

## 複数 Mobile Network による経路アグリゲーションの設計と実装

舩 田 知 広<sup>†</sup> 石 原 進<sup>††</sup>

筆者らは、無線通信における移動端末の低速な通信を解決する手法として通信回線共有方式 SHAKE (SHARing multipath procedure for a cluster network Environment) を提案している。これは、近隣にある複数の移動端末を短距離高速リンクで一時的に接続し、各端末がもつ外部へのリンクを同時利用することで通信速度向上を実現する方式である。本論文では、SHAKE を応用し、Network Mobility (NEMO) における Mobile Router (MR) を相互接続させることで、複数 MR の外部リンクの同時利用を可能とし、MR 配下のネットワークに対してリンクの帯域および通信の安定性を向上させる NEMO-SHAKE の設計と実装について述べる。その基本動作についての実験を行った結果、経路 2 本を用いた場合のスループットは、その合計帯域をもつ経路 1 本を使用した場合の値と同等であり、NEMO-SHAKE の有効性を確認することができた。

### Design and implementation of route aggregation with multiple Mobile Networks

TOMOHIRO MASUDA<sup>†</sup> and SUSUMU ISHIHARA<sup>††</sup>

We have proposed a system that aggregates links between multiple mobile hosts and the internet, and improves transmission speed between mobile hosts and hosts in the Internet (SHAKE: SHARing multipath procedure for a cluster network Environment). This paper describes the design and implementation of SHAKE with Network Mobility (NEMO-SHAKE). NEMO-SHAKE aggregates external links of mobile routers on different vehicles that connected each other with short range highspeed wireless links. Therefore this system enables to increase bandwidth and stability of links between the mobile network and the Internet. We measured the performance of NEMO-SHAKE using its implementation. Evaluation results show that the throughput of file transmission in the case when two paths were used was as same as one in the case when one path whose bandwidth is same as the sum of the bandwidth of two paths was used.

#### 1. はじめに

携帯移動通信端末の普及とともに、Mobile IPv6<sup>1)</sup> や Network Mobility (NEMO)<sup>2)</sup> 等の移動体通信技術が重要視されており、特に ITS 分野での利用が期待されている。しかしながら、無線通信は状況によって接続が途切れることもあり、通信の安定性に乏しい。また、高品質化するアプリケーションに対応するため、無線通信における帯域の増大が必要になる。

筆者らの研究グループでは、Mobile IP および Mobile IPv6 を用いて、複数の端末の通信経路を同時利用し、帯域の増大および接続性の安定をはかる通信回線共有方式 (SHAKE: SHARing multipath procedure for a cluster network Environment) の提案、実装、評価を行っている<sup>3)4)</sup>。

SHAKE ではまず、移動端末が近隣の端末と協調して、短距離高速リンクを用いて一時的なネットワークを構築する。そして、ネットワーク外部のホストと通信を行う際、そのネットワーク内の移動端末がもつ外部リンクを複数同時に利用し、各リンクにトラフィックを分散させ

る。このようにして、SHAKE では通信速度、信頼性の向上を実現させる。

さらに筆者らは、Mobile IPv6 を拡張した NEMO の Mobile Router (MR) を相互接続させ、複数の通信経路を同時に利用することでネットワーク単位での接続の安定性および通信速度の向上をはかる NEMO-SHAKE を提案している<sup>5)</sup>。本論文では、NEMO-SHAKE の基本動作の実装と評価について述べる。

以下、2 章では NEMO-SHAKE の設計とその関連研究について述べる。そして 3 章で NEMO-SHAKE の実装およびこれを用いた基本動作の評価について述べ、4 章でまとめとする。

#### 2. NEMO-SHAKE

移動端末の移動透過性を保障する Mobile IPv6 を、ネットワークの移動透過性を保障するように拡張した技術が NEMO である。NEMO-SHAKE は、この NEMO を用いて以下のように SHAKE を実現したものである。

NEMO-SHAKE では、近接する自動車等の Mobile Network に搭載された MR が無線 LAN により複数相互接続し、一時的なネットワーク (Alliance) を構築する。この Alliance を構成する MR の中で、他の MR の外部リンクを用いて通信を行う Mobile Network の MR を Alliance

