

平成 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「温度場制御技術による薄板構造物の極低歪レーザー溶接方法の開発」

研究開発成果等報告書

平成 24 年 3 月

委託者 関東経済産業局  
委託先 公益財団法人 千葉県産業振興センター

## 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	1
1.2	研究体制	2
1.3	成果概要	4
1.4	当該プロジェクト連絡窓口	5
第2章	加熱・吸熱複数熱源の数値解析の確立	
2.1	実験・数値シミュレーションによる温度場制御技術による低ひずみ 溶接法の評価加熱・吸熱複数熱源に対する熱影響数値解析	5
2.2	加熱・吸熱複数熱源装置における変形量低減効果の研究	13
第3章	被溶接材固定方法の開発	
3.1	5M 材における両端固定法の検討	16
第4章	ステンレス鋼、Ni 基耐熱合金に対する実験的低歪溶接技術の開発	
4.1	ステンレス鋼における溶接歪の評価技術の検討	18
4.2	Ni 基耐熱合金における I 型継手強度試験	23
4.3	Ni 基耐熱合金による円筒形部材の製造性確認	25
第5章	最適シームトラッキング条件の実験的研究	
5.1	三次元曲線シームトラッキング走行実験	27
第6章	ハイブリッド溶接による最適ギャップ裕度拡大条件の研究	
6.1	ハイブリッド溶接による最適ギャップ裕度拡大条件の実験的研究	29

## 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 研究背景

建材用 SUS 形鋼やジェットエンジンの燃焼室に使用されている分離隔壁（図 1-1-1）等に用いられている薄板製品の製造に関しては、その製造コストの低減が望まれていた。しかしながら、従来のアーク溶接方法ではその入熱量の大きさから溶接変形が発生し、部材として満足できる製品を製造する事が難しく、後工程での修正加工により対応していた。

しかし、少量多品種の要求に応えることが非常に困難な事や、歪取り工程の必要性は大きなコスト上昇を伴うことになり、いずれにしても最適とは言い難かった。

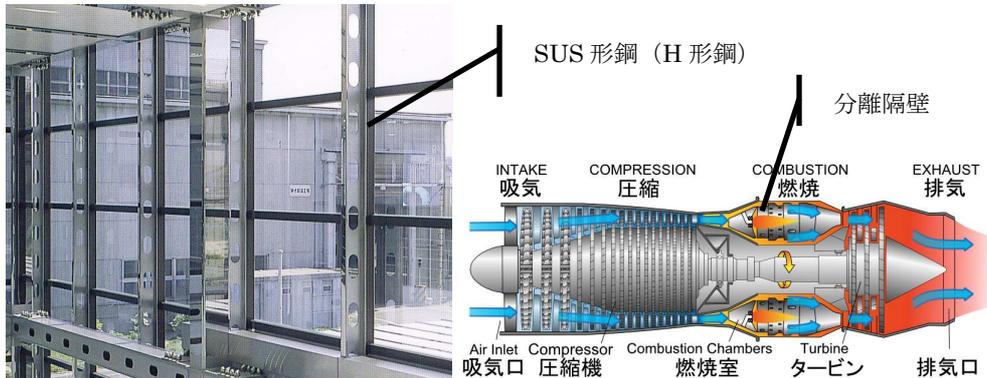


図 1-1-1 SUS 形鋼や分離隔壁の例

#### 1.1.2 研究目的および目標

本研究の目的は、近年急速に開発が進んだ高出力シングルモードファイバーレーザー技術を採用し、そこに加熱・吸熱複数熱源を用いた温度場制御技術を適用することにより極低歪溶接技術を確立することである。これにより、ビルド形鋼や航空機用 Ni 基耐熱合金等の高付加価値部材を効率的かつ安価に製造できる技術を確立することを目的とする。

本研究の目標は、SUS ビルド H 形鋼の縦曲り変形を 3.0mm/5.0M 以下、角変形を 0.05rad 以下に、Ni 基耐熱合金製円筒変形歪を 1.0mm 以下に低減することとする。

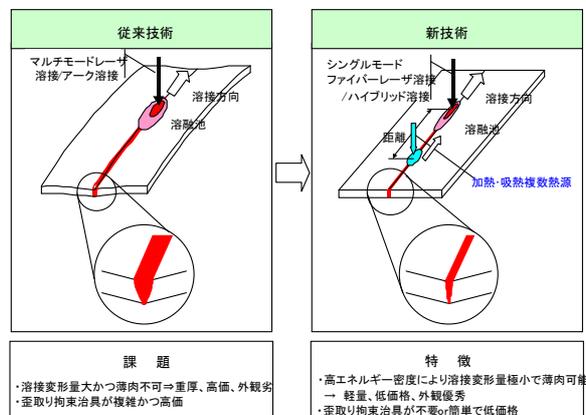
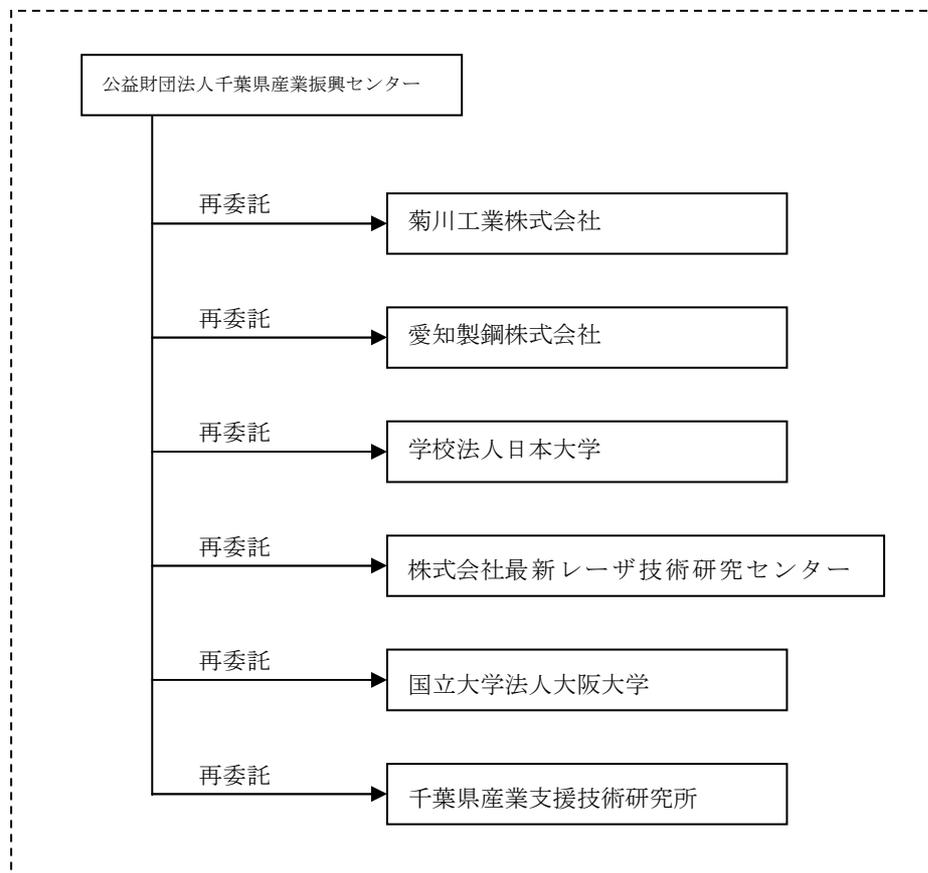


図 1-1-2 温度場制御技術による極低歪溶接技術のイメージ

## 1.2 研究体制

### 1.2.1 研究組織及び管理体制

#### 1) 研究組織



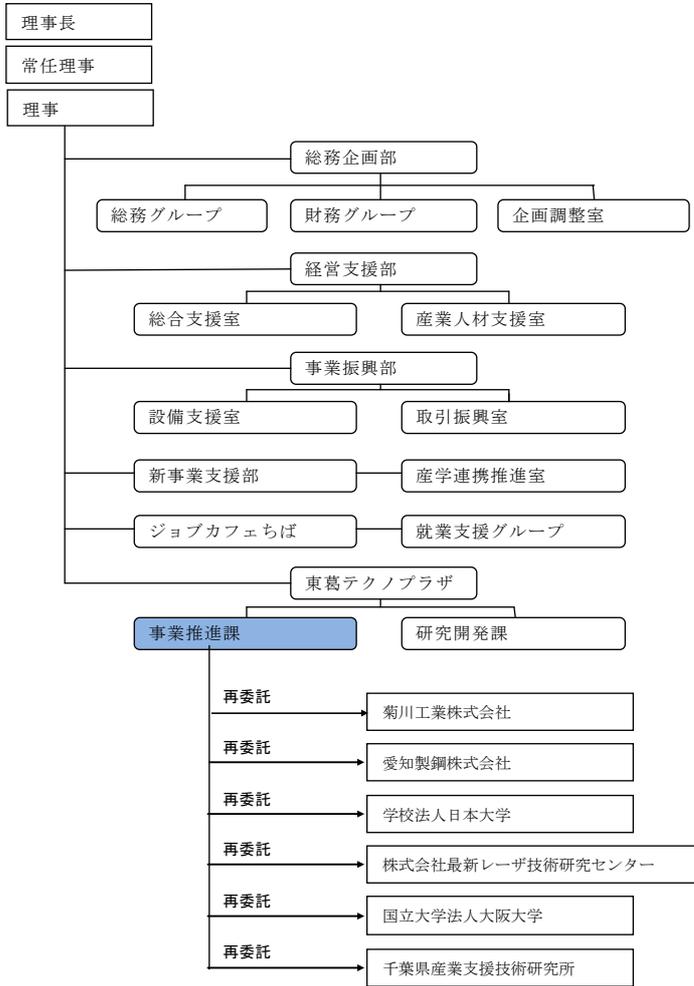
統括研究代表者 (PL)  
菊川工業株式会社  
常務取締役 川上 十伍

副統括研究代表者 (SL)  
日本大学生産工学部  
教授 大久保 通則

2) 管理体制

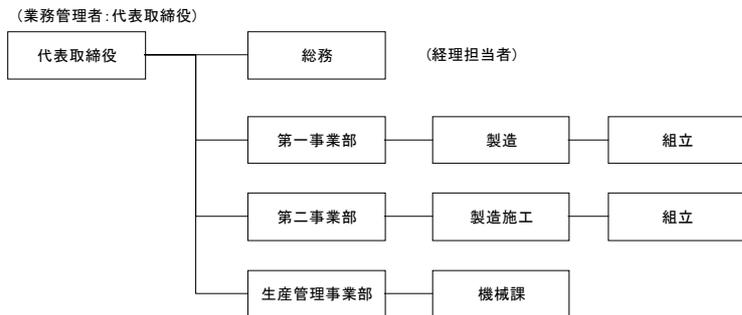
① 事業管理者

[公益財団法人 千葉県産業振興センター]

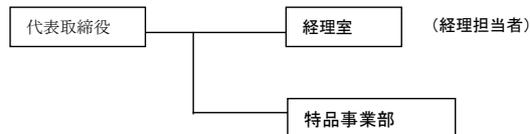


② 再委託先

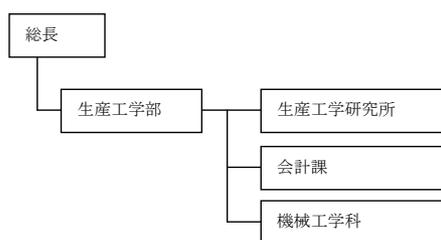
[菊川工業株式会社]



