

■3群（コンピュータネットワーク）- 5編（通信品質）

2章 ネットワーク層以下の品質

（執筆著：阿野茂浩）[2011年1月 受領]

■概要■

ネットワーク層以下の品質は、アプリケーションを含むユーザ体感品質にも直結する、通信品質として考慮すべき最も重要なファクターである。このため、現在、世界的に通信インフラストラクチャーとして広く普及しているIP網における品質保証は、ISP（Internet Service Provider）などの通信事業者にとって、最優先で対応すべき事項である。実際、主にコンシューマ向けIP網であるインターネットでは、ベストエフォートというかたちで品質保証が行われている。また、企業向けIP通信を提供するVPN（Virtual Private Network）サービスにおいては、ベストエフォートから更に品質保証を明確化するため、SLA（Service Level Agreement）と呼ばれる、通信事業者がIPやイーサネットなど、ネットワーク層以下の品質を一定基準内で安定的に保証する契約を利用者との間で結んでいる。

本章では、ネットワーク層以下の品質として、上述のIP品質とイーサネット品質に注目する。IP品質に関しては、IPパケットのロスや転送遅延・ジッタに基づく品質から、ネットワークの信頼性にかかわる安定品質まで、その各種品質指標（メトリック）を紹介するとともに、その発生要因やモデリング、品質計測・推定手法について解説する。また、イーサネット品質に関しては、従来品質管理がそのネットワーク機器個々の信頼性に依存せざるを得ない状況であった。しかしながら、近年イーサネット品質の定義をフレームレベルのロス率や転送遅延・ジッタ、ネットワーク帯域に対して行い、その測定手法の確立が標準化ベースで進められており、その動向についても解説する。

【本章の構成】

2-1節では、ネットワーク層の通信品質について、その品質メトリックの定義や測定手法について説明している。特に、IPパケットのネットワーク機器への集中による品質劣化だけでなく、経路制御プロトコルの不安定動作により発生するIPパケットの品質劣化について、プロトコル動作も含めてその発生要因を示している。

2-2節では、2-1節のIPパケットの転送品質ではない、ネットワーク構成そのものの信頼性が問われる安定品質について、その定義からネットワークの設計手法、並びに、災害などの非常時対策について解説している。

また、2-3節では、ネットワーク層（レイヤ3）の下のデータリンク層（レイヤ2）の代表的なプロトコルとして、インターネットや企業向けVPNサービスで標準インタフェースとして利用されている、広域イーサネットの品質管理の現状について述べている。具体的には、品質メトリックの定義から、品質保証するための新しいOAM（Operation, Administration and Maintenance）プロトコルについて詳説している。

2-4節では、ネットワーク層以下の品質規定・測定手法に関する標準化動向について、主に品質規定についてはITU-T SG12での検討状況を、品質測定手法についてはIETF IPPM WGでの検討状況について、主にIP層の品質を中心に、イーサネットやMPLS（Multi-Protocol Label Switching）の品質も含めて、紹介している。本章により、通信事業者がネットワーク層以下

の品質をどのような基準を持って、監視並びに保証しているのかについて、理解を得ることを期待する。

■3群 - 5編 - 2章

2-1 ネットワーク層の通信品質

(執筆者：北辻佳憲) [2011年1月 受領]

本節では、ネットワーク層に着目した通信品質について説明する。まず、通信品質の指標（メトリック）について説明し、次に、ネットワーク全体の品質の観点から、経路安定性を動的経路制御プロトコルのタイプに分けて説明する。更に、通信品質の各指標について、その劣化の度合いを計測・推定する手法を簡単に紹介する。

2-1-1 通信品質の指標

通信品質の指標（メトリック）には、通信の送信元から宛先にデータが到達するまでの必要な帯域、データが捨てられる割合（ロス率）、遅延、遅延時間のばらつき（ジッタ）がある。それぞれについて、順に説明する。

(1) 必要帯域

複数の回線を集線する中継装置（ルータ）では、集線される通信回線（以下、単に「回線」とする）の入力トラヒックが出力回線の帯域を越えるために輻輳を起こすことがある。このとき、輻輳中の回線を通る通信は必要な帯域を得ることができず、通信の品質が劣化する。通信品質の劣化は、遅延及びジッタの増大、あるいはロスの発生というかたちで現れる。輻輳は回線のみならず、入出力する総トラヒック量がルータの処理能力を超える輻輳もあるが、以下では特に説明を加えない限り回線輻輳を単に輻輳という。

必要帯域は、通信のレート変化（トラヒック特性）によって異なる。例えば、Voice over IP（VoIP）のトラヒック特性の一つに固定レートがある。このような通信は、通常その固定レートが必要帯域そのものとして扱われる。一方、ビデオストリームのようなトラヒック特性であれば、レートが変動するため、長い時間（数秒）の平均レートと短い時間（数ミリ秒）の平均レートが異なる。通信の長時間の平均レートと短時間のそれに大きな差があるトラヒック特性を、バースト性が高いという。

必要帯域の不足は、通信のデータロスや遅延ジッタが増大して通信品質の劣化を引き起こす。遅延ジッタの大きさやロスの割合は、通信のバースト性と輻輳回線に備えられるバッファの大きさによって異なってくる。

(2) ロス率

ロスの発生は、三つの原因 1) ネットワークを構成する装置の故障、2) 装置及び装置を結ぶ通信回線における輻輳、3) 通信経路の変化による経路収束までの不到達、に大別することができる。1) については、2-2 節で詳しく説明する。

2) については、通常、出力回線のインタフェースには、短時間の輻輳からロスを回避する出力バッファが備えられる。出力回線におけるデータの出力方法（スケジューリング）には様々なものがある。最も一般的なスケジューリングは、先入れ先出しの FIFO（First in first out）であるが、その他に、複数のデータ（トラヒック）クラスに優先度を付けて、優先度の高いデータから先出しする優先制御（Priority Queuing [PQ]）などもある。

FIFO では、トラヒックの到着レートが回線出力レートを超える状態が続くとトラヒックがバッファに滞留し始め、なおも到着レートが高いまま継続するとバッファがあふれてロスが

発生する。長い期間の平均レートが低い到着レートであっても、バースト性に合わせて回線に備えるバッファ量を大きくしなければロスが生ずる。

3) の経路変更の間のロスは、二つの理由に大別される。一つは回線あるいはルータにおいて障害が発生してからそれが検出されるまでの間にロスが生ずる。二つめは、障害が検出されてからネットワーク層の経路制御プロトコルが経路変更を行う（経路が収束するまでの）間、各ルータで転送先が不整合を起こしてループなどを引き起こしてロスが生ずる。経路変更の収束については、2-1-2 節で詳しく説明する。

(3) 遅延

遅延は、データが送信元から宛先まで転送される間にかかる時間で、往復の遅延と区別するために片道（一方向）遅延という場合もある。遅延は、送信元から宛先までのルータと回線で生ずる様々な遅延（伝播遅延、伝送遅延、バッファ待ち遅延、データ処理遅延）と区別するために終点間遅延（end-to-end latency）と呼ぶ場合もある。遅延の変化に最も起因する要素は通信経路の変更である。インタラクティブ性の高い通信（TCP による通信や、VoIP、Video Conference）にとっては、小さい往復遅延が望ましく、地理的に遠く離れた二点間の通信になると、経路の違いによる遅延の差が大きくなることが多いため、経路選択が重要になる。

遅延の観点からは、各通信に最短経路を提供することが望ましいが、経路上の回線にトラヒックが集中して輻輳を起してしまうと、遅延ジッタやロスなど別の問題を引き起こす可能性がある。収容する通信を最大化する観点からは、最短経路を要求しない通信には、第2、第3の最短経路を提供するなどして、より多くの通信が要求する遅延を満たすように最適な経路選択が望ましい。このとき、最短経路を割り当てる通信や第2、第3の最短経路を割り当てる通信の選択は、通信サービスの方針に依存するが、任意の2点間の通信に関して、 k 番目までの最短経路（ k -shortest path）を探索できることは重要である。 k -shortest pathを探索するアルゴリズムには、link-disjoint, node-disjointなど、いくつかのタイプがあるが、ネットワーク中のある2点間でlink-disjointな k -shortest pathの探索は、最も条件のよい（リンクコストがリンク間でほぼ同じ値になっている）場合に、 $O(kn)$ のオーダーで計算が可能である¹⁾。

(4) ジッタ

ストリーム系の通信（例えば、VoIPによる通信）では、通信を構成するデータ単位（以下、「パケット」とする）が一定間隔で送出され、宛先ではその一定間隔で到着することが望ましいことが多い。このとき、通信経路上の回線やルータで輻輳が起きると、一連のパケットの終点間遅延が変化し、宛先ではパケットの期待される到着時刻にパケットを受信できない問題が起きる。このパケットの終点間遅延の変化の度合いをジッタと呼ぶ。

ジッタの算出方法には様々な方法が考えられるが、ストリーム系通信であれば IETF RFC1889²⁾で定義される計算方法が参照されることが多い。この計算方法では、送信元と計測地点でパケット送信・到着時刻が取得され、その時刻差のパケット間の変化量の忘却平均を求める。 i 番目のパケット（ $i=2, 3, \dots$ ）が送出される時刻を S_i 、宛先（または計測地点）でのパケット到着（通過）時刻を R_i とすると、ジッタ J_i は次のように求められる（ただし $J_1=0$ とする）。

$$J_i = \frac{15}{16} J_{i-1} + \frac{1}{16} [(R_i - S_i) - (R_{i-1} - S_{i-1})]$$

なお、忘却計数（1/16）は Cadzow らの研究³⁾を基にしている。

2-1-2 経路の安定性

コネクションレスの IP ネットワークでは、ルータが一つひとつのパケットを受け取るたびに転送先（ネクストホップ）を決定する。ルータはパケットの転送先を決定するために経路表を管理するため、ネットワークトポロジの変化（回線や他のルータの故障または追加など）にあわせて俊敏に経路表を更新できれば、ネットワークの安定性を向上することができる。

