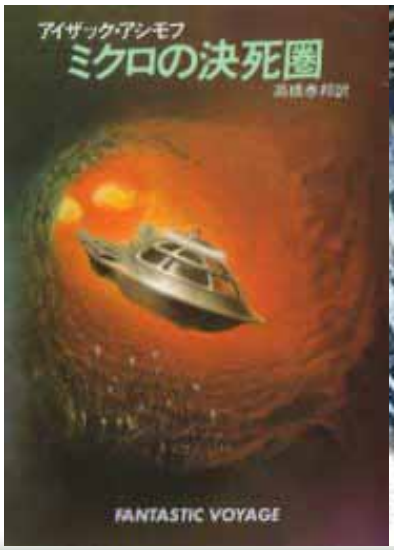
「小さな機械　が創る　大きな機会」

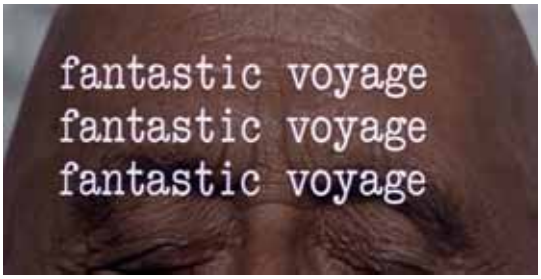
京都大学
マイクロエンジニアリング専攻
田畑　修

Fantastic Voyage（邦題：ミクロの決死圏）

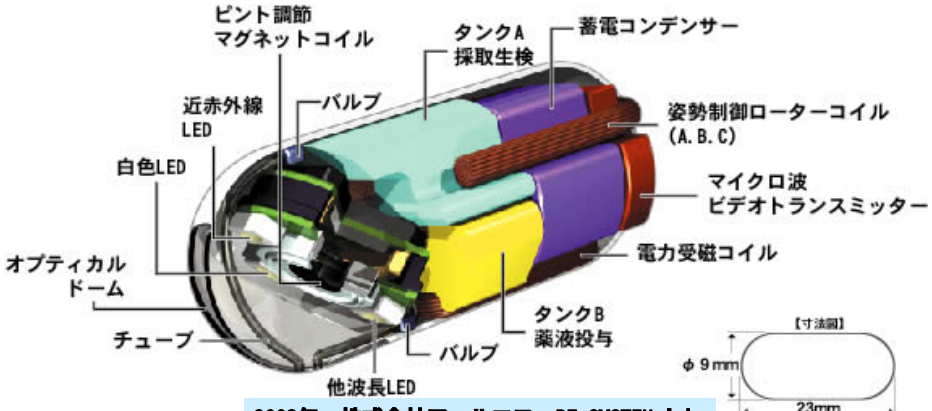
1966年



Fantastic Voyage



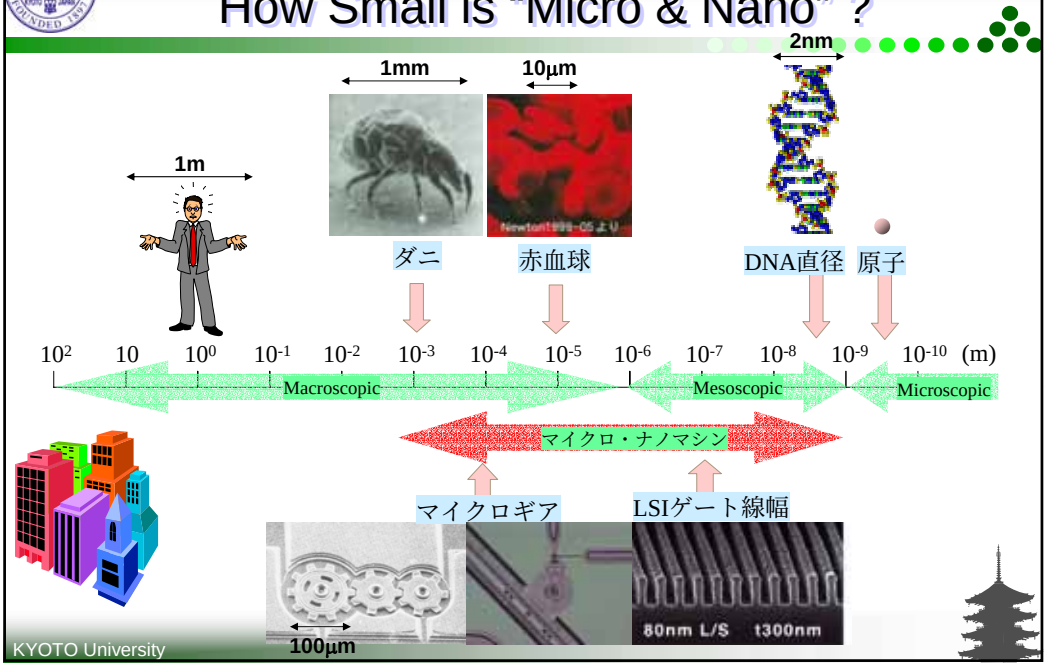
SFから現実に・・・カプセル内視鏡



2003年　株式会社アールエフ　RF SYSTEM lab.

超小型カプセル型CCDカメラと無線で制御・操縦するコントローラ、電力送信と姿勢制御用のコイルを内蔵したベストで形成される．外形は直径９㎜、長さ23㎜のピル型、筐体部分は樹脂を使用する．内部側面に3つの姿勢制御ローターコイルを囲むように配置し、レンズ部分は周囲にピント調整マグネットコイルと4つのLED、中央の空間部にはバルブをつけたタンクを2つ置く。電力を蓄えるための蓄電コンデンサーとマイクロ波送信部を含む．
価格は100＄．香港では病院にて臨床応用中．

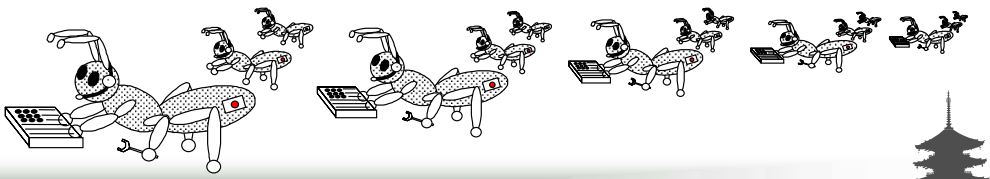
How Small is “Micro & Nano” ?



M^3技術=マイクロマシン/MEMS/MST

- Micromachine (Japan)
- MST (Micro System Technology) (Europe)
- MEMS（Micro ElectroMechanical Systems） （US）

- **概念:**
  センサ・アクチュエータ・処理回路の集積化システム
  機械・電子・光・化学・物理など多くの現象の複雑な相互作用を利用



通産省マイクロマシンプロジェクト

期間:10 年
予算: 25 (1991-1993)
75 (1994-1995)
150 (1996-2000)
計 250 億円

通産省工業技術院
- 機械技術研究所
- 電子技術総合研究所
- 計量研究所

↓

新エネルギー・産業技術総合開発機構

↓

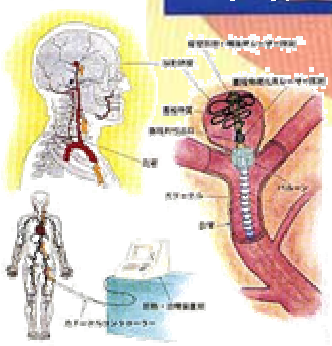
マイクロマシンセンター

発電施設用メンテナンス	マイクロファクトリー	医療応用
村田製作所 オムロン 東芝 横河電機 住友電気工業 など15社	日立製作所 安川電機 SII ファナック など7社	オリンパス光学工業 テルモ オムロン

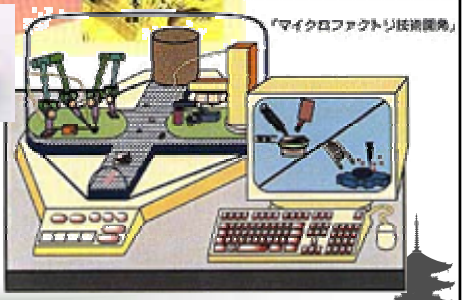
マイクロマシンプロジェクト

管内自走環境認識用マイクロマシン

体腔内診断・治療用マイクロマシン



マイクロファクトリ



マイクロマシンの歴史

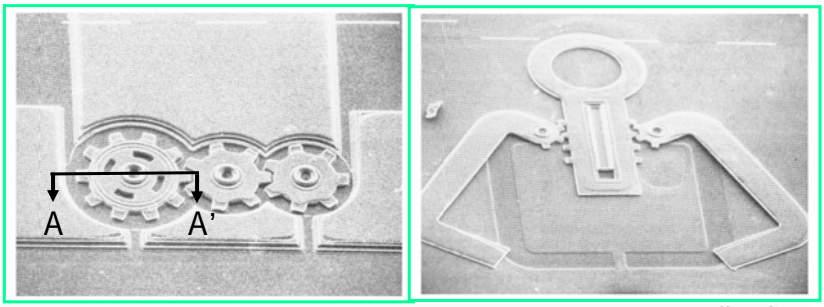
1954	Ge，Siのピエゾ抵抗効果の発見
1956	犠牲層エッチング特許
1958	Siひずみゲージの商品化
1959	ファインマン講演”There’s plenty of room at the bottom”
1962	Si半導体式圧力センサ
1965	Si結晶異方性エッチング
1966	ミクロの決死圏公開
1967	振動ゲート型トランジスタ
1973	イオンセンサ
1975	ガスクロマトグラフ
1978	インクジェットプリンタヘッド
1979	集積化圧力センサ
1979	加速度センサ
1986	サーボ型シリコン加速度センサ
1987	マイクロギア
1988	静電マイクロモータ

