

2011.7.14 BEANSプロジェクトセミナー

メーター級マイクロシステム 集積プロセス技術

伊藤寿浩

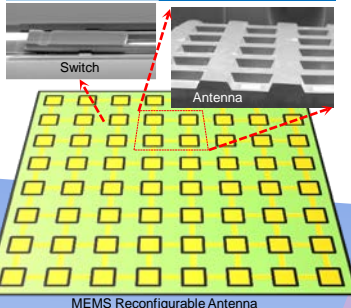
BEANSプロジェクト・Macro BEANSセンター
産業技術総合研究所・集積マイクロシステム研究センター

Macro BEANSの全体像

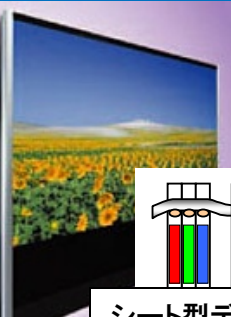
大面積エネルギーハーベスティングデバイス



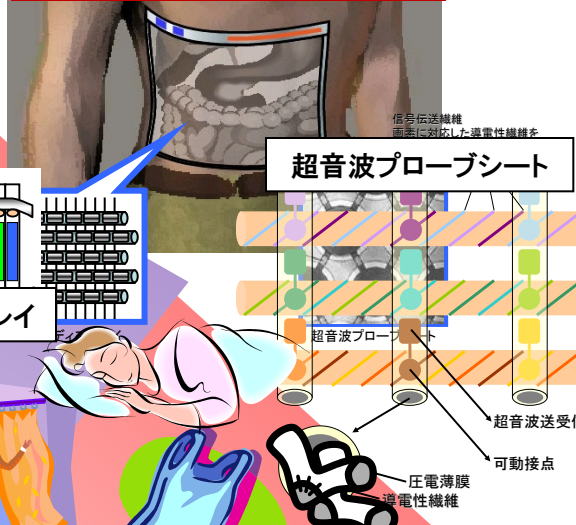
大面積通信デバイス



大面積映像デバイス



シート型健康管理デバイス



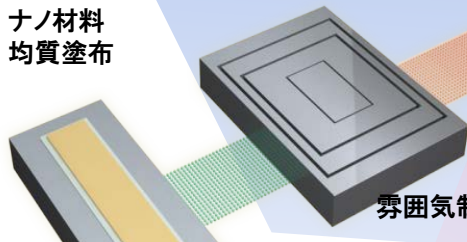
光電効果・ピエゾ抵抗効果・熱電効果・ゼーベック効果
・ペルチェ効果を利用した大面積Siデバイス

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

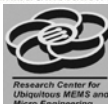
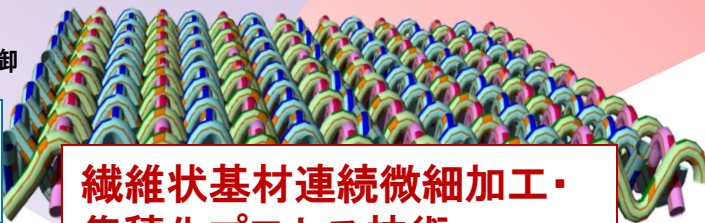
フレキシブルシートデバイスを基板の大面積化
を伴うことなく実現する、製織技術などを利用した
新たな製造技術を開発する

ウェアラブル発電



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



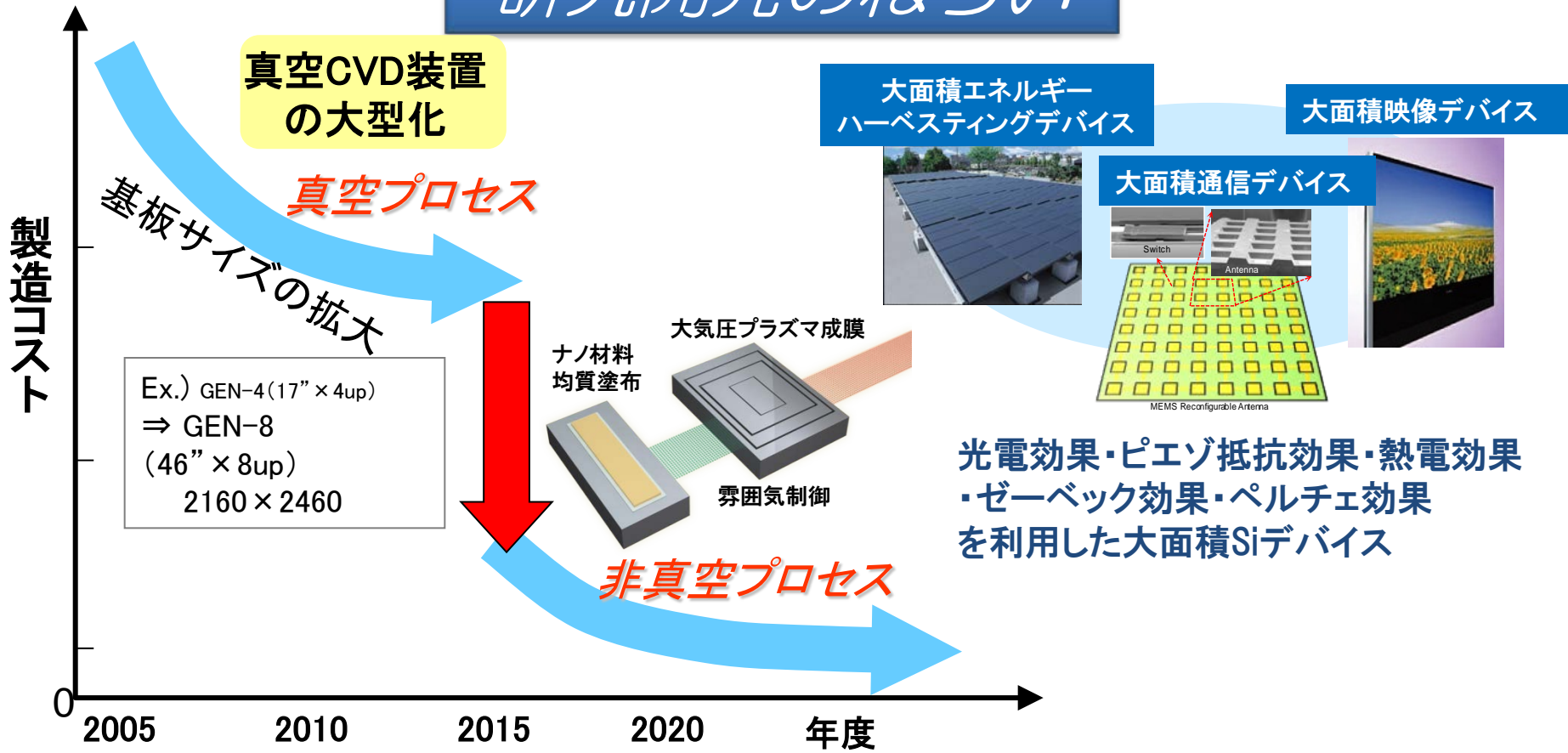
Macro BEANS



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

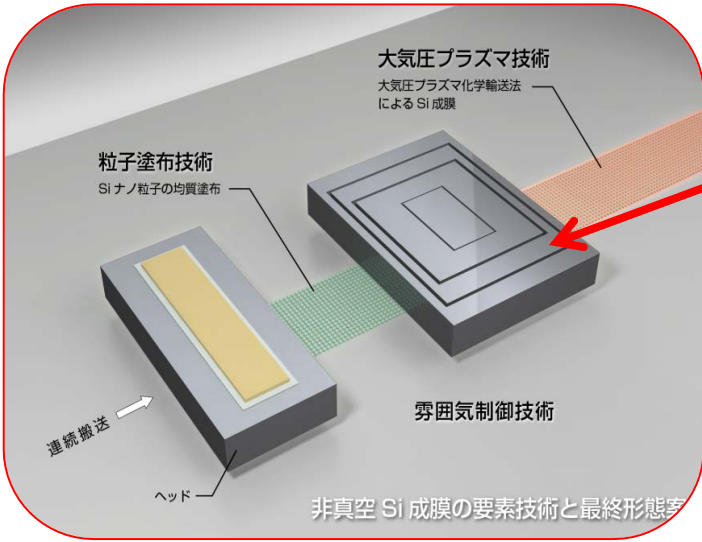
③ 局所環境制御技術

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 ⇒ SiH₄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
 - ・大気圧プラズマ化学輸送法によるシリコン膜の膜特性把握
 - ・成膜速度律速因子の解明

〔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



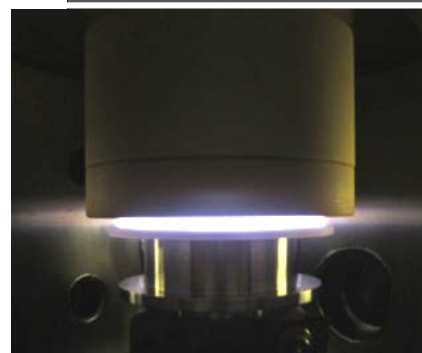
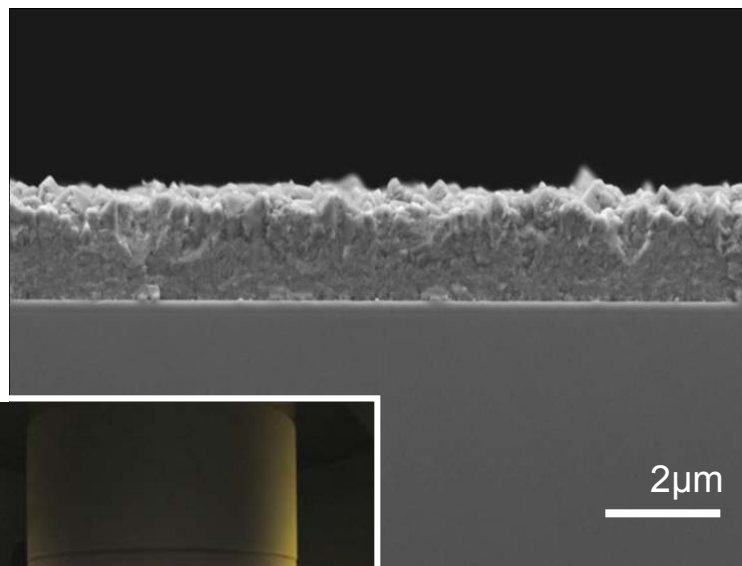
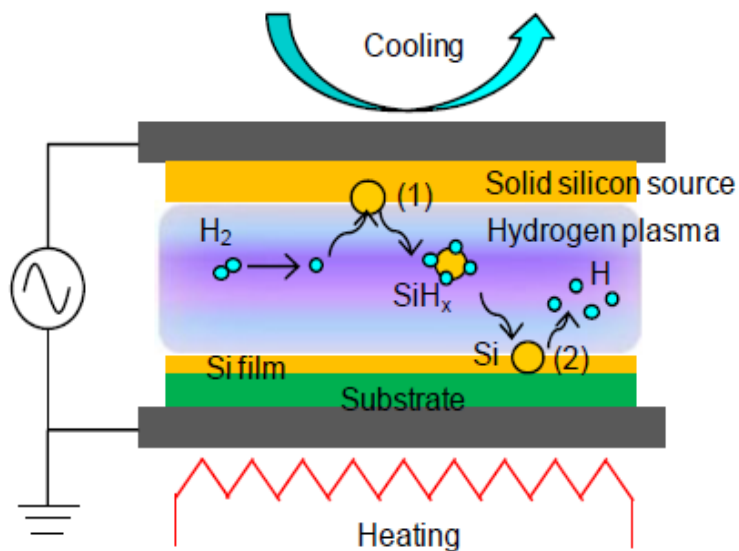
①大気圧プラズマ成膜技術



