

ネットワーク設計法による 耐被災性能向上

——「被災しないネットワーク」の実現を目指して——

New Network Design Method for Increasing Robustness of Disaster-affected
Networks: Toward Realization of Disaster-free Networks

齋藤 洋

Abstract

これまでの災害対策とは全く異なるアプローチとして検討されている、そもそも被災しない、少なくとも、被災しにくいネットワークの地理的・空間的設計法を紹介する。2点間のネットワークの切断確率や被災確率を小さくするような物理ネットワークの地理的・空間的特性が明らかとなる。実際の地震データに基づくシミュレーションにより、理論の検証が例示される。機能集約ノードの選定やネットワーク装置の更新などの応用も可能である。

キーワード：ネットワーク設計法，耐被災性能，地理的・空間的設計法，「被災しないネットワーク」

1. ま え が き

我が国は、これまで多くの震災に見舞われ、多大の損害を被ってきた。情報通信ネットワークも、その例外ではない。こうした災害に対して、ネットワーク事業者は冗長設備を配備し、現用系が被災した場合は予備系に切り換えることで、可能な限り通信サービスを維持しようとしてきた。また、衛星車載局などの投入による応急対応もなされる。しかしながら、2011年の東日本大震災を経験し、これら伝統的手法の限界も痛感するところである。

これに対して、これまでの災害対策とは全く異なるアプローチである、そもそも被災しない、少なくとも、被災しにくいネットワークの地理的・空間的設計法を筆者らは検討している^{(1)~(3)}。これらの研究では、同じ冗長経路数でも、地理的・空間的にどのような性質を持つと、同時に多数の経路が災害に遭遇しにくいかを議論している。本稿では、関連研究の状況を2.に、これらの研究の理論的背景となっている積分幾何のごく初歩的部分を3.で解説し、その後、被災しにくいネットワークの地理的・空間的設計法を解説する。

2. 地理的・空間的特性を考慮した ネットワークの頑健性の研究

故障に関する信頼性の研究は、必ずしも対象ネットワークの地理的・空間的特性を考慮しないのに対して、それらを考慮したネットワークの頑健性の研究が、ここ数年、行われるようになってきた。例えば、文献(4)、(5)では、長方形等の幾何学的な海底ケーブルの敷設パターンを想定し、震源からの距離に応じた故障率でケーブルが壊れると仮定する。海底ケーブルで結ばれる2地点間が結ばれ続ける確率が一定以上で、ケーブルコストを最小化しよう長方形の辺の長さなどを決めている。文献(6)は、ネットワークノード間が直線的に結ばれたネットワークモデルに対して、直線状の被災が生じるとして、任意の2点間が通信可能である確率等を多項式時間で計算できるアルゴリズムを示した。

更に、最小カット問題の拡張として、地域がネットワークから切り離される最小ノード数や最小領域数等の尺度による地理的最低カット問題なども論じられるようになってきた。文献(7)は、この分野の先駆けとなる論文であり、被災エリア内の枝を全て取り除くことによる最大流・最小カット問題の一般化を論じている。文献(8)では、半径既知の円形領域をregionと呼ぶ。第*i*番目のregion内のノードであって、壊れたらネットワークを切断する最小限ノード数を*i*に関して最小化したもの(region-based connectivity)の値を求める多項式時間のアルゴリズムを提案している。文献(9)では、

齋藤 洋 正員：フェロー 日本電信電話株式会社 NTT ネットワーク基盤技術研究所

E-mail saito.hiroshi@lab.ntt.co.jp
Hiroshi SAITO, Fellow (NTT Network Technology Laboratories, NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION, Musashino-shi, 180-8585 Japan).

