

NEDO委託・助成「高集積・複合MEMS製造技術開発事業」  
(平成18年度～平成20年度)

---

---

# 高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクト

## (ファインMEMSプロジェクト)

### 中間成果発表会

---

---

日時：2007年7月27日(金) 13:00～16:30  
会場：東京ビッグサイト 西3ホール内 特設会場

主催：ファインMEMSプロジェクト推進連絡会、(財)マイクロマシンセンター  
共催：独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構  
後援：経済産業省

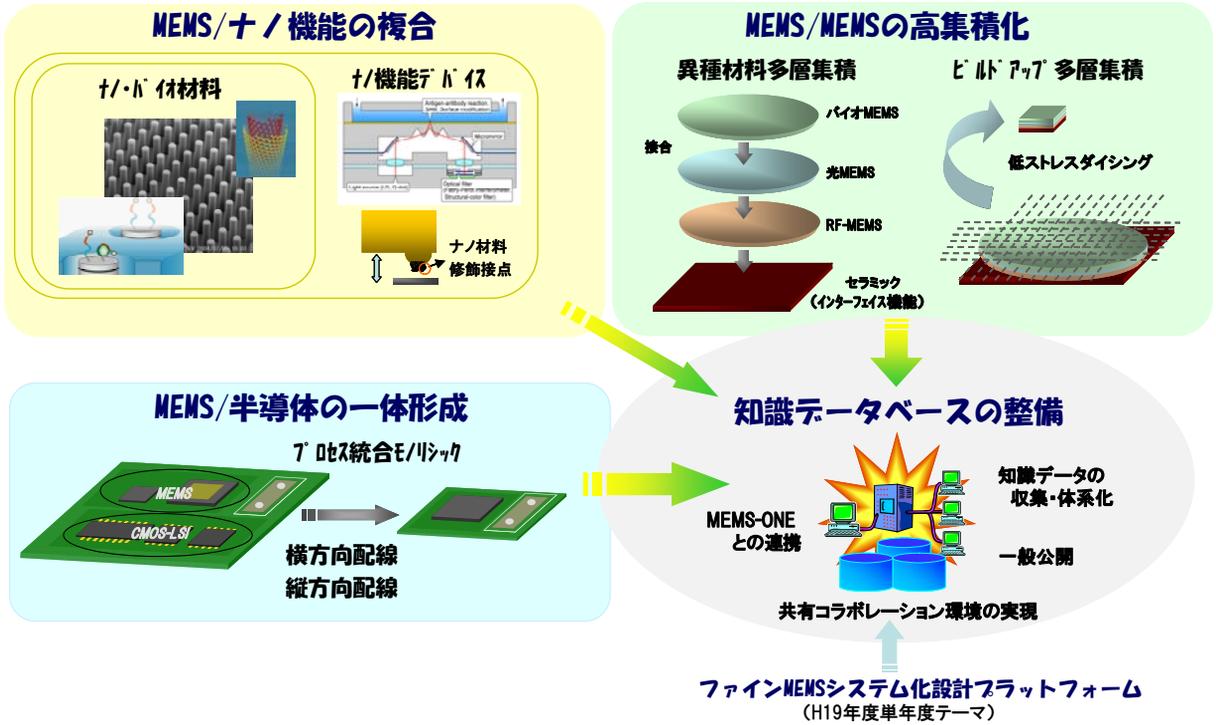
# プログラム

|             |   |
|-------------|---|
| セッション1      | オープニング  |
| 13:00-13:10 | 来賓挨拶<br>経済産業省 製造産業局 産業機械課 課長補佐 岡橋寛明<br>(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 理事 高安正躬             |
| 13:10-13:25 | ファインMEMSプロジェクトの概要<br>ファインMEMSプロジェクト推進連絡会 座長<br>(東京大学 大学院情報理工学系研究科 研究科長 教授) 下山 勲 |
| セッション2      | ファインMEMSプロジェクト委託事業の成果発表(1)  |
| 13:25-13:45 | 選択的ナノ機械構造体形成技術<br>東京大学 大学院情報理工学系研究科 研究科長 教授 下山 勲                                |
| 13:45-14:05 | バイオ材料(タンパク質など)の選択的修飾技術<br>(独)産業技術総合研究所 バイオニクス研究センター 研究員 鈴木祥夫                    |
| 14:05-14:25 | ナノ材料(CNTなど)の選択的形成技術<br>(独)産業技術総合研究所 ナノカーボン研究センター チーム長 畠 賢治                      |
| 14:25-14:30 | 休憩  |
| セッション3      | ファインMEMSプロジェクト委託事業の成果発表(2)  |
| 14:30-14:50 | MEMS-半導体プロセス統合モノリシック製造技術(新たなセンシング原理の探求)<br>立命館大学 理工学部 教授 鳥山寿之                   |
| 14:50-15:10 | MEMS-半導体横方向配線技術(高密度な低温積層一体化実装技術)<br>(独)産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 グループ長 明渡 純        |
| 15:10-15:30 | MEMS-半導体横方向配線技術(高密度な低温積層一体化実装技術)<br>東北大学 工学研究科 教授 小柳光正                          |
| 15:30-15:50 | 多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシング技術<br>(財)レーザー技術総合研究所 主任研究員 藤田雅之                           |
| セッション4      | クロージング  |
| 15:50-16:00 | ファインMEMS知識データベースについて<br>(財)マイクロマシンセンター 専務理事 青柳桂一                                |
| 16:00-16:30 | 技術相談コーナー<br>展示会場C-032ブース  |

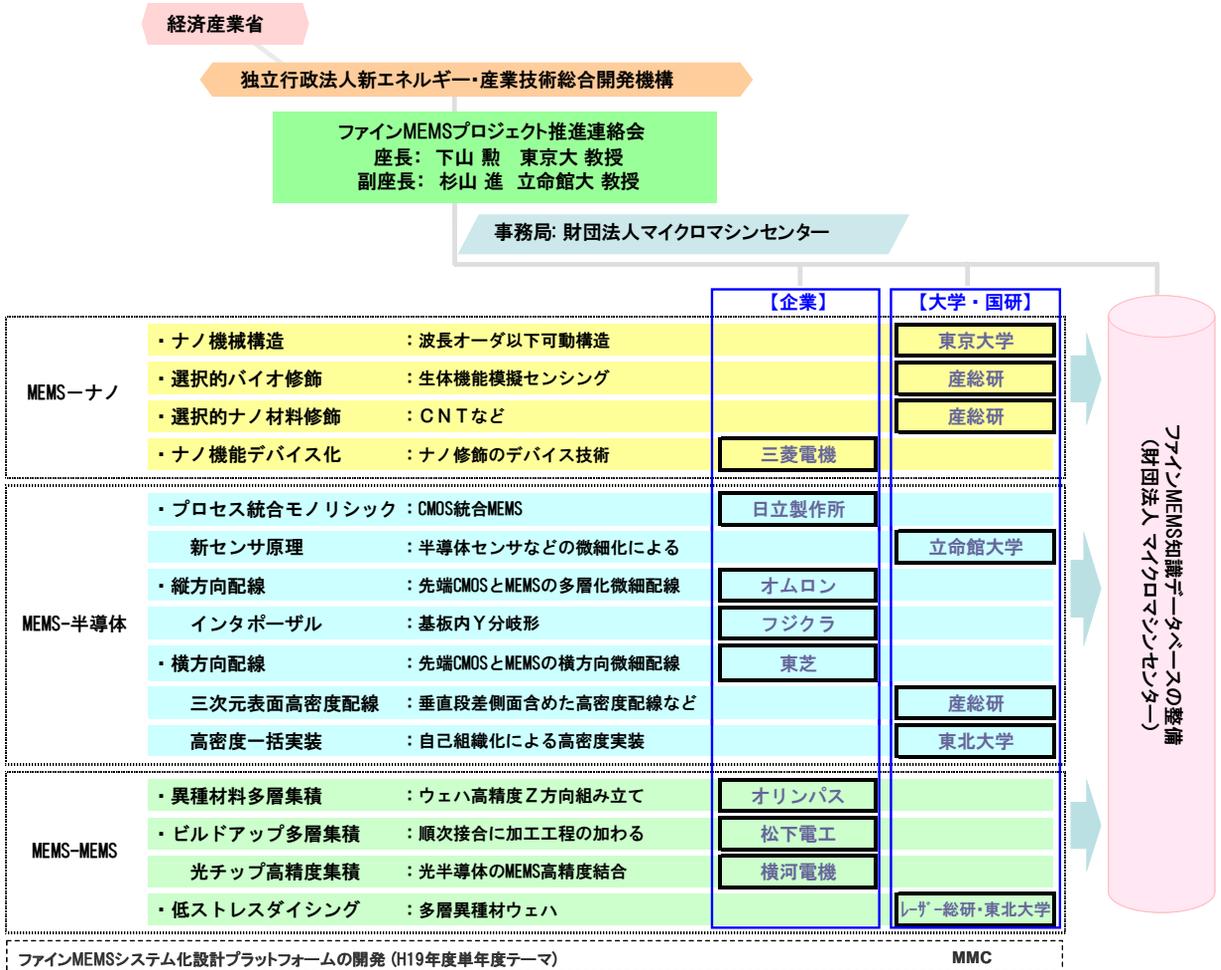
# ファインMEMSプロジェクトの概要

ファインMEMSプロジェクト推進連絡会 座長 下山 勲

## ■ ファインMEMSの開発カテゴリー



## ■ 開発テーマと開発体制

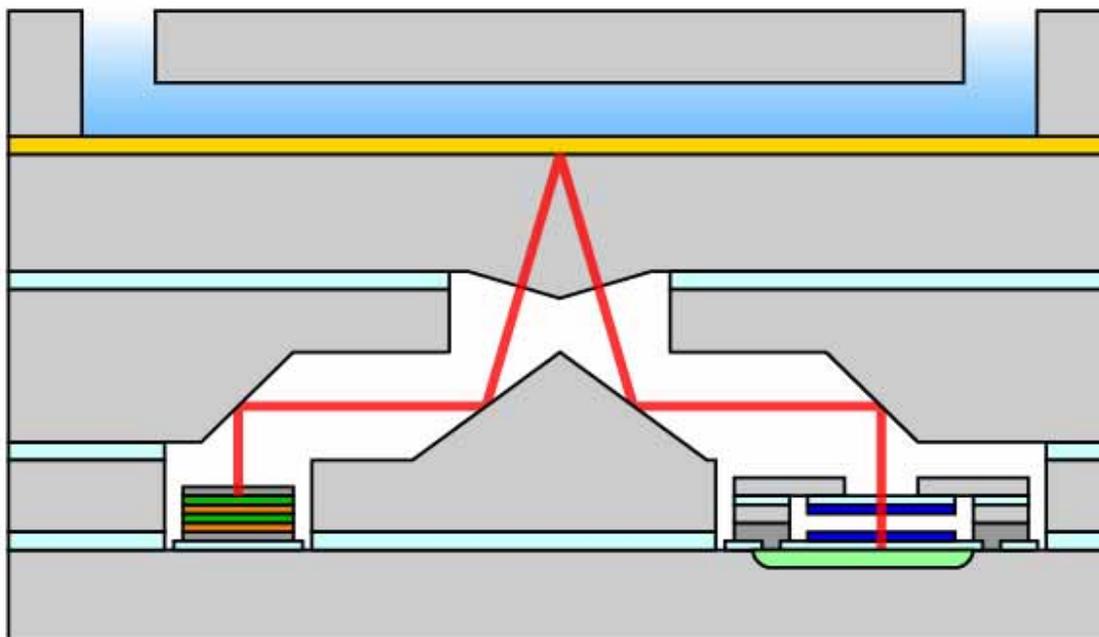


高集積・複合MEMS製造技術開発事業  
「MEMS / ナノ機能の複合技術の開発」  
選択的ナノ機械構造体形成技術

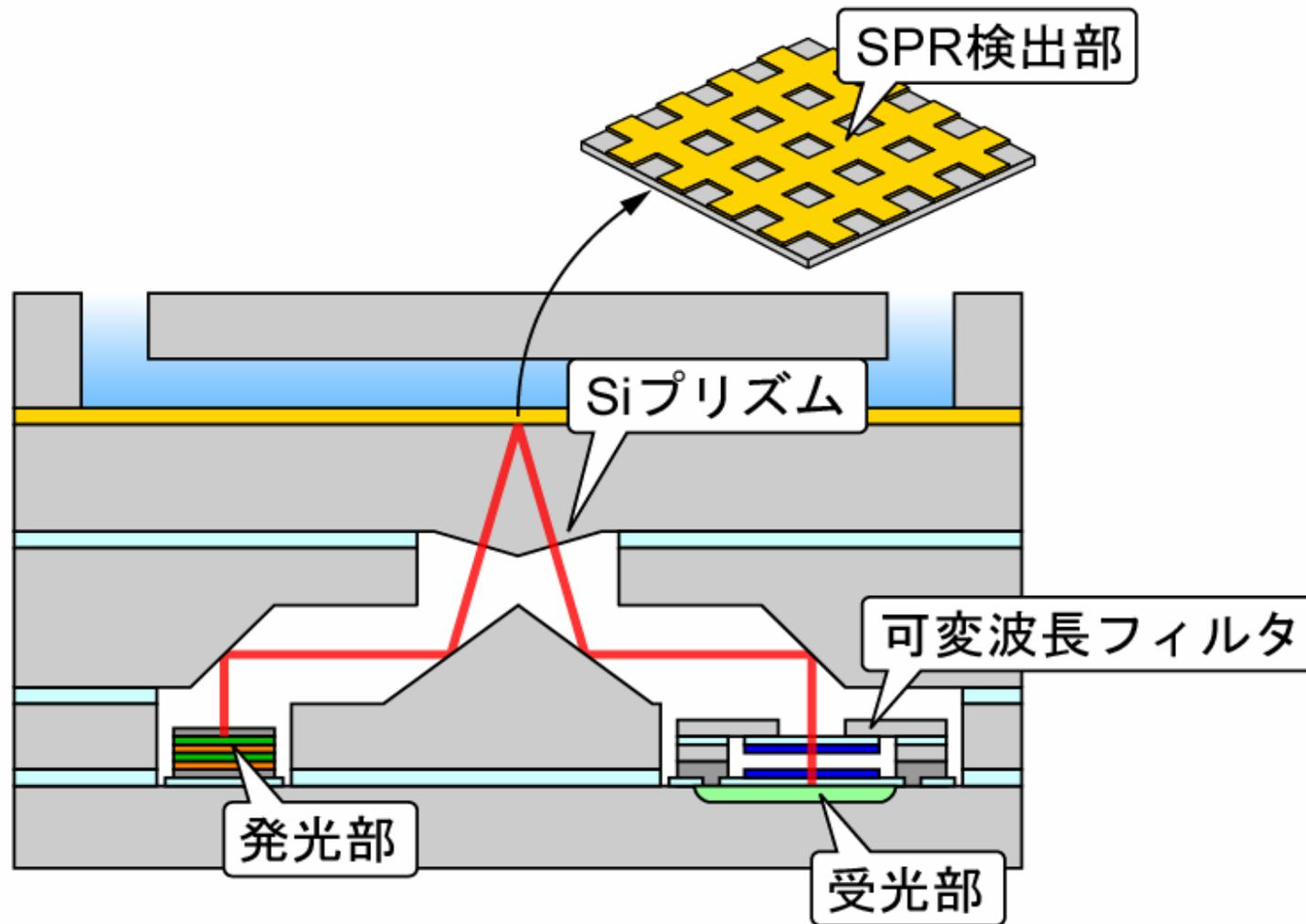
---

東京大学  
下山 勲

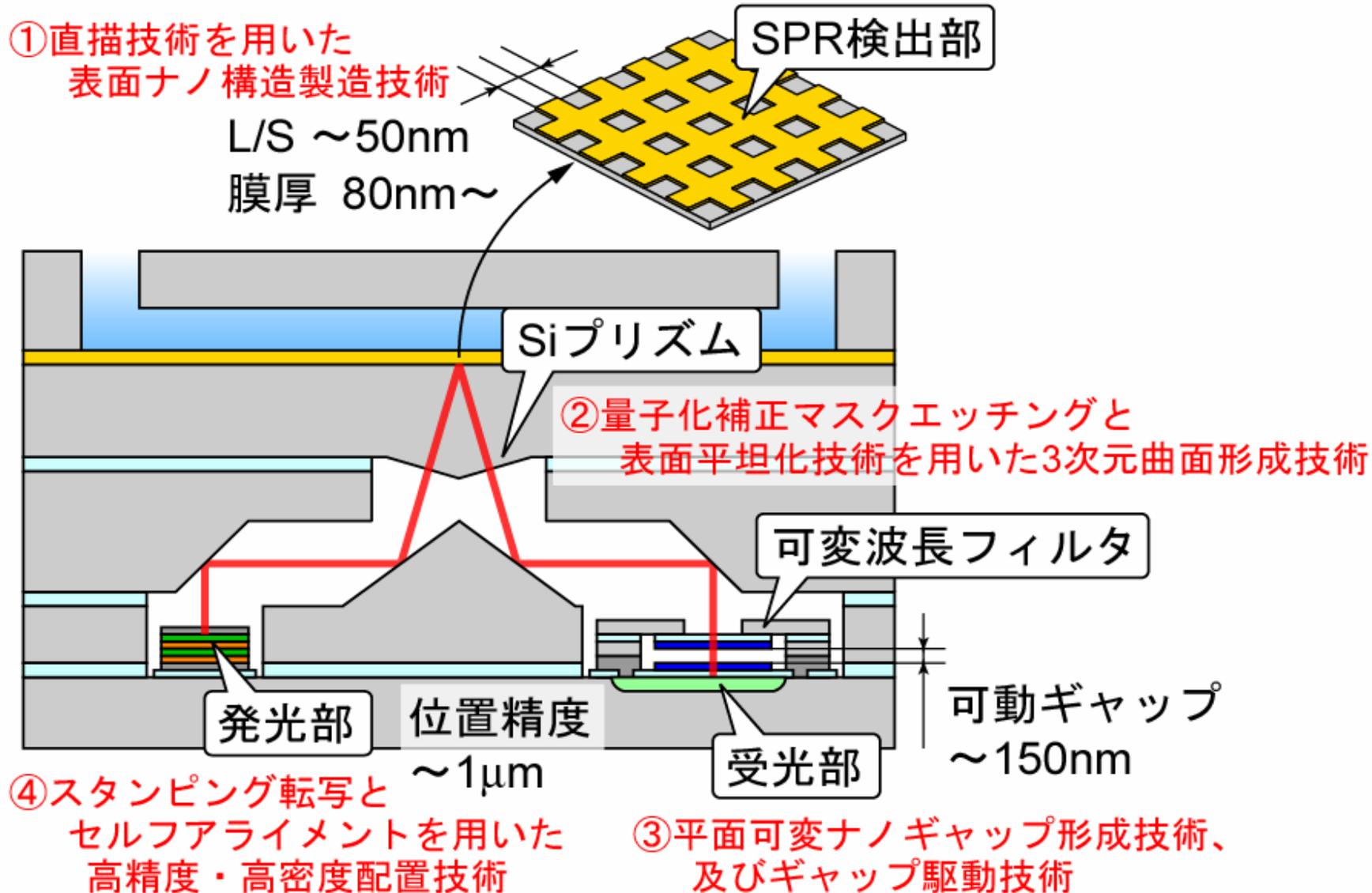
# SPR環境センサを構成する4つのコア技術



# SPR環境センサを構成する4つのコア技術



# SPR環境センサを構成する4つのコア技術



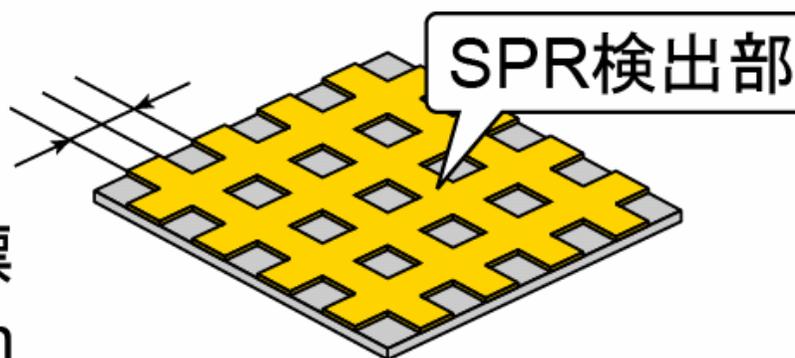
# 直描技術を用いた 表面ナノ構造製造技術

## 表面ナノ構造製造技術の概要

- SPRナノ機能の発現による、検出部の高機能化
- そのために、直描技術によるナノL/S製作

直描技術を用いた  
表面ナノ構造製造技術

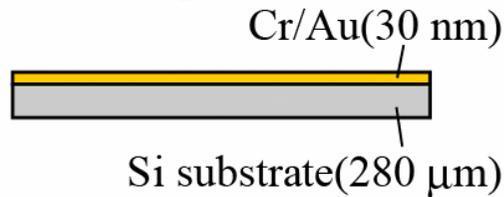
H18年度目標  
L/S ~ 100nm



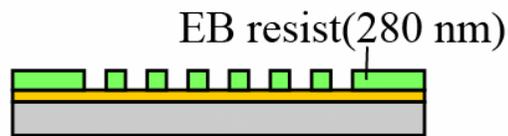
# 手法1: SPRセンサ用金膜ナノL/Sパターン

(a)

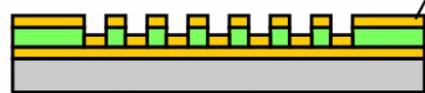
(i) Cr/Au deposition



(ii) direct EB lithography



(iii) Au deposition Au(30 nm)

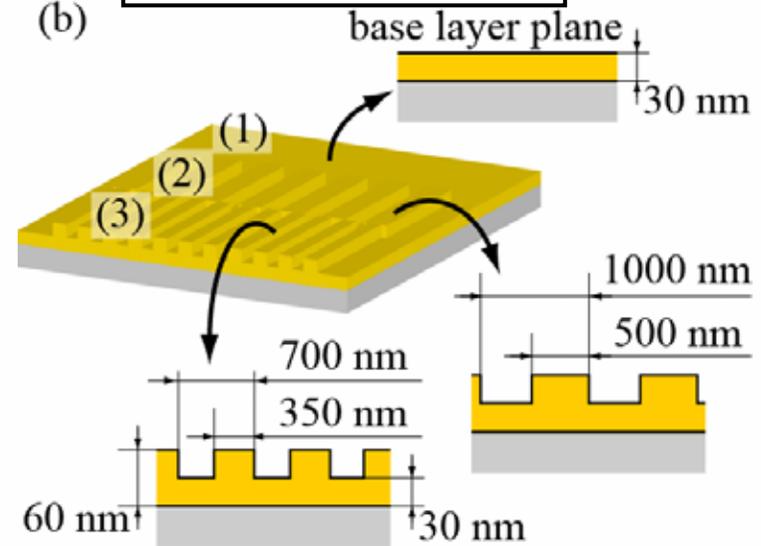


(iv) lift-off

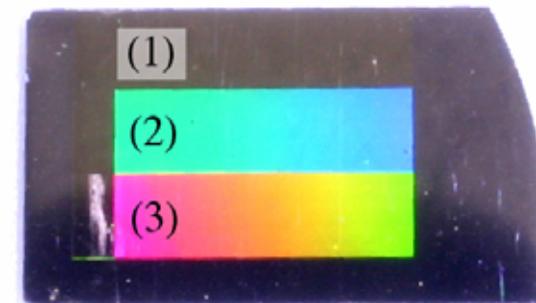


試作パラメータ

(b)



(c)

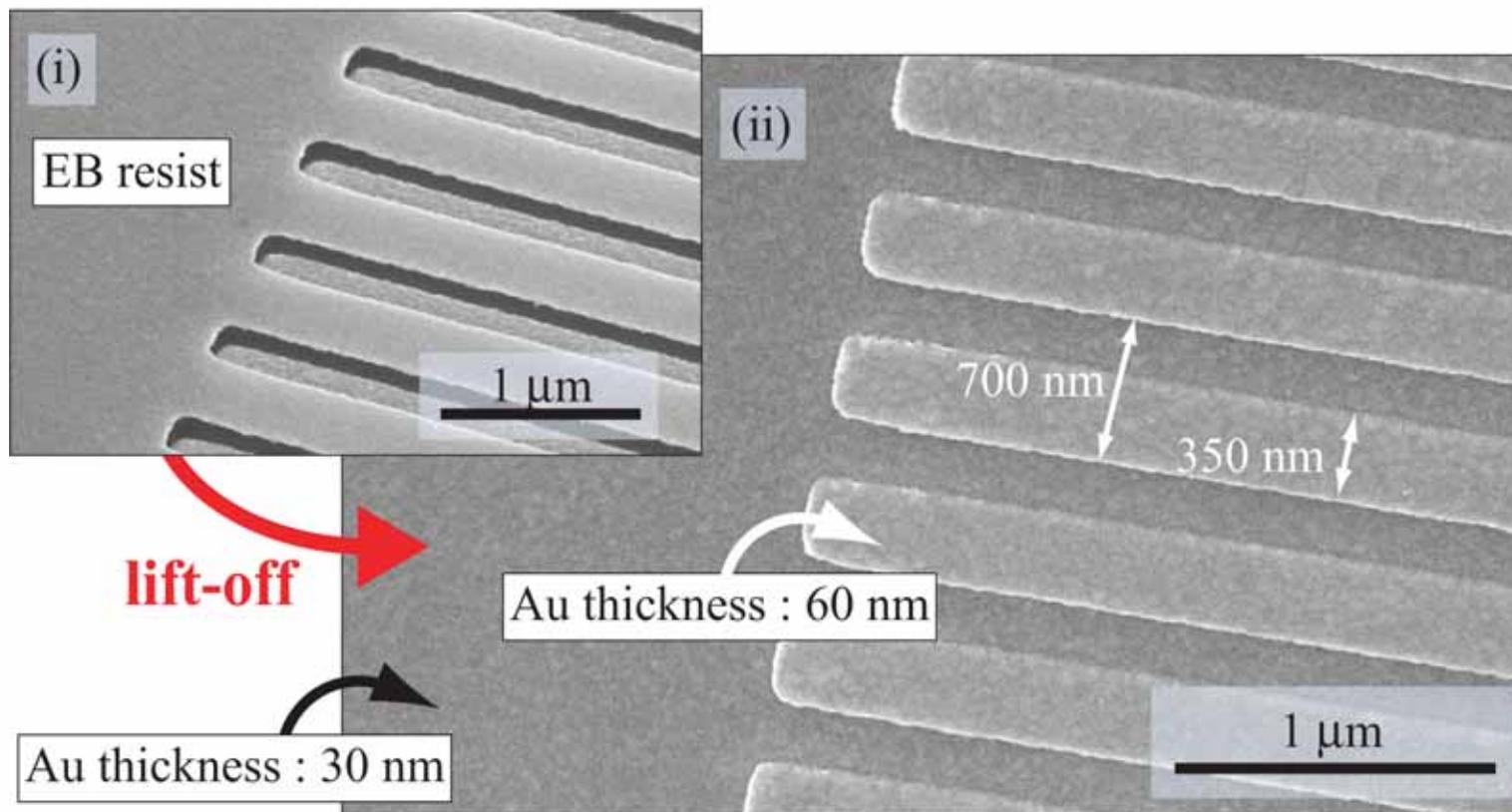


デバイス光学像

10 mm

# 金薄膜におけるL/S350nm

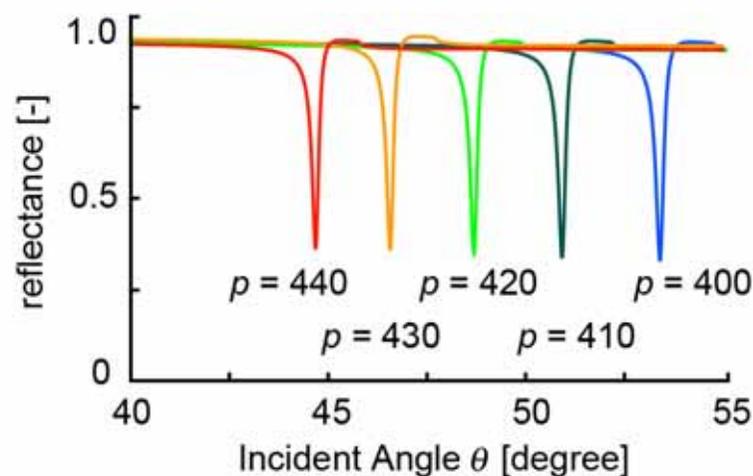
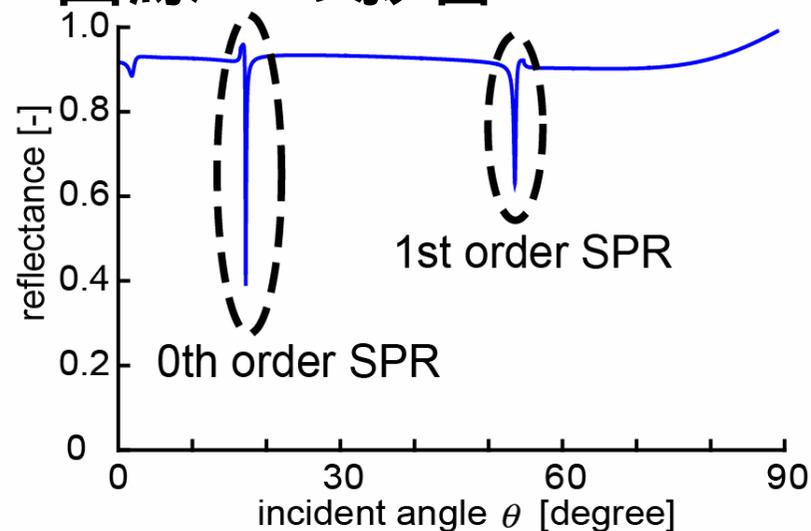
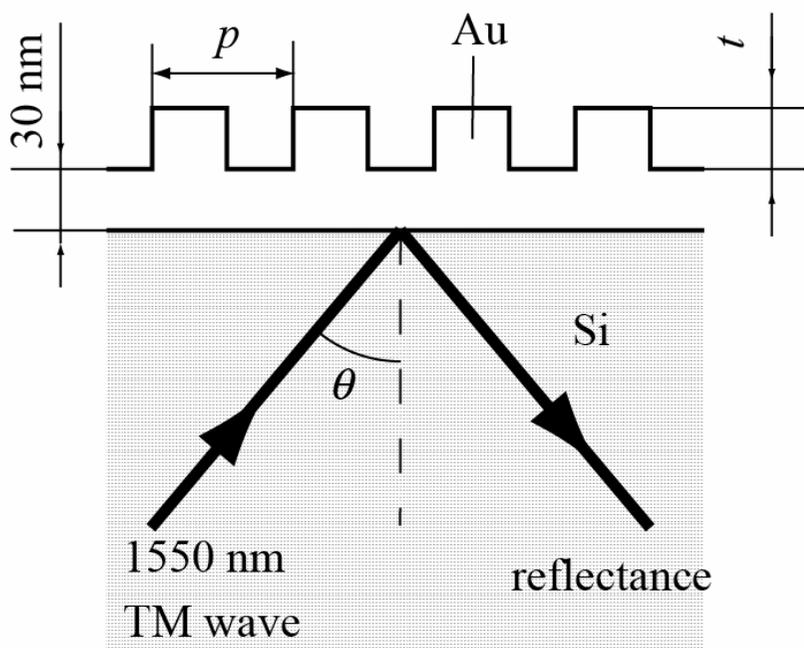
## レジストパターン



## 金膜ナノL/Sパターン

# RCWA\*シミュレーション

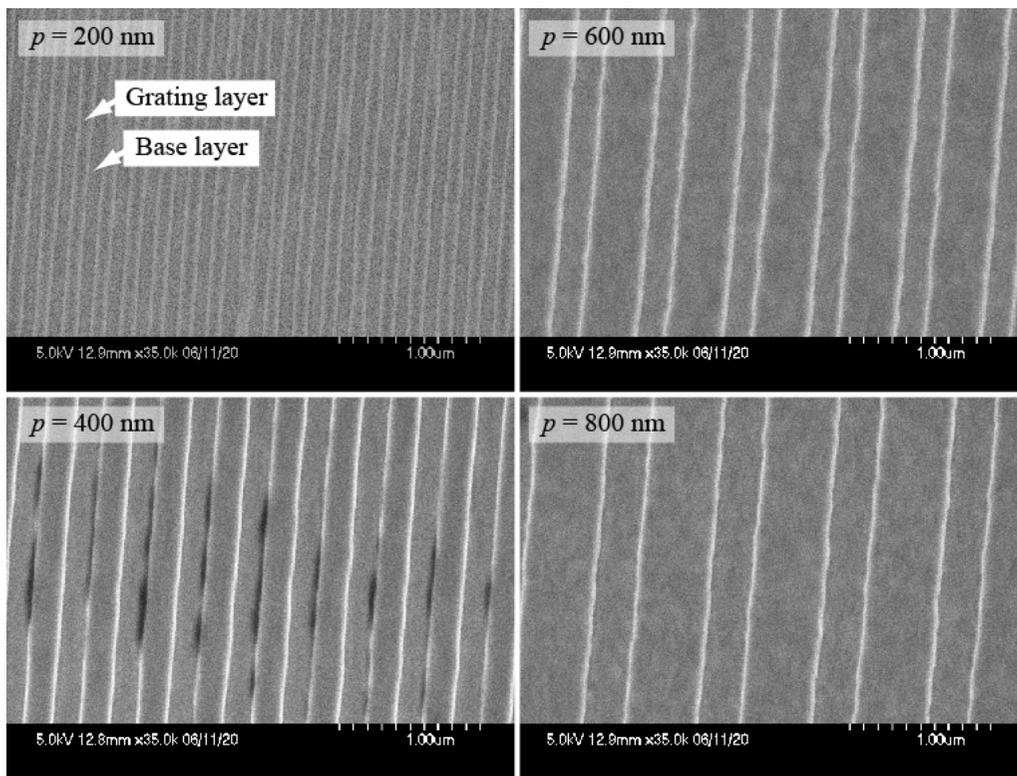
- 表面ナノ構造が与えるSPR曲線への影響



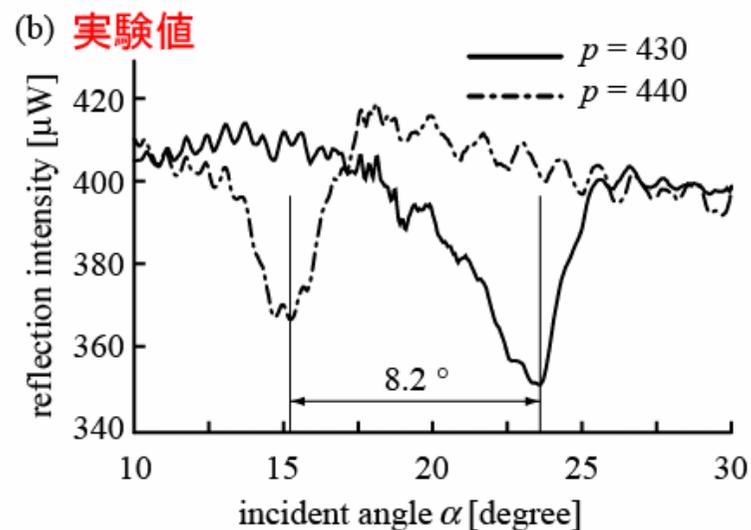
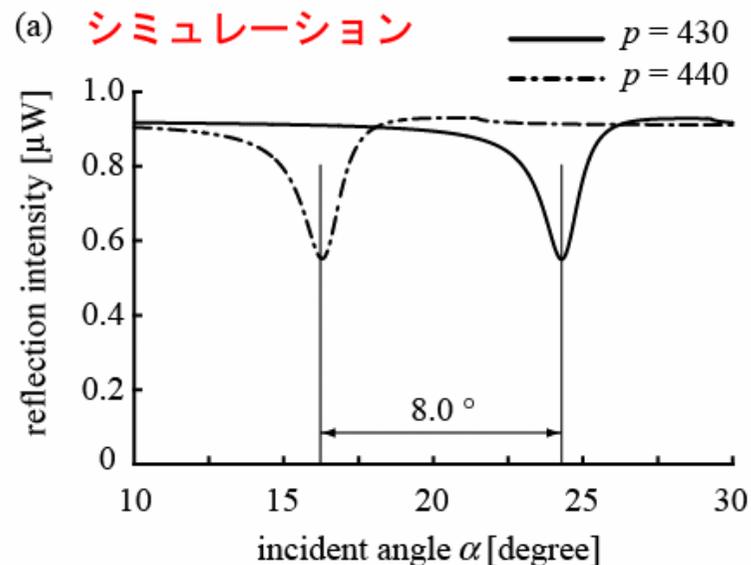
\* Rigorous Coupled Wave Analysis

# 理論と実験の比較

- 最小100nmL/S(200nm pitch)



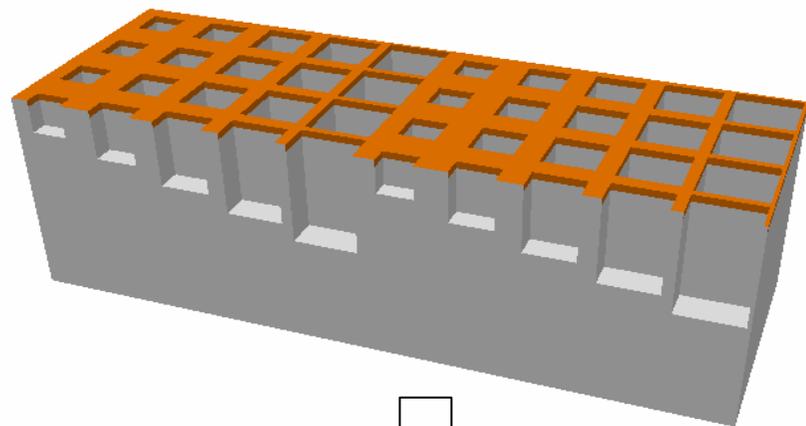
理論のシフト量:  $8.0^\circ$  実験:  $8.2^\circ$   
実験と理論の整合を確認



# 量子化補正マスクエッチングと表面 平坦化技術を用いた3次元曲面形成技術

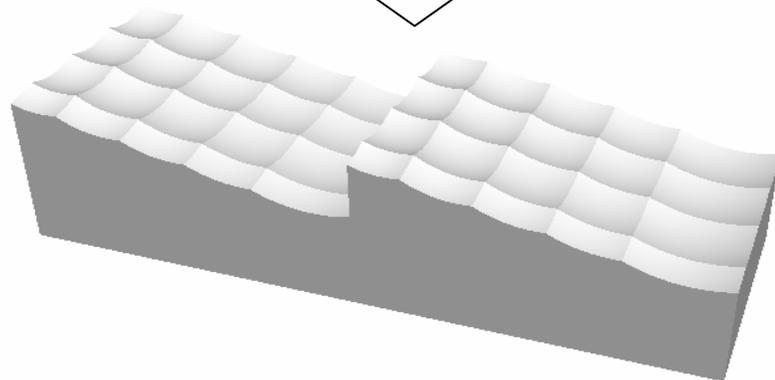
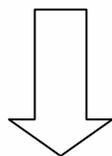
## 3次元曲面形成技術の概要

- SPR光入射用のプリズム角を任意に設定できる技術



### 1. 斜面の形成

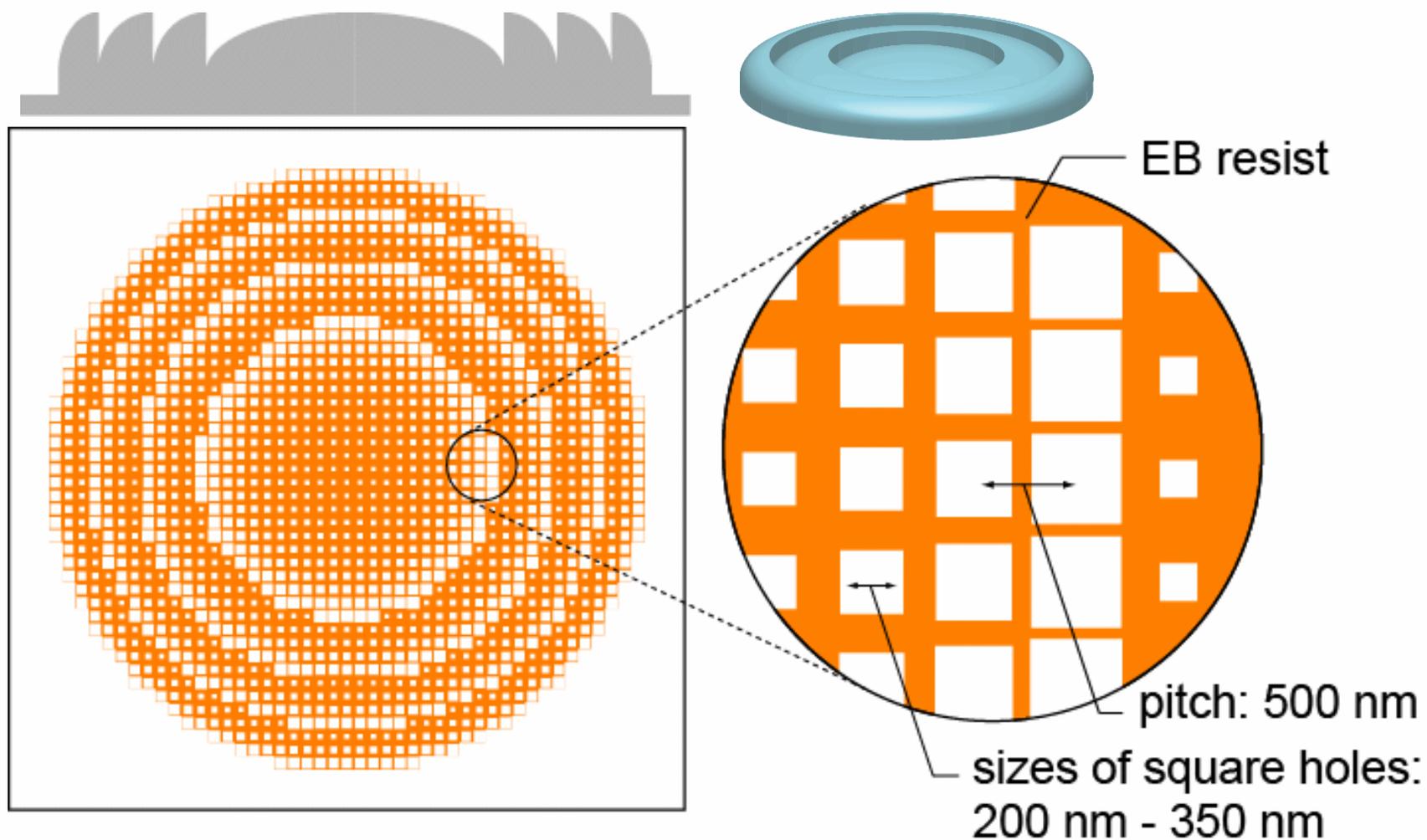
Aspect Ratio Dependent Etching (ARDE) を利用したDRIEによる異方性エッチング



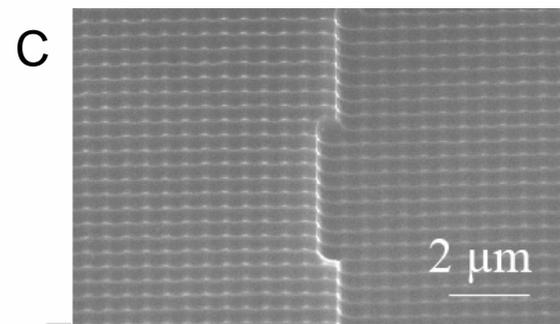
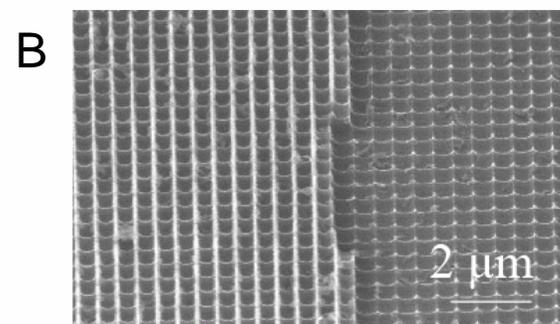
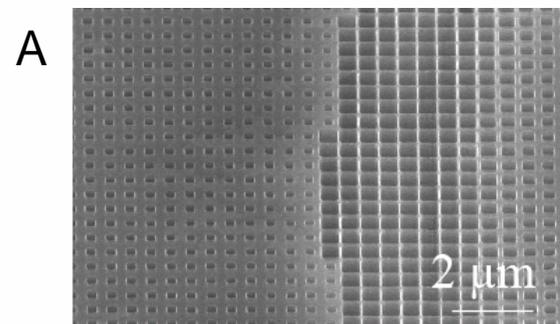
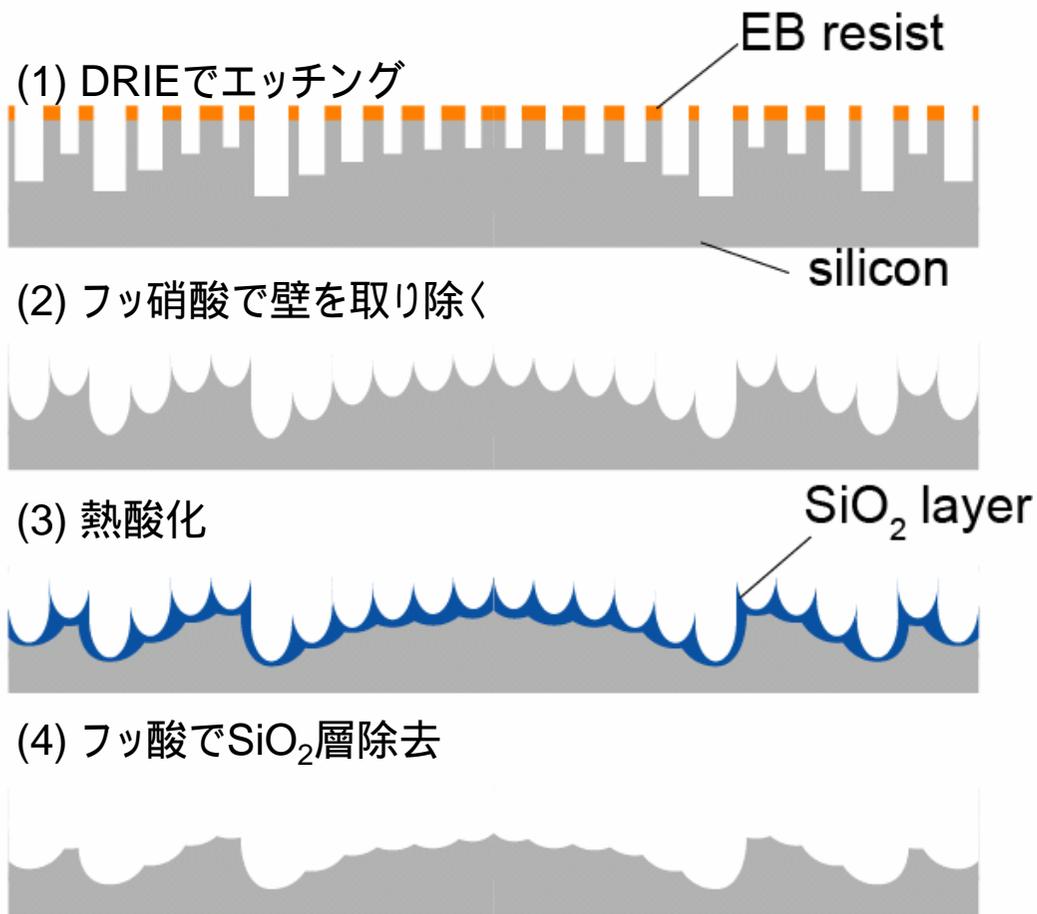
### 2. 表面の平坦化

フッ硝酸と熱酸化の組み合わせによるシリコン表面の平坦化

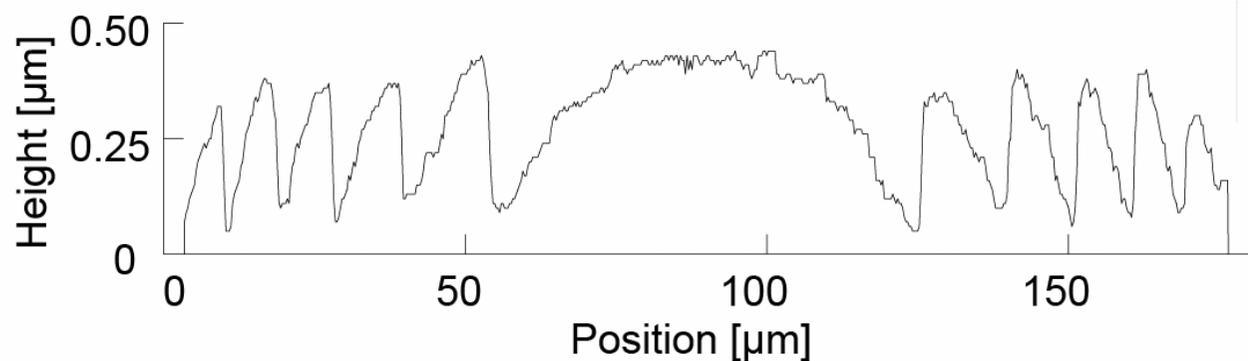
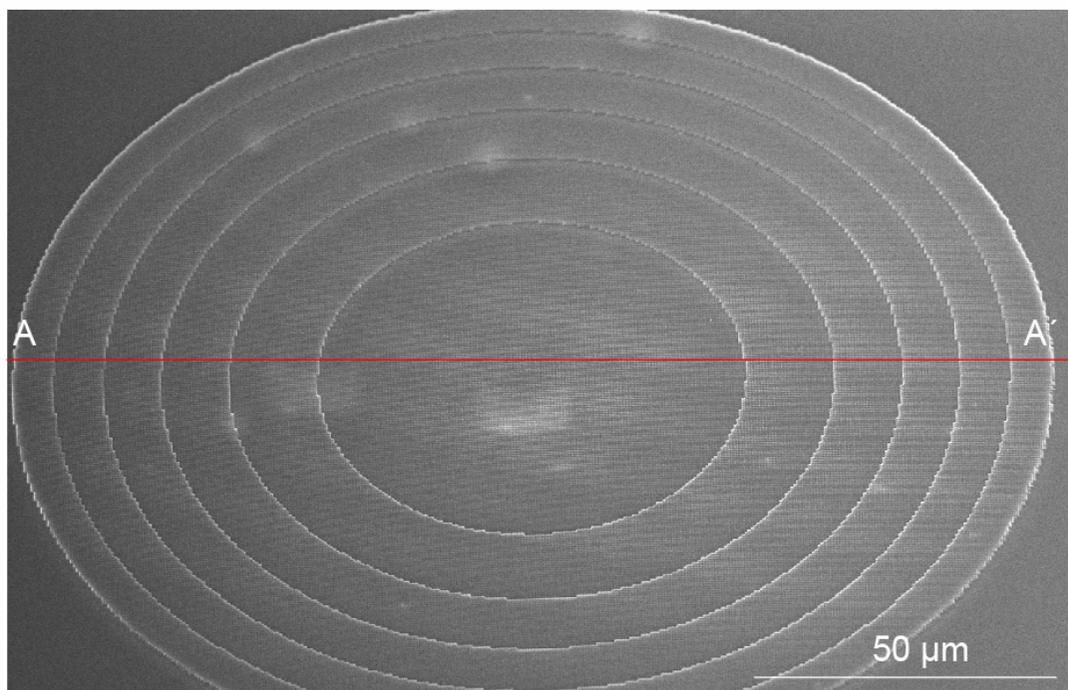
## 設計した表面形状



