

平成28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

「溶接部応力制御技術開発による自動車用サスペンション部品の軽量化」

研究開発成果等報告書

平成29年 3月

担当局 中国経済産業局

補助事業者 公益財団法人岡山県産業振興財団

## 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           | 高精度疲労解析技術.....                                  | 7  |
| 2-1-1         | テストピースによる残留応力予測精度の向上.....                       | 7  |
| 2-1-2         | テストピースによる疲労寿命予測精度の向上.....                       | 11 |
| 2-2           | 残留応力低減技術、応力分散技術.....                            | 30 |
| 2-2-1 / 2-2-2 | テストピースによる応力低減・分散させる方法の検討.....                   | 30 |
| 2-3           | 解析に基づいたサスペンション設計と製品検証.....                      | 39 |
| 2-3-1         | クロスメンバーをテストピースで得られた疲労強度向上の<br>データベースを適用し設計..... | 39 |
| 2-3-2 / 2-3-3 | 製品による残留応力／疲労寿命予測精度の整合性検討.....                   | 47 |
| 2-4           | 対策方法の適正化手法確立.....                               | 57 |
| 2-4-1         | 新規製品における最適形状・最適プロセスの構築.....                     | 57 |
| 2-5           | スケジュール.....                                     | 67 |
| 2-5-1         | 取組み実績.....                                      | 67 |
| 最終章           | 全体総括  |    |
| 1)            | 研究開発成果  |    |
| 2)            | 研究開発後の課題・事業化展開                                  |    |

## 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

主要取引先の自動車メーカーから製造部品に対し10%の軽量化要請がある。しかし自動車のサスペンション部品は、走行中に路面からの入力を受ける部品であり溶接部に亀裂が生じ、進行することによって破損、破断に至り操縦不能になった場合、最悪は人命の危機にさらされることになる。このため、溶接部の耐久強度を十分に満たした設計にする必要があり、重量増、コスト増の要因となっている。また高炉メーカーより疲労強度に優れた高張力鋼による板厚ダウン等の提案があり使用をしているが高張力鋼でも溶接をすると疲労強度が低下し、効果が出ない問題がある。このような溶接部の疲労強度低下の問題に対して、各自動車メーカーから溶接部の疲労強度低下防止のニーズがあり共同研究を進めている。

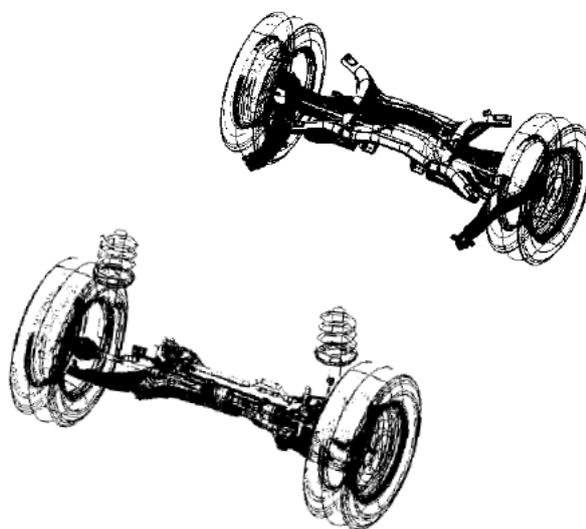
本事業では、溶接構造のサスペンションが致命傷として抱える溶接部の疲労強度が低下することに対して、プレス成形と溶接による残留応力を反映した高精度疲労寿命解析技術の確立、溶接部の残留応力低減及び応力分散制御という革新的技術による溶接部の疲労強度向上を図る。また2輪6軸ロードシミュレーターを使用した実車相当負荷による精度の高い試験により、自動車用サスペンション部品の10%以上軽量化とコスト低減を実現し、ヒルタのコスト競争力を確保、及び革新的技術による軽量化・開発期間短縮等による国内自動車産業の国際競争力強化に結びつける。

具体的には、自動車用サスペンション部品であるクロスメンバーにおいて、複雑な溶接入熱条件、量産プロセスバラツキ等を加えた一致精度の高い溶接残留応力・疲労応力予測技術の確立と、この予測に基づいた、プレス成形、溶接後の残留応力低減及び革新的な応力分散制御技術による疲労強度向上を実現する。これらを設計に反映し、各溶接部品の板厚低減（10%以上）・溶接長短縮、歩留まり向上を具現化し、自動車の燃費向上、排出ガス低減による環境問題への良化に貢献するとともに、顧客カーメーカーより要望されている10%以上の軽量化・コスト低減、開発効率向上による開発費30%低減を実現する。

本研究開発期間で得られる最終目標は以下のとおりである。

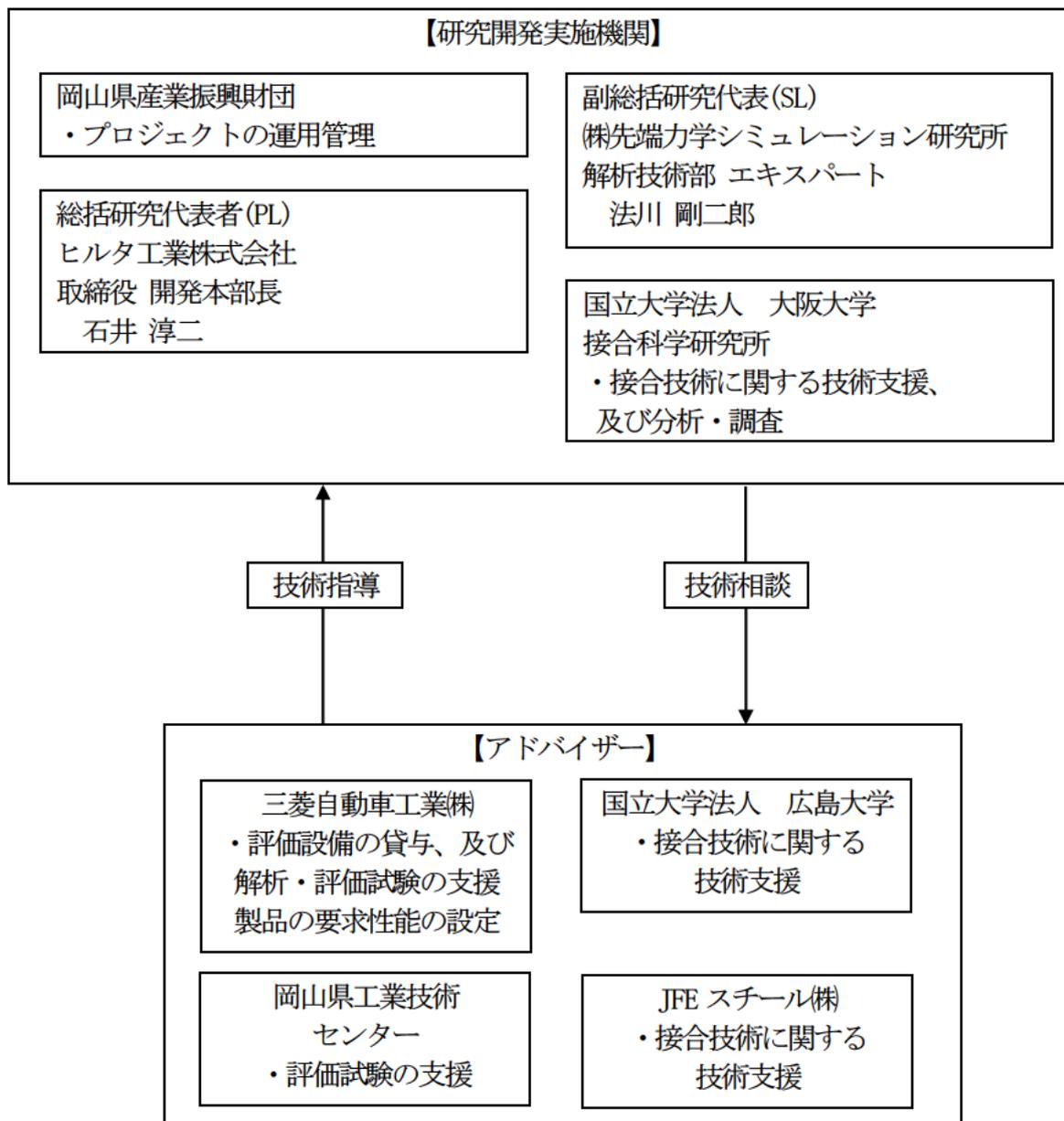
目標：自動車用クロスメンバー新規製品（サスペンション部品）の軽量化、部品コスト低減、開発費低減

- ①軽量化：10%以上
- ②部品コスト：10%以上低減
- ③開発費：30%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

溶接部応力制御技術開発による自動車用サスペンション部品の軽量化を目的として計画通りの研究を行った。

### 【1. 高精度疲労解析技術】

#### 【1-2】テストピースによる残留応力予測精度の向上

テストピースの材料物性値を熱弾塑性解析に反映するため、テストピース材料のフォーマスター試験により得られた溶接時の材料毎の物性値を反映し解析を行なった。材料特性の違いから残留応力の精度向上を狙い解析結果の一致率70%以上は達成した。

#### 【1-3】テストピースによる疲労寿命予想精度の向上

溶接部S-N線図のバラツキを抑えるため溶接ビードの安定化を図り溶接フランク角も大きくしたものを製作しS-N線図を再取得した。これによって溶接S-N線図の精度を向上させ、解析との合わせ込み精度を向上させた。解析ではメッシュサイズの変更及び局部応力に対応するためホットスポット応力を適応し解析と実機の一致率70%以上を達成した。精度向上の為にフォーマスター試験の結果を取り込んで解析を実施した。設計段階から解析をするためにビード スキャンデータのデータベースより、標準ビードを作成したが更に自動化を図るため、流体解析にて妥当性のある自動モデリング手法を確立した。今後実機との合わせ込みにより実用化を検討する。

疲労解析については、モールの応力円法により疲労寿命解析を進めているが設計段階で簡易的に耐久負荷に残留応力を見込んだ簡易疲労寿命予測システムを構築した。今後、実機との合わせ込みにより実用化を図る。

### 【2. 残留応力低減技術、応力分散制御技術】

#### 【2-1】テストピースによる溶接時の残留応力低減要素の検討

#### 【2-2】テストピースによる応力を分散させる方法の検討

応力集中部において残留応力を低減または、疲労寿命が伸びる方向になるよう溶接工夫し、残留応力低減50%以上を達成した。

シェル要素で高応力部の目処付けを行なった後、必要部をソリッド要素で解析する手法を確立した。残留応力解析に必要な部分のソリッド要素解析は標準ビードを用いてメッシュサイズを0.5mmとした解析で一致率70%以上を達成した。

また、応力分散制御については溶接ビードの延長等による板端応力集中部から残留応力が高い溶接止端部を回避し応力分散率50%以上を満足することができた

テストピース解析時に習得したホットスポット応力での評価によりサブAssemblyモデルで解析と実機での一致率70%以上を達成し、応力分散対策を具現化し応力分散率50%以上を達成させ対策要素をデータベース化した。

### 【3. 解析に基づいたサスペンション設計と製品検証】

#### 【3-1】クロスメンバーをテストピースで得られた疲労強度向上のデータベースを適用し設計

データベースからクロスメンバー溶接時の残留応力の向きと外部入力時の引張方向の主応力の向きを考慮し残留応力の圧縮方向成分で外部入力時の主応力を低減する方向に設定するようにプロセスの変更を行う設計をした。

これにより、クロスメンバーのパイプ、BRKTの板厚を低減することが可能になった。ベースになるクロスメンバーに対しコスト低減10%、軽量化10%のクロスメンバー

となり試作品を製作した。

【3-2】製品による残留応力予測精度の整合性検討

【3-3】製品による疲労寿命予測精度の整合性検討

【3-1】項で設計、製作したクロスメンバーの残留応力解析、疲労強度解析を実施した。解析結果と実機での発生応力の一致率は70%以上であり目標を達成している。さらに2輪6軸ロードシミュレータによる実車入力での耐久試験でベースのクロスメンバーと同等の疲労強度を有していることを確認した。

併せて単軸試験機による過負荷入力で限界疲労強度を確認した結果、ベース品に対して10%以上の疲労強度を有することを確認し、他サスペンション部品の各種形状に適用可能な、最適形状・最適プロセスの解析データベースを構築した。

【4. 対策方法の適正化手法確立】

【4-1】新規製品における最適形状・最適プロセスの構築

テストピース及びクロスメンバーから得られた知見をデータベースより展開し新規開発車種であるMPV車、マイクロEV車のサスペンション部品に反映し、試作評価した。薄板使用による10%以上の軽量化とコスト低減10%以上を実現した試作品で疲労強度向上効果の確認ができた。

過去の類似部品の開発実績と比較して開発費の低減30%以上の効果があり目標を達成した。

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 : 技術支援部 次長 横田尚之  
連絡先 : TEL : 086-286-9651 FAX : 086-286-9676  
E-mail : [nyokota@optic.or.jp](mailto:nyokota@optic.or.jp)

## 第2章 本論

### 2-1 高精度疲労解析技術

#### 2-1-1 テストピースによる残留応力予測精度の向上

##### 2-1-1-1 熱依存性材料物性値の解析への取り込み

板材料母材：JSH440Wの高温引張試験より得られた物性値を板材料母材：JSH440Wと溶接金属：DS1-Aの物性値をフォーマスター試験により取得し、熱物性値をJmatProにより計算させた。これは、相変態による熱膨張を解析に反映することで解析精度向上を狙って、テストピース材料の高温引張試験から得られた物性値を解析に反映したものである。

##### 2-1-1-2 フォーマスター試験の材料物性値と計算結果

表1 フォーマスター試験の材料特性

|      | 実験 TP・材質 | H26 年度・材質<br>(高温引張試験値) | H27 年度・材質<br>(JMatPro 計算値) |
|------|----------|------------------------|----------------------------|
| 溶接金属 | DS1-A    | JSH440W (1種類)          | DS1-A (①～③)                |
| 母材   | JSH440W  | JSH440W (1種類)          | JSH440W (④～⑦)              |

表1の材料特性を反映し、溶接部7箇所の熱物性値をJMatProにて計算を実施した。

方法1) 結晶粒度と冷却速度より算出した。

方法2) 硬度試験で得られた硬さより算出した。

※ ④は溶接金属と母材の成分を平均化

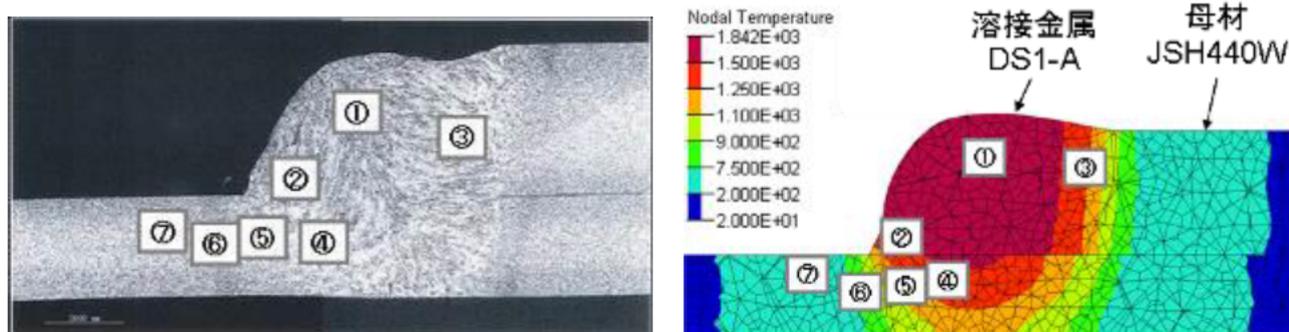


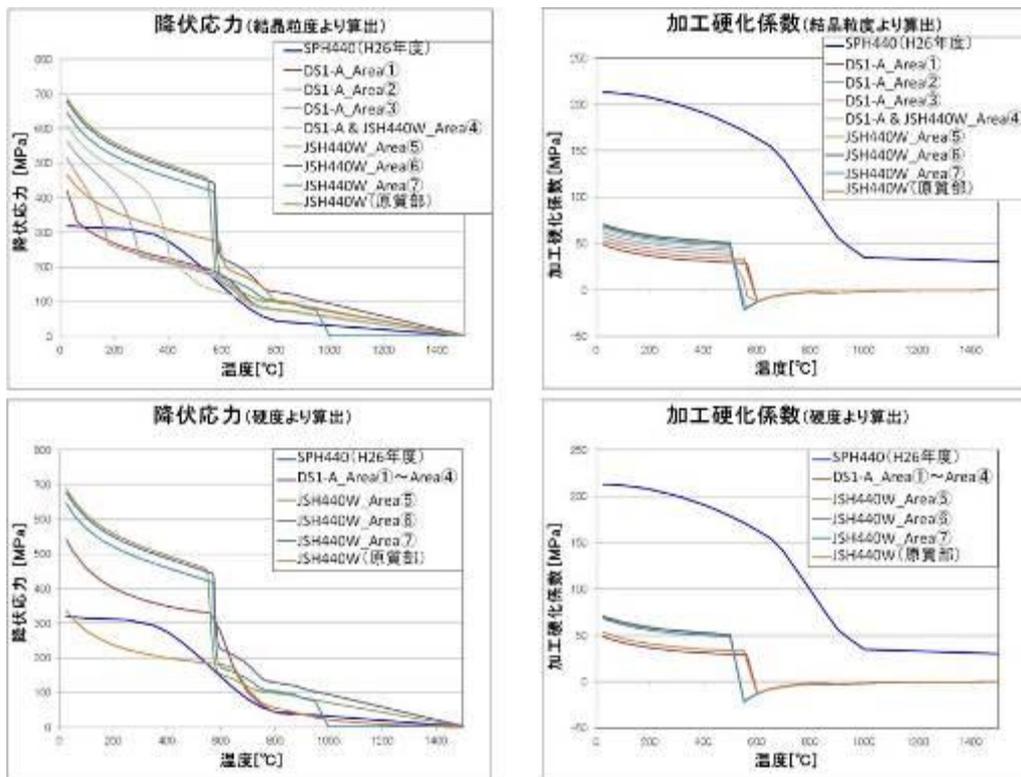
図 1

2-1-1-3 「フォーマスター試験で得られた結晶組織観察結果」

| 部位 | ミクロ観察結果   | 種別                        | 最高到達温度<br>(FEM)<br>[°C] | 冷却速度<br>(FEM)<br>[1/°C] | 田口-オーステナイト<br>結晶粒度<br>[ASTM] | 硬度<br>[HRC] |
|----|---|---------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------|
| ①  |  | 溶接金属<br>(1,500°C以上)       | 1,805                   | 42                      | 4.4                          | 20.8        |
| ②  |  | 溶接金属<br>(1,500°C以上)       | 1,507                   | 40                      | 3.7                          | 20.8        |
| ③  |  | ボンド付近<br>(1,500°C以上)      | 1,410                   | 38                      | 3.9                          | 20.8        |
| ④  |  | 混粒域<br>(1,300°C~1,500°C)  | 1,277                   | 39                      | 4.4                          | 20.8        |
| ⑤  |  | 細粒域<br>(900°C~1,100°C)    | 959                     | 36                      | 8.6                          | 23.3        |
| ⑥  |  | 粒状パーライト域<br>(750°C~900°C) | 835                     | 31                      | 11.4                         | 4.57        |
| ⑦  |  | 脆化域<br>(200°C~750°C)      | 622                     | 18                      | 9.2                          | 3.05        |

図 2

2-1-1-4 「降伏応力と加工硬化係数」



※ SPH440 の加工硬化係数はヤング率の 1/1000 を使用

図 3

2-1-1-5 「伝熱計算時の熱依存性材料物性値」

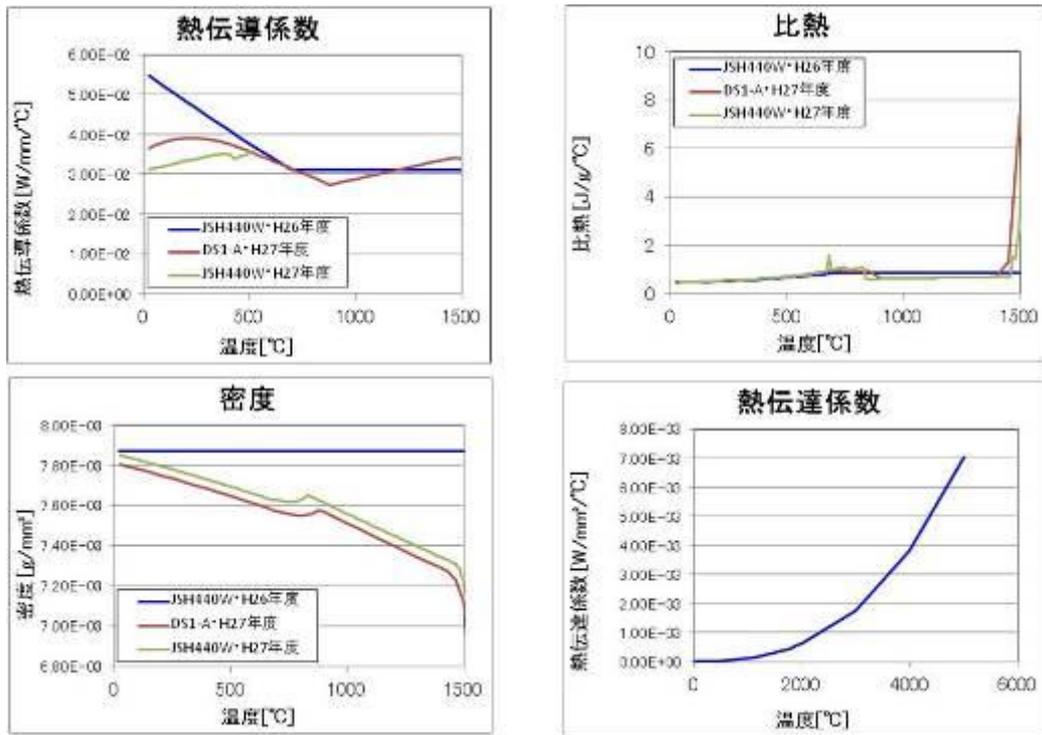


図 4

2-1-1-6 「応力計算時の熱依存性材料物性値」

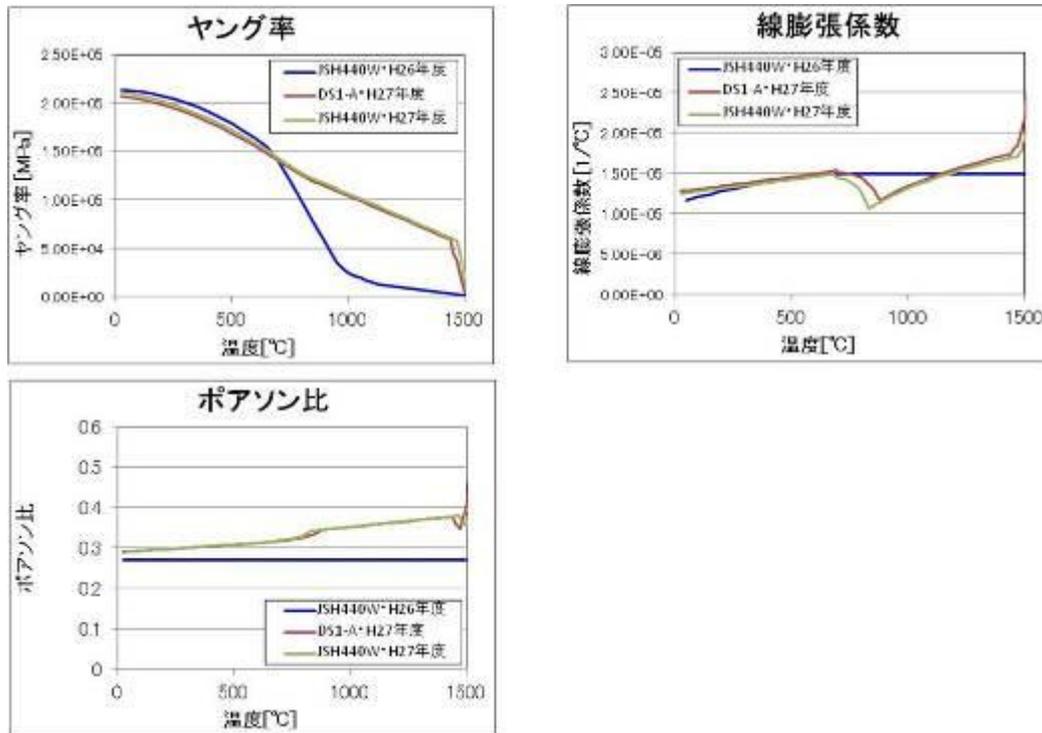


図 5

2-1-1-7 フォーマスター試験での材料特性をASU/WELDに反映  
 テストピースの材料物性値を高温引張試験の値とJMatProで計算し、それぞれの値をASU/WELDに反映。材料特性の違いから、残留応力の精度向上を狙い、標準ビードモデルにて残留応力解析を実施し、実機と解析の相関性にて精度の比較を行なった。

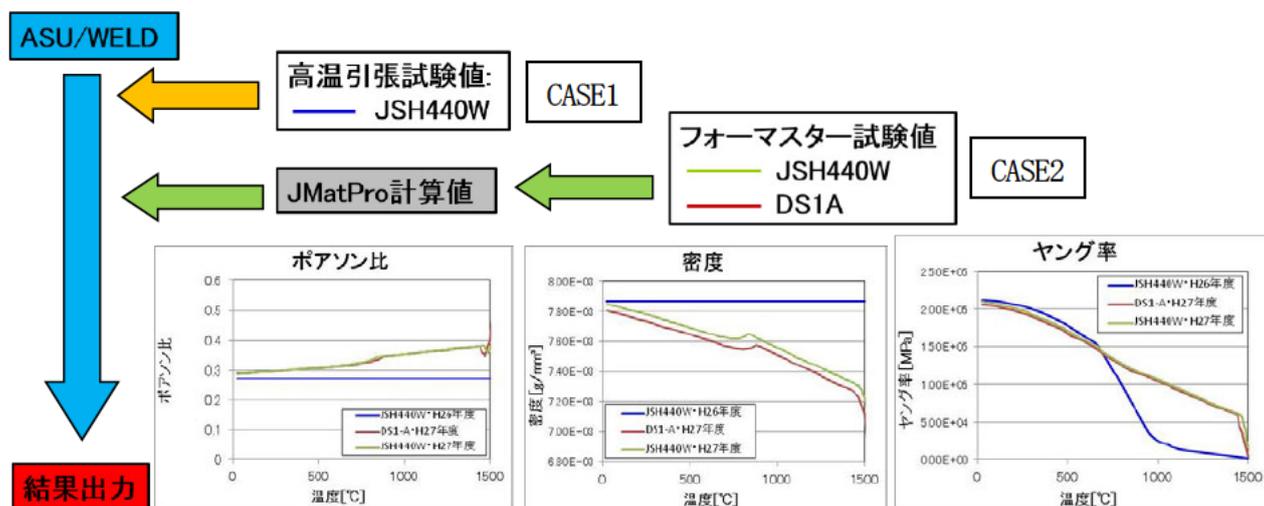
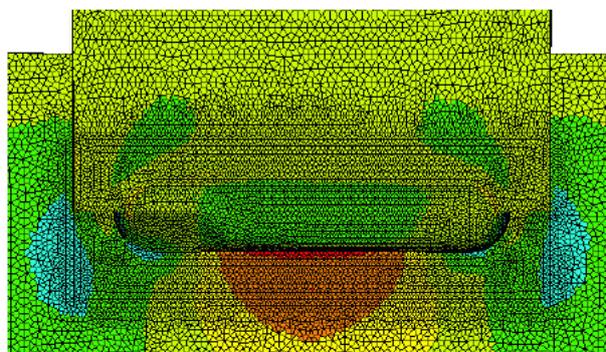
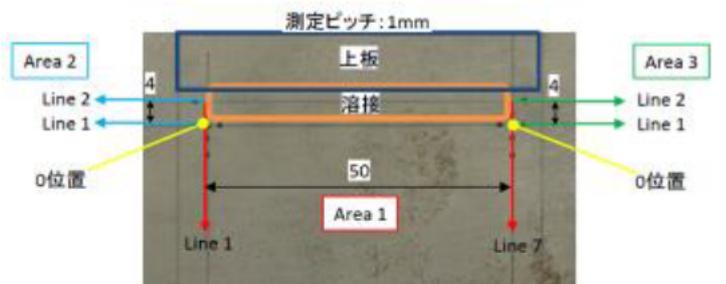


図 6

| テストピースNo.155 | 相関率 |
|--------------|-----|
| 高温引張試験       | 87% |
| フォーマスター      | 87% |



X軸方向残留応力分布

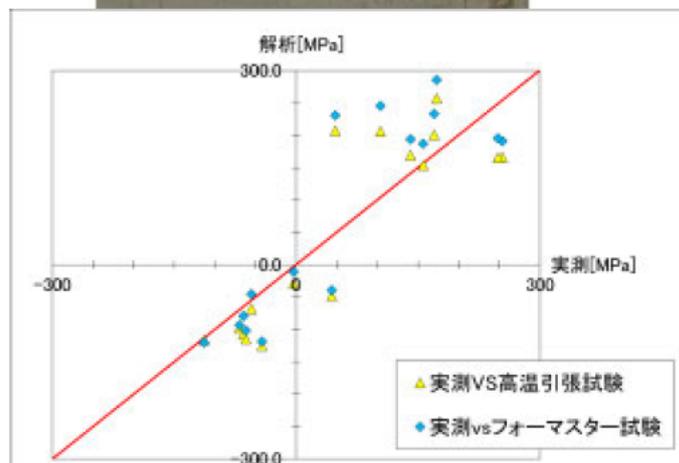


図 7

残留応力の解析結果は、実測値に対し、フォーマスター試験結果から得られた材料物性値を反映した場合、若干上方にシフトするが、解析と実測の相関率はいずれも87%であった。本結果より、溶接ビード部近傍の組織に応じて熱物性値を細かく定義する必要はなく、従来通り高温引張値により、解析を容易に行なう。

これらの結果より革新的新技術のベースの1つの残留応力の解析と実測の相関性を確保した。これらの原理、方法、ノウハウ、実験結果、相関性等をデータベース化した。

## 2-1-2 テストピースによる疲労寿命予測精度の向上

### 2-1-2-1 テストピースによる疲労寿命予測精度向上

平成27年度の取り組みで取得したテストピースのS-N線図において発生応力クラック回数、入力荷重-クラック回数のいずれの線図でもバラツキが大きかった。これは解析結果との一致率の信頼性にかかわってくるので重ね合わせのテストピースにおいて再度S-N取得を行なうことにした。

