

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 4 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560663

研究課題名(和文)強い非線形性を伴う構造物の解析・設計のための非滑力学的方法論の展開

研究課題名(英文)Development of nonsmooth mechanics approach to analysis and design of strongly nonlinear structures

研究代表者

寒野 善博 (Yoshihiro, Kanno)

東京大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：10378812

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：非滑力学(nonsmooth mechanics)とは、構造物の複雑な力学現象を、近似や試行錯誤に頼ることなく理論的・数値的に解析するための統一的な枠組みである。非滑力学が扱う対象は、弾塑性、接触問題、摩擦、亀裂、組石造、摩耗、膜など、実に多岐にわたる。この研究課題では、建築構造物の種々の非線形問題を非滑力学の観点から整理・理解し、それらに対する有効な数値解法を構築した。さらに、その過程で得られたモデル化法に基づいて、たとえば負のポアソン比をもつ骨組構造など、機能性を有する構造物の設計法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Nonsmooth mechanism is methodology to deal with various mechanical behaviors of structures without resorting to approximation or trial-and-error methods. Interests of nonsmooth mechanics include elastoplastic problems, contact mechanics, friction, crack, masonry structures, wear, membranes, etc. In this study we attempted to understand various nonlinear problems in structural engineering within the framework of nonsmooth mechanics, and proposed efficient algorithms for those problems. Moreover, based on such modeling, we proposed some new design methods for structures with unusual functions, such as a frame structure with the negative Poisson's ratio.

研究分野：建築構造力学，数理工学

キーワード：接触問題 弾塑性解析 半正定値計画 凸解析 摩擦 張力構造

### 1. 研究開始当初の背景

非滑力学 (Nonsmooth Mechanics) は、構造物のさまざまな非線形現象を、近似や試行錯誤に頼ることなく理論的・数値的に解析するための統一的な枠組みである。非滑力学が扱う対象は、弾塑性、接触問題、摩擦、亀裂、組石造、剥離、膜、形状記憶合金など、実に多岐にわたる。非滑力学の起源は 1960 年代であり、欧米では現在に至るまで高い関心が寄せられている。しかし、従来の研究の中心は剛体であり、建築構造物のような変形体の非滑力学は発展途上であった。

一方、国内においては、非滑力学の考え方や有効性は十分に認知されてはいない。このため、本来は非滑力学の視点に立てば解決可能な建築構造物の非線形問題が、困難な問題として見過ごされていることが少なくなく、非滑力学の理論および数値手法の成果が十分に享受されていないという状況であった。

このような状況を受けて、まず非滑力学の視点に立脚し、建築構造物の非線形問題を系統的に整理・理解することから、研究を開始した。

### 2. 研究の目的

「研究開始当初の背景」の欄で述べたように、非滑力学の方法論は、国内の建築構造力学の研究者にはほとんど認識されてこなかった。また、国外での研究の主な対象は、剛体の動力学であった。このため、本来は非滑力学の枠組で扱うのが適切な問題が、単に難しい問題として見過ごされたままになっている可能性が大きい状況であった。このため、まずそのような問題を、できるだけ多様な分野から収集・整理することを最初の目的とした。

次に、収集された問題に対する効率的な数値解法を開発することを目指した。また、そのような信頼度の高い数値解法が得られることは、nonsmooth な性質をもつ構造物の設計が容易になることを意味する。そこで、非滑力学の手法を応用することで、新しい機能性を有する構造物の設計法を開発することを目指した。

### 3. 研究の方法

(1) 非滑力学の視点に立脚した、建築構造物の非線形問題の系統的な整理と理解。建築構造力学の種々の非線形問題の中には、本来は非滑力学の枠組で扱うべき問題が、単に「複雑で難しい非線形問題」として見過ごされたままになっている可能性が大きい。そのような問題を、建築構造力学のできるだけ多様な分野から収集・整理する。

(2) 半正定値計画法および整数計画法を活用した、建築構造物の非滑問題の解法の開発。従来の非滑力学の主な対象は、剛体の力学である。建築構造力学にとって真に有用な「変形体の非滑力学」を扱うためには、ブレーク

