# 平成28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

「精密な大型空中結像光学パネルを実現するためのレーザー加工と ダイヤモンドワイヤーソー切削の複合技術の開発」

## 研究開発成果等報告書

## 平成29年3月

## 担当局 近畿経済産業局

## 補助事業者 公益財団法人 滋賀県産業支援プラザ

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 ・・・・・	•	•	•	• •	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	• 8

## 第2章 本論

2-1 大型ガラス基板へのレーザー加工機による精密加工技術の開発・・・・9
2-1-1 内部にのみ加工変質層を形成可能なガラス材料の選定およびレーザ
ー照射技術の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・9
2-1-2 大型レーザー加工機による精密照射技術の開発 ・・・・・・20
2-2 ダイヤモンドワイヤーソーによる高効率かつ高精細な切断加工技術の開
発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 25
2-3 空中結像光学パネルの製造プロセスの最適化・・・・・・・・・・30
2-4 空中結像光学パネルの評価方法および評価装置の開発・・・・・・35
2-5 研究成果の検証(750×750mmの空中結像光学パネルの試作と評
価) • • • • • • • • • • • • • • • • • • •

最終章 全体総括

3-1	複数年の研究開発成果 ・・・・	•	•	•	•	•	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	41
3-2	研究開発後の課題・事業化展開	•	•	•	•	•	•	•	••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	43

#### 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)研究開発の背景

近年、病院や食品工場などで多発する感染事故を防ぐため、非接触型表示操作 盤(空中タッチパネル)の製品開発を進める川下企業から、空中に被写体の浮遊 像を結像させるデバイス "空中結像光学パネル"の供給が求められている。

空中結像光学パネルは、全体が多数のマイクロミラーセルで構成されたガラス 製のパネルで、ミラー膜が形成されたガラス基板を多数積み重ねて接着した積層 ガラスブロックを輪切りにし、うち2枚をミラー膜が互いに90°交差するよう に貼り合わせて製作される。空中タッチパネル向けには、キーボードの全体を鮮 明に映し出すためのサイズ(500mm×500mm)と高精細性(反射面間隔 1mm)が要求される。しかし従来のより小型パネル向けの製作プロセスでは、 大型化と高精細化に対応できず、現状、空中タッチパネル向け仕様を満たす製品 を供給することができない状況である。

(2)研究目的

そこで本研究開発は、積層ガラスブロックの切断における、最先端のレーザー 加工とダイヤモンドワイヤー切断を組み合わせた複合切断工法の開発を中心とし た、大型精密空中結像光学パネルの製造技術を検討し、確立することを目的とす る。本技術の確立により、空中タッチパネル向けの高精細で大型の空中結像光学 パネルの供給が可能になるばかりでなく、既存パネルの生産効率の大幅な向上が 期待される。

(3) 最終目標

上記の目的を達成するため、本課題を要素技術ごとにサブテーマに分解し、それぞ れについて下記の目標値を設定した。

- 【1】大型ガラス基板へのレーザー加工機による精密加工技術の開発
- 【1-1】内部にのみ加工変質層を形成可能なガラス材料の選定およびレーザー

照射技術の開発

- ●技術目標:<u>切断所用時間を50%以下(400hr→200hr)</u> ガラス内部に切削性の良好な変質層を形成させるためのレーザー照射 条件、ガラス材質を見出し、変質層に沿ったダイヤモンドワイヤーソ ー切断により加工時間を半減させる。
- 【1-2】大型レーザー加工機による精密加工技術の開発
- ●技術目標: Z軸位置制御が素材ガラス厚の10%以内

1mm厚の大型ガラス基板に対し、その厚み中心部のみに変質層を導入するための、精密レーザー加工技術を確立する。

- 【2】ダイヤモンドワイヤーソーによる高効率かつ高精細な切断加工技術の開発
  ●技術目標: 切断後の厚みバラツキ0.5mm 以下
  - 素材ガラス、金属膜、接着剤より構成されたで750mm×750m m以上の積層ガラスブロックを切出す工程で、レーザー変質層に沿っ て切断カーフの蛇行を抑えた大型ダイヤモンドワイヤーソーによる切 断技術を開発する。
- 【3】空中結像光学パネルの製造プロセスの最適化
- ●技術目標:研磨後の厚みバラツキ0.2mm以下

前工程であるレーザー援用ダイヤモンドワイヤーソー切断工程に整合 した、大型ガラスパネルの光学鏡面研磨技術を確立する。両面研磨後 の厚み3mm以下の狙いに対して、厚みばらつきを0.2mm以下に 抑えることを目標とする。

- 【4】空中結像光学パネルの評価方法および評価装置の開発
  - ●技術目標:空中映像の限界解像度200本(200mmあたり:ISO122)
    33)

ISO12233規格に準じた解像度評価を行うための空中映像取り込み技術を検討し、評価装置を開発する。

1-2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

(1)研究組織·管理体制

補助事業者



教授 三浦 清貴

代表取締役社長大西康司

有限会社オプトセラミックス

(2) 管理員、研究員及び補助員

【補助事業者】公益財団法人滋賀県産業支援プラザ

管理員

氏	名	所属部署・後	〕職	実	施内容	
田中	勝晴	連携推進部 部長		プロジェクトの進 務	捗把握・管理、	指導業
篠原	弘美	連携推進部 も くり支援課 課	う のづ 誤長	プロジェクトの進 務	捗把握・管理、	指導業
熱田	善胤	連携推進部 も くり支援課 参	5のづ う与	プロジェクトの進 務、間接補助事業	捗把握・管理、 先との連絡調整	指導業 醫業務

## 【間接補助事業者】有限会社オプトセラミックス

## 研究員

	氏	名	所属部署・役職	実施内容
	大西	康司	代表取締役社長	【1-1】【1-2】【2】【3】 【4】 プロジェクトの進捗把握・管 理、指導業務
	上原	稔	技術顧問	【1-1】【1-2】【2】【3】 【4】
	古川政	史		$\begin{bmatrix} 1 - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4 \end{bmatrix}$
1				

【間接補助事業者】国立大学法人京都大学

### 研究員

氏	名	所属部署・役職	実施内容
三浦	清貴	大学院工学研究科 材料化学専攻 教授	【1-1】【1-2】 プロジェクトの進捗把握・管理、指 導業務
下間	靖彦	大学院工学研究科 材料化学専攻 准教授	【1-1】【1-2】

## 【間接補助事業者】株式会社アスカネット

研究員

氏	名	所属部署・役職	実施内容
大坪	誠	A丨事業開発室 室長	[4]

## 【間接補助事業者】泉陽光学株式会社

研究員

-/12 02	-		
氏	名	所属部署・役職	実施内容
内矢	智大	常務取締役兼開発営 業部長	[2] [3]

斧 督人	本研究開発における、ガラスの物性評 価および切削・研磨技術に関する助言 と指導	アドバイザー
A氏	本研究開発における、空中結像画像評 価方法に関する助言と指導	アドバイザー
中西徹	本研究開発における、アルミミラー膜 の形成および研磨技術に関する助言と 指導	アドバイザー

