

Osaka University

ネットワークの相互接続構造が大域的な信頼性に与える影響の比較評価

大阪大学 大学院情報科学研究科
竹下 結花、荒川 伸一、村田 正幸

2013 / 7 / 18

Osaka University

研究の背景

- **インターネットの普及と発展**
 - 社会インフラとしての重要性
 - 障害発生時における信頼性の要求
- **ISP による独自のネットワーク設計^[1]**
 - 顧客のトラフィックを収容できるよう設計
 - 障害時でも最小コストで信頼性を維持出来る構造
 - 想定されていない障害に対する信頼性は不十分

[1] G. Iannaccone, C.-N. Chush, S. Bhattacharyya, and C. Diot, "Feasibility of IP restoration in a tier 1 backbone," *IEEE Network*, vol. 18, no. 2, pp. 13–19, Aug. 2004.

Osaka University

障害発生時の信頼性を高める研究^[2,3]

- 通信機能、性能の維持
- 単一のネットワークが対象

↓

インターネットは、複数のネットワークが相互に接続することで構築されているため、単一のネットワークを対象とするだけでは不十分

[2] L. Shen, X. Yang, and B. Ramamurthy, "Shared risk link group (SRLG)-diverse path provisioning under hybrid service level agreements in wavelength-routed optical mesh networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 13, pp. 918–931, Aug. 2005.
[3] A. Hansen, A. Kraibien, T. C. K. C., and S. Guessing, "Resilient routing layers for network disaster planning," *Lecture notes in computer science*, vol. 3421, pp. 1097–1105, Apr. 2005.

Osaka University

相互接続構造に関する研究^[6-8]

- **電力ネットワーク**
 - 電力網と制御網により構成される
 - 接続するノードペアの性質が近くなるように接続される
 - ノード次数
 - クラスタリング係数
 - すべての制御ノードは電力ノードと接続されなければならない
 - ネットワーク間リンクが多くなる

↓

通信ネットワークでは、ネットワーク間リンクを少なく抑えることが望ましい

[6] R. Parshani, C. Rozenblat, D. Ietti, C. Ducruet, and S. Havlin, "Intersimilarity between coupled networks," *Europhysics Letters*, vol. 92, p. 68002, Jan. 2011.
[7] J. Gao, S. V. Buldyrev, H. E. Stanley, and S. Havlin, "Networks formed from interdependent networks," *Nature Physics*, vol. 8, pp. 40–48, Dec. 2011.
[8] C. D. Brummitt, R. M. D'Souza, and E. A. Leicht, "Suppressing cascades of load in interdependent networks," in *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, vol. 109, Mar. 2012, pp. 681–688.

Osaka University

研究の目的とアプローチ

複数のネットワーク間の相互接続構造と、障害に対する信頼性の関係を明らかにする

1. **大域ネットワークの構築**
 - 一対の同一な局所ネットワークを生成
 - 局所ネットワークの階層の設定
 - 最も次数の大きいノードを最上位層とする
 - 最上位層のノードからのホップ数を、各ノードの階層とする
 - 局所ネットワーク間を横々に接続
2. **障害に対する信頼性の評価**

大域ネットワーク

Revasz, E., Barabasi, A.L., 2003. Hierarchical organization in complex networks. *Phys. Rev. E: Stat. Nonlinear Soft Matter Phys.* 67, 026112.

Osaka University

単一のネットワークを対象とした信頼性の研究^[4]

- **ノードペア (i, j) に対して P(i, j) を算出し、リンクを追加**

$$P(i, j) \propto e^{-\frac{D_{ij}}{\lambda}} \cdot e^{-\frac{x_{ij}}{\zeta}}$$
 - D_{ij} : (i, j) の共通の親ノード a_{ij} の階層
 - x_{ij} : (i, j) 間のホップ距離 ($x_{ij} = (d_i^2 + d_j^2)^{1/2}$)
- **パラメータ (λ, ζ) により構造を5種に分類**
- **故障時の信頼性を評価**
 - 評価指標
 - Congestion Robustness: ノードにかかる負荷の最大値
 - Connectivity Robustness: 接続性を維持しているノードの割合
 - 評価結果
 - λ = 0.5, ζ = 0.5 の Multiscale 構造が高い信頼性を示した

[4] P. S. Dodds, D. J. Watts, and C. F. Sabel, "Information exchange and the robustness of organizational networks," in *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, vol. 100, Oct. 2003, pp. 12516–12521.