経路表の動的な更新には経路制御プロトコルが用いられる。一般的な動作は、パケットが送り届けられる宛先の情報（経路情報）を他のルータへ広報し、各ルータは複数のルータから受け取る経路制御情報から適切な経路情報を取捨選択する。ネットワークトポロジが変化すると、変化を検出したルータが該当する経路を経路情報として他のルータへ通知する。ネットワーク全体で経路表が更新されて経路が安定することを「経路が収束する」という。経路制御プロトコルは Distance-Vector 型、Link State 型、Path-Vector 型の三種類に大別され、以下では各タイプについて経路の収束性を説明する。

(1) Distance-Vector 型経路制御プロトコル

Distance-Vector 型経路制御プロトコルの代表として RIP, RIP2⁴⁾がある。その特徴は、定期的にルータが経路表に持つ経路情報を、ホップ数を加えて隣接するルータへ通知する。この経路制御プロトコルは、経路収束大規模なネットワークでは経路収束時間が大きくなる。その原因は次の二つである。

一つは、経路情報の通知が定期的（たとえば 30 秒間隔）に行われ、障害回線から遠いルータほど経路変更が遅れてしまう。二つめは経路情報を更新したルータ識別子が広報される経路情報に含まれないことである。例えば、図 2・1 は、ルータ A, B, …, M が接続し、net C の経路を経路表に持ち（ただしルータ A, B, C の経路表しか示していない）、net C の経路情報を通知する様子を示している。net C が障害で到達できなくなると、net C に接続していないルータ A, B が、net C に到達できることをルータ C に通知してしまう。ルータ C には、この経路情報が、ルータ C から通知されたものなのか、ほかの代替経路（D～M）から通知されたものなのかを区別できないため、ルータ C はルータ A, B の経路情報を採用してしまう。この経路情報は経路広報の時間になると順次ルータ A, B, C の中で通知され、net C は次第にホップ数が増えて登録し直され、最終的に代替（ルータ D～M を通る）経路が選択されるようになるが、それまでの間ルータ A, B, C の間でパケットがループを起こす。

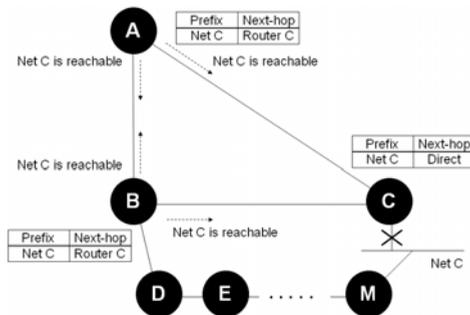


図 2・1 Distance Vector 型経路制御プロトコルにおいて、ルータが経路情報を隣接ルータへ通知する様子

(2) Link-State 型経路制御プロトコル

Link-State 型経路制御プロトコルの代表として OSPFv2⁵⁾, Integrated System to Integrated System (IS-IS) がある。その特徴は、各ルータが持つ転送可能な回線の状態（リンクステート）とそのコストの情報をほかのすべてのルータに広告し、すべてのルータが同じ内容のリンクステート情報から最小コスト経路を計算して、経路表を構築する。回線状態の確認は、定期的（例えば 10 秒間隔）にパケットを転送することで認識され、経路計算は、新しいリンクステートを受信してからある一定時間（例えば 10 秒）を待って実行される。Link-State 型経路制御プロトコルは、ネットワーク規模が大きくなっても経路収束が比較的早い。

しかしながら、ネットワークが大規模になるにつれて経路変化が起きやすくなり、経路収束が急激に劣化する。そこで、大規模ネットワークを持つインターネット接続事業者（ISP）は、BGP（Path-Vector 型経路制御プロトコル）を組み合わせ、OSPF などのネットワークを複数に分割して経路収束の安定化を図ることが多い⁶⁾。

(3) Path-Vector 型経路制御プロトコル

Path-Vector 型経路制御プロトコルの代表として BGP⁷⁾がある。その特徴は、隣接ルータに通知される経路情報に、通過したルータ（または Autonomous System）の識別子がパス情報として含まれる点にある。ルータは、通知されたパス情報に自身の識別子が含まれていればループとして検出できるため、Distance-Vector 型経路制御プロトコルで発生するループを回避可能である。

しかしながら、BGP には、経路収束が遅い問題がある。例えば、先の図 2・1 において、ルータ C が net C に到達できないことをルータ A, B に通知した場合、それぞれの経路情報の伝搬には時間差が生ずるため、ルータ B は、ルータ A 経由のパスで net C に到達できることをルータ D に通知してしまう。多くの代替パスを有するルータでは、各パスでの収束を待つ必要があるため、収束までにより長い時間を要することになる。このため、現在、経路数を削減する方法として、Locator and Identifier Separation (LISP) と呼ばれる新たなアーキテクチャが提案されており⁸⁾、収束時間を削減する方法が検討されている。また、頻繁な経路変動は、ルータの処理能力を圧迫するため、経路数の増加がインターネット全体の経路安定性を低下させる。そのため、BGP では、頻繁に変化する不安定な経路に対するペナルティとして、一定時間、該当経路の隣接ルータへの通知を抑制する機能がある⁹⁾。

2-1-3 各メトリックの推定手法

以下では、ボトルネック回線帯域・可用帯域推定手法、パケットロス推定手法、片道遅延推定手法に関して、提案されている方式について簡単に説明する。

(1) ボトルネック回線帯域・可用帯域推定手法

終点間の通信路上の回線の中で、最も帯域が小さい回線をボトルネックと呼ぶ。また、終点間の通信路上で各回線の利用可能な帯域の最小値を可用帯域と呼ぶ。ボトルネック回線の帯域や可用帯域の情報を取得できれば通信品質を安定化できる場合があり、様々な推定手法が提案されている。

(a) ボトルネック回線帯域推定手法

ボトルネック回線の帯域推定では、試験パケット（プローブパケット）のパケット長に対

する片道遅延の増加量が、回線帯域に反比例することを前提としている。例えば、帯域 C の回線ではパケット長が 1 ビット大きくなると、片道遅延が 1/C 大きくなる。

ボトルネック回線の帯域推定手法には pathchar¹⁰⁾がある。pathchar は終点間の通信路を構成する回線の物理帯域をホップごとに推定し、最小値を持つ回線をボトルネック回線とする。パケット長増加に対する片道遅延時間の増加量を正確に計測するために、pathchar ではパケット長が異なるプローブパケットを多数送信して最小遅延を求める。ホップごとの計測を可能にするため、プローブパケットの Time to Live (TTL) を操作してホップ数を調整し、ICMP time exceeded を応答として受信する。計測は第一ホップから計測を行い、第二ホップ、第三ホップと順にホップ数を増やす。あるホップの回線帯域の推定方法は、様々なパケット長のパケットを送信した際の最小 RTT を求め、一つ前のホップの最小 RTT との差分から当該ホップの回線帯域を推定する。本手法は、パケットプローブ送信ホスト及び各ホップにおけるパケット処理並びにパケット送信時のバッファ内待ち行列遅延が十分小さいことが前提となっている。そのため、各パケット長の計測では、多量なサンプルを用いて、最小 RTT を所得しなければならない。

別の方法に、パケットペアの到着時刻差に基づく推定手法があり、CapProb¹⁴⁾などがある。

(b) 可用帯域推定手法

可用帯域の推定手法に、パケットトレイン（複数のパケット列）を用いてパケット間隔が大きくなる限界のレートを可用帯域の推定値とする。このような手法に Pathload¹³⁾がある。

Pathload は送信用と受信用の装置（以下ホストとする）を用いて、通信経路の一方方向について、可用帯域を二分探索で推定する。送信ホストはパケット間隔を一定にしたパケットトレインを送出し、受信ホストは到着するトレインのパケット間隔の変化を観測して送信元へ通知する。送信ホストはパケット間隔が広がっていれば次の試行ではトラヒックレートを下げる（トレインのパケット間隔を広げる）。パケット間隔に変化がなければ、逆に、次の試行ではトラヒックレートを上げる（トレインのパケット間隔を狭める）。

Pathload では、最大帯域が既知であること、一連の探索の間、可用帯域が一定であることが前提となっている。ある程度の精度を得るためには、十分な試行回数が必要である。

(2) パケットロス推定手法

TCP 通信は多くの場合、パケットロスを経験すると送信レートを半減させるため、必要以上に送信性能を落としてしまう恐れがある。また、ストリーム系通信では、誤り訂正 (FEC: Forward Error Correction) 手法などを用いることで、データロスの影響を小さく抑えることができるが、パケット（データ）ブロックに対して何割のパケットロスが生ずるかを見積もることができなければ誤り訂正の性能を最適化できない。このような問題を解決するために、パケットロス推定手法が提案されている。

パケットロスの推定には、ある通信パスでパケットロスが継続する時間を推定する手法¹¹⁾や、大規模ネットワークで生じているパケットロスをパッシブ計測によって推定する手法¹²⁾などがある。以下では、それぞれについて簡単に説明する。

(a) パケットロス継続時間推定手法

パケットペアを用いるアクティブ計測によって、パケットロスが継続する時間を推定することが可能である。送信ホストから受信ホストへ、一定間隔のパケットトレインを送出し、

受信ホストにおいてパケットがロスを経験する割合と連続的にロスを経験する連続値からパケットロス継続時間の平均値を推定する。本手法では、平均 1%未滿のロス率に対して 25%以下の誤差で継続時間を推定することが可能である。ロス率がより大きいときには、この誤差はより小さくなる。

(b) 大規模ネットワークのパケットロス推定手法

2 地点に設置されるパケットカウント計数装置の情報からその区間を通るトラフィックのパケットロス率を求めるフレームワークが提案されている。計数装置は、パケット数をある一定時間のスロットごとに計数して、集計装置へ通知する。集計装置は、2 地点から通知されるパケットカウント数の差分をパケットロスとする。この方式では、スロットを十分長くすることで、パケットロス数の誤差が小さくできることを示している。パケットカウント計数情報は、トラフィックをフロー（送信元/宛先 IP アドレス、プロトコル、送信元/宛先ポートで区別されるパケット列）で区別して、計測区間を通るトラフィックかを判断してパケットロスの精度を高めている。