<sup>†</sup> 静岡大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

<sup>††</sup> 静岡大学工学部

Faculty of Engineering, Shizuoka University

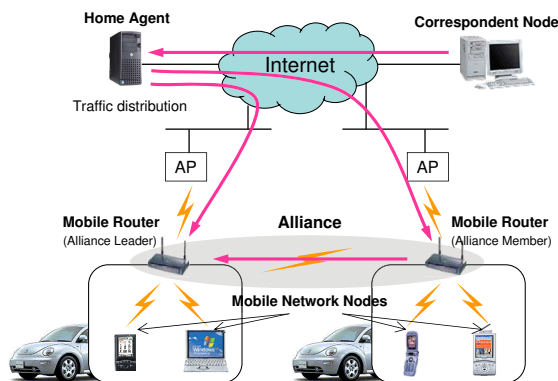


図 1 NEMO-SHAKE

Leader (ALR), ALR に協力する MR を Alliance Member (AMR) と呼ぶ。

ALR は, AMR の外部リンクを利用して通信を行うために, 自身の Home Agent (HA) に対して AMR を登録する。ALR の HA は, ALR の Mobile Network Prefix (MNP) 宛のパケットを, 登録された MR へそれぞれ分配する。AMR では, ALR の HA から配送されたパケットを ALR-AMR 間のリンクを用いて ALR へ転送する。このようにして, 通信相手である Correspondent Node (CN) と ALR 配下の移動ネットワーク内で複数の通信経路を同時に利用し, 帯域の増大および通信の安定性の向上をはかる (図 1)。

SHAKE では, 複数経路にトラフィックを分散させる場所が重要となる。NEMO では, MR 配下の端末である Mobile Network Node (MNN) が CN と通信を行う際, パケットは必ず MR の HA を経由する。そこで, NEMO-SHAKE では, トラフィック分配機構を ALR および ALR の HA に設置する。

## 2.1 関連研究

NEMO-SHAKE のように NEMO 上で複数の通信経路を同時に用いるという研究がいくつか行われている。

塚田らは文献 6) で, ひとつの Mobile Network に複数の MR が存在する状況において, 複数 MR が持つ外部との接続性を有効に利用する手法として, Multiple Mobile Router Management (MMRM) を提案している。この MMRM を各 MR に導入することにより, Mobile Network 側の Ingress インタフェース間で MR-MR 間トンネルを確立し, 各 MR がもつ外部接続に用いる Egress インタフェース情報を共有する。そして, MR 配下にある MNN が Mobile Network 外部のホストと通信する際, その MNN のデフォルトルータである MR は, MNN からのトラフィックが自身が持つポリシーに従えば, そのまま HA へ転送し, そうでなければ, MR 間トンネルを通して適切な MR へトラフィックを振り分ける。

今井らは文献 7) で, MR の多重化システムを実現して

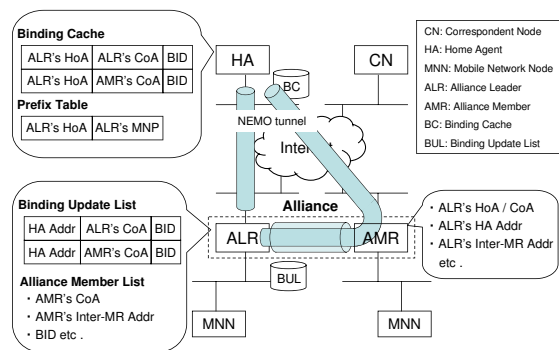


図 2 各端末が保持する情報

いる。多重化システムとは, 複数の通信メディアを同時に使用することによって, リンクの広帯域化を図るものである。すなわち, ひとつの MR が複数の Egress インタフェースを持ち, 各インタフェースから HA に対して自身の登録を行うことにより, そこで使用される通信メディアの同時利用を可能にする。この文献では, 複数の Egress インタフェースを搭載した MR を実装し, CDMA2000 1x と CDMA2000 1x EV-DO を用いた実験を行っている。また, トラフィック分配時の性能向上のために, パケットスケジューリング, 順序制御機能, ポリシールーティングを実現している。

上に挙げた 2 つの研究では, 複数の外部リンクを持つ単一の Mobile Network または MR が, それぞれのインタフェースを介して HA に自身の登録を行い, 複数経路の同時利用を可能にしている。しかし, Mobile Network が存在する位置によっては, Mobile Network 自体が通信不可能になる場合も考えられる。

