

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：82670

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04136

研究課題名（和文）ラチス構造破壊過程の三次元形状計測と解析技術の構築

研究課題名（英文）Observation of 3D structural changes in the lattice structure using in-situ X-ray imaging
Observation of 3D structural changes

研究代表者

三浦 由佳（Miura, Yuka）

地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・事業化支援本部技術開発支援部実証試験技術グループ・副主任研究員

研究者番号：10807647

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：輸送機器業界では部品の軽量化が最重要課題となっており、ラチス構造など金属3Dプリンタでしか製造できない構造に注目が集まっている。ラチス構造を金属3Dプリンタで造形した際、形状によっては残留応力の影響により、構造体内部に欠損・非接合不良が生じる。本研究では、In-Situ X線撮影による三次元形状計測技術を開発し、ラチス構造体の圧縮破壊過程における三次元的な構造変化を計算機で解析することを目指す。本研究により、造形不良がラチス構造の機械的特性に及ぼす影響の解明が可能となり、破壊過程など造形物の実性能データをフィードバックした設計手法の構築につながる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、これまで成し遂げられていないラチス構造体に対する圧縮破壊過程の三次元形状計測・解析技術によるラチス構造体の評価手法の確立にある。本研究の推進によりトポロジー最適化で得られたラチス構造体の仮想強度と金属積層造形で造形したラチス構造体の実強度を比較検討することが可能になり、破壊シミュレーションの精度向上につながる。さらに、ラチス構造体評価手法の確立により、破壊挙動の理解が困難である周期的でない構造体の性能評価への適用も期待される。

研究成果の概要（英文）：Metal additive manufacturing (MAM) has been attracting attention for creating complex models such as lattice structure. The extreme thermal, mechanical, and metallurgical coupling in MAM process leads to defects and cracks on the strut and node elements which make up the lattice structure. These defects and cracks can influence the mechanical properties of lattice structure. Therefore, it is important to understand disruptive process of lattice structure including defects and cracks. In this study, we developed monitoring system using in-situ X-ray imaging to observe 3D structural changes in the lattice structure during the compressive fracture process.

研究分野：精密計測

キーワード：In-Situ X線撮影 金属積層造形

1. 研究開始当初の背景

現在、日本の製造業は国際的に厳しい市場競争に直面しており、製品の開発期間短縮、製造コスト削減と高付加価値化が求められている。このような要求を満たすため、製造プロセスをデジタル化する「デジタルものづくり」への変革が進展している。その中心的存在である金属 3D プリントは、従来技術で製造することが困難であった複雑形状を実現でき、産業分野での幅広い応用が期待されている。輸送機器業界では、CO₂ 排出削減や燃料高騰の影響から、部品の軽量化が最重要課題となっており、トラス構造やラチス構造など金属 3D プリントでしか製造できない構造に注目が集まっている。特にラチス構造体(図 1)は、複数方向からの応力に対して強度を保持するため、既存部品の置換が期待されている。しかしながら、ラチス構造体の設計は、構造が複雑なため、設計者の勘や経験による形状・形態の最適化が困難である。このような課題を解決する設計手法としてトポロジー最適化が注目されている。トポロジー最適化技術を用いた形状の創出(図 2)は部品の軽量化・製造の向上・開発期間の短縮を可能にする。

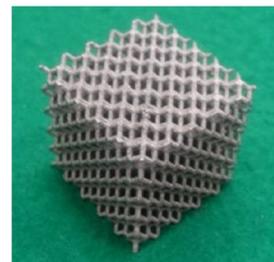


図1ラチス構造体

トポロジー最適化により設計したラチス構造体を金属 3D プリントで造形した場合、3D プリント特有の課題から要求強度や特性を満たすラチス構造体を得られない事例が見られる。図 3 に金属 3D プリントの主要な造形方法である金属積層造形装置で造形したラチス構造体の X 線 CT 画像を示す。金属積層造形はレーザー等で溶融・凝固させるため、形状によっては残留応力の影響を強く受ける。ラチス構造は形状が複雑であり、残留応力の影響を完全に除去することができず、構造体内部に欠損・非接合不良が生じる。また、造形不良部がラチス構造体の強度にどのように影響するか不明な部分が多く、その利用は限定的である。

