

IP 網の信頼性評価方法の検討

藤原 和弘[†] 加藤 慎一[†] 渡邊 均[‡]

[†] NTT コミュニケーションズ 〒163-1421 東京都新宿区西新宿 3-20-2

[‡] NTT サービスインテグレーション基盤研究所 〒180-8585 東京都武蔵野市緑町 3-9-11

E-mail: [†]{kazuhiro.fujihara, s.kato}@ntt.com, [‡]watanabe.hitoshi@lab.ntt.co.jp

あらまし 近年、IP 網のインフラ化が急速に進んでおり、専用線から IP-VPN というような企業網の IP へのシフトやブロードバンドを用いた個人向けの警備システムなどのサービスが見られるようになってきた。本来ベストエフォートの考え方で発展してきた IP 網ではあるが、これらのニーズに応えるために高信頼性が要求されてきており、「キャリアクラス」を標榜する高信頼ルータの出現、および通信の継続性を向上する様々な高信頼化方式・技術が提案・実装されつつある。しかしながら、現状では IP 網の信頼性評価方法が確立されておらず、新技術導入の費用対効果の定量評価が困難であった。そこで、従来の装置やリンクの不稼働率のみを考慮した評価方法をベースにして、IP レイヤの振舞や保守運用条件などを考慮した IP 網における信頼性評価尺度および定量評価方法について検討したので報告する。

キーワード IP, 信頼性, アベイラビリティ, 自律動作, 定量評価

Study of reliability evaluation method in IP networks

Kazuhiro FUJIHARA[†] Shin-ich KATO[†] and Hitoshi WATANABE[‡]

[†] NTT Communications 3-20-2 Nishi-Shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo, 163-1421 Japan

[‡] Service Integration Laboratories, NTT 3-9-11 Midori-Cho, Musashino-shi, Tokyo, 180-8585 Japan

E-mail: [†]{kazuhiro.fujihara, s.kato}@ntt.com, [‡]watanabe.hitoshi@lab.ntt.co.jp

Abstract This paper describes the evaluation method of reliability in IP networks based on the conventional method in public switched telephone network (PSTN). As the importance of IP based enterprise applications increases and the cost-effective communication becomes critical, many companies have deployed an IP based network like IP-VPN as their primary enterprise network. On the other hand, most businesses require the network infrastructure with high reliability (e.g., quality, availability, etc). In order to build IP network with high reliability, many network equipments implemented 'non-stop forwarding' mechanism are provided and new IP technologies are discussed. However it is hard to evaluate their cost-benefit performance because the reliability evaluation method in IP networks has not been established. We propose the criterion and the evaluation method of reliability in IP networks which is based on that of PSTN.

Keywords IP, reliability, availability, autostability, quantitative evaluation

1. はじめに

従来、音声サービスを提供してきた電話網や TV 放送網、あるいは専用線などのネットワークには非常に高い信頼性が求められており、それを実現するための設計手法や実現技術[1]の蓄積の上で、高品質・高信頼な通信を提供してきた。しかしながら、近年のブロードバンドの急速な普及や IP 技術の進展に伴い、従来は専用に構築された網上で提供されていた音声通信あるいは映像伝送などのサービスが次々と IP 網上で展開されてきている。また、企業ネットワークも専用線から IP-VPN やインターネット VPN などの IP 技術をベ

ースとしたネットワークに移行しつつある[2]。IP 網は自律的に動作することにより高いサバイバリティを有するが、基本的にはベストエフォートのネットワークであり、電話・放送・専用線などのサービスを提供しているインフラとはネットワークの信頼性に関する考え方が異なっていた。前述したように音声通信・放送などの高信頼を要求されるサービスが IP 網の上で展開されるようになり、ルータメーカ各社も「High Availability」あるいは「キャリアクラス」を標榜するところも多く、また技術の側面でも各種 Graceful Restart[3][4] や Non-StopForwarding[5], Bidirectional

