

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「ファイバ集積型レーザによる難溶接材ベローズの開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成25年 3月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人石川県産業創出支援機構

この報告書には、委託業務の成果として、産業財産権等の対象となる技術情報（未出願又は未公開の産業財産権等又は未公開論文）、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、通例の取り扱いにおいて、非公開とする。ただし、行政機関の保有する情報の公開に関する法律（平成11年法律第42号）に基づく情報開示請求の対象の文書となる。

## 目 次

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	4
1-2	研究体制	5
1-3	成果概要	8
1-4	当該研究開発の連絡窓口	11
第2章	溶接ベローズ製造装置の開発	
2-1	ファイバ集積によるスポット形状可変レーザー装置の開発	12
2-2	精密溶接機本体の開発	14
第3章	ニッケル基耐熱合金薄板溶接に対するレーザー光スポット形状の最適化	
3-1	溶接挙動のシミュレーション解析	16
3-2	応力解析	18
第4章	ニッケル基耐熱合金製溶接ベローズ製造のための溶接技術の開発	
4-1	内周エッジ溶接技術の開発	20
4-2	外周エッジ溶接技術の開発	21
第5章	ニッケル基耐熱合金製溶接ベローズ製品の試作	
5-1	半導体製造装置用溶接ベローズ製品の試作	23
5-2	安全バルブ用溶接ベローズ製品の試作	24
第6章	全体総括	
6-1	研究成果	26
6-2	事業展開と今後の課題	26

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### 1-1-1 研究開発の背景

発電プラントでは、発電効率向上のため使用する蒸気の高温度化高圧化が求められ、それに耐え得る各種溶接製品・部品を必要としている。例えば、溶接ベローズについては、温度600℃以上で圧力25MPa以上の環境下で長期間使用しても漏れがなく動作することが求められている。また、半導体製造用プラントでは、作動ガスに高腐食性の塩素系ガスを使用するため、それに耐え得る溶接製品・部品を必要としている。

こうした要求に応えるには、ニッケル基耐熱合金(インコネル718やインコネル625LCFなど)を素材として使用することが有効であるが、溶接が難しく、溶け込み部に割れを生じやすい。厚さ0.1mm程のドーナツ状の薄板を幾重にも重ね、その内周エッジおよび外周エッジを交互に溶接することで製造される溶接ベローズでは、一カ所でも漏れがあれば不良になる。そのため、ニッケル基耐熱合金を使用した場合の溶接ベローズの不良率は高く、製造工程で多くの素材を無駄にしている。また、工程毎に漏れ試験などの検査を頻繁に行う必要がある。その結果、納期に長期間を要し、コスト高の大きな要因となっている。

#### 1-1-2 研究開発の目的

本研究開発は、特定ものづくり基盤技術高度化指針における『(十七)溶接に係わる技術に関する事項の内、(3)発電、工業用プラントに関する事項』の下、川下製造業者等の抱える課題及びニーズである『ア.製品の使用条件の高温度化、極低温化、高圧化等高性能化ニーズへの対応』と『ウ.製造コスト削減および短納期化』に該当する事項の解決を目指した。

具体的には、発電・工業プラントを手がける川下製造業者において課題となっている「製品の高性能化」と「コスト削減」の解決のため、高温・高圧・高腐食性環境下において使用可能なニッケル基耐熱合金薄板を高品質かつ低コストで溶接する技術の開発を目指した。そして、これを適用して、耐熱性・耐腐食性溶接ベローズを低コストで製造するための技術を開発することを目的とした。

#### 1-1-3 研究開発の目標と実施結果

本研究開発では、インコネル718やインコネル625LCFなどニッケル基耐熱合金薄板を無欠陥で接合するレーザ溶接技術を開発し、難溶接材ベローズの不良率を現行の70%から0%に大幅低減することを目指した。そして、試作する溶接ベローズについて長期使用の目安となる伸縮回数100万回以上経ても気密性を堅持することを最終目標とした。

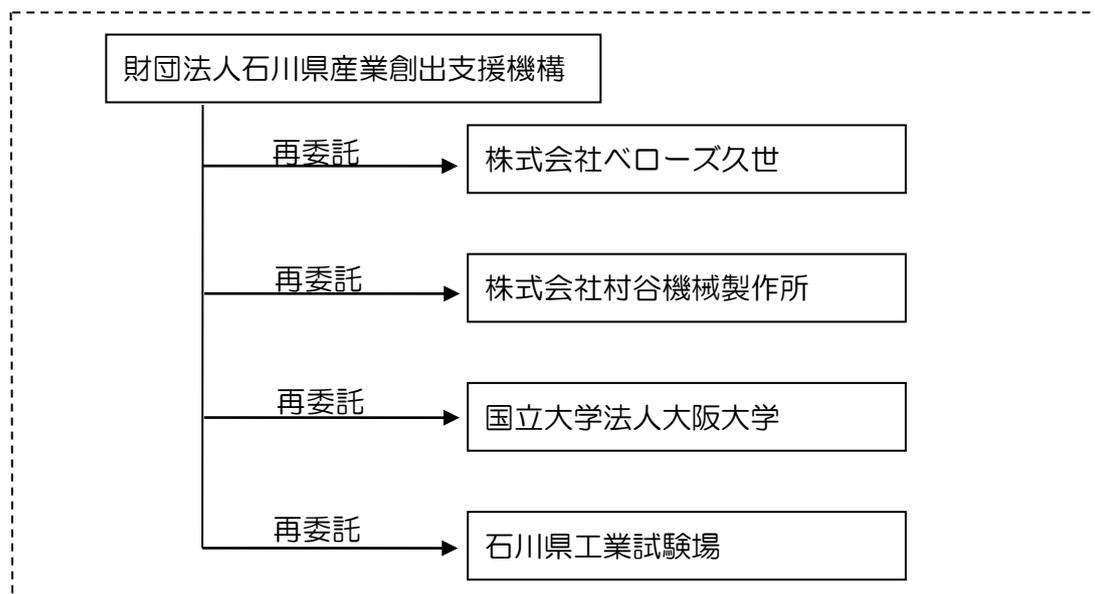
当該最終目標を達成するため、『溶接ベローズ製造装置の開発』や『レーザ光スポット形状の最適化』、『ニッケル基耐熱合金製ベローズ製造のための溶接技術の開発』、『溶接ベローズ製品の試作および性能評価』を課題と定め、開発に取り組んだ。

開発を実施した結果、スポット形状の可変を特徴とするファイバ集積型半導体レーザ装置を開発し、これを搭載したダブルヘッド型のベローズ製造装置を開発した。また、薄板レーザ溶接における溶け込み形状や発生する応力をシミュレーション解析し、ベローズ溶接に対する最適なレーザ光スポット形状を求めた。得られた最適条件を参考に、開発した装置を使用して不良率を「0%」とするニッケル基耐熱合金製ベローズに対する溶接技術を開発した。

これらの成果を基に、ニッケル基耐熱合金(インコネル 625LCF)を素材とする半導体製造装置向け溶接ベローズを試作した。不良率「0%」での製造が可能であり、1000万回の伸縮疲労試験回数後でも漏れのないことを確認した。以上のことから、当初目標を達成することができた。

