

複数応力が作用する鋳造製品のトポロジー最適化計算を用いた 軽量・高剛性化形状設計方法の開発

鈴木 逸人, 上田 修生*, 本田 真也*, 武田 量*, 佐々木克彦*,
小椋 博樹**, 泉上 和範**

Development of Lightweight and High-rigidity Shape Design Method using Topology Optimization Calculation for Cast Products Subjected to Multiple External Stresses

Hayato SUZUKI, Shusei UEDA*, Shinya HONDA*, Ryo TAKEDA*, Katsuhiko SASAKI*,
Hiroyuki OMURA**, Kazunori IZUMIKAMI**

抄 録

トポロジー最適化は、外力に対して必要最低限の構造を計算することで、製品形状の軽量化や高剛性化を行う形状最適化方法である。しかし、複数の外力や応力が作用する状況に対するトポロジー最適化理論は確立されておらず、製品に対する応用例が非常に少ない。そこで本研究は、外力と熱応力が同時に作用する鋳物製品に対して、汎用のソフトウェアを用いてトポロジー最適化を行う方法について検討を行った。検討の結果、製品使用環境を再現した予備解析の結果から求めた代替荷重を用いて複数の応力により生じる変形を表現し、トポロジー最適化を行う方法を開発した。また、本方法を用いることで、軽量・高剛性な形状設計が可能であることを解析により示した。さらに、計算した最適形状について、鋳物として製作可能であり、従来の形状よりも熱応力による変形が少ないことを確認した。

キーワード：トポロジー最適化, 鋳造, 最適化設計, CAE

Abstract

Topology optimization is a shape optimization method that reduces the weight or increases the stiffness of a product shape by calculating the minimum necessary structure against external forces. However, topology optimization theory for multiple external forces and stresses has not been established, and there are very few applications to products. Therefore, this study investigates a method of topology optimization for cast products under external forces and thermal stresses using general-purpose software without modifying the theoretical equations. As a result, a topology optimization method was developed to represent the deformation caused by multiple stresses using alternative loads obtained from the results of a preliminary analysis that reproduced the product's operating environment. Also, it was possible to design a lightweight and high-rigidity casting product shape capable of tolerating thermal stresses and external forces using this method. Furthermore, the casting with the optimal shape was manufactured and a heating test under restraint conditions were conducted. As a result of the test, it was confirmed that there was less deformation due to thermal stress than the conventional shape.

KEY-WORDS : Topology optimization, Casting, Optimum design, CAE

* 北海道大学 * Hokkaido University

** 札幌高級鋳物株式会社 ** Sapporo Kokyu Imono Co., Ltd.

事業名：重点研究

課題名：AM技術を用いた高性能鋳ぐるみ部品製作法の開発

1. はじめに

製品設計において、3D-CADやCAEなどコンピューターを使用した設計技術の活用が進み、多くの企業等で使用されている。3D-CADは、設計者が形状をコンピューター上で設計し、三次元モデルとして出力する。近年では、設計支援のため、製品の形状を半自動的に最適化することが可能となる最適化ツールが汎用のCADやFEM (Finite Element Method) ソフトウェアパッケージに内蔵されることが多くなった。半自動的に形状を最適化するツールの一つにトポロジー最適化がある。

トポロジー最適化は製品の寸法設計に限らず、設計領域内の材料分布を変化させ、孔の数(位相)の変更も可能とする自由度の大きい手法として着目されている。トポロジー最適化を設計手法として用いることで、構造の軽量化、材料の節約、製造性の向上、設計者の知識だけでは考えつかないような形状の提案が期待されている。トポロジー最適化手法の提案初期は、機械的な外力に対するトポロジー最適化が開発されていた。現在、トポロジー最適化を構造物の固有振動数に関する問題や高温環境の伝熱、熱応力に関する構造設計問題、翼や流路の流体力学の問題など適用範囲の拡大に関して研究が行われている¹⁻³⁾。

トポロジー最適化手法を用いた設計は、これまでの設計者主観の「最適と思われる」設計に対して、構想設計の段階で下流工程における設計要件を包括した制約条件を導入することで、理論的に正しい解を得ることが可能である。しかし最適化は、目的関数、制約条件の設定、結果検証方法等の組み合わせごとに無限の答えが得られるため、これらを適切に設定しなくてはならない。この解析設定の複雑さや解析結果の検証の難しさ、最適化結果の再現モデル作成の困難さ等から、実際の製品にトポロジー最適化が適用される機会は未だ少ない。特に、機械的な外力のみではなく、外力と熱応力が同時に作用する製品に対してトポロジー最適化を適用した最適化工程に関する報告はない。