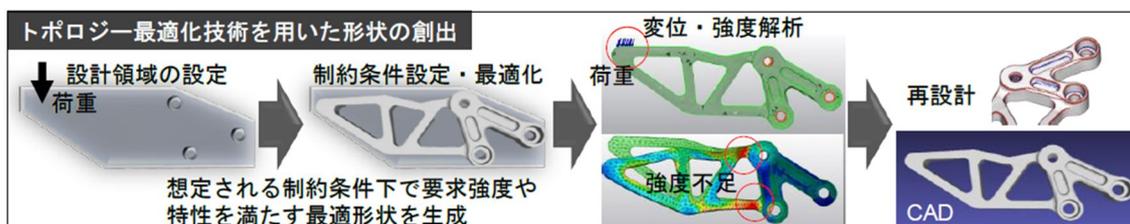


図 2 トポロジー最適化による設計の流れ

2. 研究の目的

本研究の目的は In-Situ X 線撮影による三次元形状計測技術を開発し、金属積層造形により造形したラチス構造体の圧縮破壊過程における三次元的な構造変化を計算機で解析することにある。新規計測・解析技術により、造形不良が機械的特性に及ぼす影響の解明が可能となる。最終的には、破壊過程など造形物の実性能データをフィードバックしたラチス構造体の設計手法構築を目指す。

本研究は、これまで成し遂げられていないラチス構造体に対する圧縮破壊過程の三次元形状計測・解析技術によるラチス構造体の評価手法の確立にある。これまで、ラチス構造体の破壊挙動は、破壊シミュレーションにより理解されてきた。しかしながら、シミュレーション結果と実製品の破壊挙動の差異が大きく、シミュレーションのみでは設計したラチス構造体が要求通りの性能を有しているか評価することは困難であった。本研究の推進によりトポロジー最適化で得られたラチス構造体の仮想強度と金属積層造形で造形したラチス構造体の実強度を比較検討することが可能になり、破壊シミュレーションの精度向上につながる。さらに、ラチス構造体評価手法の確立により、破壊挙動の理解が困難である周期的でない構造体の性能評価への適用も期待される。

3. 研究の方法

【リアルタイム 3 次元計測】ラチスモデルのリアルタイム 3 次元計測を実用化するには、動的変形する物体のボケの影響を軽減することが必須である。このボケはリアルタイム X 線 CT 計測では本質的に発生し得るものである。

リアルタイムでない通常の X 線 CT 計測では、360 度分の投影像列(サイノグラム)が得られる。これは計測の 1 次データであり、これを CT 再構成することで CT ボリュームが得られる。それに対し、リアルタイム計測では、テレビアニメーションのように、複数の CT ボリュームを時系列に観察することで、時間変化に伴う変形観察を可能にすることを目的とする。そのためには、複数のサイノグラムを取得することとなる(図 3)。通常の CT 再構成は、サイノグラム計測中は変形しないことを前提としているが、リアルタイム計測では 360 度回転にかかる時間 $t_1 \sim t_2$ の間に変形が起こるため、ボケののったサイノグラムが得られ、それを CT 再構成した CT ボリュームにも看過できないボケが生じ、解析に悪影響を及ぼしている。

本研究では、計測によって得られる複数のサイノグラム列から、任意の瞬間 t (t は t_1 から t_2 の間の

時刻)におけるサイノグラム、すなわち動きのない形状のサイノグラムを計算により人工的に生成することで、それを基に生成される時刻 t の CT ボリューム上のボケの影響を軽減することとした。

