

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「高耐熱耐食合金のプレス成形加工の研究開発」

研究開発成果等報告書

平成25年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 一般社団法人日本金属プレス工業協会

(目 次)

第1章 研究開発の概要	2
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
1-2-1 研究組織（全体）	4
1-2-2 事業管理機関	4
1-2-3 再委託先	5
1-2-4 管理員及び研究員	5
1-2-5 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名	6
1-2-6 高耐熱耐食合金のプレス成形加工委員会 委員(他からの指導・協力者)	7
1-3 成果概要	8
1-4 当該研究開発の連絡窓口	9
第2章 本論	10
2-1 高耐熱耐食合金の材料特性値の測定と材料成形ひずみ及び加工限界の検証	11
2-1-1 高耐熱耐食合金の材料特性値の測定	11
2-1-2 材料成形ひずみ及び加工限界の検証	14
2-2 高精度金型製作技術の研究開発とプレス成形加工技術の研究開発	18
2-2-1 鏡面仕上げ研究による高精度金型加工開発	18
2-2-2 サーボプレス機を利用した加工モーションによる成形加工技術の開発	21
2-3 テンパー処理による成形技術の開発	25
2-4 マイクロファイバレーザ溶接加工技術の開発	27
2-5 環境（高温）検証	31
2-5-1 リラクゼーション試験	31
2-5-2 高温疲労試験による耐久性の検証	32
2-5-3 実用化に向けての環境（高温）検証	34
第3章 総括	36

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

家庭用・業務用燃料電池の普及に向けて、現在、エネファームで普及中の PEFC(固体高分子形燃料電池)タイプの燃料電池から、次世代の燃料電池として、さらに効率の高い SOFC(固体酸化物形燃料電池)タイプの開発が進んでいる。

将来的に、家庭用燃料電池の価格は 40 万円程度が目標（ロードマップ指標）とされている中で、高価な白金触媒の使用を回避するために PEFC から SOFC の開発へと進みつつある。

SOFC の課題として、動作環境の高温(600° ～1,000°)において耐久性・耐食性を有することである。特にインターコネクタ(燃料電池部品)は、ガス燃料を供給するために高精度な溝形状の加工が必要であり、材料面では、耐熱性からセラミック材料が用いられてきたが、近年低コスト化から高耐熱耐食合金である特殊フェライト系ステンレス鋼へと開発が進められている。この合金は、難加工材料であることから高精度の溝形状を加工するためにはエッチング加工が用いられている。

インターコネクタは発電量により左右されるが、SOFC 1 装置あたり数十枚～数百枚が用いられる。そのため、エッチング加工のコストを考えると SOFC の普及には、インターコネクタの生産性の向上によるコスト削減が必要不可欠である。

そこで、本研究開発の目的は、インターコネクタに使用される難加工性材料(特殊フェライト系ステンレス鋼)である高耐熱耐食合金のプレス成形加工を実現するために、プレス加工技術及び高精度金型の研究開発を行い、インターコネクタが要求する形状（板厚、溝のピッチ、溝の長さ・幅）を目標として試作品を製作し要求形状及び要求精度を満たす量産技術を確立することでコスト削減を目指す。

従来は、プレス機械と金型は別個の技術として取り扱われてきたが、インターコネクタのプレス成形加工技術の開発においては、難加工性材料であることから、材料検証により高耐熱耐食合金の材料特性値の測定、成形ひずみ及び加工限界の検証をもとに、高精度金型製作研究開発を行い金型の高精度化を図ると共に、プレス加工では、サーボプレス機の制御機構である加工モーション研究により成形加工技術での実現を目指す。

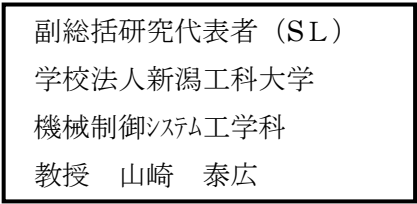
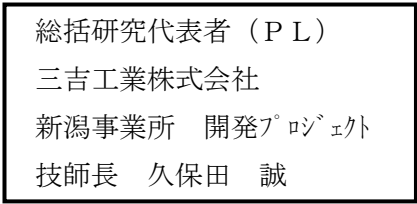
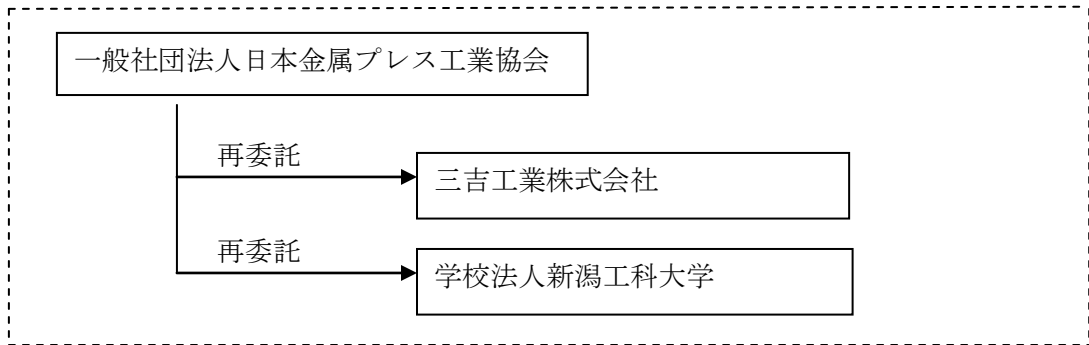
今回の特殊フェライト系ステンレス材のプレス加工においては、常温加工での成形加工技術の開発だけでは実用化が難しい場合があると思われる。そこで、加熱炉を用いてプレス成形途中でのテンパー処理を用いた研究を行い成形性の向上を目指す研究開発も行う。

また、現状のインターコネクタ形状はエッチング加工で行われていることから、裏面には凹凸が無い状態となっている。プレス加工品のインターコネクタの実用化においては、プレス成形で発生する裏面の凹凸を平面形状にする必要がある。そこで、熱変形が少なく微細な薄板溶接が可能なマイクロファイバレーザ溶接を使用して平板との接合を行い、エッチング形状と同一形状化することで、より具体的な形状での提案に向けて研究開発を行う。

さらに、SOFC の環境は高温(600° ～1,000°)であることから、プレス成形品の実用化に向けた高温での耐久性の検証として、リラクゼーション試験、高温疲労試験による耐久性の検証、試作品による高温状態での環境検証を行い、より具体的な提案に向けて実用化を目指す。

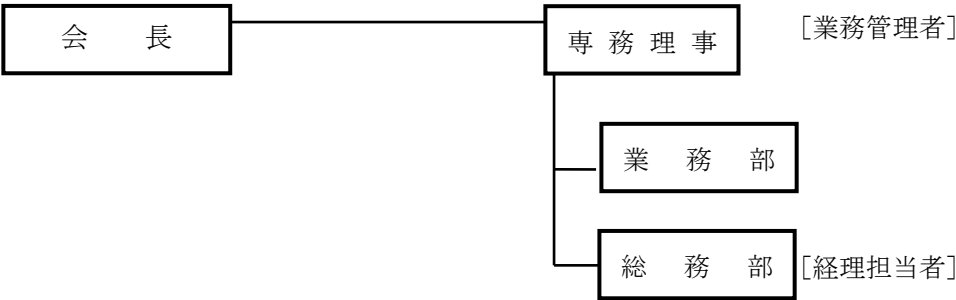
1-2 研究体制

1-2-1 研究組織（全体）



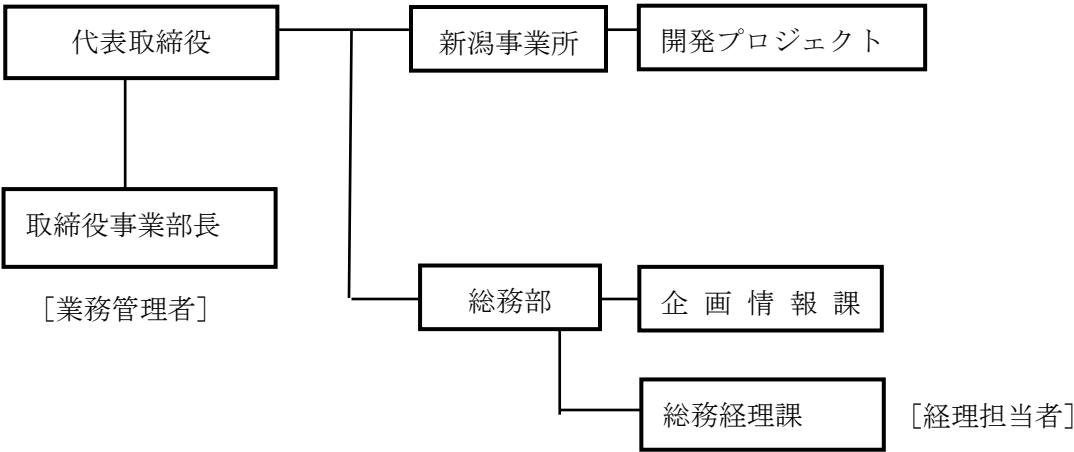
1-2-2 事業管理機関

[一般社団法人日本金属プレス工業協会]

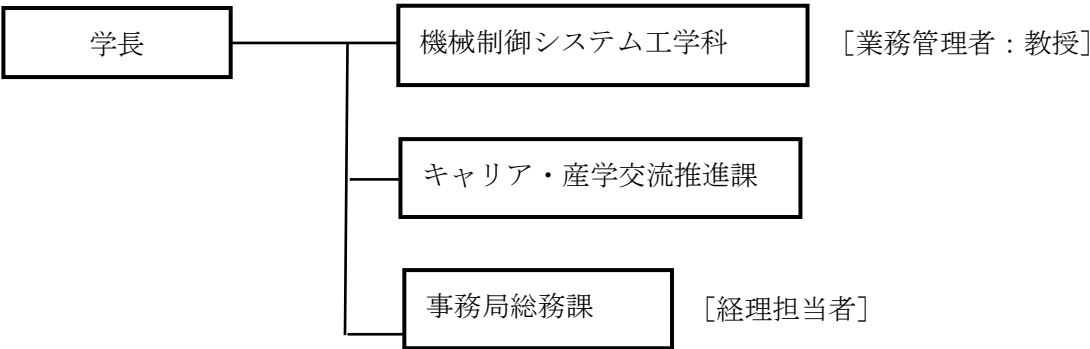


1-2-3 再委託先

[三吉工業株式会社]



[学校法人新潟工科大学]



1-2-4 管理員及び研究員

【事業管理機関】

(管理員)

