

## Mobile IPv6 における複数 Home Agent の配置法における検討

遠藤 誠† 寺岡 文男†

† 慶應義塾大学理工学部情報工学科

〒 223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1

E-mail: †done@tera.ics.keio.ac.jp, ††tera@ics.keio.ac.jp

**あらまし** Mobile IPv6 の一点障害性や冗長経路問題に対処するため、Global HA-HA によって複数の HA を設置し、問題の改善を図る。AS レベルトポロジーにおいて、運用上、どのように HA を分散配置すればよいのか、2008 年 5 月に発表したものを詳細に検討し直した。その結果、中位や下位の ISP は betweenness が上位の AS に 2 台目の HA を置くとホップ数やコストの点では改善されるが、上位の AS に負荷が集中してしまうことがわかった。上位の ISP は上位の AS に 2 台目の HA を設置するとコストの低下や負荷分散に効果的であることがわかった。

**キーワード** Mobile IPv6, 複数 Home Agent 配置

## An Analysis of Placement of Multiple Home Agents in Mobile IPv6

Makoto ENDO† and Fumio TERAOKA†

† Department of Information and Computer Science, Faculty of Science and Technology, Keio University

Hiyoshi 3-14-1, Kohoku-ku, Yokohama-shi, 223-8522 Japan

E-mail: †done@tera.ics.keio.ac.jp, ††tera@ics.keio.ac.jp

**Abstract** This paper investigates efficient placement of multiple HA of Mobile IPv6 in an AS level topology by examining the results of our paper in May 2008. As a result, in case of an AS with middle or low betweenness, it would be good to place the 2nd HA in an AS with high betweenness in terms of hop count and path cost, however, communication cost concentrates on the AS with high betweenness. In case of an AS with middle or low betweenness, it would be better to place the 2nd HA in an AS with high betweenness in terms of path cost and dispersion of communication cost.

**Key words** Mobile IPv6, Multiple Home Agents

### 1. ま え が き

IPv6 における移動透過な通信をサポートするプロトコルとして、Mobile IPv6 (MIPv6) [1] が標準化された。MIPv6 では移動ノード (MN: Mobile Node) と通信相手ノード (CN: Correspondent Node) 間の通信はすべて Home Agent (HA) と呼ばれるルータを経由する。HA を経由せずに MN と CN が最適経路で通信するための手順も定義されているが、処理が複雑であり CN にも拡張が必要のため、実運用では HA を経由する通信が主流になると思われる。HA では、MN の持つ Home Address (HoA) と Care-of Address (CoA) という 2 つのアドレスの対応関係が管理される。しかし、MN に対して HA は 1 台しか設置することができないため、これらの性質から冗長経路問題や一点障害性などの問題が生じてしまう。HA を分散配置することによってこれらの問題は改善されるが、MIPv6 の仕様では HA の分散配置はできない。

このような問題に対処するために Global HA-HA プロトコル [2] が提案されている。Global HA-HA プロトコルでは、1 台の MN に対して複数の HA をインターネット内に分散配置することができる。MN から CN へ送信されるパケットは MN に最も近い HA を経由し、CN から MN へ送信されるパケットは CN に最も近い HA および MN に最も近い HA を経由する。これにより、MIPv6 における冗長経路問題や一点障害性問題は大幅に改善される。

Global HA-HA プロトコルは HA の分散配置を可能にするが、運用上どのような配置にすれば良いのかについての検討はされていないため、その検討を行う必要がある。そこで文献 [3] は、AS (Autonomous System) レベルでどのように HA を分散配置すれば効率が良いかをシミュレーションによって解析した。本稿は文献 [3] の結果を精査する。なお、今回は 2 台の HA を設置する場合における MN と CN の通信経路に着目した静的な解析にとどめる。HA をさらに増やした場合や MN と CN