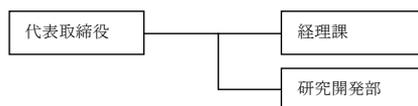
[愛知製鋼株式会社]



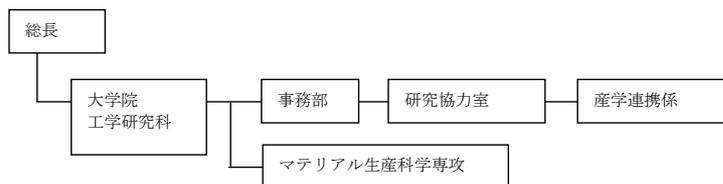
[学校法人日本大学]



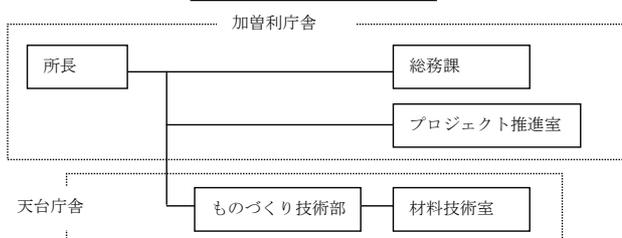
[株式会社最新レーザ技術研究センター]



[国立大学法人大阪大学]



[千葉県産業支援技術研究所]



### 1.3 成果概要

#### 1.3.1 加熱・吸熱複数熱源の数値解析の確立と加熱・吸熱複数熱源の装置化

アーク溶接に対する吸熱源の数値シミュレーションについて実溶接との比較を行い、その有用性を立証した上で、シングルモードファイバーレーザ溶接に対する吸熱源の吸熱位置と吸熱範囲を変化させた場合の数値シミュレーションを行い、吸熱効果が最も高くとれる条件を検討する事が出来た。

シングルモードファイバーレーザ溶接に対する加熱源の加熱位置と加熱量を変化させた場合の数値シミュレーションを行ない、加熱効果による溶接変形量の変化予測が立てられるようになった。

シングルモードファイバーレーザ溶接に対する吸熱実験を行ない、溶接条件と吸熱方法を変化させた際の溶接変形量の挙動を把握する事が出来た。同様にシングルモードファイバーレーザ溶接に対する加熱実験を行ない、溶接条件と加熱方法を変化させた際の溶接変形量の挙動を把握する事が出来た。

シングルモードファイバーレーザ溶接に対する冷却源の冷却位置を変化させた場合の数値シミュレーションを行い、冷却実験での結果と同様の傾向を示していることを確認した。これらの実験結果・数値シミュレーション結果より、今後の実製品への適用における溶接条件設定の予測が立てられるようになった。

溶接ロボットのシステム上のプログラムで同時制御可能な複数熱源溶接装置を導入した。

### 1.3.2 被溶接材固定方法の開発

高精度・高強度 3D 作業テーブルを精度良く導入する事が出来た。

効率的な製品固定方法を導入することで、5M 材でのビルド H 型鋼を製作しその結果目標値である溶接歪 3mm 以下/5M の数値目標を達成する事ができた。これより、川下企業である愛知製鋼㈱のニーズに応えることができるようになると共に、これまでにない高品質な製品を市場に提供できるようになった。

### 1.3.3 ステンレス鋼・Ni 基耐熱合金に対する実験的低歪溶接技術の開発

熱電対による温度測定・歪ゲージによる歪測定履歴から簡便な変形挙動の把握が可能であることを見出すと共に、溶接変形評価の 1 手法として明らかにする事が出来た。

ステンレス鋼による T 型継手の継手性能評価を行いシングルモードファイバーレーザ溶接の有用性を確認できた。同時に Ni 基耐熱合金の I 型継手の継手性能評価を行い、インコネル 625 材におけるシングルモードファイバーレーザ溶接の有用性を確認できた。

Ni 基耐熱合金（インコネル 625 材）における円筒形部材のシングルモードファイバーレーザ溶接実験を行ない、その結果目標値である円筒形部材の溶接部の溶接歪 1mm 以下を達成する事が出来た。これにより川下企業である本田技研のニーズに応えることができるようになった。

### 1.3.4 最適シームトラッキング条件の実験的研究

導入されているシームトラッキングシステムの開先検出精度を把握した上で、二次元シームトラッキングの溶接作業プロセスを確立する事ができた。また、円筒形の三次元曲線に対するシームトラッキングについて、ロボットの動作精度範囲内である 0.2mm 以下の精度でシームを倣う事ができることを確認した。

### 1.3.5 ハイブリッド溶接による最適ギャップ裕度拡大条件の実験的研究

高速溶接を前提とした実験的シングルモードファイバーレーザ・MIG ハイブリッド溶接装置を導入する事ができた。

導入した装置を用いた実験より、板厚 3mm 及び 6mm の条件において許容開先ギャップ裕度を 1mm まで拡大することが出来る条件を実験的に求めることが出来た。

## 1.4 プロジェクト連絡窓口

菊川工業株式会社

常務取締役 川上 十伍

電話 047-492-1331、電子メール [t.kawakami@kikukawa.com](mailto:t.kawakami@kikukawa.com)

## 第2章 加熱・吸熱複数熱源の数値解析の確立

### 2.1 実験・数値シミュレーションによる温度場制御技術による低ひずみ溶接法の評価

#### 2.1.1 研究の目的

薄板構造物を対象とした低歪み溶接技術の確立を最終的な目的として、材料・構造に対して溶接変形を抑制するための効果的な加熱または吸熱源の配置の仕方が明確でない点、溶接変形を制御するためにはどのような熱影響を制御する必要があるのかが明確でない点という観点から、本節では基礎的な立場から数値解析技術の検討を行う。

#### 2.1.2 研究の概要

シングルモードファイバーレーザーを用いた溶接法による低ひずみ化の効果について従来のアーク溶接法と比較し検討を行う。次に、冷却源を伴う温度場制御技術を用いた極低ひずみ溶接法による低ひずみ化の効果について数値シミュレーション手法を構築し、これを用いて検討を実施する。これらの検討から、温度場制御技術による極低ひずみ溶接法の効果について評価する。

#### 2.1.3 シングルモードファイバーレーザー溶接によるひずみ低減効果の実験的検討

##### (a) 実験手順

レーザー溶接とアーク溶接において生じる変形の比較のための溶接条件は、LASERによって板厚を貫通して溶接する条件をまず設定し、これと入熱が同じアーク溶接の場合・貫通溶接となるようなアーク溶接の場合の3条件を設定した。これに加え、より広範な条件を設定して行った実験における溶接条件を設定し、溶接変形の支配因子として提案されている入熱パラメータ  $Q_{\text{net}}/h^2$  ( $Q_{\text{net}}$ : 溶接入熱,  $h$ : 板厚) が等しくなるように条件を設定した。

各条件に対して、溶接後の変形量の計測と断面マクロ観察を行った。測定位置および算出方法、板厚断面マクロ観察に基づく溶込み・熱影響部寸法の計測について図 2-1-1 に示す。

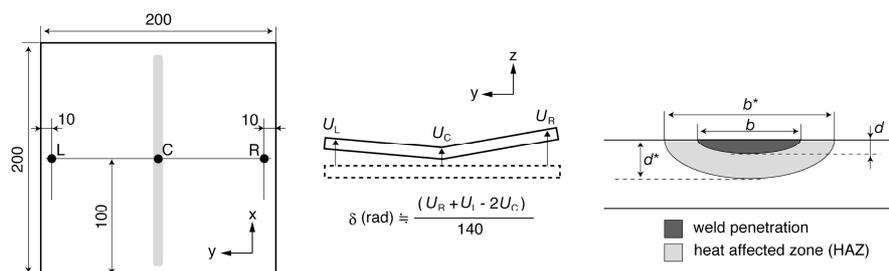


図. 2-1-1 実験における測定要領

##### (b) 実験結果・考察

溶接変形計測結果を図 2-1-2 に示す。アーク溶接にて貫通溶接を行った場合には極めて大きな変形量を生じているのに対して、低入熱のレーザー溶接およびアーク溶接の二条件ではおよそ同程度の小さい変形量となっている。しかし、入熱量がレーザー溶接と等しいアーク溶接では材料は溶融しておらず、接合という観点からは不十分である。すなわち、レーザー

溶接を用いることで、ひずみ低減に有効な低入熱化を達成した上で、板厚を貫通する溶接が可能であることを確認した。

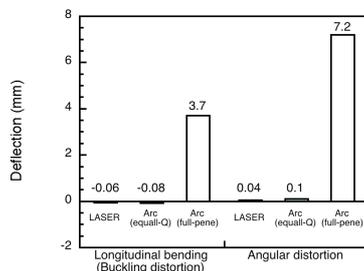
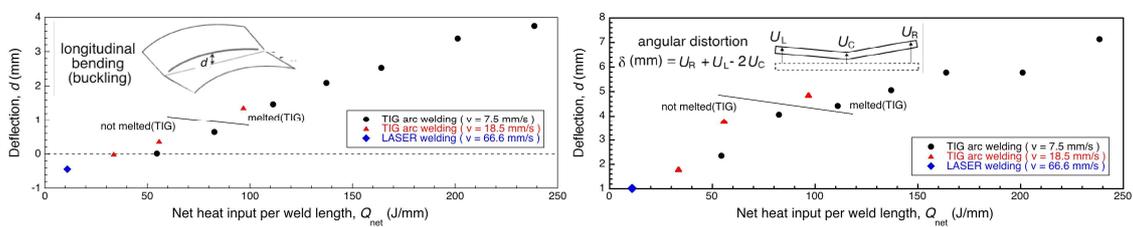


図 2-1-2 レーザ溶接とアーク溶接における変形の比較に関する実験結果

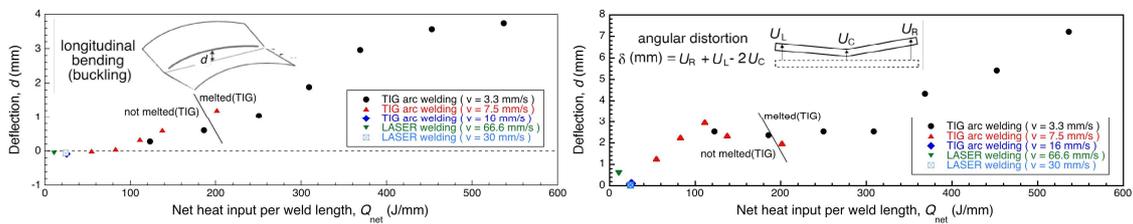
縦曲り変形に伴う撓み量と角変形量を溶接入熱で評価した結果を図 2-1-3 および図 2-1-4 に示す。レーザ溶接はアーク溶接と比較してかなり低入熱化されており、ほとんどひずみが生じない結果となっている。板厚が 3.2mm の場合の溶接速度が速い条件での角変形は低入熱化によってかえって変形量が大きくなっているが、これは角変形が入熱量よりも板厚方向の温度分布勾配に起因することが原因である。過剰な低入熱化を行うと貫通溶接とはなくなるために、このような結果となったものと考えられる。これらの結果、入熱パラメータ  $Q_{net}/h^2$  によって整理した結果を図 2-1-5 に示す。レーザ溶接による結果が、従来のアーク溶接と比較して総じて低入熱側の条件となっており、ひずみの低減ならびに座屈変形の発生防止に対して極めて有用であることがわかる。



