

# フェムト秒レーザーを用いた超薄板ガラスの ナノスケール加工とその応用

奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学領域  
准教授 ヤリクン ヤシヤイラ (Yalikusn Yaxiaer )  
(2018年度 重点研究開発助成 課題研究 AF-2018202-A3)

キーワード：フェムト秒レーザー，超薄板ガラス，高精度加工

## 1. 研究の背景と目的

### 1・1 研究の背景

ガラス材料は透明で熱や強度や化学反応に対して耐性がある特徴を活かし、高耐熱・高純度・高絶縁・高耐圧が求められる製造プロセス用途として、半導体をはじめ幅広い産業で使用されている。特に極めて薄い板ガラス（厚みは数マイクロメートルから数十マイクロメートル、薄板ガラスと言う）はディスプレイ、タッチカバー（高耐久）、指紋センサー（高い誘電率）、カメラモジュールカバー（高い透過率）、IC パッケージ（高帯域での低誘電損失）、薄膜バッテリー（化学的に安定、耐高温）などの応用において、極めて高い優位性を示し、今後の需要増加が期待されている<sup>1)</sup>。

上記の分野の需要と潜在市場を重視し、近年各ガラスメーカーは薄板ガラス（厚みが  $30\mu\text{m}$  以下の板ガラス）の生産技術と生産能力向上に力を入れ、すでに国内外数社から市販されている。中には、厚みは  $4\mu\text{m}$  の超薄板ガラスもある。ここまで薄くするとガラスは軽量のフィルム状になり、自在に曲げることができる。ガラス材料であるため、頑丈で電気性能、耐久性の優れ、且つ柔軟な設計のデバイスの作製が可能になる。しかし、従来のガラスの加工技術は、前処理、固定、洗浄などの加工手順が多く、ガラスに破損や不要なひび割れが発生するリスクが高いため、柔軟で薄いガラスの加工に適さない欠点があった。

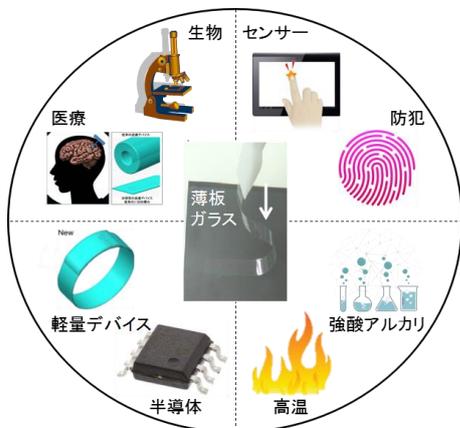


図1. 超薄板ガラスは通常ガラスの特性を有する上に、応用可能な領域はさらに広い。

MEMS 加工実績を多数有する筆者らは、従来の MEMS 技術で上記の厚み  $30\mu\text{m}$  以下の薄板ガラスの加工を試みたが、

図2のように試料がどうしても割れてしまう。その原因は、薄板ガラスに MEMS 加工による小さいクラックが生じることで、構造上の弱点になることが顕微鏡観察から明らかとなった。クラックを基点とした破断が起き、柔軟性はともかく、元の形状さえ維持できなくなる。このため、低歩留まり、マイクロメートル精度の自在加工に対応できない問題点があった。超薄板ガラスの応用展開を実現するためにはクラックを防ぎ、高密度な微細構造加工が可能な新たな技術を開発する必要がある。

