

IPv6 は必要か

池田信夫*

山田肇**

Is IPv6 Necessary?

IKEDA Nobuo, RIETI

YAMADA Hajime, GLOCOM

要旨

政府の「e-Japan 重点計画」では、IPv6 (Internet Protocol version 6)の普及を促進することが政策目標に掲げられている。その理由として、現在の IP アドレス(v4)が間もなく枯渇するとされるが、この推定には多くの疑問がある。実際には、アドレスはまだ半分以上残っており、しかもインターネットに接続して使われているのは全体のわずか 3%である。現状のままだと今後 15 年は枯渇することは考えられず、使われていないアドレスを有効利用すれば、ほぼ無期限に利用できよう。また v4 でも事実上無限のアドレスが利用可能であり、絶対的に不足することはありえない。機能的にも、今のところ IPv6 でしか実現できない重要なアプリケーションはなく、v6 がブロードバンド時代の課題に答える本質的な技術革新かどうかは疑わしい。したがって現在の段階で IPv6 の商用化を急ぐ必要はなく、とりわけ政府がそれを性急に推進することはインターネットの健全な発展を阻害する。

*独立行政法人経済産業研究所 上席研究員 (E-mail: ikeda-nobuo@rieti.go.jp)

**国際大学グローバル・コミュニケーション・センター教授 (E-mail: yamada@glocom.ac.jp)

有益なコメントおよび批判をいただいた荒野高志、楠正憲、藤原洋、森川博之の各氏や日経デジタルコアのメーリング・リストの参加者、また調査にご協力いただいた清貞智会さんに感謝したい。なお、これらの諸氏が著者と意見を同じくするものではなく、本稿の内容や意見は著者個人に属し、経済産業研究所の公式見解を示すものではない。

はじめに

2000 年 11 月の臨時国会の所信表明演説で、森首相（当時）は「IP バージョン 6 などによるグローバルインターネットの課題解決への積極参加など、インターネットの発展に対する大きな国際的貢献を目指します」と述べて国民を驚かせた。インターネットの世界でも一部の人は知らなかった IP(Internet Protocol)バージョン 6(v6)が日本で急に脚光を浴びるようになったのは、これがきっかけである。政府の「e-Japan 重点計画」でも「2005 年までにすべての国民が、場所を問わず、自分の望む情報の入手・処理・発信を安全・迅速・簡単に行える IPv6 が実装されたインターネット環境を実現する¹」という方針が掲げられ、官民共同で「IPv6 普及・高度化推進協議会」が作られて、2001 年度の補正予算で 80 億円、2002 年度の当初予算で 22 億円の v6 関連予算が計上された。

常時接続や携帯電話の普及によってインターネットのアドレスの消費は急速に増えており、家電がすべてインターネットにつながる「ネット家電」時代には膨大なアドレスが必要になるから、IPv6 は日本の IT 産業が巻き返す最大の武器だ——というのが v6 推進派の主張であり、首相官邸のホームページにある森首相の所信表明の注には「日米欧豪以外の国は既にアドレスが枯渇し、インターネットにつなぎたくてもつなげない状況」と書いてある。

しかし、IPv4 のアドレスは本当に間もなく枯渇するのだろうか。また IPv6 は本当に現在のインターネットにはない画期的な新機能を実現するプロトコルなのだろうか。そして、それが全世界で採用されて国際標準となる可能性はあるのだろうか——われわれの見た限りでは、日本の v6 論議はこうした基本的な点の検証が十分行われないうまま、「v4 は米国のひとり勝ちだったので、日本は v6 で巻き返す」といったナショナリズムがあおられ、「政府による補助の対象は v6 対応を条件とする」といった国家による事実上の強制が行われようとしているように見受けられる。本稿では、IP アドレスの実態を紹介し、IPv6 の必要性を客観的なデータにもとづいて検証する。

1. IP アドレスとは

TCP/IP(Transmission Control Protocol/Internet Protocol)のパケットは、アドレスなどを指定するヘッダとデータ本体にわかれており、このヘッダを各サイトのルータで読んで宛先に近いサイトに転送する。IPv4 のアドレスは 32 ビットで指定され、普通は 202.238.95.24 のように 10 進数で表記して 8 ビットごとに区切る。アドレスは、LAN を同定するネットワーク・アドレスと端末を同定するホスト・アドレスにわけられ、クラスごとに階層的に管理される。クラス A では、たとえば 043.***.***.***のように最初の 8 ビットをネットワー

¹ <http://www.kantei.go.jp/jp/it/network/dai3/3siryou42.html>

ク・アドレスとして使い、以下の 24 ビットをすべて同じネットワークの中で使うことができるもので、利用可能なアドレス空間は 2^{24} =約 1670 万個ある。同様に、クラス B では 16 ビット (約 65000 個)、クラス C では 8 ビット (256 個) ある。

アドレスは、全世界の割り当てを管理している IANA(Internet Assigned Number Authority) から ARIN (アメリカ大陸)、APNIC (アジア太平洋)、RIPE (ヨーロッパ) の 3 つの RIR(Regional Internet Registry)に割り当てられ、そこから各国の NIC(Network Information Center)を経由して ISP などのユーザーに配布される。各サイトのルータは、あるアドレスにデータを送るにはどこを経由すればよいかというルーティング・テーブル (経路データベース) を持ち、これにもとづいてパケットを送る。世界中のアドレスのルーティング・テーブルをすべてのルータが持つことは不可能なので、アドレスはできるだけクラスごとにまとめて一つのサイトに割り当て、クラスの中は各サイトで分担してルーティングを行う。これは東京から大阪に電話をかけるとき、大阪(06)につなぐところまでは東京の電話交換機がやるが、大阪市内の接続は大阪の交換機が行うようなものである。