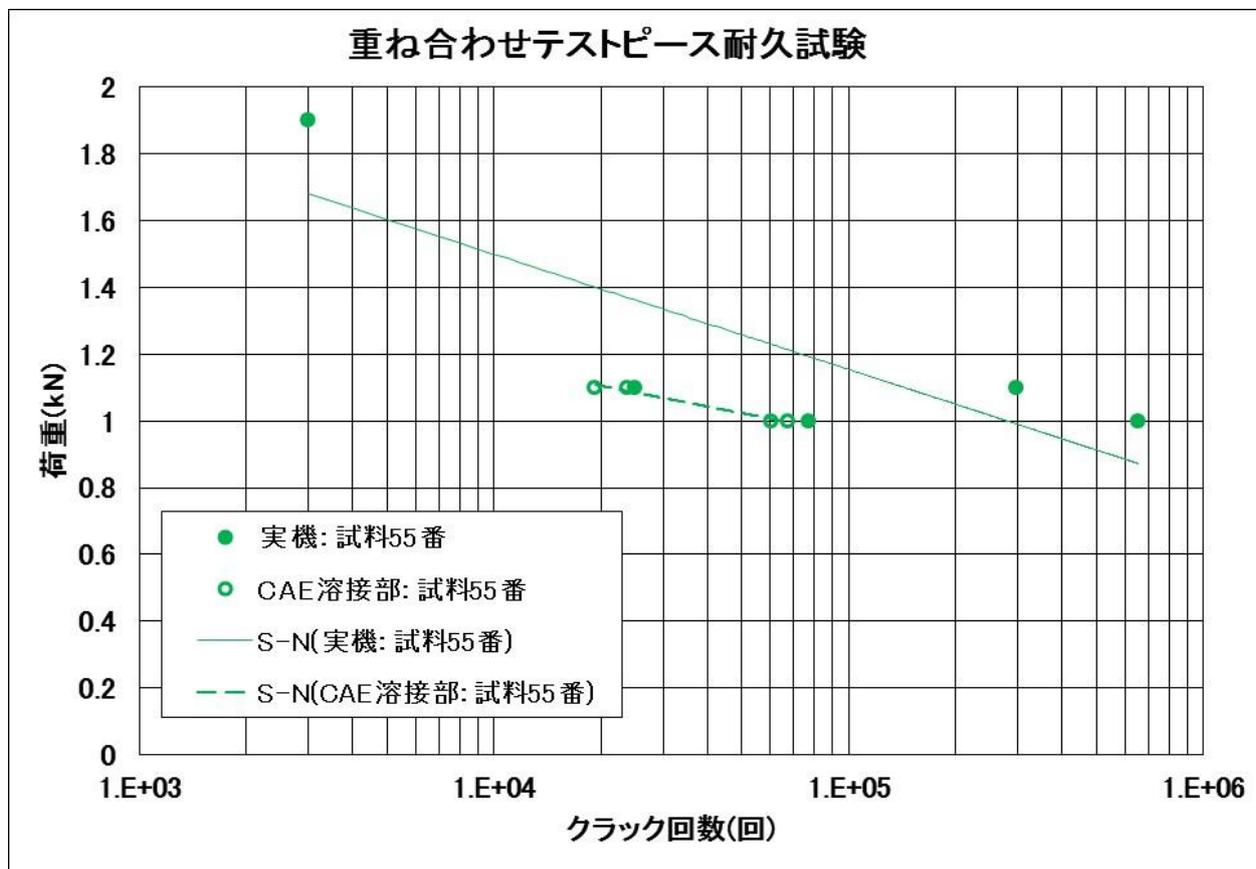
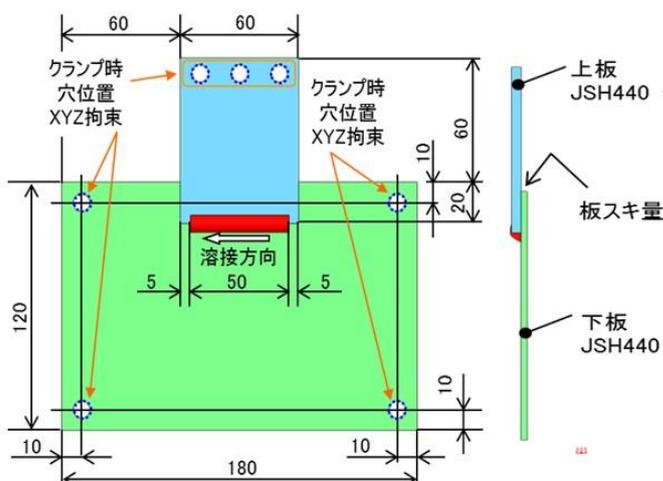


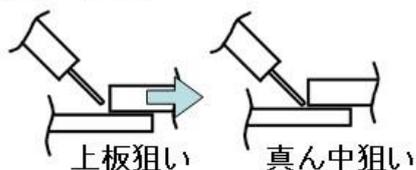
図 8

テストピースの作成にあたっては試料55(試料27と同一素性)の実機のバラツキが大きい為、溶接ビード、溶け込みを安定させた。ベースになる試料55の溶接条件として溶接速度、狙い位置、送り角度の条件を見直し、溶接ビードの安定化を図るため溶接フランク角も見直した。(試料155)

|              |           | 溶接<br>残留応力品 |     |
|--------------|-----------|-------------|-----|
| サンプルNo.      |           | 55          | 155 |
| 残留応力         | あり        | ●           | ●   |
|              | なし(溶接後焼鈍) |             |     |
| テストピース<br>形状 | T字        |             |     |
|              | 重ね合わせ     | ●           | ●   |
| 隙間           | 1mm       |             |     |
|              | 0mm       | ●           | ●   |
| 溶接条件         | 電流        | 180A        |     |
|              |           | 200A        | ●   |
|              |           | 230A        | ●   |
|              | 電圧        | 21V         | ●   |
|              |           | 22V         |     |
|              |           | 22.7V       | ●   |
|              | 速度        | 0.4m/min    | ●   |
|              |           | 0.5m/min    |     |
|              |           | 0.7m/min    | ●   |
|              | 狙い位置      | 真ん中         |     |
| 上板           |           | ●           |     |
| 送り角度         | 前進3°      | ●           |     |
|              | 前進15°     | ●           |     |
| 止端<br>形状     | 通常溶接      | ●           |     |
|              | 捨て溶接      | ●           |     |
| 材料           | JSH440    | ●           | ●   |
| 板厚           | t4.0+t2.6 | ●           | ●   |
|              | t2.6+t2.6 |             |     |



### 狙い位置



### 送り角度

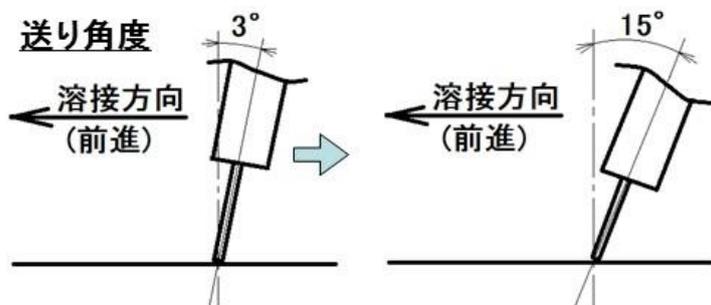


図 9

2-1-2-2 再製作したテストピースの溶接ビード比較

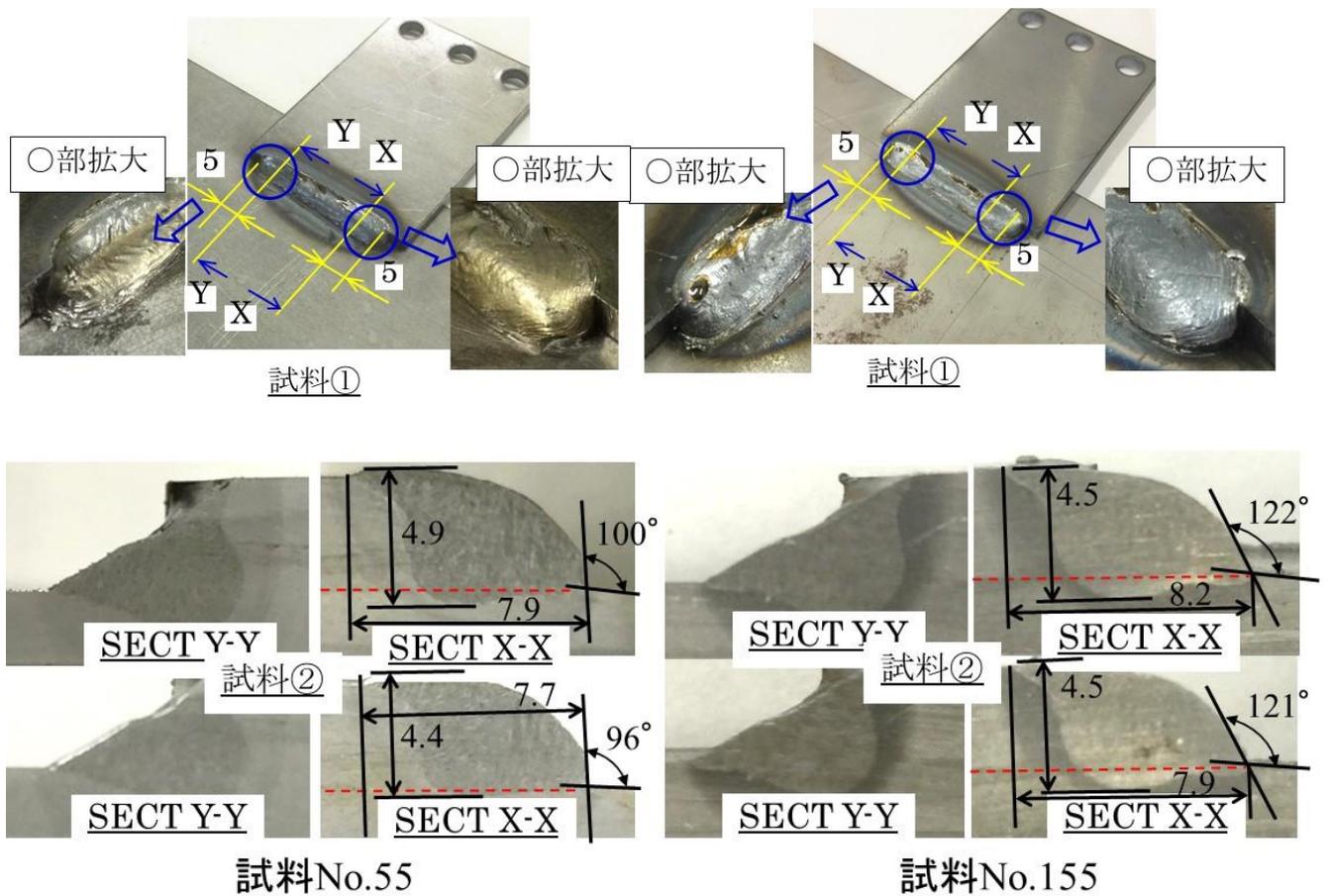


図 10

狙い通り溶接ビード、溶け込みは安定しており溶接フランク角も大きくなっている。  
このテストピースを用いて疲労寿命線図を再取得し予測線図の精度向上を図る。

### 2-1-2-3 テストピースの残留応力測定

テストピースの残留応力を、X線残留応力測定器により測定した。

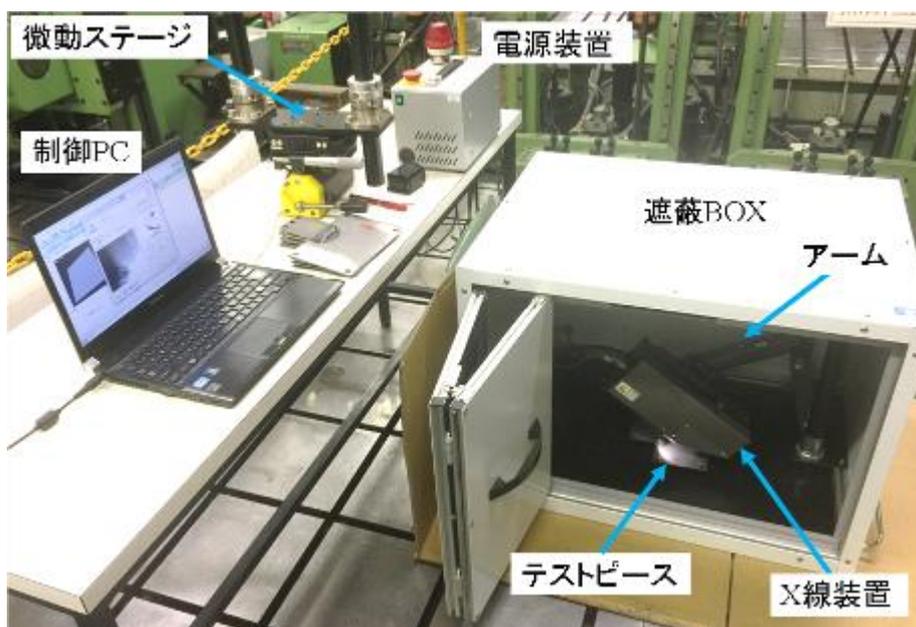


図 1 1

### 2-1-2-4 残留応力の一致率確認

試料55、試料155の残留応力解析を行い、実機の測定結果との相関性を確認した。

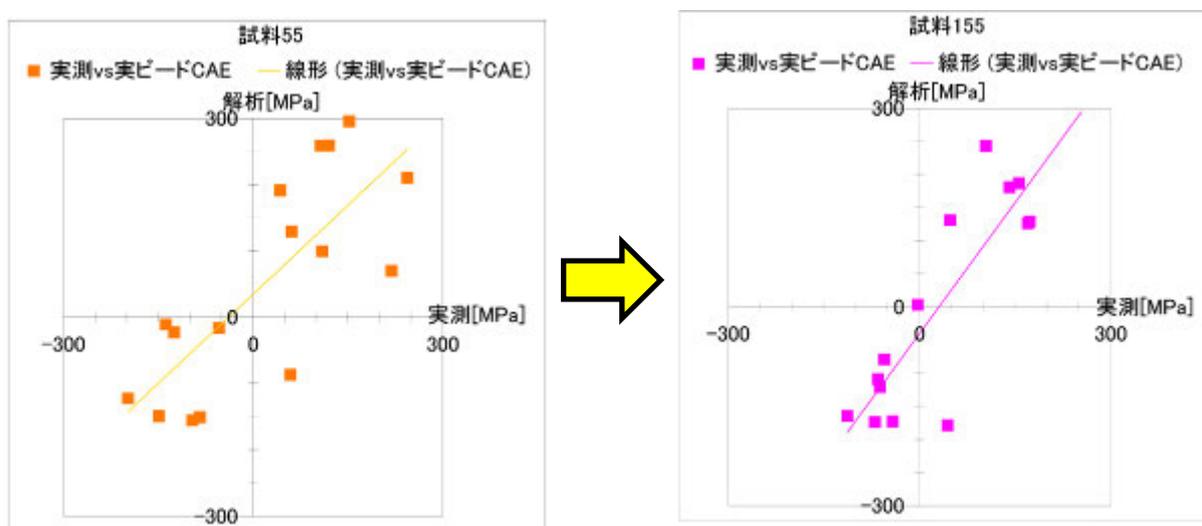


図 1 2

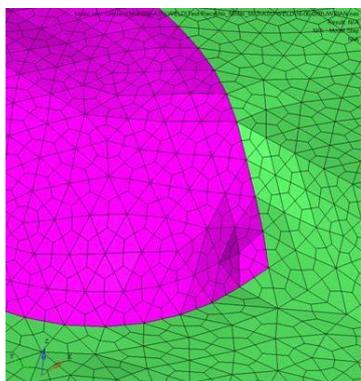
溶接条件の見直しにより試料155は試料55に比べ残留応力のバラツキは少なくなっている。

試料55の一致率80%に対し、試料155の一致率は85%となり、溶接ビード、溶け込みの安定化を図ったテストピースに変更しても目標の一致率70%以上は達成している。

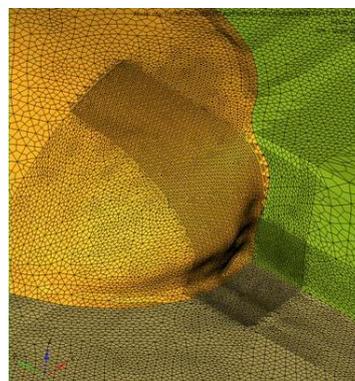
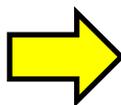
## 2-1-2-5 メッシュサイズの見直し

クラック部の詳細な形状に対応し、実態ビードの精度向上を図るため、ビードの形状効果（切欠き係数等）を反映できる様、耐久入力解析のクラック発生部のメッシュサイズを0.5mmから0.05mmに変更した。

メッシュサイズを微細化することにより溶接端部の解析精度向上を狙った。



メッシュサイズ：0.5mm

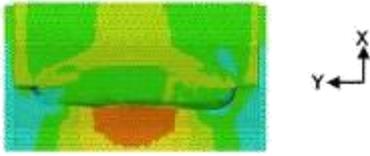


メッシュサイズ：0.05mm

図 13

以前の検討は、疲労解析時のメッシュサイズが0.5mmで、溶接端部の応力は解析値を読み取っており、解析での予測回数と実測の相関はとれていた。

しかし、疲労解析時のメッシュサイズが0.5mmから0.05mmに小さくなると溶接端部の応力が局所応力まで精度良く読み取れるため下記の計算方法における $\sigma_{max}$ が極所応力となるので、非常に大きな値になり、解析での疲労強度予測ができなくなり関連の検討が出来なくなるという問題が発生した。



モール円により残留応力を計算

$$\sigma_{AV} = (\sigma_{1XX} + \sigma_{1YY}) / 2$$

$$\tau_{max} = \sqrt{(((\sigma_{1XX} - \sigma_{1YY}) / 2)^2 + \tau_{1XY}^2)}$$

$$\theta = \tan^{-1}(-\tau_{2XY} / (\sigma_{2XX} - \sigma_{2max}))$$

$$\sigma_3 = \cos(\theta \times 2) \times \tau_{max} + \sigma_{AV}$$

残留応力の影響を修正グッドマン線図により考慮したn回作動時の降伏応力を計算

$$Y_{pn2} = Y_{pn1} - Y_{pn1} / T_s \times \sigma_3$$

修正降伏応力 $Y_{pn2}$ よりS-N線図を作成し、最大主応力 $\sigma_{2max}$ 時の回数を疲労寿命予測回数とする。

記号

ASU/WELD計算結果

$\sigma_{1XX}$ : X方向残留応力

$\sigma_{1YY}$ : Y方向残留応力

$\tau_{1XY}$ : せん断残留応力

NASTRAN 静強度計算結果

$\sigma_{2max}$ : 最大主応力

$\sigma_{2XX}$ : X方向応力

$\tau_{2XY}$ : せん断応力

$\sigma_{AV}$ : モール円中心(平均応力)

$\tau_{max}$ : モール円半径(最大せん断応力)

$\theta$ : モール円角度

$\sigma_3$ : 発生残留応力

$Y_{pn1}$ : 降伏応力(n回作動時)

$T_s$ : 引張り強さ

$Y_{pn2}$ : 修正降伏応力(n回作動時)

そこで対応策としてホットスポット応力の計算方法より、応力集中の影響のない溶接端部の応力 $\sigma_{0t}$ を求め、応力集中係数Kを掛けて、溶接端部の応力 $\sigma_{max}$ を求める手法に変更した。

$$\sigma_{max} = K \sigma_{0t}$$

## 2-1-2-6 ホットスポット応力の計算方法

ホットスポット応力は、溶接ビードによる局所的な応力集中を含まず、構造的な応力集中を考慮した溶接止端位置の応力として定義される。

- ・国際溶接学会の基準の計算方法を使用。
- ・溶接端部ラインから平行に0.4t・1.0tの位置の応力を求め、その2点を結んだ直線の延長上に溶接端部の応力がある。

$$\sigma_{0t} = \sigma_{0.4t} + 0.4t \left\{ (\sigma_{0.4t} - \sigma_{1.0t}) / (1.0t - 0.6t) \right\}$$

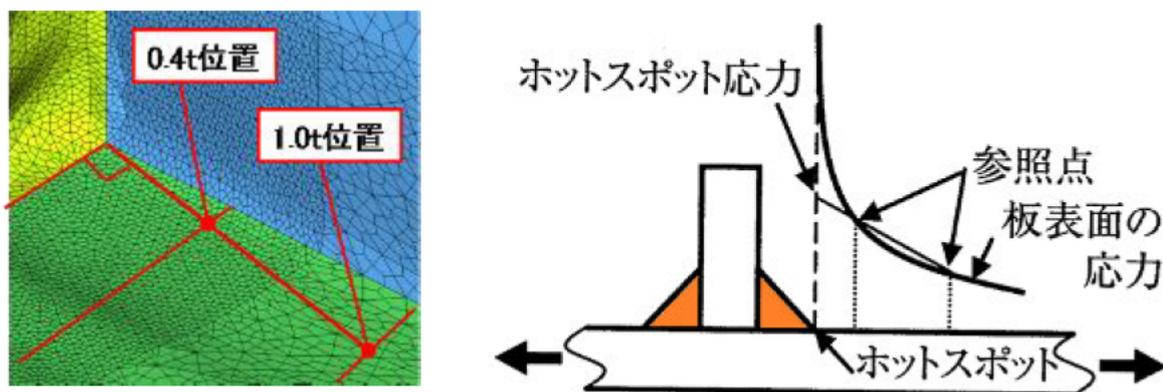
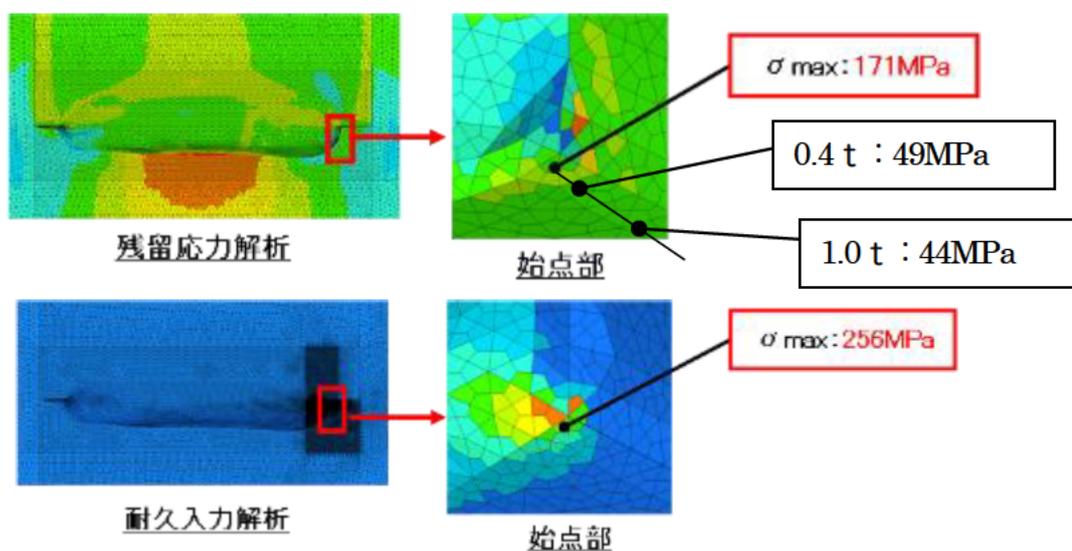


図 14

ホットスポット法を用いた疲労寿命の計算例（試料155）

<解析条件>

- ・解析メッシュ 残留応力：0.5mm 耐久入力：0.05mm
- ・応力集中係数：4.9



$$\sigma_{0.4t} : 48.95, \sigma_{1.0t} : 43.95, t : 2.6$$

$$\sigma_{max} = 4.9 \times (48.95 + (48.95 - 43.95) / (2.6 - 0.4) \times (0.4 \times 2.6))$$

- ・予測回数：13万回（実機回数25万回）

## 2-1-2-7 疲労寿命予測結果

再製作した試料155について入力荷重3パターン（①：0.9kN、②：1.0kN、③：1.2kN）で解析を実施し、疲労寿命予測回数と実機回数との相関性を確認した。

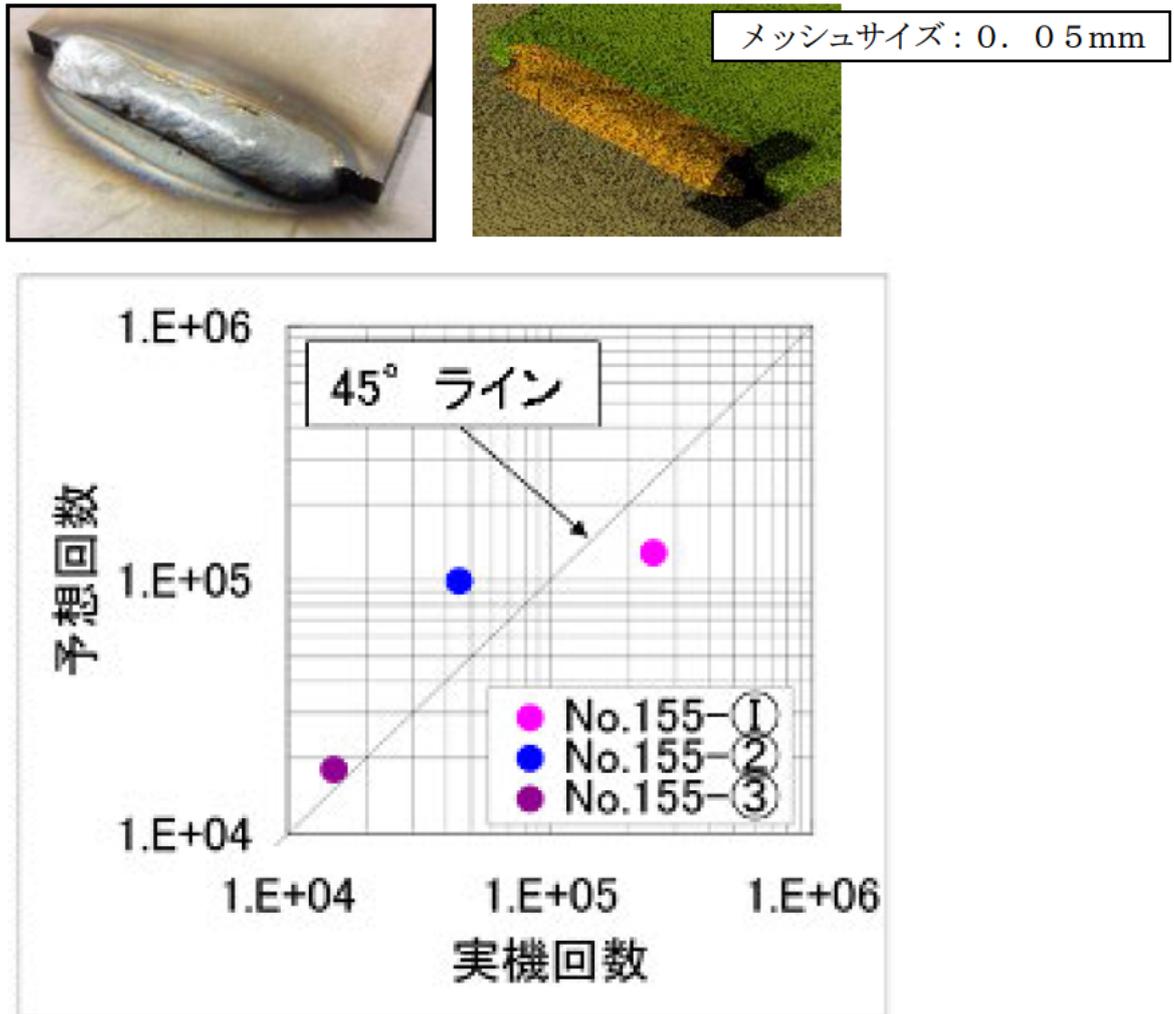


図 15

疲労寿命の一致率は $n=3$  86%となり、目標の70%以上を達成している。得られたS-N線図を図16に示す。

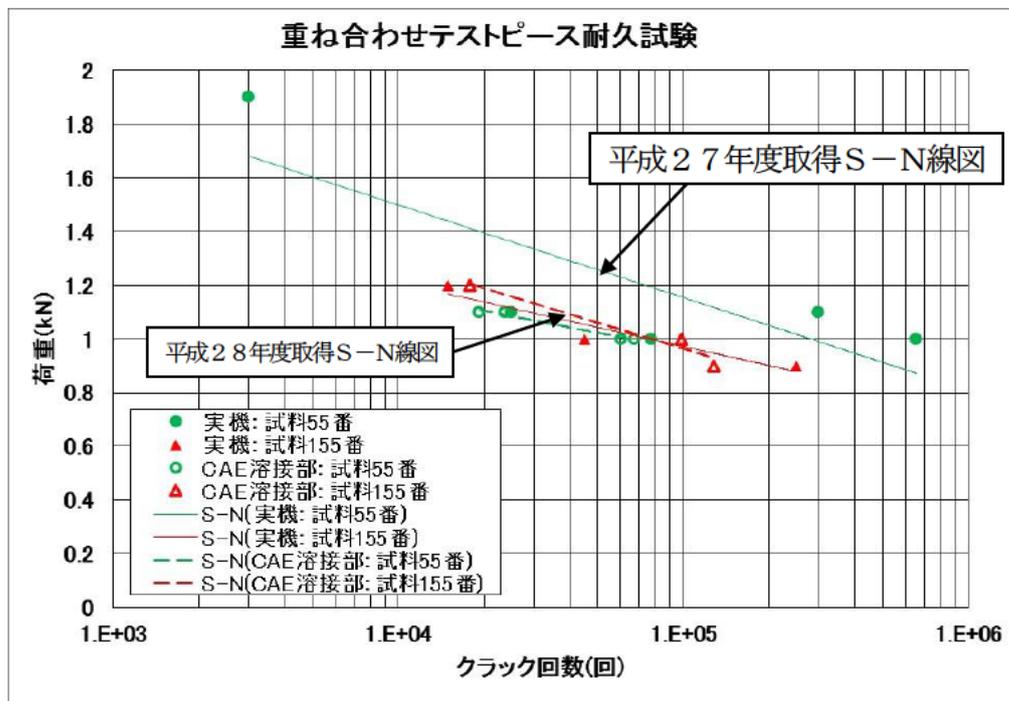


図 16

平成27年に取得したS-N線図はバラツキが大きいが本年度に取得したS-N線図はバラツキが減少した。試料155の実機結果とCAE解析結果も一致し精度が向上した。

2-1-2-8 溶接ビード標準化の検討

設計段階からの解析を行なう為 及び解析スピード向上、精度向上の為 テストピースの溶接ビードスキャンデータ及び溶接標準を基に標準ビードの外観形状を設定した。

(図17)

また、標準ビード形状と今回測定した試料155の実ビードモデルにて残留応力解析を実施し、残留応力の相関性を確認した。(図18)