の通信特性や MN の移動特性も考慮した動的な解析は今後の研究課題とする。

## 2. 評価方法

評価は文献 [3] と同様に以下のように行った。

### 2.1 評価の方針

本論文では、データの通信量に比べてシグナリングによる通信量ははるかに少ないと考えられるため、シグナリングによるネットワークコストは無視することとする。冗長経路によるネットワークコストは以下のように考えることとする。まず多数の MN-CN ペアを生成し、AS レベルでの通信経路を調べる。MIPv6 を利用しない通信ではパケットは最適な経路を通る。このときの (1) 経路のホップ数、(2) 経路のコスト、(3) AS の通信負荷の分布をそれぞれ調べる。経路のホップ数は、各 AS ペアをそれぞれ始点ノード、終点ノードとして、始点ノードから終点ノードまでの最短経路のホップ数である。経路のコストは、始点ノードから終点ノードまでの最短経路の総リンクコストである。AS の通信負荷は、MN と CN が通信する際に AS が送信、受信または中継するパケット数に比例するものとする。同一の MN-CN ペアに対して、MIPv6 で通信した場合についても、経路のホップ数、経路のコスト、AS の通信負荷の分布を調べ、それぞれのデータを比較する。

通常 1 つの AS は 1 つ以上の Internet Service Provider (ISP) を含むが、本論文では便宜上 1 つの ISP によって 1 つの AS が構成されているとする。ISP とはユーザにインターネット接続サービスを提供する企業のことであり、将来はさらに MIPv6 サービスも提供することになると考えられる。つまり、ISP は MIPv6 サービスの契約ユーザのための HA を運用することになる。ユーザは MIPv6 サービスを利用するために 1 つの ISP と契約するが、ユーザが契約している ISP (すなわち AS) のことを home AS と呼び、home AS とローミング契約している他の ISP を visited AS と呼ぶこととする。ある MIPv6 ユーザが使用する MN の HA はその MIPv6 ユーザの home AS に設置される。よって本研究では、そのとき 2 台目の HA をどのような visited AS に設置すればいいかを考えることとする。

本研究では 2 つの評価尺度が考えられ、1 つはユーザの観点からであり、もう 1 つは ISP の観点からである。ユーザの観点から評価すると、最も重要なことは経路の最適性である。一方、ISP の観点では HA への負荷を分散させつつ、経路もできるだけ最適にすることが重要であると考えられる。本研究では ISP の観点から評価することとする。

### 2.2 評価手順

#### 2.2.1 トポロジーの生成

まず、現在のインターネットの構造になるべく近い AS 間のトポロジーを作成する必要がある。現在、全世界で使用されている AS は 30,000 個を超えているため [4]、本論文では AS レベルのトポロジーを作成するツールとして inet [5] を使用し、30,000 個の AS による AS レベルトポロジーを生成した。

