

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「ホットプレス法によりCFRP製三次元大型形状品の
高精度、高効率成形を可能とする、低熱歪み金型の開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成23年 9月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人岐阜県産業経済振興センター

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	3
1-3	成果概要	6
1-4	当該研究開発の連絡窓口	6

第2章 本論

1.	高精度、高効率成形金型（低膨張合金）の適正溶接方法 （施工方法）への対応	7
1-1	研究目的	7
1-2	研究内容	7
1-3	研究成果	14
2.	溶接後の残留応力除去方法への対応	28
2-1	研究目的	28
2-1-1	溶接後の熱処理方法について	28
2-1-2	有効的な溶接残留応力除去方法について	28
2-1-3	金型の完成加工形状（3D-MODEL）との変形量 に対する、適切な測定方法について	28
2-2	研究内容	28
2-2-1	溶接後の熱処理による変化量の分析	28
2-2-2	低周波システム振動残留応力除去装置を使用した 場合の変化量	28
2-2-3	金型完成形状（3D-MODEL）との比較	29
2-3	研究成果	29
2-3-1	溶接後の熱処理による変化量の分析	29
2-3-2	低周波システム振動残留応力除去装置を使用 した場合の変化量	30
2-3-3	金型完成形状（3D-MODEL）との比較	32

3. 溶接技術及び残留応力の評価	34
3-1 研究目的	34
3-1-1 レーザ・ハイブリッド溶接技術の評価	34
3-1-2 残留応力除去方法の評価	34
3-1-3 溶接材の力学特性の評価	34
3-2 研究内容	34
3-2-1 レーザ・アークハイブリット溶接技術の評価	34
3-2-2 低周波システム振動残留応力除去装置の評価	35
3-2-3 レーザ・アーク溶接法の強度	35
3-3 研究成果	35
3-3-1 レーザ・アークハイブリット溶接技術	35
3-3-2 低周波システム振動残留応力除去装置	37
3-3-3 レーザ・アークハイブリット溶接強度	38
4. 事業化への取り組み	43

最終章 全体総括

1 溶接設備の改良	44
2 レーザ・アークハイブリット振動溶接法の確立	44
3 インバー材における溶接条件の課題	44

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

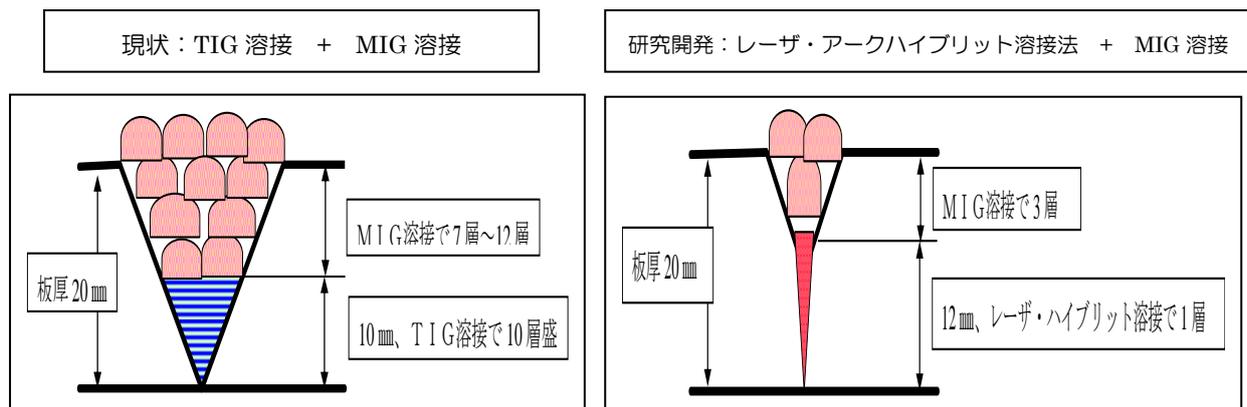
航空機仕様のCFRP成形金型(低熱膨張合金)に関しては、品質確保、コスト削減、リードタイム短縮が求められており、溶接割れ、気泡を極力低減する溶接加工方法の確立と、熱変形による成形面の溶接残留応力除去技術の確立が急務となっている。

現状の金型は、SS材やインバー材により製作しているが、金型部材の溶接に関しては、TIG溶接で10層、MIG溶接で7層～12層の溶接を行うために、母材への熱変形による歪み等が想定されることから、品質要求板厚は10mmにかかわらず、実際は20～30mm板厚材料で溶接を行い、その後マシニングセンターで仕上げ加工を行っているのが現状である。その結果、高コストの起因となるとともに、溶接割れや気泡等の不具合も生じており、川下製造業者のニーズに対応出来ない状況である。

航空機分野では、航空機の一次構造体に軽量で高強度なCFRPを採用している。そのため、型成形によるCFRP部材の高精度、複雑形状化に対応するため、高精度、高効率成形金型(低膨張合金)の適正溶接方法、板厚の変形や残留応力による変形の回避、高精度な成形面の三次元曲面の高精度仕上げ技術を開発し、CFRPの用途拡大を目指す。

そこで、本研究開発では、溶接欠陥のない、低入熱、低歪の溶接法の確立が必要になった。低入熱で十分な溶込み深さのあるレーザー溶接法を採択し、大型の厚板部材への適用を考慮して、許容ギャップに裕度の大きい、レーザー・アークハイブリッド溶接法を実施工に適用する方法を確立する。

レーザー装置としては5kWのファイバーレーザー発振器を、アーク溶接としてはMIG溶接を選定し、ロボットを導入して、金型組立て用レーザー・アークハイブリッド溶接システムを開発した。また、残留応力の除去のため、超音波応力除去装置を溶接時に併用する方法も開発した。



技術目標及び主要な技術目標値は以下の通りである。

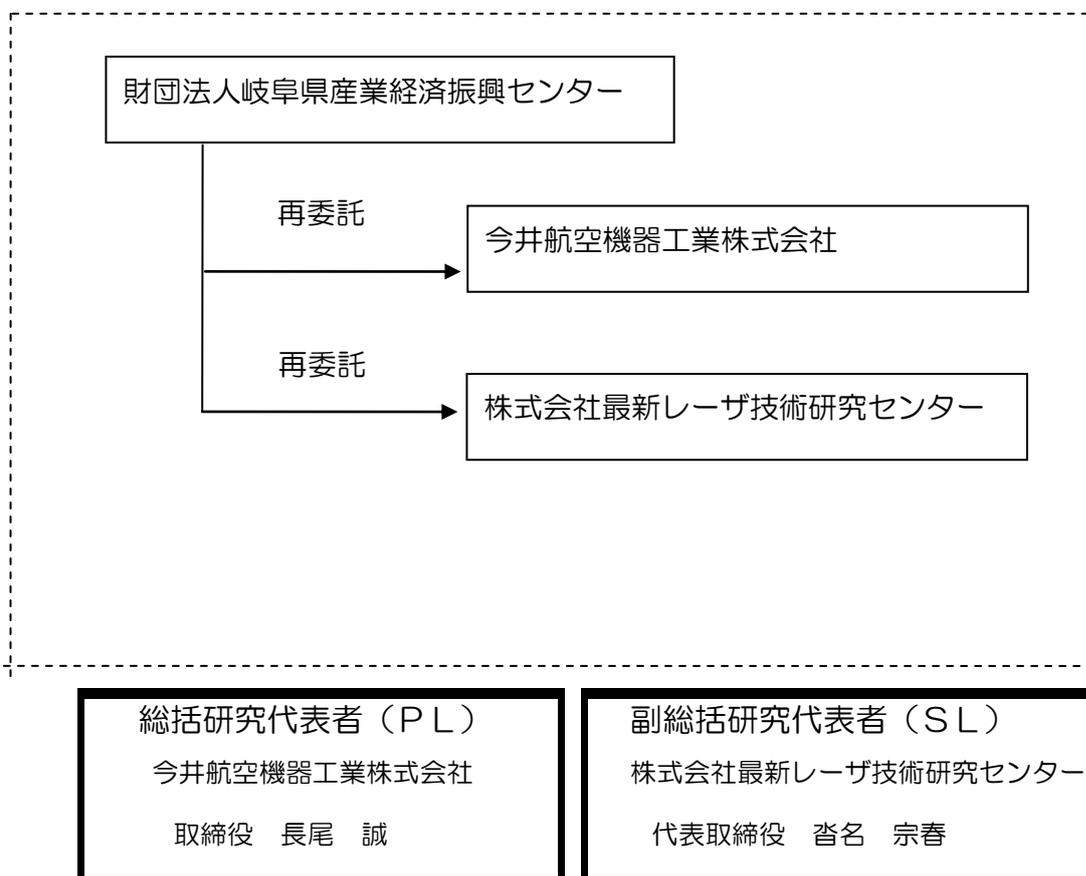
総加工時間 200時間 → 175時間以下、高精度加工面の輪郭度公差の精度達成時間を現状基本の50%以下を目標とする。

区分	現状	目標値	備考
第1層溶接時の割れ、気泡の発生	1	10%以下	最新レーザ技術研究センター及び外部機関で実施
残留応力による変形量	20~30mm	10mm以下	成形金型：高：200mm × 幅：800mm × 長：1000mm
総加工時間	200時間	175時間以下	リードタイム
高精度加工面の輪郭度公差の精度達成時間	現状基本	現状基本の50%以下	レーザトラッカー

1-2 研究体制

1) 研究組織（全体）

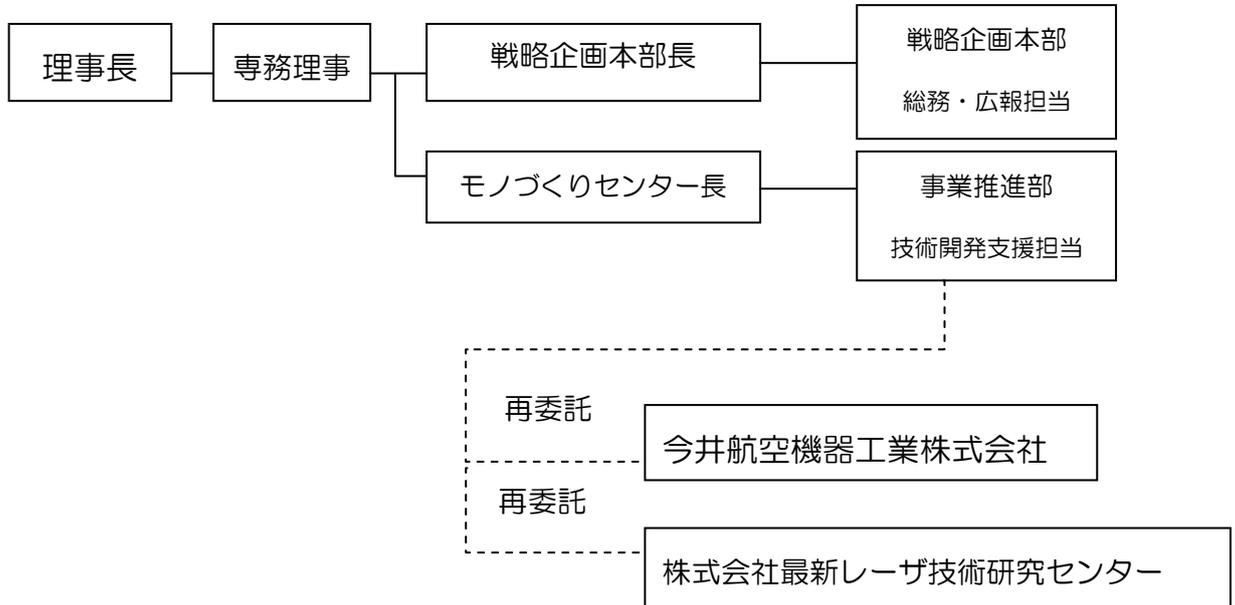
（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）



