

# Valley-free 規則を用いた ネットワークトポロジ描画ツール

野本真吾\*, 福田健介†, 上原稔\*, 森秀樹\*

## Topology Drawing Tool with Valley-free rules

Shingo Nomoto\*, Kensuke Fukuda†, Minoru Uehara\*, and Hideki Mori\*

### 概要

本論文では、これまで考慮されることが無かったトラフィックの方向を考慮した、インターネットトポロジの AS (Autonomous System) レベルでの構造の視覚化について述べる。既存の手法では、単にノードとリンクの表示に着目し、実際のトラフィックの方向について深く鑑みてこなかった。そこで Gao が提案している Valley-free 規則に着目し provider-customer, peer-peer 関係を考慮した描画を行い、これまでの描画とは異なる、トラフィックの流れを表現するネットワーク視覚化ツールを提案する。

## 1. はじめに

### 1.1 背景

インターネットは AS (Autonomous System) と呼ばれる、自律分散したノードが結合したネットワークとして表現され、AS は現実世界の組織 (ISP, 企業, 大学等) に対応する。AS レベルネットワーク構造はランダムグラフからほど遠く、直径が小さく、クラスタ化された (ノード間が密接に結合している) スモールワールド構造であること、また、ノードの次数に大きな偏りがあり、ベキ的な減衰を伴うスケールフリー構造であることが明らかとなっている [1]。ネットワーク構造はその上を流れる情報流の効率に大きな影響を及ぼすことが知られており [2]、現在我々はスモールワールド構造やスケールフリー構造などを応用したルーティングや負荷分散についての研究を行っている。

適切なモデルを構築することは、ルーティン

グ、輻輳制御、負荷分散等、様々な研究分野に対して必要不可欠な作業である。そのため、ネットワークの構造の可視化や管理についての分野の研究が盛んに行われており、トポロジやネットワークの特性を明らかにするための様々なツールがある。ネットワークの帯域や、ルータやサーバの接続、機器の処理能力を含めた構成等をユーザが直感的に理解できるように視覚化し表現することは、ネットワーク全体についての様々な評価を出すための良き指針となる。しかしながら、単純なノード間の接続関係が明らかになっただけでは、ネットワークトポロジ上の情報流の制御アルゴリズムを評価することは難しい。なぜなら、2つのノード間に接続関係があったとしても、実際にそのリンクにトラフィックを流せるかどうかは AS 間のルーティングポリシーに基づくからである。

Gao は AS 間のポリシーを provider-customer, peer-peer の関係に分類し、その関係を推定するアルゴリズムを提案している [3]。customer は provider にトラフィックの中継を依頼している関係にある AS である。各 AS 間は個別の契約を結んでおり、peer-peer 関係は双方向でトラフィックを送り出すことが可能である関係であり、provider と customer の関係は customer が provider に対してトラフィックを送るという関係である。これらの AS 間のポリシーがルーティングに多大な影響を与えているため、ルーティングが複雑になっている。

### 1.2 目的

本研究では、これまでにネットワークの構成の視覚化において考慮されることが無かった、トラフィックの向きを考慮し二点間の経路を視覚化するツールの設計と実装を行う。また、トラフィックの向きを考慮しない場合と選択され

\*東洋大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Toyo University

†国立情報学研究所

National Institute of Informatics

る経路がどの程度異なるかについても確認することで、実装したツールの評価を行う。

## 2. スモールワールドとスケールフリー

ネットワーク構造を表す統計的尺度にはいろいろな提案が存在する。ここでは、最も基本的な2つのモデルについて説明する。

### 2.1 スモールワールド構造

スモールワールド構造は以下の二つの値によって判別することができる [4].

