

PIAFS (PHS 用データ転送プロトコル)上での TCP トラフィックの振舞いに関する検討

田上 敦士 井戸上 彰 加藤 聡彦

国際電信電話(株) 研究所

PHS において、32kbit/s の伝送速度を用いたデータ通信サービスが開始されている。本サービスでは、フロー制御や誤り再送などをサポートする PIAFS (PHS Internet Access Forum Standard) と呼ばれるプロトコルが用いられている。PIAFS を用いたデータ通信においても、TCP/IP による既存のデータアプリケーションが広く用いられると予想されるため、PIAFS 上の TCP/IP 通信の性能評価を行うことが重要となる。そこで筆者らは、シミュレーションにより、さまざまな伝送誤りが存在する場合に、TCP と PIAFS がどのように振る舞うかを詳細に解析した。本稿では、それらの結果について述べる。

A Simulation Study on TCP Traffic Behavior over PIAFS

Atsushi TAGAMI, Akira IDOUE and Toshihiko KATO

KDD R&D Laboratories

E-mail: {tagami, idoue, kato}@hsc.lab.kdd.co.jp

In PHS (Personal Handy-phone System), 32kbit/s data communication service is being offered. This service uses PIAFS (PHS Internet Access Forum Standard) protocol which supports flow control and retransmission procedures. Since various TCP/IP applications seem to be used on this service, it is important to evaluate performance of TCP/IP communication over PIAFS protocol. In this paper, we present a result of simulation study on behaviors of TCP over PIAFS communication in detail.

1 はじめに

近年、ノートパソコンや携帯端末を用いたモバイル・コンピューティングが注目されており、PHS (Personal Handy-phone System) においても、32kbit/s の伝送速度を用いたデータ通信サービスが開始されている^[1]。このデータ通信サービスにおいては、PIAFS (PHS Internet Access Forum Standard) と呼ばれる、エンド・エンドで高品質な全二重データ伝送を提供するプロトコルが使用される^[2]。

PIAFS を用いたデータ通信においても、TCP/IP による既存のデータアプリケーションが広く用いられると予想される。このため、PIAFS 上での TCP/IP 通信の性能評価が重要であり、実際の PHS 回線を用いた評価実験の結果も報告されている^[3]。本実験では、電波状況が良

好な通常の使用環境では約 29kbit/s の高いスループットが得られ、伝送誤りが存在する場合でも PIAFS による再送が有効にはたさず、最悪でもスループットが約半分に落ちる程度であることが確認されている。しかし、PIAFS 上での TCP/IP 通信の有効性をより明確にするためには、さまざまな伝送品質の回線に対して網羅的に評価するとともに、TCP および PIAFS がどのように振る舞うかについて詳細に検討する必要がある。このためには、TCP と PIAFS のプロトコル手順や、任意のビット誤り率を持つ伝送路を模擬するシミュレータを用いる方法が有効であると考えられる。そこで筆者らは、PIAFS のプロトコル手順を既存のシミュレーションプログラムの上で実装し、TCP や PIAFS のプロトコルの振舞いを詳細に解析した。本稿ではその結果について示す。

2 PIAFS のプロトコル

2.1 ネットワーク構成と機能概要

PIAFS は、OSI 参照モデルのデータリンク層に相当するプロトコルであり、PHS 32kbit/s 非制限デジタルベアラ伝送チャネルを用いて、高信頼なデータ転送を実現するものである。PIAFS を用いたネットワーク構成例を図 1 に示す。この例では、PHS 端末側の PIAFS アダプタと、PIAFS 対応ターミナルアダプタ (TAP : Terminal Adapter for PIAFS) 間で PIAFS プロトコルによるエンド-エンドでの伝送制御が行われる。PIAFS は、データリンクの確立/解放、フロー制御、ユーザデータの分割/組み立て、FCS による誤り検出と SR ARQ (Selective Repeat Automatic Repeat Request) と呼ばれる再送方式をサポートし、エラーフリーの全二重データ伝送路を提供する。