# 製作プロセス



## 完成したフレネルレンズ形状



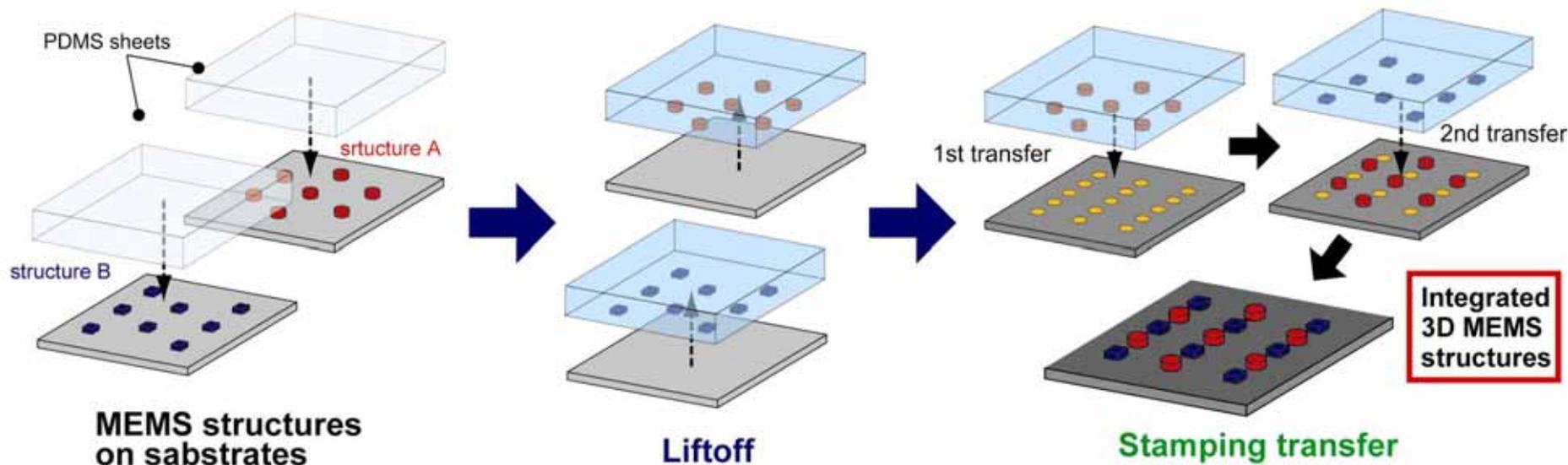
構造の高さ: 350nm  
直径: 200μm  
斜面粗さRa=20nm

# スタンピング転写とセルフアライメントを用いた 高精度・高密度配置技術

---

# リフトオフ&スタンピング転写の概要

- 異なるMEMSパーツをひとつの基板にインテグレート



## 付着力の比較

リフトオフ

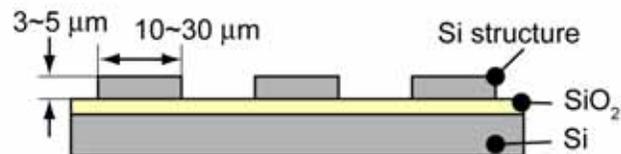
スタンプ転写

SOI基板とSi構造 < PDMSシートとSi構造 < Si構造とSi基板

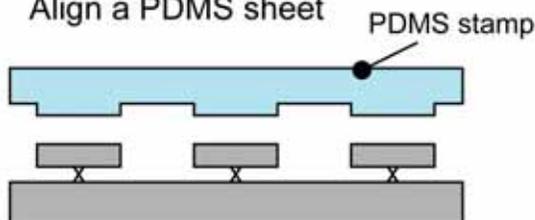
# リフトオフ&スタンピング転写の詳細

## Liftoff process

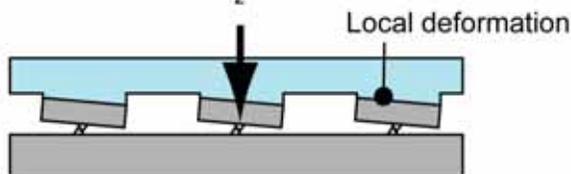
(A) Fabricate Si structures



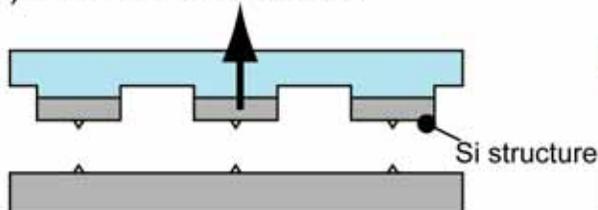
(B) Etch SiO<sub>2</sub> by HF  
Align a PDMS sheet



(C) Press the PDMS sheet  
Break the SiO<sub>2</sub> columns

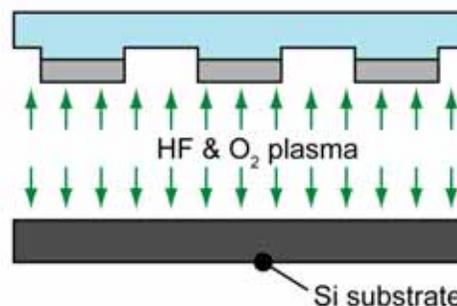


(D) Liftoff the Si structures

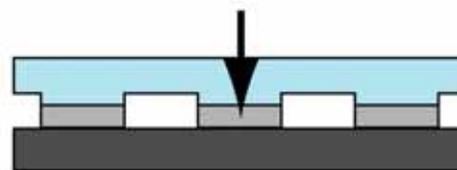


## Stamping transfer process

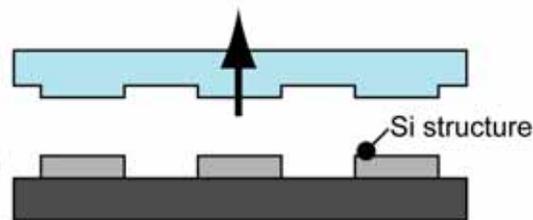
(E) Remove the SiO<sub>2</sub> by HF  
Modify the surface by O<sub>2</sub> plasma



(F) Stamp the Si structures onto the Si substrate

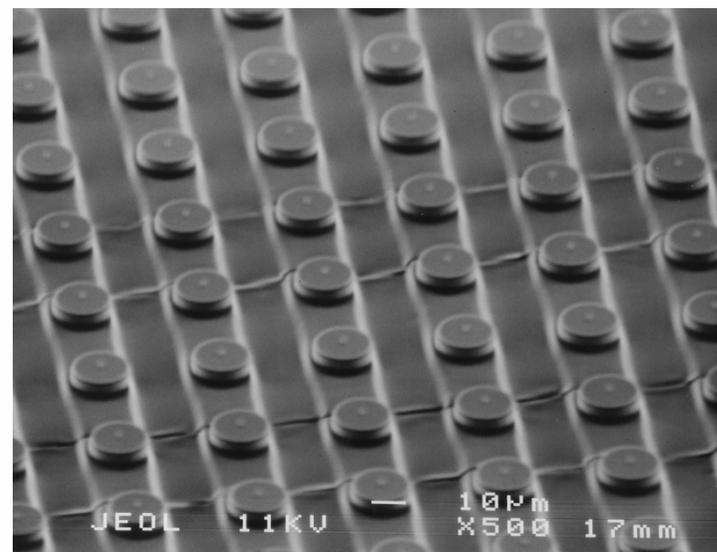
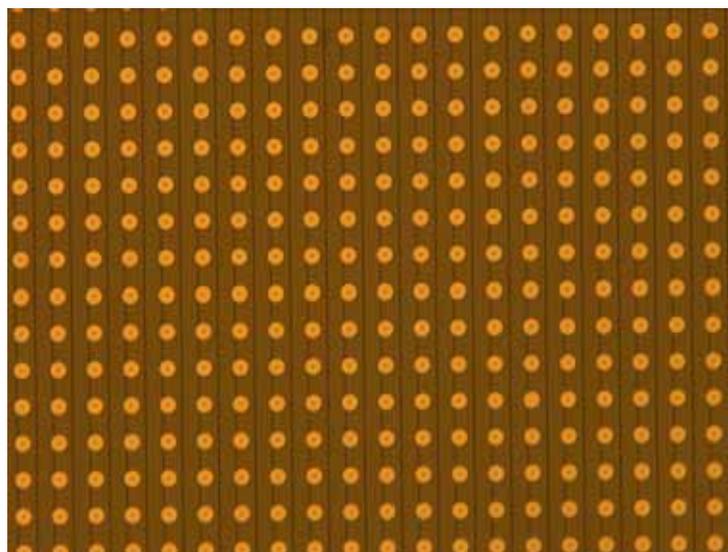
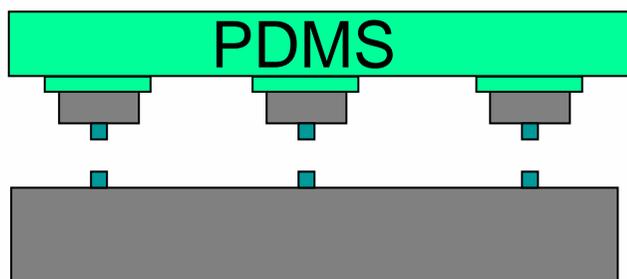


(G) Transfer the Si structures



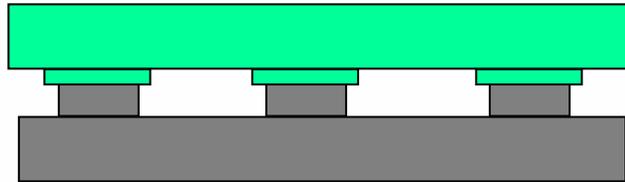
# Si構造のリフトオフ

PDMSでリフトオフ

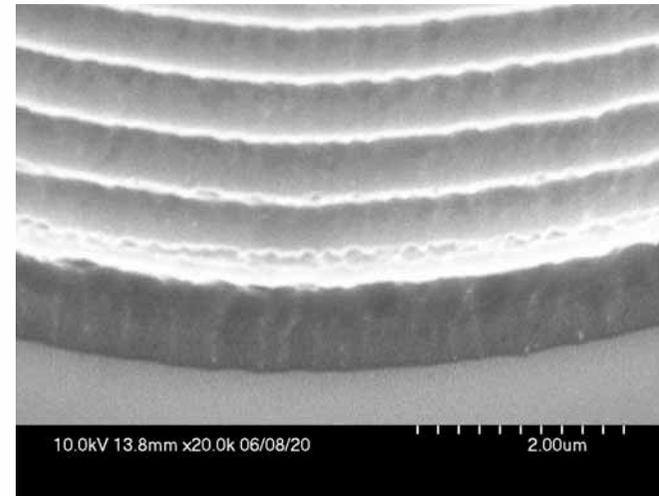
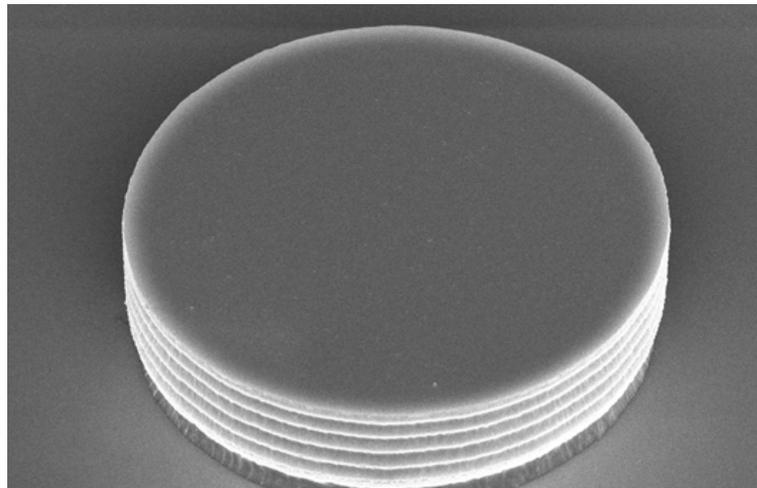
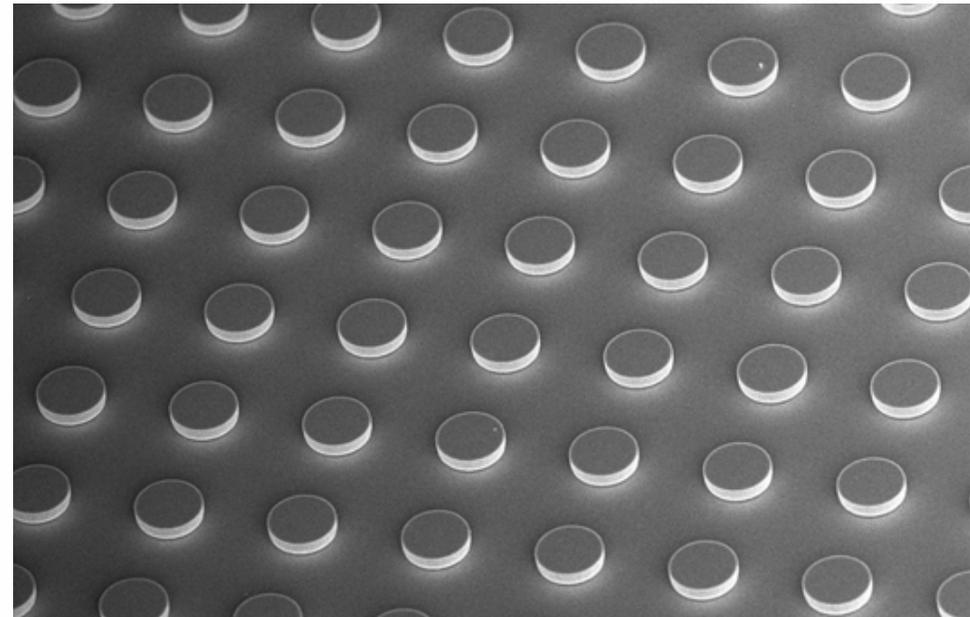
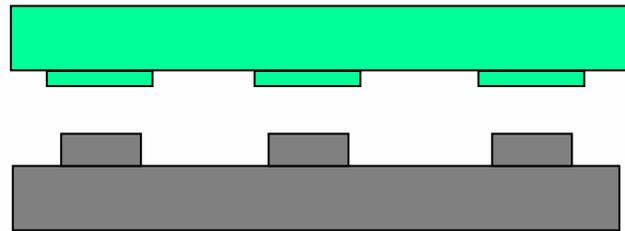


# Si基板上へのスタンピング転写

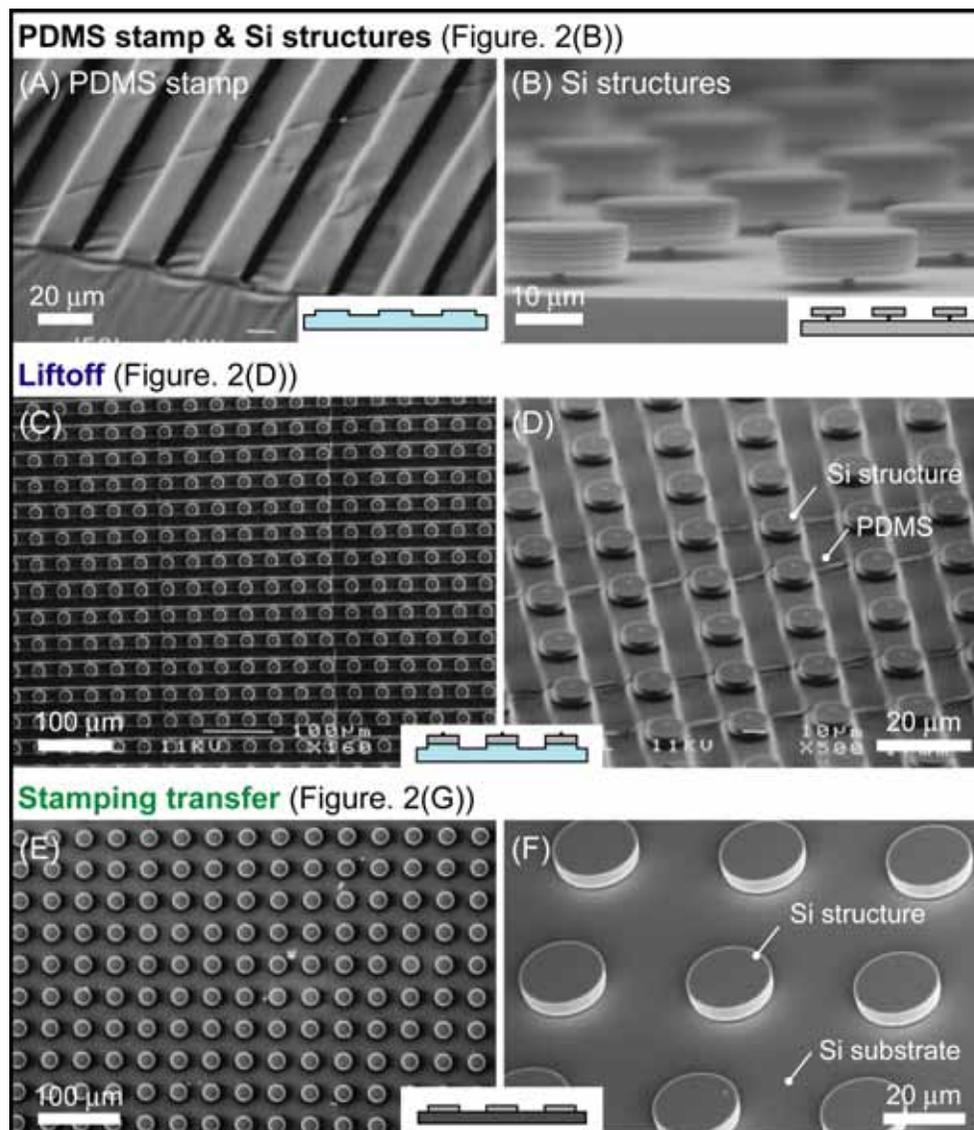
アライメント & 加圧



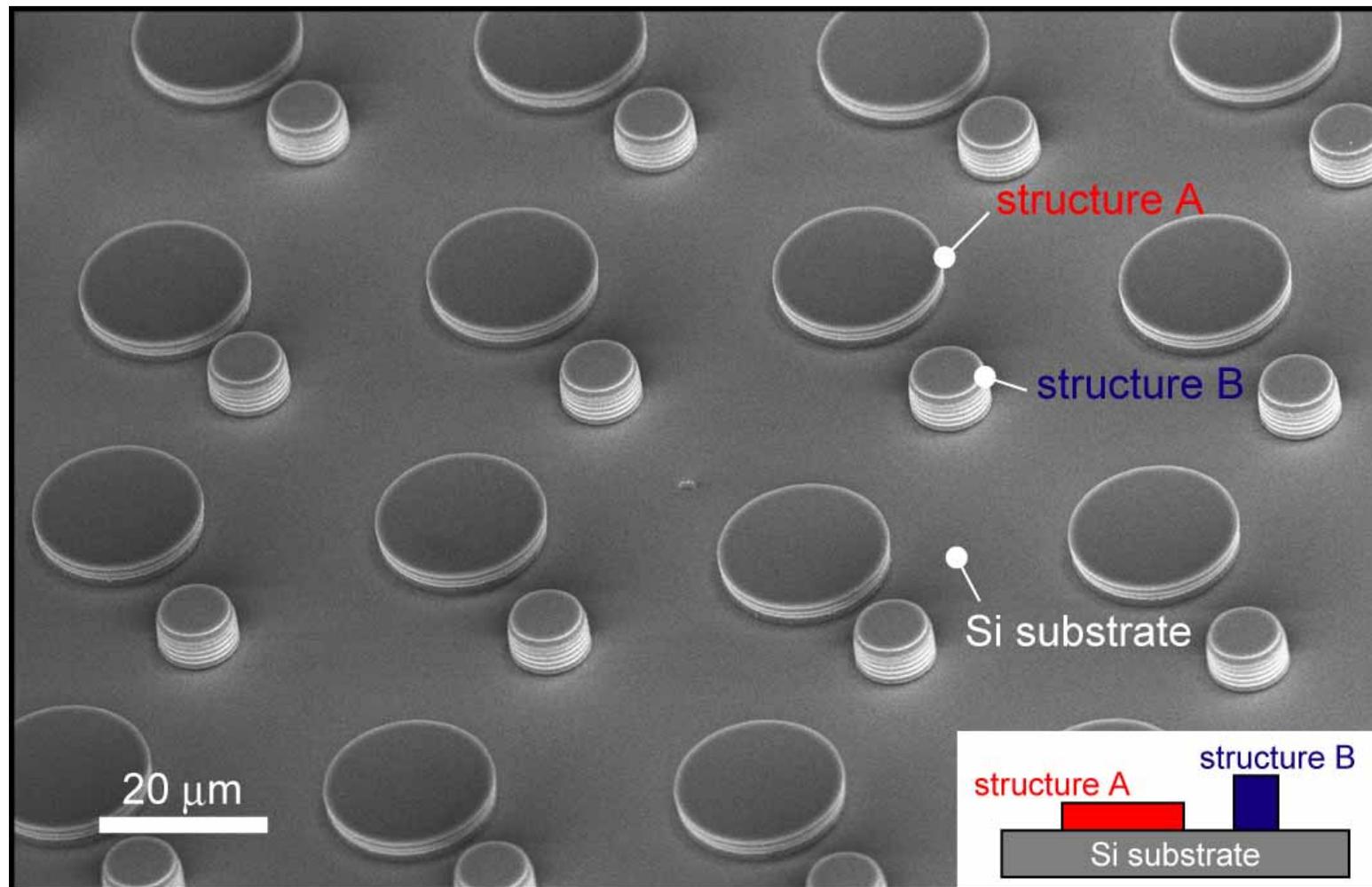
Si構造を転写



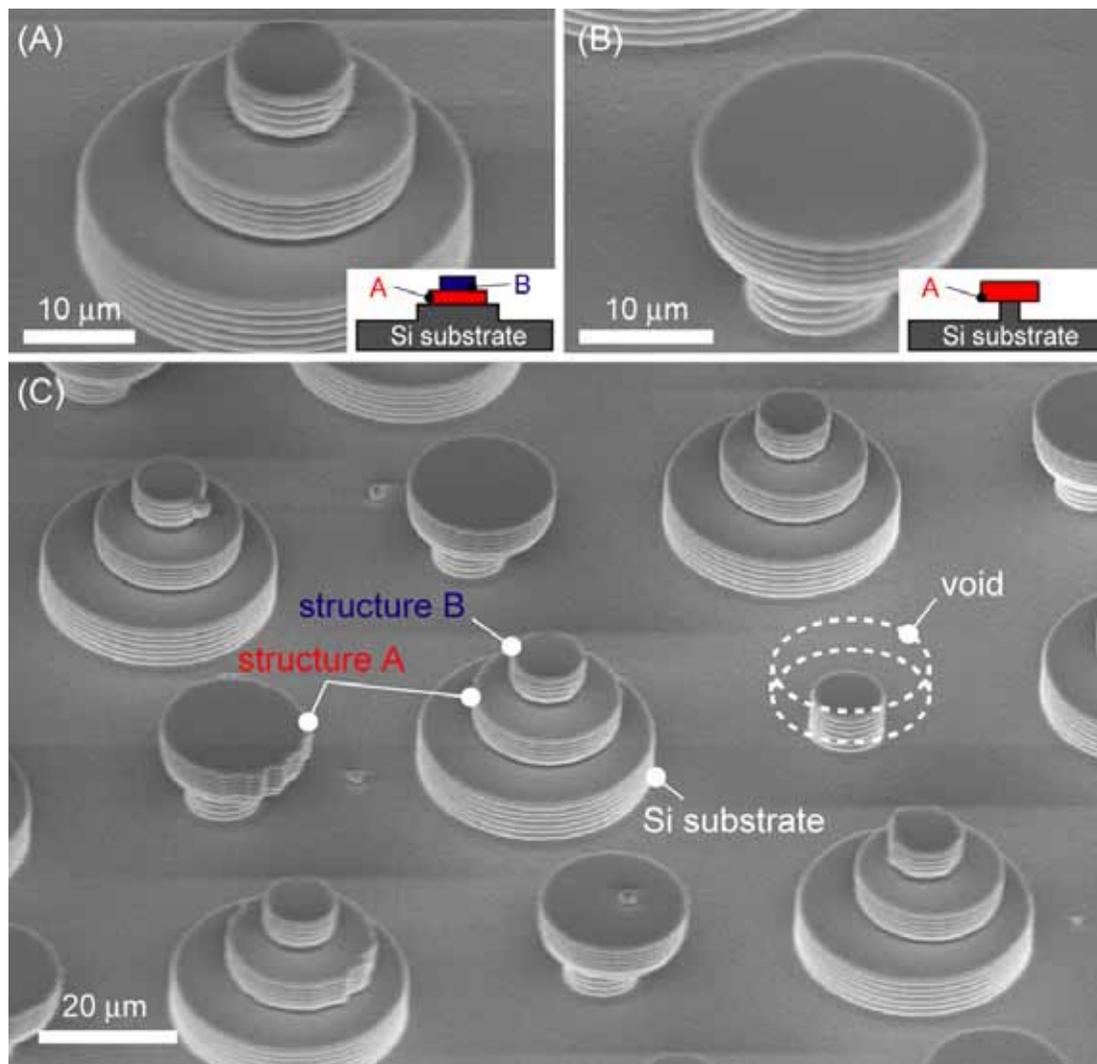
# スタンピング転写された構造の写真



# 背の高さの異なる2種類のマイクロ粒子の転写



# マイクロ粒子の上にマイクロ粒子転写



## バイオ材料（タンパク質など）の選択的修飾技術

(独) 産業技術総合研究所  
バイオニクス研究センター  
鈴木 祥夫

### 【本事業の目的】

本事業は、MEMS 基板上において、ヒト疾患腸管関連タンパク質などの生体分子を検出するための MEMS センシングデバイスの開発を目標とした検出法の開発をおこなう。具体的には再利用可能となる新規な分子認識素子の開発、分子認識素子の選択的修飾技術の開発、MEMS センシングデバイスへの適応の可能性を示す。また、本研究で開発した分子認識素子を MEMS 構造体等に固定化し、生体環境を模倣した実験系のもと、血管新生因子 (VEGF) などの疾病関連マーカータンパク質、ヒドロキシリノール酸 (HODE) などの酸化傷害バイオマーカーなどを検出することが可能な小型バイオセンシングデバイスの開発を行う。

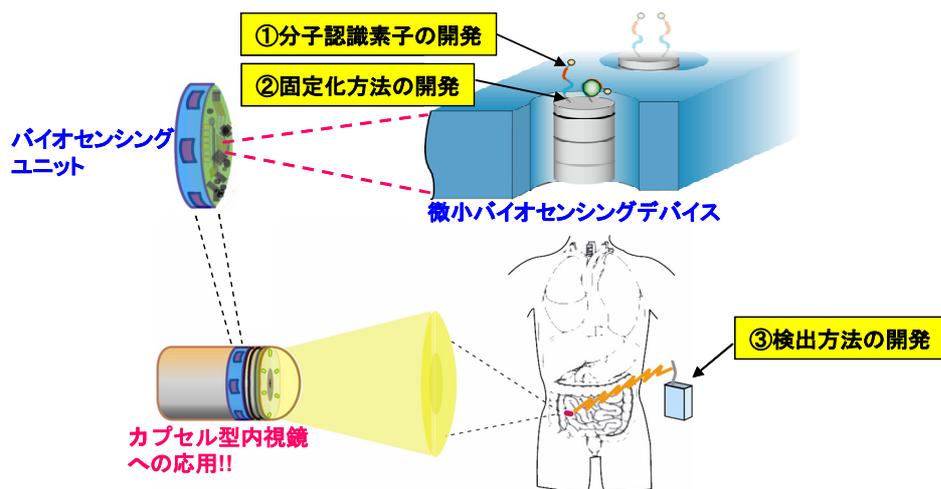


図 1 本事業の研究開発項目と、MEMS を利用した体内バイオセンシングシステムのイメージ図

### 【これまでの研究成果】

#### [背景]

血管新生は成人の正常な人体にみられる生理的な現象(例えば、胎児の血管形成、子宮内膜、卵胞形成などが)や、特定の疾患(例えば、増殖性糖尿病性網膜症、外傷における創傷治癒過程、悪性腫瘍の増殖・転移など)にみられる「新しい血管が形成

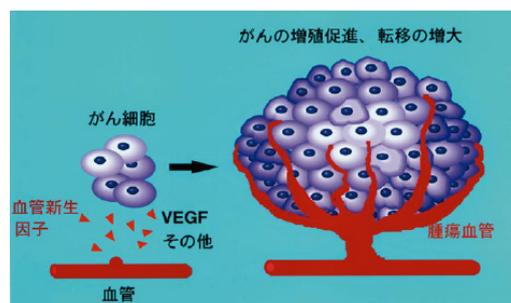


図 2 血管新生のメカニズム

されるプロセス」である。血管新生に関与する一群の物質を血管新生因子といい、代表的な血管新生因子として、VEGF、が挙げられる。血管新生因子を計測するために、通常、血液診断が行われているが、①患者の苦痛を伴う、②病変部位を特定することができない、③微量成分の検出には適さない、といった問題点がある。

そこで、本研究では、MEMS 基板上において、非侵襲的かつ高感度で血管新生因子を計測するための分子認識素子の開発を行い、血管新生因子として知られるタンパク質マーカーを3種類選択し (TNF- $\alpha$ 、IL-6、VEGF)、これらの測定対象物質に対する性能を評価した。

### [結果および考察]

TNF- $\alpha$ の認識素子は、TNF- $\alpha$ レセプタータンパク質として知られる TNFRSF1A の部分配列を用いて設計した。IL-6 の認識素子は IL-6 と結合する gp130、IL-6R を利用した。さらに、VEGF については、58 アミノ酸から成るペプチド鎖をタンデムに繋いだ新規認識素子を設計・合成した。これらの認識素子が、それぞれの測定対象物質を特異的に認識できるか、表面プラズモン共鳴法 (SPR 法) を用いて検討した。その結果、TNFRSF1A の細胞外ドメインの部分アミノ酸配列は、特異的に TNF- $\alpha$  を検出でき、また、IL-6 / IL-6R 複合体は gp130 と特異的に結合することを確認した。さらに、VEGF 検出用認識素子についても検討を行ったところ、分子認識素子と VEGF との解離定数は  $3.3 \times 10^{-9} \text{M}$  であり、極めて高い結合能力を有していることが明らかとなった。さらに、検出限界を算出したところ 0.1pg/mL であり、増殖性糖尿病性網膜症患者の VEGF 濃度測定 (異常値 345pg/mL、正常値 3.9pg/mL) に適応可能であることが明らかになった。

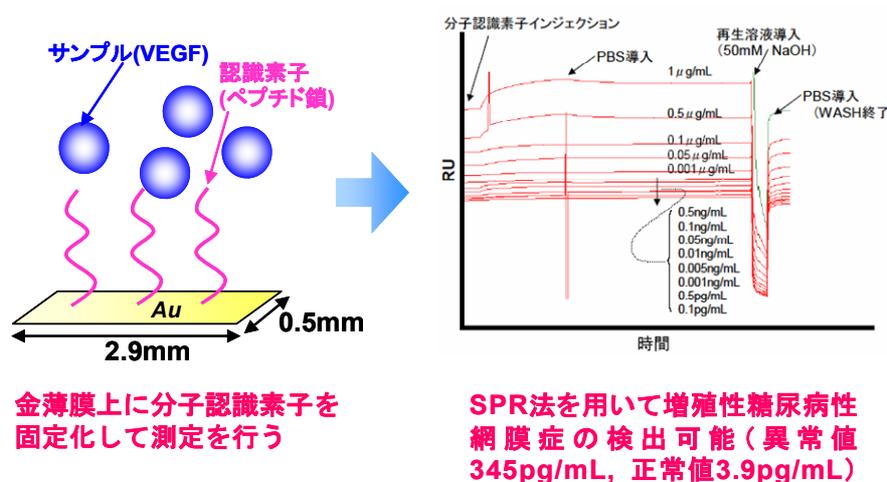


図3 分子認識素子と VEGF との反応による SPR シグナルの変化の様子

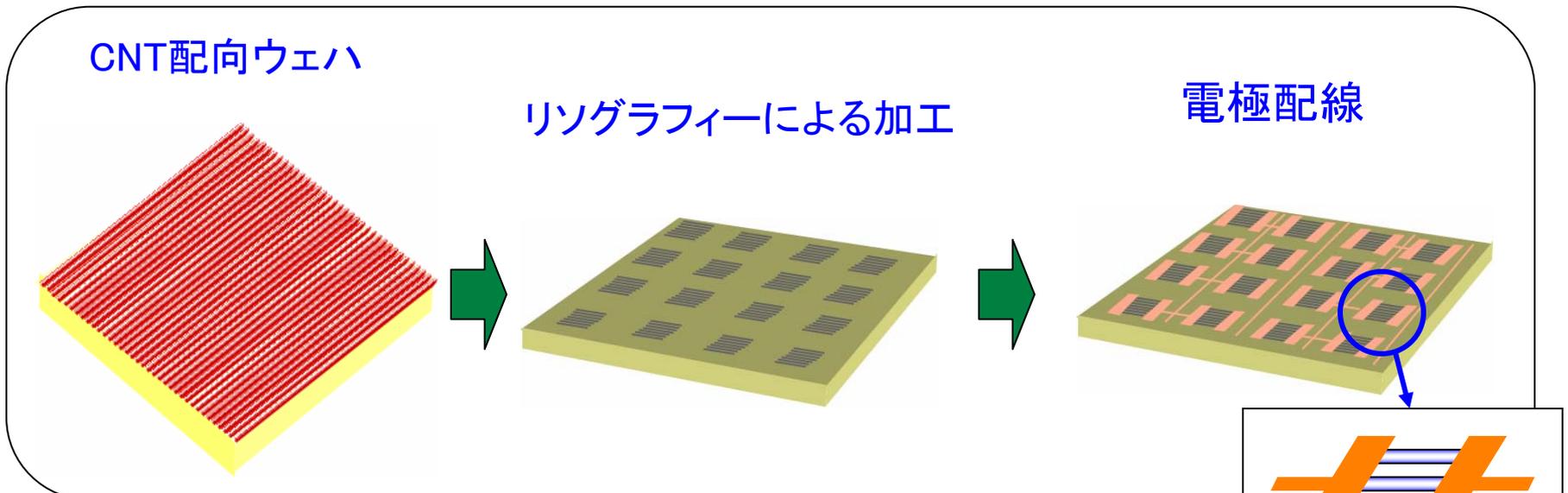
高集積・複合MEMS製造技術開発事業

ナノ材料(CNTなど)の

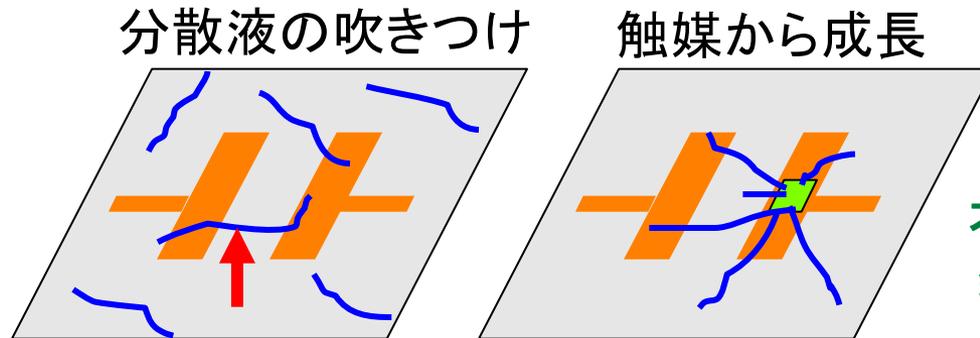
選択的形成技術



# 集積化CNT構造体



従来法の  
製作法

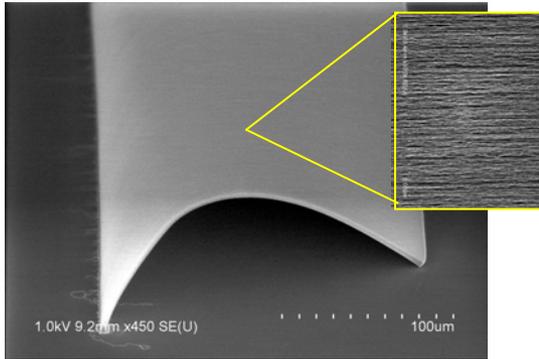


不完全な位置制御  
架橋数にばらつき

任意の位置に・再現性よく・均質な・配向CNTを

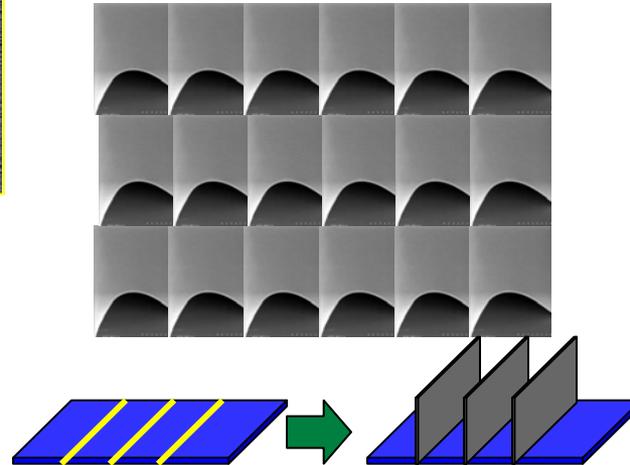
# 「CNTウェハ」

スーパーグロースによる  
SWCNT配向シート

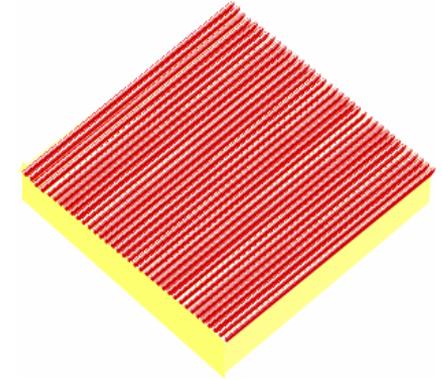


自己組織化による配向  
超長尺かつ超高密度

パターニングにより配列



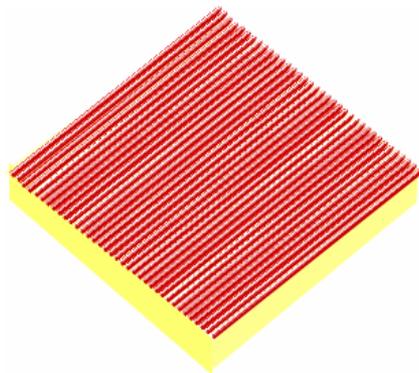
SWCNT配向ウェハ



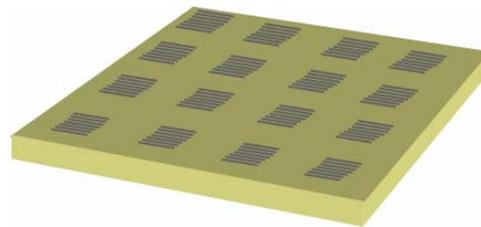
新種のCNT素材!

# 「集積化MEMS」

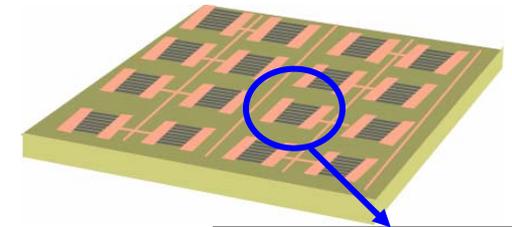
CNT配向ウェハ



リソグラフィーによる  
ドット配列化



電極配線／集積化MEMS



任意の位置に・再現性よく・均質な・配向CNTを



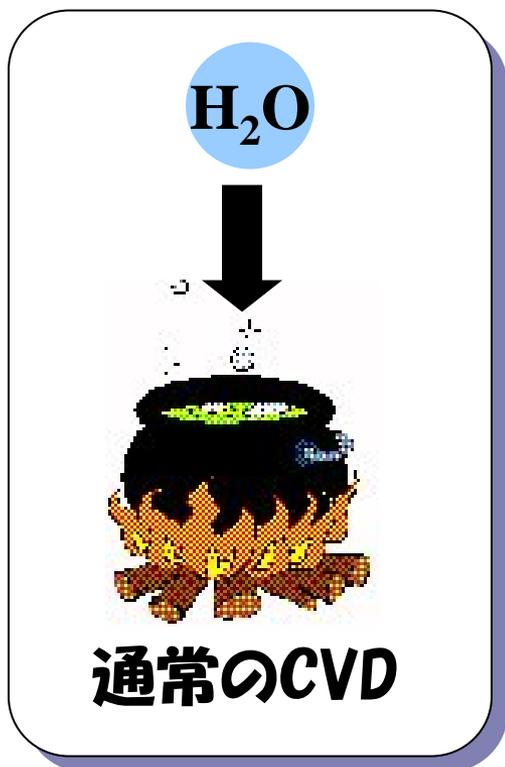
# スーパーグローースとは

産総研発

•カーボンナノチューブ合成の世界最高の技術

## 水分を添加

(PPMレベルの極微量)



## 水分の効果

触媒の活性、寿命を大幅に改善

## 結果として

- 超高效率 従来の500倍
- 超高純度 従来の2000倍
- マクロ構造体の作製 世界初

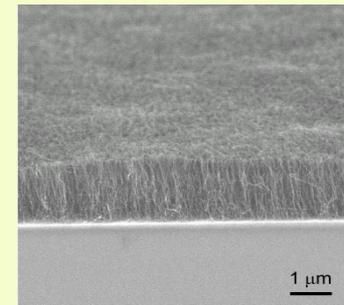
# 超高効率のCNT成長

つくる

成長効率

垂直配向単層ナノチューブ構造体  
高さ2.5ミリ成長時間10分

従来の世界記録  
高さ4 μm東大丸山  
(2004CPL)



高さで500倍  
時間効率で3000倍

将来大量生産の可能性

従来の数百倍の触媒効率

将来大幅なコストダウンの可能性

Science, 306, 1362 (2004)

触媒効率

成長法

SWNT/触媒 (重量比%)

レーザーアブレーション

500%

HiPCo法

300%

アルコールCVD

800%

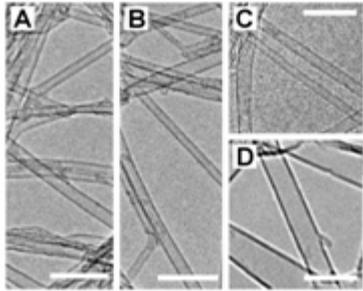
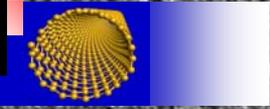
気相流動

100%

スーパーグロース

50000%

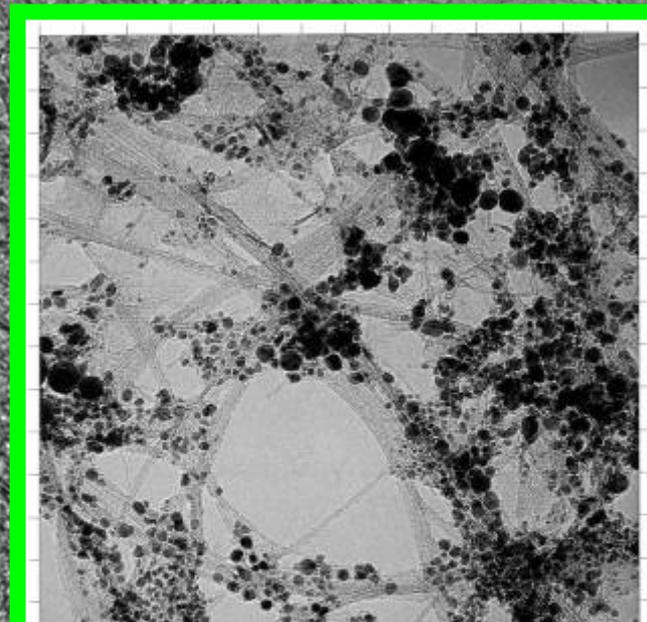
# 超高純度単層カーボンナノチューブ つくる



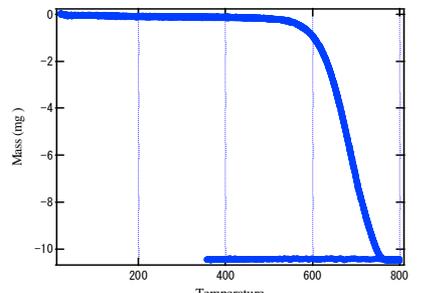
Scale A,B = 10 nm, C,D = 5 nm



**スーパーグロースのTEM像  
チューブしか観察されない**



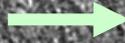
従来CVDでのas-grown  
チューブ  
触媒不純物が黒点として観  
察される



熱重量分析  
→ 超高純度を示す

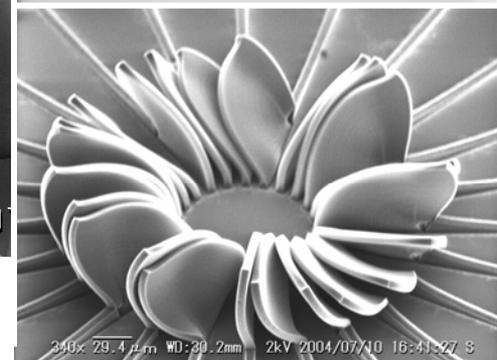
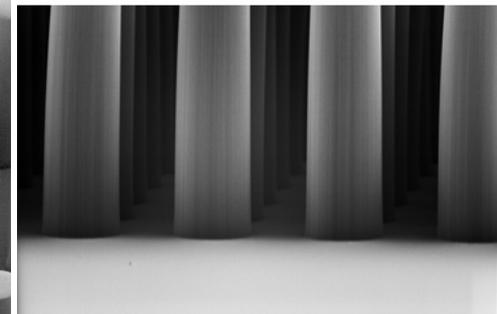
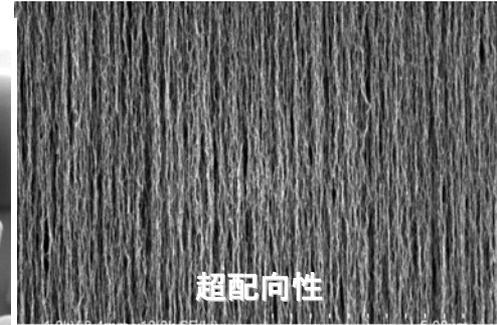
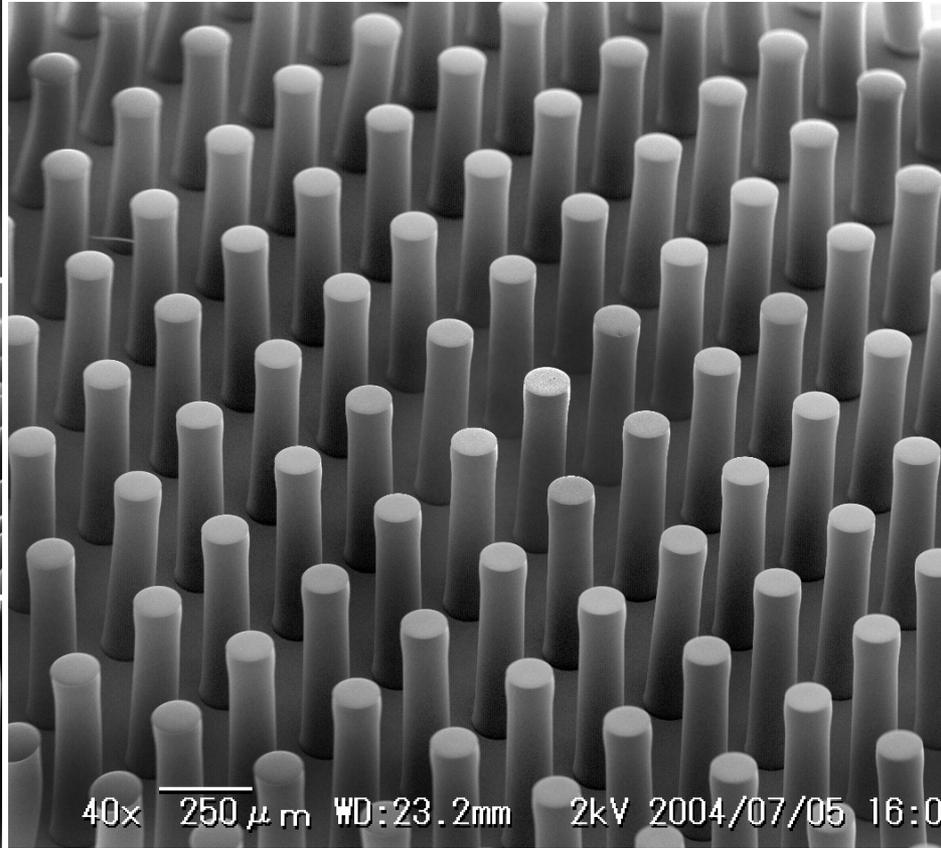
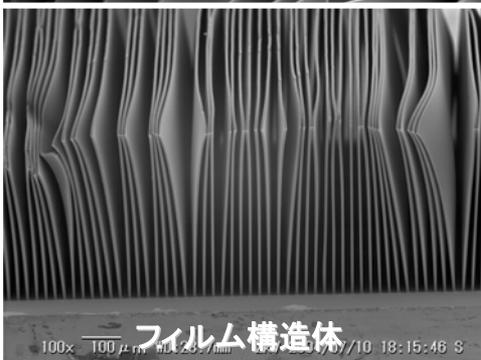
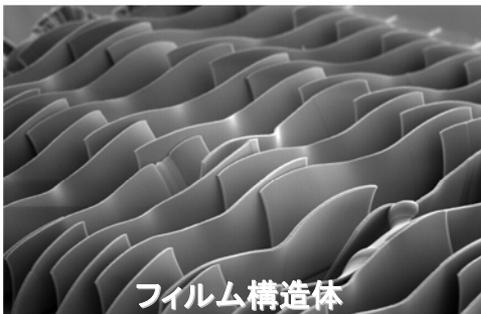
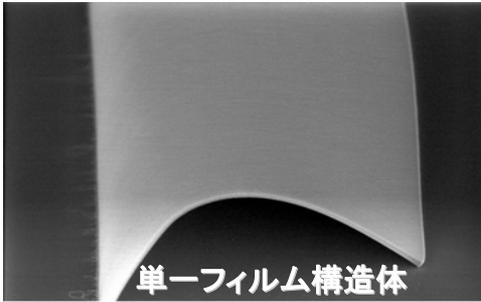
## 不純物濃度 (蛍光X線分析)

| 成長法      | 不純物    |
|----------|--------|
| 通常のCVD   | 17%    |
| HiPCo    | 30%    |
| スーパーグロース | 0.013% |

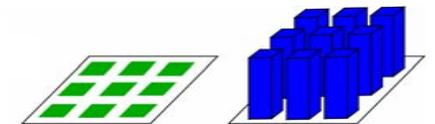


**純度99.98%  
HiPCoの2000倍の純度**

# 配向単層ナノチューブ構造体

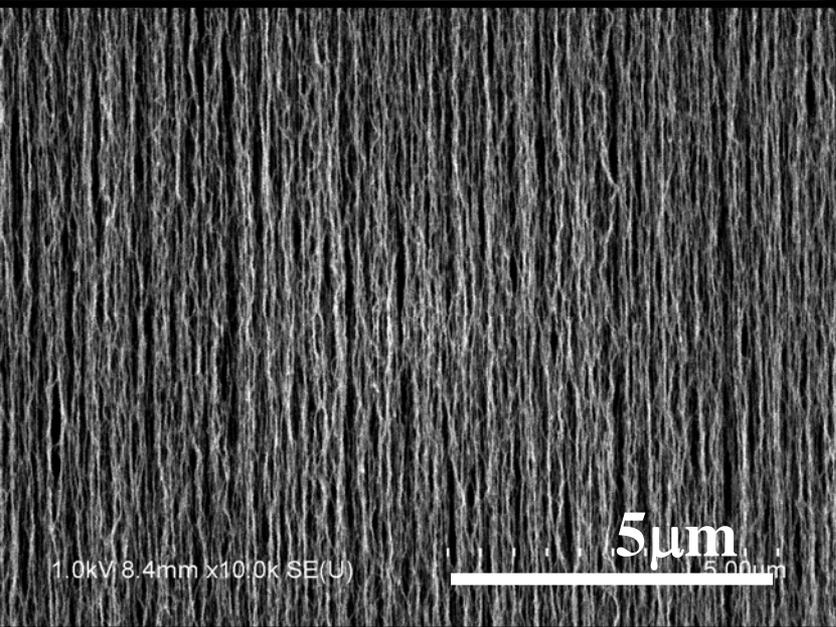


世界で初めて単層チューブ構造体の創製に成功一産総研のみで合成可能



# Oriented Films

- CNT構造体を自在に合成するスーパーグロース合成技術  
→狙った場所にデザインされた形態のCNT-MEMS構造体  
を作製
- CNTの優れた物性がMEMSに新しい機能をもたらす



