

14. 航空衛星データ通信における伝送遅延時間分布

通信・航法・監視領域 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時間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、伝送遅延時間が増加する可能性がある。このような通信性能の劣化は、自動位置情報伝送・監視機能（ADS：Automatic Dependent Surveillance）^[1]による航空機の監視精度を劣化させ、また管制官-パイロット間データ通信（CPDLC：Controller Pilot Data Link Communication）でリクエストや管制指示の通報の遅延の原因になる。通常伝送遅延時間は平均値や95%値を用いるが、監視性能を正確に予測するためには、伝送遅延時間の分布を把握する必要がある。また、計算機シミュレーションをより簡略化する1つの方法としては、モデル化した伝送遅延時間分布を用いることが考えられる。

当所では、これまでICAO航空衛星通信技術標準（AMSS SARP s：航空移動衛星業務の標準及び勧告方式，AMSS：Aeronautical Mobile Satellite Services，SARP s：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^{[2][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、計算機シミュレーションにより伝送遅延時間の分布を解析した結果を述べる。MTSATやインマルサットの衛星による航空衛星データ通信はこの通信プロトコルに基づき、主として伝送速度600bpsと10500bpsで行われる。そこで、これらの伝送速度に対する伝送遅延時間の分布について述べる。

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

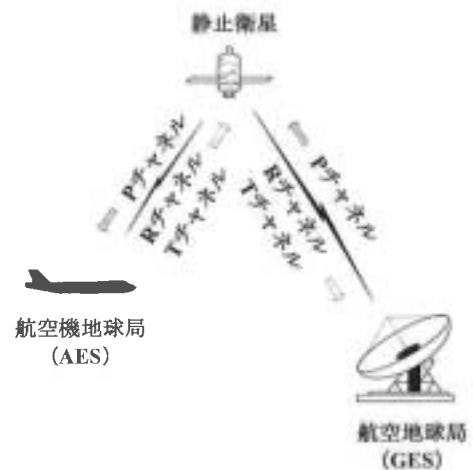


図1 航空衛星回線の構成

(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、600、1200、2400、4800及び10500bpsがSARP s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600及び10500bps (一部では1200bpsも可能) に対応している。

2.2 伝送手順

図2にRチャネルでデータを伝送する場合の手順を示す。Rチャネルでは、33オクテット以下のデータをその長さに応じて1~3個のSU

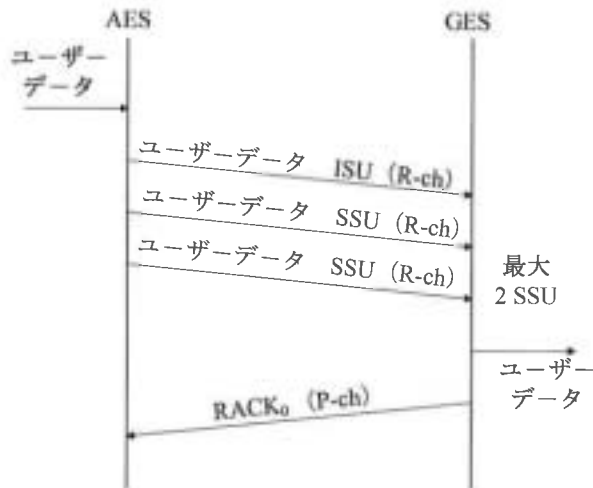


図2 Rチャンネルの伝送シーケンス

（シグナル・ユニット：データグラムに相当する）に分割して伝送する。AES から伝送した SU が GES で正しく受信されると、GES は肯定応答（RACK₀）を AES に送り、伝送シーケンスは終了する。もし、伝送した SU の一部または全部に誤りがある場合には、その旨を RACK_r または RACK_r で AES に知らせる。GES から応答がないときは、データ送信時に設定した AES のタイマが満了となる。タイマは下記の式にしたがって設定される。

$$7.9 + \text{RND}(0, Z_{k-1}) \cdot T_s \quad (\text{秒}) \quad (1)$$

ただし、 $Z_k = Z_0 \cdot 2^k$, $Z_0 = 4$, k : 再送回数, T_s : Rチャンネルのスロット幅 (秒), $\text{RND}(m, n)$: m と n の間のランダムな整数とする。 T_s は伝送速度 600bps では 1 秒である。いずれの場合も、AES では GES に正しく届かなかったデータを再送する。