そこで本研究では、外力と熱応力を考慮したトポロジー最適化の実製品への応用例として、高温炉内で用いられている運搬用トレー鋳物製品について、トポロジー最適化を適用し、境界条件の設定方法、最適化結果を参照した改良モデルについて検討した。

2. トポロジー最適化理論と課題

構造最適化は、ある設計領域に対して境界条件を与え、所望の性能が最大となるような構造・形状を求める。構造最適化は、寸法最適化、形状最適化、トポロジー最適化に大別される(図1)。寸法最適化は、板厚、断面形状特性が設計変数となり、内部の肉抜きなど構造の大幅な変更はない。形状

最適化は、外形形状が設計変数となり、形状や設計領域内部設置した穴形状を変化させることができる。トポロジー最適化は、3つの手法の中で最も自由度が高い手法であり、外形形状の変化に加え、元形状に設定していない穴等の空間の追加、穴の数と形状を変化させることができ、設計領域内の材料分布問題ともいえる手法である。このように外形形状変更だけでなく、穴の数などの形態変更も許容させることで、外力に対する剛性を保持したまま構造物の軽量化が可能な手法である。

トポロジー最適化の計算手法は、対象とする設計領域 Ω を包含する固定された設計領域(固定設計領域) D と、次式の特異関数 χ を導入する⁴⁾。

$$\chi(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in \Omega \\ 0 & \text{if } x \in D \setminus \Omega \end{cases} \quad (1)$$

図2に概要を示す。ここで、 x は固定設計領域における任意の位置座標を表す。特異関数 χ は固定設計領域 D における材料の有無を表していることから、 χ に関する最適化問題を考えると、トポロジー最適化は固定設計領域における材料分布問題に帰着する。これにより、固定設計領域において任意の形状と形態を表現することができる。

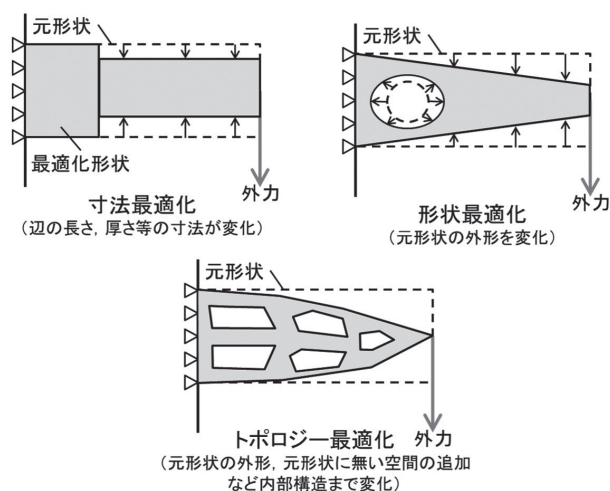


図1 寸法最適化、形状最適化、トポロジー最適化の各手法における形状変化イメージ

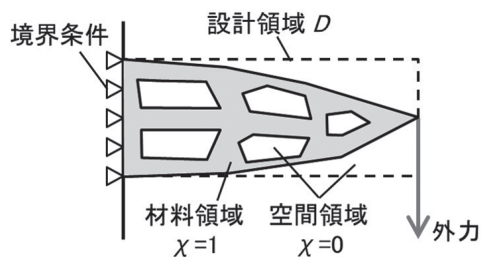


図2 トポロジー最適化の設計概念

トポロジー最適化は目的関数にコンプライアンスを設定することが主流となっており、決められた領域体積、制約条件下で構造物のコンプライアンスを最小化している。コンプライアンスは一定外力のもと次式で定義される⁵⁾。

$$Compliance = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV \quad (2)$$

ここで、 σ_{ij} は応力、 ε_{ij} はひずみ、 V は領域の体積を表す。すなわち、コンプライアンスは、一定外力の下で弾性体内に蓄えられるエネルギーのことで、応力のした全仕事、外力のなす仕事に等しい。コンプライアンスを最小化することで構造物の剛性が最大化される。

トポロジー最適化は、基本的に設計領域に作用するある外力に対して理論的な最適解を提示する手法である。一方、この外力が熱応力と圧縮、曲げ応力のように複数種類の応力が作用する場合や動的な応力つまり作用する応力が時刻により変化する場合、これらを考慮可能な理論のソフトウェアへの実装が行われておらず、計算することができない。そこで本研究は、現状のソフトウェアを用いて、複数の応力が作用する設計対象において、適切に解析条件を設定する方法について検討した。

