

板金製造制約下におけるインストルメントパネルビームの高解像度トポロジー最適化

High-resolution topology optimization of instrument panel beams under sheet metal manufacturing constraints

和田 有司¹⁾, 檜山 武士, 長坂 圭²⁾, 西口 浩司³⁾, 岡澤 重信⁴⁾, 坪倉 誠^{5) 6)}
Yuji Wada, Takashi Kashiyama, Kei Nagasaka, Koji Nishiguchi, Shigenobu Okazawa, and Makoto Tsubokura

¹⁾東京工業大学 未来産業技術研究所 (〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-R2-26, E-mail: ywada@sonic.pi.titech.ac.jp)

²⁾スズキ株式会社 (〒 432-8611 静岡県浜松市中央区高塚町 300)

³⁾名古屋大学 大学院工学研究科 土木工学専攻 (〒 464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

⁴⁾山梨大学 工学域 機械工学系 (〒 400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

⁵⁾神戸大学 システム情報学研究科 (〒 657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

⁶⁾理化学研究所 計算科学研究センター (〒 650-0047 兵庫県神戸市中央区港島南町 7-1-26)

The instrument panel beam at the front of the vehicle body is often made of hollow tubes, but recently, one-piece molding has been considered to reduce the number of parts. Stiffness maximization for multiple load cases with/without plate filter application is performed on an instrument panel beam member using a BCM-based voxel topology optimization framework. One hundred million degrees of freedom finite element analysis was performed in the Fugaku supercomputer environment. The stiffness performance and manufacturing feasibility of the optimal shape is compared with the existing parts. As a result, users can select the degree of thin plate formation by adjusting the radius of influence of the thin plate filter.

Key Words : Topology optimization, Finite element method, Building-cube method, Instrument panel beam, Manufacturing constraint

1. 背景

自動車構造におけるインストルメントパネルビーム部材^[1]は車体前部のインストルメントパネル部品とステアリングコラムの保持のためにAピラー同士および場合によってはフロアと接続する形で配置される。インストルメントパネルビーム形状は剛性要件が支配的で、概ね線形荷重要件で設計される部材である。主たる構造部材として中空管がよく採用されるが、部品点数の削減の観点から近年ではダイキャスト材による一体成型によるものも採用されており、構造最適化による高剛性・低重量化の余地があると考えられる。

トポロジー最適化^[2-5]は、許容された設計空間の中で目的関数を最大または最小となるよう部材・材料の配置を空隙含めて決定する最適化手法のひとつで、設計者に有効な示唆をもたらすものとして、近年産業応用が進んでいる。三次元構造物の設計にはボクセルトポロジー最適化^[3]がよく知られており、大設計領域で三次元構造物を設計する際に剛性マトリクスの再計算が不要であるため大きく計算量を削減することができる。

著者ら^[6,7]は大領域・高解像度・低体積制約を実現するトポロジー最適化フレームワークの構築と最適化性能に関する検討を行っている。理化学研究所により開発されている複雑流体・構造現象を大規模計算するための共通基盤シミュレーションフレームワークであるCUBE^[8]は、Building Cube Method(BCM^[9])を利用

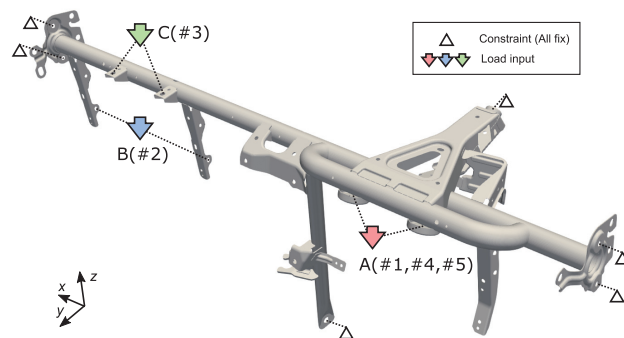


Fig.1 Existing instrumental panel beam model and boundary conditions for the optimization.

することでメモリ分散環境での高い並列化効率を得ることできる。BCMは解析空間をCUBEと呼ばれるセル集合で分割することにより直交格子による離散化を行い、CUBEにおける流体解析は埋め込み境界法で形状の表現を行う。西口らはBCMを利用したVOF法によるオイラー型有限体積法による強連成の流体構造連成解析^[10]を、嶋田らはマーカー粒子を用いた流体構造連成解析を提案している^[11]。著者らはBCMにおいて有限要素法によるトポロジー最適化を実装し、自動車フレームの剛性最大化や固有値最大化、非等方性フィルタを用いた板金制約について検討している^[12]。

Table1 Load case and direction for the load inputs.

