

22. 航空衛星データ通信の性能と容量のシミュレーション

衛星技術部 ※住谷 泰人 石出 明

1. はじめに

航空衛星通信では、多数の航空機がほぼ同時帯に同一の通信回線を介してデータ通信を行うと、通信の輻輳により、伝送遅延の増加等通信性能の劣化が起こる可能性がある。このような通信性能の劣化は、航空管制に大きな影響を与えるおそれがあるために、許容できない通信性能の劣化が起こる通信条件や、1回線当たりの取扱い機数等をあらかじめ定量的に把握する必要がある。

航空衛星通信ネットワークにおける通信性能は、簡単なモデルであれば待ち行列理論^[1]を用いて理論的に解析できる。しかし、実際のネットワークは複雑であるため、通信プロトコルモデルを利用した計算機シミュレーションを用いるのが一般的な解析手法である。通信プロトコルを正確にモデル化してシミュレーションを行うことにより、実際に起こりうる様々な通信トラフィック条件に対する通信性能を予測できる。

当所では、これまで ICAO 航空衛星通信技術標準（AMSS SARPs：航空移動衛星業務の標準及び勧告方式，AMSS：Aeronautical Mobile Satellite Services，SARPs：Standards and Recommended Practices）に基づく航空衛星データ通信^[2]において、多数の航空機が同一時間帯に通信を行う場合の通信性能を検証するために、計算機シミュレーションを行ってきた^[3]。本報告では、この通信プロトコル（通信を行う上で送信側と受信側で決めた約束のことで、別名、通信手順ともいう）で ADS（Automatic Dependent Surveillance：自動位置情報伝送・監視機能）レポートを伝送する場合の計算機シミュレーションにより得られた航空機数と通信性能の関係、及び1回線当たりの取扱い機数を報告する。次に、その結果から所要チャンネル数が得られる方法を述べる。

2. 航空衛星通信の概要^[2]

2.1 構成

図1に航空衛星回線の構成を示す。GES

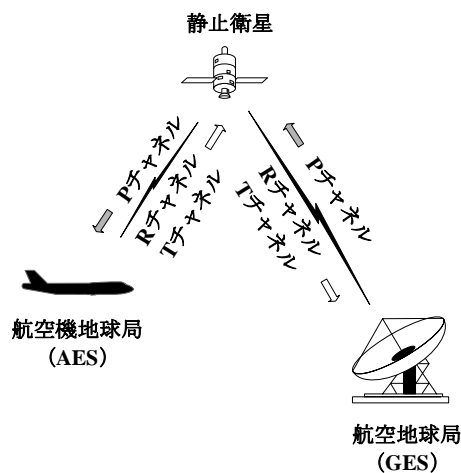


図1 航空衛星回線の構成

（Ground Earth Station：航空地球局）と AES（Aircraft Earth Station：航空機地球局，以下「航空機」ともいう）の間では、静止衛星を介して双方向のデータ通信が可能である。GESからAESの回線では、各航空機宛のデータを早いものから順番に送信する時分割多重（TDM：Time Division Multiplex）方式のPチャンネルが用いられる。また、AESからGESの回線では、各航空機からデータをいつでも送信できるRチャンネルと、GESから送信スロットの割り当てを受けてデータを送信する予約時分割多元接続方式（TDMA：Time Division Multiple Access）のTチャンネルの2通りの方式がデータ通信に用いられる。データ伝送速度は、両方向とも、0.6、1.2、2.4、4.8及び10.5 kbpsがSARPsに規定されている。本シミュレーションでは、上記のすべての伝送速度が可能であるが、ほとんどの現用GESでは0.6及び10.5 kbps（一部では1.2 kbpsも可能。）に対応している。

2.2 ADSレポートの伝送手順

図2にADSレポートを伝送する場合の手順を示す。航空機ではADSレポートを作成すると、Rチャンネルを用いて、GESにTチャンネル送信スロット割り当て要求を送信する。GESでは、この要求に基づき、ADSレポートの伝送のための

