

20. シミュレータによるログオンストーム現象の解析

通信・航法・監視領域 ※住谷 泰人、石出 明

1. はじめに

近年、洋上の航空管制に、静止衛星を利用したデータ通信が導入、運用されている。全世界的には、インマルサットや運輸多目的衛星（MTSAT）がこれに該当する。このシステムは、地上の航空交通管制センタとパイロットが飛行中、双方向にデータ通信できる。このため、現在では、洋上を安全に飛行する上で欠かせないものとなっている。

航空衛星通信システムは、国際民間航空機関（ICAO）の規定する航空衛星移動サービスの国際標準（AMSS SARPs）に準拠したデータ通信プロトコルを利用している^{[1][2]}。この方式では、各航空機に搭載された航空機地球局（AES: Aircraft Earth Station）は、各々地上の航空地球局（GES: Ground Earth Station）に対し、衛星経由で離陸前にログオンと呼ばれる通信手順を実施する。この手順により航空機は地上システムと衛星を介した通信が可能となり、洋上空域の飛行中では、航空機から航空交通管制センタへ約1時間に最低1回必要とされる位置通報も衛星経由で確実に配信できる。通常、GESは、数百機の航空機のログオンを処理できる性能を持つ。しかし、何らかの原因で航空機とGESの間の通信が不通になると、航空機は信号の欠落を検知し、一斉にログオン手順を開始する。多くの航空機が一斉にログオン手順を開始する状況では、ログオン用のチャンネルに輻輳が発生する。このため、30分以上の長時間にわたり、多くの航空機がGESにログオンできず、通信不能な状況に陥る可能性がある。この現象はログオンストームと呼ばれている。

本稿では、最初に、国際標準で規定されている航空機と航空衛星通信システム間のログオン手順、及びログオンストームについて説明する。次に、チャンネル設定や航空機数等のパラメータに基づくシミュレータを用いたログオンストームの再現例を示す。最後に、シミュレータを用いたログオンストームの緩和策及びその効果に

ついて報告する。

2. 航空衛星通信

2.1 航空衛星通信システムの動作

図1に現用の航空衛星通信システムの回線構成を示す。GESとAESの間では、静止衛星を介し、双方向のデータ通信を行う。データ通信を行うため、最初に、AESがGESと通信設定処理を行う。これをログオンという。また、AESが移動に伴い当該GESと通信を終了する場合にはログオフと呼ばれる処理を行う。

ログオン後に、AESからGESの回線でデータ送信する際には、RチャンネルとTチャンネルが利用される。Rチャンネルはスロット付アロハによるランダムアクセス方式で、航空機はデータをいつでも送信できる。Tチャンネルは、予約時分割多元接続方式（TDMA: Time Division Multiple Access）で、航空機はGESからの送信スロットの割当に基づきデータ送信する。利用に際し、Rチャンネルは33オクテット(1オクテット=8bitとする)以下のデータ送信時やスロットの予約割当時に、これ以外はTチャンネルが使われる点異なる。

GESからAESの回線でデータ送信する際には、Pチャンネルが利用される。Pチャンネルは時分割多重（TDM: Time Division Multiplex）方式で、各航空機宛のデータを早い順に送信する。Pチャンネルはログオン時や、予約割当情報及びAESからのデータ到着を知らせるための確認信号等に利用される。

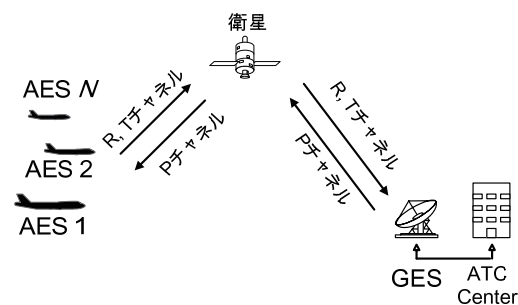


図1 航空衛星回線

PチャンネルとRチャンネルには、データ通信以外に制御用チャンネルを有する。制御用チャンネルは現在600bpsがSARPsに規定されている。データ通信における伝送速度は、両方向とも、600, 1200, 2400, 4800及び10500bpsがSARPsに規定されている。このうち、600及び10500bps（一部では1200bpsも可能）がほとんどの現用GESで利用できる。

2.2 ログオン手順

データ通信には上記3種類のチャンネルを利用するが、ログオンには2種類のチャンネルを利用する。GESからAESへの伝送にはPチャンネルを、AESからGESへの伝送にはRチャンネルを利用する。ログオン手順は図2のとおりである。ログオンは600bpsの伝送速度である。