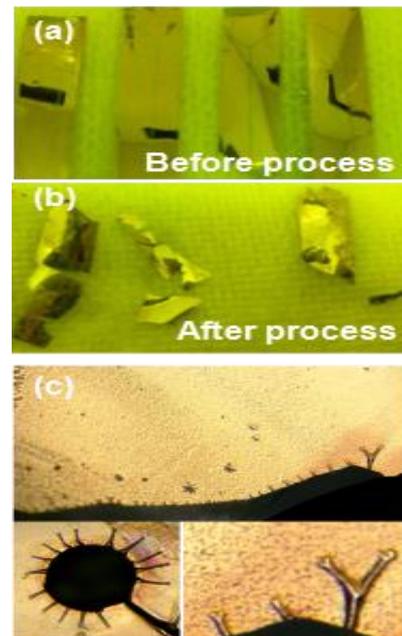


図2. 超薄板ガラスの加工における破損の原因。(a) MEMS 技術により Cr, Au で 2 重成膜した超薄膜ガラスの写真。この時点では破損はみられない (b) ドライ、ウェットエッチングの工程で破壊された超薄板ガラスの写真。(c) エッチング前のガラス表面の顕微写真。破損の原因となる微小クラックが確認できる。

### 1・2 本助成研究の目的

- ①超薄板ガラス加工の精度向上: 空气中で薄板ガラスをマイクロから数十ナノメートルのスケールで加工できるように、従来の加工システムを改良する。
- ②超薄板ガラス加工の応用開拓: 開発する加工手法を用いて、超薄板ガラスの特徴を活かせる様々な応用開発を行い、さらなる加工手法の改良を図る。

## 2. 実験方法

### 2・1 超薄板ガラス試料の準備

超薄板ガラスは薄ければ薄いほどたわみややすくなり、正確に加工することが困難になる。より厳しい条件での加工システムの有用性を評価するには、市場にある薄板ガラスよりも、薄くて表面の平坦さが優れる超薄板ガラスの作製が必要になる。従来の超薄板ガラスの製造では、フロート法やオーバーフロー法など高温で熔融させたガラスを引き延ばす方法が使われるが、ガラスを熔融させると、液体状のガラス自体の表面張力(粘性)によりシート形状を保つことが困難になり、薄さには限界があった。ガラスを薄くする最も一般的な手法は研磨であるが、厚みが  $30\mu\text{m}$  以下の薄膜ガラスを研磨するのは難しい。そこで報告者らはガラス軟化点(塑性変形可能な温度)よりも低温で、ガラスを延伸して薄くする方法の開発した(図3)。