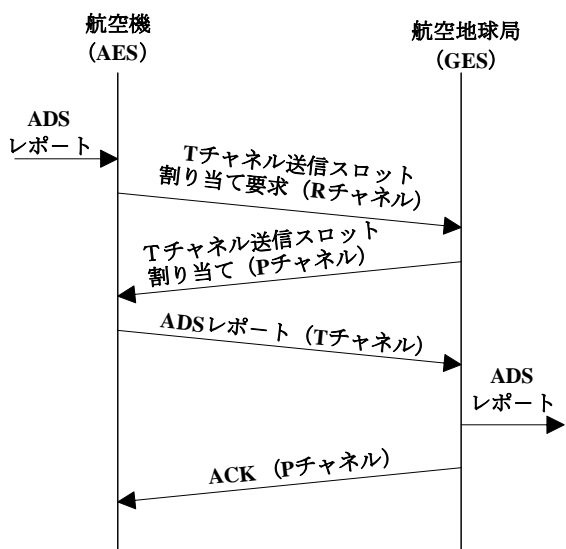


図2 ADS レポートの伝送手順

送信スロットを割り当て、Pチャンネルによりその割り当て情報を航空機に知らせる。航空機では、割り当てられたTチャンネル送信スロットで、ADSレポートを送信する。ADSレポートが正しく受信されたかどうかは、Pチャンネルにより、ACKと呼ばれる確認信号をGESから航空機に通知する。この手順は、地上側から指定された時間間隔で、周期的に繰り返される。

3. 通信性能予測シミュレーションの方法

図3に通信性能予測シミュレーションの概念を示す。通信トラフィック・モデルでは、伝送データ長、伝送間隔、伝送形態（周期的またはランダム）等の通信トラフィック条件を設定する。計算機シミュレーションは、その設定に従って、通信シミュレーションソフトウェアを用

いて高速で実施され、伝送遅延時間、伝送効率等の通信性能が出力される。通信トラフィック・モデルとしては、例えば「100のAESが10octet（octetは8ビットに相当する）のデータを指数分布に従うランダムな伝送間隔（平均伝送間隔20秒）で伝送する。」という内容になる。

計算機シミュレーションは、プロトコルシミュレータOPNET（米国MIL3社製）上で、航空衛星通信評価用プロトコルモデルASET（米国Mayflower社製）を改造したものを使用して行った。ASETは、ICAOのAMSS SARPに適合したデータ通信プロトコルに対応している。図4に、航空機が10機の場合のネットワーク構成例を示す。ASETでのネットワークは、AES、GES及び衛星（Satellite）からなる。設定可能な

