

20. 洋上航空路における航空機対の相対速度の推定

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に、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（北太平洋航空路）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、1998年4月から RNP10 承認機に対し 50NM（1 NM = 1852 m）の横間隔を用い、2000年2月からは短縮垂直間隔承認機に対し 1,000 ft（1 ft = 0.3048 m）の短縮垂直間隔を用いている。

北太平洋航空路では、縦（進行）方向の管制間隔に対し、現在の 10 分の時間間隔（距離に換算すると約 80NM）から 50NM の距離間隔への短縮が望まれている。

この短縮の前提として、航空機の位置情報の取得に自動従属監視（Automatic Dependent Surveillance: ADS）を用い、管制官と操縦士の通信に CPDLC（Controller - Pilot Data Link Communications）を用いることを考えている。

国際民間航空機関の管制間隔・空域安全パネル（Separation and Airspace Safety Panel: SASP）

（旧 RGCSP）では、縦間隔を短縮する際の安全性評価の方法が議論されてきた。SASP では、空域の安全性の尺度として、衝突危険度^[1]が主に用いられている。縦間隔短縮に際しては、縦間隔を失って衝突する危険度を推定する必要があるが、この縦方向衝突危険度の推定方法は Karppinen ら^[2]等により提案されている。

衝突危険度は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ため、対象空域の実測データにより衝突危険度モデルのパラメータを推定する必要がある。

本稿では、縦方向衝突危険度の重要なパラメータの一つである縦方向相対速度の分布を調べた。この分布は、Anderson 等^{[3][4]}により南太平洋における分布が報告されているが、レーダデ

ータを用いて調べた例は見あたらない。そこで、北太平洋航空路のルート R220 に注目し、釧路航空路監視レーダのデータを用いて調べた。

以下では、まず縦方向の衝突危険度モデルについて説明する。次に解析に使用したデータと観測空域を示す。そして縦方向相対速度の推定方法と結果を示す。

2. 縦方向の衝突危険度モデル

ここでは、同一経路上、同一高度（以降 FL と記す）を飛行する航空機対の縦（進行）方向の衝突危険度 N_{ax} を考える。 N_{ax} は考察空域内の航空機が縦間隔を喪失して起こる空中衝突事故件数（1 衝突 = 2 事故）の単位飛行時間あたりの期待値である。Karppinen ら^[2]のモデルでは、 N_{ax} は次式で与えられる。

$$N_{ax} = \Pi_x P_y(0) P_z(0) \left[\frac{V_{rx}}{2\lambda_x} + \frac{V_{ry}}{2\lambda_y} + \frac{V_{rz}}{2\lambda_z} \right] \quad (1)$$

ここで Π_x はある航空機が同一経路・同一 FL 上の他機と縦方向で重なる時間の割合で、次式で与えられる。

$$\Pi_x = \frac{4\lambda_x}{S_m} \int_0^{\infty} w(s) U(s) ds \quad (2)$$

ここで記号の意味は次の通りである。

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

$P_z(0)$: 垂直方向重畳確率（同一経路、同一 FL を割り当てられた航空機対が垂直方向で重なる確率）

V_{rx}, V_{ry}, V_{rz} : 縦・横・垂直方向の平均相対速度
 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$: 航空機の平均長、平均幅、平均高
 S_m : 縦間隔基準

$w(s)$: 同一 FL 上にある航空機対の公称間隔が s である確率の密度関数

$U(s)$: $t=0$ での航空機間の公称間隔が s のとき、 $t=T_r+\tau$ までの間に縦方向の重なりが生じ

る確率

T_r : ADS 位置通報の時間間隔

τ : 通信遅延や回避行動のための余裕時間（管制官が危険を認識し、回避指示が出して航空機が回避動作を始めるまでの時間）

文献[2]では $U(s)$ を次式で与えている。

$$U(s) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_x(v) F(s+v(T_r+\tau)) dv \quad (3)$$

ここで記号の意味は次の通りである。

$\phi_x(v)$: 縦方向相対速度の確率密度関数

$F(a)$: 2機間の公称の縦間隔が a のとき、航空機対の真の縦間隔が航空機的全長 λ_x 以下になる確率（航空機の縦方向の航法精度と ADS の位置予測誤差に関する値）

