

地域 IX による安定した地域内通信環境の実現と評価

中川 郁夫[†] 米田 政明^{††} 安宅 彰隆^{†††}

近年、国内の各地において、地域内の通信を効率的に実現することを目的として地域 IX を構築するケースが増えている。地域 IX は通信の効率化をはかるだけではなく、地域内通信の安定性の向上や耐障害性の向上などにも効果が期待されている。富山地域においても 1998 年に地域内に IX を実験的に構築し、地域内のプロバイダや大学、研究機関など計 10 以上の組織間で相互接続を行ってきた。著者らは富山地域 IX を中心として経路情報や通信状態などの観測を行い、地域ユーザ間の通信経路の安定性に関する研究を行った。本論文では通信経路の安定性に関する評価関数を定義し、富山地域 IX で得られた観測結果をもとに、地域 IX を介さずに行う通信と比較して地域 IX 経由の通信経路が非常に安定していることを示す。また、不安定な経路では経路の変化にともなって深刻な問題が発生することがある。本論文では地域ユーザ間の通信が地域外を経由する場合に経路の変化にともなう通信障害や通信品質の変化が発生しうることを実例を用いて述べ、地域 IX の実現によりこれらの問題を回避できたことを示す。

Implementation and Evaluation of Stable Regional Communication Infrastructure Using Regional IX

IKUO NAKAGAWA,[†] MASA AKI YONEDA^{††} and SHORYU ATAKA^{†††}

Recently, in several regional areas, regional people implemented regional IXes for achieving efficient regional data communication. Implementing regional IXes has benefits of achieving efficiency, stability, and redundancy. In the Toyama area, we also experimentally implemented a regional IX in 1998, and we have been operating interconnections between more than 10 sites, including regional providers, universities, research institutes, and so on. We have been doing research about stability of communication path around the Toyama regional IX. In this paper, we define a function for evaluating stability of communication path between regional users, and we denote that a communication path through regional IX is more stable than that of exterior region. In addition, unstable communication paths may cause serious problem, for example, communication trouble or communication quality change. We describe that these problems could happen for communications between regional users, with true example. We also refer to the fact that Toyama regional IX avoided these troubles and it provides stable regional communication infrastructure.

1. はじめに

近年、国内の各地において地域 IX (Internet eXchange)^{1),2)} を構築するケースが増えている。地域 IX は通信遅延の縮小や安定性の向上などの通信品質の向上を実現するだけでなく、地域内通信の耐障害性の向上、実験・イベント的な地域内通信の利用など多くの効果が期待されている^{3)~6)}。また、地域 IX の構築・運用は社会的な面から人的コミュニティの確立や産

業の誘致などに効果があるとされている^{7),8)}。

富山地域では 1998 年に「富山地域 IX 研究会」を設立し、地域内の高速で安定した通信路の実現に関する研究を行ってきた。同研究会では実験的に地域 IX を構築し、地域プロバイダや大学、研究機関など計 10 以上の組織間での相互接続を行っている。また、プロバイダ間の経路制御を効率的に実現する独自ルートサーバの開発⁹⁾ や地域型アプリケーション実験¹⁰⁾ など地域の新しい通信モデルに関する研究も行っている。

地域 IX による通信品質の向上に関して八代らは地域内の通信に関する品質について定量的に調査を行い^{11),12)} 伝搬遅延やジッタ、パケット損失率などの面から地域 IX が有効に機能していることを具体的な数値で示している。これまで、地域 IX は安定した効率的な地域内通信を実現するとされながらも、国内の各

[†] インテック・ウェブ・アンド・ゲノム・インフォマティクス株式会社

INTEC Web and Genome Informatics Corporation

^{††} 富山大学

Toyama University

^{†††} 富山県立大学

Prefectural University of Toyama

地域 IX の研究活動においては安定性や効率性について定量的な評価についての報告はされていないことが問題とされてきた．これに対し八代らは、地域 IX を介した通信の品質に関して定量的な実験を行い、初めて数値を用いて地域 IX の有効性を示した．この意味で同研究は重要な意味を持っているといえる．

本論文では通信経路の安定性の定量的な評価を行うことにより地域 IX の有効性を示す．インターネットではプロバイダ間の相互接続トポロジが複雑な場合に通信経路が不安定になることがある¹³⁾．地域ユーザ間の通信についても、通信経路が地域外を経由する場合には同様の問題があることが予想される．そのため、地域外を経由する通信経路と地域 IX を経由する通信経路についてその安定性を評価・比較することは、地域 IX の有効性を示すうえで重要な意味を持つ．

著者らは富山地域 IX を中心として地域ユーザ間の通信経路に関する経路情報の変化や通信状態について 1 年以上にわたって計測を行った．インターネットでは通信経路は経路情報で決定されるため、通信経路の変化は経路情報を観測することにより確認できる．本論文では経路情報の更新頻度を用いて通信経路の安定性を表す評価関数を定義し、地域外を経由する通信経路および地域 IX 経由の通信経路の安定性を数値化する．また、その結果、地域外を経由する通信経路に比較して地域 IX 経由の通信経路が非常に安定していることを示す．

本論文では不安定な通信経路の問題についても言及する．通信経路の変化はさまざまな問題をひき起こす可能性がある．著者らは地域ユーザ間の通信が地域外を経由する場合に次のような問題があることを実例を用いて述べる．

- 経路情報の伝搬遅延にともなう通信障害
- 通信経路の変化にともなう通信品質の変化

さらに、富山地域 IX ではこれらの問題を回避し地域内に安定した通信路を実現していることを示す．

本論文では、2 章で全国における地域 IX の動向、富山地域 IX 研究会における地域 IX の活動、および富山地域 IX の基本的なアーキテクチャについて述べる．

3 章では富山地域 IX を中心に構築した実験・計測環境、および地域ユーザ間の通信経路の評価に関する結果について述べる．ここでは通信経路の安定性に関する評価関数を定義し、経路情報の更新データをもとに地域ユーザ間の通信経路の安定性を数値化する．

4 章では本研究で観測した実例をもとに、経路の安定性に依存する問題について述べる．経路情報の伝搬遅延にともなう通信障害と通信経路の変化による通信

品質の変化について言及し、富山地域 IX でこれらの問題を回避できたことを示す．

2. 富山地域における IX の実現

富山地域では、1998 年に富山地域 IX 研究会を設置し、地域内の効率的な通信環境の実現に向けた実験・研究活動を実施してきた．本章では同研究会設立の背景として全国各地における地域 IX 構築の動向について紹介し、富山地域 IX 研究会における活動内容、および富山地域における地域 IX の仕組みについて述べる．

