

省エネルギー指向情報セントリックネットワークングに向けて

長谷川 亨^{†a)} 杉山 浩平^{††} 田上 敦士^{††} 柳生 智彦^{†††}
内山 彰[†] 浅見 徹^{†††}

Towards Green Information Centric Networking

Toru HASEGAWA^{†a)}, Kohei SUGIYAMA^{††}, Atsushi TAGAMI^{††}, Tomohiko YAGYU^{†††}, Akira UCHIYAMA[†], and Tohru ASAMI^{†††}

あらまし 将来ネットワークアーキテクチャの候補として、情報セントリックネットワークング (ICN: Information Centric Networking) が期待されており、アーキテクチャや、名前ルーティング、キャッシングなどの基本的な機構は固まりつつある。しかしながら、どのように利用するかの検討や、今後ネットワークが具備すべき省エネルギーについての検討はこれからである。これに対して、筆者らが参加する日欧共同研究 GreenICN プロジェクトでは、省エネルギーをアーキテクチャの根幹に据えながら、代表的なユースシナリオとしてビデオ配信と災害時通信を取り上げ、ICN アーキテクチャを拡張した GreenICN アーキテクチャを設計している。本論文では、既存の ICN 研究プロジェクトと対比させて、GreenICN アーキテクチャが目指すゴールとアプローチを述べてから、これまでに得られた成果と今後の方向性を紹介する。

キーワード 情報セントリックネットワークング, コンテンツセントリックネットワークング, 省エネルギー, 災害時通信

1. ま え が き

ストーリーミングによるビデオ配信や膨大な数の IoT (Internet-of-Things) 端末によるデータ収集など、設計時に想定していなかった応用に対して、インターネットが十分に対応できないことが課題となっている。これに対して、将来インターネット [1] 等の研究プロジェクトにおいて、将来ネットワークアーキテクチャが検討されている [2]。この内、コンテンツ/情報を中心に据えた情報指向ネットワークング (ICN: Information

Centric Networking) [3] は、ビデオやセンサデータなどの多様な情報が流通する将来ネットワークに適したアーキテクチャの一つである。

ICN では、情報の名前を指定して取得するため情報の移動を自然に提供できる。更にはキャッシング機能をルータが具備しており、名前ルーティングやキャッシングに焦点を当てて、多数の研究が実施されてきた。すなわち、これまでの研究では ICN を支える機構の開発が中心で、近年ネットワークに要求される省電力や応用について、十分な検討は行われていない。これに対して、筆者らは、日欧共同の GreenICN プロジェクト [4] において、電力消費に対して厳しい要求条件を有するビデオ配信並びに災害時通信に対して、少ない消費電力で提供可能な GreenICN アーキテクチャを検討している。

GreenICN アーキテクチャは、ICN アーキテクチャを、ビデオ配信及び災害時通信の電力消費を抑えながら提供できるように拡張したアーキテクチャである。具体的には、Jacobson が提案した、ヒューマンリーダブルかつ階層的な名前ベースにした NDN (Named Data Networking)/CCN (Content Centric Networking) [5] の拡張を進めている。現在、ICN アー

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科, 吹田市
Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University, 1-5 Yamadaoka, Suita-shi, 565-0871
Japan

^{††} (株) KDDI 研究所, ふじみ野市
KDDI R&D Labs, Inc., 2-1-15 Ohara, Fujimino-shi, 356-
8502 Japan

^{†††} NEC, 川崎市
Cloud System Research Laboratories, NEC Corporation,
1753 Shimonumabe, Nakahara-ku, Kawasaki-shi, 211-8666
Japan

^{††††} 東京大学大学院情報理工学系研究科, 東京都
Graduate School of Information Science and Technology,
The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo,
113-8656 Japan

a) E-mail: t-hasegawa@ist.osaka-u.ac.jp

キテクチャが実現すべき省電力等に関する目標を決め、アーキテクチャの設計方針を明確にしたところである。本論文では、アーキテクチャの特徴である災害時通信の提供に焦点を当て、その目標、設計方針を述べることで GreenICN アーキテクチャの目指す将来ネットワークを述べるとともに、現在までの研究成果を紹介する。

以下、2. では、GreenICN アーキテクチャと既存 ICN 研究プロジェクトの目標の差異を概観する。3. では、省電力に焦点を当ててアーキテクチャの設計方針を述べる。4., 5. では災害時通信への適用に焦点を当て、まず 4. で災害時のユースシナリオと要求条件を抽出し、5. で要求条件を満たすための拡張を述べる。最後に 6. で GreenICN アーキテクチャの目標とこれまでの成果を概観する。

2. 関連研究

2.1 ICN

NDN (Named Data Networking) プロジェクト [6] は、階層的な名前をベースにした NDN/CCN を様々な角度から開発している。また、プロタイプをオープンソースとして提供するとともに、チャット、ビデオ配信や、遠隔からの機器管理などの応用を実装している。GreenICN プロジェクトは NDN/CCN のソースコードを使用するとともに、同プロジェクトとリエゾン関係を結んでいる。

4WARD/SAIL/NetInf [7] プロジェクトは、名前の完全性や永続性を提供する名前スキームや、DHT (Distinguished Hash Table) を用いたスケーラブルな名前解決を提案している。GreenICN プロジェクトでは名前スキームの影響を受け、異なるドメイン間の名前を変換するインターネーム (inter-name) の概念を提案している。

PRISP/PURSUIT [8] プロジェクトは、情報のパブリッシュ/サブスクライブのパラダイムを提案するとともに、アーキテクチャ、フォワーディング手法等を開発している。また、CONVERGENCE [9] プロジェクトは、情報の名前に加えてメタ情報も考慮した、パブリッシュ/サブスクライブのアーキテクチャを提案している。ビデオの配信や災害時通信では 1 対多の通信形態が多いため、GreenICN プロジェクトも本パラダイムを採用している [10]。

