

通信媒体切替時の TCP の 性能劣化に対する改善手法の提案とその効果

塚本 和也[†] 福田 豊[†] 堀 良彰^{††} 尾家祐二^{†††}

九州工業大学 情報工学部 電子情報工学科^{† ††}

〒 820-8502 福岡県飯塚市川津 680-4

Phone:(0948)-29-7687, Fax:(0948)-29-7651

九州芸術工科大学 芸術工学部^{††}

〒 815-8540 福岡県福岡市南区塩原 4-9-1

Phone:(092)-553-4443, Fax:(092)-553-4440

E-mail: [†]{kazuya,ytk}@infonet.cse.kyutech.ac.jp, ^{††}hori@kyushu-id.ac.jp, ^{†††}oie@cse.kyutech.ac.jp

あらまし 近年「いつでも」、「どこでも」インターネットに接続したいという要求の高まりに伴い、携帯電話、無線 LAN 等の様々な無線インターネット接続技術が注目されており、新しい技術の研究、開発が盛んに行われている。このような状況から将来の移動端末は、有線及び無線という複数の通信媒体を保持し、ユーザーの嗜好や受信状況に応じて最適な通信媒体を選択する機構を有すると考えられる。そこで本研究では、通信媒体が動的に切り替わるような状況において、効率的な TCP 通信を実現する事を目的とする。現在のインターネット通信においてこの通信を実現するためには、(1) 通信媒体の切替に伴う IP アドレスの変化によって TCP 通信が途切れる。(2) TCP フロー制御が通信媒体切替によるロスパケットの発生や急激な帯域変化を考慮していないために効率的な通信再開が行えない、という二つの問題点を解決する必要がある。(1)の問題点を解決する機構は既に提案されているため、本研究では(2)の問題に着目し、通信媒体切替時のロスパケットの発生や急激な帯域変化を考慮したフロー制御方式を新たに提案する。加えて通信媒体の帯域、切断時間、切替回数を変化させ、通信媒体切替直後の TCP の *cwnd* 特性、スループット特性を性能指標としたシミュレーションを行い、その結果から本研究の提案手法の有効性を示す。

キーワード 通信媒体切替, TCP フロー制御, タイムアウト待ち時間, *ssthresh* 推定

TCP flow control with agile response to mobility of hosts with multiple datalink interfaces

Kazuya TSUKAMOTO[†], Yutaka FUKUDA[†], Yoshiaki HORI^{††}, and Yuji OIE^{†††}

^{† ††}Dept. of Computer Science and Electronics, Kyushu Institute of Technology
Kawazu 680-4, Iizuka, 820-8502 Japan

^{††}Department of Art and Information Design, Kyushu Institute of Design.

Siobaru 4-9-1, Minami-ku, Fukuoka, 815-8540 Japan

Phone:(092)-553-4443, Fax:(092)-553-4440

E-mail: [†]{kazuya,ytk}@infonet.cse.kyutech.ac.jp, ^{††}hori@kyushu-id.ac.jp, ^{†††}oie@cse.kyutech.ac.jp

Abstract Recently, wireless datalink technologies have received much attention as ways to obtain mobile access to the Internet anytime and anywhere. In this paper, we focus on the context that future mobile hosts will have multiple interfaces, and select dynamically the optimized one for some reasons. Consequently, our concern is a way of keeping an efficient TCP flow even in this context, in which the following issues can arise. 1) IP addresses can change with the change of datalink interfaces. 2) Current TCP flow control may not be able to keep pace with the change because timeout may occur and available bandwidth may change as well. The architecture which can resolve the first issue is already proposed. Therefore, We propose two new TCP flow control schemes which can resolve the second issue, and investigate the effectiveness of our proposal TCP flow control by means of simulation.

Key words datalink interface change, TCP flow control, retransmission timer expiration, estimation of *ssthresh*

1. はじめに

近年インターネットは飛躍的に発展し、その接続方法は多様化してきた。特に昨今では「いつでも」「どこでも」インターネットに接続するというモバイルアクセスを実現する手法として無線インターネット接続技術が注目されており、現在この技術に関する研究、開発が盛んに行われている。

次世代移動体通信システムである第三代移動体通信システム (IMT-2000) 準拠の通信方式である Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) では、屋外の広範囲をカバーする事が可能な、最大通信速度 2Mb/s のパケット交換サービスを近々開始する予定である。

その他の無線インターネット接続技術としては、802.11b に代表される無線 LAN が挙げられる。無線 LAN はサービスの提供範囲は狭いが、高速なデータ通信が可能である。この無線 LAN の普及によって屋外の特定の場所での高速なインターネット接続が可能となる。