以下では、(3)式の $\phi_x(v)$ を推定する方法と結果を示す。

3. 使用データ

本稿では、北太平洋航空路の R220 における $\phi_x(v)$ を主に次のデータを用いて推定した。

- (1) 釧路航空路監視レーダ（Air Route Surveillance Radar : ARSR）のデータ
- (2) 飛行計画情報

3.1 釧路 ARSR の二次監視レーダ

釧路 ARSR には二次監視レーダ（Secondary Surveillance Radar : SSR）が付いている。SSR は質問信号を機上の自動応答装置に対して送信し、それに対する応答時間により、航空機的位置座標（レーダアンテナからの距離 r 、レーダ回転角 θ ）を測る。SSR では、応答信号から（機上の気圧高度計で測った）飛行高度 h および航空機の識別符号の情報が得られる。

解析には、SSR で得た位置座標を用いた。表 1 に釧路 ARSR に付属する SSR の諸元を示す。SSR の回転周期は 10 秒で、航空機的位置情報は約 10 秒毎の離散データとして得られる。

3.2 飛行計画情報

飛行計画情報には便名、機種名、識別符号、飛行経路上の各位置通報点の通過時刻および飛行高度など航空機の運航に関わる様々な情報が記載されている。ここで位置通報点とは、航空機がその上空を通過する際、管制機関に対して位置通報（通過時刻、飛行高度等の報告）を行

表 1 釧路 ARSR の SSR 部の諸元

項目	仕様（測定値）
空中線給電方式	ダイポールアレイ
空中線回転数	約 6 rpm
最大覆域	200 NM
周波数（送信）	1030 MHz
（受信）	1090 MHz
水平ビーム幅	1.55°
送信先頭電力	1 kW
送信繰り返し周波数	347.4 PPS
最小量子化単位	測距系 : 0.125 NM 測角系 : 0.088°

※釧路航空路監視レーダ事務所調べ

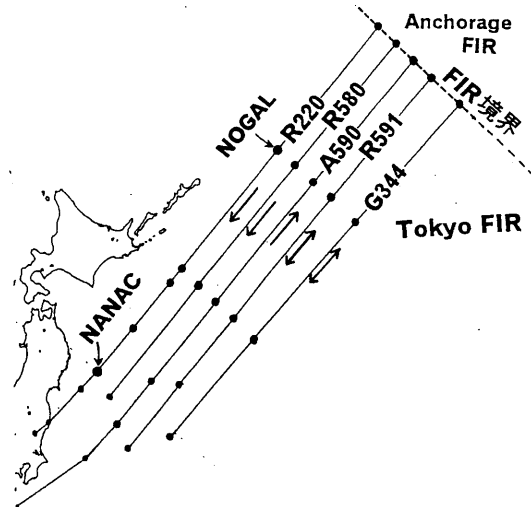


図 1 北太平洋航空路の概略

うために定められた地理上の地点である。

レーダデータからは位置通報点の通過時刻、高度、真対気速度等の情報が得られないため、飛行計画情報からそれらの情報を得た。

4. 観測空域

図 1 に北太平洋航空路の概略図を示す。北太平洋航空路は 5 本のルートで構成されており、R220, R580 が西行き用、A590 が東行き用の一方通行ルートである。R591, G344 は基本的には東行き用だが、時間帯により西行き便も飛行させている。

図 2 に観測空域を示す。図中の円は釧路 SSR の覆域（200 NM（2000 年 7 月からは 250 NM に拡張））を示す。釧路 SSR では、R220 および R580 が覆域内に入るが、R220 が西行き便の交通量の約 7 割を占めることから、R220 の方が観測できる距離が長いことから、R220 を

飛行した航空機を観測対象とした。

5. 解析方法

5.1 航跡データの作成

解析にあたり、まず SSR の測位データの追尾処理を行い、飛行便毎の航跡データを作成した。この際、レーダの測位値のランダム誤差を取り除くため、最小二乗法を使って航跡の平滑化処理を行った^[5]。