一方、これらの研究プロジェクトは、GreenICN と異なり、省電力化には焦点を当てていない。

2.2 ネットワークの省電力化

インターネットなどの固定ネットワークの省電力化は長く研究されており [11]、ルータなどの装置の消費電力削減、負荷と消費電力が比例する性質 (Energy-proportional [12]) を装置にもたせる手法、不要な装置などのネットワークの一部を一時停止する手法が提案されている。ICN ネットワークに対しては、キャッシング機能を用いて、全体のトラフィック量やホップ数を削減することで、結果として消費電力を削減することが検討されている [13]。

同様に携帯ネットワークの省電力化も長く研究されており [14]、特に消費電力の大半を占める基地局設備の消費電力の削減に焦点を当てている。基地局設備は、空調設備等の負荷に関係なく固定的に消費する電力が多く、トラフィック削減による消費電力削減効果は少ない。このため、一部の基地局の一部を停止し、残った基地局のセルを拡大し、停止基地局のセルをカバーするセルズーミングが提案されている [15]。

一方、GreenICN アーキテクチャは、新たな要素技術を開発するのではなく、上記のこれまでに明らかにされた消費電力削減方針を ICN 固有の手法で取り入れることを目的としている。

3. GreenICN アーキテクチャ

GreenICN プロジェクトでは、図 1 (1) に示すように、消費電力を抑える基本 ICN アーキテクチャを設計し、ビデオ配信 (図 1 (2)) と災害時の情報配信 (図 1 (3)) の応用を提供できるように拡張する。

図 1 の (1) は基本アーキテクチャが提供する、省電力技術、具体的にはキャッシング技術やトラフィック制御技術を示している。(2) と (3) はビデオ共有、並びに

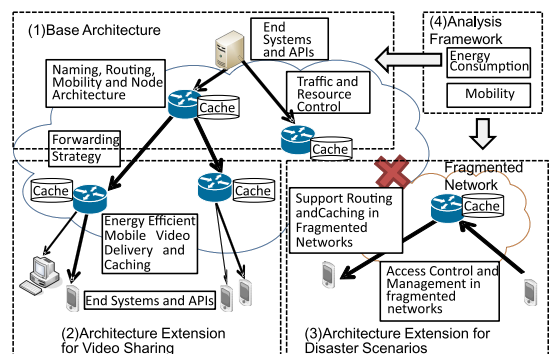


図 1 GreenICN アーキテクチャ
Fig. 1 GreenICN architecture.

災害時通信の二つのシナリオに、基本アーキテクチャを適用する方法を示している。(2) ビデオ共有では、ビデオ配信に特化したキャッシング技術が鍵となり、一方、(3) 災害時通信では、停電などで分断されたネットワーク間でのルーティングやキャッシング技術が鍵となる。

本章では、省電力を実現するアーキテクチャの設計方針、並びにこれまでの研究成果を述べる。

3.1 省電力志向のアーキテクチャ

個々の設備/個々のノードでなく、ネットワーク全体が消費する電力の削減を目的とする。このため、図1の(4)に示すように、設計と並行して、消費電力を推定する解析フレームワークを開発し、事前に手法を導入した効果を定量評価することを可能としている。

3.1.1 設計方針

これまでに固定並びに携帯ネットワークで確立された省電力の実現方針を、ICNへの適用性の観点で精査し、以下の設計方針を立てた。

(1) ホップ数削減

インターネットのキャッシング機能がICNの特徴の一つであり、キャッシング機能を用いて全体のホップ数を削減することを、消費電力削減の柱とする。この結果、メッセージが通過する回線の合計のホップ数を削減することで、Energy proportional な回線あるいはルータ等のノード設備の消費電力を削減する。なお、ホップ数削減の結果として、ネットワーク全体のトラフィック量や負荷を削減する。

更に、ネットワーク全体の負荷を削減した結果、一部の回線にトラフィックを集約して、負荷が0%の回線を作り出し、その回線を収容する回線設備を停止させる[16]ことで、更なるホップ数削減を実現する。ここで、従来方式の多くは、事前にトラフィック流量が推定できることを前提としているが、ICNではキャッシングにより必ずしも元の情報を有するノードから送信されとは限らず、事前のトラフィック推定は困難である。したがって、事前推定を必要としない手法を開発することが目標である。なお、現在までの研究成果を、3.2.1に述べる。

(2) ICN機能の一部停止

ICNルータは、IPアドレスより長い名前の最長プレフィクスマッチやキャッシング機能など、処理負荷の高い、すなわち消費電力の多い機能が多い。これに対して、全てのICNルータで全てのICN機能を実行するのではなく、遅延などの品質の劣化を抑えながら、

一部のICNのルータで必要がない、あるいは効果が少ない機能を一時停止する。従来、このアプローチを取る研究例は筆者らが知る限りは無く、GreenICNアーキテクチャの特徴の一つである。

3.2.3で述べるように、FIB (Forwarding Information Base) を用いた最長プレフィクスマッチなどの消費電力が多い。そこで、3.2.2で最長プレフィクスマッチを一部のルータで停止させる手法を考案している。

(3) 携帯基地局設備の一時停止

携帯ネットワークの回線設備や機器の多くは必ずしもEnergy-proportionalではないため、(1)のトラフィック削減だけでは十分でない。更に災害時には一部の基地局設備が停電による電池駆動になることにより、プロアクティブに一部の基地局設備を停止し、停止した基地局のセルを、他の停止しない基地局設備でカバーするセルズーミングを採用する。災害時に採用するために必要な拡張に関する詳細は5.1で述べる。