電子情報通信学会誌 Vol.98 No.9 pp.803-809 2015年9月
©電子情報通信学会 2015

ノード間が直線ルートで結ばれ、それを切断する災害が線分、または、円形であるというモデルを用い、切断リンクの容量等を最大化する最悪ケース災害を見いだす、多項式オーダー時間の解法が提示されている。文献(10)では、地理的グラフに対して、複数の円形の被災エリアの災害が生じた場合に、最小限幾つの災害でノード間の接続が切れるか、1災害で切れない最大幾つのパスがあるかを線形時間で計算するアルゴリズムを提案している。最大流・最小カットの拡張だが、この場合、最大流・最小カットの数は等しくならない。文献(11)は、災害によるあるネットワーク要素の故障確率が、災害発生位置の関数であるとモデル化し、壊れる要素数、壊れるファイバの総容量やその中のトラック量などの尺度で見て、最悪ケースとなる災害発生場所を見いだすアルゴリズムを与えている。文献(12)は、部分ネットワークに分けて、各部分ネットワークの最悪の直線状のカットを探索し、最終的に、どこの地方のリスクが高いか分析している。文献(13)は、だ円あるいは多角形の形をした critical region を探す問題を論じ、多項式時間のアルゴリズムを与えている。critical region とは、そこが壊れるとネットワークが切れる領域のことである。更には、与えられた直径を持つある形の region failure が生じたときにも同時に壊れないパス (region-disjoint path) を探す発見的方法も提案している。

これらは、被災しにくいネットワークの地理的・空間的設備設計法への第一歩であるが、実際には、以下のような大きな課題が残る。①与えられたネットワークに対して、ある種の尺度を評価するアルゴリズムを得るという研究がほとんどである。ある種の尺度について、所望の特性を有するネットワークを得ること、すなわち、設計問題は、逆問題に相当する。通常、ネットワークの地理的・空間的解は無数にあるので、形式的に、入出力を逆にしても、設計法は得られないことが多い。②被災領域を円形や線分で表す等の人工的仮定が多く、妥当性について、実際にデータによる検証がなされていない。

4. において、これらの課題を解決する設計法について解説する。

3. 積分幾何の初歩

積分幾何は、対象となる幾何学的図形の位置関係に関する尺度を計算する数学理論である。工学者でも読みやすい数学書としては、文献(14)を推薦する。数学書を読む前の導入としては、文献(15)が、日本語でもあり、適当である。

平面上の有限領域 K の位置を、 K の基準点の座標 (x, y) と領域 K にくくり付けられた軸と座標系に固定された軸との成す角 θ により表す。 (x, y, θ) の定義域を Ω とする。 K がランダムに生じたときに、ある事象 X を

満たす確率を考えたい。 Ω 内のパラメータ値が同じ重みで生じると仮定すると、 Ω のうち X を満たすパラメータ空間の面積比をもって、 K が X を満たす確率であるということは直感的にも理解しやすい。すなわち、 $\int_x dK / \int_{\Omega} dK$ をもって、この確率とする。ここで $dK = dx dy d\theta$ である。この確率を geometric probability と呼ぶ。例えば、 K を被災エリア、 X を被災エリアがネットワークに係るという事象とすれば、この確率によって、ネットワークが被災する確率が評価できる。(実際に用いる評価尺度については、後述する。)

なお、積分幾何における最も重要な原理として motion-invariance がある。これは、平行移動や回転によって結果が変わってはならないという原理である。対象となる幾何学的図形の位置関係は、平行移動や回転という変換で保存されるべきであることから、この要請が生じている。有限領域の場合は、自然なパラメータ x, y, θ を用いれば、この要請が満たされることから、言及しなかったが、直線等のパラメータ化の場合には、注意が必要である。

4. 地理的・空間的設計法

4.1 概要

ここで述べる設計法は、被災に関わる尺度を最適にする、あるいは、向上させる物理ネットワークの地理的・空間的経路を出力する。以下、断らない限り、ネットワークは物理ネットワークであることを念頭に話を進める。後述するように、サーバノードの最適な地理的・空間的配備、あるいは、管路等の最適更新などへの応用も可能である。

本設計法では、有限、凸な、ある地理的範囲 A_0 で (正確には、 $A_0 \cap D \neq \emptyset$ となる範囲で)、被災エリア D を伴う災害がランダムに生じるとする。(地震ハザードマップに全面的に依存したアプローチは別の機会に譲る。) D が有限領域か、否か、 D 内のネットワーク要素が常に壊れるか、確率的に壊れるかで、モデルを分類することができる。被災エリア外のネットワーク要素は壊れないものとする。文献(1)は、半平面・全壊モデル、文献(2)は、半平面・確率的故障モデル、文献(3)は、有限領域モデルの検討がなされている。半平面モデルについては、一般的なネットポロジーに関する結果が得られており、特に、全壊モデルでは、下記の $Q(s, d)$ に関する陽な式が得られ、最適なネットワークの空間的・地理的形状やバックアップの最適配備などが容易に導かれる。これは、半平面の境界である直線に関して、積分幾何の利用しやすい結果が得られているためである。その反面、半平面モデルは、 D が対象とするネットワークに比し、非常に大きな場合のみ、実際に適用可能となるこ

