

2009.07.29 BEANSプロジェクトセミナー

# メーター級大面積高機能デバイス実現化戦略 ～高品位ナノ機能膜非真空連続形成とウィービングMEMS～

伊藤寿浩

BEANSプロジェクト Macro BEANSセンター長

産業技術総合研究所 集積マイクロシステム研究センター  
副研究センター長

# 大面積デバイスへの期待

## “Ambient Devices: アンビエントデバイス”

(日経MICRODEVICES 2009/7 No.289)

- 実世界のありふれたモノに、多様かつ大量の入出力素子を作り込む
- アンビエント・デバイスの進化：  
    デバイスの面積×機能×利用する場所 
- 「入力機能」と「出力機能」を環境や人との親和性に優れる
- 想定使用例
  - 入力機能の分散配置
    - モニタリング：自動車ボディ・モニタ・システム
    - 集合知：次世界検索
  - 出力機能の分散配置
    - 大面積化：壁面ディスプレイ
    - 情報の見える化：薬の名称や服用方法を見せる机
    - 誘導：サイネージでの誘導
  - 入出力機能の分散配置
    - 双方マーケティング：消費者の状態に応じた広告

# 大面積デバイスの課題と Macro BEANSの戦略

## <課題>

- ・プロセス装置の大型化
- ・デバイスの高機能化・高性能化
- ・基板の大型化
- ・製造プロセスの連続化・高速化
- ・デバイスのフレキシブル化

“脱・真空チャンバー”  
で高品位シリコン膜の大面積低温成膜

繊維状基材のリールツーリールプロセスと  
機織りでフレキシブルデバイス  
“Weaving MEMS”

# Macro BEANSの全体像

## 大面積エネルギーハーベスティングデバイス



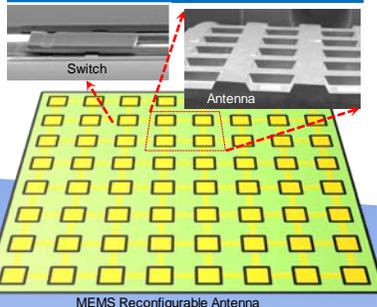
光電効果・ピエゾ抵抗効果・熱電効果・ゼーベック効果  
・ペルチェ効果を利用した大面積Siデバイス