一方, NEMO-SHAKE の場合, 独立した Mobile Network の MR が, 外部および内部のインタフェース以外のインタフェースを用いて相互接続し, 一時的なネットワークを構築する。これにより, ALR-AMR 間のリンクを介すことによって, ALR は AMR の外部リンクを用いることができる。このように, 独立した Mobile Network の MR 間で接続することにより, たとえひとつの Mobile Network が通信を行えなくなったとしても, 協調している他の MR との接続が維持されており, かつその MR の外部リンクが使用可能ならば, 外部との通信を維持することができる。また, 各 MR は外部リンクのための複数のインタフェースを用意する必要がないという利点もある。

## 2.2 NEMO-SHAKE の設計

### 2.2.1 Alliance の構築

ALR は, 他の MR の外部リンクを用いて通信を行うために, これらと Alliance を構築してパケットを転送してもらう必要がある。この Alliance を構築する際, ALR は

近隣の MR に対して、Alliance Request (AReq) を MR 間インタフェースから定期的送信する。AReq を受信した MR は、自身が AMR として Alliance に参加するならば、AReq に対して Alliance Reply (ARep) を返信する。

AReq メッセージには ALR の Home Address (HoA)、Care-of Address (CoA)、そして MR 間インタフェースのグローバルアドレスが含まれる。また、ARep メッセージには、AMR の CoA および MR 間インタフェースのグローバルアドレスが含まれる。ALR は、メッセージ交換によって得られた AMR の情報を Alliance Member List として保持する (図 2)。

### 2.2.2 複数の MR の CoA の登録

NEMO-SHAKE では、複数経路を使用するために、ALR の HA でトラフィック分配を行う。ALR は、ALR の HoA に対して自身の CoA および AMR の CoA を複数対応付けさせることにより、ALR の HA に複数 MR の登録を行う。しかしながら、Mobile IPv6 および NEMO の仕様では、一つの HoA に対して一つの CoA しか登録することはできない。そこで、登録する複数の CoA を識別するため、各 CoA に対して Binding Unique Identification number (BID)<sup>8)</sup> を与える。これにより、登録先である ALR の HA に対して、複数 CoA の登録を可能にする。先に述べた関連研究においても BID を使用しているが、その場合、CoA を持つ各インタフェースを介して Binding Update を送信している。一方、NEMO-SHAKE では、AMR における NEMO-SHAKE 参加に対する処理の軽減のため、ALR が代表して AMR の CoA の登録を行う。

ALR は、Binding Update に、SHAKE を使用することを示すため、新たに用意した SHAKE (S) フラグを追加する。さらに、登録識別子である BID を通知する BID sub-option をこの Binding Update に付加する。このとき、ALR 自身の CoA を登録する場合は、BID sub-option に、ALR の登録であることを示す P フラグをセットし、AMR の CoA を登録する場合は、P フラグをセットせず、AMR の CoA を Alternate CoA option に格納して ALR の HA に伝える。

ALR の HA では、Binding Cache において各 MR の CoA と BID を ALR の HoA に対応付けて保持する (図 2)。

### 2.2.3 通信

CN から MNN へ送信されるパケットは、HA を経由して転送される。ALR の HA が ALR のネットワークへパケットを転送する場合、HA は受信したパケットの宛先アドレスのネットワークプレフィックスが、保持している Binding Cache の MNP と一致するかどうか確かめる。一致するならば、その対応付けに基づき、その MNP と対応する MR が ALR となっている Alliance 内の各 MR の CoA 宛にパケットをカプセル化して転送する。AMR は、Alliance 構築時に得られた情報から、受信したパケット

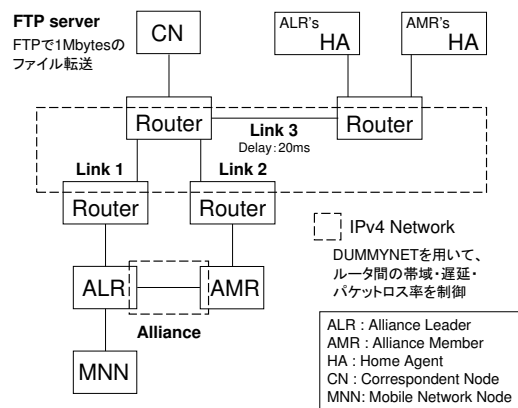


図 3 実験環境

の送信元が ALR の HA であると判断する。そして経路制御ヘッダの次ホップが ALR の CoA であるなら、MR 間インタフェースを介して、そのパケットを ALR へ転送する。

