

# 博士論文概要

## 論文題目

Performance Evaluation and  
Management of the Internet  
インターネットの性能評価  
と管理に関する研究

申請者

Masaki	FUKUSHIMA
福嶋	正機

1970年代にTCP/IPプロトコルに基づくインターネットアーキテクチャが開発された。それ以降にインターネットは様々な進化を遂げ、今や我々の社会の多くの場面で必要不可欠なインフラストラクチャとなった。この発展は初期のインターネットアーキテクチャの設計者たちの想定をはるかに超えている。今日のインターネットは当初想定されていなかった様々な技術的課題を抱えている。これら技術的課題の中には、現行のインターネットのアーキテクチャを根本的に変更しなければ解決できない問題も存在する。ただし、従来のインターネットが成功した結果、今日のインターネットのエコシステムは、様々な利害を持つ多数のステークホルダーの関与によって成立している。インターネットのアーキテクチャを根本的に変更することは、エコシステムへの影響が大き過ぎるために、容易ではない。

これまでインターネットのトラフィックは常に想定を超える速度で増加し続けてきた。特に近年は、スマートフォン等のモバイル端末からインターネット上のコンテンツにアクセスするトラフィックの伸びが急激である。今後しばらくの間は指数関数的に伸び続けることが予想されている。急激にトラフィックが増加すると、サービスプロバイダが需要に見合うだけの十分なだけのリンク帯域やノード容量等のネットワーク資源を適時投入して、ユーザから見た体感品質(Quality of Experience, QoE)を一定以上に適切に維持することが、困難な課題となる。またコンテンツへアクセスするトラフィックの増加に対処するため、現在はContent Delivery Network (CDN)の技術がコア網への負荷を軽減するために用いられている。一方でモバイル端末の普及につれて、ネットワークのボトルネックはアクセス網へ移っている。CDNのようなコア網上でのオーバーレイネットワークによる対処だけでは限界が生じる。これに対応するために、ネットワーク層のプロトコルがネイティブな機能としてコンテンツを認識して、その配信をルータレベルで最適化することが望まれるが、現行のIPはそのような機能を持っていない。

現在のインターネットが抱えるこれらの課題を克服した「将来ネットワーク」の実現を目指して、近年多くの研究が行われている。これらの研究は一定の成果を収めており、インターネットが抱える個々の課題を解決するための個別の要素技術が次第に確立されつつある。しかしながら、インターネットのような大規模・複雑なシステムにおいては、現実の課題を解決するために、個々の要素技術を単に組み合わせただけでは、運用上様々な問題が発生することが知られている。個々の要素技術を確立することは当然であるが、それに加えて、将来ネットワークの運用面での課題を解決することが必要不可欠なのである。そこで本論文では、第2章から第5章にわたり、将来ネットワークにおける運用の側面から、重要となる課題を一つずつ取り上げて問題提起して、その解決方法を提案する。

第2章では、増加し続けるトラフィックを収容できるモバイルネットワークを

いかに設計するかという課題を取り上げる。近年、モバイル端末はインターネットにアクセスする手段としてますます重要性を増しており、モバイルネットワークの容量を確保することは喫緊の課題である。そのため、モバイルネットワークの容量を拡張するための取組みが盛んに行われ、単一の無線アクセス技術の性能を向上させるだけでなく、様々な異なる無線アクセス技術（LTE、Wi-Fi、WiMAX等）や複数の無線周波数帯を組み合わせて利用する技術が確立されつつある。しかしながら、実際の運用面から考えると、これらの異種無線アクセスシステムを同時に使用した際に、各システムに対するトラフィックの配分がどのような分布となるか、また、ユーザの移動特性がその分布にどのような影響を与えるか、その結果ユーザから見た **QoE** がどの程度となるか等の総合的な特性がよく分かっていない。そこで本研究では、このような異種無線アクセスシステムの動作ならびにユーザの移動特性を待ち行列ネットワークでモデル化し、その性能を評価する。このモデルを用いることで、異種無線アクセスシステム混在環境におけるトラフィック分布や **QoE** を評価することが可能となる。これにより、モバイルネットワーク運用者が、最適なネットワーク設計を行うことが可能となる。

