

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

「高張力鋼板によるモジュール部品軽量化を実現させる
プレス加工・ハイブリッド溶接複合プロセスの構築」

研究開発成果等報告書

平成 29 年 5 月

担当局	東北経済産業局
補助事業者	一般社団法人日本金属プレス工業協会 国立研究開発法人理化学研究所

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) 研究開発の背景	1
(2) 研究目的	1
(3) 研究目標	2
(4) 実施結果	3
1-2 研究体制	3
(1) 研究組織	3
(2) 管理体制	4
(3) 研究者及び協力者一覧	4
1-3 成果概要	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	5
第2章 本論	6
1. 高張力鋼板溶接不良対策課題への対応	6
1-1 レーザ・アーク複合溶接機的设计製作	6
1-2 レーザ・アーク複合溶接実験による最適化検討	6
1-3 実部品試作検討	9
1-4 モジュール部品（ステアリングハンガービーム）としての機能検証	9
2. アーク溶接不良対策課題への対応	9
2-1 アーク溶接加工条件の最適化検討	10
2-2 溶接加工データベース構築	12
2-3 溶接プロセスの最適化検討	13
3. モジュール部品寸法精度不良対策課題への対応	13
3-1 プレス成形単品のスプリングバック予測	13
3-2 実組立品対解析結果比較検証	14
4. 溶接（熱歪）そり変形不良対策課題への対応	14
4-1 熱歪そり変形予測	14
4-2 実験対解析結果比較検証	15
第3章 全体総括	18
3-1 総括	18
3-2 今後に向けて	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) 研究開発の背景

(二) 精密加工に係る技術に関する事項

1 精密加工に係る技術において達成すべき高度化目標

(3) 川下分野横断的な共通の事項

① 川下製造業者等の共通の課題及びニーズ

ア. 高機能化・精密化・軽量化

コックピットモジュール「ステアリングハンガービーム」は、自動車としての基本性能である走る・曲がる・止まるの基本性能を担うステアリング・ホイール(ハンドル)操作安定性、振動吸収、衝突事故時のエネルギー吸収等高機能化に併せてモジュールの大型化が加速している。さらに、環境保護意識の世界的な広がりや原油高等による低燃費車実現に向けた「車両の軽量化」に対応すべく衝突安全性による重量増加をも克服する軽量化の達成が重要課題となっている。

鋼板の高強度化は、強度を維持したまま板厚を小さくすることが可能であり、車体軽量化と衝突安全性という相反する難題を同時に解決できる。しかし、「ステアリングハンガービーム」では、主要構成部材であるパイプ材に高強度鋼材が採用されているが、その他の構成部品(プレス成形品)には高強度鋼板が使用されていないのが現状である。高強度鋼板は、一般的に引張強度、降伏強度が高くスプリングバック量が大きくなる特徴がある。そのため、スプリングバック量を設計段階に予測して、製品形状の単純化や組立(Assy)作業時に発生する各構成部品同士のゆがみ現象を抑制することが、溶接時の熱歪による影響を予測し軽減していく上でも重要となっている。

特に、引張り強さが 700MPa 以上の高張力鋼板の溶接では、その溶接部分もそれと同等以上の強度を要求されるとともに、過大な入熱及び過大な溶接電流による機械的性質、溶接時に発生する水素により遅れ割れ等に対策が必要となり、新たな溶接工法の確立が必要不可欠となっている。

(2) 研究目的

イ. 品質の安定性・安全性の向上

モジュール部品組み立て工程では、アーク溶接が①強度面での信頼性が高いこと、②継ぎ手形状を選ばないこと、③プレス精度の感受性が低いこと(ギャップに強いこと)等の利点から、「ステアリングハンガービーム」のような複雑形状部品等では経済性に優れた施工法として多用されている。しかし、アーク溶接では電極を兼ねた溶加材が溶接ワイヤー(溶接棒)から溶けて母材に落下する際にアークの力を受けて溶滴や溶融池の一部が周囲に飛び散り固化した約 1 μ m～数 mm サイズの金属粒(スパッタ)が発生する。このスパッタは、ノズルに付着してシールドガスの流れを阻害したり、溶接構造物に付着して手直し工数を増やしたり、溶接欠陥の原因となる等作業効率、品質面で大きな問題となっている。また、モジュール部品の寸法精度向上及び安定化には、溶接時に発生する熱量を抑えて材料変形(熱歪)を軽減することが重要となっている。そのため、溶滴移行後のアークが再発生する瞬間の電流を下げてアークの爆発力を弱める溶接電源制御手法を構築し、施工面でもアーク電圧、トーチ角度・ワイヤ突出し長さ等の溶接条件を最適化させることにより、スパッタ発生量及び熱歪の影響のミニマム化を実現させる。

ア. 当該技術が持つ物理的な諸特性の向上

高張力鋼板を溶接する際は、過熱による熱影響部の拡大・結晶粒の粗大化・水素脆性等に対する対策が必要とされる。従来から、被加工物の予熱と小入熱量の溶接、ならびに後熱による歪の緩和等が行われているが、作業速度とコストの観点からは、入熱方法の更なる検討による加工技術の高度化が必要不可欠である。

アーク熱源は、エネルギー密度が低いために溶接速度が遅くビード幅が広くなり溶け込み深さも浅くなるが安価で大出力を発生することができる。これに対して、レーザービームは、エネルギー密度が極めて高くできることから深溶け込みや高速度溶接が可能となるが、高エネルギー密度ビーム特有の溶接欠陥が発生する。これらの2つの熱源の長所を生かして短所を補い合い、両用効果にて指向性の高い安定した熱原を得ることにより、高エネルギー密度の熱源特有の溶接欠陥及び溶接変形・残留応力を大きく抑制することにより、高張力鋼板にも対応できる高効率な溶接を実現させる。

エ. プロセスの革新・IT活用的高度化

「ステアリングハンガービーム」等モジュール部品ではプレス成形品同士を組み立てること(アセンブリー)が必要となる。そのため、溶接(アーク溶接等)による部材接合が行われるが、その際に生じる熱により各成形品(構成部品)が変形する。そのため、モジュール部品全体が複雑な要因で変形するために、部品(CAD)データを使用した幾何学的な組み付け検討(シミュレーション)結果では組立部品を要求寸法精度内に収めることが難しい。実際には各成形品形状を変更することで全体形状を補正しようと金型形状修正及び組立トライアルの繰り返し作業が発生している。そのため、各構成部品が溶接組立される際に発生する組立部品の変形量を予測する技術を開発し、設計段階にて「ステアリングハンガービーム」を構成する各部品形状及び加工工程の最適化を図るプロセスの構築が必要不可欠である。

(3) 研究目標

【1. 高張力鋼板溶接不良対策課題への対応】

レーザ・アーク複合溶接技術の構築により、700MPa 級高張力鋼板の溶接加工を実現させ、高張力鋼板を採用した機能要件を満足させた「ステアリングハンガービーム」を試作する。

【2. アーク溶接不良対策課題への対応】

溶接条件及び溶接工程の最適化により量産時に発生するスパッタ等による仕損率(製作不良による製品廃却割合)を30%削減する。

【3. モジュール部品寸法精度不良対策課題への対応】

設計段階に寸法不良及び形状不良を事前検討・対策することにより、製作段階で最小限の試作(トライアル)にて部品(OK 品)取得ができる状況を実現させ、組立構成部品のプレス金型改修費用を50%削減する。

【4. 溶接(熱歪)そり変形不良対策課題への対応】

従来の溶接そり変形量予測は、過去の類似部品の実績と熟練者の勘に頼っており、結果にバラツキが大きく新規部品では実物による試行錯誤作業となっている。本開発では、成形シミュレーションから連続して溶接時の熱変形シミュレーションを行なうことにより、各組立構成部品形状に対

