計算工学講演会論文集　Vol.28 (2023年5月)　計算工学会

商用コードによるトポロジーおよび形状最適化と3Dプリンターを用いたデジタルもの創りプロセス

A framework for processes of digital design and 3D printing
by using topology and shape optimization of a commercial code

岩井信弘[1)]，櫻井文嶺[2)]，野村利成[3)]，加藤義孝[4)]
Nobuhiro Iwai, Bunrei Sakurai, Toshinari Nomura and Yoshitaka Kato

1) 博(工) SOLIZE株式会社 テクニカルフェロー（〒102-0075 東京都千代田区三番町6番3号 三番町UFビル3F）
2) SOLIZE株式会社 デジタルエンジニアリング開発統括部　チームリーダー
3) SOLIZE株式会社 デジタルドリブンエンジニアリング事業部　リードリサーチャー
4) 博(工) SOLIZE株式会社 デジタルドリブンエンジニアリング事業部　リードリサーチャー

All processes from conceptual design to detailed design and actual production were carried out using digital methods. The processes involved reverse engineering, topology optimization, 3D CAD modeling, shape optimization, and actual production with 3D printing, where OPTISHAPE-TS was used for topology and shape optimization.

Key Words: *Topology optimization, Shape optimization, 3D printer, 3D CAD, Digital design, CAE, FEM, CFD, Drone, Digital-Driven Engineering*

1.　はじめに

もの創りの過程を構造設計的な視点で概察すると，構想設計，詳細設計，CAEによる力学的特性の確認，または，試作・実験による確認，大量生産の場合には量産設計，実機製造に大別されることが一般的である．

構想設計や詳細設計においては，さまざまな最適化手法が試みられている．トポロジー最適化においては，当初，材料構成則を均質化法により求めていたが[1]，密度法[2]の適用による簡易なアルゴリズムで実用化が進み[3]，中間密度（グレースケール）部分の除外を目的としたレベルセット法[4]の商用コードへの実装[5]により，設定した体積や質量に，より近い最適化が可能になった．

詳細設計段階においては，性能のみならず，製造要件の考慮が不可欠である．これは，製造上の制約による設計変更が行われると，開発期間の遅延のみならず，詳細設計において見込んだ性能を満たせないことも生じ得るからである．そこで，何らかの最適化手法を取り入れる場合には，性能目標の達成に加えて，製造要件を十分に考慮した検討をすることが重要となる．

本報告においては，構想設計から実機生産までのすべてのプロセスをデジタル手法で完遂することを目的に，リバースエンジニアリング，トポロジー最適化，生産要件を考慮した形状最適化，3Dプリンターによる実機生産，試走および試飛行などの実施例を紹介する[6]．

2.　プロセス概要

図-1に，プロセスの概要，用いたツールおよびデータの種類を記す．Process欄において，上下に分離されている項目のうち，上段は，後述する事例1：インラインスケート靴の開発，下段は事例2：ドローンの開発，の実施手順

