

平成19～20年度 地域活性化共同研究開発事業研究成果報告書
(電源立地地域対策交付金補助事業)

福島県ハイテクプラザ研究報告書

Technical Reports of Fukushima Technology Centre

研究テーマ

『精密機器のための微細溶接技術による応用製品の開発』

Development of micro welding for products applied to precision instruments

平成21年2月

福島県ハイテクプラザ
Fukushima Technology Centre

はじめに

この研究が始まった平成19年度当初は景気が足踏み状態といわれていましたが、その後、サブプライムローンの破綻等に端を発した世界的な景気の悪化に伴って、輸出産業をはじめとした県内の製造業にとっても状況は厳しさを増すばかりであります。

このような事態に対応するためには、固有の技術を発展させることで開発された付加価値の高い新製品や新技術によって、企業の競争力を強化する必要があります。新製品の事業化や新技術による経営の安定化は雇用も創出して、地域を活性化します。そこで、本研究は、ハイテクプラザや県内企業が培ってきたものづくりの基盤となる溶接を応用しながら、従来の方法では不可能であった極薄金属板の接合技術の開発とその技術を応用した新製品の開発を目的として実施いたしました。

この2年間の取り組みによって、すべての課題が克服された訳ではありません。しかし、ハイテクプラザと企業が共同で製作した溶接システムや溶接に関する知見は、企業の新製品開発や生産技術の向上に大いに役立つことが期待できると信じております。

最後になりましたが、本事業の推進にあたりまして、大学や関係機関並びに参画企業の皆様から温かいご協力並びに貴重なご意見を賜りましたことに対して、心から厚く御礼申し上げます。

福島県ハイテクプラザ
所長 宮野 壮太郎

研究テーマ：精密機器のための微細溶接技術による応用製品の開発

目 次

1. 研究の概要	・・・	1
2. 極薄ステンレス鋼板のプラズマ溶接	・・・	3
3. 極薄ステンレス鋼板の抵抗溶接	・・・	9
4. 溶接ベローズの開発	・・・	13
5. 高感度センサーの開発	・・・	21

研究の概要

研究の概要

板厚 0.5mm 以下の極薄金属板はしなやかで熱を伝えやすく、高感度なセンシング技術や製品の小型・軽量化が著しい最近の傾向に合致した材料である。最近、半導体製造、電子、医療関連をはじめとした高付加価値な精密機器製品に極薄金属板の接合構造体が多く用いられるようになってきた。これに伴って、金属の代表的な接合技術である溶接に対する県内企業からの要望も高まっている。

極薄金属板の溶接は、熔融した金属の表面張力が原因で溶接部に” 溶け落ち” が発生するので、これまでの主な高品位溶接技術であった TIG 法でも接合できないことが多い。また、板材の変形量は、同じ大きさの曲げ応力に対して板厚の二乗に反比例するので、薄くなるほど変形量が極端に大きくなるため、溶接時に発生した応力によって、甚だしい溶接変形が発生して製品にならない。それらの理由によって、極薄金属板の溶接技術は全国的にも限られた企業のみが所有する極めて難易度の高いものであり、県内の中小企業による単独での技術開発は困難であった。そこで、極薄金属板の溶接技術と、それを応用した県内企業が競争力のある製品を開発することを目的として本研究開発事業を計画した。

極薄金属板の溶接には、適した熱源と治具が不可欠である。そこで、熱源には溶け落ちを防止し、ランニングコストに優れるマイクロプラズマアークを用いた。また、シールドや正確な溶接線のトレース等に必要な機能を有し、直線と周の溶接ができる 3 種類の治具を設計製作した。同様に、溶接位置決めやアーク長を計測して溶接条件を適正にするため、PC カメラを有する位置決め装置を用いた。

溶接実験は、開先の品質が溶接に与える影響について検討するため、精密プレス・レーザ・フライスで製作した試験片を用いて行った。共同研究企業は、工数の削減と品質の向上を目的として、CAE の活用等について検討した。以上で得られた知見等をもとに、すべてが極薄金属板で構成されている溶接ベローズや部分的に極薄金属板を用いているセンサーやフィルターの製品開発に取り組んだ。

以下に、研究課題と概要を示す。

1. 極薄ステンレス鋼板のプラズマ溶接

極薄金属板の溶接技術を開発するため熱源と治具で構成される溶接システムを製作した。溶接突合せ継手試験片による基礎的な実験を行って、開先の品質が継手に与える影響等を検討した。

2. 極薄ステンレス鋼板の抵抗溶接【19年度のみ】

品質の向上と工数の低減を目的として、微小な電子部品の組み立てに用いられることが多い抵抗溶接部の評価と、溶接用シミュレータ活用の有効性について検討した。

3. 溶接ベローズの開発

高圧用ベローズバルブに用いられる特殊な溶接ベローズの開発を目的として、CAE を活用した強度設計と専用の溶接用治具を製作して溶接ベローズを試作・評価した。

4. 高感度センサーの開発

より優れた感度を有する圧力・液面検出センサーをはじめとした新製品の開発を目的として、溶接実験と溶接システムの最適化を行った。応用製品としてハイブリッドフィルターが実用化できた。

研究の成果品



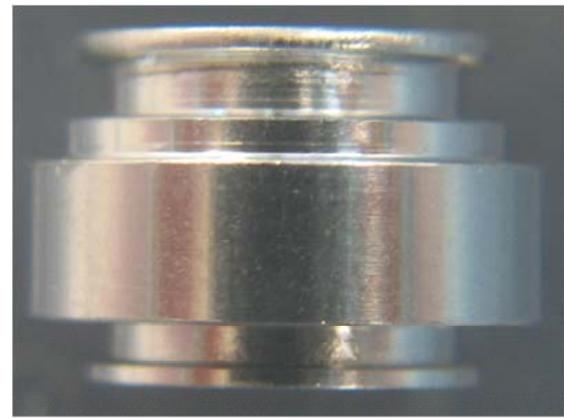
溶接突合せ継手試験片
(左：板厚0.3mm 右：板厚0.1mm)



健全な抵抗溶接部
(板厚0.1mm)



溶接ベローズ



圧力センサー



実用化できたハイブリッドフィルター

極薄ステンレス鋼板の プラズマ溶接

福島県ハイテクプラザ

極薄ステンレス鋼板のプラズマ溶接

－治工具の製作と突合せ溶接－

Plasma welding of extremely thin stainless-steel plates

-Development of jigs and butt welding by use of them-

福島県ハイテクプラザ いわき技術支援センター 佐藤善久・富田大輔

極薄金属板の溶接技術を開発するため、マイクロプラズマ溶接機の導入と治工具類の設計製作を行った。それらを用いて SUS316L の突合せ溶接継手試験片を製作した。試験片の接合部を評価することによって以下のことがわかった。マイクロプラズマアークは、TIG アークよりもパワー密度が高い。板厚 0.1mm と 0.3mm の突合せ溶接ができた。プレス・レーザー・フライスによる開先の加工方法にかかわらず、ほとんど同等の機械的な強度を有する溶接部が得られた。

Key words:マイクロプラズマ、溶接用治具、ヒートシールドプレート、突合せ継手、

1. 緒言

金属板は機械加工やプレス加工で、容易に所定の形状にできる。更に、板厚 0.5mm 以下の金属板である極薄金属板は軽量でしなやかであり、板厚方向に熱を伝えやすい特長も持つ。それらの特長を利用して、半導体製造、電子、医療関連をはじめとした高付加価値な精密機器製品に極薄金属板が利用される場合が増加してきた。しかし、極薄金属板は一般的な溶接法である TIG で溶接すると、板厚に対して溶融部分が大きくなり、表面張力で溶融池が維持できなくなる溶接欠陥の溶け落ちが発生しやすいく。また、曲げに対する変形は、同じ大きさの応力に対して板厚の 2 乗に反比例するので溶接部の溶融－凝固に伴う応力で生じる変形も大きく、溶接が難しくて製品にならないことも多い。

一方、極薄金属板を溶接するためには、レーザーに代表される高いパワー密度の熱源を用いて溶融池を小さく維持することによって、溶け落ちを防止する必要がある。また、溶融池が小さくなると、開先と溶接線にずれが生じる狙いズレによる融合不良が発生しやすくなるので、正確な位置決めと、速やかに放熱し、変形を防止するために試験片を拘束する治具も必要である。

そこで、本研究では極薄金属板の溶接技術を開発するため、治工具の製作と溶接実験を行った。熱源には高いパワー密度を有しながらもランニングコストに優れるマイクロプラズマ溶接機を用いた。また、位置決めや速度等の溶接条件を適正にするため、基本となる直線と周の溶接ができる治工具を専用に設計・製作した。それらを用いて半導体製造や医療関連をはじめとした精密部品に使用されることが多い SUS316L の極薄ステンレス鋼板を溶接して TIG とを比較しながらマイクロプラズマによる接合部を評価した。

2. 溶接装置

2. 1. マイクロプラズマ溶接機

今回は、マイクロプラズマ溶接機（小池酸素工業 PW-50NR）を新規に導入して用いた。マイクロプラ

ズマ溶接機は図 1 に示すように、本体と冷却装置、プラズマ・シールドガスのボンベ（7m³）が専用の台車の上に搭載され、作業者が溶接する場所に合わせて移動できるようになっている。



(左:全景 右:本体前面の操作パネル)

図1 マイクロプラズマ溶接機

溶接条件である電流やパルス周波数等は、本体である電源部に設けられた操作パネル上で数値設定できる。また、操作パネル上には外部機器との同期制御を行うための入出力端子が設けられている。表 1 にマイクロプラズマ溶接機的主要仕様を示す。

表1 マイクロプラズマ溶接機の仕様

入力電圧	230 V±10 %
入力相数、周波数	3 相、50/60Hz
定格入力	3.4 KVA
定格出力電流	50 A
定格使用率	100 %
定格負荷電圧	47.5 V
パルス周波数調整範囲	CW ~ 9900 Hz
パルス幅調整範囲	10 ~ 90 %
プラズマガス	Ar
シールドガス	Ar + H ₂ (5 %)
トーチ冷却方式	水冷 (循環水)
本体外形寸法	360×750×650 mm
本体重量	95 Kg

溶接トーチは図2に示すように、電極を覆うように設置されたメタルノズルの穴を通してアークが形成される。アークはメタルノズルによる熱的ピンチ効果によって緊縮してパワー密度が向上する。図3に、今回用いた TIG とマイクロプラズマ溶接機の溶接トーチを示す。

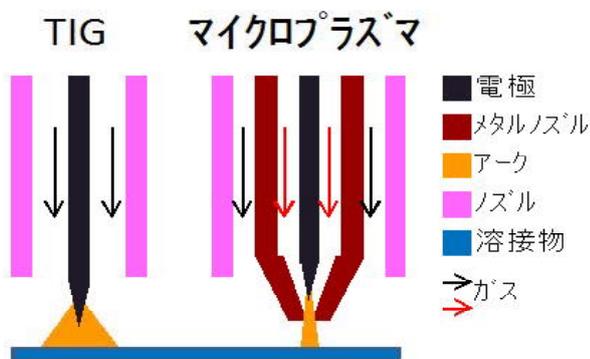


図2 溶接トーチの構造



(TIG) (マイクロプラズマ)

図3 溶接トーチの比較

2. 2. 溶接用治具

溶接するための基本的な動作である回転運動と直線運動を行うため、Ⅰ～Ⅲ型までの3種類の溶接用治具を設計・製作した。溶接用治具の溶接姿勢は下または横向きで一定にすることによって溶接部の品質を安定させるため、試験片等の溶接物は治具に装着する構造にした。

回転運動を行うⅠ型の治具は図4に示すように、溶接物や溶接物を装着した治具を把持するスクロールチャックが端部に設置された中空シャフトを電動のサーボモータで回転させる機構を有する。本プロジェクトでは、主に、溶接ベローズや圧力センサー、フィルタの試作に用いられた。ローリングセンターを用いて溶接物に軸方向の力を加えて、摩擦で回転を維持しながら溶接できる構造になっている。溶接時の電流がモータの回路に流れて動作に影響を与えないように、モータのマウントと駆動力の伝達には、マイクロプラズマ溶接機の定格負荷電圧に対して電気抵抗値が大きい樹脂板とゴム製のタイミングベルトを用いている。



図4 溶接用治具(Ⅰ型)

また、極薄金属板を溶接するためには数 A からマイクロプラズマ溶接機の定格電流である 50A までの溶接電流を安定して溶接用治具に導通させる必要がある。そこで、シャフトのもう一方の端部には図5に示すような1極あたり 12A の容量を有するスリップリング4基を並列に接続してグラウンドに用いた。その他、チューブフィッティング (φ 6mm) から中空シャフトを介して、スクロールチャックにシールドガスを導入して、バックシールドに用いることもできる。表2にⅠ型溶接用治具の主な仕様を示す。



(ロータ) (ステータ)
図5 溶接のグラウンドに用いたスリップリング

表2 Ⅰ型溶接用治具の仕様

設定可能な回転速度	1.0 ~ 100.0 rpm
電流容量	48 A
把持できるワークの寸法	φ 1 ~ 70 mm
回転時の芯振れ	±15 μm

Ⅱ型は図6に示すように、部品や部品の把持部を固定するためのねじ穴や位置決めピン用の穴が設けられた2台のターンテーブルが対向して設置されている回転型の治具である。本プロジェクトでは、主に、溶接ベローズの試作に用いる溶接治具のベース部分として使用した。それぞれのターンテーブルを駆動している

ステッピングモータを同期しながら動作させることで、剛性が低い等の理由で部品に軸方向の力を加えなくても溶接ができるようになっている。また、ターンテーブルを保持している部分はリニアガイド上に設置され、一方が台形ねじによって位置決めできるため、溶接物や溶接物を保持する治具の大きさにあわせてターンテーブルの間隔を設定できるようになっている。表3にII型溶接用治具の主な仕様を示す。



図6 溶接用治具(Ⅱ型)

表3 Ⅱ型溶接用治具の仕様

設定可能な回転速度	最大 200 rpm
ターンテーブル間の距離	0 ~ 195 mm
回転時の芯振れ	15 μm

直線運動を行うⅢ型の治具は図7に示すように、直線の溶接部を有する板状の試験片や溶接物を装着した治具を固定する部分をリニアガイド上に設置して、ボ



図7 溶接用治具(Ⅲ型)

ールねじとサーボモータで直線運動させる機構を有する。本プロジェクトでは、主に、突合せ溶接継手試験片による溶接実験に用いた。I型と同様に、溶接電流がモータの動作に影響を与えないように、モータのマウントと駆動力の伝達には樹脂板と樹脂を用いた継ぎ手を用いている。また、バックシールドと試験片の近傍にグラウンドを設けるための配管と配線が設けられている。

また、溶接時のねらいずれやアーク長の変動を小さくするため、テストインジケータやダイヤルゲージを用いて位置の変動を確認しながら部品の組み立てを行った。表4にⅢ型溶接用治具の仕様を示す。