1990年代以降　急速に展開

マイクロギヤ

犠牲層エッチング技術

A-A’断面の変化の様子

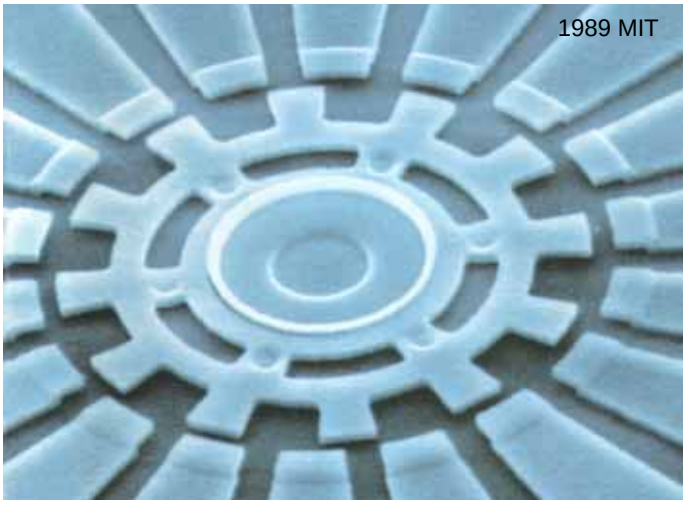


1987 Bell Lab.

何故シリコン微細加工技術が多用される?

- ＬＳＩの基板である.
  エレクトロニクスとの集積化可能
  半導体微細加工技術を利用可能
- 安価に入手できる単結晶材料である.
  機械的強度が高い (鋼より強い)
- 優れた材料特性 (電気, 機械)
  ピエゾ抵抗係数が大きい
  熱伝導率が高い

マイクロモーター

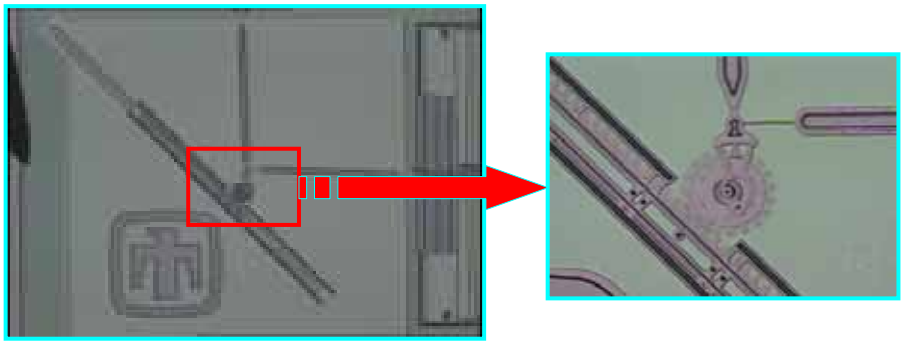


マイクロモーター

1989年 MIT

Linear Rack

Sandia National Lab.
http://www.mdl.sandia.gov/

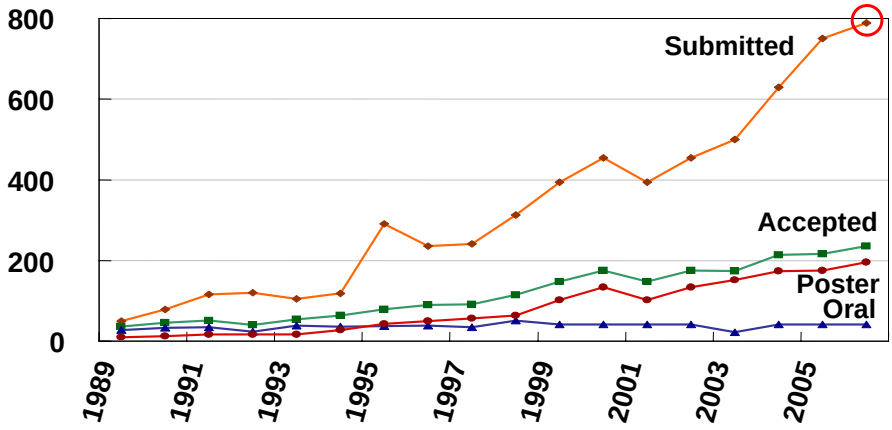


MEMS2006 at Istanbul

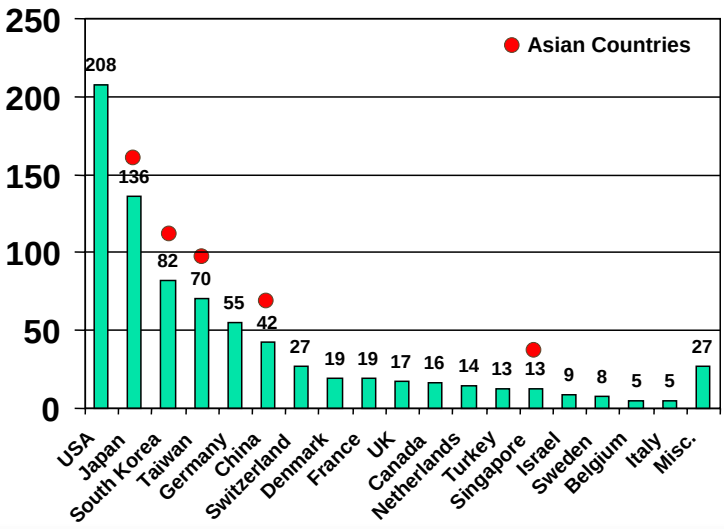
19th IEEE International Conference on
Micro Electro Mechanical Systems
MEMS 2006
January 22 - 26, 2006
Lütfi Kirdar Convention and Exhibition Centre, Istanbul

Abstracts and Contributions for MEMS Conf.

