

9 新世代ネットワークの 実現に向けて —AKARI プロジェクト—

平原正樹 ^{*1}

^{*1} (独) 情報通信研究機構

//AKARI プロジェクトの目指すところ //

インターネットが社会基盤になりつつあるのは周知のとおりである。しかし、一方で、インターネットはその急激な発展の中で、一貫性のない、言わばその場しのぎの機能拡張や追加を繰り返してきており、アーキテクチャの観点から見ると「つぎはぎだらけ」のネットワークになりつつある。そこで、今後新たに発生するであろう技術的さらには社会的要求に応えることのできる、新しい概念に基づく新世代ネットワークに関する研究開発が国の内外を問わず開始されている。

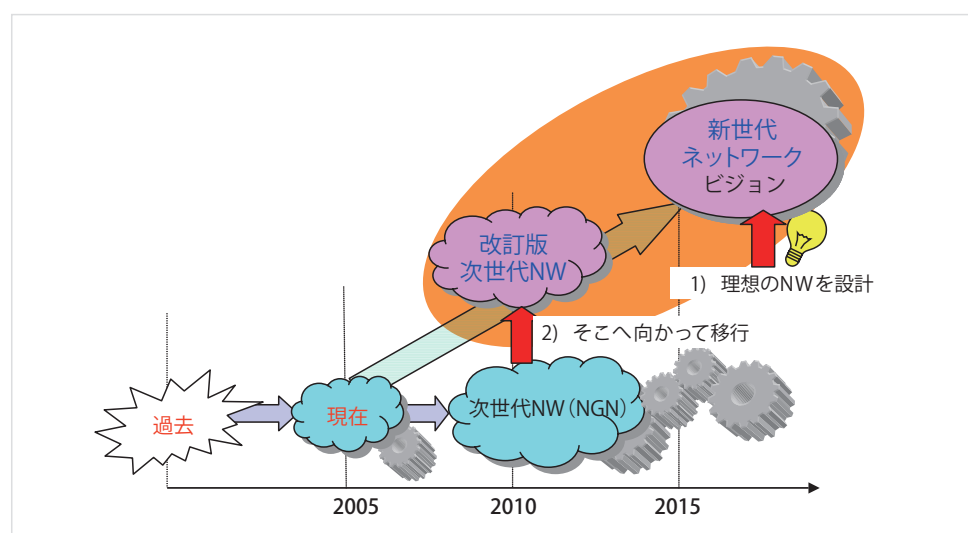
ここでは、NICT（(独) 情報通信研究機構）において取り組んでいる新世代ネットワークアーキテクチャ設計プロジェクト（通称、AKARI プロジェクト）について紹介する。AKARI プロジェクトは、2015 年に新しい技術に基づく新世代ネットワークを実現することを目的としている（図-1）。暗がりの中で将来への方向を指し示す小さな「あかり」となることを「AKARI」ということばに込めているが、目指すところは現在人類が抱える問題を解決し、地球規模での文明のさらなる発展を支える、未来のネットワークのデザインである。

現状においてネットワーク技術の研究開発というと、

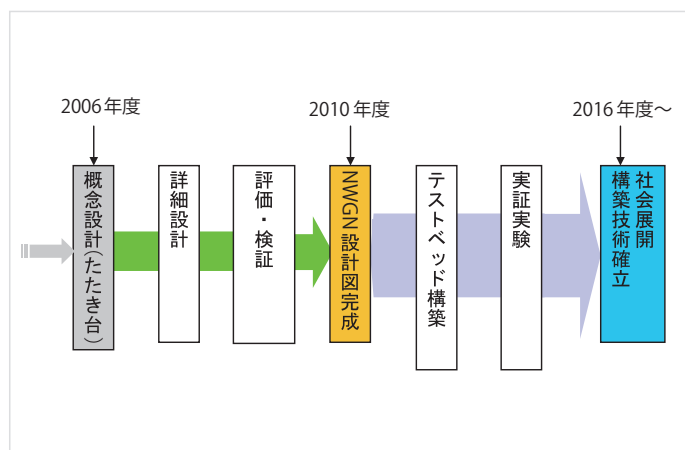
まずインターネットありきで、インターネットの改善に終始することがほとんどである。社会基盤となっているインターネットを対象とする限り、半ば当然とも言えるが、それではイノベーションは生まれない。我々は、現状のしがらみにとらわれず、いったん白紙の状態から理想を追求し、その後に現在からの移行を考える立場をとる。新しい設計原理に基づいて社会基盤としてのネットワークのグランドデザインを行うことが我々の目的である。

