

インターネットトポロジのコラボレーション構造の分析

中田 侑[†] 荒川 伸一[†] 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: †{y-nakata,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 光通信ネットワークを対象として、プロテクションやリストラクションなどの信頼性を確保する手法が広く検討されているが、耐故障性の高い物理トポロジを構築することによりさらに相乗効果をもたらすと考えられる。今までもルータレベルトポロジの構造と耐故障性に関する議論が行われているが、ISP トポロジの現状分析がなされているのみであり、耐故障性に優れた物理トポロジ設計手法を検討することが重要であると考えられる。そこで本稿では、省エネルギーでありながらも環境変動に対応し進化してきた生物の転写因子ネットワークに着目し、転写因子ネットワークが有するコラボレーション構造とインターネットトポロジのコラボレーション構造および耐故障性を比較評価した。評価結果、インターネットトポロジの耐故障性は、大腸菌の転写因子ネットワークの耐故障性の傾向と類似していることが明らかとなった。

キーワード べき則、耐故障性、転写因子ネットワーク、ルータレベルトポロジ、コラボレーション

Analysis of the collaboration structure in the Internet topology

Yu NAKATA[†], Shin'ichi ARAKAWA[†], and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

E-mail: †{y-nakata,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract Numerous studies showed that the performance of diverse networks, such as the Internet and metabolic networks is strongly depended on the structure of their topologies. However, the relationship between structure in the topology of the Internet and its performance is not clear because the Internet was constructed based on physical and economic restrictions. The present study puts its focus on a structure called collaboration existing in transcriptional regulatory networks that is discussed in the field of molecular biology. In this paper, we discuss a correlation between collaboration and robustness of the network. Simulation results indicate that the degree of collaboration in ISP topology is similar in one in a transcriptional regulatory network of *E. Coli* networks.

Key words power-law network, robustness, transcriptional regulatory network, router-level topology, collaboration

1. はじめに

インターネットが社会インフラ化し大規模化するとともに、ルータなどのネットワーク機器の故障に対する信頼性やトラフィック変動に対する適応性を確保することが重要になりつつある。光通信ネットワークにおいては、プロテクションやリストラクションなどの信頼性を確保する手法が広く検討されてきた [1, 2]。しかし、多くの研究では、物理トポロジは与えられたとした上で、様々な手法が考えられてきた。高い信頼性を有するインターネットを構築するためには、物理的トポロジレベルでの信頼性を確保することが重要である。物理トポロジにおける大局的な障害への耐性の確保と、単一ルータ故障/単一リンク故障などの局所的な障害に対する高速復旧可能なプロテク

ション技術の導入には耐故障性に対して相乗効果があると考えられる。

近年、インターネットのルータレベルトポロジの次数分布が、べき則に従うことが明らかになっている。すなわち、 k 本のリンクを有する次数 k のノードの出現確率 $P(k)$ が $k^{-\gamma}$ (γ は定数) で近似される。ルータレベルトポロジは原則として事業者 (ISP) が構築するトポロジであり、例えばコスト最小化、信頼性の向上、ISP 独自の最適化ポリシーによって設計される。また、トポロジを設計する際には、ルータの処理能力やリンク回線容量にも制約があり、この制約のもと上述の指標の最適化が行われる。文献 [3] では、同じ次数分布を有するいくつかのトポロジを列挙し、ノードが処理可能なトラフィック量の制約下でそれぞれのトポロジに収容可能なトラフィック量を評価している。

その結果、ルータレベルトポロジは、ルータにおける処理能力の制約下で収容可能なトラフィック量を最大化することでモデル化されることが示されている。文献 [4] では、ルータレベルトポロジの耐故障性の評価がなされている。しかし、そこでは計測された ISP トポロジの分析にとどまっている。耐故障性に優れたインターネットトポロジを構築するために必要なトポロジ構造を明らかにすることが重要である。

生物の細胞内に存在する転写因子ネットワークでは、複数の転写因子が一つの転写因子や遺伝子を制御するコラボレーション構造を有することが知られている。転写因子ネットワークは転写因子と呼ばれるたんぱく質で構成され、外界からの刺激に応じた遺伝子の制御信号を伝達するためのネットワークである。転写因子ネットワークは進化の過程で、省エネルギーでありながらロバスト性や負荷分散性を高めることに成功してきた。より高等な生物種ほどコラボレーション構造が多く含まれていることが明らかにされており [5]、省エネルギーかつロバスト性を高めた生物種や、より複雑なゲノムを制御する生物種が存在する。転写因子ネットワークも次数分布がべき則に従っており、インターネットトポロジと類似点が存在する。そこで本稿では転写因子ネットワークのコラボレーション構造に着目したインターネットのトポロジ構造を議論し、インターネットのトポロジ構造がどの生物種と似ているのか、そして生物種の違いに合わせてインターネットの物理トポロジをどのように変化させるべきかを検討する。