表4 Ⅲ型溶接用治具の仕様

設定可能な溶接速度	0.5 ~ 1200 mm/min
ストローク	220 mm
溶接中の位置の振れ	±10 μm

なお、I～Ⅲまでのすべての溶接用治具の動作は、プログラマブルロジックコントローラ(以下"PLC")に製作したラダープログラムを書き込むことによってシーケンス制御が行われている。PLCにマイクロプラズマ溶接機の制御用入出力端子を接続しているため、溶接用治具と同期した動作ができる。図8に示すように、溶接電流とPLCから発生される制御信号は、PLCのスキャンタイムとリレーの動作・復帰時間の影響があるが、ほとんど正確に同期していることがわかる。たとえば、I型の治具において、溶接角度を360°にした場合、溶接機の出力がアップスロープから定常状態に移行すると同時にエンコーダから発生されるパルスの計数を開始し、360°回転すると同時に溶接機の出力がダウンスロープに移行する。

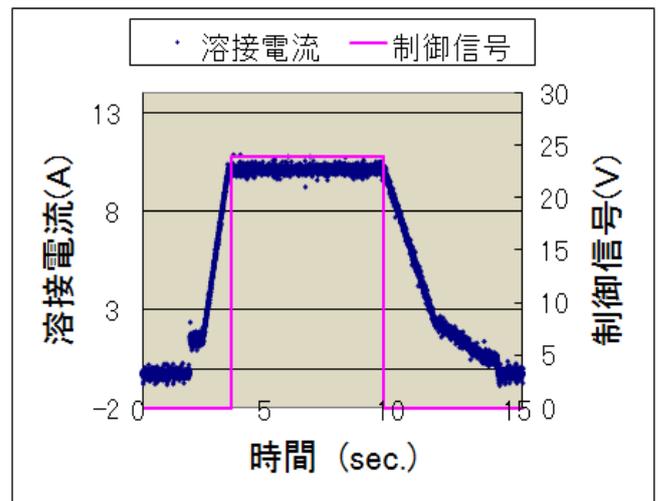


図8 溶接機と治具の同期

2. 3. 位置決め用具

アーク長に伴ってアークの温度分布も変化するので、溶接部の溶け込み深さや溶融池の大きさも増減する。また、溶接物の厚さが小さくなるに従って溶接ビードの幅も小さくなるので、溶接アークと溶接線の位置が合致していないと重大な溶接欠陥である溶け込み不足が発生する。特に極薄金属板ではアーク長や溶接位置を正確に設定しないと溶接が困難になるので、溶接時に用いる位置決め用の治具を製作した。

溶接トーチ位置決め用具は、図9に示すようにマイクロメータを有し、可動範囲が±5mmの1軸テーブルを連結して、溶接トーチを3軸方向に位置決めできる。



図9 溶接トーチと位置決め用具

同様に溶接位置測定用具は、図10に示すように作業距離が95mmのズームレンズを装着したPCカメラを搭載しているので、溶接線と溶接トーチを19inchディスプレイ上で約20～120倍で観察しながら、マイクロメータによって位置や間隔を計測できる。



図10 溶接位置測定用具

3. 溶接実験

3. 1. ビードオンプレート溶接

共同研究企業の研究課題で使用されている板厚0.1mmと0.3mmのSUS316Lについて、溶け込みの状態を比較することによって、適正な溶接電流を決定するため、TIGとマイクロプラズマによるビードオンプレート溶接実験を行った。表5に溶接条件を示す。

表5 ビードオンプレート溶接の条件

溶接電流	板厚 0.1mm TIG : 3,5,7A プラズマ : 2,3,4A
	板厚 0.3mm TIG : 10,15,20,25,30A プラズマ : 9,10,11A
溶接速度	540mm/min
アーク長	1mm
電極径	1mm
電極先端角度	30deg
ノズル径	板厚 0.1mm : φ 0.8mm ※プラズマのみ 板厚 0.3mm : φ 1mm
シールドガス (流量)	TIG : Ar (5 ~ 10l/min) プラズマ : Ar+5 % H ₂ (6l/min)
プラズマガス (流量)	Ar (0.2l/min) ※プラズマのみ

3. 2. 突合せ溶接

ビードオンプレート溶接実験によって、適当な溶接電流を決定し、次に、それらの条件を用いて図11に示すように、マイクロプラズマによる突合せ溶接継手試験片を製作して溶接部を評価した。

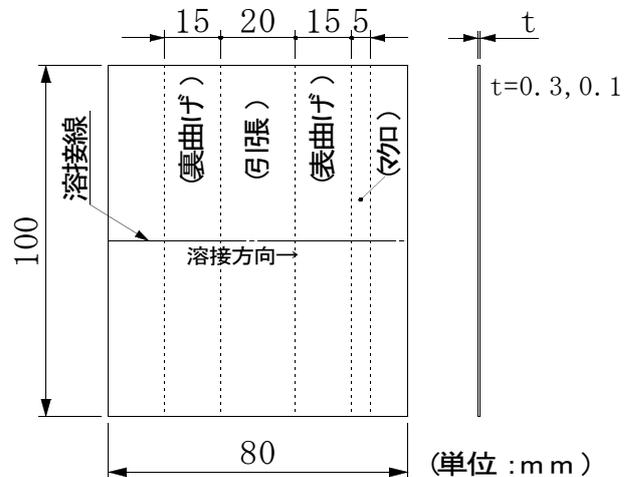
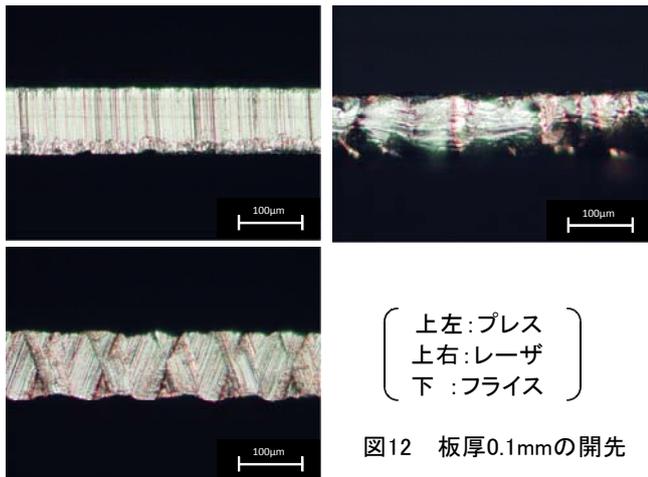


図11 溶接突合せ継手試験片

試験片の機械的な特性は引張・密着曲げ・硬さを測定する物性試験で評価した。また、溶接ビードの外観とマクロ観察を行って、溶接部の健全性を確認した。

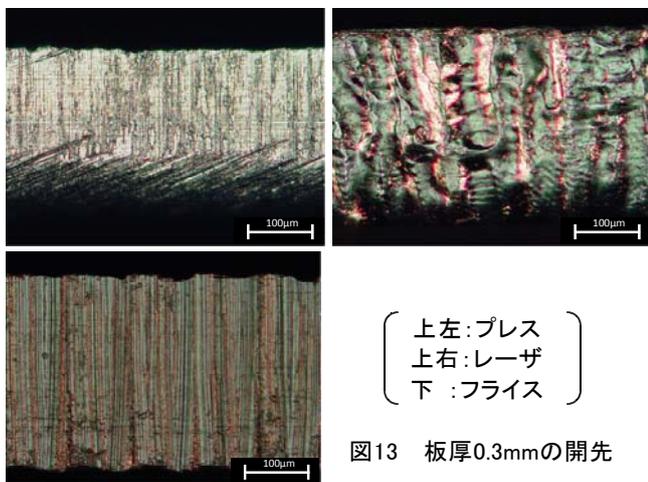
通常、試験片は所定の形状に切断された後に板厚や溶接方法、溶加材の有無等に合わせて開先が加工・調整される。しかし、極薄金属板は切断後に開先を加工・調整することは困難であるから、切断面をそのままI型の開先として使用すると考えられる。そこで、試験片の開先は、板金の主な切断方法であるプレス加工とレーザー加工による端面を用いた。また、I型の開先として、ダレ等が少なくて最も理想的な端面が得られる機械加工による試験片についても溶接実験を行い、開先が溶接部の品質に与える影響について検討した。

今回用いた試験片の開先を図12と図13に示す。開先面は開先と開先を数回擦りあわせて端面を整えた。特に、プレス加工による試験片は、板厚0.3mmの場合で研磨紙を用いて端面を整えたが、それ以外は表面の凹凸やダレもなくほとんど機械加工と同等の開先が得られている。レーザー加工による試験片は、入熱による変質層と表面の凹凸ががわずかに残存していることが確認できた。



〔 上左:プレス
上右:レーザー
下:フライス 〕

図12 板厚0.1mmの開先



〔 上左:プレス
上右:レーザー
下:フライス 〕

図13 板厚0.3mmの開先

溶接中の入熱による試験片の溶接変形で溶接ができなくなることを防止するために、試験片に当て金を設置した。当て金には速やかな熱の拡散と試験片を拘束するためにタフピッチ銅板を使用し、トグルクランプで固定した。銅板は溶接線の両側の各1mmを除いて試験片の全面を覆うように設置した。図14に突合せ溶接実験の風景を示す。

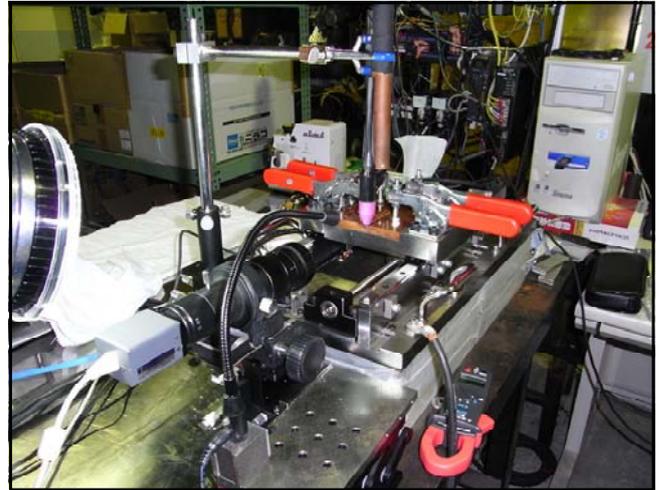


図14 突き合わせ溶接実験

4. 溶接実験の結果

4. 1. ビードオンプレート溶接

表6に示すようにTIG、マイクロプラズマ共に板厚に対して十分な溶け込み深さが得られ、良好な溶接部になるための適正な溶接電流があることを確認した。

表6 ビードオンプレート溶接の結果

板厚：0.1mm			
溶接法：TIG		溶接法：マイクロプラズマ	
溶接電流	外観	溶接電流	外観
3A	溶け込み不足	2A	溶け込み不足
5A	良好	3A	良好
7A	溶け落ち	4A	一部溶け落ち
板厚：0.3mm			
溶接法：TIG		溶接法：マイクロプラズマ	
溶接電流	外観	溶接電流	外観
20A	溶け込み不足	9A	溶け込み不足
25A	良好	10A	// (部分的)
30A	不均一	11A	良好
		12A	良好

しかし、同じ溶け込み深さを得るために、TIG はマイクロプラズマに比べて約 2 倍の電流が必要なことがわかった。これは TIG アークに対して、マイクロプラズマアークのパワー密度が高いことを示している。図 15 に示すように、遮光板を通して溶接中のアークを観察すると、TIG は電極の先端を中心に比較的に大きな角度で広がりながらアーク柱が形成されているのに対して、ノズルの先端からアーク柱が形成されるマイクロプラズマアークの広がり角度は非常に小さいことがわかる。

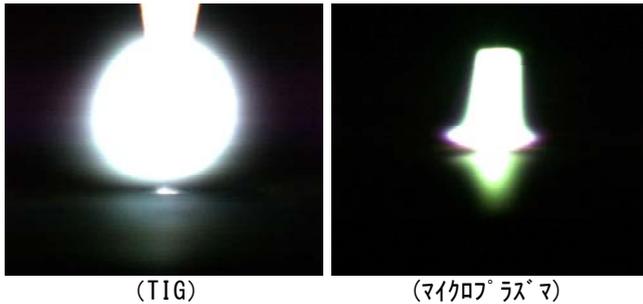


図15 溶接電流10Aにおけるアークイメージの比較

4. 2. 突合せ溶接（マイクロプラズマ）

母材部は冷間加工された素材であるため、引張強度や硬さが高くなっている。板厚や開先の加工方法を問わず、引張試験では表 7 に示すようにすべて溶接部から破断したが、 480N/mm^2 以上 (JIS G 4305) の強さが確認できた。

表7-1 物性試験の結果1

板厚：0.1mm 溶接電流:3A				
開先加工	引張強さ	破断位置	硬さ	曲げ試験
プレス	581 N/mm^2	溶着金属	222HV0.1	無欠陥
レーザ	576 N/mm^2	溶着金属	202HV0.1	無欠陥
フライス	581 N/mm^2	溶着金属	216HV0.1	無欠陥
母材部	1080N/mm^2	—	309HV0.1	—

表7-2 物性試験の結果2

板厚：0.3mm 溶接電流：12A				
開先加工	引張強さ	破断位置	硬さ	曲げ試験
プレス	582 N/mm^2	溶着金属	198HV0.1	無欠陥
レーザ	599 N/mm^2	溶着金属	207HV0.1	無欠陥
フライス	583 N/mm^2	溶着金属	189HV0.1	無欠陥
母材部	622 N/mm^2	—	185HV0.1	—

また、曲げ試験では曲げた面を 10 倍で観察できるルーペや、ビデオマイクロスコープで観察した結果、割れ等の欠陥は確認されなかった。

溶接部断面のマクロ観察でも、図 16 および図 17 に示すようにブローホール等の溶接欠陥は見られず、溶接部は健全であることが確認できた。

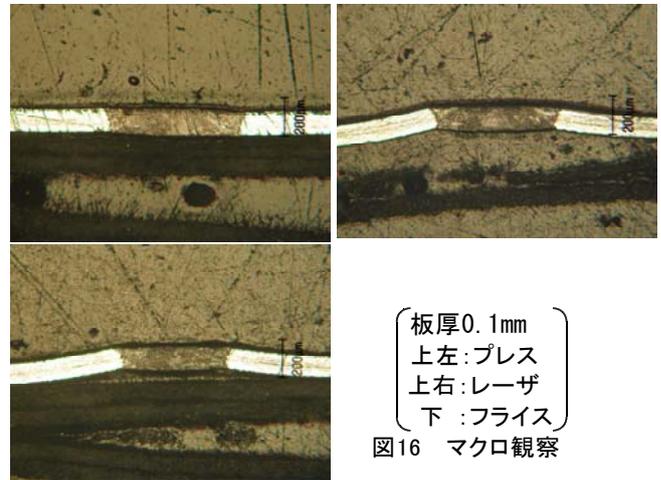


図16 マクロ観察

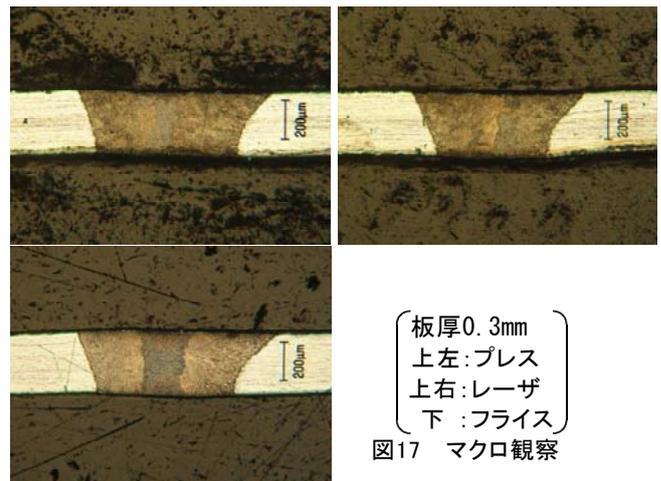


図17 マクロ観察

5. 結言

極薄金属板の溶接技術を開発するため、マイクロプラズマ溶接機の導入と治工具類の設計製作を行った。それらを用いて SUS316L の溶接突合せ継ぎ手試験片を製作した。試験片の接合部を評価することによって以下のことがわかった。

