

2012.7.13 BEANSプロジェクトセミナー

# メーター級 大面積マイクロシステム を実現する集積化技術

伊藤寿浩

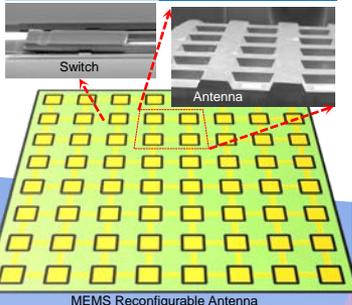
BEANSプロジェクト・Macro BEANSセンター  
産業技術総合研究所・集積マイクロシステム研究センター

# Macro BEANSの全体像

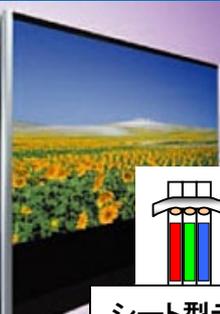
## 大面積エネルギーハーベスティングデバイス



## 大面積通信デバイス



## 大面積映像デバイス



## シート型健康管理デバイス



### 超音波プローブシート

### シート型ディスプレイ

### ウェアラブル発電

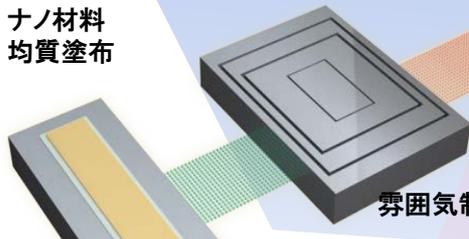
光電効果・ピエゾ抵抗効果・熱電効果・ゼーベック効果・ペルチェ効果を利用した大面積Siデバイス

## 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

大気圧プラズマ成膜

ナノ材料均質塗布



雰囲気制御

## 非真空高品位ナノ機能膜大面積形成プロセス技術

## 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

## 繊維状基材連続微細加工・集積化プロセス技術

## 安全安心ジャケット



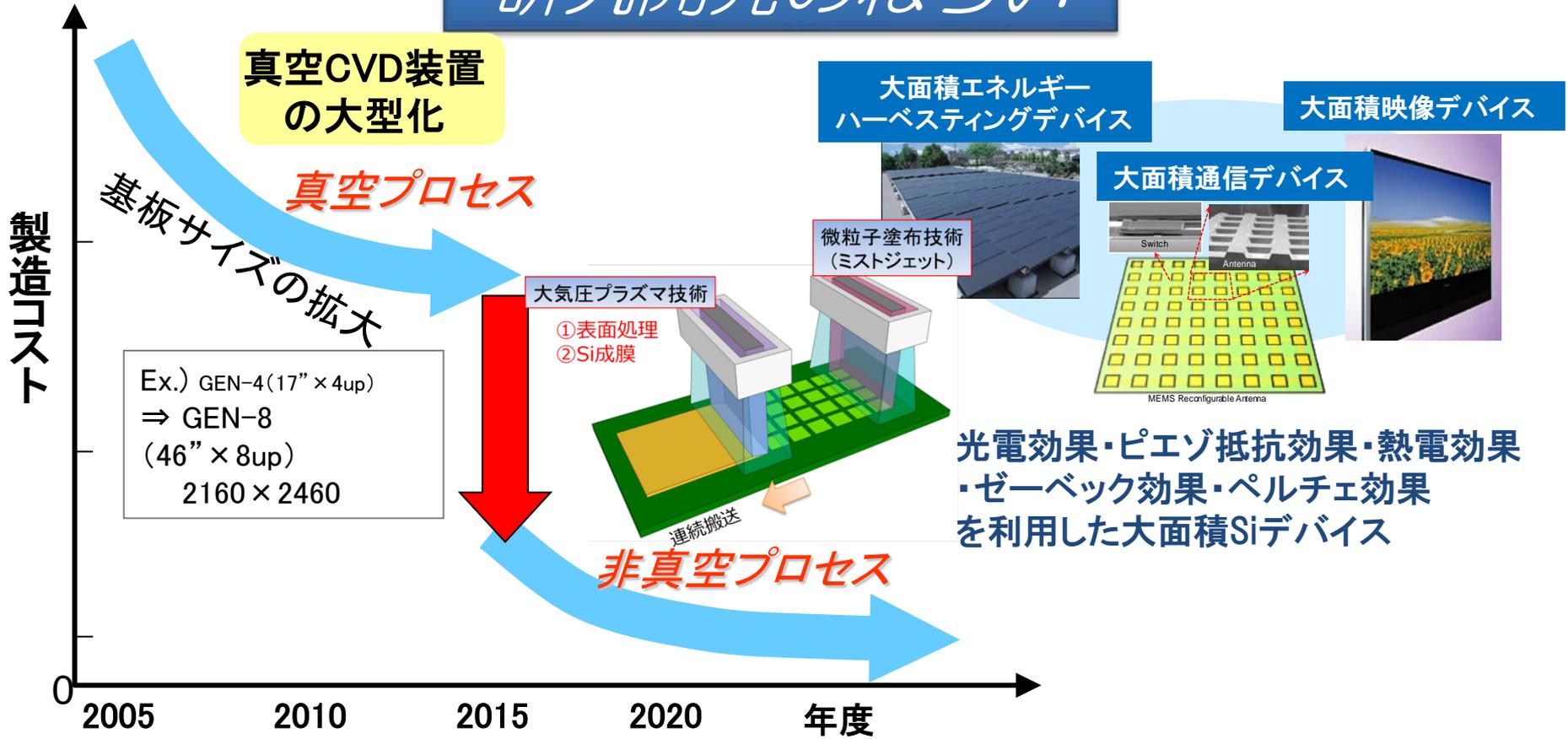
Macro BEANS



# 非真空で拓く 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

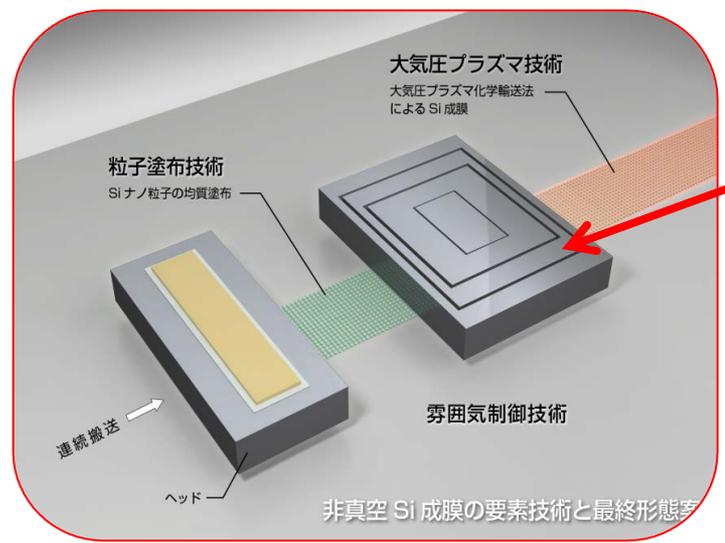
③ 局所環境制御技術

# 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



制御した雰囲気条件下において  
大気圧プラズマ化学輸送法による  
シリコン成膜を開発

- ★課題
- ・導電率制御
  - ・成膜スピード
  - ・大気開放系でのSi成膜

〔プラズマ化学輸送法〕+ 〔雰囲気制御〕

成膜寄与種生成

開放型成膜



①大気圧プラズマ成膜技術

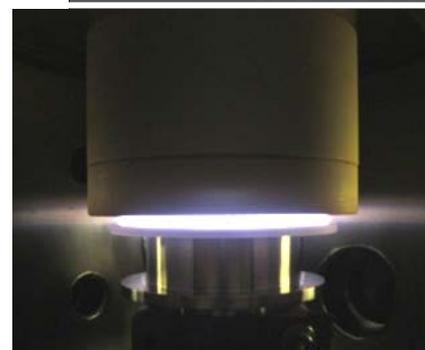
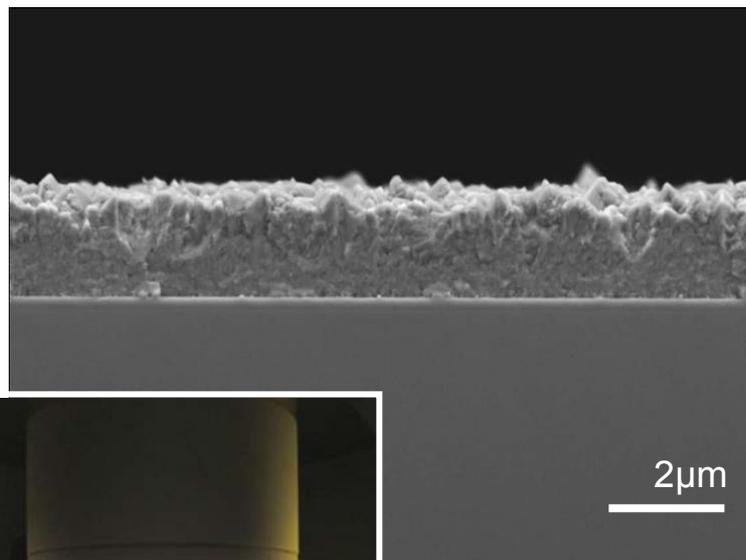
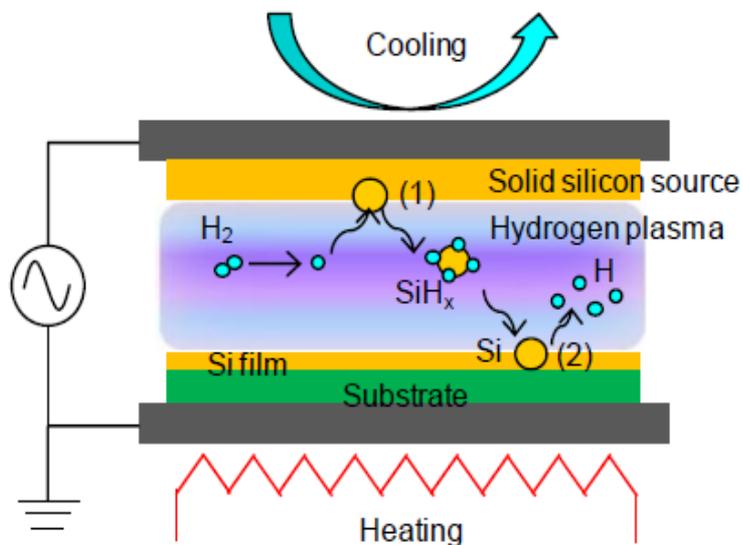
Macro BEANS



# 大気圧下 (700 Torr) でのシリコン成膜

## 成膜原理 プラズマ化学輸送法

H<sub>2</sub>、シリコンターゲット使用 (SiH<sub>4</sub>フリー)