# CNT-MEMS開発ロードマップ

構造体  
作る



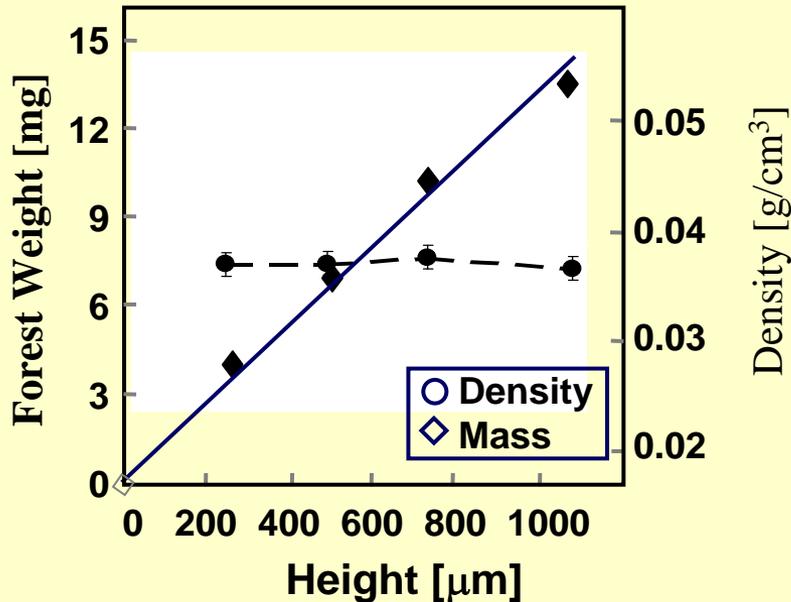
どんな  
機能  
か？



なんに  
使える  
か

# Characterization of SWNT-Forests

## Uniform Vertical Density



**Density = 0.037 g/cm<sup>3</sup>**

SWNT: 1.3 g/cm<sup>3</sup>

Graphite: 2.25

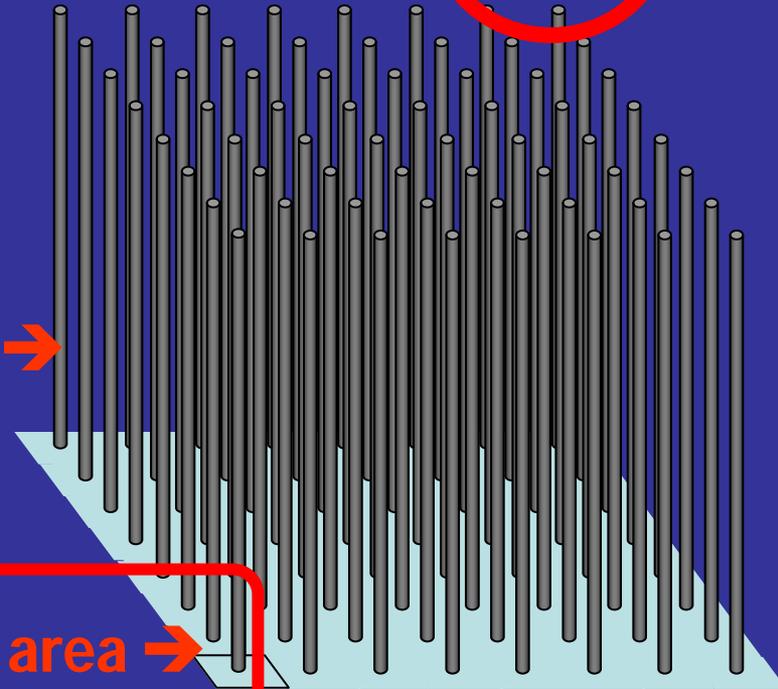
Diamond: 3.52

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| SWNT Volume Density                | <b>0.036 g/cm<sup>3</sup></b>                    |
| SWNT Number Density                | <b>5.08x10<sup>11</sup> tubes/cm<sup>2</sup></b> |
| Substrate Area Containing One SWNT | <b>196 nm<sup>2</sup></b>                        |
| SWNT Coverage                      | <b>3.6%</b>                                      |

**Very Sparse Material**

**2.89 nm →**

**14x14 nm area →**

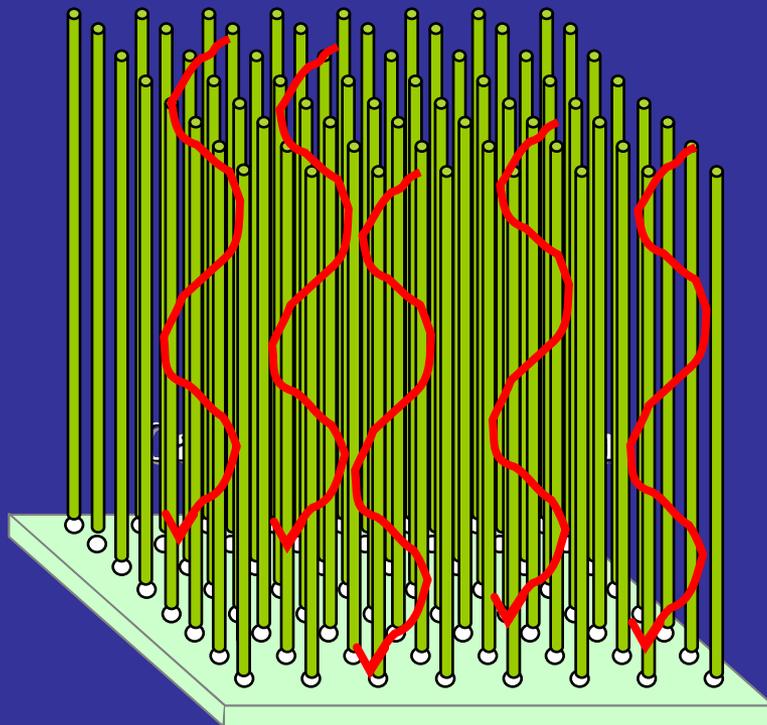


# Critical Factors for Highly Efficient Growth

Large Catalyst (2.8nm) → Long Life Time

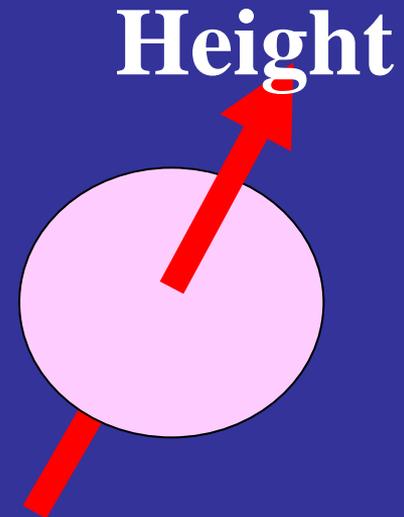
Sparsely Distributed (15 nm) → To enable Carbon Diffusion

Densely Distributed → To enable Vertical Standing



SWNT Density

High  
Low



Small Large  
SWNT Size

# CNT-MEMS開発ロードマップ

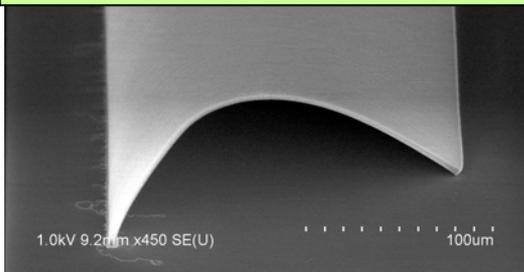
構造体  
作る

カーボンナノチューブ構造体をスーパーグローブ法により合成



構造体をリソグラフィー、エッチング等により形成加工する技術開発

非常にスカスカなカーボンナノチューブ構造体（フォレスト）

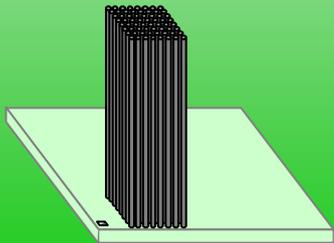
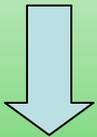
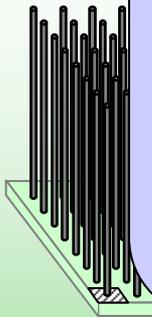


高密度  
化技術

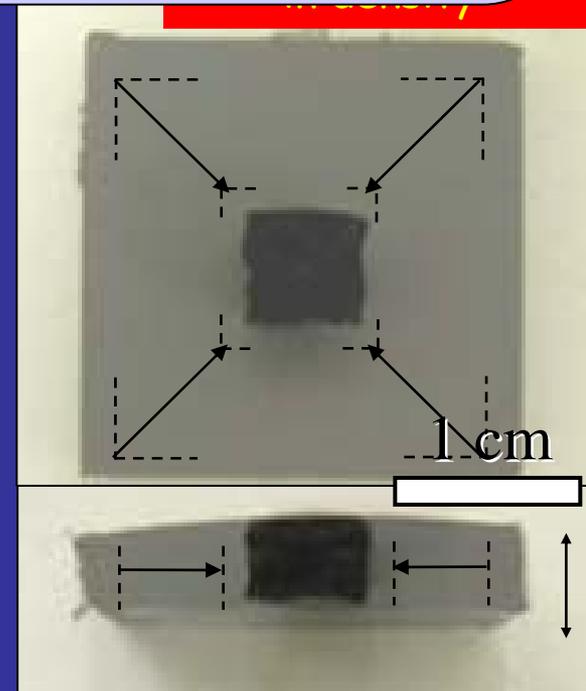
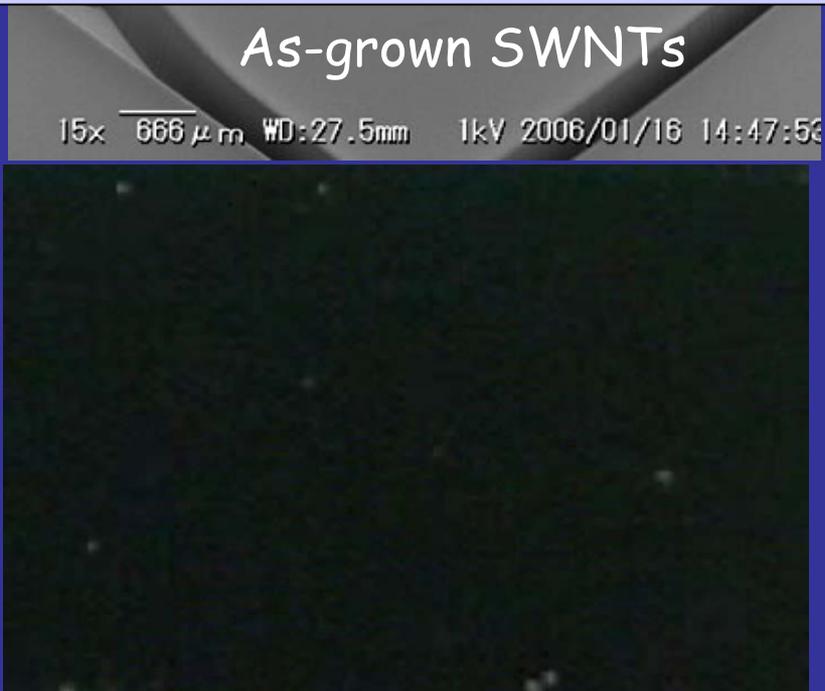
形成プロセス

SWNT Solid

# 単層カーボンナノチューブ固体

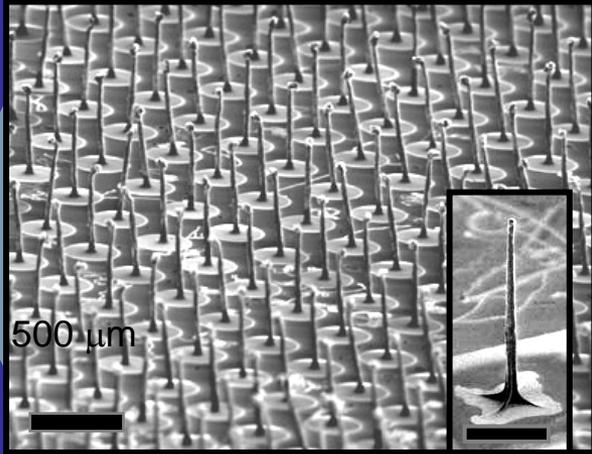


Densely packed SWNTs

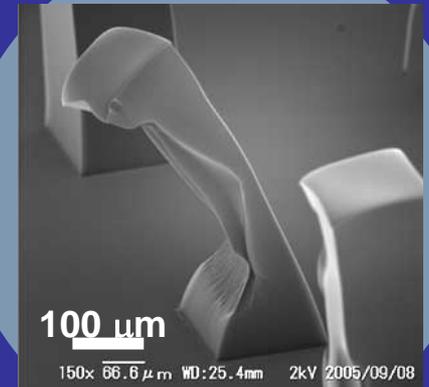
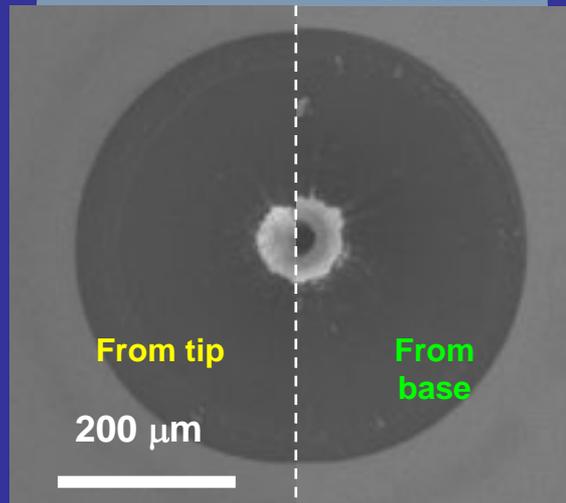
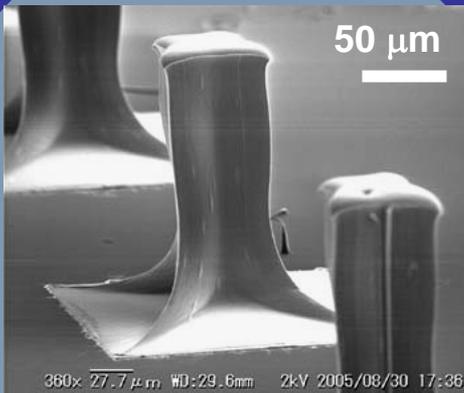
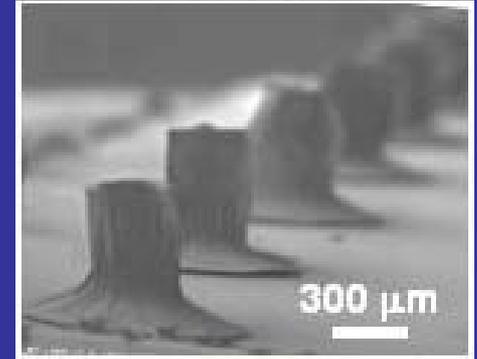
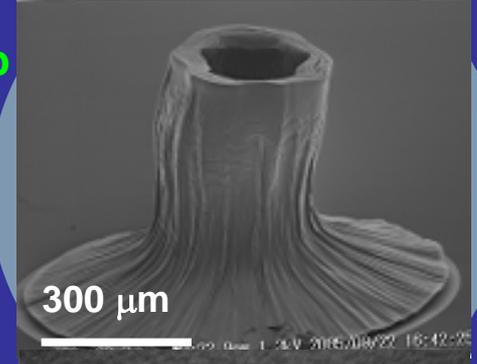
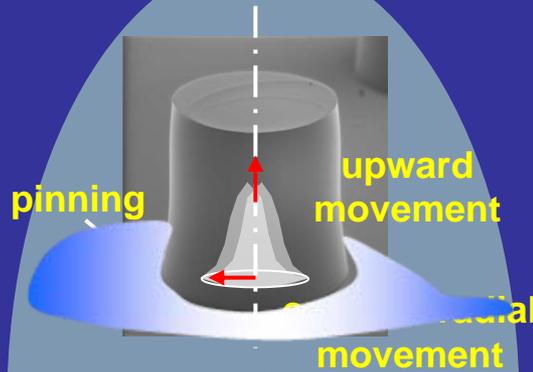


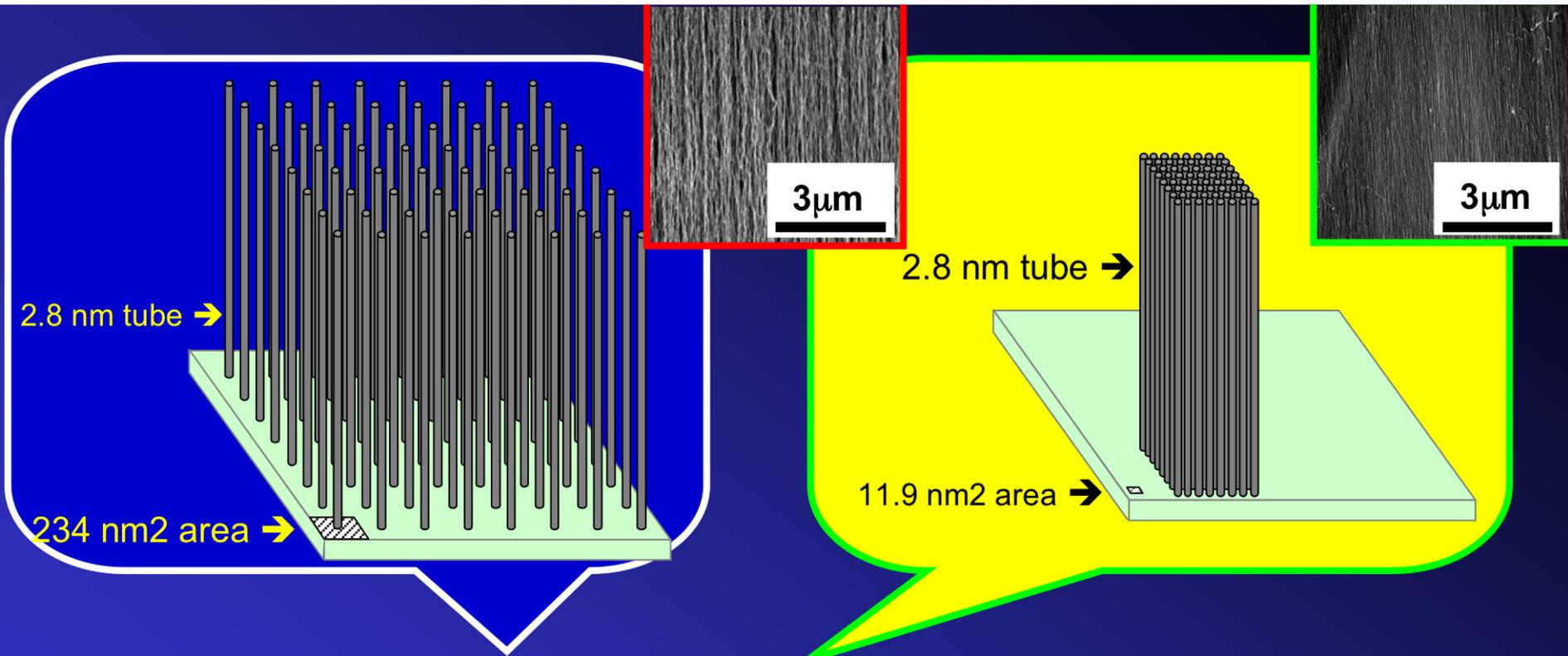
# Interfaces, points of contact, aspect ratio...

Tip → down



Base → up





|                     | As-grown            | Solid                | Ideal<br>2.8nm      |
|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Density (g/cc)      | 0.029               | 0.57                 | 0.78                |
| Area per tube       | 234 nm <sup>2</sup> | 11.9 nm <sup>2</sup> | 8.7 nm <sup>2</sup> |
| Lattice const.      | 16.4 nm             | 3.7 nm               | 3.2 nm              |
| Coverage            | ~ 3%                | 53%                  | 72%                 |
| Hardness<br>Vickers | ~ 0.1               | 7-10                 | -                   |

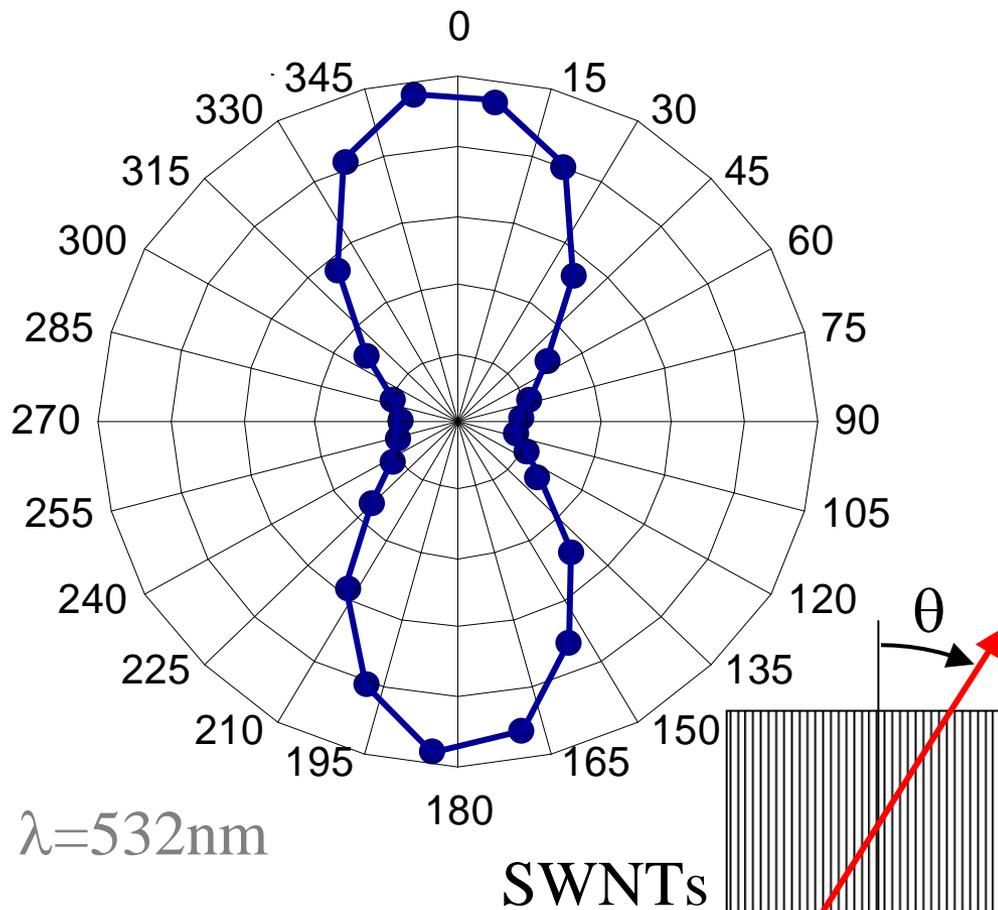
X-ray attenuation  
and  
Micro-balance

**75% ideal!**

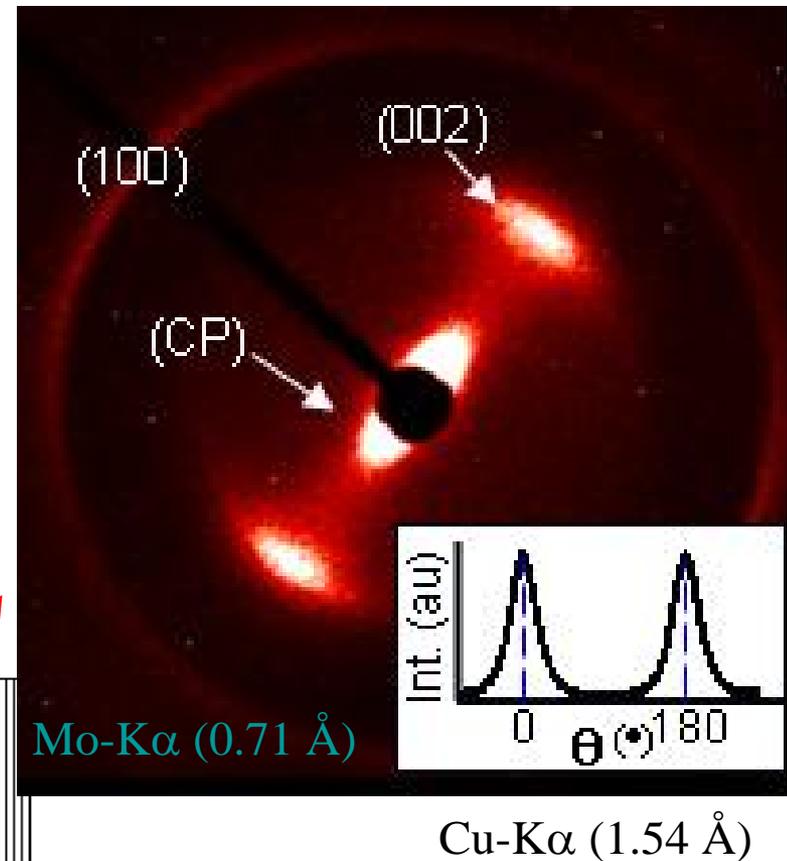
**Same as HOPG!**

# No Loss in Alignment

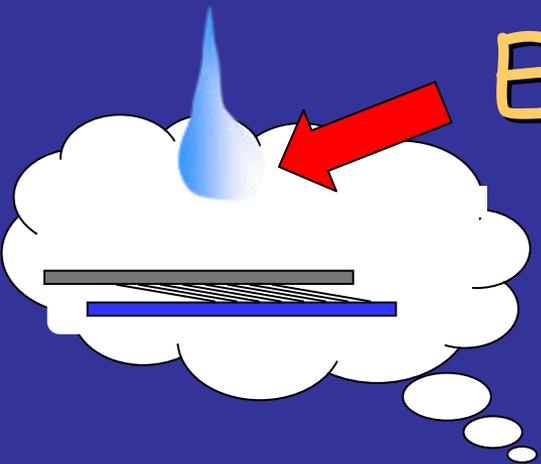
G-band intensity  
as a function of  $\theta$



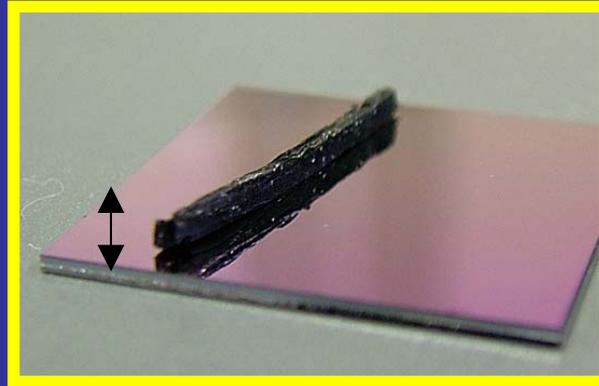
Order parameter (CP)  $\sim 0.62$



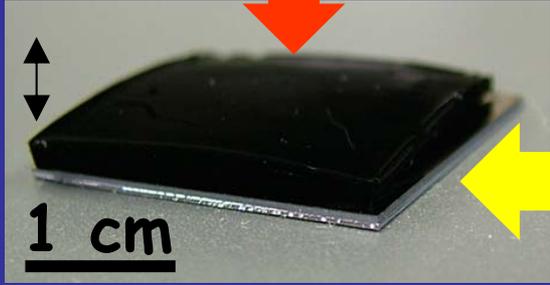
# Engineered Shape



Vertical pressure

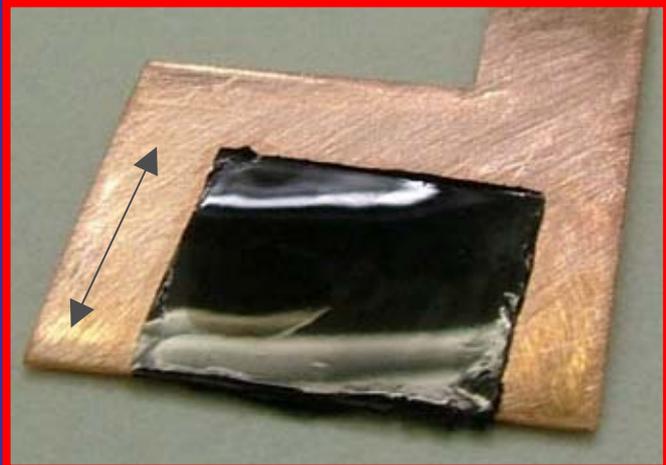
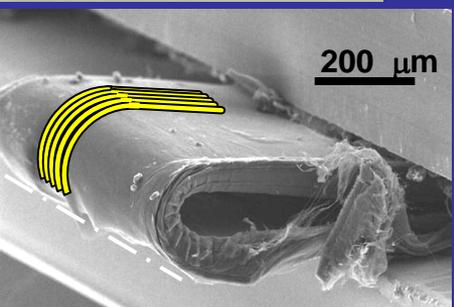
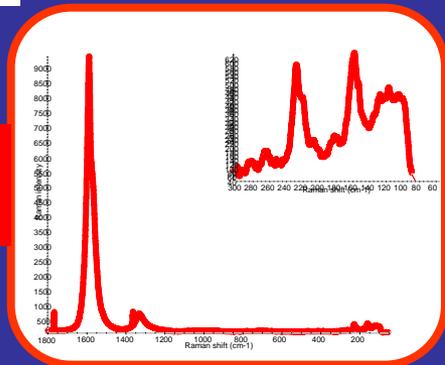


Lateral pressure

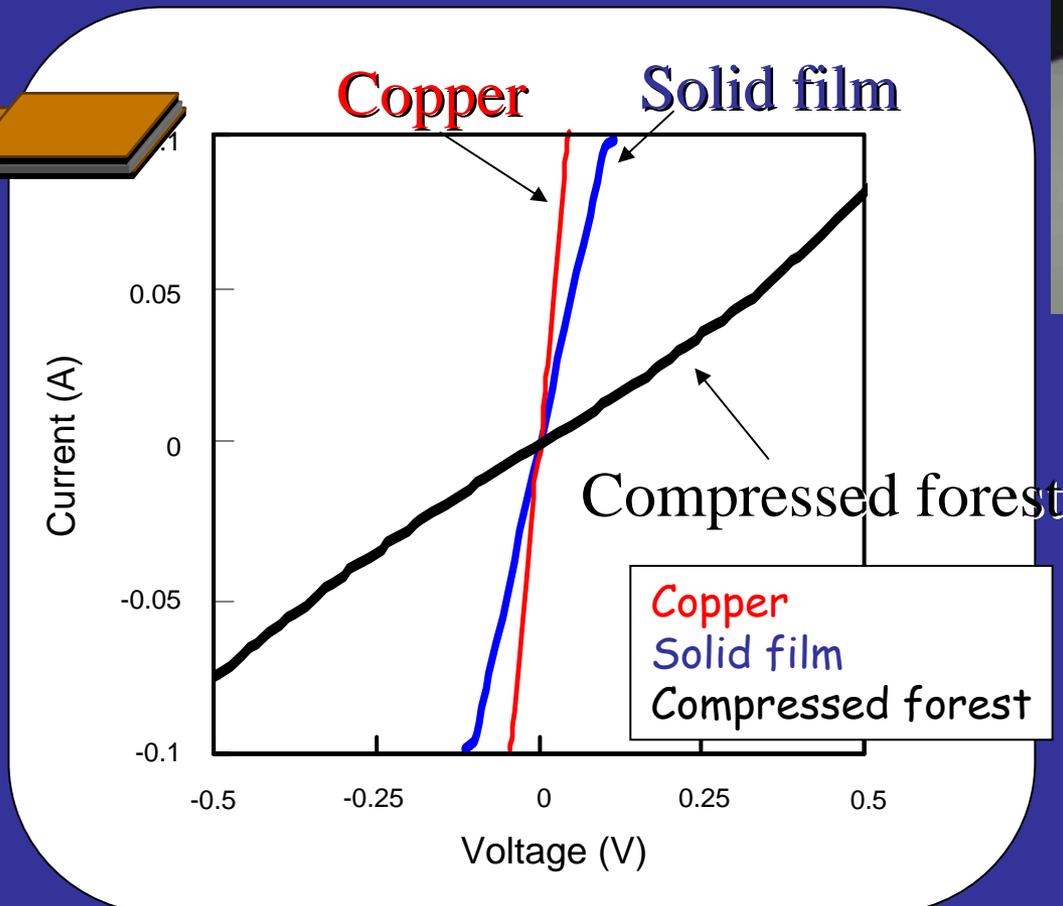
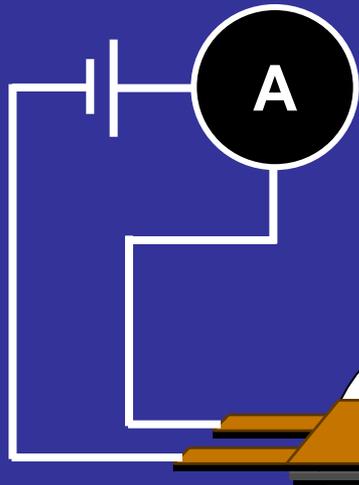


- 100 % CNT
- Binder-free
- flexible
- aligned

No suppression of Raman signals



# Electrical Properties



flexible heater



# Water Affinity

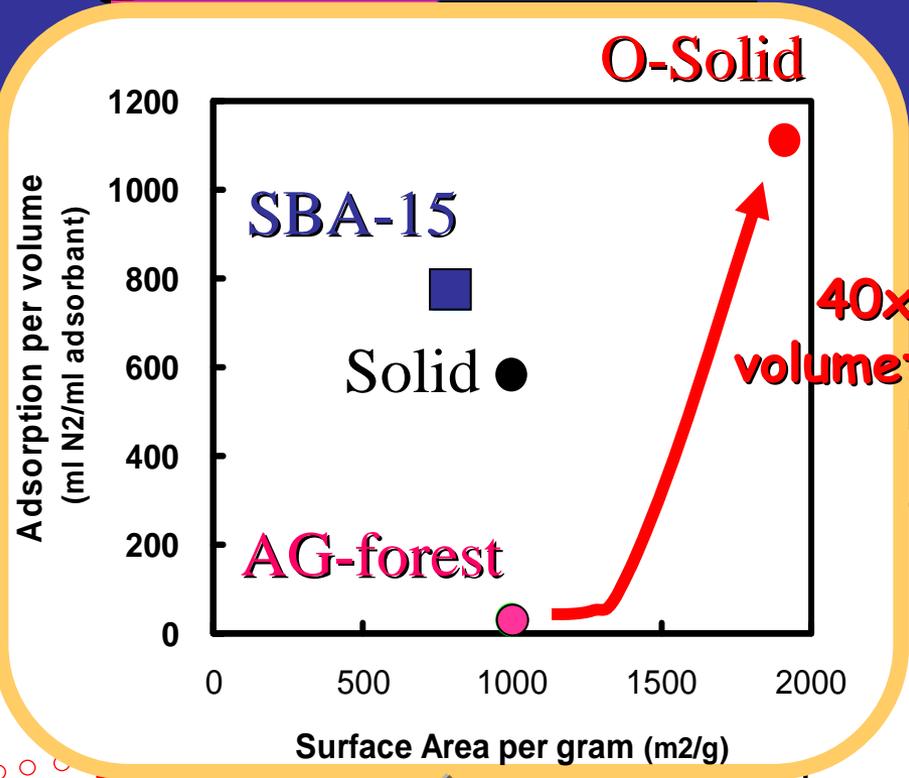
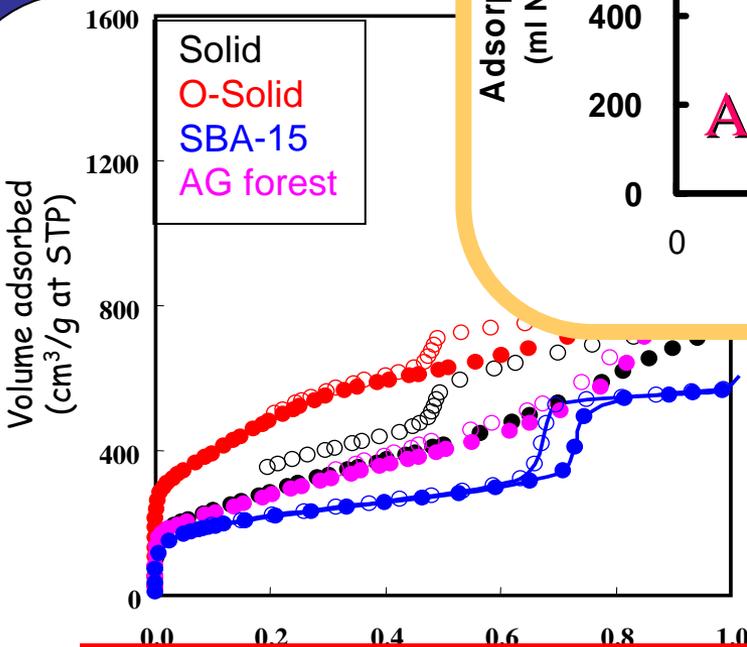
Different affinity towards water than forests



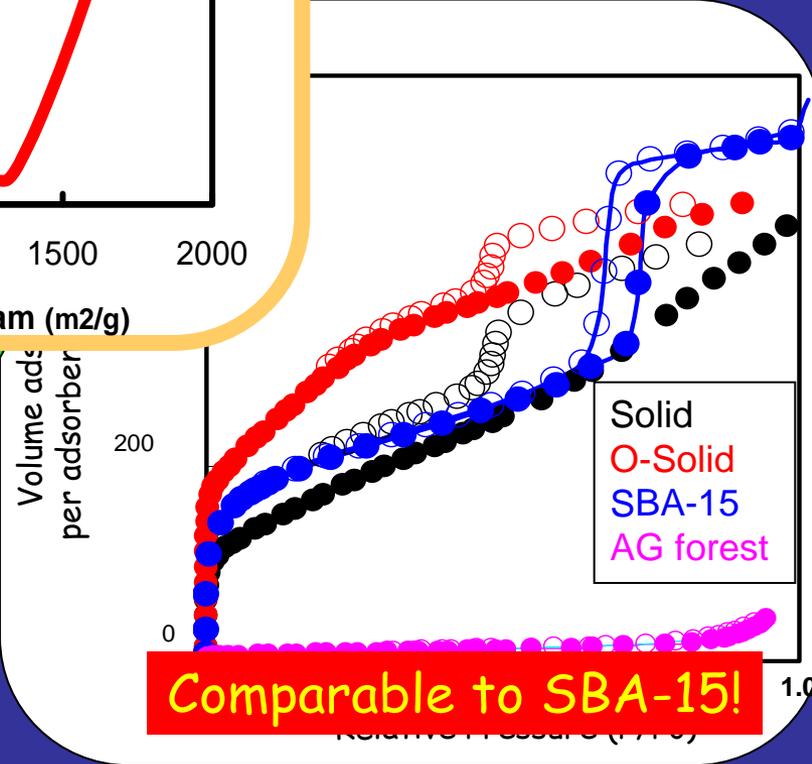
> 140° contact angle

# High Surface Area

**N<sub>2</sub> Adsorption Isotherms**



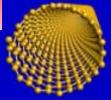
**40x increase in volumetric adsorption!**



**Comparable to SBA-15!**

**Brunauer-Emmett-Teller (BET) Surface area/weight unchanged!**

# まとめ高密度化技術—CNT固体の創製



- スーパーグロース法による垂直配向薄膜シート創製
- 高密度、柔軟性、導電性、高比表面積CNT材料の創製
- 形成加工可能

## 今後の課題

• プロセス適応可能なCNT材料開発への基盤技術

• 薄膜化  
プロセス適応  
デバイス創製

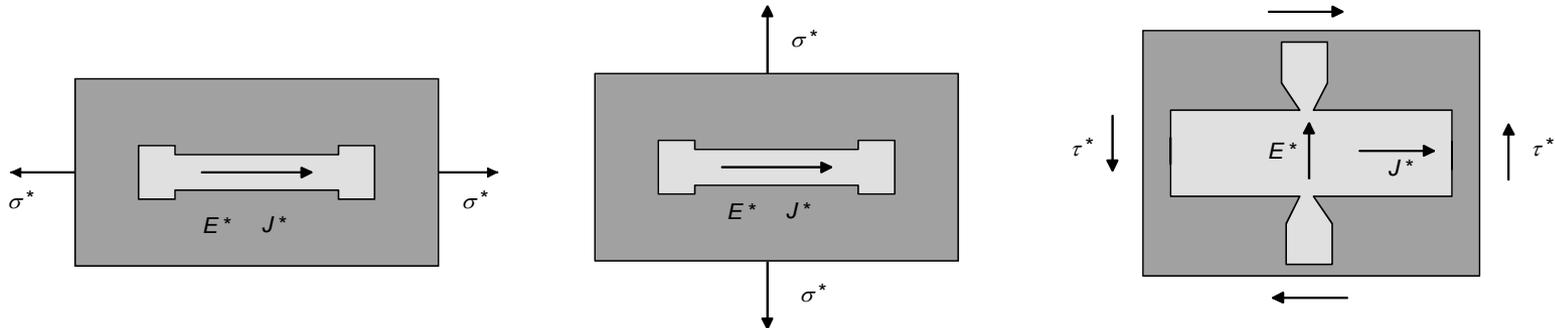
# 高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクト ファインMEMSプロジェクト

MEMS-半導体プロセス統合モノリシック製造技術  
(新たなMEMSセンシング原理の探索)

---

立命館大学  
2007年7月27日

# ピエゾ抵抗係数



ピエゾ抵抗素子に作用する応力 $\sigma^*$ 、 $\tau^*$ 、電場 $E^*$ 、電流密度 $J^*$ の状態

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_1 & \rho_6 & \rho_5 \\ \rho_6 & \rho_2 & \rho_4 \\ \rho_5 & \rho_4 & \rho_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \Delta\rho_1/\rho_0 \\ \Delta\rho_2/\rho_0 \\ \Delta\rho_3/\rho_0 \\ \Delta\rho_4/\rho_0 \\ \Delta\rho_5/\rho_0 \\ \Delta\rho_6/\rho_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix}$$

| Longitudinal | Transverse    | $\pi'_{11} = \pi_l$                   | $\pi'_{12} = \pi_t$                   | $\pi'_{66}$           |
|--------------|---------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| [100]        | [010]         | $\pi_{11}$                            | $\pi_{12}$                            | $\pi_{44}$            |
| [110]        | $[1\bar{1}0]$ | $1/2(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})$ | $1/2(\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44})$ | $\pi_{11} - \pi_{12}$ |

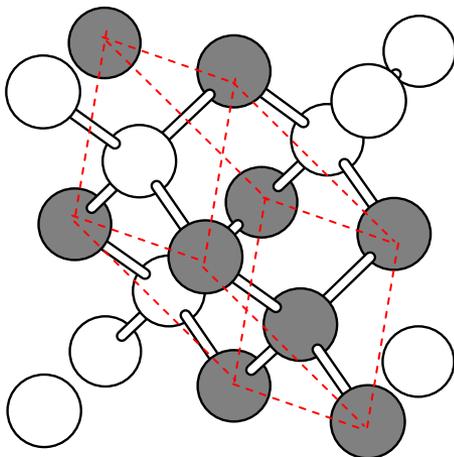
# 第一原理計算

密度汎関数法: Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) 交換相関汎関数を使用  
(一般化勾配近似 (GGA))

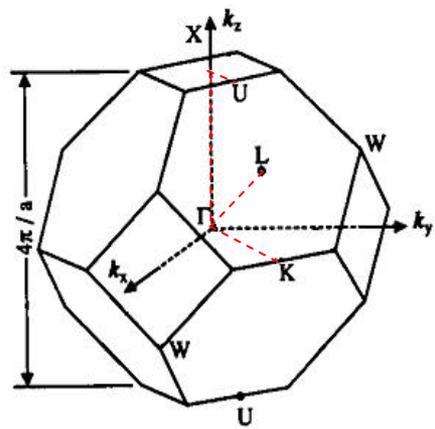
波動関数: 平面波基底 (カットオフエネルギー: 408 ~ 544 eV)

擬ポテンシャル: Hamann のノルム保存型擬ポテンシャル

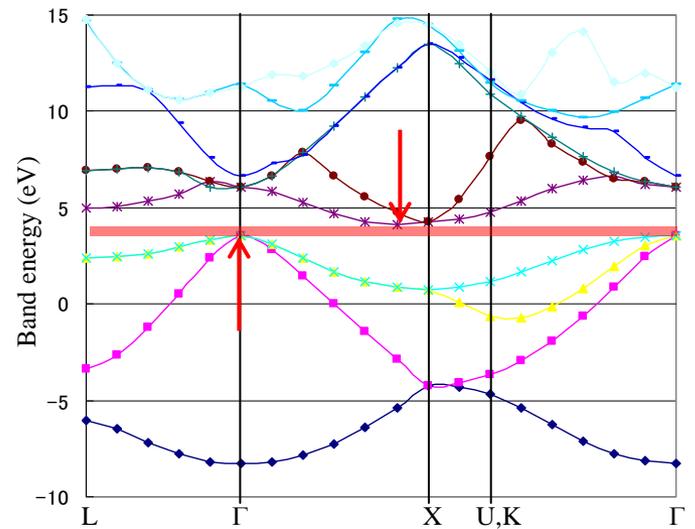
電子占有数フェルミ分布の温度: 0.026 eV (300 K)



バルクシリコンの単位格子



Brillouin ゾーン



バンド構造

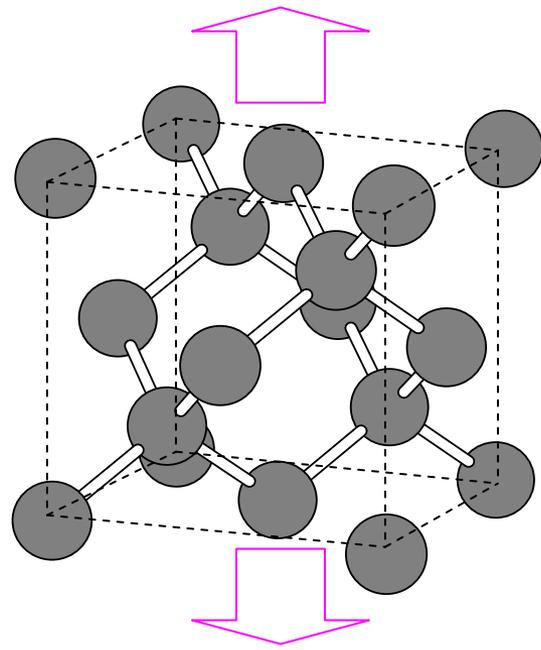
間接バンドギャップ

0.6123 eV (実測値1.19 eV)

一般に、密度汎関数法により得られるバンドギャップ値は実測値より過小評価される。

密度汎関数理論(Hohenberg-Kohnの定理)による変分原理は系の基底状態しか成立せず、励起状態の電子配置に対応する伝導帯のエネルギーが低く見積もられる

# バルクシリコンモデル

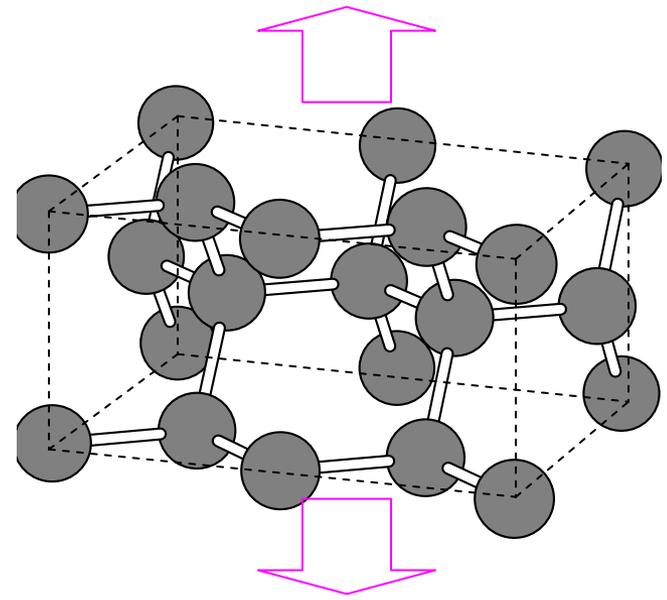


<100>方向引っ張り

格子長:  $5.463 \times 5.463 \times 5.463$  (Å<sup>3</sup>)  
バンドギャップ: 0.612 eV



格子長:  $5.449 \times 5.449 \times 5.518$  (Å<sup>3</sup>)  
          optimized optimized fixed  
バンドギャップ: **0.555 eV**



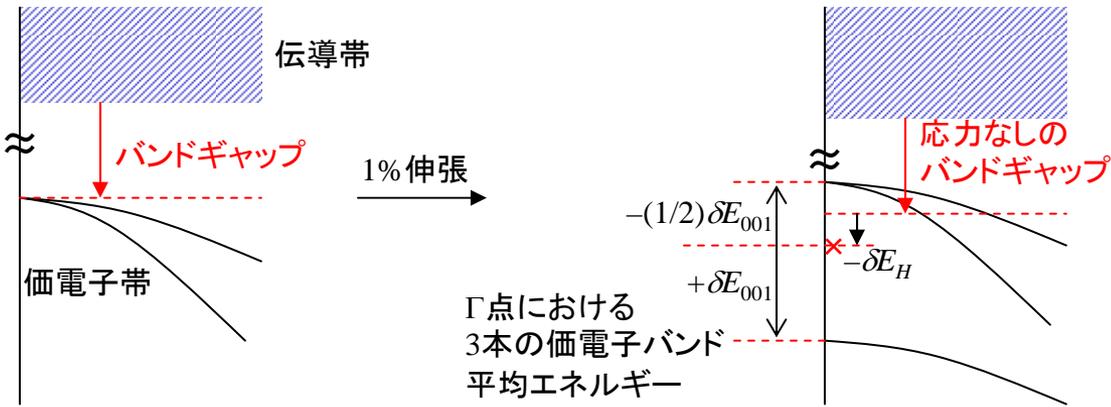
<110>方向引っ張り

格子長:  $7.726 \times 5.463 \times 3.863$  (Å<sup>3</sup>)  
バンドギャップ: 0.612 eV



格子長:  $7.726 \times 5.447 \times 3.902$  (Å<sup>3</sup>)  
          optimized optimized fixed  
バンドギャップ: **0.548 eV**

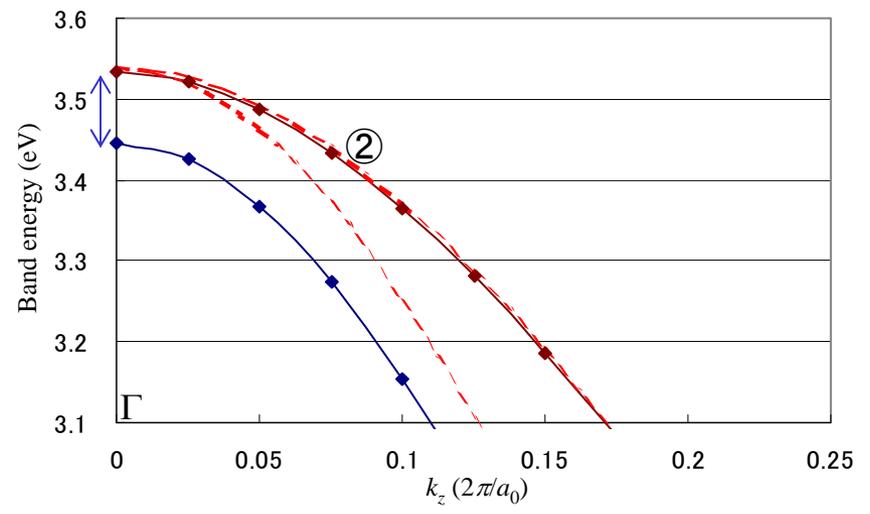
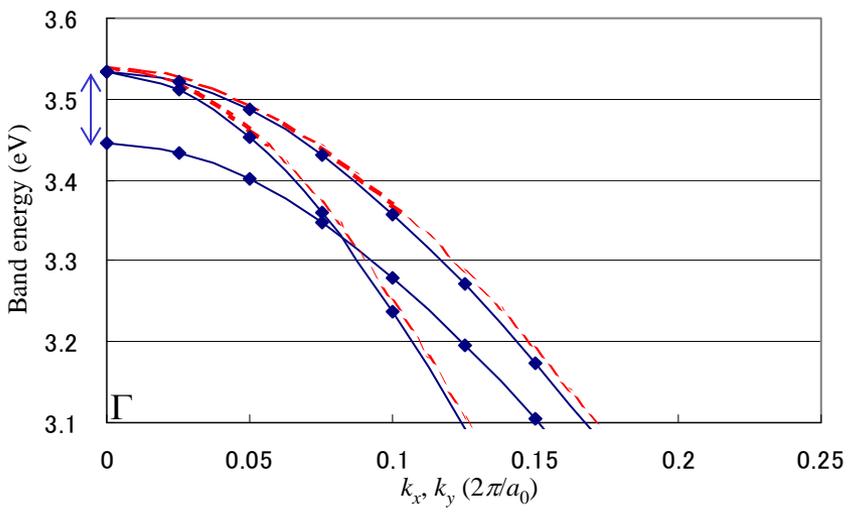
# 変形ポテンシャル



$$\Delta E_{v_1} \approx \Delta E_{v_2} \approx -\delta E_H - \frac{1}{2} \delta E_{001}$$

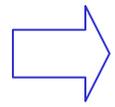
$$\Delta E_{v_3} \approx -\delta E_H + \delta E_{001}$$

(スピン-軌道カップリングを無視した場合)