//AKARI プロジェクトの全体計画 //

AKARI アーキテクチャ設計プロジェクトは、図-2 に示すように、新世代ネットワークの設計図を得るまでの前期 5 年間と、それに基づいてテストベッドに展開する後期 5 年間に分けて考えている。前期の設計では、次章で述べる設計要求を考慮し、最大満足度を得られることの証拠を提示する。まず、概念設計を作成し、最初の設計原理を提示する。これを改訂しながら詳細設計に展開する。その後、プロトタイプを開発して評価・検証し、概念の確からしさを示し、設計図を完成させる。後期には、開発した設計図およびプロトタイプをもとに、テス



● 図-1 新世代ネットワークへの道程



●図-2 AKARI プロジェクト全体計画

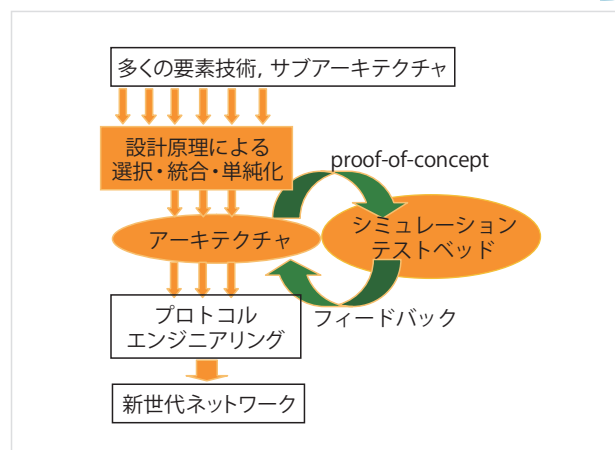
トベッドに組み込んだ実証実験を行う。さらにネットワークの各構成要素とともにプロトコルエンジニアリングを行い、新世代ネットワークの構築技術を確認する。現在、2年を経過し、概念設計図を公表した段階である。本稿も主として、その設計概念図に基づいて、新世代ネットワークの基本概念を説明している。

このような長期にわたる計画を成功させるためには、以下の課題を克服していくことが重要であり、そのために NICT が中心となった産学官の連携によってプロジェクトを推進している。

- 10 年以上先のアーキテクチャに対する全体を見渡す広い見識と、経験に基づいた確かな設計能力を確保する。
- 競争関係のある産業界に対して、それらの将来を指し示しリードする陣容を敷き、中立的な革新性を確保する。
- 細分化されてしまった要素技術を進歩させることや局所的な効率改善を目指すのではなく、全体に共通した基本原理に基づいて、新世代ネットワークを設計する。

// なぜネットワークアーキテクチャか //

そもそもネットワークアーキテクチャとは何か。一義的には、ネットワークアーキテクチャは抽象的な設計原理の集合であると定義できる。設計原理のそれぞれは、設計の際に直面する選択場面における判断基準となる。しかし、あるネットワークが要求を満たしているかどうかの判断はできるが、要求を満たすようなネットワークを設計する一般的な方法論は存在しない。我々が採るアーキテクチャ設計手法は以下のようなものである(図-3 参照)。より良いネットワークアーキテクチャを得るには、試行を繰り返すことによってより要求を満足させられるように、また、より安定した結果が得られるようにする必要がある。そのためには、それぞれの選択肢となる基盤技術やサブアーキテクチャを選択し、統合による単純化が必要になる。また、ネットワークアーキテクチャは、