一般社団法人日本金属プレス工業協会

氏名	所属・役職
濱中 豊	専務理事 (H24. 4. 1～H24. 5. 15)
南澤 正孝	専務理事 (H24. 5. 16～)
中川 朝彦	業務部
小林 範子	業務部

【再委託先】

(研究員)

三吉工業株式会社

氏名	所属・役職
平 雅吉	代表取締役
久保田 誠	新潟事業所 開発プロジェクト 技師長
桜井 正勝	新潟事業所 開発プロジェクト 技師補
三膳 春彦	新潟事業所 開発プロジェクト

学校法人新潟工科大学

氏名	所属・役職
山崎 泰広	機械制御システム工学科 教授

1-2-5 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

一般社団法人日本金属プレス工業協会

(経理担当者)	総務部経理担当	久保田 利江
(業務管理者)	専務理事	濱中 豊 (H24. 4. 1～H24. 5. 15)
	専務理事	南澤 正孝 (H24. 5. 16～)

(再委託先)

三吉工業株式会社

(経理担当者)	総務部 総務経理課	真板 保昌
(業務管理者)	取締役事業部長	米山 和博

学校法人新潟工科大学

(経理担当者)	事務局総務課	主任 植木 正志
(業務管理者)	機械制御システム工学科	教授 山崎 泰広

1-2-6 高耐熱耐食合金のプレス成形加工委員会

事業推進にあたって「高耐熱耐食合金プレス成形加工開発委員会」（平 雅吉 委員長）を組織し、期間中に計４回／年の委員会を開催して事業の進捗を管理した。

なお、本委員会にはプロジェクトメンバー以外にアドバイザーとしてNTT環境エネルギー研究所、日新製鋼(株)が参加したほか、研究開発全般について遠藤 神奈川工科大学名誉教授から指導を受けた。

委員（他からの指導・協力者）

氏名	所属・役職	備考
平 雅吉	三吉工業株式会社 代表取締役	委員長
久保田 誠	三吉工業株式会社新潟事業所 開発プロジェクト 技師長	委 PL
山崎 泰広	学校法人新潟工科大学 機械制御システム工学科 教授	SL
南澤 正孝	一般社団法人日本金属プレス工業協会 専務理事	委
中川 朝彦	一般社団法人日本金属プレス工業協会	委
遠藤 順一	学校法人神奈川工科大学名誉教授	アドバイザー
勇 晋平	日新製鋼株式会社（平成２４年４月～７月）	アドバイザー
兼安 信太郎	日新製鋼株式会社（平成２４年８月～）	アドバイザー
吉田 吉晃	NTT 環境エネルギー研究所	アドバイザー

1-3 成果概要

次世代の燃料電池として SOFC（固体酸化物形燃料電池）の開発が進行中である。SOFC 燃料電池の普及計画は、各社 2015 年を目標としていることから、今後 1～2 年後、大きな需要が見込まれる。

本研究開発は、SOFC 用のインターコネクタのプレス加工技術による実用化を目標とし、SOFC 燃料電池スタックは、インターコネクタを数十枚から数百枚重ねて作られるため実用化されるとコスト削減が可能となることがわかっている。

コスト削減が現実化すると一般家庭への潜在市場規模は大きく、また、環境問題にとっても、温暖化ガス削減の効果は絶大であり、更に原子力発電に変わる新たな電源としても期待できる。

以上の期待される効果から本研究開発の成果目標としては、プレス成形加工によりインターコネクタの実用化に向けて具体的なインターコネクタのモデル形状をもとに溝形状を高精度に成形するプレス加工方法の研究開発及び高精度な成形金型の開発を行った。

研究開発の結果をもとにインターコネクタの要求精度を満たした良好形状で実用性のある成形高さ 0.5mm、平坦度 0.2mm の試作品を製作し実装評価を行った結果、良好な SOFC 装置としての結果が得られた。

また、SOFC はセルをセラミック材料で構成しており、インターコネクタを組み込んだ構造となっている。現状のインターコネクタはエッチング加工で行われていることから裏面には凹が無い状態となっている。プレス加工品のインターコネクタの実用化提案においては、プレス成形ではどうしても発生する裏面の凹を平面形状にする必要がある。そこで、熱変形が少なく微細な薄板溶接が可能なマイクロファイバレーザ溶接装置を開発し、この装置を使用して平板との重ね合せ溶接接合の条件検証研究をもとに、エッチング形状と同一形状の試作品の溶接研究開発を行った。この研究開発により燃料電池としての実装評価を依頼する上でエッチング加工品との相関が図れ、良好な結果が得られている。

さらに、SOFC の環境は高温度 (600° ～1,000℃) であることから、インターコネクタのプレス成形品の実用化に向けた高温度での耐久性の検証として、リラクゼーション試験、高温疲労試験による耐久性の検証、高温状態での環境検証を行い実用化に向けた検証ができたことで実現性への確信が図れた。

これらの研究開発の成果については、第 2 章本論で詳述している通りで多くの重要な研究結果が得られている。

また、これらの成果について、SOFC 燃料電池メーカーから注目され、新聞報道(日本経済新聞平成 24 年 1 月 27 日付)にも取上げられ事業化に向けて大きく期待されている。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

【住 所】東京都港区芝公園 3 丁目 5 番 8 号機械振興会館 2 1 2 号室
【名 称】一般社団法人日本金属プレス工業協会
【代表者】会長 晝田 眞三
【管理者】専務理事 南澤 正孝
【担 当】中川 朝彦 TEL : 03-3433-3730 FAX : 03-3433-7505 E-mail : nakagawa@nikkin.or.jp

第2章 本論

2-1 高耐熱耐食合金の材料特性値の測定と材料成形ひずみ及び加工限界の検証

2-1-1 高耐熱耐食合金の材料特性値の測定

1. 課題及び目標

SOFEC 用インターコネクタ用材料（特殊フェライト系ステンレス材料）のプレス加工技術の開発に向けて材料特性値を測定する。

2. 研究内容

(1) 実験方法

供試材はインターコネクタ用材料として使用されている 3 種類の特種フェライト系ステンレス鋼である。各材料は厚さ 1mm の圧延板として準備した。この供試材から、異方性を考慮し圧延方向に対して引張軸方向が 0° 、 45° 、 90° となる様に、図 2-1-1-1 の形状の試験片を機械加工した。試験片の評点部中央表裏両面にひずみゲージ (GL=2mm) を接着して引張試験に供した。

引張試験は、室温、変位制御下、変位速度 0.005mm/sec で行った。なお、各条件に対し 5 本あるいは 6 本の試験片を実験に供した。また、引張強度、0.2%耐力に対する変位速度の影響を調査した。引張試験は、室温、変位制御下、変位速度 0.05mm/sec、0.25mm/sec、0.5mm/sec で行った。なお、各条件に対し 1 本あるいは 2 本の試験片を実験に供した。

さらに、繰り返し負荷による負荷除荷試験を行った。塑性ひずみが 0.2、0.5、1.0、1.5、2.0% になるよう負荷除荷を行い、繰り返し負荷による応力への影響を調査した。なお、実験条件は上述の引張試験と同様で、各条件に対し 3 本あるいは 4 本の試験片を実験に供した。

ビッカース硬さへの予ひずみの影響を調査した。先ず、実験に先立ち予ひずみを与えていない試験片を用いて各材料の硬さの荷重依存性を評価した。供試材から切り出した切片を熱間埋込のフェノール樹脂にて樹脂込めし、平面研削盤によって試験片表面を研削して平面を出した後、手研磨によって試験片表面を研磨して硬さ試験片とした。マイクロビッカース硬さ試験は荷重 50gf、100gf、200gf、負荷時間 20sec で行った。予ひずみ導入にあたり引張試験と同様の試験片を用い、塑性ひずみが 0.2、0.5、1.0、1.5、2.0% になるよう狙いをつけて上述の引張試験と同様に引張負荷を与えた。負荷後、試験片を樹脂込めおよび研磨を施し、硬さ試験に供した。硬さ試験は後述の結果から、負荷荷重 50gf の条件で行った。

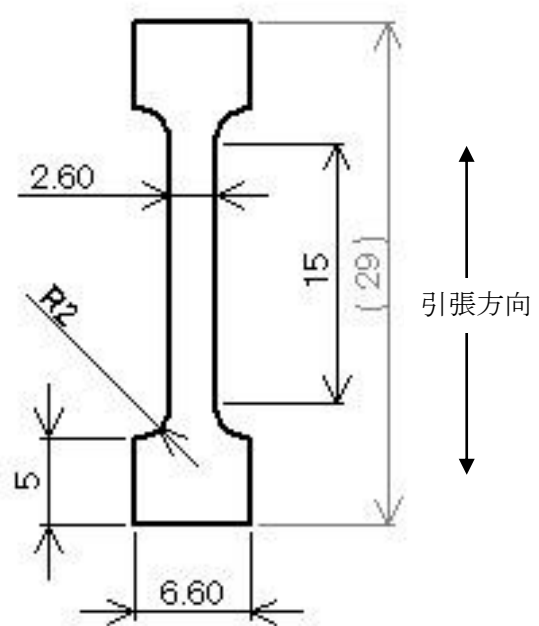


図 2-1-1-1 試験片形状

(2) 実験結果

① ビッカース硬さへの予ひずみの影響

無負荷材（予ひずみを与えている試験片）のマイクロビッカース硬さ試験結果を図 2-1-1-2 に示す。各図の縦軸はビッカース硬さ、横軸は荷重とした。すべての材料に荷重依存性が認められ、負荷荷重が高い条件ほど硬さが低下している。この要因は試験片厚さが 1mm と薄いため、負荷荷重が大きくなると樹脂の影響が顕在化したためと考えられる。そこで樹脂の影響が小さい荷重 50 gf の条件で硬さを評価することとした。硬さへの予ひずみの影響を調査した結果を図 2-1-1-3 に示す。図 2-1-1-3 では縦軸をビッカース硬さ、横軸を塑性ひずみとしている。塑性ひずみにかかわらずビッカース硬さの相違は小さく、硬さへの予ひずみの影響はほぼないと考えられる。