[001]方向に1%伸張したバルクシリコンの価電子帯バンド構造

伸張によって生じた $\Gamma$ 点でのエネルギーギャップ(矢印)  $(3/2)|\delta E_{001}|$

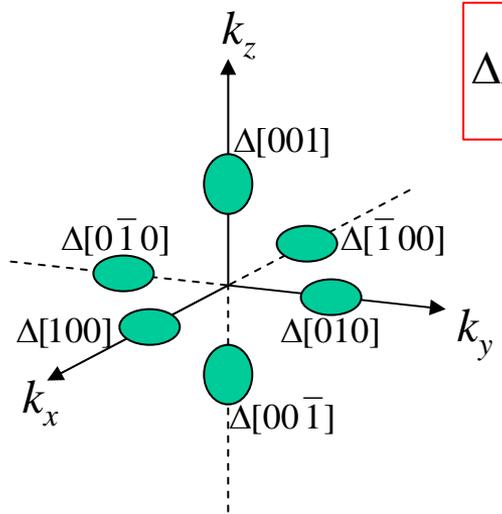


$$\delta E_{001} = 2b(\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx}) \text{ において}$$

$$b = -2.352$$

実測値やこれまでの報告値とよく一致

# 変形ポテンシャル

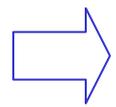


$$\Delta E_c^0 = \left( \Xi_d + \frac{1}{3} \Xi_u \right) \text{Tr}[\vec{\varepsilon}]$$

$$\Delta E_g^0 = \Delta E_c^0 - \Delta E_v^0 = \left( \Xi_d + \frac{1}{3} \Xi_u - a \right) \text{Tr}[\vec{\varepsilon}]$$

$$\Delta E_c^{\Delta[001]} - \Delta E_c^0 = \Delta E_c^{\Delta[00\bar{1}]} - \Delta E_c^0 = \frac{2}{3} \Xi_u (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx})$$

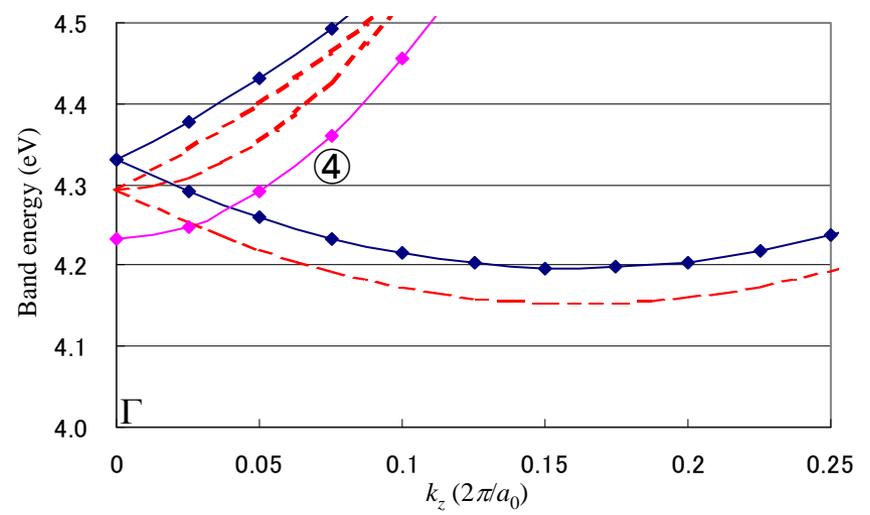
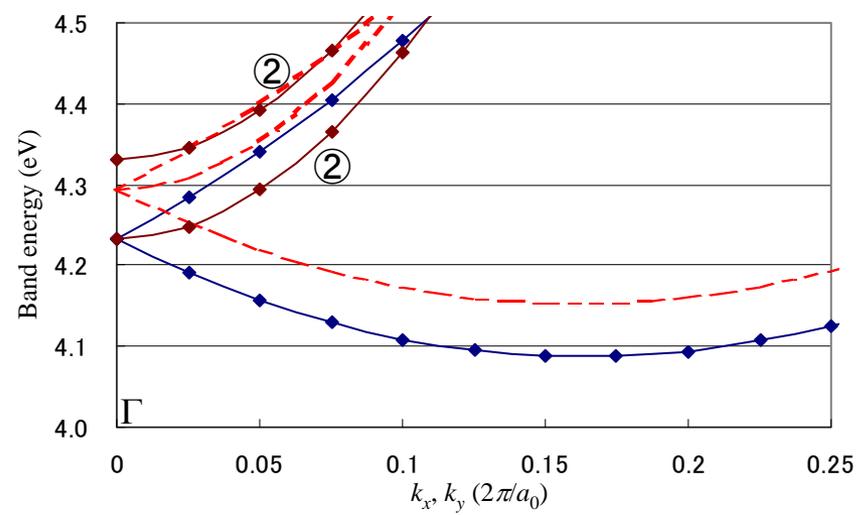
$$\begin{aligned} \Delta E_c^{\Delta[100]} - \Delta E_c^0 &= \Delta E_c^{\Delta[\bar{1}00]} - \Delta E_c^0 \\ &= \Delta E_c^{\Delta[010]} - \Delta E_c^0 = \Delta E_c^{\Delta[0\bar{1}0]} - \Delta E_c^0 = -\frac{1}{3} \Xi_u (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx}) \end{aligned}$$



$$\Xi_u = 8.71$$

実測値と正確に一致

$$\Xi_d + (1/3)\Xi_u - a = 1.69$$



[001]方向に1%伸張したバルクシリコンの伝導帯バンド構造

# 電子有効質量

$$(\mathbf{m}^*)^{-1} = \frac{1}{\hbar^2} \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial k_x^2} & \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial k_x \partial k_y} & \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial k_x \partial k_z} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial k_y \partial k_x} & \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial k_y^2} & \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial k_y \partial k_z} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial k_z \partial k_x} & \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial k_z \partial k_y} & \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial k_z^2} \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial k_i^2} = \frac{\varepsilon(k_i + \Delta k_i, k_j, k_k) - 2\varepsilon(k_i, k_j, k_k) + \varepsilon(k_i - \Delta k_i, k_j, k_k)}{(\Delta k_i)^2}$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial k_i \partial k_j} = \frac{1}{(2\Delta k_i)(2\Delta k_j)} \times [\varepsilon(k_i + \Delta k_i, k_j + \Delta k_j, k_k) - \varepsilon(k_i + \Delta k_i, k_j - \Delta k_j, k_k) - \varepsilon(k_i - \Delta k_i, k_j + \Delta k_j, k_k) + \varepsilon(k_i - \Delta k_i, k_j - \Delta k_j, k_k)]$$

( $i \neq j$ )

ただし、非対角要素は $\Gamma$ 点で不連続な特異点になる場合があります、そのときは

$$\left( \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial k_i \partial k_j} \right)_{\Gamma} = \lim_{\delta \rightarrow 0} \left( \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial k_i \partial k_j} \right)_{\Gamma + \delta \Gamma} \quad (i \neq j)$$

によって行列要素を定義した。

[001]方向に1%伸張したバルクシリコンのキャリア電子有効質量変化

| Valley                     | No extension |             |             | 1% extensoin |             |             |
|----------------------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
|                            | $m_x^*/m_0$  | $m_y^*/m_0$ | $m_z^*/m_0$ | $m_x^*/m_0$  | $m_y^*/m_0$ | $m_z^*/m_0$ |
| $\Delta[100], \Delta[100]$ | 0.953        | 0.197       | 0.197       | 0.962        | 0.195       | 0.202       |
| $\Delta[010], \Delta[010]$ | 0.197        | 0.953       | 0.197       | 0.195        | 0.962       | 0.202       |
| $\Delta[001], \Delta[001]$ | 0.197        | 0.197       | 0.953       | 0.196        | 0.196       | 0.961       |

# ホール有効質量

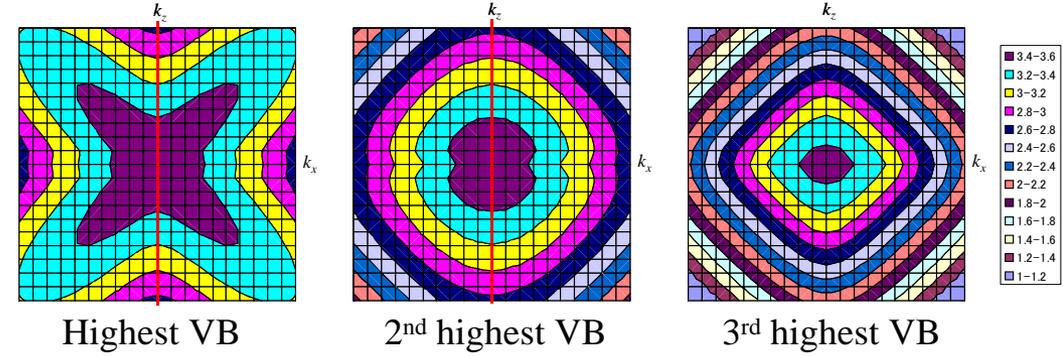
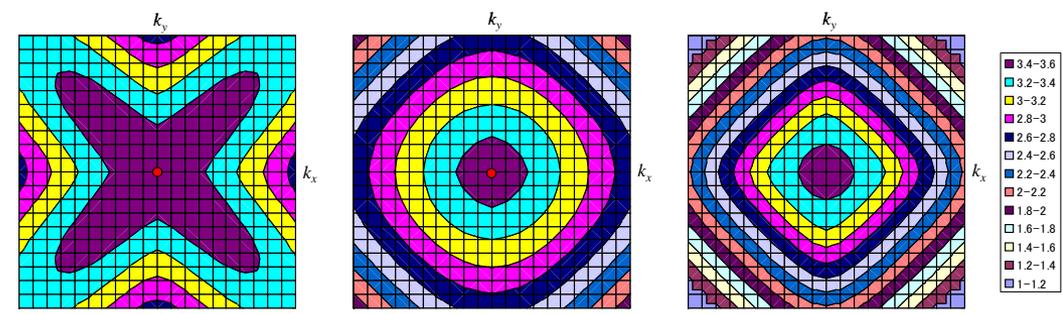
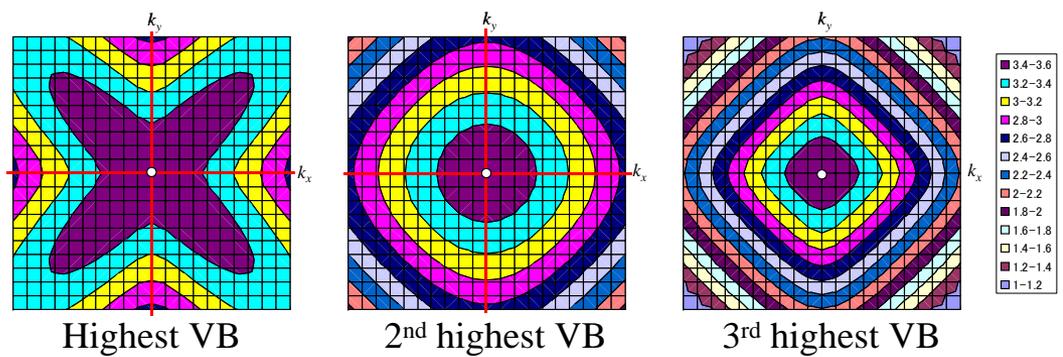
## バルクシリコンのホール有効質量変化

|                 | $m_1^*/m_0$ | $m_2^*/m_0$ | $m_3^*/m_0$ | $m_h^*/m_0$ |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Higest          | 0.143       | 0.143       | -0.342      | —           |
| 2 <sup>nd</sup> | 0.272       | 0.272       | 0.272       | 0.272       |
| 3 <sup>rd</sup> | 0.316       | 0.316       | 0.0794      | 0.199       |

$$m_h^* = (m_1^* m_2^* m_3^*)^{1/3}$$

|                 | $m_1^*/m_0$ | $m_2^*/m_0$ | $m_3^*/m_0$ | $m_h^*/m_0$ |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Higest          | 0.140       | 0.269       | -0.342      | 0.476       |
| 2 <sup>nd</sup> | 0.102       | 0.283       | 0.317       | 0.209       |
| 3 <sup>rd</sup> | 0.151       | 0.283       | 0.301       | 0.234       |

電子有効質量、ホール有効質量ともに  
1%伸張に対する変化量は大きい



# キャリア密度

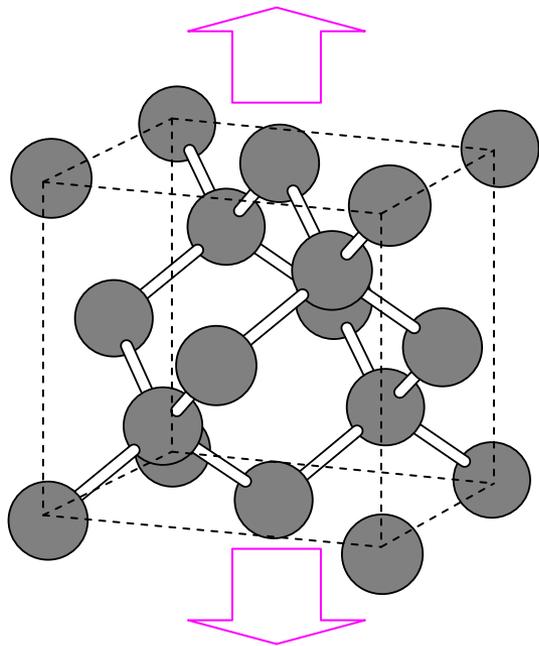
$$\sigma = e^2 \left( \sum_{j \in \text{CB}} \frac{n_j \tau_{e,j}}{m_{e,j}^*} + \sum_{j \in \text{VB}} \frac{p_j \tau_{h,j}}{m_{h,j}^*} \right)$$

$$n_j = \frac{2}{V} \int_{\text{BZ}} d\mathbf{k} \left\{ \exp\left(\frac{\varepsilon_{j,\mathbf{k}} - \varepsilon_F}{k_B T}\right) + 1 \right\}^{-1} \approx \frac{2}{V} \sum_{\mathbf{k}} w_{\mathbf{k}} \left\{ \exp\left(\frac{\varepsilon_{j,\mathbf{k}} - \varepsilon_F}{k_B T}\right) + 1 \right\}^{-1}$$

$$p_j = \frac{2}{V} \int_{\text{BZ}} d\mathbf{k} \left\{ \exp\left(-\frac{\varepsilon_{j,\mathbf{k}} - \varepsilon_F}{k_B T}\right) + 1 \right\}^{-1} \approx \frac{2}{V} \sum_{\mathbf{k}} w_{\mathbf{k}} \left\{ \exp\left(-\frac{\varepsilon_{j,\mathbf{k}} - \varepsilon_F}{k_B T}\right) + 1 \right\}^{-1}$$

各バンドごとに有効質量、キャリア密度、緩和時間を考えて、伝導率はそれぞれのバンドに対応する伝導率の総和として見積もる。

# キャリア密度

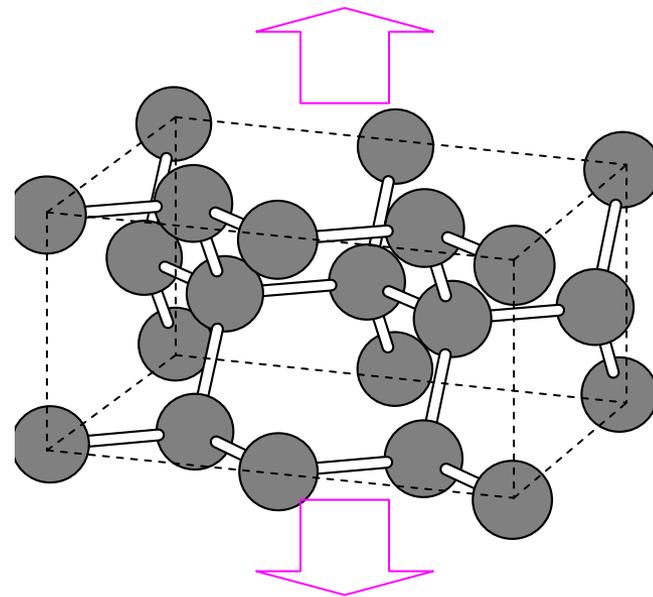


キャリア密度:  $2.520 \times 10^{14} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$



1% extension

キャリア密度:  $4.479 \times 10^{14} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$  【78% up】



キャリア密度:  $2.520 \times 10^{14} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$

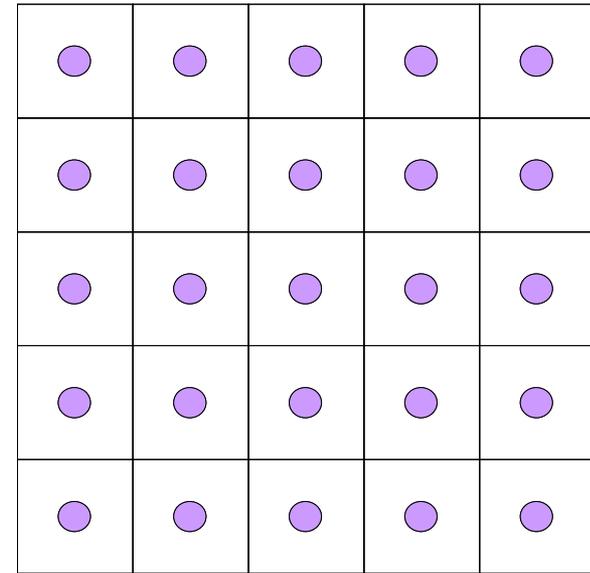
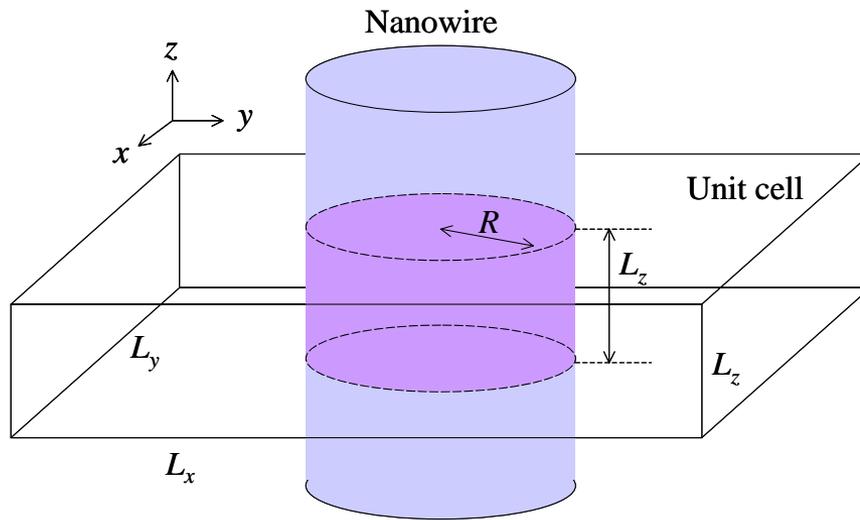


1% extension

キャリア密度:  $3.733 \times 10^{14} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$  【48% up】

バルクシリコンの場合、伝導率はキャリア有効質量よりも  
キャリア密度に大きく影響される。

# シリコンナノワイヤーモデル

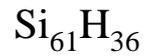
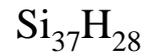
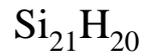
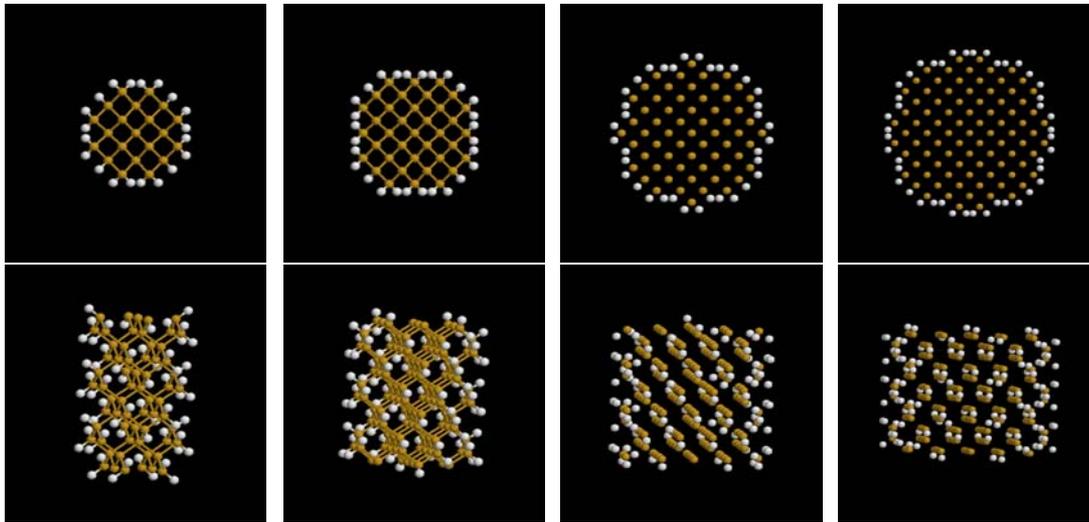


ナノワイヤーモデルの単位格子概念図と周期境界条件下での平面図

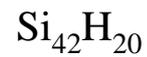
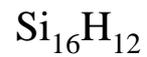
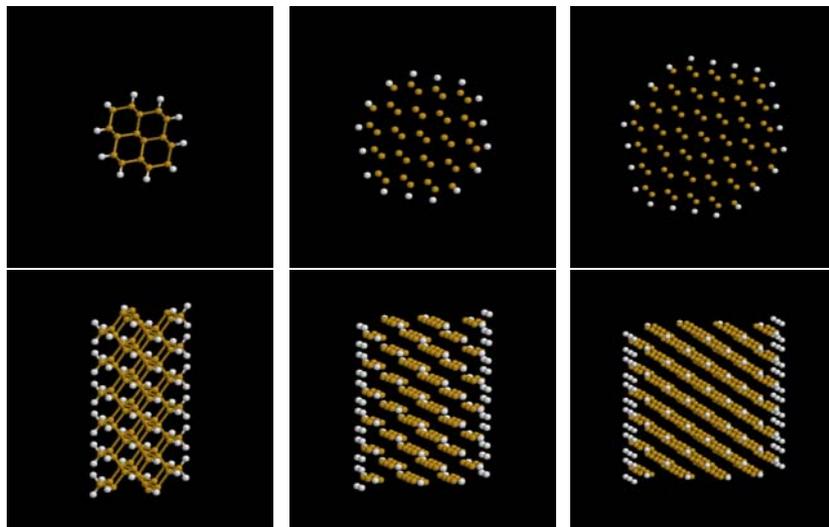
- ・ 構造最適化したバルクシリコンの断片を切り出して作製
- ・ ナノワイヤー軸は $z$ 軸に平行とし、 $z$ 方向に関する単位格子長 $L_z$ はナノワイヤーの軸方向周期の長さと同じとする
- ・  $x$ 方向および $y$ 方向に対する周期境界条件も考慮し、ワイヤー直径 $2R$ よりも十分に大きな格子長 $L_x$ および $L_y$ を設定
- ・ ワイヤー表面は水素終端する

# シリコンナノワイヤーモデル

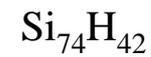
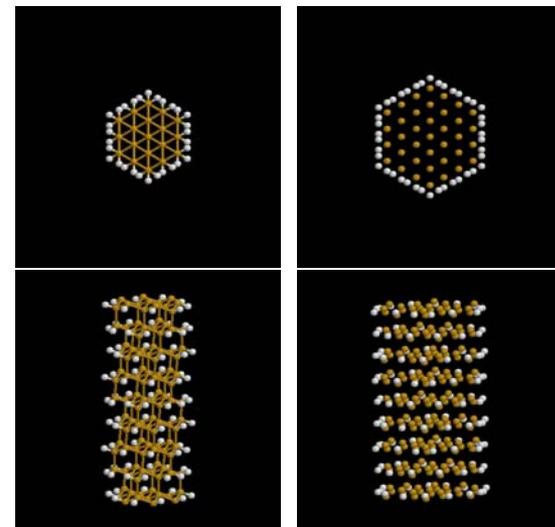
## <100>ナノワイヤーモデル



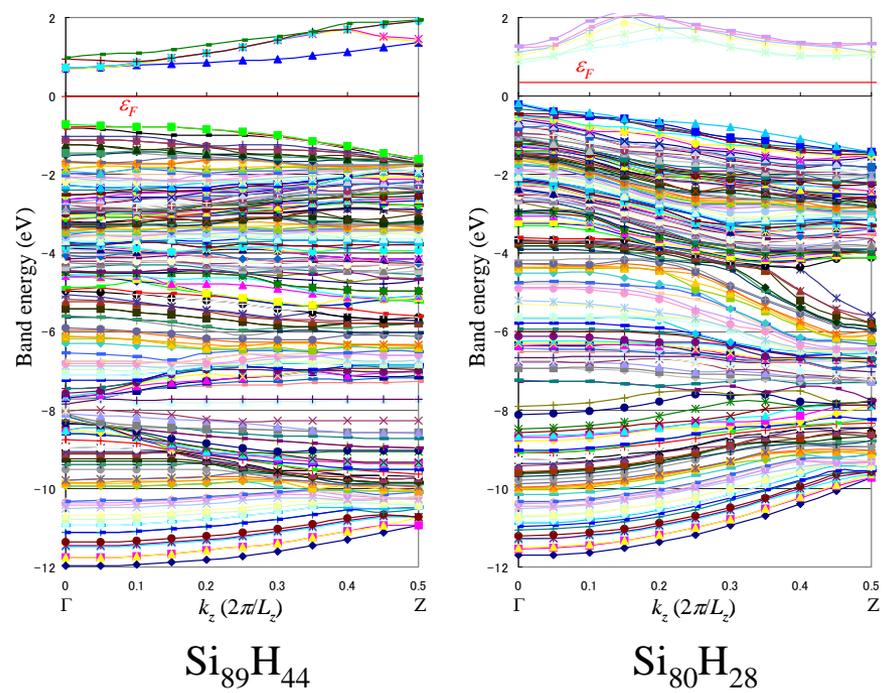
## <110>ナノワイヤーモデル



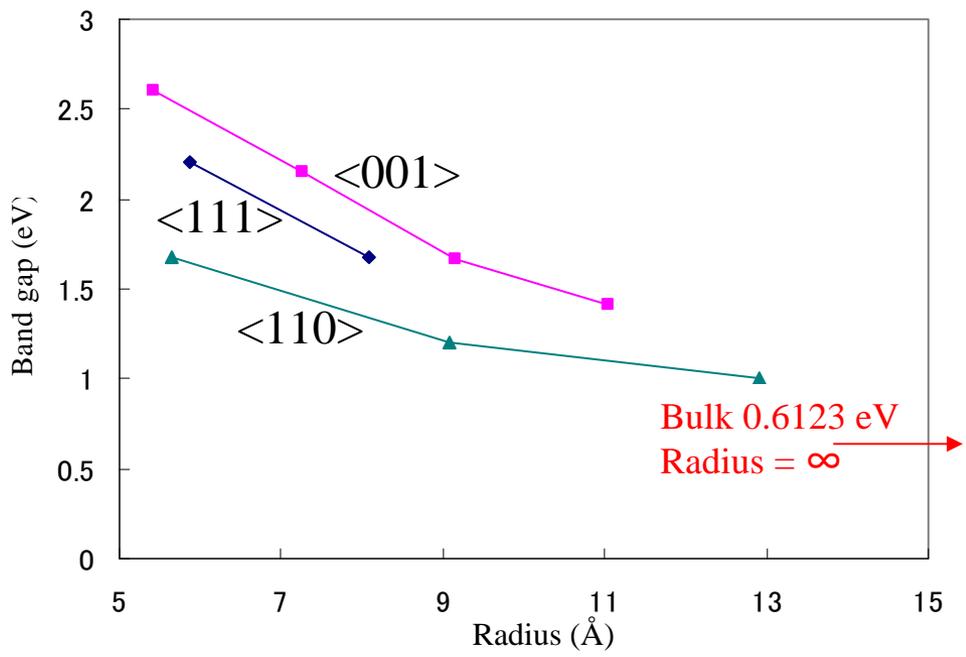
## <111>ナノワイヤーモデル



# ナノワイヤーモデルのバンド構造

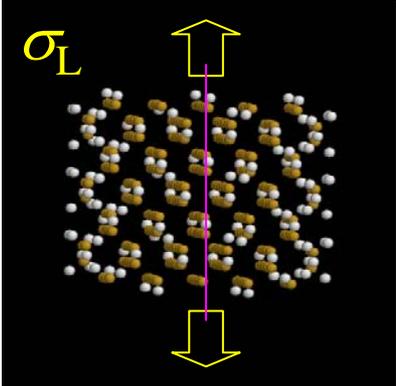


バンド構造

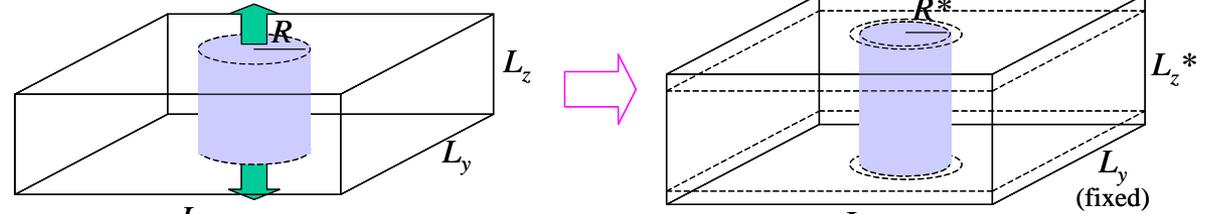


バンドギャップとワイヤー半径の相関図

# 応力作用によるバンド構造変化



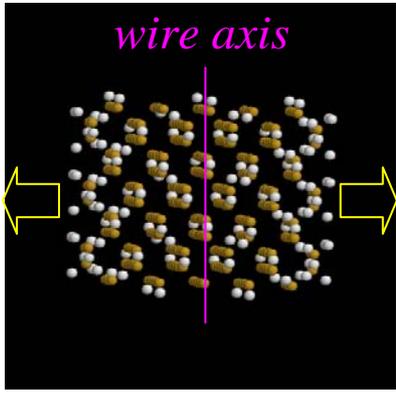
Longitudinal stress



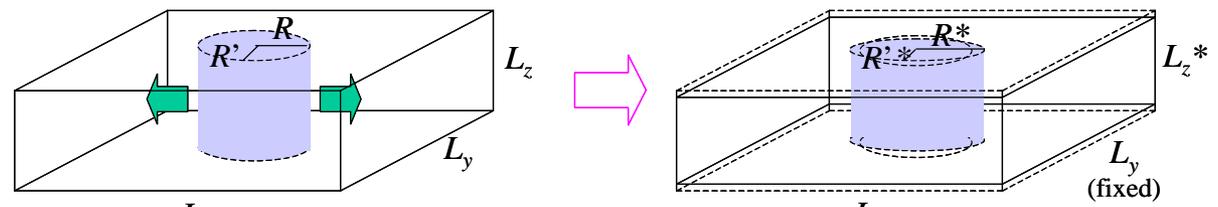
$$L_z^* = L_z + \Delta L_z$$

$$R^* = R^*(\Delta L_z)$$

(determined by Poisson ratio)



Transverse stress



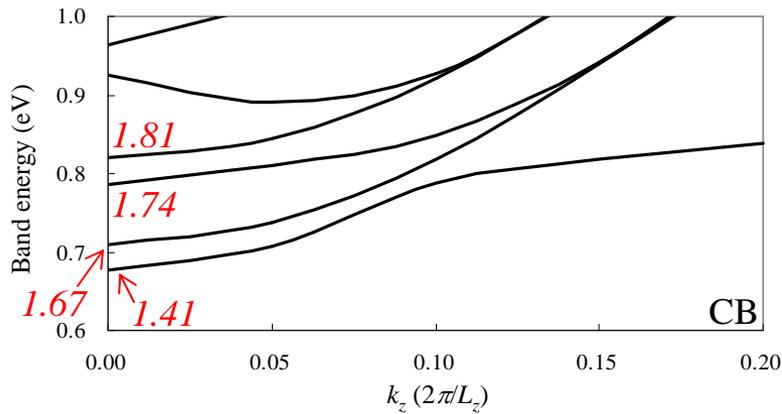
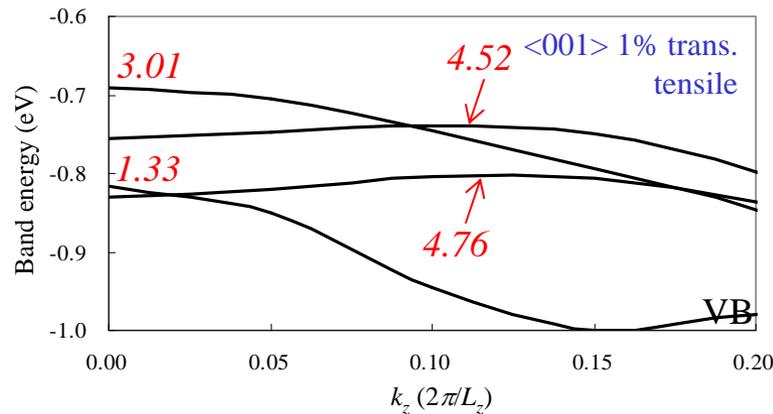
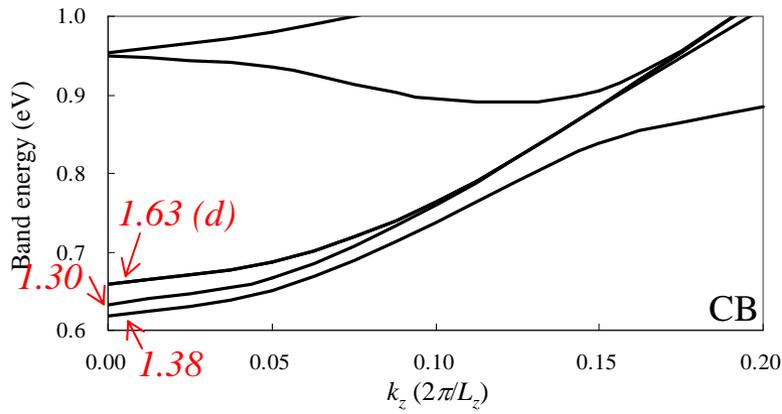
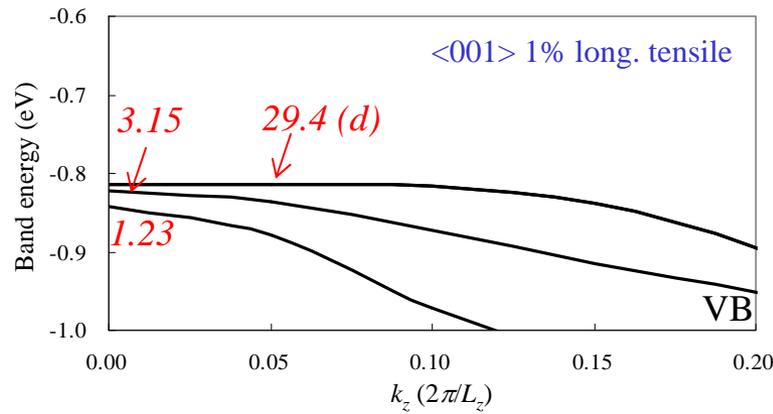
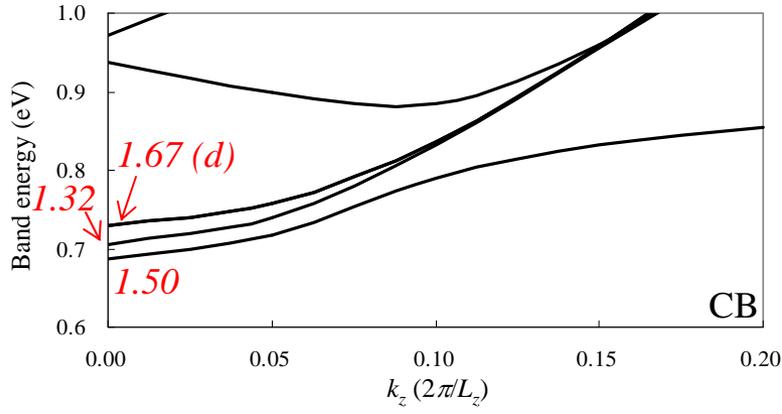
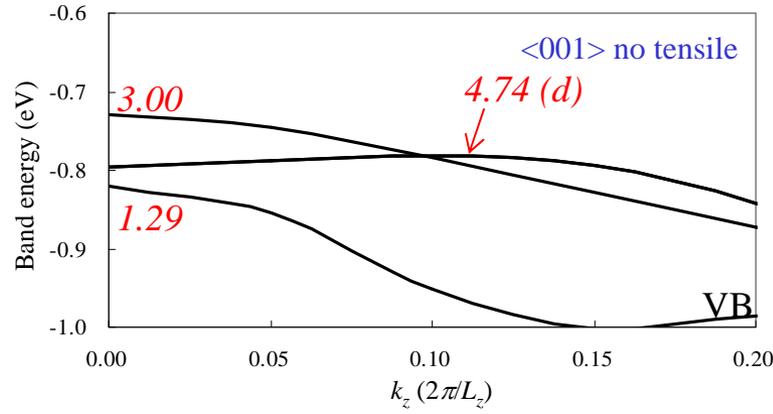
$$R^* = R + \Delta R$$

$$L_z^* = L_z^*(\Delta R); R'^* = R'^*(\Delta R)$$

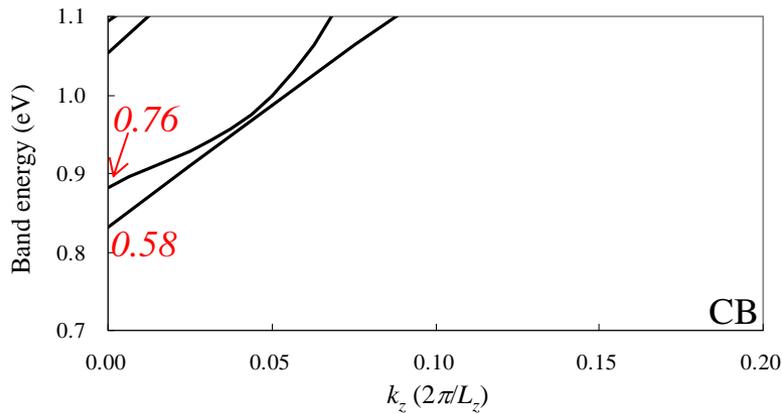
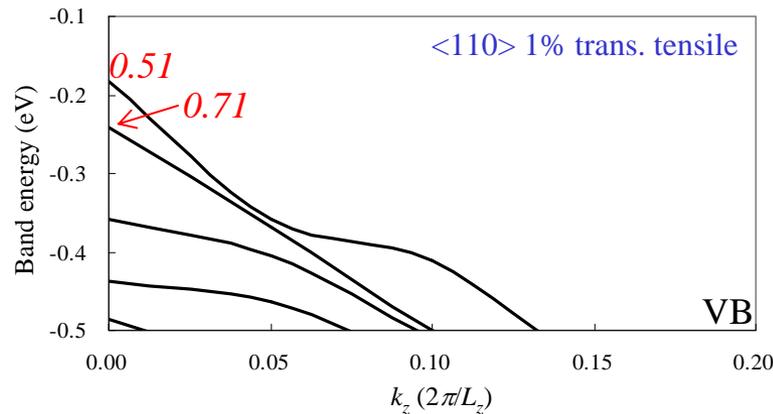
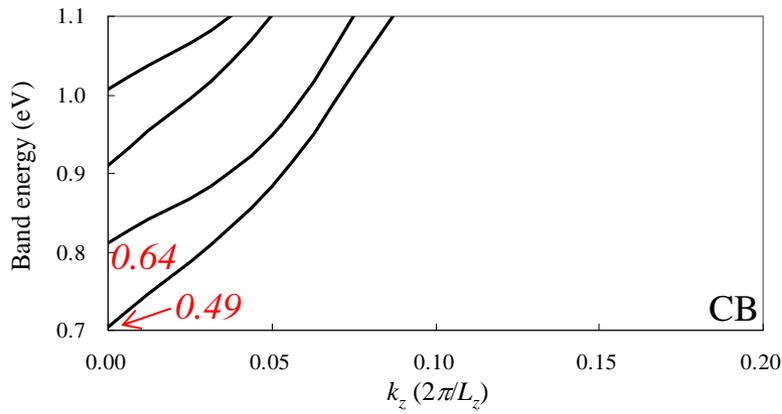
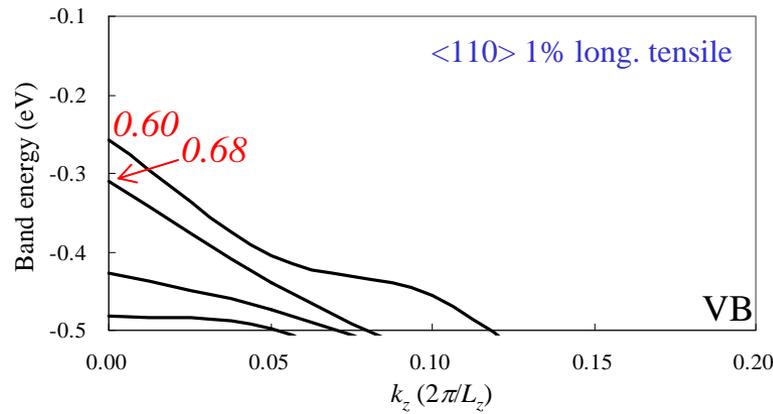
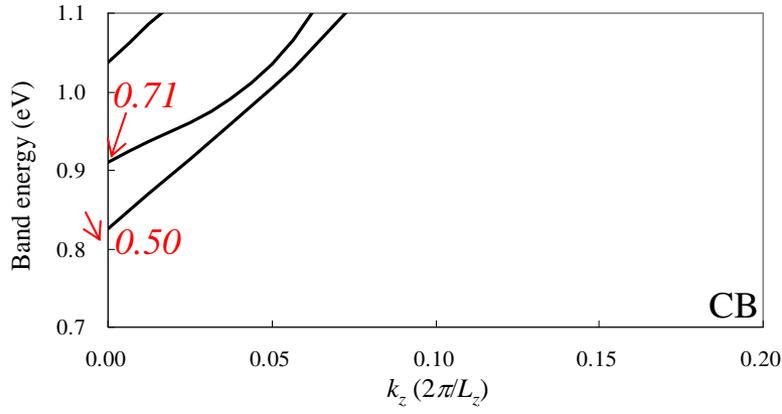
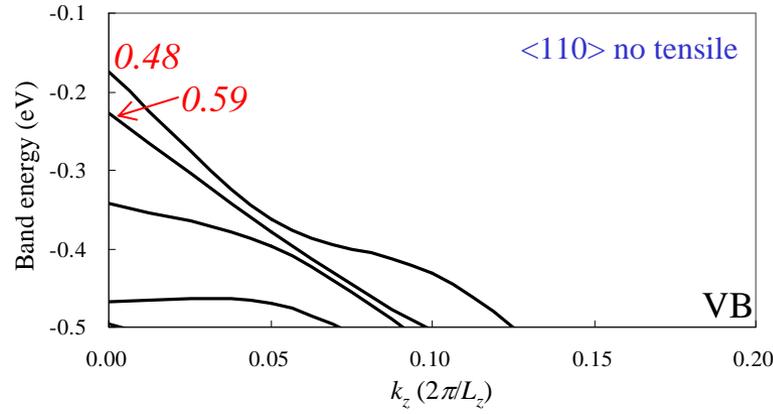
(determined by Poisson ratio)

| Model                                  | Fermi energy | VB Max. | CB Min. | Band Gap |
|--|--------------|---------|---------|----------|
| Si <sub>89</sub> H <sub>44</sub> <001> |              |         |         |          |
| No extension                           | -0.018       | -0.730  | 0.687   | 1.417    |
| 1% extension for Long.                 | -0.019       | -0.814  | 0.619   | 1.433    |
| 1% extension for Trans.                | -0.002       | -0.691  | 0.676   | 1.367    |
| Si <sub>80</sub> H <sub>28</sub> <110> |              |         |         |          |
| No extension                           | 0.327        | -0.175  | 0.826   | 1.001    |
| 1% extension for Long.                 | 0.225        | -0.257  | 0.704   | 0.961    |
| 1% extension for Trans.                | 0.324        | -0.182  | 0.831   | 1.013    |

# 応力作用によるバンド構造変化



# 応力作用によるバンド構造変化



# まとめ

バルクシリコン系における変形ポテンシャル理論や電気伝導物性に関する理論に対して我々の第一原理電子状態計算がどれほどの信頼性があるかを検証し、それらの理論をシリコンナノワイヤーの物性予測に適用させる手法の開発に取り組んでいる。

我々によるバルクシリコン系の第一原理電子状態計算に基づく解析結果は、既報の解析結果を踏襲しており、これらの解析をシリコンナノワイヤーモデルに適用させても信頼性の高い結果が得られると予想される。

シリコンナノワイヤーモデルではワイヤー軸に平行な方向の電子・ホール輸送現象のみを取り扱うので、通常の3次元の輸送現象理論が1次元に簡略化される。単軸引っ張りに応じたバンド準位の入れ替わりによって有効質量が劇的に変化するモデル系があるなど、シリコンナノワイヤーは大きなピエゾ抵抗係数をもつナノセンサの材料候補としてきわめて有望である。

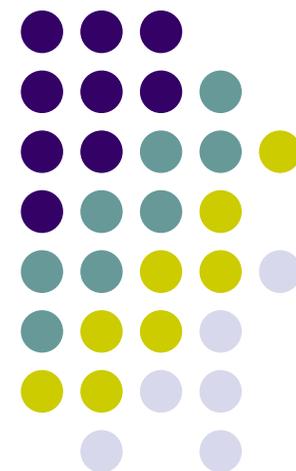
1次元性に関わる特殊な理論の取り扱いや、バルク系に比べて圧倒的に電子状態理論計算の情報が少なく、各ナノワイヤーモデルに応じて変形ポテンシャル理論を新たに構築する必要があるなどまだ多くの困難や課題があり、これらの解決に精力を注いでいる。

# 平成18・19年度 「高集積・複合MEMS製造技術開 発事業 MEMS－半導体横方向 配線技術」(中間報告会資料)

日時:平成19年7月27日

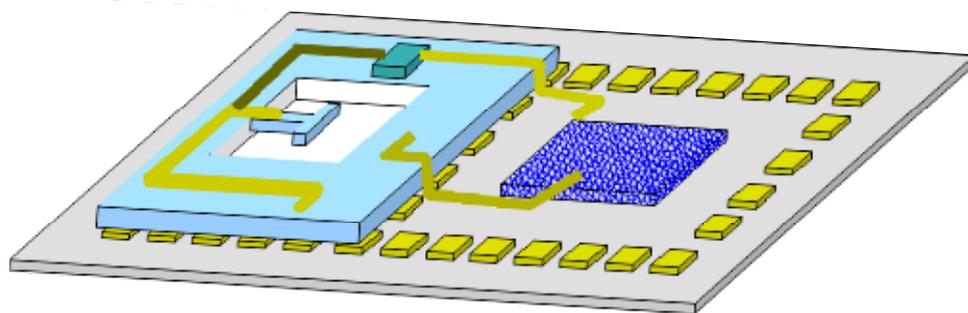
会場:ビックサイト

独立行政法人 産業技術総合研究所  
明渡純、青柳正唱

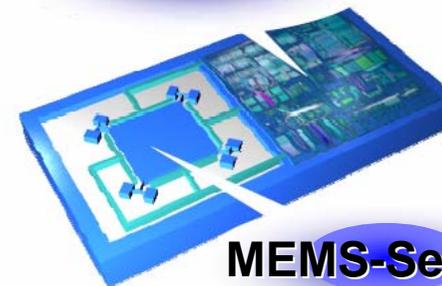


# 応用例1

## MDW技術によるMEMSデバイス、半導体チップ(CPU & メモリ)と受動回路基板との一体集積化イメージ

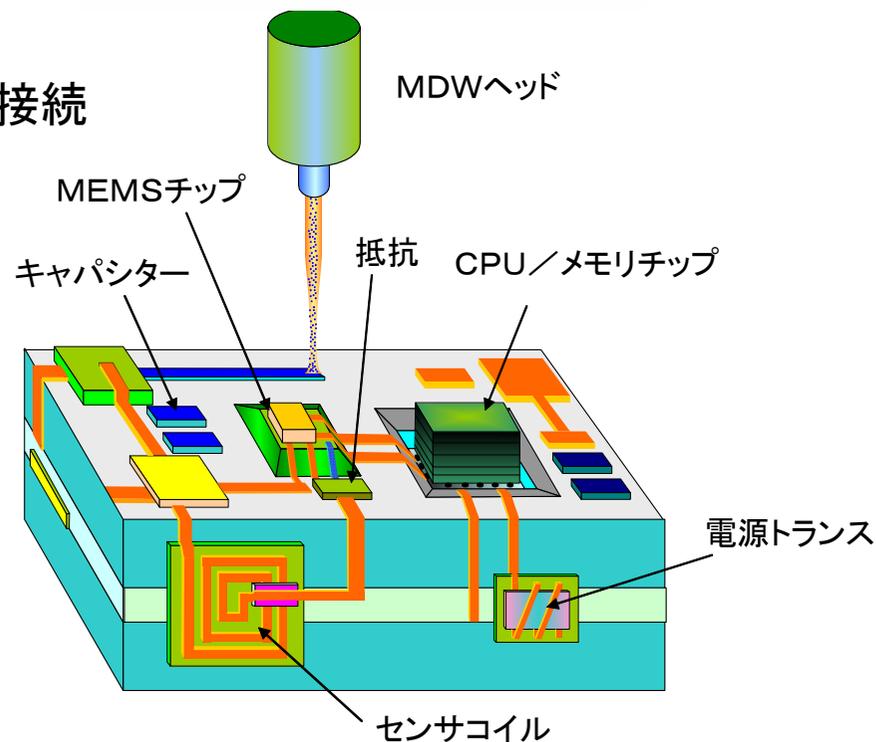


CPU&Memory

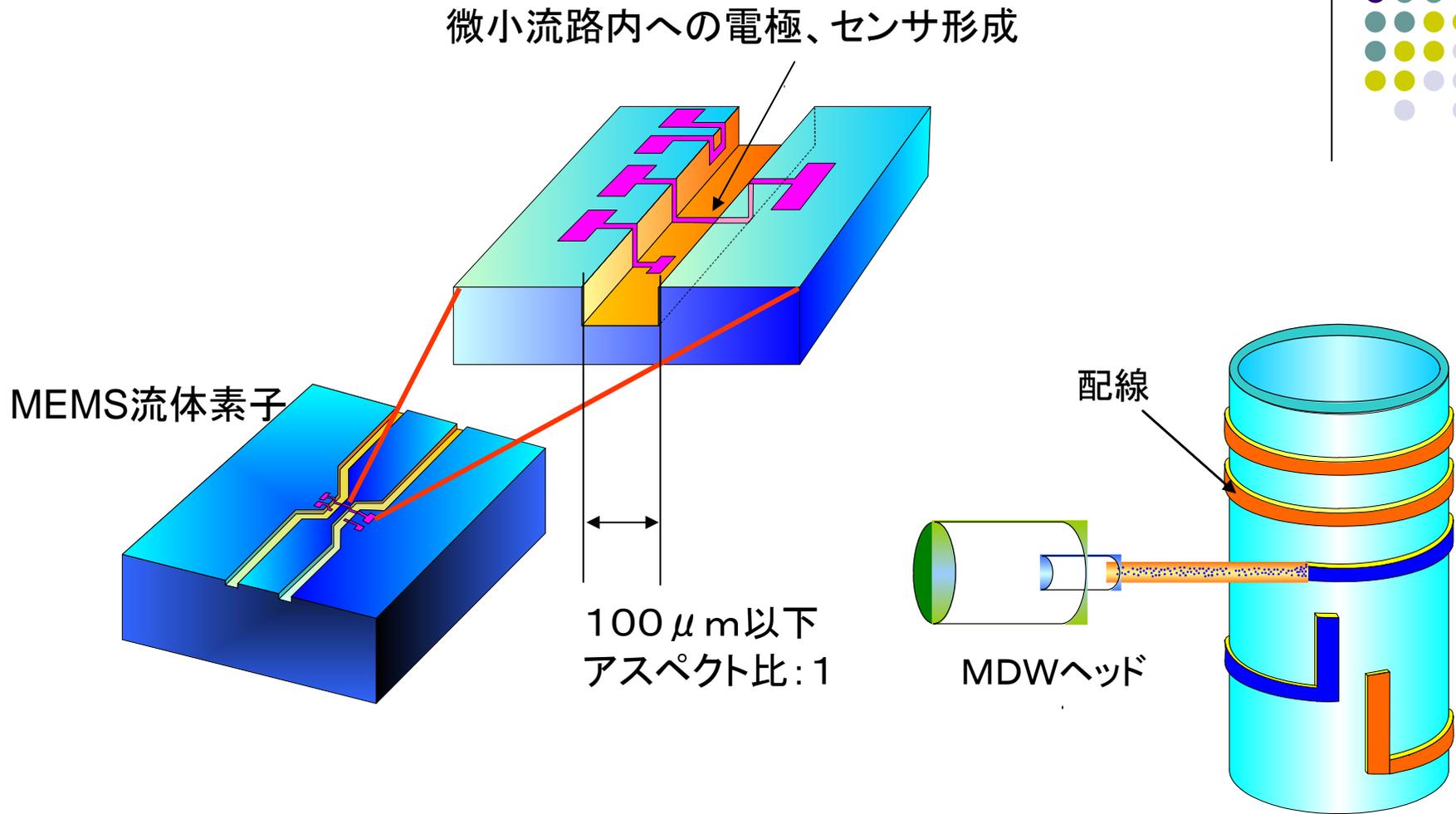


MEMS-Sensor

- MEMSチップと半導体チップの側面配線接続
- RF-MEMS用受動部品の直接形成  
(インダクター、キャパシター、アンテナ等)
- 段差乗越えの配線接続
- 配線補修による歩留まりの向上