このような多様な無線インターネット接続技術の急速な普及により、将来の移動端末は有線及び無線という複数の通信媒体を保持し、ユーザの嗜好、伝送能力、電波強度、ビットエラー等の条件に応じて、最適な通信媒体を動的に選択する機構を有すると考えられる。そこで本研究では通信媒体が動的に切り替わるような状況において、効率的な TCP 通信を実現する事を目的とする。現在のインターネット通信において、この通信を実現するためには、(1) ホストを識別する IP アドレスが通信媒体の切替により変化する。TCP フローは (始点アドレス, 始点ポート番号, 終点アドレス, 終点ポート番号) という 4 つのパラメータによって唯一に識別されている。このため IP アドレスが変化すると、切替後のフローは異なるフローとして認識される。その結果 TCP コネクションは切断され通信は途切れる。(2) TCP フロー制御が通信媒体の切替によって生じるロスパケット及び帯域変化を考慮していないため、効率的な通信再開が行えないという二つの問題を解決する必要がある。

以上の問題点から通信媒体の切替時に効率的な TCP 通信を実現するためには、「TCP コネクションの継続」と「効率的な通信再開」という二つの技術が必要になると考えられる。(1) の問題を解決する手法としては MIT の Snoeren 氏らによって IP アドレスの変化に対応可能な TCP コネクション継続機構 [1] が提案されている。しかしこの機構では既存の TCP のフロー制御を使用しているため、通信媒体の切替に伴うロスパケットや急激な帯域変化を考慮したフロー制御は行っていない。その為、この機構では (2) の問題点を解決できていない。そこで本研究では、通信媒体の切替に伴うロスパケットの発生や急激な帯域変化を考慮した TCP フロー制御方式を提案し、シミュレーションによりその有効性を示す。

まず 2 章では通信媒体切替時の効率的な TCP 通信を実現するために必要な技術を明らかにし、提案されている機構の達成点及び問題点を明らかにする。3 章では、本研究で新たに提案する TCP フロー制御の詳細について説明する。4 章では本研究で使用したシミュレーションモデルについて説明し、5 章ではシミュレーション結果を示す。最後に、6 章でこの論文をまとめる。

2. モビリティを考慮した既存の TCP 機構

通信媒体切替時において効率的な TCP 通信を実現するためには、前章で述べたように「TCP コネクションの継続」と「効率的な通信再開」という二つの技術が必要になると考えられる。

この二つの技術に関する関連研究は数多く行われており、その内の一つの手法である Snoeren 氏らの提案 [1] では、(1) の問題は解決しているが、(2) の問題は考慮されていない。また Goff 氏らの提案する Freeze TCP [2] では、効率的な TCP フロー制御を行うことによって (1)、(2) の問題を解決しようと試みている。以下、各機構に関して簡潔に述べる。

2.1 MIT の TCP コネクション継続機構

Snoeren 氏らの提案 [1] では、従来の TCP に、通信を行う双方の端末が TCP コネクションを継続する事が可能かをコネクション確立時に確認する Migrate-Permitted オプションと、通信媒体の切替に伴う IP アドレスの変化を通信相手端末に知らせる Migrate オプションを付加している。この機構ではこれらのオプションを含むパケットを通信を行う両端末間で交換することにより、通信媒体切替時の TCP コネクション継続を達成している。本研究ではこの機構による TCP 通信を、以降 MIT 方式と定義する。

MIT 方式による通信では、前述したように既存の TCP フロー制御を使用しているため、通信媒体の切替に伴うロスパケットの発生や帯域の急激な変化を考慮していない。このためコネクション再接続後、[I] ロスパケットの ACK を待ち続けるためにタイムアウト待ち時間が発生、[II] 帯域の変化に適応した効率的な通信再開ができない、という二つの問題点が生じる。

2.2 Freeze TCP の TCP フロー制御機構

Goff 氏らの提案する Freeze TCP [2] では、モビリティを考慮した新たなフロー制御機構を提案している。この提案方式では受信端末が通信媒体を切替るのを事前に検知した時点で、送信側に対して *awnd* をゼロにしたパケットを送信する。このパケットを受信した送信側の再送タイムは Freeze され、以降受信側から *awnd* がゼロではないパケットが返ってくるまで、送信側はパケットを新たに送信しない。この間再送タイムは Freeze されているためタイムアウト時間を迎えることはない ([I] を解決)。通信媒体切替後、送信側は受信側から返されるパケットの *awnd* に従い、即座にパケット送信を開始する。Freeze TCP では、この *awnd* を通信媒体切替以前の *cwnd* の値として通信を再開する事で効率的な通信再開を達成しようとしているが、これは同帯域の通信媒体の切替においてのみ有効だと考えられる。

このように Freeze TCP では、タイムアウト時間を待たないことによって効率的な通信再開を実現する手法を提案しているが、通信媒体の切替により急激に帯域が変化する状況を考慮していない。そのような状況を想定した場合、通信媒体の切替の完了直後に帯域に最適な *ssthresh* を設定しなければ、通信再開後のスロースタートによる効率的な通信再開が実現できない事が予想される。このため Freeze TCP では MIT 方式の問題点の内、[II] を解決するには不十分であると考えられる。