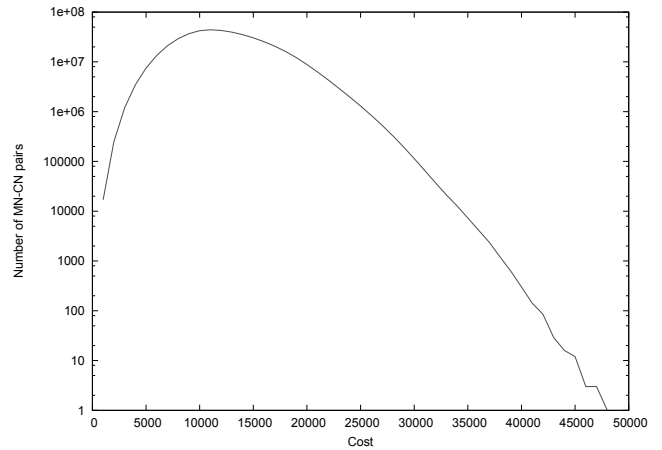


図 1 AS 間の最短経路のコストと AS ペア数の関係

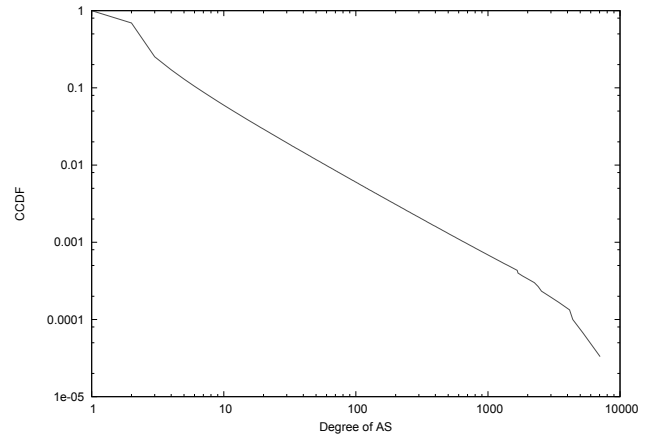


図 2 AS の次数の相補累積分布

#### 2.2.2 最短経路の計算

全 AS の組み合わせについて最短経路を計算するために、ダイクストラ法を用いた。その結果、最短経路のコストとそのコストの値を持つ AS のペア数の関係は図 1 のようになった。図 1 から、コストが 10,000 前後の AS ペアが非常に多く、コストが増えるにつれてペアの数が減っていくことがわかる。コストが 1,000 以下のペアが 10,000 強もある一方で、最もコストの大きいもので 45,000 以上のペアがあることもわかる。図 2 には AS の次数の相補累積分布関数曲線 (CCDF) を示す。AS の次数とは、AS の持つリンクの数である。図 2 から、AS の次数は最大で 7,000 にも達することがわかる。

#### 2.2.3 HA の設置場所の基準

2 台目の HA を設置する AS の選択において、本論文では各 AS の特徴を示す指標として betweenness を利用する。ノード  $v$  の betweenness 値  $C_B(v)$  は、ノードの集合  $V$  とエッジの集合  $E$  からなるグラフ  $G := (V, E)$  において次式のように表される。

$$C_B(v) = \sum_{s \neq v \neq t \in V, s \neq t} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}} \quad (1)$$

ここで  $\sigma_{st}$  はノード  $s$  とノード  $t$  間の最短経路の数、 $\sigma_{st}(v)$  はノード  $s$  とノード  $t$  の最短経路のうち、ノード  $v$  を通過するものの数である。つまり、AS の betweenness 値が大きいほ

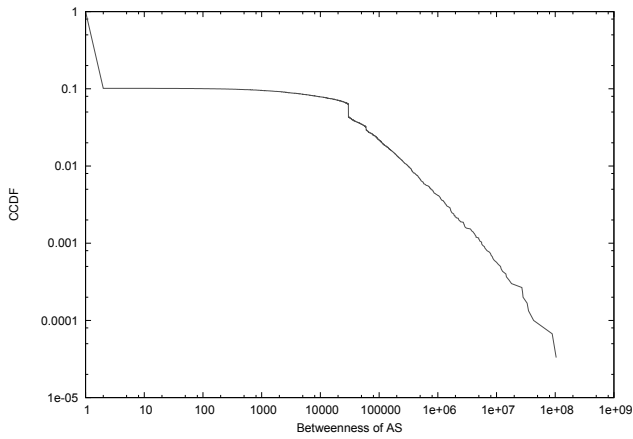


図3 ASのbetweenness値の相補累積分布

表1 ASのタイプ

ASタイプ	各ASタイプの特徴
上位AS	betweenness値が上位10番目までのAS
中位AS	betweenness値が0のASを除いた中で、順位が中央付近のAS
下位AS	betweenness値が0のAS

どそのASはトポロジの中心に近い場所にあることがわかる。

生成したトポロジにおけるASのbetweenness値のCCDFを図3に示す。各ASのbetweenness値を調べてみたところ、betweenness値が0であるASは30,000個のうち26,952個であった。つまり、全体の約90%のASは、他の2つのAS間の通信で経由されないASであることがわかる。また、残りの10%強のASのbetweenness値の分散が非常に大きいこともわかる。

betweenness値によって、すべてのASの中から表1のような3つのタイプのASについて解析する。同じタイプのASでもトポロジ的に性質が異なる場合が考えられるので、同じタイプ内の各ASに対しても別々に解析を行う。また、home ASと2台目のHAを設置したAS間のコストに着目した解析もする。

### 2.3 MNとCNのペアの生成

inetで生成したネットワークトポロジの中からランダムに10,000ペアのノードをMNとCNのペアとして選択し、これらのペアの通信において、経路のホップ数、経路のコスト、ASの通信負荷を測定した。

## 3. 結果と考察

betweennessが上位、中位、下位のASからそれぞれ5つずつASを選んだ。選んだASは表2のとおりである。表2においてidとはASを識別するための番号を表し、総ホップ数、総コストはASに1台だけHAを設置したときの全経路のホップ数とコストの合計をそれぞれ指す。また表3はMIPv6を使用しない場合の全経路のホップ数とコストの合計を示す。表2の中から、home ASとして上位ASではid0、中位ASではid2030、下位ASではid18092にHAを設置し、2台目のHAを設置するASはランダムに選び、その中で特徴のあるものを以下の図に出力した。なお、経路のホップ数に着目した結