次に航跡データと飛行計画情報との照合を識別符号、時刻、飛行空域の情報を基に行い、航跡データに飛行計画情報のデータを付加した^[6]。

このように作成したデータから、R220を西向きに飛行した経路情報を持つ航跡を抽出した。

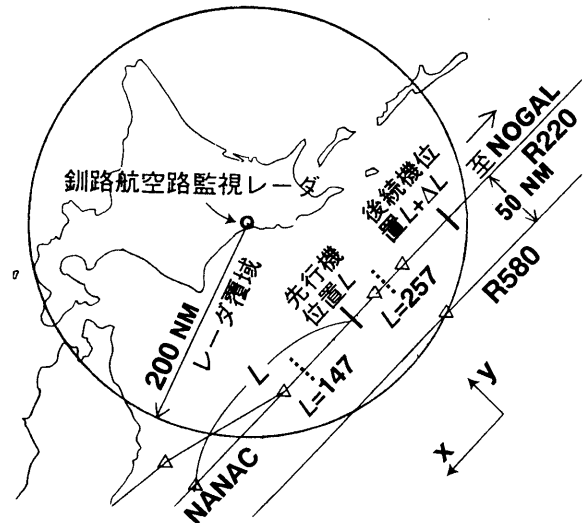


図2 観測空域

5.2 経路に対する観測位置の計算

上記の航跡データが経路に対してどのような位置にあるかを計算した。地球を真球とみなし、レーダから得られる (r, θ, h) の位置座標を球面三角法を用いて球面座標に変換し、航空機的位置座標を求めた。

そして、地球の中心と飛行経路を構成する2定点を含む平面を考え、航空機的位置座標からその平面に下した垂線の長さを経路と直交する方向の距離 y （横方向逸脱量）^[7]とした。

経路方向の距離 L は上記の垂線と平面の交点の位置座標と位置通報点 NANAC との距離を球面三角法により求めた。

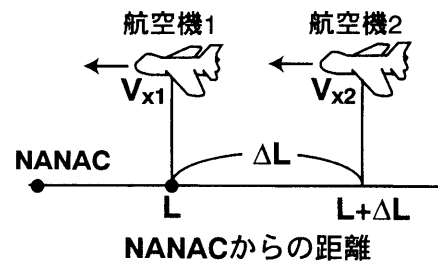


図3 縦方向相対速度の計算方法

5.3 縦方向相対速度の定義

図3のように航空機1が観測位置（NANACからの距離 L ）の上空に到達したときの航空機1の縦方向速度（対地速度）が V_{x1} であったとき、航空機1の後方（距離 ΔL ）を同一高度で飛行する航空機2の同時刻の縦方向速度が V_{x2} であったとする。このとき、縦方向相対速度 ΔV_x を次式で定義する。

$$\Delta V_x = V_{x1} - V_{x2} \quad (4)$$

実際の計算では、観測位置として $(L-5\text{NM}, L+5\text{NM})$ 内にある最も L に近い航跡データ的位置を使用した。後続機的位置は、先行機の観測位置における時刻に最も近い（10秒以内）航跡データ的位置とした。

5.4 縦方向速度の推定方法

R220の経路に沿う方向は、レーダの測角誤差の影響を受けやすい位置関係にあり、測位データにはこの誤差が含まれる。そこで、 V_{xi} を次の2つの方法で推定し比較した。

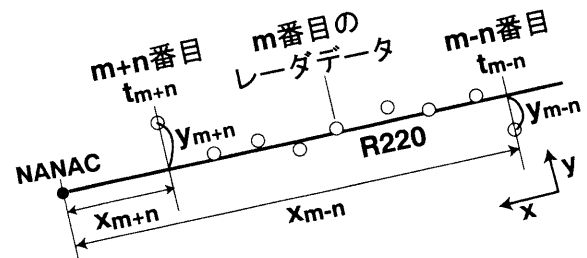


図4 縦方向速度の計算方法

5.4.1 2点の位置データから推定する方法

ここでは、一定時間内では航空機は等速度運動をしていると見なせると仮定した。図4で m 番目のデータ位置における速度を推定することを考える。 $m-n$ 番目のデータと $m+n$ 番目のデータの観測時刻、NANACからの距離、横方向逸脱量がそれぞれ $(t_{m-n}, x_{m-n}, y_{m-n})$ 、 $(t_{m+n}, x_{m+n}, y_{m+n})$ であるとき、次式で縦方向速度 V_{xp} および横方向速度 V_{yp} を推定した。