3. 計算方法

3.1 最適化対象

本研究では、高温炉内を運搬されるトレー製品を設計対象とした。図3にトレー外観と使用環境、現行形状の模式図を示す。本トレーは、運搬物を積載した状態で高温炉内をプッシャーにより押し込まれながらレール上を移動する耐熱鋳鋼 JIS SCH42を用いた鋳造品である。トレーには、高温炉内と室温環境がラインにより連続的に運搬されることで発生する繰り返しの熱荷重、プッシャーによりトレー同士が押し込まれることによる接触荷重、搭載物の重量、積載物の荷下ろし時にかかる荷重等、様々な外力が作用する。繰り返し使用し、一定以上の変形が発生した場合に使用不可となるため、長寿命化のための変形低減及びトレー持ち上げ工程の負荷低減のための軽量化を両立させる形状変更が求められている。本研究では、熱応力と外力が作用する環境下において軽量化と剛性向上の両立を目指し、トレー裏面に対してトポロジー最適化による形状設計を行った。なお、運搬物を積載する表面形状は設計変更ができないため、レールと接するトレー裏面が設計対象領域とした。裏面の現行形状は、設計者の経験により設計したハニカム形状が採用されている。

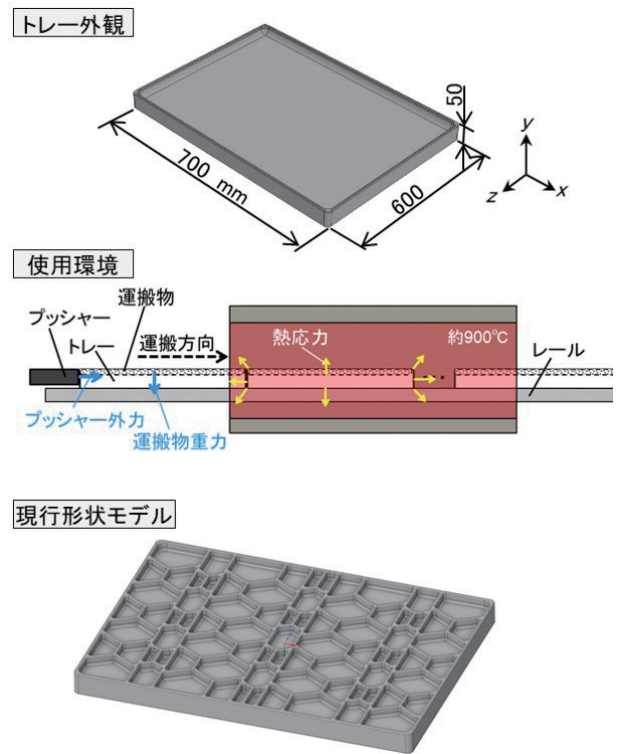


図3 トレー外観および使用環境、現行形状モデル

3.2 ソフトウェア・条件設定

本研究ではANSYS Workbench 2021 R1に搭載されているトポロジー最適化ツールを用いた。トポロジー最適化の解析を行うにあたって、本ソフトウェアには4つの最適化手法が用意されており、密度法、レベルセット法、モーフィング、ラティス最適化から選択する必要がある。今回の重量減少、高剛性化を目的とした場合、解析における目標値設定の特性から、手法として密度法、レベルセット法の2つが考えられる。密度法は材料のある、なしを示す関数を0から1までの正規化された密度で表現する本ソフトウェアでのデフォルトとなる方法である。レベルセット法は、領域の境界を移動させて最適構造を得る方法である。予備解析を、制約条件を反映した結果が得られた「密度法」を採用した。

次に、最適化の目的関数を選択する。コンプライアンス最小化、質量最小化、体積最小化、任意の判定値の4種類が用意されており、本研究では、高剛性化と質量低減の両立を目的とするため、すべての要素のひずみエネルギーの合計によって定義されるコンプライアンスが最小化されることで構造物の剛性が最大化される「コンプライアンス最小化」を採用した。

最後に、制約条件を指定する。制約条件には応答拘束、製造制約、AM張り出し拘束があり、さらに応答拘束には、質量、体積、重心、慣性モーメント、グローバルVon Mises応力、局所Von Mises応力、変位、反力、コンプライアンスがある。トレー設計では、現行のトレーの解析で得られた応力

と変位を基準にするため、「グローバルVon Mises応力」、「変位」を拘束した。また、製造制約には、寸法範囲を指定するメンバーサイズ、型製造を考慮した引き抜き方向、押し出し、回転、対称の5つがあり、設計対象のトレーは鋳造で製造されるため、「メンバーサイズ」、「引き抜き方向」の2つを制約した。

