

2. MTSAT 運用下での縦方向衝突リスクの推定

航空交通管理領域 ※藤田 雅人、長岡 栄、天井 治

1. 導入

衛星通信を用いた ADS-C（自動従属監視）と呼ばれる高精度の監視が可能になってきている。日本では MTSAT（運輸多目的衛星）導入に伴い、ADS-C による洋上航空路での縦・横方向の管制間隔の短縮が期待されている。

管制間隔の短縮は航空機の安全な運航に影響を与えうる手順の変更であり、変更後も安全な運航が保証できるか否かを確認する必要がある。北太平洋航空路(NOrth PACific routes, NOPAC routes, 図 1)の西行き航路 R220 及び R580 で縦間隔 50NM の短縮管制間隔が実施された時の交通流を予測し、それをもとに安全性検証を実施したので報告する。

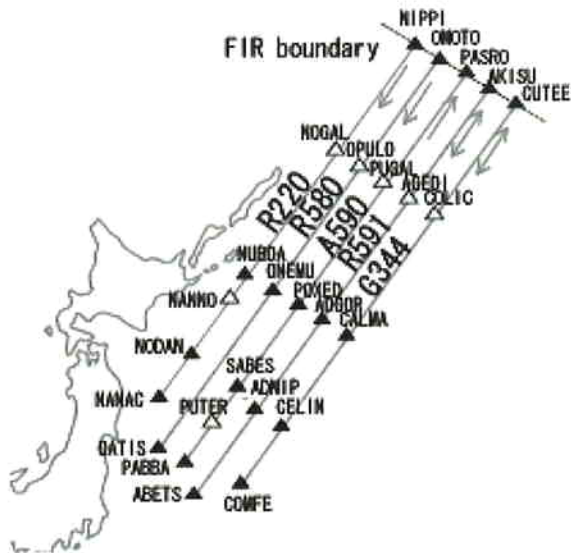


図 1：NOPAC ルート

2. ADS-C

航空機の運航を監視するためには、航空機の現在位置を知る必要がある。ADS-C では、航空機が GPS 受信機等の機上装置で測定した自機の位置を通信衛星（MTSAT 等）経由で定期的送信している。航空機は FMS（Flight Management System）が計算した自機の次の通報時刻での予測位置を併せて送信している。

そして、管制システムは受信した航空機の位置と予測位置から内挿によって現在位置を予測している。

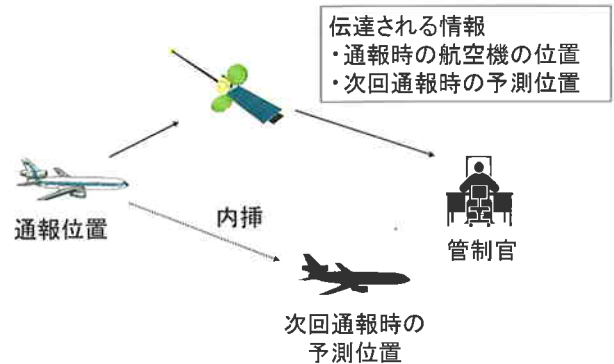


図 2：ADS-C

3. 衝突リスク推定概論

安全性の指標は考察している事象によって異なるが、航空機の衝突リスクを考察する場合、当該空域の1単位飛行時間当たりの事故数の期待値を用いることが多い。推定された衝突リスクがあらかじめ設定された目標安全度（Target Level of Safety, TLS）を下回っていた場合、リスクは許容されるレベルであると考えられる。目標安全度としては、 5.0×10^{-9} (fatal accidents/flight hour) の値が用いられることが多い。

衝突リスクと目標安全度の比較により安全性評価を実施する場合、衝突リスクの推定が不可欠となる。しかし、航法・監視・通信方法、測位等の誤差、航空路の構成、交通流、ヒューマンファクター、航空機のサイズ・形状、航空機の速度などの様々な要因が重なって、航空機の衝突に至ることが予想されるため、推定にあたっては考慮しなければいけない要素も多い。

本稿では、確率・数値計算などの理論や手法を援用して、航法・監視・通信方法及び測位誤差から所与の名目距離間隔で飛行している航空機の衝突リスクを求める。交通流はファストタイムシミュレーションによって予想する。その二つの結果を併せて、最終的な衝突リスクを推

