

平成26年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「高機能・低コスト・軽量化のための  
高板厚ハイテン材プレス加工と溶接の高度化技術開発」

研究開発成果等報告書

平成27年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 株式会社浜名湖国際頭脳センター

# 目 次

第 1 章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-1-1 研究開発の背景	1
1-1-2 デフマウントブラケット	1
1-1-3 研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	2
1-2-1 研究組織（全体）	2
1-2-2 管理体制	2
1-2-3 管理員及び研究員	3
1-2-4 アドバイザー	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 構造設計開発	7
2-1-1 構造設計開発	7
2-1-2 静的解析	7
2-1-3 成形シミュレーション	8
2-2 プレス加工	10
2-2-1 スプリングバック対策	10
2-2-2 せん断加工	10
2-3 溶接加工	11
2-3-1 溶接条件設定	11
2-4 評価試験	12
2-4-1 材料強度試験	12
2-4-2 ねじり耐久試験システム開発	13
2-4-3 動的試験	14
2-5 生産準備	17
2-6 量産化提案	17
第 3 章 全体総括	18
3-1 研究成果総括	18
3-2 今後の展望	18

# 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

### 1-1-1 研究開発の背景

自動車産業では環境負荷軽減のための軽量化への要請が高い。鋳造製品を金属プレス加工品で代替することで大幅な軽量化・低コスト化が実現されるが、強度・剛性を維持するには、厚さ4~5mmほどの高板厚ハイテン材によるプレス・溶接加工が必要となる。

### 1-1-2 デフマウントブラケット

図 1-1.1 は、本研究開発において対象とした3つのデフマウントブラケット(R, LおよびRR)を示す。デフマウントブラケットは、デフレンシャルギアと呼ばれるエンジンで発生した駆動力を様々なギアを経て駆動軸に伝える動力伝達装置を車体に固定するための役割だけでなく、ギアの回転から発生する振動を車体に伝わらないための機能部品である。

そのため、部品には強度及び剛性が求められ、且つ限られた空間レイアウト内での設計が必要であるため、現状では設計形状に自由度が大きい鋳造製品（以下、従来品と呼ぶ）が採用されている。

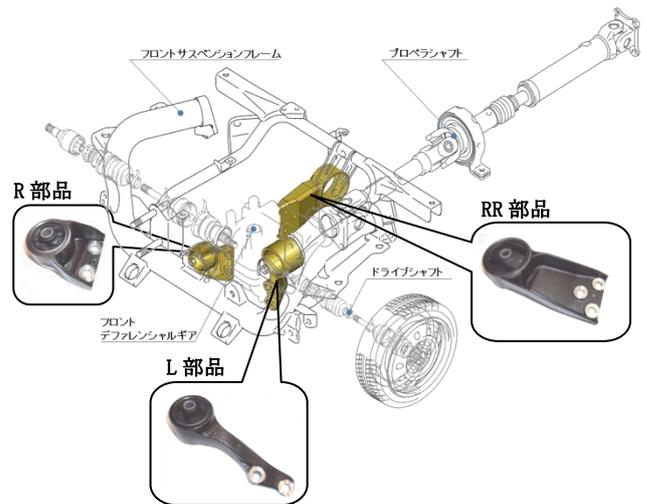


図 1-1.1 デフマウントブラケット取付け位置

### 1-1-3 研究目的及び目標

本研究の目的は、高板厚ハイテン材の機械的性質を考慮し、高機能・低コスト・軽量化のための高板厚ハイテン材のプレス加工技術及び溶接加工技術の高度化により、デフマウントブラケットを鋳造から板金構造部品へ代替することで「重量比：20%削減」「コスト比：20%削減」を実現することである。開発プロセスを図 1-1.2 に示す。

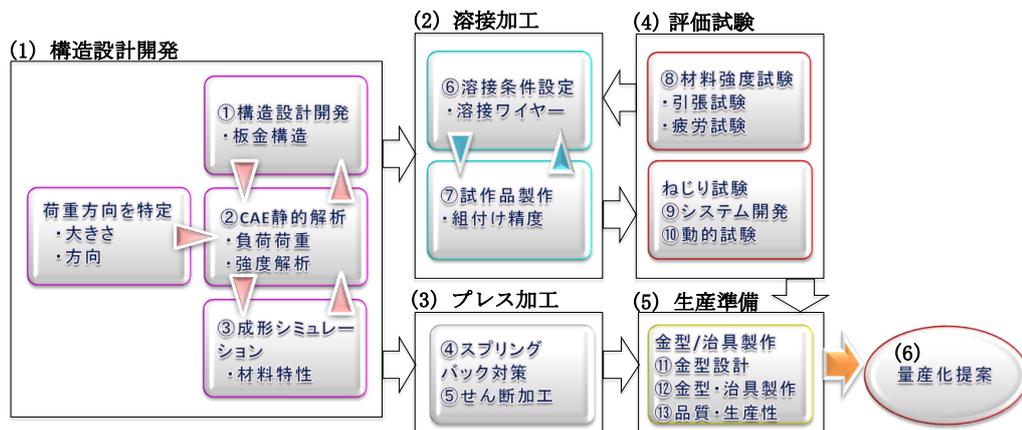
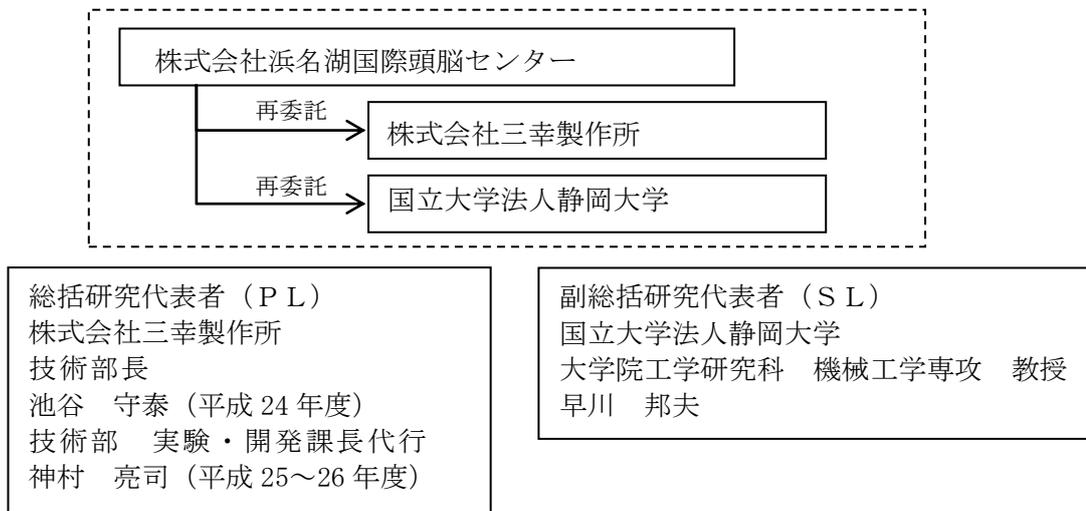