2.1 国内における地域 IX の動向

国内におけるインターネットは東京一極集中型の構造を形成している．全国をサービス提供エリアとするほとんどの大手プロバイダは東京を拠点としており、海外への接続点も東京に設置する機会が多い．大手プロバイダの国内のネットワークトポロジも東京を中心に構成され、必然的にユーザトラフィックも東京に集まることになる．これらのプロバイダ間のトラフィック交換を実現するため、NSPIXP²¹⁴⁾ や JPIX¹⁵⁾ などが IX (Internet eXchange) として相互接続環境を提供しているが、これらの IX も東京などの特定の都市でのみ運用されている．

地域の視点からみた場合にもインターネットは東京依存の構造をしている．地域のプロバイダや大学などは各地域において大手プロバイダのアクセスポイントに接続するのが一般的とされる．しかし、大手プロバイダ間は東京でのみ接続されているため、地域ユーザ間の通信は接続するプロバイダが異なる場合には東京経由で行われることになる．

図 1 は、典型的な地域内のユーザ間通信の例を表している．図中で点線で囲まれた領域がある地域の地理的な範囲を示している．また National ISP および Regional ISP はそれぞれ全国をサービス範囲とする大手プロバイダ、および地域プロバイダを表している．

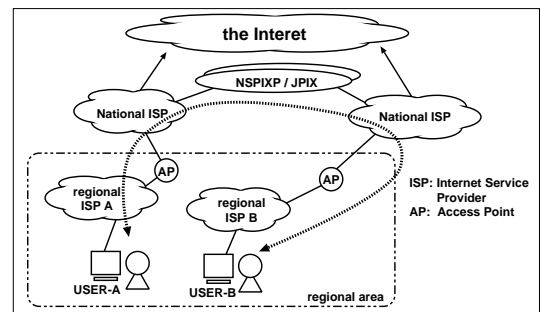


図 1 地域内の通信

Fig. 1 Communication in a region.

大手プロバイダは東京において NSPIXP や JPIX など他の大手プロバイダと相互接続をしていることが一般的である。AP は地域内に設置された大手プロバイダのアクセスポイントで、地域プロバイダは図に示されるように、いずれかの大手プロバイダの隣接アクセスポイントに接続する。USER-A および USER-B はそれぞれ地域内のユーザであるが、この例ではそれぞれが接続する地域プロバイダが異なっているため、結果的に東京を経由して通信が行われることになる。

地域内のインターネット環境を考えた場合、地域内の通信を行うための通信経路が東京などの地域外の都市を経由することはさまざまな問題を引き起こす。たとえば、本来なら地域内で終始するはずのトラフィックが他の地域を経由するために通信の無駄が発生すること、地理的に離れた場所を経由するため伝搬遅延や転送遅延が発生すること、地域外の障害や通信状態により地域内の通信に影響がでることなど通信品質に関する問題が大きいことが指摘されている^{3),12)}。また、通信路に関する決定権が地域内にないため特別な用途でのインターネット利用ができないこと、あるいは産業の地域外流出や人的コミュニティの喪失など社会的な問題についても指摘されている^{7),8)}。

このように地域内の通信が東京などを經由することにより発生する数多くの問題に対処するため、仙台¹⁶⁾、山梨¹⁷⁾、岡山¹⁸⁾ など、全国の各地では 1997 年頃から地域内でプロバイダや大学、民間企業などを相互に接続する試みが行われている。これらの相互接続の仕組みは地域 IX と呼ばれ、主として次のいずれかの手法により実現されている。

- (1) 地域内に閉じた相互接続環境
接続組織はインターネットへの接続性を別途確保し、地域 IX では地域内通信のみを行う。
- (2) 外部接続への出口の集約
インターネットへの接続を行うための接続点を物理的に 1 カ所に集約することにより、地域内の組織間の相互接続を実現する。

いずれの場合も、地域内の通信を地域内で実現することにより前述のような各種の問題を解決し、地域内通信における通信品質の向上や地域内アプリケーションの利用促進をはかっている。

2.2 富山地域 IX 研究会の設立

富山地域では大学、研究機関、通信事業者、地域プロバイダ、地元 CATV など計 20 組織以上が参加して 1998 年 5 月に「富山地域 IX 研究会¹⁹⁾」を設立した。同研究会は主として次の 2 つを研究テーマとして掲げ、研究・実験を実施してきた。

- (1) 効率的な地域内通信網確立のための相互接続実験と技術蓄積
- (2) 地域型アプリケーションの実証実験と可能性の検討

上記 (1) では、地域 IX を用いて地域内のプロバイダや大学、研究機関などの間に高速で安定した通信路を確保し、効率的なトラフィック交換を実現するための研究を実証的に行っている。特に、富山地域では独自のルートサーバ^{20),21)}を開発し、参加する組織が特別な運用を必要とすることなく各組織間での相互接続を実現する経路制御に関しての研究を行っている。

また (2) では、地域内の高速で安定した通信路を用いて、既存のインターネット環境では実現が難しかった広帯域アプリケーションやリアルタイムアプリケーションの研究を行っている²²⁾。富山地域 IX 研究会では地域内の高速な通信路を活用しコンテンツサーバを分散配置する研究・実験¹⁰⁾や地元 CATV 8 社の相互接続網を活用した広品質の映像伝送アプリケーションを実現する²³⁾など、新しい地域型アプリケーションの開発に取り組んでいる。

2.3 富山地域 IX における相互接続の仕組み

富山地域 IX 研究会では地域内のプロバイダ、大学、研究機関などの間に高速で安定した通信路を確保し、地域内での相互接続を実現している。富山地域における地域 IX は前述の地域内に閉じた相互接続環境を提供するモデルを採用している。すなわち、地域 IX に接続を行う組織はインターネットへの接続性は各組織で確保することを前提としており、地域 IX では地域内の経路情報のみを交換している。

図 2 は富山地域 IX のモデルを論理的に示したものである。富山地域 IX では、相互接続を行うためのイーサネットスイッチを準備し、地域 IX に参加する組織はそれぞれルータを持ち込んでスイッチに接続する。各組織から地域 IX に接続するための接続回線は原則として参加者の負担で準備するが、富山地域 IX では高速な地域内通信を実現するため、ほとんどの組

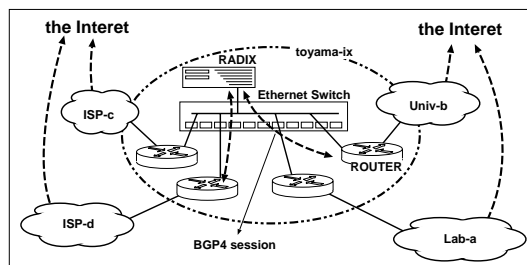


図 2 富山地域 IX のモデル

Fig. 2 Model of Toyama Regional IX.

