

平成 25 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「リチウムイオン電池の高効率・製造コスト削減を実現する

超々高速・高品質リモートレーザ溶接ヘッドの開発」

研究開発成果等報告書

平成 26 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 国立大学法人 大阪大学 接合科学研究所

目次

第1章 研究開発の概要	3
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2 研究体制	5
1-2-1 研究組織	5
1-2-2 管理体制	5
1-2-3 研究者氏名	6
1-2-4 協力者（アドバイザー）	6
1-3 成果概要	7
1-3-1 理想レーザビームレンズユニットの開発	7
1-3-2 焦点光軸方向超高速移動機構	7
1-3-3 その場画像認識による全数検査システム	8
1-3-4 リモートレーザ溶接ヘッドの試作開発と実証実験	8
1-4 当該研究開発の連絡窓口	9
第2章 本論	10
2-1 理想レーザビームレンズユニットの開発	10
2-2 焦点光軸方向超高速移動機構の開発	12
2-3 その場画像認識による全数検査システムの開発	14
2-4 リモートレーザ溶接ヘッドの試作開発と実証実験	16
最終章 全体総括	19

第1章 研究開発の概要

平成23年度から25年度にかけて実施した本研究開発では、従来式のリチウムイオン電池のレーザ溶接技術に対し、高効率工法で製造コストを大幅に削減し、且つ、高速・高品質の溶接が行えるリモートレーザ溶接ヘッドの試作開発を行った。試作開発したリモートレーザ溶接ヘッドは、電気自動車・ハイブリッドカー等の次世代自動車や、再生可能エネルギーや夜間電力を貯める蓄エネルギーユニットに使用される中・大型のリチウムイオン電池を用途対象とし、それらの重要な製造工程である筐体密閉溶接において、製造コストの削減、溶接品質の向上及び評価技術の向上をもたらす。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

本研究開発は、再委託先である有限会社 牛方商会在「中小企業のものづくり基盤技術の高度化に冠する法律第4条第1項」の規定に基づき、特定研究開発等計画としても認定(特定研究開発等計画認定番号:関東 11061277)を受けている。特定ものづくり基盤技術の種類としては、「(十七)溶接に係る技術」が該当し、想定している主な川下産業分野に自動車が挙げられる。

リチウムイオン電池は経済産業省の蓄電池戦略(2012年)においても重要な位置づけにあり、蓄電池産業の約45%を占めている。本研究開発を開始した時点では小型から大型までのリチウムイオン電池の世界市場は、2015年に約3兆円が見込まれていた。この予測は若干の遅れがあるものの堅調に成長しており、2020年に約4.4兆円の見通しとなっている。

しかしながら、蓄電池産業における日本企業の世界シェアは韓国・中国勢の進出により低下の傾向にある。リチウムイオン電池の場合、携帯電話・ノートパソコン・デジタルカメラ等に使用される小型のものの日本シェアは低下しているが、電気自動車・ハイブリッドカー等の次世代自動車に搭載される中・大型のものは現時点では日本メーカーが世界市場を牽引している。これは、中・大型のリチウムイオン電池の場合、要求される技術水準が小型のものよりも高く、日本のものづくりによる技術力が優勢に立っているからと考えられる。

何れにせよ、今後、中・大型のリチウムイオン電池においても小型のものと同様にグローバル競争化が加速することは容易に想像でき、日本メーカーが勝ち残るためには、製造コストの削減が必須の課題と言える。「溶接に係る技術において達成すべき高度化目標」の「(1)自動車に関する事項」の「①川下製造業者の抱える課題及びニーズ」の「エ. 製造コスト削減及び短納期化」に該当する。

上記の背景を受け、本研究開発ではリチウムイオン電池の重要な製造工程である筐体密閉溶接に着目した。リチウムイオン電池の筐体には幾つかの形状と材料があるが、効率的なスペース配置と軽量化を実現するために、角形で薄肉化されたアルミニウム合金を用いたものが主流の一つである。しかしながら、アルミニウム合金はレーザ光の反射率が高く熱拡散し易い難加工材であるため、従来のレーザ溶接技術では今後要求される溶接品質と信頼性に対して不十分な状況にある。「溶接に係る技術において達成すべき高度化目標」の「(1)自動車に関する事項」の「①川下製造業者等の抱える課題及びニーズ」の「ウ. 溶接品質及び信頼性の向上」に該当する。

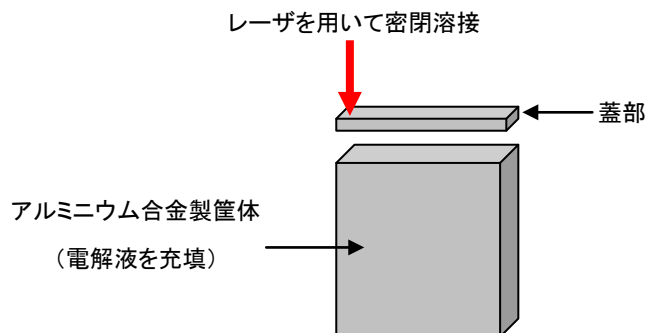


図 1 リチウムイオン電池の筐体密閉溶接

本研究開発では、上述の「① 川下製造業者等の抱える課題及びニーズ」の「エ. 製造コスト削減及び短納期化」及び「ウ. 溶接品質及び信頼性の向上」を背景に、平成 23 年度から 25 年度にかけて下表に掲げる「② 高度化目標」に対応する実施内容に取り組んだ。