(a) 縦曲り変形

(b) 角変形

図 2-1-3 溶接入熱による変形量の評価・比較(板厚 2.3 mm)



(a) 縦曲り変形

(b) 角変形

図 2-1-4 溶接入熱による変形量の評価・比較(板厚 3.2 mm)

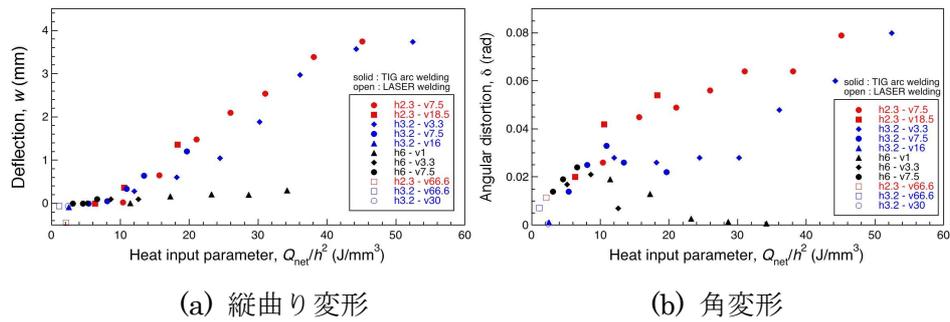


図 2-1-5 入熱パラメータによる溶接変形の評価結果

#### 2.1.4 レーザ溶接による低ひずみ化に対する材料特性・継手寸法効果の検討

##### (a) 実験手順

材料特性の影響に関する実験には、一般溶接構造用鋼材で 3.2mm、ステンレス鋼 SUS 304 では 3mm を用いた。

##### (b) 実験結果・考察

縦曲り変形、角変形の測定結果を条件毎に材料の影響に注目して整理したものを図 2-1-6 に示す。いずれの溶接条件においても一般溶接構造用鋼材よりも SUS304 の方が、変形量が大きくなっており、従来知見に従う結果となっている。また、材料が SUS304 になってもレーザ溶接による低入熱化に起因する低ひずみ化の効果は得られていることも確認できた。ただし、角変形については低入熱化によってかえって増大するような結果も見られており、高エネルギー密度を有するレーザ溶接といえども過度の低入熱化によっては板厚方向の温度分布の勾配を生じるような入熱特性になってしまうと考えられる。

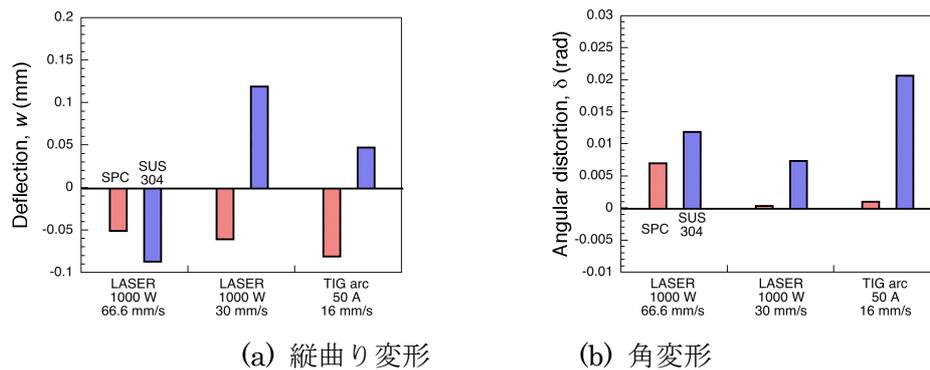


図. 2-1-6 溶接変形に及ぼす材料特性の影響

継手寸法の影響に関する実験結果を図 2-1-7 に示す。縦曲り変形に伴う撓み量は寸法の小さな試験体ではいずれの溶接条件でも撓みがほぼ生じていない。それに対して寸法の大きな試験体では入熱パラメータ  $Q_{net}/h^2$  が大きくなるにつれて撓み量は増加しており、最大で 4mm 程度の大きな撓み量を生じている。一方、角変形を見てみると今回の三条件ではどち

らの寸法の継手でも入熱パラメータ  $Q_{net}/h^2$  の変化に対して凸型の傾向を示す結果となっている。ただし、変形の絶対量は寸法の大きな試験体の方が大きくなっており、大きな縦曲り変形あるいは座屈変形に伴って角変形量が増大していると考えられる。以上より、実際の製品などで想定されるような寸法の大きな板材を溶接する場合には、必ずしも変形を抑えることができないこともあるため変形を効果的に抑えることが可能な拘束冶具の設計や配置なども考えられるが、生産の効率化という面では次に検討を行うような温度場制御によるインプロセス溶接変形低減手法の構築も望まれるところである。

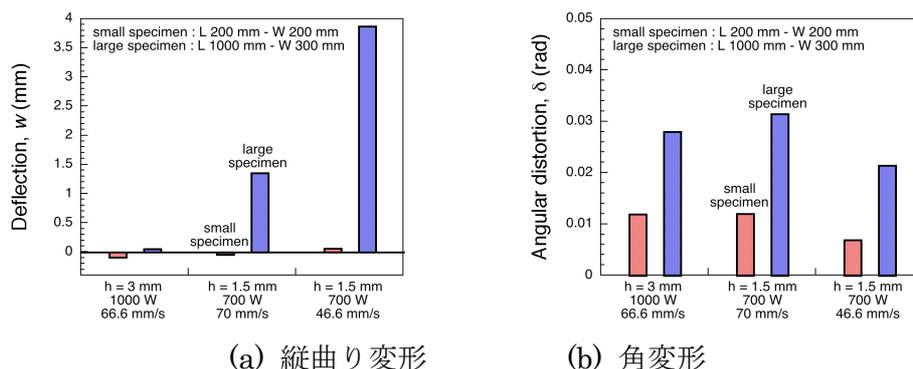


図 2-1-7 溶接変形に及ぼす継手寸法の影響

### 2.1.5 温度場制御技術による極低ひずみ溶接法に関する解析的検討

#### (a) 数値シミュレーションモデル

数値シミュレーションには図 2-1-8 に示すモデルを用いた。冷却がない場合の溶接部の温度履歴の数値シミュレーション結果を菊川工業殿で実施された実験計測結果と比較して図 2-1-9 に示す。図より、温度履歴の実験計測結果と数値シミュレーション結果は良好に一致していることから、レーザ溶接の熱源モデリングが適切であると考えられる。

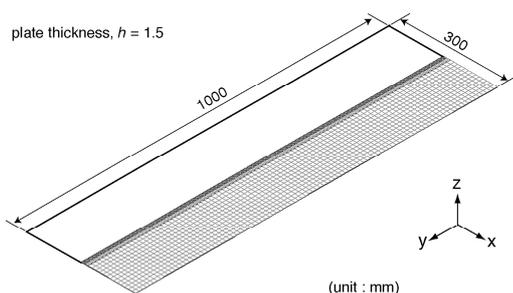


図 2-1-8 シミュレーションモデル

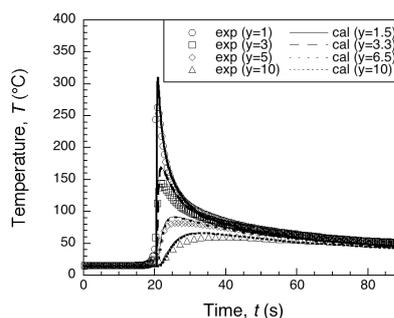


図 2-1-9 温度履歴のシミュレーションと実測値の比較

#### (b) シミュレーション結果・考察

冷却分布を固定して（冷却媒体を固定して）、冷却位置が溶接変形に及ぼす影響について検討を行った。シミュレーション結果を図 2-1-10 に示す。熱源からの距離が或る程度近くなると冷却の効果は全く見られず、今回の溶接条件では、熱源間距離を 20mm 以

内にしないと効果を得ることは難しい。また、表面冷却と裏面冷却を比較すると、表面冷却では変形低減効果が見られ、適切な冷却条件を選定すれば変形量をおよそ4割減にすることが可能であるといえる。一方、裏面冷却の場合には変形量はかえって増大していることがわかる。

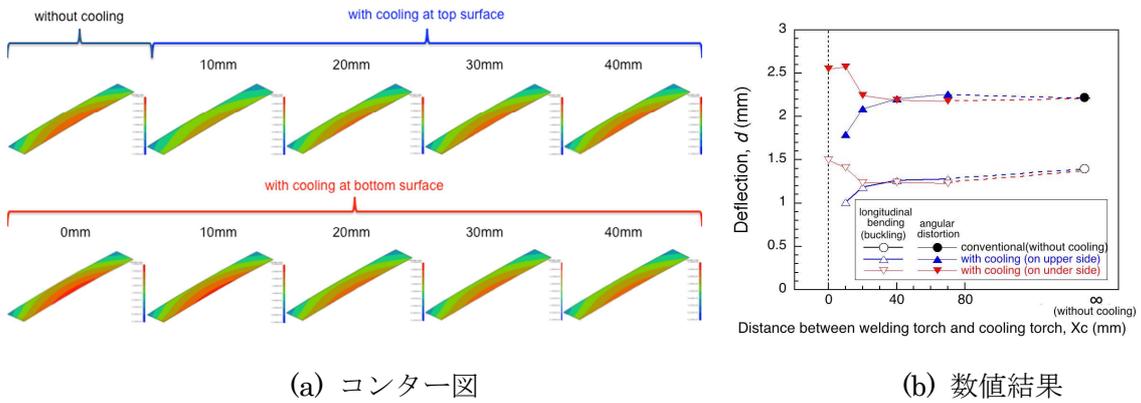


図 2-1-10 冷却に伴う変形低減効果に及ぼす冷却位置の影響

菊川工業で実施した実験結果との比較を通して考察する。レーザ出力 700W、溶接速度 4.66mm/s、板厚 1.5mm の同形状 SUS304 鋼板を突合せ溶接し継手の変形状態を測定した結果を、(a)冷却を伴わない場合、(b)板裏面から冷却を行った場合、(c)板表面から冷却を行った場合について図. 2-1-11 に示す。図より、板表面からの冷却ではひずみが大きく低減されるのに対して、板裏面からの冷却ではひずみがかえって少し増大している。このことから、数値シミュレーションによって得られた結果が少なくとも傾向を捉えているとい点で妥当であるといえる。