(3) 片道遅延推定手法

二点間の通信を考えると、多くの状況で、通信の方向によって片道遅延が異なる。その理由は、方向によってホップバイホップの通信経路が一致しない、または通信経路上の回線利用率が方向によって一致しないためである。二点間の片道遅延を計測する際、大きな課題の一つは、終端点の計測装置の時刻を一致させることにある。現在では、Global Positioning System (GPS)¹³⁾ や Code Division Multiple Access (CDMA) 方式¹⁴⁾の無線アクセスシステムからの時刻配信を用いることが可能になってきているが、こういった電波を取得できない場合も多くある。以下ではエンドホストの時刻同期を必要としない手法¹⁵⁾を紹介する。

この手法では、複数の地点に計測ホストを設置して、隣接する 2 地点で片道遅延を計測する。この計測地点はトポロジ的に隣接する必要はなく、計測プローブを送信する対抗ノードとして仮想的に隣接していればよい。計測の際、各装置はローカルの時刻を用いる。ホスト i から j への片道遅延を $x_{i,j}$ 、ホストのローカル時刻の差分による片道遅延を $\Delta T_{i,j} = R_{i,j} - T_{i,j}$ と定義 ($R_{i,j}$: プローブ受信ホスト j が送信ホスト i からプローブを受信したときのタイムスタンプ、 $T_{i,j}$: プローブ送信ホスト i が受信ホスト j へプローブを送信するときのタイムスタンプ) すると、ホスト i を基点として隣接する n 地点を順に回って装置 i に戻ってくるループから、

$$\Delta T_{i,i+1} + \Delta T_{i+1,i+2} + \dots + \Delta T_{i+n,i} = x_{i,i+1} + x_{i+1,i+2} + \dots + x_{i+n,i}$$

と表すことができる。これは任意のループについて成り立つ。

全 N 方向の区間からランダムに一つの区間を選択してパケットを通過させ、パケットが到着した直後に再びランダムに一つの区間を選択してパケットを通過させることを順に繰り返すと、どこかの区間 (i, j) でパケットを発見する確率 $p_{i,j}$ は、各区間の片道遅延 $x_{i,j}$ に比例する。

計測装置数が極端に少ない場合には、制約の数が少ないため、上述の仮定どおりにならないことが多いが、ネットワーク全体で複数の計測装置を使って計測することで、ある程度精度の高い推定が可能である。

■参考文献

- 1) M.H. MacGregor et al, "Optimized k-shortest-path Algorithm for Facility Restoration," Journal of Software - Practice and Experience, vol.24, no.9, 1994.
- 2) H. Schulzrinne et al, "RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications," IETF Request for comments 1889 (RFC1889), STD1, 1996.
- 3) J.A. Cadzow, "Foundations of digital signal processing and data analysis," Macmillan Publishing Company, 1987.
- 4) G. Malkin et al, "RIP version 2," IETF RFC 2453, Standards Track, 1998.
- 5) J. Moy et al, "OSPF Version 2," IETF RFC 1583, Standards Track, 1994.
- 6) T. Yoshida, "Operational routing experience in NTT/OCN," The 19th APNIC Open Policy Meeting - Routing Special Interest Group, 2005.
- 7) Y. Rekhter et al, "A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)," IETF RFC4271, Standards Track, 2006.
- 8) D. Farinacci, V. Fuller, D. Meyer, and D. Lewis, "Locator/ID Separation Protocol (LISP)," Internet-Draft, Work In Progress, Sep. 2009.
- 9) C. Villamizar, R. Chandra, and R. Govindan, "BGP Route Flap Damping," RFC 2439, 1998.
- 10) V. Jacobson: "pathchar ? a tool to infer characteristics of Internet paths",
<ftp://ftp.ee.lbl.gov/pathchar/msr-talk.pdf> (1997)
- 11) J. Sommers et al, "Improving Accuracy in End-to-end Packet Loss Measurement," ACM SIGCOMM 2005, 2005.
- 12) A. Papadogiannakis, A. Kapravelos, M. Polychronakis, E. P.Markatos, and A. Ciuffoletti., "Passive end-to-end packet loss estimation for grid traffic monitoring," the CoreGRID Integration Workshop, 2006.
- 13) "Global Positioning System," National Space-Based Positioning, Navigation, and Timing Coordination Office, <http://www.gps.gov/>.
- 14) Viterbi, J. Andrew, "CDMA: Principles of Spread Spectrum Communication", 1st, Prentice Hall PTR. ISBN 0201633744, 1995.
- 15) O. Gurewitz, "Maximum Entropy Based One-Way Delay Estimation," 2005 International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS'05), 2005.

■3群 - 5編 - 2章

2-2 安定品質

(執筆著：林 正博) [2009年2月 受領]

安定品質の解説として、信頼性の基礎、通信ネットワークの信頼性設計法、非常災害対策について述べる。

2-2-1 信頼性の基礎

(1) 信頼性の定義

信頼性 (Reliability) とは、JIS 規格で「アイテム (対象となるシステム, サブシステム, 機器, 装置, 構成品, 部品, 素子, 要素などの総称またはいずれか) が与えられた条件で規定の期間中, 要求された機能を果たすことができる性質」と定義される。

(2) 故障と故障率

故障率 $\lambda(t)$ は、時刻 t に故障せずに残っているアイテムのうち、次の単位時間にどれだけ故障するかを意味する。通常、故障率は図 2・2 に示すようなバスタブ曲線に従う。

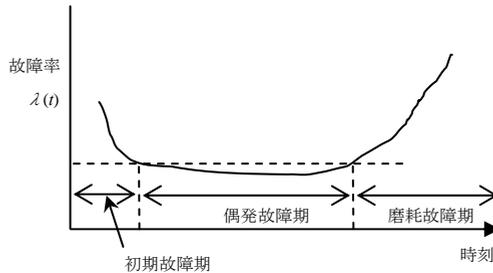


図 2・2 バスタブ曲線

初期故障は、製品の使用開始初期に故障が多発する現象である。設計や製造上の不具合によって生ずる故障と考えられ、時間と共に故障率が減少していく DFR 型 (Decreasing Failure Rate) を示す。やがて故障発生の状況が安定してくると偶発故障期に入る。この時期は、故障率一定の CFR 型 (Constant Failure Rate) を示す。更に、長期間使用の後、老朽化することによって故障が頻発するようになる。これが磨耗故障期である。この期は、故障率が増加する IFR 型 (Increase Failure Rate) を示す。

(3) 信頼度関数

時刻 0 の時点でアイテムが故障していないとして、時刻 t でアイテムが故障していない確率を信頼度 (または信頼度関数) $R(t)$ と呼ぶ。

また、 $F(t) = 1 - R(t)$ を不信頼度という。 $F(t)$ を分布関数としてその密度関数 $f(t)$ を故障密度関数と呼ぶ。つまり、以下が成立する。

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = -\frac{d}{dt} R(t)$$

冒頭で述べたように、故障率 $\lambda(t)$ は、時刻 t に残っているアイテムのうち、次の単位時間に

どれだけが故障するかであるから、故障密度関数 $f(t)$ と信頼度関数 $R(t)$ の比で表される。

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$$

これを時間 t で積分すれば、次式が得られる。

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(x) dx\right)$$

偶発故障期で故障率一定 CFR 型、すなわち故障率 $\lambda =$ 一定のときは、上式より、信頼度関数は次式の指数分布のかたちをとる。

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

CFR 型でないときの故障率を表するには様々な関数を用いられるが、次に述べるワイブル分布を用いると共通的な表現が可能となる。

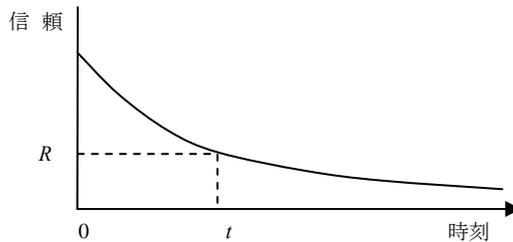


図 2・3 信頼度

(4) ワイブル分布

故障率を表す関数を共通的に表す方法の一つとしてワイブル分布 (Weibull distribution) を用いる方法がある。これは、信頼度や不信頼度を以下の式で表す方法である。

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-r}{\eta}\right)^m\right]$$

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-r}{\eta}\right)^m\right]$$

上で、 $m (>0)$ は形状パラメータ、 $\eta (>0)$ は位置パラメータ、 r は位置パラメータと呼ばれる。 $m=1$ のときは、指数分布となり、 $m < 1$ ならば、初期故障型 (DFR)、 $m > 1$ のときは磨耗故障型 (IFR) となる。また、故障密度関数 $f(t)$ は以下のようになる。

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-r}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{t-r}{\eta}\right)^m\right]$$

特別な目盛をもったワイブル確率を用いて、実際のデータから各パラメータを求める。

(5) 保全性と各種信頼性指標

ここまでは、修理について何も述べなかった。つまり、非修理系について説明した。ここでは、修理が行われる修理系について述べる。

故障が生じたとき、修理可能な系として信頼性を維持するための処置のことを保全（メンテナンス）と呼ぶ。予防保全と事後保全が考えられている。故障発生後、ある時間以内に全体の何%が修復しているかを確率で表したものを保全度（maintainability）と呼ぶ。信頼性と保全性に関する主要な指標とその意味を説明する。

(a) MTTF (mean time to failure)

アイテムの故障までの動作時間の期待値。

$$MTBF = \int_0^{\infty} xf(x)dx$$

(b) MTBF (mean time between failures)

アイテムの故障と次の故障の間の動作時間の期待値

(c) MTTR (mean time to repair)

事後保全に要する時間の期待値

(d) MCT (mean cycle time)

アイテムが正常に回復してから故障した後再び故障するまでの時間の期待値

$$MCT = MTBF + MTTR$$

(e) 故障頻度 (failure frequency)

MCTの逆数

$$\text{故障頻度} = \frac{1}{MCT}$$

(f) アベイラビリティ (availability)

アイテムが正常に機能している時間的割合の期待値

$$\text{アベイラビリティ} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

(稼働率とも呼ばれる.)