- 1) マイクロプラズマアークは、TIG アークよりもパワー密度が高い。
- 2) 板厚 0.1mm と 0.3mm の突合せ溶接ができた。
- 3) プレス・レーザ・フライスによる開先の加工方法にかかわらず、ほとんど同等の機械的な強度を有する溶接部が得られた。

極薄ステンレス鋼板の 抵抗溶接

有限会社遠藤電子
福島県ハイテクプラザ

極薄ステンレス鋼板の抵抗溶接

— 接合部の評価と溶接用シミュレータ活用の検討 —

Resistance welding of extremely thin stainless-steel plates

-Evaluation of the joint part and investigation for applicability of welding simulator-

有限会社遠藤電子

遠藤八郎

福島県ハイテクプラザ いわき技術支援センター 佐藤善久

福島県ハイテクプラザ 生産・加工科 小野裕道

極薄金属板の仮付け溶接技術を確立するため、抵抗溶接実験を行って接合部を評価した。1mm 以下のナゲット径を有する抵抗溶接部のマクロ観察を行い、接合部の健全性を確認することによって、理想的な接合強度を有する抵抗溶接ができていることを確認した。また、抵抗溶接の条件によっては、溶接用シミュレータを活用した迅速なモデリングやナゲットの大きさを推測できる可能性があることがわかった。

Key words: 極薄金属板、抵抗溶接、マクロ観察、溶接用シミュレータ、

1. 緒言

極薄金属板の溶接は入熱によって大きく変形するので、溶接条件が適正に維持できなくなり、品質の確保が難しい。それらに対して、通常は治工具を用いて拘束しながら溶接する方法や、部品的一部分だけを接合する仮付けを行ってから溶接する方法が行われる。特に抵抗溶接法は、溶接するものに電極を押しつけて通電することで、容易に接合できる自由度の高さを有し、極薄金属板の溶接における仮付けにも有効と考えられる。

抵抗溶接法において、十分な接合強度と欠陥が少ない健全な接合部を得るためには、電極の形状・加圧力・電流等の溶接条件を適正にする必要がある。通常、溶接部が健全であることは、断面のマクロ観察を行って溶接欠陥や溶接金属であるナゲットの大きさ等を測することで確認するが、極薄金属板の抵抗溶接部は、直径が 1 mm 以下の場合が多く、前処理の技術や設備が必要となり、現場でマクロ観察を行うことは難しい。そこで、熟練者が通電中の状態や溶接品の引き剥がしを行って強度を確認し、試作を繰り返しながら溶接条件を最適化しているのが一般的である。今後は接合部を客観的に評価する手法の確立と、工数を削減するために試作回数を低減することが求められている。

そこで本研究では、比較的を用いることが多い材料である板厚 0.1mm の SUS304 を用いて抵抗溶接実験を行って溶接重ね継ぎ手試験片を製作した。前処理を工夫してマクロ観察と物性試験を行って接合強度を測定し、抵抗溶接の品質を検証した。また、適正な条件を事前に絞り込むことで試作回数を低減するため、溶接条件からナゲットの状態が推測できる、溶接用シミュレータの活用も検討したので報告する。

2. 実験

2. 1. 抵抗溶接実験

今回の実験には、精密電子部品の接合に用いられて

いるコンデンサ式の抵抗溶接器（セイワ製作所製 sw-5）を用いた。上部の電極には直径 5mm の抵抗溶接電極用のクロム銅を用いた。試験片と点状に接触して大電流を流すことによって溶接部を形成するため、先端部をおおよそ半径 1mm の半球形に成型して用いた。下部の電極には、電極間の中心のズレによる接合不良を防止するため、板厚 3mm のクロム銅の平板を用いた。試験片には、電子部品にも用いられることが多い板厚 0.1mm の SUS304 を 2 枚重ねて用いた。試験片を電極間に設置し、電極を試験片に 900N の力で押しつけながら通電することによって、重ね継ぎ手試験片を試作した。溶接条件は、熟練した作業者が工具を用いて手作業で行った剥離試験と溶接中のチリの発生具合等から、0.54KA_{peak}、0.88KA_{peak}、1.84KA_{peak} の 3 通りの溶接電流（尖頭値）で設定した。

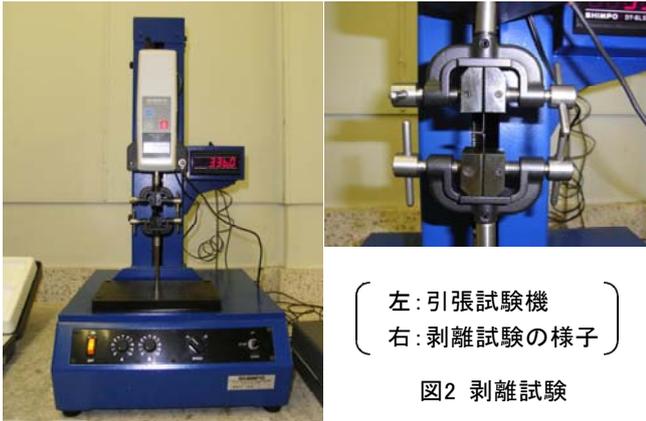


図1 実験の風景

なお、溶接電流・電圧・通電時間は、図 1 に示すように、トロイダルコイルを用いて抵抗溶接器に接続したウェルディングモニタ（ミヤチテクノス製 WM-A727-10）で計測した。また、本ウェルディングモニタは、溶接電流を最大で 10V の電圧に変換して出力する機能も有するので、電流の波形から溶接が適正に行われていることを確認するため、データレコー

ダ（日本電気社オムニエース）を用いて 20 μ sec のサンプリングタイムで電流波形を記録した。

製作した試験片は接合部の強度を確認するため、図 2 に示すように引張試験機を用いて剥離試験を行い、荷重を測定した。また、溶接部の健全性を確認するため、外観検査とマクロ観察を行った。通常、マクロ観察は、精密に研磨した面をエッチングすることによって行う。今回は、ナゲットの大きさを確認するために、顕微鏡で観察しながらカッターナイフで刻まれた線を目印にして、試験片の研磨を行った。研磨後に 10% のしゅう酸で電解エッチングを行った。



2. 2. 溶接シミュレーション

シミュレータには日本イーエスアイ社の SYSWELD を用いた。SYSWELD は PC またはワークステーション上で、有限要素法を用いて溶接時の温度上昇や応力とそれに伴って発生する変形の解析ができる。表 1 に示すような試験材の物性値を記述したデータファイルと、電極の形状や電流値等の溶接条件を設定するためのインターフェイス（以下、“GUI”）を用いることで、抵抗溶接によって形成されたナゲットの温度上昇や大きさを時系列的に示すことができる。今回は、いくつかの一般的な事例で検証した後に、抵抗溶接実験への適用を検討した。

表1 溶接用シミュレータに用いる主な物性値

・電気伝導率	・ポアソン比
・比熱	・降伏荷重
・熱伝導率	・熱膨張率
・密度	・ひずみ硬化指数
・弾性係数	

3. 結果

3. 1. 抵抗溶接

通常は、試験片の表面に電極を押し付けて通電した痕や、反りが生じる場合が多い。しかし、溶接電流 0.54KA_{peak} では図 3-1 に示すように、残った痕は非常にわずかであった。また、試験片の反りも小さく、形成されたナゲットの直径は 0.3mm で、試験片の変形も小さかった。

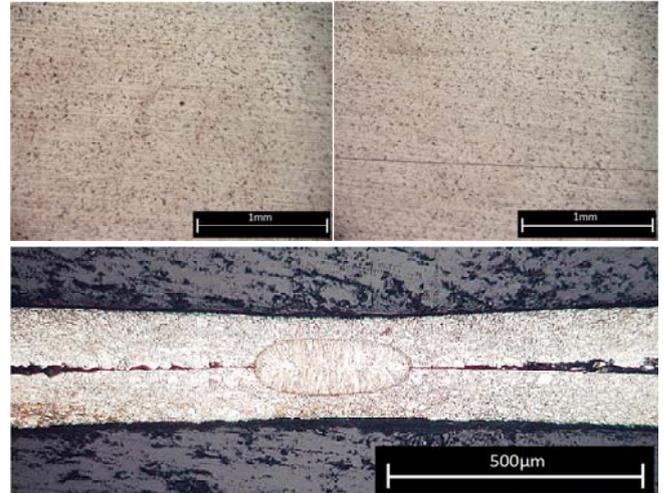


図3-1 溶接電流0.54KA_{peak} の試験片

溶接電流 0.88KA_{peak} では、図 3-2 に示すように、試験片の上部の電極側に痕が見られる。試験片の反りは、溶接電流 0.54KA_{peak} よりもわずかに大きくなり、直径 0.54mm のナゲットが形成された。

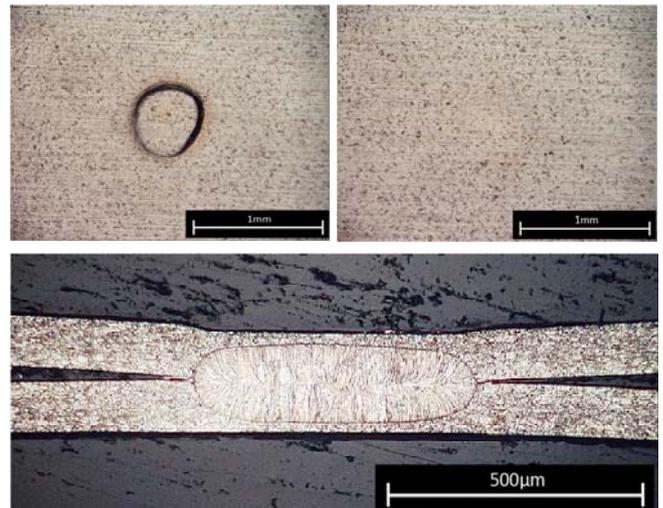
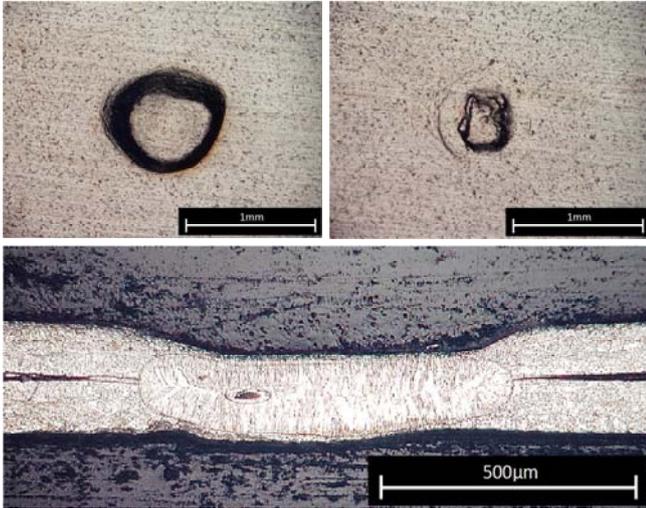


図3-2 溶接電流0.88KA_{peak} の試験片

溶接電流 $1.84\text{KA}_{\text{peak}}$ では、図 3-3 に示すように両側の表面に電極の痕が残り、おおよそ板厚の半分に達する窪みが生じていた。3 つの条件の中で、溶接部が最も高い温度に達していると考えられるので、溶接欠陥のブローホールも認められ、ナゲットの径も最大の 0.7mm であるが、部分的に試験片の厚さが低下していることがわかる。



(上左:上部の電極側 上右:下部の電極側 下:マクロ観察)
図3-3 溶接電流 $1.84\text{KA}_{\text{peak}}$ の試験片

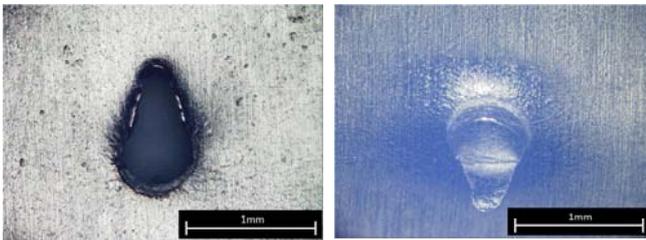


図4 破断部の観察

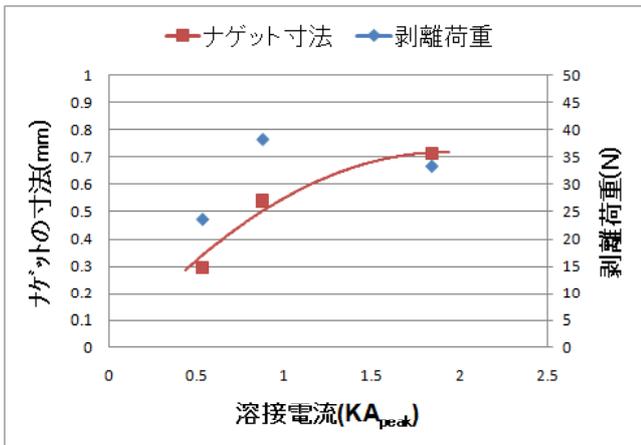


図5 破断面の観察

剥離試験では、すべての試験片で図 4 に示すようにナゲットが試験片から抜け出るようなプラグ型の破断を

示した。しかし、図 5 にまとめたように、最大荷重は $0.88\text{KA}_{\text{peak}}$ の溶接電流で最大値を示した。これは、板厚薄くなっている部分から破断したためと考えられる。

以上の結果より、通常は、溶接電流 $0.88\text{KA}_{\text{peak}}$ が強度および品質に最も優れていることがわかる。しかし、外観を優先する仮付けは、表面に痕跡を残さずに溶接する場合がある。このような際には、溶接電流 $0.54\text{KA}_{\text{peak}}$ が有効である。

溶接電流のプロファイルは図 6 に示すように急峻に立ち上がり、溶接開始後 1msec までの間に最大値を示しながら、その後は比較的になだらかに低下する。溶接は 4msec 以下の短時間に行われていると考えられ、今回行ったすべての溶接条件において、同様の傾向を示すことがわかった。

