

平成 29 年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「高出力ファイバレーザによる深層シーム溶接技術
及び高耐圧圧力センサの開発」

研究開発成果等報告書

平成 30 年 5 月

担当局 東北経済産業局
補助事業者 株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

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

1-1-1 背景 1

1-1-2 研究目的 1

1-1-3 研究開発テーマ及び目標 2

1-2 研究体制

1-2-1 実施体制 2

1-2-2 研究者等氏名 3

1-2-3 協力者及び指導・協力事項 3

1-3 成果概要 4

1-4 当該研究開発の連絡窓口 5

第2章 本論

2-1 ファイバレーザ溶接システムの開発

2-1-1 レーザ照射ヘッドの開発 6

2-1-2 クラッド伝搬光除去方法の開発 11

2-1-3 ファイバレーザ溶接装置の開発 15

2-2 高耐圧の圧力センサの開発

2-2-1 各種溶接実験 16

2-2-2 圧力センサの開発 18

第3章 全体総括

3-1 研究開発成果まとめ 22

3-2 研究開発後の課題 22

3-3 事業化展開について 23

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 背景

地球温暖化および省エネルギー対策として世界的に水素社会実現に向けて産官学あげて取り組みがおこなわれており急速な市場拡大が予測されている（図1）。その中の一つである、燃料電池車（FCV）が普及するには、構成部品（電極・セパレータ、高分子電解質膜等）の開発も重要であるが、その前に、周辺インフラ（水素ステーション等）を先行して配置しなければならない。

我々の事業分野である圧力センサを使用する場所は、図2に示す通りである。このように、水素を段階的に圧縮機で高圧状態にして、蓄圧器に貯蔵し配管で供給していく。当然安全のために輸送・貯蔵・プレクールなど、あらゆる場面で圧力の管理と制御が必要になってくる。また、水素の大量需要先として、水素の燃焼が可能なガスタービン（出力30MWクラス）開発も行われており、圧力センサの需要の大きな伸びが期待できる。

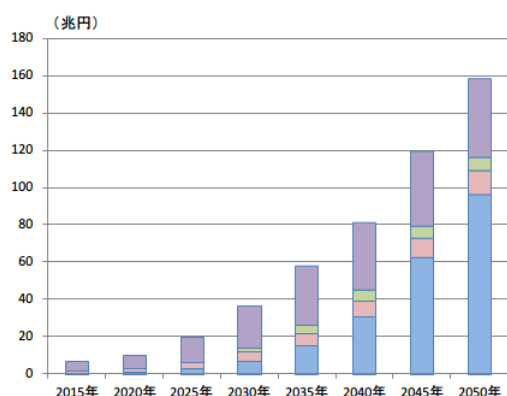


図1 世界水素インフラ市場規模予測
出典：日経 BP クリーンテック研究所
世界水素インフラプロジェクト総覧

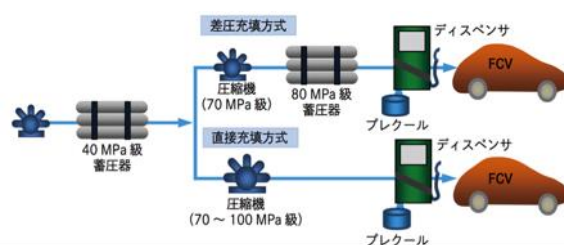


図2 水素ステーションにおける充填
出典：NEDO

1-1-2 研究目的

圧力センサの溶接部には、センサに加わる圧力に耐える接合強度と気密性が要求され、従来高圧センサと呼ばれている35MPa までの圧力センサはCO₂ レーザ溶接が使われていた。これを上回る圧力では、気密性確保が難しくなり電子ビーム溶接（EB溶接）が使われ始めている。圧力センサ部の金属薄膜に熱的に影響を与えないことと、接合強度と気密性を満足させるべく、EB溶接は溶接に使う波長を短くして小さなエリアにエネルギーを集中して深層部の溶接品質を向上させている。しかし、EB溶接は高真空中チャンバー内での加工が必須で、生産性と被加工物の冷却（昇温防止）の課題をかかえている。

一方、ファイバレーザ溶接は、波長的にはYAGレーザに近いものの、コヒレントな光源でビームが絞れることより注目され、近年光源の市販が始まっている。しかし、溶接装置として小さなエリアを深層まで接合させるには、レーザ照射ヘッドの光学系の工夫と、特にビームを絞った場合の溶接部からの反射戻り光対策を加えないと実用に耐えない。

本研究はこれらを鑑みて、各専門分野の方々にアドバイザーに加わっていただき、知識とアドバイスを基に、実用的なファイバレーザ溶接装置の実現を図ると共に、高耐圧圧力センサの開発を目指す。

1-1-3 研究開発テーマ及び目標

【1】ファイバレーザ溶接システムの開発

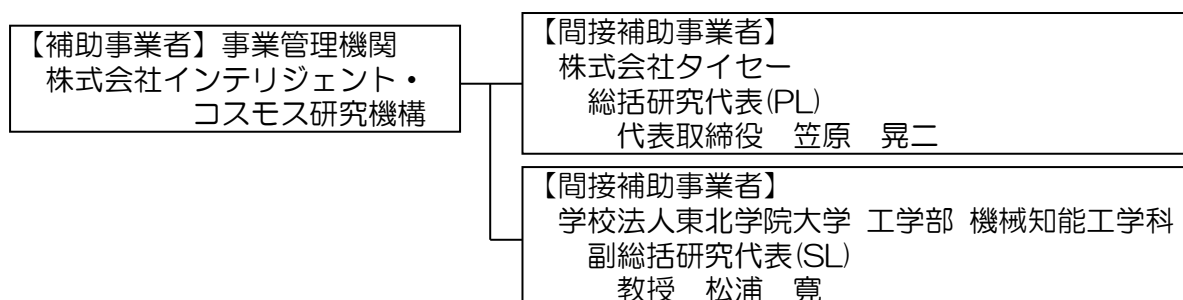
ファイバレーザ（最大光出力 500 W）を使用する溶接加工において、戻り光を監視・除去する物理光学的構造を具備し、生産を考慮して水冷機構及びヘッド位置調整を幫助するカメラを搭載でき、長時間（最大出力60%にて2時間連続）運転に耐えることができ、高強度溶接のために深層部溶け込みが可能なレンズ系を備えたレーザ照射ヘッドの光学技術確立して高度化したファイバレーザ溶接装置を開発する。

【2】高耐圧の圧力センサの開発

耐圧160MPaの高耐圧圧力センサを実現するため、金属薄膜圧力センサゲージを従来感度の3倍以上になる歪ゲージ薄膜と製造条件を確立すると共に、歪ゲージ薄膜を着けたダイヤフラムと継手材との異種金属を、開発したファイバレーザ溶接装置でEB溶接と同等以上の深層部溶接する方法を確立させ、競合他社製品と同等の性能を確保しつつ、安価でコスト優位性のある圧力センサを開発する。

1-2 研究体制

1-2-1 実施体制



1-2-2 研究者等氏名

(1) 研究員

氏 名	所属・役職	備考
笠原 晃二	株式会社タイセー 代表取締役社長	PL
松浦 寛	学校法人 東北学院大学 教授	SL
原 義雄	株式会社タイセー 工機・要素開発部 部長	
安藤 幸浩	株式会社タイセー 要素開発グループ グループ長	
久保田 哲夫	株式会社タイセー 工機開発グループ グループ長	
藤澤 啓美	株式会社タイセー 要素開発グループ 研究員	
丸山 岳史	株式会社タイセー 要素開発グループ 研究員	
神田 弘康	株式会社タイセー 工機開発グループ 研究員	
久保田 賢治	株式会社タイセー 工機開発グループ 研究員	
藤本 健	株式会社タイセー 技術1グループ 研究員	