## メーター級大面積デバイス

マイクロ・ナノ構造を有する高品位機能膜をメーター級の基板に真空プロセス装置を用いずに形成する製造技術を開発する

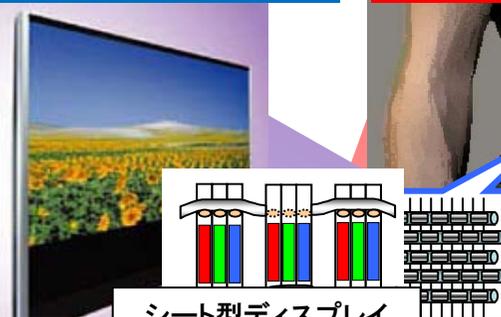
非真空高品位ナノ機能膜大面積形成プロセス技術

## 大面積通信デバイス



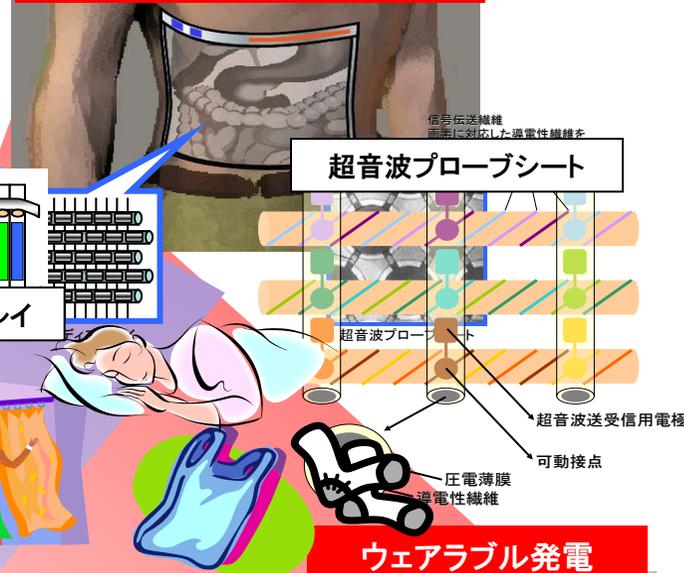
MEMS Reconfigurable Antenna

## 大面積映像デバイス

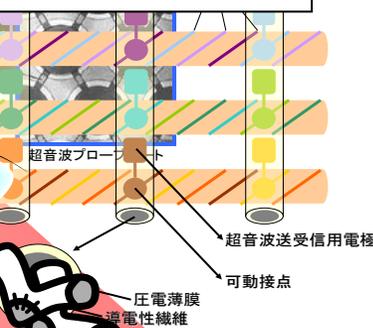


シート型ディスプレイ

## シート型健康管理デバイス



超音波プローブシート



ウェアラブル発電

## フレキシブルシートデバイス

フレキシブルシートデバイスを基板の大面積化を伴うことなく実現する、製織技術などを活用した新たな製造技術を開発する

安全安心ジャケット

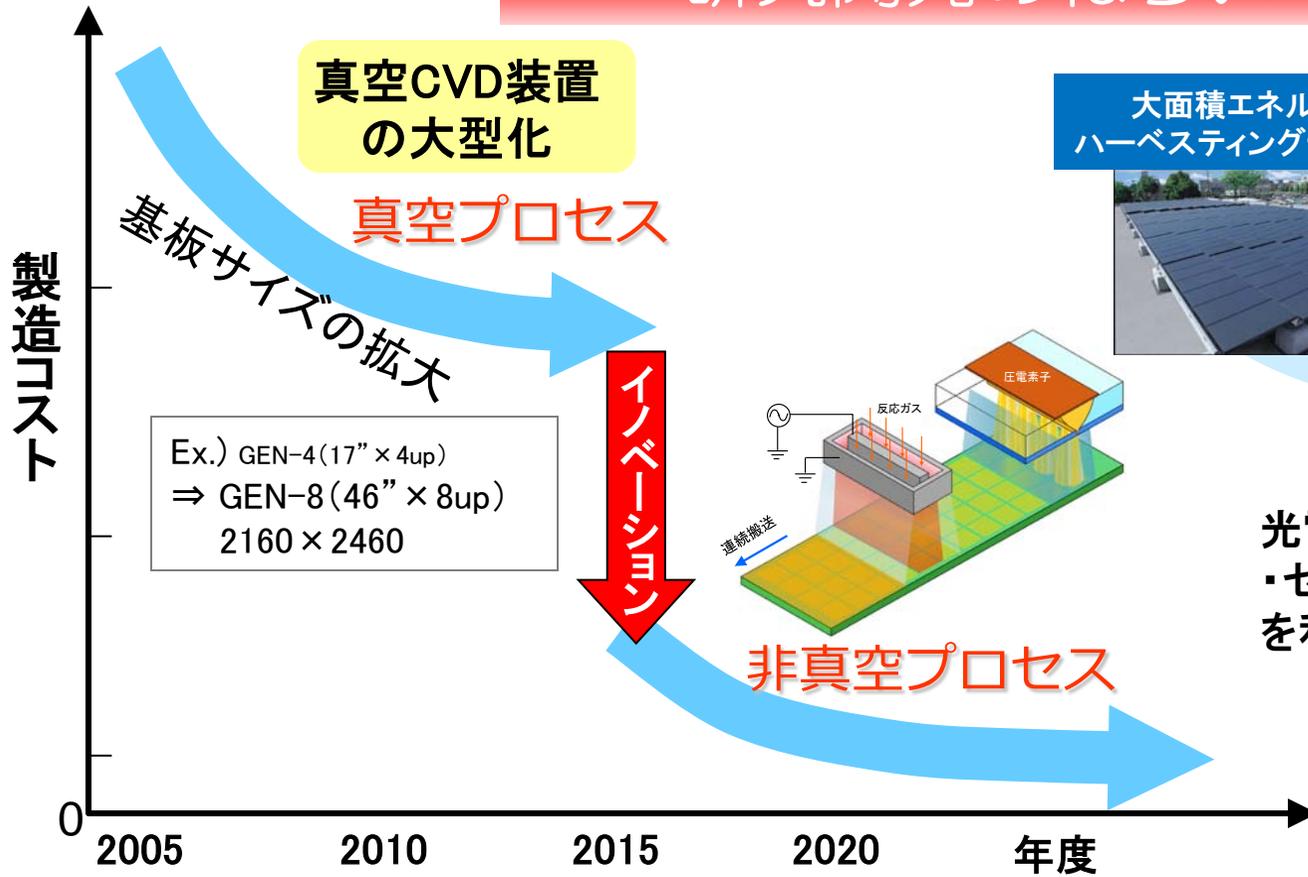
繊維状基材連続微細加工・集積化プロセス技術

# Macro BEANS センター

## 非真空と製織で拓く 大面積デバイスの連続製造

(1) 脱・真空チャンバーで狙う  
プロセス革新

# 研究開発のねらい



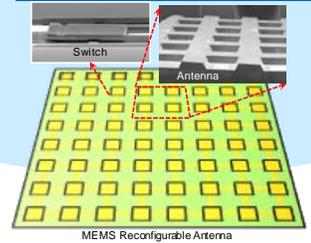
大面積エネルギーハーベスティングデバイス



大面積映像デバイス



大面積通信デバイス



光電効果・ピエゾ抵抗効果・熱電効果  
・ゼーベック効果・ペルチェ効果  
を利用した大面積Siデバイス

大型真空チャンバー・特殊ガス設備からの脱却  
⇒ 設備投資・ランニングコストの大幅低減

非真空製造プロセスの実現に向け開発する要素技術

① 大気圧プラズマ技術

② ナノ材料均質塗布技術

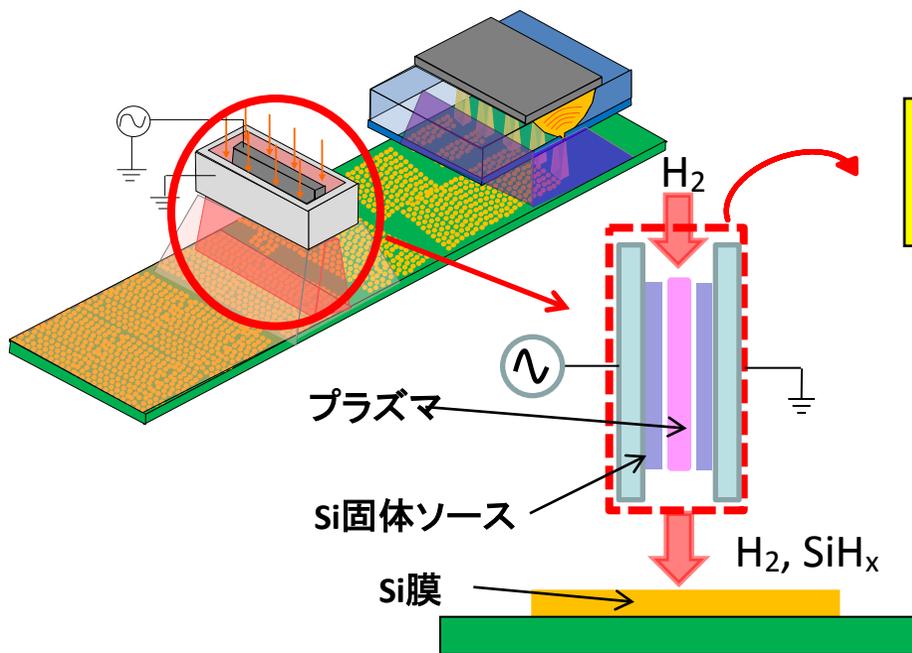
③ 局所環境制御技術

# 大気圧下 高品位シリコン成膜技術の開発

## 研究概要

非真空・大面積に対応するために

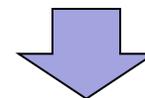
- |               |                                     |
|---------------|-------------------------------------|
| ◆大気圧下で適用可能    | ⇒ 大気圧プラズマ技術                         |
| ◆チャンバーレスに対応可能 | ⇒ SiH <sub>4</sub> などを用いないプラズマ化学輸送法 |
| ◆連続的に成膜可能     | ⇒ 噴き出し型(リモート型)装置                    |



平行平板電極装置を用いて大気圧プラズマ化学輸送法によるシリコン成膜の開発

### ★課題

- ・大気圧下での安定放電
- ・プラズマ化学輸送法による成膜
- ・膜特性把握



噴き出し型装置へ展開

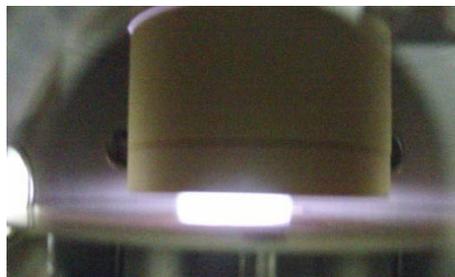
[プラズマ化学輸送法]+[噴き出し型]

成膜寄与種生成

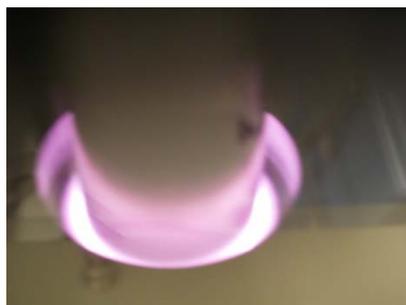
任意位置に成膜

# 大気圧下放電での課題と対策

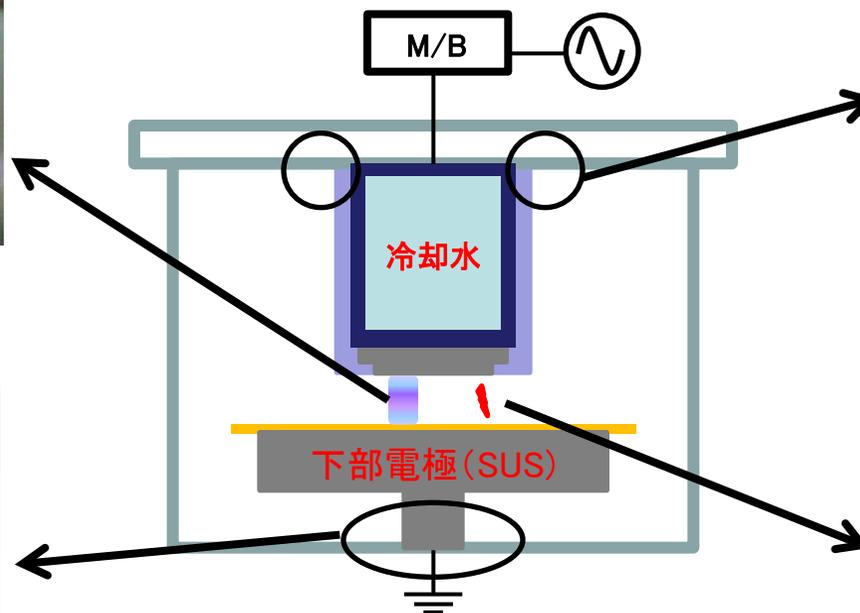
- ◆空隙はイオン衝撃によって生じた2次電子の電離増倍が生じやすい
- ◆高圧下では電離増倍が不均一になりやすい



部分的に放電  
放電不安定



空隙が放電  
⇒対策:銅箔で電位固定



実験機



空隙が放電  
⇒対策: Auメッキ処理  
(特許提出)

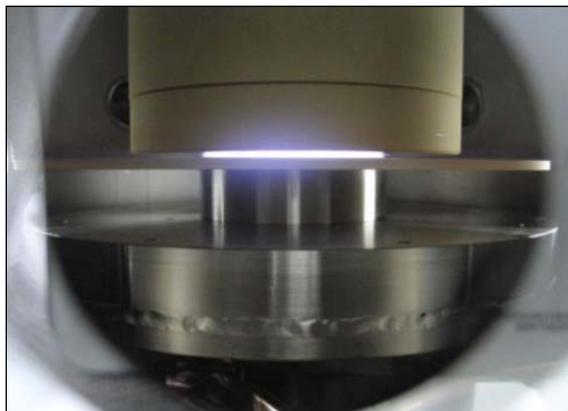
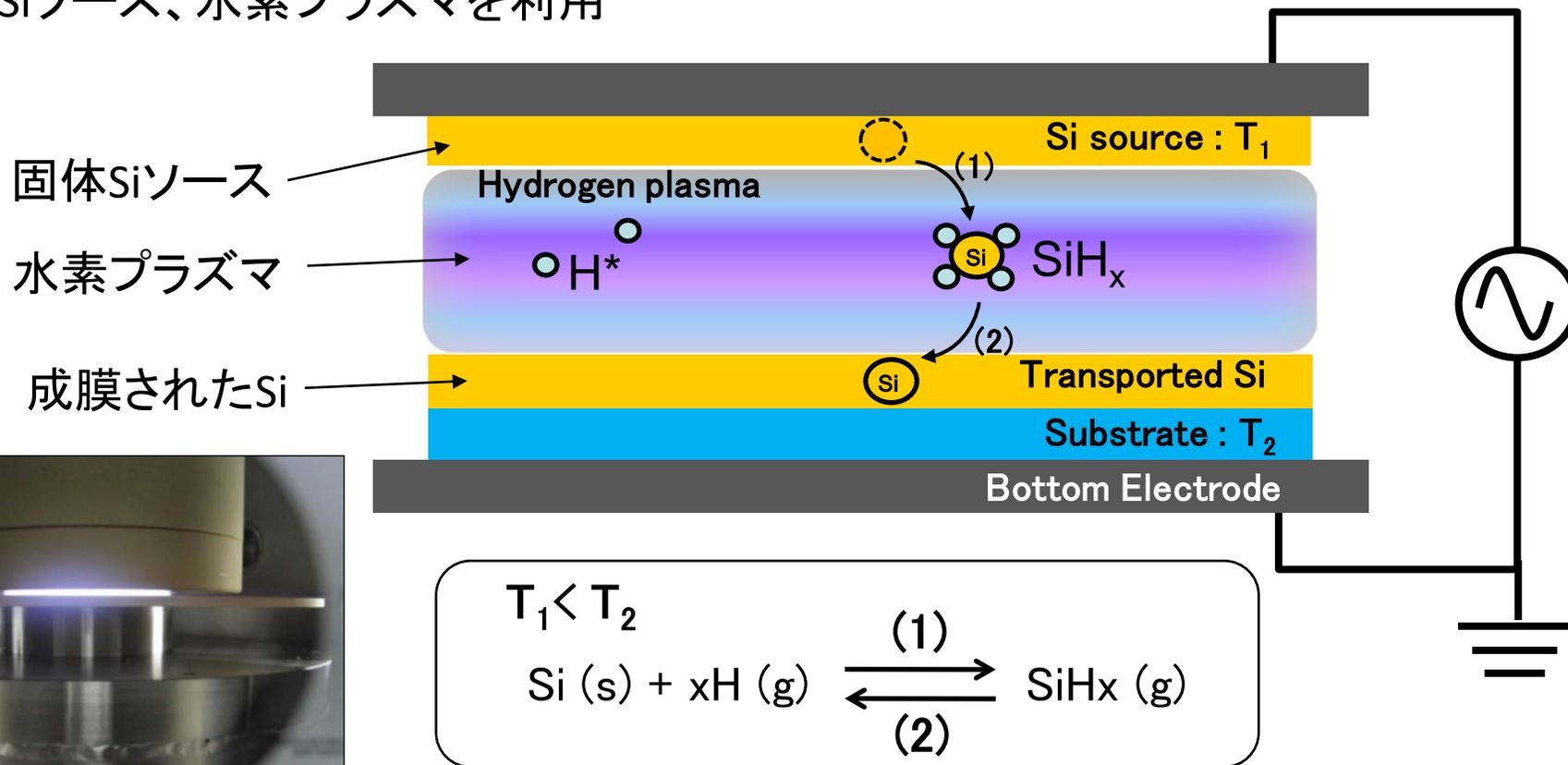


アーク放電  
(基板の破損・熔融)

