

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700077

研究課題名(和文) 環境変動への耐性と省電力を両立したネットワークの構築

研究課題名(英文) Energy efficient and robust network

研究代表者

大下 裕一(Ohsita, Yuichi)

大阪大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：80432425

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：環境変動への耐性と低消費電力を両立した大規模ネットワークを構築することを目的とした検討を行った。検討では、物理ネットワーク上に論理ネットワークを構成することを考える。そして、論理ネットワークに使用されなかった機器の電源を落とすことにより、低消費電力化を図る。

本研究課題では、論理ネットワーク制御手法では、少ない論理リンクの追加で、想定外の需要変動にも対応可能な論理ネットワークを構成する手法を提案した。また、物理ネットワーク構成手法では、チップ内ネットワークを想定し、低消費電力で通信需要を収容可能なように、回線交換スイッチを有効利用したネットワーク構造を提案した。

研究成果の概要(英文)：In this work, we construct the network that achieves the robustness against environmental changes with a small energy consumption. In this work, we construct a logical network over the physical network. We first propose a method to control a logical network so as to achieve the robustness against environmental changes by adding only a small number of logical paths. Then, we also propose a physical network structure focusing on the network on chip. In this network structure, we accommodate the traffic demands with a small energy consumption by using circuit switches efficiently.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：トラヒックエンジニアリング 省電力

## 1. 研究開始当初の背景

ネットワークを介した様々なサービスが展開されるようになっており、ネットワークの大規模化・大容量化が進んでいる。ネットワークの大規模・大容量化が進むにつれ、ネットワークの消費電力の増大している。今後もさらなるサービスの多様化・トラヒックの大容量化が予想され、ネットワークサービスを安価かつ安定的に収容するための、低消費電力のネットワークの提供が大きな課題となっている。

その一方、ネットワークは重要なインフラとなっているため、ネットワークが大規模になれば、発生頻度が高くなる機器の故障や、近年著しく大きくなってきているトラヒックの時間変動等の環境変動時にも安定的なサービスの供給が求められる。

しかしながら、既存の研究は、上記の二つの目標それぞれをターゲットとしているため、環境変動への耐性と低消費電力の両立は考えられていない。

そこで、本研究課題では、上記の問題を解決し、大規模ネットワークにおいて、環境変動への耐性と低消費電力を両立することを目的とする。

## 2. 研究の目的

環境変動への耐性と低消費電力を両立した大規模ネットワークを構築することを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究課題の目標を達成するにあたり、物理ネットワーク上に論理ネットワークを構成することを考える。そして、論理ネットワークに使用されなかった機器の電源を落とすことにより、低消費電力化を図る。

本研究課題では、目標達成に向けて、以下の二つの項目に分けて検討を行った。

- (1) 環境変動に耐性を持ちつつ低消費電力な論理トポロジの構成方法
- (2) 論理トポロジを低消費電力で収容可能なネットワーク構成

## 4. 研究成果

### (1) 論理トポロジ構成手法

少ない論理リンクで収容が必要なトラヒックを収容することができるような論理トポロジを構成することにより、低消費電力化を達成することができる。しかしながら、環境変動に対応するために、多数の論理リンクの張替が発生する場合は、多数のトラヒックが影響を受け、通信品質が低下してしまう。そのため、本研究課題では、多数のリンク構築することなく、著しい環境変動が発生した場合でも、少数の論理リンクの張替で対応すること

ができる手法について検討を行った。

本検討を行うにあたり、著しい環境変化に対応して進化し続けている生物の特徴を参考に、文献[1]では、各生物を、環境に存在する複数のリソースを合成し、生存に必要な複数の物質を生成するという機能を持つものとしてモデル化している。そして、生存に必要な物質を十分に生成できない固体は死滅し、生成可能な固体は増殖・進化する。文献[1]ではこのモデルを用いて、生物の生存・進化についてのシミュレーションを行い、環境変動が著しい場合に生存・進化を行ってきた生物の持つ機能の特徴を調査している。

