

16. GPS装備機のオフセットと横方向衝突危険度

電子航法開発部 ※長岡 栄

1. はじめに

近年、GPS（全世界測位システム：Global Positioning System）を装備した航空機（以下GPS機と呼ぶ）の数が増大している。GPS機の航法精度は従来の慣性航法システム（INS）などに比べ桁ほど高い。このため、同一ルートで隣接フライトレベルを飛行する航空機が直上または直下に存在する可能性が高くなり、垂直方向の衝突危険度（以下、垂直危険度と呼ぶ）が増大する。

これに伴い、こうした問題を考慮していなかった国際民間航空機関（ICAO）の短縮垂直間隔実施マニュアル^[2]の改正の必要性や対応策が検討されてきた。垂直危険度の軽減策として隣接フライトレベルの経路を一定間隔だけ横方向にずらす（これを計画的(Systematic)オフセットと呼んでいる）方法がある。これについては幾つかの研究^{[3~8][15, 16, 18]}があり、その有効性が報告されている。

他方、このオフセットは同一フライトレベルで隣接経路を飛行する航空機に対しては、割り当て経路間の間隔を縮小することもある。その結果、横方向の衝突危険度（以下、横危険度と呼ぶ）を増大させる可能性がある。これについてはFlaxの研究例^[8]があるが具体的な空域についての検討ではない。そこで、わが国の主要な洋上航空路である北太平洋（NOPAC）ルートでの観測データに基づき、GPS機と非GPS機が共存する環境下で、オフセットによる横危険度への影響を解析により調べてみた。

本報告では、北太平洋の洋上航空路を想定し、GPS機のオフセットの横危険度への影響を調べるための計算の方法と結果について述べる。

2. 対象空域

2.1 洋上航空路

図1はNOPACルートと呼ばれている洋上航空路である。現在、5本の平行ルートが50NM間隔で設定されている。2000年2月24日から使用高度はフライトレベル(FL)290(29,000ftの高度に相当)以上FL390以下では、1,000ft間隔が使

われている。主に、北側の2本のルート（R220、R580）は西行き便に、そして残りの3本のルート（A590、R591、G344）は東行き便に用いられる。

1999年の調査^[9]によると、ここを通る航空機の約70%がB747型機で、約40%はB747-400型機である。B777型機やB747-400型機の一部はGPSを装備しており、これらGPS機の割合が増えてきている。

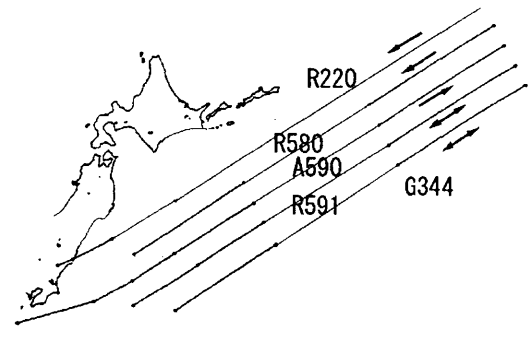


図1 NOPACルートの概略

2.2 衝突危険度

洋上航空路の安全性を評価するには、しばしばReichの衝突危険度モデル^[1]が用いられる。このモデルでは、ある経路を指定された航空機が空中衝突するのは次の3つの場合が考えられる。

- 1) 同一ルートで隣接フライトレベルを指定された航空機との垂直間隔を喪失する
- 2) 同一フライトレベルで隣接ルートを指定された航空機との横間隔を喪失する
- 3) 同一ルート、同一フライトレベルを指定された航空機との前後の間隔（縦間隔）を喪失する。

ある航空路システムの衝突危険度を考察する場合はこれらの全てが問題になるが、ここでは経路オフセットの影響に関係する、1)に基因する垂直方向の衝突危険度（垂直危険度）と、2)に基因する横方向の衝突危険度（横危険度とよぶ）を考察する。

2.3 衝突危険度モデル

横方向に S_y 、垂直方向に S_z の間隔を与えられた航空機対の r ($=y$ (横)、 z (垂直)) 方向の衝突危険度 N_{ar} は次式で与えられる。

$$N_{ar} = P_y(S_y)P_z(S_z) \times [N_x^r(s)K(s) + N_x^r(o)K(o)] \quad (1)$$

ここで、

$$K(s) = 1 + \frac{\lambda_x}{V_{rx}(s)} \left(\frac{V_{ry}}{\lambda_y} + \frac{V_{rz}}{\lambda_z} \right) \quad (2)$$