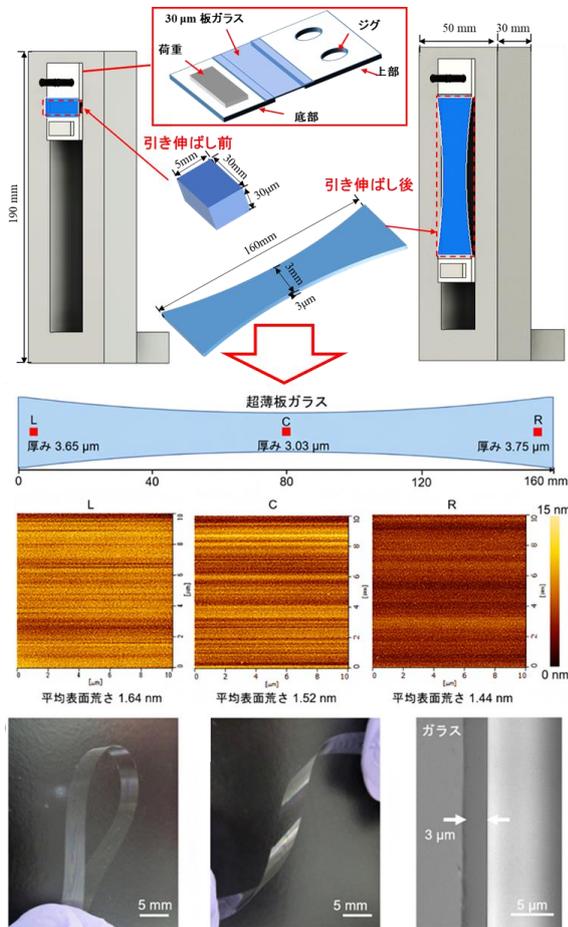


図3. 超薄板ガラスの製造と特性。厚み  $30\mu\text{m}$ 、幅  $30\text{mm}$ 、長さのガラス板の両端をカーボン製のジグ(治具)に吊り下げる。反対側のホルダーには金属製の重りを取り付け、張力を調整し、作製するガラスの厚みを制御する。この状態で真空炉に入れ、加熱することでガラスが延伸し、超薄板ガラスが得られる。表面の粗さは  $2\text{nm}$  以下の優れた平面特性が得られる。本開発手法で、厚みを市販のものより遥かに薄くすることができた ( $700\text{nm} - 3\mu\text{m}$ )<sup>2),3)</sup>。

### 2・2 超薄板ガラス加工装置の概要

本研究では、再生増幅式の高強度フェムト秒レーザーを超薄板ガラスの微細加工に用いた。これにより高価な機械、長い加工時間、危険な化学薬品を要する複雑な工程からなる浅堀、深堀、切断、貫通4種類の加工を簡素化した。超薄板ガラスの微細加工で問題となる微小クラック発生や表面たわみを防ぎ、フェムト秒レーザー加工を実現するために2種類の技術を開発した。

まずは、常に薄板ガラスの両端にテンション(張力)がかかるように、2つのピンチローラーで引っ張り構造を有するジグを設計・作製し、幅  $4 - 15\text{mm}$  の薄板ガラスの固定と平坦性確保を実現した。さらに、加工に用いるフェムト秒レーザーの加工面への素早いフォーカシングを実現するため、従来の対物レンズよりも遥かに軽く、微弱な力で駆動できるガラスレンズとレンズアレイを開発した。このレンズに充填された液体または空気に印加する圧力を変えることで、ミリ秒オーダーで  $200\mu\text{m}$  の焦点深度のフォーカススキニングが実現できた。

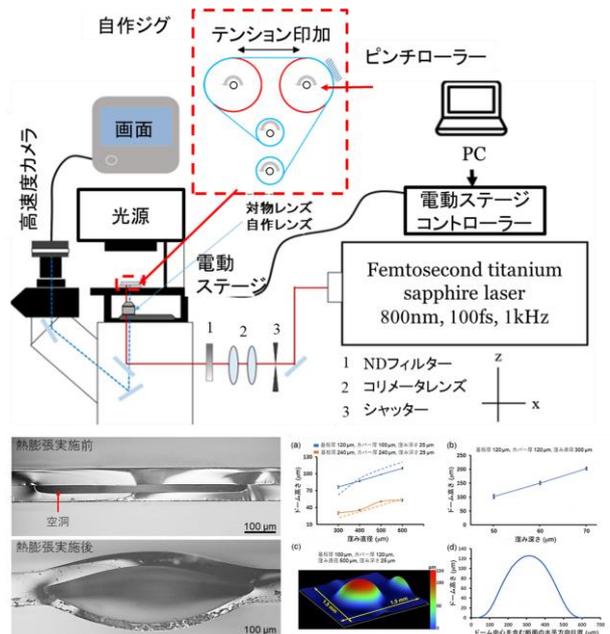


図4. 本加工システムの基本構成。フェムト秒レーザー、光学系(対物レンズ+自作レンズ)、電動ステージ駆動系、薄板ガラスの把持ジグで構成される。把持ジグはレコーダーテープの把持構造を参考に、サイズを小さくし、薄板ガラスへの把持を実現したものになる。自作レンズはガラスの熱膨張特性を利用したマイクロスケールのドーム構造作製手法で作製した。ドーム壁の肉厚が薄い(数マイクロメートル)ため、作成したレンズは極めて軽量である。更に、空洞の深さ、加熱の温度条件、時間、元の板材料の厚み、充填媒体を調整することによって、レンズの様々な特性が変更可能であり、加工目的に応じて柔軟な対応が可能な加工システムの構築が可能になった<sup>4),5),6)</sup>。