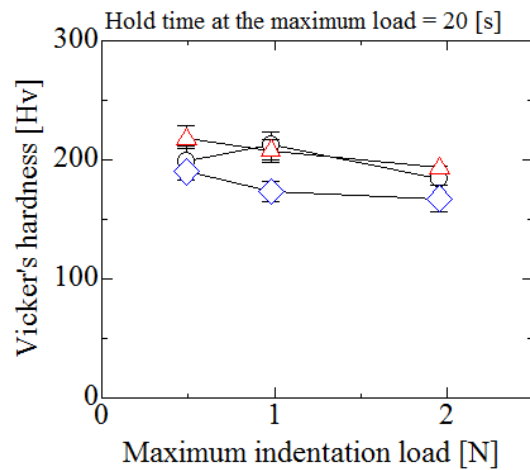


図 2-1-1-2 ビッカース硬さと負荷荷重の関係

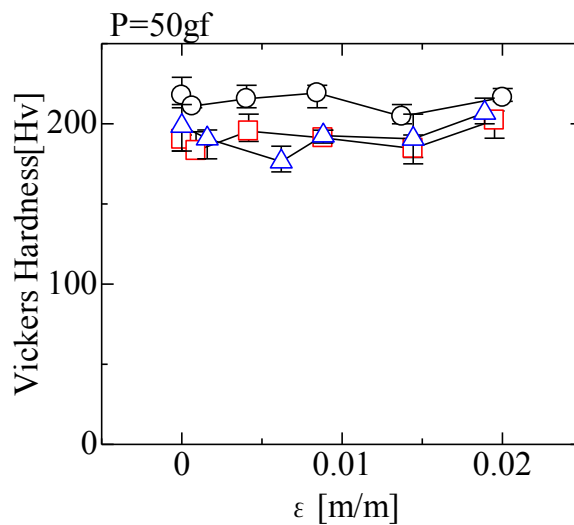


図 2-1-1-3 ビッカース硬さと予ひずみの関係

② 引張試験結果

引張試験によって得られた各試験片の代表的な公称応力－公称ひずみ曲線および真応力－真ひずみ曲線を図 2-1-1-4 に示す。これらの応力－ひずみ曲線から 0.2%耐力、ヤング率、引張強度、破断ひずみおよび加工硬化指数を評価した。

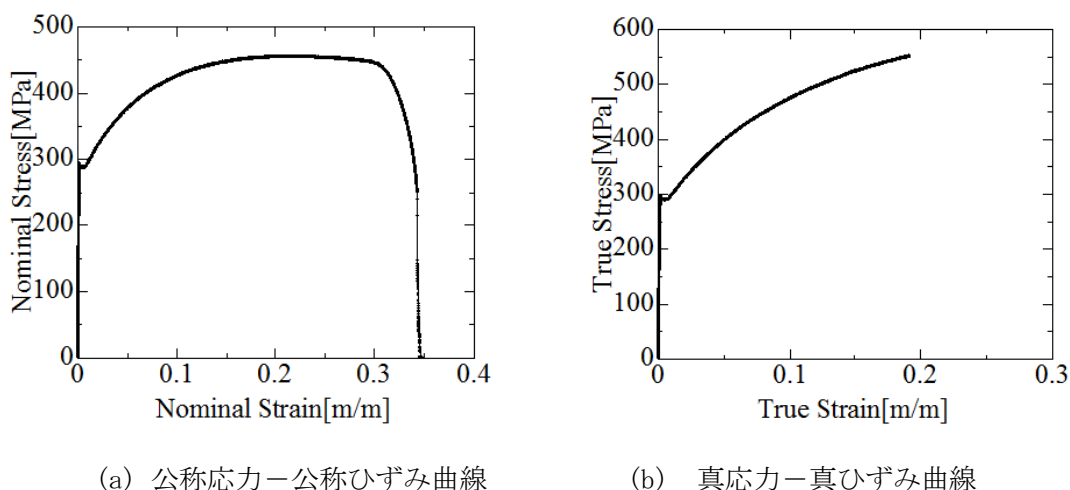


図 2-1-1-4 代表的な応力－ひずみ曲線

③ プレス加工性と機械的特性

これらの 3 鋼種のプレス加工性と各特性値を関連付けた。

各供試材の 0.2%耐力、ヤング率、引張強度、ビッカース硬さは SUS304 の値とほぼ同等でプレス加工性との関係性は認められない。一方、破断ひずみ、加工硬化指数に注目すると、各供試材の特性は SUS304 に比べ低く、プレス加工性との間に相関関係が認められる。この結果は破断ひずみ、加工硬化指数を向上させることによりプレス加工性の向上が期待できることを意味している。

得られた結果を以下に示す。

- 1) 各特性値とプレス加工性との関係性を調査した。3 鋼種の 0.2%耐力、引張強度、ビッカース硬さ、ヤング率は比較として用意した SUS304 の値とほぼ同等で関係性は見られなかった。
- 2) 3 鋼種の破断ひずみ、加工硬化指数をプレス加工性と比較すると、いずれも SUS304 に比べ低い値を取り、破断ひずみと加工硬化指数が高くなることによりプレス加工性が改善するものと考えられる。
- 3) 3 鋼種の引張強度、0.2%耐力に対する変位速度の影響を調査した結果、変位速度を増加させると 0.2%耐力、引張強度は増加した。従って、変形速度はプレス加工性に影響を及ぼすことが予想される。
- 4) マイクロビッカース硬さ試験にて硬さへの予ひずみの影響は認められず、硬さへの予ひずみの影響はほぼないと考えられる。

2-1-2 材料成形ひずみ及び加工限界の検証

1. 課題及び目標

特殊フェライト系ステンレス材料を、検証用の成形型によりプレス加工を行い、材料のひずみと加工限界を測定して材料特性値との相関を検証する。

2. 研究内容

(1) 加工実験条件

材料のひずみと加工限界を測定するために、以下①～⑤の条件により加工実験を行った。

①成形形状

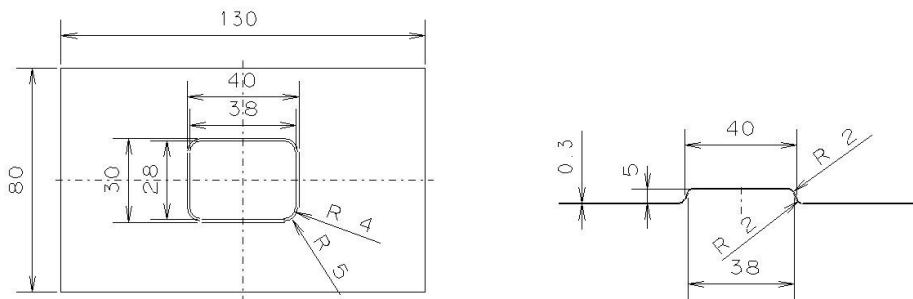


図 2-1-2-1 成形形状

②検証用材料

材質：インターコネクタ用材料として使用されている 3 種類の特殊フェライト系ステンレス鋼と比較用として SUS304 を使用した。

板厚：t 0.3mm

③使用プレス機

使用プレス：3000kN ダイレクトサーボフォーマ（アイダ製）

（仕様）

型式：NS1-3000(D)

形式：マルチモーション 1 点プレス

加圧能力：3 0 0 0 kN

能力発生位置：6 mm

ストローク長さ：3 0 0 mm

無負荷連続ストローク数：～ 3 0 spm

ダイハイト：4 5 0 mm

スライド調整量：1 2 0 mm

メインモータ：サーボモータ（アイダ製）連続定格出力 5 0 kW



写真 2-1-2-2 プレス機

④プレス加工モーショ

プレス加工モーショは、ダイレクトサーボフォーマにより、クランク、低周波振動モーションでの加工実験を行った。

クランク : C (クランク機構のモーション)

低周波振動 : DR (下死点から5ミリの高さで0.5mmを繰り返した低周波振動モーション)

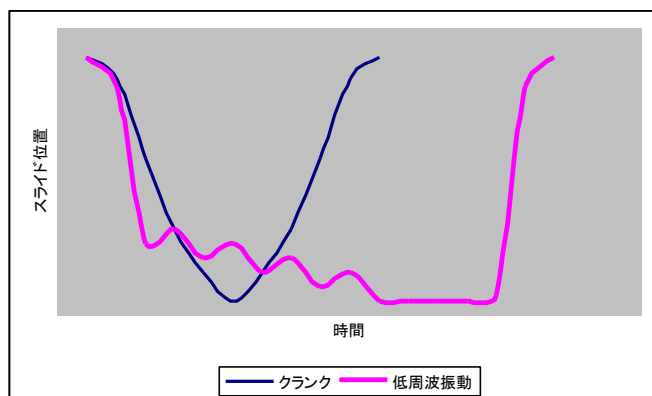


図 2-1-2-3 プレス加工モーショ

⑤成型

検証用の成形金型を写真 2-1-2-4 に示す。

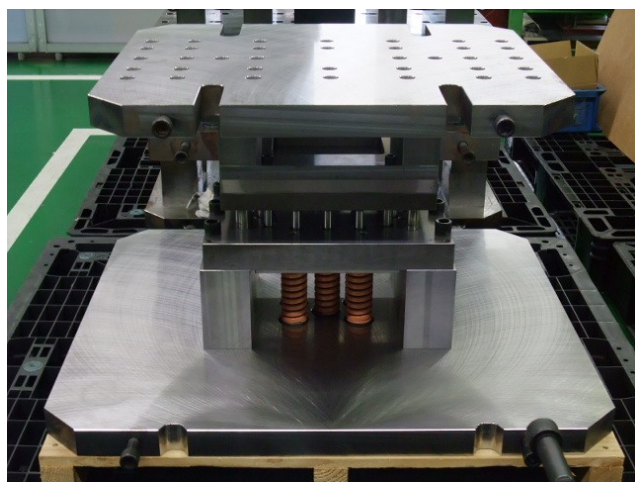


写真 2-1-2-4 成型型

(2) 加工実験結果

①限界絞り高さ

加工実験条件で割れが発生した材質・モーショングとの限界絞り高さを表 2-1-2-5 に示す。
限界絞り加工サンプルを写真 2-1-2-6 に示す。

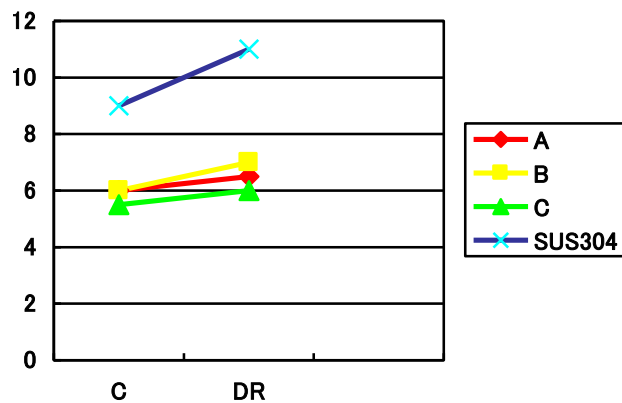


表 2-1-2-5 限界絞り高さ



写真 2-1-2-6 限界絞り加工サンプル

②材料のひずみ

全体面のひずみを考慮して、写真 2-1-2-7 に示す、ビード無し、2 本ビード、全周ビードの加工実験を行った。限界絞り高さはビード無しより低くなり、材質に差は無く限界絞り高さは 4mm であった。