- $L$  (Characteristics path Length)

グラフ中のすべてのノードの組についての最短のパスの平均

- $C$  (Clustering Coefficient)

グラフ中のノード  $v$  が  $k_v$  個のノードと隣接しているとき、 $k_v C_2 = k_v (k_v - 1) / 2$  個のノード間に存在する  $k_v$  本のエッジに対する実際に存在しているエッジの割合を  $C_v$  とし、すべてのノード  $v$  についての  $C_v$  の平均をとったもの。

上記の二値の関係が、 $L$  が小さく  $C$  が大きい場合、スモールワールド構造であるといえる。本来、うまくノードを繋ぎ合わせるには遠いノードを繋ぎ合わせるのでパスが長くなってしまふ。しかし、スモールワールド構造は、パスの長さが全般的に短い上に効率良くノードが繋がっている状態となっている。これにより、スモールワールド構造は高い伝搬性を持つという特性を持っている。

### 2.2 スケールフリー構造

ノードにリンクしているエッジの本数を次数と呼ぶ。スケールフリー構造は、ノードの次数にべき的な減衰を伴う構造であり、ランダムグラフのような指数的な減衰と比べて次数分布が図1のような形となる。

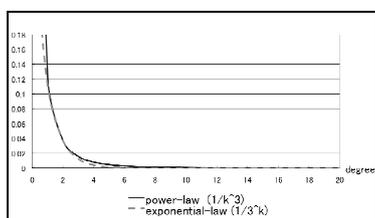


図 1: べき的な減衰を伴うスケールフリー構造

指数則と比べてべき則は、次数が小さいときは急な傾きを示すが、次数が大きくなるに従い傾きが緩やかとなっている。非常に小さい次数を持つものが存在する確率が高い一方で、非常に大きな次数を持つものの存在する確率が0ではない、という特徴を持つため、適切なスケールを持たないということからスケールフリーと呼ばれている。スケールフリー構造を示すグラフに対して両対数を取ったものが図2である。

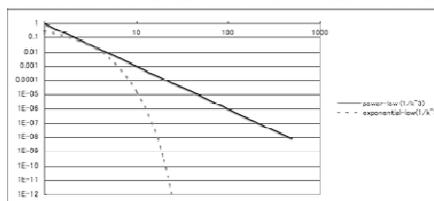


図 2: 両対数スケールのべき則グラフ

両対数スケールのグラフでは、べき則の傾きが直線になるという特徴を示す。

## 3. ルーティング

AS 内外では様々な方式のルーティングプロトコルが利用されている [5].

### 3.1 AS 内外のルーティング

ネットワークの集団である AS は内部と外部で異なるルーティングプロトコルを用いる。

- IGP

AS 内で用いられるルーティングプロトコル。ディスタンスベクタ方式の RIP (Routing Information Protocol) や、リンクステート方式の OSPF (Open Shortest Path First) などのプロトコルが用いられる。

- EGP

AS 間のルーティングプロトコル。現在のインターネットでは主にパスベクタ方式の BGP (Border Gateway Protocol) が利用されている。

### 3.2 ルーティングアルゴリズム

ルーティングアルゴリズムは大きく3つに分類される。

- ディスタンスベクタ方式

経路のコスト値は、経由するルータのホップ値としている。

ii. リンクステート方式

経路のコスト値は、帯域等のリンクの重みとしている。

iii. パスベクトル方式

ディスタンスベクタ方式では経由するルータの数を最適経路の基準にするが、パスベクトル方式では経由するノードのリストを基準にしている。例えば BGP では AS パスという AS 番号を記したリストの AS 番号の数が少ないルートを選択する。これはディスタンスベクタ方式での「ルータ数」とリンクステート方式の「AS 間のリンク情報」よりも確実で、より各ルータの処理を軽減するものである。AS は渡された AS パスに自分の AS 番号を付加して、またそれを隣接する AS に対して渡すという作業を繰り返し、ルーティングテーブルを作る。コスト値は目的地までに経由する AS の数であるが、AS パスの他に、AS としてのルートの優先度を知らせる「LOCAL\_PREF」属性などがあり、パスベクトル方式は AS が持つポリシーを反映させることが出来る方式であると言える。

