

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

**「液晶、太陽電池パネルの再利用に対応した、新しいレーザー
切削加工技術の開発」**

研究開発成果等報告書

平成25年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 よこはまティーエルオー株式会社

第1章 研究開発の概要	2
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	2
1-2 研究体制（研究組織、管理体制、研究者氏名、協力者・他）	6
1-3 成果概要	9
1-4 当該研究開発の連絡窓口	10
第2章 本論	11
2-1 加工時間の短縮及び加工効率向上	11
2-1-1 レーザー加工装置の開発	11
2-1-1-1 高出力レーザーを搭載したレーザー加工装置の開発	11
2-1-1-2 レーザービーム形状・レーザービームプロファイルの改良	12
2-1-2 加工材料に適した加工性能の向上と加工条件の適正化	13
2-2 様々な加工対象への適用検討	15
2-2-1 液晶パネルへの適用	15
2-2-2 シリコン系太陽電池パネルへの適用	16
2-2-3 その他の対象への適用	16
2-3 レーザー切削加工部材の照射表面層の高精度分析・評価	17
2-3-1 レーザー加工試料表面の高精度分析評価	17
2-3-2 モデル化した加工実験との比較対照評価	18
第3章 全体総括	22
3-1 期間を通しての研究開発成果	22
3-2 今後の課題・事業化展開	23
3-2-1 短期展望	23
3-2-2 中長期展望	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

<研究開発の背景>

液晶パネルや、太陽電池パネルには、インジウム、クロム等のレアメタルや、銀等の貴重金属が含まれている。また、カドミウム等の有害物質が含まれる場合もある。有害物質の的確な処理の重要性は勿論のこと、最近では資源を巡って世界的争奪戦が起きていることから、資源の回収・再利用の重要性が強く認識されるようになった。

更に、2009年4月より薄型テレビが家電リサイクル法の対象となったことに加え、製品のライフサイクルの短期化に伴い、電気機器メーカーは、より効率のよい液晶パネルのリサイクル方法の開発に取り組む必要に迫られている。また、太陽光発電の急速な普及に伴い、将来大量の太陽電池を回収する状況が生ずることが想定される。

従来、液晶パネル等からの再資源化の技術としては、粉砕法(*注1)や切削加工法(切削刃回転除去方式)(*注2)が用いられていたが、以下のような問題がある。

(従来技術の問題点)

1. コストが高い

粉砕法、切削法とも初期設備費用が高く、薬液や切削刃の交換などメンテナンス費用も高いので、回収にかかるコストが高くなる。回収したレアメタルの価格は市場価格よりも数倍高いとも言われている。

2. 環境問題がある

粉砕や切削工程で粉塵や騒音が発生する。また、後工程で薬液を必要とするためその処理が問題になる。

(*注1)粉砕法：数mm大のカレットに粉砕してから、化学処理でインジウムなどのレアメタルを回収する技術。

(*注2)切削加工法：ダイヤモンドグラインダーを用いて、ガラス上の金属膜を切削して取り出し、金属粉を化学処理してレアメタルを回収する技術。

<研究目的>

本研究では、上記のような背景の下、液晶パネルや太陽電池パネル等から資源を低コスト、低環境負荷で効率良く分離・回収する技術を開発することを目的とする。具体的には、従来の機械的方法に代わり、レーザーを用いて金属膜を切削加工(剥離除去)する方法(*注3)を、実用化に向けた基礎技術として確立することを目的とする。

(*注3)レーザー切削加工(レーザー剥離)について (図1-1-1)

ある材質の基板上に誘電体や金属等の薄膜が形成された物体に、パルス幅の短いパルスレーザーを照射すると、一定の条件下では、その薄膜が基板から剥離する現象があることが見出されている。本研究で用いるレーザー切削加工技術は、この現象を利用して、株式会社エスアンドデ

が保有する特許（特許第 4472014 号）に記された技術を基に開発されるものであり、以下のような特長がある。

- 1) 設備費、ランニングコストが大幅に安くなる。
- 2) 大幅に設置スペースが小さく、又電力も少なくてすむ。
- 3) レーザー加工法では、ガラスの表面にキズが付かず、ガラスを再洗浄するだけで、ガラスの再利用が行える。又切削された金属膜は、粉体で回収出来、切削液、ガラスのカレット等も含まず容易に精錬出来るので、資源の回収、リサイクルが低コストで行える。

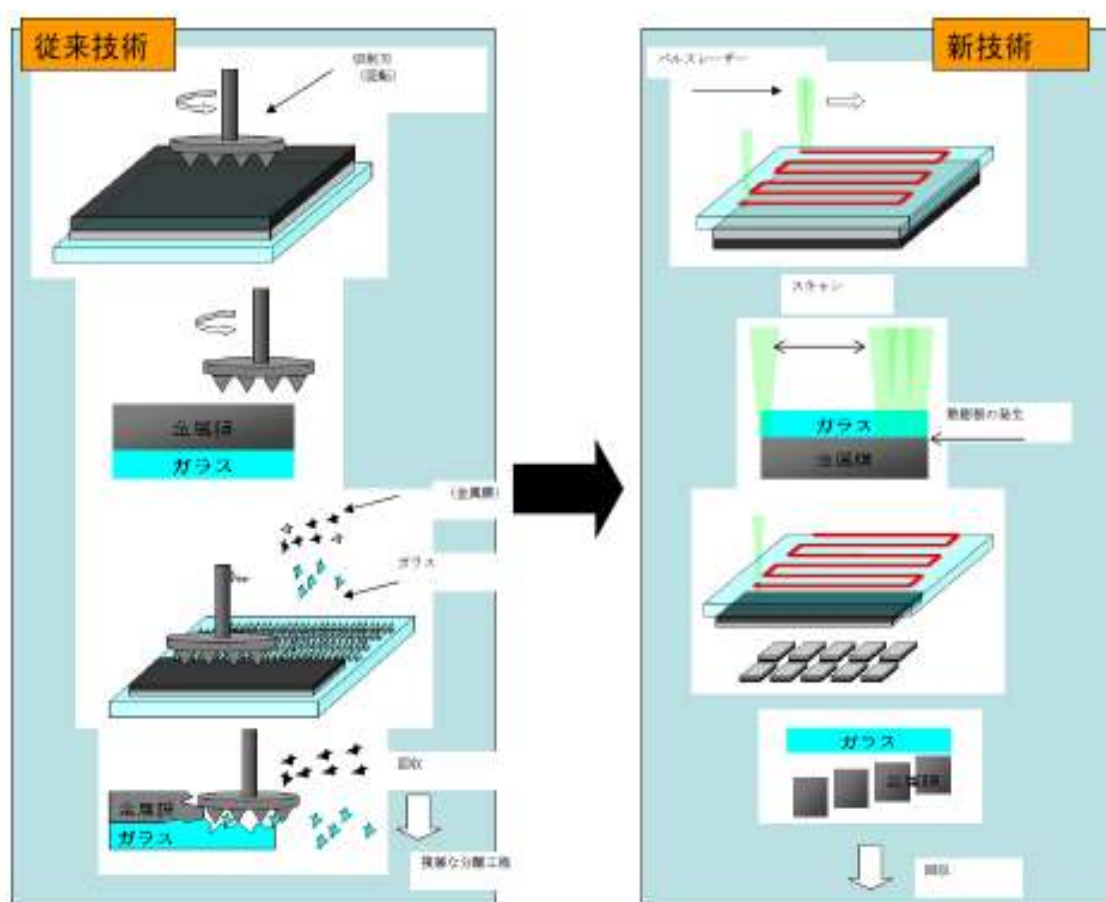


図 1-1-1 レーザー切削加工法の特徴

<研究目標>

本レーザー剥離技術を、実用化に向けた基礎技術として確立するため、① 加工時間の短縮及び加工効率向上（①-1 レーザー加工装置の開発、①-2 加工材料に適した加工性能の向上と加工条件の適正化）、② 様々な加工対象への適用検討、③ レーザー切削加工部材の照射表面層の高精度分析・評価について、各々以下のような目標で取り組む。