# 成膜原理

## ◆プラズマ化学輸送法

固体Siソース、水素プラズマを利用

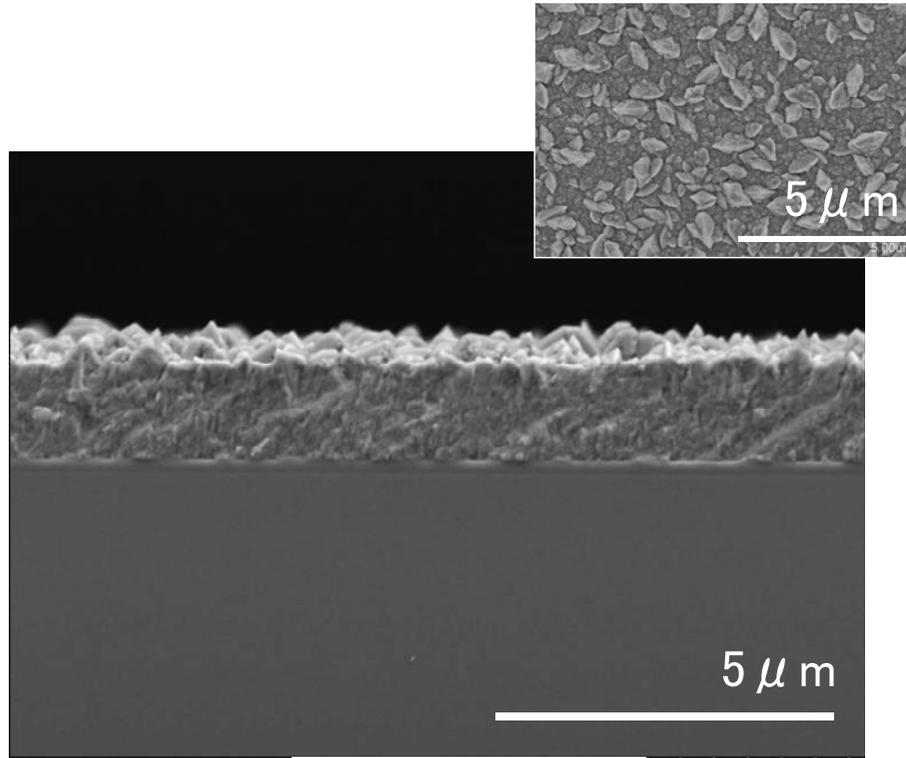


上下電極間に温度差を設けることで、Siを輸送・成膜する

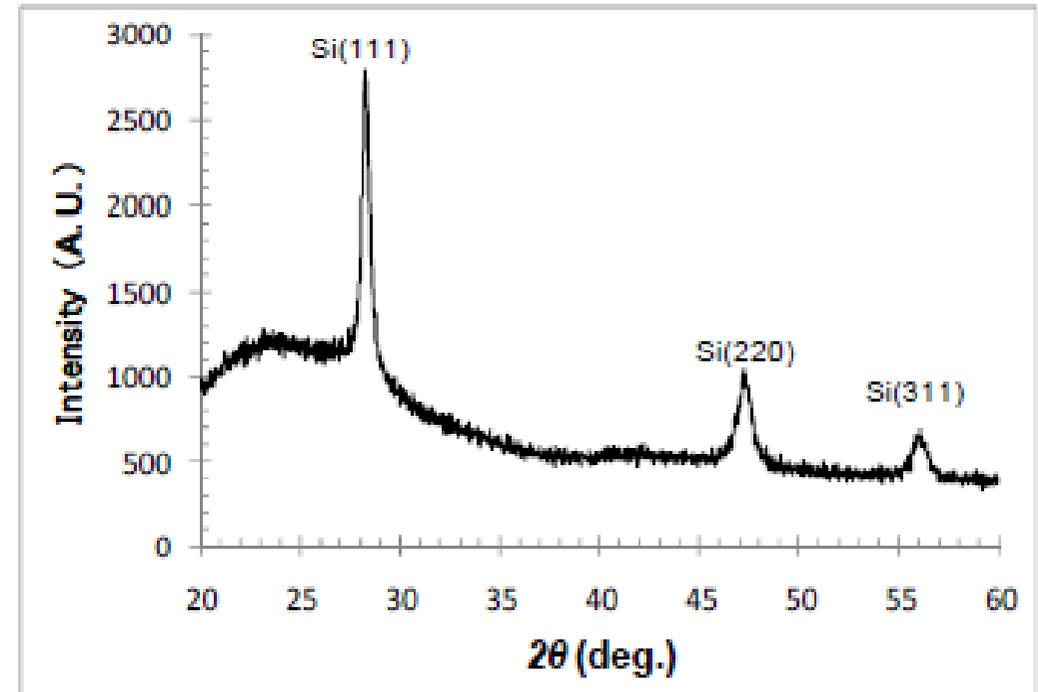
⇒ 低温成膜の可能性もある。

# 大気圧下 (700Torr) でのシリコン成膜

電極での電力密度向上や不要放電抑制  
⇒安定グロープラズマの放電条件範囲を拡大



SEM写真



膜のX線回折パターン

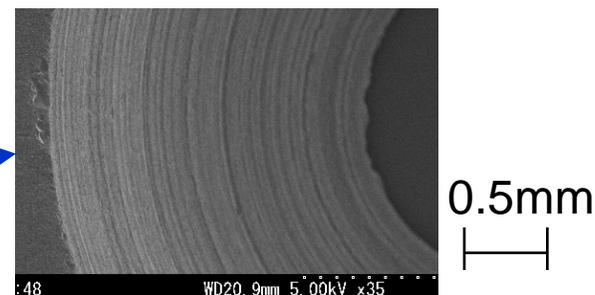
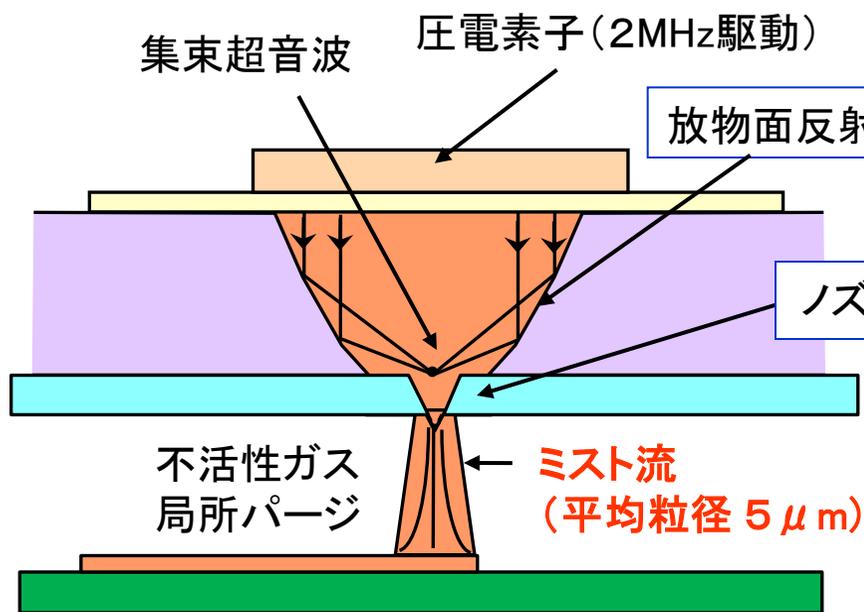
- ✓水素混合ヘリウムガスでの大気圧下 (700Torr)における放電条件確立
- ✓大気圧下、300°Cで多結晶シリコンを成膜