(4) 解析フレームワーク

ホップ数削減、ICN機能の一部停止による消費電力削減量を定量的に事前評価するには、ICNルータの消費電力をモデル化する必要がある。従来は、ルータきょう体と転送エンジンとCS (Content Store) のメモリ設備の消費電力を推定した試み[17]はあるが、ICN機能の消費電力を対象としていない。これに対して、最長プレフィクスマッチなどの個々のICN機能の消費電力も推定可能な、ICNルータの消費電力モデルを作成する。

またホップ数削減の効果は、解析的あるいはシミュレーションで評価する方法があるが、シミュレーションによる評価は作業工数が多くなることが多いため、解析的な手法を用いる。ホップ数削減はキャッシングによるトラフィック量削減で決まるため、想定するICNネットワークで解析的に各ルータのキャッシュヒット率を導出するモデルを作成する。先に説明した1台のICNルータの消費電力モデルと組み合わせて使用することで、様々なトポロジーに対して、様々なトラフィック条件の下で、ネットワーク全体の消費電力を推定できる。現在までに開発した双方のモデルについては、3.2.3で述べる。

3.2 これまでの研究成果

3.2.1 トラフィック集約による回線設備の一時停止

キャッシュ容量や要求パターンによるトラフィック流量の動的変化に対応するため、事前トラフィック推定を

必要としないオンラインでの ICN トラフィックエンジニアリング方式 (MTTE: Multiple Tree based Traffic Engineering) を考案した [18]. MTTE は, 複数の木を使いトラフィックを分散して輻輳を回避し, 回線負荷に応じて動的にツリーの増減を行う方式である. シミュレーションでは, MTTE により低通信負荷時にはコンテンツ取得時間を 2 倍以下に抑制しつつ 50% の回線を停止できた. また, 高通信負荷環境では 40% の回線を停止した上で, 更に輻輳によるコンテンツ取得時間の変動を抑制できることを確認した.

3.2.2 最長プレフィクスマッチの一部停止

ICN ルータの FIB を用いた最長プレフィクスマッチを効率良く行うため, 前段の ICN ルータでの情報を用いた, 検索手法を提案した [19]. FIB は最長プレフィクスマッチを行うことが必須であるが, この処理を高速に行うためには, CAM や SRAM などの高速メモリが必要となる. しかしながら, これらのメモリの消費電力は大きい. 一方で, FIB で保持する経路表は分散的に配布されるため, 隣接ルータでの差は小さい. この特徴を生かし, ICN ルータでマッチングしたプレフィクス数を伝播させることにより, FIB 内で全プレフィクス数に対してではなく, 伝播されたプレフィクス数だけを対象として, マッチングを行う手法を考案した. モデル評価により, 消費電力削減のために, 高速メモリ量を 1,000 分の 1 にした場合, 転送パケット速度の低下量を既存手法を使ったときの低下量と比較して, 半分以下に抑制することができた.

3.2.3 消費電力の解析フレームワーク

(1) ICN ルータの電力消費モデル

NDN/CCN の実装コードであり, そのソースコードがオープンソースとして提供されている NDNx/CCNx を, 1 台の CPU を搭載したソフトウェアルータを対象として, 電力消費モデルを作成した [20]. 式 (1) に示すように, NDNx/CCNx のプロトコル処理に CPU が消費する電力 (第 1 項), NDNx/CCNx パケットを UDP/IP パケットにカプセル化して転送するのに NIC (Network Interface Card) が消費する電力 (第 2 項), きょう体が消費する電力 (第 3 項) の和として, ルータの消費電力をモデル化している. 第 1 項と第 2 項は負荷に比例した Energy proportional と仮定しており, l は CPU の負荷率で, l' はパケットの転送レート (パケット/秒) である.

$$P_{ICN} = P_{CPU}(l) + P_{Fwd}(l') + P_{Idle} \quad (1)$$

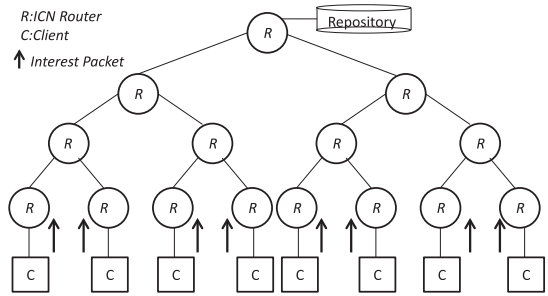


図 2 消費電力推定対象のネットワーク
Fig. 2 Network of which consumed energy is estimated.

CPU 負荷率 l を求めるために, まず, プレフィクスマッチやキャッシングなどの個々の ICN 機能の CPU 負荷と消費電力を実際に NDNx/CCNx を動作させて測定しており, この結果は, 方針 (2) の一部停止する ICN 機能の選定に用いる. 更に NDNx/CCNx のソースコードを解析して, ICN ルータへの Interest パケットの入力レートとキャッシュヒット率から, CPU 負荷率 l を算出する手法を開発した. これにより, Interest パケットの入力レートとキャッシュヒット率を決めることにより, ICN ルータが 1 秒間に消費する電力 (単位は W) を算出できる.

(2) キャッシュヒット率の解析モデル

図 2 に示すトポロジーにおいて, クライアントからレポジトリへのコンテンツへの要求レート, すなわち Interest パケットの入力レートを決めることにより, 各ルータのキャッシュの状態遷移をマルコフ連鎖でモデル化し, 解析的に導出するモデルを作成した. 本モデルは, 欧州側メンバの研究成果 [21] を基に作成した. 本モデルと (1) のモデルを用いて, 図 2 に示す 4 段の完全 2 分木の構成での消費電力を導出し, キャッシング機能を行わない IP ルータで構成した IP ネットワークでの消費電力と比較している. これまでの結果では, 全 ICN ルータでキャッシング機能を実施した場合, ICN 機能による消費電力の増加を, トラフィック削減による消費電力削減で相殺している. ただし, 小規模なネットワークでの評価であるため, 大規模なネットワークでの評価を進めている.