定する。

4. 北太平洋航路（NOPAC）の交通流シミュレーション

西行き航路 R220 及び R580 を 2004 年 4 月から 2005 年 3 月までに利用した航空機の FDP（Flight Data Processing）データを用いて、短縮管制間隔の下での航空交通流を予想した。考察区間は R220 が NIPPI-NUBDA 間、R580 が OMOTO-ONEMU 間である（図 1 参照）。FDP データには飛行計画情報ならびに実際の通過位置通報点名、通過時刻、通過速度、通過高度が含まれている。短縮管制間隔が実施されても希望経路・高度等の傾向は変わらないと仮定し、以下の方法で短縮管制間隔下での航空機の希望フライトスケジュール（経路・位置通報点通過時刻・通過高度）を構成した。

飛行計画に記された経路等の情報から航空機が希望する飛行経路及び希望飛行高度を抽出した。実データから計算される航空機の対地速度と飛行計画に記載された対気速度の間に大きな開きのあるデータが少なくない。よって、航空機の対地速度を可能な限り希望フライトスケジュールの速度として採用した。そうでない場合には、実データを用いて希望速度を修正した。東京 FIR（飛行情報区）境界にある位置通報点の希望通過時刻として、その航空機が東京 FIR 境界にある位置通報点を通過した時刻を採用し、その他の位置通報点では希望速度と位置通報点間の距離から算出される値を希望通過時刻として用いた。

構成された希望フライトスケジュールをもとに短縮管制間隔が実施された場合の航空機のフライトスケジュールを構成した。

各航空機のフライトスケジュールは東京 FIR 境界の希望通過時刻順に、図 3 のフローチャートに従って決めていくものとする。フライトスケジュール候補の作成は表 1 に従うものとする。表 1 では、経路の欄が○の時には構成されるフライトスケジュール候補の経路は希望経路の隣の経路になる。高度の欄は構成されるフライトスケジュールと希望フライトスケジュールの高度の差を表している。航空機には燃料消費量の点から最適高度が存在し、その上下の高度を飛

行する場合、上の高度帯を飛行した方が燃料消費量の点から有利であることから、表 1 のような優先順位とした。

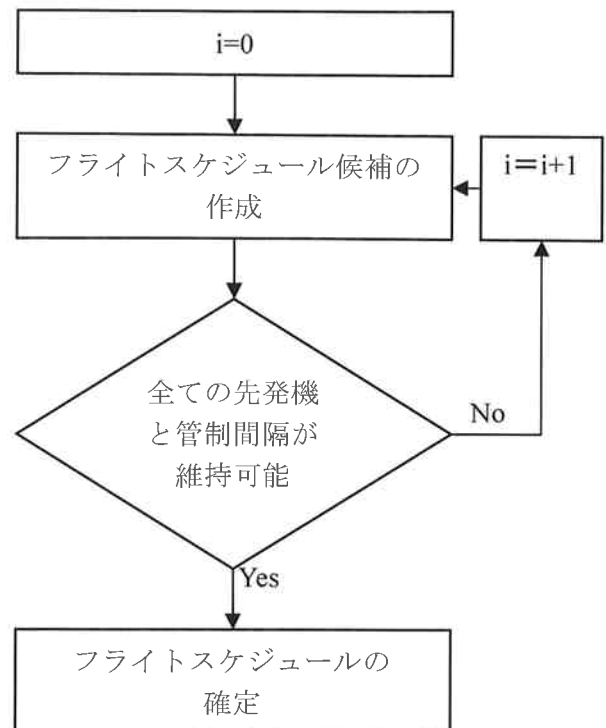


図 3：フライトスケジュール構成フローチャート

表 1：フライトスケジュール候補作成手順

i	経路	高度
0	×	+0ft
1	×	+1000ft
2	×	-1000ft
3	×	+2000ft
4	×	-2000ft
5	○	+0ft
6	○	+1000ft
7	○	-1000ft
8	○	+2000ft
9	○	-2000ft
10	×	+3000ft
11	×	-3000ft

