

令和元年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「自動車用板金プレス部品のノンパラメトリック形状最適化と
トポロジー最適化を組合せた軽量化技術の研究開発」

研究開発成果等報告書

令和2年3月

担当局 中国経済産業局
補助事業者 ヒルタ工業株式会社

目次

第1章	研究開発の概要.....	3
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標.....	3
1-2	研究体制.....	4
1-3	成果概要.....	5
1-4	当該研究開発の連絡窓口.....	6
第2章	本論.....	7
2-1	最適化シミュレーションシステムの構築.....	7
2-1-1	板金プレス加工シャシー部品の開発に適したテストピース モデルの検討	
2-1-2	最適化シミュレーションシステムの開発	
2-1-3	最適化シミュレーション結果の試作検証	
2-2	解析に基づいた金型構造と試作品の製作.....	37
2-2-1	テストピースモデルでの加工工程を含めた最適化設計 及び加工最適金型の検討・検証	
2-3	最適化手法を用いたシャシー部品の設計と製品検証... ..	43
2-3-1	板金プレス加工シャシー部品をテストピースの最適 最軽量化で確立した技術により設計	
2-3-2	最適化したシャシー部品の構造解析ソフトでの結果検証	
2-3-3	加工工程を含めた最適化でシャシー部品の試作品製作 及び台上試験にて妥当性の評価	
2-4	最適化手法の確立.....	53
2-4-1	最適化設計手法のデータベース化	
2-5	まとめ.....	54
第3章	全体総括.....	55

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

自動車用部品は地球温暖化防止を目標とした燃費の向上を行うため、軽量化を押し進めている。これらを「低コスト」で実現するため、鋼板材料の高強度化・薄肉化・構造最適化・余肉の削除に関する開発が盛んに進められている。ヒルタ工業（株）が生産しているサスペンションアーム、ブレーキペダル、及びステアリングコラム等のシャシー部品は自動車の基本性能である「走る、止まる、曲がる」を確実なものとし、また不具合があると人命に影響する重要保安部品であり、主に板金プレス加工で製造されている。これらは全て設計者が材料力学の知識及び過去の経験から形状を作り、CAE解析を行い、発生応力、変形量等を確認しながら、形状変更とCAE解析を繰返し行うことにより、最適な形状としていた。そのため形状は設計者の技量及び投入時間によって大きく変わり、最適なものが得られないという課題がある。

本事業では、板金プレス構造のサスペンションアーム、ブレーキペダル、及びステアリングコラム等が抱える、最適形状が求められず、最軽量化が図れない課題に対し、最適形状化技術の確立として、設計者による形状のパラメータ化を必要としないノンパラメトリック形状最適化を用いた製品の最適面形状の創生技術の確立、トポロジー最適化を用いた肉盗み等による軽量化技術の確立、及び、溶接位置、長さの適正化技術の確立、且つこれらを連成・自動化した、設計者の経験値に依存しない革新的な最適最軽量技術を実現する。

更に、これら最適化設計システムの検討において、ヒルタ工業（株）の強みであるプレス加工によって、板厚変動を考慮したCAE解析、板厚変動を考慮した金型構造設計によりプレス加工品の寸法精度の向上を図り、かつ寿命の長い金型設計により安定した製品が量産できるように最適化する。このことにより、自動車用サスペンションアーム、ブレーキペダル、及びステアリングコラム等の10%以上の軽量化と5%以上のコスト低減、開発効率向上による開発費10%低減を実現し、コスト競争力を確保、及び、革新的技術による軽量化・開発期間短縮等による国内自動車産業の国際競争力に結び付ける。

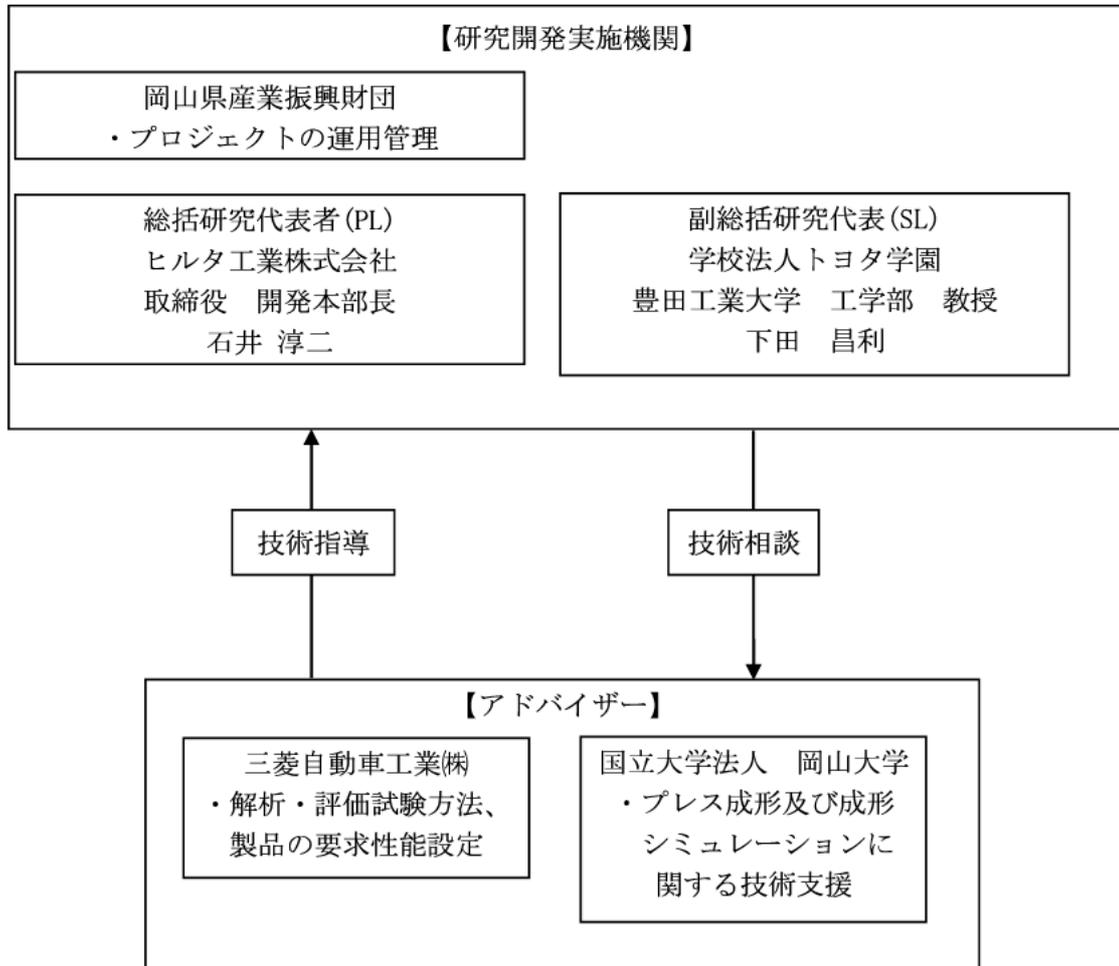
本研究開発で得られる最終目標は以下の通りである。

目標：自動車用板金プレス加工のサスペンションアーム、ブレーキペダル及びステアリングコラム新規製品（シャシー部品）の軽量化、コスト低減、開発費低減

- ①軽量化：10%以上
- ②コスト：5%以上低減
- ③開発費：10%以上低減

1-2 研究体制

研究体制全体図を下図に示す。



1-3 成果概要

最適化シミュレーションシステム構築による自動車用シャシー部品の最適最軽量化を目的として計画通りの研究を行った。

【1】最適化シミュレーションシステムの構築

【1-2-3】最適化シミュレーションシステムの構築

非線形最適化シミュレーション連成システムの構築に際し、まずはノンパラメトリック形状最適化の形状変更時に干渉領域に対し接触が考慮できるようにプログラムの改良を行った。次に複数入力に対して同時に形状変更できるようにプログラムの改良を行ったが、各入力に対する面の変形方向が異なると強度UP効果が打ち消されることが分かった。その対策として、入力方向の優先順位付けを行い1方向毎に計算を行うこととした。また、プレス加工可能な成形Rの生成については複数回に渡りプログラムの改良検討を行ったが、エッジが残る結果しか得られなかった。その為、エッジの処理についてはS-Generatorのスムージング機能を用いて形状修正することによりプレス加工可能な成形Rとした。

その後、手動で行っていたノンパラメトリック形状最適化とトポロジー最適化のデータ受け渡しを非線形最適化シミュレーション連成システム内で自動化した。

上記で構築した非線形最適化シミュレーション連成システムの同時最適化と手動最適化の比較検証をテストピースCで実施し、同時最適化で得られた最適解は手動最適化と同様に強度UP、軽量化できることが確認できた。トポロジー最適化によって空いた穴回りについても、穴淵が形状変更して補強されることにより応力が低減していることも確認できた。以上、非線形最適化シミュレーション連成システムの構築を完了し、本年度目標に対し100%の達成率を得た。

【2】解析結果に基づいた金型構造と試作品の製作

【2-2-1】テストピースモデルでの加工工程を含めた最適化設計及び加工最適化金型の検討・検証

テストピースモデルで加工最適化金型の設計検討を行い、製品コストと金型費5%低減検証を行い、金型最適化製作マニュアルを完成した。

【3】最適化手法を用いたシャシー部品の設計と製品検証

【3-1】板金プレス加工シャシー部品をテストピースの最適最軽量化で確立した技術により設計

【1-2-3】項で構築した干渉領域と複数部品の同時最適化を考慮した最適化シミュレーションシステムを用いて、フロントロアアームの最適化検討を実施した。入力条件は、上向き入力→後向き入力の順番とし、最適化計算を実施したが得られた最適解の軽量化効果は僅か4%で、且つ剛性・強度がベース形状に対して低下していた為、原因調査を行った。最適化結果を検証した結果、本検討は設計完了している実車部品からの検討でレイアウト制約が大きいため、面変形が可能な設計領域が確保できないため剛性・強度のUP率が確保出来ないことが分かった。

その為、最適化対象をレイアウト制約の少ないフロントアッパーアームに切り替え、最適最軽量化設計を行った。非線形最適化シミュレーション連成システムにより、軽量化10%以上、剛性・強度同等以上となり、フロントアッパーアームでの最適最軽量化設計を完了した。

【3-2】最適化したシャシー部品の構造解析ソフトでの結果検証
最適化シミュレーションソフトで得られた最適解を構造解析ソフト（NASTRAN）で強度検証を行い、試作形状の剛性・強度がベース形状と同等以上であることを確認した。

【3-3】加工工程を含めた最適化にて、シャシー部品の試作品の製作を行い、
台上試験にて妥当性の評価を行なう。

量産加工工程での金型検討においては、板厚変動データベースを活用しながらプレス成形シミュレーションを実施し、各量産工程毎の金型を製作した。製作した金型及びプレスした製品を3Dデジタルライザーで測定し、プレス成形シミュレーション結果との整合性を確認しながら、台上試験用の試作品を製作した。台上試験では、最適化形状の強度確認を実施し、検証を完了した。

【4】最適化手法の確立

【4-1】最適化設計手法のデータベース化

テストピース及びフロントアッパーアームの最適化検討結果を基に最適化設計手法の流れ、各項目のマニュアルを作成した。また、その他シャシー部品の最適化検討事例のデータベース化を完了し、本年度目標に対し100%の成果達成率を得た。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

管理法人：公益財団法人岡山県産業振興財団
所在地：〒701-1221 岡山県岡山市北区芳賀 5301 テクノサポート岡山3F
担当者：ものづくり支援部次長 入江 栄治
連絡先：TEL：086-286-9651 FAX：086-286-9676
E-mail：bay@optic.or.jp

第2章 本論

2-1 最適化シミュレーションシステムの構築

2-1-1 板金プレス加工シャシー部品の開発に適したテストピースモデルの検討

2-1-1-1 対象部品の選定とテストピースの形状決定

シンプルなテストピースを用いて最適化シミュレーションシステムの開発・評価の効率アップを図る。まずは、ヒルタ工業（株）で生産しているサスペンションと操作系の板金プレス加工部品をリストアップし、断面構造の調査を行った。



図1. サスペンション部品と操作系部品（板金プレス加工部品）

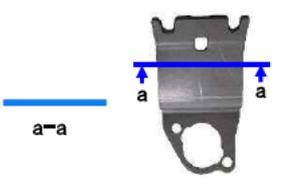
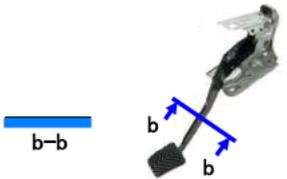
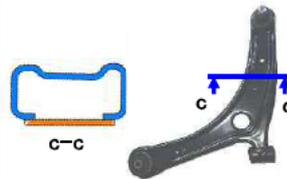
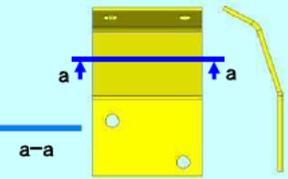
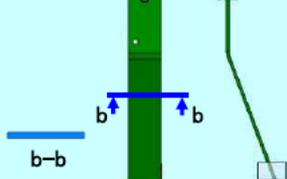
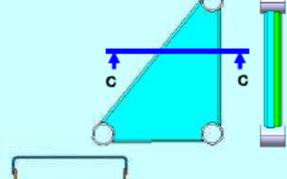
図1より、サスペンション部品と操作系部品では設計の考え方が異なる為、断面構造が異なる。大別すると、薄板開断面、厚板開断面、薄板閉断面の3タイプに分けられる。

表1. 構造特徴の抽出

薄板 開断面	厚板 開断面 断面イメージ	薄板 閉断面
板厚:t1.6~t3.2	板厚:t5.0~t8.0	板厚:t1.6~t3.6

以上より、3タイプの断面構造別に最適化対象部品と最適化シミュレーション開発用のテストピースの形状を決定した。尚、テストピースの形状については、最適化シミュレーションシステムの開発を効率的に進められるようにシンプルな形状とし、且つ将来、ヒルタ工業（株）で開発する板金プレス部品の最適化設計が可能となることを考慮した形状とした。

表2. 最適化対象部品とテストピース（A, B, C）形状

	A(薄板 開断面)	B(厚板 開断面)	C(薄板 閉断面)
最適化対象	ロアBRKT 	ブレーキペダル 	ロアアーム 
材料、板厚	440材、t3.2	440材、t6.0	440材、t1.6
設計要素	剛性	強度	強度
テストピース			

テストピースAはステアリングコラムのロアBRKTを簡素化したもの。
 テストピースBはブレーキペダルアームを簡素化したもの。
 テストピースCはフロントロアアームを簡素化したもの。

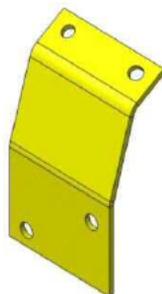
上記3タイプを検討することで、ヒルタ工業（株）で開発する板金プレス部品の最適化設計がほぼ100%可能となる。

2-1-1-2 テストピース最適化における要求仕様の検討

開発する最適化シミュレーションシステムの動作確認・理論検証を行う為、テストピースA, B, Cの要求仕様（製品の性能要求）を決定し、図面化した。

<テストピースA>（薄板 開断面）

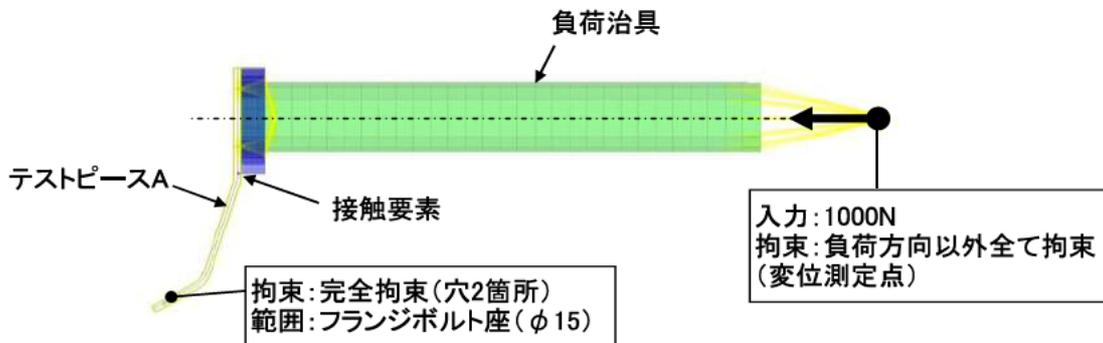
1) 板厚、材料・重量



板厚	t3.2
材料	440材
重量	0.258kg

2) 入力・拘束条件

目的：コラム軸方向に1000N負荷時の負荷点変位（剛性）確認（線形解析）



3) 要求仕様図

テストピースA 最適化要求仕様図

◎性能要求：コラム軸方向剛性

入力、拘束条件（線形解析）

入力：1000N（軸方向）
拘束：負荷方向以外全て拘束
変位測定点

拘束：完全拘束（穴2箇所）
範囲：フランジボルト座（φ15）

解析モデル

最適化目標値（要求値）

	最適化前	最適化後
変位(mm)	0.677	0.515以下
剛性(N/mm)	1477	1625以上
重量(kg)	0.258	0.232以下

◎プレス加工性要求

- 板内肉厚：R；板厚以上
- ヒート内角：3t以上
- 突き角配：0度以上
- （まずは3つの条件で検討する）

ヒート内角：3t以上

◎最適化条件

この図は最適化条件のみ、主査確認のこと

フランジボルト座（φ15）

フランジボルト座（φ20.5）

フランジボルト座（φ19.5）

フランジボルト座（φ20.5）

テストピースA

4.最適化するにあたり、板厚の変更は可とする。材料の変更は不可とする。
3.最適化条件を適用の上、◎性能要求及び◎プレス加工性要求を満たすこと。
2.最適化時の形状は3Dデータ。
HZ012624-testpiece-A--(trkt)modelを参照のこと。
解析モデルはtest_piece_A.daeを参照のこと。
注1.本図はテストピースAの最適化要求仕様図を示す。

NO.	REV.	DATE	DESCRIPTION	BY	CHKD	APPV
1	01	17.11.30	最適化要求仕様図	石井	安藤	山本

APPROVED: 石井 安藤

DATE: 17.11.30

REV: 01

DATE: 17.11.30

440材相当 (3.2)

0.258(E)

2:3

TESTPIECE A

テストピースA

HZ012624

<テストピースB>（厚板 開断面）

1) 板厚・材料・重量



板厚	t6.0
材料	440材
重量	1.443kg

2) 要求仕様図

テストピースB 最適化要求仕様図

①性能要求：静強度（荷込方向・変形荷重）
入力：荷重多量（非線形解析）

材料	項目	Yield Point
1. 440材	降伏強度	2005
2. 440材	降伏強度	2885
3. 440材	降伏強度	2005

最適化目標値（参考値）
最適化前に対し、変形荷重10%以上向上及び静強度10%以上向上のこと。

変形荷重(N)	最適化前	最適化後
1. 1000	1.11E+03	1.22E+03
2. 1000	1.11E+03	1.22E+03
3. 1000	1.11E+03	1.22E+03

②プレス加工条件

- 板内動員：R板厚以上
- ヒート内輪：3t以上
- 板厚均等：10%以上
- （すべて3つの条件で検証する）

7 最適化するにあたり、板厚の変更は可とする。材料の変更は不可とする。
 8 本図は非線形解析による。詳細は設計者へお示しを要する。
 9 ①の部品を最適化後、②の部品も最適化及びの部品の最適化は可能であること。
 10 最適化条件を適用の上、①の性能要求及びのプレス加工条件を満足すること。
 11 最適化前の形状は標準JISの形状とする。
 12 HZ012626-testpiece-B (spread) modelを参照のこと。
 13 解算モデルはtest_piece-B.dwgを参照のこと。
 14 ①の部品を最適化の対象とする。
 15 ②の部品は最適化の対象とする。
 16 ①②本図はテストピースBの最適化要求仕様図を示す。

①最適化条件

テストピースB

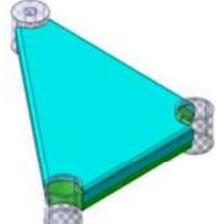
1 PIPE	3 SHIMMUS	12.45	0.041Ekg
2 PLATE	2 2X0H用	12.0	0.339Ekg
3 ARM	1 440H用	16.0	1.423Ekg
4 TESTPIECE B	HZ012626		1.522Ekg

■This drawing is secret information of HONDA KODYO Co., Ltd. and not to copy, use or transfer this drawing without prior approval and without legal responsibility.
 ■此図は機密情報であり、複製、転送、譲渡、貸与、複製等を行うことは法律上禁止されています。

DATE: 2013/03/20
 DRAWN: 山本
 CHECKED: 安藤
 TESTPIECE B
 HZ012626

<テストピースC> (薄板 閉断面)

1) 板厚・材料・重量



	アッパープレート	ロアプレート
板厚	t1.6	t1.6
材料	440材	440材
重量	0.562kg	0.544kg

2) 要求仕様図

テストピースC 最適化要求仕様図

①性能要求：静強度（荷込向き方向・変形荷重と曲げ荷重）
入力：荷重多量（非線形解析）

材料	項目	Yield Point
1. 440材	降伏強度	2005
2. 440材	降伏強度	2885
3. 440材	降伏強度	2005

最適化目標値（参考値）
最適化前に対し、変形荷重、変形荷重20%以上向上、

変形荷重(N)	最適化前	最適化後
1. 1000	1.11E+03	1.33E+03
2. 1000	1.11E+03	1.33E+03
3. 1000	1.11E+03	1.33E+03

②プレス加工条件

- 板内動員：R板厚以上
- ヒート内輪：3t以上
- 板厚均等：10%以上
- （すべて3つの条件で検証する）

7 最適化するにあたり、板厚の変更は可とする。材料の変更は不可とする。
 8 本図は非線形解析による。詳細は設計者へお示しを要する。
 9 ①の部品を最適化後、②の部品も最適化及びの部品の最適化は可能であること。
 10 最適化条件を適用の上、①の性能要求及びのプレス加工条件を満足すること。
 11 最適化前の形状は標準JISの形状とする。
 12 HZ012626-testpiece-C (sus_arm) modelを参照のこと。
 13 解算モデルはtest_piece-C.dwgを参照のこと。
 14 ①の部品を最適化の対象とする。
 15 ②の部品は最適化の対象とする。
 16 ①②本図はテストピースCの最適化要求仕様図を示す。

