

1. 交通流の分散による垂直方向衝突リスクの低減

航空交通管理領域 ※天井 治、長岡 栄

1. まえがき

航空交通管制では、航空機の安全および効率的な運航を確保するために、航空交通管制官（以後、管制官と呼ぶ）が航空機同士の間で確保すべき最小の間隔（管制間隔）の基準を定めている。平成17年9月30日に日本の国内空域において、フライトレベル（FL）290（29,000 ft（1 ft = 0.3048 m））に相当以上FL410以下の高度で高さ方向の管制間隔基準（垂直間隔基準）が2,000 ftから1,000 ftに短縮された。

航空機には最も燃料効率の良い飛行高度（最適高度）が存在する。今回の短縮垂直間隔（Reduced Vertical Separation Minimum : RVSM）の導入により最適高度に近い高度の選択可能性が高まり、より効率の良い航空機の運航が可能となった。

RVSMの導入に先立ち、国土交通省 航空局の委託により、いくつかの仮定の下で導入後の環境を想定した空域の安全性の事前評価を行った。そこでは、RVSM導入の手引書¹⁾に従って、衝突リスクモデル（Collision Risk Model）を用いて計算された衝突リスク（単位飛行時間あたりの事故件数の期待値）により空域の安全性を評価した。このリスクには、高度計システムの誤差等に起因する技術的リスク（Technical Risk）とそれ以外の原因（管制官や操縦士の過誤など）に起因する運用的リスク（Operational Risk）がある。本稿では、技術的リスクのみを考察対象とした。

衝突リスクの最大許容値は目標安全度（Target Level of Safety : TLS）と呼ばれている。RVSM環境の技術的リスクに対しては 2.5×10^{-9} [件/飛行時間]を用いることになっている。

平成15年度に実施したRVSM導入の安全性の事前評価²⁾では、RVSMの導入が予定されて

いる国内の全空域についての衝突リスクの推定値（平均値）は、目標安全度 2.5×10^{-9} [件/飛行時間]より小さかった。しかし、特定のルート（G581）における局所的な衝突リスクは目標安全度を満たしていなかった。

これを満たすためにいくつかの提案をした。この提案を受けて航空局では、G581ルートでも目標安全度を満たすようにするため、RVSMの導入前の平成17年2月17日にG581ルートシステムの交通流を分散させるようにルートシステムの改編を行った。これは、衝突リスクモデルのパラメータのうち、進行方向で航空機がすれ違う頻度に係わる（頻度の2倍）近接通過頻度（Passing Frequency）を低減するための措置である。

この改編により近接通過頻度が実際にどのように変化したのかを安全性の観点から調べることは重要である。航空路の改編前後の近接通過頻度の違いを調べた例は、北太平洋航空路のRVSM導入前後の違いを調べた例³⁾はあるが、交通流の分散による改編の例は少なくとも日本にはない。

当該空域での技術的リスクが目標安全度を満たすためには、仮定した条件下では、等価反航近接通過頻度と呼ばれる値が1.6 [機/飛行時間]以下である必要がある。飛行計画情報の解析の結果、ルートシステム改編後の近接通過頻度がこの値以下になっていることを確認したのでそれを報告する。

本稿では、まず衝突リスクモデルについて述べる。次に近接通過頻度の計算方法を示し、G581ルートシステム改編の概要および観測対象機と使用データを示す。その後、ルート改編前後の近接通過頻度の推定結果を示し、改編後の値が許容値以下になっていることを確認する。

2. 衝突リスクモデル

2.1 概念

短縮垂直間隔の安全性評価では一般に衝突リスクモデルが使用されている。衝突リスクモデルは1966年に提案されたReichモデル^[4]をもとにして、国際民間航空機関の管制間隔検討パネルが改良したもの^[5]が用いられている。

このモデルでは、簡単化のため、航空機の形状を直方体もしくは円柱と考える。航空機は予め管制機関により割り当てられた経路の中心線上を飛行することになっている。しかし、実際には航法誤差や人的過誤等のために割当経路や割当高度から逸脱して飛行する可能性がある。この逸脱により管制間隔を喪失し、両機が三次元的に重なった場合を衝突と考える。