文献[1]では、生物の持つ機能の特徴のうち、機能間の関連に着目している。ここで、生物の機能は、各リソースをもとに、特定の物質の生成を行う、あるいは、生成を阻害する小機能に分割できるものとし、同一のリソースをもとにした小機能や、同一の物質の生成・阻害を行う小機能は関連があるものとする。そして、関連がある小機能をグループにまとめた結果、生成されたグループ数をモジュール度として定義すると、環境変動が著しい場合に、モジュール度が高い生物ほど生き残り、モジュール度が高くなるように生物が進化していくことが明らかになっている。そこで、本研究では、論理トポロジに対するモジュール度を定義し、モジュール度を高く維持することにより、環境変動への耐性を高く維持する。

論理ネットワークの機能は、トラヒックを収用することである。生物のモデルと対応付けると、論理ネットワークが持つ機能のモジュール度が高ければ、その論理ネットワークトポロジは、環境変動時により少ないパスの再構成で新たなトラヒック需要に対応できると考えられる。

論理ネットワークが持つ機能のモジュール度を定義するにあたり、論理ネットワークが持つ小機能同士の関係性を定義する必要がある。本研究では、論理ネットワークの機能は、各フローを収用するという小機能に分割できるものとし、その小機能同士の関係性を定義する。各フローを収用する機能間の関係として、フロー包含関係を定義する。ここで、フロー包含関係とは、フローAが収容される仮想ネットワーク上の経路集合が、フローBが収容される経路集合の部分集合である場合、フローAとフローBが包含関係にある、と定義した関係である。フロー包含関係を持つフローを収用する機能同士は密な関係があり、あるフローのトラヒック量が急増し輻輳が発生した場合、そ

のフローとフロー包含関係にあるフローも輻輳したリンクを経由する。また、輻輳の解消のために、あるフローの経路を変更した場合にも、フロー包含関係にある別のフローが経過している輻輳箇所も解消できる可能性がある。

また、フロー包含関係は、各フローを頂点とし、フロー包含関係を持つフロー同士を辺で結んだグラフとして表すことができる。以降、フロー包含関係を表したグラフをフロー包含関係グラフと呼び、フロー包含関係グラフの頂点をフローノードと呼ぶ。

本稿では、フロー包含関係グラフをもとに、グラフに対するモジュール分割手法[2]を適用する。そして、フロー包含関係グラフのモジュール度を求め、その指標が環境変動への耐性を示すかを検証する。以降、フロー包含関係グラフのモジュール度をフロー包含関係モジュール度と呼ぶ。

本研究では、まず、フロー包含関係モジュール度と、環境変動時に追加が必要なパス数の関係を調べた。本評価では、フロー包含関係モジュール度が異なる複数の初期仮想ネットワークを準備し、その初期仮想ネットワークにおけるフロー包含関係モジュール度を計算する。そして、ランダムに生成したトラヒックマトリクスを与え、発生した輻輳を解消するのに必要な光パスの追加・削除の本数を調べる。本評価では、各初期仮想ネットワークに対して、10パタンのトラヒックを与える。

フロー包含関係モジュール度に違いのある初期仮想ネットワークを生成するために、本稿では、文献[3]のトポロジ生成手法におけるパラメータを変更しながら、生成したトポロジを初期仮想ネットワークトポロジとして利用する。

また、環境変動後の論理パスの追加方法としては、本稿では、文献[4]の手法を用い、仮想ネットワーク上の全リンク使用率が閾値  $Th$  を下回るまで、光パスの追加を行う。

