

## インテリジェント実験B

## マイコンArduinoを使ったMEMSセンサの実験



## マイクロナノ工学研究室 (MEMS研)

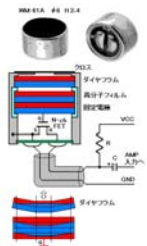
教員：鈴木孝明 (教授)  
T A：栗山頌明 (M1)  
T A：須賀海成 (M1)

## マイクロフォンのMEMS化

4

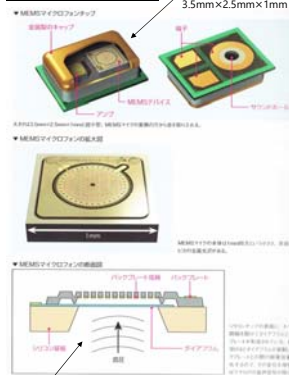


## 従来のマイク (コンデンサマイク)



## MEMSマイクロフォン

サイズ 3.5mm×2.5mm×1mm



振動板 (ダイアフラム) が音圧で変形

参考：http://41j.com/blog/2014/12/iphones-mems-sensors/

## スマートスピーカー

7



Amazon Echo dot  
(2018年4月一般販売開始)



参考：https://mazu-bunkai.com/bunkai-wp/engineering/6842/

## 自己紹介：鈴木 孝明 桐生高校・群馬大学機械OB



| 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018~ |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
| 学部   | 修士   | 博士後期 | PD   | 助教   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |

## 微小電気機械システム・MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)



半導体集積回路

半導体製造技術



電子回路だけでなく、  
小さな機械部品も作ってしまおう！



プラズマ

レーザー

紫外線

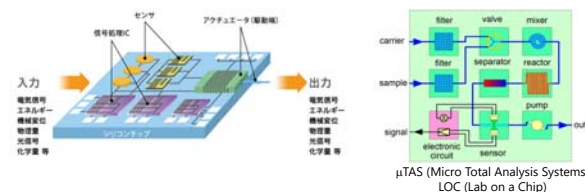


## What is MEMS? (微小電気機械システム)

3



## MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)



## MEMSの特徴

- 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など

## MEMSの本質：3“M”

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

研究室では、MEMSを創る研究をしています。  
学生実験は、短時間で可能な市販のMEMSを使った実験です。

## スマートフォンのなかのMEMS

5



参考：http://www.mmc.or.jp/info/cafe/talk/beans/beans53.html

## スマホのなかのMEMSは今後も増える

6



## 2013



## 2020頃



MEMSマイクの数、一つではない

参考1：https://docplayer.net/8297840-Mems-and-sensor-trends-smaller-faster-and-available-to-the-mass-market-karen-lightman-executive-director-mems-industry-group.html  
参考2：https://www.eetimes.com/document.asp?doc\_id=1328333

## 車のなかのMEMS

8



参考：http://www.mmc.or.jp/info/cafe/talk/beans/beans54.html

## 日本のマイクロマシン関連企業 結構たくさんあります。

9



オムロン株式会社  
オリンパス株式会社  
セイコーインスツル株式会社  
ソニー株式会社  
株式会社デンソー  
テルモ株式会社  
株式会社東芝  
株式会社日立製作所  
古河電気工業株式会社  
パナソニック電工株式会社

みずほ情報総研株式会社  
三菱電機株式会社  
株式会社日立製作所  
株式会社日立製作所  
京セラ株式会社  
三洋電機株式会社  
シチズンHD株式会社  
住友精密工業株式会社  
住友電気工業株式会社

セイコーエプソン株式会社  
富士電機HD株式会社  
株式会社富士通研究所  
株式会社三井物産株式会社  
株式会社村田製作所  
株式会社山武  
株式会社リコー





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。



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



### IoT (Internet of Things), CPS (Cyber Physical System)

- リアル空間の情報をセンサで収集  
⇒サイバー空間で分析・解析  
⇒機械や人間・社会に反映
- 情報を取得するための**センサとそのシステム化が重要な要素技術**

#### 目的① MEMS加速度センサ (Hardware)

MEMSセンサのメカニズムや作製方法（加工装置見学）について学ぶ。

#### 目的② IoTセンサシステム (Software)

IoTセンサノードを想定し、マイコンArduinoを利用してMEMSセンサからのデータ取得について学ぶ。

※本実験の結果・知見に基づいてArduinoに無線通信モジュールを組み込むことで、インターネットを介した無線情報通信端末であるIoT開発へと発展できる。



マイコンボードArduinoの基本操作の習得から、MEMS加速度センサを用いた傾斜角測定への応用までを以下の5つのステップで実験を行う。

1. “Lチカ”：Arduino基板上のLEDを点灯する（Arduinoの基本操作）
2. 外部LEDを点灯する（ブレッドボードとLEDの基礎）
3. 外部LEDを制御する（PWM：Pulse Width Modulation制御）
4. 加速度センサのデータを読み取る（MEMSの原理、センサ-Arduino-PC間の接続）
5. 加速度センサのデータから傾斜角を求める（実践）