3. 本研究の提案手法

本章では本研究で提案する手法について説明する。提案手法では TCP コネクション継続を可能にする MIT 方式を元に、効率的な通信再開を実現する機構を既存のフロー制御機構に組み入れる。

3.1 Immediate Expiration of Timeout Timer

MIT 方式の TCP コネクション継続後にタイムアウトが発生するという問題 ([I]) を解決するために、TCP コネクション継続処理を行った後、タイムアウト時間を待たずにタイマーをリセットし、スロースタートによってデータ通信を再開するようにフロー制御を変更した。しかし通信再開後においては既存の TCP フロー制御を使用しているため、コネクション継続

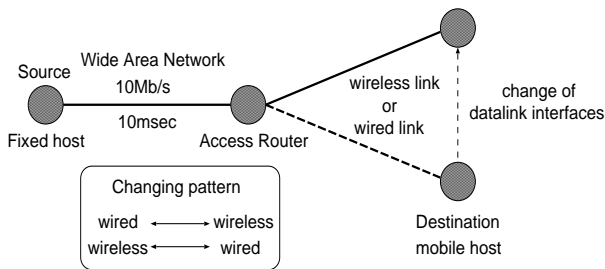


図 1 シミュレーションモデル.

後の通信再開時には MIT 方式と同様に、 $ssthresh$ は帯域変化に関わらず、切替以前の $cwnd$ の値の半分と設定される。本研究では以降この提案手法を Immediate Expiration of Timeout Timer(Immediate Expiration) 方式と定義する。

3.2 Bandwidth Aware Ssthreshold

前節同様 TCP コネクションを継続した後、Immediate Expiration 方式と同様にタイマーを強制的にリセットし、スロースタートによって通信を再開する。加えて効率的な通信再開を実現するため ([11])、データ通信再開直後に通信相手とのエンドツーエンドのネットワーク容量を帯域遅延積から算出し、その値を元に帯域に最適な $ssthresh$ 値を決定する。通信再開後、TCP がこの $ssthresh$ までデータ送信量をスロースタートによって素早く増加させることで効率的な通信再開が可能となる。本研究では以降この提案手法を Bandwidth Aware Ssthreshold 方式 (BW Aware Ssthresh) と定義する。

帯域遅延積からの最適な $ssthresh$ の決定手法については、Hoe 氏の提案する手法 [3] を使用した。この提案では通信開始時の過剰パケット転送によるパケットロスを防ぐために、通信開始時の 3 つのパケットによって通信相手までのエンドツーエンド間の帯域遅延積を算出している。具体的には、通信再開後の最初のパケットによって RTT を概算し、次に連続した 2 個のパケットを送信し、そのパケットの ACK のタイムラグから算出する。また帯域に最適な $ssthresh$ はこの帯域遅延積に基づいて決定される。以下の式 (1)、(2) に [3] で提案されている式を示す。

$$\text{帯域遅延積} = RTT \times \frac{\text{パケットサイズ}}{ACK \text{ 受信タイムラグ}} \quad (1)$$

$$ssthresh = \frac{\text{帯域遅延積}}{\text{パケットサイズ}} \quad (2)$$

この $ssthresh$ の推定は [3] では TCP コネクションの確立時のみに限定されていたが、Aron 氏らの提案する TCP [4] では、Hoe 氏の提案する $ssthresh$ の推定手法をある条件を満たす間に常に行っており、その間は $ssthresh$ を動的に変更している。そこで本研究では [4] と同様に、通信媒体の切替直後という条件を満たす間 $ssthresh$ の推定を行い、通信媒体を切り替える毎に帯域に最適な $ssthresh$ を決定するように変更を加えている。

4. シミュレーションモデル

本研究では図 1 に示すような AR(Access Router) を介して固定端末である Source と移動端末である Destination が通信しているモデルを用いてシミュレーション実験を行う。シミュレータとしては TCP の性能評価に広く用いられている VINT プロジェクトのネットワークシミュレータ NS Version 2 [5] に、前章で述べた提案手法を追加したものを用いる。

固定端末で発生したトラヒックは、まず広域ネットワークを

経由して AR に到着する。その間のリンク帯域は 10Mb/s、伝搬遅延時間は 10msec とした。その後、トラヒックは動的に切り替えられる通信媒体を通して移動端末に伝送される。AR と移動端末間の帯域と遅延は通信媒体の変更に伴い、動的に変更するものとした。