(2) 管理者（事業管理機関）

株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

氏 名	所属・役職	備 考
矢口 仁	産学官連携・インキュベーション事業部 取締役事業部長	
猪股 則夫	産学官連携・インキュベーション事業部 統括マネジャー	
菊池 公博	産学官連携・インキュベーション事業部 プロジェクト・マネージャー	平成 27 年度事業管理者
鈴木 秀夫	産学官連携・インキュベーション事業部 プロジェクト・マネージャー	平成 28 年度事業管理者
佐藤 加代	産学官連携・インキュベーション事業部	平成 27,28 年度事業管理者
三浦 融	産学官連携・インキュベーション事業部 プロジェクト・マネージャー	平成 29 年度事業管理者
池田 由美	産学官連携・インキュベーション事業部	平成 29 年度事業管理者

1-2-3 協力者及び指導・協力事項

氏 名	所属・主な指導及び協力
並木 周	国立研究開発法人産業技術総合研究所 電子光技術研究部門 光加工についての助言
塚本 雅裕	国立大学法人 大阪大学 接合科学研究所 溶接技術についての助言
千代窪 毅	宮城県経済商工観光部新産業振興課 溶接接合評価についての助言
内海 宏和	宮城県産業技術総合センター 溶接接合評価及び助言
奥寺 正晴	国立大学法人岩手大学 工学部ものづくりエンジニアリングファクトリー 溶接技術、圧力センサ等助言

藤崎 晃	古河電気工業株式会社 戦略本部新事業推進室 ファイバレーザ発振器についての助言
平尾 昌弘	古河電気工業株式会社 戦略本部新規事業推進部産業レーザシステム部 ファイバレーザ装置についての助言
柴 直人	セレスティカジャパン株式会社 宮城サイトオペレーション部 溶接装置メカ設計についての助言
原島 孝文	株式会社 GM タイセー テクニカ事業部 製造2グループ 光ファイバ加工についての助言

1-3 成果概要

【1】 ファイバレーザ溶接システムの開発

【1-1】 レーザ照射ヘッドの開発

目標	成果	達成度
レーザ照射ヘッド筐体温度 45℃以下（2 時間連続運転 にて）	2 時間連続運転にてレーザ照射ヘッド筐体温度 45℃以下（室温+5.5℃の上昇）。	100%
開発したレーザ照射ヘッド をファイバレーザ溶接装置 へ搭載	搭載を完了。	100%
多種形状対象物に対応する XYZ 軸追従型インテリジェ ント照射ヘッドの開発	原理試作完了、継続して開発。	25%

【1-2】 クラッド伝搬光除去方法の開発

目標	成果	達成度
クラッド伝搬光除去目標値 順方向：波長 1.1 μm 、 ファイバ曲径 R100mm 以 下で損失 0.17dB 以内 逆方向：波長 555nm で 10dB 以上	順方向波長 1.1 μm 、ファイバ曲げ曲径 100mm で損失 0.17dB 達成。 逆方向波長 555nm で 10dB 以上に対してバラツ キ確認。曲げ方が原因と思われる。組み立て環境 を含め継続して開発。	85%
戻り光を監視し、閾値を超 えたらファイバを切断	ファイバカッターを作製。実験レベルでファイバ フューズ停止効果を確認。実機搭載での評価は破 壊試験になるため実施せず。	70%

【1-3】 ファイバレーザ溶接装置の開発

目標	成果	達成度
ワーク速度 20mm/min 以上、カメラによる溶接加工点監視機能付き、EB 溶接と同等の深層溶接を実現、2 時間連続運転で安定した品質確保	開発完了。ワーク速度 1225mm/min。 溶接個所の Z 軸位置ずれに対し Z 軸自動調整機能を追加、品質の安定を確認。 EB 溶接と同等の深層溶接、強度を確認。 2 時間連続運転で安定した溶接品質を確認。	100%

【2】 高耐圧の圧力センサの開発

【2-1】 各種溶接実験

目標	成果	達成度
開発したファイバレーザ溶接装置を使用し、最適溶接条件を探索	焦点距離、溶接スピードを最適化、レーザパワーで溶接量をコントロールが可能。 引張試験により E B 溶接と同等の強度を確認。 ヘリウムリーク試験にて機密性を確認。	100%

【2-2】 圧力センサの開発

目標	成果	達成度
ASIC 付き 160MPa 圧力センサの試作及び評価	高強度、耐水素脆性材料の入手が困難なため、入手できる材料で設計。一般用途用として 100MPa と 140MPa、水素用途用として 35MPa を試作。実用域の特性は得られたが、更なる精度向上、精度ばらつき低減を継続して行う。	75%

1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社タイセー

要素開発グループ グループ長 安藤 幸浩

TEL 0494-77-1211 (代表) FAX 0494-77-1415

E-mail ando1544@mkt-taisei.co.jp

株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

産学官連携・インキュベーション事業部

プロジェクト・マネージャー 三浦 融

TEL 022-343-8811 (代表) FAX 022-279-8880

E-mail t-miura@icr-eq.co.jp

第2章 本論

2-1 ファイバレーザ溶接システムの開発

2-1-1 レーザ照射ヘッドの開発

ファイバレーザ溶接装置に搭載するレーザ照射ヘッドとして、レーザ照射用レンズと溶接部をモニタリングするCCDカメラの撮像用レンズの工学系とこれを収納する筐体の設計を行った。また、今後の事業化の発展性を考え、圧力センサだけでなく、ファイバレーザ溶接装置の外販も視野に、差別化できるレーザ照射ヘッドの開発を目指した。

E B溶接と同等以上の深層シーム溶接能力確保の他に、生産ラインで使用する溶接装置のため連続運転が必須であるが、長時間連続照射を続けると内部に熱が溜まり、熱レンズ効果が発生、透過波面の乱れが生じ綺麗なガウシアンプロファイルが保てず、溶接不良が起きる可能性が高いことから、冷却構造が必要となる。

市販の溶接システムは汎用性を考えて、特殊なものは使用せず、特に工学系は一般的なものではないと思われる。そのため、ファイバレーザのI/O制御とコネクタ接続形状に関しては、IPG社と互換性を持っているものがほとんどである。そこで、我々はファイバレーザから出たプロテクトされた光ファイバと、その先端に付属するIPG互換の光コネクタではなく、ファイバレーザ本体だけ購入し、そこから出た光ファイバから先を全て設計することで差別化できると考えた。

そこで、独自のレーザ照射ヘッドの開発を①光学系と②本体構造に分けて検討を行った。

①光学系（集光レンズの最適化）

無限共役比での単レンズのベストフォーム形状は、平凸レンズに近い状態ということは広く知られている（図 1.1.1 参照）。もちろん、アクロマートレンズ（合わせレンズ）の方がより収差が良いが、合わせの接合面に有機物の接着剤を入れなければならないこと、500 W以上のハイパワー光をハンドリングすることから、アクロマートを使用するという解は本研究では無い。1枚の単レンズを使うこともできるが、近軸焦点近傍に集光しないため、2枚の平凸レンズの凸面を向き合わせた配置でかつ近接させて配置した系で、集光特性が格段に向上する。よって、今後は平凸レンズで設計の議論をすることにした。

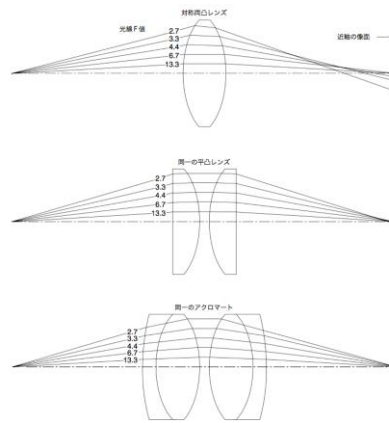


図 1.1.1 レンズのベストフォーム形状のイメージ（メレスグリオ社カタログ参考）

上記の一般的なレンズ理論と YAG レーザ溶接の光学系開発の経験から、光ファイバから出た光のコリメートレンズとコリメートされたビームを溶接点に絞こむ集光レンズの焦点距離は同じである方が、ビーム品質が良いことが分かっている。