3.3 最適形状設計手順

本研究では、複数応力が作用する設計対象に対して現状のソフトウェアを用いてトポロジー最適設計を実現するための方法を検討した。図4に本研究で用いたトポロジー最適設計方法のフローチャートを示す。はじめに現行品の3D-CADモデルを作成する。解析に必要なトレー材料の材料物性値を導入する。次に、トポロジー最適化計算で必要となる荷重を求めため、予備解析を行う。解析コスト低減のため、本研究の解析はすべて1/4モデルを用いた。予備解析の結果が実際の現象と一致し、予備解析の再現性を確認したのち、予備解析結果を元にし、複数応力状態による変形を再現した代替荷重を求めた。この代替荷重を用いてトポロジー最適化計算を行った。最後に、現行形状の解析結果との比較による設計検証を行った。設計検証では、まずトポロジー最適化計算結果で得られたメッシュデータを参照し、設計検証用ソリッドモデルを作成した。次に、設計検証用ソリッドモデルに対して予備解析と同様の条件で解析を行った結果を現行形状モデルの解析結果と比較し、目標値を達成しない場合は、構造部材の配置（位置、角度）を変更し、再設計を繰り返した。目標値を達成した形状を本研究で得られた最適形状とした。

表1から3に本研究で用いた各種物性値を示す。本研究では、温度依存弾塑性材料物性値を導入することで解析の高精度化を図った。本研究で使用した物性値は、試験片により各種試験を行った結果を用いた。

3.4 予備解析方法

予備解析は製品の使用環境を再現した解析を行い、トポロジー最適化計算に必要な代替荷重を決定することを目的として実施した。本研究では、予備解析として過渡伝熱解析、静的構造解析を行った。メッシュは、正四面体メッシュを用い、メッシュサイズは7mmとした。予備解析条件は、現行形状モデルに対して解析を行い、解析結果が現行の変形状態を再現できているかなどの妥当性を評価することで決定した。決定した予備解析条件において、トレー裏面が中実である中実モデルに対して予備解析を行い、代替荷重を決定した。次に、現行形状モデルに中実モデルで決定した代替荷重と同じ荷重条件を与え、このときの最大相当応力と図3に示すy方向最大変位をトポロジー最適化計算における制約条件として設定した。

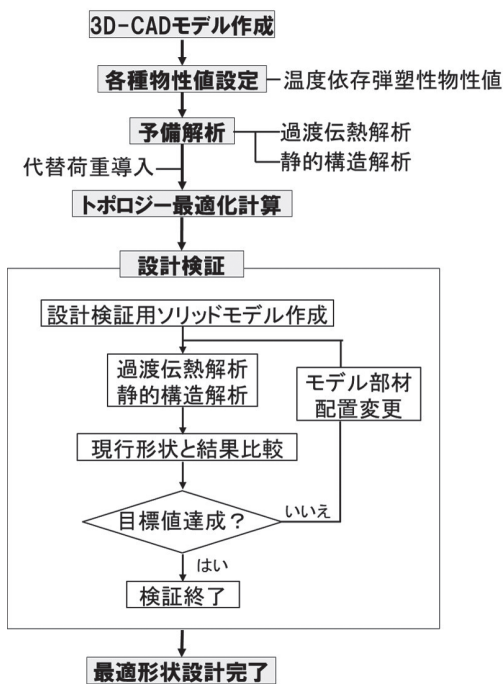


図4 本研究の最適形状設計手順

表1 解析に用いた密度 (SCH42)

温度 [°C]	密度 [kg/mm ³]
25	8.181×10 ⁻⁶
940	7.810×10 ⁻⁶

表2 解析に用いた各種材料特性値 (SCH42)

温度 [°C]	弾性率 [MPa]	ポアソン比 [-]	降伏強さ [MPa]	接線係数 [MPa]	線膨張係数 [°C]
20	2.17×10 ⁵	0.28	255.92	2977.4	1.33×10 ⁻⁵
50	-	-	-	-	1.33×10 ⁻⁵
100	-	-	-	-	1.35×10 ⁻⁵
150	-	-	-	-	1.37×10 ⁻⁵
200	-	-	-	-	1.39×10 ⁻⁵
250	-	-	-	-	1.41×10 ⁻⁵
300	-	-	-	-	1.43×10 ⁻⁵
350	-	-	-	-	1.44×10 ⁻⁵
400	85125	0.29	190.27	3255.8	1.46×10 ⁻⁵
450	-	-	-	-	1.48×10 ⁻⁵
500	-	-	-	-	1.50×10 ⁻⁵
550	-	-	-	-	1.53×10 ⁻⁵
600	-	-	-	-	1.56×10 ⁻⁵
650	-	-	-	-	1.58×10 ⁻⁵
700	-	-	-	-	1.60×10 ⁻⁵
750	-	-	-	-	1.62×10 ⁻⁵
800	54551	0.32	160.74	840.88	1.64×10 ⁻⁵
850	-	-	-	-	1.66×10 ⁻⁵
900	33246	0.33	91.008	422.9	1.68×10 ⁻⁵
940	-	-	-	-	1.69×10 ⁻⁵

表3 解析に用いた熱物性値 (SCH42)