本研究では全体のシミュレーション時間は 60 秒間とし、シミュレーション開始から 10 秒の時点で通信媒体の切替を開始した。通信切断時間は 0.5 秒または 3.5 秒とし、TCP フロー数は 1 本、TCP パケットサイズは 1000 バイトとした。TCP のアルゴリズムとしては NewReno [6] を使用した。また AR から移動端末までの wireless link としては、無線 LAN(802.11b) と IMT-2000 を想定し、wired link としては LAN 環境 (100Mb/s) を想定した。TCP トラヒックは無限のデータを連続してファイル転送する greedy トラヒックとした。

本研究では TCP の通信媒体切替時の過渡特性に着目し、通信媒体切替直後の $cwnd$ 特性、スループット特性を性能指標とした。その上で通信媒体の帯域、切断時間、切替回数を変化させシミュレーションを行い、評価を行った。

5. シミュレーション結果

AR と移動端末間の通信媒体を切り替えた直後の TCP の $cwnd$ 特性とスループット特性に関して性能評価を行った。本章ではシミュレーション結果を示し、考察する。

まず帯域が異なる、または同じ通信媒体の切り替えた場合について、次に切替に伴う切断時間及び切替回数を変化させた場合についてそれぞれ結果を示し、この変化が現在の TCP(MIT) と 2 つの提案手法 (Immediate Expiration, BW Aware Ssthresh) の計 3 種類の TCP フロー制御にどのような影響を与えるかに着目する。またこれらのシミュレーション結果から提案手法の有効性を示す。

5.1 帯域の変化による影響

5.1.1 広帯域から狭帯域への切替

まず AR と移動端末間の通信媒体を広帯域である無線 LAN から狭帯域である IMT-2000 へと切り替えた場合について調査する。この通信媒体の切替により AR と移動端末間の帯域は 11Mb/s から 384Kb/s へ、遅延は 15msec から 70msec へと変化するものとした。また通信媒体の切替に伴う通信切断時間は 0.5 秒とした。

通信媒体切替直後の $cwnd$ 特性を図 2 に示す。図 2 から通信媒体の切替は 10.5 秒で終了しているにも関わらず、MIT 方式は約 0.5 秒程タイムアウト時間を待っている。このタイムアウト待ち時間は、通信媒体切替に伴う通信切断中に生じたロスパケットの ACK を待ち続けるためだと考えられる。またタイムアウト時間を迎えた後、スロースタートによって通信を再開しているが、その後 $cwnd$ は急激に増加している。これは通信媒体切替以前の帯域が 11Mb/s と広帯域であるため、切替直前の $cwnd$ が大きな値となるためである。具体的には、通信再開後の $ssthresh$ の値が、この大きな $cwnd$ の半分に設定されるため、通信再開後スロースタートによって、この大きな $ssthresh$ まで $cwnd$ は指数的に増加しているためである。しかし通信媒体切替後の帯域は 384Kb/s と小さいため、急激に $cwnd$ を増加させると、通信再開直後に複数のパケットロスが生じることになる。図 2 において 12.5 秒付近から長い間 $cwnd$ が変化しない期間が存在するが、この期間において通信再開直後に発生したロスパケットを、固定端末が NewReno のファストリカバリアルゴリズム [6] によって再送しているためだと考えられる。この結果から分かるように、MIT 方式は TCP コネクション継続後、効率的な通信再開が行えない事がわかる。

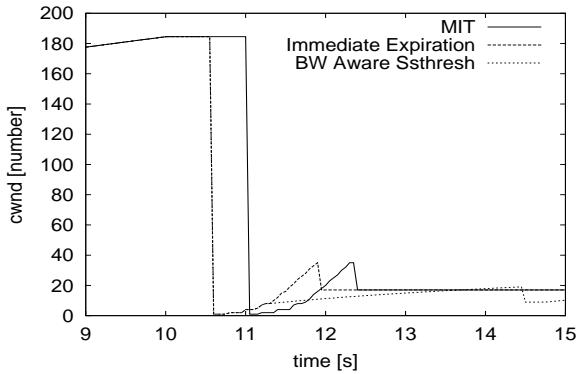


図2 cwnd 特性.(11Mb/s 384Kb/s)

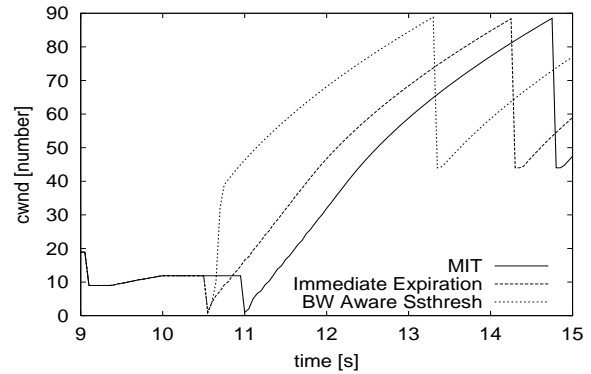


図3 cwnd 特性.(384Kb/s 100Mb/s)