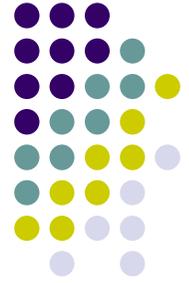
## 応用例2



MDW技術によるカテーテル  
やファイバなど局面上への  
配線直接描画のイメージ



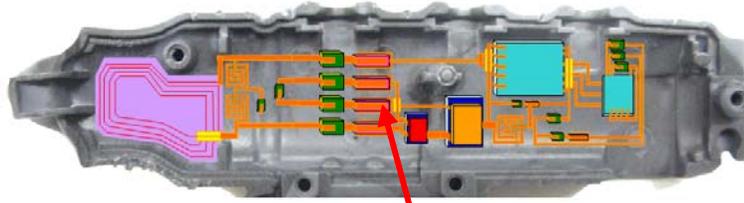
# 応用例3



## (従来の組み込み)

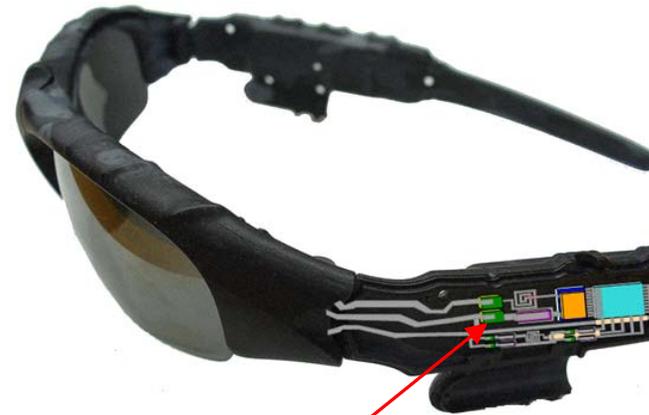
製品ケース

電子回路基板



樹脂、金属ケース内面(非平面上)に回路素子を直接描画

## (本提案技術)



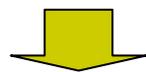
製品表面に後から回路機能を付加



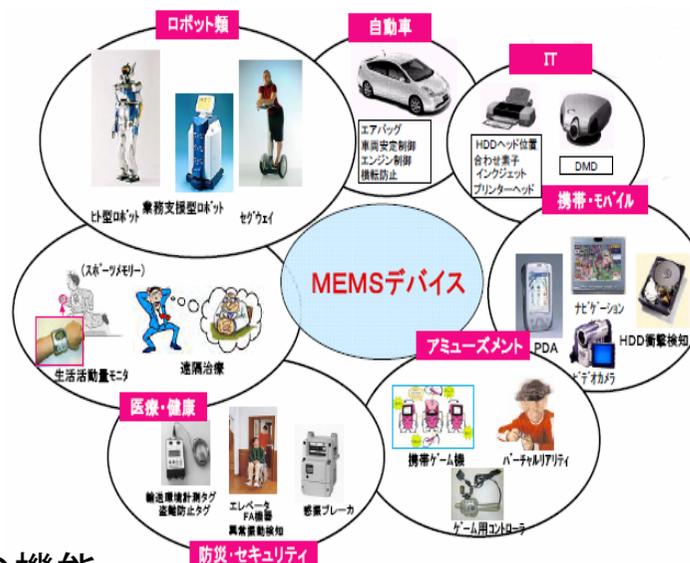
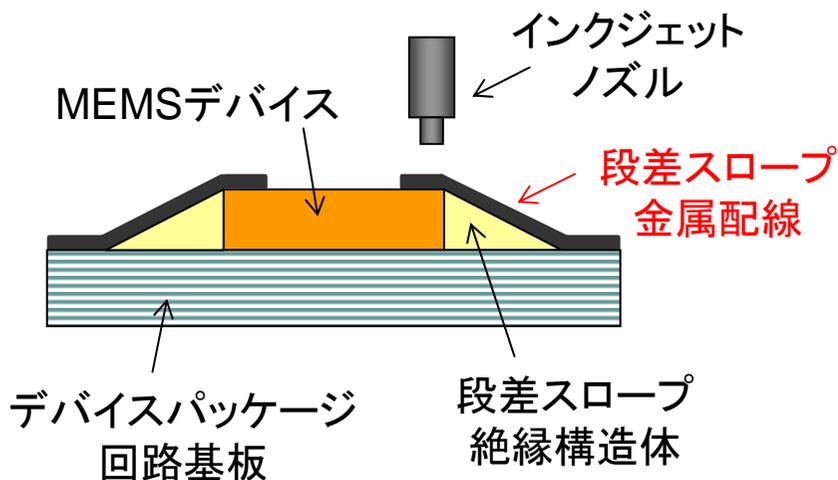
# 技術課題1: マイクロジェット

# 研究の目的

マテリアル・ダイレクト・ライティング技術の開発を目的に、インクジェット技術を、より実用的な**3次元微小配線形成技術**や高機能膜の形成技術に展開。



## MEMSデバイス用実装配線形成技術の開発



### MEMSの機能

RF(スイッチ、フィルタ、アンテナ)-MEMS

光(スイッチ、導波路)-MEMS

バイオ(流体、気体制御)-MEMS

センサ(力、加速度、赤外線)-MEMS



# 研究のポイント

インクジェット技術は、高精細な配線パターン形成や厚膜の形成において、

- ノズルの詰まり
- インクの粘度、表面張力
- 基板の材質、表面状態（粗さ、濡れ性）

影響

液滴の広がり

実用的には様々な問題点や課題がある。

# 従来のインクジェット技術の課題

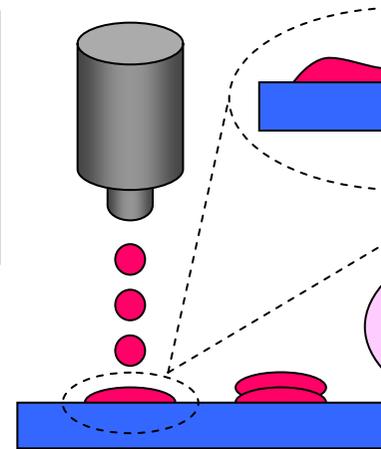


| インク   | 基板    |
|-------|-------|
| ・粘度   | ・材質   |
| ・沸点   | ・表面粗さ |
| ・表面張力 | ・濡れ性  |

影響

液滴が広がり乾燥する際、  
表面張力の影響により  
膜厚が不均一になる。

基板着弾後に液滴は広がり、  
膜厚は薄く、  
線幅は太くなる。

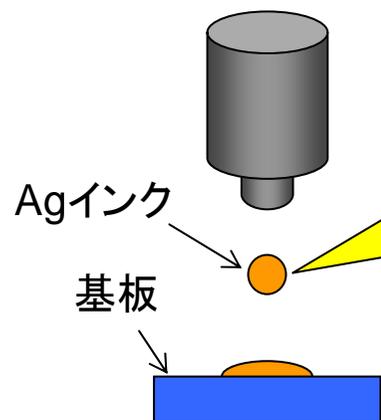


30~50  $\mu\text{m}$ の  
線幅が限界

<一般的な対策方法>

- ・基板の表面改質による濡れ性の改善
- ・ノズル径サイズの微小化 → 目詰まり

# 基板の違いによるドットサイズの比較



液滴サイズ(直径) 50~100  $\mu\text{m}$   
液滴容量 65~523 pL  
吐出スピード 1~2 m/sec

面積で約5倍の広がり

インクジェット用光沢紙  
ドットサイズ 90  $\mu\text{m}$



50  $\mu\text{m}$



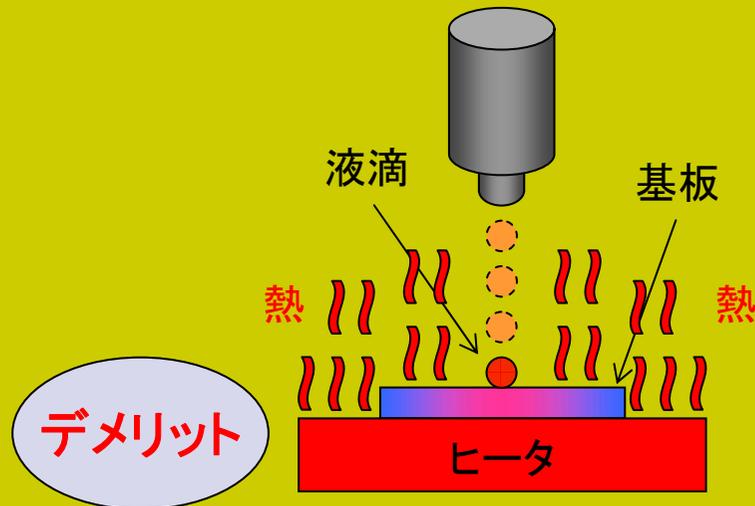
| ガラス基板  | Si基板  |
|--|---|
| ドットサイズ 250 $\mu\text{m}$   | ドットサイズ 260 $\mu\text{m}$  |
|  |  |

# 加熱方法の比較

## ～レーザによる照射加熱のメリット～

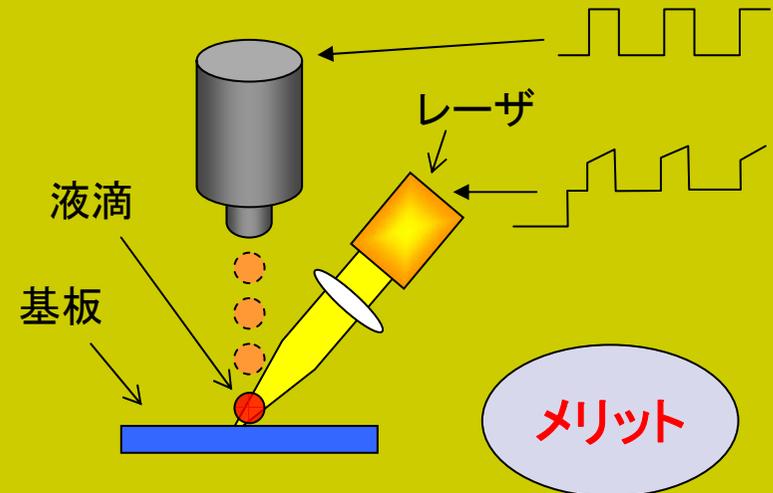


### ヒータによる基板加熱



- 基板からの熱によるノズルの乾燥と液滴の目詰まり。
- 熱に弱い基板は使えない。

### レーザによる照射加熱

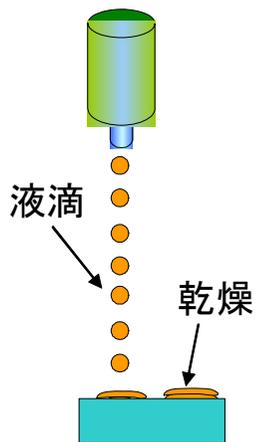


- 局所的に液滴を加熱できるため、
- ノズルが乾燥せず詰まりにくい。
  - 液滴加熱の精密制御が可能。
  - 幅広い基板に対応可能。

# エネルギー援用インクジェット法(1)



従来インク  
ジェット技術

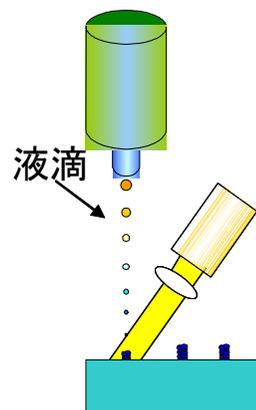


着弾後液滴は、広がり、膜厚は薄く、線幅は広くなる。

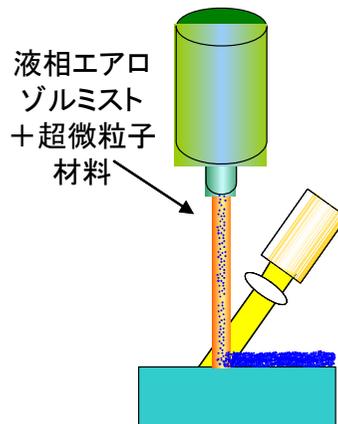
(本提案)MDW技術

エネルギー援用

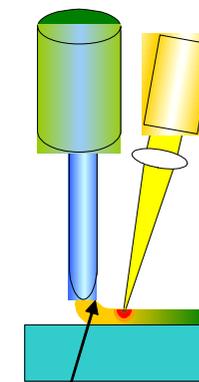
1)パルスジェット方式



2)連続ジェット方式



3)スラリーディスペンス方式



エネルギー援用により着弾後、液滴は急速に固化し、線幅は細く、膜厚は厚くなる。

ナノスラリー

材料供給量

極小

小

大

バンプ、配線形成  
(段差乗り越え等)

配線、素子形成

LTCC、構造形成

# ヒータおよびレーザーによる加熱の効果



## Agインク

アルバック社製

固形分 50~60wt%

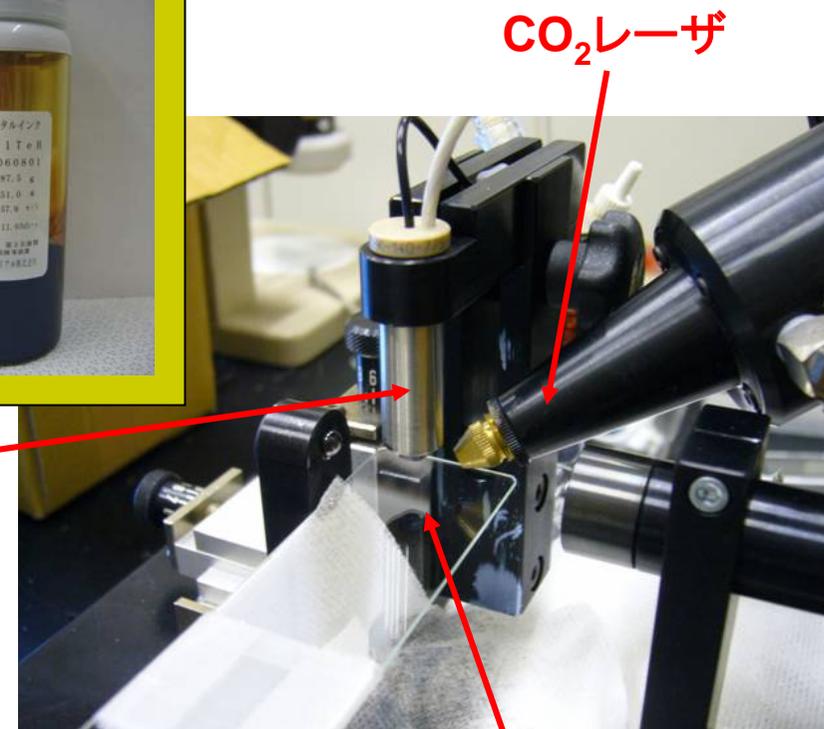
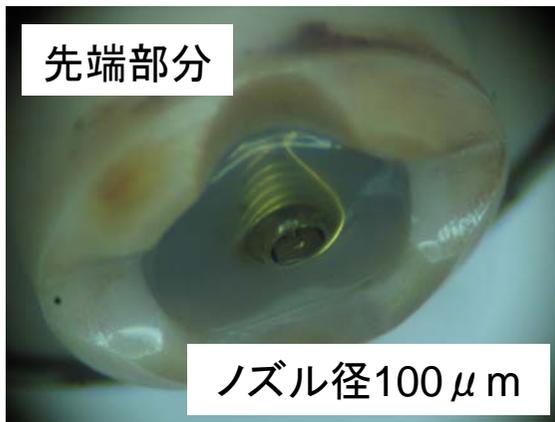
主溶媒 n-テトラデカン

粘度 11.05mPa·s

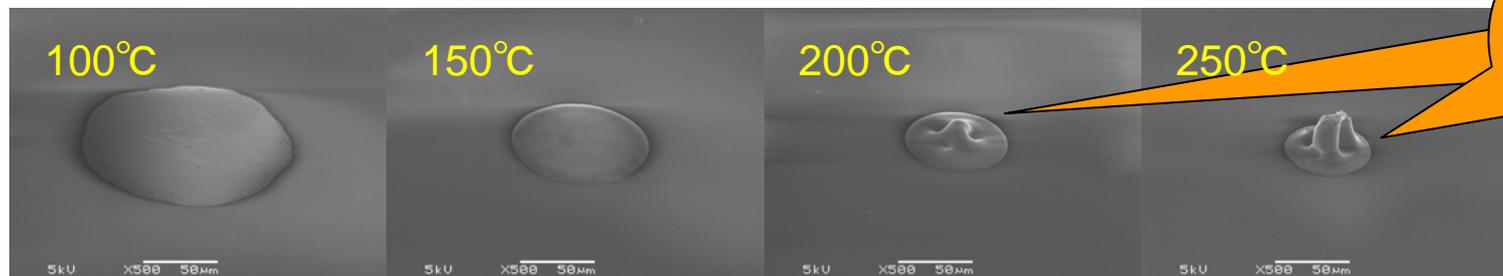
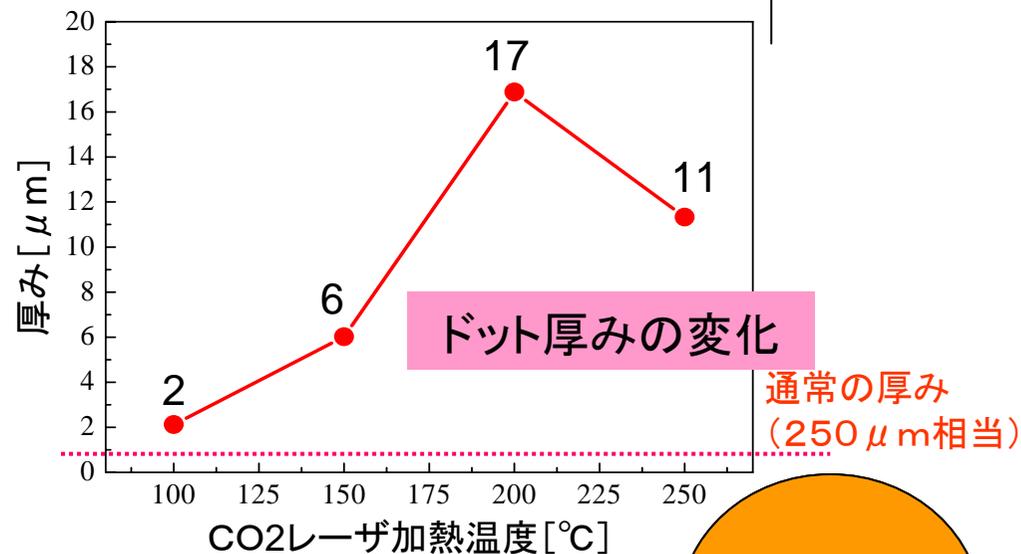
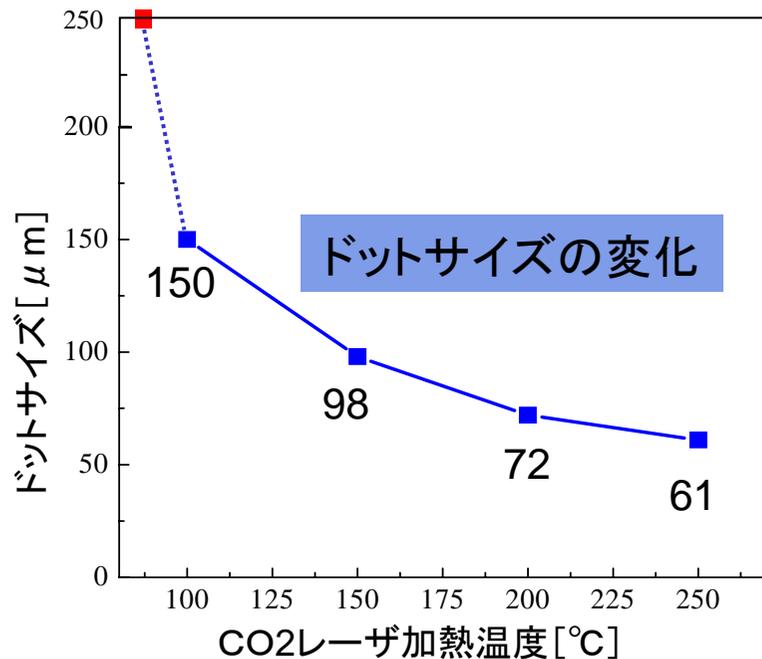
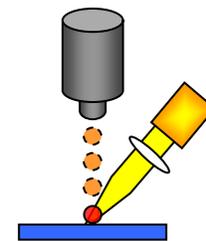
比抵抗値  $1.9 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$



## インクジェットノズル



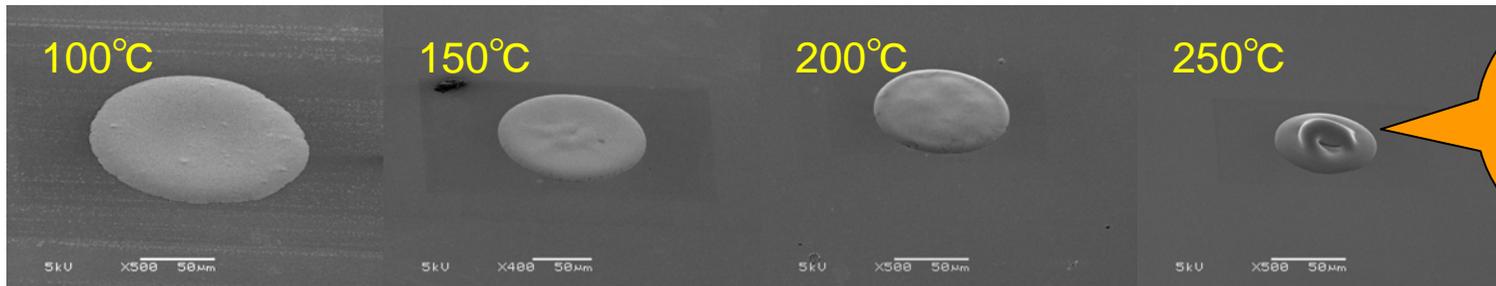
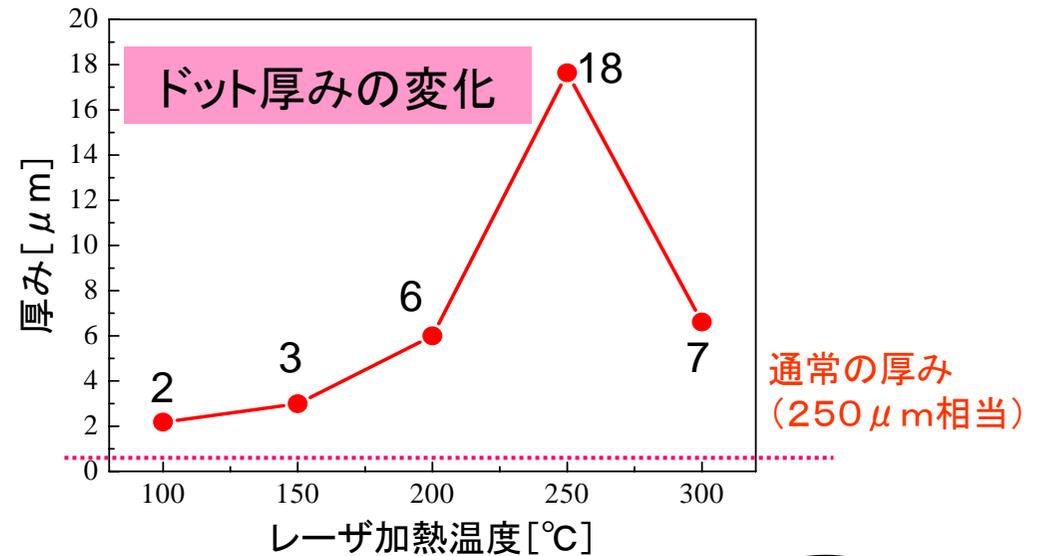
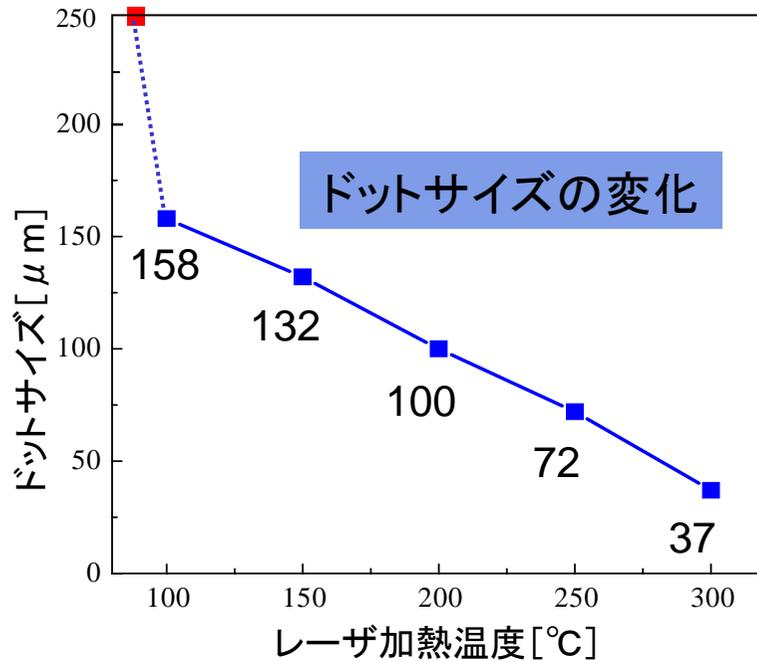
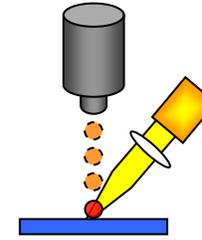
# レーザー照射による加熱効果 (ガラス基板)



突沸による  
形状の乱れ

- 温度上昇と共に、ドットサイズは小さくなり、厚みは増加。
- 急激な加熱は突沸を引き起こし、ドット形状(厚み)を乱す。

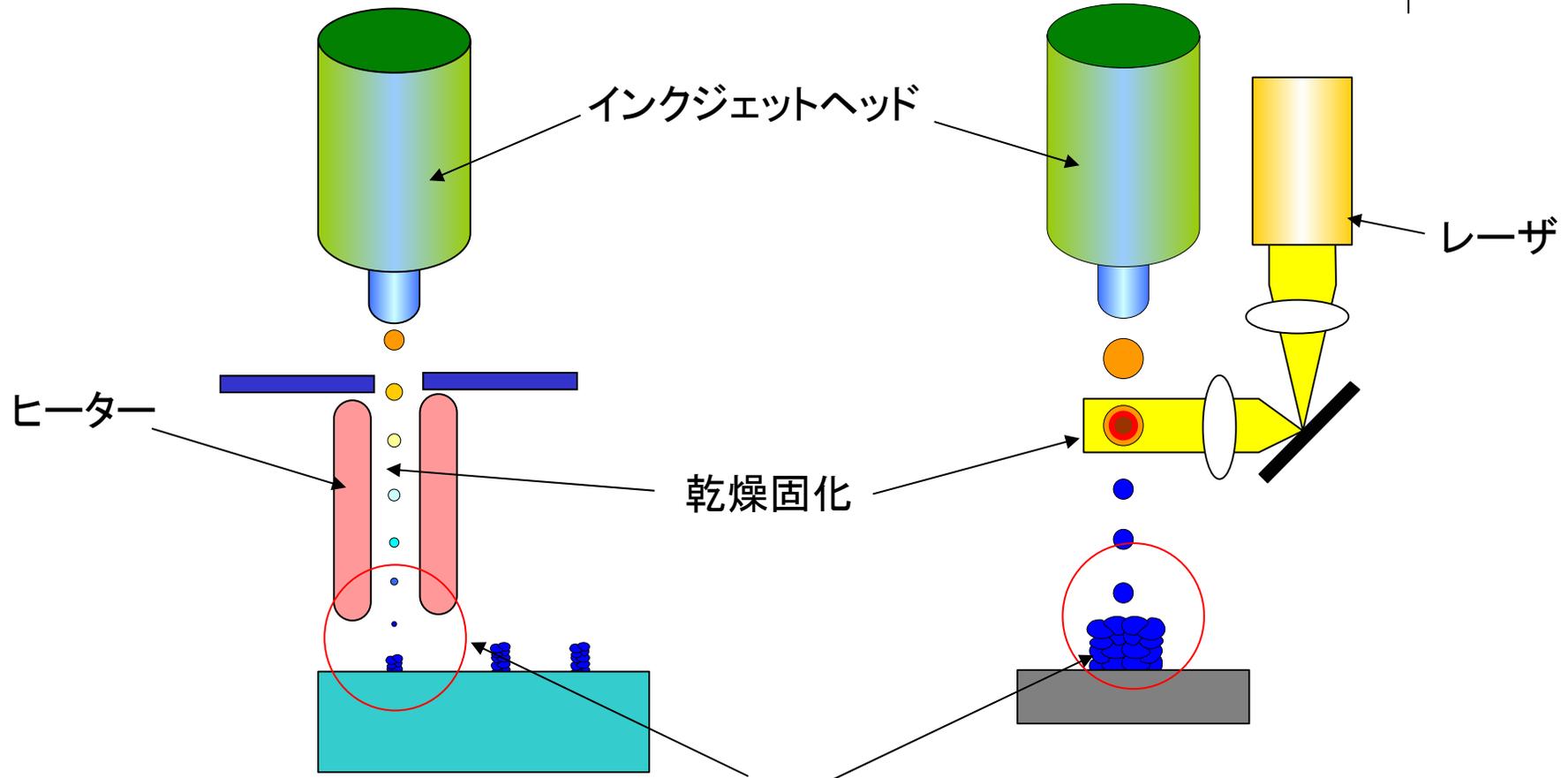
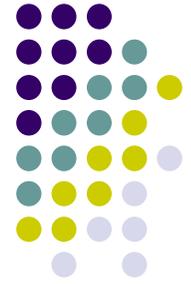
# レーザー照射による加熱効果 (シリコン基板)



突沸による  
形状の乱れ

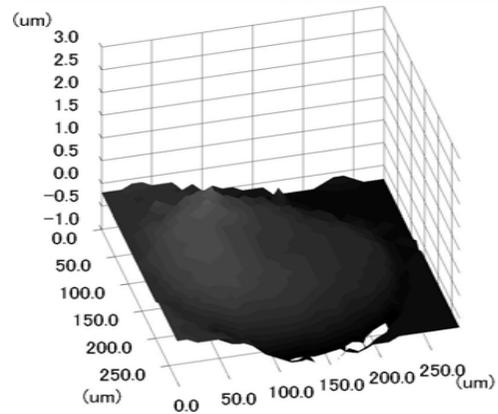
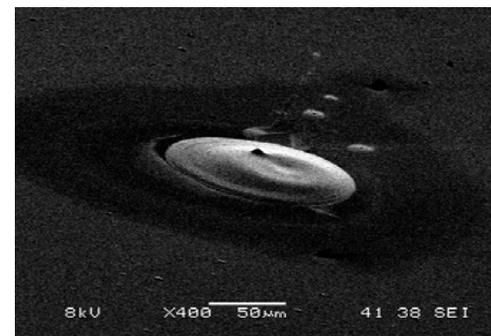
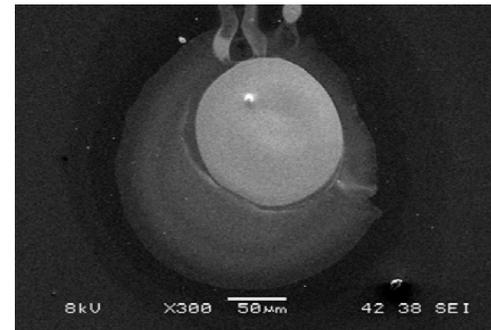
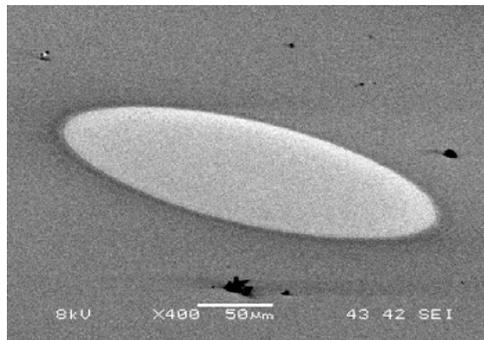
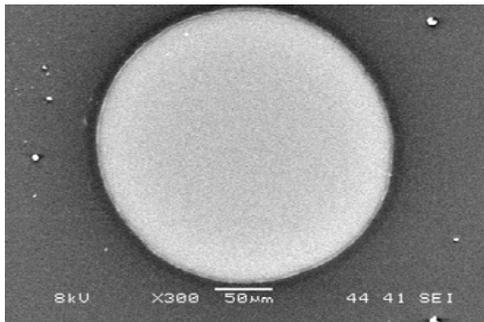
● ガラス基板の場合とほぼ同様の傾向が見られた。

# エネルギー援用インクジェット法(2)

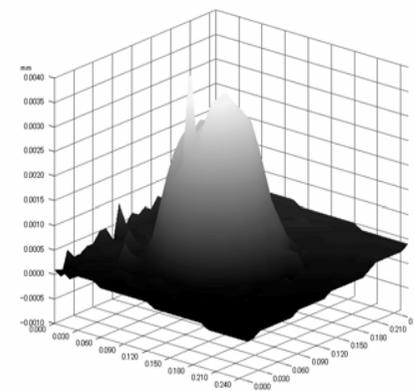


半固体・固体状態で衝突  
(常温衝撃固化現象)

# 着弾ドット径の比較

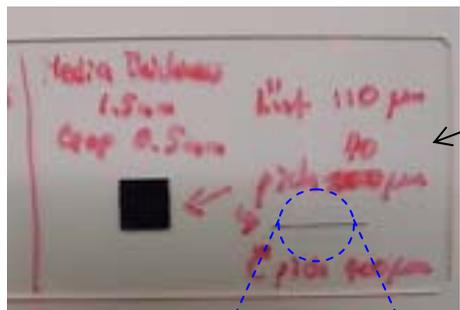


ドット径 245µm  
ドット厚 0.1~0.3 µm



ドット径 90~100µm  
ドット厚 3.2µm

# ラインパターの形成実験 (線幅、比抵抗値)



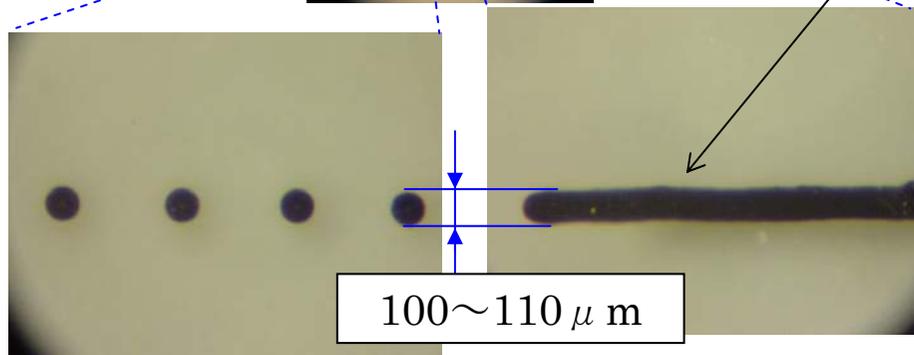
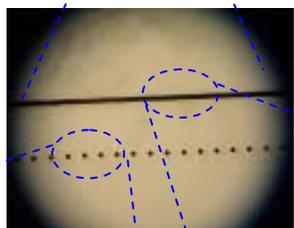
ガラス基板

Agインク

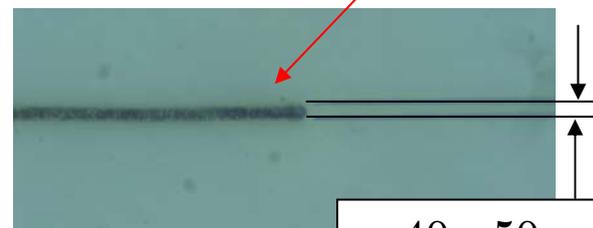
比抵抗値

$2.6 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$  (実測値)

$1.6 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$  (バルク値)



100~110  $\mu\text{m}$

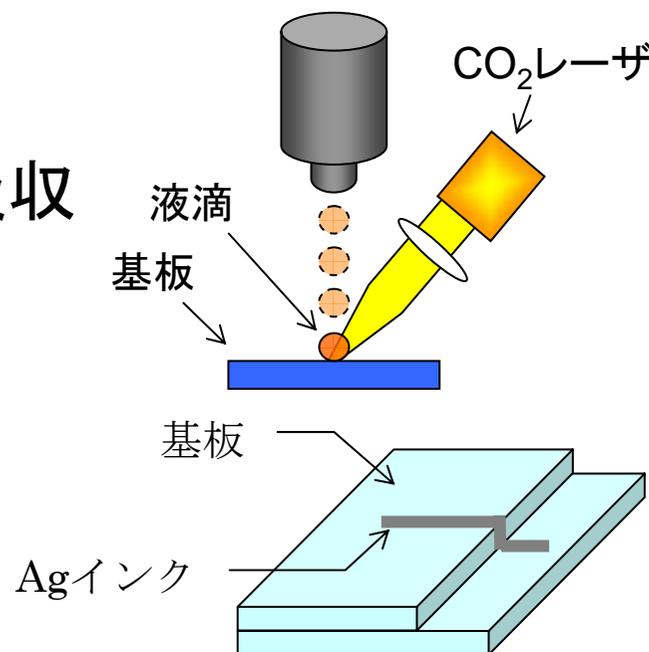


40~50  $\mu\text{m}$

加熱条件の最適化

# 今後の予定

- レーザ照射、ヒータ加熱が着弾精度に及ぼす影響を明らかにする。
- Agインクの主溶媒を、レーザーの吸収効果が高い溶液にする。
- 段差スロープへの金属配線。
- 絶縁層や誘電体膜形成の試み。  
(シリカ, ポリイミド, PZT etc)





## 技術課題2: マイクロバンプ

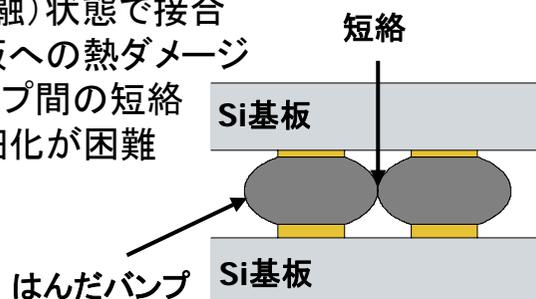


# 微細接続用金属バンプ技術の比較

## はんだバンプ

加熱(熔融)状態で接合

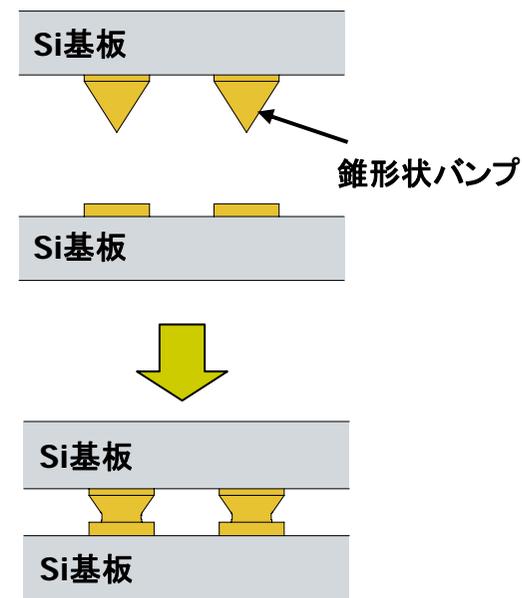
- 基板への熱ダメージ
- ・ バンプ間の短絡
- ・ 微細化が困難



## ピラミッド形状バンプ

先鋭形状により先端部分の強度が低い

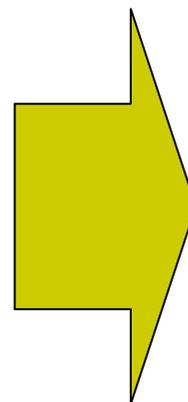
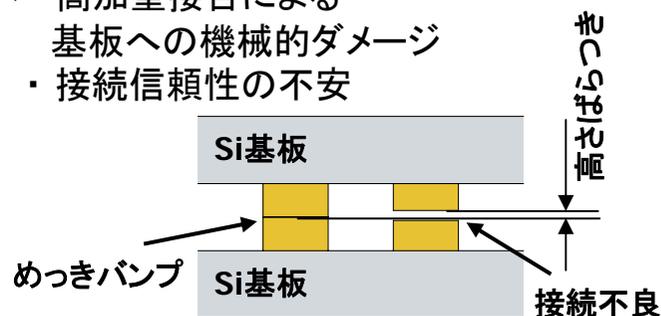
- ・ 低加重・低温でのMEMSチップ実装
- ・ 高さばらつきを吸収した、確実な接続
- ・ 狭ピッチでも短絡の危険性がない



## めっきバンプ(柱状バンプ)

潰れにくい形状

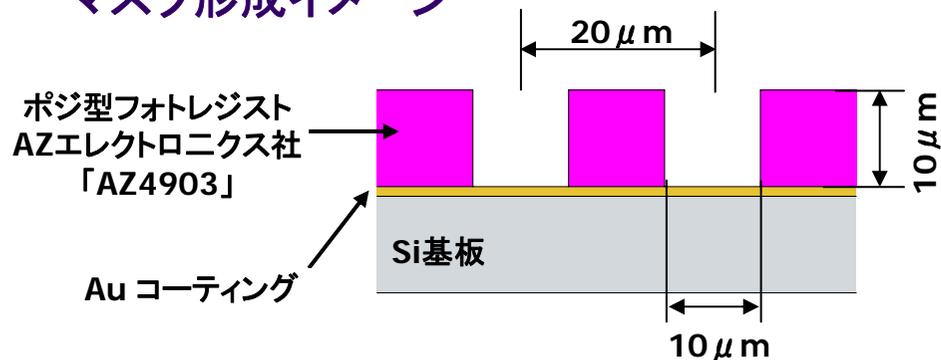
- 高加重接合による  
基板への機械的ダメージ
- ・ 接続信頼性の不安



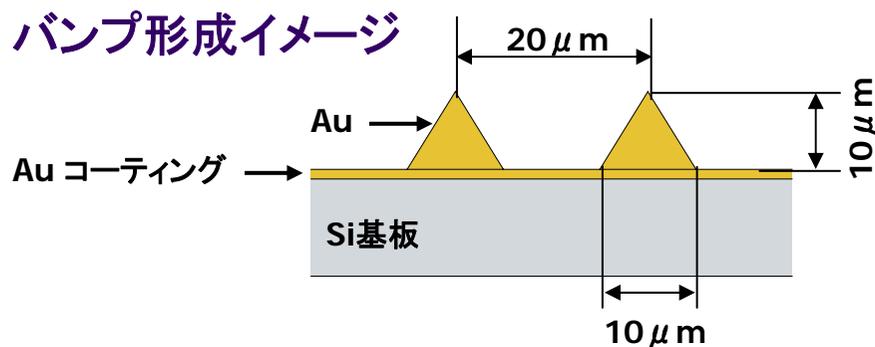
# ピラミッド形状バンプの形成



## マスク形成イメージ

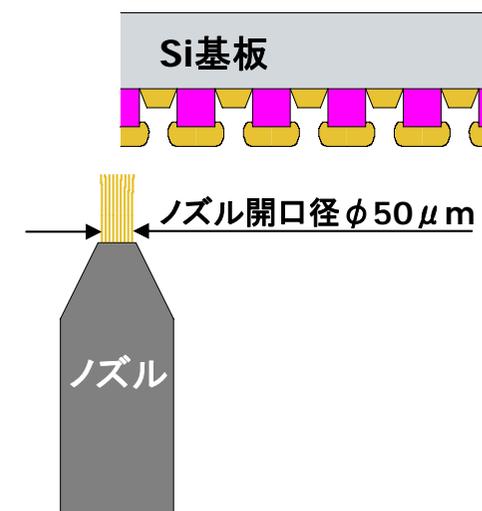


## バンプ形成イメージ



## ガスデポジション法

ノズルに対し、テーブルを往復させて蒸着



テーブル送り速度: 2mm/sec

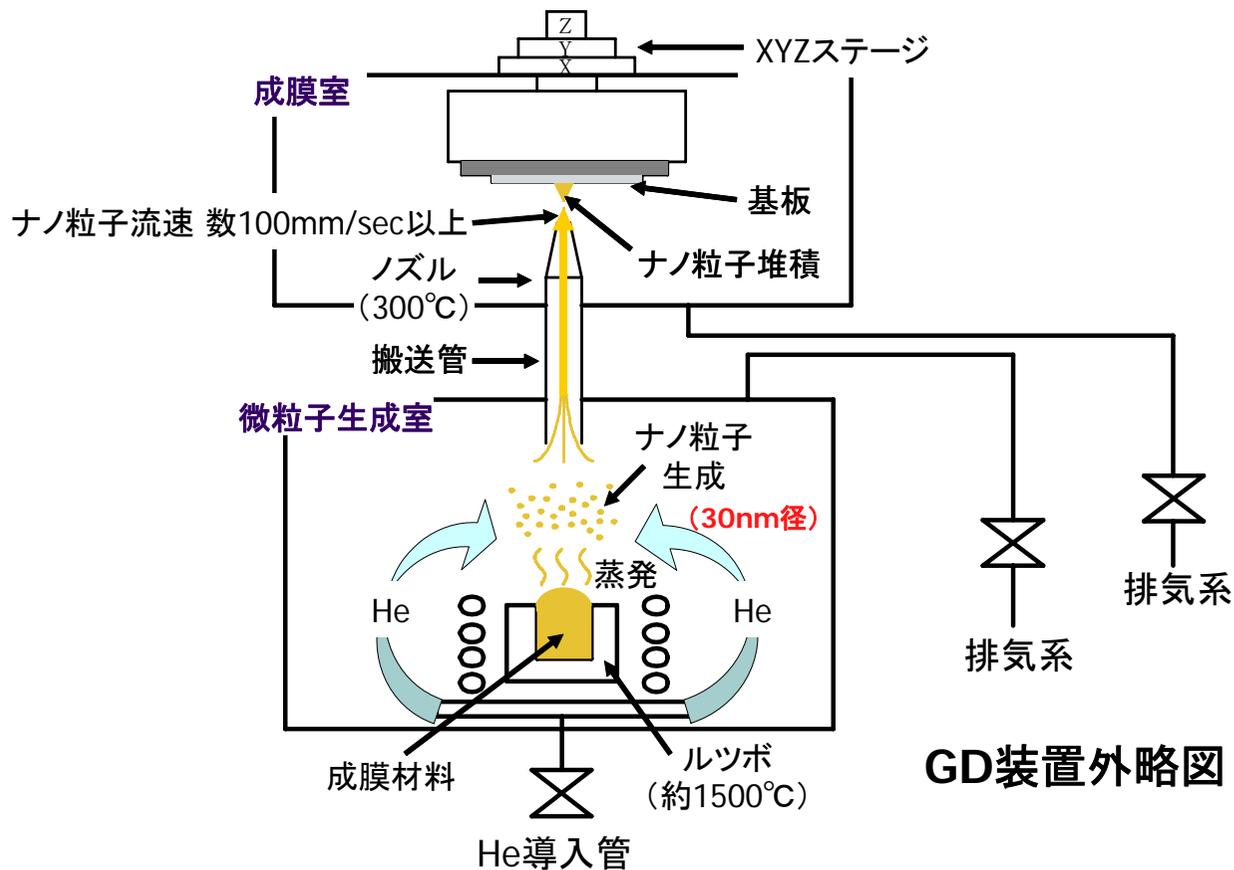
走査回数: 70往復

(バンプ形成速度 2.8秒/個)

# ガスデポジション法 (GD法) とは

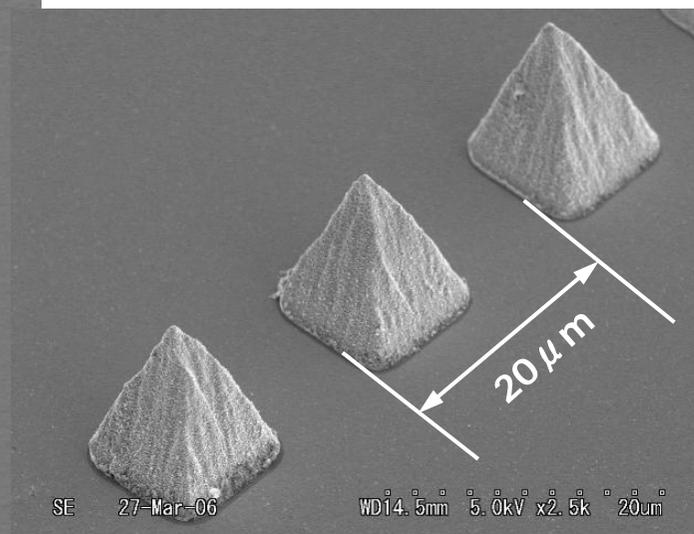
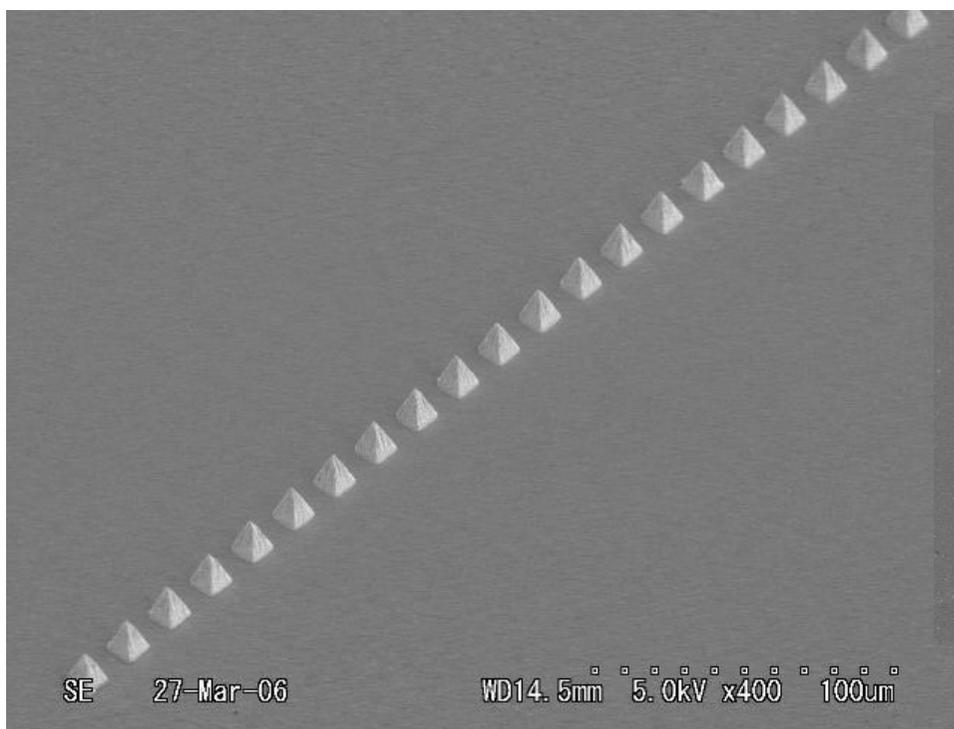