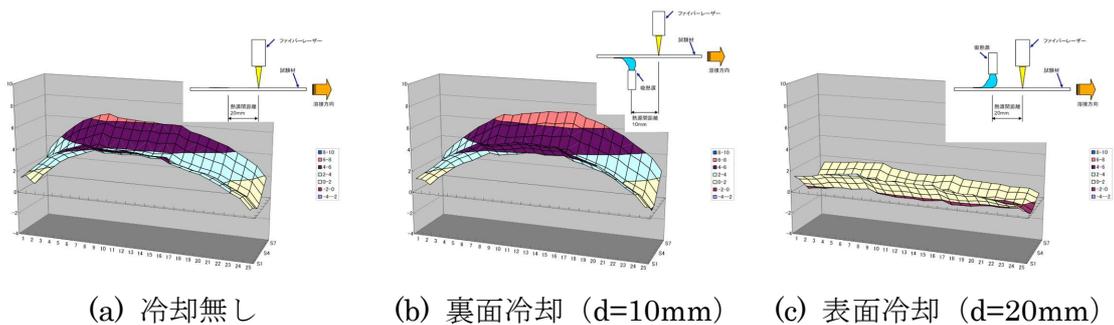


図. 2-1-11 冷却に伴う溶接変形の低減効果の実験結果

溶接線方向の撓みは継手寸法と溶接線方向の収縮を生じさせる力 (Tendon Force) から決まると考えられており、溶接線方向の収縮力は溶接熱に起因する塑性域の寸法によって決まると考えられている。追従冷却では熱が拡散する前に吸熱することで塑性域を縮小し、収縮力を軽減させる効果が期待されるが、冷却するタイミングがより早い裏面からの冷却において、かえって変形量が増大しており、期待された効果は得られていないといえる。

そこで、この要因について、数値シミュレーション結果を用いて考察する。

入熱に対して板の剛性が十分に大きい場合には、溶接線方向の収縮の発生源となる固有ひずみの発生特性は、両端固定棒モデルによって考えることができるとされている。両端固定棒モデルにおいて、材料が温度上昇によって自己降伏する温度を求めておけば、これが溶接によって塑性ひずみが生じる範囲に相当する最高到達温度分布になる。本検討で用いた SUS304 鋼板では、この温度はおよそ 80°C と見積もることができる。そこで、数値シミュレーション結果からこの三条件における最高到達温度が 80°C 以上に達する領域の幅を求めた。その結果を表 2-1-1 に示す。これを見て分かるように、いずれの場合も冷却することによって、塑性ひずみの発生領域幅は 1 割弱程度狭まっていることが確認できる。このことから、冷却に伴って収縮力は 1 割弱程度軽減されると考えられる。また、冷却する面に関してみると、裏面冷却の方が熱源からの距離が近いために、僅かではあるが熱の拡散範囲がより狭められており、収縮力に対しても同様の効果が得られると考えられる。一方、先の変形量の低減効果と比較すると、裏面からの冷却が最も収縮力の軽減が期待されるのに対して、変形量は冷却無しの場合よりもかえって増大しており、収縮力の観点からはこれらの低減効果の違いを理解することができない。

表 2-1-1 溶接熱に伴って塑性ひずみが生じる領域幅

condition	width (mm)
Without cooling	14.1
With cooling on bottom surface	13.3
With cooling on top surface	12.8

そこで、溶接中の変形発生挙動に注目して考察を加える。図. 2-1-12 に、上記の三条件における溶接中の変形発生挙動の数値シミュレーション結果を示している。図より、変形発生挙動としては、まず溶接中に溶接線直下は下に落ち込むような変形を生じ、それと同時に角変形を生じている。角変形は溶接終了（図中の網掛け部分）と同時に生じきっており、その後の冷却過程では一定となっている。一方、溶接線直下の撓みは、溶接終了後の冷却過程において下方向への撓みが軽減されるように戻り変形が生じており、最終的には上方向の撓みとなる挙動が見てとれる。冷却条件の違いに注目すると、薄板のレーザ溶接のような元々が板厚貫通型の温度分布を生じるものに対して、裏面から冷却を行うとかえって板厚方向の温度勾配をつけてしまうために、生じる角変形量を増大させてしまうと考えられる。また、溶接終了時に生じている角変形は冷却過程の収縮に伴う撓み変形に対して板の初期不整として影響すると考えられるため、収縮力の軽減に有利な裏面冷却では、この初期不整の影響がより大きく出るために、溶接線方向の撓み量も低減されずかえって増大すると考えられる。

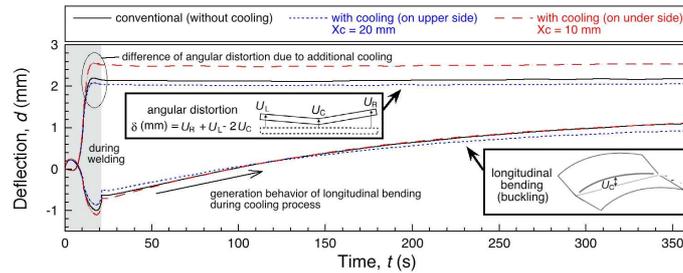


図. 2-1-12 溶接中の変形発生挙動の比較

以上のように、薄板の溶接変形を制御するためには、溶接中の温度分布と固有ひずみの発生特性に注目した取り組みだけではなく、溶接中の過渡変形の影響を考慮する必要があることが示された。このような変形発生メカニズムの理解を深めることによって、低ひずみ化や形状制御に向けての適切な施工指針を提示する上で有用となることが期待される。

#### 2.1.6 まとめ

加熱・吸熱複数熱源の数値解析とシミュレーション技術の確立を通して、レーザを用いた溶接法および温度場制御技術を用いた溶接法による低ひずみ化の効果について検討を行った。得られた結論を以下に示す。

- (1) 高エネルギー密度熱源であるレーザ溶接を用いることで、従来のアーク溶接と比較して 1/20 倍の熱量で板厚貫通溶接が可能であり、この低入熱化に伴ってひずみも 1/10 程度の低減効果が得られることを示した。
- (2) 低入熱・板厚貫通型の溶接が可能であるレーザ溶接を用いた低ひずみ化は、ステンレス鋼のようなひずみ易い材料の低ひずみ化に対しても有用であったが、実際の製品で想定されるような寸法の大きな板材の溶接では、必ずしも十分なレベルまでひずみを軽減することができない場合もあることが示唆された。
- (3) このような場合での適用を想定して、更なる低ひずみ化のための後方冷却による温度場制御技術について検討を行った結果、表面からの適切な冷却条件を選定すれば効果的なひずみ低減効果が得られることを示した。
- (4) しかしながら、裏面からの冷却によっては、熱影響範囲をより効果的に縮小できるにも関わらず、冷却がない場合と比較してもかえって変形量が増大してしまう結果が、実験・数値シミュレーション共に得られた。
- (5) その要因としては、溶接中の過渡変形、特に角変形量の変化によって、冷却時の収縮に伴う撓み変形に対する板の初期不整としての影響が考えられることを示した。
- (6) 薄板のように剛性の小さい構造においては、溶接熱に起因する温度分布、固有ひずみの発生特性のみならず、溶接中の過渡変形挙動をも考慮した変形発生メカニズムを理解す

ることによって、更なる低ひずみ化やあるいは意図的に形状を作り出す形状制御に対しても、有用な施工指針の提示が可能となることが期待される。

## 2.2 加熱・吸熱複数熱源装置における変形量低減効果の研究

### 2.2.1 研究の目的

本研究では、シングルモードファイバーレーザーによるステンレス鋼板の溶接施工における、吸熱による溶接変形量の低減を目的とする。

### 2.2.2 研究の概要

初めに、シングルモードファイバーレーザー溶接機及び加熱・吸熱複数熱源溶接装置を用いて試験体の溶接を行い、溶接後にレーザー変位計を用いて溶接変形量の測定を行う。吸熱条件を変化させた時の溶接変形量の変化を観察し、最適な加熱・吸熱方法を検討する。それぞれの溶接に際し、温度及び歪量を測定する。温度の測定についてはK熱電対を使用し、歪量の測定については歪ゲージを使用する。

### 2.2.3 実験手順

吸熱源をレーザー溶接機のレーザー焦点後方裏側又は後方表側に配置し、それぞれの溶接試験体を作成する。作成した溶接試験体の溶接変形量を、レーザー変位測定器にて測定する。実験の概要図 2-2-1 に示す。溶接機と吸熱装置の速度を同期させて溶接作業を行なう事とする。