MNN が CN へパケットを送信する場合、MNN のデフォルトルータである ALR が、ALR の HA および AMR へパケットを転送することにより、トラフィックの分配を行う。ALR が直接 HA へパケットを転送する場合、NEMO のプロトコルに従い、ALR と自身の HA との双方向トンネルを用いる。パケットを AMR へ転送する場合、ALR は直接 ALR の HA へ転送するパケットをカプセル化し、MR 間リンクを介して AMR へ転送する。AMR では、受信したパケットをカプセル解除し、AMR の外部リンクを用いて ALR の HA へ転送する。

## 3. 評価

この章では、NEMO-SHAKE の基本動作の実装と、その実装を用いた NEMO-SHAKE の実測評価について述べる。

### 3.1 実装

NEMO-SHAKE を FreeBSD5.4-RELEASE 上で、KAME プロジェクトの IPv6 プロトコルスタック (2005 年 9 月 26 日のスナップ) を用いて実装した。NEMO は SHISA<sup>9)</sup> で実装されており、SHISA を拡張することで、NEMO-SHAKE を実装した。

AReq, ARep のメッセージ交換による Alliance 構築に関しては未実装である。したがって、ALR および AMR において、それらの間のメッセージ交換で得られる ALR の HoA, CoA, AMR の CoA および ALR, AMR の MR 間インタフェースの IP アドレスは互いに既知であるとした。

ALR の HA に対する複数の CoA の登録処理に関しては、すべてユーザ空間で実装した。一方、ALR の HA で

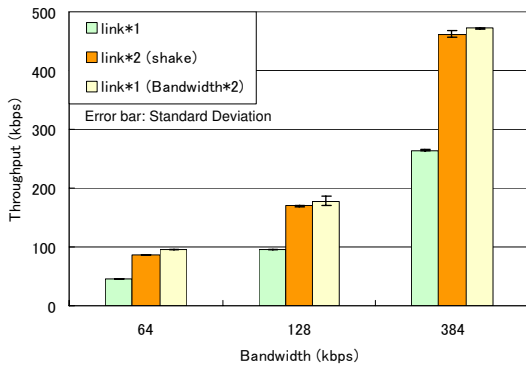


図4 複数経路を使用した場合のスループット比較

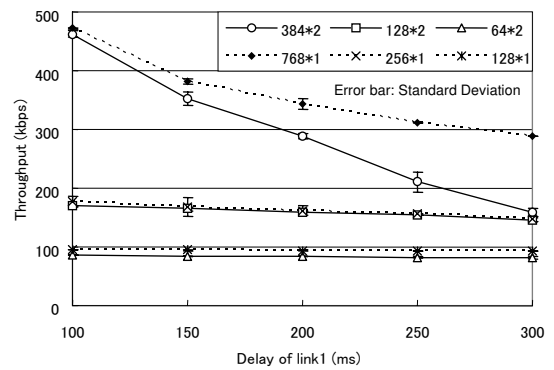


図5 各経路の遅延差による影響

の packets 分配に関してはカーネル空間でその機能を実現した。パケット分配は、ダウンリンクのみ実装済みである。ALR の HA でのパケットの振り分け方法は、ラウンドロビンである。

### 3.2 実験

実験環境を図3に示す。ALR が AMR と Alliance を構築し、ALR 配下の MNN が外部ネットワーク上の CN と通信する状況を想定した。すべての端末は、Fast Ethernet で接続した。図中の IPv4 トンネル上のルータ間で dummynet を用い、ALR および AMR の外部リンクであるリンク1とリンク2およびMR間リンクの遅延・帯域・パケットロス率を制御した。

下の各条件のもと、MNN において CN から FTP で 1 Mbytes のファイルをダウンロードしたときのスループットを5回測定し、その平均値を求めた。HA から各 MR へのパケット分配率は 1:1 である。以下、特に示さない限り、リンク1,2の遅延は 100 ms、パケットロス率は 0%とし、リンク3の遅延を 20 ms に設定した。また、ALR-AMR 間のリンクは、実験(6)以外では、どの値も制御していない。