大気圧成膜Siの断面SEMと放電の様子

### 反応式



温度が低いほど右に反応が進む

TIA nano  
Tsukuba Innovation Arena



Research Center for  
Ubiquitous MEMS and  
Micro Engineering

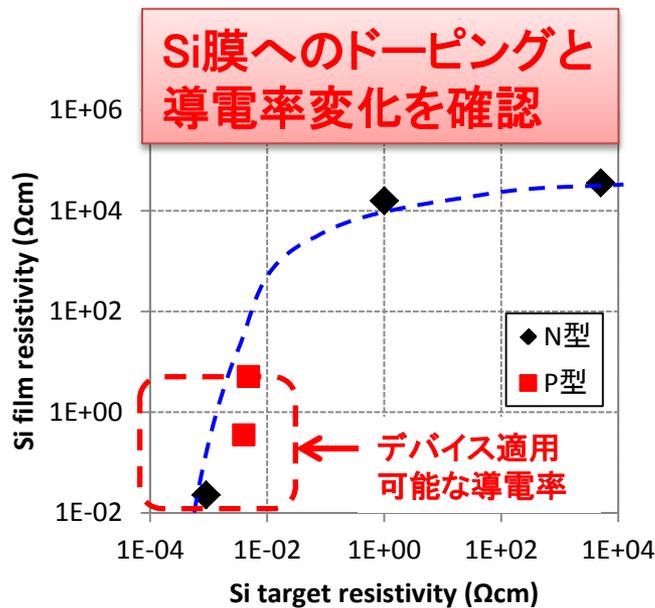
# 固体ソースによる荷電子制御プロセスの開発

電子デバイスへの適用

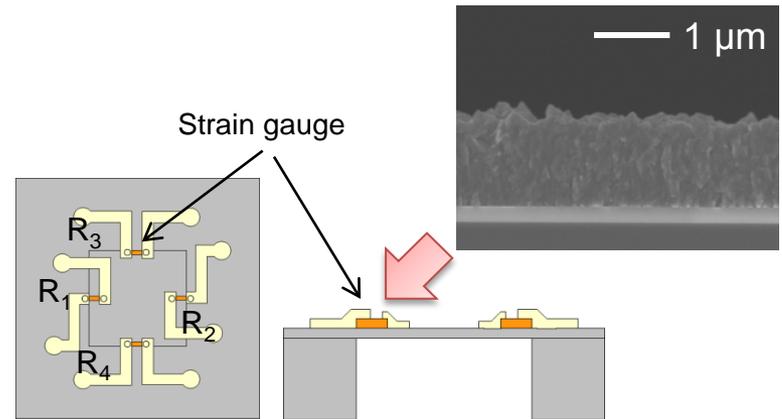


膜の導電率制御が必須

化学輸送法による膜中へのドーパント取り込み



Si膜抵抗率のターゲット抵抗率依存性



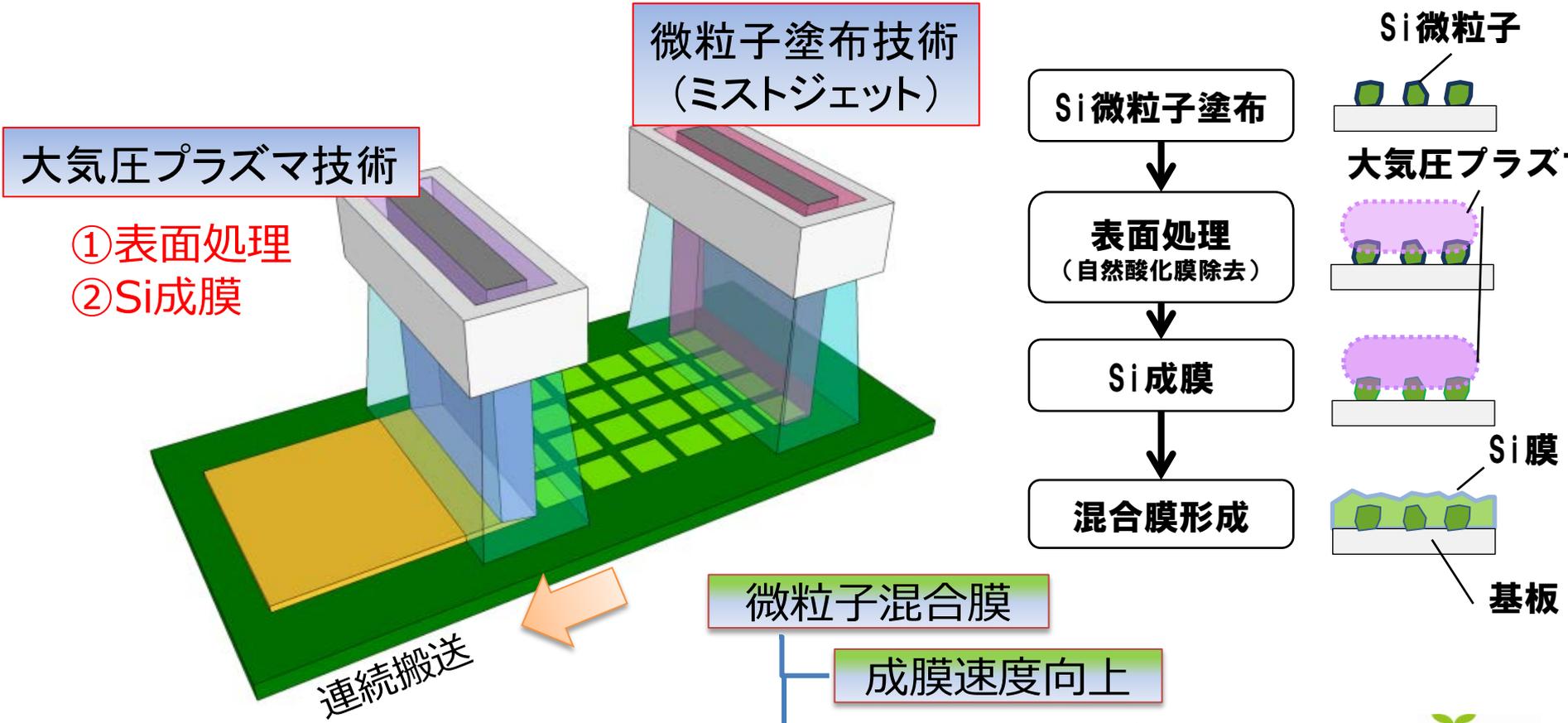
従来型の低圧CVD膜と同等のゲージ率(40)を確認

今後

➤ 大気圧Si膜の実用化検証 (光電変換素子)



# 微粒子塗布と大気圧プラズマ成膜による 混合膜形成プロセスの開発

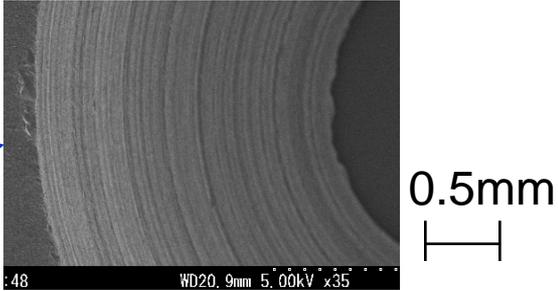
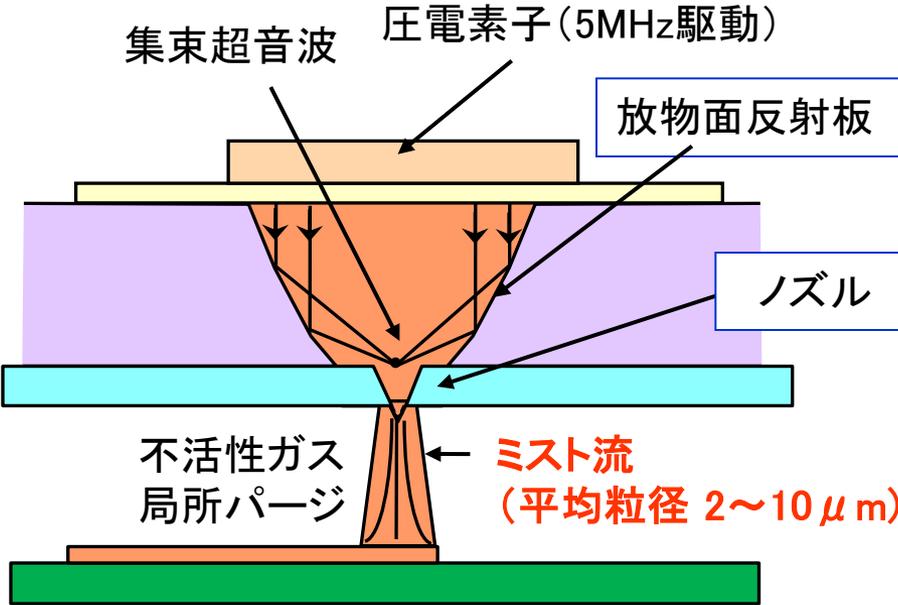


# ミストジェットSi粒子塗布技術

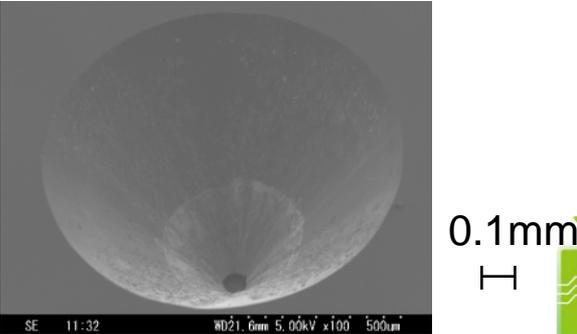
## 特長

- 1. 超音波エネルギーの利用により平均粒径数  $\mu\text{m}$  のSi粒子群(ミスト)を連続的に吐出可能 → 機能膜の均質化
- 2. 吐出径が小さいため、Si微粒子分散液の蒸発が早い