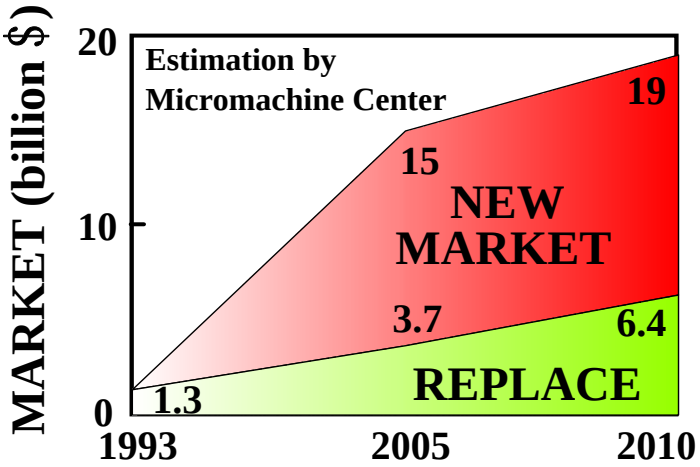
MEMS2006
Submitted; 789



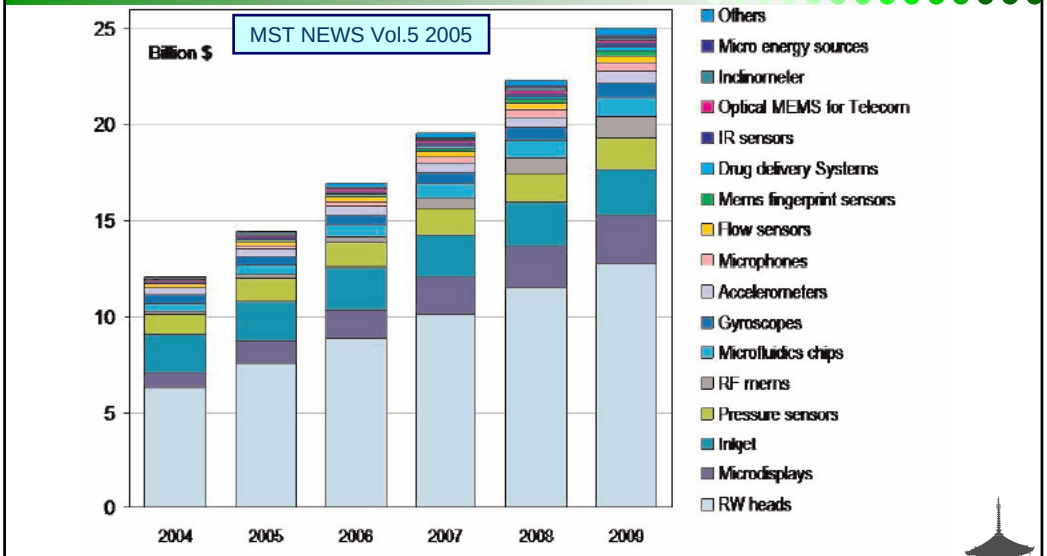
Abstracts by Country



Micromachine Market Forecast

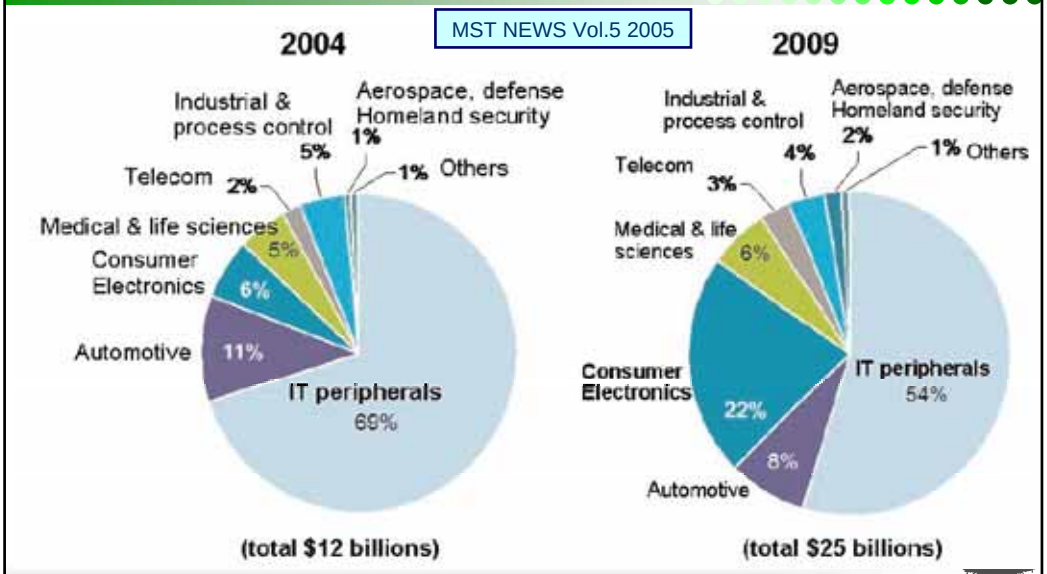


MST/MEMS Market

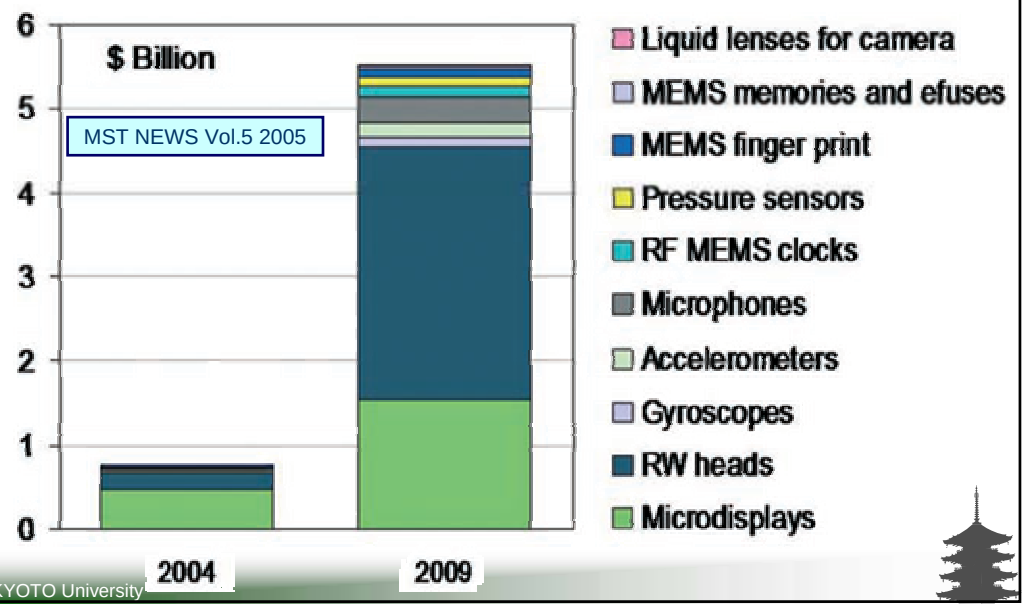


* Other are: Microreaction, chip cooler, MEMS memories, liquid lenses, microspectrometer, wafer probes, micro-mirrors for optical processing, micro pumps, micromotors, chemical analysis systems

MST/MEMS Market by Application Fields



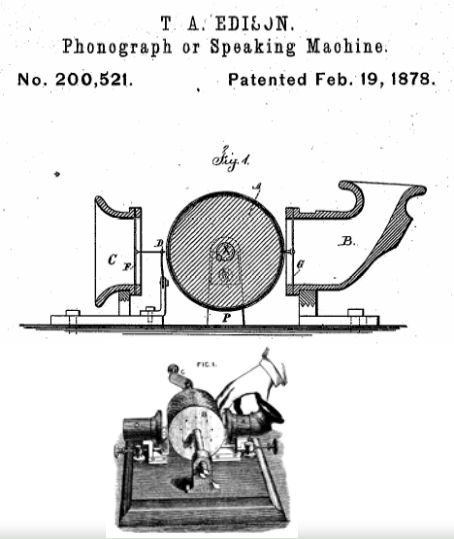
MST/MEMS Market in Consumer Electronics



Why “Micro”?

- 微細な対象を扱う、あるいは精密な動作が必要な用途には空間分解が高いデバイスが適している。
  → ex. データストレージ
- マイクロ化によって従来利用できなかった物理化学現象を積極的に利用することができる。
  → ex. 静電アクチュエータ
- 対象をマイクロ化することでリソースを節約して効率良く目的を達成することができる。
  → ex. マイクロ化学分析
- 製造コストが安くコストパフォーマンスが向上する。
  → ex. センサ

エジソンの蓄音機と次世代データストレージ



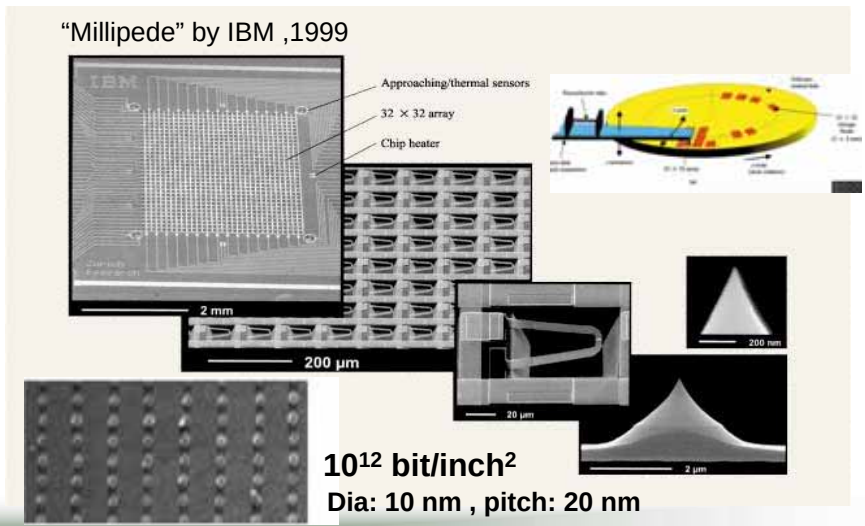
10^{12} bit/inch^2

"Millipede" by IBM ,1999

Dia: 10 nm , pitch: 20 nm

AFM Data Storage

"Millipede" by IBM ,1999



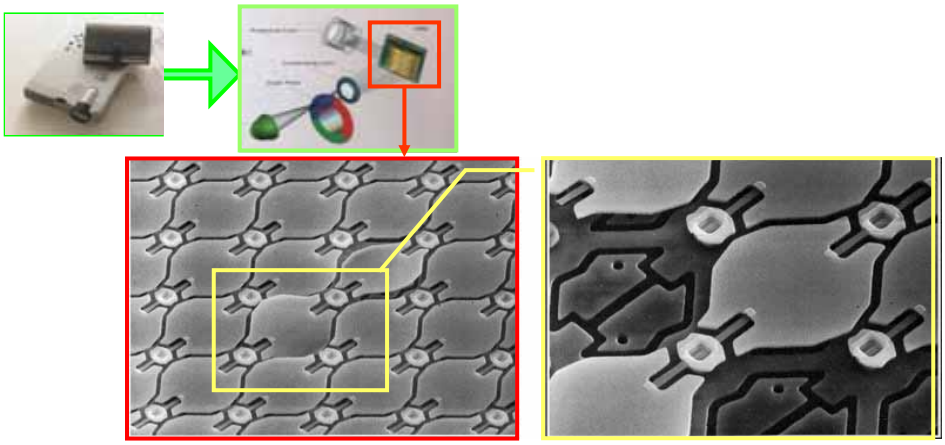
10^{12} bit/inch^2

Dia: 10 nm , pitch: 20 nm

Why “Micro”?