AESは制御用のRチャンネル(R_{smc})を利用し、GESに対しログオン要求(Log-on Request)を送信する。ログオン要求がGESに到着後、GESは、AES Authorization Tableを検索し、AESが衛星通信利用を認められているかどうか確認する。認められている場合、そのAESに対し、ログオン認証(Log-on Confirm)を送信する。認められていない場合、ログオン拒否(Log-on Reject)を送信する。GESがログオン認証を送信する場合、P/Rチャンネル制御とTチャンネル制御用のログオン認証として、制御用のPチャンネルでAESに送信する。その後、AESはGESに対し、データ用のRチャンネル(R_d)で確認信号(Log-on Acknowledge)を送信する。GESはAESからの確認信号が届いたことを示す確認信号(Log-on

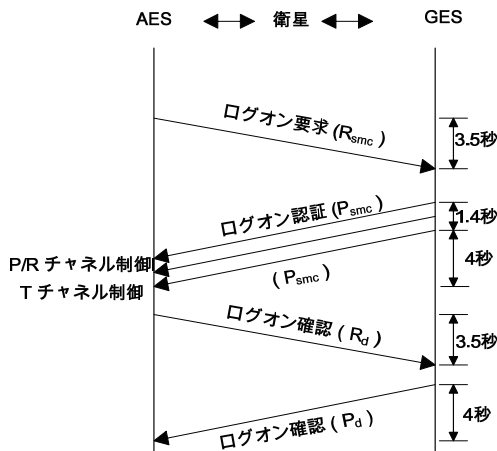


図2 ログオン手順

Acknowledge) をデータ用のPチャンネルでAESに送信し、ログオン手順が終了する。

ログオン手順のうち、AESからGESへのRチャンネルによるログオン要求や確認信号は、各々2SUである。SUはSignal Unitでデータ送信の packets 単位のことである^[3]。この送信における物理回線上のデータ長は約1秒である。これに対し、GESからAESへのPチャンネルによるログオン認証と確認信号も各々1SUであるが、さらに1インターリーブブロック^[3]に相当する2SUを必要とする。

ログオン手順のための時間は、AESからのログオン要求や確認信号に各々約3.5秒、GESからのログオン認証や確認信号に各々約4秒、3インターリーブブロックの送信に要する時間の2秒を追加した計約17秒である。なお、この時間はAESやGESでの処理及び待ち時間を考慮しておらず、航空機1機に最小限要する時間である。ログオン手順の終了後は、AESとGES間でのデータ通信が始まり、AESから順に位置情報等が送信される。

2.3 ログオンストーム現象

多数の航空機がログオンした状態で、GESや衛星等途中の通信路における不具合の発生により通信が途絶すると、Pチャンネルを用いて常時通信されているブロードキャスト信号も途絶する。この結果、ログオン済みのAESは、ほぼ同時にログオン手順を開始する。多数の航空機がほぼ同時帯に同一の通信回線に接続するこの状況は、通信が輻輳し、通信性能が劣化する。このとき、AESによっては、GESに30分以上ログオンできない可能性があり、この現象はログオンストーム（もしくはログオンラッシュ）と呼ばれている。

ログオンストームにより通信が途絶すると、航空機と地上の間の情報伝達は、従来から利用される短波無線による音声通信のみとなる。このため、安全かつ同時に多数の航空機を運航させるにあたって、ログオンストームによる通信不通の時間を最小限とすることが望ましい。

3. シミュレータに基づく検討

3.1 数値解析シミュレータに基づく通信性能解析

航空衛星通信回線における通信性能は、その

ネットワークが簡易モデルであれば待ち行列理論に基づく理論的な解析が可能である。しかし、実際には、通信ネットワークが複雑なため、通信プロトコルを正確にモデル化した計算機シミュレータの利用が一般的な解析方法である。これにより、実際の様々な通信トラフィック条件に対する通信性能が予測できる。