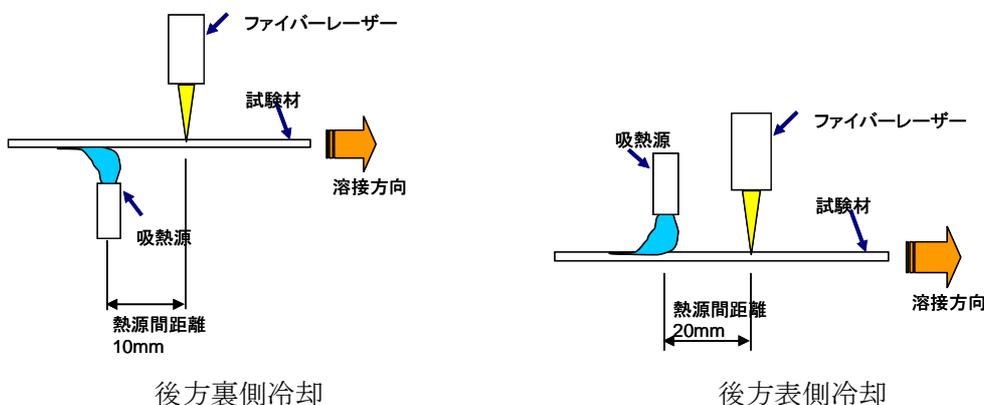


図 2-2-1 加熱・吸熱実験の概要図

### 2.2.4 実験結果

後方裏側冷却の実験結果を図 2-2-2 に、後方表側冷却の実験結果を図 2-2-3 に示す。

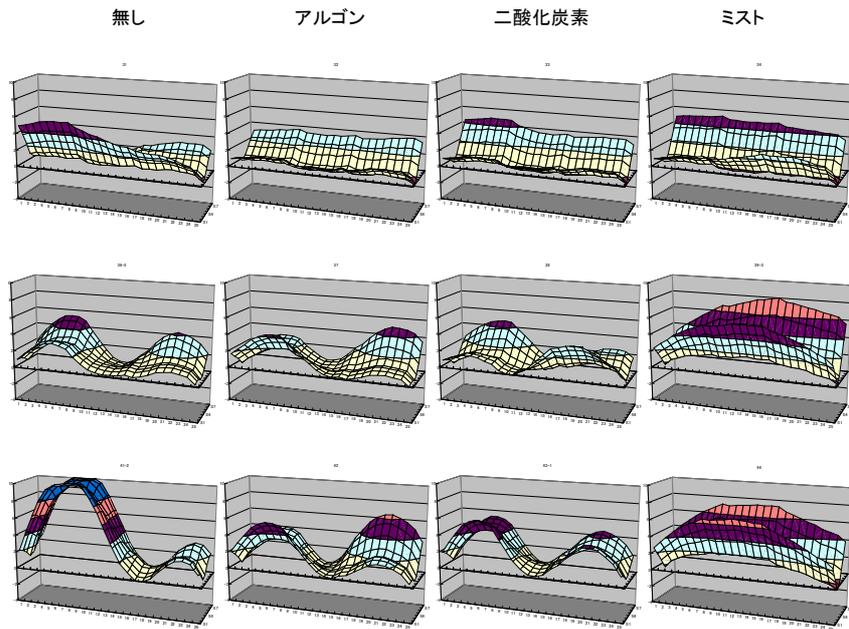


図 2-2-2 後方裏側冷却の実験結果

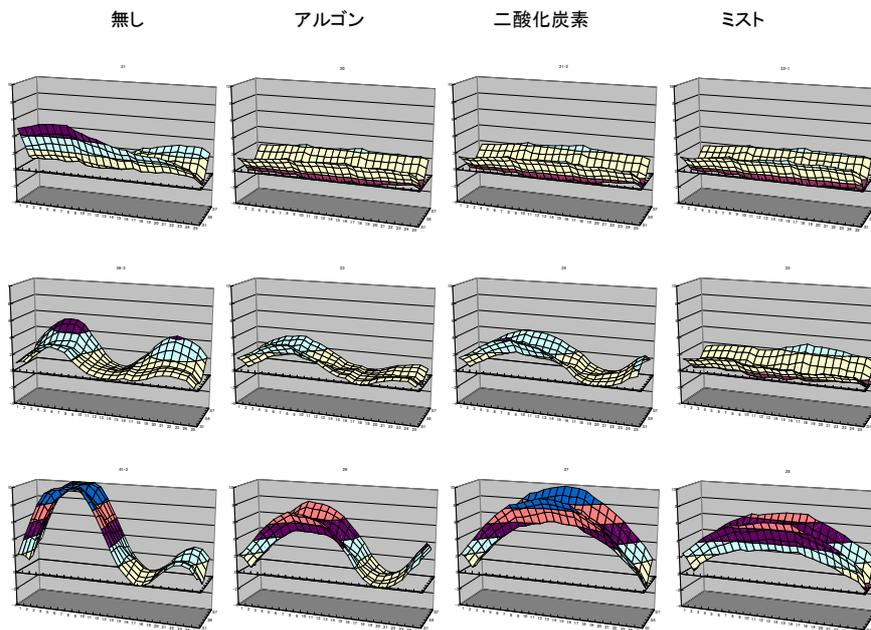


図 2-2-3 後方表側冷却の実験結果

実験結果より、後方表側冷却全ての板厚条件において、溶接入熱量を上げていくと変形量が大きくなっていく結果が得られた。また、変形量に非常に顕著な結果が得られた。どちらの溶接速度においても、ミスト（合番 39）（合番 44）のみ単一の反りが確認されたのに対し、他の冷却源ではすべて 2 回波打つ溶接変形形状がみてとれる為、ミストの条件が

最も溶接変形量を抑えている結果が得られた。また、後方表側冷却のほぼ全ての板厚条件において後方裏面吸熱条件の変形量よりも後方表面吸熱条件の変形量のほうが少なくなるという結果が得られた。吸熱源無しの条件と比較した場合、全ての吸熱源において変形量が減少するという結果が得られた。それぞれの吸熱源での変形量の違いを見てみると、入熱量を低くした場合は大きな変化がみられなかったが、入熱量を上げていった場合はミスト（合番 70、合番 73）による変形量低減効果が高いことが確認できた。

### 2.2.5 研究のまとめと考察

吸熱源の配置においては、後方裏面よりも後方表面に配置するほうがよい結果を得ることが出来た。この結果は、後方裏面よりも施工上の条件における制限が少なくなるという重要な要素がある。実使用においては主に製品形状や板厚による施工条件の制限が発生すると共に、装置が大型化するという懸念があり、後方裏面からの吸熱ではこれらが大きな課題となると考えられていたが、本実験結果が実使用においても非常に有用であることが確認された。溶け込み状態を把握する為に裏波の外観検査結果を表 2-2-1 に示す。

表 2-2-1 裏波外観検査結果

	cm/min	無し	Ar	CO2	ミスト	急冷
板厚 3.0	1200	×	×	×	×	×
	600	△	×	×	×	×
	400	△	△	△	△	△
板厚 1.5	840	△	×	△	△	◎
	420	◎	△	△	△	◎
	280	◎	◎	◎	◎	◎
		◎	◎	◎	◎	◎
板厚 1.0	600	△	△	△	△	△
	300	◎	△	◎	◎	◎
	200	◎	◎	◎	◎	◎

◎:裏波良好  
△:一部溶け込み不良有り  
×:全線溶け込み不良有り

吸熱条件無しの条件で板厚別に見ていくことにする。

板厚 3.0mm を見ると、裏波があまり出ない条件の範囲内で溶接速度を落としていくと、角変形量が大きくなる傾向が得られている。板厚 1.5mm を見ると、裏波が完全に確認される条件になると、溶接線方向の反りが確認されるようになり、溶接速度を落としていくと反りが大きくなる傾向が得られている。板厚 1.0mm を見ると、裏波が完全に確認される条件になると、座屈が確認されるようになり、溶接速度を落としていくと座屈が大きくなる傾向が得られている。

これらより、ファイバーレーザー溶接における溶接変形には、溶接部の溶け込み形状が大きく影響していると考えられる。

### 第3章 被溶接材固定方法の開発

#### 3.1 5M材における両端固定方法の検討

##### 3.1.1 研究の目的

本研究では、5M材におけるビルドH形鋼の溶接実験を行い、固定方法の違いによる溶接変形量の変化を明確にすると共に、先に掲げた数値目標値の達成を目的とする。

##### 3.1.2 研究の概要

FB-5\*50mm、長さ5000mmのステンレス製フラットバーを用い、シングルモードファイバーレーザー溶接機にてビルドH型鋼を作成する。溶接時の被溶接材固定方法は両端固定方法とする。作成したH型鋼について、縦曲り変形と角変形をそれぞれレーザー変位計を用いて測定する。測定値を元に溶接変形の評価を行い、数値目標値との差異を確認する。

##### 3.1.3 実験手順

ステンレス製フラットバーをH形に固定し、3kWシングルモードファイバーレーザー溶接装置にて溶接を行なう。溶接概要図を図3-1-1に示す。また、拘束概要図を図3-1-2に示す。

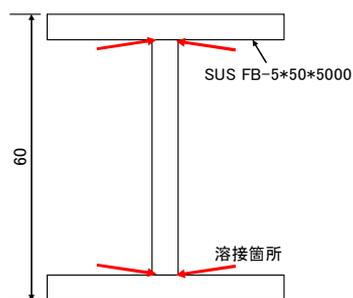


図 3-1-1 溶接概要図

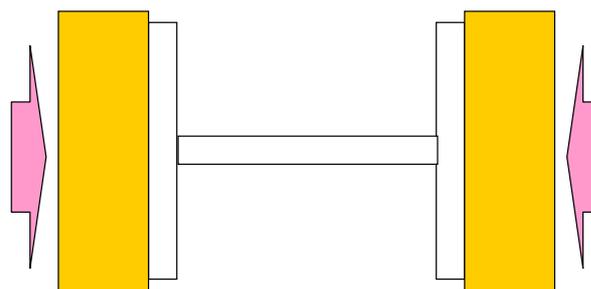


図 3-1-2 拘束概要図

製作したビルドH形鋼に対し、レーザー変位計を用いて縦曲り変形量と角変形量の測定を行う。変位測定位置概要図を図3-1-3に示す。また、角変形量の測定概要図を図3-1-4に示す。

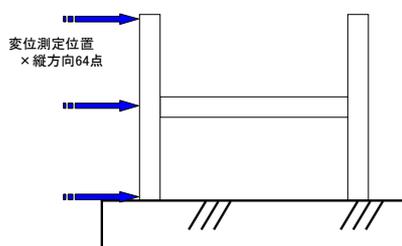


図 3-1-3 変位測定位置概要図

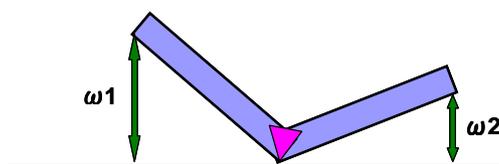


図 3-1-4 角変形量測定概要図

図3-1-4の時、 $\omega 1$ 及び $\omega 2$ の平均値を $\omega$ 、角変形量を $\theta$ とした時、ラジアンは次式で表

される。

$$\text{rad} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \theta}{360} \quad \text{式3-1-4}$$

### 3.1.4 実験結果

縦曲り変形量測定結果を、図 3-1-7 に示す。実験結果より、最大縦曲り変形量は 2.8mm であった。この時の角変形量  $\theta$  は式 3-1-3 より、 $\theta = 1.38^\circ$  となり、これをラジアンに変換すると、式 3-1-4 より 0.02rad となった。

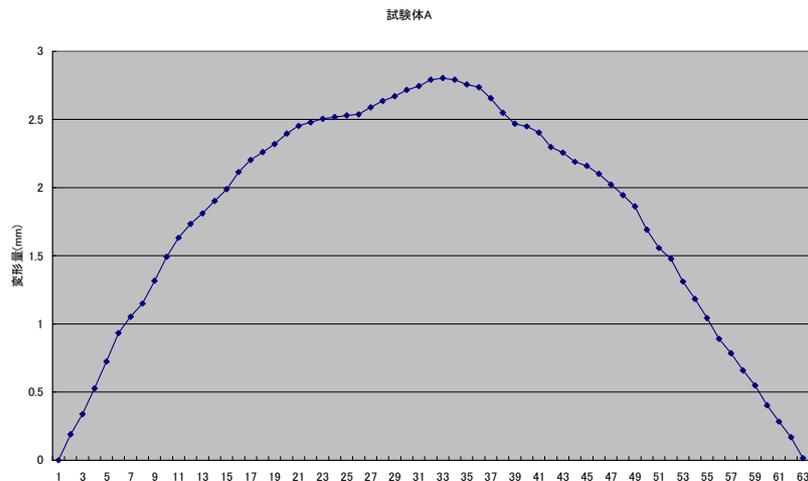


図 3-1-7 縦曲り変形量測定結果

### 3.1.5 5M 材における両端固定方法のまとめと考察

5M 材における両端固定方法による溶接実験結果より、当初の数値目標である縦曲り変形量 3mm 以下/5M 及び角変形量 0.05rad 以下 をクリアする事が可能となった。

この結果から、複雑な固定方法をすることなくこれまででない高品質な製品を製造可能となり、建築用部材の製造におけるシングルモードファイバーレーザー溶接の有用性を見出すことができた。

## 第4章 ステンレス鋼・Ni基耐熱合金に対する低歪溶接技術の開発

### 4.1 ステンレス鋼における溶接歪の評価技術の検討

#### 4.1.1 研究の目的

レーザ溶接は母材への入熱量を低減し変形の少ない溶接が可能であるが、レーザ溶接を用いても長尺、薄板の構造物を溶接すると大きく変形してしまう。本研究では溶接歪の挙動解析を行い、ステンレス鋼における溶接歪の評価技術を検討することを目的としている。

#### 4.1.2 研究の概要

レーザ溶接による歪および変形をより減少させる為、溶接直後の冷却による局部歪やマクロ的な変形挙動の評価を行った。また吸熱源として溶接直後に冷却媒体を付与して、溶接熱サイクル、局部歪および変形の評価方法を確立した。

#### 4.1.3 実験手順

本研究では供試材としてSUS304を使用し、1000×300mm、板厚は1.0、1.5、3.0mmの突合せ溶接とした。上吸熱の冷却装置はビード上面にアルゴン、炭酸ガス、ミストの3種類の冷却媒体を吹き付け冷却した。拘束は供試材の両端を治具で拘束した。