- 微細な対象を扱う、あるいは精密な動作が必要な用途には空間分解が高いデバイスが適している。
  → ex. データストレージ
- **マイクロ化によって従来利用できなかった物理化学現象を積極的に利用することができる。**
  → ex. 静電アクチュエータ
- 対象をマイクロ化することでリソースを節約して効率良く目的を達成することができる。
  → ex. マイクロ化学分析
- 製造コストが安くコストパフォーマンスが向上する。
  → ex. センサ

Digital Micromirror Device (DMD)



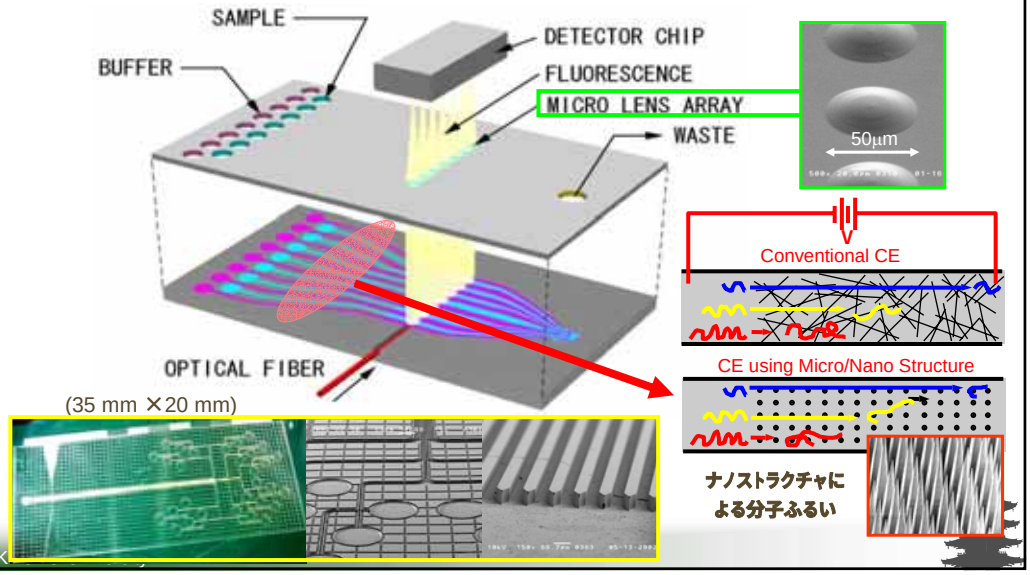
Texas Instruments

Why “Micro”?

- 微細な対象を扱う、あるいは精密な動作が必要な用途には空間分解が高いデバイスが適している。
  → ex. データストレージ
- マイクロ化によって従来利用できなかった物理化学現象を積極的に利用することができる。
  → ex. 静電アクチュエータ
- **対象をマイクロ化することでリソースを節約して効率良く目的を達成することができる。**
  → ex. マイクロ化学分析
- 製造コストが安くコストパフォーマンスが向上する。
  → ex. センサ

ポリマ製バイオ分析用マイクロチップ

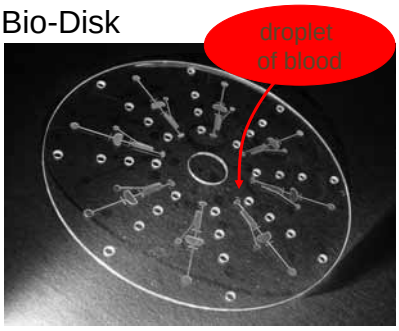
例：DNA塩基配列解析用電気泳導マイクロチップ



Bio-Disk Platform

Courtesy of Prof. Zengerle

Bio-Disk



- application specific disk
- low-cost disposable

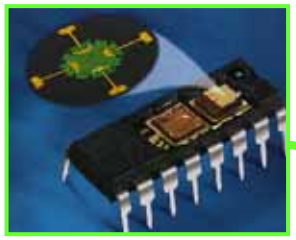
Mobile Player

- process control by frequency
- integrated detection unit

Why “Micro”?

- 微細な対象を扱う、あるいは精密な動作が必要な用途には空間分解が高いデバイスが適している。
  → ex. データストレージ
- マイクロ化によって従来利用できなかった物理化学現象を積極的に利用することができる。
  → ex. 静電アクチュエータ
- 対象をマイクロ化することでリソースを節約して効率良く目的を達成することができる。
  → ex. マイクロ化学分析
- **製造コストが安くコストパフォーマンスが向上する。**
  → ex. センサ