$$V_{xp} = \frac{x_{m+n} - x_{m-n}}{t_{m+n} - t_{m-n}} \quad (5)$$

$$V_{yp} = \frac{y_{m+n} - y_{m-n}}{t_{m+n} - t_{m-n}} \quad (6)$$

ここで、 $|V_{yp}| \geq 50$ kt (1 kt(knot) = 0.514 m/s)となる航跡は意図的な経路逸脱をしたものと見なして計算から除いた。

V_{xp} の推定誤差 ΔV_{xp} は、時刻の誤差がないと仮定した場合、(7)式で計算できる。

$$\Delta V_{xp} \cong \hat{V}_{xp} \frac{|dx_{m+n}| + |dx_{m-n}|}{x_{m+n} - x_{m-n}} \quad (7)$$

$$|dx_{m+n}| \cong |dx_{m-n}| \cong r\Delta\theta \cong r3\sigma_\theta \quad (8)$$

ここで dx は位置 x における経路方向の位置誤差で(8)式の近似を用いて $\sigma_\theta = 0.112^\circ$ ^[5]、 $r = 150$ NM (レーダアンテナと観測位置の距離)とし、 $\hat{V}_{xp} = 450$ knots、 $x_{m+n} - x_{m-n} = 49$ NM ($n = 19$)を用いると $\Delta\theta = 3\sigma_\theta$ と考えた場合 $\Delta V_{xp} = 16$ ktを得る。

5.4.2 最小二乗法により推定する方法

一定時間内では、航空機は等加速度運動をしていると見なせると仮定した。データ番号 m 位置の速度を推定する場合、 $m-n$ 番目のデータから $m+n$ 番目のデータ ($2n+1$ 個)を全て用いて、(9)式、(10)式に対する最小二乗法の計算を行い、係数 α_x 、 V_x 、 x_0 、 α_y 、 V_y 、 y_0 の推定値を求めた。そして(11)式で V_{xl} を計算した。

$$x = \frac{\alpha_x}{2} t^2 + V_x t + x_0 \quad (9)$$

$$y = \frac{\alpha_y}{2} t^2 + V_y t + y_0 \quad (10)$$

$$V_{xl} = \hat{\alpha}_x t_m + \hat{V}_x \quad (11)$$

5.4.1 節と同様に $|V_{yl}| \geq 50$ kt以上となる航跡は計算から除いた。

また、 V_x の推定値の標準偏差 σ_{vx} を計算し、 σ_{vx} が5NMを越えるものは計算から除いた。このため、2点の位置データから推定する方法に比べて使用できるデータが少なくなっている。尚、 σ_{vx} の分布の平均値は1.4 kt、標準偏差は0.66 ktであった。

6 結果

1993年5月1日から1994年4月30日の1年間のデータを解析した。期間中、18,477便がR220を飛行した。

6.1 縦方向相対速度の計算方法

(3)式の $\phi_x(v)$ の計算には、同一(真対気)速度を指定した航空機対の相対速度が必要となる。航空管制では、縦間隔を10分とする場合、マックナンバーテクニックを用いる。これは、対象となる2機にマック数(真対気速度に相当)を指定する管制方式である。

そこで、飛行計画情報中の先行機および後続機の観測位置に最も近い位置通報点の情報にマック数の記載があり、両機のマック数が同一の場合に限り縦方向相対速度 ΔV_x を推定した。

(5)式および(11)式を計算するにあたり、 $m-n$ 番目のデータと $m+n$ 番目のデータの間で、飛行高度を変更している航跡は計算から除いた。また $n=19$ として計算した。

6.2 縦方向相対速度の分布

図5に最小二乗法による方法で推定した観測位置 $L=147$ NMにおける ΔV_x の分布を示す。区間幅は5 ktである。図中には最尤推定法で当てはめた(12)式の正規分布の計算値を示した。

$$f(x; \sigma^2, \mu_N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu_N)^2}{2\sigma^2}} \quad (12)$$