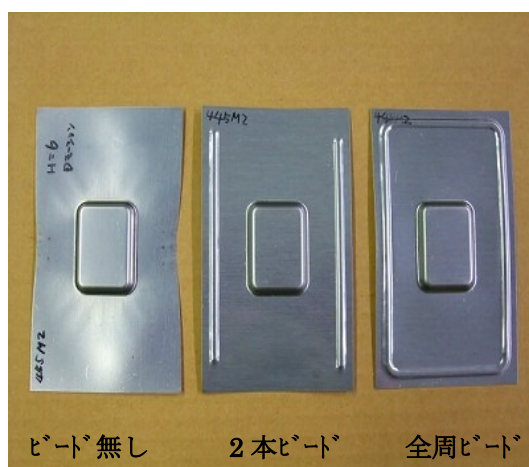


写真 2-1-2-7 材料のひずみ加工実験

ひずみの傾向は写真 2-1-2-8 に示すように、ビード無だと引かれの大きい長辺が反り上がっており、全体にねじれがあるが、2 本ビードだと引かれの変形は抑えられるが、短辺の反り上がりが大きく長辺は小さな上ソリとなっている。全周ビードは短辺のソリが抑えられ、長辺の上ソリが残り、全体は上向きの弓反りソリになっている。

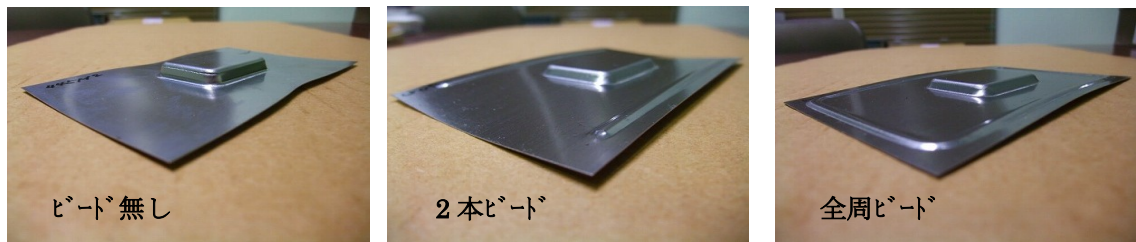


写真 2-1-2-8 ひずみの傾向

3. 成果・まとめ

3 種類の特種フェライト系ステンレス材料の加工実験により、成形絞りの加工限界と材料のひずみの検証を行いプレス成形加工の可能性を確信した。

絞り加工限界においては、比較用として加工実験した SUS304 材の 60%であることから、改めて難成形加工材料であることの認識を受けた。

2-2 高精度金型製作技術の研究開発とプレス成形加工技術の研究開発

2-2-1 鏡面仕上げ研究による高精度金型加工開発

1. 課題及び目標

プレス成形加工の実現に向けて、インターコネクタ試作品の高精度金型開発を行う上で、成形パンチのR形状部の仕上げ加工が最も重要なことから仕上げ加工の研究開発を行った。

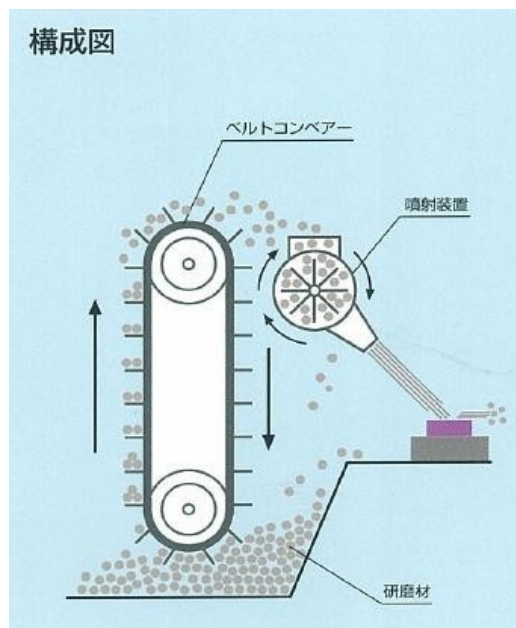
2. 研究内容

(1)鏡面研磨機による仕上げ加工研究

鏡面研磨機は写真 2-2-1-1 に示す鏡面仕上げ磨きが可能なメディアを使用できる装置で吐出量調整は最大 20L/min でノズルを自由に動かせる装置である。この装置を使用してジグボア加工及び研削加工後の加工面に鏡面仕上げ加工研究を行った。



鏡面研磨機本体



構成図

写真 2-2-1-1 鏡面研磨機

(2) 鏡面研磨機による仕上げ加工研究結果

鏡面仕上げ加工研究により、今回の開発に最も適したメディアの選定をコア径（0.3mm）、砥粒径（1.0 μ ）を選択し加工研究を行った。

結果として、高速ジグボーラ加工後の鏡面仕上げ加工の状態を写真 2-2-1-2 に示す。

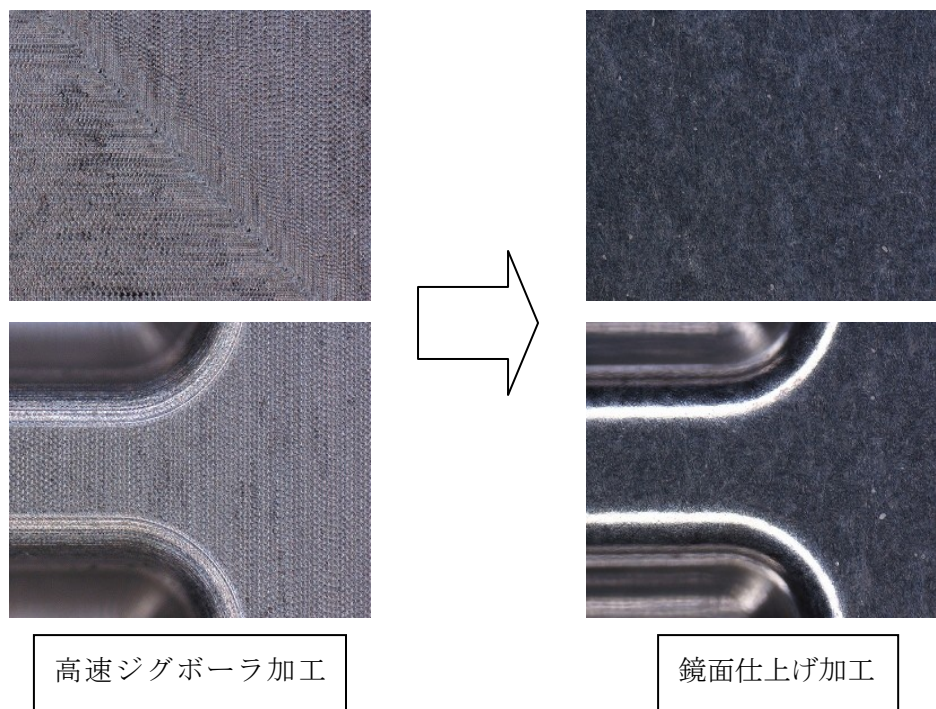


写真 2-2-1-2 高速ジグボーラ加工後の鏡面仕上げ加工の状態

研削加工(#100)後の鏡面仕上げ加工の状態を写真 2-2-1-3 に示す。

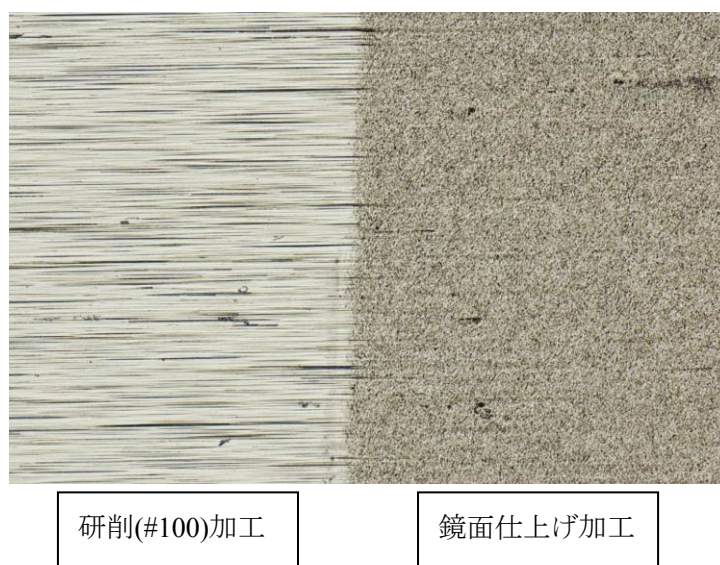


写真 2-2-1-3 研削加工(#100)後の鏡面仕上げ加工の状態

これらの仕上げ加工研究をもとに高精度金型技術の最終目標であるインターコネクタのモデル形状試作金型を製作した。

鏡面仕上げ加工により製作した高精度金型を写真 2-2-1-4 に示す。

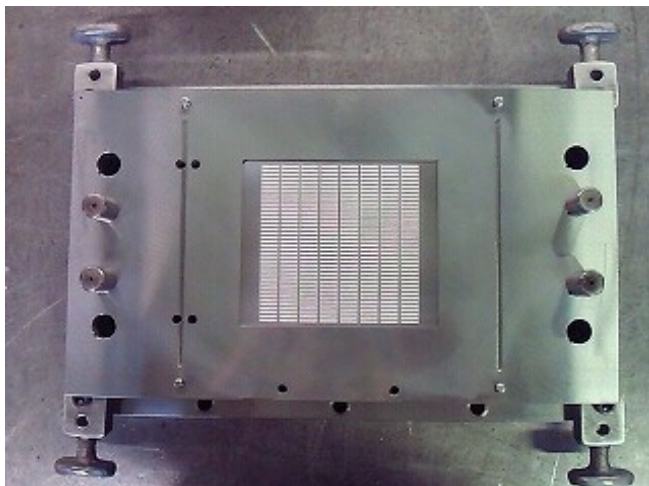


写真 2-2-1-4 鏡面仕上げ加工を用いたモデル形状の高精度金型

3.成果・まとめ

プレス成形加工用金型の部品で、最も重要な金型部品である成形パンチの仕上げ加工について、鏡面仕上げによる加工研究で写真 2-2-1-2、写真 2-2-1-3 の結果からジグボーラのカッターパス、また、研削による研削目が改善されており難加工性材料のプレス成形加工における摩擦の軽減において大きな効果があると判断できる。