表7 home ASがid2030の場合のMN、CNとHA間の平均コスト

通信パターン	平均コスト	通信パターン	平均コスト
MN→home AS	10,593.81	MN→home AS	10,593.81
MN→id500	9,652.55	MN→id2197	7,869.77
CN→home AS	12,099.76	CN→home AS	12,099.76
CN→id500	11,436.60	CN→id2197	9,471.31

表8 home ASがid18092の場合のMN、CNとHA間の平均コスト

通信パターン	平均コスト	通信パターン	平均コスト
MN→home AS	11,577.37	MN→home AS	11,577.37
MN→id20769	12,946.05	MN→id15167	11,811.41
CN→home AS	13,269.48	CN→home AS	13,269.48
CN→id20769	14,651.28	CN→id15167	13,501.24

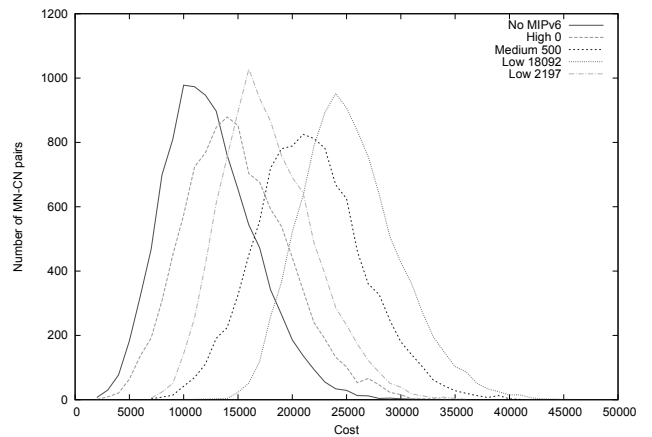


図4 HAを1台だけ設置した場合の経路のコスト

果は経路のコストに着目した結果と似たような特徴を示したため、紙面の都合上、本稿では経路のコストに着目した結果のみについて考察する。また、表4、表5、表6には、それぞれ上位ASのid0、中位ASのid2030、下位ASのid18092をhome ASとし、2台目のHAを設置するASのタイプとid、home ASと2台目のHAを設置したAS間のホップ数とコスト、全経路のホップ数とコストの合計を示した。

### 3.1 経路のコスト

図4にMIPv6を使用しない場合とHAを1台だけ設置した場合のMNとCNの通信の経路のコストとMN-CNのペア数の関係を示す。図4から、予想通り中位ASや下位ASよりも上位ASにHAを設置した方がコストが低くなっていることがわかる。この理由は、MIPv6を使用しない場合の最短経路は上位ASを経由している場合が多いため、上位ASにHAを設置した経路でもコストが増加しない場合が多いためである。また、下位AS(id2197)よりも中位AS(id500)の方がかえってコストが高くなってしまっている場合があることがわかる。表2における該当するASの総ホップ数や総コストでもこの結果が確かめられる。この理由は今のところよく分からない。id500(中位)の次数は34であり、id2197(下位)の次数は8であるので、次数が高いほどHAとして向いているわけではないようである。

図5、図6、図7には、それぞれ上位AS、中位ASおよび下位ASをhome ASとし、2台目のHAを設置した場合のMN

表 2 HA を配置する AS の候補

AS のタイプ	AS の id	0	1	3	4	8
	上位 AS	AS の次数	7,069	5,237	4,150	3,432
中位 AS	総ホップ数	49,401	50,570	53,445	51,986	53,625
	総コスト	144,166,558	140,371,110	169,323,499	166,137,852	141,146,444
下位 AS	AS の id	2030	500	996	3788	20769
	AS の次数	8	34	17	5	2
中位 AS	総ホップ数	72,496	68,618	62,665	76,988	69,400
	総コスト	226,935,743	210,891,547	157,122,083	207,984,171	275,973,376
下位 AS	AS の id	18092	2197	15167	19377	26928
	AS の次数	2	8	2	2	1
中位 AS	総ホップ数	73,735	67,374	68,265	89,485	76,777
	総コスト	248,468,451	173,410,821	253,126,540	272,134,694	307,787,152