図 1-1.2 研究開発プロセス

## 1-2 研究体制

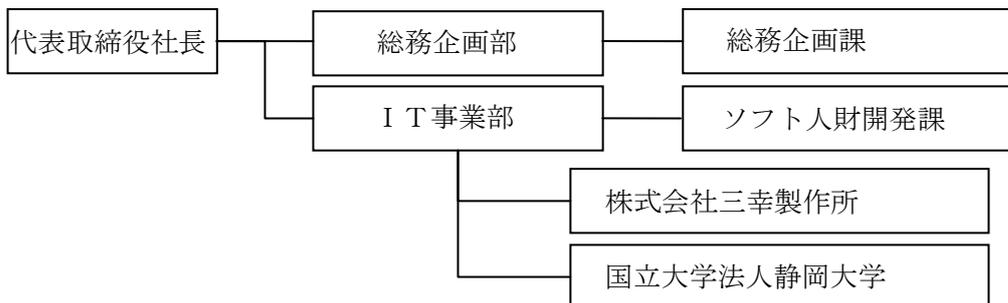
### 1-2-1 研究組織（全体）



### 1-2-2 管理体制

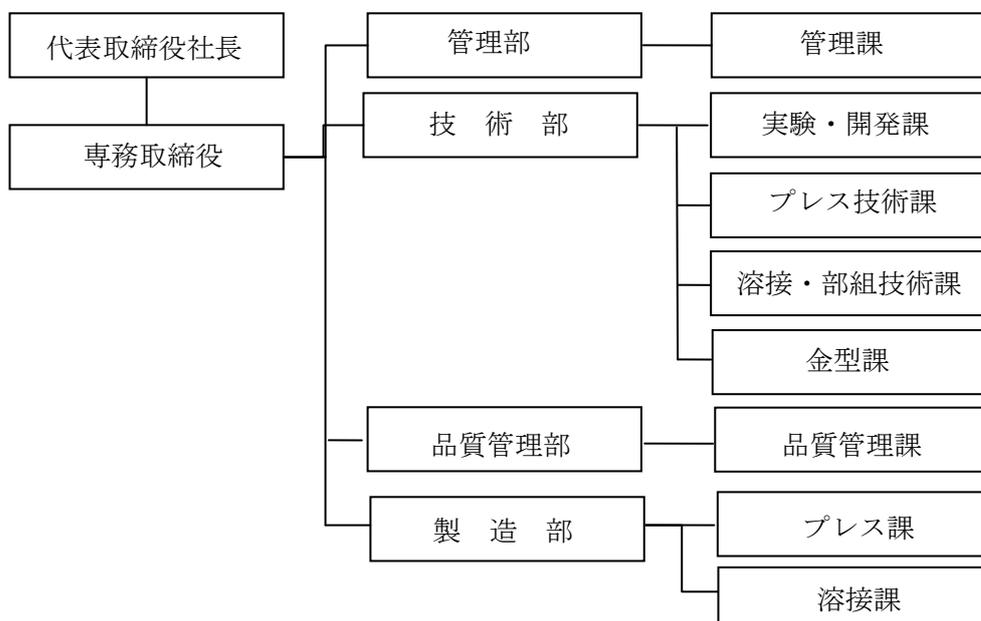
#### (1) 事業管理機関

[株式会社浜名湖国際頭脳センター]

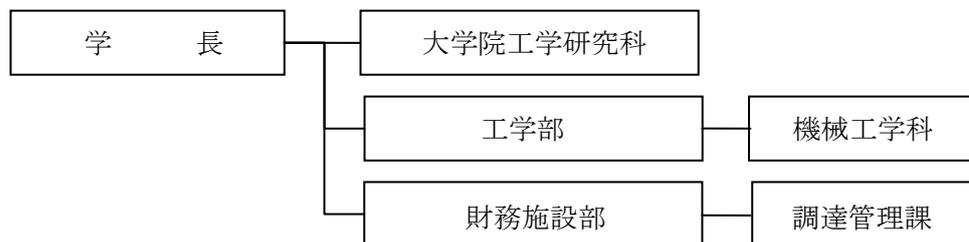


#### (2) 再委託先

[株式会社三幸製作所]



[国立大学法人静岡大学]



### 1-2-3 管理員及び研究員

#### (1) 事業管理機関[株式会社浜名湖国際頭脳センター] (管理員)

氏名	所属・役職
森田 智久	総務企画部長
鈴木 温子	I T事業部 ソフト人財開発課長
細川 佳伸	I T事業部 ソフト人財開発課 主任

#### (2) 再委託先 (研究員)

[株式会社三幸製作所]

氏名	所属・役職
池谷 守泰	技術部長
中島 輝明	技術部 次長
神村 亮司	技術部 実験・開発課長代行
岡部 和弥	技術部 実験・開発課 主任
飯田 真也	技術部 実験・開発課 主任
矢代 朋秀	技術部 プレス技術課長
名坂 和真	技術部 プレス技術課 係長
鈴木 章史	技術部 溶接・部組技術課長
田口 和市	技術部 溶接・部組技術課 係長
梅田 夏生	製造部 プレス課長
角谷 広昭	品質管理部 品質管理課長

[国立大学法人静岡大学]

氏名	所属・役職
早川 邦夫	大学院工学研究科 機械工学専攻 教授
中村 保	工学部 機械工学科 特任教授

1-2-4 アドバイザー

氏名	所属・役職
濱田 透	スズキ株式会社 四輪トランスミッション設計部 設計企画課長
片桐 健	〃 四輪トランスミッション設計部 第一課長
金田 裕光	〃 要素技術開発部 第二課 専門職（課長）
伊藤 芳典	静岡県工業技術研究所 浜松工業技術支援センター 材料科 科長
長津 義之	〃 上席研究員
植松 俊明	〃 主任研究員
大井 健次	JFE スチール株式会社 スチール研究所接合強度研究部 部長
瀬戸 一洋	〃 スチール研究所薄板研究部 部長（理事）
大和田 浩	〃 西日本製鉄所薄板商品技術部 自動車室 主幹職（部長）
平本 治郎	〃 スチール研究所薄板加工研究部 主任研究員（部長）
池田 倫正	〃 スチール研究所接合強度研究部 主任研究員（部長）
木津 太郎	〃 スチール研究所薄板研究部 主任研究員（課長）
立石 哲康	浜松商工会議所 産業振興部 工業振興課 課長