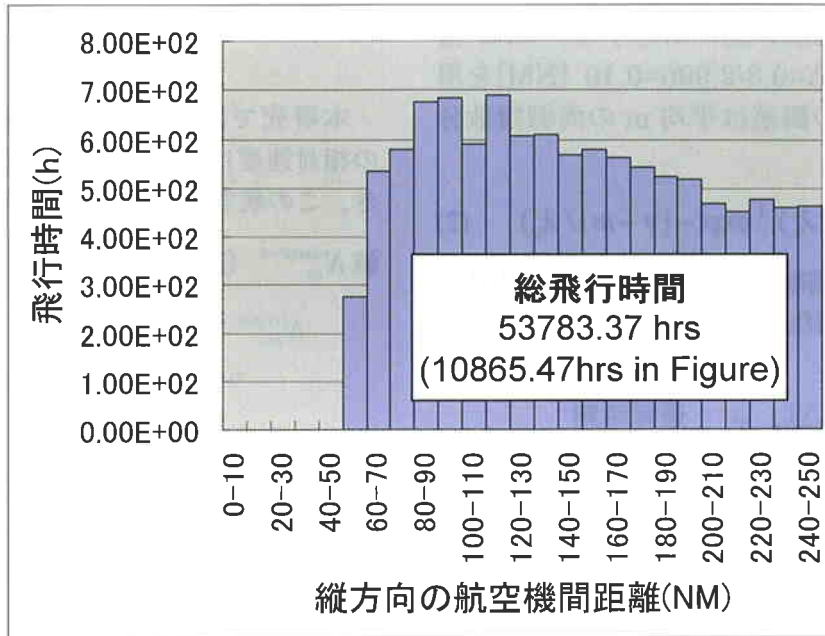


図 4：シミュレーション結果（名目距離の分布）

ただし、上記のシミュレーションでは以下が仮定されている。

- 航空機は隣接位置通報点間を一定速度で飛行する。
- 航空機の高度変更は高度変更希望が記載されている位置通報点において瞬時に行われる。

構成されたフライトスケジュールをもとに、航空機対の距離と相対速力の2次元分布を構成した。図4はこの分布の周辺分布を表している。

5. 衝突リスク計算式

管制システムの画面に表示されている航空機の位置は、航空機の実際の位置とは異なる。航空機から送信されてきた現在位置と予測位置の値には誤差が含まれているからである。この結果、管制システムの位置把握誤差は管制システムが航空機からの通報を受信してから、次の通報受信まで増加する傾向にある。図5はその様子を模式的に表している。以下、通報周期を T で表すこととする。本邦の現在のシステムでは $T=27$ 分となっている。

同じ直線航路、同じ高度を前後して飛行している航空機対を考える。管制システムが把握し

ている二機の航空機間の距離を名目距離と呼び、 D と表す。管制システムは通報された通報時の航空機の位置と次の通報時の航空機の予測位置から航空機を速度を推定している。この章では、1飛行時間あたりの衝突事故数の期待値

$N_{ax}^{ave-v,eq,t}(D)$ を表す計算式を紹介する。

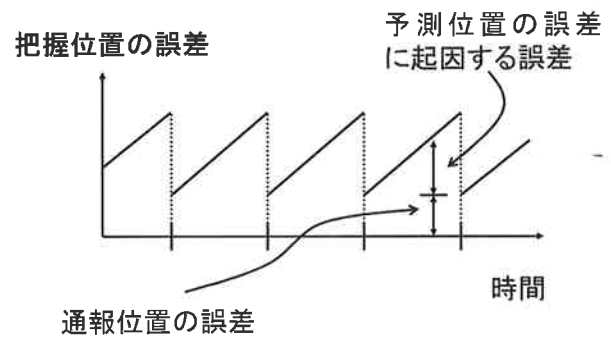


図 5：誤差の時間変化

航空機の通報位置の縦成分の誤差は(1)式の確率密度関数を持つ両側指数分布に従うとする。

$$f_x(x) = (2\lambda)^{-1} \exp(-|x|/\lambda) \quad (1)$$

ただし、変数 λ の値は GPS 搭載機と非搭載機では異なる値を用いる。非搭載機に対しては

$\lambda=10/2.996=3.34$ [NM]を用いる。これはRNP10相当の航法誤差に対応する。GPS搭載機に対しては $\lambda=0.3/2.996=0.10$ [NM]を用いた。推定速度の誤差は平均 m の両側指数分布に従う。

$$f_v(v) = (2\lambda_v)^{-1} \exp(-|v-m|/\lambda_v) \quad (2)$$

(2)式が確率密度関数である。 $\lambda_v=5.7$ [NM/hr]かつ $m=-5.62$ [NM/hr]となる。^[1]