再構成パス数の結果を縦軸に、初期仮想ネットワークのルーティング情報からフロー包含関係モジュール度を計算したものを横軸にとり、各仮想ネットワークの値をプロットしたグラフを図1に示す。ただし、プロットされたデータの内、黒丸は追加パス数の平均値、エラーバーは追加パス数の信頼区間(1)を表す。図1より、リンク使用率が  $Th$  を上回るリンクがほとんど生じなかった2つの仮想ネットワークを除き、フロー包含関係モジュール度と追加パス数は負の相関関係があることが分かる。

これは、フロー包含関係グラフにおける特定モジュール内のフローが経過するリンクで発生した輻輳が、モジュール内の一部のフローの送信元・宛先間へのリンクの追加で解消されたことが原因であると考えられる。光パスを追加することによって、輻輳箇所を経由するフローが迂回される。迂回が発生すると、迂回されたフローが経過していたリンクにおける他のフローが利用できる帯域が増加し、当該リンクへのさらなる迂回が可能となる。

フロー包含関係モジュール度におけるモジュールは、同一の経路を経由するフローをまとめたものとなる。このモジュール内の関係が密であると、多くのフローが同一、あるいは、近隣のリンクを経由しているため、光パスの追加によるモジュール内のフローの迂回が、別の同一モジュール内のフローの迂回を可能とする確率が高い。その結果、少数の光パスの追加で、より多くのリンクの輻輳を解消できる。逆に、モジュール度が低いと、同一、あるいは近隣のリンクを経由するフローが少なく、多数の箇所の輻輳を解消するためには、より多くの光パスの追加が必要となる。

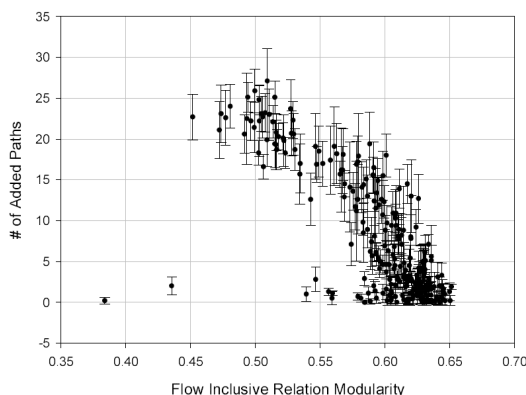


図1：フロー包含関係モジュール度と追加パス数の関係

そこで、フロー包含関係モジュール度を考慮した、論理ネットワーク再構成手法を提案する。提案手法は、以下のように動作する。

- パスの追加  
パスの追加は、輻輳等の問題が発生した場合に直ちに行う必要がある。そこで、パスの追加には従来手法(たとえば文献[4])をそのまま用いる
- パスの削除  
パスを削除する際には、フロー包含関係モジュール度を考慮することにより、環境変動への耐性を維持しつつ、不要な資源を開放することにより低消費電力化を行う。このパスの削除は、(1)パスを削除した仮想

ネットワークで、必要な通信を必要な性能で収容できること、(2)フロー包含関係モジュール度が十分に大きいことの2つの条件を満たす場合のみ行うことができる。

パスの削除の手順を以下に示す。

1 .パスを1本削除した候補仮想ネットワークの集合を得る。ただし、必要な通信性能を得ることができない仮想ネットワークは候補から除外する。

2 .各候補仮想ネットワークについて、フロー包含関係モジュール度を計算する

3 .フロー包含関係が最も大きい候補仮想ネットワークを選択する

4 .3で選択された仮想ネットワークのフロー包含関係モジュール度が閾値以上であれば、該当するパスを削除する。閾値を下回っている場合は、パスの削除を行わない

上記の論理ネットワーク再構成手法について、シミュレーションにより評価を行った。評価では、初期論理ネットワークとしてフルメッシュなネットワークを構築し、初期トラヒックを生成する。そして、その初期トラヒックを収容できるという条件下で、提案手法や比較対象の手法を用いてパスの削除を行う。その後、ランダムにトラヒック変動を発生させ、変動後のトラヒックを収容するのに必要なパスの追加を行う。その追加されたパスの本数を比較することにより、提案手法の有効性を評価した。