①最適化条件

テストピースC

1 B PIPE	4 440H用	0.400Ekg
2 PIPE	3 440H用	0.131Ekg
3 LOWER PLATE	2 440H用	0.544Ekg
4 UPPER PLATE	1 440H用	0.562Ekg
5 TESTPIECE C	HZ012626	1.760Ekg

■This drawing is secret information of HONDA KODYO Co., Ltd. and not to copy, use or transfer this drawing without prior approval and without legal responsibility.
 ■此図は機密情報であり、複製、転送、譲渡、貸与、複製等を行うことは法律上禁止されています。

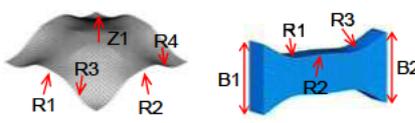
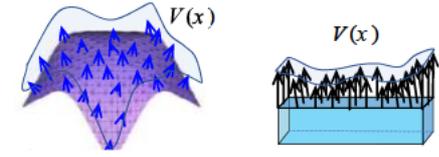
DATE: 2013/03/20
 DRAWN: 山本
 CHECKED: 安藤
 TESTPIECE C
 HZ012626

2-1-2 最適化シミュレーションシステムの開発

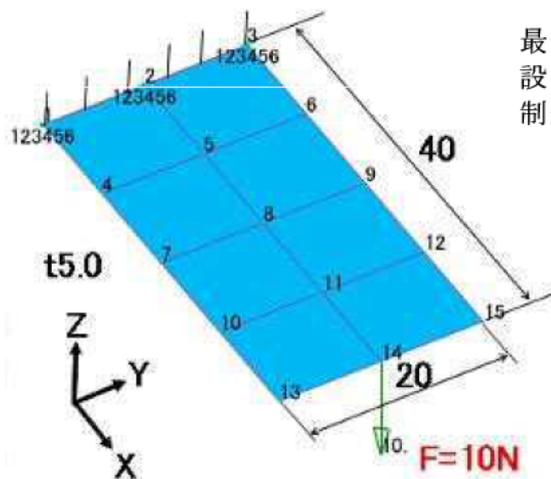
2-1-2-1 ノンパラメトリック形状最適化の単独システムの構築

豊田工業大学 下田昌利先生の指導により、ノンパラメトリック形状最適化法による板金プレス加工部品の形状最適化シミュレーションシステム構築の共同研究を行った。形状最適化システム構築に際して、まずは最適化法の原理・理論、現状把握と問題点の洗い出しを実施した。

表3. ノンパラメトリック最適化法とパラメトリック最適化法の現状把握と問題点

	パラメトリック最適化法	ノンパラメトリック最適化法
	<p>外形寸法、板厚などの設計変数を定義し、それを変更する手法。パラメータとして決めたこと以外の変更が出来ない。</p>  <p>《パラメトリック》 定義した寸法だけが変化</p>	<p>寸法等のパラメータに依存せず、剛性UP等の目的に対し、形状を任意に変形させて滑らかな自由曲面を求める形状最適化手法。</p>  <p>《ノンパラメトリック》 個々の面位置が変化</p>
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・CADとの親和性がある ・機械的処理、システム化や実行が容易 ・汎用性がある 	<ul style="list-style-type: none"> ・知識や経験が不要 ・自動メッシュが不要 ・パラメータ非依存
短所	<ul style="list-style-type: none"> ・知識や経験が必要 ・自動メッシュが必要 ・パラメータに依存 	<ul style="list-style-type: none"> ・大規模自由度(設計変数)の扱い ・難解な理論と感度計算 ・問題ごとの定式

ノンパラメトリック最適化法では、設計者の経験値に依存しない最適化設計が可能となるが、システム構築においては最適化理論の理解が必要となる。そこでC言語プログラム開発に際し最適化原理・理論の基礎検討としての断片的な手動計算から取り組み、効率的に開発を進めた。



最適化目標：負荷点剛性UP
 設計変数：各節点をY, Z方向へ移動
 制約条件：面積変化無

図2. 手動計算用簡易モデル (片持ち梁)

手動計算では、まず各節点をY方向とZ方向に移動し、各節点の剛性に対する寄（感度）を確認した。各節点を感度比から決定した移動量で動かす、面積増加分を補正した後、負荷点の剛性値を計算・確認した。この流れを手動で繰り返した。

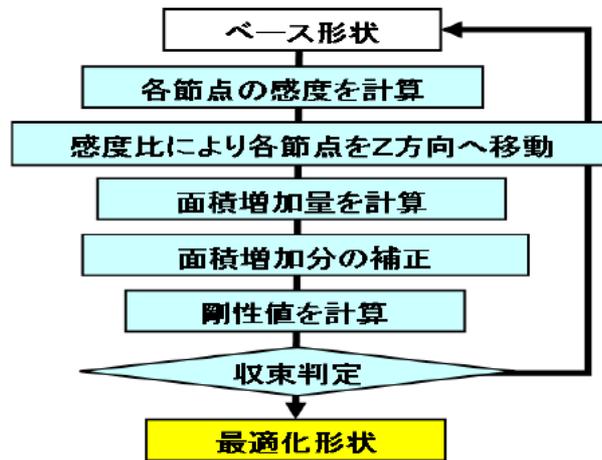


図3. 最適化の流れ（手動計算）

手動計算を3回繰り返した計算結果を図4に示す。原理・理論として剛性に対する感度が高い節点を動かすことで、剛性アップすることが確認できた。

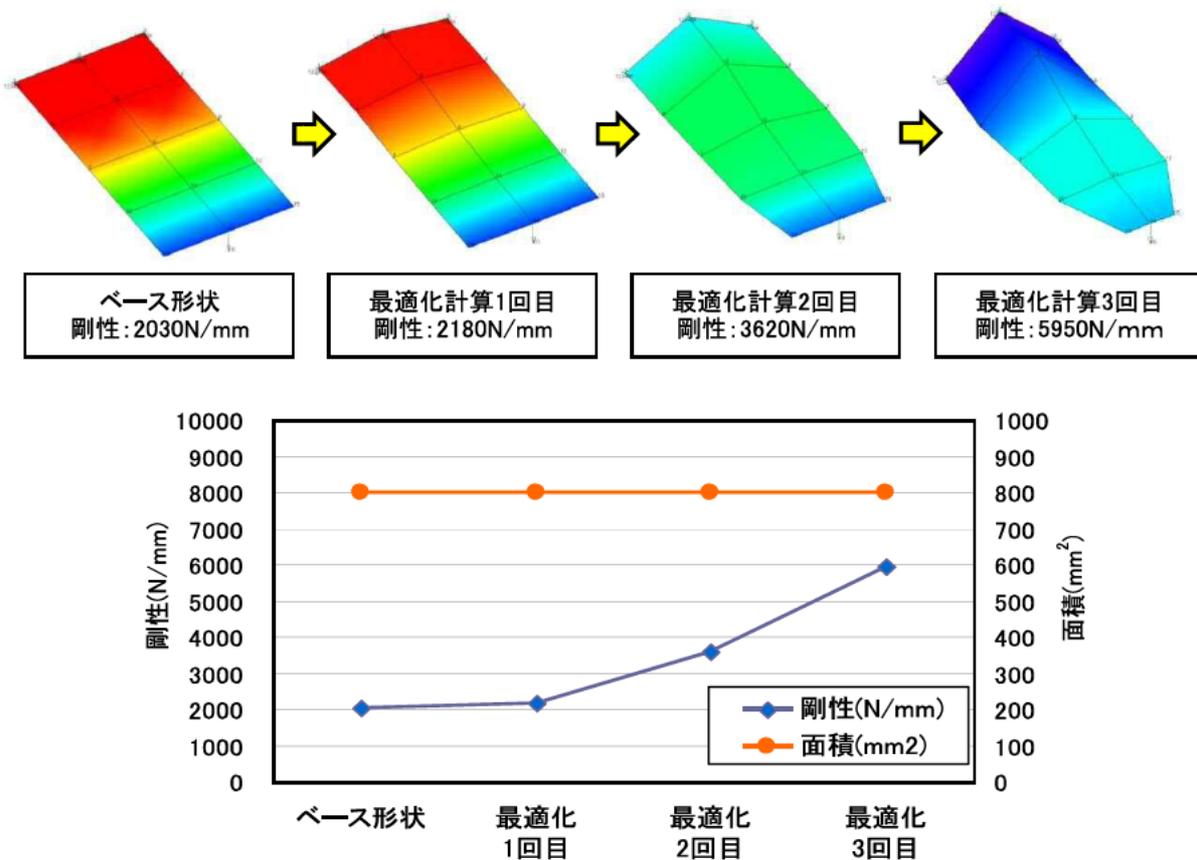


図4. 手動による最適化計算結果

手動計算による基礎検討を踏まえ、C言語開発ツールによるノンパラメトリック形状

最適化法の開発（豊田工業大学との共同研究）に着手した。

現状のノンパラメトリック形状最適化は構造計算、感度計算、形状変更、体積制約判定の流れ（フロー）で、最適化計算が行われる。

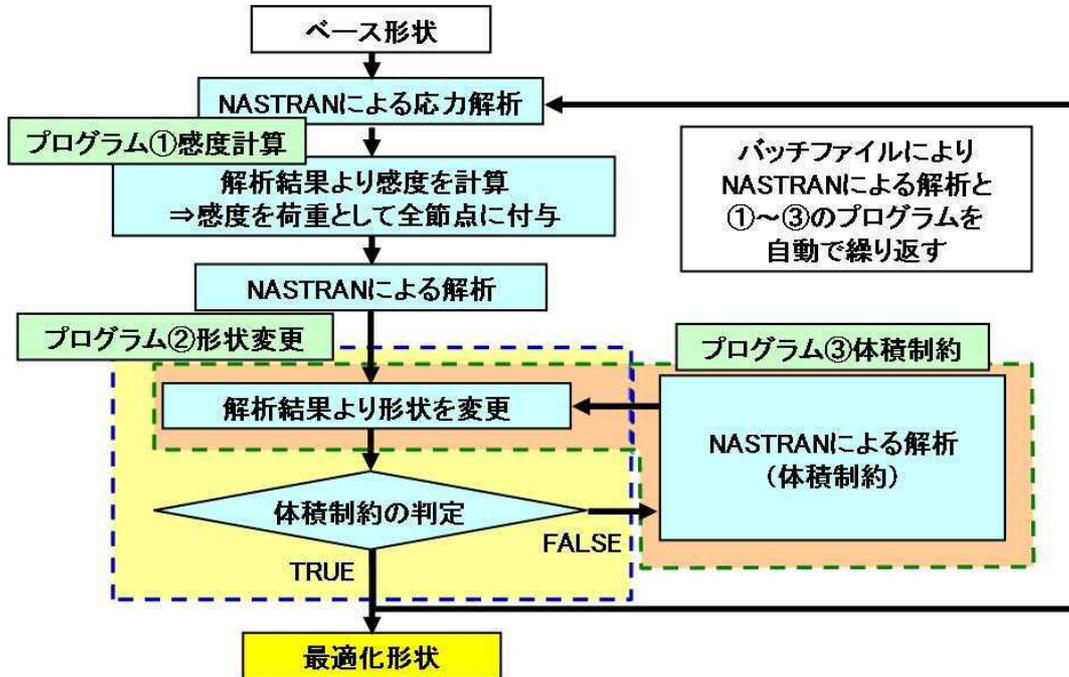


図5. ノンパラメトリック形状最適化の流れ（フロー）

<プログラム①>

解析結果（応力と歪）より感度を計算し、全節点に荷重を負荷する。

$$\begin{aligned} \text{感度} : Gv = & -C_{\alpha\beta\gamma\delta} \{u_{0\alpha,\beta} - (t/2)\theta_{\alpha,\beta}\} \{u_{0\gamma,\delta} - (t/2)\theta_{\gamma,\delta}\} \text{ (シエル要素下面)} \\ & + C_{\alpha\beta\gamma\delta} \{u_{0\alpha,\beta} - (t/2)\theta_{\alpha,\beta}\} \{u_{0\gamma,\delta} - (t/2)\theta_{\gamma,\delta}\} \text{ (シエル要素上面)} \\ & + \dots \end{aligned}$$

応力 = 剛性テンソル × 歪 （剛性テンソル : $C_{\alpha\beta\gamma\delta}$ ）

歪 : $u_{0\alpha,\beta} - (t/2)\theta_{\alpha,\beta}$

<プログラム②>

荷重負荷時の変位をベース形状の各節点に与えて形状変更する。（図6）

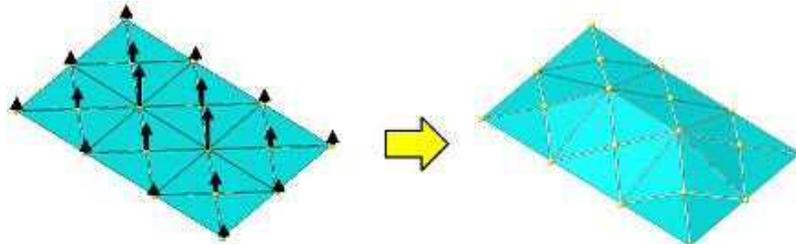


図6. 形状変更イメージ

<プログラム③>

体積制約の判定より、体積制約を満たす様に形状変更する。
(大きすぎる変位を小さくする)

本研究では、このプログラム①②③の流れをベースに線形と非線形のノンパラメトリック形状最適化の単独システムの共同研究を進めた。

まずは、テストピースAの剛性最適化を目的とした線形のノンパラメトリック形状最適化システムの構築検討を行った。要求仕様に基づきテストピースAの最適化計算を行いながらエラー原因の検討及び潰しこみを行った。大きなエラーとしては対象要素がシェル要素と剛体要素しか対応しておらず、他の要素があると読み込みエラーとなっていることがわかった。よって、テストピースAの最適化計算に必要なソリッド要素と接触要素の読み込み、書き出しが可能となるようにプログラムの修正を行い、計算可能なシステムとした。

その他、解析モデルの各板厚がプログラム内で設定するようにしていた為、取り込む解析モデルの板厚が反映されなかった。よって解析モデルの板厚の読み込み、書き出しが行えるようにプログラムの修正を行った。また、構造解析ソフト（NASTRAN）とのリンクプログラムを作成し、解析モデルと構造解析結果の読み込み、感度計算による形状変更、最適化形状の書き出し、構造解析の一連の繰り返し計算を可能とした。

```
/**ソリッド要素の読み込み *****/
n=1;
for(;;)
{
  gets(buf,sizeof(buf));
  for(i=0;i<64;i++)chara[i]=buf[i];
  x=strcmp(chara,"CHECK");
  y=strcmp(chara,"");
  if(y==0)
  {
    for(i=0;i<64;i++)chara[i]=buf[i];
    CHECK[i]=atoi(chara);
  }
  else if(y==0)
  {
    for(i=0;i<64;i++)chara[i]=buf[i];
  }
}
```

図7. ソリッド要素の読み込みプログラム (抜粋)

```
/**GAP要素の読み込み *****/
n=1;
for(;;)
{
  gets(buf,sizeof(buf));
  for(i=0;i<64;i++)chara[i]=buf[i];
  x=strcmp(chara,"GAP");
  y=strcmp(chara,"");
  if(y==0)
  {
    for(i=0;i<64;i++)chara[i]=buf[i];
    GAP[i]=atoi(chara);
  }
  else if(y==0)
  {
    for(i=0;i<64;i++)chara[i]=buf[i];
  }
}
```

図8. 接触要素の読み込みプログラム (抜粋)

〈テストピースA ノンパラメトリック形状最適化〉

プログラム修正により計算可能となったプロトタイプの線形のノンパラメトリック形状最適化の単独システムにて、テストピースAの形状最適化を実施した。ベース (t 3. 2) 形状に対し、最適化計算 3 回目において剛性 1 0 %以上向上を達成。

【テストピースA形状最適化条件】

- ・ 負荷点剛性最大化
- ・ 設計領域 (右図赤色部)
- ・ 最適化前形状を板厚 t 3. 2 → t 2. 9 とする。
- ・ シェル要素はテトラ (3 角形) とする。
- ・ 繰り返し計算回数: 3 0 0 回
- ・ 体積制約: 1. 0
- ・ 境界析条件は要求仕様図に基づく。



図 9. 設計領域 (赤色)

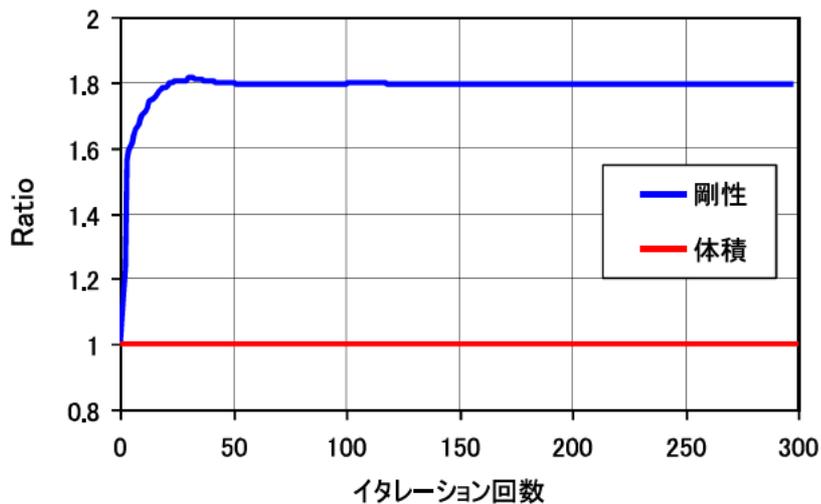
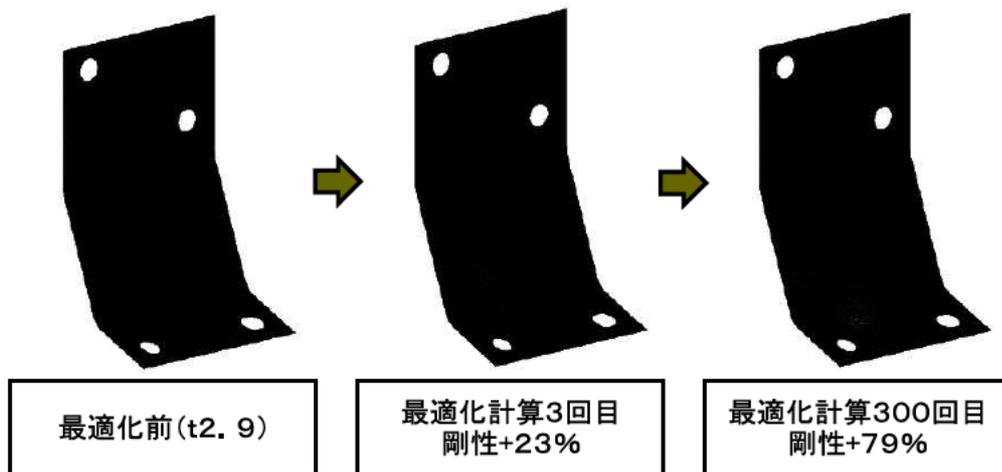


図 1 0 . テストピースA 形状最適化結果

次に、ノンパラメトリック形状最適化結果（メッシュ）から面を抽出し、正確に3Dモデル化し、構造解析ソフト（NASTRAN）で計算し検証した。その結果、形状最適化システムによる自動計算結果と3Dモデル形状の計算結果に差異は無いことが確認できた。検証結果を図12及び表4に示す。

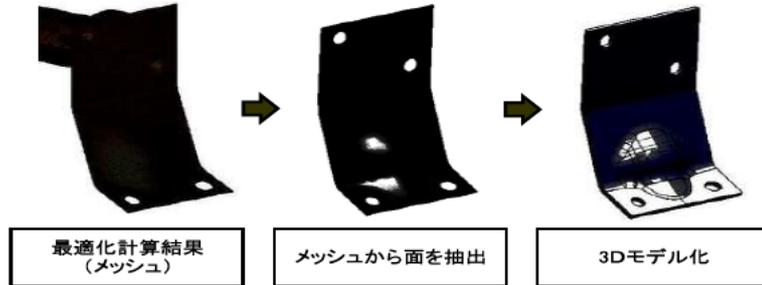


図11. 最適化計算結果の3Dモデル化

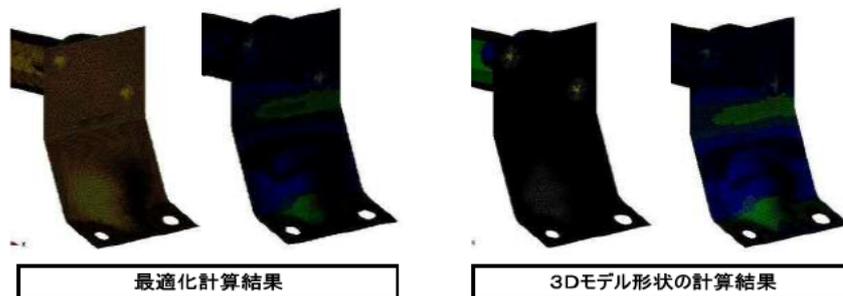


図12. 構造解析ソフト（NASTRAN）による解析結果

表4. 剛性と重量比較（形状最適化）

	最適化計算結果	3Dモデル形状結果
剛性(N/mm)	1818(+23%)	1802(+22%)
重量(kg)	0.234(-9.3%)	0.232(-10.1%)

最適化計算結果と3Dモデル化形状の結果はほぼ同等であり、目的の剛性10%以上を達成。

〈テストピースB、C ノンパラメトリック形状最適化〉

テストピースB、CについてもテストピースAと同様に形状最適化を実施した。

表5. テストピースB強度（変形荷重）と重量比較（形状最適化）

	最適化計算結果	3Dモデル形状結果
変形荷重(N)	2280(+15.6%)	2261(+14.6%)
重量(kg)	1.467(+1.7%)	1.463(+1.4%)

表6. テストピースC 強度（変形荷重）と重量比較（形状最適化）

	最適化計算結果	3Dモデル形状結果
変形荷重(kN)	16.7(+16.8%)	16.8(+17.5%)
重量(kg)	1.120(+1.3%)	1.118(+1.1%)