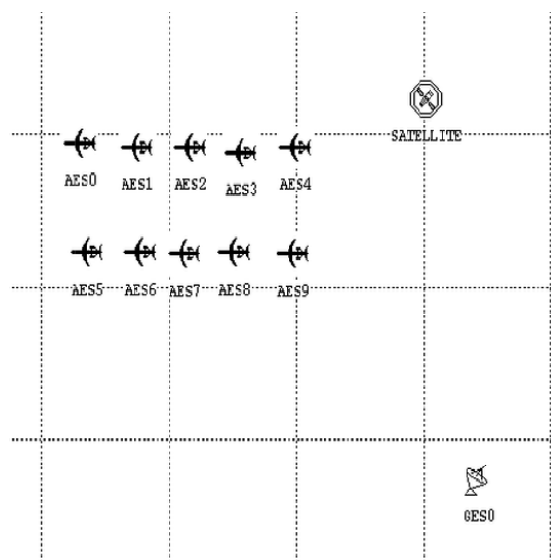


図4 ネットワーク構成の例
AES数は最大400である。

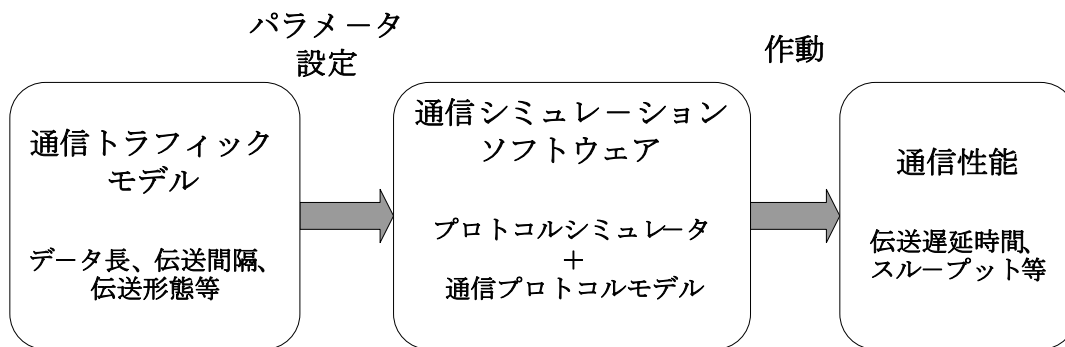


図3 通信性能予測シミュレーションの概念

本報告では、多数の航空機が洋上空域での管制用衛星データ通信において主となる ADS レポートを伝送した際の伝送遅延時間や伝送効率の変化を求めた。ADS レポートは、基本 ADS グループ（緯度、経度、高度、時刻等）^[2]を航空通信ネットワーク（ATN：Aeronautical Telecommunication Network）^[4]で伝送されるものと仮定する。したがって、衛星回線を伝送するデータの長さは基本 ADS グループ 11 octet に各種通信制御用のヘッダが付加されて最終的に 200 octet を越える。そこで、ADS レポートを伝送するデータの長さを 223 octet と仮定する^[4]。この長さのデータを伝送するには、前述の T チャンネルが用いられる。なお、現在洋上空域で行われている衛星経由の ADS のデータ長は、前述の ATN の場合と近い値になる。伝送形態は、ADS レポートの伝送を想定して周期的とした。伝送間隔としては、最大 10 分から最小 1 分までとした。なお、ADS レポートの伝送間隔は 8 s（秒）単位と規定されているため、以下のシミュレーションでは伝送間隔を 8 s で割り切れる数字にした。

4. シミュレーション結果

4.1 最小伝送遅延時間

図 5 に航空機数を 1、伝送間隔を 600 s とし、データ長を変えたときの伝送遅延時間を示す。この条件では、回線の混雑はないので、各データ長における伝送遅延時間は、最小の値となる。最小伝送遅延時間は伝送速度が低いほど、

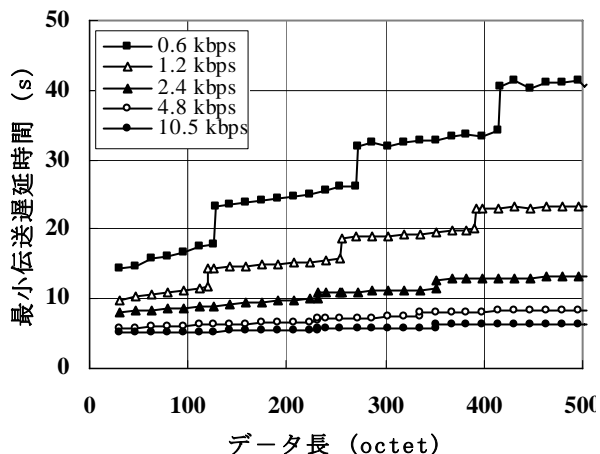


図 5 最小伝送遅延時間

またデータ長が大きいほど大きくなる。しかし、データ長が大きくなると、複数のバースト信号に分割して伝送するため、バースト信号数が増える毎に、階段状に伝送遅延時間は増加する。データ長が 223 octet の場合の最小伝送遅延時間は、伝送速度 0.6 kbps で約 25.1 s、伝送速度 10.5 kbps で約 5.5 s である。

4.2 航空機数と通信性能

次に、前述した 0.6~10.5 kbps の伝送速度について、ADS レポートを 600 s（10 分）、304 s（約 5 分）、240 s（4 分）、184 s（約 3 分）、120 s（2 分）及び 64 s（約 1 分）の時間間隔で、定期的に伝送したときの伝送効率と伝送遅延時間を、航空機数に対して評価した。各伝送速度及び伝送間隔に対して、5 回ずつシミュレーションを行った。