Forwarding Detection(BFD)[6]など様々な技術が提案、実装されるようになってきた。しかしながら、従来から電話網や専用線でなされてきた信頼性の定量的な評価方法がIP網では十分に検討されていないため、上述した高信頼化技術の導入効果を定量的に評価することが困難であった。そこで本稿では、従来から電話網などの通信において使用されていた信頼性評価手法をベースとしてIP網に特有な自律的な経路制御の効果を考慮した信頼性評価尺度およびその尺度に基づくIP網信頼性定量評価法について報告する。また、代表的なIP高信頼化技術についての評価を行ったので、その結果についても示す。

2. 電話網における信頼性評価方法

電話網では1970年頃から「通信網の信頼性」という考え方が採り入れられてきた[1]。ここでは装置の信頼性を定めるのではなく、通信網の信頼性の基準(電話網における許容不稼働率 10^{-3})をつくり、全国最速のエンドエンドでこれを満たすようにネットワークの区間やネットワーク装置などの要素に許容不稼働率を配分するという考え方を採用している。また、1980年頃からデジタル交換機の開発によりシステム規模が非常に大きくなり障害時の影響範囲が拡大する懸念が生まれ、信頼性の目標を規模の関数として規定する考え方が確立した。この考え方をさらに拡張し、枝わかれ構造を有するシステムにおいても故障規模に応じて不稼働率を積み上げる考え方を適用している。たとえば、図1において、装置1の故障は全ユーザに影響を与えるが、装置3-1の故障はそこに収容されているユーザのみに影響を与えることになる。したがって、装置3-1に収容されているユーザは装置1と装置2-1と装置3-1の故障の影響を受けることになるため、それぞれの不稼働率を積み上げることで故障の影響を受けるユーザに対する不稼働率を決定する。

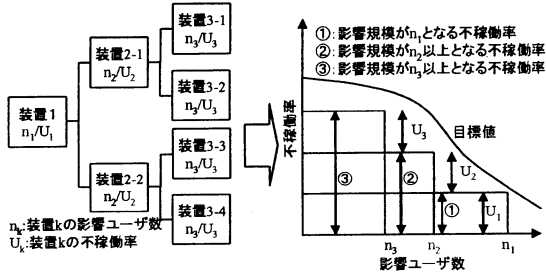


図 1.不稼働率と影響ユーザ数の考え方

ここで、不稼働率は以下のように計算する。

(I)要素が直列に接続されている場合(図 2(a))

直列に接続された要素のうち、いずれかの要素が不

稼働状態になると系として不稼働になるため、それぞれの不稼働率を U_A 、 U_B とすると、系の不稼働率 U は

$$U = 1 - (1 - U_A) * (1 - U_B) \quad (1)$$

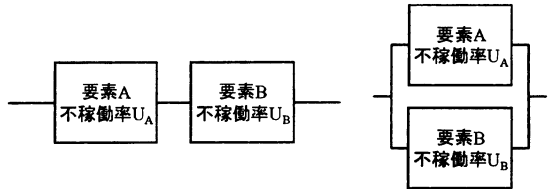
で表される

(II)要素が並列に接続されている場合(図 2(b))

並列に接続された要素のうち、両方の要素が不稼働状態となってはじめて系として不稼働となるため、同様にそれぞれの不稼働率を U_A 、 U_B とすると、系の不稼働率 U は

$$U = 1 - U_A * U_B \quad (2)$$

で表される。



(a)要素が直列に並んでいる場合

(b)要素が並列に並んでいる場合

図 2.不稼働率の計算モデル

3. IP 網の信頼性評価における課題

IP 網の場合であっても宛先までの物理的な経路が存在しない場合にはパケットの転送が不可能となるため、基本的な考え方としては電話網の信頼性評価手法が適用可能である。しかし、IP 網ではデータ転送を行う物理的なデータプレーンと経路制御プロトコルが動作するコントロールプレーンは同一であるため、データプレーンの障害がコントロールプレーンにも影響を与える。このため、電話網の信頼性評価方法をIP 網の評価方法としてそのまま適用することは不適切である。たとえば、図3において、L1で障害が発生した場合には、電話網およびIP 網のいずれの場合でもR1とR4間は物理的な経路が存在しないため疎通不可となる。