# ミストジェット均質塗布技術

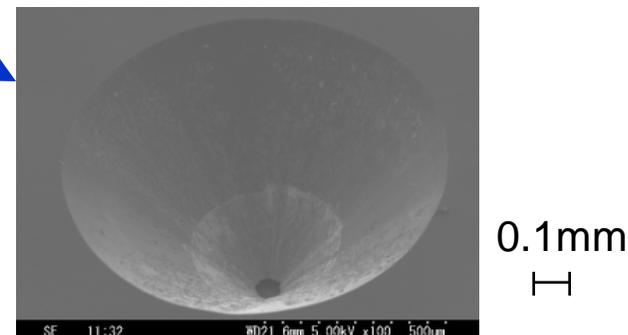
## 研究概要

利点：一滴ずつ吐出するインクジェット技術と異なり、超音波エネルギーの利用により、平均粒径数  $\mu\text{m}$  のミストを連続的に吐出可能

ねらい： Si微粒子分散液の均質塗布、かつ高純度な塗布膜形成



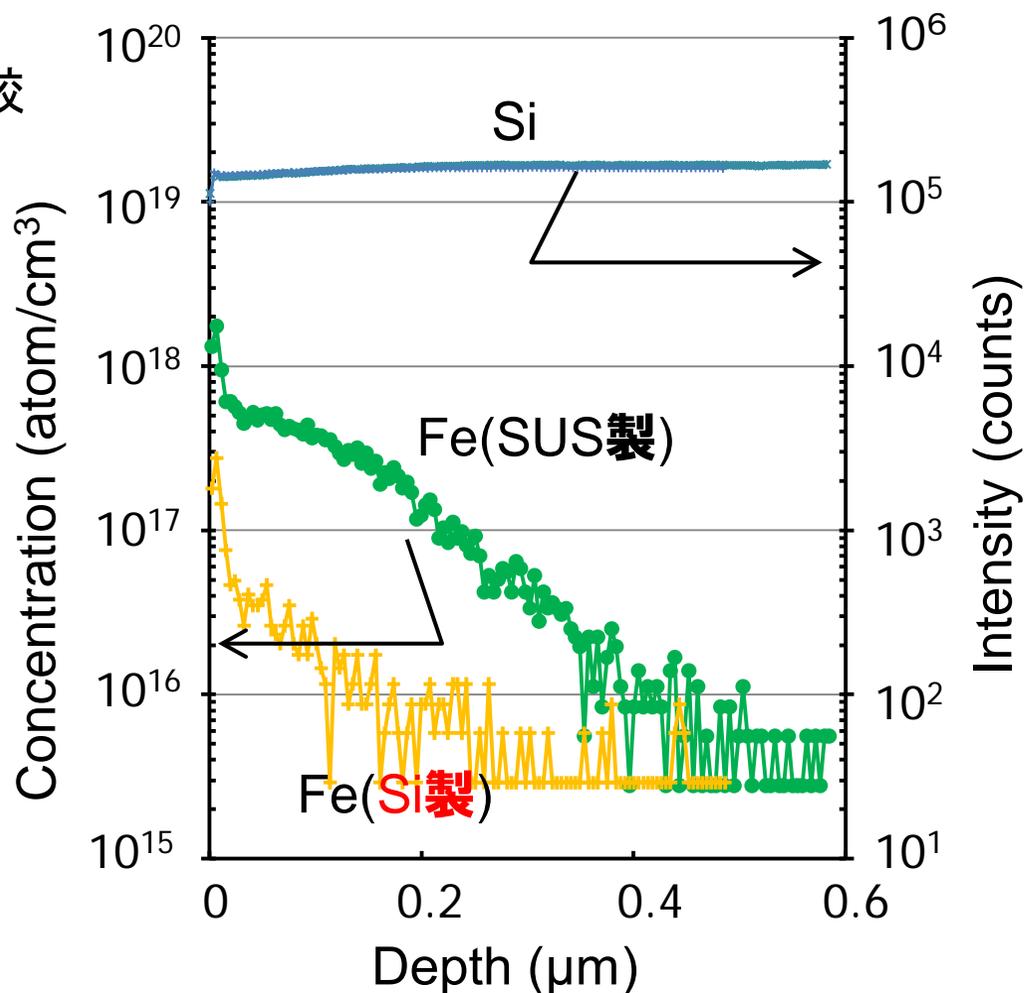
Si製放物面



Si製ノズル

# 塗布膜の不純物SIMS分析

(例) Fe成分での比較



✓ Si製ヘッド部材により金属不純物混入を低減

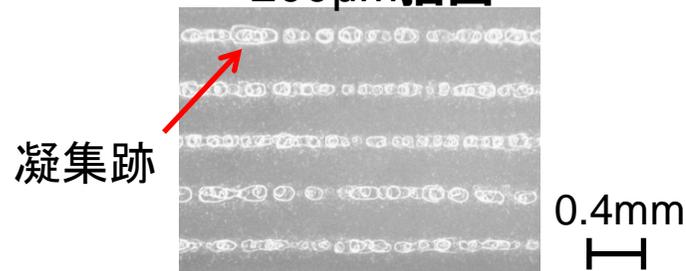
# スキャン描画性能



(a) パターニング吐出

10mm  
└───┘

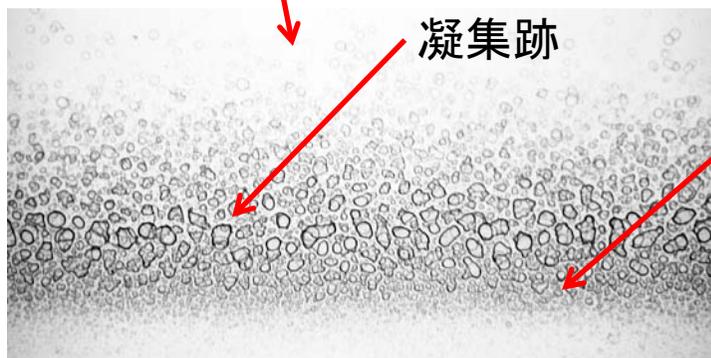
200 $\mu$ m描画



凝集跡

0.4mm  
└───┘

(c) 0.4mmピッチ吐出

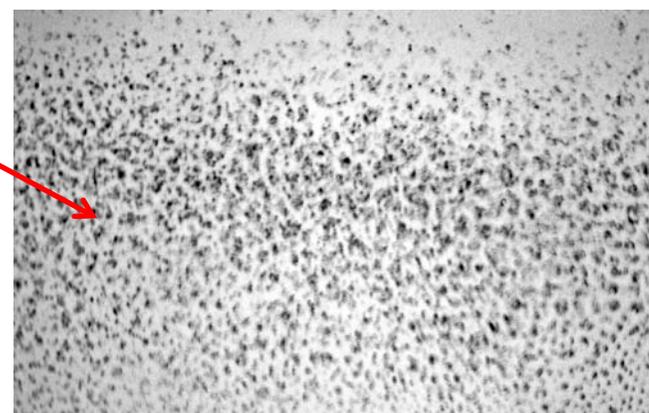


凝集跡

0.1mm  
└───┘

(b) パターニング吐出拡大図

Si微粒子



0.1mm  
└───┘

(d) 気流制御付き吐出結果

- ✓パターニング分解能200 $\mu$ mを実現
- ✓気流制御により凝集のない塗布が可能

# 自己組織化応用成膜技術

## 研究概要

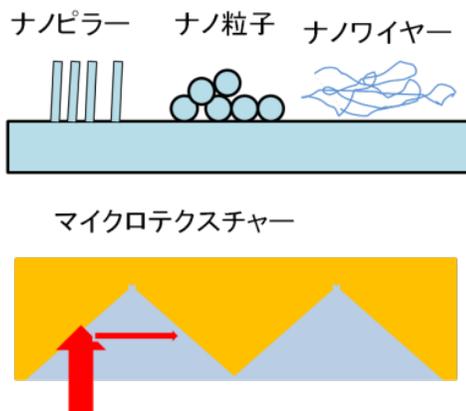
### エレクトロスプレー法によるナノ構造制御

#### (利点)

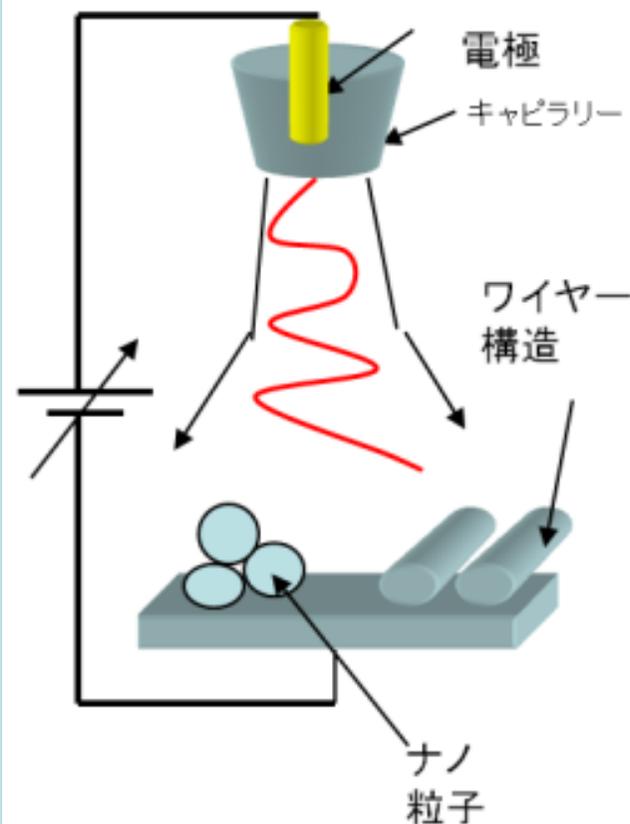
- ・電界印加のみで微細ミストが形成可能
- ・溶媒と電界の組み合わせにより簡便な構造制御が可能

#### (適用先)

- ・有機PV、光触媒など機能膜のマイクロ・ナノ構造体
- ・Si系PVの下地マイクロ・テクスチャー

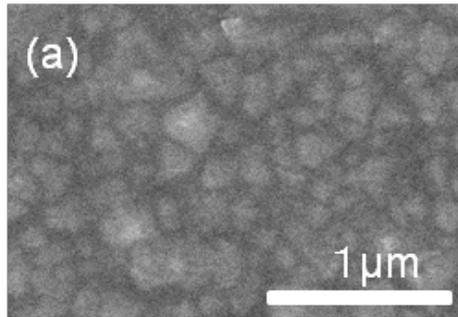


### エレクトロスプレー法によるナノ構造制御

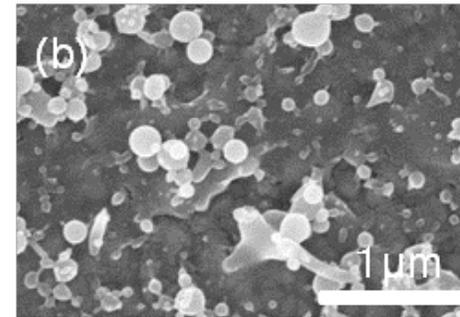


## エレクトロスプレー法によるナノ構造制御

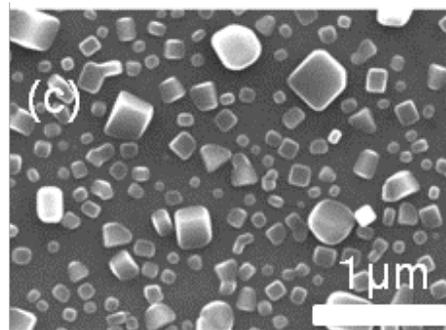
- ✓ エレクトロスプレー法を用いて酸化スズ、酸化チタンのマイクロナノ構造体形成を検討し、ミスト溶媒を調整することにより多様な構造体作製に成功
- ✓ 水酸化物をあらかじめ表面に配置することにより、ナノピラー形成を実現



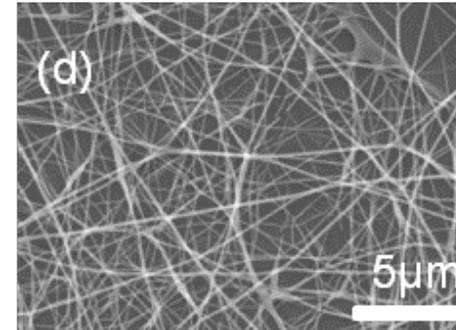
酸化スズマイクロテクスチャー



酸化スズナノ粒子:



酸化スズ含有KOHピラー

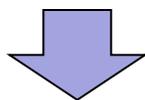


酸化チタンナノワイヤー

## 研究概要

開放系において擬似的な密閉清浄空間を作るための課題

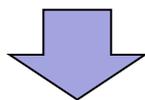
- ◆ **反応ガス**の外部への漏洩防止
- ◆ **大気成分**の内部への侵入防止
- ◆ **反応ガス**と**大気成分**が混合しない安全な排気



独自のガスカーテン構造

- ・ガスカーテンを排気の外周に設ける
- ・ヘッド下面を陽圧にする流量制御

流体シミュレーション・実機での検証



噴き出し型プラズマ装置へ展開



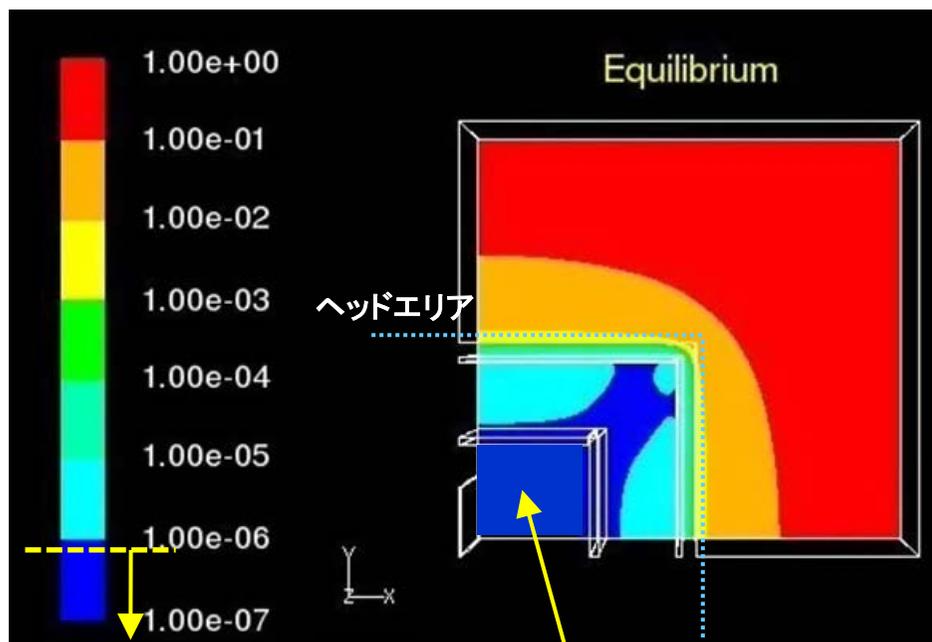
## 技術概要と放電実写ビデオ



実写ビデオ：  
霧団気制御下・ステージ移動でのHe放電(760Torr)