① 加工時間の短縮及び加工効率向上

①-1 レーザー加工装置の開発

加工時間を短縮するには、先ずレーザーの出力を上げる必要がある。そこで、出力 20W という高

出力短パルスレーザーを搭載したレーザー加工装置を開発し、加工時間短縮の効果を検証する。

また、加工効率向上のため、レーザービーム形状、並びにレーザービームプロファイルの適正化(改良)を行い、効果を検証する。

①-2 加工材料に適した加工性能の向上と加工条件の適正化

加工性能向上のためには、加工対象ごとに最適な加工条件を見出す必要があることから、レーザーに関わる条件（平均出力、繰返し周波数など）、及びビーム走査に関わる条件（レーザービーム走査速度など）の最適化という観点で検討を進め、条件最適化に関する手法の基礎を確立する。また、レーザーのパルス幅の加工効率への影響についても基礎データを収集し、基本的ノウハウを獲得する。

② 様々な加工対象への適用検討

加工対象としては、液晶パネルや太陽電池パネルが第1の候補であるが、これら以外にも視野を拡げてユーザーニーズを幅広く収集し、これを基に種々の評価実験を行い、基礎的データの蓄積を行う。更に、この取組みを通じて、早期実用化が期待できる加工対象を見出す。

③ レーザー切削加工部材の照射表面層の高精度分析・評価

レーザー走査顕微鏡ならびに SEM 等による表面分析評価およびモデル化試料の評価分析を行う。これらの知見に基づいて、切削加工された表面層および切削加工物の材質変化等の検証を行い、高性能の加工機システムの構築に反映する。対象物は、各種ガラス基板及びインバー合金基板に蒸着された薄膜材料を用い、レーザー照射条件を変えて検討を行う。これらの観察ならびに測定を、比較対照実験を系統的かつ、並行して行うことで、原理・メカニズムを明らかにするとともに、レーザー処理時間の一層の短縮化と高回収率技術の指針を得る。

④ プロジェクトの管理・運営

プロジェクト全体管理、再委託先の指導等を行う。

（＊注）本研究開発開始段階では、上記の他、「レーザースキャン幅の拡大による加工寸法の実験、検証」を目標項目に挙げていたが、初年度に行った「レーザー加工装置の開発」の過程で、これは設計上の工夫で比較的容易に実現できることが判明したため、目標項目から外した。

<研究開発の実施結果>

上記目標に対し、以下のような結果を得ることができた。以って、上記研究目的を達することができた。

① 加工時間の短縮及び加工効率向上

①-1 レーザー加工装置の開発

出力 20W の短パルスレーザーを搭載したレーザー加工装置を開発し、加工時間短縮の効果を検証した。この結果、レーザー出力に比例する加工速度の向上（加工時間の短縮）が確認できた。また、本レーザー加工装置に対して光ファイバーを用いた光学系への改良を施し、レーザービーム形状並びにレーザービームプロファイルの適正化(改良)の効果を検証した。その結果、原理検証を行うこ

とができた。但し、実用化に向けての課題がいくつか残された。

①-2 加工材料に適した加工性能の向上と加工条件の適正化

レーザーに関わる条件、及びビーム走査に関わる条件の最適化という観点で、理論と実験の両面で検討を進め、条件最適化に関する基礎的手法を確立できた。また、レーザーのパルス幅の加工効率への影響についても基礎データを収集し、基本的知見やノウハウを得る事ができた。

② 様々な加工対象への適用検討

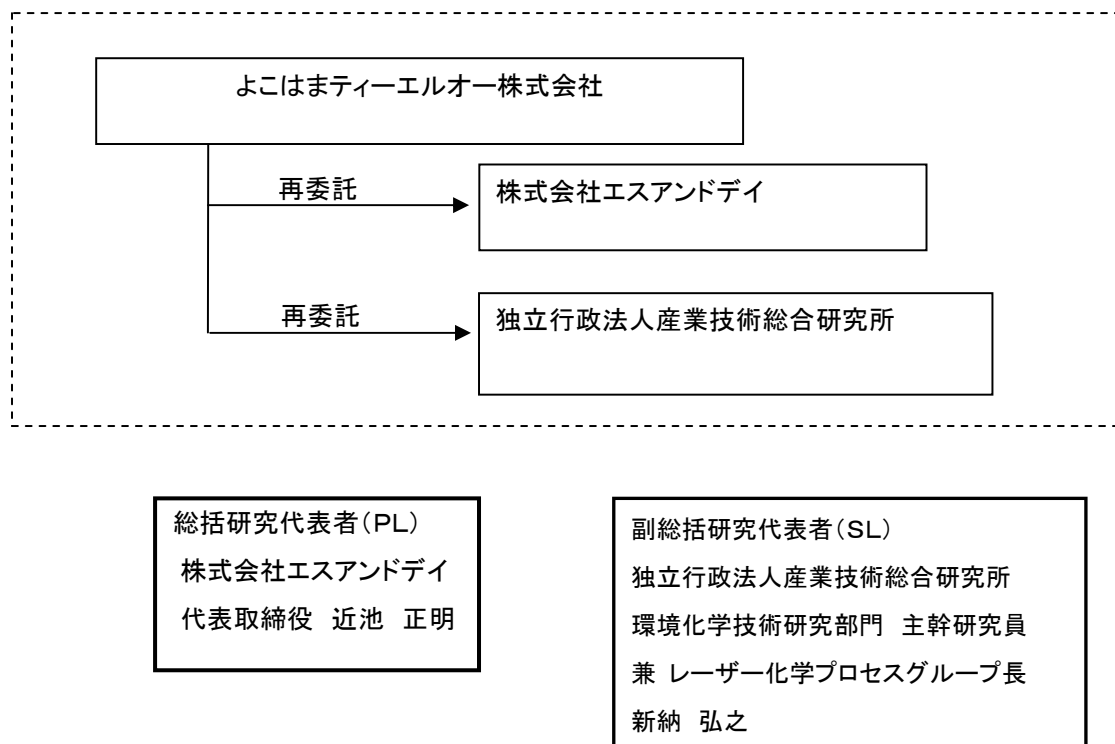
加工対象として、先ず液晶パネルや太陽電池パネルについて取り組み、一定の効果が期待できることが確認できた。また、これら以外にも様々な対象について評価実験を行った結果、金属基板上に形成された有機膜の剥離という応用が有望であることを見出すことができた。

③ レーザー切削加工部材の照射表面層の高精度分析・評価

レーザー走査顕微鏡評価や不純物分析評価、及びモデル化分析等を行い、高性能の加工機システムを構築するための、切削加工された表面層、切削加工物の材質変化等を検証した。具体的には、加工試料に対してレーザー顕微鏡、ならびに SEM を用いた表面分析評価を行うとともに、モデル化試料に対しても同様の評価分析を系統的に行った結果から、レーザー加工の原理・メカニズムを明らかにした。パルスレーザー照射によって誘起された、上部薄膜層／基板界面部位での過渡的な光熱発生機構による薄膜層の高効率剥離の確認に成功した。2倍超のレーザー処理時間の短縮化と高回収率技術の指針を得ることができた。