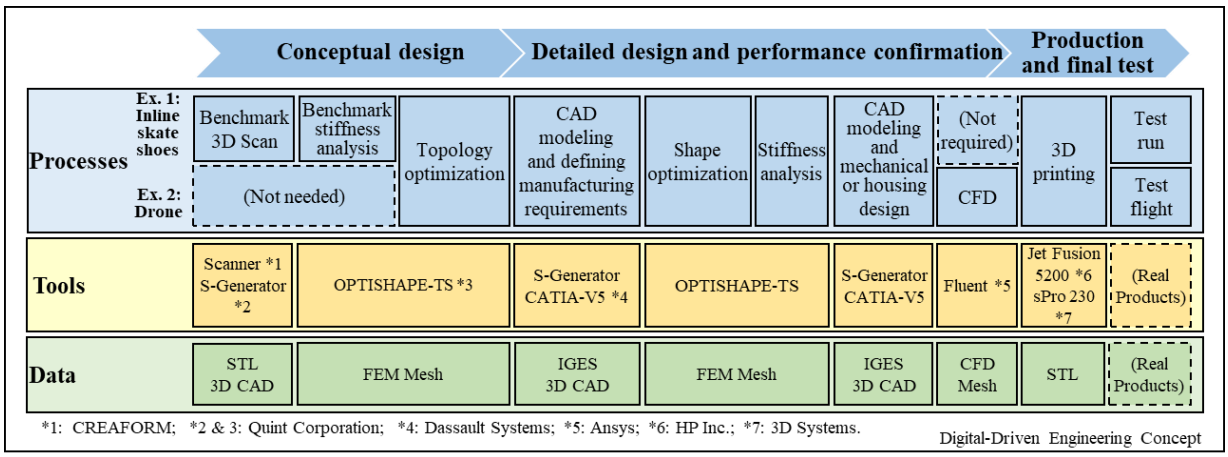


図-1　デジタルもの創りプロセスのフレームワーク

© 一般社団法人日本計算工学会

を示す．分離されていないものは，両事例共通である．

構想設計においては，必要に応じ，ベンチマークを実施する．次に，OPTISHAPE-TS（株式会社くいんと）によるトポロジー最適化を実施し，おおよその構造を得る．

詳細設計においては，CADによる詳細な操作を要する．さらに，後工程のリメッシュを効率よく実施するためには，「きれいな」面や稜線が必要となる．そこで，S-Generator（株式会社くいんと）を用いて，トポロジー最適化後のFEMデータをCADで読み込めるデータに変換し，主要な面や稜線を整える．次に，製造のための制約条件を付し，リメッシュ後に，OPTISHAPE-TSにより形状最適化を実施する．形状最適化により歪んだメッシュを修正後，最終確認のために剛性解析を行い，制御機器の筐体や機構部品を設計する．空気流性能が課題となる場合には，数値流体解析を実施する．

実機生産においては，上述のプロセスで作成したデジタルデータを3Dプリンターに送付し，3D造形を実行する．得られた実機を用いて試走ないしは試飛行を実施する．

3. 事例１：インラインスケート靴の開発

(1) 構想設計

a) ベンチマークモデルの作成

図-2(a)(b)に示すように，参考となる既存製品の外形形状を3Dスキャンし，STL(Standard Triangulated Language)データ化する．(c)に示すように，3D CADで自由にデータを扱うために，STLデータをS-Generatorを用いてIGES(Initial Graphics Exchange Specification)形式のデータに変換する．次に，3D CADを用いて，製品として成り立つ形状に修正するとともに，容易にメッシュ分割をするために，面の調整をしておく．

b) ベンチマーク解析

図-3(a)に示すように，FEMメッシュを作成し，対象製品の使用時に生じ得るさまざまな外力を検討し，荷重・拘束条件を設定する．図-3 (b) に，剛性解析の結果の例を示す．コンターは変位を示す．得られた結果から，設計者の意図を理解し，性能目標の参考にするとともに，後述する最適化の目的関数および制約条件に織り込む．

c) トポロジー最適化

ベンチマークと同等の剛性を有し，より軽量なスケート靴の概形を創生するために，OPTISHAPE-TSを用いて，トポロジー最適化を行う．図-4(a)において，黄土色のテトラメッシュで示す領域は，許容設計空間である．緑のシェル要素で示す領域は，非設計空間である．タイヤのクリアランスや足を挿入する際の軌跡を考慮して定義した．

最適化問題を以下に定義する．

$$Minimize\ M \tag{1}$$

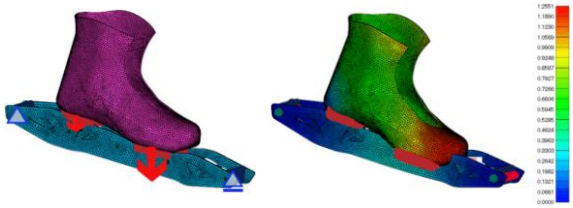
$$Subject\ to\ C_i \le C_{Bi}\,, \quad where\ i = 1,2,3,\cdots,12. \tag{2}$$

