

インターネットの革新にむけて



随 筆

長谷川 亨*

Toward the Innovation of Internet Architecture

Key Words : Future Internet, Routing and Forwarding, Privacy

はじめに

1990年代の商用化以降、インフラストラクチャとしてのインターネットの役割は増加する一方である。Web サービス、Social Network Service (SNS)、さらにはテレビ番組のストリーミング配信など、インターネットを使わない日は一日もなくなっている。さらに、大規模災害時に電話網が不通になっても、SNS が活用されるなど、平常時だけでなく、緊急時にも重要な役割を果たしている。一方で、多様な応用からの要求に応えるため、設計当初は、宛先へのホップ毎のパケット転送だけを提供していた Internet Protocol (IP) に多数の機能が追加されており、インターネットの仕様を規定する文書の Request For Comments (RFC) も 8000 を超えるまでになっている。

2000年代中盤には、アドホックに機能が追加され硬直化 (ossified) した IP ベースのインターネットを、クリーンスレートに見直す必要性が認識された。解決に向けて米国、欧州、日本で多数の研究プロジェクトが開始され、コンテンツ、アドレスと名前付け、セキュリティの観点で多数の将来インターネットアーキテクチャが提案された¹⁾。筆者も情報指向ネットワーク (ICN: Information Centric Networking) を中心に将来アーキテクチャの設計開発に取り組むこととなった。

大阪大学大学院情報科学研究科に 2013 年に教授として着任した際に、将来に向けての構想を本誌で執筆しており²⁾、本稿では取り組みの結果と今後の方向性を述べる。

広帯域化するインターネット

筆者は 1984 年に国際電信電話株式会社 (現 KDDI) に入社して 2013 年に大阪大学に着任するまで、データ通信サービスの高速化、高度化に資する研究を実施した。特に 1990 年代に ATM の商用サービス化に取り組んで以来、広帯域化する回線速度に見合った高速なパケット、プロトコル処理に取り組んだ。1990 年代の半ばでは 45 メガビット / 秒であった回線速度は、現在 400 ギガビット / 秒になっている。また新技術の導入には、ルータなどのネットワーク機器が回線速度 (ラインレート) でパケット転送できることが鍵であり、一貫してラインレートを目指したプロトコルや実装技術の開発に取り組んできた。近年、P4 スイッチのように、パケット処理用の ASIC を搭載したプログラマブルスイッチの登場に伴い、現在はテラビット / 秒クラスのパケット処理に焦点を当てている。

情報指向ネットワーク

スト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であった。これに対して、コンテンツ / 情報を中心に据えた ICN 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。図 1 のプロトコル構成に示す通り、IP を中心とする現在のインターネットと異なり、IP によるパケット転送の代わりにコンテンツ転送



* Toru HASEGAWA

1958年4月生まれ
京都大学 大学院工学研究科 情報工
学専攻修了 (1984年)
現在、島根大学 材料エネルギー学部
特任教授 博士 (情報学)
専門 / 情報ネットワーク
TEL : 0852-37-6649
E-mail : t_hasegawa@mat.shimane-u.ac.jp

を中心としている。

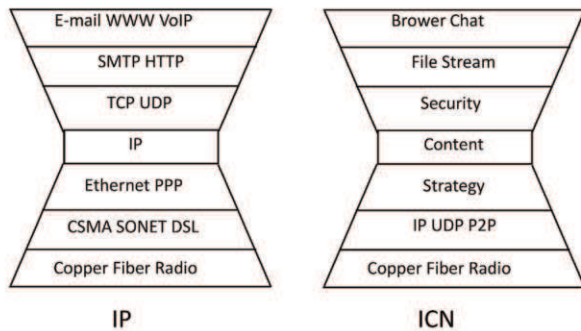


図1 IP と ICN のプロトコル構成

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、さらにはキャッシング機能を用いて、膨大する一方のトラフィック量を削減することが期待できる。

GreenICN、Juno-2 プロジェクト

大阪大学への着任後は、当時着目されていた ICN の研究開発を、主にゲッチング大学、University of College London (UCL)、ローマ第二大学と共同で、日欧共同の GreenICN プロジェクト³⁾で実施した。

電力消費に対して厳しい要求条件を有するビデオ配信ならびに災害時通信を ICN をベースに提供する GreenICN アーキテクチャの開発を進めた。特に、所属した情報流通プラットフォーム講座では、ICN のキャッシュ機能を活用した消費電力削減を目標として、ネットワークの消費電力の解析モデルを開発した⁴⁾。この結果、キャッシュによる消費電力削減の有用性を検証した。