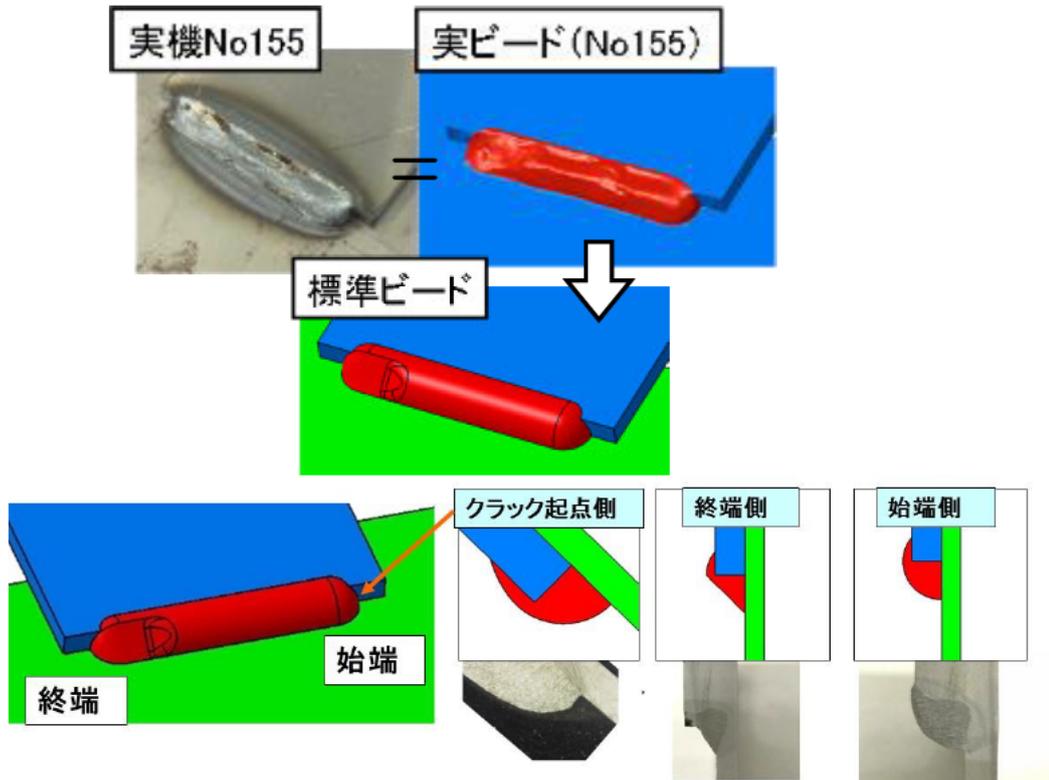


図 17

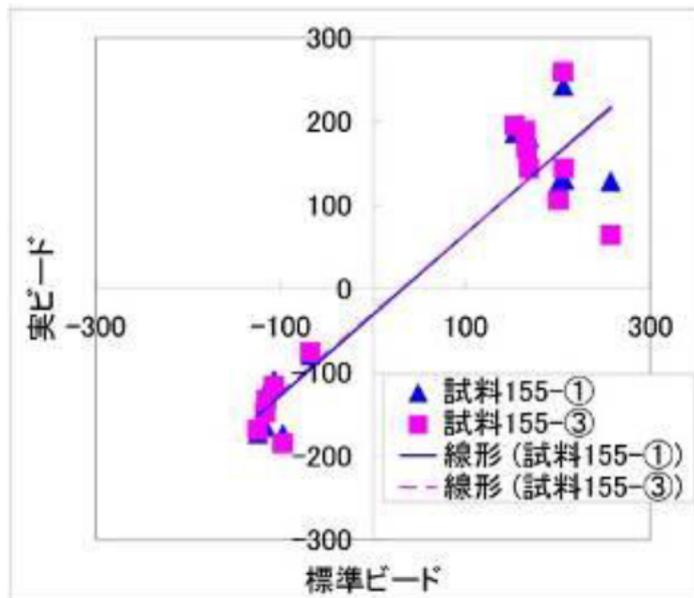
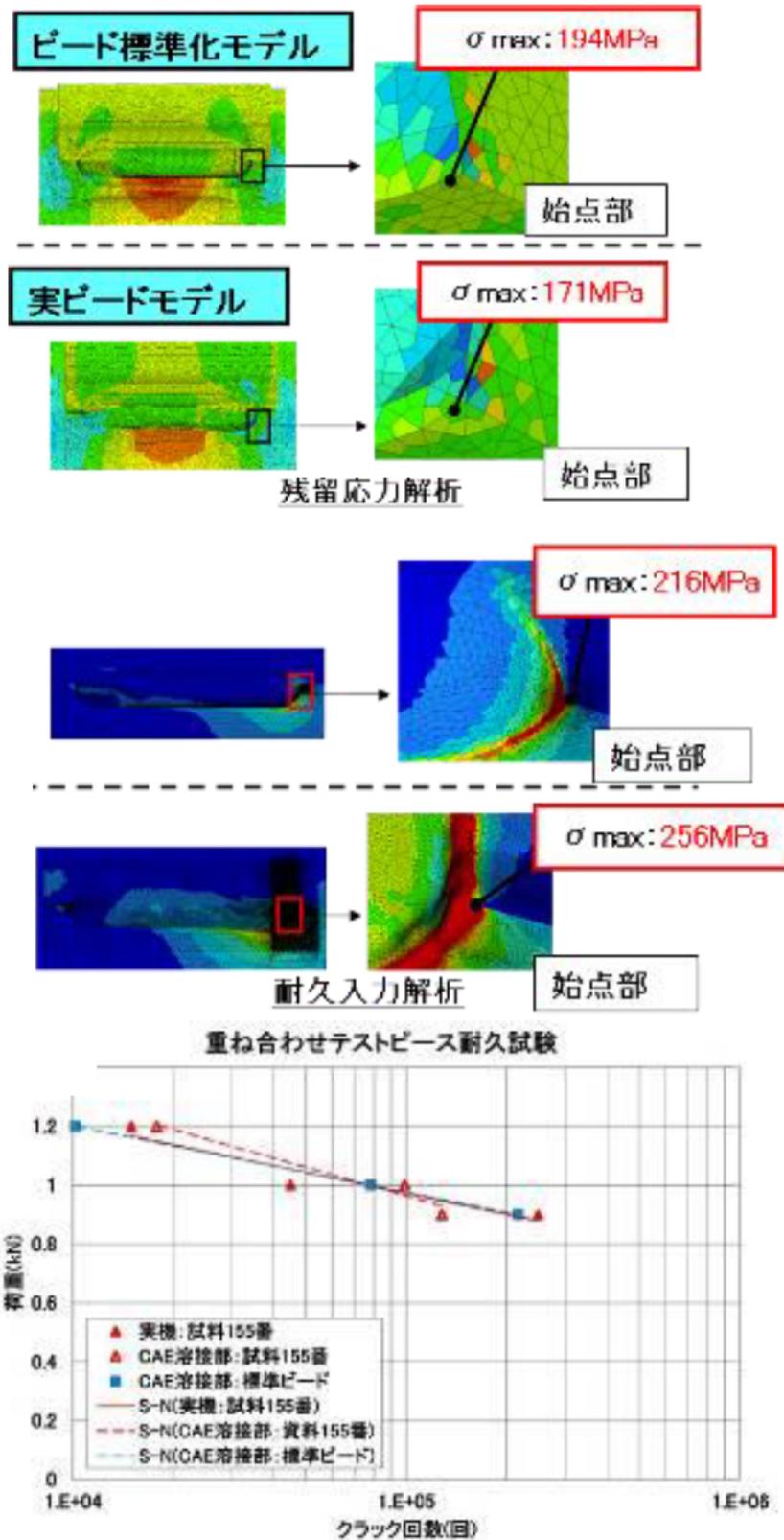


図 18

標準ビードと実ビードの残留応力の相関率は94%となり相関性があることが確認できた。今後の残留応力解析は標準ビードをデータベース化して行なう。

## 2-1-2-9 標準ビードの疲労寿命予測

標準ビードモデル、実ビードモデルにて疲労寿命予測を実施し一致率を確認した。



一致率は98%で目標の70%以上を達成し相関性があることが確認できた。データベースに落とし込んで溶接標準ビード形状にて解析を行なうこととした。

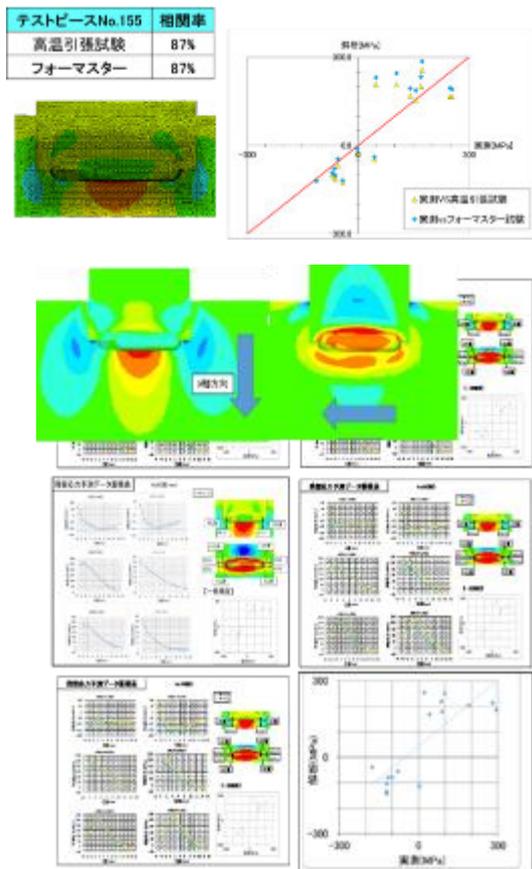
2-1-2-10 データベースへの反映

2-1項で得られた内容をデータベースに反映した。

【反映した内容】

- 1) テストピースによる残留応力予測精度の向上
  - ・材料物性値のフォーマスター試験を反映することは不要。
- 2) テストピースによる疲労寿命予測精度の向上
  - ・メッシュサイズを0.05mmにすることで解析精度向上。
  - ・局部応力に対応する為、ホットスポット応力の適用。
  - ・溶接ビード標準化

残留応力予測



疲労寿命予測

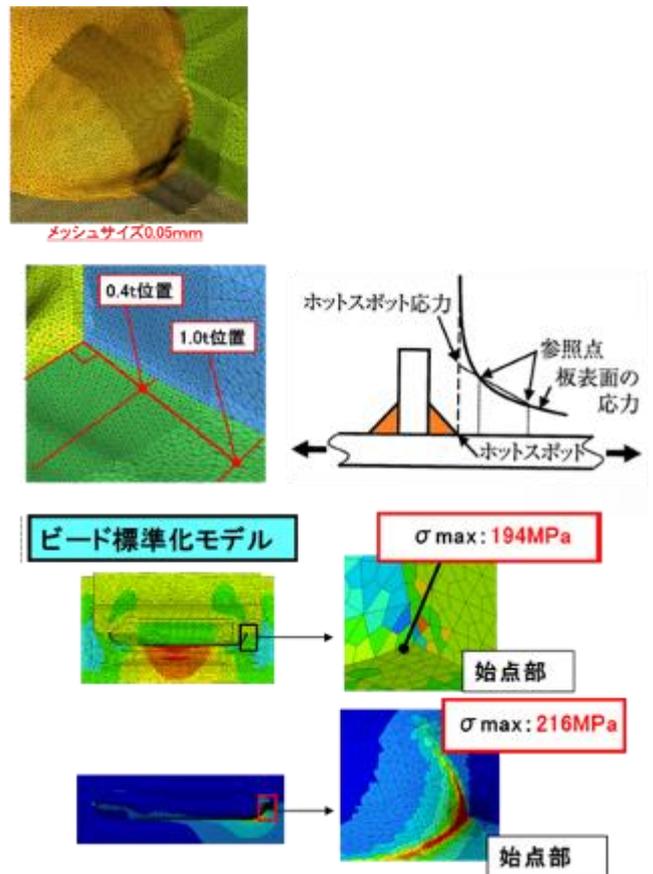


図 20

## 2-1-2-1-1 流体解析による溶接ビード形状の予測

### 2-1-2-1-1-1 背景

溶接部の残留応力解析や疲労耐久性予測計算を行うためには、溶接ビード部の形状を与える必要がある。これまでは以下の2通りの方法で溶接ビード形状を作成していた。

- ① 実ビード部を3Dスキャンして形状を作成する。

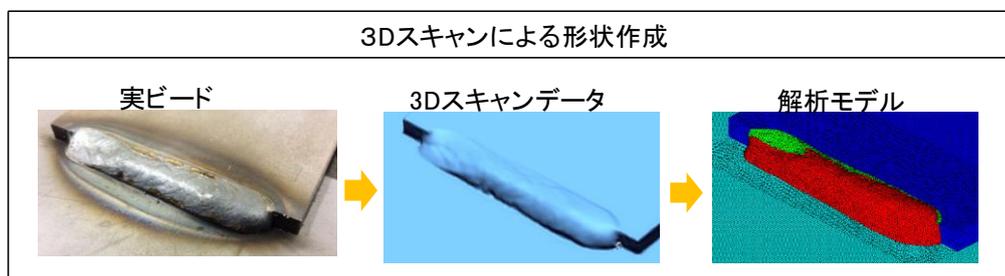


図 2-1 3Dスキャンによる形状作成の事例

- ② 実ビード部の形状を予測した上で、人の手作業によって作成する。

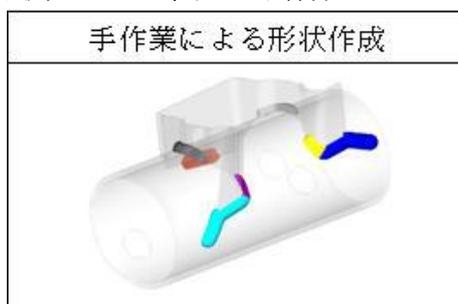


図 2-2 手作業による形状作成の事例

### 2-1-2-1-1-2 課題

既存の溶接ビード形状作成手法では、以下の課題が存在するため、設計段階で疲労寿命を評価できない問題があった。

- ① 設計段階で溶接継手部の疲労強度を予測する場合、3Dスキャンが存在しない。
- ② 継手形状によって変化するビード形状を手動で定式化する方法では、形状再現精度に問題がある。
- ③ 継手形状ごとに3Dスキャンを実施し、DB化する方法は膨大な工数を要する。

### 2-1-2-1-1-3 改善方法

そこで本事業では、以下に示す利点から、流体解析を活用することで溶接ビードを事前に予測する技術の確立を進めた。

- ① 流体計算により、手動による溶接ビード作成工数が削減できる。
- ② 流体計算では、幾何学的な予測と比較し、熔融金属にかかる表面張力や重力などの力を考慮した上で形状が求まるため妥当性が高い。
- ③ 流体計算であれば、3次元の複雑な継手形状に対しても適用可能

## 2-1-2-1 1-4 実施した流体解析の概要

本解析では、初期形状の違いにより生じる最終的な溶接ビード形状が、疲労寿命予測解析に与える影響を相対的に評価することを目的とし、図 2-3 に示す 3 種類の溶接ビード初期形状をモデル化した。

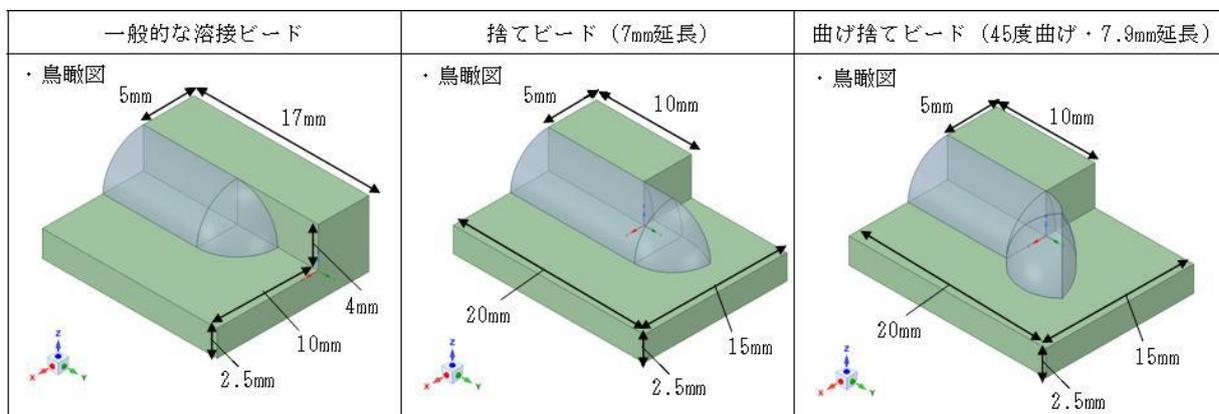


図 2-3 解析モデル

表 2 解析モデルの規模

| 一般的なビード  | 捨てビード    | 曲げビード    |
|----------|----------|----------|
| 367, 025 | 548, 053 | 565, 875 |

## 2-1-2-1 1-5 流体解析の基礎方程式

本解析では、熔融金属の凝固を考慮し、熱輸送を取り入れることで、ビード形状が重力と表面張力の影響で変化する過程で、凝固により動きが止まる様子を予測した。

流体解析で使用する基礎方程式を式(1)から式(4)に示す。

$$\text{連続の式} \quad \partial_t \rho + \nabla \cdot \rho \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\text{運動方程式} \quad \partial_t (\rho U_i) + \partial_j (\rho U_i U_j) = -\partial_i p + \partial_j \tau_{ij} + \rho g_i + \sigma \kappa \partial_i \alpha - K_d U_i \quad (2)$$

$$\text{熱輸送方程式} \quad \rho C \frac{DT}{Dt} + p(\nabla \cdot \mathbf{U}) = \nabla \cdot (k \nabla T) - \rho L \frac{\partial f_L}{\partial t} \quad (3)$$

$$\text{界面輸送方程式} \quad \partial_t \alpha + \mathbf{U} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (4)$$

2-1-2-1 1-6 流体解析から予測された溶接ビード形状

時刻 0.2 秒後の溶接ビード表面の形状を、図 24 に示す。図中の赤色が液相領域を、青色が固相領域を表す。標準ビードに比べ、捨てビードや、曲げ捨てビードでは、先端部の傾斜がなだらかになっていることが確認できる。

さらに、時刻 0.2 秒後の金属内部の温度分布を図 25 以下に示す。

温度分布結果から、母材と接地している箇所から溶融金属が冷却することが確認できる。

また、標準ビードの方が、捨てビードや曲げ捨てビードに比べて初期体積が小さく、母材との接地面積も相対的に大きいいため、冷却速度が速いことが確認できる。

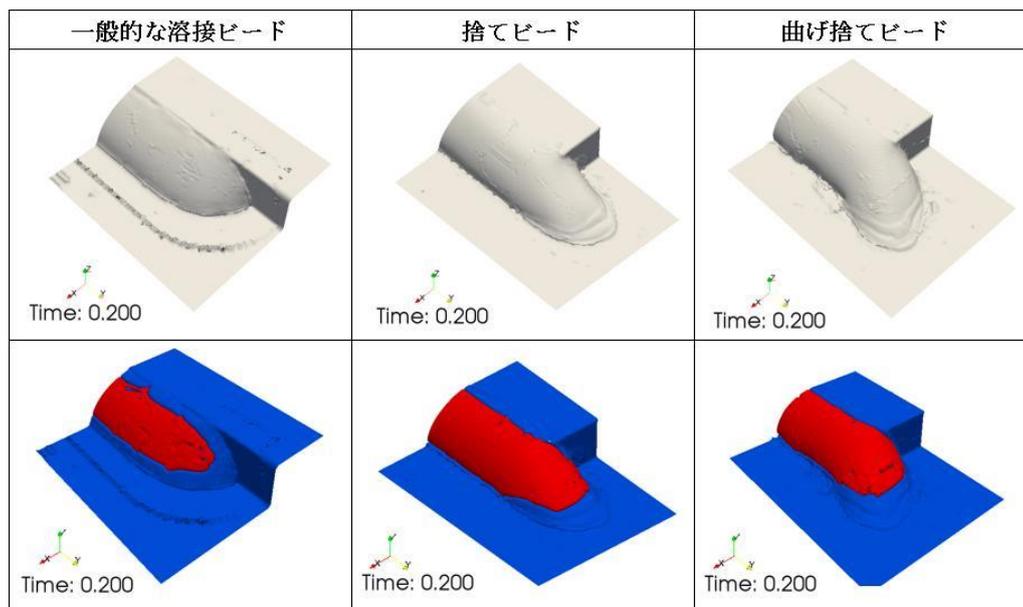


図 24 流体解析で予測された溶接ビード形状

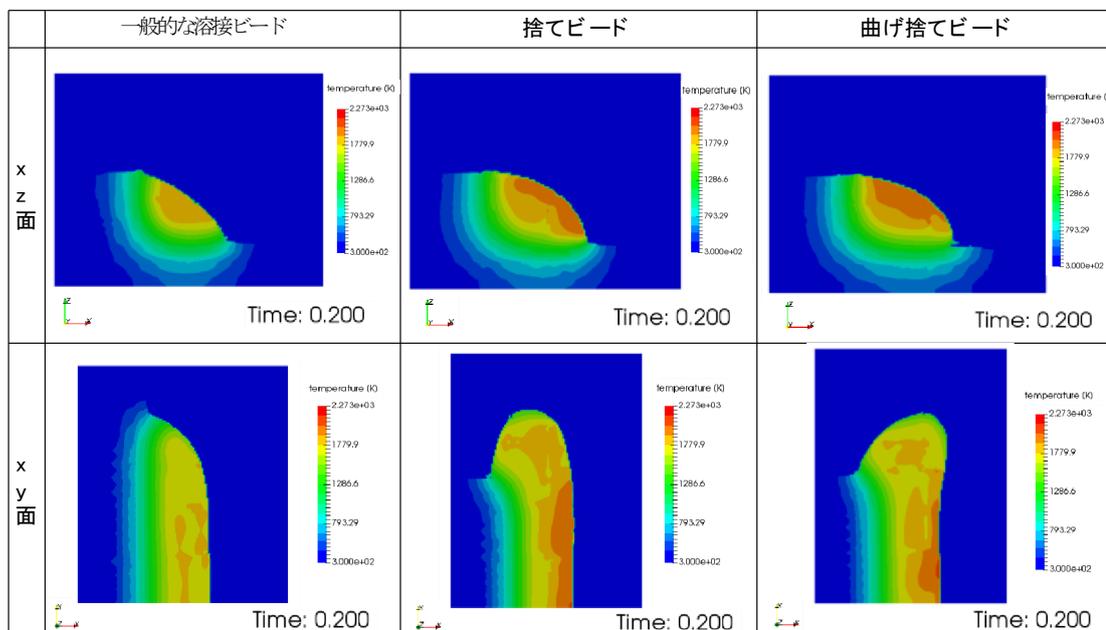


図 25 流体解析で予測された金属内部の温度分布

## 2-1-2-11-7 流体解析による簡易ビード形状予測のまとめ

本検討では、金属の溶融・凝固を含む熱輸送を考慮した二相流体計算を用いて溶接ビード形状の予測を試み、初期形状の異なる溶接ビードに対して解析を行い、最終状態における形状の差異を明らかにした。

本検討により、重力と表面張力による溶接ビードの運動が、凝固によって抑えられ、停止する現象を簡易的に解析する手法を確立することができた。

結果として、一般的なビード形状に比べ、捨てビードや曲げ捨てビードでは、金属表面の先端部の傾斜がなだらかとなった。

さらに、母材金属と接地している箇所溶融金属から冷え始め、表層部では熱がこもる現状が確認できた。

## 2-1-2-11-8 今後の展開

この度開発された溶接ビード予測手法は、以下の2つの方向性に沿って展開を進める。

### ①本解析で考慮されていない物理モデルを定式化した計算を実施する

- 1) 物性値の温度依存性を考慮し、アークの入熱や圧力を近似的に扱った計算を行う。
- 2) 入熱により形成された溶融池と溶加材の液滴挙動を含めた計算を行う。
- 3) プラズマの電磁的な効果であるローレンツ力やジュール加熱を考慮した上で、プラズマと溶融金属の統一的な流体挙動・熱輸送計算を実行する。

### ②本解析手法を、3次元的に複雑な溶接ビード形状や母材形状に対して実施する

- 1) 複雑な実機形状の中で、特にビード形状の予測が難しいような部位に対して、本解析手法を用いて、形状予測の相対評価を行い、実際の溶接工程における事前検討に活用していく。

## 2-1-2-1 2 簡易疲労寿命予測ツールの開発

### 2-1-2-1 2-1 背景

疲労強度設計におけるこれまでの取り組みでは、強度解析により得られた応力集中のみを用い、亀裂発生及び亀裂進展寿命を予測していたが、予測精度に問題が存在していた。

また、疲労耐久試験による信頼性確保の取り組みには、膨大な期間と工数が必要となっていた。これらの問題を解決する手段として、大阪大学接合科学研究所にて簡易疲労寿命予測ツールを開発した。以下にその詳細を示す。

### 2-1-2-1 2-2 本手法の考え方

平滑材にひずみを付与すると応力が生じ、応力-ひずみ曲線の面積で表わされるひずみエネルギー密度が発生する。溶接による応力が継手に残留している場合には、ひずみエネルギー密度が台形の面積として表わされる。本手法では、このひずみエネルギー密度の一部が亀裂発生及び亀裂進展に用いられるとの考えを基本とする。

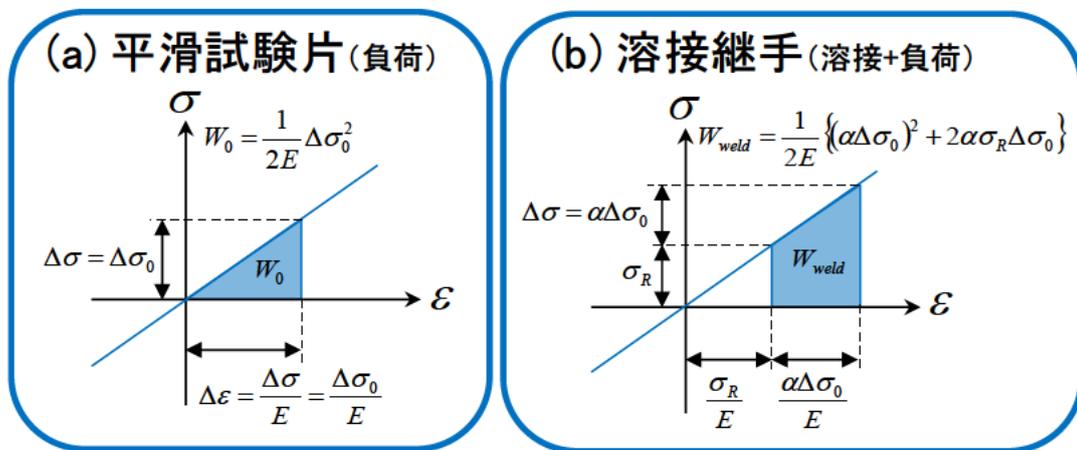


図 26 平滑材と溶接継手に生じるひずみエネルギー密度

### 2-1-2-1 2-3 等価応力範囲

溶接継手に生成されるひずみエネルギー密度を、平滑材のひずみエネルギー密度で表わすことで得られる応力振幅を、等価応力範囲として式(6)に定義する。

$$\text{ひずみエネルギー密度} \quad W_0 = W_{\text{weld}} \quad (5)$$

$$\text{等価応力範囲} \quad \Delta\bar{\sigma} = \left\{ (\alpha\Delta\sigma_0)^2 + 2\alpha\sigma_R\Delta\sigma_0 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

### 2-1-2-1 2-4 亀裂進展特性

等価応力範囲から、亀裂発生及び亀裂進展寿命を求めるため、材料固有の物性値である亀裂進展特性を使用する。

亀裂進展特性の横軸である応力拡大係数範囲  $\Delta K$  は、式(6)より得られる等価応力範囲を式(7)に代入することで求められる。亀裂進展特性の縦軸が亀裂進展速度であり、亀裂長さ  $a$  と負荷荷重の回数  $N$  の比で表わされる。

以上の関係を利用し、本簡易疲労寿命予測ツールでは、等価応力範囲から応力拡大係数範囲を求め、亀裂進展特性から、亀裂発生及び亀裂進展寿命を同定する。

出展：大田他、日本機械学会論文集、43-373 (1977)、p.3179.

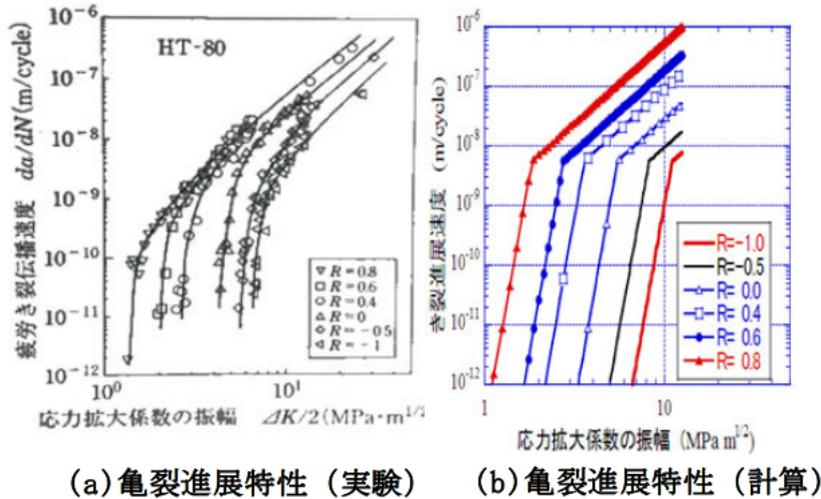


図 27 亀裂進展特性

$$\text{応力拡大係数範囲} \quad \Delta K = \sqrt{\pi a} \Delta \bar{\sigma} \quad (7)$$

2-1-2-1 2-5 応力比を考慮した3次元応力状態への一般化

一軸状態で定式化された、式(6)の等価応力範囲を三次元応力状態に展開した結果を式(8)に示す。

$$\begin{aligned} \Delta \bar{\sigma} &= \left[ 2E \int_0^1 \phi(\xi) \{ \sigma_{Rij} + \sigma_{ij}(\xi) \} \Delta \varepsilon_{ij} d\xi \right]^{1/2} \\ &= \left[ 2E \int_0^1 \phi(\xi) \{ \sigma_{Rij} + \sigma_{ij}^{\min} + \xi \Delta \sigma_{ij} \} \Delta \varepsilon_{ij} d\xi \right]^{1/2} \\ \text{等価応力範囲} \quad &= \left[ 2E \int_0^1 \phi(\xi) \{ \sigma_{Rij} + \beta \sigma_{ij}^{\max} + \xi(1-\beta) \sigma_{ij}^{\max} \} C_{ijkl} (1-\beta) \sigma_{kl}^{\max} d\xi \right]^{1/2} \\ &\quad \phi(\xi) = 1 \quad \text{if } \sigma_m(\xi) > 0 \\ &\quad \phi(\xi) = 0 \quad \text{if } \sigma_m(\xi) < 0 \end{aligned} \quad (8)$$

2-1-2-1 2-6 流体による溶接ビードを用いた簡易疲労寿命解析

流体解析から得られた溶接ビード形状を用い、開発された簡易疲労寿命予測ツールにて、一定振幅の疲労寿命解析を実施した。

疲労寿命解析にて、図 28に示す S-N 曲線が予測され、結果として以下の結論が得られた。

- 1) S-N 線図の傾向は3種類のビード形状で一致した。
- 2) 実機と同様に、曲げ捨てビードの疲労耐久性が有利であることが示された。

一般的な溶接ビード      捨てビード      曲げ捨てビード

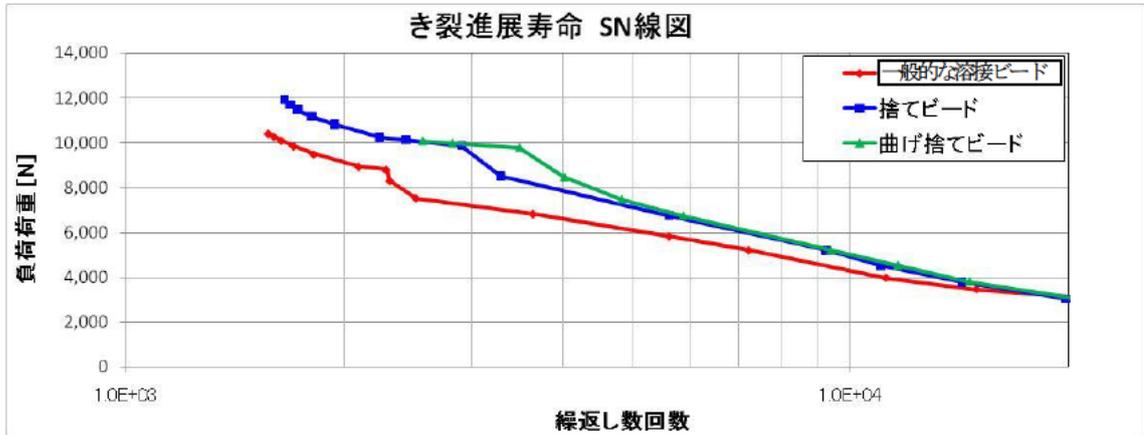
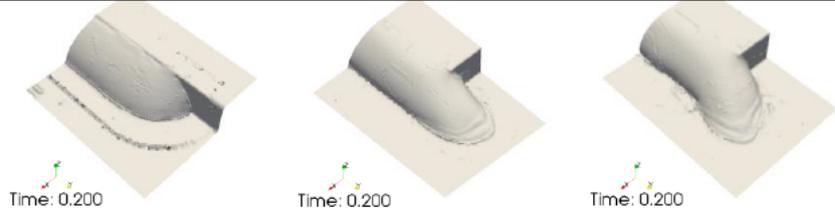


図 28 溶接ビード形状が疲労寿命に及ぼす影響

図 29 に示す通り、本簡易疲労寿命予測ツールにて、亀裂進展寿命が最も短い領域をコンター図で確認可能となるよう開発を実施した。これらの領域が重要保安部位である場合は、応力低減及び応力分散のための対策を講じる必要がある。本ツールを活用することで、設計段階で危険部位を事前に予測し、最適な対策を講じることが可能であることが示された。

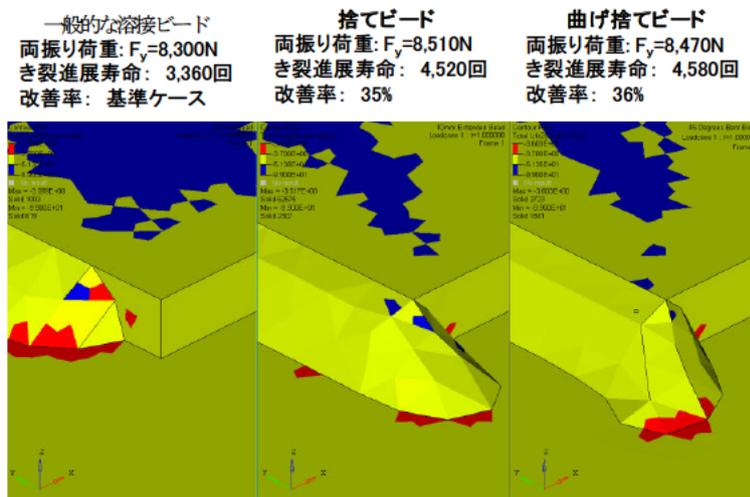


図 29 疲労寿命の危険領域 (赤色: 危険領域)

### 2-1-2-1 2-7 簡易疲労寿命予測ツール開発のまとめ

これまで、モデル作成の簡便さを重点に置き、溶接ビード形状を幾何学的に決定していたが、流体解析を活用し、熔融金属にかかる表面張力や重力などの釣り合いからビード形状を求めることで、疲労解析時の解析モデルの妥当性を高めた。

流体解析にて予測された溶接ビード形状を用い、溶接解析、強度解析、疲労解析を連続して実施する仕組みを構築した。

実機ビード形状の測定結果に依存することなく、設計段階で溶接部の残留応力を予測することが可能となり、簡易疲労寿命予測ツールを用い、最適な溶接条件を設計段階で把握することで、軽量化が達成可能であることを示した。