現在の IP アドレスは 2^{32} =約 43 億個ある。これはインターネットのできた 1970 年ごろには十分大きい数と考えられたが、その後ユーザーが急速に増えたため、アドレス空間を広げるため 1992 年に IETF(Internet Engineering Task Force)に提案され、98 年に正式の規格 (RFC2460)になったのが IPv6 である。v6 のアドレスは 128 ビットだから、 2^{128} (3.4×10^{38}) というほぼ無限大に近いアドレスが利用可能になる。

最近では、ウィンドウズ XP が IPv6 をサポートし、シスコシステムズがルータのソフトウェア(IOS)を無料で v6 にアップグレードするなど、v6 をサポートする機運は少しずつ高まってきたが、IPv6 のサイトから v4 のサイトは見えるが、その逆はできないため、互換性を保つには両方をサポートしなくてはならない。また v6 が動くためには高性能のルータが必要で、サイト内の設備を全面的に更新しなければならないので、サポートしているサイトは全世界で約 1000 しかなく²、商用サービスはまだ始まっていない。

2. アドレスは枯渇するか

政府が v6 を推進する最大の理由は、v4 のアドレス消費量が急増しており、間もなく涸渇するためだとされている。この根拠になっているのは、ICANN の「2008 年にはアドレスが涸渇する」という試算である(ICANN 2001)。これは 2000 年現在で残っているアドレスを約 17 億個とし、新規アドレスの需要を毎年 7500 万個と推定して、2001 年以降、毎年 1.3 倍ずつ等比級数的にアドレス需要が増加していくと仮定すると 2008 年に、1.5 倍ずつであれば 2006 年に枯渇するというものである (図 1)。

² 6bone Registry Status Report, <http://whois.6bone.net>

図1 アドレス消費量の予測(ICANN)

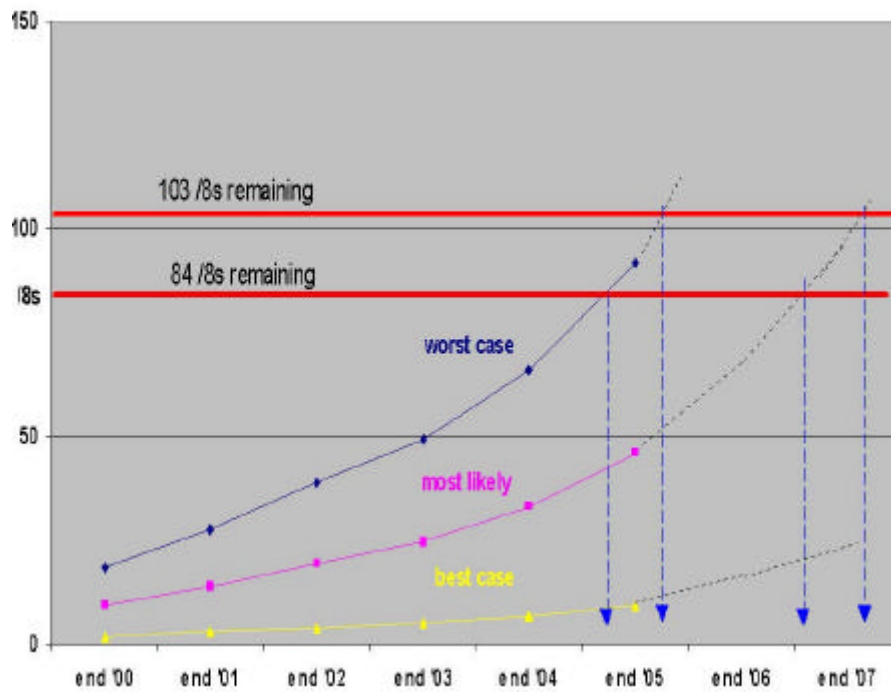
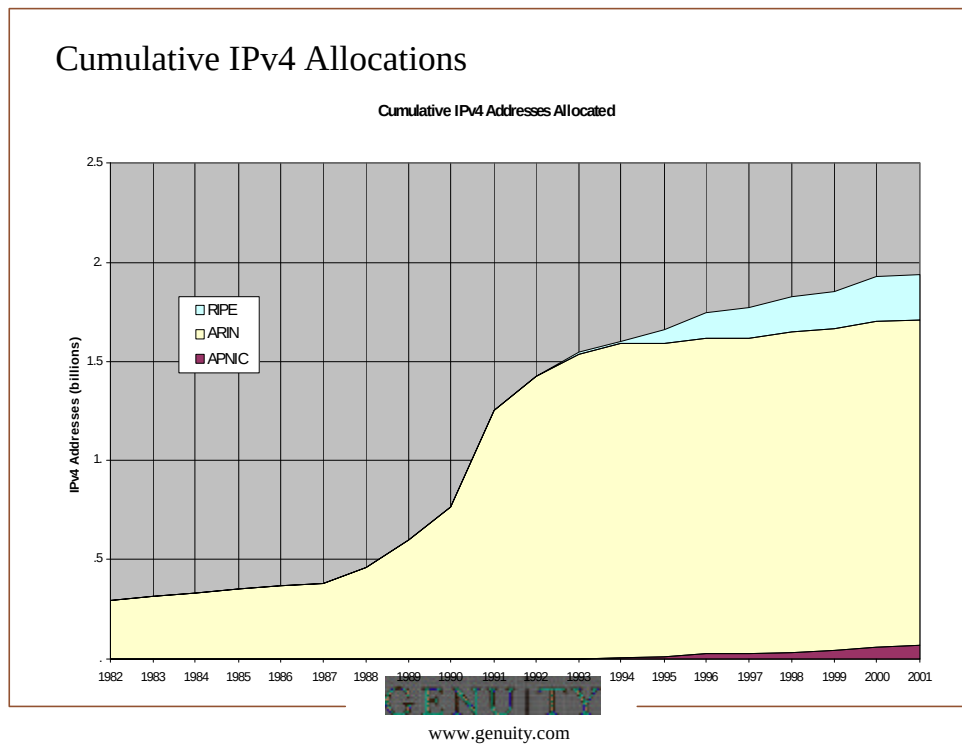