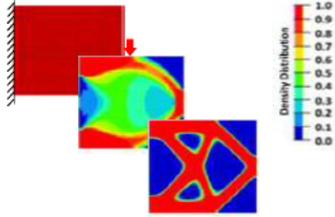
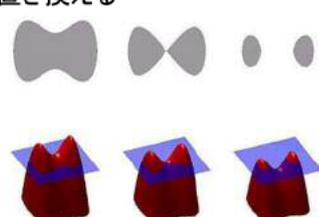
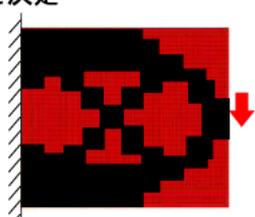
テストピース A、B、C とも最適化計算結果と3Dモデル化形状の結果はほぼ同等であり、目標の強度10%以上向上を達成できた。

以上、プロトタイプとしての非線形のノンパラメトリック形状最適化システムの構築を完了した。

2-1-2-2 トポロジー最適化システムの構築

トポロジー最適化法の現状把握と問題点の洗い出しを実施した。尚、トポロジー最適化法は長所、短所を考慮しSIMP法を採用した。

表7. トポロジー最適化法の現状把握と問題点

	SIMP法	レベルセット法	創発的方法
	要素ごとに材料密度を変化させる 	外形形状の変動を関数の変動に置き換える 	要素のON/OFFをあるルールによって決定 
長所	・要素ごとに密度を決定する為、形状と同時に変動可能	・グレースケールやチェッカーボード問題が無い	・感度計算が不要
短所	・グレースケールやチェッカーボード問題対策が必要	・難解な理論と感度計算 ・問題ごとの定式 ・複雑な曲面や構造への適用が難しい	・チェッカーボード問題対策が必要 ・計算コストが膨大 ・効率的、効果的なルール

現状のトポロジー最適化は構造計算、感度計算、形状変更の流れ（フロー）で、最適化計算を行う。（流れは形状最適化と同じ）

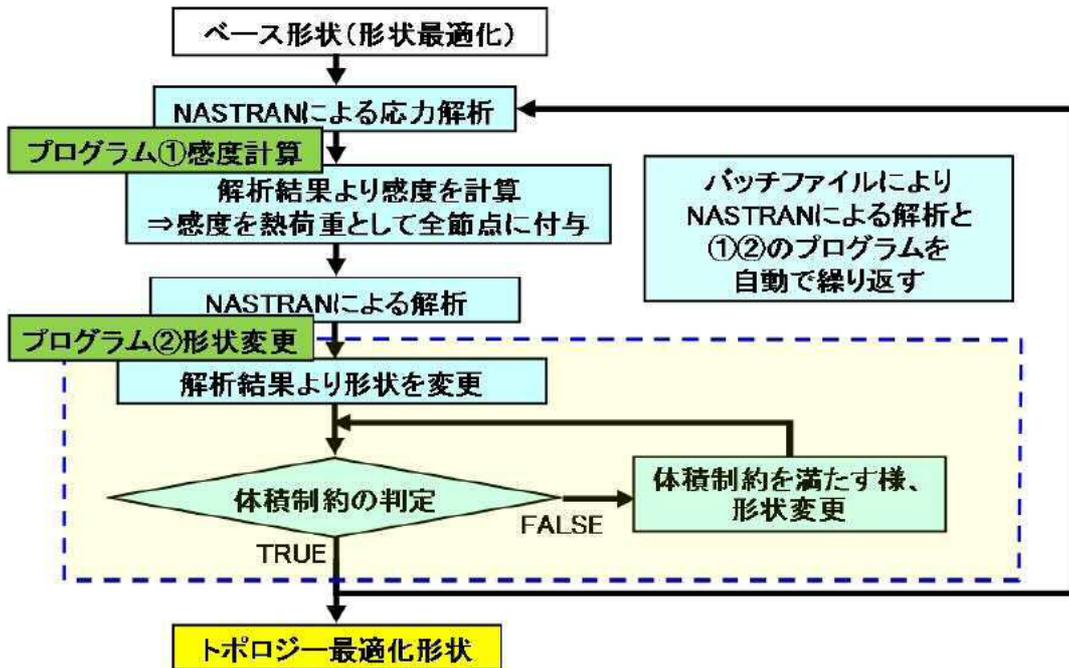


図21. トポロジー最適化の流れ（フロー）

プロトタイプのとポロジー最適化システムにて、テストピースA、B、Cの形状最適化結果をベースにとポロジー最適化を下記にて実施し、其々剛性・強度10%以上向上、軽量化10%以上を達成した。

〈テストピースA とポロジー最適化〉

【テストピースA とポロジー最適化条件】

- ・体積制約：0.9
- ・負荷点剛性最大化
- ・設計領域（右図赤色部）



図22. 設計領域（赤色）

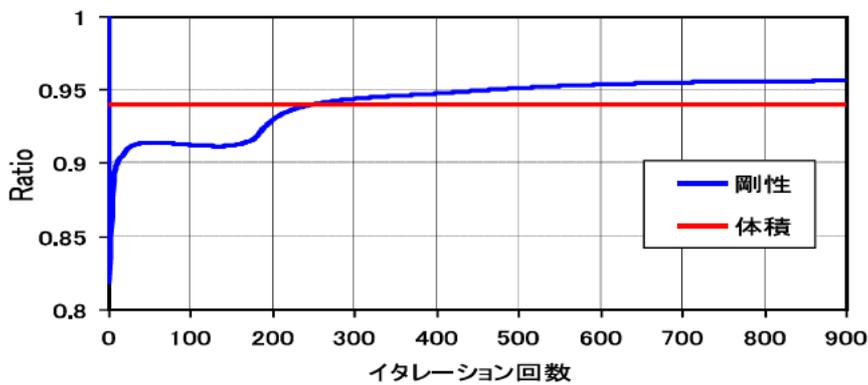
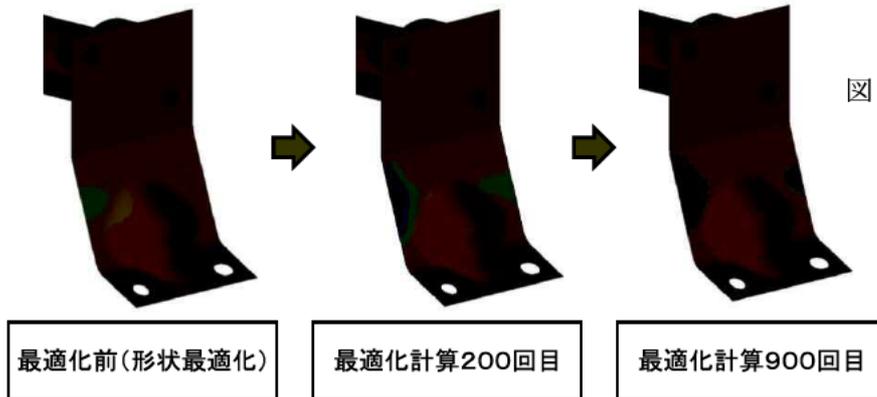


図23. テストピースA とポロジー最適化結果

次に、とポロジー最適化結果（メッシュ）から面を抽出し、正確に3Dモデル化し、構造解析ソフト（NASTRAN）で計算し検証した。検証結果を図25及び表8に示す。

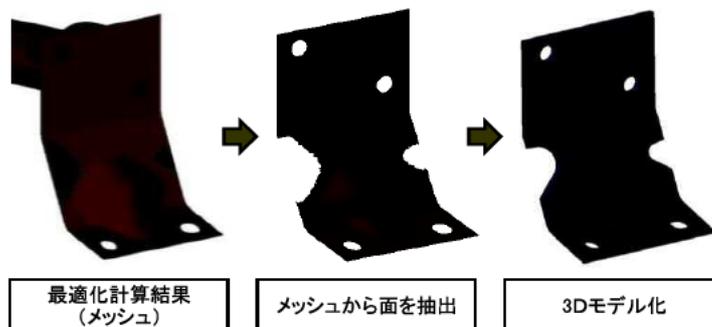
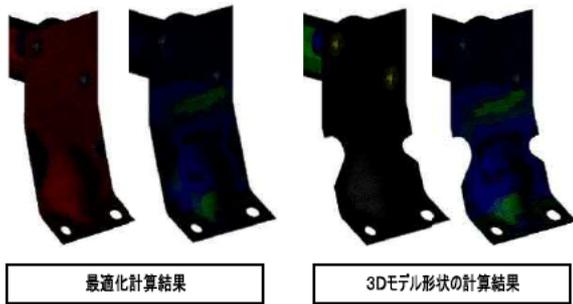


図24. 最適化計算結果の3Dモデル化



	最適化計算結果	3Dモデル形状結果
剛性(N/mm)	1718(+16.3%)	1748(+18.4%)
重量(kg)	0.220(-14.7%)	0.226(-12.4%)

図 25. 構造解析ソフトによる解析結果 表 8. 剛性と重量の比較(トポロジー最適化)

最適化計算結果と3Dモデル化形状の結果はほぼ同等であり、目標の剛性10%以上向上、軽量化10%以上を達成できた。

<テストピースB トポロジー最適化>

テストピースAと同様に実施。検証結果を図28及び表9に示す。



	最適化計算結果	3Dモデル形状結果
変形荷重(N)	2259(+14.5%)	2191(+11%)
重量(kg)	1.181(Δ18.2%)	1.04(Δ27.9%)

図 28. 構造解析ソフトによる解析結果 表 9. 剛性と重量の比較(トポロジー最適化)

最適化計算結果と3Dモデル化形状の結果はほぼ同等であり、目標の剛性10%以上向上、軽量化10%以上を達成できた。

<テストピースC トポロジー最適化>

テストピースA、Bと同様に実施。検証結果を図32及び表10に示す。



	最適化計算結果	3Dモデル形状結果
変形荷重(kN)	16.5(+15.4%)	16.9(+18.2%)
重量(kg)	0.902(Δ18.4%)	0.948(Δ14.3%)

図 32. 構造解析ソフトによる解析結果 表 10. 強度と重量の比較(トポロジー最適化)

最適化計算結果と3Dモデル化形状の結果はほぼ同等であり、目標の強度10%以上向上、軽量化10%以上を達成できた。

以上、プロトタイプとしてのトポロジー最適化システムの構築を完了した。

〈3Dプリンターによる最適化結果の検証〉

最適化結果の性能検証の為、素早く形状化できる3Dプリンターで試験品を製作した。尚、3Dプリンター品の評価前に、製作した造形品（樹脂）が評価に値するものである事を確認するため、3Dデジタイザーで形状チェックを行った。

〈テストピースC〉

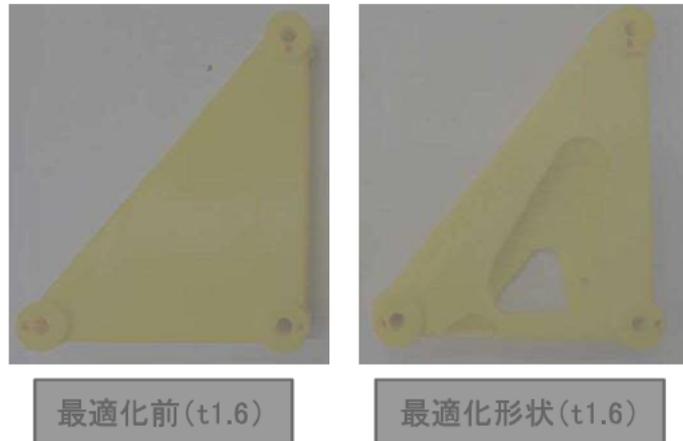


図 3.3. テストピースC 造形品（樹脂）

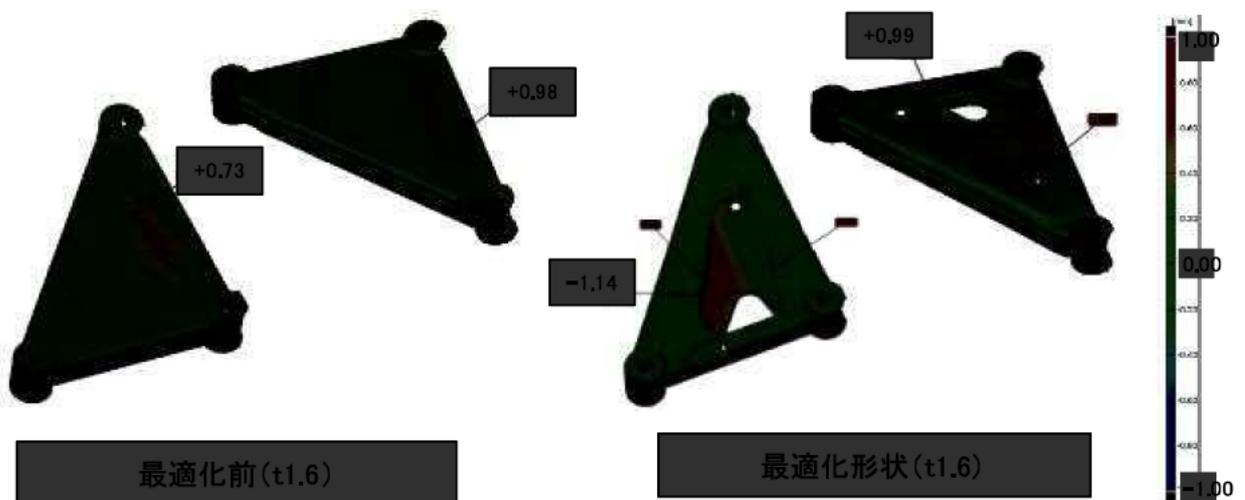
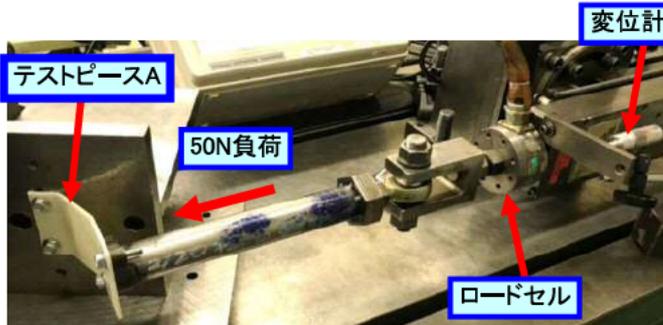


図 3.4. テストピースC造形品（樹脂）形状測定結果

表面偏差を確認した結果、3Dプリンターで製作した造形品は、3Dモデル通りに製作できていると判断し、台上試験による相対評価を実施した。

最適化結果の性能検証の為、3Dプリンターで製作した造形品（樹脂）で台上試験を実施した。試験結果を下記に示す。

〈テストピースA〉



	(N/mm)	
	試験	解析
最適化前(t3.2)	14.6	18.1
最適化形状(t2.9)	18.2	22.7
最適化効果	+24.7%	+25.4%

〈テストピースB〉

	(N/mm)	
	試験	解析
最適化前(t6.0)	5.5	3.2
最適化形状(t6.0)	5.5	3.6
最適化効果	注 +0%	+12.5%

(注) 解析結果と試験結果の最適化効果が大幅に異なる、原因は拘束条件の違い、変形モードの違い等が考えられる。今後板金試作品により詳細原因を詰めることとする。

〈テストピースC〉

	(N/mm)	
	試験	解析
最適化前(t1.6)	496	308
最適化形状(t1.6)	539	336
最適化効果	+8.7%	+9.1%

3Dプリンター品の試験にて概ね最適化の効果（剛性アップ）が確認できた。

3Dプリンター品の試験結果から、テストピースBを除き性能検証できた。テストピースBについては板金試作品により詳細原因を詰めることとする。

2-1-2-3 最適化シミュレーション連成システムの構築

構築したプロトタイプのパラメトリック形状最適化とトポロジー最適化、それと、構造解析ソフト（NASTRAN）を連成し、一連の流れを自動化した最適化シミュレーションシステムを構築した。この最適化シミュレーション連成システムは、形状最適化とトポロジー最適化が同時に並行して進む同時最適化システムである。また最適化の目的違いにより、線形と非線形の2タイプのシステムを構築した。

線形最適化シミュレーション連成システムの流れ（フロー）を図35に示す。基本的な流れ（フロー）は単独のシステムと同様であり、形状最適化とトポロジー最適化には其々、最適化のスピードを決定する更新率パラメーターがある。

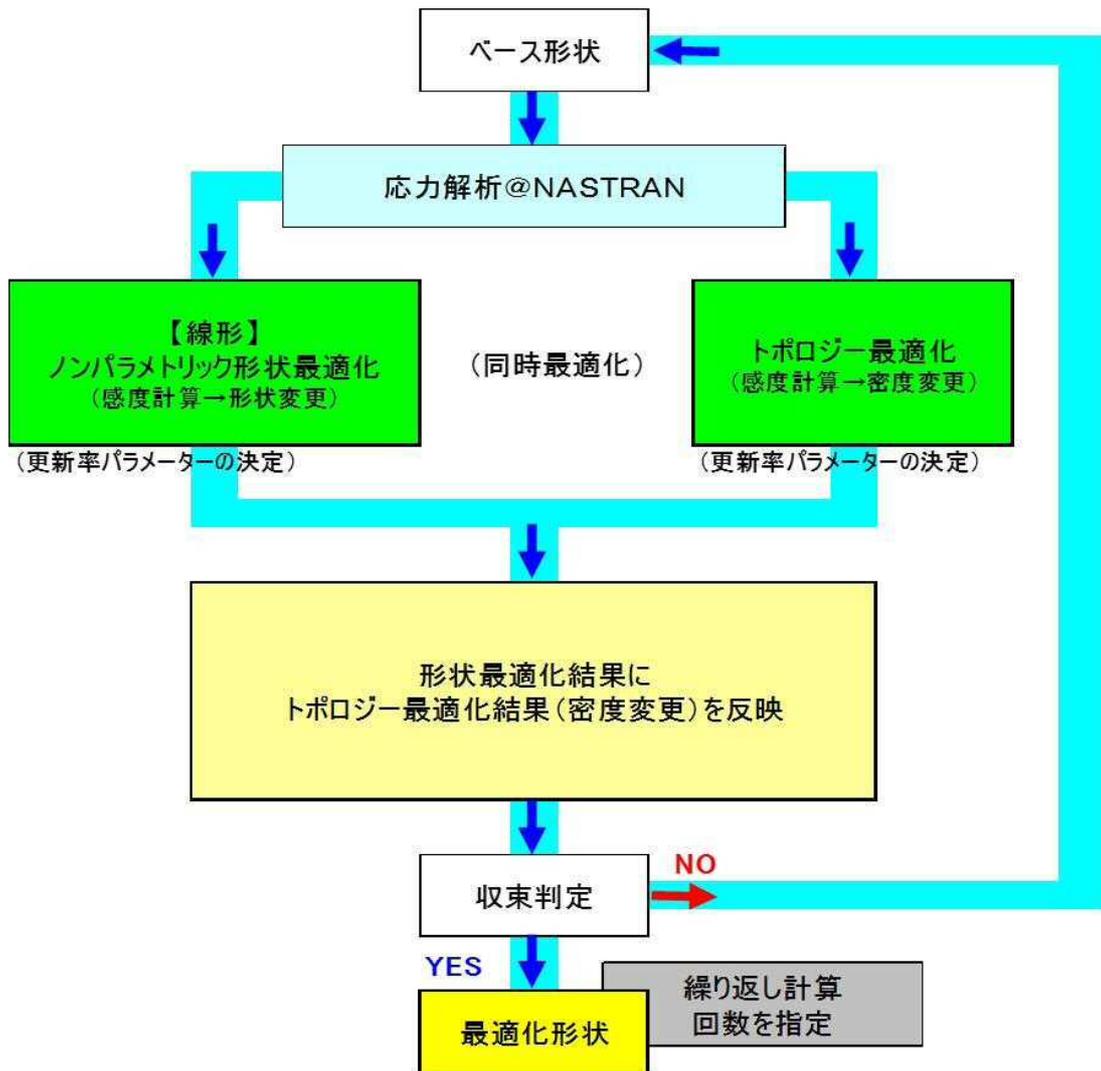


図35. 線形最適化シミュレーション連成システムの流れ（フロー）

〈テストピースAによる線形の最適化シミュレーション連成システム確認〉

線形の最適化シミュレーション連成システムにてテストピースAの同時最適化検討を実施した。また、形状最適化とトポロジー最適化のスピードを決定する更新率パラメータの違いによる最適化結果の比較を行った。

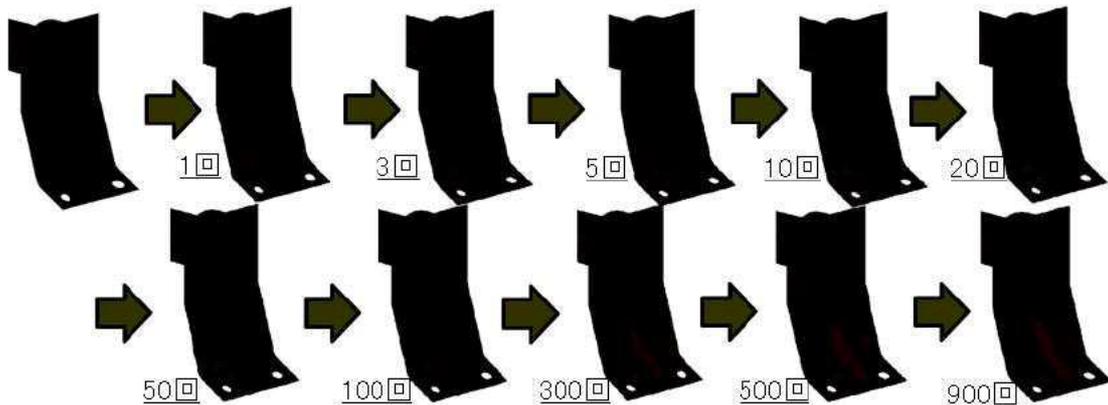
【テストピースA 同時最適化条件】

- ・ 負荷点剛性最大化
- ・ 設計領域（単独の形状最適化とトポロジー最適化と同様）
- ・ 体積制約：1.05（形状最適化時）、0.7（トポロジー最適化時）
- ・ 繰り返し計算回数：900～1500回
- ・ 更新率パラメータ：2パターンで計算。（表12）

