

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

「タッチパネルディスプレイ用機能性フィルムのための  
熱影響を抑制するレーザー切断装置の実用化開発」

研究開発成果等報告書

平成28年11月

担当局 九州経済産業局  
補助事業者 公益財団法人佐賀県地域産業支援センター

## 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	3
(1) 研究組織及び管理体制	3
(2) 管理員及び研究員	5
(3) 他からの指導・協力者氏名及び・協力事項	6
1-3 成果概要	7
(1) ガルバノスキャナと駆動機器との高速同期制御技術の開発	7
(2) 加工性を向上するためのレーザ光学系の最適化	7
(3) 除去物の付着対策技術の開発	7
(4) レーザ切断における熱影響の発生機構の解明	7
1-4 当該研究開発の連絡窓口	8
第2章 本論	9
(1) ガルバノスキャナと駆動機器との高速同期制御技術の開発	9
(1-1) レーザ切断装置の試作	9
(1-2) 高速同期制御機構の開発	10
(2) 加工性を向上するためのレーザ光学系の最適化	11
(2-1) 加工に最適なエネルギー密度分布のレーザ光を成形できる光学系の開発	11
(2-2) 中赤外波長域の短パルスレーザによる低熱影響の研究	12
(3) 除去物の付着対策技術の開発	14
(3-1) 加工点吸引機構の開発	14
(3-2) 保護フィルムによる除去物の付着防止技術の開発	15
(4) レーザ切断における熱影響の発生機構の解明	15
(5) プロジェクトの管理・運営	18
最終章 全体総括	18
(1) 複数年の研究開発成果	18
(2) 研究開発後の課題・事業化展開	18

## 第1章 研究開発の概要

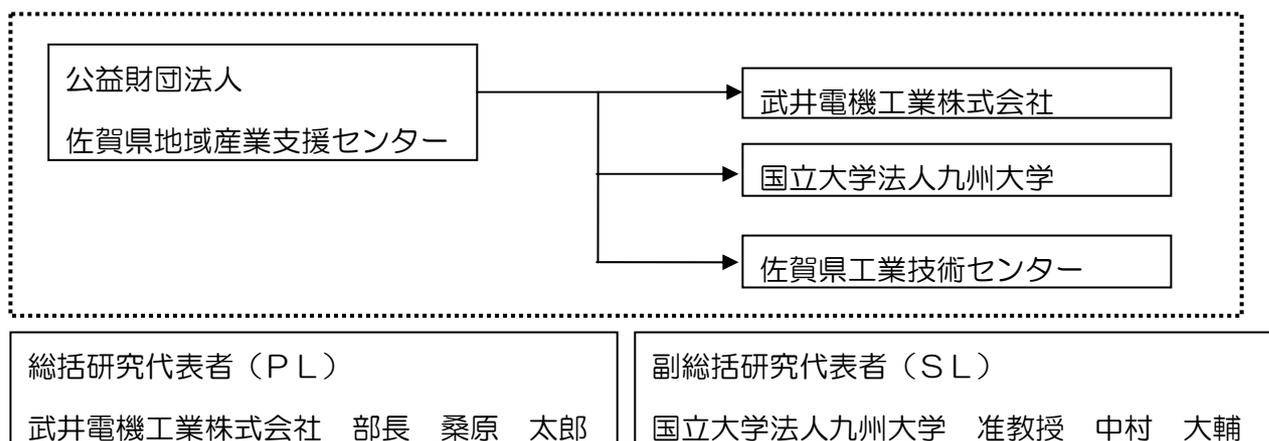
### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

タッチパネルディスプレイ用途の機能性フィルムの切断において、機械加工では応力による割れが発生し問題となっている。また、レーザ光による非接触加工も使用されるが、量産水準で加工品質と処理能力とを両立できていない。そこで加工端部における熱影響を抑制するレーザ光学系と除去物の付着防止技術を開発する。さらに複雑な形状に対して高速加工が可能な機械的手法と光学的手法を高速同期制御したレーザ走査技術を確立する。