そこでまず、直径 50 mm で共通化し、焦点距離を 80 mm、90 mm、100 mm、110 mm、120 mm の平凸レンズを用意した。両面には波長 1050 nm で反射防止膜を施している。光ファイバからの出射光は広がるため（NA=0.1 換算）、焦点距離 120 mm のレンズではビーム径が 24 mm になる。高出力を取り扱う安全の経験則から、その値の 1.5 倍を我々は規定にし、ビーム径 36 mm 以上とした。さらに平凸レンズの取り付けコバを考慮して直径 50 mm とした。2 枚の平凸レンズの凸面を向き合わせた系で溶接実験を行った。初期試作のレーザ照射ヘッドは IPG 互換のコネクタの安全装置をフェイク導通させて、接続できるようになっている。

<実験結果 1>

焦点距離 90 mm 以下は目視による焦点位置の確認が容易であった。焦点距離がわずか 10 mm ずつの違いではあるが、焦点距離 100 mm 以上はどこに焦点があるのかが目視では判別しにくかった。

<実験結果 2>

シーム溶接後に断面を割って測定をした結果、焦点距離 110 mm 辺りの選択が最も良いことが分かった。

<成果 1>

溶接する製品の形状が固定された状態で、深層シーム溶接の焦点距離の最適化は図れた。表面のみの溶接であれば、どの焦点距離でも溶接は可能である。

②本体構造（光学系の小型化）

焦点距離の最適化実験から初期試作は、かなり大きな形状となった。焦点位置確認のための CCD カメラを内蔵してないため、斜めレーザ照射ヘッドの横に CCD カメラを設置した。YAG レーザ溶接の光学系開発の経験から、光路上から照準できることが望ましい。特に深層シーム溶接は高いエネルギーを一点に集中するため、200～300 μm のビーム径となる。これを合わせ面に正確に照射しなければならない。よって、この単純な光学系をさらに見直して、最終的には CCD カメラが内蔵できる小型の光学系を開発した。

設計したレーザ照射ヘッド内部の光学部品と製作中の融着工程を図 1.1.2 に示す。融着条件はノウハウ事項のために割愛するが、製作は容易ではなかった。次に、コリメートレンズ及びその先にある集光レンズを一体化したレンズ保持部の温度上昇を測定した。レンズ径を小さくして長時間照射すると熱レンズ効果によりビーム品質が劣化するだけでなく、この先に内蔵する CCD カメラなど電子部品が熱の影響を受ける。並行して以前から検討している材料でも実験を行なった。焦点距離、及びレンズ材質の材料 A はノウハウ事項のために詳細は割愛する。

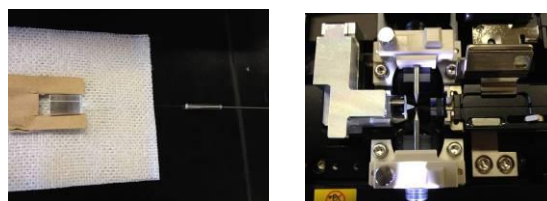


図 1.1.2 光ファイバ先端処理（左：完成、右：融着中）

<実験結果3>

取得した値を図 1.1.3 に示す。レーザヘッド（光コネクタ）から出射された光はレンズモジュールを通過し、垂直にワークに照射される光路となっている。図 1.1.3 右上が石英、左上が材料 A である。下の左右の温度カーブから見ても明らかなように、材料 A の方が熱の上昇が少なく優れている。照射開始から 250 秒になる手前で出力を下げたため両グラフ共に温度が下がっている。これは故障ではない。

<成果2>

図 1.1.4 に示す通り、戻り光の処理をしなければ内部の光学部品が熱で燃えることもわかった。よって、今後は光路に近い場所で部品を固定するための有機系接着剤は用いないことにした。

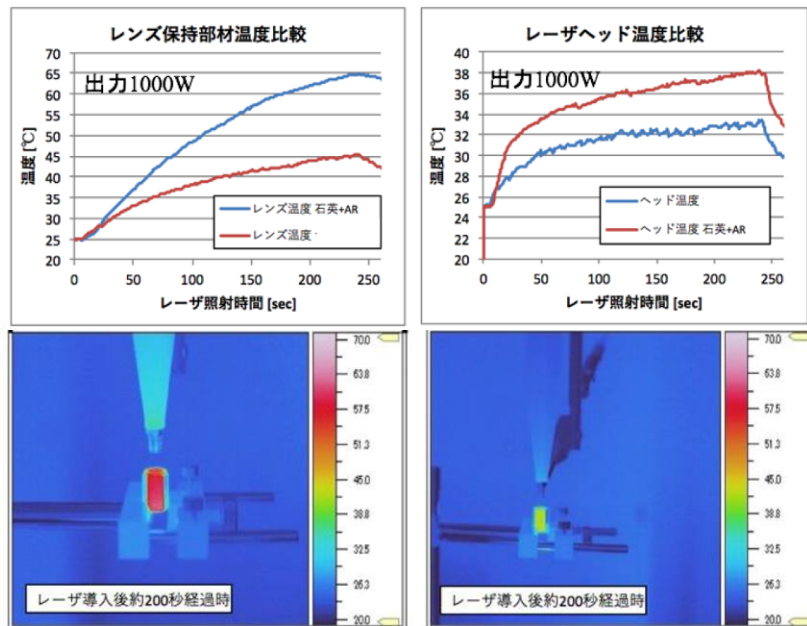


図 1.1.3 レーザ照射ヘッドの温度上昇実験



図 1.1.4 戻り光によるレーザ照射ヘッド内部の破損

<成果3>

レーザ照射ヘッド内部はヒートパイプを用いて熱を外部に逃がし、その先の熱交換器に温度センサと水冷機能とフィンを付けた図 1.1.5 に示すタイプを開発した。ただし、形状が大きくなることと、複雑な部品形状をしており総合的にコストを見直す必要がある。

<成果4>

本体内部に発熱体（80 度）を取り付けて実験を行なったところ、本体表面の温度は 50 度程度に抑えられており、冷却効果が期待できることが分かった。



図 1.1.5 水冷式レーザ照射ヘッド（初期試作型）

また、ヒートパイプは折り曲げることも可能であるため、無理にコストを上昇させる水冷機構を付けずに、溶接装置の外部に熱を移動する構造にできることが分かった。

以上のこれまで行なってきた実験、及び得られた成果から 2-1-3 ファイバレーザ溶接装置への搭載を行った。

2時間の連続運転試験として、ファイバレーザ出力を最大出力の60%にて継ぎ手 SUS 304、起歪体 SUS630-H900 材を用い溶接試験を実施し、検証用にレーザヘッド部、溶接部上部の押さえ機構に各々温度センサを取り付け、温度上昇と溶接状態を確認した。図 1.1.6 に測定結果を示す。

<成果5>

溶接開始と共にレーザヘッド部（表中青線）、押さえ機構部（表中ピンク線）の温度上昇が確認されるが、2 時間後にてレーザヘッド部は約 5 度の温度上昇であった。また溶接後にサンプルの断面観察を行い、深層量、ビート幅、溶接位置を確認、結果（図 1.1.7 参照）、時間経過に対し溶接状態は安定しており、目標の連続 2 時間連続運転を達成した。