### 3.3 Valley-free 規則

Gao は AS 間のルーティングポリシーを分類するために Valley-free 規則を使う方法を提案した [3]。Valley-free はトラフィックの方向によって provider-customer, peer-peer 関係を推測するもので、文字通り谷の無いルート以外は越えることができず、谷を含めた以下の 4 つの条件があるルートを通ることが出来ないというものである。それぞれ AS パス内に

- i. 2 個以上の peer-peer 関係のリンクがある。
- ii. provider-customer 関係の後に customer-provider 関係が存在する。
- iii. provider-customer 関係の後に peer-peer 関係が存在する。
- iv. peer-peer 関係の後に customer-provider 関係が存在する

という条件に当てはまるルーティングが無いものとする。provider-customer, peer-peer の関係が推測できる。例として、図 3 のような、点線が peer-peer、実線の直線が provider-customer としてあるグラフを示す。

図 3 においては、AS パス {30, 10, 2

0}, {60, 10, 20, 40} は Valley-free であるが、AS パス {30, 40, 50} は②の条件、AS パス {40, 50, 60} は④の条件により Valley-free でない。また、{40, 50, 60} は選択不可能だが、{60, 50, 40} は経路として選択可能であるということになる。このような手法による、それぞれの AS 間の関係が provider か customer かということ推定したデータが CAIDA [6] によって研究者用に提供されている。

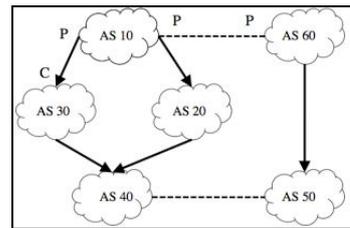


図 4: Valley-Free 規則の例

## 4. グラフ描画

### 4.1 グラフレイアウト

情報を抽象化し視覚化することの効果はグラフのレイアウトの工夫に因るもの大きい。良いレイアウトの評価基準には、ノードの配置やエッジの配線等についての描画規約と、ノード間の距離やエッジの交差数などの表現についての描画規則があり、そのふたつをまとめて美的基準と呼ぶ [7]。描画アルゴリズムのタイプにはアルゴリズムによる理論志向なものや力学モデルなどを用いたシミュレーションによるものなどがある。

ばねモデルは、力学モデルに基づいた発見的な手法として Eades によって提案されたバネ埋め込みと呼ばれるアルゴリズムである [8]。力学的なシステムを真似るモデル的アプローチで、エッジをバネに置き換えてその配置を求めるものであり、バネはノード間の距離が開くとノードを引きつけ、ノード間が近すぎると斥ける役割を果たす。シミュレーションではノードに働く力を計算しそれにしたがってノードを移動させる処理の繰り返しによってレイアウトを変形させる。

## 5. 設計および実装

Valley-free 規則を表現するために、リンクのポリシー等を描画する機能を考慮した設計を行った。また、スケールフリー構造で重要とされるハブも描画することとし、ツールに持たせる機能として

- I. ルーティングテーブルの表示
- II. 指定した2つのAS間の最短経路・次善経路の表示
- III. リンクのポリシーの視覚化
- IV. 描画範囲内の次数の値が大きいASを識別できるように視覚化

という機能を考慮した [9].

