

令和 5 年 4 月 27 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11729

研究課題名（和文）幅広い次元のトーラスにおいて高性能を発揮する確率的耐リンク故障経路選択手法の探求

研究課題名（英文）Investigation of a High-performance Stochastic Link-Fault Tolerant Routing Method in Torus with Wide Dimensions

研究代表者

金子 敬一（Kaneko, Keiichi）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：20194904

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：トーラスにおいて、あるノードが隣接ノードからメッセージを受け取れることを前提として、目的ノードまでの到達確率の推定を計算し、これを隣接ノードに通知することで、従来手法の欠点である袋小路への侵入を回避する手法を開発した。現在、この手法に基づくアルゴリズムを実現し、計算機実験を実施しており、その成果を発表予定である。また、トーラスやそこから派生する双射結合グラフ、ハイキューブ、フォールディッドハイパーキューブ、メビウスキューブといった位相において、基礎的な性質を明らかにするとともに、素な経路選択アルゴリズムを含む耐故障アルゴリズムを開発することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トーラスにおける耐故障経路選択に関する先行研究では、2, 3次元の低次元において専用の耐故障経路選択手法が提案されており、ある程度の性能を示している。一方、超並列システムである「京」や「富岳」では、より高い6次元が採用されている。本研究では、高い次元のトーラスにも適用可能な制限された大域情報である有向到達確率を新たに設計して活用するアルゴリズムを開発した。その成果は、独創的かつ画期的である。トーラスは、超並列システムの相互結合網として非常に良く利用されている位相であるため、本研究による成果は、社会の情報インフラに対して大きなインパクトを与える。

研究成果の概要（英文）：In the torus, assuming that a node receives a message from an adjacent node, we developed a method that calculates the estimated probability of delivery of the message to the target node excluding the effect from the adjacent node. Then, the estimated probabilities are exchanged between the adjacent nodes. By using the exchanged estimated probabilities of adjacent nodes, the routing algorithm can avoid entering dead ends. Currently, we are implementing the method, and planning to conduct computer experiments. In addition, we have clarified the basic properties such as the shortest path routing and the crossing number of the torus and its variances: bijective connection graphs, bicubes, folded hypercubes, and Moebius cubes. Regarding the topologies, we have developed fault-tolerant algorithms including disjoint paths routing algorithms.

研究分野：情報工学

キーワード：高信頼性システム ディペンダブルコンピューティング

## 1. 研究開始当初の背景

近年、逐次計算が性能限界に近付き、並列処理への期待が高まっている。これに伴い、その相互結合網のための位相も数多く提案されている。位相に関する問題は、プロセッサをノード、プロセッサ間のリンクをエッジとして、グラフ理論の問題に帰着可能である。本研究では、相互結合網の位相として最も採用されているトーラス (図1参照) を対象とする。トーラスは、「京」(Ajimaら2009)のような超並列計算機から商用サーバに至るまで幅広く使用されて