ねらい: Si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



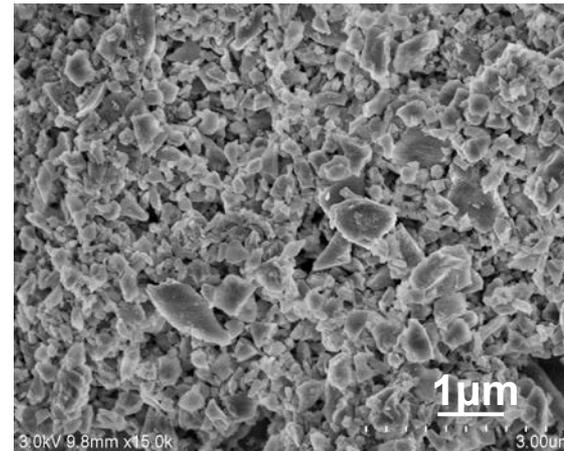
# Si粒子塗布膜厚評価

<塗布>

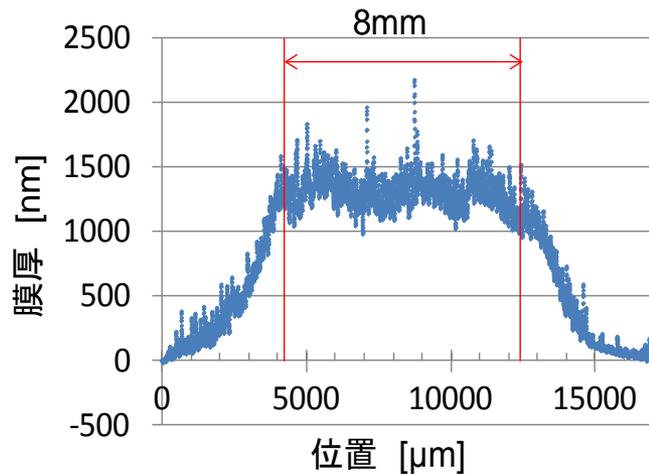
10mm□にミストジェットによりSi粒子塗布

<評価>

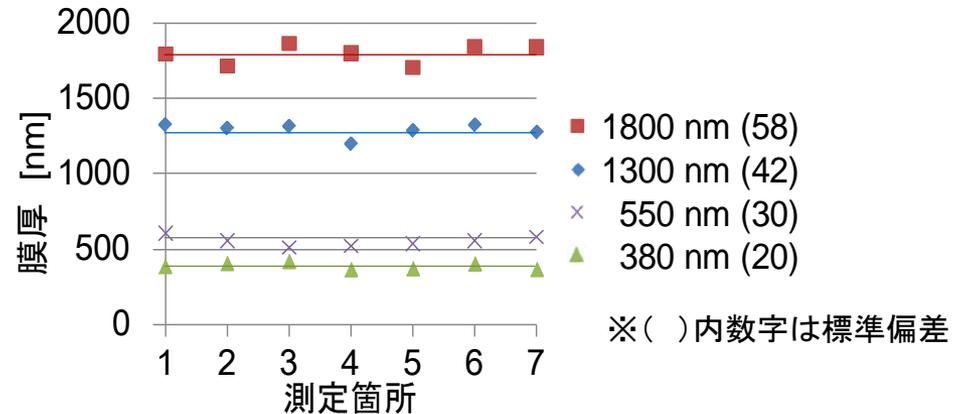
塗布端部を除く8mmを有効領域として塗布厚を触針式にて測定、評価



Si粒子塗布膜表面



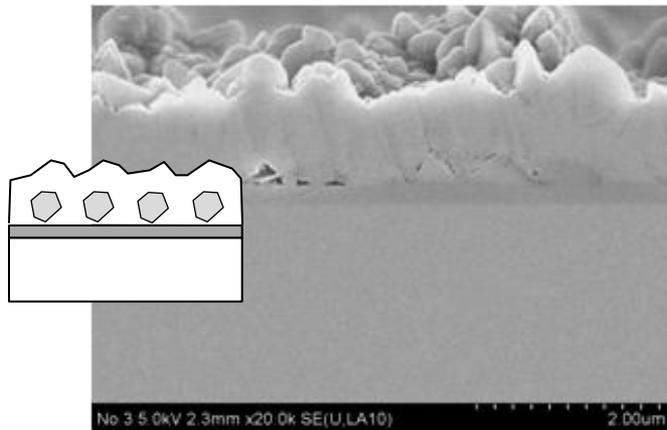
膜厚測定例



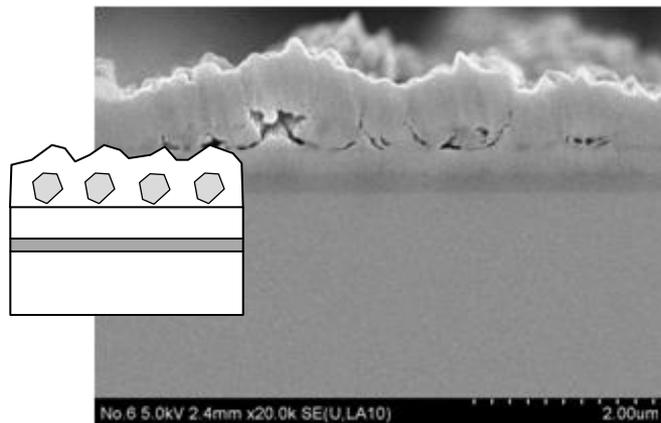
膜厚評価結果

膜厚均一性の目標値  $\pm 10\%$  を達成

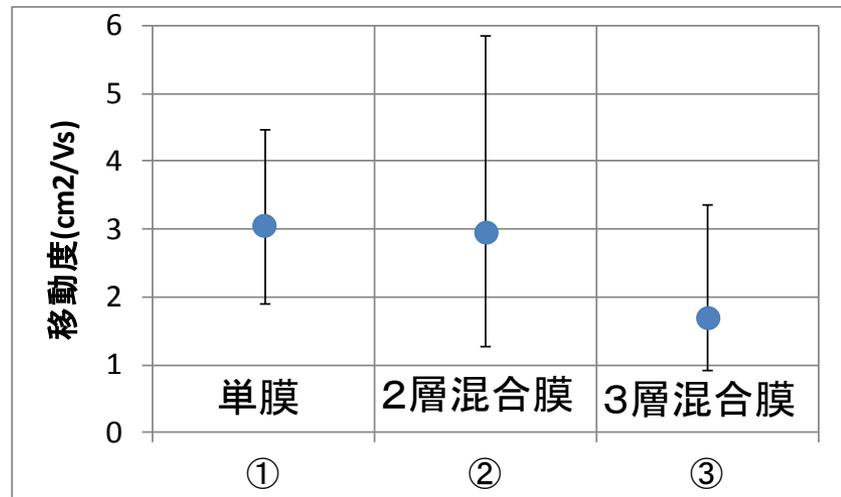
# 混合膜形成結果



2層混合膜  
Si膜(1 μm)/Si粒子/基板



3層混合膜  
Si膜(0.6μm)/Si粒子/Si膜(0.3μm)/基板



- 単結晶シリコンと同等のバンドギャップ値1.1eV
- 大気圧プラズマシリコン単膜と同等の移動度：1.7~3.0 cm<sup>2</sup>/Vsecを混合膜で達成

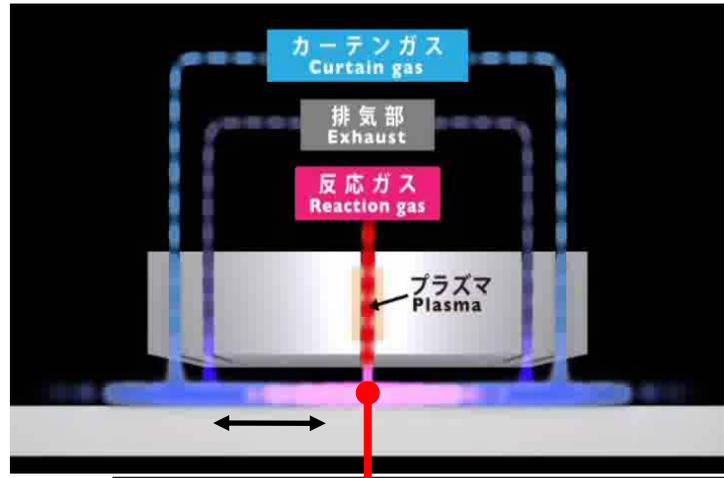
# 局所環境 雰囲気制御技術の開発

## 開放系で擬似的な密閉清浄空間を形成

- ◆ **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

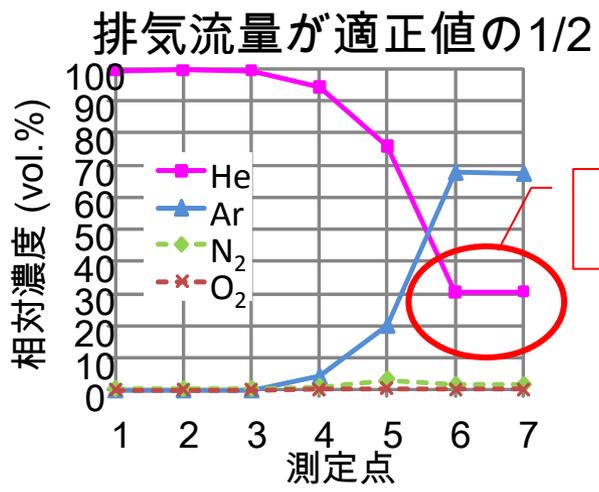
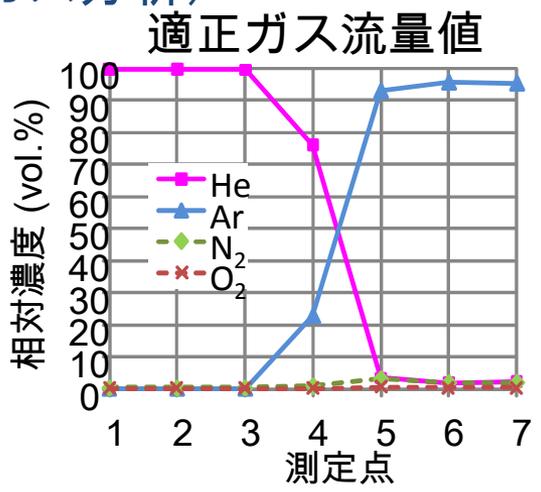
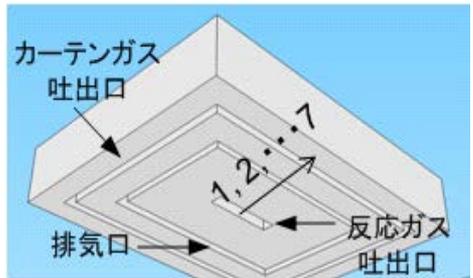
**独自のガスカーテン構造**

- ・カーテンガス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



ガス質量分析器(常圧対応Q-mass)

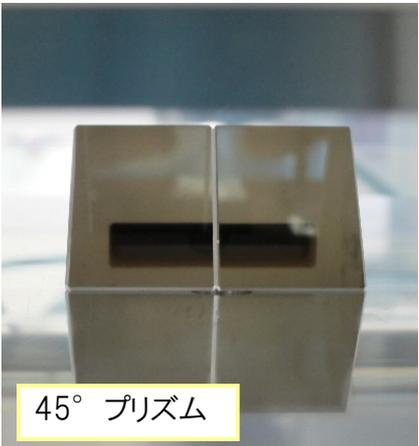
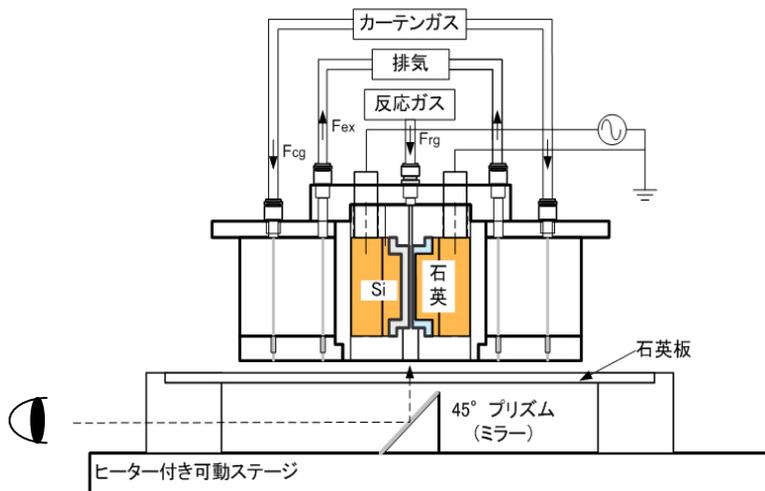
- ①ガス流量設定への流体シミュレーション活用
- ②実機による検証(ガス分析)



反応ガスの外部漏洩

## ガスカーテン構造による擬似的な密閉清浄空間の形成を実証

# 雰囲気制御下での大気圧放電



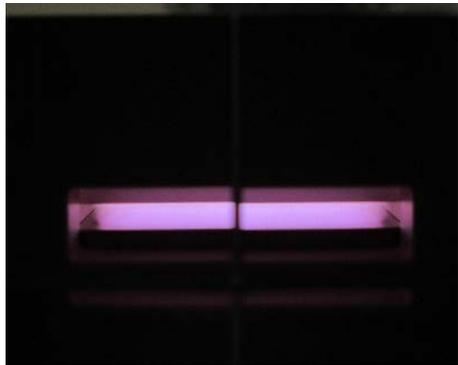
45° プリズム

電源周波数 : 13.56MHz  
 投入電力 : 300 W  
 放電Gap : 3.5mm

Heガス100%、及びH<sub>2</sub>混合Heガスにて反射波の無い安定放電を確認



(a) 水素濃度3.8%混合Heガス

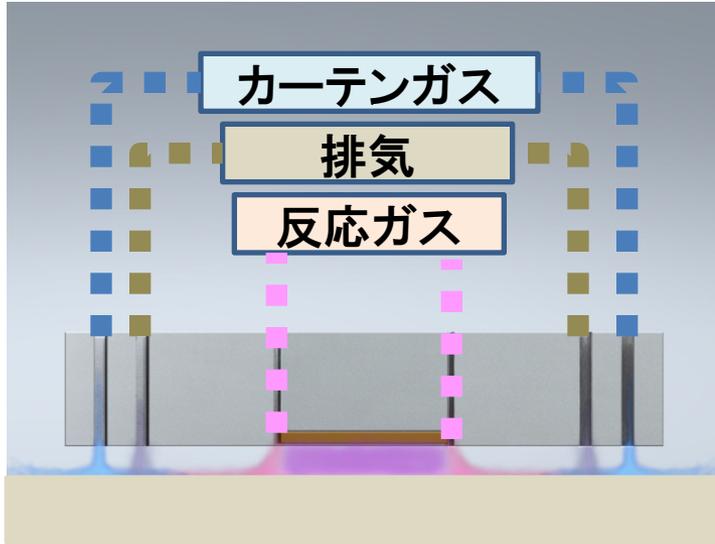


(b) Heガス100%

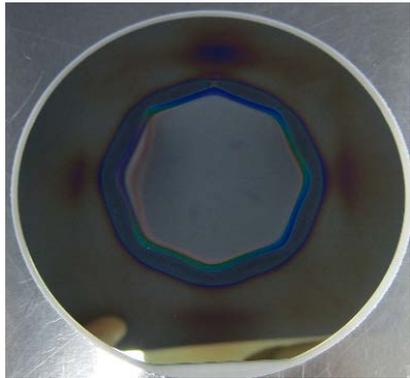
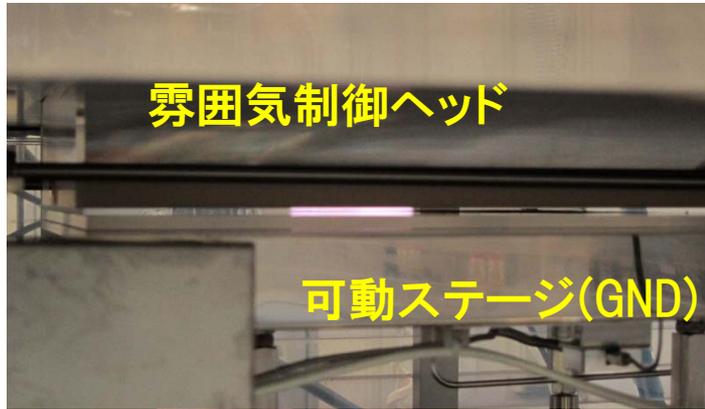
## ★課題

