

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00118

研究課題名(和文) IPv6時代におけるネットワーク状態評価手法に関する研究

研究課題名(英文) Study of evaluation method for network condition in the era of IPv6

研究代表者

北口 善明 (Kitaguchi, Yoshiaki)

東京工業大学・学術国際情報センター・准教授

研究者番号：30537642

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ネットワーク運用において、「つながらない」状況の問題点を突き止める場合には、ユーザ側からのネットワーク観測が有効であるが、ユーザからは得てして「つながらない」という漠然とした状況しか得られない。そこで、ネットワーク障害点を的確に検出するために、ユーザ側からの観測を元に状態を評価し、ネットワーク運用者が迅速に問題点を把握できる手法を提案する。本研究において、提案手法を複数のクライアントOSに実装し、実環境において有効性を評価した。この検証実験により、無線ネットワークにおける品質の影響が大きいことが示唆され、ユーザ環境からの無線品質評価と組み合わせることで提案手法を実現できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In a network-troubleshooting situation, an end user tend to tell highly unclear reports like as 'just can not connect'. In most cases, it's hard to measure from a client side to clarify the detail of the network trouble. We proposed a mechanism for measuring network condition from client-side and gathering results to grasp the detail of the network trouble. We classify elements of a network trouble by layer, and thereby define a description of network connectivity.

In this study, we implemented the proposed method on multiple client OS, and we evaluated its effectiveness in real network environment. This experiment suggested that the quality in the wireless network accounted for a large proportion of the total impact. Therefore, we confirmed that we can realize our proposed method by combining with wireless quality evaluation in user environment.

研究分野：ネットワーク運用

キーワード：IPv6 ネットワーク計測 デュアルスタック ネットワーク接続性 ネットワーク運用 可視化

### 1. 研究開始当初の背景

ネットワーク運用において、ユーザから「つながらない」というクレームを受ける場合がある。「つながらない」という現象の原因としては、提供されるネットワークにおける物理的な障害の他に、エンドユーザの端末に付与されるアドレスの問題や DNS における名前解決の不具合など、様々な要因が考えられる。このような「つながらない」状況の問題点を突き止める場合には、ユーザ側からのネットワーク観測が有効であるが、ユーザからは得てして「つながらない」という漠然とした状況しか得られないものである。

さらに、今後利用が加速すると予想される IPv6 を利用したデュアルスタックネットワークでは、IPv4 と IPv6 それぞれの挙動を把握する必要があり、問題発生時の障害点の把握が一層難しくなることが予想されている。特に、端末 OS 上においてドメイン名と IP アドレスの変換を行う DNS レゾルバの実装に関しては端末 OS 毎に異なる場合があることが示されている。

これらの課題を受け、我々はユーザが利用している実環境からの状態観測情報をネットワーク運用者に的確に伝える手法の確立が必要と考え本研究に着手した。

### 2. 研究の目的

本研究では、ユーザ視点によるネットワーク状態評価手法の確立を目的としている。

#### (1) 階層的ネットワーク計測手法の定義

ユーザの利用環境におけるネットワーク状態を評価する手法を、アクセス回線の種別や利用するインターネットプロトコルといったネットワークの運用形態毎に定義する。そのために、ネットワーク運用モデルを整理し、正確なネットワーク状態を把握するため、ネットワーク計測を実施する計測階層を定義し、それぞれの階層で発生しうる障害を整理し体系化する。この目的のために、評価対象とする IPv4/IPv6 デュアルスタック環境の整理と、各端末 OS における実装状況を調査する。

#### (2) ネットワーク状態の計測手法の評価

定義した階層的ネットワーク計測手法の有用性を評価し、的確なネットワーク状態把握が行える手法を確立する。このために、提案手法を実証実験により有効性を評価する。評価にあたっては、ユーザ環境で利用される代表的な端末 OS を対象とし、提案手法にてネットワーク状態評価を行うアプリケーションを開発する。また、ユーザが利用しているネットワーク環境の状態を容易に理解できるように、ネットワーク状態の定量的な可視化を実現し、ネットワーク運用に貢献することを目的とする。

