

省電力志向新世代ネットワーク

南 正輝[†] 川村龍太郎^{††} 森川 博之^{†,††} 平原 正樹^{††}

Power-Aware New Generation Network

Masateru MINAMI[†], Ryutaro KAWAMURA^{††}, Hiroyuki MORIKAWA^{†,††},
and Masaki HIRABARU^{††}

あらまし 本論文では新世代ネットワークの研究開発において一つの重要な軸となる省電力性について議論を行う。映像を中心としたコンテンツの台頭により、ネットワークトラフィックは今後も急速な増加を続けることは確実であり、トラフィックの増加に伴ってネットワークの消費電力も急速に増加することが予想されている。昨今の地球温暖化への意識の高まりにかんがみれば、今後の情報通信技術においてネットワークの低消費電力化は重要なテーマとなる。このような観点から本論文ではネットワークとエネルギー問題を消費電力量、社会活動のグリーン化、環境センシング、排出権取引の四つの観点から検討するとともに、ネットワークの省電力化に向けた技術課題とアプローチについて、研究動向を交えながら議論を行う。

キーワード 新世代ネットワーク, 地球温暖化, グリーン IT, ネットワークアーキテクチャ

1. ま え が き

インターネットがここまで普及した大きな理由は、新しいアプリケーションの登場を促す将来を見据えた見事な設計哲学があったからである。しかしながら、30年前と現在とでは、インターネットを取り巻く環境があまりにも大きく異なり始めている。

第1は、当初のインターネットでは想定していなかったサービスや技術が登場してきたことである。インターネットの基本プロトコルであるTCP/IPは、モバイル、センサネットワーク、CDN (Contents Delivery Network)、P2P、などの環境を想定してはいない。また、ラベルスイッチングや光パスなどといったスイッチ技術の登場ももちろん想定していない。第2に「エンドツーエンドの原則」にそぐわない機能拡張が登場してきたことを挙げることができる。NAT (Network Address Translator)、ファイアウォール、コンテンツキャッシュなどだ。ベンダ、ユーザ、ISPなどが、個々

の要求を満たすために設計哲学を考えるとなくその場しのぎの解決策を導入した結果である。第3に「エンドツーエンドの原則」に従う機能拡張ではあるものの、プレーヤの要求にそぐわないものが出てきている。例えば、IP Security (IPSEC) はエンドツーエンド原則を満たすものの、ISPにとってはネットワーク管理の観点から必ずしも望ましい機能ではない。IPSECにより暗号化されてしまうことで、パケットの種別の判断が困難になるためである。

第4に、ユーザの多様化が挙げられる。設計当初は技術者のみを対象ユーザとしていたのに対し、ユーザ層が拡大するにつれ、より使いやすいネットワーク、信頼できるネットワークへの要求が高まってきている。現在のインターネットは、だれもが容易に利用できるとは言いがたい。「エンドツーエンドの原則」として、アプリケーションなどのインストールや更新、設定処理などをユーザ自身が行わなければならないためである。また、サイバーアタックやスパムなどを排除し、信頼のおけるネットワークを実現するためには、ネットワーク内に機能を付加することも必要となり得る。第5に、インターネットが社会基盤となるにつれ、幅広い分野においてインターネットの貢献が求められ始めている。エネルギー分野、環境分野、災害分野、医療分野、食糧分野、セキュリティ分野、地方・都市格差、先進国・発展途上国格差、少子高齢化などである。

[†] 東京大学先端科学技術研究センター, 東京都
Research Center for Advanced Science and Technology, The
University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo,
153-8904 Japan

^{††} 独立行政法人情報通信研究機構, 小金井市
National Institute of Information and Communications
Technology, 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei-shi, 184-8795
Japan

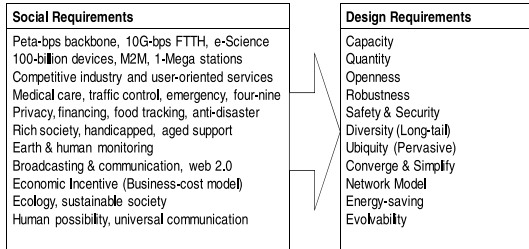


図 1 社会的要求から設計要求への展開

Fig. 1 Social requirements and design requirements.

インターネットは 20 年後, 30 年後の情報ネットワーク社会を支える基盤であるのみならず, 多様な社会問題を解決する手段となる必要がある。

このような観点から, 独立行政法人情報通信研究機構 NICT では, 2006 年から新世代ネットワークアーキテクチャ設計プロジェクト (AKARI プロジェクト) を開始している [1]。新世代ネットワークに課せられる社会的要求を予測した上で, 理想のネットワークアーキテクチャを白紙から設計することを目的としたプロジェクトである (図 1)。

本論文では, 社会的要求としてエネルギー分野を取り上げ, ネットワークをエネルギー問題からとらえる視点を示すとともに, ネットワーク自体の省電力化に向けての技術課題を明らかにする。省電力に関する視点は, 地球温暖化問題への対応のみならず, 「炭素」本位経済が語られ始めている世界情勢にかんがみて重要度を増しつつある。例えば, Bank of America は融資審査の際, CO₂ 排出を 1 トン当り 20~40 ドルの負債として計算すると発表している。また, ドイツの BASF は炭素排出管理責任者として CPO (気候保護責任者) 職を新設している。このような情勢をも考慮して, AKARI プロジェクトにおいても省電力指向新世代ネットワークの研究開発を開始している。

