

トポロジー・形状最適化による軽量構造の設計手法の開発

奥村 克博*1 川畑 将人*2 林 宏充*2 田口 智之*2 山田 圭一*2 倉本 紘彰*2

Development of lightweight structure design method by topology / shape optimization

Katsuhiko Okumura, Masato Kawabata, Hiromitsu Hayashi, Tomoyuki Taguchi,
Keiichi Yamada, and Hiroaki Kuramoto

ロボットや自動車、機械装置等の開発の中で永続的な課題である軽量化に対し、多くの場合は素材の高強度化や材料置換、設計上の工夫で軽量化されてきたが、より効果的な軽量化手法としてトポロジー最適化・形状最適化などの構造最適化解析の活用が注目されている。本開発では、構造最適化解析と3Dプリンタを組み合わせ、解析から設計、3D造形、検証、実利用に至るまでの開発工程で企業への支援が可能な軽量構造設計手法を構築し、軽量化に挑戦する県内中小企業への製品開発支援や技術移転を行った。同時に、3D-CADやCAEに関する「ものづくりの3D化」人材育成を行い、3D化率が約3割の地域中小製造業の3D化を促進した。本稿では、ドローン等の検査ロボットに対する開発支援、実施した3D化人材育成について報告する。

1 はじめに

地球温暖化対策のためのCO₂削減（エネルギー消費削減）の手段の一つとして、自動車や機械装置に対する軽量化ニーズが急激に高まっている。一般的な軽量化手法として、素材の高強度化や薄肉化、より軽量な素材への材料置換、小型化や肉抜きなどの設計上の工夫、製造上の工夫など、これまでに様々な軽量化手法が開発されてきた。近年、3Dプリンタに代表される付加製造技術（AM技術）が進展し、剛性と軽量化を両立させ得る手法である構造最適化解析と組み合わせられ、航空宇宙産業や自動車産業等で活発に利用されている。現在、構造最適化ソフトウェアの低価格化や既存の3D-CADへの実装により、設計者が構造最適化解析を利用する機会が増えており、解析専任者を抱えていない多くの中小企業でも活用が進展すると期待されている。

機械電子研究所では、3Dプリンタやトポロジー・形状最適化解析が可能な構造最適化ソフトウェアを導入し、県内中小企業を支援するための「支援基盤の整備」と、3D-CADやCAEに関する実習形式の人材育成セミナーを開催し技術者の3D化を図る「人づくり」を並行して実施し、技術向上を推進している。

本研究では、構造最適化解析を用いた軽量構造の設計提案、3Dプリンタによる軽量構造の造形、強度解析や試験機を用いた検証、製品までの各開発工程をフォローする軽量構造設計手法を構築し、企業の製品開発

支援を行った。

2 本開発で使ったツール

本開発では、構造最適化ソフトウェアに(株)くいんと社製HiramekiWorks、3DプリンタにStratasys社製Fortus450mcを使用した。両ツールは、(公財)JKAの補助を受けH30年度に導入された。

3 軽量構造設計手法を用いた開発支援の事例

3-1 配管内検査ロボットの構造の簡素化と軽量化

発電・石油・化学プラント等の配管の劣化診断や健全性評価ニーズに対し、新日本非破壊検査(株)を中心に配管内検査ロボット「エルボマスター」が開発された^{1)~3)}。本研究を進めるにあたり、構造最適化解析の対象とした管径φ100~200 mm用エルボマスターの機構を図1に示す。前後移動用に2個、ローリング用に1個の合計3個のオムニホイールと2本のアームを用いた「への字」突っ張り機構を持ち、水平・垂直管の移動、エルボ通過、ローリングなど管内検査に必要な