大気圧下 (700 Torr) でのシリコン成膜

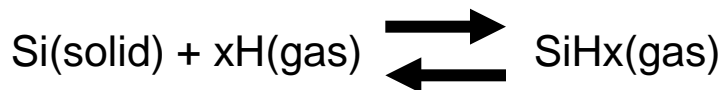
成膜原理 プラズマ化学輸送法

H₂、シリコンターゲット使用 (SiH₄フリー)



大気圧成膜Siの断面SEMと放電の様子

反応式



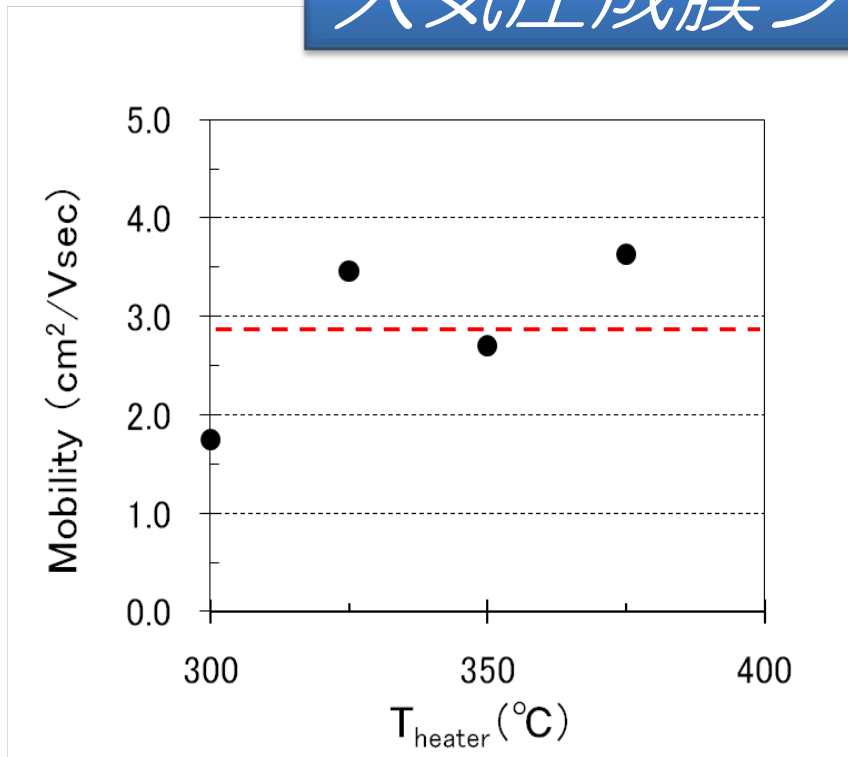
温度が低いほど右に反応が進む

TIA nano
Tsukuba Innovation Arena

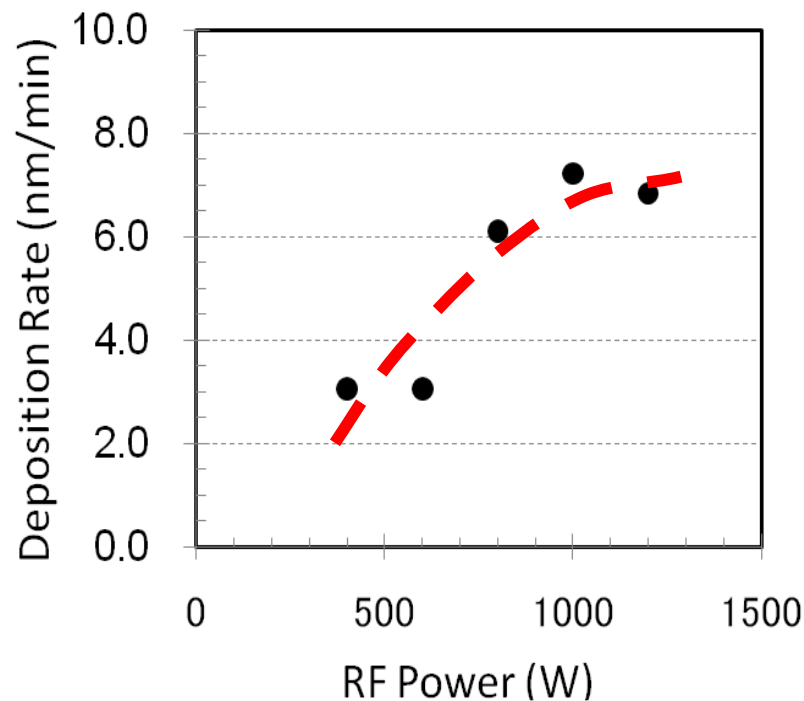


Research Center for
Ubiquitous MEMS and
Micro Engineering

大気圧成膜シリコンの膜特性



Hall電子移動度



成膜速度の放電電力依存性

✓ シリコン膜の電子移動度は 2.9 cm²/V·sec

✓ 成膜速度は放電電力(ラジカル密度)とともに増加し、飽和の傾向

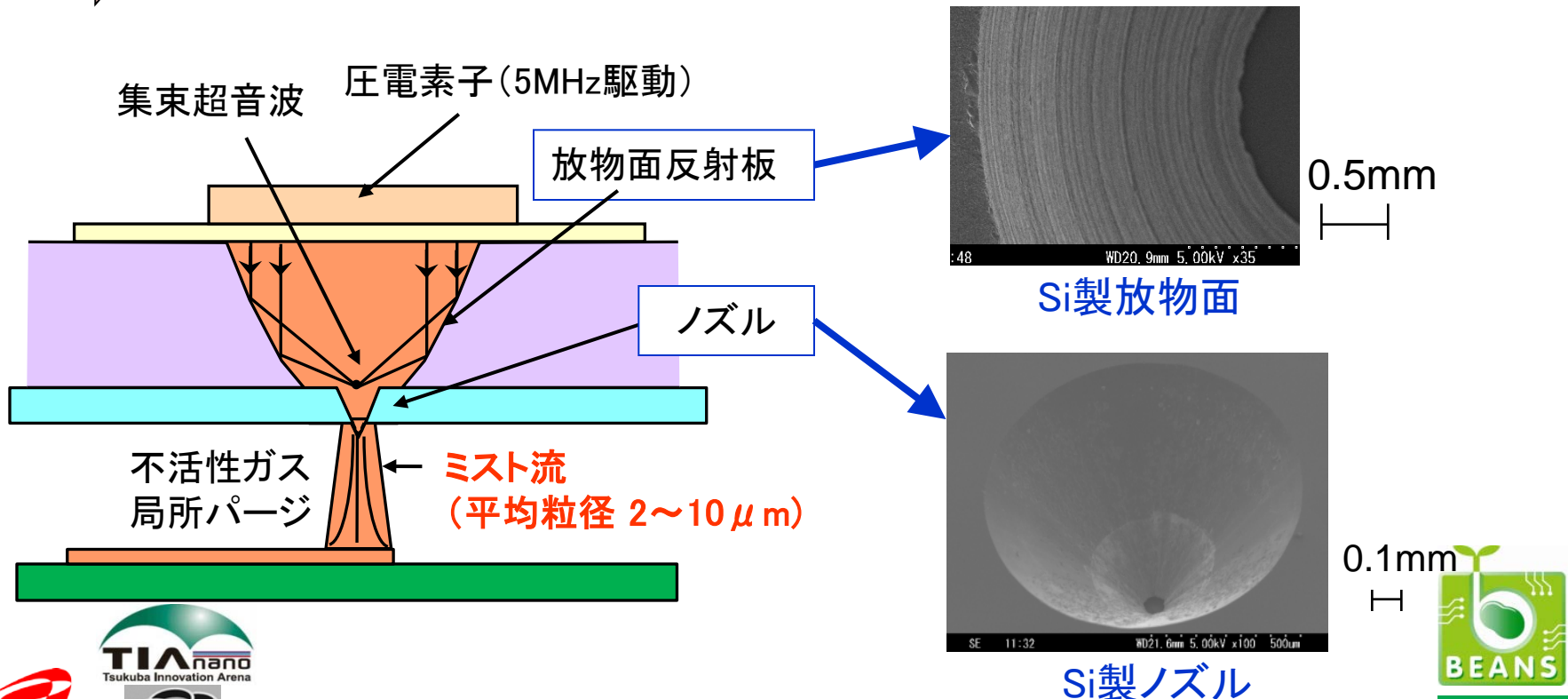
➡ 放電用電源の高周波化(高電子密度化)により成膜速度向上を検討

ミストジェットSi粒子塗布技術

特長

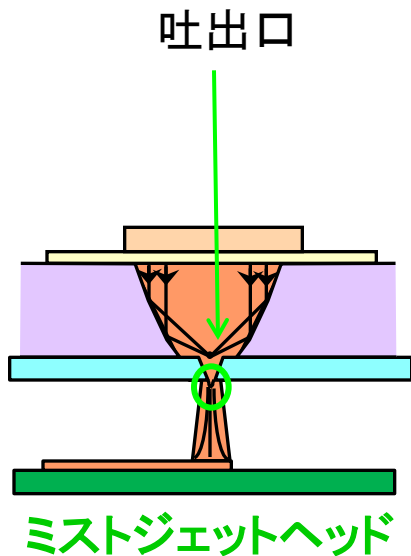
1. 超音波エネルギーの利用により平均粒径数 μm のSi粒子群 (ミスト) を連続的に吐出可能 → 機能膜の均質化
2. 吐出径が小さいため、Si微粒子分散液の蒸発が早い

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



ミスト粒径制御～ノズルエッジ加工と粒径分布

異方性エッチングによりノズルエッジを鋭角化することができ、粒径が安定



	放物面	ノズルエッジ部	粒径分布
機械加工		<p>放物面のエッジは表面進行波の波長(約2.6 μm)よりも大</p>	
異方性エッチング		<p>ノズルエッジの鋭角化</p>	

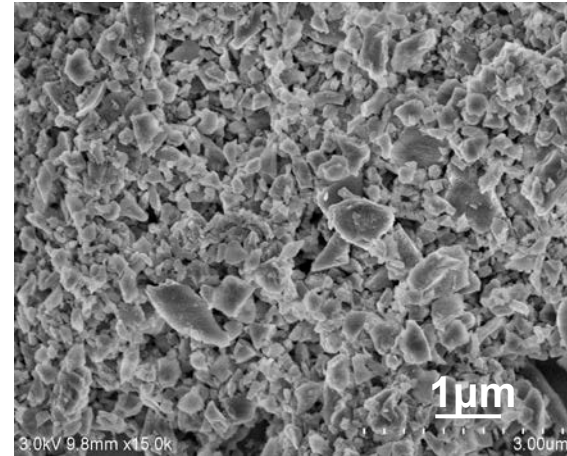
Si粒子塗布膜厚評価

<塗布>

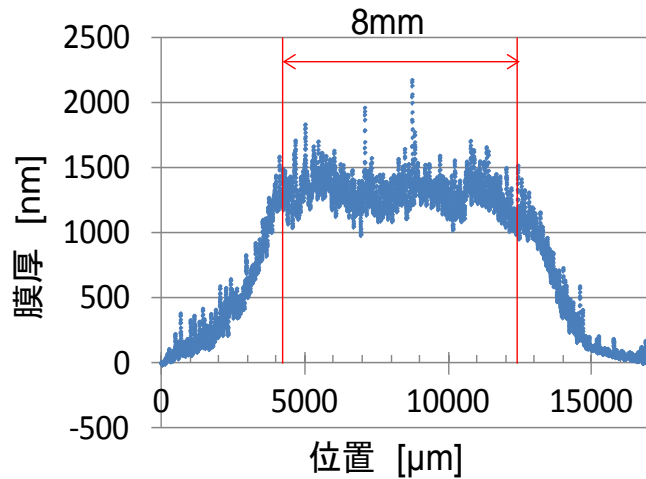
10mm□にミストジェットによりSi粒子塗布

<評価>

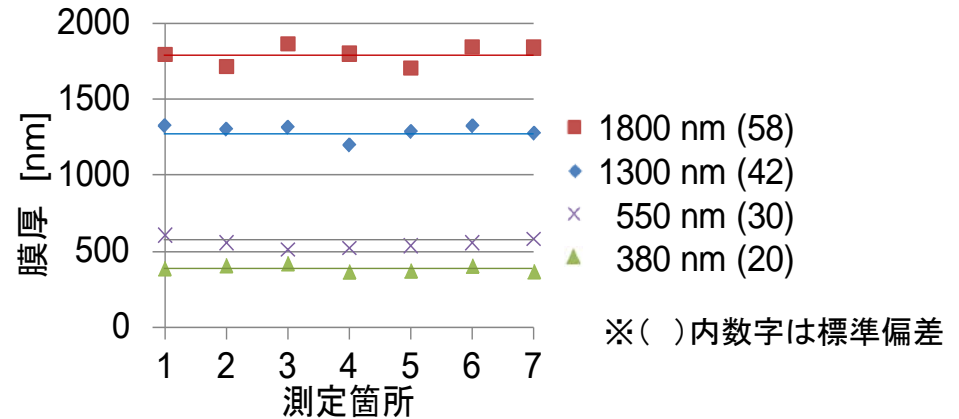
塗布端部を除く8mmを有効領域として塗布厚を触針式にて測定、評価



Si粒子塗布膜表面



膜厚測定例



膜厚評価結果

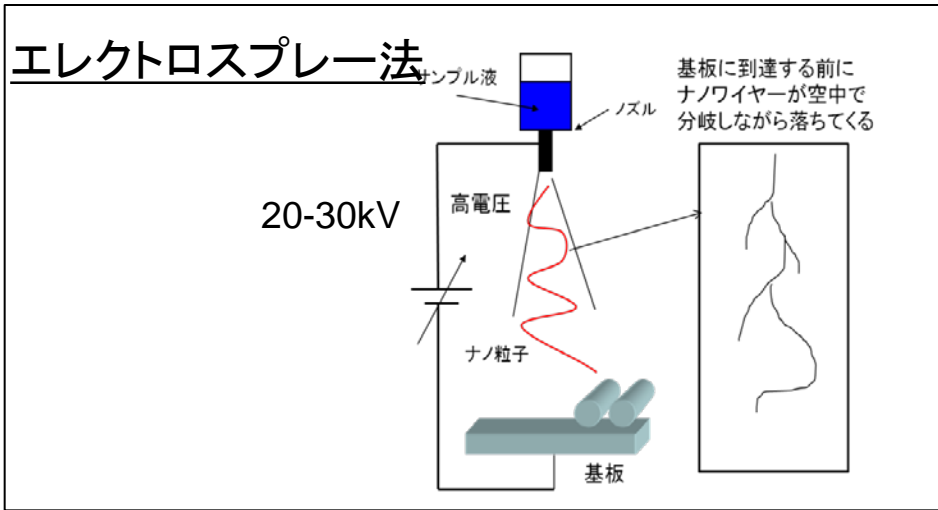
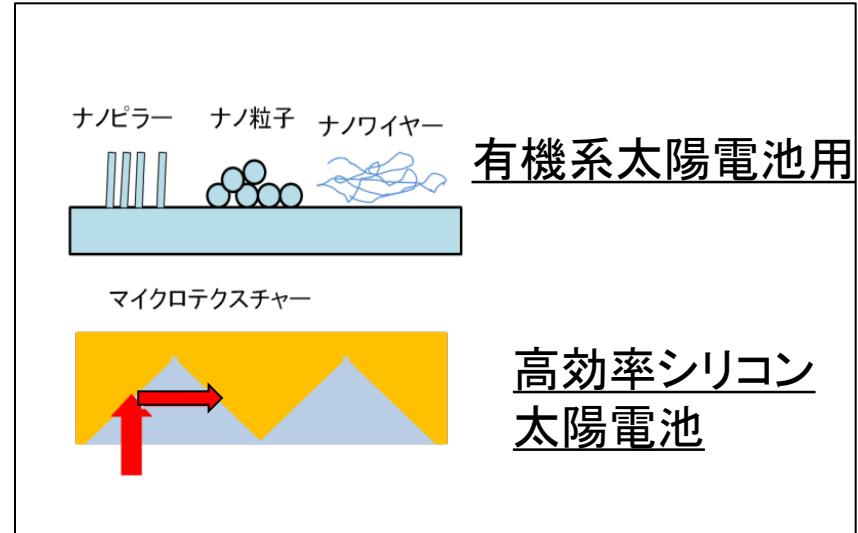
膜厚均一性の目標値 $\pm 10\%$ を達成

②ナノ材料均質塗布技術

エレクトロスプレーによるナノ粒子の形成

研究の背景

デバイスの高性能化には表面積を広げるため
マイクロ・ナノ構造体の形成が必須。
有機太陽電池、光触媒等については
ナノワイヤー、ナノロッド
シリコン系薄膜では
マイクロテクスチャーの構造体形成
マイクロ・ナノ構造体をメーター級の大面積
基板に短時間で形成する技術として
エレクトロスプレーに着目



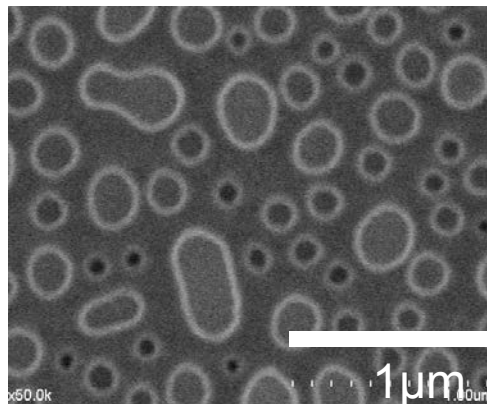
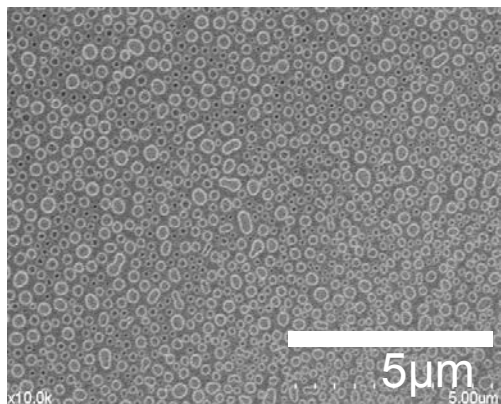
特長 ・ガスが不要で電界のみで
非常に細かいミストができる

- ・大面積噴霧が可能
- ・課題はワイヤー以外でかつ
高分子を使わないナノ構造形成法の確立

前駆体をSnCl₂として加熱温度を下げた場合

(溶媒:エタノール 4wt%、電圧27kV)

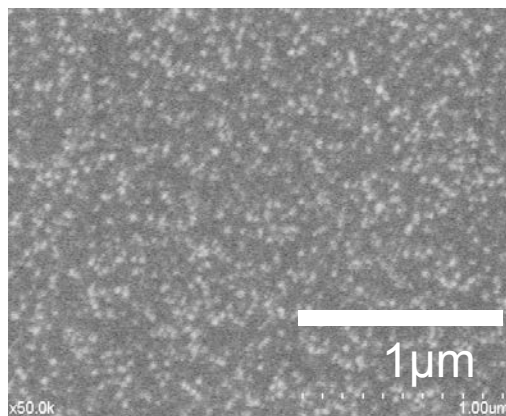
大気中200°C 1時間加熱では均一なナノ粒子



Y. Matsushima et al.,
J. Cera. Soc.Jpn 114
(2006)1121

SnCl₂を前駆体にした場合に
構造制御が非常にしやすい
(従来のSnO₂薄膜作成時は
SnCl₄を前駆体)

大気中300°C 1時間では均一なさらに微細なナノ粒子



より微細な
ナノ粒子の形成に成功

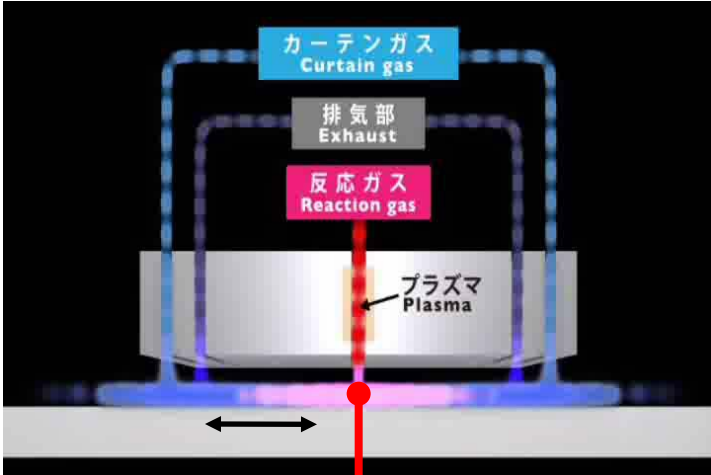
局所環境 雰囲気制御技術の開発

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

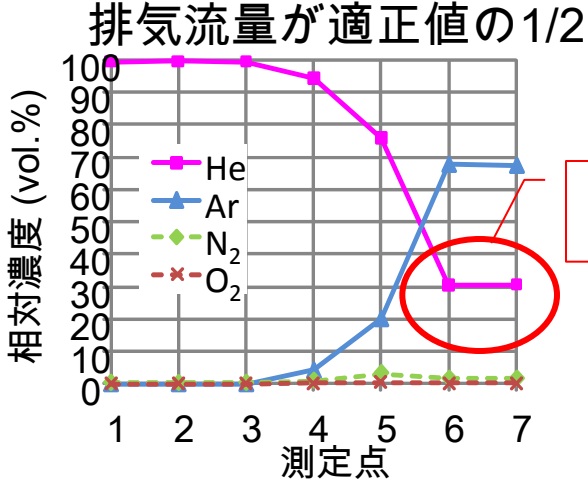
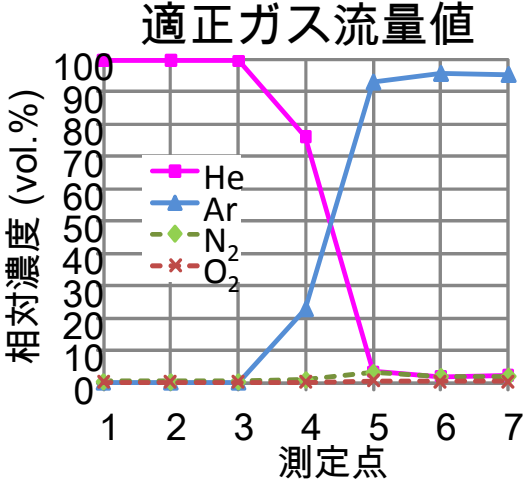
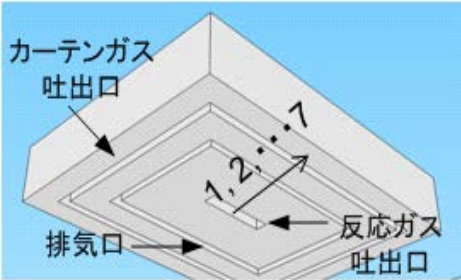
独自のガスカーテン構造

- ・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)

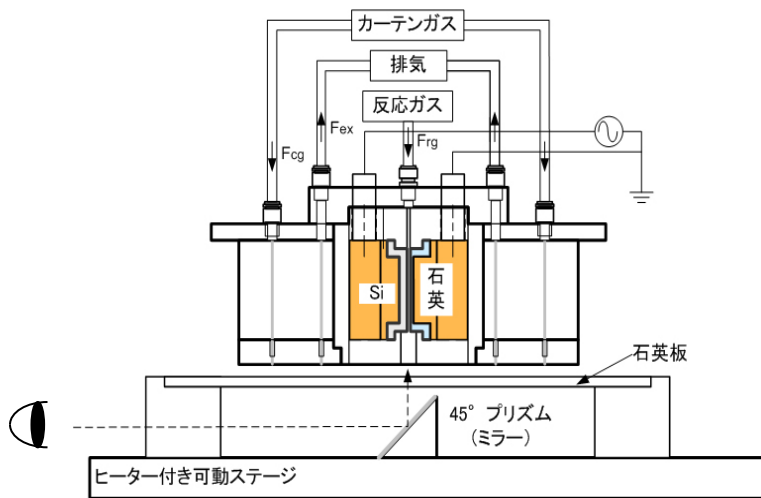
- ①ガス流量設定への流体シミュレーション活用
- ②実機による検証(ガス分析)



反応ガスの外部漏洩

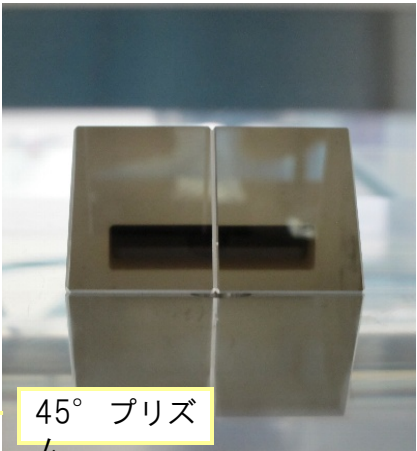
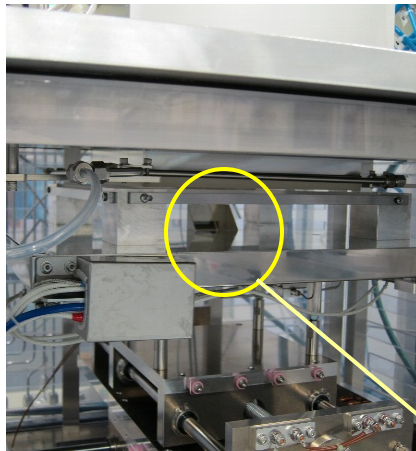
ガスカーテン構造による擬似的な密閉清浄空間の形成を実証

雰囲気制御下での大気圧放電

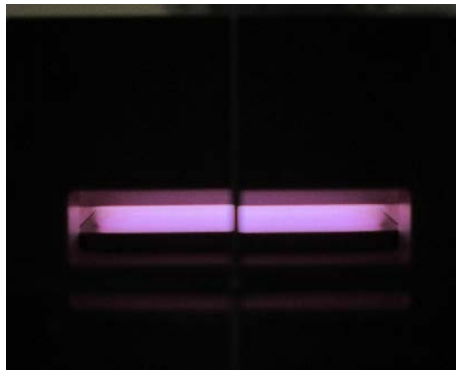


電源周波数 : 13.56MHz
 投入電力 : 300 W
 放電Gap : 3.5mm

Heガス100%、及びH₂混合Heガスにて反射波の無い安定放電を確認



45° プリズム



(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

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
- ✓ 目標の電子移動度を超える $2.9 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ を確認

(2) ナノ材料均質塗布技術

- ✓ ミストジェット塗布; 膜厚均一性の目標値 $\pm 10\%$ を達成
- ✓ 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の形成を実証
- ✓ 雰囲気制御下(760Torr)で水素混合Heガスによる安定放電を確認

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

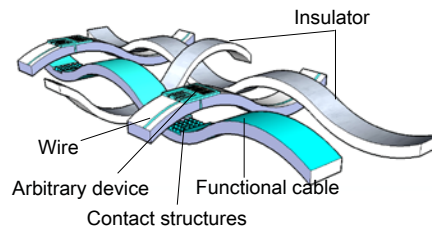
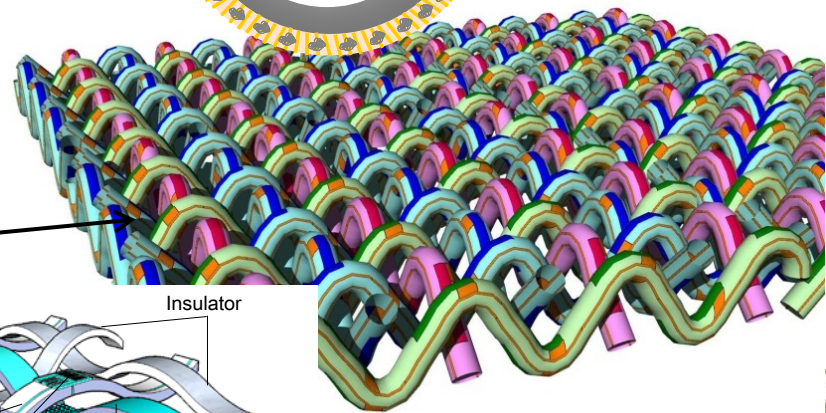
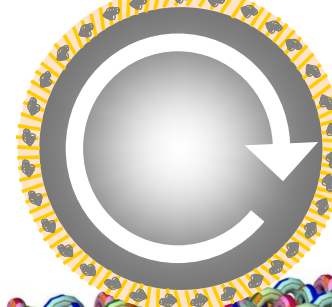
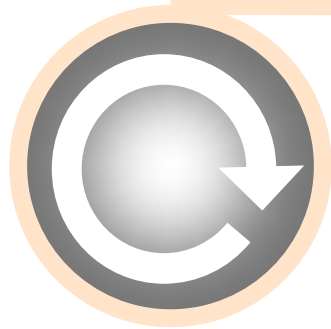
— Reel-to-Reel Continuous Deposition & Patterning

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

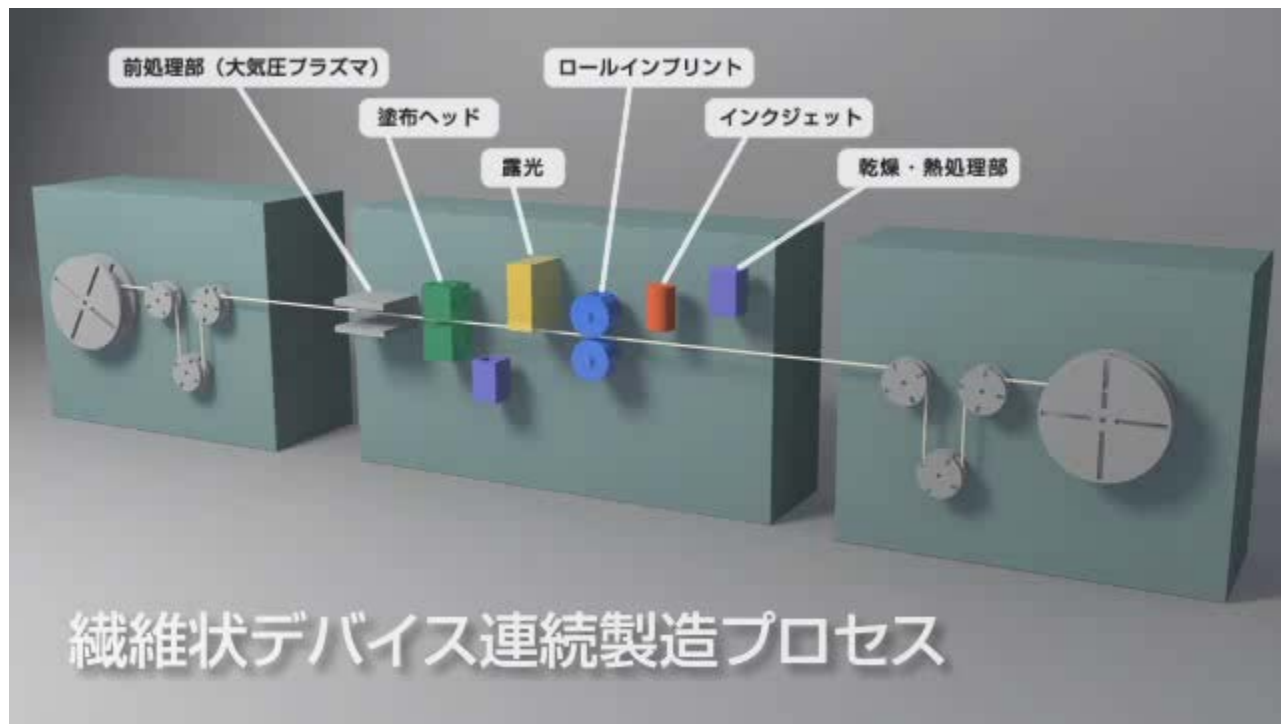
繊維状デバイス的高速連続製造工程

【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

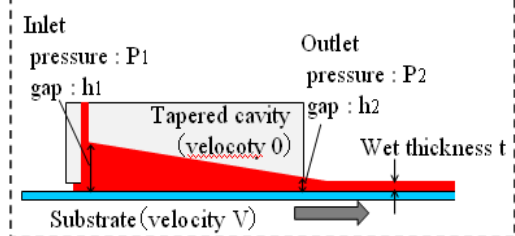
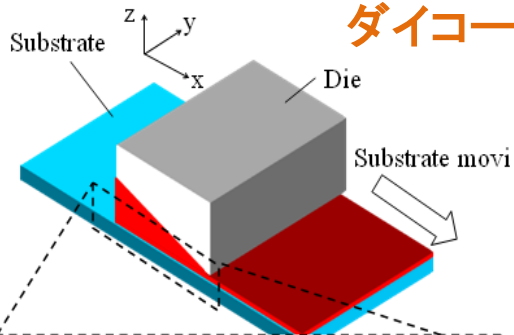


高速ダイコーティング技術

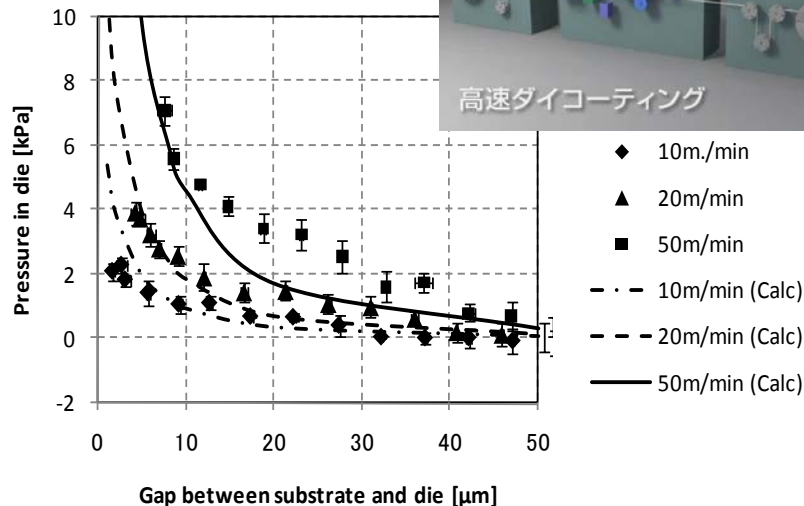


基材(W:5mm)とダイ

ダイコーティング

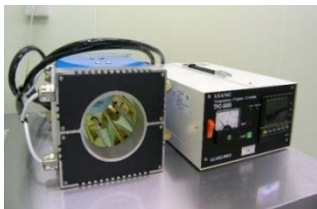


溶液塗布解析モデル

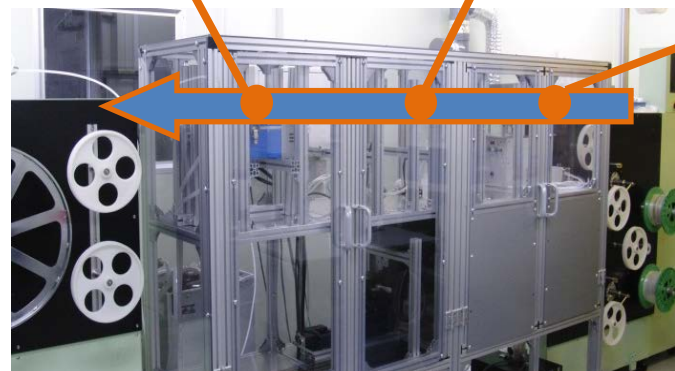


塗布ヘッド内圧のギャップ依存性膜厚制御

乾燥

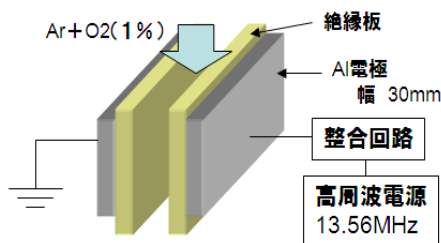


赤外線イメージ炉

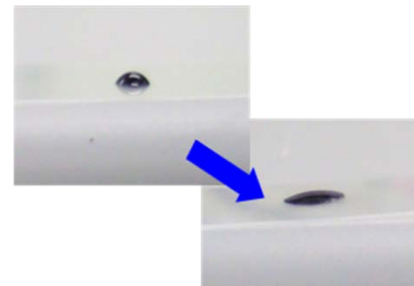


連続コーティング装置

表面改質



プラズマヘッド概略



改質前後の濡れ性変化

高速ダイコーティング技術(2)

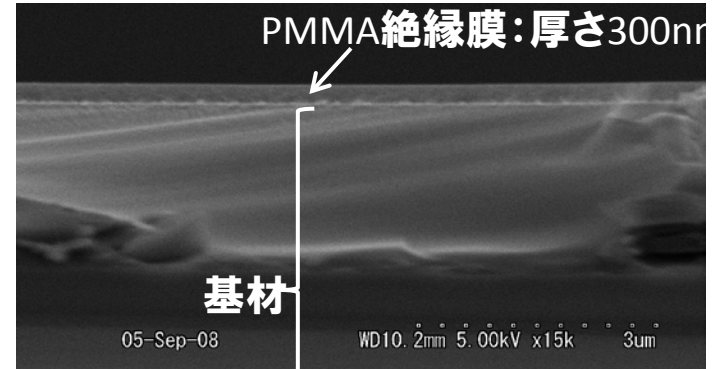
繊維状基材への被覆試作



PEDOT被覆PET平線
(w:5mm × t:100μm)

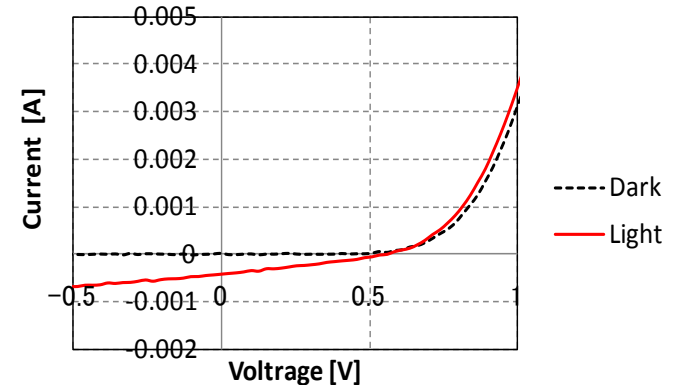
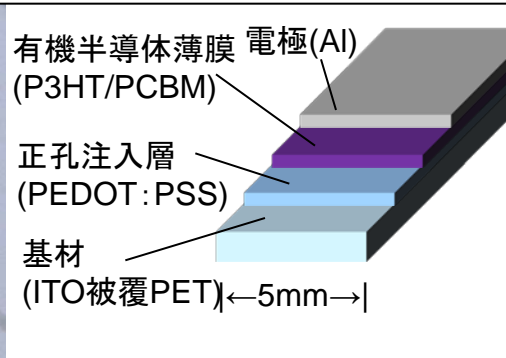
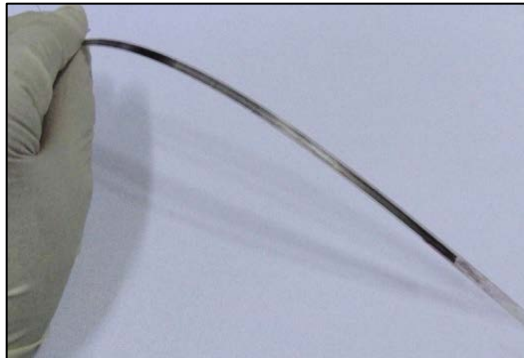


PEDOT被覆ナイロン線
(φ165μm)



形成薄膜の断面SEM画像

繊維状デバイスの試作



試作した長尺有機太陽電池とI-V特性

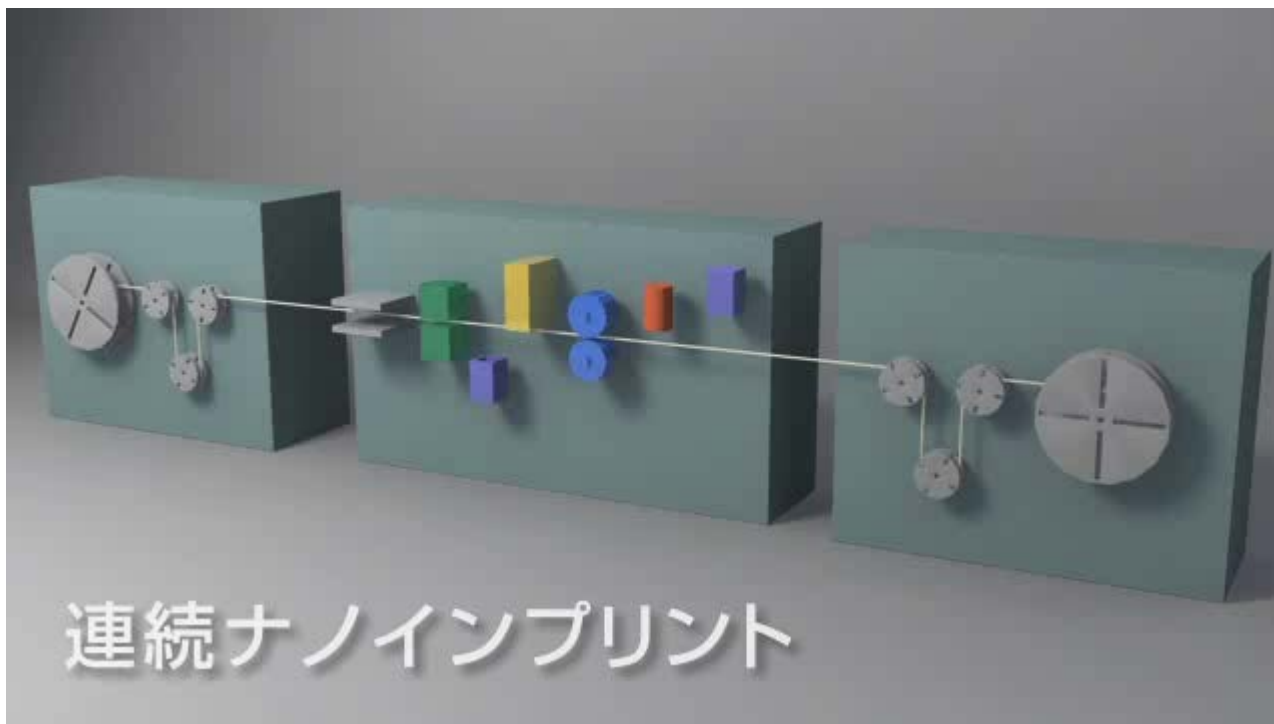
ナノ機能薄膜の連続形成 長尺デバイスを実現



Macro BEANS



連続ナノインプリント技術



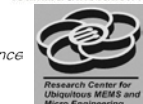
連続ナノインプリント



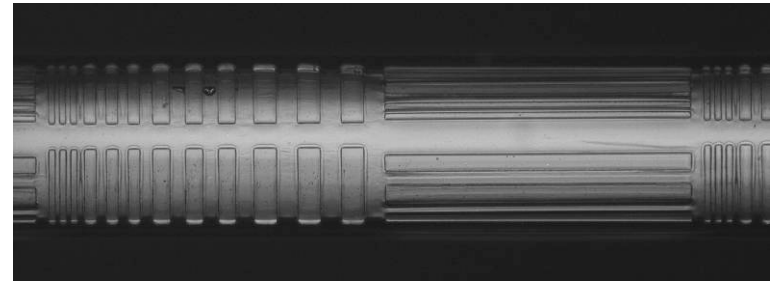
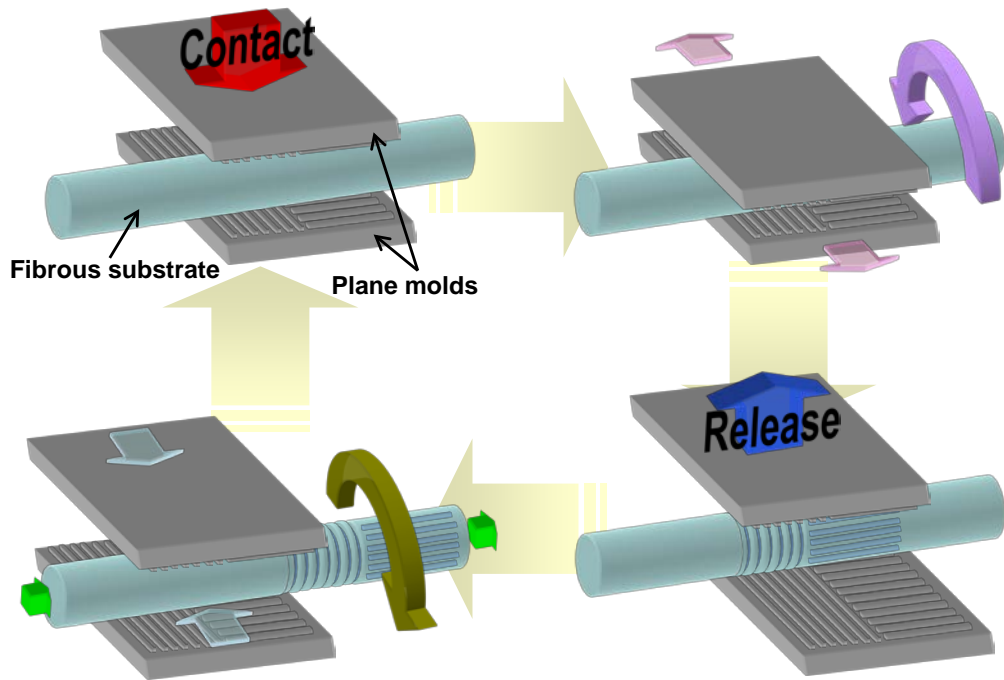
スライド式リールツール
リールインプリント装置



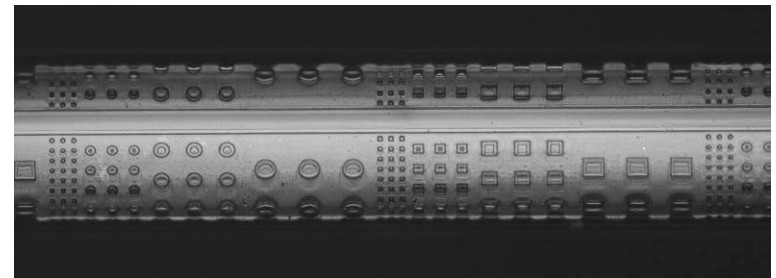
複合機
(ローラーインプリント装置)



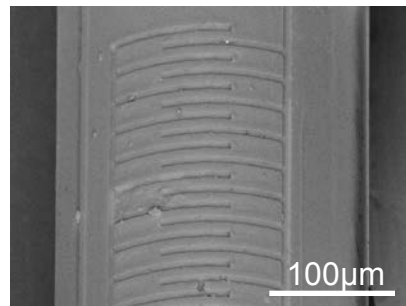
スライド式リールツールリールインプリント



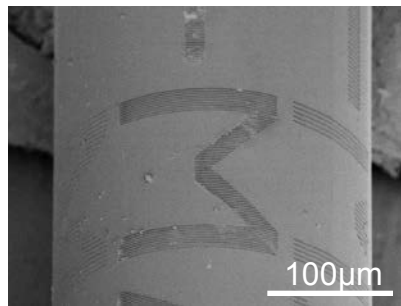
Lines / spaces



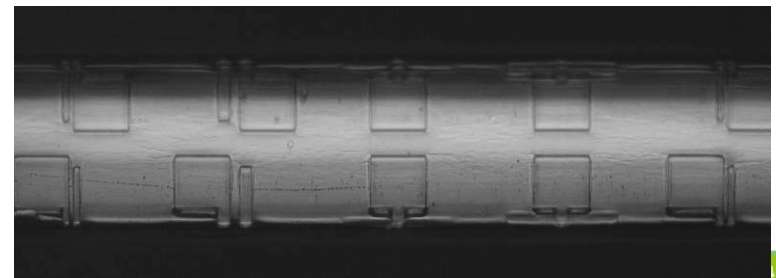
Dots



疑似MEMSパターン



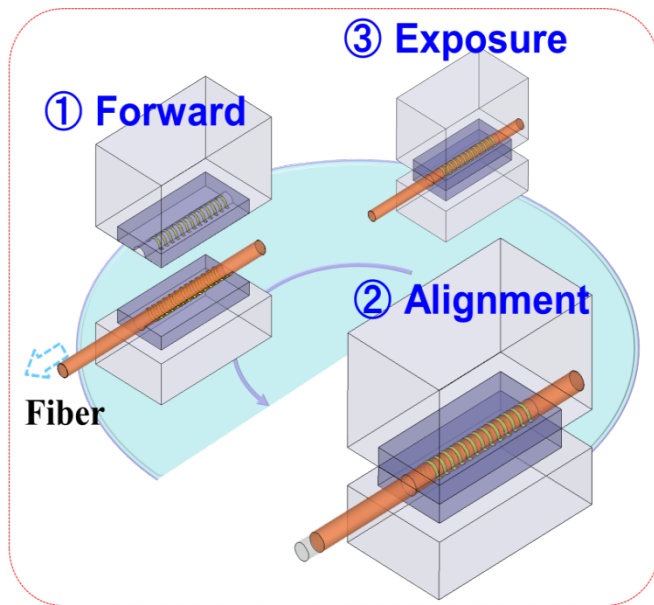
1 & 2 µm回折格子



Electrode pads

250 µm

繊維状基材用3次元露光プロセス



Continuous alignment process could be enabled by using the mode of stepping-forwardly process.

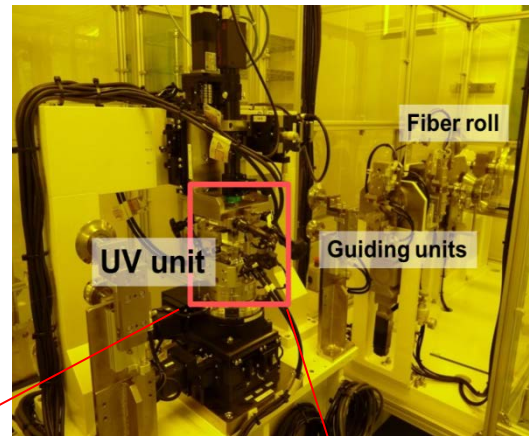
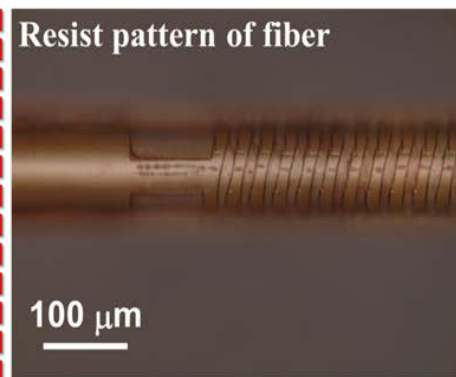
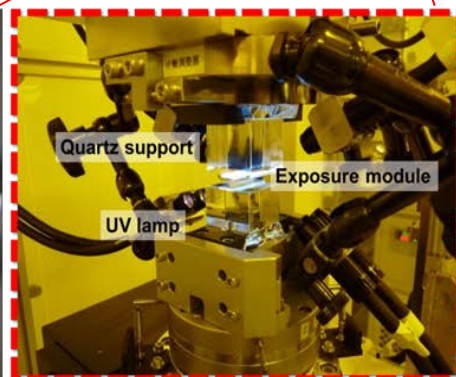
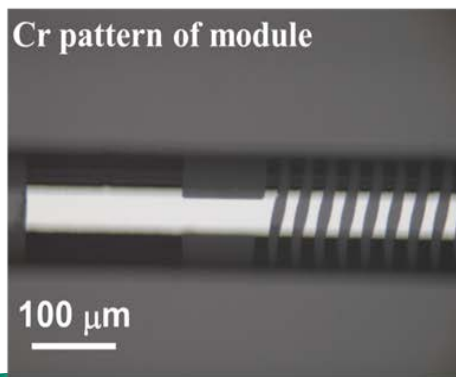


Fig. Photograph of the continuous exposure unit.



Yi. Zhang et al., Transducers 2011, Beijing

中空基材内パターン形成技術

■ 特徴

- 中空繊維内部に規則的パターンを形成
- 各種流体を封入可能

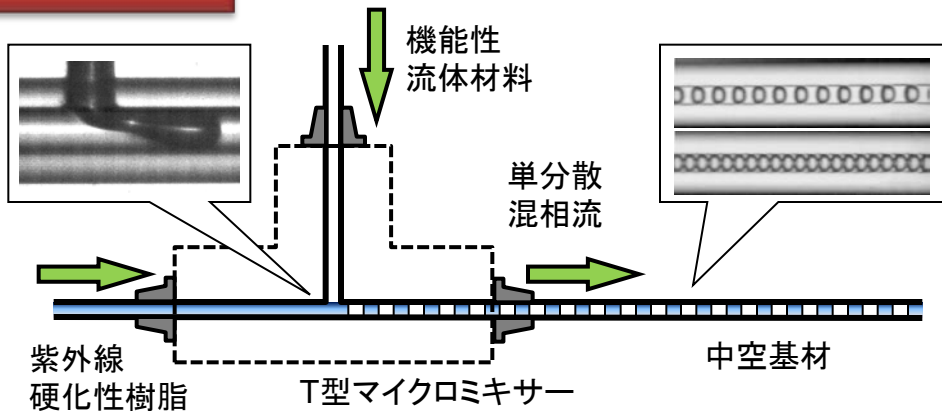


- 応用: シート型ディスプレイなど

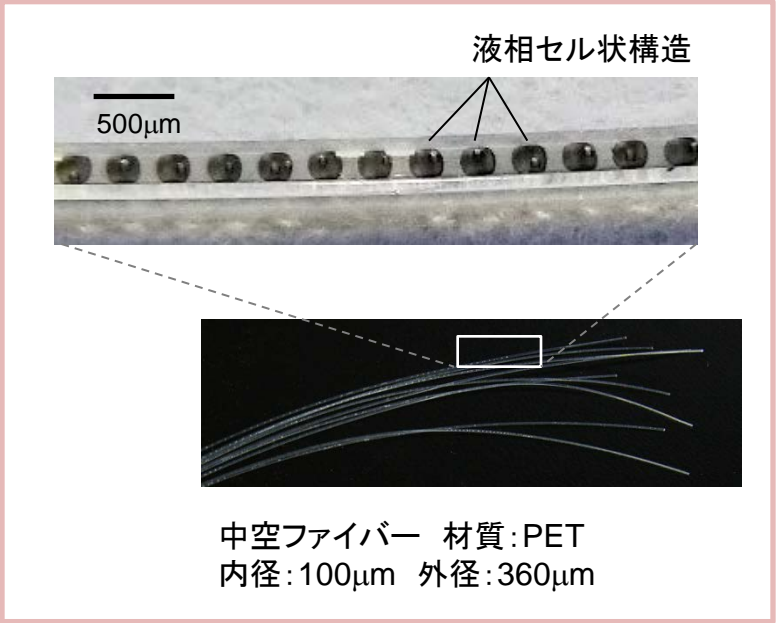
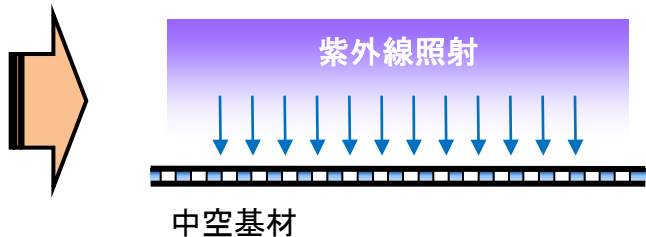
■ プロセス概要

- マイクロ流路中で複数流体材料のパターン形成
- 樹脂材料硬化によりパターンを固定

パターン形成



硬化



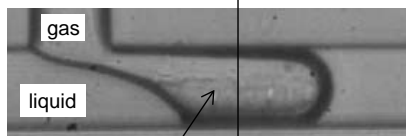
中空基材内パターン形成技術 (2)

■ マイクロ流路によるパターン形成の制御・解析

混合部ぬれ性の影響評価

PDMS (hydrophilic)

gas: 5.9 mm/s
liquid: 9.5 mm/s

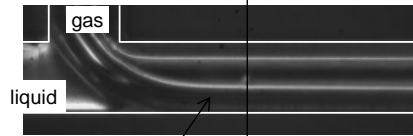


Dry surface

親水性PDMS流路
(接触角ヒステリシス小)

Si/glass

gas: 5.3 mm/s
liquid: 11.7 mm/s



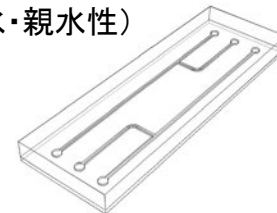
Liquid film

親水性シリコン・ガラス流路
(接触角ヒステリシス大)

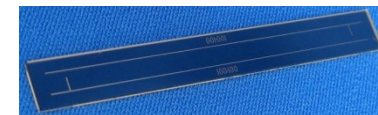


パターン形成過程にはぬれ性(接触角)に加え接触角ヒステリシスの影響が大

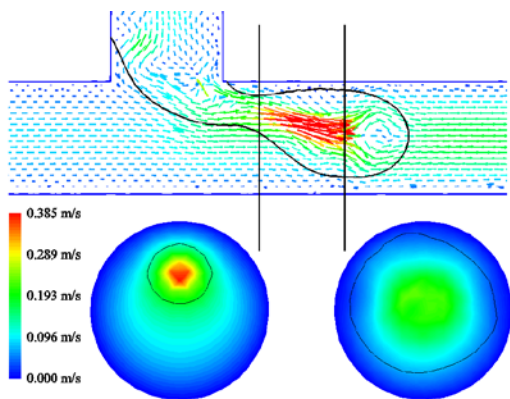
PDMS流路
(疎水・親水性)



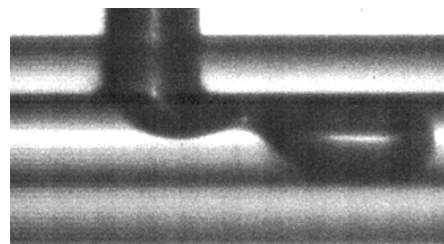
シリコン・ガラス流路(親水性)



ぬれ性を考慮したT型流路3次元計算

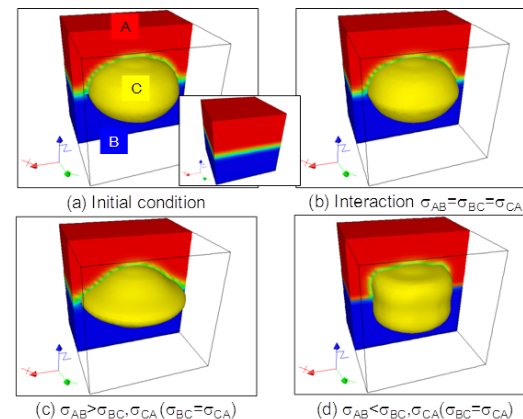


スラグ破断直前の速度分布
(円形断面T型流路)



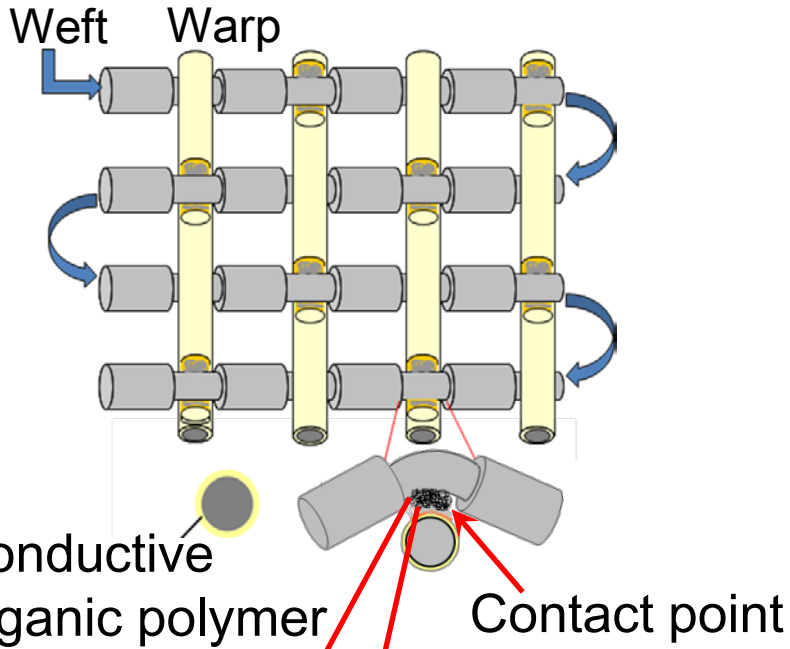
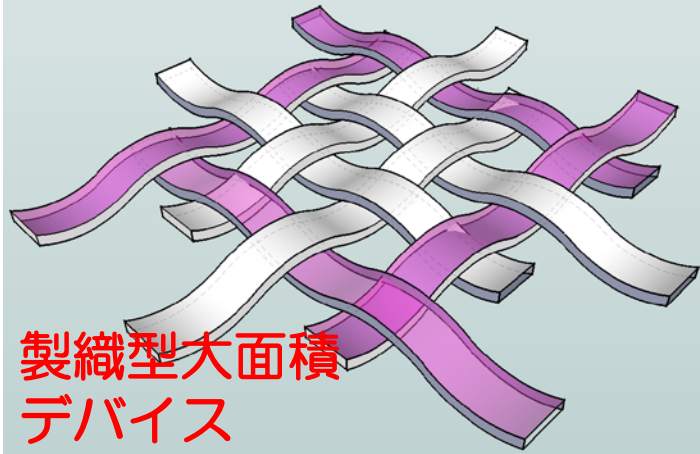
対応する実験で得られた画像

多相プロセスCFDへのMulti-Phase-Fieldモデルの導入

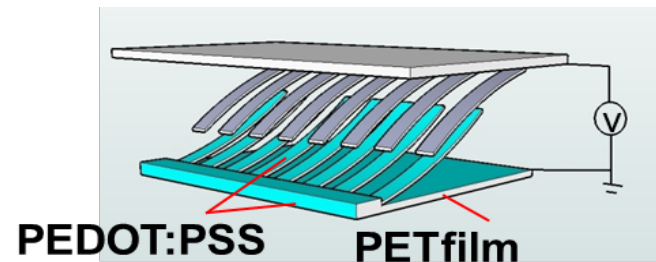
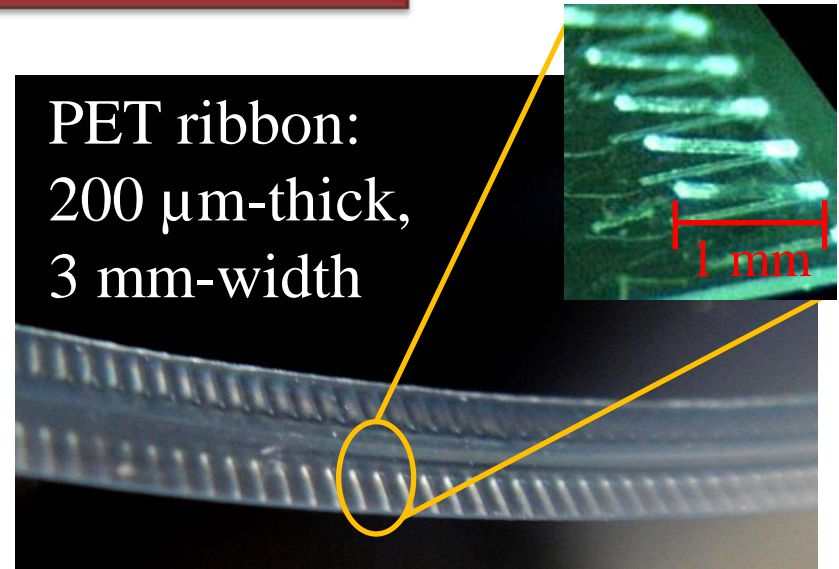


三相系における界面張力の影響による相の変形

接点構造・配線技術



折り曲げ時、電気
接点部に間隙が発生



Spring Contact Structure

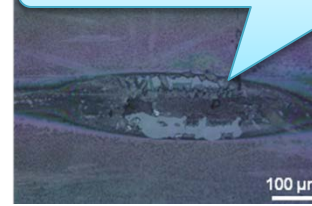
- 基材上に可動カンチレバー構造の電気接点を形成
- カンチレバー長さ1mmとすることで300 μm の間隙に対応
- RtoRプロセスによる連続成形

接点構造・配線技術 (2)

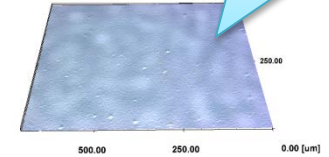
通常の薄膜構造と、カンチレバー構造の様々な機械・電気特性を比較

繰り返し接触による摩耗

著しい摩耗発生



ほぼ摩耗無し



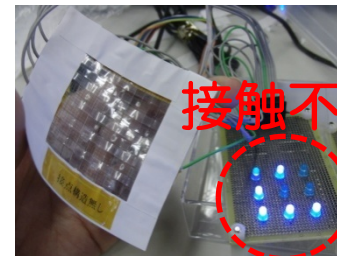
接点構造無し
(摩耗深さ:

$1.2 \times 10^{-5} \text{ mm/N} \cdot \text{m}$)

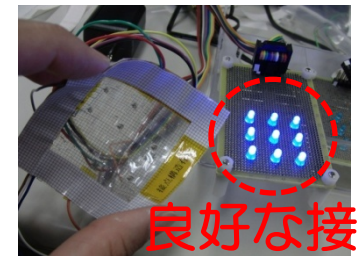
接点構造有り

基材折り曲げ時の接触の安定性

3×3接点構造の模擬シートデバイスを作製し、接点の安定性を確認

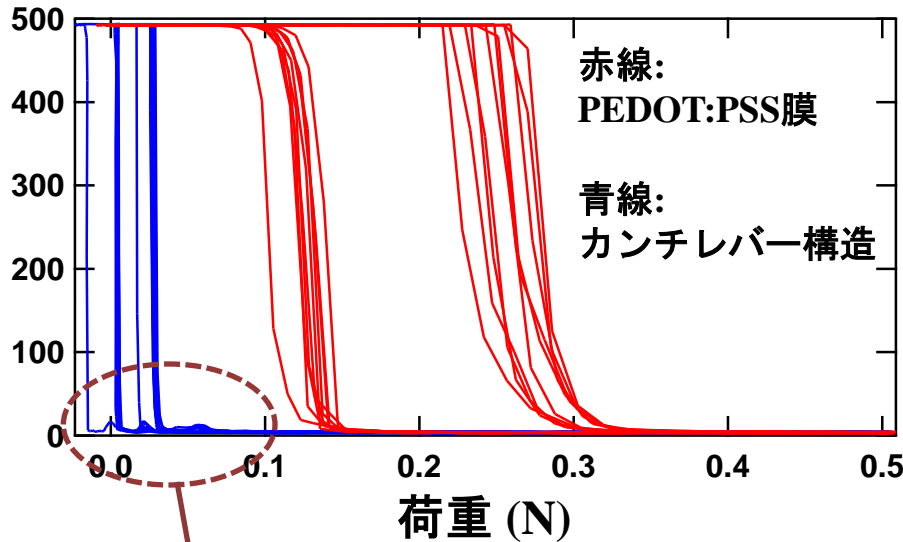


接点構造無し



接点構造有り

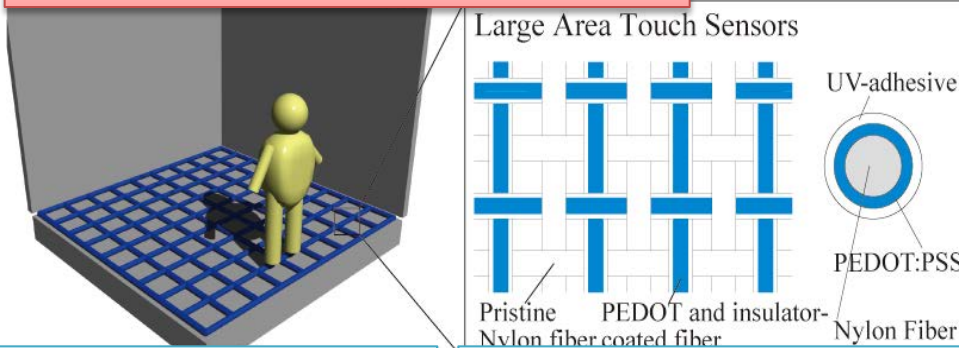
荷重負荷に対する
接触抵抗変化



カンチレバー構造により、
薄膜構造の1/3の荷重(0.05N)
で安定的に接触

製織集積化技術によるメートル級 大面積センサシートの試作

大面積タッチセンサの構造



位置決め、摩擦低減自動織機



アプリケーション:
位置検出フロアセンサ
介護用ベッドセンサ

構造:
有機導電膜と紫外線硬化樹脂
をコーティングした糸による布

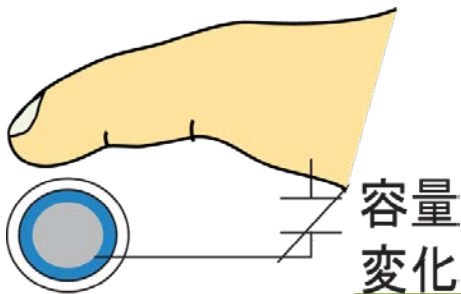
フィーダー



糸位置 検出センサ



静電容量型検出原理



人体の導電性利用

iPhone などと同様に
指と糸の間の静電容量変化

横入れ用アクチュエータ



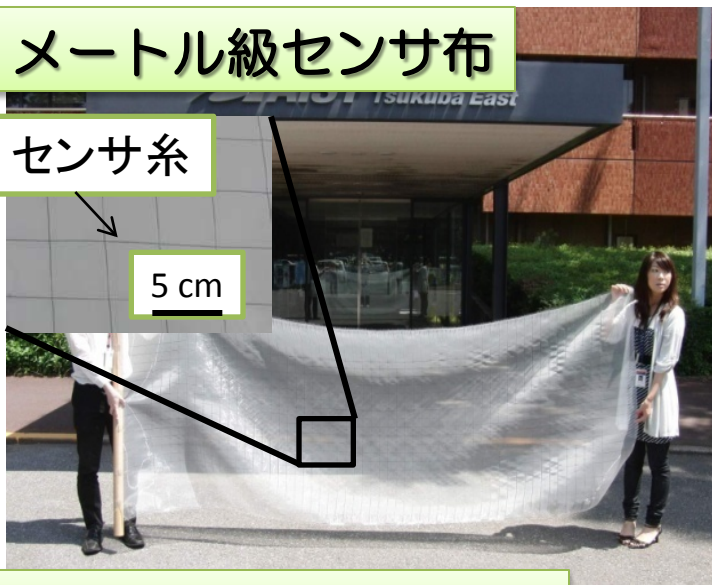
布構造、静電容量型タッチセンサを位置決め、摩擦
低減機能付き自動織機を開発することで製織可能に

センサ布の製織とウェアラブルキーボード化

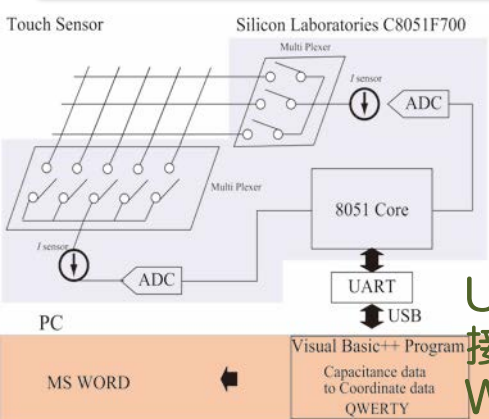
メートル級センサ布

センサ糸

5 cm



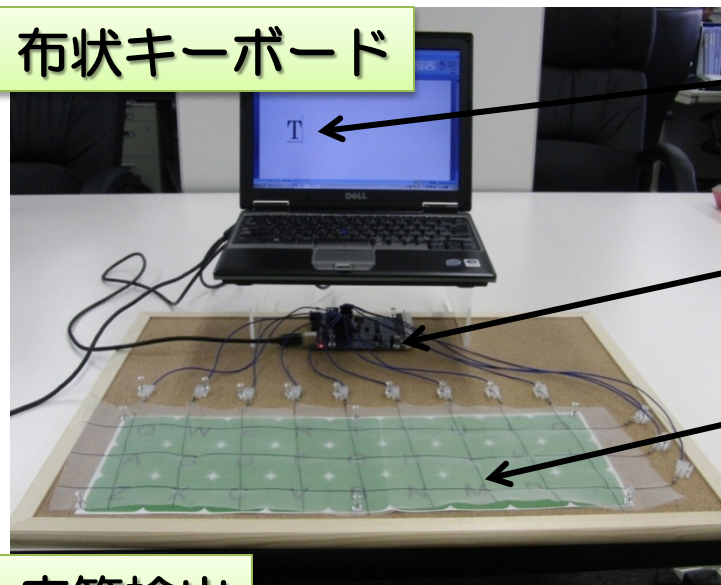
キーボードシステム図



組み込み
マイコン
と接続

USBでPCと
接続し、VBで
Wordに入力

布状キーボード

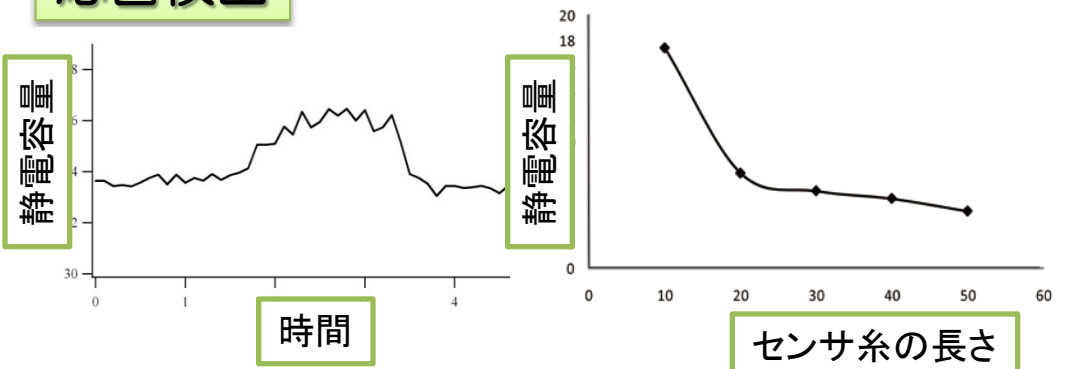


Wordに入力

制御回路

センサ布

応答検出

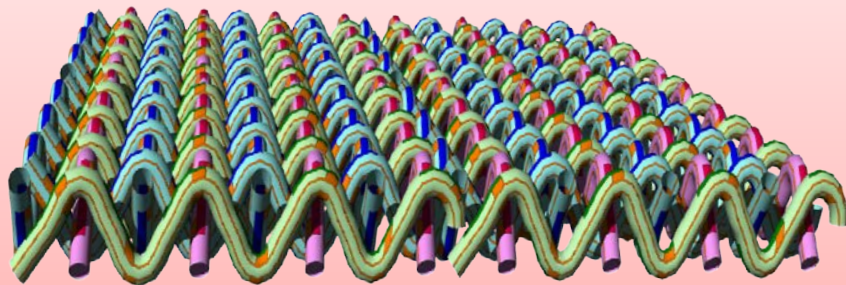


- 指入力で2pF程度の容量変化
- センサ糸が長いほど抵抗で感度低下

→ 今後の課題

メートル級センサを製織し、組み込みマイコンと接続し、ウェアラブルキーボードを実現

大面積多機能センサシートの実現



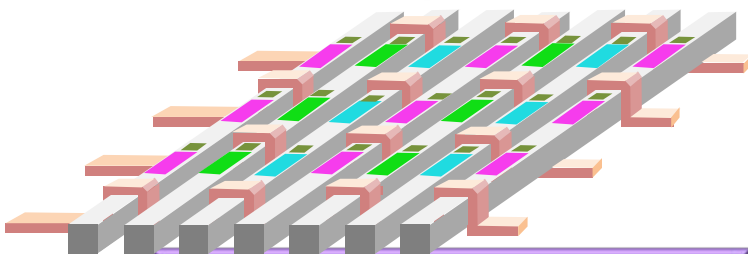
多機能センサシート



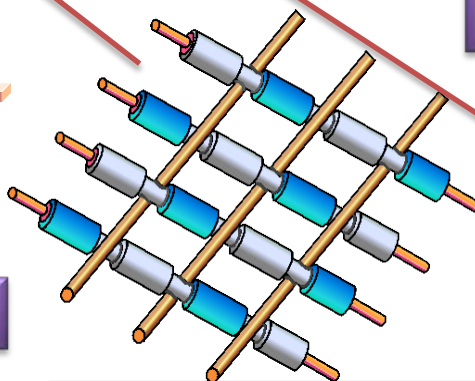
メートル級センサシート



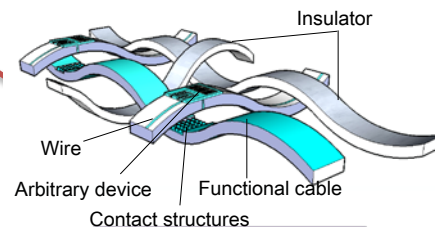
メートル級発電ファイバー



フレキシブルディスプレイ



圧電超音波シート



可動接点



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

- ✓ 前後処理プロセスの適正化、低粘度溶液の安定供給、ダイの構造変更
⇒有機半導体、圧電体、導体、絶縁体についてそれぞれ10 m/minでの連続形成を実現

(2) 連続微細加工

- ✓ 熱ローラーインプリント機構と光リソグラフィー機構を有する複合型リール
ツールールプロセス装置を開発
⇒送り速度5 m/minでの熱ローラーインプリントを実現

(3) 製織集積化

- ✓ 接点構造としての有機導電膜(PEDOT:PSS)カンチレバー構造⇒良好な
摩耗特性
- ✓ 異種繊維状基材を製織する自動織機(ウィービング装置)を試作⇒横幅
1.2m長さ3 mのシート型タッチセンサを試作