とから、全国網などの評価には不適當である。本稿では、 D が有限領域の場合を主に解説する。

4.2 評価尺度

設計法において評価する尺度を二つ定義する。第1の尺度 $P(s, d)$ は2点 s, d 間のネットワークの切断確率と呼ばれるもので、この2点間の全経路が被災により全て切断する確率を指す。第2の尺度 $Q(s, d)$ は、2点 s, d 間の被災確率と呼ばれるもので、この2点間の全経路が被災エリアに係る確率である。ぜい弱なネットワーク、被災エリアにあるネットワーク要素は全て壊れるようなネットワークでは、 $P(s, d) = Q(s, d)$ である。通常のネットワークに対しては、被災確率は、切断確率の上限を与える。 $P(s, d)$ の下限に対応する、頑健なネットワークに対する $P(s, d)$ を尺度 $P_0(s, d)$ として定義する。 $P_0(s, d)$ は、 D 内のネットワーク要素の故障確率が非常に小さい場合の $P(s, d)$ である。 $Q(s, d)$, $P_0(s, d)$ を評価することで、 $P(s, d)$ の両極端の特性が評価できる。

以下では、理論的な結果と、その結果を実際の被災エリアを用いたシミュレーションで検証した結果を述べる。シミュレーションでは、 A_0 に係るようにランダムに D を置いて、 $P(s, d)$, $Q(s, d)$ を評価する。被災エリア D は、阪神淡路大震災の震度7のエリア⁽¹⁶⁾、及び、評価時点で、気象庁から発表されていた推計震度分布⁽¹⁷⁾を用いて一定震度以上のエリア全体が得られたもの八つ、の計九つの実際の地震による被災エリアを使用した。

4.3 D が有限領域でモデル化される場合⁽³⁾

D が有限の凸領域である場合について論じる。以下、有限領域 A に対して、 $|A|$ は、その外周長を、 $\|A\|$ は、その面積、 \bar{A} は、その凸包を表す。また、2点 x, y 間の線分を $l(x, y)$ と表記する。

4.3.1 単一経路に対する $Q(s, d)$

2点 s, d 間に経路1がある。経路1を経路2に替えることを検討する。両経路は、以下の仮定を満たす。(i) 地理的に n 個の線分区間でモデル化できる。(ii) 第 i 線分区間上の任意の点と第 j 線分区間 ($j \neq i-1, i, i+1$) の任意の点の間の距離は、 D の直径より大きく、第1線分区間 (第 n 線分区間) に属する端点と第2線分区間以降 (第 $(n-1)$ 線分区間以前) の任意の点の間の距離も D の直径より大きい。両経路の第 i 線分区間と第 $i+1$ 線分区間の成す角を $\phi_i \leq \pi$, $\phi_i \leq \pi$, $Q_i(s, d)$ を第 j 経路の被災確率とすると、以下が成立する。

[定理1⁽³⁾] 経路1の長さ \leq 経路2の長さ、かつ、 $\{\phi_i\}_i \leq \{\phi_j\}_j$ であれば、 $Q_1(s, d) \leq Q_2(s, d)$ 。ただし、 $\{\phi_i\}_i \leq \{\phi_j\}_j$ は、昇順に並べ換えた角の列 $\phi_1 \leq \dots \leq \phi_{n-1}$, ϕ_1

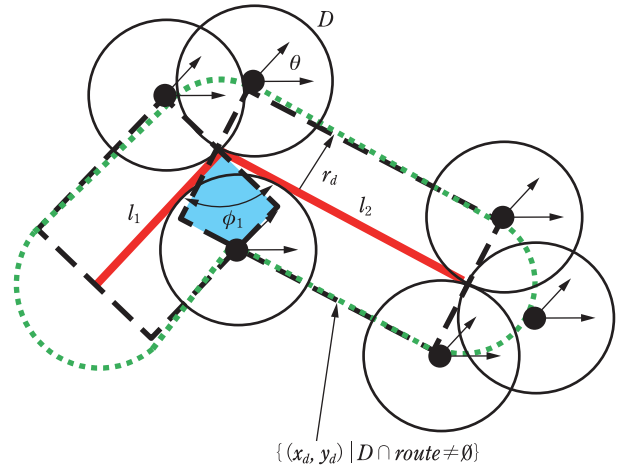


図1 単純な例による定理1の考察 D が半径 r_d の円で、経路が長さ l_1, l_2 の二つの線分区間から成っている場合の例。経路が D に係るとき、 D の中心 (x_d, y_d) がある領域は、 θ によらず、緑の点線で示された領域内となる。