表1 スループット特性.(11Mb/s 384Kb/s)

| 帯域切替パターン 11 Mb/s 384 Kkb/s | スループット [Mb/s] (%) |
|-------------------------------|----------------------|
| MIT | 0.117 (30.5) |
| Immediate Expiration | 0.122 (31.8) |
| BW Aware Ssthresh | 0.291 (75.8) |

表2 スループット特性.(384Kb/s 100Mb/s)

| 帯域切替パターン 384 Kb/s 100 Mb/s | スループット [Mb/s] (%) |
|-------------------------------|----------------------|
| MIT | 6.485 (64.9) |
| Immediate Expiration | 7.372 (73.7) |
| BW Aware Ssthresh | 8.218 (82.2) |

次に Immediate Expiration 方式は、通信媒体の切替完了直後からスロースタートによって通信を再開している。通信再開後は MIT 方式と同様に *cwnd* が指数的に増加している。これは Immediate Expiration 方式では既存の TCP フロー制御を使用しているため、MIT 方式と同様の理由によるものと考えられる。このため Immediate Expiration 方式でも、通信再開後まもなくして、長い間 *cwnd* が変化しない期間が存在し、ロスパケットの再送を行っていると考えられる、この結果から、Immediate Expiration 方式だけでは TCP コネクション継続後、効率的な通信再開が行えない事がわかる。

一方 BW Aware Ssthresh 方式は、Immediate Expiration 方式と同様に通信媒体の切替完了直後すぐにスロースタートによって通信を再開し、切替後の通信媒体の帯域推定から帯域に最適な *ssthresh* を決定している。固定端末は最適な *ssthresh* に基づきスロースタートによってパケットを送信するため、ロスパケットが生じていない事がわかる。以上の結果から、BW Aware Ssthresh 方式を用いる事で TCP コネクション継続後の効率的な通信再開が可能である事がわかる。

続いて通信媒体切替時のスループットの過渡特性を評価するために、切替開始後 5 秒間の平均スループットを表 1 に示す。() 内はボトルネックリンク帯域で正規化した値である(この場合のボトルネックリンク帯域は 384Kb/s)。

表 1 を見ると、BW Aware Ssthresh 方式のスループットは MIT 方式のスループットに比べ約 2.5 倍、Immediate Expiration 方式のスループットに比べ約 2.4 倍とかなり良好なスループットを示し、最も効率的な通信再開を行っている事がわかる。この結果から *ssthresh* の推定が TCP のスループットに大きな影響を与える事がわかる。

5.1.2 狭帯域から広帯域への切替

次に AR と移動端末間の通信媒体を狭帯域である IMT-2000 から広帯域である有線 LAN へと切替えた場合について調査する。この通信媒体の切替により AR から移動端末間の帯域は 384Kb/s から 100Mb/s へ、遅延は 70msec から 5msec へと変化するものとした。また通信媒体切替に伴う通信切断時間は 0.5 秒とした。

通信媒体切替直後の *cwnd* 特性を図 3 に示す。図 3 から MIT

方式は図 2 と同様にタイムアウト時間を待って、スロースタートによって通信を再開している。また通信再開後、すぐに輻輳回避モードによる通信に遷移している事が分かる。これは通信媒体切替以前の帯域が 384Kb/s と狭帯域であるために、切替以前の *cwnd* は小さくなっているためである。具体的には通信再開後の *ssthresh* が、この小さな *cwnd* の半分と設定されるため、通信再開直後、すぐに輻輳回避モードによる通信に遷移すると考えられる。また Immediate Expiration 方式は、図 2 と同様に通信媒体切替完了直後から通信を再開しているが、MIT 方式と同様にすぐに輻輳回避モードによる通信に遷移している。これは既存の TCP フロー制御を使用している事から、MIT 方式と同様の理由と考えられる。これに対し BW Aware Ssthresh 方式では、帯域に最適な *ssthresh* を推定しているため、スロースタートによって推定した *ssthresh* まで素早くデータ送信量を増加させることにより、効率的に通信を再開している様子がわかる。

続いて通信媒体切替時のスループットの過渡特性を評価するために、切替開始後 5 秒間の平均スループットを表 2 に示す。() 内はボトルネックリンク帯域で正規化した値である(この場合のボトルネックリンク帯域は 10Mb/s)。

表 2 を見ると、BW Aware Ssthresh 方式のスループットは MIT 方式のスループットに比べ約 1.2 倍、Immediate Expiration 方式のスループットに比べ約 1.1 倍と最も良好なスループットを示し、効率的な通信再開を行っている事がわかる。

5.1.3 同一の通信媒体の切替

最後に AR と移動端末間の通信媒体の切替を帯域が等しい無線 LAN とした場合について調査する。この通信媒体の切替によって帯域は 11Mb/s、遅延は 15msec から変化しないものとした。また通信媒体切替に伴う通信切断時間は 0.5 秒とした。