当所では、プロトコルシミュレータ OPNET（米国 MIL3 社製）上で動作する航空衛星通信評価用プロトコルモデル ASET（米国 Mayflower 社製）を所有している。ASET は、ICAO の AMSS SARP s に適合したデータ通信プロトコルに対応している。なお、このソフトは、通常定常状態のシミュレーション条件で利用されるため、ログオン状態のような定常状態に至る過渡期への利用には対応していない。また、AES 数やシミュレータで利用できる制御及びデータチャンネル数には制限があり、近年の航空機数や航空容量の増加に対応した将来的な検討が難しかった。このため、過渡状態の環境下でも利用でき、従来は 250 機までの AES の上限を最大 4000 機まで、各制御及びデータ用チャンネルを 8 チャンネルまで拡張する改造を行った。

これにより、シミュレータの入力パラメータとして、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し、ログオン時の伝送遅延時間やトラフィック等の通信性能も高速に解析できる。

3.2 ログオンストームの再現

シミュレータに設定した主なパラメータを以下に示す。

通常、通信が途絶した後の一斉ログオンの再開は、ブロードキャスト信号の途絶により判明するため、高々数秒である。このため、ログオ

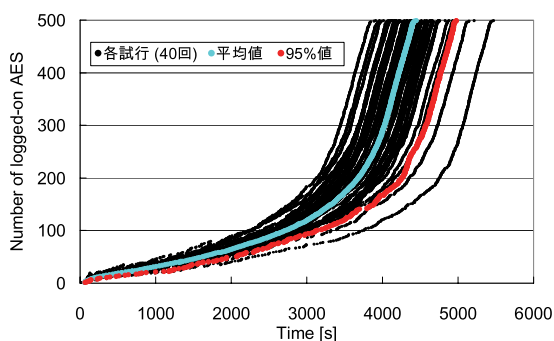


図3 AES とログオン時間

ン開始時間の幅であるログオンウィンドウを 5 秒に設定した。AES 数は、太平洋上で航空衛星通信を同時に利用する可能性に余裕を含めた最大機数として 500 機を想定した。シミュレーション時間は、AES500 機が十分にログオンを終了する時間を想定し、7000 秒に設定した。データの統計処理に必要なデータ取得開始時間は、ログオンウィンドウ直後の 5 秒に設定した。なお、シミュレーションの試行回数は 40 回とした。

本稿では、制御及びデータ用 P チャンネルが各 1 チャンネル、制御及びデータ用 R チャンネルが各 3 チャンネルの構成において、ログオンストームを再現した結果を示す。図 3 にログオンストーム再現時の、各 AES とログオンできた時間との関係を示す。各試行で AES がログオンできる時間が異なっている。AES500 機がログオン完了に要する時間は平均して 4500 秒程度、95% 値では 5000 秒程度であり、全ての航空機のログオンに 1 時間以上かかる。また全ての AES がログオン完了に要する時間には、最短と最長で 1000 秒以上の幅がある。

4. ログオンストームの緩和策

4.1 方法

ログオンストームの緩和策として、一般に、次の方法が考えられる。1 つには、GES 上の制御用 R チャンネルの選択における AES テーブルのチャンネル選択確率を非対称にする方法である^[4]。2 つ目には、利用チャンネル数の増加である。3 つ目には、現在ログオンに利用される伝送速度の増大である。

現在は、図 4(a)に示すとおり、GES 上の AES テーブルは 8 チャンネルまで登録でき、制御用 R チャンネルの利用数のみを登録している。例えば 3 チャンネルを使う場合には、図 4(b)に示すように、8 つの登録箇所のうち、3 箇所のみを利用する。このとき、各チャンネルを利用する確率は均一である。これを図 4(c)に示すとおり、全ての登録箇所を利用し、いずれかのチャンネルを含めると、各チャンネルの利用確率は非均一になる。なお、当所の所有するシミュレータには、テーブル情報の選択機能がないため、各制御用 R チャンネルの利用確率を数値で設定できるよう改造した。

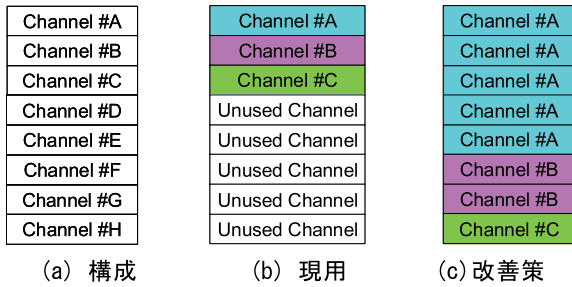


図4 AES テーブルのチャンネル構成例

実際のテーブル情報の選択と同様に模擬するため、シミュレータ利用時には、各チャンネルの和を8に設定した。例えば、図4(c)のように、チャンネルAが5チャンネル、チャンネルBが2チャンネル、チャンネルCが1チャンネルで合計8チャンネルになるよう設定する。その際、最大8つまで登録できるテーブル情報の各チャンネルあたりの確率を0.125とし、チャンネル数に応じて乗算した値を設定する。上記の例であれば、チャンネルAは0.625、チャンネルBは0.25、チャンネルCは0.125の確率で選択されるように設定した。これにより、実際のテーブルの非均一状態と同様に扱える。本稿では表1の5通りのチャンネル組合せ条件を検討した。