式(1)は，目的関数を示す．ここで，Mは質量である．最適化により，Mが最小化される．式(2)は，制約条件を示す．左辺のCは最適化対象構造のコンプライアンス，すなわち，変位を荷重により除したものであり，剛性の逆数となる．右辺のC_Bはベンチマーク構造のコンプライアンスである．ここで，両辺の下添え字iは荷重ケースの番号を示す．すなわち，荷重ケース1から12において，各ケースのコンプライアンスがベンチマーク以下（ベンチマークの剛性以上）となる制約条件が付されることになる．

図-4(b)に，トポロジー最適化後の物質配置を示す．許容設計空間の外周の稜線近傍に多くの材料が配置されていることがわかる．図-5に，目的関数Mと制約関数C_iの履歴を示す．本例においては，131回の計算で収束し，許容設計領域と非設計（設計固定）領域の合計質量が86%低減，すなわち14%となった．なお，Mは初期質量により無次元化し，C_iはベンチマーク値により無次元化した．

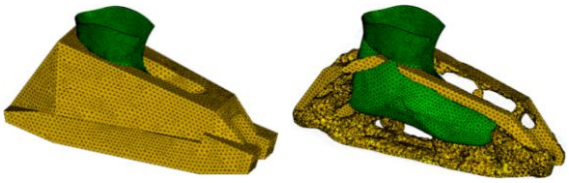
(a) 3D スキャン　(b) STL 化　(c) IGES 化

図-2 ベンチマークモデリング



(a) 荷重・拘束条件の例　(b)剛性解析結果

図-3 ベンチマーク解析の例



(a) 許容設計空間　(b)最適トポロジー

図-4 トポロジー最適化による物質配置

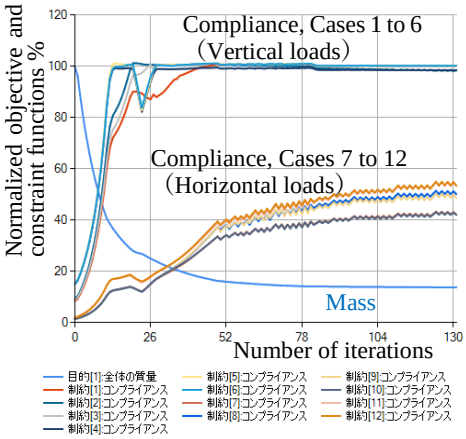


図-5 トポロジー最適化における目的関数と制約関数の履歴

© 一般社団法人日本計算工学会

(2) 詳細設計

a) FEMメッシュデータのCADモデル化

図-6(a) に示すように，S-Generatorを用いて，メッシュを修正して稜線を明確にする．次に，図-6(b)に示すようにFEMメッシュデータをCADデータに変換し，CADを用いて面を整えておく．

b) リメッシュと形状制約条件

図-7に示すように，再びメッシュ分割し，機能のための形状的な制約を付する．本例においては，タイヤ装着のためのスペース，地面との最小クリアランスおよびスケート靴を履く際の足の軌道などを考慮した．

c) 形状最適化

形状最適化をOPTISHAPE-TSを用いて実施した．設計趣旨を確実に取り入れることと，高効率な計算を目的に，最適化の収束計算を，Step 1から3に分割した．表-1に，各Stepの狙いとその理由，目的関数および制約関数を示す．