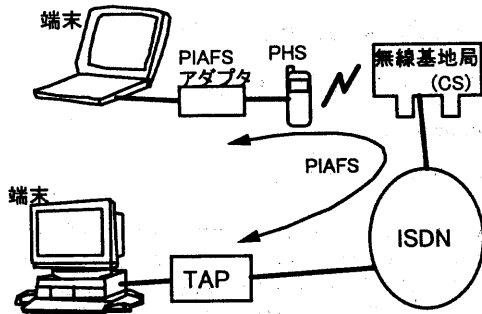


図1 PIAFSを用いたネットワーク構成

2.2 PIAFS フレームの種類

PIAFS で使用されるフレームはすべて 640bit (80byte) 固定長である。データリンクが確立された後は、ユーザデータが存在しない場合を含め、物理回線には常にいずれかのフレームが転送される。また、すべてのフレームは 32 ビット CRC に基づく FCS を持ち、FCS 誤りの受信フレームは破棄される。

先頭の FI (Frame Identifier) により、以下の 4 種類のフレームが識別される。

- ネゴシエーションフレーム

データリンク確立の際にのみ用いられる。プロトコルの選択、フレーム同期、応答遅延時間測定 (ARQ 同期) などを行う。

- 同期フレーム

制御フレームやデータフレームを転送中に連続した FCS 誤りを検出した場合や、ハンドオーバー (端末の移動に伴う接続先の無線基地局 (CS) の変更) が生じた際などに、ARQ 同期を再確立する

ために使用される。

- 制御フレーム

通信パラメータや、RTF (再送までのフレーム間隔を規定するパラメータ) などの ARQ パラメータの通知、データリンクの解放などのために使用される。

- データフレーム

ユーザデータを送受信するために使用され、図 2 に示すフォーマットを有する。再送やフロー制御を行うために、送信フレーム番号 (FFI: Feed Forward Information) と、受信側が次に受信を期待する要求フレーム番号 (FBI: Feed Back Information) を持つ。また、継続フレーム識別ビット (M) によって、分割されたデータの途中であることを示す。1 フレームのユーザデータ長は最大 584bit (73byte) であり、このことから、PIAFS におけるユーザデータの最大スループットは 29.2kbit/s となる。

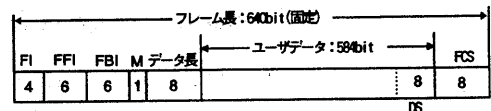


図2 データフレームのフォーマット

2.3 データ転送手順

PIAFS のデータ転送手順は SR ARQ 方式に基づいている。その手順を以下に示す。

(1) データ送信側

- 未確認データフレームを連続して送出する。最大アウトスタンディングフレーム数 (= モジュール数 (63) - 1) 到達後は最旧未確認フレームに戻り、再度未確認フレームを繰返し送出する (以後、この繰返しによる再送を繰返し再送と呼ぶ)。
- 受信側から FBI で要求されたフレームを再送する (以後、この FBI の要求に応じて行う再送を要求再送と呼ぶ)。ただし、あるフレームを最後に送信してから RTF 以内に、再送を要求された場合には、正しい要求とは見なさずに無視する。
- 送信すべきデータが存在しない場合は、FFI=0、データ長=0 のフレーム (空フレーム) を送出する。

(2) データ受信側

- FCS 誤りの受信フレームは破棄する。
- 受信側から送出するデータフレームの FBI に、最旧未受信フレーム番号、すなわち次に受信を期待するフレーム番号を設定する。
- フロー制御要求があった場合は、要求フレーム番号の更新を行わず、同一番号の FBI を繰返し送信する。

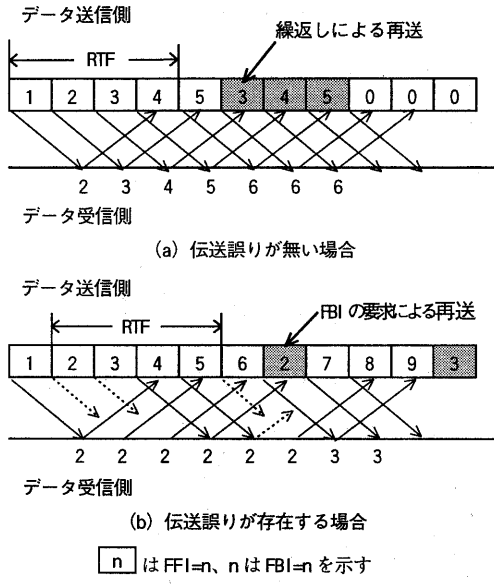


図3 データ転送シーケンスの例

図3(a)に、送信すべきフレームのFFIが1から5までの場合の線返しの例を示す。また、図3(b)では、伝送誤りが発生し、途中で再送を行った場合の例を示す。

2.4 ARQ 同期確立手順

ARQ 同期確立手順は、ネゴシエーションフレームによるデータリンク確立時、連続FCS誤りの検出時、制御フレームまたはデータフレーム転送中での同期要求フレーム(同期フレームの一種)受信時に起動される。