・雰囲気制御下でのシリコン成膜に向けたプロセス条件把握

# 大気開放系でのシリコン成膜

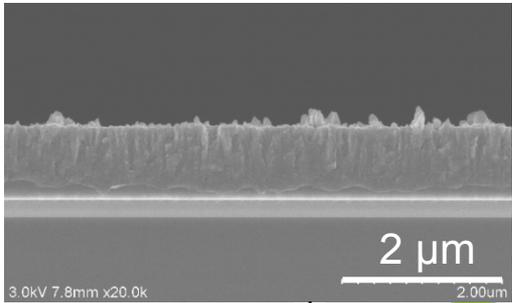
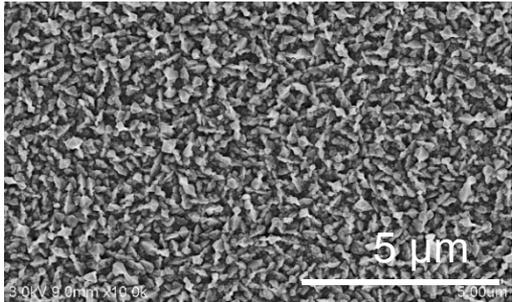


制御した雰囲気条件下において  
大気圧プラズマ化学輸送法による  
シリコン成膜



開放型大気圧プラズマSi膜

世界初



SEM写真



Macro BEANS



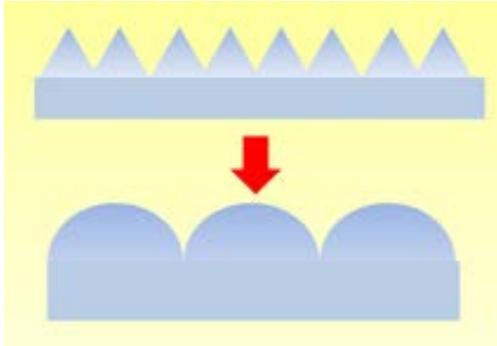
放電状態 (H<sub>2</sub>混合Heガス)

# ナノ粒子の超会合から生まれる巨大なマイクロ粒子

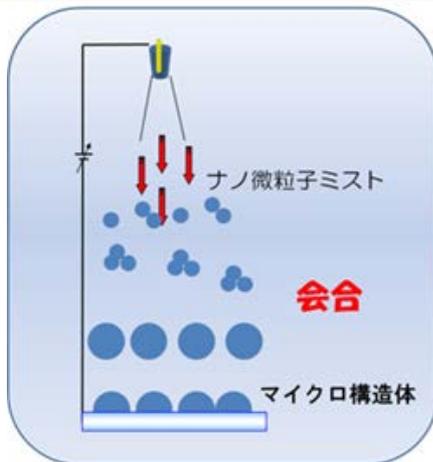
光電変換デバイス用の透明電極：  
赤外光吸収効率向上必要

従来技術  
500 nm

目標  
1000nm以上

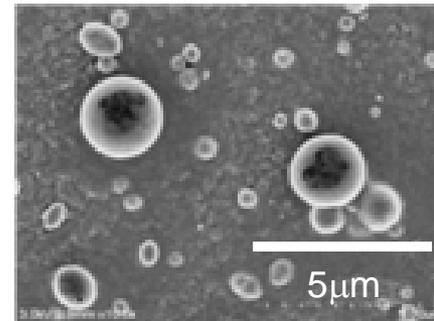


エレクトロスプレー：ナノ微粒子の会合  
⇒マイクロ粒子形成

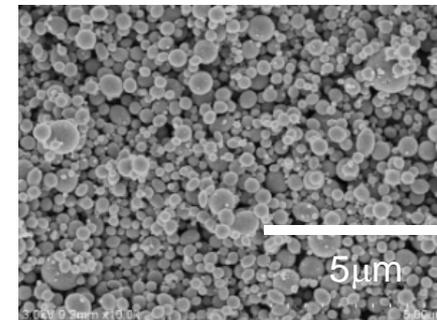


酸化スズ粒子のSEM写真

印加電圧：15 kV



印加電圧：25 kV



自己組織化を利用して元の大きさ(5nm)  
の400倍のサイズの  
マイクロ粒子形成に成功

# 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

- ✓ 大気圧プラズマシリコン膜へのドーピングと導電率変化を確認

## (2) ナノ材料均質塗布技術

- ✓ 大気圧プラズマシリコン単膜と同等性能の混合膜を実現
- ✓ 自己組織化を利用して元の大きさの400倍のサイズのマイクロ粒子形成に成功

## (3) 局所環境制御技術

- ✓ 世界で初めて大気開放系でのシリコン成膜に成功

# 繊維状基材連続微細加工と製織で拓く 大面積デバイスの連続製造

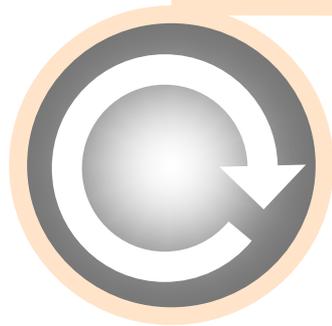
## (2) ウィービングMEMS

# "Woven MEMS" (Weaving MEMS process)

## ①機能薄膜連続被覆

**(1) Continuous coating process of high-quality functional films**

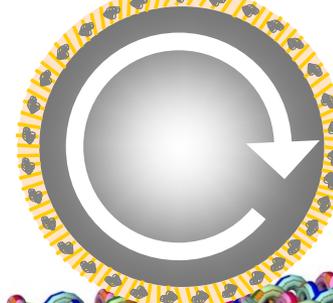
— Multilayer Dye-coating Process



**(2) High-speed continuous 3D nano/micro-machining process**

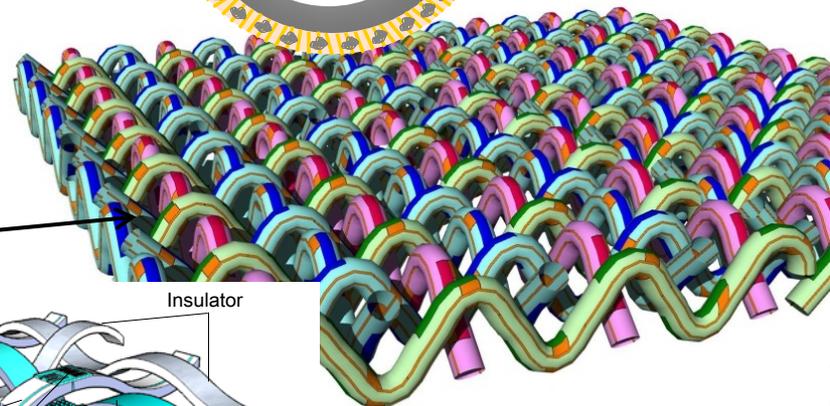
— Reel-to-Reel Continuous Deposition & Patterning

## ②連続微細加工

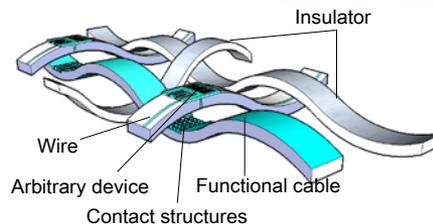


**(3) Weaving integration process of hetero functionalized fibers**

— Movable-contact Structure  
— Woven Device Design & Aligned Weaving Integration



## ③製織集積化



# 繊維状基材連続微細加工・集積化プロセス技術開発

## 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



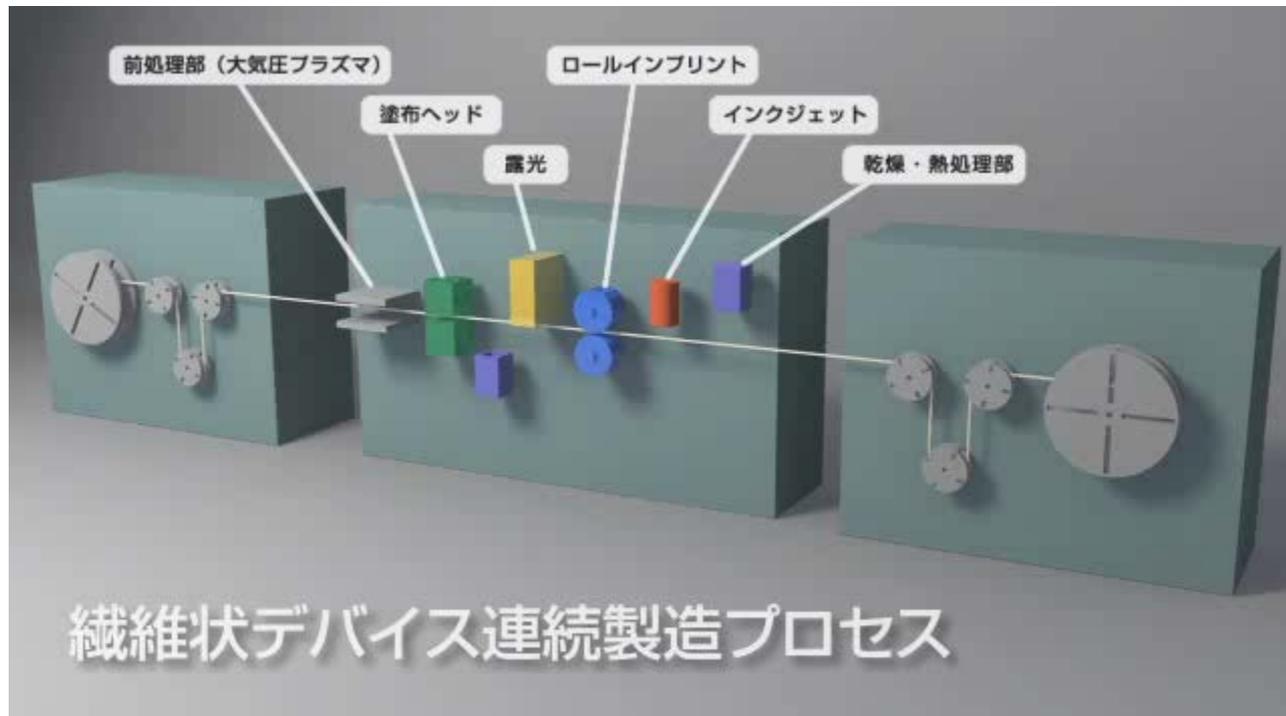
# 繊維状デバイスの高速連続製造工程

## 【繊維状デバイスに求められる要素】

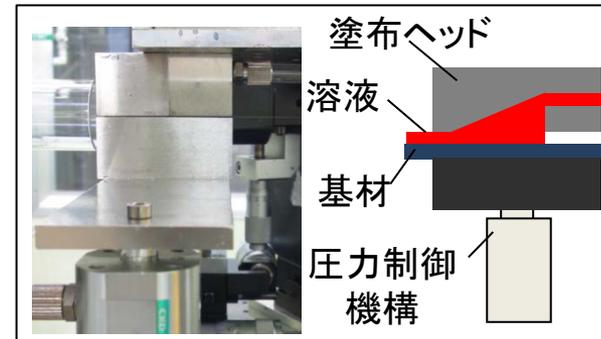
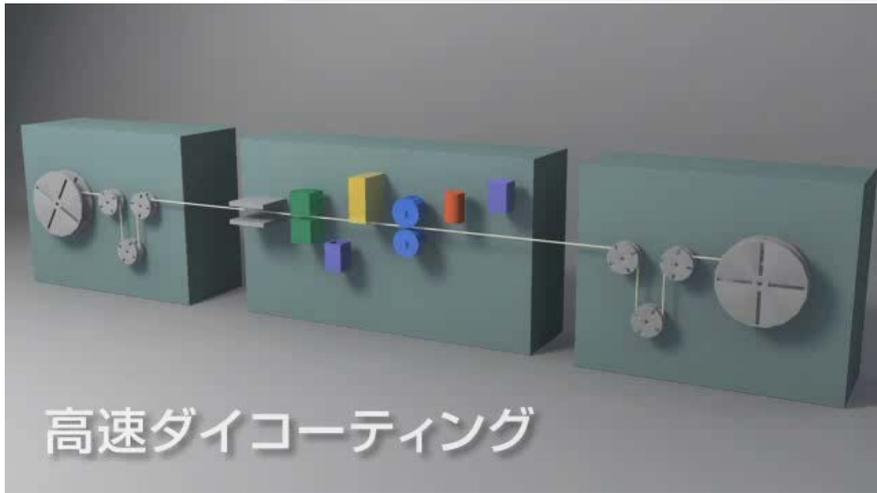
- ・高速かつ連続的な機能性薄膜形成
- ・高速かつ連続的なパターン形成
- ・可動接点構造形成