Load case	Load A	Load B	Load C
#1	(0,0,1)	(0,0,0)	(0,0,0)
#2	(0,0,0)	(0,0,1)	(0,0,0)
#3	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,1)
#4	(1,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)
#5	(0,1,0)	(0,0,0)	(0,0,0)

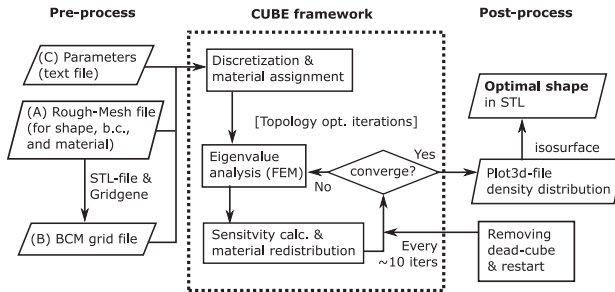


Fig.2 Procedure of topology optimization using CUBE framework.

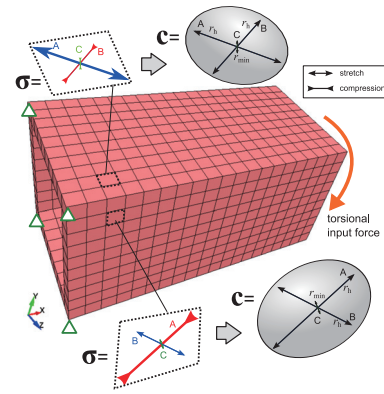
トポロジー最適化を用いてインゴット状の設計領域から中空管のような薄板構造を導出するには、期待する薄板の厚みを基準とする詳細な要素解像度を必要とする。本研究で使用するフレームワークは数十億自由度条件下でも並列性能を維持してトポロジー最適化を実施することができる。また、要素離散化がフレームワーク内で完結するため、ユーザーは軽量の格子ファイルと形状ファイルのみを編集すればよく、かつCADソフトから出力される計算には不向きな STL ファイルから立体形状を生成できるため、プリ処理の労力を大幅に低減することができる。

本稿ではスーパーコンピュータ富岳^[13]を利用した大並列環境において、インストルメントパネルビーム部材を対象とした高解像度・低体積制約のトポロジー最適化の実施を行う。ビーム部材各部に作用する複数荷重の影響の寄与および板金製造制約を適用したときの最適形状および剛性性能について、板金制約パラメータの調整による既存の中空管形状との類似および相違点について検討する。

2. トポロジー最適化

(1) 既存モデルと荷重条件

Fig. 1 にモデル作成の基準となる既存のインストルメントパネルビームモデル、および今回対象とする荷重・拘束境界条件を示す。両方の A ピラーに接続する合計 4 点、ステアリング部前面、およびフロアに接続する下部のボルト穴近傍が全自由度の単点拘束がされている。また入力についてはステアリング部に荷重点 A、グローブボックス接続部に荷重点 B、助手席エアバッグ保持部に荷重点 C を設定する。Table 1 に今回対象とする荷重ケース #1–#5 と図中の荷重点 A, B, C への入力荷重とその方向について示す。荷重の大きさについてはいずれも合計で 1 N となるよう、荷重が設定される対象節点に対して均等に分配される。

Fig.3 Concept of plate manufacturing condition using stress tensor σ for filtering tensor c .

(2) 最適化フレームワーク

Fig.2 にボクセルトポロジー最適化フレームワークを示す。トポロジー最適化はユーザーが準備した (A) 形状ファイルと (B) BCM グリッドファイル、および (C) 最適化設定ファイルで動作する。形状ファイル情報から各セルに初期密度情報を設定する離散化処理はプログラム中で長くとも数十分で完了し、SIMP 法^[4]による剛性行列と CG 法ソルバによる有限要素解析と最適性規準法^[2]による密度再分配が反復される。