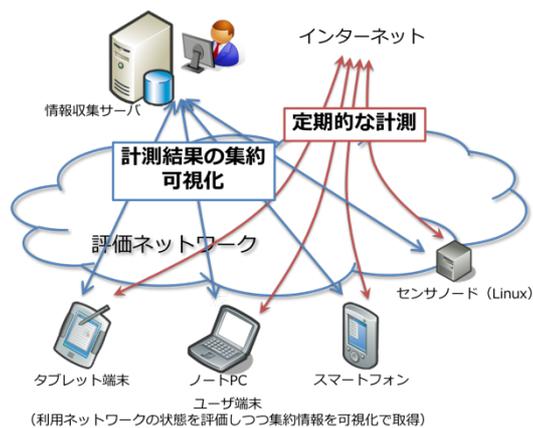


図1 様々な端末による提案手法の評価環境

### 3. 研究の方法

本研究の実施にあたり、図1に示す評価環境を構築し、提案手法の有効性を検証する。

#### (1) IPv4/IPv6 ネットワーク運用モデル

IPv4/IPv6 デュアルスタック環境におけるネットワーク運用モデルを整理し、本研究におけるターゲットを明確にする。

#### (2) ネットワーク接続性記述の定義

ネットワーク状態を正確に把握するため、TCP/IP 階層モデルを参考にしたネットワーク接続性記述を定義し、ネットワーク状態の正確な把握を実現する。そのため、ネットワーク計測に階層の概念を導入し、計測階層の定義を行うこととし、これまでのネットワーク運用で培ったネットワーク障害事例を活用し、また、有識者からの知見を取り入れつつ進める。ネットワークの計測階層の定義と併せて、評価結果を的確にネットワーク運用者に提示可能な記述フォーマットを、標準的な表記形式 (YAML や JSON など) を用いて定義する。

#### (3) ネットワーク状態計測手法の評価

実証実験により有効性の評価を実施する。利用するクライアント端末は、多くのユーザに利用してもらうため、Windows 端末、Mac 端末、Linux 端末、Android 端末、iOS 端末および Chrome OS 端末を想定し、それぞれで利用できるアプリケーションを開発する。特に Linux 端末には小型ボードコンピュータである Raspberry Pi を利用し、定期的な計測評価を行うセンサノードとして用意する。実ネットワークにおける評価は、定期的な運用を行うキャンパスネットワークと一時的な運用となるイベントネットワークを想定しており、複数のクライアント端末を利用した評価を行う。

#### (4) 無線ネットワークにおける状態評価

ネットワーク状態計測手法の評価実験により、クライアント環境において無線ネットワークの環境を評価することが困難であることが健

在化した。そこで、クライアント端末において無線ネットワーク状態を評価する手法についても平行して取り組み、提案手法に組み込むことを検討する。

(5) クライアント OS における IPv6 実装調査多くのユーザ環境でのネットワーク状態評価を実現するために、提案手法のアプリケーションを多くのクライアント OS にて実装する必要があるが、IPv6 実装の差異が指摘されている。提案手法の実装を広く展開するにあたり、IPv6 実装の差異を明確にし、アプリケーション実装に反映する。

#### 4. 研究成果

以下に、先に挙げた研究の方法に沿って、研究成果をまとめて報告する。

##### (1) IPv4/IPv6 ネットワーク運用モデル

IPv6 では、クライアント端末がネットワークに接続した際に IP アドレスを自動設定する手法が IPv4 と異なり二種類存在する。また、IPv6 を導入する際に用いられる一般的なデュアルスタックでは、IPv4 と IPv6 双方のネットワーク運用が必要となり、ネットワーク障害が発生した際の問題切り分けが複雑になることや[1]、ネットワーク運用に際しても双方のプロトコル監視が必要となるため、運用コストやセキュリティリスクの増加も課題となる。そのため、IPv6 オンリーネットワークの利用も現実的なものとなっている。

以上のことから、IPv4/IPv6 通信環境を提供するネットワーク形態を整理し、表 1 にまとめた。IPv4 と IPv6 とをそれぞれ提供する構成と、IPv4 をトランスレーションで提供する構成に大別できる。IPv6 のアドレス設定に関しては、RA (Router Advertisement)における冗長なフラグ構成を排除し、IPv6 アドレスやネットワーク情報を RA もしくは DHCPv6 のどちらかで提供する形態のみとしている。