1-3 成果概要

【1】大型ガラス基板へのレーザー加工機による精密加工技術の開発

【1-1】内部にのみ加工変質層を形成可能なガラス材料の選定およびレーザー照射 技術の開発

個別に導入した、長ストローク精密XYステージと超短パルス・ピコ秒レーザー 発振器から、750mm×180mmの大型ガラス基板に対応した複合切断用レー ザー加工機を構築し、所期の駆動性能、位置決め精度、損失特性が得られることを 確認した。開発したレーザー加工機を使って、複合切断工法に適したガラス材質の 選定とレーザー照射条件(レーザー波長、レーザー出力、発振周波数、送り速度、 集光レンズ)の検討を行い、その知見を基に実施した750mm×750mmの空 中結像光学パネルの試作では、レーザー加工で形成したガラス内部の変性層のガイ ド効果により、ダイヤモンドワイヤーソーの切断カーフのうねりが500μm以下 を達成した。

【1-2】大型レーザー加工機による精密照射技術の開発

レーザー加工機のXYテーブルの表面仕上げ精度を高め、高さのばらつきを12μm に抑えた結果、動的位置制御に拠らずとも、事前の集光レンズの位置合わせだけで、ガ ラス基板の内部に深さ位置ばらつきの小さいレーザー加工を行うことが可能となった。 集光点の位置を集光レンズの固定位置から正確に割り出すための検討を実施した結果、 設定した集光点の深さ位置に対して、約10μmの精度で正確にレーザーを照射する技 術を確立した。

ガラスのレーザー照射による光吸収率の変化に伴ったガラス変質領域の乱れた構造 が、先端的なレーザー技術であるレーザーパルスエネルギーの時間変調により改善でき ることを見出した。さらに詳しくレーザー照射条件を検討し、ガラスクラックの発生を 抑えながら、従来よりも高い平均エネルギーで加工することのできるレーザー照射条件 を見出した。しかし、大型ガラス基板を使った空中結像光学パネルの試作には、加工速 度への対応が間に合わず、基礎検討での効果確認の段階に留まった。 【2】ダイヤモンドワイヤーソーによる高効率かつ高精細な切断加工技術の開発

大型ダイヤモンドワイヤーソー設備を設計・製作し、一部改造、運転条件の検討 を完了後、大型空中結像光学パネル試作向け750mm×750mm×180mm の積層ガラスブロックの切断を実施した。運転諸条件の検討で固定砥粒の電着ダイ ヤモンドワイヤーの採用、クーラント液の水中埋没方式への変更等のプロセス改良 により、従来比約4倍の切断速度が得られた。また複合切断工法の狙いであるレー ザー照射で形成したガラス内部の変性層のガイド効果により、切断カーフのうねり 幅が500μmに低減した。うねりの低減によって、切断後の研磨工程における歩 留まり、効率が飛躍的に改善した。

切断カーフのうねりがレーザーによる変性層の導入により低減した一方で、うねり が発生する由来については、たわみ角度やワイヤーのテンション等の仮説の検証を試み たものの、その原因を特定するに至らなかった。

【3】空中結像光学パネルの製造プロセスの最適化

空中結像光学パネルが大型化に伴って、ガラス基板を積層接着して積層ガラスブロ ックを製作する工程で、より接着強度が強く、接着歪の小さい接着剤が望まれていた。 その探索を行った結果、従来比で約2倍の接着強度が得られるエポキシ系接着剤を新た に見出した。

また、大型ガラス基板の積層接着工程の課題に対応するため、接着時にガラス基板 積層体に偏在圧力を加える機構と減圧脱泡機構を備えた積層治具を製作した。この治具 を使って750×750×180mmの積層ガラスブロックを製作し、接着歪による厚 みばらつき、接着層の気泡共に良好な結果が得られた。また積層ガラスブロックを切 断・研磨して作製したガラスプレートに、接着強度の不足による積層ガラスのハガレや 割れは見られなかった。

積層ガラスブロックのワイヤーソー切断と切断面の研磨を精度よく行うため、ガラ スブロックを裏面から支持する基板を製作し、切断から光学プレートの仕上げ研磨に至 るプロセス全体のブラシュアップを行った。裏面支持基板の表面精度を高め、750m m×750mmの空中結像光学プレートの厚みばらつきは、0.18mmに抑えられた。 【4】空中結像光学パネルの評価方法および評価装置の開発

空中結像光学パネルの評価・検査に必要な要素技術の検討と、開発した要素技術を 組入れたプロトタイプ機の製作を経て、500×500mmの大型空中結像光学パネル の製品検査に対応する評価・検査装置の製作を完了した。本事業で試作したパネルを当 該設備で測定し、最終ユーザーが要求する品質が得られていることを確認した。

また、別途本事業で試作したパネルの解像度を、ISO12233規格に準拠した方法で測定し、目標としていた限界解像度200本(200mm当たり)以上の解像度が得られていることを確認した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

【事業管理機関】

公益財団法人 滋賀県産業支援プラザ

〒520-0806 滋賀県大津市打出浜2番1号 コラボしが21内 TEL:077-511-1414 FAX:077-511-1418 連携推進部 ものづくり支援課 参与 熱田 善胤 E-mail::atsuta@shigaplaza.or.jp

【研究開発機関】

有限会社 オプトセラミックス

〒601-8213 京都市南区久世中久世町5丁目35

TEL:075-922-0756 FAX:075-922-0756

代表取締役社長 大西 康司

E-mail: : onishi@optceramics.name

#### 第2章 本論

2-1 大型ガラス基板へのレーザー加工機による精密加工技術の開発

2-1-1 内部にのみ加工変質層を形成可能なガラス材料の選定およびレーザー 照射技術の開発

① ハイブリッド切断工法用レーザー加工機の開発

ハイブリッド切断工法において、ワイヤーソーによる切断を支援するレーザー加 エの要件は、レーザー照射後のガラスが、ミラーとして使用し得る表面精度と、後 の積層接着工程に耐える機械的強度を保ち、その上で、ダイヤモンドワイヤーソー による切削効率を向上させることである。ガラスが機械的強度を保つには、クラッ クの発生があってはならず、熱応力を抑えたレーザー加工のプロセスが必要である。 超短パルス・ピコ秒レーザーは、こうした特殊な用途に応える設備として期待され ているが、本課題が対象とする大型ガラス基板に対応できる加工機は市販されてい ない。そこで本課題では、ガラス基板を精密移動させる大型XYステージを設計・製 作し、市販のピコ秒レーザー発振器を組み合わせることにより、独自のレーザー加 工機を開発した。製作したレーザー加工機の仕様を表1に示す。750×180mm(厚 み約1mm)の大型ガラス基板を固定するテーブルの材質は、本課題が要求するガ ラス厚み方向の照射位置精度を考慮して、高い寸法精度での仕上げが可能なアルミ ナを選択し、さらにワークのハンドリングに配慮して、固定がパキューム吸着式の ピンチャックタイプのテーブルとした。