溶接に係る技術において達成すべき高度化目標 (1) 自動車に関する事項 ② 高度化目標	実施内容	実施年度
イ. 難接合材の溶接技術の向上	理想レーザービームレンズ ユニットの開発	平成 23 年度
	焦点光軸方向超高速移動機構 の開発	平成 23～24 年度
オ. 製造プロセスにおける品質保証検査技術 の高度化	その場画像認識による 全数検査システムの開発	平成 24 年度
エ. 溶接加工品質安定化のための溶接条件等 の最適化及び溶接工程の高度化	リモートレーザー溶接ヘッドの 試作開発と実証実験	平成 24～25 年度

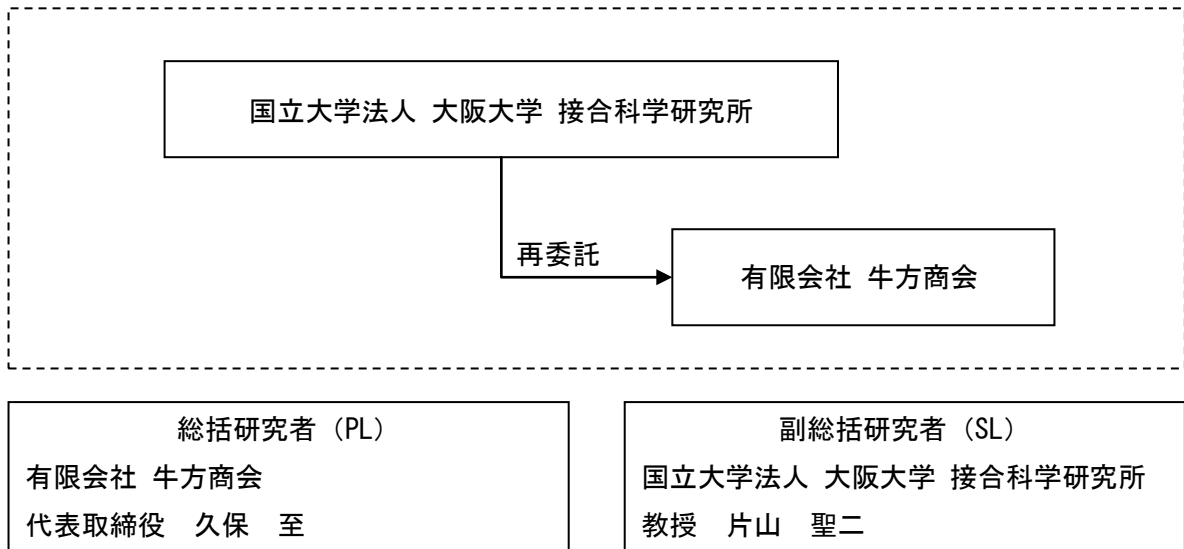
表 1 本研究開発の高度化目標と実施内容

また、各実施内容には以下の具体的目標を掲げて実施した。

- 「理想レーザービームレンズユニット」により、単焦点の加工光学（レンズ）系に対して 3 倍の焦点深度を実現する。
- 「焦点光軸方向超高速移動機構」を最大 1,000 m/分で駆動し、溶込み深さを倍化する。
- 「その場画像認識による全数検査システム」により、リアルタイムで溶接結果の良否判定を行える画像認識装置を開発する。
- 最大スキャン速度 80 m/分の「リモートレーザー溶接ヘッド」を試作開発する。