## 【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



# 高速ダイコーティング技術



コーティング成膜プロセス

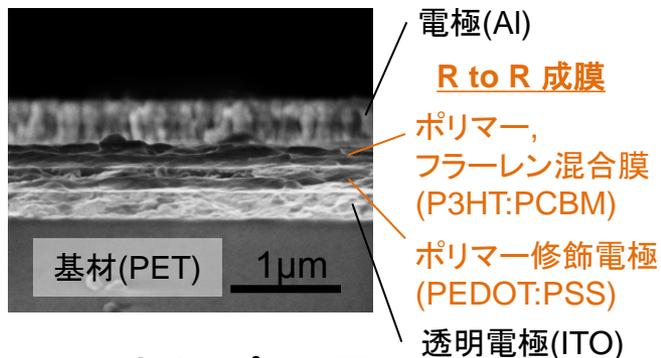


単層膜30m/minの成膜速度を実現

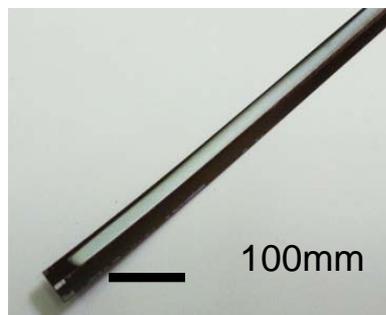


# 繊維状有機薄膜太陽電池の試作

## ・太陽電池材料の成膜にプロセスを適用



電池サンプル断面

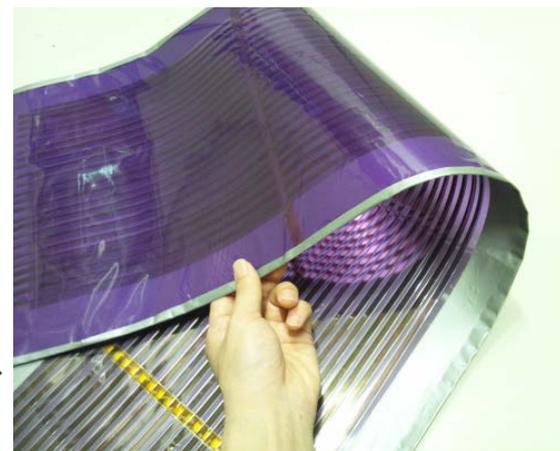


繊維状有機薄膜太陽電池

## 有機薄膜太陽電池材料を連続成膜



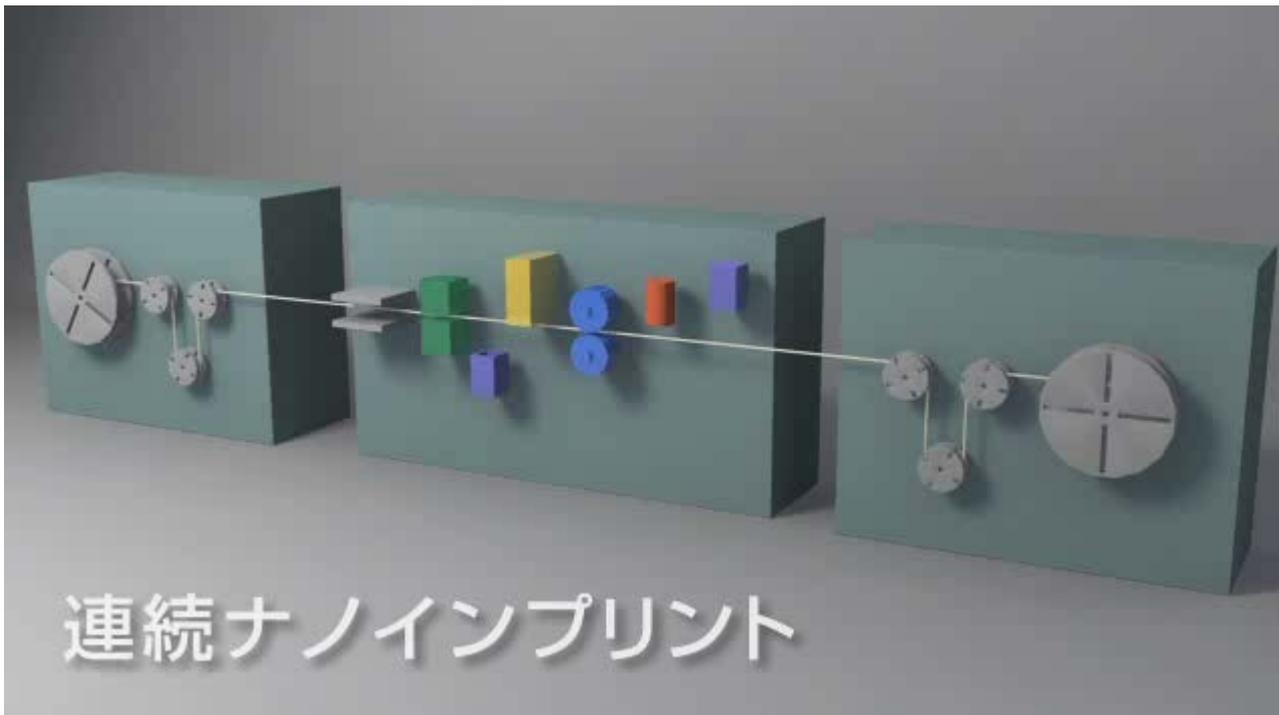
平面集積  
・配線  
・パッケージング



試作フレキシブル発電シート



# 連続ナノインプリント技術



連続ナノインプリント



スライド式リールツール  
リールインプリント装置

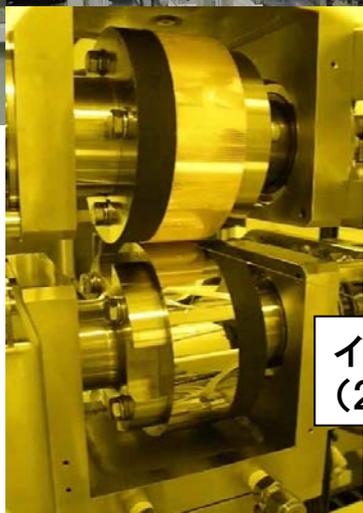


複合機  
(ローラーインプリント装置)



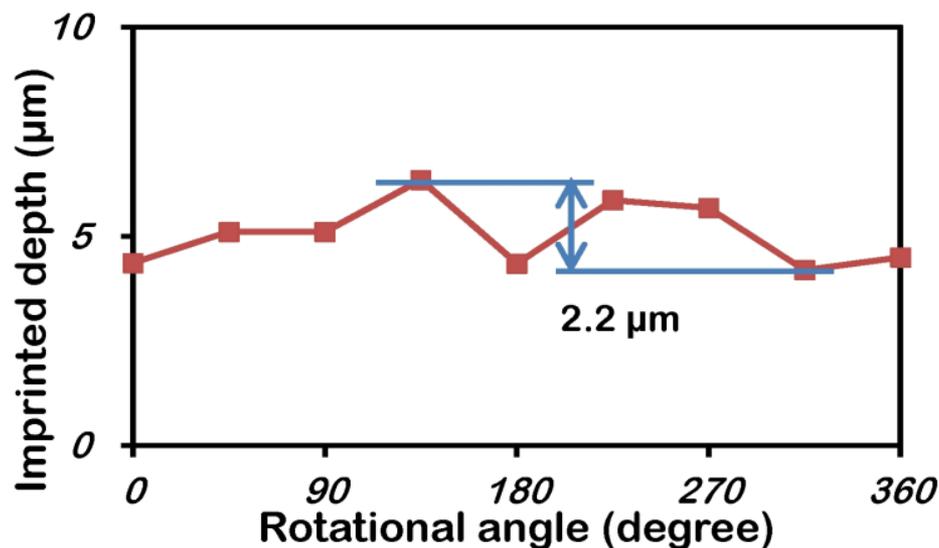
# リールツーリール高速成形

20m/minでの高速成形を実現！



インプリント状況  
(20m/min)

$\phi 250\mu\text{m}$ POFで直径変動( $3.6\mu\text{m}$ )以下に抑制

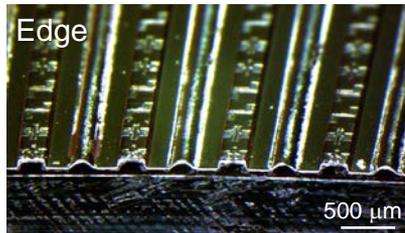
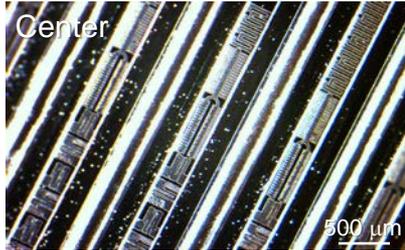
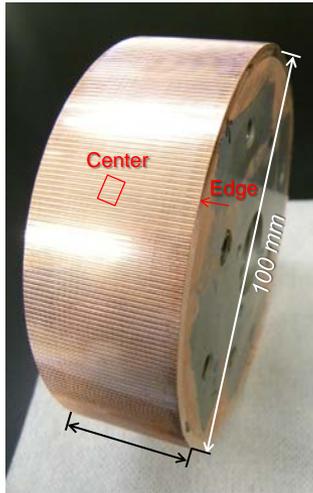