Automotive



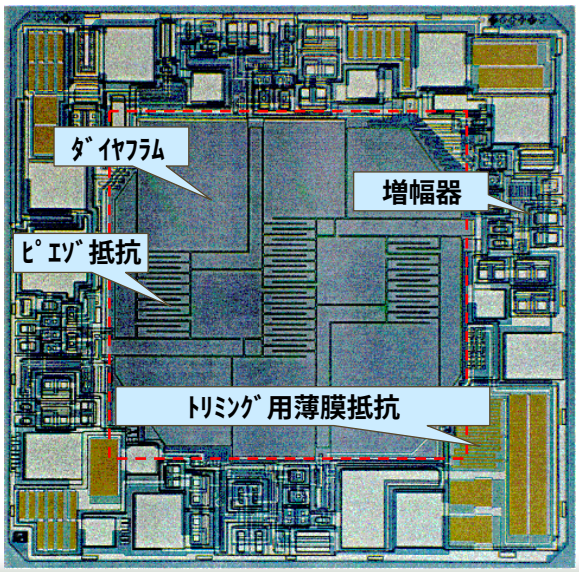
加速度センサ

圧力センサ

角速度センサ

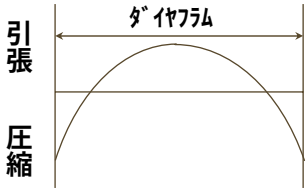
集積化圧力センサチップ （デンソー）

DENSO

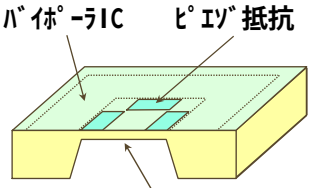


3.6×3.6mm

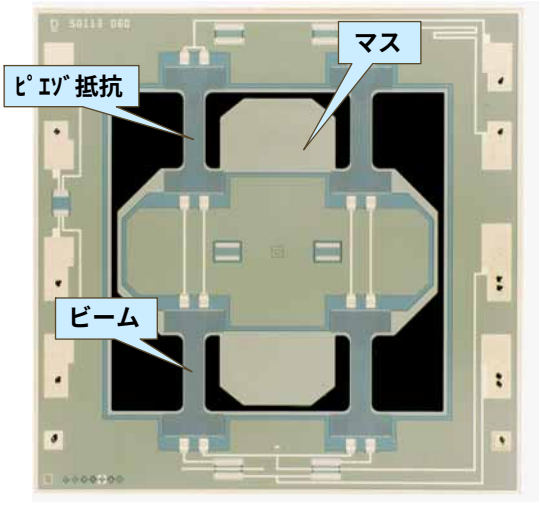
圧力印加時の応力



断面構造

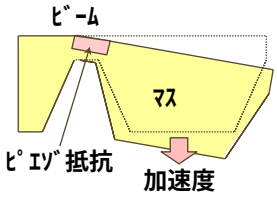


ABS用加速度センサチップ（デンソー）

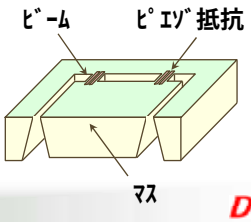


3.6mm× 3.6mm

加速度印加時



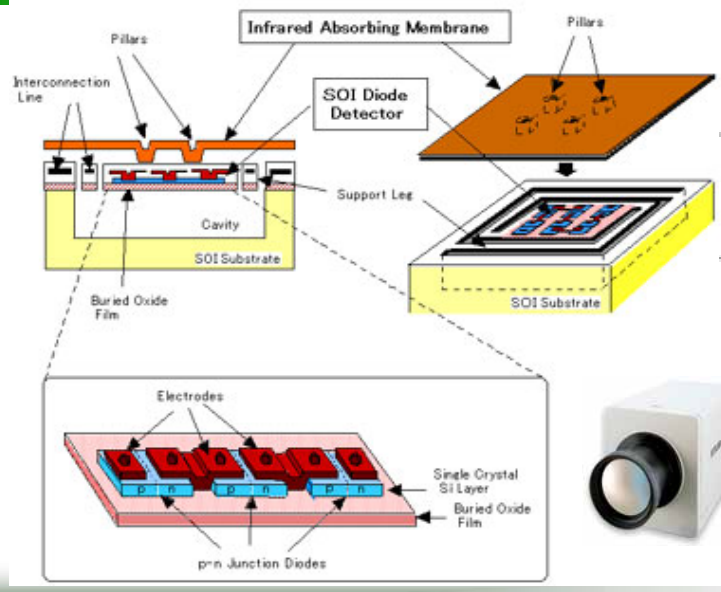
断面構造



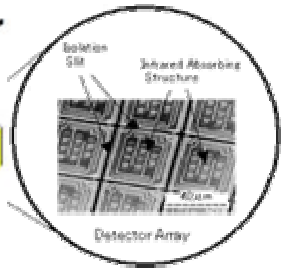
DENSO

非冷却型赤外線イメージセンサ

SENS (Synthesis Engineering for Nano Systems) Lab.



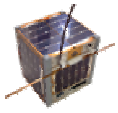
三菱電機 IR-SC1

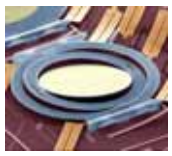


マイクロマシンの応用が期待される分野

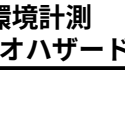
治療・診断

運輸・交通


宇宙開発
情報通信


化学分析
蛋白質解析

産業応用展開


環境計測
バイオハザード
ロボット
基礎技術

Promising Application Fields

ACRONYM
Bio MEMS
Optical MEMS
μTAS
RF MEMS
Power MEMS
Space MEMS
Marine MEMS
Agro MEMS
Environment MEMS

情報
- ☑ センシングシステム
- ☑ マイクロ化学分析システム
- ☑ 走査型顕微鏡(SPM)
- ☑ 光ネットワーク
- ☑ ワイヤレス通信
- ☑ データストレージ

エネルギー
- ☑ マイクロタービン
- ☑ 燃料電池
- ☑ マイクロ推進器
- ☑ 航空機翼境界層制御

Fingerprint Sensor

ピクセル数：横224×縦256＝約6万個，ピクセルサイズ：50μm角

NTT

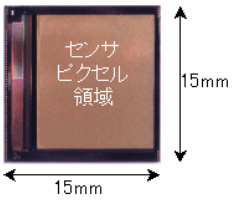


図1 MEMS[注]指紋センサ

図3 取得した指紋画像

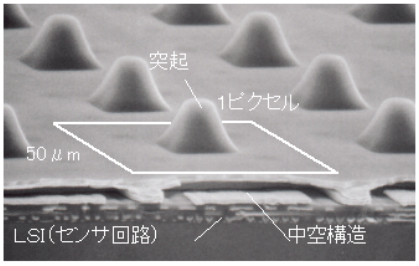
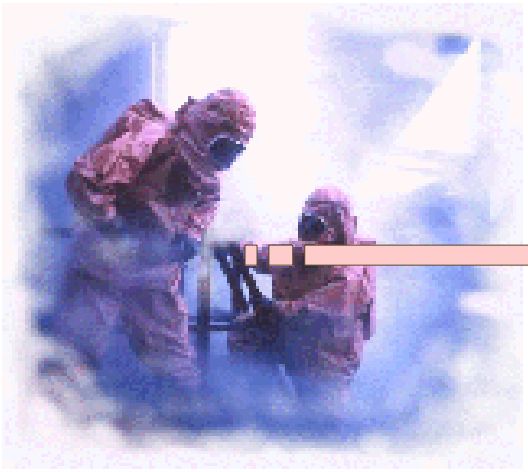


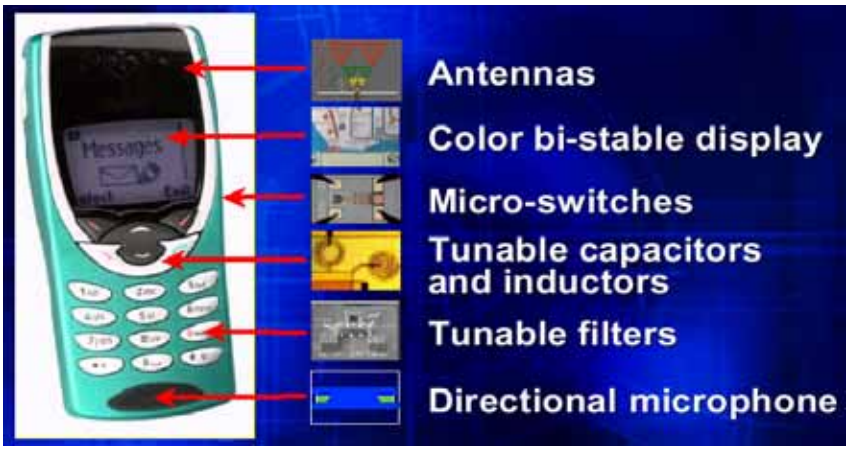
図2 MEMS指紋センサの表面および断面

Bio-Detector



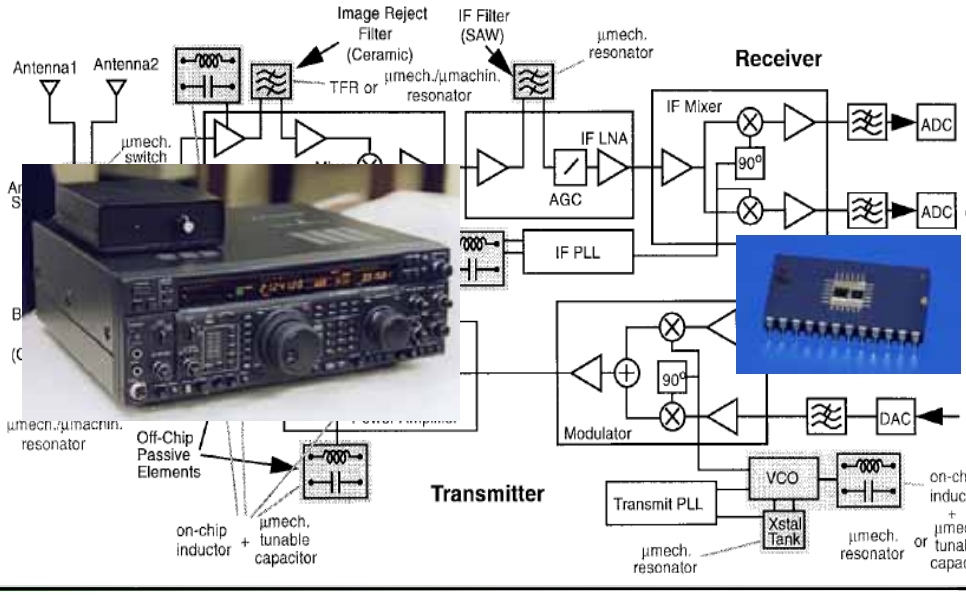
Kovacs, Stanford Univ.

Information Technology



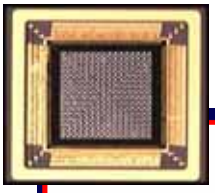
From 2001 intel

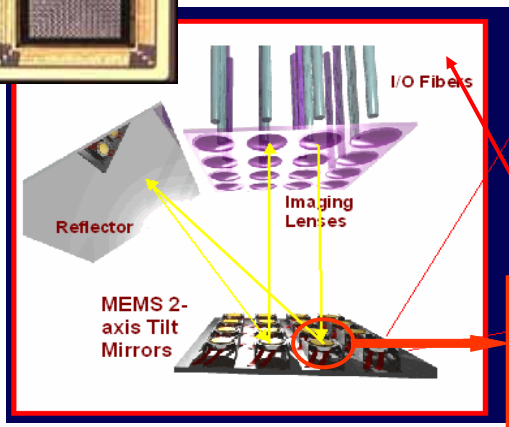
RF Communication



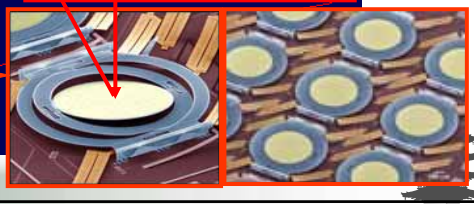
Optical Router

by Lucent & AT&T Bell Lab.