比較対象としては、(1)削除後のリンク使用率が最も低くなるように削除を行う、(2)削除のリンク媒介中心性が最も低くなるように削除を行う、の2種類を用いた。

図2に結果を示す。図2の横軸は削除されたパス数、縦軸は追加が必要になったパス数の平均値を示す。図より、提案手法、リンク媒介中心性を用いた手法では、リンク使用率ベースの手法よりも、環境変動時に追加が必要なパスの本数が少ないことが分かる。これは、リンク使用率ベースの手法では、その後利用される可能性が高くても、現在のトラヒックを収容するのに不要であるパスは削除されてしまうのに対して、提案手法やリンク使用率ベースの手法では、そのような利用される可能性の高いパスは削除されないためである。

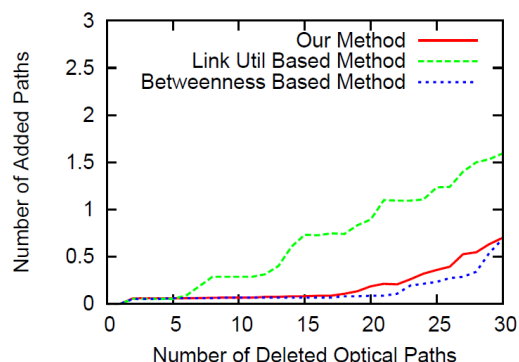


図2：平均追加パス数

また、図3に、30本のパスが削除された後の環境変動で追加されたパス数の分布を示す。図では、横軸は追加されたパスの本数、縦軸は累積補分布である。図より、提案手法が最悪時の追加パスの本数をもっとも抑えることができていることが分かる。これは、提案手法が媒介中心性よりも正確に、環境変動耐性を表しているためである。

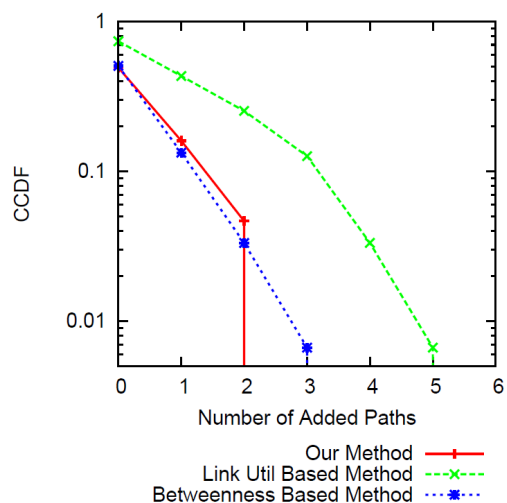


図3：追加パス数の分布

#### 参考文献

- [1] H. Lipson, et al., "On the origin of modular variation," *Evolution*, vol. 56, pp. 1549-1556, Aug. 2002.
- [2] M. E. J. Newman, "Modularity and community structure in networks," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 103, pp. 8577-8582, June 2006.
- [3] N. Hidaka, "A topology design method for sustainable information networks," Master's thesis, Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Feb. 2009.
- [4] A. Gençata and B. Mukherjee, "Virtual-topology adaptation for WDM

mesh networks under dynamic traffic, " IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 11, pp. 236-247, Apr. 2003.

## (2) 物理ネットワーク構成

物理ネットワーク構成の検討を行うにあたり、本研究では、近年消費電力の増大が課題となっているデータセンターに注目した。また、データセンターをさらに低消費電力化する手法として、多数のコアをチップに集約する、オンチップ型データセンターが提唱されている[5]。本研究では、オンチップ型データセンターを対象とし、低消費電力化と性能の両立ができるようなネットワーク構成について検討を行った。