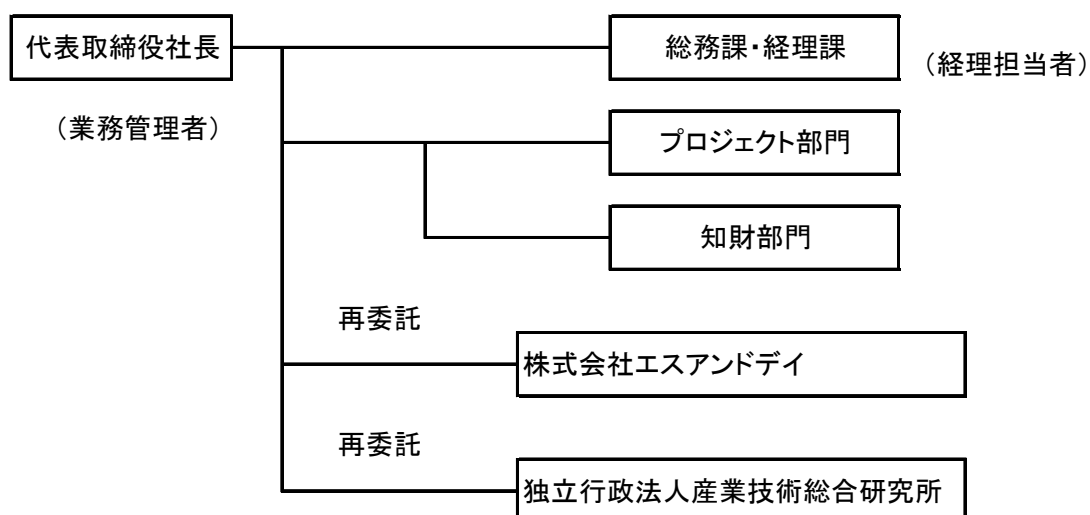
1-2 研究体制 （研究組織・管理体制・研究者氏名・協力者・他）

1-2-1 研究組織（全体）



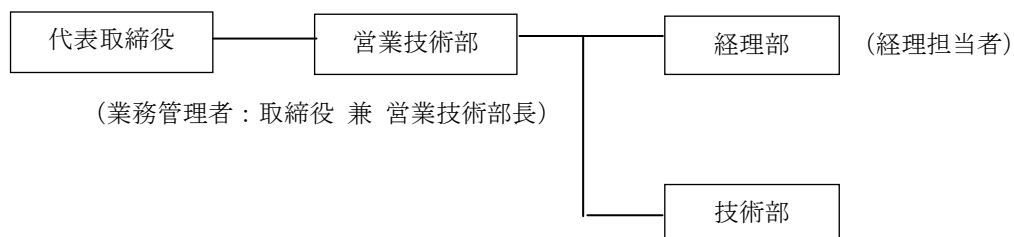
1-2-2 管理体制

[よこはまティーエルオー株式会社]

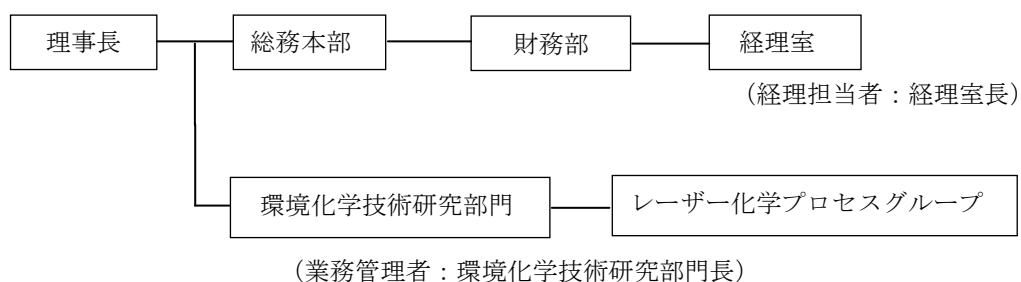


(再委託先)

[株式会社エスアンドデイ]



[独立行政法人産業技術総合研究所]



1-2-3 研究者氏名 (管理員含む)

【事業管理機関】

管理員 よこはまティーエルオー株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容 (番号)
穂苅 泰明	プロジェクトコーディネーター	④

【再委託先】

研究員 株式会社エスアンドデイ

氏 名	所属・役職	実施内容 (番号)
近池 正明	代表取締役	①②
近池 貴志	営業技術部 課長代理	①②
廣島 達也	営業技術部 技術部 部長代理	①②
杉山 俊雄	営業技術部 技術部 顧問	①②
大橋 一司	営業技術部 技術部 顧問	①②
伊東 宇一	営業技術部 技術部 顧問	①②
加茂下 雅一	営業技術部 技術部 顧問	①②

研究員 独立行政法人産業技術総合研究所

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
新納 弘之	環境化学技術研究部門 主幹研究員 兼 レーザー化学プロセスグループ 研究グループ長	③
佐藤 正健	環境化学技術研究部門 レーザー化学 プロセスグループ 主任研究員	③

1-2-4 協力者・他

(1) 協力者

① 研究開発推進委員会委員・アドバイザー

高田岳志（古河機械金属株式会社）

小穴保久（元株式会社東芝）

永野鉄洋（リユースビズテック株式会社）

(2) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

（事業管理機関）

よこはまティーエルオー株式会社

（経理担当者）総務課・経理課 経理課長

稲光 教子

（業務管理者）代表取締役社長

井上 誠一

（再委託先）

株式会社エスアンドデイ

（経理担当者）営業技術部 経理部

橋本 美里

（業務管理者）取締役 兼 営業技術部長

小嶋 秀夫

独立行政法人産業技術総合研究所

（経理担当者）総務本部 財務部 経理室長

山口 洋二

（業務管理者）環境化学技術研究部門長

柳下 宏

1-3 成果概要

研究課題	研究成果	残された課題
① 加工時間の短縮及び加工効率向上	—	—
①-1 レーザー加工装置の開発	出力 20W の短パルスレーザーを搭載したレーザー加工装置を開発し、加工時間短縮の効果を検証した。レーザー出力に比例する加工速度の向上（加工時間の短縮）が確認できた。	特に大きな問題点はない。
①-1 レーザー加工装置の改造 ▽ レーザービーム形状の改良	本レーザー加工装置に対して光ファイバーを用いた光学系への改良を施し、レーザービーム形状並びにレーザービームプロファイルの適正化(改良)の効果を検証した。その結果、原理検証を行うことができた。	方形ビームパターン内で、強度ムラが発生する（対策案はいくつか考えられる）。パルスレーザーに対してファイバーの耐性が低い。
①-2 加工材料に適した加工性能の向上と加工条件の適正化	レーザーに関わる条件、及びビーム走査に関わる条件の最適化という観点で、理論と実験の両面で検討を進め、条件最適化に関する基礎的手法を確立できた。また、レーザーのパルス幅の加工効率への影響についても基礎データを収集し、基本的知見やノウハウを得る事ができた。	新規の対象に対して、条件適正化の前提となる物性条件を効率的に調べる方法の開発。
② 様々な加工対象への適用検討	加工対象として、先ず液晶パネルや太陽電池パネルについて取り組み、一定の効果が期待できることが確認できた。また、これら以外にも様々な対象について評価実験を行った結果、金属基板上に形成された有機膜の剥離という応用が有望であることを見出すことができた。	液晶パネル、太陽電池パネルのリサイクルに関わる応用では停滞。 ⇒ 探索継続。
③ レーザー切削加工部材の照射表面層の高精度分析・評価	加工試料に対してレーザー顕微鏡、ならびに SEM を用いた表面分析評価を行うとともに、モデル化試料に対しても同様の評価分析を系統的に行った結果から、レーザー加工の原理・メカニズムを明らかにした。パルスレーザー照射によって誘起された、上部薄膜層／基板界面部位での過渡的な光熱発生機構による薄膜層の高効率剥離の確認に成功した。2 倍超のレーザー処理時間の短縮化と高回収率技術の指針を得ることができた。	特に大きな問題点はない。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

【管理法人】

住所：〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5
横浜国立大学共同研究推進センター内
名称：よこはまティールエルオー株式会社
代表者役職・氏名：代表取締役社長 井上 誠一
担当者役職・氏名：プロジェクトコーディネーター 穂苅泰明
Tel：045-339-4441 Fax：045-340-3541
E-mail：yoko-tlo@ynu.ac.jp

【総括研究代表者】

氏名：近池 正明
所属組織名：株式会社エスアンドデイ
所属役職：代表取締役
Tel：045-547-1040 Fax：045-547-1040
E-mail：chikaike@sandd.jp

【副総括研究代表者】

氏名：新納 弘之
所属組織名：独立行政法人産業技術総合研究所
環境化学技術研究部門 主幹研究員
兼 レーザー化学プロセスグループ 研究グループ長
所属役職：主幹研究員、研究グループ長
Tel：029-861-9313 Fax：029-861-4560
E-mail：niino.hiro@aist.go.jp

第2章 本論

2-1 加工時間の短縮及び加工効率向上

本レーザー加工技術を実用化していく上では、処理コスト低減のため、加工時間の短縮が強く求められる。加工時間短縮の方法として考えられるのは、レーザーの出力を上げること、レーザー出力以外の部分で装置上の工夫をすること、加工条件を適正化して加工効率を向上させることである。この観点から、レーザー加工装置の開発、レーザービーム形状・レーザービームプロファイルの改良、加工材料に適した加工性能の向上と加工条件の適正化に取り組んだ。