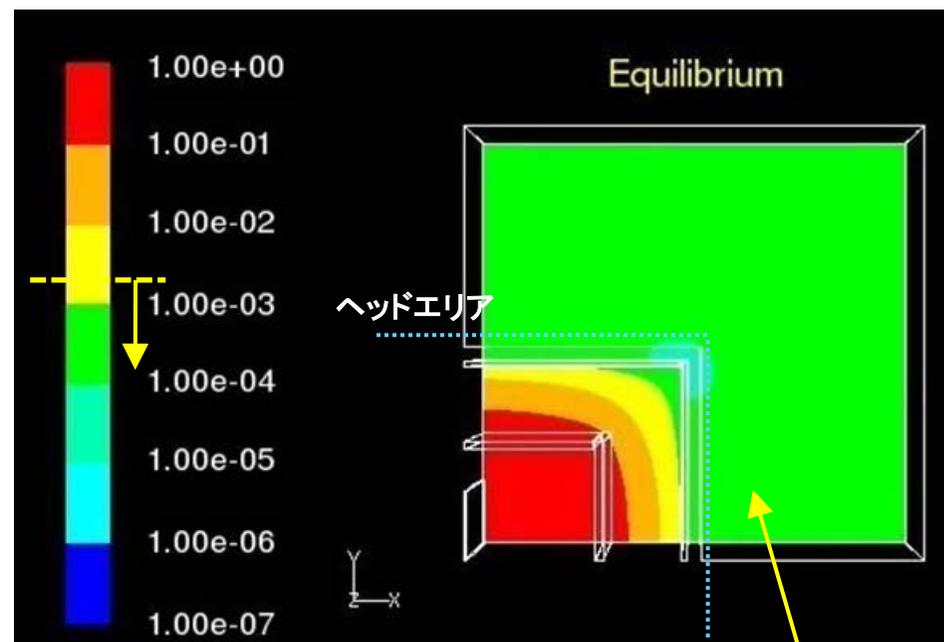
# 流体シミュレーションによるガス濃度分布の予測

①HeガスによりAirをパージ → ②反応ガス導入 → ③平衡状態



内部1ppm以下

Air濃度分布



外部0.1%以下

反応ガス(H<sub>2</sub>)濃度分布

面内1/4エリアで解析

# 非真空高品位ナノ機能膜 大面積形成プロセス技術の開発 ～まとめ～



## (1) 大気圧プラズマ成膜

- ✓ シランフリーの700Torrプラズマ、300°Cで多結晶シリコン膜を形成
- ✓ 圧力センサ用ひずみゲージを試作

## (2) ナノ材料均質塗布技術

- ✓ ミストジェット塗布; シリコン製部材を用いた不純物低減、パターン描画
- ✓ エレクトロスプレー塗布; 各種酸化物の自己組織化形成

## (3) 局所環境制御技術

- ✓ ガスカーテン構造による擬似的な密閉清浄空間を作り出す技術
- ✓ 雰囲気制御下・ステージ移動でHe放電(760Torr)を確認

# Macro BEANS センター

## 非真空と製織で拓く 大面積デバイスの連続製造

### (2) ウィービングMEMS

## マイクロデバイス製造技術の課題

- バッチ生産の限界
  - ・半導体－Siウエハの限界(300mm?)
  - ・液晶－ガラス板の限界(60インチ角)
- ロール生産の限界
  - ・ロール製造の困難性
  - ・投資コストの高騰
- 基材球形化法の閉塞
  - ・ハンドリングの困難性
  - ・加工の困難性

## 大面積フレキシブルデバイスへの期待

- 安心安全な生活
  - ・大面積情報表示(衣服、壁、窓)
  - ・ネットワーク通信機能
- 環境、エネルギー
  - ・浄化、抗菌
  - ・発電(太陽電池、温度、振動)
- 医療、福祉
  - ・身体センサ(健康、睡眠、疲労)
  - ・アクチュエータ(熱交換、インターフェイス)

## 製織(ウィービング)による繊維状基材大面積デバイス

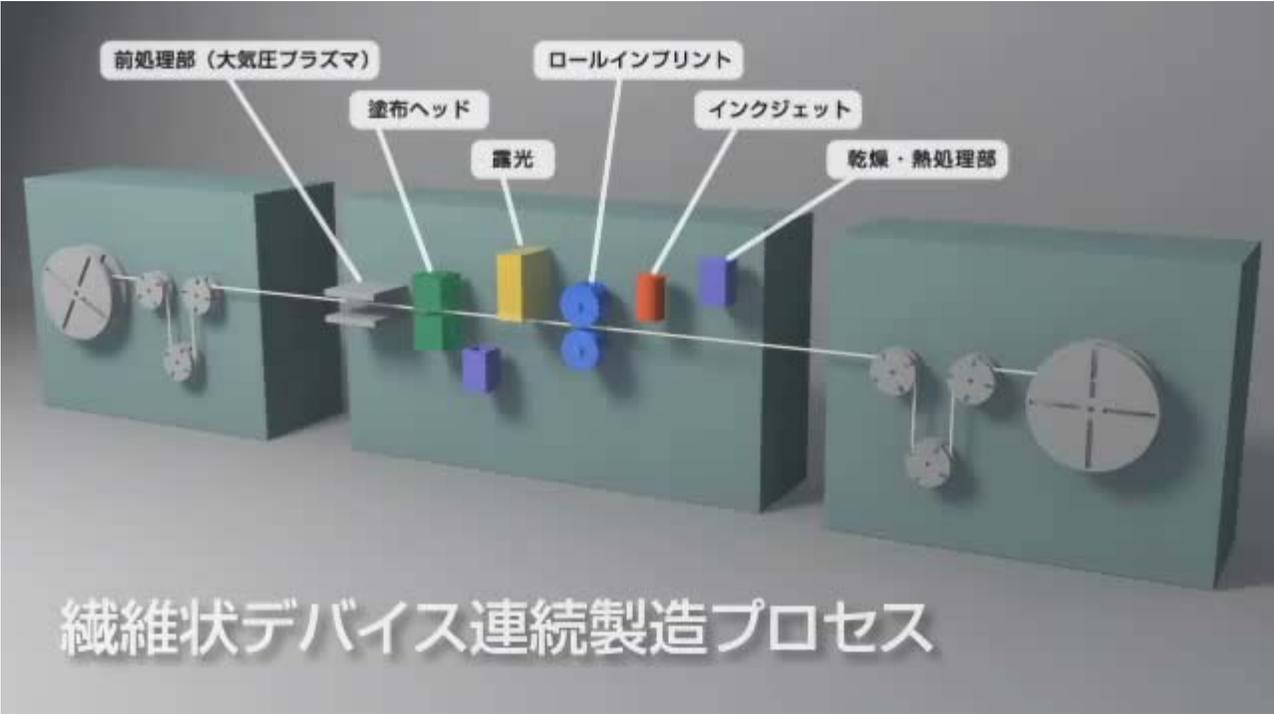
- ・ 小型装置で加工、製織で大面積化
- ・ 高いフレキシブル性の実現
- ・ 異種機能の集積化

# 繊維状デバイス的高速連続製造工程

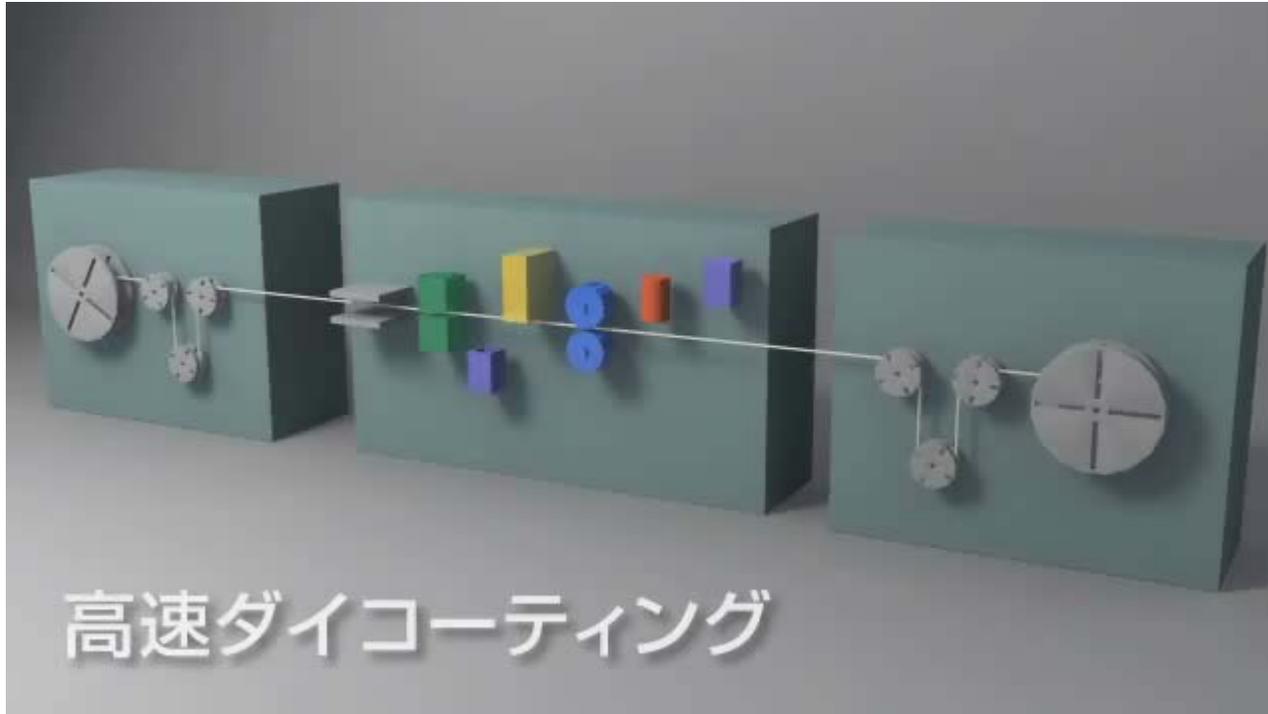


- 【繊維状デバイスに求められる要素】
- ・高速かつ連続的な機能性薄膜形成
  - ・高速かつ連続的なパターン形成
  - ・可動接点構造形成

- 【基本プロセス】
- ・高速ダイコーティング技術
  - ・連続インプリント技術
  - ・連続露光プロセス
  - ・インクジェット
  - ・中空基材内への構造形成