具体的には、異なる投影像列から同投影角の投影像を抽出し、それらを基に変位ベクトルを算出する。この変位ベクトルを用いると、指定の時刻における物体の位置と形状を決定することができるため、その時刻における投影像を生成可能である(図2)。

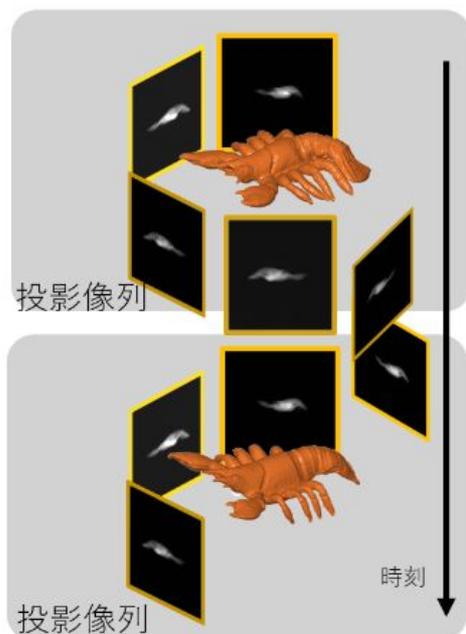


図3 リアルタイム計測の概念図

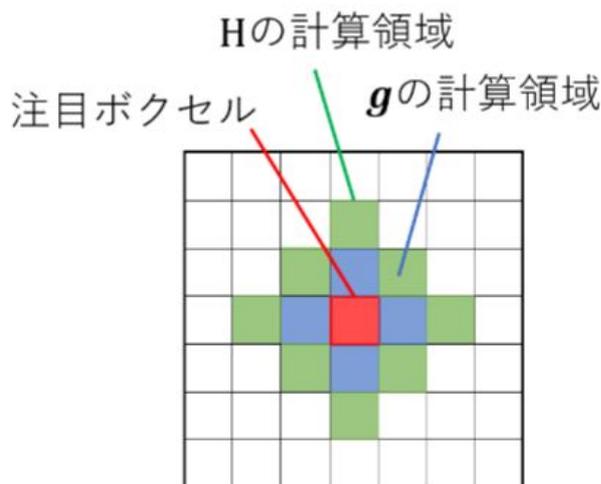


図5 注目ボクセルにおける勾配(g)とヘシアン (H) 領域の計算で参照するボクセル

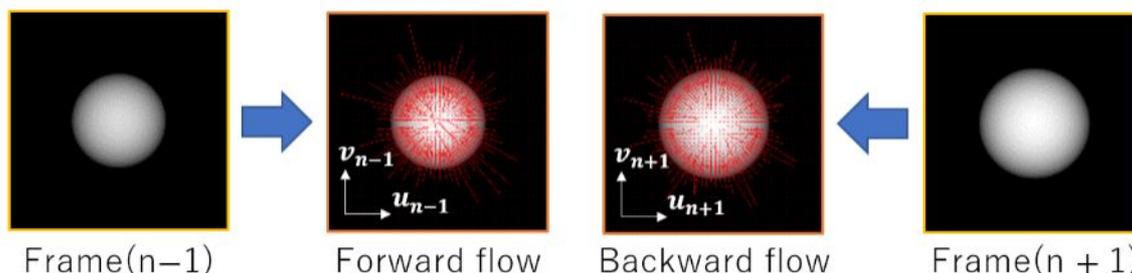


図4 異なる投影像(左右)から変異ベクトル(中央2画像、赤線)の推定

【高精度表面計測】CT ボリュームから表面メッシュを抽出する際、CT ボリューム上の CT 値の離散化誤差・CT 再構成時の誤差が表面メッシュの精度に影響を与えることが知られている。解析的勾配ノルム極大曲面で物体表面を定義すると、これらの影響を軽減できる [1]。勾配ノルム極大曲面は、CT 値の勾配ノルムの極大点を表面点と定義する表面抽出法であり、より一般的な CT 値の等値面による表面定義と比べ、CT ボリューム上のアーチファクト等による悪影響を低減することができる。また、CT 値の勾配計算の際、CT ボリュームを経由することなくサイノグラムから直接 CT 値の微分値を計算して用いる(解析的微分)ことで、CT ボリューム上の CT 値の離散化誤差・CT 再構成時の誤差を受けずに済む。