MEMS DEVICE:
- 2-axis, angular range of > ±6°
- continuous, controlled tilt
- directly scalable to 256 mirrors (1024 in the long term)
- simple technology for rapid development / prototyping
- manufacturable



Microsystem for the Land Warrior

G. Fleming (TACOM 2001)

Computer/Radio Subsystem

- Computer
- Soldier Radio
- Squad Radio
- GPS
- Handheld Flat Panel Display
- Video Capture

Protective Clothing and Individual Equipment Subsystem

- Advanced Load Carrying Capability
- Chem/Bio Garment/Glove/Boot
- Combat ID

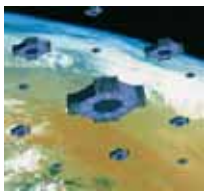
Integrated Helmet Assembly Subsystem

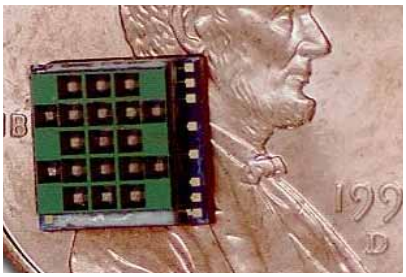
- Lightweight Helmet with Suspension
- Helmet-Mounted Display
- Image Intensifier
- Laser Detector
- Chem/Bio Mask
- Ballistic/Laser Eye Protection

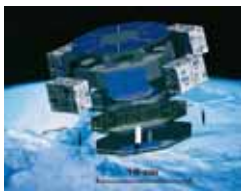
Weapon Subsystem

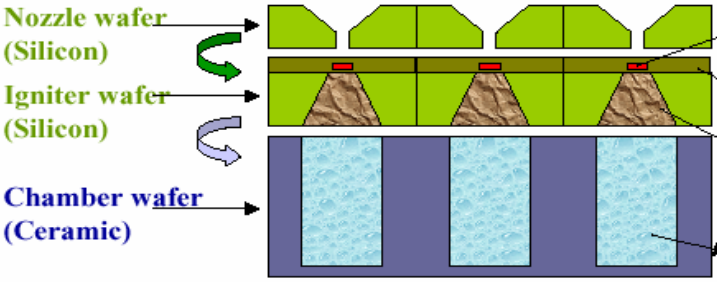
- Laser Rangefinder
- Digital Compass
- Wiring Harness
- Video Camera
- Thermal Weapon Sight
- Close Combat Optic

Space

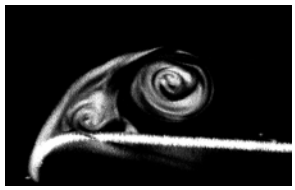


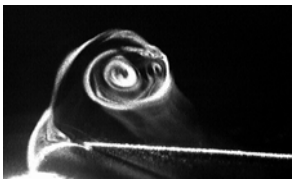




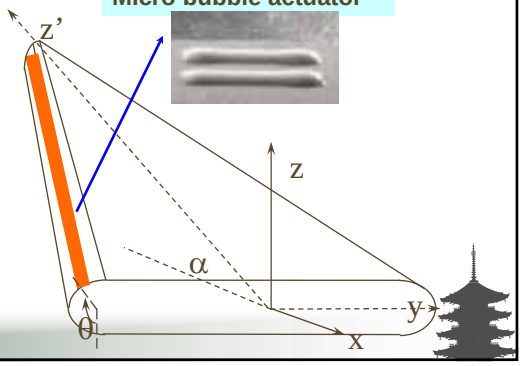


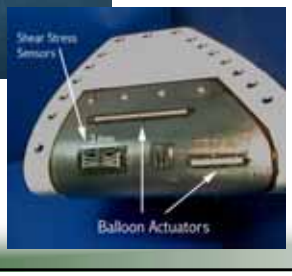
Aeronautics





Micro bubble actuator





by CALTEC

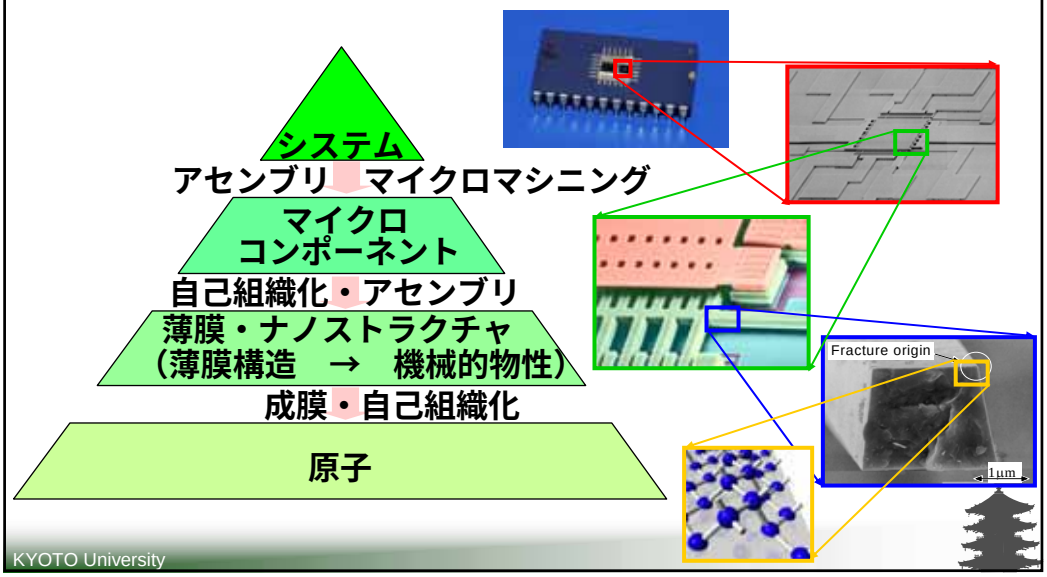
KYOTO University

MEMS for Amenity, Safety, Maintenance

- 情報センシング
  - 機器安全（移動体）
  - 防犯（個人認証（指紋など），監視（暗視カメラ））
  - 環境物質モニタリング
  - 医療（予防，診断，治療）
  - 社会インフラ・機器の保全と寿命予測
- ネットワーク
  - センサ
  - アクチュエータ
  - 通信
  - エネルギー源

社会基盤の保全の要は，
設備への自律分散型デバイスによる自己診断機能の付与とネットワーク？

Small Complex System = MEMS



Research Trend in MEMS

MEMS = Small Complex System in Interdiscipline

- Multi Scale (Scale Down)
  MEMS/MS → NEMS/NS
- Multi Physics (Interdiscipline)
  Physical Sensor → BioMEMS, μTAS
- Multi Material (Complexify)
  Si → Metal, Ceramics, Polymer

Miniaturization of Complex System

Feature of MM,MEMS, MST
Batch-Process
Pre-Assemble

Initially

Nowadays

In future

Nano System

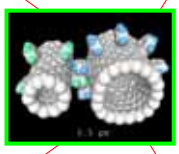
Big Question ?

Can we hold?
- Batch Process
- Pre-assemble

ファインマンとマイクロマシン
トップダウン vs ボトムアップ

"There's Plenty of Room at the Bottom"

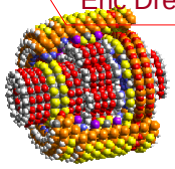
Richard P. Feynman 1959



Eric Drexler 1986

"Engines for Creation"

http://www.foresight.org/EOC/index.html



Copyright 1995 IMM and Xerox.
Do not reproduce without permission.

マクロマシン, MEMSは学問か？

Analysis → Synthesis

機械工学
電気・電子工学
化学工学
バイオ工学
医学・生体工学

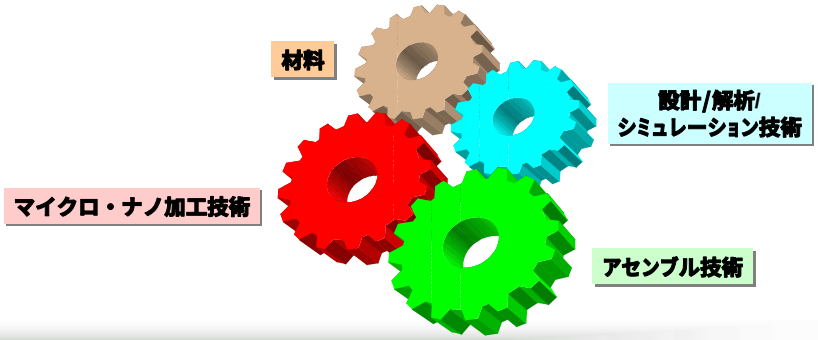
機械力学
流体力学
熱力学
材料力学
・
・

マイクロマシン
MEMS

目標：マイクロマシン工学の体系化

マイクロ/ナノスケールに最適な材料工学，システム設計工学，加工学，アセンブル工学の体系化

（SENS: Synthetic Engineering for Nano System）



小さな機械が創る大きな機会

機械の定義（広辞苑）
「外力に抵抗し得る物体の結合からなり、
一定の相対運動をなし外部から与えられた
エネルギを有用の仕事に変形するもの」
には必ずしも一致しない．
しかし，大事なのは・・・

"There's Plenty of Room at the Bottom"

Richard P. Feynman 1959

Why cannot we write the entire 24 volumes of the Encyclopaedia Britannica on the head of a pin?