2-2-2 サーボプレス機を利用した加工モーションによる成形加工技術の開発

1. 課題及び目標

プレス成形加工の実現に向けて、2-1-2 加工検証の成形型のパンチ、ダイ R 部を高精度金型製作技術の研究開発をもとに鏡面仕上げ加工を行い、サーボプレス機を利用した加工スピードでの変化及びサーボプレス機を利用した低周波振動モーションで最適なプレス加工モーションによるプレス成形加工技術の研究開発を行った。

2. 研究内容

(1) クランクモーション 30spm（加工スピード 100%）の成形加工実験

加工検証実験では、成形高さ 6 mm が加工限界（割れ発生高さ）であったが、今回の実験においては 7 mm と向上が見られた。要因として、鏡面仕上げの効果が考えられる。

実験結果を写真 2-2-2-1 に示す。

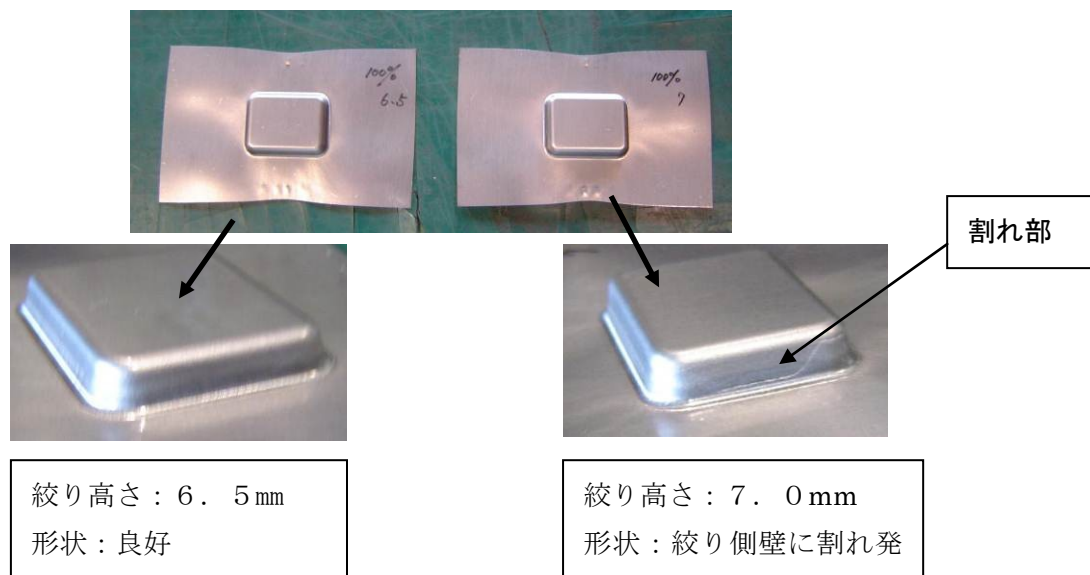


写真 2-2-2-1 クランクモーション 30spm 成形加工実験

(2) サーボプレス機を利用した加工スピード変化での加工実験

加工モーションを下死点上 15mm からスピードを変更するプログラムを作成し、100%（spm30）、75%（spm22.5）、50%（spm15）、25%（spm7.5）、5%（spm1.5）の5段階での加工スピード変化での加工実験を行った。

鏡面仕上げによる加工実験での限界絞り高さ 7 mm の条件で、加工スピード 100% から 5% と加工スピードが遅くなるにつれて割れが少なくなる傾向が見られたものの完全に割れがなくなるまでには至らなかった。

実験結果を写真 2-2-2-2 に示す。

また、比較として SUS304 材料を使用して同じ条件での実験加工を行った。SUS304 材料は、限界絞り高さ 9mm をもとに、加工スピードの変化による実験を行い、100%での割れは 50%で良好形状となり加工スピードでの効果が見られた。

実験結果を写真 2-2-2-3 に示す。

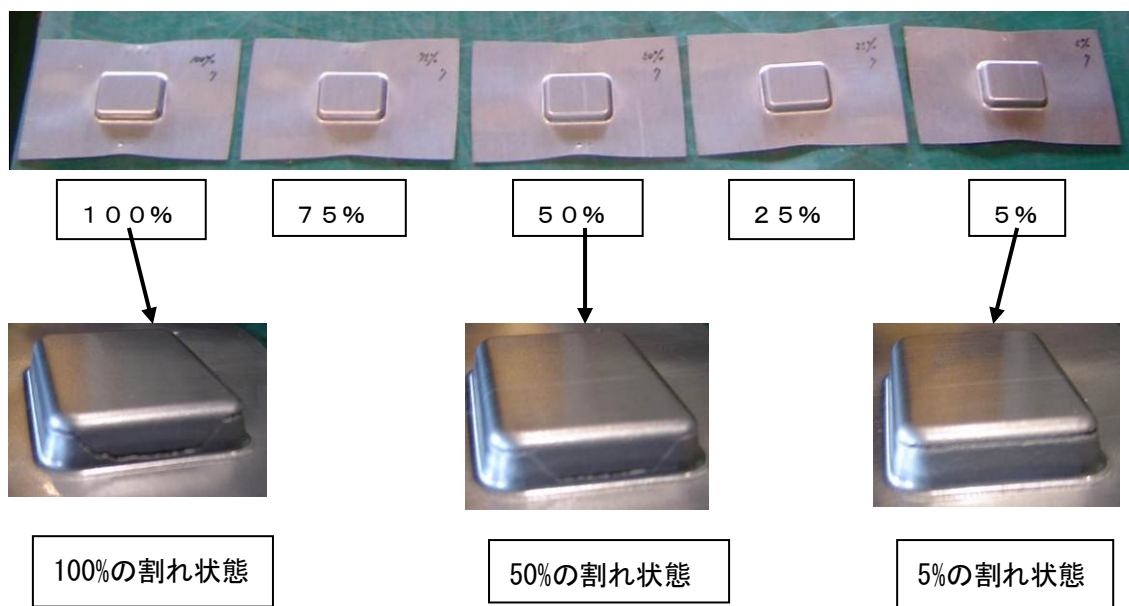


写真 2-2-2-2 加工スピード変化での加工実験結果

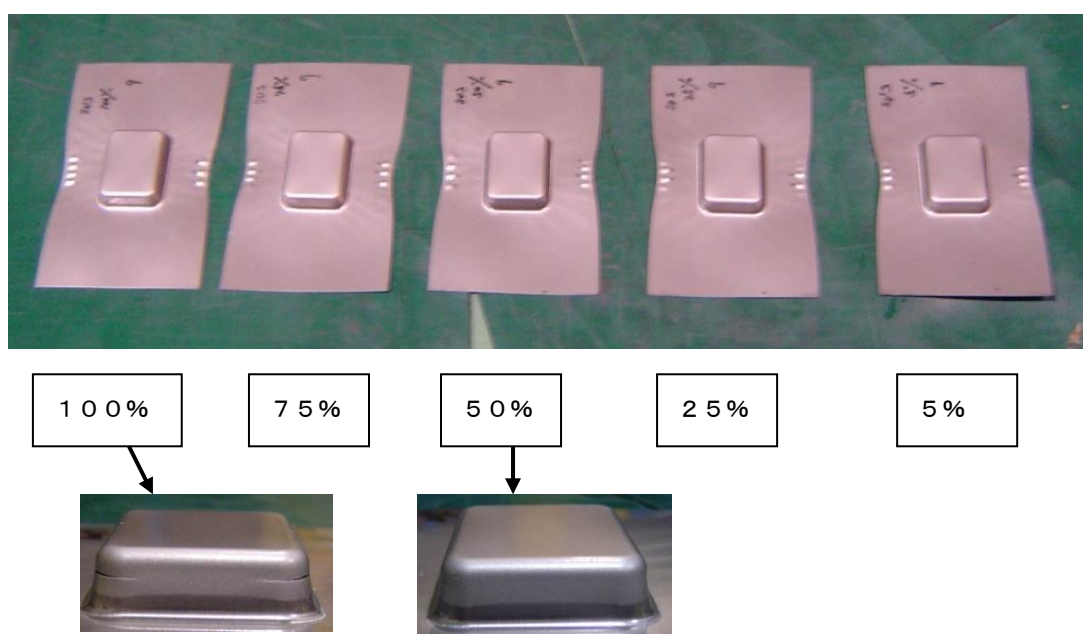


写真 2-2-2-3 加工スピード変化での加工実験結果(SUS304 材料)