### 1-3 成果概要

研究テーマ	成果概要
構造設計 開発	<p>高板厚 780MPa 級ハイテン材で部品性能とプレス成形加工・溶接加工に耐え得る板金構造のデフマウントブラケット（以下、開発品と呼ぶ）を設計開発した。この開発品は、従来品より重量 28.4%の軽量化と約 20%の低コスト化を実現しうる。ユニット解析手法を構築し、強度評価基準を設定した。</p>
プレス 加工	<p>成形シミュレーションを使用し成形性を考慮した部品設計を行った。</p> <p>成形シミュレーションによる板厚減少・スプリングバックの予測精度の向上を図り、板厚減少・スプリングバックを抑えた成形工程を考案した。</p> <p>成形シミュレーションに基づき試作型を製作し、成形実証を行った。シミュレーション結果との比較を行い、シミュレーション精度向上にフィードバックした。</p> <p>穴抜き型によるせん断加工を行い、せん断荷重を実測した。実測値と予測式の値はほぼ合致しており、予測式が有効であることが確認できた。予測式で、開発品のせん断荷重を求め、プレス成形に必要な荷重と合わせ保有設備で生産ができる工程設計を行った。</p>
溶接加工	<p>780MPa 級ハイテン材とパイプ材の異種材溶接に適した溶接ワイヤーと溶接条件を選定した。</p>
評価試験	<p>溶接試験片による引張・疲労試験を実施し溶接継手部の強度評価を行った。また硬さ試験を実施し熱影響部の強度を調べ、問題が無いことを確認した。</p> <p>疲労試験の結果を、ユニット解析の評価基準とした。</p> <p>実車に代わる台上での疲労試験を行う、ねじり耐久試験システムを開発し、疲労試験を行った。また、単品での疲労試験方法を考案し、開発品個々の疲労強度を確認し十分な強度を確保していることを確認した。</p>
生産準備	<p>各項目で研究を行った要素技術を用いた、順送金型・溶接治具を製作し、順送プレス加工、自動ロボット溶接による実機生産を行い、保有設備での高速・実用レベルでの生産性を実証した。</p>
量産化 提案	<p>川下企業に対し開発品の量産化提案を行った。その結果、高板厚ハイテン材の加工技術による軽量化・低コスト化が評価され、次期モデルでの部品開発を継続して行い採用を目指す事となった。</p>

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

##### (1) プロジェクト全体に関すること（事業管理機関）

[株式会社浜名湖国際頭脳センター]

住所：静岡県浜松市西区村楯町 4598 番地の 9

電話：053-484-4002 / FAX：053-484-4001

e-mail：sapoin-hic@hamanako.co.jp

担当：IT事業部 ソフト人財開発課 鈴木 温子

##### (2) プロジェクトの技術内容に関すること（研究実施機関）

[株式会社三幸製作所]

住所：静岡県浜松市南区高塚町 685-1

電話：053-447-0367 / FAX：053-448-5104

担当：技術部 実験・開発課 課長代行 神村 亮司

## 第2章 本論

### 2-1 構造設計開発

#### 2-1-1 構造設計開発

高板厚 780MPa 級ハイテン材で部品性能とプレス成形加工・溶接加工に耐え得る開発品の設計開発を行った。この開発品は、従来品より重量 28.4%の軽量化と約 20%の低コスト化を実現しうる。

##### (1) 実車走行によるトルク・ひずみ測定

走行時における、プロペラシャフトのトルクとデフマウントブラケットのひずみの相関を調べるため、対象車種による実車走行測定を行った。測定にはトルク用ひずみゲージとロゼット型ひずみゲージ（ロゼット型ひずみゲージを用いることにより、物体に作用する最大・最小主応力とその方向が測定できる）を用いた。その結果、プロペラシャフトのトルクが高いほどデフマウントブラケットに発生する応力も高くなり比例関係にあることを確認した。プロペラシャフトの最大トルクは、急発進で測定した。開発品は、最大トルクに耐え得る強度設計を行った。

#### 2-1-2 静的解析

開発品の強度を確認するため強度解析を行った。当初、部品単品での解析を行ったが、荷重条件が複雑になることや、実車との整合性を高めるため、ユニットによる強度解析を行うこととした。

##### (1) ユニット解析手法の構築

図 2-1.1 にユニット解析で用いた形状モデルを示す。デファレンシャルアッシーとデフマウントブラケット及びゴムブッシュをモデリングし、締結定義により接続した。ゴムブッシュ芯金を完全拘束し、デファレンシャルアッシーのプロペラシャフト、R 側ドライブシャフト、L 側ドライブシャフトを締結する位置に負荷荷重（トルク）を与え、実車に近い解析モデルを作成した。「2-4-3 動的試験」のねじり耐久試験データをもとに解析条件を調整し、デフマウントブラケットの応力・変位を解析上で再現することができ、ユニット解析による強度評価が可能となった。

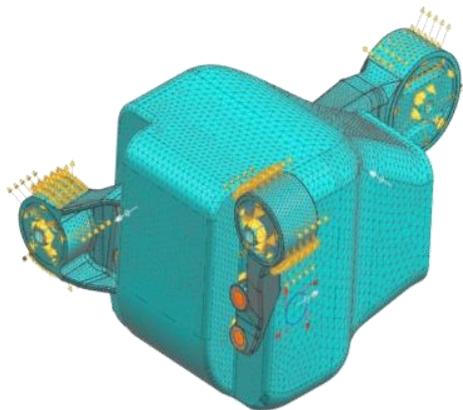


図 2-1.1 ユニット解析モデル

## (2) 強度評価基準の設定

静的解析における強度の判断は疲労強度と塑性変形のしきい値を設定し評価した。疲労強度に関しては、素材のS-N曲線で評価し、塑性変形に関しては、素材の降伏応力とした。780MPa級ハイテン材、パイプ材、溶接継手部の材質ごとにしきい値の基準を設定した。溶接継手部のS-N曲線は、後述の溶接疲労試験で調査した。

## (3) ユニット解析の結果

疲労強度を最大主応力、塑性変形をミーゼス応力で評価を行った。急発進の前進・後退においてL部品は他の2部品に比べ応力が高く、780MPa級ハイテン材の部位で評価基準値を超える結果となった。通常走行では、評価基準値を超える部位はなかったが、ここでもL部品が他2部品と比べて高い応力であった。以上の結果より、開発品は通常走行では強度的に満足しているが、急発進の大きな負荷が掛る状況ではL部品の強度不足が懸念される解析結果となった。

## 2-1-3 成形シミュレーション

### (1) プレス工程設計

高板厚 780MPa 級ハイテン材の複雑形状を保有設備で高速加工するため、プレス工程は順送工程とし、成形シミュレーションを用いて板厚減少を抑制する工程方案を検討した。工程レイアウトでは曲げ加工によるわれを防ぐため、曲げラインをコイル材の圧延方向に対して $0^\circ$ 方向になるよう設定した。また曲げ加工によるショックラインを軽減するため、フランジ曲げ工程では2工程設け、 $45^\circ$  曲げ後に $90^\circ$  曲げとした。板厚減少の大きい部位に対しては、順送加工の利点を活用し、エンボス形状(図 2-1.2)を出して、外側から材料が入るように工程を複数かけて圧縮させながら逐次曲げることで板厚減少の緩和を図った。(図 2-1.3)。