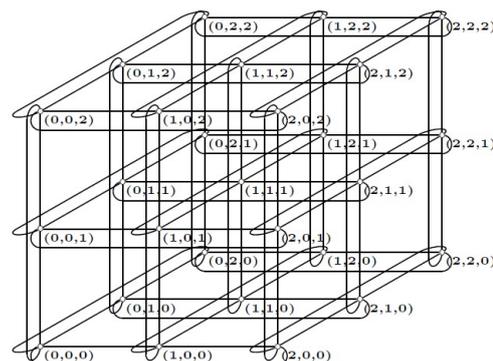


図1 3進3次元トーラス

ており、本研究の成果が与えるインパクトは、学術的だけでなく、社会的にも非常に大きい。

一方、表1に示すように多くのノードを持つ超並列計算機では、故障要素の存在を無視した運用は困難である。故障発生ごとにシステムを停止し、故障要素を修理・交換することは、稼働率の低下を招く。また、予備要素を配置する手法では、その数の推定が難しく、多数の遊休要素の発生や予備要素の不足につながる可能性がある。そのため、故障要素の存在を前提としたアルゴリズム、特に耐故障経路選択手法の確立が重要である。すべての故障要素の情報 (大域的情報) を集中管理したり、各非故障ノードが保持したりすれば、最適な経路選択が可能となる。しかし、付加的なハードウェアのコスト、情報収集・保持のための時間・空間計算量の観点から、このアプローチは実用的でない。逆に、各非故障ノードが近傍の故障要素情報 (局所的情報) だけを使って経路選択しても、高い到達率の達成は困難である。そこで、各非故障ノードが、圧縮された故障要素の情報 (制限された大域情報) を保持して耐故障経路選択の際に利用するアプローチが提案されている。トーラスの特殊形であるハイパーキューブでは、到達保証性やそれを改良した到達確率といった制限された大域情報を用いる多くの先行研究が存在する。しかし、トーラスでは、その複雑さが類似の情報を用いることを困難にしてきた。また、故障ノードには、これに接続するリンクすべてを故障要素と見なすことで対応可能である。このため、申請者らは、先行研究で、目的ノードまでのハミング距離 $h$ と距離 $d$ を併用し、トーラスのリンク故障に適用可能な到達確率 $P_{h,d}(\cdot)$ を導入し、その性能を評価したところ、「京」が採用する6次元トーラスといった高次元で高い性能を示した。一方、実用機によくある2, 3次元の低次元では、専用の耐故障経路選択手法が提案されており、その方がより高い性能を示すという実用上の大きな課題も見つかった。そのため、本研究課題では、申請者らの先行研究による提案手法で何が不足していたのかを解明すること、それを補うことによる性能向上を検証すること、ネットワークの輻輳を考慮した耐故障経路選択手法を確立することを研究課題の核心をなす学術的「問い」とした。

表1 超並列計算機のノード数(2019年6月)

システム名 (国名)	ノード数
Sunway Taifulight (中国)	10,649,600
Tianhe-2A (中国)	4,981,760
Summit (米国)	2,414,592
Sierra (米国)	1,572,480
Trinity (米国)	979,072

## 2. 研究の目的

本研究では、トーラスにおいて、従来の耐リンク故障経路選択手法に、ブレークスルーと

なる改善を行うことで、低次元でも高い到達率を達成可能な確率的耐リンク故障経路選択手法の提案と性能検証、さらにネットワークの輻輳を考慮した手法の提案を目的とした。具体的には、①到達確率に基づく経路選択アルゴリズムの改善（基本課題）、②到達確率のより厳密な推定（主要課題）、③各リンクの輻輳を表すパラメータの導入（挑戦的課題）を目指した。

アルゴリズム改善に関するアイデアは、既に考案していた。本研究では、各ノードは、汎用的なルータ（図2参照）を持つと想定した。このルータは、メッセージを入力チャンネル側のバッファに保持しつつ、転送先の隣接ノードを決定し、スイッチの切り替えで出力チャンネルを通してメッセージを転送する。このため、メッセージを保持するバッファが属する入力チャンネルによって、各ノードは、自身へそのメッセージを転送した直前のノードを知ることができる。これにより、付加的なハードウェア支援をほとんど必要とせず、各ノードは、メッセージの転送先ノードから直前ノードを除外し、後退を禁止することができる。これにより、2ノード間のメッセージのループを防止する手法は、高い汎用性と創造性を持つ。

本研究では、トーラスにおいて、従来の耐リンク故障経路選択手法に、

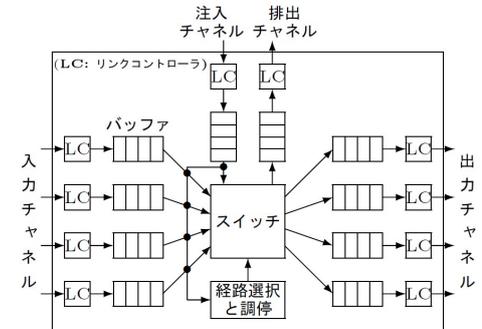


図2 本研究におけるルータモデル

申請者らによる先行研究における到達確率の推定では、トーラスの複雑さを回避するため、図3に示すように構造を無限に展開する。これに対して、本研究では、トーラスの構造を忠実に反映した到達確率を推定するように改善する。これにより、 $k$ 進 $n$ 次元トーラスで、 $k$ の値が変化しても誤差を導入することなく、幅広い次元において高性能を達成することが期待できる。さらに、リンクの輻輳を考慮した実用的経路選択は他に例もなく、達成されれば、高い独自性を持つ。