(3) 板金フィルタ

トポロジー最適化においては要素単位で濃淡が交互に出現してしまうチェッカーボード問題や非常に細かいフレーム構造の抑制のために、目的関数 Θ に対する感度 $f = -\rho \frac{\partial \Theta}{\partial \rho}$ にフィルタをかけるのは多くの手法が知られている^[4]。その最も基本的なものは近傍要素感度を用いた陽的フィルタである。

$$\bar{f}_j = \frac{\sum_i w(r_{ij}) f_i}{\sum_i w(r_{ij})} \quad (1)$$

$$w(r_{ij}) = \max(r_h - r_{ij}, 0) \quad (2)$$

$\bar{f}$ がフィルタリング後の感度で、 r_{ij} は要素 i, j 間の距離である。影響半径 r_h を大きくとり最小メンバサイズを制限する場合には、ヘルムホルツ方程式を解く陰的なフィルタ^[14]も用いられる。

$$\nabla \cdot (-c \nabla \bar{f}) + \bar{f} = f \quad (3)$$

c は影響領域に関する正定値テンソルである。

板金フィルタ^[12]はテンソル c の意味する回転楕円体のサイズや向きを制御して、薄板で形成される構造体を導くものである。Fig.3 に応力テンソルをフィルタテンソル c に変換する過程を示す。

$$c = V \left(\frac{D}{2\sqrt{3}} \right)^2 V^T \quad (4)$$

$$D = r_{min} I + r_h H(\bar{\sigma}) \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$H(\bar{\sigma}) = \frac{1}{2} \left[1 + \tanh \left(\alpha \frac{\bar{\sigma} - \sigma_0}{\sigma_0} \right) \right] \quad (6)$$

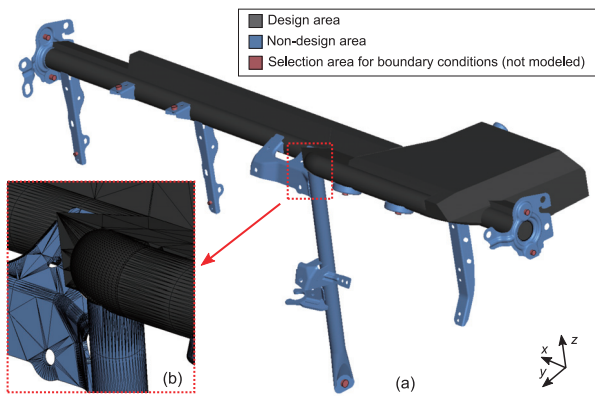


Fig.4 (a) Design, non-design, and boundary condition selection area in the optimization model, and (b) STL mesh near load input A.

H は式 (6) に示す相当応力 $\bar{\sigma}$ に関するヘビサイド関数である。 σ_0 は密度を考慮した体積平均による基準応力である。 本稿では $\alpha = 2.0$, $\beta = 0.1$ を使用した。

楕円体の向きを決定する固有ベクトル $\mathbf{V}$ について、応力テンソルを固有直交分解したとき絶対値の大きいものから A, B, C としたとき、もとの固有ベクトルをこの順番にソートしたものを使用する。 このとき、最後の固有ベクトルの向きが「期待される中空管表面の法線方向 (C)」として扱われ、その方向には小さな影響半径 r_{min} が適用される。 2つ以上の荷重ケースでテンソルを求める場合には、ケース間の応力差により最適形状が不均等にならないよう、応力を加算平均するのではなく、式 (7) のようにヘビサイド関数を用いた正規化応力を加算平均したものを使用する。

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H(\bar{\sigma}_{(i)}) \frac{\sigma_{(i)}}{\sqrt{s_{(i)} : s_{(i)}}} \quad (7)$$

(4) 設計領域と境界条件

Fig. 4(a) に最適化対象の設計領域を含むモデルを示す。 図の灰色部分がトポロジー最適化の設計領域であり、Fig. 1 の許容される領域内において中空管部分を覆うように設定した。 図の青色部分が非設計領域であり、SIMP 法においては常に密度 1 の領域として計算される。 図の赤色の円筒部分は境界条件を適用する選択領域を示しておりこの部分には要素は割り当てられない。すでに材料配置が設定されている節点において、この選択領域内の点が拘束または荷重の設定がなされる。

最適化プログラムに使用される形状ファイルは Fig. 4(b) のように CAD ソフトにより自動的に生成される一般的な有限要素解析には不向きな STL メッシュでも対応可能である。 これは本フレームワークではボクセル状の格子メッシュで解析されるため形状ファイルは格子の内外の判定のみに使用するためである。

上記の形状モデルに対して、計算格子をセルの解像度 1 mm, 1 CUBE=16³ セルで分割した結果、CUBE 数は 17281, 全セル数は 7078 万, 初期構造の自由度数 1.09 億となった。 最適化は富岳 361 ノード, 1441 プロセス (1 プロセス 12 共有メモリ並列) で実行した。 最適化

Table2 Compliance result normalized by the compliance of existing model after optimization without plate filter.