Reichモデルでは、縦、横、高さの各方向の事象を独立と仮定し、横および高さ方向で重なる確率および進行方向ですれ違う頻度をそれぞれ推定し、それらの積として衝突リスクを求める。縦と横を独立でないと仮定したモデルも提案されている。またReichモデルでは、位置誤差の確率密度関数が時間に依存しない（定常）状態を統計的に扱っている。時間に依存する場合を考えたモデル^[11]も提案されているが、ここでは簡単のため、Reichモデルを取り扱う。

2.2 垂直方向の衝突リスクの計算式

垂直方向の衝突リスク N_{az} は、航空路システム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起こる衝突事故件数（1衝突は2事故とみなす）の期待値である。航空機対の位置関係は、同航（航空機対の飛行方向が同じ場合）、反航（航空機対の飛行方向が反対の場合）、交差する場合が考えられるが、ここでは同航／反航の場合のみを考える。尚、本稿では、同航をs、反航をoの文字で表す。

反航／同航の場合の衝突リスクは次式で計算できる^[5]。

$$N_{az} = P_z(S_z)P_y(0)[N_x^z(o)K(o) + N_x^z(s)K(s)] \quad (1)$$

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 だけ離れた隣接高度を飛行する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飛行する航空機対が横方向で重なる確率）

$N_x^z(o/s)$ ：隣接高度との反航／同航近接通過頻度（後述）

$K(o/s)$ ：航空機が重なっている時間を考慮した係数で $K(o)$ は反航の場合、 $K(s)$ は同航の場合である。次式で計算できる。

$$K(o) = 1 + \frac{\lambda_x}{2|V_x|} \left(\frac{|\Delta V_y|}{\lambda_y} + \frac{|\Delta V_z|}{\lambda_z} \right) \quad (2)$$

$$K(s) = 1 + \frac{\lambda_x}{|\Delta V_x|} \left(\frac{|\Delta V_y|}{\lambda_y} + \frac{|\Delta V_z|}{\lambda_z} \right)$$

記号の意味は次の通りである。

λ_x ：航空機の平均長

λ_y ：航空機の平均幅

λ_z ：航空機の平均高

$|V_x|$ ：航空機の縦（進行）方向の平均速度

$|\Delta V_x|$ ：航空機対の縦方向の平均相対速度

$|\Delta V_y|$ ：航空機対の横方向の平均相対速度

$|\Delta V_z|$ ：航空機対の垂直方向の平均相対速度

3. 近接通過頻度^[6]

3.1 近接通過頻度の計算式

ある航空機と同一経路上を垂直間隔基準 S_z だけ離れた高度を飛行する航空機とが進行方向ですれ違う事象を、隣接高度との近接通過と呼ぶ。図1に示すように同航の場合を同航近接通過、反航の場合を反航近接通過と呼ぶ。

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。ここで、飛行時間（flight hours）は考察空域内を航空機が飛行した延べ時間である。例えば、午前9時から午前11時までの2時間の観測時間内に、航空機12機が考察空域内をそれぞれ1時間ずつ飛行した場合の飛行時間は12時間となる。

観測時間内に考察空域内で起こる近接通過の回数を $n_p^z(o/s)$ 、各航空機が考察空域内の通過に要した時間の総和を H とすると、近接通過頻度 $N_x^z(o/s)$ は次式で求められる。

$$N_x^z(o/s) = \frac{2n_p^z(o/s)}{H} \quad (3)$$

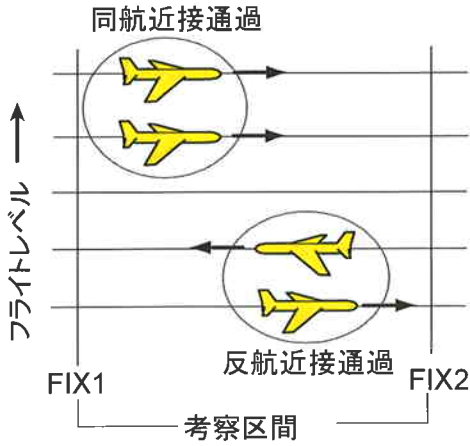


図1 近接通過頻度の概念

$N_x^z(o/s)$ の単位は [機/飛行時間] である。また、1回の近接通過には2機が関与するために2を掛けている。

図2に示すように隣り合う位置通報点（操縦士がその上空で通過時刻、通過高度等を報告するための地理上の地点：FIX）の間の空域を経路セグメントと呼ぶ。実際の計算では、経路セグメント毎に近接通過回数および飛行時間を計算し、次式により全体の $N_x^z(o/s)$ を求めた。