上記、板厚減少抑制を行った成形シミュレーション結果を、図 2-1.4 に示す。



図 2-1.2 エンボス形状

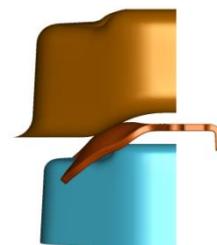


図 2-1.3 逐次曲げ工程

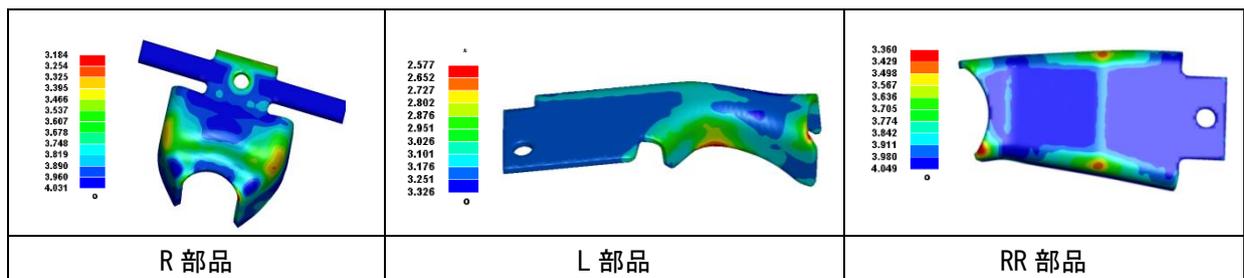


図 2-1.4 成形シミュレーション結果

## (2) 成形シミュレーションの精度の向上

成形シミュレーション結果と「2-5 生産準備」で製作した開発品の、板厚減少とスプリングバックを比較すると概ね近い値となったが、R 部品において差異が大きかったため、予測精度の向上を図った。メッシュサイズを細かくするとともに、順送工程には送りさんがあることから、成形シミュレーションにも送りさんを追加した。(図 2-1.5)

材料パラメータは引張試験から機械的性質を求め、S-S カーブは Swift 式を用い、引張試験データのひずみの大きいところと傾きが合うよう設定した。(図 2-1.6)

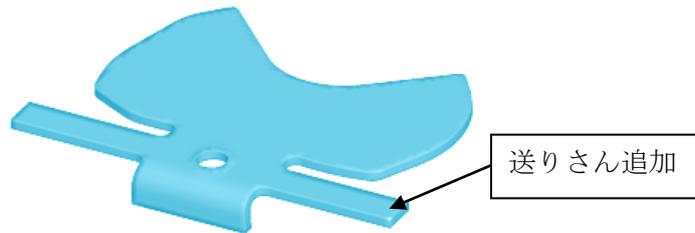


図 2-1.5 成形シミュレーションのブランク形状

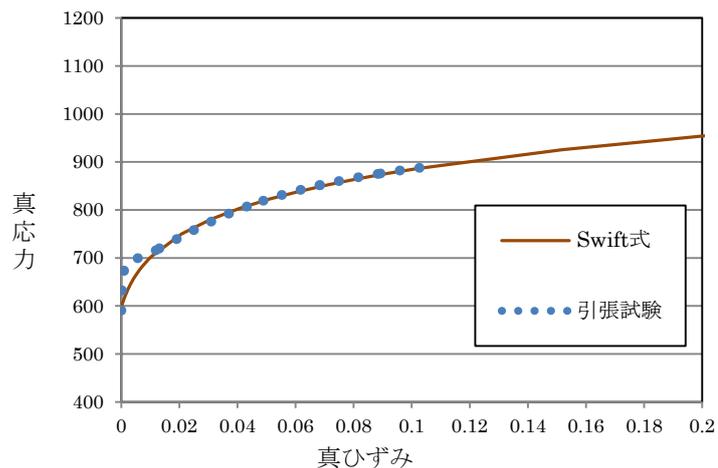


図 2-1.6 材料パラメータ S-S カーブ

また、シミュレーションのメッシュサイズ別に予測精度と解析時間について比較検証し最適なメッシュサイズを選定した。ブランクの形状、最適なブランクメッシュサイズ、S-S カーブの作成により、プレス成形品と近似値になり、成形シミュレーションの精度が向上した。

## 2-2 プレス加工

### 2-2-1 スプリングバック対策

デフマウントブラケットはデファレンシャルケースとの距離が近い部位もあり、スプリングバック量が大きいと干渉する恐れがあるため、対策が必要である。成形シミュレーションによりスプリングバック量を予測し、オーバーバンドするよう工程内にリストブロックを設けることで抑制することができた。

### 2-2-2 せん断加工

高板厚 780MPa 級ハイテン材のせん断加工においては、せん断荷重の正確な見積りが必要となる。そこで、穴抜き型を製作し、実測値と抜き荷重計算値を比較した。また、打ち抜き断面性状に及ぼす金型クリアランスの影響について調査し、金型設計、プレス生産設備選定に反映させた。

#### (1) 穴抜き型を用いた抜き荷重測定

穴抜き型を用いて、780MPa 級ハイテン材（板厚 3.2mm）の穴抜き加工を行った。実測値と抜き荷重計算値に大きな誤差はなく計算値が有効と判断し、開発品のせん断荷重を見積もり、加工設備を選定した。

#### (2) 金型クリアランスの設定

穴抜き型のクリアランス（図 2-2.1）を変化させ、断面性状の検証を行い、最適なクリアランスを選定した。

なお、「2-5 生産準備」で確認した結果、伸びフランジ部がある部品も含めて断面性状が良好であり、われが発生していないことを確認した。（図 2-2.2）

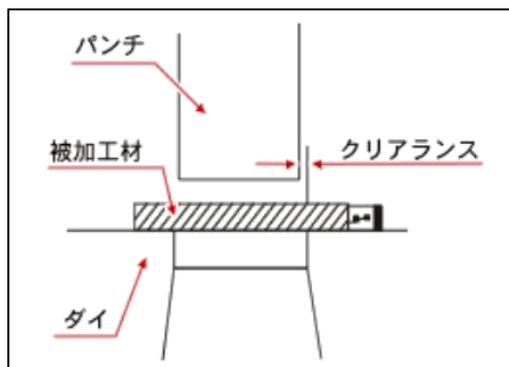


図 2-2.1 金型クリアランス



図 2-2.2 開発品伸びフランジ部

## 2-3 溶接加工

### 2-3-1 溶接条件設定

開発品では、板金加工部分の 780MPa 級ハイテン材とパイプ材の異種材溶接を行う。強度を満足し溶接欠陥を発生させない溶接条件の設定が必要となる。

電流・電圧・速度・ガス流量を調整し十分な溶け込み量を確保する溶接条件を設定した。

溶接ワイヤーは、軟鋼材用、590MPa 級材用、780MPa 級材用を試した結果、溶接試験片による引張試験、疲労試験、硬さ試験では、溶接金属の硬さに違いはあったものの、試験片の強度に違いが無かったため、コストを考慮し軟鋼材用ワイヤーを選定した。図 2-3.1 に溶接ワイヤー別の疲労試験結果を示す。X 線装置を用いて溶接内部の観察を行った結果、溶接金属に占める欠陥はごく微量であることを確認した。

