

# ネットワークシステムにおける可用性測定の考察

藤堂 伸勝†      金岡晃†      加藤雅彦‡      岡本栄司†

† 筑波大学大学院システム情報工学研究科

305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

toudou@cipher.risk.tsukuba.ac.jp {kanaoka,okamoto}@risk.tsukuba.ac.jp

‡ 株式会社アイアイジェイテクノロジー

101-0051 東京都千代田区神田神保町 1-105 神保町三井ビルディング

masa@iij-tech.co.jp

あらまし 近年、インターネットを利用したサービスの提供が一般化され、サービスを提供するネットワークシステムは高い可用性が求められるようになった。可用性の測定は MTBF が広く知られている。しかし、ネットワークシステムは機能の異なる複数のネットワーク機器により構成され、その通信は複数の階層をまたがった複雑な依存関係をもつため、これまでの可用性測定指標は適用が困難である。そこで、本研究ではネットワークシステムを対象に、各階層ごとの通信の依存関係を考慮した可用性の定量化を検討する。

## A Study of Availability Measurement on Networked System

Nobukatsu TOUDOU†      Akira KANAOKA†      Masahiko KATO‡  
Eiji OKAMOTO‡

† Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba,  
1-1-1, Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573, Japan

toudou@cipher.risk.tsukuba.ac.jp {kanaoka,okamoto}@risk.tsukuba.ac.jp

‡ IJ Technology Inc.

1-105 Kanda Jinbo-cho, Chiyodaku, Tokyo 101-0051, Japan

masa@iij-tech.co.jp

**Abstract** Recently, high availability of a networked system, which consists of various network equipments and uses LAN technology to provide services, is required, because many people are using Internet services. MTBF is known as the way of availability measurement. However, the data communication on the networked system have complex dependency among some layers. Therefore, it is difficult to apply MTBF to the networked system. In this paper, we study an availability measurement for dependency of data communication among some layers.

## 1 はじめに

Web ページの閲覧、メールの送受信、キーワード検索を行う場合など、現在様々なサービスが、複数のネットワーク機器やサーバによって構成されたシステム（以後ネットワークシステム）を通じて提供されている。インターネットの利用が一般的になり、このようなサービスは世界中の誰もが 24 時間いつ

でも利用できることが求められるようになった。このため、ネットワークシステムには高い可用性が必要となってきた。

信頼性工学の分野では、故障率とフォールトツリー解析（以後 FTA）を用いて、複数の機器で構成される装置全体の稼働率を数値で導出することが可能であるため、この稼働率計算を適応することでネットワークシステムの可用性を定量的に導出できると考

えられる。しかし、FTA でネットワークシステムを解析しようとするツリーが巨大かつ複雑化し、ツリーの生成および計算が困難なものとなる。ネットワークシステムはルータや Web サーバなど機能の異なる多数の機器群で構成され、各機能間の依存関係を複雑化しているためである。

そこで本研究では、ネットワークシステムにおける各階層ごとの通信の依存関係を考察し、その依存関係を抽出するアルゴリズムを提案することで、よりネットワークシステムに適した可用性の導出方法を検討していくこととする。

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章では FTA を用いた稼働率計算方法と問題点について説明を行う。第 3 章ではネットワークシステムにおける階層ごとの通信の依存関係について議論し、その依存関係を抽出するアルゴリズムを提案する。第 4 章では、アルゴリズムを利用した可用性の導出方法について考察する。最後に第 5 章でまとめる。

## 2 関連研究

信頼性工学の分野では、平均故障間隔 (MTBF) の逆数である故障率と FTA を用いて、複数の構成要素からなる機器全体 (以後システム) の稼働率を定量的に導出できる。以下では、故障率と FTA を用いた稼働率導出方法を説明し、この方法をネットワークシステムに適用する場合どのような点が問題となるかを示す。