#### 4.1.4 実験結果

##### (1) レーザ溶接における入熱量と変形

各条件における溶接変形を図4-4-1に示す。板厚1.0mmの場合、80J/cmの条件では冷却なしが最も歪み、冷却法の違いは確認できない。冷却なしと冷却ありでは溶接変形量が約5%減少した。角変形は冷却なしのみ2°を超えた。冷却ありでは、大きな違いは認められなかった。165J/cmの条件では、冷却なしが大きく変形し、さらに波打つようになった。アルゴン、炭酸ガス冷却も波打ったが、冷却なしと比較し変形量は約50%減少している。ミスト冷却のみ波打ちがなかったが、溶接変形量はアルゴン、炭酸ガスと大きな違いはなかった。しかし角変形角度は冷却なし、ミスト冷却共に約1.2°となり、アルゴン、炭酸ガス冷却の場合が低いレベルとなった。250J/cmの条件は冷却ありなしに関係なく、大きく変形した。溶接変形量の大きさは冷却なし、アルゴン、炭酸ガス、ミストの順で小さくなり、冷却なしと比較しミスト冷却では約40%減少した。冷却なし、アルゴン冷却は波打つように変形したが炭酸ガス、ミスト冷却は波打たなかったが、角変形の大きさ増大する傾向にあった。

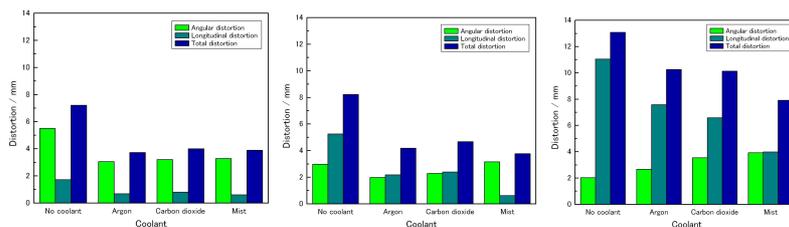
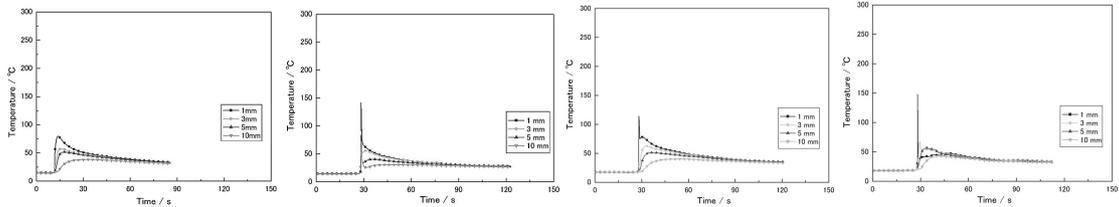


図 4-1-1 Welding distortion of heat input 80J/cm、165J/cm、250J/cm.

(2) レーザ溶接における入熱量と温度変化

板厚 3mm において、入熱 165J/cm の条件における熱サイクルを図 4-1-4 に示す。冷却なしがすべての測定位置において温度が最も低い結果となった。冷却ありでは炭酸ガスとミスト冷却にて 1mm 地点と 3mm 地点の落差が大きい。冷却効果を確認できる。入熱 250J/cm の条件では、冷却の効果が表れており温度が急激に下がっていることが確認できた。アルゴン冷却では、一度温度が下がった後再び元に戻る復熱現象が現れていたが、ミスト冷却では温度が下がったままになっていた。またミスト冷却の 3mm 地点の最高温度が最も低く、冷却効果が高いことも見られる。入熱 335J/cm の条件は全体的に高い温度だが、冷却により温度が急激に下がっていた。中でもミスト冷却は 300℃ 近くまで上昇した温度が約 2 秒で 50℃ 付近まで冷却された。また 1mm 地点と 3mm 地点の最高温度が 200℃ 以上違っており、温度の広がりも抑えられていることも見られた。アルゴン、炭酸ガス冷却も冷却効果が表れていたが、ミスト程ではなかった。なお、ミスト冷却にも復熱現象は表れていた。



(Non cooling)。 (Coolant is Argon)。 (Coolant is Carbon dioxide) (Coolant is Mist)。

図 4-1-4 Temperature change of heat input 165J/cm.

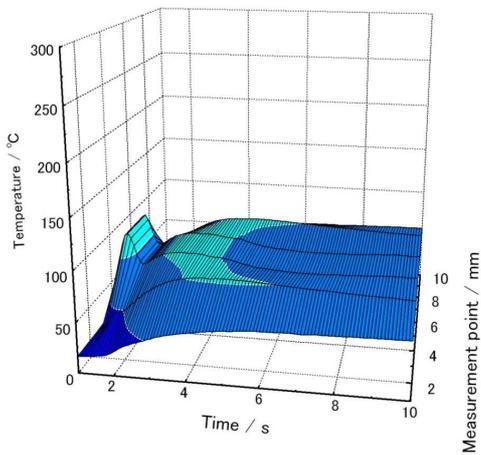


図 4-1-5 Three-dimensional Temperature change (250J/cm、Coolant is Argon).

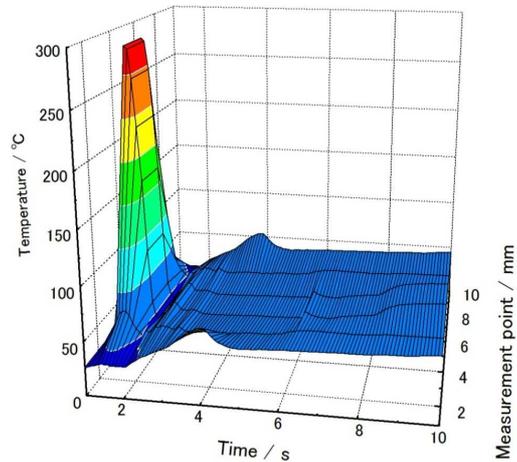
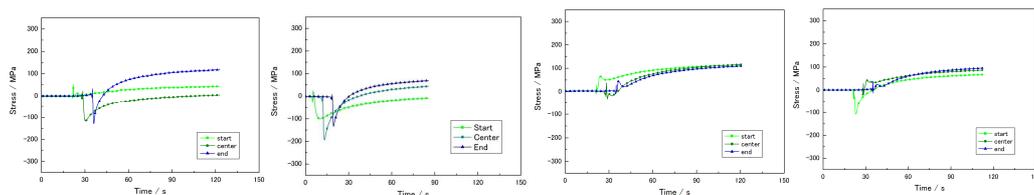


図 4-1-6 Three-dimensional Temperature change (335J/cm、Coolant is Mist).

(3) レーザ溶接中の局部応力

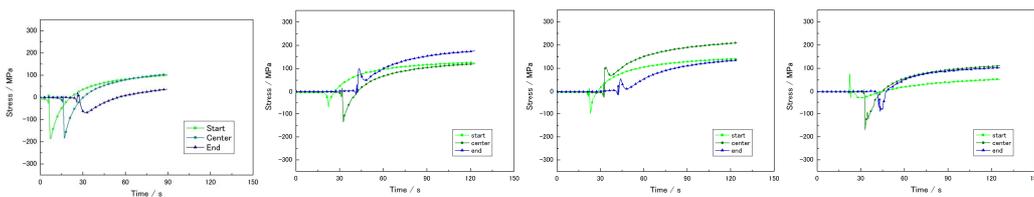
板厚 3.0mm の溶接中の局部応力変化を表したものを図 4-1-9 から図 4-1-10 に示す。165J/cm の条件では、最終的な局部応力はいずれも 100MPa ほどになった。冷却なしとアルゴン冷却はセンターの応力が 0 付近に対し、炭酸ガス冷却とミスト冷却は全地点の応力が 100MPa

Pa ほどになっていた。瞬間的な最大応力は冷却なしが最も大きく、アルゴンガス、炭酸ガス、ミストの順で小さくなっていったが、熱から求めた熱応力は冷却なしが最も小さくなっていった。変形量をみると冷却なしが最も小さく、アルゴンガス冷却が大きくなっている。250J/cmの条件では、冷却なしが瞬間的に大きく引張応力が発生しており、SUS304の縦弾性係数値まで達しているが、最終的な残留応力は100MPaほどとアルゴン、炭酸ガス冷却より小さい値となっている。また炭酸ガス冷却のセンター地点が瞬間的に210MPaと縦弾性係数を超えている。最大応力はミスト冷却がもっとも小さくなっており、残留応力も100MPa以下になった。変形を見ると炭酸ガス冷却が最も変形していた。335J/cmの条件では、ミスト冷却以外はすべて縦弾性係数を超える値となった。ミスト以外は最終的な残留応力が200MPa近くになっており、熱応力も1mm地点、3mm地点ともに縦弾性係数を超えていた。ミスト冷却は歪ゲージの値は164MPaほどに抑えられており、熱応力も1mm地点は800MPaと大きくなっているが3mm地点は137MPaと小さかった。またミスト以外は圧縮応力に大きく転じているがミスト冷却は引張応力が発生した後ゆっくり圧縮応力に転じていっていた。しかし変形量を見るとアルゴン冷却以外は変形量に大差なかった。変形の大きいアルゴン冷却は圧縮応力が発生した後一度応力が小さくなり、再び圧縮応力が発生する波形になった。



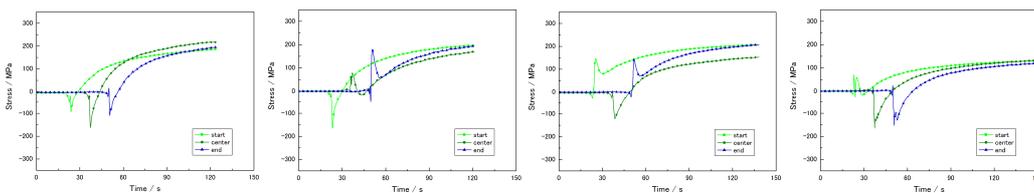
(Coolant is nothing) (Coolant is Argon) (Coolant is Carbon dioxide) (Coolant is Mist)

図 4-1-9 Stress change of heat input 165J/cm.



(Coolant is nothing) (Coolant is Argon) (Coolant is Carbon dioxide) (Coolant is Mist).

図 4-1-10 Stress change of heat input 250J/cm.



(Coolant is nothing) (Coolant is Argon) (Coolant is Carbon dioxide) (Coolant is Mist)

図 4-1-11 Stress change of heat input 335J/cm.

(4) 総合判定

総合判定の基準数値を表 4-1-1 に示す。レーザ溶接実験結果の評価を板厚ごとにまとめた結果を表 4.1.4.1.5-2 から表 4.1.4.1.5-4 に示す。

表 4-1-1 Judging standard of distortion.

	Longitudinal distortion (mm)	Total distortion (mm)	Angul (rad)
○	~1.8	~3.2	~0.017
△	1.9~3.6	3.3~6.0	0.018~0.025
×	3.7~	6.1~	0.026~

評価結果を表 4-1-2 に示す。板厚 3.0mm の場合は、入熱 165J/cm の冷却なし、335J/cm の冷却なし、炭酸ガス、ミスト冷却の変形が低下した。板厚 1.5mm の場合は、80J/cm の冷却なし、165J/cm のアルゴンガス冷却、250J/cm のアルゴンガス、炭酸ガス冷却の変形が少なかった。板厚 1.0mm の場合は、すべての条件で変形量が増加する傾向にあった。変形の少ない条件は比較的縦弾性係数を超えている条件が少なかった。変形の多い条件では全体的に縦弾性係数を超えており、応力の値も大きい条件が多かった。しかし最高温度には大きな違いは現れなかった。溶接後の温度低減にはミストによる冷却が最も効果があったと認められた。板厚 3.0mm の低入熱では冷却によって温度を低下させると局部応力が増えることが見られたが、その他の条件では残留応力の低下が見られた。特に板厚 1.5mm、1.0mm では 50%程の局部応力になっていることから薄板では冷却が有効であることが認められた。

表 4.1.4.1.5-2 Judgment result of thickness 3.0、1.5、1.0mm.

