

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05770

研究課題名(和文)3Dプリンタによる位相最適化コア層CFRPサンドイッチ構造のテーラーメイド設計

研究課題名(英文) Taylor-Made Design of Sandwich Structures with Topology-Optimized Core Layers by Using 3D Printers

研究代表者

鈴木 浩治 (SUZUKI, Kohji)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：70322427

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではサンドイッチ構造コア層を汎用FEM解析コードMSC Nastranを用いて位相(トポロジー)最適化し、さらに3Dプリンタ成形するという、本構造のテーラーメイド設計・製作の新たな手法を提案した。具体的には中実コア層から出発し、剛性や衝撃吸収エネルギーなど所望の目的関数に対し、重量制約条件の下、密度法(SIMP法)による位相(トポロジー)最適化によりコア層の最適かつ合理的な形態を創出し、熱溶解積層造形(Fused Deposition Modeling, FDM)型3Dプリンタを用いて実際に供試体を成形した。さらに供試体のX線CT撮像や特性評価試験より本研究の妥当性や有用性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, Taylor-made design and manufacturing of sandwich structures with topology-optimized core layers were successfully conducted by using the general-purpose finite element code, MSC Nastran, and FDM 3D printers. As case studies in this project, two different materials for the core layer of sandwich structures were chosen and topology-optimization designs were applied to three-point bending problem of sandwich beams. Stiffness maximization (compliance minimization) was selected as an object function under weight constraints. SIMP method was used for finding optimal shape for design regions in sandwich core layers and actual 3D printed objects were manufactured by FDM 3D printers. X-ray CT imaging and mechanical characterization tests were effectively employed to show the validity and usability of the present study.

研究分野：複合材料工学

キーワード：サンドイッチ構造 軽量化 位相最適化 構造最適化 複合材料 有限要素法 SIMP法 X線CT

1. 研究開始当初の背景

近年、炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) に代表される先進複合材料 (Advanced Composite Materials, ACM) の民生部門への本格的な普及が始まった印象がある。熱硬化樹脂を用いた CFRP がエアバス A380 やボーイング 787 など民間旅客・貨物機の主構造部材⁽¹⁾や VaRTM 法など革新成形技術による欧州 BMW 社や Volkswagen 社などの量産車ボディーパネルへの本格採用^{(2),(3)}がそれを象徴していよう。また、特に我が国において熱可塑性 CFRP (CFRTP) の大衆車主構造用途への技術開発⁽³⁾⁻⁽⁶⁾も加速しており、そのほか燃料電池車 (FCV) 用途 CFRP 製水素蓄圧タンク⁽⁷⁾にも注目が集まるなど、リサイクル技術までもが既に完成されている鉄鋼・非鉄軽金属を 100% 代替することは無いにしても、これまで防衛・航空宇宙産業やレジャー・スポーツ分野を主戦場としていた構造用炭素繊維 (カーボン) の低コスト量産に目処が立った⁽⁵⁾ことで、その“大衆化”が満を持して始まった。

ところで、樹脂として熱硬化を用いようが熱可塑を用いようが今後 CFRP の構造部材技術の要の一つとして CFRP サンドイッチ構造に注目の集まることが予想される。CFRP サンドイッチ構造^{(8),(9)}とは、高剛性・高強度な CFRP を上下スキン (表皮) 層として、その間に厚肉・低密度なコア層をサンドイッチしたものであり、パネルの大幅な軽量化と曲げ・ねじり剛性の向上を同時に達成できる技術である。また準中空構造のため防音性・断熱性にも優れ、さらに CFRP スキン層の積層構成・繊維配向を適度に調整することで、寸法安定性の高い曲面構造の成形が可能で、人工衛星筐体等にも活用されている⁽¹⁰⁾。ところで、この CFRP サンドイッチ構造には技術的に未踏で大いなる可能性を孕んだ“工夫の余地”が多分に残されていると考えられる。サンドイッチ構造のコア層として実用に供しているものは、ロハセル® (PMI ベースのクローズドセル) のような均質等方な硬質発泡材かノーメックス® (メタ系アラミド繊維紙) ハニカムやアルミハニカムのような面内に 2 次元的な蜂の巣状の規則的幾何学パターンを展開させたものだけであるといつてよい⁽⁹⁾。コア層の最も大切な役割は、サンドイッチ構造の曲げ・ねじり剛性を決定するスキン層をパネル中立面から所望の距離に保つことであり、コア層にはパネル表面に分布する面圧および面圧変化に伴う面外せん断力に抗する強度・剛性があれば十分とされている⁽⁹⁾。しかし、それではパネル端部やボルト締結部および突発的な異物衝突箇所などに生じる集中的な負荷により、コア層の圧壊およびコア/スキン間界面のはく離等内部損傷を容易に発生させる。また、事故等による極限的な全損破壊時には、行き場を失った運動エネルギーをパネルが衝撃損壊することで可能な限り消費し、内側の搭乗者や機器類を守る