図2 アドレス割り当ての長期的な傾向(ARIN)



ところが ARIN(American Registry of Internet Numbers)による統計(Marcus 2001)では、アドレスは 19 億個余りしか使われておらず、まだ約 24 億個残っている(図 2)。消費量も 5000 万個程度で一定で、この調査を行なったスコット・マーカス氏(ARIN 理事)は、「不足が問題になるのは、早くても 2010 年以降だ」としている。

なぜ数字がこんなに大幅に食い違うのだろうか。まず ICANN の推計の問題点は、残りのアドレスがクラス A で 103 ブロック(約 17 億個)しかないとしていることである。これは 2000 年現在で IANA に残っているアドレス数だが、実際には各 RIR や NIC に配布されたままユーザーに割り当てられていない「在庫」がかなりあると見られる。ARIN の統計は RIR が NIC に実際に配布したアドレス数を積み上げているので、こちらの数字(残り 24 億個)のほうがまだ信頼できるが、この他にも NIC や ISP の在庫を加えれば、実際には ARIN のデータ以上にアドレスは余っているだろう。

次に今後の消費量の見通しだが、ICANN は毎年 1.3 倍から 1.8 倍という率でアドレスの消費量が指数関数的に増えてゆくと仮定して将来の消費量を推定している。たしかに表 1 に示すように 1998 年から 2000 年にかけて世界のアドレス消費量は急増し、特に 2000 年には前年度比 1.8 倍になっている。このトレンドをそのまま延長して、アドレス消費量が毎年 1.8 倍になるとすると、あと 3 年余りでアドレス(17 億個)は涸渇することになる。

しかし、この 2 年間は世界的に「インターネット・バブル」のピークに当たる特異年であり、長期的なトレンドの基準とはなりえない。事実、RIPE では 2001 年は前年比マイナスになり、中国や韓国などのインターネット普及でアドレスが急増している APNIC でも増加率は減速し、全世界の増加率も 11%に落ちている。日本の JPNIC でも、ここ 5 年間、消費量は年間 200 万個とほぼ一定である。

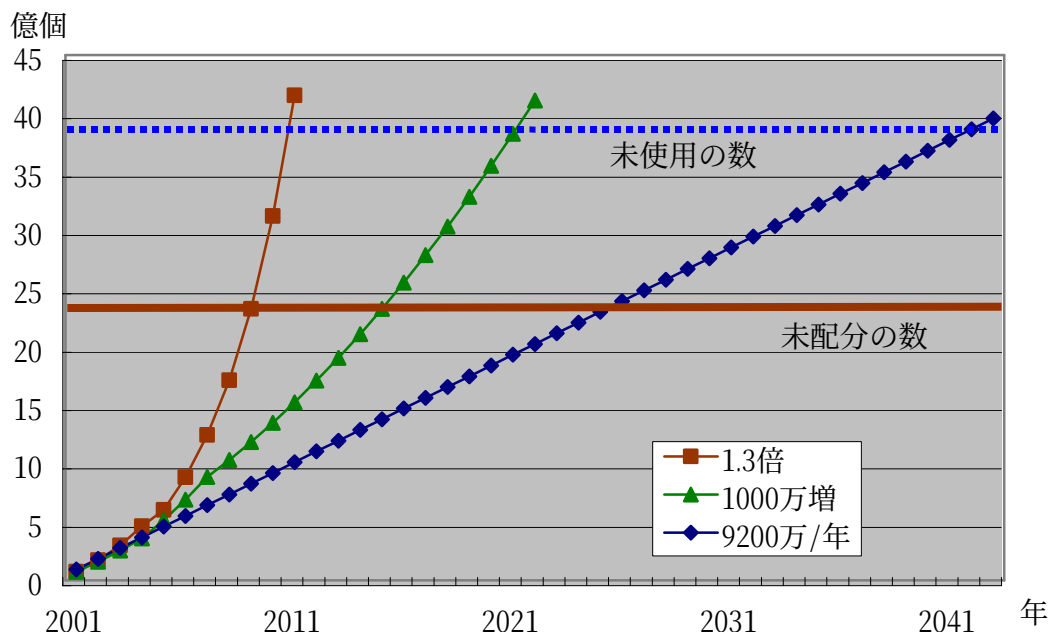
表 1 世界のアドレス割り当て(各 RIR の集計 単位 100 万個)

	APNIC/RIPE/ARIN/ WORLD			
1996	9	12	17	38
97	5	10	17	32
98	5	14	13	32
99	10	16	21	47
2000	21	28	34	83
01	29	25	38	92

表 1 のように不規則に変化する数字から今後のトレンドを予測することは不可能であり、ICANN のようにバブルのピークの伸び率をそのまま将来に外挿して指数関数的な増加を想定することは常識では考えられないが、そう仮定しても残り 24 億個を消費するには 9 年かかる。2001 年の増加量(約 1000 万個)がこの先ずっと続くとしても、使い切るのに 15 年かかる。長期的には伸び率が逡減することを見込んで年間 9200 万個(2001 年の実績)と考えると、26 年は持つ(図 3)。したがって v4 のアドレスは、これまでの平均的な

ペースなら 15 年から 20 年以上は持つと考えられる。実際には消費量は各 RIR でコントロールできるので、本当に逼迫してきたら割り当てをきびしくするなどの対応が可能だから、一定率で増え続けて自動的に天井にぶつかって涸渇するということはありません。