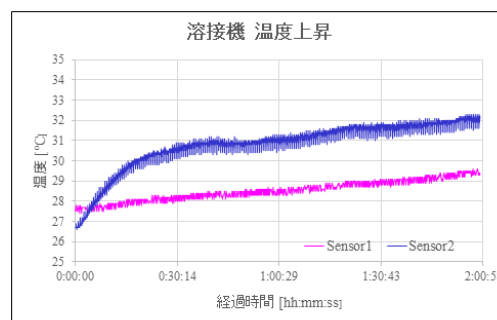


図 1.1.6 連続運転による温度測定結果

サンプル	時間 [hh:mm]	深層量 [mm]		ビート幅 [mm]		溶接位置 [mm]
		左	右	左	右	
001	0:00	2.077	2.101	0.776	0.699	2.757
002	0:46	2.073	2.137	0.667	0.687	2.750
003	1:32	2.182	2.109	0.788	0.769	2.755
004	2:18	2.090	2.176	0.706	0.782	2.755

図 1.1.7 連続運転による溶接断面観察結果

③照射ヘッドのインテリジェント化

本研究開発を進めていく中で、溶接の対象物が圧力センサのような円形以外に、楕円形や多角形、凹凸形等の複雑な形状にも安定した品質で溶接する必要があると考え、XYZ軸追従型のインテリジェント照射ヘッドの開発をテーマに加えた。

インテリジェント化として、コリメートレンズの先に配置している直角プリズムのチップ

とヨー角をサーボモータで動かすことでコリメート光の反射角度をわずかに可変することで集光レンズの入射角度が変わる。(図 1.1.8 参照) これを利用すると角度変化に連動して、照射光の集光ポイントの位置を変えることができる。CCD カメラで生画像を確認しながら細かな制御を行う試作実験を行ったが完成には至らず開発は継続して行う。

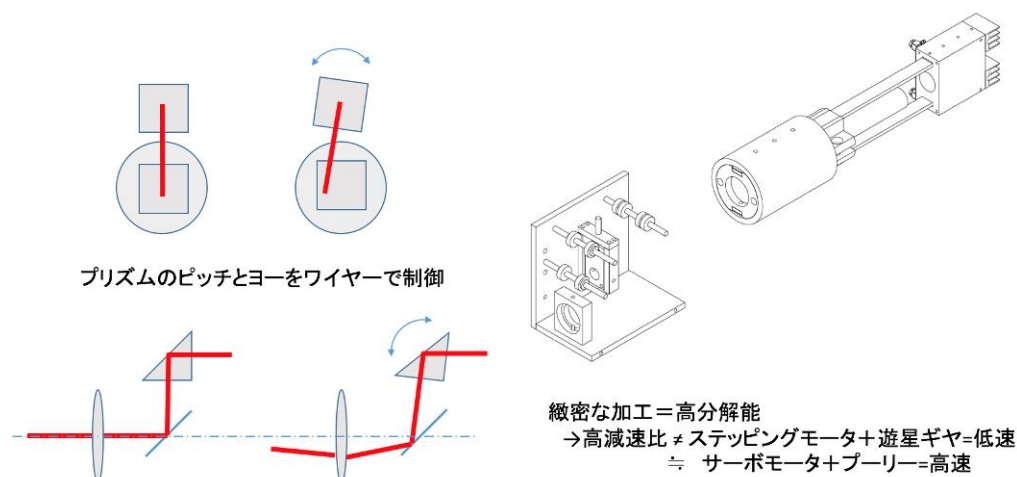


図 1.1.8 インテリジェント型のレーザー照射ヘッド（案）

2-1-2 クラッド伝搬光除去方法の開発

高圧センサのダイヤフラムの固定には深層シーム溶接の固定強度とリーク度合いが性能を左右する。より深く溶け込ませるにはレーザービームをワークに対して垂直に入射するしかない。この方法は反射が強いので戻り光も相当強く逆進してくる。一般に、ファイバレーザは戻り光に弱いと言われており、このような使用法は故障の原因となるためメーカーはあまり推奨していない。現在ではファイバレーザメーカー側もその対策が徐々にされているようで、徐々に戻り光の耐性がアップしてきている。ところが事故が起きると責任の所在は使用者側にある。本研究においても、ファイバの途中断線の修理を依頼した経験がある。この現実を考えると、本研究で独自のレーザー照射ヘッドの開発とセットで戻り光への対策に対する研究はマストである。ここで、クラッド伝搬光の除去をする上で、ポイントとなる現象が二つある。

一つ目は、特に垂直入射において顕著となる加工点から戻り光である。順方向はシングルモードで伝搬するため、コアを光が通過している。加工点から反射してくる戻り光は、集光レンズによりファイバレーザのクラッド部に再結合して光ファイバを逆進して、ファイバレーザに向かって進んでくる。通常は、コネクタ内部の石英ロッドの後ろの光ファイバの外側表面を化学処理して凸凹にして、クラッドを伝搬する光を徐々に外に漏らして、光源側に

逆進しないように工夫している。化学処理すると曲げに弱く、このコネクタ部分は全長 350 mm 近く曲げることができない。そこで、図 1.2.1 の左に示したように光ファイバの保護コートを剥がし、ガラスキャピラリーを 100 mm 間隔で 10 個通して固定した。ガラスキャピラリーは光ファイバのクラッドより高い屈折率を用いた。また、ガラスキャピラリーの出入口の形状は光学研磨されたある曲率がついた滑らかな表面にしてある。ガラスキャピラリーと光ファイバは接着剤などで固定はされていないため、ケーブルを可動させたり曲げたりしても、引っかからずガラスキャピラリーの内部を光ファイバが動く構造になっている。これにより、クラッドはガラスキャピラリーのどこかに必ず触れているため、クラッドを伝搬する逆進光がそこから外部に徐々に抜けていく構造になっている。

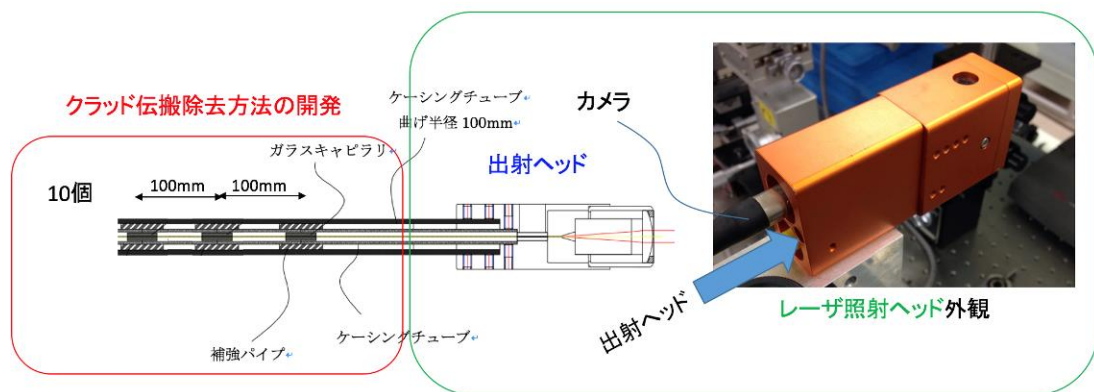


図 1.2.1 CCD カメラ内蔵レーザ照射ヘッド

<実験4>

使用しているファイバレーザの波長は約 $1.1 \mu\text{m}$ である。加工するための光は波長 $1.1 \mu\text{m}$ である。逆進する光の波長は $1.1 \mu\text{m}$ に加えて熱も戻ってきている。逆進実験において、波長 $1.1 \mu\text{m}$ のハイパワー光を入力すると、ファイバレーザ本体が故障する可能性がある。そのため、目視による確認もできる可視光 555 nm で基礎実験及び組み立て中の確認をすることにした。

<成果6>

順方向波長 $1.1 \mu\text{m}$ @R100 mm 以下で損失 0.17dB 以内を達成した。逆方向波長 555nm で 10dB 以上に対して、曲げの状況によりバラついた。ケーブルの曲げ方が影響していると思われることが分かった。