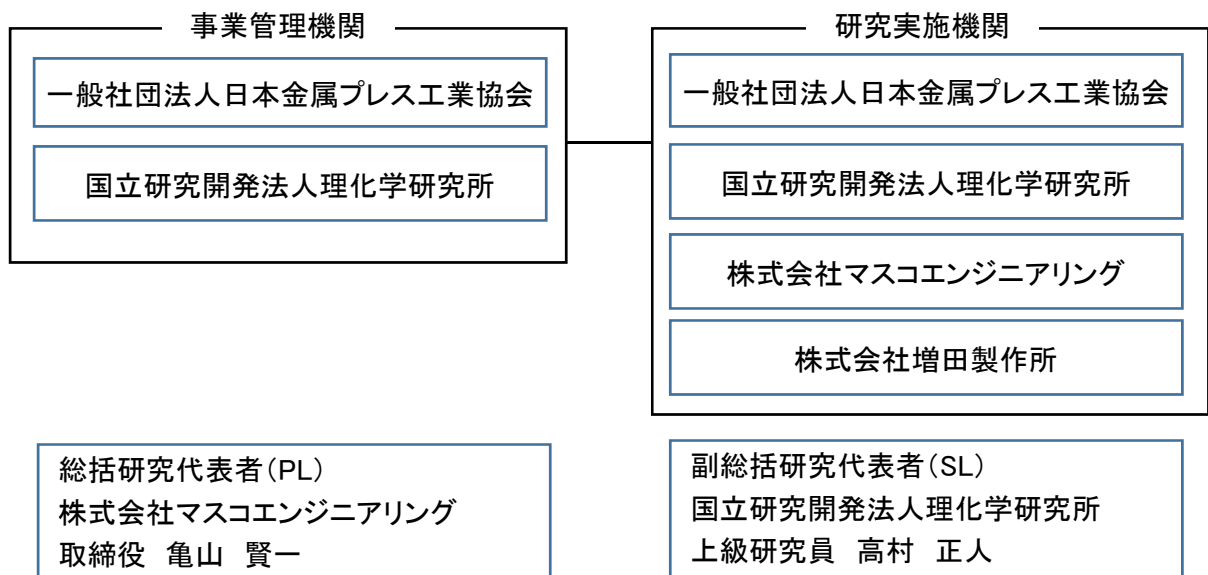
する溶接そり変形変位量予測精度誤差(誤差分散)を1～2mm程度とする。さらに、設計段階でのシミュレーション適用の実用化を図ることにより、部品組立(Assy)時の造り直し作業を低減させる。

(4)実施結果

- レーザ・アーク溶接複合溶接機による700MPa級高張力鋼板の溶接加工を実現させ、仕上がり形状寸法及び固有値振動等機能要件を満足させる「ステアリングハンガービーム」の試作品を取得した。
- アーク溶接において従来のスパッタ発生量を5～6分の1に減らすことができた。実際の現場にも導入し、同様の効果を得ることを確認している。それに伴い、不良品の発生率を押さえることができた。
- 440MPa級の高張力鋼板を使用した現行品に対して、製作段階で最小限の試作(トライアル)にて980MPa級の高張力鋼板を使用した試作品を取得することができた。
- 部品アセンブリ段階での変形予測を行う固有ひずみ法を応用した熱変形シミュレーションツールを開発し、パイプ溶接の歪変形量に関して実験対解析結果比較により予測精度誤差を約0.5mm以内を確保することができた。

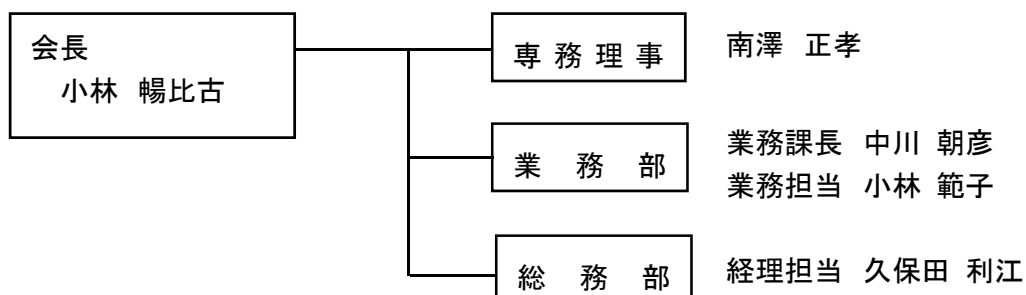
1-2 研究体制

(1) 研究組織

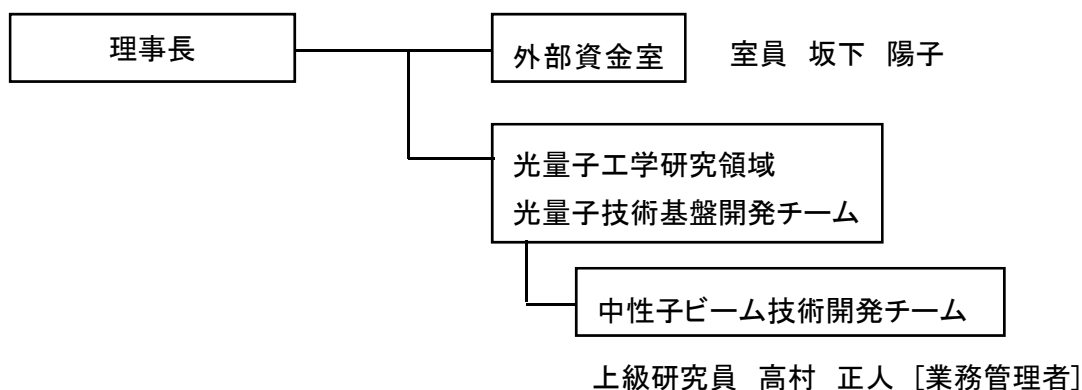


(2) 管理体制

①事業管理機関【一般社団法人日本金属プレス工業協会】



②事業管理機関【国立研究開発法人理化学研究所】



(3) 研究者及び協力者一覧

一般社団法人日本金属プレス工業協会

氏名	所属・役職
南澤 正孝	専務理事
中川 朝彦	業務部 業務課長

国立研究開発法人理化学研究所

氏名	所属・役職
高村 正人	光量子工学研究領域 光量子技術基盤開発チーム 中性子ビーム技術開発チーム 上級研究員
須長 秀行	光量子工学研究領域 光量子技術基盤開発チーム 中性子ビーム技術開発チーム 上級研究員
見原 俊介	光量子工学研究領域 光量子技術基盤開発チーム 中性子ビーム技術開発チーム テクニカルスタッフ

株式会社マスコエンジニアリング

氏名	所属・役職
亀山 賢一	取締役
安喰 洋一	山形工場 生産技術課 次長
松田 勇一	山形工場 生産技術課 課長
矢口 隼人	山形工場 生産技術課 係長
荒木 一則	山形工場 生産技術課
小野 正敏	山形工場 生産技術課 主任
小林 貞雄	山形工場 金型生産課 技師
加藤 同	山形工場 金型生産課 技師

中川 克也	山形工場 生産技術課 主任
田中 智史	山形工場 生産技術課 主任

株式会社増田製作所

氏名	所属・役職
秋保 正喜	取締役 常務執行役員
山村 広樹	埼玉工場 営業。品質管理課 課長代理
鈴木 孝夫	埼玉工場 品質管理課 課長
中村 英樹	栃木開発センター 製品開発課 課長
森島 正昭	栃木開発センター 新技術開発課 課長
秋山 伸二	栃木開発センター 製品開発課 主任
柿崎 渉	千葉工場 次長
江澤 正昭	千葉工場 プレス課 課長
河野 竜介	千葉工場 品質管理課 課長代理

協力者(アドバイザー)

氏名	所属・役職
小久保 伸章	本田技研工業株式会社 購買本部生産改善ブロック 技術主任

1-3 成果概要

【1. 高張力鋼板溶接不良対策課題への対応】

ロボットの採用により自動化されたレーザー・アーク複合溶接システムを構築したことにより、機能要件を満足させた「ステアリングハンガービーム」を試作することができた。

【2. アーク溶接不良対策課題への対応】

溶接条件及び溶接工程の最適化により量産時に発生するスパッタ等による仕損率(製作不良による製品廃却割合)を30%削減することができた。

【3. モジュール部品寸法精度不良対策課題への対応】

設計段階に成形シミュレーションによる形状不良等を事前検討することにより、更なる高強度の鋼板適用判断支援が可能となるとともに、製作段階で最小限の試作(トライアル)にて部品(OK品)取得ができる状況を実現できた。

【4. 溶接(熱歪)そり変形不良対策課題への対応】

弾塑性有限要素法プログラムに対して固有ひずみ法を導入した溶接そり変形量予測ツールの開発により、各溶接工法における部材の溶接後のそり変形量を定量的に3次元形状として把握でき、部品組立(Assy)時の造り直し作業を低減させる基盤が構築できた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