製作したXYステージを図1に、導入した超短パルス・ピコ秒レーザーを図2に 示す。レーザー・ヘッドとXYステージの間に光路を敷設して構築したレーザー加工 機は、当初、集光レンズの取付ユニットとして利用した市販のビデオマイクロスコ ープユニットで約53%のパワーロスが発生したため(図3)、このユニットの光 学設計の見直し、改造を行った。(図4)その結果、集光レンズまでのレーザーの パワーロスが当初の76.5%から36.7%に抑えられ、ハイブリッド切断を支 援するレーザー加工機の開発を完了した。

9

	波長	1064/532nm
レー	平均出力	>40W@300kHz(1064nm) >20W@300kHz(532nm)
ザ	バルスエネルギー	>130µJ@300kHz(1064nm) >70µJ@300kHz(532nm)
発	繰返し周波数	シングルショット~1MHz
飯部	パルス幅	<13ps
ЧР	ビーム品質	TEM <sub>00</sub> M <sup>2</sup> < 1.3
	テーブル	アルミナ製ビンチャックテーブル
ス =	×軸駆動	リニアサーボモータ
	X軸可動範囲	0~934mm
**	x軸真直度	<b>0.02</b> mm(参考値)
部	Y軸駆動	ステッピングモータ
нр	Y軸可動範囲	0~250mm
	Y軸真直度	0.05mm
	高さセンサ	レーザー式(分解能: <b>0.02µm</b> )

### 表1 開発したレーザー加工機の技術仕様

ステッピングモーター (Y軸)



ピンチャックテーブル

```
リニアサーボアクチュエーター (X軸)
```



高さ位置センサ(オムロン製変位センサ)



図1 導入したレーザー加工機用XYステージ(ピンチャックテーブル装着済)



図2 導入したピコ秒レーザー発振器



図3 レーザー加工機光学系のパワーロス評価



図4 新旧集光レンズ取付ユニットの光学系

② レーザー照射条件の検討

2-1 波長選択、レーザー出力

本課題で導入したピコ秒レーザー発振器は、赤外の基本波(波長:1064nm)と、 グリーンの第二高調波(波長:532nm)のいずれか一方を切替えて利用できる。基 本波の最大平均出力エネルギーは約40Wであるが、第二高調波の平均出力エネルギー は、波長変換モジュールの効率の制約から、最大約20Wである。(表1)以降、本報 告におけるレーザー出力の表示は装置設定した値を用い、各波長の最大平均出力エネル ギーに対する割合を記載する。

複合切断に適したレーザー照射条件を見出すため、ホウケイ酸ガラスAに、2種類のレーザー波長に対してそれぞれ出力を変えて照射を行い、加工痕跡の観察を行った。いずれもパルスレーザーの繰返し周波数は200kHz、ワークの送り速度は5mm/sとした。図5が波長1064nm、図6が波長532nmのレーザーを照射したもので、ガラス基板の入射面、および断面を観察した光学顕微鏡像と偏光を使った光弾性像を示している。断面の写真から、加工痕は集光点周りに局在し、ガラスの内部に留まっていることが確認できる。さらに顕微鏡像と光弾性像を比べると、加工痕として見えている領域とその周囲に応力が蓄積されているのが判る。加工痕の近傍を高分解能の走査電子顕微鏡で観察したところ、周辺にボイド・空隙の痕跡は確認できなかった。よって、加工痕として発現する光学的なコントラストは、応力による複屈折効果や組成の変動による、ガラスの光学物性の変化を反映したものと推察される。レーザーの出力が波長により異なるため直接比較できないものの、波長532nmのレーザー光を照射したガラスには、より非対称な応力分布が形成され、クラックが発生しやすい傾向が確認された。



図5 基本波(λ=1064nm)レーザーを照射したガラスに形成した加工痕



図6 第二高調波(λ=532nm)レーザーを照射したガラスに形成した加工痕

2-2 繰返し周波数

レーザーパルスの繰返し周波数は、ガラスの熱伝導率や比熱といった熱物性と連鎖 して、照射したガラスの応力分布に影響を及ぼすことが想定される。

波長1064nmのレーザーパルスの繰返し周波数を200kHz~1000kH zの範囲で変化させ、ガラスに照射した後の加工痕の様子を図7に示す。断面の光弾性 像は、集光点とその周りに蓄積される応力が、繰返し周波数とともに増加することを示 し、周波数1000kHzに至っては応力がガラスの破壊限界を超えて、クラックが発 生した。応力発生の最大要因が熱であると考えられることから、ガラスの変性形態への 熱の関与を、レーザーパルスの繰返し周波数を調整し制御できることが明らかになっ た。



図7 異なるパルス繰返し周波数のレーザーを照射したガラスに形成した加工痕

2-3 テーブル送り速度

レーザー加工におけるワークの送り速度は、単位長さに投入されるエネルギーを規 定する。さらに、熱応力分布の動的振舞いも、送り速度が関係し、クラックの発生や伸 展に影響することが予想される。そこで先ず、開発したレーザー加工機で実現可能な最 大送り速度を見積もるためにXYステージの駆動能力を評価し、その後、ガラス加工に おける、ワーク送り速度の影響を調査した。

XYステージの駆動能力評価は、ステージで移動しているガラスに低周波(200 Hz)のレーザーパルスを照射し、加工痕の座標を測長顕微鏡で読み取り、解析するこ とで行った。(図8)評価のためのプログラムは、助走距離と到達速度を入力し、助走 区間でステージを加速させた後、レーザーのシャッターを開にして照射痕のマーキング を開始するように設定した。

50mm/sと100mm/sの到達速度に対して、助走距離をそれぞれ10mm、 20mmに設定し、横軸に加工痕跡の座標、縦軸にテーブルの送り速度をプロットした ものを図9に示す。ここで、速度は図8により照射痕の座標を使って算出したものであ る。設定速度が50mm/sであれば、10mmの助走で速度は設定値の97%となり、 ほぼ定常状態に達する。一方、設定速度が100mm/sの場合、助走10mmの地点 で速度は設定値の89%、20mmの地点では96%となり、定常状態に達するまでに 約40mm程度の助走が必要である。本設備で750mmのワークを加工する場合、リ ニアアクチュエーターの制約により助走距離は最長10mmである。従って、大型空中 結像光学パネルの試作に当たって50mm/s以上の速度設定を行う場合、ステージの 駆動特性を考慮する必要があることが判明した。

繰返し周波数を200kHzに固定し、送り速度とレーザー出力の水準を変えて得ら れたレーザー加工痕を入射面と断面から光学顕微鏡で観察した結果を図10に示す。熱 応力のため歪んで見える領域は、送り速度が20、50、100mm/sとテーブル送 り速度が早くなるにつれ縮小している。これは単位長さ当たりに投入されるエネルギー が小さくなることと整合する。ところが、テーブル送りが20mm/sとした場合に、 レーザー出力70%まで、クラック発生なくガラスが加工される一方で、送り速度50 mm/sの場合には、レーザー出力50%でクラックが生じ、さらに送り速度100m m/sになると、レーザー出力20%の試料に、ひげ状のクラックが確認できる。送り 速度が速くなると応力分布の異方性が強まってステージの移動軸に沿ったクラックが 走りやすくなるためと考えられる。