### 1-2 研究体制

#### (1) 研究組織及び管理体制

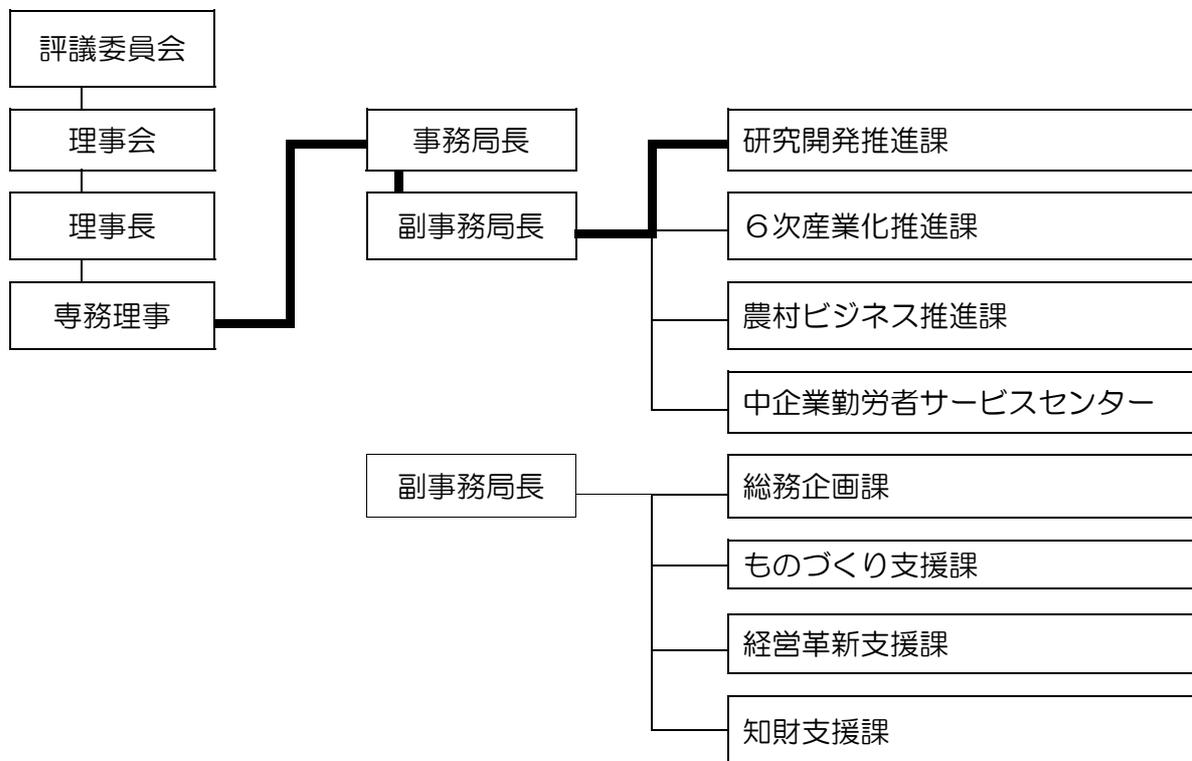
##### 1) 研究組織（全体）



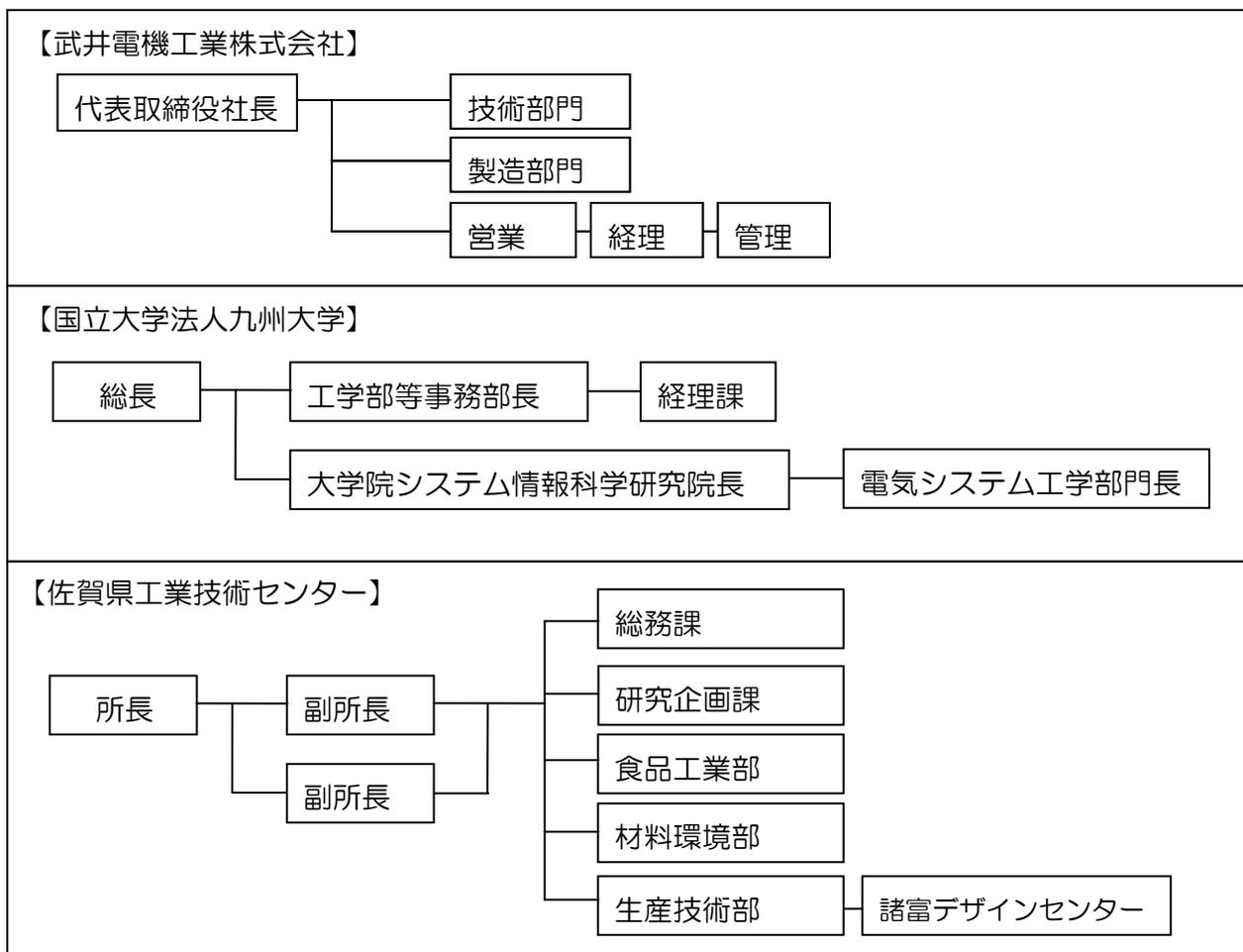
## 2) 管理体制

### ①事業管理機関

【公益財団法人佐賀県地域産業支援センター】



②（再補助先）



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】公益財団法人佐賀県地域産業支援センター

氏名	所属・役職	実施内容
坂井 亨	副事務局長（研究開発推進課長兼務）	(5)
安田 誠二	研究開発推進課 科学技術コーディネータ	(5)
西村 有加里	研究開発推進課 嘱託	(5)

【再補助先】※研究員のみ

武井電機工業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容
桑原 太郎	技術部 部長	(1-1) (1-2)
池田 圭太	技術部 主任研究員	(2-1) (2-2)
		(3-1) (3-2)
		(4)

国立大学法人九州大学

氏名	所属・役職	実施内容
中村 大輔	大学院システム情報科学研究院 電気システム工学部門 准教授	(2-2) (3-1)
		(4)

佐賀県工業技術センター

氏名	所属・役職	実施内容
平井 智紀	材料環境部 特別研究員	(2-1) (2-2)
永石 尚昭	材料環境部 技師	(3-1) (3-2)
		(4)

(3) 他からの指導・協力者氏名及び・協力事項

推進委員会委員

(外部推進委員)

氏名	所属・役職	備考
近藤 健	リンテック株式会社 室長	アドバイザー
森貞 裕和	株式会社日立ハイテクノロジーズ 部長代理	アドバイザー
坂本 満	国立研究開発法人産業技術総合研究所 九州センター所長	アドバイザー

(内部推進委員)

氏名	所属・役職	備考
諏訪 剛	武井電機工業株式会社 執行役員 T.C 本部長	委員長
桑原 太郎	武井電機工業株式会社 技術部 部長	PL
中村 大輔	国立大学法人九州大学 電気システム工学部門 准教授	SL
池田 圭太	武井電機工業株式会社 技術部 主任研究員	
玉井 富士夫	佐賀県工業技術センター 所長	
平井 智紀	佐賀県工業技術センター 材料環境部 特別研究員	
徳島 都昭	公益財団法人佐賀県地域産業支援センター 事務局長	