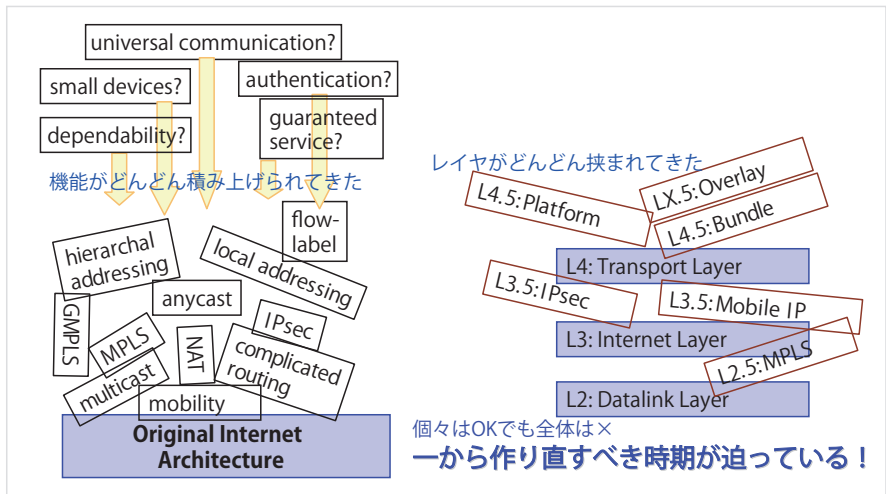
●図-3 新世代ネットワーク設計手法

利用側からの要求(ニーズ)と要素技術の開発(シーズ)を調和させる中間にあるものと考え。優れたネットワークアーキテクチャは、ニーズとシーズのギャップを埋め、より最適化され安定した組合せをもたらす。

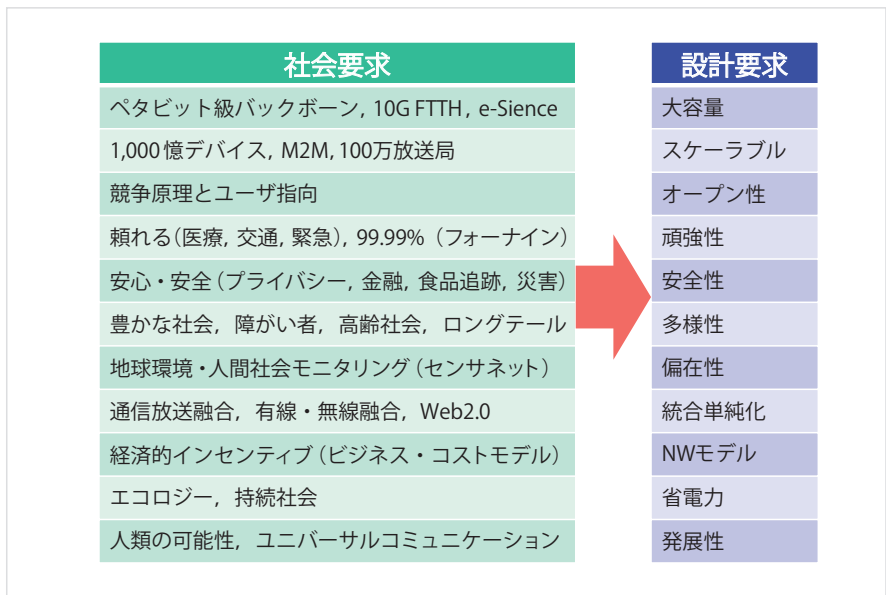
それではなぜ今、新しいネットワークアーキテクチャが必要なのか。インターネットの設計思想の優秀性は、たびたび指摘されているところである。しかし、これまでも NAT, IPsec, MPLS などさまざまな機能がその必要性から、一貫性なく追加されてきた(図-4 参照)。たとえば、MPLS の導入は、経路制御やリルート機能など本来 IP 層で提供されてきた機能も含んでおり、機能の2重化を生み、構造が冗長になる問題を抱える。また、IPsec や TCP では、マルチホームや端末移動により、IP アドレスが変更になったときの変更手順が煩雑になる。

問題は、インターネットが社会的経済的基盤になった現在、これ以上の機能追加が困難になりつつあり、複雑化したインターネットの機能を維持することはもはや難しい段階にきているという点である。すなわち、今後出現する未知の新しいサービスに対応していけるかどうかははなはだ疑わしい。その結果、インターネットが抱える諸問題を根本的に解決するために、今のアーキテクチャをいったん白紙に戻して、根本的に考え直すという考え方に至る。たとえば AKARI プロジェクトでは、エンド・ツー・エンドで QoS を提供可能な形態としてパケット・パス統合の実現を考えている。また、ID・ロケータ分離方式については、ID とロケータをつなぐ関連づけを変更するのみで、上位層のプロトコルに影響を与えず通信の継続が可能となるような方式を提案している。紙面の制限上、ここでは省略するが、現状のインターネットの問題を指摘し、新世代ネットワークによって解決できる可能性のある、他の例については文献1)を参照してほしい。