ガラス基板はその後、加圧した状態で積層接着されるため、レーザー加工でのクラ

ック発生は回避されなければならない。従って送り速度は、20mm/s程度に抑える 必要がある。



図8 テーブル送り速度の計測方法







図10 レーザーを照射したガラスに形成した加工痕の差異(テーブル送り速度、レーザー出 力)

②-4 集光レンズ開口数

集光レンズ(対物レンズ)の開口数(N.A.)は、光路の屈折率n、集光点からレンズの最大半径に引いた線と光軸とがなす角をθとして、

 $N.A. = n \cdot \sin \theta$ 

で定義され(図11)、レンズとワークの間が空気である今の場合はn=1である。開 ロ数によってレーザーエネルギーが集束する角度が変化するため、集光点検出の位置精 度やレーザー照射による変性層の形態に影響することが想定される。そこで、集光レン ズとして同ーメーカーが製作している開口数の異なった対物レンズを使い(図12)、 レーザーを照射した後、加工痕跡の比較観察を行った。開口数0.1~0.65の4種 類の対物レンズでレーザー光をガラス内部に集光させ、形成した加工痕を断面から光学 顕微鏡で観察した像と、偏光下で観察した光弾性像を図13に示す。ガラスの変性領域 は、開口数が大きくなるにつれてフィラメント状から球状に変化している。これは、集 光レンズの開口数の違いにより、集光角に差が生じたためと考えられる。実際の運用で 生じた問題点としては、レンズの開口数が小さいとエネルギー密度の高い領域が上下方 向に伸張するため、ガラス表面を精度よく検出するのが困難になる。実際に開口数0. 1の対物レンズでは、再現性良くガラス表面を検出することができなかった。また、開 口数の大きなレンズは焦点距離が短いので、ワークとレンズの間のクリアランスが小さ くなって作業に支障が出るばかりか、状況によってはガラスの深い位置に集光すること ができなくなる。これらの知見をガラス内部のみに切削性の良いガラス変性域を形成す るという本課題の目的に併せて考慮すると、集光レンズの開口数として、0.3~0. 65程度が適当と考えられる。



駿河精機製対物レンズ S72Sシリーズ

倍率	開口数	焦点距離	W.D.
×5	0.10	37.9mm	18mm
×10	0.25	22.17	7.5
×20	0.40	11.72	2.2
×40	0.65	5.78	0.6

#### 図11 開口数の説明図

図12 評価を行った対物レンズ



図13 レーザーを照射したガラスに形成した加工痕の差異(対物レンズ開口数)

③ レーザー加工したガラス基板の曲げ強度試験、ガラス材質の選定

光学パネルに使うガラス材質は、レーザー加工で切削性の良い変性層がガラス内部 に形成しやすく、同時に後の積層接着工程に耐える機械強度を保たなければならない。 それ以外の要請、例えば積層接着での変形要因である熱膨張率や、積層接着で撓みの要 因であるガラス基板の機械精度などの要件から、候補となるガラスがアルミノケイ酸ガ ラスCと無アルカリガラスDの2種に絞られた。この中から、最終的に使用するガラ ス基板の材質を決定するため、いくつかの照射条件でこれら2種のガラスをレーザー加 工し、加工後のガラスの変性域を観察するとともに機械強度を4点曲げ試験法で評価し た。

レーザー加工した2種のガラスを切断し、断面から観察した光学顕微鏡像と偏光下 で観察した光弾性像を図14に示す。レーザー照射条件が同じであれば、アルミノケイ 酸ガラスCと無アルカリガラスDのそれぞれに形成する変性域のサイズの差は小さい。 ただし、応力分布がアルミノケイ酸ガラスCにおいて非対称になる傾向がみられた。

これらのレーザー加工を行ったガラス試料それぞれ5枚ずつをとって、4点曲げ強 度試験を行った結果を図15に示す。赤いマーカーが5枚の試料の平均値で、エラー・ バーは標準偏差を表わす。無アルカリガラス D は、比較的大きな変性層が形成してい るガラスでも、曲げ強度の変化は小さい。一方アルミノケイ酸ガラス C では、レーザ ー加工の条件が厳しくなるにつれ、曲げ強度の低下が見られた。しかし、最も変化が見 られた試料であっても未加工状態の1/3程度の曲げ強度を保ち、ハンドリングに支障 は及ばないと考えられる。従って、空中結像光学パネル用のガラス材質には、レーザー 加工によって明確な機械特性の変化が期待でき、かつ後工程のハンドリングに耐えるア ルミノケイ酸ガラス C ガラスを選定した。

19

	λ=1	064 nm、f=20	0kHz、V <sub>t</sub> : 5m	$\lambda$ =532 nm、f=200kHz、V <sub>t</sub> : 5mm/s			
	出力: <b>5%</b>	10%	15%	20%	出力: <b>10%</b>	20%	30%
アルミノケィ酸ガラスC	•	9	0	0		0	1
			9			X	
無アルカリガラスD	į.	•	0	۲		0	0
			(0)	O	1		Ŷ

図14 レーザーを照射した2種類のガラスに形成した加工痕



2-1-2 大型レーザー加工機による精密照射技術の開発

① 深さ方向精密加工位置決め技術の検討

深さ方向(Z軸方向)の位置精度を決める前提となる、XYステージのチャック テーブル表面の高さ精度を、XYステージに付設したレーザー式変位センサで測定 した。アルミナ製ピンチャックテーブルのほぼ全面に当たる730×160mmの 範囲の表面高さを、10mmピッチで計測した結果を図16に示す。平滑化処理せ ず評価した高低差の最大は12.2μmであった。 本課題では、レーザー加工で形成する変質層をガラス内部に局在させるのに必要 な位置決め精度としてガラス厚みの10%以内を目標に設定しており、空中結像光 学パネルのガラス基板の厚み約1mmに対し、位置決め精度の目標は0.1mm以 内となる。チャックテーブルの高さ精度はこれよりも一桁小さいため、最初に集光 点が高精度に位置決めされ、固定されていれば、目標の加工精度が得られるはずで ある。このことを検証するため、まず集光点の検出方法を検討し、その後、事前に 設定した集光点の狙いの位置と、レーザー照射で形成した変質層の位置とを比較し た。

集光点は、出力を絞ったレーザーを照射しながら、集光レンズを高い位置からマ イクロメーター付き移動ステージで降下させ、ワークであるガラス基板の表面が閃 光を発した瞬間をガラス表面に集光点が一致した高さとして位置を検出した。