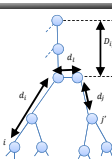
Osaka University 7

大域ネットワークの構築手法

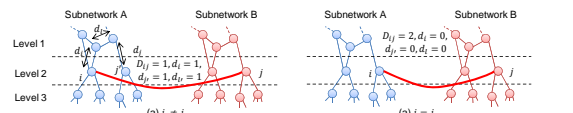
1. ノードペア (i, j) に対して、 $P(i, j)$ を算出

$$P(i, j) \propto e^{-\frac{D_{ij}}{\lambda}} e^{-\frac{x_{ij}}{\zeta}}$$

- D_{ij} : (i, j) の最短経路にあるノードのうち、最も高い階層
- x_{ij} : (i, j) 間の距離 ($x_{ij} = (d_i^2 + d_j^2 + d_{ij}^2)^{1/2}$) [4]の拡張
- j : i の属する局所ネットワーク内で、 j と同じ位置のノード



2. $P(i, j)$ に基づいて、ノードペアを l 個選択し、接続



第2層のノード i と第2層のノード j を接続する場合の例

[4] P. S. Dodds, D. J. Watts, and C. F. Sabel, "Information exchange and the robustness of organizational networks," in *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, vol. 100, Oct. 2003, pp. 12516-12521.

Osaka University 8

評価に用いたパラメータ設定

• λ, ζ の値の与え方により様々な構造を構築可能

- λ を小さくすると、上層のノードが接続されやすい
- ζ を小さくすると、ホップ距離の近いノードが接続されやすい




λ	ζ	相互接続構造
∞	∞	Random (R)
∞	0.05	Local Team (LT)
0.05	∞	Random Interdivisional (RID)
0.05	0.05	Core-periphery (CP)
0.1~0.9	0.1~0.9	Multiscale (MS)

[4] を参考に決定

[4] P. S. Dodds, D. J. Watts, and C. F. Sabel, "Information exchange and the robustness of organizational networks," in *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, vol. 100, Oct. 2003, pp. 12516-12521.

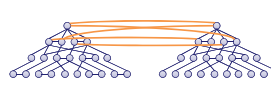
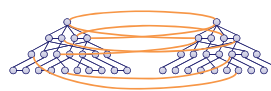
Osaka University 9

相互接続構造 (1/2)

- Random (R)**
 - ランダムにリンクを追加
- Local Team (LT)**
 - 同じ階層のノード同士が接続されやすい
- Random Interdivisional (RID)**
 - ホップ距離の離れたノード同士が接続されやすい

Osaka University 10

相互接続構造 (2/2)

- Core-periphery (CP)**
 - 同じ階層で、距離の近いノード同士が接続されやすい
→ 上層が密に接続される
- Multiscale (MS)**
 - R, LT, RID, CP の中間的な構造をとる
 - パラメータ (λ, ζ) を一意に定めることができない
→ Multiscale 構造の中で、高い信頼性を示すパラメータを事前に調査する

Osaka University 11

評価環境

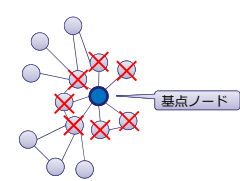
- 局所ネットワークには BA トポロジー^[9] を使用**
 - m_0 個のノードを持つ完全グラフを配置する
 - ノード数 n に達するまで以下の処理を繰り返す
 - 新規ノードを追加
 - $\frac{k_i}{\sum_j k_j}$ (k_i はノード i の次数) の優先的確率で m ($\leq m_0$) 個のノードを選択
 - 選択したノードと新規ノードの間にリンクを追加
- 大域ネットワーク構築に用いた値**
 - 局所ネットワークのノード数: 500, 1000
 - 局所ネットワークの平均次数: 2, 3
 - 局所ネットワーク間リンク: 50, 100, 200 本

[9] A. Barabási and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks," *Science*, vol. 286, pp. 509-512, Oct. 1999.

Osaka University 12

信頼性の評価のための障害モデル

- 単一障害**
 - 1 ノードずつランダムに故障
 - 100 通りの故障パターンを試行
- 複数同時障害**
 - 以下のノードが同時に故障
 - 選択された基点ノード
 - 基点ノードのすべての隣接ノード
 - 100 通りの故障パターンを試行