本課題では、スムージング効果を併せ持つ勾配ノルム極大曲面を提案した。勾配ノルム極大値を求める際、従来法のように勾配のみ用いるのではなく、勾配ノルムの勾配方向微分の際に自然に導かれるヘシアンを用いた極大値の定義を用いると、従来法 [1] よりも広範囲のボクセルを参照することになるため(図3)、スムージング効果が得られる。これにより、CT 値の離散化誤差・CT 再構成時のアーチファクトの少ない表面抽出を実現した。

【金属積層造形ラチス構造体のリアルタイム X 線三次元計測】

ラチス最適化プログラムで設計したラチス構造体を用いて、破壊過程の In-Situ 形状計測を実施する。ラチス構造体は、In-Situ 圧縮試験機を用いて、一定の圧縮時間ごとにラチス構造体の形状変化を従来法である高精度 X 線 CT 撮影および提案する形状計測法によりそれぞれデータ化する。両データを比較し、提案法の形状再現精度を検証する。さらに、ラチス構造体を圧縮しながらリアルタイム X 線三次元計測を実施する。圧縮時間ごとの計測結果と比較し、圧縮試験を途中で止め CT 撮影した場合と圧縮試験を途中で止めることなく計測した場合の圧縮破壊過程の違いを明らかにする。

4. 研究成果

【リアルタイム3次元計測】リアルタイム計測によるサイノグラムに対し提案法を適用し、ベクトルに対する

異なる補間法 [2, 3] による結果と比較した(図4)。再構成した CT ボリュームでは、他手法に比べストリーク状のアーチファクトが少なく、正解データに近い画像であることが分かる。また、画質評価の結果、正解データとの差分による指標 PSNR、画素値・コントラスト・構造の変化による指標 SSIM とともに 3 手法のうちで最良または最良に近い結果を得た。



図4 リアルタイム3次元計測データに対する本研究と他手法の比較。

【高精度表面計測】X線 CT 計測用器物(ステップシリンダ、底面の直径 60mm)に対する計測データを用いて、等値面・従来法[1]、提案法による表面の精度比較を行った。CT ボリュームのボクセルサイズは 108 μ m である。

図5は、各段のベストフィット円筒(表面をもっともよく近似する円筒)と抽出面の差異のカラーマップとヒストグラムである。従来法もサブボクセル精度を達成しているが、提案法ではそれを上回る精度を達成したことが観察できる。偏差はボクセルサイズの 1/8 程度であった。

図6は、器物の真値(CMM 計測値)と抽出表面のずれを表している。提案法では、全体的に真値よりも小さな径で表面が抽出されていることが分かる。この傾向は従来法と同様であるものの、最下段右部(赤い四角で囲まれた領域)にみられるような大きな偏差が提案法では軽減されている。

