

ミクロの決死圏

マイクロマシン・ナノテクノロジーとその応用



群馬大学 理工学府（機械） / JST さきがけ

鈴木 孝明

0277-30-1579
suzuki.taka@gunma-u.ac.jp
http://mems.mst.st.gunma-u.ac.jp/



自己紹介（学歴・職歴）

3



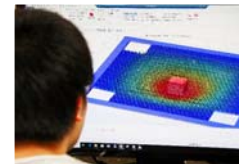
学 歴： 1994年3月 群馬県立桐生高等学校 卒業
1998年3月 群馬大学工学部機械システム工学科 卒業
2000年3月 群馬大学大学院工学研究科機械システム工学専攻 修士課程 修了
2003年3月 京都大学大学院エネルギー科学研究科 博士後期課程 修了

1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
群馬大学 修士課程					学振 PD					京都大学 助教						香川大学 准教授				群馬大学 准教授

メカトロニクス・制御

連続体力学とその応用

マイクロマシン



設計・解析・理論

マイクロ・ナノ加工

デバイス応用・評価
(バイオ・光・IoT)

本日の内容は、社会と情報・物理基礎・化学基礎・生物基礎の内容がベースになっています。

最初の質問

4



マイクロマシン・ナノテクノロジー

Technologyと聞いて連想する物事？



IT
Information Technology

身近なところで、スマートフォンについて考えます。

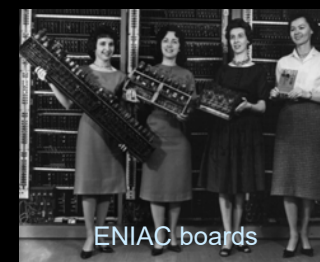
5



スマホには、どんな機能がある？



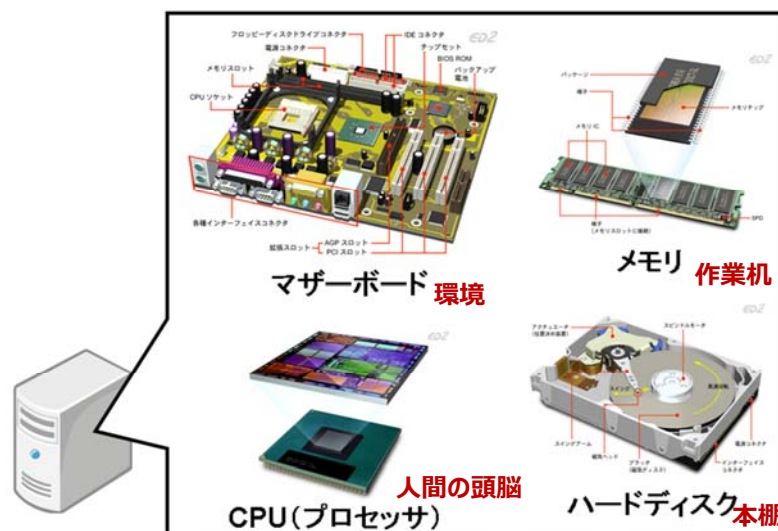
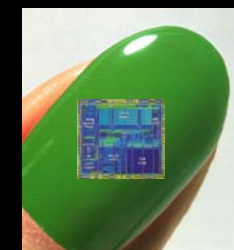
- ・ 携帯電話
- ・ カメラ
- ・ ビデオカメラ
- ・ テレビ
- ・ ラジオ
- ・ ICレコーダー
- ・ 電子手帳
- ・ 電卓
- ・ 電子辞書
- ・ インターネット端末機
- ・ テレビゲーム機
- ・ 方位磁石
- ・ 懐中電灯
- ・ ポータブル音楽プレイヤー
- ・ GPSナビ
- ・ 電子書籍リーダー...



ENIAC boards



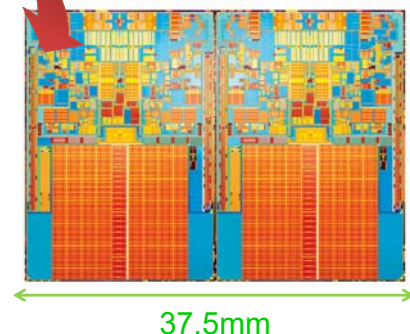
ENIAC(Electronic Numerical Integrator and Computer):世界最初のデジタル電子計算機(1946)