#### (1) 複数経路を使用した場合

NEMO-SHAKE により、同じ帯域を持つ経路2本を用いた場合と、その2本の合計帯域と同等の帯域を持つ経路1本を使用した場合のスループットを比較した。

#### (2) 各経路間の遅延差による影響

リンク1のみの遅延を 100 ms から 300 ms まで変化させた。経路2本の合計帯域と同じ帯域を持つ経路1本を使用した場合と比較し、NEMO-SHAKE の有効性を検証した。経路1本の場合、その遅延は NEMO-SHAKE を使用したときのリンク1の遅延と同じ値にした。

#### (3) パケットロス率による影響

リンク1のみパケットロス率を 0% から 10% まで変化させ、SHAKE を使用した場合と経路2本分と同じ帯域をもつ経路1本を用いた場合を比較した。パケット

ロス率は、経路1本あたりの平均パケットロス率の値が同等になるように設定した。

#### (4) 各経路の帯域による影響

リンク1の帯域を 384 kbps に固定し、リンク2の帯域を 64 kbps から 384 kbps まで変化させた。このとき、経路2本分の帯域をもつ経路1本を用いた場合のスループットを測定し、比較した。

#### (5) 複数のフローを流した場合

NEMO-SHAKE を用いて複数のフローを流した場合と、SHAKE で利用した同等の帯域をもつ経路1本を使用し、複数のフローを流した場合の比較を行った。

#### (6) MR間の各帯域におけるパケットロス率の影響

MR間のリンクに IEEE 802.11b を使用した場合を想定し、MR間の帯域を 2 M, 5.5 M, 11 Mbps、パケットロス率を 0, 1, 2% に設定した場合のスループットを測定した。なお、各 MR の外部リンクは、帯域 384 kbps、遅延 100 ms、パケットロス率 0% とした。

### 3.3 結果と考察

以下、前項で述べた実験の結果を示し、今回実装した NEMO-SHAKE の基本動作の評価を行う。なお、図中のエラーバーは5つの測定値の標準偏差を表している。

#### (1) 複数経路を使用した場合

図4に結果を示す。MRの外部リンクであるリンク1,2のすべての帯域において、NEMO-SHAKE により経路2本使用した場合、経路1本の場合と比較し、ほぼ倍のスループットが得られている。また、経路2本の合計の帯域を持つ経路1本を使用した場合のスループットと比較すると、NEMO-SHAKE でも同程度の結果が得られている。

#### (2) 各経路間の遅延差による影響

結果を図5に示す。リンク1,2の帯域が 64 kbps, 128 kbps の場合、遅延差の大きさにかかわらず、経路を2本使用した場合と同じ帯域を持つ経路1本のスループットと同程度の値を得ており、NEMO-SHAKE による性