表 3 MIPv6 不使用時の経路情報

総ホップ数	42,637
総コスト	118,810,706

表 4 上位 AS (id0) が home AS のとき 2 台目の HA を設置する AS の id

AS のタイプ	上位 AS		中位 AS		下位 AS	
AS の id	1	4	3788	2030	18092	2197
home AS までのホップ数	1	1	2	2	1	2
home AS までのコスト	1,973	4,582	5,221	8,116	6,539	4,326
総ホップ数	48,519	48,616	50,415	50,438	49,401	52,032
総コスト	136,097,407	139,517,961	145,617,961	145,654,782	144,163,787	144,969,485

表 5 中位 AS (id2030) が home AS のとき 2 台目の HA を設置する AS の id

AS のタイプ	上位 AS		中位 AS		下位 AS	
AS の id	0	8	500	996	2197	26928
home AS までのホップ数	1	2	3	2	3	2
home AS までのコスト	8,116	8,332	8,533	8,640	8,788	13,024
総ホップ数	50,438	54,186	69,025	63,139	67,332	72,496
総コスト	145,654,782	142,408,511	206,588,557	159,644,567	175,194,662	227,316,629

表 6 下位 AS (id18092) が home AS のとき 2 台目の HA を設置する AS の id

AS のタイプ	上位 AS		中位 AS		下位 AS	
AS の id	0	3	3788	20769	15167	19377
home AS までのホップ数	1	2	3	2	2	4
home AS までのコスト	6,539	5,665	11,760	13,130	12,046	14,595
総ホップ数	49,401	53,445	76,568	73,733	71,326	75,774
総コスト	144,163,787	169,323,499	209,968,607	248,457,957	243,477,557	246,933,511

と CN の通信の AS 間コストと MN-CN のペア数の関係を示す。図 5 より、上位 AS (id0) が home AS である場合、2 台目の HA を上位 AS に設置した場合にわずかにコストは低下しているが、中位 AS や下位 AS を選んでもほとんど効果は見られないことがわかる。これは、ほとんどの MN にとって中位 AS や下位 AS よりも上位 AS が近くにあるので、2 台目の HA を中位 AS や下位 AS に設置しても home AS を経由するためであると考えられる。上位 AS に 2 台目の HA を設置するとわずかに効果が得られるのは、各 MN が上位 AS の中でもより近い AS を選ぶことができるためであると考えられる。

図 6 より、中位 AS (id2030) が home AS である場合、id26928 (下位 AS) に 2 台目の HA を設置した場合以外でコストの低下が見られ、効果的であることがわかる。特に、上位 AS に 2 台目の HA を設置すると最もコストが低下していることがわかる。この理由は、ほとんどの MN にとって home