0と1の組み合わせ

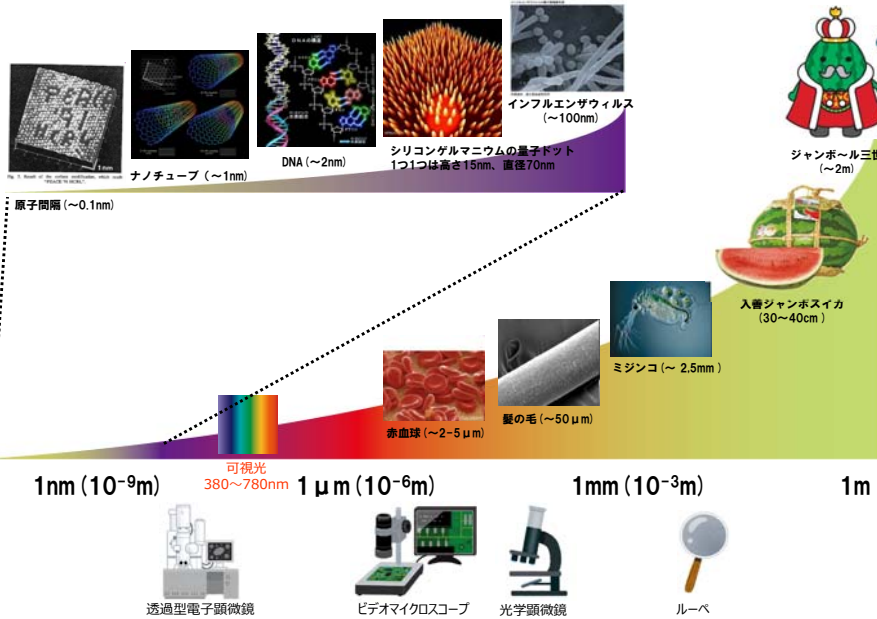


- 2006年7月 - Core 2 Duo
- ・クロック周波数: 1.06~3.20GHz
 - ・トランジスタ数: 個
 - ・加工精度: m
 - ・サイズ: 37.5mm x 37.5mm



マイクロ・ナノ サイズとは？

10

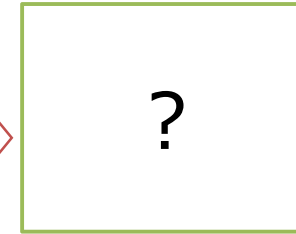


Gold Leaf in Kanazawa (from 16th century)



Hand-made 100 nm-thick free-standing Au film

Coin-size Au



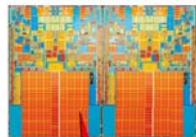
Kinkaku-ji temple



Traditional craft
“金沢漆器”

どのくらい細かいのか？

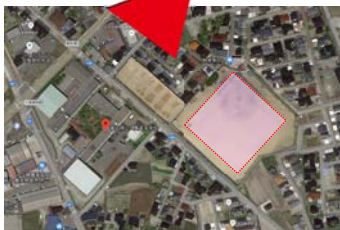
12



Core 2 Duo

- ・サイズ: 37.5 mm x 37.5 mm
- ・加工精度 (ゲート配線幅): 65 nm (= 65×10^{-9} m)

拡大コピー



サイズ: 100 m x 100 mm

- Hint -
大学教員には、ひねくれ者が多い！？

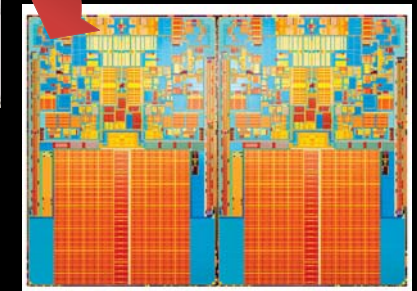


どうやってつくる？

13



- 2006年 - Core 2 Duo
- ・クロック周波数: 1.06~3.20GHz
 - ・トランジスタ数: 2億9,100万個
 - ・加工精度: 65nm
 - ・サイズ: 37.5mm x 37.5mm



機械加工技術






除去加工
切削、研削、放電加工



変形加工
鋳造、鍛造、プレス、成形



付加加工
溶接、被覆

半導体製造技術

- ・パワー密度が高い（作用面積が小さい）
- ・非削加工（非接触）
- ・材料の硬さや脆さに無関係
- ・エネルギー輸送や物質輸送が伴うため、加工表面に塑性変質層がない
- ・加工エネルギーは、電子・電力制御が容易
→ 高精・細度加工向き



除去加工
ドライ・ウエットエッチング



変形加工
モールド、インプリント、成形



付加加工
フォトリソ、スパッタ、CVD

半導体製造技術の中心はフォトリソグラフィ

16

Photolithography

写真(光)



石版印刷(リトグラフ)

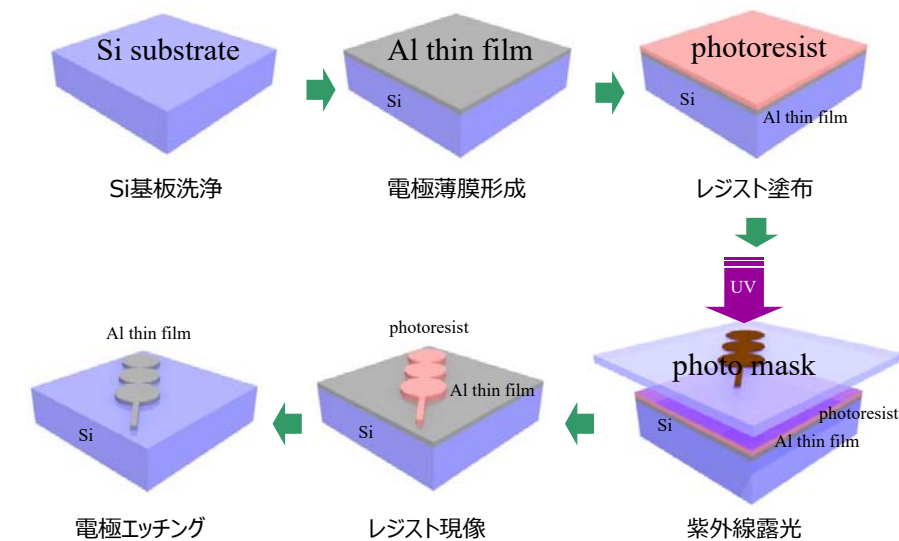


東山魁夷「白馬の森」(1972年)

