

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22656027

研究課題名（和文）目に見える階層的周期対称構造系の自発的破れ解析と折紙スキルの利用

研究課題名（英文）Use of origami skill and symmetry-breaking analysis of hierarchy periodic structures with visualization

研究代表者

有尾 一郎 (ARIO ICHIRO)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：50249827

研究成果の概要（和文）：本課題は、マイクロ材料からマクロな自然現象までの臨界現象を「多様な折り構造を分岐点から説明するマルチフォールディング多重分岐理論」を通して、周期対称性を有する構造系の非線形力学現象の解決法と並列化解析の検証を実施したものである。周期階層分枝モデルにおいて、分枝モデルに適した群元を用いると、高度で超並列性の高い固有直交空間に分解できる不変性を確認した。それらの結果を計算力学の論文等にまとめている。

研究成果の概要（英文）：This work has applied to the verification of the parallel computing and resolution of nonlinear mechanics for the various structures with periodic symmetry through we suppose bifurcation point for a folding structure based on the multi-folding and multi-bifurcation theory with the critical behavior from micro-materials to macro natures widely. I have obtained the mathematical law to decompose to eigen-orthogonal spaces which are higher and super-parallelized computing using the suitable sources of group theory for the branching models in FEM. It is successful to get several results for the models with high order symmetry with multiple degrees-of-freedom also and it has been submitting to computing mechanics.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,600,000	0	1,600,000
2011 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012 年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	450,000	3,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、工学基礎

キーワード：周期階層構造、高次対称性、分岐解析、超並列計算、構造不安定、有限要素法、折り、自己組織化

1. 研究開始当初の背景

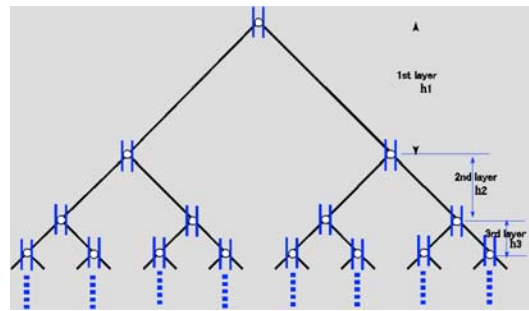
①近年、折り紙を工学に応用し、工業製品に利用する流れがある。例えば、写真1に示すような、2つの堅固な円筒を隙間をつかって一列に並べ、それにロール紙を巻き付け固定し、その両側でねじるとき、円筒周りにセン断が働き、捩れ座屈パターンが現れる。特に、この周期凹凸の斜めパターンをクレスリングパターンと呼ばれている。このとき、その紙面内には曲げも含まれるが、微小なストレッチも働く張力場が形成される。しかし、ねじり作用下の円筒シェルの初期座屈問題の両者は回転対称・鏡映非対称型の座屈波形を示す。終局的な座屈モードでは、三角形からなる多面体構造が織り込まれ、1次近似の後座屈を経たモード形となる。この多面体に変態した形態から主要なストレッチ抵抗部分となるトラス構造を構成し、軽量の展開構造物を創造するような、折り紙による折畳み機構が報告されている。この「折り」技術と自発的破れを伴う座屈現象と共通する部分があり、日本伝統文化である「折り」を収納・展開構造として利用する折紙工学と対称性破れをこれでモデル化するアイデアの創造が背景にあった。



写真1 折り紙上のクレスリング折り

②対称性は自然界のミクロな素粒子、原子、分子、結晶構造から人工構造物のドーム、シェル等の大規模構造物まで幅広く存在するが、対称性を数理的に表現する方法として現在群論の表現が有効である。一方、近代分岐理論は H. Sattinger によって数学的に表現されている。この分岐現象は構造物や材料等の破壊形態の一つであり、Euler 座屈、ハニカム材料や均質な折畳みパンタグラフ構造の不安定現象から金属材料や砂の滑り線破壊等の各種の物理現象に対し分岐現象が発現し、多種多様な方法論が現在展開されている。また、分岐理論そのものも時代とともに進化し、Koiter の初期不整感度則理論や Thompson・Hunt のカタストロフィ理論による、分岐点の分類および群論に基づく分岐現象の解明へ体系化されている。

③研究過程での派生発案では、対称性の高い格子構造が、格子欠陥等の周期的な不完全なパターンが介在する際に、その認知や理解は単純に見えて一般にとっても複雑である。特に、複数のパターンで不完全性が繰り返される



