

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (特設分野研究)

研究期間：2017～2020

課題番号：17KT0038

研究課題名(和文) 金属製積層造形の自動進化型最適造形システムの創成

研究課題名(英文) Development of automatic topology optimization for additive manufacturing

研究代表者

加藤 準治 (Kato, Junji)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：00594087

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年、宇宙航空、自動車、機械、建設、医療工学分野など、種々の分野において「積層造形によるものづくり」が本格的に導入されるようになってきた。その主な理由は、積層造形の最大の利点である自由形状を活かして最適な構造を設計・製作すれば、大幅な軽量化が期待できるためである。しかし、積層造形の長所を活かした造形物の設計は、高度な知識を要し、依然としてハードルが高い。このような高度にデザインされた構造製品を生み出すためには、積層造形を前提としたトポロジー最適化法の研究開発が必要不可欠である。本研究ではそれを可能にする汎用性の高いトポロジー最適設計法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

積層造形によるものづくりは、未来の社会基盤を支える重要な技術開発であるが、積層造形の長所を活かした造形物の設計は、高度な知識を要し、依然として難しい。高性能な構造製品を生み出すためには、積層造形を前提としたトポロジー最適化法の研究開発が必要不可欠である。本研究ではそれを可能にする汎用性の高いトポロジー最適設計法を開発した。本成果は、学術的価値が高く、また将来の設計工学に一石を投じるもので社会的意義が大きいものと考えている。

研究成果の概要(英文)：In recent years, additive manufacturing has been introduced in earnest in various fields such as aerospace, automobiles, machinery, construction, and medical engineering. The main reason is that if the optimum structure is designed and manufactured by taking advantage of the free shape, which is the greatest advantage of additive manufacturing, a significant weight reduction can be expected. However, the design that takes advantage of the additive manufacturing requires a high degree of knowledge, and the hurdles are still high. In order to produce such highly designed structural products, research and development of topology optimization methods premised on additive manufacturing are indispensable. In this research, we have developed a highly versatile topology optimization method that makes this possible.

研究分野：計算力学

キーワード：トポロジー最適化 積層造形 熱伝導 マルチマテリアル

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、宇宙航空、自動車、機械、建設、医療工学分野など、種々の分野において「積層造形 (3D-printing) によるものづくり」が本格的に導入されるようになってきた。その主な理由は、積層造形の最大の利点である「自由形状」を活かして最適な構造を設計・製作すれば、大幅な軽量化が期待できるためである。また、黎明期の積層造形では金属と樹脂が主な造形材料であったが、最近ではセラミックスやゴム系材料、セメント、繊維強化プラスチックなど、さまざまな材料を使った積層造形も開発されている。また、本研究の開発当初、金属製積層造形は、熱によって部材に塑性変形が生じたり、造形条件の違いによる材料特性 (強度や靱性など) のばらつきが問題視されていたが、これらの造形上の課題も造形装置の進歩によって制御しやすくなっているようである。このように、造形装置や造形材料の開発スピードは目覚ましく、積層造形によるものづくりの本格的な導入が多くの分野で現実的なものとなっている。しかし、造形装置の発展とは別に、積層造形の長所を活かした造形物の設計は、高度な知識を要し、依然としてハードルが高い。特に、最近では積層造形による、熱伝導製品の最適設計や自由形状を活かしたロバスト設計法、多孔質構造を積極的に活用した製品などが多く見られるようになってきた。このようなデザインされた高機能な構造製品を生み出すためには、積層造形を前提としたトポロジー最適化法の研究開発が必要不可欠である。

### 2. 研究の目的

セル構造体 (空隙率 70 % 以上の多孔質構造体をいう) という軽量かつ高い熱伝導機構 (熱を外気へ逃がす) を導入して、熱輸送性能を最大化する最適な多孔質構造体を見出すための手法開発を目的とする。また、セル構造体は、形によって様々な性能を発現する非常に興味深い性質があり、研究代表者がこれまでに行ってきた機能性最適設計 (材料強度・剛性・靱性・エネルギー吸収性能・減衰性能の最大化など) と融合させることで、軽量かつ優れた『機能』を有する究極の最適構造を見出すことに挑戦する。具体的には、ラチスのような細かい部材を有する構造 (インフィル構造とも呼ばれる) を最適化し、構造強度の改善を図る新しい手法の開発を目指す。

