

横方向オフセット導入時の横方向の衝突危険度

電子航法開発部 長岡 栄 天井 治

1. はじめに

近年，全世界測位システム（GPS）の受信機を搭載した航空機（以後，GPS 装備機とよぶ）が増えている．GPS 装備機の航法精度は従来の慣性航法装置（INS）のそれに比べて格段に高精度である．このため，同一経路で隣接フライトレベルを飛行する航空機対の場合，GPS 装備機は横方向の経路維持誤差が小さいため，航空機の直下または直上に他機が存在する確率が高くなる．その結果，垂直方向の衝突危険度[1]が増大する恐れがある．これに伴い国際民間航空機関の「RVSM マニュアル」[2]の内容を更新することが提案[3]され，最近改訂された．

北太平洋の洋上航空路では 2000 年 2 月 24 日から，垂直間隔が従来の 2000ft から 1000ft に短縮されている．このため，従来よりも隣接フライトレベル（FL と略記）上の航空機による後方乱流の影響が大きくなっている．

こうした問題を避ける方法として，隣接フライトレベル上の航空機の一方を横方向にオフセットする方法が提案され，これに関する多くの研究がある[4]～[13]．オフセットを適用すると，垂直方向の衝突危険度は大幅に軽減できる．しかし，実質的なルート間間隔が変化するため，オフセットの仕方により横方向の衝突危険度が増大する恐れがある．

最近，ICAO の管制間隔・空域安全パネル（SASP）の作業部会（SASP-WG/WHL/2, Montreal）会議において，前述の問題に対処すべく，NOPAC ルートで全ての航空機に 1 または 2NM のオフセットを適用した場合，横方向の衝突危険度がどの程度変化するかを調べて欲しいとの依頼があった．これを受けて，著者らは NOPAC ルートでの交通流を調査し，進行方向右側に 2 NM のオフセットを導入したとき，当該空域での横方向衝突危険度がどうなるかを推定してみた．本稿ではその方法と得られた結果を示す．

2. 考察対象空域

図 1 に北太平洋の洋上航空路（以下，NOPAC ルートと呼ぶ）を示す．現在，5 本のルートがあり，ルート間間隔は約 50NM，垂直間隔は 2000 年 2 月 24 日から FL290～FL390 で 1000ft，2000 年 10 月 5 日からは FL410 まで 1000ft 間隔とな

った．北側の 2 本の経路（R220 と R580）は西行き便に，A590 は東行き便に，そして，R591 と G344 は双方向に用いている．

1999 年の調査[17]ではこの交通の約 70% が B747 型機で，40% が B747-400 型機である．B747-400 型機の一部や B777 型機には FANS-1 と呼ばれる GPS を組み込んだアビオニクス・パッケージが装備されている．2000 年 12 月の調査結果では NOPAC ルートを飛行した 3972 便中 1655 便（42%）が自動従属監視（ADS）装備機であった．これは即ち GPS 装備機でもある．

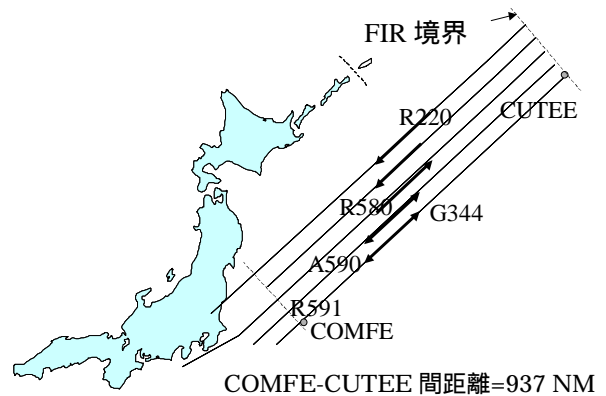


図 1 NOPAC ルートの構成

3. 衝突危険度モデル

洋上航空路の安全性評価には Reich モデル[1]がよく用いられる．同一 FL で横方向に S_y だけ離れた平行経路上の航空機対が横方向の間隔を喪失することにより，単位飛行時間あたりに発生する空中衝突事故件数の期待値（横方向衝突危険度）は次式で表される．

$$N_{ay} = P_y(S_y)P_z(0) \times [N(s)K(s) + N(o)K(o)] \quad (1)$$

ただし， $K(s) = [1 + \frac{\lambda_x}{V_{rx}(s)} (\frac{V_{ry}}{\lambda_y} + \frac{V_{rz}}{\lambda_z})]$ (2)

$$K(o) = [1 + \frac{\lambda_x}{V_{rx}(o)} (\frac{V_{ry}}{\lambda_y} + \frac{V_{rz}}{\lambda_z})] \quad (3)$$