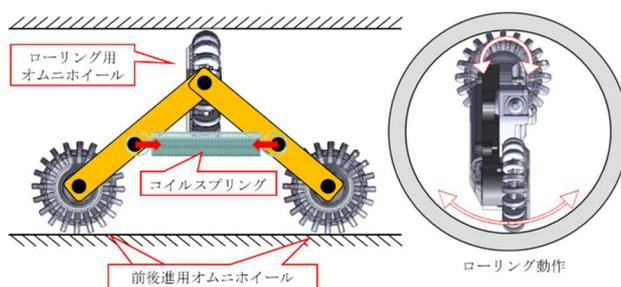


図1 管径φ100~200 mm用のロボット機構の概略図

*1 企画管理部
*2 機械電子研究所

動作が可能である。実用化後、現場での使用実績の増加に伴い整備性向上や運動性能向上のための部品点数の削減、軽量化が要望されていた。そこで、構造最適化解析による軽量化と 3D プリンタでの製作を前提とした新たな管径φ100 mm用ロボット構造を開発した。新構造は、最適化による軽量化の実現に加え、使用する柔軟素材の撓りを管内で突っ張るためのコイルスプリングの代替とすることで、複数の部品で構成されていたロボット機構を一部のみとし、部品点数の大幅な削減による機構の簡素化と軽量化を同時に実現した。

具体的な開発の流れを図2に示す。図2に示す通り、①～④にて構造最適化解析を行い、⑤にて必要な形状

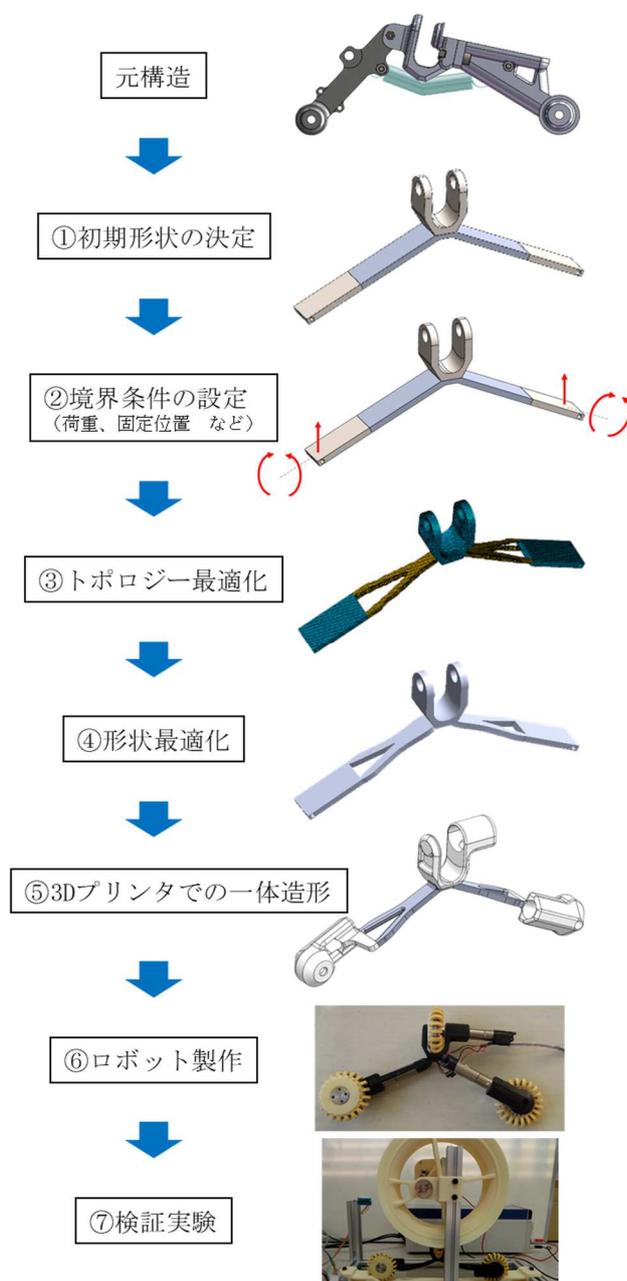


図2 最適化と3Dプリンタによる構造開発の流れを

追加した構造を Nylon12 樹脂を使用し一体造形した。その後、モータやギア等の部品を取り付け可動状態とし(⑥)動作テストを行った結果、水平・垂直移動、ローリング動作が可能であった。最適化前後でのロボット構造の部品点数や重量の比較を表1に示す。部品の種類数は13から1種へ(92%減)、部品点数は17から1個へ(94%減)、重量は81gから30.5g(62%減)へと大きな削減を実現した。なお、3Dプリンタによる造形部品は積層方向で強度が異なるため、解析で用いる強度値は強度が低いZ方向(高さ方向)での積層時の数値を使用し、得られる解析結果が安全側となるようにした。使用した強度値は、表2に示すStratasys社の公表データを用いた。