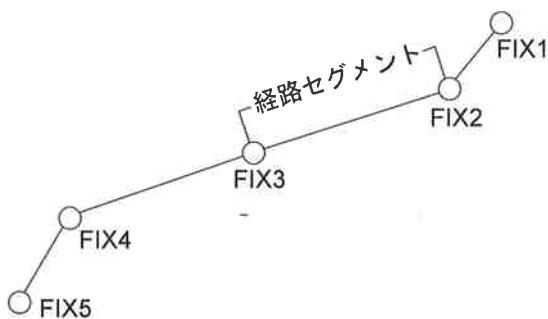


図2 経路セグメントの概念

$$N_x^z(o/s) = \frac{2 \sum_{i=1}^n (n_p^z(o/s))_i}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (4)$$

ここで $(n_p^z(o/s))_i$ 、 H_i はそれぞれ分割区間 i における近接通過回数と総飛行時間を表す。 n は経路セグメントの総数である。

3.2 等価反航近接通過頻度

同航と反航の近接通過頻度の衝突リスクへの関与をまとめて把握できる量として、等価反航近接通過頻度^[7] $N_x^z(e)$ がある。これは次式で計算できる。

$$N_x^z(e) = N_x^z(o) + \frac{K(s)}{K(o)} N_x^z(s) \quad (5)$$

$N_x^z(o/s)$ のパラメータは文献[8]を参考にして、 $\lambda_x = 0.036$ NM, $\lambda_y = 0.032$ NM, $\lambda_z = 0.010$ NM, $|V_x| = 960$ knots, $|\Delta V_x| = 28.9$ knots, $|\Delta V_y| = 11.6$ knots, $|\Delta V_z| = 1.5$ knots とした。(2)式で計算すると $K(o) = 1.02$, $K(s) = 1.64$ となる。航空機の平均サイズ、進行方向および横方向の平均相対速力の値に対しては、北太平洋航空路での推定値^[9]を使用した。これらは欧米で用いられている値とさほど変わらない。

4. ルートシステム改編の概要

G581 ルートは三宅島と台湾方面を結ぶ航空路である。図3にG581ルートの概略図を示す。

G581 ルートシステムの交通流を分散させるため、G581 の南北にそれぞれ一方通行の平行経路 (Y52 と Y57) を設けた。図4にG581 ルートシステム改編の概要を示す。

今回の解析では、平成15年度の評価時（平成15年の1年間のデータを使用）に特に近接通過頻度の高かった紀伊半島の南の位置通報点 TAPOP と奄美大島付近の位置通報点 POMAS の間の空域を評価の対象とした（図3参照）。