この結果から、実験においてはある程度ケーブルを曲げて実験を行なった。レーザ照射ヘッドに 500 W を投入して、ワークに対して垂直に光を当てて、あえて光を戻した。しばらくして図 1.2.2 の赤枠で示した部分が発光して SUS304 のケーシングチューブから火花が出て、光ファイバは断線した。

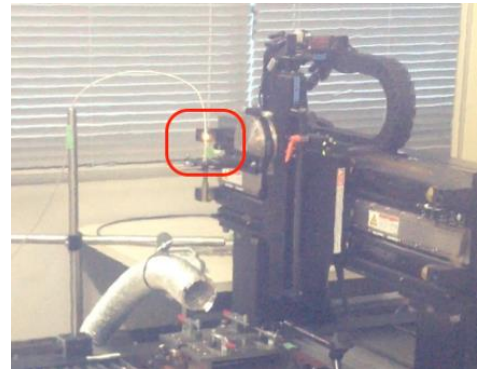


図 1.2.2 クラッド伝搬除去実験

<成果7>

内部を分析するとガラスキャピラリーがあった付近が激しく壊れていることが分かった。組み立てをクラス 1000 のクリーンルームで行なったが、作業中に顕微鏡で確認するとわずかだが埃がガラスキャピラリーの穴に巻き込んでいるものがあった。何度か再トライしたがこれは取りきれなかったので実験に供した。これが原因である可能性もあり、今後組み立てには細心の注意を払う必要があることが分かった。

二つ目は、ファイバフューズと呼ばれる現象である。これはハイパワーで光ファイバを扱うエンジニア全てが知っている注意すべき有名な現象である。この現象は 1 W 程度でも故意に発生させることができる。伝搬する光のパワーにも依存するが 500 W 程度では毎秒 500 mm のスピードで発生点から光源に向かってコアが破壊されていく。我々の方針として、ファイバフューズが起きたら途中で光ファイバを折ってでも止めるという設計思想である。ファイバフューズ防御装置の構成を図 1.2.3 に示す。制御は安価な Arduino を用いた。動作原理は、ファイバフューズが非常に強烈な光を発しながら導火线に火をつけたように光源に向かって光ファイバが破壊されていく。そのため、この強烈な光をフォトダイオードで監視して、一定の光が検出されたらソレノイドを動かして、光ファイバを断線させるという単純な機構である。光ファイバを融着した部分から若干光源側の位置にフォトダイオードを配置することで、順方向の光と逆進方向の光を区別している。ソレノイドの先端にはカッターをつけている。光ファイバをボビンに巻きつけて曲げのテン

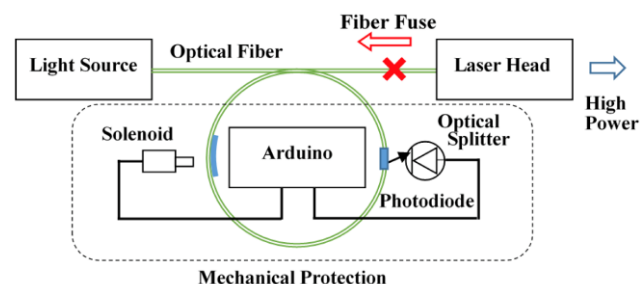


図 1.2.3 ファイバフューズ防御装置の概略構成

ションをかけてあるため、カッターが光ファイバにわずかに触れただけで劈開破断させることができる。フォトダイオード検出を Arduino が判定して、ソレノイドを可動させる信号を送る時間が、ファイバフューズの速度から逆算した光ファイバ長を満たすことで達成できる。

測定のプロフローチャートを図 1.2.4 に示す。閃光が走るためフォトダイオードは可視光に感度があるものを用いた。光源として He-Ne レーザの波長を用いた。出力の違いの影響もあると考えて 0.5mW と 2mW でそれぞれ 10 回繰り返し実験を行なった。結果を図 1.2.5 に示す。最悪でも 2 秒はかからなかった。よって、安全を考えて動作までに 4 秒かかるとして、毎秒 500 mm のスピードから光ファイバの長さを 2m 以上とした。直径 100 mm のボビンに 6 巻程度で収納できる。

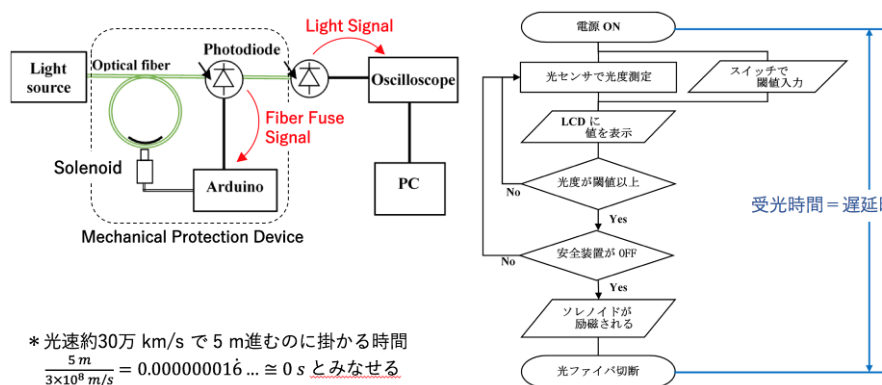


図 1.2.4 ファイバフューズ防御装置のフロー

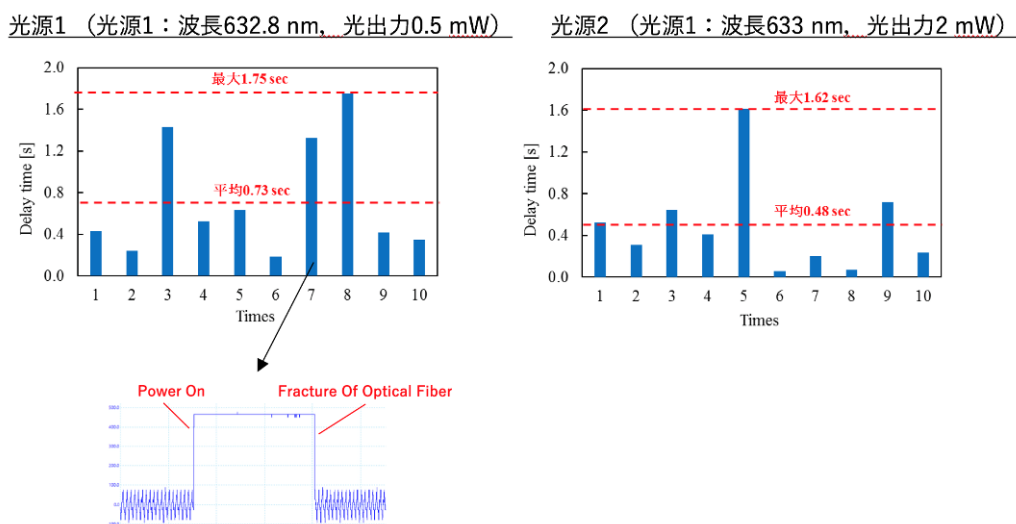


図 1.2.5 検出から切断までの遅延時間の測定

開発の柔軟性と拡張性を考えて Arduino を用いた単純な回路を製作した (図 1.2.6.参照)。複数個試作したが、電子回路のトラブルは一度もない。12V5A の AC アダプタを用いて

Arduino とソレノイドの駆動電源としている。

搬送中にソレノイドが動いて、光ファイバを切断しないように誤動作対策を講じてある。最終的に筐体は 3D プリンタを用いて製作した（図 1.2.7 参照）。3D プリンタの加工精度が悪くソレノイドなど組み付け調整をする必要はある。