表12. 更新率パラメーターと最適化結果

		CASE1	CASE2
更新率パラメーター	形状最適化	1.0	2.0
	トポロジー最適化	15	15
繰り返し計算回数(回)		900	1500
最適化結果	重量(kg)	0.225	0.226
	剛性(N/mm)	2004	2222

(CASE1) 繰り返し計算回数900回



(CASE2) 繰り返し計算回数1500回

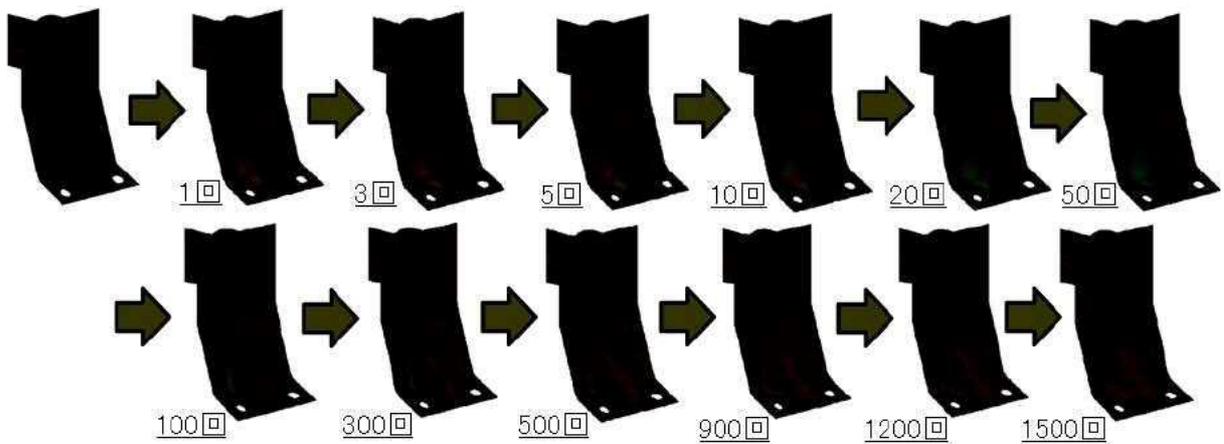


図36. テストピースA 同時最適化結果 (CASE1とCASE2)

CASE 1とCASE 2の最適化結果の応力分布図を図37に示す。形状最適化の更新率パラメータ値が大きいCASE 2のほうが剛性値が高いが、梁が細い部分に応力集中が発生しており、生産性と応力分布を考慮するとCASE 2は最適化形状としては不適である。

このように更新率パラメータ違いにより最適解が異なり、現状の最適化シミュレーションシステムでは、設計者が生産性を考慮して最適解を選択する必要がある。

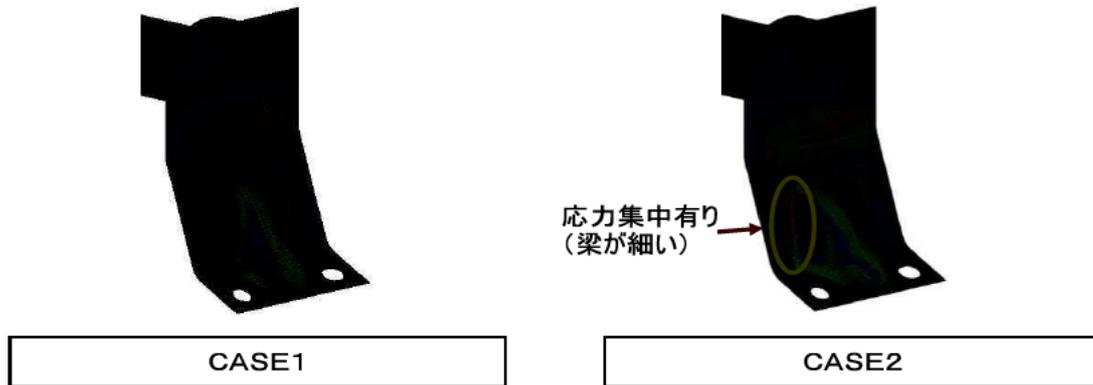


図37. 更新率パラメータ違いによる最適化結果

次に2段階最適化（形状最適化→トポロジー最適化）を実施し、同時最適化結果との比較結果を図38に示す。

【テストピースA 2段階最適化条件】

- ・ 負荷点剛性最大化
- ・ 設計領域（同時最適化と同様）
- ・ 体積制約：1.05（形状最適化時）、0.7（トポロジー最適化時）
- ・ 繰り返し計算回数：300回（形状最適化、トポロジー最適化とも）

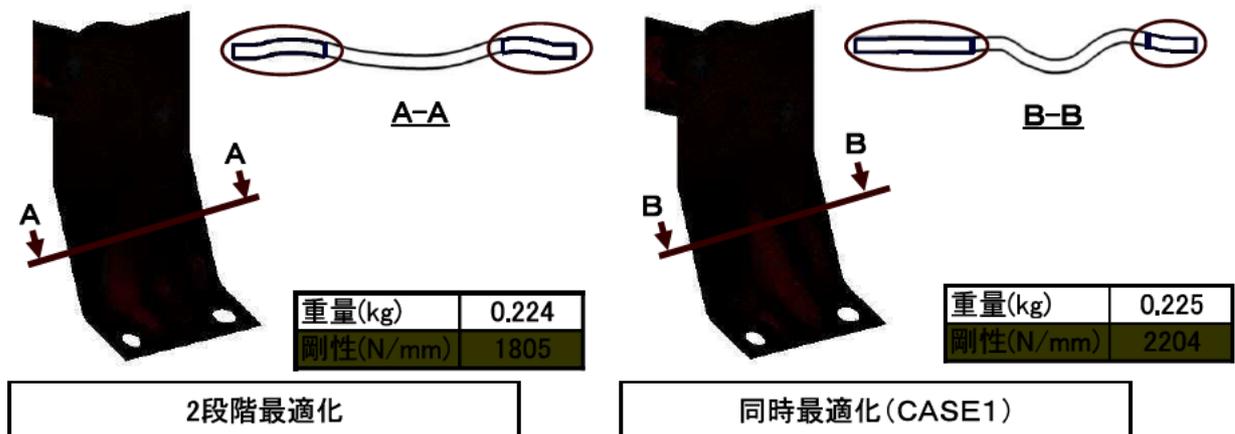


図38. 2段階最適化と同時最適化の結果比較

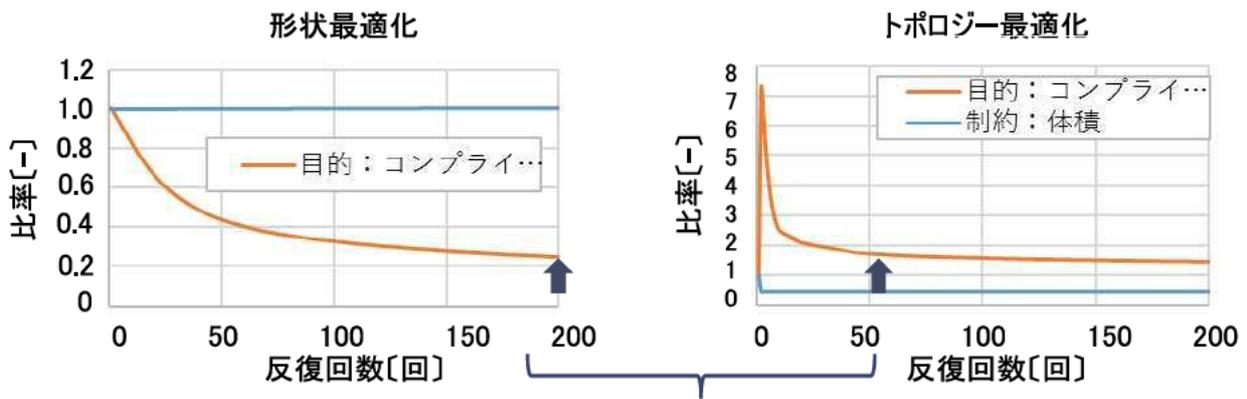
2段階最適化結果は、形状最適化が完了した後にトポロジー最適化を行う為、剛性アップに必要なビード形状の上に軽量化穴が空き、剛性が低下してしまう。一方、同時最適化は形状最適化とトポロジー最適化を同時に繰り返す為、計算が進む毎に剛性はアップする。よって、同時最適化の方が剛性が高い形状を得られる。

＜更新率パラメーターの検証＞

同時最適化における更新率パラメーターを設定する際の目安を決定する為サンプルモデルで検証を行った。

【更新率パラメーターの決め方】

事前に、形状最適化とトポロジー最適化を実行し、収束回数を合わせるように更新率パラメーターを設定する。



このとき形状の更新率パラメータを4倍にする

【サンプルモデル1】

- ・コンプライアンス最小化
- ・体積制約：1.05（形状最適化時）、0.5（トポロジー最適化時）

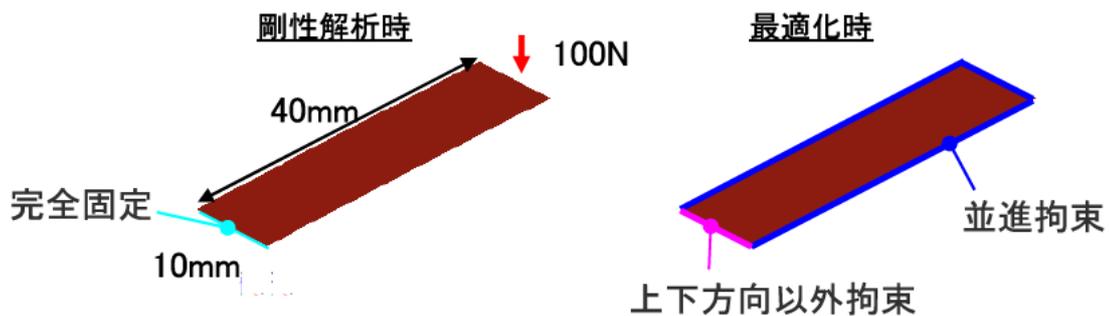


図39. 最適化条件

上記の条件で、形状最適化とトポロジー最適化をそれぞれ実施する。

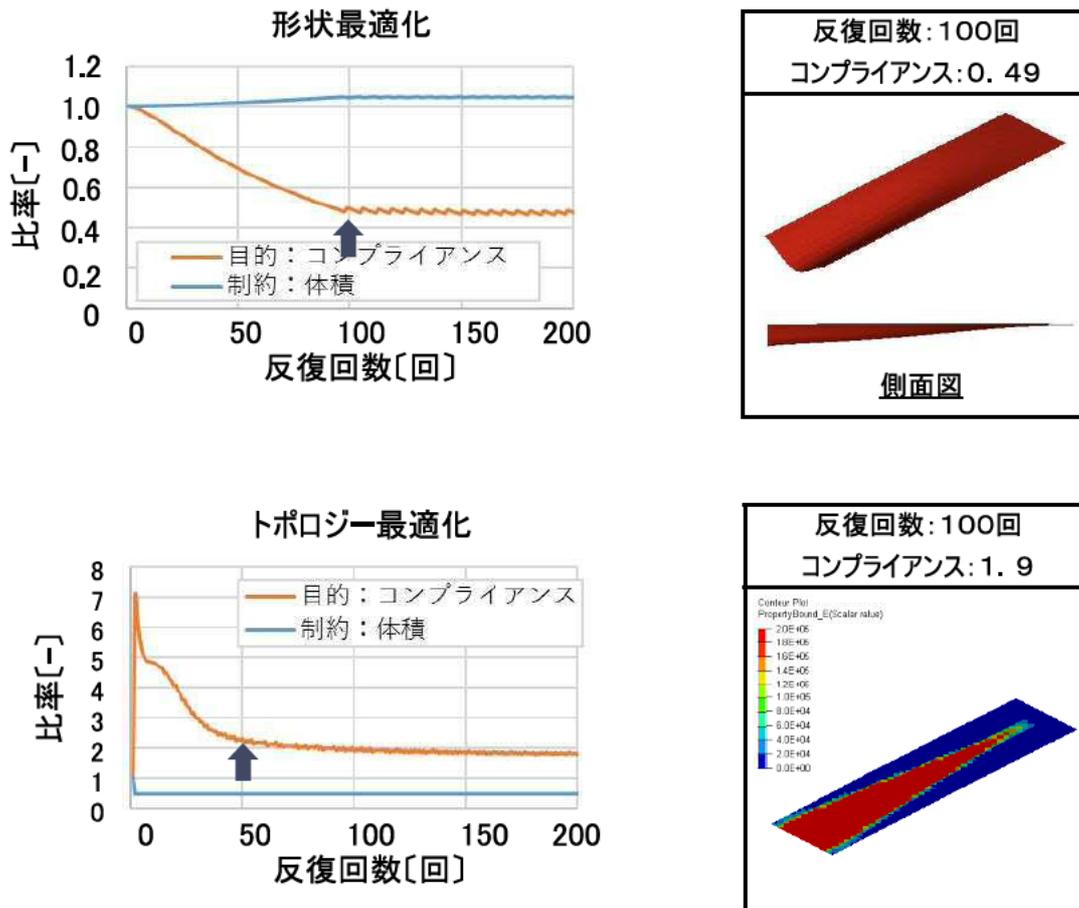
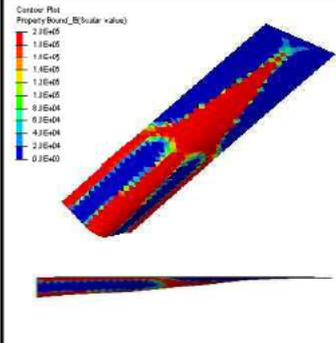
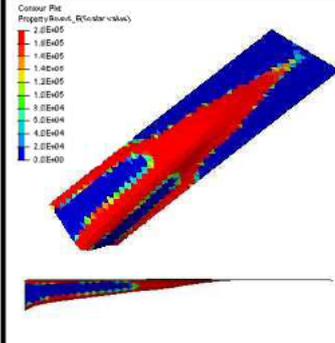
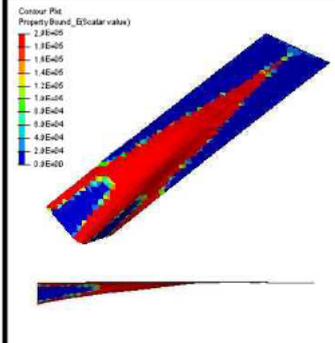


図 4 0 . 最適化結果

上記の形状最適化とトポロジー最適化の結果より収束回数を合わせるように、更新率パラメータを設定する。

→ (形状最適化) : (トポロジー最適化) = 2 : 1

表 1 3 . 更新率パラメータ変更時の最適化結果

2段階最適化	同時最適化	
	更新率=2:1	更新率=1:1
反復回数300回	反復回数200回	反復回数400回
コンプライアンス:1.0	コンプライアンス:0.89	コンプライアンス:1.05
		

同時最適化において、更新率パラメーターの形状最適化の値を大きくすると、剛性の高い結果が得られる。また、2段階最適化結果よりも剛性は高い結果となった。ここで更なる検証のため、更新率パラメーターの値を振った場合の最適化結果を表14に示す。

表14. 更新率パラメーター ケーススタディー結果 (サンプルモデル1)

		更新率パラメーター	反復回数	コンプライアンス	備考
2段階最適化			300回	1.00	
同時最適化	①	1:25	250回	1.74	
	②	2:5	250回	1.28	
	③	1:1	400回	1.05	
	④	2:1	200回	0.89	
	⑤	20:1	200回	0.71	剛性最大
	⑥	40:1	300回	1.05	

形状最適化の更新率が大きいほど、剛性が高い形状が得られる。但し、値が大きすぎると、形状が不安定となり剛性が低下する結果も得られた。(ケース⑥)

更に下記2つのサンプルモデルにて形状最適化とトポロジー最適化を実施する。

【サンプルモデル2】

【サンプルモデル3】

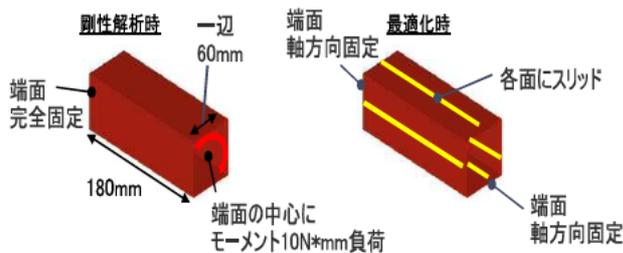


図4.1. 最適化条件

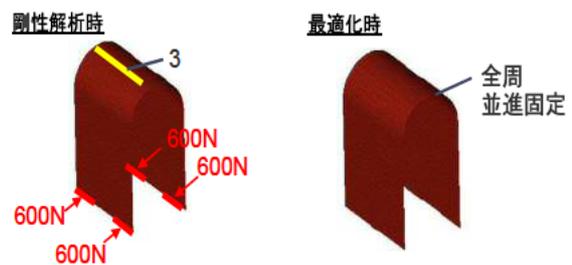


図4.3. 最適化条件

表19. 同時最適化結果 (ケース⑥)

モデル1	モデル2	モデル3
更新率=40:1	更新率=20:1	更新率=10:1

検討した3つのサンプルモデルにおいて、2段階最適化よりも同時最適化の方が高い剛性を得ることができる。また、同時最適化の更新率パラメーターの変化に対して、形状最適化の更新率が大きいほうが、剛性の高い形状が得られ易い。但し、形状最適化の更新率が高いケースでは、不安定な形状とトポロジー結果が得られ、剛性が低い結果となった。(表19)

以上、事前に形状最適化とトポロジー最適化を実行し、其々の収束回数を合わせるように更新率パラメーターを合わせることで、概ね最適化な結果が得られることが分かった。但し、境界条件と形状の違いにより、2段階最適化と同時最適化の使い分けが必要と考える。

〈非線形最適シミュレーション連成システム構築〉

非線形最適シミュレーション連成システムの流れ（フロー）を図44に示す。
基本的な流れ（フロー）は単独のシステムと同様となる。

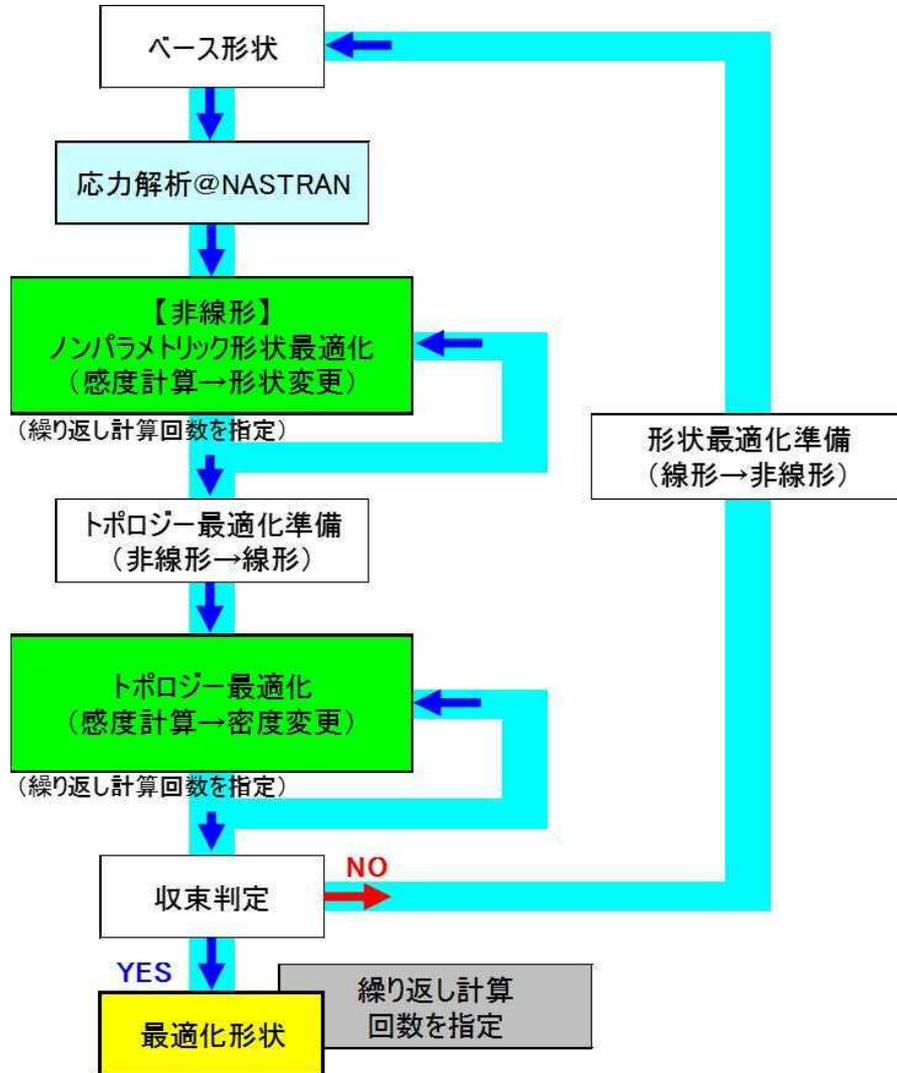


図45. 非線形最適シミュレーション連成システムの流れ（フロー）

非線形最適シミュレーション連成システムの構築に際し、まずは、ノンパラメトリック形状最適化の形状変更時に干渉領域に対し接触が考慮できるようにプログラムの改良を行った。これにより、干渉領域に干渉物を設定し、構造解析ソフト（NASTRAN）の接触設定により干渉物への接触を認識させることで干渉領域側への形状変更を抑制することを可能とした。