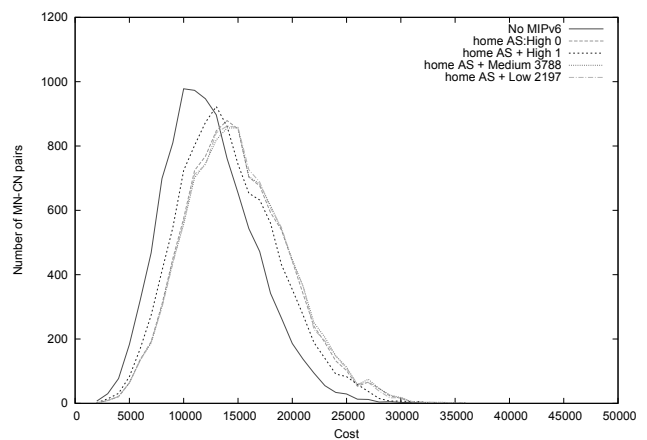


図 5 上位 AS が home AS である場合の AS 間コスト

AS である中位 AS よりも上位 AS の方が近くであり、上位 AS を経由する経路はコストが低いためであると考えられる。2 台

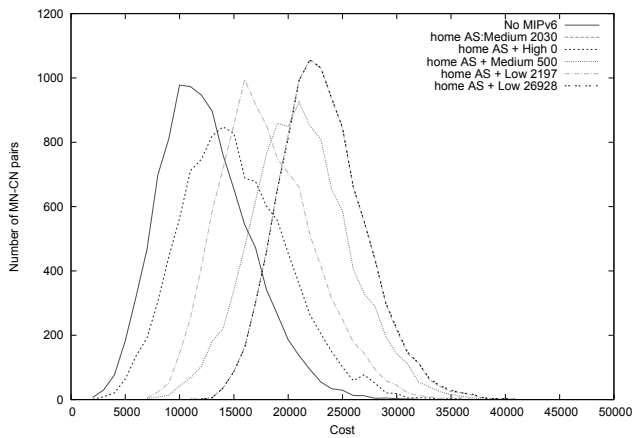


図 6 中位 AS が home AS である場合の AS 間コスト

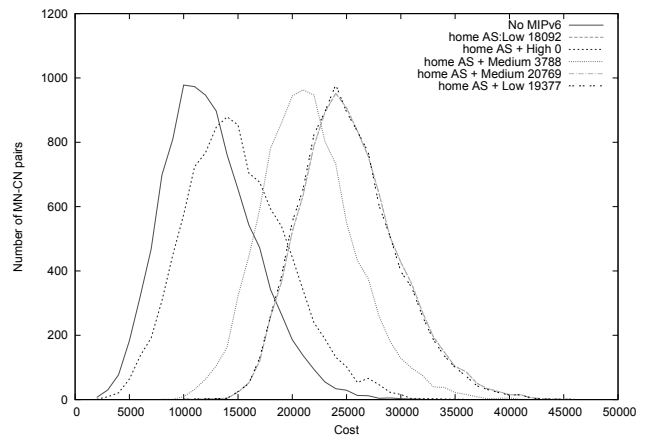


図 7 下位 AS が home AS である場合の AS 間コスト

目の HA を設置した AS だけに 1 台の HA を設置した場合と図 6 の結果を比較すると、*id26928* (下位 AS) に 2 台目の HA を設置した場合を除いて、2 台目の HA を設置した AS だけに HA を設置した場合とほぼ同じ総コストであることがわかる。これは、home AS よりも 2 台目の HA を設置した AS の方がほとんどの MN にとって近いためであると考えられる。*id26928* (下位 AS) に 2 台目の HA を設置した場合は、HA を 1 台だけ *id2030* (中位 AS) に設置した場合とほとんど同じ分布になっており、コストの変化はほとんどないことがわかる。これは、*id26928* (下位 AS) よりも *id2030* (中位 AS) の方がほとんどの MN にとって近いので、ほとんどの MN からの通信では *id2030* (中位 AS) を経由するためであると考えられる。また、2 台目の HA を設置する AS として下位 AS (*id2197*) を選ぶよりも中位 AS (*id500*) を選んだ方がかえってコストの低下が小さくなっていく場合があることもわかる。この理由は表 7 より、各 MN、CN と下位 AS の *id2197* 間の平均コストより各 MN、CN と中位 AS の *id500* 間の平均コストの方が大きいことが関係していると考えられる。表 7 は、home AS の *id2030* に 1 台だけ HA を設置した場合と、中位 AS の *id500*、下位 AS の *id2197* にそれぞれ 2 台目の HA を設置した場合の各 MN、CN と経由する HA 間の平均コストを表したものである。表 7 より、MN、CN どちらからの通信の場合でも、2 台目の HA の AS が中位 AS の *id500* であるよりも下位 AS の *id2197* である方がコストの低下が大きい。このことが、中位 AS の *id500* よりも下位 AS の *id2197* に 2 台目の HA を設置した方がコストの低下が大きいことに関係していると考えられる。

図 7 より、下位 AS (*id18092*) が home AS である場合、上位 AS と中位 AS の *id3788* に 2 台目の HA を設置した場合にコストの低下が見られることがわかる。また、下位 AS が home AS のときに 2 台目の HA を設置した上位 AS や中位 AS の *id3788* だけに 1 台の HA を設置した場合と図 7 の結果を表 2 及び表 6 で比較すると、2 台目の HA を設置した AS だけに HA を設置した場合と図 7 において 2 台目の HA を設置した場合はほぼ同じ総コストであることがわかる。この理由は、ほとんどの MN にとって home AS である下位 AS よりも上位 AS や中位 AS の *id3788* の方が近くにあり、上位 AS を経由