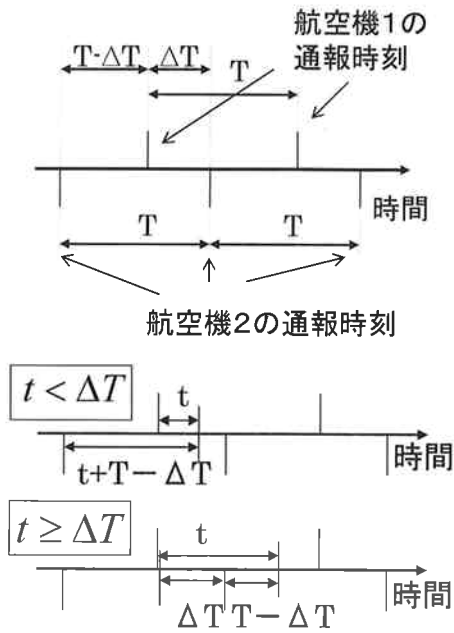


図 6：通報周期のズレ

二機の航空機の通報周期のズレを ΔT とし、 t を先行する航空機の先の通報時刻からの通報時間とする(図6)。 x_1, x_2 は各々二機の航空機の通報位置の縦成分の誤差を、 v_1, v_2 は推定速度の縦成分の誤差であるとする。このとき、全体の誤差の縦方向の成分は

$$d = \begin{cases} x_1 - x_2 + v_1 t - v_2 (t + T - \Delta T) & t < \Delta T \\ x_1 - x_2 + v_1 t - v_2 (t - \Delta T) & t \geq \Delta T \end{cases} \quad (3)$$

で表される。本研究では $\Delta T=0$ とした。この仮定は、二機の航空機が同期をとってADS-Cレポートを通報するのに相当する。 $f_x(d; v_1, v_2, t)$ を変数 v_1, v_2, t を固定値と考えたときの確率変数 d の確率密度関数とする。この関数は積分計算を行うことにより解析的に計算することが出来る。

(v_1, v_2, t を固定値と考えたときの)縦方向重畳確率 $P_x(D; v_1, v_2, t)$ は以下の式で表される。

$$P_x(D; v_1, v_2, t) = \int_{D-\lambda_x}^{D+\lambda_x} f_x(d; v_1, v_2, t) dx \approx 2\lambda_x f_x(D; v_1, v_2, t) \quad (4)$$

本研究では相前後して飛行する航空機の相対速度は0であると仮定した。このとき、この航空機対による衝突事故数の期待値 $N_{ax}^{const-v}(D, v_1, v_2, t)$ は

$$N_{ax}^{const-v}(D, v_1, v_2, t) = 2P_y(0)P_z(0)P_x(D, v_1, v_2, t) \times \left(\frac{|v_1 - v_2|}{2\lambda_x} + \frac{|v_y|}{2\lambda_y} + \frac{|v_z|}{2\lambda_z} \right) \quad (5)$$

となる。ここで、 $\lambda_x=0.036$ NM, $\lambda_y=0.032$ NM, $\lambda_z=0.010$ NMはそれぞれ航空機の平均機長、翼長、機高を表し、 $|v_y|=20$ kts, $|v_z|=1.5$ ktsは横、鉛直方向の相対速力の平均値である^[4]。鉛直方向重畳確率は $P_z(0)=0.5380$ で与えられる^[3]。横方向重畳確率は航空機対がGPS機同士の場合は $P_y(0)=P_y^{GG}(0)=0.659$ 、GPS搭載機・GPS非搭載機という航空機対に対しては $P_y(0)=P_y^{Gn}(0)=0.0381$ 、非搭載機同士の場合には $P_y(0)=P_y^{nn}(0)=0.0196$ を用いる。これらの値は文献[6],[7]で与えられた航空機の横方向の経路からの逸脱量の分布モデルに基づいてMathematicaを用いて導き出された。