織で 1.5 Mbps の専用線、もしくは ATM 専用線を用いて 10 Mbps 以上の帯域を確保するか、あるいは IX の拠点において LAN 接続を行っている。

地域 IX での経路情報の交換は BGP4²⁴⁾ を用いている。前述のとおり富山地域 IX では独自のルートサーバを導入し、地域 IX 全体での経路制御や運用の単純化を実現している。接続参加組織は最初に接続を行う際ルートサーバ RADIX との間で BGP4 による経路情報の交換を行うよう設定を行う。相互接続組織の追加、変更、あるいは経路情報の追加、削除などはすべてルートサーバ側で対応可能であるため、接続参加組織は最初の設定後は設定を変更する必要はない。なお、BGP4 での経路制御を行うため参加組織は AS (Autonomous System) 番号を持っていることが望まれるが、中小規模のプロバイダや企業、大学では AS 番号を取得していないケースも多いため、地域 IX 内で重複がないようにプライベート AS 番号も利用している。

3. 実験・観測環境と通信経路の安定性の評価

本章では実験・観測から得られた実験・観測結果をもとに地域ユーザ間の通信経路に関する安定性について述べる。ここでは、まず最初に地域ユーザの通信経路に関する変化とその影響を調べるために構築した富山地域 IX を中心とする実験・観測環境について紹介する。次に通信経路の安定性に関する評価関数を定義し、本研究で得られた観測結果をもとに地域ユーザ間の通信経路の安定性を数値化し、評価する。

3.1 実験・観測環境

本研究では地域ユーザの通信経路の変化とその影響に関する調査を行うため図 3 に示す環境を構築し、2000 年 4 月から 1 年以上の期間にわたって経路情報や通信状態に関する情報を収集記録した。図 3 において Site-a と記された点線で囲まれた小さい函型は著者らのネットワークを表している。点線で囲まれた大きな領域が富山地域を示しており、地域内には図のように地域内の大学 Univ-b やプロバイダ ISP-c、あるいは著者らのネットワーク Site-a などが存在する。TOYAMA-IX は富山地域 IX を表しており、Site-a、Univ-b、ISP-c などの地域内の組織が接続を行っている。前述のとおり富山地域 IX では接続参加組織は独自にインターネットへの接続性を確保するため、各組織は外部のプロバイダ (ISP) に接続を行っている。なお、ISP-d は地域内にアクセスポイントを持つプロバイダで Site-a は ISP-d に接続された部分的なネットワークを持つ。ISP-d は地域 IX には接続

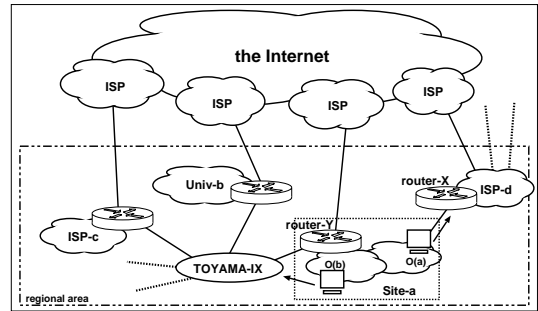


図 3 評価環境

Fig. 3 Environment for evaluation.

を行っていないため ISP-d と Univ-b、ISP-d と ISP-c の通信はいずれも地域外を経由する通信経路を介して行われる。

本環境では著者らのネットワーク Site-a に次の目的で 2 つの独立した観測点 O(a)、O(b) を設置した。

- O(a) – 地域外を経由する通信経路の実験・観測
- O(b) – 地域 IX 経由の通信経路の実験・観測

これらの観測点では地域 IX に接続される Univ-b、ISP-c などの地域ユーザに関する経路情報の変化、中継ルータのリスト、通信品質について情報を収集・記録している。経路情報の収集では O(a) は地域内にアクセスポイントを持つプロバイダ ISP-d の router-X と BGP4 のセッションを確立し地域外を経由する通信経路に関する経路情報を収集している。O(b) は同様に地域 IX に接続している router-Y から経路情報を得ている。中継ルータのリストの収集では各観測点で定期的に地域内の各組織の特定のホストに対して traceroute コマンドを実行することにより中継ルータのリストを調べ、記録している。また、通信品質の計測では、定期的に地域内の特定ホストに対して ICMP Echo パケットを送出し ICMP Echo Reply パケットの受信結果により RTT (Round Trip Time)、およびパケット損失率を調べている。RTT は十分な間隔において定期的に調べた値の中から最良値を選ぶことによりほぼ実効値に近い値が得られることが分かっており²⁵⁾、本研究でも同様の手法により、5 分間に 15 回計測した RTT の値から得られた最良値を RTT としている。

3.2 通信経路の安定性の評価

本研究では、地域外を経由する場合と地域 IX 経由の場合のそれぞれで通信経路が変化する頻度を調べることで地域ユーザ間の通信経路に関する安定性の評価を行った。本論文では特に通信経路の変化について着目しており、ここでは通信経路の安定性を「経路

が変化するまでの平均時間」で定義した。すなわち、ある経路 p についてその安定性 $s(p)$ は次のように表現できる。

$$s(p) = \frac{\text{観測時間}}{\text{経路の変化の回数}} \quad (1)$$

通信経路が変化する頻度は BGP4 を用いて収集を行っている経路情報の更新を観測することで計測した。インターネットにおける通信経路は経路情報で決まるため、経路情報の更新頻度はインターネットにおける通信経路の変化と密接な関係を持つ。特に、プロバイダ間では経路情報は BGP4 で交換されており、経路情報の更新は UPDATE メッセージとして伝搬される。UPDATE メッセージは経路情報に変更があった場合のみ広告されるため、地域ユーザのアドレスについて UPDATE メッセージを受け取った数を調べることにより通信経路の変化の頻度を調査することができる。なお、UPDATE メッセージには経路情報の更新 (update) と経路情報の喪失 (withdraw) の 2 種類があるが、ここでは更新・喪失の双方を別々に計測している。ただし、式 (1) を用いて安定性の評価を行う場合にはこれらの和を経路の変化の回数として扱う。