### 3. 研究の方法

研究については、主に以下に示す 2 つの手法を開発した。

#### ① 積層造形を考慮した構造強度最大化設計法の開発

本研究では線形の構造解析にもとづく実用的な手法を前提としつつ、部材の細長比を制御することで構造強度を改善するトポロジー最適設計法を開発した。具体的には、一般的な材料体積制約付き剛性最大化問題に対して、「部材数を増やして部材の細長比を小さくする制約条件」を付加する方法である。提案する制約条件は、部材数の増加を促すために主応力方向のばらつき、すなわち主応力方向の分散を大きくする局所的な不等式制約条件で表現されている。また、主応力方向を表現するために角度を変数として取り扱うが、通常の算術方法では特異となることが知られている。そこで、本研究では方向統計学による統計量を表現方法として取り入れ、安定的な解の収束を可能にしている。なお、本手法は、線形の構造解析の枠組みで剛性最大化を図りつつ、同時に非線形応答である構造強度を改善するものである。非線形構造解析を実施しない本手法の計算コストは従来の複雑な非線形応答を考慮したトポロジー最適化手法に比べて十分に小さいことを強調しておく。

#### ② 積層造形に念頭においた非定常熱輸送量最大化手法の開発

積層造形を念頭におき金属製金型を想定した熱輸送量最大化手法を開発した。ここでは、流体 (空気) から熱が固体 (造形物) に伝わることを考慮した非定常熱問題を定式化し、その最適化アルゴリズムを開発した。

### 4. 研究成果

産業応用までを考えると、あまりにも高度な設計法や複雑な計算を前提とした最適設計法は実設計には不向きである。そのため、実用的で扱いやすい設計法の開発を念頭において本研究を進めた。上記①の研究についてはそれを可能とする「主応力方向分散制約」という制約条件式を開発した。②については、非定常熱伝導問題の順解析の近似解法を用いて設計の簡略化を図った。ここでは、①で開発した手法について報告する。

#### (1) 構造強度最大化を可能にする主応力方向分散制約の概要

構造の軽量化を図った材料体積制約付き剛性最大化は、最も実績の多い設計問題であるが、その最適構造はスレンダーな構造となることが多い。しかし、スレンダーな構造は、線形領域を超える荷重が作用したとき、あるいは荷重条件が不確かに変化すると、途端に座屈するなどの脆弱な破壊挙動を示す。このような背景から、非線形構造解析を前提としたトポロジー最適化に関する研究が報告されるようになった。これらの手法は、力学的な観点に根ざしたもので学術的にも高く評価されているが、複雑な非線形挙動を対象とする場合、そもそも順解析自体が不安定で計算が破綻しやすく、最適設計も容易ではない。このような経緯から、扱いやすい線形座屈解析を基本とした材料体積制約付き座屈荷重最大化問題を扱う研究も多く報告されている。しかし、線形座屈解析は、複雑な構造形状や荷重荷重が大きくなると実現象と大きく乖離することが知られており、信頼性に乏しい。

そこで、本研究では線形の構造解析にもとづく実用的な手法を前提としつつ、部材の細長比を制御することで構造強度を改善するトポロジー最適設計法を開発した。具体的には、一般的な材料体積制約付き剛性最大化問題に対して、「部材数を増やして部材の細長比を小さくする制約条件」を付加する方法である。提案する制約条件は、部材数の増加を促すために主応力方向のばらつき、すなわち主応力方向の分散を大きくする局所的な不等式制約条件で表現されている。また、主応力方向を表現するために角度を変数として取り扱うが、通常の算術方法では特異となることが知られている。そこで、本研究では方向統計学による統計量を表現方法として取り入れ、安定的な解の収束を可能にしている。

なお、本手法は、線形の構造解析の枠組みで剛性最大化を図りつつ、同時に非線形応答である構造強度を改善するものである。

非線形構造解析を実施しない本手法の計算コストは従来の複雑な非線形応答を考慮したトポロジー最適化手法に比べて十分に小さいことを強調しておく。

### (2) 最適化問題の設定

前述のとおり、目的関数は剛性最大化であり、ここでは力学的な観点から平均コンプライアンス最小化と同義であると位置づけた。以下に、本研究のための目的関数  $f$  および不等式制約条件  $g$  を以下のように設定した。