$\leq \dots \leq \phi'_{n-1}$ において、 $\phi_k \leq \phi'_k$ が $k=1, \dots, n-1$ 全てで成立すること。

この定理の証明を一般的に示すことは大変なので、 D が半径 r_d の円で、経路が長さ l_1, l_2 の二つの線分区間からなっている場合を考えてみよう。図1に示されるように、経路 (図1で、赤の太線で記載) が D に係るとき、 D の中心 (x_d, y_d) がある領域は、 θ によらず、点線で示された領域内となる。積分幾何の説明で述べたように、このパラメータの領域の面積の評価が肝要である。この領域は、各線分区間に付随する幅 $2r_d$ 、長さ l_i の長方形領域 (図1の黒の点線で囲まれた領域) と経路両端の半円領域、二つの線分区間の結合部に生じる扇形領域から成る。ただし、二つの長方形領域は、重複する部分 (図1の青の網掛け部分) があるので、これを取り除く必要がある。その結果、これらの領域の面積は、 $2(l_1 + l_2)r_d + \pi r_d^2 - f(\phi)/2\pi$ 、ただし、 $f(\phi) = 2\pi((\pi - \phi)r_d^2/2 - r_d^2/\tan(\phi/2))$ となる。よって、 $\int_{route \cap D \neq \emptyset} dD = 2|D|L + 2\pi\|D\| - f(\phi)$ となる。ここで、 L は経路長であり、この例では $L = l_1 + l_2$ である。(一般には、 n 個の線分区間から成る経路、有限凸領域の D に対しては、 $\int_{route \cap D \neq \emptyset} dD$ は、 $2|D|L + 2\pi\|D\| - \sum_i f(\phi_i)$ で与えられる (文献(3)の補助定理2)。ここで、 $f(\phi_i)$ は非負、 $\phi_i \leq \pi$ の減少関数である。) $Q(s, d)$ は、 $\int_{route \cap D \neq \emptyset} dD$ に比例することから、定理1を得ることができる。

上記結果は、短く、鋭角なジグザグの経路が $Q(s, d)$ に関しては有利であることを示している。シンプルな具体例を示す。図2において、経路(a), (b), (c)を八つの線分区間から成るとみなすことで、定理が適用でき、

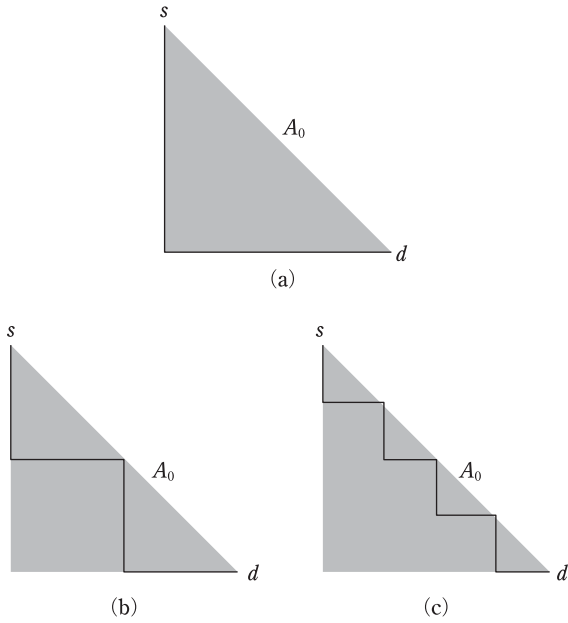


図2 単一経路モデル

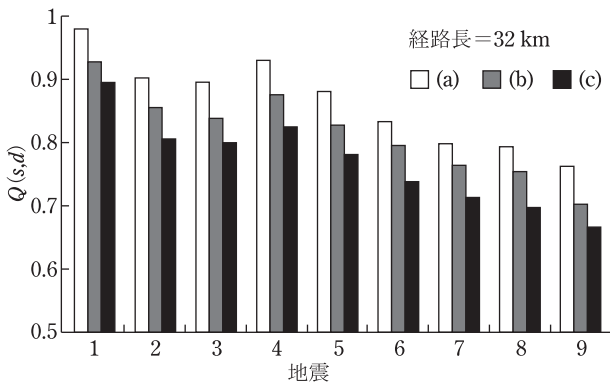


図3 単一経路モデルに対する $Q(s, d)$ (文献(3)図7から再構成) 実データを使ったシミュレーション結果は、理論どおり、経路(a)が $Q(s, d)$ 最大、経路(c)が $Q(s, d)$ 最小となる。