ことが重要になるが、準中空構造のコア層の衝撃エネルギー吸収能は、必ずしも最適化されていない。従って、コア層の厚さ方向へも (規則的もしくは不規則な) 幾何形態の変化を許容し、様々な境界条件下において、重量や剛性だけでなく、集中負荷時の破壊マージンや衝撃エネルギー吸収能なども目的関数として最適化された 3 次元形態を模索する意義は大きく、このような問題意識はこれまでも複合材料工学分野の多くの研究者達や技術者達とも共有されていたと考えられる。

しかし、有限要素法 (Finite Element Method, FEM) 数値解析を利用した構造体の位相 (トポロジー)・形状最適化^{(11),(12)}は、鋳造、射出成形、プレス成形など従来の製造技術の実情を一切慮らない、時に奇想とも思える 3 次元形態を設計・製造側に無邪気にも提示することが常であり、“理に適ってはいるがそれをカタチにする術がない”という状況に陥ることが多く、本研究対象である CFRP サンドイッチ構造コア層の場合についてもまさにそれが当てはまっていた。ところが、近年、CFRP の大衆化と歩調を合わせるかのように 3 次元積層造型技術 (3D プリンティング技術、付加製造技術) が急速に普及し、この 3D プリンタは、高速試作 (Rapid Prototyping, RP) どころかれっきとした工作機械として活用され始め、かつ、開発・解析サイドが提示する奇想な 3 次元形態をも物ともしない極めて高い造形能力を有している⁽¹³⁾。

参考文献

- (1) “航空機材料としての炭素繊維適用の動向について”, (公財)航空機国際共同開発促進基金【解説概要 19-2】, pp.1-9, (2007).
- (2) “欧州で拡大する炭素繊維の応用 高級スポーツカーから量産車に広がる可能性も”, 日経 Automotive Technology 2011 年 7 月号, p.129, (2011/7).
- (3) “図解特集 カーボンの実力 — 素材・製法と最新適用例”, Motor Fan illustrated, Vol.61, pp.45-87, (2011/11).
- (4) 「サステナブルハイパーコンポジット技術の開発」平成 20 年度—平成 24 年度成果報告書, (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構, (2011/3).
- (5) “特集 1 鉄並みに安くなる炭素繊維 — CFRP が大衆車に搭載へ”, 日経ものづくり, 2014 October, pp.36-55, (2014/10).
- (6) 「革新炭素繊維基盤技術開発」プロジェクト中間評価検討会資料, 経済産業省産業構造審議会産業技術環境分科会, (2014/3).
- (7) “特集 燃料電池—2015 年の FCV 一般販売開始を前にした技術動向と課題 — タイプ 3 高圧水素容器”, 坂口善樹, 工業材料, Vol.62 No.6, pp.67-70, (2014/6).
- (8) 「軽構造の理論とその応用」, 林毅 編, 日本科学技術連盟, (1966).
- (9) 「サンドイッチ構造」, 宮入裕夫 著, 養賢堂, (2008).