図3 IPアドレスはいつ涸渇するか



3. ゆがんだ配分

実は、問題は残っているアドレスの量ではない。これまでに 19 億個のアドレスが割り当てられているが、インターネットに接続しているコンピュータ(ホスト)の数は全世界で 約 1 億 3000 万台と推定されている³。つまり実際には、43 億個のアドレスの 3%しか使われていないのである。もちろんクラスの構造上、残りがすべて利用可能というわけではないが、枯渇を心配する状況ではないことは明らかだろう。問題は、なぜ 1 億 3000 万台のコンピュータに 19 億個もアドレスが配られたのかということである。

図 2 でもわかるように、アドレスは 1995 年までに約 15 億個、それから 2001 年までに約 4 億個配られている。ところが、世界のインターネット人口は 1995 年には 3000 万人だったのが急増し、2001 年には 4 億人を超えた。つまり現在の利用者には 1 人あたり 1 個以下しかアドレスが配られていないのに、初期の利用者には 1 人あたり 50 個もアドレスが割り

³ Internet Domain Survey, <http://www.isc.org/ds/WWW-200107/>. 「ホスト」とは、IP アドレスを持つすべてのコンピュータやデバイスを意味する（インターネットではサーバとクライアントは区別しない）。この統計はホストの名前を数えているので、これ以外にも名前を持たないデバイスがあるが、一つのコンピュータが複数の名前を持っていることも多いので、実際の数と大幅には変わらないだろう。

当てられている。このきわめて不均等な割り当てが見かけ上の不足の原因である。

インターネットは自律分散型のネットワークだといわれるが、アドレス体系は電話番号とよく似ており、IANA から各 RIR へ、そしてユーザーへと中央集権的に割り当てられ、クラスごとに構造化されているため、部分的な変更がむずかしく無駄が出やすい。初期には一つのサイトで必要なアドレス数がクラス B (約 65000 個) を超えるといきなりクラス A (約 1670 万個) が与えられ、必要かどうかも確認しないで大きなブロックが要求されるままに割り当てられていたという (堀ほか 2001:p.74)。この結果、国防総省だけでクラス A を 6 ブロック (約 1 億個) も持っており、ARPANET (インターネットの前身) の設計を請け負ったデータサービス会社 BBN(Bolt Beranek and Newman)は、一社でクラス A を 3 ブロック (約 5000 万個) も持っている。また MIT (マサチューセッツ工科大学) はクラス A を 1 ブロック持っているが、これは中国全体のアドレス数を上回る (付録参照)。現在、全世界のアドレスの 74%がアメリカ大陸に配分され、アジアは全部で 9%である。

このため、1992 年には「このままでは、あと 2 年余りでアドレスが枯渇してしまう」という報告書が出され、IPv6 の標準化作業が始まった。しかし v6 の標準化が難航しているうちに、アドレスはサブネットごとにビット単位で消費量に見合っって割り当てられるようになり⁴、クラスを横断してルーティングを行う CIDR (Classless Inter-Domain Routing)も可能になった。NAT や DHCP などの技術によってアドレスの利用効率も上がったため、1998 年に完成したころには、v6 の存在意義は疑わしいものになっていた。

したがって v6 を推進する前にやるべきなのは、アドレスの利用状況を調査し、使われていないアドレスを返却させるとともに、割り当てるブロックの大きさを利用実態に見合ったものに変更することである。クラスの構造によるロスを最大限に勘案して、残りのうち 90% (39 億個) が利用可能とすると、ICANN のバブル期を単純に延長した非現実的な想定でも 11 年、常識的な推定では 20 年以上持つ (図 3)。20 年というのは、インターネットではほぼ永遠の未来に等しい。つまり現在のアドレスの寿命は、割り当てポリシー次第で事実上無期限に延命できるのである。

事実、日本の WIDE プロジェクトが持っているクラス A のアドレス(043)は v6 協議会に運用が委託され、スタンフォード大学はクラス A のアドレス(036)を IANA に返却した (付録参照)。アドレスを変更して細分化すると、ルーティング・テーブルが大きくなって検索の効率が低下するが、これはつまるところルータのハードディスクの容量と CPU の処理能力の問題にすぎない。インターネット初期のようにコンピュータの能力が限られていたときならいざ知らず、現在のようにテラバイトのハードディスクが珍しくない時代に、ルーティング・テーブルを小さくするためにアドレスを浪費するというのは本末転倒である。

各ユーザーはアドレスを所有しているわけではなく、それを管理しているのは RIR だから、これまでのように善意を期待するのではなく、使っていないアドレスは返却するとい

⁴ サブネットとは、一つのクラスをビット単位で分割したもので、たとえば 20 ビット以下をホスト・アドレスとして使うものを /20 と表記する。最近の JPNIC などの割り当ては /20 単位である。

ルールを明文化すべきである。最近では、ARIN への割り当てが絞られる傾向にあるというが、米国への新規割り当てを止めれば未使用分の再利用が進むだろう。ただ現在使われているホストの数はわかるが、今後の利用計画などを検証することは困難なので、アドレスの「使用料」を取ることも一案だろう。たとえば1個1ドル取ったとしても、クラス A だと 20 億円を超えるから、余分なアドレスは返すだろう。このとき、使用料に見合った額で買い取って相殺すればよい。

ユーザーに v6 待望論があるのは、JPNIC の割り当てが官僚的で、将来の業務計画まで細かく干渉され、自由なアドレス利用ができないという原因が大きい。今は「手数料」という変則的な形で料金を取っているが、本来はすでに持っているユーザーも含めた従量制の使用料にすべきだ。アドレスの不足が問題になるということはすでに稀少な資源なのであり、価格メカニズムで配分すべきである。もちろん、これにともなうコストは発生するが、それは全世界のアドレスを v6 に付け替える莫大なコストと時間に比べれば無視できる程度である。E2E で通信したいプロフェッショナルだけが固定アドレスを使い、普通のユーザーはサーバで通信すれば、43 億で不足するということは考えられない。40 年前から「石油はあと 40 年で枯渇する」といわれてきたように、この種の終末論的な予言が当たった試しはない。それは価格メカニズムの機能を考えていないからである。IP アドレスの「不足」は技術的な問題ではなく、第一義的には配分の効率性という経済学の問題なのである。