集光点がガラス表面に一致した点から、集光レンズを下に向けて移動させた距離 *dと、*その時に集光点がガラス内部に侵入した深さ*D*の関係を、空気とガラスの屈 折率の違いを考慮して表したのが図17である。ガラスの屈折率を*n、*集光レンズ の開口数を*NA*とすると、*dとD*の関係は、幾何学的考察により、

$$\frac{D}{d} = \sqrt{\frac{n^2 - (NA)^2}{1 - (NA)^2}}$$

となる。

集光レンズに開口数NA=0.3の対物レンズを使い、厚さ1.1mmのアルミ ノケイ酸ガラスC(n=1.502@780nm)に、集光点をガラス表面に合わ せた位置から集光レンズを0.05mmずつ下げて、順次レーザー照射を行った。 得られた加工痕を、断面から観察した写真を図18に示す。

最初の加工痕はガラス表面と非常に良い一致を示した。その後、集光レンズを移動させる毎に、加工痕がほぼ一定距離ずつ移動し、その距離はO.77mmであった。集光レンズと加工痕の深さ方向移動距離の比は、上記関係式のnおよびNAに、それぞれガラス基板の屈折率と集光レンズの開口数を代入して得られるD/d= 1.54と一致した。 本検討により、集光点の位置を上記の手順で精度よく検出することが可能であり、 その後集光レンズを算出式から求めた距離移動すれば、ガラスに照射するレーザー の集光点の位置を10 μmレベルで制御できることが判明した。



図16 レーザー加工機チャックテーブルの高さ分布



図17 集光レンズと集光点の 図18 集光点の移動の様子(△*d*=0.05mm) 移動距離の関係

②新規レーザー照射技術の検討

ピコ秒レーザーを使ってガラス基板のレーザー加工を検討する過程で、加工痕の変 性構造に周期的な乱れが現れるのが確認された。過去の研究により、その原因は、レー ザー照射に伴う温度上昇で、熱励起された電子によって光の吸収率が高くなる領域が、 時間的・空間的に変動しながら生ずるためと考えられている。(参考文献、Nordin,I.H.W. et al. Appl. Phys.A(2016)122:492)加工痕の乱れた構造は空間的に不均一な応力 分布があることを示しており、応力集中個所がクラック発生の原因になることが懸念さ れる。そこでレーザーパルスのエネルギーに時間変調を加え、加工痕の変性構造を均質 化する検討を行った。(図19)

500kHzの繰返し周波数でパルス発振するピコ秒レーザーを、パルスエネルギ ーが50%~100%の範囲で変化するよう2kHz~20kHzで変調し、一般的な 板ガラス材料であるソーダライムガラスに照射した。加工痕を照射方向から顕微鏡で観 察した写真が図20である。レーザーの走査方向にパルスの繰返し周波数に比べて長周 期の構造が現れ、これが光吸収率の空間的変動に対応すると考えられる。平均出力7. 5Wの変調したレーザーを照射した試料の一連の写真からは、変調周波数が高くなる につれて、周期構造が曖昧化しているのがわかる。エネルギー変調の無いレーザーを照 射した試料は、平均出力10Wでクラックが発生した一方で、20kHzで変調した レーザーを照射した試料は、平均出力が11Wであっても、クラックフリーの加工が 可能であった。

図21は、組成・機械特性が、空中結像光学パネルのガラス材料に類似する無アル カリガラスに対して、パルスエネルギーの変調を変えたレーザーを照射し、得られた加 工痕を観察した様子である。変調のないレーザーを照射した試料には、ソーダライムガ ラスよりもさらに明瞭な周期構造が見られ、変調周波数の高周波化に伴って、周期構造 が急速に失われているのが確認できる。

本検討は、レーザー加工したガラスの変性構造にみられる周期的な乱れが、レーザ ーエネルギーを変調することにより均質化され、クラックの発生が抑えられることを明 らかにした。すなわち、クラックを発生させることなく、平均エネルギーの高いレーザ ーを照射し、より大きな変性領域をガラスに形成することが可能になった。これを、ダ イヤモンドワイヤーソーとの複合切断工法に応用することで、切断速度の更なる向上が 期待できる。

23



図19 レーザーパルスエネルギーの時間変調による変性構造の均質化のアイデア



図20 ソーダライムガラスに対するレーザーパルスエネルギーの時間変調効果



図21 無アルカリガラスに対するレーザーパルスエネルギーの時間変調効果

2-2 ダイヤモンドワイヤーソーによる高効率かつ高精細な切断加工技術の開発
 ① 大型ダイヤモンドワイヤーソーの開発

750mm×750mm×180mm積層ガラスブロックを切断するために、ガイ ドローラーの配置やワイヤーテンションの制御機構に独自の設計を取り入れた大型ワ イヤーソー設備を製作した。設計図面を図22に示す。大型ガラスブロックをワークに した試験運転では、ダイヤモンドワイヤーの切断が頻発した。調査を行ったところ、ダ イヤモンドワイヤーの走査方向が反転する際にワイヤーテンションの制御が追いつか ず、弛んだ状態のワイヤーがボビンに巻き取られるのが原因であることが判明した。そ こで、以下の3点の設備改造を実施した。(図23)

- i)ワイヤーテンション制御用エアシリンダーの多段化
- ii)ダイヤモンドワイヤー繰り出しボビンの緩み防止機構の設置
- iii) 切断終了時のワイヤーの跳ね上がりの防止機構の設置

これらの結果ダイヤモンドワイヤーの切断頻度は顕著に減少し、改善が得られた。



図22 導入した大型ダイヤモンドワイヤーソー



図23 ダイヤモンドワイヤー切断対策の設備改造

#### ② ダイヤモンドワイヤーの選定

ダイヤモンドワイヤーは主にダイヤモンドのワイヤーへの固定方法で分類され、ガラス ブロックの切断に適したワイヤーを、耐久性に問題があるレジンボンドを除き、電着固 定のワイヤー(製品A)とメタルボンドのワイヤー(製品B)で比較検討した。時間と、 単位時間に切り込まれたガラスブロックの面積で定義した切断速度の関係を図24に 示す。製品Bは、途中でワイヤーの切断が発生し、再試験でも同じ結果となった。一方 の製品Aは、時間経過に伴う切断速度の変化が大きいものの、切断速度の初速が大きく、 最後までワイヤーが切れることなくガラスブロックの切断を終えた。得られた結果に従って、空中結像光学パネル切断用のダイヤモンドワイヤーに、電着固定したダイヤモンドワイヤーである製品Aを選定した。



図24 2種のダイヤモンドワイヤーの切断速度の比較

③ クーラント方式の改善

固定砥粒方式で切断するダイヤモンドワイヤーソーの場合、クーラントの役割 は主に、冷却、潤滑、そして削られた研削粉のカーフ溝からの排出である。導入し たワイヤーソーは大型ガラスブロックの切断を目的とするため、特に切削粉を効率 的にワークの外に排出する必要がある。そのため、クーラントをカーフに沿って滴 下する従来の方法と、積層ガラスブロックを、クーラント液を満たした水槽中に埋 没させて切断を行う水没方式の比較を行った。375mm角のガラスブロックを2 つの方式で切断し、その時の切断速度を比較したものを図25に示す。