	#1	#2	#3	#4	#5
final 1%	1.66	1.48	1.66	1.31	0.88
final 2%	0.90	0.60	0.69	0.75	0.55
final 5%	0.59	0.25	0.35	0.50	0.42

は最適化反復を最低 50 回確保した上で、目的関数が十分収束するまで実施した。

(5) 最適化方法

式 (8) の複数荷重ケースの剛性最大化を実施する。

$$\text{Maximize } \Theta = \sum_i \frac{\theta_i}{\theta_i^{(1)}} \quad (8)$$

$$\text{subject to } \theta_i = \frac{1}{2} \mathbf{u}_i^T \mathbf{f}_i \quad (9)$$

$$\left(\sum_j \rho_j^p [k_0]_j \right) \mathbf{u}_i = \mathbf{f}_i \quad (10)$$

$$\int \rho dV = V_0 \quad (11)$$

ここで j は要素番号, $p = 3$ は SIMP 法のペナルティ係数, $\theta_i^{(1)}$ は最適化初回のコンプライアンスであり、重み付き加算の正規化値として使用する。 単材料 SIMP 法で最適性規準法^[2]を使用する場合、一般的に等号体積制約が容易に達成可能である。

SIMP 法のトポロジー最適化で指定の体積制約を達成する場合、体積分率制約が 5% のときはグレースケール密度 0.05 を一様に与えた上で最適化を進行することが多い。 しかしながら、今回はある程度大きな初期密度 0.25 を与え、最適化の初期段階で目標体積分率を初期の 25% から段階的に低減させて最終的に 5% になるような条件で最適化を進める。 これは、本フレームワークにおいてはヤコビ前処理つき共役勾配法 (CG 法) を用いて有限要素解析を実施するが、低密度要素で構成される設計領域と高密度要素で構成される非設計領域の隣接する部分で行列の対角性が悪化し収束が極めて遅くなるためである。

最適化は体積分率制約が 5% となる場合を中心に実施し検討する。 既存モデルの中空管部分の設計領域に対する体積分率は 2.3% であるが、板金フィルタを用いて板状の構造を形成する場合、穴を埋めるようにある程度追加の材料を必要とするためである。 本研究では陽的フィルタは影響半径 r_h は最小格子サイズの 1.5 倍、板金フィルタでは $r_h = 50, 100, 250$ mm とした場合について検討する。

3. 最適化結果と検討

(1) 計算時間と目的関数履歴

Fig.5 に初期密度を一様に与えた場合の初回有限要素解析にかかった時間を示す。 CG 法の収束に関する相対残差のしきい値は 10^{-3} とし、以降すべての最適化計算に使用している。 初期密度が 25% のときは初期密度 100% のときの解析時間がオーダーとしてほぼ相違ない

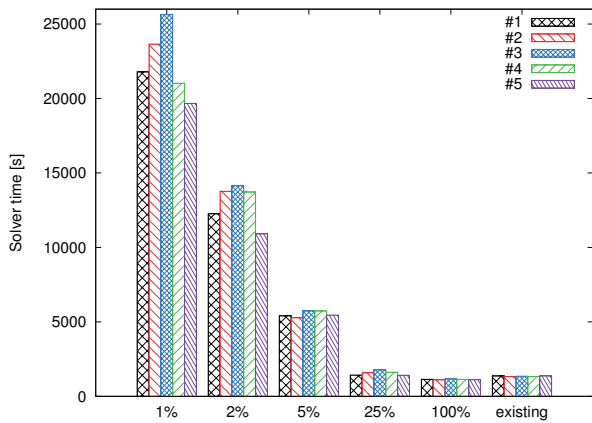


Fig.5 CG solver time for each load case when the initial uniform density is set to 0.01–1.00 for design model. The time for the existing base model is also displayed.