表 1 は地域ユーザに関連する経路情報について、2000/4/1 ~ 2001/4/30 の 396 日間に受け取った UPDATE メッセージの数を示している。a ~ m は富山地域 IX において交換されている経路情報のいずれかに対応する。また +, - はそれぞれ経路情報の更新、および喪失の数を表している。 $s(p)$ は式 (1) により計算される安定性を表しており、ここでは経路情報の更新の数、および喪失の数をを用いて次のように計算できる。

$$s(p) = 396 / (\text{更新の数} + \text{喪失の数}) \quad [\text{days}]$$

表 1 から、地域外を経由する通信経路に関するすべての経路情報で安定性を示す評価関数の値は 2 以下を示しており、経路が変化するまでの平均時間が 2 日間に満たないことが分かる。また、今回の観測では、評価関数の値の全体平均は 1.07 であった。このことは、ある 1 つの経路に着目した場合、ほぼ 1 日 1 回程度経路が変化していることを意味しており、非常に頻繁に通信経路が切り替わっていることが分かる。

これに対して地域 IX 内の経路情報の評価関数の値はすべての経路において非常に高い数値を示しており、地域外を経由する場合に比較して、経路が変化するまでの時間が長いことが確認できる。また、表 1 では地域 IX 経由の経路に関する評価関数の値の平均は 19.45 を示している。すなわち、ある 1 つの経路に着目した場合、経路が切り替わるまでの平均時間は地域外を経由する場合の $19.45/1.07 = 18.26$ 倍にもなることが

表 1 経路の安定性の評価 (2000/4 ~ 2001/4)

Table 1 Evaluation of routing stability (2000/4~2001/4).

path	地域外の経路			地域 IX 経由の経路		
	+	-	s(p)	+	-	s(p)
a	317	48	1.08	23	15	10.42
b	441	76	0.77	12	6	22.00
c	440	60	0.79	24	13	10.70
d	307	53	1.10	12	4	24.75
e	259	57	1.25	10	0	39.60
f	308	53	1.10	18	7	15.84
g	379	76	0.87	61	51	3.54
h	419	81	0.79	13	7	19.80
i	165	36	1.97	8	1	44.00
j	314	47	1.10	18	7	15.84
k	267	53	1.24	10	0	39.60
l	346	72	0.95	61	51	3.54
m	398	74	0.84	67	57	3.19
total	4360	786		337	219	
average			1.07			19.45

分かる。以上から、地域 IX を経由した通信経路は地域外を経由する場合に比較して経路の変化が非常に少ないことが分かる。すなわち、地域 IX による相互接続の実現は地域ユーザ間の通信経路の安定化に大きく寄与しているといえる。

4. 通信経路の変化にともなう問題

本章では、不安定な通信経路に関する問題について言及する。インターネットにおいて通信経路の変化は深刻な問題をともなうことがある。本研究では、地域ユーザ間の通信であっても、その通信が地域外を経由する場合に同様の問題がしばしば発生することを確認した。本章では、その具体的な例として次の 2 つについて実例を用いて紹介し、富山地域 IX では地域内の相互接続によりこれらの問題を回避したことを示す。

- 経路情報の伝搬遅延と通信障害
- 通信経路の変化にともなう通信品質の変化

なお、本章で扱う観測・調査結果には AS 番号や IP アドレスなどが含まれるが、これらの情報は非公開情報などを含んでいる可能性があるため必要に応じて伏せ字などを用いて表現する。

4.1 経路情報の伝搬遅延と通信障害

経路情報の更新には経路情報の伝搬遅延をともなうのが一般的である。特に、プロバイダ間の相互接続トポロジが複雑な場合には経路情報の変化が伝搬するための時間が長くなり、経路情報の収束に数分以上を要することがある²⁶⁾。特に不安定な通信経路では、経路情報の更新・喪失に際してこのような問題が発生する可能性が高くなるが、通信経路が地域外を経由する場合には同様の問題が発生することがある。本研究では

```

..... AS-a AS-x
16:03:59 AS-a AS-b AS-c AS-x
16:04:28 AS-a AS-d AS-c AS-x
16:04:55 AS-a AS-b AS-e AS-f AS-g AS-x
16:05:25 AS-a AS-b AS-h AS-e AS-f AS-g AS-x
16:05:53 (withdraw)
16:06:48 AS-a AS-x

```

図 4 経路情報の更新

Fig. 4 Updates of routing information.

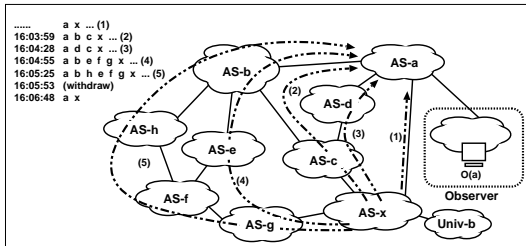


図 5 経路情報の収束の遅れ

Fig. 5 Delay in routing convergence.

地域ユーザの経路情報が変化する際に経路情報の収束が遅れ、それにともない通信障害が発生することがあることを確認した。以下では実例を用いて経路情報の収束の遅れとおよびそれにともない通信への影響について述べる。

図 4 は 2001 年 5 月 2 日に Univ-b に関する経路情報の更新を観測した結果を示している。図では、簡単のため Univ-b に関する経路情報のうち、UPDATE メッセージを受け取った時刻と更新情報に含まれる AS パス属性の情報だけを記述している。AS-x は学術系のネットワークであり Univ-b の経路情報を広告している。5/2 までは AS-x から広告されていた経路情報は直接 AS-a で受け取っていたが、16:03:59 から数分間の間に経路情報が頻繁に更新されたことが確認できる。この間、経路情報に含まれる AS パス情報は約 30 秒ごとに複雑に変化し、結果的に経路情報の更新を 4 回受け取ったのち、16:05:53 には経路情報が無効になった。図 5 は図 4 から得られた情報をもとに各プロバイダ間の接続状況を図示したものである。図 4 で示される記録は本図において (1)~(5) のような順で経路情報が変化したことを示している。

図 4, 5 のような現象は経路情報の更新や喪失に際して、経路情報の伝搬がルータ内の経路の再計算に間に合わずに起こるもので、プロバイダ間が複雑に相互接続されている場合にしばしば観測される²⁶⁾。今回の例では、地域内の大学 Univ-b への通信が地域外を経

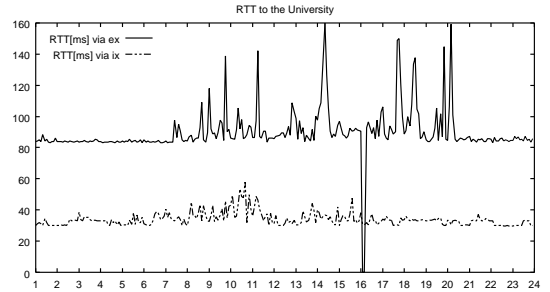


図 6 障害時の通信状態

Fig. 6 Communication during the trouble.