AKARI プロジェクト内においてはネットワークシステムが消費するエネルギーを大きな課題の一つと位置づけており, その低減に向けた多くの研究開発を推進している [1]。現時点では, 光パケットや光バスなどフォトニックネットワーク技術をネットワークの基盤構成に用いることで, 従来の IP ルータと比較して大幅な消費電力削減が見込めることを示している。また, 無線通信においてもモビリティや通信速度の向上に加えて消費電力量の低減を大きな目標関数の一つと位置づけ検討を進めている。AKARI プロジェクトでは,

今後も省エネルギー性を一つの主要な評価項目として新世代ネットワークのアーキテクチャ設計を行う予定である。

2. ネットワークとエネルギー問題

新世代ネットワークに代表される今後の通信ネットワークは情報化社会の新たな時代を切り開く ICT 基盤として大きく期待されている。その一方で, そのようなネットワークシステムの環境負荷 (主に電力使用による炭酸ガス排出) は, 昨今の地球温暖化問題にかんがみると, 今後重要な課題である。現在の ICT の消費電力は日本の総消費電力比較で約 5.8% (2006 年度) をも占めると算定されており [2], ICT の電力使用量についてはその低減に継続的かつ重点的に取り組まなければならない課題であることは明らかである。一方, ネットワークはその積極的利用によって, 我々が社会活動に伴い排出する炭酸ガス量を低減する手段としても大きく着目されている。例えば人間の移動を最小限に抑える遠隔勤務などである。現在世界規模で議論されている大きな炭酸ガス排出削減目標を達成するには, 積極的にこのような取組みを推進する必要があると考えられ, ネットワークが果たす役割はますます重要となる。

このように通信ネットワークとエネルギーを議論する場合, いくつかの側面が存在する。その代表的なものとして下記の四つの観点で検討することが妥当であると考えている。

- (1) ネットワークシステムの消費エネルギー量
- (2) ネットワークを活用した社会活動のグリーン化
- (3) ネットワークを用いた環境センシング技術
- (4) CDM (Clean Development Mechanism) におけるネットワーク技術を用いた炭酸ガス排出権取引

以下ではこれら四つの観点で新世代ネットワークとエネルギー問題を考える。

2.1 ネットワークシステムの消費エネルギー量

現在の ICT が発生する電力消費量は日本の総量比較で既に約 5.8% (2006 年度) をも占め, 更に増加する傾向にある [2]。また, その結果から推定される 2012 年予想の各構成要素の内訳から, ネットワーク機器が発生する電力量は ICT 全体のおよそ 50% 程度であることが分かる。当委員会の調査をはじめこれまで国内外において多くの調査, 予測, 学術研究等が存在するが, 算定手法 (大きくマクロ手法とミクロ手法がある), 算定範囲, 算定年設定等の評価条件がそれぞれ

異なっている。このため、これらの結果を総合することによってネットワークの各構成要素の内訳等を厳密に算定することは現時点では困難であるが、おおむね以下に示す総括が現時点のネットワークシステムにおける電力使用量に関する概要と考えられよう。

(1) ネットワークの使用電力量は ICT 全体のおよそ 50% を占める。1 MB 転送当りの CO₂ 排出量は約 1 g (ブロードバンドサービスのユーザ 1 人当りの排出量に換算すると約 290 g 日) となる。

(2) 宅内通信機器 (電話機, ブロードバンドルータ, ONU, DSL モデム, LAN-SW 等) の使用電力が最も多く, ネットワーク全体の 50~80% を占める。機器を利用していないときの待機電力が非常に大きい。

(3) アクセス設備の製造・敷設にかかわる使用電力は 20~30% 程度となる。光アクセスの場合, PON 形態のファイバ共用による低減効果は大きい。シングルスターを採用すると大きく増加する。

(4) 携帯電話では端末製造及び基地局電力が支配的であり, 端末の使用電力量は比較的小さい。

(5) 現在のところ, 基幹網の使用電力量はネットワーク全体の中では, 非常に少ない。しかしながら, ブロードバンド化に伴い, 無視できない量へと増加傾向にある。

日本のトラヒックはおよそ年率 1.4 倍の指数関数的に増加していることが解っている [3]^(注1)。仮にこのトラヒック増加傾向が今後も継続すると仮定すると, 新世代ネットワークの時代にはトラヒック量が現在比で $10^3 \sim 10^5$ 倍程度となる [1]。したがって, ネットワークの使用電力量を現在と同程度に維持することを目標すれば, 新世代ネットワークの時代では「単位情報転送当りの電力使用効率を現在比の $10^3 \sim 10^5$ 倍程度に増加させる」必要があり, これが現時点での目標設定として妥当となろう。「ネットワークの使用電力量を現在と同程度に維持する」という目標は後述する三つの観点との関係も含めて今後賛否両論が予想されるが, おおむねこのような大きな効率向上に向けて積極的な技術開発を行わなければならないことは明らかである。

ただし, 目標値推定の根拠としたトラヒック量については下記の要因等に関連して増減双方に変化する可能性もあり今後の推移に注意を払う必要がある。

・キラーアプリケーションの出現・衰退: 過去, P2P 型ファイル交換アプリケーションによるトラヒック量の急増と, ウイルス発生による一時的急減が発生している。

・加入者数の推移: ブロードバンドユーザ数が今後どのように推移するか, 住宅数を上限に頭打ちとなるかどうか, また, ワイヤレスアクセス型ブロードバンドの動向に注意する必要がある。現在実用化が進められている 100 Mbit/s レベルのワイヤレスブロードバンドが本格普及すれば, FTTH, DSL などによるホームユースのトラヒックが支配的である現状のトラヒックを急激に増加させる可能性がある。