ここに，記号の意味は以下のとおりである．

$P_y(S_y)$ ：横方向重畳確率（横方向に S_y だけ離れた平行経路上の航空機が横方向で重なる確率），

$P_z(0)$ ：垂直重畳確率（同一 FL 上の航空機が垂直方向で重なる確率），

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$: 航空機の全長, 全幅, 全高,
 $V_{rx}(s), V_{rx}(o), V_{ry}, V_{rz}$: それぞれ, 同航(s)機の平均相対縦方向速度, 反航(o)機の平均相対縦方向速度, 平均相対横方向速度, 平均相対垂直方向速度である. なお, 記号(s)の同航は航空機対の進行方向が同じもの, (o)の反航は反対のものを指す.
 $N(o/s)$: 反航(o)/同航(s)近接通過頻度.

図1では経路間隔 50 NM (=S_y)のルートが5本あり4つの隣接ルート対ができる. オフセットを適用した場合, 飛行方向により実効経路間隔が異なる. 本稿では, これら全ての組み合わせに対して, 各ルート対の横方向衝突危険度を総合し, 全ルートをひとまとめにしたルートシステムの横方向衝突危険度の期待値を求める.

4. 近接通過頻度の調査

最近の近接通過頻度を求めるため, 2002年11月の飛行計画情報から位置通報点(FIX)上の通過時刻を調べ, これから近接通過件数と飛行時間を算出した.

対象空域は, 図1のように, FIRの境界, G344上の二つのFIX(CUTEE-COMFE: 937 NM), COMFEからR220に下ろした垂線を1辺とする長方形の領域である. FL290~FL410の各FLの各FIX間での近接通過件数と当該ルート対上の飛行時間を算出し, 近接通過頻度を計算した. FIX間では各航空機の速度は一定とし, 計算に用いる区間の端点上での近接通過は重複を避けるため1/2件と計数した. 時刻精度は0.1分以内である.

近接通過頻度は, 各FL, 各ルート対毎に求め, それを総合して(各飛行時間で重みをつけた平均として)求めた. 因みに, 図2のi番目のルート対の近接通過頻度 $N_i(o/s)$ は次式で表せる.

$$N_i(o/s) = 2 \cdot n_i(o/s) / \tau_i \quad (4)$$

ただし, $n_i(o/s)$ は当該ルート対上での近接通過件数, τ_i はそこでの飛行時間の総計である.

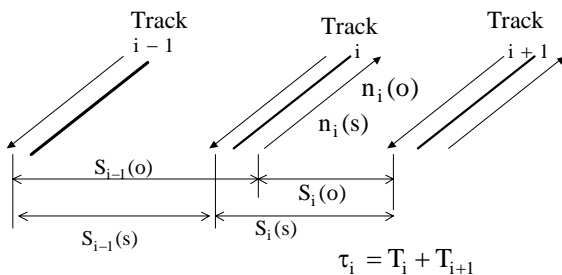


図2 ルート対における近接通過頻度の計算概念

5. オフセット適用時の衝突危険度

オフセットは予め指定した FL 上の航空機に対して進行方向右側に 2NM とした. 簡単化のために, 次の仮定を設けた.

- (1) 全ての航空機は同一の航法性能を有する (横方向経路維持誤差は独立で, 同一分布に従う).
- (2) どの経路でも, オフセットは上二桁が奇数 (または偶数) FL のみに適用する.

図3にはオフセット適用時の実効経路間隔を示す. 飛行方向により実効経路間隔は変化するので, 当該空域での衝突危険度は各ルート対に対する衝突危険度の期待値(平均)となる. 全ルートの衝突危険度の期待値は

$$E[N_{ay}] = P_z(0) \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\tau_i}{H} \right) \times [K(s)N_i(s)P_y(S_i(s)) + K(o)N_i(o)P_y(S_i(o))] \quad (5)$$

となる. ただし, $S_i(o/s)$ はルート対i(経路iと経路i+1から成る)の実効経路間隔, $N_i(o/s)$ はルート対iの反航/同航近接通過頻度,

$H = \sum_{i=1}^5 T_i$ は全ルート上の総飛行時間, T_i はルートi上の飛行時間, τ_i はルート対i上の飛行時間($\tau_i = T_i + T_{i+1}$)である. 式(4)と式(5)から次式を得る.