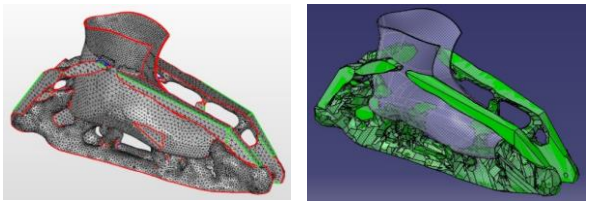
Step 1を詳述すると，最適化問題は以下に定義される．

$$Minimize\ W_M M + C_1,\quad where\ W_M = 3.0. \tag{3}$$

$$Subject\ to\ C_i \le C_{Bi},\quad t \ge t_{CR},\quad where\ i = 1,3,5,8,9,11,12,13. \tag{4}$$

式(3)は，目的関数を示す．ここで，Mは質量，W_Mは重み関数，C_1は荷重ケース１のコンプライアンスである．すなわち，重み付質量と荷重ケース１のコンプライアンスの和を最小化する．式(4)は，制約条件を示す．指定した荷重ケースiにおけるコンプライアンスC_iがベンチマークC_{Bi}以下であることと，板厚 t が製造限界板厚t_{CR}以上であることを制約条件とする．

図-8に目的関数および制約関数の履歴を示す．形状最適化前の質量1945gは，817gになった．



(a) Mesh モデルの稜線設定　(b) CAD 化と面の修正

図-6 FEM モデルから CAD モデルへの変換

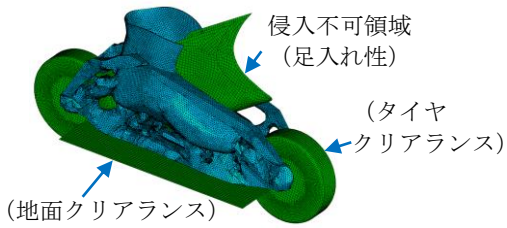
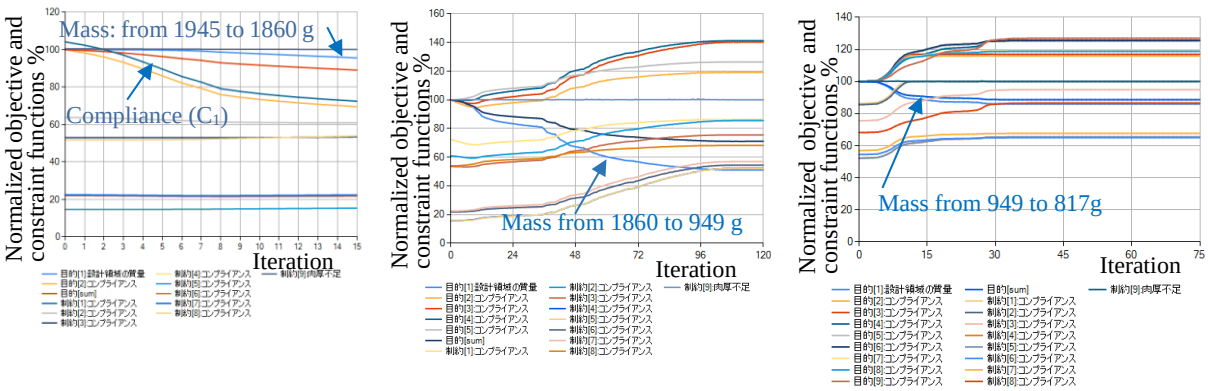