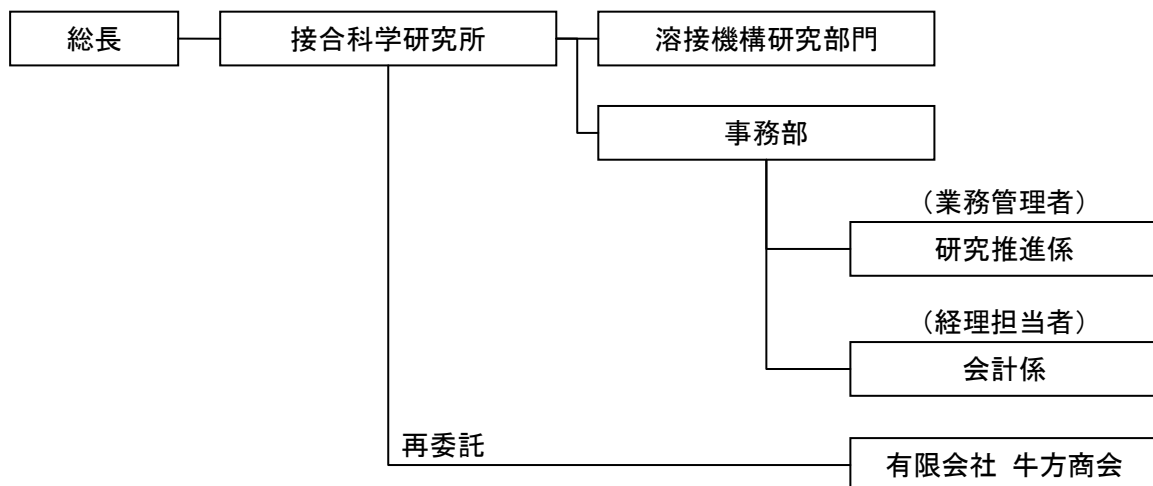
1-2 研究体制

1-2-1 研究組織

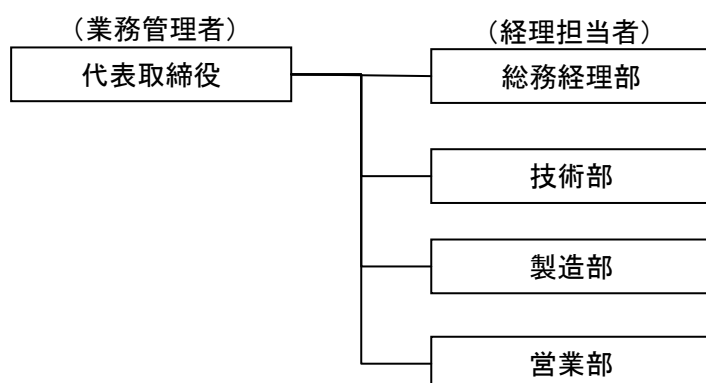


1-2-2 管理体制

① 事業管理機関（国立大学法人 大阪大学 接合科学研究所）



② 再委託先（有限会社 牛方商会）



1-2-3 研究者氏名

① 事業管理機関（国立大学法人 大阪大学 接合科学研究所）

氏名	所属・役職
片山 聖二	レーザ接合機構学部門・教授
川人 洋介	レーザ溶接機構学部門・准教授
李 修眞	レーザ溶接機構学部門

② 再委託先（有限会社 牛方商会）

氏 名	所属・役職
久保 至	代表取締役
大川 剛史	技術部顧問
根本 裕	技術部長
榊原 実	製造部長
佐々木 弘	営業部長
片柳 裕	社員

1-2-4 協力者（アドバイザー）

氏 名	所属・役職
近藤 正嗣	パナソニック株式会社 客員 (元 松下電池工業 株式会社 代表取締役社長)
高田 寿之	株式会社ナ・デックス 執行役員
石井 勝巳	株式会社オフィールジャパン 取締役営業部長

1-3 成果概要

本研究開発では、平成 23 年度から 24 年度にかけて「理想レーザビームレンズユニットの開発」、「焦点光軸方向超高速移動機構の開発」及び「その場画像認識による全数検査システムの開発」にて要素技術を開発した。平成 25 年度には、これらの要素技術を組込んだ「リモートレーザ溶接ヘッドの試作開発」を行い、各種サンプルを用いた「実証実験」を行った。

1-3-1 理想レーザビームレンズユニットの開発

従来の単焦点の加工光学（レンズ）系では、焦点深度が浅いため深い溶込み深さを得難い。そこで、穴加工を施した異なる焦点距離（曲率）を持つ石英ガラス製平凸レンズを組み合わせ、それぞれのレンズが別の位置で焦点を結ぶことで長焦点深度化する「理想レーザビームレンズユニット」の開発を行った。この結果、単焦点の加工光学（レンズ）系に対して 3 倍の焦点深度を達成した。

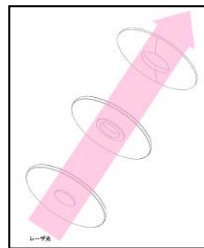


図 2 理想レーザビームレンズユニット

1-3-2 焦点光軸方向超高速移動機構

「焦点光軸方向超高速移動機構」では、 piezo 圧電素子を用いてレンズそのものを光軸方向に高繰返しで駆動させ、対で使用する集光レンズとの結像比を上げることで、擬似的に焦点深度を深くすることを試みた。目標とする駆動速度 1,000 m/分（周波数 1.3 kHz 相当）を達成し、溶込み深さが良化することが分かった。

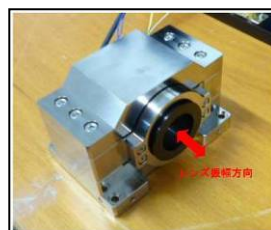


図 3 焦点光軸方向超高速移動機構

しかしながら piezo 圧電素子を用いた機構の場合、溶込み深さの倍化には至らなかったため、カム機構を用いて試料自体を上下駆動させてみたところ、明らかな溶込み深さに対する効果が認められた。

1-3-3 その場画像認識による全数検査システム

「その場画像認識による全数検査システム」では、溶接中の溶融池の形状を鮮明にリアルタイムで可視化し、その形状で溶接結果の良否判定を全数に行える画像認識装置を開発した。これにより、従来の抜き取りによる目視及び破壊検査による品質保証の負担を軽減し改善できる。

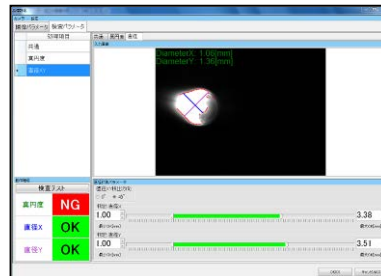


図 4 その場画像認識による全数検査システムの開発

1-3-4 リモートレーザ溶接ヘッドの試作開発と実証実験

「リモートレーザ溶接ヘッドの試作開発」では、上記「理想レーザビームレンズユニット」、「焦点光軸方向超高速移動機構」及び「その場画像認識による全数検査システム」を光学的に最適化し、高剛性の筐体に組込んだ。また、目標値の最大スキャン速度 80 m/分も達成した。