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

である。ここで、

$P_y(S_y)$: 経路の間隔が S_y のとき航空機対が横方向で重なる確率 (横方向重畳確率)

$P_z(S_z)$: フライトレベル間の間隔が S_z のとき航空機対が垂直方向で重なる確率 (垂直重畳確率)

$N_x^r(s/o)$: r 方向のモデルの同航(s)/反航(o) 近接通過頻度

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$: 航空機の全長、全幅、全高

$V_{rx}(s), V_{rx}(o), V_{ry}, V_{rz}$: 同航機の平均縦方向相対速度、反航機の平均縦方向相対速度、平均横方向相対速度、平均垂直方向相対速度である。

なお、(1)式の [] 内は等価反航近接通過頻度

$$N_x^r(o)_{equi} = N_x^r(o) + N_x^r(s)K(s)/K(o) \quad (4)$$

を用いて、 $N_x^r(o)_{equi}K(o)$ と書きかえられる。

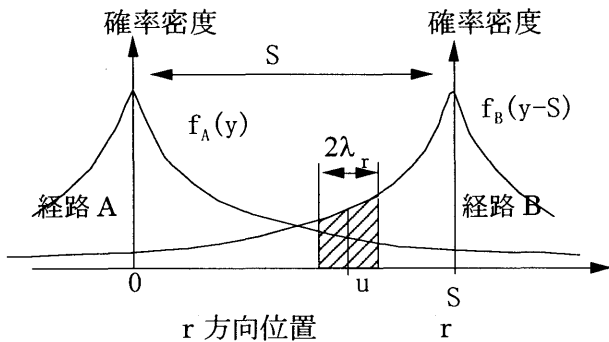


図2 r 方向重畳確率の考え方

3. 重畳確率

図2は r 方向に S だけ離れた経路を割り当てられた航空機が重なる確率の概念図である。 r

$= z$ の場合は同一ルート上で隣接フライトレベル上の経路となり、 $r = y$ の場合は同一フライトレベルの隣接平行ルート上の経路に相当する。

航空機の経路維持誤差はそれぞれ独立とし、同一分布に従うものとする。経路 A の航空機の r 方向経路維持誤差の確率密度関数 (probability density function: pdf) を $f_A(r)$ 、経路 B のそれは $f_B(r-S)$ で表す。航空機の r 方向の幅を λ_r とする。図中の $r=u$ に一方の航空機がいて、他機が u を中心とした幅 $2\lambda_r$ の区間にいるとき重なりが生ずる。従って、間隔 S に対する r 方向重畳確率は次式で与えられる。

$$P_r(S) = \int_{S-\lambda_r}^{S+\lambda_r} C^*_{AB}(u) du \quad (5)$$

ここで、 $C^*(u)_{AB}$ は次の畳み込み関数である。

$$C^*(u)_{AB} = \int_{-\infty}^{\infty} f_A(v-u)f_B(v)dv \quad (6)$$

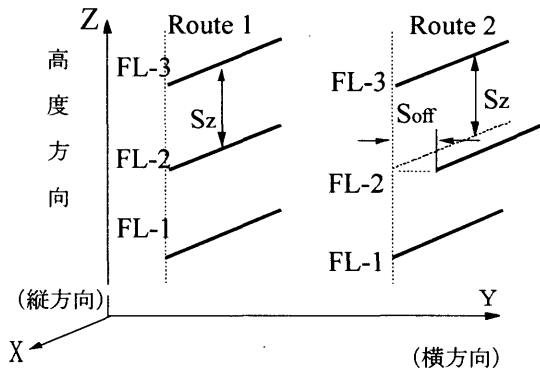


図3 オフセットの考え方 (Route1は通常経路、Route2はオフセットを適用した経路)

4. 計画的オフセット

図3に計画的オフセットの概念を示す。ここで、考察するオフセットは同一ルートで隣接フライトレベル (FL) を飛行する航空機が双方とも GPS 機の場合、いずれか一方の GPS 機を右または左に S_{off} だけ割り当て経路をずらすものである。