図 6 に、伝送速度が 10.5 kbps の場合について、伝送間隔を 600 s、304 s、184 s 及び 64 s としたときの T チャンネル 1 チャンネル当たりの伝送効率の変化を示す。なお、P チャンネル及び R チャンネルは各 1 チャンネルとする。また、5 回のシミュレーションで伝送効率の値は差がほとんどなかったため、図には 1 回の結果のみを示した。伝送効率は回線をどのくらい効率的に使っているかを百分率で表しており、理論的な伝送効率 G は以下の式であらわされ、図 6 の実線（最大値は 100%）のようになる。

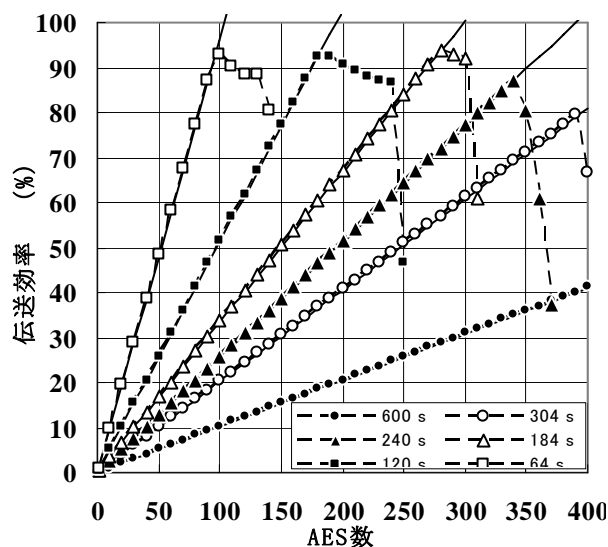


図 6 伝送効率 (10.5 kbps)

$$G = \frac{L \times N}{T} \times 100 \quad (\%)$$

ただし、 L (s) は ADS レポートの長さ、 N は航空機数、 T (s) は ADS レポートの伝送間隔である。伝送効率、各伝送間隔で航空機数に比例して増加する。その増加率は理論値とほぼ一致するが、伝送間隔によって伝送効率の最大値は異なり、航空機数をさらに増加すると伝送効率は減少する。

図7~10に、伝送速度が 10.5 kbps の場合について、伝送間隔を 600 s、304 s、184 s 及び 64 s としたときの伝送遅延時間の変化を示す。これらの結果は、前述の伝送効率の結果と対応している。各図には5回のシミュレーションで得られた各航空機数の平均値（黒丸）と95%値（白

丸）各々5個ずつ、また各々5個を平均した値（2本の濃淡の違う実線）を示す。

伝送間隔が 600 s の場合（図7）、航空機数が増加するに従って少しずつ増加する。伝送効率の結果と対照すると、航空機数が 400 でも伝送効率は 40% である。伝送遅延時間の 95% 値は航空機数 400 で 20 s 程度である。

伝送間隔が 304 s の場合（図8）、各航空機数に対する伝送効率は伝送間隔が 600 s の場合の2倍になるので、伝送遅延時間は航空機数に対して増加率が大きい。この場合、伝送遅延時間の 95% 値は航空機数 400 で 30 s 程度になる。