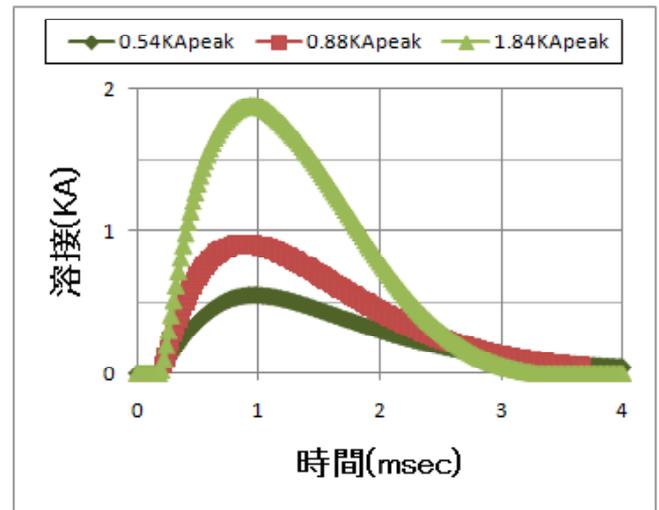


図6 溶接電流のプロファイル

3. 2. 溶接シミュレーション

はじめに、表 2 に示すような一般的な溶接条件を設定することで溶接シミュレーションを行った。

表2 設定した溶接条件1

電極の直径	20mm
電極先端の直径	6mm
電極先端の曲率半径	40mm
電極の押し付け力	900N
試験片(厚さ)	SUS304(0.1mm)
電流値	2KA
通電時間	2msec
融点	1450℃

2.2GHz で動作する CPU を有するノート PC で、計算の所要時間は約 16 分であった。その結果、図 8 に示すように、電極と試験片および融点まで上昇した領域であるナゲットのイメージが線対称な 2次元形状として示された。また、到達した最高の温度は 3620℃

であった。更に、時間毎のナゲットの大きさを示す図9から、半径は0.55mmであることが示された。

溶接条件から、ナゲットの大きさが予測できれば、条件をあらかじめ絞り込むことができると考えるので、試作の回数は低減できる。しかし、欠陥とナゲットの大きさや到達した最高の温度との関連をシミュレーションで予測するにはシステムの最適化が必要なので、別途検討する。

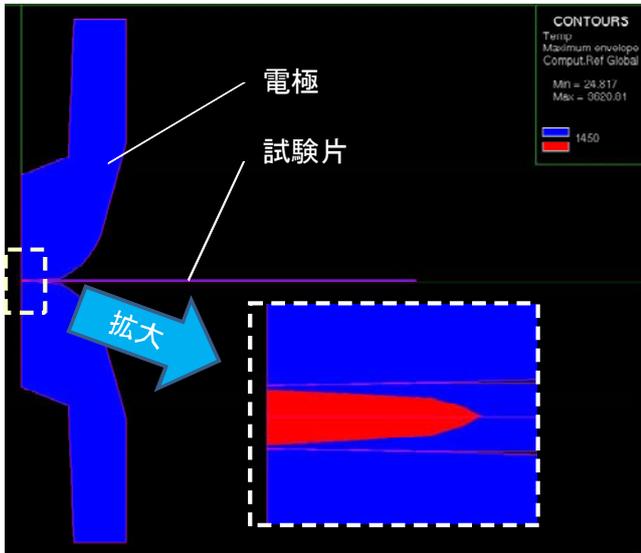


図8 溶接用シミュレータによるナゲットのイメージ

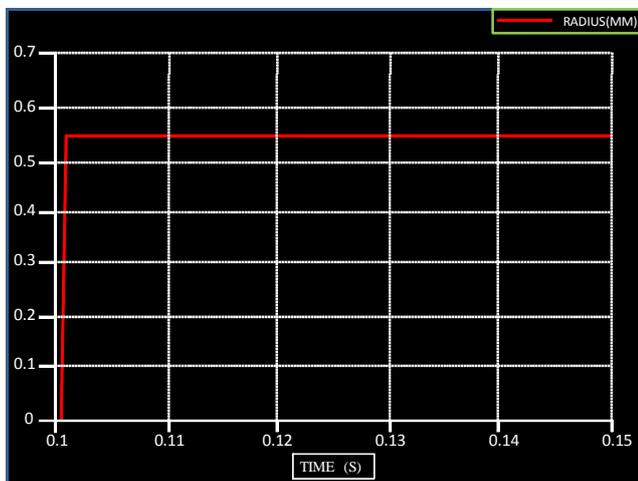


図9 溶接用シミュレータによるナゲットの寸法

次に、電極径や溶接電流を今回の実験にあわせて表3のように設定して解析を行った。実験によって、直径約0.5mmのナゲットが形成されることを確認したが、今回のシミュレーションでは、ナゲットは形成されなかった。SYSWELDは専用のGUIを用いて条件を設定することで、モデルが自動的に生成されるので、シミュレーションが迅速に行える。しかし、GUIは

ある想定範囲内での条件設定を前提としているため、今回の結果を含めてあらゆる溶接条件に対応することは難しいと考えられる。今後の開発によって、今回の事例を含めて対応できる溶接条件が広がることを期待する。

表3 設定した溶接条件2

電極の直径	2 mm
電極先端の直径	1 mm
電極先端の曲率半径	1 mm
電極の押し付け力	90N
試験片(厚さ)	SUS304(0.1mm)
電流値	1KA
通電時間	2msec
融点	1450°C

4. 結言

極薄金属板の仮付け溶接技術を確立するため、抵抗溶接実験を行って接合部を評価した。また、溶接用シミュレータの活用を検討して次のことがわかった。

- 1) 理想的な接合強度を有する抵抗溶接ができた。
- 2) 1mm以下のナゲット径を有する抵抗溶接部のマクロ観察を行い、接合部の健全性が確認できた。
- 3) 条件によっては、溶接用シミュレータのGUIを活用した迅速なモデリングやナゲットの大きさの推測ができる可能性がある。(研究継続中)

溶接ベローズの開発

大野ベロー工業株式会社
福島県ハイテクプラザ

溶接ベローズの開発

Development of welding bellows

大野ベロー工業株式会社 佐原代喜・荒蒔正之・蛭田仁・平山正一
福島県ハイテクプラザいわき技術支援センター 佐藤善久
福島県ハイテクプラザ 小野裕道

流体搬送システムにおける配管部材であるバルブについて、外部への漏洩が絶対になく、流体の品質維持が可能な構造の代表として、ベローズバルブがある。そのシール部材としてベローズ製作方法の一つに、薄板を溶接によりつなぐ溶接ベローズがある。

本研究では、素材である薄肉ドーナツ形円板のその形状について、CAEを用いて応力解析を行い、また製作手段の微細溶接について、マイクロプラズマ溶接法を用いて薄板溶接を行い、溶接ベローズの製作を試みた。その結果、CAEによる応力解析の有効性、及びマイクロプラズマ溶接法の実用性を確認した。

Key words: ベローズ、CAE、微細溶接、マイクロプラズマ溶接、薄板溶接

1. 緒言

近年、世界的規模での環境問題がグロースアップされ、流体搬送システムにおいて外部へ漏洩が絶対になく流体の品質維持が可能なベローズバルブは表1に示すとおり、その使用分野は多岐に渡っている。

ベローズバルブとは、弁棒を金属薄膜による伸縮性に富んだ「蛇腹状」のもの（ベローズ）で覆い、その一端を運動する弁棒側へ、他端を静止している弁蓋側へ、溶接にて取り付け、弁棒伝いの漏れを完全に防止したバルブである。

ベローズの製作には、表2に示すとおり、大きく二通りに分けられる。金属円筒を薄く伸ばし金型にいれ、内側より液圧により膨らませて作る成形ベローズと、薄肉ドーナツ形円板を重ね合わせ、内外周を交互に溶接し作る溶接ベローズである。配管上の弁仕様により、配管周囲の寸法制限によるコンパクト化が必要な場合、また使用圧力が高圧な場合、条件により成形ベローズよりも溶接ベローズの方が優位である場合があり、これの開発を試みるものである。

今回試作するのは、高圧用途とするため比較的肉厚を厚くし、さらにスパンを小さくした。この様にすると伸縮性能は犠牲になるが、耐圧力性能は優位となる。試作に当たりその形状であるが、CAEを利用し仕様負荷を与え、応力解析を行い形状の最適化に努めた。溶接による製作過程では、薄肉ドーナツ形円板の保持方法の検討を行い、微細溶接となるため高精度な治具を必要とし、その治具を専用機として設計製作した。溶接方法は、従来の薄板溶接には、高精度な電子ビーム溶接法、YAG レーザ溶接法等が使われている。しかし、その設備は、非常に高価であり、製品への原価償却費の上載せ等を考慮すると、なかなか利用できない。そこで、TIG 溶接設備よりは高価であるが、薄板溶接に向く安定した低電流域制御が可能であり、アークの指向性を有するマイクロプラズマ溶接法にて、実用化が可能か試作検討した。さらに、その成果物である溶接ベローズを1層溶接したものと2層溶接したものを試作し、試験用弁に組み込み寿命試験を実施した。

表1 ベローズバルブ使用例

	使用プラント	使用流体
原子力工業	原子力発電所、核融合、高速増殖炉	放射性流体、液体金属ナトリウム等
化学工業	肥料プラント、石油精製プラント	シアン化水素、塩素、酸化エチレン等
電子工業	半導体製造プラント シリコン製造プラント	高純度ガス、特殊高圧ガス等
重電機工業	発電機、タービン、変圧器、遮断機	絶縁油、水素、窒素等
食品工業	原乳精製装置、食品油製造装置	原乳、食品油、乳製品飲料等
真空工業	高真空装置、分析装置、真空焼鈍炉	不活性ガス、極低温液体等

表2 ベローズの種類と特長

	成形ベローズ	溶接ベローズ
製造方法	液圧成形による	溶接による
サイズ	小口径まで製作可	小口径は不得意
形状	円筒形に制限	円筒、楕円、角形等自由
材質	展延性に優れたもの	溶接可能なもの
山数	素管の長さ制限	無制限
1山当たりの伸縮量	1ピッチの10~30%	形状工夫で密着まで可能
清浄性	優れる	劣る
価格	安価	高価

2. 形状

2.1 形状解析

溶接ベローズは、その薄肉ドーナツ形円板の平板を種々重ねることにより、伸縮性及び耐圧性に特長を持たせている。しかし、その形状についての設計手法は統一されておらず、各メーカーが実験と解析を行い実用化している。

今回の目標は、ステンレス鋼製の圧力クラス 300 及びクラス 900、弁サイズ 25A に用いる溶接ベローズとした。

溶接ベローズ製品化までのプロセスを仮説し、薄肉ドーナツ形円板のプレス成形性及びその後の溶接作業性を考慮しその形状を数種類計画した。これらの形状について、それぞれ CAE による外的負荷条件を、圧力クラス 300 の溶接ベローズには 6MPa、同様にクラス 900 には 15MPa の流体圧力及び伸縮量 10% として与え、発生応力及び集中応力の検討を行った。いずれの場合も図 1 に示すように集中部は、溶接近傍に表れやすいことがわかった。

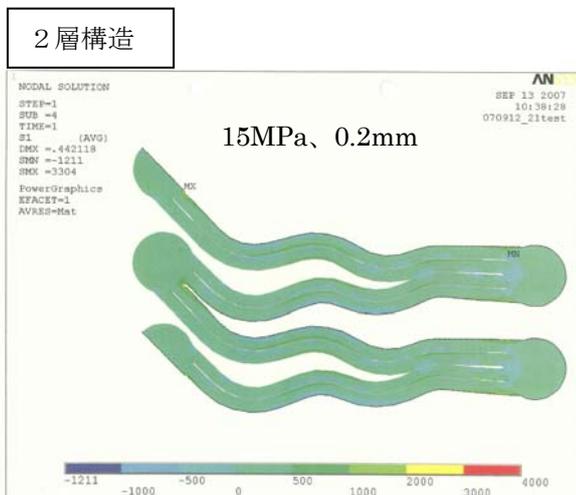
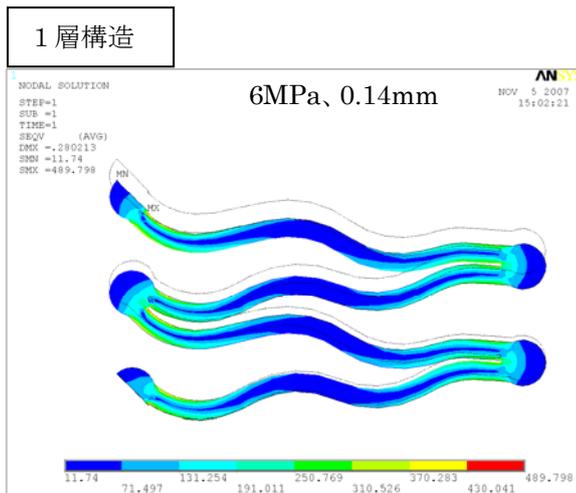


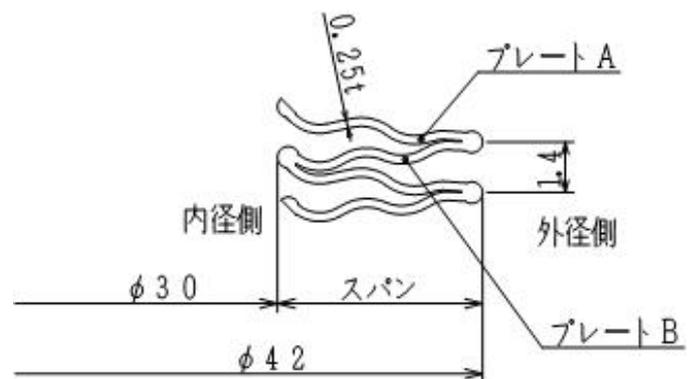
図 1 CAE 解析結果例

また、重なり合わせの溶接部の内側の隅Rの大小によりその集中応力値が変わることもわかった。しかし、この部分は計画と実際は異なるであろうことから、ここでの詳細検討は参考とすることにとどめた。

2.2 形状決定と製作

上記にて解析した形状を元に、図 2 に示す形状に決めた。また材質は、高温高圧用に用いるため Ni 系合金であるオーステナイト系ステンレス鋼とした。これの製作過程において、薄肉ドーナツ形円板の波形プレス成形の際、外径内径の寸法に多少の変化が表れること、またねらいの山谷Rについてのスプリングバックが表れることの予測を行い、種々試作を行った。その結果を図 3、図 4 に示す。試作板は、ほぼ計画通りの形状であることを、形状測定器にて測定を行い確認した。