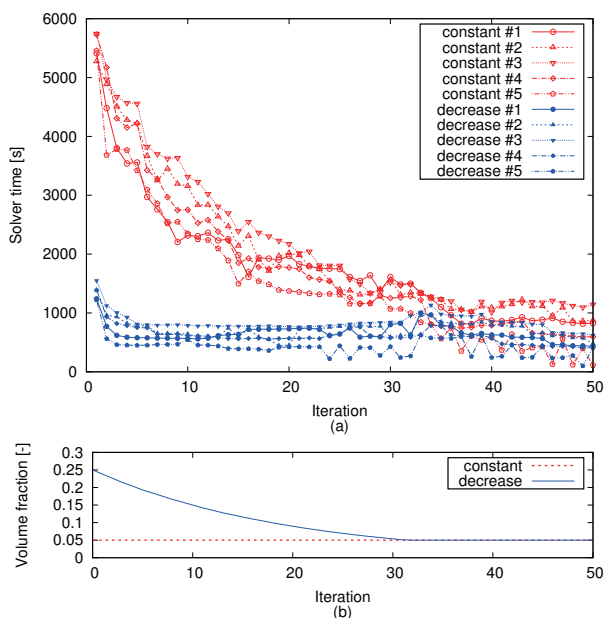


Fig.6 (a) Solver time history for the optimization iteration when the volume fraction is constantly 5% and decreased to 5%. (b) Volume fraction history during the optimization.

のに対して、初期密度を小さいと収束までの時間が加速的に増大し、1%のときは解析あたり7時間を要することになってしまう。

Fig.6(a)に初期密度を0.05としたときに一定体積での体積分率制約5%を守って最適化を実施した場合、および初期密度を0.25としたうえで目標体積を漸近的に変化させた上で最終的に体積分率制約を5%とした場合の計算時間の履歴を示す。Fig.6(b)には上記の場合の体積分率の履歴を示す。一定体積のときは最適化が進むに連れ接続部の行列の対角性が改善する傾向にあるので解析時間は低減していく傾向にあるがそれでも最適化初期は25%で開始したときより5倍以上の解析時間を要している。体積低減しながら最適化した場合は概

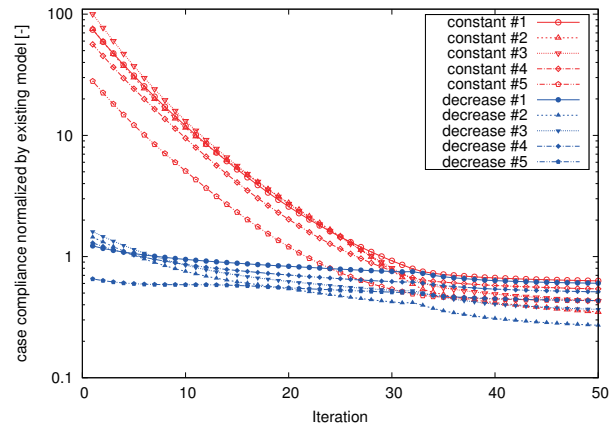


Fig.7 The compliance θ history for each load case when the volume fraction is constantly 5% and decreased to 5%. The value is normalized by the compliance of existing base model.

ね1解析あたり10～20分程度でCG法の収束が得られている。

Fig.7には両最適化計算における正規化コンプライアンスの履歴を示す。Table 2に最適化後の各荷重ケースの正規化コンプライアンスを示す。正規化は既存モデルのコンプライアンス値を用いて実施している。体積一定で最適化を進行した場合と体積を低減しながら最適化を進行した場合とで、最終的に得られる目的関数はほとんど同じあるいはより高剛性の結果が得られており、体積低減をしながら最適化を進行することは目的関数の観点でも問題ないと考えられる。最終的な剛性が既存モデルを数倍下回っているのは、既存モデル(2.3%)に対して大きな体積分率(5%)が許容されているためである。

(2) 荷重ケース数・使用体積の効果

Fig.8に体積分率5%および陽的フィルタを用いた場合に荷重ケース(a)#1のみの場合、(b)#1と#2のみを作用させた場合、(c)#1～#5のすべてのケースを作用させた場合を示す。Fig.9にはすべてのケースを作用させたときの体積分率の制約を影響半径(d)1%、(e)2%としたときの最適形状を示す。参考のために(f)には既存モデル(Fig. 1)を同じ視点から図示した形状を示す。