一方, 無線・有線という観点からエネルギー問題を考える場合, 電源容量制約に対し技術革新を繰り返してきた携帯電話端末に関しては既に高度な電力マネジメント技術に基づき高度な省電力化を実現している。また, 最近の報告によれば, 携帯電話網に関しては基地局の消費電力が問題となっており [5], その削減に向けた研究開発が進められつつある。

有線ネットワークにおいては, 宅内通信機器, ルータ等その他の通信機器は低価格化や大容量化が優先された開発がなされてきており, 低消費電力化については重点化されてこなかった。しかしながら, 近年のエネルギー問題に対する意識の高まりから, それらの機器に対しても消費電力の低減化技術の研究開発が行われるようになってきている。その代表的な例として次のような事例を挙げることができる。

・ADSL2 規格: 欧州を中心として ADSL モデムの非使用時, 及び低速通信時にスリープまたはクロック低減により電力消費量を低減する技術の標準化を推進している [4]。

・ブロードバンドルータや LAN-SW の低消費電力化: 情報通信ネットワーク産業協会 (CIAJ) を中心として, トップランナー制度を利用した家庭向けブロードバンドルータ, LAN スイッチの低消費電力化が積極的に推進されている [6]。

・コア/エッジルータの低消費電力化: 低消費電力型ルータの開発 [7] がなされている。

これらの取組みはいずれも現在のネットワークアーキテクチャをそのまま踏襲する前提で, ネットワーク機器単位で内部構成, 使用デバイス, 方式等を改善することによって消費電力量削減が行われる。携帯端末を除く他の通信機器に関してはこれまで低消費電力化が重点的に行われていなかったため, これらの取組みによって大きな電力消費量削減が期待できる。しか

(注1): 利用者一人当りの利用トラヒック増加分と利用者数の増分の双方の効果によるものである。利用者増分を除いた「一人当りの利用トラヒック増」は年率約 1.2 倍程度である。

し、現在の予想ではその削減量は単位情報転送当りの効率にしておよそ 10 倍程度（2015 年程度）との検討結果 [8] もあり、その効率は新世代ネットワーク時代の目標値には大きく及ばない。すなわち、3. で述べるように、現在のネットワークアーキテクチャに限定せず、各種通信機器の使用電力削減を行う方法が今後必要となる。

2.2 ネットワークを用いた社会活動のグリーン化

ICT は社会活動に有効利用することによって大きなエネルギー削減効果が得られることが期待され、これまでも多くの取組みが行われてきた。例えば、サプライチェーンマネジメント (SCM)、ビルや住宅におけるエネルギーコントロール (BEMS, HEMS)、ITS などに ICT を活用することによって大きなエネルギー削減効果が期待できるという報告がある [2]。新世代ネットワークは様々な社会活動を十分に支援できるネットワークとしての要件を満足し、社会全体としてのエネルギー削減に大きく貢献する必要がある。

2.3 ネットワークを用いた環境センシング

電力消費による地球環境負荷を考える場合、電力消費量や CO₂ 排出量の計測など、環境負荷の度を正確に把握するための環境センシング技術が重要となる。環境センシング技術の計測範囲・粒度は地球、国、地域、ビル、家屋、各コンセントなど多様であり、それらごとに必要となるネットワーク技術、センサ技術も異なるであろう。

新世代ネットワークは多種多様なセンシングシステムを統合化し、地球規模での環境センシング実現するための重要な要素技術としても位置づけられる。例えばこれまで研究開発が行われているリモートセンシング、レーザを用いた CO₂ 濃度検出、大気汚染物質検出など環境センシング技術から得られる各種データを新世代ネットワーク上で連携・可視化する技術は啓蒙活動や省電力化技術の具体的な効果を確認するために有用となる。

2.4 CDM におけるネットワーク技術を用いた炭酸ガス排出権取引

CDM (Clean Development Mechanism) は国連気候変動枠組み条約の第 3 回締約国会議 (COP3) において採択され、後の京都議定書で規定された「柔軟性措置 (京都メカニズム)」の一つであり、市場メカニズムを活用して炭酸ガス排出を削減するものである。CDM では、他国において温暖化対策のプロジェクトを行い、その結果として排出量削減を実現できた場合、

その排出削減量に対して CER (クレジット) が発行され、それをプロジェクト実施国の排出削減目標達成に用いることができる。新世代ネットワークの時代には、ICT 技術を国際的に活用することによって、地球規模での炭酸ガス排出抑制を積極的に推進する必要がある。更に炭酸ガス排出権取引については、今後国間だけではなく、企業間、個人取引などへの拡張の可能性もある。

しかし、現在では ICT を用いた炭酸ガス削減に関して削減量の算定方法の明確化・標準化が十分でない等の理由から、国際取引が困難な状況にある。これらの状況を踏まえて、日本の総務省、TTC が中心的役割を担い ITU-T において議論が開始されており、当課題を議論する FG (Focusing Group) が設立されている。