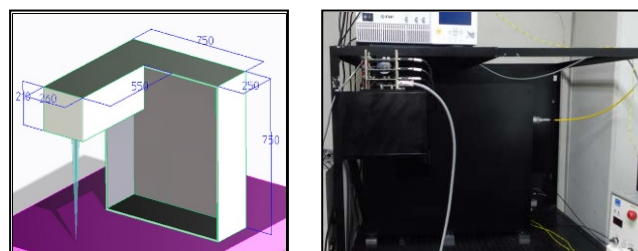


図 5 リモートレーザ溶接ヘッド

「実証実験」にては、アルミニウム合金・チタニウム合金等の各種サンプルに対する実際のレーザ溶接実験や擬似的なりチウムイオン電池の筐体密閉溶接を実施した。



図 6 擬似的な筐体密閉溶接

1-4 当該研究開発の連絡窓口

① 事業管理機関

国立大学法人 大阪大学 接合科学研究所 研究推進係 橋本 薫

〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1

TEL) 06-6879-8657 FAX) 06-6879-8689

E-mail) hashimoto-k@office.osaka-u.ac.jp

② 再委託先

有限会社 牛方商会 営業部 片柳 裕

〒224-0053 神奈川県横浜市都筑区池辺町 4666

TEL) 045-345-0001 FAX) 045-345-0011

E-mail) hkatayanagi@ushikata.co.jp

第2章 本論

本章では、「1-3 成果概要」で述べた各実施内容に関し、より詳細を報告する。

2-1 理想レーザビームレンズユニットの開発

従来の単焦点の加工光学（レンズ）系では、焦点深度が浅いため深い溶込み深さを得難く、また、焦点位置合わせ条件の裕度も狭くなってしまう。この課題に対し、比較的安価に入手可能な合成石英製球面平凸レンズに中空の穴あけ加工を施したレンズ群（中空光学系）を用い深い焦点深度を得ることができる「理想レーザビームレンズユニットの開発」を行った。

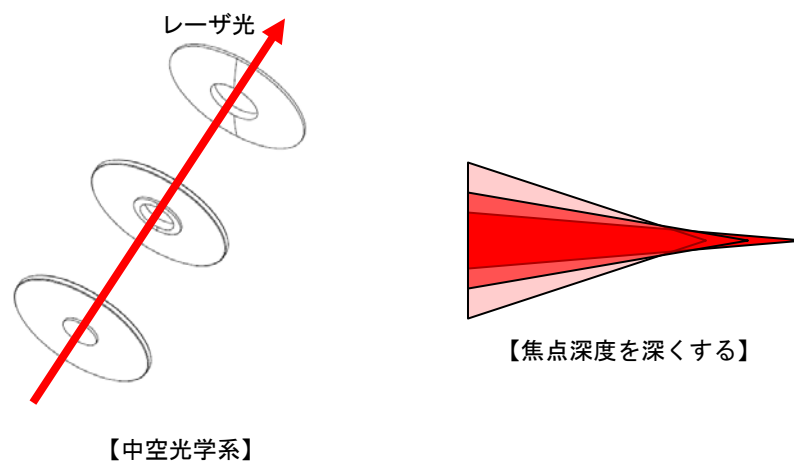


図 7 中空光学系と効果

中空光学系に使用した合成石英製球面平凸レンズは焦点距離 800/700/600 mm の3枚であり、ガラス穴あけ加工機を用いて中空加工を施し、それぞれが部分的な曲率を持つレンズ群として設計を行った。

	Lens 1	Lens 2	Lens 3
直径	100 mm	100 mm	100 mm
レンズ部直径	25 mm	35 mm	100 mm
中空穴径	—	25 mm	35 mm
厚さ	5 mm	5 mm	5 mm
焦点距離	800 mm	700 mm	600 mm
材質	合成石英	合成石英	合成石英
コーティング	1,070 nm AR	1,070 nm AR	1,070 nm AR

表 2 中空光学系仕様

上表中の Lens 1 と Lens 2 は、それぞれ中央のφ25 mm とφ35 mm 部だけに曲率を持たせる必要

があったため、φ100 mm の合成石英製平行円板にオプティカルコンタクトで曲率部を接合した。また、大出力のレーザ光を使用した場合に生じる熱レンズ効果を想定し、中空光学系にはφ50 mm のレーザ光を入射しパワー密度を抑えるものとした。

下図は、ガラス穴あけ加工機とオプティカルコンタクトを用いて実際に作成した中空光学系の各レンズである。



図 8 作成した中空光学系

作成した中空光学系の各レンズを治具に配置し、φ50 mm に平行光化した波長 1,070 nm のファイバーレーザを入射し、ビームプロファイラを等間隔で移動させスポット径を計測することで中空光学系の焦点深度を測定した。

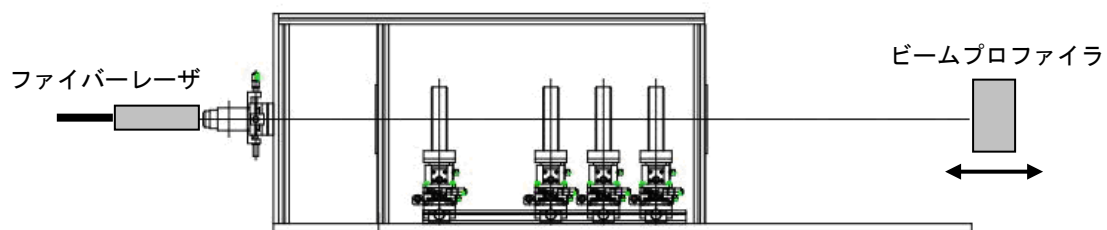
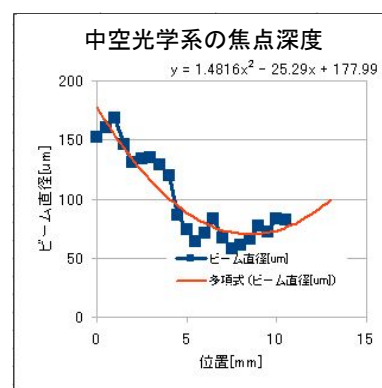


図 9 中空光学系の焦点深度評価構成

この結果、スポット径は 70.1 μm で焦点深度は±4.4 mm となり、中空光学系の焦点深度は目標値である“従来の単焦点の加工光学（レンズ）系が持つ焦点深度（±0.33 mm）の 3 倍以上”を達成することができた。



$$\text{焦点深度} = \pm \frac{\lambda}{2NA^2}$$

(λ:波長 NA:絞り角)