しかしL2で障害が発生した場合、電話網の信頼性評価方法ではR1とR4の間には冗長な経路が存在するため不稼働状態とはならないが、ダイナミックなルーティングプロトコルを用いているIP 網の場合では、一般的に故障の検出から経路再計算までの間で不稼働状態となり短時間のパケット損失が発生する。

また、交換機の場合には一般的にハードウェアが完全に冗長構成になっているため、保守や故障時でもサービス中断に到らないが、たとえばルートプロセッサの冗長を取っているルータの場合、プロセッサ切替時におけるバスのリセットなどの原因によるトラヒックの中断や、ルーティングプロトコルのリセットなどが発生し、その結果経路収束まで短時間のサービス停止となる場合が一般的である。さらにIP 網の場合には宛

先までの物理的な経路が存在しているにもかかわらず、経路異常によりパケットが正常に転送されない場合もありうるが、このような場合などは電話網の信頼性評価手法には含まれていない。

したがって、IP 網の信頼性を評価するためには、物理的経路の正常性(電話網の評価手法を適用)、物理的障害が経路制御に与える影響、保守など新たなサービス停止要因、異常経路の影響などを考慮する必要がある。

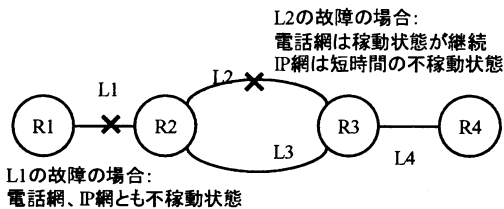


図 3.障害発生時の電話網と IP 網の差異

4. IP 網における信頼性評価手法

4.1. 「信頼性」の定義と尺度

前述したように、IP 網の場合には単なる機器故障に起因する評価(機器の不稼働率)だけで信頼性を定義することは困難である。すなわち、物理的経路だけではなく、IP 網において特徴的な自律経路制御メカニズムの動作に起因する故障を考慮する必要がある。しかしながら、これらの故障を網羅的に定義していくことは IP 網における信頼性評価を複雑化する。そこで本検討では、図 4 に示すように、IP 網における故障を“ユーザーが送出した IP パケットが正常に宛先に到達しないこと”と定義してパケット損失を指標とした IP 網の信頼性評価を行う。一般的に言って、“IP 網故障”にはパケット損失だけではなく、遅延やジッタ、トラヒックの輻輳など、アプリケーション品質あるいはネットワーク設計に大きく影響する項目があるが、本検討では IP 網の availability に注目して、設備に起因するパケット損失のみを扱うこととする。

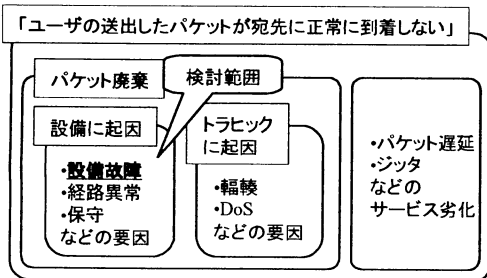


図 4.故障の定義と検査の範囲

IP 網では通信経路に異常が発生した場合、Open Shortest Path First(OSPF)などの経路制御プロトコルを動作させることより、自律的に迂回経路探索を行って通信を復旧させる仕組みが実装されている。しかしながら、経路広告、経路計算などの処理に時間を必要とするため、経路切り替えまでの間はパケット損失が発生する。したがって、IP 網における故障では通信が回復するまでの比較的短い“故障継続時間”が故障を表すための要素となる。また、故障継続時間の導入により、ある一定時間以上継続する遅延もパケット損失として考慮することが可能となる。