伝送間隔 184 s の場合（図9）、航空機数 270 程度で伝送効率は最大となり、航空機数がそれ以上になると伝送効率は低下し、伝送遅延時間は急激に増加する。

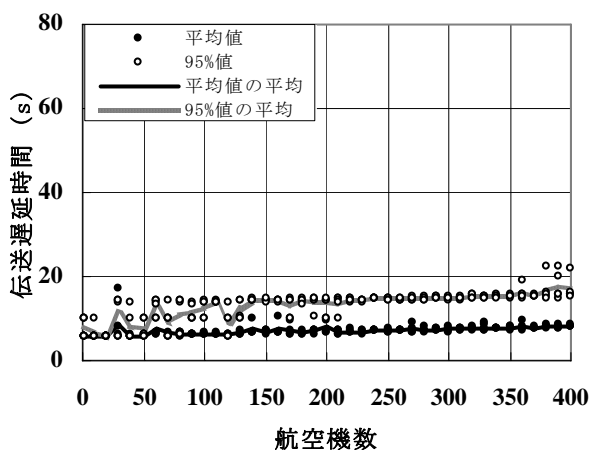


図7 伝送遅延時間（伝送間隔：600 s、10.5 kbps）

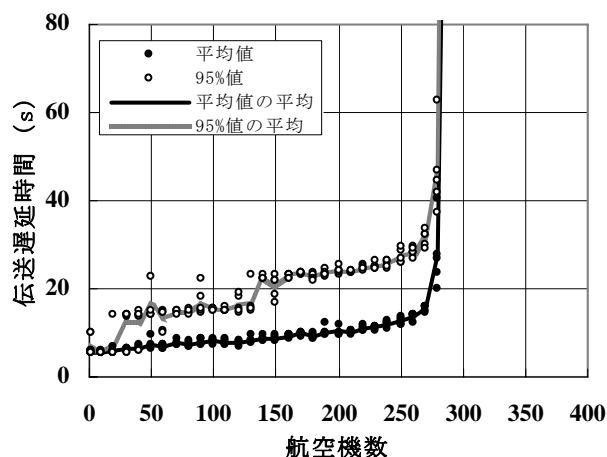


図9 伝送遅延時間（伝送間隔：184 s、10.5 kbps）

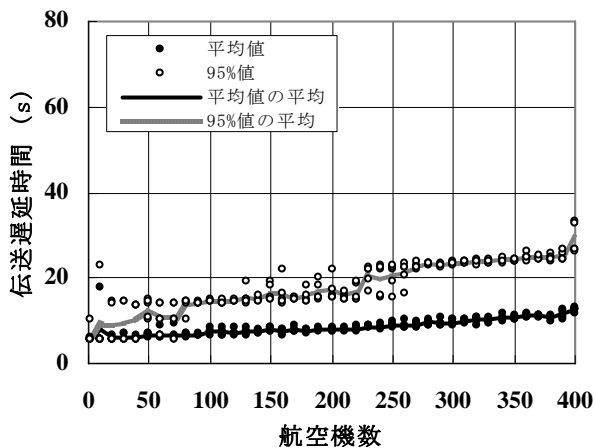


図8 伝送遅延時間（伝送間隔：304 s、10.5 kbps）

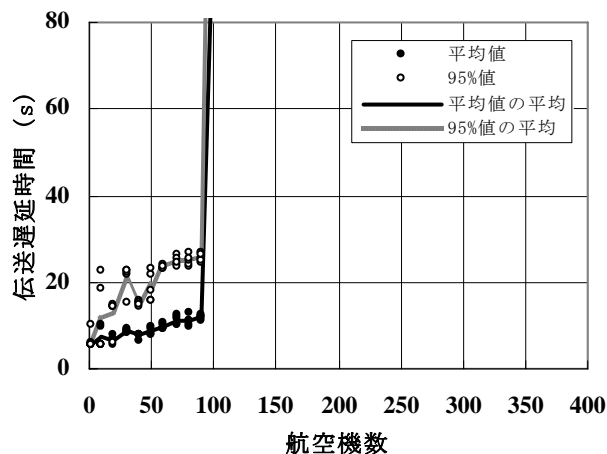


図10 伝送遅延時間（伝送間隔：64 s、10.5 kbps）

伝送間隔 64 s の場合（図 10）、この傾向はさらに顕著になる。航空機数 90 程度で伝送効率は最大となり、航空機数がそれ以上になると伝送効率は低下し、伝送遅延時間は急激に増加する。