(3)サーボプレス機を利用した低周波振動モーションでの加工実験

限界絞り高さ 7mm で、加工スピードの効果があると思われる 5% (spm1.5) の条件で低周波振動モーションを付加した。

各条件として

Aー下死点上 3.5mm の 1 回の振動モーション

Bー下死点上 4mm、2mm の 2 回の振動モーション

Cー下死点上 7mm から 1mm ずつの振動モーション

Dー下死点上 7mm から 0.5mm ずつの振動モーション

を付加しての加工実験を行った。

材料の特性から伸びが少なく、サーボプレス機のモーションによる効果は想定した以上にあまり期待できないことが解明できた。

実験結果を写真 2-2-2-4 に示す。

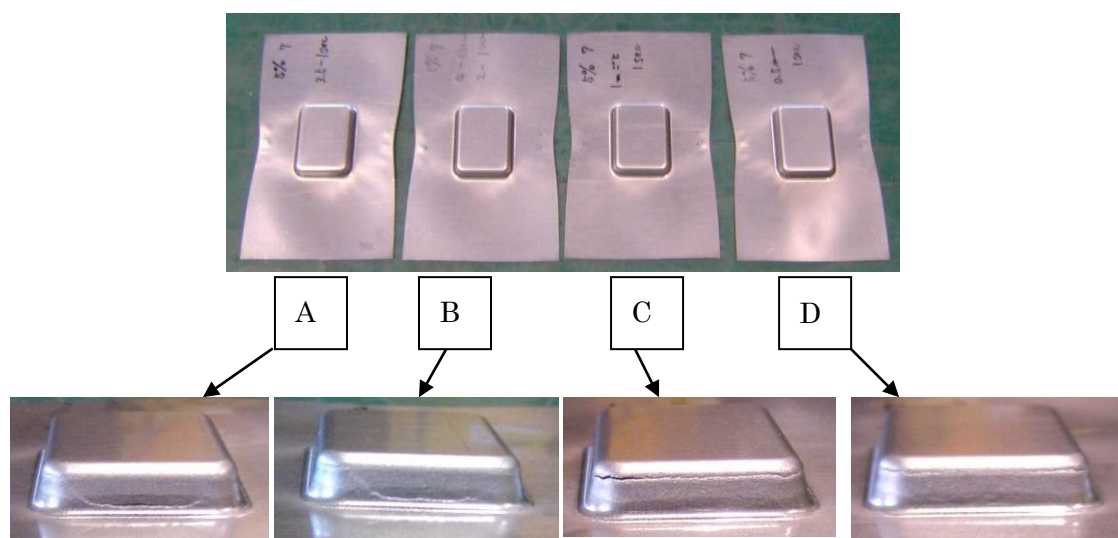


写真 2-2-2-4 低周波振動モーションでの加工実験結果

(4) モデル形状の高精度金型での加工実験

(3)サーボプレス機を利用した低周波振動モーションでの加工実験をもとに最適加工条件により加工実験を行った。

インターコネクタのモデル形状試作金型では絞り高さ 0.8mm までは割れの発生は無く、絞り高さ 0.9mmで割れが発生した。

全体の反り形状は絞り高さにより変化量が大きくなっている。

実験結果を写真 2-2-2-5 に示す。

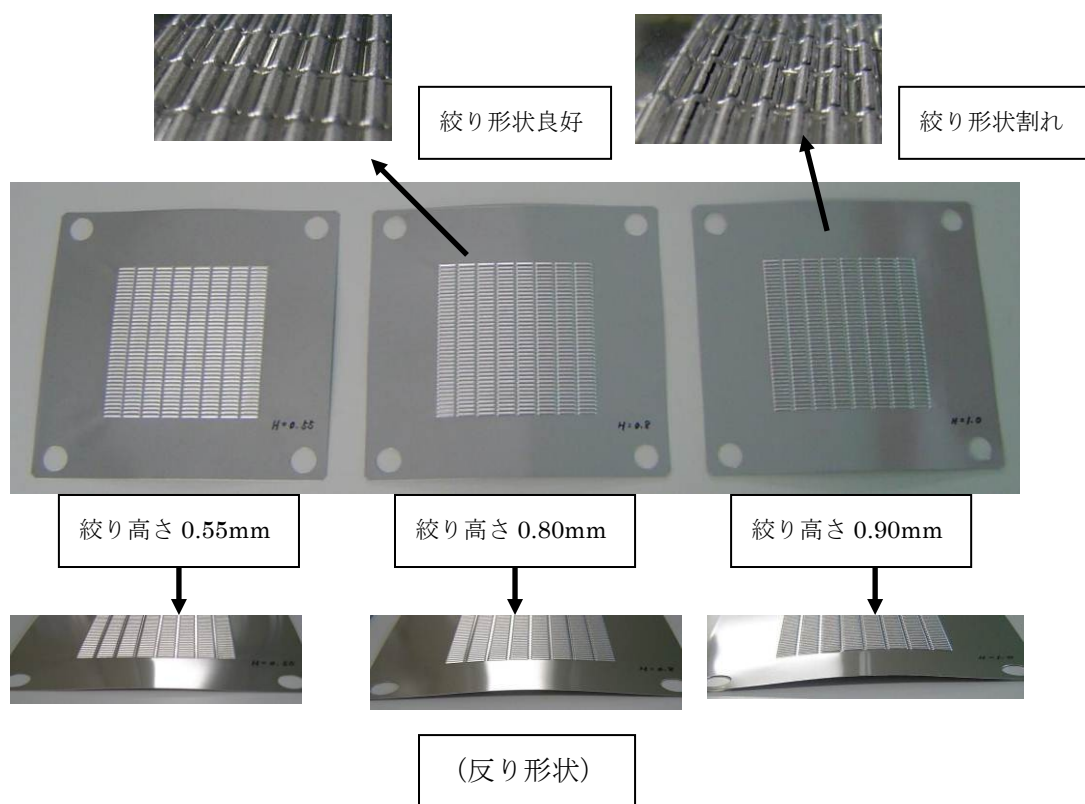


写真 2-2-2-5 モデル形状の高精度金型での加工実験結果

3.成果・まとめ

加工実験により求めた最適加工条件の成形高さは0.8mmであった。また、平坦度については、成形高さが高くなるにつれて平坦度が悪化しフランジ部の平面矯正加工を行っても写真 2-2-2-5 に示すように平坦度の改善が見られなかった。

この結果をもとに、SOFC のプレス成形加工品での実用性を考慮した場合、モデル形状の試作品の実現性から平坦度 0.2mm 及び全体の成形高さのバラツキ等を考慮すると成形高さは 0.5mm が良好であると判断した。

2-3 テンパー処理による成形技術の開発

1. 課題及び目標

本研究材料の特殊フェライト系ステンレス材のプレス加工においては、常温加工での成形加工技術の開発だけでは実用化が難しい場合があると思われる。そこで、プレス成形形状をより良好に保つために、プレス成形途中でテンパー処理を行い、成形性の向上を図る研究開発を行った。

2. 研究内容

(1)使用設備

炉内の温度分布を安定させるために、壁 6 面にヒーターを装備した特殊過熱炉を使用した。特殊加熱炉を写真 2-3-1 に示す。



温度使用範囲：～950℃

写真 2-3-1 特殊加熱炉

(2)加工実験条件

3 種類の特種フェライト系ステンレス材料について加工実験は下記の条件で行った。また、テンパー処理温度については材料メーカーよりの情報を参考とした。

(加工条件)

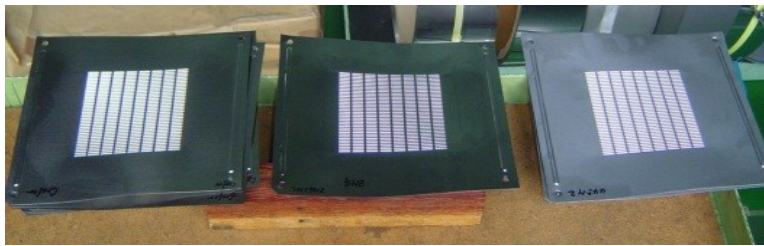
第 1 プレス成形加工（成形高さ 0.5mm）⇒テンパー処理（850℃）⇒第 2 プレス加工

(3)加工実験結果

テンパー処理加工後の第2プレス成形加工においては、写真2-3-2に示すように3種類の特殊フェライト系ステンレス材料に差はなく成形高さ0.95mmまでプレス成形が可能となった。

また、プレス成形加工後の平坦度についても加熱温度800℃でテンパー処理することで平面修正が図れた。

平面修正の状態を写真2-3-3に示す。



第1プレス成形加工
成形高さ：0.5mm



テンパー処理加工
温度：850℃
保持時間：1時間



第2プレス成形加工
成形高さ：0.95mm

材質：A

材質：B

材質：C

写真 2-3-2 加工実験結果

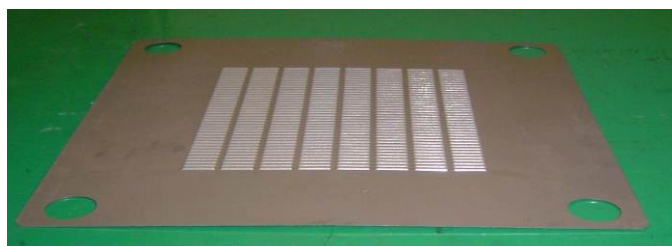


写真 2-3-3 加熱による平面修正状態

3.成果・まとめ

テンパー処理による成形技術の研究開発の結果は、効果はあると判断できるが量産性を考慮すると多くの課題がある。

また、2-2 高精度金型製作技術の研究開発及びプレス成形加工技術の研究開発の結果から常温での加工を優先することとして、今後の動向において実用性の中で成形高さの要望が発生した場合、再度検討することとする。

2-4 マイクロファイバレーザ溶接加工技術の開発

1. 課題及び目標

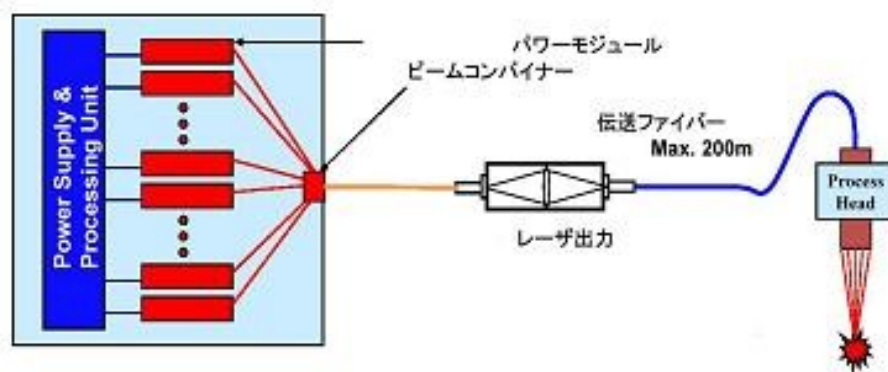
現状のインターコネクタは、エッチング加工で行われていることから裏面には凹が無い状態となっている。プレス加工品のインターコネクタの実用化においては、プレス成形で発生する裏面の凹を平面形状にする必要がある。そこで、熱変形が少なく微細な薄板溶接が可能なマイクロファイバレーザ溶接を使用して平板との重ね合せ溶接接合を行い、エッチング形状と同一形状とする溶接加工開発を行った。

2. 研究内容

(1)使用設備

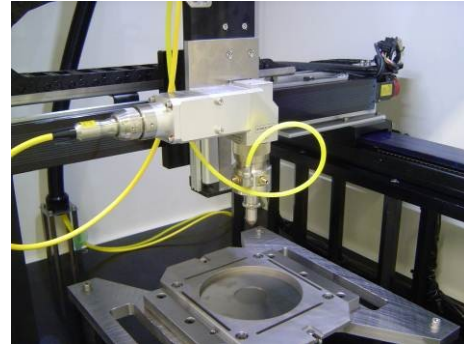
ドイツ製の高精度なマイクロファイバレーザシステム（図 2-4-1）を組み込んだ独自の溶接装置を開発した。

溶接装置を写真 2-4-2 に示す。



(ドイツ製)

図 2-4-1 マイクロファイバレーザシステム



溶接装置内部写真

写真 2-4-2 溶接装置

(2)溶接加工条件の検証

マイクロファイバーレーザー溶接機の加工条件は独自の開発設備であることから、加工条件のデータベース化が必要と判断し、加工条件の検証を行った。

①試験片の採取方法及び観察方法

図 2-4-3 に示すように材厚 $t0.3\text{mm}$ を重ね合せ溶接にてレーザー出力、加工速度を変化させて試験片を製作し溶接部をワイヤーカット機で切り出し、樹脂で固め、溶接断面を磨き、写真 2-4-4 に示すように溶接部を観察し溶接幅を測定した。