図 10 中空光学系の焦点深度測定結果

2-2 焦点光軸方向超高速移動機構の開発

「焦点光軸方向超高速移動機構」とは、レーザ溶接中のキーホール持続時間中にレンズの焦点位置を高速で上下運動させることで深い溶込み深さを得るものである。

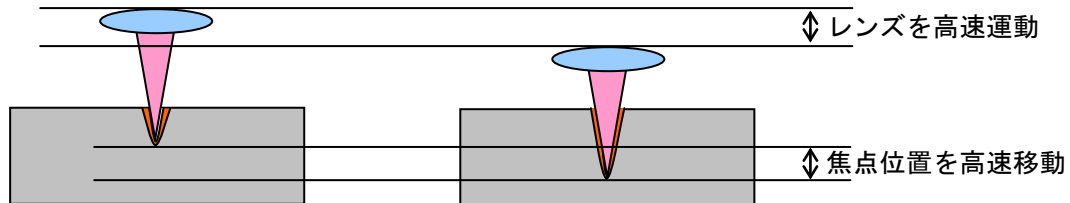


図 11 焦点光軸方向超高速移動機構

レンズを高速移動させる機構への負荷を軽減するために、駆動するレンズと焦点を結ぶレンズの結像倍率を光学的に上げる構成を取った。実際には、結像倍率を 100 倍とし、駆動レンズを 20 μm 移動することで、焦点位置を 2 mm 移動させるものとした。

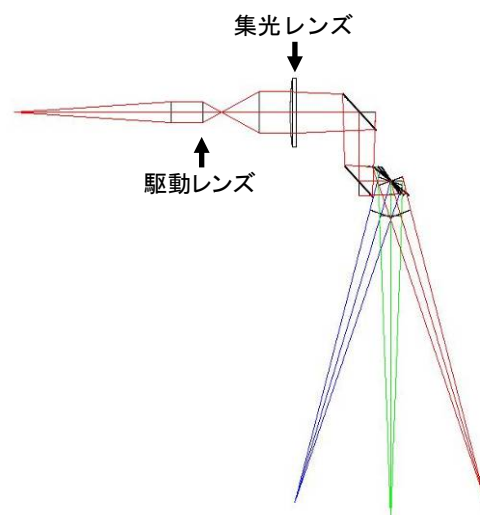


図 12 駆動レンズと集光レンズ

レンズを高速移動させる機構には、 piezo 圧電素子を採用した。piezo 圧電素子は、電圧により伸縮する圧電体を用いた素子であり、高精度に微小な駆動を行うことが可能である。しかしながら、重量が大きくなる程、移動速度に制限が掛かるため、駆動レンズ及びホルダーの軽量化設計を行った。ホルダーをアルミニウム合金製とし、全体重量を 70 g まで軽量化した。piezo 圧電素子の駆動条件を Sin 波駆動として、目標速度である 1000 m/分 で 20 μm の移動を達成する駆動周波数は以下の与式で求められる。

$$v = A \omega = A \cdot 2\pi f \Rightarrow f = \frac{v}{2\pi \cdot A}$$

ここで、 v は Sin 波駆動時の最大速度、 A は駆動振幅 (pp)、 f は駆動周波数であり、1000 m/分で $20\text{ }\mu\text{m}$ を達成するには 1.3 kHz の駆動周波数が必要である。つまり、全体重量 70 g の駆動レンズとホルダーを 1.3 kHz で駆動する必要がある、ピエゾ圧電素子で振動解析を行った結果、当該条件は、限界値である固有振動数に抵触せず、実現可能であることを確認した。

下図は、ピエゾ圧電素子を用いて実際に作成した「焦点光軸方向超高速移動機構」である。



図 13 焦点光軸方向超高速移動機構

「焦点光軸方向超高速移動機構」を用いて実施にレーザ溶接を行ったところ、溶込み深さが良化することが確認できた。下図は、SUS304 (3 mm 厚) に対し $60\text{ }\mu\text{m}$ に集光した 430 W のファイバーレーザ光を 15 ms で照射し、レンズ駆動条件を変えたものである。

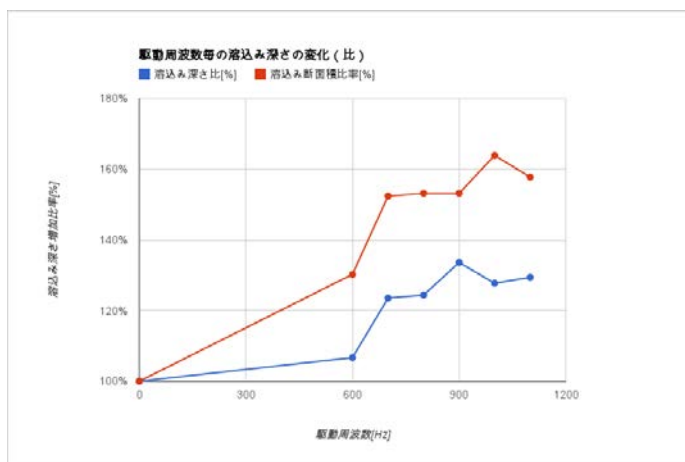
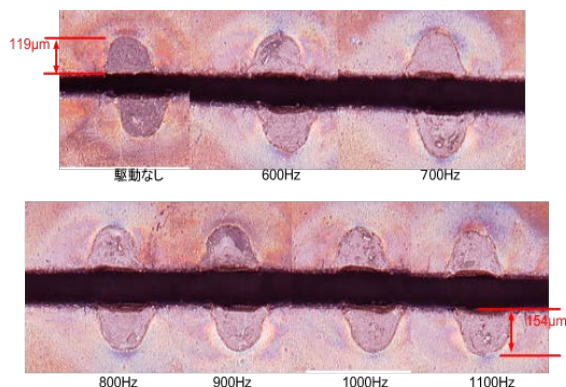