以上のような考え方に基づくプロジェクトは、AKARI プロジェクトだけではなく、諸外国で長期的な



●図-4 インターネットの問題



●図-5 社会的要求から設計要求への展開

(図-1, 図-5). 10年後, 20年後の社会予測は簡単ではない. しかし, 少なくとも理想とする情報ネットワーク社会を掲げ, それを実現するネットワーク技術の研究開発を推進すべきである. 現在の技術に拠って立つ研究開発は, 企業の一時的な利害を反映するものになったり, たとえそれがなくても局所的な最適化に陥ったりする恐れがある. その結果, 限界点に達したときに, 次の世代の技術に対して大きなギャップを生む可能性が大きい. そのため, 現状用いられているネットワークシステムやそこでの技術資産に縛られることなく, 目指す理想の将来に責任を持つ気概を持って研究開発することが重要である. 理想とするネットワークの実現をビジョンとして持つてこそ, ネットワーク研究開発の方向性が定まり, 将来へ向けてのステップを踏むことができる. もちろん新世代ネットワーク自体はすぐに実現できるものではないとしても, 当該分野の研究開発の方向性を指し示すものとなるよう心がけなければならない. これらが, ネットワークアーキテクチャ研究・開発にとって最も重要な立脚点である.

重要課題として取り組まれつつある. 米国ではNewArchプロジェクトが2000年に始まり, ACM SIGCOMMコミュニティによるFDNA (Future Directions in Network Architecture) ワークショップの開催を経て, 2006年にFIND (Future InterNet Design) プログラムがNSFによって開始された. また, 同じくNSFによってGENI (Global Environment for Network Innovations) プロジェクトが開始されている. 欧州においても, Euro-NGIやAutonomic Communicationなどのプロジェクトが2003年から始まり, 2008年, FP7のFIRE (Future Internet Research and Experimentation) などによって本格的な取り組みが始まりつつある. NICTにおいても, 未来ネットワークの研究開発のために, ネットワークアーキテクチャについて重点的に研究を進める体制が整えられ, 2006年にAKARIプロジェクトが発足した.

そもそも我々ネットワーク研究者・技術者は, 将来のネットワークに対するビジョンを持たなければならない

// 社会的要求から設計要求への展開 //

現在, エネルギー問題, 環境問題, 医療問題, 食糧問題, 少子高齢化問題などさまざまな社会問題が存在する. また, 地方・都市間や先進国・発展途上国間などの格差問題も依然問題となっている. 新世代ネットワークはこれらの問題を解決する, あるいは解決の一助となる必要がある. 我々はそれらの問題を精査し, 図-5に示すような社会要求としてまとめ, それを設計要求に展開するという手法をとった.

たとえば, 設計要求の2番目に掲げるスケーラビリティとは, 以下のようなことである. すなわち, 今後, ネットワークに接続される機器は, 高性能なサーバから単機能のセンサまで多岐にわたり, 特に小さな機器は生成するトラフィック量が小さいものであっても, 数が膨大になる. 例として, 全世界50億人のそれぞれに20個程度の接続機器があるとする, 1,000億の機器が

接続できなければいけない計算になる。また、人同士の通信だけでなくロボットやコンピュータ同士の通信 m2m (Machine-to-Machine) が増えていくことが予測される。さらに、通信と放送の融合が進めば、放送エリアもボーダレスになって全世界の放送局がグローバル化する。個人による発信も考慮すれば、送信主体となる数は 100 万以上と見積もることができる。また、オープン性も重要である。適切な競争原理があつてこそ、ネットワークに自律的な発展を促す。また、ネットワークを提供する側と利用する側のバランスは大切である。ユーザによる制御の自由度を高め、多様性を担保する必要がある。WWW が発明できたのはネットワークがオープンであつたからであるという事実はよく指摘されるところであり、ネットワークはユーザの創意工夫を活かすためにオープン性を確保すべきである。