3. 省電力化に向けた課題

本章では 2. での議論を踏まえ、特にネットワークの省電力化の観点から掘り下げた議論を行うとともに、いくつかの具体的なアプローチを紹介する。

ネットワークに限らず、システムの省エネルギー化に向けた最も基本的かつ効果的なアプローチは非効率性の発見とその改善である。システム内のどこかの部分にどれくらいのエネルギーが使われているかを把握し、支配的な部分を改善することで低消費電力化が可能となる。徹底的な効率化を図った結果、それ以上の改善が望めない場合には、システムアーキテクチャ自体を変更することも求められる。新しいネットワークアーキテクチャの創出を目指す新世代ネットワークにおいては、省エネルギー的な観点からネットワークアーキテクチャを再考することも重要なテーマである。また、単にネットワークの省エネルギー化だけに着目するのではなく、様々なサービスの開発サイクルを改善し、それらサービスを利用することにより社会全体の省エネルギー化が促進されるようなプラットフォームデザインが必要となる。

これに向けては、ネットワーク内のどこでどの程度の電力が消費されているかを知るためのプロファイリング技術が必要となる。プロファイリングを通じて、消費電力の観点からボトルネックを明らかにすることができる。ボトルネックが明らかになった後は具体的な技術開発を通じて低消費電力化を目指すことになるが、この際、プロファイリング結果に基づいて現状のネットワークを消費電力の観点から制御・管理する技

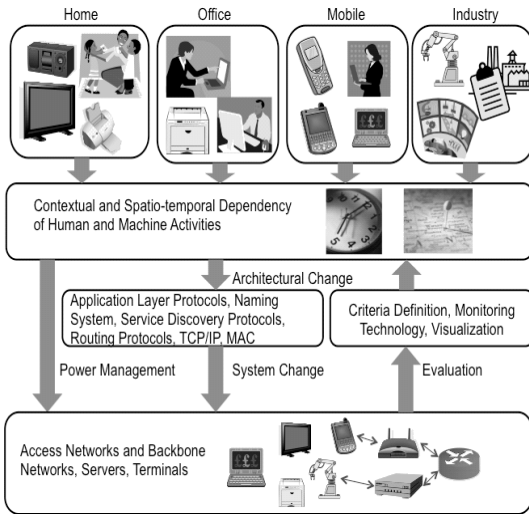


図 2 省電力ネットワークに向けた技術課題
Fig. 2 Technical challenges.

術が必要になる。これに加え、アーキテクチャ的な観点からネットワークを再考することも必要となろう。特に、現在のインターネットが消費電力を強く意識して設計されていない点に気がみれば、現在のアーキテクチャのままの低消費電力化はいずれ限界を迎えることになる。そのような場合、消費電力の制御をも考慮した新しいネットワークアーキテクチャが必要になる可能性もある。更にその先を見据えれば、消費電力を評価軸にした新しいサービスの登場も期待できる。

以下では「プロファイリング」「制御・管理」「アーキテクチャデザイン」「新サービスの創出」の各課題について、より詳細な議論を行う。

3.1 プロファイリング

図 2 にネットワークの省電力化に向けた諸課題を示す。現在のネットワーク機器は家庭、オフィス、街、工場など、様々な空間に浸透している。これらネットワークの利用状況は人間の行動、時間、物理的位置などの各種コンテキスト情報と関連がある。しかしながら、現在のネットワークはそのような利用状況に適応的な制御がなされておらず、トラフィックの多少にかかわらずほぼ一定の電力を消費する。また、トラフィックの増加に対しては provisioning を行うことで対応がなされるため、ピークトラフィックの増加に伴って消費電力も増加してしまう。したがって、ネットワークの低消費電力化に向けた最初のステップとしては、トラフィック量を含めたネットワークに関する様々なコンテ

クトと消費電力の関係を明らかにするプロファイリングが必要となる。

プロファイリングを行うためには、電力及びコンテキストを計測するためのネットワークシステム及び可視化を含めた分析システムの構築が必要となろう。例えば日本からアメリカからまで IP パケットを 1 個送るために必要な電力を正確に求めることができれば、ネットワークの消費電力を考える上での重要な知見が得られるだけでなく、そのような情報をユーザにフィードバックすることでネットワークの消費電力に関する関心を高めることもできる（電子メールを 1 通受け取るたびに、そのメールを送り届けるのに消費された電力が表示されるなど）。

IP パケット 1 個単位で消費電力を知ろうとする場合、現在のインターネットを構成する各機器の消費電力とトラフィックの関係をリモートから正確に知る必要がある。これに向けては、trace route, nmap (Network Mapper) などのツールや remote physical device fingerprinting [9] 等の技術を使い、あるネットワークパス上に存在するネットワーク機器を間接的に特定し、カタログスペック等を利用して消費電力を推定することも考えられる。しかしながら、それらツールを使ったとしても、パス上に存在する MPLS ルータなどの存在を知ることにはできない。ネットワークの正確な消費電力を知り、サービス単位、パケット単位で消費電力を見積もるためには、各 AS 内のネットワーク構成、ルータやスイッチの消費電力、各機器のトラフィックなどの情報を収集し、それらの情報を外部からも参照できるような枠組みが必要となろう。