### 1-3 成果概要

#### (1) ガルバノスキャナと駆動機器との高速同期制御技術の開発

目標達成度：100%

H26 年度に目標値を達成できる構造の設計を行い、実証装置を製作した。H27 年度までに検証試験を実施し、加工速度 500mm/s において加工精度 $\pm 50\mu\text{m}$ 以下の目標値を達成した。

#### (2) 加工性を向上するためのレーザ光学系の最適化

目標達成度：95%

研究項目(2-1)において、当初の目標値に対して、PET フィルムの盛りりで 2%、テーパ角で 1.5%、多層フィルムの熱影響範囲で 5%を満たせなかったが、その他の項目は概ね目標値を達成した。

#### (3) 除去物の付着対策技術の開発

目標達成度：100%

吸引機構を最適化することで、切断加工したフィルムの表面において $3\mu\text{m}$ 以上の除去物の付着が無いことを確認した。また、レーザ加工と相性の良い保護フィルムを選定することで基材全域の保護を可能とし、目標値を達成した。

#### (4) レーザ切断における熱影響の発生機構の解明

目標達成度：100%

各研究項目で得られたデータを分析することで、単位長さ当たりの投入熱量を低減した条件であるほど熱影響を抑制できることが明らかとなり、目標を達成した。

本研究における成果概要の一覧を表 1 に示す。

表 1 成果概要の一覧

	研究項目	目標値	成果
御技術の開発 (1)	(1-1) レーザー切断実証装置の試作	■走査速度： 1000mm/s ■位置決め精度： ±20μm	走査速度は 1000mm/s、位置決め精度は X 軸 -3.8μm~5.3μm、Y 軸 -4.7μm~1.5μm となった
	(1-2) 高速同期制御機構の開発	■加工速度：500mm/s ■加工精度：±50μm	加工速度 500mm/s において加工精度 -15.2μm~10.8μm となった
最適化 (2)	(2-1) 加工に最適なエネルギー密度分布のレーザー光を成形できる光学系の開発	■溶融による端部盛り高さ：基材厚の 10% 以内 ■切断面テーパ角度：70° 以上 ■切断面からの熱影響範囲：30μm 以下	【PET フィルム】 ・溶融による盛り：10.2% ・テーパ角：69° (平均値 71°) ・熱影響範囲：29.9μm 【多層フィルム】 ・溶融による盛り：7.4% ・テーパ角：84° ・熱影響範囲：31.5μm  異なるフィルム材料、構成において概ね目標値を達成した
	(2-2) 中赤外波長域の短パルスレーザーによる低熱影響の研究	■パルス幅と熱影響との関係解明	パルス幅に伴う加工性の比較試験より熱影響の抑制効果を確認し、パルス幅と熱影響の関連性が明らかとなった
の除去物の付着対策技術の開発 (3)	(3-1) 加工点吸引機構の開発	■切断端部より 50μm 以上の基材表面に 3μm 以上の付着物なきこと	吸引機構を最適化することで、切断加工したフィルムの表面において 3μm 以上の除去物の付着が計測全域で無いことを確認した
	(3-2) 保護フィルムによる除去物の付着防止技術の開発	■フィルム基材との融着や着色なきこと ■切断端部より 50μm 以上の基材表面の保護	レーザー加工と相性の良い保護フィルムを選定することで基材との融着や着色なく、基材全域の保護を可能とした
	レーザー切断における熱影響の発生機構の解明 (4)	■熱影響の発生機構の解明	単位長さ当たりの投入熱量を低減した条件であるほど熱影響を抑制できることが明らかとなった

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人佐賀県地域産業支援センター

副事務局長/研究開発推進課長 坂井 亨

住所：〒849-0932 佐賀県佐賀市鍋島町八戸溝 1 1 4

TEL：0952-34-4413

FAX：0952-34-4412

E-mai：[sakai@mb.infosaga.or.jp](mailto:sakai@mb.infosaga.or.jp)

## 第2章 本論

### (1) ガルバノスキャナと駆動機器との高速同期制御技術の開発

#### (1-1) レーザ切断装置の試作

平成26年度に機械設計、電気設計および光学設計を行い、レーザ光を走査するガルバノスキャナとフィルムを走査する駆動機器とを組合せた実証装置を製作した。(図1参照)

本実証装置を用いて検証試験を実施した結果、走査速度 1000mm/s、位置決め精度 X 軸- $3.8\mu\text{m}$ ~ $5.3\mu\text{m}$ ・Y 軸- $4.7\mu\text{m}$ ~ $1.5\mu\text{m}$ となり、目標値を達成することができた。