図3にTチャンネルでデータを伝送する場合の手順を示す。Tチャンネルでは、AES からデータ送信要求を GES に送り、送信スロットの割り当てを要求する。GES では、これを受信すると、送信スロットの割り当て情報を AES に返信する。AES は割り当てられた送信スロットでデータを送信する。Tチャンネルでは、33 オクテットを超えるデータをその長さに応じて単数または

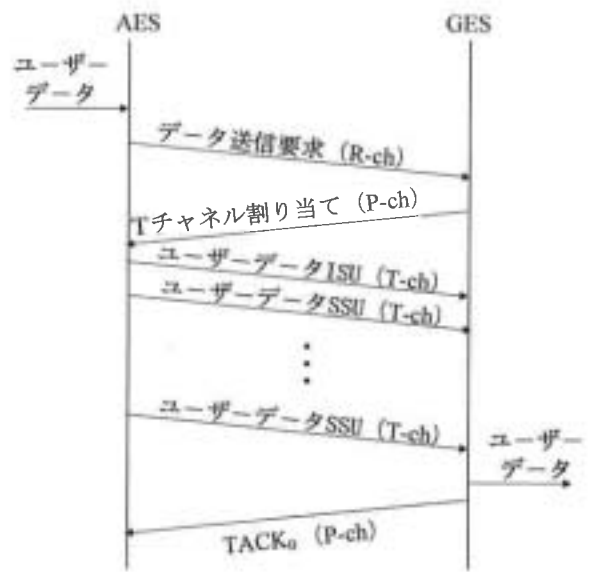


図3 Tチャンネルの伝送シーケンス

複数の SU に分割して伝送する。すべてのデータが GES で正しく受信された場合には、GES は肯定応答（TACK₀）を AES に送り、伝送シーケンスは終了する。もし、伝送した SU の一部または全部に誤りがある場合には、その旨を TACK_r または TACK_r で AES に知らせる。GES から応答がないときは、データ送信時に設定した AES のタイマが満了となる。いずれの場合も、AES では GES に正しく届かなかったデータを再送する。このほか、Rチャンネルでのデータ送

表1 シミュレーションの設定

| チャンネル種別 | R | |
|-----------|------------|--------|
| | 伝送速度 (bps) | 600 |
| データ長 (SU) | 2 | 2 |
| 伝送間隔 (秒) | 600 | 600 |
| AES 数 | 20-80 | 10-350 |

| チャンネル種別 | T | | | |
|--------------|------------|-------|--------|--------|
| | 伝送速度 (bps) | 600 | | 10500 |
| データ長 (オクテット) | 31 | 223 | 31 | 223 |
| 伝送間隔 (秒) | 304 | 600 | 120 | 120 |
| AES 数 | 10-80 | 10-30 | 20-320 | 20-160 |

信要求、PチャンネルでのTチャンネル割り当て等が相手方に正しく届かない場合には、それぞれタイマー値の満了後、再送される。

3. シミュレーションの方法

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 SARPsに適合したデータ通信プロトコルに対応している。

表1に本シミュレーションで設定したパラメータの一覧を示す。表1に示すように、RチャンネルとTチャンネルともに、伝送速度は600 bpsと10500 bpsの2つの場合を選択した。データ長はRチャンネルでは中間の値の2 SUに、またTチャンネルでは最小の31オクテット（5 SU）と最も多く使われると考えられる223オクテット（30 SU）の2つを選択した。伝送間隔は600秒（10分）を基準として、AES数の最大がどの場合も400を超えないように設定した。伝送間隔を一定にして、AES数を増加すると、通信量が増加して、通信回線も混雑するようになる。このような混雑がない状態から、混雑する状態まで、伝送遅延時間の分布がどのように変化するかを調べた。