ナノサイズの微粒子を生成し、堆積させていく成膜技術





# ピラミッド形状10 $\mu$ m金バンプ500個の直線配列

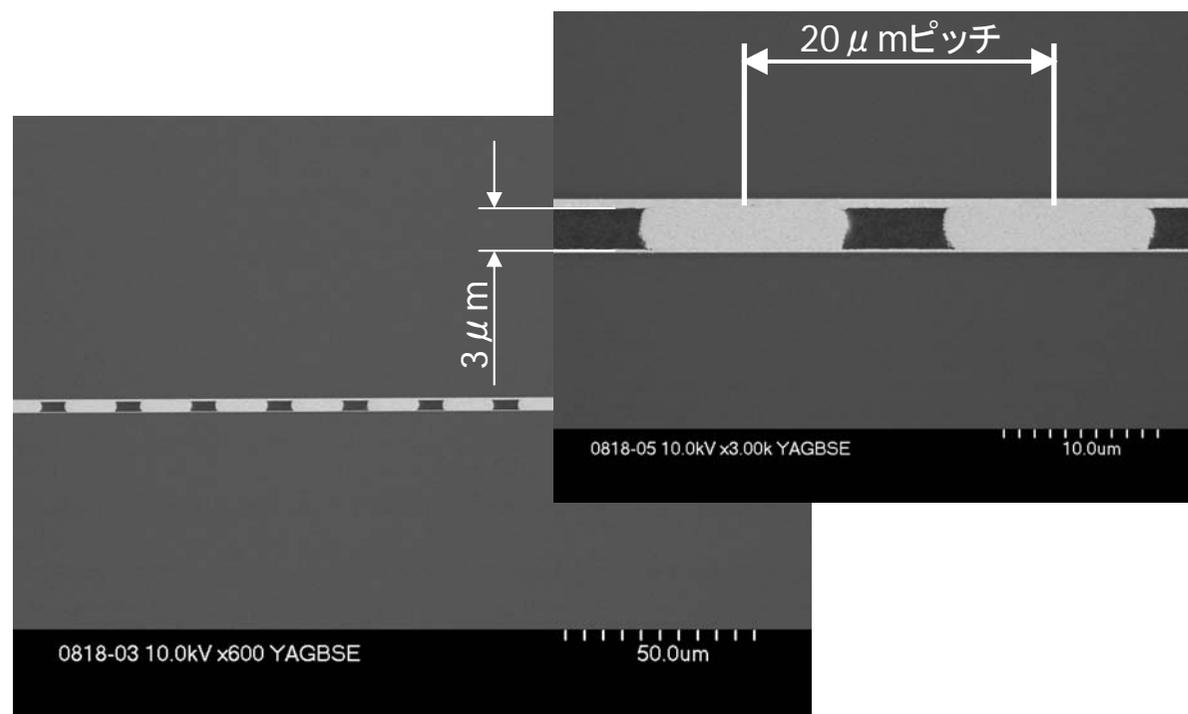
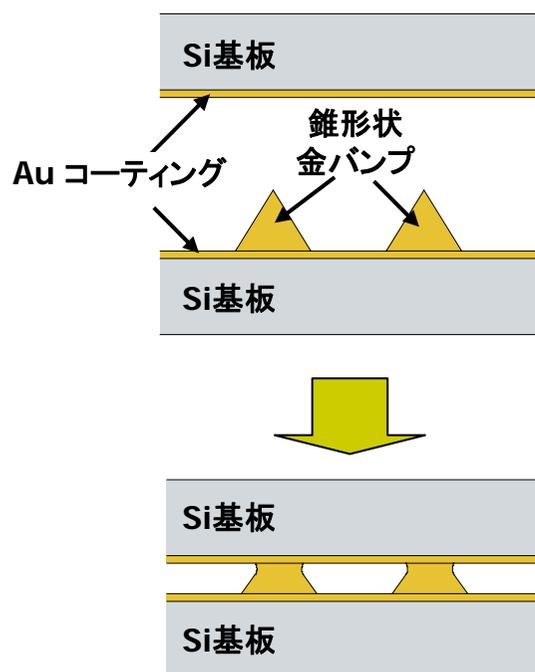




# フリップチップ接続テスト

## 錐形状金バンプのつぶれ具合を確認

高さ約 $3\mu\text{m}$ までつぶしても、隣同士つながらない

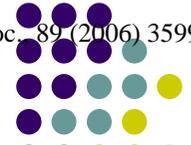




# 技術課題3: マイクロデスペンス

# ダイレクトライティング技術

From Reviewed paper by J.A.Lewis et al., J.Am.Ceram.Soc. 89 (2006) 3599



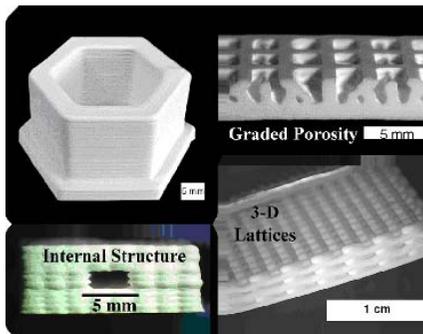
- 2次元、3次元構造体の形成
- 型を使わない
- マスクを使わない

プロセスの特徴

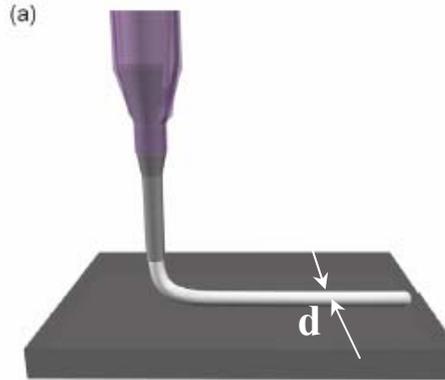
## ダイレクトライティング

応用

- 電子部材
- センサー
- 生体組織制御
- フォトニック材料
- etc.,



### マイクロディスペンス (英語では Continuous Filament Writing)



### ロボキャストイング(in air)

(Robocasting)

$d > 500 \mu\text{m}$

### ロボキャストイング(in oil)

(Robocasting)

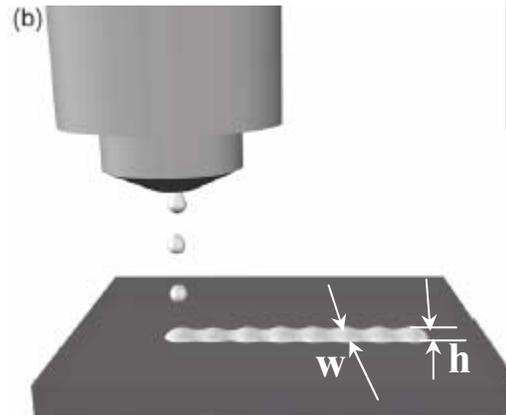
$d > 100 \mu\text{m}$

### フューズドデポジション

Fused deposition

$d > 100 \mu\text{m}$

### インクジェット (英語では Droplet jetting)



### インクジェット

Inkjet Printing

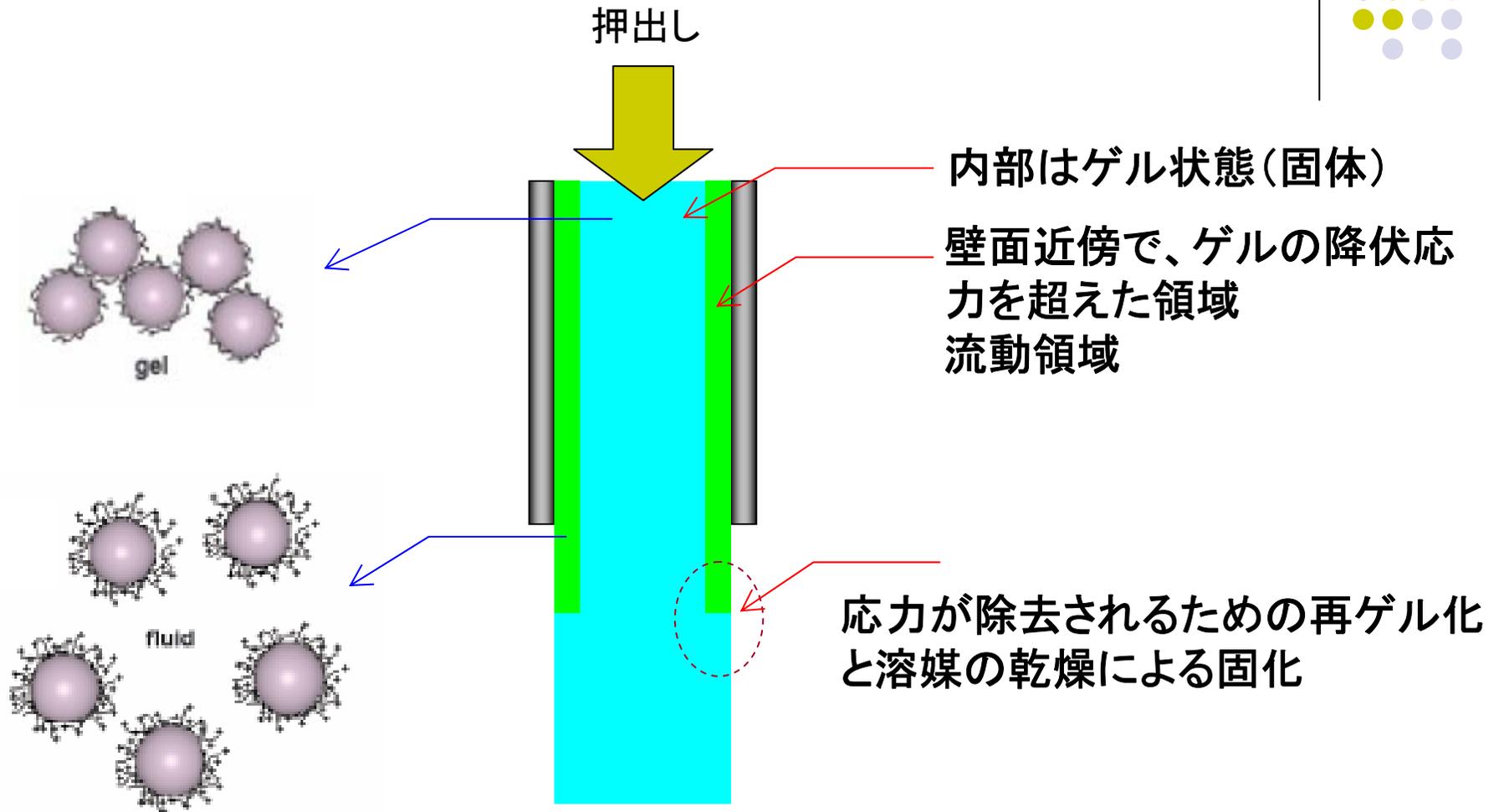
$W > 20 \mu\text{m}, h > 100 \text{nm}$

### ホットメルトインクジェット

Hot melt Inkjet Printing

$W > 70 \mu\text{m}, h < 1 \mu\text{m}$

# コロイドゲルの流動→固化メカニズム

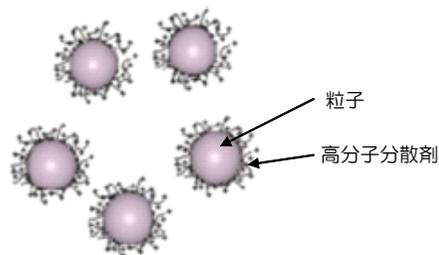


研究課題：ダイレクトライティング  
用コロイドゲルの調製法

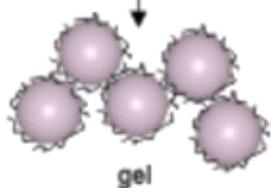
# 本開発法と従来法の原理比較



従来法

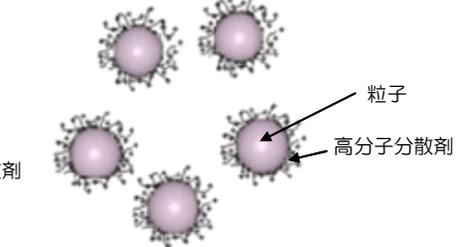


pH変化  
or  
金属塩の添加

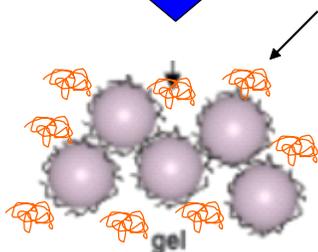


粒子凝集力の起源：  
粒子間の分子間力  
(ファンデアワールスカ)

本開発



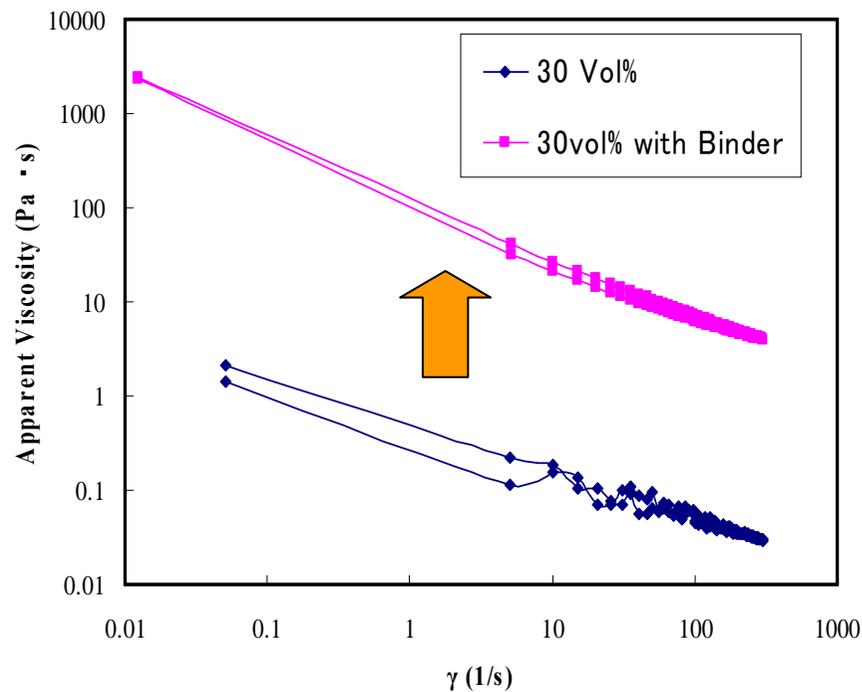
バインダー高分子添加



粒子凝集力の起源：  
高分子の存在によるエントロ  
ピー架橋

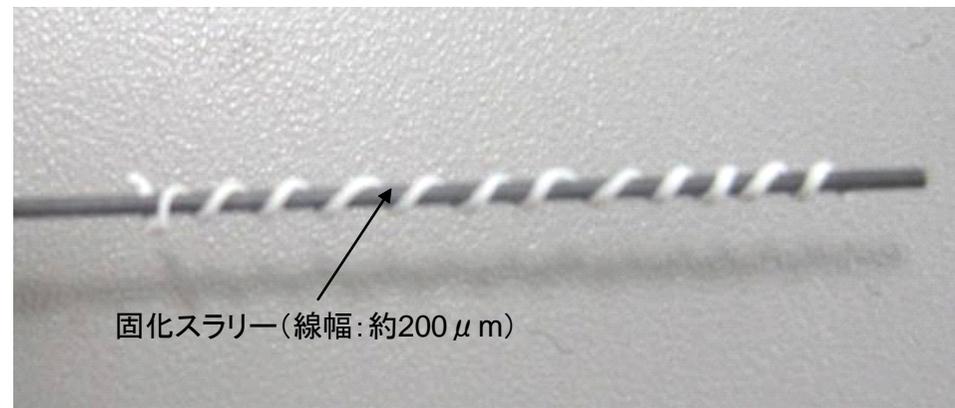
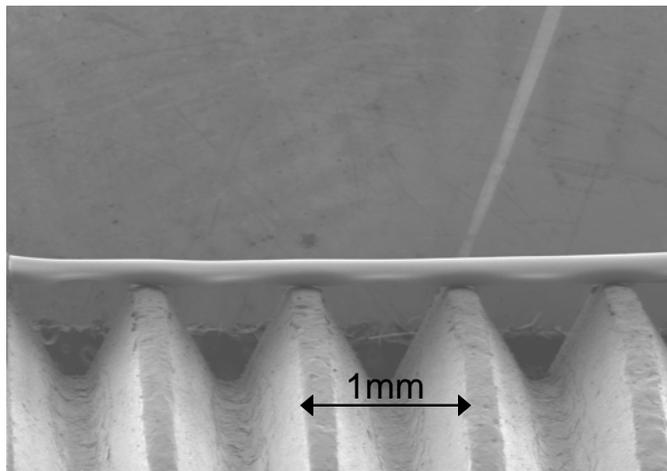
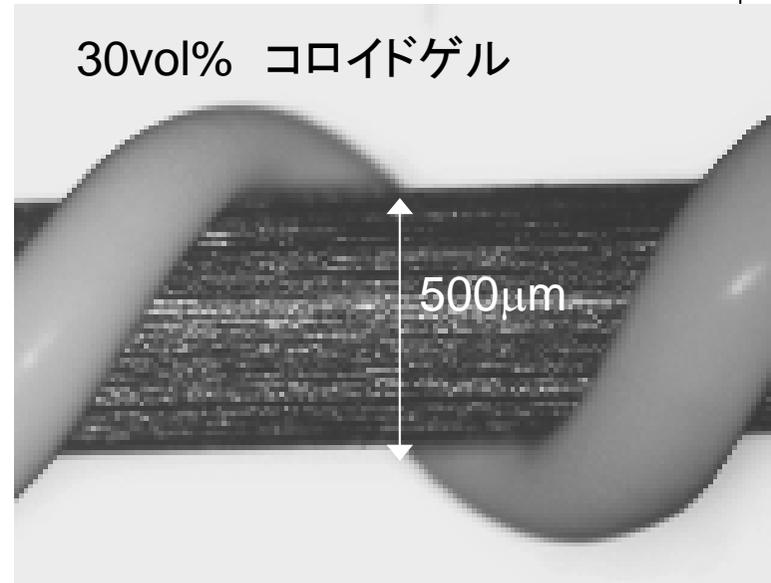
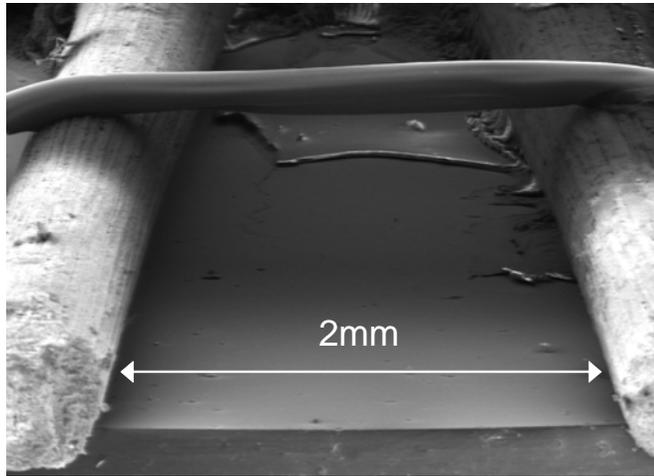


スラリー粘度

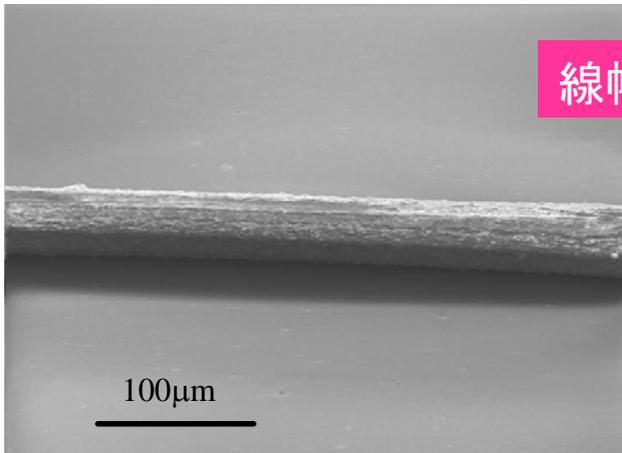
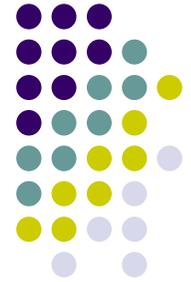


スラリーせん断速度

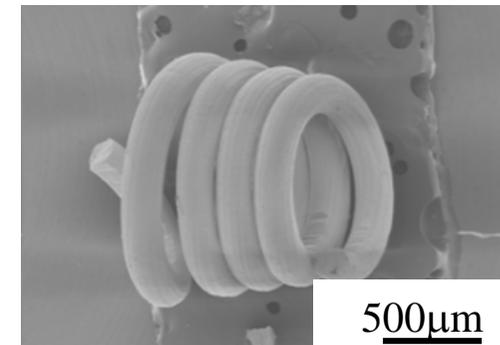
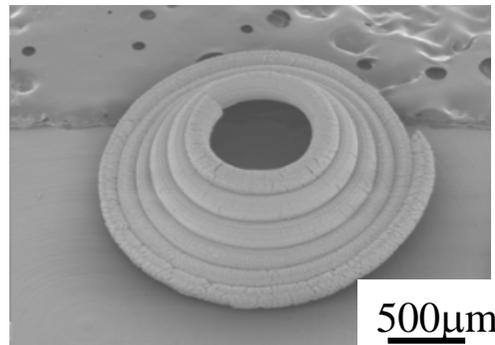
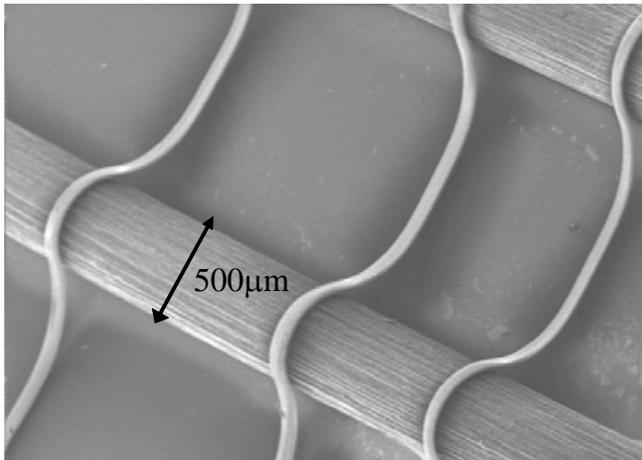
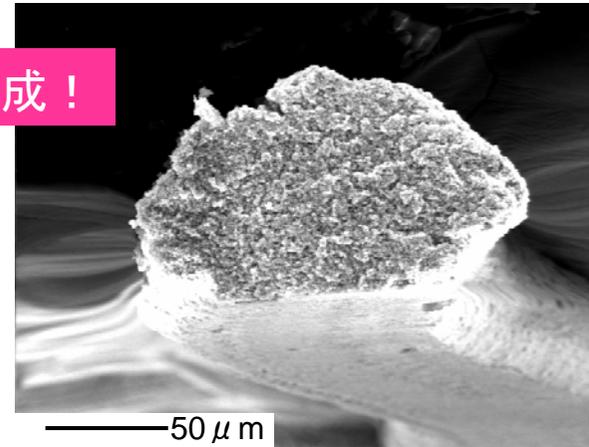
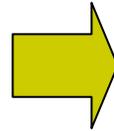
# 微粒子スラリーによる微細配線化（１） （界面活性剤の最適化による粘・流動性調整）



# 微粒子スラリーによる微細配線化（2） （濃度条件の最適化による細線化）



線幅50 μmを達成！



高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクト

# **MEMS－半導体横方向配線技術**

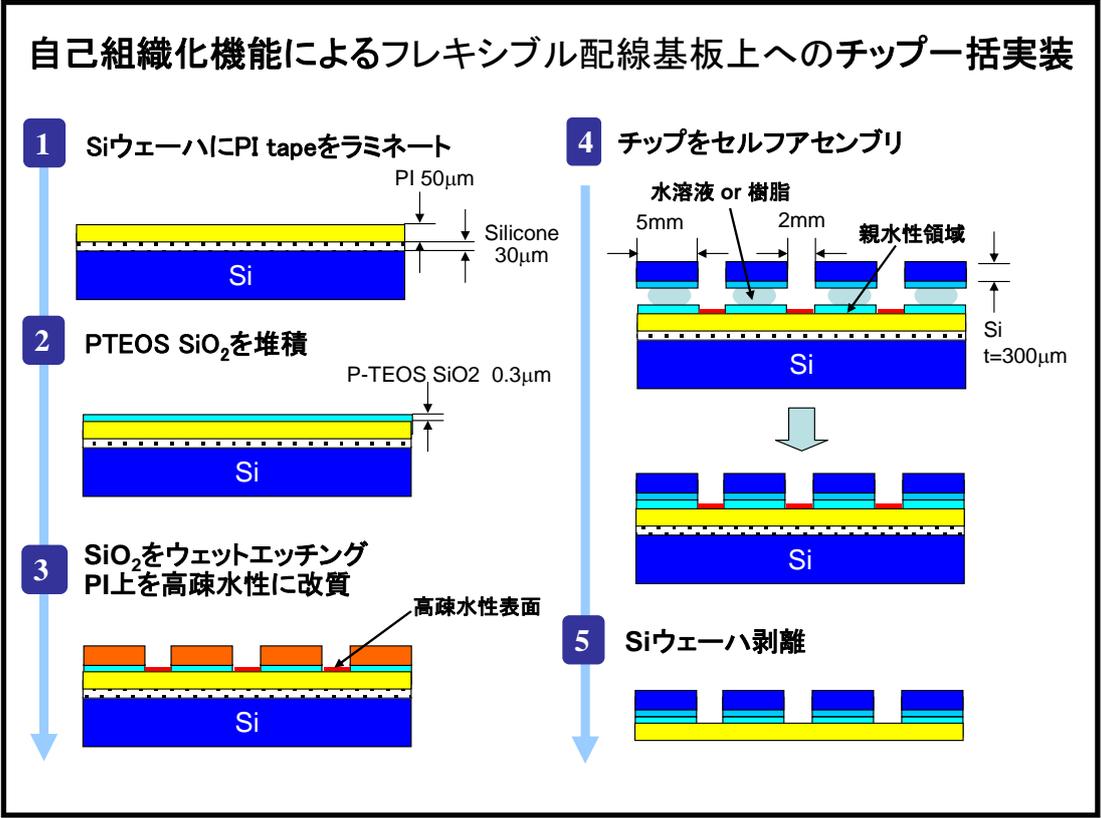
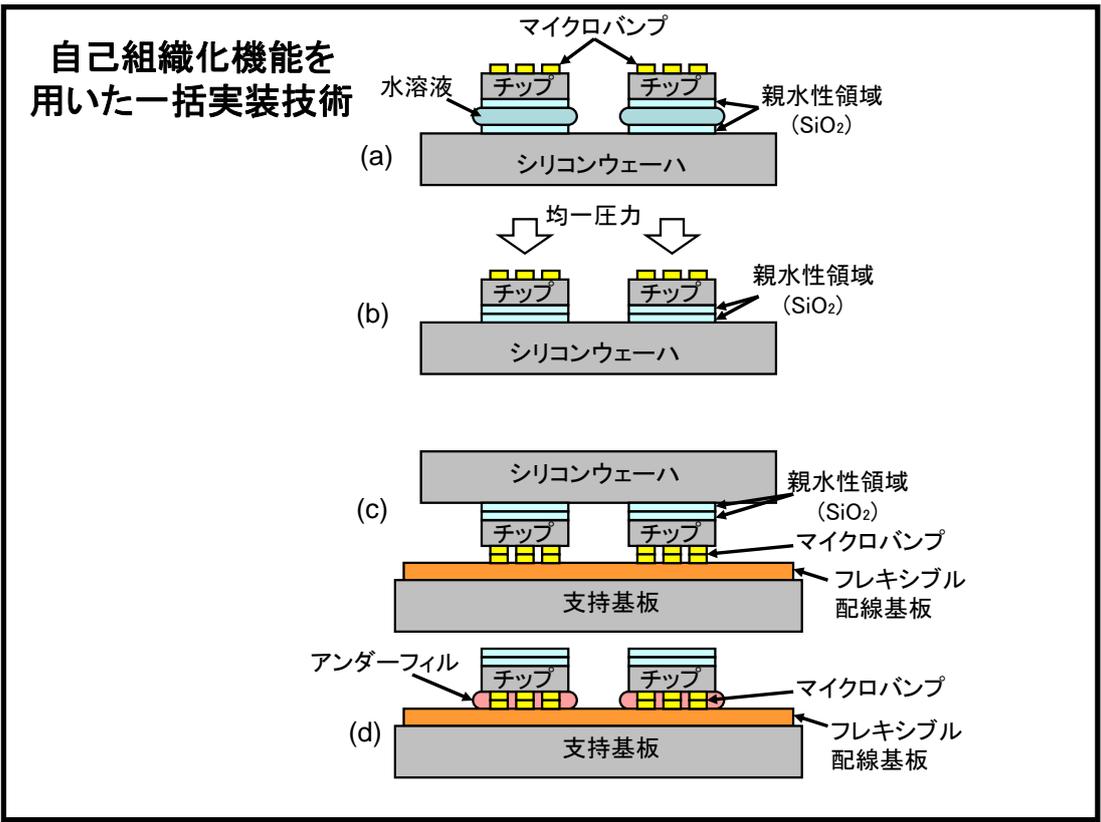
**(高密度な低温積層一体化実装技術)**

東北大学大学院工学研究科  
バイロボティクス専攻

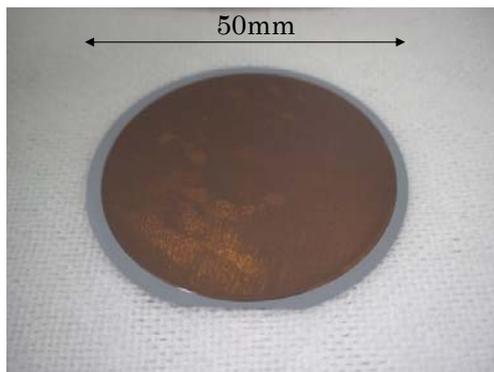
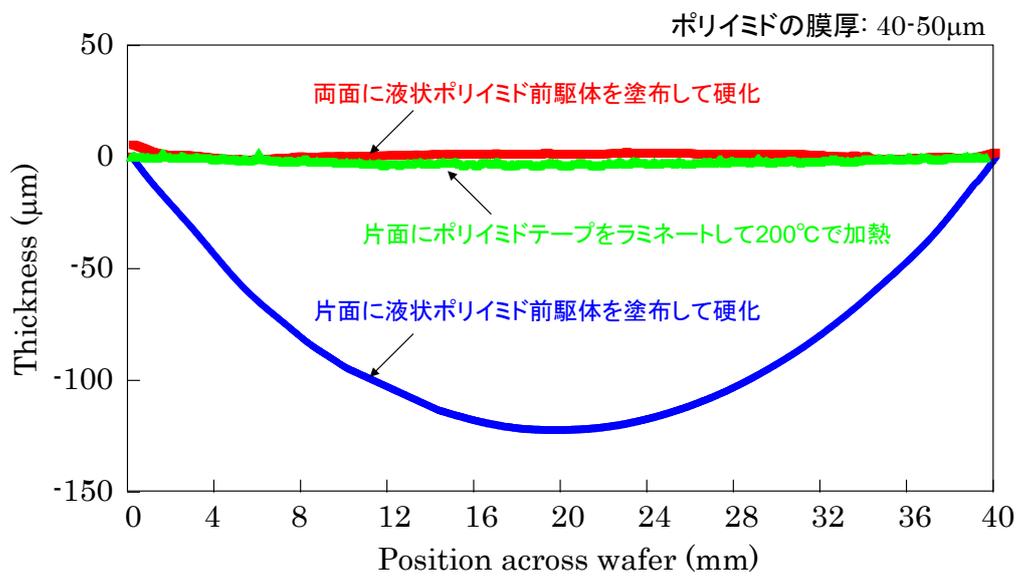
小柳 光正

## 内容

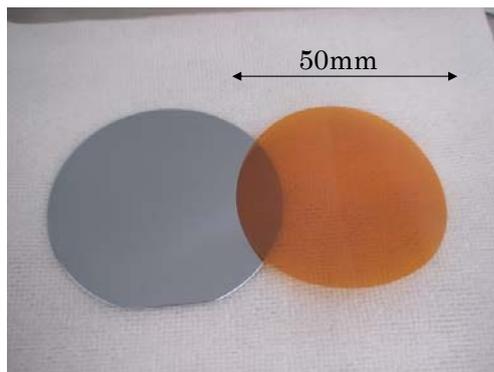
- 1)自己組織化機能を用いたMEMS－LSI一括実装技術
- 2)フレキシブル配線基板上への高密度マイクロバンプ形成技術
- 3)チップ乗り越え配線形成技術
- 4)チップ上への受動素子形成技術



## ポライミドを形成したSiウェーハに発生する反り



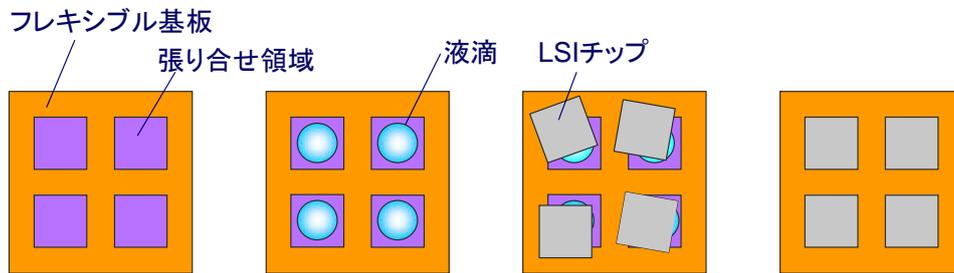
ポライミドテープをラミネートした  
Siウェーハの全体写真  
PI層: 50 $\mu\text{m}$ , Silicone層: 30 $\mu\text{m}$



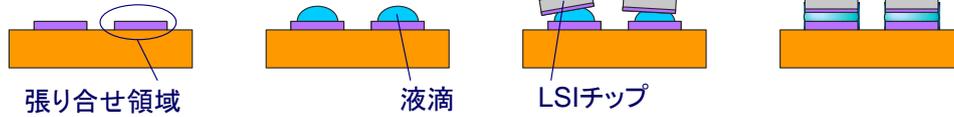
剥離させたポライミド膜  
の全体写真 (PI膜: 50 $\mu\text{m}$ )

## フレキシブル基板上への自己組織化によるチップ位置合わせ技術

### 【上面図】

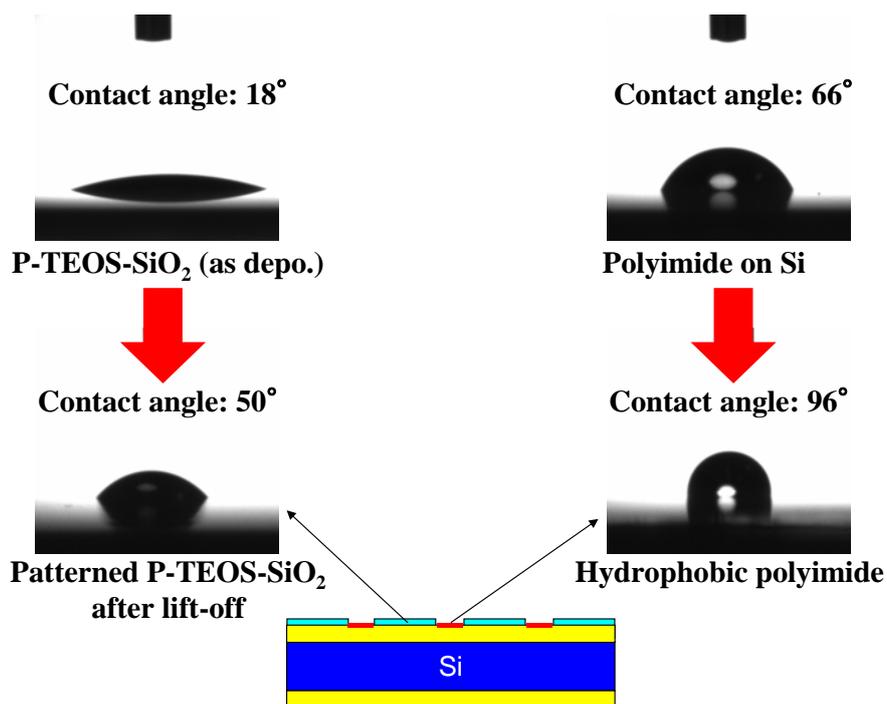


### 【断面図】

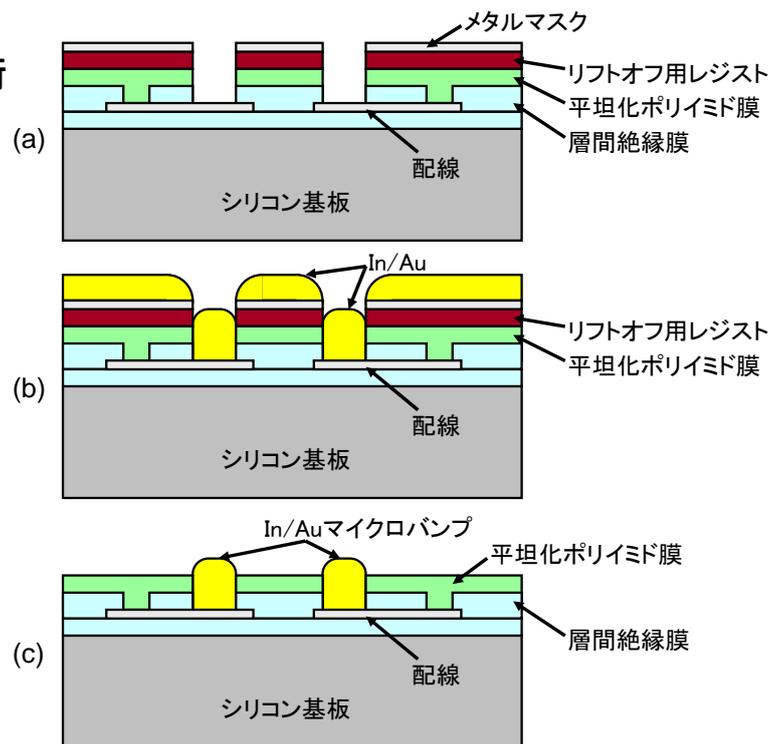


- (1)フレキシブル基板へ張り合わせ領域形成  
 (2)張り合わせ領域への液体滴下  
 (3)チップ配置  
 (4)自己組織化による位置合わせ

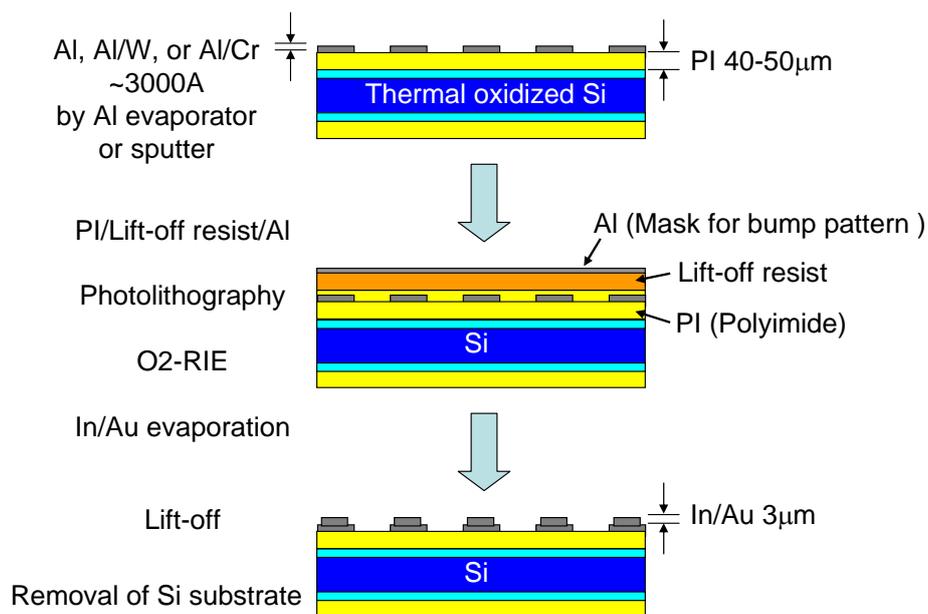
## 接触角測定結果



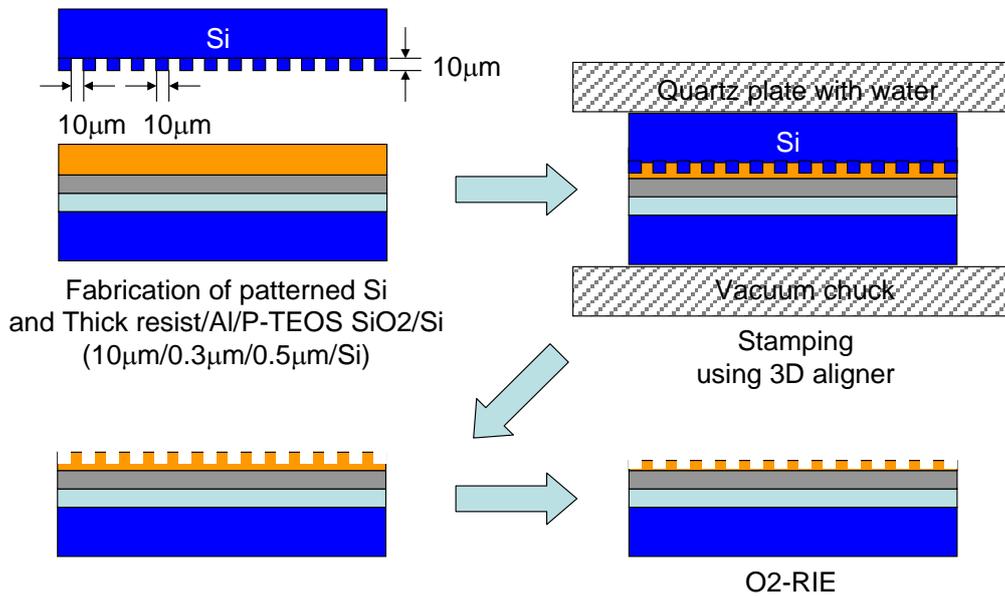
## 高密度マイクロバンプ形成技術



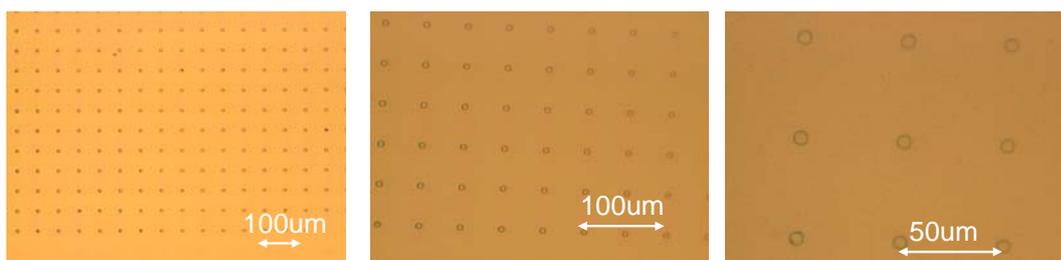
## フレキシブル配線基板上へのマイクロバンプの形成工程



## マイクロバンプパターン形成のためのインプリント技術



## インプリント技術によりフォトリジスト上に形成したマイクロバンプ用ビアパターンの顕微鏡写真

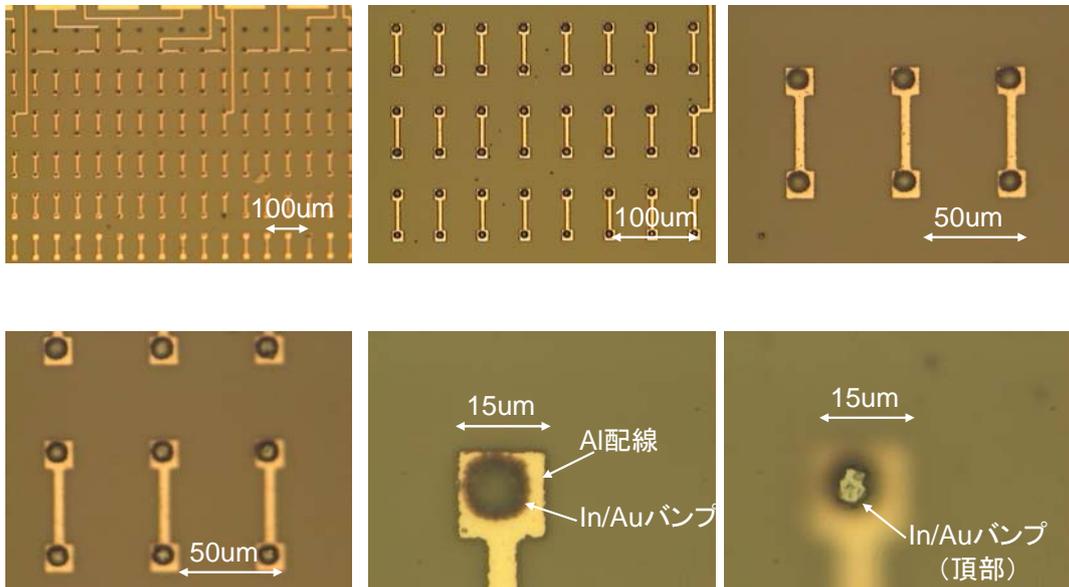


モールド端部(良好なインプリントができた部分)

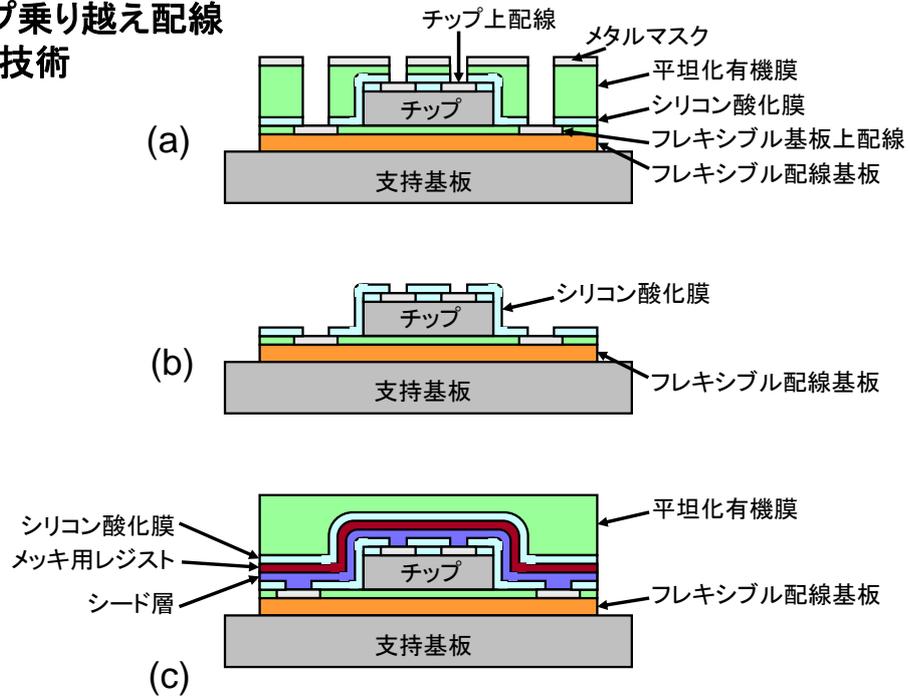
モールド四隅(不良部分)

印可荷重: 50N

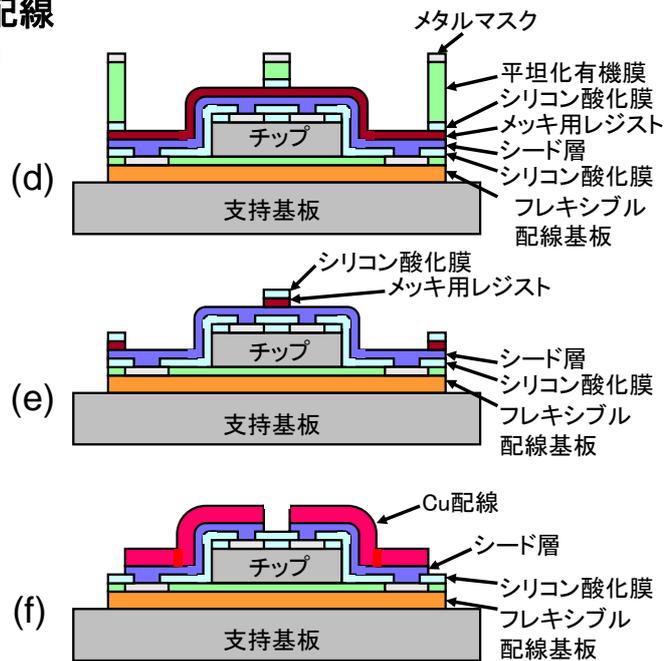
## インプリント技術により形成したマイクロバンプの顕微鏡写真



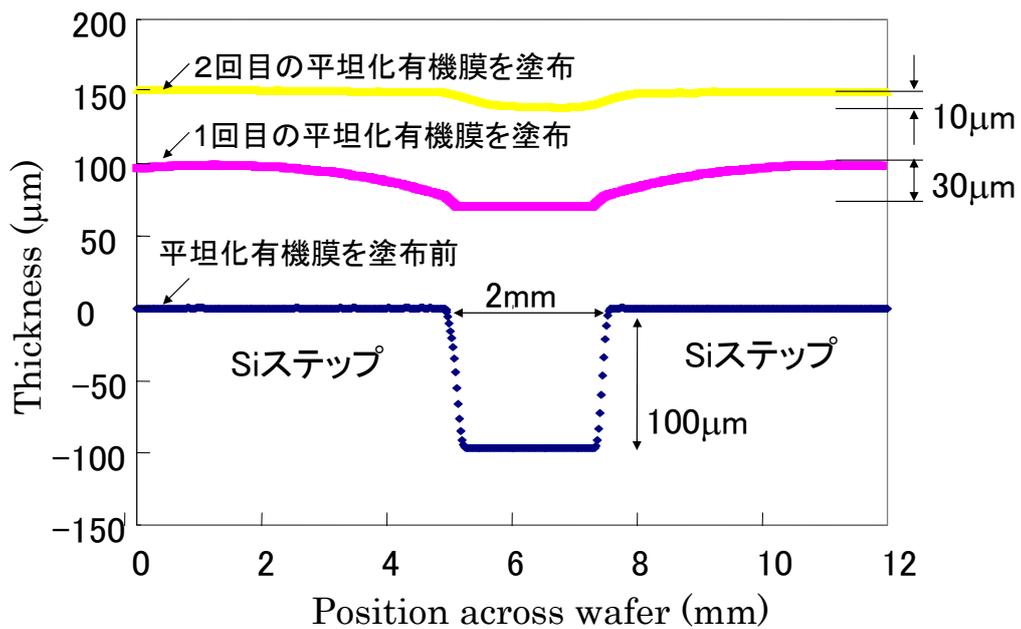
## チップ乗り越え配線形成技術



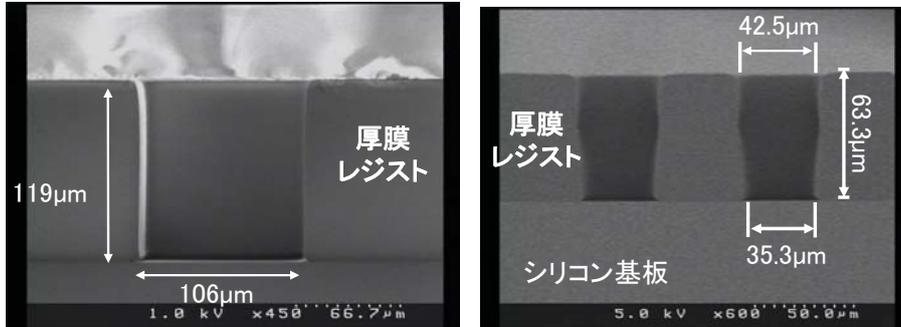
### チップ乗り越え配線 形成技術(続き)