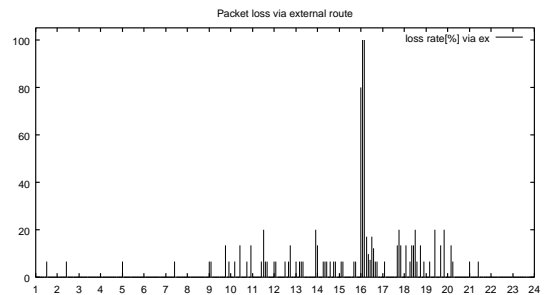


図 7 障害時のパケット損失率

Fig. 7 Packet loss rate during the trouble.

由する場合に、相互接続トポロジが複雑になり同様の現象が確認できたものと思われる。

本研究では、今回の事例について、経路情報の収束の遅れにともない実際の通信への影響を観測した。図 6, 図 7 は 5/2 の Univ-b に対する RTT およびパケット損失率の計測結果を示している。図 6 では O(a)-Univ-b 間で計測した地域外を経由する通信の RTT を実線で、O(b)-Univ-b 間で計測した地域 IX 経由の通信における RTT を点線で表している。また、図 7 は O(a)-Univ-b 間で計測された地域外を経由する通信でのパケットの損失率を表している。これらの図から前述の経路情報の更新が観測された時刻とほぼ同時刻に地域外を経由した通信で障害が発生していることが確認できる。

一方、図 6 の点線で示されるように、地域 IX を経由した場合は今回の事例における経路情報の異常発生時にも正常な通信を保持できている。すなわち、地域 IX により地域内での相互接続を行うことにより、地域外の障害時でも地域内経路は影響を安定した通信経路を確保していることが確認できた。一般的に、地域 IX による地域内組織の相互接続は単純なトポロジで構成され、経路情報の伝搬遅延や収束の遅れは発生しない。そのため地域 IX の実現により地域内の通信経路の安定性を向上させることが可能である。

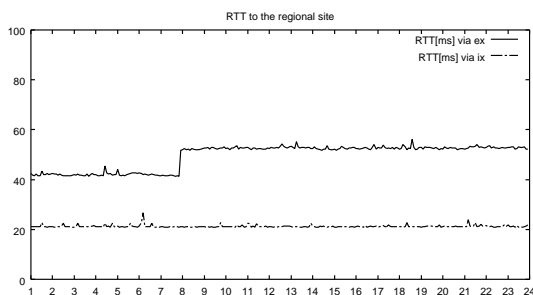


図 8 経路の変化による通信品質の変化

Fig. 8 Communication quality depends on route change.

4.2 通信経路の変化にともなう通信品質の変化

本研究では通信経路が変化する際にエンドツーエンドの通信品質がその影響を受けることがあることを確認した。プロバイダ間の相互接続が非常に複雑に構成されている場合、通信経路が変化することにより中継ルータや中継プロバイダが切り替わり、結果的にエンドツーエンド通信における通信品質が影響を受けることがしばしばある。地域ユーザ間の通信であっても、その通信が地域外を経由する場合には通信経路の変化にともなう品質への影響が問題になる場合がある。本節では、地域外を経由する地域ユーザ間の通信について、エンドツーエンドの通信経路の変化に応じて通信品質が影響を受けることがあることを実例を用いて述べる。また、富山地域 IX では安定した地域内通信路の確保により、この問題を回避したことを示す。

図 8 はある地域内のプロバイダ ISP-c に対する RTT について 2001/4/20 のデータを表している。図中、実線は O(a)-ISP-c 間で計測した地域外を経由する通信経路による RTT を、点線は O(b)-ISP-c 間で計測した地域 IX を経由する場合の RTT を示している。本図では、同日午前 8 時直前に O(a)-ISP-c 間の RTT が急激に変化したことが確認できる。今回の観測では同時刻の前後で RTT が平均値で 42 ms から 52 ms に変化した。

また、図 9 は O(a)-ISP-c 間で計測した地域外を経由する経路での同日のパケット損失率を表したものである。同図からは、前述の通信品質が変化した時間とほぼ同じ時間帯にパケット損失が発生していることが確認できる。実際、今回の観測では午前 07:54:36 ~ 07:57:16 の間に O(a) から ISP-c に向けて送信された ICMP Echo パケットに対する応答は受け取っておらず、少なくとも 160 秒間以上の通信断が発生していることが分かっている。

図 10 は 2001 年 4 月における ISP-c のアドレスに関する経路情報の変化を O(a) で観測したものであ

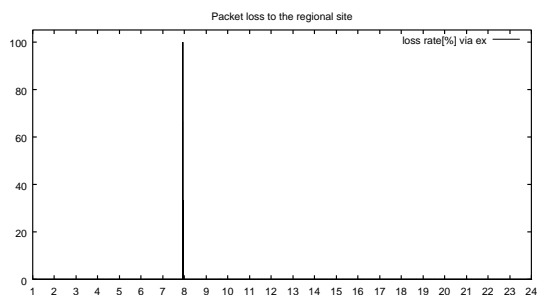


図 9 経路の変化にともなう通信断

Fig. 9 Disconnection during route change.

```
2001-04-16 17:44:22 AS-a AS-y AS-x
2001-04-20 07:57:41 AS-a AS-z AS-x
```

図 10 経路情報の変化

Fig. 10 Routing information update.