機能 I では、中心となる AS が持つ、その他の AS に対する Valley-free 規則に基づいたルーティングテーブルの作成を行う。データとして CAIDA の提供するものを使用するが、経路数が 5000 を越えるため、計算したルーティングテーブルはオンメモリではなくテキストデータとして出力した。また、機能 II では Valley-free に基づいた場合の、他の AS への最短経路・次善経路の1つをハイライトする。最短経路は探索アルゴリズムによって最も早く見つけられる、最もホップ数が少ない経路である。本研究における次善経路は、最短経路以外の経路の中で最もホップ数が少ない経路であり、また比較的 shortest 経路に含まれるノード以外のノードを経路としているような代替性を鑑みた選択を行っている。例を図4に示す。

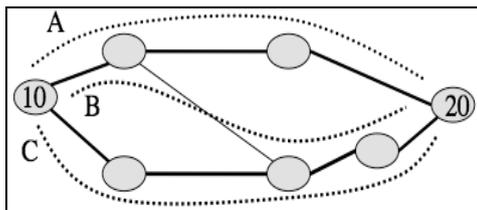


図 4: 最短経路と次善経路

図4中のグラフでは、ノード10からノード20へ到達する経路の中で最も少ないものを破線 A として示してある。このグラフにおける最短経路は破線 A の経路である。その他に、ホップ数が少ない経路として破線 B, C が示してある。経路としては破線 B も C も、ノード10か

らノード20まで、どちらも同じホップ数である。しかし、破線 B の経路上のノードは、最短経路である破線 A の経路上のノードと重複しているものがある。そのため、破線 C の経路の法が最短経路に対して、破線 B の経路よりも代替性が高いものであると考えることができる。

次に、機能 III として、中心の AS からの provider-customer, peer-peer というリンクのポリシーをハイライトし、判別可能にする。描画時においては図5のようにして表現した。図5の上側のリンクが provider-customer 関係を示しており、下側のリンクが peer-peer 関係を示している。

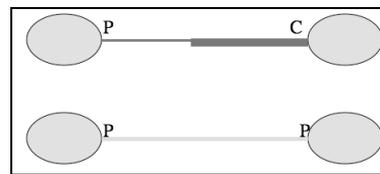


図 5: リンクのポリシー表現

機能 IV では、スケールフリー構造で重要な役目を果たすハブノードの描画オブジェクトの形を変え、判別可能とした。機能 II と機能 IV は、描画時においては図6のようにして表現した。図6の上部に描画されている長方形がハブノードであり、内側に「AS 番号-(リンク数)」を記述している。また、中部と下部に描画されている楕円形のものが、ハブではない一般ノードである。色のハイライトによって最短経路と次善経路を判別することが出来、下部の色が淡い AS 番号 2516 の楕円形が最短経路上の AS を示しており、色が濃い AS 番号 702 の中部の楕円形が次善経路上の AS であることを示している。最短経路でも次善経路でもないハブノードは、描画の際には黄色で表現している。

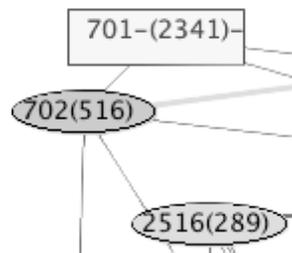


図 6: 経路とハブノードの表現

また、ばねモデルをただ実装するだけでは無く、リンクを多く持つハブノードを描画範囲の上部に寄せる効果も実装した。ハブノードは経路の上流に位置するため、この描画範囲の上部に寄せる効果を用いて、上流下流を表現した。

### 5.1 入力データ

ツールの入力データは、CAIDA が提供している AS トポロジデータのフォーマットに従うものとする。CAIDA のデータは"AS 番号 AS 番号 関係", で表されており、前者の AS 側から見て後者の AS が customer, peer, provider, sibling であるということを示す "関係" の数値で表現している。これを用いて各 AS がノード、各 Link がエッジであるとしてグラフを作成し、ルーティングテーブルを作成する。

CAIDA が提供している AS のデータ数は 2007 年度の時点で 26023 個である。その中の 7129 個のノードが次数 1 のリーフノードであり、次数が 2 以下のノードが全体の半数以上を占めている。以下の図 7 がノードの次数についてグラフ化したものである。また、ポリシーのデータとしては provider-customer 関係のリンクは 48457 本あり、peer-peer 関係のリンクは 4002 本ある。