4. シミュレーション結果

4.1 Rチャンネルの伝送遅延時間

図4に600 bpsのRチャンネル1回線でデータ（2 SU）を送った場合のトラフィック、スループット及び伝送遅延時間（平均値、95%値）

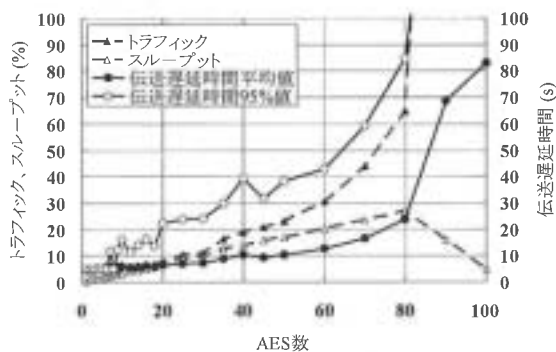


図4 600bps Rチャンネルのトラフィック、スループット及び伝送遅延時間（平均値、95%値）

を示す。データの伝送間隔を600秒としてAESの数を変化したときの各量の変化をプロットした。AES数を増加するにしたがい、伝送されるデータ量が増加し、回線の占有率を表すトラフィックが増加する。相手方に伝送されたデータの割合であるスループットはAES数約30まではトラフィックと近い値となるが、それ以上ではAES数に応じて増加する。しかしトラフィックに比べてその増加率は小さい。図5にAESの数が20~80の範囲内の4つの場合について伝送遅延時間の相対度数分布を示す。相対度数は伝送遅延時間の標本を1秒きざみで集計して求めた（以下同様）。AES数20では、約89%は3~4秒の範囲に集中しており、データの再送が少ない。この範囲では伝送遅延時間は最小である。AES数を40、60、80と増加すると、3~4秒の範囲の相対度数は71%、65%、46%と減少し、約12秒、20秒強付近の伝送遅延時間の発生が見られる。これは、前述したタイマ値の式からわかるように(7.9+ランダム数)秒毎にデータの再送が発生するからである。このようにしてAES数が増加すると、回線のトラフィックが増

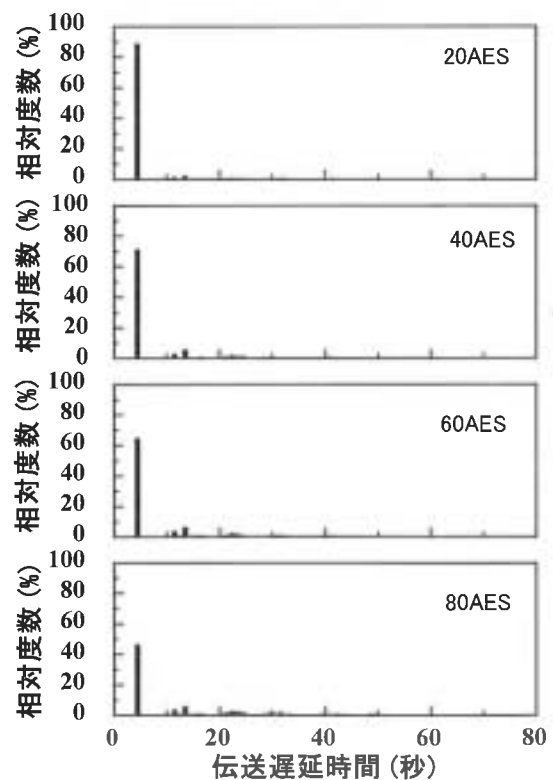


図5 600bps Rチャンネルの伝送遅延時間分布

加し、伝送データのロス、再送の発生数が増加するので、図4に見られるように、伝送遅延時間の平均値及び95%値はトラフィックの増加とともに増加する。

図6に10500 bpsのRチャンネル1回線でデータ(2 SU)を伝送した場合の伝送遅延時間の相対度数分布を示す。AES数10では約98%が伝送遅延時間1秒以内に入っている。AES数100では86%、AES数200では71%、AES数300では46%となる。