### 2.1 FTA を用いた稼働率計算

FTA はシステムや機器の信頼性及び安全性の図式解析手法である。FTA は、一般的にシステムの故障をトップ事象において、その事象が生ずるための 1 次要因、2 次要因、それ以下の要因を展開して、これらの要因同士を論理記号で結合する [1]。このようにして要因の上下関係が故障の因果関係として表現される。要因同士の関係には直列系と並列系 (図 1 参照) が存在する。直列系は、どの構成要素が故障してもシステム故障となるため、構成要素  $i (i = 1, \dots, n)$  の故障率を  $q_i$  とすれば、システム  $S$  全体の故障率は、

$$q(S) = q(1 \cup 2 \cup \dots \cup n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i) \quad (1)$$

と表わされる。

並列系は、すべての構成要素が故障した場合のみシステム故障となるため、

$$q(S) = q(1 \cap 2 \cap \dots \cap n) = \prod_{i=1}^n q_i \quad (2)$$

と表わされる。

図 2 にシステムの構成要素 4 つを直列に接続し、そのうちの 1 つが並列で構成されている場合の FTA で導出された図 (FT 図) を示す。図 2 の各事象ごとに記されている数値は、それぞれの要因の故障率を表している。システムの稼働率 = 1 - システム全体の故障率より、システム全体の稼働率は  $1 - 0.064 = 0.936$  と計算できる。

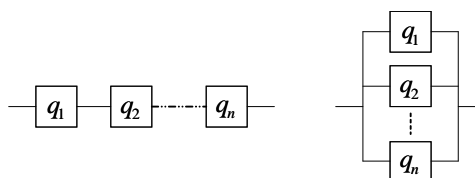


図 1: 直列系と並列系

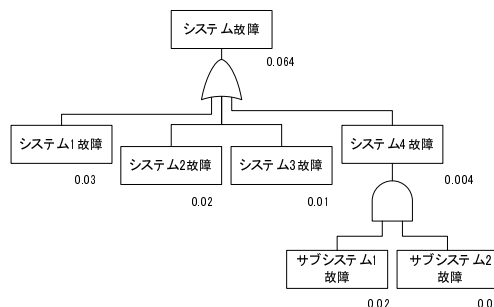


図 2: FT 図の一例

### 2.2 問題点

ネットワークシステムは複数の要因同士の関係によって成り立っている。FTA では移行記号 (Transfer Event) を用いることでネットワークシステムに適応することは可能であるが、その場合移行記号を多用することになり、FT 図は非常に複雑かつ巨大になる。加えて、その FT 図を用いた稼働率計算を行うとなるとさらに複雑さを増し、適用困難となる。実際に山本らの研究 [2] は、移行記号による影響を稼働率計算には考慮していない。このため、ネットワーク

システムに対して FTA は適しておらず、ネットワークシステムの特徴を捉えた、より簡単な方法を用いて稼働率計算を行うことが必要である。

### 3 ネットワークシステムの特徴

ネットワークシステムは、ルータやスイッチ、ファイアウォールなど複数の機器によって構成される。それぞれの機器は、TCP/IP 階層モデルによって物理層 (レイヤ 1)、データリンク層 (レイヤ 2)、ネットワーク層 (レイヤ 3)、トランスポート層 (レイヤ 4)、アプリケーション層 (レイヤ 5) と定義され、それらの通信が組み合わさって各機能が提供される。例えば、ルータが行うルーティング機能は、レイヤ 3 で経路制御を行い、経路制御を行うためには、レイヤ 1 や 2 での通信が正常に行われていることが必要になる。一方で、レイヤ 3 での経路制御がうまく機能していないからといって、レイヤ 1 や 2 の通信が原因だと特定することはできない。レイヤ 3 で行われる経路制御情報を持った通信のやりとりだけが機能しない場合もあるからである。

このように、各機器は複数の階層にまたがって機能が提供され、それぞれ関係をもつことがわかる。以下では、金岡らの提案モデル (以後 NSQ モデル) [3] を利用して、各レイヤごとの通信の依存関係を考察し、これを抽出するアルゴリズムを提案する。

#### 3.1 NSQ モデル

ネットワークシステムの通信の依存関係を考察する手段として、NSQ モデルを利用する。このモデルはノードとリンクによって、階層構造を考慮したネットワークシステムを表現できる。ノードは通信が行われる際の送信者、受信者、中継者を表し、ID をもつ。同一レイヤ内のリンクはノード間の通信が実現可能であることを示している。レイヤ間のリンクは上位レイヤのノードが下位レイヤに依存して存在していることを表している。また、これらノードとリンクの幾つかの集合によってファイアウォールやルータなどの機器が表現される。この集合をモジュールと定義している。従来との表現方法の差異を表すため、図 3、図 4 にそれぞれ従来のネットワーク図、モデルを用いたネットワーク図を示す。以後この NSQ モデルを利用して議論を行う。