いま、平行ルートの経路間間隔が S_y ($=50NM$) で垂直間隔 (FL間の距離) が S_z ($=1,000ft$ (約 $300m$)) の経路を考えよう。このとき航空機の割り当て経路間間隔はオフセットの有無と方向により、表1に示すように5つの場合が存在する。

以後の議論では、航空機の種類は GPS 機と非

GPS機（従来型機）の二種類とし、GPS機の割合 γ をパラメータとし、オフセットがある場合の横方向重畳確率の平均値 $P_y(S_y)_{av}^{off}$ を求めることを考える。

5. 経路維持誤差のモデル

5.1 横方向経路維持誤差のモデル

北太平洋ルートR220での航空路監視レーダによる観測結果^[14]によれば、非GPS機の経路維持誤差の分布は次の混合型両側指数(DDE)分布で近似できる。

$$f(y) = (1 - \alpha)DE(y|\lambda_{core}) + \alpha DE(y|\lambda_t) \quad (7)$$

ただし

$$DE(y|\lambda) = (2\lambda)^{-1} \exp(-|y|/\lambda) \quad (8)$$

で両側指数(DE)分布の確率密度関数(pdf)である。ここで、中心部(第1項)のパラメータ λ_{core} ($\lambda_{core} \equiv \lambda_c$) は $\lambda_c = 0.816$ NM、裾部(第2項)のパラメータは $\lambda_t = 5.26$ NM、そして $\alpha = 7.26 \times 10^{-4}$ である。なお、中心部は通常の誤差に関係し、裾部は故障や過誤などによる異常時の誤差と考えることもできる。

5.2 GPS機のモデル

GPS機の経路維持誤差の観測例ではその標準偏差 (1σ) は非GPS機のそれより一桁以上小さい^{[9][13]}ことが報告されている。なお、2000年5月2日よりGPSの選択利用性(SA)が解除されている。SA解除後は1桁程度の精度向上が期待できる。しかし、GPS機の経路維持誤差の標準偏差 σ_{GPS} の値は飛行技術誤差で殆ど決まるためさほど変化しない。そこで、本稿ではSAがある時点のGPSの精度で考察した。

ここでは文献^{[10][11]}を参考にし、中心部の分布が標準偏差 $\sigma_{GPS} = 0.066$ NM (飛行技術誤差の $1\sigma = 0.0625$ NM、GPSの測位誤差の $1\sigma = 0.02$ NMを仮定した見積)のDE分布に従うものとする。

すなわち、(7)式の横方向経路維持誤差の中心部のパラメータ λ_{core} はGPS機では $\lambda_{core} \equiv \lambda_g = \sigma_{GPS} / \sqrt{2} (= 0.047$ NM) とする。なお、裾部はGPS機の場合でも不変とし、 $\lambda_t = 5.26$ NM、 $\alpha = 7.26 \times 10^{-4}$ とする。

ここで、非GPS機、GPS機の分布のpdfをまとめると次のようになる。

$$f_c(y) \equiv (1 - \alpha)DE(y|\lambda_c) + \alpha DE(y|\lambda_t) \quad (9)$$

$$f_g(y) \equiv (1 - \alpha)DE(y|\lambda_g) + \alpha DE(y|\lambda_t) \quad (10)$$

ここで、添字 c は非GPS(従来型)機を g はGPS機を表す。図4に仮定した $f_g(y)$ と $f_c(y)$ の分布を示す。

5.3 実際の航空機全体についての分布

いま、考察する空域内の航空機はGPS機と非GPS機とから成るとする。当該空域内の航空機全体のうちGPS機の割合を γ とする。このとき、航空機全体の経路維持誤差の中心部のpdfは次式のようになる。