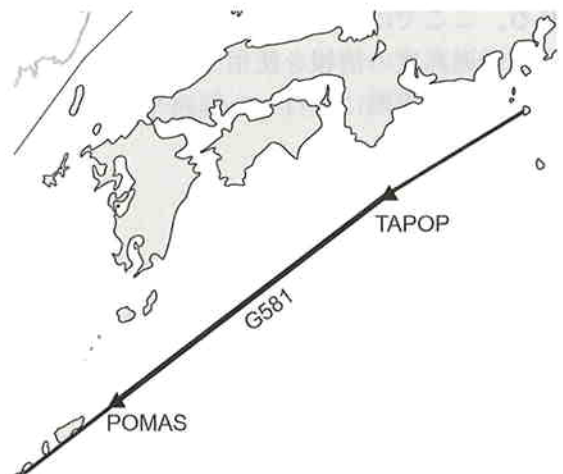


図3 G581ルートの概観

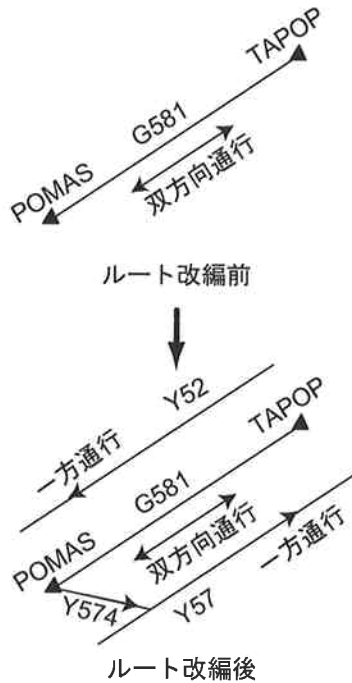


図4 G581 ルートシステム改編の概要

5. 観測対象機と使用データ

観測対象は、G581 ルートシステムのうち位置通報点 TAPOP と POMAS の間（平成 17 年 2 月 17 日以降は Y52、Y57、Y574 の関連位置通報点間も含む）を FL290 以上 FL410 以下で飛行したすべての航空機である。

近接通過頻度の計算には、平成 16 年 2 月から平成 17 年 8 月までの飛行計画情報を用いた。

飛行計画情報からは、便名、機種名、出発／目的空港、飛行経路、位置通報点の通過時刻・高度など航空機の運航に関する様々な情報が得られる。ここでは、主に位置通報点の通過時刻および通過高度の情報を使用した。尚、飛行計画情報には、実際に飛行した経路や時刻、高度が記載されている。

6. 近接通過頻度の評価結果

計算に際し、次の 2 つを仮定した。

- (I) 国内短縮垂直間隔基準導入時は各 FL の交通量の分布が異なるものと考えられるが、 S_z のみが 1,000 ft になり、2,000 ft 間隔での分布がそのまま 1,000 ft 間隔に移行する。
- (II) 航空機は短縮垂直間隔の最低航空機システム性能要件 (RVSM MASPS) を満たすと仮

定する。このとき当該機は RVSM の手引き書^[1]の記載値 $P_x(1000) = 1.7 \times 10^{-8}$ を満たす。

6.1 等価反航近接通過頻度の最大許容値

技術的リスクが目標安全度 2.5×10^{-9} [件／飛行時間] を満たすための等価反航近接通過頻度の最大許容値の値を計算する。(5)式を用いて(1)式を変形すると次式となる。

$$N_{az} = P_z(S_z)P_y(0)N_x^z(e)K(o) \quad (6)$$

$S_z = 1,000$ ft とし、上記(II)の仮定から $P_x(1000) = 1.7 \times 10^{-8}$ とする。 $P_y(0)$ は、1 年分のレーダーデータから求めた値^[2] $P_y(0) = 0.091$ を使用する。 $N_{az} \leq 2.5 \times 10^{-9}$ [件／飛行時間]、 $K(o) = 1.02$ を代入して $N_x^z(e)$ を計算すると、 $N_x^z(e)$ の最大許容値は 1.6 [機／飛行時間] となる。

6.2 近接通過頻度の推定結果

上記(I)の仮定の下で 2,000 ft 離れた高度を飛行する航空機に対する近接通過頻度を求めた。計算に際し、以下のようにした。

- (i) 航空機は位置通報点間を等速で飛行していると見做す。
- (ii) 飛行計画情報からは正確な高度変更地点がわからない。このため位置通報点間で高度の変更があった場合は、はじめの位置通報点にて高度の変更があったものと見做す。
- (iii) 位置通報点上での近接通過は、重複計数を避けるため 0.5 回と計数。
- (iv) 2 つの経路間を横切る飛行は無視。

表 1 に等価反航近接通過頻度および総飛行時間を月毎に計算した結果を示す。G581 ルートシステム改編後（平成 17 年 2 月 17 日以降）については、4 本のルートの平均値を示した。これは G581、Y52、Y57、Y574 の経路セグメント毎に計算した値を(4)式に代入して求めた。

改編前の平成 16 年 2 月から平成 17 年 1 月までの一年間の $N_x^z(e)$ の平均値は 3.96 [機／飛行時間] で、改編後の平成 17 年 3 月から 8 月までの半年間の $N_x^z(e)$ の平均値は 0.20 [機／飛行時間] であった。改編後の $N_x^z(e)$ は改編前の 20 分の 1 に減少している。