チャンネル数の増加では、制御用Rチャンネル(R_{smc})数を3チャンネルから4チャンネルに増加した場合を検討した。

伝送速度の増大では、ログオン時の伝送速度をデータ通信時の最大速度である10500bpsに変更した場合を検討した。なお、現用チャンネル数を考慮し、制御用Rチャンネル数を1チャンネル、データ用Rチャンネル数を1チャンネルで初期設定し、状況に応じて変化させた。

4.2 解析結果

解析結果のうち、表1の条件#4の場合を図5に示す。図3と比較し、40回分の各試行においてAESがログオンできる最短と最長の時間の幅が少なくまとまっている。AES500機がログオン完了に要する時間は平均して1300秒弱、95%値でも1356秒程度である。ログオン完了に要する時間の最短と最長の差は270秒程度であった。表2にAES500機がログオン完了するまでの40回分の試行の最小、最大、平均、95%値を示す。条件#1から#5は表1の各チャンネル組合せの場合であり、条件#0は前章に述べたログオ

表1 AES テーブルにおけるチャンネル割当

条件	各チャンネルにおける割当数		
	Channel #A	Channel #B	Channel #C
#1	3	3	2
#2	4	2	2
#3	4	3	1
#4	5	2	1
#5	6	1	1

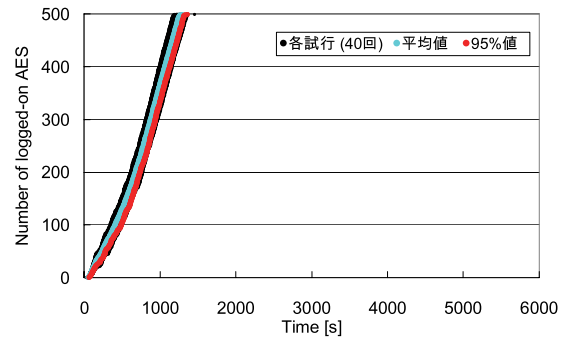


図5 AES とログオン時間(表1 条件#4)

表2 AES500機のログオン完了時間[単位:秒]

条件	最小	最大	平均	95%値
#1	2692	3537	3231	3437
#2	1972	2540	2294	2439
#3	1294	1538	1421	1491
#4	1186	1452	1284	1356
#5	1045	1165	1096	1155
#0	3907	5470	4459	4977

ンストームの場合である。条件#1から#5の全ての場合において、条件#0と比較し、ログオン完了に要する時間が改善されている。

チャンネル数を増加した場合の解析結果を図6(a)に示す。1500秒程度でログオン完了時間で、ログオンストームは改善されている。

伝送速度を10500bpsに増大した場合の解析結果を図6(b)に示す。この結果、AESが250機程度まではログオンストームは発生しない。しかし、その後遅延が発生し、AES500機がログオン完了に要する時間は3700秒程度である。原因として、データ用Rチャンネル(R_d)のオーバーロードが考えられたため、 R_d を2チャンネルに増加した解析結果を図6(c)に示す。この結果、AES500機がログオン完了に要した時間は最大

700 秒程度に短縮された。

ログオンストーム及びその改善策におけるログオン要求の衝突数と時間との関係の一例を図7に示す。図7(a)のログオンストームの状態では、最初200回以上の衝突の後、一旦衝突数は20回前後に減少するものの3000秒以上まで衝突数が減少していない。しかし、図7(b)~(e)に示す改善策では、図7(d)の10500bps, $R_d=1$ の場合を除き、最初の衝突数は大差なく、その後の衝突数はすぐに減少を始め、1000秒前後で衝突がなくなることがわかる。

5. 考察

各チャンネル別のトラフィックとスループットの関係性を考察した。トラフィックは、AESが衛星に送信したパケット数を時間内に送信したいパケット数で除算した結果と定義した。またスループットは、衛星からの送信が実際にGESで