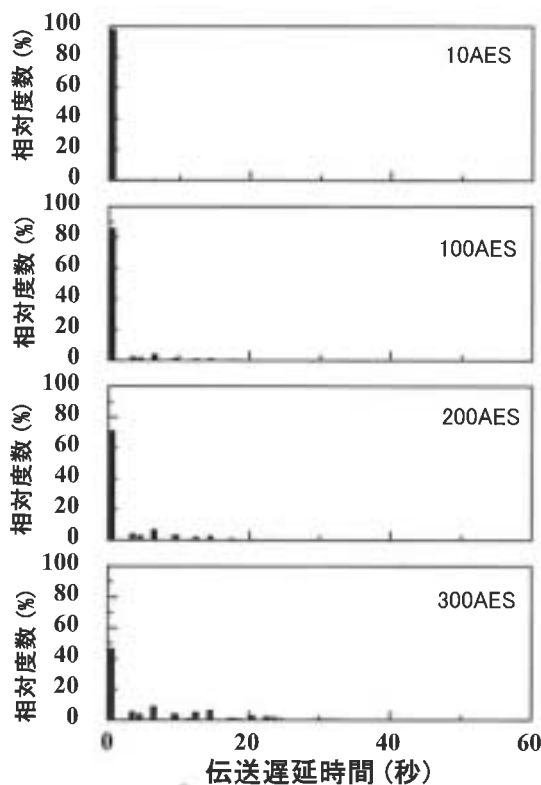


図6 10500bps Rチャンネルの伝送遅延時間分布

4.2 Tチャンネルの伝送遅延時間

図7に600 bpsのTチャンネル1回線で31オクテットのデータを伝送した場合のトラフィック及び伝送遅延時間(平均値、95%値)を示す。データの伝送間隔を304秒としてAESの数を変化させたときの各量の変化をプロットした。AES数を増加するにしたがい伝送されるデータ量が増加し、トラフィックが増加する。Rチャンネルと違ってTチャンネルでは送信スロットを予約するために伝送データが衝突することはない。こ

のため、スループットはトラフィックとほぼ同じであり、図7において、スループットはトラフィックと重なることから、記述を省略した。ただし、AES数が80近くなると、データ送信要求を伝送するRチャンネルのトラフィックが増加するためそのデータの再送が多数発生して伝送遅延時間が急激に増加する。その場合、Tチャンネルのトラフィックは約60%以上にはならない。図8にAESの数が20~80の範囲内の4つの場合について伝送遅延時間の相対度数分布を

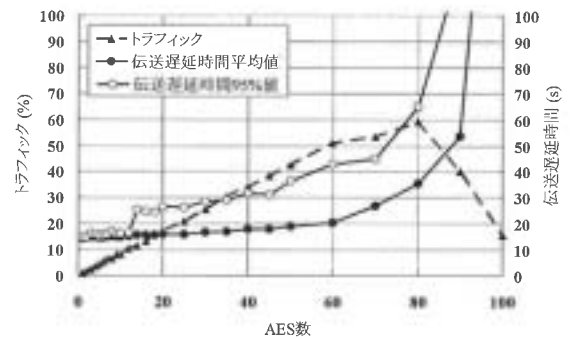


図7 600bps Tチャンネルのトラフィック、スループット及び伝送遅延時間(平均値、95%値)

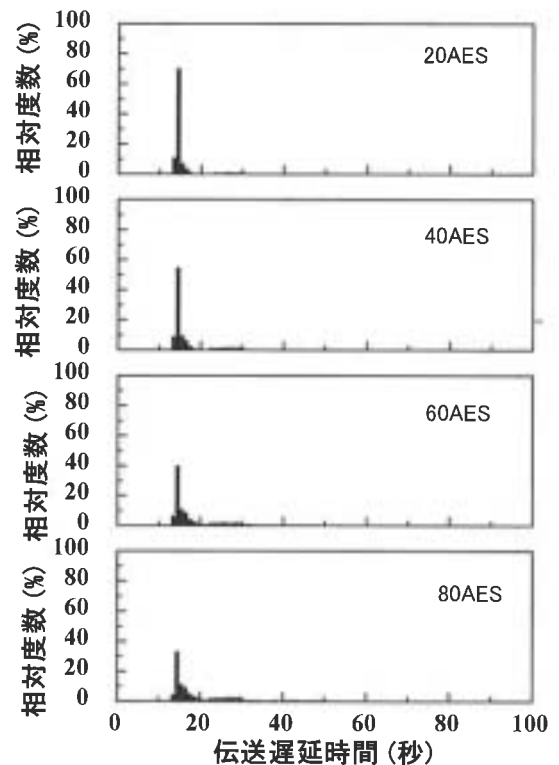


図8 600bps Tチャンネルの伝送遅延時間分布(データ長:31オクテット)

示す。AES 数 20 では、約 70%は 14～15 秒の範囲に集中している。この範囲では伝送遅延時間は最小である。AES 数を 40、60、80 と増加すると、14～15 秒の範囲の相対度数は 55%、40%、33%と減少し、約 14～20 秒、20～30 秒付近の伝送遅延時間の発生が見られる。このうち 14～20 秒の伝送遅延時間の増加は T チャンネルの送信待ちによるものと考えられる。また 20～30 秒の伝送遅延時間の増加は R チャンネルでのデータ送信要求の伝送ロスによるその再送と T チャンネルの送信待ちが複合したものと考えられる。