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\rho(s)) = u^T F = u^T K u \\ \text{s.t.} \quad & K u = F \\ & g_{\text{vol}}(\rho(s)) = \frac{\int_{\Omega} \rho(s) d\Omega}{\int_{\Omega} d\Omega} \leq v_0 \\ & g_{\text{pri}}(\rho(s)) = V^{\min'} \geq \bar{V}' \\ & 0 \leq s_e \leq 1 \quad (e = 1, 2, \dots, N) \end{aligned}$$

ここで、 $u$  は全体節点変位ベクトル、 $F$  は外力ベクトル、 $K$  は全体剛性行列、 $g_{\text{vol}}$  は全体の使用材料体積制約、 $v_0$  は所与の全体材料体積比率の上限値、 $g_{\text{pri}}$  は提案する主応力方向分散制約であり、構造強度の向上を図るための条件である。 $s_e$  は、設計変数で各有限要素の材料体積比であり、 $N$  は要素の総数である。 $\rho$  は、 $s_e$  にフィルターを施した後のもので、ここでは要素の密度として扱う。 $\bar{V}'$  は、定数で主応力方向分散の下限値である。 $V^{\min'}$  は、計算で求められる主応力方向の分散であり、以下の式で定義した。主応力方向の分散値は、局所領域内に存在する有限要素の積分点で求めた主応力およびその方向から計算されるようにしている。 $V^{\min'}$  が、 $\bar{V}'$  よりも大きくなるように制約を課すことで、主応力方向にばらつきを与え、それによって枝分かれを促進する制約条件となっている。

$$V^{\min'} = \left[ \frac{1}{n^{\text{loc}}} \sum_{l \in \Omega} \left( \frac{\rho_l^{\text{loc}}}{V_l} \right)^p \right]^{-\frac{1}{p}}$$

ここで、 $n^{\text{loc}}$  は、領域全体を区分する局所領域の個数、 $V_l$  はその局所領域の体積、 $\rho_l^{\text{loc}}$  は局所領域でフィルターを掛けた後の材料体積比、 $p$  は  $p$ -ノルムのパラメータで本研究では 20 とした。

### (3) 主応力方向分散制約の概念

ここでは、構造強度の向上を意図した主応力方向分散制約について簡単に説明する。本制約条件は構造部材の枝分かれを誘発することで、全体の構造部材数を増やし、部材自体の細長比を制御することを目的としている。このような制約条件を設定するためには構造部材の角度を定量的に評価する必要がある。しかし、密度法によるトポロジー最適化の場合には設計変数が 0 または 1 に収束していない中間密度（グレースケール）の状態においては部材の幾何学的特徴を明確に識別することが困難になるという問題が生じてしまう。また、このようなグレースケールの状態と、設計変数が完全に 0 と 1 に収束した状態のどちらにおいても一律に構造部材の角度を評価できる方法が必要となる。そこで、本研究では主応力方向に基づく構造部材の角度評価方法を提案している。この手法は、構造部材の角度はその構造部材に生じている主応力方向と大まかに一致しているという事実に基づくものである。

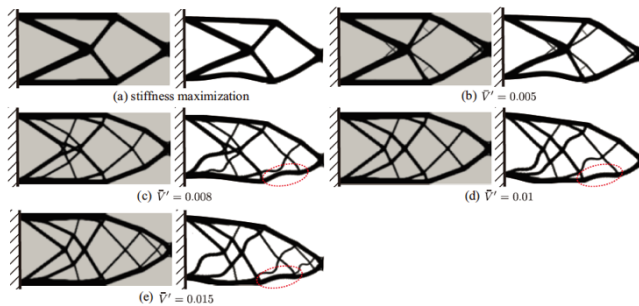


図1 最適化結果：(a) 通常の剛性最大化、(b)～(e) 主応力方向分散制約を化した剛性最大化

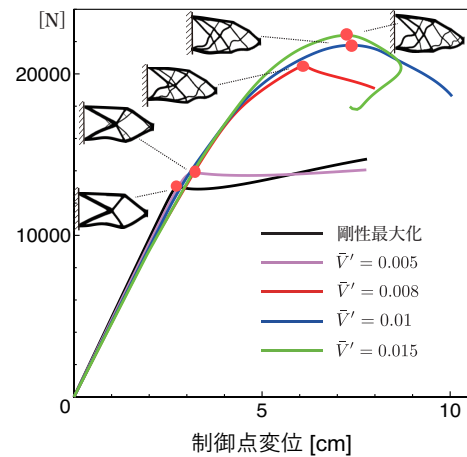


図2 case-1 の荷重 - 変位曲線

(4) 最適化計算例

・ case-1 (片持ちはり)