$$f(y) = (1 - \gamma)DE(y|0.816) + \gamma DE(y|0.047) \quad (11)$$

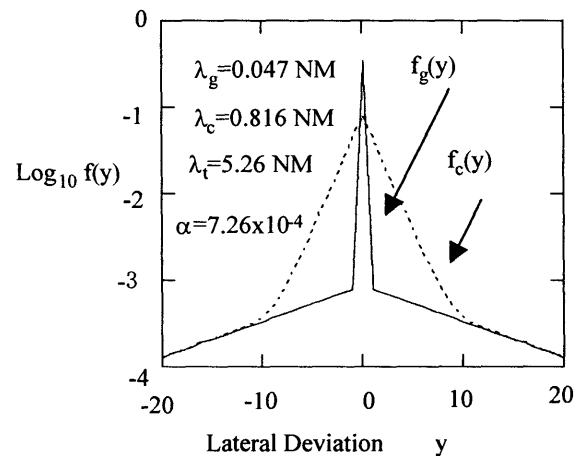


図4 GPS機と非GPS機の横方向経路維持誤差の確率密度関数モデル

6. オフセットの影響

6.1 オフセット適用の原則

ここでは、ルート間間隔 S_y の平行経路について、横方向の経路オフセットを次のように適用するものとした。

- 1) 同一ルート上で隣接フライトレベルの航空機対が共にGPS機の場合、いずれか一方の航空機を確率1/2でオフセットさせる。
- 2) オフセットの方向はランダムに左右とも確率1/2で、変移量は S_{off} とする。
- 3) GPS機の割合 γ はルート、フライトレベルによらず一定とする。

なお、空域内のどの航空機の飛行時間も同じとみなし、GPS機の飛行時間の割合は γ に等しいものとする。

以上の仮定の下で、同一フライトレベルで経路の間隔が S_y で隣接する平行ルートにおいて、

航空機対に割り当てられる間隔 S は5つ (S_y , $S_y + S_{off}$, $S_y - S_{off}$, $S_y + 2S_{off}$, $S_y - 2S_{off}$) の場合がある。表1に航空機対の組み合わせ、 S の値とその発生確率（[]内）を示す

表1 平行ルートにおける横間隔 S の確率分布。
[]内の値が確率

		GPS 機 [γ]			非 GPS 機 [$1-\gamma$]
オフセット量		$-S_{off}$ [$\gamma/4$]	$+S_{off}$ [$\gamma/4$]	0 [$\gamma/2$]	0 [$1-\gamma$]
GPS 機 [γ]	$-S_{off}$ [$\gamma/4$]	S_y [$\gamma^2/16$]	$S_y + 2S_{off}$ [$\gamma^2/16$]	$S_y + S_{off}$ [$\gamma^2/8$]	S_y [$\gamma(1-\gamma)$]
	$+S_{off}$ [$\gamma/4$]	$S_y - 2S_{off}$ [$\gamma^2/16$]	S_y [$\gamma^2/16$]	$S_y - S_{off}$ [$\gamma^2/8$]	
	0 [$\gamma/2$]	$S_y - S_{off}$ [$\gamma^2/8$]	$S_y + S_{off}$ [$\gamma^2/8$]	S_y [$\gamma^2/4$]	
非 GPS 機 [$1-\gamma$]	0 [$1-\gamma$]	S_y [$\gamma(1-\gamma)$]			S_y [$(1-\gamma)^2$]

6.2 平均横重畳確率

航空機対の機種（GPS 機か非 GPS 機か）の組み合わせにより割り当てられる横間隔 S は変化する。双方とも GPS 機である航空機対にのみオフセットを適用した場合、空域内の航空機対の横方向重畳確率の平均値（期待値）は次式で表せる。

$$\begin{aligned}
 P_y(S_y)_{av}^{off} &= \frac{\gamma^2}{16} P_{G,G}(S_y + 2S_{off}) \\
 &+ \frac{\gamma^2}{16} P_{G,G}(S_y - 2S_{off}) + \frac{\gamma^2}{4} P_{G,G}(S_y - S_{off}) \\
 &+ \frac{\gamma^2}{4} P_{G,G}(S_y + S_{off}) + \frac{3\gamma^2}{8} P_{G,G}(S_y) \\
 &+ \gamma(1-\gamma)[P_{C,G}(S_y) + P_{G,C}(S_y)] \\
 &+ (1-\gamma)^2 P_{C,C}(S_y) \\
 &\dots \dots \dots (12)
 \end{aligned}$$