一方、実際の IP ネットワークサービスを考える場合には、発生した故障が影響を及ぼすユーザ数が重要な要素となる。一般的に、IP ネットワークで発生する故障は、その発生箇所により故障の影響範囲が変化する。すなわち、図 1 で示した電話網の場合と同様に、IP ネットワークの基幹部分で発生した故障はネットワーク全体に影響を及ぼし、ユーザを収容するエッジネットワークで発生した故障はそのユーザ自身もしくはそのユーザに通信しようとする通信者のみに影響を与える。したがって、たとえ短時間の故障であっても基幹ネットワークで故障が発生すると、その影響は極めて大きいものとなる可能性がある。そこで、IP 網故障を定義する変数として、“故障継続時間”とともに故障が影響を及ぼすユーザ規模を示す“故障の広がり”を導入する。図 5 に故障継続時間と故障の広がりとの関係を模式的に示す。図からわかるように、IP 網における故障を継続時間(t)と広がり(N)という変数で表すことにより、たとえばネットワークの基幹部分に設置されたコアルータに起因する故障は、一般的にネットワーク冗長が取られているために継続時間は短いが故障の広がり極めて大きい故障と表現できる場合が多く、逆に加入者収容ルータの故障では、ネットワーク冗長が取られていないことが多いため故障の継続時間は長くなる傾向があるが、影響を受けるユーザ数は収容されるユーザ数にほぼ等しいため、故障の広がり小さい場合が多いといえる。このように、IP ネットワークにおける故障形態を(N, t)として表現すると、IP 網の信頼性は故障形態(N, t)の故障発生頻度として表すことが出来る。すなわち故障形態(N, t)にかかわらず、故障発生頻度が小さければ高信頼なネットワークであるということが出来る。この故障発生頻度を λ とすると、故障形態毎の IP 網信頼性は、図 5 に示すように、 $\lambda(N, t)$ として表現することができる。

以上のように、本検討では、IP 網の信頼性を $\lambda(N, t)$ と定義し、故障継続時間、故障の広がり、そして故障の発生頻度を評価尺度として IP 網信頼性の評価を行う。

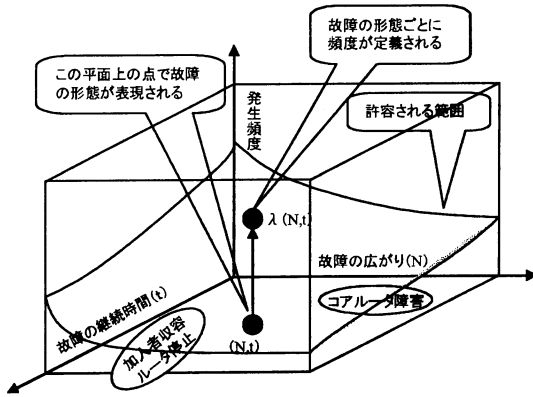


図 5.IP 網の信頼性の表現方法

4.2. 評価手法

3章で述べたように、IP 網の場合にも物理的経路が失われた場合にはパケットの疎通が不可になるため、電話網の場合と同様にまず物理的経路の正常性を評価する必要がある。以下ではこれを「物理レベルの評価」と呼ぶ。さらに IP 網の場合には物理レベルの評価では不稼働とならないような故障の場合にも短時間の故障となりうるため、ネットワーク装置やリンクの故障などが原因で発生するリルーティングによるパケット損失も評価する必要がある。以下ではこれを「IP レベルの評価」と呼ぶ。これらを加えることにより IP 網としての信頼性を評価することが可能となる。