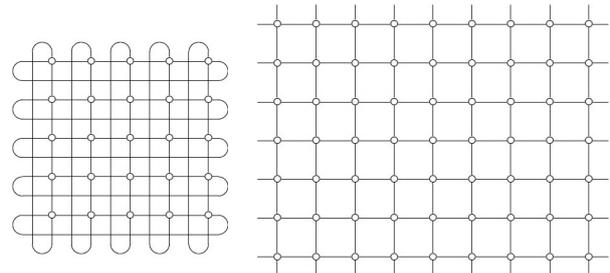


図3 5進2次元トーラス(左)の無限展開(右)

### 3. 研究の方法

本研究は、研究代表者が研究統括・理論創成・手法構築を、研究室の大学院生のべ約10名が手法の実現・検証を担当する研究体制で、おおよそ以下のスケジュールに基づき遂行した。

#### ◆スケジュール

◆2020年度4～9月 まず、メッセージの後退を禁止した確率的耐リンク故障経路選択アルゴリズムに対し、大規模・長期の実験を考慮しつつ実現し、予備実験で問題がないことを確認した。同時に、研究協力者らが、科研費で調達予定の計算機上に実験環境を開発、整備した。

◆2020年度10～3月 研究協力者らが大規模な評価実験を実施した。その結果、実現に不備は見つからなかった。

◆2021年度4～3月 新たに求めた到達確率を使用するアルゴリズムを実現した。次に、簡単な予備実験を行って、問題がないことを確認した。

◆2021年度10～3月 研究協力者らが、2020年度4～6月期に開発した実験環境を拡張した。

する（2022年度末まで）。

◆2022年度4～9月 研究協力者らが、評価実験を実施し、問題がないことを確認した。

◆2022年度10～3月 最終的に10万ノード規模での実験が可能となるように実験環境を拡張した。現在、最終的な評価実験を実施している。

#### 4. 研究成果

本研究における主要な成果は、直前のノードに戻らない確率的耐故障経路選択アルゴリズムを提案したこと、また、各隣接ノードに対して、そのノードに特化した経路選択確率を計算して通知する、有向経路選択確率を提案したことの2点からなる。次に、本研究を通じてトーラスの構造を深く極めた結果、トーラスに関して、2つの隣接した故障ノードをクラスタ故障としてあたかも1つの故障要素として扱うアルゴリズムを開発したこと、ノード対間に多項式時間で素な経路を構築するアルゴリズムを開発したこと、トーラスを2次元に配線した場合、交差する辺の上界を求めたこと、が成果となる。また、トーラスの派生形であるバイキューブ、フォールディッドハイパーキューブ、双射結合グラフ、およびメビウスキューブにおいて、新たな知見を得ることができた。具体的には、バイキューブにおいては、最短経路選択アルゴリズムを開発したこと、フォールディッドハイパーキューブ、双射結合グラフ、およびフォールディッドハイパーキューブでは、ノード集合間に多項式時間で素な経路を構築するアルゴリズムを開発したことが成果である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Bossard Antoine, Kaneko Keiichi	4. 巻 20
2. 論文標題 Cluster-Fault Tolerant Routing in a Torus	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3286 ~ 3286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s20113286	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kaneko Keiichi, Nguyen Son Van, Binh Hyunh Thi Thanh	4. 巻 8
2. 論文標題 Pairwise Disjoint Paths Routing in Tori	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 192206 ~ 192217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2020.3032684	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Keiichi Kaneko, Antoine Bossard, Frederick C. Harris, Jr.	4. 巻 10
2. 論文標題 Set-to-set Disjoint Path Routing in Bijective Connection Graphs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 72731-72742
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2022.3188783	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Masaaki Okada, Keiichi Kaneko	4. 巻 E105-D
2. 論文標題 Minimal Paths in a Bicube	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 1383-1392
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2021EDP7235	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroyuki Ichida, Keiichi Kaneko	4. 巻 10
2. 論文標題 Set-to-Set Disjoint Paths Problem in Mobius Cubes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 83075-83084
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2022.3197288	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Antoine Bossard, Keiichi Kaneko, Frederick C. Harris, Jr.	4. 巻 E106-A
2. 論文標題 On the Crossing Number of a Torus Network	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 35-44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2021EAP1144	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Hiroyuki Ichida and Keiichi Kaneko
2. 発表標題 Set-to-Set Disjoint Paths in a Folded Hypercube
3. 学会等名 2021 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaaki Okada and Keiichi Kaneko
2. 発表標題 A Shortest-path Routing Algorithm in Bicubes
3. 学会等名 2020 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ベトナム	ハノイ科学技術大学			
米国	ネバダ大学リノ校			