表1 元構造と新構造での部品点数や重量の比較

	最適化前	最適化後
部品の種類数 [種]	13	1 (92%減)
部品の点数 [個]	17	1 (94%減)
機構の重量 [g]	81	30.5 (62%減)

表2 Z方向積層の場合のNylon12の主なスペック

引張強度 [MPa]	38.5
ヤング率 [MPa]	1,138
曲げ強度 [MPa]	61
曲げ弾性率 [MPa]	1,180

3-2 実用化に向けた耐久性の確認

図2の⑤にて一体造形した Nylon12 樹脂製部品の内部構造を X 線 CT (ニコンインテック社製 MCT225K) にて撮影した結果、Fortus450mc の材料押出堆積法という造形原理に由来する多数の空洞が存在することが分かった(図3)。このように、理想的に密な形状となる CAD モデルと空洞が存在する実物との内部構造が一致しな

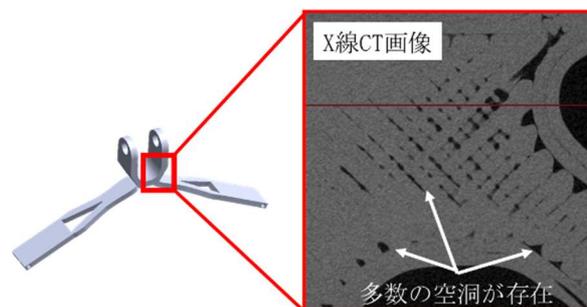


図3 3Dプリンタで造形した部品のX線CT画像

いため、数値解析にて強度や耐久性を正確に評価することは困難と判断し、実使用条件に即した変異を繰り返し与えることができる専用の耐久性試験装置を開発し、強度と耐久性の確認を行うこととした(図2 ⑦)。

耐久性試験の結果、実使用で想定される年間1,000回程程度の負荷回数に対し2,500回以上耐えることが分かった。実際の運用では、部品の定期交換を行う予定のため、耐久性に問題はないと考えられる。

3-3 橋梁検査用ドローンの簡素化と軽量化

全国に存在する約73万本の橋梁と約1万本のトンネルを低コストかつ高効率で検査を行うために、新日本非破壊検査(株)では橋梁下面に車輪移動機構を押し付けながら移動し、カメラ映像を使用した画像検査や打音検査が可能な橋梁検査用ドローンを開発した^{4,5)}。橋梁点検の様子を図4に、全体概要を図5に示す。

本点検ドローンも配管内検査ロボットと同様に、検査の現場からは整備性向上を目的とした部品点数の削減、運動性能向上のための軽量化が要望されていた。そこで、構造最適化による軽量化および柔軟素材を用いた3Dプリンタでの製作を前提とした新たな構造を開発することとした。本稿では、紙面の都合により、