フォトリソグラフィ = 写真・光技術を応用した印刷技術

従来技術：半導体製造技術（フォトリソグラフィ）

17



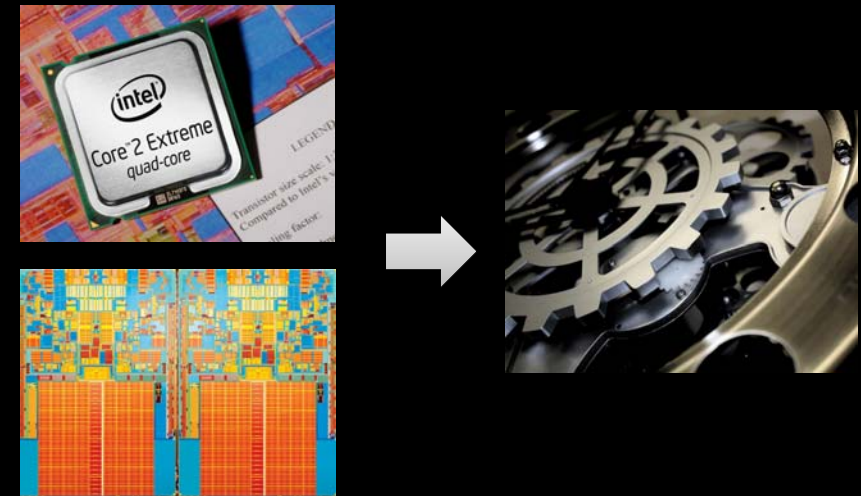
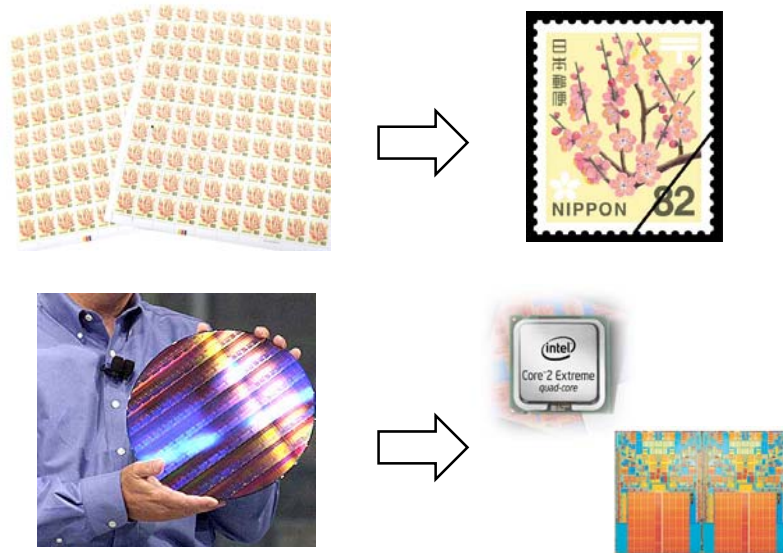
```

graph TD
    A[Si substrate] --> B[Al thin film]
    B --> C[photoresist]
    C -- UV --> D[photo mask]
    D --> E[Al thin film]
    E --> F[photoresist]
    F --> G[Si]
    G --> B
  
```

Si基板洗浄 → 電極薄膜形成 → レジスト塗布 → UV → フォトリソマスク → レジスト現像 → 電極エッチング → 電極薄膜形成

平面的だが、高精細・大面積が可能

大面積

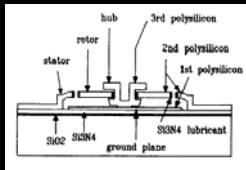


電子回路だけでなく、機械も作ってしまおう！

微小電気機械システム
MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)
『マイクロマシン』

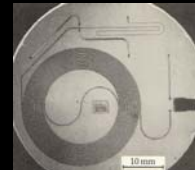


Figure 1. SEM photograph of a fabricated micro-motor; rotor diameter = 120 μm .



直径120 μm の静電気で動くモータ

IC-processed micro-motors: design, technology, and testing,
Tai, Y.-C.; Fan, L.-S.; Muller, R.S. (U.C. Berkeley),
IEEE MEMS 1989.



手のひらサイズのガスクロマトグラフ

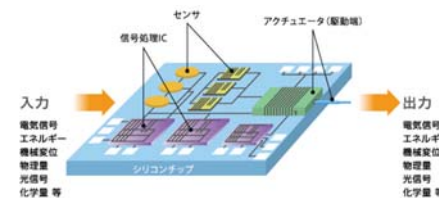
A gas chromatographic air analyzer fabricated on a silicon wafer,
Terry, S.C.; Jerman, J.H.; Angell, J.B. (Stanford University)
IEEE Transactions on Electron Devices, 26, 1979.