4. アドレス空間の拡張は必要か

グローバル・アドレスは、本当に 43 億個では足りないのだろうか。ICANN の報告書では、消費量が急増する根拠として、携帯電話によるインターネット接続の増加や、DSL やケーブル・インターネットなどの常時接続が増えていることを挙げ、その需要を「NAT や DHCP による節約効果を考慮に入れずに」推定すると書かれているが、これは乱暴な仮定である。DSL が常時接続だといっても、全ユーザーがいつも接続しているわけではない。普通はログインしている時だけ DHCP(Dynamic Host Configuration Protocol)でプライベート・アドレスを自動的に割り当て、一定時間がたったら切ることによってアドレスの消費量を節約している。

プライベート・アドレスとは、クラス B のうち 192.168.***.***を各ユーザーが LAN の中だけで自由に使えるようにした「内線番号」のようなもので、 2^{16} = 約 65000 個使えるから、かなり大規模なネットワークでも十分である。論理的には、すべてのグローバル・アドレスをプライベートに拡張できるので、今でも $43 \text{ 億} \times 65000 = \text{約 } 280 \text{ 兆個}$ のアドレス空間があることになる。さらにそのアドレスをネストして使うこともできるから、実は IPv4 のアドレス空間もほとんど無限大なのである。

ただ、プライベート・アドレスは LAN の中でしか使えないので、インターネットにアクセスするときは NAT(Network Address Translation)でグローバル・アドレスに変換しなけ

ればならない。NAT は、外部にアクセスするときだけプライベート・アドレスをグローバル・アドレスに変換する PBX のようなものである。いくら内線電話の台数が多くても、必要な外線の数と同時にかかる通話の数だけあればよいように、NAT を使えばグローバル・アドレスは同時に発生するアクセスの数だけあればよい⁵。

つまり必要なアドレスの数は、デバイスの数ではなく、アクセスの数によって決まるのである。したがって DSL やケーブル・インターネットでも、グローバル・アドレスはユーザー数の 10～20%あれば十分である。世界各地の NIC も、最近はプライベート・アドレスを利用することを前提にした数しか割り当てないので、大企業の LAN でもクラス C で数ブロック（数百個）しかもらえない。これがインターネットの利用者が急増した 1990 年代後半にアドレスの消費量がほぼ一定だった理由である。

では最終的にはどれぐらいのアドレスが必要になるだろうか。全世界でインターネットにつながったホストは約 1 億 3000 万台、ユーザーは約 4 億人である。ユーザーは遠からず 10 億人台に乗るだろうが、プライベート・アドレスを使えば同時に発生するアクセスが全ユーザー数を上回することは考えられないから、必要なグローバル・アドレス＝アクセス数は最大 1 人に 1 個以内だろう。これは現在の割り当て実績とも一致する。つまり効率的に割り当てれば、全世界の 63 億人の 70%が同時にインターネットを利用しない限り、アドレスは 43 億個で十分なのである。

5. IPv6 で何ができるか

アドレスが潤渇しなくても、v6 によって従来にない機能が実現するなら、移行する意味はあるかもしれない。e-Japan 重点計画でも、「プライバシーとセキュリティの保護がしやすい IPv6 を備えたインターネット網への移行を推進する」と書かれており、この他にもマルチキャスト、実時間制御、プラグ・アンド・プレイなどが v6 によって実現する新機能とされているが、これらはいずれも v4 で実現している。

IPv6 のセキュリティ機能は IPsec と呼ばれるが、これはすでに v4 でも実現している⁶。また情報セキュリティには、ホームページの改ざんやサーバへの集中的なアクセスにどのように対応するかという問題や、そのような攻撃者をどのように追及するという側面があるが、v6 のスコープには入っていない。マルチキャストも、MBone という実験サービスが v4 ですでに始まっている。パケットの優先順位をラベルで指定することによって音声通話やストリーミングなどのリアルタイム（実時間）通信をサポートするラベル・スイッチン

⁵ さらに NAPT(Network Address Port Translation)あるいは IP マスカレードと呼ばれる技術を使えば、1 個のアドレスをポート番号で補完してセッションごとにわけ、複数のデバイスで使うことができる。

⁶ IPsec には、認証と暗号化の二つの方法が用意されている。認証は、受け取ったデータが本当に相手からきたものか、あるいは途中で改ざんされていないかを確認するのに用いられる。一方、暗号化については、あらかじめ送信側と受信側の間でどの暗号方式を使用するかを決めておき、そのルールに基づいて暗号化したデータを送信する。

グも、すでに MPLS(Multi-Protocol Label Switching)が国際標準となっている。アドレスを自動的に設定するプラグ・アンド・プレイも DHCP で実現している。

これから冷蔵庫や電子レンジがインターネットで結ばれる「ネット家電」になったら、それぞれに IP アドレスが必要だ、というのが e-Japan 計画の構想である。「v6 ブーム」が急速に広がったのも、出井伸之氏（ソニー会長）がこれを強力にサポートし、「ソニーの製品は今後すべて v6 対応にする」などと宣言したことが大きい。しかしネット家電にすべてアドレスが必要なら、今でも DHCP を使えばほぼ無限のプライベート・アドレスが利用可能である。要するに、v6 でしか実現できない決定的な「キラー・アプリケーション」はなく、v6 の意味は「NAT を使わない」ということしかないのである。

ネットワーク運用において、NAT に問題が多いことは確かである。すべての通信が NAT を通るので負荷が集中し、変換表が壊れるとすべての通信が切れてしまう。またセキュリティを守るためにデジタル署名などの暗号化を行った場合、NAT でアドレスを変換すると暗号が無効になってしまう。プライベート・アドレスに外から直接アクセスすることはできないので、IP 電話のように双方向で相手を同定する場合には困る。しかし、この程度はネットワーク管理者だけの問題であり、v4 でも解決可能である。