また、その応用として互いに接する複数部品が同時に形状変更する際に接触設定を追加することで、お互いがすり抜けない様にした。

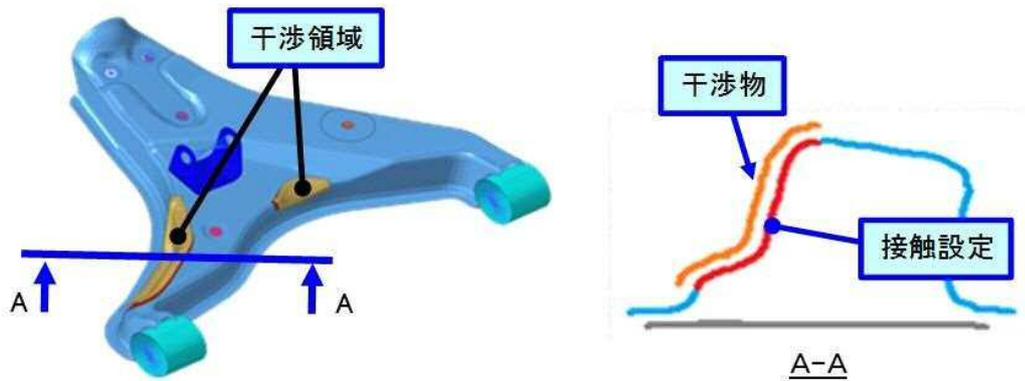


図 4 6．干渉領域を考慮した形状最適化

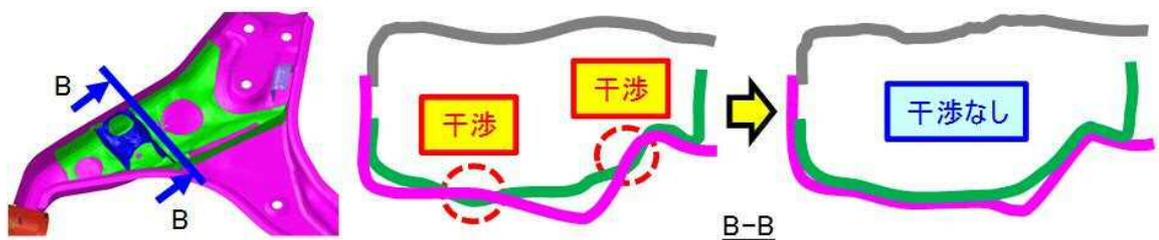


図 4 7．複数部品での形状最適化

次に、1方向毎に行っていた最適化計算を複数入力に対して同時に形状変更ができるようにプログラムの改良を行った。各入力の感度計算を行い、其々の感度を足し合わせることで形状変更するようにした。しかし、各入力に対する面の变形方向が異なると強度UP効果が打ち消されることが分かった。その対策として、入力方向の優先順位付けを行い1方向毎に計算を行うこととした。

また、最適化形状生成時にエッジができる対策として、プレス加工可能な成形Rの生成についてプログラムの改良検討を複数回に渡り行ったが、エッジが残る結果しか得られなかった。その為、エッジの処理についてはS-Generatorのスムージング機能を用いて形状修正することによりプレス加工可能な成形Rとした。

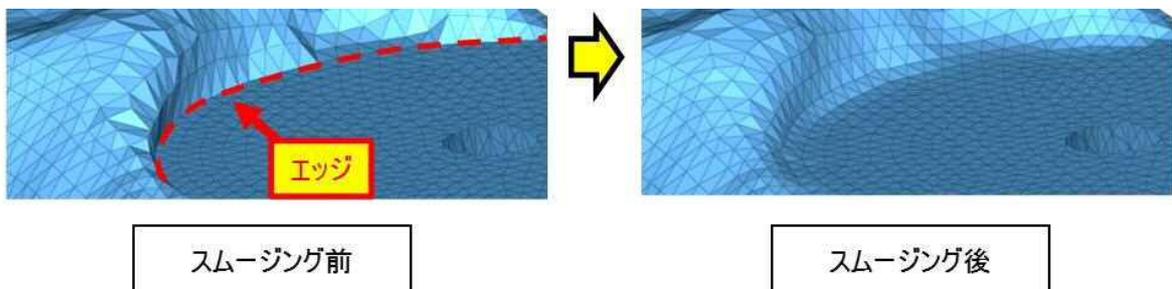


図 4 8．スムージングによる成形R生成

【テストピースC 同時最適化条件】

- ・ 負荷点荷重最大化
- ・ 設計領域：(2段階最適化と同様)
- ・ 体積制約：1.05 (形状最適化時)、0.8 (トポロジー最適化時)
- ・ 繰り返し計算回数：【形状最適化40回→トポロジー最適化200回】
×3サイクル

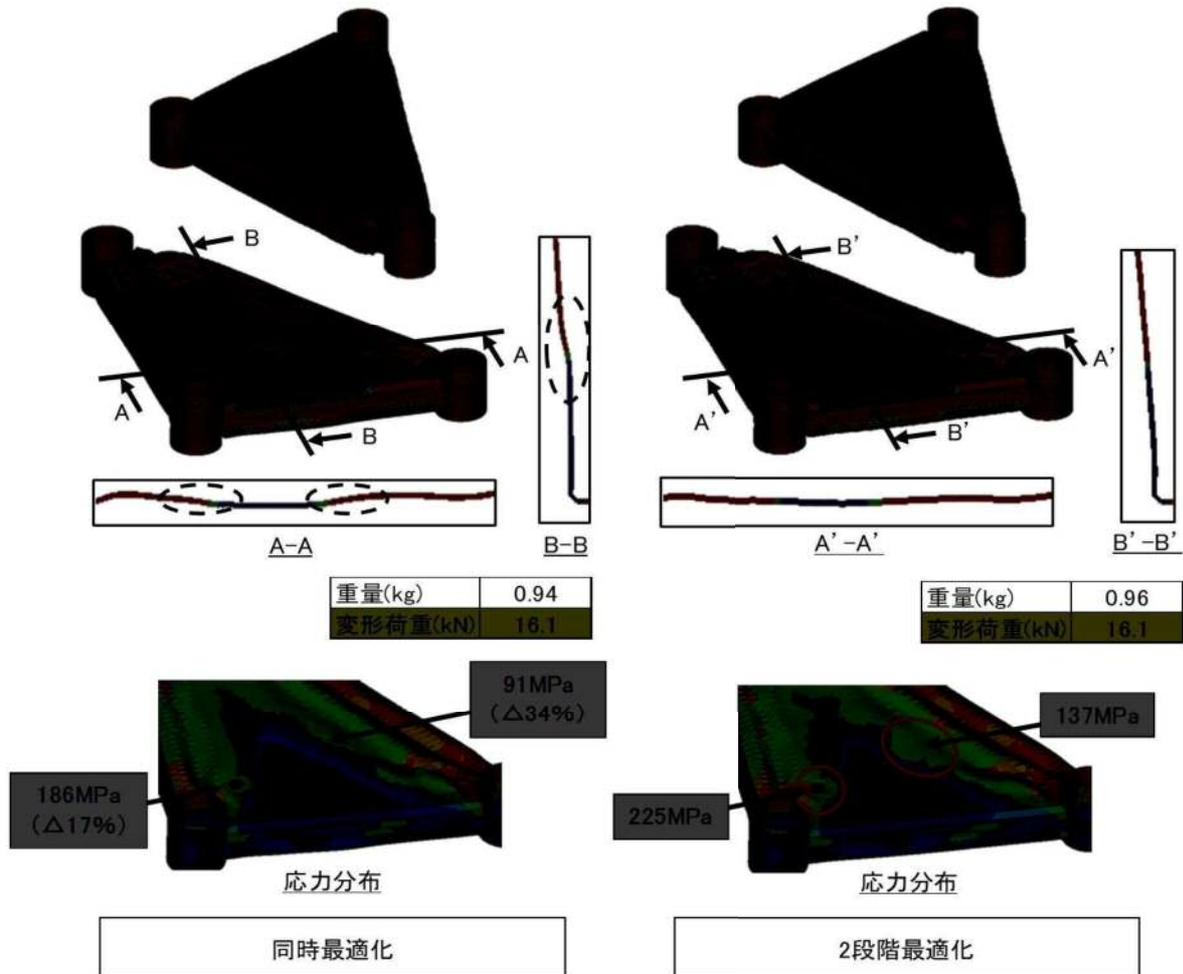


図49. 2段階最適化と同時最適化の結果比較

同時最適化で得られた最適解は強度UP、軽量化できることが確認できた。また、トポロジー最適化によって空いた穴回りについても、穴淵が形状変更して補強されることにより応力が低減していることも確認できた。

最適化シミュレーションシステムの構築に際し、使用した機器とその活用方法は以下の通り。

解析用ワークステーション (図50)

- ・レノボ製 ThinkStation P910
- ・スペック
メモリ：512GB
ハードディスク：4TB
- ・最適化シミュレーションシステムの構築、及び最適化計算と最適化結果の検証用として活用

HyperWorks

- ・アルテアエンジニアリング製
- ・最適化計算用の解析モデル作成ソフト
- ・上記ワークステーションにインストール
- ・最適化計算用モデルを作成する為に活用

MSC NASTRAN

- ・MSC製
- ・最適化結果検証用の構造解析ソフト
- ・上記ワークステーションにインストール
- ・最適化結果の構造解析用として活用

3Dプリンター (図51)

- ・ムトー工業製
- ・スペック
造形方式：熱溶解積層方式
造形サイズ：300x300x300mm
- ・最適化前後の性能・機能の簡単な相対評価を実施する為に活用



図50. 解析用ワークステーション



図51. 3Dプリンター

S-Generator

- ・メッシュモデルから面作成に使用
- ・面のエッジ部に成形可能Rを作るため使用

2-1-3 最適化シミュレーション結果の試作検証

2-1-3-1 最適最軽量化したテストピースのプレス成形シミュレーション

テストピースA最適化形状のプレス成形シミュレーションを実施。
曲げとビード成形を一発で加工する金型構造とし、プレス成形シミュレーションを実施。解析結果で増肉している部分は上下金型のクリアランスを調整。スプリングバック対策としては、スプリングバック角度を見込んだ金型モデルを作成した。

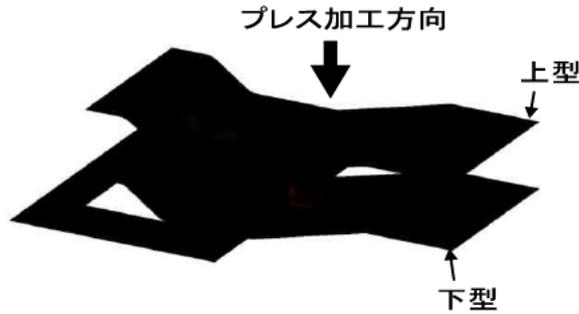
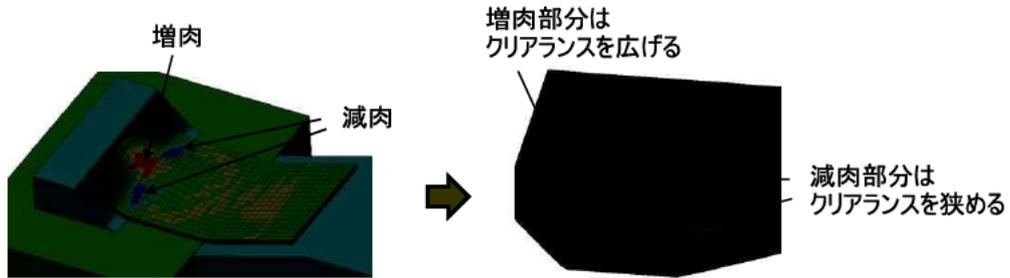


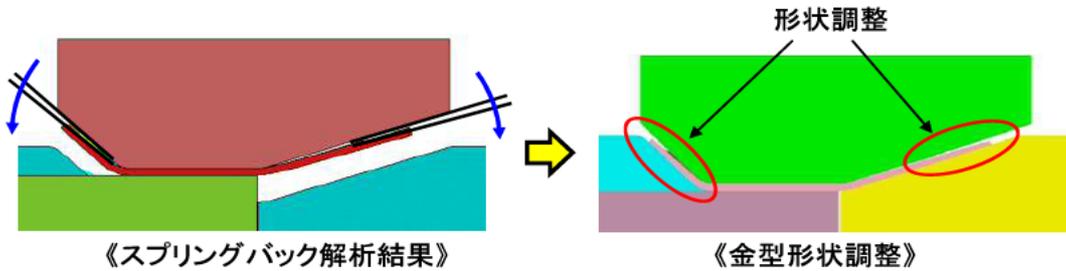
図 5 2. 金型構造



《板厚増減解析結果》

《金型クリアランス調整》

図 5 3. プレス成形シミュレーション結果 (板厚変動)



《スプリングバック解析結果》

《金型形状調整》

図 5 4. プレス成形シミュレーション結果 (スプリングバック)

2-1-3-2 成形シミュレーション結果に基づく、板厚変動を見込んだ金型製作
成形シミュレーション結果を金型モデルで金型製作した。

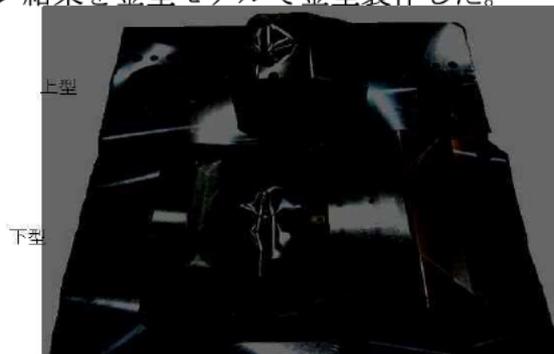


図 5 8. 金型 (テストピースA)

2-1-3-3 製作金型の形状測定結果とプレス成形シミュレーション結果との整合確認

3Dデジタイザーで金型測定を実施。金型形状モデルと測定結果を重ね合せ表面偏差を確認した結果、差は±0.05mm以内であり、金型は3Dモデル通り精度良く出来ていることを確認した。

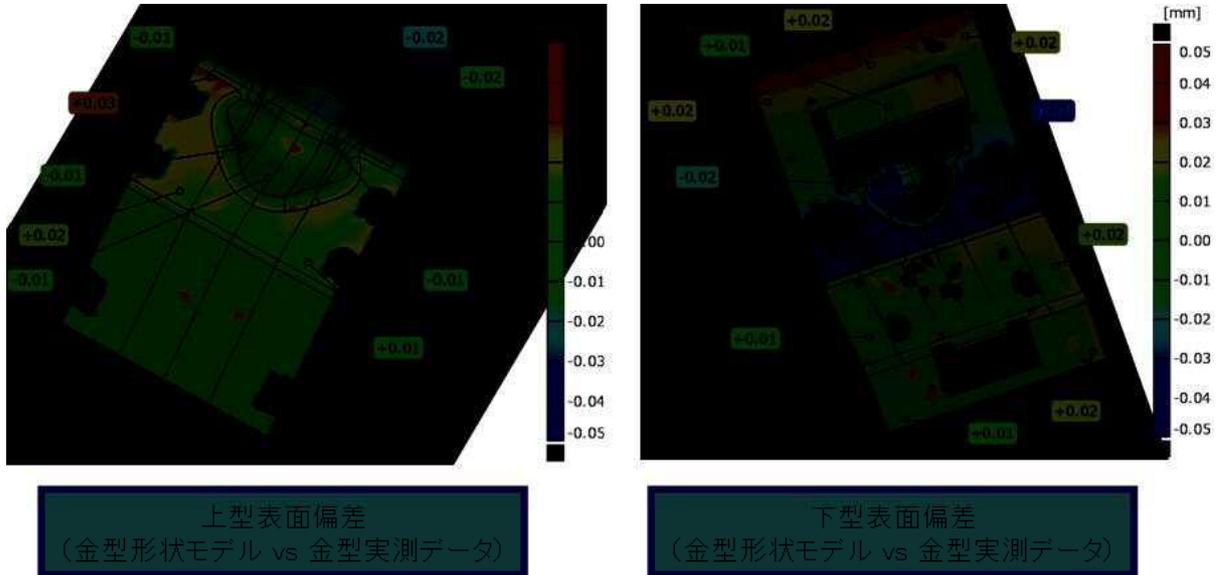


図60. 金型形状測定結果 (テストピースA)

2-1-3-4 プレス加工した製品の形状測定結果とプレス成形シミュレーション結果との整合確認

3Dデジタイザーでプレス加工品の測定を実施。製品3Dモデルと測定結果を重ね合せ、表面偏差を確認した結果、形状及び板厚変動においてプレス成形シミュレーションと同等のプレス加工品ができた。

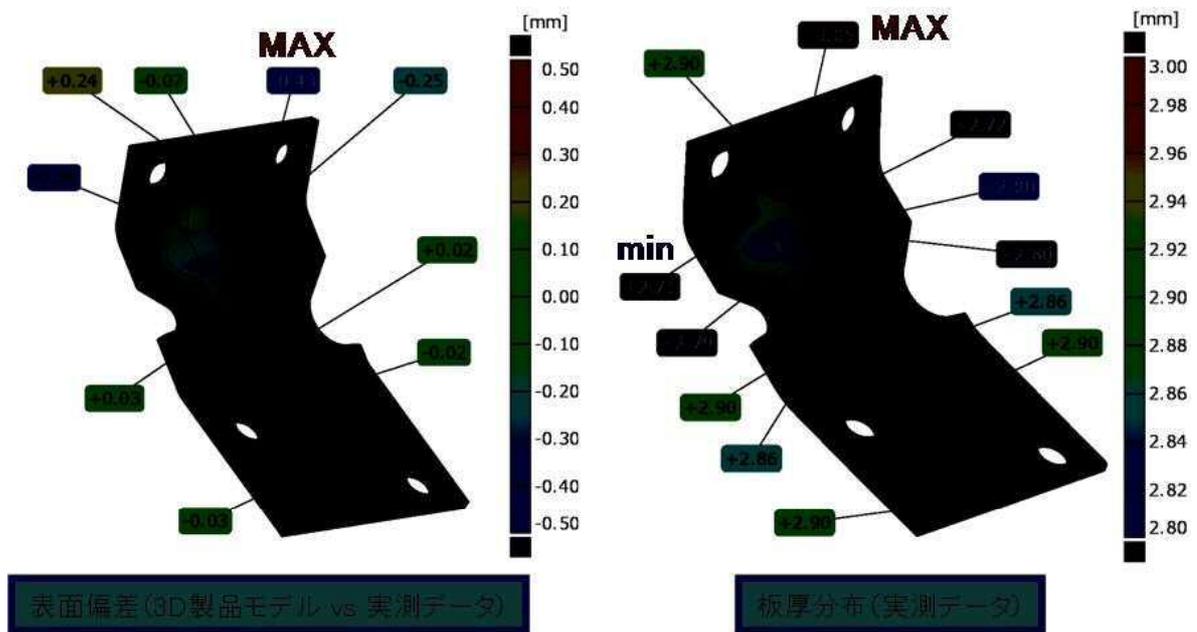


図62. プレス加工品測定結果 (テストピースA)

2-1-3-5 製品の試験評価による要求事項の確認

製作したテストピースの剛性・強度試験を実施。テストピースA、Bに関しては試験結果が目標の剛性・強度10%以上向上に対し未達だった為、形状・板厚変動・境界条件に注目し解析と試験結果の相関調査を実施した。

〈テストピースA〉

治具にボルト2本で固定し、負荷治具を介し図中矢印方向に1000N負荷した際の、負荷点変位を計測した。試験結果を下記に示す。

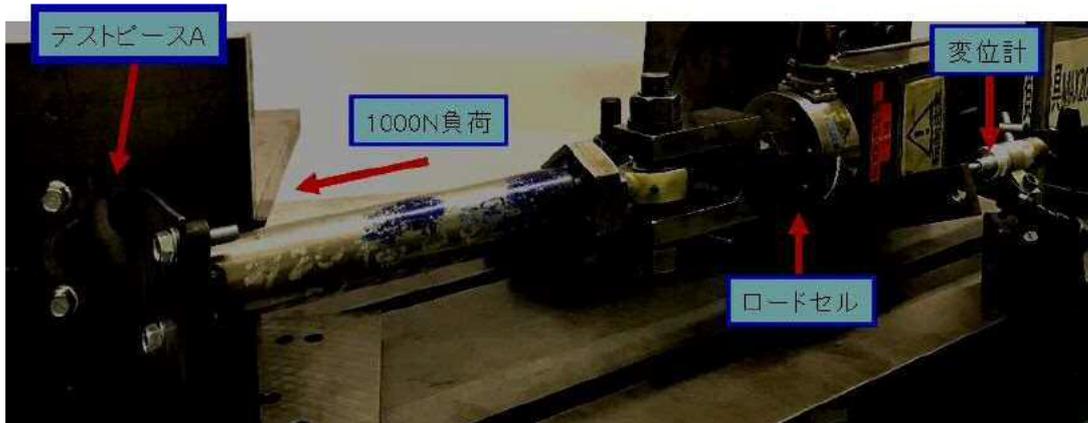


図6 4. テストピースA 剛性試験条件

表2 0. テストピースA 剛性試験結果 (N/mm)

	試験		解析		
	3Dプリンター	板金	3Dプリンター	板金	相関調査後
最適化前 (t3.2)	14.6	988	18.1	1477	1250
最適化形状 (t2.9) ※	18.2	1005	22.7	1748	1226
最適化効果	+24.7%	+1.7%	+25.4%	+18.3%	-1.9%

※2段階最適化結果(形状最適化→トポロジー最適化)

解析結果(+18.3%)に対し、台上試験結果では最適化効果が無い結果(+1.7%)となった為、試験と解析条件の違い(形状、入力・拘束条件、接触条件)に注目し相関調査を実施。相関調査の結果、試験と解析の剛性値の乖離が27%程度まで回復。許容範囲内である為、試作検証を完了した。

〈テストピースB〉

テストピースBをピン2本で支持し、図示矢印方向にテストピースBが変形するまで負荷し、変形荷重を計測した。試験結果を下記に示す。

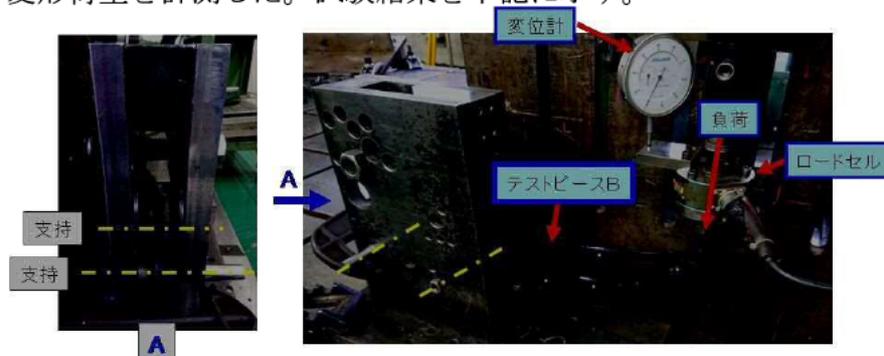


図6 5. テストピースB 強度試験条件

表 2 1. テストピース B 強度試験結果 (変形荷重)