3 経路のうち経路(a)が $Q(s, d)$ 最大、経路(c)が $Q(s, d)$ 最小となる。

シミュレーション評価結果を図3に示す。実際の D は凸ではないが、いずれの地震による D の場合も、(a)のときが最大、(c)のときが最小という理論どおりの結果となっている。 D の細かな形状が結果には大きな影響を与えないことから、理論どおりの結果となったものと思われる。

4.3.2 リングネットワークに対する $Q(s, d)$

リングネットワークで囲まれる領域が凸であるとす。このとき、以下の結果を得る。

[定理2⁽³⁾] 単一リング上に2点 s, d があり、 s, d 間に時

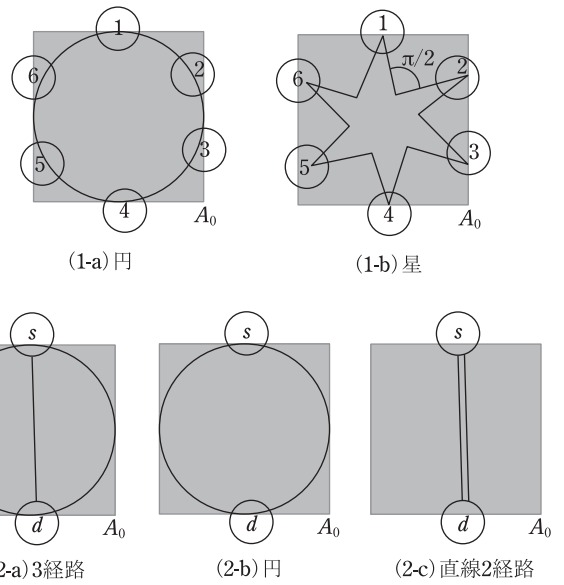


図4 リングネットワークモデル

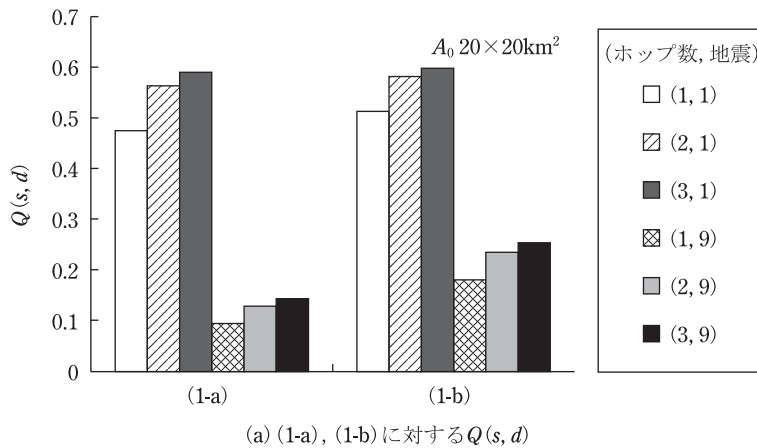
計回り、反時計回りの経路1, 2がある。当該リングに囲まれる凸領域を C とする。第3以降の経路が C 内に含まれるとき、 $Q_{1,2}(s, d) \leq Q_{i_1, \dots, i_n}(s, d)$ である。ここに、 $Q_{i_1, \dots, i_n}(s, d)$ は、 s, d 間の第 i_1, \dots, i_n 経路により実現される $Q(s, d)$ である。

このことから、 $Q(s, d)$ に関しては、リングネットワークの内側の付加ルートは効果がないこと、リングを構成するルートはできるだけ大回りがよいことになる。また、定理2は、リングネットワークの組合せから成るネットワークに拡張が可能である。