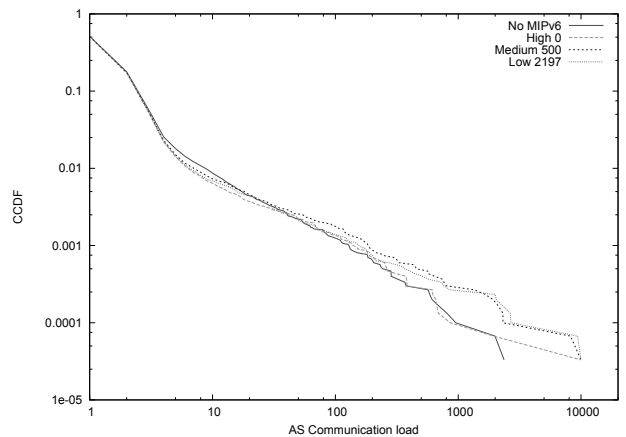


図 8 HA を 1 台だけ設置した場合の AS の通信負荷

する経路はコストが低いためであると考えられる。一方、中位 AS の *id20769* や下位 AS に 2 台目の HA を設置してもあまり効果は得られないことがわかる。これは、home AS である *id18092* よりも中位 AS の *id20769* や下位 AS の方がほとんどの MN にとって遠くに位置しているため、home AS に設置されている HA を経由する機会が多いためであると考えられる。

### 3.2 AS の通信負荷

図 8 に MIPv6 を使用しない場合と HA を 1 台だけ設置した場合の AS の通信負荷の相補累積分布関数曲線 (CCDF) を示す。図 8 から、上位 AS に 1 台だけ HA を設置すると HA には負荷が集中するがそれ以外の AS の負荷は分散していることがわかる。この理由は経路のコストに対する考察と同様に、MIPv6 を使用しない場合の最短経路は上位 AS を経由している場合が多いため、MIPv6 を使用しない場合に比べて負荷の集中度が小さいが、必ず HA を通るため高負荷の AS があり、それに伴って HA を設置した AS 付近の AS にもある程度負荷がかかってしまうためだと考えられる。中位 AS や下位 AS に 1 台だけ HA を設置すると、HA 以外の AS にも高い負荷がかかっていることがわかる。これは、多数の MN-CN ペアの通信で、中位 AS や下位 AS を経由するために HA を設置した AS 以外にも経由しなければならない AS がいくつか存在するためであると考えられる。

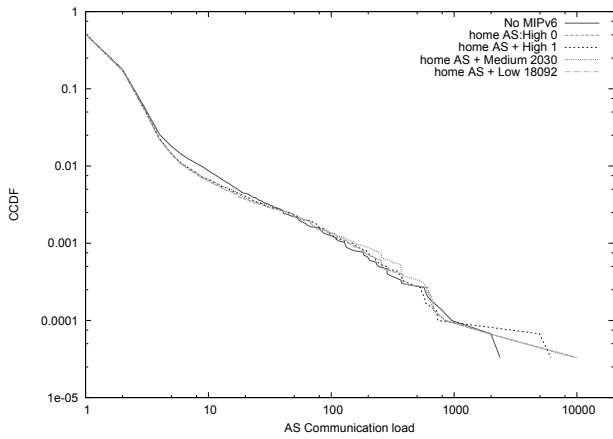


図9 上位 AS が home AS である場合の AS の通信負荷

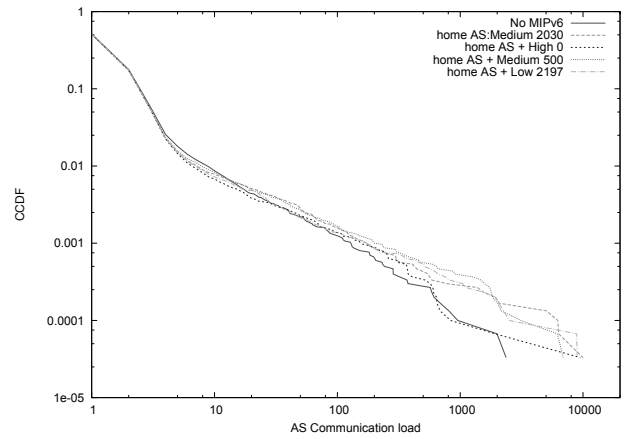


図10 中位 AS が home AS である場合の AS の通信負荷

図9, 図10, 図11には, それぞれ上位 AS, 中位 AS および下位 AS を home AS とし, 2 台目の HA を設置したときの AS の通信負荷の CCDF を示す. 上位 AS が home AS である場合, 上位 AS に 2 台目の HA を設置することで負荷の集中している AS の負荷を下げることができる. これは, 全 MN-CN ペアの通信が経由する HA に偏りがないためであると考えられる. また, 中位 AS や下位 AS に 2 台目の HA を設置しても効果は得られないことがわかる. この理由は, 2 台目の HA を中位 AS や下位 AS に設置してもほとんどの MN にとって home AS の方が近いためであると考えられる.

