

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19500022

研究課題名（和文）相互結合網における耐クラスタ故障経路選択アルゴリズムの開発

研究課題名（英文）Development of Cluster-Fault-Tolerant Routing Algorithms  
in Interconnection Networks

研究代表者

金子 敬一（KANEKO KEIICHI）

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・准教授

研究者番号：20194904

研究成果の概要（和文）：相互結合網の位相である，パンケーキグラフおよび焦げたパンケーキグラフにおいて 2 ノード間の耐クラスタ故障経路選択アルゴリズムを開発した．また，パンケーキグラフにおいて 1 対多およびノード対間の耐クラスタ故障の素な経路選択アルゴリズムを開発した．研究過程において，良い性質を持つ新しい位相，新しい耐故障経路選択アルゴリズムを開発した．

研究成果の概要（英文）：In pancake and burnt pancake graphs which are topologies for interconnection networks, we have developed cluster-fault tolerant routing algorithms for one-to-one communication. We have also developed cluster-fault-tolerant disjoint-path routing algorithms for one-to-many and pairwise communication. In the process of research activities, we have also developed new topologies with good properties and new fault-tolerant routing algorithms.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・ソフトウェア

キーワード：アルゴリズム

## 1. 研究開始当初の背景

1980 年以降，プロセッサの性能はおおよそ 3 年ごとに倍々となってきた。しかしながら，今後は無制限の性能向上を望むことはできない。これに対して，解かなければならない問題の規模は留まるところを知らず，これを解決する手法として，並列計算に対する期

待が高まっている。並列計算機は，プロセッサや交換器などの市販品を組合せることで，比較的安価で高性能のシステムを構築することができる。しかし，唯一，市販の製品で構成できないのが相互結合網である。結果として大規模並列計算機の構成において，相互結合網の位相は，コスト性能比を大きく左右

する。相互結合網の設計における重要な要素は、低い次数、小さな直径、および小さな平均距離である。このような要素を指標として、並列計算機のために、ケイリーグラフなどに基いて、ローテータ  $R_n$ ,  $(n, k)$ -ローテータ  $R_{n,k}$ , スター  $S_n$ , パンケーキ  $P_n$ , 焦げたパンケーキ  $BP_n$ , 一般化パンケーキ  $GP_{n,k}$ , パブルソート  $BS_n$ , 部分列反転  $SR_n$  など、数多くの相互結合網が提案されている。しかしながら、近年では、大規模であるが故に、並列計算機中に故障要素が存在する可能性が高く、そのため、上記の指標に加えて、耐故障性を考慮した効率の良い経路選択アルゴリズムが必須となっている。

このような耐故障性を考慮した経路選択アルゴリズムは、(1) 適応的な経路選択アルゴリズム、(2) 出発ノードと目的ノード間で、途中のノードを共有しない経路をできるだけ多く構成する素な経路選択アルゴリズム、(3) 故障ノードを想定してハミルトン閉路やハミルトン経路といった特定の経路を求めるアルゴリズム、などに分類することができる。このうち、(1)については、研究活動は広く分布している。一方、米国では、Sudboroughを中心とするグループが、(2)に関して活発な研究を行っている。また、台湾では、(3)について Hsu らによる研究グループの活動が盛んである。これに対して、日本では、申請者の研究室や Peng らの研究グループが、(3)について活発に成果を報告している。

これらの研究のほとんどが、故障モデルとしてランダムに発生する多重故障を想定している。しかしながら、現実には、物理的あるいは論理的に隣接した複数の要素（プロセッサやリンク）に同時に障害が発生するクラスタ故障が起きる可能性が高い。それぞれのクラスタは、連結した比較的小さな部分グラフであるため、うまく処理することで、あたかも1つの故障要素だけが存在するかのように対処することができる場合も多い。そのため、従来の研究では、クラスタ故障が起きた場合に、システムが、大幅に性能を低下させてしまう可能性が高いのに対して、本研究では、クラスタ故障を想定してアルゴリズムを構築することで、より大規模な故障に対しても、システムが、比較的高性能のまま処理を継続できるような耐故障性を実現することができるようになるという利点がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、ケイリーグラフに基づいて提案された位相に対して、1対1の耐クラスタ故障経路選択問題、1対1の内素な経路選択問題、1対多の互いに素な経路選択問題、多対多の互いに素な経路問題などを解く効率的な耐クラスタ故障性を考慮した

アルゴリズムの開発を目指す。具体的には、まず、パンケーキグラフを取り上げ、これに対して、クラスタ故障を想定し、上記の問題それぞれを解決するアルゴリズムを開発する。さらに、グラフに対しても手法を適用して、アルゴリズムの開発を進める。