3.3 進行中の研究

GreenICN プロジェクトでは, 目標である ICN ネットワーク全体の消費電力の 20% 削減の達成には, 単一の提案技術だけでは不十分であることが分かってきている. 例えば, 3.2.3 で示すように, キャッシング機

能によるホップ数やトラフィックの削減だけでは、高負荷な ICN 機能の消費電力増をカバーして、十分に消費電力を削減できない。一方、回線設備の一時停止技術では、一時停止後のキャッシュヒット率を推定できないため、一時停止すべき回線を特定できない。このため、これらの技術を連携させてより消費電力を削減できるよう、解析フレームワークにおいて、回線集約によるキャッシュヒット率の変化の推定技術に取り組んでいる。

更に、キャッシュヒット率の低い ICN ルータでのキャッシング機能の停止、協調キャッシュなど、キャッシュヒット率を向上する手法の開発を進めている。

一方、消費電力の解析フレームワークについては、単一 CPU コアのルータや一様に分布するコンテンツのみが対象などの制約があるため、複数 CPU コアや Zipf 分布に従ったコンテンツに対応できるよう拡張中である。

4. 災害時通信の要求条件

本章では、GreenICN で特徴的な災害時のユースシナリオと要求条件を説明する。

4.1 参照ネットワーク

参照ネットワークは、図3に示すように、LTE (Long Term Evolution) の携帯ネットワークをベースとしており、以下の特徴を仮定する。

(1) 分断ネットワーク

バックホール回線の切断や、基地局設備障害により、携帯電話コアネットワークから分断されたネットワーク (分断ネットワークと呼ぶ) が災害時の特徴である。図3(i)に示すように、基地局のノード eNodeB (eNB) とコアネットワーク間のバックホール回線が切断され

て、図3(a)に示すように、端末はコアネットワークから分断される。現状の携帯電話ネットワークでは、セル内の端末どうしてもコアネットワークを介して通信するため通信不能となる。これに対して、基地局に設置した ICN ルータによりセル内の端末はコアネットワークを介して通信できることを仮定し、現在 3GPP で検討中の基地局設備を介さずに端末間で直接通信することを可能にする D2D (Device-to-Device) 通信機構 [22] を利用することを想定している。

一方、図3(ii)に示すように障害や停電で eNB が停止すると、セル内の端末が孤立する場合は、避難所等に一時的に設置した Wi-Fi アクセスポイントで通信を提供する。しかしながら、図3(b)に示すように、アクセスポイントもコアネットワークから分断されている。

(2) 電池の消耗

東日本大震災の被害状況に関する総務省の報告では、停電により電池で駆動された基地局設備の内、最大で 67% が災害発生後 1 日以内に停止し、停電の復旧に 3 日以上かかかっている。したがって図3(c)で示すように、コアネットワークに接続されていても、電池で駆動される場合は、基地局設備の消費電力削減が必須である。

(3) データミュールの導入

分断ネットワークの端末に、コアネットワークへの通信を提供するために、データミュールを導入する。データミュールは、携帯電話や Wi-Fi インタフェースを有する ICN ルータを搭載した自動車、例えば、救急車やパトロールカーであり、被災地を巡回することで、DTN (Disruption Tolerant Network) 技術をベースにした通信を提供する。具体的には、データミュールは、被災地の端末からのメッセージをいったん蓄積し、移動してコアネットワークと通信可能になった時点で転送する。

4.2 ユースシナリオと要求条件

災害時にネットワークが果たすべき役割として、被災者の安否確認情報を関係者に伝えること ((1) 参照)、自治体から緊急情報を被災者に伝えること ((2), (3) 参照) と捉え、3 種類のユースシナリオ策定した [23]。

(1) 安否確認メッセージの配信

災害発生後、数時間から 1 日経過すると、安否確認メッセージが多数の被災者から親戚、友人へ発信される。被災者からのメッセージを、DTN 技術で配信するが、以下のことが要求される。まず、刻々と変化する

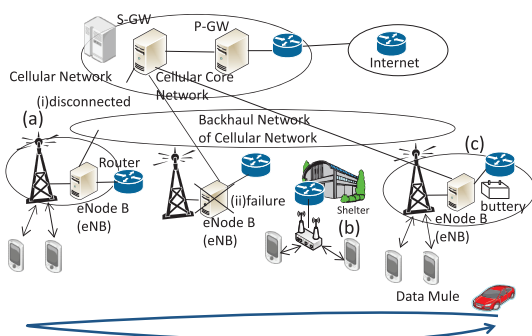


図3 参照ネットワーク
Fig.3 Reference network.

る使用可能な設備、回線や輻輳状況に適應する必要がある。次に、多数の被災者から同時に携帯ネットワークの上リンクに送信されるメッセージを、限られた周波数資源で配信することも要求される。

(2) 緊急メッセージの配信

災害直後に、自治体からの避難指示等の緊急メッセージを被災者に配信するには、多数の被災者に配信できるスケーラビリティが要求される。また、緊急メッセージがデマや風評ではあってはならないため、中央の認証用の設備から分断されていても、緊急メッセージを正当な自治体が作成したことを保証することも必須である。

(3) 被災者と自治体間での重要情報の共有

災害発生から一日程度経過すると、被災者と自治体の間で、被害状況や避難所のスケジュール等の情報共有が必要となる。(2)と同様の配信のスケーラビリティに加えて、電池の消耗が進んでおり、電池などの資源の消費をより少なくすることが要求される。