文献[4]では、両側指数分布で ΔV_x の分布を近似できることが示されているが、図5の中心部は正規分布に近い。また、文献[4]の分布の平均値は0.085 ktであるが、図5では中央値が-4.7 ktである。これは後続機の方が先行機より速度が早い傾向にあることを示唆している。

この原因の一つとして、風の影響が考えられる。北太平洋航空路付近では、ジェット気流と呼ばれる偏西風が吹いており、最大風速は100 m/sを超えることもある^[8]。先行機の方がこの風の影響(向かい風方向)をより受ける場合には、後続機の対地速度の方が速くなる。

6.3 観測位置と縦方向相対速度分布の関係

図5のバイアスの原因が風の影響だとすると、このバイアスは観測位置により変化する可能性がある。そこで、観測位置 L を147 NMから

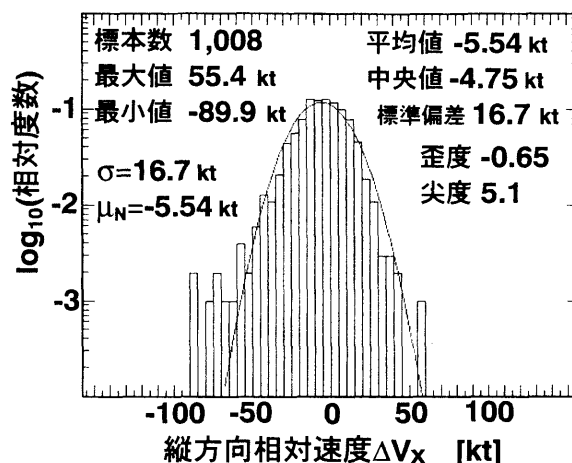


図5 縦方向相対速度の相対度数分布

表2 観測位置（NANACからの距離L）と縦方向相対速度の統計値の関係

L [NM]	標本数	最小値 [kt]	最大値 [kt]	中央値 [kt]	標準偏差 [kt]	DE分布		正規分布		対数尤度差 I _{DE} -I _N	
						λ [kt]	μ _{DE} [kt]	σ [kt]	μ _N [kt]		
147	LSM	1,008	-89.9	56.6	-4.7	16.7	12.7	-4.66	16.7	-5.54	-0.9
	2P	1,047	-86.9	56.9	-4.4	16.5	12.6	-4.30	16.5	-5.35	-3.4
157	LSM	963	-86.5	52.7	-4.5	16.3	12.5	-4.50	16.3	-5.13	-10.0
	2P	999	-86.6	52.5	-4.6	16.3	12.5	-4.60	16.3	-5.13	-9.7
167	LSM	888	-88.7	45.3	-4.4	15.9	12.1	-4.40	15.9	-4.94	-2.7
	2P	926	-89.4	45.4	-4.7	15.9	12.1	-4.66	15.9	-5.17	-3.6
177	LSM	842	-94.5	39.2	-4.5	15.0	11.5	-4.37	15.0	-4.71	-5.7
	2P	866	-93.2	41.5	-4.5	14.9	11.4	-4.44	14.9	-4.66	-10.6
187	LSM	959	-76.9	63.0	-4.1	14.4	11.1	-4.10	14.4	-4.53	-14.5
	2P	997	-72.5	63.7	-4.1	14.3	11.0	-4.10	14.3	-4.55	-15.7
197	LSM	852	-78.2	62.7	-3.5	14.3	11.1	-3.50	14.3	-4.27	-17.8
	2P	904	-77.9	61.0	-3.7	14.2	11.0	-3.70	14.2	-4.40	-14.9
207	LSM	762	-72.9	30.2	-3.2	13.6	10.6	-3.20	13.6	-4.02	-22.2
	2P	819	-72.0	30.8	-3.3	13.7	10.7	-3.20	13.7	-4.01	-23.9
217	LSM	646	-63.4	31.2	-3.7	13.3	10.3	-3.60	13.3	-4.07	-12.7
	2P	695	-62.0	29.5	-3.3	13.0	10.1	-3.28	13.0	-3.88	-14.1
227	LSM	582	-52.4	31.5	-3.0	12.9	9.9	-3.00	12.8	-3.67	-9.0
	2P	616	-53.3	31.2	-3.0	12.8	9.9	-3.00	12.8	-3.35	-10.3
237	LSM	482	-56.2	34.4	-3.4	13.5	10.3	-3.39	13.5	-3.81	-1.5
	2P	514	-54.6	44.5	-3.4	13.5	10.3	-3.40	13.5	-3.70	+1.6
247	LSM	383	-67.7	38.9	-2.9	13.8	10.2	-2.90	13.8	-3.21	+9.7
	2P	400	-66.8	43.9	-2.2	13.9	10.3	-2.21	13.9	-2.69	+11.2
257	LSM	270	-65.5	39.3	-2.1	14.4	10.5	-1.95	14.3	-2.40	+10.8
	2P	278	-62.4	39.7	-2.2	14.0	10.4	-2.10	14.0	-2.50	+7.5