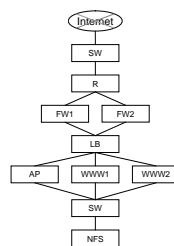


図 3: 従来の図

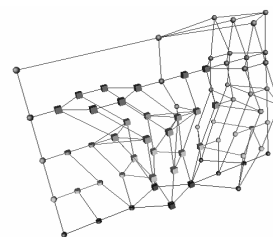


図 4: NSQ モデルの図

#### 3.2 可用性の阻害

可用性が阻害される原因として、通信路の故障やアクセス制御状態の不慮の変化が挙げられる。一般的に通信路とはレイヤ 1 で示されるような物理的な配線 (LAN ケーブル etc) を指すが、実際のネットワークシステムにおけるデータ処理は階層内、階層間で行われるため、この部分も通信路と捉えるべきである。よって、ネットワークシステムの可用性は、各レイヤの通信路を考慮すべきである。各レイヤの通信路が切断され得る状況としては、レイヤ 1 内では LAN ケーブルなどの破損、レイヤ 2 以上ではアクセス制御状態の不慮の変化による通信路の遮断などが考えられる。このように各レイヤによって通信路の切断は別の意味を持つ。

NSQ モデルを利用すると、インターネット、スイッチ、Web サーバの直列構成 (I-S-W と表記) は図 5、ルータが冗長化された場合 (I-R<sup>2</sup>-W と表記) は図 6 と表現できる。ここで、数字はノード ID、点線のリンクはネットワークシステムを立体的に表現した場合の奥のリンクを表すこととする。

図 5 において、レイヤ 1 のリンク (10, 11) が切れた場合、物理的な配線が断線したことを意味するため、その上位のレイヤ 2 の通信も維持できなくなる。このため、リンク (7, 8) も切れる。同様に考えるとリンク (5, 6)、リンク (3, 4) も切れ、レイヤ 1 のリンク切断による影響がレイヤ 2 から 3、レイヤ 3 から 4へと順に伝わっていく。すると、Web サービス自体も維持できなくなるため、リンク (1, 2) も切れる。一方で、図 6 において、レイヤ 1 のリンク (29, 30) が切れた場合を考察すると、図 5 と同様にリンク (23, 24)、(17, 18) も切れる。しかし、リンク (15, 16) やリンク (13, 14) は切れない。ルータの冗長化で Web サービス自体は維持される。よって、下位レイヤのリンクが切れた場合、階層間の依存関係で上位レイヤのリンクは切れるが、冗長化によって切れない場合が存

在することがわかる。

上位レイヤのリンクが切れた場合、下位レイヤのリンクには影響を及ぼさない。例えば、経路制御の異常が物理的な断線を起こすことは考え難いためである。このことは、図 6 においてリンク (20, 22) が切れても、リンク (30, 32) は切れないことに相当する。

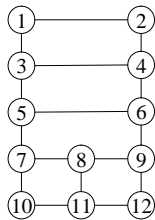


図 5: I-S-W 直列構成

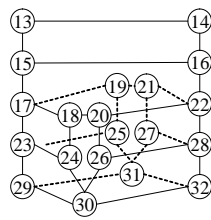


図 6: I-R<sup>2</sup>-W の R 冗長構成

### 3.3 リンクの依存関係抽出アルゴリズム

NSQ モデルを利用して、ネットワークシステムにおける通信の依存関係を考察した結果、

1. 下位レイヤのリンクが途切れた場合、冗長化されている場合を除き、上位レイヤのリンクに影響を及ぼす
2. 上位レイヤのリンクが途切れた場合、下位レイヤのリンクには影響を及ぼさない

という 2 つの依存関係を得た。これらから、リンクが途切れるという事象はリンクそのものに障害が起きる場合のみならず、下位レイヤのリンクの依存関係によっても障害が起きることが分かった。