- (10) “ハニカムサンドイッチパネルの熱変形評価”, 樺島重憲, 日本複合材料学会誌, Vol.27 No.6, pp.271-280, (2001/11).
- (11) “A homogenization method for shape and topology optimization”, Suzuki, K. and Kikuchi, N., Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.93, pp.291-318, (1991).
- (12) 「トポロジー最適化」, 西脇眞二・泉井一浩・菊池昇 著 (社)日本計算工学会 編, 丸善出版, (2013/1).
- (13) “トポロジー最適化と金属 3D プリントを用いたポーラス材料の設計・製造”, 竹澤晃弘, 日本機械学会誌, Vol.117 No.1151, p.51, (2014/10).

2. 研究の目的

そこで本研究では, 3Dプリンタを用いて位相(トポロジー)・形状最適化されたコア層を有するサンドイッチ構造をテララーメイド設計・製作することを試みる. 最適化にあたっては, 汎用 FEM 解析コード MSC Nastran (エムエスソフトウェア株)を用いる. 3点曲げ単純支持はりの境界条件について, 中実(ソリッド)コア層から出発し, 剛性や衝撃吸収エネルギーなど所望の目的関数に対し, 重量制約条件の下, 密度法(SIMP 法)による位相(トポロジー)最適化によりコア層の最適・合理的な3次元形態を創出する. その後, 熱溶解積層造形(Fused Deposition Modeling, FDM)型 3D プリントを用いて実際に供試体を成形し, X線 CT 撮像や負荷試験結果や数値構造解析結果から供試体の寸法精度や機械的特性・品質等々を評価する.

3. 研究の方法

- (1) 汎用 FEM コードによる位相(トポロジー)のサンドイッチ構造コア層への適用

汎用有限要素法(FEM)解析コード MSC Nastran (エムエスソフトウェア株)に実装されている位相(トポロジー)オプションを用いて, アルミ製スキン層を有するサンドイッチ構造コア層の3次元形態の形状最適化を実施する.

- (2) コア層の3Dプリンタ出力

コア層の最適化結果は, 有限要素(FE)メッシュとして得られる. 続いて, その FE メッシュを 3D プリント出力用三角形ポリゴン幾何データである STL ファイル形式に変換しコア層の3Dプリンタ成形を実施する. なお, 本研究では, コア層造形樹脂としては, 強度, 耐熱性, 靱性に優れた ULTEM™ 9085 (米国 SABIC イノベータープラスチック社, ポリエーテルイミド (PEI) とポリカーボネート(PC)とのポリマーブレンド)およびポリ乳酸(PLA)を使用する. その後, 薄いアルミ合金板をエポキシ樹脂にて貼り合せ, サンドイッチはり構造とする.

- (3) 特性評価試験と X線 CT 非破壊検査

実際に成形された供試体に対して, まず非破壊検査的に産業用マイクロフォーカス X

線 CT 撮像を実施する. その後, 静的3点曲げ試験をねじ式万能試験機(秤量 50kN)にて実施する.

4. 研究成果

- (1) 密度法(SIMP 法)の採用

形状最適化手法の一つである位相(トポロジー)最適化とは, 連続体内 Ω の任意点 x に 0 か 1 の 2 値を取り得る特性関数 x_Ω を設計変数として, 当初弾性特性 E_0 で満たされた設計領域に対して $E_i = x_\Omega E_0$ で表される最適分布の探索を行う手法である. これは構造最適化問題を材料配置問題へ置き換えたものとも解釈できる. ただし, 計算機を用いた有限な有効数字内で数値的に近似計算するための方法として, 厳密に 0 または 1 の 2 値のみ取り得る特性関数 x_Ω の設計空間を, 0 から 1 までの連続的な値をとりうる正規化密度(normalized density)に拡張した密度法(Solid Isotropic Material with Penalization, SIMP 法)が提唱されており, 本研究ではこれを用いる.