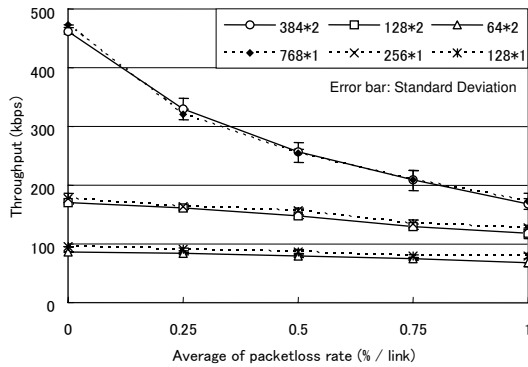


図 6 パケットロス率 (0 - 1%) による影響

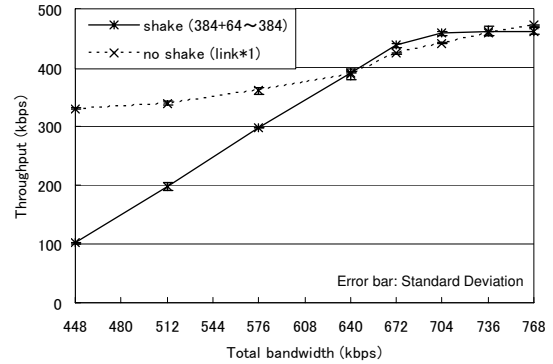


図 8 各経路の帯域による影響

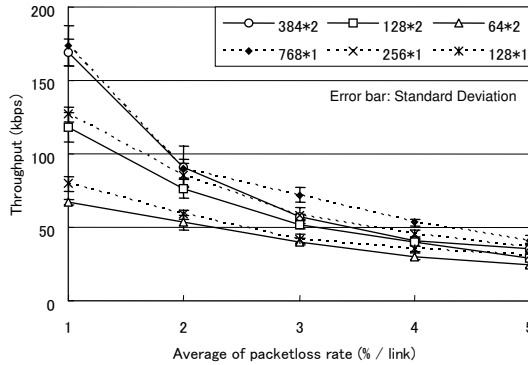


図 7 パケットロス率 (1 - 5%) による影響

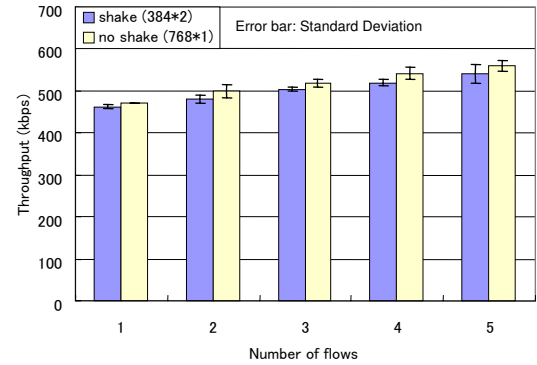


図 9 複数のフローを持つ場合

能低下は見られなかった。

しかし、リンク 1, 2 の帯域が 384 kbps の場合、遅延差が大きくなるにつれて SHAKE 利用時と同等の帯域を持つ経路 1 本のスループットとの差が広がっている。リンク 1 の遅延が 300 ms、すなわち使用している経路の遅延差が 200 ms の場合、そのスループットは 128 kbps の帯域を持つリンクを 2 本使用した NEMO-SHAKE と同程度まで低下しており、NEMO-SHAKE による性能悪化が見られた。

(3) パケットロス率による影響

結果を図 6, 図 7 に示す。すべての帯域において、パケットロス率の増加に伴い、スループットが低下している。

図 6 において、リンクの帯域 384 kbps のスループットは、経路 2 本分の帯域を持つ経路 1 本の場合と同等の値をとっていることがわかる。一方、図 7 のグラフを見ると、パケットロス率が 3% のところで、経路 2 本使用した合計帯域と同等の帯域を持つ経路 1 本のスループットとの差が広がっている。しかしながら、そのスループット比は約 80% であり、全体的にパケットロス

率の増加に伴い、スループットが低下していることを考慮すると、NEMO-SHAKE 使用による顕著な性能低下とはみなせないと考える。

(4) 各経路の帯域による影響

図 8 に結果を示す。複数経路使用時において、その経路の合計帯域が小さい場合、すなわち 2 本の経路の帯域差が大きいとき、NEMO-SHAKE によるスループットは、経路 1 本を用いた場合の値を大きく下回っている。このとき、複数経路を使用した場合のスループットは、遅いリンクの帯域を 2 本使用した場合のスループットと同程度の値をとっている。このことから、パケットを分配している HA において、適当な分配方法をとることにより、十分な性能向上が見込めると考える。一方、合計帯域が 640 kbps 以上、すなわち経路の帯域差が小さいとき、経路 1 本のスループットとの差は小さい。これにより、同質のリンクを使用することによって、NEMO-SHAKE による実効帯域の向上が得られるといえる。

(5) 複数のフローを流した場合

図 9 に結果を示す。フローの数が増加するにつれて、全



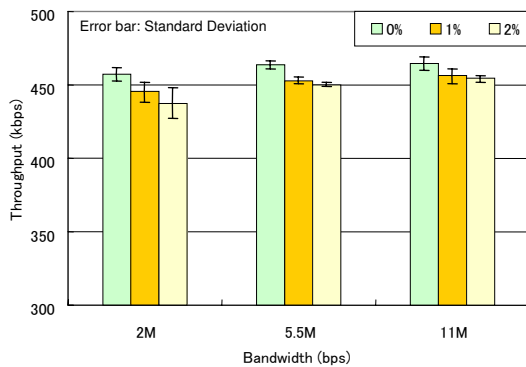


図 10 MR 間の各帯域でのパケットロス率による影響

体のスループットが向上している。また、複数経路使用時と経路 1 本使用時のスループットの差は、フロー数が増加しても悪化していない。したがって、フロー数増加における NEMO-SHAKE による性能低下は見られないといえる。