図-7　Re-mesh と機能のための制約条件付与

表-1 形状最適化における目的関数および制約関数*

	Step 1	Step 2	Step 3
収束計算	0～15	15～135	135～210
狙い	制約条件を超えたコンプライアンス（悪条件）を優先的に下げる．	目標値に近いコンプライアンスの悪化を抑えつつ，質量を優先して下げる．	質量低減と，ある程度の剛性向上の衡量を図る．
理由	形状最適化用にモデル修正した結果，コンプライアンスが制約条件を超えたため．	目標値を超えないようにしつつ，質量を最小化していくため．	僅かな質量低減のために，剛性が大きく悪化するのを防ぐため．
目的関数	Min. $W_M M+C_1$, where W_M=3.0.	Min. $W_M M+W_1C_1+W_3C_3+W_5C_5+W_{13}C_{13}$, where W_M=12.0, W_1=1.2, W_3=1.0, W_5=0.9, W_{13}=0.9.	Min. $W_M M+C_1+C_3+C_5+C_8+C_9+C_{11}+C_{12}+C_{13}$, where W_M=100.0.
制約関数1	Subject to $C_i \leqq C_{Bi}$, where i=1,3,5,8,9,11,12,13.	Subject to $C_i \leqq C_{Bi}$, where i=1,3,5,8,9,11,12,13.	Subject to $C_i \leqq C_{Bi}$, where i=1,3,5,8,9,11,12,13.
制約関数2	Subject to $t \geqq t_{CR}$.	Subject to $t \geqq t_{CR}$.	Subject to $t \geqq t_{CR}$.

*ベンチマークのコンプライアンスおよび各 Step 開始時の質量により無次元化した．



(a) Step 1　(b) Step 2　(c) Step 3

図-8 形状最適化における目的関数と制約関数の履歴

表-2の第三列に，形状最適化後の構造におけるコンプライアンスC_iを示す．Ratioは，C_iを，制約条件である上限値C_{Bi}で割った値である．荷重ケース１と3以外において，Ratioは100％未満であり，コンプライアンスが制約上限に達していない，すなわち，剛性に余裕があることを示す．これは，式(4)の第2式に示す板厚の制約条件が，第1式に示すコンプライアンスの制約よりも強いため，と推察される．

図-9に形状最適化前後の材料配置を示す．ロードパスと考えられる稜線はシューズのくるぶし部分に接続し，シューズ全体で剛性を受け持つ構造になったと考えられる（次節参照）．

d）性能確認

図-10に，荷重Case 3における形状最適化後の物質配置におけるミーゼス相当応力の分布を，ベンチマークの応力分布と比較して示す．ベンチマークにおいて観察される応力集中域は，最適化により解消し，系全体で剛性を受け持つ構造になったことがわかる．

(3) 実機生産

a）製品データ化

前節で得られた最適形状はFEMメッシュモデルであるため，S-Generatorを用いてCADデータに変換する．図-11に示すように，CADを用いて，バックルやホイールのピボットなどの機構部品を付加し，意匠面を整えて，製品データが完成する．

b）実機生産と試走

粉末造形3Dプリンター（HP社製，Jet Fusion 5200）を用いて，実機を生産した．

図-12に，実機による試走の様子を示す．ベンチマークと比し，軽量となったことに加え，試走者から「官能特性として振動が低減した」との感想を得た．

表-2 形状最適化後のコンプライアンス

Load case	Load direction	Compliance		Ratio C_i/C_{Bi} %
		Optimal result C_i	Upper limit C_{Bi}	
1	Vertical	4.35E+05	4.36E+05	100
2		3.32E+05	3.35E+05	99
3		3.47E+05	3.47E+05	100
4		5.63E+05	5.96E+05	94
5	Vertical & Longitudinal	5.50E+05	5.79E+05	95
6		5.57E+05	5.81E+05	96
7	Vertical & Lateral	3.24E+06	6.20E+06	52
8		4.10E+06	6.30E+06	65
9		4.11E+06	6.30E+06	65
10		3.21E+06	6.20E+06	52
11		1.04E+06	1.61E+06	65
12		1.09E+06	1.61E+06	68
13	Longitudinal	2.23E+05	2.57E+05	87

(a) 最適化前　　(b)最適化後

図-9 形状最適化における材料配置

4. 事例２：ドローンの開発

(1) 構想設計

a）トポロジー最適化

まず，おおよその骨格を得るために，トポロジー最適化を行う．図-13に示すように，回転翼の軌跡とその取り付け部およびコントローラの筐体を非設計領域とする．図-14に，許容設計領域と，荷重条件を示す．