2) 管理体制

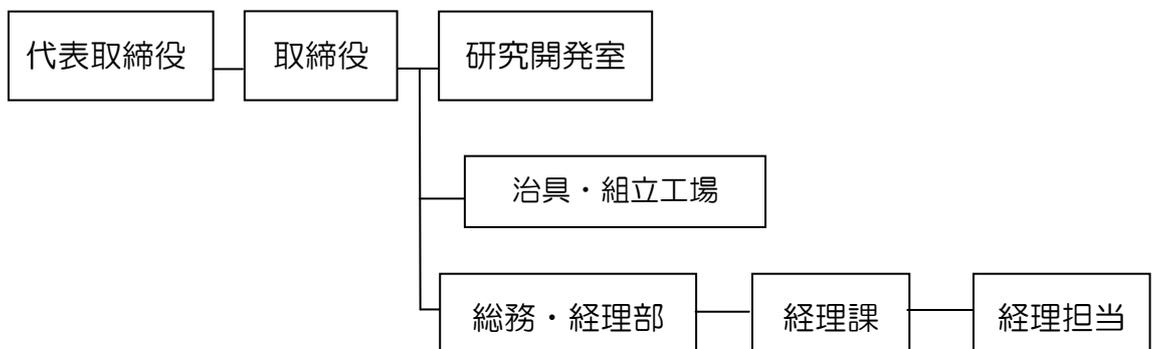
① 事業管理者

財団法人岐阜県産業経済振興センター

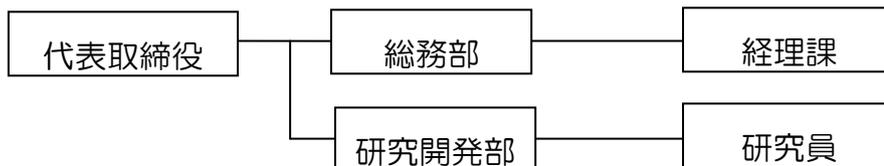


② 再委託先

今井航空機器工業株式会社



株式会社最新レーザー技術研究センター



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】 財団法人岐阜県産業経済振興センター

管理員

氏名	所属・役職
石樽 芳直	モノづくりセンター長
宮田 亘	事業推進部 部長
小川 誠	事業推進部 主査
篠田 隆博	事業推進部 主事
瀬瀬 まゆみ	戦略企画本部 主任

【再委託先】

研究員

今井航空機器工業株式会社

氏名	所属・役職
長尾 誠	取締役
林 淳	研究開発室 研究員
伊藤 正美	治具・組立工場 工場長
杉江 春次	研究開発室 研究員

株式会社最新レーザー技術研究センター

氏名	所属・役職
沓名 宗春	代表取締役

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人岐阜県産業経済振興センター

(経理担当者) 戦略企画本部 総務・広報担当 主任 瀬瀬まゆみ

(業務管理者) モノづくりセンター事業推進部 主事 篠田 隆博

(再委託先)

今井航空機器工業株式会社

(経理担当者) 総務・経理部経理課長 横山 猛

(業務管理者) 研究開発室 林 淳

株式会社最新レーザー技術研究センター

(経理担当者) 総務部 経理課長 沓名 祥子

(業務管理者) 代表取締役 沓名 宗春

(4) その他

なし

1-3 成果概要

航空機分野では、航空機の一次構造体に軽量で高強度なCFRPを採用している。そのため、型成形によるCFRP部材の高精度、複雑形状化に対応するため、高精度、高効率成形金型(低膨張合金)の適正溶接方法、板厚の変形や残留応力による変形の回避、高精度な成形面の三次元曲面の高精度仕上げ技術を開発し、CFRPの用途拡大が見込める。

なお本研究開発の実現により金型製作においての使用材料の薄板化、それに伴う曲げ形状の高精度化、製作時間の短縮化により、より低コストとなる。

本研究開発では、鋼材においては、低熱歪溶接技術により従来の約22%の製作時間を達成したが、低熱膨張合金であるインバー材においては、課題が残った。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

財団法人岐阜県産業経済振興センター

(最寄り駅：東海旅客鉄道 東海道本線 西岐阜駅)

〒500-8505 岐阜県岐阜市藪田南五丁目14番53号

担当 モノづくりセンター 事業推進部 篠田 隆博

TEL 058-277-1093 FAX 058-273-5961

E-mail gifu-sapoin@gpc-gifu.or.jp

第2章 本論

1. 高精度、高効率成形金型（低膨張合金）の適正溶接方法（施工方法）への対応

1-1. 研究目的

溶接部の割れ、気泡の発生は、溶接部の過加熱が原因と考えられ、低熱溶接方法の確立が必要になった。しかし、低熱溶接では、溶け込み不足等の欠陥が発生するため、最新の溶接法であるレーザー・アークハイブリッド溶接法により上記欠陥の防止技術を確立する。

ファイバーレーザー発振器と MIG 溶接ロボットを導入して、局部的加熱のための、同軸・小型の継ぎ手を開発し、成分を指定した溶接棒、混合比を指定したガスの組み合わせ最適化を実証しながら各種形状の溶接実験を実施して適正条件の確立を図る。

低熱溶接の実証実験に関しては、代表的な溶接形状である2種類の形状（L型、突合せ）で行い、L型形状では板厚9mm、突合せ形状では板厚 9mm、19mm及び2種類の成分の違う溶接棒、2種類の混合比の違うガスを使用して従来溶接法と比較するための実験を実施する。

総加工時間200時間→175時間以下、高精度加工面の輪郭度公差の精度達成時間を現状基本の50%以下を目標とする。

区分	現状	目標値	備考
第1層溶接時の割れ、気泡の発生	1	10%以下	
残留応力による変形量	20~30mm	10mm以下	成形金型：高：20mm×幅：800mm×長：1000mm
総加工時間	200時間	175時間以下	リードタイム
高精度加工面の輪郭度公差の精度達成時間	現状基本	現状基本の50%以下	

1-2. 研究内容

(1) レーザー・アークハイブリッド溶接システムの構築

① 株式会社最新レーザー技術研究センターでは3kW高出力シングルモードファイバーレーザー発信器により高アスペクト比の溶け込みを確認できた。

そのことを踏まえて、本研究開発における低熱溶接は、高出力のファイバーレーザー発振器の熱エネルギーを瞬間的に溶接部に照射し、なおかつ従来のアーク溶接（M

I G、MAG) と併用することにより従来法溶接と比較して加熱時間の短縮により低歪溶接を実現するものである。

① MIG/MAG溶接ロボットの導入

アーク溶接ロボットAⅡ V20-DP350

マニピュレータ

制御装置

ティーチペンダント

操作ボックス

溶接機 DP350

アーク溶接ロボットの仕様

ロボット部

最大許容可搬質量 : 20kg

位置繰返し精度 : ±0.07mm

溶接機部

定格出力電流 : 350A

定格負荷電圧 : 36V

出力電流範囲 : 30~350A

出力電圧範囲 : 12~36V

最高無負荷電圧 : 81/89

使用ワイヤ : 1.2mmφ

導入されたアーク溶接ロボット装置を 図 1-2 (1) ①に示す。



マニピュレーター



操作ボックス、ティーチペンダント



溶接機

図 1-2 (1) ①

② 5 kWファイバーレーザー装置の導入

ファイバーレーザー発振器

レーザー発振器本体 YLS-5000-CT

ファイバーカプラー

QBHプロセスファイバー

冷却装置（チラー）

コントロールソフトウェア

電源トランス

光学ヘッド LXD50S

QBHコネクタマウント

ファイバーレーザー発振器の仕様

定格出力 : 5 kW

出力範囲 : 10~105%

発振波長 : 1070~1080nm

発振モード : CW、QCW

発振振幅幅 : 3~6nm

発振周波数 : 5.0 kHz

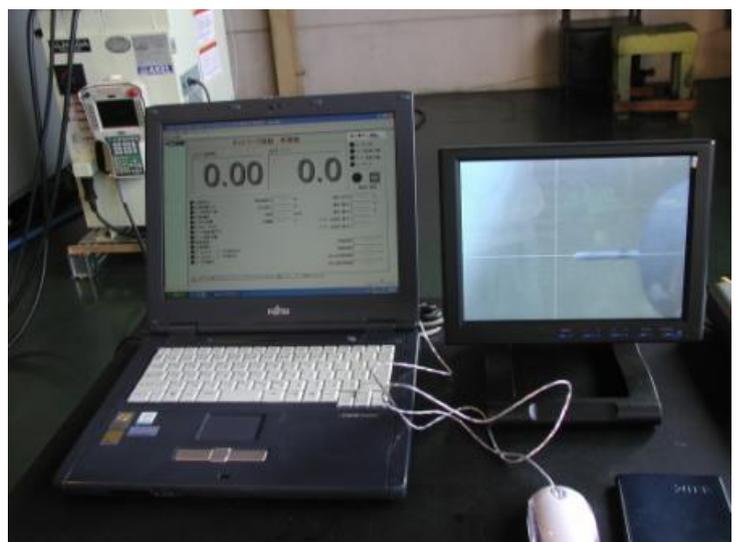
ビーム品質 : 8.0 mm*mrad (ファイバーカプラー出口)

導入されたファイバーレーザー装置を 図 1-2 (1) ② a および b に示す。



図 1-2 (1) ②a

レーザー発振器本体



コントロールソフトウェア

図 1-2 (1) ②b



冷却装置 (チラー)

電源トランス

③ レーザ加工光学系の開発、ハイブリッド溶接装置の構築

厚板の溶接を可能とするために、高出力のファイバーレーザーエネルギーをアーク溶接のアークポイントと同じにすることで、最も効率が良いと考えられ、そのためポイントが同軸となる取付金具を設計・開発した。