京都大学大学院工学研究科　マイクロエンジニアリング専攻
ナノシステム工学講座　ナノ・マイクロシステム分野　田畑研究室

田畑　修

１．はじめに

京都大学ナノ・マイクロシステム研究室（田畑研究室）は，機械・電気・化学・光・バイオなどの種々の領域で動作する機能部品をマイクロメータからナノメータの微小領域において集積化することによって，新規でユニークな機能を発現させるマイクロ・ナノシステムの実現と，関連する基盤技術の構築を目的として 2003 年 10 月に発足し，ようやく３年目を迎えた．所属している京都大学大学院工学研究科マイクロエンジニアリング専攻は，京都大学大学院工学研究科の機械専攻群の改組によって2005年4月に発足した新設専攻であり，人間社会・生活に大きな変革をもたらす原動力となる微小機械システム実現の基礎となる微小領域特有の物理現象の研究をはじめ、微小機械に特有の設計・制御論に関する研究・教育を機動的かつ重点的に推進するために，機械専攻群を構成する３専攻の一つとして設けられた．本稿ではまず現在の京都大学機械専攻群の構成とその沿革，続いてマイクロエンジニアリング専攻の特徴と教育への試みの一端を紹介し，最後に研究室の研究内容を紹介する．

２．京都大学機械系の沿革

現在の京都大学大学院機械系とその関連組織は、工学研究科の機械理工学専攻・マイクロエンジニアリング専攻・航空宇宙工学専攻（機械系専攻群）とエネルギー科学研究科のエネルギー変換科学専攻、情報学研究科のシステム科学専攻の一部などからなる．教員はこれらの大学院研究科に所属し、工学部物理工学科の教育を兼担している．機械系専攻群は，原子力研究施設，創造融合部門，再生医科学研究所などの協力講座を含めると，35（2005 年 9 月）の分野，総勢約 100 名の教員で構成されており，大学院入試を始めとして,教育･研究を密接な連携の下に運営している．機械系専攻群が中核となって提案，推進している文部科学省 21 世紀 COE プログラム「動的機能機械システムの数理モデルと設計論－複雑系の科学による機械工学の新たな展開－」は研究面での連携の好例である．機械系専攻群の学生定員（1 学年）は大学院工学研究科博士課程 34 名，修士課程約 120 名，工学部物理工学科機械システム学コースおよび宇宙基礎工学コースを合わせて約 120 名である．

現在の機械系専攻群の前身である機械工学科は，1897 年の京都帝国大学設置と同時に開設された理工科大学の 2 学科の 1 つとしてスタートした．現在の航空宇宙工学専攻の前身である航空工学科は 1942 年に新設され機械工学科から一講座が移行した．1949 年に新制の京都大学発足時に工学部機械工学科となり，1960 年代の工学部拡充期の精密工学科・機械工学第二学科（後に物理工学科）新設を経て，1975 年には機械工学科，精密工学科，物理工学科への改組・拡充が行われた．大学院は 1953 年に機械工学専攻，精密工学専攻, 1966 年に機械工学第 2 専攻が開設された. 1994 年、大学院重点化に伴う改組に際して、大学院は機械工学専攻，機械物理工学専攻，精密機械工学専攻，航空宇宙工学専攻の 4 専攻となり，学部は機械系３学科と航空工学科が金属系 2 学科・原子核工学科と合併して学生定員 240 名の現在の物理工学科が誕生した．この時期に発足したエネルギー応用工学専攻，情報工学研究科には機械系より関連講座が移行してこれらの分野での教育・研究にあたっている．

1997 年には創立百周年を、2000 年には、第一期の卒業生を送り出してから百年目を迎えた．京都大学機械系専攻群の特徴は，機械に関連する科学技術の体系的発展を支える力学およびシステム設計に関する基礎学術を重視したアプローチであった．一方、従来の高効率高性能を重視した体系から人類の活力ある発展と環境との調和を重視した体系へのパラダイムシフトを含む激動する現代社会の要請に迅速に対応するため，4 専攻を「機械工学群」に統合し、中核を担う機械理工学専攻を設置して機械工学に関する基盤的研究・教育を行うとともに、将来分野に関する積極的な展開を目指すと共に社会から緊急的にその展開を要請されている量子効果も視野に入れた微小領域における複雑現象に対峙する微小機械工学分野および未知なる過酷な環境に対峙する極限的工学分野の 2 領域を「機械工学群」から抽出して重点専攻とし機動的・重点的な研究・教育の進展を図ることとし, 2005 年 4 月の改組でマイクロエンジニアリング専攻と航空宇宙工学専攻を設置した．この重点専攻の分野は 6 年ごとに見直し、現代社会の要請に迅速に対応できるダイナミズムを維持する．

３．マイクロエンジニアリング専攻[(1)]

３．１　専攻概要

マイクロエンジニアリング専攻は、21 世紀における人間社会・生活に大きな変革をもたらす原動力として期待されている微小な機械の研究開発能力を有する研究者・技術者を養成するための研究と教育を行うことを目的として設置された．機械工学の基本知識をベースに、ナノメートルオーダーからマイクロメートルオーダーの微小領域特有の物理現象を解明し、ナノレベルで発現する量子効果を利用するために必要な量子工学、材料を創製し加工するための微小領域における材料工学・微細加工学、ナノ・マイクロシステムを構築し思い通りに動かすためのシステム工学・

制御工学、などの学問分野を研究対象とする．これらの研究に関連する講義科目に加え、最も精密な微小機械の集合である生体に学び、微小機械を生体・バイオテクノロジー分野と融合をするための生体機械工学なども修得できるカリキュラムを整備している．ナノ・マイクロエンジニアリングに関する講義科目群の履修、および微小機械に関わる先端的なテーマに積極的に取り組む研究活動を通じて、ナノからマイクロの領域における微小機械に関する先端分野の高度な研究能力を有する研究者・技術者の養成を目指している．

ナノ・マイクロエンジニアリングは、工学のみならずバイオエンジニアリング分野や医学・生命科学分野をはじめとする多くの分野に関連することから、近年急速に発展している異分野との融合領域と位置づけ，専攻の修了者は、機械工学を取り巻く異分野との融合領域における研究開発のリーダーとして幅広く活躍することが期待されている．このような教育研究を行うために、本専攻には、構造材料強度学講座、ナノシステム創成工学講座、ナノサイエンス講座、マイクロシステム創成講座に加えて、再生医科学研究所のナノバイオメカニクス講座が協力講座として設置されている．

３．２　ナノメディシン融合教育ユニット[(2)]

マイクロエンジニアリング専攻が目指す既存の研究科・専攻という教育体系の枠組みを越えた教育を実践する試みの一つが，2005年10月よりスタートした「ナノメディシン融合教育ユニット」である．これは平成17年度文部科学省科学技術振興調整費新興分野人材養成プログラムによって創設された教育組織で，マイクロエンジニアリング専攻が中核部局の一つとなり，同専攻の小寺教授が松重副学長、再生医科学研究所、医学研究科と共に準備を進めてきた．ナノメディシンとはナノテクノロジーとライフサイエンス、並びに医学が融合して初めて実現できるという新しい高度先端医療を意味している．21世紀のナノメディシンへの社会ニーズに応えその発展を支える工学・医学の両分野を理解し，高度技術を習得した若手研究者・技術者を育成するために､京都大学の大学院生と社会人の両者を対象として、先端医工学に関する融合領域の基礎知識、基礎技術の実習教育、研究指導を行うことを目標としている．

履修コースは(1)バイオナノマテリアルコース，(2)ナノデバイスコース，(3)生体イメージング・ターゲッティングコース，(4)生体機能シミュレーションコース，の4コースに分かれている．工学・医学両分野に跨る多様なバックグラウンドを有する大学院生や社会人のために，各コースに入門講義を設け､実習による体験教育を重視するとともに、興味に応じてさらに発展科目としてより専門的な講義を履修できる仕組みになっている．マイクロエンジニアリング専攻はナノデバイスコースの教育・実習を担当し，医療用ナノデバイス・マイクロデバイス・微小電気機械システム（MEMS：Micro Electro Mechanical Systems）・マイクロ化学分析システム（μTAS：Micro Total Analysis Systems）の設計・作製に関する基礎知識を講義するとともに、実習を行うことによって、先端医工学の現場で実際に応用できるデバイスを大学院生・社会人が自ら考案し実現できるレベルの技術を習得させることを目標としている．