受信できたパケット数を時間内に送信したいパケット数で除算した結果と定義した。ログオンストームにおける各試行のトラフィックとスループットの関係を図8に示す。図8は1試行を1点で表しており、3チャンネル分の40試行である120点が示されている。なお、図8における曲線は式(1)のとおりである。式(1)はRチャンネルで利用しているスロット付アロハによるランダムアクセス方式の理論値である。

$$S = Ge^{-G} \quad \dots\dots(1)$$

(S:スループット, G:トラフィック)

図8より、ログオンストームの状態では、各試行のトラフィックが500%, スループットが5%程度であることがわかる。

図9に各改善策における図8と同様の関係性を示す。なお、伝送速度を増大した場合は、データ用Rチャンネルのオーバロード状態が改善された $R_d=2$ の場合を示した。図9(a)のチャンネルの選

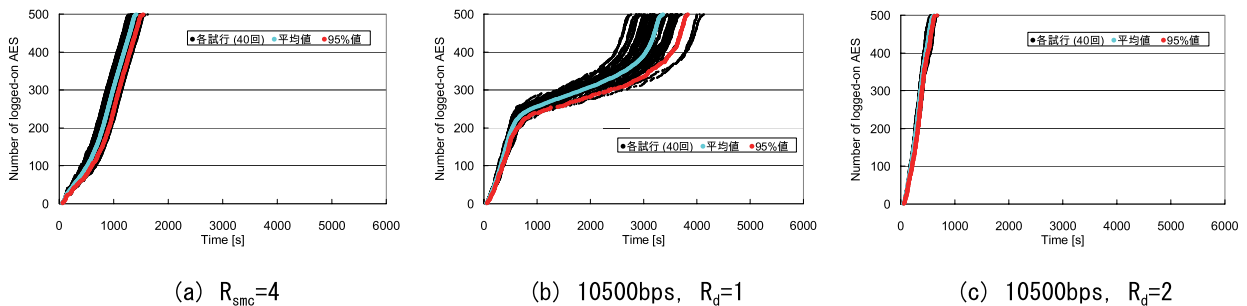


図6 AESとログオン時間

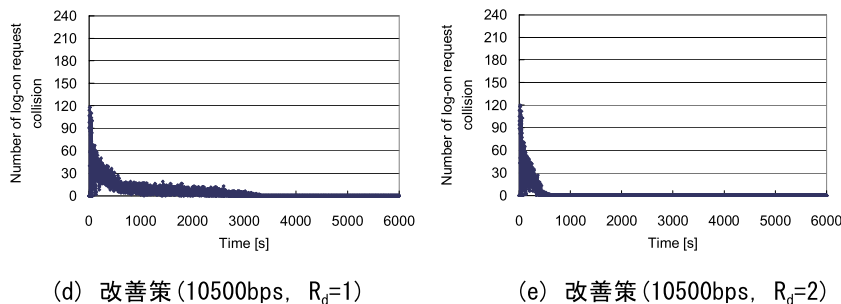
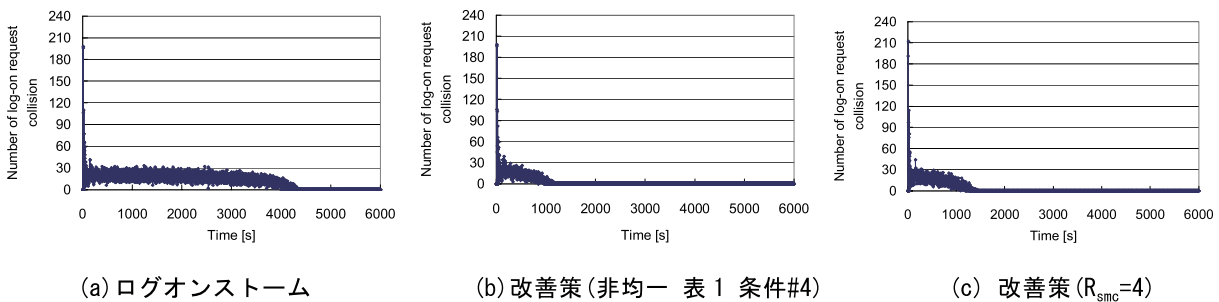