一般社団法人日本金属プレス工業協会 中川 朝彦 TEL: 03-3433-3730

nakagawa@nikkin.or.jp

第2章 本論

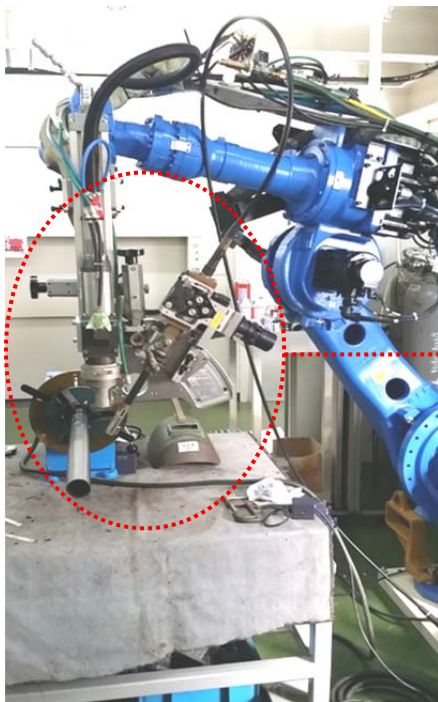
【1. 高張力鋼板溶接不良対策課題への対応】

高張力鋼板を溶接する際は、過熱による熱影響部の拡大・結晶粒の粗大化・水素脆性等に対する対策が必要とされる。従来から、被加工物の予熱と小入熱量の溶接、ならびに後熱による歪の緩和等が行われているが、作業速度とコストの観点からは、入熱方法の更なる検討による加工技術の高度化が必要不可欠である。

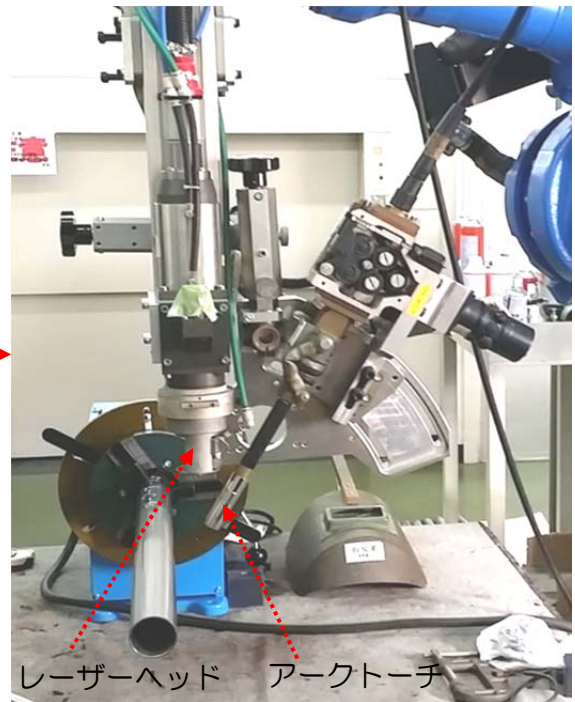
アーク熱原は、エネルギー密度が低いために溶接速度が遅くビード幅が広くなり溶け込み深さも浅くなるが安価で大出力を発生することができる。これに対して、レーザービームは、エネルギー密度が極めて高くできることから深溶け込みや高速度溶接が可能となるが、高エネルギー密度ビーム特有の溶接欠陥が発生する。これらの2つの熱源の長所を生かして短所を補い合い、高エネルギー密度熱原特有の溶接欠陥及び溶接変形・残留応力の増加を抑制することにより、高張力鋼板にも対応できる高効率な溶接法として、レーザ・アーク複合溶接を開発した。

【1-1】レーザ・アーク複合溶接機的设计製作

本開発では、発振効率が高く、高品質なビームが得られるようにレーザー発振器及びレーザーヘッドの最適化を図った。さらに、溶接ロボットアームにレーザーヘッドを装着することにより、溶接条件及び溶接プロセス等をプログラミングすることで自動溶接できるレーザ・アーク複合溶接機を試作した。図 1-1-1 に試作されたレーザ・アーク複合溶接機の全体写真及びトーチ部拡大写真を示す。



(a) 全体写真



(b) トーチ部拡大写真

図 1-1-1 レーザ・アーク複合溶接機

【1-2】レーザ・アーク複合溶接実験による最適化検討

板厚2mmの高張力鋼板を使用したレーザ・アーク複合溶接実験により、アーク電流及びレーザー

出力の増加に対して、溶接部の溶け込み深さが急激に増加することが確認できた(図 1-2-1 参照)。そのため、アーク電流及びレーザー出力の増加に対する溶接部の溶け込み深さの増加を抑制できる溶接条件の検討を行った。その結果、従来からの厚板部材等におけるレーザー溶接条件と異なり、レーザーの焦点位置を溶接部材に対してはずすことにより、自動車用高張力鋼板(板厚2mm程度)適用時の溶け込み深さを抑えられることが把握できた。さらに、アークのトーチ姿勢の適正化を図ることによりバラツキも小さくなることが確認できた(図 1-2-1 及び図 1-2-2 参照)。

また、レーザー・アーク複合溶接(ハイブリッド溶接)が熱歪(変形)に与える影響を把握するために、実際に板厚、内径及び材質の異なる長さ700mmのパイプ材を使用して、長手方向及び円周方向に溶接長さを変えて溶接実験を行い、溶接後のパイプ材端部の変形量を計測することにより、アーク溶接、レーザー溶接及びハイブリッド溶接での熱歪(変形)影響度を把握した。その結果、熱歪(変形)影響度は、パイプの種類及び溶接長さに拘わらず、アーク溶接>ハイブリッド溶接>レーザー溶接 となることが明らかとなった(図 1-2-3 参照)。

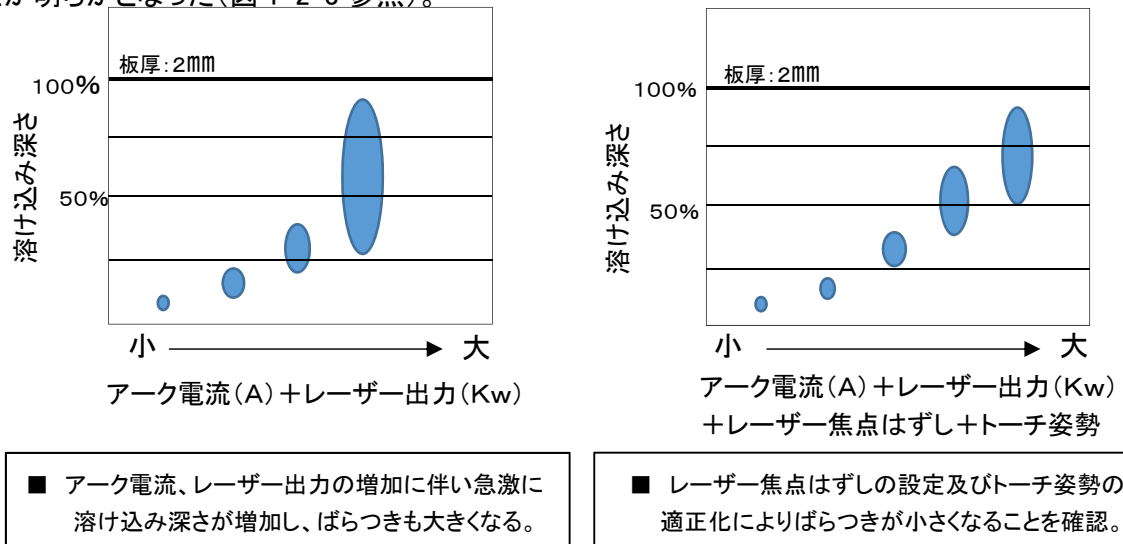
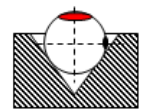
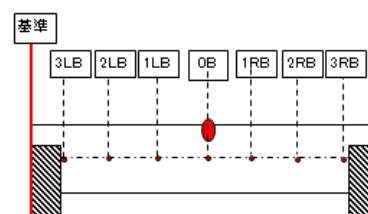
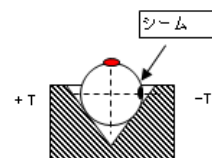
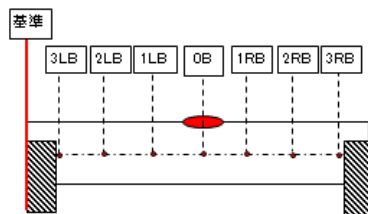
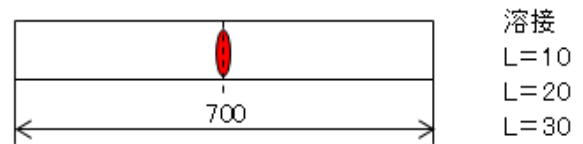
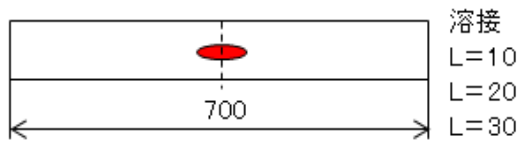