る。ここで AS-x は ISP-c が接続しているプロバイダの AS 番号で、ISP-c のアドレス空間に関する経路情報は AS-x から広告されている。AS-a は観測点 O(a) が接続しているプロバイダ、AS-y、AS-z は中継プロバイダを表している。図 10 では ISP-c 向けの経路が 4/16 に一度更新された後 4/20 の午前 7:57 に新しい経路を観測し、中継プロバイダが AS-y から AS-z に入れ替わっていることが確認できる。

図 11, 12, 13 は通信品質の変化が起こった時点の前(4/20 午前 7:30)、途中(同日 午前 7:55)、後(同日 午前 8:20)での中継ルータの変化を示したものである。いずれも traceroute コマンドによる結果を表しているが、より状況を理解しやすくするため、出力の各行に中継ルータのアドレスが含まれる組織名、もしくは AS 番号を記載している。これらの図によると 7:30 頃には 3 番目のルータ bbb.bb.160.121 に続いて 4~7 番目に AS-y のルータを経由して通信が行われていた(図 11)。その後、7:55 頃には同じ経路で通信を行おうとしているが、8 番目のルータ 202.249.2.??? への到達性がなくなっている(図 12)。8:20 頃、通信断から復旧した後については 3 番目のルータ bbb.bb.160.121 に続いて 4~8 番目に AS-z のルータを中継するように経路が切り替わっている。このように、4/20 の通信断の前後では中継ルータの経路が変化しており、7:55 前後に O(a)-ISP-c 間での RTT の値が変化したことは通信経路の変化に依存したものであると断定できる。

なお、その後の関係者らの情報により 4/20 午前 8:00 頃に NSPIX2 で保守作業があり、同時刻に一部のプロバイダのボーダルータで BGP4 のセッションを切

```
# 2000-04-20 7:30:10 started
traceroute to ISP-c (ccc.cc.91.135), 30 hops max, 40 byte packets
 1 aaa.aa.194.126 0.324 ms 0.329 ms 0.260 ms [local site]
 2 aaa.aa.193.254 0.412 ms 0.403 ms 0.553 ms [local site]
 3 bbb.bb.160.101 1.827 ms 1.861 ms 1.685 ms [AS-a]
 4 yyy.yy.152.81 4.747 ms 4.211 ms 4.156 ms [AS-y]
 5 yyy.yy.143.250 3.342 ms 3.123 ms 3.277 ms [AS-y]
 6 yyy.yy.0.129 13.195 ms 10.462 ms 12.378 ms [AS-y]
 7 yyy.yy.130.67 11.699 ms 12.072 ms 9.937 ms [AS-y]
 8 202.249.2.??? 9.974 ms 12.856 ms 10.864 ms [AS2500]
 9 xxx.xx.252.166 23.634 ms 23.690 ms 23.831 ms [AS-x]
10 xxx.xx.252.134 22.991 ms 21.292 ms 21.200 ms [AS-x]
11 xxx.xx.252.9 21.933 ms 24.958 ms 21.608 ms [AS-x]
12 xxx.xx.185.21 30.644 ms 31.159 ms 23.618 ms [AS-x]
13 xxx.xx.185.2 22.581 ms 23.351 ms 21.901 ms [AS-x]
14 xxx.xx.187.102 29.669 ms 23.773 ms 23.255 ms [AS-x]
15 xxx.xx.253.121 29.527 ms 33.366 ms 29.527 ms [AS-x]
16 xxx.xx.1.33 32.620 ms 29.141 ms 29.298 ms [AS-x]
17 xxx.xx.1.54 28.433 ms 28.759 ms 28.548 ms [AS-x]
18 xxx.xx.3.30 28.916 ms 29.403 ms 30.419 ms [AS-x]
19 xxx.xx.255.117 31.752 ms 29.680 ms 30.338 ms [AS-x]
20 xxx.xx.231.34 37.481 ms 37.962 ms 38.478 ms [AS-x]
21 ccc.cc.91.37 48.688 ms 39.135 ms 38.531 ms [ISP-c]
22 ccc.cc.91.2 40.305 ms 44.397 ms 42.920 ms [ISP-c]
23 ccc.cc.91.135 40.141 ms 40.350 ms 39.945 ms [ISP-c]
```

図 11 通信断前の経路

Fig. 11 Route before disconnection.

```
# 2001-04-20 07:55:20 started
traceroute to ISP-c (ccc.cc.91.135), 30 hops max, 40 byte packets
 1 aaa.aa.194.126 12.677 ms 3.318 ms 0.269 ms [local site]
 2 aaa.aa.193.254 0.354 ms 0.740 ms 0.391 ms [local site]
 3 bbb.bb.160.101 2.469 ms 1.848 ms 1.688 ms [AS-a]
 4 yyy.yy.152.81 166.376 ms 219.400 ms 31.346 ms [AS-y]
 5 yyy.yy.143.250 4.894 ms 4.952 ms 4.937 ms [AS-y]
 6 yyy.yy.0.129 10.138 ms 9.439 ms 9.755 ms [AS-y]
 7 yyy.yy.130.67 9.586 ms 9.639 ms 9.735 ms [AS-y]
 8 * * *
 9 * * *
10 * * *
11 * * *
12 * * *
13 * * *
14 * * *
15 yyy.yy.0.129 9.518 ms !H 9.637 ms !H 9.382 ms !H [AS-y]
```

図 12 通信断時の経路

Fig. 12 Route during route change.

```
# 2001-04-20 08:20:10
traceroute to ISP-c (ccc.cc.91.135), 30 hops max, 40 byte packets
 1 aaa.aa.194.126 4.302 ms 3.556 ms 2.936 ms [local site]
 2 aaa.aa.193.254 4.259 ms 6.594 ms 2.483 ms [local site]
 3 bbb.bb.160.101 5.014 ms 4.106 ms 2.099 ms [AS-b]
 4 zzz.zz.125.45 24.746 ms 42.293 ms 26.654 ms [AS-z]
 5 zzz.zz.125.1 30.457 ms 24.889 ms 25.191 ms [AS-z]
 6 zzz.zz.99.49 30.932 ms 31.533 ms 30.137 ms [AS-z]
 7 zzz.zz.99.29 35.117 ms 34.321 ms 30.482 ms [AS-z]
 8 zzz.zz.97.202 31.115 ms 31.173 ms 44.009 ms [AS-z]
 9 202.249.2.??? 21.019 ms 26.147 ms 22.944 ms [AS2500]
10 xxx.xx.252.166 35.173 ms 31.937 ms 30.762 ms [AS-x]
11 xxx.xx.252.134 31.359 ms 31.299 ms 33.547 ms [AS-x]
12 xxx.xx.252.9 31.197 ms 31.412 ms 32.204 ms [AS-x]
13 xxx.xx.185.21 35.864 ms 32.346 ms 31.822 ms [AS-x]
14 xxx.xx.185.2 32.339 ms 31.922 ms 31.872 ms [AS-x]
15 xxx.xx.187.102 33.181 ms 32.637 ms 31.393 ms [AS-x]
16 xxx.xx.253.121 39.253 ms 38.695 ms 41.299 ms [AS-x]
17 xxx.xx.1.33 39.185 ms 41.338 ms 38.980 ms [AS-x]
18 xxx.xx.1.54 38.533 ms 39.429 ms 38.164 ms [AS-x]
19 xxx.xx.3.30 39.168 ms 38.933 ms 39.653 ms [AS-x]
20 xxx.xx.255.117 39.736 ms 39.257 ms 45.963 ms [AS-x]
21 xxx.xx.231.34 47.236 ms 48.477 ms 48.193 ms [AS-x]
22 ccc.cc.91.37 48.293 ms 48.694 ms 48.240 ms [ISP-c]
23 ccc.cc.91.2 51.389 ms 49.532 ms 48.876 ms [ISP-c]
24 ccc.cc.91.135 50.200 ms 56.709 ms 49.149 ms [ISP-c]
```