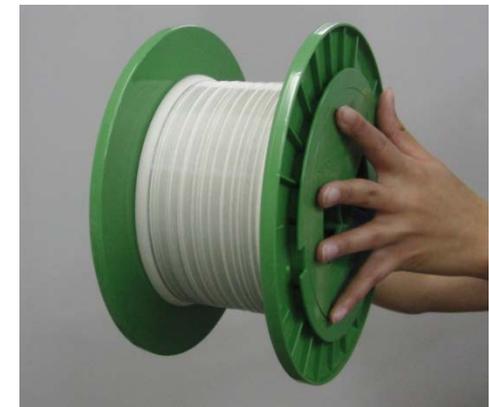
繊維状デバイス製造プロセスイメージ



ダイコーティングプロセスイメージ



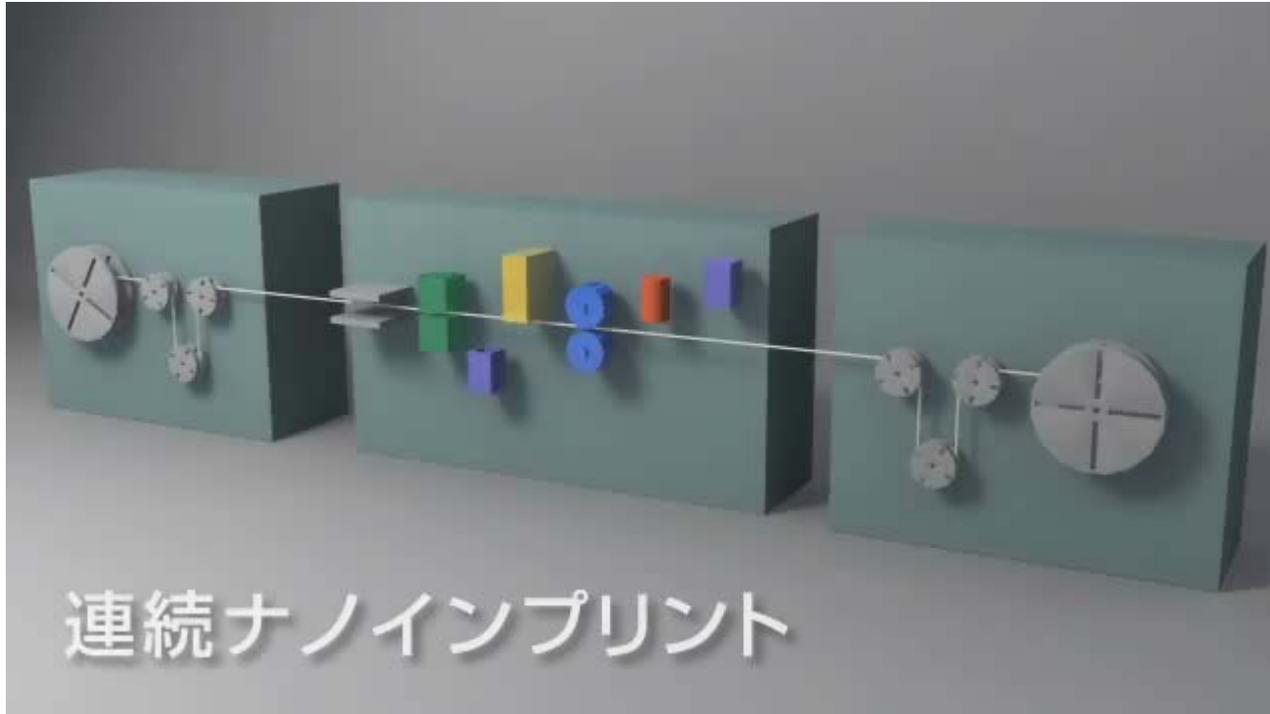
連続ダイコーティング装置



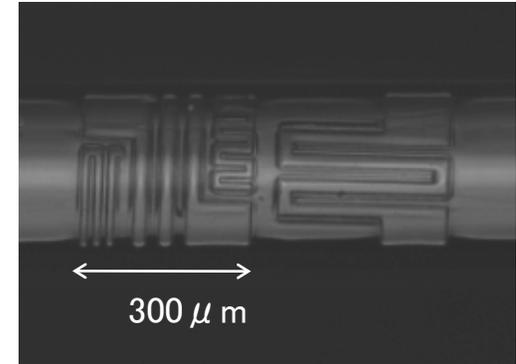
試作した長尺被覆基材

ナノ機能薄膜の連続形成 長尺デバイスを実現

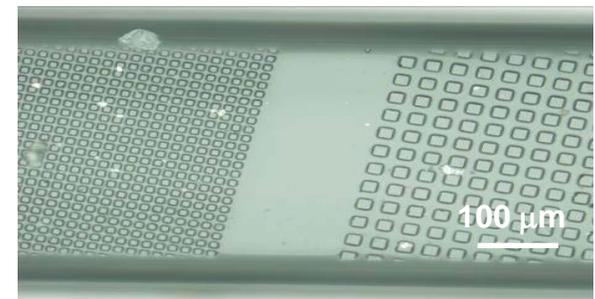
# 連続ナノインプリント技術



連続ナノインプリントプロセスイメージ



樹脂ファイバパターン例



石英ファイバパターン例

繊維状基材表面へのナノ構造連続形成

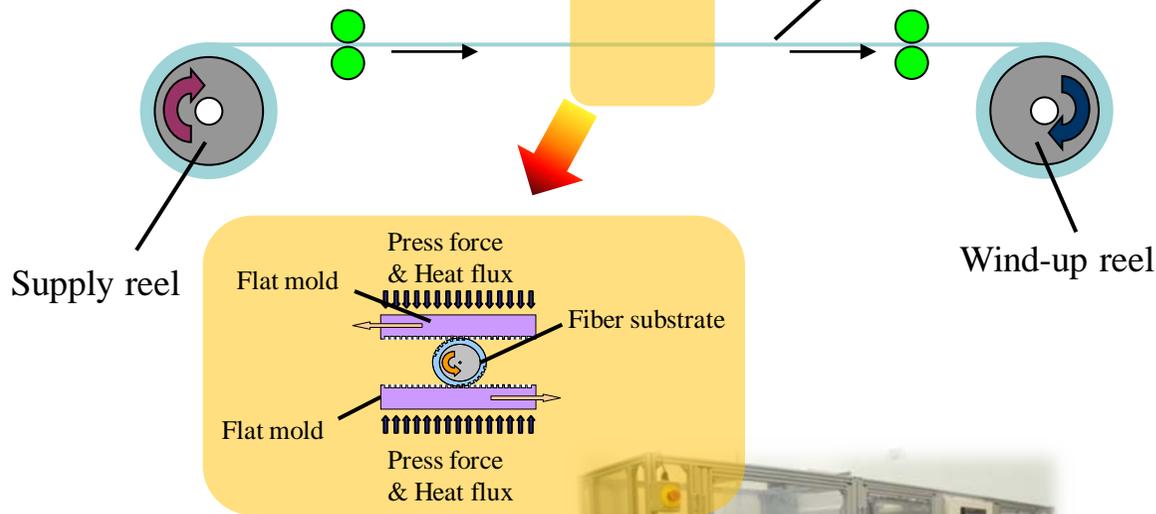
# 連続ナノインプリント技術



## ○スライド式リールツーリールインプリント装置

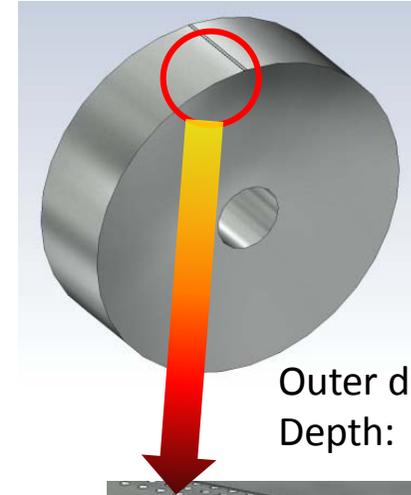
Maximum feed rate: 40m/min

Imprinting zone Fiber substrate

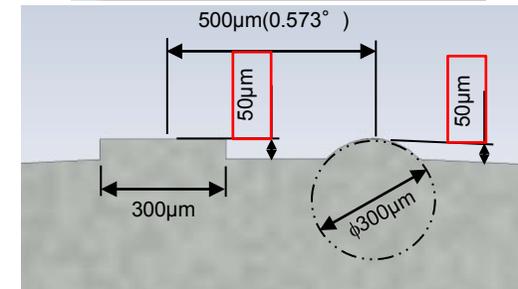
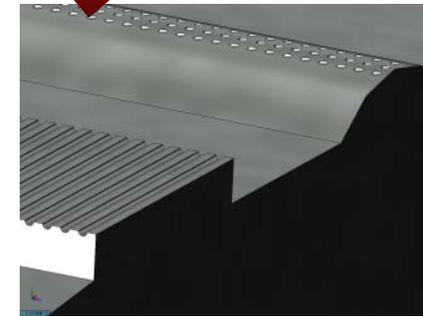