Micro Total Analysis Systems (microTAS)
Lab on a Chip (LOC)

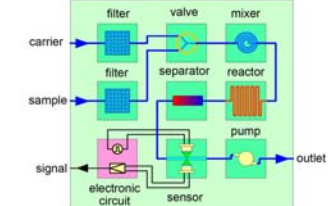
電子回路だけでなく機械の部品も同時に作製して、システム化する。

マイクロマシン（マイクロナノシステム、マイクロロボティクス）

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)



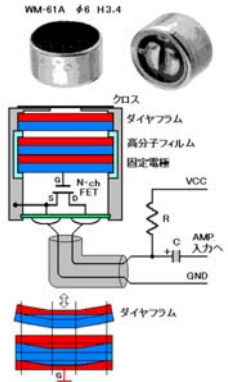
μ TAS (Micro Total Analysis Systems)



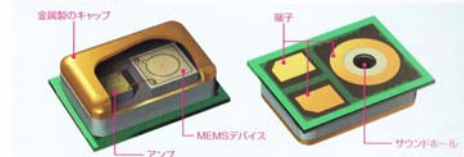
高機能化、小型・軽量・省エネルギー、試薬・廃液の節減、分析時間の短縮、操作の自動化、バッチプロセスによる低コスト化

MEMSの本質：3“M”

- Micro（小型化）
- Mass Production（大量生産性）
- Multi Function（複合機能）

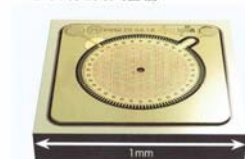


▼MEMSマイクロフォンチップ



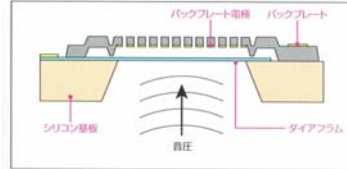
大きさは3.5mm×2.5mm×1mmと超小型。MEMSマイクの裏面の穴から音を取り入れる。

▼MEMSマイクロフォンの拡大図

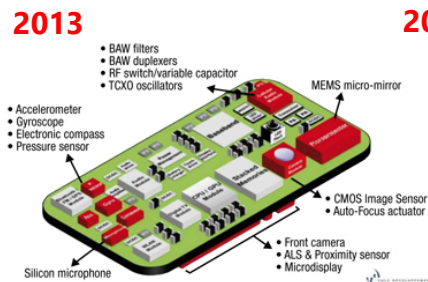
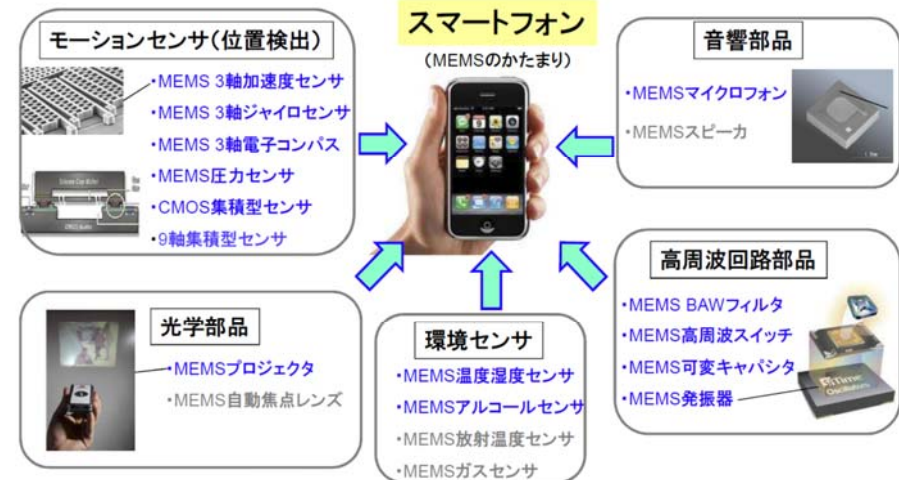


MEMSマイクの本体は1mm四方という小さな、表面はシリコンの金属光沢がある。

▼MEMSマイクロフォンの断面図



シリコンチップの表面に、わずかな凹凸を付けてダイアフラムとバックプレートが形成されている。音圧を伝えるダイアフラムが振動し、バックプレートとの間の静電容量が変化する。その変化を電圧に変換すればアナログの音声信号が得られる。



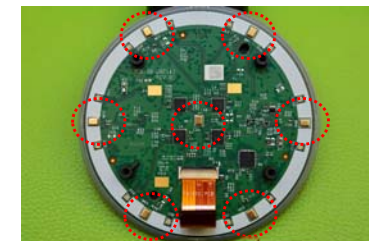
2020頃

New MEMS devices in volume in 2018?

- 9-axis combo
- Pressure + Humidity + T° combo
- More microphones!
- Silicon timing for XO / TCXO / 32kHz clock
- Antenna switching
- Gas / biochemical sensors
- Auto-focus
- MEMS mirrors
- Microspeaker
- Touchscreen?
- IR sensor?