二機の航空機がともにGPS搭載機であると仮定して計算した $N_{ax}^{const-v}(D, v_1, v_2, t)$ の値を $N_{ax}^{GG}(D, v_1, v_2, t)$ と書く。ともに非搭載機であると仮定して計算した計算値を $N_{ax}^{nn}(D, v_1, v_2, t)$ と書く。GPS搭載機と非搭載機の対に対して計算した計算値は $N_{ax}^{Gn}(D, v_1, v_2, t)$ で表すこととする。

実際の空域ではGPS搭載機と非搭載機が混在する。FDPデータによるとNOPACルートを飛行する航空機の現在のGPS搭載率は約30%である。GPS搭載率を a とした時の平均的な衝突リスクは次の(6)式で与えられる。

$$N_{ax}^{ave-eq}(D, v_1, v_2, t) = a^2 N_{ax}^{GG}(D, v_1, v_2, t) + 2a(1-a)N_{ax}^{Gn}(D, v_1, v_2, t) + (1-a)^2 N_{ax}^{nn}(D, v_1, v_2, t) \quad (6)$$

ΔT=0 の時、(3)式から $f_x(d;v_1,v_2,t)$ は変数 $v_{rel}=v_1-v_2,t$ の関数であることが見て取れる。したがって(4),(5)式より $N_{ax}^{ave-eq}(D, v_1, v_2, t)$ も v_{rel}, t の関数であることがわかる。それを $N_{ax}^{ave-eq}(D, v_{rel}, t)$ で表す。確率変数 v_{rel} は(2)式を畳み込み積分することにより

$$f_{rel}(v_{rel}) = \frac{1}{2} \left(\frac{|v_{rel}| \exp(-|v_{rel}|/\lambda_v)}{2\lambda_v^2} + \frac{\exp(-|v_{rel}|/\lambda_v)}{2\lambda_v} \right) \quad (7)$$

という確率密度関数を持つことがわかる。速度誤差は管制が制御できない確率変数であるので、航空システムの安全性の指標としては $N_{ax}^{ave-eq}(D, v_{rel}, t, T)$ そのものよりも v_{rel} に関する期待値の方が望ましい。

$$N_{ax}^{ave-v,eq}(D, t) = \int_{-\infty}^{\infty} N_{ax}^{ave-eq}(D, v_{rel}, t) f_{rel}(v_{rel}) dv_{rel} \quad (8)$$

時間 t は一様分布していると仮定してよい。したがって、航空機間距離 D が定数である時の衝突リスクは

$$N_{ax}^{ave-v,eq,t}(D) = \frac{1}{T} \int_0^T N_{ax}^{ave-v,eq}(D, t) dt \quad (9)$$

で与えられる。

本研究では、通信のアップリンク、航空機の回避行動等の衝突回避所要時間 τ を考慮に入れた式を構成しなかった。しかし、 τ は無視できないほど大きいので、 τ を考慮した衝突リスク

$N_{ax}^{ave-v,eq,t}(D, \tau)$ を文献[5]と同様に暫定的に

$$N_{ax}^{ave-v,eq,t}(D, \tau) = \frac{1}{T} \int_0^{T+\tau} N_{ax}^{ave-v}(D, t) dt \quad (10)$$

で計算することとした。

6. 最終結果の導出

NOPAC 交通流シミュレーションの結果として、2004年4月から2005年3月までの各月の名目距離 D の経験分布（確率密度関数を $f_{D,mon}(D)$ とおく。ただし、 mon は月を表すパラメータである）が求まる。一方、アップリンク所要時間を除いた衝突回避行動に必要な時間は2分30秒である(表2)。表2ではアップリンク所要時間の欄が α になっている。その値は日本における各月での実績値(表3)を用いる。

表2,3をもとに各月での衝突回避行動の所要時間 τ のなす経験分布(離散分布)を求めることが出来る。その確率密度関数を $u_{mon}(\tau)$ とおく。

表2：衝突回避行動とその所要時間^[5]

項目	時間(秒)
スクリーンの更新・管制官によるコンフリクトの認識	30
送信メッセージの構成	15
アップリンク所要時間	α (表3)
パイロットの反応に要する時間	30
航空機の慣性飛行状態から上昇・下降に至るのにかかる時間	75
合計	150+ α