図7 ログオン要求の衝突数の時間変移

択確率を非均一にした状態では、チャンネル A が約 150%のトラフィックで約 25%のスループット、チャンネル B が約 300%のトラフィックで約 15%のスループット、チャンネル C が約 750%のトラフィックで 5%のスループットである。この場合、各 A,B,C チャンネルのトラフィックとスループットの関係が分散している。図 9(b)の $R_{smc}=4$ にチャンネル数を増加させた場合では、4 チャンネル共に約 300%のトラフィックで約 15%のスループットの状態である。このとき、チャンネル毎の差は無いが、図 8 に比べトラフィック、スループットともに改善された。図 9(c)の 10500bps に伝送速度を増大した場合、約 250%のトラフィック、15%のスループットである。この場合も、チャンネル数増加の場合同様、トラフィック、スループットともに改善された。

6. まとめ

航空衛星通信システムにおいて伝送遅延等の原因となるログオンストーム現象を、当所所有のシミュレータにより再現した。また、ログオンストーム現象を改善させる複数の方法についてシミュレータを用いて検討した。この結果、AES テーブルの選択確率を非均一に利用する

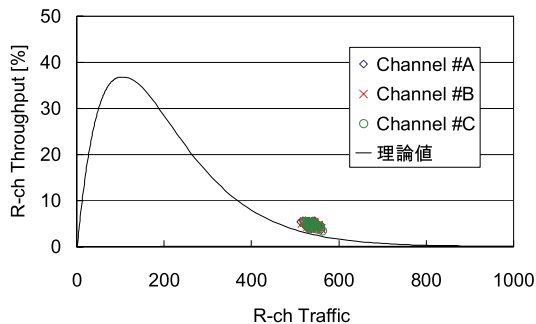


図 8 トラフィックとスループットの関係 (ログオンストーム)

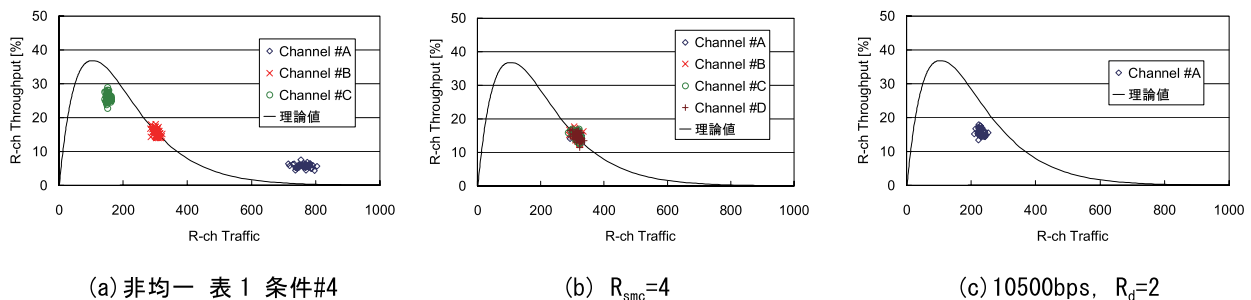


図 9 トラフィックとスループットの関係(改善策)

方法、伝送速度の増大、チャンネル数の増加という全ての改善策で、その効果を確認できた。このうち、伝送速度の増大やチャンネル数の増加の改善策は、利用する周波数の調整や、AES の改修を伴う可能性がある。これに対し、AES テーブルの選択確率を非均一に利用する改善策は、GES の改修のみで、AES の改修や周波数の調整が不要で、改善策の中では最も実現可能性が高い方法であると考えられる。

謝辞

本解析にあたり、貴重なご意見等をいただきました関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- [1]ICAO: Aeronautical Mobile Satellite Services Standards and Recommended Practices
- [2]INMARSAT: INMARSAT AERONAUTICAL SYSTEM DEFINITION MANUAL”, 2000
- [3]石出明,藤田光弘,北折潤: “航空衛星データ通信における通信輻輳と伝送遅延時間特性”, 電子航法研究所報告 No.106,Nov. 2003
- [4]Alan Schuster Bruce, Per Nokeby :“Log-on Issues”, FANS Satcom Improvement Team 2nd meeting in Paris, Oct 2007
- [5]Y.Sumiya, A.Ishide :’ Mitigation of Log-on Rush Phenomenon in Aeronautical Satellite Data Communication’, IEEE Aerospace Conference 2009, No. 4.0702, Bigsky in Montana, Mar.2009
- [6]住谷泰人,石出明: “航空衛星通信シミュレータによるログオンラッシュの一検討”, 2007年電子情報通信学会総合大会 B-2-1, Mar. 2007