Amazon Echo dot
(2018年4月一般販売開始)





オムロン株式会社	みずほ情報総研株式会社	セイコーエプソン株式会社
オリンパス株式会社	三菱電機株式会社	富士電機HD株式会社
セイコーインスツル株式会社	横河電機株式会社	株式会社富士通研究所
ソニー株式会社	アルプス電気株式会社	株式会社本田技術研究所
株式会社デンソー	キヤノン株式会社	三菱マテリアル株式会社
テルモ株式会社	京セラ株式会社	株式会社村田製作所
株式会社東芝	三洋電機株式会社	株式会社山武
株式会社日立製作所	シチズンHD株式会社	株式会社リコー
古河電気工業株式会社	住友精密工業株式会社	
パナソニック電工株式会社	住友電気工業株式会社	



Photolithography

写真(光)



石版印刷(リトグラフ)

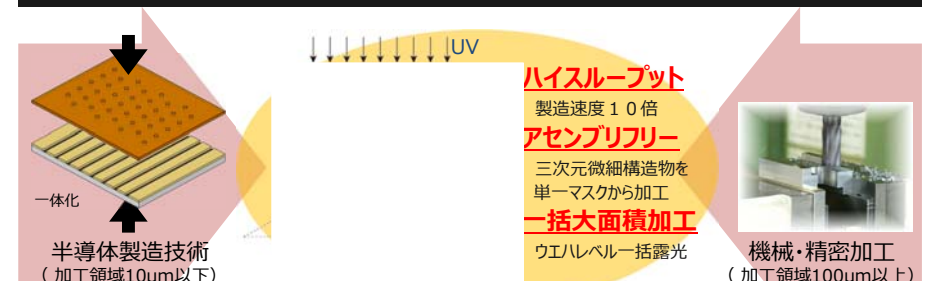


東山魁夷「白馬の森」(1972年)

フォトリソグラフィ = 写真技術を応用した印刷技術



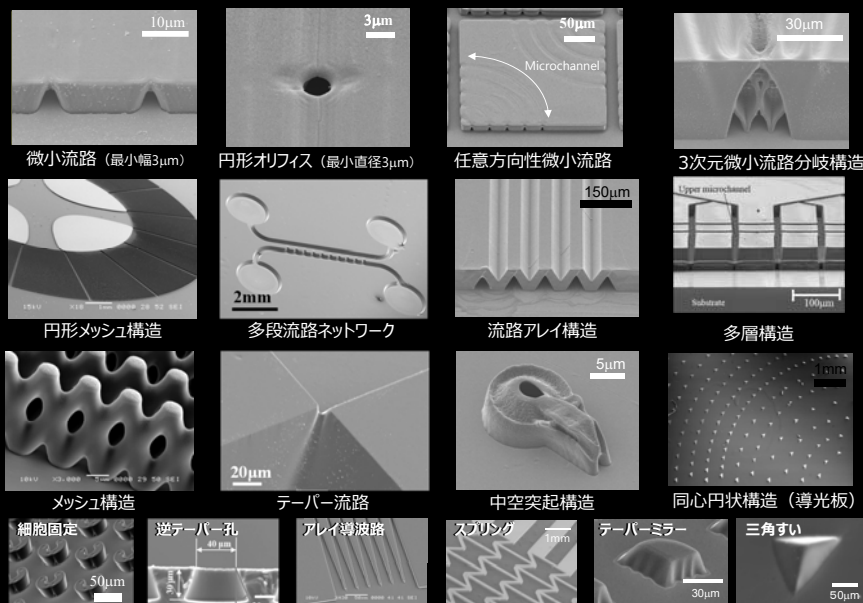
目的：機械・精密加工と半導体製造技術の空白領域を埋める加工技術
方法：複雑3次元構造を単一マスクからアセンブリレスで作製



加工精度：1μm以下、加工面積：φ100mm以上

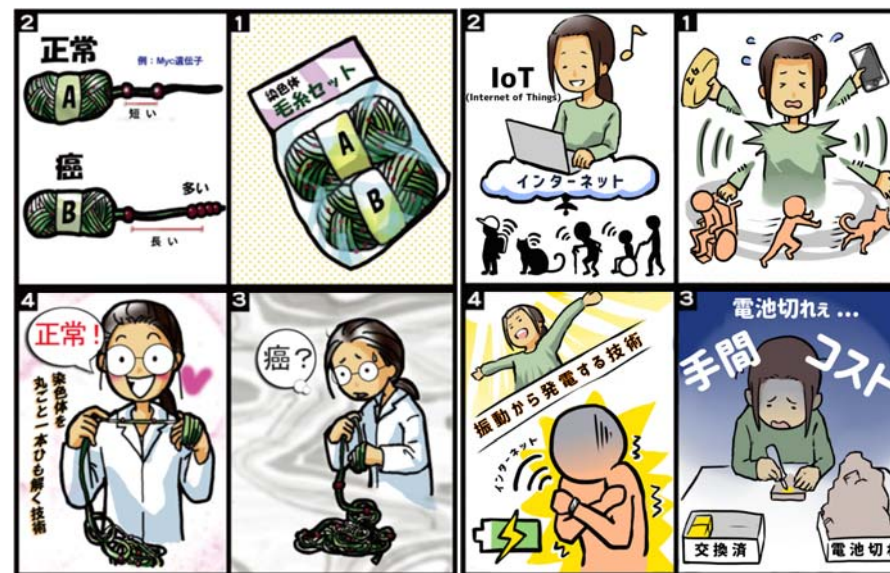
日本特許第5458241号、US Patent 8871433
 文部科学大臣表彰・若手科学者賞 (2015年)

- ・従来の光造型法に比べて、シンプルな設備と工程で大面積加工ができる。
- ・既存の3Dプリンタ技術に比べて高精細な加工ができる。
- ・特に、中空構造を有する微細加工ではユニークな形状ができる。