そのような枠組みを全インターネット規模で実現することは现阶段では困難であるため、最初のステップとしては組織規模でシステムを構築し、ネットワークの消費電力とコンテキストの関係を明らかにし、そこから得られる知見を一般化していくことが有効である。また、このようなアプローチに加え、将来的にはネットワークの電力消費のモデル化と消費電力の算定基準の明確化も重要となろう。CDM 等の排出権取引までを視野に入れる場合には、CO₂ 削減量の算定基準を明確化し、定量的に評価を行うことが求められる。ネットワークの消費電力をどのようにモデル化し、どのような測定を行えばよいのかについて明確な指針を与える必要がある。

3.2 制御・管理

プロファイリングにより消費電力のコンテキスト依

存性を掌握した後は、そのコンテキストを利用する形で具体的な省電力化手法を考えていくことになる。具体的な省電力化手法に関してはこれまでいくつかの従来研究で提案が行われている [10], [11]。

インターネットの消費電力の問題に本格的に着目した最初の研究は文献 [12] である。省電力化における最も基本的な手法は機器をスリープさせることであるが、文献 [12] はルータを対象にして、現行の TCP/IP の枠組みを壊さずにどのようなスリープの形態が可能かを検討している。このほかにも、パースト的なトラヒックを生成することでスリープ時間を作り出す方法 [13]、プロキシに本質的でないパケットの処理をさせてプロキシの後方にあるデバイスをスリープさせる方法 [14]、イーサネットのリンクレートをダイナミックに可変することで省電力化を図る方法 [15]、仮想化による省電力化 [16]、ラインカードときょう体の最適割当による省電力化 [17] など提案されている。

これら既存研究を要約すれば、ネットワークの省電力化手法は「新デバイスの利用」、「スイッチング」、「集約・分散化」の形に分類できる。「新デバイスの利用」は基本的には半導体電子デバイスの技術革新に頼るアプローチであり、省電力型の新しいデバイスを利用した機器の導入や光ネットワーク化による省電力化 [18] などが含まれる。また待機電力の削減を目的とした低消費電力ウェイクアップ機構 [20], [21] などのキーデバイス技術も重要となる。「スイッチング」はスリープのタイミングやリンクレートを適応的にコントロールするアプローチであり、前述の先行研究の多くがこれに含まれる。「集約・分散化」にはルータやスイッチの最適配置、インターネットでのデータ圧縮 [19] あるいは筐体の統合化などが含まれる。

これらの基本的な手法を単独あるいは複合的に用い、サービスの品質を劣化させることなく消費電力を制御・管理することが現在のネットワークの低消費電力化技術における中心課題となっている。今後は、どのようなコンテキストに着目し、どのような省電力化手法を適用すればネットワークの消費電力を効果的に低減させることができるかが一つの研究トレンドとなることが予想される。

3.3 アーキテクチャデザイン

プロファイリング及び制御・管理によって低消費電力化を実現したとしても、ネットワークアーキテクチャ自体が省電力化を意識した設計となっていなければ、低消費電力化の効果は限定的なものとなる。光ネッ

トワークを利用することで低消費電力なバックボーン/アクセスネットワークを構築可能であるという議論がある一方で、光ネットワークの導入によってユーザ側の宅内終端装置の消費電力が大きくなってしまう場合、そのアーキテクチャが消費電力の観点から正しいデザインなのかどうかは疑問となる。このように考えれば、消費電力的な観点からネットワークアーキテクチャを再考することも、新世代ネットワークの研究において重要となる。

新世代ネットワークにおける消費エネルギー削減技術の具体的な研究開発は今後の取組みではあるが、2. で述べた動向からいくつかの指針は得られる。例えば、ICT 全体の電力消費量を大きく削減する有効な手段は、電力使用量が最も大きい宅内通信装置への対策として、スリープ機能を実装する方法であろう。しかし、スリープ機能を ONU (Optical Network Unit) やブロードバンドルータ、LAN スイッチなど宅内装置の L1, 2 プロトコル層に導入した場合、それら装置をスリープから起動させる方法や、起動までの不通時間、電力制御による通信速度変化などの問題が生じ、現在用いられている上位プロトコルの振舞いに影響を及ぼす可能性がある。つまり、消費電力効率の大きな向上を目標とした場合、現在のアーキテクチャのまま個々の装置やレイヤごとに対処を行う方法では限界があり、ネットワーク全体 (マルチプルレイヤ) で検討することが効果的であると考えられる。ただし、その検討にあたってはネットワークの将来的な発展を考えた通信レイヤ間の独立性確保や既存ネットワークからのマイグレーション方法については十分に考慮が必要であることは自明である。

図 3 にエネルギー消費に着目したマルチレイヤの技術領域を示す。最下位のレイヤは装置レベル、低位プロトコルレベルのレイヤである。このレイヤでは各装置機能の構成法やデバイス技術の革新による使用電力量低減と、待機時のスリープや低速通信時のクロック低減などによる使用電力量低減が主となる。また、IP ネットワークで問題視されているルータの消費電力を、フォトリックネットワーク技術を用いて低減するなどの、ネットワークアーキテクチャの革新により基幹網における電力消費量の低減効果も大きく期待できる。

ネットワークプロトコルは現在のレイヤ 3 及び 4 相当のプロトコル層を想定している。このプロトコルレベルでは、下位層においてスリープや通信装置の電力制御による通信速度変化や一時的な通信断が発生する

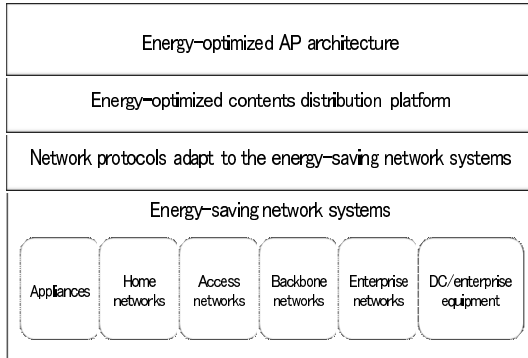


図 3 新世代ネットワークの環境エネルギー技術領域
Fig. 3 Energy issues in new generation network.