通信媒体切替直後の *cwnd* 特性を図 4 に示す。図 4 から MIT 方式は図 2、3 と同様にタイムアウト時間を待って通信を再開しているため、効率的な通信再開を実現出来ていない事がわかる。また Immediate Expiration 方式は、これまでと同様にタイムアウト時間を待たずに通信媒体切替直後から通信を開始しており、通信再開後は MIT 方式と同様に、切替以前の *cwnd* の半分に *ssthresh* が設定されている。これに対し BW Aware

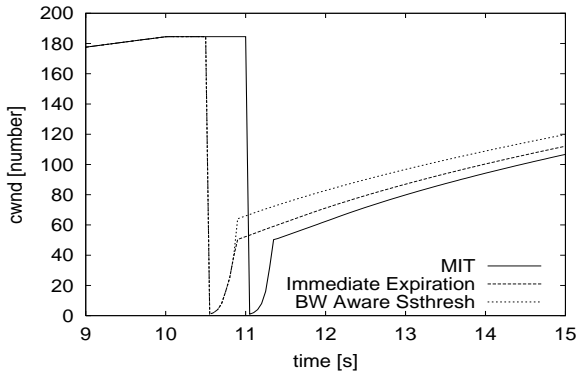


図 4 cwnd 特性.(11Mb/s 11Mb/s)

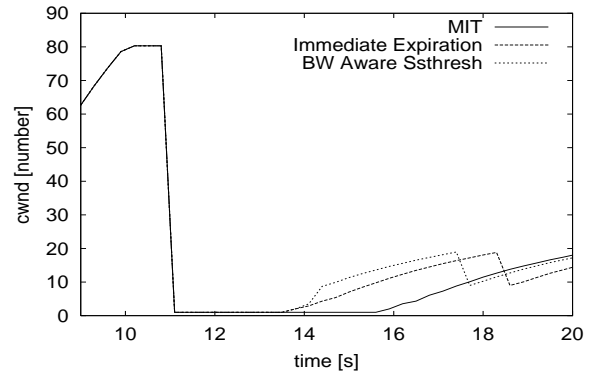


図 5 cwnd 特性.(11Mb/s 384Kb/s)

表 3 スループット特性.(11Mb/s 11Mb/s)

| 帯域切替パターン 11M b/s 11 Mb/s | スループット [Mb/s] (%) |
|-----------------------------|----------------------|
| MIT | 6.926 (69.2) |
| Immediate Expiration | 7.830 (78.3) |
| BW Aware Ssthresh | 8.000 (80.0) |

表 4 スループット特性.(11Mb/s 384Kb/s)

| 帯域切替パターン 11M b/s 384 Kb/s | スループット [Mb/s] (%) |
|------------------------------|----------------------|
| MIT | 0.124 (32.3) |
| Immediate Expiration | 0.199 (51.8) |
| BW Aware Ssthresh | 0.213 (55.5) |

Ssthresh 方式では、帯域に最適な *ssthresh* を推定しているため、最も効率的に通信を再開している様子がわかる。

続いて通信媒体切替時のスループットの過渡特性を評価するために、通信媒体切替開始後 5 秒間の平均スループットの値を表 3 に示す。() 内はボトルネックリンク帯域で正規化した値である(この場合のボトルネックリンク帯域は 10Mb/s)。

表 3 を見ると BW Aware Ssthresh 方式のスループットは MIT 方式のループットに比べ約 1.2 倍、Immediate Expiration 方式のスループットとはほぼ同等となった。これは同一の通信媒体を切り替えた場合、切替後の帯域に最適な *cwnd* や *ssthresh* が切替以前とそれほど変わらないためだと考えられる。

5.1.1 節から 5.1.3 節では帯域の異なる、もしくは同じ通信媒体を切り替えた場合において、その変化が TCP の性能にどのような影響を与えるかに着目してシミュレーションを行った。その結果 MIT 方式と Immediate Expiration 方式による通信は、帯域が大きく変化するような切替において性能が大きく劣化し、安定した性能を示さないことがわかった。それに対し BW Aware Ssthresh 方式による通信は、どの帯域の通信媒体に切り替えても最も安定した性能を示す事が明らかとなった。

5.2 切断時間の変化による影響

本節では AR と移動端末間の通信媒体を無線 LAN から IMT-2000 へと切り替え、かつ切替にかかる時間が長い場合について調査する。この通信媒体の切替により AR から移動端末間の帯域は 11Mb/s から 384Kb/s へ、遅延は 15msec から 70msec へと変化するものとした。

現在の IMT-2000 におけるデータ通信では、データ通信に先立って通信相手との回線を確立する必要が生じる。つまり無線 LAN から IMT-2000 へと通信媒体を切り替える場合、データ通信を開始するまでの切断時間が長くなる。そこで本節では通信媒体の切替にかかる時間を 3.5 秒としてシミュレーションを行った。