表 1 IPv4/IPv6 ネットワーク運用モデル

Type	IPv4	IPv6		
		RA flag, opt	Address	DNS
0	DHCP	A	RA	IPv4
1		A, RDNSS	RA	RA
2		A, O	RA	DHCPv6
3		M	DHCPv6	DHCPv6
4	DNS64/ NAT64	A, RDNSS	RA	RA
5		A, O	RA	DHCPv6
6		M	DHCPv6	DHCPv6

##### (2) ネットワーク接続性記述の定義

我々が提案する、ユーザ視点によるネットワーク状態計測手法では、計測階層を定義した階層的なネットワーク計測手法を用いる。計測階層は、ネットワーク運用のモデル化に必

要な概念として考えており、ネットワーク状態を階層的に表現し、それぞれのレイヤにて発生しうる障害を体系的に表現するために用いる。インターネットは OSI 参照モデルと同様に TCP/IP 階層モデル (4 層) により通信プロトコルが整理されているため、このモデルに沿う形で以下のように整理を進め定義した。

##### 1. データリンク層 (datalink)

TCP/IP 階層モデルにおけるリンク/ネットワークインタフェースと同じ層で、隣接機器との接続性を確認するための計測層である。ネットワークインタフェースの down/up により、リンクアップできるまでを確認する。無線ネットワークにおいては、Association が確立されるまでの計測となる。計測と合わせて、リンクアップにおける接続パラメータの収集を行う。具体的には以下の項目となる。

- 共通項目:  
MAC アドレス, インタフェース MTU
- 有線ネットワーク:  
メディアタイプ 等
- 無線ネットワーク:  
サービスセット識別子 (SSID), チャンネル, 受信信号強度 (RSSI), ノイズ信号強度 等

現時点では、無線ネットワークは無線 LAN に限定しているが、スマートフォンなどのデバイスへの展開を考慮すると、3G/LTE での評価項目を検討する必要があると考えている。

##### 2. インタフェース設定層 (interface)

TCP/IP 階層モデルにおけるインターネット層のうち、IP アドレス設定を確認する層である。IPv4 の場合は DHCP による自動アドレス設定の確認、IPv6 の場合は RA による SLAAC もしくは DHCPv6 による自動アドレス設定の確認を行う。IPv6 の自動アドレス設定に関しては、SLAAC のみ、SLAAC+ステートレス DHCPv6、SLAAC+ステートフル DHCPv6 など様々なパターンが存在するため、評価対象のネットワークによる運用モデルにより評価項目が大きく異なる可能性がある。また、RA に設定されるフラグによる挙動が OS 毎に異なることが指摘されており、仕様上の整理が進められている。インタフェースに設定された情報として以下の項目を収集する。

- IPv4 情報:  
IPv4 設定情報, IPv4 アドレス, ネットマスク, IPv4 デフォルトルータ, IPv4 ネームサーバ 等
- IPv6 情報:  
IPv6 設定情報, IPv6 リンクローカルアドレス, RA プレフィックス情報, RA フラグ情報 (プレフィックス情報のフラグを含む), IPv6 アドレス, プレフィックス長, IPv6 デフォルトルータ, IPv6 ネームサーバ 等

### 3. ローカルネットワーク層 (localnet)

TCP/IP 階層モデルにおけるインターネット層のうち、同一セグメント (ローカルネットワーク) における IP の到達性を確認する層である。ローカルネットワークにおけるサービス発見として mDNS (Bonjour, Avahi) や LLMNR (Windows) を用いたサービス確認もこの層になる。到達性の確認対象はデフォルトルートとネームサーバとし、通信遅延時間 (RTT) の計測を合わせて実施し収集する。

### 4. グローバルネットワーク層 (globalnet)

TCP/IP 階層モデルにおけるインターネット層のうち、組織外の外部サーバへの IP 的な到達性を確認する層である。到達性の確認 (ping による RTT と traceroute によるパス計測) と合わせて、パス MTU を計測する。確認する対象のサーバとしては、本計測用に準備するサーバの他に、名前解決層で用いる Google パブリック DNS サーバ等を用い、それぞれのサーバ毎に到達性確認を実施する。