5. 通信処理容量

前節では、伝送速度 10.5 kbps の場合に、ADS レポートを伝送間隔及び航空機数を変えたときの伝送効率及び伝送遅延時間を述べた。その結果、航空機数を増加したときに伝送遅延時間が増加する割合は、伝送間隔により異なることがわかった。同様のシミュレーションを 0.6、1.2、2.4 及び 4.8 kbps についても行った。図 11 に、航空機数を増加したときに、伝送遅延時間が急激に増加し始める航空機数を 1 チャンネル当たりの最大処理可能機数とし、各伝送速度及び伝送間隔について求めた結果を示す。また、図 12 にそのときの伝送遅延時間の 95% 値を示す。

図 12 より、伝送速度 10.5 kbps の場合、ADS レポートの伝送間隔が 300 s 以上であれば、1 チャンネル当たりの最大処理可能機数は 400 以上、ADS レポートの伝送間隔が 64 s であれば、90 程度になる。またそのときの伝送遅延時間の 95% 値は、図 11 より 20~30 s の範囲になる。一方、伝送速度 0.6 kbps の場合には、ADS レポートの伝送間隔が 300 s でも、1 チャンネル当たりの最大処理可能機数は 35 程度、ADS レポートの伝送間隔が 64 s では、4 程度である。またそのときの伝送遅延時間の 95% 値は 40~70 s の範囲であることがわかった。

実際には、最大処理可能機数で運用した場合、取扱い機数や通信量の微増で伝送遅延時間が急激に増加する場合もあるので、取扱い機数は、十分な余裕をもって管理する必要がある。図 6 からわかるように、伝送間隔によって機数が増えたときの伝送効率の増加量は異なる。機数の増加に対する余裕に基準はないが、例えば 50 機の余裕があると仮定すると、図 11 より最大取扱い機数は、伝送速度 10.5 kbps の場合、伝送間隔 64 s で 40 機であることになるので、図 6 より 50 % と求められる。また、伝送間隔 304 s では、同様にして、約 350 機であるため、70% となる。

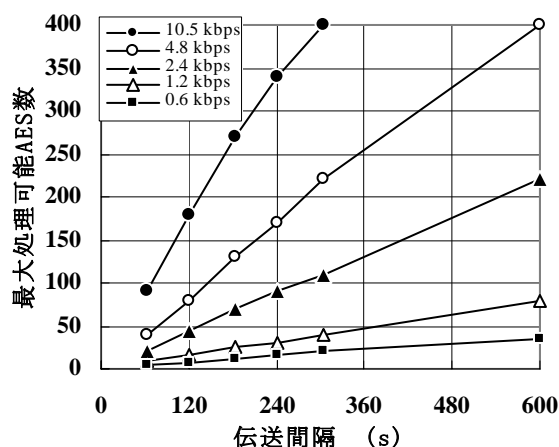


図 11 最大処理可能機数

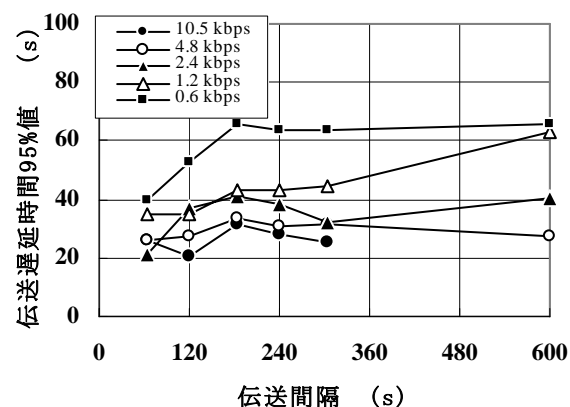


図 12 処理可能機数最大時の伝送遅延時間 95% 値

6. 所要回線数の試算

図 13 に、北太平洋航空路を 1 つのスポットビームでカバーした場合のビーム覆域を示す。これはほぼひまわり 6 号(MTSAT)のスポットビーム覆域に相当する。北太平洋航空路は 5 本のルートで構成されている。各ルートでの距離はそれぞれ少し異なるが、大圏コースを仮定して 4,400~4,700 km と考えられる。航空機の手数を 1,000km/h とすると、各ルートを飛行する航空機の数は、各ルートを 10 分間隔で運航する場合最大 29 機となる。したがって、5 本のルートを運航する航空機の総数は 145 機である。同様に、縦間隔を 50 NM 及び 30 NM とすると、各ルートを飛行する航空機の手数は、各々 51 機及び 85 機となる。したがって、5 本のルートを運航する航空機の総数は各々 255 及び 425 機である。