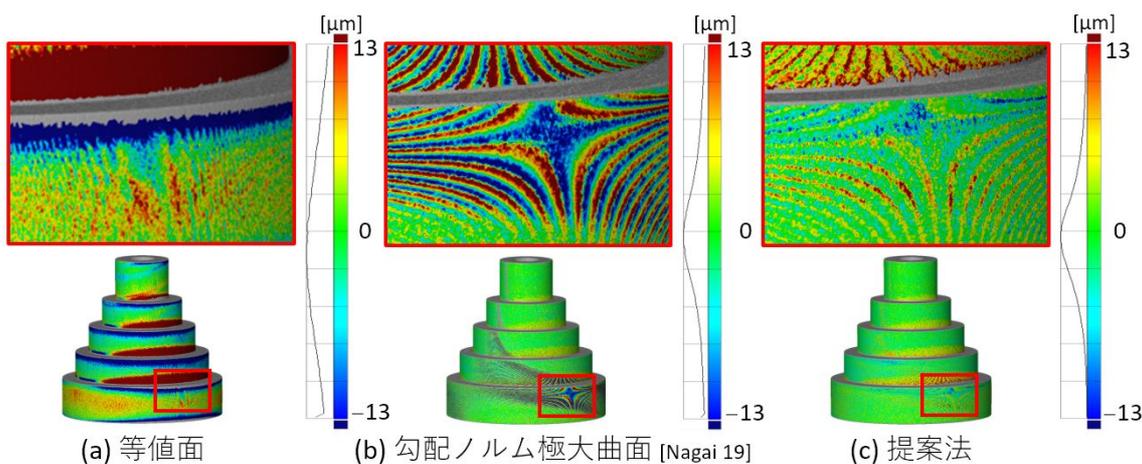


図5 ベストフィット円筒からの偏差

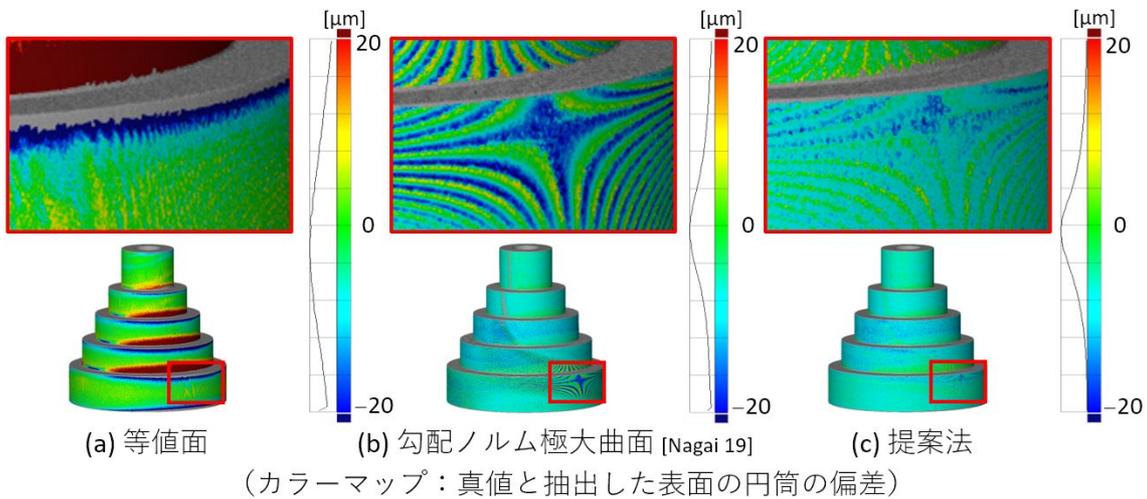


図6 真値(CMM計測値)からの偏差

【金属積層造形ラチス構造体のリアルタイム X 線三次元計測】

造形物内に含まれている欠陥を与える機械強度をリアルタイムで評価するために、X 線 CT 装置内に設置可能な小型の圧縮試験機を製作した。図 7 に圧縮試験機外観と X 線三次元計測結果を示す。圧縮試験機を用いて、圧縮試験前後の金属積層造形で作製したサイコロ状試料の CT 画像を取得した。今後の課題として、リアルタイムで圧縮過程を観察する手法に関して検討していく必要がある。