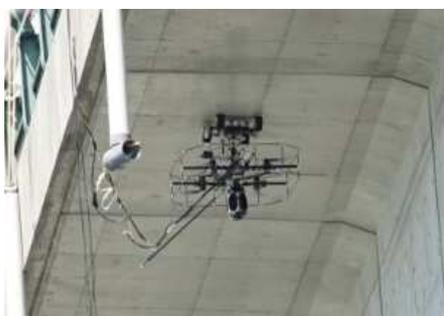


図4 点検中の橋梁検査用ドローン

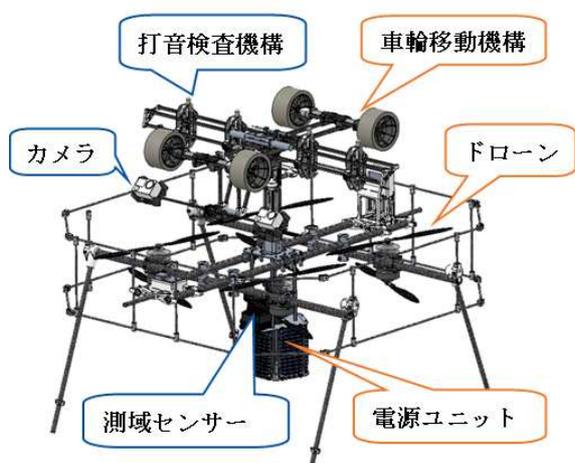


図5 橋梁検査用ドローンの全体概要

ドローン上部に搭載する車輪移動機構に関してのみ報告する。

具体的な開発の流れを図6に示す。図6の最上部に示される車輪移動機構の元構造は、中心部のユニバーサルジョイントと4本のコイルスプリングで構成され、前後左右へ $\pm 30^\circ$ の受動的な傾斜機能によって平常時の水平保持から傾斜した天井面や凹凸に対応することが可能である。一方で、部品点数が多く現場でのメンテナンス性に劣るという課題があった。そこで、柔軟なNylon12を3Dプリンタの材料として使用することで、外力に応じ自ら変形可能な車輪移動機構のための構造の開発を行った。構造の設計にあっては、図6の①に示す初期形状を設定し、まずトポロジー最適化を

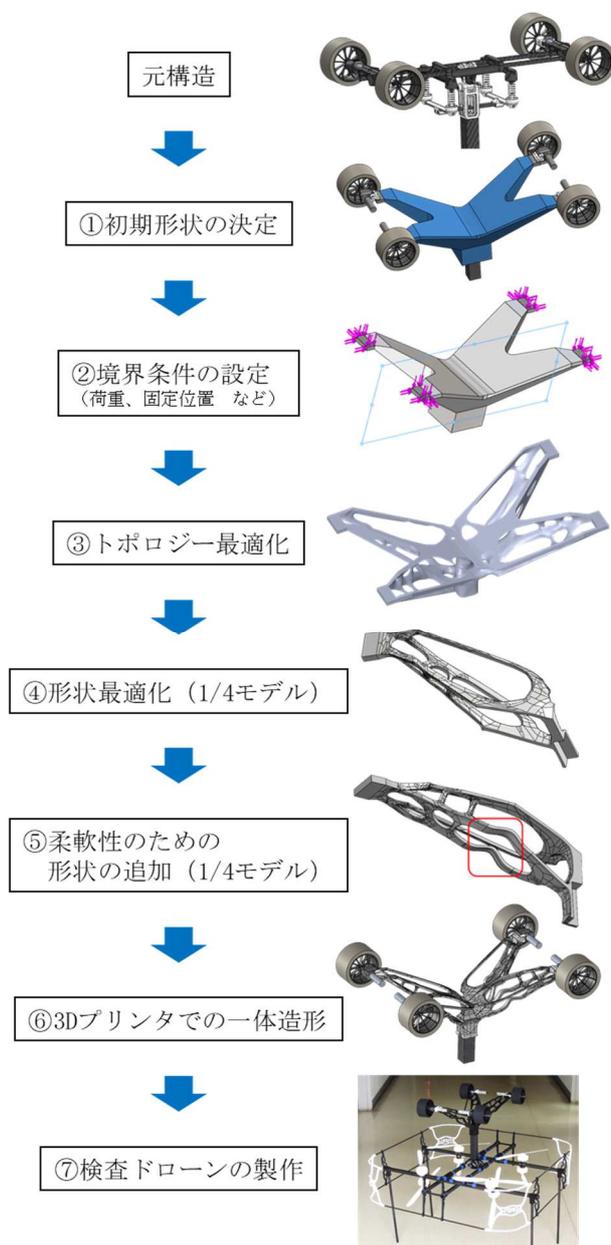


図6 最適化と3Dプリンタによる機構の開発の流れ

表3 元構造と新構造での部品点数や重量の比較

	最適化前	最適化後
部品の種類数 [種]	33	12 (64%減)
部品の点数 [個]	89	50 (44%減)
機構の重量 [g]	967	763 (21%減)