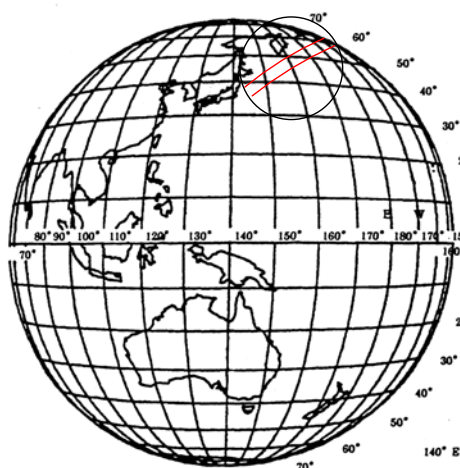


図13 北太平洋航空路のスポットビーム
覆域

このような航空機数を取り扱うために必要なTチャンネル数は、前節で述べた1チャンネル当たりの最大取り扱い機数から算出できる。表1に、伝送速度10.5 kbpsの場合における結果を示す。このように、ADSレポートの伝送間隔が長い場合はチャンネルが少なくてよいが、伝送間隔が短くなると、多くのチャンネルが必要になる。

7. おわりに

本報告では、まず現在のICAO AMSS SARPsに基づく航空衛星通信でADSレポートの伝送を行った場合を例として、計算機シミュレーションによる多数機の環境での通信性能予測結果について述べた。つぎに、各伝送間隔に対して、伝送効率が低下し、かつ伝送遅延時間は急激に増加する航空機数を求められることを示した。また、その結果から、北太平洋航空路の5本のルートを一定間隔で運航し、各航空機はADSレポートのみを伝送するという単純なモデルで所要のチャンネル数を試算できることを示した。

本報告では、各航空機がADSレポートのみを同一の間隔で伝送する、非常に単純な通信トラフィックを仮定したが、実際にはADSだけでなく管制官-パイロット間データ通信(CPDLC)、航空会社の運航管理通信(AOC)、公衆通信(APC)等も同様に運用される。また、空域によって、航空機の運航状況も異なる。したがって、実際の環境に合わせたより正確な条件での

表1 所要チャンネル数の試算結果

縦間隔	航空機数	所要チャンネル数	
		伝送間隔 5分	伝送間隔 1分
10分	145	1チャンネル	4チャンネル
50 NM	255	1チャンネル	7チャンネル
30 NM	425	2チャンネル	11チャンネル

通信性能及び容量を予測するためには、より広範な航空トラフィックや通信トラフィックのモデルを用いてシミュレーションを行う必要がある。特に、今後インマルサットのSwift-Broadband^[5]やボーイングのCBB^[6]等、乗客にインターネットの利用サービスを提供する次世代の航空衛星通信システムが管制通信に利用されることが考えられているが、そこでは管制通信に比べて、インターネット利用が圧倒的に多くなることが想定される。そのような通信環境で、管制通信が所要の性能を確保できるかどうかについて、今後様々な条件でシミュレーションにより十分な検証を行う必要があると考える。

参考文献

- [1]北岡正敏：“情報処理試験のための確率・統計と待ち行列理論”，産業図書，1994
- [2]石出他：“自動従属監視（ADS）実験システムの開発と実験”，信学論（B-II），Vol.J78-B-II，No.5，pp.366-373，1995.
- [3]北折他：“航空衛星データ通信のシミュレーション解析”，第32回電子航法研究所研究発表会講演概要，51-56，2000.
- [4]板野他：“航空通信網（ATN）の研究”，電子航法研究所報告，No.100，2003.
- [5] <http://countdown.inmarsat.com/home.aspx>
- [6] <http://www.boeing.com/connexion/flash.html>