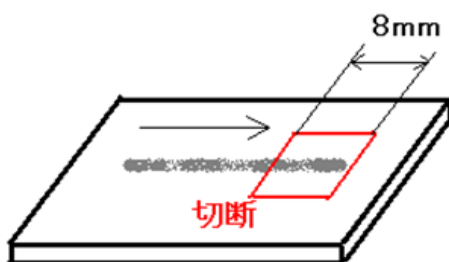


図 2-4-3 試験片の採取方法

溶接幅

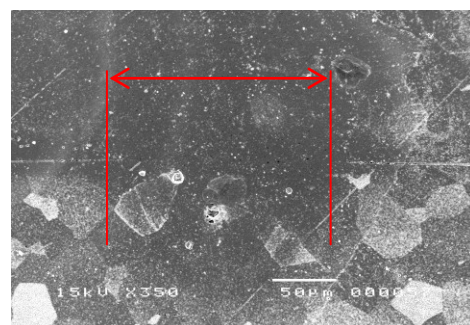


写真 2-4-4 溶接部の観察状態

②溶接条件による検証

断面観察結果からマイクロファイバーレーザー溶接で溶接した薄板の溶接状態を定量的に評価しデータベース化した。溶接条件の検証結果を図 2-4-5 に示す。また、溶接部近傍の EBSD 分析結果を図 2-4-6 に示す。

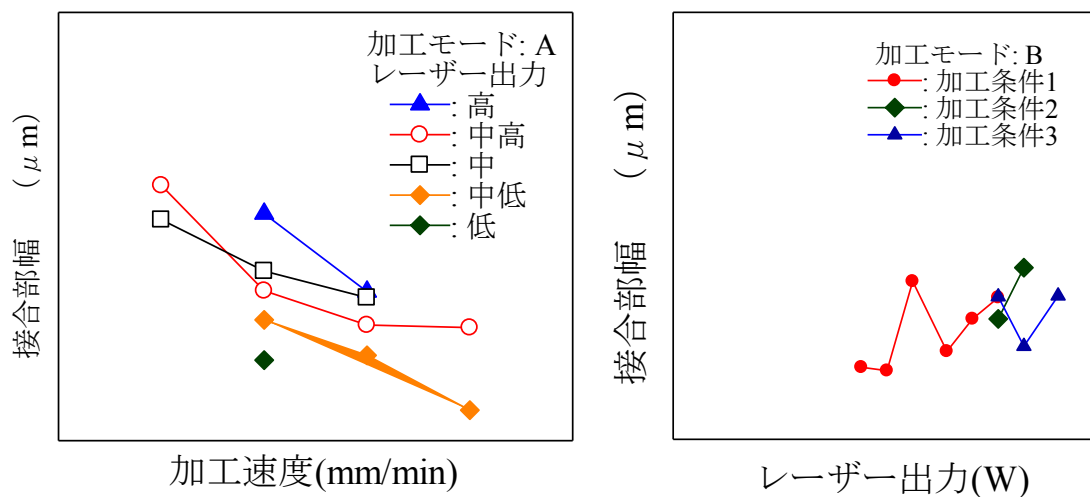


図 2-4-5 溶接条件の検証結果

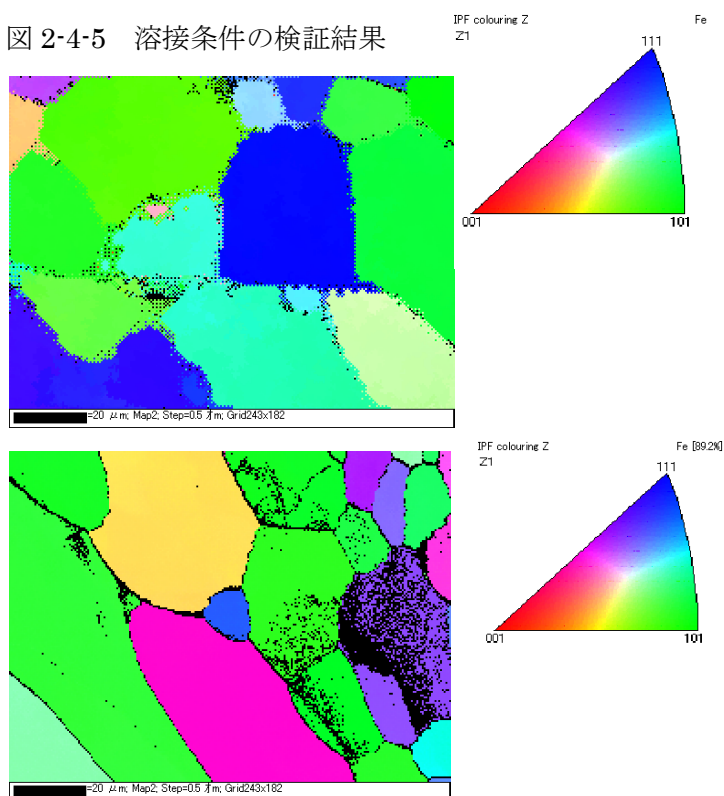


図 2-4-6 溶接部近傍の EBSD 分析結果

(3)モデル形状での溶接加工研究

溶接条件による検証をもとに、モデル形状でのマイクロファイバレーザ溶接加工技術の研究を行った。

モデル形状の溶接状態を写真 2-4-7 に示す。

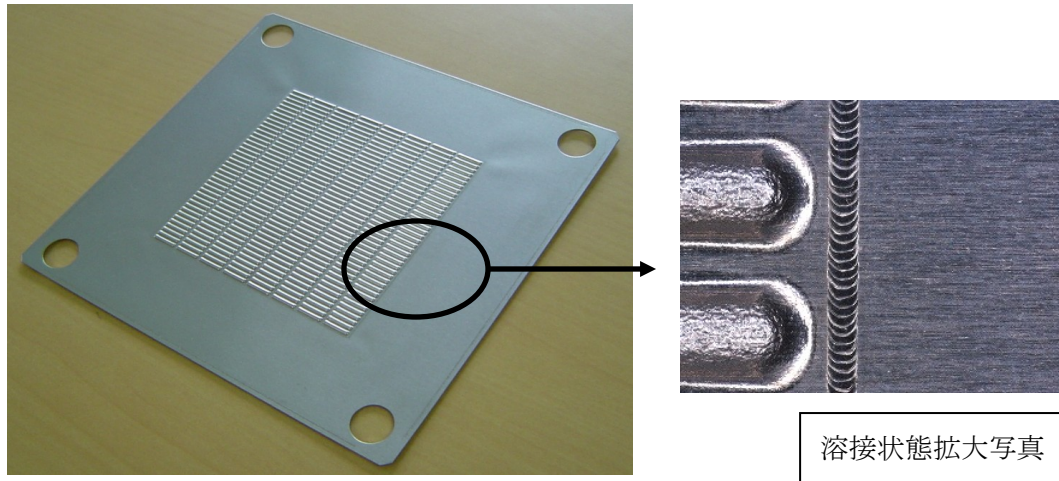


写真 2-4-7 モデル形状の溶接状態

3. 成果・まとめ

マイクロファイバレーザ溶接加工技術の開発により、具体的な使用レベルでのインターコネクタの提案が可能になった。

溶接加工研究においては、製品の平坦度が大きく影響することから、プレス成形加工における反りの影響が大きく左右される。

2-5 環境（高温）検証

2-5-1 リラクゼーション試験

1. 課題及び目標

SOFC 用インターコネクタの動作環境は高温（600℃～1,000℃）であり、実用化に向けては、この環境での耐久性の検証が必要である。一般に、塑性加工により導入された残留応力は高温環境下でリラクゼーションにより解放され、それに伴い形状が変形することが危惧される。そのため、リラクゼーション挙動を検証した。

2. 研究内容

(1) 使用試験機（薄板用リラクゼーション試験装置）

SOFC 用インターコネクタの動作環境である高温（600℃～1,000℃）でのリラクゼーション試験を実施するため、薄板用リラクゼーション試験装置を開発した（写真 2-5-1-1）。開発装置により薄板のリラクゼーション試験が可能であることを検証し、開発装置によりリラクゼーション試験を実施した。

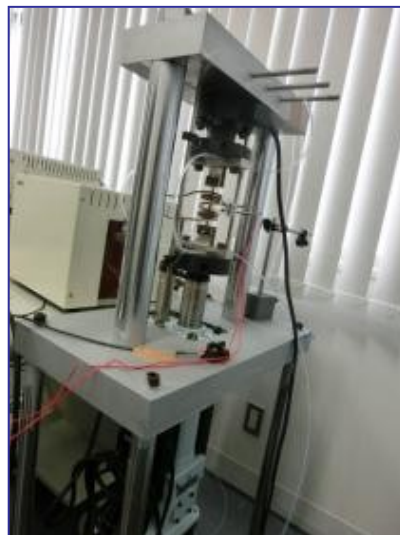
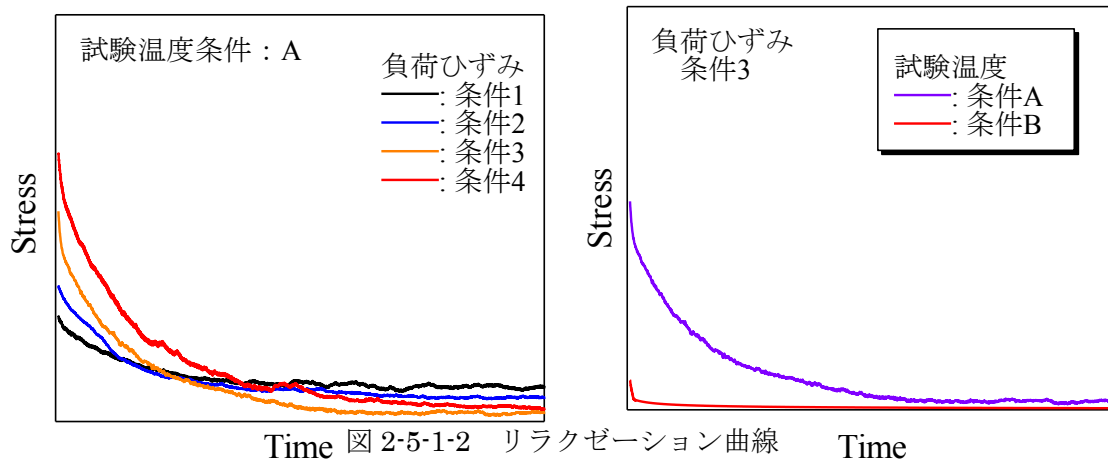