## 1-2 研究体制

### 1-2-1 研究組織

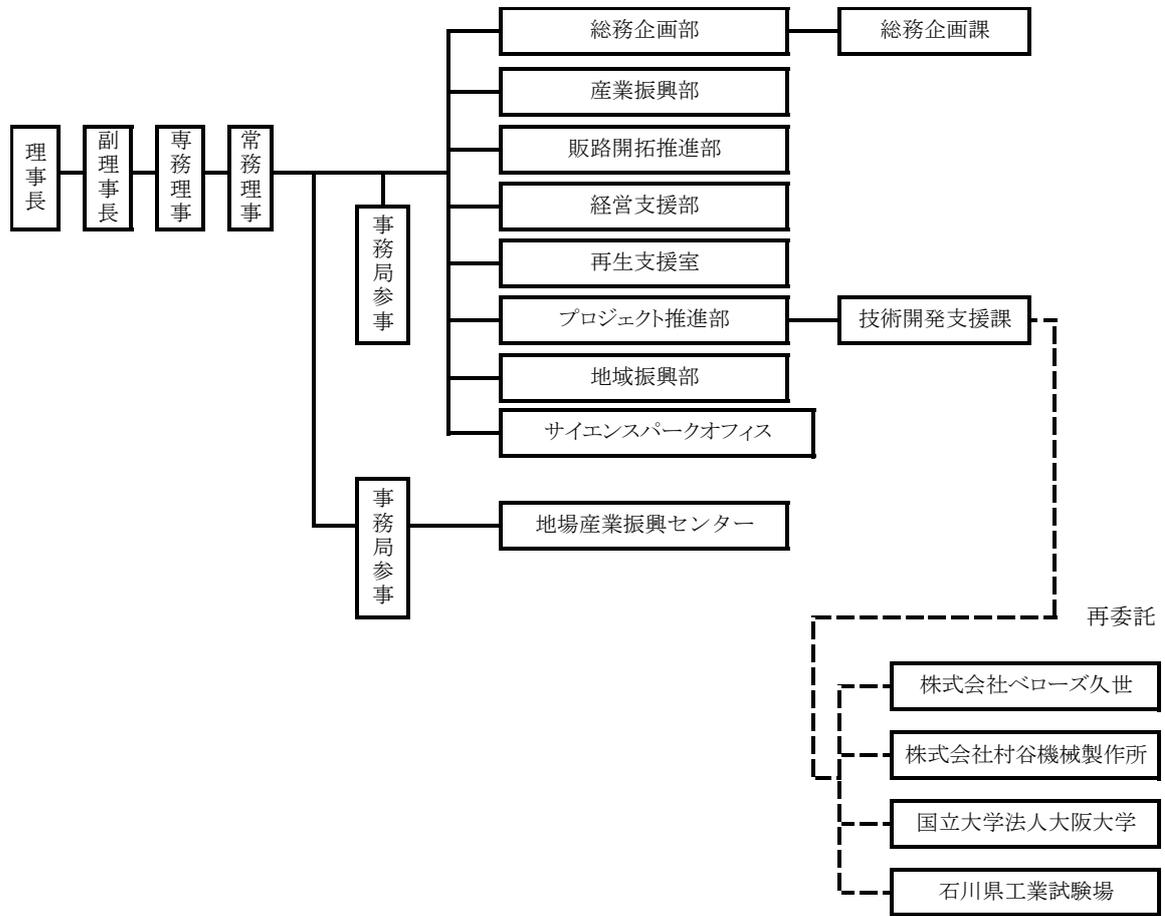


総括研究代表者 (PL)  
所属 株式会社ベローズ久世  
役職 設計開発職職長  
氏名 目木 憲一

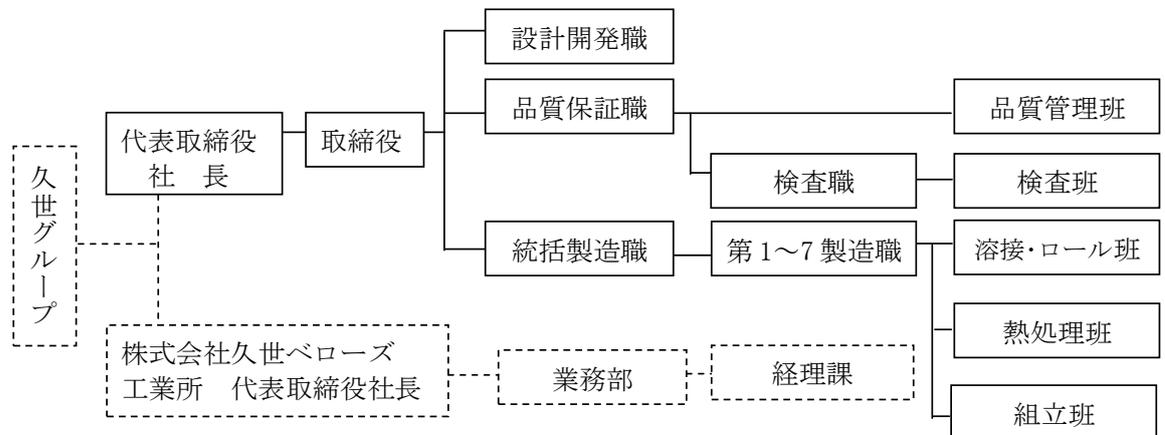
副総括研究代表者 (SL)  
所属 株式会社村谷機械製作所  
役職 開発営業部部長  
氏名 長井 久雄

## 1-2-2 管理体制

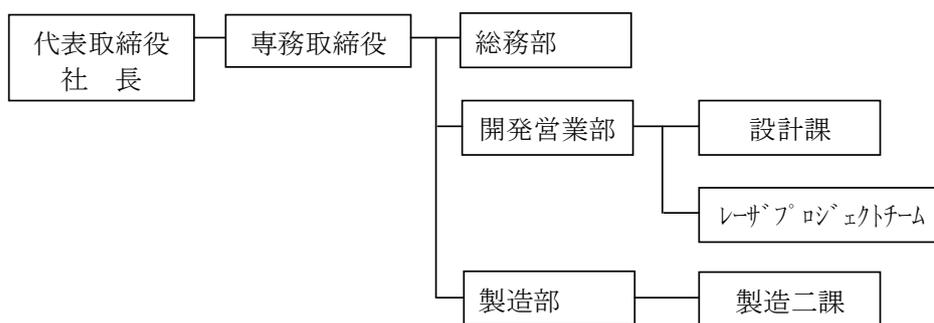
### ①事業管理機関：財団法人石川県産業創出支援機構



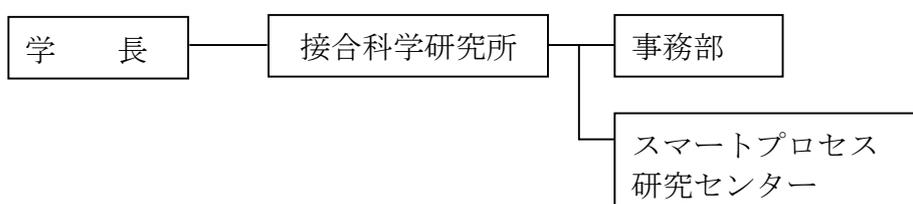
### ②再委託先：株式会社ペローズ久世



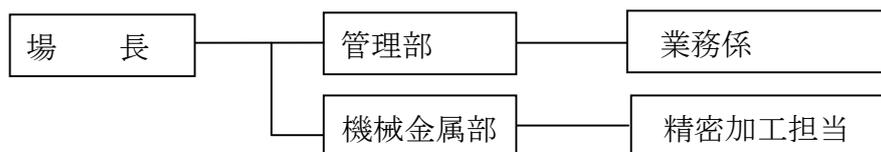
③再委託先：株式会社村谷機械製作所



④再委託先：国立大学法人大阪大学



⑤再委託先：石川県工業試験場



1-2-3 管理員及び研究員

①事業管理者：財団法人石川県産業創出支援機構

管理員

氏 名	所属・役職
西村 聡	プロジェクト推進部長
木村 孔明	プロジェクト推進部技術開発支援課
中尾 一也	総務企画部総務企画課長

②再委託先：株式会社ベローズ久世

研究員

氏 名	所属・役職
沢田 外代一	代表取締役
坪野 靖彦	第2製造職職長
松本 孝紀	第3製造職・熱処理班班長
勘山 崇	第6製造職職長
宮嶋 三臣	品質保証職職長
河合 昭彦	検査職職長
目木 憲一	設計開発職職長

③再委託先：株式会社村谷機械製作所

研究員

氏名	所属・役職
村谷 外博	専務取締役
長井 久雄	開発営業部 部長
水上 望	開発営業部設計課 課長
宮崎 健志	開発営業部設計課員
松田 文彦	開発営業部設計課員
能和 功	開発営業部レーザープロジェクトチーム チームリーダー
左今 佑	開発営業部レーザープロジェクトチーム チーム員
加納 浩一	製造部製造二課 課長

③再委託先：国立大学法人大阪大学

研究員

氏名	所属・役職
阿部 信行	接合科学研究所スマートプロセス研究センター 准教授

④再委託先：石川県工業試験場

研究員

氏名	所属・役職
坂谷 勝明	機械金属部・部長
舟田 義則	機械金属部・研究主幹
根田 崇史	機械金属部・主任技師
谷内 大世	機械金属部・技師

1-2-4 協力者（アドバイザー）

氏名	所属・役職
福井 俊光	株式会社福井製作所・取締役 技術部長
渡邊 彰三	パナソニックアクトリソリューションズ株式会社・主事
青木 潤次	株式会社堀場エステック・開発本部 VEGA 推進室
三原 孝夫	一般社団法人レーザープラットフォーム協議会・事務局長

1-3 成果概要

1-3-1 溶接ペロース製造装置の開発

(1) レーザ装置開発

○開発目標

- ・レーザー光スポット形状を 1mm×1mm の範囲内で可変
- ・作動距離 60mm 以上確保
- ・空冷式で最大出力 150W 以上

- 出力変動 1%以下

#### ○開発成果

- 1mm×1mm 範囲内でレーザー光スポット形状を可変とするファイバ集積型半導体レーザー装置を開発した。
- 90mm の作動距離を確保し、レーザー光をφ0.25mm まで集光可能とした。
- 空冷式で最大出力 300W のレーザー光を照射可能とした。
- レーザ光の繰り返し照射における出力変動を 0.52%に抑えることができた。