1 層構造



2 層構造

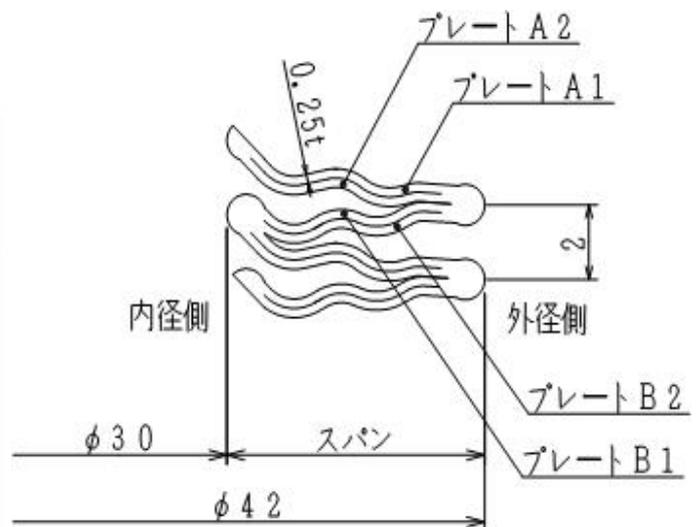


図 2 寸法形状



図3 薄肉ドーナツ型円板（1層構造用）

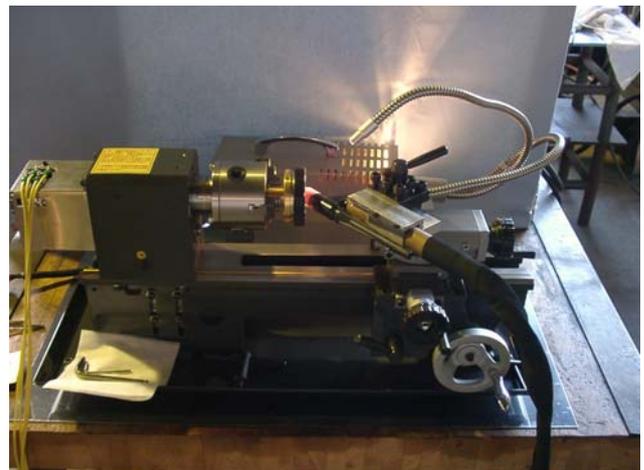


図5 内周溶接用治具



図4 薄肉ドーナツ型円板（2層構造用）

外周溶接治具は、図6に示すように、同軸上で対向型にステッピングモータによる回転駆動系を2つ配置し、その間にワーク専用の押さえ治具を設けた。尚、回転系はそれぞれの回転数を同期させ、ワーク同志がスリップを起こすことを防いだ。また、溶接トーチホルダー部は、いずれの治具にも位置決め用の微動ステージを用い、調整を容易とした。

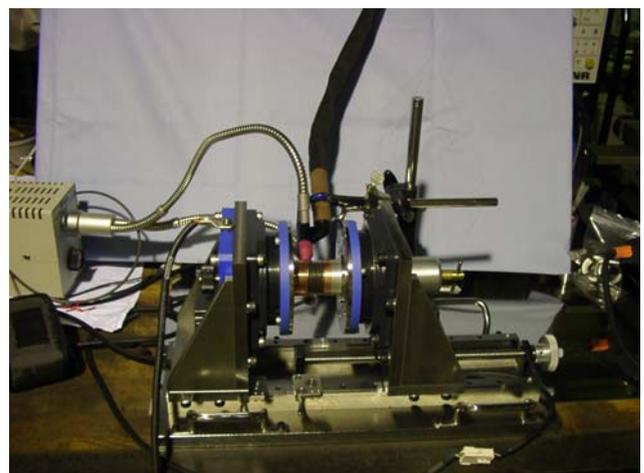


図6 外周溶接治具

3. 溶接によるベローズ製作

3.1 溶接治具の製作

本溶接は、薄肉ドーナツ形円板の内・外周をそれぞれ交互に溶接し、山谷を作り、所定の長さにする。このため、本溶接には、汎用機としての市販治具は使用できず、ワーク押さえ用治具及び回転機構は専用機として設計する必要がある。

内周溶接治具は、図5に示すように旋盤型のベースを用い、その回転駆動系には新たにサーボモータを取付け、回転精度を向上させた。また、ワーク専用のクランプ治具は、熱伝導率の大きい銅系材料を用い、溶接熱によるワークの熱歪を抑えるように工夫した。

3.2 溶接条件

薄板溶接では、溶け落ちなどの不良が生じ易くなるため、溶接における入熱量を高精度に制御する必要がある。また、製品を製造する観点から、ワークの微小バリ、面取りのバラツキ及び合わせ目の目違い等、精度管理の許容範囲を広くとれる溶接方法が望まれる。また、その設備の保守費用が少額なことは言うまでもない。

本微細溶接には、表3に示す仕様のマイクロプラズマ溶接機を用い、その実用性を検討した。まず、溶接速度を一定とし、電流値をコントロールして溶接条件

を見出すことにした。電流値を低く押さえると入熱不足となり、溶け込みが不完全となった。逆に電流値を上げ過ぎると、入熱過剰となり過剰な熔融金属が表面張力によりボール状に凝固して連続した溶接ビードの形成が困難となった。これらの中で適切な条件を見出した結果を表 4 に示す。

表 3 マイクロプラズマ溶接機の仕様

入力電圧	230V±10%	
入力相数、周波数	3 相、50/60Hz	
定格入力	3.4KVA	
定格出力電流	50A	
定格使用率	100%	
定格 無負荷 電圧	47.5V	
パルス数 調整範囲	1~10,000Hz	
パルス幅 調整範囲	10~90%	
使用ガス	プラズマガス	Ar
	シールドガス	Ar+H ₂ (5%)
トーチ冷却方式	水冷 (循環水)	
外形寸法	360×750×650mm	

表 4 溶接条件

	内周溶接		外周溶接	
	1層	2層	1層	2層
ノズル径 (mm)	0.8	1.2	0.8	1.2
電極棒径 (mm)	1.0	1.6	1.0	1.6
パ ル ス 条 件	周波数	9900Hz		9900Hz
	IP (A)	8~12	16~20	6~8 14~18
	IL	50%		50%
	デューティ	50%		50%
溶接速度	420mm/min		420mm/min	
プラズマガス流量 Ar	0.2L/min		0.2L/min	
シールドガス流量 Ar+H ₂ 5%	4.0L/min		4.0L/min	
パイロット電流	2A		2A	
スタンドオフ	1mm		1mm	

3. 3 ベローズ製作手順

表 4 に示す条件にて、下記手順により、1層2層構造の溶接ベローズの製作を試みた。

- ① プレート A、プレート B の内周側を合わせ、図 5 に示す内周溶接治具を用いて溶接する。
- ② 内周溶接済のもの同志、外周側を合わせ、図 6 に示す外周溶接治具を用い溶接する。
- ③ 上記②に①の外周側をあわせ、同様に順次外周を溶接する。
- ④ 所定の山数になったら、その両端にベローズ末端金具を溶接する。
- ⑤ 酸化スケール除去のため、電解研磨を行い、温純水により洗浄し、クリーンオープンにて乾燥させる。

以上により試作した溶接ベローズの外観を図 7 に示す。

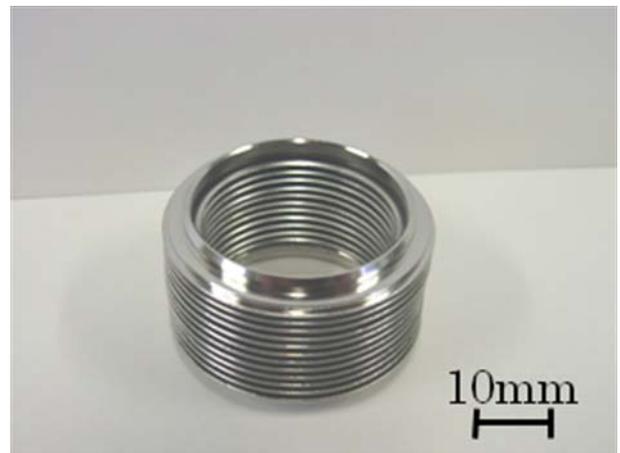


図 7 溶接ベローズ (1層構造)

4. 試験、評価

4. 1 溶接部の観察

溶接ベローズの内周及び外周溶接ビード部を観察した結果、表面状態はなめらかで、ビードの不整がなく、良好な溶接表面であった。またビード部をカットし、金属顕微鏡を用い観察したものを図 8、図 9 に示す。溶接部は、母材に対し十分な溶け込みがあり、溶融部は均一に球状に形成されていることがわかった。

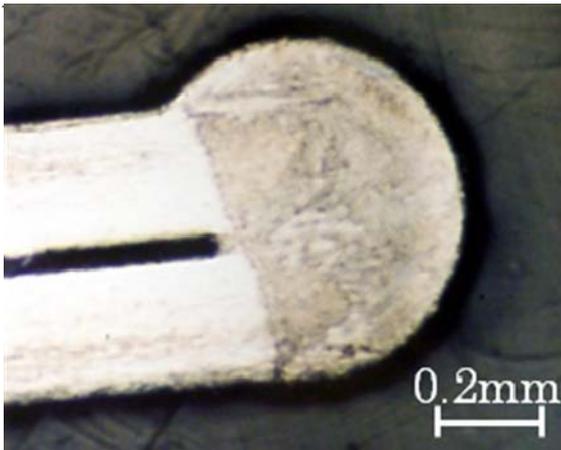


図 8 溶接ビード部 (1層用)

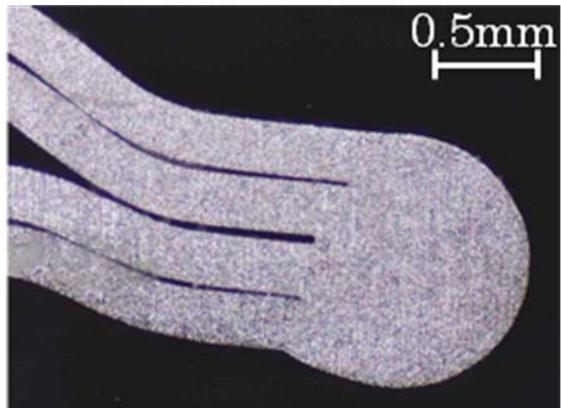


図 9 溶接ビード部 (2層用)

4. 2 溶接部の硬さ及び強度の推定

通常溶接部の健全性をみるのに引張試験を実施するが、薄板の拌み溶接である今回のサンプルでの直接引張試験では、引き裂く形になり、溶接部に応力集中が起こり易く適切な評価が困難であると考えた。

一般に材料の引張強さと硬さとの間には一定の相対関係が成立することが知られており、今回の溶接部の機械的強度を推定するために、硬さを測定した。その結果を図 10 に示す。これより、母材と溶接ビード部の硬さはほぼ同程度であり、その硬さ $Hv \approx 180$ から引張強さ (N/mm^2) $= 1/3 \times Hv \times 10$ より $\sigma_B = 600N/mm^2$ 位と推定される。

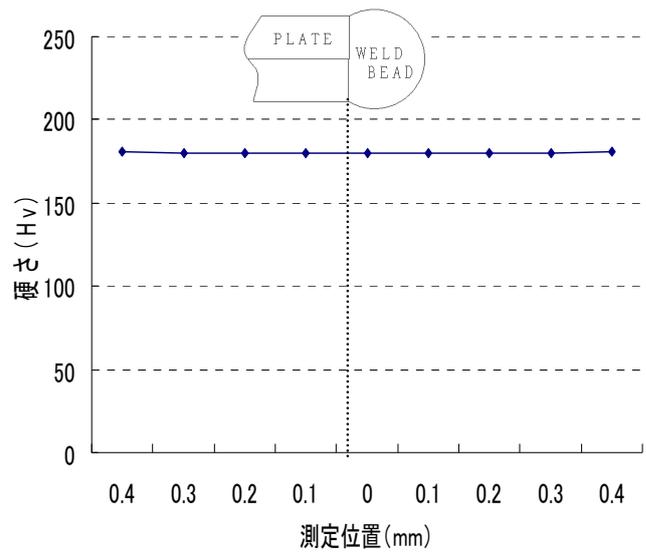


図 10 硬さ試験

4. 3 バネ定数測定

本溶接ベローズの荷重-変位特性を測定した結果を図 11 に示す。バネ定数は約 $90N/mm$ (1層用 10山) 及び、約 $240N/mm$ (2層用 10山) ある。溶接ベローズとしての特長に、高伸縮性があげられるが、本溶接ベローズは高压用途とするため比較的板厚を厚くし、スパン [(外径-内径) $\times 1/2$] を小さくしている。このため、バネ定数は高い値となっている。

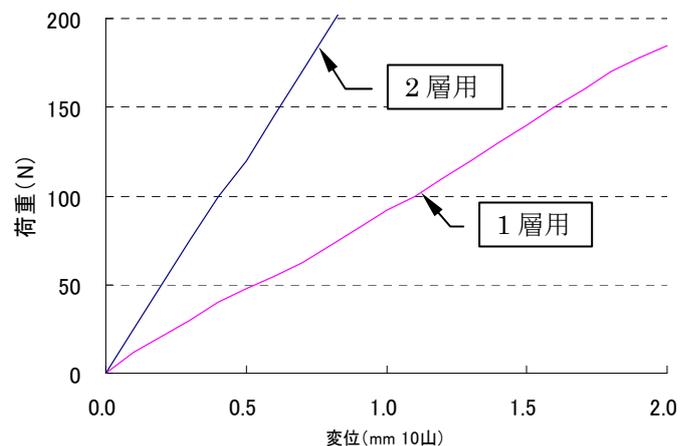


図 11 荷重-変位特性

4. 4 漏れ試験

本溶接ベローズの使用目的は、弁棒伝いの漏れ防止材としての利用である。この方法は、溶接ベローズの一端を運動する弁棒側に、他端を静止しているベローズフランジ側へ溶接にて取付け組立てる。

この部分をベローズトリムと呼ぶ。供試品は、図 12 に示すように 1 層用、2 層用を各 3 本用意した。

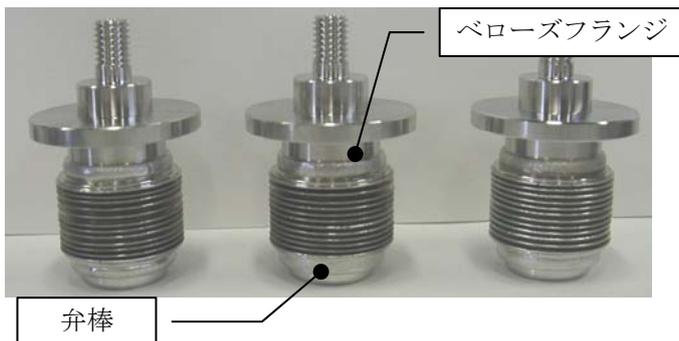


図 12 ベローズトリム (1 層構造)

弁部品であるベローズトリムには、耐圧性、気密性が求められる。これゆえ、溶接ベローズの内周、外周のそれぞれの溶接部に 1 ヶ所でも漏れる箇所が存在すれば使用できない。これゆえ、漏れ試験は重要な試験となる。漏れ試験を実施するため図 13 に示す試験用のエアシリンダー型のバルブを製作し、本弁の中に上記ベローズトリムを搭載し組立てた。