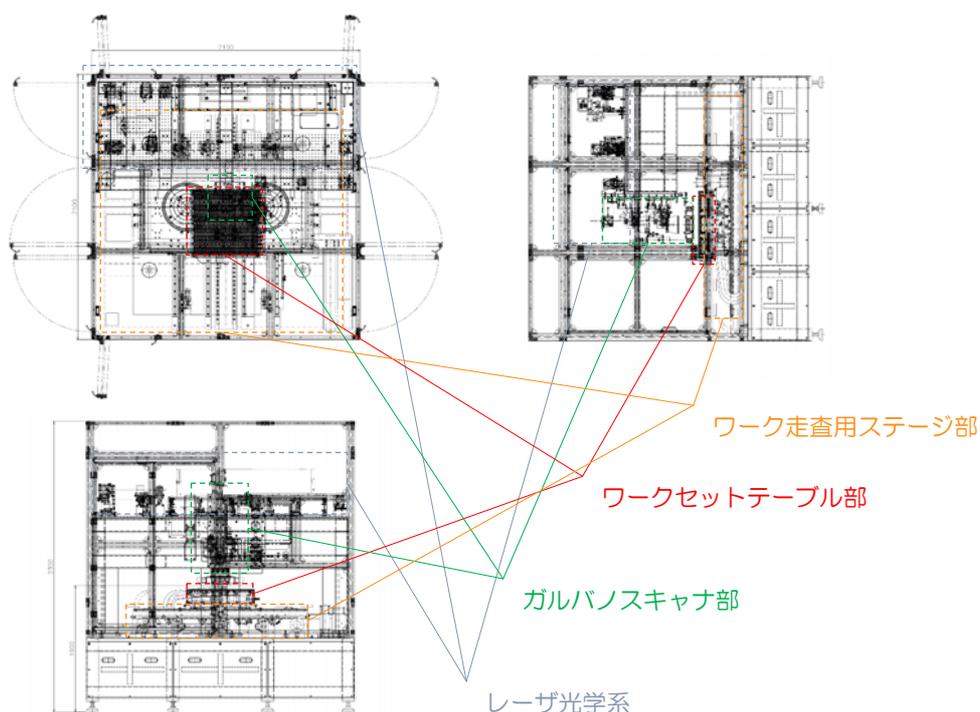


図1 装置外形図および外観写真

## (1-2) 高速同期制御機構の開発

平成27年度に高速同期制御機構の動作検証を行った。初期段階においては目標値 500mm/s の加工速度で複雑な形状を加工させた場合、動作が不安定になることが判明した。要因としては、加工中に PC を介在させ駆動機器へパルス指令を出力していたことによるものであった。そこで、加工前にハードウェアへ動作情報をストレージし、加工中はハードウェアより直接駆動機器へパルス指令を出力できるよう改良した。その結果、目標とした 500mm/s の加工速度において図 2 のような 5 インチサイズのスマートフォンの形状に類似した複雑な外形および内部のボタン用の穴の加工を加工精度 $-15.2\mu\text{m}\sim 10.8\mu\text{m}$ で処理することができた。図 3 に切断加工を 20 回行った際の精度測定結果を示す。当初の目標値は $\pm 50\mu\text{m}$ であったが大幅に更新し、処理時間は 1.8 秒となった。

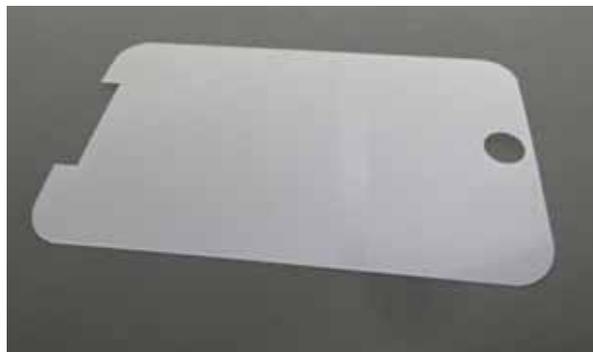


図 2 レーザ切断実証装置で加工した透明導電性フィルム (ITO/IM/PET)

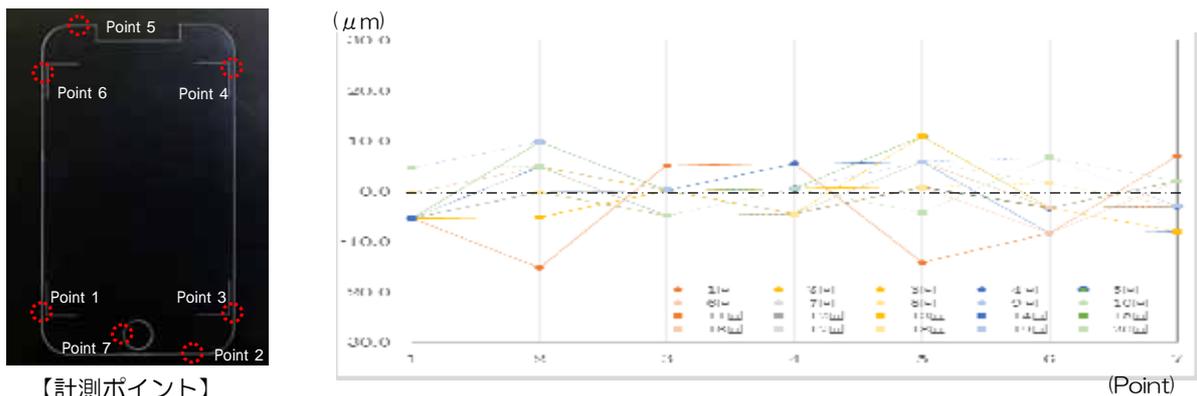


図 3 切断加工 20 回における精度測定結果

## (2) 加工性を向上するためのレーザ光学系の最適化

### (2-1) 加工に最適なエネルギー密度分布のレーザ光を成形できる光学系の開発

レーザ光による熱影響の抑制を目的にレーザ切断実証装置において、集光性の指標となる開口数 N.A.に伴う加工性の評価を行った。また、照射するエネルギー密度分布を平滑化し、レーザ光端部のエネルギー密度勾配を高めた光学系を用いて評価を行った。

加工対象としては、機能性フィルムの主要な基材として多く用いられる PET（ポリエチレンテレフタレート）フィルムや機能性を持った多層フィルム、中赤外波長領域で吸収の高いアクリルフィルム等を用いた。

評価については、品質工学を用いた実験計画を立て、これに基づいたサンプルを作成後、マイクロスコープを使用して切断面の熱影響部を観察し、熔融による盛りりやテーパ角、熱影響範囲について定量的な評価を行った。また、加工点における状態変化を把握する為、100,000/秒フレームで撮影できる高速度カメラを用いて現象観察を行った。

開口数 N.A.に伴う加工性の評価試験については 2 水準用いて実施した。PET フィルムを加工対象として、加工性の評価を行った結果を図4に示す。

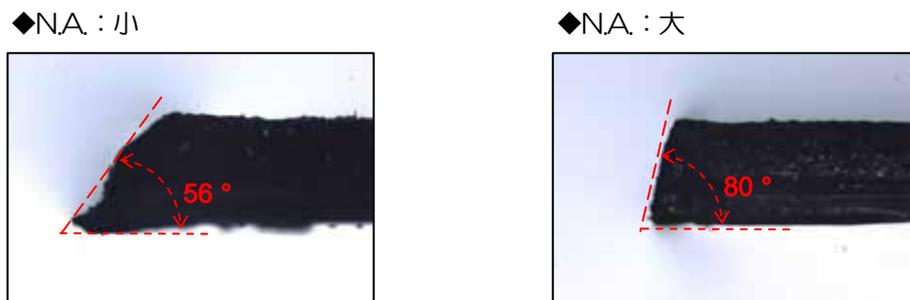


図4 開口数 N.A.に伴う切断状態の比較

本結果より、高 N.A.条件ではエネルギー密度勾配が高まることにより、大幅に切断部のテーパ角が増加することを確認し、開口数 N.A.は加工品質の改善に寄与するものと推察する。しかしながら、汎用性のある切断システムとして考慮した場合、開口数 N.A.は容易に大きくすることはできない。まず、レンズの焦点距離を短くすることで大きな N.A.を得ることができるが、ガルバノスキャナのミラーと加工点との距離が短くなり、スキャナで走査できるエリアが狭くなる。次にレンズの焦点距離を維持したままレーザビーム径を拡大することで対応できるが、ミラー径が大きくなり、重量が増加することで、スキャナ動作のレスポンスが遅くなる。これらのことより、開口数 N.A.は制限される。そこで品質向上を目指す手法として、低 N.A.条件でもエネルギー密度