### (2) 精密溶接機本体の開発

#### ○開発目標

- ベローズ素材の内外周エッジ溶接を 1 台で実施
- 回転精度や位置決め精度 0.01mm 以下
- 部材供給や製品排出の自動化

#### ○開発結果

- シグ交換により内外周エッジ溶接を 1 台で可能な溶接機を開発した。
- 位置決め精度は 0.01mm 以下であった。しかし、再取り付けにおける回転精度の再現性が低く、0.03mm を超える場合もあり、目標の完全達成はできなかった。
- 自動で部材供給と製品排出を行う段取り装置を開発し、溶接機本体に取り付けた。
- サイクルタイムを 75 秒まで短縮したが、60 秒の目標時間には達しなかった。

### 1-3-2 レーザ光スポット形状の最適化

#### ○開発目標

- シミュレーション解析による薄板レーザー溶接の溶け込み形状に及ぼす板厚とレーザー光スポット形状の影響把握
- 板厚 0.1mm のニッケル基耐熱合金薄板のエッジ溶接に最適なレーザー光スポット形状の抽出

#### ○開発結果

- 薄板レーザー溶接の溶け込み形状をシミュレーション可能な解析装置を製作した
- シミュレーション解析により、溶け込み形状に及ぼす材料物性や板厚、レーザー光スポット形状の影響を明らかにした。
- 板厚 0.1mm のニッケル基耐熱合金製ベローズの溶接において、平滑で漏れのない溶け込みを得るための集光形状やサイズを明らかにした。

### 1-3-3 ニッケル基耐熱合金製溶接ベローズ製造のための溶接技術の開発

#### (1) 内周エッジ溶接技術の開発

##### ○開発目標

- ・溶接不良率「0%」
- ・溶接焼けによる変色防止
- ・内周エッジ溶接後の内径バラツキを 0.02mm 以下に抑制

##### ○開発成果

- ・ニッケル基耐熱合金(インコネル 625LCF、インコネル 718)製ベローズにおいて漏れ不良率「0%」の内周エッジ溶接技術を開発した。
- ・レーザヘッドに取り付けた同軸ノズルにより不活性ガス(アルゴンガス)を溶接部に適量吹き付けることで溶接焼けを防止できた。
- ・内周エッジ溶接後の内径バラツキが $\pm 0.007$ mm であり、目標を達成した。

#### (2) 外周エッジ溶接技術の開発

##### ○開発目標

- ・溶接不良率「0%」
- ・伸縮疲労試験回数 100 万回後でも気密性を確保

##### ○開発成果

- ・ニッケル基耐熱合金(インコネル 625LCF)製ベローズにおいて漏れ不良率「0%」の外周エッジ溶接技術を開発した。
- ・ニッケル基耐熱合金(インコネル 718)製ベローズにおいては、漏れ不良率「20%」まで低減したが、目標達成には至らなかった。
- ・ニッケル基耐熱合金(インコネル 625LCF)製ベローズにおいて、伸縮疲労試験回数 1000 万回後でも気密性を確保できることを確認でき、目標を達成した。

### 1-3-4 ニッケル基耐熱合金製溶接ベローズ製品の試作

##### ○開発目標

- ・ニッケル耐熱合金製溶接ベローズ試作における溶接不良率「0%」
- ・伸縮疲労試験回数 100 万回後でも気密性を確保可能な製品試作

##### ○開発成果

- ・半導体製造装置向けニッケル基耐熱合金(インコネル 625LCF)製溶接ベローズ製品について、漏れ不良率「0%」で試作することができた。

- ・伸縮疲労試験(要求仕様 100 万回)を 1000 万回実施し、漏れないことを確認した。
- ・川下企業の評価には至らなかった。
- ・化学プラント安全バルブ向けチタン合金(チタン 1 種 TR270)製溶接ペローズ製品について、漏れ不良率「0%」で試作することができた。
- ・伸縮疲労試験(要求仕様 1 千回)を 100 万回実施し、漏れないことを確認した。
- ・川下企業にてフィールド試験を実施し、性能上問題がないことを確認した。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

##### 【事業管理機関】

○財団法人石川県産業創出支援機構

(経理担当者) 総務企画部総務企画課長 中尾 一也

(業務管理者) プロジェクト推進部長 西村 聡

##### 【再委託先】

○株式会社ペローズ久世

(経理担当者) 株式会社久世ペローズ工業所 業務部経理課長 細川 博史

(業務管理者) 代表取締役 沢田 外代一

○株式会社村谷機械製作所

(経理担当者) 総務部 村谷 早代

(業務管理者) 専務取締役 村谷 外博

○国立大学法人大阪大学

(経理担当者) 接合科学研究所 事務部 会計係長 東堤 忠勝

(業務管理者) 接合科学研究所 事務部 研究推進係員 塩谷 崇

○石川県工業試験場

(経理担当者) 管理部 業務係 主幹 梶 清孝

(業務管理者) 機械金属部長 坂谷 勝明

財団法人石川県産業創出支援機構

プロジェクト推進部 木村孔明

Tel:076-267-6291 Fax:076-268-1322

Email:kimura@isico.or.jp

## 第2章 溶接ペロース製造装置の開発

### 2-1 ファイバ集積によるスポット形状可変レーザー装置の開発

#### 2-1-1 開発内容

ニッケル基耐熱合金などの難溶材を素材とする接材ペロースを低コストで製造するには、素材を無欠陥で溶接し、不良率を 0%に抑える必要がある。そのためには、「出力変動のないレーザー光を連続的に照射しても安定して溶接すること」や「板厚等に応じてレーザー光スポット形状を最適化し、溶け込み形状を均一化すること」が求められる。

そこで、ファイバ結合型半導体レーザー素子を必要数組み込み、これらを任意のパターンで集積し調整することでレーザー光の集光スポット形状を自由に設定可能なファイバ集積型半導体レーザー装置を開発した。

#### 2-1-2 装置本体とレーザーヘッド

開発したレーザー装置本体を図 2.1.1 に示す。同装置には最大定格出力 50W 以上のファイバ結合半導体レーザー装置を 6 個搭載した。各素子は、レーザー光照射時に発生する熱によって自身の温度上昇を防ぐため、冷却器上に設置した。この冷却器はペルチェ素子と温調器および放熱器、空冷ファンによって構成され、空冷でレーザー素子を冷却することができる。また、W420× D350×H200 のレーザー装置本体筐体には、レーザー光の照射に必要な電源やコントローラを全て内蔵した。その結果、家庭用電源のみ高出力のレーザー光を安定して照射することを可能にした。

レーザー装置本体で発生するレーザー光は複数のファイバによって専用のレーザーヘッドに導光され、溶接部に集光されて照射される。これには、レーザー光の集光スポット形状を自由に設定するための調節機構があり、レーザー光の集光スポット形状を自由に設定できる構造とした。

#### 2-1-3 出力性能

図 2.1.2 は開発したファイバ集積型半導体レーザー装置の出力特性を測定した結果である。投入電流 10A で 293W に達した。測定に使用したパワーセンサで測定可能な出力の上限が 300W であったため、投入電流をこれ以上増やすことができなかったが、電流を 12A まで投入できるため、その際の出力は 300W を遙か



図 2.1.1 ファイバ集積型半導体レーザー装置

に超えるものと推測される。

一方、電力-光変換効率は、投入電流 4A の時に最大 55%を示した。ランプ励起の YAG レーザに代表される従来の溶接用レーザ装置に比べて効率は 10 倍以上高く、省力性能の高いレーザ装置であることがわかった。

#### 2-1-4 集光スポット形状可変性能

レーザヘッドの集光スポット形状可変機能について性能を確認するため、ビームプロファイルを測定した。その結果を図 2.1.3 に示す。レーザヘッド端面から焦点位置までの作動距離を 90mm 確保しながら、レーザヘッド背面の偏芯ピンを回転することで、最小集光径  $\phi 0.25\text{mm}$  の点から長さ 1mm の直線まで、自由にレーザ光集光スポット形状を変更できることがわかった。

#### 2-1-5 出力安定性

開発したファイバ集積型半導体レーザ装置について、繰り返し照射時のレーザ光の出力安定性を調べた。設定出力を 200W とし、10 秒間の照射と 20 秒間の休止を 480 回繰り返したときのレーザ光の出力を測定した結果を図 2.1.4 に示す。設定出力 200W のときのバラツキの標準偏差は 0.53W であった。よって、出力変動幅は 1.06W (=0.52%) であることがわかった。