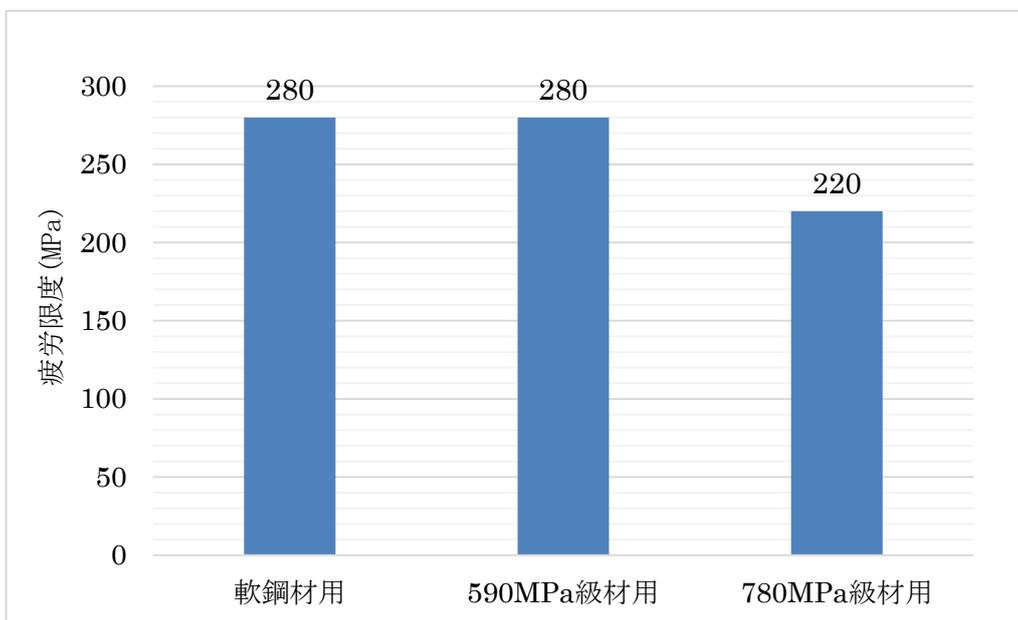


図 2-3.1 疲労限度

## 2-4 評価試験

### 2-4-1 材料強度試験

#### (1) 引張試験・疲労試験

780MPa 級ハイテン材の引張試験を行い、成形シミュレーションの材料パラメータを取得した。

「2-3-1 溶接条件設定」で選定した溶接条件を用いて、突き合せ溶接と重ねすみ肉溶接の異種材溶接試験片製作し、引張試験、疲労試験を行い、溶接継手の強度評価を実施した。その結果、溶接強度に問題が無いことが確認でき、疲労試験で得た S-N 曲線を用いて、ユニット解析における溶接継手部の評価基準を作成することができた。

#### (2) 溶接硬さ試験

ハイテン材における溶接熱影響部の素材特性変化が疲労強度へ及ぼす影響を確認するため硬さ試験を行った。今回の開発で選定した 780MPa 級ハイテン材では、熱影響部の硬さが母材より高く、強度が増しており、疲労試験結果からも問題が無いことが確認できた。また、別の特性を持つ 780MPa 級ハイテン材では、熱影響部の硬さ低下が確認され、材料選定の重要性を認識した。図 2-4.1 は、「2-5 生産準備」で生産をした R 部品の硬さ試験結果を示す。

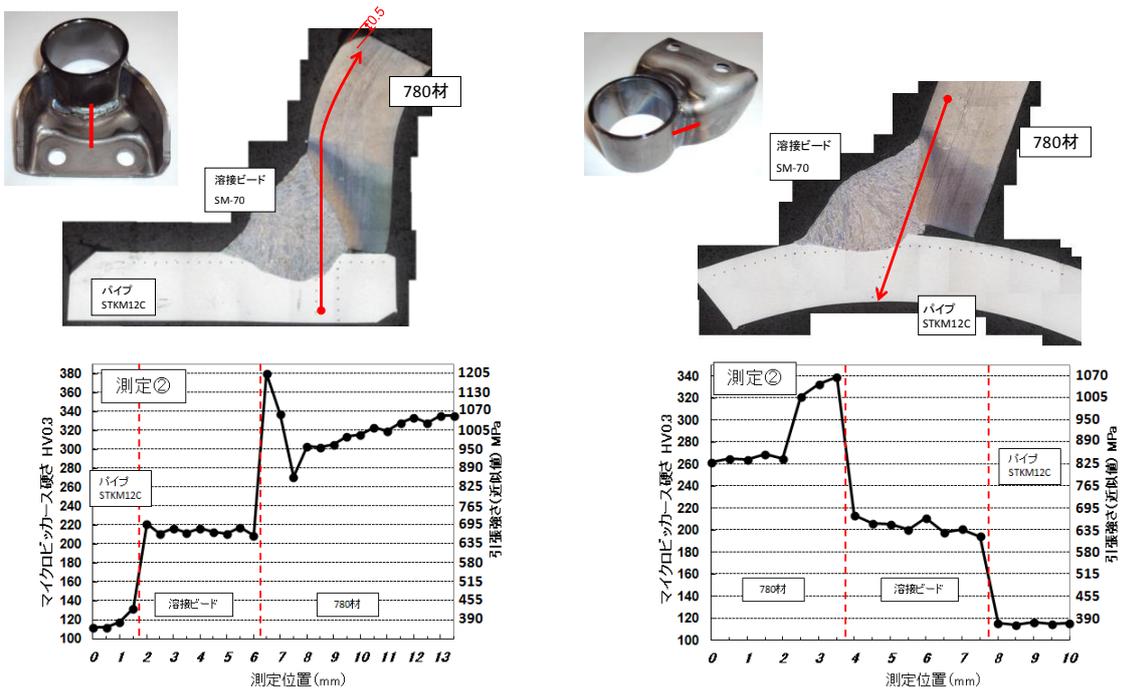


図 2-4.1 R 部品の硬さ試験結果

## 2-4-2 ねじり耐久試験システム開発

実車走行試験に代わる疲労試験を台上で行うことで開発品の信頼性評価を行うことを目指し、試験環境が実車と同じ条件となるように試験機を開発した。図 2-4.2 は、ねじり耐久試験システムの設計図面を示す。