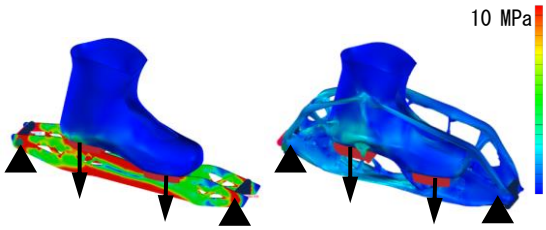
最適化問題を2つのStepにわけ，以下に定義する．

$$Minimize\ C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 \tag{5}$$

$$Subject\ to\ M_1 \leq 0.2M_{org}\ (Step\ 1), \tag{6}$$

$$Subject\ to\ M_2 \leq 0.6M_1\ (Step\ 2). \tag{7}$$

式(5)は目的関数を示す．C_1，C_2 ... C_6 は，各荷重ケースにおけるコンプライアンスであり，この合計値を最小



(a) ベンチマーク　　(b)最適化後

図-10 形状最適化後の応力（荷重 Case 3）

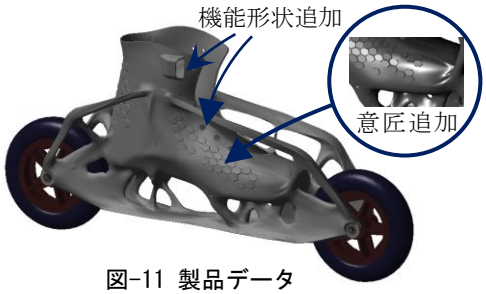


図-11 製品データ

図-12 実機による試走

© 一般社団法人日本計算工学会

化（剛性を最大化）することになる．式(6)において，M_1は，Step 1における質量，M_{org}は初期質量であり，M_1がM_{org}の20%以下であることを制約条件とした．式(7)において，M_2は，Step 2における質量であり，M_1の60%以下，すなわちM_{org}の12%以下であることを制約条件とした．

図-15(a)に，Step 1における目的関数と制約関数の履歴，および，収束時の物資配置を示す．収束計算の初期において，質量は制約条件である60%に低減した．一方，質量低減に伴い，コンプライアンスはいったん上昇するが，質量収束後に，コンプライアンスが低減したことがわかる．

図-15(b)に，Step 2における目的関数と制約関数の履歴，および，収束時の物資配置を示す．収束の傾向はStep 1と同様であるが，より少ない計算で収束した．

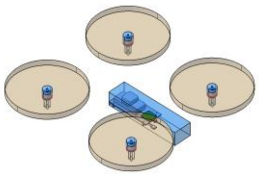


図-13 非設計領域

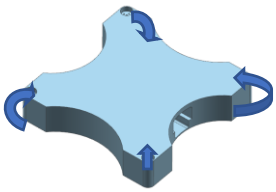
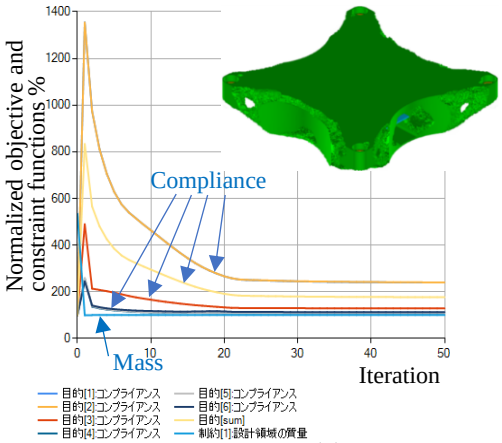
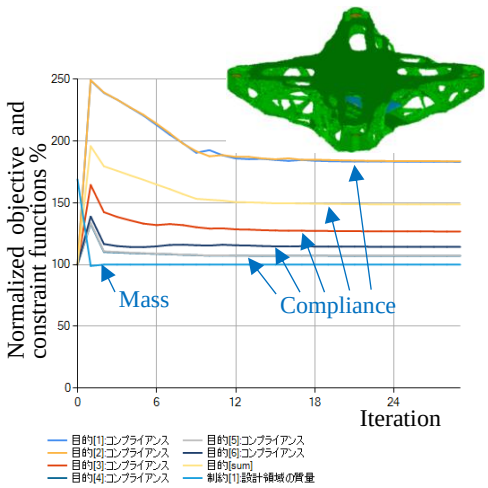