最終目標とした出力変動 1%以下を下回る変動幅の小ささであり、ランプ励起 YAG レーザに代表される従来の溶接用レーザ装置に比べて出力安定性に優れた装置となった。ペローズの溶接に使用すれば、品質バラツキ低減への寄与が期待できる。

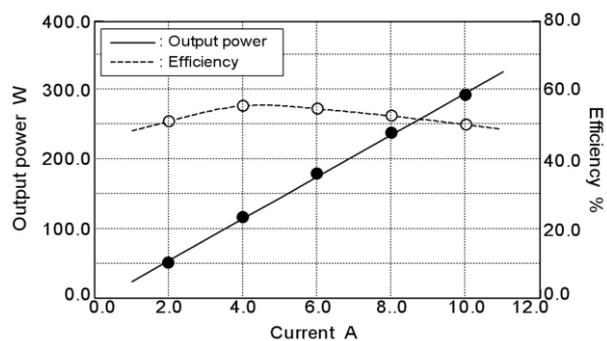


図 2.1.2 レーザ光出力特性

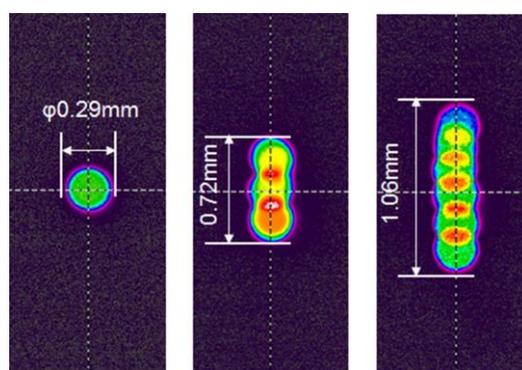


図 2.1.3 レーザ光集光スポット形状可変性能

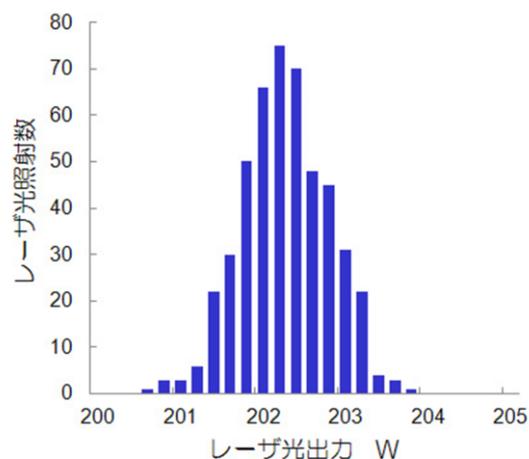


図 2.1.4 繰り返し照射における出力変動

## 2-2 精密溶接機本体の開発

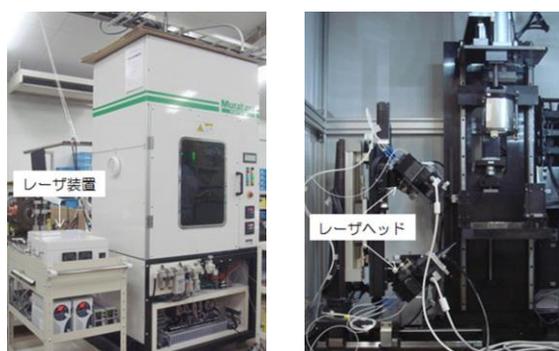
### 2-2-1 開発内容

外径がφ100mm で長さが 250mm までの溶接ベローズに対応し、ベローズ製造で必要な内周エッジ溶接と外周エッジ溶接を専用ジグの交換のみで、一台で可能な精密溶接機本体の開発を行った。また、省力化によるコスト削減と品質の安定性向上のため、ベローズ素材の供給と溶接後の製品の搬出を自動で行う段取り装置の開発も併せて実施した。

### 2-2-2 溶接機本体の開発

図 2.2.1 に開発した溶接ベローズ製造用の精密溶接機外観および内部構造を示す。溶接機本体には、ファイバ集積型半導体レーザー装置を 2 台搭載し、斜めに配置した 2 台のレーザーヘッドから同時にレーザー光を照射することでベローズの内周エッジを偏り無く均一に溶接することを可能にした。

内周エッジ溶接の場合は、中央のジグホルダに設置した内周エッジ溶接専用ジグにてベローズ素材を固定し、回転させながらレーザー光を照射することで自動で溶接することを可能にした。また、外周エッジ溶接の場合は、内周エッジ溶接専用ジグを取り外し、外周エッジ溶接ジグに交換することで、同一の機械で内外周エッジを溶接することを可能にした。



(a) 外観 (b) 内部構造

図 2.2.1 ベローズ用精密溶接機本体

### 2-2-3 精密溶接機本体の精度評価

レーザーヘッドが取り付けられている制御軸の位置決め精度を測定した。その結果を表 2.2.1 に示す。いずれの軸についてもその繰り返し位置決め精度は 0.001mm 以下であり、当初目標を遙かに上回った。

次に、精密溶接機本体に取り付けた状態での内周エッジ溶接ジグの回転精度を測定した。その結果を表 2.2.2 に示す。ベローズ素材の位置を決める鋼製部品部や内周

表 2.2.1 位置決め装置の繰り返し精度

制御軸	指示値	実測値	繰り返し誤差
Z1	0	0.0005	0.0006
	4	4.0202	0.0005
Z2	0	-0.0003	0.0002
	4	4.0091	0.0005
X	0	0.0000	0.0002
	4	4.0000	0.0001
Y	0	-0.0002	0.0002
	4	8.0201	0.0002

エッジ部の突き出し長さを決める銅製部品の回転振れ精度は 0.01mm 以下であった。しかしながら、取り外し取り付けにおける回転精度の再現性が低く、課題が残された。一方、外周エッジ溶接ジグの回転振れ精度を精密溶接機本体に取り付けた状態で測定した結果を表 2.2.3 に示す。組み立て後に溶接ジグを仕上げ加工した結果、回転振れを 0.008mm まで低減することができた。

表 2.2.2 内周エッジ溶接ジグ回転振れ

測定位置	回転振れ(mm)
ステンレス製部品	0.009
銅製部品(修正前)	0.037
銅製部品(修正後)	0.008

表 2.2.3 外周エッジ溶接ジグ回転振れ

溶接ジグ	回転振れ(mm)
修正前	0.032
修正後	0.008

#### 2-2-4 自動段取り装置の開発

溶接ベローズ製造コストの削減と品質向上のため、精密溶接機本体へのベローズ素材供給と溶接後の製品取り出しを自動で行うための段取り装置を開発した。その外観と内部構造を図 2.2.2 に示す。異なる溶接ベローズ素材を必要枚数別々のストッカーに積んでおき、1つの素材をロボットアクチュエータと吸着バットによって内周溶接ジグ内に搬送した後、次工程の外周エッジ溶接で必要な割スペーサを専用ストッカーより供給し、その後、もう1方のベローズ素材を供給する構造とした。溶接後には、同じロボットアクチュエータと吸着バットによって、製品用のストッカーに搬出した。

当初、こうした動きを各工程毎に順番に行っており、そのときのサイクルタイムは 110 秒であった。そこで、各工程の動きを同時並行的に行えるように改造した結果、サイクルタイムを 75 秒まで短縮することができた。しかしながら、60 秒以内の目標時間を達成することができず、課題が残された。