行い強度に関与が低い箇所が削り取られた形状を得た(図6の③)。次に、1/4モデルを用い形状最適化を行い、剛性と軽量化のバランスがとれた形状を得た(図6の④)。しかしながら、構造最適化は剛性の高い構造を導き出す手法であるため、得られた形状は柔軟性を発揮できる構造ではない。そこで、敢えて剛性を低下させ変形を誘発する構造を追加した(図6の⑤の枠内部の湾曲構造)。この変形を狙った形状を用い、Nylon12樹脂にて車輪移動機構(図6の⑥)を製作した。開発前後での部品種や部品点数の比較を表3に示す。また、検査ドローンに取り付けた様子を(図6の⑦)に示す。

開発した車輪移動機構を用い、コンクリート壁面に押し付ける模擬実験を行ったところ、車輪のトリー角やキャンバー角の大きな変化が直進性へ悪影響を与え、実使用に大きな問題があることが分かった。今後、外力による変形も考慮した境界条件の再設定を行い、変形時の直進安定性を改善させた上で現場実験にて検証を行う必要がある。

4 人材育成セミナーによる中小企業のものづくりの3D化

ものづくり企業において、CAEや3Dプリンタなどの3Dデータの取り扱いが前提となるツールの活用は必須と考えられるが、北九州地域における製造業の3D化率は3割^⑧という調査結果もあることから、まずは入り口となる3D-CADを扱うことができる人材を育成し、CAEや3Dプリンタの活用を促すことで県内企業のものづくりの3D化を進めていくことが急務となっている。

そのため、機械電子研究所では中小企業の技術者を対象とした実習形式の3D関連技術人材育成セミナーを数年前より実施している。R1年度はオートデスク社のFusion360を使用し、3D-CAD、CAE(線形静解析、構造最適化解析)、CAM、3Dプリンタ造形体験、RE(リバーエンジニアリング)体験など、3Dデータの作成から活用までの総合的なセミナーを実施し、延

べ98名の参加があった。今後も「支援基盤の整備」と、3Dツールを活用できる人材を育成する「人づくり」を並行して実施し、地域企業の支援を進めていく。

5 まとめ

構造最適化と3Dプリンタを組み合わせた軽量構造設計手法を構築し、県内中小企業の開発支援を行った。具体例として、配管内検査ロボットや橋梁検査用ドローンに対する軽量化支援を行った結果、大幅な軽量化と部品点数の削減が可能であることが分かった。今後は現場での実験を通して本手法の有効性の検証を行っていく必要がある。また、県内中小企業自らがCAEや3Dプリンタを活用するために実習形式の3D化人材育成セミナーを実施した結果、延べ98名が参加した。今後も引き続き、県内中小企業への開発支援や軽量設計手法の技術移転、3D人材育成を行っていく。

6 参考文献

- 1) 奥村克博, 渡邊恭弘, 百合本淳, 和田秀樹, 大貝晴俊, 大屋勝敬, 大川不二夫, 井上美和, 御厨美和: 配管検査用ロボット機構の開発, 日本機械学会, 第61期総会・講演会九州支部講演論文集, No. 088-1, pp. 255-256(2008)
- 2) 新日本非破壊検査(株): エルボマスター, (オンライン) <http://www.shk-k.co.jp/business/technology/equipment/equipment07.html>
- 3) 奥村克博, 渡邊恭弘, 百合本淳, 和田秀樹: 小径管内検査ロボットの開発, 日本機械学会, 第66期総会・講演会九州支部講演論文集, No. 138-1, pp. 53-54(2013)
- 4) 奥村克博, 古賀文隆, 糸平圭一, 田中雅敏, 和田秀樹: 飛行ロボットによるインフラ点検ロボットシステムの開発, 日本機械学会九州支部第講演論文集, No. 168-1, pp. 371-372(2016)
- 5) 奥村克博, 古賀文隆, 山田圭一, 田中雅敏, 和田秀樹: マルチコプターを使ったインフラ点検ロボットシステムの開発, 日本機械学会九州支部第講演論文集, No. 178-1, pp. 327-328(2017)
- 6) 竹田陽子: 北九州地域における3次元ものづくりの実態と政策含意, 北陸先端科学技術大学院大学年次学術大会講演要旨集, 30:447-452(2015)