同時に、発生するスパッタや、高温のプラズマガスによる光学ヘッドへの影響を軽減するために、高圧エアによるクロスジェットを装着した。

設計・開発した取付金具およびクロスジェット装置を図 1-2 (1) ③a および b に示す。

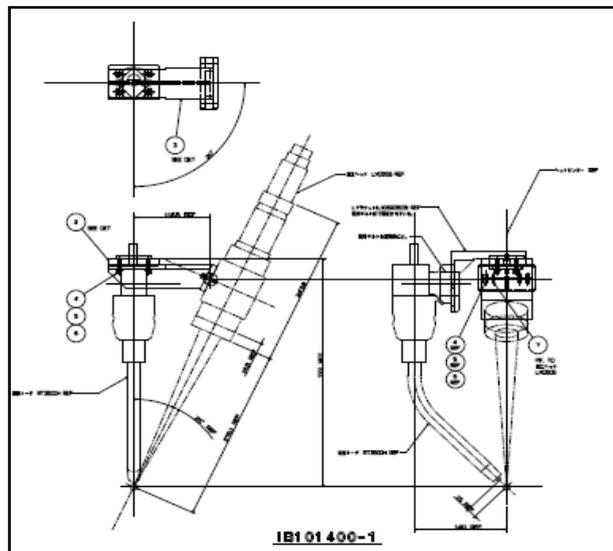


図 1-2 (1) ③a 取付金具 図面

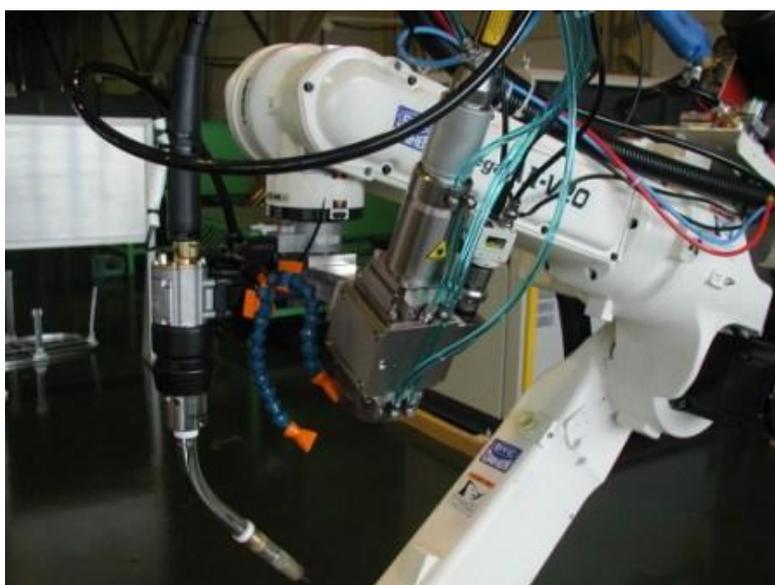


図 1-2 (1) ③b 取付金具およびクロスジェット



図 1-2 (1) ③c 導入された設備

(2) レーザ・アークハイブリッド溶接システムによる適正溶接条件の検討

① アーク溶接、レーザ溶接、およびハイブリッド溶接の比較

まず、板厚6mm、9mm、12mm、16mmの板厚の軟鋼材を表1-1に示す条件でアーク溶接、レーザ溶接、および、ハイブリッド溶接をそれぞれ行った。

表1-1 アーク溶接、レーザ溶接およびハイブリッド溶接の溶接条件

アーク溶接、レーザ溶接、ハイブリット溶接の比較				
T板厚	アーク	レーザ	ハイブリット	送り
6mm	200A	3Kw	○	0.6m/min
9mm	250A	4Kw	○	0.6m/min
12mm	300A	5Kw	○	0.6m/min
16mm	340A	5Kw	○	0.5m/min

条件表により、構築した溶接システムにて、それぞれのアーク溶接、レーザ溶接、レーザ・アークハイブリット溶接実験を行った。

① レーザ・アークハイブリッド溶接の適正溶接条件の検討

12mm、16mmの板厚の軟鋼材を表1-2に示す条件でハイブリッド溶接を行い、レーザ・アークハイブリッド溶接の適正溶接条件を検討した。

表1-2 レーザ・アークハイブリッド溶接の実験条件
レーザ・アークハイブリット溶接の条件

	T板厚	速度 m/min	アーク溶接	レーザ溶接出力			
			Aシールド15?/分 ワイヤー突出し長さ 20mm	3Kw	4Kw	5Kw	
I 突合せ	6mm	0.8	260A×26V~28V	HI-005	HI-006	-	4Kwで貫通したため5Kwは省略
		1.2	260A×26V~28V	HI-007	HI-008	HI-009	
		2.0	260A×26V~28V	HI-010	HI-011	HI-012	
Y 突合せ	9mm	0.8	300A×30V	HI-013	HI-014	-	4Kwで貫通したため5Kwは省略
		1.5	300A×30V	HI-015	HI-016	-	4Kwで貫通したため5Kwは省略
	12mm	0.6	320A×32V	HI-017	HI-018	-	4Kwで貫通したため5Kwは省略
		1.0	320A×32V	HI-019	HI-020	HI-021	
	16mm	0.6	340A×34V	HI-022	HI-023	HI-024	
		1.0	340A×34V	-	HI-025	HI-026	送り0.6m/minで貫通しないため3Kwは省略

6mm厚の鋼材はI形突合せ継手として、9mm、12mmおよび16mmのものはY形開先継手として行った。

③シールドガスの種類による溶け込み状態の検討

今回のレーザ・アークハイブリット溶接に適したシールドガスを調査するために4種類のガスを用意した。

CO₂

アルゴン

アルゴン+水素の混合ガス

CO₂+アルゴンの混合ガス

④低周波システム振動残留応力除去装置と併用した溶接

今回の研究では、振動を与えながらのレーザ照射は、照射位置が振動により不安定になると予想していたが、実際、共鳴点での振幅は、非常に小さく、レーザ照射位置がずれるようなことが発生しないことがわかった。よって、低周波振動を与えながら行う溶接法の比較実験を行うと共にギャップ溶接実験を追加した。

⑤T型継手溶接の溶接法による歪の比較

T型継手におけるレーザ・アークハイブリット溶接法による有効性評価を行う、なお今回は、低周波振動残留応力除去装置と併用することも実施する。

⑥インバー材の溶接

精密ホットプレス金型には低熱膨張合金であるインバー材の使用が最適である。そのため今まで得られた溶接低歪の成果を基にインバー材の溶接を行った。

1-3. 研究成果

従来溶接法における突合せ溶接時の歪データを下記に示す。

従来溶接法の状態

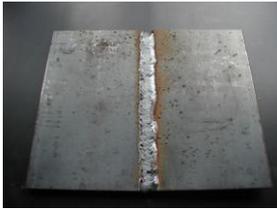
試験体番号	表面	側面	T板厚	歪量(mm)		
				A	B	C
TM-001			9mm	6.63	6.82	5.66
TM-002			16mm	19.39	19.70	19.78
TM-003			20mm	19.24	19.73	20.01

図1-3 従来溶接法での歪量

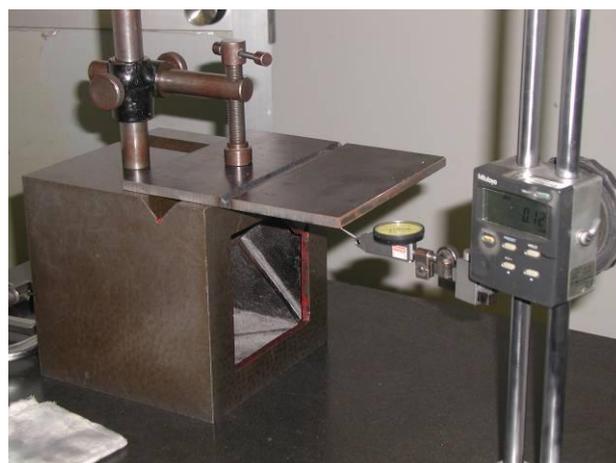
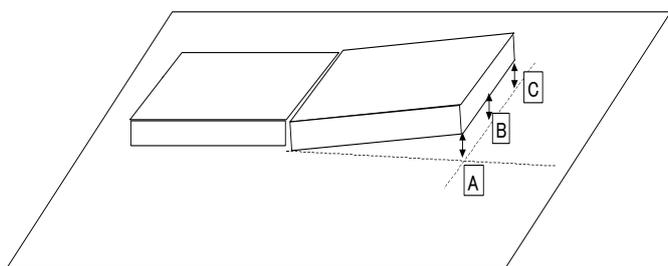


図1-3 (1) 歪量測定箇所

② レーザ・アークハイブリッド溶接の適正溶接条件の検討

レーザ・アークハイブリッド溶接の条件を変えて各種の組合せで試験した結果を下記に示す。

表 1-3 ②a ハイブリッドの条件 HI-005~HI-0013

ハイブリッドの条件

試験体番号	表側	裏側	T板厚	速度 m/min	アーク電流	レーザ出力	シールドガス	ワイヤー突出量	歪量(mm)		
									A	B	C
HI-005			6mm	0.8	260A × 26V	3Kw	Arシールド15L	20mm	0.38	0.22	0.19
HI-006			6mm	0.8	260A × 26V	4Kw	Arシールド15L	20mm	0.19	0.05	0.10
HI-007			6mm	1.2	260A × 26V	3Kw	Arシールド15L	20mm	1.59	1.50	1.41
HI-008			6mm	1.2	260A × 26V	4Kw	Arシールド15L	20mm	0.43	0.36	0.36
HI-009			6mm	1.2	260A × 26V	5Kw	Arシールド15L	20mm	0.60	0.56	0.50
HI-010			6mm	2.0	260A × 26V	3Kw	Arシールド15L	20mm	1.43	1.42	1.61
HI-011			6mm	2.0	260A × 26V	4Kw	Arシールド15L	20mm	1.06	1.44	0.99
HI-012			6mm	2.0	260A × 26V	5Kw	Arシールド15L	20mm	0.24	0.60	0.33
HI-013			9mm	0.8	300A × 30V	3Kw	Arシールド15L	20mm	0.09	0.24	0.34

表1-3 ②b ハイブリットの条件 HI-014~HI-0022

試験体番号	表側	裏側	T板厚	速度 m/min	アーク電流	レーザー出力	シールドガス	ワイヤー突出し量	歪量(%)		
									A	B	C
HI-014			9mm	0.8	300A × 30V	4Kw	ArシールドF15L	20mm	-0.26	-0.26	-0.13
HI-015			9mm	1.5	300A × 30V	3Kw	ArシールドF15L	20mm	0.83	0.93	1.07
HI-016			9mm	1.5	300A × 30V	4Kw	ArシールドF15L	20mm	0.03	0.03	0.15
HI-017			12mm	0.6	300A × 30V	3Kw	ArシールドF15L	20mm	1.15	1.15	1.14
HI-018			12mm	0.6	300A × 30V	4Kw	ArシールドF15L	20mm	0.11	0.13	0.10
HI-019			12mm	1.0	320A × 32V	3Kw	ArシールドF15L	20mm	1.27	1.62	1.63
HI-020			12mm	1.0	320A × 32V	4Kw	ArシールドF15L	20mm	0.88	0.88	0.92
HI-021			12mm	1.0	320A × 32V	5Kw	ArシールドF15L	20mm	0.83	0.95	0.95
HI-022			16mm	0.6	340A × 34V	3Kw	ArシールドF15L	20mm	2.07	2.18	2.21

表 1-3 ②c ハイブリットの条件 HI-023~HI-026

ハイブリットの条件

試験体番号	表側	裏側	T板厚	速度 m/min	アーク電流	レーザー出力	シールドガス	ワイヤー突出し量	歪量(mm)		
									A	B	C
HI-023			16mm	0.6	340A × 34V	4Kw	ArシールドF15L	20mm	1.93	2.07	2.17
HI-024			16mm	0.6	340A × 34V	5Kw	ArシールドF15L	20mm	0.62	0.58	0.56
HI-025			16mm	1.0	340A × 34V	4Kw	ArシールドF15L	20mm	2.64	2.59	2.50
HI-026			16mm	1.0	340A × 34V	5Kw	ArシールドF15L	20mm	2.29	2.27	2.20

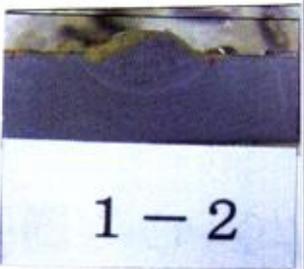
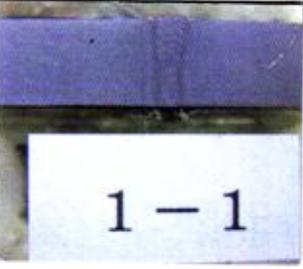
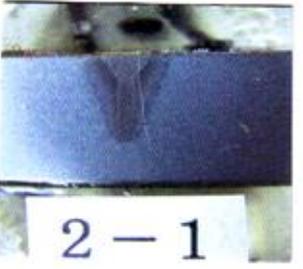
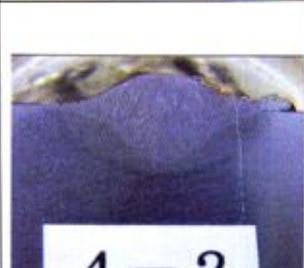
これらの中で歪量が最も少ない物は、HI-016であった。この溶接状態を観察すると溶接ビードは、裏側に完全に抜けており、9mmの板厚においてこの条件が、最適であることがわかる。