連続インプリント装置

## ○シームレス円筒モールド試作

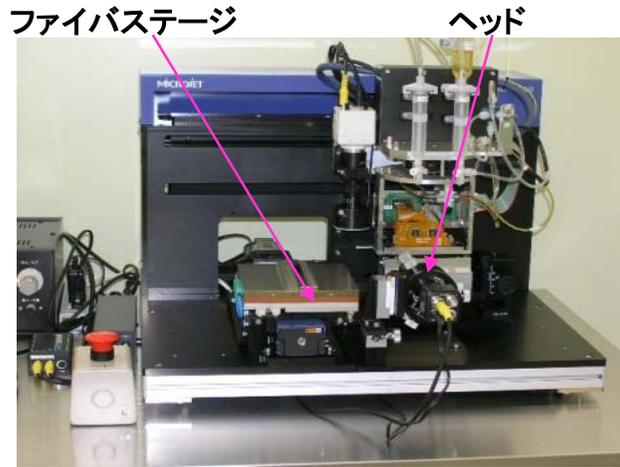


Outer diameter: 100mm  
Depth: 30mm

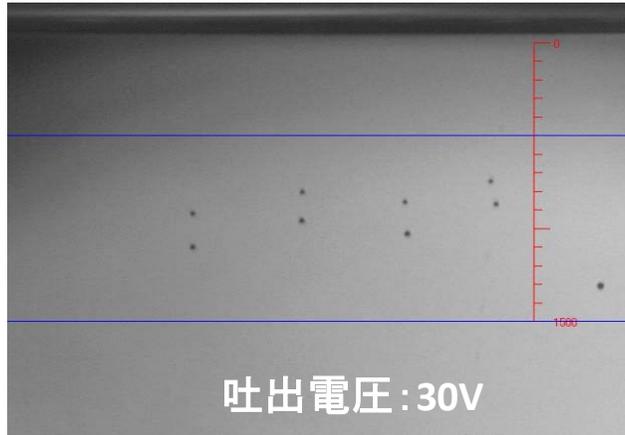


Macro  
BEANS

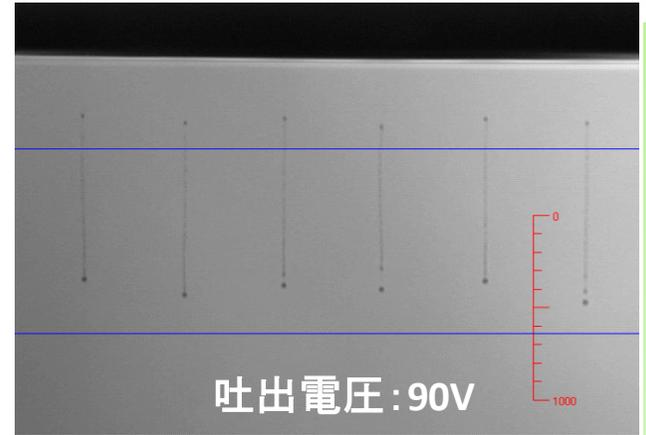
# インクジェットパターン塗布直描技術



インクジェット装置

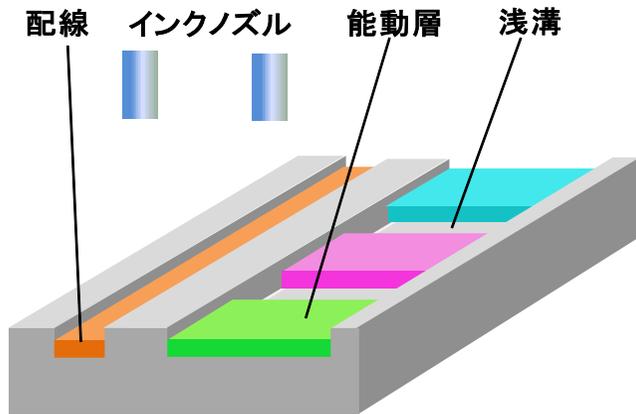


吐出電圧: 30V

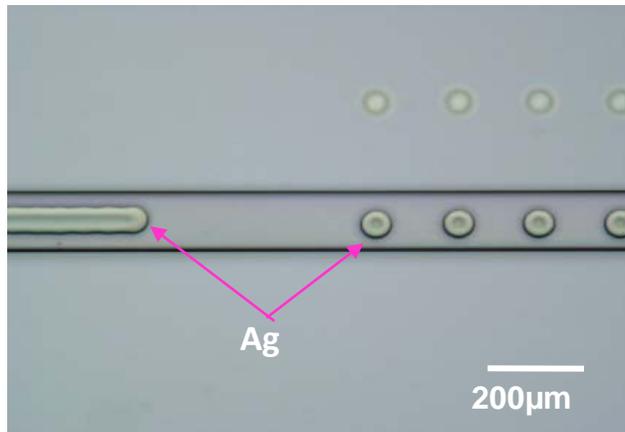


吐出電圧: 90V

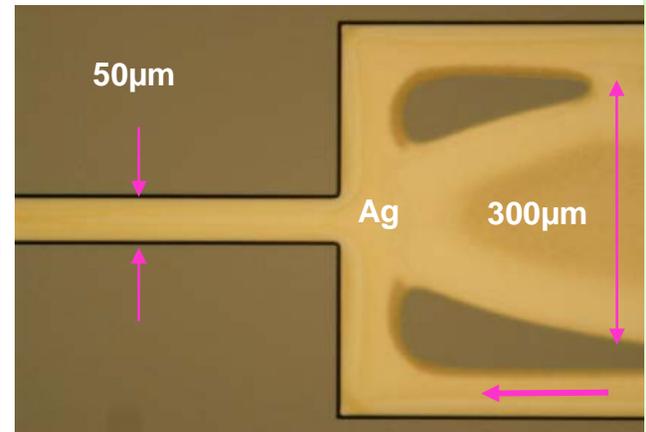
Agインクの吐出状態



溝付きファイバ塗布



角型石英ファイバ塗布例



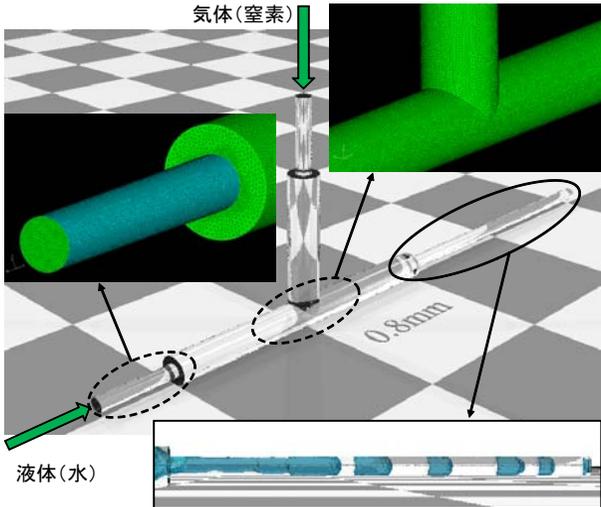
Si基板浅溝塗布例

省材料、省エネプロセスの実現。 焼成温度、時間の長いAg, Cu配線の形成

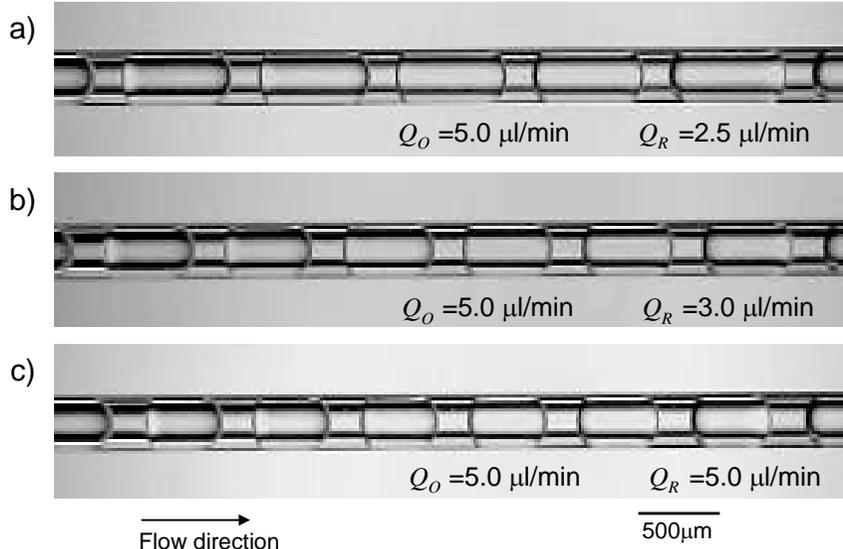
# 中空基材内パターン形成技術



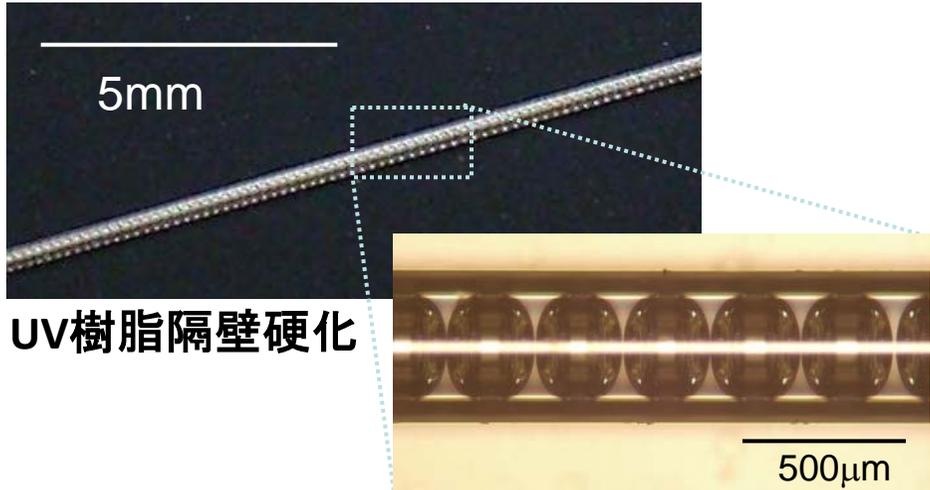
パターン形成プロセス  
(中空基材内径250 $\mu$ m)



流動シミュレーション



(中空基材内径250mm)

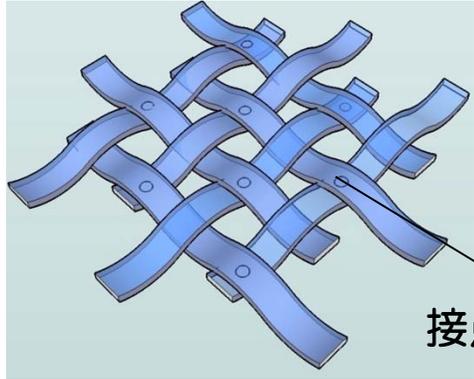


UV樹脂隔壁硬化

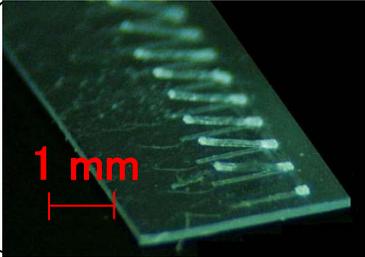
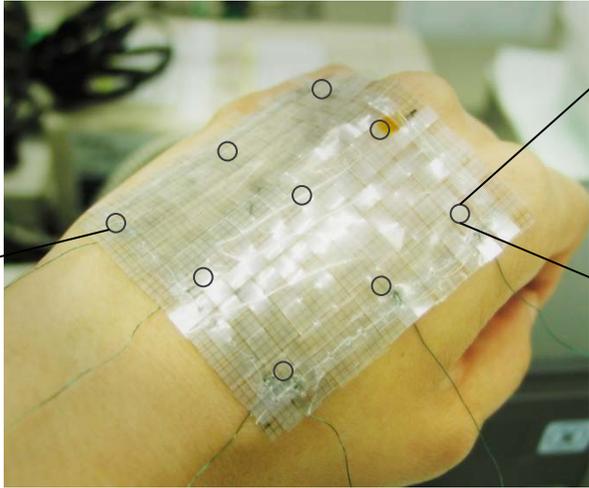
中空基材樹脂隔壁の形成