5. 災害時通信向きアーキテクチャ拡張

5.1 アプローチ

災害時には、4.で示したように、分断されたネットワークにおいて、基地局設備の消費電力を抑えながら、スケーラビリティの高い配信と情報アクセス制御を提供することが要求される。本節は、各要求に対する目標と実現に向けたアプローチを示し、5.2でこれまでの研究成果を紹介する。

5.1.1 省電力化

東日本大震災では停電復旧に約3日にかかり、震災後には、基地局に約1日分の電池の設置が検討されているため、基地局設備の電池の持続時間を1日から3日へ約3倍延ばすことが目標である。そこで、プロアクティブに基地局設備を一時停止するセルズーミング、具体的には、文献[15]で示された四つに一つの基地局設備を順に一時停止させるセルズーミングを採用する。

ここで、約3倍以上に持続時間を延ばした副作用として、元々四つの基地局がカバーした範囲を、一つの基地局でカバーすることになり、端末1台当たりの周波数資源、あるいはトラフィック量が1/4未満となる。したがって、災害時の省電力化は、与えられた電池容量で、提供可能なトラフィック量を最大にするとともに、緊急通信などの重要な通信は優先して必ず配信するという二つの課題に置き換えられる。

(1) メッセージ集約による上りリンクの周波数資源の

有効利用

LTEで採用するSC-FDMA (Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access)の上りリンクでは、基地局は周波数資源を一定長の帯域幅と時間で分割した資源ブロック (RB: Resource Block) を単位として、端末に割り当てる。このとき、多数の被災者が同時に安否確認メッセージを送信すると、周波数資源の有効利用には以下の2点が課題となる。まず、(i) 端末はメッセージ送信するためのRB群を予約する要求をRBを用いて送信する必要があり、要求用のRBがオーバーヘッドとなる。次に、(ii) 同一のデータ量のメッセージを送信する場合、基地局の受信電波の受信感度が低い端末、例えば、基地局から遠隔の端末は、1メッセージあたりに必要なRB数が多くなる。

これに対して、基地局での受信感度の高い端末に、そうでない端末のメッセージをWi-Fiなどによるマルチホップ通信を用いて集約し、集約した端末から基地局へまとめて送信する手法 (メッセージ集約と呼ぶ) は、上記の無駄をなくし、周波数資源の有効利用を可能とする。

(2) 優先制御

周波数資源や電力が極端に不足する状況で、緊急メッセージを確実に配信するために、優先制御を提供する。プル型のICN通信においては、データを要求するInterestパケット並びに応答として返送されるDataパケットの優先制御が可能である。

Interestパケットについては、メッセージ単位と、FIBエントリ (名前プレフィクス) 単位の優先度を指定するパラメータ (あるいは属性) を追加する。これにより、Interestを送信する要求者に優先度 (前者) を与えるとともに、要求される情報 (後者) にも与えることとなり、細粒度での優先制御を提供できる。例えば、要求者の優先度に差がない場合でも、情報の優先度が高い (例えば、消防署へ救難を依頼する) Interestパケットが優先的に転送される。逆に、同じ優先度の情報へのInterestパケットでも、優先度の高い要求者 (例えば、レスキュー隊など) のInterestパケットが優先的に転送される。一方、Dataパケットの優先度は、Interestパケットの優先度によって決定する。このため、PIT (Pending Interest Table) にInterestパケットの優先度を記録しておけば良く、Dataパケットに優先度を示すパラメータは追加しなくて良い。

5.1.2 分断ネットワークにおける接続性

ネットワークが分断された場合も、通常の電話の呼

損率程度の接続性を端末に提供できるよう、分断ネットワークの端末に対して95%の確率でDataパケットが配信されることを目標とした。端末が移動する環境で断続通信を提供する移動サポート機構を設計し、現実的な移動モデルに基づく評価を行うことで、この目標を達成する。

(1) 移動サポート機構

ネットワーク分断時には、分散的な配信プロトコルが適しており、例えばICNベースのチャットを提供するChronos [24]が候補と考えられる。しかしながら、フラディングに基づくパケット転送を行うため、電力などの資源が不足する災害時には向いていない[25]。このため欧州側研究者が開発したCOPSS [10]をベースに配信プロトコルを設計する。COPSSはICNネットワーク上で、フラディングを用いずにパブリッシュ/サブスクライブ型の通信を提供するプロトコルである。

COPSSを採用した理由は、ICNの基本的なプル型の通信では、応答のDataパケットに対するタイムアウト値を最適に決定することが、分断ネットワークの断続通信環境下では困難なためである。一方、COPSSはプッシュ型通信によりこの問題を回避している。したがって、COPSSに対して、分断ネットワークにおいて、警察・消防などの自治体が所有する車両、すなわちデータミュールを用いた移動サポート機構を導入することが目的である。

(2) 評価用移動モデル

一般的に、モバイルワイヤレスネットワークにおいては、ノードの移動がネットワーク性能に大きな影響を与える[26]。GreenICNアーキテクチャにおいても、メッセージ集約や情報配信などのアプリケーションやプロトコルの設計には、被災者やデータミュールなどのノードの移動を考慮した性能の事前評価が必須である。

そこで、ノード移動特性の一つであるノード密度分布に着目し、移動モデルがネットワーク性能に与える影響を効率良く評価するために、あるノード密度分布が与えられたとき、そのノード密度分布を維持し続けることができる移動モデルを生成する手法を考案する。

5.1.3 分断ネットワークにおけるアクセス制御

無線通信媒体を用いる場合、正当な送受信者間でのみ通信する内容を確認することができる秘匿(暗号化)と正規のユーザのみがネットワークにアクセスすることができる認証が問題となる。災害時にはなり