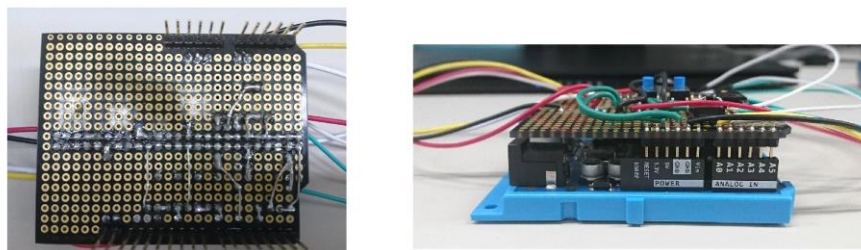


図 1.2.6 製作したファイバフューズ防御回路

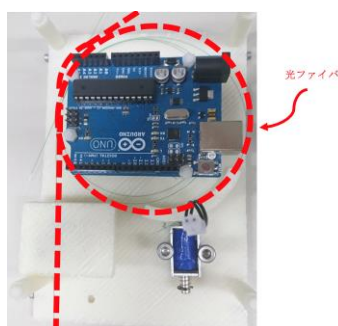


図 1.2.7 ファイバフューズ防御装置の内部構造

<成果8>

ファイバカッタに関しては約2mの余丁を持たせることでファイバフューズの停止効果が得られることが実験により証明された。

2-1-3 ファイバレーザ溶接装置の開発

本研究開発にて開発したファイバレーザ溶接装置は、2-1-1 及び 2-1-2 で開発したレーザ照射ヘッドとクラッド伝搬光除去装置の一部であるファイバカッタを搭載し、連続運転を可能にするためのワーク供給機能、溶接サンプル取り出し専用のワーク用扉及びメンテナンス扉を装備、各扉には安全性クラス 1 により安全装置を取りつけた。また、内部にCCDカメラを搭載し溶接加工時の状態を監視できるモニター機能も搭載した。図 1.3.1 に完成したファイバレーザ溶接装置の外観写真を示す。



ワーク用扉

メンテナンス扉

図 1.3.1 ファイバレーザ溶接装置外観

ファイバレーザ溶接装置の動作評価及び溶接の評価をしていく中で、主に圧力センサ形状の誤差が起因となる溶接個所のZ軸方向ばらつきが溶接品質に影響することが判明、対策としてCCDカメラを使用した画像認識によるレーザ出射ユニットのZ軸自動調整機能を追加することとし、改造工事を実施した。結果、溶接品質が安定することを確認した。

2-2 高耐圧の圧力センサの開発

2-2-1 各種溶接実験

開発したファイバレーザ溶接装置を使用し、レーザ照射ヘッドの焦点距離、レーザ溶接スピード、レーザパワーの3点をパラメータに、SUS316L材で深層シーム溶接への影響を調査した。図 2.1.1 に焦点距離、溶接スピード、レーザパワーの各パラメータと溶接ビート距離の調査結果を示す。

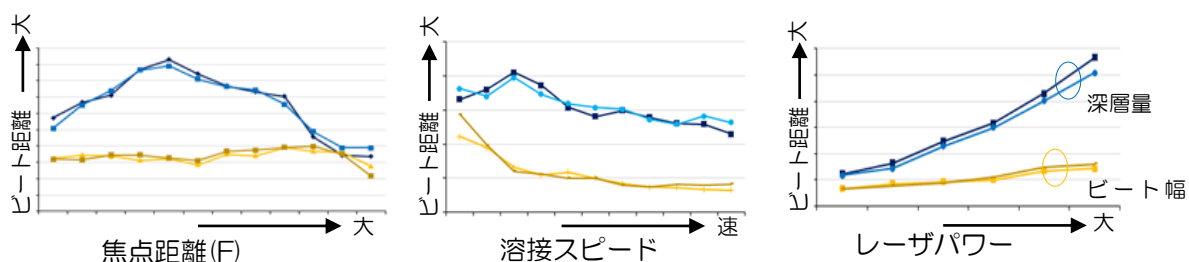


図 2.1.1 各パラメータと溶接ビート距離 調査結果

レーザ照射ヘッドの焦点距離、溶接スピードを最適値に設定することにより、レーザパワーで深層シーム溶接量のコントロールが可能であることを確認した。

溶接強度の評価として、SUS316L 材を溶接し、引張試験を実施した。引張試験片は、JIS Z2201 の 14A 号試験片とし、丸棒無垢材（溶接なし）と溶接品としてレーザパワーの低い値と最適な値の二種類（焦点距離と溶接スピードは最適値に設定）を用意し比較評価した。図 2.1.2.に引張試験後の破断部を、図 2.1.3 に引張試験結果を示す。

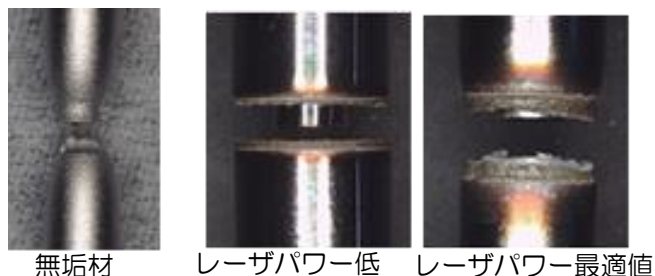


図 2.1.2 引張試験後の破断部

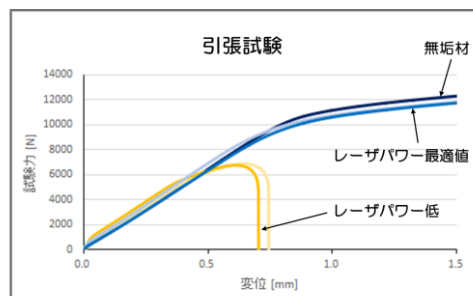


図 2.1.3 引張試験結果

結果は、レーザパワー最適値での溶接品と無垢材の強度がほぼ同じ値が得られた。これは、溶接部分の破断ではなく、材料そのものの破断であり、溶接部はそれ以上の強度が得られたと言える。

溶接部位断面の溶接溶け込み量調査結果を図 2.1.4 に示す。ビード幅に対して溶け込み深さが約 3 倍強となっており、この結果からも、高い強度が得られたことが解る。

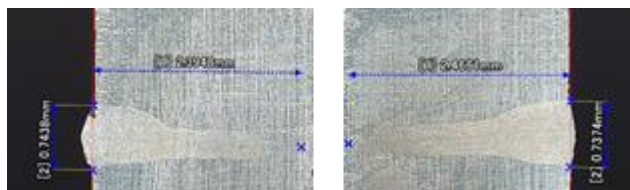


図 2.1.4 溶接溶け込み量

また、E B 溶接と開発したファイバレーザ溶接装置による溶接の引張試験についても比較を行った。その結果を図 2.1.5 に示す。引張試験力のピーク値は、E B 溶接とほぼ同じ結果が得られており、開発したファイバレーザ溶接装置は、E B 溶接と同等の溶接性能を持つことが確認できた。

更に、気密性試験としてヘリウムリーク試験をリーク度 $1 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ で実施し、気密性に問題ないことも確認した。

外観上、溶接表面に溶接焼けが発生することを確認した。対策として、アシストガス

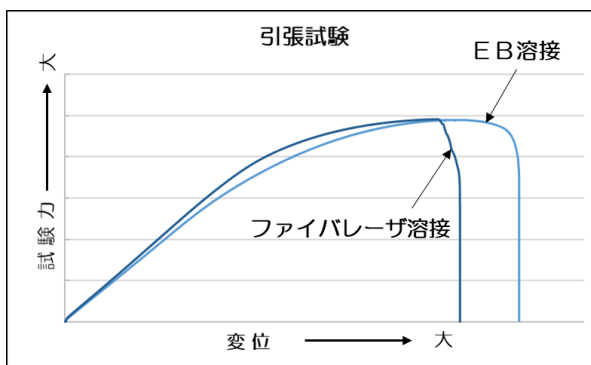


図 2.1.5 E B 溶接とファイバレーザ溶接の引張試験結果

（窒素及びアルゴン）を使用して溶接部に吐出する方法を検討したが、吐出量、時間、位置などの最適条件を見出すまで至っていない。しかし、本研究の圧力センサに於いては、溶接仕様上で問題はなく、外観上だけの問題であり、実際にはケースの内部に入り露出することはないため、圧力センサ用途の溶接としては問題ないと判断した。今後の事業展開で想定される、溶接部が露出する製品やファイバレーザ溶接装置本体の販売などでは溶接焼けが問題になる可能性があり、その対策は今後の課題である。