本研究では、3次元に積層されたチップ上にCPUやキャッシュの機能を果たすコアを配置した構成を想定する。異なる階層の同一位置にあるコア同士は直接接続し、一台のサーバーの役割を果たす。コア間を結ぶネットワークは、回路集積の容易な3次元格子型ネットワークであるとする。ネットワークの各ノードは、回線交換スイッチまたはパケット交換スイッチであるとし、各サーバーは、特定の階層において隣接するスイッチ1台と接続することでネットワークと接続する。ただし、各サーバーは同時に複数のサーバーと通信を行う可能性があるため、各サーバーと接続するスイッチはパケット交換スイッチであるとする。

以降、この構成において、回線交換スイッチの配置方法とそのネットワーク上で低消費電力となるようにトラヒックの収容を試みた場合に達成可能な電力の関係を求めることにより、適切なネットワーク構成を明らかにする。

評価対象としては、(1)階層間の接続構成、(2)サーバーと接続するスイッチの階層、(3)同一階層内のスイッチの構成がある。

階層間の接続構成としては、隣接階層のみを接続する隣接階層接続型、すべての層をパケットスイッチと接続するパケットスイッチ集約型の2種類が考えられる。また、サーバーと接続するスイッチの階層としては、全スイッチが同一の階層に接続する接続階層集約型と、異なる階層に接続する接続階層分離型の2種類が考えられる。また、同一階層内のスイッチの構成としては、同一種類のスイッチのみを配置する単一スイッチ階層構成型と、複数の種類のスイッチが混在するスイッチ混在型が考えられる。

本評価では、これらの各ネットワーク構

造について、発生させたトラヒックを収容した際にかかる消費電力を比較した。

評価にあたり、電力消費モデルとして、文献[6]の結果をもとに、トラヒック1bitあたりの消費電力を、回線交換スイッチで0.37uW、パケット交換スイッチで0.98uW、リンクで $(0.39 + 0.12L)$ uW(ただしLはリンクの長さ(mm))とした。

トラヒックはランダムに選択したサーバー間で発生するものとした。

電力消費モデルより、各スイッチ、リンクが消費する電力は、経由するトラヒック量に依存する。そのため、トラヒック需要の多いサーバーペア間の通信が消費電力に与える影響は大きく、1bitあたりの消費電力がより少ない経路に収容することが必要とされる。

そこで、サーバーペアに発生している通信需要が多いものから順に経路を確定する。各スイッチ・各リンクが使用する消費電力は、そのスイッチ・リンクを流れるトラヒック量に比例するため、各サーバーペアに対する低消費電力な経路は、各スイッチ・リンクの1bitあたりの消費電力を重みとしたグラフ上でダイクストラ法を用いて得ることができる。ただし、経路計算の際には、すでに設定済みの回線交換スイッチの出入口ポートは、接続されているものとして扱う。

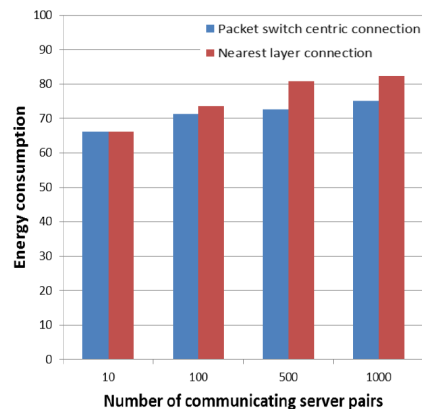


図4：階層間の接続構造の違いによる消費電力の比較

まず、階層間の接続構造が異なるネットワーク構造を消費電力の観点から比較を行う。消費電力の比較を図示したグラフを図4に示す。ただし、図の縦軸は2次元格子型ネットワークにおける消費電力を100として正規化した値である。図より、隣接階層接続型よりもパケットスイッチ集約型の方が消費電力が少ないことが分かる。これは、隣接階層接続型では、第三階層の回線交換スイッチを利用する