### 2-1-2-13 疲労寿命予測精度のまとめ

熱変態による熱膨張を解析に反映することで解析精度の向上を図ったが、フォーマスター試験結果から得られた材料物性値を反映した場合、高温引張試験とも解析と実測の相関率はいずれも87%であり、物性値の影響は無いことが確認された。

疲労寿命予測はホットスポット応力により予測可能であり実機と解析の整合性もとれた。

このことにより残留応力の予測及び、高精度疲労解析技術の検証ができた。

高い解析精度の確保を確認し、CAEモデリングのノウハウ（溶接ビードの標準化、適正なメッシュサイズ、モール応力円、ホットスポット応力）をデータベース化した。

これらの結果より革新的新技術のベースの1つの残留応力解析結果を反映した疲労寿命予測の解析と実測の相関性を確保した。

これらの原理、方法、ノウハウ、実験結果、相関性等をデータベース化した。

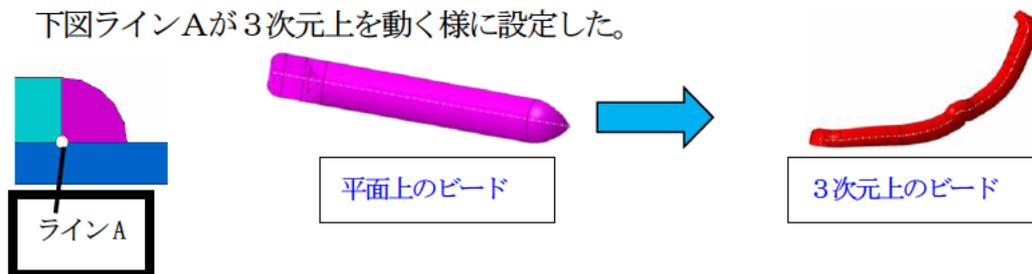
## 2-2 残留応力低減技術、応力分散技術

### 2-2-1/2-2-2 テストピースによる応力を低減・分散させる方法の検討

#### 2-2-1-1/2-2-2-1 サブ ASSY による残留応力低減・分散制御法の検討

標準ビードを3次元モデルの上に乗せてモデリングする方法を検討した。

下図ラインAが3次元上を動く様に設定した。



テストピースから得られた残留応力、疲労寿命予測技術を基に残留応力低減と応力分散要素の洗い出しを行ってデータベースに取り込んだ。

本データベースを基にサブ Assy モデルを用いて応力の高いところを抽出し、データベースを基に分析し低減と分散の対策を具現化し反映した。

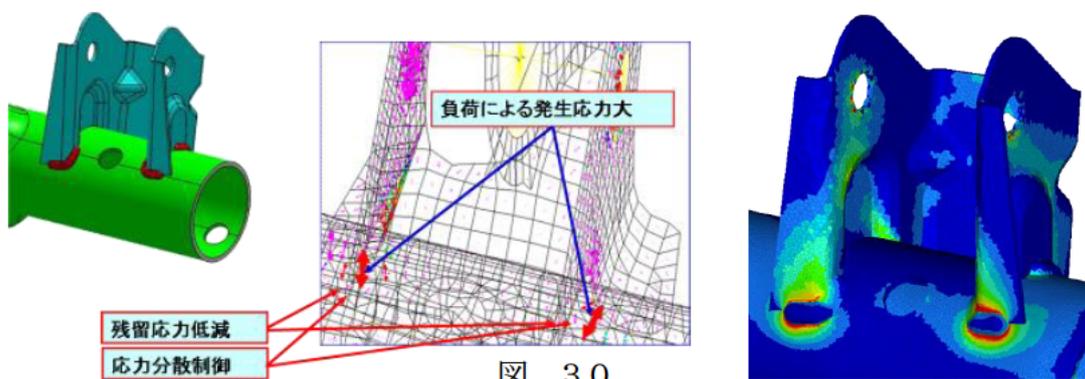


図 30

具体的な項目としては、ベースモデルに対し板端応力集中部の残留応力をキャンセルする方向にコントロールするため溶接ビードに捨てビードの追加を検討した。

捨てビードの向きは45°方向に設定した。

解析結果は残留応力の低減は30%、応力分散は45%で目標の残留応力50%以上低減、応力分散率50%以上の目標は未達となった。

次に板端応力集中部から残留応力の高い溶接端を回避するため10mmの捨てビードを追加して疲労強度向上を図った。

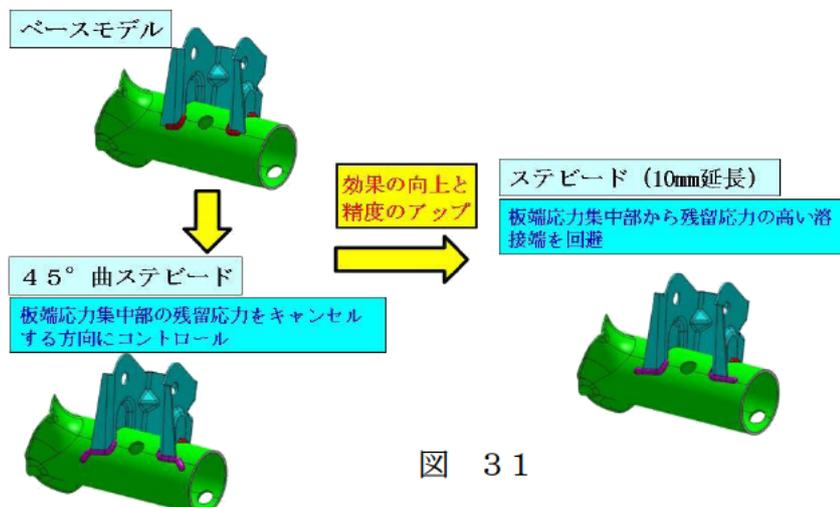


図 31

ベースモデルと10mmの捨てビードを設定したモデルにて残留応力解析を実施し、実機との残留応力の相関性確認を実施した。

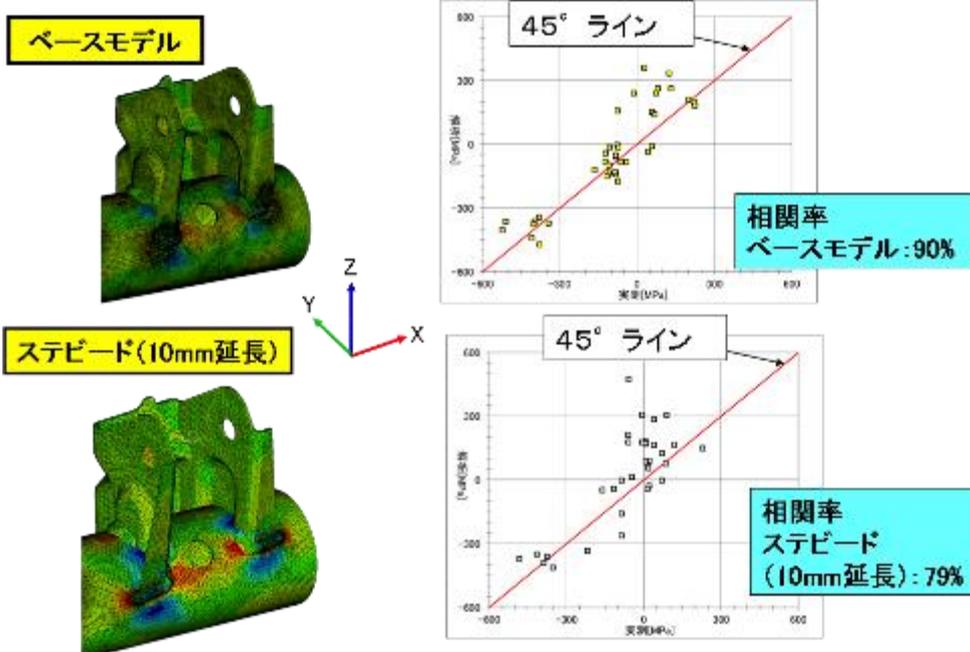


図 32

ベースモデルは実機と解析の一致率が90%、捨てビードを設定したモデルにおいては実機と解析の一致率が79%となり、相関性が良好であることが確認できた。

ベースモデルと10mmの捨てステピードを設定したモデルにて、残留応力解析、疲労強度解析を実施し、残留応力低減、発生応力分散効果を確認した。

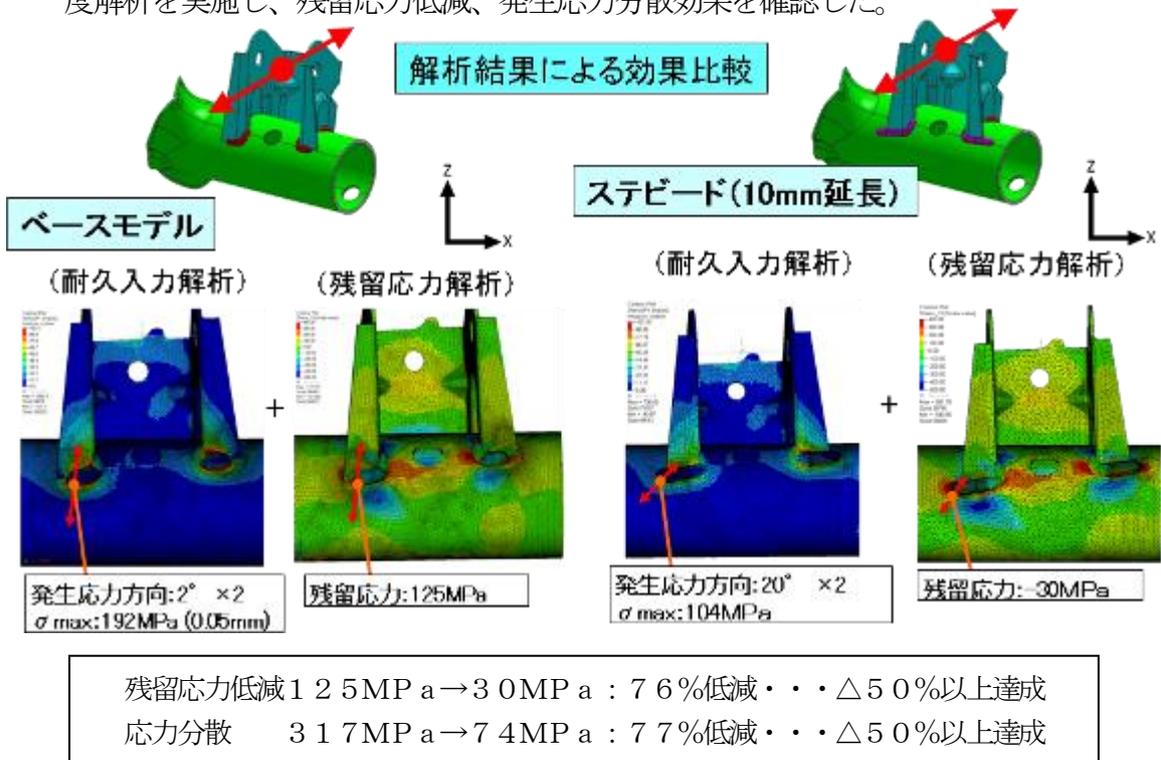


図 33

## 2-2-1-2 サブ ASSY での解析時の問題点

サブ ASSY テストピースを0.05mmメッシュにて耐久強度解析を行う際、0.5mmモデルと比較して要素数が多く、解析時間が大幅に増えるため解析時間が実用的でない。メッシュの細分化(0.05mmメッシュ)とホットスポット応力の測定によって応力低減・分散の精度向上が図れ、残留応力低減/分散目標の50%低減を達成したが、解析確認した結果、時間がかかり開発スピードに乗らないという課題が残った。

### モデルサイズと所要時間の検討



図 34

そこで、解析時間の短縮案として下記①～③を検討した。

- ①解析方法の変更：シェルの解析にて高応力部の目処をつける。  
(必要部のみソリッドにて熱解析&強度解析実施)
  - ②溶接ビードの標準化を図る。
  - ③メッシュサイズ拡大：疲労強度解析0.05mm→0.2mmに変更。残留応力解析は0.5mmで変更なし。
- ③項を反映した場合の耐久応力、残留応力の比較を実ビードモデル、標準ビードモデルにて実施した。

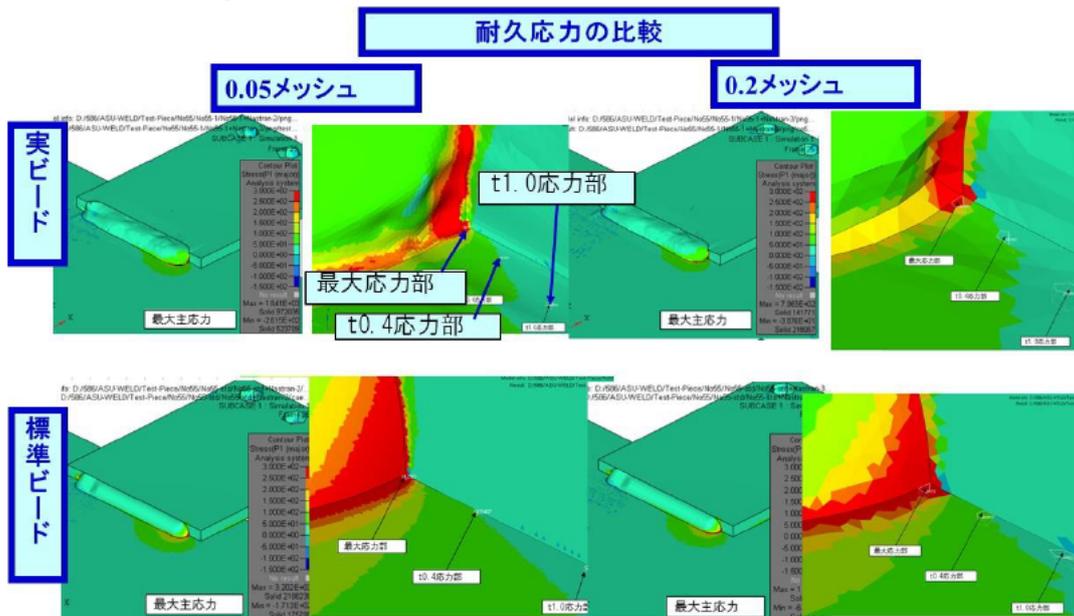


図 35

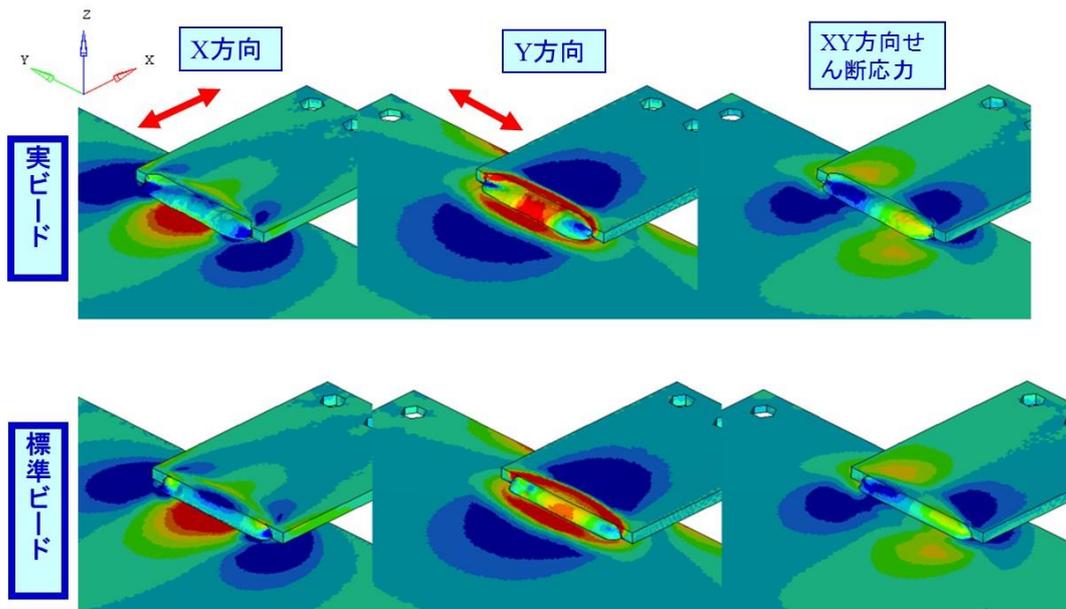


図 36

0.5mmメッシュ

前記①～③項を反映した解析時間短縮案にて実機との相関性を確認済。

### 重ね合わせテストピース耐久試験

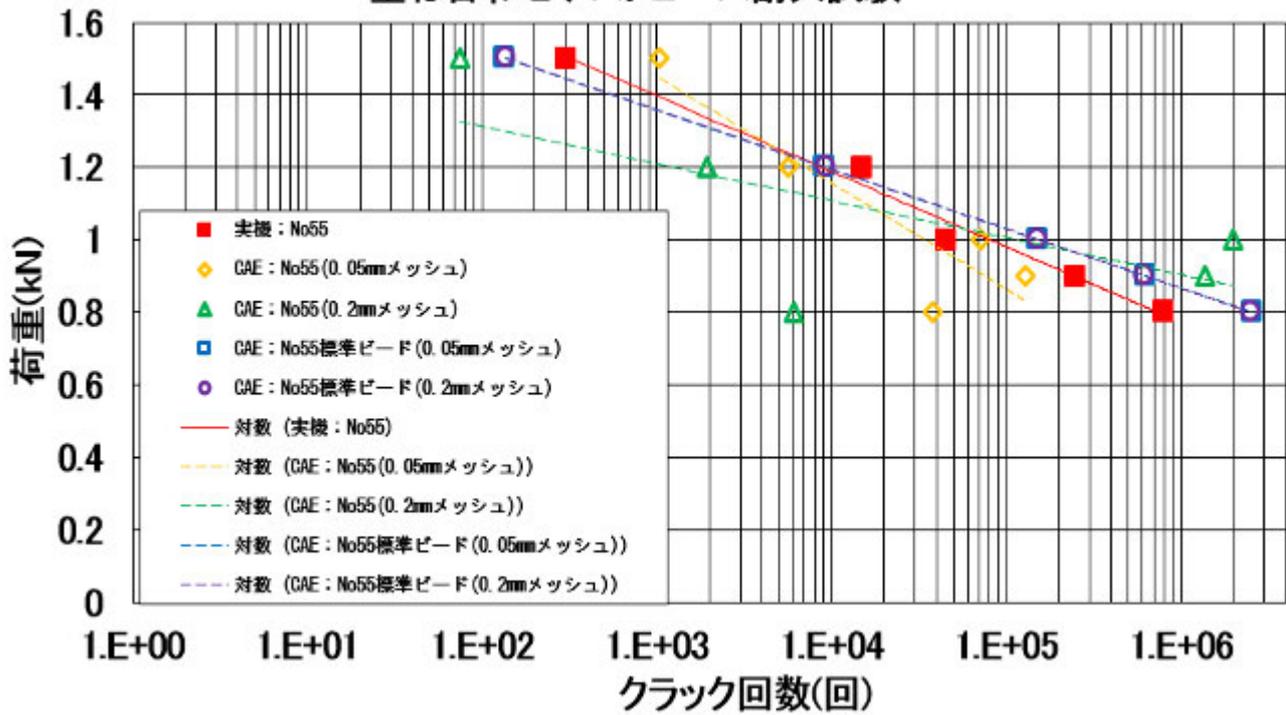


図 37

### 2-2-1-3 サブ ASSY での疲労強度確認

解析にて疲労強度向上に対して効果があった捨てビード品とベースモデルで疲労強度の差を確認した。

#### 【試験方法】

- ①サブ Assy (アッパーアーム BRKT とサイドパイプ) を固定する。
- ②単軸油圧加振機を使用し、車体左右方向に繰り返し負荷する。
  - ・入力荷重：± 3 kN
  - ・試験周波数：2 Hz

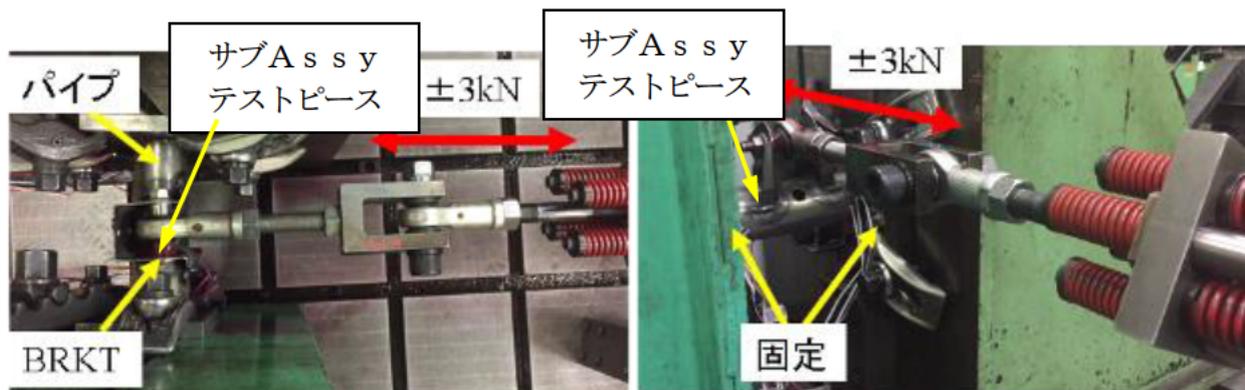


図 38

#### 【試験結果】

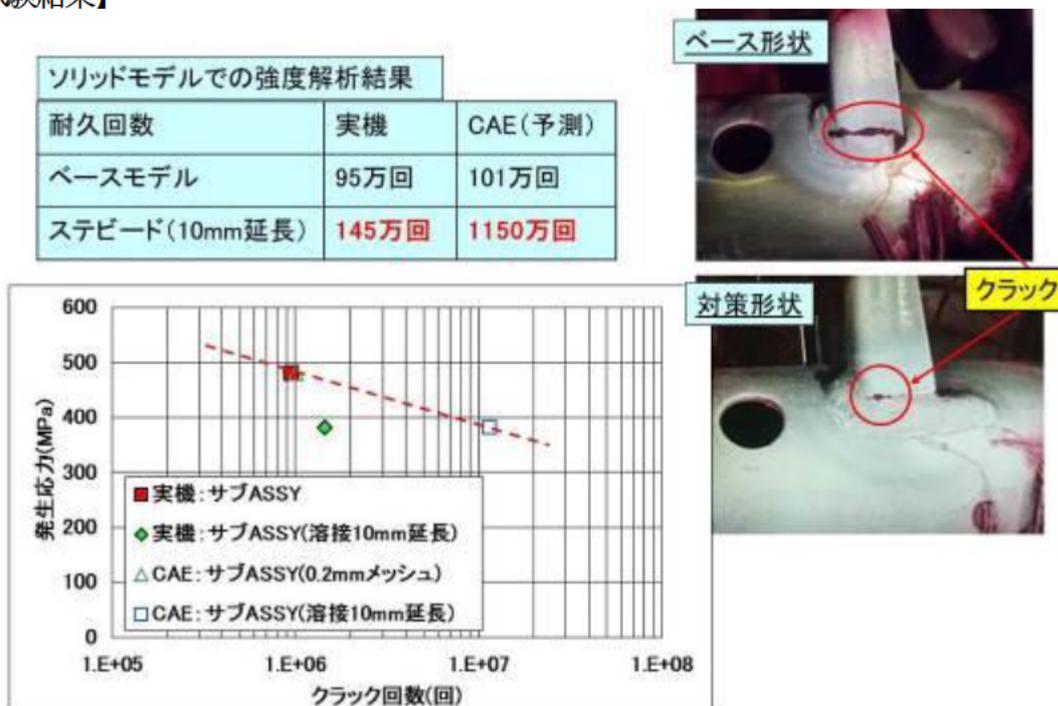
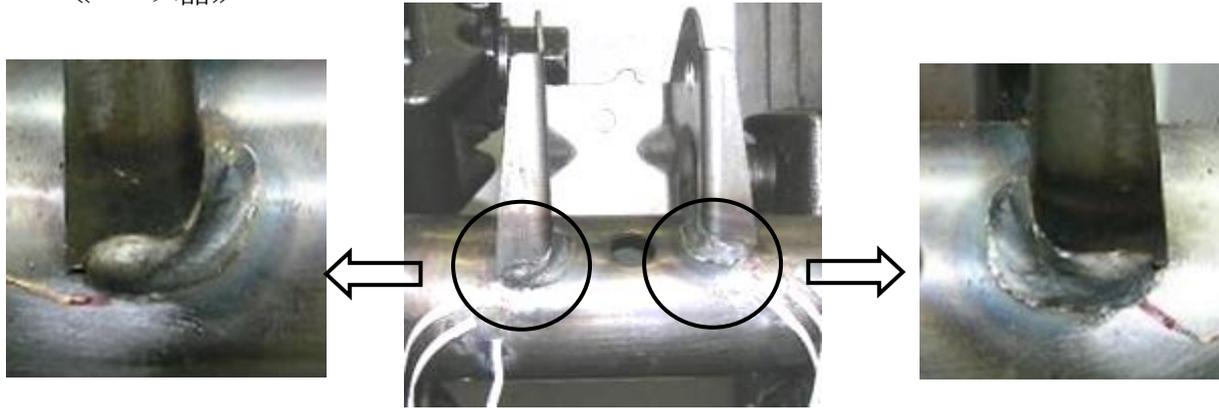


図 39

捨てビードを追加した対策案形状の疲労耐久回数の解析予測値と実機結果とが大きく異なっている。

《ベース品》



《対策品》



捨てビード追加

捨てビード追加

図 40

溶接ビード始端のクラックは回避できたが溶接ビード途中からクラックが発生し、解析でワンポイントしか評価ができていないことが、実機との相関が取れない原因であるので対策を検討した。

2-2-1-4 製品による疲労寿命予測精度の整合性検討

現状の解析ではクラック発生の予測部に違いが生じている為、解析手法の見直しを検討。

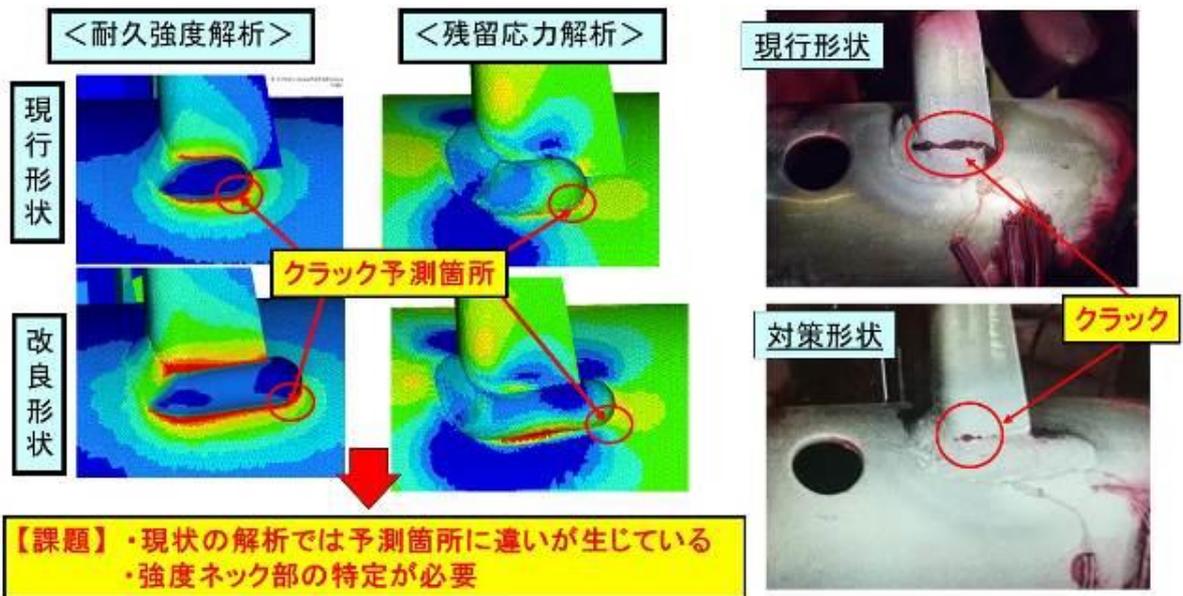


図 41

・従来のシェル要素による注目部位の抽出手法では忠実な溶接ビード形状が表現できない為、正確にネック箇所が特定できない。  
 対策として均等サイズ1.5mmのソリッドヘキサメッシュで溶接ビード部をモデリングしリスク部の抽出を図る。後工程でリスク部のメッシュを細分化し疲労強度の評価を実施。破損部を確実に予測した上で、データベースを基に有効な応力低減/制御効果を反映し設計を実施する。

《これまでの解析の流れ》

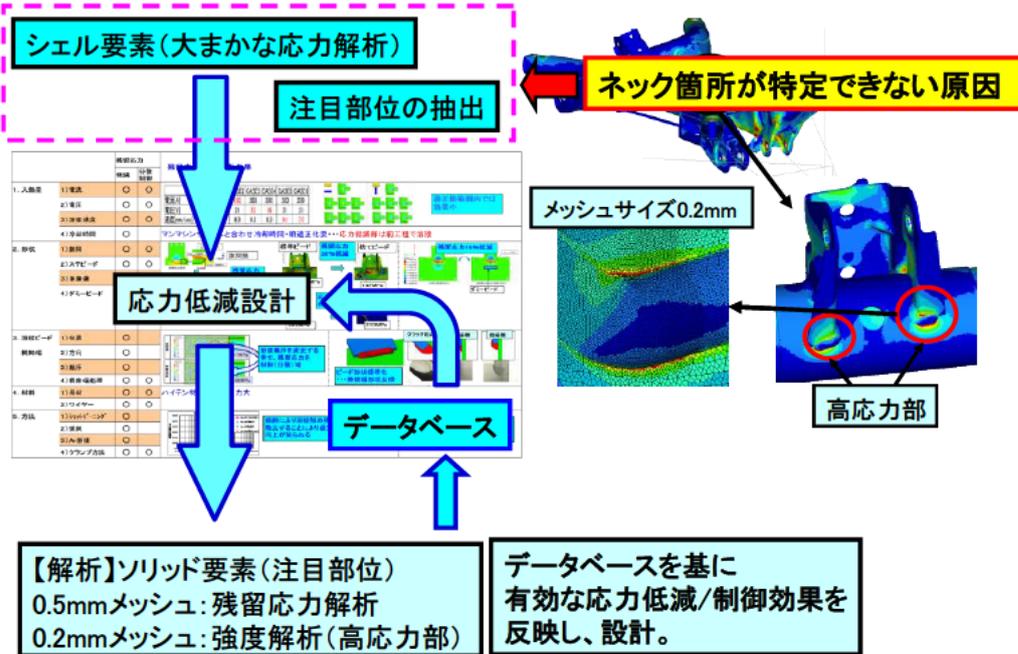
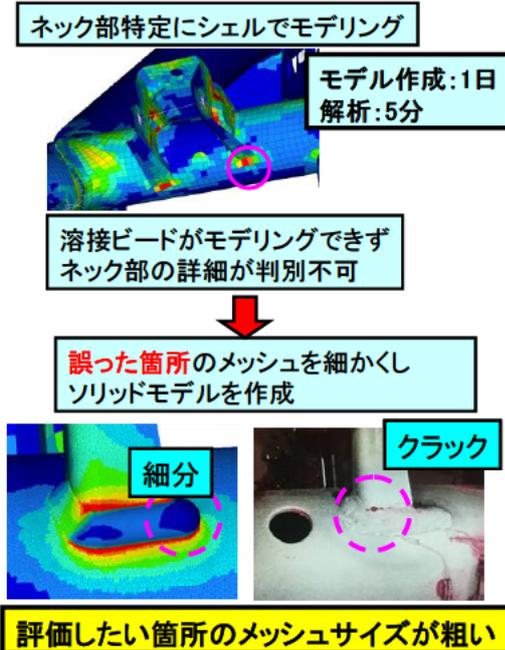