スルーを引き起こす新しい数理的な道具の導入が必要である。非滑力学にとって新しい道具として、半正定値計画と整数計画を用いる。

(3) Nonsmoothness を含む機能性構造物の設計法の開発。以上の成果の拡張として、nonsmoothness を含む構造物の設計法を開発する。その際に、半正定値計画と整数計画の双方のアプローチからモデル化を行う。

### 4. 研究成果

(1) 接触問題および弾塑性問題に対するウォーム・スタート法の開発。増分解析におけるウォーム・スタート法は、前の载荷ステップの解の情報を現ステップの解析の初期解に利用することで、計算コストを小さくする手法である。ウォーム・スタート法は、多くの载荷ステップからなる釣合経路を追跡するような強非線形問題にとって、有用な手法である。この研究課題では、接触問題や弾塑性問題に対するウォーム・スタート法を開発した。

(2) テンセグリティの設計法の開発。ケーブルは、引張られると正の剛性を有するが、縮められると弛みが生じて剛性を失う。従って、ケーブルは非滑力学の対象の典型例である。ケーブルを含む張力構造のうち、特に設計の難しいテンセグリティを取り上げ、整数計画を用いたモデル化を行うことで、ケーブルの弛みを陽に考慮した設計法を開発した。

(3) 整数計画によるモデリングを用いた機能的な構造物の設計手法の開発。(1)および(2)で確立した方法論の拡張として、機能的な構造物の設計手法の開発を行った。ここで取り上げた設計問題は、制振構造のためのダンパーの最適配置問題、負のポアソン比をもつ周期的な骨組構造の設計問題、負の熱膨張率をもつ周期的な骨組構造の設計問題である。

### 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12件)

1. R. Hirota, Y. Kanno: "Optimal design of periodic frame structures with negative thermal expansion via mixed integer programming," Optimization and Engineering, 査読有, to appear. DOI: 10.1007/s11081-015-9276-z
2. R. Kureta, Y. Kanno: "A mixed integer programming approach to designing periodic frame structures with negative Poisson's ratio," Optimization and Engineering, 査読有, 15, 773-800 (2014). DOI:

- 10.1007/s11081-013-9225-7
3. M. Ohsaki, Y. Kanno, S. Tsuda: "Linear programming approach to design of spatial link mechanism with partially rigid joints," Structural and Multidisciplinary Optimization, 査読有, 50, 945-956 (2014). DOI: s00158-014-1094-y
  4. Y. Kanno: "Damper placement optimization in a shear building model with discrete design variables: a mixed-integer second-order cone programming approach," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 査読有, 42, 1657-1676 (2013). DOI: 10.1002/eqe.2292
  5. Y. Kanno: "Worst-case load in plastic limit analysis of frame structures," Journal of Mechanics of Materials and Structures, 査読有, 8, 415-439 (2013). DOI: 10.2140/jomms.2013.8.415
  6. Y. Kanno: "Exploring new tensegrity structures via mixed integer programming," Structural and Multidisciplinary Optimization, 査読有, 48, 95-114 (2013). DOI: 10.1007/s00158-012-0881-6
  7. Y. Kanno: "Topology optimization of tensegrity structures under compliance constraint: a mixed integer linear programming approach," Optimization and Engineering, 査読有, 14, 61-96 (2013). DOI: 10.1007/s11081-011-9172-0
  8. K. Yonekura and Y. Kanno: "Second-order cone programming with warm start for elastoplastic analysis with von Mises yield criterion," Optimization and Engineering, 査読有, 13, 181-218 (2012). DOI: 10.1007/s11081-011-9144-4
  9. Y. Kanno: "Worst scenario detection in limit analysis of trusses against deficiency of structural components," Engineering Structures, 査読有, 42, 33-42 (2012). DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.04.012
  10. Y. Kanno: "Topology optimization of tensegrity structures under self-weight loads," Journal of the Operations Research Society of Japan, 査読有, 55, 125-145 (2012).  
[http://www.orsj.or.jp/~archive/menu/01\\_55.html#num2](http://www.orsj.or.jp/~archive/menu/01_55.html#num2)
  11. 寒野 善博: コンプライアンス制約下での構造物のロバスト性評価法 . 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol.77, No.671, 27-33 (2012). DOI: 10.3130/aajs.77.27
  12. Y. Kanno, M. Ohsaki: "A non-interior implicit smoothing approach to complementarity problems for frictionless contacts," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 査読有, 200, 1176-1185 (2011). DOI: 10.1016/j.cma.2010.06.038
- 〔学会発表〕(計16件)
1. 暮田 留依, 寒野 善博: 負のポアソン比をもつ周期的な骨組構造物の最適設計法 . 数学協働プログラムワークショップ「数理学の物質・材料科学への応用」・日本応用数理学会 2014 年度年会 (共催), 2014 年 9 月 3 日-5 日, 政策研究大学院大学(東京) .
  2. 寒野 善博: 建築構造物における粘性ダンパーの最適配置問題に対する整数計画法 . 第 26 回計算力学講演会 (CMD2013), 2013 年 11 月 2 日-4 日, 佐賀大学(佐賀) .
  3. Y. Kanno: "Generating asymmetric tensegrity structures via truss topology optimization." IASS Annual Symposium—Beyond the Limits of Man, 2013 年 9 月 23 日-27 日, Wroclaw (Poland).
  4. Y. Kanno: "Discrete optimization of damper placement in a shear building via mixed integer programming." International Conference on Vibration Problems (ICOVP 2013), 2013 年 9 月 9 日-12 日, Lisbon (Portugal).
  5. 寒野 善博: 整数計画を用いたせん断型構造物モデルにおける粘性ダンパーの最適配置法 . 日本建築学会大会学術講演会, 2013 年 8 月 30 日-9 月 1 日, 北海道大学 (札幌) .
  6. 寒野 善博: ロバスト性と冗長性の定量的評価法 . 建築構造設計における冗長性とロバスト性シンポジウム, 2013 年 6 月 18 日, 建築会館 (東京) .
  7. 寒野 善博: 混合整数計画を用いた構造物の冗長性の評価法 . 第 10 回最適化シンポジウム (OPTIS 2012), 日本機械学会, 2012 年 12 月 6 日-7 日, 神戸市産業振興センター (神戸) .