リンクの依存関係を抽出するアルゴリズムを Algorithm 1, Algorithm 2 に示す。このとき、Algorithm 1 に記された入力  $T$  は、リンク  $(a,b)$  と 1 つ下位レイヤのパス  $[c,d]$  の親子関係を示すデータ  $Parent\_Child$  の集合とする。  $Parent\_Child$  は  $\langle a,b,c,d \rangle$  で表現することとする。また、関数  $f$  はノード ID とリンク情報を入力として、入力したノード ID がもつ下位レイヤのノード ID を返す。

図 7 に、図 8 に記されたネットワーク内のノード ID1 から 2 を入力として、Algorithm 1 を適用した結果の一部を示す。

$[1,2]$  はノード ID1 から 2 への通信経路を意味する。 $[1,2]$  を囲った集合をパスと呼び、 $1 \sim 2$  のよう

に表記することとする。 $(1,2)$  は  $1 \sim 2$  を構成する通信の 1 つでリンクと呼ぶ。 $(1,2)$  が囲われた集合は、 $1 \sim 2$  を構成する通信の集まりを示し、リンク群と呼ぶこととする。各リンクからパスへ向かう矢印はそのリンクがもつ通信の依存関係を表し、黒点はそれ以上依存するパスがないことを示している。点線は、余白の都合上、パスやリンクの依存関係を割愛するために用いている。

リンク群はパスを構成する通信の集まりを意味しているため、リンク群の要素が 1 つでも消滅した場合はリンク群自体が意味をなさない。このため、例えば  $18 \sim 36$  のリンク群  $(18, 19)$ ,  $(19, 35)$ ,  $(35, 36)$  のいずれかのリンクが切れてもリンク群は消滅する。この影響で  $18 \sim 36$  の存続もできなくなり、消滅する。このパスの消滅は矢印に沿った上位レイヤのリンクやパスにも影響を及ぼし、同様の作業を繰り返せばリンク切断の影響範囲がわかる。一方、 $3 \sim 4$  では冗長化されてリンク群が 2 つあるため、片方のリンク群が消滅しても、もう一方のリンク群によって  $3 \sim 4$  は存続する。このような場合には、上位レイヤには影響を及ぼさない。

このようにネットワークシステムが冗長化された場合にも依存関係をうまく抽出ことができ、各アルゴリズムを適用すれば、各通信の依存関係とリンク切断の影響範囲が判断できるようになる。