図 1 は、左端を変位拘束し、右端中央付近で鉛直下向きに一定の荷重を载荷した条件下において得られた最適化計算結果である。同図 (a) は、参考として実施した、主応力方向分散を課さない通常の剛性最大化の結果、(b)~(e) はそれぞれ主応力方向分散制約の下限値を  $\bar{V}' = 0.005, 0.08, 0.01, 0.015$  とした場合の最適化結果である。下限値が大きいくほど、枝分かれを強要する条件となる。また、図 2 は、得られた最適化構造に対して、別途、有限変形解析を実施し、それにより得られた、制御点における荷重-変位関係と荷重ピーク時の変形モードである。このそれぞれの変形モードは、図 1 の右側にも記した。

まず、図 1 (a) の通常の剛性最大化の結果を見ると、細長い部材で構成される単純な構造が得られたことがわかる。それに対し、主応力方向分散制約を課した同図 (b)~(e) の結果は、通常の剛性最大化の最適構造を基本としつつ、主応力方向分散制約の下限値が大きくなるにつれて概ね部材数が増加していることがわかる。また、上下の水平部材とそれに接する部材とのなす角度もそれに従って大きくなっており、主応力方向分散制約の効果が反映された結果となっていることがわかる。

次に、荷重ピーク時での変形モードを観察すると、図 2 (a) の剛性最大化の結果では下側水平部材が座屈に至っているように思われるが同図 (c)~(e) の構造では赤の波線で囲まれた部材において座屈と思われる変形が見られた。これは構造の中の部材数が増加したことにより下側水平部材の細長比が小さくなることで同部材の座屈が抑制されたためであると考えられる。また、荷重-変位関係を見ると、初期剛性は (a) の構造が最も大きく、主応力方向分散制約の下限値が大きくなるほどそれが低下していることがわかる。(a) の剛性最大化の結果では荷重の大きさが  $1.30 \times 10^4$  N で下側水平部材に大きな変形が生じ、荷重耐力を失うのに対し、主応力方向分散制約を課した (b)~(e) の構造ではいずれも大きな構造強度を示していることがわかる。最も大きな構造強度を示したのは同図 (e) に示した  $\bar{V}' = 0.015$  の最適構造で、その構造強度は  $2.25 \times 10^4$  N となり、(a) の通常の剛性最大化による最適構造に対して約 1.73 倍となった。

・ case-2 (3点曲げはり)

同様の例として、単純支持はり (3点曲げ) を対象に実施した最適化計算結果を図 3 に示す。先程と同様に、同図 (a) は通常の剛性最大化の結果、同図 (b)~(e) はそれぞれ  $\bar{V}' = 0.005, 0.01, 0.015, 0.02$  とした場合の最適化結果である。(b)~(e) では、先程の例と同様に通常の剛性最大化の最適構造を基本構造としつつ、枝分かれの多い構造が得られていることがわかる。また、図 4 は有限変形解析により得られた、制御点における荷重-変位関係であるが、これも先程と同様に初期剛性は同図 (a) の通常の剛性最大化の結果が最も大きく、主応力方向分散制約を課した最適構造ではわずかに低下していることがわかる。また、構造強度については主応力方向分散制約を考慮したものが、常に (a) の剛性最大化の結果よりも大きくなっていることがわかる。最も大きな構造強度を示したのは同図 (c) の最適構造であり、同図 (a) に比べて約 1.59 倍の構造強度を示した。

最後にまとめると、開発した主応力方向分散制約は、線形の構造解析の枠組みで剛性最大化を図りつつ、同時に非線形応答である構造強度を改善するものである。非線形構造解析を実施しない本手法の計算コストは従来の複雑な非線形応答を考慮したトポロジー最適化手法に比べて十分に小さく、実用性のある手法であると思われる。一方で、主応力方向分散の下限値をいくらに設定すればよいか、また、荷重強度を直接制御できないなど、実際のものづくりの観点からすると悩ましい問題も残っている。これらの課題の解決については、今後の課題としたい。