図 1-2-1 複合溶接と溶け込み深さの関係

試験片	①	②	③
外観			
断面写真			
溶け込み量	0.6mm (38%)	1.0mm (50%)	1.5mm (75%)

図 1-2-2 複合溶接外観



■ : アーク溶接

■ : ハイブリッド溶接

■ : レーザー溶接

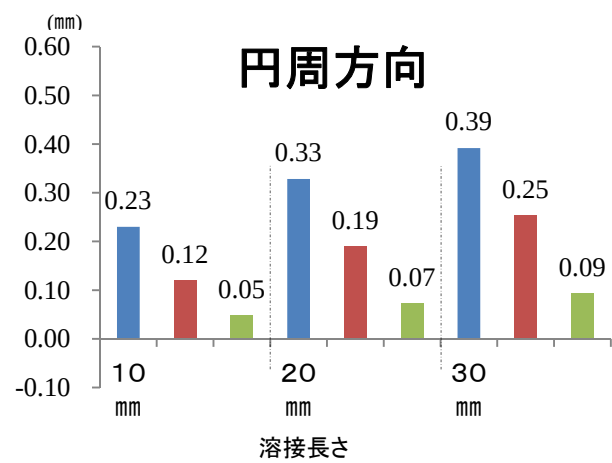
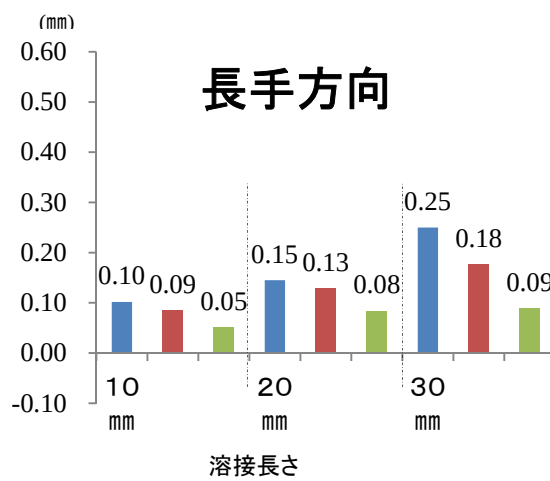


図 1-2-3 溶接熱歪変形に関する影響度調査

【1-3】 実部品試作検討

ハイブリッド(レーザー・アーク複合)溶接試作機を試用して、実際に高張力鋼板を使用した部品にて構成されるモジュール部品「ステアリングハンガービーム」の試作するために、レーザー・アーク複合溶接用ポジショナーの製作、溶接条件の設定及びロボットティーチングの設定等を行い、図 1-3-1 に示すように実際に試作実験を行った。

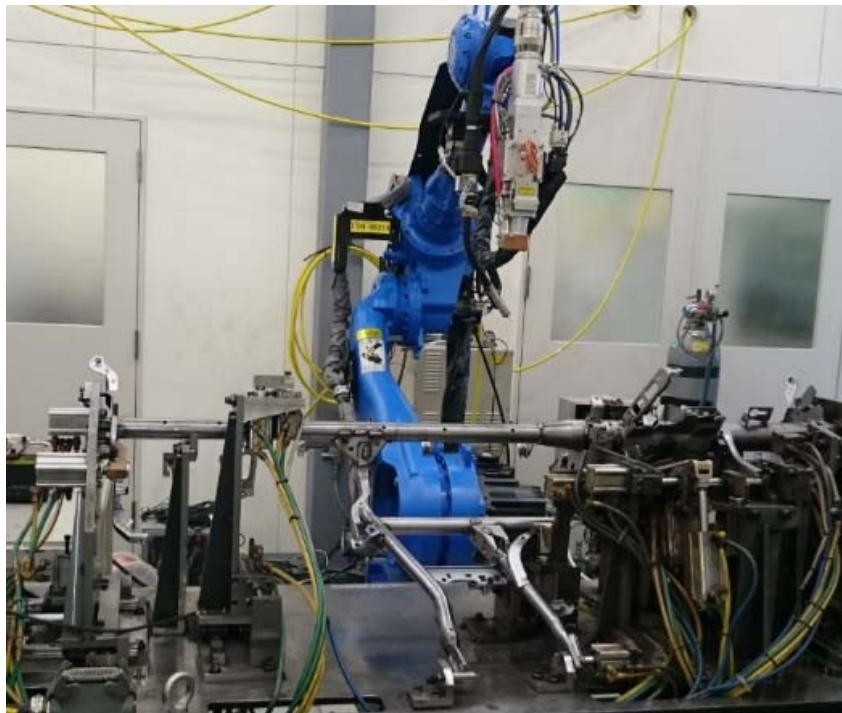


図 1-3-1 ハイブリッド溶接試作機によるモジュール部品「ステアリングハンガービーム」試作実験

【1-4】 モジュール部品(ステアリングハンガービーム)としての機能検証

試作された「ステアリングハンガービーム」に対して、実際の車両走行時に想定されるステアリング振動に対する応答試験による性能検証を行い、さらに寸法精度及び各溶接部状態を検証することにより、従来品同等以上の品質が確保されていることを確認した。

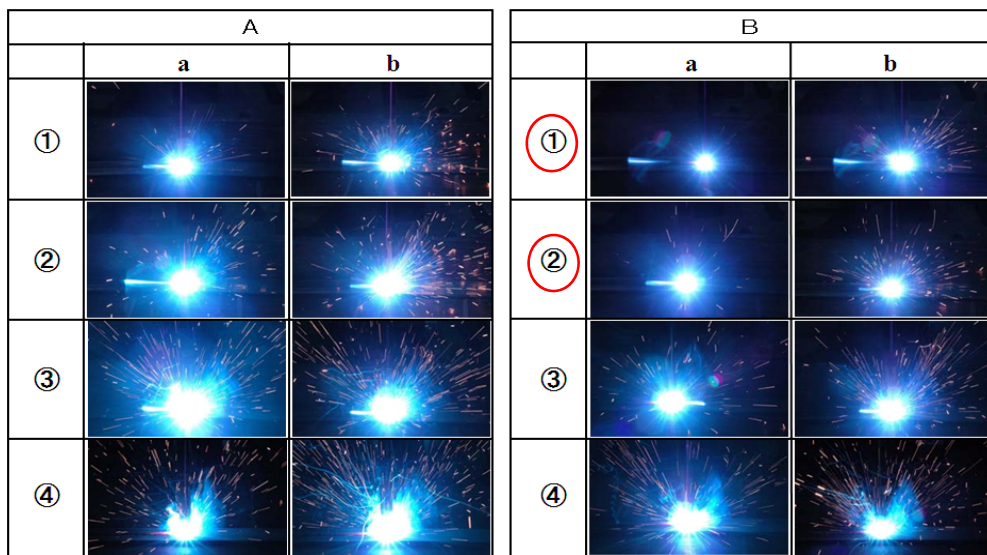
【2. アーク溶接不良対策課題への対応】

モジュール部品組み立て工程では、アーク溶接が①強度面での信頼性が高いこと、②継ぎ手形状を選ばないこと、③プレス精度の感受性が低いこと(ギャップに強いこと)等の利点から、「ステアリングハンガービーム」のような複雑形状部品等では経済性に優れた施工法として多用されている。しかし、アーク溶接では電極を兼ねた溶加材が溶接ワイヤー(溶接棒)から溶けて母材に落下する際にアークの力を受けて溶滴や熔融池の一部が周囲に飛び散り固化した約 $1\mu\text{m}$ ～数 mm サイズの金属粒(スパッタ)(図3参照)が発生する。このスパッタは、ノズルに付着してシールドガスの流れを阻害したり、溶接構造物に付着して手直し工数を増やしたり、溶接欠陥の原因となる等作業効率、品質面で大きな問題となっている。