勾配を高めることのできるビーム成形手法を用いて次のテストを実施した。

エネルギー密度がガウス状の分布と矩形状に成形された分布の 2 種類の光学系に対して比較評価を行った。加工対象は、エネルギー密度分布を反映して深さ方向に加工されるアクリルフィルムを用いた。図 5 にエネルギー密度分布を観察できるビームプロファイルを用いた測定画像および加工状態の比較結果を示す。

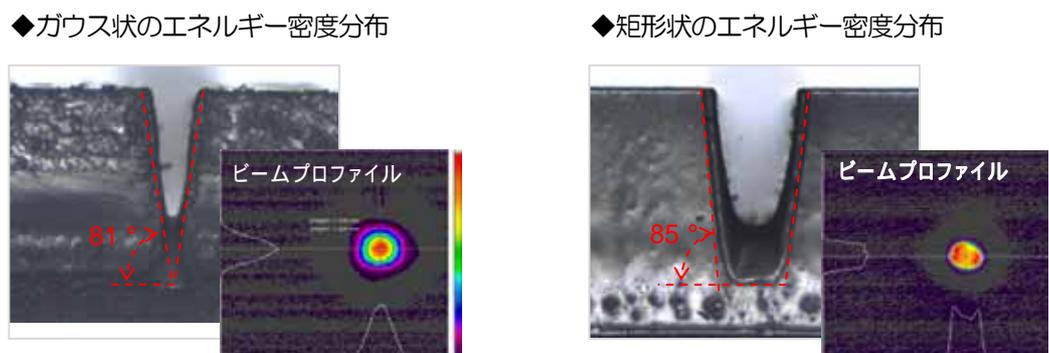


図 5 エネルギー密度分布に伴うビームプロファイルおよび加工状態の比較

本結果より、ビーム成形を行いレーザー光端部のエネルギー密度勾配を高めることで、切断部のテーパ角が改善され、加工品質の向上を確認した。

評価結果については、フィルムの材質および構造に違いがあり、熔融による盛りりを基材厚の 10%以内とし、切断部のテーパ角を 70° 以上、熱影響範囲 30  $\mu\text{m}$  以内とした当初目標に対して、PET フィルムの盛りりで 2%、テーパ角で 1.5%、多層フィルムの熱影響範囲で 5%を満たせなかったが、その他は概ね達成することができた。結果を表 2 に示す。

	PET フィルム	多層フィルム
熔融による盛りり	10.2%	7.4%
テーパ角	69° (平均値 71°)	84°
熱影響範囲	29.9 $\mu\text{m}$	31.5 $\mu\text{m}$

表 2 加工品質に対する評価結果

### (2-2) 中赤外波長域の短パルスレーザーによる低熱影響の研究

短パルスレーザーによる熱影響の抑制効果の調査を目的に、短パルス CO<sub>2</sub> レーザ発振器から出力されるパルス幅 13 ナノ秒のレーザー光と産業用 CO<sub>2</sub> レーザ発振器から出力されるパルス幅 50 マイクロ秒程度のレーザー光との加工性の比較を、PET フィルムやアクリルフィルムを用いて実施した。

熱影響についての評価は、マイクروسコープによる微視的な観察と、高速度カメラを用いた加工点における加工現象の観察とを行った。

評価結果を以下に述べる。アクリルフィルムに対して 1 ショットにおける加工を実施し、パルス幅に伴う加工状態の比較を行った。図 6 に示すようにマイクロ秒レーザーでは熱影響により加工痕端部に溶融層が形成されたのに対し、ナノ秒レーザーではデブリや熱的溶融部の無い加工痕となった。

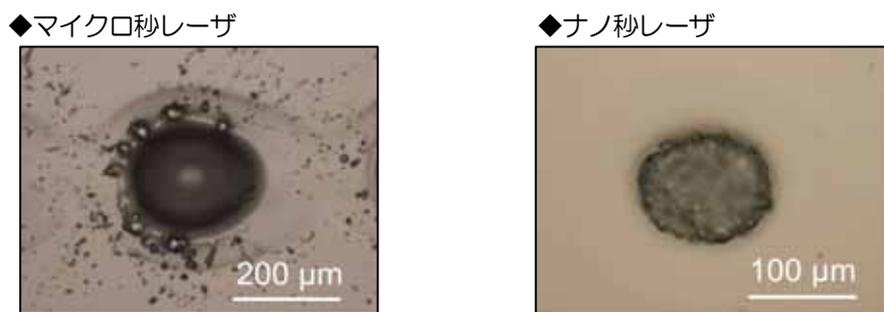


図 6 1 ショット加工におけるパルス幅に伴う加工状態の比較

次に、アクリルフィルムへレーザー光を100mm/sで相対的に走査して溝加工を行った際の断面写真を図7に示す。より大きな投入熱量においてもナノ秒レーザーの方が赤枠の示す熱影響領域は少ないことを確認した。また、各加工点平均出力に応じた加工深さをプロットしたものを図8に示す。加工深さに関して2Wの出力条件ではナノ秒レーザーが深く加工できていたが、3W以上の出力条件ではマイクロ秒レーザーの方がより深い加工となっている。この交点が厚み70  $\mu\text{m}$ 程度にあり、この点を境に加工効率が逆転していると考えられる。これらのことから70  $\mu\text{m}$ 以下においてはナノ秒レーザーの方が熱影響の少ない加工が実現できると推察される。