(g) アンアベイラビリティ (unavailability)

アイテムが故障している時間的割合の期待値

$$\text{アンアベイラビリティ} = \frac{MTTR}{MTBF + MTTR}$$

(不稼働率とも呼ばれる.)

図 2・4 は、上記指標のうち MTBF、MTTR、MCT の関係を図示したイメージ図である。

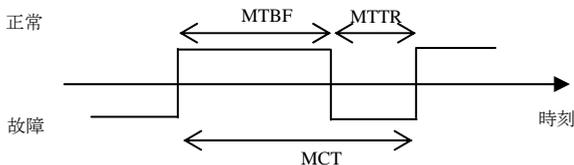


図 2・4 MTBF と MTTR と MCT

なお、2000年にJIS規格が改定され、それまで非修理系の用語であったMTTFが修理系で

も用いられるようになった。新定義の中で、修理系の MTF と MTBF の定義の違いは以下のとおりである。

修理系の MTF は、始業時には故障していないとしたうえで、始業から故障までの動作時間を計算に入れて、動作時間の平均のことをいう。これに対し、MTBF は、故障から戻って次の故障までの動作時間の平均値である。

例えば、図 2・5 の場合、3 回の故障が発生しているが、MTF をこの 3 回から求めるならば、

$$\text{MTF} = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3}$$

となるが、MTBF は以下のように求める。

$$\text{MTBF} = \frac{T_2 + T_3}{2}$$

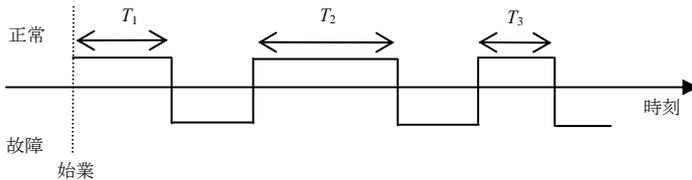


図 2・5 正常・故障の変遷例

2-2-2 通信ネットワークの信頼性設計

故障によって通信サービスに障害が生じた場合、我々の生活は大きな影響をこうむる。したがって、故障が少なく、故障が発生しても早急に回復するという意味で安定したサービスを実現することが重要である。サービスの安定性を示す指標が安定品質（信頼性）である。

十分な安定品質を確保するためには適切な信頼性設計が重要となる。このような信頼性設計は、一般に図 2・6 に示す手順に従って順次進める。

本手順の各段階を説明する。

(1) 通信ネットワークの特性把握

通信ネットワークの機能上の特徴、要求性能、使われ方、故障時の影響を十分に把握することが信頼性設計の第一歩である。すなわち、設計対象の提供するサービスの目的及び特殊性を明確にし、その目的を十分果たすために必要な信頼性設計のあり方を明らかにすることが必要である。

(2) 故障の分類と信頼性評価尺度の選定

通信において、いくつかの観点から故障を分類する必要がある。何故ならば、それぞれの故障によって、その影響が異なり、影響の深刻な故障ほど高い信頼性を確保する必要があるからである。

少数のユーザが故障に遭遇する場合と多数のユーザが同時に故障に遭遇する場合で、影響の深刻さに違いがあると考えるならば、故障に遭遇するユーザ数による故障の分類を行う。

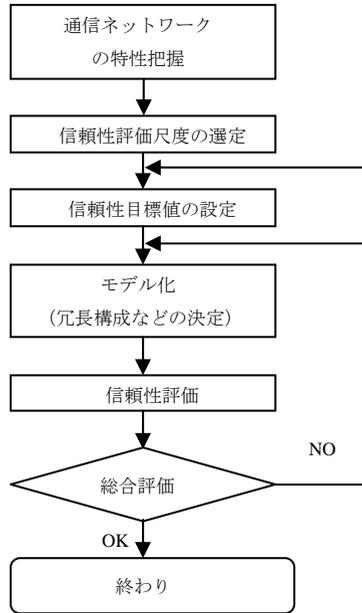


図 2・6 信頼性設計手順

一方、同じユーザ数が故障に遭遇しても、完全に通信が途絶する場合と、通信は可能であるがつながりにくい場合では、影響の深刻さが異なると考えて故障を分類することもある。どのように故障を分類するかは、設計対象の性格によって異なる。電話サービスの場合は、故障に遭遇するユーザ数に対応する規模の規模とつながりにくさに対応する疎通率による分類が行われている。

故障分類に続いて、分類された故障の発生の程度を表す信頼性評価尺度を選定する。通常、信頼性評価尺度は 2-2-2 節の(2)で述べた故障率や(4)で述べた各指標が用いられる。MTBF や アンアベイラビリティが用いられることが多い。

(3) 信頼性目標値の設定

選定した各種信頼性評価尺度に対し、コスト、故障発生時の影響度、及び技術的可能性を考慮して信頼性目標値を設定する。通信においては、故障の規模（故障に遭遇するユーザ数）が大きくなると故障時の影響が大きくなると想定し、図 2・7 で示すように故障の規模ごとに目標値を設定することも行われている。

図中の曲線の求め方として、一定のエリアが途絶することによる社会的迷惑量を、ユーザが途絶エリアから通信可能となるエリアまで移動する時間・コストに比例すると考え、社会的迷惑量の期待値が等しくなるように曲線を決定するという方法が提案されている。

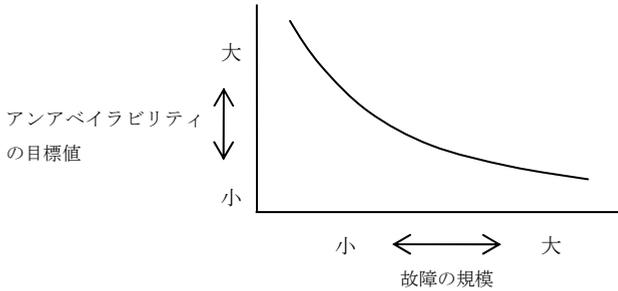


図 2・7 故障の規模と信頼性目標値

(4) モデル化

通信ネットワーク内で冗長構造を定め、これを図 2・8～図 2・10 に示すような信頼度ブロック図で表現する（なお、信頼度ブロック図を作成する際には、見かけ上の構成と信頼性評価するときの構成が異なることが多いので、一度、通信ネットワークの実際に立ち戻って考えることが重要である）。

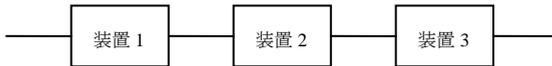


図 2・8 直列モデル

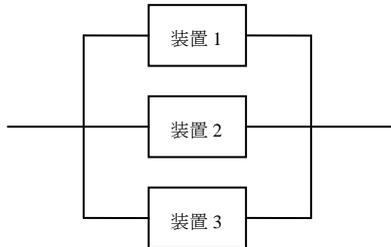


図 2・9 並列モデル

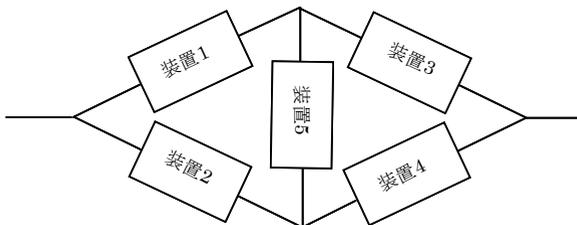


図 2・10 ブリッジ

図2・8～図2・10以外にも以下のモデルが考えられる。

m out of N : G

N 個の装置から構成されており、そのうち m 個が正常であれば、全体が正常であるとするモデル m/N 系とも呼ぶ。

(5) 信頼性評価

2-2-1 節の(2)で述べた故障率や(4)で述べた MTBF, MTTR, MCT, 故障頻度, アベイラビリティ, アンアベイラビリティの間には以下の関係が成立する。

$$\text{故障率} = \frac{1}{\text{MTBF}}$$

$$\text{MCT} = \text{MTBF} + \text{MTTR}$$

$$\text{故障頻度} = \frac{1}{\text{MCT}}$$

$$\text{アベイラビリティ} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$$

$$\text{アンアベイラビリティ} = \frac{\text{MTTR}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$$

これらの式を用いれば、アベイラビリティと故障頻度からほかの値は容易に算出できる。例えば、故障率はアベイラビリティと故障頻度から以下の式のように求められる。

$$\text{故障率} = \text{故障頻度} / \text{アベイラビリティ}$$

で求めることができる。

したがって、以下では、信頼性評価法として、アベイラビリティと故障頻度の求め方を説明する。

(a) アベイラビリティの求め方

直列モデル:

装置のアベイラビリティが A_1, A_2, \dots, A_N であるとき、直列モデルのアベイラビリティ A は以下の式で求められる。

$$A = A_1 A_2 \cdots A_N$$

例えば、10個の装置からなる直列モデルで、各装置のアベイラビリティが 0.9998 である場合、このモデルのアベイラビリティは、以下のよう求められる。

$$A = 0.9998^{10} = 0.998001800$$

並列モデル:

装置のアベイラビリティが A_1, A_2, \dots, A_N であるとき、並列モデルのアベイラビリティは以下の式で求められる。

$$A = 1 - (1 - A_1)(1 - A_2) \cdots (1 - A_N)$$

例えば、2個の装置からなる並列モデルで、各装置のアベイラビリティが 0.9998 である場合、このモデルのアベイラビリティは、以下のよう求められる

$$A = 1 - (1 - 0.9998)^2 = 0.99999960$$

ブリッジモデルやより複雑な信頼度ブロック図、また、 m out of N : G モデルについては、文

献2-6)のような様々な評価法が考案されている。しかし、これらの方法は、すべて真理表を用いた方法を基礎としている。ここで、真理表とは、各装置の正常・故障と全体の正常・故障の関係をすべて列挙した表である。例として2 out of 3:Gモデルの場合の真理表は表2・1のようになる。なお、表中の1は正常、0は故障に対応している。