図 9 に 600 bps の T チャンネルで 223 オクテットのデータを伝送した場合の伝送遅延時間の相対度数分布を示す。図 8 と比べるとデータ長が大きくなったため、最小となる伝送遅延時間は大きくなり、AES 数が少なくてもトラフィックは大きくなる。AES 数 10 で伝送遅延時間 24～26 秒の範囲の相対度数は約 62%、AES20 で約 45%、AES30 で約 29%である。伝送遅延時間の増加の原因は T チャンネルの送信待ち単独のものと R チャンネルでのデータ送信要求の伝送ロスに

よるその再送と T チャンネルの送信待ちが複合したものの 2 つが考えられる。T チャンネルの送信待ちによる場合、データ長が大きくなったため伝送遅延時間のばらつきが大きくなり、広範囲に伝送遅延時間がばらつく。

図 10 に 10500 bps の T チャンネルで 31 オクテットのデータを伝送した場合の伝送遅延時間の相対度数分布を示す。伝送遅延時間 4～5 秒の範囲の相対度数は AES 数 20 で 97%、AES 数 100 で 87%、AES 数 200 で 74%、AES 数 300 で 61%である。データ長が小さくかつ伝送速度が 600 bps に比べて高いため、送信待ちによる伝送遅延時間の増加は 4～5 秒の範囲内に入っていると考えられる。また 13～14 秒の範囲の相対度数の増加の原因は、R チャンネルでのデータ送信要求の伝送ロスによるその再送によることが考えられる。T チャンネルの送信待ちも複合している可能性はあるが、1 秒の範囲内に含まれていると考えられる。この他、21～24 秒の範囲の相対度数の増加は R チャンネルでのデータ送信要求の伝送ロスによるその再送が 2 回と T チャンネルの

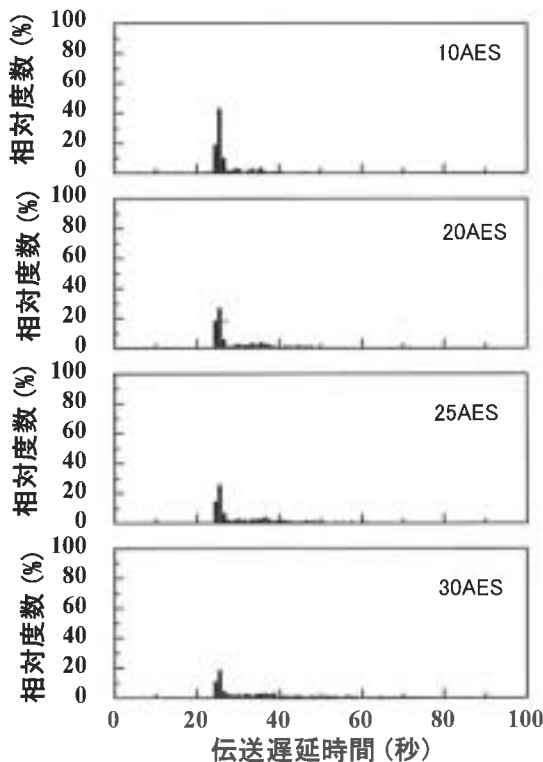


図 9 600bps T チャンネルの伝送遅延時間分布
(データ長：223 オクテット)

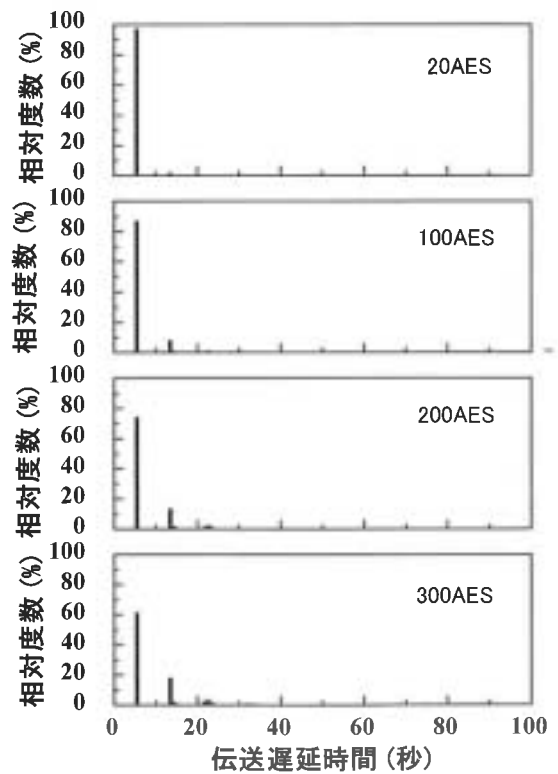


図 10 10500bps T チャンネルの伝送遅延時間分布
(データ長：31 オクテット)