4.2.1. 物理レベルの評価

まず、電話網の信頼性評価手法を用い、物理レベルの評価を行う。物理的レベルの評価においては、まず障害発生時の影響ユーザ数に応じてネットワークを区分し、各装置やリンクなどの要素の不稼働率から、それぞれの区間における不稼働率の計算を行い、それらを積み上げることにより影響ユーザ数に応じた不稼働率を算出する。図 6 のネットワークモデルを用いて具体的な評価を行う。ここで、L0 及び L9 は加入者線を意味するため、故障の影響ユーザ数は 1 となる。R1 及び R6 は加入者収容ルータを意味し、ルータ 1 台あたり 100 ユーザを収容しているモデルとしているため、R1/L1/L2 などの故障の影響ユーザ数は 100 となる。R2 ~ R5/L3 ~ L6 の障害は収容している全ユーザに影響が有るため、これらの故障の影響ユーザ数は 2000 となる。まず影響ユーザ数 2000 の不稼働率 U_{2000} の計算をおこなう。この区間が不稼働状態になるのは、R2 と R3/R2 と R5/R2 と L5/R3 と R4/R3 と L4/R4 と R5/R4 と L5/R5 と L4/L4 と L5 という 9 通りの二重故障が発生したときであるため、各ルータの不稼働率を U_{R_i} 、各リンクの不

稼働率を U_L で表すとき、 U_{2000} は

$$U_{2000} = U_{R2} * U_{R3} + U_{R2} * U_{R5} + U_{R2} * U_{L5} + U_{R3} * U_{R4} + U_{R3} * U_{L4} + U_{R4} * U_{R5} + U_{R4} * U_{L5} + U_{R5} * U_{L4} + U_{L4} * U_{L5} \quad (3)$$

で表すことができる。

次に影響ユーザ数 100 の不稼働率 U_{100} の計算を行う。この区間の不稼働状態は「R1 が故障または L1, L2 の両方が故障」という事象で表現されるため、その不稼働率 U_{100} は影響ユーザ数 2000 の区間の不稼働率 U_{2000} と合わせて

$$U_{100} = U_{2000} + 1 - (1 - U_{R1}) * (1 - U_{L1} * U_{L2}) \quad (4)$$

で表すことができる。

最後に影響ユーザ数 1 の区間の不稼働率 U_1 の計算においては、この区間の不稼働状態は L0 の不稼働状態と同じであるため、影響ユーザ数 100 以上の不稼働率 U_{100} と合わせて

$$U_1 = U_{100} + U_{L0} \quad (5)$$

で表すことができる。

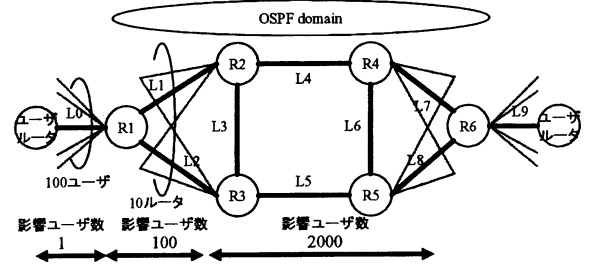


図 6.ネットワークモデル

4.2.2. IP レベルの評価

次に、IP レベルの評価を行う。IP レベルの評価においては、物理レベルと同様に障害発生時の影響ユーザ数に応じてネットワークを区分し、それぞれの区間においてリルーティングが発生する頻度を故障率等から求め、さらに発生頻度と故障の継続時間(ルーティングプロトコルの収束時間)との積により不稼働率を計算し、それらを積み上げることにより影響ユーザ数に応じた IP レベルの不稼働率を算出する。「物理レベルの評価」と同様に図 6 のネットワークモデルにおいて、影響ユーザ数 2000 の IP レベルの不稼働率 U'_{2000} を求める。ルータの故障頻度を F_R 、リンクの故障頻度を F_L 、故障の継続時間を C とすると、影響ユーザ数 2000 の区間には 4 台のルータと 4 本のリンクがあることより、この区間の不稼働率 U'_{2000} は

$$U'_{2000} = (4F_R + 4F_L) * C \quad (6)$$

で表すことができる。

次に、影響ユーザ数 100 の IP レベルの不稼働率 U'_{100} を求める。ここで、R1 の故障については物理的経路が

失われてしまうことより、物理レベルの評価に含まれていると考える。したがって、この区間のIPレベルの評価はL1とL2の故障についてのみ考慮すれば良く、影響ユーザ数2000の不稼働率 U'_{2000} と合わせて

$$U'_{100} = U'_{2000} + 2F_L * C \quad (7)$$

で表すことが出来る。

影響ユーザ数1の区間のIPレベルの不稼働率 U'_1 については、この区間の故障は物理的経路が失われてしまうことより物理レベルの評価に含まれるため、

$$U'_1 = U'_{100} \quad (8)$$

となる。

ここまでで物理レベルおよびIPレベルの不稼働率をそれぞれ求めたが、各規模の物理レベル、IPレベルの不稼働率を加えることにより、IP網としての影響ユーザ数別の不稼働率を算出することが可能となる。