// 新世代ネットワークアーキテクチャ設計のための基本原理 //

未来社会の質を高めるためには、まず、あり余量の資源を持つネットワークを実現することが不可欠である。十分な量は質を高める。技術の融合によってシステムを複雑にしてはならない。選択と合成によって、より単純な方向へと導くのがアーキテクチャの役割であると考えられる。ネットワーク上の仮想空間を現実化する仕組みは、インターネットの弱点であるセキュリティ由来の社会問題を解決する。そして、ネットワークの核心に頑強性が備わることで小手先の改良では与えることのできない安心を社会にもたらす。

すなわち、新世代ネットワークアーキテクチャ設計の根幹をなす原理は、以下のように、KISS (Keep It Simple, Stupid) 原則、現実結合原則、持続的な進化可能原則の 3 原則にまとめられる。以下、それぞれについて詳述する。

【KISS 原則】

多様性や拡張性さらには信頼性を増すためにも、KISS 原則は社会の一部となるようなネットワークに必要な大原則である。その原則を堅持するために結晶合成、共通レイヤ、エンド・ツー・エンドの原理を取り入れる。

結晶合成

多くの技術の中から選択し統合する際に最も大切なことは、単純化することである。技術の結晶合成と呼ぶべき単純化を行い、機能統合しても複雑度が減る方向へ設計を行うことが求められる。

共通レイヤ

階層構造をとるネットワークにおいては、各層は独立して設計され機能拡張されるが、インターネット成功の

理由の 1 つは IP 層を共通とした点にある。ネットワーク層を共通層として存在することを仮定すれば、その共通層で実現される機能を他の層で持つ必要はない。新世代ネットワークアーキテクチャでは、共通層の存在を前提として他の層での重複機能を省きレイヤ縮退を行う。

エンド・ツー・エンド

特定のアプリケーションに基づいて、あるいは、特定のアプリケーションのサポートを目的としてネットワークを構築してはならない。これはインターネットの基本原理を継承するものである。

【現実結合原則】

インターネットの問題は、ネットワーク上の空間にあるエンティティと現実社会とが乖離してしまうことによって生じる。これらの関係を滑らかに結合するためには、アドレッシングを物理と論理に分けた後、これらの間のマッピングやそれによって生じる認証やトレーサビリティの要求を満たす原理が必要となる。

物理・論理アドレッシングの分離

物理アドレッシングと論理アドレッシングをどこまで分離するかを追求すべきである。モビリティやマルチホームなど、これまでになかったホストの接続形態が出現し、インターネットのように物理アドレスと論理アドレスを同じものとして扱うことによってさまざまな問題が引き起こされている。

双方向認証

常に双方向認証が可能である前提でネットワークを設計すべきである。また、認証情報はその個人あるいはエンティティが制御可能な条件下に置かれていなければならない。

追跡可能性

ネットワーク上の攻撃を軽減するために追跡可能でなければならない。アドレッシングやルーティングさらにその上のトランスポートを設計する際には追跡可能であることを原理とする。さらにアプリケーションから現実社会へまで追跡可能なシステムとする必要がある。

【持続的な進化可能原則】

新世代ネットワークアーキテクチャでは、ネットワークが進化し発展するために、持続可能なネットワークを設計することが必要となる。ネットワークはできるだけ単純な構造にし、エンドノードやエッジノードにおいてサービスの多様性を確保することが重要である。そのために、以下に述べるネットワーク制御手法や設計手法を確立し、50 年、100 年と持続発展するネットワークに寄与する必要がある。