$$E[N_{ay}] = P_z(0) \left(\frac{2}{H} \right) \times \sum_{i=1}^4 [K(s)n_i(s)P_y(S_i(s)) + K(o)n_i(o)P_y(S_i(o))] \quad (6)$$

この横方向重畳確率と近接通過件数の積を, 偶数(even)FL(300, 320, ..., 400)と奇数(odd)FL(290, ..., 410)に分割する. このとき(6)式は次のようになる.

$$E[N_{ay}] = \frac{2P_z(0)}{H} \times \sum_{i=1}^4 [K(s)\{P_y(S_i^{odd}(s)) \cdot n_i^{odd}(s) + P_y(S_i^{even}(s)) \cdot n_i^{even}(s)\} + K(o)\{P_y(S_i^{odd}(o)) \cdot n_i^{odd}(o) + P_y(S_i^{even}(o)) \cdot n_i^{even}(o)\}] \quad (7)$$

オフセットがない場合の衝突危険度は次式で表せる.

$$E[N_{ay}]_c = \frac{2P_z(0)P_y(S)}{H} \sum_{i=1}^4 [K(s)n_i(s) + K(o)n_i(o)] \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここで, $S=S_y=50$ NM である. 危険度比を R とすると

$$R \equiv E[N_{ay}] / E[N_{ay}]_c \quad \dots \dots \dots (9)$$

となる. これは, $K(o/s), P_y(S)$ ($S=S_y, S_y+4$ NM, S_y-4 NM)および $n_i(o/s)$ の関数である.

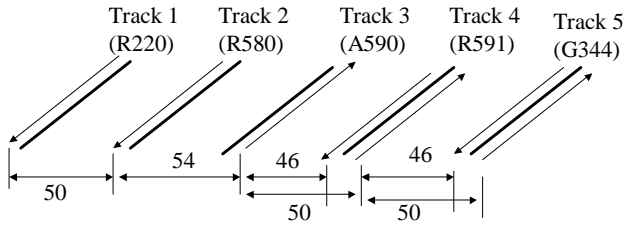


図3 オフセット導入 FL の実効経路間隔

6. 重畳確率

R220 上の航空機の横方向経路逸脱量を航空路監視レーダ(ARSR)で観測した結果 [16]は、その分布が次の混合型両側指数(DDE)分布 で近似できることを示唆している。

$$f(y) = (1-\alpha)DE(y|\lambda_{core}) + \alpha DE(y|\lambda_{tail}) \quad (10)$$

ここで、 λ_{core} 、 λ_{tail} はそれぞれ、中心部および裾部のパラメータ、 α は裾部の重み係数である。ここで、

$$DE(y|\lambda) = (2\lambda)^{-1} \exp(-|y|/\lambda) \quad (11)$$

は両側指数 (DE) 分布の確率密度関数である。

文献[16]の値は $\lambda_{core}=0.816$ NM, $\lambda_{tail}=5.26$ NM, $\alpha=7.26 \times 10^{-4}$ である。中心部は通常の誤差、裾部は故障や過失など異常時の誤差に相当すると考えられる。

GPS 装備機の経路維持誤差の観測結果 [17][18]では、その標準偏差は従来型機のそれと比べて1桁以上小さい。そこで、ここでは文献 [14][15]を参考にし、GPS 装備機の標準偏差 $\sigma_{GPS} = 0.063$ NM とし、中心部の分布に $\lambda_{core} = \sigma_{GPS} / \sqrt{2}$ ($=0.044$ NM)の DE 分布を仮定する。

計算には、図3の横方向重畳確率 $P_y(50)$, $P_y(54)$, および $P_y(46)$ を求める必要がある。経路間隔 S に対する横方向重畳確率は

$$P_y(S) = \int_{S-\lambda_y}^{S+\lambda_y} \int_{-\infty}^{\infty} f(y) \cdot f(y+u) dy du \quad (12)$$

$$\cong 2\lambda_y C(S; \lambda_{core}, \lambda_{tail}, \alpha) \quad (13)$$

となる。ただし

$$C(y; \lambda_1, \lambda_2, \alpha) = \frac{(1-\alpha)^2}{4\lambda_1^2} (|y| + \lambda_1) \exp(-|y|/\lambda_1) + \frac{\alpha^2}{4\lambda_2^2} (|y| + \lambda_2) \exp(-|y|/\lambda_2) + \frac{\alpha(1-\alpha)}{(\lambda_2^2 - \lambda_1^2)} [\lambda_2 \exp(-|y|/\lambda_2) - \lambda_1 \exp(-|y|/\lambda_1)] \quad (14)$$