### 5. 名前解決層 (dns)

TCP/IP 階層モデルにおけるアプリケーション層のうち、DNS による名前解決の確認を行う層がこの層である。ドメイン名から IP アドレスを取得する名前解決は、アプリケーションを利用する際に必須となる機能であるため、独立した計測レイヤとしている。名前解決はデュアルスタックになると IPv4 と IPv6 双方での確認が必要であり、また、OS が提供する resolver API 毎に挙動が異なることが想定される。そのため、以下の調査を DHCP/DHCPv6 等で得られたネームサーバと Google パブリック DNS サーバに対して実施する。

- OS の resolver API を用いた名前解決
- レコードおよびトランスポートを指定した名前解決

上記それぞれにおいて A レコードのみ、AAAA レコードのみおよび双方を持つサーバドメイン名の名前解決を実施する。NAT64/DNS64 によるトランスレータが動作している環境の評価もこの層で行う。

### 6. ウェブアプリケーション層 (web)

TCP/IP 階層モデルにおけるアプリケーション層に相当する機能を確認する層で、ウェブアプリケーション (HTTP) に特化して評価を行う。この層では、組織外の外部サーバに対して HTTP での通信が可能か確認する。この他に確認する項目として以下を想定する。

- HTTP 通信における通信速度
- Happy Eyeball による閲覧確認 DF ビットが有効なウェブサーバへの通信確認 (IPv4)
- ISP における通信最適化処理の影響確認

以上ように定義した計測階層に基づき、提案手法による計測アプリケーションを実装した。



図2 情報収集サーバにおける可視化画面例

### (3) ネットワーク状態計測手法の評価

定義した計測階層を用いたネットワーク状態手法を用いたアプリケーションを複数の OS に実装し、実環境における評価実験を行った。実装したアプリケーションは Windows 版、macOS 版および Linux 版で、シェルスクリプト (Windows 版は PowerShell) による実装を github にて公開している。

<https://github.com/SINDAN/sindan-client>

また、計測結果を収集する情報収集サーバを構築し、計測結果を DB に蓄えつつ、対象ネットワーク毎に可視化するシステムとしている。図2は、SSIDにより区別した対象ネットワークの計測結果を時系列に可視化した画面例である。我々が定義した計測階層毎に状態を表示することで、どの階層においていつ障害が発生していたかを把握可能にしている。こちらも github にて公開している。

<https://github.com/SINDAN/sindan-visualization>

これらの実装を利用し、イベントネットワークにおける評価実験や、キャンパスネットワークにおける定常的な評価実験を実施した。定常的な評価実験には Raspberry Pi をセンサデバイスとして活用し、定常的なネットワーク状態計測を実現している。

### (4) 無線ネットワークにおける状態評価

ネットワーク状態計測手法の評価実験により、ネットワーク状態の品質低下の大きな要因として無線ネットワークの品質が考えられ、提案手法における計測に取り入れる必要性に迫られた。そこで、文献[2]で提案されている無線ネットワークの制御フレームに含まれる再送ビットを活用した無線区間の品質評価手法の適応を進めた。利用する制御フレームには、通信データが一切含まれない NFDf (Null Function Data Frame) を利用し、通信の覗き見に配慮している。

センサデバイスとして利用する Raspberry Pi には、NFDf 再送率を評価するために、通信に利用する無線インタフェースとは別に、無線 LAN をモニタするための無線インタフェースを用意した。すなわち、USB 無線 LAN アダプタ

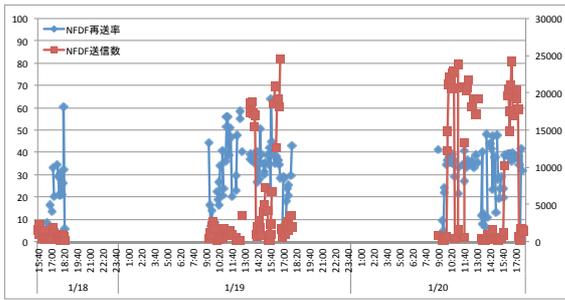


図 3 NFDG 再送率の評価結果

を 2 つ利用する構成となる。モニタモードの無線インタフェースにて、通信で利用しているチャンネルと同じチャンネルの packets をキャプチャし、文献[2]と同様に Type フィールドにて NFDG を判定し、Flag フィールド内の Retry 値にて再送フレームの判断を行う。計測期間は提案するネットワーク状態計測手法の計測頻度としている 5 分に合わせ、計測期間毎にキャプチャした NFDG 送信数と再送フレーム数を用いて算出する。