本開発では、溶滴移行後のアークが再発生する瞬間の電流を下げてアークの爆発力を弱める溶接電源制御により、スパッタ発生量及び熱歪の影響のミニマム化を実現させた。

【2-1】 アーク溶接加工条件の最適化検討

従来からの溶接加工条件に対して、アーク発生に必要な電流を制御した実験（スパッタ低減実験）を繰り返し行ない、最適な電流波形を抽出した（図 2-1-1 参照）。アーク発生直前の電流波形を制御することにより短絡移行領域におけるスパッタが減少できることを確認した（図 2-1-2～2-1-3 参照）。また、スパッタ低減実験では、定量的にスパッタ発生状況を把握するために、スパッタ捕集箱の中で溶接加工（200mm）を行い、スパッタ粒の大きさ別に重量を測定（図 2-1-4 参照）した。これにより、くびれ検出電流波形制御によりスパッタの発生量が約1／6に低減し、スパッタが飛散し製品に固着する可能性の大きい Over1. 40mmの発生量が約1／20となり、不良品削減に大きな効果が確認できた（図 2-1-5 参照）。



（B-a-①、B-a-②の組合せがスパッタ発生量が少ない）

図 2-1-1 電流制御条件の違いに対するスパッター発生状況比較結果

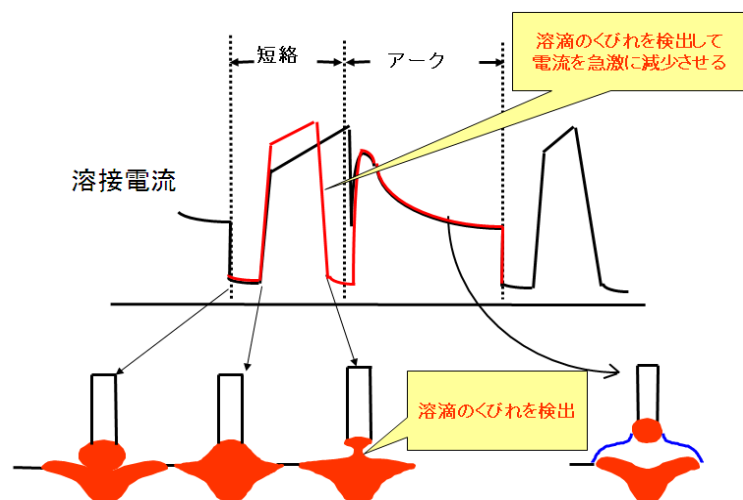
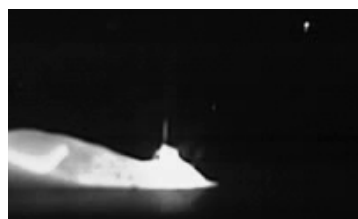


図 2-1-2 スパッター発生を減少させる電流波形制御条件

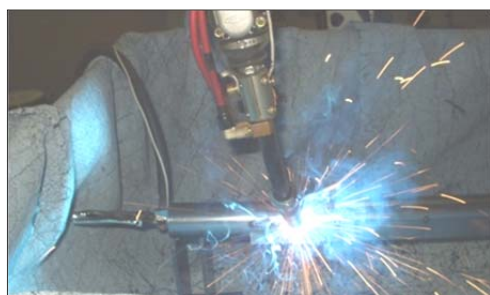
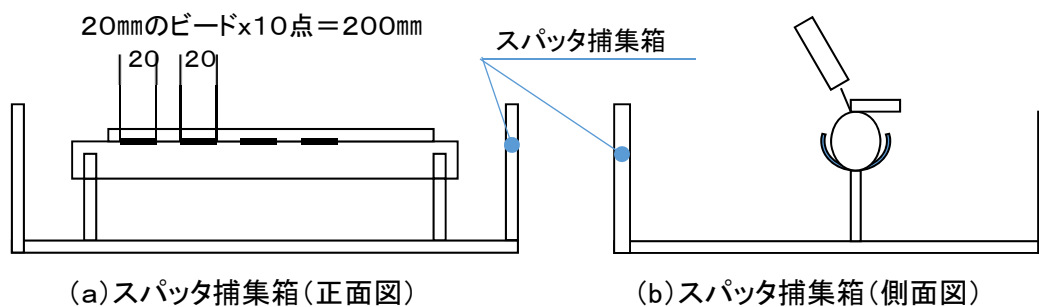


(a) くびれ検出無



(b) くびれ検出有

図 2-1-3 電流波形制御(くびれ検出)有無の比較写真



(c) スパッタ溶接実験状況



(d) スパッタ溶接実験結果

図 2-1-4 スパッタ捕集箱を使用した溶接実験

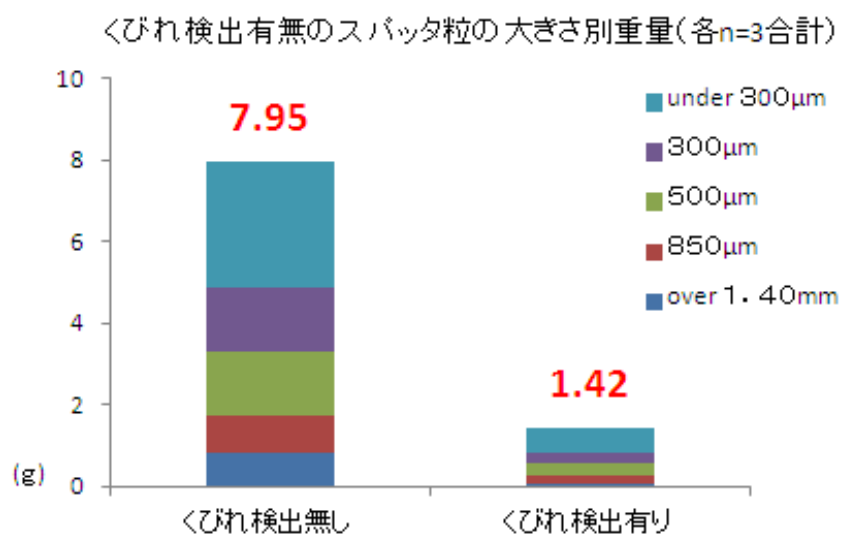
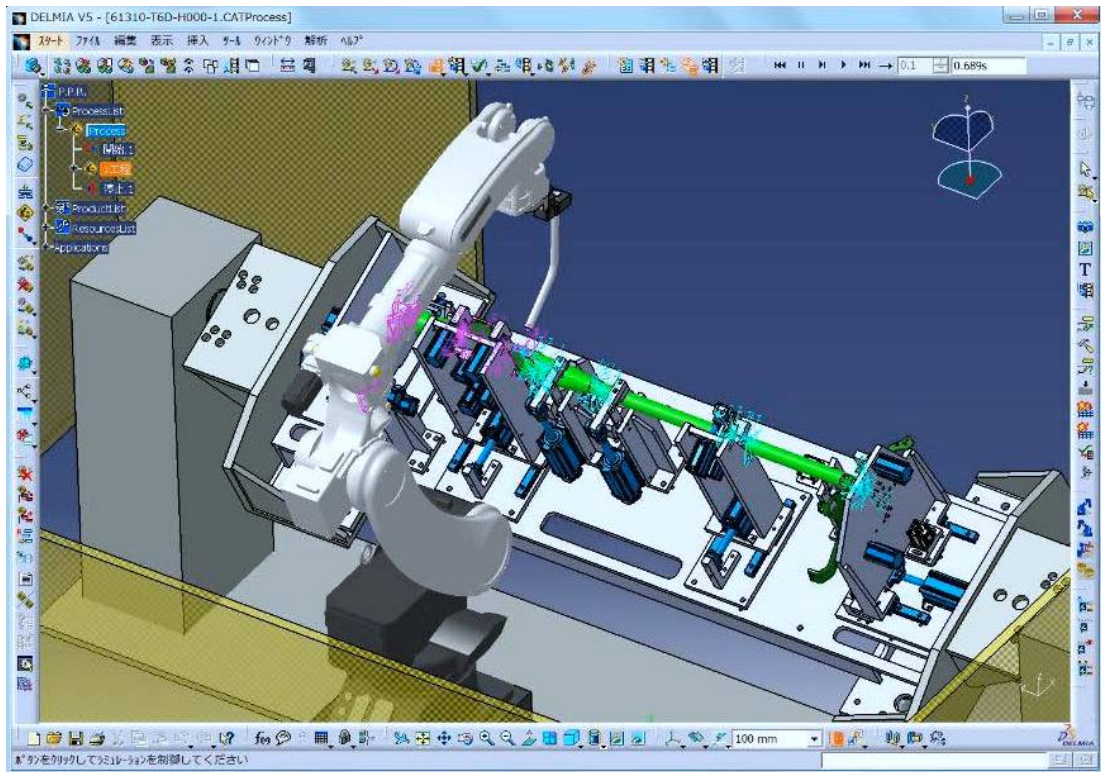