場合には、人間の認知では理解しがたく、認知エラーを起こしかねない。もとの完全な対称性からどの程度不完全性が存在するか、あるいは、破壊等が進行しており、その不完全性を表す物質の乱れのパターンが変化する高い対称性が段階的に喪失していくような様相の場合に、定量的に対称性レベルをデジタル的な指標で認知・比較する簡易的な方法は皆無であった。

2. 研究の目的

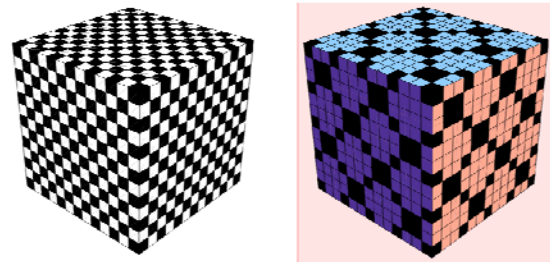


図1 立体格子空間上での周期模様と階層分枝折畳み構造モデル

①本研究課題は、図1に示すような高次対称性を持つ構造(ナノ構造、分子・原子配列構造やハニカム・フォーム)の大規模周期セル微視構造・材料系や階層的な分枝折畳み構造において、多重特異点を有する、階層的で自己組織化する対称性の自発的破れ現象を群論的分岐解析することにある。本課題は、ミクロ材料からマクロな自然現象までの臨界現象を「多様な折り構造を分岐点から説明するマルチフォールディング多重分岐理論」を通して、多様な周期対称性を有する構造系の非線形力学現象の解決法と高効率計算法を両立することを目的とした。

②周期構造を持つような高い対称性を持つパターンの認知を計算システムによる指標化、および、その対称性の変化に伴うパターン崩壊の定量的な把握を目的とした装置やシステムに利用できる。

③高次対称性を有する階層周期構造の一部欠陥構造等の局所的に不完全なパターンが介在する際に、その対称性の認知やどの程度

の対称性を有するかなどの理解は単純に見えて一般にとっても複雑である。特に、複数のパターンで不完全性が繰り返される場合には、人間の認識では理解しがたく、認知エラーを起こしかねない。もとの完全な対称性からどの程度不完全性が存在するか、あるいは、破壊等が進行しており、その不完全性を表す物質の乱れのパターンが変化し高い対称性が段階的に喪失していくような様相の場合に、定量的に対称性レベル(対称性の位数や同類)を容易に把握できる利点は大きい。

3. 研究の方法

①力学事象の不安定性を正しく理解するためには、臨界現象を問題とする「力学的な対称性の破れ」の観点は重要である。特に、自然の中には、潜在的に見え隠れする動的現象を伴うことがあり、様々な系統的な対称性の階層喪失レベルでのポテンシャルエネルギーに落込んでしまって、振舞いが複雑化してしまい、正しく理解することが困難になってしまうことが、ポーランド科学アカデミーのマルチフォールディング(MFM)実験と小職の多重分岐理論アプローチから分かってきた。これは、特殊な問題ではなく、均質材料などの無限対称性と時空間対称性などの利用によって、上述の「力学的な対称性の破れ」で出現する特異点前後で質的な挙動変化を正しく捉えられるのではないかという着想のもと、構造体の形態モードの崩壊や最適構造デザインの創出も秘めており、このことは折り紙を用いた計算力学分野や周期対称性を持つ材料などの解析研究に科学的手段やツールを与える可能性がある。

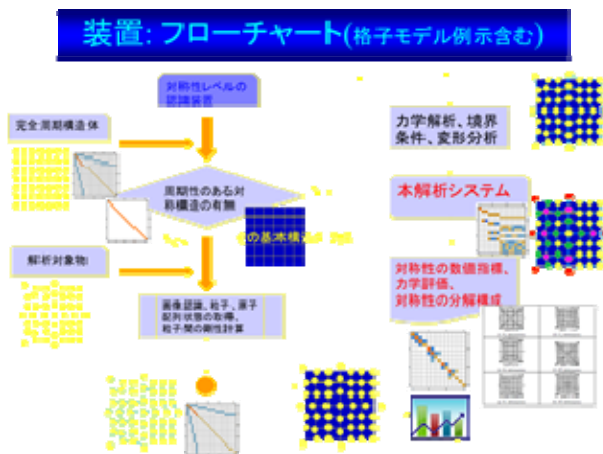


図2 解析フロー

②周期対称構造を折り紙のように折りたたむマイクロ構造モデルを創案し、この「折り」技術と自発的破れを伴う座屈現象と共通する部分があり、日本伝統文化である「折り」を群論表現による変換行列を用いて不変的