Thickness (mm)	Hear input (J/cm)	coolant	Longitudinal distortion	Total distortion	Angul
3	165	No coolant	○	○	○
		Argon	○	△	×
		Carbon dioxide	○	△	△
		Mist	○	△	△
	250	No coolant	○	△	△
		Argon	○	△	△
		Carbon dioxide	×	×	×
		Mist	○	△	△
	335	No coolant	○	○	○
		Argon	×	×	×
		Carbon dioxide	○	○	○
		Mist	○	△	○

Thickness (mm)	Hear input (J/cm)	coolant	Longitudinal distortion	Total distortion	Angul
1.5	80	No coolant	○	△	○
		Argon	○	△	△
		Carbon dioxide	○	△	△
		Mist	○	△	△
	165	No coolant	△	△	△
		Argon	○	○	△
		Carbon dioxide	○	△	△
		Mist	○	△	△
	250	No coolant	×	×	△
		Argon	○	○	○
		Carbon dioxide	○	○	○
		Mist	○	△	△

Thickness (mm)	Hear input (J/cm)	coolant	Longitudinal distortion	Total distortion	Angul
1	80	No coolant	△	×	×
		Argon	○	△	△
		Carbon dioxide	○	△	△
		Mist	○	△	△
	165	No coolant	×	×	△
		Argon	△	△	○
		Carbon dioxide	×	△	○
		Mist	○	△	△
	250	No coolant	×	×	○
		Argon	×	×	△
		Carbon dioxide	×	×	△
		Mist	×	×	×

4.1.5 考察

レーザ熱源では、同じ板厚で入熱量を変更して溶接した場合冷却を行わない条件では、入熱量が増えるごとに変形が増加していった。この事より従来の知見通り入熱量が増えることと変形が大きくなる事が推察される。入熱量が増えることで近傍温度が上昇し、熱応力による局部応力が増えるので変形が増えたのではないかと考える。また、同様の熱量で異なる板厚を溶接すると、板厚 1 mm のような薄板は縦曲り変形が大きくなることが認められた。このことから板厚に対して高い入熱量を与えると変形が増大することも分かる。

冷却効果はミスト冷却が最も効果的であり、次に炭酸ガス、アルゴンガスの順で冷却効果が高いことが認められた。溶接直後に冷却を行うことで一度大きく温度が低下した後、温度が再び上がる複熱現象が見られた。これは冷却ガスにより表面のみ冷却を行ったので裏側は冷却しきれておらず、裏側に残った熱によって再び表面が熱せられたために発生したと考える。冷却を行うことによって板厚 1.0mm~1.5mm は変形が低減されたが、板厚 3mm では冷却を行うことで変形が増大している。変形が低減された冷却では、広範囲に温度が広がっていないことがみられた。このことから冷却を行うことで温度拡散を防止し、熱応力が発生する範囲が狭くなり、結果ビード周辺の非常に狭い部分のみの局部応力となったので全体的な変形が減少したのではないかと考える。板厚 3mm では冷却を行うことで変形が増大していたのは、冷却後に温度は低下したが、板厚が厚いため表面のみ冷却され裏側まで冷却効果が及ばなかったため板の表裏で多大な温度差が生じそれによって表裏で応力値も変わり、バランスが崩れ変形が大きくなったのではないかと考える。

局部歪・応力は入熱量が高くなるほど大きく発生していることが見られた。冷却によって応力が減少している傾向が見られたが、あまり大きな値ではなかった。始め圧縮応力が発生しその後引張応力に転じる場合が多く、熱膨張時に圧縮応力が発生し、温度が低下し熱収縮によって引張応力が発生していると考えられる。また歪変化の波形が温度変化の波形と連動している部分も見られ、複熱によって温度が上昇した際も連動して引張応力が発生していた。このことから温度の低減が歪発生抑制につながると考える。William M Steen<sup>3)</sup>は、レーザプロセスの草創期からレーザ溶接における熱流体の挙動を考察しており、板厚により十分な熱量を与えることが冶金的な観点からも必要であることを示唆している。

#### 4.1.6 まとめ

レーザ溶接において、冷却ガスを吹き付けることによって溶接部近傍を冷却できる確認され、冷却は水を霧状にし、空気に含ませたミスト冷却が最も効果的であった。冷却を行うことによって母材の温度拡散防止となり、広範囲で高温になることが防げるため、溶接後の供試材変形を低減させる傾向となった。しかし冷却が有効なのは板厚 1.5mm までとなり、板厚 3.0mm では冷却によって変形が増大される傾向が表れた。

溶接時の温度、歪、変形量の履歴を測定していくことで、シングルモードファイバーレーザによる溶接時の溶接変形の挙動を把握する事が可能となり、溶接変形量低減に向けた評価方法の 1 手法として明らかにする事ができた。

## 4.2 Ni 基耐熱合金における I 型継手強度試験

### 4.2.1 本実験の目的

本実験は、Ni 基耐熱合金に対するシングルモードファイバーレーザ溶接による I 型継手の強度試験を行い、継手性能の評価を行うことを目的とする。

### 4.2.2 本実験の概要

シングルモードファイバーレーザ溶接機を用い、Ni 基耐熱合金鋼の I 型継手を作成し、それらの試験体について曲げ試験、硬さ試験、引張試験を行い、溶接性能の評価を行う。

### 4.2.3 本実験の手順

供試材はインコネル 625、インコネル 718、ハステロイ X を使用して、I 型継手の溶接試験体を作成し、それらから曲げ試験体、硬さ試験体、引張試験体をそれぞれ切り出して作成した。

### 4.2.4 曲げ試験結果

曲げ試験の結果を表 4-2-1 に示す。

表 4-2-1 曲げ試験結果

	曲げの種類	最大荷重 (N)	最大曲げ応力 (N/mm <sup>2</sup> )	母材最大荷重 (N)	母材最大曲げ応力 (N/mm <sup>2</sup> )	結果 (割れ, mm)
2-1	表	1700	40.7	1550	37.1	良
2-2	裏	1670	40.0	1550	37.1	良
3-1	表	1330	32.5	1220	29.8	良
3-2	裏	1330	32.5	1240	30.3	良
4-1	表	1450	35.4	1290	31.5	良
4-2	裏	1460	36.0	1310	32.3	良
5-1	表	1660	40.1	1560	37.7	良
5-2	裏	1640	39.6	1520	36.7	良
6-1	表	1310	32.0	1210	29.5	良
6-2	裏	1320	32.6	1220	30.1	良
7-1	表	1460	36.0	1300	32.1	良
7-2	裏	1420	35.4	1310	32.6	(2.2)
8-1	表	1680	40.2	1530	36.7	良
8-2	裏	1690	40.5	1550	37.1	良
9-1	表	1270	31.0	1220	29.8	良
9-2	裏	1330	32.5	1210	29.5	(0.4, 2.9)
10-1	表	3680	56.6	3400	52.3	良
10-2	裏	3630	55.5	3300	50.4	良
11-1	表	3500	53.4	3370	51.4	良
11-2	裏	3520	53.7	3280	50.1	良
12-1	表	3670	56.1	3380	51.6	良
12-2	裏	3630	55.4	3350	51.2	良
13-1	表	10700	82.8	10000	77.3	良
13-2	裏	10200	78.9	9900	76.6	良

以上より、次の 4 点を確認する事ができた。

- 1) 割れ等の欠陥は少なく、ほぼ良好な結果が得られた。
- 2) 表曲げ、裏曲げの違いによって、最大曲げ応力に変化はみられない。
- 3) 最大曲げ応力は、母材試験片より溶接継手試験片の方が大きい。



と考えられる。

また、シングルモードファイバーレーザー溶接機による Ni 基耐熱合金の溶接試験体全般において、溶接部の断面形状が凹型になるという結果が得られた。代表的なマクロ写真を図 4-2-2 に示す。

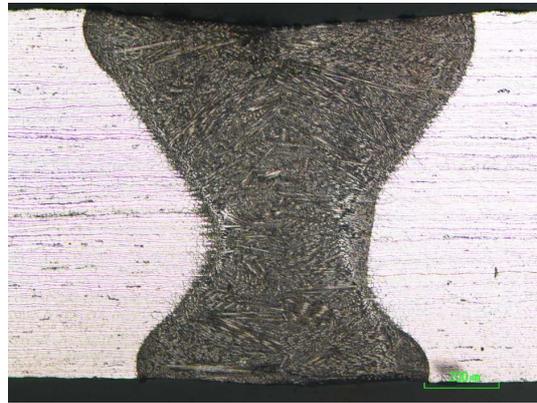


図 4-2-2 代表的な Ni 基耐熱合金の継手断面マクロ写真

### 4.3 Ni 基耐熱合金による円筒形部材の製造性確認

#### 4.3.1 研究の目的

本研究では生産化に向けた研究として、インコネル 625 材における円筒形部材の製造性を確認すると共に、溶接部における溶接変形量 1.0mm 以下及び円筒形変形量 1.0mm 以下の数値目標値を達成する事を目的とする。

#### 4.3.2 研究の概要

インコネル 625 材を用い、直径  $\phi$  348mm の円筒形部材を作成する。円筒形部材の溶接はシングルモードファイバーレーザー溶接機を用いて行う。溶接治具は、本実験用に考案した治具を使用し、円筒形部材の溶接部を拘束する。作成した円筒形部材に対し、溶接部の溶接変形量及び円筒形変形量を測定し評価を行う。

#### 4.3.3 実験手順

供試材である板厚 1.0mm のインコネル 625 材を円筒形に加工し、作業台の上に固定する。継手部分は特殊な治具にて拘束する。実験概要図を図 4-3-1 に示す。作成した円筒形部材について、突合せ部の溶接変形量を金差しで測定する。また、円筒形部材の直径 2 箇所をメジャーにて測定する。

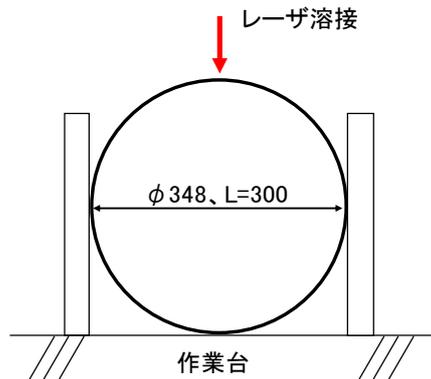


図 4-3-1 実験概要図

#### 4.3.4 実験結果

実験結果より、突合せ部の溶接変形量は 0.4mm であった。突合せ部溶接変形量の測定写真を図 4-3-2 に示す。また、直径は φ385 に対して、φ385×φ385 であった。直径の測定写真を図 4-3-3 に示す。



図 4-3-2 突合せ部測定写真



図 4-3-3 直径測定写真

#### 4.3.5 Ni 基耐熱合金の円筒形部材の製造性確認のまとめと考察

以上より、突合せ部溶接変形量 1.0mm 以下という数値目標を達成可能な製品を提供できるようになった。

インコネル材におけるシングルモードファイバーレーザー溶接部の強度については、報告してあり、今回は引張試験のみを行い、強度の確認を行った。強度試験結果を、表 4-3-1 に示す。