2-1-1 レーザー加工装置の開発

2-1-1-1 高出力レーザーを搭載したレーザー加工装置の開発

出力 20W 級の高出力レーザー及び高速ビーム走査光学系を搭載するとともに、大型ワーク搬送機能や集塵機能も備えた、実用機開発のモデルとなるレーザー加工装置を開発した。また、この装置を用いて高出力化による加工時間短縮の効果を検証した。

(1) 開発したレーザー加工装置の仕様および外観

開発したレーザー加工装置の概略仕様を表 2-1-1 に、外観を図 2-1-1 に示す。

表 2-1-1 レーザー加工装置の概略仕様

レーザー	20W 級 x 2
ビーム走査	ガルバノミラー方式
搬送方式	自動化対応コロボースト
集塵方式	送風・吸引ノズル方式
共試品寸法	1100W x 1400D
外形寸法	4000W x 1700D x 2500H



図 2-1-1 レーザー加工装置の外観

(2) 高出力化による加工時間短縮の効果の検証

化合物系薄膜太陽電池をサンプルとして実験検証を行った。このサンプルには透明電極として ITO(Indium-Tin-Oxide)膜が片面に付されており、レーザー照射によってこれが剥離されると、この面の導通がなくなる。

表 2-1-1 と図 2-1-2 に、照射条件及び実験結果の代表例を示す。

表 2-1-2 照射条件及び実験結果

条件	レーザー出力	ビーム走査速度	結果
1	5W	0.6m/s	ITO 面導通なし
2	20W	1.2m/s	ITO 面導通なし

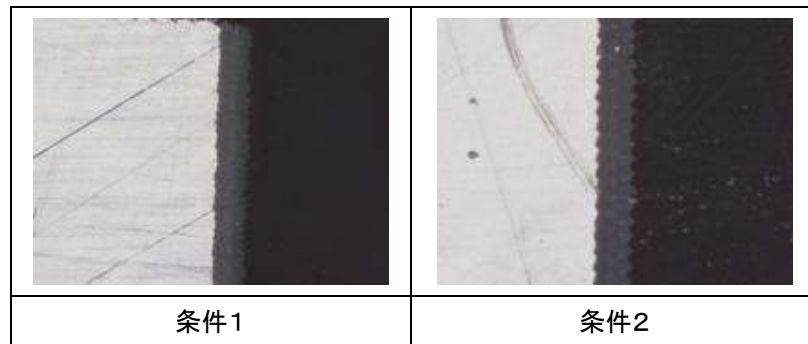


図 2-1-2 レーザー照射部の顕微鏡写真

図 2-1-2 はレーザー照射されたサンプルの顕微鏡写真であり、右半分がレーザー照射によって表面層（Al 層および ITO 層）が剥離された部分である。条件 1、条件 2 とも ITO 面の導通はなく、レーザー照射結果としてはほぼ同等と見ることができる。しかし加工時間に換算すると、条件 2（レーザー出力 20W）は、条件 1（レーザー出力 5W）に比べ 1/4 である。即ち、レーザー出力に比例して加工速度が向上することが分かる。

2-1-1-2 レーザービーム形状・レーザービームプロファイルの改良

一般に、多くのレーザーのビームは、ビーム形状は円形、ビームプロファイルはガウシアンもしくはそれに近い形なので、ワーク上でのレーザービームパターン形状も円形で、ビームプロファイルもガウシアン形状である。

パルスレーザーを光源とするこのような円形ビームパターンをワーク上で走査すると、隣接ビームパターン（照射スポット）間に隙間が生じるが、ビーム形状を方形にできれば、隙間が少なくなり、加工効率が向上すると考えられる。

一方、一般にレーザー加工においては加工閾値が想定され、ワーク上におけるレーザービーム出力が加工閾値を越えると加工が起きると考えられるので、ガウシアンビームでは、中心部分でレーザー出力の無駄が生じやすい。そこで、ビームプロファイルを、大きな損失なく、平坦な形（トップハットプロファイル）に変換できれば、同じレーザー出力であっても、加工径は大きくなり、加工効率を上げることが出来ると考えられる（図 2-1-3 参照）。

そこで、これを検証するため、光学系の設計検討、および検証実験（原理確認実験）を行った。

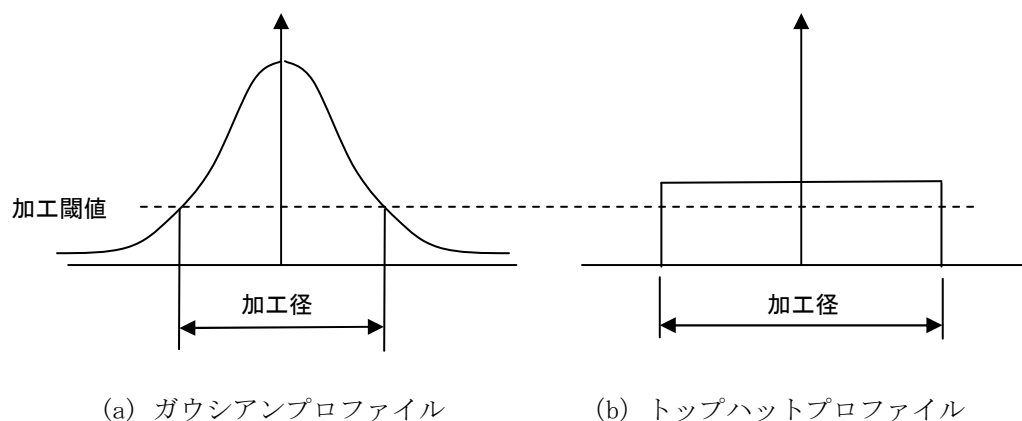


図 2-1-3 ガウシアンプロファイとトップハットプロファイルによる加工径の違い

(1) 光学系の設計検討

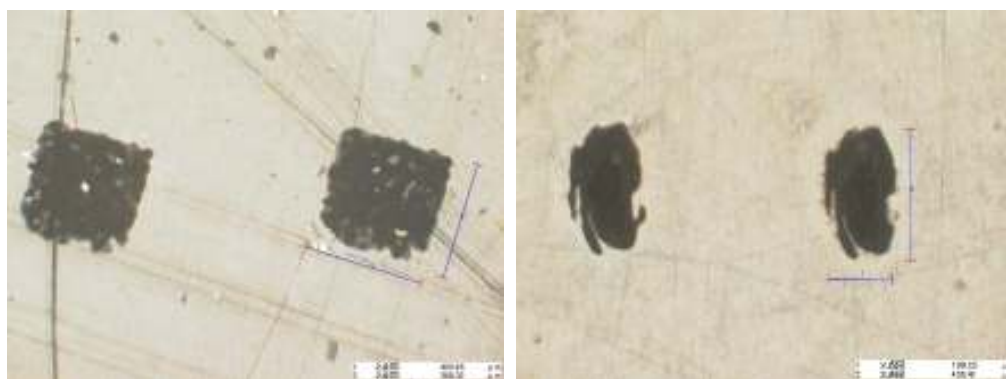
ビームプロファイルを変換するための、ある程度現実性の高い方法として考えられるのは (a) 非球面レンズを用いる方法、(b) 回折光学素子を用いる方法、(c) 光ファイバーを用いる方法である。これら (a), (b), (c) の方法には各々特徴・得失があるが、以下の理由から、(c) 光ファイバーを用いる方法を採用した。

- i) 回折光学素子や非球面レンズに比べ、汎用性が高く使いやすい。
- ii) 光ファイバーのコアを方形とすることで方形ビームパターンのトップハットプロファイルが実現できる。
- iii) 比較的光の利用効率が高い。
- iv) 比較的安価である。
- v) 光学系が比較的簡単である。

(2) 検証実験

光学系の具体設計に基づき本レーザー加工装置の光学系に改造を加え、これを用いて検証実験（原理確認実験）を行った。ワークサンプルには、薄膜太陽電池を用いた。

レーザー照射後の照射スポットパターンの顕微鏡写真を図 2-1-4 に示す。比較のため(b)には、改造前の光学系による照射パターンを示す。



(a) 改造後の光学系による照射パターン (b) 改造前の光学系による照射パターン

図 2-1-4 改造前、改造後の光学系による照射パターン

これから分かる通り、改造前の従来光学系ではかなり不規則的な照射パターンであったのが、本改造光学系では、概ねきれいな正方形のパターンになっている。ビームプロファイルも、概ね平坦になっていると推測される。