温度 [°C]	熱伝導率 [W/mm·°C]	比熱 [mJ/kg·°C]
25	0.00959	4.49×10 ⁵
940	0.0259	6.55×10 ⁵

過渡伝熱解析は、最高温度950℃の炉内で2時間熱荷重を受けた後、20℃室内温度で5時間冷却されるものとした。対称面以外の表面の熱伝達係数は $5 \times 10^{-6} \text{ W/mm}^2 \cdot \text{℃}$ とし、対称面の2面は断熱条件とした。

過渡伝熱解析により得た温度履歴及び使用環境を再現した機械的な境界条件を導入し、静的構造解析を行った。モデルの拘束条件は、1/4モデルの対称面である2面に対称性を考慮した「摩擦なし支持」、トレー底面のレールと接触する部分と隣のトレーと接触する面に接触を再現した「圧縮のみ支持」、トレーの熱膨張を妨げないようトレー底面の一点に対して x 方向変位をフリー、 y 方向変位を0 mm、 z 方向変位を0 mmとなるように拘束した。

3.5 トポロジー最適化計算方法

トポロジー最適化は、設計領域の材料領域を減少させる計算を行うため、既に空間となっている設計空間に新たに物体を出現させることができない。このため、トポロジー最適化計算の開始モデルは、設計領域が中実形状の3D-CADモデル（中実形状モデル）を用いた。中実形状モデルに予備解析で決定した代替荷重を与え、3.2節で設定した条件に加え、現

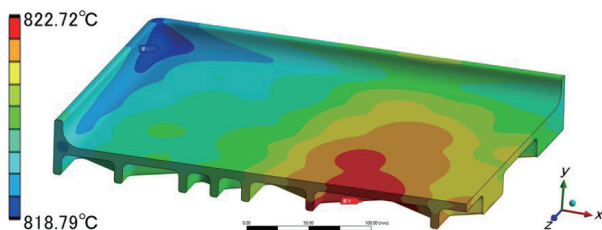


図5 現行形状モデルトレー温度分布（7200秒時点）

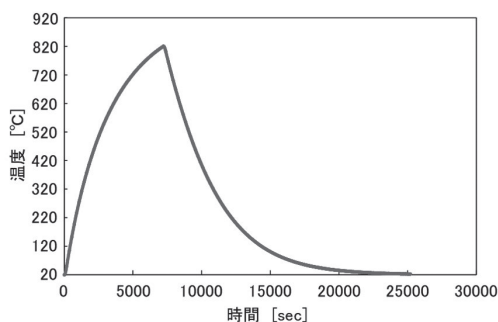


図6 現行形状モデルトレー平均温度

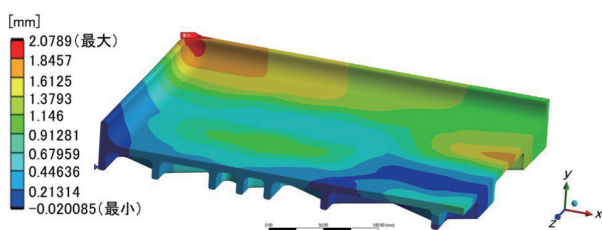


図7 現行形状モデル静的構造解析結果（25200秒、 y 方向変位分布）

行のトレーから設計領域重量の10%減少を目標の目安として質量拘束条件を中実モデルの46%、製造制約で「引き抜き方向」 y 軸と逆方向を与え、「メンバーサイズ」で部材の厚さの最小値を7 mmとして計算を行った。また、レールと接触する部位は、材料が残るよう設定した。

4. 解析結果

4.1 予備解析条件の妥当性検証

現行形状モデルに対して行った過渡伝熱解析結果を図5、図6に示す。図5は、950℃の環境温度の最終時刻である7200秒時点の温度分布である。肉厚が薄いトレー中心部付近の温度が若干高く、肉厚の厚いふち部分が若干低い傾向となるが、全体が818-822℃まで昇温した。図6は、0から25200秒のトレー平均温度の変化である。トレーは周囲環境に合わせて平均温度が高くなり、約2時間後である7200秒付近でおよそ820℃の最高平均温度となった。周囲環境温度が下がると平均温度が低下し、5時間後である25200秒には周囲環境温度の20℃におおよそ収束した。この過渡伝熱解析の結果をモデルの温度変化として静的構造解析へ導入し解析を行った。

図7に静的構造解析の最終25200秒時点の y 方向変形量の結果を示す。 y 方向は図中に示したようにトレーの受け皿面に垂直な方向である。トレーが熱膨張し、収縮した後の変位の結果であるため、弾性変形が取り除かれ、ほとんどが塑性変形による変位である。トレーの四つ角の部分が y 方向に最も変位した。この変位分布は、実際の製品と同じ変形であった。したがって、本予備解析条件は、現実の使用環境を十分に表現しており、実製品のトレーの四つ角の反り変形の原因は、高温炉の熱による熱変形と周囲環境の拘束による塑性変形であると確認することができた。