図 2-1-5 電流波形制御(くびれ検出有無)に対するスパッタ粒サイズの違い

【2-2】 溶接加工データベース構築

取得された溶接条件及び溶接機器・ロボットの条件設定情報等を蓄積して再利用できる環境を実現するために、既存のロボットシミュレーションソフトウェア上に溶接加工データベースを組み込み、データが蓄積できる機能としたことにより、溶接工程等更に高度化が必要となる新たな製品等に対応できる環境を構築した(図 2-2-1 参照)。



(a) ロボットシミュレーション・溶接加工データベース操作画面(例)

No.	電流 (A)	電圧 (V)	溶接速度 (mm/min)	溶接長さ (mm)
1	150	17.0	80	25
2	150	17.0	80	25
3	150	17.0	80	25
4	150	17.0	80	25
5	150	17.0	80	25
6	150	17.0	80	25
7	150	17.0	80	25
8	150	17.0	80	25
9	150	17.0	80	25
10	150	17.0	80	25
11	150	17.0	80	25
12	150	17.0	80	25
13	150	17.0	80	25
TOTAL	-	-	-	300

No.	電流 (A)	電圧 (V)	溶接速度 (mm/min)	溶接長さ (mm)
1	120	16.5	80	15
2	120	16.5	80	15
3	120	16.5	80	15
4	120	16.5	80	15
5	120	16.5	80	15
6	120	16.5	80	15
7	120	16.5	80	15
8	120	16.5	80	15
9	120	16.5	80	15
10	120	16.5	80	15
11	120	16.5	80	15
12	120	16.5	80	15
13	120	16.5	80	15
14	150	17.0	80	25
15	150	17.0	80	25
TOTAL	-	-	-	300

溶接条件表

(b) 溶接加工データベースの蓄積に関する入力画面(例)

図 2-2-1 ロボットシミュレーション・溶接加工データベースの概要

【2-3】溶接プロセスの最適化検討

実際の複雑な形状を有するモジュール部品「ステアリングハンガービーム」に対して、溶接加工時に最適な溶接条件を維持するために必要となる溶接姿勢・溶接スピードの制御等を従来からのロボットアームの治具・製品干渉確認に加えて設計段階で事前検討を行い、ハイブリッド溶接試作機による「ステアリングハンガービーム」試作実験のためのプログラムを作成し、ロボットを使用したレーザー・アーク複合溶接により試作品を製作した。

【3. モジュール部品寸法精度不良対策課題への対応】

プレス成形加工において、単純曲げに加えて伸び縮みフランジが共存するような3次元的形状を有する製品や高強度鋼板が採用された製品では、従来からの経験と勘をもとにスプリングバックを完全に抑制することは困難であり、試し打ちと金型修正の繰り返しによる対策が必要となる。そのため、設計段階にて成形シミュレーションを適用することによりスプリングバック量を事前予測して、見込み形状として金型形状へ反映させることが求められている。本開発では、モジュール部品を構成する各プレス成形品のプレス加工時に発生するスプリングバック量を予測するとともに、更なる高張力鋼板適用の可能性に関して検討する。

【3-1】プレス成形単品のスプリングバック予測

モジュール部品「ステアリングハンガービーム」を構成する部材に対して、実際の量産金型形状及び成形条件範囲での従来からの高強度鋼板材料 JSC440W に加えて、JSC780Y 及び JSC980Y に対して成形シミュレーション解析を行なった。スプリングバック量及び伸び歪量等をもとに材料の高強度化に対する成形性を検証し、実部品成形実験による980MPa 級高張力鋼板材料の適用を検討した（図 3-1-1 参照）。

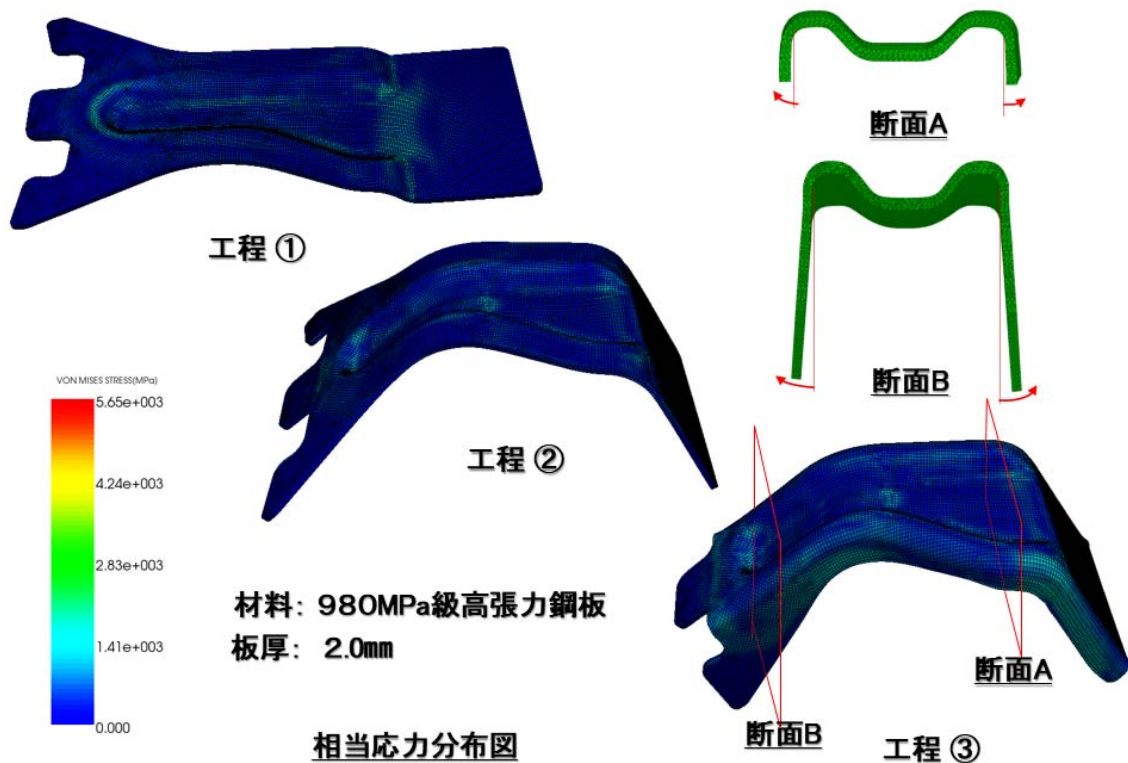


図 3-1-1 成形シミュレーション解析結果

【3-2】 実部品対解析結果比較検証

モジュール部品「ステアリングハンガービーム」の構成部材に関する成形シミュレーション解析結果にもとづき、従来からの高強度鋼板材料 JSC440W 適用に対して、新たに980MPa 級高強度鋼板材料を使用した順送金型によるプレス成形実験を行い、各成形工程における成形性を検証した(図 3-2-1 参照)。部品形状を創成する基本的部位に関しては、解析結果と同様に成形加工することが確認できた。しかし、パネル搬送(順送)に関わる各工程で成形された部品をつなぐ部位(マッチング部位)に破断が発生した。980MPa 級高強度鋼板適用に対して、量産時の搬送(順送)に関する検討は必要だが、部品形状創成に関しては解析結果と同様に成形加工できると考えられる。

(400MPa 級高強度鋼板材料)



(980MPa 級高強度鋼板材料)