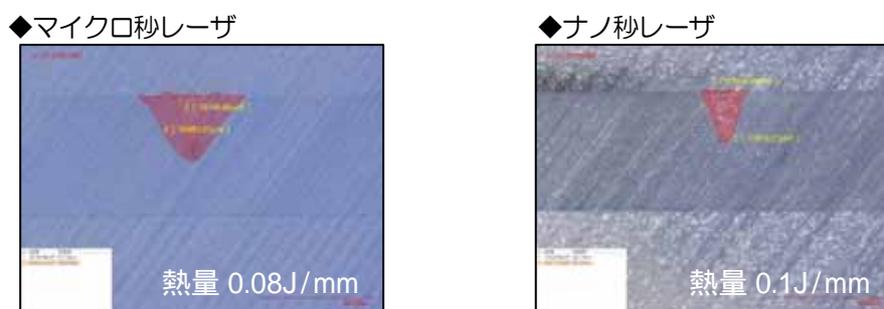


図7 パルス幅に伴う断面観察による熱影響領域の比較

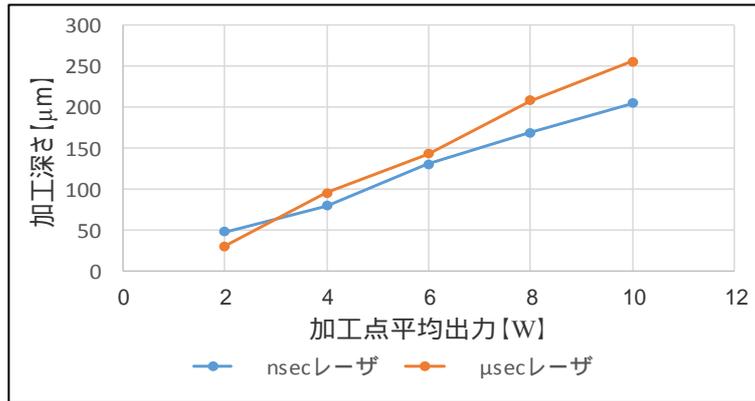


図8 2種類のパルス幅における加工点平均出力に伴う加工深さの比較

本推察を検証する為、PET フィルム 25 μmを用いて比較試験を行った結果を図 9 に示す。

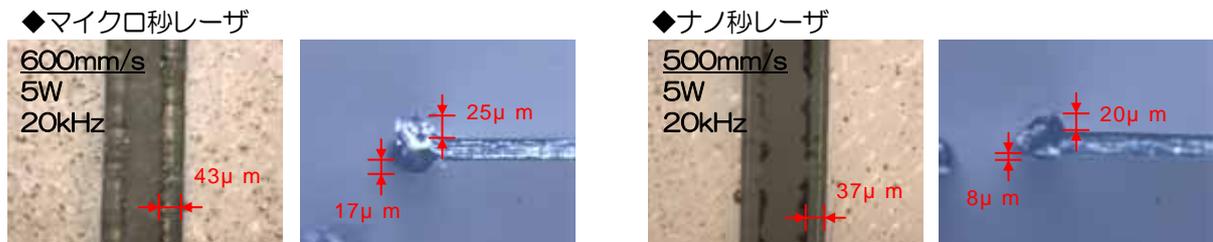


図9 パルス幅に伴うPET フィルム 25 μmの切断状態の比較

本結果より、盛りりで 33%、熱影響領域で 14%の熱影響領域が低減され、パルス幅による熱影響の抑制効果が確認された。

### (3) 除去物の付着対策技術の開発

#### (3-1) 加工点吸引機構の開発

ガルバノスキャナによりレーザー光が走査される加工領域内より発生する気相となった除去物の吸引条件の最適化を目的に、吸引位置および方向、風量、風速等の吸引条件を変更できる吸引ノズルをレーザー切断実証装置に搭載し調査した。

調査方法については、PET フィルムの切断状況をデジタルカメラで撮影し、加工中の気相除去物の発生方向を観察した。また表面の付着物をレーザー顕微鏡で確認した。

これらの調査結果を基に吸引機構の最適化を図り、切断加工したフィルムの表面において、加工により発生した 3 μm 以上の除去物は検出されなかった。(図 10 参照)

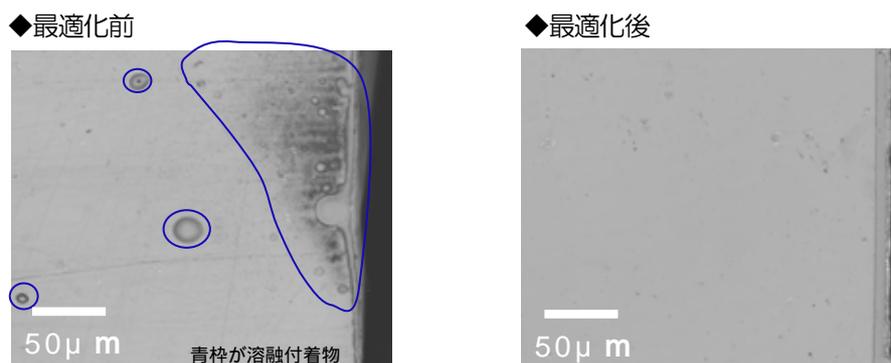


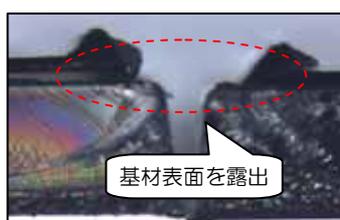
図 10 最適化前後による付着物の比較

### (3-2) 保護フィルムによる除去物の付着防止技術の開発

基材表面の保護を目的とし、一般的に流通する3種類の保護フィルムをそれぞれアクリルフィルムに貼合し、切断した際の基材の保護性能を調査するとともに、保護フィルム種に起因した加工特性への差について評価を行った。

各保護フィルムの貼合状態における加工部断面を図 11 に示す。保護フィルム A は熱収縮性があり基材表面を露出し、保護フィルム B は、基材にダメージが発生した。これは光吸収特性が低く過剰なレーザー出力を必要とした為であった。保護フィルム C は、基材全面を保護することができた。これらの加工結果からレーザー加工用の保護フィルムを選定する上で熱収縮性と光吸収特性とが保護性能や加工特性へ大きく影響することが明らかとなった。

#### ◆保護フィルム A



#### ◆保護フィルム B



#### ◆保護フィルム C

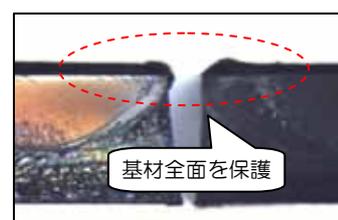


図 11 保護フィルムによる基材の保護性能の比較

### (4) レーザ切断における熱影響の発生機構の解明

切断端部において熱影響の低減に向けた指針を与えることを目的に、各研究項目で得られた知見を考察し、切断端部における熱影響の発生機構の解明を行った。

まず、一般的に産業用途に用いられるパルス幅がマイクロ秒の CO<sub>2</sub> レーザにより、PET フィルムを切断した際の、主要なレーザー加工条件となる各繰返し周波数および各加工速度において、必要となる切断方向に対する単位長さ当たりの投入熱量の閾値を、繰返し周波数