この密度法(SIMP 法)では, FEM 解析モデル中の個々の有限要素(FE)に設定された正規化密度 $x_i (i=1, 2, \dots, N)$ が設計変数となる. ここで N は位相最適化を試みる解析モデル中の設計領域 D 内での有限要素の総数である. 最適化構造を見出すことを試みるためには, 最適化前の弾性特性 E_0 に正規化密度 $x_i (0 \leq x_{\min} \leq x_i \leq 1)$ とペナルティ係数 $p \geq 1$ を使用し, 以下の式を用いる.

$$E_i = x_\Omega E_0 \approx x_i^p E_0 \quad (1)$$

$$x_i = x_{\min} \approx 0 \Rightarrow \text{void}, \quad x_i = 1 \Rightarrow \text{solid}$$

式(1)では, ペナルティ係数 p を設計変数である正規化密度 x_i に乗じることで中間密度を取ることがよりコストのかかることとなり, 結果的に正規化密度 x_i は 1 かまたは x_{\min} に近い値を取り易くなる. 具体的な位相最適化プロセスを目的関数として位相最適化領域における平均コンプライアンス,

$$c(\mathbf{x}) = f^T \mathbf{u} = \sum_{i=1}^N \mathbf{u}_i^T \mathbf{k}_i(x_i) \mathbf{u}_i \quad (2)$$

の場合を用いて以下説明する. 一般制約条件として, 最適化領域の総重量が最適化前と比べて M_{target} の割合以下というものを考え, さらに設計変数に対する側面制約条件もいっしょに, これらを式で表すと,

$$g(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N V_i \rho_i - M_{\text{target}} V_0 \rho_0 \quad (3)$$

$$= \left(\sum_{i=1}^N V_i x_i - M_{\text{target}} V_0 \right) \rho_0 \leq 0$$

$$g_i^{\text{low}} = x_{\min} - x_i \leq 0, \quad g_i^{\text{up}} = x_i - 1 \leq 0 \quad (4)$$

となる. ここで, 平均コンプライアンス $c(\mathbf{x})$ の最小化(荷重一定条件下では, ひずみエネ

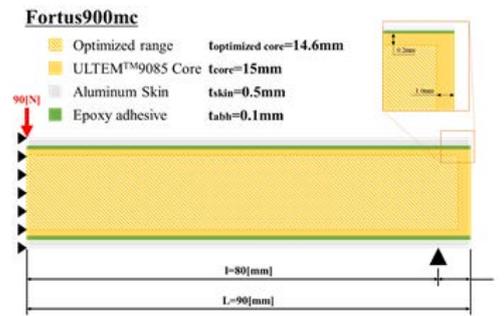
ルギー最小化・剛性最大化)問題となり、下記のように表すことができる。

$$\min_{\mathbf{x} \in N} \{c(\mathbf{x}) \mid g(\mathbf{x}) \leq 0, g^{\text{low}} \leq 0, g^{\text{up}} \leq 0\} \quad (5)$$

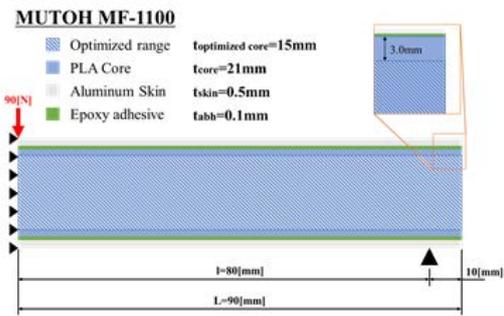
以上の問題を考えることは、ある定められた重量制約下において剛性の低下を抑えた構造形態を見出すことになる。これは本研究におけるサンドイッチ構造コア層へ位相最適化を施すことによって軽量かつ剛性を高めるための手法として用いることができる。

(2) 2種のサンドイッチ構造コア層の最適化

最適化には汎用コードのMSC Nastranを用いた。最適化対象となる2種類のサンドイッチ構造の境界条件を図1に示す。3点曲げの境界条件を与え、対称境界条件を設けた。そして使用材料にはスキン層にアルミニウム(A1050-H24)を用いた。コア層は使用する3Dプリンタに応じ材料を変更している。さらに、スキン層とコア層の接着を行うためのエポキシ樹脂(Araldite2000)も最適化計算を行う