このように、原理確認はできたが、照射パターンの中に斑状のムラがあり、実用化のためには対策が必要である。また、光ファイバーの高強度レーザーに対する耐性など、実用化に向けては課題が残る。

2-1-2 加工材料に適した加工性能の向上と加工条件の適正化

加工効率向上のためには、加工対象ごとに最適な加工条件を見出すことも極めて重要である。加工条件として、レーザーに関わる条件（平均出力、繰返し周波数など）、ビーム走査に関わる条件（レ

レーザービーム走査速度など）が想定されるが、照射レーザービームのプロファイルがガウシアンである場合、デフォーカス（ビームウェスト位置のワーク位置からの Z 方向へのずれ）の設定がかなり重要な意味を持つので、これについて実験検証を含めて検討を行った。また、レーザーパルス幅と加工効率の関係についても実験確認を行った。

(1) デフォーカスと加工効率の関係

ガウシアンビームは、あるビームウェストの近傍では、そのビームウェスト位置でビーム径が最小になり、その前後ではピーク強度が下がると共にビーム径が大きくなる。これを、ある加工閾値が想定されるレーザー加工との関係で見ると、図 2-1-5 に示すように、ある最適のデフォーカス値があることが分かる。

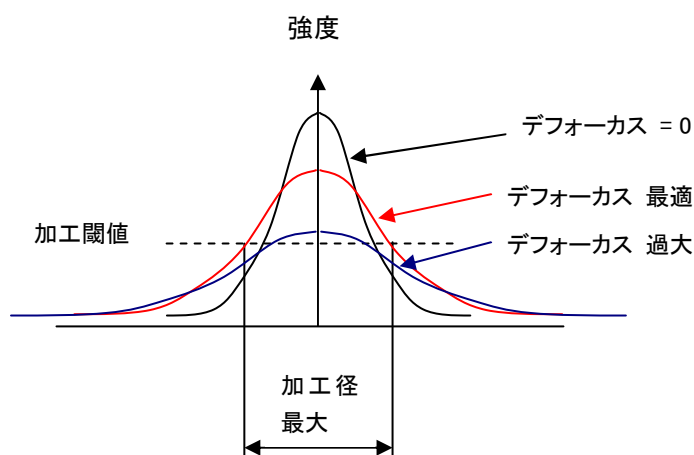
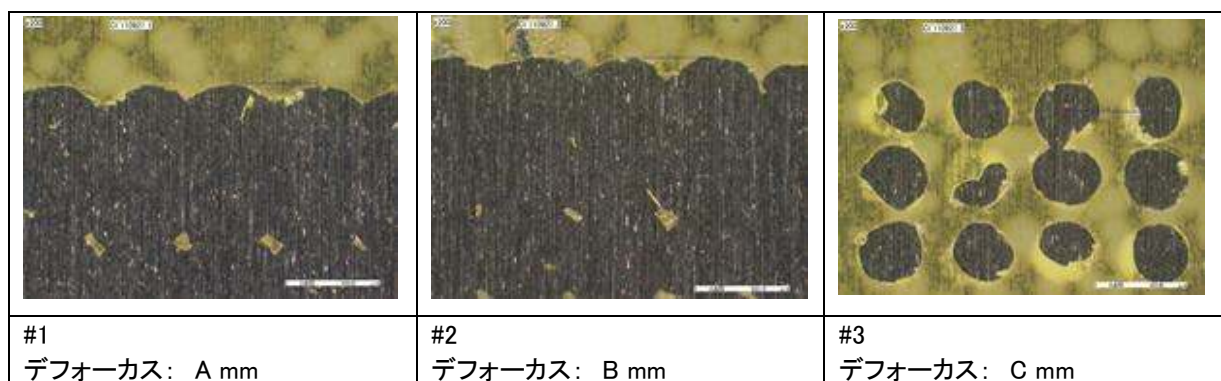


図 2-1-5 デフォーカスと加工径の関係

このことを検証するため、金属基板上に有機膜が形成されたものをワークサンプルに用いて、実験を行った。この結果を図 2-1-6 の顕微鏡写真に示す。図 2-1-6 において、黒く見えている部分が、レーザー照射により有機膜が剥離された部分である。



(*) #1,#2,#3 は、デフォーカス値以外は全て同じ条件 (**) $A < B < C$

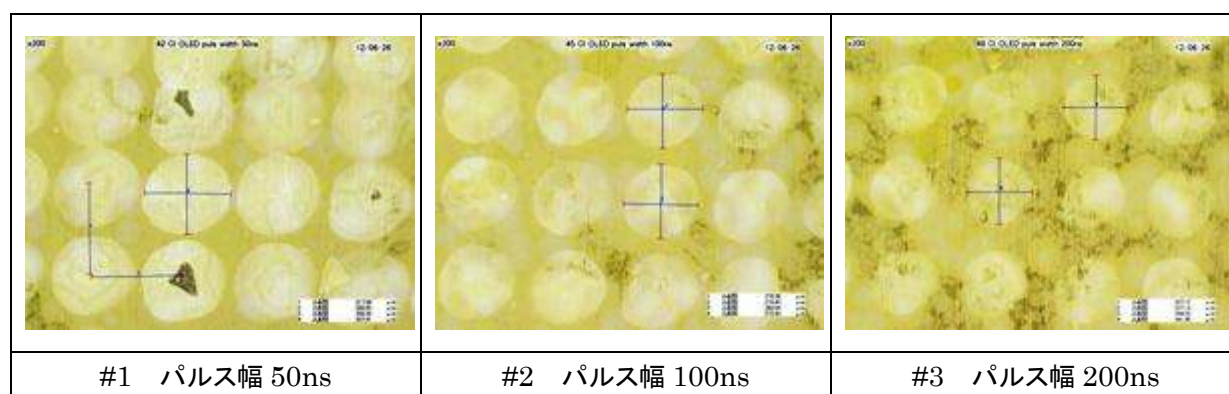
図 2-1-6 レーザー照射後の顕微鏡写真

図 2-1-6 から分かるように、デフォーカスが中間の#2 が加工径が最大になっており、これは図 2-1-5 で示した考え方と合致する。

(2) レーザーパルス幅と加工効率の関係

レーザーパルス幅と加工効率の関係については、パルス幅が狭いほうが加工効率がよいと推測されるので、これを実験検証した。

実験では、金属基板上に有機膜が形成されたものをワークサンプルに用いて、パルス幅 50ns, 100ns, 200ns に対して、加工径（剥離径）がどうなるかを観た。この結果を図 2-1-7 の顕微鏡写真に示す。図 2-1-7 において、丸い白っぽく見える部分が、有機膜が基板から剥離している部分である。



(*) #1,#2,#3 は、パルス幅以外は全て同じ条件

図 2-1-7 レーザー照射後の顕微鏡写真

図 2-1-6 から、推測通り、パルス幅が狭い方が剥離径は大きいことが分かる。よりパルス幅の狭いレーザーを用いれば更に剥離径が大きくなるのか、興味の持たれるところではあるが、実際的には、そのようなレーザーの入手性の問題があるので自ずと限界はある。

2-2 様々な加工対象への適用検討

本事業では当初、液晶パネルや太陽電池パネルの分野を加工の対象と考えていたが、その後様々な潜在的ユーザーとのコンタクトを行うなかで、液晶パネルや太陽電池パネルの分野以外にも本技術が有効に適用できる可能性のある分野があることが分かってきたので、加工対象を幅広く捉え、様々な応用対象を探索してきた。その結果、液晶パネルや太陽電池パネルにおいて一定の効果が期待できることが確認できた他、金属基板上に形成された有機膜の剥離という応用が実用化の可能性が高いことが分かってきた。

2-2-1 液晶パネルへの適用

液晶パネルをカラーフィルター側と TFT 側に分離し、それぞれにレーザー照射を行った。照射後の顕微鏡写真を図 2-2-1（左：カラーフィルター側、右：TFT 側）に示す。