クーラント液を滴下させる方式では375mm角のガラスブロックを切断するのに 403分の時間を要したのに対し、水槽中埋没方式の場合261分で切断が完了した。 遊離砥粒を懸濁させたクーラント液を滴下させる従来方式との比較では、固定砥粒で あるダイヤモンドワイヤーを使った水槽中埋没方式の切断で、切断速度は約4倍に向 上した。



図25 2種のクーラント方式の切断速度の比較

#### ④ 切断カーフのうねり発生原因の探求

ダイヤモンドワイヤーソー切断した積層ガラスブロックの切断面に生ずるうねりの 原因解明と抑制を目的に、ダイヤモンドワイヤーのたわみ角度の検討を行った。現状の ワイヤーソーは、メインローラーの位置が固定されているため、切断の進行とともに、 たわみ角度 θ が漸次小さくなる。(図26)この配置でワイヤーテンションを一定に保 ち、375mm角の積層ガラスブロックを切断すると、たわみ角の減少に合わせて、切 断速度(短時間当たりの切込面積)が時間とともに低下した。(図27)また、切断面 の形状測定の結果、うねりは切断開始初期に生じていることが判明し、たわみ角度が切 断速度を通してうねりの発生に関係していることを示唆した。(図28)これを検証す るため、750mm角の積層ガラスブロックを使い、通常位置の上方に切断開始時のた わみ角を小さくするためのメインローラーをもう一組設置し、途中、ガラスブロックを 約半分切り込んだところで、ダイヤモンドワイヤーを通常位置のローラーに掛け替えて 切断を行った。(図29)

メインローラーの位置が高くなり、たわみ角が小さくなったことで、開始時の切断 速度は約1/2に低下した。(図30)しかし、切断面のうねりと切断速度との明確な 相関は確認できず、一方で、約半分を切断したところで実施したダイヤモンドワイヤー の掛け替えが原因と思われる大きなうねりが観察された。(図31)

同じく積層ガラスブロック切断面のうねり対策として、ワイヤーテンションの検討

28

を行った。切断速度を平滑化するため、ダイヤモンドワイヤーのテンションを切断途中 で変更し、開始時50%、終了時150%となるよう調整しながら連続運転を行った。

積層ガラスブロック切断面の表面形状を図32に示す。ワイヤーのテンションを下 げることによって切断速度を抑えたにもかかわらず、うねりが運転初期に発生する傾向 に変化はなかった。

切断速度と切断面のうねりの間の因果関係には証憑が得られず、うねりの発生のメ カニズムを明らかにするには、より原理的・基礎的な検討が必要である。複合切断工法 の大きな狙いの一つは、レーザー加工で形成した変性層を切断ガイドとして機能させ、 うねりを抑制することである。加えて、うねりの発生メカニズムが解明できれば、更な る生産性の向上が期待できるため、本事業の補完研究として検討を継続する予定であ る。



図26 切断の進行に伴うたわみ角の変化





図27 切断速度の変化(375mm積層ガラ 図28 切断面の表面形状 スブロック)



図29 2段ローラー式切断の略図と改造設備の写真



図30 切断速度の変化(2段ローラー式)

図31 切断面の表面形状(2段ローラー式)



図32 切断面の表面形状(テンション制御式)

2-3 空中結像光学パネルの製造プロセスの最適化

① ガラス基板積層用接着剤の選定

マイクロミラーアレイで構成される空中結像光学パネルは、AI 膜を形成したガラス 基板を積層接着し、それを輪切りにした後、切断面を研磨して作られる。積層接着に は、後の研磨工程に耐える強い接着強度と、歪の小さい接合を可能にする接着剤が要 求される。そこで、近年電子材用接着剤として高い評価を得ているエポキシD剤を新 たに入手し、従来から用いてきたエポキシA剤との性能比較を行った。 4点曲げ試験による接着強度の測定結果を図33に示す。光学パネルの製作では積層 接着部の歪緩和を目的に、接着剤にシリカ系球状フィラーを混合したものを通常用い るため、エポキシAとエポキシDをそのまま用いて接合したテストピースと、フィラ ーを20wt%混合させた接着剤で接合したテストピースの両方を用意した。また接 合面は、ガラスの表面同士を突き合わせて接着したテストピースと、ガラス基板にAI 膜を形成し、膜がコーティングされた面同士を突き合わせて接着したテストピースを 比較した。新たに見出したエポキシDは、従来のエポキシAよりも高い接着強度を示 し、特にフィラーを混合しAI膜の面同士を突き合わせて接着した試料では、従来使用 してきたエポキシAのおよそ2倍の強度が得られた。開発を目指す大型の空中結像光 学パネルの場合、加工負荷が従来以上に大きくなることが想定されるため、より強い 接着強度が得られるエポキシD剤を、ガラス基板の積層用接着剤として選定した。



【囲け試験機】 RIC-1250A 【測定条件】 5mm/min

図33 2種の接着剤の4点曲げ法による接着強度の比較評価

#### ② 大型ガラス基板用積層接着治具の製作

750×180×<sup>t</sup>1.1mmのガラス基板750枚を積層接着する積層接着工程の 技術課題を抽出するため、同じサイズの基板30枚を使った予備実験を実施した。本来 は、ミラーを構成するアルミ膜付きのガラス基板を積層するところ、接着面がガラスを 通して観察できるように、上部の20枚にアルミ膜の付いていないガラス基板を使用した。

積層接着条件を表2に、積層接着後にガラスを通して観察した接着面の様子を図3 4に示す。この写真から、接着面の特に中心付近に、気泡が集中しているのが確認でき た。図35は積層したガラスブロックの上下の面形状を基板の長手方向に測定したもの である。積層面全面に均一に圧力を加えて接着したガラスブロックは、中央部分が端に 比べて約400μm膨らんでおり、そこに隙間ができて気泡が入り込んだものと推定さ れた。接着層(29層分)の厚み分布を基板の長手方向に測定した結果を図36に示す。 どの接着層も厚み分布の傾向は似ており、それらを積算すると、右側グラフのように積 層ガラスブロックの中央の膨らみの高さにほぼ一致した。

上記予備実験で得られた知見に基づいて、750mm×180mm×<sup>t</sup>1.1mmの ガラス基板750枚を積層接着する治具を製作した。設計組み立て図と完成写真を図3 7に示す。積層ガラスブロックの中央部の膨らみを矯正するため、接着時に積層面(7 50mm×180mm)の4隅と中心をそれぞれ独立に加圧できる治具を設計し、トル ク値を設定したトルクレンチでボルトを締め込んで加圧する構造にした。また、接着層 の気泡対策として、接着剤を充填した液槽中で接着硬化を行う治具構造として、液槽を 外部から遮断し、内部を真空ポンプで脱気できるようにした。

ガラス基板	が小酸ガラスB 750×180×1.1mmt アルミミラ−付き10枚 無し20枚 計30枚
接着剤	エポキシD + フィラー
荷重	全面均一荷重
硬化	室温24hr

#### 表2 積層接着条件



図34 ガラス基板を通して観察した、内部接着 面の状況







図36 接着層の厚み分布(左:個別接着層、右:接着層29層の積算)