表 4-3-1 引張試験結果

	断面寸法 (mm)	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
規格値	—	827-1034	55-30
試験体1	1.0×25.0	940	41
試験体2	1.0×25.0	920	32

試験結果より、溶接部の引張強さは規格値を満足しているという結果が得られた。

## 第5章 最適シームトラッキング条件の実験的研究

### 5.1 三次元曲線シームトラッキング走行実験

#### 5.1.1 研究の目的

本研究では、三次元曲線を有する部材に対するシームトラッキングシステムの走行実験を行ない、三次元曲線への適用性を把握する事を目的とする。

#### 5.1.2 研究の概要

直径 $\phi 348\text{mm}$ の円筒形部材を突合せ継手状に設置し、シングルモードファイバーレーザ溶接機及びシームトラッキングシステムを用いて、三次元曲線のシームトラッキング走行実験を行なう。トラッキング中は、ギャップが検出されているかどうかを確認する。

#### 5.1.3 実験手順

直径 $\phi 348\text{mm}$ の円筒形部材を突合せ継手状に固定しギャップ寸法を、無し・ $0.2\text{mm}$ ・ $0.5\text{mm}$ と変化させた時のトラッキング性能を確認する。シームトラッキングシステムの動作範囲は、作業台と水平位置から $180^\circ$ 反対側までとする。実験概要図を図5-1-1に示す。

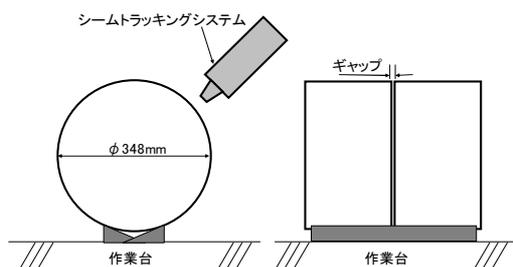


図 5-1-1 実験概要図

#### 5.1.4 実験結果

実験結果①：ギャップ無し

シームトラッキング途中でシームを見失ってしまい、システムがストップしてしまう結果が度々見られた。

実験結果②：ギャップ寸法  $0.2\text{mm}$

シームを検出しながら動作した。しかし、シームトラッキング中は中心線から約  $0.2\text{mm}$  程度左右に振れながら動作した。

実験結果③：ギャップ寸法  $0.5\text{mm}$

ギャップが大きい為、ギャップ間を大幅に振れながら動作した。

#### 5.1.5 三次元曲線シームトラッキング走行実験のまとめと考察

実験結果より、ギャップ寸法が適切に設けてあればシームトラッキングシステムを使用

する事で、ティーチング作業を減らすことが可能であることが明らかになった。これにより、事業化の際のタクトタイム短縮によるコスト削減に繋げることが可能となる。また、製品の要求品質に応じてギャップ寸法を選択する事で、様々な製品に対応できる可能性がある。

しかし、ギャップが無い条件においては、実験結果①より、現在導入しているシームトラッキングシステムでは対応が不可能である可能性が考えられる。シームを見失ってしまう原因と考えられる点は、

(1) シームを検出する為に必要な、溶接部の形状変化が無い事

(2) 仮止め溶接部分による、継手形状の不連続性

の2点が考えられる。

(1)の原因については、ギャップを設けることでシームトラッキングが走行可能であることから、溶接部にギャップや面取りのような措置が必要であると考えられる。

(2)の原因について検証する為に、仮止め溶接部にケガキ線を描き、走行テストを行った。走行テスト写真を図 5-1-3 に示す。



図 5-1-3 走行テスト写真

走行テストの結果、ケガキ線を入れることで溶接線を外れながらも動作停止することなく走行した。よって、仮止め溶接部がシームトラッキングシステムの走行上不都合が発生する事が確認できた。

## 第6章 ハイブリッド溶接による最適ギャップ裕度拡大条件の研究

### 6.1 ハイブリッド溶接による最適ギャップ裕度拡大条件の実験的研究

#### 6.1.1 研究の目的

シングルモードのファイバーレーザーの欠点である許容ギャップの狭さをアークとハイブリッド化することにより、許容ギャップ裕度を拡大することを目的とする。研究目標では3.0mm厚さのステンレス鋼板の突合せ溶接において、0.2mm以上の許容ギャップ裕度を実現することにある。

#### 6.1.2 研究の概要

フィラー径等とギャップ裕度の関係を実験的に決定しギャップ裕度を最大化する。また、レーザー・アーク間距離を変化したときの溶接現象並びに許容ギャップについて調査し、最適ギャップ裕度の拡大を図る。すなわち、ハイブリッド溶接により許容ギャップ裕度を0.2mmに拡大する方法を実験的に研究し良好な継手性能を安定的に実現させる。

#### 6.1.3 実験手順・内容

許容ギャップ裕度を0.2mmに拡大する方法を次の項目の実験を行い、良好な継手性能を安定的に実現させる方法を検討した。

#### 6.1.4 実験結果

##### (1) SMファイバーレーザー溶接におけるギャップ裕度に及ぼす開先形状の影響

SUS鋼のI形突合せ継手に対して、ハイブリッド溶接における開先ギャップ裕度を求めた。溶接ワイヤ径を0.8mmのワイヤを用いて、3.0mm及び6.0mm板厚のステンレス鋼に対して、I形突合せ継手を用いて、ハイブリッド溶接実験を行ない、良好なハイブリッド溶接が実施できる溶接条件をもとめた。

その結果、アーク先行式のハイブリッド溶接では3.0mmの鋼板の溶接では、0.93mmの開先ギャップでも、図6-1-1に示すように良好なハイブリッド溶接ができた。6.0mmの板厚ではほぼ0.75mmの開先ギャップまでハイブリッド溶接が可能であった。

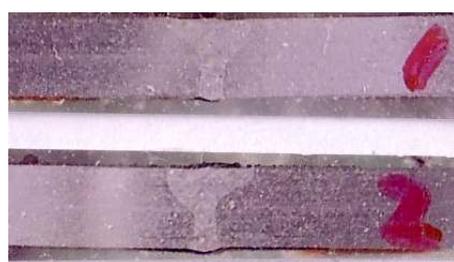


図 6-1-1 3.0mm 板厚のステンレス鋼のハイブリッド溶接継手

##### (2) フィラーワイヤ径とギャップ裕度の関係

アーク溶接現象がハイブリッド溶接に大きく影響するので、ここでは溶接ワイヤのワイヤ径およびそれに伴う溶接条件を変化させたときのハイブリッド溶接におけるギャップ裕度を調査した。

溶接ワイヤ径を0.8mmのワイヤ以外に1.0mm及び1.2mm径のものも用いて、V形開先形状の突合せ継手のハイブリッド溶接実験を行ない、3.0mm及び6.0mm板厚のステンレス鋼に対して、良好なハイブリッド溶接が実施できる許容開先ギャップをもとめた。

その結果、ワイヤ径が 1.0mm の場合、許容ギャップが 0.8mm までは良好なビード形状が得られた。これに対してワイヤ径 1.2mm の場合は、健全なビードを得ることが困難であった。

アーク溶接の溶接電流が低いとスパッターの発生が多く十分な溶込みが得られなかったが、条件によってはハイブリッド溶接を行うと良い結果を得ることもできた。図 6-1-2

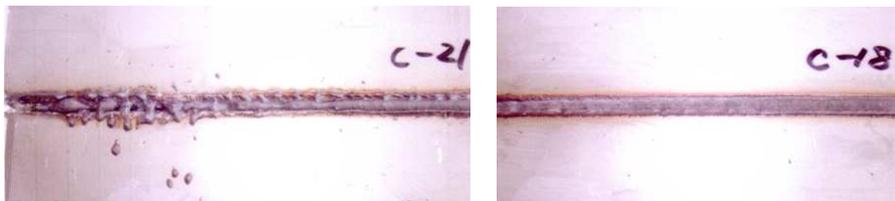


図 6-1-2 溶接条件によるビード形成の違い

### (3) レーザ・アーク間距離と許容ギャップ裕度の関係

図 6-1-19 に示すように溶接ワイヤのワイヤ上にレーザーのパイロットビームのスポットを照射し、同じ面上にあること、およびレーザー・アーク間距離を確認した。そしてこのレーザー・アーク間距離を-2.0mm~4.0mm の範囲で変化し、これにより許容ギャップ裕度は拡大するか否か調査した。

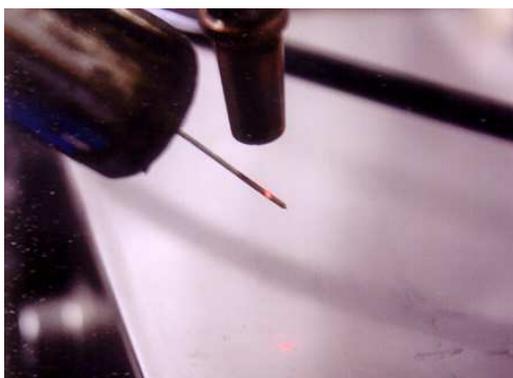
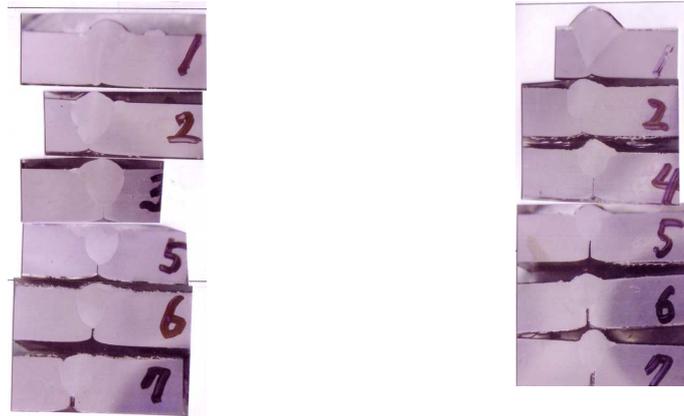


図 6-1-19 レーザ・アーク間距離の確認

図 6-1-20 にレーザー・アーク間距離が 0.0mm の試験片および-2.0mm の試験片の断面マクロをギャップの狭い方から番号で示す。

この場合、溶込み深さが十分あれば、いずれのビードも 1.0mm のギャップでも溶接が可能であったと思われる。どちらかといえば、レーザー・アーク間距離が 0.0mm の方が溶込みが大きく、よい結果であった。



(a) アーク間距離 0mm

(b) アーク間距離-2.0mm

図 6-1-20 レーザ・アーク間距離の違いによる変化

溶接ワイヤが溶融池に突込むような形でハイブリッド溶接が行われている。

溶滴移行形態に及ぼすレーザ・アーク間距離またはアーク電圧の影響をさらに把握し、安定な溶接ができる条件を設定する必要性を感じた。

#### 6.1.5 まとめと考察

以上の研究結果をまとめると次のとおりである。

レーザ溶接のみでは許容ギャップは 3.0mm の板厚では約 0.4mm くらいで、6.0mm の板厚の場合は、許容ギャップは約 0.3mm 以下であることを明らかにした。

また、レーザ・アークハイブリッド溶接では許容ギャップ裕度は 3.0mm の板厚では約 0.8mm で、6.0mm の板厚の場合は、約 0.75mm であることを明らかにした。

ハイブリッド溶接による許容ギャップ裕度の拡大において、溶接電流、レーザ・アーク間距離、溶接ワイヤ径も重要な因子であることを明らかにした。