今回の目標としている16mmの板厚では HI-024 であるが、溶接ビードは、裏側まで貫通しているが、表面側ではブローホールが見られ抜け落ちた状態である。16mmの溶接を行うには、送り速度を落とす必要があるが、HI-025 では溶接ビードが貫通していないため、その中間である0.8m/minが最適であると判断する。

今回の実験で指定電流を340Aに設定しても、出力されているのは、295A~300Aまでであった。これは、使用している溶接棒の径がφ1.2mmであるために流れる電流量があがらないことが判明した。

各種溶接法の比較を行うために実施した比較試験の結果（板厚：6mmの場合）をビード断面マクロ写真として表1-3に示す。

表1-3 各種溶接法で溶接した溶接部の断面マクロ写真

板厚 出力	アーク溶接	レーザー溶接	ハイブリッド溶接
6 mm 200 A 3 kW	 1-2	 1-1	 1-3
9 mm 250 A 4 kW	 2-2	 2-1	 2-3
12 mm 300 A 5 kW	 3-2	 3-1	 3-3
16 mm 340 A 5 kW	 4-2	 4-1	 4-3

12mmおよび16mmの板厚のレーザー溶接では、溶接ビードはアーク溶接に比べて、狭く、溶込み深さが板厚に対して不十分である。これは保護ガラスの汚れによりレーザー出力が十分試験片に入っていないためと思われる。保護ガラスを取り換える必要がある、6mm厚のものは

貫通溶接となっている。

ハイブリッド溶接のビードはいずれもアーク溶接のそれより大きいですが、理想的にはアーク溶接ビードの断面積がレーザー溶接ビードの断面積より小さくなるべきである。溶接ひずみを低減するためにも重要である。

①・ レーザ・アークハイブリッド溶接の適正溶接条件の検討

次に、ハイブリッド溶接の適正溶接条件の検討するために、板厚6mm、9mm、12mmおよび16mmの軟鋼のハイブリッド溶接を行い、その断面マクロ写真を表1-4～1-6に示す。なお、9mm、12mmおよび16mm厚の継手はY形開先としてハイブリッド溶接を行った。6mm板厚のものは2m/minの溶接速度でも良好なビードが得られている。ビード幅も狭く、変形も少ない。

表1-4 板厚6mmの軟鋼のハイブリッド溶接の断面マクロ写真

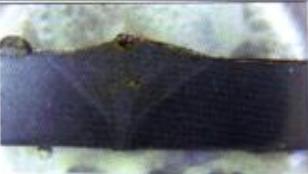
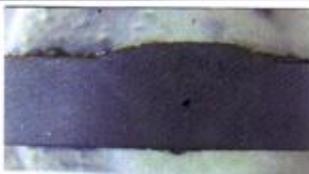
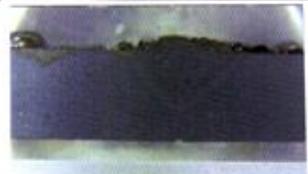
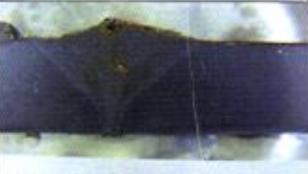
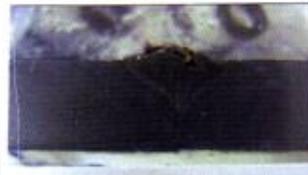
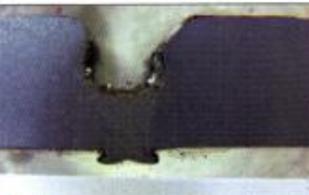
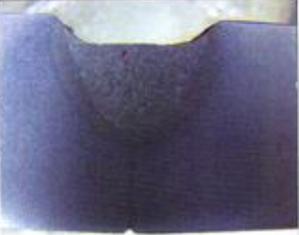
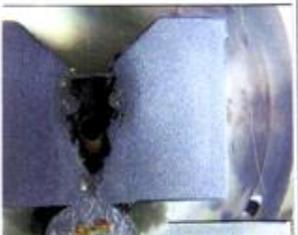
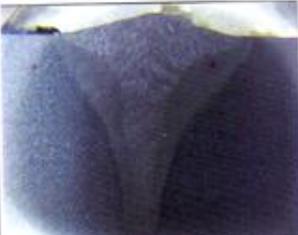
レーザー出力 溶接速度	3 kW	4 kW	5 kW
0.8 m/min	 HI-005	 HI-006	
1.2 m/min	 HI-007	 HI-008	 HI-009
2.0 m/min	 HI-010	 HI-011	 HI-012

表1-5 板厚9mmおよび12mmの軟鋼のハイブリッド溶接の断面マクロ写真

レーザー出力 溶接速度	3 kW	4 kW	5 kW
t = 9 mm 0.8 m/min			
	HI-013	HI-014	
t = 9 mm 1.5 m/min			
	HI-015	HI-016	
t = 12 mm 0.6 m/min			
	HI-017	HI-018	
t = 12 mm 1.0 m/min			
	HI-019	HI-020	HI-021

板厚が9mmおよび12mmの場合、Y形開先の開先深さおよび開先角度が大き過ぎたために、ビードがアンダーフィルとなり、健全な継手になっていない。Y形開先の開先深さおよび開先角度をより小さくすべきである。開先形状に関しては、さらに系統的な研究が必要である。

表1-6 板厚16mmの軟鋼のハイブリッド溶接の断面マクロ写真

レーザ出力 溶接速度	3 kW	4 kW	5 kW
0.6 m/min	 HI-022	 HI-023	 024
1.0 m/min		 HI-025	 HI-026
0.5 m/min Gap=0.2 mm			 HI-027

板厚が16mmの場合は表1-6に示すように1.0m/min および0.6m/minの速度では アンダーフィルとなっているが、溶接速度が0.5m/minでは試験片027に示すように、ギャップが0.2mmでも良好な溶接ビード形状が得られた。

③ 最適シールドガスの検討

4種類のシールドガスを用い、9mm板厚の鋼板に同条件でレーザー・アークハイブリット溶接を行った結果を下記に示す。

表1-3 ③a シールドガスによる変化

溶接ガスの比較

ss400 T=9mm

No.	ガス種類	試験番号			電流	送り	レーザー出力	状態
1	CO2	HI-030C			300A	1.0m	5Kw	スパッタが多いが安定している
2	アルゴン	HI-031Ar			300A	1.0m	5Kw	スパッタは少ないが溶け込みが不安定
3	アルゴン+水素	HI-032AH			300A	1.0m	5Kw	スパッタは少ない 溶け込みは深いが不安定
4	CO2+アルゴン	HI-033CA			300A	1.0m	5Kw	安定した溶け込みが得られるがスパッタがやや多い

シールドガスがCO₂ のみの場合安定した溶け込みが得られ、またビード面もきれいであるが、スパッタの発生が多い。

またアルゴンガスは、スパッタの発生は少ないが、溶け込みが不安定であった。

アルゴンと水素の混合ガスでは、スパッタの発生も少なく深溶け込みが得られるが、溶け込み深さのコントロールが難しく、一部に溶け落ちた部分があった。

CO₂ とアルゴンの混合ガスは、スパッタはやや多いものも、CO₂ のみよりは、少なく安定した溶け込みが得られた。またビード面もきれいである。

よって今回導入されたレーザー・アークハイブリット溶接設備に最適なシールドガスは、CO₂+アルゴンであることがわかる。

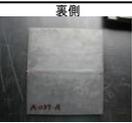
④低周波システム振動残留応力除去装置と併用した溶接

導入された低周波システム振動残留応力除去装置とレーザー・アークハイブリット溶接法の併用使用が可能であったことから条件を変えて実施した。また、ギャップ溶接についても確認を行った。

使用ガスは、スパッタ発生が少ないアルゴンガスを使用した。

表 1 - 3 ④a

低周波システム振動残留応力除去装置と併用した溶接

No.	パイプ/開先	T板厚	試験番号	表側	裏側	電流	送り	レーザー出力	シールドガス (アルゴン)	ワイヤー 突出し量	歪量(mm)			
											A	B	C	
1	× Y開先	9mm	A-037A			300A	0.5m	-	20L	15mm	0.81	0.88	0.52	
2	○ Y開先	9mm	A-038A-V			300A	0.5m	-	20L	15mm	0.36	0.41	0.63	
3	○ Y開先	9mm	HI-039A-V			300A	1.0m	5Kw	20L	15mm	0.28	0.24	0.17	
4	○ I開先	9mm	HI-040A-V-I			300A	1.0m	5Kw	20L	15mm	-0.02	0.09	0.18	
5	○ I開先	16mm	HI-041A-V-I			340A	0.5m	5Kw	20L	15mm	2.79	2.94	3.21	隙間0.5mm
6	○ I開先	16mm	HI-042A-V-I			340A	0.5m	5Kw	20L	15mm	1.86	2.18	2.52	隙間1mm
7	○ I開先	16mm	HI-043A-V-I			340A	1.0m	5Kw	20L	15mm	1.91	1.93	2.02	隙間無
8	○ I開先	19mm	HI-044A-V-I			340A	0.5m	5Kw	20L	15mm	1.87	1.97	2.07	隙間1mm

観察結果から、A-037A と A-038-V は同条件のアーク溶接で振動の有無を比較した物であるが、発生した歪量が振動を与えながら溶接した方が少ないことがわかる。

また HI-039A-V はハイブリット溶接であるが、さらに歪量が少ない結果となっている。

ここで、前項で行ったアルゴンガスでの試験片 (HI-031Ar) と比較したとき、溶け込みが深いことがわかる。そこで同条件の開先で (HI-040A-V-I) と比較する。



図 1-3 ④b ハイブリット振動溶接（表側）



図 1-3 ④c ハイブリット振動溶接（裏側）

レーザ・アークハイブリット溶接の場合明らかに溶け込みが深いことが観認された。原因については振動に溶融池内の温度が均一なるなど考えられるが、今後の確認が必要である。

次にギャップ量を変えてレーザ・アークハイブリット振動溶接では、(HI-042A-V-I) が隙間 1 mm のものが裏側までビードが出ている。また、歪量も少ない結果となった。

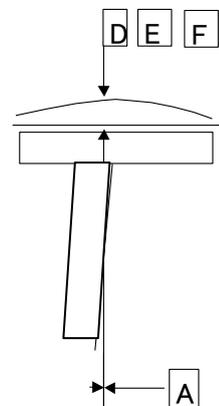
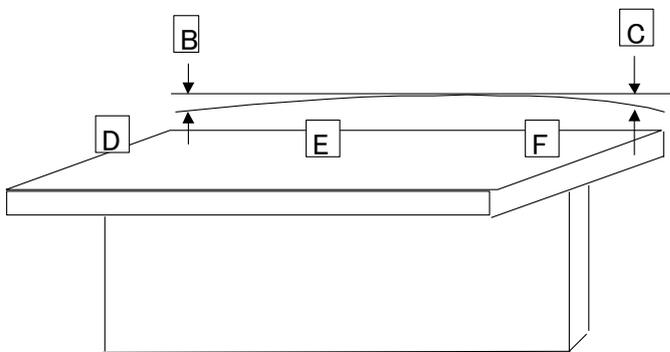
⑤ T型継手溶接