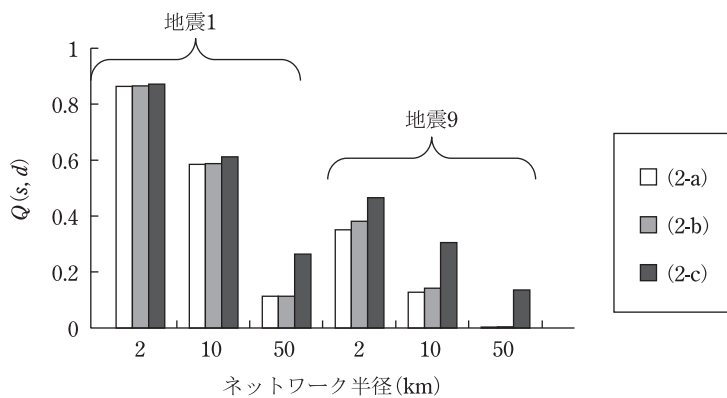
図4にあるシンプルな例と前述の実際の地震例についてシミュレーション評価を行い、理論的結果の検証を行う。図5に地震1と9の場合の結果を示す。(地震2~8も地震1と同様の結果を示す。) $Q(s, d)$ に関しては、(1-a)が(1-b)より小さくなっており、理論どおりの結果となっている。更に、地震1に対しては、理論どおり、(2-a)と(2-b)が同じで、(2-c)が最大となる。地震9に対しては、(2-b)が(2-a)より若干大きくなっている。この理論とのかい離は、地震9の D が複数の小領域から成るという特殊性に基づいていると思われる。更に、ネットワークが小さくなる、つまり、 D が相対的に大きくなると、(2-a)、(2-b)、(2-c)の差がなくなってくる。これは、 D が半平面モデルの場合の結果に合致する⁽²⁾。なお、図5において、地震1の D は、地震9の D に比べて、広域であるため、地震1の $Q(s, d)$ が地震9の $Q(s, d)$ に比し、大幅に高い。

4.3.3 単一経路に対する $P_0(s, d)$

$P(s, d)$, $P_0(s, d)$ を論じる場合は、 D 内のノードは確



(a) (1-a), (1-b) に対する $Q(s, d)$



(b) (2-a), (2-b), (2-c) に対する $Q(s, d)$

図5 リングネットワークモデルに対する $Q(s, d)$ (文献(3)図12, 14から再構成) 実データを使ったシミュレーション結果は、おおむね理論どおり、 $Q(s, d)$ に関しては、(1-a)が最小と(1-c)が最大、(2-a)と(2-b)が同じで、(2-c)が最大となる。

率 α で、リンクの微小区間 du は、確率 βdu で、独立に故障するものとする。2点 s, d 間に単一経路があり、その経路上に n ノードがあって、経路長が L のとき、経路故障率 $\gamma = \alpha n + \beta L$ が1より十分小さいときの $P(s, d)$ 、すなわち、 $P_0(s, d)$ は以下で与えられる。

$$P_0(s, d) = \frac{2\pi \|D\| \gamma}{2\pi(\|D\| + \|A_0\|) + |D| \cdot |A_0|} \quad (1)$$

上記 $P_0(s, d)$ は、 γ が十分小さいことから、単一故障のみ考慮すればよく、かつ、経路上のある点 x が D に含まれる確率は、積分幾何の結果から、

$$\frac{\int_{x < D} dD}{\int_{A_0 \cap D \neq \emptyset} dD} = \frac{2\pi \|D\|}{2\pi(\|D\| + \|A_0\|) + |D| \cdot |A_0|}$$

であることにより得られる。

この結果、 $P_0(s, d)$ は、経路長の増加関数であること、経路長が一定であれば、経路の地理的・空間的形状に依存しないことが分かる。これは、形状依存性のある

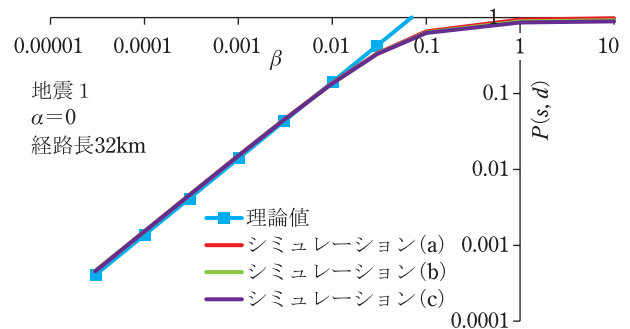


図6 単一経路モデルに対する $P_0(s, d)$ (文献(3)図10から再構成) 実データを使ったシミュレーション結果は、理論どおり、 $P_0(s, d)$ は、経路長が一定であれば、経路の地理的・空間的形状に依存しないことが分かる。