(a) ULTEM™ 9085 をコア層材料に使用



(b) PLA をコア層材料に使用

図1 本研究で扱う2種のサンドイッチ構造

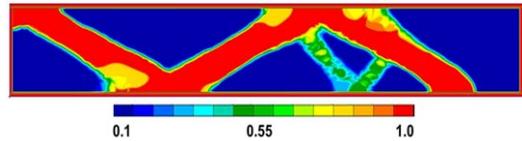
表1 材料特性

	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio	Density
ULTEM™9085	1.620	0.3	1.34
PLA	1.604	0.3	1.34
aluminium (skin)	70	0.35	2.705
epoxy resin (adhesion)	1.65	0.4	1.16

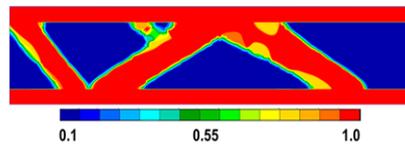
際に考慮した。表1には使用材料の物性値をまとめたものを示す。

(3) 最適化結果

図2には、最適化を施したサンドイッチ構造の正規化密度分布を示す。最適化されたコア層の形状が図中赤い部分で示されており、それが前述の境界条件に対してコンプライアンスを最小化するものである。正規化密度分布には中間的な密度も存在することが分かる。



(a) ULTEM™ 9085 をコア層材料に使用



(b) PLA をコア層材料に使用

図2 コア層の位相(トポロジー)最適化結果

(4) 3Dプリンタによるコア層の成形

次に熱溶解積層造形(Fused deposition modeling, FDM)型3Dプリンタを用いてコア層を成形する。正規化密度から中間密度分布無くすためにしきい値0.3を設けた。これによって、0.3以下の要素を無くすことでコア層の境界線を抽出する。図3には、スキン層を接着した最適化サンドイッチを示す。また、図4にはULTEM 9085 コア層サンドイッチ



(a) ULTEM™ 9085 をコア層材料に使用



(b) PLA をコア層材料に使用

図3 3Dプリンタ成形されたコア層

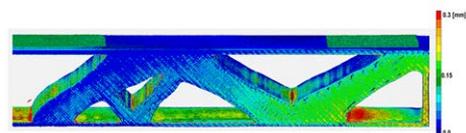


図4 寸法精度の検証(ULTEM™ 9085)

においての CT 撮像データを用いた寸法精度検証の結果を示す。

(5) 特性評価試験による平均コンプライアンスの比較

評価試験より得られた荷重 - 変位線図をもとに平均コンプライアンスの比較を行う。図 5 および 6 にそれぞれ最適化 ULTEM™ 9085 コア層および PLA コア層のサンドイッチはりに対する特性評価試験および FEM 構造解析により得られた平均コンプライアンスを示す。最適化 ULTEM™ 9085 コア層サンドイッチでは、試験片 1, 2 でコンプライアンスに差が生じていることがわかる。これは、スキン層接着時のエポキシ樹脂接着剤層が不均一であったためと考えられる。実験値 1 においては、構造解析結果と近い値を示していることがわかる。次に、最適化 PLA コア層

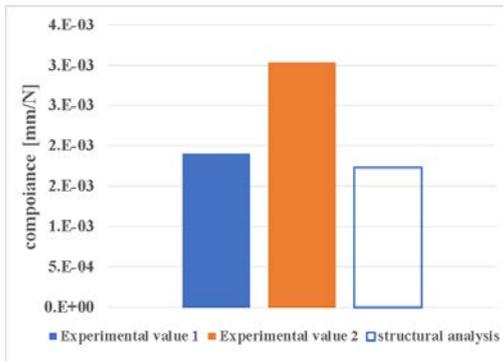
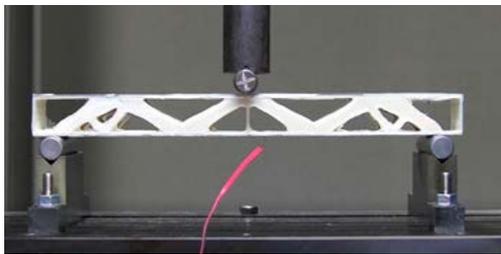