すましによる破壊行為が最も大きな脅威となる。第3世代携帯電話以降では、ユーザ固有鍵などをUSIM (Universal Subscriber Identity Module) カードに収容し、GSMのようなユーザ認証(正しいカードからアクセスしている)だけでなく、ネットワーク認証(正しいネットワークにアクセスしている)も行う相互認証を行うようになった。このネットワークアクセス制御は、3GPP AKA (Authentication and Key Agreement) プロトコル [27] で実現しているが、コアネットワーク内のHSS (Home Subscriber Server) との接続を前提にしており、もちろん分断ネットワークでは利用できない。ネットワークアクセス制御は、資源の保護のためにも必要である。また、パニックを回避するためには情報アクセス制御は必須であり、例えば自治体関係者のみでメッセージを共有するようなことができないとしない。このような秘匿のポリシーや前述のネットワークアクセス制御をコアネットワークへ接続できない制約下で分散的に実装する必要がある。

5.2 これまでの研究成果

5.2.1 省電力

(1) メッセージ集約

これまでに、マルチホップ通信によるメッセージ集約を、端末からの上りリンクへの送信に使用するRB数を最小化する最適化問題として定式化し、様々な条件下で、最小化したRB数を求めている[28]。この結果、メッセージ集約のRB数、すなわち周波数資源を削減できることを定量的に示した。現在、メッセージ集約を組み込むように、ICNプロトコルの拡張を検討している。

(2) 優先制御

これまでに、5.1.1で提案した優先度パラメータとICNルータでの優先制御方式の設計を完了している。現在は、以下の課題について、検討を進めている

まず、要求者と情報の二つの優先度があるため、パケットの優先度が一意に決まらない。例えば、要求者と情報の優先度が、それぞれ高、低と低、高のInterestパケットの内、どちらを優先するかという問題である。現在、欧州側の研究者を中心として、情報の優先度の決定法の検討を開始した。文献[29]では、メッセージの優先度や有効期間、配布地域などを名前ベースの属性として定義するNREP (Name-based Replication Priorities) を提案している。

更にICNルータでの優先制御方式について、優先度

が低い Interest パケットや Data パケットを単純に破棄するのでなく、回線が未接続状態の場合や帯域等の資源が不足する場合、一時停止時間を長くするためなどに、ストレージに一時保存する方式を検討している。

5.2.2 分断ネットワークにおける移動サポート

(1) 移動サポート機構

分断ネットワークで移動サポートするプロトコル [30] の特徴は、分断ネットワークとデータミュールの間で論理回線を構築し、物理的に切断している場合においても論理的に情報の配信先情報を保持することである。これにより、フラディングを用いずに、情報を必要としている先に、必要な情報を届けることが可能となる。文献 [30] では、小規模な分断ネットワークを仮定して、安否確認を例として情報の伝達をモデル化し、2 台のデータミュールが存在すれば、95% の確率で情報が到達可能であることを示した。

(2) 評価用移動モデル

これまでに、指定されたノード密度分布を維持し続けることができる移動モデルを生成する手法を提案した [31]。この移動モデルにおいては、対象とする領域を複数セルに分割し、それぞれのセルに存在する各ノードはセルごとにあらかじめ定められた移動確率に基づき、他のセルを目的地として選択し、そのセルへ移動する動作を繰り返す。

本手法では、指定されたノード密度分布を実現し、かつその密度分布を維持し続けることができるような移動確率を導出する問題を、指定された密度分布と実現される密度分布の差を最小にするような移動確率を決定する最適化問題として定式化し、効率的に解を導出するためのヒューリスティックなアルゴリズムを提案している。これまでに、幾つかの代表的なノード密度分布を再現した結果、密度分布の誤差は高々 0.1% であることが確認できている。

5.2.3 分断ネットワークにおけるアクセス制御

情報アクセス制御の観点から考えると、現在のインターネット上のコンテンツへのアクセス制御は、Public Key Infrastructure (PKI) に基づいた TLS で一般に制御されている [32]。NDN も PKI を前提にしており、コンテンツ、すなわちデータパケットへのアクセスは、データパケットを公開鍵で暗号化することにより制御可能である。また、NDN では、データパケットの送出時に秘密鍵で署名する際、公開鍵、公開鍵証明書のリスト（ルート認証局 (CA) 以下の全 CA による証明書列）も添付して送る実装になっている。このため、

NDN ノード間でお互いに Interest パケットを送信して対応するデータパケットを受信すれば、証明書付き公開鍵を送信者の署名付きで入手できるため、相互認証可能である。したがって、ネットワークアクセス制御も実現可能である。しかし、CA に接続できない分断ネットワークでは、証明書失効リストを入手できない。このため、有効な公開鍵証明書かどうかをチェックできず、なりすまし攻撃の可能性がある。

GreenICN では、ID ベース暗号の Key Generation Center (KGC) を階層化させた階層型 IBE (ID-based Encryption) と呼ぶ方式 [33] で PKI を代替することを検討している。これは、大元のキャリアがもつ Root KGC, Root KGC が生成したユーザ秘密鍵を元に動作しユーザ端末に実装される KGC といった階層構成をとる。復号時に用いる System Parameters は各階層で共有され、各端末の ID はメールアドレスのようにネットワーク上のオブジェクトにひも付け済みであるため、分断ネットワークで eNB 経由若しくは LTE 端末間で通信する際のネットワークアクセス制御に有効である。また、Facebook のような既存インターネットのログイン過程もエミュレーションもできる [34] ことを示した。

一方、情報アクセス制御を実現するには秘匿性が必要になるため、キャッシュの利用効率が下がる。このため、Ciphertext-Policy Attribute-Based Encryption (CP-ABE) [35] を導入し、コンテンツの利用を個人単位からポリシー単位に拡張し、ユーザグループ内で秘匿性を満足し、かつキャッシュも活かすことを考えている。階層型 IBE や CP-ABE は計算量が増えるため、プロトコルを工夫し、GreenICN の省エネルギー制約下で実装する必要がある。