ただし

$$P_{A,B}(S) \equiv \int_{S-\lambda_y}^{S+\lambda_y} C^*(u)_{AB} du \quad (13)$$

は、経路間隔が S で一方の経路上の航空機の経路維持誤差分布が f_A 、他方の経路上の航空機のその分布が f_B のときの重畳確率である。添え字の G は(10)式の f_g を用いたとき、 C は(9)式の f_c を用いたときに対応する。

6.3 横危険度比の導入

オフセット適用時の横危険度は、(1)式を用いると次のようになる。

$$N_{ay} = P_y(S_y)_{av}^{off} P_z(0) N_x^y(o)_{equi} K(o) \quad (14)$$

他方、オフセットを適用しない場合の横方向重畳確率の平均値は

$$\begin{aligned}
 P_y(S)_{av} &= \gamma^2 P_{G,G}(S) + 2\gamma(1-\gamma)P_{G,C}(S) \\
 &+ (1-\gamma)^2 P_{C,C}(S) \\
 &\dots \dots \dots (15)
 \end{aligned}$$

となる。なお、添字 G は GPS 機、 C は非 GPS 機の分布を用いることを意味する。

オフセット適用時と適用しない場合とを相対的に比較するには、それぞれの衝突危険度の比を考察すればよい。これは、交通量や垂直方向の航法精度が双方の場合について不変とすると、平均横方向重畳確率の比と等価である。

オフセット適用時と適用しない場合の横危険度の比 R_y は

$$R_y \equiv P_y(S_y)_{av}^{off} / P_y(S_y)_{av} \quad (16)$$

で評価できる。

6.4 垂直危険度比

同様に、GPS 機同士の航空機対にのみオフセット S_{off} のオフセットを加える場合を考える。このとき $P_y(0)$ の平均値 $P_y(0)_{av}^{off}$ は次のように表せる。

$$\begin{aligned}
 P_y(0)_{av}^{off} &= \gamma^2 P_{G,G}(S_{off}) + 2\gamma(1-\gamma)P_{G,C}(0) \\
 &+ (1-\gamma)^2 P_{C,C}(0) \\
 &\dots \dots \dots (17)
 \end{aligned}$$

このとき、垂直危険度は

$$N_{az} = P_y(0)_{av}^{off} P_z(1,000) N_x^z(o)_{equi} K(o) \quad (18)$$

で求まる。また、オフセット適用時と適用しない時の垂直危険度比 R_z を次式で定義する。

$$R_z \equiv P_y(0)_{av}^{off} / P_y(0)_{av} \quad (19)$$

7. 使用パラメータと計算結果

7.1 オフセットの有無による比較

オフセットの導入の効果は先に定義した横危険度比 R_y と垂直危険度比 R_z を調べれば明らかになる。NOPAC ルートを想定し、 $S_y=50\text{NM}$ 、 $\lambda_y=0.032\text{NM}$ 、 $S_{off}=0, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2\text{NM}$ として計算した。

図5は幾つかの S_{off} に対して計算した横危険度比 R_y と GPS 機の割合 γ との関係である。オフセット量の増大につれ R_y は増大する。 $S_{off}=2\text{NM}$

で R_y の増大は最大で7%程度である。

図6には垂直危険度比 R_z の変化を示す。0.1NM程度のオフセットの導入により R_z を著しく軽減できることがわかる。

表2 NOPACでの近接通過頻度（2000年3月）^[19]

	$N_x^r(o)$ [hour ⁻¹]	$N_x^r(s)$ [hour ⁻¹]
隣接ルート間 (r=y)	0.018	0.011
隣接FL間 (r=z)	0.0002	0.043

表3 使用パラメータ^[19]

パラメータ	推定値
$P_z(1000)$	1.7×10^{-8}
$P_z(0)$	0.41
λ_x	0.036 NM
λ_y	0.032 NM
λ_z	0.010 NM
$V_{rx}(s)$	28.9 kt
V_{ry}	11.6 kt
$V_{rx}(o)$	960 kt
V_{rz}	1 kt

7.2 衝突危険度

オフセットの影響を相対的に見るには危険度比をみればよいが、衝突危険度の絶対的な値についてはルートの交通流の特性である近接通過頻度などパラメータの値を知らねばならない。Amai and Nagaoka^[19]によれば2000年3月におけるNOPACルートの近接通過頻度は表2のとおりである。危険度の値をおおまかに見るため、この値と表3のパラメータ値を用いて N_{ay} と N_{az} を計算した。図7には横危険度 N_{ay} 、図8には垂直危険度 N_{az} の計算値を示す。