Bio: 新しい染色体診断

IT: 新しい発電機

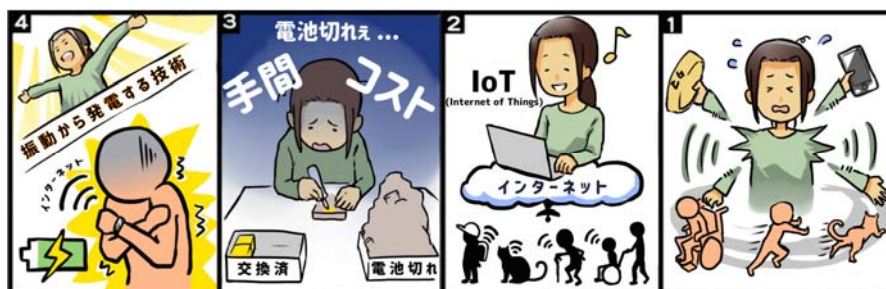


IT: 新しい発電機



電池いらずの見守りネットワーク

(のための超小型発電機: エナジーハーベスタ)



IoT (Internet of Things) とは ?



モノのインターネットとはモノがインターネット経由で通信すること。
身の回りのあらゆるモノがインターネットにつながる仕組みのこと。



メンテナンス
(交通網・建築物・ライフラインなど)

- Smart house
- Smart city
- Smart grid
- Infrastructure
- Wearable device



見守り (老人・子供・ペットなど)



モノのインターネット化：IoT（Internet of Things）



<http://www.pyments.com/internet-of-things/2016/how-lipstick-plus-payments-equals-the-internet-of-things/>

課題：膨大な数のセンサの電源確保
メンテナンス、電池交換のコスト大



Wearable devices

自給自足型のセンサ（ノード）が必要
→ エナジーハーベスタ

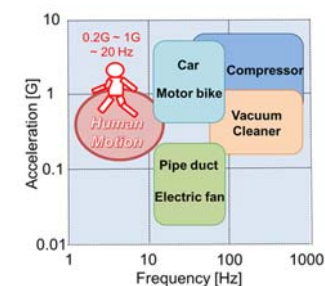
- ・エネルギー密度10倍
- ・人に身に付けることできる

機械（力学）と、
電気部品を組み合わせ、
振動（力学）エネルギーを、
電気エネルギーに変換する

→ MEMSでやろう！



さまざまなエネルギーの形態と変換
東京書籍「改訂 物理基礎」P209

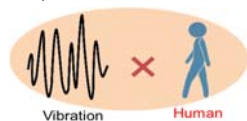


効率良く振動発電するために共振を利用する



人のわずかな動作（10Hz以下）から、自家発電する超小型発電機

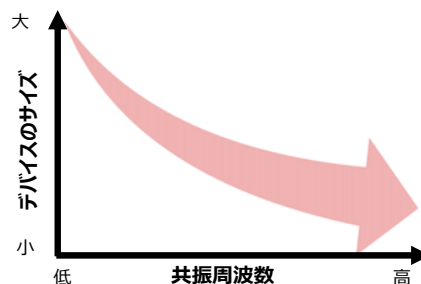
こども・老人の見守りネットワーク
(数十μW要)



身につけるために小型化！



共振させて効率良く発電！
(念力振り子)



デバイスを小さくできない！

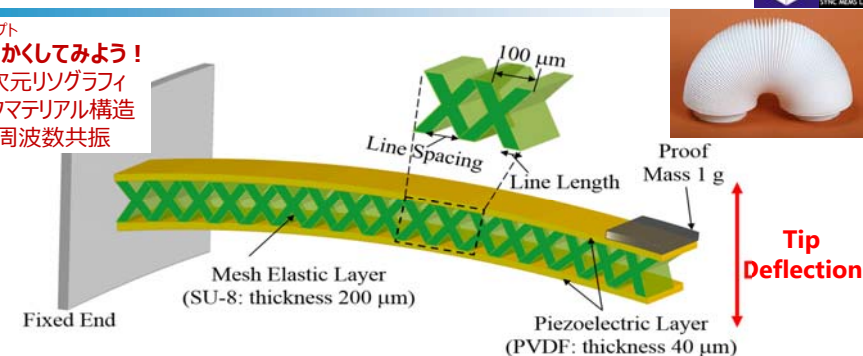
微細構造で材料が持っている以上の柔らかさを与える



コンセプト

柔らかくしてみよう！

- ・3次元リソグラフィ
- ・メタマテリアル構造
- ・低周波数共振



$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{(m + \frac{33}{140}m_s)L^3}}$$

Lower Resonant Frequency

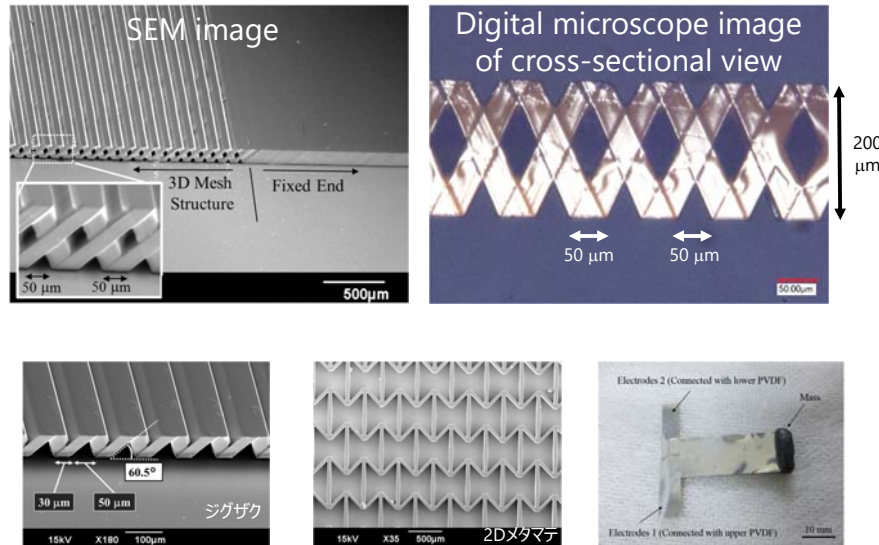
$$\text{Power} \propto (\text{deflection})^2$$