$Q(s, d)$ に対する結果と対照的である。図6に、図2の三つのモデルに対する $P_0(s, d)$ の結果を示す。図3との違いを確認してほしい。また、 s, d 間を直線で結ぶ経路が $P_0(s, d)$ を最小化する。 $Q(s, d)$ の点でも、直線経路が望ましいことから、単一経路に対しては、広く直線経

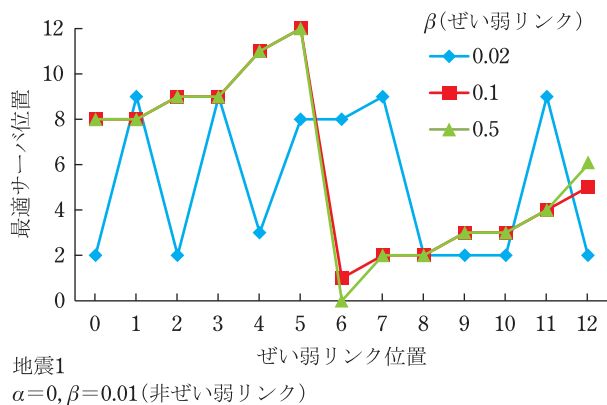


図7 切断しにくいサーバノード位置 (文献(3)図23から再構成) 被災時故障率が高い区間(ぜい弱リンク)のほぼ反対側にサーバノードを置くことがよい。

路の優位性が成立すると考えられる。

4.4 その他の応用

物理ネットワークの空間的形狀を決めることが、本設計法の一つであるが、それ以外にも、ネットワーク内の機能の空間的配備やネットワーク装置の更新計画などを耐被災性能の点で評価・決定することができる。例えば、ある機能をノード s に配備し、当該ノードと他ノード d_1, d_2, \dots との切断確率 $\sum_i P_0(s, d_i)$ を最小化する s を探すことが前者の典型的な例である。また、管路などを最新の設備に更新する際に、最新の設備を導入することで被災時故障率 β が改善するが、全てを最新設備に更新することは難しく、どの設備から更新すべきかという問題が生じる。これが、後者の典型例である。これについても各ノード間の切断確率 $P_0(s, d)$ の改善幅の和を最大化する更新箇所を探すことで問題解決が図れる。

図7に、13ノードから成るリングネットワーク(時計回りに、ノード番号を付与)で、機能集約ノード(サーバノード) s を、 $\max_i P_0(s, d_i)$ を最小化する s によって定める例を示す。ノード i と $i+1$ の間が、例えば、老朽管路を使用している、液状化が生じるなどの理由で、被災時故障率が高い区間(ぜい弱リンク)であるとし、その区間の位置がサーバノード位置にどのような影響を与えるか、評価例が図示されている。同図の横軸は13ノードから成るぜい弱リンクの位置、縦軸は13ノードのどこにサーバを置けばよいかを示している。 $\beta=0.1, 0.5$ のように、ぜい弱リンクの被災時故障率が非ぜい弱リンクのそれに比し、大幅に悪い場合は、例えば、ぜい弱リンク6のときのサーバノードの最適位置が0または1、ぜい弱リンク0のときのサーバノードの最適位置が8であるように、リングネットワークにおけるぜい弱リンクの反対側にサーバノードを置くことがよいとされている。このことから、ぜい弱リンクの地理的位置を正しく把握することが耐震性の高いサーバノードの

設置において肝要であることが分かる。

5. あとがき

被災しにくいネットワークの地理的・空間的設備設計法について解説した。上記理論は数学的仮定に基づく。主な仮定は、(i)地震が A_0 内で一様に発生する、(ii)リングネットワークで囲まれる領域は凸である、(iii) D は有限、凸である、あるいは、半平面でモデル化できるの三つである。実際の問題が、これらの仮定を満たさない場合、理論的な結果が実際には妥当でない可能性が生じる。(iii)については、既に、本文中で言及したように、実際の地震データを用いたシミュレーションにより、結果の妥当性を確認している。残る(i)、(ii)の問題についての影響も文献(3)では検討されているので、参考にされたい。また、文献(3)では、リングネットワークに対する $P_0(s, d)$ を与えているが、 $P(s, d)$ に関して有利なネットワーク形状は導出されていない。実際には、これらの理論結果に基づく設計法は、地震ハザードマップの活用と補完しながらの適用になる。

今回紹介した設計法は、そもそも、災害自体にできるだけ遭わないよう設備設計しようという、これまでの災害対策とは全く異なるアプローチを取る。これに、被災回避制御⁽¹⁸⁾を加えて、「被災しないネットワーク」というビジョンを実現しようという動きになっている⁽¹⁹⁾。