いま標準化の進んでいる RSIP(Realm Specific Internet Protocol)は、サーバがクライアントに対してグローバル・アドレスを一定期間「貸し出す」もので、これを使えば E2E のアーキテクチャを守ってアドレスを動的に割り当てることができる。また IP 電話についても、NAT にユーザーの使ったプライベート・アドレスを記録しておき、外からかかったときにはそのアドレスにつなぐ MGCP(Media Gateway Control Protocol)というプロトコルがすでに使われている。インターネットでは、要素技術がモジュール化されて独立に改良できるため、その組み合わせでたいの機能は実現してしまうのである。

IPv6 によって実現する夢としてよく描かれるのは、全世界のコンピュータや家電などのさまざまなデバイスにすべて IP アドレスがつき、サーバを介さず P2P(peer-to-peer)で超分散的に作動する「ユビキタス・ネットワーク」である。しかし、このように多くの生活用品が全世界と直接つながる状態はセキュリティ上、危険である。実際にグローバル・アドレスを使ってみると、世界中どこからでも直接ねらうことができるので、頻繁に侵入が起こる。インターネットであなたの家のオートロックを外して泥棒に入ることもし、常時電源の入っている冷蔵庫がネットワーク犯罪の「踏み台」に使われる危険も強い。

迷惑メールのような問題は、今はサーバ側でかろうじてコントロールしているが、各端末が裸で全世界とつながったら、もっと深刻な被害が出るし、その対策も困難である。v6 がセキュリティやプライバシーにすぐれているというのは使いこなした場合の話で、ユーザーがコンピュータの知識を十分持っていないと、本人のみならず社会に迷惑を及ぼす。冷蔵庫がネットワークに接続される時代がくれば、氏名や生年月日をパスワードに利用するようなユーザーも増えるだろう。情報家電はファイヤウォールで守ったほうがよいし、こうしたサーバ＝クライアント型なら今でも可能である。

おそらく考慮に値する唯一の v6 の存在根拠は、NAT のようにネットワークを ISP がコントロールする構造はエンドユーザーがネットワークをコントロールするインターネットの E2E (end-to-end) の設計思想に反するという「哲学的」な議論であろう (Lessig 2001:p.171)。もしも 1990 年に NAT が使われていたら、WWW(World Wide Web)は生まれていなかったかもしれない。いかなる通信業者の許可もなしにユーザーが創造性を発揮できることがインターネットの最大の価値である。今後の技術革新の方向が P2P のような超分散型アプリケーションだとすれば、いちいちサーバを経由する現在の IP のアーキテクチャはインターネットが「超分散並列コンピュータ」に進化するのを阻害するかもしれない。こうした議論は傾聴に値するが、それが一般ユーザーに訴求力を持つのは、実際に v6 の特長を生かした強力な P2P アプリケーションが出てきてからだろう。

実際のインターネットはすでに E2E ではない。たとえばファイアウォールでセキュリティを守るのも E2E 違反だが、自分でサーバを立ててセキュリティを守るユーザーはごく少数だろう。E2E は、初期の専門家だけで運営されていたときのインターネットの設計思想であり、今ではわれわれは電子メールさえ E2E で受け取ってはいないのである。実際には NAT ベースでも、多くのユーザーが ISP のサーバに自分のウェブサイトを作って世界に情報を発信している。大多数の一般ユーザーは、むしろウェブサーバのサポートなしで自己表現をすることは困難だろう。TCP/IP は、通信が電話からインターネットへと根本的に転換する「分水嶺」の役割は十分果たしたのであり、それが修正されたとしても、もとの電話網に戻ることは考えられない。

6. 移行は可能か

では v6 に移行する意味があると仮定して、それを実際に全世界に普及させることは可能だろうか。IP アドレスは、郵便番号のように政府が決めればすべて変更できるわけではなく、全世界のユーザーが自分のコストでルータやサーバや端末をすべて改造するか買い換えなければならない。初期のインターネットとは違って、ISP を中心とする現在のユーザーはボランティアで実装はしてくれないから、改造のコストを上回るメリットが必要だが、サポートするサイトが全世界の 3300 万のサイトの 1/30000 という状態では、ビジネスとして移行するインセンティブがない。特にアドレスの余っている米国が消極的で、インターネットの中心になっている企業 (IBM、HP、アップルなど) ほどクラス A の潤沢なアドレスを持っているので、v6 に移行するとは考えられない。皮肉なことに、米国の持つ膨大な在庫を放出させなければ v6 の普及も進まないのである。

インターネットの最大の長所は、その単純さと普遍性だから、v4 と v6 のパケットが混在する状態は、かえってネットワークが不安定になって好ましくない。実際には v4 のサイトからも見えないと使えないため、v6 と一緒に v4 のアドレスも割り当てて「デュアル・スタック」で運用されており、アドレスの節約にはならない。したがって最終的に v4 を完

全に置き換える見通しがあるかどうかは問題だが、現在のペースでは、全世界のサイトがすべて v6 対応に切り替わるのに数百年かかるだろう。

世界で数億も採用されている標準を互換性のない規格に全面的に変更するというのは、きわめて困難な作業であり、ごくまれにしか成功しない。特に通信プロトコルのように「ネットワーク外部性」の強い市場では、いったん標準になった規格が強い経路依存性を持つので、VHS や MS-DOS の例でもよく知られているように、機能的にすぐれていることは標準となるための必要条件でも十分条件でもない。歴史的にも、v6 のように従来の技術を改良した高コスト・高機能の「持続的技術」(sustaining technology)によって大衆化した安価な標準を置き換える試みが成功した前例はほとんどない(Christensen 1997)。かつての 4 チャンネル・ステレオや L カセット、最近では APS(Advanced Photo System)などがその失敗例だろう。