送信待ちが複合したものと考えられる。

図11に10500bpsのTチャンネルで223オクテットのデータを伝送した場合の伝送遅延時間の相対度数分布を示す。伝送遅延時間5～6秒の範囲の相対度数はAES数20で90%、AES数60で78%、AES数100で60%、AES数140で34%である。6～12秒の範囲の伝送遅延時間の増加はTチャンネルの送信待ちが複合したことが原因であると考えられる。また13～16秒の範囲の伝送遅延時間の増加は、Rチャンネルでのデータ送信要求の伝送ロスによるその再送とTチャンネルの送信待ちが複合したことが原因であると考えられる。

5. 伝送遅延時間分布の特徴

AMSSの通信プロトコルに基づく航空衛星データ通信では、データ伝送シーケンスにおける各チャンネルでの伝送の成功、不成功に応じて伝送遅延時間が左右される。RチャンネルとTチャンネルにおける伝送遅延時間の分布の特徴は以下のように概括できる。

(1) Rチャンネル

Rチャンネルの伝送の場合、伝送シーケンス上Rチャンネルでの伝送ロスの有無が伝送遅延時間の増加の主要原因である。したがって、伝送遅延時間の分布は伝送ロスがないものと伝送ロスにより再送するものに分けられる。回線が混雑していない場合は最小の伝送遅延時間になり、混雑するに従い、再送により、伝送遅延時間が増加する。

(2) Tチャンネル

Tチャンネルの伝送では、伝送シーケンス上使用されるチャンネルがTチャンネルの他にPチャンネルとRチャンネルがある。この場合には、これらすべてのチャンネルで伝送ロスや送信待ちが発生しない最小の伝送遅延時間とTチャンネルやPチャンネルでの送信待ち、Rチャンネルでの伝送ロスによる再送のいずれかまたは複合によるものがある。回線の混雑があまりないときは、最小の伝送遅延時間が主となり、混雑が増すに従って最小の伝送遅延時間は減少し、Tチャンネルの送信待ちによるもの、Rチャンネルでの伝送ロスによるもの及びTチャンネルの送信待ちの複合による伝送遅延時間が増加する。

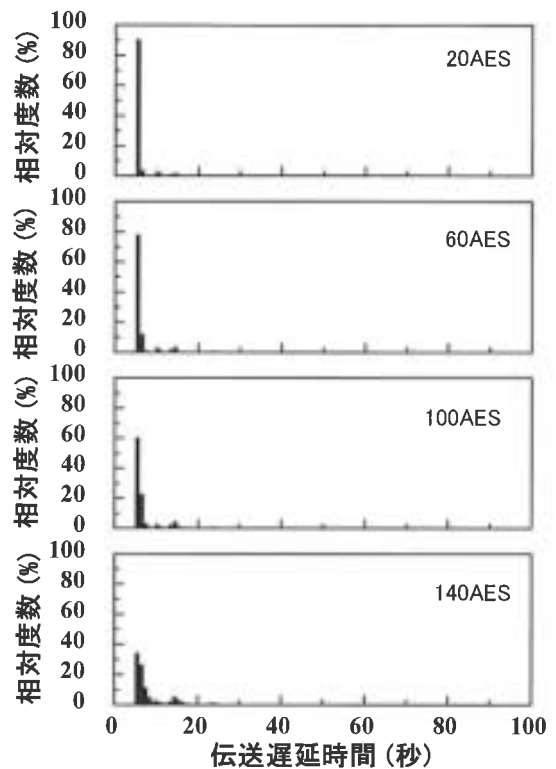


図11 10500bps Tチャンネルの伝送遅延時間分布
(データ長：223 オクテット)

6. おわりに

本報告では、現在のICAO AMSS SARPsに基づく航空衛星通信で、多数機の環境下での計算機シミュレーションにより求めた伝送遅延時間分布の解析結果について述べた。

今後は、将来、次世代の航空衛星通信に導入されるTCP/IPに対応したデータ通信の伝送遅延時間の分布についても検討する計画である。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 住谷他：“航空衛星データ通信の性能と容量のシミュレーション”，2005年（第5回）電子航法研究所研究発表会講演概要，105-110，2005.