図 14 焦点光軸方向超高速移動機構による溶込み深さ (SUS304)

しかしながら、「焦点光軸方向超高速移動機構」による溶込み深さは、レンズ駆動しないときと比較して最大 1.29 倍 (溶込み断面積としては 1.58 倍) に留まり、目標である溶込み深さの倍化には至らなかった。(但し、「2-4 リモートレーザ溶接ヘッドの試作開発と実証実験」で述べる「振動台機構」により、溶込み深さは良化された。)

2-3 その場画像認識による全数検査システムの開発

従来の検査方式では、リチウムイオン電池筐体をレーザ溶接した後に、抜き取りによる目視及び破壊検査を行っている。「その場画像認識による全数検査システム」では、レーザ溶接中の溶融池の形状をリアルタイムで可視化し、画像認識により溶接状態の良否判定を行うものである。

レーザ溶接中には、プルームと呼ばれる金属蒸気を伴った弱電離プラズマが発生する。このため通常の CCD カメラ等を用いて溶融池を観察することができない。「その場画像認識による全数検査システム」では、波長 940 nm の高出力半導体レーザを照明光源とし、CCD カメラに波長 940 nm のみを透す干渉フィルターを配置することで、プルームから発生する余分な波長をキャンセルし、溶融池を鮮明に可視化することができた。

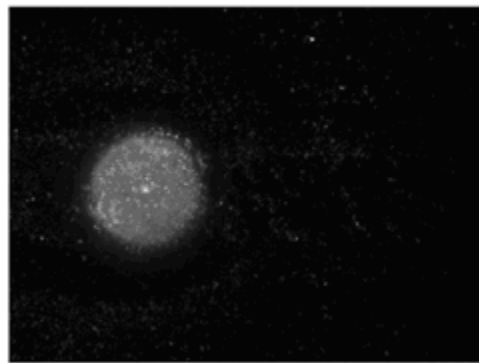


図 15 可視化したキーホールと溶融池

溶接状態が良好な場合、溶融池上面は深円に近い形状となっているため、可視化した溶融池の真円度を溶接状態の判断基準と考えアルゴリズムを作成した。

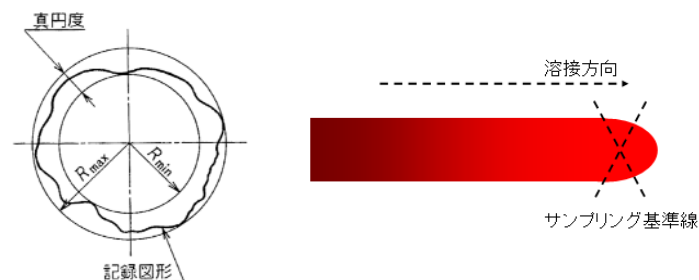


図 16 溶融池の真円度に基づく溶接状態の良否判定

溶融池の中心位置と半径を求め、境界半径の最大 R_{max} と最小 R_{min} を測定し、真円度を計算している。線状に溶接している場合は、溶接方向の先端箇所を移動方向に対し 45° の 2 ヶ所の半径を測定し真円度計算を行った。また、溶融池ではない箇所の金属表面の凸凹から照明光源が散乱光として CCD カメラに届くとノイズとなり正しく溶融池の輪郭が抽出できないため、画像処理にて白黒二値化して白く大きな円を抜き出し溶融池の輪郭抽出を行った。

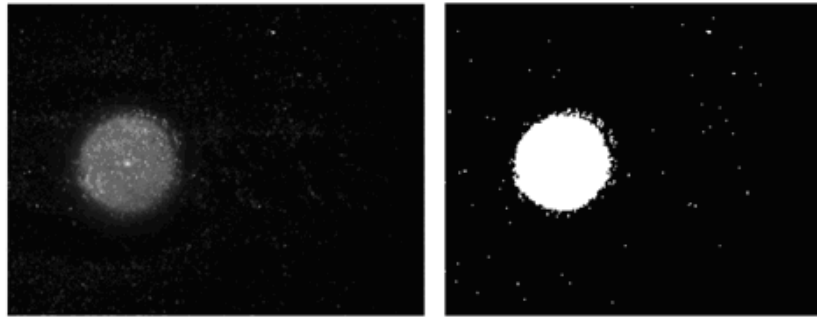


図 17 溶融池の輪郭抽出

上記のアルゴリズムに基づき、実際にレーザ溶接を可視化した状態でリアルタイムに良否判定を行うことができた。

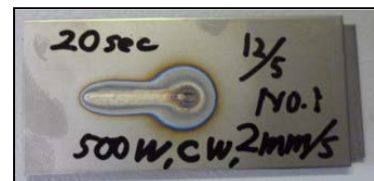
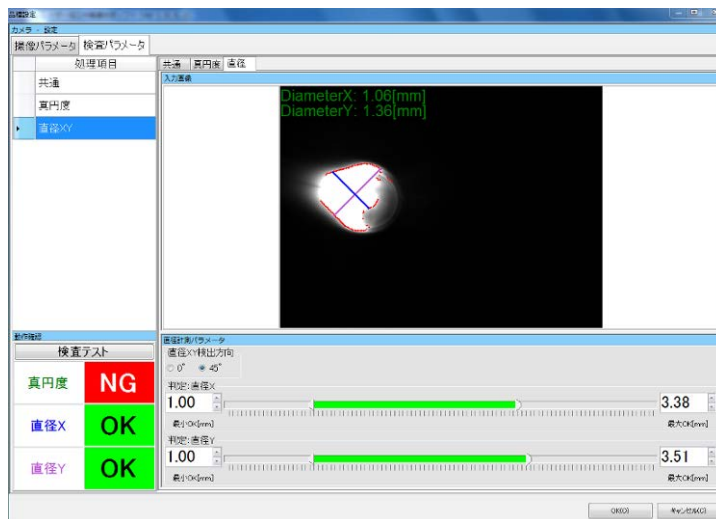


