33,479.2
	洋上転移	0.53	0	151.7
	RNAV	0	0.056	3,518.6
	直行経路	0.012	0.026	9,280.8
	総計	1.30	0.052	46,430.4
那覇	航空路	2.21	0.087	59,608.1
	RNAV	0	0.002	2,190.2
	直行経路	0.27	0.088	1,158.8
	総計	2.10	0.084	62,957.1

10. 近接通過頻度の評価

(c)に関しては、手引き書には文献[7]で提案された近接通過頻度を代表値によって評価する次の方法が記載されている。

(c-1) 交通量の最も多い空域か近接通過頻度の最も高い空域を含む、隣接した3つのACCの管轄空域全体を考える。

(c-2) この空域における年間の平均近接通過頻度を計算し、その値が次式を満たせば近接通過頻度は安全圏にあると考える。

$$N_x^z(opp) + 2.5N_x^z(same) + 37.5N_{xy}^z(cross) \leq 2.5 \quad (4)$$

表5 (c-1)の条件を満たす空域の近接通過頻度

空域	$N_x^z(opp)$	$N_x^z(same)$	H [時間]
札幌+東京+福岡	0.76	0.035	213,999
札幌+東京+那覇	1.02	0.045	230,526
東京+福岡+那覇	1.17	0.048	250,481

ここで、 $N_{xy}^z(cross)$ は経路の交差点における近接通過頻度を表す。 $N_{xy}^z(cross) = 0$ の場合、(4)式の左辺は(2)式の中括弧内に一致し、これは $K(o) = 1$ 、 $K(s) = 2.5$ の場合に相当する。

8章で示したように交通量の最も多い空域および近接通過頻度が最も高い空域はともに東京ACC内にあり、(c-1)の条件を満たす空域は、日本では表5に示した3つとなる。表5には、各空域における反航および同航近接通過頻度と総飛行時間を示した。近接通過頻度の値は6ヶ月分の平均値である。

より安全寄りの評価をするため、表5の最も高い値を代表値として採用すると、反航近接通過頻度 $N_x^z(opp)$ は 1.17 [機/飛行時間] となり、同航近接通過頻度 $N_x^z(same)$ は 0.048 [機/飛行時間] となる。

これを(4)式に代入すると、(c)の条件を満足するためには、経路の交差点における近接通過頻度 $N_{xy}^z(cross)$ が 0.032 [機/飛行時間] 以下でなければならないことが分かる。短縮垂直間隔の適用可能性の判断には、 $N_{xy}^z(cross)$ の推定を必要とする。

1.1. 考察

11.1 反航/同航近接通過頻度の値

文献[3]によると1988年のデータに基づく代表値は、 $N_x^z(opp)$ が 0.64 [機/飛行時間]、 $N_x^z(same)$ が 0.014 [機/飛行時間] である。今回推定した代表値は $N_x^z(opp)$ が 1.8 倍、 $N_x^z(same)$ が 3.4 倍といずれも12年前より高い値になっている。

11.2 ルートの交差点における近接通過頻度

$N_{xy}^z(cross)$ の推定には、レーダデータなどを用いた膨大な作業を要し^[1]、今回はその値を求めることはできなかった。

参考までに、海外の $N_{xy}^z(cross)$ の推定例を以下に示す。文献[8]では、1996年5月2日から5月5日におけるヨーロッパ空域の $N_{xy}^z(cross)$ が計算されている。これによると4日間の平均値は $N_x^z(opp) = 1.65$ [機/飛行時間]、 $N_x^z(same) = 0.82$ [機/飛行時間] に対し、 $N_{xy}^z(cross) = 2.54 \times 10^{-3}$ [機/飛行時間] である。

1.2. むすび

日本の陸上空域における短縮垂直間隔の適用可能性を検討するための基礎資料となるよう、最近の6ヶ月分の飛行計画情報に基づいて、日本の管轄空域の直行経路を含む全経路における近接通過頻度の計算した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 特に高い反航近接通過頻度を示す部分航空路は、G597、A1、G581、B597、Y21、A582 である。
- (2) 反航近接通過頻度の代表値は 1.17 [機/飛行時間]、同航近接通過頻度の代表値は 0.048 [機/飛行時間] となる。
- (3) 日本の管轄空域で短縮垂直間隔の適用条件を満たすためには、経路の交差点における近接通過頻度の代表値が 0.032 [機/飛行時間] 以下でなければならない。

今後の課題としては、経路の交差点における近接通過頻度の推定、1年分のデータによる解析などがある。

[謝辞]

飛行計画情報の収集の際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および航空局の関係各位に感謝いたします。

[参考文献]

- [1] Manual on Implementation of a 300 m (1000 ft) Vertical Separation Minimum between FL290 and FL410 Inclusive, ICAO Doc 9574-AN/934, second edition, 1999
- [2] P. G. Reich : "Analysis of Long Range Air Traffic System", Journal of Institute of Navigation, 19, Nos.1, 2 and 3, 1966
- [3] 天井・長岡 : "日本の航空路における航空機の近接通過頻度"、第23回電子航法研究所研究発表会講演概要、pp.25-28、1991
- [4] 天井・長岡 : "航空路における垂直方向の衝突危険度の推定"、日本航海学会論文集、82、pp.61-68、1990
- [5] Aeronautical Information Publication Japan (航空路誌)、国土交通省発行、2001
- [6] 天井・長岡 : "北太平洋ルートにおける航空機対の水平重畳確率の推定"、日本航海学会論文集、96、pp.11-19、1997
- [7] Report of the Seventh Meeting of RGCSF Appendix A to the Report on Agenda Item 1, ICAO RGCSF-WP/201, Montreal, 1990
- [8] K. Mehadhebi : "Numerical Values for Passing Frequencies", RGCSF WG/B-WP/3, Singapore, April, 1997