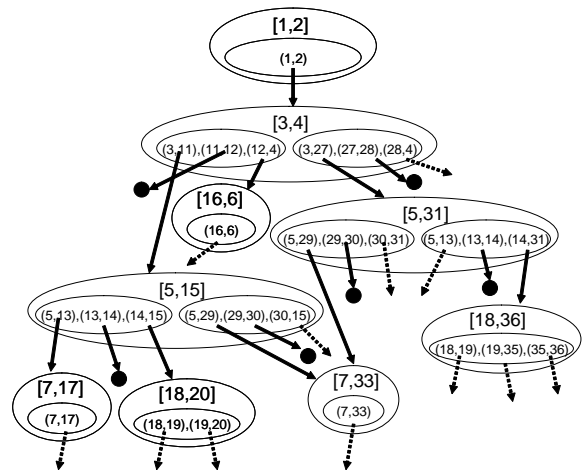


図 7: リンク依存図

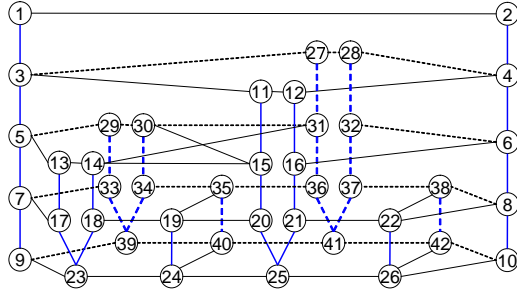


図 8: I-R<sup>2</sup>-S<sup>2</sup>-F<sup>2</sup>-S<sup>2</sup>-W の冗長構成

---

#### Algorithm 1 通信の依存関係を抽出するアルゴリズム: *search\_child()*

---

**Require:** Node  $x, y$ , Link Set  $L$ , Parent\_Child Set  $T$   
**Ensure:** Parent\_Child Set  $T'$

- 1:  $T' \leftarrow \emptyset$
- 2:  $P \leftarrow search\_routes(x, y, L)$
- 3: **for all**  $w \in P$  **do**
- 4:   **for all**  $(i, j) \in w$  **do**
- 5:     **if**  $f(i, L) \neq 0$  **and**  $f(j, L) \neq 0$  **then**
- 6:        $T' \leftarrow T' \cup \{ \langle i, j, f(i, L), f(j, L) \rangle \}$
- 7:        $T' \leftarrow T' \cup search\_child(f(i, L), f(j, L), L, T')$
- 8:     **end if**
- 9:   **end for**
- 10: **end for**

---

## 4 ネットワークシステムにおける可用性の検討

前章において、ネットワークシステムの通信の依存関係を抽出するアルゴリズムを提案した。これを使えば、各レイヤの通信の依存関係を考慮した稼働率計算が可能になる。同時に、あるリンクが切れた場合、そのリンクの影響がどこまで及ぶかも判別可能となるため、リンク切断によるシステムの稼働率への影響も考察することができる。以下では、ネッ

---

#### Algorithm 2 パスを構成するリンク群の集合を抽出するアルゴリズム: *search\_routes()*

---

**Require:** Node  $x, y$ , Link Set  $L$   
**Ensure:** Route Set  $P$

- 1:  $P \leftarrow \emptyset$
- 2: **if**  $(x, y) \in L$  **then**
- 3:    $P \leftarrow \{ \{ (x, y) \} \}$
- 4: **else**
- 5:   **for all** node  $i$  which  $(x, i) \in L$  **and**  $search\_routes(i, y, L) \neq \emptyset$  **do**
- 6:     **for all**  $r \in search\_routes(i, y, L)$  **do**
- 7:        $P \leftarrow P \cup \{ \{ (x, i) \} \cup r \}$
- 8:     **end for**
- 9:   **end for**
- 10: **end if**

---

トワークシステムの稼働率 (以後、システム稼働率) をリンク依存図の頂点にあるパス稼働率とみなして、必要な稼働率計算の導出式を示し、考察を述べる。

### 4.1 リンク群稼働率

リンク群を構成するリンクは、下位レイヤの依存関係に影響を受ける。このため、各レイヤのリンクは、依存する下位レイヤのパス稼働率と自身のリンクがもつリンク稼働率の積となる。ただし、NSQモデルではレイヤ 5 を抽象レイヤと定義しているため、レイヤ 5 自身のリンク稼働率は考慮しないこととする。

リンク群  $G_k$  はパスを構成する集合であるため、すべて直列で構成される。よって、リンク  $(i, j)$  ( $i, j$  は同一レイヤ内のノード ID) の稼働率を  $q_{(i,j)}$  とすると、リンク群の稼働率  $R_k$  は、

$$R_k = \prod_{(i,j) \in G_k} q_{(i,j)} \quad (3)$$

と表すことができる。

### 4.2 パス稼働率

パス稼働率はリンク群稼働率に依存して導出される。パス内に複数のリンク群が存在するときは、両方のリンク群が稼働しない場合のみパスは存続できないとして計算を行う。しかし、パスに存在する複数のリンク群の中に、共通するリンクが存在すると単純に計算すれば重複を許したパス稼働率が導出されてしまう。このため、パスを構成する複数のリンク群から共通するリンク稼働率を除いて計算しなければならない。これらを考慮するため、最初に複数のリンク群の中で共通しているリンクがないかを調査し計算しておく。次に、各リンク群から共通部分を抜いたリンクを再グループ化して、パス稼働率の計算を行う。よって、共通するリンクの集合を  $M$ 、再グループ化したリンク群の集合を  $G'_k$  とすると、パス稼働率  $P$  は、