４．　田畑研究室の研究内容[(1, 3)]

４．１　概要

ナノ・マイクロシステムはマイクロメータからナノメータの微小領域において働く，新規でユニークな機能を有する微小なシステムの総称であり，ナノ・マイクロマシン，MEMSとほぼ同一の概念である．今年度の研究室陣容は，教授（田畑），助教授（土屋），助手（菅野），研究生1名，博士課程2名，修士課程10名，学部生6名，企業からの研究員数名である．基礎から応用までの幅広いアプローチを通して，微小領域においてマルチディシプリナリな現象をいかにすれば最も効率よく相互作用させたナノ・マイクロシステムを最適に構築できるかについての方法論を確立するための研究を遂行している[(3)]．最終目標はナノ・マイクロシステムを実現するマイクロスケールに最適な材料工学，システム設計工学，微細加工学，アセンブル工学（これをSENS（Synthetic Engineering for Nano System）と名付けた）の体系化である．半導体微細加工設備は，主に京都大学工学研究科桂インテックセンターのナノ工学高等研究院[(4)]および機械系専攻の共同利用設備を利用しており，研究室では独自に開発した微細加工装置および評価，解析用の装置を保有している．研究テーマは，(1)ナノ・マイクロシステム創製技術,(2)ナノ･マイクロ材料の評価･解析技術,(3)ナノ・マイクロデバイス＆システムの3グループに大別される．以下にそれぞれの研究概要を紹介する．

４．２　ナノ・マイクロシステム創製技術

ナノ・マイクロシステムを創製するための３次元微細加工技術とアセンブル技術に関する研究を行っている．

ナノ・マイクロシステムは基板上あるいは基板内に数百μmオーダの三次元微細加工を施す必要があり，そのためにLSI分野で用いられる微細加工技術とは異なる特殊な三次元微細加工技術が必要とされる．我々が世界に先駆けて開発した独創的な技術である移動マスクＸ線露光技術は，シンクロトロンから放射される波長数ÅのＸ線を用いた高分子の３次元加工技術である(図1).この技術を応用すると，自由局面を有する３次元微細加工が可能である．この技術を用いれば射出成型用微細金型の微細パターン側壁に抜き勾配を精度よく付与することが可能であり，幅30μm，深さ50 μm，ピッチ100 μmの微細溝が32本形成されたマルチチャンネルDNA解析用電気泳導チップの射出成型用金型作製に応用されている．現在はSENS確立の一環として，移動マスクＸ線露光用加工シミュレーション技術の研究を推進すると共に，UV光リソグラフィーへの応用展開を進めている．

次世代のナノシステムに期待される更なる微細加工と多様な材料の集積化に対応できるアプローチとして注目し，注力しているのが，マイクロメータからナノメータスケールの機能部品のアセンブル技術である．これは従来のトップダウン手法で作成したマイクロチップ上にマイクロメータからナノメータスケールの機能部品をアセンブルしてナノシステムを構築するトップダウンとボトムアップの融合手法である．ミリメートルオーダの領域内におけるコントローラブルなダイナミック位置制御技術とサブマイクロメ

ートルオーダ領域での相互作用力を用いたセルフアセンブル技術を組み合わせた新規なコントロールドセルフアセンブル技術の構築を目指している．

４．３　薄膜材料の評価・解析技術

ナノ・マイクロシステムの構造材料として用いられる厚さ数μm以下の薄膜材料やナノメートルオーダの材料のヤング率，破壊強度，疲労などの機械的物性に関するデータは，SENS確立に必要不可欠である．材料のサイズが非常に小さくなると，強度や疲労を支配する要因も従来のマクロスケールの材料とは異なることが予測されるため，独自に考案した疲労試験方法を用いて種々の薄膜の機械的物性データを測定し，薄膜機械的物性データベースの構築と設計基準の確立を目指した研究を行っている（図2）．現在は雰囲気制御下におけるシリコンの疲労特性評価およびSWCNT（Single Wall Carbon Nano Tube）の機械的物性評価技術の構築を進めている．

４．４　ナノ・マイクロデバイス＆システム

上記のような基盤技術の構築のみでなく，研究室で提案している新規な加工・評価技術の応用および企業との共同研究テーマとして様々なナノ・マイクロシステムの設計・試作・評価も進めている．モバイルPC用CPUのマイクロヒートパイプ，金微粒子合成用マイクロ流体チップ，触覚提示用マイクロハプティックディスプレイ，光通信用マイクロミラーデバイス，3軸加速度センサー，薬剤の皮下投与用マイクロニードルアレイなどがその一例である．

５．　おわりに

ナノ・マイクロシステムのトレンドは構成要素の微小化，システムの複雑化，構成材料の多様化であり，研究室が目指すSENS確立には，異なる研究分野の多くの研究者の協力と連携が必要不可欠である．本稿が読者の興味をナノ・マイクロシステム分野に向ける一助になれば幸いである．

参考文献

(1)http://mech-server.mech.kyoto-u.ac.jp/micro/

(2)http://www-gs.kogaku.kyoto-u.ac.jp/nanomed/index.html

(3)「MEMSは学問となり得るだろうか？」,マイクロマシン, Vol.47, pp.6-7, 2004

(4) http://www.kogaku.kyoto-u.ac.jp/gakukyo/inttech/index.htm

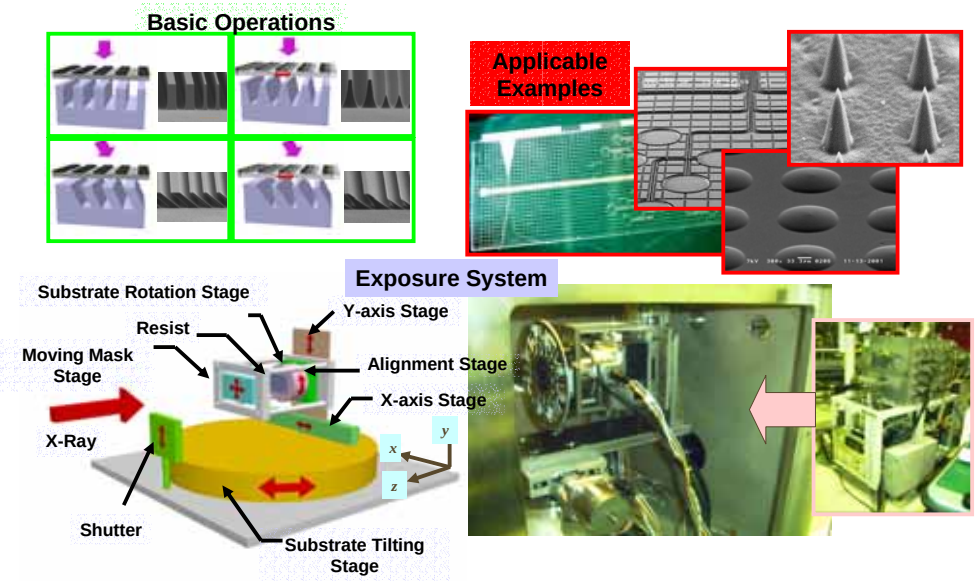


図１　シンクロトロン放射Ｘ線露光を用いた PMMA の 3 次元微細加工装置

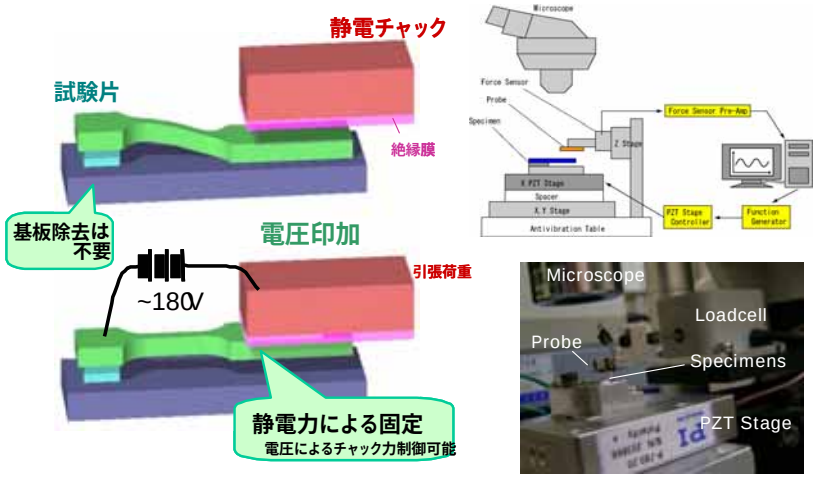


図２　静電チャック法を用いたナノ・マイクロ材料の機械的物性評価装置