図 13 通信断後経路

Fig. 13 Route after disconnection.

断,再確立することが行われたことが分かった. 図 11 で 8 番目の中継ルータのアドレスは AS2500 に含まれているが,これは同ルータが NSPIX2 に接続されていることを意味している. すなわち AS-x と AS-y は NSPIX2 上で相互接続をしており, O(a) と ISP-c 間の通信は東京の NSPIX2 を経由して行われていたこ

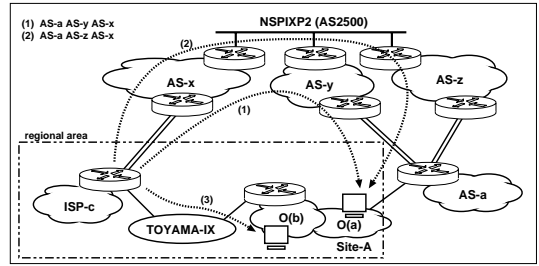


図 14 経路が切り替わった例

Fig. 14 Example of route change.

とが分かる. 図 12 では 8 番目の同ルータからの応答がなくなっているが,これは NSPIX2 の保守作業で通信不能状態が発生したことに起因している.

図 14 は以上の情報から得られた各プロバイダ間の接続関係を簡略化して表現したものである. 本図に示されるように, O(a)-ISP-c 間の通信はもともと (1) で表されるように AS-y を経由していた. しかし, NSPIX2 での保守作業に起因して経路が切り替わり, それ以降は (2) で表されるように AS-z を経由するように変化したものである.

なお, BGP4 では経路選択のアルゴリズムは実装依存であり, 今回の定常的な通信経路の変化は以下のような経緯で起こったものと推定できる.

- (1) NSPIX2 に接続する AS-y のルータが保守作業により AS-x のルータとの通信ができなくなり, この間 ISP-c 向けのパケットが損失した.
- (2) AS-y のルータが一定時間 (通常 120 ~ 180 秒) KEEPALIVE メッセージを受け取らなかったため AS-x のルータとの BGP4 セッションを切断し, ISP-c のアドレスに関する経路情報が無効になった.
- (3) AS-a で ISP-c のアドレスに関する経路情報の再計算が発生し, AS-z 向けに経路を切り替えた.
- (4) AS-a で AS-y から再度 ISP-c のアドレスに関する経路情報を受け取ったが, ルータの実装上, 先に存在する AS-z 経由の経路情報が優先され続けた.

以上のように, O(a)-ISP-c 間の通信経路は 4/20 に行われた NSPIX2 の保守作業に起因して通信経路が変化し, その結果これら 2 点間の通信品質が劣化した. すなわち, 本事例から, 地域外を経由する地域ユーザー間通信において, たとえば東京などの地域外の要因に依存して通信経路が変化しエンドツーエンドの通信品質が影響することがあることが確認できた.

これに対し, 地域 IX を経由した通信は外部要因により経路が変化することはなく, 非常に安定した通信


```
# 2000/04/20 8:00:00 started
traceroute to ISP-c (ccc.ccc.91.135), 30 hops max, 40 byte packets
 1 ssa.aa.6.13  5.517 ms  5.242 ms  0.697 ms  [local site]
 2 xxx.xx.6.95  6.029 ms  7.999 ms  12.226 ms  [TOYAMA-IX]
 3 ccc.cc.91.37  72.431 ms  82.557 ms  47.109 ms  [ISP-c]
 4 ccc.cc.91.2  55.417 ms  41.094 ms  45.266 ms  [ISP-c]
 5 ccc.cc.91.135  44.360 ms  43.731 ms  41.512 ms  [ISP-c]
```

図 15 地域 IX 経由の経路

Fig. 15 Route via regional IX.

環境を実現する。図 15 は 4/20 の同時刻に地域 IX を経由した通信経路による通信の状態を traceroute の結果を用いて示している。地域 IX を経由した通信経路は同時期の数週間で経路が変化することはなく、地域外で経路の変化が起きている状況下でもつねに安定した通信路を確保できている。また、図 14 に示される点線は地域 IX を経由した ISP-c への通信経路を用いた通信による RTT を表しているが、地域 IX 経由の通信経路は他のプロバイダや地域外の要因に影響されることがないため安定した通信ができていたことが確認できた。

5. おわりに

本論文では地域ユーザ間の通信経路の安定性について定量的な評価を行い、地域 IX の実現により非常に安定した通信経路が得られることを示した。本研究では BGP4 で伝搬される経路情報を観測することにより地域ユーザ間の通信経路の変化の頻度を計測し、本論文で定義した評価関数を用いてその評価を行った。その結果、地域 IX を経由した通信経路の安定性、すなわち、ある経路が変化するまでの平均時間は地域外を経由する場合の通信経路の 18 倍以上にもなることが確認され、地域ユーザ間の通信経路の安定化の面で地域 IX が有効に機能していることを示した。

また、本論文では地域ユーザ間の通信経路が不安定な場合に経路情報の伝搬遅延にともなう通信障害、および通信経路の変化にともなう通信品質の変化などの問題が発生しうることを実例を用いて述べ、地域 IX を用いた地域内の相互接続を実現することにより、これらの問題を回避することが可能であることを示した。