T 型継手についても歪量を比較した結果 (T-HI-036-A-V) のレーザ・アークハイブリット振動溶接の物が最も少ない結果となった。

表 1 - 3 ⑤ T型継手溶接の歪量

No.	パイプ/開先	T板厚	試験番号	表側	側面	電流	送り	レーザ出力
1	× I 開先	9mm	T-M-035-A			250A	0.5m	-
2	× I 開先	9mm	T-HI-034-A			300A	1.0m	5Kw
3	○ I 開先	9mm	T-HI-036-A-V			300A	1.0m	5Kw

No.	パイプ/開先	T板厚	試験番号	歪量 (mm)					
				A	B	C	D	E	F
1	× I 開先	9mm	T-M-035-A	1.94	0.47	0.20	0.24	0.28	0.15
2	× I 開先	9mm	T-HI-034-A	1.75	0.17	1.31	0.41	0.28	0.25
3	○ I 開先	9mm	T-HI-036-A-V	0.34	0.17	0.32	0.47	0.35	0.23

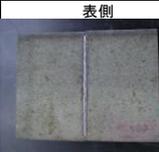
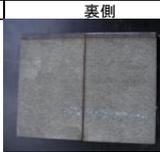
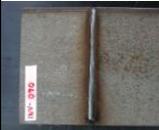


⑥インバー材の溶接について

レーザ・アークハイブリット溶接の条件を変えて各種の組合せで試験した結果を下記に示す。またレーザ先行かアーク先行での比較も行った。

インバー溶接

表 1 - 3 ⑥a

No.	パイプ角	T板厚	試験番号	表側	裏側	電流	送り	レーザ出力	溶接順
1	× I 開先	9mm	INV-060			-	0.4	5Kw	-
2	○ I 開先	9mm	INV-061			-	0.4	5Kw	-
3	○ I 開先	9mm	INV-062			250A	0.5	-	-
4	○ I 開先	9mm	INV-063			250A	1.0	5Kw	L⇒A
5	○ I 開先	9mm	INV-064			250A	1.0	4Kw	L⇒A
6	○ I 開先	9mm	INV-065			250A	0.8	4Kw	A⇒L
7	○ I 開先	9mm	INV-066			300A	0.8	4.5Kw	A⇒L
8	○ I 開先	9mm	INV-067			300A	0.8	4.5Kw	A⇒L
9	○ I 開先	9mm	INV-068			250A	1.0	4Kw	L⇒A
10	○ I 開先	9mm	INV-069			250A	1.0	4Kw	A⇒L
11	○ I 開先	9mm	INV-070			250A	1.0	5Kw	A⇒L

INV-063 は全面裏側まで溶接ビードが貫通した結果が得られた。しかし表面でのビード状態は、アンダーカットになっている。また、INV-068 は途中から急に溶け込みが、深くなる結果がでているこれは、インバー材の熱伝導率が鋼材に比べて低いために溶接母材に熱が溜まり溶融した物と推測される。

表 1 - 3 ⑥b 溶接材の熱伝導率と融点

	熱伝導率(W/mK)	融点
インバー材	13. 4	1425°C
鋼材	84. 0	1539°C

この対処方法としては、レーザ出力の高い物で熱が溜まる前に溶融を行うか、又は、溶接中に溜まった熱に対応した送り速度の調整などの検討が必要である。

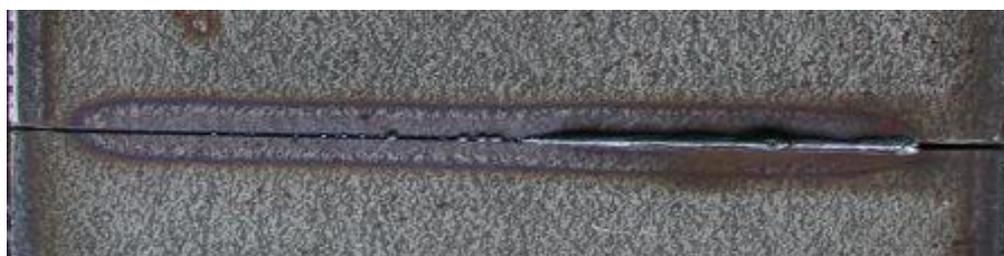


図 1 - 3 ⑥c インバー材の溶け込み状態（裏側）

2. 溶接後の残留応力除去方法への対応

2-1. 研究目的

2-1-1 溶接後の熱処理方法について

溶接後熱処理方法としては、焼鈍による応力除去の変化をレーザトラッカーで数値データとして収集し昇温効果解析ソフトの数値データとの分析を行い最適な熱処理方法を抽出する。

2-1-2 有効的な溶接残留応力除去方法について

低周波振動を利用した残留応力除去に対する有効性について、データ収集及び応力除去後の変化をレーザトラッカーで数値データとして収集、分析を行い最適な溶接残留応力除去方法を確立する。

2-1-3 金型の完成加工形状（3D-MODEL）との変形量に対する、適切な測定方法について

レーザトラッカーを用いて、溶接後の金型歪み変形量を測定し、図面形状データ（3D-MODEL）との比較を行い、この変形量を最小限にとどめるためのデータ収集、分析を行う。

2-2. 研究内容

実施方法としてダミー金型を2台製作し、1台を従来法によりまた一方をレーザ・アークハイブリット溶接法及び、低周波振動残留応力除去装置を使用したものと比較する。

2-2-1 溶接後の熱処理による変化量の分析

従来法で製作された、ダミー金型に対して、溶接後の形状測定データと熱処理後の測定データを比較することで、熱処理による変形量を可視化することで熱処理による応力除去後の影響を検討した。

なお、形状測定には、レーザトラッカーを使用して測定し、Spatial Analyzer(SA)ソフトを使用して評価した。

2-2-2 低周波システム振動残留応力除去装置を使用した場合の変化量

レーザ・アークハイブリット溶接法により製作されたダミー金型に対して、有効的な残留応力除去方法のための「低周波システム振動残留応力除去装置」を用い、振動を与えながら溶接を行うことで残留応力の低減を検討した。

(1)「低周波システム振動残留応力除去装置」の導入

装置の仕様

型式 : Fomula62 C 型

定格電圧 : 交流 110V

定格周波数 : 50-60Hz

定格電流 : 7A

導入された「低周波システム振動残留応力除去装置」を図2-2-2(1)に示す。

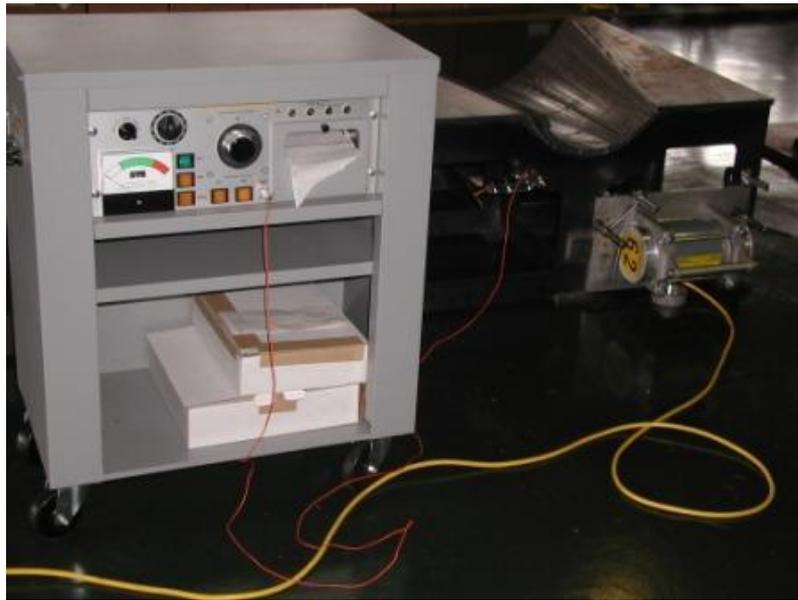


図2-2-2(1) 低周波システム振動残留応力除去装置

2-2-3 金型完成形状(3D-MODEL)との比較

従来溶接法で製作された、ダミー金型とレーザ・アークハイブリッド溶接法および低周波システム振動残留応力除去装置を用い、振動を与えながら溶接により製作されたダミー金型の溶接完成形状を3D-MODELと比較検討する。

2-3. 研究成果

2-3-1 溶接後の熱処理による変化量の分析

(1) 来法で溶接された、ダミー金型を熱処理(焼鈍)により残留応力の除去を行った。

従来溶接法による完成したダミー金型を図2-3-1(1)に示す。

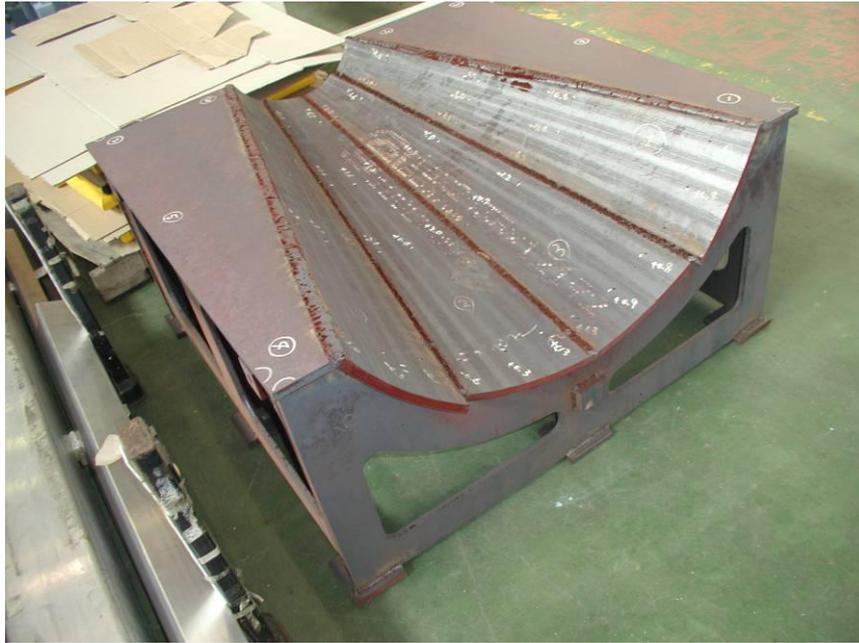


図 2-3-1 (1) 従来溶接法による完成したダミー金型

(2) 熱処理（焼鈍）後の測定データから得られた影響

溶接後の測定数値と従来の熱処理（焼鈍）により残留応力除去を行った数値の比較データを図2-3-1 (2) および表2-3-1 (2) に示す。

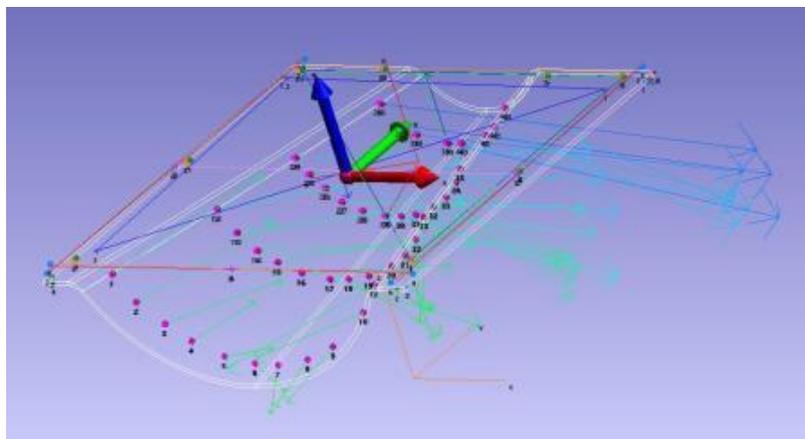


図 2-3-1 (2) 熱処理（焼鈍）によるダミー金型変形量

上記の図からわかるように、曲率の大きな部分に熱処理による影響が出ている。この部分に本溶接後に残留応力が蓄積され熱処理（焼鈍）により除去され、変化量として現れた物である。この変化量は最大 11.02 mmであり、この後の機械加工に大きな影響があることが判る。