尚、溶接ベローズの伸縮量である弁作動量は、シリンダー上部にピストンロッドが突き出すようにしてあり、観察が容易にできるようにした。

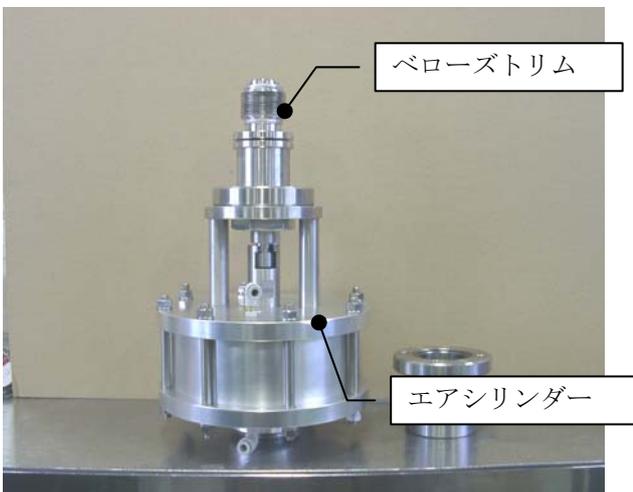


図 13 試験弁への搭載

[耐圧・気密試験]

本弁内へ、弁開の状態にて設計圧力の 1.5 倍の圧力を N_2 ガスにて加え、10 分間保持後、図 14 に示すように圧力の降下がないこと、またスヌープ液により弁棒伝いの漏れがないことを確認した。また、上記の試験後ベローズトリムを弁から取り出し、未試験のものと比較観察した結果、ベローズ形状に大きな変形は起きておらず、充分耐圧性があることを

確認した。

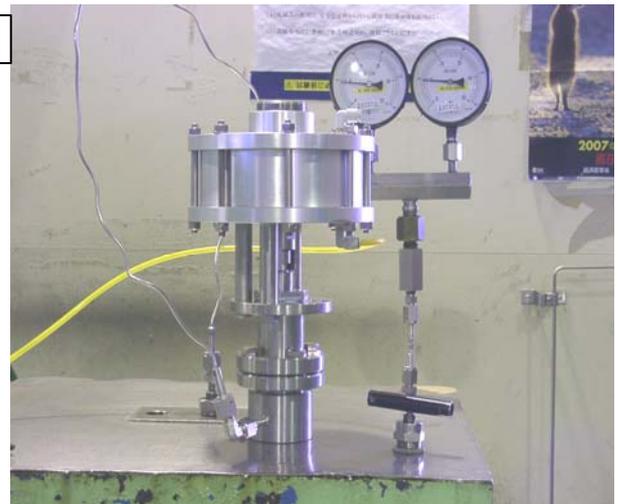


図 14 耐圧・気密試験

[He リーク試験]

その後、再びベローズトリムを弁内へ組込み、耐圧試験によるダメージを与えても溶接ベローズに漏れないことを He リーク試験 (真空外覆法) により確認した。以上の結果は表 5 に示す用に、全ての供試品に漏れはなく良好な結果が得られた。

表 5 漏れ試験結果

	1 層			2 層		
	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3
耐圧・気密試験圧力	9MPa			22.5MPa		
結果	○	○	○	○	○	○
変形度観察	○	○	○	○	○	○
He リーク試験	○	○	○	○	○	○
漏れ試験合否判定	合格	合格	合格	合格	合格	合格

※ ○ : 異常、漏れ無し

4. 5 寿命試験

漏れ試験後、試験用バルブ内に設計圧力の N_2 ガスを充填する。次に弁作動量を溶接ベローズの自由長の 10% になるように、ダイヤルゲージにてピストンロッドの運動量を測定しながらシリンダー上部のストッパーボルト位置を調整した。その様子を図 15 に示す。弁開閉スピードは、弁開 3 秒、弁閉 3 秒とし、1 サイクル 6 秒にて開閉運動を行うよう、シリンダーへの圧気供給口の絞り弁を調整し、さらに供給圧気切替用のソレノイドバルブの切替時間を調整する。

尚、弁内圧力は圧力センサーにて検知し、溶接ベローズが破損した際、圧気が抜け圧力降下時、ソレノイドを停止するように制御回路を図 16 に示すように組んでいる。以上の開閉作動による 1 層用、2 層用のベローズの寿命試験結果をそれぞれ表 6、表 7 に示す。本結果から、溶接ベローズの寿命は、クラス 300 用は 5,000 回程度、また、クラス 900 用は、1,000 回程度期待できる。しかし、本試験の場合、内圧は負荷されるものの静圧であり、実際には、弁開閉時変動圧を受けるであろうことから条件は更に悪くなることが予測できる。今後の更なる検証が必要である。



図 15 寿命試験（作動量調整）

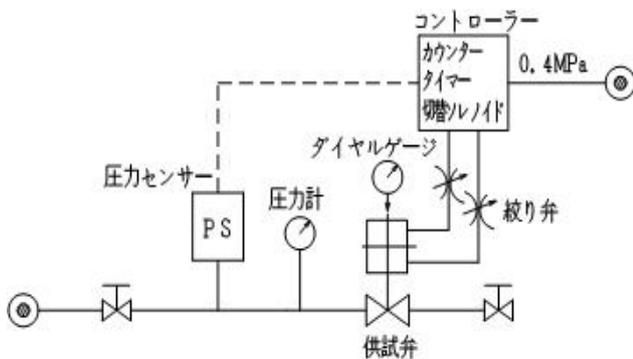


図 16 制御回路

4. 6 分解点検

破損した溶接ベローズに内圧 0.3MPa を加え、スヌープ液による発泡試験にて図 17 に示すように漏れ箇所の特定制を行った。その結果、いずれのベローズも内径溶接部の近傍であった。

このことは CAE による発生応力の解析の結果ともよく一致していることがわかり CAE 解析の有効性が確認された。

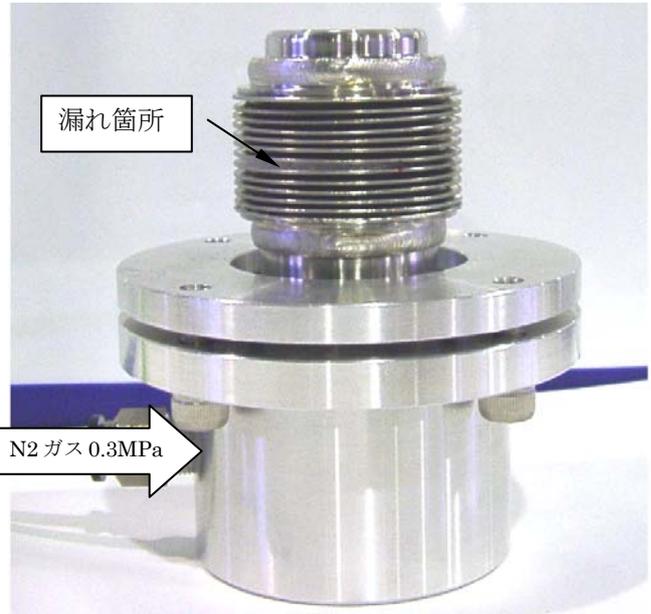


図 17 発泡試験

表 6 寿命試験結果

サンプル No.	クラス 300 用		
	No.1	No.2	No.3
弁内 充填圧力	6MPa		
破損回数	5,300 回	6,500 回	6,800 回
破損箇所	内径側 溶接部 付近	内径側 溶接部 付近	内径側 溶接部 付近
破損箇所 スケッチ			

表 7 寿命試験結果

サンプル No.	クラス 900 用		
	No.1	No.2	No.3
弁内 充填圧力	15MPa		
破損回数	1,200 回	1,300 回	1,000 回
破損箇所	内径側 溶接部 付近	内径側 溶接部 付近	内径側 溶接部 付近
破損箇所 スケッチ			

参考文献

- 1) 溶接学会編、溶接・接合便覧、丸善、1990 年
- 2) 大和久重雄 鋼熱処理アラカルト、日刊工業新聞社、昭和 53 年
- 3) バルブ講座編纂委員会 初歩と実用のバルブ講座 日本工業出版 平成 17 年
- 4) 進藤明夫、瀬口康幸、横田二郎 日本機械学会論文集 36 巻 283 号 PP345~355 昭和 45 年
- 5) S. Graemiger 金属ベローズ 配管と装置 日本工業出版 1969 年 6 月号

5. 結言

溶接ベローズを開発するにあたり、その形状決定の過程において CAE 利用による応力解析を試みた。また、薄肉ドーナツ形円板のワーク押さえ治具及び回転機構を専用機として高精度に設計製作した。これを利用しマイクロプラズマ溶接法での溶接条件を見出し微細溶接による溶接ベローズの製作を行った。さらに、本ベローズを圧力クラス 300 及びクラス 900、弁サイズ 25A の試験弁に組み込みベローズバルブとしての試験を行った。その結果は以下のとおり。

- (1) 寿命試験により破損した溶接ベローズの部位と CAE による応力解析の結果がよく一致していることより、CAE 利用の有効性が確認された。
- (2) 溶接熱によるワーク変形歪は、治具材及び溶接条件により軽減されることがわかった。
- (3) マイクロプラズマ溶接法による溶接は、薄板溶接に充分制御可能である。また、ワークのバラツキ及びその条件の許容範囲が比較的広いことがわかった。
- (4) バルブの弁棒シール材としてのベローズとして、溶接ベローズの利用の可能性を見出すべく、初期データが得られた。
溶接ベローズについて今後も、更なるデータの蓄積が必要であると考えます。

高感度センサーの開発

株式会社ピュアロンジャパン
福島県ハイテクプラザ

高感度センサーの開発

Development of good sensors of the sensitivity

株式会社ピュアロンジャパン

高橋 誠

福島県ハイテクプラザいわき技術支援センター

佐藤善久

熱量の変化を検出する液面検出センサーは、シース部を薄板による溶接構造にすることが精度的かつ価格的に有効である。同様に圧力センサーも、ダイヤフラムの厚み寸法の安定した薄板による溶接構造にすることで高感度、高精度化が期待できる。そこで、マイクロプラズマ溶接機を用いた微細溶接技術を活用して、精密機器である部品を溶接構造化することによって、高精度で且つ安価な部品を開発することを目的として、各センサーの試作を行った。また、今回の成果を応用してハイブリッドフィルターの実用化に成功した。

Key words: 液面検出センサー、圧力センサー、微細溶接、マイクロプラズマ溶接

1. 緒言

当社は液面検出センサーや圧力センサーの新規開発と製造販売を主力の事業としている。液面検出センサーは接液部がすべてSUS316L材で構成されており、熱センサー方式を採用することと併せてコンタミネーションの抑制等に優れた性能を示す。また、液面検出センサーは熱量の変化を捉えているから、感度を高めるためにはシース部の板厚を極力薄くする必要がある。同様に圧力センサーも高い感度を得るためには、ダイヤフラムを薄くすることで圧力に対する弾性変形量を大きくする必要がある。それらのセンサーの開発と製品化には安価に大量に製造が出来る、厚み寸法の信頼性の高い極薄板の溶接・接合技術が必要である。

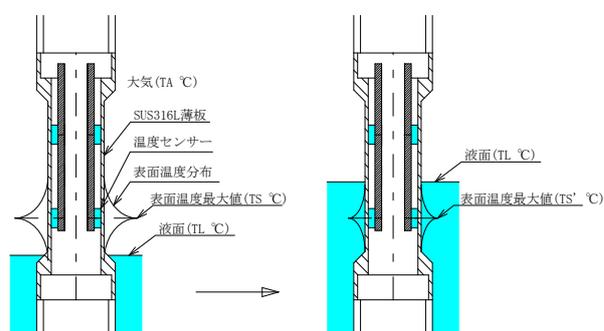
当社はセンサーの製造設備をはじめ、検査装置等の評価設備は社内に保有しているので、極薄板の溶接技術により、更に競争力の高い製品開発が可能となる。また、安価で信頼性の高いセンサーを市場に投入することが可能となることで業績向上にも大いに貢献することが期待できる。今回のセンサーは複数の得意先からの要求によるものであるから、それらが開発できれば販路は確保されている。

2. 液面検出センサーについて

2. 1. 動作原理

図1に示す内部構造により、SUS316Lの薄板の裏側に平面型の白金温度センサーを面密着させ、定電流を流し自己発熱させる。この熱がSUS316Lの薄板を通過し表面の温度を上昇させる。この発熱面に接触する媒体の温度と比熱の違いにより、発熱面の温度が変化をする。その変化が温度センサーの抵抗値の変化となり、液面の検出信号として利用できる。

液面検出センサー動作原理



$\Delta T = TS - TS'$ によって 液面の有無を検出している。

図1 液面検出センサーの構造

2. 2. SUS316L 薄板の厚みの設計

金属を伝わる熱伝導の状態方程式である、一階線形微分方程式の解を得ることによって、定常状態におけるSUS316L薄板表面の温度分布を解析した。大気中と純水中における温度分布の解析例を、それぞれ図2と図3に示す。

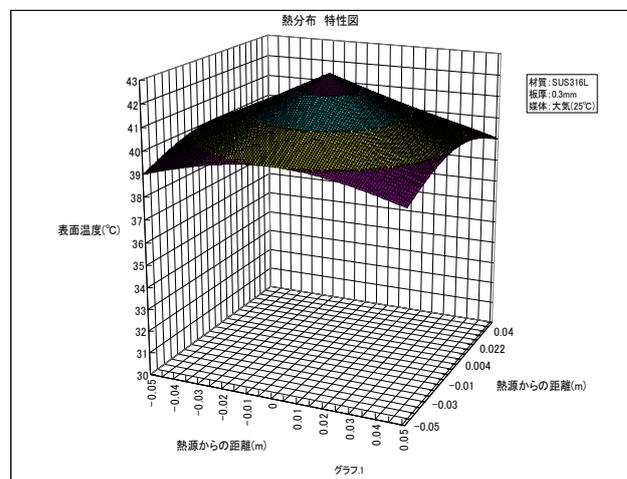


図2 温度分布の解析例 (大気中)

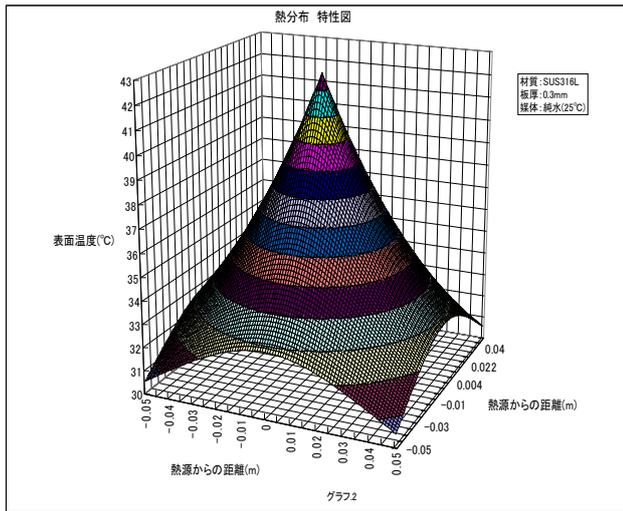


図3 温度分布の解析例（純水中）

図2と図3の比較から、大気中での温度分布より、純水中の熱源を中心とした温度分布が急峻であることがわかる。これは、媒体中へ移行する熱量が大気中よりも多いことを示している。この温度分布の変化の度合いが大きいほど、液面が高感度で検出できる。また、微分方程式の解から、変化の度合いは薄板の厚みに反比例していることがわかった。薄板の板厚は熱変化の度合いを大きくするには薄いことが望ましいが、0.9MPaの圧力にも耐える必要がある。そこで、高い感度と機械的な強度を満足するために、板厚は0.3mmが最適であると判断する。