図7ではオフセットが無い場合、GPS機の割合の増大とともに N_{ay} が減少している。これは $P_y(S_y)_{av}$ がGPS機の高精度の影響で少し減少することによる。 S_{off} を大きくすると、表1のように、経路間間隔が S_y より小さくなる場合があり、これが N_{ay} を大きくする。しかし、 S が大きいとき $P_y(S)$ は(7)式の裾部に支配されるので N_{ay} の変化は少ない。

図8は N_{az} の変化特性である。オフセットが無いときは N_{az} は $P_y(0)_{av}$ に比例するので、 γ の増大とともに増加する。 S_{off} を0.2NMより大きくすると途端に $P_y(0)_{av}^{off}$ が S_{off} の量とともに小さくなり、結果として N_{az} が非常に小さくなる。

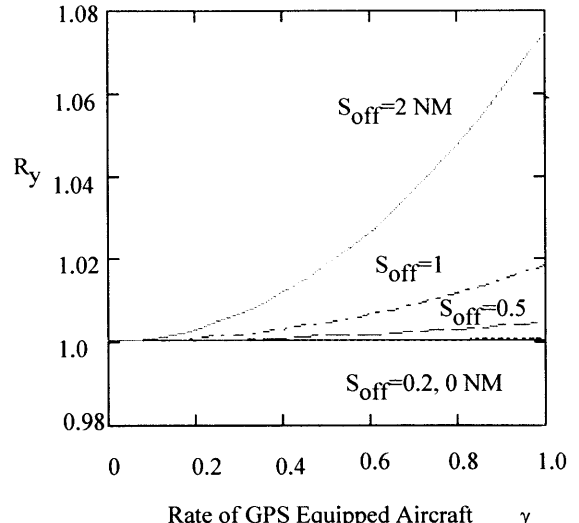


図5 横危険度比 R_y の変化特性

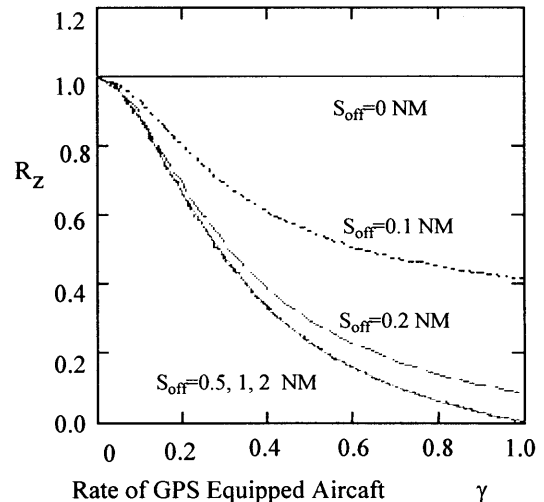


図6 垂直危険度比 R_z の変化特性

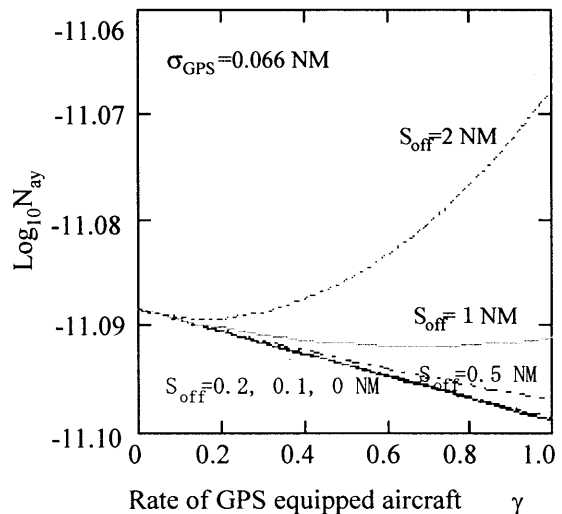


図7 横危険度 N_{ay} の変化

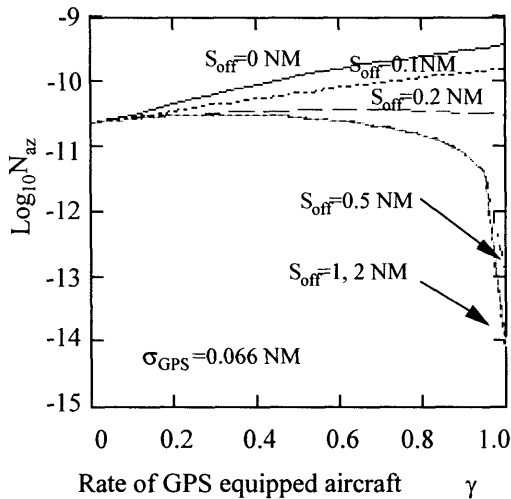


図8 垂直衝突危険度 N_{az} の変化特性

8. むすび

GPS機の増大に対処するため計画的オフセットを導入したとき、横方向の衝突危険度を増大させる恐れがあるが、この影響を数値計算により評価した。その結果、1 NM程度のオフセットでは、横方向の衝突危険度への影響は小さく、垂直衝突危険度の改善には大きな効果があることが明らかになった。

当然ながら、この影響はオフセットの適用の仕方にもよる。例えば近接通過頻度の高いルート対の間隔を広げ、頻度の低いルート対の間隔を狭めるようなオフセットの仕方をすれば、横方向の危険度の増大を抑えられる。こうした最適なオフセットの方法は今後の検討課題であろう。

参考文献

- (1) P.G Reich : "Long Range Navigation Systems: Separation Standards", Journal of Inst. of Navigation, vol.19, Nos.1,2 &3, 1966
- (2) Manual on Implementation of a 300 m (1000 ft) Vertical Separation Minimum between FL290 and FL410 Inclusive, ICAO Doc 9574-AN/934, 1992
- (3) E. Davies: "Effect of Increased Lateral Accuracy on Vertical Risk", ICAO RGCSP-WG/B-WP/2, Gold Coast, May, 1998
- (4) 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, 1998
- (5) 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