図 4 2

《強度ネック部が特定できない原因と対策》

【原因】



【対策】

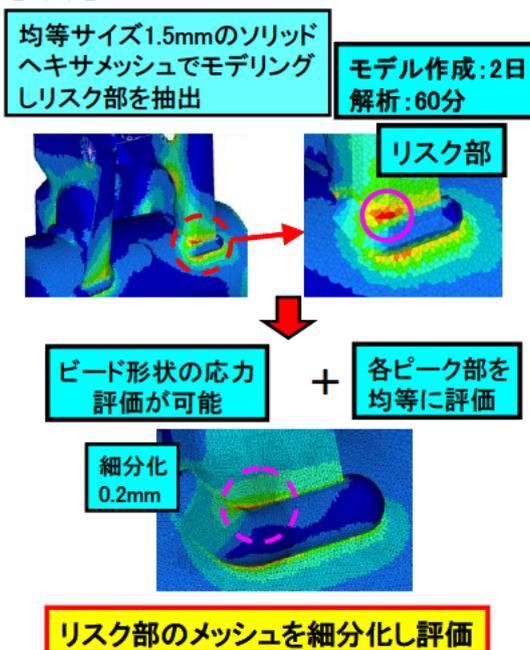


図 4 3

《対策後の解析の流れ》

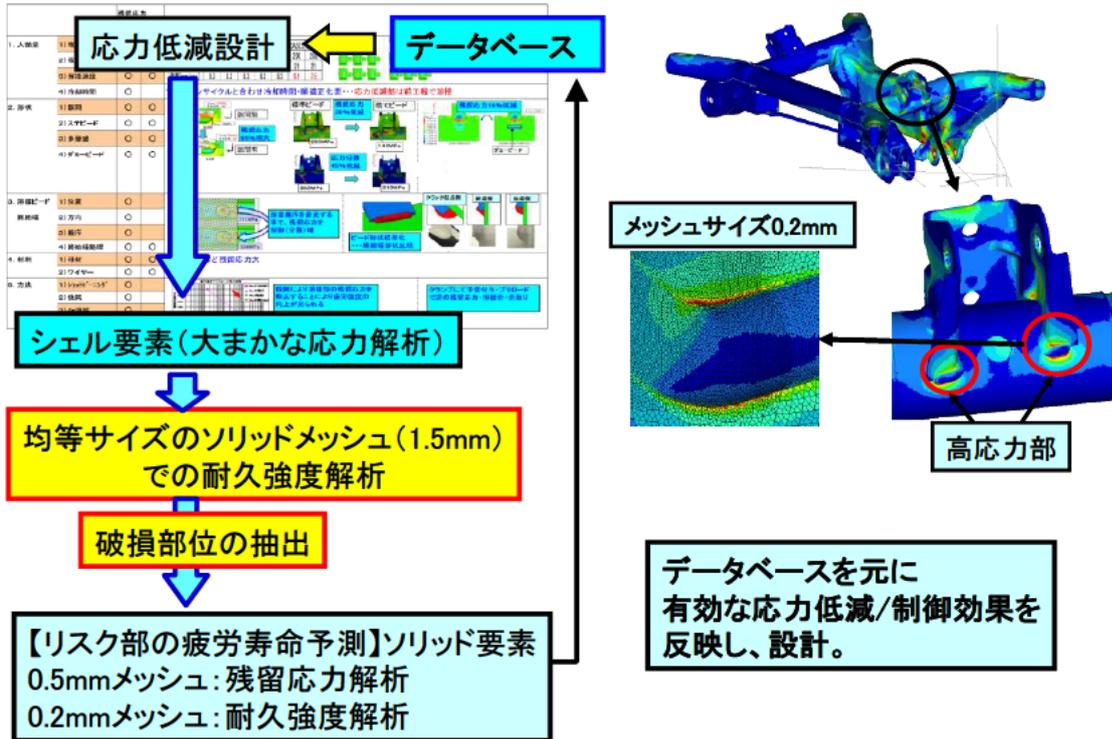
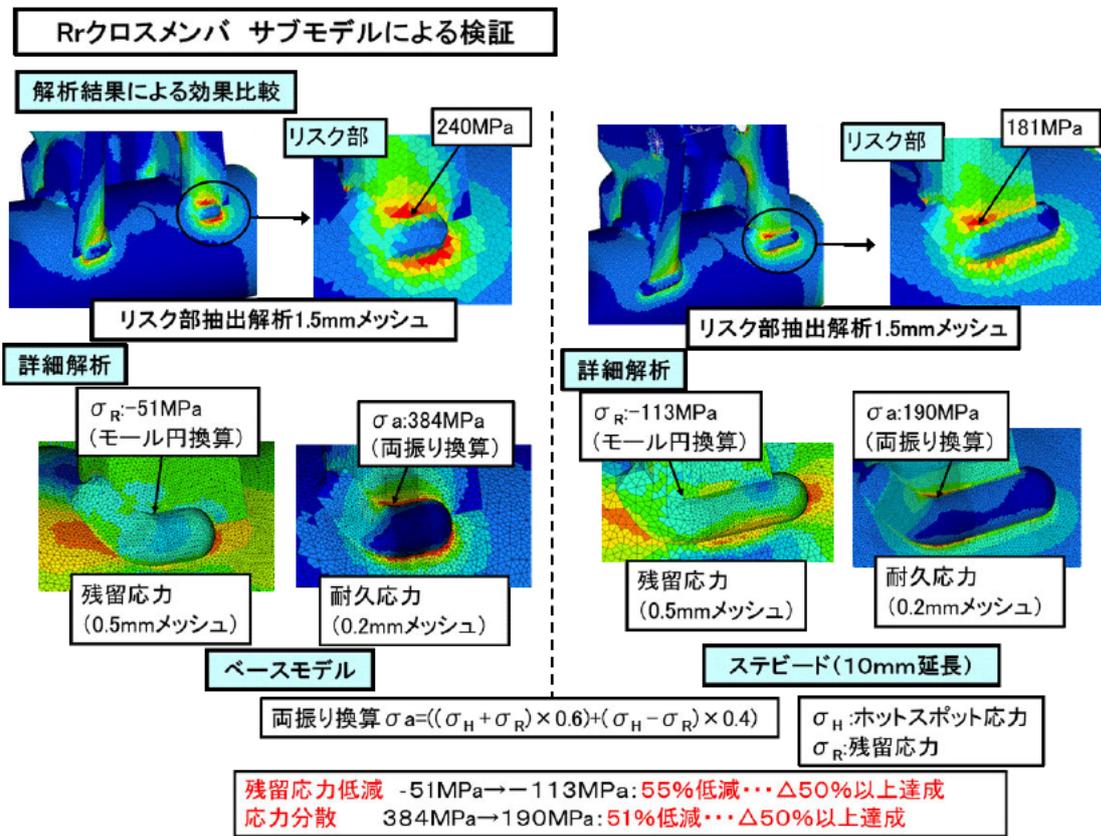


図 44

2-2-1-5 破損部位の特定事例

対策した解析手法にて実モデル (Rrクロスメンバ サブモデル) でのリスク部を抽出し、実験との整合性を確認済。解析時間は1日多くかかるが実用範囲で精度とスピードの両立が可能。



**検証結果**



**【疲労寿命】**  
CAE予測: 139万回  
実機: 145万回

**実機との相関あり**

**実機結果**

図 4 5

2-2-1-6 データベースへの反映

2-2項で得られた内容をデータベースに反映した。反映した内容を以下に示す。

**【反映した内容】**

- 1) テストピースによる溶接時の残留応力を低減させる方法
- 2) テストピースによる応力を分散させる方法  
尚、メッシュの細分化 (0.05mm メッシュ) と、ホットスポット応力の評価により応力低減・分散の精度向上が図れた。
- 3) 解析時間短縮案の妥当性検証
  - ①解析の進め方・シェル解析にて抽出→ソリッド解析→残留応力解析  
**【実用開発スピード確保の為】**
  - ②ソリッド0.2mm メッシュ、残留応力0.5mm メッシュ **【実用開発スピード確保の為】**
  - ③ホットスポット応力評価 **【解析精度確保の為】**
  - ④標準ビードモデル採用 **【解析精度向上/実用開発スピード確保の為】**

|            | 残留応力<br>低減               | 分散<br>制御                 | 残留応力低減・分散効果              |   |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|----|----|----|----|----|----|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|            |                          |                          | 電流                       | 電圧  |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
| 1. 入熱量     | 1) 電流                    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <table border="1"> <tr><th>BASE</th><th>CASE1</th><th>CASE2</th><th>CASE3</th><th>CASE4</th><th>CASE5</th><th>CASE6</th></tr> <tr><td>電流[A]</td><td>200</td><td>220</td><td>180</td><td>200</td><td>200</td><td>200</td></tr> <tr><td>電圧[V]</td><td>21</td><td>21</td><td>21</td><td>23</td><td>19</td><td>21</td></tr> <tr><td>速度[mm/sec]</td><td>8.3</td><td>8.3</td><td>8.3</td><td>8.3</td><td>9.1</td><td>7.5</td></tr> </table> | BASE  | CASE1 | CASE2 | CASE3 | CASE4 | CASE5 | CASE6 | 電流[A] | 200 | 220 | 180 | 200 | 200 | 200 | 電圧[V] | 21 | 21 | 21 | 23 | 19 | 21 | 速度[mm/sec] | 8.3 | 8.3 | 8.3 | 8.3 | 9.1 | 7.5 |
|            | BASE                     | CASE1                    | CASE2                    |   | CASE3 | CASE4 | CASE5 | CASE6 |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
|            | 電流[A]                    | 200                      | 220                      |   | 180   | 200   | 200   | 200   |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
|            | 電圧[V]                    | 21                       | 21                       |   | 21    | 23    | 19    | 21    |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
| 速度[mm/sec] | 8.3                      | 8.3                      | 8.3                      | 8.3   | 9.1   | 7.5   |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
| 2) 電圧      | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |                          |   |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
| 3) 溶接速度    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |                          |   |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
| 4) 冷却時間    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |                          |   |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
| 2. 形状      | 1) 隙間                    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <p>マンマシンサイクルと合わせ冷却時間・順適正化要... 応力低減部は前工程で溶接</p> <p>標準ビード: 残留応力 30%低減</p> <p>捨てビード: 残留応力 16%低減</p> <p>残留応力 65%増大</p> <p>応力分散 45%低減</p> <p>ダミービード</p>  |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
|            | 2) ステーパー                 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |   |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
|            | 3) 多層盛                   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |   |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
|            | 4) ダミービード                | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |   |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
| 3. 溶接ビード   | 1) 位置                    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <p>溶接順序を変更する事で、残留応力を制御(分散)可</p> <p>ビード形状標準化... 終始端形状反映</p> <p>クラック起点側 橋脚側 始端側</p>   |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
|            | 2) 方向                    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |   |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
|            | 3) 順序                    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |   |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
|            | 4) 終始端処理                 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |   |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
| 4. 材料      | 1) 母材                    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <p>ハイツ材ほど残留応力大</p>  |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
|            | 2) ワイヤ                   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |   |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
| 5. 方法      | 1) ショット・コンク              | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <p>焼鈍により溶接部の残留応力を除去することにより疲労強度の向上が見られる</p> <p>クランプにて予歪み・プリロードで歪の残留応力・溶接歪・歪取り</p>  |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
|            | 2) 焼鈍                    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |   |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
|            | 3) Ar溶接                  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |   |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |
|            | 4) クランプ方法                | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |   |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |       |    |    |    |    |    |    |            |     |     |     |     |     |     |

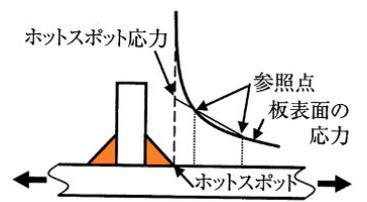
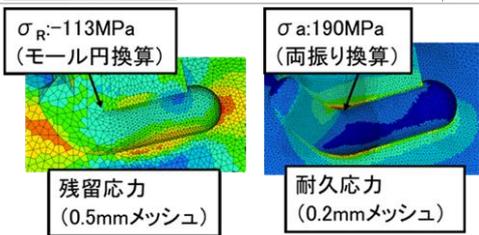
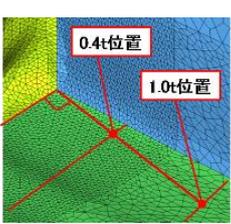


図 4 6

2-3 解析に基づいたサスペンション設計と製品検証

2-3-1 クロスメンバーをテストピースで得られた疲労強度向上のデータベースを適用し設計 (リヤクロスメンバ設計)

・検討目標とし 軽量化10%以上、コスト10%以上低減、開発費30%以上低減を掲げる。テストピースで得られた残留応力低減技術、応力分散技術のデータベースを活用し設計を行い、高精度疲労解析技術のデータベースを活用した解析を実施。試作品を製作し、6軸ロードシミュレータ及び実車入力を想定した短軸入力にて試験評価を実施する。

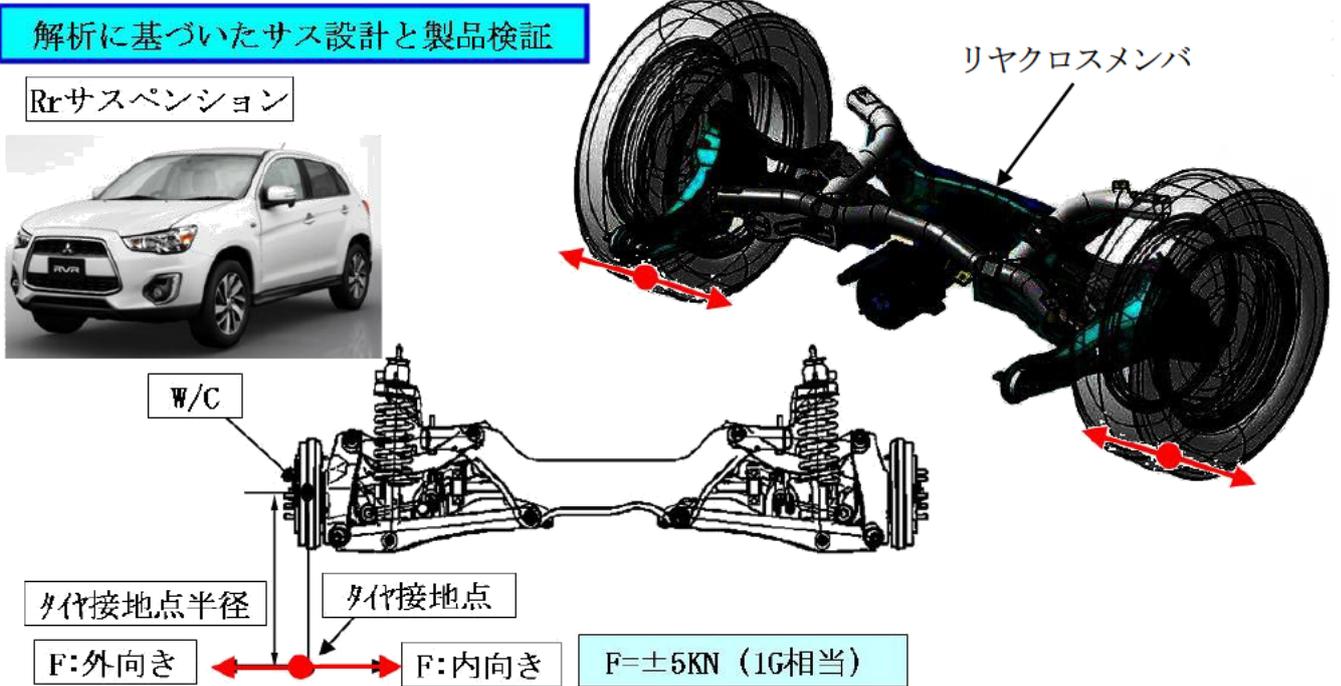


図 47

2-3-1-1 データベースを活用したリヤクロスメンバ設計の流れ

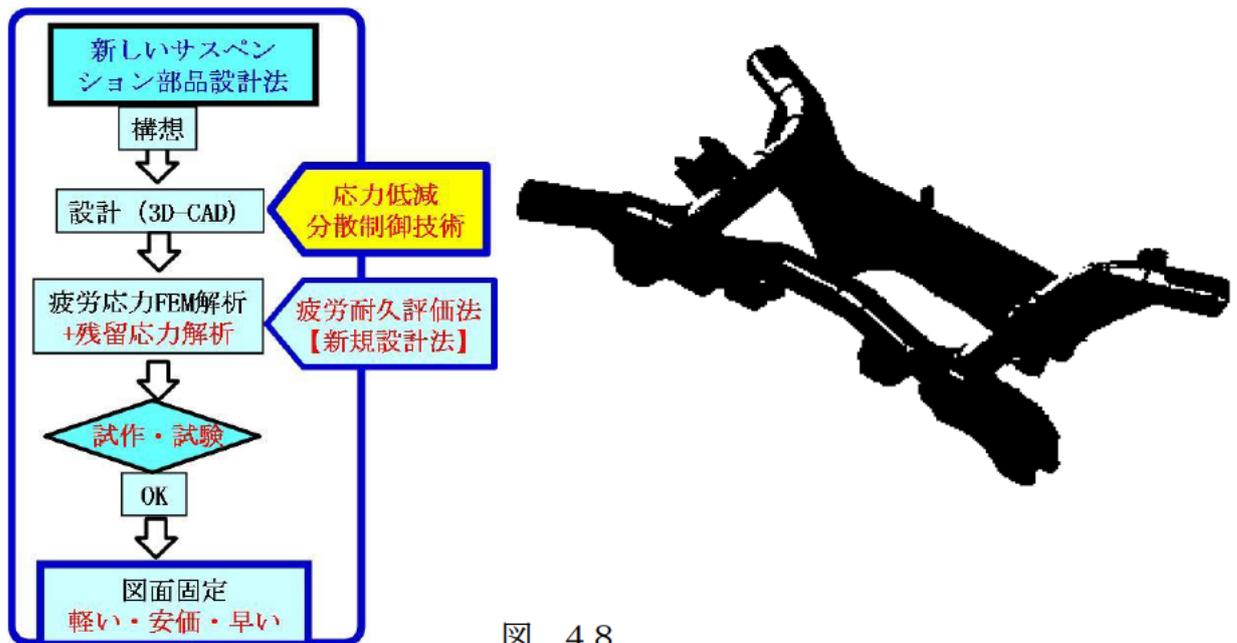


図 48

### 2-3-1-2 軽量化構造の検討

- ・溶接工夫により強度ネック部を解消できる見込みのある部品の板厚低減を検討  
データベース活用により強度低下部の補強案を反映する。
- 目標重量低減（10%軽量化）を目論む。

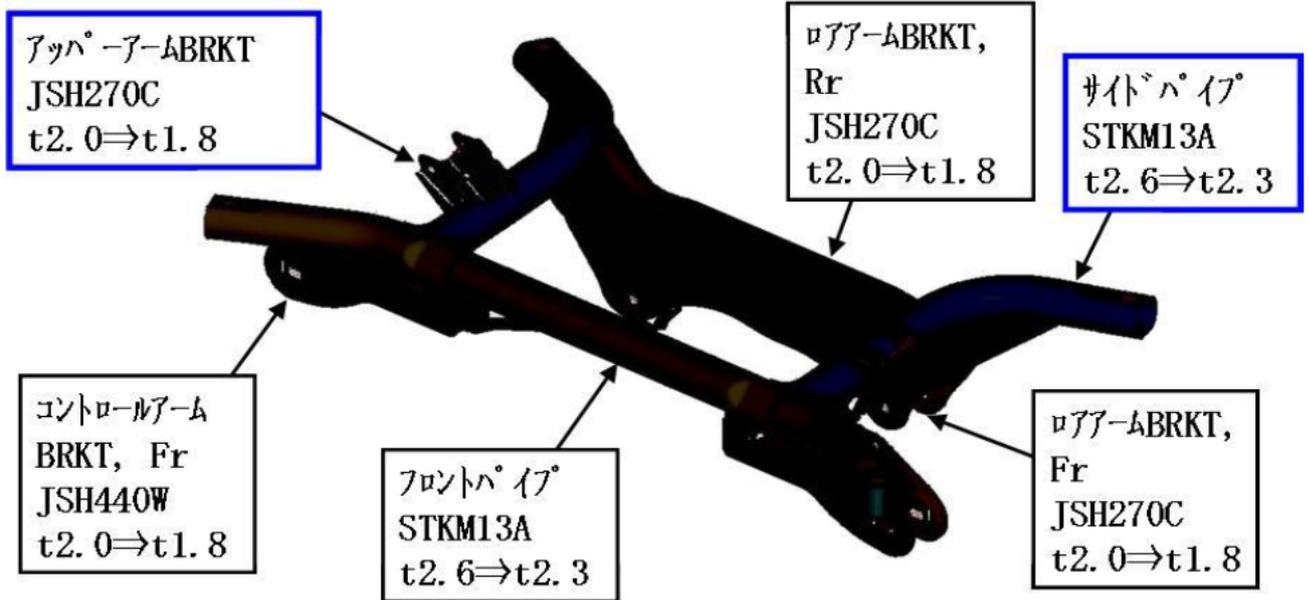


図 49

### 2-3-1-3 リヤクロスメンバ量産品の強度ネック部の抽出

- ・現状把握の為、1.5mmソリッドヘキサメッシュにて強度ネック部（応力集中部）の洗い出しを実施。
- 耐久入力は実車での走行状態を想定し、前後及び左右入力を選定し評価。

#### 1) 全体の応力分布

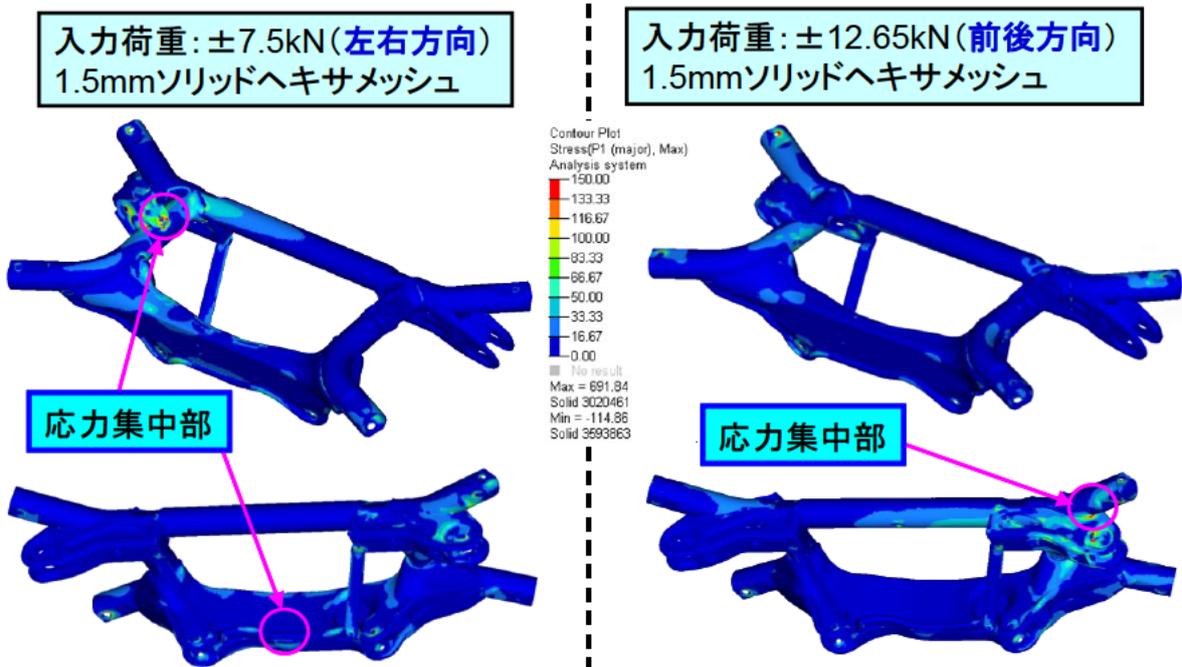


図 50

・強度ネック部を抽出 (2, 3, 4, 5部)

2) 着目部位の発生応力

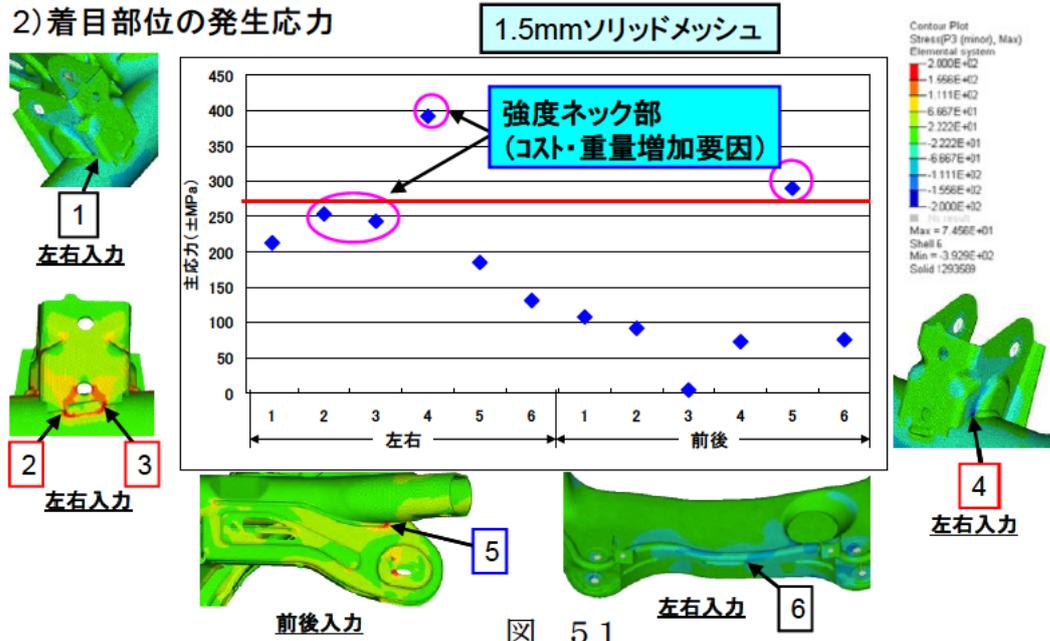
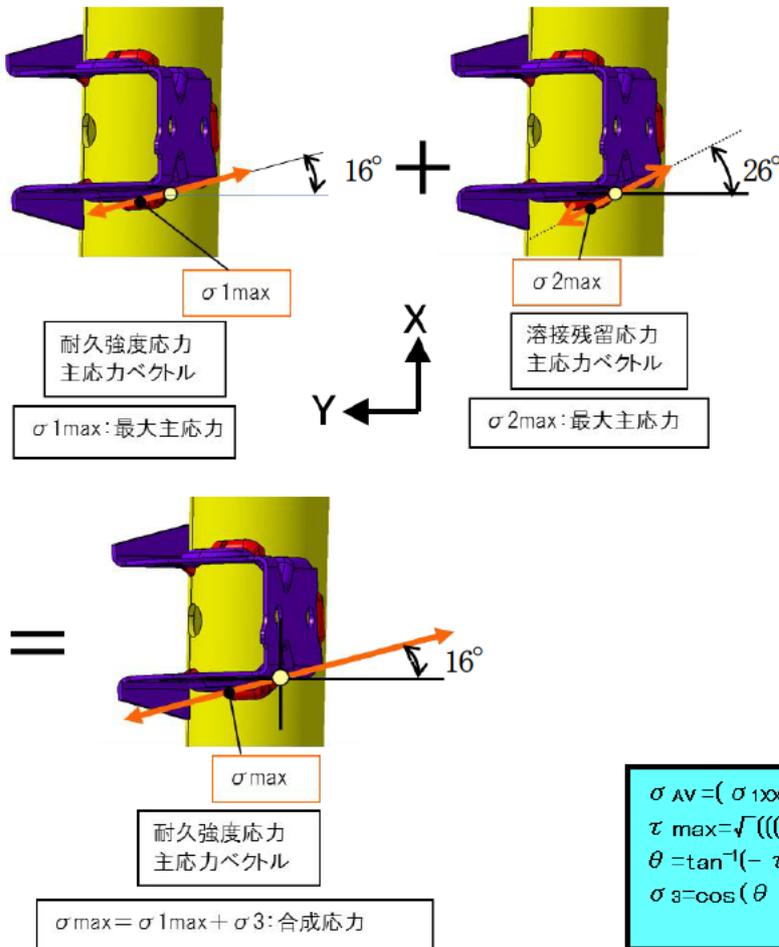


図 5.1

・強度ネック部 (2, 3, 4部) となる原因分析

<考え方>

右表にて原因として考えられる項目の洗い出しを実施。  
強度ネックの最大要因は①耐久応力と残留応力の向きの関係。



<データベースからの要因分析>

- ①溶接条件→トーチ角 問題無。
- ②耐久応力と残留応力の向きの関係  
⇒重畳しており影響大
- ③隙間の影響  
⇒隙抑制は管理可 (実績より)
- ④溶接位置・長さは適正か  
⇒溶接延長による改良効果は見込める。

記号

- $\sigma_{1xx}$ : X方向残留応力
- $\sigma_{1yy}$ : Y方向残留応力
- $\tau_{1xy}$ : せん断残留応力
- $\sigma_{2max}$ : 最大主応力
- $\sigma_{2xx}$ : X方向応力
- $\tau_{2xy}$ : せん断応力
- $\sigma_{AV}$ : 平均応力
- $\tau_{max}$ : 最大せん断応力
- $\theta = \theta_1 - \theta_2$ : 角度
- $\sigma_3$ : 発生残留応力

$$\sigma_{AV} = (\sigma_{1xx} + \sigma_{1yy}) / 2$$

$$\tau_{max} = \sqrt{((\sigma_{1xx} - \sigma_{1yy}) / 2)^2 + \tau_{1xy}^2}$$

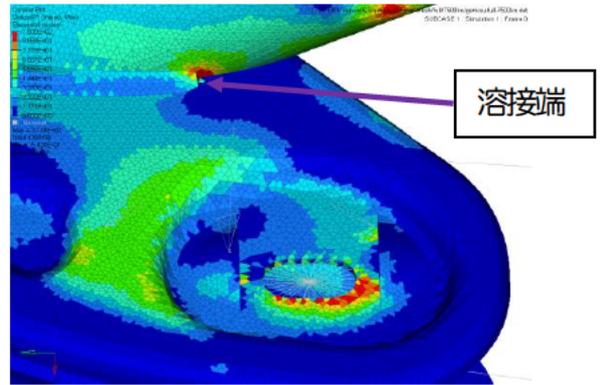
$$\theta = \tan^{-1}(-\tau_{2xy} / (\sigma_{2xx} - \sigma_{2max}))$$

$$\sigma_3 = \cos(\theta \times 2) \times \tau_{max} + \sigma_{AV}$$

・強度ネック部（5部）の原因分析

<考え方>

下表にて原因として考えられる項目の洗い出しを実施。  
強度ネックの最大要因は④溶接長さの不足。



<データベースからの要因分析>

- ①溶接条件⇒トーチ角 問題無。
- ②耐久応力と残留応力の向きの関係  
⇒最大主応力の向きは異なる為、影響小
- ③隙間の影響  
⇒隙抑制は管理可（実績より）
- ④溶接位置・長さは適正か  
⇒溶接長が短くメンバー&パイプ接合部の口開きが生じる。

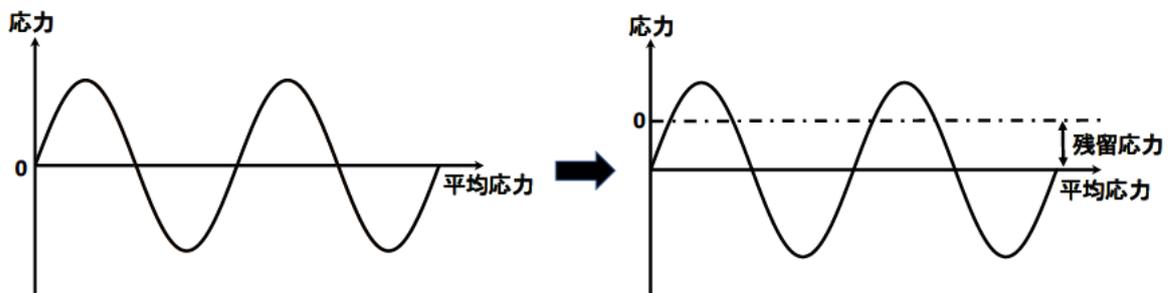
2-3-1-4 強度ネック部の対策案検討

軽量化検討に際し、強度ネック部の対策案を検討  
リヤクロスメンバー溶接部の応力状態を確認し、適したデータベースを活用し疲労耐久強度向上を図る。

・強度ネック部（2，3，4部）

（捨てビードによる疲労強度の向上）

捨てビードにて主応力の方向を制御し、耐久入力時の負荷を軽減。外部入力時の主応力を残留応力の圧縮方向成分でキャンセル（応力振幅の平均値を下げる）する方向に設定。



《CASE 1》捨てビード (45° 方向設定)