高速荷重制御機能付き  
リールツーリール熱インプリントシステム

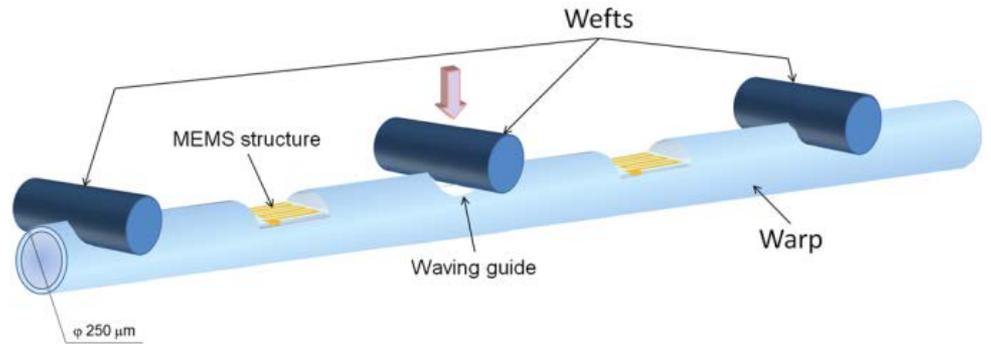
インプリントパターン深さ変動

# 複合パターンの一括転写

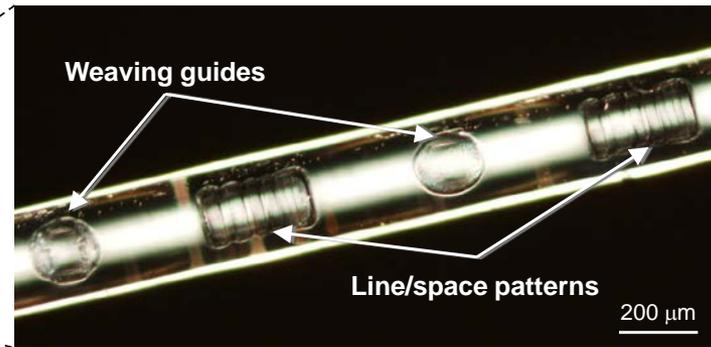
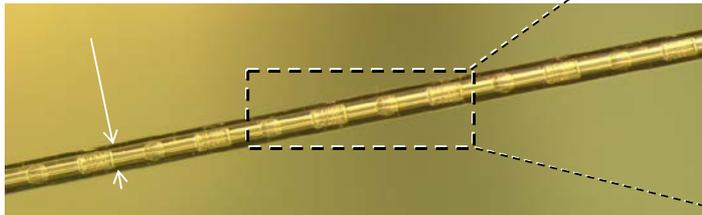
・円筒モードによる複合パターンの一括転写に成功！



シームレス円筒モード



φ250μmPOF表面に製織ガイドとMEMSパターンを一括成形



POF表面の成形パターン

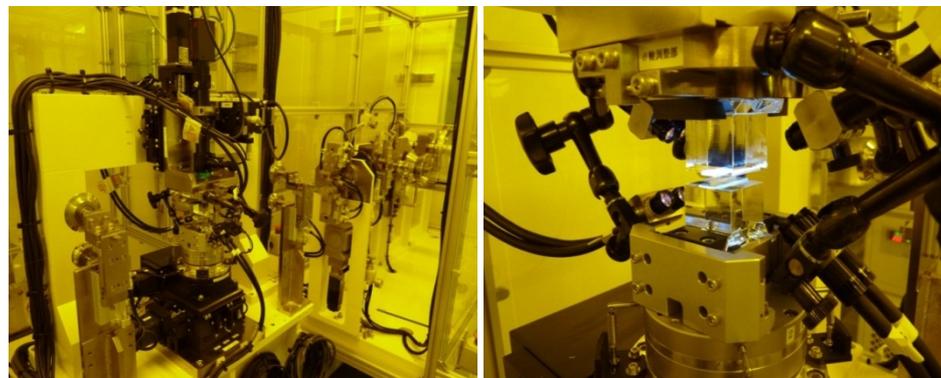
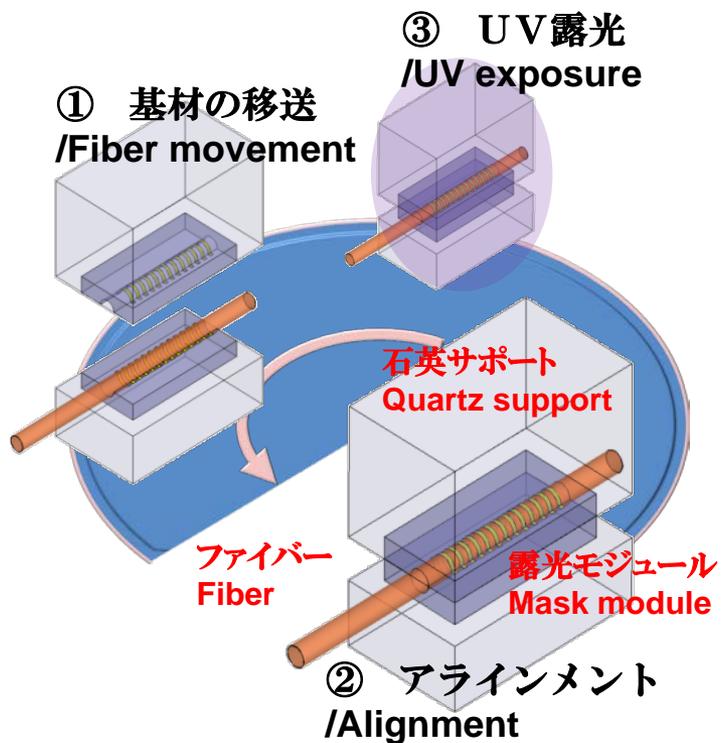


Macro BEANS Center

Macro BEANS

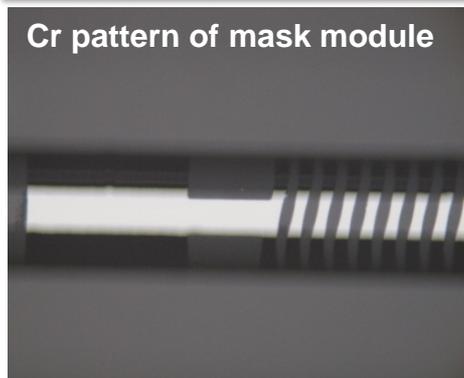


# 繊維状基材用3次元露光プロセス

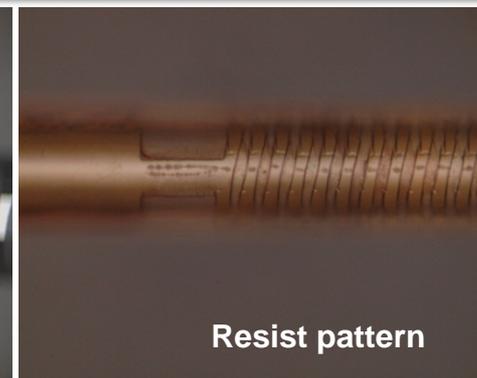


3D Photolithography System

Cr pattern of mask module



Resist pattern



Photolithography results  
(Quartz fiber with the diameter of 125 $\mu$ m)

Stepping-forwardly Continuous  
Photolithography Process

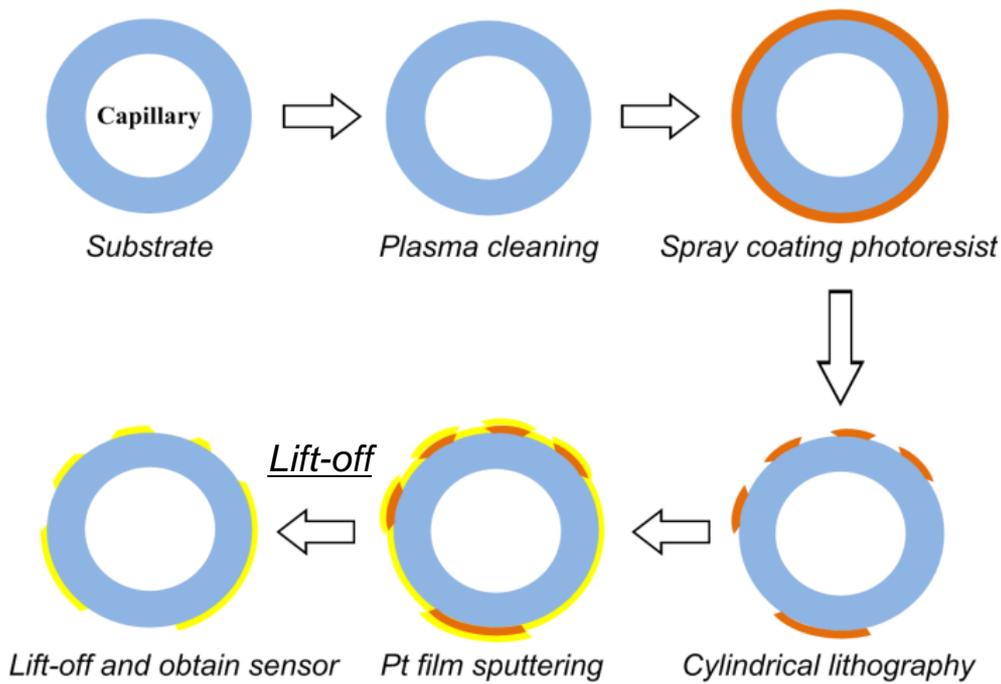
Transducers 2011



Macro BEANS

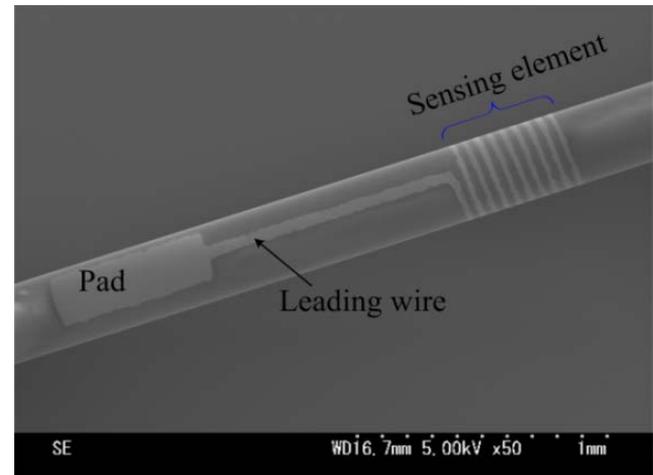
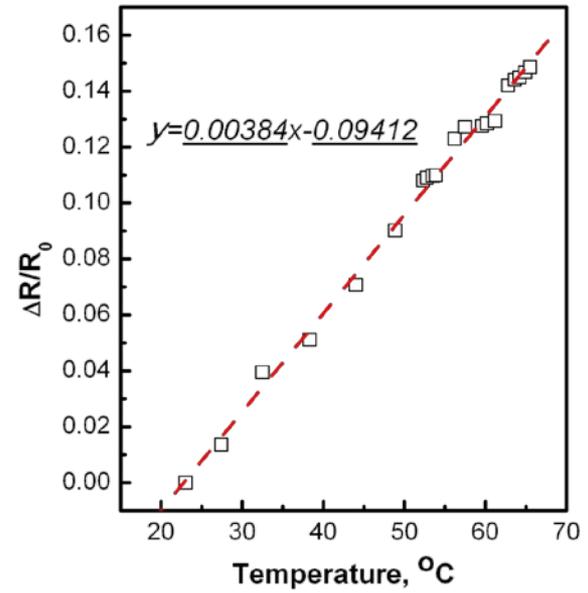
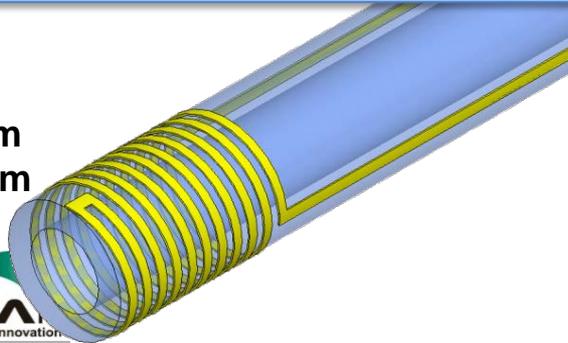