上段は最小二乗法(LSM)による速度の推定結果を、下段は2点のデータ(2P)による推定結果を示す。

257 NM まで 10 NM 毎に変化させ、このときの ΔV_x の分布の変化を調べた。

表2に結果を示す。同一L中の上段は最小二乗法による推定結果を下段は2点のデータによる推定結果を示す。表中には(12)式の正規分布および(13)式の両側指数分布を最尤推定法で計算した場合のパラメータの値を示した。

$$g(x; \lambda, \mu_{DE}) = \frac{1}{2\lambda} e^{\frac{-|x - \mu_{DE}|}{\lambda}} \quad (13)$$

表中の対数尤度差 I_{DE}-I_N は、正規分布と両側指数分布の当てはまり具合の差を表し、符号が負の場合は正規分布の方が当てはまり具合が良く、正の場合はその逆を示す。L=247 NM 以上では両側指数分布の方が当てはまり具合が良いことが分かる。但し、この付近では標本数が400程度なので信頼性に注意する必要がある。

表2からは、2つの推定方法による相対速度分布の推定値には顕著な差異は見られない。

図6に観測位置Lと中央値、λ、σの関係を示す。Lの増加（東側に移動）に従って中央値の絶対値は減少する傾向にある。また、λとσはL=207 NM 付近に極小値が存在する。