カラーフィルター側の照射部分は IT0 膜を含め完全に剥離された。TFT 側は剥離しにくい条件調整を緻密に行うことで剥離できることが確認できた。

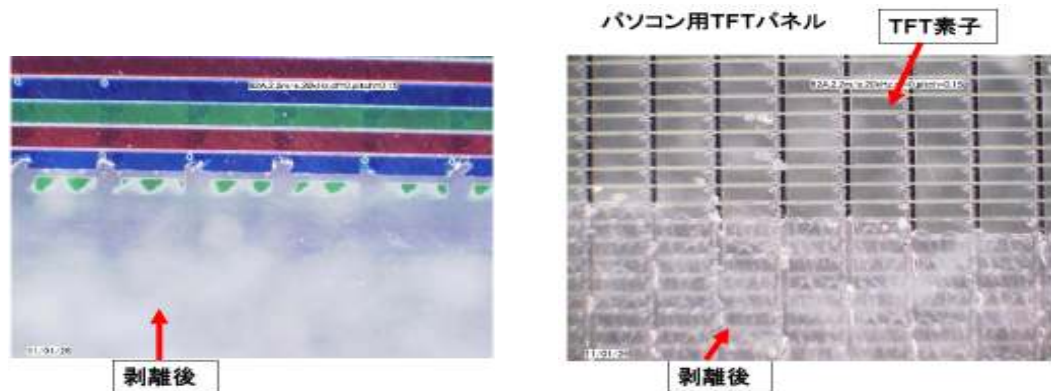


図 2-2-1 液晶パネルへのレーザー照射

2-2-2 シリコン系太陽電池パネルへの適用

シリコンの回収を目的として、太陽電池パネルからシリコン層を分離する実験を行った。照射後の外観写真を図 2-2-2 に示す。

温度を上げる補助的手段を併用することでカバーガラス及び封止材(EVA)から、シリコン層を分離することができた (図 2-2-2 右)。

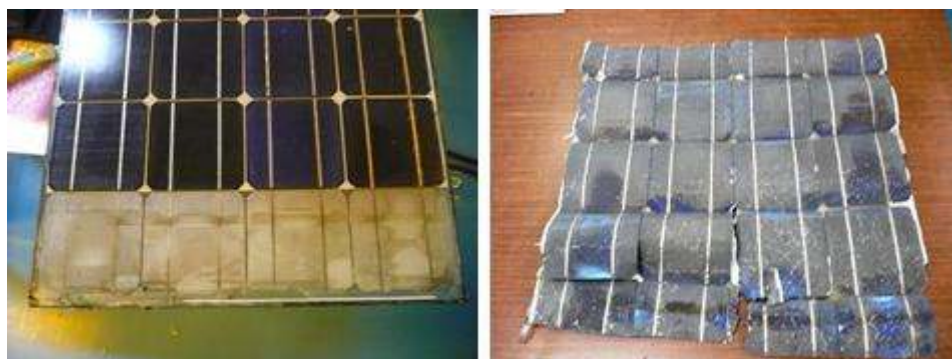


図 2-2-2 シリコン系太陽電池パネルへのレーザー照射

2-2-3 その他の対象への適用

液晶パネルや太陽電池パネルの分野以外にも、様々な応用対象を探索した。その一例として、金属基板上に形成された有機膜の剥離という応用について、実験例を示す。

ワークサンプルは、金属基板上に有機膜が、数十 μm の厚さで形成されたものである。レーザー照射後のサンプルの外観写真を、図 2-2-3 に示す。表面の白く見えるものが有機膜で、ほぼ全面で基板から遊離している。照射部の右の方では一部、遊離した有機膜が崩れて下地基板が露出している。

数十 μm というかなりの厚さであってもきれいな剥離ができることから、有機 EL 照明、或いは有機 EL ディスプレイの製造工程での応用展開が期待できる。



図 2-2-3 厚膜有機膜へのレーザー照射

2-3 レーザー切削加工部材の照射表面層の高精度分析・評価

当該研究開発において、高性能の加工機システムを構築するには、切削加工された表面層及び切削加工物の材質変化等の検証が必要であるため、レーザー走査顕微鏡ならびに走査型電子顕微鏡 (SEM) 等による表面分析評価及びモデル化分析を行った。モデル化の対象物を各種ガラス基板 (BK7、合成石英、パイレックス材料など) 及びインバー合金基板に蒸着された金属等薄膜 (酸化亜鉛薄膜、炭素薄膜、アルミニウム、金など) に設定し、レーザー照射条件を系統的に変化させて検討を行った。

これらの観察ならびに測定に対して比較対照実験を並行して行うことで、原理・メカニズムを明らかにするとともに、レーザー処理時間の一層の短縮化、及び、高回収率技術の指針を得ることを目的に検討を行った。

2-3-1 レーザー加工試料表面の高精度分析評価

本項目の具体的な検討項目として、加工試料表面と加工残渣の高精度分析評価を中心に実施した。具体的な研究結果について以下記述する。

(1) 実験結果 1：パネル表面薄膜剥離、長焦点型光学顕微鏡観察

高性能顕微鏡等による表面分析評価を行うことで、切削加工表面層の加工検証を行うもので、エスアンドデイ社で開発したレーザー加工装置からの加工試料について高精度分析を実施した。レーザー加工後のパネル基板について、長焦点型光学顕微鏡で観察した。図 2-3-1 に示すように薄膜残存率を高精度で評価でき、加工時間短縮の指針として有効であることが判明した。画像解析を行うことで、剥離率を正確に見積もることができた。

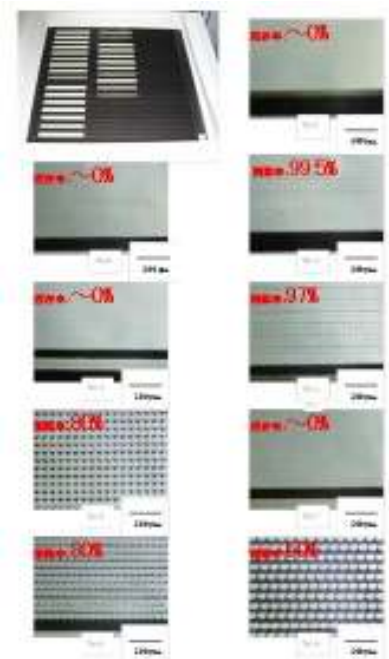


図 2-3-1 パネル表面薄膜剥離試料の長焦点型光学顕微鏡観察結果

(2) 実験結果 2：有機 EL 材料蒸着基板の観察

高性能顕微鏡等による表面分析評価を行うことで、切削加工表面層の加工検証を行うもので、今回開発したレーザー加工装置からの有機 EL 材料蒸着基板の加工試料について高精度分析を実施した。レーザー加工後の有機 EL 材料蒸着基板（基材：インバー合金基板）について、SEM ならびにレーザー走査顕微鏡等で観察した。図 2-3-2 に示すように薄膜剥離状態を高精度で評価でき、加工時間短縮の指針として有効であることが判明した。また、有機 EL 材料が蒸着されたインバー合金基板表面を観察したところ、金属表面に多数の凹凸構造が存在することが判明した。これらの結果から、剥離工程のパラメータとして、

- ・レーザーの表面強度依存性
- ・基板の表面状態

の 2 つの因子が重要であると結論した。

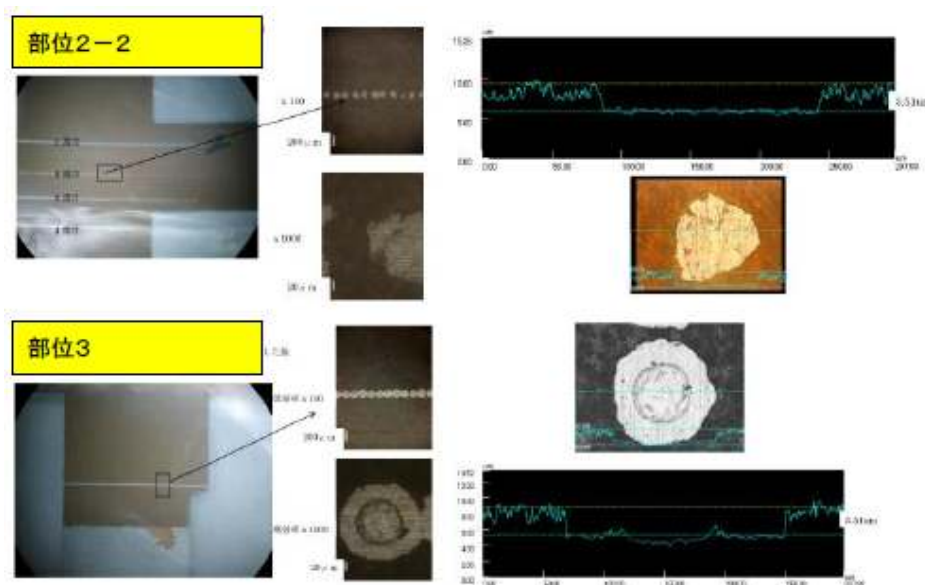


図 2-3-2 有機 EL 材料蒸着基板試料の SEM ならびにレーザー走査顕微鏡観察結果

2-3-2 モデル化した加工実験との比較対照評価

(1) モデル化標品：酸化亜鉛（ZnO）薄膜

ガラス基板に薄膜が蒸着した試料について、モデル化標品として酸化亜鉛（ZnO）薄膜を選び、アブレーションにおける正面照射と背面照射の比較を検証した。照射条件は、レーザー繰り返し 40kHz、波長 355nm、ビーム走査速度 40cm/sec に設定した。