2-3-2 低周波システム振動残留応力除去装置を使用した場合の変化量

(1) 前項で得られたレーザ・アークハイブリット溶接法と低周波システム振動残留

応力除去装置を使いダミー金型を製作し、その仮付け溶接後の測定数値と本溶接中および常温になるまで振動を与え応力除去を行った
完成したダミー金型を図2-3-2(1)に示す。



図2-3-2(1) レーザ・アークハイブリット溶接法によるダミー金型

(2) 仮付け溶接後の測定数値と本溶接中および常温になるまで振動を与え応力除去を行った、ダミー金型の測定値を図2-3-2(2)および表2-3-2(2)に示す。

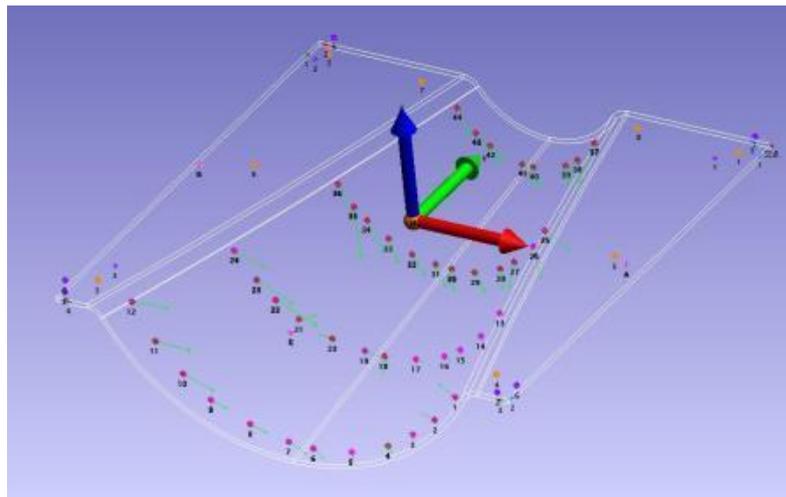


図2-3-2(2) 開発された溶接法での変形量

計測された結果を見ると、データは最大で 1.25 mm の変化量である。この部分は、金型曲面の端部であり、単品曲げ部品の精度が悪く、1 度での溶接が不可能であったために

3度の重ね溶接を行った結果であると推測される。しかし、従来法による溶接と比較してこの歪量は、機械加工においても均一な厚みの金型面が形成することが可能である。

2-3-3 金型完成形状 (3D-MODEL) との比較

従来溶接法と開発された溶接法での 3D-MODEL との画像データと数値データを示す。

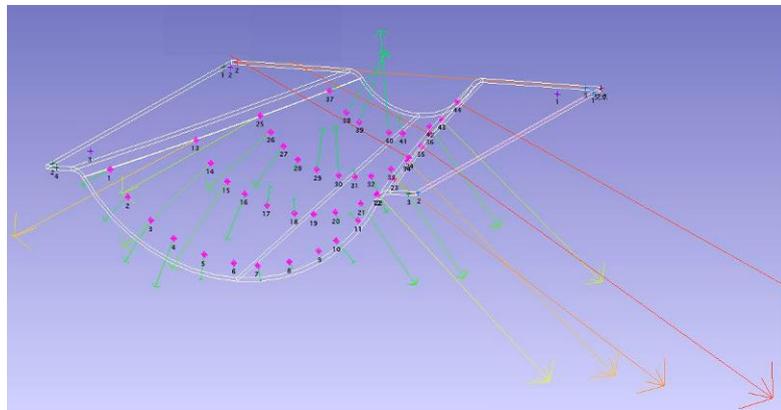


図 2-3-3 (1) 従来溶接法での 3D-MODEL 比較

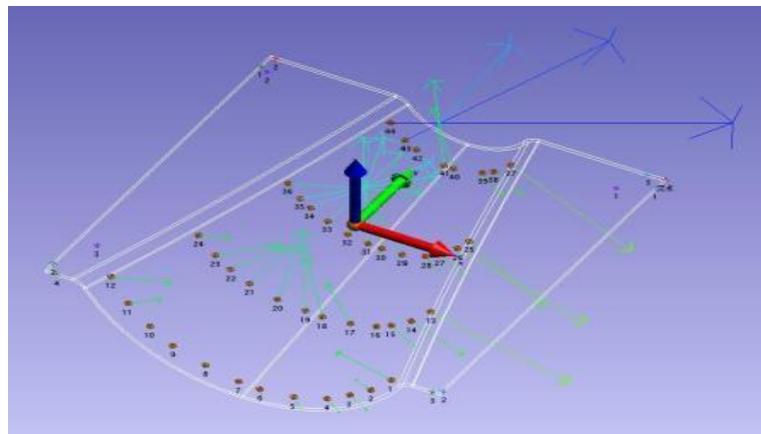


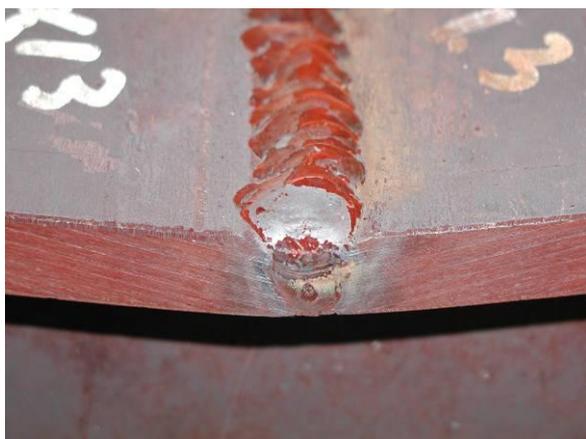
図 2-3-3 (2) 開発された溶接法での 3D-MODEL 比較

最大値を比較すると開発された溶接法が、12.22 mmとなって従来法の10.74 mmより大きくなっているが、これは、単品部品の曲げ精度によるものである。

全体的に見ると、機械加工における削り代は少なくなっている。

溶接ビード幅も開発された溶接法が狭く真直ぐであり、良好であった。

従来溶接法



開発された溶接法



図 2-3-3 (3) ダミー金型の溶接ビードの比較

3. 溶接技術及び残留応力の評価

3-1 研究目的

今井航空機器工業株式会社と株式会社最新レーザ技術研究センターは、ハイブリッド溶接された継手の金属組織観察、硬さ試験、溶込み量評価を実施し、溶接部を総合的に判断して溶接継手の健全性を検証する。また、効果的な残留応力除去方法についても評価し、今後の金型製作の精密化、効率化を目的とする

3-1-1 レーザ・ハイブリッド溶接技術の評価

開発されたレーザ・アークハイブリッド溶接法が CFRP の高精度、複雑形状化に対応できているかの評価を行う。また、溶接時の欠陥（溶接われ、気泡）の有無が従来法と比較してどれだけ軽減されたかの数値データ化と溶接前段取り時間、溶接作業時間等作業コストに関しても評価する。

3-1-2 残留応力除去方法の評価

ダミー金型を開発された製造技術であるレーザ・アークハイブリッド溶接法で製作し、CFRP 成形金型の歪についてレーザートラッカーで計測する。その結果を従来製造法と比較することでこのレーザ・ハイブリッド溶接法の残留応力減少の有効性を評価する。また、従来法と比較して歪除去にかかる時間コストを算出比較する。

3-1-3 溶接材の力学特性の評価

今井航空機器工業株式会社と株式会社最新レーザ技術研究センターは、ハイブリッド溶接された継手の金属組織観察、硬さ試験、溶込み量評価を実施し、溶接部を総合的に判断して溶接継手の健全性を検証する。

また、溶接接合部の引張破断強度調査、溶接部分の残留応力測定などの各種評価試験等は外部機関で試験・分析し、総合的に判断して溶接材の健全性を検証する。

3-2 研究内容

3-2-1 レーザ・アークハイブリッド溶接技術の評価

- (1) 溶接欠陥である気泡を防ぐため、レーザ・アークハイブリッド溶接ではクロスジェットのエアアークとの関係を検討する。
- (2) 安定したレーザ・アークハイブリッド溶接についてレーザを先行させるかアークを先行させるかの検討を行う。

3-2-2 低周波システム振動残留応力除去装置の評価

従来の熱処理による残留応力除去方法と低周波システム振動残留応力除去装置の有効性はX線回析にて比較評価する。

3-2-3 レーザ・アーク溶接法の強度

(1) 金属組織観察、

アーク溶接部、レーザ溶接部、およびハイブリッド溶接部について金属組織の変化をレーザ顕微鏡で観察し、継手の健全性について検証した。また、ハイブリッド溶接において、溶接速度を変化した溶接部について金属組織の変化をレーザ顕微鏡で観察し、継手の健全性について検証した。

(2) 硬さ試験

超微小ピッカース硬度計を用いて、負荷荷重100gでアーク溶接部、レーザ溶接部、およびハイブリッド溶接部の硬さ分布を計測した。

(3) 引張り試験

レーザ・アークハイブリット溶接法で行った引張試験片を作成し、引張り強度を確認した。

3-3. 研究成果

3-3-1 レーザ・アークハイブリット溶接技術

(1) アークトーチとレーザトーチの角度を変えて溶接実験を行った結果、アークトーチを立てたほうが、シールドガスが破れにくい傾向であった。

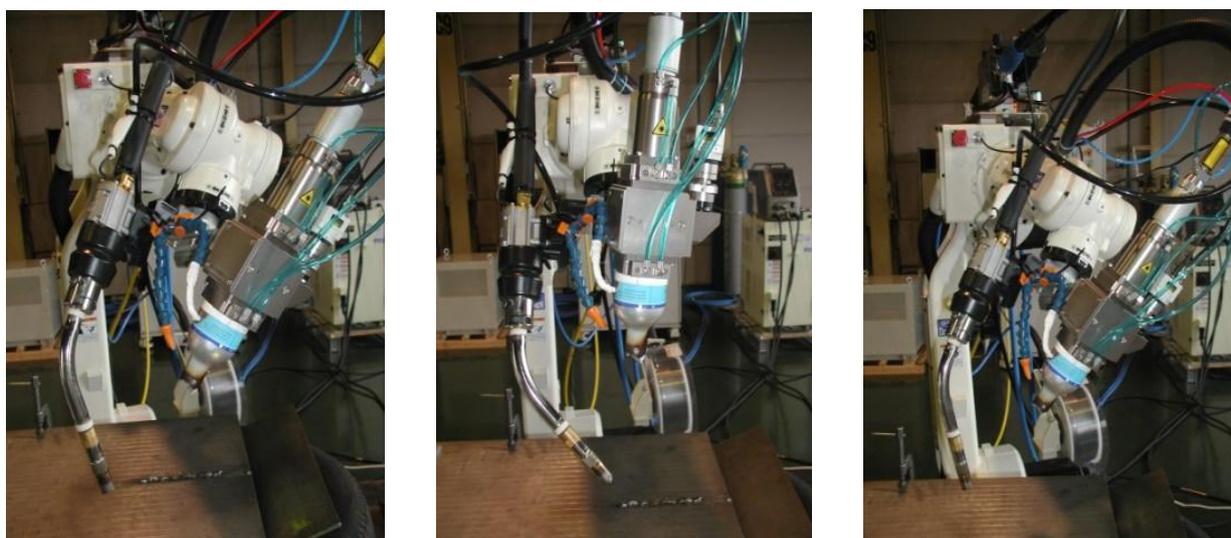


図 3-3-1 (1) a レーザトーチとアークトーチの角度

また、クロスジェットによる影響は、レーザトーチに対してなるべく直角で溶接物に対しては45度以下で当てることが良い。

溶接開始には、溶接物の影響が、無くても形状によってクロスジェットのエアークが、当たり吹き返し現象を巻き起こすことでシールドガスが破れ溶接欠陥である気泡が発生することが判明した。