6.4 2機間の距離と縦方向相対速度の関係

L=147NM のときの2機間の距離ΔLと縦方向相対速度ΔV_xの関係を図7に示す。横軸はΔL、縦軸はΔV_xを表す。

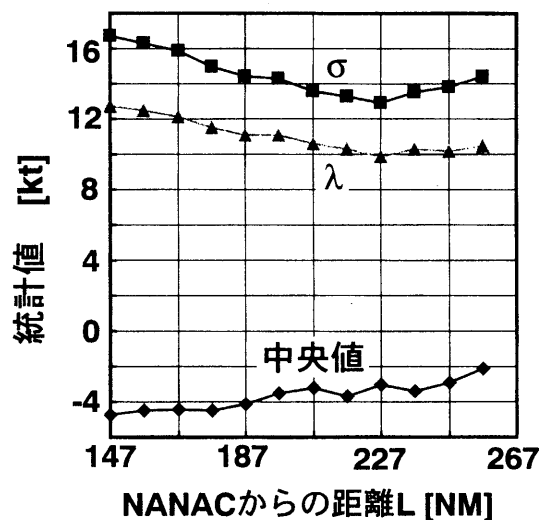


図6 観測位置Lと統計値の関係

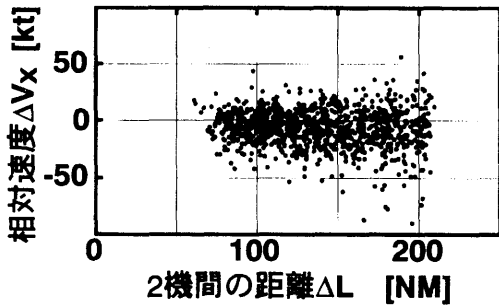


図7 2機間の距離 ΔL と相対速度 ΔV_x の関係

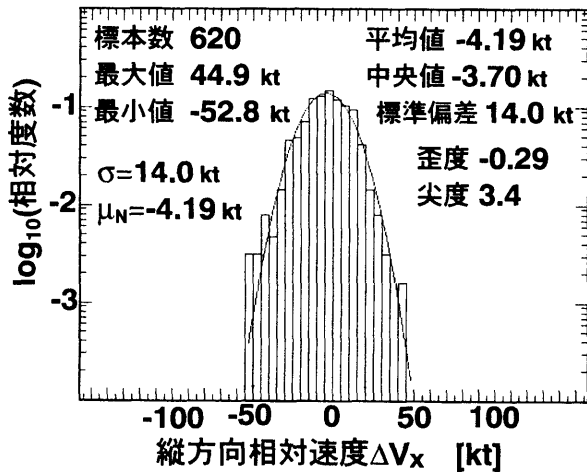


図8 $\Delta L \leq 150 \text{NM}$ のときの相対速度分布 ($L=147$)

ΔL の増加に従って ΔV_x のばらつきが大きくなる傾向が見える。 ΔL が 210 NM 付近までしかないのはレーダの覆域の関係で $L=370 \text{NM}$ 付近までしかデータが取得できないためである。

6.5 ΔL の範囲を制限した場合の ΔV_x の分布

$L=147 \text{NM}$ の観測位置で ΔL を 150 NM 以下のものだけを抽出して ΔV_x の分布を調べた。結果を図8に示す。

図5と比較すると標準偏差および中央値が ΔL の条件を付けないものより小さくなっている。標準偏差および中央値は表2の $L=197 \text{NM}$ 付近の値に相当する。

7. まとめ

1993年5月1日から1994年4月30日までの釧路航空路監視レーダデータおよび飛行計画情報を用いて、北太平洋航空路のR220における縦方向相対速度分布の推定を行った。この結果、次のことが明らかになった。

- (1) 観測位置 $L=147 \text{NM}$ における分布は中央値が -4.7kt 、中心部が $\sigma=16.7 \text{kt}$ の正規分布に近い分布である。

- (2) 2点の位置データによる縦方向速度の推定値と最小二乗法による推定値には顕著な差異は見られない。
- (3) 観測位置を東側に移動させるに従い、中央値は -4.7kt から -2.1kt の範囲で減少し、分布モデルの形状パラメータ λ 、 σ は $L=207 \text{NM}$ 付近で極小値をもつ。
- (4) 先行機と後続機間の距離が増加するに従って、縦方向相対速度のばらつきが大きくなる傾向がある。

以上のことから、北太平洋航空路における縦方向相対速度分布の推定では風の影響等を考慮する必要があり、実測分布の中心部の分布は正規分布に近く、バイアスを持っていることが分かった。

今後の課題としては、より多くの標本数での推定、最近のデータでの推定、北太平洋航空路におけるジェット気流の調査などがある。

[謝辞]

レーダデータおよび飛行計画情報の収集にご協力いただいた国土交通省の関係各位に感謝致します。

[参考文献]

- [1] Reich, P.G. : "Analysis of Long Range Air Traffic Systems", Journal of the Institute of Navigation, Vol.19, Nos.1, 2 and 3, 1966
- [2] Karppinen, N. and Anderson, D. : "A General Methodology Relating Navigation Performance to Longitudinal Distance Separation", ICAO RGCSWG/A-WP/9, Seattle, Sept., 1993
- [3] Anderson, D. and Karppinen, N. : "A Collision Risk Analysis Relating Navigational Performance to ADS Longitudinal Separation Minima for Initial ARINC 622 ADS Implementations", ICAO RGCSWG/A-WP/10, Shizuoka, Sept., 1994
- [4] 長岡 栄 : "縦方向衝突危険度モデルの解析的表現に関する一考察", 日本航海学会論文集, 105号, pp.143-148, 2001年9月
- [5] 天井, 長岡 : "航空管制用レーダの測角/測距誤差分布の解析", 電子情報通信学会技術研究報告, SANE89-1, pp.1-8, 1989
- [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号, pp.11-19, 1997
- [7] 天井, 長岡 : "洋上航空路における横方向経路逸脱量の解析 - II. ", 日本航海学会論文集, 88号, pp.235-242, 1994
- [8] 中山 章 : 「航空気象」, 日本航空機操縦士協会, pp.139-154, 1993