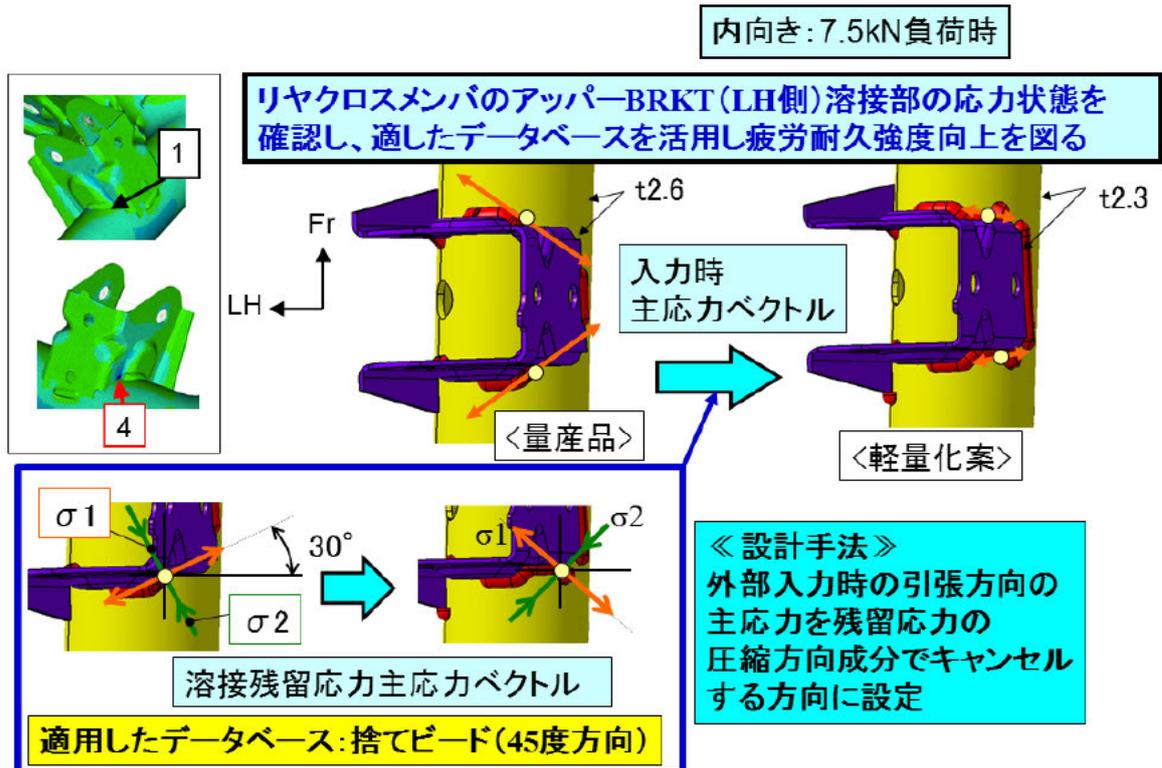


図 5.2

《CASE 2》捨てビード (10mm)

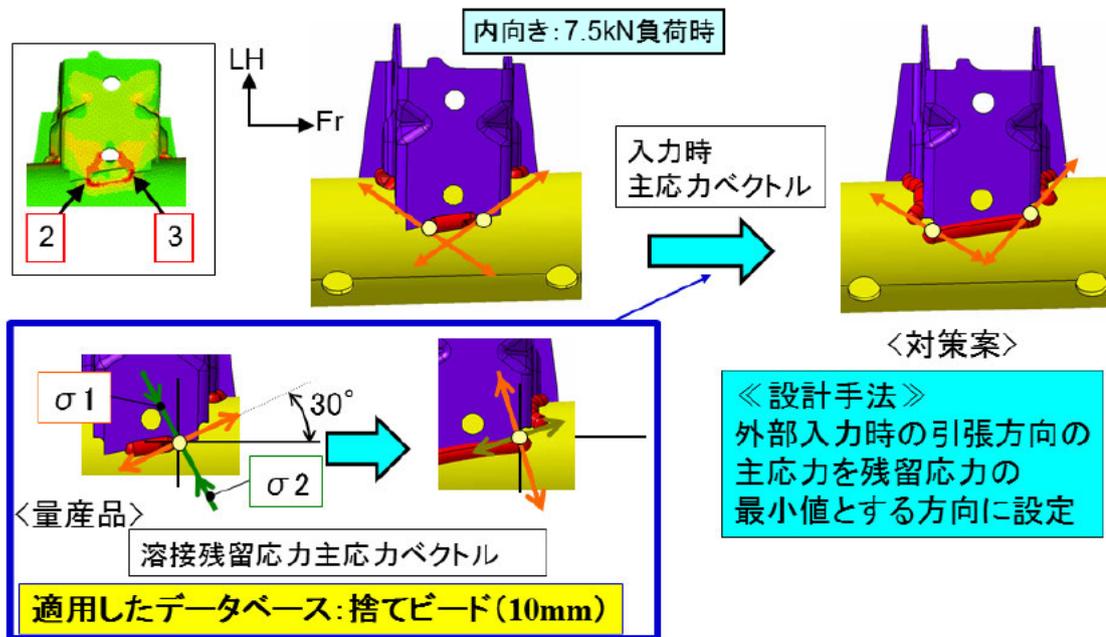
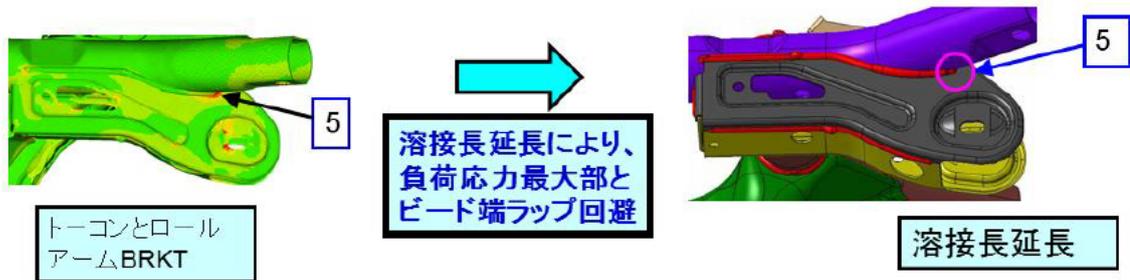


図 5.3

- ・強度ネック部（5部）の対策案を立案する。



2-3-1-5 データベースによる対策案での応力低減効果を確認

1) 全体の応力分布

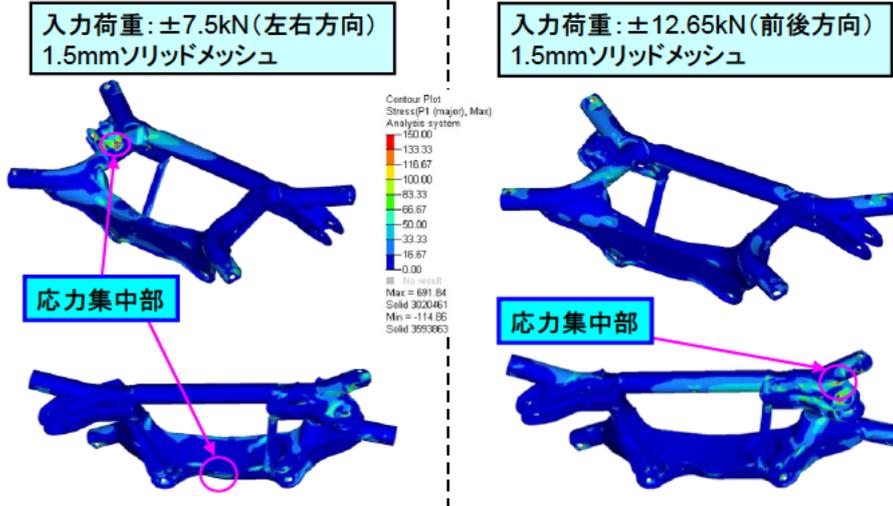


図 5 5

- ・対策案反映による応力変動を確認済。データベースより取込んだ対策案の反映により軽量化案構造にて疲労耐久強度を満足する見込み。

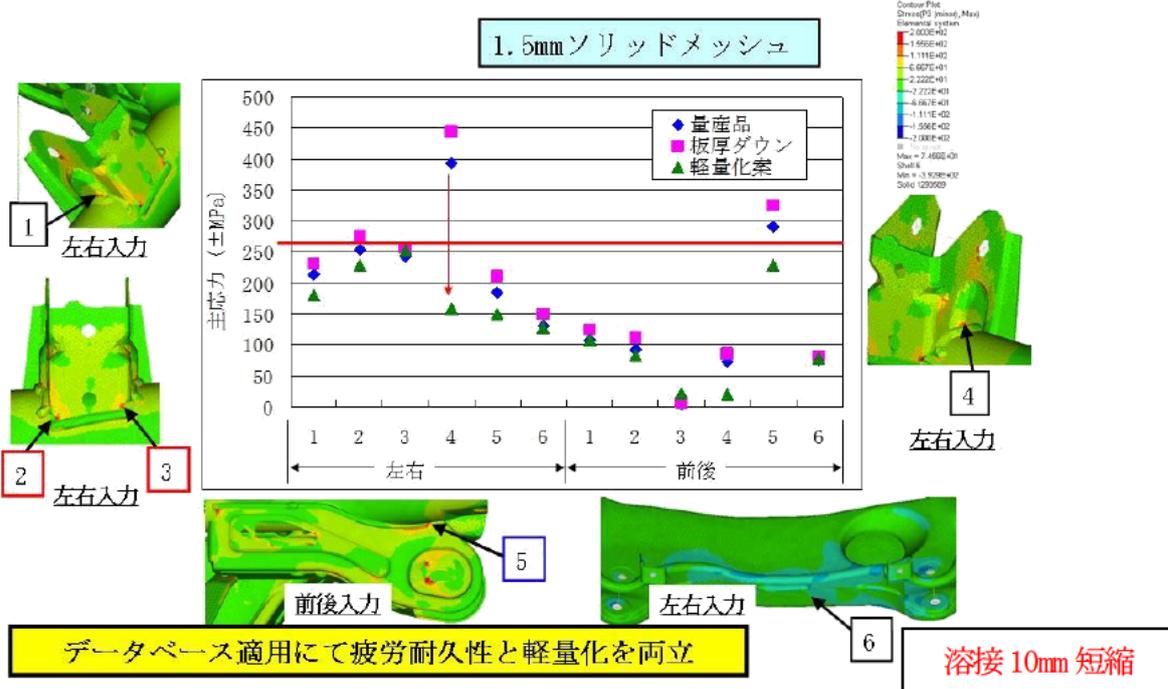


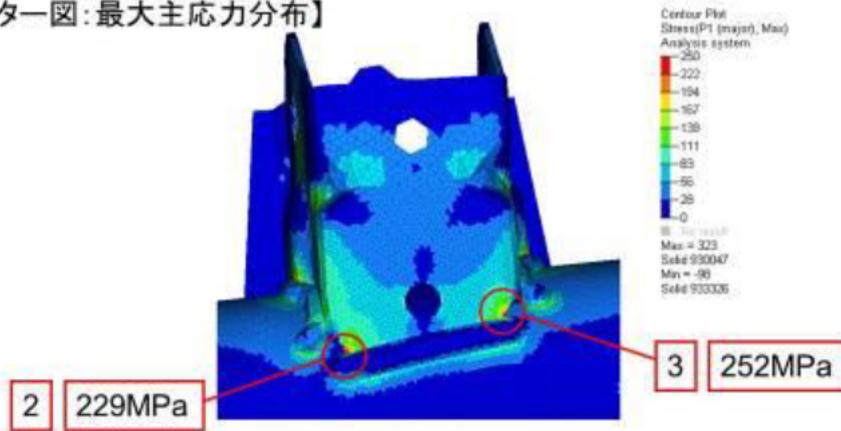
図 56

2-3-1-6 疲労耐久強度に関する詳細解析

- ・リスク部を対象として詳細評価を進める為メッシュの細分化を実施。

リスク部の特定⇒1.5mmメッシュにて強度解析を実施(内向き:7.5kN)

【コンター図:最大主応力分布】



リスク部をメッシュ細分化 → 0.5mmメッシュ: 残留応力解析  
0.2mmメッシュ: 耐久強度解析

- ・耐久応力及び残留応力解析結果より疲労寿命を予測  
軽量化案構造にて耐久強度が低下していない事を確認。

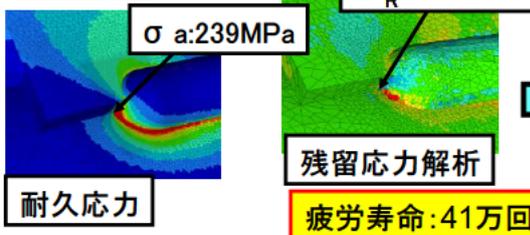
検討詳細

接点数: 550万

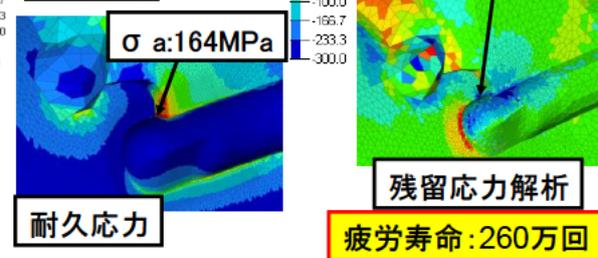
4) 疲労寿命予測(内向き: 7.5kN)

【2部】 0.2mm、0.5mm

現行仕様

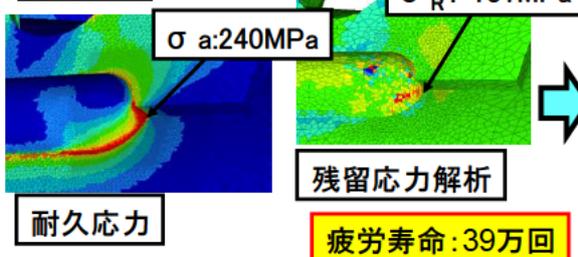


軽量化案



【3部】

現行仕様



軽量化案

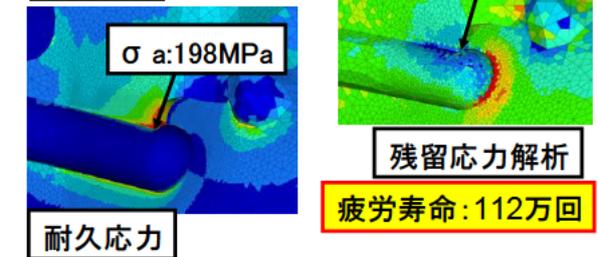


図 58

溶接工夫により強度ネック部を解消できる見込みのある部品を軽量化

データベース活用による疲労耐久性向上により

量産品：14.8kg ⇒ 軽量案：13.4kg（10%軽量化=コスト低減△10%）

となり当初の設計目標を達成。

2-3-2/2-3-3 製品による残留応力/疲労寿命予測精度の整合性検討

2-3-2-1 2輪6軸ロードシミュレータによる疲労強度評価

2輪6軸ロードシミュレータにより実車入力による台上試験を実施し、実車で10万km走行相当の耐久性を確認する。

ベースになる量産品と残留応力低減、応力分散制御技術を反映した試作品(応力低減品)により耐久強度の差を調べる。

#### 2輪6軸ロードシミュレータでの耐久性評価



図 59

2輪6軸ロードシミュレータでの試験は実車でテストコースを40km/h一定で走行した時の入力を取り込んで台上で再現を行なう。このテストコースは車両への入力が非常に厳しい入力となるようコース設定されており、常にランダム入力が車両に入力される。

このコースを規定回数周回することで実車により10万km走行した時と同じダメージになるように設定しており、車両の一生を短時間(約15日)で評価する。

言い換えれば、この試験で量産品と同様に対策品も問題がなければ、車両の一生は問題なく使用に耐えうることを示している。

2-3-2-1-1 試験方法

①クロスメンバーAssyと周辺部品(サスアーム、バネ、S/A)を治具に固定する。

②実車入力により10万km走行相当の疲労強度を確認する。

### 2-3-2-1-2 耐久条件の合わせ込み

実車で取得した入力を2輪6軸ロードシミュレータ(台上試験機)で再現するには、前段階としてイタレーションにより繰り返し入力を与えながら実車入力に台上試験機の入力の合わせ込みを行なっていく。実車入力はランダム入力であるため、一定の速度、入力値といった入力ではないので目標入力に対し台上試験機で与える入力をフィードバックすることを繰り返しながら目標とする実車入力と台上試験機の入力を一致させるものである。

実際に合わせ込みを行なった時の波形を図60、図61に示す。

20回の繰り返しにより実車入力と台上試験入力の誤差率は安定し合わせ込みは完了した。

【イタレーションによる実車入力と台上入力の誤差率の変化】

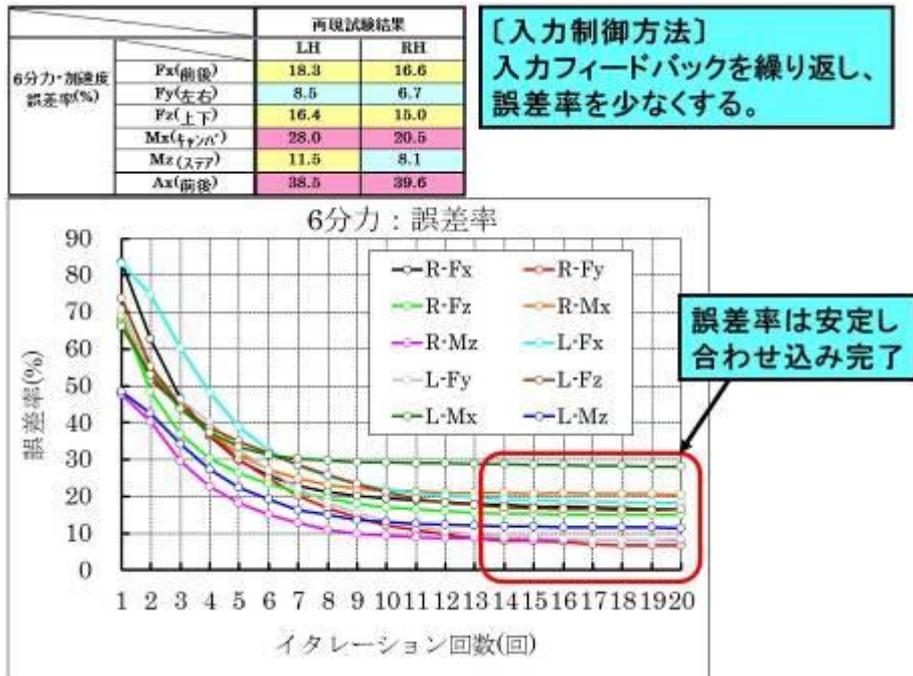


図 60

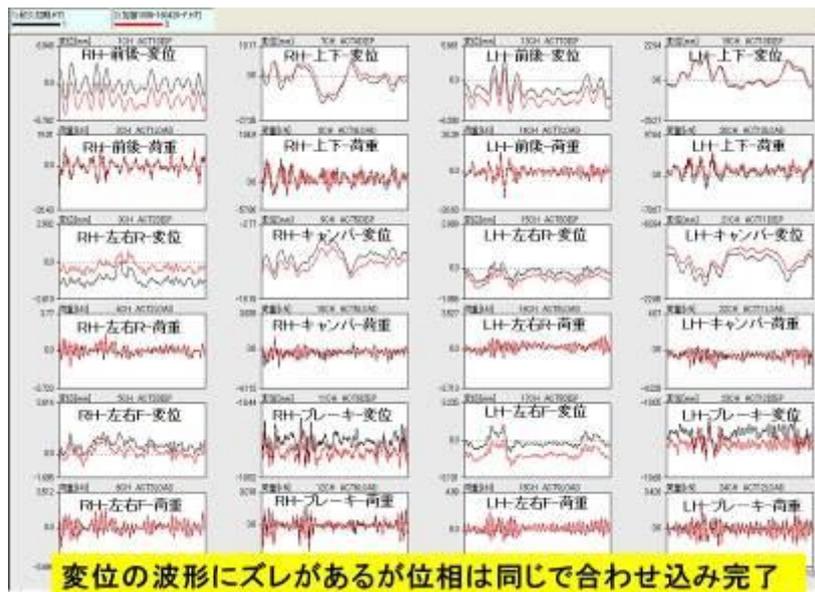


図 61

2-3-2-1-3 試験での発生応力の確認(応力低減品)

実車入力での解析はできないので、応力低減品で解析時のネック部発生応力箇所の応力を測定し、過大な応力が発生していないことを確認する。

・応力測定箇所

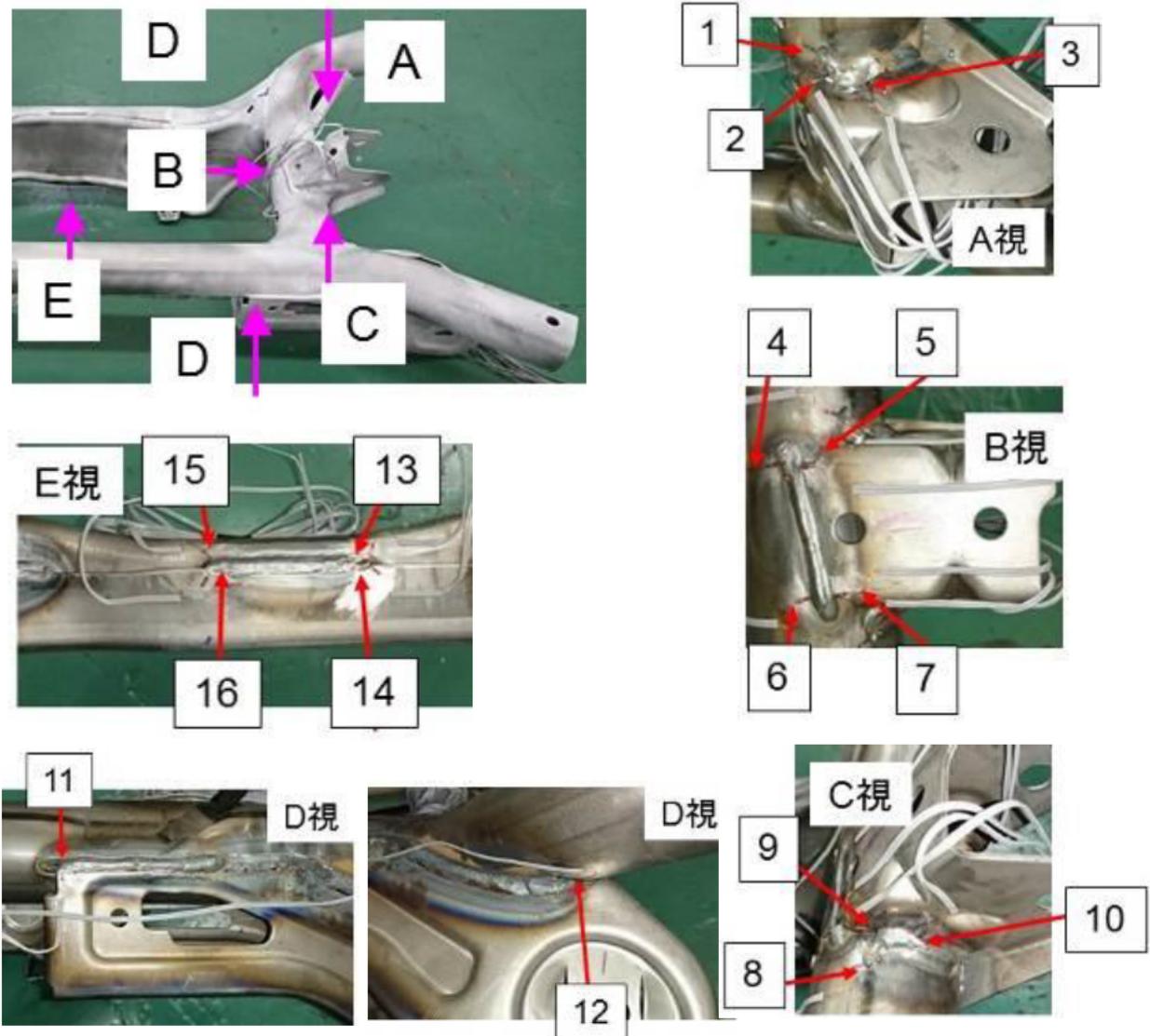


図 6 2

・応力測定結果 (MP a)

|       | 歪ゲージNo. |    |    |    |    |    |    |    |
|-------|---------|----|----|----|----|----|----|----|
|       | 1       | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| 応力低減品 | 13      | 16 | 34 | 18 | 30 | 30 | 72 | 13 |

|       | 歪ゲージNo. |    |    |    |    |    |    |    |
|-------|---------|----|----|----|----|----|----|----|
|       | 9       | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 応力低減品 | 11      | 63 | 66 | 74 | 34 | 32 | 28 | 36 |

図 6 3

各部に高応力が発生する箇所はない。(図6 3)

2-3-2-1-4 試験後のクロスメンバー(クラックチェック)  
【応力低減品】

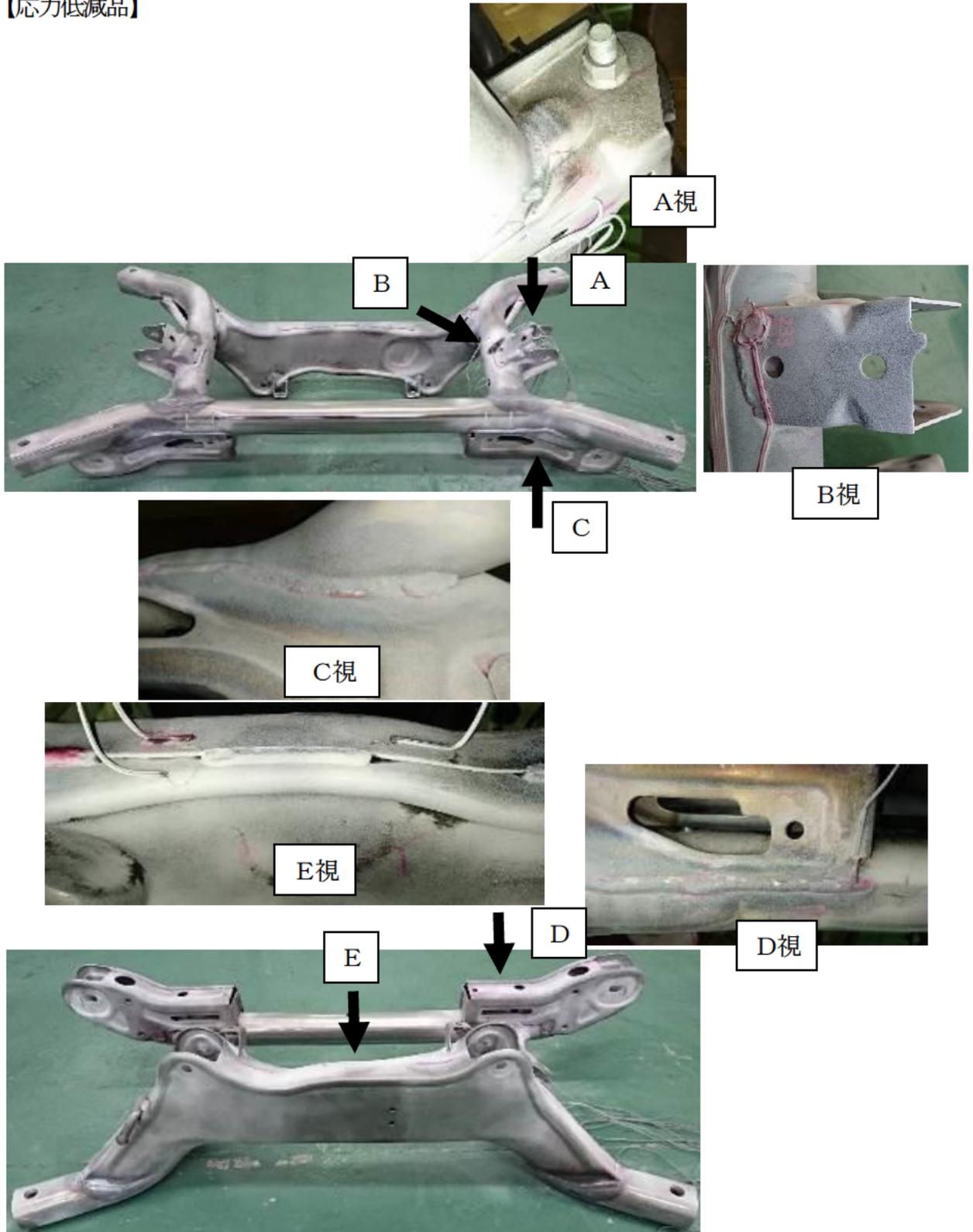


図 64

量産品と同様に各部に亀裂、破損はなし。(図64)

【量産品】

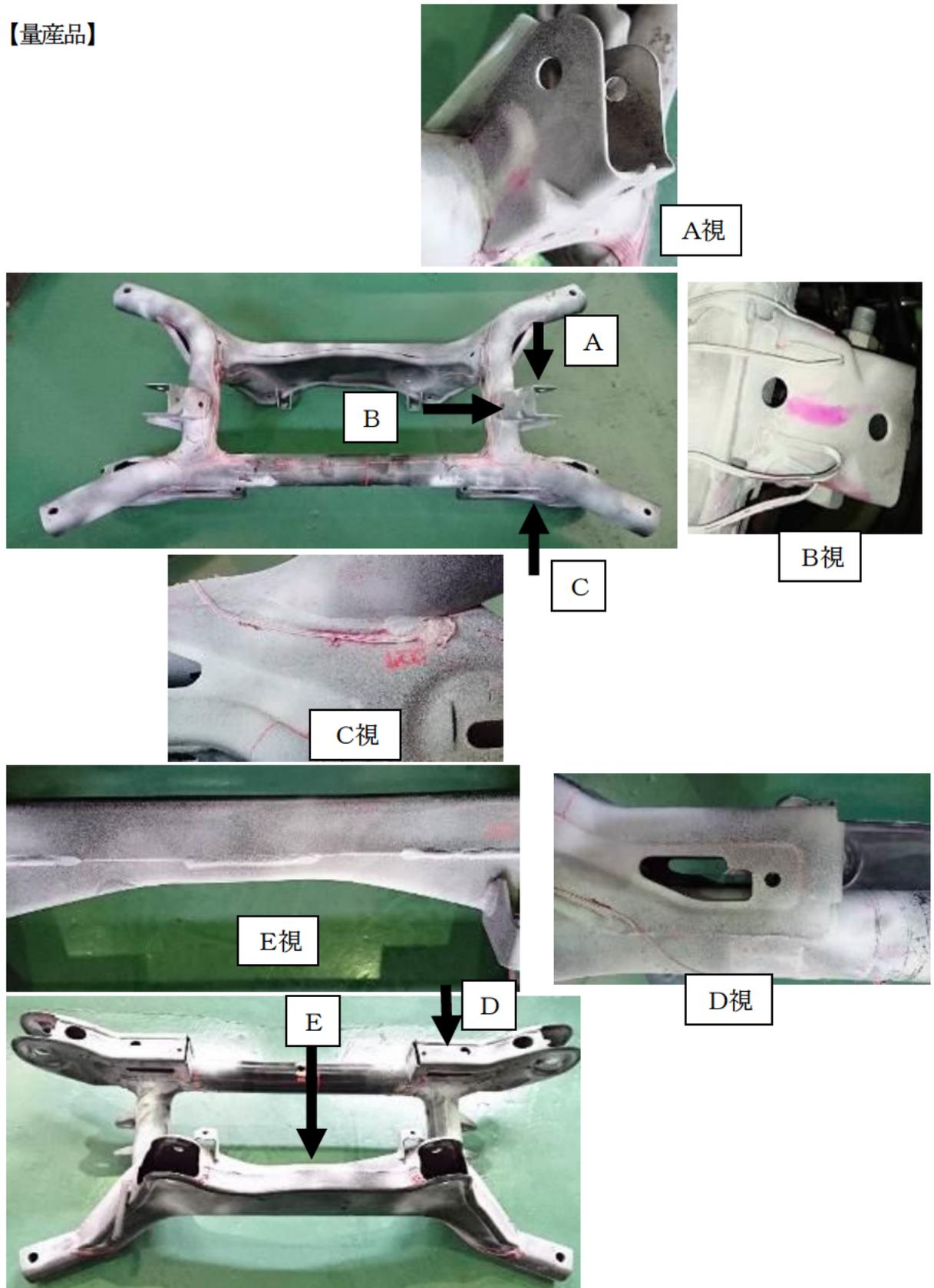


図 6 5

各部に亀裂、破損はなし。(図6 5)

## 2-3-2-2 単軸試験機による疲労強度評価

2輪6軸ロードシミュレータによる実車入力疲労強度評価で量産品、応力低減品のクロスメンバーが壊れないため追加確認として、単軸試験機でネック部の疲労寿命を確認し有意性を確認する。