通信媒体切替直後の *cwnd* 特性を図 5 に示す。図 5 から MIT 方式は、通信媒体の切替完了後 (13.5 秒) から、タイムアウト時間 (16 秒付近) を迎えるのを約 2.5 秒間待って、スロースタートによって通信を開始している。TCP の再送タイマー (RTO) は、タイムアウト時間を迎える毎に指数的に大きくなっていく。

このため切断時間が長くなるとタイムアウト待ち時間も指数的に長くなる。また 2 回以上タイムアウトを迎えているため、MIT 方式では通信再開後の *ssthresh* の値は最小値 (2) に設定される。このため通信再開後すぐに輻輳回避モードによる通信に遷移している。以上のような理由から MIT 方式の通信は効率的な通信が行えない事がわかる。

Immediate Expiration 方式は、通信媒体切替直後 (13.5 秒) からスロースタートによって通信を開始していることがわかる。しかし MIT 方式と同様の理由により通信媒体切替後すぐに輻輳回避モードに遷移しているため、効率的な通信を行っていない事がわかる。これに対し BW Aware Ssthresh 方式は、複数回のタイムアウトを迎えたとしても、通信再開直後に帯域に最適な *ssthresh* の値を決定しているため、スロースタートによって効率的な通信再開を行っている事がわかる。

続いて通信媒体切替時のスループットの過渡特性を評価するために、通信媒体切替後 10 秒間の平均スループットを表 4 に示す。() 内はボトルネックリンク帯域で正規化した値である(この場合のボトルネックリンク帯域は 384Kb/s)。

表 4 を見ると、BW Aware Ssthresh 方式のスループットは MIT 方式のスループットに比べ約 1.7 倍、Immediate Expiration 方式のスループットに比べ約 1.1 倍と最も良好なスループットを示す事がわかる。また Immediate Expiration 方式のスループットが MIT 方式のスループットに比べて約 1.6 倍も良好なスループットを示す事から、切断時間が長い場合においてはタイムアウトを待たない事が *ssthresh* の推定を行う事よりもスループットに大きな影響を与える事がわかる。

本節では、通信媒体切替に伴う通信切断時間が長かった場合に着目してシミュレーションを行った。その結果通信切断時間が長い場合においては、タイムアウト時間を待たないことがスループットに大きな影響を与える事が明らかになった。

5.3 複数回の切り替えによる影響

本節では AR と移動端末間の通信媒体を無線 LAN と IMT-2000 の間で複数回交互に切り替え、その切替が TCP に及ぼす影響について調査する。その通信媒体の切替はシミュレーションの開始から 10 秒、12 秒、14 秒、16 秒と接近した間隔で起きるものとした。またそれぞれの通信媒体切替に伴う切断時間は

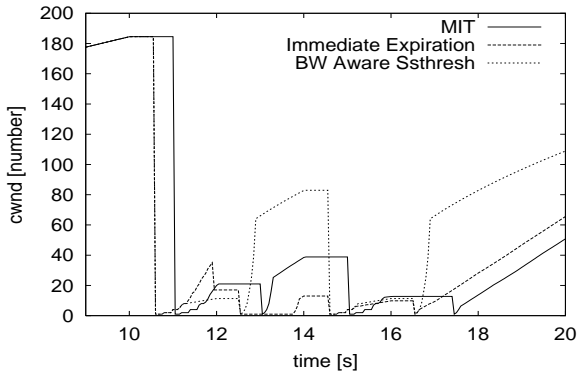


図6 cwnd 特性.

0.5 秒とした．この通信媒体の切替により AR と移動端末間の帯域は 11Mb/s と 384Kb/s を，遅延は 15msec と 70msec を交互に変化するものとした．

図 6 は，通信媒体切替直後の *cwnd* 特性を示した図である．図 6 から MIT 方式は，通信切断が起きるたびに約 1 秒間タイムアウトを待ちスロースタートによって通信を再開している事が分かる．また通信再開直後にすぐに次の通信媒体の切替が生じ，*cwnd* が効率的に増加しない．このためタイムアウトを迎えた後の通信再開時の *ssthresh* は小さくなり，すぐに輻輳回避による通信に遷移している．以上のような理由から MIT 方式は，効率的な通信再開を実現できていない事がわかる．