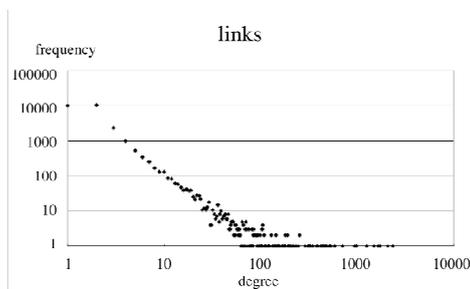


図 7: ノードの次数のグラフ(両対数スケール)

図 7 から、次数の非常に小さいノードが大部分を占めている一方で、次数の非常に大きなノードが 0 ではないということが確認できる。また、スケールフリー構造の特徴である、両対数表示での直線を示す、べき分布が確認できる。本研究では 1000 を越える次数の値を持つノードをハブとして扱っている。

### 5.2 描画

CAIDA が提供している AS 数は 2007 年度の時点で 26023 個であり、それら全ての AS について描画を行うと可視性が低くなってしまう。そのため最短経路と次善経路、近接ハブノードについてのみ描画することとした。以下、2 つの AS として AS9198 (Kazakh telecom) と AS18087 (Toyo) を選択し、描画を行ったものを例とする。図 8 として、AS9198-AS18087 間の最短経路、次善経路、近接ハブノードをそれぞれ描画したものを示す。

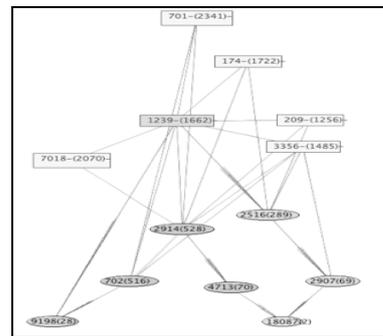


図 8: AS9198-AS18087 間のネットワーク

図 8 の描画範囲の下部には AS9198 と AS18087 を示すノードが描画されており、比較的上部にはハブノードが描画されているのが確認できる。また、最短経路としてはホップ数 4 の経路が描画されており、次善経路として同じホップ数の代替経路が描画されている。図 9 として、描画された最短経路と代替経路である次善経路上のノードとリンクを取り出して示す。

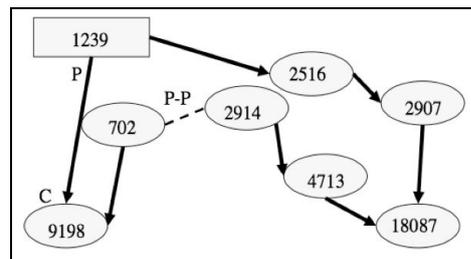


図 9: 最短経路と次善経路上のノードとリンク

図 9 は図 8 中の上側の経路が最短経路として描画されたものを表現したもので、下側の経路が最短経路とホップ数が同じ次善経路として描

画されたものを表現したものである。最短経路上のハブ AS1239 (Sprint) は、インターネットの中心部に位置する Tier1 プロバイダである。また次善経路の AS2914 (Verio) も Tier1 プロバイダであり、AS9198-AS18087 間の最短経路は最上流である Tier1AS を経由しているということがわかる。

本ツールでは全ノードを描画すると視認性が非常に低くなるので、描画対象の取舍選択を行い重要なノードのみを描画したが、Valley-free 規則を用いた場合のルーティングテーブルについては、全てのノードを対象とし、テキストデータとして書き出している。図 10 としてその一部を示す。

```

9198-1239-18734-28509-3001-3002-3003-3004-3005-3006-3007-3008-3009 @12
9198-1239-18734-28509-3001-3002-3003-3004-3005-3006-3007-3008-3009-3010 @13
9198-20485-25462-22822-3043 @4
9198-20485-3343-3058 @3
9198-782-3356-3064 @3
9198-1239-7018-3078 @3
9198-782-781-3079 @3
9198-782-781-3080 @3
9198-782-3083 @2
9198-20485-1273-3084 @3
9198-20485-1239-7132-3085 @4
9198-20485-1273-3087 @3
9198-20485-1273-3089 @3
9198-20485-1273-3092 @3
9198-782-783-3093 @3
9198-782-783-3095 @3
9198-782-3096 @2