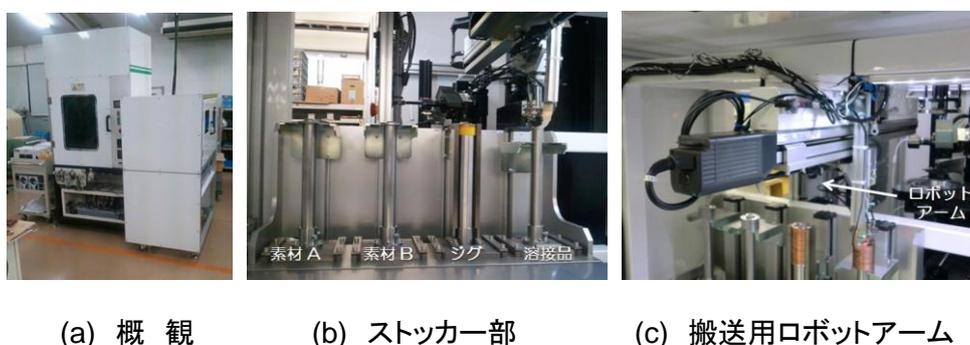


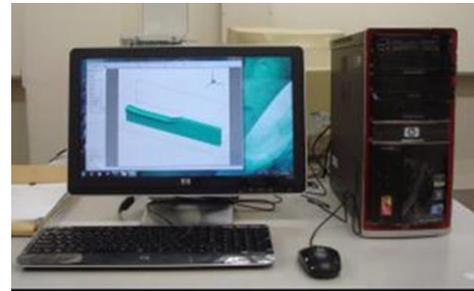
図 2.2.2 自動段取り装置

### 第3章 ニッケル基耐熱合金薄板溶接に対するレーザー光スポット形状の最適化

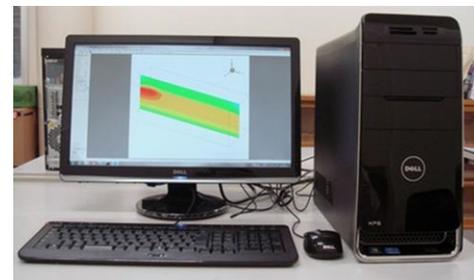
#### 3-1 薄板レーザー溶接における溶け込み形状のシミュレーション解析

##### 3-1-1 開発内容

強度不足や漏れの原因となる薄板レーザー溶接特有のコブ状溶け込み形成を防止するため、溶け込み形状に及ぼす素材板厚やレーザー光スポット形状、レーザー光出力や溶接速度の影響を明らかにすることを目的に、図 3.1.1 に示すレーザー溶接金属溶融凝固解析装置とレーザー光照射熱伝導解析装置を製作した。そして、薄板レーザー溶接時の溶け込み形状形成過程をシミュレーション解析し、平滑溶け込み形状を得るためのレーザー光の集光スポット形状を求めた。



(a) レーザ溶接金属溶融凝固解析装置



(b) レーザ光照射熱伝導解析装置

図 3.1.1 シミュレーション解析装置

##### 3-1-2 表面張力温度依存性の影響

表面張力に溶融金属の凝集が原因と推察されているコブ状溶け込み形状シミュレーション解析し、溶け込み形状に及ぼす表面張力( $T_s$ )の温度依存性( $dT_s/dT$ )の影響を調べた。図 3.1.2 は、板厚 0.1mm のインコネル 718 素材を 2 枚重ね、1mm×0.2mm のライン状スポットでレーザー光を照射したときの溶け込み形状を、表面張力の温度依存性( $dT_s/dT$ )を負の-2.8N/mK から正の+3.08N/mK まで変化させて解析した結果である。表面張力温度依存性が正であり、その値が大きいほど顕著な凸凹が溶け込み形状に現れる。このように、溶け込み形状の凸凹は溶融した金属の表面張力が大きく影響していることがわかる。

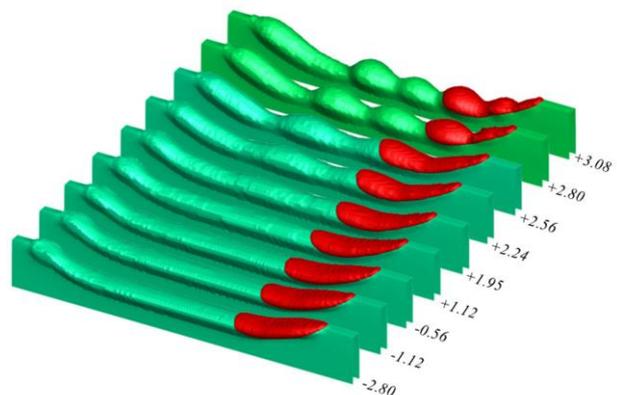


図 3.1.2 溶け込み形状に及ぼすに表面張力温度依存性の影響

### 3-1-3 溶け込み形状に及ぼす集光スポットサイズ（長さ）と板厚の影響

溶け込み形状に及ぼす集光スポットサイズ（長さ）の影響を調べるため、スポットサイズ（長さ）を変えてシミュレーション解析を行った。図 3.1.3 は、板厚 0.1mm のインコネル 718 素材を 2 枚重ねたエッジに、集光スポットサイズ（長さ）が異なるレーザー光を 15mm/sec の速度で移動させながら

照射したときの溶け込み形状を解析した結果である。集光スポットサイズ（長さ）が 0.5mm 以下では、平滑な溶け込みが形成されることがわかる。

しかし、集光スポットサイズ（長さ）が 0.6mm 以上になると溶け込み形状に歪さが生じ、0.8mm 以上になると顕著な凸凹が現れることがわかる。このことから、溶け込み形状に対して集光スポットサイズ（長さ）は大きな影響を与え、板厚に対して過剰に長い集光スポットサイズでのレーザー光照射は凸凹な溶け込み形状を誘発することがわかる。

図 3.1.4 は板厚が 0.075mm のインコネル 718 素材を 2 枚重ねた場合、図 3.1.5 は板厚が 0.15mm のインコネル 718 素材を 2 枚重ねた場合の集光スポットサイズ（長さ）による溶け込み形状の変化を解析した結果である。板厚が 0.075mm では集光スポットサイズ（長さ）が 0.3mm 以下で、板厚が 0.15mm では集光スポットサイズ（長さ）が 0.8mm 以下で平滑な溶け込み形状が得られることがわかる。

図 3.1.4 は板厚が 0.075mm のインコネル 718 素材を 2 枚重ねた場合、

図 3.1.5 は板厚が 0.15mm のインコネル 718 素材を 2 枚重ねた場合の集光スポットサイズ（長さ）による溶け込み形状の変化を解析した結果である。

板厚が 0.075mm では集光スポットサイズ（長さ）が 0.3mm 以下で、板厚が 0.15mm では集光スポットサイズ（長さ）が 0.8mm 以下で平滑な溶け込み形状が得られることがわかる。

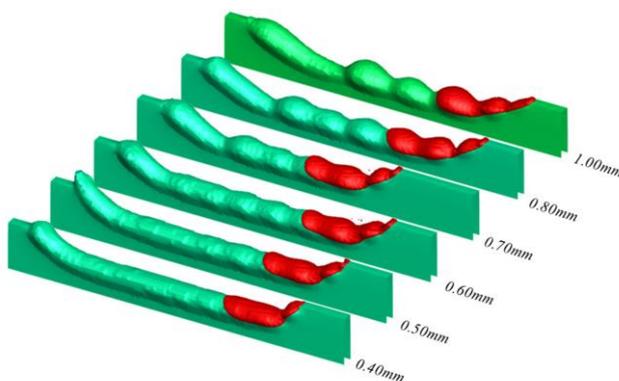


図 3.1.3 溶け込み形状に及ぼすに集光スポット長さの影響(板厚 0.1mm の場合)

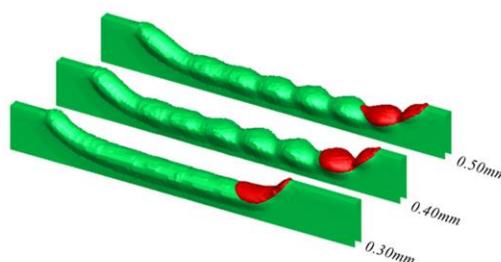


図 3.1.4 溶け込み形状に及ぼすに集光スポット長さの影響(板厚 0.075mm の場合)

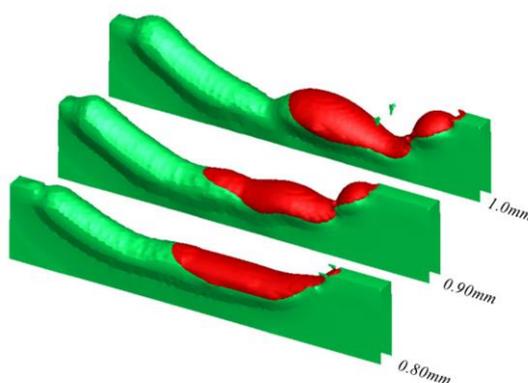


図 3.1.5 溶け込み形状に及ぼすに集光スポット長さの影響(板厚 0.150mm の場合)

このように、板厚が異なると、平滑な溶け込み形状が得られる最大集光スポットサイズ（長さ）が異なる。そこで、板厚と平滑な溶け込みが得られる集光スポット上限長さの関係を求めた結果を図 3.1.6 に示す。この図からわかるように、板厚が薄くなると平滑な溶け込み形状を得るためには、集光スポットサイズ（長さ）を短くする必要があることがわかった。

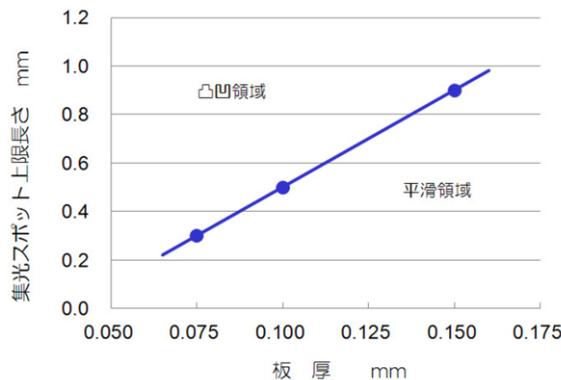


図 3.1.6 板厚と平滑ビード形成のための集光スポット上限長さの関係

### 3-2 薄板レーザー溶接における応力解析

#### 3-2-1 開発内容

溶接ペロースの漏れの原因と考えられる微細な割れの発生を防止するには、溶接時の半凝固部に作用する応力を低減する必要があると考えられる。そこで、薄板レーザー溶接において、レーザー光が通過した直後の半凝固部に作用する応力を熱伝導弾塑性解析によって評価し、応力低減に寄与するレーザー光の照射方法を検討した。