	試験			解析				
	3Dプリンタ (剛性)	板金		3Dプリンタ (剛性)	板金		相関調査後	
		剛性	変形荷重		剛性	変形荷重	剛性	変形荷重
最適化前(t6.0)	5.5	247	2855	3.2	307	1973	307	2342
最適化形状(t6.0) ※	5.5	243	3042	3.6	344	2191	344	2601
最適化効果	+0%	-1.7%	+6.5%	+12.5%	+12.1%	+11.0%	+12.1%	+11.0%

※2段階最適化結果(形状最適化→トポロジー最適化)

解析結果(剛性+12.1%、変形荷重+11%)に対し、台上試験結果では最適化効果が少ない結果(剛性-1.7%、変形荷重+6.5%)となった為、試験と解析条件の違い(形状、入力・拘束条件、接触条件)に注目し相関調査を実施。相関調査の結果、試験と解析の変形荷重値の乖離が18%程度まで回復。許容範囲内である為、試作検証を完了した。

〈テストピースC〉

テストピースCのブッシュ圧入部2ヶ所を固定し、下図示矢印方向にテストピースCが変形するまで負荷し、変形(座屈)荷重を計測した。試験結果を下記に示す。

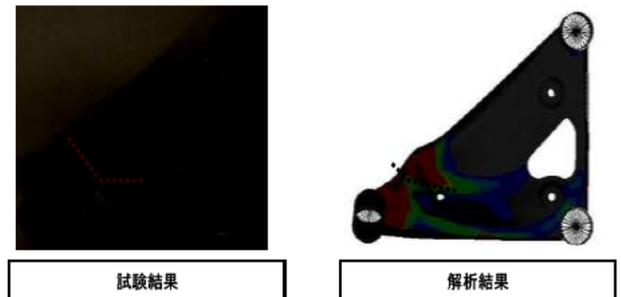
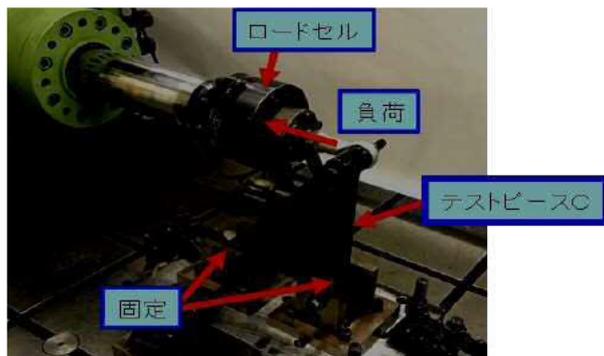


図 6 6. テストピースC 強度試験条件

図 6 7. テストピースC 変形モード(最適化形状)

表 2 2. テストピースC 強度試験結果 (座屈荷重)

	試験			解析				
	3Dプリンタ (剛性)	板金		3Dプリンタ (剛性)	板金		相関調査後	
		剛性	座屈荷重		剛性	座屈荷重	剛性	座屈荷重
最適化前(t1.6)	496	18.2	18.2	308	12.3	12.3	14.0	14.0
最適化形状(t1.6) ※	539	21.8	21.8	336	14.8	14.8	17.0	17.0
最適化効果	+8.7%	+19.8%	+19.8%	+9.1%	+20.3%	+20.3%	+21.4%	+21.4%

※2段階最適化結果(形状最適化→トポロジー最適化)

解析結果と台上試験結果の最適化効果はほぼ同等の結果となった。座屈荷重の値が試験と解析で乖離している点は、相関調査により23%程度の差に回復できた為、試作検証を完了した。

以上の試作検証結果を踏まえ、現状の最適化シミュレーション手法のマニュアルを作成し、本研究に従事するメンバーに水平展開した。

表題 **最適化シミュレーションシステム マニュアル** **秘**

1. 最適化用モデル準備 (HyperMeshでの作業)
 1-1. 線形の形状最適化・トポロジー最適化用モデル準備
 1-2. 非線形の形状最適化用モデル準備

2. 線形のノンパラメトリック形状最適化 単独システム
 2-1. 最適化計算実施

3. 非線形のノンパラメトリック形状最適化 単独システム
 3-1. 最適化計算実施

4. トポロジー最適化 単独システム
 4-1. 最適化計算実施

5. 線形の最適化連成システム
 5-1. 最適化計算実施

1) Dドライブの「05.Shape and topology optimization(linear)」フォルダを作業フォルダにコピーする (フォルダ名は変更可。但し、日本語表記はエラーとなる)

2) 作成した「input_a0.dat」を作業フォルダの「Shape and topology optimization」にコピーする。

3) 「input_a0.dat」をメモ帳で開き、コピー元「05.Shape and topology optimization(linear)」フォルダ「input_a0.dat」のテキスト文「BEGIN BULK ~ PARAM,TINY,0,0」をコピーする。
 (コピーする場所は、.datファイルの「\$\$ GRID Data」の2行上)

AをBに置き換え、「\$\$ GRID Data」の2行上に移動

datファイル編集前

datファイル編集後

4) 「setting.txt」を開き、パラメータを設定。
 ・rho_upper・・・トポロジーで穴を開ける体積目標を入力(最適化対象範囲の割合)
 ・shape_upper・・・形状変化後の体積上限値を入力
 ・ChangeRatio・・・形状最適化の重み係数を入力
 ・TopologyRatio・・・トポロジー最適化の重み係数を入力
 ・hanbetsu・・・連成での最適化を行う場合は【1.0】を入力
 ・nondesign・・・トポロジー最適化を行わない範囲のシェル要素数を入力

図 6 8. 最適化シミュレーションシステム マニュアル

最適化シミュレーション結果の試作検証に際し使用した機器とその活用方法は下記の通り。

3D デジタイザー (非接触光学式)

- ・ GOM社製
- ・ スペック：カメラ解像度：最大 1 6 0 0 万画素
- ・ 金型の形状測定、プレス加工品の形状、板厚測定の為に活用

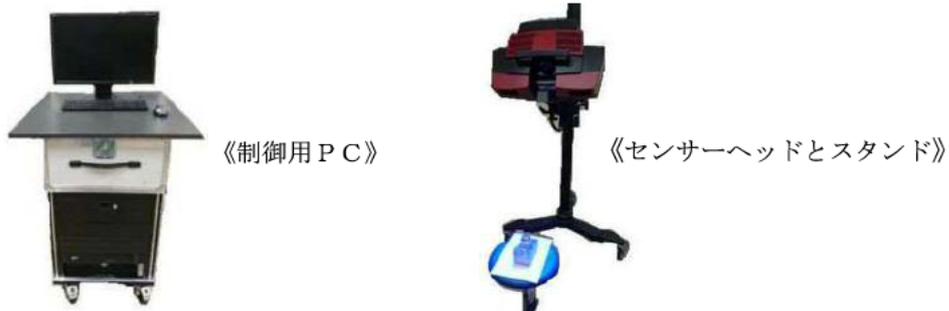


図 6 9. 非接触光学式 3D デジタイザー

2-2 解析に基づいた金型構造と試作品の製作

2-2-1 テストピースモデルでの加工工程を含めた最適化設計及び、加工最適金型の検討・検証

前項の試作検証の結果を基にテストピースBの量産プレス加工工程を考慮したプレス成形シミュレーションを実施し、金型最適化製作法の研究開発を行った。

- ① テストピースBの量産プレス工程は順送+曲げ工程の2工程に分かれる為、プレス成形シミュレーションも2工程に分けて実施した。

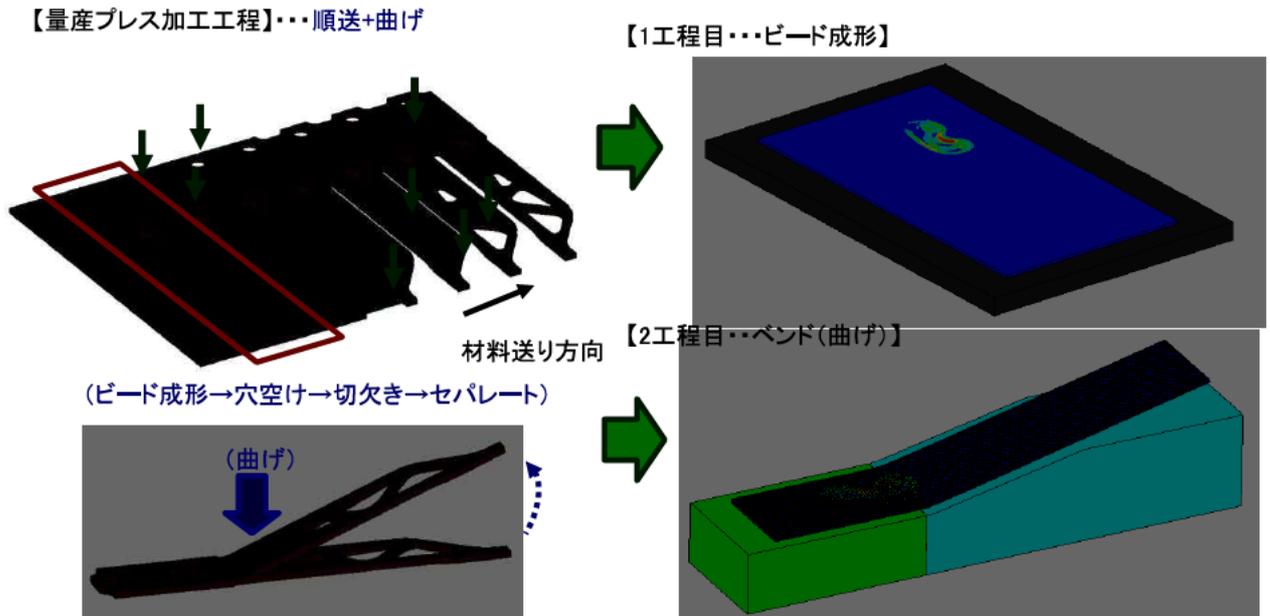


図70. テストピースB 量産プレス加工工程

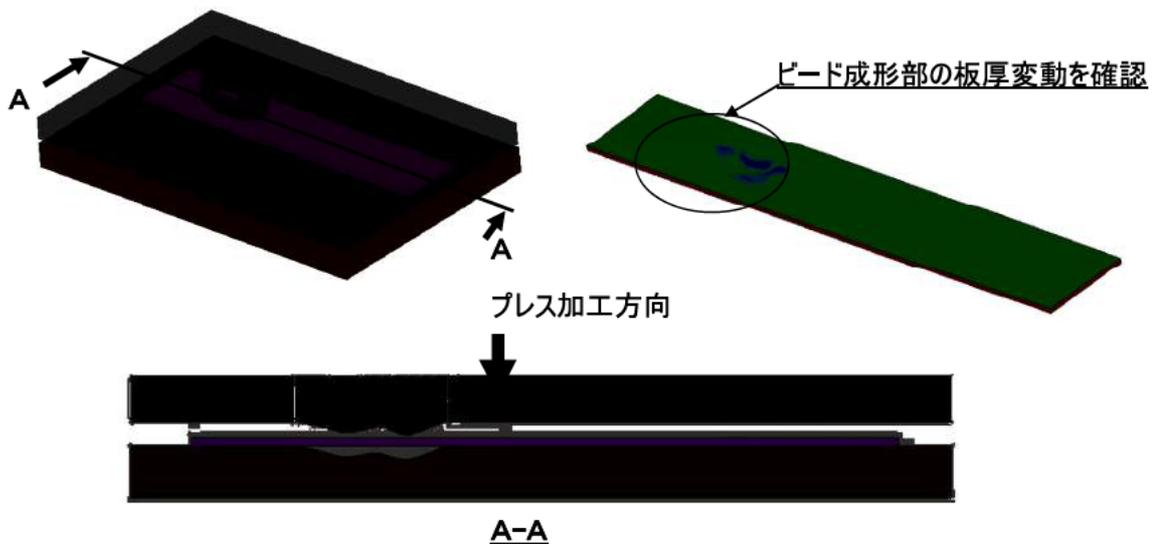


図71. プレス成形シミュレーション結果 (1工程目: ビード成形)

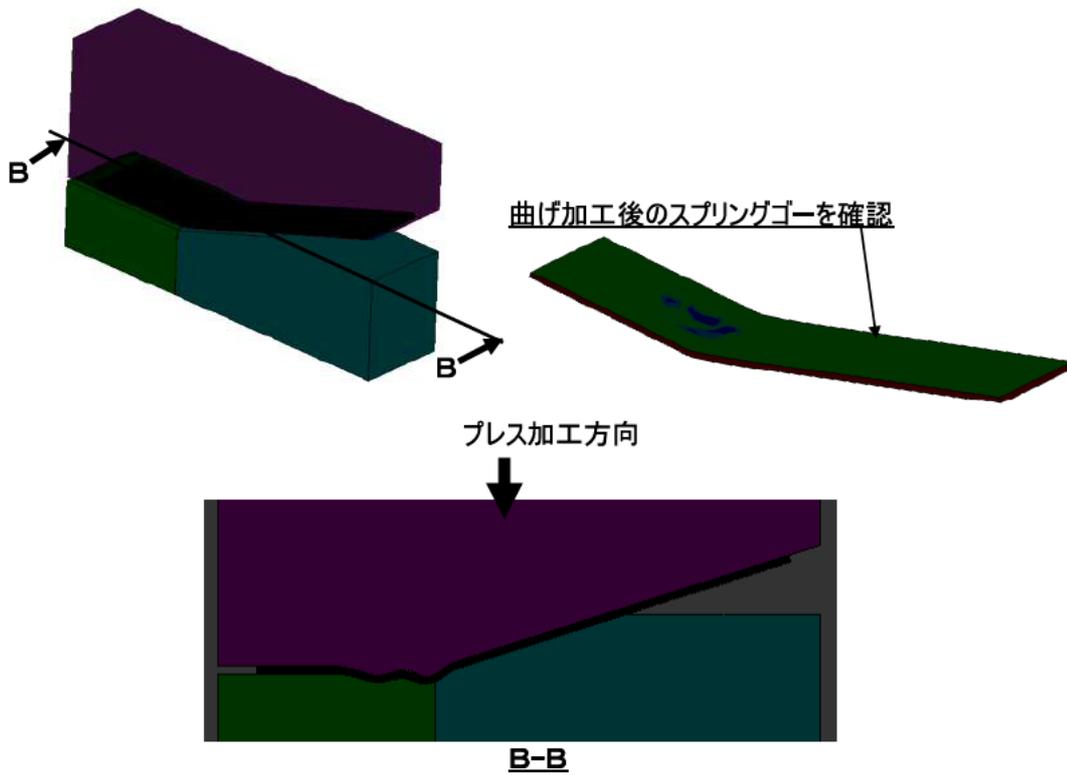
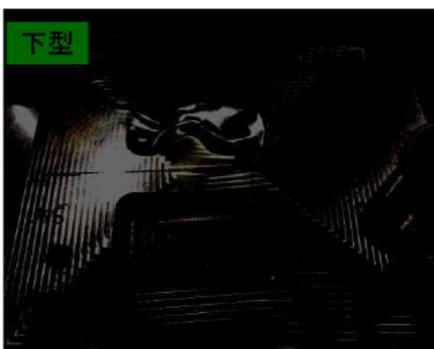


図 7 2. プレス成形シミュレーション結果（2工程目：曲げ）

②プレス成形シミュレーション結果を金型モデルに反映し金型を2型製作した。

【1工程目・・ビード成形】



【2工程目・・ベンド(曲げ)】



図 7 3. テストピースB金型（ビード成形型と曲げ型）

③ 製作した金型を3Dデジタイザーで測定し、金型形状モデルと測定結果を重ね合せ表面偏差を確認。表面偏差は±0.05mm以内であり、金型は3Dモデル通り精度良く出来た。

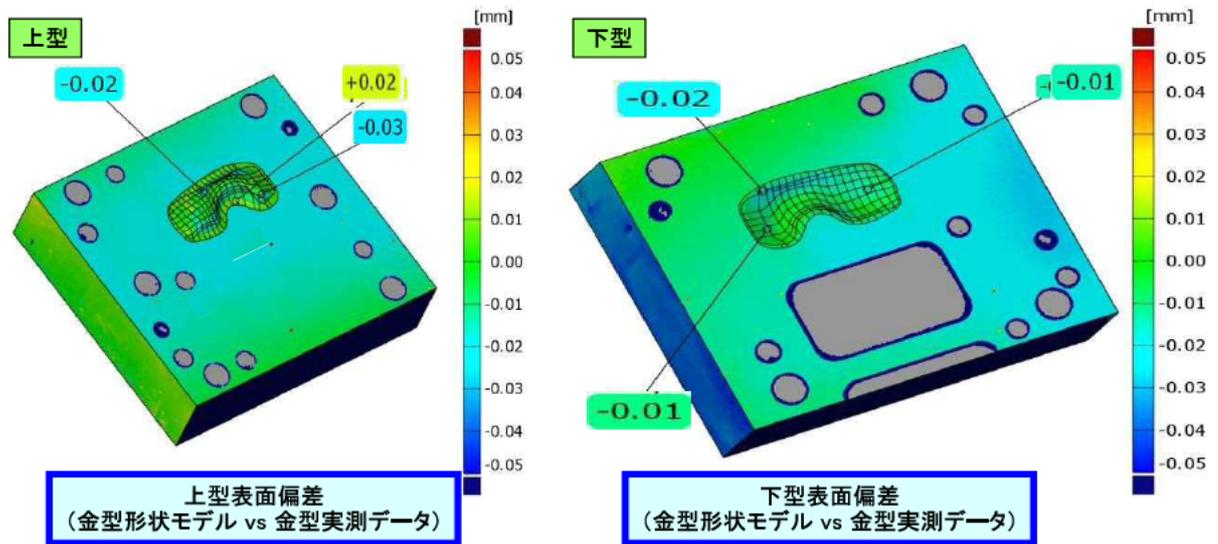


図7.4. 金型形状測定結果 (テストピースB 1工程目: ビード成形型)

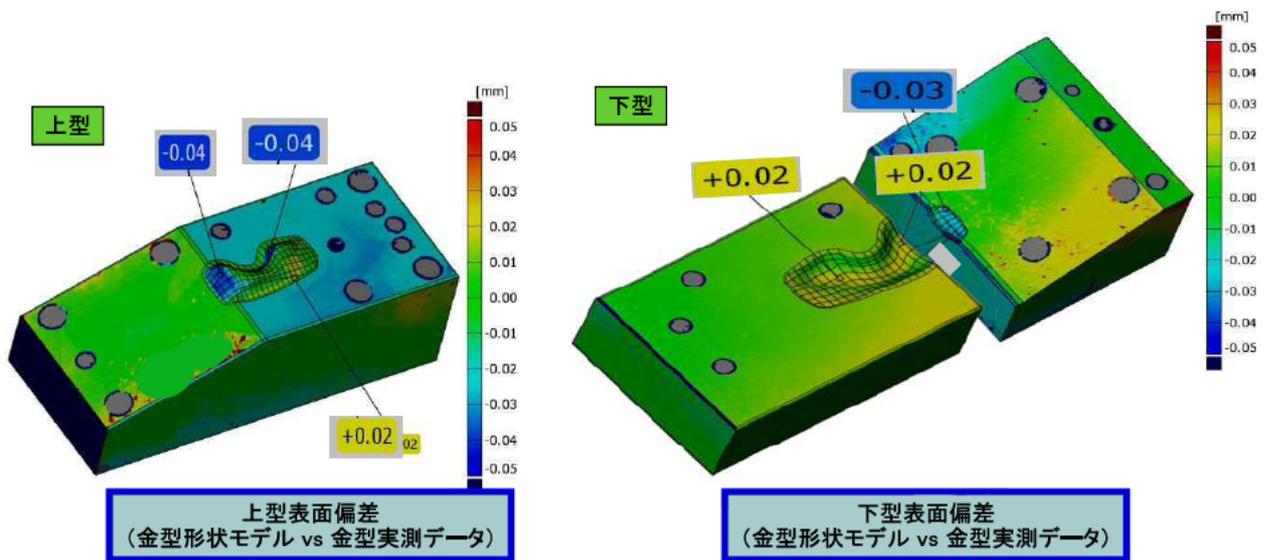


図7.5. 金型形状測定結果 (テストピースB 2工程目: ベンド型)

- ④ 量産プレス加工工程によるプレストライ品を3Dデジタイザーで測定し、プレスシミュレーション結果との整合確認を行った。
 ベンド工程品の曲げ角度が解析結果に対し差異が見られたが、プレス条件の見直しにより結果良好となった。

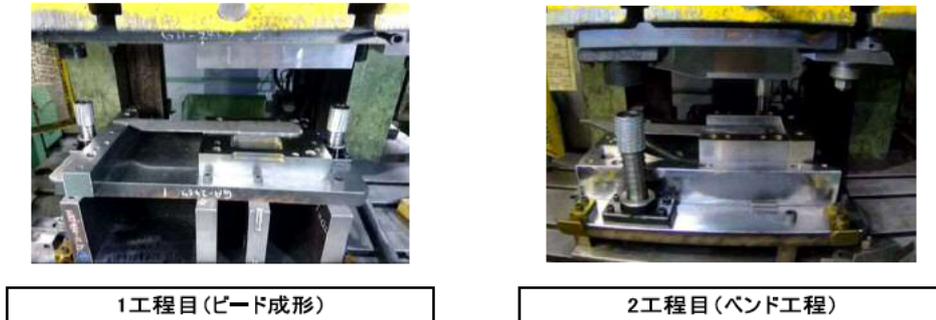


図76. プレストライ

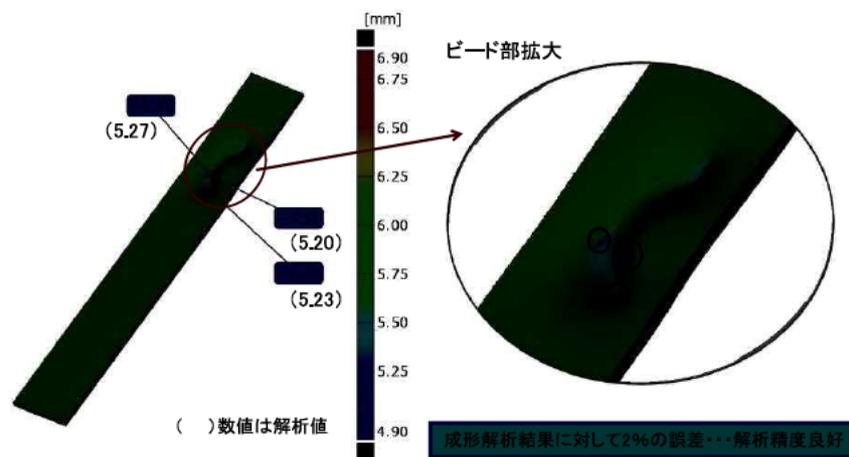


図77. プレス加工品測定結果 1工程目(ビード成形)