である。

表 1 -a 近接通過件数と実効経路間隔

ルート対	FL	反航		同航	
		$n_i(o)$ 件	$S_i(o)$ NM	$n_i(s)$ 件	$S_i(s)$ NM
R220-R580	奇	0	-	24	50
	偶	0	-	37	50
R580-A590	奇	95.5	50	0	-
	偶	111.5	54	0	-
A590-R591	奇	11	50	10.5	50
	偶	21	46	0	50
R591-G344	奇	0	-	0	-
	偶	0	-	0	-

表 1 -b 各ルートにおける飛行時間

ルート	飛行時間 T_i (hr)	総飛行時間 (hr)
R220	5780.13	$H = \sum_{i=1}^5 T_i$ $= 11067.77$ hr
R580	1344.66	
A590	3174.44	
R591	568.71	
G344	199.83	

7. 計算結果

表 1 -a には偶数 FL の航空機を右に 2 NM だけオフセットした場合の実効経路間隔と近接通過件数を示す。表 1-b には各ルート上の飛行時間を示す。これらの値を用いて、各場合について、近接通過頻度を算出した。

表 2 に計算に用いたパラメータを示す。多くは文献[9]の値を用いた。この計算で衝突危険度を大きく左右するものは DDE 分布のパラメータ α と λ_{tail} である。表 3 には、横方向重畳確率がほぼ最大となるよう、 $\lambda_{tail} = 50$ NM とし、北大西洋での推定値 $\alpha = 8.37 \times 10^{-5}$ (1990 年代)を用いて計算した結果を示す。これにみるとおり航法性能要件(RNP)4 以上の精度では中心部のパラメータの影響は小さいことがわかる。

表 3 で影を施したパラメータ値のとき、 $E[N_{ay}] = 2.92 \times 10^{-9}$ [accidents/hour] である。このとき、オフセット無しの場合、 $E[N_{ay}]_c = 2.94 \times 10^{-9}$ [accidents/hour] である。危険度比 R は 0.991 である。これは考察中のシステムではオフセットの導入によりやや危険度が減少することを意味する。これは反航近接通過の大部分が R580-A590 のルート対で起こるが、ここの実効経路間隔が 54NM となっているためである。その結果、横方向衝突危険度が小さくなっている。

表 3 で用いた裾部パラメータの根拠となる北大西洋のデータは NOPAC と比べて古い型の航空機が多い。このため衝突危険度を過大評価す

る可能性がある。

次に、DDE モデルのパラメータとして NOPAC での観測結果[17]に基づく値を用いた結果を表4に示す。ただし、この裾部パラメータは約 18,000 個のデータから求めたものである。この値を用いたときは、 $E[N_{ay}]=4.87 \times 10^{-11}$ [accidents/hour]、 $E[N_{ay}]_c=4.92 \times 10^{-11}$ [accidents/hour]である。ここで $R=0.953$ である。但し、この推定値は約 2 万個の比較的少ない標本に基づくかなり楽観的な値であると考えられる。

表2 計算に用いたパラメータ

パラメータ	推定値	出典
$P_z(0)$	0.5	文献 [9]
λ_x	0.036 NM	文献[19]
λ_y	0.032 NM	同上
λ_z	0.010 NM	同上
$V_{rx}(s)$	13 kt	文献 [9]
V_{ry}	75 kt	同上
$V_{rx}(o)$	960 kt	同上
V_{rz}	1.5 kt	同上

表3 横方向重畳確率 ($\lambda_{tail}=50\text{NM}$, $\alpha=8.37 \times 10^{-5}$)

	λ_{core}	$P_y(54)$	$P_y(50)$	$P_y(46)$
GPS 機	0.044	3.64E-8	3.94E-8	4.27E-8
従来型	0.816	3.64E-8	3.94E-8	4.27E-8
RNP4	1.34	3.64E-8	3.94E-8	4.27E-8
RNP12.6	4.21	1.78E-7	3.80E-7	8.58E-7

表4 横方向重畳確率 ($\lambda_{tail}=5.26\text{NM}$, $\alpha=7.26 \times 10^{-4}$)

	λ_{core}	$P_y(54)$	$P_y(50)$	$P_y(46)$
GPS 機	0.044	3.08E-10	6.58E-10	1.40E-9
従来型	0.816	3.14E-10	6.74E-10	1.43E-9
RNP4	1.34	3.29E-10	7.0E-10	1.51E-9
RNP12.6	4.21	1.49E-7	3.41E-7	8.17E-7