災害時に分断されたネットワークで ICN 通信を

提供するルーティング技術については、さらに、米国カリフォルニア大学リバーサイド校との日米共同の Juno-2 プロジェクトで発展させた。図2に示すように、大規模災害時に、安心安全に、具体的には、119 番通報と同等の安全性を担保しながら、救急隊員、被災者、ボランティアが迅速に情報共有することを可能とする災害通信アーキテクチャを ICN ベースで開発した⁵⁾。

ICN 2020 プロジェクト

ICN では、Universal Resource Indicator (URI) 形式の階層的な構成を持つ名前が柔軟な通信を可能にする一方で、複雑な名前処理で高速なパケット転送が困難で、さらに悪意のあるルータに盗聴されるとアクセスしたコンテンツ名、すなわちユーザのプライバシーが漏洩するリスクがある。この2つの課題に対して、GreenICN プロジェクトに続く、ICN2020 プロジェクト⁶⁾では、高速パケット転送やコンテンツの名前暗号化を用いたプライバシー防御に取り組んだ。

高速パケット転送の研究では、ソフトウェアならびハードウェアをベースにしたルータアーキテクチャを設計し、高速なパケット転送法を開発した。それぞれのアーキテクチャにおいて、当時世界最高速のスループットを達成した。ソフトウェアに基づく実装では、2017年には宛先検索を高速化するプリフェッチ方式を発明し、当時世界最速の約34ギガビット/秒のスループットを実現した⁷⁾。ハードウェアに基づく実装では、プログラム可能な(プログラマブル)スイッチとサーバを組み合わせたアーキテクチャを考案した⁸⁾。2011年には、宛先の軽量

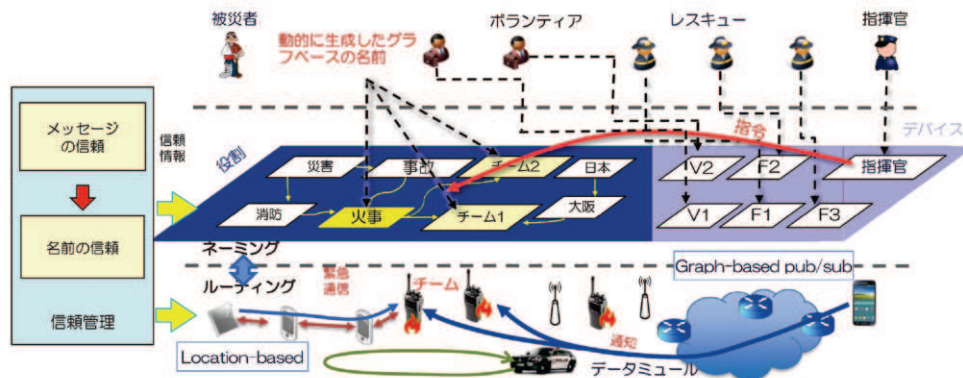


図2 ICN ベースの災害通信アーキテクチャ

な検索方式と組み合わせて、当時世界最速の約6テラビット/秒のスループットを達成した。さらに、単純なパケット転送だけでなく、暗号処理も同時に行う匿名通信の開発に発展させ、プログラマブルスイッチを用いて、2021年には約1テラビット/秒の匿名通信を実現した⁹⁾。

次世代インターネットの研究開発を振り返って

ラインレートに焦点を当て、ICNの高速化を中心に研究開発を実施した。テラビット/秒でパケット処理可能なASICを搭載したプログラマブルスイッチの登場もあり、ICNのパケット転送をテラビット/秒で行う目度を立てた。国内外の研究機関においても、ルーティング、セキュリティ、アプリケーションの研究開発が実施され、米国UCLA、国内NICTを中心に広域テストベッドも展開されている。

この間の研究開発を通じて以下の知見を得ている。第一にセキュリティとプライバシーの課題はIPの時代から解決困難であり、将来インターネットアーキテクチャにおいても解決されていない。第二に、ICNなどはIPと比較して優れた特徴を有するが、ネットワーク層のIPを別のICNなどのプロトコルに置き換えることは現実的に難しく、発展的に移行させる方法が不可欠である。

この知見を基に、まず、セキュリティとプライバシーを両立させるアーキテクチャの開発を、Beyond 5Gネットワークを対象として、日米共同の

Juno-3プロジェクトで2022年より進めている。図3に示すように。プログラマブルスイッチなどのプログラム可能なデバイスを活用している。さらに、インターネットの第3層と第4層の間にプログラミング可能なデバイスを活用して多様な計算を可能にする第3.5層を導入して、IPやICNなどの多様なアーキテクチャを並存させる研究を開始する予定である。

おわりに

大阪大学に2013年に着任し、2023年3月に退職するまでの11年間は、インターネットの革新に向けて、ICNを中心に研究を進めた。IPをICNに置き換える当初の目標は達成できなかったが、IPに残された課題、ICNなどの新しいアーキテクチャを導入する道筋を明らかにできた。島根大学においても、引き続きインターネットの革新に向けて研究を継続する予定である。