な直交空間分解し並列化解析を行った。

③図1に示すような原子の構造や(ナノやマイクロを含む)粒子が規則正しく配置された材料組成において、その配列の乱れ方や質的な変化の把握は、物理化学的に重要で本質的な現象の変化を伴うことが多く、これを体系的に定量化する方法を創案した。これは、多

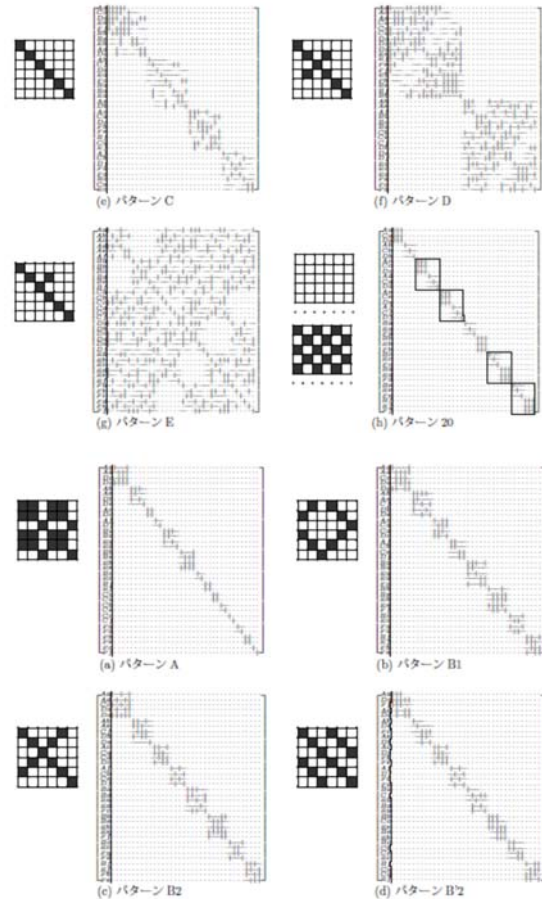


図3 階層的固有直交空間への変換

様な組成を持つ物質の対称性崩壊の多様なパターン変化を、魚群(物質)全体の動きの変化に例えると、漁網の種類(対称性の認識方法)によって、そのときの魚群の形(対称性の階層レベル)を定量的に捕獲することができることを意味する。

④冒頭の円筒構造のねじり座屈による「対称性の自発的破れ」と「折り紙的な発想法による展開構造の創造」の基礎研究より、なぜ円(筒)形という無限対称性から座屈(分岐)後に有限な対称変形に移行するのかの説明や、あるいは、そのときの座屈は急激に剛性が低下し、不安定化しやすいために、その利用は敬遠されることが多かった。しかしながら、その不安定化するデメリットを逆に、「折り紙」スキルの視点から工学的利点ととらえ、

(宇宙)展開構造の最適デザインへの利用法は、目から鱗が落ちるほどの発想の転換があった。折り紙の技法を数理的に表現することは、周期的な折りたたみ・自己相似形(階層構造)によって、群が構成される、形態変化、機能特性、強度変化、あるいはこれらを融合させた科学的な視点から、まったく新しい機能性を持つ製品や材料をデザインする可能性がある。このアイデアは、これまで対称な構造物の非線形構造解析(特に固有値問題や分岐解析)において、系の対称性を群の既約表現論を用いて、支配方程式を座標変換することにより、デカルト座標系で構成されるいくつかの連成項を相殺し、完全に独立な小空間に分解し固有値の不変性を求められることが、この研究の最大の特徴であり、斬新な点である。このことは、対称構造物の支配方程式を幾何学的条件に基づく座標変換行列により、ブロック対角化が可能となり、並列化アルゴリズムおよびプログラムの開発と、更に数値的不安定要因を除去するための数値解析法の開発にあった。群論の各既約表現空間毎のブロックは、互いに独立な関係であるため、対称性の位数の増加にもなって計算効率が高くなり、局所変換可能なブロック対角化原理を、周期的な微視構造を有するナノ構造や原子配列構造などに適用させることによって、更なる加速度的な並列解析の可能である。その並列処理を効果的かつ効率的に実現させるための、独自の局所変換法を解析エンジンソルバーの前処理に組み込むことによって、高効率で省力的な計算を実現できた。