2. 3. 構造の設計

SUS316Lの薄板を通して白金温度センサーから媒体へ熱量を大量に伝えて高感度な検出を行うためには、白金温度センサーと薄板の接触面積を大きくとる必要がある。このため、白金温度センサーは平面形状を採用しており、液面検出センサーの内面形状も角穴にする必要がある。従来の機械加工による部品の製作方法では、内面形状を角型に加工するためにワイヤー放電加工によって実現されているが、加工工程時間が5~6時間を要し、高価格となることや、大量生産が出来ないことなどの問題がある。従って、図4に示すように薄板部分を溶接構造にすることで、角穴加工をなくし、且つ内蔵する白金温度センサーやそれらを補助するための他の内蔵部品の組立の容易性を考慮する必要がある。上記の懸案事項を考慮して、各構成部品の設計図を作成した。

構造設計の妥当性を検証するため、SUS316Lの薄板(0.3mm)に白金温度センサーを貼り付けて定電流を流し、サーモグラフィによって表面の温度分布を観察した。図5に示すように、中央部の赤色部分が白金温度センサーの自己発熱により加熱している部分である。

図中右に示されている温度レベルバーによって温度を読み取ると、温度はおよそ55°Cであり、また、表面温度分布は左側の温度グラフによって、指数関数状になっており、演算の結果と整合していることがわかった。

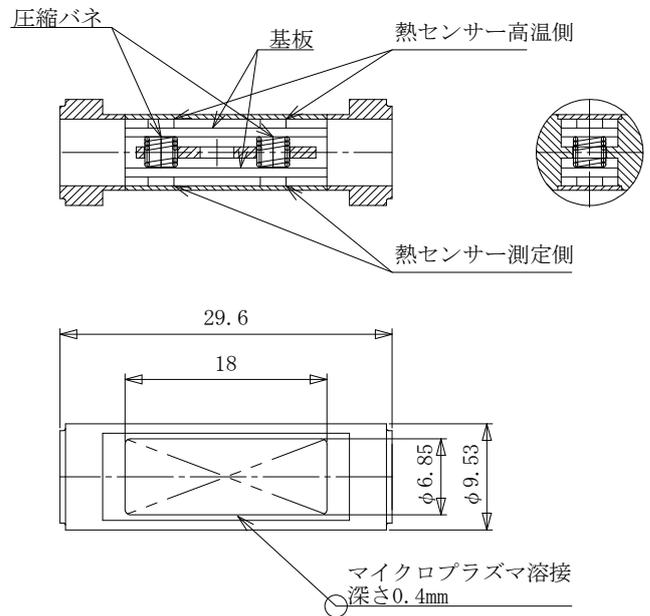


図4 液面検出センサーの構造図

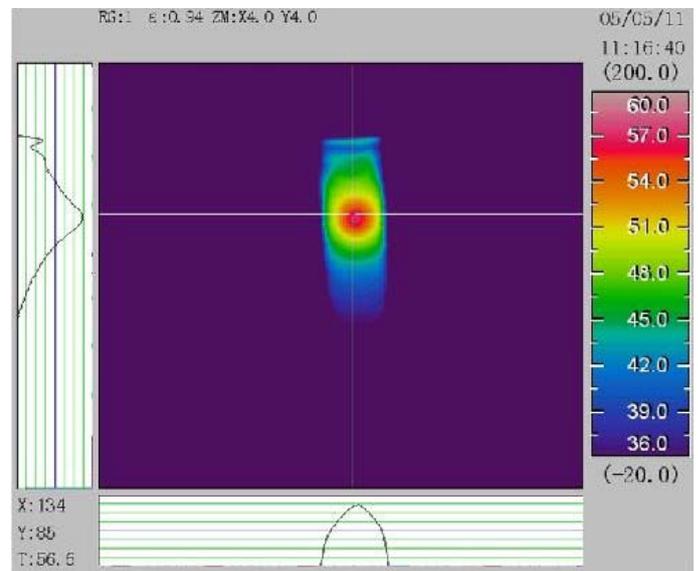


図5 表面の温度分布

2. 4. 部品の試作

製造時間や価格を知るために、液面検出センサー用の部品を実際に試作した。従来はワイヤー放電加工を用いて角穴加工を行っていたが、溶接構造とすることで一般的なプレスや機械加工で部品を製作できることが確認できた。そのため、部品の工数と価格は従来の1/10程度にできることがわかった。次の図6から図10に試作した部品を示す。

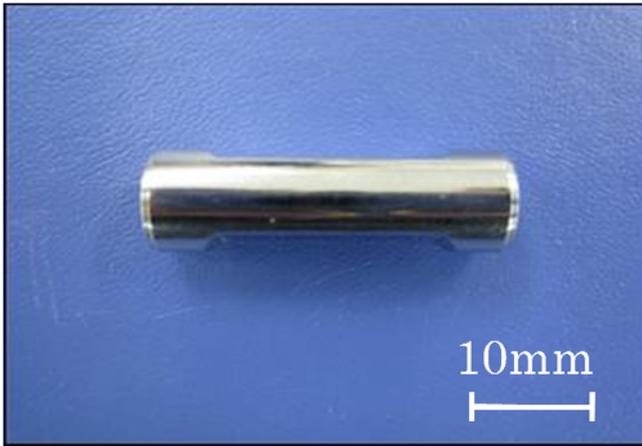


図6 中間プローブ



図7 中間プローブ蓋

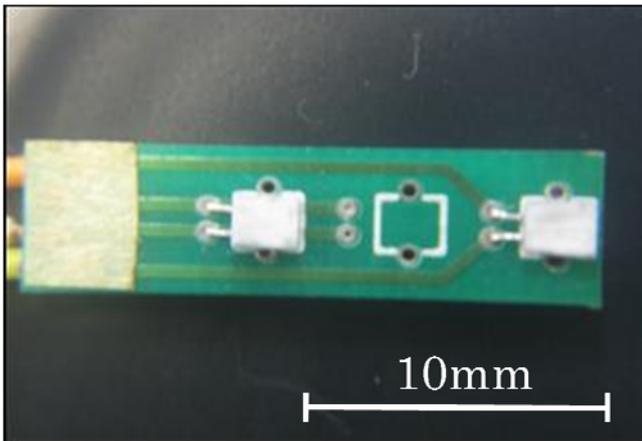


図8 白金温度センサーと PCB (中央線白角)

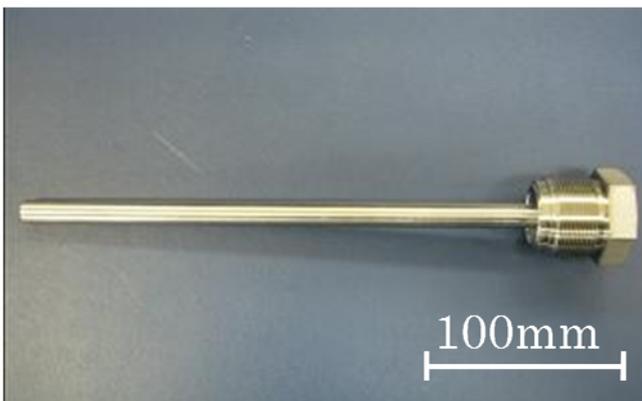


図9 センサーボディー

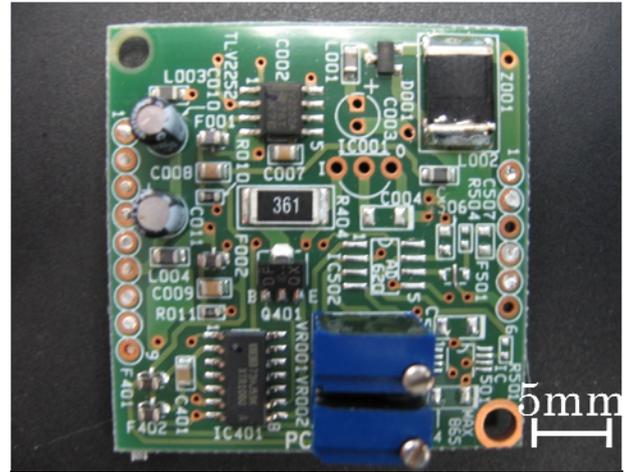


図10 トランスミッター

3. 圧力センサーについて

3. 1. 圧力センサーの種類と動作原理

圧力センサーとは、ガス媒体や、液体の圧力を電気量に変換するデバイスであり、圧力の強弱を測定する目的がある。圧力を電気量に変換する方式としては機構やストレインゲージの材質などによって様々であり、例えば、圧電方式、ピエゾ方式、電極間の静電容量の変化を捉える静電容量方式などが挙げられる。これらは用途とコストに応じて選定される。いずれの方式も多くはダイヤフラムと呼ばれる薄膜の部品の圧力に比例する歪量を利用して電気量に変換される。

以下に当社が採用しているストレインゲージ方式について述べる。

ストレインゲージの抵抗値Rは次式にて現される。

$$R = \rho L / S \quad (\Omega) \quad \text{---(1)}$$

ρ : 抵抗率、L : ストレインゲージの長さ、
S : ストレインゲージの断面積

ダイヤフラムが圧力を受けて歪量が発生すると、ストレインゲージはL+ Δ Lの長さに変化し、断面積はS- Δ Sと減少するので、抵抗値は次式にて現される。

$$R_p = \rho (L + \Delta L) / (S - \Delta S) \quad (\Omega) \quad \text{---(2)}$$

ただし、 $\Delta L \gg \Delta S$ の関係があるので、実際の抵抗値は圧力の変化に線形的に変化することがわかる。

上記(2)の計算式から以降の計算を簡素化するためにゲージ率Kに変換する。

ゲージ率とは歪量と抵抗変化の比をいい、ストレインゲージの選定の目安となる特性値である。

(1)、(2)式より次式にて算出される。

$$K = (R_p / R) / (\Delta L / L) \\ = (R_p / R) / \epsilon_s \quad \text{---(3)}$$

ϵ_s : ストレインゲージの歪 ※ $\epsilon_s \propto \epsilon$

3. 2. ストレインゲージの回路構成

回路構成には様々な方法があるが、温度変化による誤差の打ち消し効果や出力電圧の最大化などから、ストレインゲージを4個使用し、図11に示すようなホイートストンブリッジ回路に構成することが望ましい。

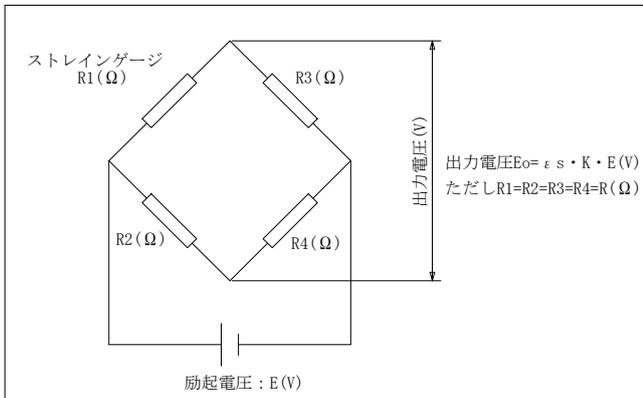


図11 ホイートストンブリッジ

3. 3. ダイアフラムの設計

次式(5)を用いてダイアフラムの弾性限度内での歪量が確保できる SUS316L の薄板の厚みを求めた。

$$\epsilon_{\max} = \frac{3(m^2 - 1) P R^4}{16 E m^2 - t^3} \quad (5)$$

ϵ_{\max} : 歪量
 m : ポアソン比
 P : 圧力
 R : 半径
 E : ヤング率
 t : 板厚

結果 : 0.1mm であれば、弾性限度内であり、また、圧力に比例した歪量が確保できるので、高精度な圧力センシングが可能と判断した。

3. 4. ダイアフラムの構造設計

ダイアフラムの薄板部は、通常の旋盤加工や研削加工では、加工中の熱の影響で、平坦度が確保出来なかったり、切粉などの衝突で薄板部が裂損してしまって大量に安定した部品製造が出来なかった。この問題を解消するために、圧延されて均一な厚み寸法を持つ 0.1mm の SUS316L 板を用いて、ダイアフラムとすると、高精度なダイアフラムが同じ品質で大量に生産できると考えた。従って、薄板を、マイクロプラズマ溶接によって低歪で溶接する図12のような構造を考案した。

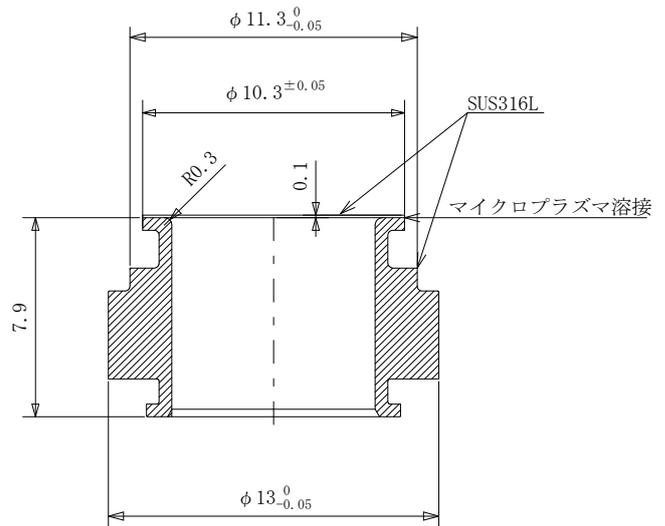


図12 溶接構造の圧力センサー

3. 5. ダイアフラムの部品試作

液面検出センサーと同様に、図13と図14に示すダイアフラムの部品を試作し、製造時間と価格を検証した。

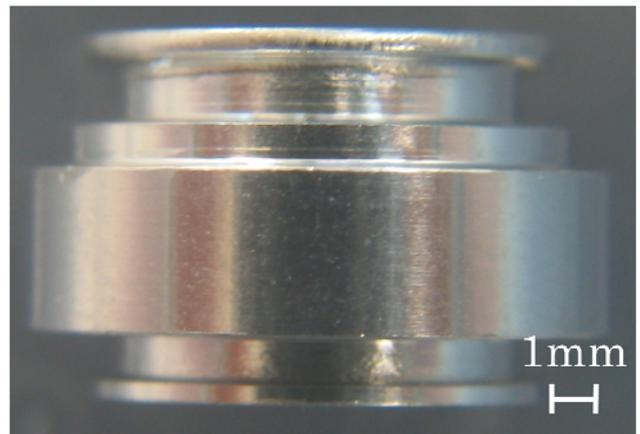


図13 圧力センサーのボディー



図14 圧力センサーのダイアフラム (板厚 0.1mm)