実車部品を使用しエンジンからハブまでの動力系統を再現している。エンジントルクはトルクアクチュエーターを使用することで任意のトルクを負荷することができる。ハブを固定することで、トルクが発生しデフマウントブラケットに負荷をかける。実車走行試験とねじり耐久試験のデフマウントブラケットの応力を比較した結果、近似値であり実車と同条件での強度評価が可能であることを確認した。(図 2-4.3)

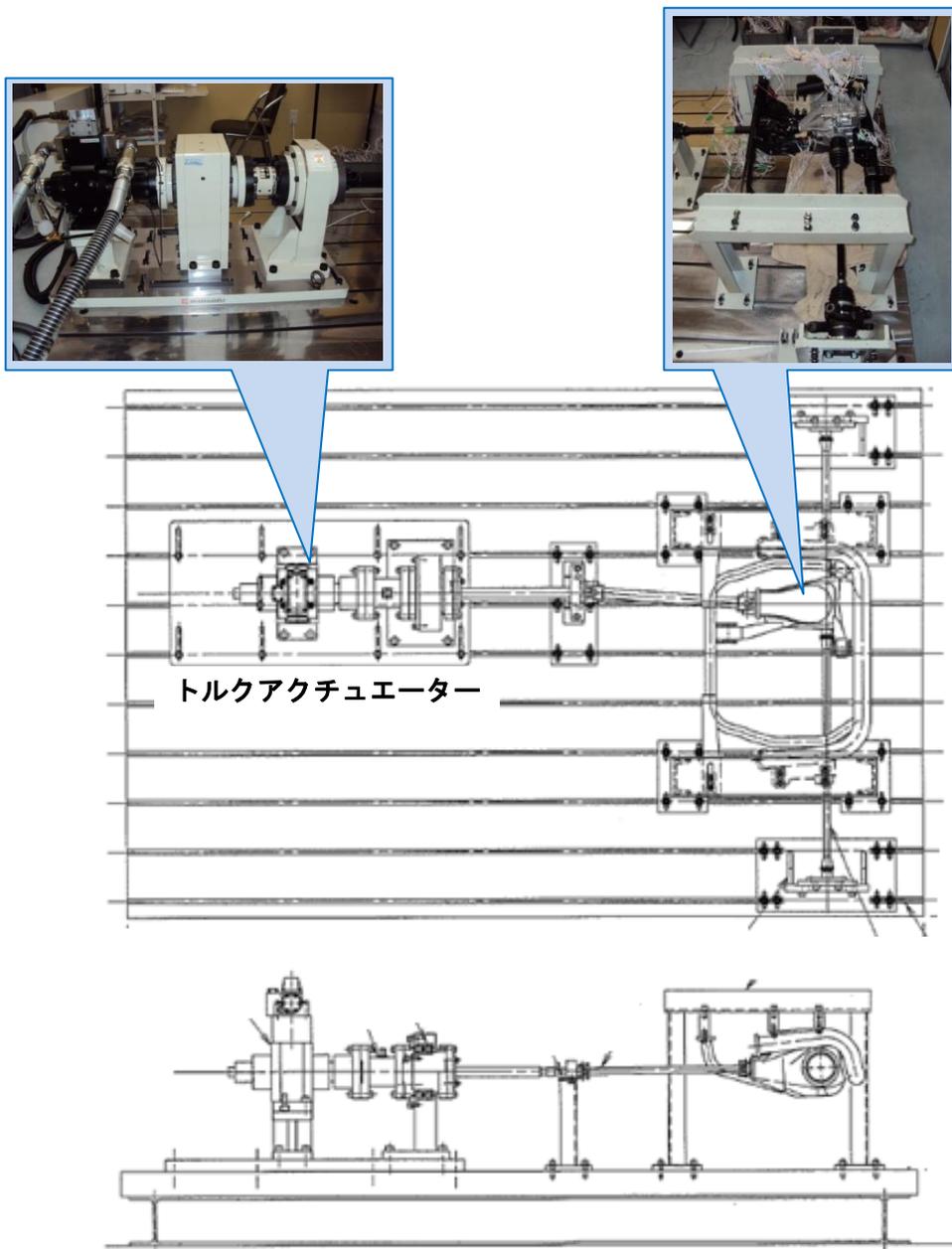


図 2-4.2 ねじり耐久試験システム設計図

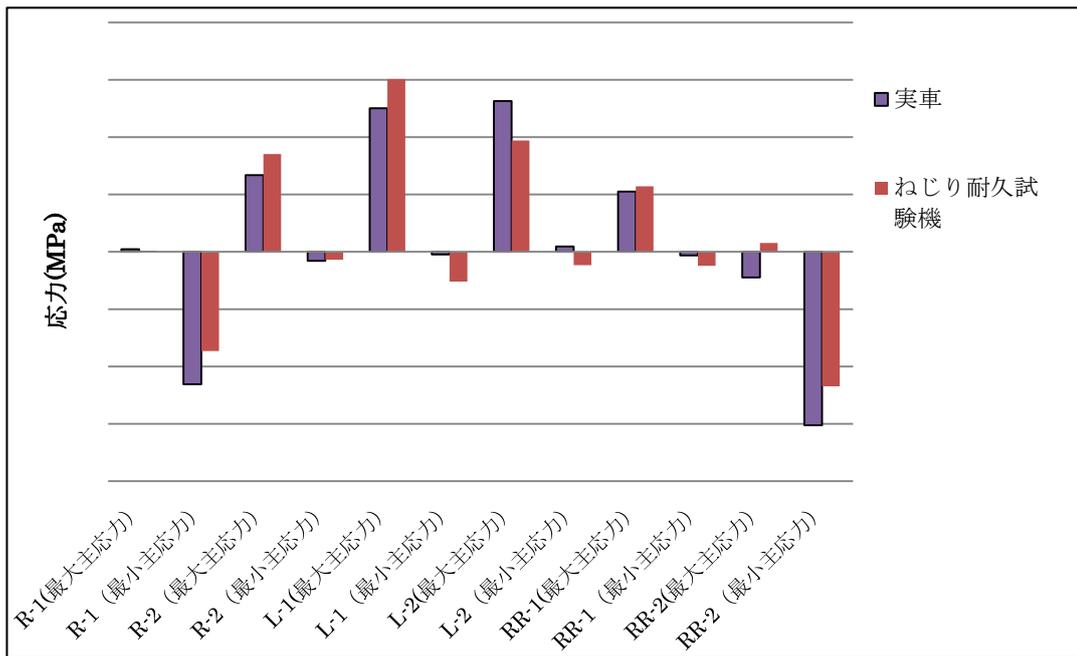


図 2-4.3 ねじり耐久試験システム妥当性

### 2-4-3 動的試験

ねじり耐久試験システムにより、疲労試験を行った。デフマウントブラケットは、デファレンシャルアッシーよりも高い疲労強度が求められる部品であり、デファレンシャルアッシーを基準として開発品の強度評価を行った。