PIAFSにおいては、データ通信開始時にネゴシエーションフレームを送受信することによってARQ フレーム同期を確立し、以降そのタイミングを保持する。フレーム同期と同時に、応答遅延時間を測定し、それに基づいて、再送までのフレーム間隔を規定するパラメータであるRTFを設定する。RTFは

$$RTF = (\text{応答遅延時間相当のフレーム数}) + N (\text{マージン}=2)$$

で求める。

3 シミュレータの構成

PIAFS の性能評価を行うために、プロトコルシミュレータ REAL⁴⁾を使用した。REAL はカリフォルニア大学バークレー校で開発されたパケット網用プロトコルシミュレータであり、パケットの生成/終端ノード(ソース/シンク)、パケット交換ノード(ルータ、ゲートウェイ)をチャネル

で接続し、各ノードを並列に実行する。

3.1 ネットワーク構成

今回の実験は、2台の端末間をPIAFSを用いて接続したネットワークを想定した(図4)。PIAFS を処理するノード(PIAFS アダプタノード:PIAFS ADP)はREAL上で新たに実装した。TCP ソースとシンクは、REALに用意されたノードに遅延ACK機能を追加したプログラム⁴⁾を使用した。TCP ソースとシンクの間に1本のTCP コネクションを設定し、セグメントサイズ1460byte、ウインドウサイズ8760byteを用いた。

TCP ソース/シンクとPIAFS ADP間は、1Mbit/sの伝送速度と、10 μ sの遅延を持つチャネルで接続した。PIAFS ADP間はPHS回線を想定した32kbit/sのチャネルで接続し、遅延は片道100msとした。伝送誤りは、REALのチャネルの機能を拡張して、任意の確率のビット誤りを発生させることとした。

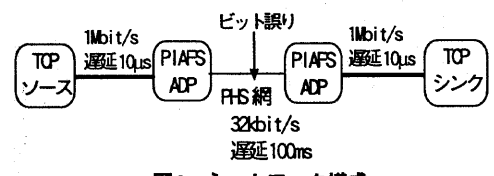


図4 ネットワーク構成

3.2 PIAFS ADP ノードのバッファ構成

PIAFS ADP ノードは2節で述べた手順を実装するために、送信/受信用ARQ バッファ、送信待ちバッファ、組み立てバッファの4つのバッファを持つ(図5)。各バッファの機能を以下に示す。

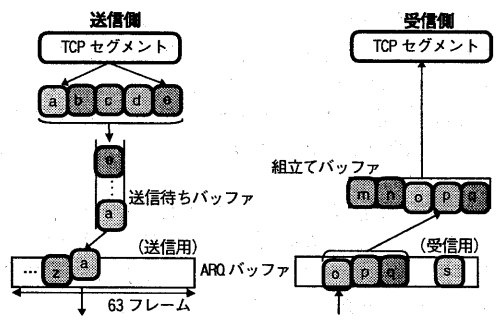


図5 PIAFS ADP ノードのバッファ構成

送信されたTCPのセグメントは、PIAFSのフレームに分割され、一旦無限長の送信待ちバッファに貯えられる。送信用ARQバッファに空きができると、フレームは送信待ちバッファから送信用ARQバッファに移され、PIAFSの手順により送信される。

PIAFS のフレームを受信した場合、ARQ バッファに一旦格納される。PIAFS の手順に従い FFI の順番通りに受信されたフレームは、ARQ バッファから組み立てバッファに渡される。組み立てバッファにおいて TCP セグメントが完成するとそのセグメントが上位ノードに渡される。

4 実験結果

4.1 ビット誤り率の変化に対するスループット

まず、ビット誤り率(BER)を変化させて2分間データ転送を行い、TCP レベルのスループット、PIAFS の1秒あたりの送受信フレーム数などを測定した。その結果を図6から図8に示す。