2. コラボレーション構造

コラボレーション構造とは、二つの転写因子が一つの転写因子を制御するトポロジ構造である。転写因子ネットワークには、トポロジにおける位置によってノードの持つ役割が異なる。よってコラボレーション構造の数はノードの位置と合わせて考察する必要がある。文献 [5] ではトポロジを階層 top、階層 middle、階層 bottom の 3 層に階層化し、ノードの位置を特定する。転写因子をノード、制御を有向辺リンクとした場合、出線のみ持つノードを階層 top、入線のみ持つノードを階層 bottom、それ以外のノードを階層 middle に分類する。階層 top は外界からの刺激を受けて他の転写因子を制御する。階層 middle は他の転写因子からの制御を中継する。階層 bottom は特定の遺伝子の発現を制御する役割を担っている。

インターネットのルータレベルトポロジもコアノードやエッジノードなど、トポロジにおけるノードの位置はノードの持つ役割と関係している。そこでコアノードからエッジノードに向けてトラフィックが流れる過程を転写因子ネットワークと対比させて階層化を行う。始めにインターネットのルータレベルトポロジではリンクが無向辺であるため、各ノードにおいて他のノードまでの平均ホップ数をノードごとに計算し、リンクを平均ホップ数が小さいノードから大きいノードへの有向辺とする。インターネットトポロジのコラボレーション構造は、一つのノードペアが他の一つのノードに向かう有向辺リンクを持つことを指す。次にトポロジをモジュールに分割し [6]、モジュール間のリンクを持つノードをコアノードと見なして階層 top に

分類する。リンクを転写因子ネットワークの制御と対比させ、入線のみ持つノードを階層 bottom、それ以外のノードを階層 middle に分類する。階層 top のノードに向かう有向辺リンクは向きを逆にし、階層 top のノードは出線のみを持つようにする。また、階層 top のノード間は双方向リンクにする。

3. コラボレーション値の測定

この階層構造をもとに、どの階層がより多くのコラボレーション構造を持つかを調べる。ノード数やリンク数の多いトポロジほどコラボレーション構造の数は多くなる可能性がある。そこでノード数やリンク数に依存せずコラボレーション構造の量を計る指標が必要である。そこで文献 [5] ではその指標として各階層のコラボレーション値 D_{collab}^L と階層間のコラボレーション値 $D_{betw-collab}^{L1,L2}$ を定義している。各階層のコラボレーション値 D_{collab}^L は、階層 L に含まれるノードがネットワーク内の他のノードと共に制御している割合を表しており、以下の式 (1)(2) で定義されている。

$$D_{collab}^i = \frac{\sum_{A \in G} G_i \cap G_A}{G_i} \quad (1)$$

$$D_{collab}^L = \langle D_{collab}^i \rangle_i \forall i \in L \quad (2)$$

G は全ノード集合、 G_i はノード i が制御するノード集合、 $\langle \rangle$ は相加平均を表す。階層間のコラボレーション値 $D_{betw-collab}^{L1,L2}$ は階層 $L1$ に含まれるノードと階層 $L2$ に含まれるノードによって共に制御されるノードの割合を表しており、以下の式 (3) で定義している。

$$D_{betw-collab}^{L1,L2} = \frac{\sum_{A \in L1} \sum_{B \in L2} \frac{G_A \cap G_B}{G_A \cup G_B}}{|L1| \cdot |L2|} \quad (3)$$

$|L1|$ は階層 $L1$ に含まれるノードの数を表している。しかし式 (3) の定義では、コラボレーション構造の数が等しくても同じノードペアによるコラボレーションの数によって値が異なる。そのためコラボレーション構造の数のみに依存する定義として式 (4) を導入し用いることにする。

$$D_{betw-collab}^{L1,L2} = \frac{G_{L1} \cap G_{L2}}{G_{L1} \cup G_{L2}} \quad (4)$$

AT&T 社と Sprint 社のルータレベルトポロジと生物の転写因子ネットワークを階層化し、各階層のコラボレーション値と階層間のコラボレーション階層間のコラボレーション値を算出した (図 1、図 2)。検証を行った転写因子ネットワークの生物種は、大腸菌 (Ec)、ヒト (Hs)、マウス (Mm)、ラット (Rr)、イースト菌 (Sc) の 5 種類である。階層 bottom は他のノードを制御しないので、コラボレーション値の算出が可能な階層は階層 top と階層 middle となる。

4. 比較検証

耐故障性の高いネットワークのコラボレーションを検討するために、各ネットワークの耐故障性を算出した (図 3)。ネットワーク内の最も大きな強連結成分から最も次数の高いノードを故障させ、それにより入線数が 0 となったノードを連続して取り除く。故障数 0 の時の最も大きな強連結成分に含まれるノー