ことを考慮した通信方式が必要となる。

コンテンツ流通プラットフォームは、エネルギー最適化を目標関数として情報流通を行うミドルウェア層である。例えば現在の CDN は使用エネルギーを考慮した方式はとられていないが、ネットワークやサーバ装置トータルの使用電力最小化を目標関数としたコンテンツの配信方式は十分考えられる。

最後はアプリケーションアーキテクチャである。トラフィック送受を行うのはアプリケーションであり、その方式次第ではトラフィック量削減による使用電力量削減も可能であろう。現行の www や検索エンジンのあり方を含め、現在及び将来にわたりネットワークアプリケーションをサポート可能なアーキテクチャを ICT 全体のエネルギーを考慮して再設計することなどもこの領域に含まれるであろう。

3.4 新サービスの創出

社会全体の省エネルギー化という視点からネットワークを見た場合には、その応用サービスが人間の社会生活環境をいかに快適かつ効率的にするかという点も重要である。インターネットのキラーアプリケーションである電子メールと Web は人間の社会活動のある面では効率化した。しかしながら、その効率化の度合をエネルギー消費量の観点から見れば全体としてはまだ改善の余地は多く残されている。様々な知的・物的生産活動を効率化するとともに、結果として社会全体のエネルギー消費量も削減できるようなアプリケーションサービスの登場が望まれる。

例えば、オフィスビルに様々なセンサを設置して行動モニタリングを行うことで、コンテキストに応じた人とモノのインタラクションを知ることができる。こ

の情報をを用いて機器や仕物のレイアウトを変えたり、部屋の使用目的を変更すれば、より効率的なオフィス環境を構築できると考えられる。このような「環境設計」のサービスを導入した結果、オフィス内での非効率性が改善されれば、単位消費電力当りの知的生産量を増加させることが可能となる。

垂直統合的な「システム」から水平分散的な「プラットフォーム」へと変化しつつある今日の ICT 分野においてはアプリケーションサービスの開発効率は飛躍的に改善されつつある。その結果、インターネットもこれまでのようなコンテンツベースではなくサービスベースに移行するであろう。多種多様なサービスが生まみ出されて淘汰される中で、生産活動の効率化やエンターテインメント性だけでなく、社会全体の低炭素化にも貢献できることがサービスのアピールポイントの一つとなり、ビジネスチャンスを広げる可能性も十分に考えられる。

消費電力は端末、ネットワーク、サービスを総合的かつ定量的に評価する新しい軸である。従来の常識にとらわれず、消費電力の観点からサービスを見直すことで、多くの研究課題、ビジネスチャンス、そしてイノベーションの機会を見出すことができる。

4. 研究事例

本章では 3. で述べた課題に対する筆者らの具体的な取組について紹介する。現在、筆者らは低消費電力なネットワークの実現に向けて、プロファイリングを中心に研究を進めている。例えば、筆者らは IEEE802.15.4 の無線インタフェースを備えた電力計測ネットワークの構築を進めている(図 4)。この研究では、まず、研究室内の個人個人の机にプラグ単位での測定が可能な電力計を設置して、個人レベルでの消費電力を計測するとともに、研究室内のルータやスイッチ等の消費電力も計測し、研究室全体での消費電力の詳細な内訳を求める。これと同時に位置情報やドアの開閉を検出するセンサ等を設置し、個々のユーザがセンサ情報を利用して独自の省電力化ポリシーを作れるような環境を構築する。その後、個々のユーザの消費電力ランキングとともにポリシーをネットワーク上で公開し、他のユーザが作成した様々なポリシーを再利用できる環境を提供することで、全体の消費電力を効果的に下げることができるような枠組みを考えている。

また、機器単位で収集した電力情報をより大規模な環境でマッシュアップして様々なサービスに応用できる

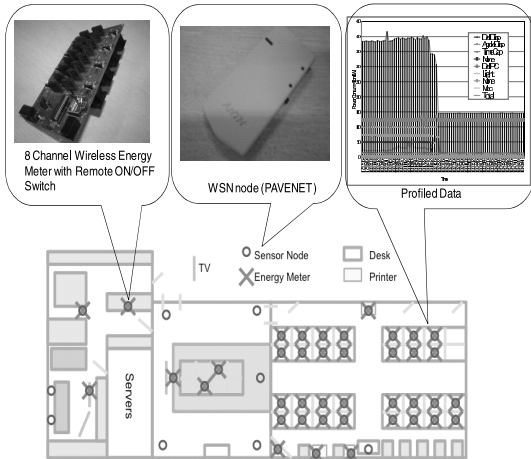


図 4 ワイヤレス電力計によるプロファイリング
Fig. 4 Wireless energy metering system.