4.2 代替荷重・制約条件決定

図8に中実モデルの静的構造解析で得られた7200秒時点の最大主応力分布、図9に引張方向最大主応力ベクトル分布を示す。7200秒は、トレーの最大平均温度を示す時刻、つまり熱変形が最も大きくなる時刻である。隣のトレーと接触する面に x 方向に最大主応力が分布し、トレー四つ角の曲面に y 方向に最大主応力が分布した。この結果から、代替荷重を隣のトレーと接触する面に「 x 軸負の方向に5000 N」、四つ角の面に「 y 軸正の方向に5000 N」とした。また、2つの対称面に対称性を考慮した「摩擦なし支持」、対称面と対称面が交わる辺の1点を「固定」した。

この代替荷重を用いた静的構造解析を現行形状モデルに対して行い、相当応力、変位を取得した。図10に相当応力分布、図11に y 方向変形量分布を示す。この結果より、最大相当応力424.29 MPa、最大 y 方向変位4.7813 mmをトポロジー最適化の制約条件として与えることとした。

4.3 トポロジー最適化計算結果

図12にトポロジー最適化計算結果を示す。密度法を用いたため、荷重に対する構造の寄与度によって特性関数の値が0から1までの数値で表される。本結果では、表示される密度の閾値を0.5と設定し表示した。設計領域外のレール接触部の部材、レールと垂直方向の対称面付近の部材、四つ角に向かうように伸びる対角線状の部材が現れる結果となった。

4.4 設計検証

トポロジー最適化計算結果を参照し、再設計を繰り返した結果得られた本研究の最適形状モデルを図13に示す。トポロジー最適化計算結果で得た四つ角に向かうように伸びる対角線状の部材の配置及びこの部材を補強する部材の追加を検討し、鋳造品として必要な角Rを与えた。図14に最適形状モデルに対して予備解析と同条件で行った過渡伝熱解析及び静的構造解析により得た25200秒時点のy方向変位分布を示す。

また、表4に現行形状モデルとの解析結果の比較を示す。最終的な最適形状モデルは、現行形状モデルから設計領域重量が8.09%軽量化され、炉内環境を再現した過渡伝熱・静的構造解析のy方向最大変形量が11.2%低下し、四つ角の反り変形が減少することが確認された。

以上より、本研究で開発した複数応力により発生する変形を予備解析から求めた代替荷重を用いたトポロジー最適化計算を行う方法を用いることで、現行形状から重量を減らし、かつ、四つ角の反りの変形量を減少させる形状を設計できることが示された。

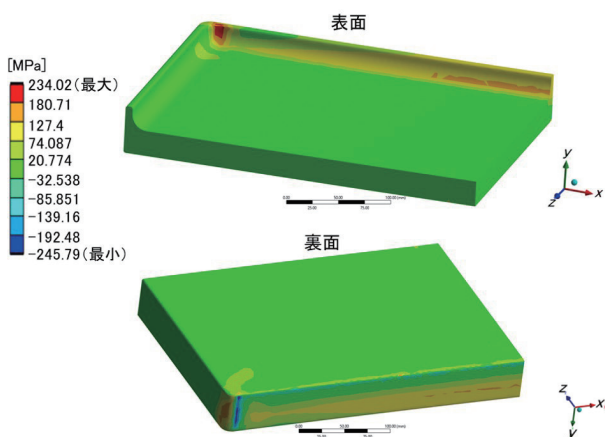


図8 中実モデル最大主応力分布 (7200 秒)

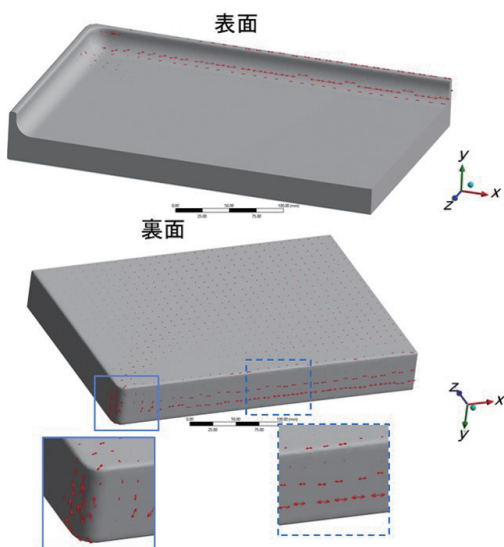


図9 中実モデル最大主応力ベクトル分布 (7200 秒)