国際標準が切り替わるような「大進化」が起こるのは、コンパクト・ディスクやデジタル・カメラのようにそれまでまったくなかった機能を実現し、新しいアプリケーションの魅力が切り替えるコストを上回る場合である。この点で、v6 のメリットとして宣伝されるのは、NAT の制約がないとかアドレスが潤沢に取れるといった供給側の問題ばかりで、エンドユーザーにとってどういうメリットがあるのかははっきりしない。このままでは、OSI (Open Systems Interconnection)のような無用の長物になるおそれが強い。

現実的には、v6 が生き残る戦略は、現在のアドレス体系を全面的に代替しようとするのではなく、他との互換性がさほど問題とならない「すきま市場」をさがすことだろう。マッキントッシュが教育や芸術の世界では標準になり、ベータマックスが業務用では圧倒的なシェアを持っているように、v6 も「高級インターネット」としてターゲットを明確にすれば活路があるかもしれない。ただ v6 をサポートする予定の第 3 世代携帯電話やブルートゥースは技術そのものが不振で、実装の具体的な計画もない。計算機資源が限られ、ぎりぎりのコストダウンが要求される情報家電にデュアル・スタックを積むことも考えられない。

結局、今のところ v6 の用途として考えられるのは、特定のユーザーだけで完結する P2P の並列計算やネットワーク・ゲームのような趣味的なアプリケーションぐらいだろう。しかし WWW も最初は趣味的なプロジェクトだった。かつての NCSA モザイクのように v6 のコンセプトを生かした魅力的なアプリケーションが出てくれば、国の援助などなくとも、v6 はあっという間に世界に広がるだろう。逆に、今の段階で無理に「国定プロトコル」としてあらゆるものに導入しようとする、かえってアプリケーションの乏しさや負のネットワーク外部性によって挫折してしまうおそれが強い。

7. IP の限界

では超長期で考えるとどうだろうか。もしかすると 2020 年ごろには涸渇が起こるかもし

れないが、そのころには IP 自体が過去の技術になっているだろう。もともと 1970 年ごろにできた技術が今日まで生き残っていることが驚異的であり、それが今後 10 年以上主流であり続けるとは考えられない。すでに米国では、コア（基幹）ネットワークは光スイッチ（あるいは光ルーティング）になり、メトロ（市内）はギガビット・イーサネットによる「メトロ LAN」になりつつある。ブロードバンド化による帯域保証の要求から考えても、中継系ではなるべく低いレイヤーでルーティングしたほうがよいが、ネットワークが物理的なインフラに依存すると、電話型の閉じたネットワークになる危険もある。したがって IP のような論理アドレスは必要だが、この場合 IP はエッジ（末端）ルータでアドレッシングだけを行うローカルなプロトコルだから、v4 で十分である。

電波が有効利用されれば、アクセス系の主流は FTTH(Fiber To The Home)ではなく 100Mbps 級の無線インターネットになることも予想されるが、IP は携帯端末には向いていない。ルーティング・テーブルがサイトごとに固定されているため、端末のアクセスする基地局（ルータ）が変わるとネットワーク・アドレスが変わってしまうからである。現在の「モバイル IP」では、移動先のアドレスを元の基地局に伝えてデータを転送するという複雑な操作を行っているため、高速移動中にはハンドオーバーできない。むしろ端末がルータに依存しない絶対アドレスを持ち、つねに追跡できるような構造が望ましい。

また CDN(Content Delivery Network)のようなストレージ・ネットワークでは、データをあらかじめキャッシュ・サーバにまとめて転送し、要求のあったユーザーのアドレスだけをインターネットでキャッシュ・サーバに送る。現在のインターネットには高速でバルク転送する機能がないので、CDN では通信衛星や専用線を使っているが、これもインターネットの中に閉鎖的な「有料道路」ができる原因となる。それを避けるには、現在のようにアドレスとデータを一緒に送る「データグラム」型ではなく、両者を切り離してオープンに相互接続する新しいプロトコルが必要だろう。

MPLS もモバイル IP も CDN も、物理層で何らかのネットワーク管理を行うもので E2E ではないが、もはやこうしたシステムなしでインターネットは機能しない。v6 が 10 年たってもほとんど普及しないのに、こういう「筋の悪い」技術が急速に普及したのは、v6 のめざしている方向が現実のニーズと食い違っているためである。その結果、かつては E2E のシンプルな構造だったインターネットは、ばらばらのプロトコルが混在する救いがたく複雑なネットワークになってしまった。こうした深刻な問題に対応するには、v6 にこだわらず、多様なプロトコルが自由に共存できる新しいオープン・アーキテクチャを開発する必要がある。

8. 結論

以上の検討の結果、今の段階で IPv6 の商用化を急ぐ必要はなく、政府がそれを普及・推進することは v6 の健全な発展にとっても望ましくないというのがわれわれの結論である。

見通せる将来に現在の IP アドレスが枯渇することは考えられない。本当に間もなくアドレスが枯渇するなら、世界的に対応が始まっているはずだが、日本以外では v6 への関心はほとんどなく、政府が介入している例もない。「日米欧豪以外はインターネットにつなげない」という事実もなく、申請すれば必要なアドレスは割り当てられる。「枯渇」説のような疑わしい話を根拠にして v6 を売り込むことは、それが崩れると v6 そのものの意義に疑問を持たれて逆効果である。また「v6 で日本の家電産業が逆襲する」といったナショナリズムをあおるのも、「日の丸プロトコル」という印象を強めて国際的な普及の障害となるだけである。政府が強制して日本で普及させたとしても、日本だけで使える IP アドレスなどというものには何の価値もない。