図 18 レーザ溶接の良否判定

2-4 リモートレーザ溶接ヘッドの試作開発と実証実験

「リモートレーザ溶接ヘッドの試作開発」では、「理想レーザビームレンズユニット」、「焦点光軸方向超高速移動機構」及び「その場画像認識による全数検査システム」を要素技術として、小型化のために光学的な最適化を図り、「焦点光軸方向超高速移動機構」からの振動抑制のために高剛性化にも配慮した。

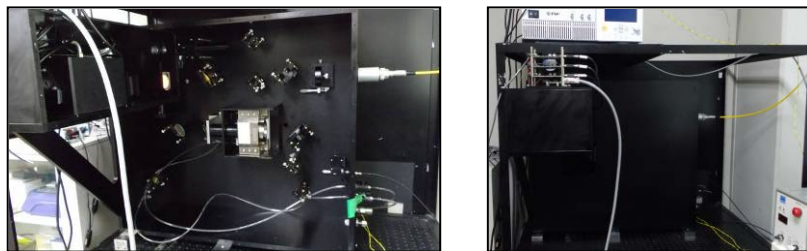
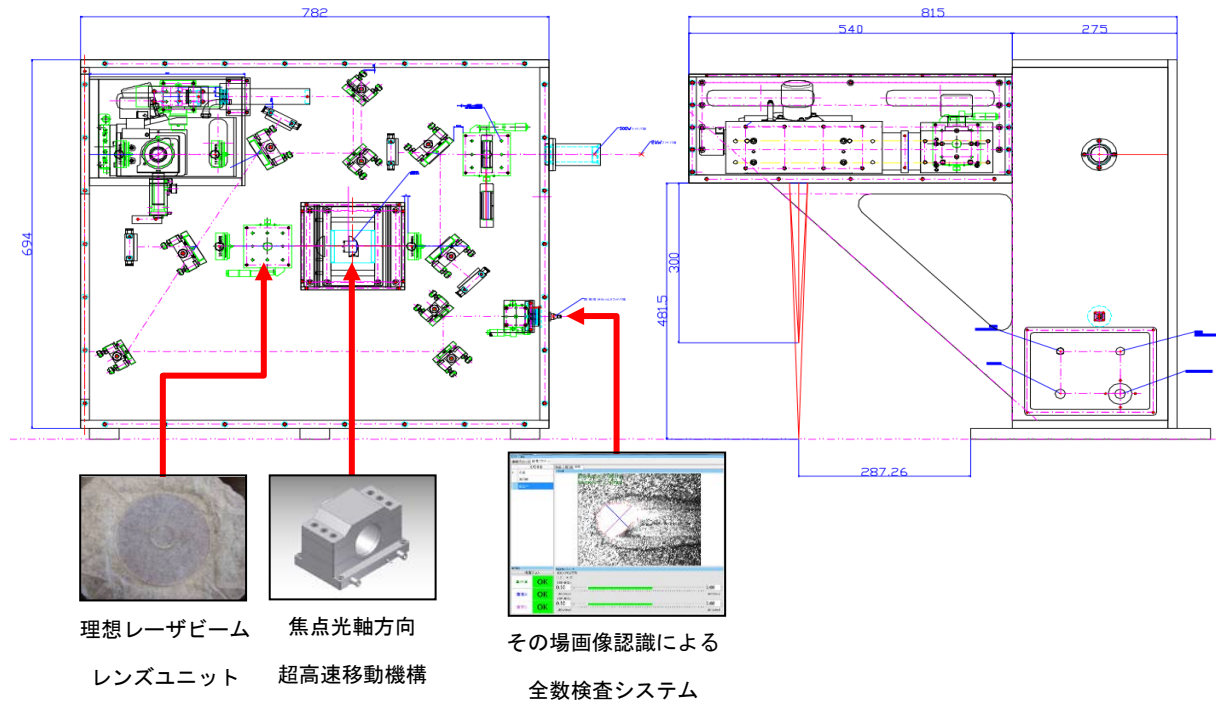


図 19 試作開発したリモートレーザ溶接ヘッド

また、中・大型リチウムイオン電池の筐体密閉溶接部の溶接サイズは 200 mm 角程度必要であることが分かり、画角制約が生じる $f\theta$ レンズを用いずに、Z 軸補正用レンズを駆動させることで、加工面での焦点位置ズレを補正し、広い加工エリアを獲得することができた。