(b)



図37 750mm×750mm×180mm積層ガラスブロック製作用接着治具((a): 組 立て図面、(b): 積層接着時の様子)

#### ③ 裏面支持工法の検討

750mm×750mm×180mmの積層ガラスブロックをダイヤモンドワイヤ ーソー切断し、その後精度よく光学ガラスプレートまで鏡面研磨するために、積層ガラ スブロックを裏面から支持する製造方法を考案し、裏面支持基板の設計・製作と全体プ ロセスの検討を行った。(図38)

裏面を支持する基板は、機械精度、重量、ワイヤーソー/研磨装置へのワークの移 動等を勘案し、ステンレス製フレームに白板ガラス基板を接着した構成とした。(図3 9)ところが、フレームに白板ガラスを取り付ける際の接着歪により、基板中央に20 0μm 程度の膨らみが生じたため、白板ガラス表面を矯正するための特殊研磨加工を 実施した。(図40)その結果、修正された白板ガラス表面の面精度は50μm以下に 収まり、750mm×750mmの積層ガラスブロックを精度よく切断し、厚みばらつ きを最小限に抑えながら研磨加工を実施できる目途が得られた。



図38 考案した裏面支持基板を使った空中結像光学パネルの製造方法



図39 積層ガラスブロックの裏面支持基板(ベース)



図40 特殊研磨加工による裏面支持基板表面の修正作業

2-4 空中結像光学パネルの評価方法および評価装置の開発

展示会への出展やサンプリング活動を通して、空中結像光学パネルに対する最終ユーザーの要求品質を明らかにし、その評価・検査測定に必要な要素技術の検討を行った。光学パネルで作られた空中映像を CCD カメラでパソコン上に取り込み、

デジタル化された画像データに基づいて、評価項目ごとに独立したイメージプロセッシングのプログラム開発を行った。(図41)個別プログラムの開発を終えた段階で検査装置のプロトタイプを製作し、この試作機を基に、被検査光学パネルのサイズのスケールアップ、評価プログラムのシステム化(プリ/ポストプロセッサーの付加、個別評価プログラムの統合、インターフェースの統一)を実施し、750mm角の積層光学パネルをクロス接着して得られる500mm×500mmの空中結像光学パネルに対応した評価・検査装置の製作を完了した。表3に装置の仕様を示す。



図41 空中結像光学パネルの評価・検査に必要な要素技術

表3 製作した空中結像光学パネルの技術仕様

被検査パネルサ	ナイズ	500×500mm以下					
テストチャ-	-ト	対角10インチ					
評価・検査仕様							
検査項目		検査内容	検査方法				
パネル外観	疵、白ス	目視検査					
結像位置	画面全体	本が指定された枠内に有るか	自動計測				
結像歪み	画面内部	自動計測					

2-5 研究成果の検証(750mm×750mmの空中結像光学パネルの試作と評価)

① レーザー加工

積層接着ブロックの製作に用いる750mm×180mm×1.1 mmのガラス 基板750枚のうち150枚のガラス基板に、ダイヤモンドワイヤーソーによる切断を 支援するレーザー加工を行った。ガラス基板の片面側(図42 右側写真の下面側)に はミラーとなるA1膜が形成してあるため、厚み1.1mmのガラス基板に対し、集光 点の狙い位置をガラス中央から少し表面側の深さ462μmに設定し、クラックを生ず ることなく最大エネルギーを投入できる条件で、レーザー照射を行った。

レーザー加工の結果を検証するため、同一条件でレーザー照射を行ったモニターガ ラス(A) 膜無し)の観察結果を図43に示す。ガラスの入射面から加工痕の中心まで の深さの実測値は470 µmとなり、狙い位置との差は、8 µm(0.008mm)で あった。また、ダイヤモンドワイヤーソーの切断カーフのガイドとなるガラス変性領域 の幅は、実測値95 µmであった。



図42 レーザーによる支援加工でガラスに形成した加工痕

#### 大型ガラス基板の積層接着

750mm×180mm×11.1mmのガラス基板750枚を、図37の接着治 具を使って、中心に集中荷重を加えながら接着し、積層ガラスブロックを作製した。得 られたブロックの厚みを6点で計測した結果を図43に示す。接着時に積層面に印加する圧力を全面均一から中央集中に変更したことによって、ブロック中央部の膨らみ(図 35)が解消できていることを確認した。



図43 積層ガラスブロックの厚み測定結果

③ ダイヤモンドワイヤーソーによる積層ガラスブロックの切断

大型ダイヤモンドワイヤーソーにより、積層ガラスブロックを切断し、複合切断工 法におけるレーザー加工の支援効果を検証するため、切断面の形状を測定した。図44 に計測結果を示す。レーザーの支援加工が無い場合に、切断開始直後に発生していた大 きなうねり(図28)が消え、切込みがレーザー加工した基板の範囲を過ぎても、安定 してうねりの少ない切断面が得られた。その結果、全体でのうねりは、本事業が当初の 目的に設定した500μm(0.5mm)以下に抑えられていることが確認できた。ま た、切断面のうねりが抑えられたことによって、この後の工程の、切断面の粗研磨工程 での取り代を、従来の2mmから1mm程度に低減させることができた。



図44 積層ガラスブロック切断面の表面形状

④ 光学ガラスプレートの研磨、仕上げ

寸法精度に優れた積層ガラスブロックの切断と、光学ガラスプレートまでの研磨仕 上げを行うため、ダイヤモンドワイヤーソーでの切断以降の工程は、積層ガラスブロッ クの片面を図39の裏面支持基板に接着して、その対面を加工した。

両面ともに鏡面研磨が完了した750mm×750mmの光学ガラスプレートの 厚みを測定した結果を図45に示す。光学プレートの厚みばらつきは、本事業の当初の 目標値0.2mmに対して、0.18mmに抑えられた。また、裏面を支持基板で固定 されたまま仕上げ加工された光学プレートに、歪みやたわみは見られなかった。



図45 両面鏡面研磨仕上げした光学ガラスプレートの厚み分布

⑤ 本事業で製作した製品検査装置による評価・検査

両面の鏡面研磨が完了した光学ガラスプレート2枚をクロス接着し、空中結像光学 パネルを完成させた。750mm×750mmの空中結像光学パネルを使って、約20 cmのフィギュアの像をパネルを挟んだ空中に結像させた。(図46)歪みが小さく、 コントラストの大きい明るい空中浮遊像が得られた。被結像体の位置を動かせて空中像 の変化を見たところ、高品質の空中像が得られる空間領域には、かなりの余裕があるこ とが確認された。

出来上がった空中結像光学パネルをサブテーマ【4】で製作した製品検査・評価装置で評価した。図47は、結像歪みの測定の様子であり、左写真が評価用原像を写した

検査画像モニター、右写真がカメラに取り込んだ空中結像を自動計測し、PCで解析された結果と合否結果を表示するモニターである。試作した空中結像光学パネルは結像歪みが小さく、現状各先から要求されている規格を十分に満足する品質が得られていた。