$$P = \prod_{(i,j) \in M} q_{(i,j)} \{ 1 - \prod_k (1 - R'_k) \} \quad (4)$$

と表すことができる。共通するリンクが存在しない場合のパス稼働率は、

$$P = 1 - \prod_k (1 - R'_k) \quad (5)$$

と表すことができる。

### 4.3 システム稼働率

システム稼働率をリンク依存図の頂点とみなすと、それはレイヤ 5 のパス稼働率であると言える。よって、図 7 を例にとると、1-2 を導出すればよい。この場合、1-2 は (1, 2)、(1, 2) は 3-4 と同じ値である。3-4 は、リンク群 (3,11),(11,12),(12,4) とリンク群 (3,27),(27,28),(28,4) 同士で共通リンクを持たないため、式 5 を用いる。各リンク群は、式 3 で導出される。リンク群を構成するリンクの稼働率は (3,11) であれば、自身のリンク稼働率と 5-15 の積となる。図 8 に記したネットワークにおけるシステム稼働率の計算結果を表 1 に示す。表 1 は、レイヤ 1 から 4 にある全てのリンク稼働率を 0.99 と設定し、それぞれ条件を与えて計算を行った結果である。

### 4.4 リンクの影響に関する考察

(24,40) はルータとファイアウォールの冗長化を行うリンクであるため、このリンクが障害を起こした場合には影響範囲が広いと考えられ、システム稼働率にも大きな影響を与えると予測できる。一方、(26,42) も同様に冗長化を行うリンクであるが、Web サーバは 1 台であるため、システム稼働率には大きな影響は出にくいと考えられる。表 1 に示すように、(24,40) を切断した状態、(26,42) を切断した状態のシステム稼働率はそれぞれ、0.980227126、0.992671361 であった。重要なリンクであると考えられる (24,40) のほうが数値が低く導出され、なおかつ、それぞれのリンク切断後のシステム稼働率は正常時よりも低い結果となっている。これは、リンクの影響の違いをうまく反映しており、可用性を測る指標となり得る結果であると言える。

(26,42) に加え、(21,22) も切断されると、一方のファイアウォールは Web サーバと通信不可能になり、より可用性の低下を受けると考えられる。表 1 に示されるように、(26,42),(21,22) を切断した場合のシステム稼働率は 0.91439253 となり、正常時や (24,40) の切断、(26,42) の切断と比較すると、大きく稼働率を落とす結果となった。このことから、可用性の低下を表す結果が数値で現れたことを示唆する可能性を示すことができたとと言える。同様に、(26,42),(21,22),(34,35) を切断した状況も、サービス

表 1: 図 8 のネットワークシステム稼働率

	システム稼働率
正常時	0.995406798
(24,40) を切断後	0.980227126
(26,42) を切断後	0.992671361
(26,42),(21,22) を切断後	0.91439253
(26,42),(21,22),(34,35) を切断後	0.826168624

を提供するための必要最低限の通信で成り立っているため、システム稼働率は低いと考えられ、それがうまく数値の大きさに現れる結果となった。

## 5 まとめ

本稿では NSQ モデルを用いて、ネットワークシステムにおける可用性の測定方法について議論を行った。フォールトツリー解析を応用した稼働率計算で、ネットワークシステムの可用性を導出しようとする、移行記号を多用した巨大かつ複雑なツリーになり、稼働率計算も困難であった。そこで、ネットワークシステムの特徴を考察し、複数の階層にまたがった通信の依存関係を抽出するアルゴリズムを提案して稼働率計算を試みた。その結果、NSQ モデルを利用して提案アルゴリズムを適応すれば、レイヤごとの通信の存続とその依存関係を考慮したネットワークシステムに適した稼働率計算が可能となった。

今後は、検討した稼働率計算を実際に利用して可用性としての尺度を検証すると共に、ノードに障害が発生した場合の稼働率についても検討を行う予定である。

## 参考文献

- [1] 眞壁肇, "信頼性工学入門", 日本企画協会, 1996
- [2] 山本貴則, 石橋勇人, 安部広多, 松浦敏雄, "セキュリティ対策案選択問題に対するフォールトツリー解析の応用", 情報処理学会研究報告, 2004
- [3] 金岡晃, 藤堂伸勝, 加藤雅彦, 岡本栄司, "ネットワークシステムの安全性定量化に向けた新たな表現モデルとアクセス制御解析", SCIS2008, 2008