5. 評価例

5.1. 具体的評価例

4章でIP網の不稼働率の評価方法を示したが、ここでは表1に示すパラメータを用いて、図6のネットワークモデルで実際に評価を行った。その結果を図7に示す。なお、IPレベルの故障の継続時間Cの値を45秒として計算を行っている。このグラフより、冗長構成となっていない、影響ユーザ数の小さな区間においては物理的な不稼働状態が信頼性低下の大きな要因となっているが、冗長構成となっている、影響ユーザ数の大きな区間においてはリルーティングによる影響が非常に大きいということを定量的に評価することができる。

表 1.パラメーター一覧

ネットワークエレメント	不稼働率	故障率(/h)	年間故障回数
ルータ	2.00E-05	2.10E-04	1.84E+00
リンク	4.50E-04	3.00E-04	2.63E+00

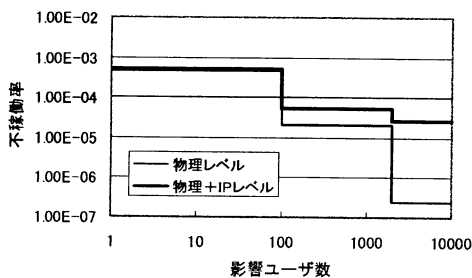


図 7.物理レベル評価と IP レベル評価結果

5.2. 収束時間の影響の評価

4章の評価ではIPレベルの故障の継続時間Cとして45秒というパラメータを用いたが、これはルータ間にイーサネットを用いた場合など、障害箇所によってはL1/L2で障害が検出できずにOSPFのHelloなどでの障害検出に依存せざるをえない場合(図8(a))を想定したパラメータとなっている。

ここで、POS (Packet over SONET/SDH) やBFDなどにより障害箇所に依らず短時間に検出可能な場合(図8(b))を想定し、障害発生からコンバージェンスまでの時間の変化の影響の評価を行った。パラメータとしては、IPレベルの故障の継続時間Cを5秒とした。その結果を図9に示す。この結果から、冗長度の低い加入者に近い区間については5.1節の評価と同様に物理的な不稼働率が支配的となっており、故障の継続時間の短縮の効果は見えないが、冗長度が高く、かつ影響ユーザ数も大きい区間については大きな改善効果が期待できることがわかる。