石英ガラス基板の場合、レーザー走査顕微鏡および SEM 観察結果からレーザービーム形状に即した良好な剥離特性が確認された（図 2-3-3）。また、プルームの発行挙動については、励起レーザーからの迷光成分を除去するために適合する光学カットフィルターを使用し、時間分解型の発光強度測定を行った。アブレーション発光は、20ナノ秒のレーザー発振時間よりもやや長い、約40ナノ秒の発光寿命で（図 2-3-4）、発光スペクトル測定からも明瞭に亜鉛原子および酸素原子の発光スペクトルが検出された（図 2-3-5）。これらの正面照射の結果は、裏面照射でも同様の結果が得られたことから、相反する照射方向によっても加工品位に差異がないことを検証できた。

一方、フローティングガラス基板でも、相反する照射方向によっても加工品位に差異がないことが明らかになった。しかしながら、照射部位の周辺部がやや荒れる現象が観測された（図 2-3-6）。これは、薄膜とガラス基板の密着性が良好でないことに起因すると考えられる。

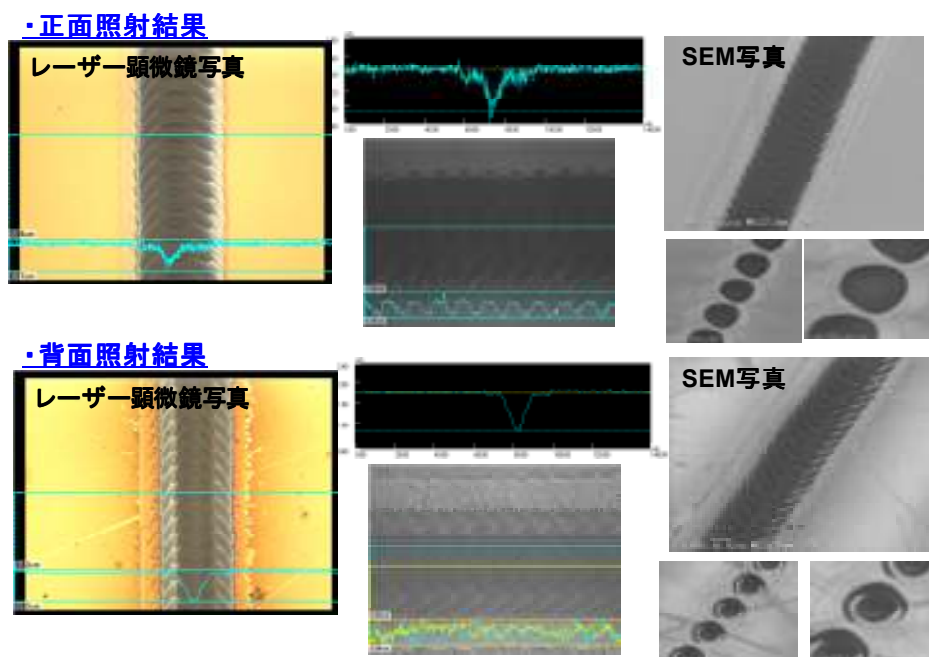


図 2-3-3 石英ガラス基板のレーザー走査顕微鏡および SEM 観察結果

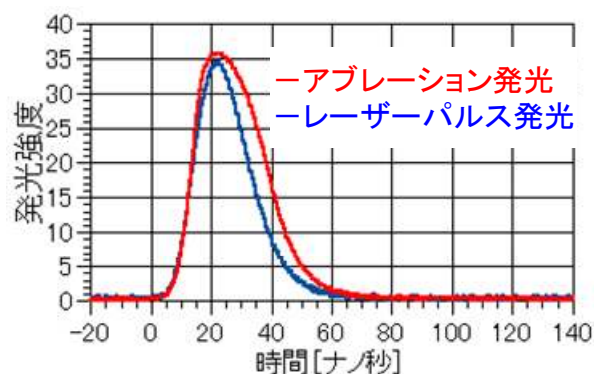
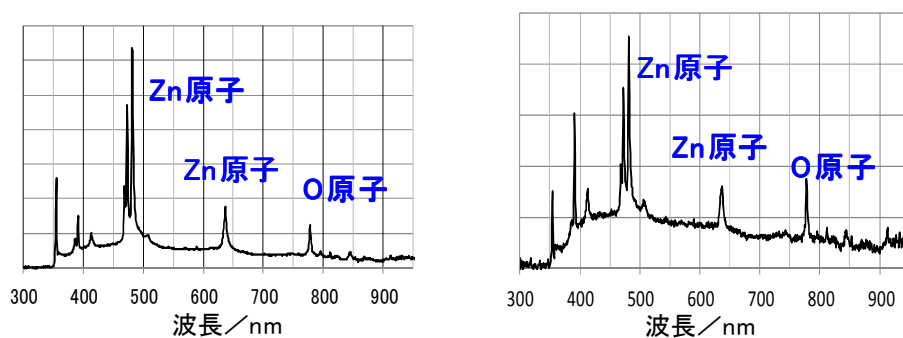


図 2-3-4 石英ガラス基板の時間分解型発光強度測定



正面照射結果

裏面照射結果

図 2-3-5 石英ガラス基板の過渡発光スペクトル測定

・正面照射結果



・背面照射結果



図 2-3-6 FL ガラス基板の SEM 観察結果

(2) モデル化標品：炭素薄膜

ガラス基板ならびにインバー合金基板に薄膜が蒸着した試料について、モデル化標品として炭素薄膜を選び、レーザー照射条件（集光距離や反射ミラー角度等）を変えて検討を行った。インバー基板等への炭素薄膜の蒸着は、既設装置を用いて行い（図 2-3-7）、レーザー照射は波長 355nm 光源を用いた斜入射照射手法での検討を行った。斜入射照射手法を採用することで、レーザー強度の連続的な可変照射が可能となり、系統的に照射条件を変えることを効率よく実施することができた。炭素薄膜蒸着基板試料への斜入射照射結果を図 2-3-8 に示す。これらの結果から剥離工程に必要なエネルギーを精度良く求めることができた。加工時間短縮の指針として有効であるとともに、パルスレーザー照射によって誘起された、上部薄膜層／基板界面部位での過渡的な光熱発生機構による薄膜層の高効率剥離の確認に成功し、原理・メカニズムを明らかにすることができた。



図 2-3-7 インバー基板等への炭素薄膜蒸着装置

レーザー照射条件 A



レーザー照射条件 B



図 2-3-8 炭素薄膜蒸着基板試料への斜入射照射結果（表面観察）

さらに、同サンプルについて、今回開発したレーザー加工装置を用いて、系統的な照射パラメータ可変条件下での検討を行った。図 2-3-9 に、代表的な従来条件の表面形状観察結果を示す。条件設定が不適切であると、レーザー照射外周部にクレーター構造が形成されて、加工品位が低下する。他方、これらの検証結果に基づいた照射条件の適正化の結果では、2 倍超のレーザー処理時間の短縮化と高回収率技術の指針を得ることができた（図 2-3-10）。