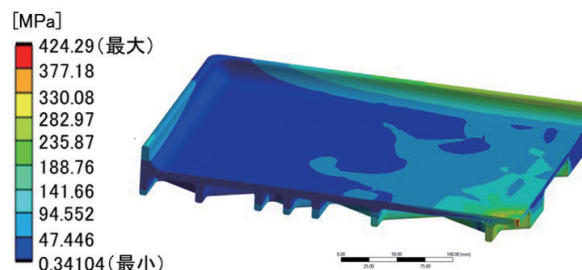


図10 代替荷重を与えた現行形状モデルの相当応力分布

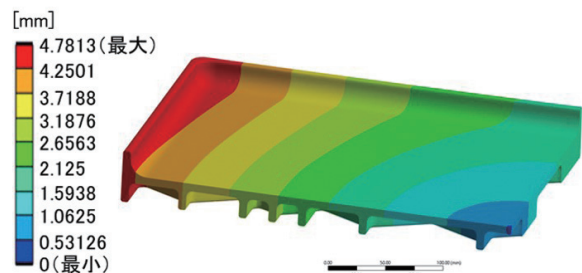


図11 代替荷重を与えた現行形状モデルy方向変位分布

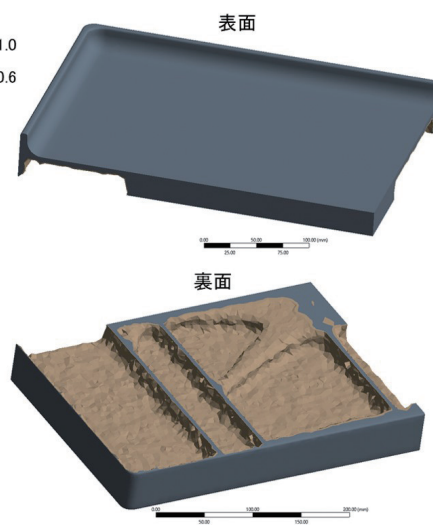


図12 トポロジー最適化計算結果

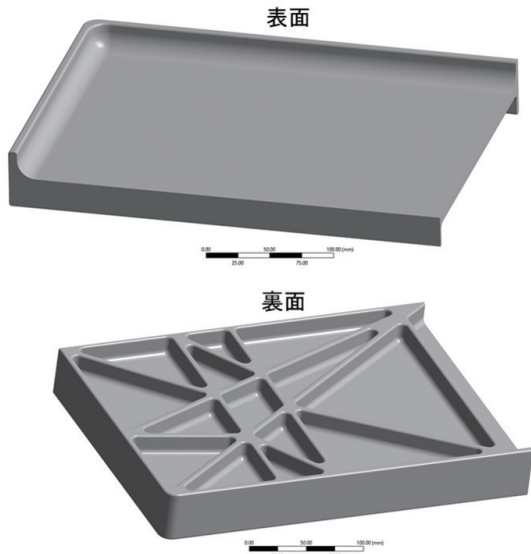
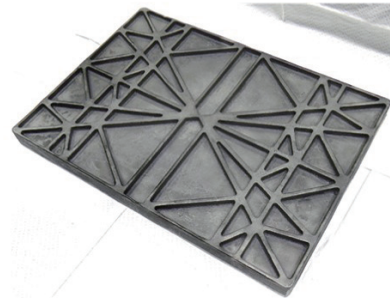
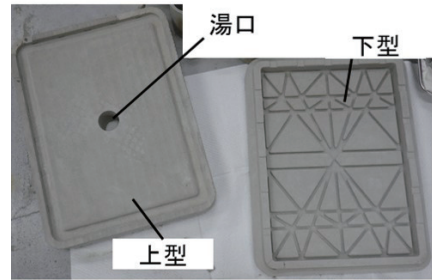


図 13 本研究で得た最適形状モデル



評価用鋳物(最適形状, 裏面)
図 15 鋳型及び最適形状の評価用鋳物

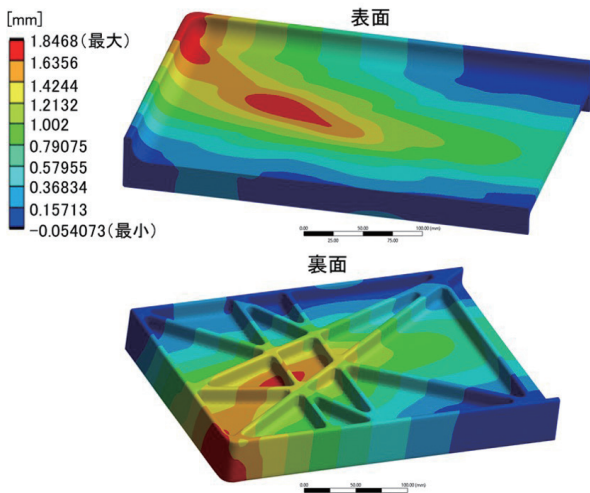


図 14 最適形状モデル解析結果 (y方向変位分布, 25200 秒)