図6に、TCP レベルでのスループットと、TCP データセグメントが受信確認されるまでの応答遅延時間を示す。

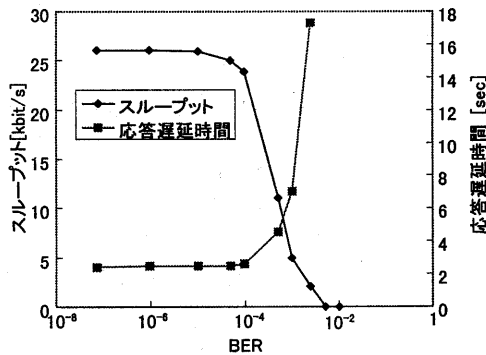


図6 TCPのスループットと応答遅延時間

図7は、PIAFS ADPの送信側における1秒あたりの送信フレーム数を、フレームの種別ごとに表わしている。このうち、データフレームには再送フレームも含まれる。また、同期・制御フレームとは、ARQ フレーム同期に関する同期フレーム、制御フレーム、ネゴシエーションフレームの総和である。

図8は、受信側における1秒あたりの受信フレーム数を、フレームの種別ごとに表わしている。ここで、有効データフレームとは受信側が初めて受信したデータフレームであり、無効データフレームとは、既に受信しているデータフレームを再送により再度受信したものを指す。

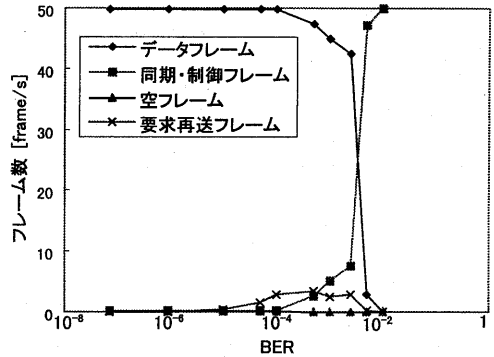


図7 PIAFS送信フレーム数

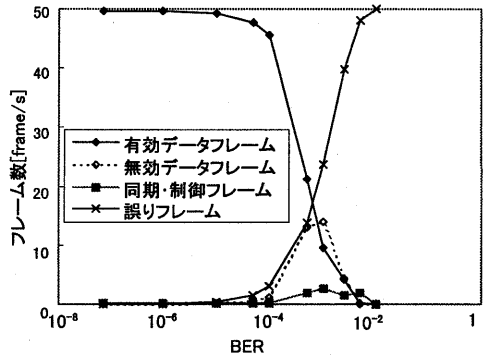


図8 PIAFS受信フレーム数

4.2 定常的な伝送誤りの場合の振舞い

TCP と PIAFS の振舞いを詳細に調べるため、TCP セグメントの転送の状態および PIAFS フレームの転送速度の時間的変化を求めた。ここでは、最も再送回数の多い $BER=5.0 \times 10^{-4}$ の場合と、同期・制御フレームの数が発散する直前の $BER=2.5 \times 10^{-3}$ の場合を対象とした。その結果を図10、図11に示す。これらの図において、PIAFS フレームの速度とは、0.2秒間隔での平均速度である。要求再送フレームは送信側で、それ以外のフレームは受信側で計測した。TCP セグメントの転送状態の各記号の表わす意味は図9に示す通りである。これらの記号が白抜きになっている場合は再送セグメントであることを表わす。

