

研究助成実施報告書

助成実施年度	2019 年度
研究課題（タイトル）	データ駆動型の建築構造力学の基盤技術の創出
研究者名※	寒野 善博
所属組織※	東京大学 数理・情報教育研究センター 教授
研究種別	研究助成
研究分野	建築技術
助成金額	100 万円
発表論文等	日本応用数学会 2020 年度年会, 9 月 8-10 日 (2020) 第 43 回情報・システム・利用・技術シンポジウム, 日本建築学会, 12 月 10-11 日 (2020)

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

() は、報告書提出時所属先。

大林財団 2019 年度研究助成実施報告書

所属機関名 東京大学
申請者氏名 寒野 善博

研究課題	データ駆動型の建築構造力学の基盤技術の創出
<p>(概要)</p> <p>データ駆動型の方法論は、近年、理工学のさまざまな分野で急速に展開されてきている。この状況を受けて、本研究課題では、建築構造力学における最も基本的な問題として弾性構造物の静的な釣合い解析をとりあげ、材料実験のデータを直接的に利用する手法を開発することを目標とした。従来の釣合い解析では、材料の構成則を実験結果から経験的にモデル化する必要がある。これに対して、ここで開発したデータ駆動型の手法では、モデル化を経ることなく材料実験のデータを利用して構造物の釣合い解析を行うことができる。このため、構成則のパラメータのキャリブレーションなどが一切不要である。この提案手法は、材料実験のデータ点が応力・ひずみ空間のある多様体（曲面）上に分布するとみなせることに着目しており、その多様体を表す方程式を予測するという手法で構成されている。本研究課題では、計算機実験により提案手法の有効性を確認した。</p>	

1. 研究の目的
<p>弾性構造物の釣合い解析では、ひずみと変位の適合条件、内力と外力の釣合い条件、応力とひずみの関係を表す材料構成則の、3つの条件を連立させることで釣合い状態における変位を解として得る。</p> <p>この3つの条件のうち、適合条件は構造物の幾何的な形状から決まる条件であり、釣合い条件はニュートンの運動の法則から得られる物理的な条件である。これに対して、材料構成則は、材料実験の結果（データ）の経験的なモデル化であり、その意味で適合条件および釣合い条件とは性質が異なるものである。本研究課題の主題である「データ駆動型の釣合い解析法」は、このように材料構成則のみが経験的モデルであることに着目し、このモデルに代えて材料実験のデータを直接的に利用しようとする試みである。このようなデータ駆動型の方法論は、近年、理工学のさまざまな分野で急速に展開されてきている。本研究課題は、このようなデータ駆動型の手法を建築構造力学において展開する萌芽的な研究であると位置づけることができる。</p> <p>より具体的には、本研究課題では、微小変形を仮定した連続体を対象として、材料構成則のモデル化を経ることなく静的な釣合い解析を行う手法を開発することを目的とする。その際に、ひずみと変位の適合条件および内力と外力の釣合い条件の2つは厳密に満たすような手法とする。材料構成則については、与えられた材料実験のデータ（ひずみテンソルの値と応力テンソルの値の組の集合）に照らして「（ある意味で）もっともらしい」結果を出力する手法を開発する。</p>

2. 研究の経過

計算力学における近年のデータ駆動型の手法の研究は、Kirchdoerfer and Ortiz によって 2016 年に出版された論文[1]を契機としている。彼らの提案した方法は、ひずみと応力の対の空間の中で、与えられたデータ集合からある意味で最も近い点を求めるというものである。より具体的には、有限要素の各積分点におけるひずみと応力を未知数として、適合条件と釣合い条件を満たす未知数のうち、データ集合の中の最も近い点からの距離を最小化するものを釣合い解と考える、というものである。この考え方に基づく手法については、論文[1]に続いて現在に至るまで、多くの論文が発表されている。

論文[1]の考え方に基づく諸手法では、データ集合の中の最も近い点のみに着目する。つまり、1つのデータ点のみの情報を用いる。このため、データ集合が多くのデータ点から成る場合であっても、その豊富な情報を十分に活用することができない。また、論文[1]で提案された解法では、必ずしも大域解が得られるとは限らないことが明らかにされている[2]。

論文[1]とは考え方の異なるデータ駆動型の計算力学の手法として、Ibañez らの提案[3]がある。材料実験のデータでは、通常、データ点はひずみと応力の対の空間の中にあまねく分布するのではなく、より低次元の多様体（曲面）の上に偏在すると考えられる。このような多様体上のデータ点を分析する手法は、データ科学の分野では多様体学習とよばれている。論文[3]では、多様体学習の手法の1つである局所線形埋め込み（LLE）[4]を用いて釣合い解析を行うことを提案している。ただし、この手法では、釣合い解析で用いられる通常の非線形連立方程式の解法（ニュートン・ラプソン法など）を適用することは困難である。

以上のような既存研究の調査を経て、本研究課題では、材料実験のデータ点が載る多様体を表現する非線形方程式を求める手法を開発することを目標として設定した。方程式が得られれば、釣合い解析で多く用いられるニュートン・ラプソン法などを容易に適用可能である。また、多様体を抽出することで、与えられたデータ集合に含まれる情報を十分に活用することができる。

[1] T. Kirchdoerfer, M. Ortiz: Data-driven computational mechanics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **304**, 81–101 (2016).

[2] Y. Kanno: Mixed-integer programming formulation of a data-driven solver in computational elasticity. *Optimization Letters*, **13**, 1505–1514 (2019).

[3] R. Ibañez, E. Abisset-Chavanne, J. V. Aguado, D. Gonzalez, E. Cueto, F. Chinesta: A manifold learning approach to data-driven computational elasticity and inelasticity. *Archives of Computational Methods in Engineering*, **25**, 47–57 (2018).

[4] S. T. Roweis, L. K. Saul: Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding. *Science*, **290**, 2323–2326 (2000).

3. 研究の成果

「研究の経過」で述べた目標に対して、カーネル法に基づく数理手法を開発した。この手法は、ひずみと応力の対の空間の中で、その空間の次元よりも1つ低い次元をもつ多様体をいくつか生

成する．ここで生成された多様体の交わりが，データ点の載る多様体を表現している．このようにして，データ点の載る多様体を，非線形連立方程式の形で表すことができる．

連立方程式のパラメータを求める問題は，ある種の最適化問題の形式で記述した．そして，この問題の最適解が，ある対称行列の固有値解析により求められることを明らかにした．さらに，提案手法を実装し，数値実験を行って有効性を検証した．

以上の研究成果を，下記の学術論文および口頭発表の形で公表した．

- Y. Kanno: A kernel method for learning constitutive relation in data-driven computational elasticity. *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, **38**, 39–77 (2021).
- 寒野 善博：カーネル法を用いたデータ点からの曲面の生成法．日本応用数理学会 2020 年度年会，9 月 8–10 日 (2020).
- 寒野 善博：カーネル法に基づくデータ点からの曲面の生成法．第 43 回情報・システム・利用・技術シンポジウム，日本建築学会，12 月 10–11 日 (2020).

4. 今後の課題

本研究課題では，データ駆動型の建築構造力学を創出するための萌芽的な研究として，カーネル法に基づき，弾性構造物の静的挙動を予測する手法を開発した．ここで開発した方法論をさまざまな問題へと拡張することが，今後の課題であると考えられる．たとえば，弾塑性材料のデータを扱う手法への拡張は，重要である．また，構造物の最適設計法に提案手法を組み込む形の拡張も，考えることができる．