第3章では、適切にネットワークやその容量を設計するにあたって、ユーザ視点で見たネットワークサービスの体感品質、すなわち **QoE** をいかに測定するかという課題を取り上げる。従来はネットワークサービスの品質の指標として、リンク利用率やパケットロス率・パケット遅延時間等のネットワークの視点で測定できる **QoS** が用いられていた。**QoS** と比較すると、実際のユーザ視点での **QoE** を測定するには様々な課題がある。例えば、サーバやユーザの端末等のエンドノードではなく、ネットワークの中の間ノードで **QoE** を測定するには、より多くの資源・コストを必要とする。これは、中間ノードで **QoE** を測定するには、**Deep Packet Inspection (DPI)**等の手法を用いて、通常のプロトコル処理とは異なる処理を行う必要があるためである。そこで本研究ではトランスポート層における制御メッセージの数を数えるだけで **QoE** を効率よく推定可能な測定手法を提案する。さらに、本論文では実際のトラフィックデータを用いて提案手法の有効性を検証する。

第4章では、実際にトラフィックの増加によってネットワークサービスの **QoE** の劣化が検出された場合に、リンクやルータといったネットワーク資源をいかに確保して、**QoE** を保つかという課題を取り上げる。このようなネットワーク資源の迅速な投入を柔軟に実現可能とするため、ネットワーク仮想化技術が提案されている。ネットワーク仮想化技術を用いることで、サービスプロバイダは、自らインフラストラクチャを保有する必要なく、それらを保有するインフラプロバイダから仮想化されたリンクやルータの提供を受け、広域に展開する仮想ネットワークを迅速に投入することが可能となる。しかしながら、このような仮想ネットワーク環境は、実際のサービス運用者の視点から考えると、運用情報の秘匿性に

ついて課題がある。例えば、仮想化されたルータ上の全ての運用情報が、資源を提供するインフラプロバイダから（少なくとも技術的には）容易に参照可能である。そこで本研究では、特にルーティング情報に着目し、**Secure Multiparty Computation (SMC)**と呼ばれる情報セキュリティ技術を応用して、インフラプロバイダにルーティング情報を開示することなく、ルーティングを決定できるルーティングプロトコルを提案する。テストベッド上での実験により、秘匿性を確保することによるオーバーヘッドを加味しても、提案手法は現実的な性能が得られることを示す。

第5章では、上記3つの課題のすべてに共通する根源的な原因として、現行のインターネットアーキテクチャでは、ネットワーク層がコンテンツの配信を最適化できないという課題を取り上げる。初期のインターネットはホスト間通信のためのネットワークとして設計された。それに対して、今日におけるインターネットの使われ方としては、何らかの情報やコンテンツを配信したり、利用者がアクセスするのが主要な用途となっている。近年では、このミスマッチが、IPに基づく現在のインターネットの重大な限界となっているという指摘がある。この課題に対して、**Content Centric Networking (CCN)**というコンセプトが提案され、この限界を打破する有望なアプローチとして注目されている。CCNのアーキテクチャは近年活発な研究の対象となっているが、その運用の側面に関してはまだ十分な検討が行われていない点も多い。例えば、CCNにおけるコンテンツの名前は、そのトポロジー上での位置とは無関係に割り当てられるため、CCNをインターネット規模で運用しようとする場合には、CCNルータの**Forwarding Information Base (FIB)**には数億の名前プレフィックスを格納しなければならない。このような巨大なFIBに対して、最長プレフィクス一致検索を行うには性能上の課題がある。そこで本研究では、実際のCCNの運用形態について妥当な仮定を置き、その仮定のもとでFIB検索を高速化する手法を提案する。さらに、実際のインターネットのトポロジーデータを用いて、提案手法の有効性を検証する。

以上で述べたように、本研究では将来ネットワークの運用的側面から、四つの課題を取り上げ、各課題について解決方法を提案した。これらの解決方法を用いることで、将来の通信サービスプロバイダが、異種無線アクセスシステム・ネットワーク仮想化環境・CCN等を用いてサービスを提供する際に、ネットワークの設計・運用を最適化して、ネットワークサービスの**QoE**を測定することが可能となる。本研究は、新しい技術を実際のサービスに導入する上での運用上の課題を解決するものであり、本論文の研究成果は、現在のインターネットが抱える諸課題の解決に向けて有用である。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