ようにするため、NGN/IMS (Next Generation Network/IP Multimedia Subsystem) 上で電力管理を行う研究なども進めている [22]。更に、ルータやスイッチ等のネットワーク機器に関しては、SNMP (Simple Network Management Protocol) の MIB (Management Information Base) を拡張してトラフィック情報と消費電力情報を収集できるようにするとともに、研究室内のネットワーク構成とサービスごとのトラフィック等を調査しどのサービスが消費電力的な観点から支配的であるか等の調査も行っている。加えて、プロファイリングを行う計測システム自体の消費電力も問題となるため、バッテリーレス型の無線センサネットワークなどの研究 [23] も継続的に行っている。

管理・制御の観点からはトラフィックに応じて研究室内有線 LAN のリンクを無線 LAN に集約させ、有線側の LAN スイッチを適宜 OFF にすることで消費電力を低減させるといった研究も進めている (図 5)。また、特に無線ネットワークシステムを対象に、アイドルリスニングによる電力浪費を軽減させる目的で、様々なデバイスをサービスに応じて選択的にウェイクアップさせるウェイクアップ無線モジュールの開発なども進めている [21]。

アーキテクチャ的な観点からはプロファイリングを通じたインターネットにおける本質的なボトルネックを明らかにすることが先決ではあるが、その中でも光ネットワーク技術が一つのキーになると考えており、光パケット・光パス統合型ネットワークの研究等も進めている [24], [25]

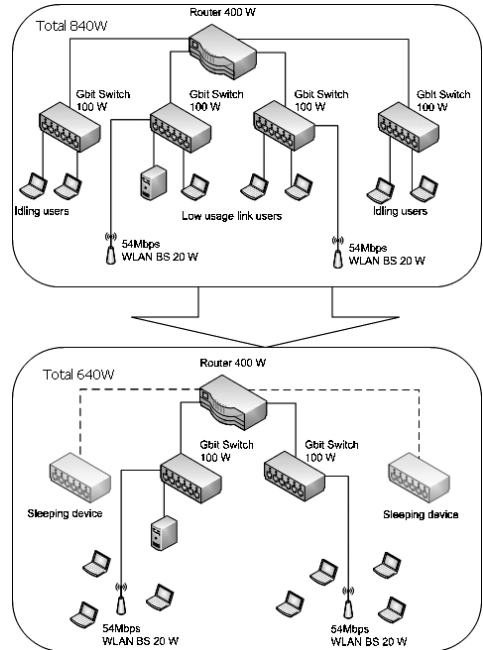


図 5 無線リンクを活用した有線ネットワークの消費電力制御
Fig. 5 Power-aware local area network using wireless LAN.

5. む す び

本論文では新世代ネットワークの研究開発において、特にネットワークの省電力化の観点から議論を行った。ネットワークの省電力化に向けては、ネットワークシステム自体の省エネルギーに加え、ネットワークを活用した社会活動のグリーン化、環境センシング技術、ネットワークを活用した排出権取引の四つの観点が重要であることを示した。また、ネットワーク自体の省電力化について技術課題を明確にするとともに、いくつかの具体的アプローチを紹介した。

地球温暖化問題を取り巻く世界情勢にかんがみれば、ICT の省電力化は今後の研究開発において極めて重要な課題となろう。その一方でネットワークの消費電力問題は様々な要素が複雑に絡み合い、研究対象の幅もデバイスレベルからサービス運用レベルに至るまで極めて広い。このため、広い視野をもちつつ長期的な視点に立った戦略的な研究開発が重要であると考えている。

また、我が国においては ICT に係わる省電力化技術の研究開発がいくつか立ち上がりつつある [26] ~ [28]。

新世代ネットワークの研究プロジェクトを含め、国内の研究開発を有機的に結び付けることで、当該研究開発分野における日本の国際的な立場を強化することも今後は重要になろう。