# 温度センサの試作



**Schematic of Pt resistance temperature sensor**

外径: 300 μm  
内径: 180 μm

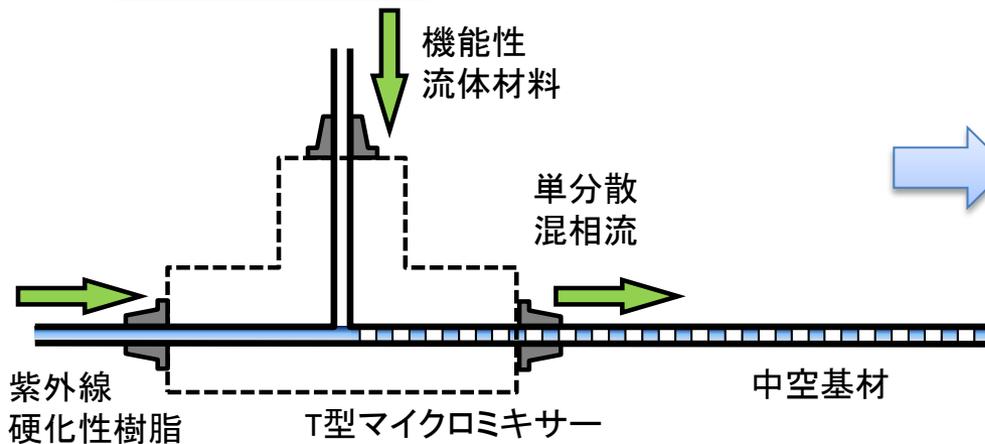


# 中空基材内パターン形成プロセス

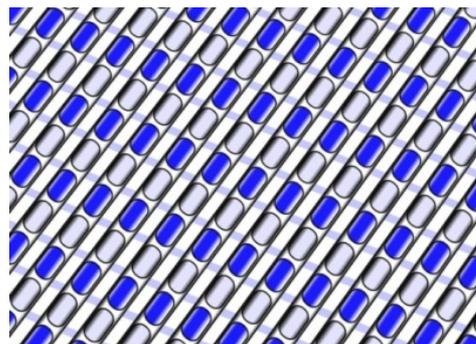
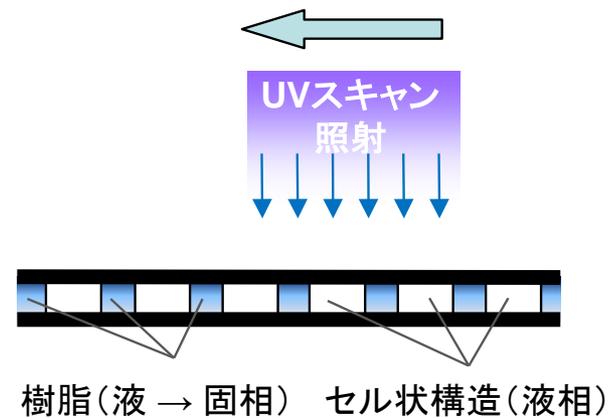
マイクロスケール混相流を応用したプロセス

→ ファイバー型表示素子を作成

パターン形成



硬化・封止



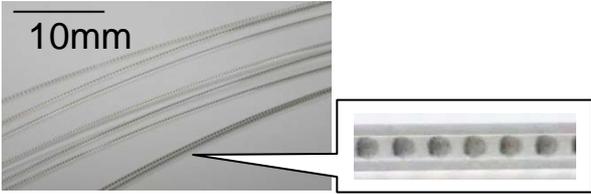
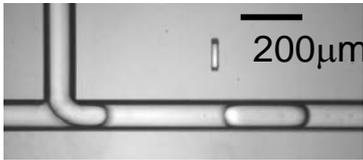
シート状  
集積化



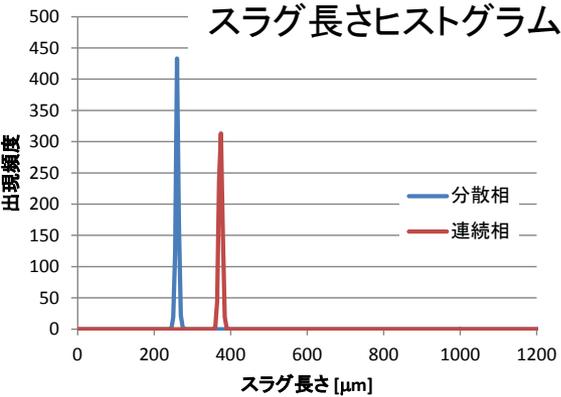
Macro BEANS



# 磁気駆動表示素子の試作



長尺・均一ファイバー作成

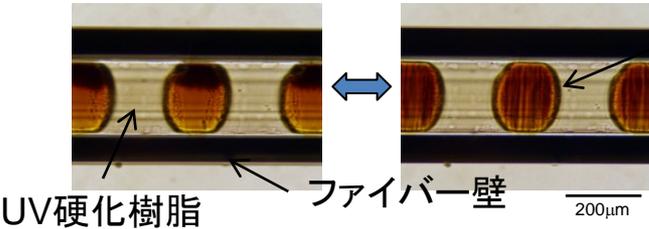


混相流パターン均一性の向上

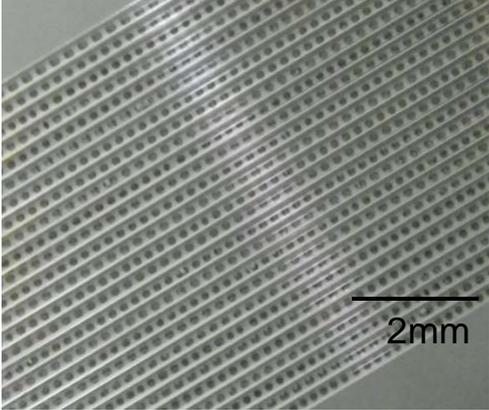
磁性顔料分散液体  
(イソパラフィン系溶媒)

外部磁場強

外部磁場弱

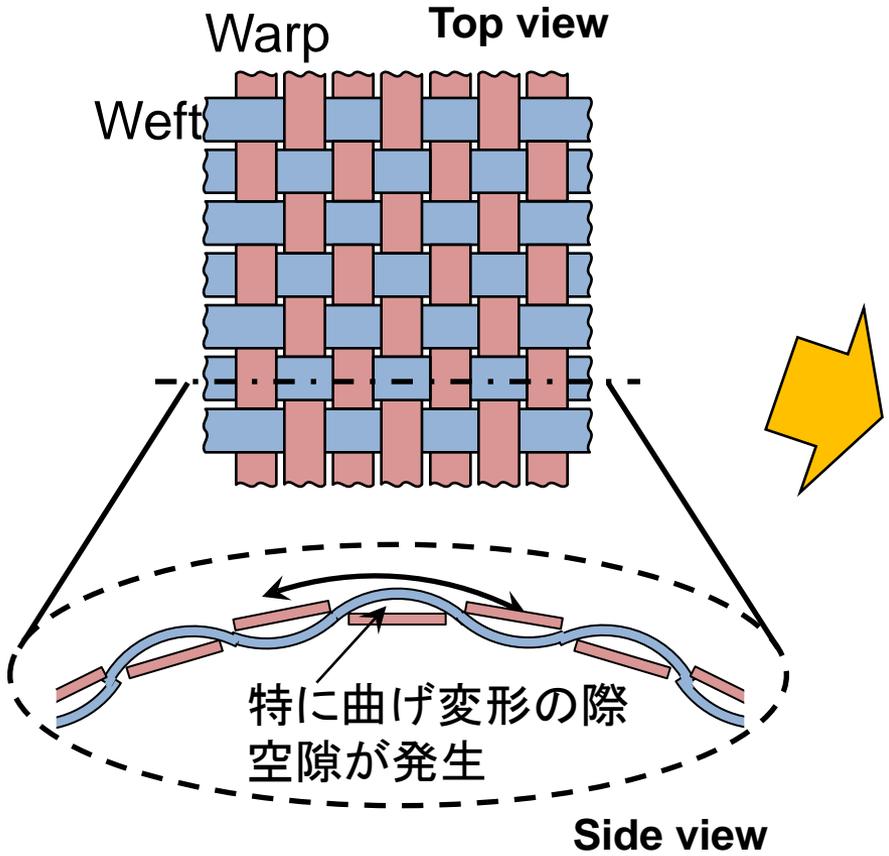


磁気駆動表示素子の試作

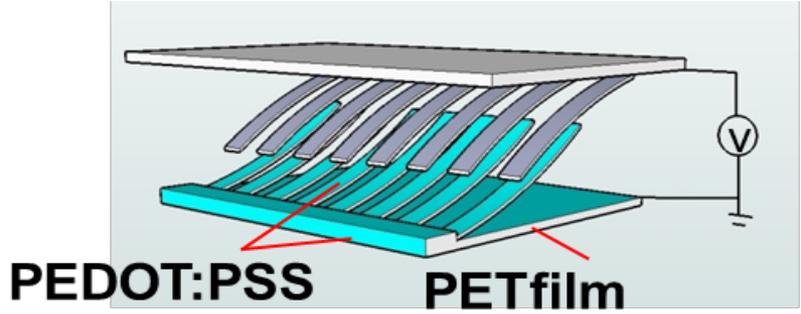


試作したシート状構造の例

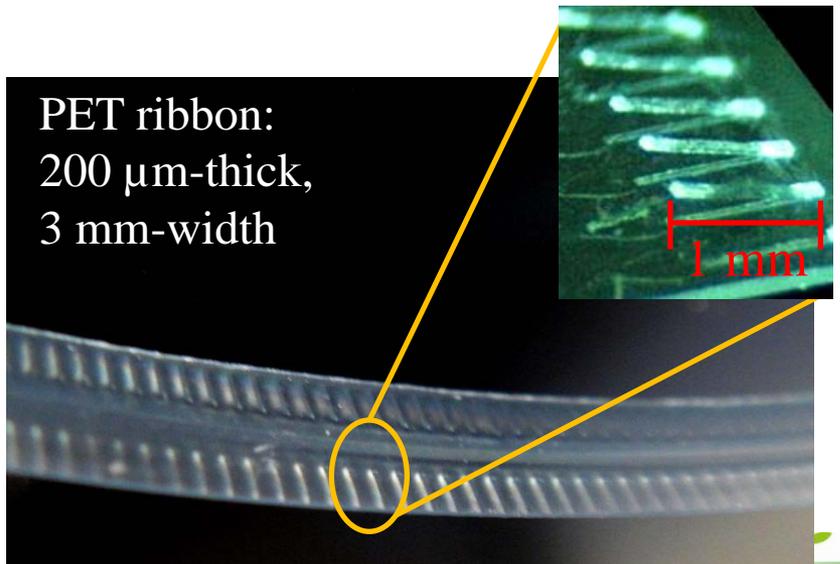
# Electronic Textile用接点構造



接触の安定化が必要



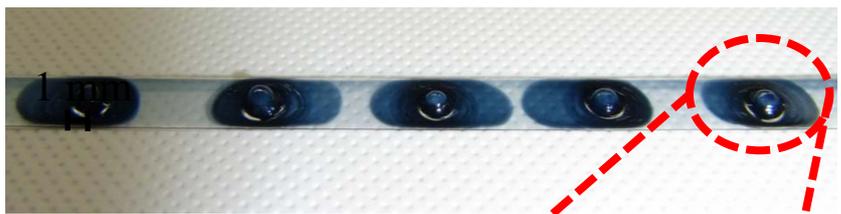
Spring Contact Structure



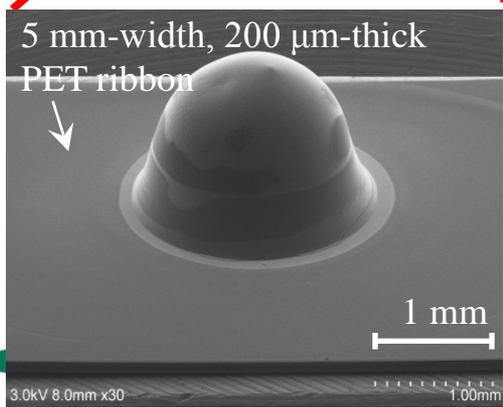
S.Khumpuang, et al: IEEE MEMS-2011

# シリコンエラストマー接点構造

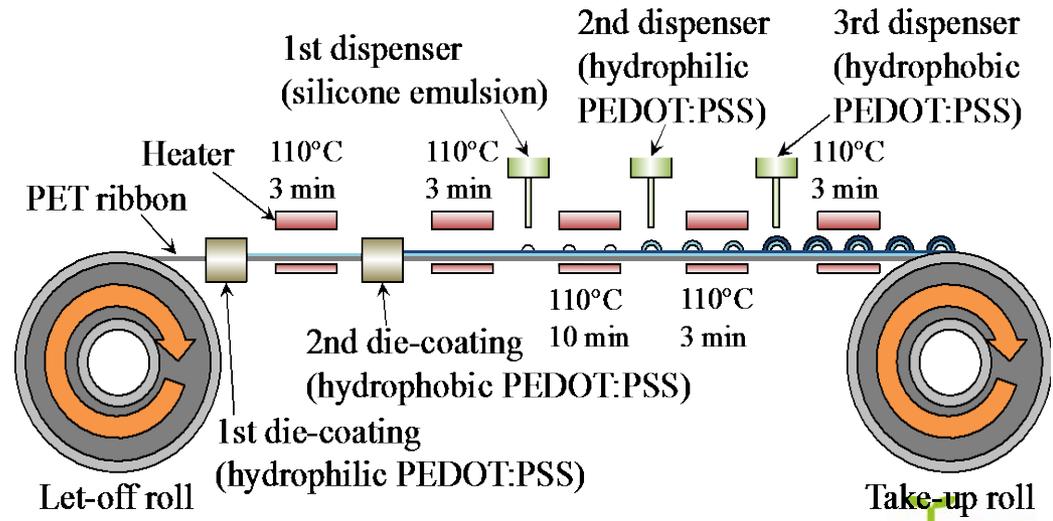
導電性ポリマー (PEDOT:PSS) を被覆した半球形状のシリコンエラストマー構造を開発 ⇒ 液体材料のディスペンシングと熱硬化のみで作製できるため、リールツールによる連続高速形成が可能。