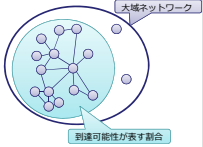
Osaka University 13

評価指標

- 平均ホップ長 H : 大域ネットワーク内の任意のノードから、任意のノードまでに要する最短ホップ長の平均を表す

$$H = \frac{\sum_{i \in B} \sum_{j \in B} d_{ij}}{|B|(|B|-1)}$$
 - N : ネットワークのノード数
 - B : ネットワークに含まれる到達可能なノード集合のうち最も大きな集合
 - d_{ij} : ノード i からノード j までの最短ホップ長
- 到達可能性 C : ノード全体の中での B に含まれるノード数の割合を表す

$$C = \frac{|B|}{N - |B_1|}$$
 - B_1 : 故障ノードの集合



Osaka University 14

Multiscale 構造の最適パラメータ

- パラメータ (λ, ζ) を一意に定めることができない
- Multiscale 構造の中で高い信頼性を示すパラメータを調査する
 - $0.1 \leq \lambda \leq 0.9, 0.1 \leq \zeta \leq 0.9$ と変化させる
 - ノード数 500, 平均次数 2 の局所ネットワークを用いる
 - 平均ホップ長と到達可能性を評価する

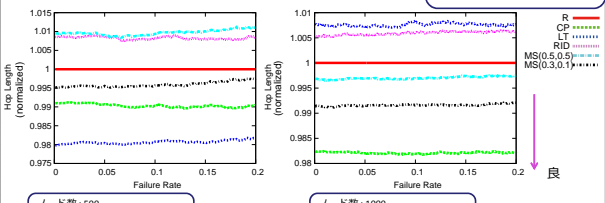
↓

$(\lambda, \zeta) = (0.3, 0.1)$ を Multiscale 構造のパラメータとして採用

Osaka University 15

単一障害に対する平均ホップ長の評価

- 上層が密に接続される構造 (CP, LT, MS(0.3,0.1)) が他の構造に比べて平均ホップ長を低く抑える傾向が強い
- LT はネットワークのノード数や平均次数によるばらつきがある



R : ランダムな構造
 CP : 上層が密な構造
 LT : 同階層の接続が多い構造
 RID : 距離の遠い接続が多い構造
 MS : 上記 4 つの中間的構造

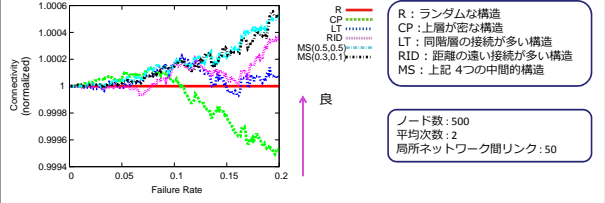
ノード数: 500
平均次数: 2
局所ネットワーク間リンク: 50

ノード数: 1000
平均次数: 3
局所ネットワーク間リンク: 100

Osaka University 16

単一障害に対する到達可能性の評価

- CP は容易に到達可能性を失う
- MS(0.3,0.1), MS(0.5,0.5) が、他の構造に比べて到達可能性を高く維持することが出来ている



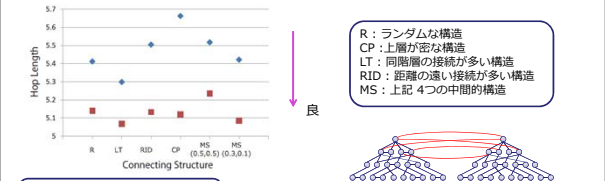
R : ランダムな構造
 CP : 上層が密な構造
 LT : 同階層の接続が多い構造
 RID : 距離の遠い接続が多い構造
 MS : 上記 4 つの中間的構造

ノード数: 500
平均次数: 2
局所ネットワーク間リンク: 50

Osaka University 17

複数同時障害に対する信頼性

- 無作為にノードを選んだ場合 (■)
 - CP, LT, MS (0.3,0.1) が値を低く抑えることが出来ている
- 中心部のノードを選んだ場合 (◆)
 - 無作為な場合と比べて、CP の値は悪くなっている
 - LT, MS (0.3,0.1) は値を低く抑えることが出来ている



R : ランダムな構造
 CP : 上層が密な構造
 LT : 同階層の接続が多い構造
 RID : 距離の遠い接続が多い構造
 MS : 上記 4 つの中間的構造

ノード数: 1000
平均次数: 2
局所ネットワーク間リンク: 50

Core-periphery 構造のイメージ

Osaka University 18

まとめと今後の課題

- まとめ
 - 異なる相互接続構造を持つネットワークの障害に対する信頼性を評価
 - ネットワークの中心部だけでなく、様々なノードを相互接続に用いることで、中心部のみを密に接続するよりも、障害に対して高い信頼性を維持
- 今後の課題
 - 構造の異なる局所ネットワークを用いた場合に、どのようなノードを相互接続に用いれば信頼性が向上するかを明らかにする
 - ネットワークの各リンクの回線容量や流れるフロー量に着目した評価を行う