表2・1 真理表

装置の正常・故障			通信ネットワークの 正常・故障	アベイラビリティ
装置1	装置2	装置3		
1	1	0	1	$A_1 A_2 A_3$
1	1	0	1	$A_1 A_2 (1-A_3)$
1	0	1	1	$A_1 (1-A_2) A_3$
1	0	0	0	0
0	1	1	1	$(1-A_1) A_2 A_3$
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
合計				$A_1 A_2 + A_2 A_3 + A_3 A_1 - 2 A_1 A_2 A_3$

真理表から通信ネットワークが正常となる場合をすべて抽出し、それぞれの確率を求めて足し合わせることで、アベイラビリティは以下のように求められる。

$$A = A_1 A_2 + A_2 A_3 + A_3 A_1 - 2 A_1 A_2 A_3$$

各装置のアベイラビリティが0.9998ならば、

$$\begin{aligned} A &= 0.9998^2 + 0.9998^2 + 0.9998^2 - 2 \times 0.9998^3 \\ &= 0.999999880 \end{aligned}$$

となる。

信頼性評価の対象が多くの装置から構成される場合、評価に要する時間の効率化を図るため、縮退法、包除原理法、SDP (Sum of Disjoint) 法、分解法、BDD (Binary Decision Diagram) 法などが提案されている。

(b) 故障頻度の求め方

通信ネットワークのアベイラビリティ A が各装置のアベイラビリティ A_1, A_2, \dots, A_N から関数 g を用いて $A = g(A_1, A_2, \dots, A_N)$ と求められるとする。このとき、通信ネットワークの故障頻度は以下の式で求められる。ここで λ_i は装置 i の故障率であり、既知とする。

$$\text{故障頻度} = \sum_i \left\{ \frac{\partial g(A_1, A_2, \dots, A_N)}{\partial A_i} A_i \lambda_i \right\}$$

上の右辺を、関数 g を別の関数に変換する作用素 (写像) とみなし、これを D と書けば、
故障頻度 $= D(g)$

と書ける。 D は以下の性質を満たす (s は実数とする)。

$$\begin{aligned} D(A_i) &= A_i \lambda_i \\ D(g_1 + g_2) &= D(g_1) + D(g_2) \\ D(g_1 g_2) &= D(g_1) g_2 + g_1 D(g_2) \\ D(g^s) &= s g^{s-1} D(g) \end{aligned}$$

これらの性質を用いれば、アベイラビリティから故障頻度を求めることができる。

例えば、二つの装置からなる直列モデルの場合、アベイラビリティは $A = A_1 A_2$ であることから、故障頻度は、以下のように求められる。

$$\begin{aligned} \text{故障頻度} &= D(A_1 A_2) = D(A_1) A_2 + A_1 D(A_2) = A_1 \lambda_1 A_2 + A_1 A_2 \lambda_2 \\ &= A_1 A_2 (\lambda_1 + \lambda_2) \end{aligned}$$

各装置のアベイラビリティが 0.9998 で、故障率が 2.0 ならば、

$$\text{故障頻度} = 0.9998 \times 0.9998 \times (2.0 + 2.0) = 3.9984$$

となる。

(6) 総合評価

評価結果が信頼性及びコストなどの観点から妥当となるまで(1)~(5)を繰り返して行うことで適切な通信ネットワーク構成が得られる。

2-2-3 非常災害対策

前節では、確率的に発生する装置故障という通信ネットワークの内的障害要因を主に想定し、通信ネットワークを適切に設計する方法を述べた。しかし、地震、火事、風水害などの自然災害という外的障害要因も無視することはできない。

このような外的障害要因から通信設備を守るには、通信ネットワークの冗長化だけでなく、設備の物理的強化、自然災害発生当面の通信途絶回避、通信サービスの早期復旧体制の確立、輻輳対策が必要となってくる。特に災害発生直後に通信途絶を避ける工夫が必要である。このような工夫として、衛星通信車載地球局、孤立防止用無線装置、可搬方交換機、移動電源車、応急復旧ケーブルの確保が行われている。

続いて、災害で停止した通信ネットワークを早期回復するためには、ネットワークオペレーションシステム (OPS) のデータベースが重要な役割を果たす。OPS の災害対策を決定するため、各 OPS についてその機能 (監視・制御)・設備回復への寄与度・サービス提供地域の広さで分類し、重要度の高い OPS の信頼性対策の充実が図られている。

災害復旧に対する事前シミュレーションの検討も行われている。例えば、文献 9) は、災害復旧のための資材・人員の確保の体制、復旧すべき設備の優先順位、人員の駆けつけ時間、復旧実作業時間などの値を入力して、災害復旧に要する時間を計算機シミュレーションによって推定するシミュレータを提案している。これによって、資材の確保の最適配置や最適量の事前検証が可能となる。

■参考文献

- 1) 真壁肇, “信頼性工学入門,” 日本規格協会, 2006.
- 2) W. G. Schneeweiss, “Boolean function with engineering application and computer programs,” Springer-Verlag, Berlin, 1989.
- 3) W. G. Schneeweiss, “The fault tree method,” LiLoLe-Verlag GmbH, Hagen, 1999.
- 4) S. Y. kuo et al, “Efficient and exact reliability evaluation for networks with imperfect vertices,” IEEE Trans. Reliability, R-56, pp.288- 300, 2007.
- 5) C.J. Colbourn, “The combinatorics of network reliability,” Oxford University of Waterloo, 1987.
- 6) A.E. Gera, “Combined k-out-of-n: G; and Consecutive-Out-of-n: G System,” IEEE Trans. Reliability, R-53, pp.

523-531, 2004.

- 7) M. Hayashi, "System failure frequency analysis using a differential operator," IEEE Trans. R-40, pp.601-609, 1991.
- 8) M. Hayashi et al, "Transformation from unavailability to failure frequency expression," IEEE Trans. Reliability R-55, pp.252-261, 2006.
- 9) M. Hayashi et al, "Estimating the restoration speed of telecommunication networks after disaster," IEEE Network Operations and Management Symposium, NOMS'94, 1994.
- 10) 電子情報通信学会ハンドブック委員会, "電子情報通信ハンドブック," オーム社, 1988.
- 11) 電子情報通信学会ハンドブック委員会, "電子情報通信ハンドブック," オーム社, 1998.
- 12) 日本環境測定分析協会, "環境計量士への近道 (上) 第7版," 丸善, 2005.

■3群 - 5編 - 2章

2-3 イーサネット品質

Quality of Ethernet

(執筆著者：鶴沢宗文) [2009年4月 受領]

■概要■

イーサネット（脚注）技術はシンプルな接続ルールと上位レイヤ、特に IP に親和性の高いデータリンク層（レイヤ 2）の protocols として非常に多くのネットワーク領域における標準インタフェースとして利用されている。本節ではイーサネットネットワークの運用管理について、サービスプロバイダの観点からその現状と課題、並びに標準化が進む運用管理のための新しいプロトコルについて述べる。

2-3-1 イーサネット技術と課題

イーサネット技術は 1970 年代の誕生から 1980 年代以降の標準化によって急速な普及を遂げ、現在ではイーサネットスイッチのみならず、パソコンから事業者用コアルータに至るまで IP を使う多くの機器に標準インタフェースとして搭載されている。また最近では家庭用ゲーム機や DVD/HDD レコーダなどインターネットを利用する家電製品にもイーサネットインタフェースが搭載され、その適用先は拡大している。

通信事業者の提供するイーサネット接続サービスはレイヤ 2 スwitch の低廉化と共に「広域イーサネットサービス」として広く普及した。サービス形態の発展やそれを可能にした技術革新については参考文献 1) に詳しいが、ユーザの拠点と通信事業者のネットワークセンターを TDM 専用線で接続した第一世代、VLAN タグをスタックすることにより多くのユーザの収容を可能にする 802.1Q 規格を用いた第二世代、そしてユーザの MAC フレームを通信事業者が管理する新たな MAC フレームでカプセルする第三世代に大別される。この第三世代ではネットワーク内のレイヤ 2 スwitch の負荷を軽減する「Ether over Ether (EoE)」技術が登場し日本の通信事業者には広く普及したものの、参考文献 1) にヘッダ構成の記述がある以外にはいずれの標準化団体の承認も受けていない非標準技術のため世界的には知られていない。しかしながらこのコンセプト自体の有用性は多くのイーサネット機器ベンダに認識されており、フレーミングの細部が異なる IEEE 802.1ah (MAC-in-MAC) として標準化されている。

これらいずれの世代の広域イーサネットサービスにおいてもネットワーク内で MAC フレームの宛先を判別してブリッジング（ストア&フォワード）を行うのはレイヤ 2 スwitch であり、イーサネットネットワークの品質はレイヤ 2 スwitch の装置品質とレイヤ 2 スwitch 間の通信品質で決まることになる。元来コネクションレス型のプロトコルであるイーサネットを実装するレイヤ 2 スwitch には受信した MAC フレームを当該ポートに送信する機能と隣接するレイヤ 2 スwitch とのリンクアップ状態を判別する程度の機能しか具備されておらず、転送先のレイヤ 2 スwitch が動作しているのか否かの確認やイーサネットネットワークにおいてエンドーエンドのフレーム転送経路の接続性を確認したりすることができなかった。すなわち通信事業者が従来 SDH/Sonet 網や IP 網で行ってきたような通信経路の状態把握、品質検知、及び複数ノード間の接続性確認など、サービス提供上最低限必要ないわゆる“キャリアクラス”の運用管理機能が備わっていない。そのため多くの場合ネットワークのエッ