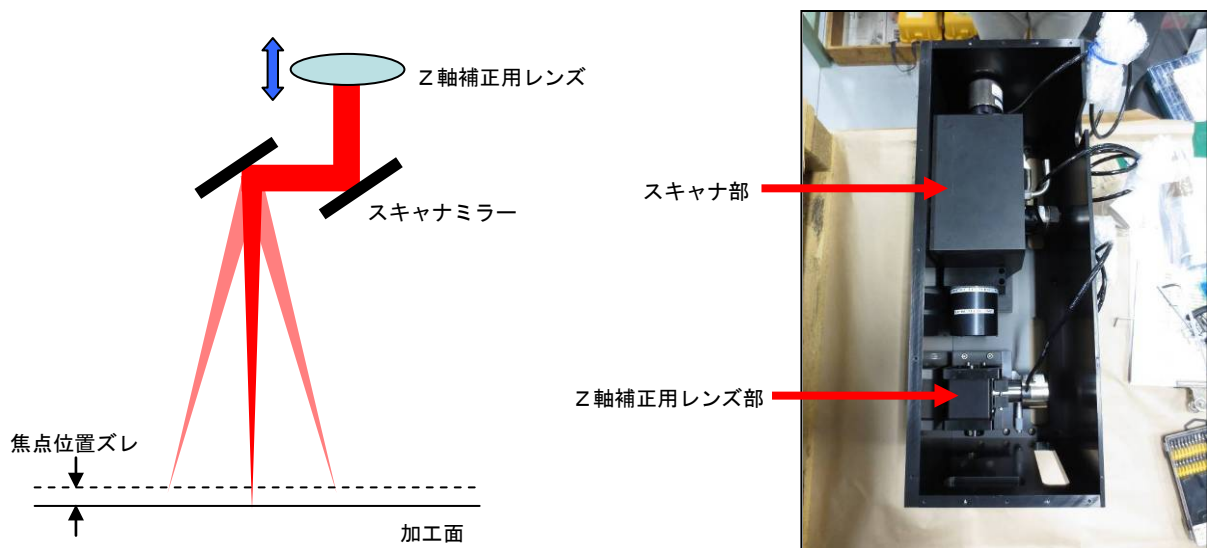


図 20 Z 軸補正用レンズによる広加工エリア

更に、リモートレーザ溶接ヘッドのスキャン速度は目標値である 80 m/分を達成しており、500 W シングルモードファイバーレーザを用いた場合の焦点位置でのスポット径は 19.2 μm と良好な集光結果となった。

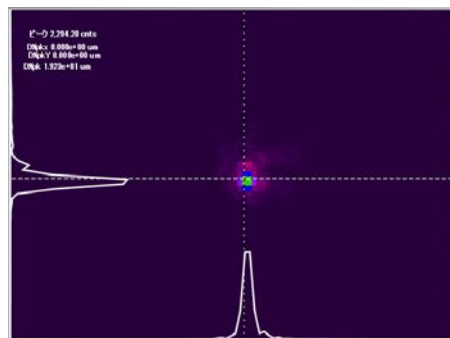


図 21 加工焦点位置でのビームプロファイル

「実証実験」では試作開発したリモートレーザ溶接ヘッドを用い、リチウムイオン電池筐体に用いられるアルミニウム合金及び今後医療用器具にて需要が期待できるチタニウム合金を中心に実際のレーザ溶接を行った。

「焦点光軸方向超高速移動機構」をリモートレーザ溶接ヘッドに搭載した状態で、焦点移動による溶込み深さは、「焦点光軸方向超高速移動機構」単体での評価をほぼ再現する結果となったため、試料そのものを駆動させる振動機構を作成し溶込み深さの評価を行ったところ良好な結果を得ることができた。



図 22 振動機構（左：試料架台、右：カム機構）

3 mm 口のアルミニウム合金とチタニウム合金に対し、それぞれ最適なレーザ出力、パルス幅及び焦点位置の条件出しを行った後に、振動機構による溶込み深さの評価を行った。3 mm 口のアルミニウム合金（A3003）の場合、レーザ出力 1 kW、パルス幅 60 ms、焦点位置を振動機構により 0 ~ -1.5 mm で移動させたとき駆動周波数 27.08 Hz にて最も深い溶込み深さを得た。同様に 3 mm 口のチタニウム合金の場合、レーザ出力 500 W、パルス幅 30 ms、焦点位置 0 ~ -2.0 mm のとき駆動周波数 27.08 Hz にて良好な結果を得た。

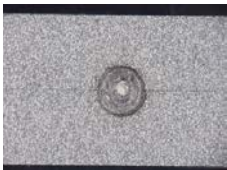
周波数	0.00 Hz	27.08 Hz	40.80 Hz
上面			
断面			

図 23 振動台による溶込み深さの評価（アルミニウム合金）

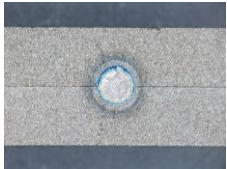
周波数	0.00 Hz	27.08 Hz	40.80 Hz
上面			
断面			

図 24 振動台による溶込み深さの評価（チタニウム合金）

また、実際の中・大型リチウムイオン電池の溶接サイズ（175 mm×45 mm・角 R 無し）のアルミニウム合金（A3003）製サンプルを用意し、擬似的な筐体密閉溶接を実施した。レーザ出力 1.75 kW・スキャン速度 120 mm/秒・焦点位置-2 mm の条件にて良好な溶接結果を得た。



図 25 擬似的なリチウムイオン電池の筐体密閉溶接

最終章 全体総括

本研究開発を実施していく中、アドバイザー、システムインテグレータ及び川下企業との意見交換を通じ、中・大型リチウムイオン電池の市場が本格化するのには 2015 年頃との認識を得た。このタイミングを逃さぬように、本研究開発の成果を事業化に結び付けていく。今後は、より具体的な顧客からのサンプル加工を積極的に行うことと、加工ノウハウの蓄積が重要であり、係る補完研究を進めていく所存である。

「理想レーザビームレンズユニットの開発」を通じてはガラス加工のノウハウも蓄積でき、「焦点光軸方向超高速移動機構の開発」では光学及び機械設計の技術力向上とレーザ加工に対する経験を大きく得ることができた。また、「その場画像認識による全数検査システムの開発」にては、レーザ加工中の特徴現象を抽出しアルゴリズムに基づいた画像検査装置を構築でき、今後もフィードバック機能等を追加開発することにより発展していくものとの考えている。

本研究開発の結果は、システムインテグレータが持つリチウムイオン電池製造装置内に組込む等して川下企業への評価を進め、拡販に努めていく。また、リチウムイオン電池だけでなく、今後、成長が期待されているチタニウム合金を用いた医療用器具等の溶接分野にも応用展開可能と考えている。