Immediate Expiration 方式は 1 回目の切替完了直後からスロースタートによって通信を再開しているが，5.1.1 節と同様に急激な *cwnd* の増加により複数のロスパケットが発生している．そのため 2 回目の切替が生じる 12 秒直前でファストリカバリアルゴリズムに入り，ロスパケットの再送を開始している．切替終了後 (12.5 秒)，*cwnd* がしばらく 1 のまま変化しないのは，このファストリカバリの動作が継続しているためだと考えられる．ファストリカバリ終了後は，スロースタートによって通信を開始しているが，MIT 方式と同様に *cwnd* が効率的に増加しないため効率的な通信再開が実現できていない．これに対し BW Aware Ssthresh 方式は，通信媒体の切替終了毎に帯域に最適な *ssthresh* を推定しているため，この場合でも効率的な通信再開を実現している事がわかる．

続いて通信媒体切替が連続して起こった際の提案手法の有効性を示すために，1 回目の通信媒体の切替開始後 10 秒間の平均スループットを表 5 に示す．また表 5 には本節のような通信媒体の切替が起こった際に理想と考えられるスループットについても示している．() 内は理想値と考えられるスループットで正規化した値である．理想値と考えられる平均スループットは以下の式 (3) に従って算出し，測定したシミュレーション時間は 10 秒から 20 秒までの 10 秒間とした．

$$\text{理想値} = \left(\frac{\text{通信媒体の帯域} \times \text{通信継続時間} \text{ の和}}{\text{測定したシミュレーション時間}} \right) \quad (3)$$

表 5 を見ると BW Aware Ssthresh 方式のスループットは MIT 方式のスループットに比べ約 3.5 倍，Immediate Expiration 方式のスループットに比べ約 2.4 倍と極めて良好なスループットを示すことがわかる．この結果から通信媒体の切替が接近して連続で起きるような状況においては，BW Aware Ssthresh 方式を用いた通信を行う事で最も効率的な通信再開が実現できる事が明らかとなった．

表 5 スループット特性.

| | スループット [Mb/s] (%) |
|----------------------|----------------------|
| 理想値 | 5.615 |
| MIT | 1.186 (21.1) |
| Immediate Expiration | 1.748 (31.1) |
| BW Aware Ssthresh | 4.162 (74.1) |

6. ま と め

本研究では将来の移動体端末が有線及び無線という複数の通信媒体を備え，状況に応じて最適な通信媒体に動的に切替える機構を有する点に着目した．しかし現在のインターネットでこの機構を実現するには，(1) 通信媒体の切替に伴う IP アドレスの変化によって TCP 通信が途切れる．(2) TCP フロー制御が通信媒体切替によるロスパケットの発生や急激な帯域変化を考慮していないために効率的な通信再開が行えない，という問題点を解決する必要がある事がわかった．そこで本研究は (1) の問題を解決する既存の機構を拡張し，(2) の問題を解決する事を目的とした．新たに二つの TCP フロー制御方式 (Immediate Expiration, BW Aware Ssthresh) を提案し，その有効性をシミュレーションにより評価した．その結果帯域が急激に変化する場合では，BW Aware Ssthresh 方式によってスループットが大きく改善された事から，*ssthresh* の推定がスループットに大きな影響を与える事を明らかにした．また切替に伴う切断時間が長い場合では，Immediate Expiration 方式によってスループットが大きく改善された事から，タイムアウト時間を待たない事がスループットに大きな影響を与える事を明らかにした．最後に切替が連続して複数回起こった場合では，BW Aware Ssthresh 方式によってスループットが大きく改善された事から，頻繁に通信媒体が切り替えるような将来の移動端末環境では，BW Aware Ssthresh 方式を用いた通信が極めて有効であることを明らかにした．

現在，本研究の前提は移動端末と固定端末の通信に限定されている．そこで今後の研究では，両方の端末が移動端末であり，かつ同時に移動を開始した場合において，その通信を継続するための機構の開発とその性能評価に関して検討を行う必要がある．

謝辞 本研究の一部は，日本学術振興会による科学研究費補助金 (課題番号 13875074) の支援を受けている．ここに記して謝意を表す．

文 献

- [1] Alex C. Snoeren and Hari Balakrishnan, "An End-to-End Approach to Host Mobility," *ACM/IEEE MobiCom'00*, no. 6, pp. 155-166, Boston, Aug., 2000.
- [2] T. Goff, J. Moronski, D. S. Phatak, and V. Gupta, "Freeze-TCP: a True End-to-end TCP Enhancement Mechanism for Mobile Enviroments," In *Proc. IEEE INFO-COMM'00*, Tel Aviv, Israel, March 2000.
- [3] Janey C. Hoe, "Improving the Start-up Behavior of a Congestion Control Scheme for TCP", in *Proc. ACM SIG-COMM'96*, Aug., 1996, pp. 270-280.
- [4] M. Aron, P. Druschel, "TCP: Improving Startup Dynamics by Adaptive Timers and Congestion Control", *Technical Report TR98-318*, Rice University Computer Science, 1998.
- [5] VINT Project, Network Simulator ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- [6] S. Floyd and T. Henderson, "The NewReno modification to TCP's fast recovery algorithm," *RFC2582*, April 1999.