PEDOT:PSS 被覆シリコンエラストマー接点構造



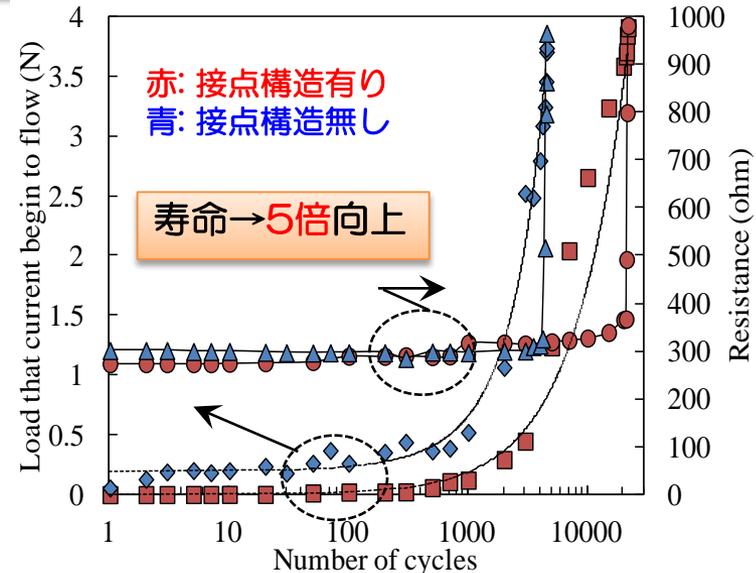
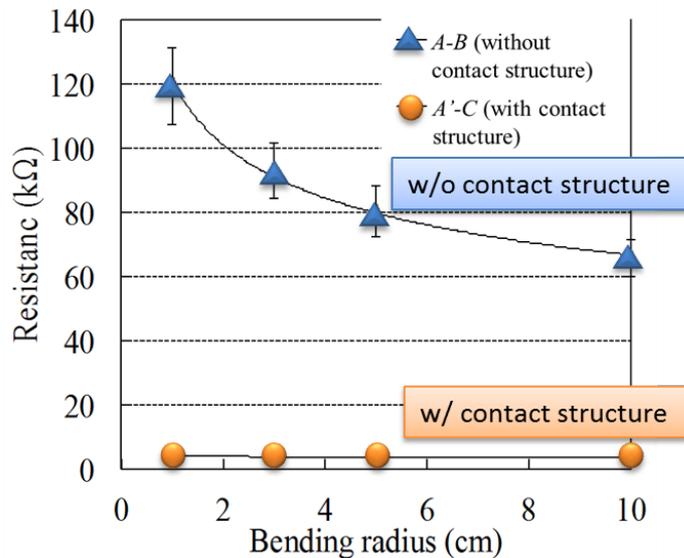
プロセス速度20m/minまで確認



リールツールを用いた構造の連続形成

# シリコンエラストマー接点構造 (性能)

- ・ 製織シートで曲率半径1cmまでの曲げ変形を与えても縦横基材間の接点は安定的な接触を維持。
- ・ 約1/30の荷重(2mN)で安定的な接触
- ・ 100MPaの荷重で対向基材を繰り返し接触させたところ、約 $2.2 \times 10^4$ 回まで安定的な導通を維持。



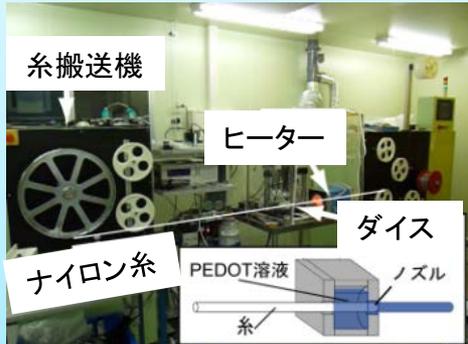
荷重100MPaの繰り返し接触時の抵抗測定結果

搬送などにより1日10回程度の繰り返し曲げが発生するデバイス (製織シート型太陽電池やディスプレイ)を想定

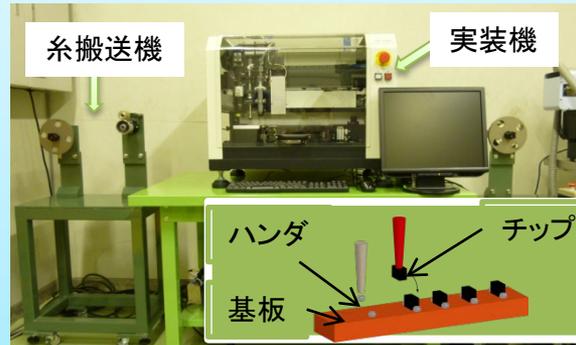
寿命：構造のある場合は約5年 (無い場合は1年程度)

# 大面積デバイス製造プロセス開発

## 1. ファイバーのマイクロ加工, チップ実装

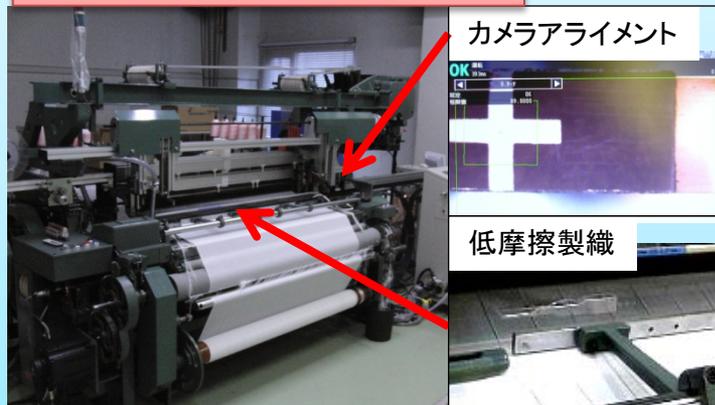


ダイコーターによる有機機能膜連続成膜



リールtoリール実装機によりMEMS,LEDチップを実装

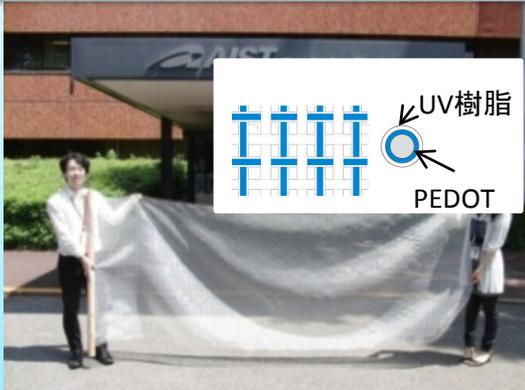
## 2. 機能性ファイバーのアライメント自動製織



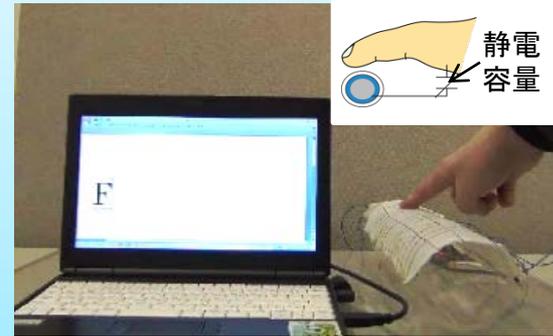
試作した電子機能ファイバーをアライメントし、低摩擦で素子を破壊しないよう連続製織

# メートル級大面積マイクロシステム

## メートル級タッチセンサ，ウェアラブルキーボード

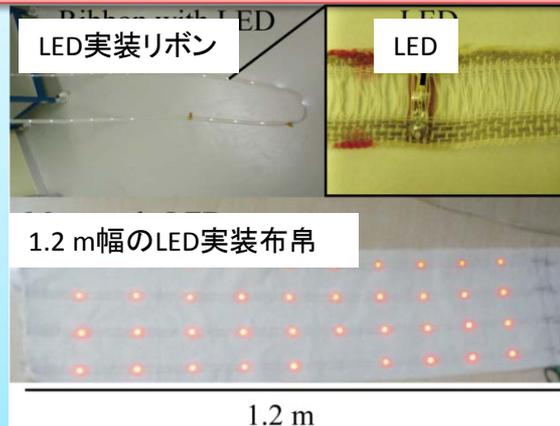


ベッドや床に敷くことができる1.2 m幅で大面積タッチセンサ



静電容量計測MCUとつないでフレキシブルなキーボードを実現

## メートル級LED照明，表示装置



蛍光灯(幅90 cm)の幅以上で照明や簡単な表示装置へ

# 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) 機能薄膜連続被覆

- ✓ 30 m/minの高速ダイコーティングプロセス
- ✓ 繊維状有機薄膜太陽電池の試作

## (2) 連続微細加工

- ✓ 20 m/minの高速熱ローラーインプリントを実現
- ✓ 3次元露光システムによる温度センサ試作
- ✓ 中空基材内パターン形成プロセスによる磁気駆動表示素子の試作

## (3) 製織集積化

- ✓ シリコンエラストマー接点構造を開発
- ✓ 自動織機(ウィービング装置)によるメートル級タッチセンサとメートル級

LED照明

# Macro BEANSハウス

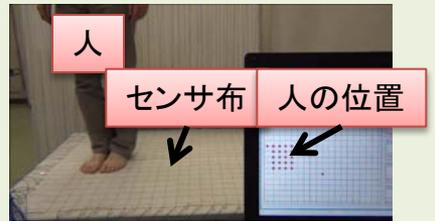


## 接点付きカーテン



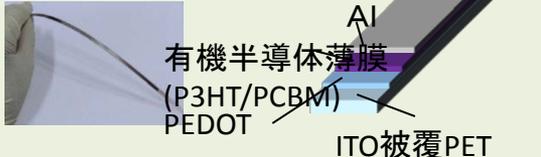
ファイバー上に接点を形成

## メートル級タッチセンサ



有機導電性ポリマーをコーティングしたファイバーを製織した構造の静電容量式メートル級大面積タッチセンサ

## 有機太陽電池



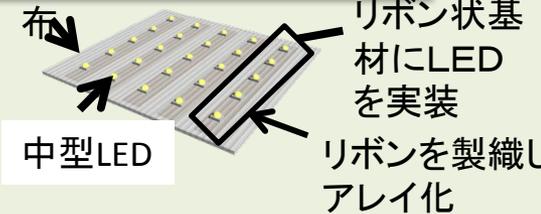
有機材料をファイバー上に連続コーティング

## 大気圧成膜Si太陽電池



大気圧成膜によるシリコン太陽電池

## フレキシブルLED照明



リボン状基材上にLEDを連続実装し製織

# Touch SensorとLED布