#### 3-2-2 ツインスポット溶接による応力低減効果

図 3.2.1 は、ペロース溶接機にて 2 台あるレーザーヘッドからレーザー光スポットを一点に重ねて溶接するシングルスポット溶接の場合と、各レーザー光スポットをずらして溶接するツインスポット溶接において距離を変えた場合とで温度分布および溶接方向の引張応力分を比較した結果である。各レーザー光スポットの出力比を 1 対 1 としたツインスポット溶接では、スポットずらし距離を変えても半凝固部における応力値またはその分布はほとんど変わらなかった。そこで、後方のレーザー光出力を前方のレーザー光出力の 1/7 に小さくして同様の解析を行った。その結果、レーザー光スポットずらし距離が 2mm の場合、後方のレーザー光による素材溶融が抑えられ、それに伴って、200MPa 程度の低応力領域が広がることわがわかる。よって、レーザー溶接時の半凝固部における応力

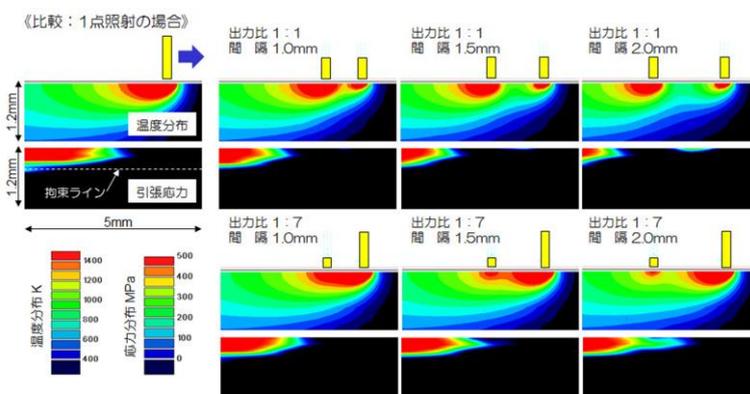


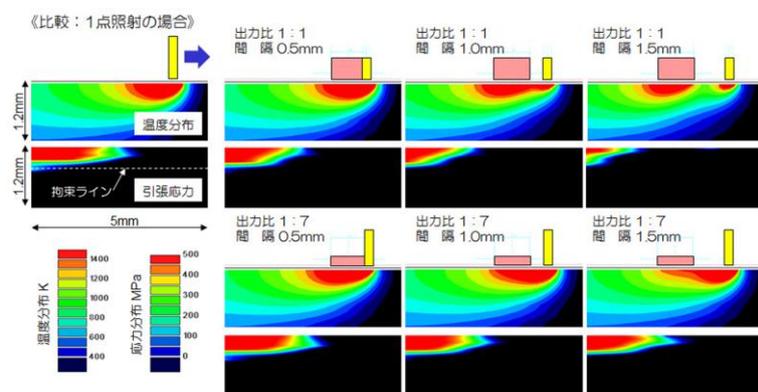
図 3.2.1 ツインスポット溶接による応力低減効果

低減には、後方のレーザー光の出力を素材溶融に至らない加熱程度に止めるよう低く抑えることがポイントとなることがわかった。

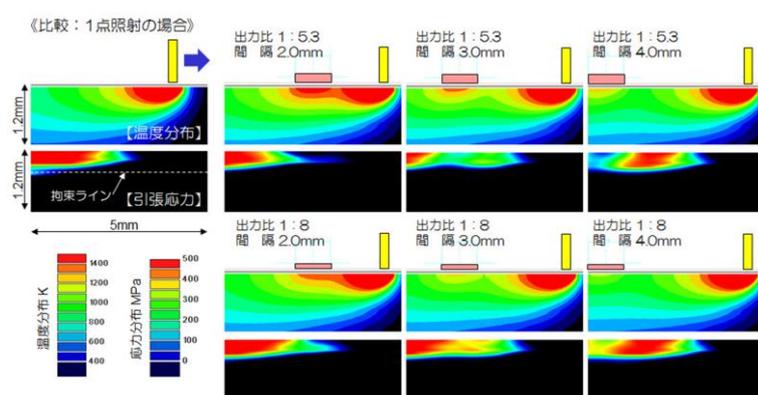
### 3-2-3 ポイント+ラインスポット溶接による応力低減効果

レーザー溶接時の半凝固部における応力のさらなる低減を図るため、ツインスポット溶接のようにどちらも点状のスポットにて溶接する代わりに、後方のレーザー光のスポットをラインとした時の応力解析を行った。その結果を図 3.2.2 に示す。なお、後方レーザー光の出力を前方のレーザー光出力の 1/5.3 と 1/8 の 2 条件で解析した。いずれの出力比においても、スポット間隔が 3mm の場合に応力低減領域が最も広くなった。そして、出力比が 1/5.3 の場合、拡大する領域での応力値は約 200MPa であり、出力比が 1/8 の場合、拡大領域の応力値は約 300 MPa であった。

以上のことから、前方に集光スポットがポイントなるレーザー光を配置し、その後方に集光スポットがラインとなるレーザー光を配置することで半凝固部に作用する引張応力を低減できることがわかった。また、その効果は、後方のレーザー光出力を小さくすること、また、前方と後方のレーザー光の間隔を適度に広げることによって大きくなることがわかった。



(a) 短距離ずらし



(b) 長距離ずらし

図 3.2.1 ライン+ポイントスポット溶接による応力低減効果

## 第4章 ニッケル基耐熱合金製溶接ペローズ製造のための溶接技術の開発

### 4-1 内周エッジ溶接技術の開発

#### 4-1-1 開発内容

ファイバ集積型半導体レーザー装置を搭載した精密溶接機を使用し、集光スポット形状やその大きさを変えながら、ニッケル基耐熱合金を素材とする内周エッジ溶接実験を行った。そして、ヘリウムリークテストによる気密性評価や溶接部の変色具合、耐腐食性や内径バラツキを評価した。

#### 4-1-2 ニッケル基耐熱合金製ペローズ素材の内周エッジ溶接実験

薄板レーザー溶接における溶け込み形状や応力のシミュレーション解析の結果を基に提示されたレーザー光照射方法を参考に、板厚 0.1mm のインコネル 718 素材に対して、2 台あるレーザーヘッドの内、1 つのレーザーヘッドからは点状スポットで、他方のレーザーヘッドからは直線スポットでレーザー光照射して内周エッジ溶接実験を行った。実験の結果、図 4.1.1 (a) に示すように溶接部は滑らかで溶接焼けも無く、割れや空隙のない溶接部を形成することができた。また、板厚 0.3mm のインコネル 718 素材に対しても同様に内周エッジ溶接実験を行った。この場合、レーザー光の集光スポット形状は長さ 0.4mm の直線とした。実験の結果、図 4.1.1 (b) に示すように滑らかで焼けのない溶接が可能であった。さらに、板厚 0.1mm のインコネル 625LCF 素材に対して内周エッジ溶接実験を行った結果、図 4.1.2 に示すように滑らかで焼けのない溶接が可能であった。

#### 4-1-3 気密性試験

ヘリウムリークテストによって、内周エッジ溶接品における気密性評価を行った。表 4.1.1 はその結果である。板厚 0.1mm のインコネル 718 内周エッジ溶接品については、200 枚個中漏れ数は 0 枚であり、漏れ不良率は 0%であった。板厚 0.3mm のインコネル 718 内周エッジ溶接品については、20 枚

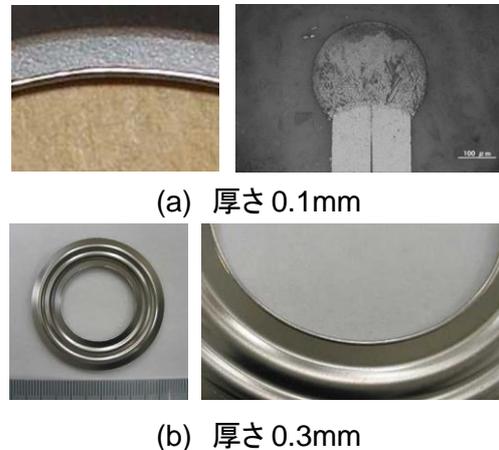


図 4.1.1 インコネル 718 材内周エッジ溶接



図 4.1.2 インコネル 625LCF 材内周エッジ

中漏れ枚数は 0 枚であり、こちらも漏れ不良率は 0%であった。同様にインコネル 625LCF 内周エッジ溶接品についても 20 枚中漏れ枚数は 0 枚であり、こちらも漏れ不良率は 0%であった。