中位 AS が home AS である場合, 上位 AS に 2 台目の HA を設置すると負荷が分散することがわかる. この理由は, home AS が中位 AS で 2 台目の HA を上位 AS に設置すると, ほとんどの MN-CN ペアの通信で上位 AS の HA を経由するようになり, 上位 AS を経由する場合は負荷の集中度が低いためであると考えられる. つまり, 上位 AS に 1 台だけ HA を設置した場合と同じような通信負荷の分布となることがわかる. 中位 AS に 2 台目の HA を設置すると高負荷の AS が減少することがわかる. これは, 多数の MN にとって 2 台目に HA を設置した中位 AS が home AS よりも近かったため, MN-CN ペアの通信が経由する HA への通信負荷が分散したためであると考えられる. しかし, 下位 AS に 2 台目の HA を設置すると高負荷の AS が増えてしまうことがわかる. この理由は, 下位 AS を経由するために複数回通過することになってしまう AS が発生してしまうためであると考えられる.

下位 AS が home AS である場合も, 上位 AS に 2 台目の HA を設置すると負荷が分散することがわかる. これは中位 AS が home AS である場合と同様な理由によりこのような結果となる. 中位 AS や下位 AS に 2 台目の HA を設置してもほとんど効果は得られない. これは, 中位 AS や下位 AS を経由する場合には負荷があまり分散しないためであると考えられる.

#### 4. まとめ

MIPv6 において 2 台の HA を設置する場合の設置場所について, AS レベルトポロジの観点から検討した. 結果としては, AS 間経路のホップ数, AS 間経路のコストの観点からは, 2 台

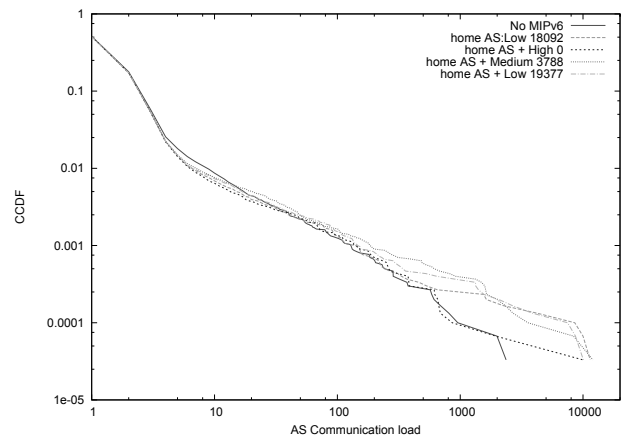


図11 下位 AS が home AS である場合の AS の通信負荷

目の HA を上位 AS に設置するのが最も効率が良いことがわかった. しかし, home AS が中位 AS や下位 AS の場合, 2 台目の HA を上位 AS に設置するとほとんどの通信は上位 AS の HA を経由するようになってしまうため負荷が集中してしまう. また home AS が上位 AS の場合, 2 台目の HA を上位 AS に設置するとどちらの AS にかかる負荷も分散するため, 上位の ISP は上位の ISP 同士で協調した方がよいことがわかった. 上位 AS が home AS の場合, 中位 AS や下位 AS に 2 台目の HA を設置しても効果はほとんどなく, 上位の ISP の観点からは Home Link に HA を複数台置くことの方が有効であると考えられる. 中位 AS と下位 AS に 2 台目の HA を設置してもあまり効果は得られず, 場合によっては中位 AS に設置するよりも下位 AS に設置する方がかえってよくなる場合があることもわかった.

#### 文 献

- [1] D. Johnson, C. Perkins and J. Arkko: "Mobility Support in IPv6", RFC3775, IETF (2004).
- [2] P. Thubert, R. Wakikawa and V. Devarapalli: "Global HA to HA protocol", Internet Draft, IETF (2005). (Work in progress).
- [3] 寺岡 文男: "Mobile IPv6 における複数 Home Agent の配置法に関する一検討", 電子情報通信学会 IA 研究会 (2008).
- [4] "IPv4 CIDR Report". <http://www.cidr-report.org/as2.0/>.
- [5] "Inet Topology Generator, version 3.0". <http://topology.eec.s.umich.edu/inet/>.