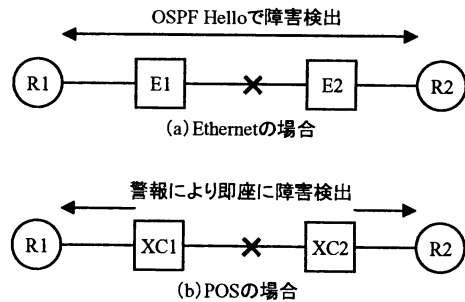


図 8.障害検出時間

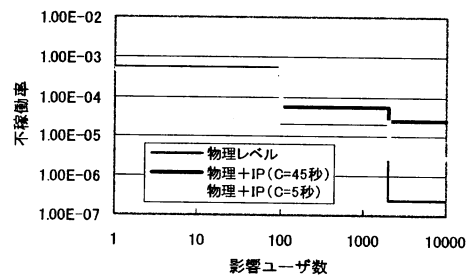


図 9.故障継続時間の影響の評価

5.3. GracefulRestart/Non-StopForwarding の効果の評価

一般的なルータはルートプロセッサの冗長構成時でも切り替え時にはパケット廃棄やプロトコルのリセットがかかるが、隣接ルータのプロトコルリセット時でもルーティングテーブルを維持しつづける Graceful Restart や自ノードのルートプロセッサ切り替え時でもパケット転送を継続できる Non-StopForwarding などの高信頼化技術が提案されている。これらの技術を用いることにより、リルーティングを発生させることなくルートプロセッサの切り替え可能となる。そこで、次にこれらの技術を適用した場合の評価を行った。ここではルータの故障のうちルートプロセッサの故障に関してはパケットの転送に影響を与えないということで、ルータの故障回数を年間 8.76×10^{-2} 回、故障の継続時間 C は 45 秒として計算を行った。その結果を図 10 に示す。

本評価においてはあまり効果が見られなかったが、これはルータのルートプロセッサの故障という事象が、リルーティングが発生しうる故障全体に占める割合が大きいことに起因すると考えられる。ただし、加入者収容ルータの保守(OS のバージョンアップなど)による停止などを考慮にいれた場合にはある程度効果があると思われる。

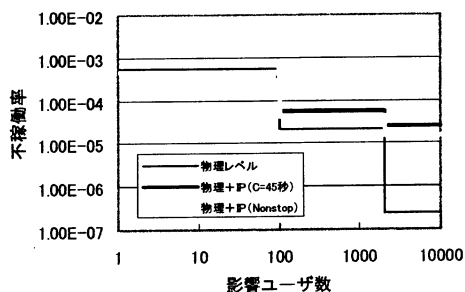


図 10. GracefulRestart/Non-StopForwarding の効果

6. まとめ

これまででは IP 網の信頼性の定量的な評価方法が十分検討されていなかったため、様々な高信頼化技術の効果を評価することが困難であった。そこで本稿では IP 網における信頼性の定義や尺度を定め、また従来から検討されてきた電話網の信頼性評価手法に、物理的障害の IP 網への影響を考慮に加えることにより、より現実的な IP 網の信頼性を定量的に評価出来る手法を提案した。さらに、高信頼化技術の導入を想定し、そ

の効果の定量評価を行った。

今後の課題としては、実ネットワークの挙動の反映が挙げられる。今回は障害発生という事象に対して一般的にパラメータを割り当てて評価を行ったが、実際の NW では事象によって振舞や影響範囲も異なることは容易に想像ができる。しかし現実には実ネットワークの振舞などは明らかになっていない部分が多く [7]、この部分を解析し、評価に採り入れることによりパラメータ及び評価全体の精度が向上すると考える。さらに、ネットワークのモデル化を実ネットワークに近づけ、さまざま提案されている高信頼化技術のメリットやデメリットなどを評価した上で導入の費用対効果について検討を行いたい。

謝辞 本検討を進めるにあたり、有益なご助言を頂いた NTT コミュニケーションズ (株) 先端 IP アーキテクチャセンタ小谷野浩氏、岸本幸典氏に心より感謝いたします。

文 献

- [1] 岩崎昇三、田崎一郎、NTT 通信網を理解していただくために、電気通信協会、1987。
- [2] 日経コミュニケーション、“2003 年の通信ネットワーク”，第 381 号，pp.100-pp.102，Jan.2003
- [3] J. Moy, P. Pillay-Esnault, A. Lindem, Graceful OSPF Restart, RFC3623, Nov.2003.
- [4] S.R. Sangli, Y. Rekhter, R. Fernando, J.G. Scudder, E. Chen, Graceful Restart Mechanism for BGP, draft-ietf-idr-restart-09.txt, (work in progress).
- [5] D. Ward, Routing/signaling Non-Stop Forwarding And Increased Network And Node Availability, <http://www.nanog.org/mtg-0202/ppt/ward.pdf>, NANOG24, Feb.2002.
- [6] D. Katz, D. Ward, Bidirectional Forwarding Detection, draft-katz-ward-bfd-01.txt, (work in progress).
- [7] 永見健一、ネットワークにおける経路の安定性について、http://www.janog.gr.jp/meeting/janog12/pdf/janog12_keiro_nagami.pdf, JANOG12, Jul.2003.