図 3-3-1 (1) b

溶接途中でシールドガスが破れ気泡が、発生したビード

(2) 安定したレーザハイブリット溶接

レーザを先行させたビードとアークを先行させたビードを比較する。

溶接条件

アーク電流：250A

レーザ出力：4kW

溶接送り : 1.0m/min



図 3-3-1 (2) a レーザ先行の溶接ビード



図 3-3-1 (2) b アーク先行の溶接ビード

今回の設備においてのレーザ・アークハイブリット溶接は、アーク先行の方法が適切である。理由として、アーク先行では、アークトーチ角度を立てることによりシールドガスを破れにくくすると共にレーザビームの熱エネルギーを溶融池に供給することで安定した深溶け込みが得られる。

3-3-2 低周波システム振動残留応力除去装置

低周波システム振動残留応力除去装置を使用した溶接試験片に X 線回析を行い残留応力を測定した。(図3-3-2)

結果は予想した物とまったく逆の結果となってしまったが、これは使用したテスト材料が、金型と同一材としたために素材面のまま測定したため素材面の応力が反映されたものと考えられる。また溶接面も歪と溶接ビードが平面ではなかったために値がばらついてしまった。

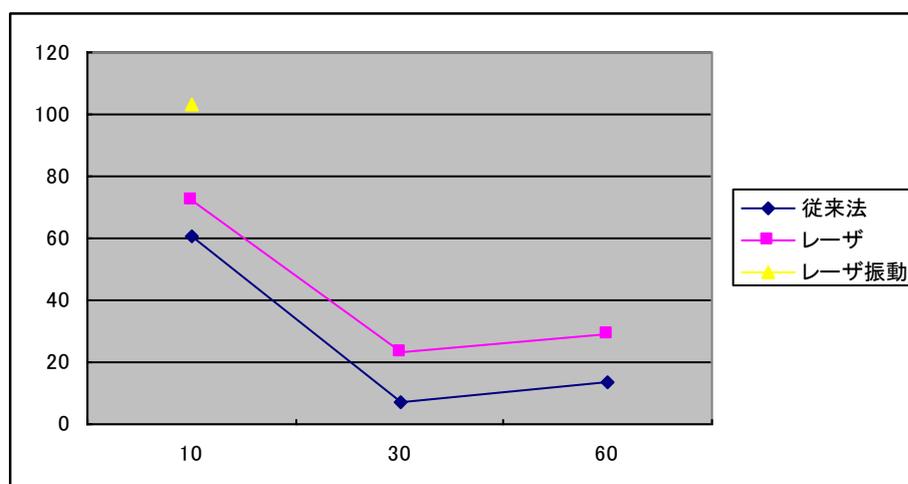


図3-3-2 (1) X 回析による残留応力 単位 Mpa



図3-3-2 (2) レーザハイブリット振動溶接法と従来溶接法

しかし、目視でもレーザーハイブリッド振動溶接で行った物の歪量が少ないのは、歴然であり有効であると判断できる。

次に、作業時間について集計した結果を示す。

ダミー金型製作時間集計

	仮付け	すり合わせ	本溶接	歪取(焼鈍)	合計	
従来方	8.0H	12.0H	15.0H	2日(48.0H)	83	
ハイブリッド溶接	8.0H	4.0H	6.0H	0.25H	18.25	21.99%

今回行った、レーザー・アークハイブリッド振動溶接では、従来の作業時間の約 22%での結果となった。

これは、残留応力除去のために熱処理時間が無くなったことが大きい。

3-3-3 レーザ・アークハイブリッド溶接強度

(1) 金属組織観察、

アーク溶接部、レーザー溶接部、およびハイブリッド溶接部について金属組織の変化をレーザー顕微鏡で観察した結果を図1-1~1-2に示す。また、ハイブリッド溶接において、溶接速度を変化した溶接部について、金属組織の変化をレーザー顕微鏡で観察した結果を表1-3に示す。

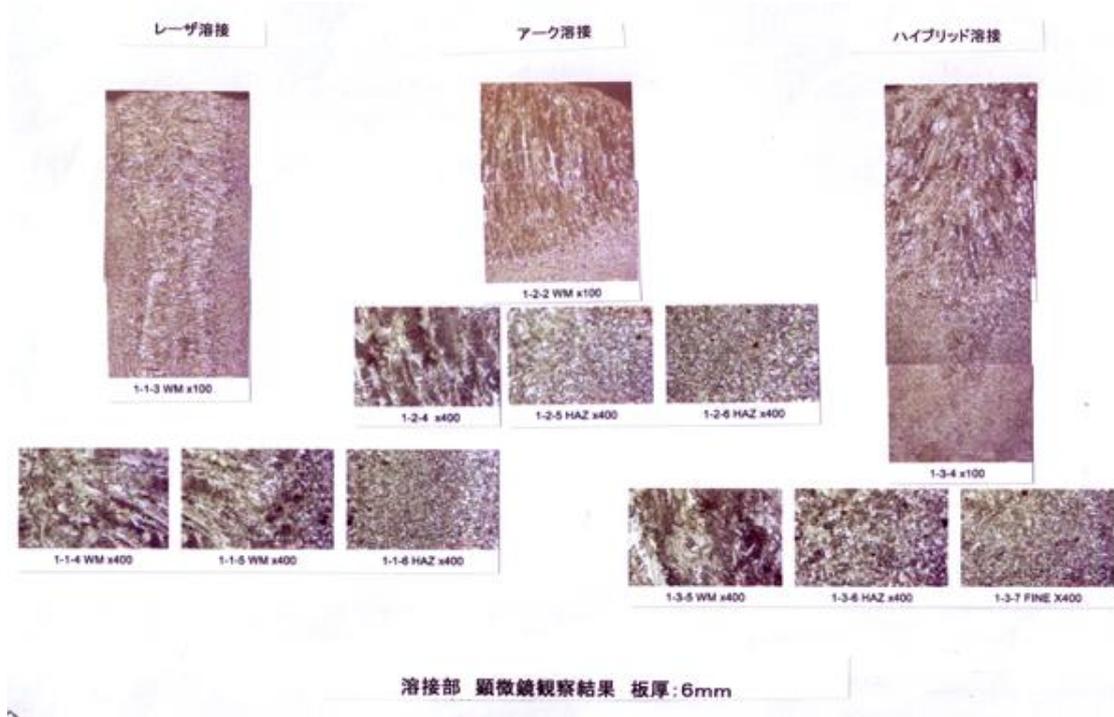


図1-1 各種溶接法による溶接部の金属組織 板厚：6mm

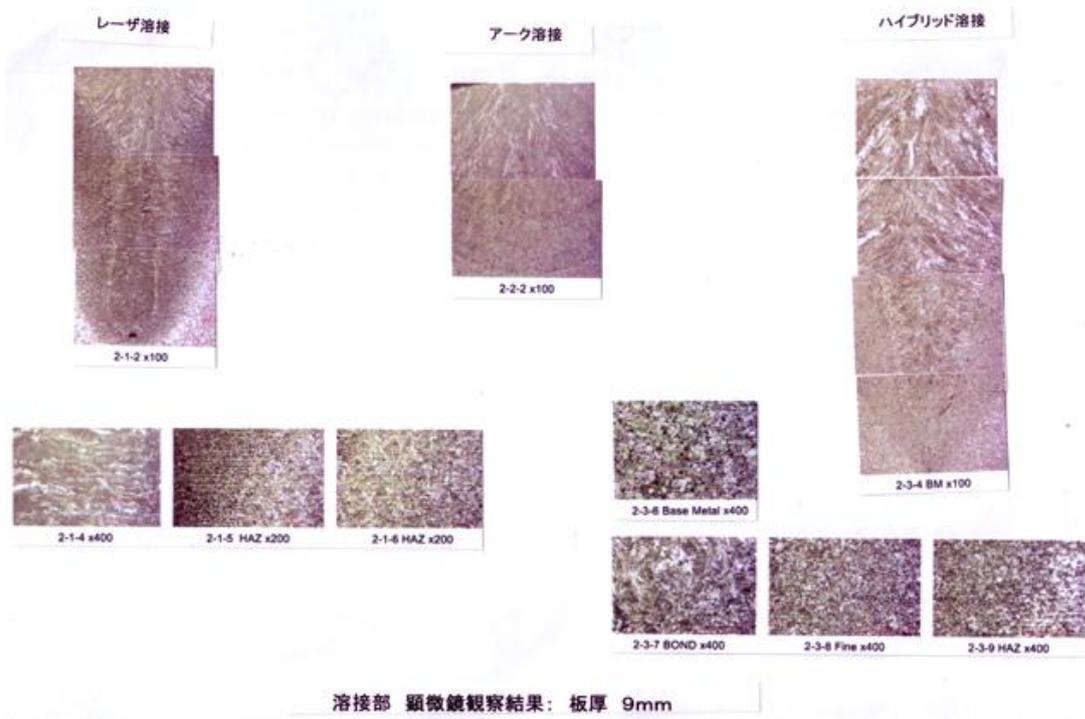


図1-2 各種溶接法による溶接部の金属組織 板厚：9mm

アーク溶接の溶接金属は試験片1-2-2に示すようにセル状組織で、1-2-4に示すようにアシキュラーフェライトとベイナイトの混合である。熱影響部は1-2-5および

び1-2-6に示すように微細なマルテンサイトとベイナイトの混合した組織である。レーザー溶接の溶接金属は試験片1-1-3に示すようにより細かいセル状で、1-1-4に示すようにマルテンサイトとベイナイトの混合組織となった。熱影響部は1-1-6に示すように細かいマルテンサイトとベイナイトの混合組織となった。ハイブリッド溶接の溶接金属は試験片1-3-4に示すようにビードの上半分と下半分で大きく異なる組織となった。すなわち、上半分はアーク溶接部と類似した組織で、下半分はレーザー溶接の溶接部に類似した微細な組織となっている。ただ、熱影響部の幅が上半分では非常に広がっている。これは入熱がすこし多かったためと思われる。