Self-* 特性

持続発展可能なネットワークを構築するためには、適

光パケット・光パス統合	光技術の広帯域性を活かした光パケット交換技術と光パス交換技術を統合し、さまざまなサービスに対して異なる交換原理を提供
新世代光アクセス	高速かつさまざまなサービス提供に有用な新世代 FTTH
新世代無線アクセス	さまざまなセンサやパーソナル通信デバイスがユーザを取り巻くように存在する新世代無線通信技術・無線ネットワーク構成技術
PDMA	パケット網の通信特性に適合し、セル設計とチャネル割り当てが不要な新世代移動体無線通信
新世代トランスポート層制御	ユニバーサル対応、移行シナリオ、公平性などを考慮した新世代トランスポート層制御。科学的根拠に基づいた工学的実現の例となる自己組織型制御にもなっている。
ID・ロケータ分離	移動通信やマルチホームを簡素化しプライバシを守り、ネットワークをスケーラブルに構築するアーキテクチャ
新世代レイヤリング	隣接レイヤに限らず制御情報のやりとりを行うクロスレイヤアーキテクチャ
新世代セキュリティ	分散管理型セキュリティ制御
QoS 経路制御	ユーザ視点で、全体最適を達成するためのスケーラブルな QoS 経路制御
新世代ネットワークモデル	多様なサービス創出のためネットワーク機能をユーザに解放するオープンモデル
ロバスト性制御	スケーラビリティ、故障などを含めた通信環境の変動に対する適応性などを実現する自己組織化手法
レイヤ縮退	ネットワークを単純化し、複数層にまたがる重複機能を削減する手法
IP の単純化	クリーンスレートで再設計した新世代ネットワーク層の例
オーバレイネットワーク	持続可能なネットワークの実現例。また、ユーザコントロールアビリティなどの枠組みを提供する
ネットワーク仮想化	アーキテクチャ設計、競争原理、持続進化を促進する枠組み

●表 -1 新世代アーキテクチャの構成要素の例

応的なネットワークが必要である。そのためにはネットワーク内の個々のエンティティが自律分散的に動作し、全体では意図する制御が実現されるようなネットワーク、すなわち、自己組織型ネットワークを設計する必要がある。また、今後もネットワークの階層構造は機能分割、機能分担という意味で重要な概念であり続けると考えられる。従来のように階層を完全に分割せず、上位層、下位層の状態に適応可能な制御構造を有するネットワーク、すなわち、自己創発型ネットワークを設計する必要がある。

スケーラブルな分散型制御

大規模なネットワークや変動のあるネットワークに対しても十分にスケールするためには、たとえば、自己組織型制御を導入し、自律的な動作を各ノードに求めることがより重要になる。

ロバストな大規模ネットワーク

システムが大規模化、複雑化すれば、単独故障ではなく、複数同時故障が常態的に発生する。また、ソフトウェアバグが入る要素が大きくなったり、運用管理における人為ミスが入り込みやすくなったりする。新しいネットワークアーキテクチャにおいては、故障が同時に発生したり重大な故障が発生したりしても対応可能な設計が求められる。

トポロジが変動するネットワークのための制御

モビリティをあらかじめ考慮したネットワーク設計は必須であり、たとえば、トポロジが頻繁に変動する場合には、経路やアドレスを維持するよりも、オンデマンドに資源を発見する制御が有効になるのは当然である。た

だし、オーバヘッドが大きいため、状況に応じた経路制御が実現できることも重要である。

実時間トラフィック計測に基づく制御

ネットワークの大規模化によって故障発生は常態化している。そのため、制御に必要なタイムスケールに応じて、精度を最適化した実時間トラフィック計測が重要であり、それを経路制御に適用する必要がある。また、エンドホストに自律的な動作をより求めるためには、ネットワーク状態をリアルタイムで実測、あるいは推測することが重要になる。

// 新アーキテクチャの構成要素 //

設計原理に基づいた新世代ネットワークアーキテクチャの基本構成要素として、本プロジェクトでは表 -1 に示すような構成要素について議論を進めてきた。現状ではその候補にすぎないが、今後、アーキテクチャの全体像の完成とともに、個々の要素技術について確立していく必要がある。

// テストベッドの要件 //

AKARI プロジェクトの後期に予定している実験ネットワークへの展開に向けて、今後、テストベッドに必要な要件をまとめていく予定であるが、従来のテストベッドネットワークの最大の問題は、高速な有線回線の提供を主体としていたためにアプリケーション実験のためのテストベッドになっていた点である。新世代ネットワー

クのためのテストベッドは、少なくとも以下のような要件を満たす必要がある。

新しいアイデアの実証

当然、ネットワークに関する伝送方式、通信方式、制御方式、プロトコル、アプリケーションまで新しいアイデアを実験できることが必要である。

多様なネットワーク技術の実験

新規開発するフォトニックネットワーク技術や高速ワイヤレス技術等の第1層を含む下位層技術、新しいアーキテクチャとプロトコルに基づくネットワークノードなどをテストベッドに組み込んで実験できることが必要である。