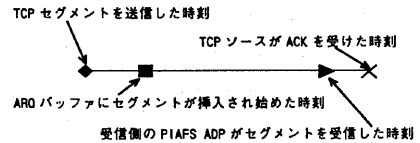


図9 TCPセグメントの転送状態を示す記号

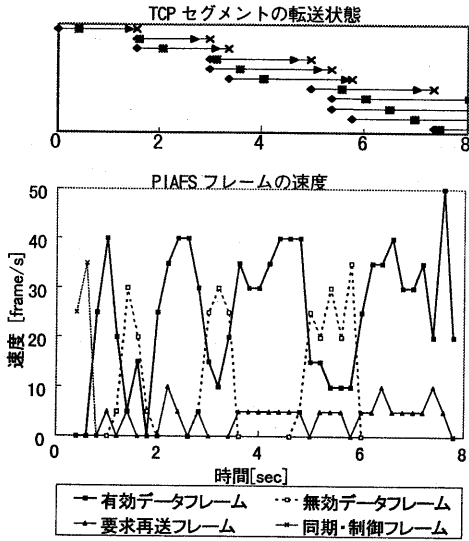


図10 BER= 5.0×10^{-4} の場合

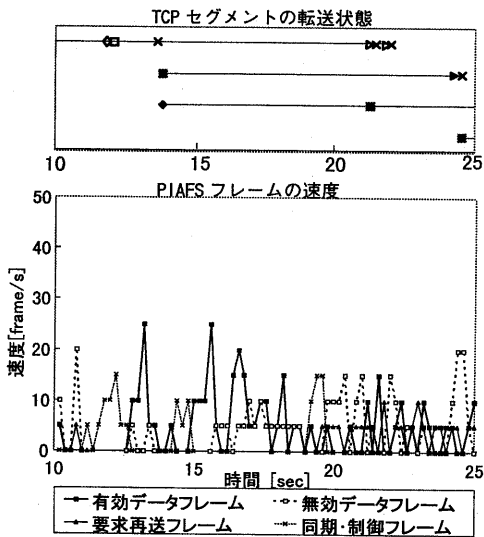


図11 BER= 2.5×10^{-3} の場合

4.3 伝送誤りの変化に対する振舞い

次に、回線品質が急激に劣化する場合に、TCPとPIAFSがどのように振る舞うかを調べるため以下のような実験を行った。

まずビット誤りが発生しない状態でデータ転送を行い、30秒後に $BER=2.0 \times 10^{-3}$ へと瞬間的に変化させた。その時の結果を図12、図13に示す。TCPセグメントの転送状態やPIAFSフレームの速度の意味は4.2節と同様である。図12はTCPの再送が発生しなかった場合であり、図13

は同じ条件下でTCPの再送が発生した場合である。なお、これらの場合においてはARQ再同期は発生しなかった。

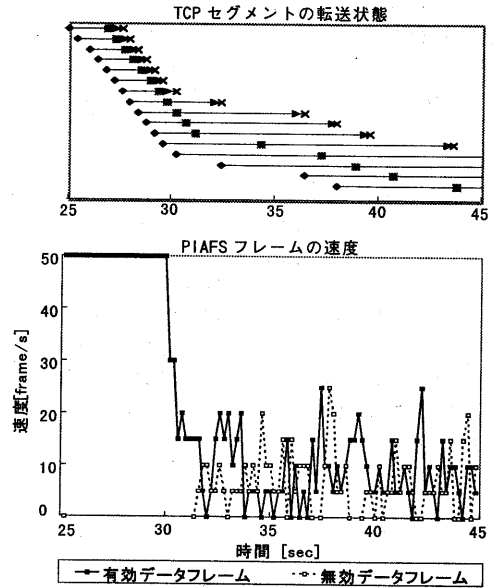


図12 TCPの再送が発生しなかった場合

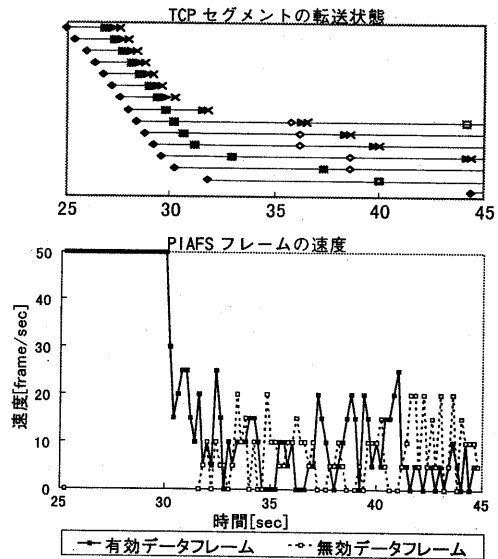


図13 TCPの再送が発生した場合

5 考察

(1) 図6～図8より $BER=10^{-4}$ 以下ではスループットの変化はほとんどなく、26.1kbit/s程度のスループットが得られている。 $BER=10^{-4} \sim 10^{-3}$ で

は要求再送フレームや無効データフレームが増加し、スループットが低下している。要求再送フレームより無効データフレームが多い理由は繰返し再送のためである。BER=10⁻³を超えると急激に同期・制御フレームが多くなり、送信されるデータフレーム自体が急激に減少している。