日欧共同のGreenICN、ICN2020、日米共同のJuno-2、Juno-3の4つのプロジェクトに参画した欧米の一流の研究者との交流が、研究進捗だけでなく、学生特に博士後期課程学生の成長に有用であった。プロジェクトに参画した多数の共同研究者、特に、KK. Ramahrishnan教授、Xiaoming Fu教授、Ioannis Psaras博士に深く感謝する。また、情報流通プラットフォーム講座の小泉准教授、武政助教、卒業生、在学生のみなさんに深謝する。

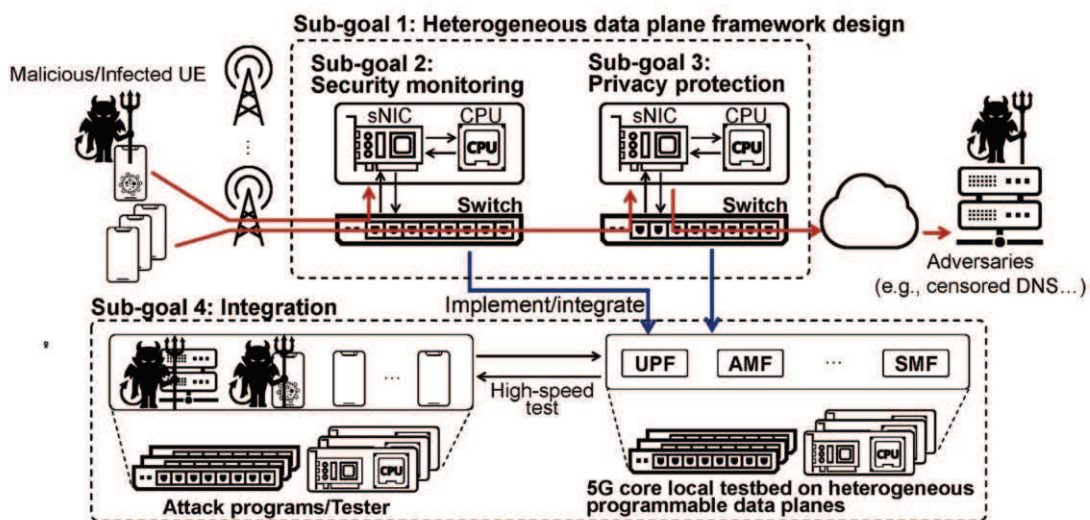


図3 Beyond 5Gに向けたセキュリティアーキテクチャ

参考文献

- 1) Toru Hasegawa: A Survey of the Research on Future Internet and Network Architectures, IEICE Transactions on Communications, Vol.E96-B, No.6, pp.1385-1401 (2013).
- 2) 長谷川亨：将来インターネットアーキテクチャに向けて，生産と技術，第67巻，第2号，pp.62-64 (2015).
- 3) 長谷川亨，杉山浩平，田上敦士，柳生智彦，内山彰，浅見徹：省エネルギー指向情報セントリックネットワークワーキングに向けて，電子情報通信学会論文誌，J97-B No.10，pp.828-838 (2014).
- 4) Toru Hasegawa, Yuto Nakai, Kaito Ohsugi, Junji Takemasa, Yuki Koizumi, Ioannis Psaras : Empirically Modeling How a Multicore Software ICN Router and an ICN Network Consume Power, Proceedings of ACM Conference on Information-Centric Networking, pp.157-166 (2014).
- 5) Mohammad Jahanian, Toru Hasegawa, Yoshinobu Kawabe, Yuki Koizumi, Amr Magdy,, Masakatsu Nishigaki, Tetsushi Ohki, K. K. Ramakrishnan : DiReCT: Disaster Response Coordination with Trusted Volunteers, Proceedings of 5th International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM), pp.1-8 (2019).
- 6) <https://cordis.europa.eu/project/id/723014>
- 7) Junji Takemasa, Yuki Koizumi and Toru Hasegawa : Data Prefetch for Fast NDN Software Routers based on Hash Table-based Forwarding Tables, Junji Takemasa, Yuki Koizumi, Toru Hasegawa, Computer Networks 173 107188 (2020).
- 8) Junji Takemasa, Yuki Koizumi and Toru Hasegawa : Vision: Toward 10 Tbps NDN Forwarding with Billion Prefixes by Programmable Switches, Proceedings of ACM Conference on Information Centric Networking (ICN) pp.1-6 (2021).
- 9) Yutaro Yoshinaka, Junji Takemasa, Yuki Koizumi and Toru Hasegawa : Feasibility of Network-layer Anonymity Protocols at Terabit Speeds using a Programmable Switch, Proceedings of IEEE International Conference on Network Softwarization (NetSoft) pp.1-5 (2022).