柔軟性の確保

未知の通信方式、制御方式、プロトコルにテストベッドとして対応するために、また、複数の方式が混在できるようにするために、テストベッドを構成するハードウェア・ソフトウェアの柔軟性を確保する必要がある。

実サービスの運用可能性の実証

新しいサービスの運用可能性を示すために、下位プロトコルの選択ができる仕組みが必要である。また、実運用ネットワークに近い環境を再現できる必要がある。

多様な通信環境の提供

無線ネットワーク、ホームネットワーク、センサネットワーク等、多様なネットワーク環境の実験を実環境に近い形でできるようにする必要がある。

共通機能の共有

今後、要素技術やプロトコルの研究開発が同時進行していく。各プロジェクトの独立性を確保することは必要であるが、一方で、共通機能の相互参照などによって、それぞれの研究開発を相補的に加速化できるようにすることもまた重要であろう。

// 持続的発展するネットワークの実現に向けて //

本稿では主として、AKARI アーキテクチャ設計プロジェクトが公表した概念設計書から、社会的な要求、将来の基盤技術、それらを元に設計を行う際の設計原理、設計原理に基づいた概念設計例や、検証を行うために構

築するテストベッドへの要求について述べた。

我々のアプローチは、新世代ネットワークを、将来の社会的要求の把握からアーキテクチャの考案、さらにテストベッドによる実証実験まで展開することによって、その実現を目指すものである。もっとも重要なことは、全体を最適化し安定化させる設計原理、すなわち、ネットワークアーキテクチャの存在である。もちろん最終的な設計図の完成まで、設計原理ですら固定されたものではなく、設計や評価を通じたフィードバックにより変化し得るものであることを念頭におくことが肝要である。

「新世代」には、既存技術の制約にとらわれない自由な発想に基づいて行動しようという思いが込められている。新世代ネットワークは斬新であるとともに中立的でなければならない。新世代ネットワークの実現のためには、個別の技術に対する深い洞察とネットワーク技術全般に対する幅広い知見を持つ、より多くのネットワークアーキテクトの参加が不可欠である。本稿は、その進むべき方向性について筆者の考えを述べているに過ぎない。今後、多くの研究者・技術者とともに新世代ネットワークの実現を目指していきたい。

謝辞 本稿の執筆内容は、AKARI アーキテクチャ設計プロジェクトでの議論を通じた成果を含む。プロジェクトメンバーに謝意を表したい。

参考文献

- 1) AKARI アーキテクチャ設計プロジェクト：新世代ネットワークアーキテクチャ AKARI 概念設計書改訂版 (ver1.1) (June 2008) (<http://akari-project.nict.go.jp/>).

(平成 20 年 8 月 8 日受付)

平原正樹

1985 年九州大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。1988 年同後期課程単位取得退学。工学博士（情報工学）。東京大学、九州大学、奈良先端科学技術大学院大学の助教授を経た後、1997 年から 2000 年までミシガン大学メリットネットワーク勤務。その後、九州システム情報技術研究所を経て、2003 年から（独）通信総合研究所（現（独）情報通信研究機構）。2006 年から同新世代ネットワークセンターネットワークアーキテクチャグループリーダー。JUNET、WIDE、JAIN コンソーシアムなどを始め、米国 NSF の IPMA プロジェクトなど多くの研究プロジェクトに参画、先導してきた経験を活かし、現在 AKARI プロジェクトを主導。JNIC、JPNIC、APNIC の創設者としても知られる。

謹告

平原正樹氏は、2008 年 7 月 29 日、本稿の出版を待たず永眠された。AKARI プロジェクトの推進は彼の存在なくしてはあり得ないものであった。プロジェクトの成功を待たずして逝去されたことは、我が国のみならず世界の損失である。ここでは特に、平原氏が生前述べられていた「プロジェクトの成功はもちろんのこと重要であるが、それとともに、あるいはそれ以上に大事なことは、今後世界的に活躍する人材を育成していくことである」という点を強調しておきたい。ここに謹んで平原氏の冥福を祈るとともに、残された我々は、平原氏の遺志を引き継ぎ、彼の理想とした新世代ネットワークを完成させていきたい。