図48は、ISO12233に基づいた、試作空中結像光学パネルの解像度の測定 結果を示したものである。右図の中のコントラストのプロファイルにより、試作した空 中結像光学パネルは、限界解像度200本以上の良好な解像度を示し、本事業の当初に 設定した目標値を達成していることが確認された。



図46 750mm×750mmのパネルを使って結像させた空中浮遊像



図47 製品評価・検査装置による試作空中結像光学パネルの結像歪みの計測



図48 ISO12233に準拠した解像度チャート(左)と、試作空中結像光学パネルの解像 度測定結果(右)

#### 最終章 全体総括

3-1 複数年の研究開発成果

【1】大型ガラス基板へのレーザー加工機による精密加工技術の開発

複合切断工法において、ダイヤモンドワイヤーソーによる積層ガラスブロックの切 断をアシストするため、750×180mmの大型ガラス基板に対応した超短パルス・ ピコ秒レーザー加工機を製作・開発した。"レーザー照射による変性層をガラスの内部 のみに形成する"という複合切断工法の要件を充たすため、深さ方向の精度に優れた加 工方法の検討を行い、XYテーブルの機械精度を高めることで、深さ方向の加工位置の 誤差が設定位置に対して10μmレベルに抑えられた。この値は加工対象であるガラス 基板の厚みの1%程度であり、本研究開発が設定した目標値を達成した。

レーザー照射により形成した変性層、およびその周囲のガラスの変化を微視的に解 析する技術の検討を行い、ミクロンレベルの元素分析(EPMA)や光弾性効果を利用し た偏光顕微鏡による応力解析の技術を導入した。レーザー照射条件を検討に際しては、 これらの解析技術を応用し、レーザー照射により形成したガラス変性層の解析、変性層 周囲の応力分布の解析等に活用した。

開発したレーザー加工機を使って、複合切断工法に適合したレーザー照射条件を検 討し、レーザーの波長、繰返し周波数、出力、テーブル送り速度他の条件を決定した。 また、空中結像光学パネル用ガラス材質のレーザー加工特性を比較評価し、その結果に 基づいて最終的なガラス材質の選定を行った。

750×750mmの空中結像光学パネルの試作において、最適化されたレーザー 照射条件でガラス基板の支援加工を行った。後工程のダイヤモンドワイヤーソーによる 切断においてレーザー加工痕のガイド効果が発現し、切断後のうねりが500μm以下 に低下した。これによって切断後の研磨工程における研磨取り代が減り、歩留まり及び 生産効率が大幅に改善した。

【2】ダイヤモンドワイヤーソーによる高効率かつ高精細な切断加工技術の開発

大型ダイヤモンドワイヤーソーを導入したのち小規模な設備改造を経て、 750mm×750mmの積層ガラスブロックを安定的に切断することが可能な設 備の開発を完了した。切断条件の最適化を検討した中で、ガラスブロックをク ーラント液に埋没させた中で切断する工法を見出し、切断時間を従来のクーラ ント液をワーク上方から滴下する方式に対して65%に短縮した。現在シリコ ンインゴットの切断等で主流の遊離砥粒方式をダイヤモンドワイヤーによる固 定砥粒方式に変更した効果を併せ、切断速度は約4倍に向上した。さらにサブ テーマ【1】のレーザーによる支援加工を組み合わせた複合切断工法を実施す ることによって、空中結像光学パネルの製造における積層ガラスブロックの切 断工程の大幅な効率化と歩留まり改善を実現した。

【3】空中結像光学パネルの製造プロセスの最適化

750mm×180mm×11.1mmのガラス基板約750枚を積層接着し、 精度の高いガラスブロックを作製するため、従来よりも約2倍の接着強度が得 られる新たな接着剤を見出した。

また、750mm×750mm×180mmの大型積層ガラスブロックの製作に 対応し、接着の際に偏在圧力を印加する機構や真空脱泡を行う機構を備えた接 着治具を製作した。大型空中結像光学パネルに向けて、この治具を使って作製 した積層ガラスブロックは、外形の変形や接着層への気泡の混入が無い良好な ものであった。

積層ガラスブロックを切断し、その後切り出したプレートを精度よく研磨仕 上げする方法として、積層ガラスブロックの裏面を面精度の良い支持基板に接 着し、切断・研磨時の変形を抑えながら最終製品を仕上げるプロセスを考案し た。条件細部を詰めた後にこのプロセスを大型空中結像光学パネルの試作に適 用し、750mm×750mm空中結像光学パネルの最終製品において、厚み ばらつきが0.18mmに抑えられた。

【4】空中結像光学パネルの評価方法および評価装置の開発

最終ユーザーの要求品質に基づいて空中結像光学パネルの技術仕様を設定し、 検査測定に必要な要素技術の検討を行った。要素技術を確立後、それらを組み 込んだ検査機プロトタイプを製作し、検証を行って必要な改造を実施した。プ ロトタイプ機において評価項目ごとに独立していた測定プログラムを統合し、 インターフェースの統一などの改良を経て、750mm×750mmの積層ガラス プレートを45°方向に切断して得られる500mm角の大型空中結像光学パネルに 対応した検査・評価装置の製作を完了した。

本事業の研究成果の仕上げとして、得られた知見を結集し、大型空中結像光学パネ ルの試作を行った。開発した検査装置で試作パネルを評価し、最終ユーザーの要求仕様 が満たされていることを確認した。また試作パネルの解像度評価を行った結果、ISO1 2233規格に準拠する方法で、限界解像度200本以上(200mm当たり)の高解 像度が得られていることを確認した。

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

本研究開発において、複合切断技術のアイデアを顕在化させたことによって、従来 と比べて大幅な歩留まり改善と生産効率の向上が達せられた。しかし、全体の製造コス トを考えた場合、ガラス基板や接着剤等の原材料コストや、ミラーを形成するアルミ薄 膜の成膜コストなど、いまだ検討が不十分な要素が残されている。これらのコストは、 空中結像光学パネルの生産量に深く関わってくるため、最終ユーザーとのコミュニケー ションを密にして、より綿密な生産計画を練り上げる必要がある。

複合切断工法におけるレーザーの支援加工により、ダイヤモンドワイヤーソーによ る切断時にガイド効果が生まれ、生産効率の向上に大きく寄与する結果が得られた。そ のアイデアが生まれる発端となった、ワイヤーソーの切断カーフの大きなうねりの原因 は、本研究開発でも探索を試みたものの、検証することができなかった。今後デバイス が用途を広げていくとコストダウンの圧力が厳しくなることが想定されるため、更なる 生産性の改善余地を残すためにも、切断カーフのうねりの原因探索を継続し、ワイヤー ソー切断の技術水準を向上させる必要がある。

レーザー加工は、近年急速に発展している技術分野であり、最先端技術のいくつか は、本研究開発の対象であるガラス基板の支援加工に応用できることが示された。実戦 投入するためには設備の一部改造が必要となるが、ここでも将来的な一層の生産性の向 上を想定し、補完研究の継続的な実施が必要である。