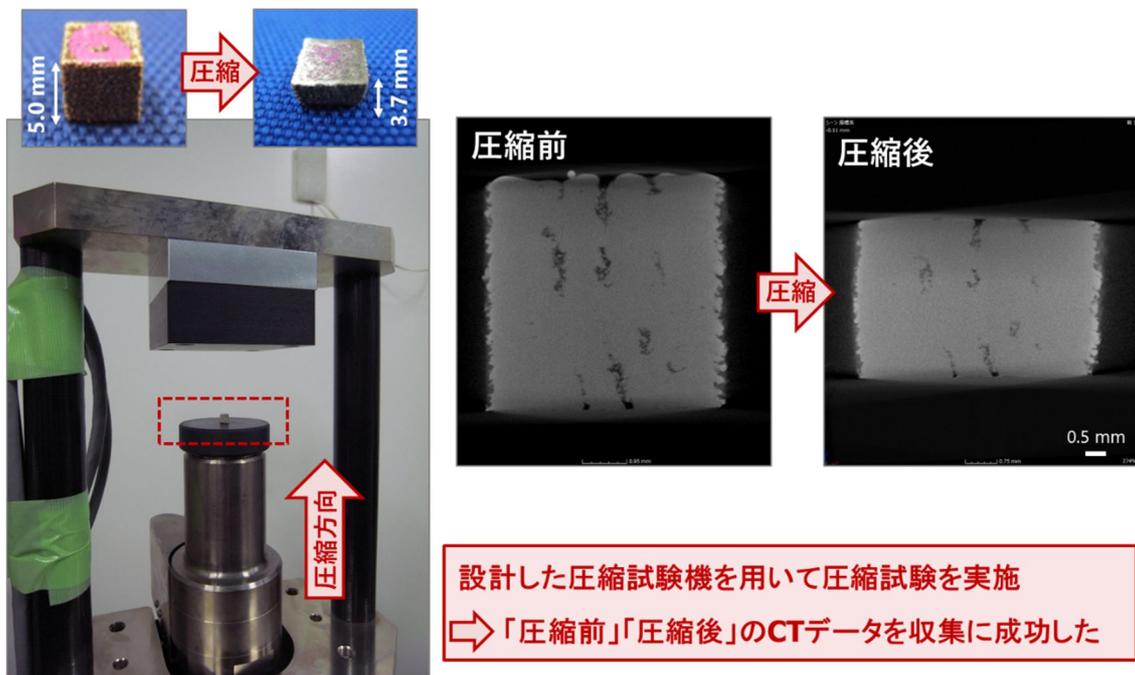


図7 圧縮試験機を用いた X 線三次元計測結果

5. 参考文献

- [1] Nagai Y., Ohtake Y, Suzuki H., SegMo: CT Volume Segmentation using a Multilevel Morse Complex, *CAD Journal*, 107, 23-36 (2019).
- [2] Lucas B. and Kanade T., An interactive image registration techniques with an application to stereo vision *Proc. 7th IJCAL*, 674-679 (1981).
- [3] Horn B. and Schunck B., Determining optical flow, *Artificial intel.*, 17, 185-203 (1981).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 金田久慶, 大竹豊, 谷田川達也, 鈴木宏正, 長井超慧, 紋川亮, 三浦由佳, 月精智子
2. 発表標題 変形する格子構造の4次元CTデータの解析手法
3. 学会等名 精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金田久慶, 大竹豊, 谷田川達也, 鈴木宏正, 長井超慧, 紋川亮, 三浦由佳, 月精智子
2. 発表標題 初期形状のレベルセット変形を用いた 4次元CT再構成法
3. 学会等名 精密工学会春季大会学術講演会
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
研究分担者	長井 超慧 (Nagai Yukie) (20586002)	東京都立大学・システムデザイン研究科・准教授 (22604)	
研究分担者	大竹 豊 (Ohtake Yutaka) (50425617)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	月精 智子 (Gessei Tomoko) (80520220)	地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・事業化支援本部技術開発支援部計測分析技術グループ・主任研究員 (82670)	
研究分担者	紋川 亮 (Monkawa Akira) (10399397)	地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・事業化支援本部技術開発支援部製品化技術グループ・上席研究員 (82670)	

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