ジに専用装置を設置して ping や traceroute などの IP の運用管理機能で擬似的にイーサネットネットワークの管理を行っているが、レイヤ3での接続性が確認できない場合、どのレイヤ2スイッチが原因であるのかを明示的に特定することはできない。これらの課題をするためイーサネットネットワークにおける品質パラメータの定義やその測定方法などが標準化、もしくは標準化のために議論されている。以下ではイーサネット品質の管理に関する考え方を概説し、将来的な品質規定に資すると考えられるイーサネット OAM 技術について述べる。

2-3-2 イーサネット品質

IP ベースアプリケーションの多様化や企業系ネットワークに求められる品質確保を背景として、イーサネットネットワークの提供品質を定義するいくつかの標準が出てきている。ただし、IEEE 802.3 が規定する 10BASE-T から 10GbE までの多様な物理規格では各々の送受信規格における符号誤り率などの許容品質基準が統一されていないことや、イーサネットレイヤにおける品質測定技術そのものがこれまで未熟であったことにより、品質規定として SDH/SONET ネットワークにおける SD/SF のような数値的規定はまだほとんどない。品質を規定するための用語と定義は ITU-T Y.1563²⁾と、その中でも参照される Metro Ethernet Forum (MEF) の文書³⁾に示されている。そこでは主にネットワーク帯域、フレームロス率、フレーム転送遅延及び遅延変動の定義が示されているが、測定手法そのものは Out of scope とされ将来課題であるとしている。

ネットワーク帯域に関しては次の考え方が示されている。

- ・ CIR (Committed Information Rate) : 輻輳が生じても保証される帯域 (帯域保証値)
- ・ EIR (Excess Information Rate) : 通信利用してよい最大帯域 (帯域確保値)

このネットワーク帯域の設定値に対し、CIR 値以下の帯域を Green、CIR 値以上 EIR 値以下の帯域を Yellow、EIR 値以上物理帯域以下の帯域を Red と定義してスイッチで転送されるトラフィックの Service Level Agreement (SLA) を定義する際の目安としている。同様に、スイッチ内の Queue に関する考え方として CBS (Committed Burst Size) と EBS (Excess Burst Size) が定義されている。ただし、CIR、EIR の議論が bit per second (bps) で行われるのに対し、スイッチにおけるフレーム長ごとの転送能力は frame per second (fps) で取り扱われることが多いため、標準化の場では統一の必要性についての提案及び議論もある。

フレームロス率の考え方は Ingress と Egress における入出力フレーム数の比であるため理解は容易である。ただし、イーサネットネットワークの場合、Ingress が 1000BASE、Egress が 100BASE といった、UNI の帯域が一致しない場合があり、特に帯域が小さくなるポイントにおいてフレームが廃棄される事象そのものは正常動作でありカウンタも定義されていないことから、ネットワーク設計上はエッジスイッチのポート数や帯域、想定されるパストトラフィックに対する許容パストサイズなどを十分に検討する必要がある。

フレーム転送遅延に関しては、イーサネットレイヤにおける遅延測定がなかったため、多くの場合 ICMP による往復遅延測定手法及び RFC 2544 に準じた評価がなされてきた。後述するイーサネット OAM 技術において測定フレームのフォーマットは定義されているが、遅延に関する評価方法は Round-Trip か One-Way か、また In-Service か Out-of-Service かなど、評価方法は複数の標準化団体で議論が進んでいる。またフレーム転送の遅延変動については ITU-T Y.1563 では送受信時間の差分を統計処理するのにに対し、MEF では RFC 2544 に準じて

フレーム間ギャップから遅延変動幅を定義する。フレーム転送遅延及び遅延変動幅の規定は測定手法を含めて提供する SLA にどのような定義が相応しいのか、利用形態を熟慮のうえ、選択する必要がある。

2-3-3 イーサネット OAM 技術

イーサネットネットワークにおける品質・性能に関する測定手法の確立を目指して標準化されたのがイーサネット OAM 技術である。イーサネット OAM 技術は複数の標準化団体で定義されており、ITU-T Y.1731⁴⁾、IEEE 802.1ag⁵⁾及び Metro Ethernet Forum (MEF) 17⁶⁾が公式に参照される。ここでは ITU-T Y.1731 と IEEE 802.1ag を取り上げ、共通の機能として定義されている Continuity Check (CC)、Loop Back (LB)、Link Trace (LT) などについて解説する。メディアコンバータや PON 技術の規定を含む IEEE 802.3ah もイーサネットフレームを使った 2 点間の接続性確認などの OAM 機能を提供するので広義にはイーサネット OAM に含まれる。そのため通常は便宜上二つの OAM を区別するため IEEE 802.3ah を「Link OAM」、IEEE 802.1ag を「Service OAM」と称している。この中で代表的に参照される ITU-T Y.1731 と IEEE 802.1ag は全く異なる内容が定義されているわけではなく管理アーキテクチャやフレーミングなどは互いに草稿段階からリエゾンとの関係を持ち大きく齟齬のないようになっている。特徴を列記すれば、ITU-T Y.1731 は SDH/SONET ネットワークの運用管理性に準ずるべく多くの試験項目が擁すること、IEEE 802.1ag はレイヤ 2 スイッチの実装を考慮した多数の定義を行っていることが挙げられる。

(1) フレーム構成

イーサネット OAM の各機能に共通のフレームヘッダは、既存のイーサネットネットワークに後方互換性を保証するため標準イーサネットフォーマットに準拠している。したがってイーサネット OAM フレームを認識しない既存レイヤ 2 スイッチは単なる MAC フレームとして宛先のみを判別して転送動作を行いイーサネット OAM フレームが強制破棄されることはない。図 2・11 はイーサネット OAM フレームのフレームフォーマットを示す。

					Destination MAC Address				
Source MAC Address					*802.1Q EtherType				
*802.1Q tag					EtherType				
MA level	ver	OpCode	Flags		TLV offset				
TLV									
					End TLV				
FCS									

* VLANタグを付ける場合

図 2・11 イーサネット OAM フレーム

2 オクテットの Ethertype フィールドがイーサネット OAM フレームであることを示し「0x8902」が定義されている。メンテナンス領域 (Maintenance Domain: MD) レベルフィールドはメンテナンスエンティティグループ (Maintenance Entity Group: MEG) レベルを定義し、

後述する管理アーキテクチャにおいて管理階層を決定する。OpCode フィールドはイーサネット OAM 機能の種別を表し、ITU-T Y.1731 と IEEE 802.1ag の共通機能並びに独自機能を考慮した通番が割り当てられている。この OpCode の値と TLV (Type, Length, Value) フィールド値の組合せにより各種機能が実現される。

(2) 管理レベル

図 2・12 には ITU-T の勧告で定義されたメンテナンスレベルの概念図を示す。ここでは二つの異なるネットワークオペレータがそれぞれ 3 台と 4 台のレイヤ 2 スイッチを有してイーサネットサービスを適用し、両端に二つの顧客設備 (CE) が接続されていることを想定している。

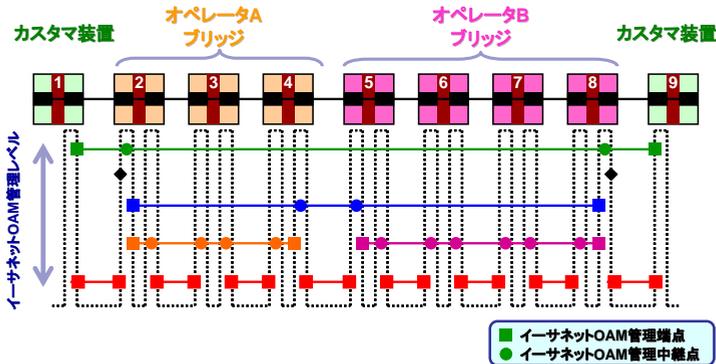


図 2・12 管理レベルの適用アーキテクチャ

前述のフレームヘッダにおける MD レベルフィールドは 3 ビットで構成され、8 段階の MD レベルが規定される。勧告ではレベル 0~2 の 3 段階が「Operator」、レベル 3, 4 の 2 段階が「Service Provider」、レベル 5~7 の 3 段階が「Subscriber」とされ、それぞれの責任分解点やネットワーク検査のために必要な管理点を設定することを規定している。例えばレベル 0~2 ではオペレータ内部のスイッチ間リンクやセグメントごとに、レベル 3, 4 ではサービスプロバイダとして顧客設備に接続される事業者設備のエッジ間で試験や監視を行い、レベル 5~7 では顧客設備間のエンド-エンドで試験や監視が行われることを想定している。

イーサネット OAM では管理端点 (MEP: Maintenance entity group End Point) と管理中継点 (MIP: Maintenance entity group Intermediate Point) という二つの概念を導入し、ネットワークオペレータやサービスプロバイダが MEP, MIP を管理レベルごとに設けることによって OAM メッセージの送受信を行う。すべてのイーサネット OAM 機能は隣接する二つの MEP 間、または MIP を挟んだ MEP 間で実行される。

(3) Continuity Check (CC)

図 2・13 にはイーサネットネットワークにおいて Continuity Check (CC) のフレーム送受信を行うイメージを示す。CC は MEP 間の接続性を継続的に監視するための機能であり、CC を送信する MEP 側では 3.33 ミリ秒から 10 分までの送信間隔を設定する。

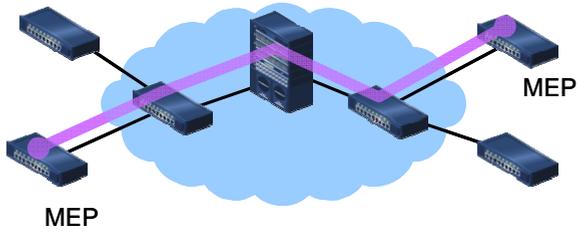


図 2・13 Continuity Check の実行イメージ

CCの受信を設定したMEPでは常にCCの受信間隔を監視しており、設定送信間隔の3.5倍の時間に相当するタイミングでCCが受信されない場合、送受信デバイスや通信経路の不具合が生じたと判断する。ネットワークの信頼性の観点からは送受信間隔は短い方が望ましいが、間隔が短いほどハードウェアに対する負荷が大きくなる。また最小の3.33ミリ秒間隔ではCCメッセージだけで200 kbps以上の帯域が消費されるためデータ通信に利用できる帯域が減少して相対的なネットワークコストの上昇につながる。CCフレームを用いたネットワークの設計においては、信頼性向上と総コストのトレードオフを考慮しなくてはならない。