(2) 図 10より無効データフレームは平均して発生しているのではなく、周期的に発生している。これは、ARQ バッファ上で送信すべきフレームが一巡し、繰返し再送が発生しているためである。図 14に転送を開始して2.5秒後付近のPIAFSのシーケンスを示す。FFI=63で送信すべきフレームが一巡したため、最旧未確認フレーム(FFI=34)からの繰返し再送によって多くの無効データフレームが送られていることが分かる。一方、図 10のTCP セグメントの転送状態を見ると、応答遅延時間はほぼ一定であり、PIAFS レベルでの周期的な変動はTCP レベルには影響を与えていないことが分かる。

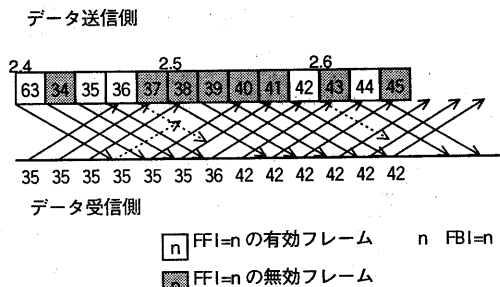


図14 BER=5.0×10⁻⁴の場合のシーケンス

(3) 図 11においてはPIAFS レベルでARQ 再同期が頻発しており、最初のセグメントは2度再送されている。しかし、それによってTCPの再送タイムアウト時間が長めに設定され、以後は再送は発生していない。図 15にBERが10⁻⁴以上の場合において、TCPソースが2分間で送信したセグメント数と、それに含まれる再送セグメントの数を示す。この図より、TCPの再送はほとんど発生していないことが分かる。よってBERが大きい場合においても始めのセグメントのみが再送を繰返し、その後は安定した送信を行うと考えられる。

(4) 図 12, 図 13に示したように、BERが0から2.0×10⁻³に急激に変化する場合には、同じ条件下であってもTCPの再送が発生する場合としない場合とがあり、発生する確率は10回に1回程度であった。従って、BERが急激に変化した場合も、そのためにTCPの再送が増加する

ことはないと考えられる。なお、図 13のように再送が発生した場合には、TCPの再送によりPIAFS レベルで転送されるフレーム数が増加し、スループットが低下する。

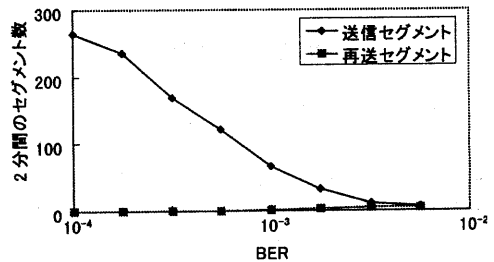


図15 TCPの送信セグメント中の再送セグメント

6 おわりに

本稿では、シミュレーションによりPIAFS上でTCPによる通信を行った場合のTCPならびにPIAFSプロトコルの振舞いについて解析を行い、その結果について述べた。実験結果から、BER=2.5×10⁻³以下の場合にはPIAFSの再送手順が有効に動作し、効率の良いデータ通信が可能である。またこの範囲では、BERが急激に変化した場合を含め、TCPの再送回数は小さい。これらの結果から、PIAFS上でのTCP/IP通信の有効性が確認されたと考えられる。

最後に、日頃御指導いただくKDD村上取締役、KDD研究所 鈴木副所長に感謝いたします。

参考文献

- [1]田中, "PHSによるデータ通信," 情報処理, Vol.38, No.5, pp.428-434, May 1997
- [2]PHSインターネット・アクセス・フォーラム, "PHS Internet Access Forum Standard (PIAFS)仕様書," 第1版, Mar. 1997
- [3]藤瀬, 川端, 今林, 小野塚, 井戸上, 加藤, "PHSデータ通信プロトコル(PIAFS)上でのTCP/IP通信実験," 信学技報, IN97-60, July 1997.
- [4]S. Keshav, "Real: A Network Simulator," Computer Science Department Technical Report 88/472, UC Berkeley, Dec. 1988.
- [5]長谷川, 阿野, 加藤, "シミュレーションを用いた広域ATM網におけるTCPの性能評価," 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会, 97-DPS-81-13, Feb. 1997