無線ネットワークの状態評価手法の評価実験として実際のイベントネットワークにて運用して評価を行った。対象としたイベントネットワークの一つは JANOG39 ミーティングで、このミーティングにはのべ人数で 700 名を超える参加者があり、多数の AP により構成されたイベントネットワークが運用された。提供されたネットワークはデュアルスタックで、同じ SSID にて 2.4GHz と 5GHz の両周波数帯で構成されていた。図 3 にセンサデバイスで評価した NFDG 再送率(左軸)と NFDG 送信数(右軸)の推移を示す。図 3 にて評価データが存在していない区間は、先に述べた NFDG 再送率評価に十分な数のデータを得ることができなかった計測期間である場合、もしくは、センサデバイスがハングアップして再起動されるまで計測ができなかった場合である。今回の評価実験では、数回の再起動があった程度で、初期の Raspberry Pi でも三日間程度の連続運用が可能であることを確認した。

この評価実験により、センサデバイスを用いたネットワーク状態計測と無線区間の状態評価のための packets キャプチャを両立させることが可能であることを確認し、NFDG 再送率による無線区間のネットワーク状態が本手法で可能であることを確認した。ただし、無線ネットワークの品質低下による通信不全状態が発生しなかったため、計測した評価値の有用性を確認できておらず、今後の課題としている。また、今回は比較的多くの無線端末が会場に存在しており、十分な NFDG の送信数を確保することが可能であったが、十分ではない場合の評価手法に関しても検討する必要があると考えている。

(5) クライアント OS における IPv6 実装調査  
IPv6 における自動アドレス設定は複雑な仕様であることに加え、少しずつ追加・改良されてきたこともあり、すべてのクライアント OS において仕様が均質に実装されていない。そのため、RA に設定されるフラグによる挙動がクライアント OS 毎に異なることが指摘された。2017 年 11 月時点における主要なクライアント OS の IPv6 自動アドレス設定の挙動と、IPv6 オンリーネットワークにおける動作検証を行った。検証結果の一部を表 2 に示す。

検証実験の結果、IPv6 の自動アドレス設定や DNS クエリの実装において細かな差異が確認できた。Windows OS においては、他の OS と異なり DHCPv6 クライアントが常に有効となっているため、IPv6 アドレス設定時におけるロジックとして注意が必要となる。Android OS では逆に DHCPv6 実装がなされておらず、古いバージョン(4.0 系)では IPv6 オンリー環境での動作が行えないことを確認した。その他の OS (macOS, iOS, Linux 等) では大きな差異はなく、提案するネットワーク状態計測手法を適用することに対する大きな問題は認められなかった。

表 2 クライアント OS 毎のアドレス設定実装

OS	IID	RA DNS	DHCPv6	v6only
Windows 7	MS 独自	○	○	○
Windows 8.1	MS 独自	○	○	○
Windows 10	MS 独自	○	○	○
OS X 10.10	EUI64	○	○	○
OS X 10.11	EUI64	○	○	○
macOS 10.12	Opaque	○	○	○
macOS 10.13	Opaque	○	○	○
iOS 9	Opaque	○	○	○
iOS 10	Opaque	○	○	○
iOS 11	Opaque	○	○	○
Android 4	EUI64	×	×	×
Android 5	EUI64	○	×	○
Android 6	EUI64	○	×	○
Android 7	EUI64	○	×	○
Android 8	EUI64	○	×	○
Chrome OS	EUI64	○	×	○
CentOS 7	Opaque	○	○	○
Fedora 26	Opaque	○	○	○
Ubuntu 16	Opaque	○	○	○
Raspbian	Opaque	○	○	○

EUI64: Modified EUI-64 IID (RFC 4291)

Opaque: Semantically Opaque IID (RFC 7217)