## 3. 研究の方法

従来の研究では、それぞれの位相に対して、個別にアプローチを試みていたため、経路選択などのアルゴリズムを得るために時間がかかっていた。これに対して、本研究では、基となるケイリーグラフに立ち戻って、その代数構造に共通に利用できる手法を開発することで、個々の位相に対しては、小さな修正でアルゴリズムを開発できるという利点がある。近年、ケイリーグラフに基づく相互結合網の位相が盛んに提案されており、これらは、低い次数、小さな直径と平均距離という望ましい性質を持っている。残念ながら、これらの位相は最近発表されたものであるため、複雑な通信パターンに対しては、効率的なアルゴリズムが存在せず、その普及を妨げている。本研究によって、耐クラスタ故障性を持つ経路選択アルゴリズムの開発を容易にすることで、従来にない集積度の高い超並列計算機を構成することが可能となり、並列計算機の研究が大きく進展することが期待できる。さらに、斬新な位相が提案される可能性を広げることになるとも考えられる。

## 4. 研究成果

研究成果を要約すると以下ようになる。

(1) パンケーキグラフ  $P_n$  において2ノード間の耐クラスタ故障経路選択アルゴリズムを世界で初めて開発した。従来アルゴリズムでは、 $n-2$  個の故障ノードまで経路選択可能であったのに対して、提案アルゴリズムでは、 $n(n-2)$ 個の故障ノードまで経路選択可能となった。これによりパンケーキグラフに基づく相互結合網の耐故障性が飛躍的に向上した。

(2) 焦げたパンケーキグラフ  $BP_n$  において2ノード間の耐クラスタ故障経路選択アルゴリズムを世界で初めて開発した。従来アルゴリズムでは、 $n-1$  個の故障ノードまで経路選択可能であったのに対して、提案アルゴリズムでは、 $2n(n-1)$ 個の故障ノードまで経路選択可能となった。これにより焦げたパンケーキグラフに基づく相互結合網の耐故障性が飛躍的に向上した。

(3) パンケーキグラフ  $P_n$  において 1 対多の耐クラスタ故障の素な経路選択アルゴリズムを世界で初めて開発した。提案アルゴリズムでは、従来アルゴリズムの  $n$  倍の故障ノードがあっても経路選択可能となった。これによりパンケーキグラフに基づく相互結合網の耐故障性が飛躍的に向上した。

(4) パンケーキグラフ  $P_n$  においてノード対間の耐クラスタ故障の素な経路選択アルゴリズムを世界で初めて開発した。提案アルゴリズムでは、従来アルゴリズムの  $n$  倍の故障ノードがあっても経路選択可能となった。これによりパンケーキグラフに基づく相互結合網の耐故障性が飛躍的に向上した。

(5)  $(n, k)$ -パンケーキグラフ  $P_{n,k}$  とその経路選択アルゴリズムを提案した  $(n, k)$ -パンケーキグラフは、任意個のノードから構成可能であり、パンケーキグラフで大きな問題となっていた逐次的拡張性の制限が一切ないという良い性質を持つ

(6) 不完全なスターグラフ  $vS_n$  とその経路選択アルゴリズムを提案した。不完全なスターグラフは、任意個のノードから構成可能であり、スターグラフで大きな問題となっていた逐次的拡張性の制限が一切ないという良い性質を持つ。

(7) 焦げたパンケーキグラフ  $BP_n$  にリンクを付加して性能改善した新しい位相  $vBP_n$  を提案した。性能改善により、集積度をあまり落とさずに、グラフの直径を下げることに成功した。

## 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 2 件)

Suzuki, Yasuto, and Keiichi Kaneko: "The Container Problem in Bubble-Sort Graphs," IEICE Transactions on Information and Systems, 査読有, Vol. E91-D, No. 4, pp. 1003-1009, Apr. 2008.

澤田直樹, 金子敬一: " $(n, k)$ -パンケーキグラフとその特性," 電子情報通信学会論文誌, 査読有, Vol. J91-D, No. 1, pp. 1-11, Jan. 2008.

### [学会発表](計 17 件)

Bossard, Antoine, Keiichi Kaneko, and Shietung Peng: "Fault-tolerant Node-to-set Disjoint-path Routing in Hypercubes," Proceedings of the 10th International Con-

ference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing, 査読有, Busan, Korea, May 21-23, 2010.

Iwasawa, Nagateru, Tatsuhiro Watanabe, Tatsuya Iwasaki, Keiichi Kaneko: "Cluster-fault-tolerant Routing in Burnt Pancake Graphs," Proceedings of the 2010 International Symposium on Frontiers of Parallel and Distributed Computing, 査読有, Busan, Korea, May 21-23, 2010.