- ・ Under constant δ

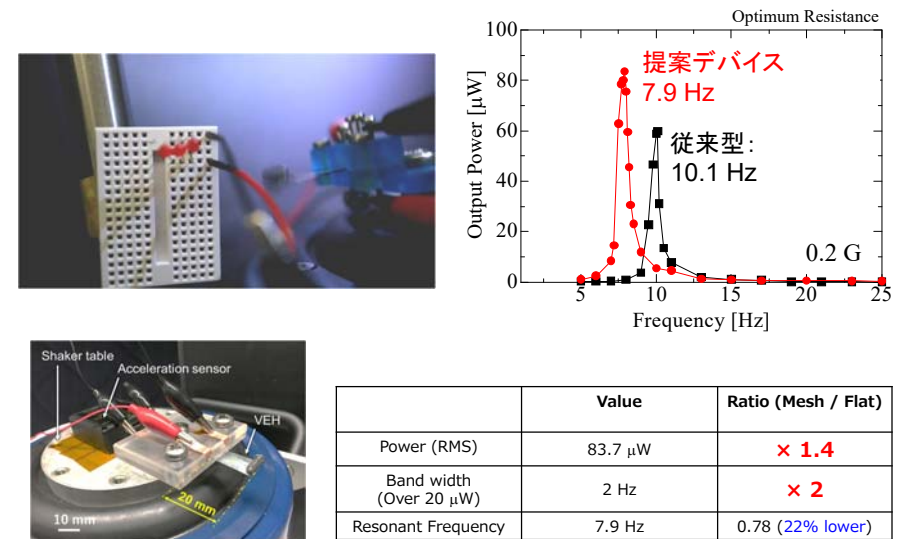


Improve Output Power

3次元リソグラフィで作製した微細構造



エネルギー：ヒト振動発電デバイス (ポリマーエナジーハーベスタ)

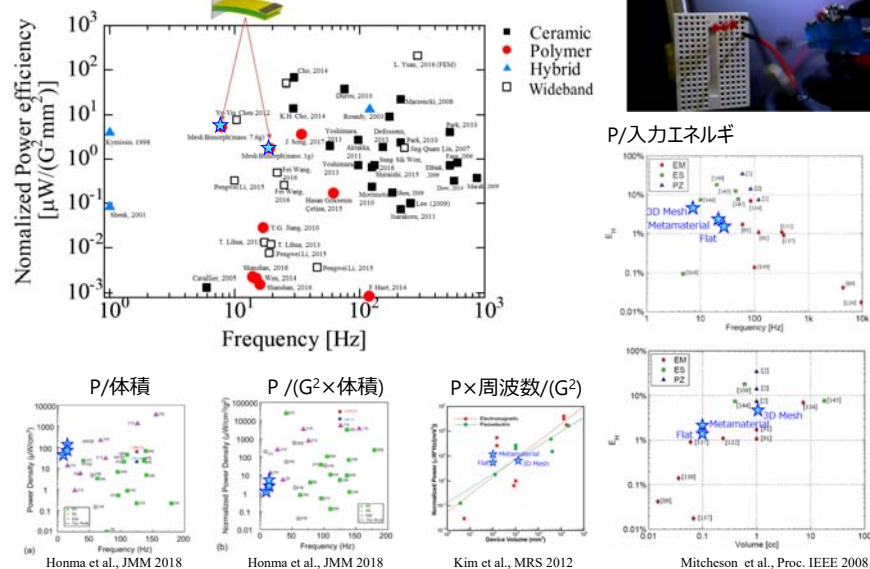


デバイス性能比較 (圧電振動発電)

52



加速度や構造寸法などで規格化した発電量



まとめ：電池レスIoTを実現するエナジーハーベスタ



人の動作から、IoTデバイス電源として十分な発電量を得る
10Hz以下の低周波数で、数十μW以上の発電量を持つ、ボタン電池サイズの発電機



材料

- ・圧電膜PVDF
- ・溶媒、膜質、電極、結晶性制御検討

解析

- ・3次元構造設計
- ・モーダル解析
- ・応力、ひずみ解析

加工

- ・傾斜露光法による3次元ジグザグ構造
- ・デバイス作製

評価

- ・圧電評価実験系構築
- ・発電量評価方法検討

本日のまとめ ミクロの決死圏

マイクロマシン・ナノテクノロジーとその応用



群馬大学 理工学府（機械） / JST さきがけ

鈴木 孝明

0277-30-1579
suzuki.taka@gunma-u.ac.jp
http://mems.mst.st.gunma-u.ac.jp/



The Postal Service "Such Great Heights"

55



Left side: Original, unedited Apple-Intel Ad

Right side: Select clips from The Postal Service's
'Such Great Heights' music video

- ・アメリカ・マサチューセッツ州に実在するSkyworks Solutions社の工場で撮影。
- ・アップル社iMacのCM(2006)に無断コピーされた。

Everything looks perfect from far away.