パターン形成例

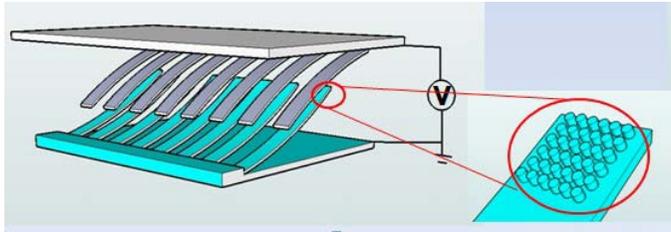
# 可動接点構造形成技術



接点構造

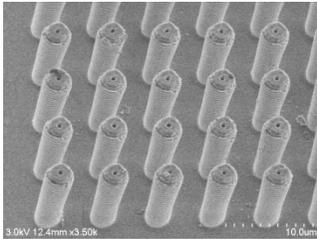


PETファイバー上の  
PMMA/PEDOT:PSS  
カンチレバー接点構造



縦横ファイバーのカンチレバー接触

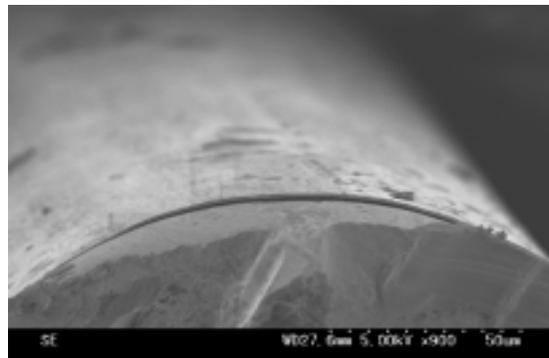
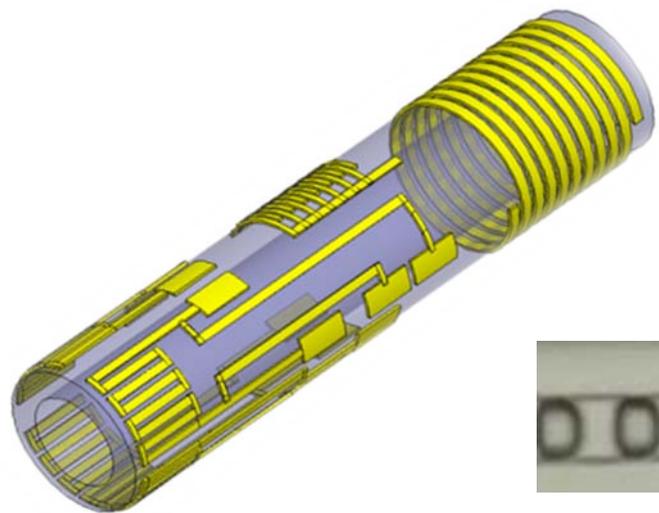
3 x 3アレイ接点のテストシート  
ファイバー幅：3mm  
ファイバー厚さ：100um  
カンチレバー長さ：1mm



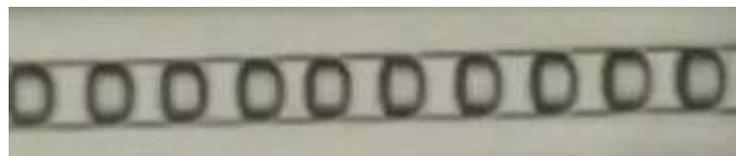
カンチレバー先端に含  
まれたナノピラー構造

導電性ポリマーカンチレバー構造の形成、可動接点適用 (300μm)

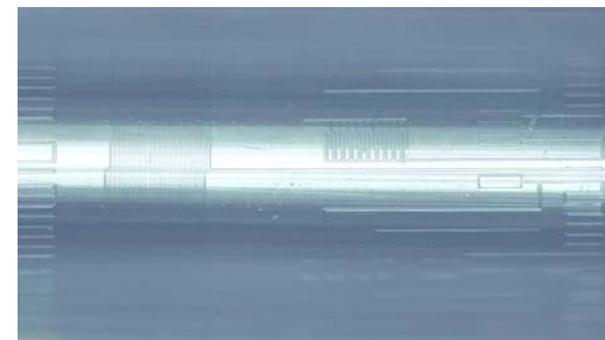
# 繊維状デバイスの例



圧電膜付き導体ファイバ



隔壁付き中空ファイバ



溝付きプラスチックファイバ

繊維状局面アクチュエータ

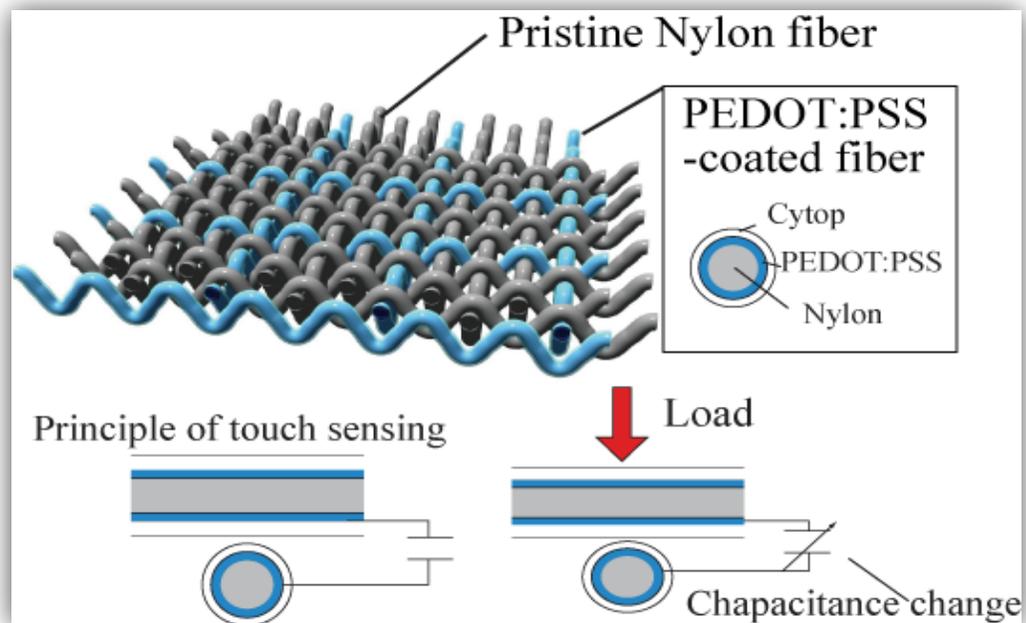


角型薄膜半導体素子ファイバ



平型発光素子ファイバ

## センサ構造



ナイロン糸上に  
有機透明導電膜を  
ダイコートし、絶縁膜を  
成膜後、製織



糸間キャパシタンスが  
圧力による糸間距離と  
断面積変化により増加

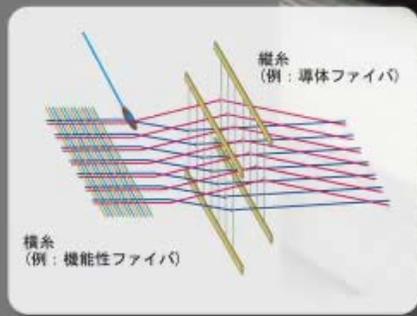
人工皮膚、身体センサ等への応用

# 異種機能繊維の製織による2次元デバイスの実現



## ウィービングMEMSの完成

異種機能の集積：  
新機能発現  
大面積化  
フレキシブル化



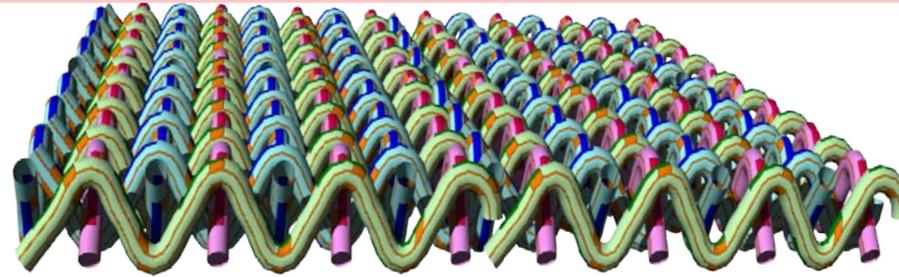
## 自動製織の様子



## 大面積接触センサシート

## 自動製織による大面積シートデバイスの実現

# 機能繊維による2次元デバイスの例



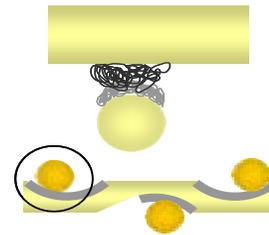
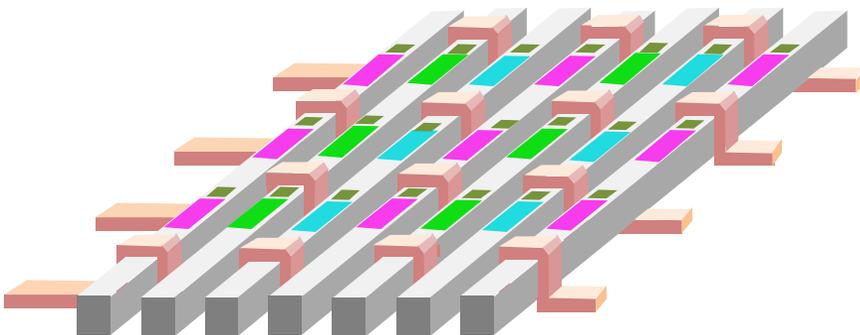
多機能センサシート



空気浄化シート

大面積接触センサシート

発電シート



可動接点

圧電超音波シート

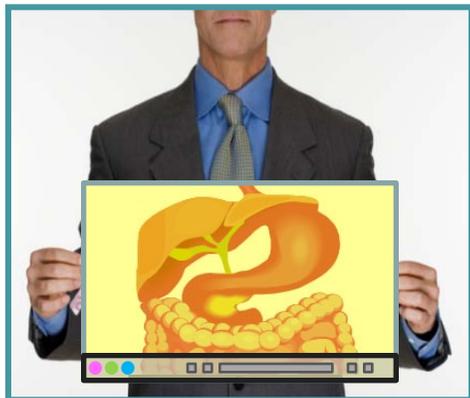
# 大面積フレキシブルデバイスが実現する安心安全な生活



発電ジャケット



空気浄化布



人体シートスコープ



壁面ディスプレイ



睡眠センサ



健康計測デバイス



疲労計測靴下