2-2-2 圧力センサの開発

①圧力センサの原理

最初に一般的な圧力センサの動作原理について説明する。圧力センサは一般的に、圧力を加えると変形する起歪体となる金属のダイヤフラム上に 4 つのゲージ抵抗膜を配置してブリッジ回路を構成した素子である。この素子に圧力が印加されると、起歪体が変形しゲージ抵抗膜も同率で変形、その電気的抵抗値が変化することでブリッジバランスが崩れ、圧力に比例した電気信号として出力される。

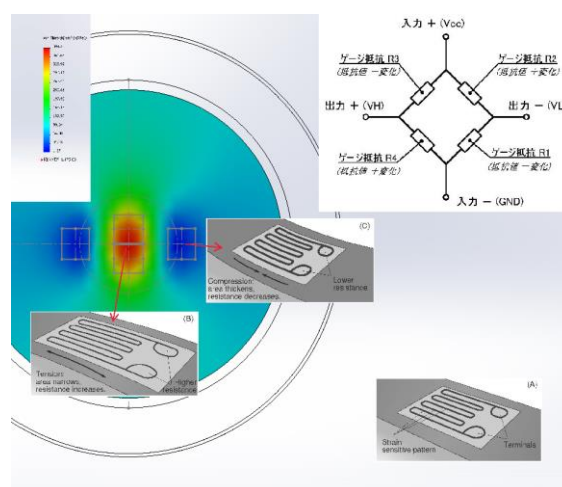


図 2.2.1 FEM解析結果と動作原理

図 2.2.1 に圧力を印加した時の素子の FEM（Finite Element Method = 有限要素法）解析結果と動作原理を示す。

②材料の選定

本研究でのファイバレーザ溶接による高圧圧力センサの開発は、油圧機器などの一般用途用と水素ステーションなどの水素用途用の 2 種類について行った。

高圧圧力センサの構造設計を行う上でまずは起歪体用および圧力センサを使用する相手側に取り付ける部分となる継手用の材料をいくつか検討し選定した。一般用途用には、耐食性を考慮しステンレスを検討、その中でも耐力の高い析出硬化系の SUS630-H900、固溶化熱処理の SUS630-S を、継手用材料として SUS304 を選定した。水素用途用には、耐水素脆性を考慮した材料を使用する必要がある、且つ、水素充填設備等に適用される技術基準(高圧ガス保安法)にも対応する必要があることから、オーステナイト系ステンレス

SUS316L を起歪体および継手用を選定した。

これら材料の機械的性質を見極めるため引張り試験片を作製し、引張試験を実施、材料強度を比較した。引張試験結果を図 2.2.2 に示す。尚、試験片は JIS Z2201 の 14A 号試験片(比例試験片)を参考にし、試験片の径を起歪体の外径とした。

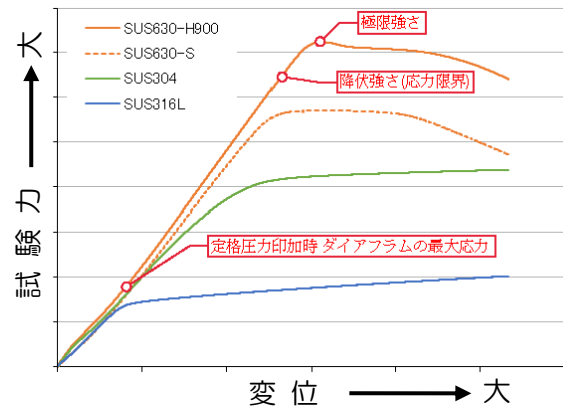


図 2.2.2 各材料の引張試験結果

引張試験および材料の特性から考察すると、全ての材料で JIS G4303 に規定されているステンレス鋼棒の機械的性質を満たしているが、SUS630-H900 と SUS630-S および SUS316L では強度に明確な差が生じ、材料特性も大きく異なる。SUS630-H900 は、高硬度且つ高強度だが靱性は乏しく、耐食性はやや劣る。SUS316L は、強度は低いが靱性があり、耐食性はステンレスの中で最も優れており、水素脆化にも優れた耐性を持つ。

③設計

上記結果より安全率を設け、定格圧力印加時ダイヤフラムの最大応力点にて FEM 解析による線形静解析で強度設計を行った。また、溶接部の強度も考慮し、溶接の拘束条件と荷重（圧力）の方向も考慮しつつ FEM 解析で形状を最適化、更に静解析を基に疲労解析も行い、繰り返し荷重（定格圧力を 10^7 回）による疲労破壊も考慮して高耐圧形状の素子を設計した。

設計の結果、一般用途用としては、起歪体に SUS630-H900、継手用に SUS304 を使用し、圧力 100MPa 品と 140MPa 品を設計、アンプ（ASIC）で増幅することを前提に印加圧力に対する検出感度を十分確保、且つ静耐圧、疲労破壊とも必要十分な強度を確保できる設計ができた。同材料にて 160MPa 品も設計したが、溶接固定周辺部に過大な応力が発生し、静耐圧に於いては強度を確保できたが、疲労破壊の強度が確保できないことが判明、更に高強度の材料を使用することが必要と判断、材料の選定を今後の課題とした。

水素用途用は、SUS316L を起歪体に設計を進めたが、定格圧力印加時に発生する応力を 100N/mm^2 程度まで落とす必要があり、印加圧力に対する感度が大きく減少することが判明した。そのため、材料の再検討を行ったところ、高圧水素環境下で使用できる溶接可能な高強度材として、HRX19 や AUS316L-H2 (JIS G4318 高強度仕様) 等の高圧ガス保

安法一般測第七条の三適用若しくは準拠の材料で高強度仕様品を使用することで、定格圧力印加時に発生する応力を 200N/mm^2 程度まで引き上げることができ、感度の低下を最小限に抑え、より高耐圧品を狙うことができることが判明した。しかし、このような材料は、現状、特殊用途のため受注生産となっており極一部の業者間でしか流通しておらず、本研究のように試作レベルの目的、数量では入手できない状況にある。そこで、強度仕様は劣るが比較的容易に入手が可能な AUS316L (JIS G4303 一般強度仕様) にて再設計を行った。材料の特性を考慮し、35MPa 品の設計を行ったが、起歪体形状を一般用途の 140MPa 品 (SUS630-H900) と同じ設計としたため、材料特性の違いから感度が低下する結果となった。その対策として、本研究とは別に開発中の高感度ゲージ膜を試用することとした。一般的な金属薄膜ゲージはゲージ率 2 倍程度に対し、高感度ゲージ膜はゲージ率 3 倍以上ある。尚、HRX19 や AUS316L-H2 (JIS G4318 高強度仕様) 等の高強度材を使用し、同様の設計を行うと、70MPa までの圧力センサが作製可能と推測している。

④試作・評価

試作内容を図 2.2.3 に示す。試作した圧力センサの外観写真を図 2.2.4 に示す。(3 種類の試作高圧圧力センサは同一形状。)