「どんなものだって遠くからなら完璧のように見えるよ」



今日は、近くから（小さいものを）見てみました！

God is in the details.



実験装置・環境：ばっちり揃ってます

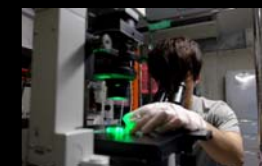
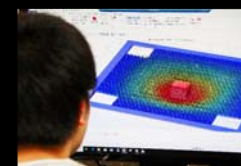


解析	材料	塗布	露光	現像	エッチング	評価
RFスパッタ装置	スプレーコータ	3次元露光装置	アッシング装置	走査型電子顕微鏡		
RFスパッタ装置	スピンコータ	ドラフトチャンバ	反応性イオンエッチング装置	表面粗さ形状測定機		
真空蒸着装置	直接描画装置	3Dプリンタ (SLA, FDM)	UVオゾンクリーナ	動的接触角計		
イオンスパッタ装置			UVキュア装置	デジタル粘度計		
			コロナ放電装置	万能試験機		
			光学式膜厚計	レーザードップラー振動計		
			攪拌・脱泡装置	振動加振器		
			マッフル炉	電気計測プローバ		
			精密メッキ装置	分光光度計		
			ドラフト	シリンジポンプ		
			超純水製造装置	蛍光顕微鏡		
			クリーンルーム	全反射顕微鏡		
				細胞培養システム一式		

ものづくりの一連の流れを実践する



学生到達目標：世界が相手の先端研究から、社会ニーズに基づいた応用研究までの実践により、ものづくりの生きた知識と課題探究能力を獲得する。



設計・解析・理論

マイクロ・ナノ加工

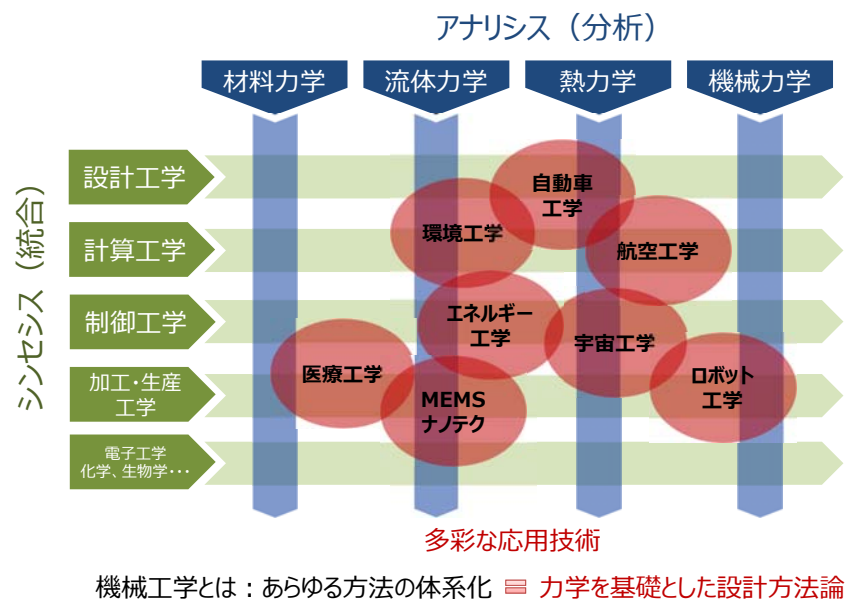
デバイス応用・評価
(バイオ・光・IoT)

材料力学・機械力学
機械材料
製図
シミュレーション
(構造解析・動力学・ロボット・熱流体)

機械加工学
計測学
(基礎・応用)
精密・微細加工
(大学院科目)

制御工学
電磁気学
流体力学
医療・バイオ・光・環境
(専門家と連携)





機械・電気・情報

Canon OA・精密機械	Panasonic ideas for life 総合電機	MITSUBISHI Changes for the Better 印刷	TOPPAN IT	SONY フューチャー・モバイル・デバイス
muRata 村田製作所	ALPS 電子部品	SHOEI 機械部品	アオイ電子	NSK NSK
住友重機	TADANO 産業機器	TOWA TEL TOKYO ELECTRON		
JFE JFE	MITSUBISHI ELECTRIC 三菱電機・システム	TMEIC TMEIC 三菱電機・システム		

食品・生活

AJINOMOTO 食品	ユニクロ 衣料品
unicharm 衛生用品	

化学・材料

ユニチカ Mitsui Chemicals	
Hitachi Chemical Hitachi Chemical	BANDO BANDO
住友化学 住友化学	

京都大学 香川大学 群馬大学 山口大学
博士後期課程 進学 大学教員

高校生向け科学体験イベント



一日体験機械教室『機械の学校』

大学の施設・実験装置を使って機械工学の面白さを体験できる無料科学体験イベントです。今年は、全17テーマ・のべ148名に参加いただきました。

例年、7月中旬の土日祝日で行います。



スズキケン

大学 MEMS 検索

SYNC MEMS LAB.
FOUNDED 2008