また、この設計法を通じて、ネットワークの空間的・地理的形狀を適切に設計することで、ある種のネットワーク特性を改善し得るということが分かった。空間的形狀を適切に設計することで改善できる特性は、耐被災性能だけでないであろう。すなわち、ネットワークの研究分野として、空間的形狀設計という新たな分野が切り開かれたのである。

文 献

- (1) H. Saito, "Geometric evaluation of survivability of disaster-affected network with probabilistic failure," INFOCOM, pp. 1608-1616 Toronto, 2014.
- (2) H. Saito, "Analysis of geometric disaster evaluation model for physical networks," IEEE/ACM Trans. Netw., to appear. DOI: 10.1109/TNET. 2014.2339356.
- (3) H. Saito, "Spatial design of physical network robust against earthquakes," IEEE J. Lightwave Technol., vol. 33, no. 2, pp. 443-458, 2015.
- (4) W. Wu, B. Moran, J. Manton, and M. Zukerman, "Topology design of undersea cables considering survivability under major disasters," WAINA, pp. 1154-1159, 2009.
- (5) C. Cao, M. Zukerman, W. Wu, J.H. Manton, and B. Moran, "Survivable topology design of submarine networks," IEEE J. Lightwave Technol., vol. 31, no. 5, pp. 715-730, 2013.
- (6) S. Neumayer and E. Modiano, "Network reliability with geographically correlated failures," INFOCOM 2010, pp. 1-9, 2010.
- (7) D. Bienstock, "Some generalized max-flow min-cut problems in the plane," Math. Oper. Res., vol. 16, no. 2, pp. 310-333, 1991.
- (8) A. Sen, B.H. Shen, L. Zhou, and B. Hao, "Fault-tolerance in sensor

- networks : A new evaluation metric," INFOCOM 2006, pp. 1-12 2006.
- (9) S. Neumayer, G. Zussman, R. Cohen, and E. Modiano, "Assessing the vulnerability of the fiber infrastructure to disasters," IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 19, no. 6, pp. 1610-1623, 2011.
- (10) S. Neumayer, A. Efrat, and E. Modiano, "Geographic max-flow and min-cut under a circular disk failure model," INFOCOM 2012, pp. 2736-2740, March 2012.
- (11) P. Agarwal, A. Efrat, S. Ganjugunte, D. Hay, S. Sankaraman, and G. Zussman, "The resilience of WDM networks to probabilistic geographical failures," INFOCOM 2011, pp. 1521-1529, April 2011.
- (12) Z. Yinfa, W.J. Yu, and L. Wenjun, "Assessing the safety risk grade of optical network from the network geography distribution," Communication Technology (ICCT), pp. 709-712, 2012.
- (13) S. Trajanovski, F.A. Kuipers, A. Ilić, J. Crowcroft, and P.V. Mieghem, "Finding critical regions and region-disjoint paths in a network," IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 23, no. 3, pp. 908-921, 2015. DOI : 10.1109/TNET.2014.2309253.
- (14) L.A. Santaló, Integral Geometry and Geometric Probability, Second edition, Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
- (15) 腰塚武志, "積分幾何学について(1)―(5)," オペレーションズ・リサーチ, vol. 21, no. 9~vol. 22, no. 1, 1976-1977.
- (16) http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/hanshin_ajwaji/earth_quake/index.html
- (17) <http://www.data.jma.go.jp/svd/eev/data/suikai/>
- (18) H. Saito, R. Kawahara, and T. Fukumoto, "Proposal of disaster avoidance control," Networks 2014, Funchal, Madeira Island, Portugal, Sept. 2014. DOI : 10.1109/NETWKS.2014.6959245.
- (19) H. Saito, "Concept and implementation of disaster-free network," Keynote Speech, DRCN 2015, Kansas City, USA, 2015.

(平成 27 年 4 月 23 日受付 平成 27 年 5 月 8 日最終受付)



さいとう ひろし
齋藤 洋 (正員:フェロー)

昭 56 東大・工・計数卒. 昭 58 同大学院修士了. 同年日本電信電話公社(現 NTT)入社. 以来, 通信トラヒック・ネットワークに関する研究に従事. 現在, NTT ネットワーク基盤研究所主席研究員. 工博. IFIP WG7.3 委員, 日本 OR 学会フェロー, IEEE Fellow.