```

図 10: AS9198 のルーティングテーブルの一部

図 10 中のハイフンはリンクを示しており、アットマークの後ろの数値がホップ数である。AS9198 からの最大ホップ数は 13 であったが、平均的には概ね 3 か 4 という小さい値で到達しているのが確認できた。これは、スケールフリー構造のハブの効果とスモールワールド構造の特徴が現れた結果である。

また、無向グラフ上の最短経路と次善経路も描画し、Valley-free 規則を用いたグラフと比較した。図 11 として有向グラフと無向グラフを並べて描画したものを示す。

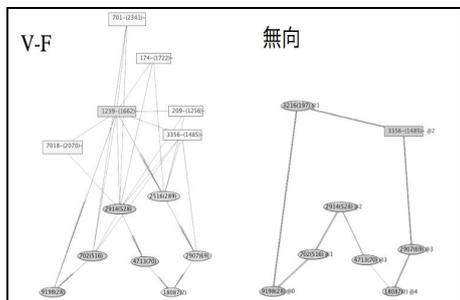


図 11: Valley-free グラフと無向グラフ

図 11 中の Valley-free 規則を用いたネットワークグラフと無向グラフを比べると、異なる最短経路が描画されていることが確認できる。

## 6. 評価

本ツールは Valley-Free 規則による AS 間のポリシーや、最短経路、次善経路を表現する Valley-Free グラフと、最短経路を表現する無向グラフを描画する機能を持っており、またグラフ内のノードの座標位置を同期させて、その 2 つのグラフを比較することができる。図 11 右側の無向グラフを拡大したものを図 12 に示す。

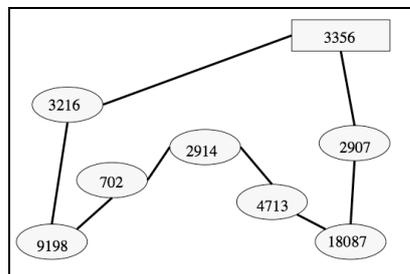


図 12: 無向グラフのノードとリンク

図 9 と図 12 を見比べると、図 12 中の無向グラフで描画されている AS9198-AS18087 間の上側の経路は、図 9 には現れていない。すなわち、この経路は Valley-Free 規則に沿うものではないということが確認できる。これは、無向グラフの場合の最短経路とトラフィックの向きを考慮した場合の最短経路が異なっていることによる差である。

全ての 2 つの AS 間の Valley-free グラフと無向グラフにおける、最短経路と次善経路は必ず異なるわけではない。その例を図 13 に示す。

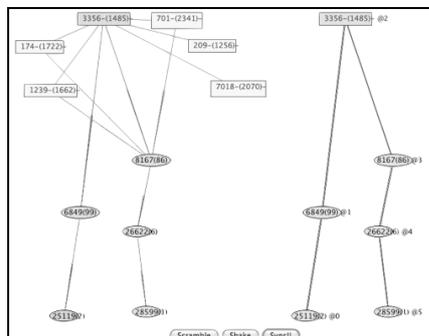


図 13: 等しい最短経路を示すグラフ

図 13 は AS25119 (UKPRESS) と AS28599 (Italcomp Informatica Ltda) の最短経路のみを示している。図 13 で描画したグラフの最短経路のノードとエッジを表したものを図 14 に示す。