現在、国内の地域では地方自治体や学校、あるいは家庭などが高速な回線でインターネットに接続されつつある。また、放送や行政システムなどの地域型広帯域アプリケーション、あるいは電話や動画転送などの実時間処理を必要とするアプリケーションの利用も積極的に進められている。このような状況を考慮すると、地域内での通信経路の安定化はこれまで以上に重要な課題であり、地域 IX の実現はその有効な解決策になりうるといえる。

今後は、次のような課題について研究を続けていく予定である。

- 地域 IX による実時間アプリケーションへの効果
- より安定した地域内経路制御手法の研究
- 経路情報の収束時間の短縮手法
- 通信品質を考慮した経路制御手法の開発

謝辞 本論文の執筆にあたって多くの有用なコメントをいただいた山梨県立女子短期大学の八代一浩助教授、慶應義塾大学の中村修助教授、および東京大学の加藤朗助手に深く感謝する。また、本研究に多大な協力をいただいた富山地域 IX 研究会の会員の皆様にも、つつしんで感謝の意を表する。なお、本研究の実施に際しては、通信・放送機構から援助・協力をいただいている。同関係者の皆様にも感謝する。

参考文献

- 1) Manning, B.: Exchange Point Information (1999). <http://www.ep.net/>
- 2) McFadden, M.M.: Regional Exchange Points Growing Trend in U.S., *CIXTRA*, Vol.2, pp.1-6 (1996).
- 3) 中川郁夫, 米田正明, 安宅彰隆: 国内における地域 IX の動向, 分散システム運用技術研究会報告, Vol.97-DSM-7, No.7, pp.1-6 (1997).
- 4) 菊池 豊, 菊地時夫: PIX: 応用層によるトラフィック交換モデル, インターネットコンファレンス'97 論文集, pp.159-162, 日本ソフトウェア科学会 (1997).
- 5) 菊池 豊, 菊地時夫: 応用層によるインターネットトラフィック交換モデル, コンピュータソフトウェア, Vol.16, No.4, pp.46-58 (1999).
- 6) 中川郁夫: 地域 IX の現状と展望—新しい相互接続のかたち, 情報処理, Vol.41, No.1 (2000).
- 7) 菅野浩徳, 樋地正浩, 布川博士: コミュニティインターネットの相互接続実験, 分散システム運用技術研究会報告, Vol.97-DSM-6, No.6, pp.19-24 (1997).
- 8) 菊池 豊, 樋地正浩, 八代一浩, 中川郁夫: 地域 IX の現状と今後の展望, インターネットテクノロジーワークショップ'99 予稿集, 日本ソフトウェア科学会インターネットテクノロジー研究会 (1999).
- 9) 中川郁夫: ルートサーバを用いた地域内経路制御, ITRC 研究会報告 (Nov. 1999).
- 10) 小杉正貴, 木村義紀, 中川郁夫, 河崎哲男, 米田政明, 黒田 卓, 安宅彰隆: 広域分散型コンテンツサーバの構築, 分散システム/インターネット運用技術研究会報告, Vol.99-DSM-16, No.16 (1999).
- 11) 八代一浩, 笹本正樹, 平川寛之, 山本彦彦, 林英輔: 地域 IX (Y-NIX) の運用とネットワーク

- 特性, 分散システム運用技術研究会報告, Vol.99-DSM-13, No.13, pp.49-56 (1999).
- 12) 八代一浩, 笹本正樹, 平川寛之, 山本芳彦, 林英輔: 地域IXを用いた通信環境改善手法の実現と評価, 情報処理学会論文誌, Vol.41, No.12 (2000).
 - 13) Paxson, V.: End-to-End Routing Behavior in the Internet, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.5, pp.601-615 (1997).
 - 14) WIDE Project: NSPIX Information (2000). <http://jungle.sfc.wide.ad.jp/NSPIX/>
 - 15) JPIX: <http://www.jpix.ad.jp/>
 - 16) 東北地域地域内インターネット相互接続研究会: <http://www.tia.ad.jp/trix/>
 - 17) 山梨地域情報ネットワーク相互接続機構: <http://www.y-nix.or.jp/>
 - 18) 岡山県高度情報化推進協議会: <http://www.okix.ad.jp/>
 - 19) 富山地域IX研究会: <http://www.toyama-ix.net/>
 - 20) Project, R.A.: The Route Server Daemon (1999). <http://www.isi.edu/div7/ra/RSd/>
 - 21) 中川郁夫: 地域IXにおける地域内経路制御の実現, 分散システム運用技術研究会報告, Vol.98-DSM-11, No.11 (1998).
 - 22) 安宅彰隆, 黒田卓, 米田政明, 小杉正貴, 中川郁夫, 河崎哲男: 地域IX構築及びアプリケーションインフラ技術の研究, 情報知識学会第7回研究報告会講演論文集, pp.53-56 (1999)
 - 23) 小杉正貴, 木村義紀: とやま国体映像中継実験, 分散システム/インターネット運用技術研究会報告 (2001).
 - 24) Rekhter, Y. and Li, T.: A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4), RFC1771 (1995).
 - 25) Jacobson, V.: Pathchar (1999). <ftp://ftp.ee.lbl.gov/pathchar/>
 - 26) Labovitz, C., Ahuja, A., Bose, A. and Jahanian, F.: Internet Delayed Routing Convergence, *ACM SIGCOMM 2000*, ACM (2000).

(平成13年5月8日受付)

(平成13年9月12日採録)



中川 郁夫 (正会員)

1968年8月26日生。1991年東京工業大学理学部数学科卒業。1993年同大学大学院総合理工学科システム科学専攻修士課程修了。同年(株)インテック入社。同社研究所にてネットワーク管理, 大規模経路制御技術, 次世代インターネットに関する研究に従事。理学修士。



米田 政明 (正会員)

1944年5月2日生。1967年東北大学工学部通信工学科卒業。1972年同大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻博士課程修了。同年富山大学工学部電子工学科講師。現在, 同知能情報工学科教授。この間, オートマトン・言語理論, パターン認識理論, 文字認識・文書画像理解等の研究に従事。工学博士。電子情報通信学会, 人工知能学会各会員。



安宅 彰隆 (正会員)

1952年10月26日生。1979年東京大学理学部化学科卒業。1984年同大学大学院理学系研究科化学専攻博士課程修了。同年富山県立技術短期大学講師。1990年富山県立大学工学部電子情報工学科助教授。現在に至る。この間, 計算機ネットワークの効果的利用法, 計算機応用による生命現象の研究に従事。理学博士。人工知能学会, 情報知識学会, 日本化学会, 日本生物物理学会各会員。