#### (1) ねじり耐久試験

ねじり耐久試験機を使用した強度試験では、デファレンシャルアッシーが開発品よりも先に疲労破壊した (図 2-4.4)。板厚を薄くした開発品の試作品を製作し試験をしたが、同様にデファレンシャルアッシーが破壊する結果となった。また、試験機を改造しデファレンシャルアッシーをダミーに変更して試験を行ったところ、サスペンションフレームが破壊した。

ねじり耐久試験で、開発品が破壊することは無く、強度が十分あることが確認できた。また、デファレンシャルアッシーの T-N 線図を得た。



図 2-4.4 デファレンシャルアッシー破損箇所

## (2) 単品疲労試験

ねじり耐久試験では、開発品の疲労強度がデファレンシャルアッシーよりも上回っていることが分かったが、各開発品の疲労強度を評価することができなかった。デファレンシャルアッシーの強度に対しどのくらいの余裕があるのか把握することは開発品の強度保証にとって重要であるため、単品での疲労試験を実施し、開発品の疲労強度を評価した。試験条件はユニット解析から求め、荷重方向が垂直に向くよう試験治具を作製した。(図 2-4.5)

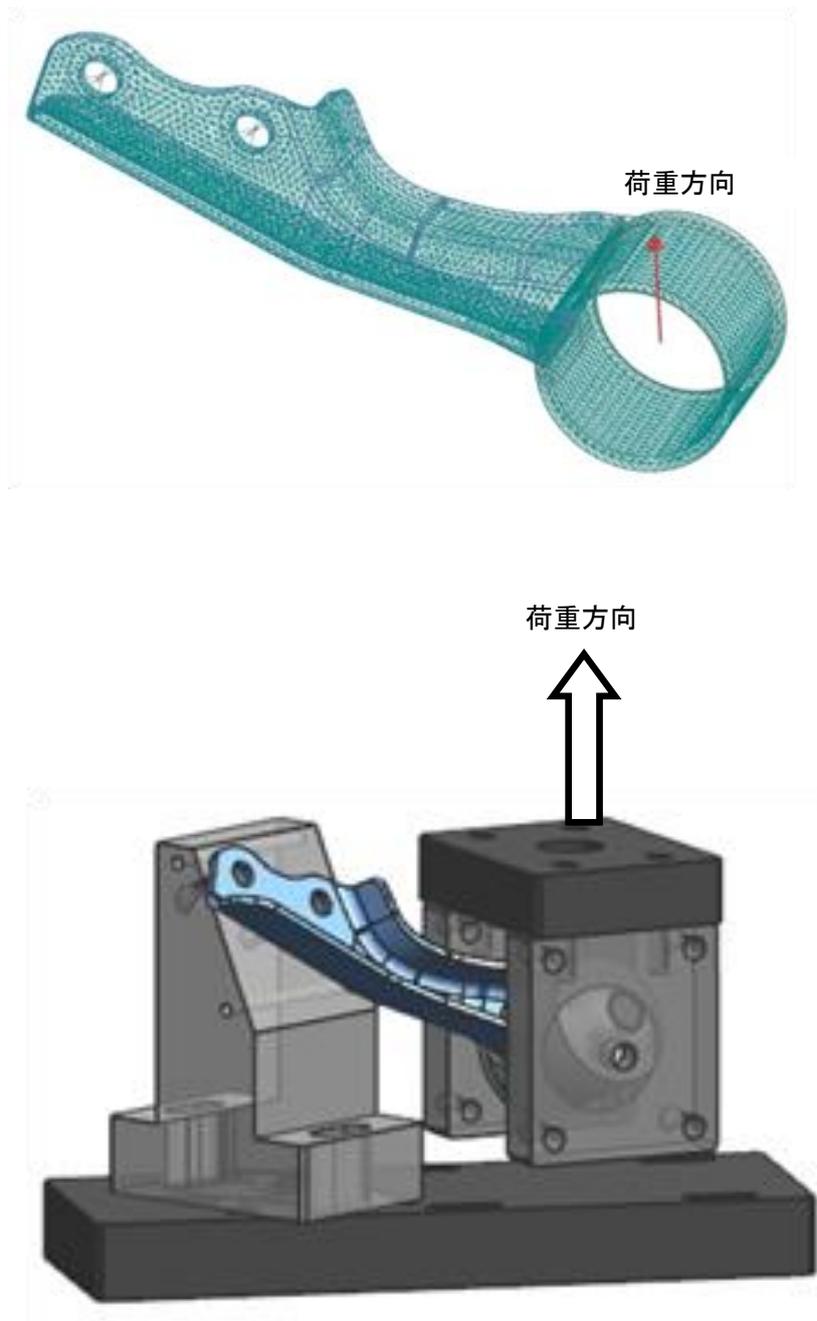


図 2-4.5 ユニット解析と試験治具

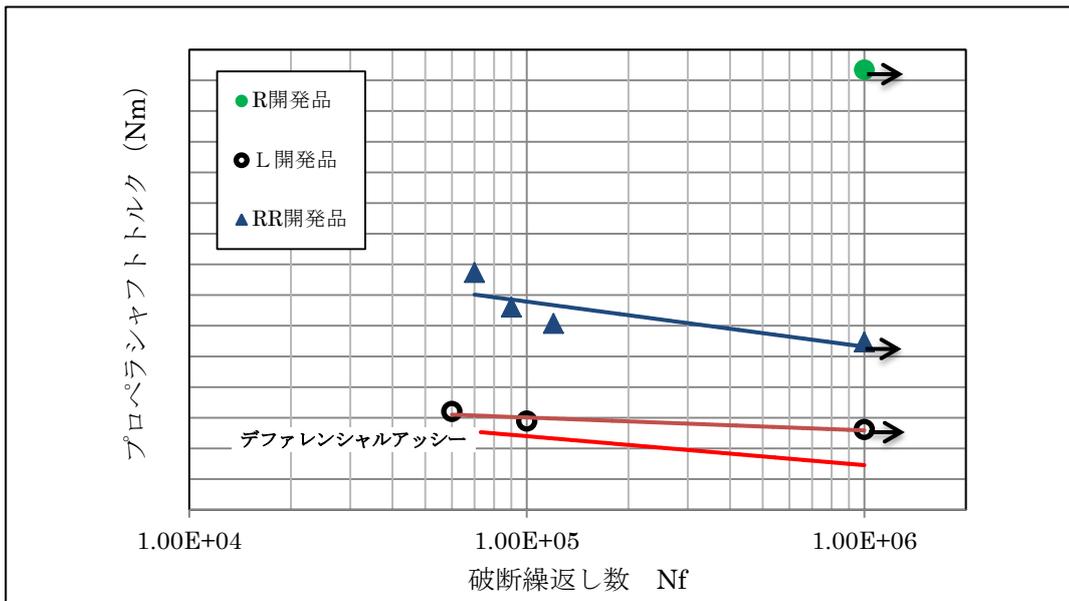


図 2-4.6 T-N 線図

試験の結果、図 2-4.6 の T-N 線図が得られた。R 部品、RR 部品は、デファレンシャルアッシーに対し十分な疲労強度を確保できている。R 部品については、疲労強度を下げられる余地があり、さらなる軽量化・低コスト化が可能であることが示唆された。L 部品は、低サイクル域での疲労強度がデファレンシャルアッシーよりも劣ることが予測され構造設計の見直しが必要となった。