図 5 特性評価試験結果 (ULTEM™ 9085)

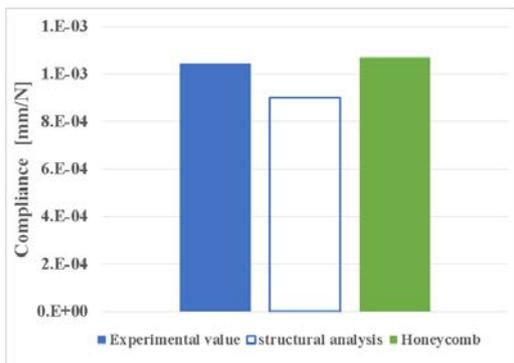


図 6 特性評価試験結果 (PLA)

サンドイッチにおいては、実験値、構造解析結果、ハニカムコア層サンドイッチのコンプライアンス値が近い値を示した。しかし、ハニカムコア層サンドイッチよりも最適化 PLA サンドイッチのコンプライアンス値が低く、つまり剛性が高くなったことが分かる。

(6) 結論

密度法による位相最適化を用いてサンドイッチ構造コア層の位相最適化形状を見出した。位相最適化コア形状とハニカム形状のコア層を 2 種類の熱溶解積層方式 3D プリントにより成形を行った。また、CT 撮像による寸法精度検証を行い、形状の成形性について評価した。成形した最適化コア層サンドイッチに対して評価試験の実施をし、平均コンプライアンス値を求めることによって構造解析結果及び、ハニカムコア層サンドイッチとの比較を行った。最適化から 3D プリントを用いて成形、寸法精度検証、評価試験の実施により本研究の目的である最適化と 3D プリントを組み合わせた手法の精度向上に向けて基礎的な検討を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 2 件)

- ① 鈴木 浩治, 石塚 圭悟, 荒井 進, ケナフ繊維系強化ポリ乳酸グリーンコンポジットの 3D プリント成形の検討, 紙パルプ技術タイムス, 査読無 Vol.61 No.6, 2018, pp.61-64.
- ② 鈴木 浩治, グリーンコンポジットの 3D プリント付加製造について, 紙パルプ技術タイムス, 査読無 Vol.60 No.4, 2017, pp.25-27.

〔学会発表〕 (計 37 件)

- ① 鈴木 浩治, 塚田 護公, 高戸谷 健, 位相最適化サンドイッチ構造梁の 3D プリント成形とその機械的特性評価, 日本機械学会関東支部 第 24 期総会・講演会, 2018.3.17, 電気通信大学 (東京都) .
- ② Kohji Suzuki, Mechanical properties of milled carbon fiber reinforced polymeric composites for additive manufacturing applications, 15th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition (JISSE15), 2017.11.28, Tokyo (Japan).
- ③ Morihiro Tsukada, Kohji Suzuki and Takeshi Takatoya, On 3D printing of topology-optimized core layers of sandwich beams and their mechanical properties validations, 15th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition (JISSE15), 2017.11.28, Tokyo (Japan).
- ④ 鈴木 浩治, SIMP 法による付加製造 CFRP 構造の形状最適化についての基礎検討, 日本機械学会第 30 回計算力学講演会 (CMD2017), 2017.9.18, 近畿大学 (大阪)