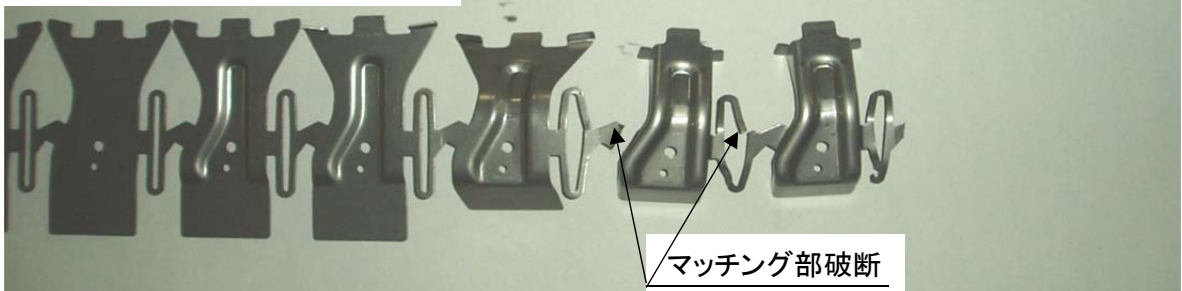


図 3-2-1 高強度鋼板材料によるプレス成形実験結果

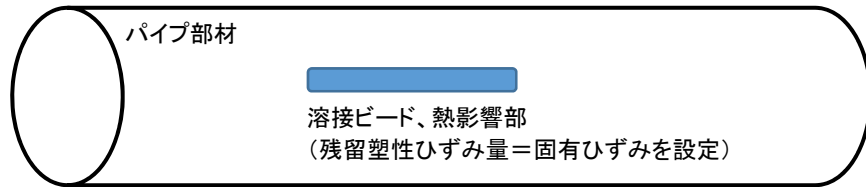
【4. 溶接(熱歪)そり変形不良対策課題への対応】

「ステアリングハンガービーム」等モジュール部品ではプレス成形品同士を組み立てること(アセンブリー)が必要となる。そのため、溶接(アーク溶接等)による部材接合が行われるが、その際に生じる熱により各成形品(構成部品)が変形する。また、モジュール部品全体が複雑な要因で変形するために、部品(CAD)データを使用した幾何学的な組み付け検討(シミュレーション)結果では組立部品を要求寸法精度内に収めることが難しい。実際には各成形品形状を変更することで全体形状を補正しようと金型形状修正及び組立トライアルの繰り返し作業が発生している。本開発では、各構成部品が溶接組立される際に発生する組立部品の変形量を予測する技術を開発する。

【4-1】 熱歪そり変形予測

溶接から冷却に至るまでの熱等の影響により発生する材料各部の弾塑性挙動(材料変形)を予測するために、弾塑性有限要素法プログラムに固有ひずみ法を導入することにより、溶接によるそり変形シミュレーション解析手法を確立した。

本解析手法では、溶接変形の原因とされる溶接部近傍に生じる残留塑性ひずみ量を離散化された解析モデルにおける溶接個所に相当する各要素に設定し、残留塑性ひずみ量(溶接ひずみ量)で生じる不釣り合い量を解くことにより、解析モデル全体の変形形状を算出する(図 4-1-1 参照)。



固有ひずみ法の適用

- 溶接形態毎、材料毎に溶接部の「固有ひずみ」をデータベース化
- 溶接部に固有ひずみから求まる応力を適用し、部材全体を解析
- 通常は弾性解析で、釣り合いが取れるまで収束計算を行う
- 理研保有の有限要素法プログラムをベースに溶接順序による影響が考慮できる

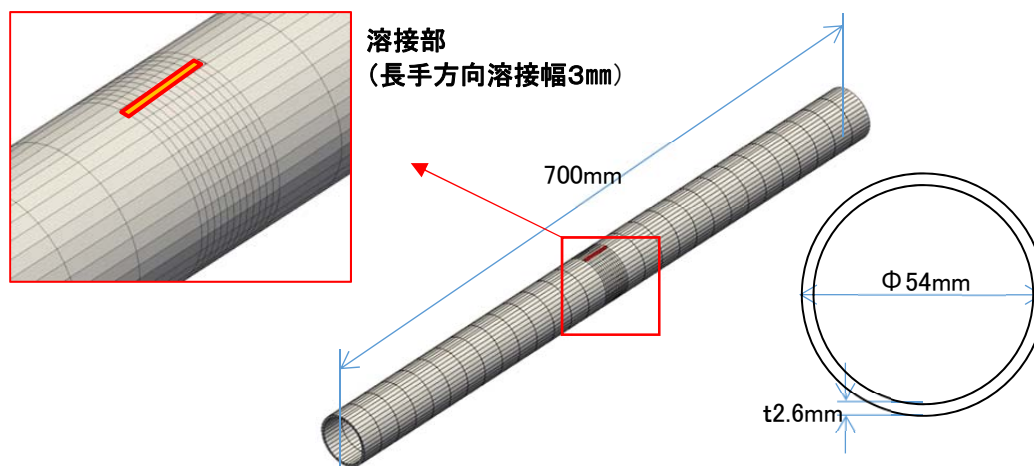
図 4-1-1 固有ひずみ法の適用概略内容

【4-2】実験対解析結果比較検証

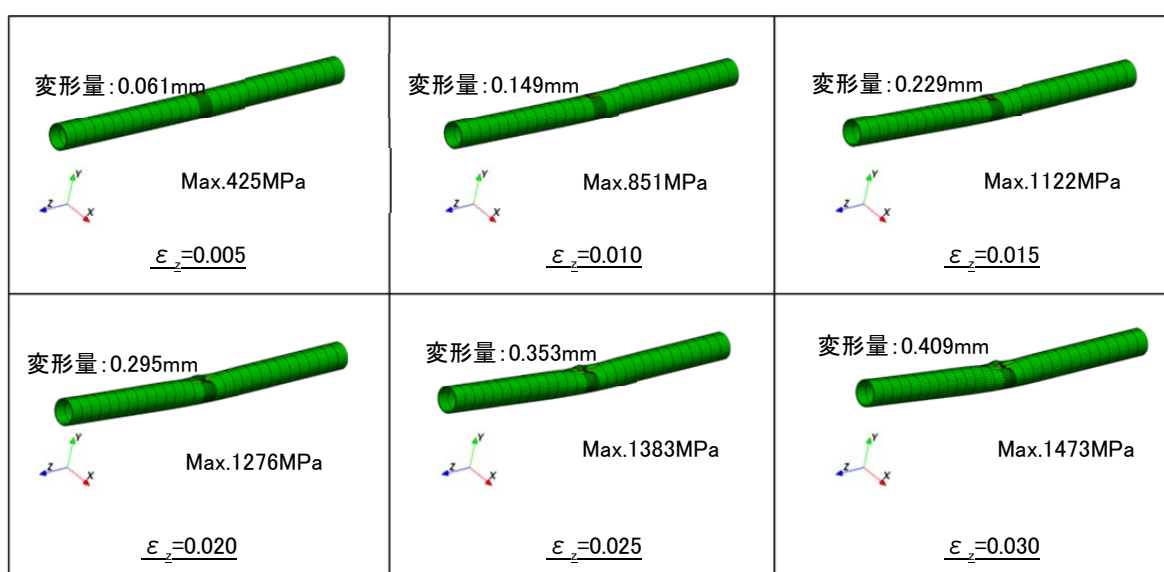
単純な形状部品(パイプ材)を適用した溶接基礎実験により取得される溶接が施された加工品に対して、実際の溶接時の溶接位置・長さをもとに解析モデル内に固有ひずみを設定し、実行されたそり変形シミュレーション解析結果と実験結果を比較することにより、解析精度を検証した。

実際の溶接基礎実験ではパイプ材の円周方向及び長手方向の2条件にて溶接加工を施したことから、溶接によるそり変形解析においても解析モデルに対して実験に則した箇所(長手方向に関して図 4-2-1(a)参照)に固有ひずみを設定した。さらに、円周方向及び長手方向に固有ひずみ値が設定された解析モデルに対して解析実行することにより得られたパイプ変形形状及び応力分布を図 4-2-1(b)に示す。これにより、固有ひずみ値とそれに伴うパイプ材変形量の関係が各溶接方向に対して導き出される(図 4-2-1(c)参照)。また、実際の溶接基礎実験結果より取得される異なる溶接加工に対するパイプ材変形量をもとに、各溶接工法に対応した固有ひずみ量が導出される。図 4-2-1(c)に示すように、アーク溶接に対する固有ひずみ値は 1.76%、ハイブリッド溶接に対する固有ひずみ値は 1.25%、レーザー溶接に対する固有ひずみ値は 0.61%となる。実際に溶接によるそり変形シミュレーション解析を行う際には、適用する溶接加工法に対して導出された固有ひずみ値を溶接個所に定義する。