には、第二階層の回線交換スイッチも経由する必要があるためである。

次に、サーバーが接続するスイッチが属する階層の違いによる消費電力を評価する。

図5に消費電力の比較を示す。図5においても、図の縦軸は2次元格子型ネットワークにおける消費電力を100として正規化した値である。図5より、接続階層集約型は2次元格子型よりも低い消費電力を達成できるのに対して、接続階層分散型は2次元格子型よりも消費電力が大きくなるのが分かる。これは、接続階層分散型では、隣接サーバー間のホップ数が2次元格子型よりも著しく大きいことが原因である。

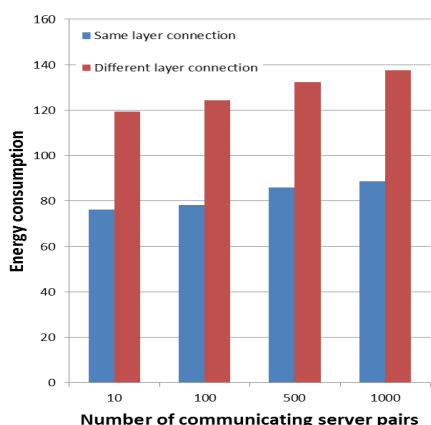


図5：サーバーの接続階層による消費電力の比較

最後に、各階層は一種類のスイッチで統一するべきか、パケット交換スイッチと回線交換スイッチを混在させた方がよいのかについて検討を行う。

図6に消費電力の比較を示す。ただし、図の縦軸は2次元格子型ネットワークにおける消費電力を100として正規化した値である。図より、スイッチ混在階層構成型の消費電力は2次元格子型よりも悪

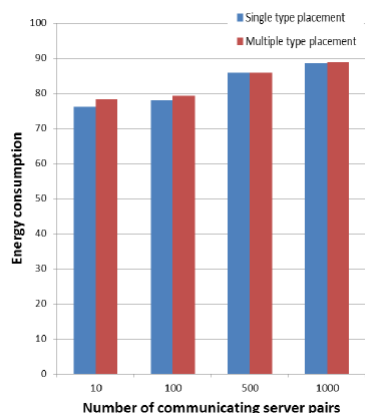


図6：階層内のスイッチによる消費電力の比較  
化していることが分かる。これは、スイ

ッチ混在階層構成型では、パケット交換スイッチの周囲を回線交換スイッチで囲む構造となっているため、サーバー間のホップ数が増大することが原因である。

以上より、チップ内のネットワーク構成は、すべてのサーバーが同じ階層のパケットスイッチと接続し、全階層はパケットスイッチと接続し、各階層のスイッチ数を最小限とした構造がよいことが分かった。

#### 参考文献

- [5] M. Kas, "Toward on-chip datacenters: a perspective on general trends and on-chip particulars," The Journal of Supercomputing, vol. 62, pp. 214{226, Oct. 2012.
- [6] P. T. Wolkotte, et al. "Energy model of networks-on-chip and a bus," in Proceedings of IEEE International Symposium on System-on-Chip, pp. 82-85, Nov. 2005.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

- [1]Masahiro Yoshinari, Yuichi Ohsita, and Masayuki Murata, "Virtual Network Reconfiguration with Adaptability to Traffic Changes," IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2014

〔学会発表〕(計6件)

- [1]Takahide Ikeda, Yuichi Ohsita, Masayuki Murata, "3D on-chip data center networks using circuit switches and packet switches," in Proceedings of The Eighth International Conference on Systems and Networks Communications, Oct. 2013. (査読付き, Best Paper)
- [2]Masahiro Yoshinari, Yuichi Ohsita, and Masayuki Murata, "Virtual Network Topologies Adaptive to Large Traffic Changes by Reconfiguring a Small Number of Paths," in Proceedings of International Conference on Networking and Services, pp. 28-33, Mar. 2013 (査読付き)

他4件

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

大下 裕一 (OHSITA YUICHI)

大阪大学・大学院情報科学研究科・助教

研究者番号：80432425