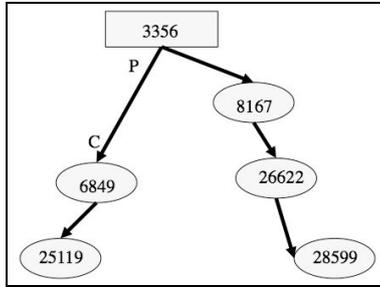


図 14: AS25119 と AS28599 間の経路

この 2 つの AS 間では、AS25119 (UKPRESS) から Tier1 である AS3356 (Level3) を通過し、AS2855 (Italcomp Informatica Ltda) へのトラフィックのみがある。この組み合わせのように、2 つの AS 間に代替経路が存在していない場合がある。

次にどの程度、Valley-free 規則に基づくグラフと無向グラフの最短経路に差が出ているのかを確認した。ランダムに 2 つの AS の組み合わせを 300 個選択し、Valley-free 規則に基づくグラフと無向グラフの最短経路を比較したものが図 15 である。

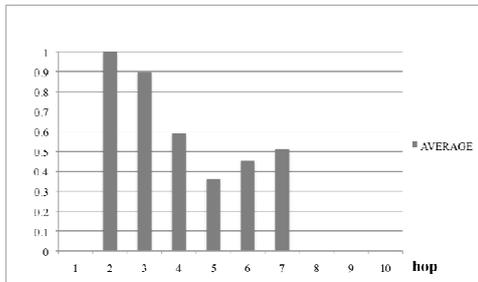


図 15: 2 つのグラフの最短ホップ数と重複割合

図 15 は、横軸が無向グラフにおける最短経路のホップ数であり、縦軸が 2 つのグラフにおける最短経路の重複割合の平均の値である。図 15 から、最短経路のホップ数が 5 の場合には 5 割ほど、Valley-free グラフの最短経路が無向グラフ上の最短経路とは別の経路となることが確認

できた。また、Valley-free グラフと無向グラフで最短経路のホップ数までも異なる場合も確認した。

次に、ランダムに 2 つの AS の組み合わせを 300 個選択した場合における、Valley-free 規則を用いたグラフと無向グラフの最短経路が異なる場合のホップ数を図 16 として示す。

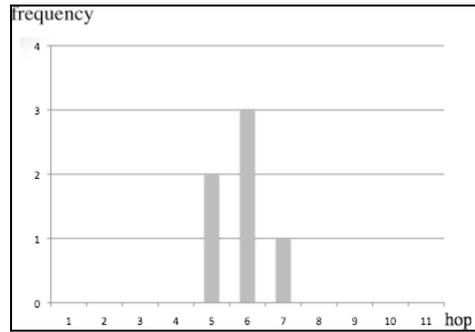


図 16: Valley-free グラフと無向グラフの最短経路のホップ数の違い

図 16 は、横軸が無向グラフにおける最短経路のホップ数であり、縦軸が 2 つのグラフにおいて AS 間の最短経路のホップ数が異なった 2 つの AS のペアの数である。頻度は少ないが、2 つの AS 間の最短経路が比較的大きいホップ数の値を持つときに、Valley-free 規則を用いたグラフは無向グラフよりも遠回りしているということが確認できる。

## 7. まとめおよび今後の課題

本論文では、これまでに考慮されることの無かったトラフィックの向きを、provider-customer, peer-peer, sibling に分ける Valley-free 規則を用いることで考慮し、2 つの AS 間のトラフィックの経路を描画し簡潔に表現した。また、Valley-free 規則を考慮しない場合とした場合ではどれほど最短経路が異なるのかという点について、無向グラフ中の最短経路と Valley-free グラフ中の最短経路の比較を行った。その結果、最短経路のホップ数が 5 の場合に、5 割近くの最短経路が無向グラフ上の経路とは別の経路となることが確認できた。本ツールを用いてホップ数が 5 のノード間を描画すると、高い確率で無向グラフと Valley-free グラフで異なるトポロ