図5にG581ルートシステム改編前後の近接通過頻度の変化を示す。図中には、反航 $N_x^z(o)$ 、同航 $N_x^z(s)$ 、等価反航近接通過頻度 $N_x^z(e)$ の値を示した。同航近接通過頻度の値は平均0.019 [機/飛行時間]と反航近接通過頻度に比べて小さい。このため、反航近接通過頻度と等価反航近接通過頻度のグラフは重なって見える。

表1 月毎の等価反航近接通過頻度

月	$N_x^z(o)$	$N_x^z(s)$	$N_x^z(e)$	H [飛行時間]
Feb. 2004	4.03	0.018	4.06	2442.4
Mar. 2004	3.67	0.034	3.72	2783.1
Apr. 2004	3.29	0.018	3.32	2654.4
May 2004	3.60	0.018	3.63	2852.8
Jun. 2004	3.77	0.015	3.79	2739.1
Jul. 2004	3.43	0.019	3.46	2742.6
Aug. 2004	4.38	0.021	4.42	3116.2
Sep. 2004	4.40	0.024	4.44	3053.5
Oct. 2004	4.28	0.019	4.31	2784.6
Nov. 2004	4.38	0.020	4.41	3106.8
Dec. 2004	3.79	0.021	3.82	2877.2
Jan. 2005	4.07	0.027	4.11	2907.2
Feb. 2005	2.20	0.026	2.24	2678.7
Mar. 2005	0.18	0.012	0.20	2699.9
Apr. 2005	0.17	0.008	0.18	2561.8
May 2005	0.18	0.015	0.21	2776.6
Jun. 2005	0.19	0.013	0.21	2478.9
Jul. 2005	0.19	0.015	0.22	2895.1
Aug. 2005	0.17	0.014	0.20	3068.2

・ N_x^z の単位は [機/飛行時間]

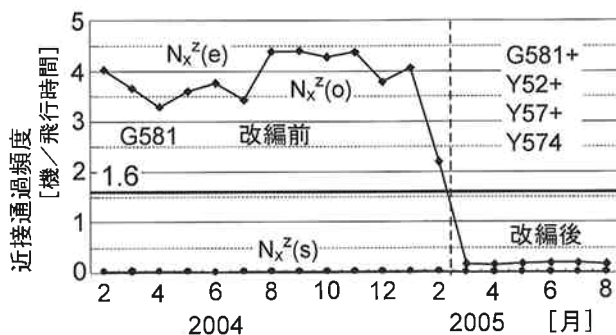


図5 改編前後の近接通過頻度の変化

図中には、 $N_x^z(e)$ の最大許容値1.6 [機/飛行時間]の線を示した。改編後はこれを満たしている。これより改編後のG581ルートシステムの衝突リスク（技術的リスク）は目標安全度 2.5×10^{-9} [件/飛行時間]を満たすことが分かった。

7. 考察

7.1 2,000 ft 垂直間隔での衝突リスク

1章でルートシステム改編前のG581ルートシステムにおける衝突リスクは目標安全度を満たしていないと述べたが、これはあくまでも1,000 ft 垂直間隔に短縮した環境における話である。

念のため、2,000 ft 垂直間隔でのG581ルートにおける衝突リスクを推定する。参考文献[10]を参考にして、 $P_x(2000) = 3 \times 10^{-10}$ とする。 $N_x^z(e)$ は大きめの見積もりとなるように、表1中の最大値4.44 [機/飛行時間]を使用する。これらをその他のパラメータと併せて(6)式に代入すると、 $N_{zz} = 1.2 \times 10^{-10}$ [件/飛行時間]となる。これは、目標安全度 2.5×10^{-9} [件/飛行時間]を満たす。

7.2 改編後の各ルートの交通量の割合

改編後の各ルートの交通量の割合を調べて、平成17年3月以降の各ルートにおける総飛行時間の半年間の平均値を求めた。

その結果、G581は4584.0時間、Y52は5441.5時間、Y57（Y574を含む）は6455.1時間で、割合はそれぞれ、28%、33%、39%であった。

8. まとめ

平成17年9月30日に日本の国内空域において短縮垂直間隔基準が導入された。その導入に先立ち、衝突リスクを用いた安全性の事前評価を行った。平成15年度に行った評価において、対象空域全体の平均値では衝突リスク（技術的リスク）は目標安全度を満たしていた。しかし、G581ルートでは局所的に目標安全度を満たしていなかった。