表3：アップリンク実績(M.A.の受け取り時刻-ODPにおけるアップリンク送信時間)

Jan. 2005	
No. of msg.	19817
Max.	0:05:19
10(s) ≥ X	11906 (60.1%)
20(s) ≥ X	4947 (85.0%)
30(s) ≥ X	1406 (92.1%)
60(s) ≥ X	1000 (97.2%)
90(s) ≥ X	174 (98.1%)
120(s) ≥ X	101 (98.6%)
180(s) ≥ X	53 (98.8%)
180(s) < X	230 (100.0%)

名目距離 D の分布 $f_{D,mon}(D)$ および衝突回避行動に要する所要時間 τ のなす経験分布 $u_{mon}(\tau)$ を用いて、式(11),(12)により各月の平均的な衝突リスク $N_{ax,mon}^{total-ave}$ を計算することが出来る。

$$N_{ax,mon}^{ave-v,eq,t,D}(\tau) = \sum_D N_{ax}^{ave-v,eq,t}(D, \tau) f_{D,mon}(D) \quad (11)$$

$$N_{ax,mon}^{total-ave} = \sum_{\tau} N_{ax,mon}^{ave-v,eq,t,D}(\tau) u(\tau) \quad (12)$$

7. まとめ

NOPAC ルートにおいて 50NM 短縮縦間隔実施に先立ち、事前安全性評価を実施することを目的として本研究を実施した。

短縮間隔が実施されたときの交通流を予測するためにファストタイムシミュレーションを実施した。一部、非現実的な仮定を用いた部分もあるが、飛行計画の情報を使うことで、詳細なファストタイムシミュレーションを実施することが出来た。

一方で、ADS-C の監視特性を考慮した衝突リスク評価式を開発した。この評価式は管制官とパイロットの衝突回避行動についてあまり考慮されていない。また、名目相対速度・ADS-C 通報周期のずれ等も考慮されていない。現在、後者を考慮したモデルを開発中である。

以上の研究結果及びアップリンクの所要時間の実績値を用いて、将来の航空交通も 2004 年 4 月～2005 年 3 月の航空交通と傾向が変わらないという仮定の下で、推定衝突リスクを計算した。その結果、2005 年 1 月のデータを用いて計算した推定値が 2.58×10^{-9} ともっとも大きかった。この値は目標安全度の 5.0×10^{-9} の値を下回っており、短縮縦方向管制間隔が導入されても安全性が保証できることが確認された。

しかし、シミュレーションでは数々の仮定の下に交通流を予測するに過ぎず、多かれ少なかれ、予測交通流と実際の交通流は異なることとなる。したがって、実際に短縮管制間隔が導入された後に再度、実交通流データを用いて安全性検証を行うことが不可欠である。

謝辞

シミュレーションに用いた FDP データならびにアップリンク所要時間の表を提供して下さった国土交通省航空局の関係各位ならびに解析作業の補助をして下さった河田・中下両氏に感謝します。

参考文献

- [1] Kodo, T., Nagaoka, S and Amai, O, Analysis of Prediction Error of an ADS, ICAO, SASP-WG/WHL/1-WP/33, Canberra, May 2002.
- [2] Reich, P.G., Analysis of Long Range Air Traffic Systems – Separation Standards I, II & III, Journal of the Institute of Navigation, Vol.19, Nos.1, 2 & 3, 1966
- [3] MAAR, Summary of the Airspace Safety Monitoring Review for the RVSM implementation in Asia Region, ICAO RASMAG/3, Bangkok June, 2005
- [4] 長岡栄, "縦方向衝突リスクモデルの解析的手法に関する一考察", 日本航海学会論文集 Vol.105, Sep., 2001
- [5] Anderson, D., A Collision Risk Model Based On Reliability Theory That Allows For Unequal RNP Navigation Accuracy, ICAO SASP-WG/WHL/7-WP/20
- [6] 天井治, 長岡栄, "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, Vol.96, March 1997
- [7] Amai, O., Nagaoka, S., Evaluating the lateral navigation accuracy of GPS equipped aircraft on a north Pacific route using radar data, Proceedings of 2003 International Symposium on GPS/GNSS, Tokyo, Nov., 2003