(4) Link Trace (LT)

リンクトレースはイーサネットフレームの転送経路を明示的に認識するための機能である。MEPはターゲットMACアドレスをTLVフィールドに格納してマルチキャストアドレスをDAフィールドに記述してLink Trace Message (LTM)を送信する。図2・14にはイーサネットネットワークにおいてリンクトレース機能を実行する際のイメージ図を示す。

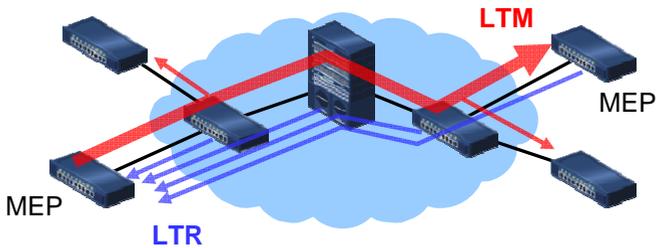


図 2・14 Link Trace の実行イメージ

LTMを受信したMIPはそのターゲットMACアドレスが自Filtering Data Base (FDB)に登録されているか否かを判断し、登録されていれば「RlyFDB」メッセージと自MACアドレス情報をTLVフィールドに書き込んだLT Reply (LTR)フレームを返信する。LTMのTLVフィールドにはTTL (Time To Live) 値が設定でき、MIPはLTRの返信と同時にTTLを一つ減算した値を書き込んだLTMをリンク先のスイッチに転送する。このLTMの受信、LTRの返信、新たなLTMの転送はターゲットMACアドレスを自装置内に有するレイヤ2スイッチに到達するまでTTL値の範囲で繰り返される。LTMの受信後にターゲットMACアドレスが自

装置内にある場合には送信元の MEP に「RlyHit」メッセージを TLV フィールドに書き込んだ LTR フレームを送信元 MEP に返信する。このようにリンクトレース機能は正常状態におけるネットワークでは LTM に対する LTR を TTL 順にリスト表示することによって転送経路とターゲット MAC アドレスまでのスイッチ接続段数を確認でき、ネットワーク障害もしくはスイッチ動作の不具合など故障原因の究明に大きな役割を果たすと考えられる。

(5) Loop Back (LB)

ループバック機能も LT と同様に Loop Back Message (LBM) フレームと Loop Back Reply (LBR) フレームを MEP 間で送受信することにより実現される。宛先 MAC アドレスにはユニキャスト、マルチキャストのいずれかを記述し、ユニキャストアドレスの場合はターゲット MAC アドレスまでの接続性確認を行い、マルチキャストアドレスの場合には同一管理グループ内の MEP の存在を確認することができる。図 2・15 にイーサネットネットワーク上でループバック機能を実施した際のイメージ図を示す。

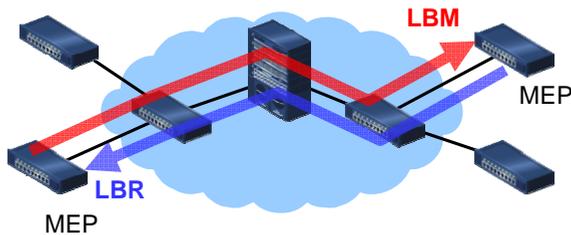


図 2・15 ループバック機能の実行イメージ

ITU-T Y.1731 と IEEE 802.1ag の共通機能ではないため小項目としての記載を割愛するが、ITU-T Y.1731 では LBM/LBR の送受信と同じフレームワークにおいて Frame Delay Measurement (DM) 機能と Frame Loss Measurement (LM) 機能を規定している。DM 機能はメッセージ中の TLV フィールドにタイムスタンプを記述してリプライフレーム受信時の時刻と記述された送信時間との比較によって往復遅延の測定が可能になる。同様に LM 機能は送信フレーム数と受信フレーム数の比較によって転送経路中のフレームロスに関する情報を取得して品質判断の指標にするものである。

2-3-4 今後の展望と課題

イーサネット技術とネットワーク構築上の課題、並びにイーサネット品質と OAM 技術について概説した。イーサネットネットワークの品質及びその向上策については標準化の途にあり今後ますます高品質なネットワーク装置並びにイーサネット接続サービスが提供されることが期待される。一方で前述のように幅広い通信速度規格が存在するイーサネット技術において統一的な品質基準を設けることが難しいこと、それに伴って品質に関する数値基準を導入することに対して慎重であるなどの課題もある。また多くのイーサネット装置ベンダ、半導体部品ベンダは ITU-T Y.1731、IEEE 802.1ag の最終化後に実装を進めているが、キャリアクラスを謳うイーサネットスイッチが即時導入されているわけではなく、イーサネット OAM

機能の市場投入及び商用実ネットワークでの活用という段階まではまだ時間を要すると考えられる。しかしながら IP 時代の低コストインフラストラクチャとしてイーサネットが果たしてきた役割は大きく、更に SDH/SONET 並の信頼性と運用管理性を備えることにより、より高品質なサービスを低コストで提供することが可能になると考えられる。

■参考文献

- 1) 阿留多伎明良編著, “広域イーサネット技術概論,” 電子情報通信学会, 2005.
- 2) ITU-T recommendation Y.1563, “Ethernet frame transfer and availability performance,” 2009.
- 3) Metro Ethernet Forum 10.2, “Ethernet Services Attributes Phase 2,” 2009.
- 4) ITU-T recommendation Y.1731, “OAM functions and Mechanisms for Ethernet based Networks,” 2006.
- 5) IEEE P802.1ag, “Connectivity Fault Management,” 2007.
- 6) Metro Ethernet Forum, technical specification MEF 17, “Service OAM Framework and Requirements,” 2007.

■3群 - 5編 - 2章

2-4 標準化動向

(執筆者：大岸智彦) [2011年1月 受領]

通信サービスの多様性・品質向上への要求が高まる中、通信事業者が提供する通信サービスの品質を客観的に規定する仕組みが必要となる。これに対して、ITU-T SG12では、通信サービスの種別ごとの品質ガイドラインの策定を、IETF IPPM WGでは、プロトコル的な観点でIPパケットの品質メトリック及び測定方法の定義をそれぞれ目標とし、それぞれ標準化を行っている。本節では、ITU-T SG12における品質規定、並びに、IETF IPPM WGにおける品質メトリックにかかわる標準化動向について述べる。

2-4-1 IP層の品質規定

(1) イベント及びパラメータの規定

ITU-T 勧告 Y.1540¹⁾では、IP層における品質を、参照イベント、性能パラメータ、アベイラビリティパラメータの観点から規定している。本勧告での対象範囲を示した概念図を図2・16に示す。

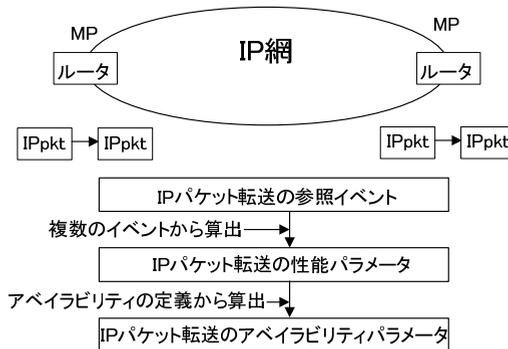


図2・16 IP層の品質規定の概念

参照イベントとは、IP網の境界線上に位置する測定点（MP：Measurement Point）で発生するIPパケットに関する事象、あるいは、複数の測定点での関連より得られる事象を定義したものである。性能パラメータとは、複数の事象をもとに、IP網の性能に関わる数値を算出したものである。例えば、性能パラメータの一つであるIPパケット転送遅延（IPTD：IP packet transfer delay）は、Egress MPでのイベント発生時刻（ t_2 ）からIngress MPでのイベント発生時刻（ t_1 ）を引いた値、ただし $t_2 > t_1$ かつ $t_2 - t_1 \leq T_{\max}$ の場合のみ有効、として定義されている。IPパケット転送遅延の平均値、最小値、メディアン、分散などについても規定されている。

その他の性能パラメータとしては、IPパケットエラー率（IPER：IP packet error ratio）、IPパケットロス率（IPLR：IP packet loss ratio）、IPパケット順序逆転率（IPRR：IP packet reordered ratio）、経路変動などによる連続ロスを規定したパラメータ（IPSLBR：IP packet severe loss

block ratio) などが存在する。IP サービスアベイラビリティについては、IP パケットロス率が 0.75 を超える場合に非可用である (unavailable) と定義し、可用、非可用となる時間率を用いて、PIU (percent IP service unavailability)、PIA (percent IP service availability) のパラメータが規定されている。

なお、ITU-T 勧告 Y.1540 の付録として、Appendix III において速度やスループットに関連するパラメータの定義、Appendix VII において FEC (Forward Error Correction) を考慮したストリーム補完技術のためのパラメータの定義、Appendix VIII においてリンクごとのスループットや可用帯域などのパラメータの定義などが行われている。

(2) 品質目標値の規定

ITU-T 勧告 Y.1541²⁾では、勧告 Y.1540 をベースとして、クラスごとの品質目標値を規定している。表 2・2 にその目標値を示す。

表 2・2 IP 層の品質目標値 (抜粋)