図78. プレス加工品測定結果 2工程目(バンド)

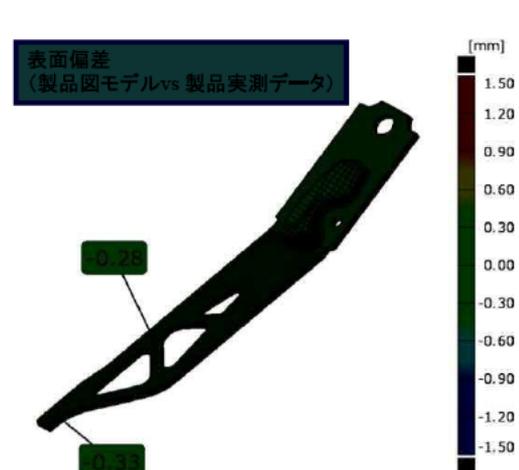


図79. 【プレス条件見直し】2工程目

プレス条件見直し品にて、解析結果と同等の結果となり、金型最適化の検証が完了した。

金型最適化設計製作手法と従来設計手法との比較による、金型製作にかかるコスト変動の有無について検証を行った。最適化設計手法では、データベースの活用により、精度の高い成形解析シミュレーションが短時間で対応可能となると考える。また、それに伴い金型トライ工数も低減できる為、目標の製品コストと金型費5%低減は達成できる見込み。

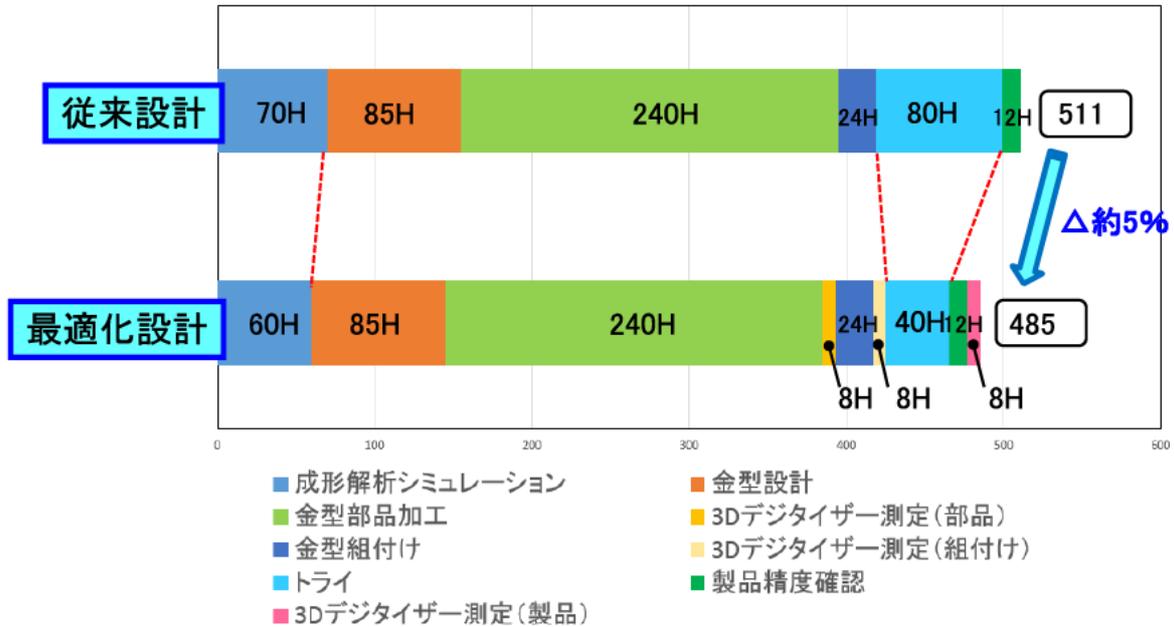


図 80. 金型製作費予測

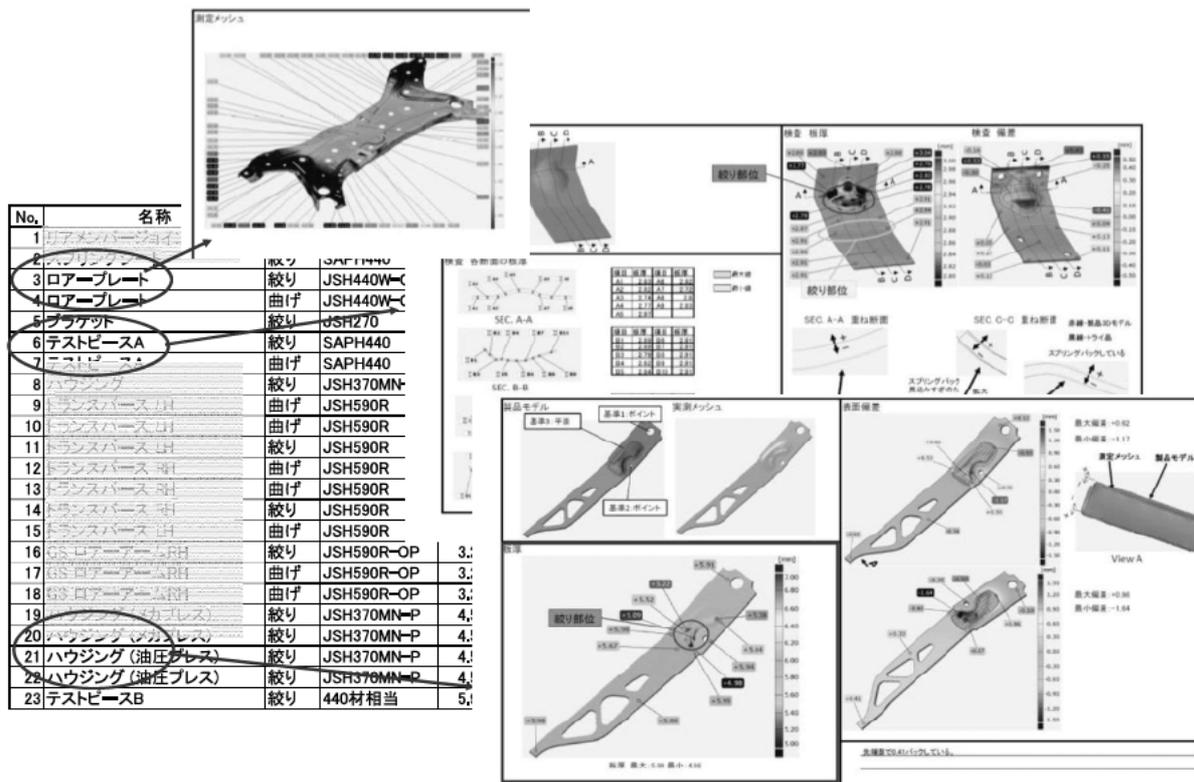


図 81. データベース (イメージ) .

以上、検証結果に基づき、製品コストと金型費5%低減の目途も立った為、金型最適化製作マニュアルを作成した。

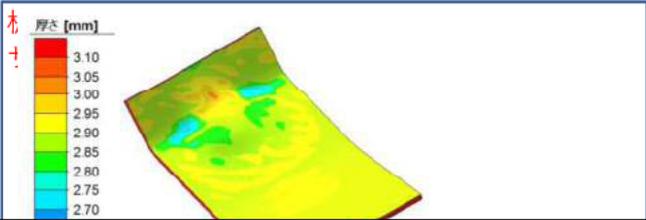
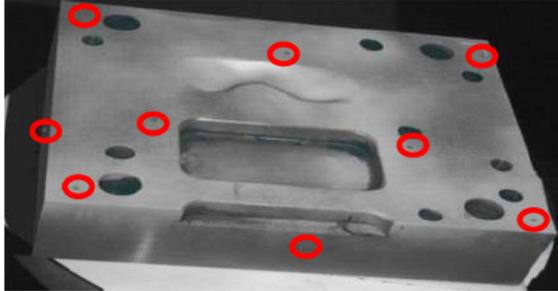
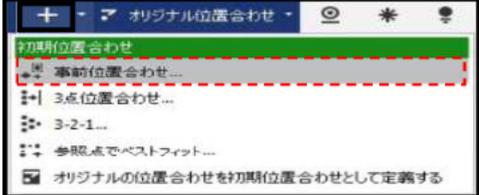
表題	金型最適化設計製作手法 マニュアル	秘
3 成形シミュレーション 3-1板厚変動	1. 工法検討結果に基づき工程モデルを作成する(板厚変動見込みなし) 2. 板厚減少が図面スペックを満たす範囲になるまで進める 解析誤差が発生する為、板厚の3%分余裕をもった数値を目指す	
		
6. 金型部品加工	6-2 3Dデジタイザー測定(金型部品)	
	1. 参照点を貼り付ける 【参照点貼り付けの注意点】 <ul style="list-style-type: none"> ・汚れを清掃し、参照点がずれないようにする ・測定精度に影響するため参照点の配置は単調にならないようにする ・どの方向からでもスキャンできる場所には必ず参照点を貼り付ける ・表と裏両方に映るであろう共通点参照点は5箇所以上確保する 2. スキャンする 対象との位置を変えながら認識済みの参照点が4箇所以上映るように撮影をする 【スキャンの注意点】 <ul style="list-style-type: none"> ・精度を上げるため1回目のスキャンは多くの参照点を認識させる ・撮影時間は露出オーバーにならないように調整をする 	
		
	3. 3Dモデルと金型測定メッシュをベストフィットさせる 「+」 - 「事前位置合わせ」を選択	

図8 2. 金型最適化設計製作マニュアル

2-3 最適化手法を用いたシャシー部品の設計と製品検証

2-3-1 板金プレス加工シャシー部品をテストピースの最適最軽量化で確立した技術により設計

シャシー部品の最適最軽量化設計に際し、高剛性、高強度、且つ軽量化が求められるサスペンションのフロントロアアームを選定。

最適化検討に際し、現物（市場品）を3Dスキャンし最適化前のベースモデルを作成した。

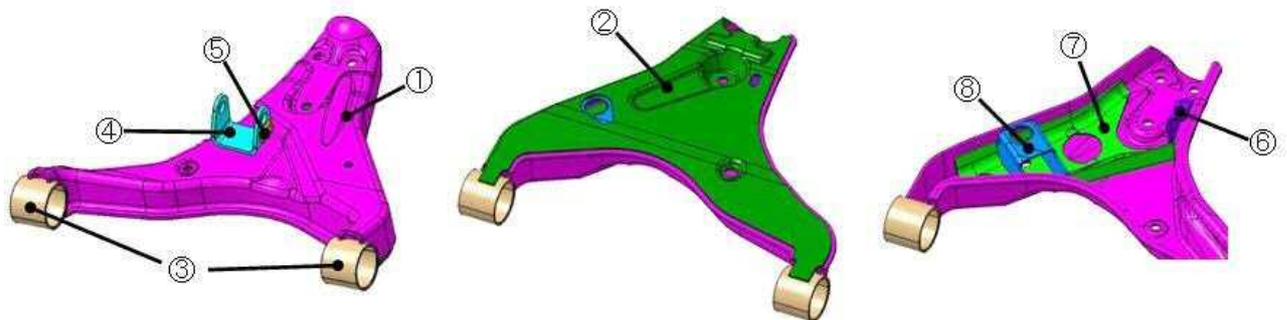


図8.3. フロントロアアーム 3Dモデル化検討

また、最適化計算にロアアームを構成する部品の材料強度が必要となる為、現物の板厚、表面硬度を測定し、その結果から材料を推測した。

表2.3. 材料調査結果

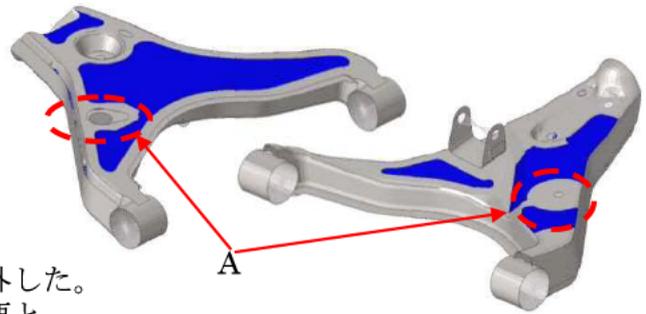
		板厚 (mm)	表面 硬度	材料
①	ARM, UPR	t4.0	Hv158	JSH440
②	ARM, LWR	t2.9	Hv156	JSH440
③	PIPE	t3.2	Hv179	STKM11C
④	S/A BRKT	t4.5	Hv167	JSH440
⑤	PLATE	t4.0	Hv164	JSH440
⑥	STABI BRKT	t4.0	Hv134	JSH440
⑦	REINF A	t2.3	Hv166	JSH440
⑧	REINF B	t2.9	Hv166	JSH440



フロントロアアームに対する要求仕様を決定し、非線形の最適化シミュレーションシステムで最適化計算を行った。

【フロントロアアーム バンプ入力に対する形状最適化条件】

- ・ 負荷点剛性、強度最大化
- ・ 設計領域（右図青色部）
- ・ 繰り返し計算回数：56回
- ・ 体積制約：1.05



設計領域の右図 A 部については
バンプストッパーが取りつくため
現行車の機能面を考慮し設計領域から除外した。
(設計段階であれば調整は可能で除外不要と
考えられる)

図 8 4. 設計領域（青色）

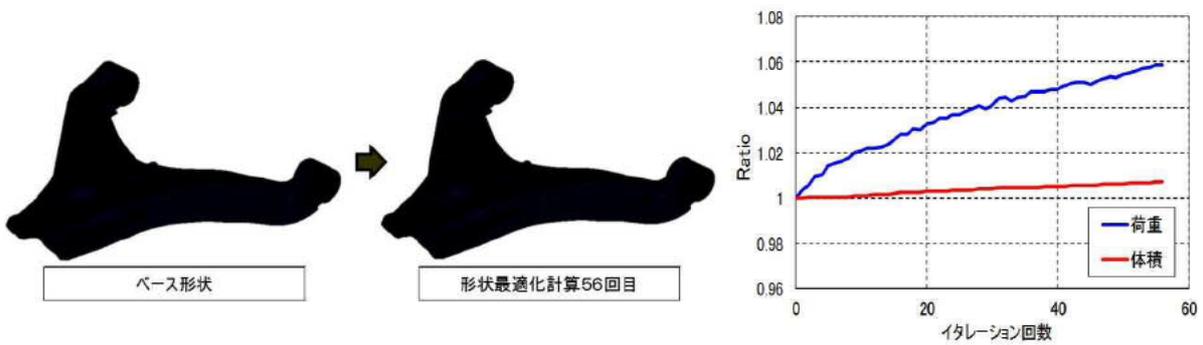


図 8 5. フロントロアアーム 形状最適化結果

表 2 4. 剛性と変形荷重の比較

	ベース	最適化計算結果
剛性(kN/mm)	7.3	7.4(+1%)
変形荷重(kN)	20.2	20.9(+4%)

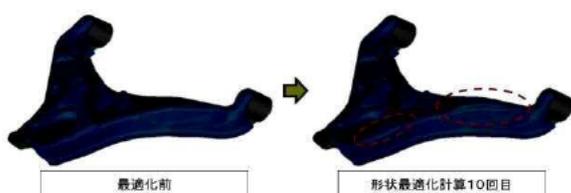
バンプ入力の剛性は+1%、強度は+4%とUP率は僅かであった。
次に、バンプ入力での最適化結果をベースに後向き入力での最適化を行った。

【フロントロアアーム 後向き入力に対する形状最適化条件】

- ・ 負荷点剛性、強度最大化
- ・ 設計領域（右図青色部）
- ・ 繰り返し計算回数：10回
- ・ 体積制約：1.05



44 図 8 6. 設計領域（青色）



		ベース	最適化計算結果
後向き入力	剛性(kN/mm)	24.7	26.5 (+7%)
	変形荷重(kN)	24.1	25.4 (+5%)
外向き入力	剛性(kN/mm)	92.8	101.4 (+9%)
	変形荷重(kN)	53.6	57.5 (+7%)

図 8.7. フロントロアアーム 形状最適化結果 表 2.5. 剛性と変形荷重の比較

後向き剛性・強度の向上が確認できた。また、外向き方向についても強度解析を行い、剛性・強度の向上が確認できた為、後向き入力での最適化結果をベースとしてトポロジー最適化による軽量化を実施した。

【フロントロアアーム トポロジー最適化条件】

- ・体積制約：0.8
- ・負荷点剛性最大化
- ・設計領域（右図青色部）
- ・繰り返し計算回数：80回

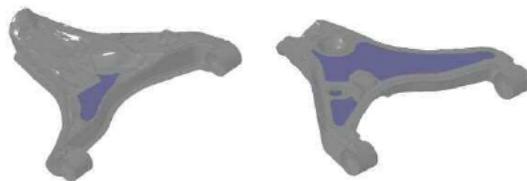


図 8.8. 設計領域（青色）

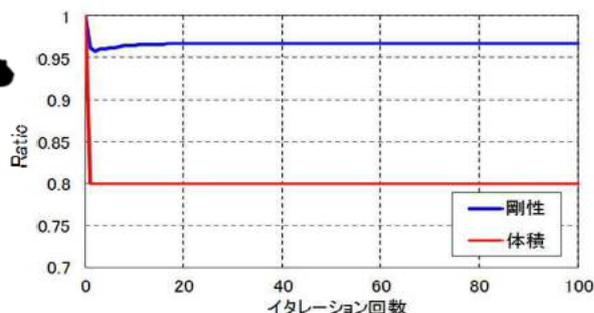


図 8.9. フロントロアアーム トポロジー最適化結果

強度解析結果を図 9.0 に示す。



		ベース	最適化計算結果
バンク入力	剛性(kN/mm)	7.3	7.1 (△3%)
	変形荷重(kN)	20.2	19.7 (△3%)
後向き入力	剛性(kN/mm)	24.7	25.5 (+3%)
	変形荷重(kN)	24.1	24.8 (+3%)
外向き入力	剛性(kN/mm)	92.8	96.8 (+4%)
	変形荷重(kN)	53.6	55.4 (+3%)
重量(kg)		6.615	6.331 (△4%)

図 9.0. 構造解析ソフト (NASTRAN) による解析結果

トポロジー最適化結果にて、軽量化効果は僅か4%、剛性・強度はベース形状に対して△3%低下となり、要求仕様未達となった。

原因調査として、レイアウト制約を考慮しない場合の最適化の効果を確認した。バンプ入力での最適化実施後、後向き入力での最適化を実施した。

【フロントロアアーム 形状最適化条件】

- ・ 負荷点剛性、強度最大化
- ・ 設計領域（右図青色部）
- ・ 繰り返し計算回数：150回
- ・ 体積制約：1.05

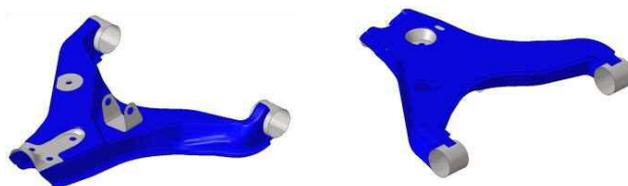


図9-1. 設計領域（青色）

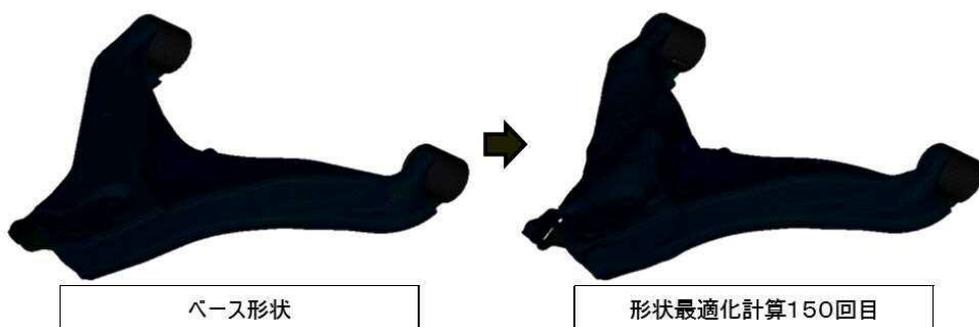


図9-2. フロントロアアーム 形状最適化結果

表2-7. 剛性と変形荷重の比較

		ベース	最適化計算結果
バンプ入力	剛性(kN/mm)	7.3	9.7(+33%)
	変形荷重(kN)	20.2	27.5(+36%)
後向き入力	剛性(kN/mm)	24.7	28.9(+17%)
	変形荷重(kN)	24.1	29.0(+20%)
外向き入力	剛性(kN/mm)	92.8	111.1(+20%)
	変形荷重(kN)	53.6	63.5(+18%)

レイアウト制約を考慮しない場合、各入力の剛性・強度は大幅に向上することが分かった。

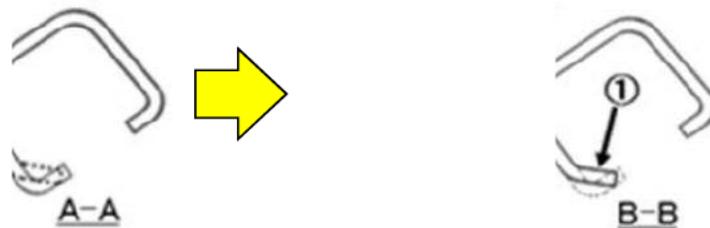
その為、最適化対象をレイアウト制約が少なく同等機能のフロントアッパーアームに切り替え、最適化手法を用いたシャシー部品の設計と製品検証を行った。