### 3. 実験結果

超薄板ガラスは通常ガラスの特性を有する上に曲げることができるので、広範な領域での応用が期待されることは前記した。特に、微小な MEMS センサー分野では、材料の厚みと材質、表面状態の均一性がセンサー性能に影響する。今回開発した超薄板ガラス加工技術と微小空間でのレーザー計測技術を用いることで、微小流路中での高精度な多点非接触同時流速計測センサーを世界に先駆けて実現した (図5)。

3・1 超薄板ガラスを用いた高感度流速センサーの開発  
流路中にある流速の計測は、様々な分野で幅広く使われている。特にマイクロ流体デバイス分野では、流速の精

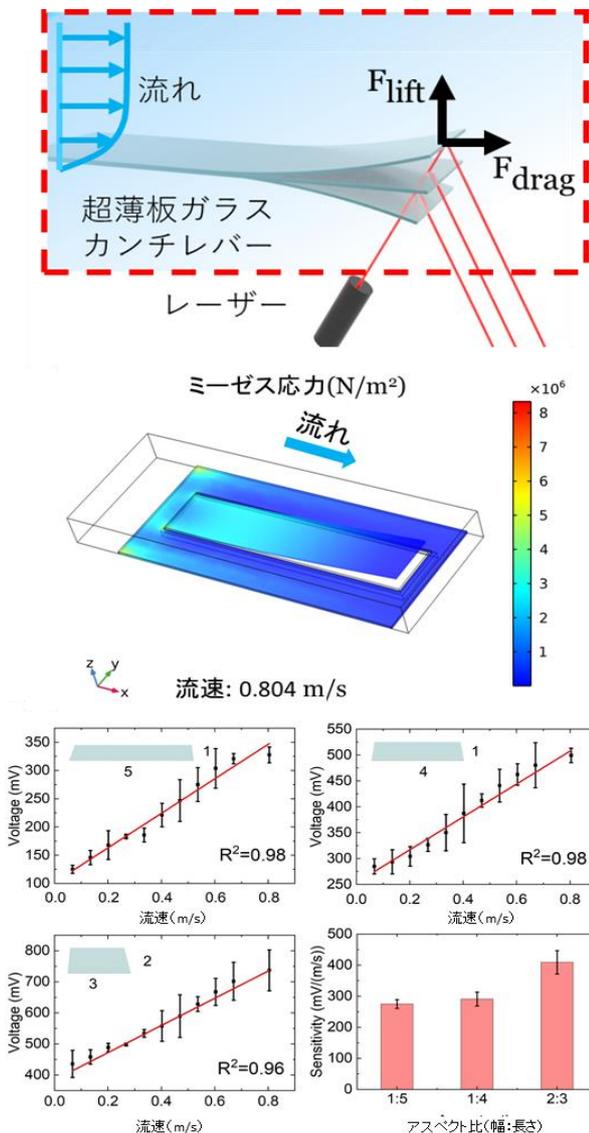


図5. 超薄板ガラスを用いた微小流路内の流速計測システムの原理と性能。流速に依存する揚力 ( $F_{lift}$ ) と流体力 ( $F_{drag}$ ) の作用によって板の変形量が決まる。したがって板の変形量から流速が計測可能である。上記理論をシミュレーションで検証するとともに、アスペクト比 (幅と長さの比率) が違う複数パターンを作製し、本センサーの原理を実証した<sup>7), 8)</sup>。

密制御が重要となる。これまでの手法は複雑で、侵襲性のある方法 (ビーズなどを導入するなど) が多い。本手法では超薄板ガラス ( $4\mu\text{m}$  と  $10\mu\text{m}$ ) を高精度加工して、上記の問題を解決できる新型の流速センサーを開発した。