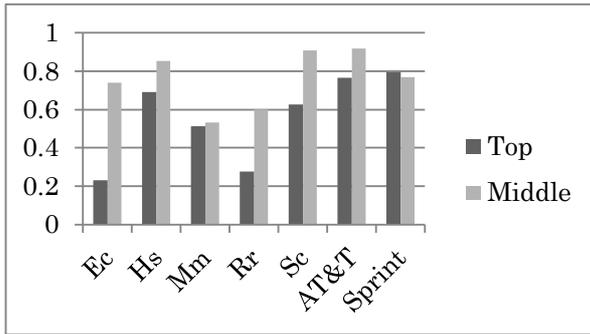


図 1 各階層のコラボレーション値

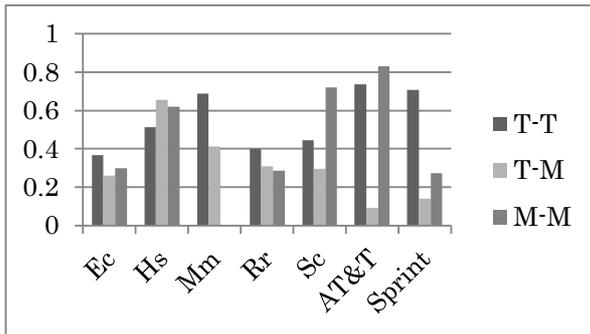


図 2 階層間のコラボレーション値

ド数を N とし、故障させたノード数を i とおく。 i 個のノードを故障させた時に取り除かれたノードの数を R_i とすると、図 3 の Failure ratio は $\frac{i}{N}$ であり、Cover ratio は $\frac{N-R_i}{N}$ としている。limit は Failure ratio に対する Cover ratio の最大値を表している。

図 3 によると、インターネットトポロジは大腸菌よりも耐故障性に優れているがその他の生物種よりも劣っていることが分かる。また図 2 を見るとインターネットトポロジの階層間のコラボレーション値は転写因子ネットワークと異なり同じ階層によるコラボレーション構造は多く含まれるが、階層 top と階層 middle によるコラボレーション構造は少ない。耐故障性の高いヒトとマウスの共通点として、図 1 で階層 top と階層 middle の各階層のコラボレーション値の差が少ないことがあげられる。今後インターネットトポロジを設計する際に、耐故障性の高いヒトやマウスのコラボレーション構造を取り入れることにより、信頼性の高いネットワークを構築できると期待される。

5. おわりに

本稿では、AT&T のルーラレベルトポロジと転写因子ネットワークのコラボレーション構造の割合と耐故障性の算出を行って比較することで、インターネットトポロジは大腸菌の転写因子ネットワークよりは耐故障性が高いがその他の生物種の転写因子ネットワークよりは低いことがわかった。また階層間のコラボレーション値が転写因子ネットワークと大きく異なることも明らかとなった。今後は耐故障性に優れた生物種のコラボレーション構造を基に、耐故障性に優れたトポロジの設計手法を検討する予定である。

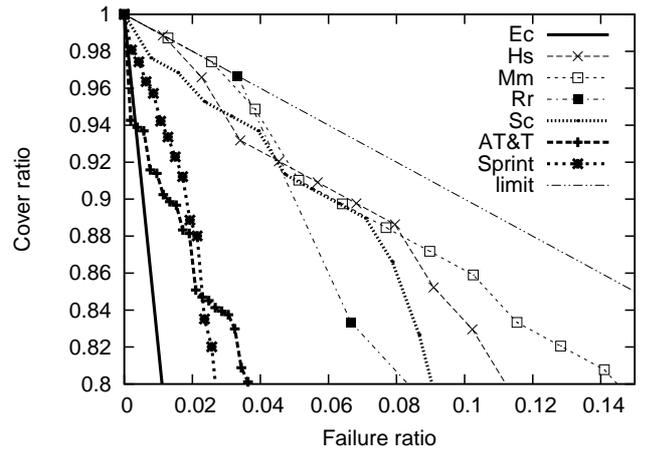


図 3 次数の多いノードから故障させた場合の耐故障性

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金若手研究(B)22300023 によっている。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] R. Munoz, R. Casellas, R. Martinez, M. Tornatore, and A. Pattavina, "An experimental study on the effects of outdated control information in GMPLS-controlled WSON for shared path protection," in *Proceedings of ONDM*, Feb. 2011.
- [2] J. Pesic, E. L. Rouzic, N. Brochier, and L. Dupont, "Proactive restoration of optical links based on the classification of events," in *Proceedings of ONDM*, Feb. 2011.
- [3] W. W. Lun Li, David Alderson and J. Doyle, "A first-principles approach to understanding the internet's router-level topology," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 34, pp. 3-14, Aug. 2004.
- [4] S. Arakawa, T. Takine, and M. Murata, "A failure-tolerant structure in router-level Internet topologies," *Technical Report of IEICE (NS2010-39)*, vol. 110, pp. 7-12, July 2010.
- [5] N. Bhardwaj, K.-K. Yan, and M. B. Gerstein, "Analysis of diverse regulatory networks in a hierarchical context shows consistent tendencies for collaboration in the middle levels," *PNAS*, vol. 107, pp. 6841-6846, Mar. 2010.
- [6] M. E. J. Newman, "Modularity and community structure in networks," *PNAS*, vol. 103, pp. 8577-8582, June 2006.