- (6) K. Hurrass: "Effect of Flying Offsets on Vertical Separation", IB-112-90/03, Report of Institute fur Flugfuhrung, DFVLR, Jan. 1990
- (7) K. Hurrass: "Systematic Offset for Aircraft using GNSS", Monitoring and Technical Task Force of the NSSG, Jan., 1997
- (8) B. Flax: "Effects on collision risk of the use of lateral offset", ICAO RGCSP-WG/A-WP12, St.Petersburg, May, 1999
- (9) O. Amai, S. Nagaoka: "Distribution of the cross track deviations for the FANS-1 equipped aircraft flying the North Pacific routes", ICAO RGCSP-WG/A-WP/14, St.Petersburg, May, 1999
- (10) T. McDavid, T. Murphy, G. Sotolongo: "GPS/IRS/FMS Integration for RNP Airspace Operations", ICAO RGCSP WG/A-WP/19, Brussels, Belgium, May, 1995
- (11) 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
- (12) O. Amai, S. Nagaoka: "Recent collision risk model parameters of the North Pacific Routes", ICAO RGCSP-WG/A-WP/15, St. Petersburg, May, 1999
- (13) G. Nezer: "Empirical data on lateral path-keeping accuracy of GPS-equipped aircraft", ICAO RGCSP-WG/A-WP/18, St. Petersburg, May, 1999
- (14) 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
- (15) B. Flax: "Effects on Collision Risk of the Use of Lateral Offsets to Avoid Wake Turbulence", ICAO RVSM-TF/4-WP/8, Brisbane, 9-13, Aug., 1999
- (16) 長岡 栄: "GPS 装備機の高度維持性能基準への影響の一考察", 日本航海学会論文集, 99号, pp.13-20, 平成10年9月
- (17) 天井, 長岡: "洋上航空路におけるGPS 装備機の航法精度の解析", 日本航海学会論文集, 102号, pp.27-35, 平成12年3月
- (18) 長岡 栄: "GPS 装備機の経路オフセットによる垂直衝突危険度の軽減効果", 日本航海学会論文集, 102号, pp.19-25, 平成12年3月
- (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