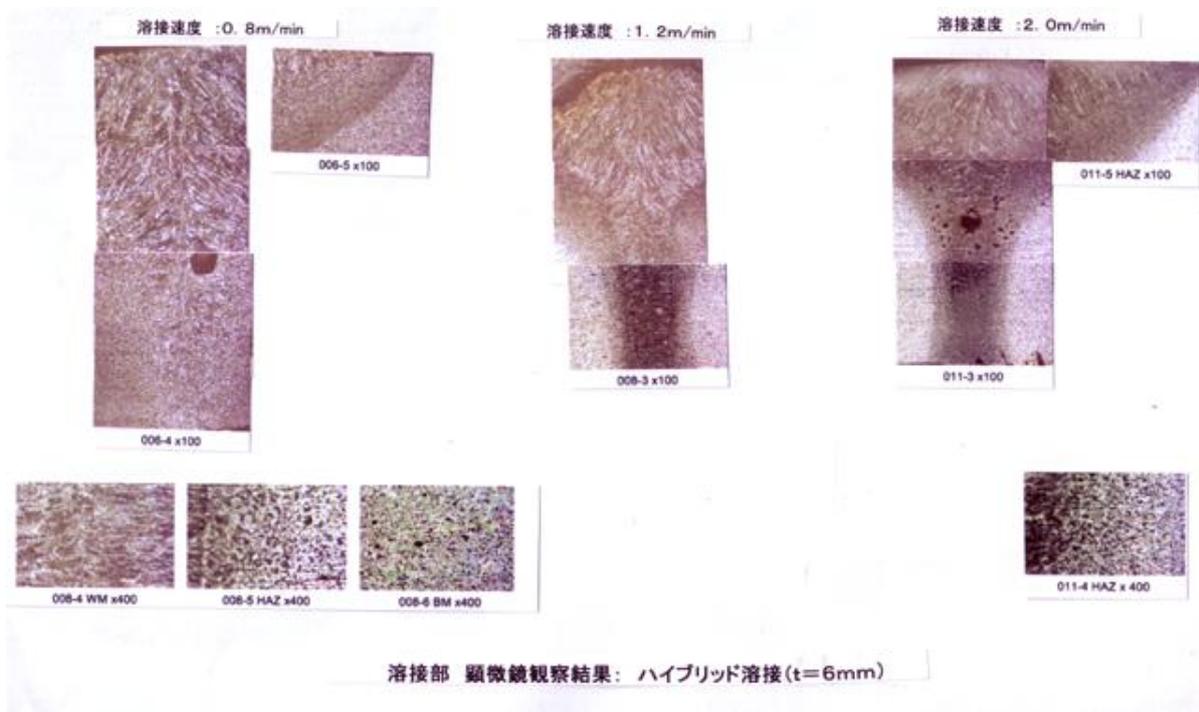


図1-3 ハイブリッド溶接の溶接部の金属組織 板厚：6mm

(2) 硬さ試験結果

超微小ピッカース硬度計を用いて、負荷荷重100gでアーク溶接部、レーザー溶接部、およびハイブリッド溶接部の硬さ分布を計測した結果を図1-4に示す。試験片1-2はアーク溶接の硬さ分布では溶接金属の硬さが220HV~290HVと高いのは50キロ級溶接ワイヤーを用いたためである。ポンド部（粗粒域）は450HVと硬化している。細粒域は250HVと低下している。試験片1-1はレーザー溶接部でその硬さ分布は溶接部が狭く、溶接後の冷却速度も速いので、マルテンサイト変態による硬化が生じているために、300~400HVの硬さになっている。

また、狭い熱影響部も最高硬さが450HVと硬化が起こっている。

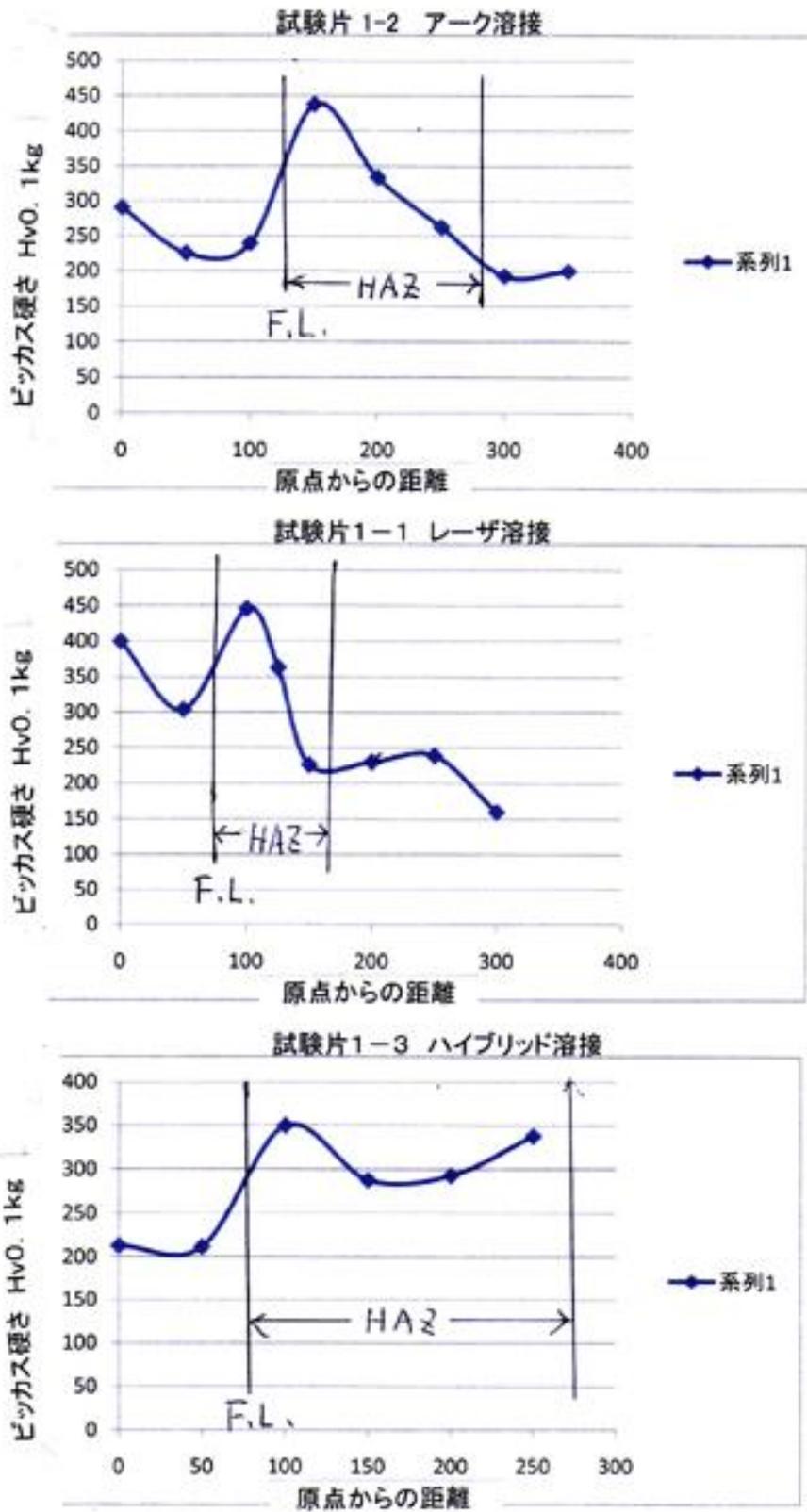


図1-4 溶接部のピッカース硬さ分布 (荷重: 100g)

ハイブリッド溶接の硬さ分布は試験片1-3に示すように、溶接金属は200Hvとマルテンサイトによる硬化が生じていない。しかし、全入熱（レーザー溶接の入熱とアーク溶接の入熱の和）が大きかったためか、熱影響部が幅広く、最高硬さは350Hvとあまり高くなかった。

ただ、これはビードの上半分の部分の硬さ分布で、下半分はレーザー溶接部と同様になる。

(3) レーザ・アークハイブリット溶接の引張り強度を測定した結果を示す。

寸法 mm		断面積 mm ²	降伏荷重 N	降伏点 N/mm ²	最大荷重 N	引張強さ N/mm ²
幅	板厚					
25	16	400	—	—	160,500	401

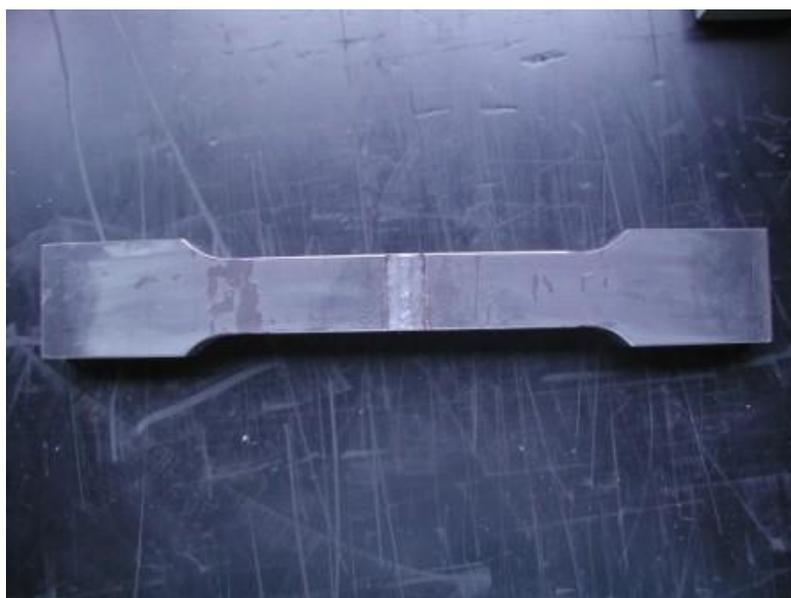


図3-3-3 引張り試験片

結果としては引張り強さが予定していたよりも低い結果となった。溶接部の溶け込みが不足していたことが判明した。この試験片は、レーザー・アークハイブリット溶接の条件が、レーザー先行のハイブリット溶接であったことと振動溶接が有効であることが判明する前の条件で実施されたためであった。今後の再確認が必要である。

4. 事業化への取り組み

本研究開発において、レーザー・アークハイブリッド振動溶接法を実施した。この溶接法は、低熱溶接により低歪を実現する物である。ダミー金型では、現状作業時間の約 22%での作業が可能になるという非常に良い結果が得られた。またその時の溶接における歪量も 1 mm 程度に抑えられ、この後の機械加工も容易になると考えられる。

この結果を踏まえ、使用材料の薄板化を図ることにより材料費の節減、曲げ加工における工数削減と高精度化が可能となる。

しかし、インバー材における溶接法については、熱伝導率が低いことから溶接母材に熱が溜まり易く溶接時間と共に溶け込みが、深くなるという現象が、発生している。このことを解決すると事で、ホットプレス用精密金型の製作受注につなげる所存である。

最終章 全体総括

1. 溶接設備の改良

(1) レーザ・アークハイブリット溶接設備の改良

現在のクロスジェットには、圧縮エアーを利用しているためにエアーを当てる方向が制限される。この圧縮エアーから溶接シールドガスでクロスジェットを行えば、当てる方向の制限は無くなり、溶接ビードの欠陥の発生は、少なくなることが期待できる、このためレーザトーチと一体化したクロスジェットの開発が必要である。

2. レーザ・アークハイブリット振動溶接法の確立

(1) 今回の研究開発で低周波の共鳴振動を与えながらレーザ・アークハイブリット溶接を行うと安定した溶け込みが得られたが、その理由についてはわかっていない。

この理由を突き止めレーザ・アークハイブリット振動溶接法として低歪溶接法の確立を考える。

3. インバー材における溶接条件の課題

(1) インバー材においては、熱伝導率が非常に低いため溶接母材に熱が蓄積され、溶接途中から急激に深溶け込みを起こす現象が見られた。これを改善するには、現在の設備を利用して可能なことは、溶接途中から送りを変化させて急激な溶け込みを防止する方法について研究する必要がある。

<謝辞>

今回の戦略的基盤技術高度化支援事業「ホットプレス法によりCFRP製三次元大型形状品の高精度、高効率成形を可能とする、低熱歪み金型の開発」においてアドバイザーとして参加いただいた川崎重工業株式会社 様をはじめダイヘン溶接メカトロシステム株式会社 様、IPG フォトニクスジャパン株式会社 様、ニッコー溶材工業株式会社 様、エアリーキッド工業ガス株式会社 様、岐阜県機械材料研究所 様、諸機関の皆様には、惜しめないアドバイスをいただき感謝いたします。