⑤また、物質内部の対称性の分岐階層構造を構造工学的見地から調査するために、均質場からの摂動パターンを想定し、対称性の階層的喪失の追跡を行なう。隠れた対称性の階層構造を確認する方法として、群の直積(群のテンソル積)を記述表現した上でフーリエ級数列からなる選点直交性を利用し、場の(偏)微分支配方程式をその対称性を張る空間に変換し、既往のブロック対角化(BDM)の状況(ブロック数やサイズなど)によって、隠れた対称性を見つけ出し、対称性の階層レベルを定量的にとらえる方法を考案した。この方法は、従来の構造物の幾何学的対称性による BDM とは異なり、新たに均質場からの摂動パターンを動的現象のある段階としてとらえ、周期位相構造における「隠れた対称性」の構造および分岐の系列を見つけ出すことを主眼とした。すなわち、完全な直交関数列から構成される座標変換によって、境界条件や力学的変形を伴う位相格子系に与え、系の階層的対称性の喪失(対称性のレベル)を変換後の行列表示にて得る方法を採用した(図 2 参照)。

4. 研究成果

①ある周期構造の物理挙動を解析するときの局所対称条件を導き、変換表現行列に適応させるとともに、周期階層分枝モデルにおいて、分枝モデルに適した群元を用いると、高度で汎用性と並列性の高い、固有直交空間に分解できる仕組みを見出し、数値計算によって確認した。自由度がある分枝折畳み構造を持つモデルの解析においても良好に再現し、特許ならびに計算力学の学術会議プロシーディングや学術論文に結果をまとめている。International Conference on Computer Methods in Mechanics (CMM) 2013 に査読投稿中である。

②この研究分野は、力学的な臨界点を持ち、物理変形挙動が質的に変化する(破綻を伴う)微視的な周期対称構造・材料系において、周期対称性を持つ高い対称性は、そのレベルに相当する多くの特異点(非線形力学では、多重特異点という)を有するために、非線形力学では収束反復計算時に破綻を生じるか、あるいは、数値解が解けたとしても、厳密的な解でないために、他の解を見失うは極力小さく抑えることができた。これを今回の方法によって、周期対称構造をもつ支配方程式も安定的に変換させて、解の多重度や構造を得ることができるとともに、並列解析を実現できた。すなわち、スナップスルー現象を伴う不安定現象などの幾何学的非線形性を伴う支配方程式を不変的に直交空間に分解することができた。

③「隠れた対称性」の数値計算については、均質場における「隠れた対称性」の存在と、均質領域が分岐にともないパターンを形成しながら系が乱れていくことを確認した。均質な位相格子モデルにおける剛性分布パターンと位相対称性との体系的な関係を得た。格子構造の隠れた対称性については、均質場の離散化を伴う要素解析は場の位相構造に依存し、この位相構造から周期パターン変形が形成されるものとして、その階層的な対称性を探ることとする。均等に分割された格子上の 8 隣接の部材剛性をモデル化し、有限要素解析を行なった。周期境界上での位相格子空間の構造と対称性を考え、この格子構造の剛性行列は帯行列化された成分構成を形成する。一方、座標変換された剛性行列は完全に対角行列となり、変換後のブロックは固有直交小ブロック細胞となることを数値的に得た。このことは、この構造の剛性行列が線形独立な既約表現と一致し、このような位相格子構造や階層分枝構造の離散系では変換効率を高め、同じ座標変換成分で、同じような解空間が得られるような構造をトレースすることができ、計算効率が高められることを確認した。

④また、高度で体系的な対称性に対する群論の表現論を応用することによって、その物質配列構造の隠れた対称性に基づく質的変化の予測が可能となり、そのときのエネルギー準位や特異点、あるいは変形パターンの数、種類、対称性のレベル、系統などの情報を得ることができる(図-3参照)。このことは、科学的予見を可能とし、隠れた対称性の存在を体系的に把握できる利点がある。これによって、対称性が見え隠れする事象も的確にとらえることができるとともに、正確に物理変形パターンの種類など識別することができる。このことはナノテクノロジーなど、微細な構造の崩壊や構造色による可視光の変化を微視構造のパターン変化や定量的にとらえることに役立つものと考えられる。