表 4 現行形状モデルと最適形状モデルの解析結果比較

	現行形状	最適形状
体積 [mm ³]	1.094×10 ⁶	1.064×10 ⁶ (-8.09%)
y 方向最大変位 [mm]	2.079	1.847 (-11.2%)

5. 最適形状の評価用鋳物製作及び加熱変形試験

5.1 評価用鋳物製作方法

本研究で求めた最適形状の製造性と铸造品による性能検証を行うため、実製品40%サイズの評価用鋳物を製作した。評価用鋳物は、結合剤噴射法の積層造形装置 (Projet 660 Pro, 3D Systems社) を用いてセメント系鋳型材料 (TCaST, 太平洋セメント社) により造形した鋳型に球状黒鉛鋳鉄を注

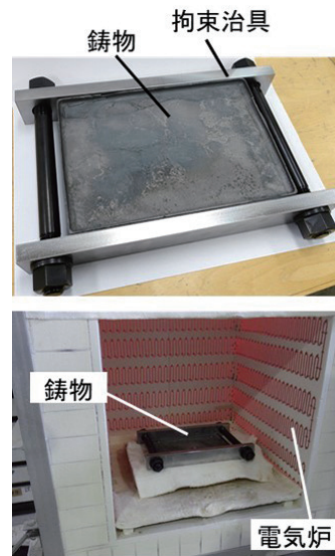


図 16 評価用鋳物拘束状態および炉内設置方法

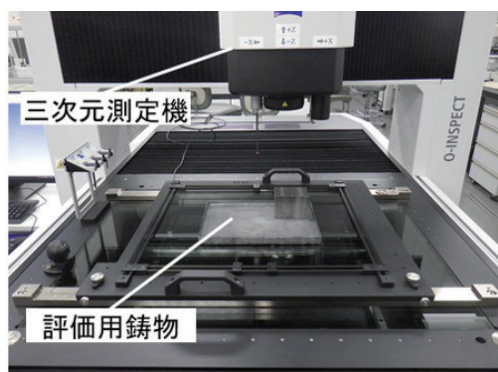


図 17 寸法計測方法

湯し製作した。図15に鋳型及び方案等を切断し仕上げ加工を行った鋳造品を示す。同様に現行形状についても鋳物を製作した。

5.2 加熱変形試験方法及び結果

使用環境を模擬した拘束状態において加熱試験を行った。加熱条件は、900℃に昇温した電気炉内に拘束状態の評価用鋳物を設置し、2時間加熱した後に炉内で冷却した。図16に鋳物拘束状態と炉内設置状況を示す。加熱試験前後において3次元測定機（O-INSPECT863, カールツァイス社）により四つ角の変形量を計測した（図17）。四つ角の変形量の平均と標準偏差は、現行形状が 1.5 ± 0.7 mm, 最適形状が 0.8 ± 0.4 mmであった。最適形状は現行形状に対して変形が少ないことを確認した。

本研究で得られた最適形状は、鋳造品として製作可能であり、解析結果と同様に熱応力に対して高剛性な形状であることを確認した。

6. おわりに

本研究は、熱応力及び外力の複数応力が作用する鋳造製品に対して、トポロジー最適化を用いて軽量・高剛性な形状を計算する方法を開発した。本研究の方法は、汎用の解析ソフトウェアを用いて、予備解析や構造再設計を行う解析方法の工夫により最適形状を求めることができる。トレー製品以外に対しても応用が可能な方法であり、他の製品を対象として今後研究を継続する予定である。また、道内鋳物製造業の高付加価値な製品開発への応用展開を目指し、本技術の普及に努める。

参考文献

- 1) 伊賀淳郎, 西脇眞二 他: 設計変数依存性を考慮した熱伝達問題に対するトポロジー最適化, 日本機械学会論文集 (C編), 74巻746号, pp. 118-127, (2008)
- 2) T. Borrvall and J. Petersson: Topology optimization of fluids in Stokes flow, International journal for numerical methods in fluids, Vol. 41(1), pp. 77-107, (2003).
- 3) 岸本直樹, 野口悠暉 他: レベルセット法に基づく複数材料を対象としたトポロジー最適化, 日本機械学会論文集, Vol. 83(849), p. 17-00069, (2017)
- 4) 西脇眞二, 泉井一浩 他: トポロジー最適化, 日本計算工学会編, 丸善出版, (2013)
- 5) 田村 武, 西藤 潤: 有限要素法および境界要素法による弾性体のコンプライアンス最小形状の探索, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp. 75-84, (2003)