8. むすび

NOPAC ルートにおいて、幾つかの仮定の下に、特定(ここでは偶数)フライトレベル(FL)の航空機を右側に 2 NM だけオフセットさせたとき、当該空域内での横方向衝突危険度がどうなるかを検討した。4 つのルート対について一か月分の飛行計画情報に基づき近接通過頻度を計算し、これを用いて横方向衝突危険度を試算した。

偶数 FL の航空機のみオフセットを適用したとき、GPS 装備機に対して、やや大きめに推定した横方向衝突危険度は 2.9×10^{-9} [accidents/hour] である。これは ICAO の目標安

全度 5×10^{-9} [accidents/hour] より小さい。危険度比は 0.991 で、オフセットの採用により横方向危険度が增大することはなかった。

衝突危険度の推定値は横方向経路維持誤差の分布に強く依存するので、より信頼できる推定値を求めるには、当該空域における大きな経路逸脱量のデータの蓄積と解析が必要である。

参考文献

- [1] P. G. Reich : " Analysis of Long-Range Air Traffic Systems - Separation Standards I, II and III", Journal of the Inst. of Navigation, vol.19, 1966
- [2] Manual of a 300 m (1000 ft) Vertical Separation Minimum between FL290 and FL410 Inclusive, ICAO Doc 9574-AN/934, 1992
- [3] G. Moek: "Some Proposed Changes to ICAO Doc 9574, Manual on Implementation of a 300m VSM between FL290 and FL410 inclusive", ICAO RGCSP-WG/B-WP/5, Gold Coast, May, 199.
- [4] K. Hurrass: "Probability of Lateral Overlap", ICAO RGCSP-WP/152, Montreal, Nov., 1988
- [5] K. Hurrass: "Effect of Flying Offsets on Vertical Separation", IB-112-90/03, Report of Institute fur Flugfuhrung, DFVLR, Jan. 1990
- [6] K. Hurrass: "Systematic Offset for Aircraft using GNSS", Monitoring and Technical Task Force of the NSSG, Jan., 1997
- [7] E. Davies: "Effect of Increased Lateral Accuracy on Vertical Risk", ICAO RGCSP-WG/B-WP/2, Gold Coast, May, 1998
- [8] B. Flax, "Lateral overlap probability in oceanic route systems with segregated traffic", ICAO RGCSP-WG/A-WP/4, Annapolis, Sept.-Oct, 1996
- [9] B. Flax: "Effects on collision risk of the use of lateral offset", ICAO RGCSP-WG/A-WP12, St. Petersburg, May, 1999
- [10] B. Flax: "Effects on Collision Risk of the Use of Lateral Offsets to Avoid Wake Turbulence", ICAO TF/4-WP/8, Brisbane, 9-13, Aug., 1999
- [11] S. Nagaoka: "Influence of Improved Lateral Path-keeping Accuracy on the Global Height-Keeping Performance Specification", ICAO RGCSP-WG/B-WP/4, Gold Coast, May, 1998
- [12] S. Nagaoka: "Effect of systematic offsets of the GPS equipped aircraft on the average lateral overlap probability for a mixed environment in an oceanic route", ICAO RGCSP-WG/B-WP/8, St. Petersburg, May, 1999
- [13] S. Nagaoka: "Effects of Systematic offsets of GPS Equipped aircraft on lateral collision risk", ICAO RGCSP-WG/A/17-IP/4, Annapolis, Nov., 2000
- [14] T. McDavid, T. Murphy, G. Sotolongo: "GPS/IRS/FMS Integration for RNP Airspace Operations", ICAO RGCSP WG/A-WP/19, Brussels, Belgium, May, 1995
- [15] T. McDavid: "Distribution of Lateral Navigation Error for FANS-1 Equipped 747-400 Aircraft: Implementation for Reduced Separation", ICAO RGCSP WG/A-WP/20, Brussels, May, 1995
- [16] O. Amai, S. Nagaoka: "Estimation of the lateral collision risk of the North Pacific routes", Proc. of 54th Ann. meeting, The Institute of Navigation, pp.639-646, June, 1998
- [17] O. Amai, S. Nagaoka: "Recent collision risk model parameters of the North Pacific Routes", ICAO RGCSP-WG/A-WP/15, St. Petersburg, May, 1999
- [18] G. Nezer: "Empirical data on lateral path-keeping accuracy of GPS-equipped aircraft", ICAO RGCSP-WG/A-WP/18, St. Petersburg, May, 1999
- [19] O. Amai, S. Nagaoka: "Passing Frequency Values for the North Pacific Routes under Implementation of Reduced Vertical Separation Minima", ICAO RGCSP/10-IP/6, Montreal, May, 2000