福嶋 正機 印

(2013年11月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○論文	M. Fukushima, A. Tagami, and T. Hasegawa, "Efficient Lookup Scheme for Non-Aggregatable Name Prefixes and Its Evaluation," IEICE TRANSACTIONS on Communications, Vol.E96-B, No.12, Dec. 2013. (掲載決定)
○論文	M. Fukushima, K. Sugiyama, T. Hasegawa, T. Hasegawa, and A. Nakao, "Minimum Disclosure Routing for Network Virtualization and Its Experimental Evaluation," IEEE/ACM Transactions on Networking. (掲載決定)
○論文	M. Fukushima, H. Nakamura, S. Nomoto, and Y. Watanabe, "Modeling of seamless interworking environments for heterogeneous mobile systems," IEICE TRANSACTIONS on Communications, vol. E89-B, no. 10, pp. 2885-2896, 2006.
○論文	M. Fukushima and S. Goto, "Analysis of TCP flags in congested network," IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, vol. E83-D, no. 5, pp. 996-1002, 2000.
論文	H. Khosravi, M. Fukushima, and S. Goto, "An Improved TCP Protocol Machine for Flow Analysis and Network Monitoring," IEICE TRANSACTIONS on Communications Vol. E86-B, No. 2, pp. 595-603, 2003.
論文	Hiroki FURUYA, Masaki FUKUSHIMA, Hajime NAKAMURA, Shinichi NOMOTO, "Modeling of Aggregated TCP/IP Traffic on a Bottleneck Link Based on Scaling Behavior", IEICE TRANSACTIONS on Communications Vol.E85-B No.9 pp.1756-1765, 2002.
○国際会議	M. Fukushima, A. Tagami, and T. Hasegawa, "Efficiently Looking Up Non-Aggregatable Name Prefixes by Reducing Prefix Seeking," in Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2013 IEEE Conference on, pp. 3247-3252, 2013.
○国際会議	M. Fukushima, T. Hasegawa, T. Hasegawa, and A. Nakao, "Minimum Disclosure Routing for Network Virtualization," in 2011 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2011, pp. 858- 863.
○国際会議	M. Fukushima, H. Nakamura, S. Nomoto, and Y. Watanabe, "Impact of mobility on traffic distribution in seamless interworking environments," in Vehicular Technology Conference, VTC2004-Fall. IEEE 60th, 2004, vol. 6, pp. 4395 - 4401.
○国際会議	Fukushima, M.; Nakamura, H.; Nomoto, S., "A playout-buffer-sensitive time slot scheduling for integration of real-time and elastic traffic in wireless networks," Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2004. PIMRC 2004. 15th IEEE International Symposium on , vol.2, no., pp.1188,1192 Vol.2, 5-8 Sept. 2004.
○国際会議	M. Fukushima and S. Goto, "Analysis of TCP flags in congested network," in Internet Workshop, 1999. IWS 99, 1999, pp. 151- 156.