この検証実験により、IPv6 対応時にクライアント OS に設定される IPv6 アドレスは IPv4 のみの時と大きく異なることが明らかになった。このことを受け、ネットワーク管理における課題を運用面と実装面から整理して考察した。運用面では、一様にステータフルでのアドレス管理ができない状況であることから、セキュリティインシデント対応時のトレーサビリティ

ティに関して課題があり、IPv4とは異なる管理手法の導入が必要と考えられる。実装面では、デュアルスタック運用で機器のメモリ資源が切迫することが予想でき、機器導入時において考慮が必要であることを指摘した。

#### (6) まとめ

本研究では、IPv6時代に即したユーザ視点でのネットワーク状態計測手法を提案した。提案手法はネットワーク計測を階層的に実施することで、IPv4/IPv6デュアルスタック環境などの複雑なネットワーク環境においてもネットワーク状態をユーザ側からの確にネットワーク運用者に伝えることを可能にする。提案手法を複数のクライアントOSへの実装し評価実験を行うことで有用性を示すことができている。また、IPv6実装の差異によるネットワーク運用の負荷増加やネットワーク機器への課題も明らかにした。

今後は、本研究の成果を継続的なネットワーク運用に適用し、各階層における計測項目の相関分析などを実施し、ネットワーク障害予兆評価などへの応用を検討する予定である。

#### [引用文献]

- [1] IPv6普及・高度化推進協議会 IPv4/IPv6共存WG IPv6導入に起因する問題検討SWG: IPv6導入時に注意すべき課題, [http://www.v6pc.jp/jp/pdf/20111124\\_v6fix.pdf](http://www.v6pc.jp/jp/pdf/20111124_v6fix.pdf) (2001). (参照 2017-12-27)
- [2] 新谷隆文, 前田香織: 無線LANの通信品質推定におけるMAC層情報の有効性調査, 情報処理学会論文誌, Vol. 58, No. 3, pp. 664-671, March 2017.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

##### [雑誌論文] (計5件)

- ① 北口 善明, 石原 知洋, 高嶋 健人: IPv6時代におけるネットワーク状態評価手法の提案, 情報処理学会研究報告, Vol. 2015-IOT-31, No. 15, pp. 1 - 6, September 2015.
- ② 新谷 隆文, 前田 香織, 北口 善明: MACフレーム情報を用いた無線LANの通信品質推定とネットワーク監視への応用, 情報処理学会 インターネットと運用技術シンポジウム (IOTS) 2016 論文集, 査読有, pp. 26-32, December 2016.
- ③ 北口 善明, 近堂 徹, 鈴田 伊知郎, 小林 貴之, 前野 譲二: クライアントOSのIPv6実装検証とネットワーク運用における課題, 情報処理学会研究報告, Vol. 2017-IOT-36, No. 13, pp. 1-8, March 2017.

- ④ 近堂 徹, 北口 善明, 鈴田 伊知郎, 小林 貴之, 前野 譲二: IPv6ネットワークにおける利用者認証における一考察, 情報処理学会研究報告, Vol. 2017-IOT-38, No. 9, pp. 1-8, June 2017.
- ⑤ 北口 善明, 石原 知洋, 高嶋 健人: センサデバイスを利用したネットワーク状態計測手法の評価, 情報処理学会 マルチメディア・分散・協調とモバイル (DICOMO) シンポジウム 2017 論文集, pp. 1348-1353, June 2017.

##### [学会発表] (計2件)

- ① 北口 善明: IPv6時代におけるネットワーク状態評価手法に関する研究, 第37回インターネット技術第163委員会研究会 RICC分科会, May 2015.
- ② 北口 善明: クライアントOSのIPv6実装調査, 第11回地域間インタークラウドワークショップ, March 2017.

##### [その他]

ホームページ等

<https://sindan-net.com/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

北口 善明 (KITAGUCHI YOSHIAKI)  
東京工業大学・学術国際情報センター・准教授  
研究者番号: 30537642

##### (2) 研究分担者

石原 知洋 (ISHIHARA TOMOHIRO)  
東京大学・大学院総合文化研究科・助教  
研究者番号: 60588242

##### (3) 研究協力者

高嶋 健人 (TAKASHIMA TAKETO)