5.3 進行中の研究

GreenICN プロジェクトでは、災害で分断されたネットワークにおいて、災害後 3 日間通信を提供することを目標としている。いいかえると、限られた周波数資源の中で、緊急度の高いメッセージ配信を保証しながら、緊急度の低いメッセージについても、最大のメッセージ数を転送することが目標である。

緊急度の高いメッセージ配信については、COPSS 及びメッセージ集約と、優先制御を連携させることが必須である。まず、分断ネットワークでの緊急メッセージの優先的な配信については、COPSS のプッシュ型のメッセージ配信に、優先制御を提供することを検討している。COPSS 独自の FIB にサブスクライバやバ

ブリッシャごとの優先度を設定することを検討中である。また、メッセージ集約については、端末間で同一優先度のメッセージを集約をできるように、ローカル通信を拡張するとともに、高優先度のメッセージ集約した端末が上りリンクに優先的に送信する手法を検討している。

また、限られた周波数資源で最大のメッセージ数を転送するには、停止する基地局設備、データミュールの配備台数や移動経路などを最適化する必要がある。この最適化には、被災者やデータミュールの移動を正確に予測することが鍵となるため、人や端末のノードの密度を考慮した現実的な移動モデルの作成を進めている。

6. む す び

GreenICN プロジェクトは、省電力指向の ICN アーキテクチャを開発している日欧共同の研究プロジェクトである。GreenICN アーキテクチャは、消費電力を抑えながら、ビデオ共有や災害時通信の応用を提供することを目的として、設計を進めている。本論文では、本アーキテクチャの特徴である、省電力指向と災害時通信に焦点を当てて、アーキテクチャのユースシナリオ、要求条件、実現へのアプローチという流れに従って、アーキテクチャを説明した。災害時通信に関しては、これまでに、基地局設備の約 4 分の 3 が停止していてもトラフィックを収容可能とすること、並びに分断されたネットワークにおいても時間率で 95% の接続性を提供することを目標値として設定し、目標に向けた個別の課題の解決法を提案した。現在は、これらの解決法をシームレスに一つのアーキテクチャとして纏め上げ、設定した目標値を達成することを目指している。

謝辞 本研究成果の一部は、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究課題 167 「新世代ネットワークの実現に向けた欧州との連携による共同研究開発」課題ウ「コンテンツ指向ネットワークによる省エネルギーコンテンツ配信の研究開発」により得られたものである。またアーキテクチャ設計を共同で設計している、欧州側の研究者 X. Fu 氏、M. Arumathurai 氏、J. Sedrof 氏、I. Pasars 氏、N. Brefaris 氏、及び米国の K.K. Ramakrishna 氏に深謝する。

文 献

- [1] NSF Future Internet Architecture Project, <http://www.nets-fia.net/>
- [2] T. Hasegawa, "A survey of the research on future Internet and network architectures," IEICE Trans. Commun., vol.E96-B, no.6, pp.1385-1401, June 2013.
- [3] C. Dannewitz, C. Imbrenda, D. Kutscher, and B. Ohlman, "Survey of information-centric networking," IEEE Commun. Mag., vol.50, no.7, pp.26-36, July 2012.
- [4] GreenICN Project, <http://www.greenicn.org/>
- [5] V. Jacobson, D. Smetters, J. Thornton, M. Plass, N. Briggs, and R. Braynard, "Networking named content," Proc. ACM CoNEXT'09, pp.1-12, Dec. 2009.
- [6] Named Data Networking Project, <http://www.nameddata.net>
- [7] B. Tarnauca and S. Nechifor, eds., "Netinf evaluation," EC FP7-ICT-4WARD Project, Deliv. D-6.3, June 2010, <http://www.4ward-project.eu>
- [8] Pursuit Project, <http://www.fp7-pursuit.eu/PursuitWeb/>
- [9] CONVERGENCE project, <http://www.ict-convergence.eu>
- [10] J. Chen, M. Arumathurai, L. Jiao, X. Fu, and K.K. Ramakrishnan, "COPSS: An efficient content oriented pub/sub system," Proc. ANCS, pp.99-110, Oct. 2011.
- [11] R. Bolla, R. Bruschi, F. Davoli, and F. Cucchietti, "Energy efficiency in the future internet: A survey of existing approaches and trend in energy-aware fixed network infrastructures," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.13, no.2, pp.223-244, July 2011.
- [12] T. Harder, V. Hudlet, Y. Ou, and D. Schall, "Energy efficiency is not enough, energy proportionality is needed!," Proc. DASFAA'11, pp.226-239, 2011.
- [13] U. Lee, I. Rimac, D. Kilper, and V. Hilt, "Toward energy-efficient content dissemination," IEEE Netw., vol.25, no.2, pp.14-19, March 2011.
- [14] Z. Hasan, H. Boostanimehr, and V. Bhargava, Fellow, "Green cellular networks: A survey, some research issues and challenges," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.13, no.4, pp.524-540, Nov. 2011.
- [15] Z. Niu, Y. Wu, J. Gong, and Z. Yang, "Cell zooming for cost-efficient green cellular networks," IEEE Commun. Mag., vol.48, no.11, pp.74-79, Nov. 2010.
- [16] M. Zhang, C. Yi, B. Liu, and B. Zhang, "GreenTE: Power-aware traffic engineering," Proc. IEEE ICNP 2010, pp.21-30, Oct. 2010.
- [17] D. Perino and M. Varvello, "A reality check for content centric networking," Proc. ACM ICN 2012, pp.44-49, Aug. 2012.
- [18] L. Xu and T. Yagyu, "Multiple-tree based online traffic engineering for energy efficient content centric networking," 信学技報, IA2013-78, Jan. 2014.
- [19] M. Fukushima, A. Tagami, and T. Hasegawa, "Efficient lookup scheme for non-aggregatable name prefixes and its evaluation," IEICE Trans. Commun.,