図5に示すように、流体はフラットの板を通る際に、上下の流速で生じる圧力差によって生じる板を変形させる揚力 ( $F_{lift}$ ) と、流れ方向に変形止めようとする流体力 ( $F_{drag}$ ) が働く。板の変形量は双方の作用によって支配され、変形量の計測から流速を見積もることができる。

筆者らはフェムト秒レーザー加工技術を用いて、超薄板ガラスに複数種類 (アスペクト比 1:5, 1:4, 1:1.5) のカンチレバー型センサーを作成し、その特性を微小流路内で検証した。また、超薄板ガラスの厚みの影響 (変形量と感度)、耐薬性評価、多点計測など様々な特性を評価した。結果として、 $4\mu\text{m}$  の薄板ガラスカンチレバーセンサーを利用した場合、感度は  $0.409\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  になり、従来のカンチレバーセンサーより高い感度が得られた (2022 年時点)。さらに、気体の計測も可能で、本加工手法で開発したセンサーの応用展開が期待できる。

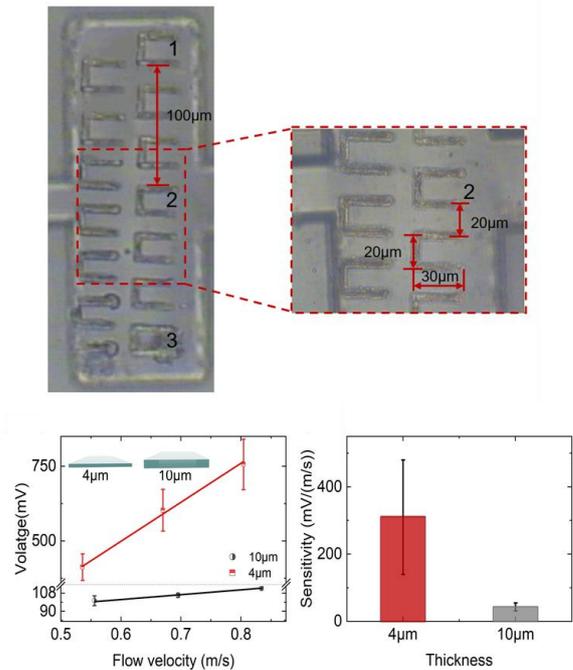


図6. 多点流速計測センサアレイ。微小流路中に、カンチレバーのアレイ (14 × 2 計 14 個) を加工し、同時多点流速計測を実現した。さらに、超薄板ガラスの厚み ( $4\mu\text{m}$  と  $10\mu\text{m}$ ) から流速計測への影響を調査した。結果として、薄ければ薄いほど感度が良く、 $4\mu\text{m}$  厚のカンチレバーは  $10\mu\text{m}$  のそれと比較し、感度は一桁改善された<sup>7), 8)</sup>。

### 3・2 超薄板ガラスのフェムト秒レーザー加工を用いた他の応用開拓

超薄板ガラスとその加工手法の確立で、様々な応用が実

現可能になった、例えば、超薄板ガラスの任意場所にフェムト秒レーザーを集光して貫通穴を作成することで、基板上で神経回路を誘導する神経軸索制御・誘導デバイス<sup>9)</sup>を実現した。また、ガラス表面ナノスケール加工による血液やリンパ液を循環するがん細胞 (circulating tumor cells) の分取デバイス<sup>10),11)</sup> や、超薄板ガラスの物理的な安定性・一様性を利用した受精卵特性計測用のカンチレバーセンサーデバイス<sup>12)</sup>、ガラス表面の金属電極にナノギャップ作製し、菌類やエクソソームなどナノスケール試料の計測が可能なデバイスを開発し、本手法の有用性を証明した。