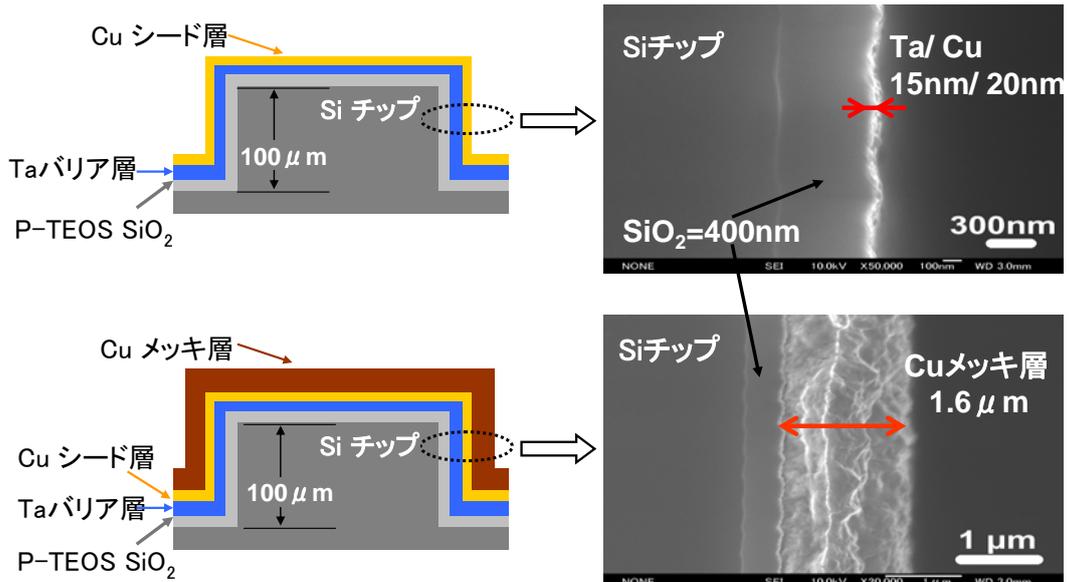
### Siステップ上に塗布した平坦化有機膜の表面プロファイル



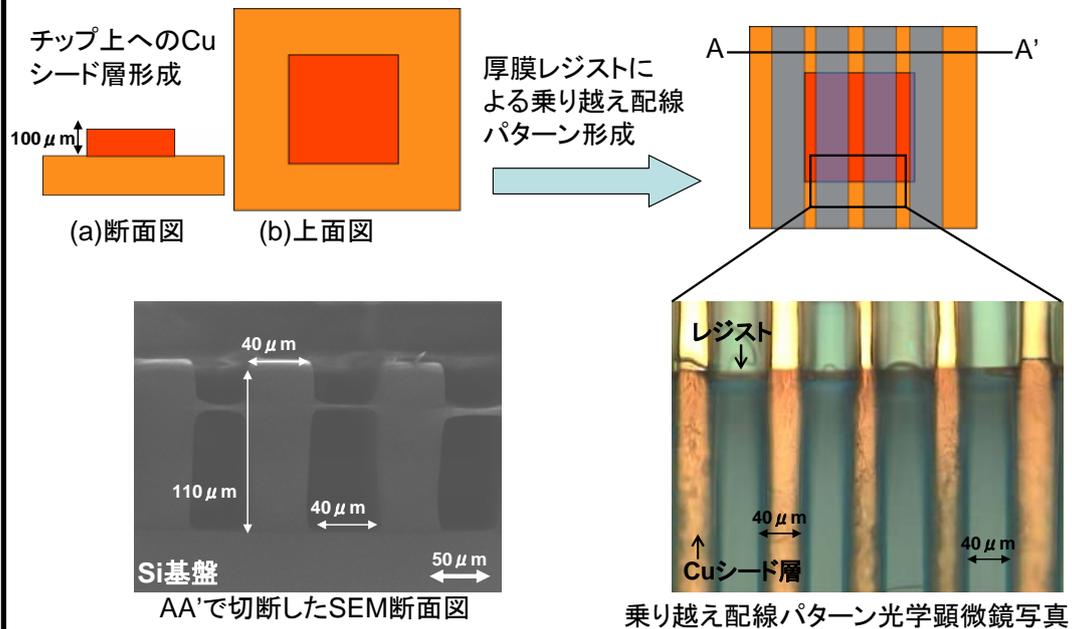
## 厚膜レジストを用いたパターン形成



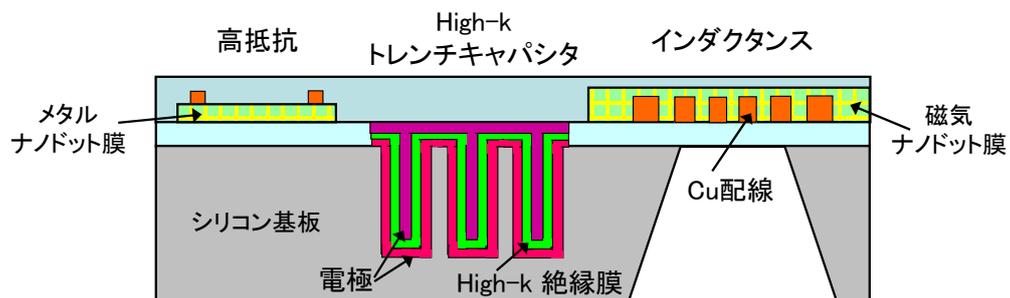
## チップ乗り越え配線のSEM断面観察写真



## チップ乗り越え配線パターンの形成 (チップ厚: 100 $\mu\text{m}$ )

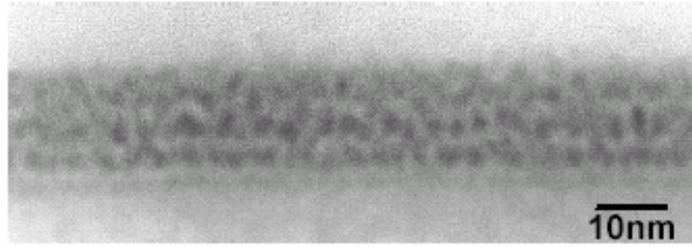


## チップ上への受動素子形成技術

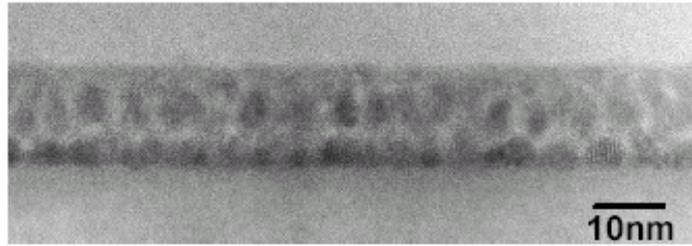


## メタル・ナドット膜の TEM断面観察写真

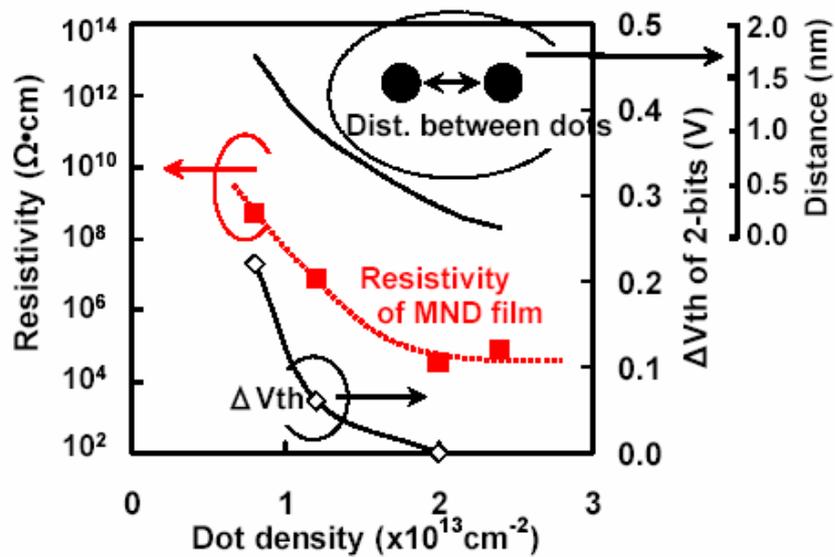
Co 30vol.%  
2~3nm  
 $2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$



Co 50vol.%  
3~5nm  
 $8 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$

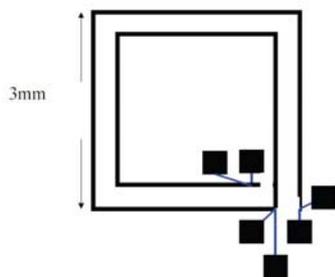


## メタル・ナドット膜の抵抗とナドット密度の関係

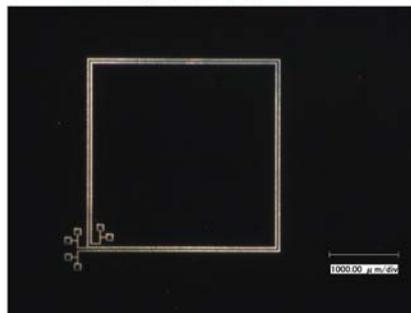


## Cu ダマシン法により作製したコイルの写真

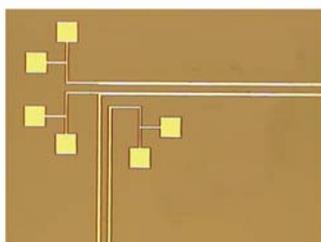
線幅16  $\mu\text{m}$ 、回線距離30  $\mu\text{m}$



CMP後 コイル全体写真、  
Cuめっき層/Cuシード層/Ta/SiO<sub>2</sub>/Si



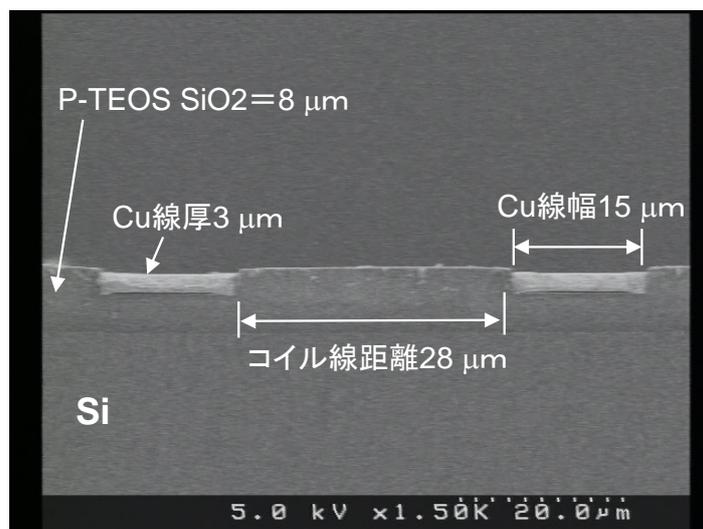
CMP後 コイル光顕微鏡写真、



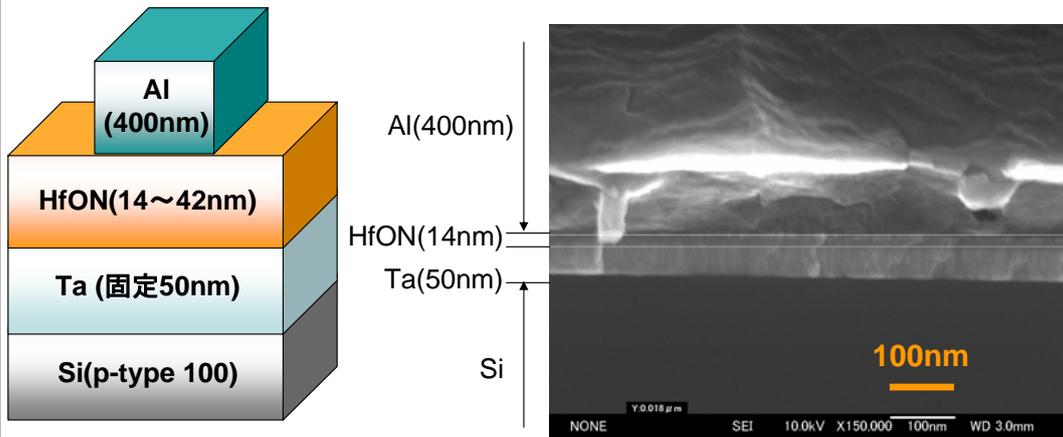
## Cu ダマシン法により作製したコイルのSEM断面観察写真

Cuめっき層/Cuシード層/Ta/SiO<sub>2</sub>/Si

Cu 30nm/ Ta 10nm/Si 8 $\mu\text{m}$



## High-K 材料を用いた MIM キャパシタの構造



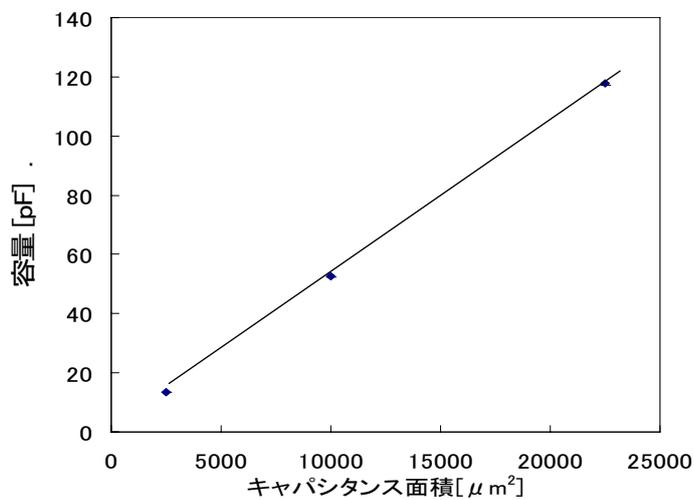
X150,000倍

Pattern sizeは3種類 : 50x50um  
100x100um  
150x150um

## High-K 材料を用いた MIM キャパシタ容量の電極面積依存性

HfON成膜の条件

| Gas Ratio          | Working Press | 厚さ   | 基板温度 (成膜の時) |
|--------------------|---------------|------|-------------|
| Ar:8sccm /N2:4sccm | 0.152kpa      | 42nm | 300°C       |



HfON成膜条件  
Ar 8sccm,  
N2 4sccm

## まとめ

- 1)自己組織化機能を用いたMEMS－LSI－括実装技術：
  - Si ウェーハ上でのフレキシブル配線基板形成
  - フレキシブル配線基板上での自己組織化機能を用いたチップ
  - －括実装
- 2)フレキシブル配線基板上への高密度マイクロバンプ形成技術：
  - インプリント技術を用いたIn/Auマイクロバンプの形成
- 3)チップ乗り越え配線形成技術：
  - 厚膜レジストを用いた乗り越え配線パターン形成
  - チップ側面への絶縁膜、Cuメッキ膜の形成
- 4)チップ上への受動素子形成技術：
  - メタルナノドット膜を用いた高抵抗の形成
  - High-K膜を用いたMIMキャパシタの形成
  - Cu ダマシン技術によるコイルの形成



# 多層ウェハレベル接合体の 低ストレスダイシング技術

財団法人 レーザー技術総合研究所

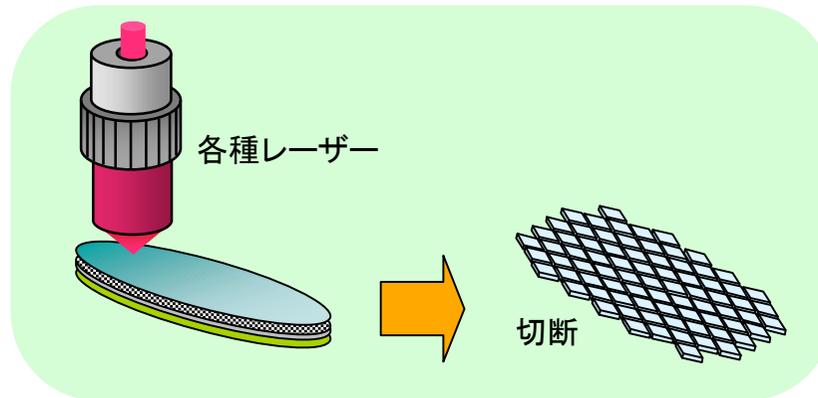
国立大学法人 東北大学江刺・小野・田中研究室

国立大学法人 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心

20x 500 2007.7.27 マイクロマシン展@東京ビッグサイト

## 開発目標

- 3種類以上の多層構造体に対して破損率1%以下のダイシング技術の開発



## 研究内容

### ・平成18年度の成果

多層MEMSを構成する代表的な材料であるガラス、Siの加工特性を定量化。  
単層厚肉材料のデブリフリーダイシングを実証。

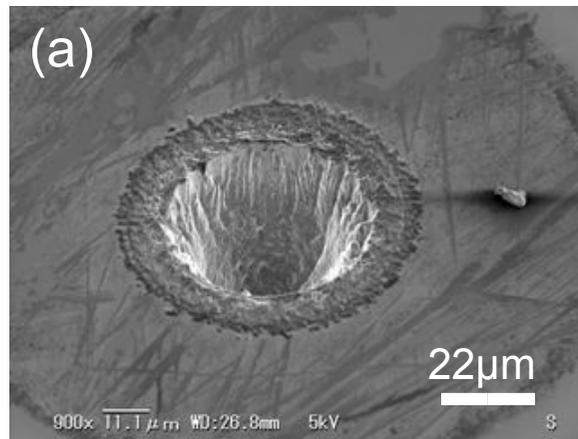
→ 10kHzレーザーで300mm/sの加工速度の可能性

### ・平成19年度以降の計画

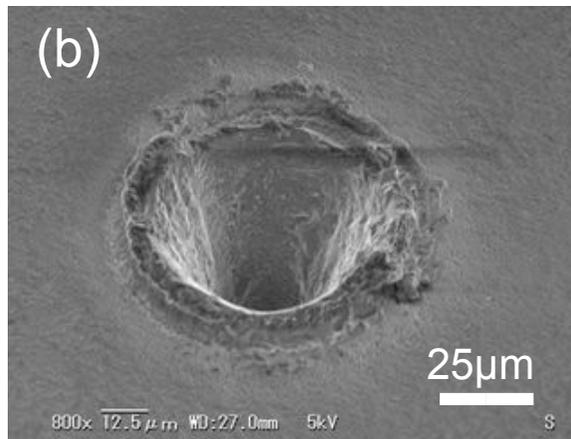
多層構造体(ガラス/Si/ガラス)のデブリフリーダイシングの実証。

☆新技術開発項目:ホログラフィック集光、複合レーザー照射

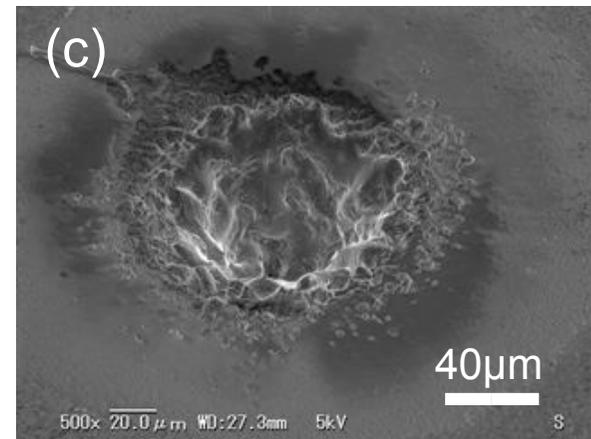
# パルス幅による加工の比較 (Si)



100fs

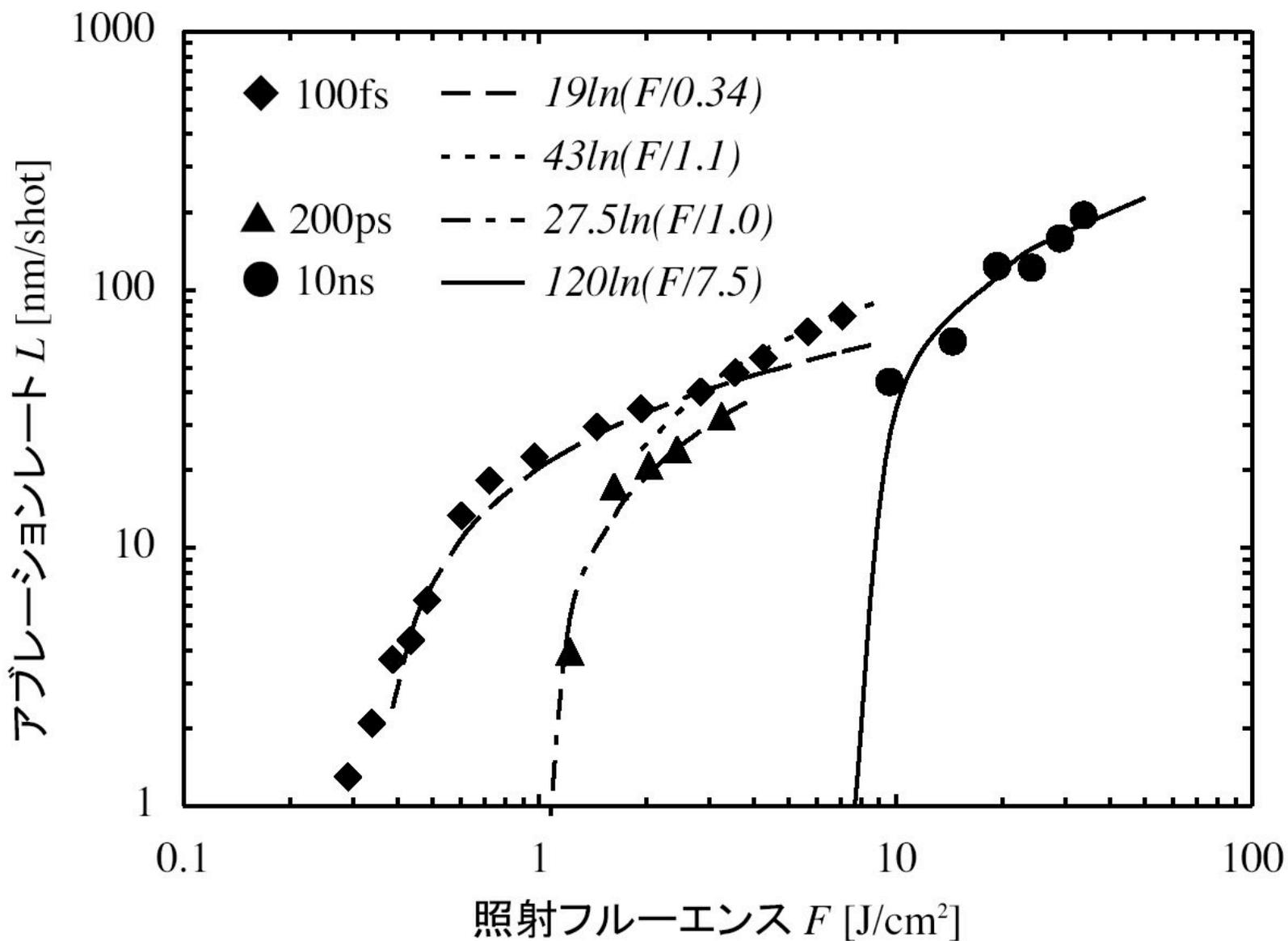


200ps



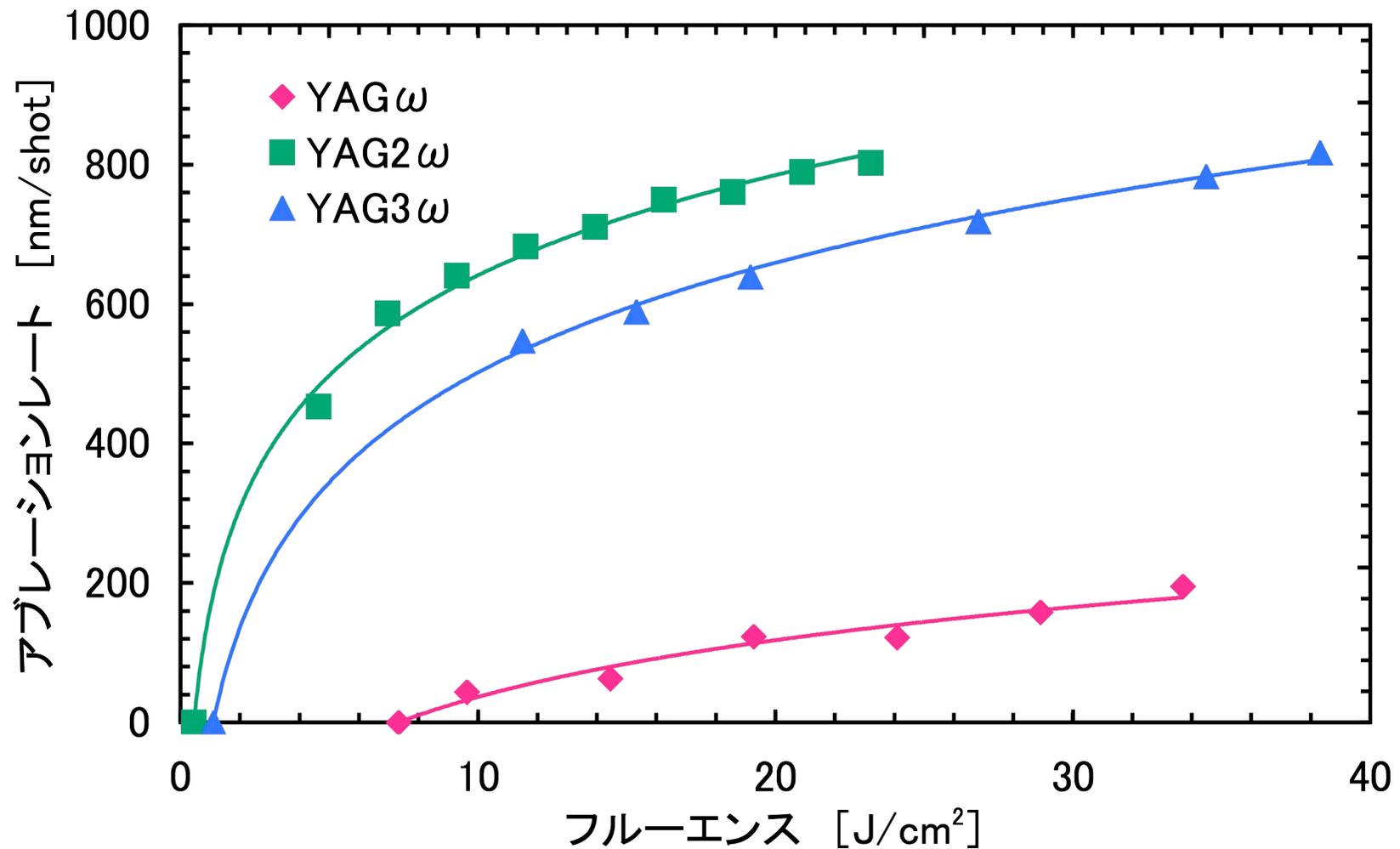
10ns

# パルス幅による加工レートの比較 (Si)



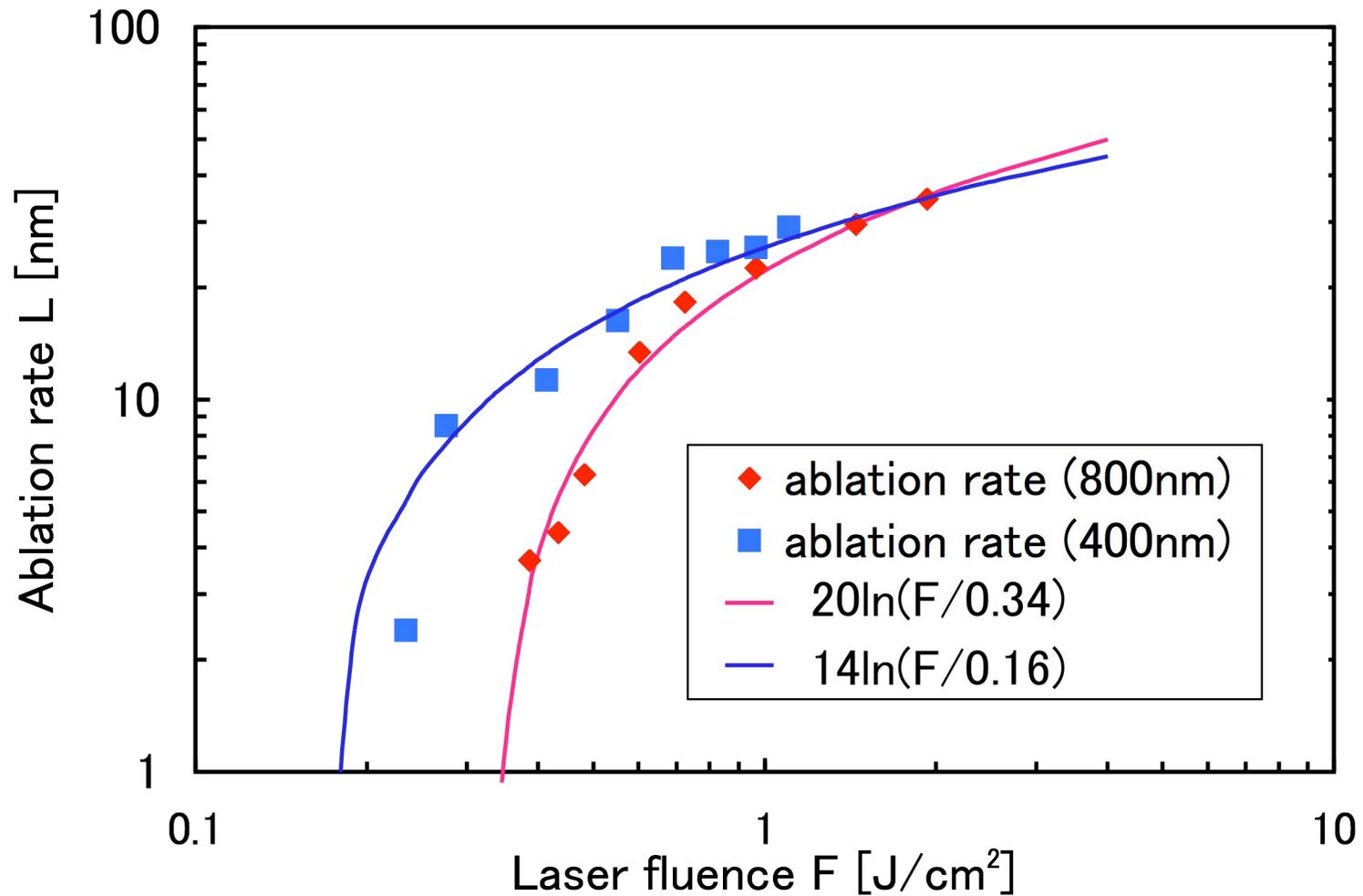
# 波長による加工レートの比較 (Si)

パルス幅～10ns

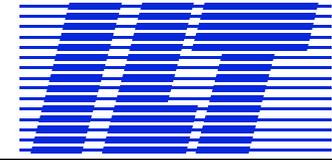


# 波長による加工レートの比較 (Si)

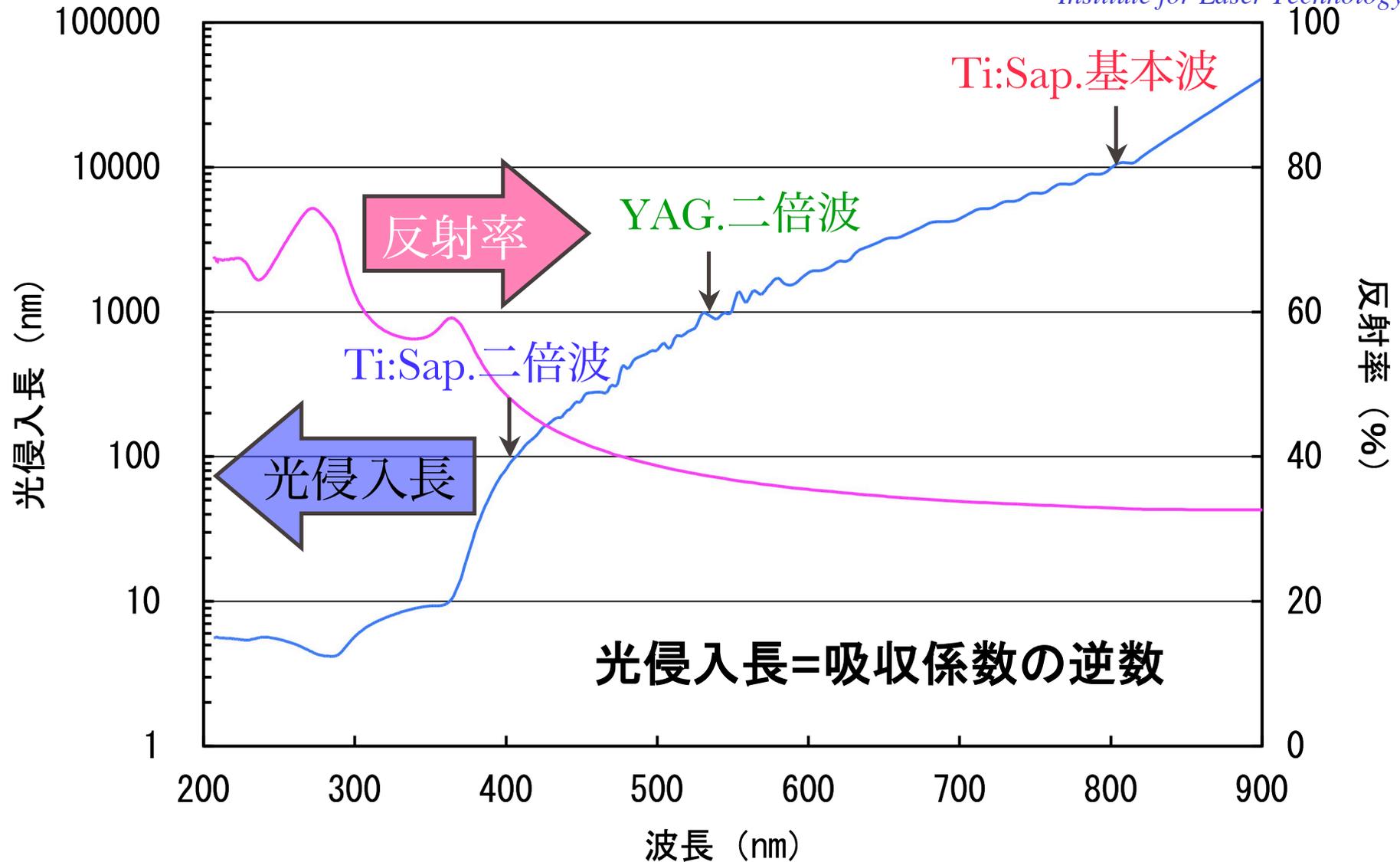
パルス幅 ~ 100fs



# 単結晶Siの光侵入長と反射率

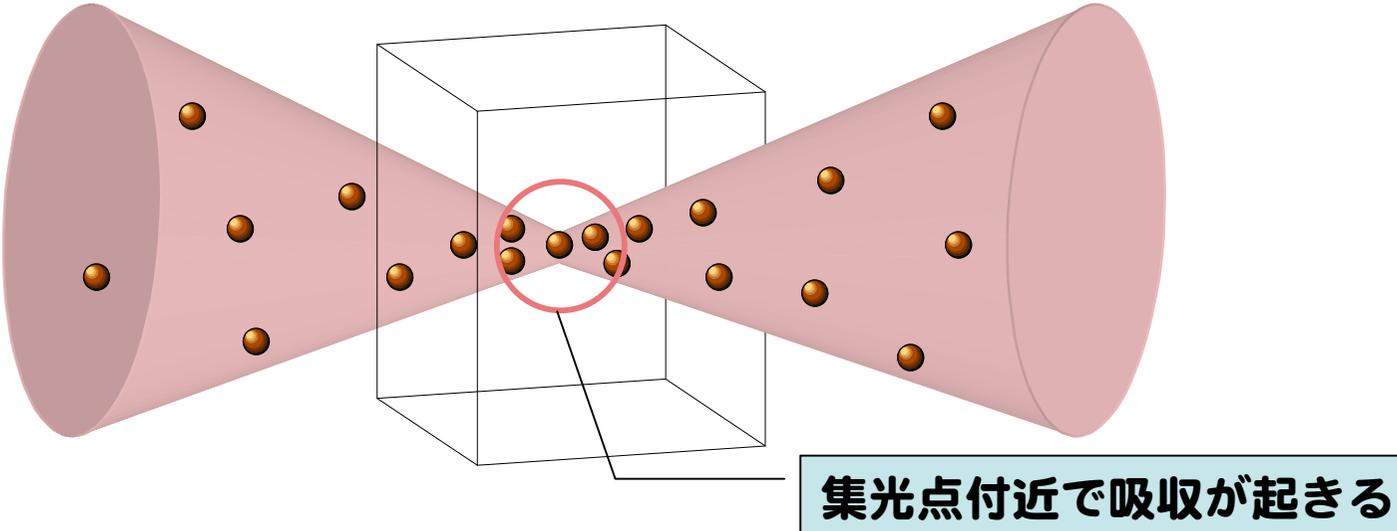
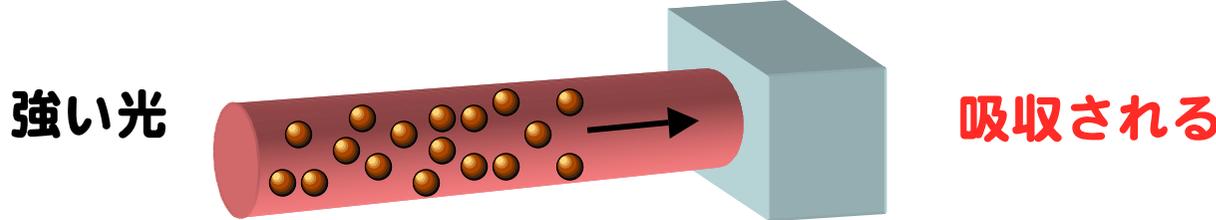
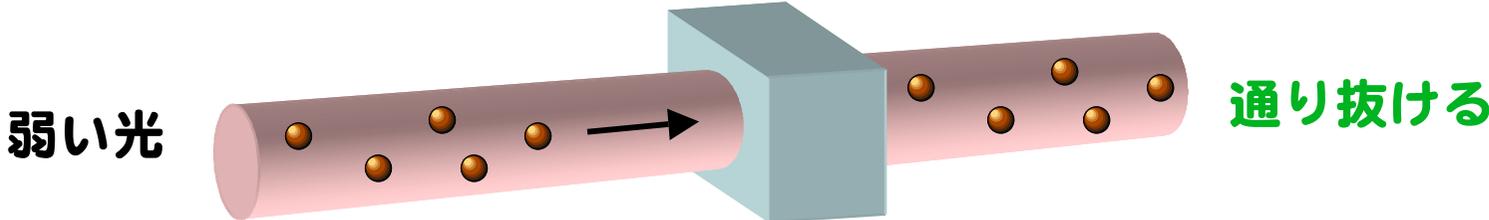


Institute for Laser Technology



# 多光子吸収

光の強度が高いと



# Si内部クラック形成実験



Institute for Laser Technology

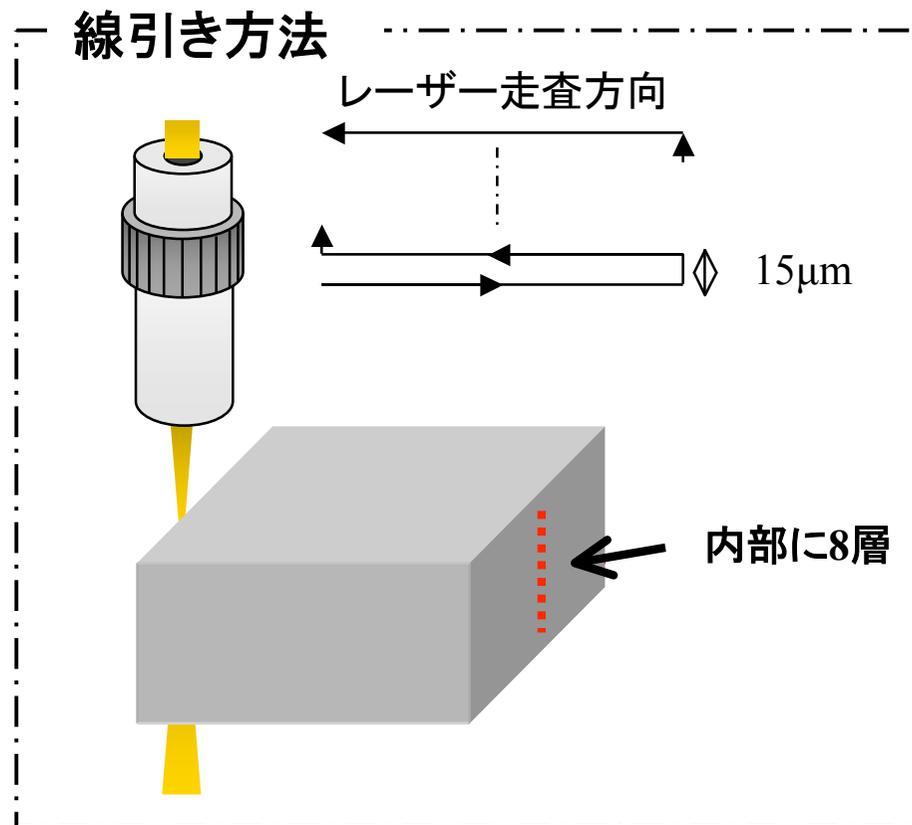


ILE OSAKA

## 実験方法

Si内部に焦点をしぼり、内部に8層線引きする。

その後、レーザー顕微鏡で観察する。

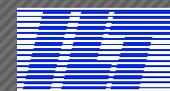


表面観察用 波長400nm



内部観察用 波長1300nm

# Si内部クラック形成実験



Institute for Laser Technology

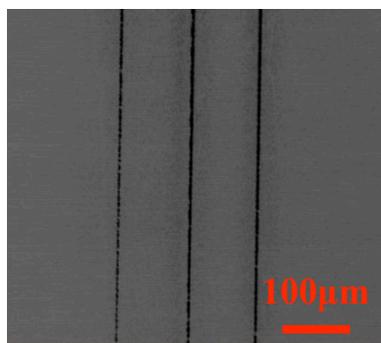


ILE OSAKA

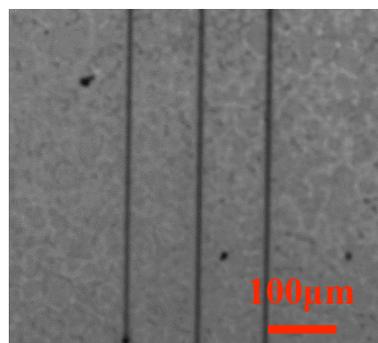
## 実験結果 (NAによる比較)

パルス幅200ps

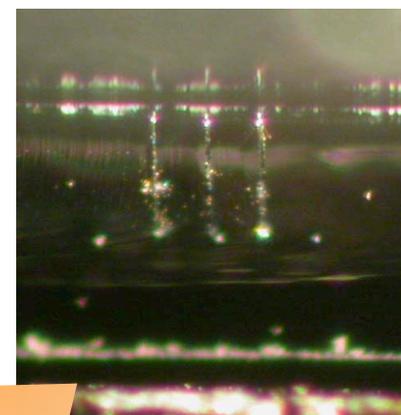
### NA0.5の場合



表面



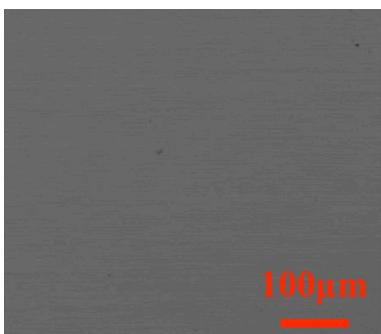
内部



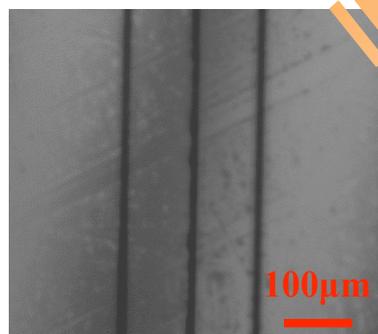
500μm

線引きと垂直に割って断面観察したもの

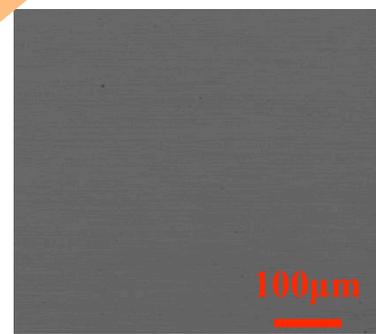
### NA0.7の場合



表面



内部



裏面

# Pyrexガラスへのレーザー光吸収：YAG (2 $\omega$ )

---

210 $\mu$ J

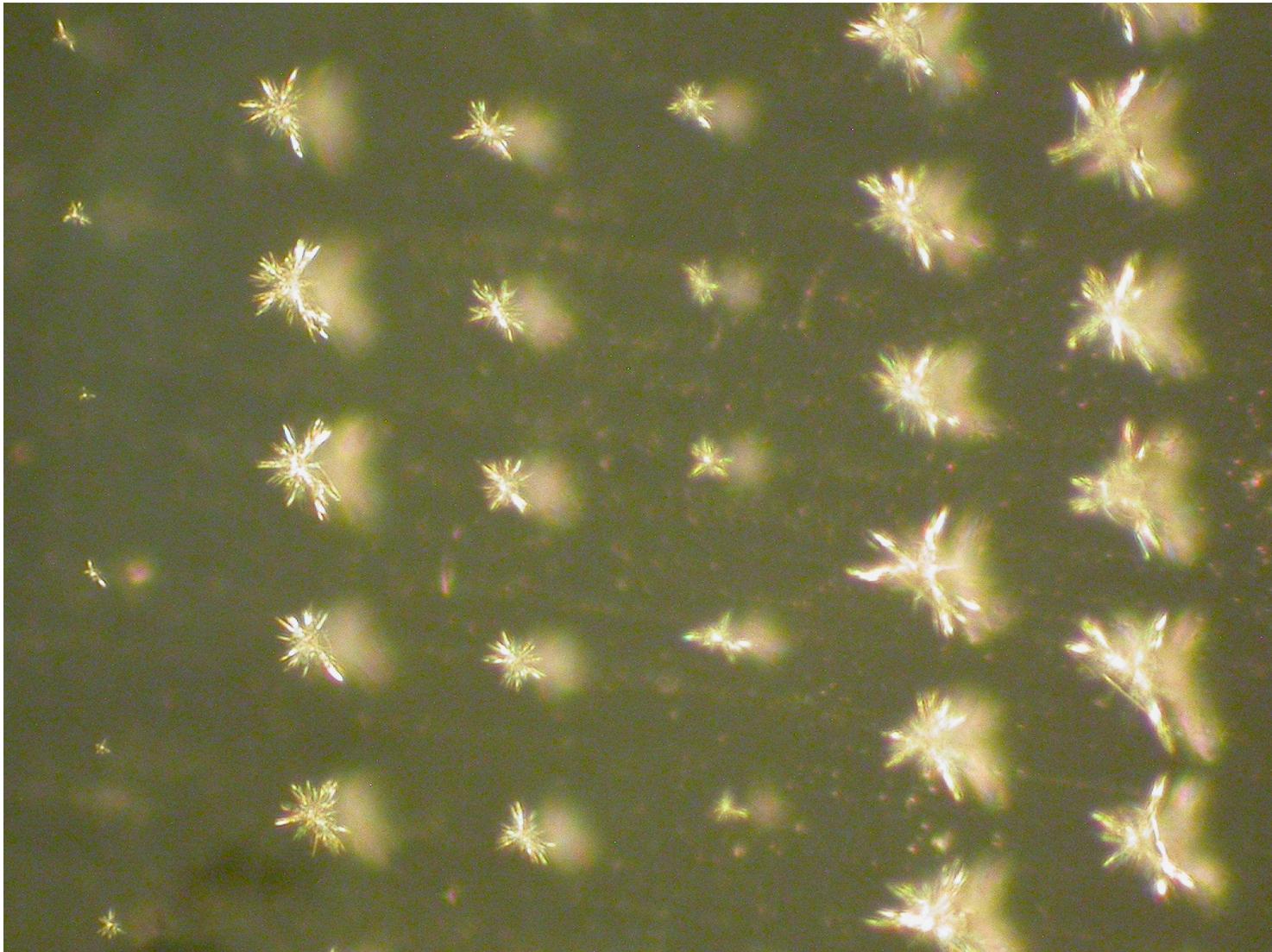
420 $\mu$ J

280 $\mu$ J

140 $\mu$ J

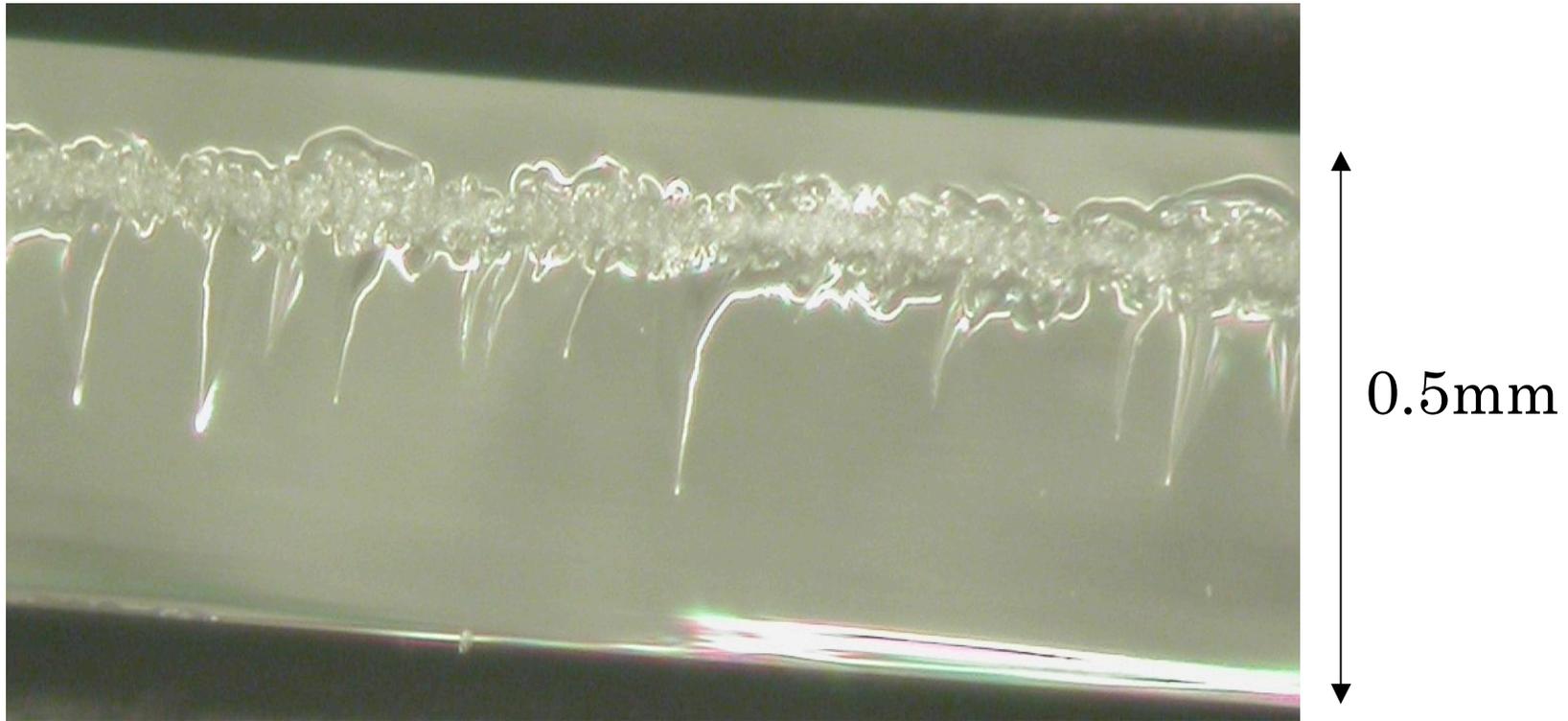
560 $\mu$ J

700 $\mu$ J



## Pyrexガラスへのレーザー光吸収：YAG (2 $\omega$ )

---



140 $\mu$ J、走査速度:500 $\mu$ m/secの条件でレーザー照射し、割断。

ナノ秒レーザーとフェムト秒レーザーによる  
クラックサイズの比較 (NA0.7対物レンズ使用)