100kHz、加工速度 100mm/s の条件に対する相対値として図 12 に示す。

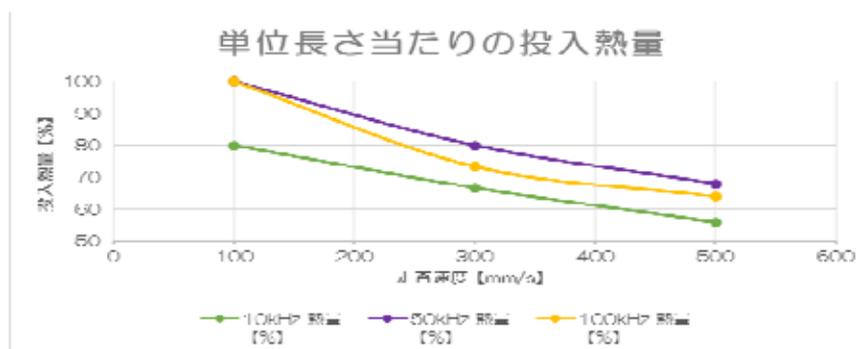


図 12 各水準における単位長さ当たりの投入熱量

また同様に各繰返し周波数および各加工速度において発生した熱影響発領域を繰返し周波数 100kHz、加工速度 100mm/s の条件に対する相対値として図 13 に示す。

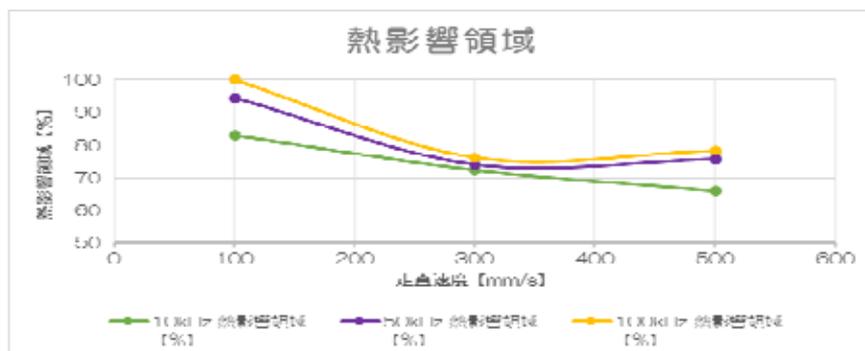
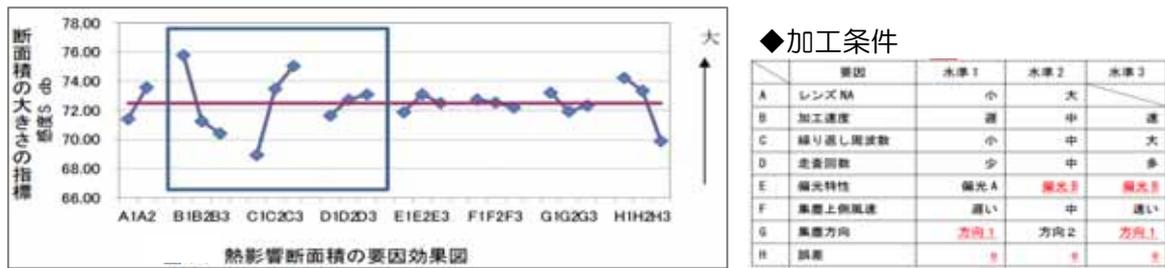


図 13 各水準が与える熱影響の発生領域

全体的な傾向として加工速度条件が早いほど必要となる単位長さ当たりの投入熱量 J/mm は減少した。さらに投入熱量が少ない条件であるほど概ね熱影響発生領域は少ない傾向にあった。また、繰返し周波数が 100kHz の加工条件においては、50kHz の加工条件と比較して単位長さ当たりの投入熱量が少ないにも関わらず、熱影響領域は大きいものとなった。

これらのことより、効率的に加工が進行する条件であるほど単位長さ当たりの投入熱量が少ない為、レーザに晒される時間が短くなり熱影響の発生が抑制されることが推察される。しかしながら、繰返し周波数が高い条件においては、パルス発振するレーザの照射間隔が短くなることにより擬似的な連続出射に近づくため、冷却時間が得られないことにより熱影響領域が拡大しやすい傾向にあるものと考えられる。またその他の種々の加工条件についても品質工学の手法を用いて図 14 の通り各因子と熱影響発生との相関について評価した。



- 加工速度（要因B）：遅いほど単位長さ当たりの投入熱量が大きくなるため熱影響領域が増大する
- 繰返し周波数（要因C）：高繰返し周波数ほど冷却時間が得られないため熱影響領域が増大する
- 走査回数（要因D）：多いほどレーザーに晒される回数が増えるため熱影響領域が増大する