8. 暮田 留依, 寒野 善博: 混合整数計画を用いたポアソン比が負の骨組構造物の設計法. 第 22 回設計工学・システム部門講演会, 日本機械学会, 2012 年 9 月 26 日-28 日, 広島大学 (広島).
9. 寒野 善博: 混合整数計画を用いたテンセグリティ構造の最適設計法. 日本建築学会大会学術講演会, 2012 年 9 月 12 日-14 日, 名古屋大学 (名古屋).
10. Y. Kanno and M. Ohsaki: "Warm-start strategy in implicit reformulation method for frictionless contact problems." The 8th European Solid Mechanics Conference (ESMC 2012), 2012 年 7 月 9 日-13 日, Graz (Austria).
11. Y. Kanno: "Design of tensegrity structures by using mixed integer programming." The 7th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems (CJK-OSM7), 2012 年 6 月 18 日-21 日, Huangshan (China).
12. Y. Kanno: "Worst-scenario of deficiency of structural elements in plastic limit analysis." Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications (APSSRA 2012), 2012 年 5 月 23 日-25 日, Singapore (Singapore).
13. Y. Kanno: "Topology optimization of tensegrity structures based on nonsmooth mechanics." The 5th International Conference on Advanced Computational Methods in Engineering (ACOMEN 2011), 2011 年 11 月 14 日-17 日, Liege (Belgium).
14. 暮田 留依, 寒野 善博: 混合整数計画法を用いた auxetic 挙動を示す構造物の設計法. コロキウム構造形態の解析と創生 2011, 2011 年 10 月 27 日-28 日, 建築会館 (東京).
15. 米倉一男, 寒野 善博: von Mises の降伏条件に基づく弾塑性解析に対する 2 次錐計画法. 日本応用数理学会 2011 年度年会, 2011 年 9 月 14 日-16 日, 同志社大学 (京都).
16. Y. Kanno: "Topology optimization of tensegrity structures via mixed integer programming." The 9th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO9), 2011 年 6 月 13

日-17 日, GRANSHP Shizuoka (Shizuoka, Japan).

〔図書〕(計 1 件)

1. 日本建築学会 (編), 応用力学シリーズ 12 『建築構造物における冗長性とロバスト性』. 分担執筆, 寒野 善博: 「第 4 章: ロバスト性と冗長性の定量的評価法」, 丸善出版, 2013, pp.43-58.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寒野 善博 (Yoshihiro Kanno)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号: 10378812

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者