ジ図が描かれる。

また、本ツールでは特に描画するノードの取舍選択を行った。スモールワールド構造とスケールフリー構造の特徴によって、多くのノードとリンクが描画対象となり易く、そのまま描画すると可視性が低くなってしまふ。そこで、最短経路と次善経路上のノード、ハブノードのみを描画させた。それにより、可視性が高まり、ノードとリンクを確認しやすくなる事が出来た。

グラフを描画するにあたっては、直感的に理解でき易いように、スモールワールド構造の直径が小さいという特性と、スケールフリー構造のハブの存在という特性について考慮し、ばねモデルを実装し、ノード間の距離を調節させた。また描画範囲の上部にハブノードが移動し、描画範囲の下部に一般ノードが移動するよう実装した。これにより上流と下流を表現し、よりトラフィックの経路を直感的に理解でき易いようにした。

本研究において設計、実装したツールの評価については無向グラフと比較することで行った。それにより、既存の表現である無向グラフとトラフィックの向きを考慮した有向グラフでは、最短経路のホップ数が異なる場合や全く異なる最短経路の探索と発見をする場合があるということが確認できた。無向グラフの最短経路数よりも **Valley-free** グラフの最短経路数の方が少ないことから、同じグラフ構造を用いて負荷分散のシミュレーションを行ったとしても、全く異なる結果が出る事が予想される。その例としてグラフを図 16 に示す。

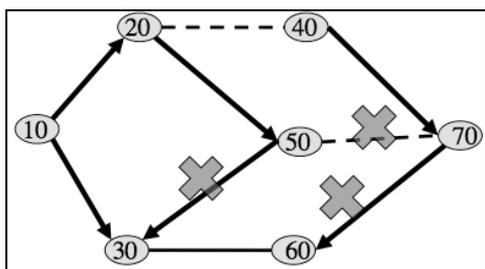


図 16: 負荷分散の考察

図 16 では、ノード 10 からノード 70 への経路を考えた場合の **Valley-free** 規則によりトラフィックが無いエッジを×印で示してある。無向グラフと考えると、ノード 40, 50, 60 は同じだけ

の負荷を持つことになる。しかし、**Valley-free** 規則を用いてトラフィックの向きを考慮すると、無向グラフの場合と異なり、ノード 40 にノード 50, 60 の負荷がかかることとなる。負荷分散のシミュレーションを無向グラフで行った場合のルーティングと、**Valley-free** 規則を用いてトラフィックの向きを考慮したグラフで行った場合の最適なルーティングは全く異なるものであることが予想出来る。

今後の課題としては、今回利用した **Valley-free** グラフやモデル的グラフなどを用いて、ネットワークトラフィックについての負荷分散シミュレーション等を行うことがある。また、次善経路や代替経路などについても差異を確認することなどがある。

## 参考文献

- 1) R.Pastor-Satorras and A.Vespignani, "Evolution and Structure of the Internet", Cambridge University Press, 2004.
- 2) R.Albert, H.Jeong and A. László Barabási, "Error and attack tolerance of complex networks", Nature, vol.406, pp.378-382, 2000.
- 3) Lixin Gao, "On Inferring Autonomous System Relationships in the Internet", IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.9, No.6, pp.733-745, 2001.
- 4) ダンカンワッツ, 訳辻竜平, 友知政樹, "スモールワールド・ネットワーク 世界を知るための新科学的思考", 阪急コミュニケーションズ, 2004.
- 5) Radia Perlman, "Interconnections", Addison-Wesley, 1999.
- 6) Cooperative Association for Internet Data Analysis (<http://www.caida.org/>)
- 7) 杉山公造, "グラフ自動描画法とその実態", コロナ社, 1993.
- 8) P. Eades, "A Heuristic for Graph Drawing", Congressus Numerantium, 42, 149-160, 1984.
- 9) 野本真吾, 福田健介, 上原稔, 森秀樹, "ネットワークトラフィックシミュレーションのためのグラフ描画ツールの設計", マルチメディア通信と分散処理 情報処理学会研究報告, 2007-DPS-133, pp.37-41, 2008.