荷重ケース数については、その方向や数を増加すると荷重の作用する領域が増加するため、(a)のような不均等な配置から(c)のような左右材料配分のバランスが取れた形状が得られる。このように、板金制約を使用しなくてもある程度の薄板に近似した形状が得られるが、細かい部材を含む形状を含んでおり実構造に反映するには人為的な解釈とその検証に関する労力を必要とする。体積制約を変更すると(c)の板金に近似した部分が網状の構造となることで(d)および(e)のような構造が生成される。

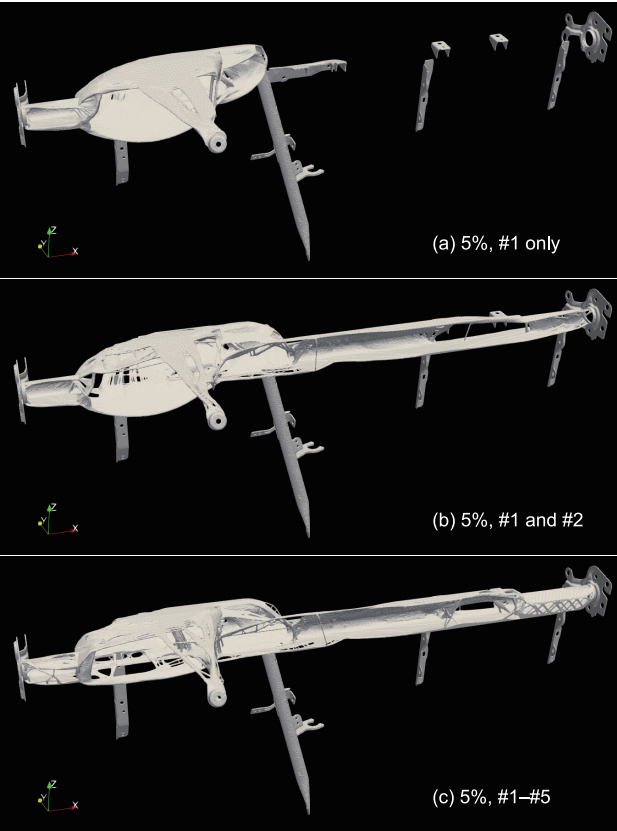


Fig.8 Optimal shape subjected to (a) #1, (b)#1 and #2, and (c) all five load cases when the volume fraction is 5% and the explicit filter is applied.

Table3 Compliance result normalized by the compliance after optimization with/without plate filter.

	#1	#2	#3	#4	#5
explicit	0.59	0.25	0.35	0.50	0.42
plate50mm	0.62	0.30	0.39	0.53	0.45
plate100mm	0.61	0.29	0.38	0.53	0.44
plate250mm	0.68	0.39	0.49	0.60	0.49

(3) 板金フィルタの効果

Fig.10 に体積分率 5%としたときの影響半径 $r_h=(g)50$ mm, (h)100 mm, (i) 250 mm の板金フィルタを適用した場合の最適形状を示す。荷重ケースはすべての荷重ケース#1-#5 を作用させている。Table 3 に各ケースのコンプライアンスの結果を示す。この範囲の影響半径の板金フィルタの適用により生じる剛性の低下は最大で一割程度であった。板金フィルタの結果としては影響半径が小さい場合は陽的フィルタ結果の網目部分を覆う形状を示すが、影響半径が大きくなると構造を単純化しなめらかな曲線を構成される薄板で形成されるようになる。

Fig.11 に体積分率 5%(c) 陽的フィルタおよび (i) 板金フィルタ ($r_h=250$ mm) を使用した場合の最適形状を、三次元 CAD ソフトに入力し等値面生成時の凹凸をスムージングした後、レイトレーシング表示した結果を示す。