### 2-3-2-2-1 試験方法

ネック部であるクロスメンバーのアップパーアーム取付点に単軸試験機で直接入力を行ない、量産品と応力低減品の疲労強度を比較する。(図66)

解析で応力が高く出た[2]、[3]部に対し過大な入力を行ない量産品と応力低減品の有意性を評価する。

- ①クロスメンバーAssyを固定する。
- ②単軸油圧加振機を使用し、車体左右方向に繰り返し負荷する。
  - ・入力荷重：±9 kN
  - ・試験周波数：2 Hz

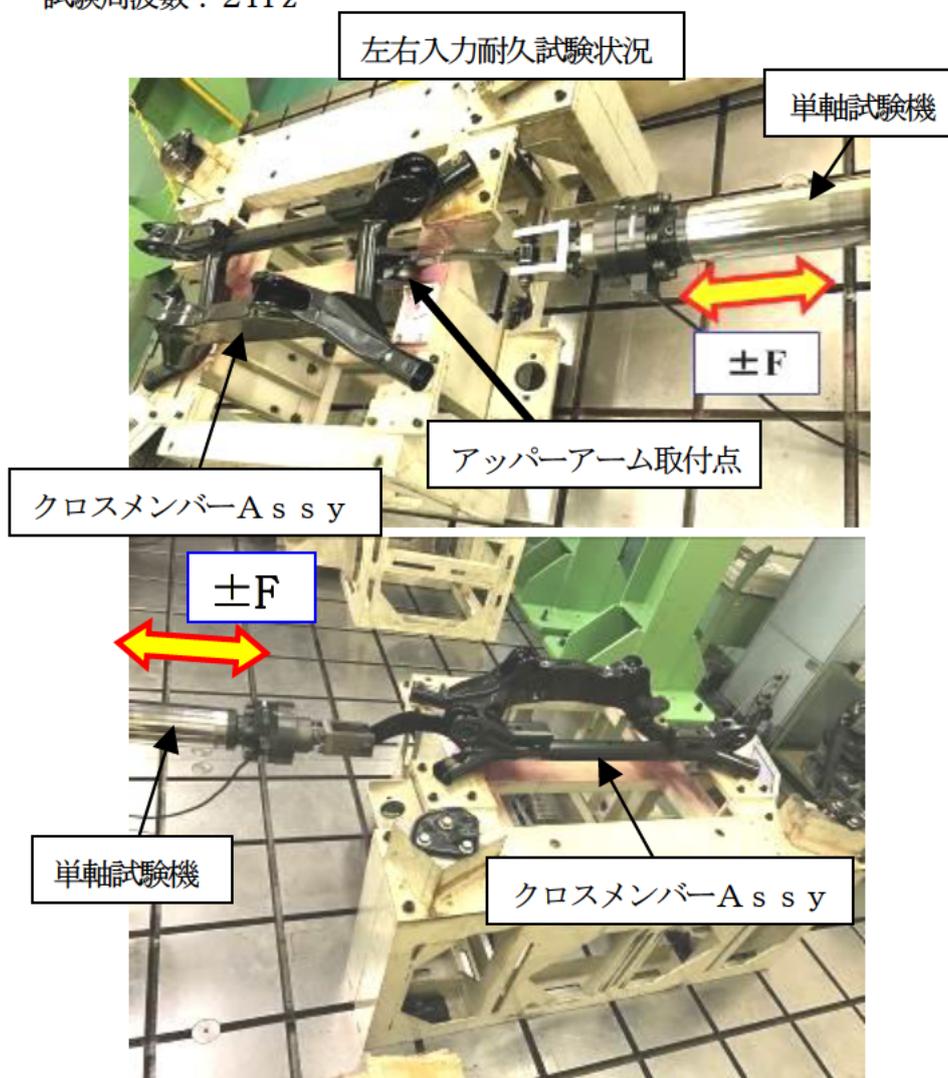


図 66

2-3-2-2-2 試験での発生応力の確認(量産品、応力低減品)

アッパーアーム取付点周辺(ネック部)で量産品と応力低減品の応力を測定する。

・応力測定箇所

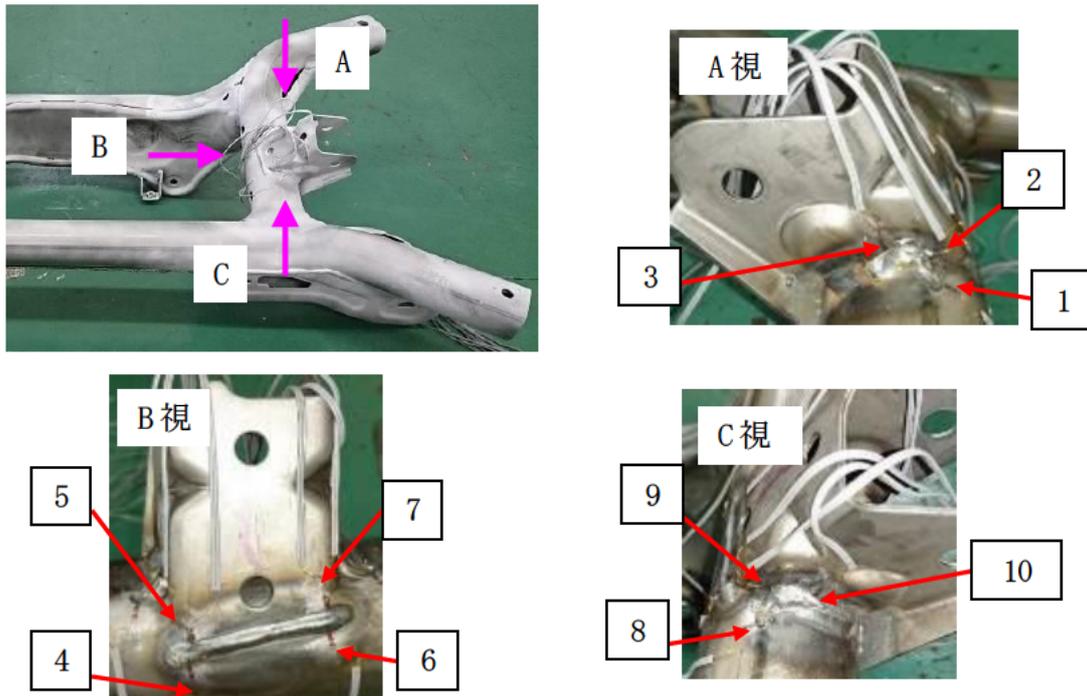


図 67

・応力測定結果

|     |     | 1   | 2    | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9    | 10  |
|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| 量産品 | 実機  | 100 | -196 | 18  | 101 | 95  | 75  | 78  | 87  | -98  | 138 |
|     | CAE | 176 | -213 | 91  | 254 | 131 | 243 | 148 | 229 | -392 | 170 |
| 軽量案 | 実機  | 35  | -24  | 104 | 44  | 92  | 123 | 174 | 40  | -150 | 167 |
|     | CAE | 131 | -7   | 180 | 77  | 229 | 104 | 252 | 125 | -59  | 159 |

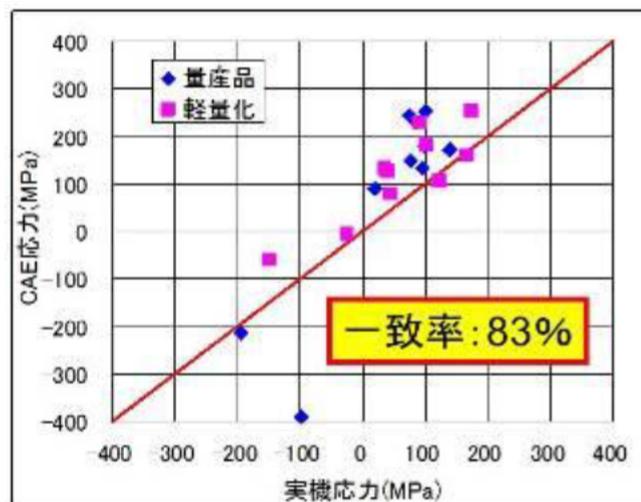


図 68

実機での応力とCAE解析の応力は一貫率は高く、目標の70%以上を達成しているなので実際の耐久試験により有意差を確認する。(図68)

2-3-2-2-3 試験後のクロスメンバー(クラックチェック)  
【応力低減品】

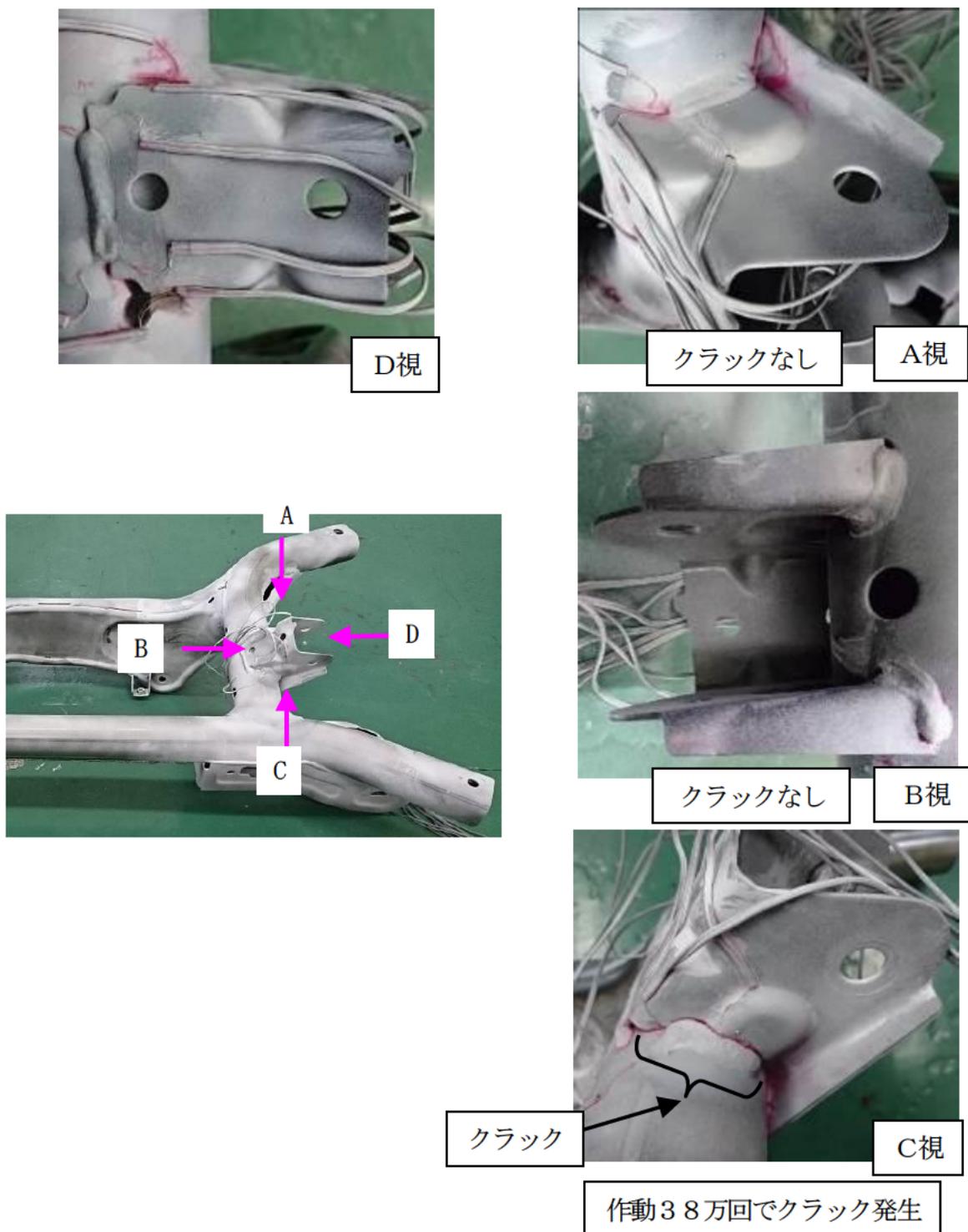


図 69

作動38万回でアッパーアーム取付部にクラックが発生した。  
その他の部位に亀裂、破損はなし。(図69)

【量産品】

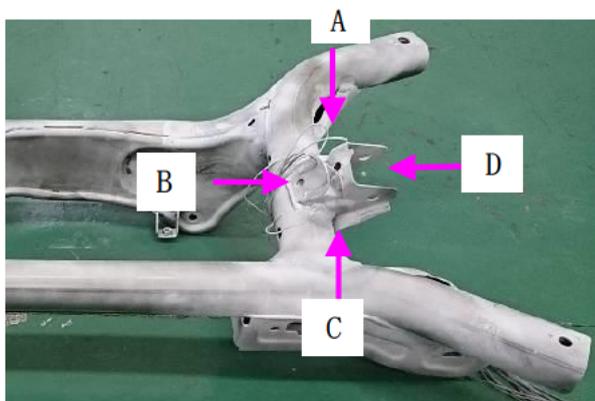


D視



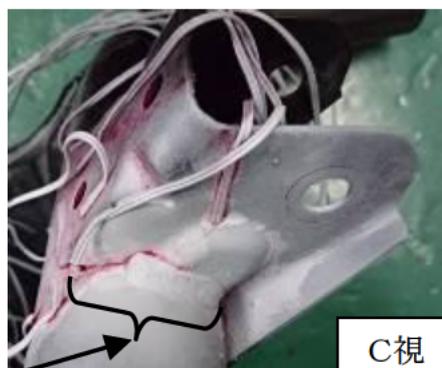
クラックなし

A視



クラックなし

B視



クラック

C視

作動33万回でクラック発生

図 70

作動33万回でアッパーアーム取付部にクラックが発生した。  
その他の部位に亀裂、破損はなし。(図70)

#### 2-3-2-2-4 解析での量産品に対する応力低減品の効果

2輪6軸ロードシミュレータによる実車入力での台上試験では応力低減品も量産品と同様に試験後の亀裂破損はなく、実車で10万km走行相当の耐久性を有している。

量産品と応力低減品の優位性確認の為に単軸試験機による疲労強度評価では量産品のクラック発生回数：33万回に対し、応力低減品のクラック発生回数：38万回で応力低減品は量産品と同等以上の耐久性になった。（+15%）  
残留応力低減、応力分散制御技術に基づいて設計されたクロスメンバーは量産品と同等以上の疲労強度を有しており解析での結果と整合性がとれた。（図71）

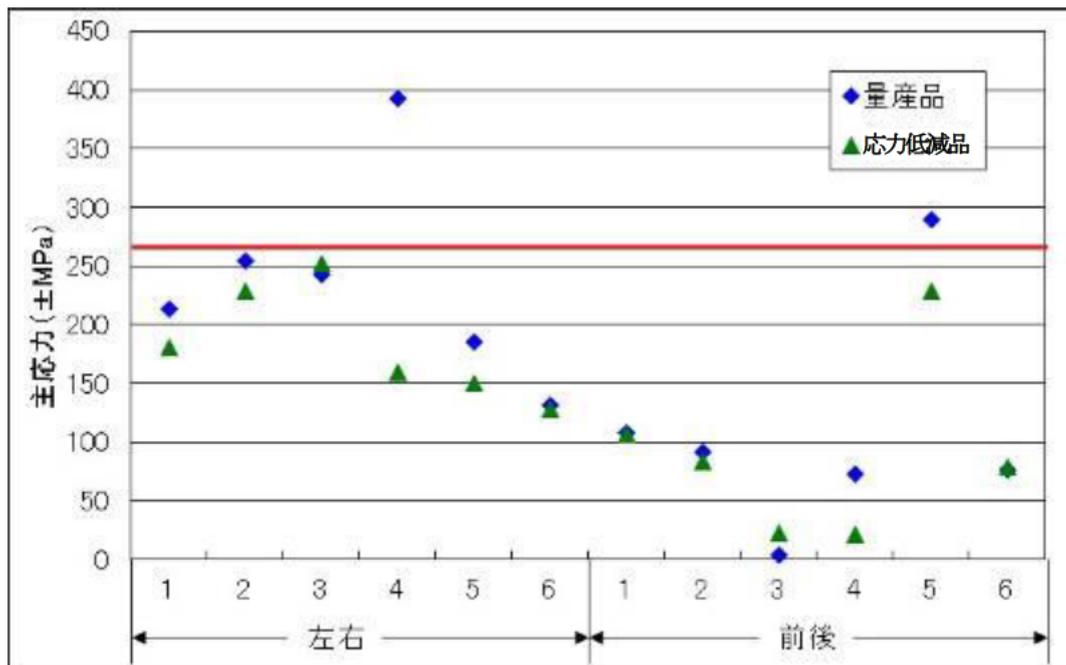


図 7 1

## 2-4 対策方法の適正化手法確立

### 2-4-1 新規製品における最適形状・最適プロセスの構築

新規製品開発に際してデータベースより強度ネック部の対策を立案し客先に提案した事例2件を示す。

#### 〈事例1〉

MPV車用リヤサスペンションのリンフォース溶接部の疲労強度の向上検討を実施。

通常回避策であれば板厚UPが必要である。

#### ・強度ネック部の原因分析

##### 〈考え方〉

右表にて原因として考えられる項目の洗い出しを実施。

強度ネックの最大要因は④残留応力の増大。

多数溶接による残留応力の重畳により、

残留応力が大きくなる。…応力振幅の平均応力が高くなる。

#### 〈データベースからの要因分析〉

①溶接条件⇒トーチ角 問題無。

②フランク角

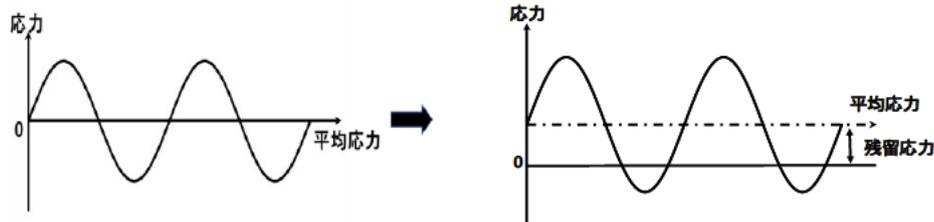
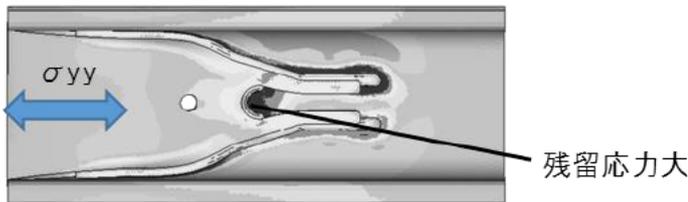
⇒溶接姿勢は問題なく悪化の懸念は少

③隙間の影響

⇒隙抑制は管理可（実績より）

④残留応力が大きい

⇒溶接が多く残留応力が増大



#### ・対策案の検討

【実施した対策内容】多数溶接時、残留応力の重畳を回避する

ポイント:問題となる溶接を1番目に行う

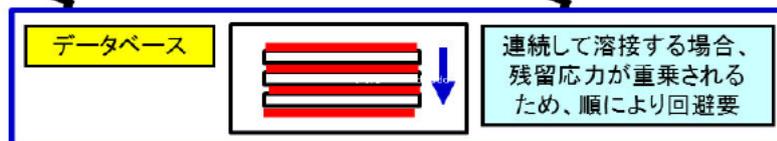
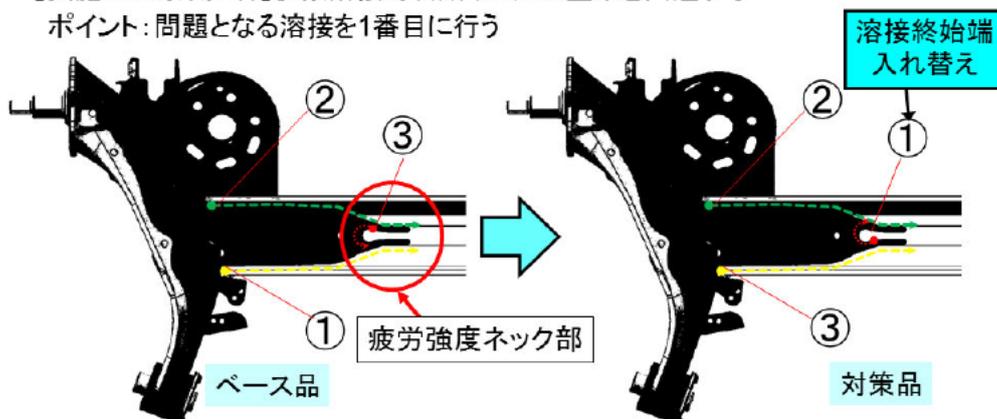


図 7 2

- ・製品による溶接順序変更での疲労強度向上効果確認

**【溶接順序変更によるトーションビーム溶接部の残留応力低減効果】  
(ビーム板厚up回避検討)**

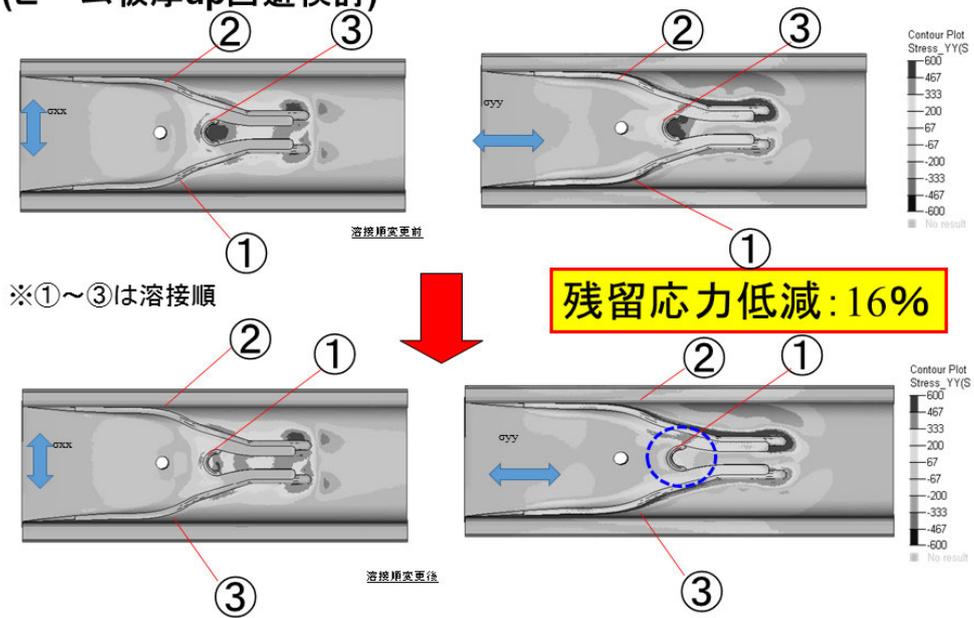


図 7 3

- ・重量低減効果に関する検証結果

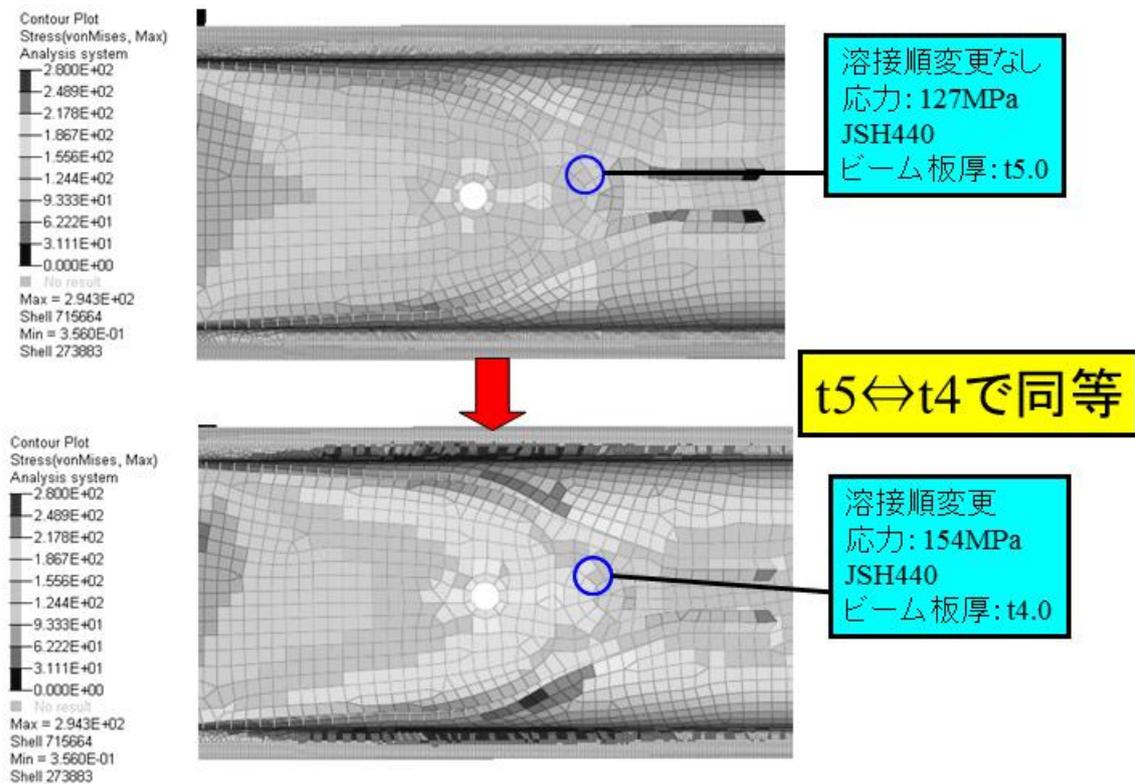
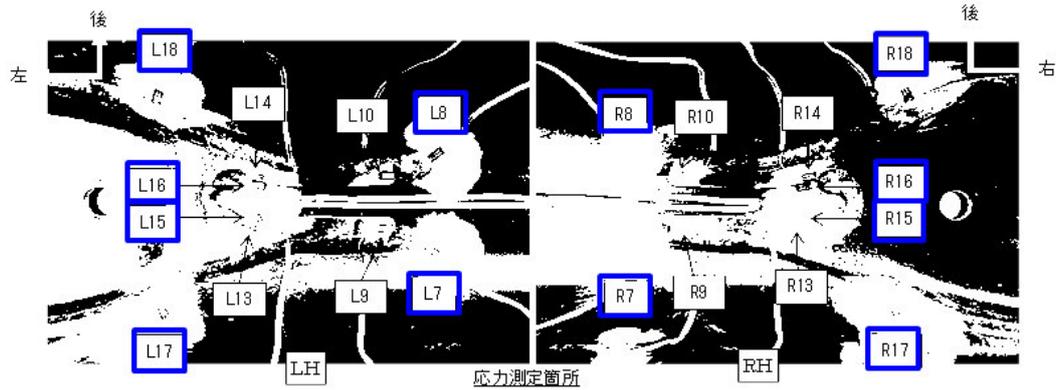


図 7 4

t4 での発生応力は21%アップするが溶接順序変更による効果(△16%)により t5 品と同等になり板厚アップは不要となる。

## 【耐久試験入力での発生応力】



|             |    | 発生応力(MPa) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------|----|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|             |    | L7        | L8   | L15  | L16  | L17  | L18  | R7   | R8   | R15  | R16  | R17  | R18  |
| 現状品         | 最大 | +53       | +78  | +89  | +72  | +117 | +123 | +78  | +94  | +83  | +38  | +101 | +133 |
|             | 最小 | -110      | -131 | -145 | -122 | -109 | -107 | -121 | -149 | -136 | -71  | -95  | -121 |
| 溶接順序<br>変更品 | 最大 | +59       | +77  | +101 | +89  | +123 | +138 | +68  | +67  | +99  | +78  | +99  | +137 |
|             | 最小 | -110      | -131 | -156 | -141 | -110 | -122 | -118 | -127 | -152 | -122 | -94  | -115 |

図 7 5

耐久試験での現状品と溶接順序変更品の発生応力は同等。

- ・操安性評価をシミュレーション (ADAMS) で実施 (2016. 6. 20)

対策案仕様にてアライメント特性は良好であり問題無。

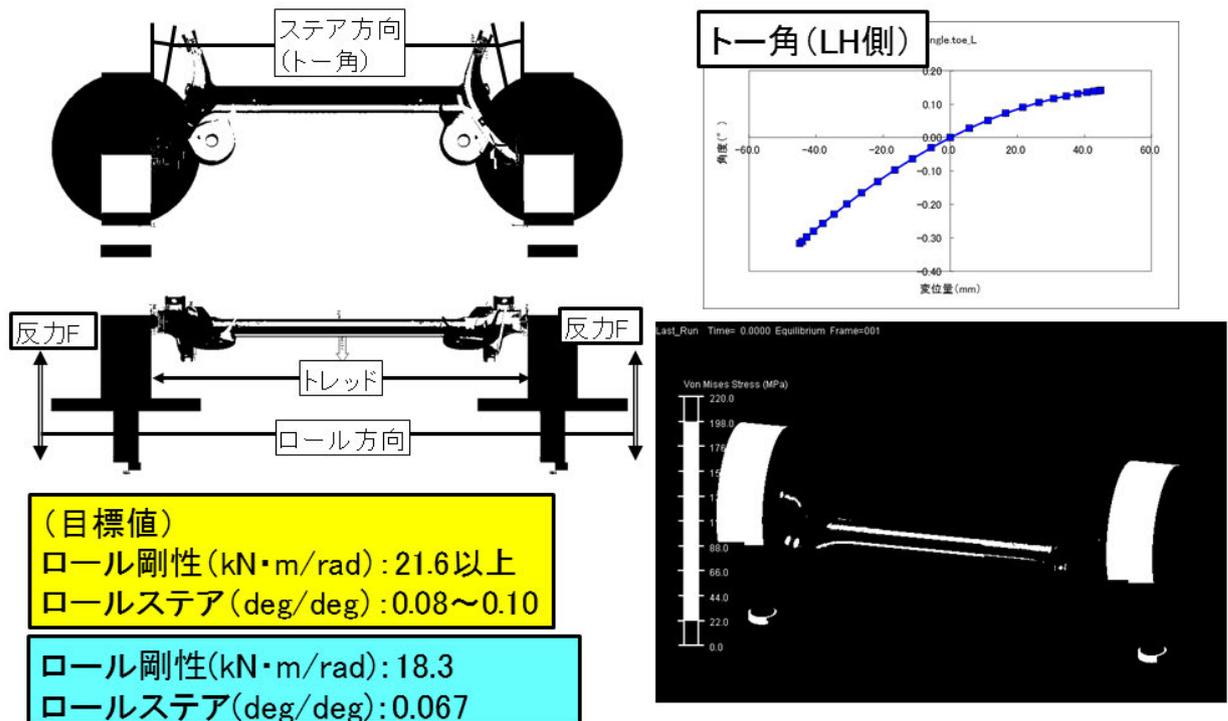


図 7 6

《事例2》

マイクロEV車用リヤサスアームの疲労耐久強度向上検討  
 サスアーム板厚低減に伴う問題箇所の抽出を実施し、データベースより  
 疲労耐久性向上案を選定し対策検討を進める。

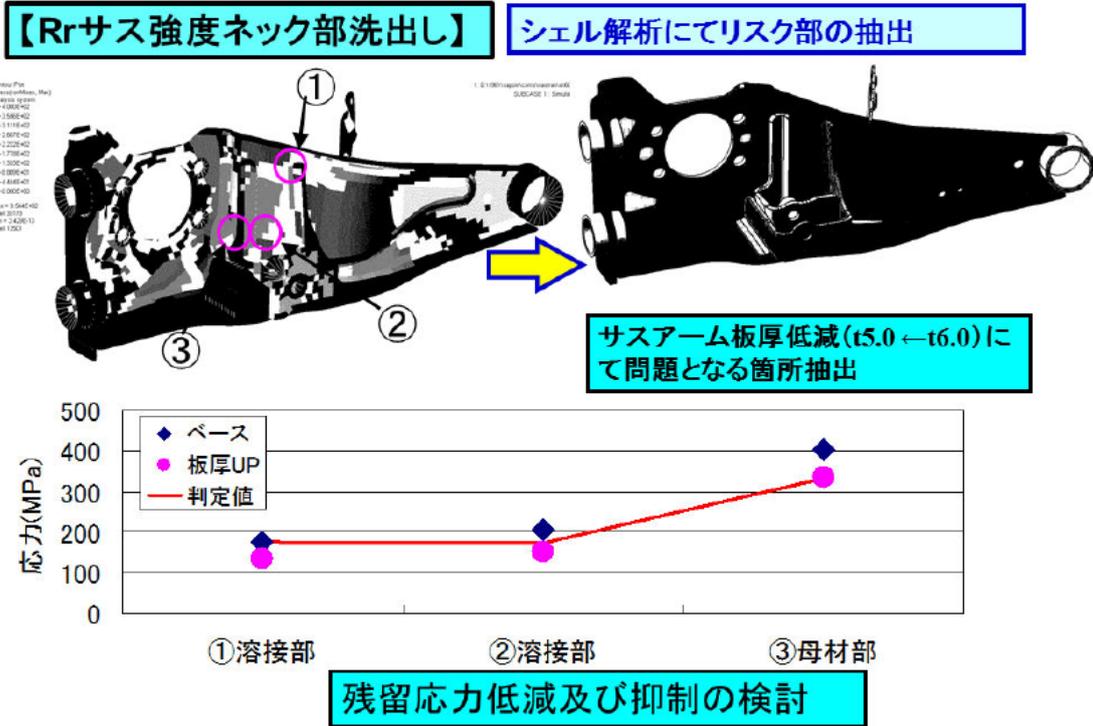


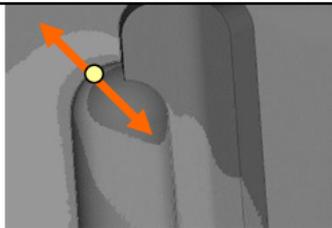
図 77

本結果から①と②部は疲労限度応力をオーバーしており対策が必要となる。  
 本体アームの板厚をUP (t 5.0 ⇒ t 6.0) すれば強度OKとなることを確認できた。