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
国際会議	Sugiyama, K.; Fukushima, M.; Tagami, A.; Hasegawa, T., "Secure and traceable online image sharing," Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012 IEEE, vol., no., pp. 2089, 2094, 3-7 Dec. 2012.
国際会議	Sugiyama, K.; Fukushima, M.; Hasegawa, T., "Anonymous communication for encouraging the reporting of wrongdoing in social groups," Secure Network Protocols (NPSec), 2010 6th IEEE Workshop on , pp.37-42, Oct. 2010.
国際会議	Koto, H.; Fukushima, M.; Nomoto, S.; Takahata, F., "Scheduling algorithm based on sender buffer backlog for real-time application in mobile packet networks," Wireless Communications and Networking Conference, 2005 IEEE , vol.1, no., pp. 151,157 Vol. 1, 13-17 March 2005.
講演	吉田芳明、福嶋正機、北辻佳憲、田上敦士、阿野茂浩、” サービス合成可能なネットワークプラットフォーム”，信学技報，vol. 113, no. 205, NS2013-77, pp. 27-27, 2013年9月.
講演	福嶋正機、長谷川輝之、長谷川亨、中尾彰宏、” ネットワーク仮想化環境における最小開示ルーティング方式の提案”，電子情報通信学会ネットワーク仮想化研究会、北海道大学、2011年7月.
講演	福嶋正機、長谷川輝之、長谷川亨、中尾彰宏、” ネットワーク仮想化環境における最小開示ルーティング方式の提案”，電子情報通信学会技術研究報告. NS（ネットワークシステム） 111(8), 1-6, 2011-04-14.
講演	M. Fukushima, T. Hasegawa, and T. Suda, "A new secure computing architecture based on anonymity in a network and its quantitative analysis", NSF FIND PI meeting, April, 2009.
講演	福嶋正機、中村元、” 異種移動体システム間におけるシームレスインターワーク環境のモデル化”，電子情報通信学会 2004年ソサイエティ大会、2004年9月。
講演	福嶋正機、中村元、野本真一、” 移動体異種システム間インターワーク環境でのモビリティの影響に関する検討”，電子情報通信学会 2004年総合大会、東京工業大学 大岡山キャンパス、2004年3月.
講演	福嶋正機、中村元、野本真一、” Modeling of mobile environments with heterogeneous system-interworking”，日本オペレーションズ・リサーチ学会 待ち行列研究部会 2003年度（第22回）シンポジウム、ひこねステーションホテル、2004年1月.
講演	福嶋正機、中村元、野本真一、” 異種システム間インターワークを考慮したモバイル環境のモデル化”，電子情報通信学会技術研究報告. IN, 情報ネットワーク 103(421), 59-64, 2003-11-07.

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	福嶋正機、中村元、野本真一、” 移動体異種システム間インターワーキング環境性能評価モデルに関する検討”，電子情報通信学会 2003 年ソサイエティ大会、2003 年 9 月。
講演	山本周、福嶋正機、中尾彰宏、“ネットワーク仮想化基盤サービス設計ツール“，電子情報通信学会 ネットワーク仮想化研究会、2012 年 11 月。
講演	長谷川亨・福嶋正機・北辻佳憲・岡本修一・中尾彰宏、” サービス合成可能なネットワークプラットフォームの提案”、信学技報, vol. 112, no. 230, IN2012-75, pp. 7-12, 2012 年 10 月。
講演	杉山浩平、福嶋正機、長谷川輝之、” 安全かつ追跡可能なオンライン画像共有方式の提案”，信学技報 IA, インターネットアーキテクチャ 111(81), 41-46, 2011-06-09。
講演	杉山浩平・福嶋正機・長谷川輝之、” 集団における問題の通報を促進する匿名通信方式とゲーム理論を用いた評価”、信学技報, vol. 110, no. 79, ICSS2010-5, pp. 25-30, 2010 年 6 月。
講演	杉山浩平、福嶋正機、長谷川輝之、” グループ間の早期警報を実現する匿名通信方式の検討”，電子情報通信学会総合大会講演論文集 2010 年_通信(2), 34, 2010-03-02。
講演	福嶋正機、長谷川輝之、長谷川亨、須田達也、” ネットワークの匿名性を利用して安全に計算を行うアーキテクチャの提案”，新世代ネットワークワークショップ 2009。
講演	岸洋司、福嶋正機、中村元、” 無線アクセス環境における加入者側トラヒック制御法に関する一検討”，信学技報. RCS, 無線通信システム 106(478), 61-64, 2007-01-17。
講演	福嶋正機・岸洋司・中村元、” 適応型レート制御を用いた加入者側トラヒック制御方式の提案”，信学技報, vol. 106, no. 420, IN2006-124, pp. 61-65, 2006 年 12 月。
特許	T. Kitahara, M. Fukushima, Y. Kishi, H. Nakamura, “Traffic control system, traffic control method, communication device and computer program”, US Patent 7974203 B2.
特許	H. Nakamura, M. Fukushima, Y. Kishi, H. Koto, “Apparatus, method and computer program for traffic control”, US Patent 7944838 B2.
特許	福嶋正機、小頭秀行、岸洋司、中村元、” トークンバケットによるトラヒック制御装置、方法及びプログラム”，特許登録番号 4577230。
特許	中村元、福嶋正機、岸洋司、” トークンバケットによるトラヒック制御装置、方法及びプログラム”、特許登録番号 4577220。
	その他 39 件（講演 29 件、特許 10 件）