- 府) .
- ⑤ 塚田 護公, 鈴木 浩治, 高戸谷 健, SIMP 法により形状最適化されたサンドイッチ構造はりの3Dプリンタ成形精度の検討, 日本機械学会第30回計算力学講演会 (CMD2017), 2017.9.18, 近畿大学 (大阪府) .
- ⑥ 鈴木 浩治, 静的トポロジー最適化 CFRP シェル構造の振動・座屈挙動の検討, 日本機械学会機械力学・計測制御部門 Dynamics and Design Conference 2017 (D&D2017), 2017.8.31, 愛知大学 (愛知県) .
- ⑦ Kohji Suzuki, On a few additional considerations for applying density-type topology optimization to the case of additive manufacturing of fiber reinforced composites, 21st International Conference on Composite Materials (ICCM21), 2017.8.24, Xi'an (China).
- ⑧ Kohji Suzuki, Some suggestions for improvement of the topology optimization for additive manufacturing of fiber reinforced composites, The 6th JSME/ASME 2017 International Conference on Materials and Processing (ICM&P2017), 2017.6.6, Los Angeles (USA).
- ⑨ 塚田 護公, 鈴木 浩治, 高戸谷 健, 望月朝日, 位相最適化コア層を有するサンドイッチはりの力学特性評価, 第8回日本複合材料会議(JCCM-8), 2017.3.17, 東京大学 (東京都) .
- ⑩ 鈴木 浩治, 繊維強化複合材料への位相最適化の適用, 日本機械学会第12回最適化シンポジウム (OPTIS2016), 2016.12.6, 北海道大学 (北海道) .
- ⑪ 塚田 護公, 鈴木 浩治, 高戸谷 健, 位相最適化サンドイッチ構造コア層の3Dプリンタ成形に関する研究, 日本複合材料学会第41回複合材料シンポジウム (JSCM41), 2016.9.15, 高知工科大学 (高知県) .
- ⑫ 鈴木 浩治, 高戸谷 健, 位相最適化による構造部材局所の軽量化の試み, 日本航空宇宙学会構造部門第58回構造強度に関する講演会, 2016.8.4, 北海道大学 (北海道) .
- ⑬ Kohji Suzuki and Takeshi Takatoya, On Structural Forms Observed in Topology Optimized Layered and Sandwich-Type Composite Beams, 17th US-Japan Conference on Composite Materials (US-Japan 2016), 2016.8.2, Sapporo (Japan).
- ⑭ 鈴木 浩治, 高戸谷 健, “位相最適化試行による新たなサンドイッチ型 FRP 軽構造様式の検討”, 第7回日本複合材料会議 (JCCM-7), 2016.3.16, 京都テルサ (京都府) .
- ⑮ 塚田 護公, 鈴木 浩治, 高戸谷 健, “位相最適化による集中荷重を受けるサンドイッチ軽構造はりの高剛性化”, 日本機械学会 関東学生会第55回学生員卒業研究発表講演会, 2016.3.10, 東京工業大学 (東京都) .
- ⑯ 塚田 護公, 鈴木 浩治, 高戸谷 健, “サンドイッチ構造コア層の位相最適化による合理的軽量化とその3Dプリンタ成形の試み”, 日本材料学会複合材料部門委員会第7回自動車用途コンポジットシンポジウム, 2015.11.12, 同志社大学 (京都府) .
- ⑰ 高石 竜也, 鈴木 浩治, 高戸谷 健, “位相最適化コア層を有するサンドイッチ材の試み”, 日本材料学会複合材料部門委員会2015年度 JCOM 若手シンポジウム, 2015.9.26, 日本大学 (長野県) .
- ⑱ 鈴木 浩治, 高石 竜也, 塚田 護公, 高戸谷 健, “位相最適化されたサンドイッチ構造コア形態の構造強度に関する一考察”, 日本複合材料学会第40回複合材料シンポジウム (JSCM40), 2015.9.19, 金沢工業大学 (石川県) .
- ⑲ 鈴木 浩治, 高戸谷 健, “構造最適化を用いたサンドイッチ構造中層部形態の検討”, 日本機械学会 2015年度年次大会, 2015.9.16, 北海道大学 (北海道) .

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 浩治 (SUZUKI, Kohji)
千葉工業大学・工学部・教授
研究者番号: 70322427

(2) 研究分担者

高戸谷 健 (TAKATOYA, Takeshi)
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究領域リーダー
研究者番号: 40344254

(3) 研究協力者

塚田 護公 (TSUKADA, Morihiro)