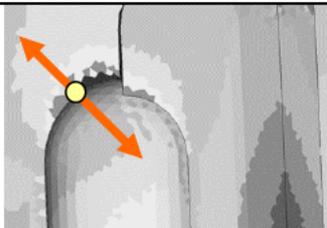
・①強度ネック部の原因分析

＜考え方＞下表にて原因として考えられる項目の洗い出しを実施。対策可能な②耐久応力と残留応力の向きとの関係を取り上げる。

耐久強度主応力ベクトル



残留応力主応力ベクトル



＜データベースからの要因分析＞

- ①溶接条件 (トーチ角、電流、電圧) ⇒問題無
- ②耐久応力と残留応力の向きの関係  
⇒重畳しており影響大
- ③隙間の影響  
⇒隙抑制は管理可 (実績より)
- ④終始端位置が適正か (溶接方向)  
⇒強度ネック部が始点側で不利な状態。  
但し、溶接治具構造より変更が不可。

- ①強度ネック部の対策検討をデータベースから実施。

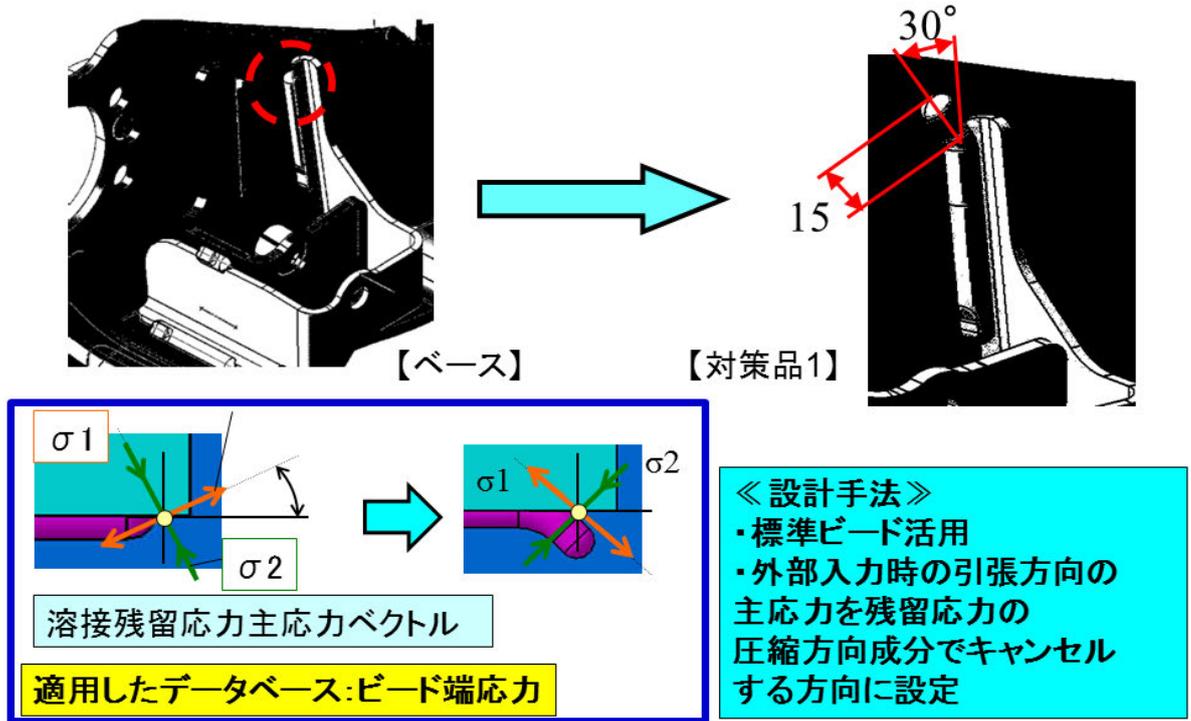


図 7 8

【データベースからの引用事項】

- ・ビード始端から残留応力を除去する為、捨てビードを設定
- ・長さは15mmに設定
- ・上下入力に対する応力を増加させない様、捨てビードの角度は30°に設定

形状・溶接対策を反映し残留応力解析、強度解析を実施

1) ①部の確認

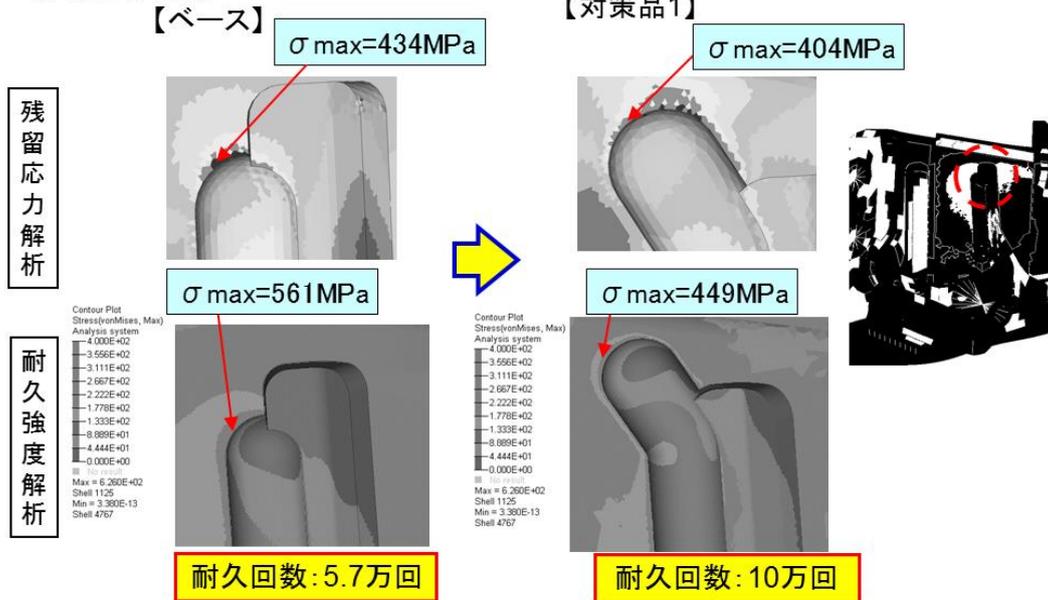


図 7 9

→解析結果より疲労耐久強度予測回数は5.7⇒10万回まで向上。

- ・②強度ネック部の原因分析  
 <考え方>右表にて原因として考えられる項目の洗い出しを実施。
- ⑤溶接ビード形状（のど厚）の影響大

<データベースからの要因分析>

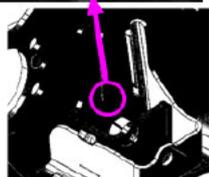
- ①溶接条件（トーチ角、電流、電圧）⇒問題無
- ②耐久応力と残留応力の向きとの関係⇒影響小
- ③隙間の影響  
 ⇒隙抑制は管理可（実績より）
- ④終始端位置が適正か（溶接方向）  
 ⇒ネック部は終端であり問題無
- ⑤溶接ビード形状⇒溶接ビード上に応力が集中

- ・②強度ネック部に関してデータベースより対策を立案。
- 対策案として溶接ビード形状の変更（クレーター処理によるのど厚確保）にて応力低減を図る。（対策品1）  
 ⇒今後、溶接姿勢等を考慮した、標準ビード形状をデータベースに反映する。

2-1)②部の対策立案  
 【ベース品】



作動4.0万回  
クラック発生



実機結果

溶接ビード部に  
クラック発生

スペックNG

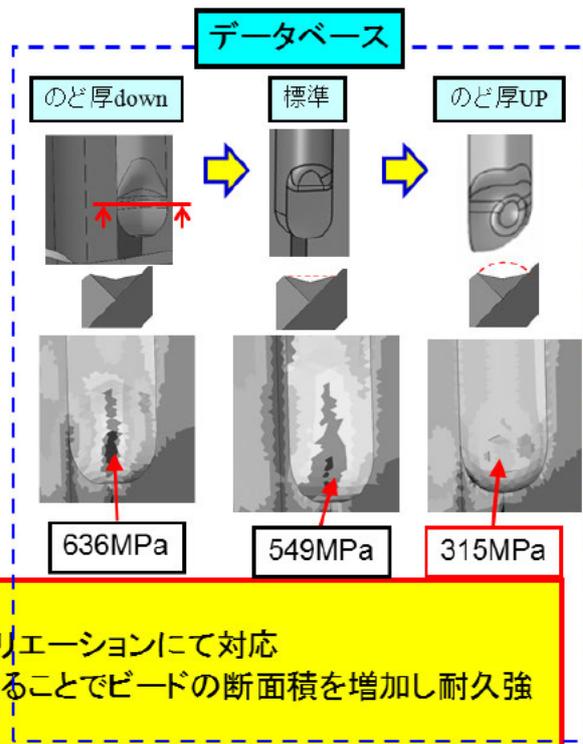
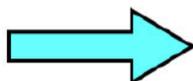


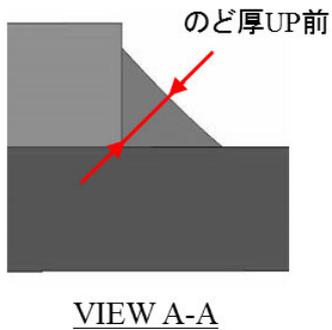
図 80

## データベースより強度ネック部の対策立案

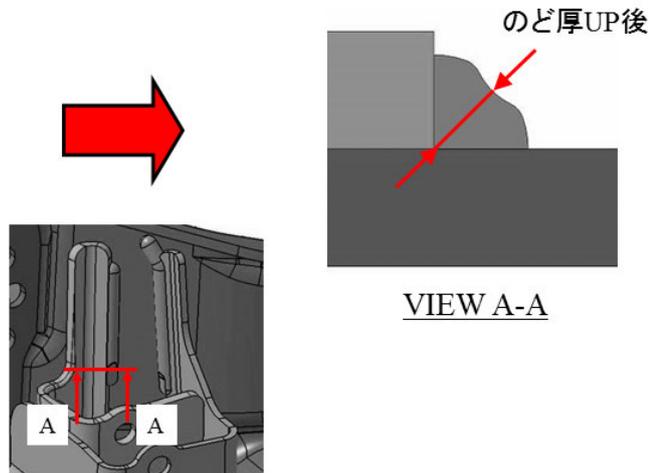
2-2) ②部へ実施した対策

- ・クラック発生部ののど厚を増加
- ・終端部のホールド時間延長によるクレーター処理

【ベース】



【対策品1】

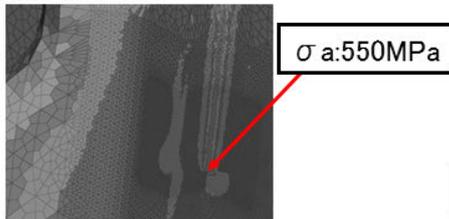


## 対策品1の疲労強度向上効果

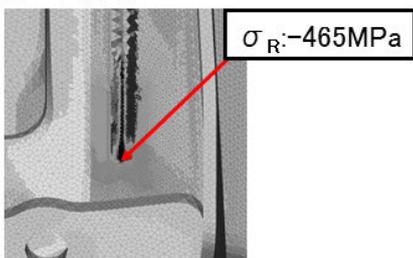
2) ②部の確認

【ベース品】

- ・耐久強度解析



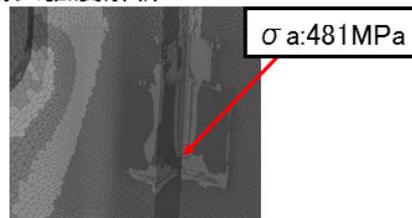
- ・残留応力解析



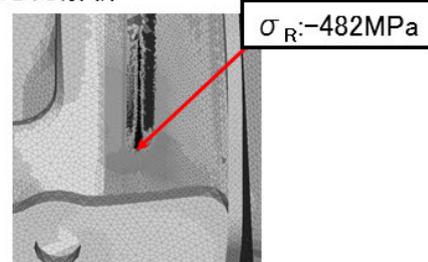
耐久回数: 1.2万回

【対策品1】

- ・耐久強度解析



- ・残留応力解析



耐久回数: 4.8万回

耐久強度向上したが実機にてスペックNG

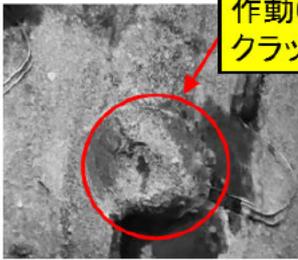
図 8 2

耐久強度は向上したが、スペックNGの為、再検討を実施（対策品2）

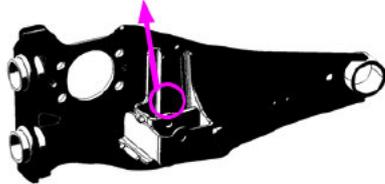
**強度対策(対策品2)の再検討**

1) ②部の対策立案

【対策品1】



作動6.5万回  
クラック発生

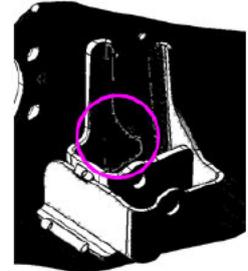
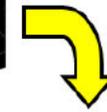


【狙い】  
応力集中部を溶接端から  
遠ざけクラックを防止

【対策品2】



対策品1に対し  
BRKTのトリム  
ラインを変更



実機結果

溶接ビード部  
にクラック発生

スペックNG

要因の分析結果より上記案を検討

図 83

・ 対策品2の疲労耐久強度の向上効果を解析にて確認

**対策品2の疲労強度向上効果**

2) 全体から強度ネック部を特定

1.5mmソリッドメッシュ解析結果

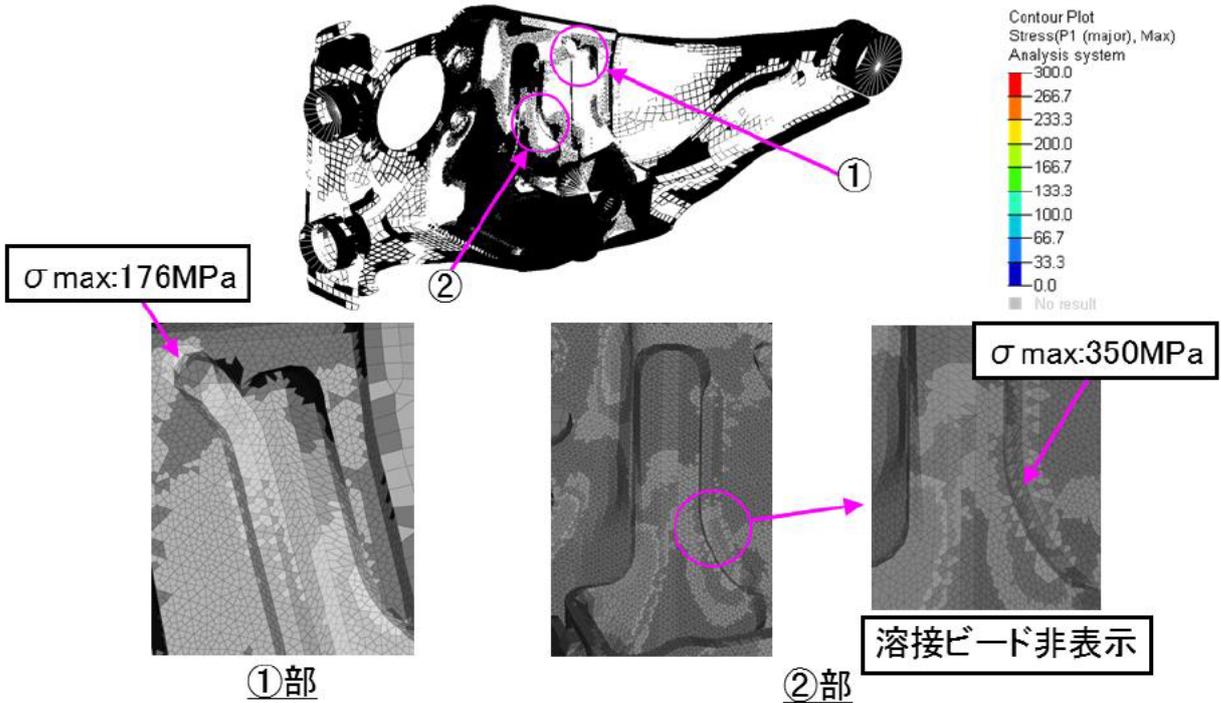
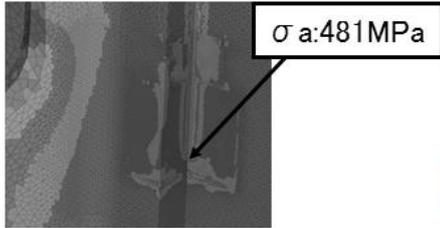


図 84

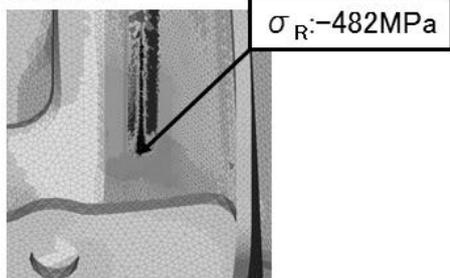
3) 疲労寿命予測

【対策品①】

・耐久強度解析



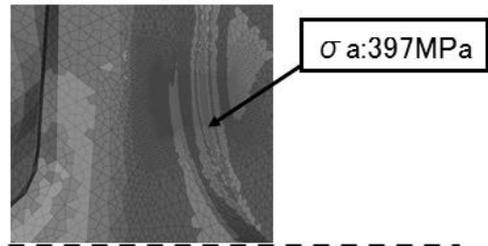
・残留応力解析



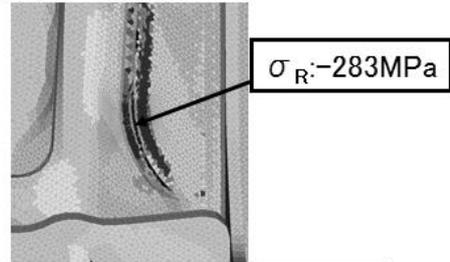
耐久回数: 4.8万回

【対策品②】

・耐久強度解析



・残留応力解析



耐久回数: 27万回

実機にて強度OK確認⇒図面に反映

図 85

対策を反映した試作品にて実機評価を進める。

・マイクロEV車 Rr サスペンション対策仕様反映での実機評価

【マイクロEV車リヤサスペンションアーム耐久試験条件】

単軸油圧加振機により車体前後、左右、上下方向に加振試験。

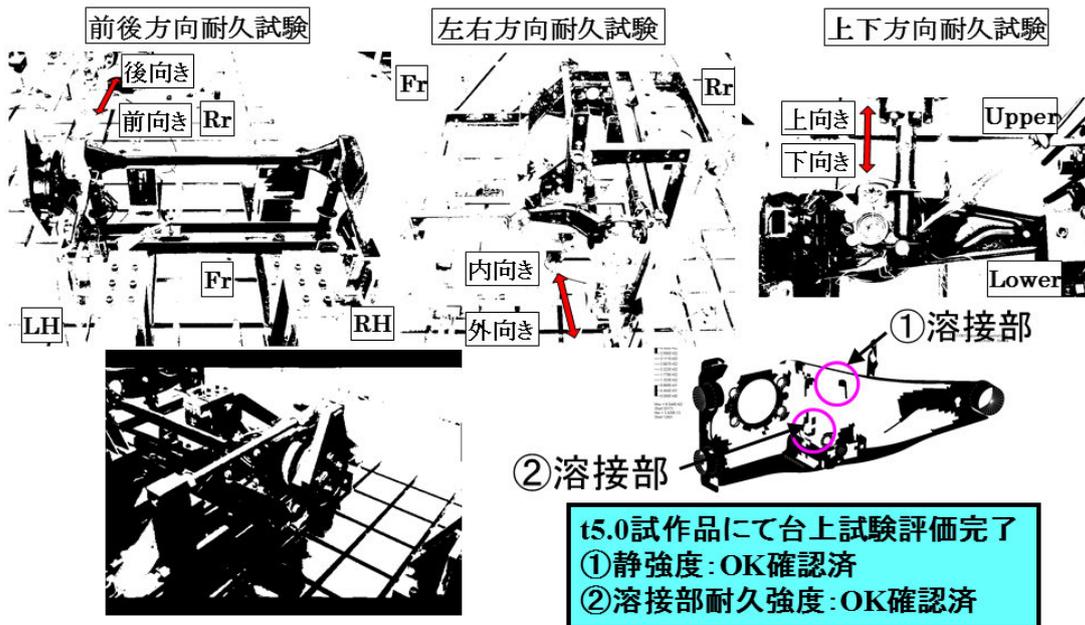


図 86

対策を反映した試作品にて実機評価を進める。

・マイクロEV車 Rrサスペンションにて効果を確認

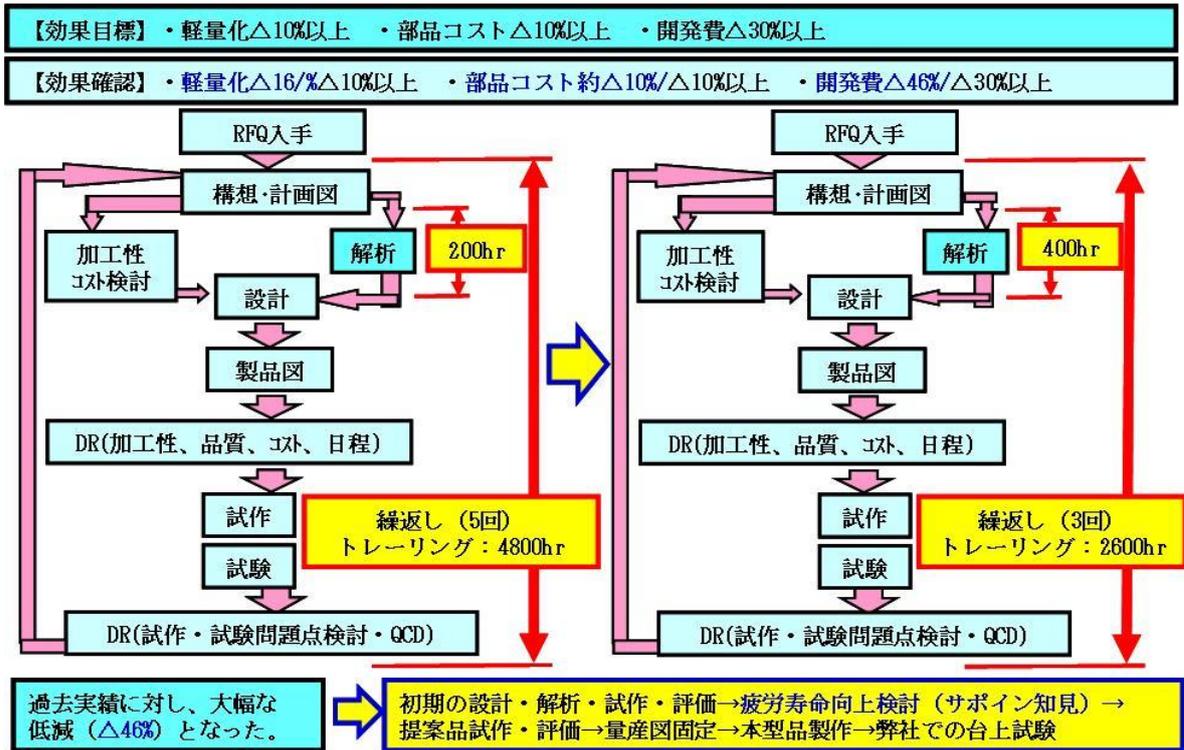


図 8 7

過去の類似形状のサスペンションアームの開発実績と比較して開発費30%低減の目標を達成した。

コスト低減10%以上、軽量化10%以上についても達成しており目標を達成した。

・実機-CAEの相関確認

1. 実機-CAE応力相関性

実機-ソリッドモデル (1.5mm) の耐久入力負荷時発生応力の相関性を確認

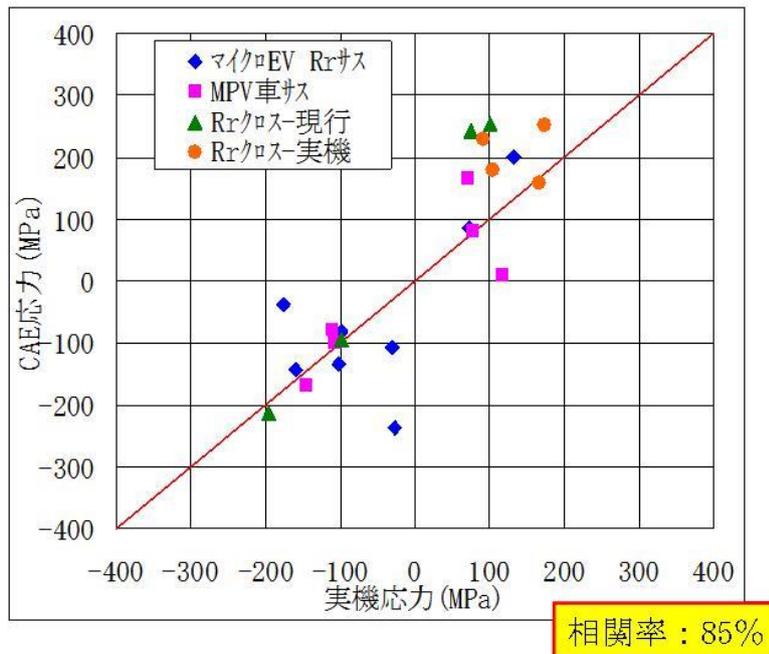


図 8 8

相関率は85%で良好である。

## 2.実機-CAE耐久回数相関性

実機-ソリッドモデルの耐久回数の相関性を確認

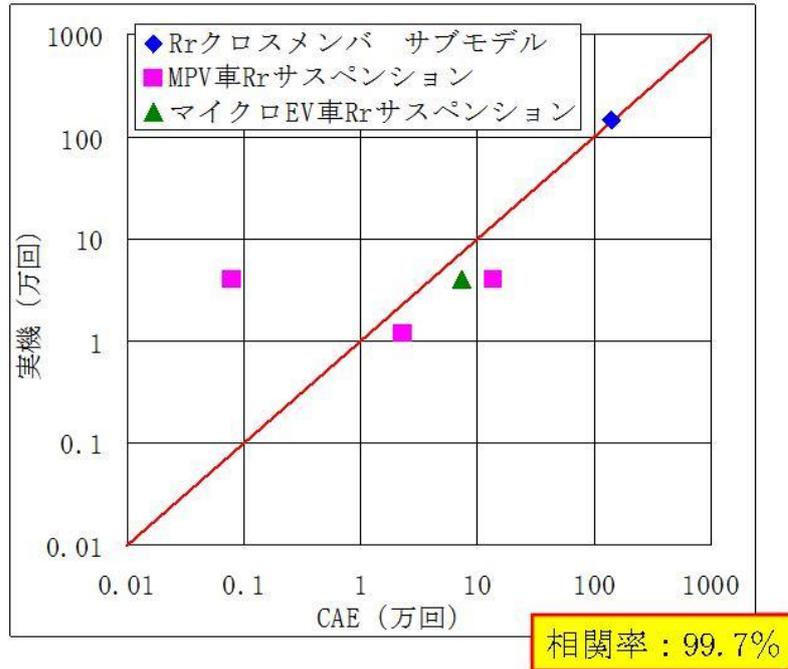


図 89

相関率は99.7%で一致率は高い。

### 2-5 取組み実績

| 実施内容                                | 機関                 | 平成26年度  | 平成27年度             | 平成28年度 |
|-------------------------------------|--------------------|---|--------------------|--------|
| [1] 高精度疲労解析技術                       |                    | 目標：疲労寿命予測一致率70%以上達成                               |                    |        |
| 【1-1】サスペンション疲労解析要素に適合したテストピースモデルの検討 |                    | ●→  | 完了                 |        |
| 【1-2】テストピースによる残留応力予測精度の向上           | ヒルタ<br>阪大<br>ASTOM | ●→  | →                  | 完了     |
| 【1-3】テストピースによる疲労寿命予測精度の向上           | ヒルタ<br>阪大<br>ASTOM | ●→  | →                  | 完了     |
| [2] 残留応力低減技術、応力分散制御技術               |                    | 目標：残留応力の低減・分散のデータベース完了<br>目標：残留応力低減50%以上、分散率50%以上 |                    |        |
| 【2-1】テストピースによる溶接時の残留応力低減要素の検討       | ヒルタ<br>阪大<br>ASTOM | ●→  | →                  | 完了     |
| 【2-2】テストピースによる応力を分散させる方法の検討         | ヒルタ<br>阪大<br>ASTOM | ●→  | →                  | 完了     |
| [3] 解析に基づいたサスペンション設計と製品検証           |                    | 目標：疲労寿命予測一致率70%以上                                 |                    |        |
|                                     |                    |   | ヒルタ<br>阪大<br>ASTOM | ●→ 完了  |
| 【3-2】製品による残留応力予測精度の整合性検討            |                    |   | ヒルタ<br>阪大<br>ASTOM | ●→ 完了  |
|                                     |                    |   | ヒルタ<br>阪大<br>ASTOM | ●→ 完了  |
|                                     | ヒルタ<br>阪大<br>ASTOM | データベース構築完了 目標：wt△10%、C△10% 開発費△30%以上              |                    |        |
|                                     |                    |   | ヒルタ<br>阪大<br>ASTOM | 完了 ●→  |

本研究での実施内容は全て終了し目標を達成した。

## 最終章 全体総括

### 1. 研究開発成果

- ①溶接構造のサスペンションが致命傷として抱える溶接部の疲労強度が低下することに対して、実サンプルにて検証を行い溶接による残留応力を反映した高精度疲労寿命解析技術を確立した。
- ②溶接部の残留応力低減及び応力分散制御のデータベースを構築した。
- ③本データベースを活用して自動車用サスペンション部品の溶接部残留応力低減及び応力分散制御という革新的技術により溶接部の疲労強度向上を図り10%以上の軽量化、コスト低減を実現する設計が可能となった。
- ④本革新的技術を用いて設計したサスペンション部品を2輪6軸ロードシミュレータにて実車相当負荷で試験検証し、従来のクロスメンバーに対し10%以上の疲労強度向上を実現し10%以上の軽量化、コスト削減を図った。
- ⑤これらの革新的技術を類似部品に適用し、目標の軽量化、コスト低減10%以上、開発費低減30%以上を達成した。

### 2. 研究開発後の課題・事業化展開

- ①今後、更に日々の実験及び、他社市場品のベンチマーク等によりデータベースの強化を図る。
- ②本事業の展開として溶接ひずみの把握により板金溶接構造部品のものづくり力向上を果たし、更なる強みとし客先提案に結び付ける。
- ③更に本成果の市場投入を目指し、本事業で培った技術を順次開発部品へ反映中。  
また当社の強みとして自動車メーカーへ本成果を盛り込み提案中。

### 3. 「Goodmanの法則」及び「切欠き効果」等にて疲労寿命への影響は理論的に知られていたが、本事業にて解析と実測の相関性を確保する 及び、残留応力等の制御により疲労寿命を延長する技術について実設計へ応用できる革新的技術の目途付けが出来た。

但し、依然データのバラツキ及びシフトが有り今後、実務に活用すると同時にそれらをデータベースにフィードバックすることにより引き続き改良を図る。  
これらにより、今まで設計段階で出来なかった残留応力制御による疲労寿命向上を図ることが出来るようになった。

以上