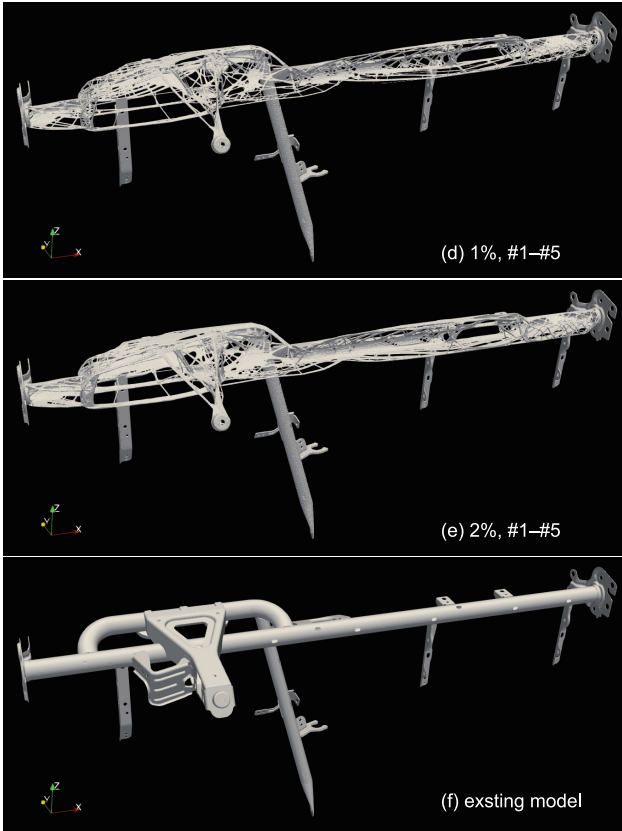


Fig.9 Optimal shape subjected to five load cases when the volume fraction is (d) 1% and (e) 2% where the explicit filter is applied. (f) is existing beam model with the same view angle.

4. 結論

インストルメントパネルビーム部材を対象として、BCM を用いたボクセルトポロジー最適化フレームワークを利用して複数荷重ケースに関する剛性最大化、および板金フィルタの適用を実施した。CAD を直接 STL に変換した軽量な入力を用いて、富岳環境下で 1 億自由度の有限要素解析を並列実行し、初期密度の与え方を調整することで計算時間が大幅に低減できることが明らかになった。最適形状については、単荷重ケースのみでは中央ロッドの片側で構造が形成されるのに対して荷重ケースが多くなると既存部品とやや近くなることと、板金フィルタの影響半径を調整することでユーザーが薄板形成の度合いを選択できることが明らかになった。

謝辞： 本研究は、HPCI システム利用研究課題（課題番号：hp220249）を通じて、理化学研究所のスーパーコンピュータ「富岳」の計算資源の提供を受け、実施しました。

参考文献

[1] “軽量化 環境対応で多様化する金属加工部品の現状と動向：インストルメントパネルビーム,” 自動車産業レポート, no.864, pp.12-14, 09 2016.
[2] M.P. Bendsøe, and N. Kikuchi, “Generating optimal

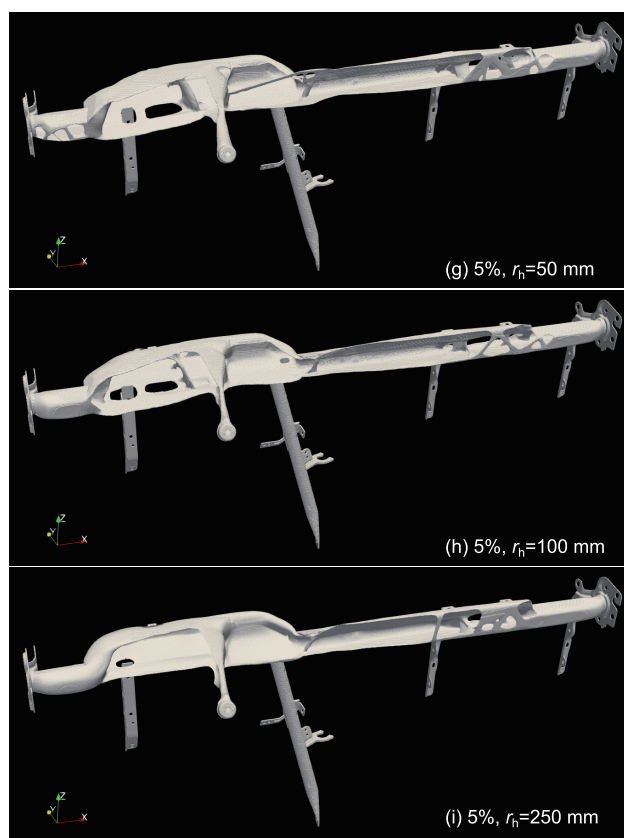


Fig.10 Optimal shape subjected to five load cases with 5% volume fraction constraint where the plate filter with the effective radius r_h of (g) 50 mm, (h) 100 mm, and (i) 250 mm.

topologies in structural design using a homogenization method,” Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol.71, no.2, pp.197-224, 1988.