図-14 許容設計領域と荷重条件



(a) Step 1



(b) Step 2

図-15 トポロジー最適化 目的関数および制約関数の履歴と最適物質配置

(2) 詳細設計

a) FEMメッシュモデルのCADモデル化

図-16に示すように，トポロジー最適化後に得られたメッシュモデルをS-Generatorを用いて，CADモデルに変換し，CADを用いて面を整える．次に，最適化解析のための境界条件を付与し，再度メッシュ分割をする．

b) 形状最適化

形状最適化問題を以下に定義した．

$$Minimize\ M \tag{8}$$

$$\begin{aligned} Subject\ to\ C_i &\le C_{Ui}, \\ t &\ge t_{CR}, \\ where\ i &= 1,2,3,4,5,6. \end{aligned} \tag{9}$$

式(8)において，Mは目的関数を示し，最小化する．式(9)は，制約条件を示す．C_iは，荷重ケースi のコンプライアンスであり，C_{Ui}はその最大許容値である． C_iがC_{Ui}以下であること，および，板厚 t が製造限界板厚t_{CR}以上であることが制約条件となる．

図-17に目的関数と制約関数の履歴および最適化後の物質配置を示す．形状最適化により，許容設計領域の質量は，形状最適化前の11%となった．

c) 空力特性の確認

構造最適化後の設計形状が，空力性能，特に，揚力を大きく棄損していないか，Fluent(v 2020 R1, Ansys)を用いた空気流解析により，確認する．

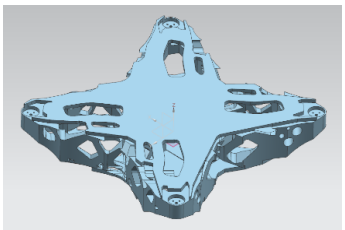


図-16 CAD 化と面修正

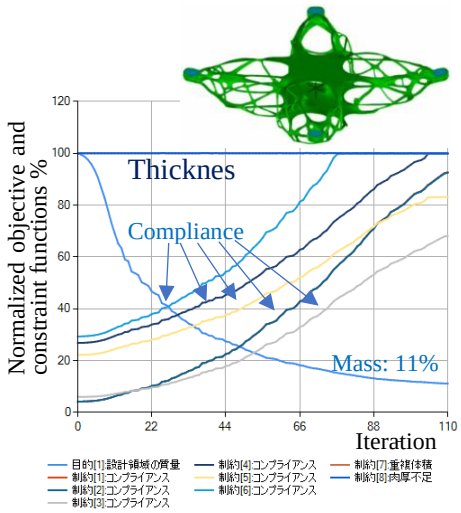


図-17 形状最適化 目的関数および制約関数の履歴と最適物質配置

© 一般社団法人日本計算工学会

解析条件を以下に定義する．

- 時間：定常
- プロペラ回転数：9000 rpm
- 旋回流の計算：MRF(Multi Reference Frame)[7]
- 乱流モデル（デフォルト設定）：SST-kω[8]
- 境界条件

  Inlet:0.8163 m/s

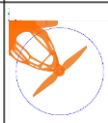
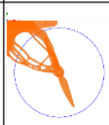
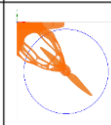
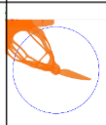
  Outlet:圧力一定