パフォーマンスパラメータ	計算方法	クラス 0	クラス 1	クラス 2	クラス 3	クラス 4	クラス 5
IPTD	平均 IPTD の上限	100 ms	400 ms	100 ms	400 ms	1 s	U
IPDV	(IPTD $1-10^3$ 位値-IPTD 最小値) の上限	50 ms	50 ms	U	U	U	U
IPLR	上限	1×10^{-3}	U				

(注) U は、Unspecified を示す。

これらの目標値は、評価期間 (1 分が推奨されている) ごとに計算した値の上限により規定されている。例えば、IPTD については、評価期間で得た IPTD の平均値の上限が参照値となる。また、IP パケット遅延変動 (IPDV: IP Packet Delay Variation) については、評価期間で得た IPTD 値を昇順に並べ、その $1-10^3$ 番目の値から最小値を引いた値の上限が参照値となる。

クラス 0 及び 1 は IP 電話などのリアルタイムの双方向の通信、クラス 2 及び 3 はインタラクティブなデータ通信、クラス 4 は映像配信、クラス 5 はベストエフォートの通信を想定している。近年 (2009 年現在)、IP テレビ放送などを想定したプロビジョナルクラス (クラス 6, 7) が規定されており、これらのクラスでは IPLR の目標値が 1×10^{-5} となるなど、より厳しい規定となっている。

2-4-2 各層・各プロトコルの品質規定

IP 層以外に関しても、各層及び各プロトコルにおいて、以下の品質規定が標準化されている。

(1) IP マルチキャストの品質

IP マルチキャストの特性を考慮した品質に関して、勧告 Y.1544 において規定されている。代表的なパラメータとして、あるマルチキャストツリーにおいて、全体でのパケット損失率

を示すグローバルパケット損失率（Global loss ratio）や、受信ノードごとの片道転送遅延の平均値を求めたグローバル平均片道転送遅延時間（Global mean one-way delay）などが存在する。

(2) イーサネットの品質

イーサネット上でのフレーム転送に関する性能及び可用性の定義について、勧告 Y.1563⁴⁾において規定されている。本勧告では、1対1の通信だけでなく、1対多を対象とした通信に関する規定も行われている。

(3) MPLSの品質

MPLS ネットワークを対象とした品質に関しては、勧告 Y.1561⁵⁾において規定されている。本勧告では、勧告 Y.1540 に準拠するかたちで、MPLS ネットワーク上での遅延やパケット損失に関するパラメータを定義している。

(4) 上位層の品質

IP 層よりも上位層の品質を規定している勧告について、いくつか紹介する。勧告 Y.1560⁶⁾では、TCP コネクションの品質を規定している。勧告 Y.1531⁷⁾では、SIP のセッションの品質を規定している。

2-4-3 品質規定の利用促進

通信事業者が上記の品質規定を利用する上で、補助的な役割を示す勧告を以下に示す。

(1) IP 品質目標値を実現するフレームワーク

通信事業者間でエンドツーエンドの IP 品質目標値を実現するフレームワークに関して、勧告 Y.1542⁸⁾で規定されている。本勧告では、トップダウン、ボトムアップの 2 つのアプローチが提案されている。前者は、UNI-UNI 間品質目標値を、何らかの方法で各事業者に配分して、各事業者は自網に配分された品質目標値を実現できるように、設計、制御、管理を行う。後者は、相互接続の際、各網の提供事業者が実現可能な品質値を示し、UNI-UNI 間の経路に沿って品質値を積み上げ、目標値を満たしていない場合に、UNI-UNI 間の経路を再考するか、あるいは、想定品質クラスを満たせないものとして品質クラスを変更する。

(2) 通信事業者間での情報交換に関する規定

上記のフレームワークを用いた QoS 制御を実現するため、相互接続された通信事業者間での交換される情報が、勧告 Y.1223⁹⁾において規定されている。通信業者で交換される情報については、トラヒックに関する情報（Tspec）、優先度に関する情報（Pspec）、品質に関する情報（Qspec）に分類されている。

(3) 品質測定

IP 網上での品質測定方法に関して、勧告 Y.1543¹⁰⁾で規定されている。本勧告では、品質測定にかかわる要求条件として、品質測定情報の顧客、通信事業者、通信事業者間での通知に関する規定を行っている。また、アクティブ測定、パッシブ測定に関して規定し、それぞれ測定方法、パラメータ、時間粒度などを規定している。

2-4-4 IETF IPPM WG

続いて、品質メトリックの標準化を行う IETF IP Performance Metric Working Group（IPPM WG）の活動について紹介する。

IETF IP Performance Metric WG は、インターネットの通信サービスにおける品質、性能、安定の指標となるメトリックの標準の開発を目指す、IETF のワーキンググループである¹¹⁾。IPPM WG によって規定される標準メトリックは、ネットワークの運用に限らず、エンドユーザや、様々な機関の検証に用いられることを一つの目的としている。規定されるメトリックは、ある特定のネットワーク状態の良し悪しを示すのではなく、偏りのない性能の測度を提供する。そのために、計測方法も含めた標準の策定が行われている。

表 2・3 に、IPPM WG で既に規定された、あるいは取り組み中のメトリックを示す。

表 2・3 IPPM WG で規定されるメトリック (2008 年 4 月 30 日現在)

メトリック	概要	文献
Connectivity	ある特定の時間の間、特定のホストへの片方向または双方向の到達性の有無を示す指標と、計測方法を定義する。	RFC2678 ¹²⁾
One-way delay	RFC2679 は単一パケット及びポアソン分布で送出するパケットストリームによる、片道遅延の計測方法とその統計値の算出方法を定義し、RFC3763 は計測システムのプラットフォームを定義する。	RFC2679 ¹³⁾ , RFC3763 ¹⁴⁾
One-way loss	RFC2680 は単一パケット及びポアソン分布で送出するパケットストリームによる、ロスの計測方法とその統計値の算出方法を定義する(RFC3763 は同上)。	RFC2680 ¹⁵⁾ , RFC3763 ¹⁴⁾
Round-trip delay	RFC2681 は単一パケット及びポアソン分布で送出するパケットストリームによる往復遅延の計測方法とその統計値の算出方法を定義し、draft は RFC3763 から拡張して双方向または往復の遅延及びロスを計測するプラットフォームを定義する。	RFC2681 ¹⁶⁾ , draft-ietf-ippm-twamp-07.txt ¹⁷⁾
Round-trip loss	同上。	draft-ietf-ippm-twamp-07.txt
Delay variation	RFC3393 は単一パケット及びポアソン分布で送出するパケットストリームによるジッタの計測方法とその統計値の算出方法を定義する。One-way delay の差分を基本としてジッタを求める。draft は片道遅延の変動あるいはパケット間隔の変動をジッタとするときの適用範囲を明確化する。	RFC3393 ¹⁸⁾ , draft-ietf-ippm-delay-var-as-00 ¹⁹⁾
Loss pattern	Loss distance と loss period を導入してパケットストリームの loss pattern を定義する。	RFC3357 ²⁰⁾

表 2・3 IPPM WG で規定されるメトリック (2008 年 4 月 30 日現在) [続き]

メトリック	概要	文献
Packet reordering	基本的な Packet reorder の定義, reorder distance と reorder period を用いて reorder パターンを定義する.	RFC4737 ²¹⁾
Link bandwidth capacity	Link capacity, available link capacity, 並びに二点間の path capacity, available path capacity を定義	RFC5136 ²²⁾

■参考文献

- 1) ITU-T Recommendation Y.1540, "Internet protocol data communication service - IP packet transfer and availability performance," 2007.
- 2) ITU-T Recommendation Y.1541, "Network performance objectives for IP-based services," 2006.
- 3) ITU-T Recommendation Y.1544, "Multicast IP performance parameters," 2008.
- 4) ITU-T Recommendation Y.1563, "Ethernet frame transfer and availability performance, 2009.
- 5) ITU-T Recommendation Y.1561, "Performance and availability parameters for MPLS networks," 2004.
- 6) ITU-T Recommendation Y.1560, "Parameters for TCP connection performance in the presence of middleboxes," 2004.
- 7) ITU-T Recommendation Y.1531, "SIP-based call processing performance," 2007.
- 8) ITU-T Recommendation Y.1542, "Framework for achieving end-to-end IP performance objectives," 2006.
- 9) ITU-T Recommendation Y.1223, "Interworking guidelines for transporting assured IP flows," 2008.
- 10) ITU-T Recommendation Y.1543, "Measurements in IP networks for inter-domain performance assessment," 2007.
- 11) "IP Performance Metric (IPPM) Working Group," IETF Transport Area, <http://www.ietf.org/html.charters/ippm-charter.html>
- 12) J. Mahdavi et al, "IPPM Metrics for Measuring Connectivity," IETF RFC2678, Standards Track, 1999.
- 13) G. Almes et al, "A One-way Delay Metric for IPPM," IETF RFC 2679, Standards Track, 1999.
- 14) S. Shalunov et al: "A One-way Active Measurement Protocol Requirements", IETF RFC 3763 Informational, 2004.
- 15) G. Almes et al, "A One-way Packet Loss Metric for IPPM," IETF RFC 2680, Standards Track, 1999.
- 16) G. Almes et al, "A Round-trip Delay Metric for IPPM," IETF RFC 2681, Standards Track, 1999.
- 17) K. Hedayat et al, "A Two-way Active Measurement Protocol (TWAMP)," ver.7, IETF DRAFT, <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ippm-twamp-07.txt>, 2008.
- 18) C. Demichelis et al, "IP Packet Delay Variation Metric for IPPM," IETF RFC 3393, Standards Track, 2002.
- 19) A. Morton et al, "Packet Delay Variation Applicability Statement," ver.0, IETF DRAFT, <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ippm-delay-var-as-00.txt>, 2008.
- 20) R. Koodli et al, "One-way Loss Pattern Sample Metrics," IETF RFC 3357 Informational, 2002.
- 21) A. Morton et al, "Packet Reordering Metrics," IETF RFC 4737, Standards Track, 2006.
- 22) P. Chimento et al, "Defining Network Capacity," IETF RFC 5136 Informational, 2008.