【フロントアップアーム検討】

フロントアップアームの要求仕様は、ベース形状に対し軽量化10%以上、また性能としては、後ろ向き変形開始荷重及び後ろ向き最大荷重はベース解析値に対し同等以上とした。

【(1) ベース形状で生産性改良及び軽量化検討】

- ①フランジ角度を90° → 45° に変更による板厚減少改善
- ②RをR50 → R58 に拡大による板厚減少改善 (R拡大に伴い外形ライン変更)
- ③リンフォース小型化による軽量化



ベース形状

成形性改良形状

図93. 生産性改良及び軽量化検討内容

【(2) フロントアップアーム 後・内向き入力に対する形状最適化条件】

- ・ 負荷点剛性、強度最大化
- ・ 設計領域 (バーリング加工部、パイプ溶接部を除くプレス成形面)
- ・ 繰り返し計算回数: 50回
- ・ 体積制約: 1.05

【(3) エッジ形状のR化】

形状最適化結果にてプレス成型が出来ないエッジ形状が生成された為、S-Generatorのスムージング機能により、プレス成形可能なRとした。

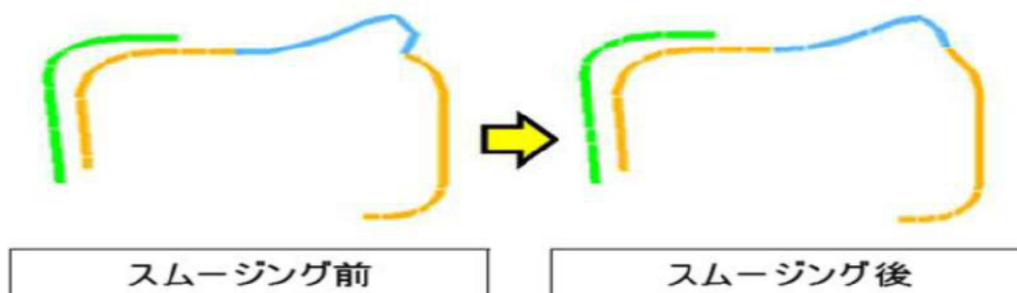


図95. フロントアップアーム スムージング結果

【(4) トポロジー最適化】

フロントアッパーアーム トポロジー最適化条件

- ・体積制約：0.8
- ・負荷点剛性最大化
- ・設計領域（バーリング加工部除く）
- ・繰り返し計算回数：100回

【(5) トポロジー最適化結果をベースに後向き入力に対する形状最適化条件】

- ・負荷点剛性、強度最大化
- ・設計領域（バーリング加工部、パイプ溶接部を除くプレス成形面）
- ・繰り返し計算回数：10回
- ・体積制約：1.05

【(6) 3Dモデル化】S-Generatorにて面を抽出し、3Dモデル化した。このとき、上面にある穴については、プレス工程が追加となりコスト増となる為、廃止した。また、客先にてレイアウトの確認を行い、レイアウト要件を考慮し外形ラインを一部変更した。

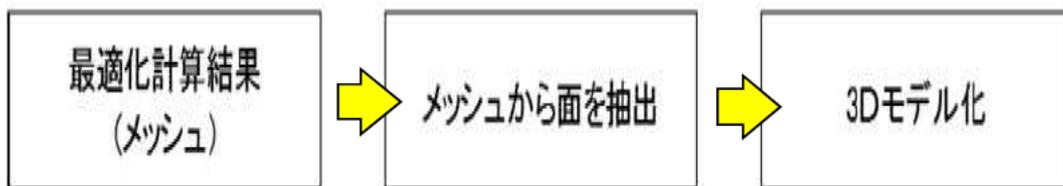


図96. フロントアッパーアーム 3Dモデル化フロー図

【(7) 人工形状化】客先要望により、自由曲面ではプレス成形不良に見られる可能性が有る為、最適化ビード形状を自由曲面→基準面が有り管理し易い形状（人工化）とした。

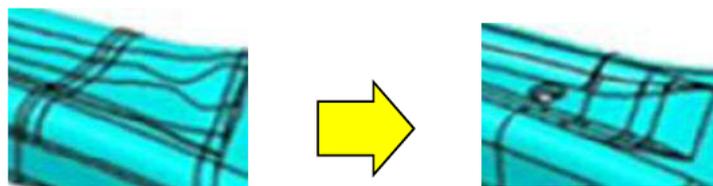


図97. フロントアッパーアーム 最適化形状（人工化）

2-3-2 最適化したシャシー部品の構造解析ソフトでの結果検証
強度解析結果を図98に示す。

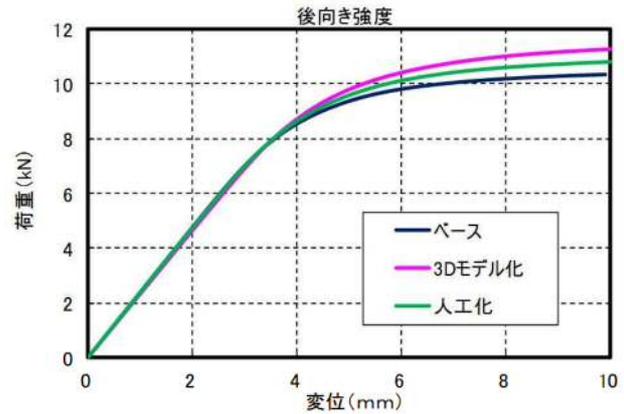


図98. 構造解析ソフト (NASTRAN) による解析結果

最適化形状 (人工化) にて、ベース形状と性能同等以上、軽量化10%を達成した。
以上、新設計手法により軽量化10%を達成した。

また、開発リードタイムについては、最適化設計手法により、設計とFEM解析の
繰返しを行う必要が無くなり、設計工数の短縮を図ることが可能となった。これにより、
従来設計手法：320hに対して、最適化設計手法では280hへの短縮となり
開発リードタイム10%短縮となった。

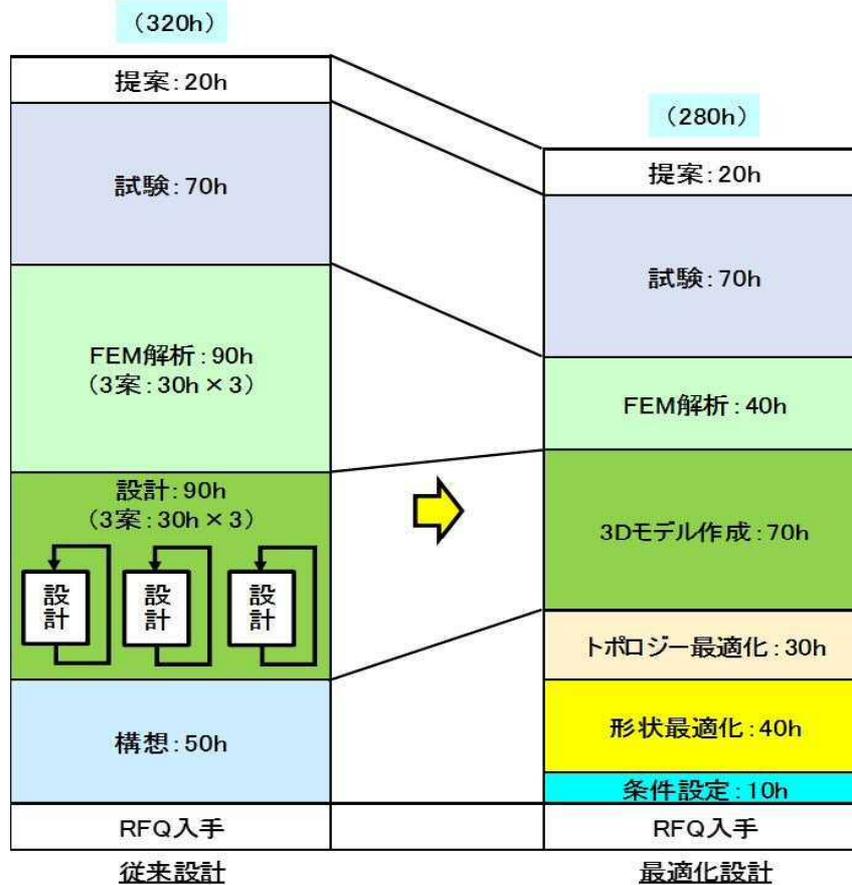


図99. 開発リードタイム

最適化結果の性能検証の為、3Dプリンターで製作した造形品（樹脂）で台上試験を実施した。試験結果を下記に示す。（樹脂製で剛性しか測定できないためベース形状と提案形状について、剛性差がないこと、及び重量低減割合が確保できていることの参考とする）

	剛性(N/mm)		重量 (g)
	試験	解析	
ベース形状	54.1	33.0	398
最適化形状	54.1	32.6	360
最適化効果	+0%	△1%	△10%

	剛性(N/mm)		重量 (g)
	試験	解析	
ベース形状	641	676	398
最適化形状	625	667	360
最適化効果	△3%	△1%	△10%

図100. 3Dプリンター品 後・内向き剛性

3Dプリンター品の試験にて最適化の効果（性能同等で軽量化10%）が確認できた為、最適化形状の試作を実施した。

2-3-3 加工工程を含めた最適化でシャシー部品の試作品製作及び台上試験にて妥当性の評価

加工工程を含めた最適化にて、シャシー部品の試作品の製作を行い、台上試験にて妥当性の評価を行なう。

前項で検討したアッパーアーム最適化形状の量産加工工程での試作品の製作を行う為、量産工法の検討を行い、フォーム工程→バンド工程→リスト工程の3工程に設定した。板厚変動データベース内の材質・板厚・形状が同等の部品を確認すると最大7.2%の増肉となっていた為、バンド工程については増肉逃し見込みを付けてプレス成形シミュレーションを実施。

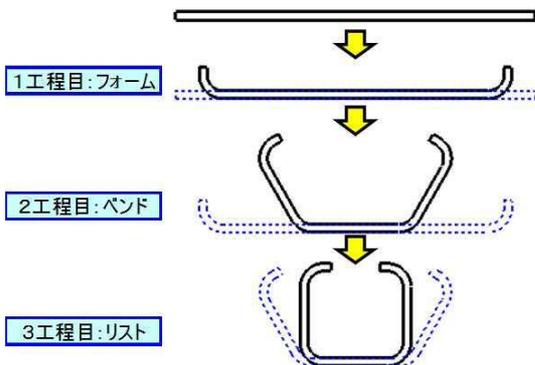


図102. アッパーアーム工程

図103. 最適化形状成形シミュレーション結果

プレス成形シミュレーション結果を金型モデルに反映し金型を製作し、製作金型を3Dデジタイザーで測定し、金型形状モデルと測定結果を重ね合せ確認。表面偏差は $\pm 0.05\text{ mm}$ 以内であり、金型は3Dモデル通り精度良く出来た。

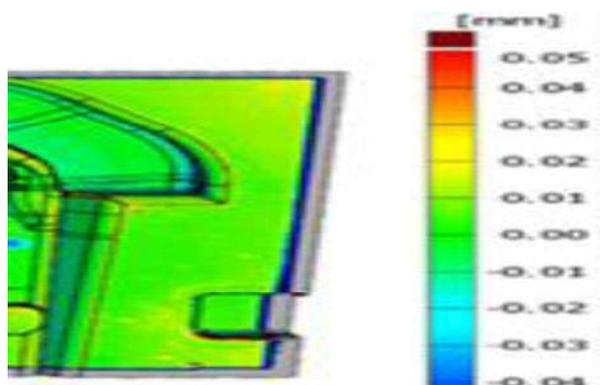


図104. 最適化形状 金型形状測定結果 (リスト型の一部)

量産加工工程によるプレス加工品を3Dデジタイザーで測定し、プレス成形シミュレーション結果との整合確認を行った。表面偏差は $\pm 1.0\text{ mm}$ 以内であり、成形解析結果通り精度良く出来た。

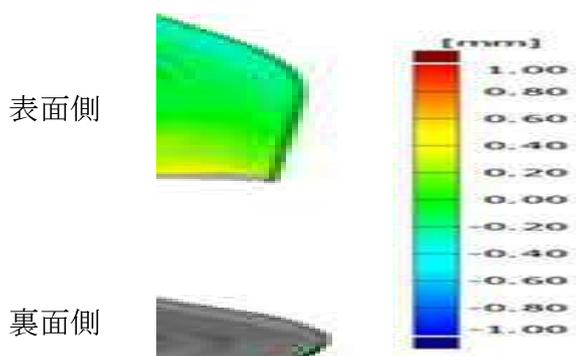


図105. 最適化形状 プレス加工品測定結果 (フォーム)

ASSY品を3Dデジタイザーで測定し、3D製品モデルとの整合確認を行ったが、表面偏差 $\pm 1.0\text{ mm}$ 以上の箇所があり、形状修正の為、プレス条件の見直しを行った。



図106. 最適化形状 ASSY品測定結果

金型最適化設計製作手法と従来設計手法との比較による、金型製作にかかるコスト変動の有無について検証を行った。最適化設計手法では、データベースの活用により精度の高い成形解析シミュレーション結果となり、金型設計及び金型トライ工数が低減できる為、金型費は6.5%低減となった。



図107. 金型製作工数

製作した最適化形状の強度試験を実施した。ブッシュ圧入部を固定し、後向き方向にアッパーアームが変形するまで負荷し、変形荷重を計測した。試験結果を下記に示す。



図108. アッパーアーム 後向き強度試験

表 28. フロントアッパーアームのスペックと最適化形状の解析結果及び試験結果

		スペック	ベース形状	最適化形状	
			解析結果	解析結果	試験結果
後ろ向き入力	変形開始荷重 (kN)	ベース形状解析値と同等以上	8.5	8.8 (+3%)	13.5 (+58%)
	最大荷重 (kN)	ベース形状解析値と同等以上	9.9	10.7 (+8%)	16.8 (+69%)
板金溶組後重量 (最適化対象部品のみ)		(kg) ベース重量に対し△10%以下	1.201	1.086(△10%)	1.086 (△10%)

試験結果の後ろ向きの変形荷重において、いずれもスペック（ベース形状解析結果）を十分満足し、重量低減もスペックを満足した。・・・[軽量化：10%以上、コスト：5%以上、開発費：10%以上 を確保]（本部品のコストにおいては材料比率が 50%以上のため、軽量化が 10%確保出来ると、コストは 5%以上低減出来る）
ただし、大変形モード（座屈部位）が解析と異なる、精度向上のため、今後大変形後の挙動について大変形座屈解析を実施すると共にベース形状試作品で試験を行い比較予定。

2-4 最適化手法の確立

2-4-1 最適化設計手法のデータベース化

テストピース及びフロントアッパーアームの最適化検討結果を基に、【最適化システムでの最適化計算→最適化結果の 3Dモデル化→3Dプリンター品での評価】といった最適化設計の流れをマニュアル化し、最適化システムや S-Generator でのスージング方法等の各項目についてマニュアルを作成した。また、開断面薄板／開断面厚板／閉断面薄板の各構造での最適化検討事例をデータベース化し、今後の最適化設計の資とする。

以上、最適化設計手法のマニュアル作成及びデータベース化を完了した。

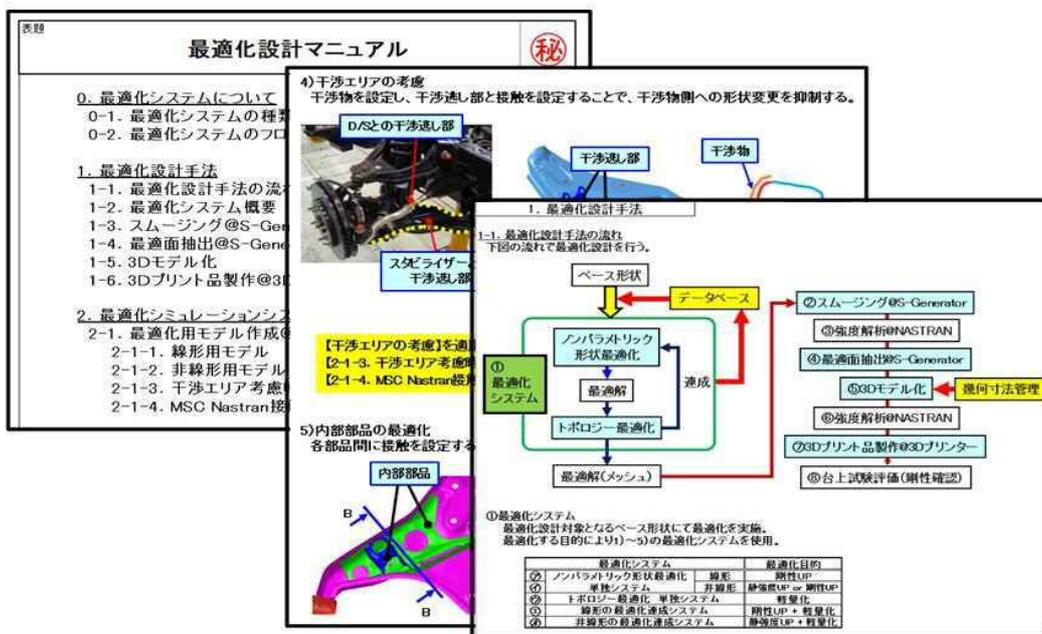


図 109. 最適化設計手法マニュアル

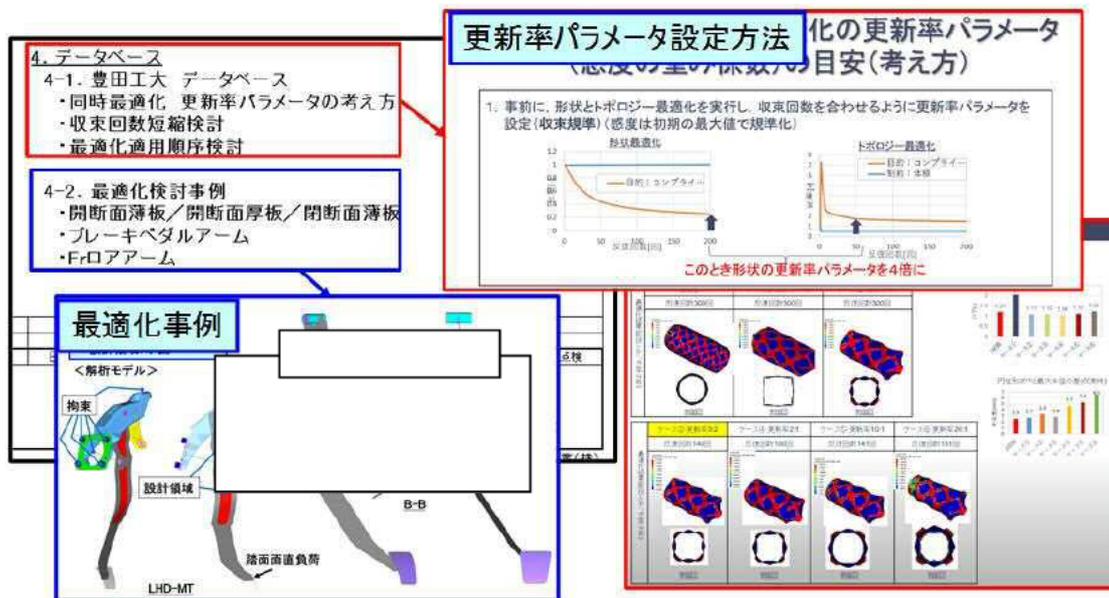


図110. データベース

2-5 まとめ

- ① 革新的技術である最適化シミュレーションシステムの構築は完了し、高度化目標である、自動車用板金プレス加工製品（シャシー部品）の
 - ・軽量化：10%以上
 - ・コスト：5%以上低減
 - ・開発費：10%以上低減
 を達成した。
- ②本最適化シミュレーションシステムは自動化し、設計者の経験値・技量に依存しない革新的な最適最軽量技術とした。
- ③これを活用した部品については、現在、川下企業に自動車用シャシー部品の市場投入に向け提案中。
- ④プレス金型の高精度化においても、データベースが出来、今後加工機の高度化と合わせ、安価で高精度な金型が提供できるようになり、弊社の基盤技術である板金プレス加工において、設計から金型加工、製品加工と一貫した高度化が図れ企業競争力が向上した。
- ⑤本最適化シミュレーションシステムの権利化については、秘密の保持が図れるよう権利化しないで、実施した製品形状・構造について可能であれば都度権利化を図る予定。

第3章 全体総括

① 研究成果としては、最適化シミュレーションシステムの構築、及び高度化目標の達成である。本技術の内、特にプレス加工板金部品の成形面を本技術のようにダイナミックに創成し強度アップする技術は我々が知る限り日本初の革新的技術である。特にそれが自動化されているものは無いと考えられる。

本件については、ベース技術を構築されていた 豊田工業大学 下田教授にご指導頂いたことが大きな成功要因である。すなわち下田教授の基礎理論とヒルタ工業の自動車部品への展開技術が補完しあうことにより、具体的な成果として自動車用プレス部品へ展開し、市場投入が可能となったと考えられる。

さらには、古い素形材技術である板金プレス加工に、最新話題の理論であるトポロジー最適化等を反映したことは意義が大きいと考える。

② 今後は本革新的技術をより多くの板金プレス部品へ展開できるよう、より使用しやすく日々改良を加え順次社内展開を図っている。

③ 今回の事業での成果を活用することによって、自動車用板金プレス部品全般の軽量化技術において他社に先行し、従来の顧客メーカーだけでなく、他自動車メーカーへも積極的な提案・受注活動を行う。また、自動車以外の他業種の部品にも展開できる技術であり、この強みをベースに、板金プレス部品であるエアコン室外機の圧力容器、農機具、産業機器、家電製品、航空機、船舶等の多業種への事業展開を図る。

④ 本技術の今後の展開については、疲労耐久性に対する最適化が出来るよう、発生応力の最適化を図れるようにしたい。

⑤ 課題としては、解析活用の永遠の課題である解析結果と実物による実験結果の高精度な整合である。また、強度解析についても多くのソフトウェアが存在し、それぞれ特徴・強みを持っており、本最適化シミュレーションシステムもより多くのソフトウェアにリンク・適合させることも重要と考えている。

⑥ 最後に本事業にてご指導頂きました豊田工業大学 下田教授、岡山大学 上森准教授、三菱自動車工業株式会社 開発本部機能実験部 首藤担当マネージャー様及び中国経済産業局様、岡山県産業振興財団様に感謝申し上げます。