Bossard, Antoine, Keiichi Kaneko, and Shietung Peng: "Node-to-Set Disjoint Paths Problem in Perfect Hierarchical Hypercubes," Proceedings of the Ninth IASTED International Conference on Parallel and Distributed Computing and Networks, 査読有, pp. 65-72, Innsbruck, Austria, Feb. 16-18, 2010.

Bossard, Antoine, Keiichi Kaneko, and Shietung Peng: "A Node-to-set Disjoint-path Routing Algorithm in Metacube," Proceedings of the 10th International Symposium on Pervasive Systems, Algorithms and Networks, 査読有, pp. 23-28, Kao-Hsiung, Taiwan, ROC, Dec. 14-16, 2009.

Bossard, Antoine, Keiichi Kaneko, and Shietung Peng: "Node-to-set Disjoint-path Routing in Metacube," Proceedings of the Tenth International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, 査読有, pp. 57-62, Hiroshima, Japan, Dec. 8-9, 2009.

Iwasaki, Tatsuya, and Keiichi Kaneko: "A Fault-tolerant Routing Algorithm of Burnt Pancake Graphs," Proceedings of the 2009 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, 査読有, Vol. 1, pp. 307-313, Las Vegas, Nevada, USA, July 13-16, 2009.

渡部達朗, 金子敬一, 彭旭東: "パンケーキグラフにおける節点对間の互いに素な耐クラスタ故障経路選択アルゴリズム," 情報処理学会第 71 回全国大会論文集, 査読無, pp. 1-413-1-414, 立命館大学, Mar. 10-12, 2009.

岩崎達矢, 金子敬一: "焦げたパンケーキグラフにおける耐故障経路選択アルゴリズム," 情報処理学会第 71 回全国大会論文集, 査読無, pp. 1-415-1-416, 立命館大学, Mar. 10-12, 2009.

Peng, Shietung, and Keiichi Kaneko: "Set-to-set Disjoint Paths Routing in Dual-cubes," Proceedings of the Ninth International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, 査読有, pp. 129-136, Dunedin, New Zealand, Dec. 1-4, 2008.

Iwasaki, Tatsuya, and Keiichi Kaneko: "A

New Configuration of an Incomplete Star Graph and its Routing Algorithm," Proceedings of the 2008 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, 査読有, Vol. 1, pp. 116-122, Las Vegas, Nevada, USA, July 14-17, 2008.

Kaneko, Keiichi, and Shietung Peng: "Node-to-set Disjoint Paths Routing in Dual-cube," Proceedings of the International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks, 査読有, pp. 77-82, Sydney, Australia, May 7-9, 2008.

澤田直樹, 金子敬一: "焦げたパンケーキグラフの改善," 電子情報通信学会総合大会論文集, 査読無, D-1-3, p. 3, 北九州学術研究都市, Mar. 18-21, 2008.

Sawada, Naoki, Keiichi Kaneko, and Shietung Peng: "Pairwise Disjoint Paths in Pancake Graphs," Proceedings of the Eighth International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, 査読有, pp. 376-382, Adelaide, Australia, Dec. 3-6, 2007.

Kaneko, Keiichi, Naoki Sawada, and Shietung Peng: "Cluster Fault-Tolerant Routing in Pancake Graphs," Proceedings of the 19th IASTED International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems, 査読有, pp. 423-428, Cambridge, Massachusetts, USA, Nov. 19-21, 2007.

Watanabe, Tatsuro, Keiichi Kaneko, and Shietung Peng: "A Node-to-Set Cluster-Fault-Tolerant Disjoint Routing Algorithm in Pancake Graphs," Proceedings of the ISCA 20th International Conference on Parallel and Distributed Computing Systems, 査読有, pp. 200-205, Las Vegas, USA, Sept. 24-26, 2007.

渡部達朗, 金子敬一, 彭旭東: "パンケーキグラフにおける半素な耐クラスタ故障経路選択," 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, Vol. 107, No. 174, pp. 13-18, 旭川国際会議場, 北海道, Aug. 1-3, 2007.

Sawada, Naoki, and Keiichi Kaneko: "An  $(n, k)$ -Pancake Graph and its Properties," Proceedings of the 2007 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, 査読有, pp. 173-179, June 25-28, Las Vegas, USA, 2007.

(2)研究分担者  
なし

(3)連携研究者  
なし

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

金子 敬一 (KANEKO KEIICHI)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院  
院・准教授

研究者番号 : 20194904