図 14 加工パラメータと熱影響の相関

本結果に基づいて、最適条件における加工状況を高速度カメラで撮影した結果を図 15 に示す。加工部周辺において熱影響に伴う発泡や変形を確認することは出来なかった。

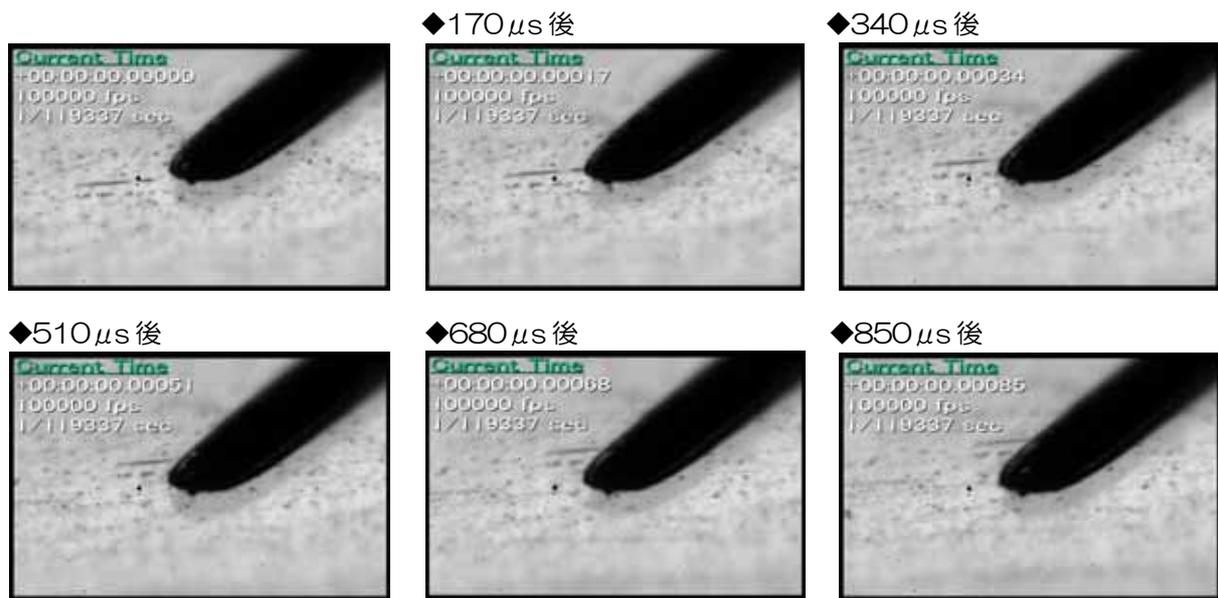


図 15 高速度カメラで観察した加工点における加工状況

次に、短パルス CO2 レーザを用いたパルス幅による熱影響の比較試験から、薄いフィルムにおいては、パルス幅による熱影響の抑制効果を得ることができたが、加工効率はマイクロ秒レーザーによる加工の方が 20%ほど高く、切断のメカニズムは熱加工による要素が大きいとの結果を得ることができた。

## （５）プロジェクトの管理・運営

推進委員会の開催、プロジェクト会議の開催等、該当プロジェクトが円滑に運営され、かつ目標が確実に達成できるように、参加研究機関と事業管理者との連携を密に図るとともに、プロジェクト全体の運営と進捗確認を行い、事業化に向けた支援を行った。また、研究開発の実施内容を整理し、実績報告書や成果報告書の取りまとめを行った。

## 最終章 全体総括

### （１）複数年の研究開発成果

３ 機関の共同研究により、レーザーによるフィルム加工の基礎メカニズムを解明した。これにより様々なフィルムの切断加工において熱影響を抑制した加工条件の確立、吸引機構の最適化における付着物の低減など多くの知見が得られた。本事業での成果は、実用的なフィルム加工装置の開発と発展に大きく貢献するものとする。

本実証装置については、既に多くの顧客の製造設備としての採用試験を受け、その多くで高い評価を得ており、今後の事業化に向けて大きな期待が持てる状況となっている。

本補助事業は国立大学法人 九州大学と佐賀県工業技術センターの多大なる協力により、大変多くの成果を２年間という短期間で得ることができた。

### （２）研究開発後の課題・事業化展開

本事業では、様々な機能を持った機能性フィルムにおいて高速・高品質に切断することを目指し開発を進めてきた。その中で、一部のフィルム種によっては加工品質の目標値を満たさないものが確認された。そこで、レーザーでは難加工なフィルムに特化した最適な光学設計・加工条件を調査し、更なる汎用性を持たせることが今後の課題となる。

事業化展開についてはスケジュールを図 16 に示す。自社のみならず機械商社を活用した営業展開ならびにウェブサイトや展示会などを活用した PR を行い、平成 29 年度に 5 台の販売を計画する。また、販売価格の見直しや海外における営業展開を行い、平成 31 年度には年間 15 台以上の販売を目指す。

製品等の名称 開発事業者		機能性フィルム用レーザー切断装置 武井電機工業株式会社				
スケジュール	年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度	平成31年度	平成32年度
	サンプルの出荷	実証装置を用いた新規顧客開拓のためのデモは継続して実施 デモテストで得られた各顧客サンプルの適正加工条件も提案				
	追加研究	切断品質の更なる追い込み デモテストの傾向調査 難加工材料の加工条件最適化	低コスト化のための 設計見直し	競争力強化のための機能追加・オプションの設定		
	設備投資				■サービス体制構築のための必要ツールの拡充 ■追加機能の検証設備	
	製品等の生産	営業協力 サンプルデモ等	製造手順の確立	製造コスト見直しを含む 改善活動	生産の効率化	
	製品等の販売	PR受注活動 展示会出展	国内での受注体制確立	海外営業展開	■応用展開調査開始 価格戦略等による競争力向上	

図 16 事業化に向けたスケジュール

また、近年では車載向けのディスプレイ用フィルムや加飾用フィルムにも注目が集まっており、設備投資の計画がなされている。そこで車載用途への展開も視野に入れ、図 17 のような車載用ディスプレイをイメージしたサンプル加工品を作成した。今後は、さらに複雑な形状でも検証試験を進め、モバイルデバイスの業界のみならず自動車業界へも PR 活動を行い、更なる拡販を目指す。

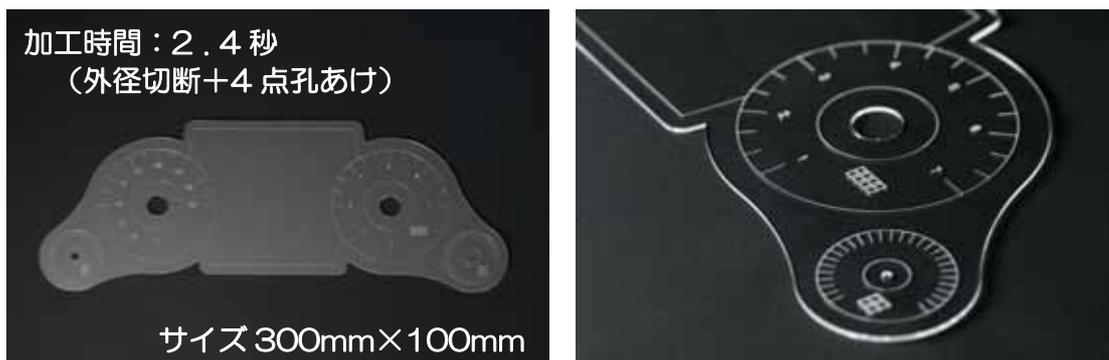


図 17 車載用ディスプレイをイメージしたアクリルフィルム（厚さ 1mm）の異型切断