L 部品の形状を見直し、ユニット解析での強度評価の結果が向上したことを確認した上で、再度試作品を製作し単品疲労試験を行った。結果より得られた T-N 線図を図 2-4.7 に示す。形状の見直しにより疲労強度が向上し、低サイクル域においてもデファレンシャルアッシーより高い疲労強度を確保できる見込みを得ることができた。

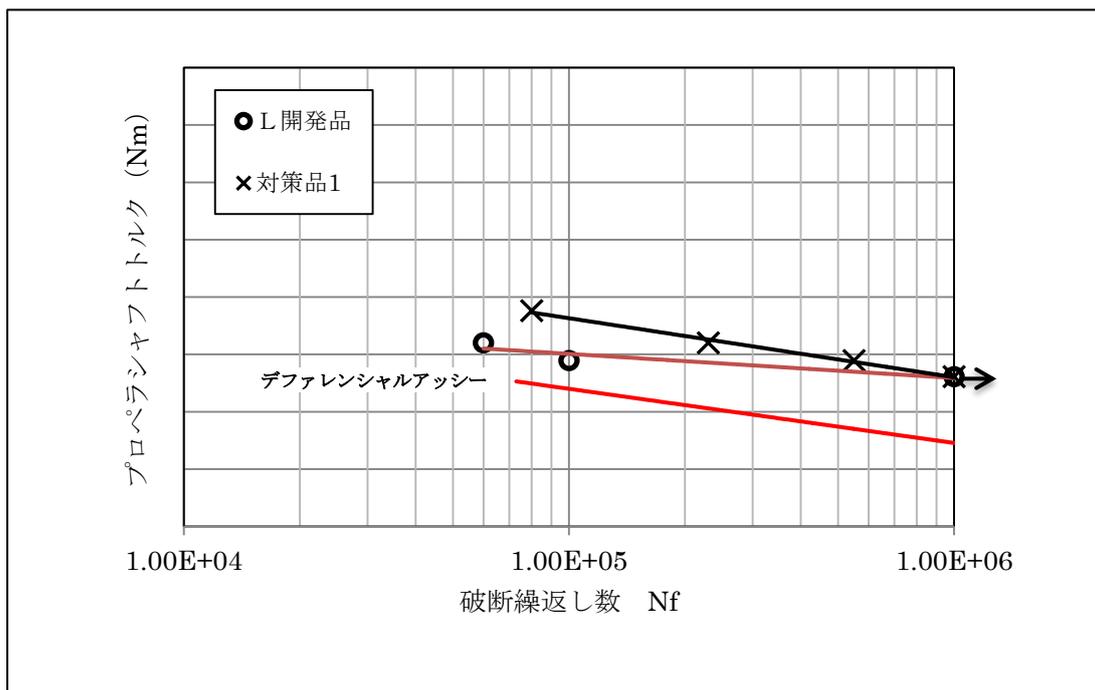


図 2-4.7 対策形状品 1 T-N 線図

## 2-5 生産準備

生産性を実証するため、順送金型・溶接治具を作製し予備生産を行った。金型設計では、各項目で研究を行った要素技術を金型機構に組み込み、作製した金型・治具を用いて品質及び生産性の検証を行った。順送プレス加工（図 2-5.1）、自動ロボット溶接加工（図 2-5.2）による実機生産を行い、保有設備での高速・実用レベルでの生産性を実証した。



図 2-5.1 プレス加工



図 2-5.2 溶接加工

## 2-6 量産化提案

研究の結果、高板厚 780MPa 級ハイテン材を適用した、板金構造デフマウントブラケットを開発し、3 部品合計で軽量化 28.4%、低コスト化約 20%を達成した。川下企業からの、要望を随時研究内容に反映させ、開発品については川下企業より事業化に向け一定の評価を得ることが出来た。川下企業への研究成果報告並びに開発技術を適用した次期モデル車の部品開発提案を行い、事業化を目指す。

## 第3章 全体総括

### 3-1 研究成果総括

本研究開発では、平成 24 年度から平成 26 年度までの 3 年間、高板厚ハイテン材の素材特性を考慮し、高機能・低コスト・軽量化のための高板厚ハイテン材のプレス加工技術及び溶接加工技術の高度化を目的とし、事業レベルでの利用を目指して鋳物部品からの代替が可能な高板厚 780MPa 級ハイテン材を適用した板金構造デフマウントブラケットの開発を行った。

本プロジェクト実施に当たっては、ユーザーである川下企業にアドバイザーとして参画して頂き、アドバイスと研究の評価を頂くとともに、大学・公設試・材料メーカー等産官学が連携し高板厚ハイテン材に適した加工技術の開発と部品評価プロセスの構築を図り、多大な成果を挙げることができた。

- ①780MPa 級ハイテン材の機械的性質を考慮した成形シミュレーション技術の向上を図り、板厚減少やスプリングバックを抑制するプレス加工方法を考案した。
- ②780MPa 級ハイテン材と軟鋼材との異種材溶接の最適溶接条件を選定した。
- ③ユニットによる強度解析手法を構築するとともに、強度判断しきい値の基準を作成した。
- ④実車に代わり台上で疲労試験を行う、ねじり耐久試験システムを開発し、開発品の疲労強度を検証した。また、ユニット解析から、各デフマウントブラケットの負荷荷重を調べることで単品疲労試験での評価が可能となった。
- ⑤順送プレス加工、自動ロボット溶接による実機生産を行い、保有設備での高速・実用レベルでの生産性を実証した。

なお、今後はより複雑な形状に対応できるシミュレーション技術、加工技術の確立が課題となる。また、金型への負荷が大きいため、金型の耐久性や品質面の長期的な確認が必要である。

### 3-2 今後の展望

今回の研究開発により、高板厚 780MPa 級ハイテン材のプレス・溶接加工に必要な数々の技術的知見と部品開発のプロセス及びノウハウを得ることができた。これは、当社の特徴である厚板加工と順送プレス加工の活用範囲を広げ、自動車部品の軽量化・低コスト化及びそれらを実現するための開発力が飛躍的に向上した。本開発技術を、川下自動車メーカーへ技術紹介と開発品の提案を実施し、事業化の推進を展開中である。さらに、自動車部品に限らず、あらゆる機器の鋳物部品へも本技術の応用展開を行い、新市場への参入や顧客拡大を進め、事業化の拡大展開を図っていく。