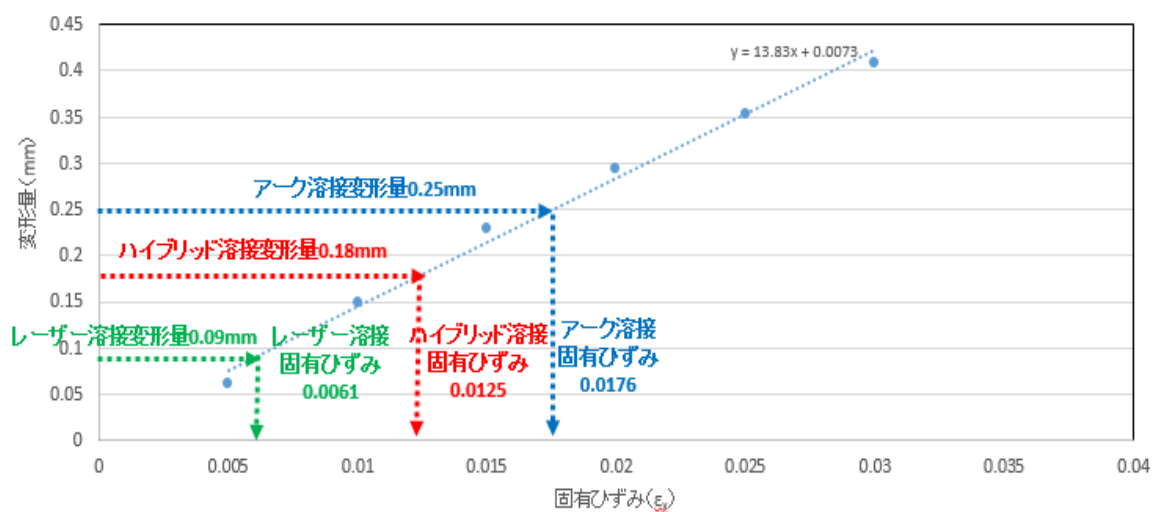
図 4-2-2 は、パイプ材の長手方向溶接長さ 30 mmとする溶接条件に対して、溶接基礎実験結果と同様のそり量をシミュレーション解析結果として得るために必要となる各溶接工法に対応した固有ひずみ値を導出し、長手方向溶接長さ 10 mm及び 20 mmに対してシミュレーション解析を行なうことにより得られたパイプ材端部のそり量と実験結果の比較を示す。各溶接工法によるそり量の違いに対して解析結果が実験結果と同様の傾向を示す等、部品組立時のそり変形量が定量的に予測できる解析精度を有すると考えられる。



(a) 固有ひずみ法の適用箇所(溶接部)



(b) 固有ひずみ値に対する変形量の関係 (変形量は100倍に誇張)



(c) 溶接工法に対する固有ひずみ値の関係

図 4-2-1 固有ひずみ法の適用概略内容

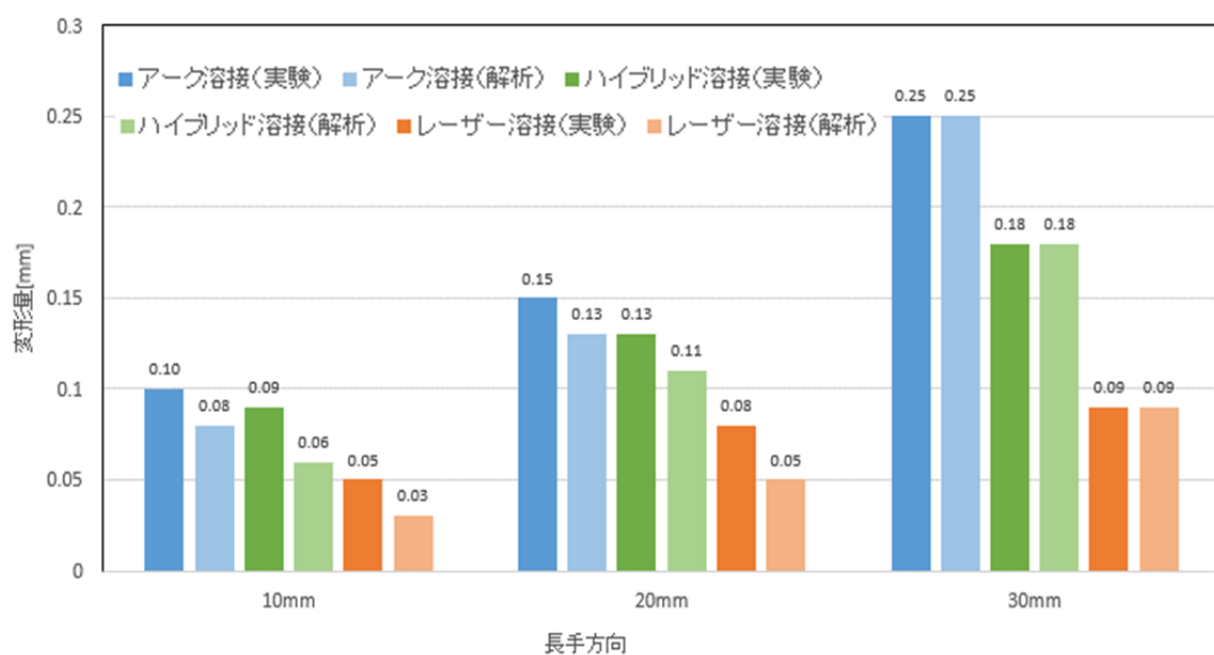


図 4-2-2 各溶接長さに対する変形量予測

第3章 全体総括

3. 1 総括

モジュール部品「ステアリングハンガービーム」は、約 40 種類のプレス成形品と複数のパイプを主にアーク溶接により接合することで組み立てられている。そのため、モジュール部品生産では、単独のプレス加工では問題なくても、後工程となる溶接工程の品質・生産性に問題があると接合する部品すべてに関係する不具合として顕在化する。さらに、部品点数削減に伴う一体化や機能統合等高付加価値化に向けて、部品が大型化する反面、完成品としての更なる寸法精度及び生産性向上が要求されている。しかし、現状では、熟練技術者のKKD(経験・勘・度胸)に頼った従来技術の延長線上で実際のものづくり(試作等)が行なわれており、プレス成形品形状変更のための金型修正と溶接不具合による失敗の繰り返しが頻繁に発生している。

本開発では、モジュール部品「ステアリングハンガービーム」の品質及び生産性向上を図るために、アーク溶接時に発生する熱量を抑えて材料変形(熱歪)及び溶接時のスパッタ発生不具合を大幅に減少させる新たな溶接工法を構築するとともに、アーク熱源とレーザービーム2つの熱源の長所を生かして短所を補い合うことで、高エネルギー密度熱源特有の溶接欠陥及び溶接変形・残留応力を大きく抑制できる高張力鋼板にも対応可能な高効率な溶接工法としてレーザー・アーク複合(ハイブリッド)溶接工法を構築した。

これにより、アーク溶接による接合部品量産時に発生するスパッタ等による仕損率(製作不良による製品廃却割合)の大幅削減を実現させるとともに、ロボットによる自動溶接作業も実現させたレーザー・アーク複合溶接機を実際に製作し、薄鋼板に対応できる高効率な溶接工法として高度化させることにより、機能要件を満足させた「ステアリングハンガービーム」を試作することができた。

また、本開発では、溶接時の熱歪の影響等を固有ひずみとして取り扱い、その固有ひずみにて発生する不釣り合い力を弾塑性有限要素法プログラムにより解くことで熱歪そり変形量を予測できる解析手法として構築した。これにより、新たな溶接接合部品開発における溶接時の変形そり現象が設計段階で事前予測できることで、過去の類似部品の実績と熟練者の勘に頼った試行錯誤や造り直し作業は、大幅に削減されることが期待される。

3. 2 今後に向けて

本開発における研究成果は、新機種開発時の試作レス(トライアル)や量産の工程内手直し率低減および仕損率低減は、直接的に『製造原価低減』に結びつき、大きく利益貢献する事が期待できる。そのため、今後、新車種の量産開始による新旧車種切り替え時に順次、本研究成果の活用方法を具体的に検討する。さらに、自動車メーカー等川下企業に対して積極的にハイブリッド溶接工法による高強度化等技術的な提案を行いながら、量産工程への導入を図っていく。また、エンジンルーム内に設置されている『ストラット・バー』もパイプ、プレス・溶接複合プロセスで構成されている部品であり、本研究成果の活用による効果が期待できることから、導入に向けた具体的検討を行なっていく。