### 謝 辞

本研究は、2018 年度公益財団法人天田財団の研究助成を受けて行ったものであり、同助成会に心より感謝を申し上げます。また、同研究にご協力いただきました信越化学工業株式会社、松浪硝子工業、日本電気ガラス、国立研究開発法人理化学研究所集積バイオデバイスチームの皆様重ねてお礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) Tao Tang, Yapeng Yuan, Yaxiaer Yalikusun, Yoichiroh Hosokawa, Ming Li, Yo Tanaka: Glass based micro total analysis systems: Materials, fabrication methods, and applications, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 339, 129859 (2021)
- 2) Yapeng Yuan, Yaxiaer Yalikusun, Satoshi Amaya, Yusufu Aishan, Yigang Shen, Yo Tanaka: Fabrication of ultra-thin glass sheet by weight-controlled load-assisted precise thermal stretching, *Sensors and Actuators A: Physical*, 321, 112604 (2021)
- 3) 田中陽, ヤリクン ヤシャイラ, 天谷諭, エン ヤーボン, ユスフ アイサン, シン キゴウ: “ガラスシートの製造方法、ガラスシート、デバイス、及びガラスシートの製造装置”, 2020 年 10 月 30 日出願, 特願 2020-182007, 2021 年 9 月 22 日 PCT 出願, PCT/JP2021/34876
- 4) Yusufu Aishan, Yaxiaer Yalikusun, Satoshi Amaya, Yigang Shen, Yo Tanaka: Thin glass micro-dome structure based microlens fabricated by accurate thermal expansion of microcavities, *Applied Physics Letters*, 115, 263501 (2019)
- 5) Yusufu Aishan, Yaxiaer Yalikusun, Yo Tanaka: Pneumatically actuated thin glass microlens for on-chip multi-magnification observations, *Actuators*, 9(3), 73 (2020)
- 6) Yusufu Aishan, Yaxiaer Yalikusun, Shun-ichi Funano, Yigang Shen, Yo Tanaka: Accurate rotation of ultra-thin glass chamber for single cell multidirectional observation, *Applied Physics Express* 13, 026502 (2020)
- 7) Yansheng Hao, Yo Tanaka, Yoichiroh Hosokawa, Ming Li, Yaxiaer Yalikusun: A gas flow velocity sensor fabricated with femtosecond laser using 4  $\mu\text{m}$  ultra-thin glass sheet, *Applied Physics Express*, 15, 036502 (2022)
- 8) Yansheng Hao, Yo Tanaka, Yaxiaer Yalikusun, Ming Li, Yoichiroh Hosokawa: Flow Velocity Dependency of Microfluidic Sensor of Ultra-thin Glass Sheet Fabricated by Femtosecond Laser Processing, *The Japan Society of Applied Physics*, 10a-Z16-9
- 9) Dian Anggraini, Kazunori Okano, Yo Tanaka, Yaxiaer Yalikusun, Yoichiroh Hosokawa: In Situ Guided Neurite Outgrowth by Femtosecond Laser Processing in a Microfluidic Device, 2021 IEEE 34th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 20510448
- 10) Tianlong Zhang, Yigang Shen, Ryota Kiya, Dian Anggraini, Tao Tang, Hanaka Uno, Kazunori Okano, Yo Tanaka, Yoichiroh Hosokawa, Ming Li, Yaxiaer Yalikusun: Focusing of particles in a microchannel with laser engraved groove arrays, *Biosensors*, 11(8), 263 (2021)
- 11) Tianlong Zhang, Misuzu Namoto, Kazunori Okano, Eri Akita, Norihiro Teranishi, Tao Tang, Dian Anggraini, Yansheng Hao, Yo Tanaka, David Inglis, Yaxiaer Yalikusun, Ming Li, Yoichiroh Hosokawa: Hydrodynamic particle focusing enhanced by femtosecond laser deep grooving at low reynolds numbers, *Scientific Reports*, 11, 1652 (2021)
- 12) Yapeng Yuan, Yaxiaer Yalikusun, Yo Tanaka: Micro cantilever sheet glass thin-ultra and flexible using measurement deformation, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022 in Sapporo, J04-2P2