これまでの YAG レーザ溶接では、漏れ不良率は 70%であったインコネル 718 素材について、本研究開発で開発したファイバ集積型半導体レーザ装置を用い、レーザ光集光スポット形状を最適化することで漏れ不良率が 0%の内周エッジ溶接を可能にした。

#### 4-1-4 耐腐食性および内径バラツキ

板厚 0.1mm のインコネル 718 材を用いた内周エッジ溶接品について、溶接部周辺における耐腐食性能の劣化の有無を調べるため、キャス試験 (JIS Z 2371) による耐腐食性試験 (試験時間: 96 時間) を実施し、ステンレス材 (SUS316L) 内周エッジ溶接品と比較した。その結果を図 4.1.3 に示す。ステンレス材 (SUS316L) 製溶接ベローズ標準品では、溶接部直下に腐食による変色が観察されたが、インコネル 718 製内周エッジ溶接品では変化は無く、溶接部の耐腐食性の低下は認められなかった。

次に、100 枚連続して実施した内周エッジ溶接品について内径を測定し、そのバラツキを評価した。図 4.1.4 はその結果であり、平均内径に対してバラツキの標準偏差は 0.007 mm であった。よって、次工程の外周エッジ溶接に支障を与える程のバラツキはなかった。

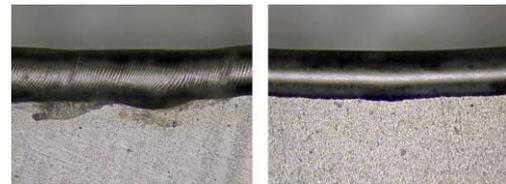
#### 4-2 外周エッジ溶接技術の開発

##### 4-2-1 開発内容

ファイバ集積型半導体レーザ装置を搭載した精密溶接機を使用し、集光スポット形状やその大きさを変えながら、漏れの無い内周エッジ溶接品を集めて外周エッジ溶接実験を行った。そして、ヘリウムリークテストによる気密性評価や伸縮疲労試験による信頼性を評価した。

表 4.1.1 内周エッジ溶接部漏れ不良率

素材	板厚	試験枚数	不良率
インコネル 718	0.1mm	200	0%
	0.3mm	20	0%
インコネル 625LCF	0.1mm	20	0%



(a) SUS316L (b) インコネル 718

図 4.1.3 CAS 試験 (96 時間) 結果

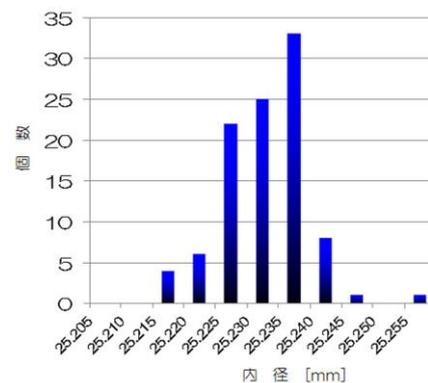


図 4.1.4 インコネル 718 内周エッジ溶接品における内径バラツキ

#### 4-2-2 ニッケル基耐熱合金製ベローズ素材の内周エッジ溶接実験

漏れのない内周エッジ溶接品を6個用い、1回当たり5カ所の外周エッジについて溶接実験を行った。その結果、図4.2.1に示すようにインコネル718素材およびインコネル625LCF素材のいずれについても溶け込み部は滑らかで焼けのない外周エッジ溶接が可能であった。

#### 4-2-3 気密性評価

ヘリウムリークテストによって、外周エッジ溶接品における気密性評価を行った。表4.2.1はその結果である。インコネル718素材については、10個の外周エッジ溶接品の内、漏れ個数は最小で2個であり、漏れ不良率は20%であった。これまでのYAGレーザー溶接に比べれば不良率は小さいが、当初目標の不良率「0%」を達成するには至らなかった。

一方、インコネル625LCF素材については、20個の外周エッジ溶接品の内、漏れ個数は0個であり、これについては漏れ不良率は0%となり、当初目標を達成できた。

#### 4-2-4 伸縮疲労試験による信頼性評価

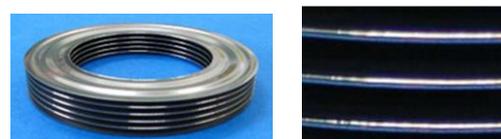
溶接ベローズの信頼性を評価するため、外部および内部の圧力を変動させながら伸縮疲労試験を行うための試験機を製作し、漏れなし外周エッジ溶接品の寿命を評価した。

インコネル625LCF製の外周エッジ溶接品について、最大1000万回の伸縮疲労試験を行った。その後、ヘリウムリークテストによる気密性を調べた結果、漏れのないことを確認した。さらに、溶接品を2個追加し、1000万回の伸縮疲労試験を行った。その後、気密性を調べ、いずれも漏れのないことを確認した。

以上のことから、高寿命で信頼性の高いインコネル625LCF製溶接ベローズの製造技術が確立できた。



(a) インコネル 718



(b) インコネル 625LCF

図 4.2.1 外周エッジ溶接品

表 4.2.1 外周エッジ溶接部の漏れ不良率

素材	試験個数	不良率
インコネル 718	10 個	20%
インコネル 625LCF	20 個	0%

## 第5章 ニッケル基耐熱合金製溶接ベローズ製品の試作

### 5-1 半導体製造装置用溶接ベローズ製品の試作

#### 5-1-1 開発内容

川下企業で本研究開発のアドバイザーとして協力を受けている(株)パナソニックファクトリソリューションズの依頼に基づき、半導体レーザ装置向け製溶接ベローズ製品の試作を行った。同製品は半導体製造工程の一つであるドライエッチング装置に外気との隔壁部品として使用される。内部に腐食性の高いガスを流すため、ベローズ素材として耐腐食の高いインコネル 625LCF を使用することが求められている。

#### 5-1-2 試作結果

試作する製品の重要仕様の項目である保証寿命を検証するために必要な伸縮疲労試験を実施するには、製品仕様の全長では長すぎるため、山数、ベローズ自由長、伸縮量を製品仕様の 1/10 として試作品を製作した。その結果を図 5.1.1 に示す。滑らかで焼けのない溶け込みが形成されており、外観上全く問題ない試作品を製作できた。なお、内周エッジ溶接および外周エッジ溶接における漏れ不良率は 0%であった。

#### 5-1-3 伸縮疲労試験結果

上述の試作品を 3 個製作し、これら全てについて伸縮疲労試験を実施した。一定回数毎にヘリウムリークテストによる気密性評価を行いながら試験を継続した。その結果、いずれの試作品についても伸縮疲労試験回数が 1000 万回を超えても漏れはなかった。通常、金属学的には 1000 万回を超えても異常がなければ、その後も破損することがないと考えられており、このことから、製品の要求仕様を超える高寿命で信頼性の高い半導体レーザ装置向けニッケル基耐熱合金(インコネル 625LCF)製溶接ベローズ製品を試作できた。



図 5.1.1 伸縮疲労試験用インコネル 625LCF 溶接ベローズ試作品

## 5-2 安全バルブ用溶接ベローズ製品の試作

### 5-2-1 開発内容

川下企業で本研究開発のアドバイザーとして協力を受けている(株)福井製作所の依頼に基づき、安全バルブ用溶接ベローズ製品の試作を行った。同製品は、高温多湿で海岸に近い地域に立地する化学プラントでの使用が想定されている。そのため、塩素や海水に対して高い耐腐食性を有するチタン合金(チタン 1 種 TR270)を素材とする溶接ベローズが求められている。また、高圧下でも確実に動作することが必要であり、素材の厚さは 0.3mm とすることが求められている。当初内容であるニッケル基耐熱合金製ベローズの製品試作とは異なるが、技術の用途拡大には意義があると考え、取り組んだ。

### 5-2-2 試作結果

厚さ 0.3mm のチタン 1 種 TR270 製ベローズ素材の内周エッジ溶接を行った。その結果を図 5.2.1 (a)に示す。滑らかで溶接焼けのない溶け込みを形成することができた。ヘリウムリークテストによる気密性を調べた結果、テスト枚数 10 枚中漏れ枚数は 0 枚と、不良率 0%という結果であった。次に、内周エッジ溶接品を集めて外周エッジ溶接を行った。その結果を図 5.2.1 (b)に示す。内周エッジ溶接同様、滑らかで焼けのない溶け込みが得られている。ヘリウムリークテストによる気密性を調べた結果、テスト枚数 10 枚中漏れ枚数は 0 枚であり、不良率 0%という結果であった。