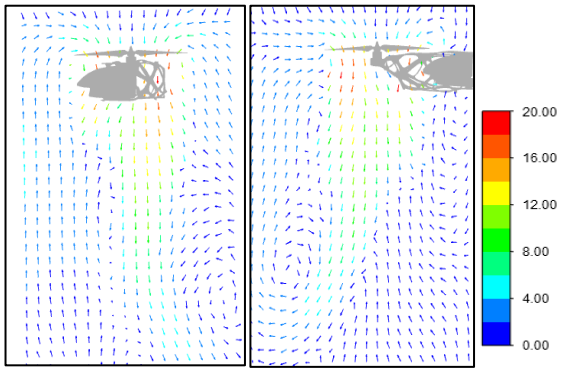
  流れ場全体に一定速度(0.8163 m/s)の下降流

表-3に，プロペラ回転角度と揚力との関係を示す．Ratioは，当該揚力の平均揚力に対する比である．プロペラの回転角度による揚力の変化は，最大で3%であった．

図-18に，プロペラの回転角度と等しい角度，かつ，プロペラの軸位置断面における速度ベクトルを示す．角度により，速度ベクトルの差異が観察されるが，揚力への影響は限定的であった．ただし，地面や壁などとの近傍の挙動が課題となる場合においては，局所的な風速分布の影響を受けるため，詳細な検討が推奨される．

表-3 プロペラ回転角度と揚力との関係

Angle deg.	0	70	94	126
Figure				
Force N	4.341	4.481	4.225	4.375
Ratio %	99.7	102.9	97.0	100.4



(a) 0 deg　　(b) 94 deg

図-18 速度ベクトル

図-19 完成した実機

図-20 実機による試験飛行

(3) 実機生産と試験飛行

図-19に完成した実機，図-20に試験飛行を示す．初回の試行において，計画通りホバリングをすることができた．

5. まとめ

インラインスケート靴およびドローンの開発を例に，構想設計，詳細設計および実機生産までのすべてのプロセスをデジタル手法で実践した．リバースエンジニアリングにより目標性能を検討し，トポロジー最適化により構想設計を行った．詳細設計においては，生産要件を考慮した形状最適化を実施することで，前工程に戻ることなく検討を完了した．3Dプリンターにより実機を生産し，試走および試験飛行により，機能を確認した．

謝辞:株式会社くいんと代表取締役会長 石井惠三 博士と同社の方々に，トポロジーおよび形状の最適化について，懇切丁寧な御教示を賜った．深甚なる謝意を表する．

参考文献

[1] Bendsøe, M. P. and Kikuchi, N.: Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 71, No2, pp. 197-224, 1988.

[2] Rozvany, G. I. N., Zhou, M. and Birker, T.: Generalized shape optimization without homogenization, *Structural Optimization*, Vol.4, pp.250-252, 1992.

[3] 株式会社くいんと：技術コラム「OPTISHAPE-TSの理論」，2023, https://www.quint.co.jp/jp/Qrepo/techcolumn/.

[4] 山田崇恭，西脇眞二，泉井一浩，吉村允孝，竹澤晃弘：レベルセット法による形状表現を用いたフェーズフィールド法の考え方に基づくトポロジー最適化，日本機械学会論文集（A編）75巻753号，pp. 550-558，2009.

[5] 株式会社くいんと：HiramekiWorks「そもそもレベルセット法によるトポロジー最適化って？」, 2023, https://www.quint.co.jp/jp/pro/hws/hws_fnc-opt.htm.

[6] 岩井信弘，櫻井文嶺，野村利成，加藤義孝：「設計X構造最適化X3Dプリンティング，創った，走った，飛んだ？」，くいんと交流会，2021, https://www.quint.co.jp/jp/semi/qusrsemi2021.htm.

[7] Luo, J. Y., Issa, R. I. and Gosman, A. D.: Prediction of Impeller-Induced Flows in Mixing Vessels Using Multiple Frames of Reference, *I. Chem E. Symposium Series, 136*, pp. 549–556, 1994.

[8] Menter, F. R.: Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, *AIAA Journal. 32(8)*, pp. 1598–1605, 1994.

© 一般社団法人日本計算工学会