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 10 件)

- ① Ichiro Ario, Multiple Duffing Oscillation in a Folding Structure with Hill-top Bifurcation Euromech Colloquium 541, New Advances in the Nonlinear Dynamics and Control of Composite for Smart Engineering Design, 査読有, 541, 2013, CD
- ② Ichiro Ario, Multiple Duffing Problem in a Folding Structure with Hill-top Bifurcation, Chaos, Solitons and Fractals: the interdisciplinary journal of Nonlinear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena, 査読有, 51, 2013, 52-63, <http://dx.doi.org/10.1016/j.chaos.2013.02.012>
- ③ Ichiro Ario, Hierarchical Structural Analysis for the Multi-Folding Structures with Hill-Top Bifurcation Points, Procedia IUTAM Symposium on 50 Years of Chaos: Applied and Theoretical, 査読有, 5, 2012, 88-98, <http://dx.doi.org/10.1016/j.piutam.2012.06.012>
- ④ Ichiro Ario, Hill-top bifurcation analysis for a foldable structure with imperfection, Proc. of the 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM2012), 査読有, 23, 2012, CD
- ⑤ Ichiro Ario, Hill-top bifurcation analysis for the multi-folding structures with local symmetry-breakings, Proc. of

European Nonlinear Oscillations Conferences, 査読有, 7, 2011, 1-6 on CD

- ⑥ Ichiro Ario, Multiple Duffing Problem for a Symmetric Folding Structure with Hill-top type of Symmetry-breaking, Proc. of International Symposium RA'11 on Rare Attractors and Rare Phenomena in Nonlinear Dynamics, 査読有, 2, 2011, 43-47
- ⑦ Ichiro Ario, Hierarchical structural analysis for the multi-folding structures with hill-top bifurcation points, Proc. of IUTAM Symposium on 50 Years of Chaos : Applied and Theoretical, International Union of Theoretical and Applied Mechanics, 査読有, 2011, 48-49
- ⑧ I. Ario, A. Watson, M. Nakazawa, Multi-Folding Behavior of a Tree Structure, The proceedings of the 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics, 査読有, 9, 2010, On CD-ROM
- ⑨ A. Watson and I. Ario, Extended and Multiple Duffing Oscillation Model in Multi-folding System with multiple bifurcation points, Proc. of Dynamics Days Europe, 査読有, 15, 2010, 104-104
- ⑩ I. Ario, M. Nakazawa, Non-linear dynamic behaviour of multi-folding microstructure systems based on origami skill, International Journal of Non-Linear Mechanics, 査読有, 45, 2010, 337-347, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2009.11.010>

[学会発表] (計 6 件)

- ① Ichiro Ario, Hill-top bifurcation analysis for a foldable structure with imperfection, Proc. of the 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM2012), 2012年8月19-24日, 北京
- ② 有尾一郎, 衝撃安全性を考慮した座屈制御法と力学的対称性破れの定量化, 広島大学新技術説明会(招待講演) 2012年8月1日 広島市
- ③ 有尾一郎, 周期材料構造系の隠れた対称性の発見法と超並列化有限要素法, 土木学会中国支部学術研究講演会, 2012年6月9日, 呉工業高等専門学校
- ④ 有尾一郎, 対称性喪失レベルの定量的把握方法及び定量的把握システム, 広島大学 新技術説明会(招待講演) 2012年5

- 月 18 日, J S T 東京別館ホール
- ⑤ Ichiro Ario, Bifurcation analysis with symmetry breaking using origami skills in civil engineering, Proc. of International Conference on Civil and Environmental Engineering, 15th Nov. 2011, Taiwan
 - ⑥ I. ARIO, Multi-Folding Behavior of a Tree Structure, World Congress on Computational Mechanics, 2010 年 7 月 21 日, シドニー

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 対称性喪失レベルの定量的把握方法及び定量的把握装置

発明者: 有尾一郎

権利者: 国立大学法人広島大学

種類: 特許

番号: 特願 2012-002363

出願年月日: 平成 24 年 1 月 24 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

有尾 一郎 (ARIO ICHIRO)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号: 50249827

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: