

ナノからマイクロまでをつなぐ 異機能集積プロセス技術

- ライフ & グリーンイノベーションを目指して -

東京大学生産技術研究所
マイクロナノメカトロニクス国際研究センター
藤田博之

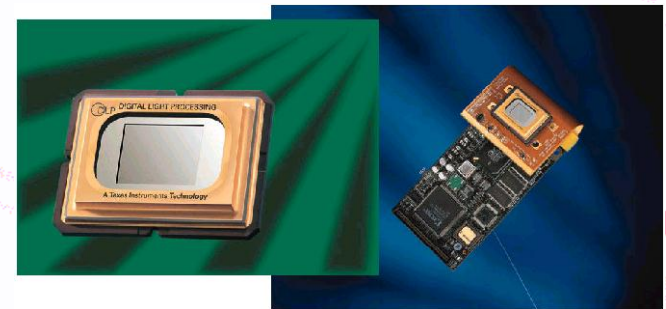
現在MEMSは日常の様々なところに浸透 将来はさらに広範囲に利用される

- In your car
- In your camera
- In your cellular phone
- In your TV game controller
- In your video projector
- In your printer
- In your computer
- In your (?) robot



Nintendo Wii™ controller

Apple
ipod touch

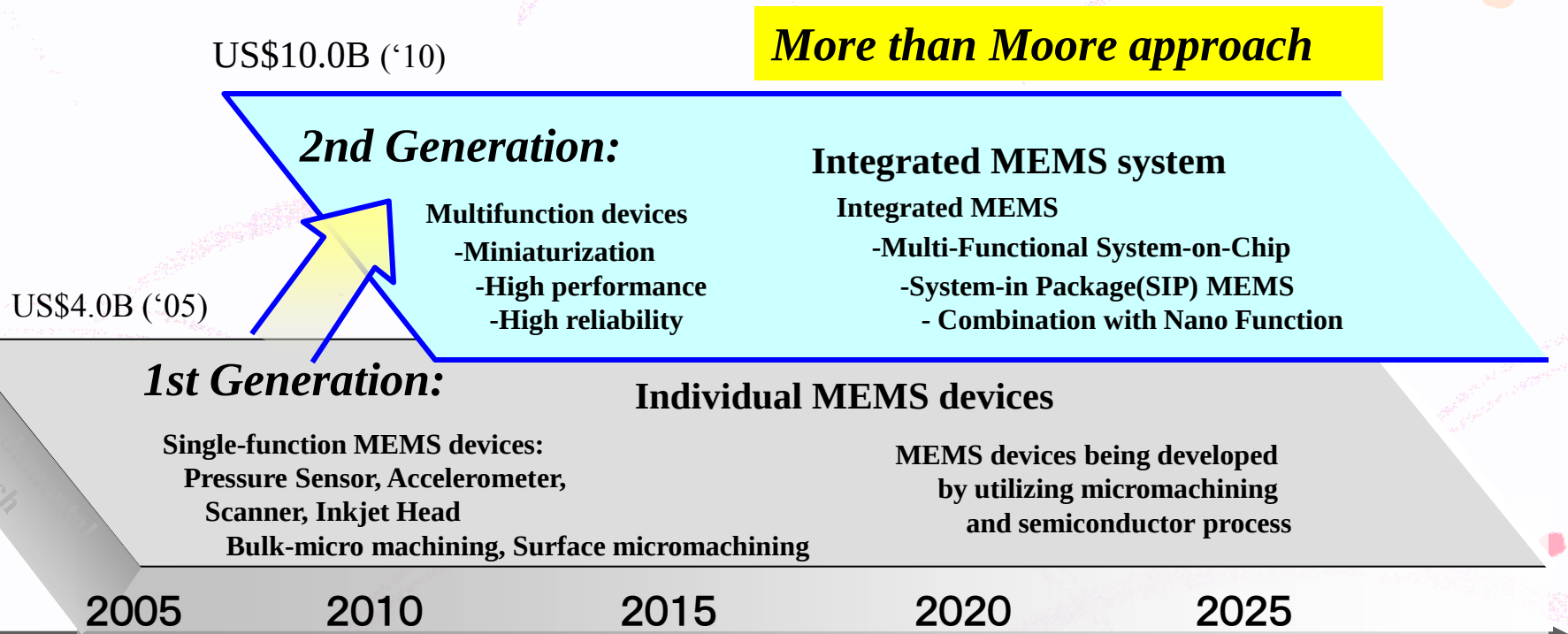


Digital Light Processing™
Texas Instrument

MEMS技術の発展過程と市場拡大

Generations of Technology Development

research

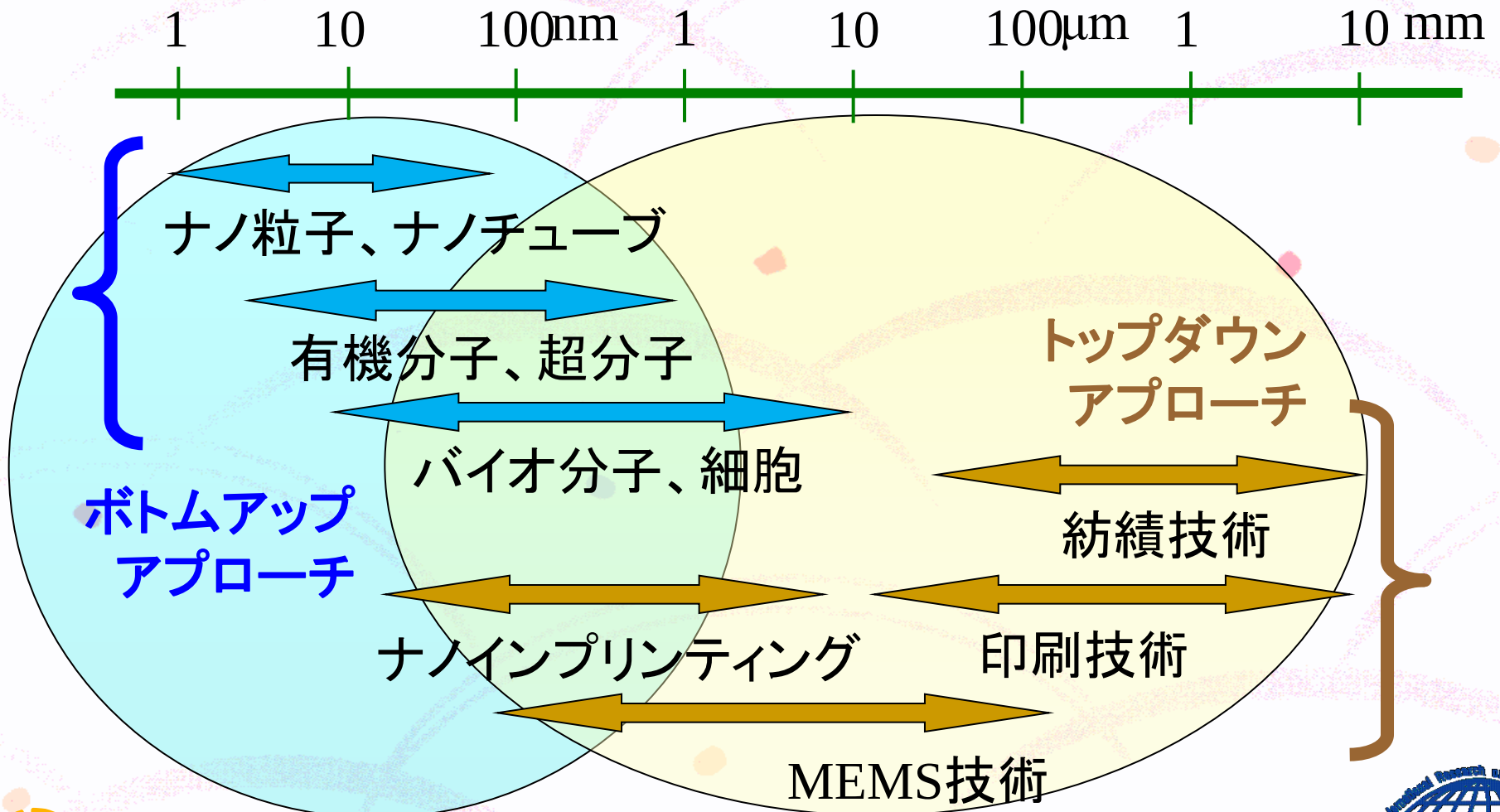


では、この次は何?

MEMS と ナノ・バイオ技術の融合

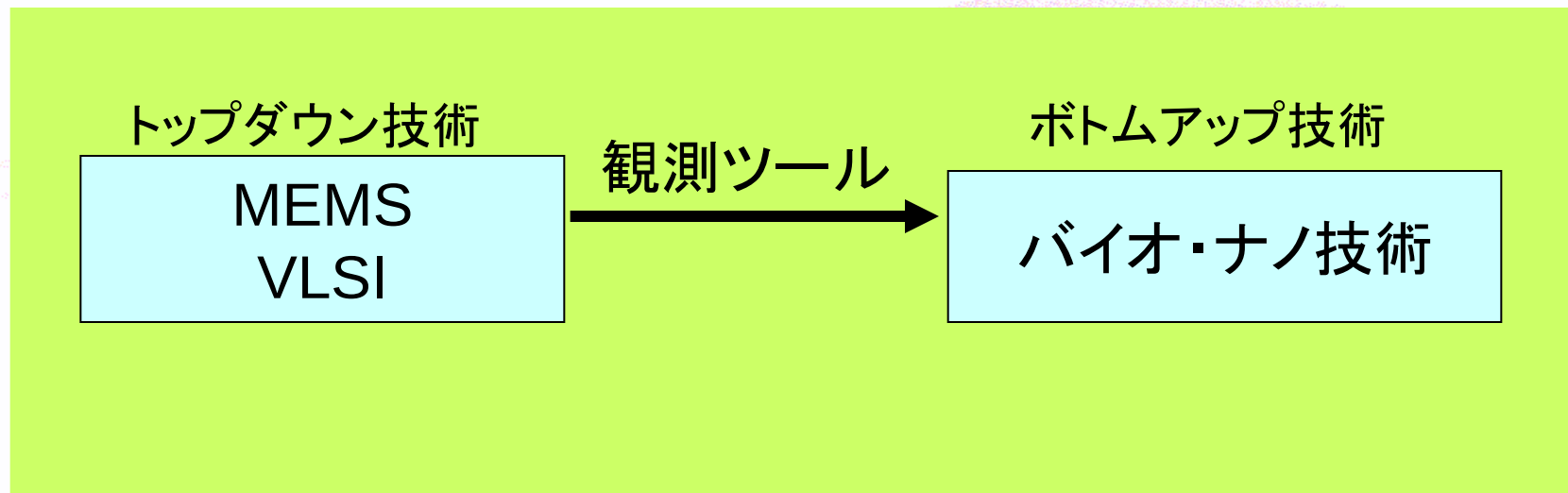
トップダウンとボトムアップの技術融合

ナノからマクロまでの異スケール融合



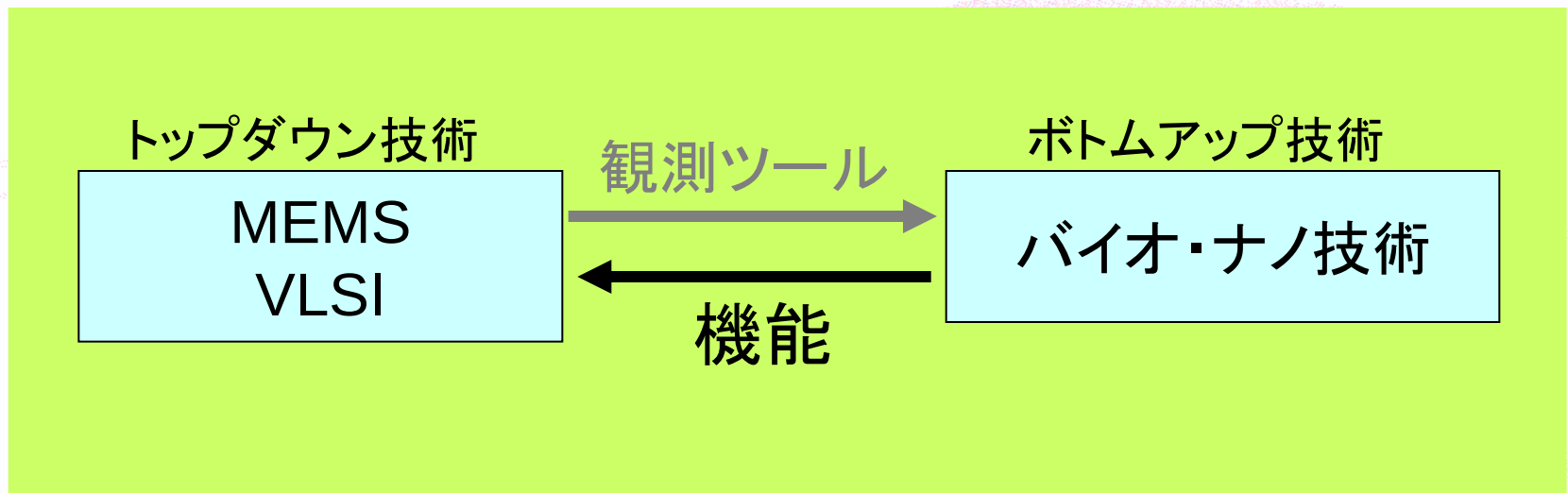
トップダウン手法とボトムアップ手法の融合 (第1ステップ)

- マイクロマシン技術でナノ世界を解明する。ナノバイオ技術、ひいては環境、医療、安心・安全の進歩に貢献する。

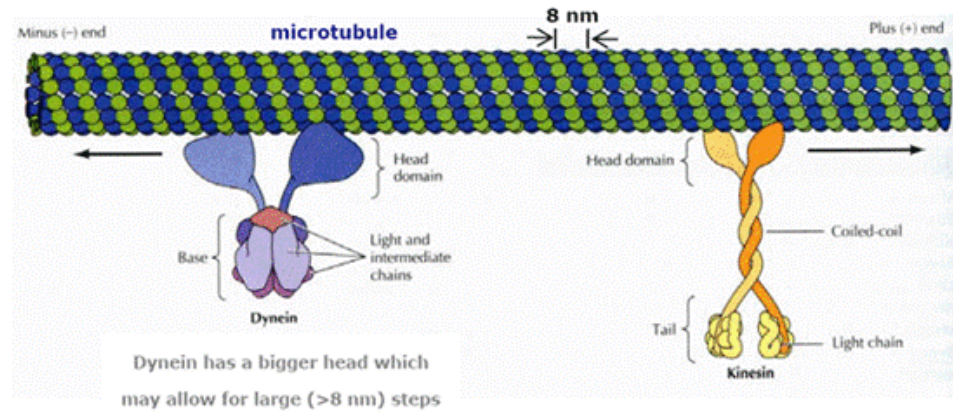
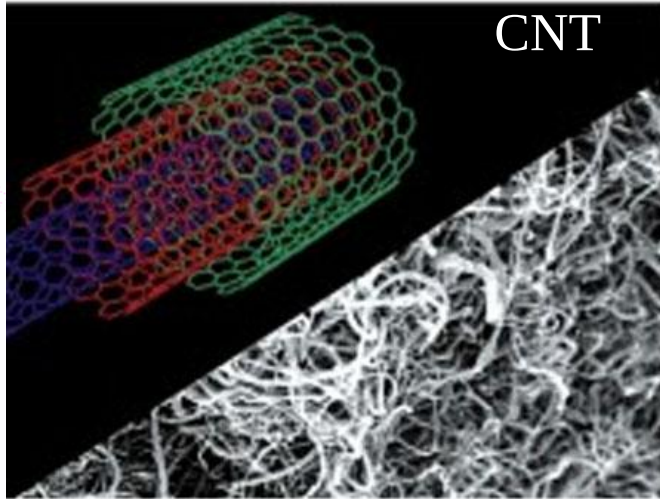


トップダウン手法とボトムアップ手法の融合 (第2ステップ)

- ナノ技術が提供する機能(素子)をMEMSや集積回路に取り込む。

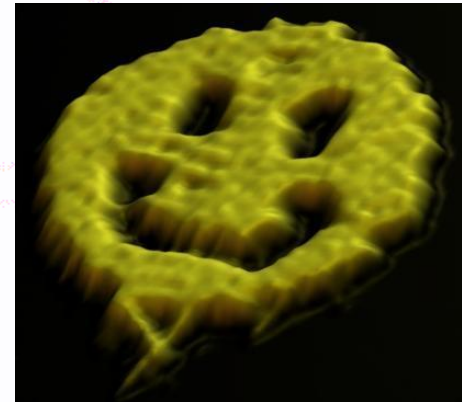
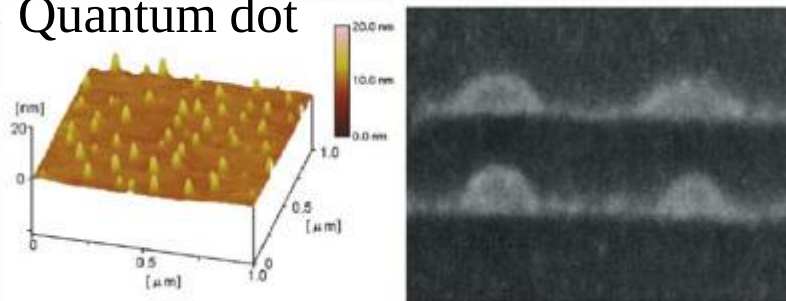


ナノやバイオの機能エレメント



Bio molecular motor

Quantum dot



DNA origami

MEMS ピンセットによる微小管・キネシン 生体分子モータ系の再構成

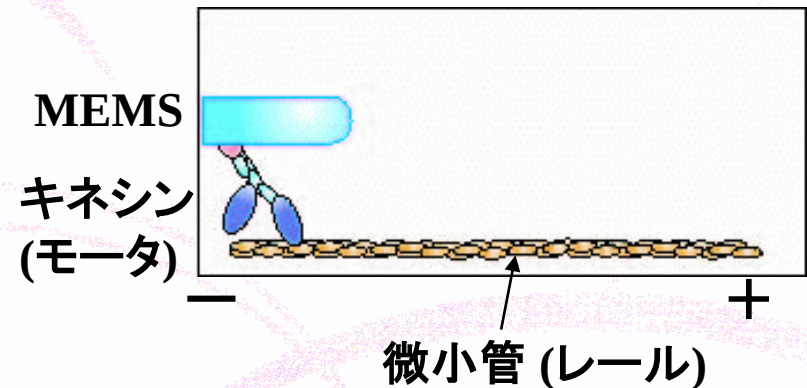
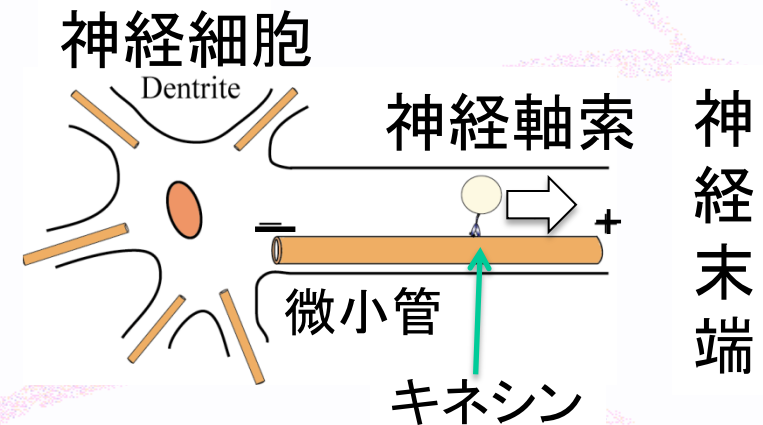
生体分子モータによる分子輸送

- 細胞内の物質輸送システムをまね
ナノ粒子に捕獲した標的分子を
直接運ぶ

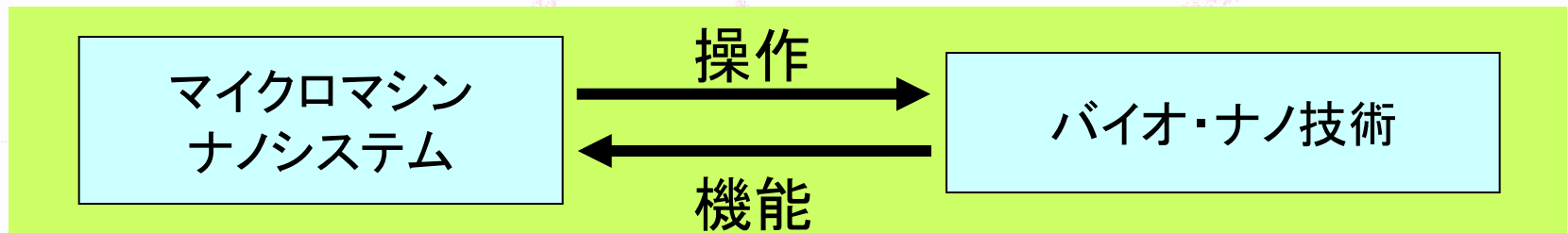
微小管・キネシン系分子モータ利用



- レールを一方方向にそろえて敷く
微小管には+端と一端があり、キネシンは+端に向かって動く
- 特定の荷物(標的とする分子)だけを選択的に運ぶ
- 止めたり、動かしたり制御する



ナノ機能融合システム



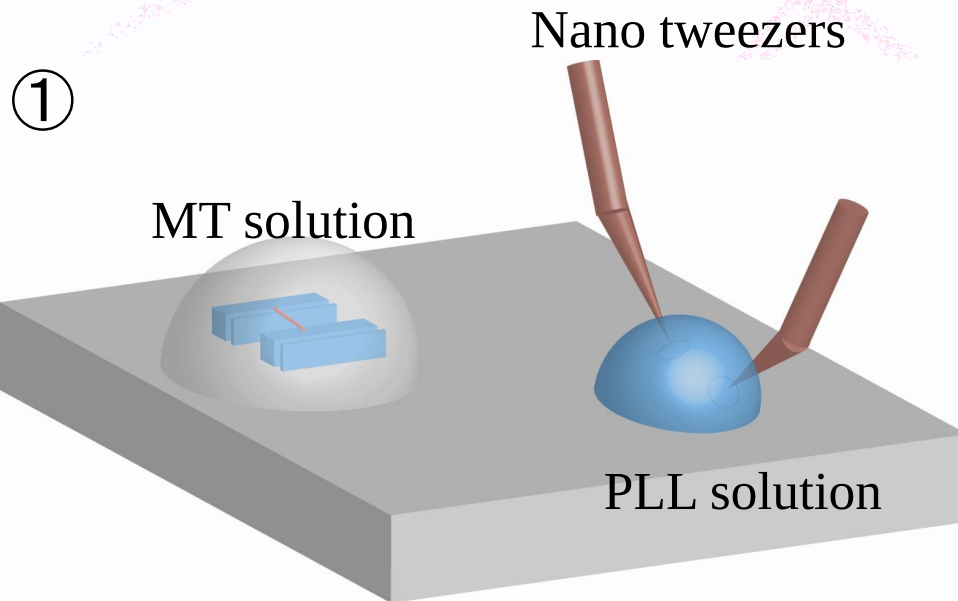
目標分子を捕獲して
望みの場所に搬送する

生体分子モータの抽出
ナノピンセットでMEMSへ組込

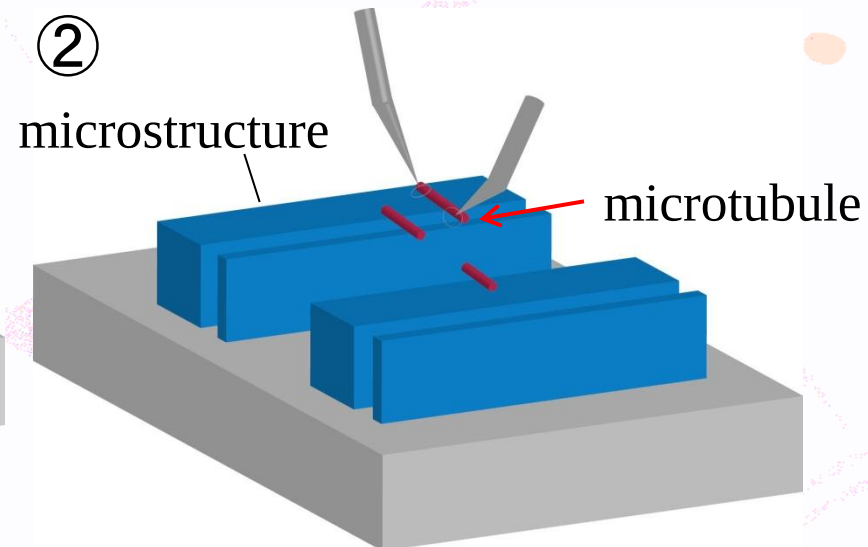
ナノ物体を水中で搬送するデバイス

微小管の捕獲・配置によるナノレール構築

(1) 単一微小管の分離と捕獲



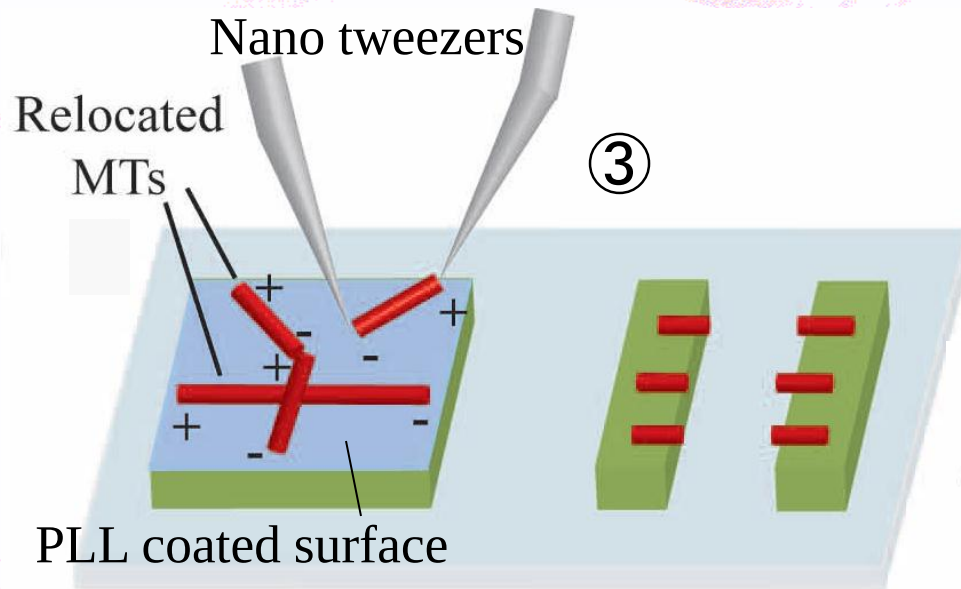
Coating tweezers tips with PLL



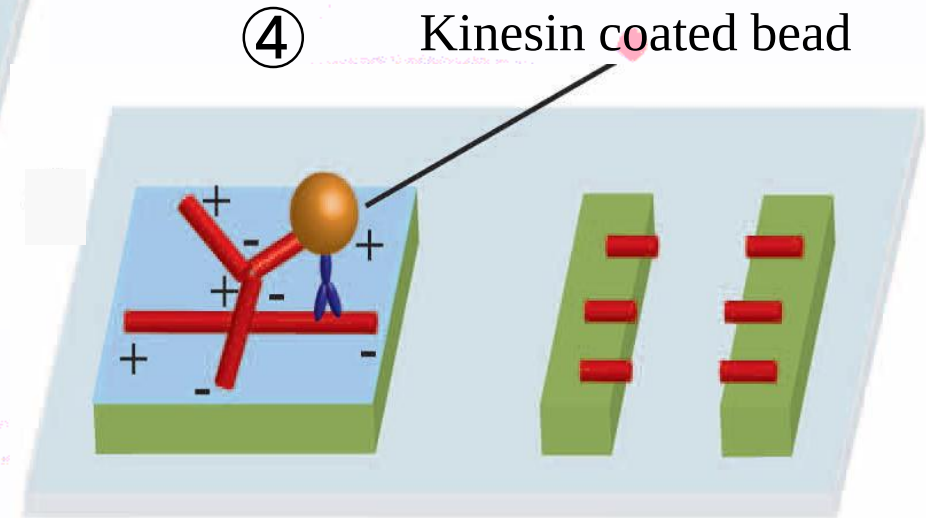
A single MT bridging over a gap was captured by tweezers

微小管の捕獲・配置によるナノレール構築

(2) 微小管ネットワークの組み立て



Relocate MT's on docking zone



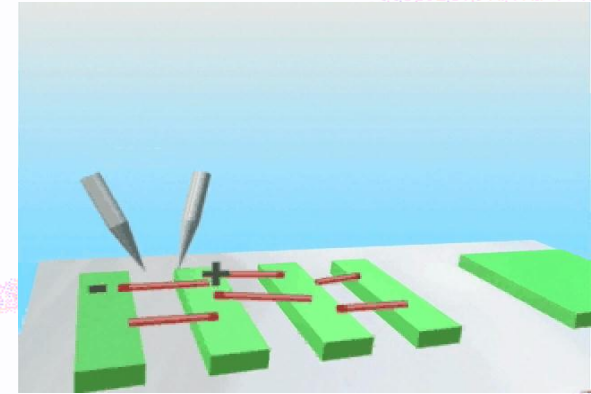
Conveyance of beads by kinesin on MT

単一微小管をMEMSピンセットで捕獲

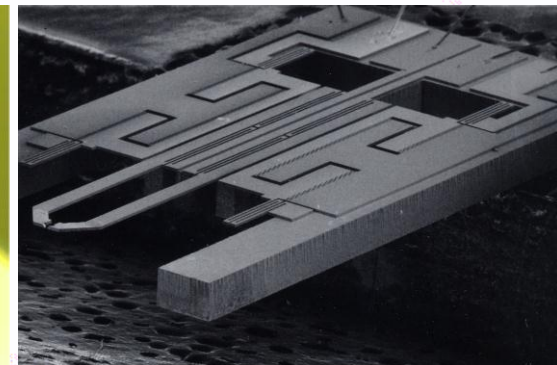
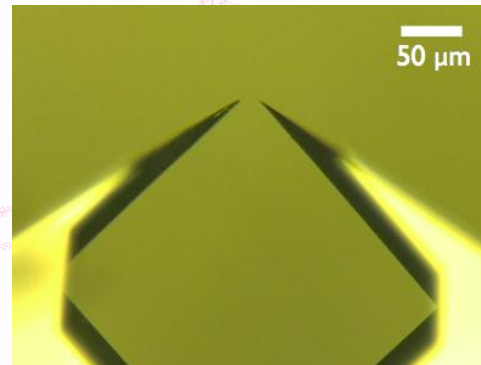
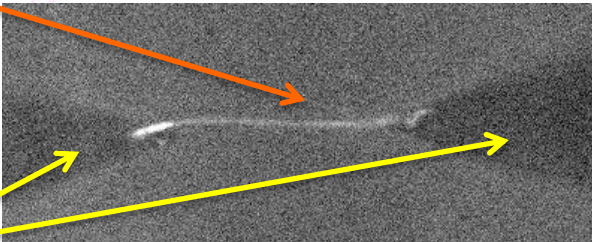
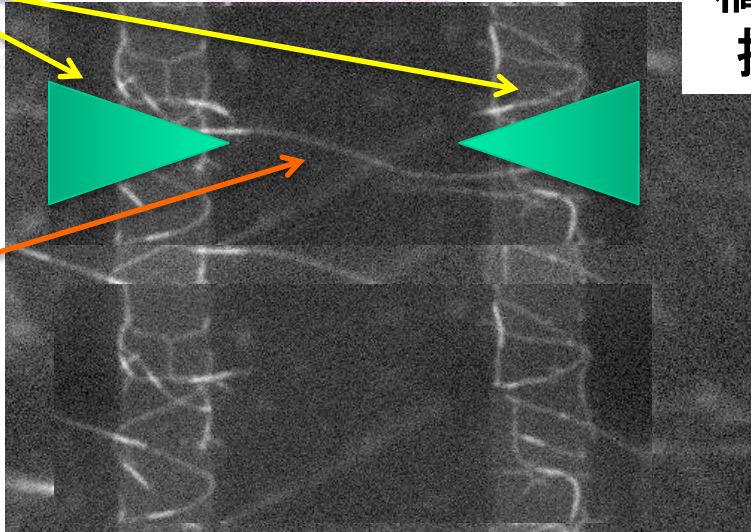
先端

架橋した
微小管

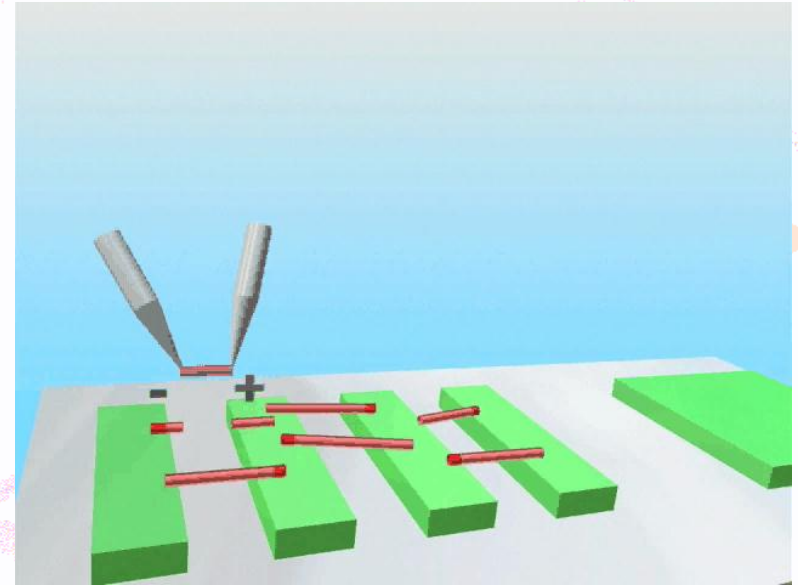
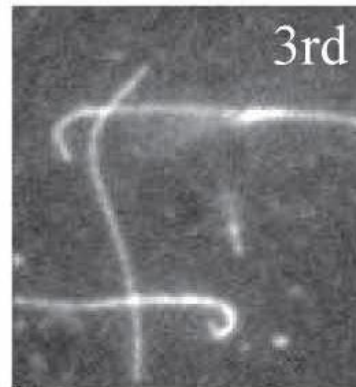
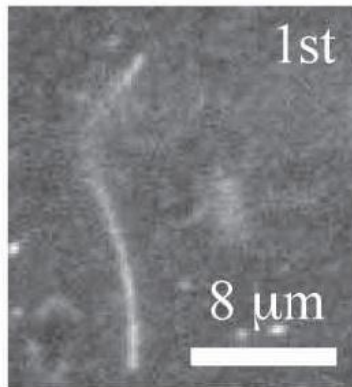
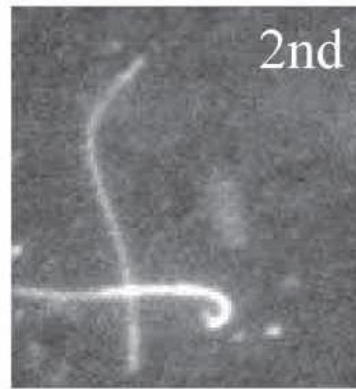
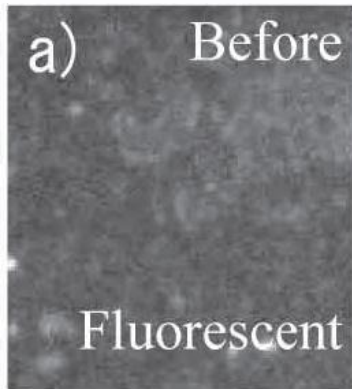
橋掛かりした微小管をMEMSピンセットで
捕獲(先端にポリLリジンをつけて接着)

捕獲した
微小管

先端



微小管ネットワークの組み立て

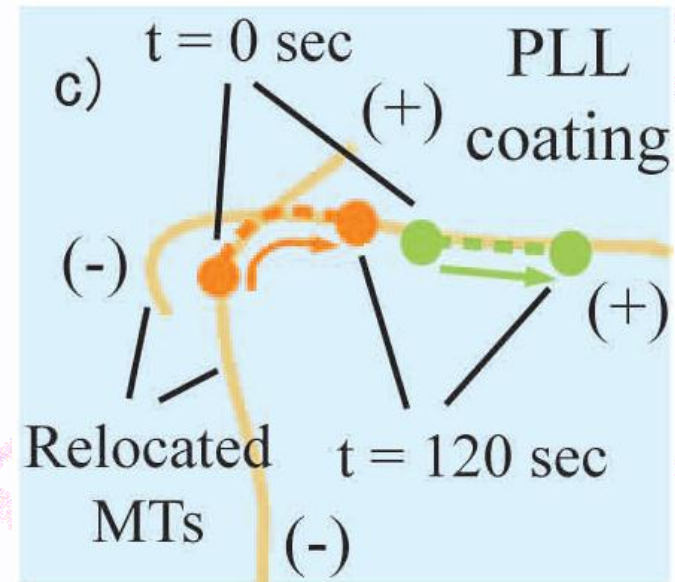
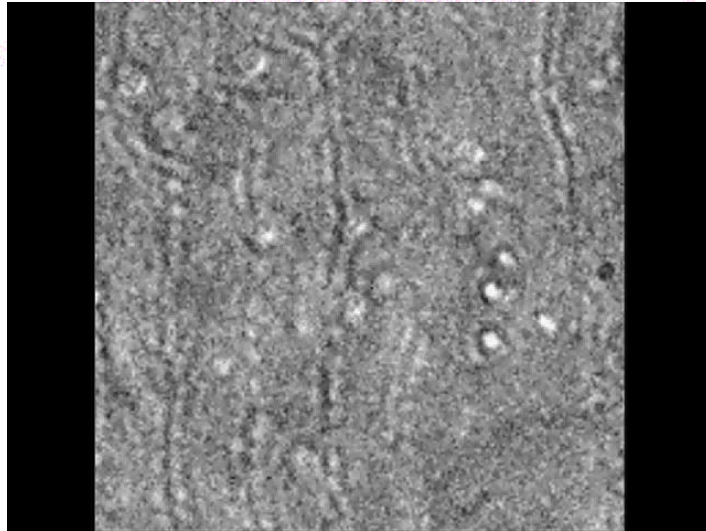


捕獲した微小管をチップ上に
配置(緑色はポリLリジン膜)

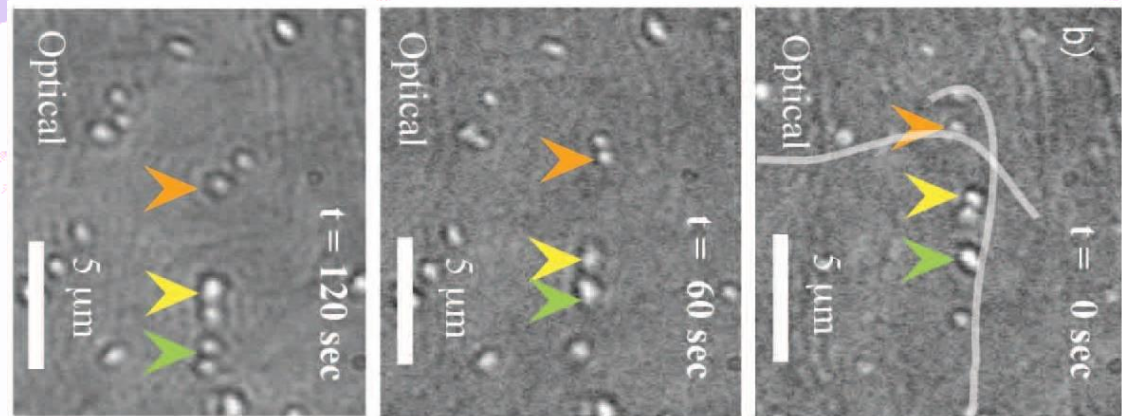
- Poly-L-Lysine coating of the docking zone
- Assembling a network by repeating picking & placing of microtubules

微小管上でのマイクロビーズの動き

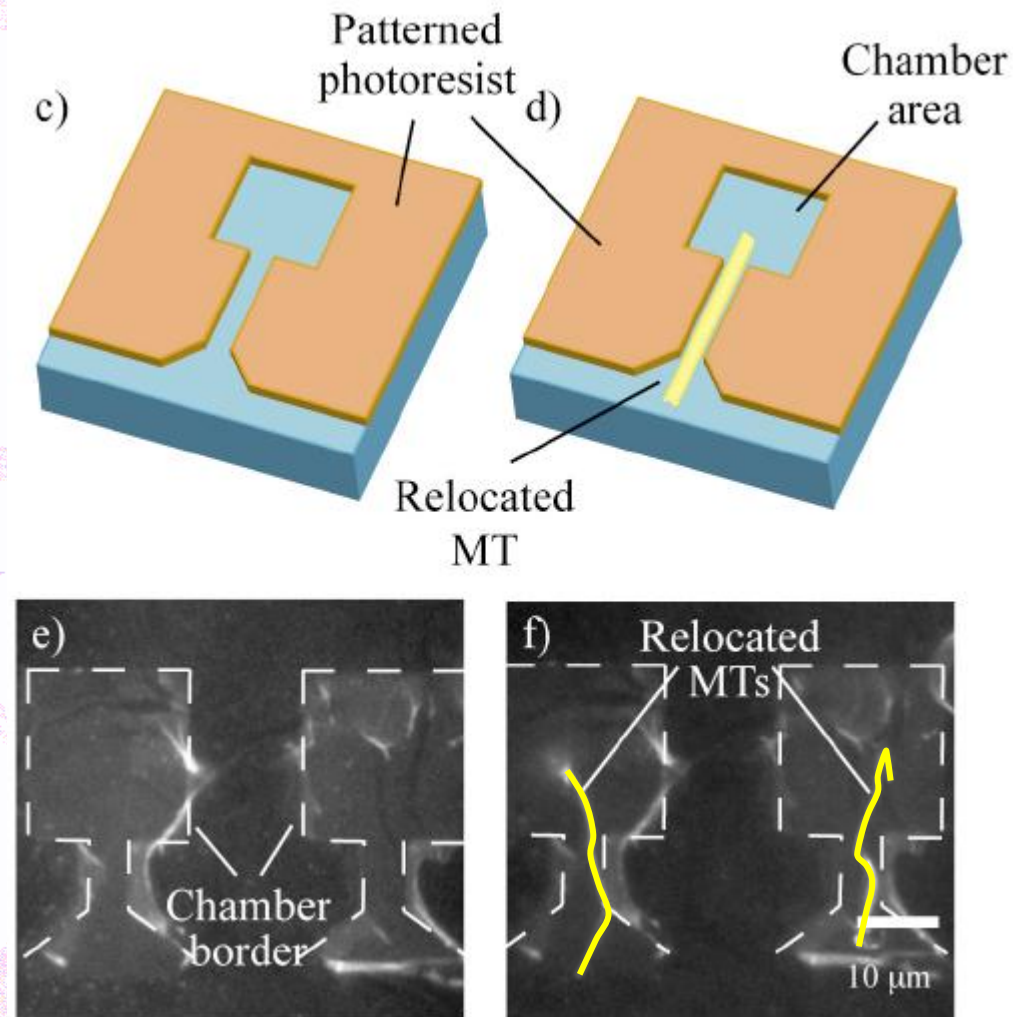
M.C. Tarhan, et al. Micro TAS-09



ATPを導入すると配置した微小管上で、キネシンを付けたビーズ(径 $0.3\ \mu\text{m}$)が動く。
「交差点」での動きに注意！

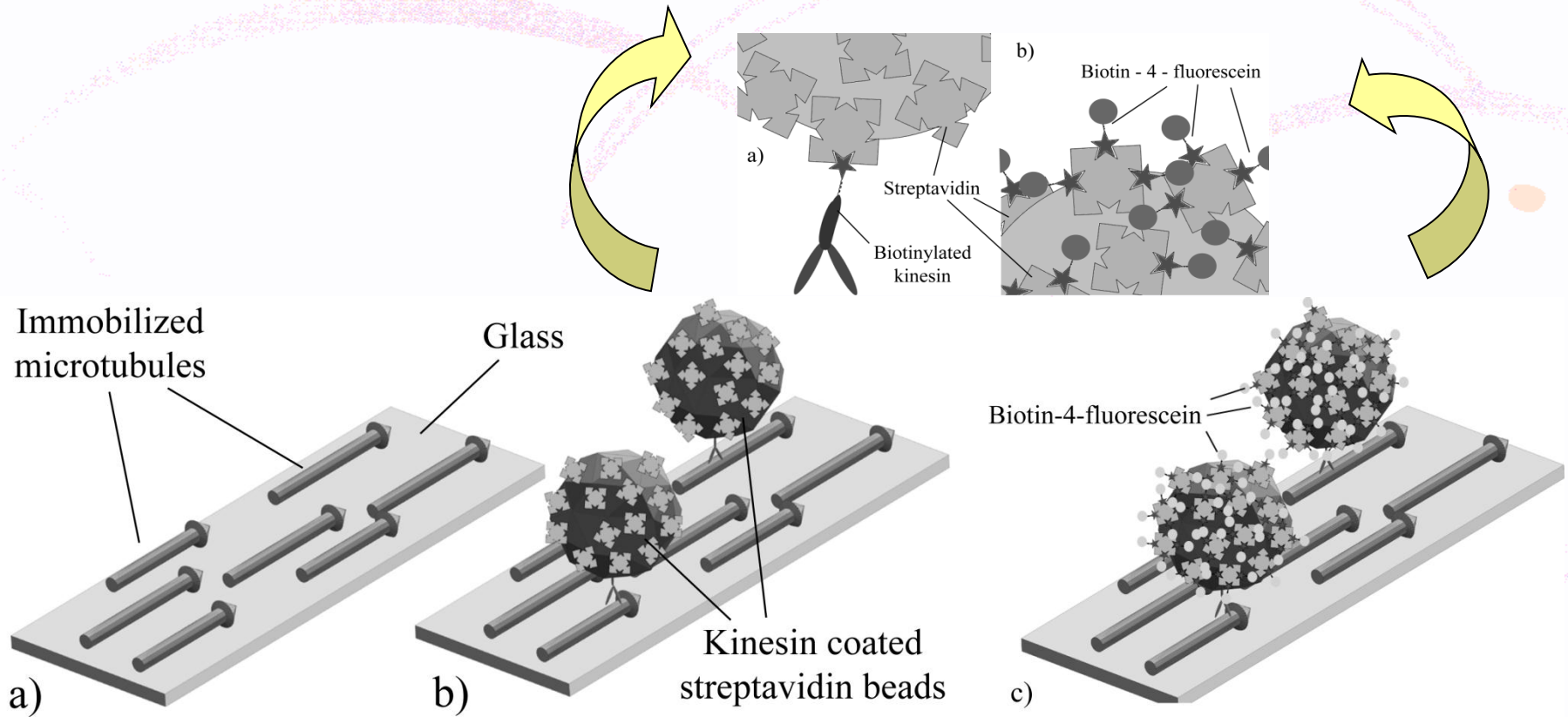


ピック&プレース操作で微小管を マイクロ流路に組み込める



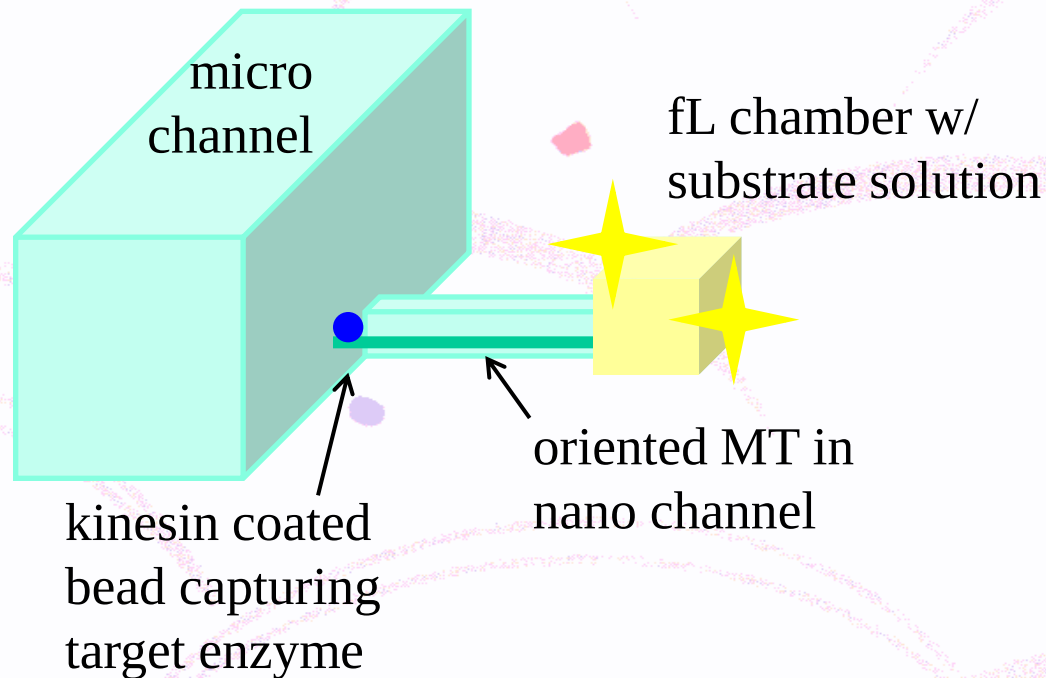
ビーズ表面には選択的に分子を付加可能

M. C. Tarhan, et al. IEEE MEMS-2006

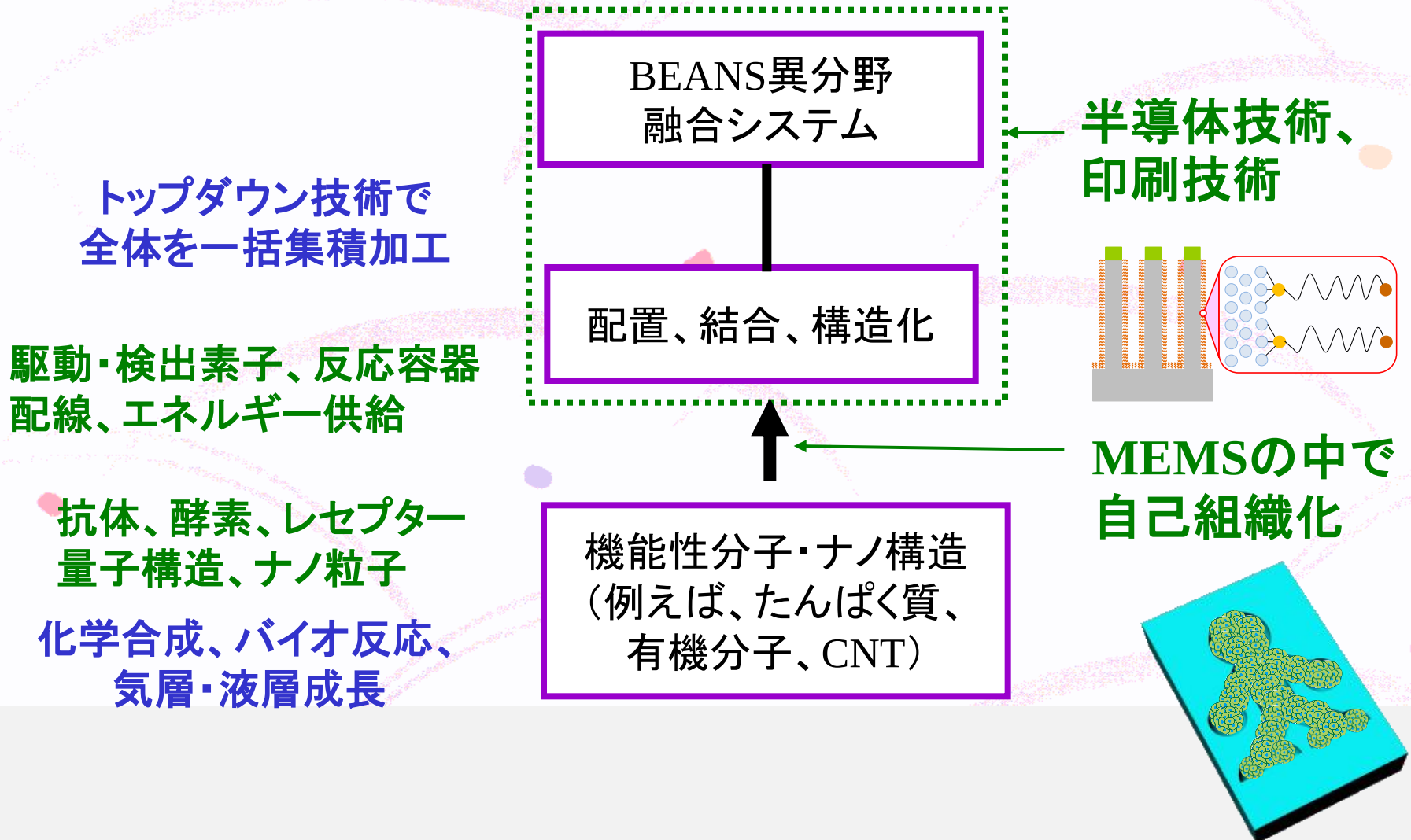


将来の夢

-生体分子輸送を利用した一分子バイオアッセイ



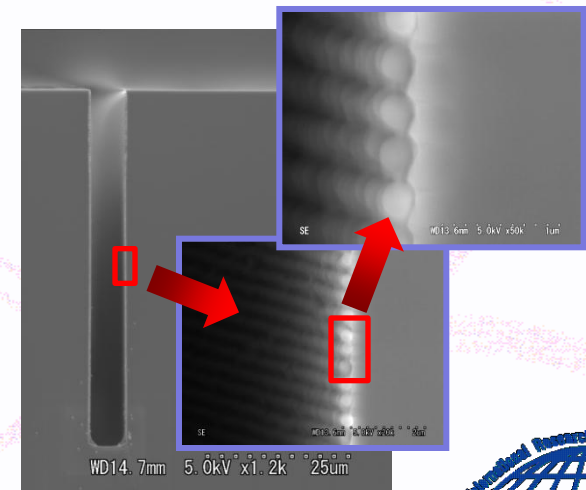
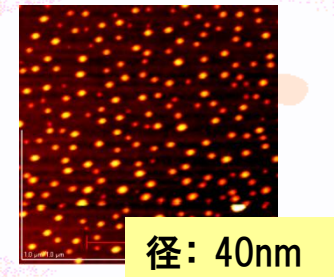
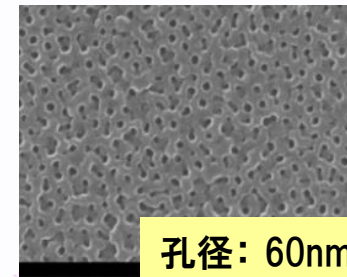
MEMSとバイオ・ナノ材料の融合





自己組織化の利用

- ナノパターン形成に自己組織化を利用(数十ナノメートルの規則的なナノパターン)
 - 陽極酸化時にできるナノ多孔質
 - 蒸着によるポリマーのナノドット
 - ブロックコポリマーの結晶構造
- 自己組織化手法とマイクロ加工とを融合する
 - ナノ粒子の自己組織化配列を用い、ミクロの深溝の側面に規則的かつ稠密な単層ナノ粒子膜を得た。

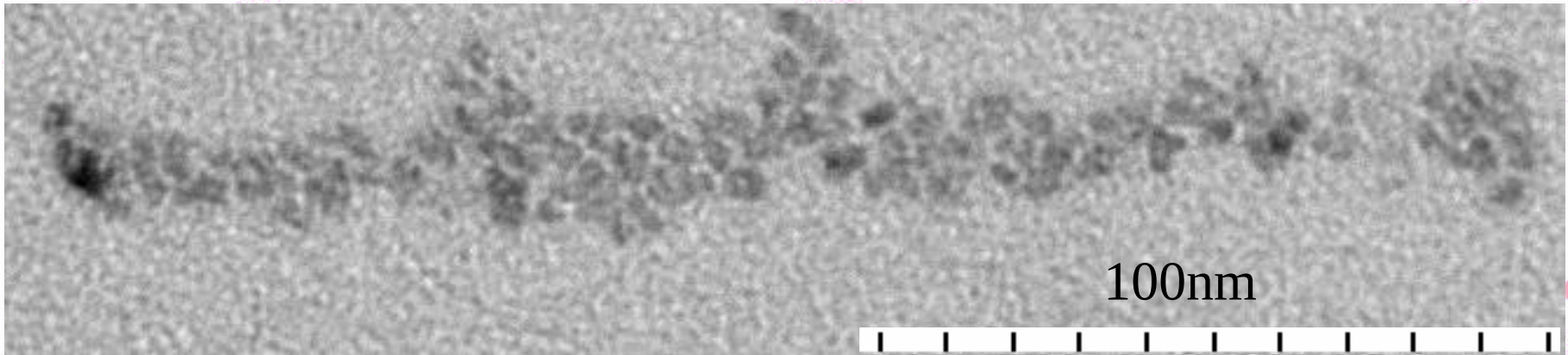
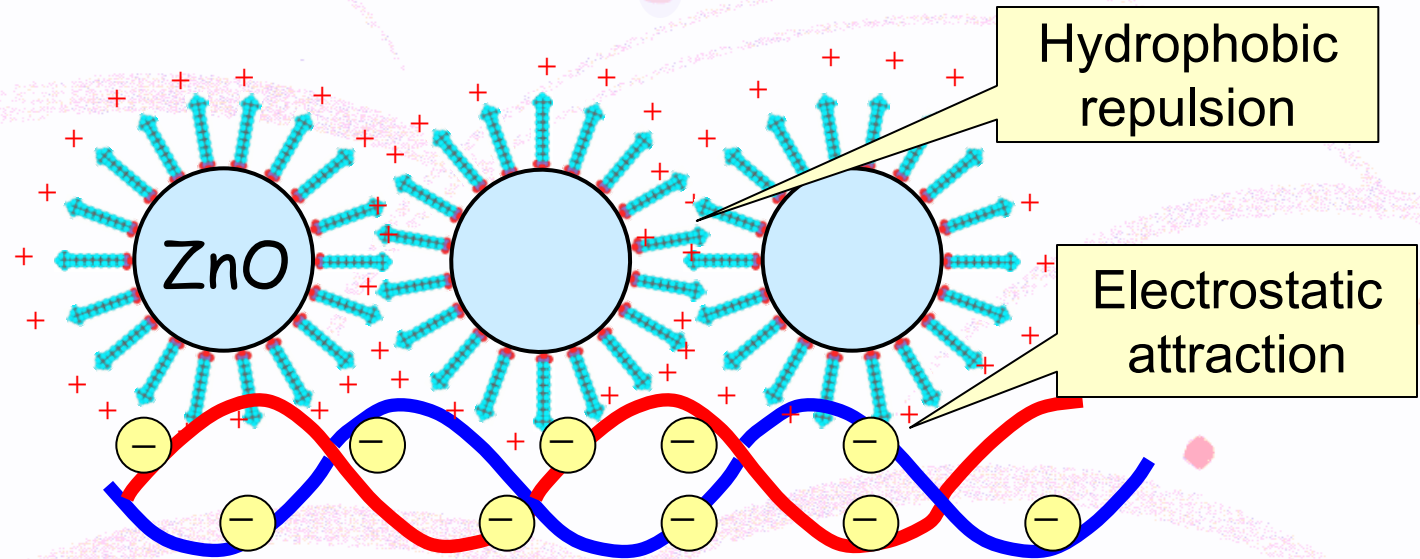


M.Abasaki, M.Sugiyama, et al: IEEE MEMS-2011

DNA分子束上に量子ドットを 整列して自己組織化

DNA上の量子ドット整列のTEM観察

2011.7.14

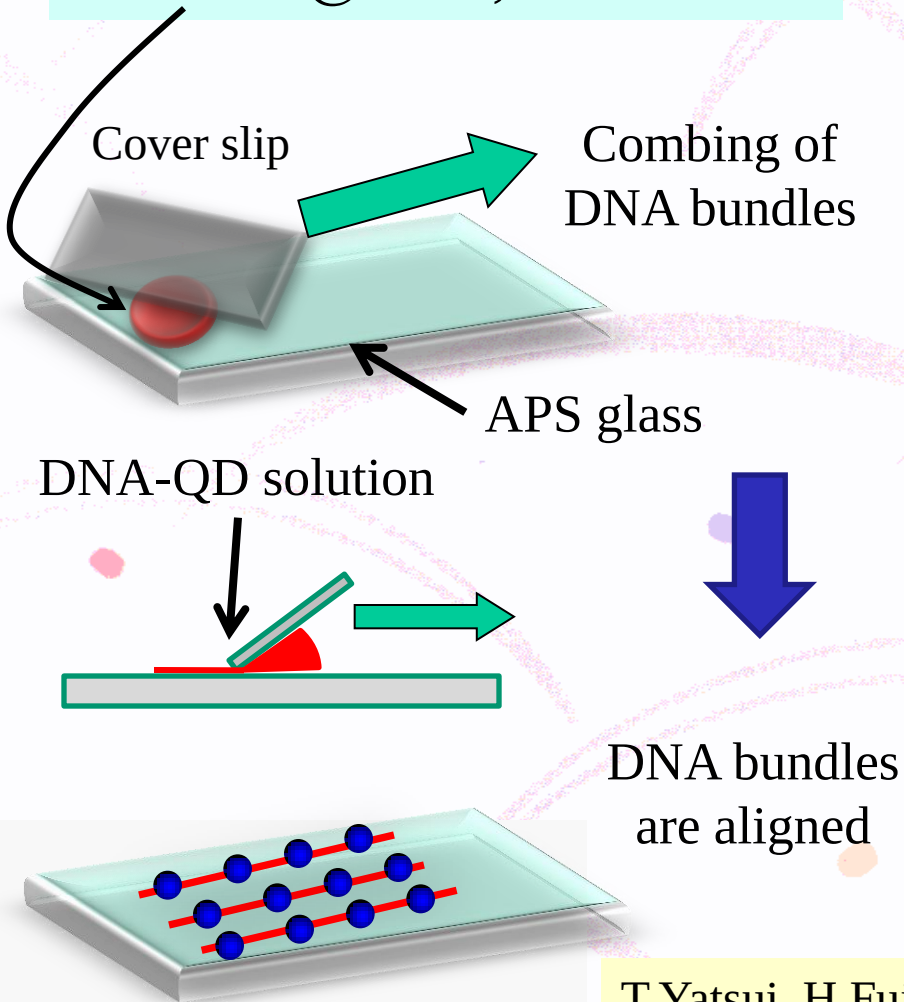


Mono disperse QD are well aligned on a DNA bundle

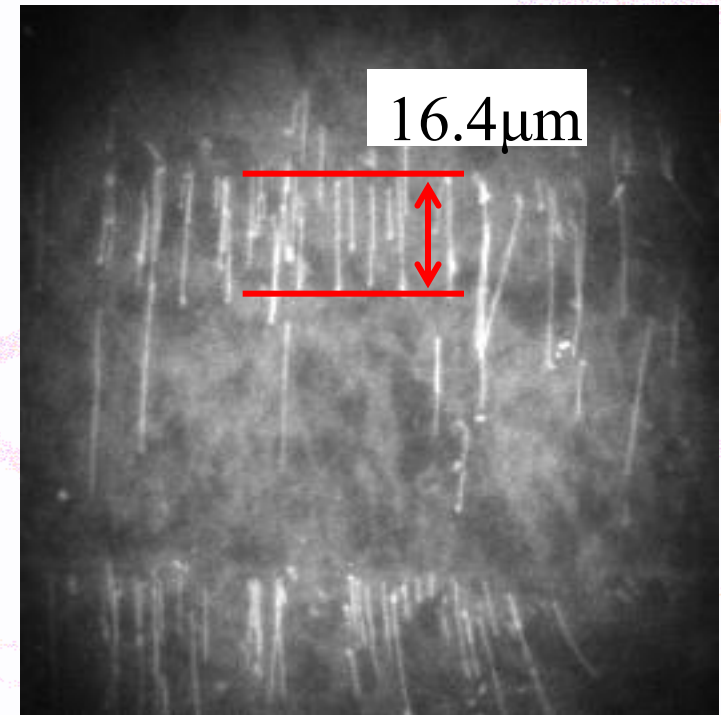
T.Yatsui, H.Fujita, et al: APL 2010

DNA分子に付加した量子ドットの蛍光観察

λ DNA and ZnO-QD mixture
@50°C, 2h



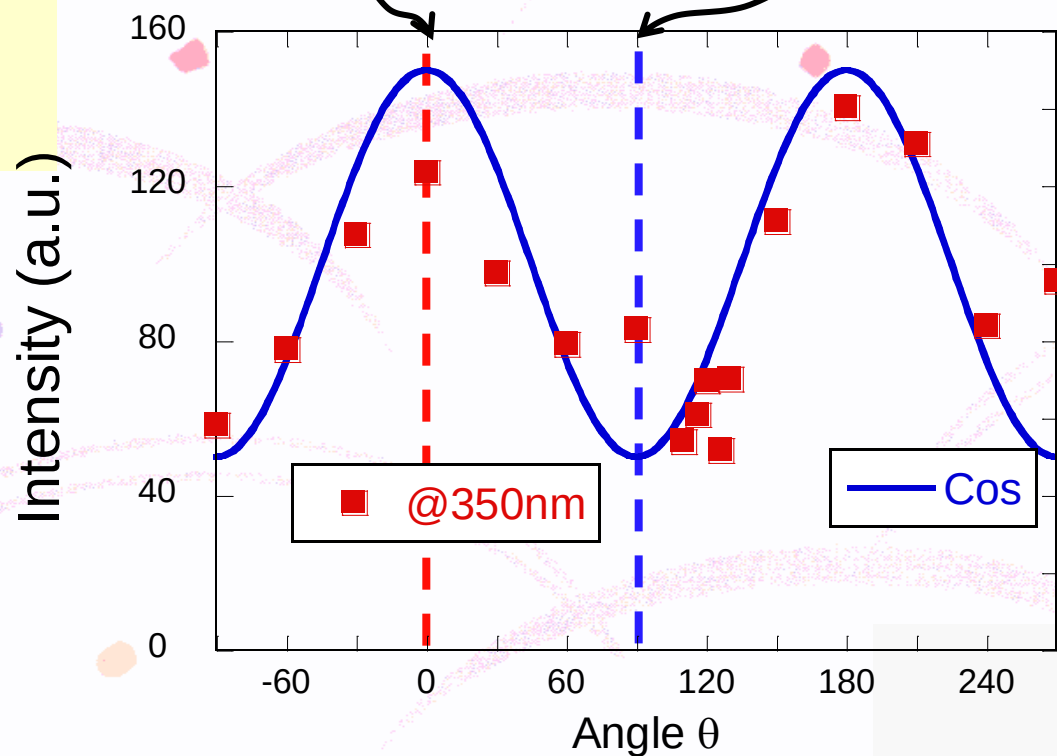
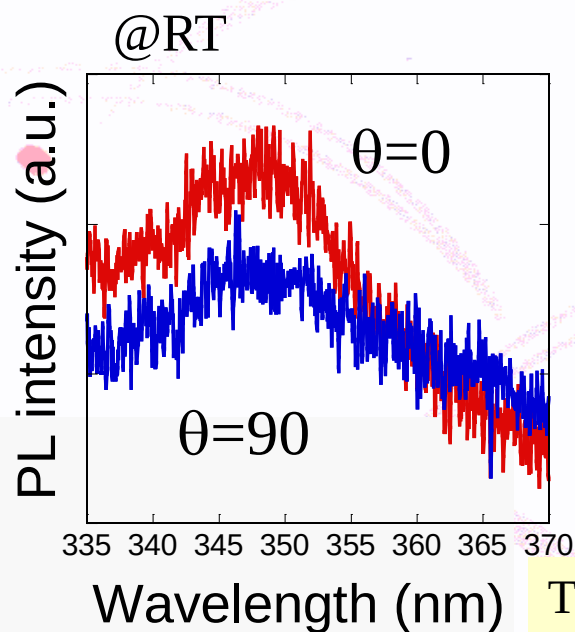
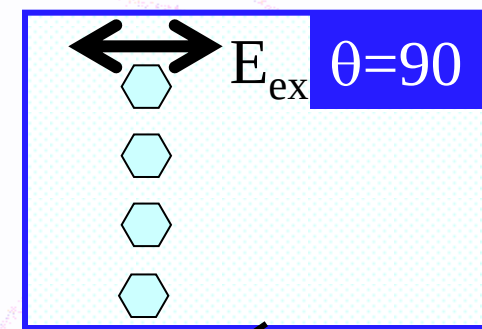
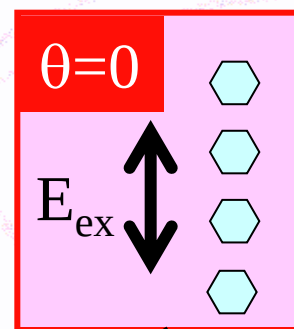
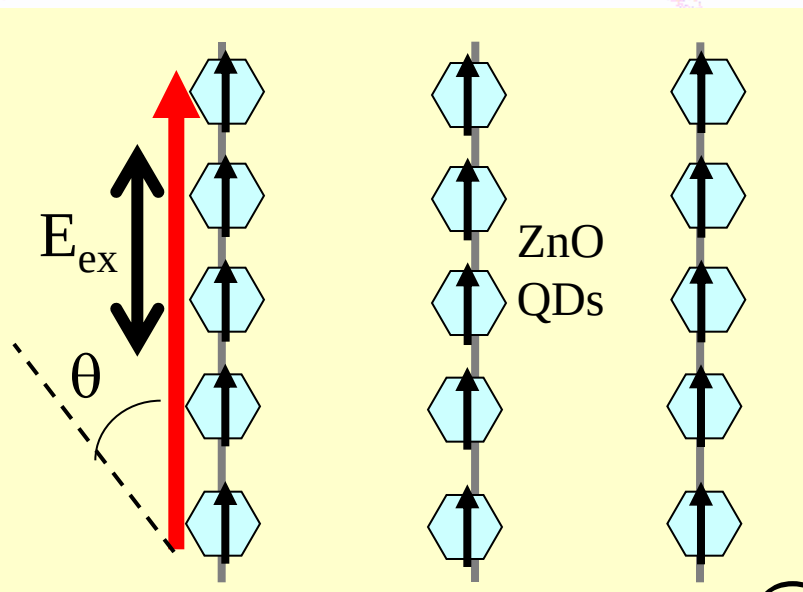
Fluorescent view
x100 objective lens



DNA bundles are extended
in the same direction

フォトルミネッセンスの偏光角依存性

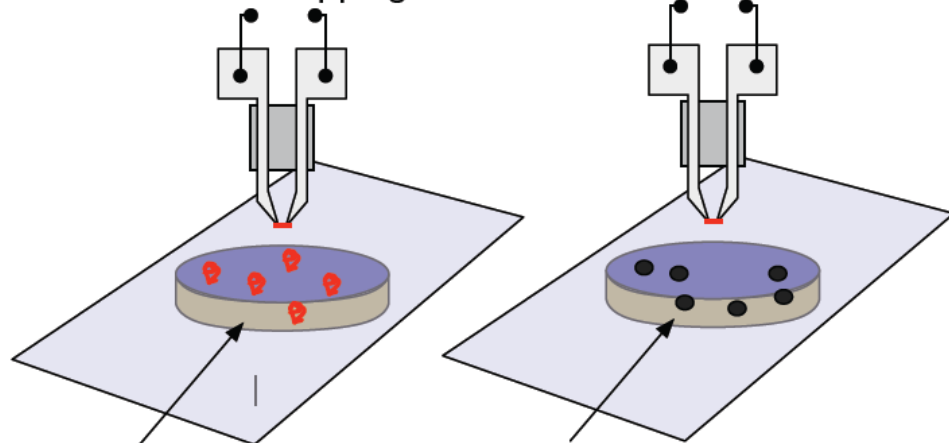
2011.7.14



T.Yatsui, H.Fujita, et al: APL 2010

DNA分子束状へのパラジウムナノ粒子の付加

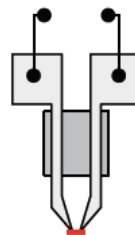
DEP trapping



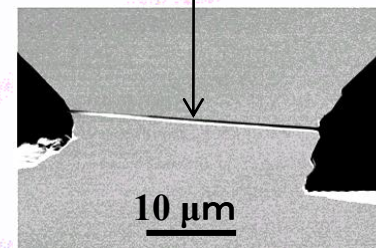
DNA solution

Thiocoline solution

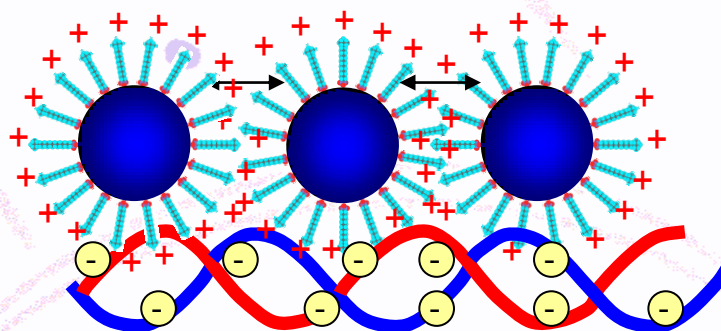
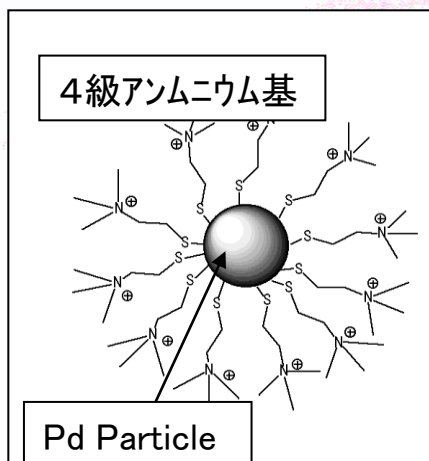
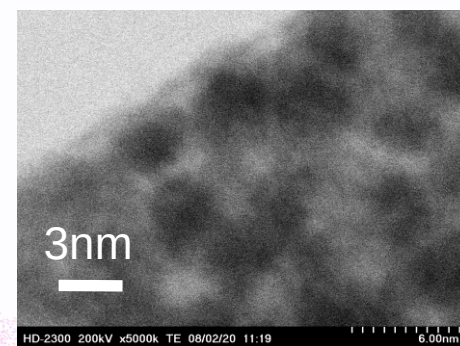
$$I = f(V)$$



DNA bundle



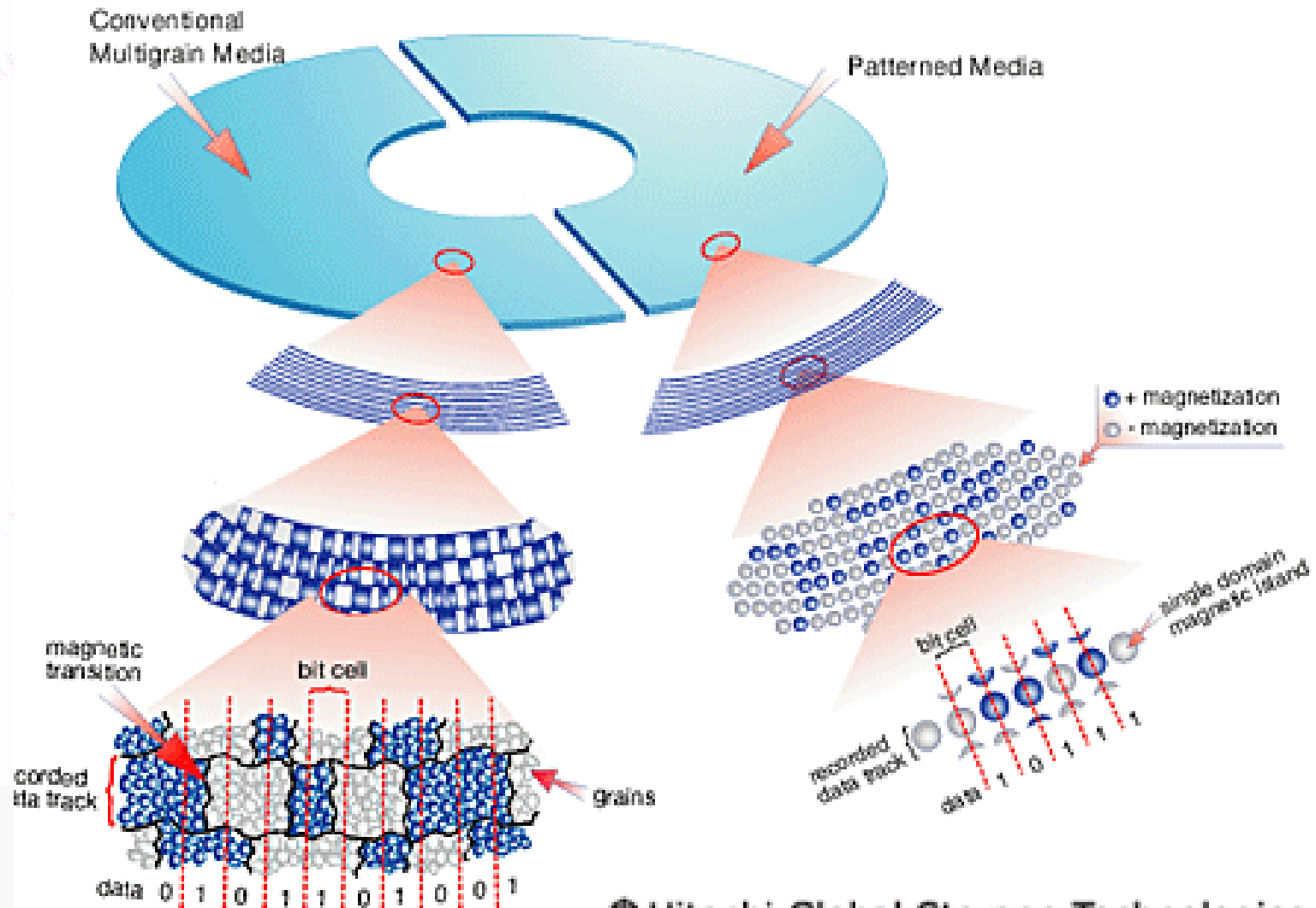
Nano dots attached



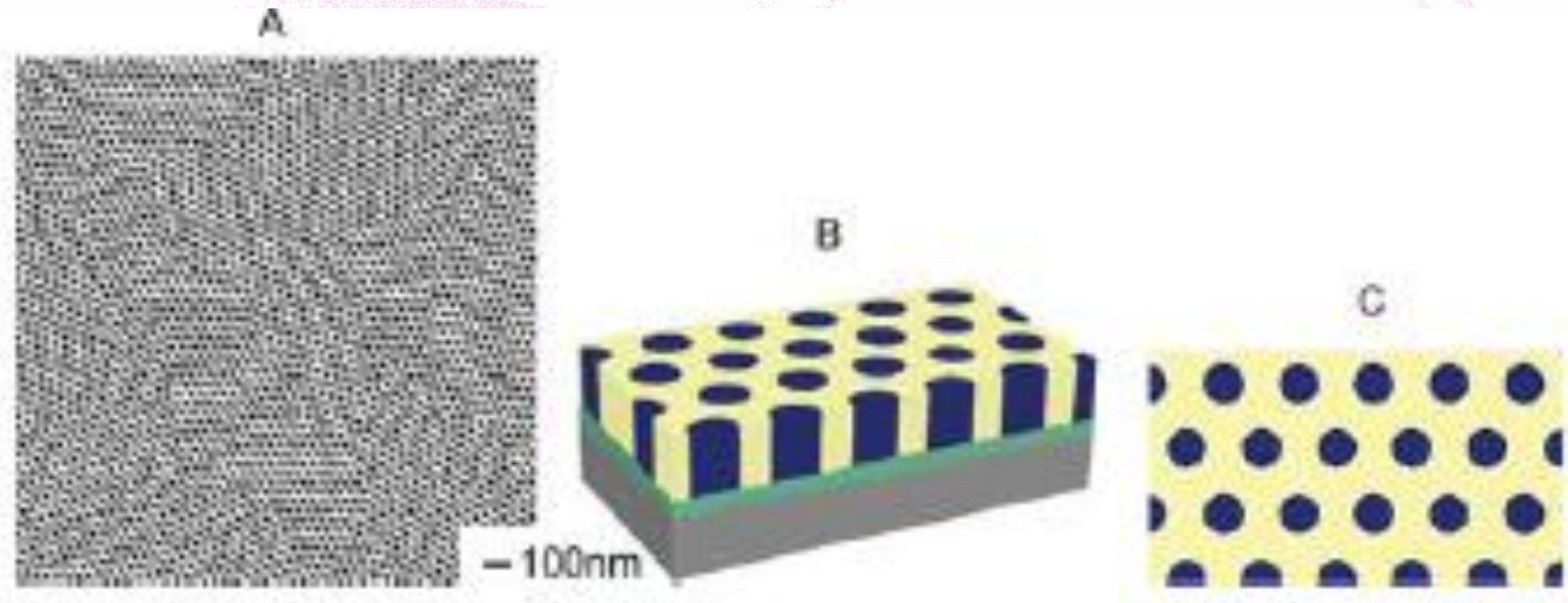
Electrostatic attachment of dots on DNA molecular bundle

ハードディスク用メディアのパターン化に用 いるブロックコポリマーの自己組織化

パターン化メディアでは、磁気記録用ビットの形が予め決めてあり高密度記録ができる

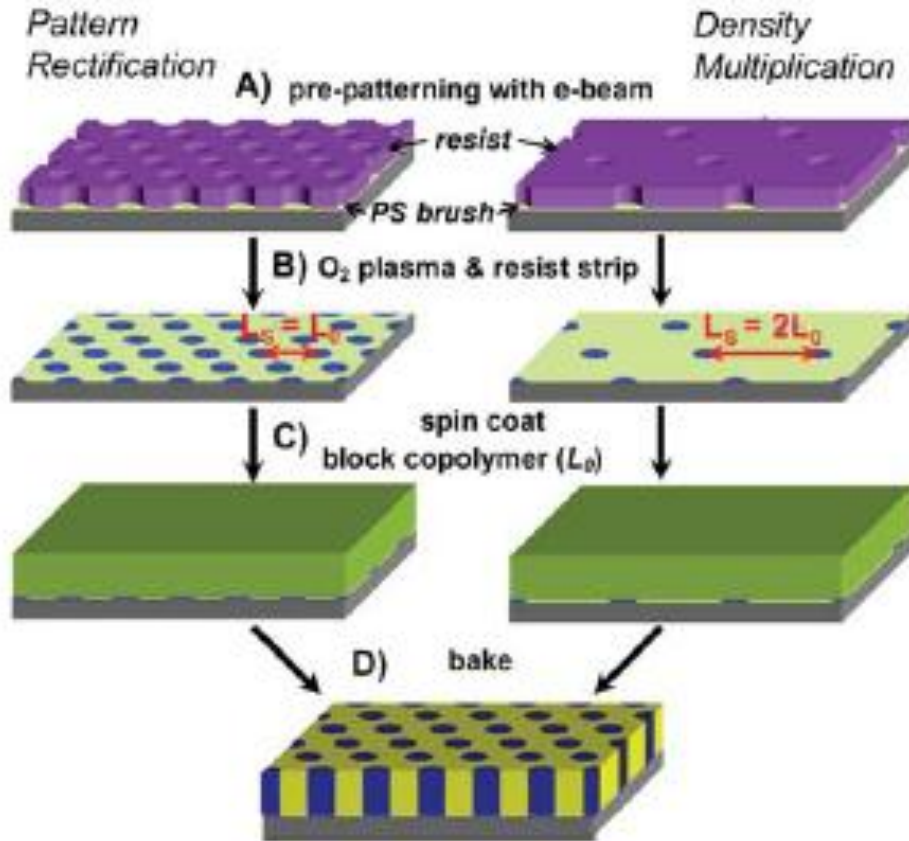


ブロックコポリマーの自己組織化による 円筒形ナノパターン形成

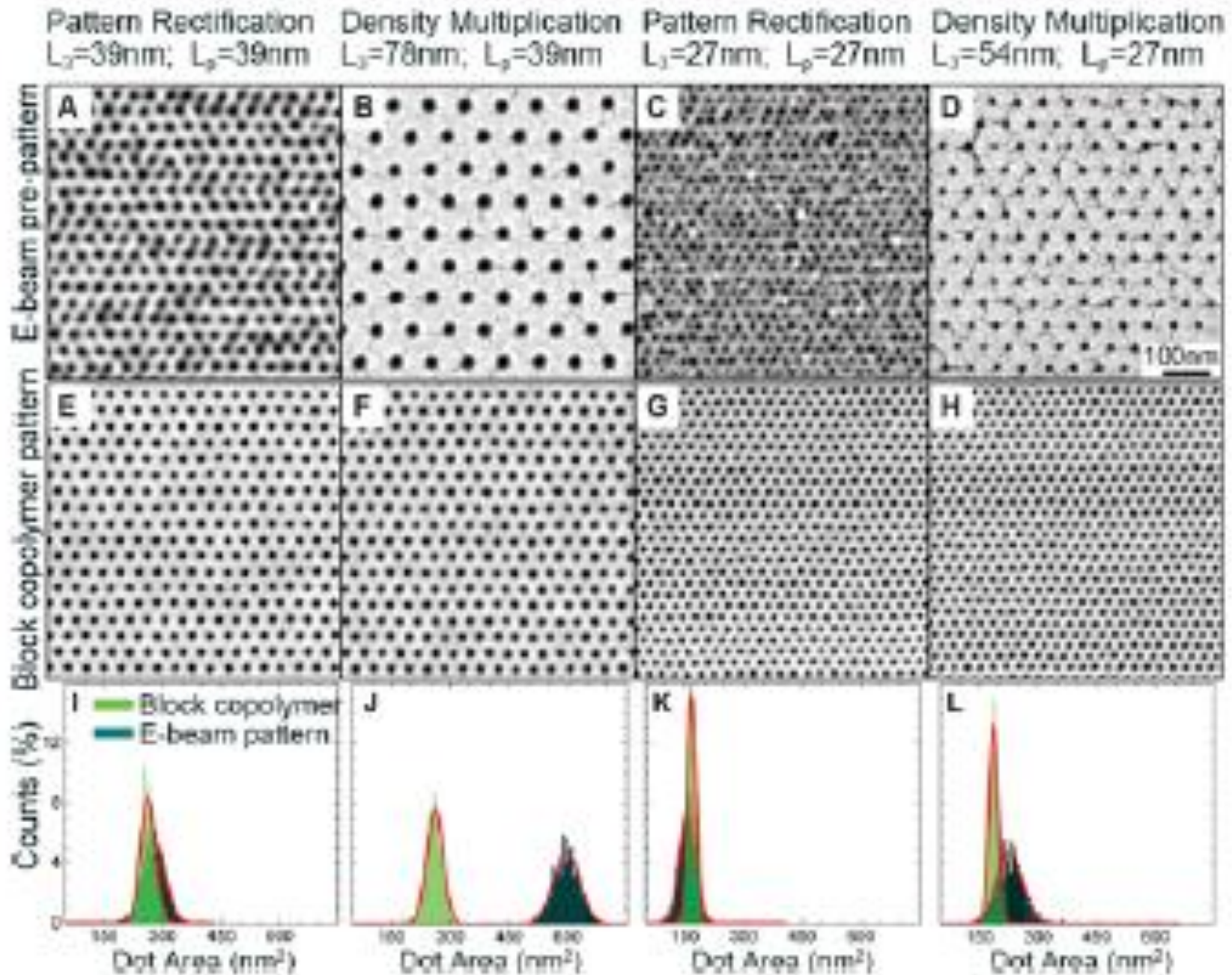


*A) SEM micrograph of a Polystyrene-*b*-methyl methacrylate (PS-*b*-PMMA) block copolymer. B) Cartoon representation of the block copolymer film with PMMA*

予めフォトリソで形成した化学パターンを手掛かりに 自己組織化を誘導

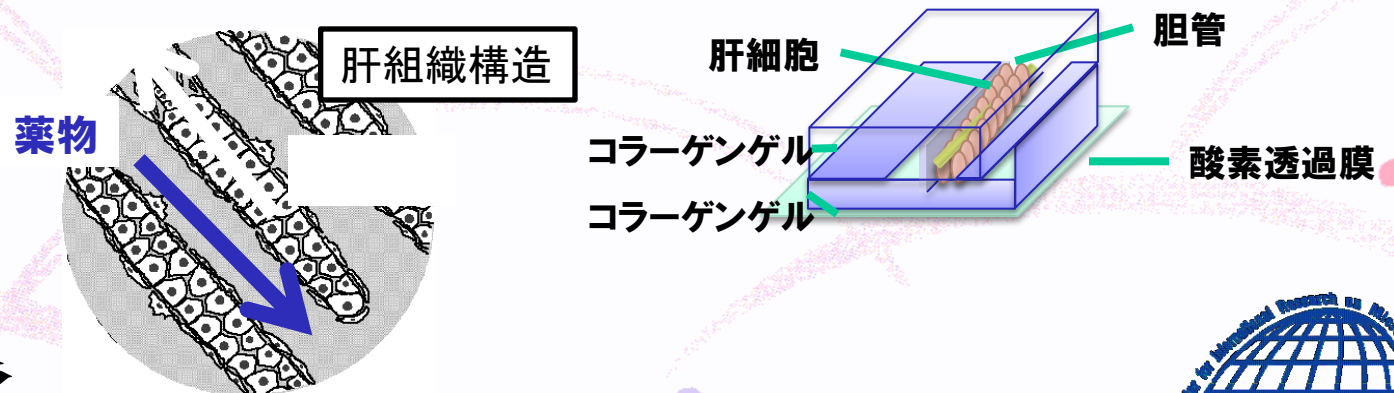


(A) Electron beam lithography patterns at $L_s = L_0$ (left) and $L_s = 2L_0$ (right). (B) Chemical contrast on the substrate after O_2 plasma exposure on the e-beam defined spots above. (C) Block copolymer thin film. (D) Guided self-assembly in registration with the underlying chemical pattern.



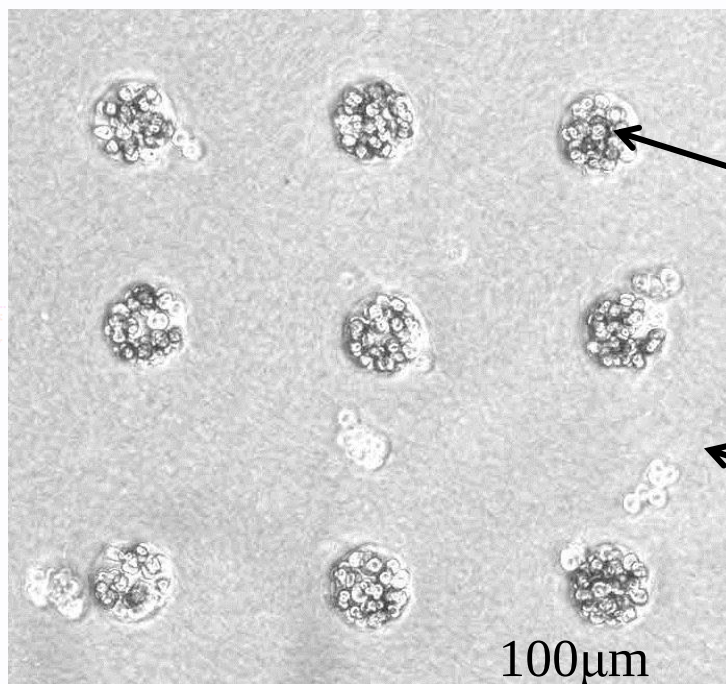
MEMSでバイオの自己組織化を誘導

- 細胞の増殖と自己組織化能力を、トップダウン手法で制御して秩序ある三次元組織を作る研究に注力
- ゲルのビーズやファイバーに閉じ込めた異なる種類の細胞を、立体的に配置した後に培養
 - 肝臓では多数の肝臓細胞の中に胆管が走る。これを模擬した組織を構築
 - 培養組織内での毛細血管の形成にトライ



MEMS構造で肝細胞の胆管形成を助長

- 肝臓では多数の肝臓細胞の中に胆管が走る。これを模擬した組織を構築

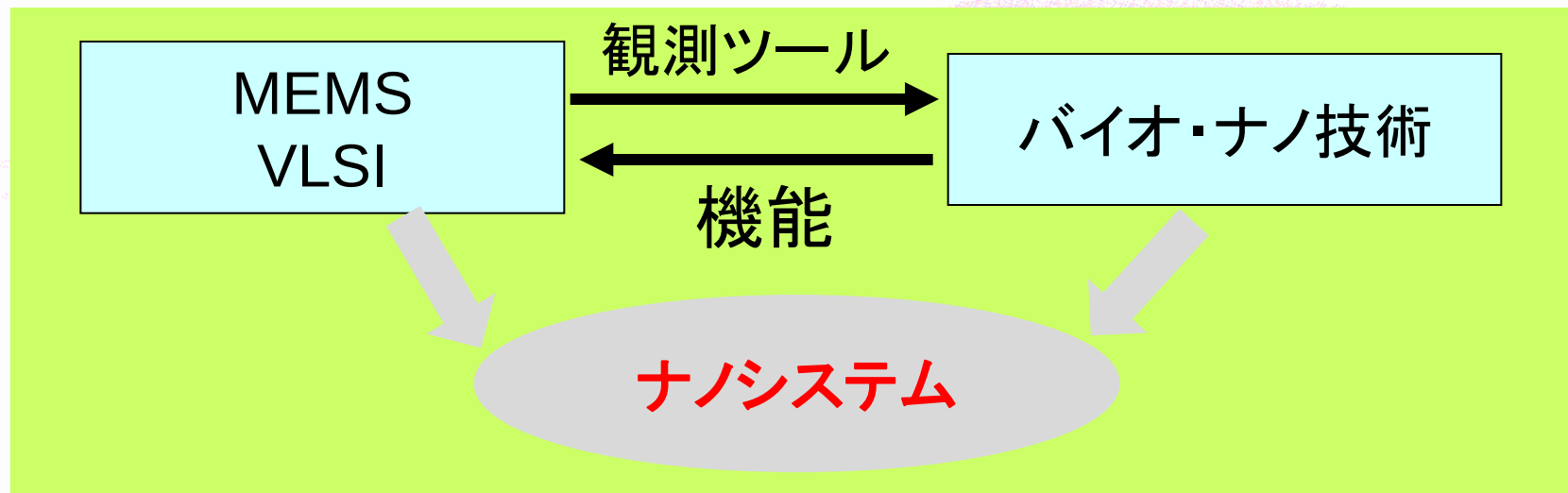


胆細胞の塊の中央に
大きな胆管ができた

マイクロ容器を形成したゲル

トップダウン手法とボトムアップ手法の融合 (最終ステップ)

- スケールや材料を超えたボトムアップ技術とトップダウン技術の融合で真のナノシステムを創製する。



異機能集積化プロセスプラットフォーム

METI/NEDOの支援による BEANSプロジェクト

MEMS技術の発展過程と市場拡大

産業の高度化
(技術の発展と市場の拡大)

2兆4,000億円
(2015年)

第3世代: BEANS 新しいライフスタイルの創出

ターゲット市場

環境・エネルギー
医療・福祉
安心・安全

製造技術

- ・ バイオ・有機材料融合
- ・ 3次元ナノ構造形成
- ・ マイクロ・ナノ構造



1兆1,700億円
(2010年)

第2世代

ファインMEMS

自動車・IT市場をターゲット
多機能デバイスの創出
(高機能・小型化・高信頼性)

- ・ MEMS/ナノテク機能の複合技術
- ・ MEMS/半導体の一体成形技術
- ・ MEMS/MEMSの高集積化技術

トップダウンプロセス中心
シリコンを主とする無機材料

4,400億円
(2005年)

第1世代

現状

黎明期

単機能デバイス—既存部品の置き換え
(既存部品の小型化の進展)

- ・ 3次元マイクロ加工を中心に
日本発MEMSがデバイスメーカー
ファンドリーの両輪で発展



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

BEANS研究所



BEANSプロジェクトの概要

<http://www.beanspj.org/>

マイクロマシン
MEMS技術

ナノ加工

製糸・紡績

印刷技術

バイオ材料

有機材料



プロセス融合
スケール融合
材料融合

ライフ
イノベーション

グリーン
イノベーション



産業の再生

社会問題の解決

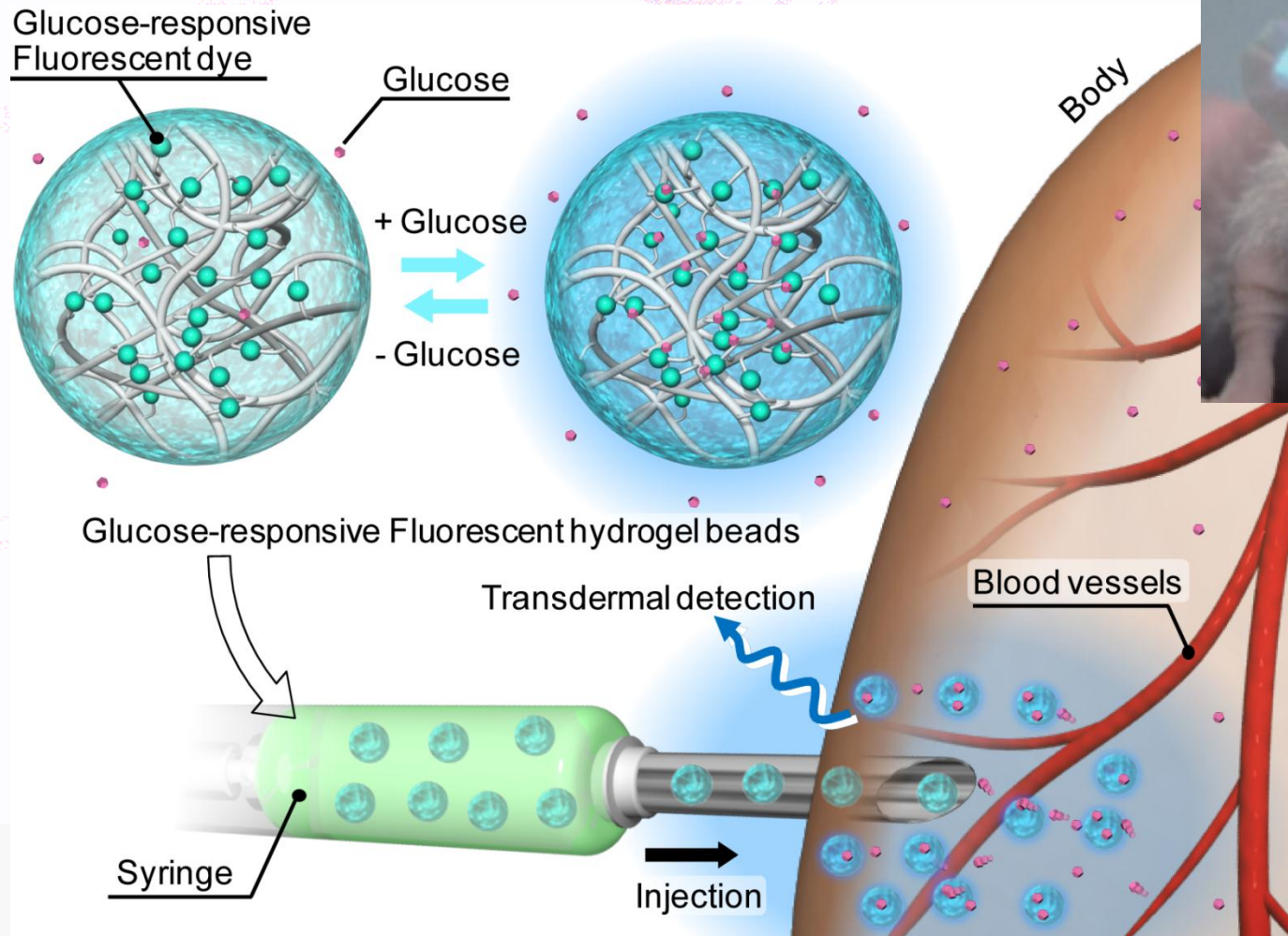
ライフ・イノベーション

- ハイスループットスクリーニングによる創薬 
- 再生医療、組織工学
- マイクロ流体チップを用いた人工授精
- 分子診断
- 生体埋め込みセンサ 
- 4D BEANSプロセスによるバイオ融合チップ

埋め込み可能血糖値センサ

BEANS'

Takeuchi Labs at IIS, U-Tokyo and Terumo Co.



黒毛和牛の人工授精を目指すマイクロ流体チップ

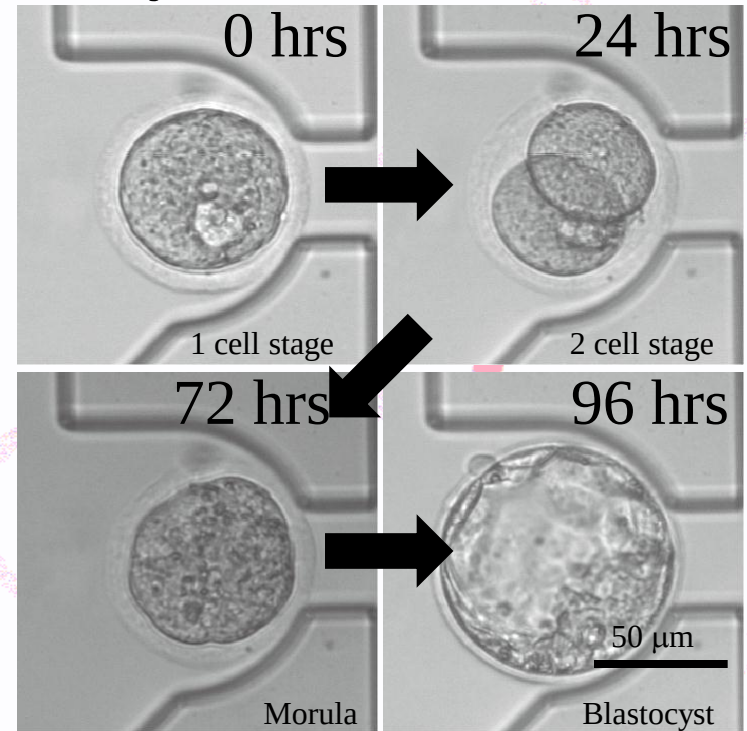
2011.7.14

Sakai-Fujii-Takeuchi Labs at IIS, U-Tokyo, DNP and National Livestock Breeding Center

Embryo culture device



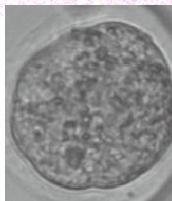
Embryo culture in the channel



Embryo collection by electrolysis



普通の牛が神戸牛を生む

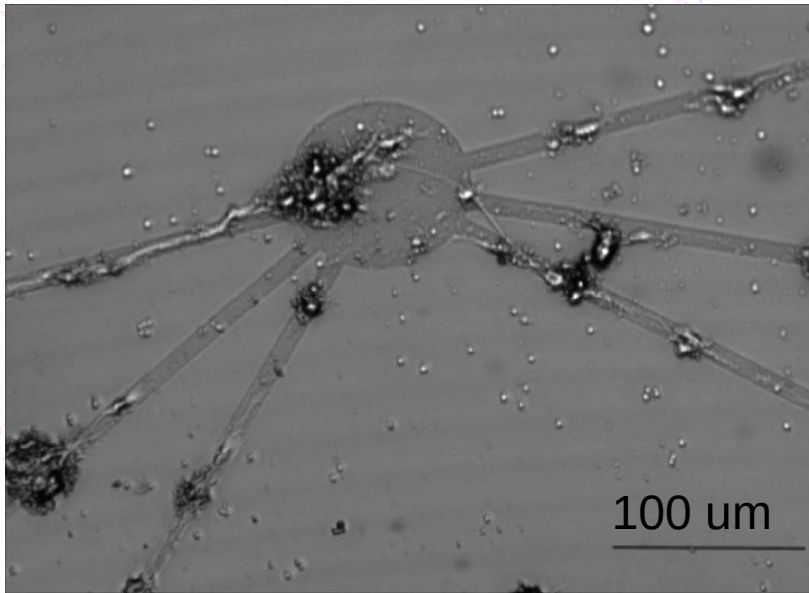


Embryo of Kobe-Beef cattle

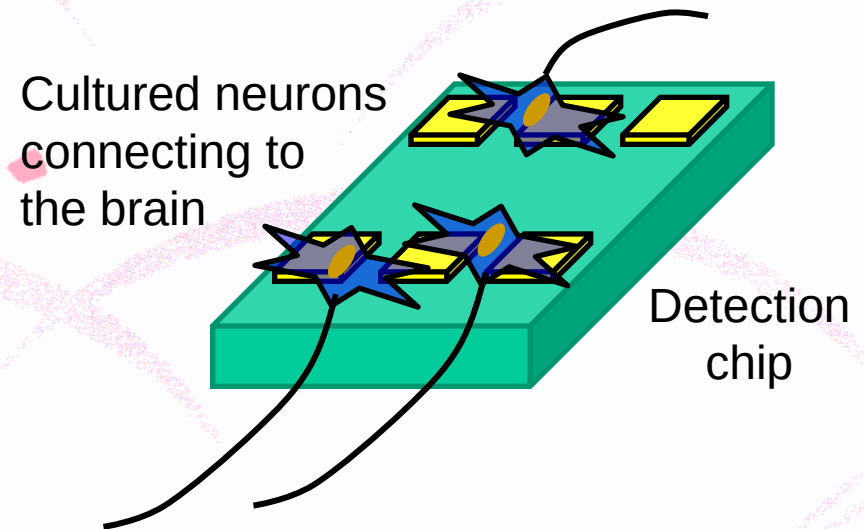


脳マシンインタフェース用脳神経培養チップ(構想)

素子の時間発展を含む4次元加工



Cultured neuron cells elongate axons
along micro patterns on a chip



Prospected BMI

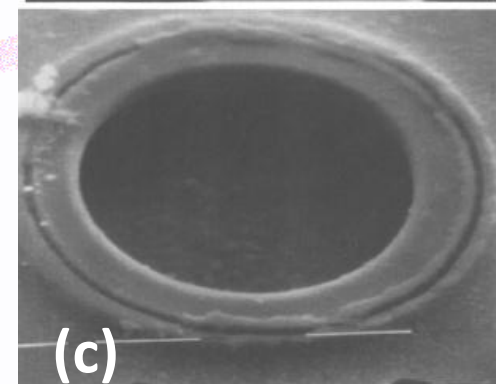
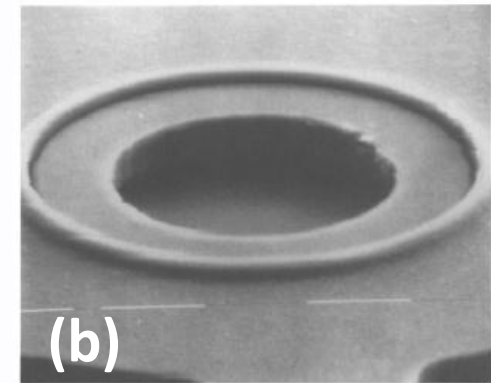
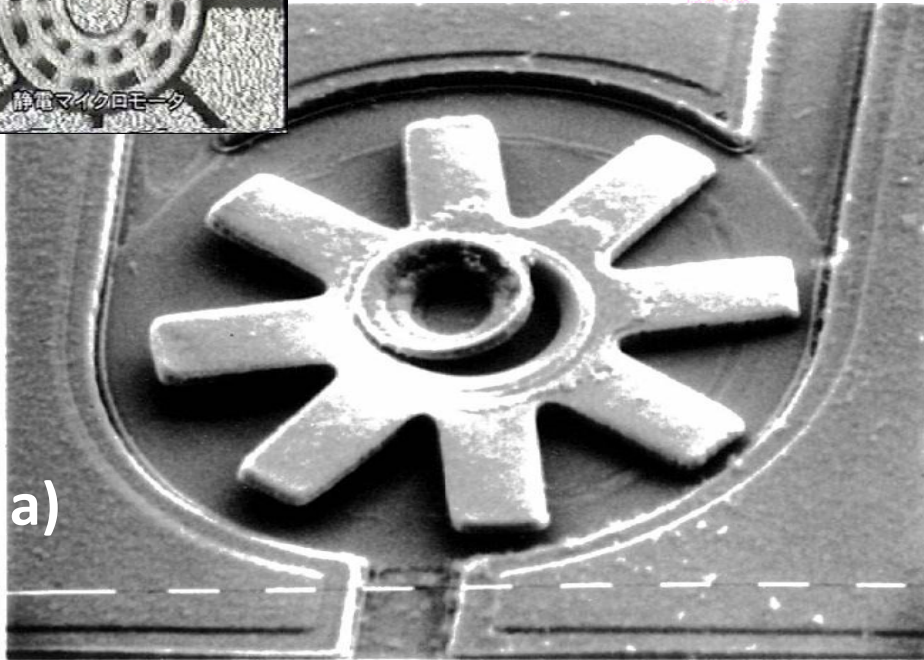
グリーンイノベーション

- 大面積に薄膜を形成する省エネルギープロセス技術 
- ナノスケールの摩擦解明
- 織物MEMSによる環境発電 
- 有機分子の自己組織化ナノ構造で太陽電池や有機EL発光素子の効率向上 
- 極低電力エレクトロニクスへのMEMSの応用

マイクロマシンの摩耗は大問題

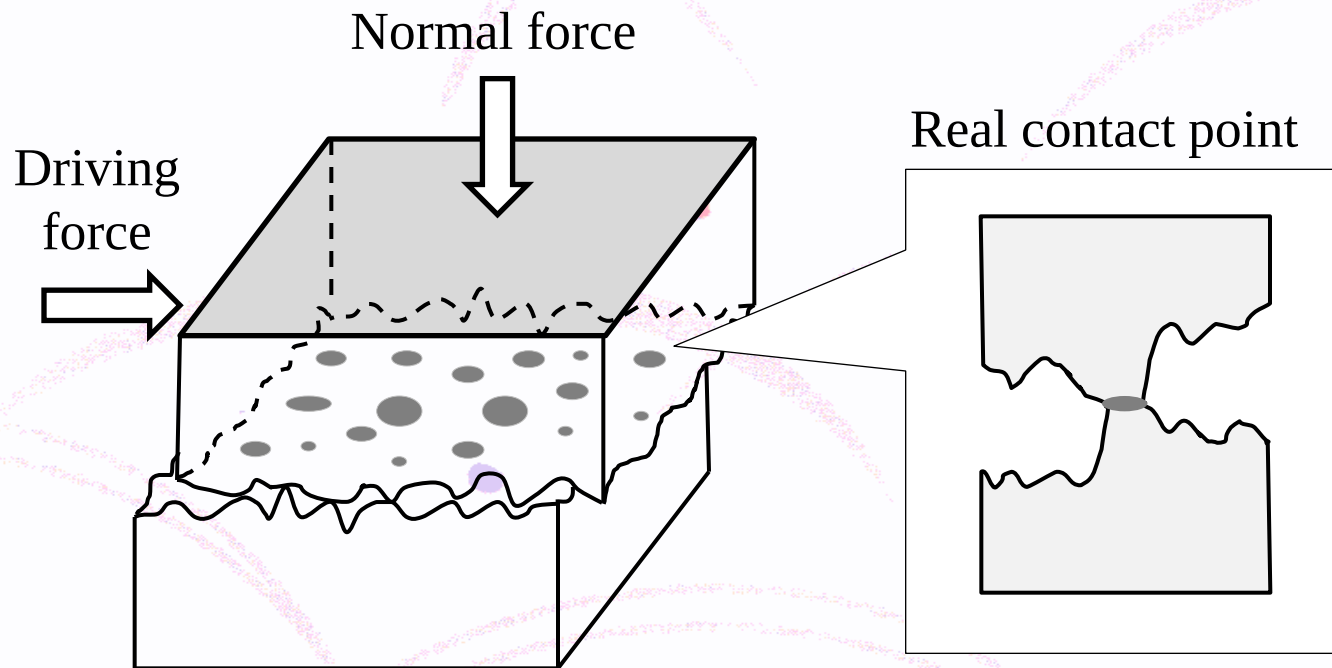
2011.7.14

K. Gabriel, et al. Sensors and Actuators (1990)



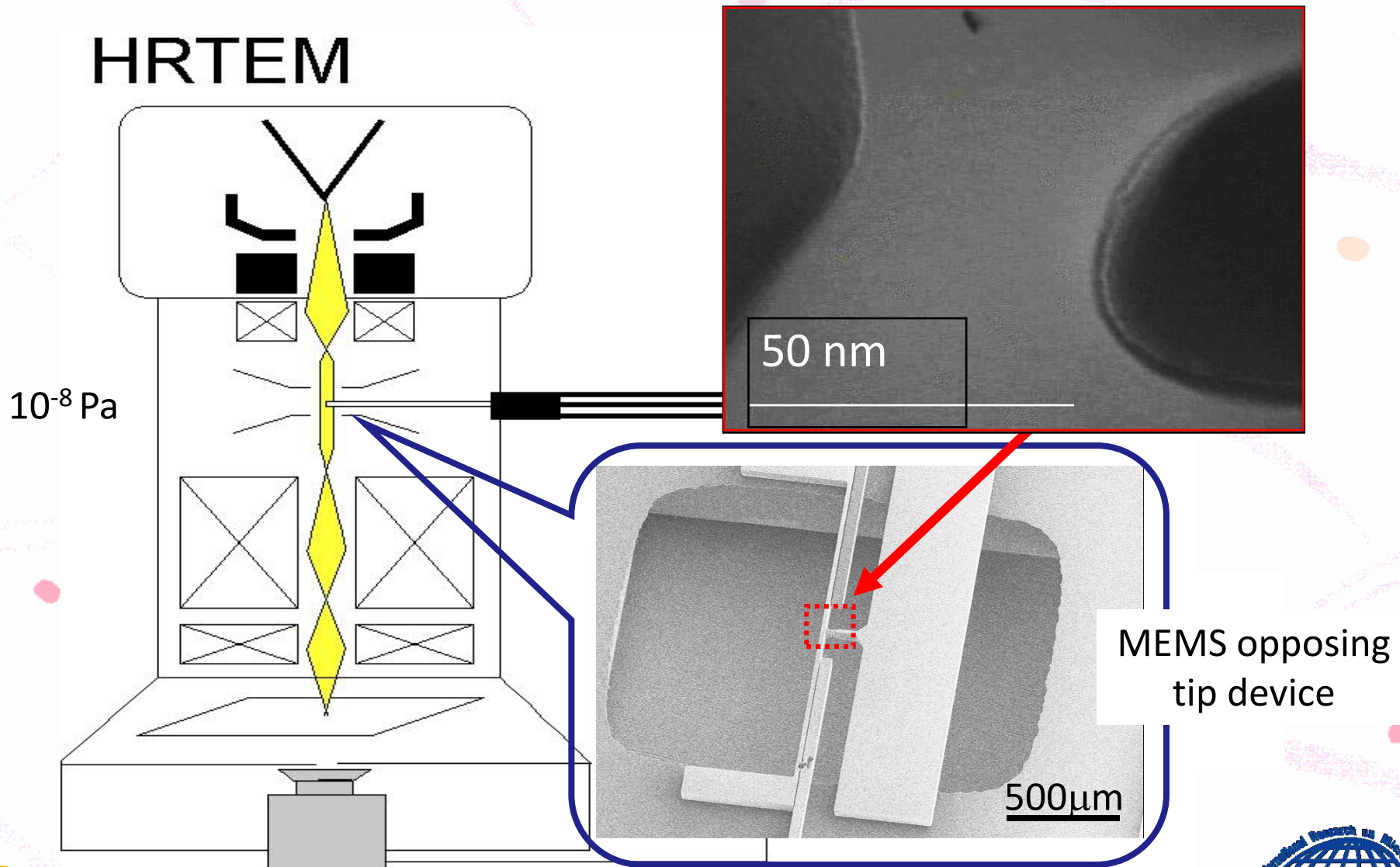
SEM photographs showing (a) the worn out micro turbine after operation (b) the under side of a turbine before operation and (c) after spinning at 2500 rps for 5 min. Each white horizontal dash is 10 μm wide

摩擦の原因は、多数の真実接触点のせん断破壊 個々のナノ接触点で生じる現象を知る必要がある



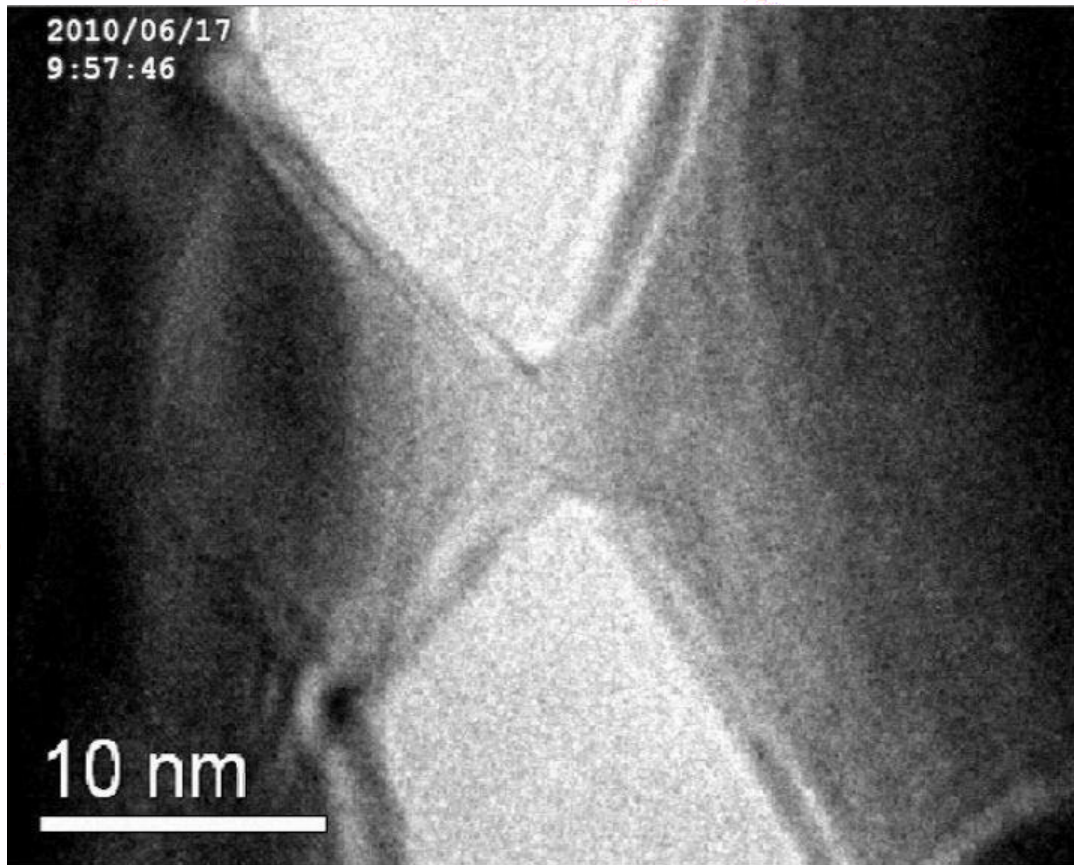
MEMS-in-TEM 実験系

2011.7.14



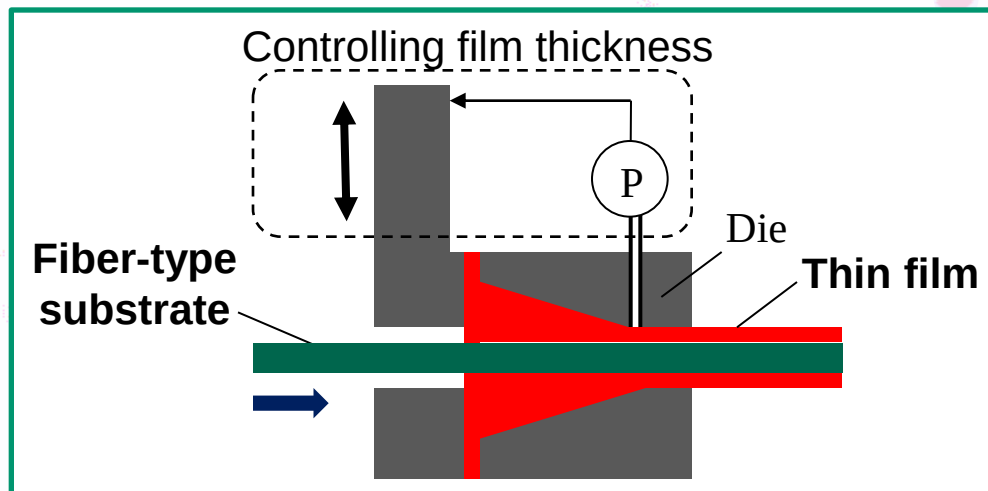
銀のナノ接合のせん断破壊

For Ag nano junction, the maximum shearing force was 10 nN. Shearing force at the fracture was 7 nN with the displacement of 5 nm.



loading speed:
 0.5 nm s^{-1}

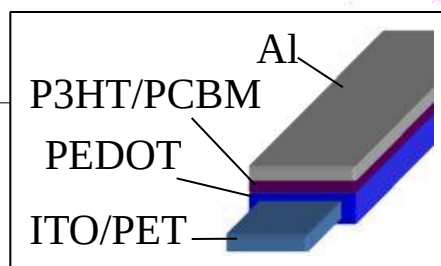
繊維状基材への薄膜コーティング



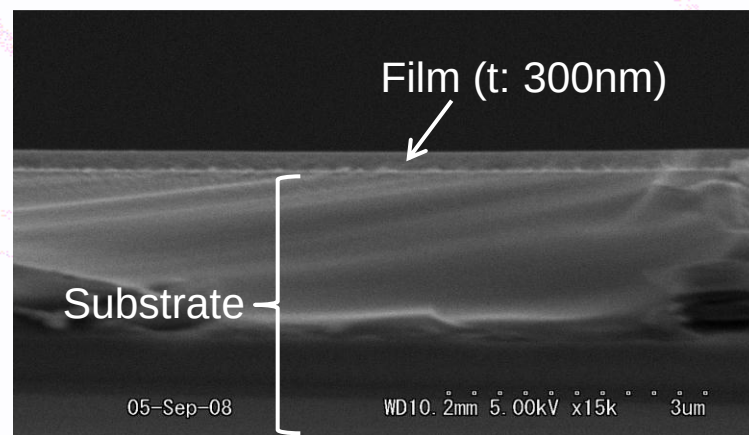
Control the film thickness with feedback of the pressure in the die



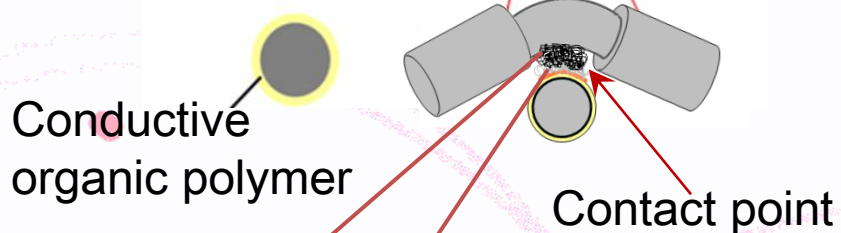
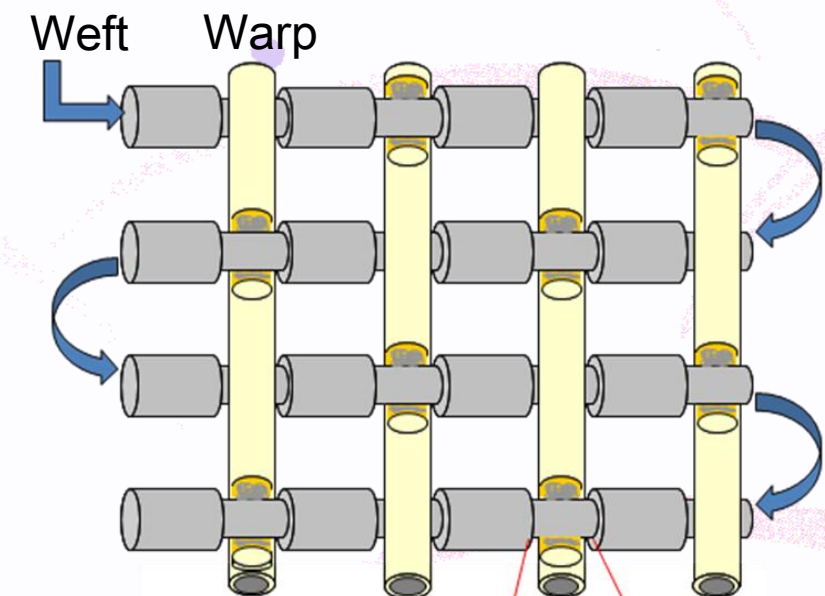
Roll-to-Roll process



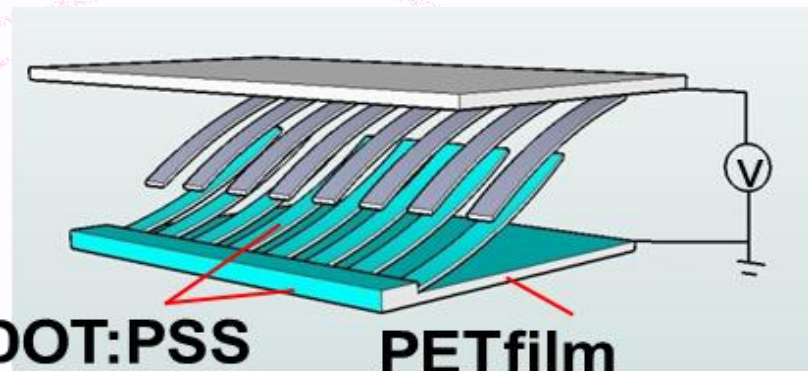
Fiber Organic Solar Cell



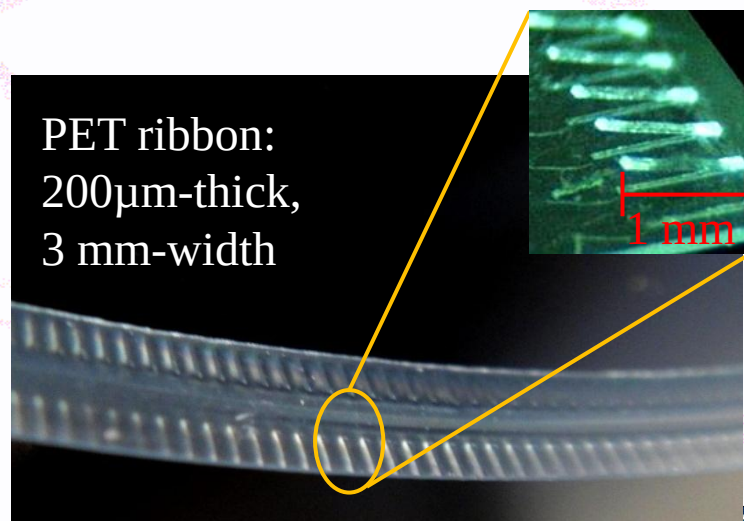
縦糸横糸の交点に電気接点を形成



Gap generation while bending the woven textile



Spring contact structure using conductive polymer



PET ribbon:
200 μ m-thick,
3 mm-width

MEMSシートを織り上げた



Linear actuator for wefts
reduces destructive friction
between wefts and warps



異機能集積化プロセス

異機能集積システム

異機能集積化BEANS技術

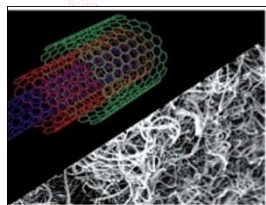
機能分子

合成化学



バイオ化学
機能素子

マイクロ
流体技術

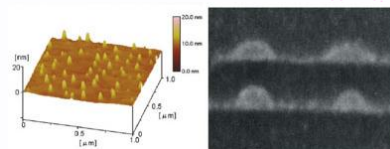


ナノ
機能素子

ナノ技術

光学機能
素子

化合物半導体技術
光集積技術

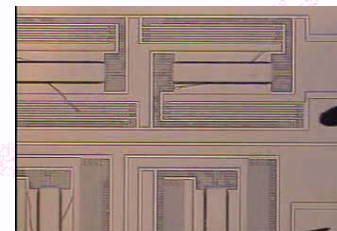


電子機能
素子

シリコン技術

運動機能素子

マイクロ
マシーニング



柔軟デバイス

印刷
紡績

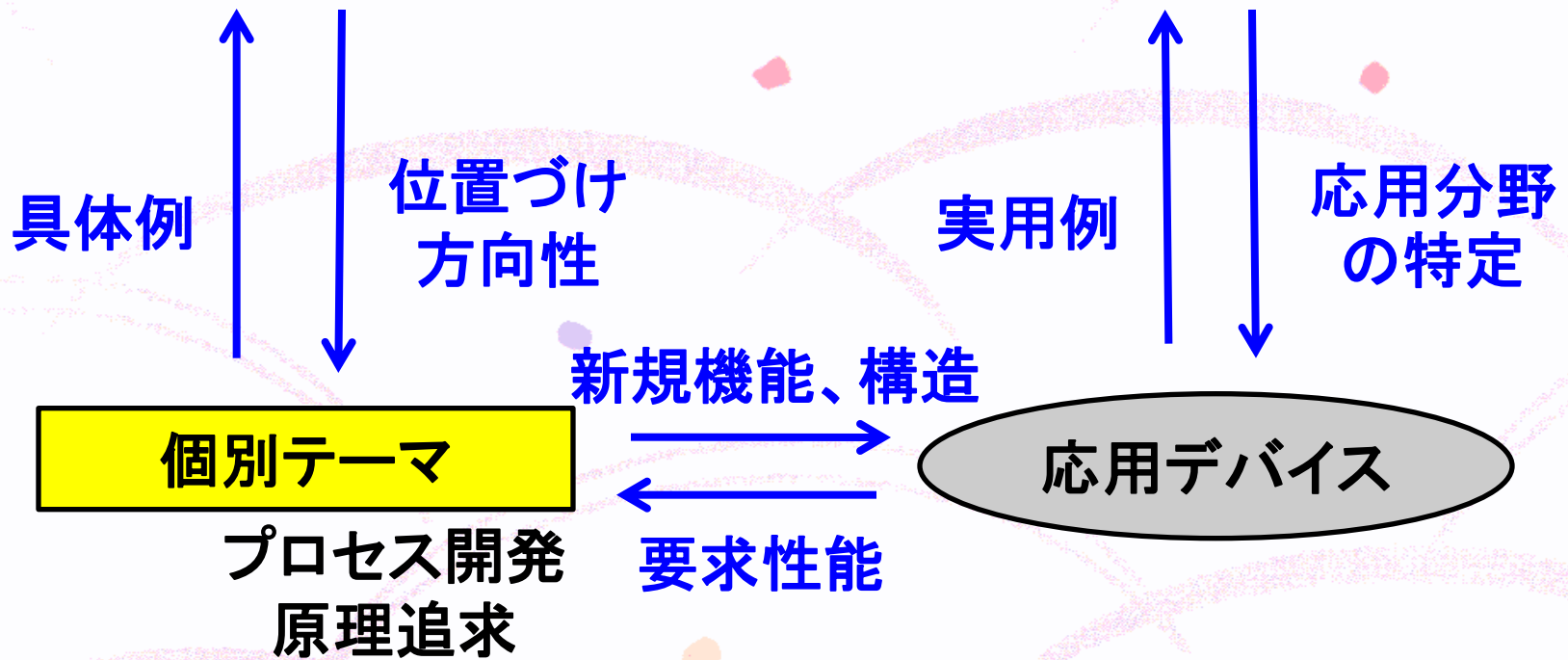
Grand Question

BEANSとは何か？

(全体像、将来目標)

それは何を意味するか？

(応用、デバイスイメージ)



まとめ

- MEMS 技術は成熟し、実用化段階に入った
- MEMSをナノテク、バイオ技術、印刷、紡績などと組み合わせ異機能集積プロセスにする
 - トップダウン技術とボトムアップ技術の融合
 - 自己組織化の活用
 - スケール、材料、プロセスを超える異分野融合
- BEANSプロジェクトはこの端緒となる試み
- ライフ、グリーンイノベーションに向け成果が得られている

謝辞

- 文部科学省
- JST
- JSPS
- GCOEプログラム
- フランス科学研究センター
- 経済産業省
- NEDO
- マイクロマシンセンター
- BEANS研究組合
- 産業競争力懇談会
(COCN)

In collaboration with

- Professors affiliated with CIRMM
 - Hideki Kawakatsu, Hiroshi Toshiyoshi, Dominique Collard, Teruo Fujii, B. J. Kim, Shoji Takeuchi, Yasuhiko Arakawa, Alan Bossebeouf, Yasuyuki Sakai, A.-M. Tixier, Y. Rondelez
- Prof. Teruyasu Mizoguchi, Prof. Masao Washizu , Prof. T. Yatsui
- Students, post-Docs and visiting scientists
 - Dr. Momoko Kumemura, Dr. M.C. Tarhan, Dr. H. Sakaki, Dr. C. Yamahata, Dr. C. Bottier
 - Dr. T. Ishida, Dr. L. Jalabert, Mr. T. Sato, Mr. S. Nabeya, Ms. M. Sato
- Japanese partners
 - Prof. Yonezawa (Hokkaido Univ.) and his group
 - Prof. Naruo Sasaki (Seikei Univ.) and his group
 - Prof. Gen Hashiguchi (Shizuoka Univ.) and his group
 - Prof. Ryuji Yokokawa (Kyoto Univ.) and his group
- Global partner
 - Prof. Fabrizio Cleri (CNRS), Prof. Karl Boehringer (U. Washington)
- And many others...