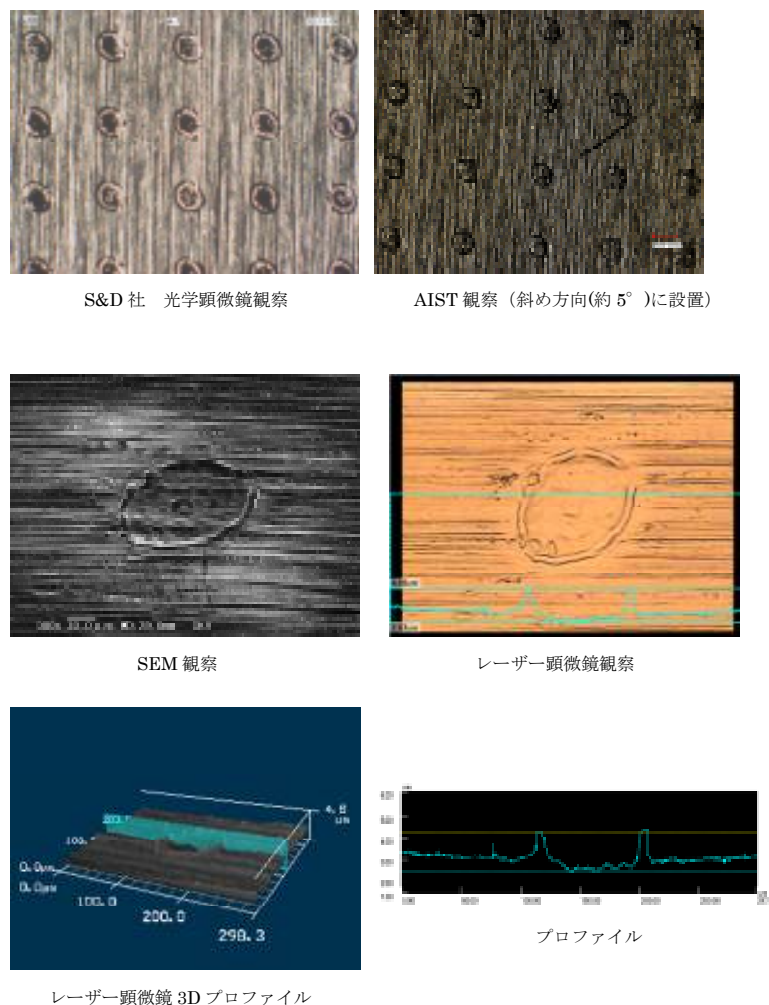
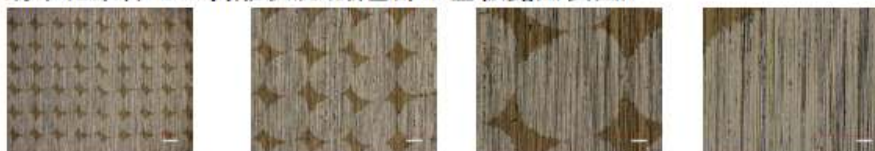


図 2-3-9 代表的な従来条件の表面形状観察結果（SEM およびレーザー顕微鏡）

効率化条件での剥離状況（銀色部が基板露出表面）



従来条件での剥離状況



図 2-3-10 効率化条件での炭素薄膜剥離状況の観察結果（基材：インバー合金基板）

第3章 全体総括

3-1 期間を通しての研究開発成果

本事業では、大きく4テーマ（①～④）の下に研究開発を行い、以下のような成果を出すことができた。

① レーザー加工装置の開発

加工能力が高く、ワーク搬送や集塵等も考慮した実用機開発のモデルとなる装置を開発した。

具体的には、出力20W級の短パルスレーザー（パルス幅1ms以下）、高速ビーム走査光学系、大型ワークに対応する搬送機構・集塵機構を備えたレーザー加工装置を開発した。また、これを動かすための操作性の良いオペレーションソフトウェアも開発した。

また、本装置を用いて加工条件の適正化の検討、様々な加工対象への適用検討を行い、レーザー照射表面層の高精度分析・評価と併せて、実用機の開発に必要なデータ・知見を多く得ることが出来た。

② 加工条件の適正化（プロセス技術開発）

高い加工効率を得るため、レーザー照射に関わる各種条件を適正化する手法を開発した。

具体的には、レーザーに関わるパラメーター（平均出力、繰返し周波数など）、ビーム走査に関わるパラメーター（走査速度など）、及びワークの物性に関わるパラメーター（加工閾値）の関連性を考察し、実験して確認することで、加工効率を最適化するための指針を得ることができた。

③ 様々な加工対象への適用検討

様々な潜在ユーザーからサンプル提供を受け、本技術の適用可能性について検討を行った。

具体的には、以下のようなサンプルについて適応検討を行った。

③-1 液晶パネルへの適用

液晶パネルをカラーフィルター側とTFT側に分離し、それぞれにレーザー照射を行った結果、カラーフィルター側はITO膜を含め完全に剥離されることが確認できた。TFT側はカラーフィルター側に比べ剥離しにくいですが、条件調整を緻密に行うことで剥離できることが確認できた。

③-2 シリコン系太陽電池パネルへの適用

シリコンの回収を目的として、太陽電池パネルからシリコン層を分離する実験を行った結果、温度を上げる補助的手段を併用することで、カバーガラス及び封止材(EVA)から、シリコン層を分離できることが確認できた。

③-3 その他の対象への適用

薄膜系太陽電池、有機膜が形成された基板など様々な対象への適用を試み、基礎データを蓄積した。特に、有機膜が形成された基板への適用については、技術的難易度は高いが、照射条件の緻密な設定を行うことで好結果を得ることができることが確認でき、実用化に向けた基盤ができた。

④ レーザー切削加工部材の照射表面層の高精度分析・評価

高性能の加工機システムを構築するには、切削加工された表面層、及び切削加工物の材質変化等

の検証が必要であるため、レーザー走査顕微鏡評価や不純物分析評価、及びモデル化分析等を行った。

具体的には、加工試料に対してレーザー顕微鏡、ならびに SEM を用いた表面分析評価を行うとともに、モデル化試料に対しても同様の評価分析を系統的に行った結果から、レーザー加工の原理・メカニズムを明らかにした。パルスレーザー照射によって誘起された、上部薄膜層／基板界面部位での過渡的な光熱発生機構による薄膜層の高効率剥離の確認に成功した。2 倍超のレーザー処理時間の短縮化と高回収率技術の指針を得ることができた。

3-2 今後の課題・事業化展開

資源小国日本においては社会ニーズとして、レアメタル等の希少資源やガラス等の回収・有効利用、有害物質の回収を、省エネルギー、省スペース、薬液を使用しないなど低環境負荷で行う方法が求められており、本事業で開発したレーザー加工技術はこの流れに沿うものである。このことは今後の事業展開の追い風になるものと期待している。

3-2-1 短期展望

近い将来に本格的実用化がなされると期待される有機 EL 照明、有機 EL ディスプレイについて、関係業界とはある程度具体的な話し合いを進めていて、一年以内に事業化を計るべく計画を進めている。このなかで、レーザー加工装置の実用機の開発においては、個別ユーザー企業のニーズに合わせた開発を行うために相応の開発資源が必要と想定されるので、大手企業と連携することを計画している。

3-2-2 中長期展望

中長期的に本格的な事業展開を行っていくためには、大きく以下のような課題がある。

(1) 技術の継続的ブラッシュアップ

本格的な事業展開には、基礎技術のブラッシュアップと、各応用対象における個別の技術的課題解決のための研究開発が必要になる。この研究開発の体制について、大まかには、(株) エスアンドデイが持つ業界内ネットワークを活用し、個別案件ごとに協力会社を集めて開発体制を作るような形を想定している。またこのとき、公的研究機関（例えば（独）産業技術総合研究所）の協力も仰ぎたい。

また、知的財産の保護についても別途戦略立案が必要である。

(2) 経営資源確保

単独での資金確保は困難なので、(株) エスアンドデイが持つネットワークを活用し、協力関係にある他社と、販売・営業面、あるいは製造面で協業することで資金負担を極力軽減する。

(3) 営業展開

新規ユーザー獲得や新規応用分野開拓のため営業機能が必須であるが、これも単独での確保は困難なので、(株) エスアンドデイが持つネットワークを活用し、協力関係にある他社と協業することを想定している。