#### (6) MR 間の各帯域におけるパケットロス率の影響

結果を図 10 に示す。MR 間の各帯域が大きいほど、スループットが高く、パケットロス率が増加するにしたがって、スループットが低下している。

ALR-AMR 間の帯域減少の影響を若干受けているものの、HA-AMR-ALR という経路のボトルネックは依然として外部リンクにある。これより、今回の実験で想定した環境の範囲内では、NEMO-SHAKE による帯域増大の効果が十分にあることが確かめられた。

#### 4. ま と め

本論文では、NEMO における独立した複数の Mobile Network の MR が協調し、相互接続することによって一時的なネットワークを構築し、それら MR の外部リンクを同時に利用することにより、MR 配下のすべての MNN に対して、通信帯域の増大および接続の安定性の向上をはかる NEMO-SHAKE の実装を行い、その基本動作の評価を行った。

NEMO-SHAKE を利用し、複数経路を使用した場合において、ファイル転送によるスループットの測定を行った結果、SHAKE 利用によるスループットの向上が見られた。同様に、NEMO-SHAKE で使用する各経路の遅延差、パケットロス率、帯域の差およびフローの数による影響について、実測に基づき評価を行った。この結果、NEMO-SHAKE 利用時に各経路の遅延差および帯域差が大きい場合、性能低下が見られた。しかし、それぞれの差が小さければ NEMO-SHAKE の性能への影響は小さく、同質のリンクを使用すれば、十分な性能が得られると考える。なお、パケットロス率、フローの数による

NEMO-SHAKE 利用による性能低下は見られなかった。さらに、MR 間リンクの帯域およびパケットロス率の影響についての実験も行った結果、NEMO-SHAKE 利用による顕著な変化は見られなかった。これらすべての実験内容において、ほぼ期待通りの結果が得られた。

今後の課題として、効率の良い Alliance 構築手法およびトラフィック分配機構によるパケット分配方法の検討、ならびに NEMO-SHAKE の基本動作の実環境での測定が挙げられる。

#### 謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金若手研究 (A) (16680002) によるものである。また、富士通研究所藤野信次氏には、適切なご助言を頂いた。ここに記して謝意を示す。

#### 参 考 文 献

- 1) Johnson, D., Perkins, C. and Arkko, J.: Mobility Support in IPv6, *Request for comments 3775* (2004).
- 2) Devarapalli, V., Wakikawa, R. and Petrescu, A.: Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol, *Request for comments 3963* (2005).
- 3) Koyama, K., Ito, Y., Mineno, H. and Ishihara, S.: Performance evaluation of TCP on Mobile IP SHAKE, *IPSJ Journal*, Vol. 45, No. 10, pp. 2270–2278 (2004).
- 4) 舩田知広, 大木一将, 峰野博史, 石原進: Mobile IPv6 を用いた通信回線共有方式の実装, *情報処理学会論文誌*, Vol. 46, No. 9, pp. 2214–2225 (2005).
- 5) 舩田知広, 石原進: 複数 Mobile Network による経路アグリゲーションの提案, *FIT2005*, No. L-28, pp. 67–68 (2005).
- 6) Tsukada, M., Ernst, T., Wakikawa, R. and Mitsuya, K.: Dynamic Management of Multiple Mobile Routers, *IEEE Malaysia International Conference on Communications and IEEE International Conference on Networks (MICC & ICON 2005)*, Vol. 2, pp. 1108–1113 (2005).
- 7) 今井尚樹, 磯村学, 堀内浩規: 複数気付けアドレス登録機構を利用した IPv6 モバイルルータの多重化システム, *FIT2005*, No. L-28, pp. 69–70 (2005).
- 8) Wakikawa, R., Uehara, K., Ernst, T. and Nagami, K.: Multiple Care-of Addresses Registration, *Internet-Drafts (draft-wakikawa-mobileip-multiplecoa-04)* (2005).
- 9) SHISA: <http://www.mobileip.jp/>.