写真 2-5-1-1 薄板用リラクゼーション試験装置

(2) リラクゼーション試験結果

リラクゼーション試験の結果を 2-5-1-2 のように、リラクゼーション曲線を取得した。



3. 成果・まとめ

結果として、800℃以上における対象材料の変形抵抗は極めて小さく、試験後直ちに応力が完全に緩和されることを明らかとなった。

また、600℃におけるリラクゼーション特性を取得した。

2-5-2 高温疲労試験による耐久性の検証

1. 課題及び目標

動作環境では、熱応力や流体抵抗による力学的負荷が作用し、それによる破損が危惧される。そこで、高温環境下で力学的負荷を付与する高温疲労試験を実施し、耐久性の検証を行った。

2. 研究内容

(1) 使用試験機(薄板用試験機制御装置)

薄板の高温疲労試験を実施するため薄板用試験機制御装置を開発し(写真 2-5-2-1)、現有の疲労試験機に取り付けた。開発装置により、薄板の高温疲労試験が実施可能であることを検証し、開発装置により高温疲労試験を実施した。



写真2-5-2-1 薄板用試験機制御装置

(2) 高温疲労試験結果 800℃以上の疲労試験も予定していたが、リラクゼーション試験から800℃以上の変形抵抗が極めて小さかったことから、800℃以上の条件下の高温疲労試験は必要が無いと判断し、600℃における高温疲労試験を実施した。そして、図 2-5-2-2 に示す高温疲労特性を取得した。

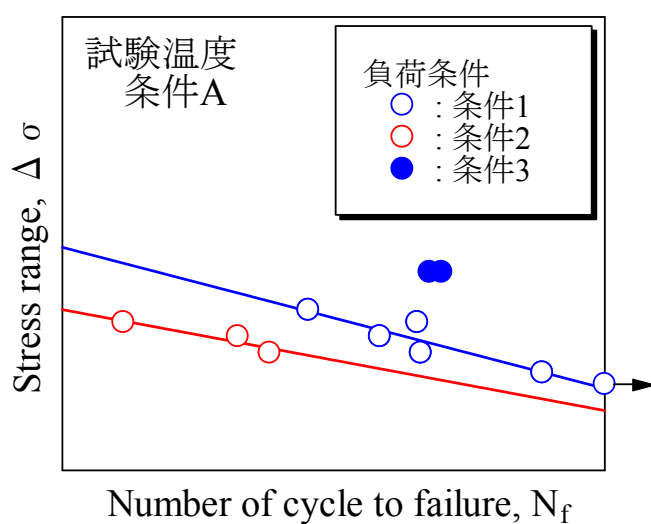


図2-5-2-2 高温疲労特性

3. 成果・まとめ

インターコネクタの力学的負荷による破損を防ぐため、インターコネクタの動作環境である高温における疲労試験を実施し、疲労強度特性を取得した。

2-5-3 実用化に向けての環境（高温）検証

1. 課題及び目標

SOFC 用インターコネクタの動作環境は高温（600℃～1,000℃）であり、実用化に向けては、この環境でのプレス成形品の検証が必要なことから、高温環境を想定した特殊加熱炉を用いて、環境(高温)検証を行った。

2. 研究内容

(1)使用設備

2-4 テンパー処理による成形技術の開発に使用した特殊加熱炉を使用した。

(2) 環境（高温）検証実験方法

インターコネクタはセルとの組み合わせにより挟み込まれた構造となっていることから構造を想定した状態での検証を行った。

加熱温度は使用設備での能力を考慮して 950℃での実験を断続的に行った。

図 2-5-3-1 に検証用の構造を示す。また、作業実験方法を写真 2-5-3-2 に示す。

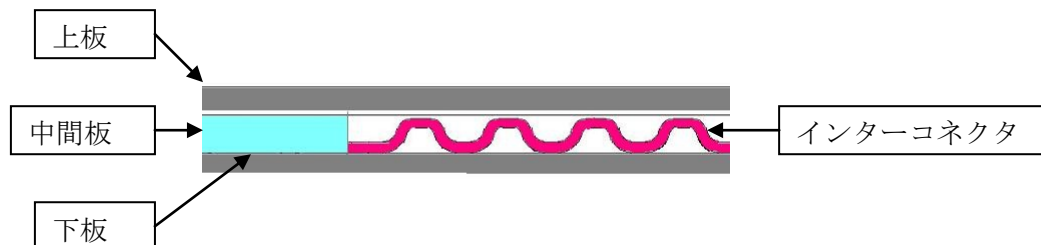


図 2-5-3-1 検証用の構造

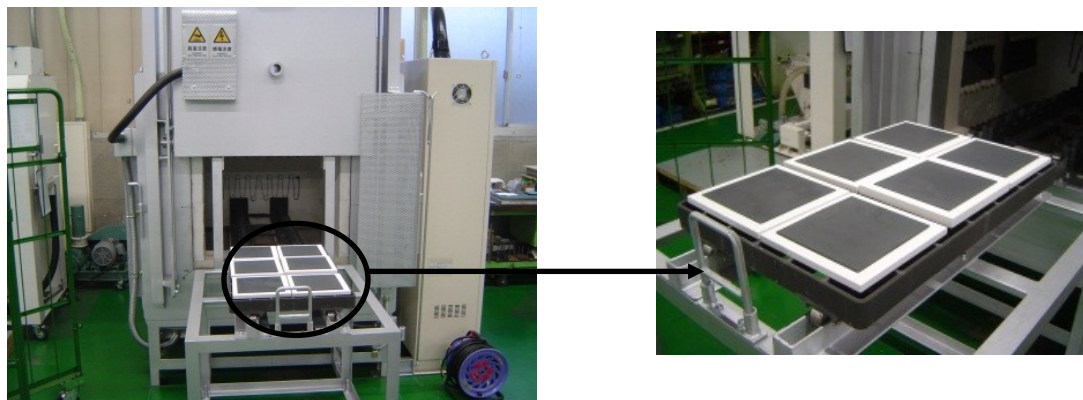


写真 2-5-3-2 環境（高温）検証作業実験

(3) 環境（高温）検証の実験結果

加熱温度 950℃で保持時間 1 時間の検証を 20 回行った。インターコネクタの形状は環境（高温）検証において特に問題が無く良好と判断した。比較に SUS304 材も高温検証を行ったところ 2 回目の実験で著しく変形及び酸化による錆が発生した。

環境（高温）検証の実験結果のモデル形状を写真 2-5-3-3 に示す。

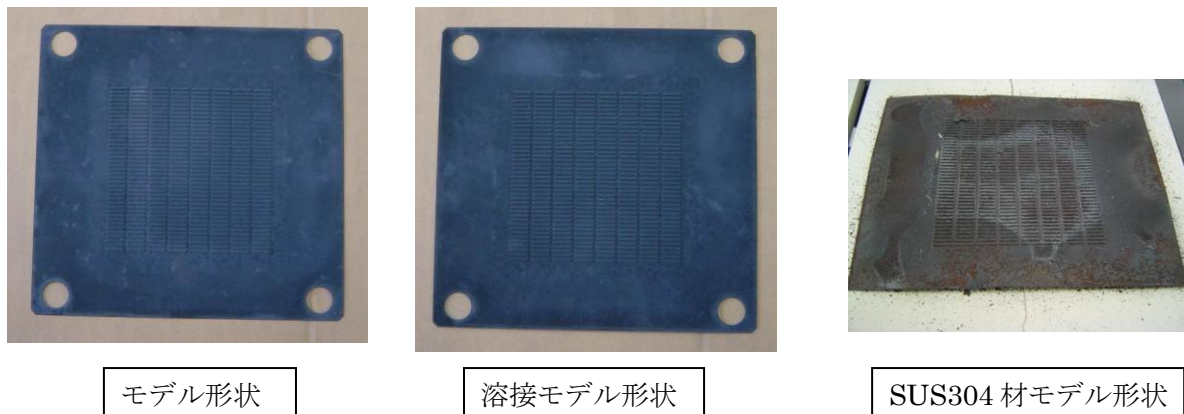


写真 2-5-3-3 環境（高温）検証の実験結果

3. 成果・まとめ

環境（高温）検証の実験により、プレス成形により加工したインターコネクタの使用において実用化は可能と判断した。

第3章 総括

< 総 括 >

次世代の燃料電池として注目されている、SOFC(固体酸化物形燃料電池)の開発が燃料電池メーカーにより進行中である。その中、SOFC 燃料電池の普及に向けコスト削減が急務となっており、コスト削減が現実化すると一般家庭への潜在市場規模は大きく、また、環境問題にとっても、温暖化ガス削減の効果は絶大であり、更に、原子力発電に変わる新たな電源としても期待されている。

本研究開発においては、SOFC のコスト削減を目標に、SOFC の重要部品であるインターコネクタのセラミック材料から置き換えられつつある高耐熱耐食合金(特殊フェライト系ステンレス鋼)のプレス成形加工の実用化を目指した。

本研究開発の成果については第 2 章本論で詳述している通りであり、多くの重要な結果を得られることができた。

それは、SOFC 燃料電池のインターコネクタを加工する上での高耐熱耐食合金材料のプレス成形加工に対して多くのノウハウを蓄積できたことで、今後の実用化への現実性が高まってきている。

また、燃料電池メーカーからは、プレス成形品での実用化はもとより、特にマイクロファイバーレーザー接合による具体的な形状の提案に注目を受け、この開発においても実用化が高まっている。

本研究開発体制については、「高耐熱耐食合金プレス成形加工開発委員会」(平雅吉委員長)を組織し活動してきた。本委員会にはプロジェクトメンバー以外にアドバイザーとして SOFC の開発を行っている N T T 環境エネルギー研究所様、また、高耐熱耐食合金の製造販売を行っている日新製鋼(株)様が参加して、より具体的な SOFC 燃料電池への提案や材料に対する情報を得ることができたほか、研究開発全般について遠藤 神奈川工科大学名誉教授から指導を受け、研究開発を順調に推移し多くの知見を得ることができた。

ここで改めて、本研究開発に対して多くの助言を頂いた N T T 環境エネルギー研究所様、日新製鋼(株)様、神奈川工科大学一遠藤名誉教授に心から感謝申し上げます。

本研究開発で得た実績によりインターコネクタの実用化を推進するために、今後も同体制での補完研究を継続して SOFC 燃料電池の普及に向けた活動を予定しております。