- [3] 藤井大地, パソコンで解く構造デザイン, 丸善, 2002.
- [4] M.P. Bendsøe, Topology Optimization: ”Theory, Methods, And Applications”, Springer, 2003.
- [5] 西脇眞二, 泉井一浩, 菊池昇, トポロジー最適化 (計算力学レクチャーコース), 一般社団法人日本計算工学会 (編), 丸善出版, 2013.
- [6] 和田有司, 嶋田宗将, 西口浩司, 岡澤重信, 坪倉誠, “Building cube method を利用した車体フレームのボクセルトポロジー最適化,” 日本計算工学会論文集, vol.2021, pp.20210019-20210019, 2021.
- [7] Y. Wada, T. Shimada, K. Nishiguchi, S. Okazawa, and M. Tsubokura, “Billion-design-variable-scale topology optimization of vehicle frame structure in multiple-load case,” Proc. Inst. Mech. Eng. D: J. Automob. Eng., vol.0, no.0, p.09544070231184309, 2023.
- [8] N. Jansson, R. Bale, K. Onishi, and M. Tsubokura, “CUBE: a scalable framework for large-scale industrial simulations,” The International Journal of High Performance Computing Applications, vol.33, no.4,

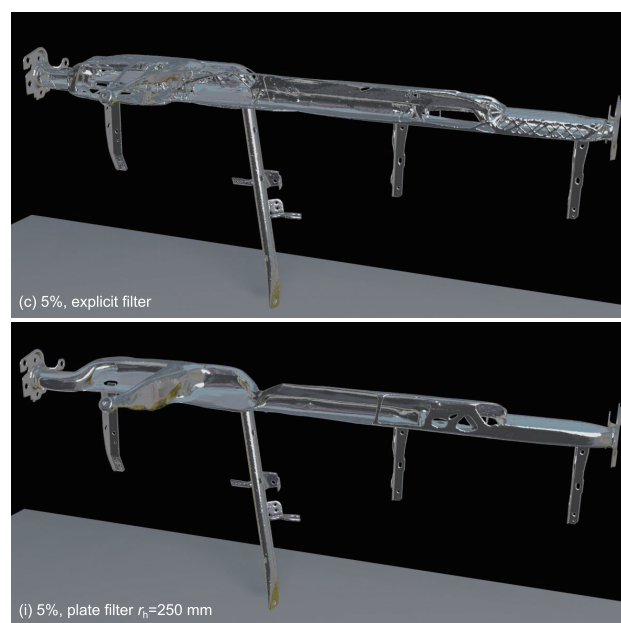


Fig.11 Rendered Optimal shape with (c) explicit and (i) plate filter.

pp.678-698, 2019.

- [9] K. Nakahashi, “Building-cube method for flow problems with broadband characteristic length,” Computational Fluid Dynamics 2002, eds. S.W. Armfield, P. Morgan, and K. Srinivas, pp.77-81, Springer Berlin Heidelberg, 2003.
- [10] K. Nishiguchi, R. Bale, S. Okazawa, and M. Tsubokura, “Full eulerian deformable solid-fluid interaction scheme based on building-cube method for large-scale parallel computing,” International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol.117, no.2, pp.221-248, 2019.
- [11] T. Shimada, K. Nishiguchi, R. Bale, S. Okazawa, and M. Tsubokura, “Eulerian finite volume formulation using lagrangian marker particles for incompressible fluid-structure interaction problems,” International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol.123, no.5, pp.1294-1328, 2022.
- [12] 和田有司, 嶋田宗将, 西口浩司, 岡澤重信, 坪倉誠, “車体構造のトポロジー最適化における板金形成の促進,” 計算工学講演会論文集 Vol. 27, pp.F-03-06, june 2022.
- [13] 理化学研究所計算科学研究センター (R-CCS), “システム紹介,” URL:<https://www.r-ccs.riken.jp/jp/fugaku/overview/system.html>, 2020, (参照 2021-03-24).
- [14] B.S. Lazarov, and O. Sigmund, “Filters in topology optimization based on helmholtz-type differential equations,” International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol.86, no.6, pp.765-781, 2011.