文 献

- [1] AKARI アーキテクチャ設計プロジェクト著, 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), 2008年6月. <http://akari-project.nict.go.jp/>
- [2] 総務省, “地球温暖化問題への対応に向けた ICT 政策に関する研究会報告書,” April 2008.
- [3] 総務省, “我が国のインターネットにおけるトラフィック総量の把握,” Aug. 2007.
- [4] British Telecom, “Opportunities and techniques for power saving in DSL,” ITU-T SG15 Power Saving Tutorials, Feb. 2008.
- [5] M. Etoh, T. Ohya, and Y. Nakayama, “Energy consumption issues on mobile network systems,” Proc. 2008 International Symposium on Applications and the Internet (SAINT2008) Workshop on Power Consumptions in Future Network Systems (PCFNS2008), July 2008.
- [6] 情報通信ネットワーク産業協会
<http://www.ciaj.or.jp/top.html>
- [7] 「アラクサラの省エネ技術」,
<http://www.alaxala.com/jp/solution/eco/index.html>
- [8] 由比藤光宏, 西 史郎, “ブロードバンドネットワークの電力消費量の試算,” 2008 信学ソ大 (通信), BS-13-5, Sept. 2008.
- [9] T. Kohno, A. Broido, and K.C. Claffy, “Remote physical device fingerprinting,” IEEE Trans. Dependable and Secure Computing, vol.2, no.2, pp.93-108, April-June 2005.
- [10] M. Minami and H. Morikawa, “Some open challenges for improving the energy efficiency of the Internet,” Proc. 3rd International Conference on Future Internet (CFI 2008), June 2008.
- [11] 南 正輝, “グリーンネットワークアーキテクチャへの挑戦,” 2008 信学ソ大 (通信), BT-1-3, Sept. 2008.
- [12] M. Gupta and S. Singh, “Greening of the Internet,” Proc. ACM SIGCOMM’03, Aug. 2003.
- [13] S. Nedeveschi, L. Popa, G. Iannaccone, S. Ratnasamy, and D. Wetherall, “Reducing network energy consumption via sleeping and rate adaptation,” Proc. 5th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation, April 2008.
- [14] K. Christensen, C. Cunaratne, B. Nordman, and A.D. George, “The next frontier for communications networks: Power management,” Elsevier Computer Communications, vol.27, no.18, pp.1758-1770, June 2004.
- [15] C. Gunaratne, K. Christensen, B. Nordman, and S. Suen, “Reducing the energy consumption of ethernet with adaptive link rate (ALR),” IEEE Trans. Comput., vol.57, no.4, pp.448-461, 2008.
- [16] Y. Wang, J. van der Merwe, and J. Rexford, “VROOM: Virtual Routers on the move,” Proc. ACM SIGCOMM’07 HotNets Workshop, Nov. 2007.
- [17] J. Chabarek, J. Sommers, P. Barford, C. Estan, D. Tsang, and S. Wright, “Power awareness in network design,” Proc. IEEE INFOCOM’08, April 2008.
- [18] J. Baliga, R. Ayre, K. Hinton, and R.S. Tucker, “Photonic switching and the energy bottleneck,” Proc. IEEE Photonics in Switching, Aug. 2007.
- [19] Storewize STN-6000 Specifications, available at <http://www.storewize.com/>
- [20] T. Umeda and S. Otaka, “ECO chip: Energy consumption zeroize chip with a 953 MHz high-sensitivity radio wave detector for standby mode applications,” Proc. IEEE CICC2007, Oct. 2007.
- [21] 石田繁巳, 鈴木 誠, 森戸 貴, 森川博之, “低受信待機電力無線通信のための多段ウエイクアップ機構,” 信学技報, IN2007-218, March 2008.
- [22] 荒木靖宏, ゲン ミン トウン, 森川博之, “NGN を用いた機器単位消費電力量流通プラットフォームの設計と実装,” 信学技報, IN2007-228, March 2008.
- [23] M. Minami, T. Morito, H. Morikawa, and T. Aoyama, “Solar biscuit: A battery-less wireless sensor network system for environmental monitoring applications,” Proc. 2nd International Workshop on Networked Sensing Systems, June 2005.
- [24] 今泉英明, 渡部克弥, 斉藤哲也, 松本延孝, 種村拓夫, アブドゥラーアルアミン, 竹中 充, 中野義昭, 森川博之, “多波長光パケット交換と光回線交換を用いたハイブリッドネットワークに関する検討,” 信学技報, PN2006-97, March 2007.
- [25] 原井洋明, “新世代フォトニックネットワーク,” 新世代ネットワークワークショップ講演資料, June 2007.
- [26] JST CREST 領域プロジェクト「情報システムの超低消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」,
<http://www.ulp.jst.go.jp/>
- [27] グリーン東大工学部プロジェクト
<http://www.v6pc.jp/jp/ut2eco/>
- [28] 山崎達也, J. Jung, Y. Kim, M. Hahn, 豊村鉄男, R. Teng, 丹 康雄, 松山隆司, “家庭における電力センシングネットワークによるエネルギーマネジメント,” 信学技報, EE2007-56, Jan. 2008.

(平成 20 年 9 月 8 日受付, 11 月 14 日再受付)



南 正輝 (正員)

平 8 芝浦工大・工・電子卒。平 10 同大大学院工学研究科電気工学専攻修士課程了。平 13 東大大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程了。工博。平 18 スイス・ローザンヌ連邦工科大学客員研究員。平 15~19 芝浦工大・工・講師。現在、東大・先端研・准教授。本会論文賞，学術奨励賞各受賞。IEEE，情報処理学会各会員。



川村龍太郎 (正員)

昭 62 北大・工・精密卒。平元同大大学院修士課程了。平元 NTT 伝送システム研究所入社。平 8 工博(北大)。平 10~11 米国コロンビア大学客員研究員。平 15~現在 OSGi Alliance ボード兼副会長。平 20 独立行政法人情報通信研究機構に出向。

IEEE 会員。



森川 博之 (正員：フェロー)

昭 62 東大・工・電子卒。平 4 同大大学院博士課程了。現在、同大・先端科学技術研究センター・教授。工博。平 9~10 コロンビア大学客員研究員。平 14~18 情報通信研究機構モバイルネットワークグループリーダー兼務。ユビキタスネットワーク，無線ネットワーク，モバイルコンピューティング，フォトニックインターネット等の研究に従事。本会論文賞(2回)，情報処理学会論文賞，情報通信功績賞等受賞。平 18~19 本会編集理事。平 20~本会情報ネットワーク研究専門委員会委員長，通信ソサイエティ英文論文誌編集長。IEEE，ACM，ISOC，情報処理学会，映像情報メディア学会各会員。

IEEE 会員。



平原 正樹 (正員)

昭 60 九州大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程了。昭 63 同大学院後期課程単位取得退学。工博(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，平 9 から平 12 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，平 15 から独立行政法人情報通信研究機構。平 18 より同新世代ネットワーク研究センター・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はじめ，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加してきた経験を生かし，AKARI プロジェクトを主導。平成 20 年 7 月 29 日逝去。