G581ルートでも衝突リスクが目標安全度を満たすようにするため、平成17年2月17日に

国土交通省 航空局では交通流を分散させて近接通過頻度を減少させるべく G581 ルートシステムの改編を行った。

本稿では、G581 ルートシステムにおける改編前後の近接通過頻度を推定し、ルート改編の効果および改編後の衝突リスクが目標安全度を満たしているかどうかを調べた。改編前後の平成16年2月から平成17年8月までの飛行計画情報を用いて、近接通過頻度を推定した。その結果、次のことが分かった。

- (I) 想定した短縮垂直間隔基準導入後の状況下で、改編後の G581 ルートシステムの衝突リスクは目標安全度を満たす。
- (II) 改編後の等価反航近接通過頻度 $N_x^2(e)$ の平均値は 0.20 [機/飛行時間] で、改編前の平均値 3.96 [機/飛行時間] の 20 分の 1 になっている。
- (III) 2005 年 3 月以降の G581、Y52、Y57 (Y574 を含む) の飛行時間の割合はそれぞれ、28%、33%、39%であった。

今回のルート改編で使用された一方通行経路を使用して等価反航近接通過頻度を減少させる方法は、有効であると考えられる。

今後の課題は以下の通りである。

- (i) 想定した仮定が満たされているかどうか、平成17年10月以降の飛行計画情報を用いて確認する。
- (ii) 実際の運用では、管制官によるレーダー誘導などがしばしば行われているので、今後は飛行計画情報ではなくレーダーデータにより近接通過頻度を計算する。
- (iii) 今回は垂直方向重畳確率の値として文献 [1] の記載値である $P_d(1000)=1.7 \times 10^{-8}$ を用いたが、高度維持誤差等の解析により実際の垂直方向重畳確率の値を求める。

謝辞

データ収集の際にご協力頂いた国土交通省 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, 2001

- [2] 長岡栄・天井治：国内短縮垂直間隔導入に係る空域安全性基礎評価委託，電子航法研究所 受託研究報告書，March 2004
- [3] 天井 治：北太平洋航空路における近接通過頻度の長期的変化，日本航海学会論文集，111, pp.127-134, Sep. 2004
- [4] P.G. Reich, "Analysis of Long Range Air Traffic Systems, Journal of the Institute of Navigation", 19, Nos.1, 2 and 3, 1966
- [5] Report of the Sixth Meeting of RGCSP, ICAO RGCSP-WP/158, chap.5, Montreal, Canada, 1988
- [6] 天井治・長岡栄：航空路における垂直方向の近接通過頻度の推定，日本航海学会論文集，82, pp.61-68, March 1990
- [7] U.S.A. : Assurance of Safe Reduced Vertical Separation Minimum Implementation for Asia and Pacific Oceanic Airspace (Revised to Include Considerations for GPS Equipped Aircraft), ICAO RVSM/TF/2- WP10, Feb. 1999
- [8] O. Amai and S. Nagaoka : A Consideration on Lateral Collision Risk for the North Pacific Routes, ICAO RGCSP-WG/A/17-IP/5, Annapolis, USA, Nov. 2000
- [9] 天井治・長岡栄：衝突危険度による洋上複合間隔ルートの安全性評価－Ⅲ．－NOPAC ルートの水平方向の衝突危険度－，日本航海学会論文集，95, pp.87-96, March 1997
- [10] 長岡栄・天井治：衝突危険度による洋上複合間隔ルートの安全性評価－Ⅰ．－NOPAC ルートの垂直方向の衝突危険度－，日本航海学会論文集，92, pp.319-327, March 1995
- [11] K. Mehadhebi and P. Lezard : Application of the Rice Formula to the Design of Stationary and Non Stationary collision Risk Models , ICAO SASP-WG/WHL/4-WP/30, Honolulu, Nov. 2003