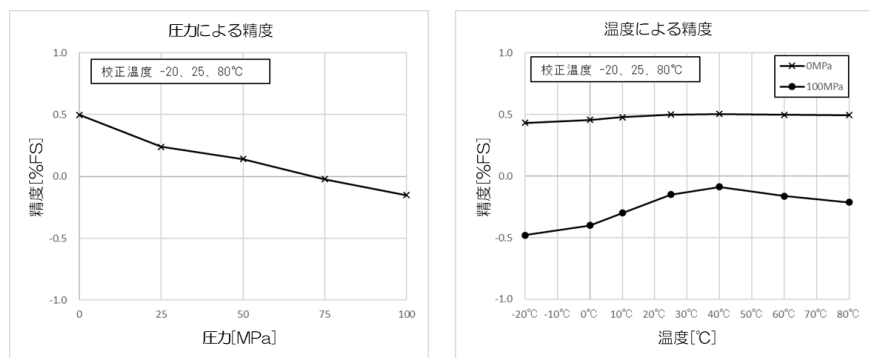
用途	圧力[MPa]	起歪体材料	継手材料
一般用	100	SUS630-H900	SUS304
	140		
水素用	35	AUS316L	AUS316L

図 2.2.3 高圧圧力センサ試作内容



図 2.2.4 試作高圧圧力センサ外観

一般用途用 100MPa 試作圧力センサの測定結果を図 2.2.5 に、同じく特性表を図 2.2.6 に示す。水素用途用 35MPa 試作圧力センサの測定結果を図 2.2.7 に、同じく特性表を図 2.2.8 に示す。尚、一般用途用 140MPa 試作圧力センサの測定結果は 100MPa 試作圧力センサの測定結果とほぼ同じであったため割愛する。

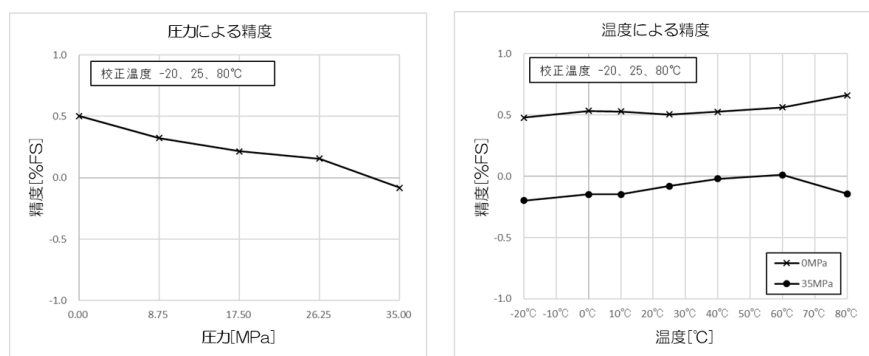


圧力-出力特性 圧力-温度特性

図 2.2.5 100MPa 試作圧力センサ測定結果

項目	目標	測定値
精度	$\pm 1.0\text{FS}$	$-0.48 \sim +0.51\% \text{FS}$
ヒステリシス	0.3%FS以下	0.05%FS

図 2.2.6 一般用途用 100MP 試作圧力センサ特性表



圧力-出力特性 圧力-温度特性

図 2.2.7 35MPa 試作圧力センサ測定結果

項目	目標	測定値
精度	$\pm 1.0\text{FS}$	$-0.198 \sim +0.66\% \text{FS}$
ヒステリシス	0.3%FS以下	0.02%FS

図 2.2.8 水素用途用 35MPa 試作圧力センサ特性表

今回試作した全種類について、精度及びヒステリシスは弊社従来品と同じ目標規格に対し、満足するものであった。しかし、既存の市販されている水素用途用の圧力センサの精度は、23℃に於いて $\pm 0.25\% \text{FS}$ となっており、現状試作品は $\pm 0.5\% \text{FS}$ と精度に課題が残る。一般用途用であれば、高圧圧力センサとして実用域にあるが、まだ精度にばらつきがあり、製品化に向けて原因調査及び対策を今後も継続して行う。

第3章 全体総括

3-1 研究開発成果まとめ

ファイバレーザ溶接装置用にレーザ照射ヘッドの開発を完了、焦点距離と溶接スピードの最適化を図り、レーザパワーで深層シーム溶接量をコントロールすることができ、連続2時間連続運転が可能となっている。

ファイバレーザ溶接装置は、開発したレーザ照射ヘッドを搭載、連続自動運転が可能なワークを装備、Z軸方向の位置ずれにも対応するよう画像認識によるレーザ照射ヘッドのZ軸自動調整機能も付加、安定した溶接品質を確保した。溶接性能は、EB溶接と同等の溶接強度が得られたことを確認、これによりEB溶接の課題となっていた真空チャンバーを必要とせず、装置本体のコスト、ランニングコスト、生産性の全てにおいて、ファイバレーザ溶接が優位となり、圧力センサ市場でコストメリットを武器に競争力のある製品作りが可能となった。

高圧圧力センサの開発は、一般用途用として100MPa品と140MPa品の2種類、水素用途用として35MPa品の1種類を設計、試作を行った。3種類とも弊社従来品と同規格では実用域にあるが、精度のばらつき改善、水素用途用のさらなる精度向上の課題が見えた。

本研究の成果として、完成したファイバレーザ溶接装置及び高圧圧力センサの設計・試作で得られた高強度材料、耐水素脆性材料の知見により、高圧圧力センサ開発のベースを構築することができた。これまで弊社圧力センサの製品ラインナップが50MPaまでだったが、製品ラインナップの拡充、客先要求への迅速な対応が可能となった。

3-2 研究開発後の課題

レーザ照射ヘッドのインテリジェント化については、試作実験を行っているが、画像によるXYZの細かな制御まではできていない。このインテリジェント化の目的は、圧力センサ以外の複雑な形状をした対象物に安定した溶接品質を提供するもので、今後の事業展開を見据えながら、継続して開発を進める。

クラッド伝搬光除去方法については、まだ確立できていない。これまでも実験から課題が見えてきており、継続して開発を行う。また、ファイバフューズ現象から高価なレーザユニットを守るため、ファイバカッタを開発、実験レベルでは効果を確認できているが、実際にファイバレーザ溶接機にて搭載した状態での動作評価を行うには、破壊を伴う試験になる可能性があり、敢えて実施していない。安全装置としてファイバレーザ溶接機に搭載し継続

して評価方法を検討していく。

外観上の課題として溶接焼けが発生する現象がある。今後想定される圧力センサ以外の外観品質を求める用途の製品やファイバレーザ溶接装置本体の販売に向け、アシストガスの最適吐出条件の検討を継続して行う。

水素用途用高圧圧力センサ用に必要な高強度且つ耐水素脆性材料の入手ができないことが最大の課題となっている。このような材料は、現状、特殊用途のため受注生産となっており極一部の業者間でしか流通しておらず、試作サンプルレベルでの目的、数量では事実上入手が困難な状況にある。しかし、ファイバレーザ溶接で高強度の溶接が可能となったことから、コストメリットを武器に水素関連企業へのブレイクスルーを図り、材料入手、試作サンプル提案を行っていく。併せて、圧力検出精度の向上、精度ばらつき低減についても原因調査、対策を継続して行う。

3-3 事業化展開について

E Bレーザ溶接と比較し、ファイバレーザ溶接は同じ溶接品質を確保しながら、コストメリットを出すことができ、市場競争力の源泉となる。まずは圧力センサの商品の幅を広げることで、油圧機器など一般用途用の既存市場でのシェアを高めていく。

また、水素ステーションや水素運搬、保管用タンクなどの水素関連の市場は、2020年以降から徐々に立ち上がると想定されるため、水素関連企業への提案をベースに参入を図っていく。

ファイバレーザ溶接装置単体、レーザ照射ヘッドの販売も視野に入れるが、溶接対象物によりカスタマイズが必要となることが予想され、まずはカタログ化し、客先ニーズを確認しながら拡販を目指す。