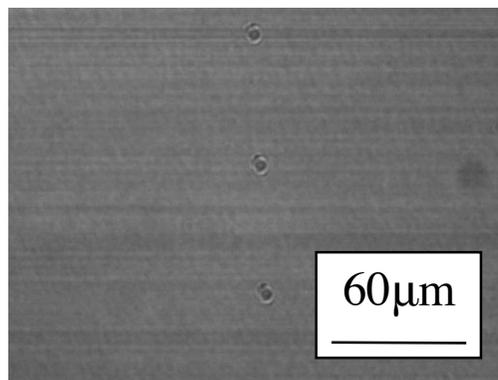


Institute for Laser Technology

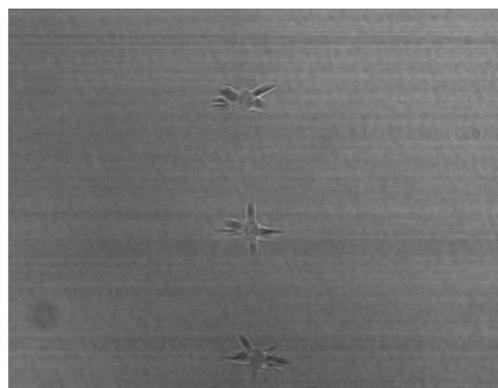


ILE OSAKA

800nm・100fs

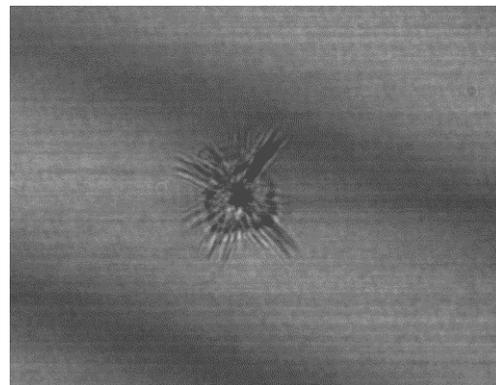


$\sim F_{th1}$

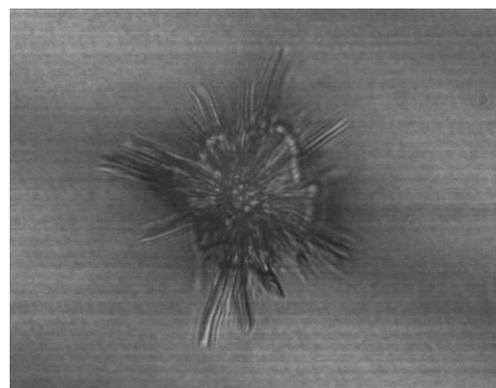


$\sim 3F_{th1}$

1064nm・6ns

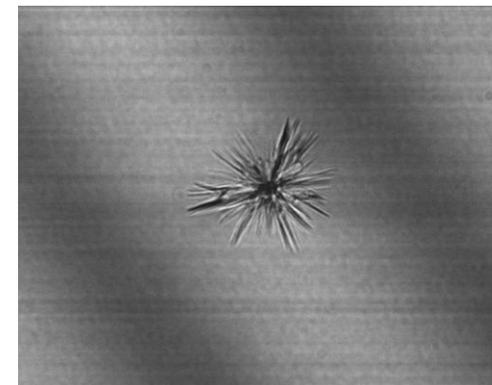


$\sim F_{th2}$

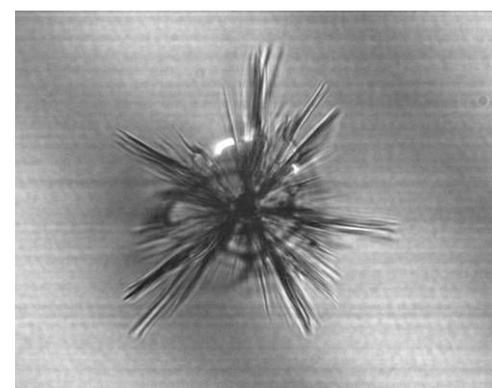


$\sim 3F_{th2}$

532nm・5ns



$\sim F_{th3}$



$\sim 3F_{th3}$

# 熱応力割断実験

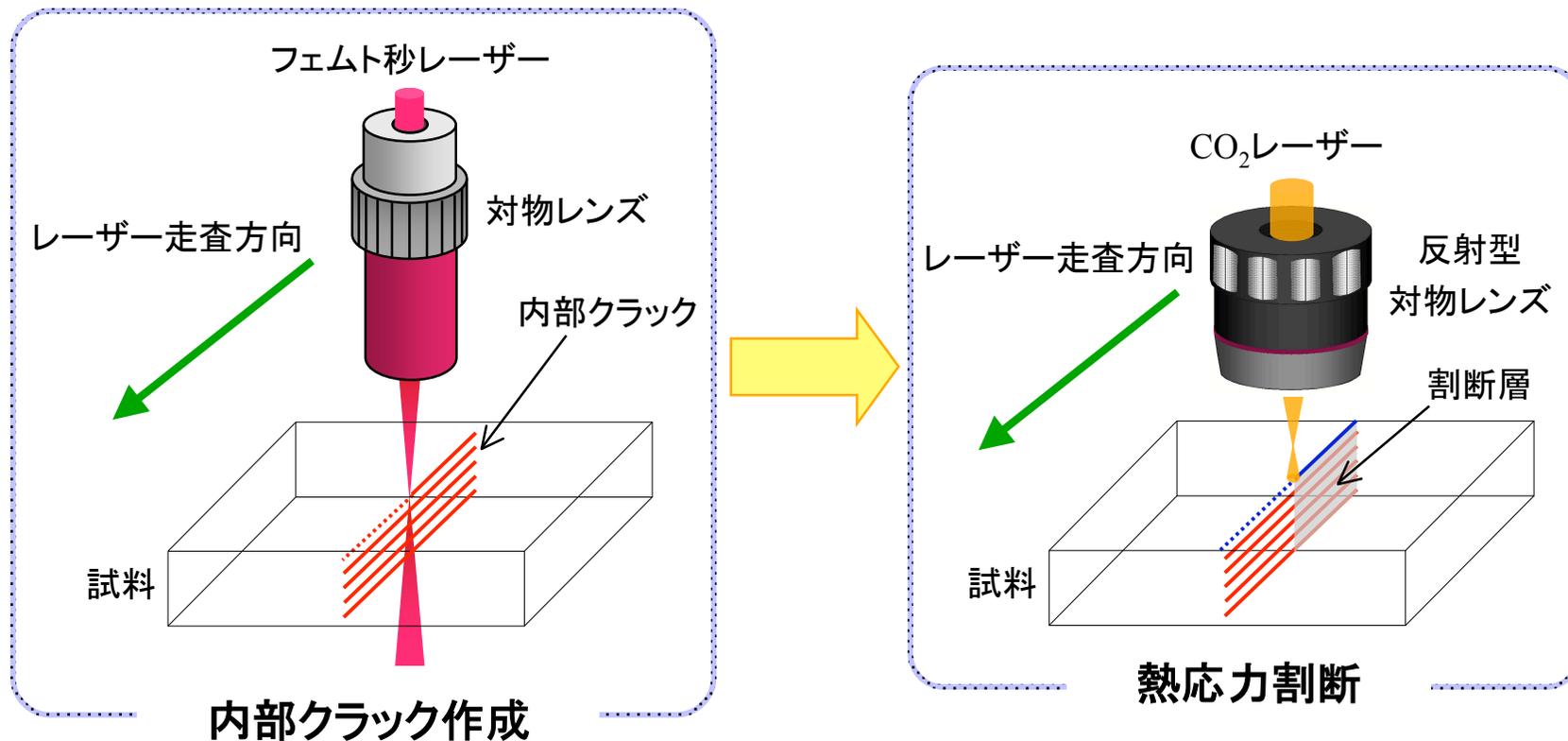


Institute for Laser Technology

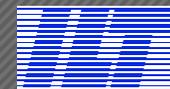


ILE OSAKA

フェムト秒レーザーで試料に内部クラックを作成した後に、試料表面にCO<sub>2</sub>レーザーを照射し、熱応力により割断する。



# 横方向加工精度の確認

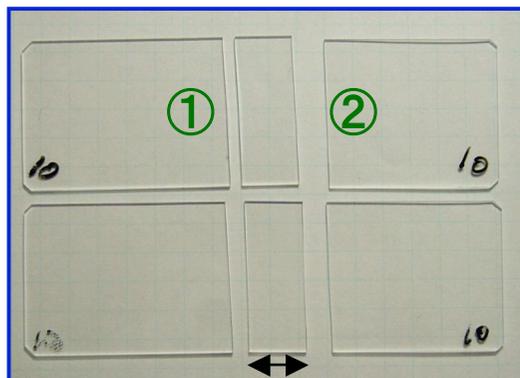


Institute for Laser Technology

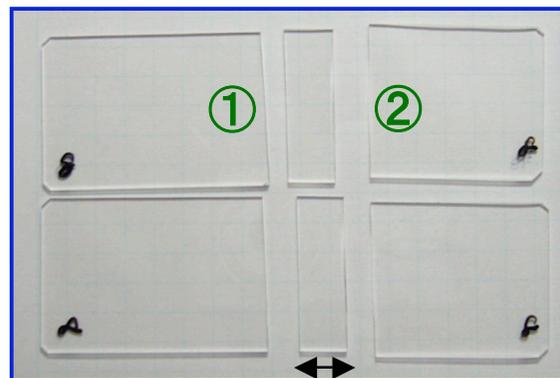


ILE OSAKA

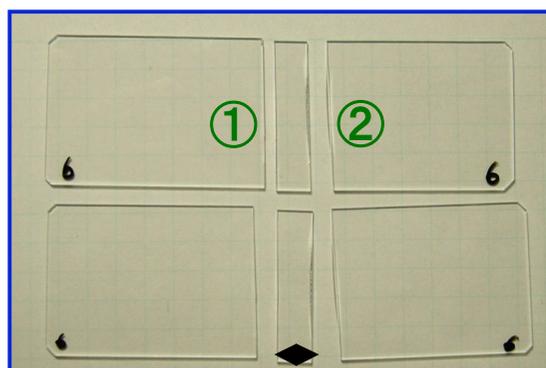
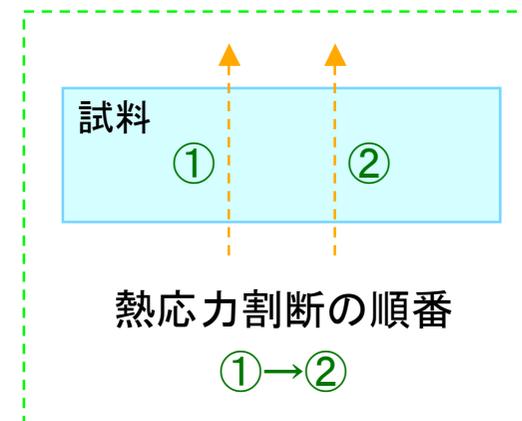
## (1) 熱応力割断(横方向の間隔変化)



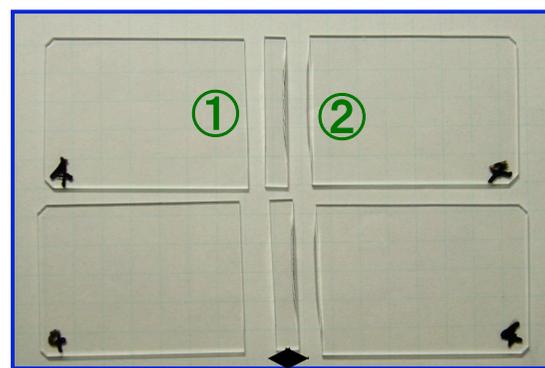
横方向間隔:10mm



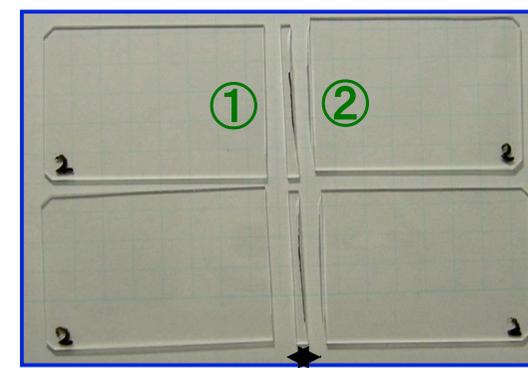
横方向間隔:8mm



横方向間隔:6mm



横方向間隔:4mm



横方向間隔:2mm

# 割断面の顕微鏡観察

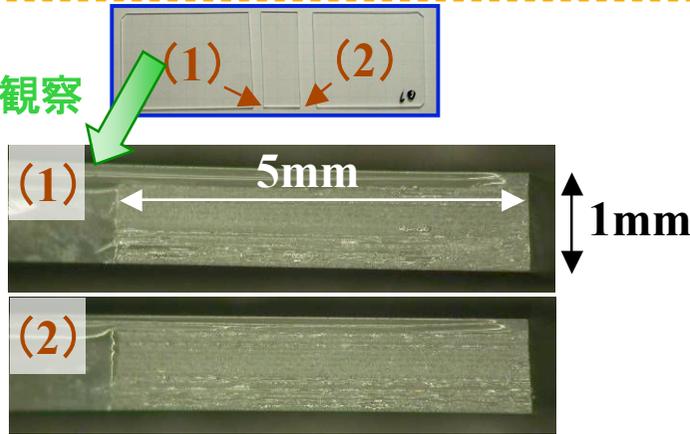


Institute for Laser Technology

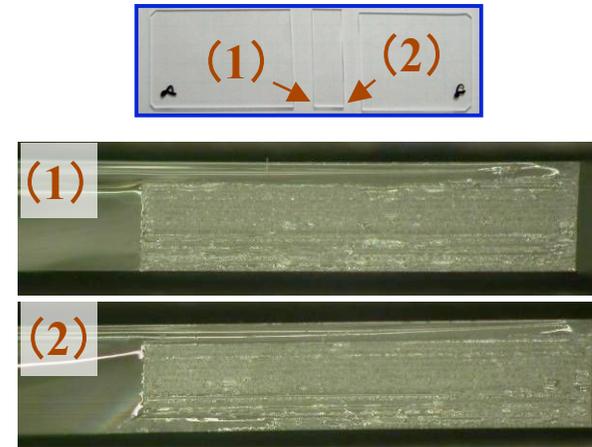


ILE OSAKA

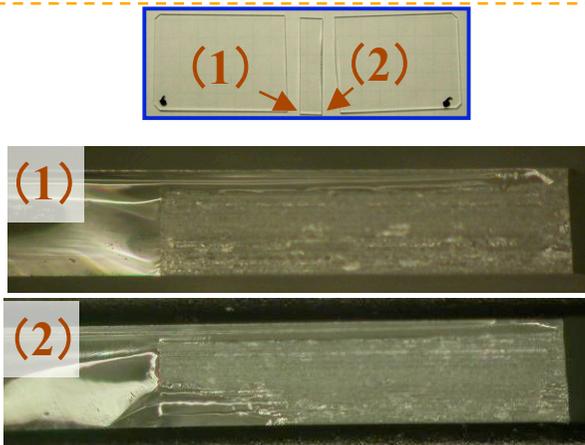
割断面観察



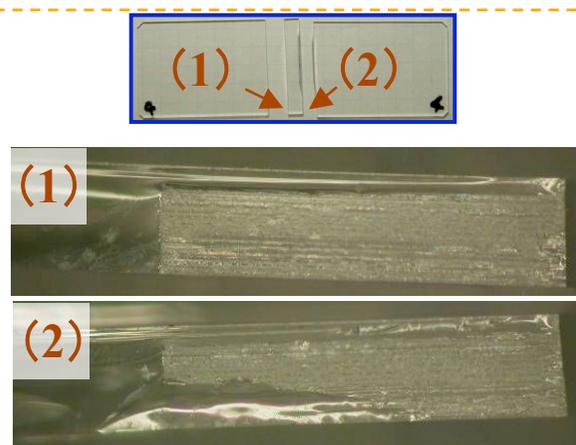
横方向間隔:10mm



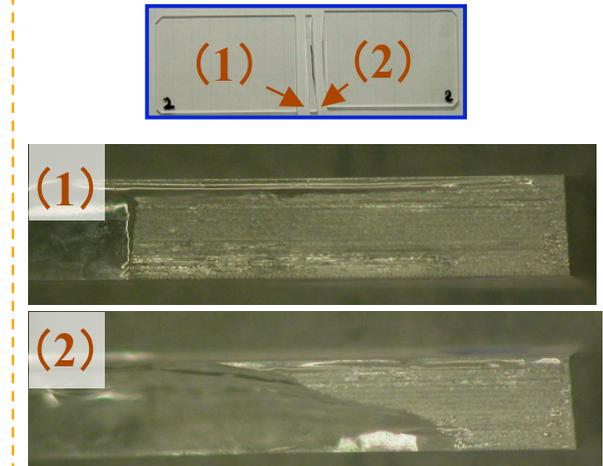
横方向間隔:8mm



横方向間隔:6mm



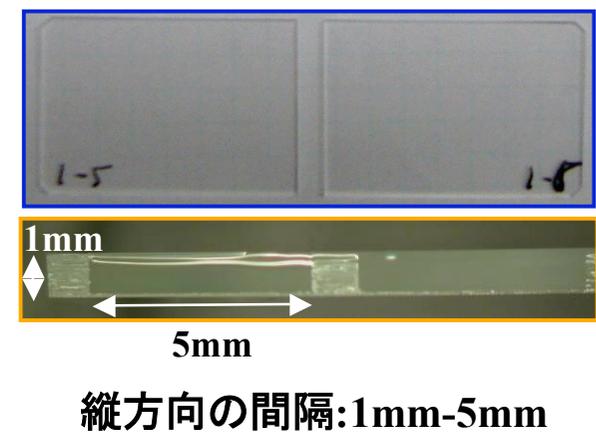
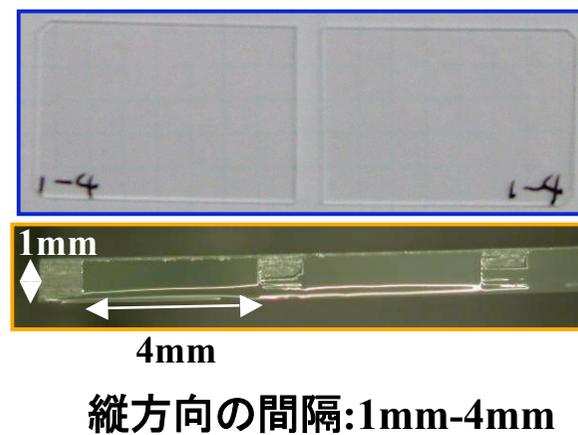
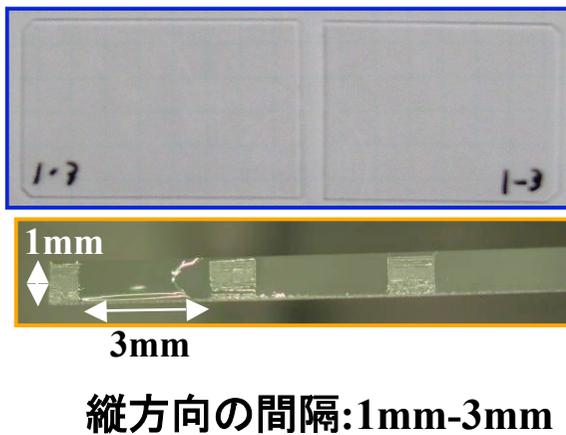
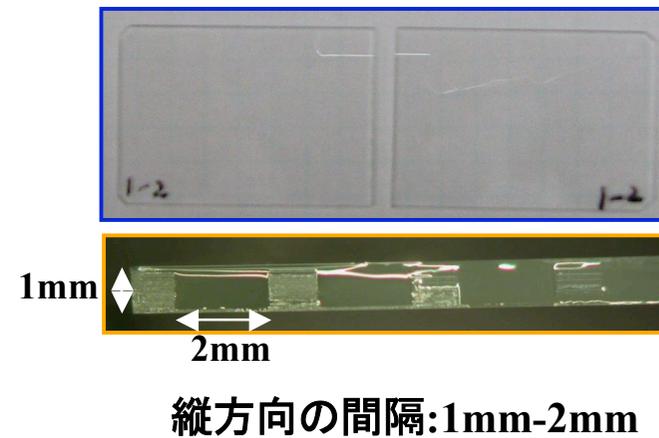
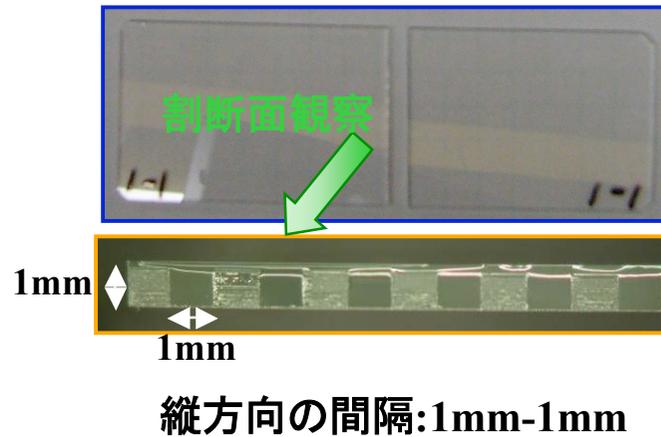
横方向間隔:4mm



横方向間隔:2mm

## (2) 熱応力割断(縦方向の間隔変化)

縦方向の間隔(内部クラック幅-空域幅)



# 十字加工によるガラスチップの切り出し



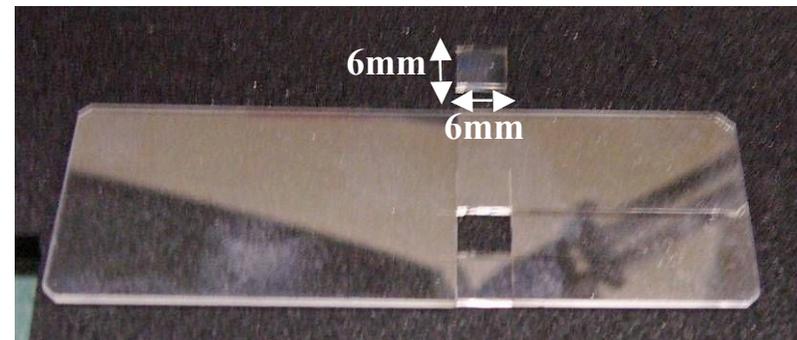
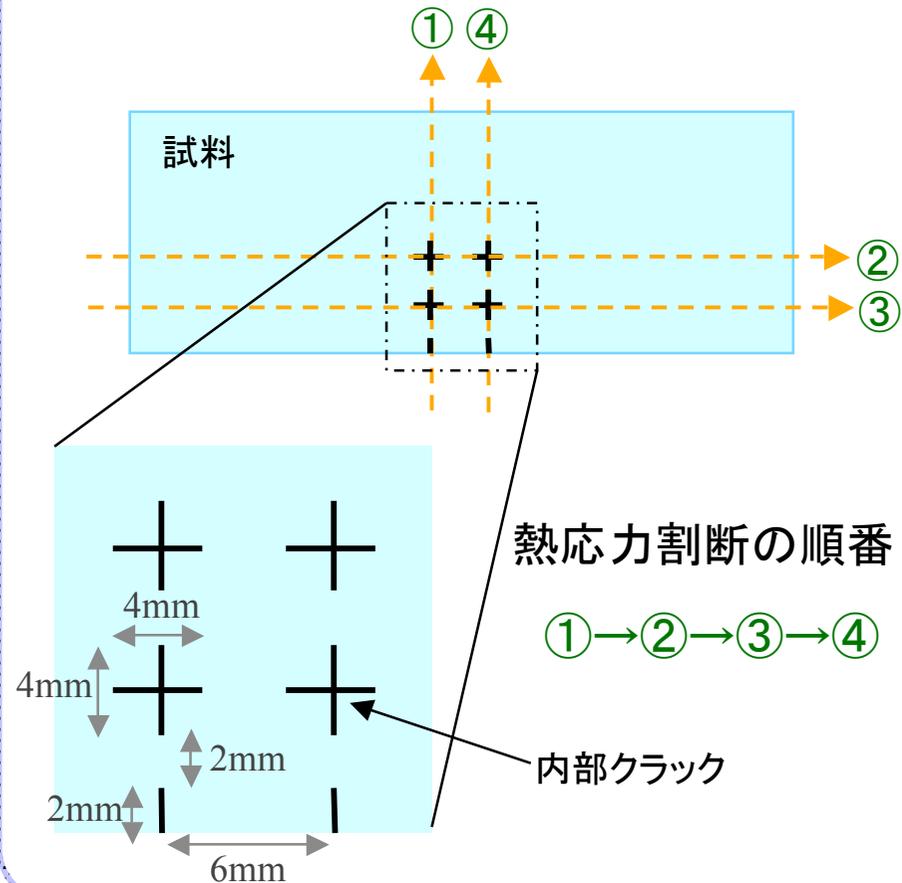
Institute for Laser Technology



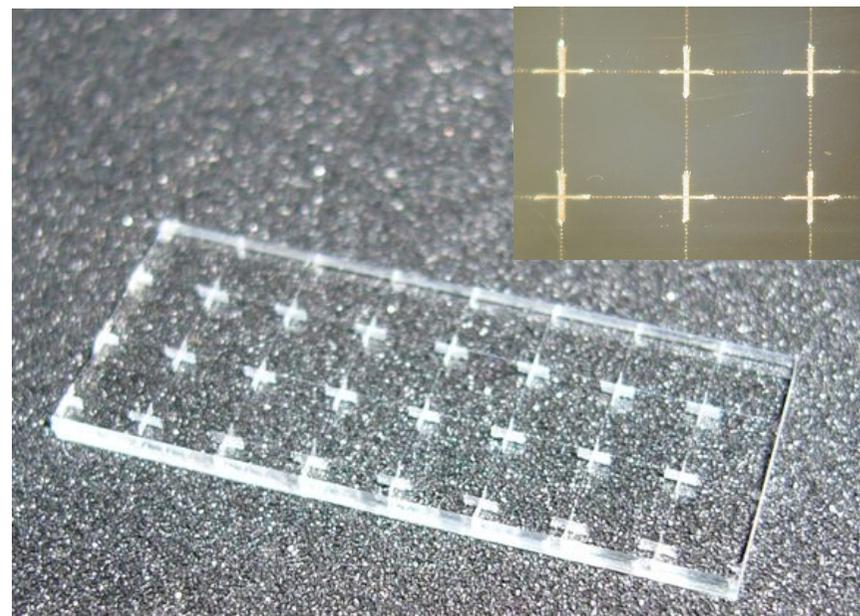
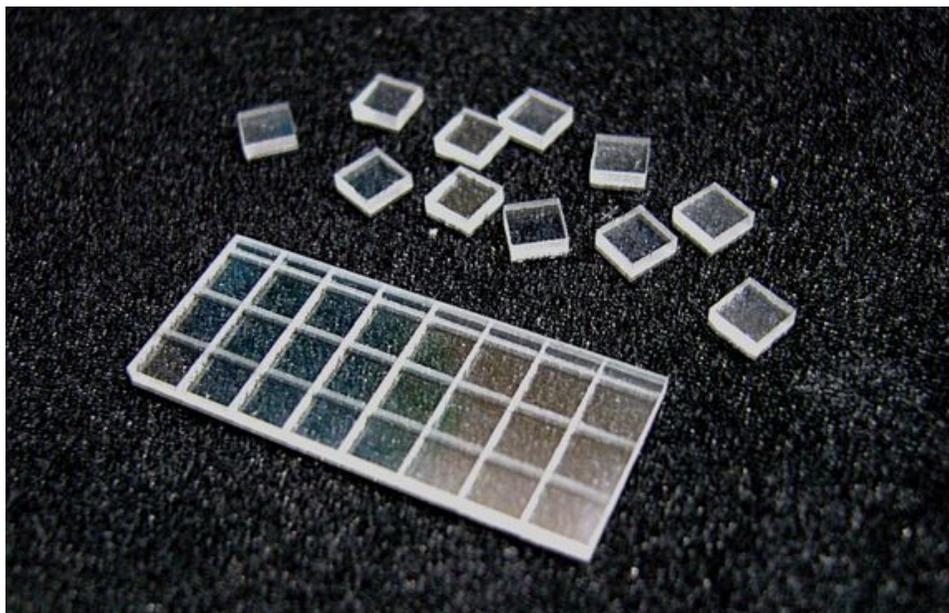
ILE OSAKA

## 実験方法

十字の内部クラックを作成した後、  
下記の順番で熱応力割断を行う。



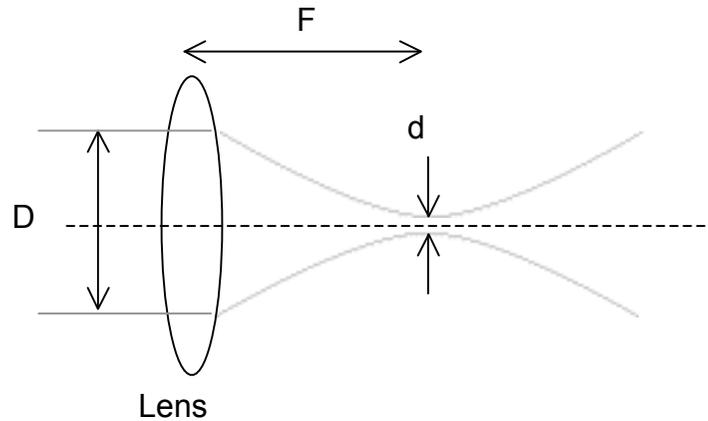
# パイレックスガラス(厚さ1mm)のデブリフリーダイシング(3mm $\square$ )



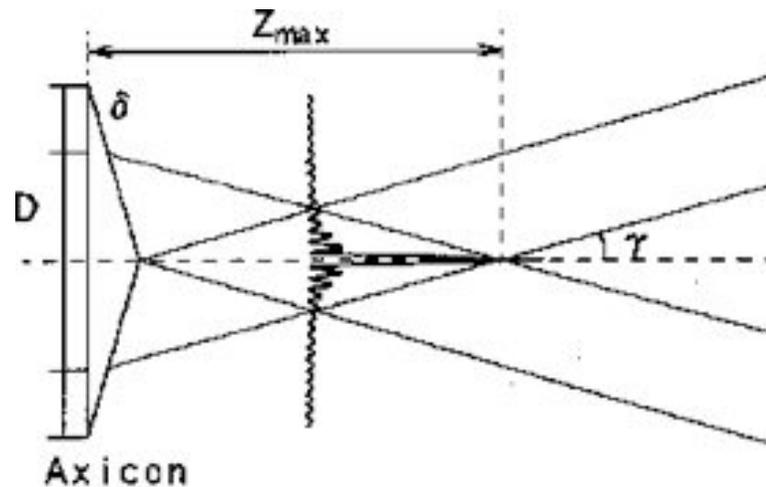
# ベッセルビーム集光

ガウスビームを通常の平凸レンズで集光すると、集光点ではガウス型の強度分布であるが、円錐レンズで集光するとベッセル関数で表される強度分布を実現できる。

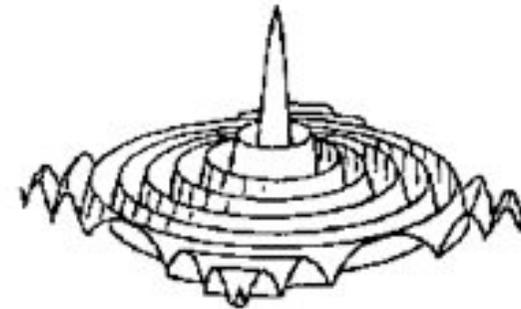
Gaussian



Bessel

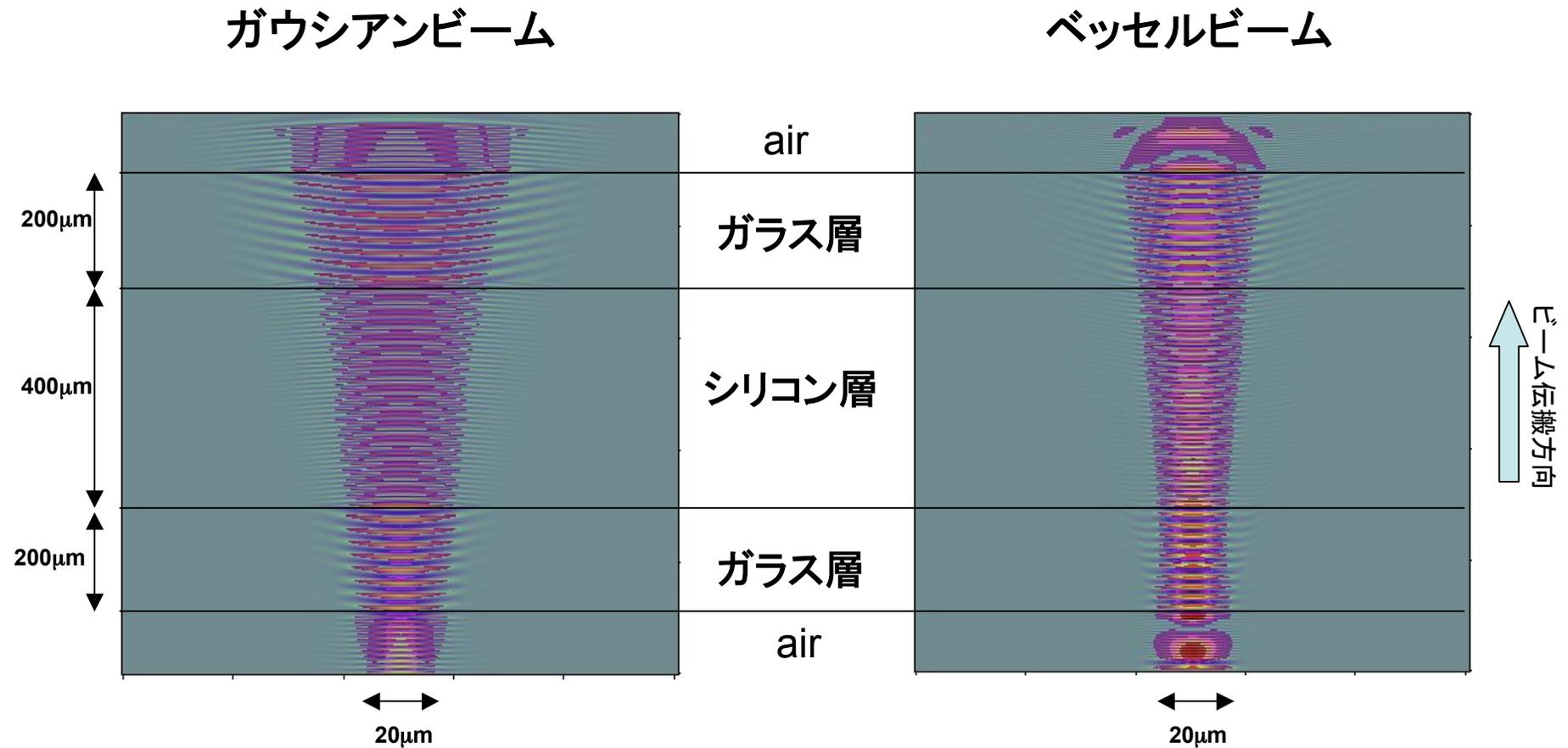


(a)



(b)

## 計算結果



- ・ベッセルビームの集光条件を最適化することでMEMSターゲット中でもスポット径を維持したままの長尺集光が可能であることが分かる。
- ・今後は実際のターゲット条件(厚み等)に近づけて最適化を行うとともに、実際の実験との比較を行う予定。

# 破損率評価試料の設計

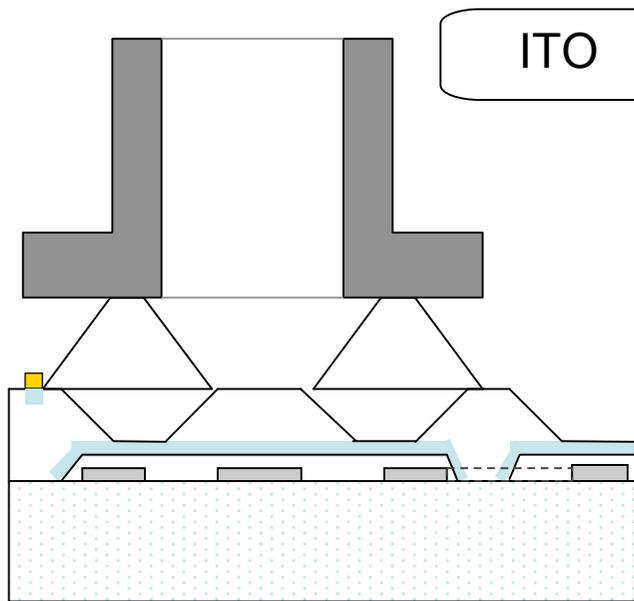
ダイシング時に予想される破損モード

1. 狭ギャップ(静電ギャップなど)へのごみの進入
2. 微細構造の貼り付き(水の浸入・乾燥による)
3. 微細構造の機械的破損
4. 接合部の剥離
5. ダイシングエッジのチッピング
6. 機能表面の汚損

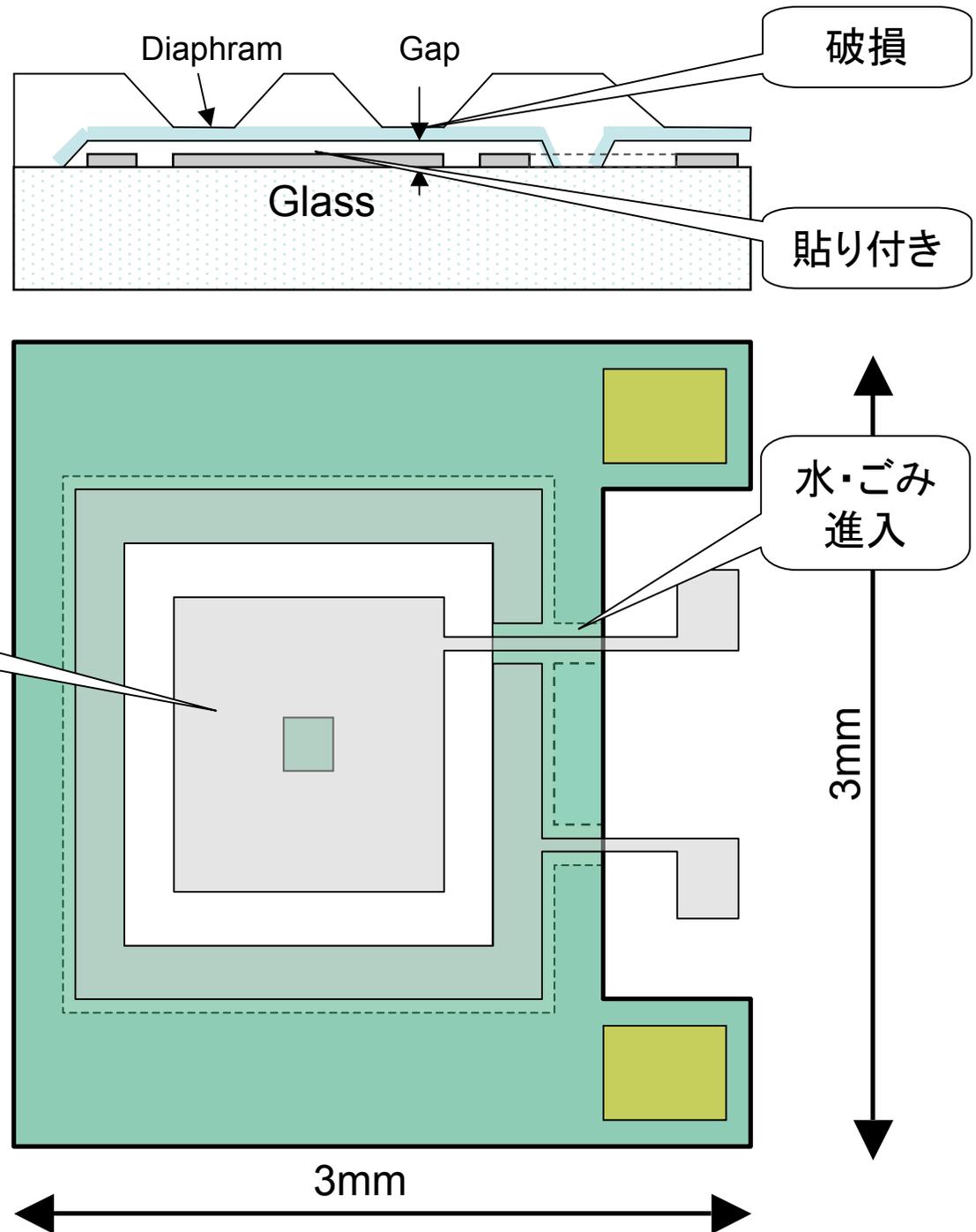
1～5の破損モードを評価でき、しかも、MEMSとして理にかなった試料を設計。

# 破損率評価試料

- キャパシタンス方式の力センサまたは圧力センサ(大気圧基準)を想定。
- シリコン/ガラスの2層構造, またはガラス/シリコン/ガラスの3層構造。
- シリコン層のみでも評価可能。



3層構造圧力センサ



# まとめ

- ・平成18年度の成果

多層MEMSを構成する代表的な材料であるガラス、Siの加工特性を定量化。  
単層厚肉材料のデブリフリーダイシングを実証。  
→ 10kHzレーザーで300mm/sの加工速度の可能性

- ・平成19年度以降の計画

多層構造体(ガラス/Si/ガラス)のデブリフリーダイシングの実証。  
破損率の定量的評価  
☆新技術開発項目:ホログラフィック集光、複合レーザー照射

セッション4:クロージング

# フラインMEMS知識データベースについて



財団法人マイクロマシンセンター

専務理事

青柳 桂一

# NEDO委託「ファインMEMS知識データベースの整備」

プロジェクトの成果

学会等の最新情報

ファインMEMS  
知識データベース

プロジェクト終了後は、

Web上で一般公開  
MemsONEに実装

研究開発メンバー

研究開発メンバー

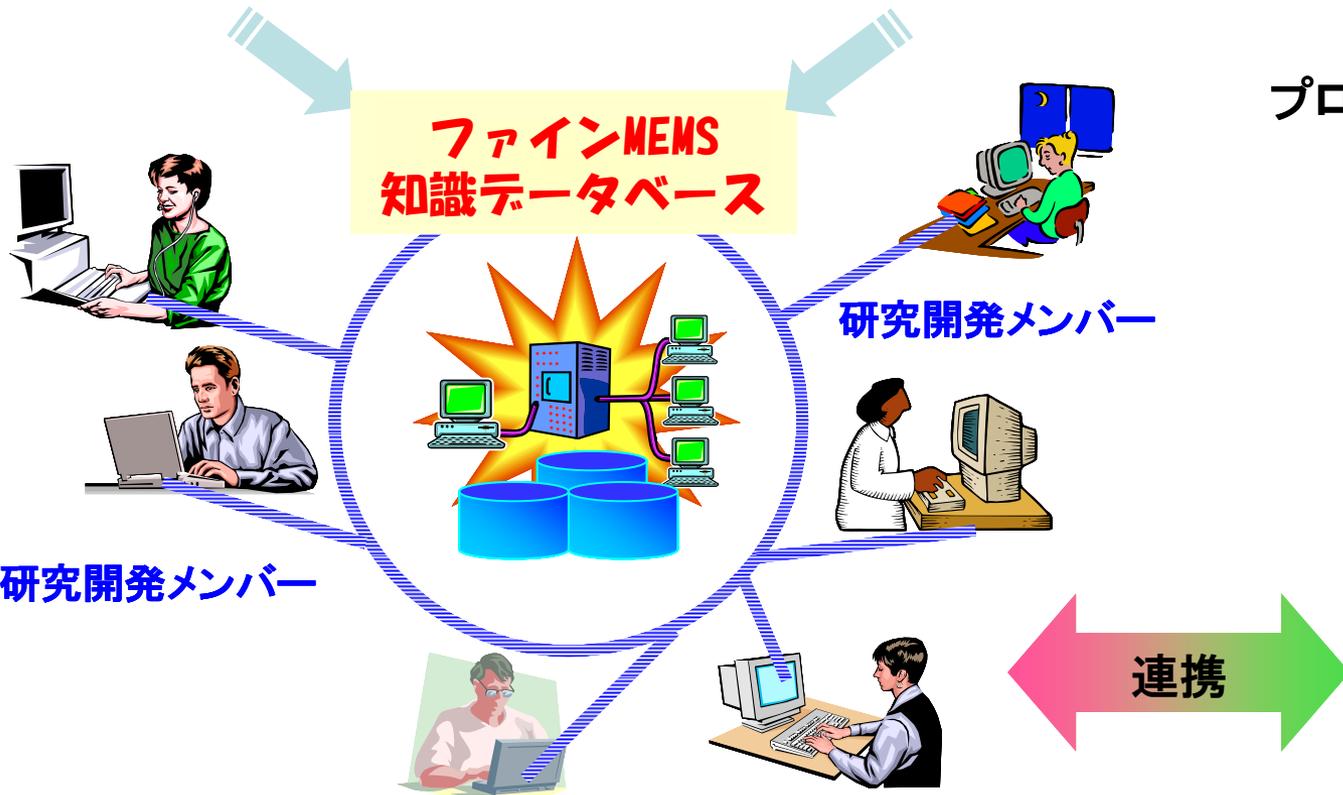
連携

MemsONE  
知識データベース

- プロセス
- デバイス
- 材料
- 解析

ウェブブラウザ、Wikiによる自由記述、閲覧

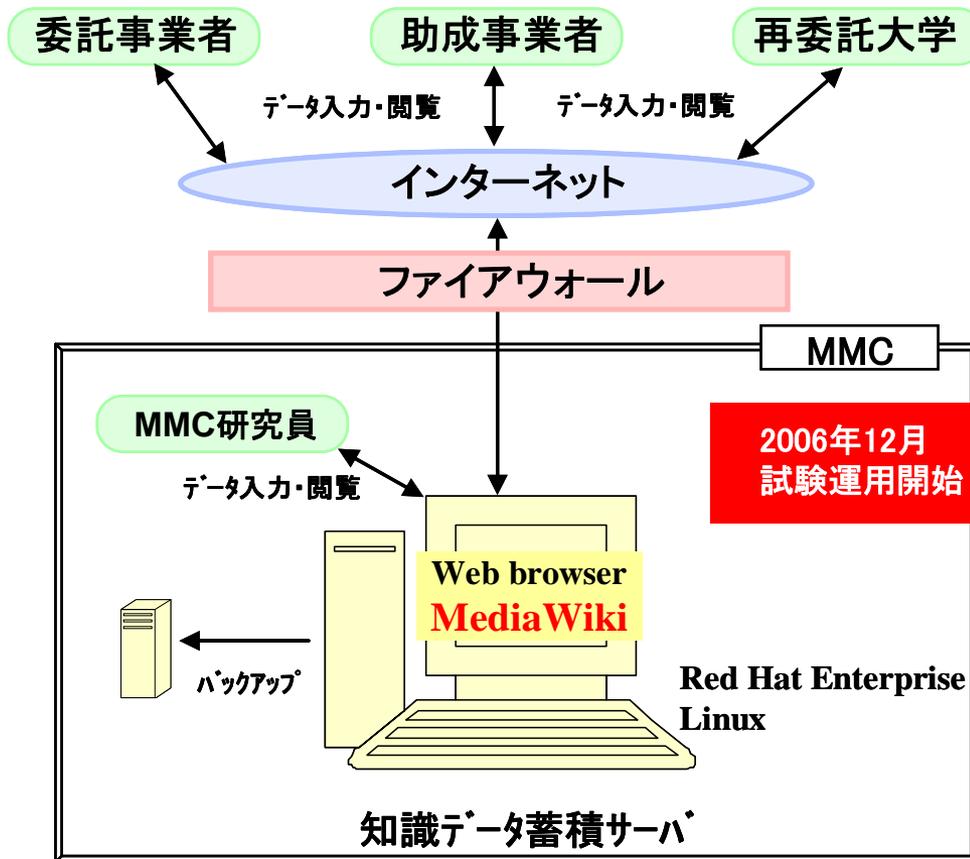
自由に「記事」を書き加えていくコラボレーションツール



# H18年度の成果 (1)

## 知識データベースシステム

- ・概念設計: Webブラウザ/MediaWikiによるDB概念設計完了
- ・システムの構築: Linuxサーバによるシステム構築
- ・試験的な運用: H18/12運用開始



## ファインMEMS知識DB委員会

(委員長: 下山勲 東京大学教授)

進捗管理  
システム改善  
データ収集

H18年度3回開催(9月、12月、2月)  
委員25名

# H18年度の成果 (2)

## 知識データの収集・体系化

知識データ登録件数; **477件**(H18年度) (3年間の目標: 1000件)

### 知識データ入力画面(メインページ)

メインページ

ファインMEMS 知識データベース 事例を入力するページです。

ユーザ毎の入力事例数

新規事例入力

新規に事例を入力する場合には、以下の入力フォームを利用して登録し

MEMS-ONEカテゴリ

材料特性  
半導体材料-単結晶シリコン  
熱特性-熱伝導率

ファインMEMSカテゴリ

プロセス統合モノシリック

事例タイトル

\*\*\*\*\*

新規事例入力

登録事例参照

以下のカテゴリを選択することにより、登録事例一覧が参照可能です。

- MEMS/ナノ機能複合技術
  - Category: ナノ機械構造
  - Category: 選択的バイオ修飾
  - Category: 選択的材料修飾
  - Category: ナノ機能デバイス化
- MEMS/半導体一体形成技術
  - Category: プロセス統合モノシリック
  - Category: センサ新原理
  - 縦方向配線
    - Category: CMOS/MEMS多層

### 入力データの進捗管理

ユーザ毎の入力事例数

| ユーザID     | ユーザ名            | 件数 | 貢献グラフ |
|-----------|-----------------|----|-------|
| Mmc       | マイクロマシンセンター     | 18 | ***** |
| Shimoyama | 下山勲             | 7  | ***** |
| Sugiyama  | 杉山正和            | 2  | **    |
| Hitachi   | 日立製作所           | 2  | **    |
| Aist-nano | 産総研ナノカーボン研究センター | 2  | **    |
| Omron     | オムロン            | 1  | *     |
| Aist-bio  | 産総研バイオニクス研究センター | 1  | *     |
| Mta       | 三田吉郎            | 1  | *     |

MEMS-ONEカテゴリ対応入力

ファインMEMSカテゴリ別入力

ファインMEMSカテゴリ別分類

シングルチップRFLSI向け低電圧駆動RF CMOS-MEMSスイッチ

目次 [非表示]

- 1 目的・更新履歴【必須】
- 2 項目の説明【必須】
- 3 構造
- 4 特性・性能・評価
- 5 文献情報・参考文献
- 6 コメント

作成・更新履歴【必須】

|            |     |
|------------|-----|
| 2006.12.26 | MMC |
|------------|-----|

項目の説明【必須】

RF CMOS-MEMSスイッチとCMOSエントロピーを集積した、単層RF CMOS-MEMSスイッチ駆動電圧3.3Vを実現。スイッチはウェハーレベルでパッケージングされ、両端を同導線で接続できるスイッチング繰り返し信頼性は10億回以上をクリアした。

構造

RF CMOS-MEMSスイッチの概念構成は図1、図2に示すとおりであるが、製造用回路が含まれるLSIにスタックして形成しており、CMOSレベルの駆動電圧で動作する。スイッチは安定動作のためにパッケージングされているが、単一チップに集積でき、通常のPINダイオードやFETスイッチより優れたパフォーマンスを示した。

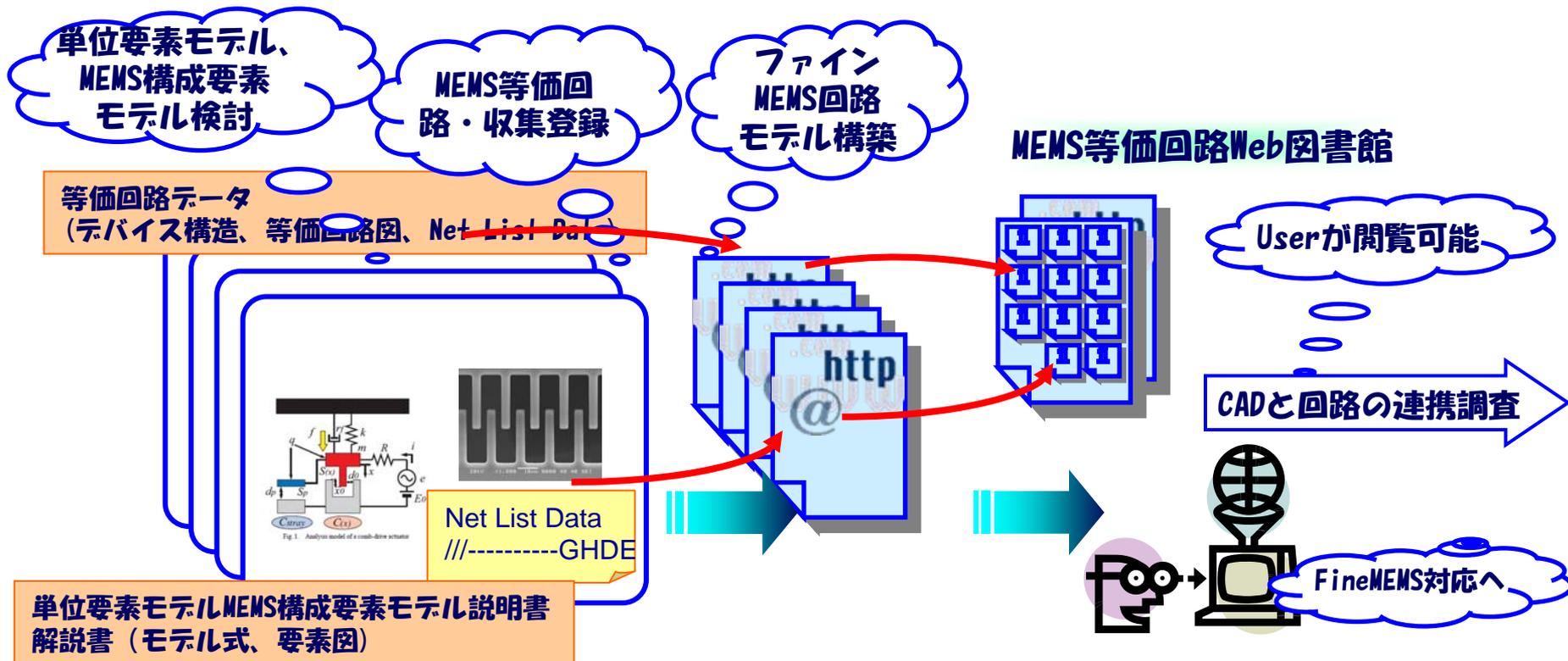
図1 RF CMOS-MEMSスイッチの概念図

図2 RF MEMSスイッチ部拡大図

入力データ例

# ファインMEMS システム化設計プラットフォーム研究開発

1. MEMS 構造体と異種材料との複合化や集積化に対応する統一的設計手法として等価回路モデルによるシステム化設計プラットフォームを開発
2. ファインMEMS実用化までの期間を大幅に短縮し、国内市場の更なる活性化と国際的な優位性を確保







**財団法人 マイクロマシンセンター**  
**Micromachine Center**

**ファインMEMSプロジェクト推進連絡会事務局**

〒101-0026 東京都千代田区神田佐久間河岸67 MBR99ビル6階

TEL: 03-5835-1870 FAX: 03-5835-1873

[fmems\\_office@mmc.or.jp](mailto:fmems_office@mmc.or.jp)