IP の限界はいろいろな面で露呈しているが、v6 はそのうちアドレス空間だけを拡張する技術であり、全世界のアドレスを付け替えるに値するような本質的な技術革新とはいえない。1980 年代以降、日本政府が補助金などによって支援したハイビジョン、キャプテン、OSI、第 5 世代コンピュータ、シグマ計画、TRON、ISDN、デジタル放送、第 3 世代携帯電話などの技術のうち、成功した例は皆無に等しい。これは真の技術革新が既存技術とはまったく違う低コスト・低機能の「破壊的技術」(disruptive technology)として出てくるといふ事実に気づかなかったためである。

今インターネットの直面している最大の問題は、ブロードバンド化にともなって帯域保証の要求が強まるとともに、モバイル化によって動的なルーティングが必要になり、現在のアーキテクチャの限界が明らかになってきたことである。いかなる物理層にも依存しないで論理的にルーティングを行う E2E のアーキテクチャはインターネットの普遍性を保証し、自由な技術革新を生み出したが、この自由はネットワークの品質管理を困難にするというコストをとまなう。これまで、そうした問題は「ベスト・エフォート」ということで切り捨てられてきたが、今後インターネットそのものが基幹ネットワークになるにしたがって、さまざまな社会的責任が生じることは避けられない。いわばインターネットは大人にならなければならないのである。

われわれは v6 の研究開発や実験に反対しているわけではない。むしろ現在の IP に代わるブロードバンド時代にふさわしいプロトコルの開発は急務である。しかし問題をアドレス空間に限定するのは狭すぎよう。現在は 30 年間続いたパケット交換（あるいはデータグラム）から新しいアーキテクチャへの過渡期であり、どの方向が正しいかはまだ見えない。今インターネットの直面している問題は、v6 のような部分的な手直しではなく、まったく新しいアーキテクチャによってしか解決できないかもしれない。今はなるべく多様な研究を行なって次世代のネットワーク像をさぐる段階であって、政府が特定の要素技術を推進することは、技術をミスリードするおそれが高い。インターネットがここまで発展したのは、国家や企業の個別利害に惑わされず、ユーザーが自律的に管理してきたためである。政府は IPv6 から手を引き、インターネットの問題は民間にゆだねるべきである。

参考文献

- Christensen, C.M. (1997), *Innovator's Dilemma*, Harvard Business School Press. (伊豆原弓訳『イノベーションのジレンマ』翔泳社)
- ICANN (2001) "McFadden/Holmes Report of the Ad Hoc Group on Numbering and Addressing",
<http://www.icann.org/committees/adhoc/mcfadden-holmes-report-08mar01.htm>
- Lessig, L. (2001) *The Future of Ideas*, Random House, 2001.
- Marcus, J.S. (2001) "Global Traffic Exchange among Internet Service Providers (ISPs)",
<http://www1.oecd.org/dsti/sti/it/cm/act/Berlin/marcus.pdf>
- 堀良彰・池永全志・門林雄基・後藤滋樹 (2001)『ネットワークの相互接続』(岩波書店)

付録 IPv4 の割り当て

<http://www.iana.org/assignments/ipv4-address-space>

Address Block	Registry - Purpose	Date
000-3/8	IANA - Reserved	Sep 81
003/8	General Electric Company	May 94
004/8	Bolt Beranek and Newman Inc.	Dec 92
005/8	IANA - Reserved	Jul 95
006/8	Army Information Systems Center	Feb 94
007/8	IANA - Reserved	Apr 95
008/8	Bolt Beranek and Newman Inc.	Dec 92
009/8	IBM	Aug 92
010/8	IANA - Private Use	Jun 95
011/8	DoD Intel Information Systems	May 93
012/8	AT&T Bell Laboratories	Jun 95
013/8	Xerox Corporation	Sep 91
014/8	IANA - Public Data Network	Jun 91
015/8	Hewlett-Packard Company	Jul 94
016/8	Digital Equipment Corporation	Nov 94
017/8	Apple Computer Inc.	Jul 92
018/8	MIT	Jan 94
019/8	Ford Motor Company	May 95
020/8	Computer Sciences Corporation	Oct 94
021/8	DDN-RVN	Jul 91
022/8	Defense Information Systems Agency	May 93
023/8	IANA - Reserved	Jul 95
024/8	ARIN - Cable Block	May 01
025/8	Royal Signals and Radar Establishment	Jan 95
026/8	Defense Information Systems Agency	May 95
027/8	IANA - Reserved	Apr 95
028/8	DSI-North	Jul 92
029-30/8	Defense Information Systems Agency	Jul 91
031/8	IANA - Reserved	Apr 99
032/8	Norsk Informasjonsteknologi	Jun 94
033/8	DLA Systems Automation Center	Jan 91
034/8	Halliburton Company	Mar 93
035/8	MERIT Computer Network	Apr 94
036/8	IANA - Reserved (Formerly Stanford University - Apr 93)	Jul 00
037/8	IANA - Reserved	Apr 95
038/8	Performance Systems International	Sep 94

039/8	IANA - Reserved	Apr 95
040/8	Eli Lily and Company	Jun 94
041-2/8	IANA - Reserved	May 95
043/8	Japan Inet	Jan 91
044/8	Amateur Radio Digital Communications	Jul 92
045/8	Interop Show Network	Jan 95
046/8	Bolt Beranek and Newman Inc.	Dec 92
047/8	Bell-Northern Research	Jan 91
048/8	Prudential Securities Inc.	May 95
049-50/8	Joint Technical Command	May 94
	Returned to IANA	Mar 98
051/8	Department of Social Security of UK	Aug 94
052/8	E.I. duPont de Nemours and Co., Inc.	Dec 91
053/8	Cap Debis CCS	Oct 93
054/8	Merck and Co., Inc.	Mar 92
055/8	Boeing Computer Services	Apr 95
056/8	U.S. Postal Service	Jun 94
057/8	SITA	May 95

* /8 というのはクラス A の意味。058 以降は各 RIR が配分。