なお、本研究では、研究開始当初、金属製積層造形の熱塑性変形と材料特性の変化のメカニズムを金属結晶レベルから数理的に解明・評価し、その情報をフィードバックして自動で変更する造形システムの構築を検討していたが、造形装置に強く依存する問題であること、また高精度な予測のためには計算量が膨大となること、また先に示したように造形装置自身の制御が容易になっていることから、これについては検討を取りやめ、より発展性の高い問題を取り扱うこととした。

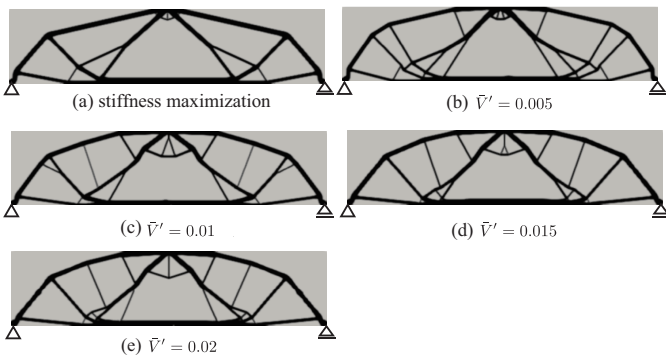


図 3 最適化結果：(a) 通常の剛性最大化、(b)~(e) 主応力方向分散制約を課した剛性最大化

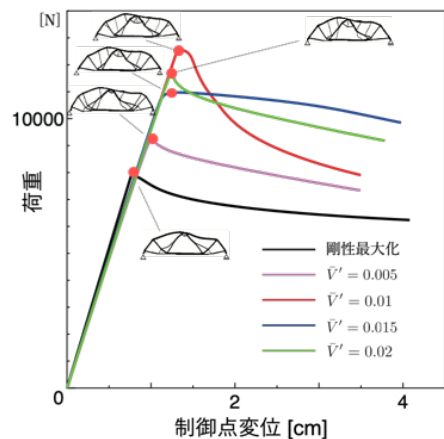


図 4 case-2 の荷重 - 変位曲線

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 小池雄介, 牛島邦晴, 加藤準治	4. 巻 No. 20190006
2. 論文標題 グランドストラクチャ法に基づく サンドイッチラティス梁の最適化設計に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 干場大也, 小川竣, 加藤準治, 京谷孝史	4. 巻 No. 20180015
2. 論文標題 複合材料の弾塑性挙動を考慮したマルチスケルトポロジ-最適化	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 1, 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 T. Endo, H. Hoshiba, J. Kato
2. 発表標題 Multi-material optimization for future products by additive manufacturing to minimize dynamic structural response
3. 学会等名 II International Conference on Simulation for Additive Manufacturing (Sim-AM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Endo, J. Kato, H. Hoshiba
2. 発表標題 Multi-material Topology Optimization for Reduction of Dynamic Structural Response
3. 学会等名 15th U.S. National Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤 拓真, 加藤 準治, 京谷 孝史
2. 発表標題 マルチマテリアル化による動的挙動制御法
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Watanabe, J. Kato
2. 発表標題 Weight reduction by multi-material topology optimization expecting advanced additive manufacturing
3. 学会等名 II International Conference on Simulation for Additive Manufacturing (Sim-AM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Watanabe, J. Kato
2. 発表標題 Preliminary investigation for weight reduction by multi-material topology optimization
3. 学会等名 13th Word Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO13) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Watanabe, J. Kato, T. Kyoya
2. 発表標題 Stress constraints for weight reduction by multi-material topology optimization under thermo-elastic behavior
3. 学会等名 The Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鎌田 浩基, 干場 大也, 加藤 準治, 京谷 孝史
2. 発表標題 多孔質充填構造のトポロジー最適化に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 第31回計算力学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鎌田浩基, 加藤準治, 京谷孝史
2. 発表標題 インフィル構造の応力制約付きトポロジー最適化
3. 学会等名 平成29年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊大貴, 加藤準治, 京谷孝史
2. 発表標題 マルチマテリアルトポロジー最適化の手法検証
3. 学会等名 平成29年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2018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	高瀬 慎介  (Takase Shinsuke)  (00748808)	八戸工業大学・大学院工学研究科・准教授   (31103)	

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
---------	---------