(a) 内周エッジ溶接 (b) 外周エッジ溶接  
図 5.2.1 チタン製溶接ベローズ試作実験

### 5-2-3 伸縮疲労試験結果

伸縮疲労試験を行うチタン製溶接ベローズ試験品を製作し、伸縮疲労試験を実施した。製品仕様での溶接ベローズ自由長寸法では、疲労試験機に設置できないため、図 5.2.2 に示すように山数、ベローズ自由長、伸縮量を製品仕様の 1/2 として製作した。伸縮疲労試験の結果、伸縮回数が 100 万回を超えても漏れがなかった。



図 5.2.2 疲労試験用チタン製溶接ベローズ

#### 5-2-4 製品試作

安全バルブ用溶接ベローズ試作品を製作した。その外観を図 5.2.3 に示す。溶接ベローズ両端に接続されるチタン製フランジ、金具類はアーク溶接にて取り付けられた。製品試作後、ヘリウムリークデテクターによる漏れ検査、寸法・外観検査を実施し、アドバイザーでの性能評価を委託した。安全バルブに組み込んでの動作確認した後、実際に使用されている。これまで全く問題が無く使用できている。結果は良好とのことである。

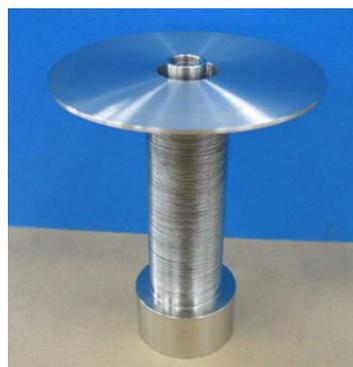


図 5.2.3 安全バルブ用チタン製溶接ベローズ製品

## 第6章 全体総括

### 6-1 研究成果

平成 22 年度から平成 24 年度までの期間、高温・高圧・高腐食性環境下において使用可能なニッケル基耐熱合金薄板を高品質かつ低コストで溶接する技術の開発を目的とした「ファイバ集積型レーザによる難溶接材ベローズの開発」に取り組んだ。その結果、以下に述べる成果が得られた。

- (1) 集光スポット形状を自由に設定でき、空冷で最大出力 300W のレーザ光を照射可能なファイバ集積型半導体レーザ装置を低コストで製造する技術を開発した。
- (2) ベローズの内外周エッジ溶接を 1 台で可能なダブルヘッド型のベローズ用精密レーザ溶接機を開発するとともに、素材供給および溶接品排出を自動化した。
- (3) 薄板レーザ溶接のシミュレーション解析によって、ベローズ素材を滑らかに漏れなく溶接するためのレーザ光照射方法およびその条件を求めることができた。
- (4) インコネル 625LCF 製の溶接ベローズについては、不良率 0%で製作可能となった。しかしながら、インコネル 718 製溶接ベローズ素材については、不良率 0%で内周エッジ溶接を行うことができた。しかし、外周エッジ溶接では不良率が最低でも 20%に止まり、今後の課題とした。
- (5) 半導体レーザ装置向けニッケル基耐熱合金製溶接ベローズ製品を試作し、要求仕様を超える 1000 万回の伸縮疲労試験後でも漏れがないことを確認した。

### 6-2 事業展開と今後の課題

#### 6-2-1 (株)ベローズ久世における難溶接材ベローズの製品化

これまでの研究開発によって、高寿命で信頼性の高いインコネル 625LCF 製溶接ベローズやチタン合金製溶接ベローズを製造可能となった。また、製造時の不良率「0%」を達成できたことは、原材料の節約と検査工程の省略による製造コスト低減に寄与し、海外製品に負けない競争力のある製品造りに繋がる。一方、インコネル 718 製溶接ベローズについては、研究開発期間内での製品試作に至らなかったが、重要製造工程の 1 つである内周エッジ溶接において不良率「0%」溶接を達成でき、製品化の可能性を示すことができた。今後の開発によって製品化が実現できれば、海外メーカーにない高度な製造技術として PR でき、従来品の売り上げ増にも繋がると期待できる。

図 6.2.1 は、難溶接材ベローズの製品化イメージである。ニッケル基耐熱合金等を素材とするベローズの両端にユーザから要望に基づいてフランジ等の金具を取り付ける。ユーザに



図 6.2.1 難溶接材ベローズ製品



図 6.2.2 難溶接ベローズ製品の用途

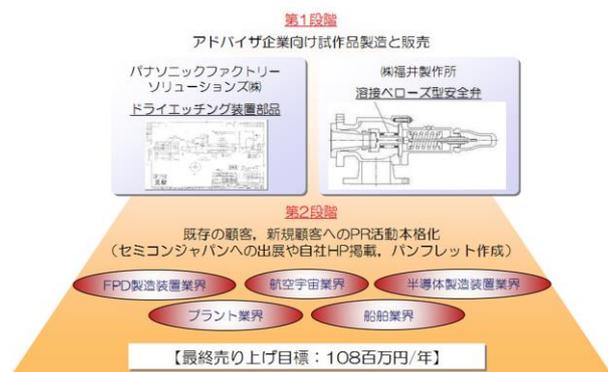


図 6.2.3 難溶接材ベローズ製造販売事業化計画

てこれら溶接ベローズを組み込み、半導体製造装置や安全バルブ等の製品が製造される。その用途は広く、図 6.2.2 に示すように、フラットパネルディスプレイやソーラパネルの製造装置、航空宇宙機器、石油化学プラント、船舶などへの利用が期待できる。そこで、難溶接材ベローズの製品化を目標に図 6.2.3 に示すような事業化計画を策定した。まず、第 1 段階として既存の顧客や本研究開発アドバイザー向けに試作品製作や試験販売を行い、実用化のための課題抽出とその解決を図る。この後、第 2 段階として HP 掲載や展示会出展、製品カタログ整備によって新規顧客獲得を図り、最終的に 108 百万円/年の売り上げを目指す。

これらを実現するには、インコネル 718 製ベローズを含めた難溶接材ベローズ製品における製造不良率「0%」の信頼性を高める必要がある。そのためには、開発したベローズ用精密溶接機の精度調整やサイクルタイムの短縮を図るとともに、これまで得られた研究成果の再現性を高めることが課題であり、今後、事業化のための補完研究として取り組みたい。

### 6-2-2 ㈱村谷機械製作所におけるファイバ集積型半導体レーザ装置の製品化

本研究開発の取り組みの結果、難溶接材ベローズを不良率「0%」で製造するためのファイバ集積型半導体レーザ装置を開発した。製造コストが安く、メンテナンスフリーで使いやすく、集光スポット形状を自由に設定できるなど従来の溶接用レーザ装置にない特徴がある。



図 6.2.4 ファイバ集積型半導体レーザ装置製造販売事業化計画

その用途はペロース製造のみならず図 6.2.4 に示すように微細部品の精密溶接やろう付、はんだ付、表面熱処理、クラディング(表面硬化肉盛り)、樹脂溶着などと広い。そこで、事業展開の第 1 段階として、既存の顧客にてファイバ集積型半導レーザ装置もしくはこれを搭載したレーザ溶接機などを試作し、実用化のための課題抽出と解決を図る。この後第 2 段階として、HP への掲載や展示会出品、カタログ整備を行うことによって、新規顧客を獲得する。そして、レーザ装置単体やこれを搭載した各種専用機の製造販売の他に、レーザ溶接等の受託加工や専用機開発のための試作実験を請け負う。これらを合計し、最終的に 485 百万円/年を目指す。

これらを実現するには、レーザ装置の高出力化や集光スポットサイズの微細化、信頼性評価の継続実施の他に、上述の用途開発が必要である。図 6.2.5 は、既に取り組みを開始したダイヤフラムや微細ワイヤの精密溶接実験の例である。このようにレーザ装置のさらなる高性能化と用途開発が事業化のための課題であり、補完研究として取り組みたい。

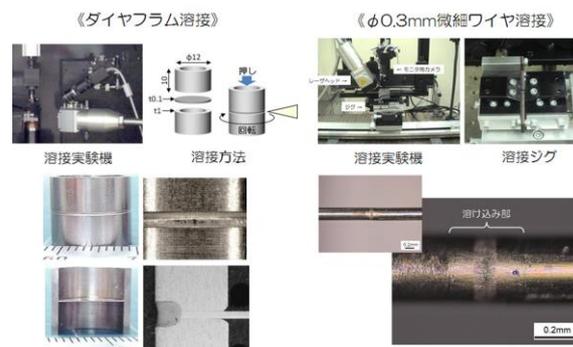


図 6.2.5 ファイバ集積型レーザ装置の用途開発