- vol.E96-B, no.12, pp.2953-2963, Dec. 2013.
- [20] 中井悠斗, 塚本圭一郎, 小泉佑揮, 長谷川亨, “CCNx ルータの電力消費モデルの提案,” 信学技報, N2013-162, March 2014.
- [21] I. Psaras, R.G. Clegg, R. Landa, W.K. Chai, and G. Pavlou, “Modelling and evaluation of CCN-caching trees,” Proc. 10th International IFIP TC 6 Conference on Networking (Networking '11), pp.78-91, May 2011.
- [22] 3GPP TR 23.703 V1.0.0, “Technical Specification Group Services and System Aspects: Study on architecture enhancements to support Proximity-based Services (ProSe) (Release 12),” Dec. 2013.
- [23] M. Arumathurai, J. Seedorf, A. Tagami, K. Ramakrishnan, and N. Blefari Melazzi, “Using ICN in disaster scenarios,” draft-seedorf-icn-disaster-01, Oct. 2013.
- [24] Z. Zhu, C. Bian, A. Afanasyev, V. Jacobson, and L. Zhan, “Chronos: Serverless multi-user chat over NDN,” NDN, Technical Report NDN-0008, Oct. 2012.
- [25] T. Ogawara, Y. Kawahara, and T. Asami, “Information dissemination performance of a disaster-tolerant NDN-based distributed application in disrupted cellular networks,” IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P), pp.1-5, Sept. 2013.
- [26] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies, “A survey of mobility models for ad hoc network research,” Wireless Communications and Mobile Computing, vol.2, no.5, pp.483-502, 2002.
- [27] L. Xiehua and W. Yongjun, “Security enhanced authentication and key agreement protocol for LTE/SAE network,” Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), pp.1-4, Wuhan, Sept. 2011.
- [28] 長谷川慶大, 小泉佑揮, 長谷川亨, “マルチホップ通信によるメッセージ集約のセルラー周波数資源の利用モデルに関する一考察,” 2014 信学総大, B-7-80, March 2014.
- [29] I. Psaras, L. Saino, M. Arumathurai, K. Ramakrishnan, and G. Pavlou, “Name-based replication priorities in disaster cases,” Proc. IEEE INFOCOM NOM Workshop, April 2014.
- [30] 杉山公平, 田上敦士, 柳生智彦, 長谷川亨, “災害時における ICN を用いた安否情報配信方式の提案,” 信学技報, IN2013-184, March 2014.
- [31] E. Ueno, A. Hiromori, H. Yamaguchi, and T. Higashino, “A simple mobility model realizing designated node distributions and natural node movement,” Proc. MASS 2011, pp.302-311, 2011.
- [32] T. Dierks and E. Rescorla, “The transport layer security (TLS) protocol Version 1.2,” RFC 5246, Aug. 2008.
- [33] C. Gentry and A. Silverberg, “Hierarchical id-based cryptography,” Proc. Asiacrypto 2002, vol.2501 of LNCS, pp.548-66, 2002.

[34] 小河原健生, 篠田詩織, 川原圭博, 浅見 徹, “Named Data Networking 上での ID-based Encryption による ID 合意および相互認証プロトコルの設計,” 信学技報, IN2013-131, Jan. 2014.

[35] J. Bethencourt, A. Sahai, and B. Waters, “Ciphertext-policy attribute-based encryption,” IEEE Symposium on Security and Privacy, pp.321-334, 2007.

(平成 26 年 4 月 10 日受付, 6 月 16 日再受付)



長谷川 亨 (正員)

昭 57 京大・工・情報卒. 昭 59 同大学院修士課程了. 同年 (株) KDD (現 KDDI) 入社. 次世代インターネットの研究に従事. 現在, 大阪大学大学院情報科学研究科教授. 情報学博士. 平成 15 年電波産業会電波功績賞受賞. 平成 26 年本学会通信ソサイエティ論文賞. 本会フェロー.



杉山 浩平 (正員)

2004 同志社大・工卒. 2006 阪大大学院・情報科学修士課程了・2009 同大博士課程了. 同年 KDDI 株式会社に入社. 博士 (情報科学). 現在次世代インターネットの研究に従事.



田上 敦士 (正員)

1995 九州大・工退学. 1997 同大学大学院修士課程了, 同年国際電信電話株式会社 (現 KDDI (株)) 入社. 博士 (工学). 現在, 次世代ネットワークのアーキテクチャに関する研究に従事. 2010 本学会通信ソサイエティ優秀論文賞受賞.



柳生 智彦 (正員)

1993 阪大・基礎工卒. 1995 同大学大学院修士課程了. 同年 NEC 入社. 2009 筑波大・ビジネス科学研究科博士課程了. 博士 (システムズマネジメント). 現在, Information-Centric Networking 等の研究に従事. IEEE 会員.



内山 彰

2008 大阪大学大学院博士後期課程修了。同年イリノイ大学客員研究員。2009 大阪大学大学院特任助教。2013 同大学院助教。博士（情報科学）。人の位置・行動センシングに関する研究に従事。情報処理学会、IEEE 会員。



浅見 徹（正員）

昭 49 京大・工・電子卒。昭 51 同大学院修士課程了。同年（株）KDD（現 KDDI）入社。ネットワーク障害診断等に従事。（株）KDDI 研究所代表取締役所長を経て、現在東大・大学院情報理工学系研究科教授。博士（情報理工学）。平成 9 年度前島賞。本

会フェロー。