部品試作の結果、切削工程や金型切断による加工の難易度が低くなるので、短時間で大量に生産出来る事から、部品が安価に製作できることが解った。

4. 溶接実験

4. 1. 溶接機と回転制御付溶接治具

図 15 に今回の溶接実験で用いたマイクロプラズマ溶接機を示す。

同様に、図 16 にはマイクロプラズマ溶接機と、設計・製作した回線制御付溶接治具とのセットアップ例を示す。



図 15 マイクロプラズマ溶接機



図 16 回転制御付溶接治具とのセットアップ例

4. 2. 液面検出センサーの試作

ヒートシンクやプラズマトーチを図 17 のようにセッティングし、表 1 の溶接条件にて液面検出センサーを試作をした。図 18 には溶接実験の様子を示す。

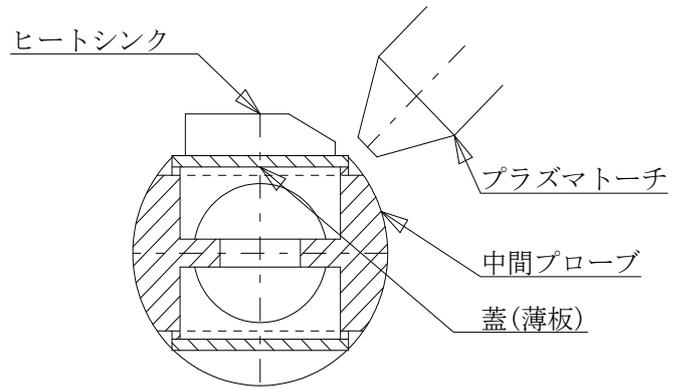


図 17 試料のセッティング

表 1 液面検出センサーの主な溶接条件

ピーク電流	10A
ベース電流	7A
周波数	9,900Hz
デューティー比	50%
溶接速度	2mm/sec

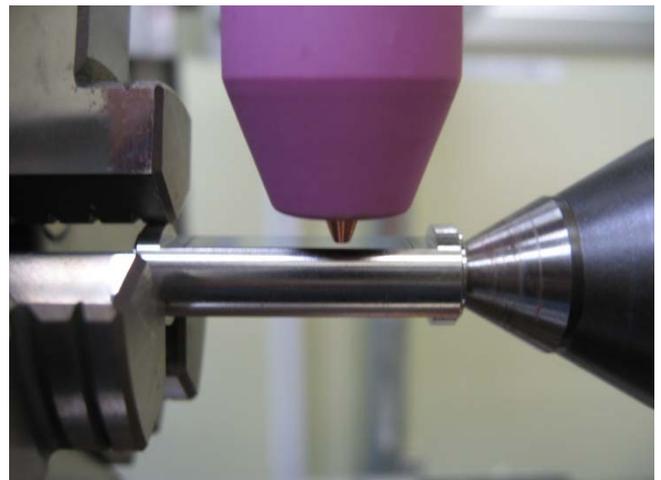


図 18 溶接実験の様子

4. 3. 圧力センサーの試作

薄板への入熱を極力回避するため、図 19 に示すように、銅のヒートシンクを製作して表裏から接触させた。表側はビード付近までヒートシンクを設けた。裏側からは内面の焼け防止と冷却のために不活性ガスを供給した。図 20 にヒートシンクを装着した溶接実験の様子を示す。図 21 には溶接箇所の様子を示す。

表 2 に示す溶接条件により、圧力センサーを試作した。マクロ観察を行って溶接ビード幅や溶け込み深さを測定し、溶接部の品質を検証することにした。

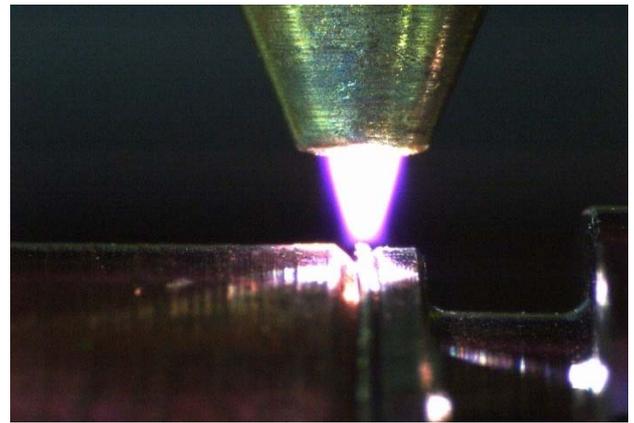


図 21 溶接部の様子

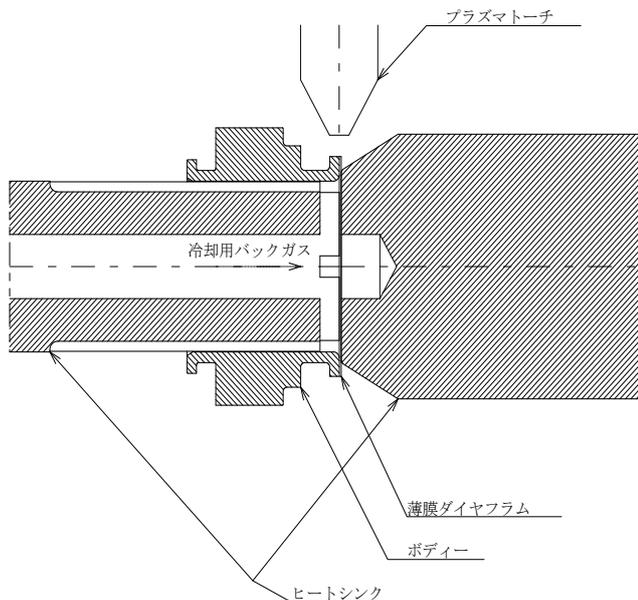


図 19 ヒートシンクの取付



図 20 ヒートシンク装着の様子

表 2 圧力センサーの主な溶接条件

ピーク電流	17A
ベース電流	7A
周波数	50Hz
デューティ比	50%
回転数	5rpm

5. 結果

5. 1. 液面検出センサーの試作結果

溶接した試作品の溶接部の表面観察を行った結果を図 22 および図 23 に示す。

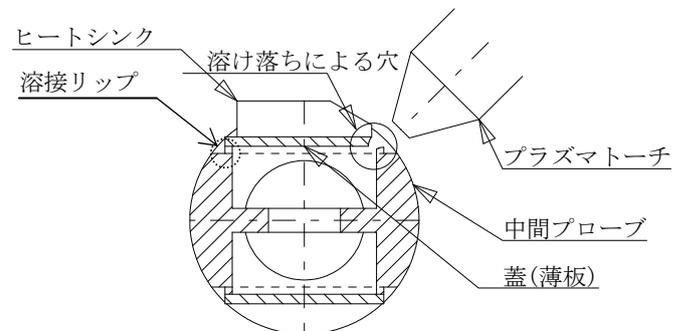


図 22 溶接部の観察

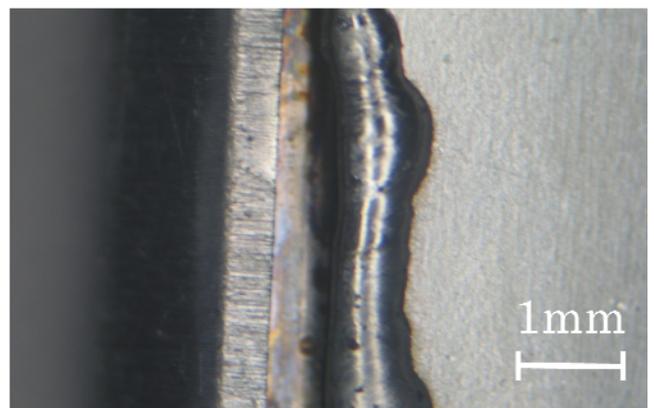


図 23 融合不良の様子

蓋のみが溶融したことによって融合不良となり、穴が発生していることがわかる。ヒートシンクの位置を溶接点に近接させて薄板への入熱の制限を試みたが、アンダーカットが発生して穴が開いた。電流値を下げて試みたが、試料を溶かすことが出来なくなって、接合が出来なかった。現行の溶接部の寸法では、ステンレスの溶融接合に適した入熱バランスが確保できないことがわかった。薄板はヒートシンクと接する部分は溶けないことが判ったので、中間プローブ側の溶接リップの熱容量を上げて溶融熱に十分耐えうる様、寸法の見直しが必要と考える。現在リップの寸法は高さ0.5mm、幅0.5mmであるので、それぞれ2倍の寸法とし、再設計を行うことにした。

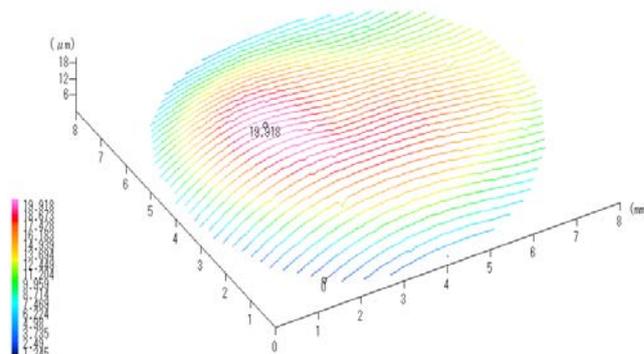


図 25 ダイアフラム表面のプロファイル

5. 2. 圧力センサーの試作結果

図 24 示すマクロ観察より、溶接ビードの幅は0.5mmで溶け込み深さは0.2mmであった。常用使用圧力0.1MPaと設定しているので、破壊圧力はその3倍と設定すると0.3 MPaなので、耐圧計算によれば、0.15mm以上の溶け込みが要求されるので、今回の溶接条件によれば0.2mmを達成しているので問題はないと考える。

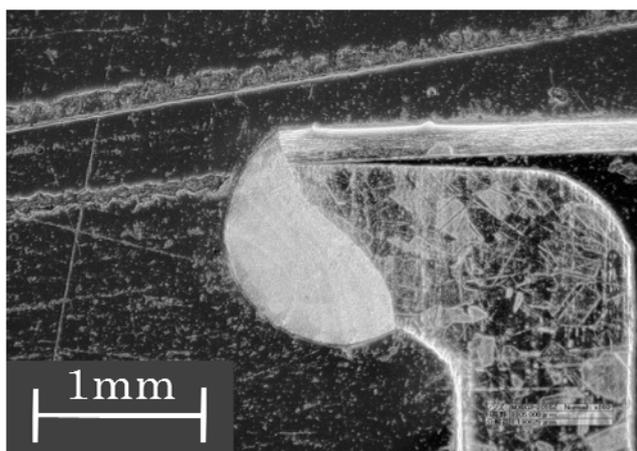


図 24 溶接部断面の観察

次に、表 3 の条件でダイアフラム表面のプロファイルを測定した。図 25 に示すように、ダイアフラム表面の高低差は最大で19.918μmであることがわかった。

表 3 ダイアフラム表面のプロファイル測定条件

測定機器名	非接触 3次元測定装置 三鷹光器社製 NH-3SP
測定範囲	ダイアフラムの直径8mmの範囲
測定ピッチ	0.1mmと0.2mm (X-Y)

ダイアフラム表面の歪は、絶縁膜やストレインゲージの形成工程を考えると、20μm以内であれば品質は確保出来るので、今回の条件であれば合格とされる。しかし、この歪は限りなくゼロであれば、より品質が安定し、高精度な圧力センサーを作ることが出来る。今後は溶接リップ形状や、ヒートシンクによる余分な入熱の排除を工夫することによって、更に歪を小さくすることが出来ることが期待できる。

7. 結言

微細溶接技術の基礎的な研究を行い、高精度、高感度、安価なセンサー部品を開発することを指標とした。また、具体的なセンサーとして、圧力センサーと液面検出センサーを挙げ、部品を試作し、溶接実験を実施し、評価も行った。

圧力センサーの試作では、センシングの精度を確保するための、ダイアフラムの歪を20μm以下と、破壊圧力を保証するための溶け込み深さ0.15mm以上が達成出来た。

液面検出センサーは溶接リップ寸法の問題から、溶接条件やヒートシンクの位置、速度、トーチ角度の変更によって溶接可能な条件が見出せなかった。中間プローブ側のリップが溶け落ちていることからリップ寸法の再設計が必要なことが解った。

今回解ったことは TIG 溶接では困難であった薄板(0.1~0.4mm)の溶接が、マイクロプラズマ溶接法ならば実現が出来ることである。実現出来る要素としてはプラズマアーク柱が TIG のアーク柱に比較して細く、熱集中が良好であること。このことによって、低い電流値でも所要の溶け込み深さが得られ、不要な箇所への入熱を避けることが出来るということにある。

今回の溶接実験の結果から、マイクロプラズマ溶接法は、広く他の製品にも応用できることが判った。具体的な事例として、SUS316Lを用いて焼結した、フィルターエレメントへの応用が挙げられる。現行はTIG溶接法により、管体とフィルターエレメントを溶接しているが、空隙を有する焼結体には特有の溶解性がある。そこで、溶接時の入熱の具合や、気温、湿度、トーチのセッティング、ワークのセットなどが品質に大きく影響するので、状況に合わせて条件を調整する必要があった。溶接士の熟練度が品質に大きく影響するため、溶接作業のチェック項目が多くて調整に時間がかかるので、生産工数の改善が進みにくいのが現状であった。マイクロプラズマ溶接機と回転制御付溶接治具を利用することによって、溶接条件と溶接物の回転角度との同期による入熱管理も容易に出来る。また、再現性も高いので、ある程度の熟練度を有する技術者であれば、高品質な溶接が繰り返し可能になり、50%以上の工数削減が実現できる。実際に、TIG溶接法や電子ビーム溶接法では、最適な溶接部の品質や生産性の向上に対応できなかったが、本研究による微細溶接技術を応用することによって、図 26 に示すハイブリッドフィルターの商品化が実現できることを確認した。



図 26 実用化できたハイブリッドフィルター

今後の課題として、様々な溶接構造の部品を開発するにあたり、個々の特有の形状や熱容量を考慮し、事前に溶接接合に必要な寸法、リップの形状などを熱的シミュレーション等を有効に活用して高精度に予測し、また、ワークやヒートシンクとトーチの物理的な干渉を避けるための CAD によるシミュレーションでの確認方法などを確立し、少ない試作回数で部品の開発が出来る環境を整えることで開発のコスト低減と時間短縮を考える。

謝 辞

本研究開発の推進にあたり、微細溶接技術に関して千葉大学工学部渡部武弘氏にご指導を頂きました。プラズマアークに関して大阪大学接合科学研究所 田中学氏にご指導を頂きました。マイクロプラズマ溶接技術に関して、小池酸素工業株式会社 溶接グループ岩堀千早氏、同 平野康治氏、佐藤 泉氏にご指導を頂きました。

多大なるご協力および助言を頂いた皆様に改めて感謝いたします。

福島県ハイテクプラザ研究報告書
Technical Reports of Fukushima Technology Centre

地域活性化共同研究開発事業
精密機器のための微細溶接技術による応用製品の開発

平成21年2月発行

発 行

福島県ハイテクプラザいわき技術支援センター
〒972-8312 福島県いわき市常磐下船尾町杭出作23-32
TEL 0246-44-1475 FAX 0246-43-6958

編 集

福島県ハイテクプラザ
いわき技術支援センター
機械・材料科

※この研究は、電源立地特別交付金により実施した事業です。