## Arduino (アルドウィーノ) Uno Rev 3



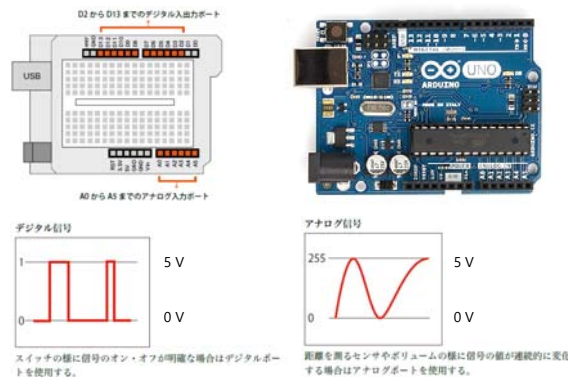
#### AVRマイコン

Atmel社が製造している、RISCベースの8ビットマイクロコントローラ（制御用IC）製品群の総称。1996年開発。

2005年にイタリアで始まったプロジェクトによるプラットフォームである。

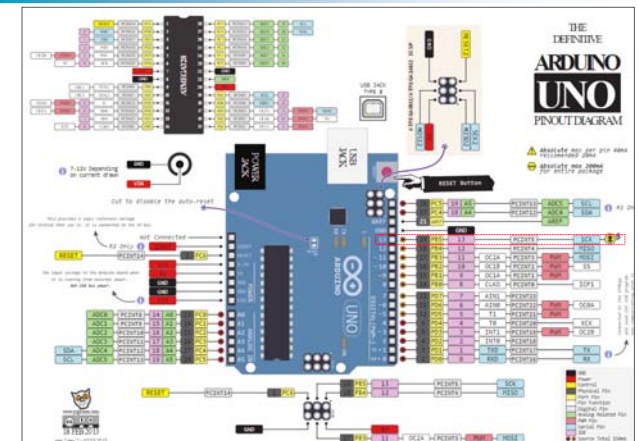
- AVRマイコン、
  - 入出力ポートを備えた基板、
  - C言語風のArduino言語とそれの統合開発環境（Arduino IDE）、からシステムが構成されている。
- 様々なバージョンがあるが、本実験で使用するUnoが基本構成である。

## Arduinoの入出力ポートについて



注意：Arduinoは、入力はアナログとデジタルが選べるが、出力はデジタルのみ。

## ArduinoのPin配置（付録1）



## 実験1：“Lチカ” Arduino基板上のLEDを点灯する



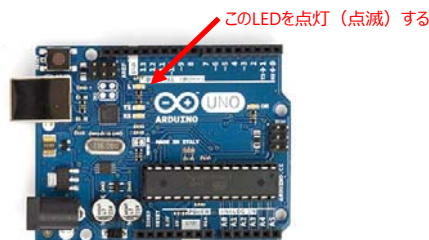
Arduinoの基本操作の習得

内容：Arduinoボード上のLED (Port:13)を点灯する。

目標：Arduinoの開発環境、基本操作を学ぶ。

手順：

- ① PCのArduino IDEを立ち上げる。
- ② プログラム（スケッチ）を作成する。
- ③ ArduinoとPCをUSBケーブルで繋ぐ。
- ④ スケッチを実行（コンパイル・書き込み）する。



考察：delayの数値をいろいろ変えて、LEDの変化を確認しよう。

## Arduino IDEの使い方



スケッチの素  
exercise1.ino

1. 起動
2. プログラム作成
3. 保存
4. 検証・コンパイル（もしエラーが出たら2に戻って修正、エラーが出なければ5へ）
5. マイコンボードへの書き込み（エラーが出なければ、Arduino にプログラムが組み込まれる）
6. 確認（シリアルモニタや実際の回路を見て確認）

## 実験2：外部LEDを点灯する



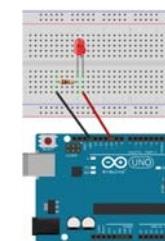
ブレッドボードとLEDの基礎

内容：ブレッドボード上のLEDに対して、Arduinoから電力供給・点灯制御する。

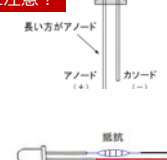
目標：ブレッドボードとLEDの使い方を学ぶ。Arduinoのデジタル出力を学ぶ。

手順：

- ① ブレッドボード上に、LEDと抵抗を回路を組む。
- ② ブレッドボードの回路とArduinoを繋ぐ。
- ③ スケッチを作成、実行する。



向きに注意！



※抵抗には特に極性がないのでどちらの向きでも良いです。  
抵抗を入れて電流を制限し、LEDを保護する。

考察：delayの数値をいろいろ変えて、LEDの変化を確認しよう。（実験1と違いはないか？）

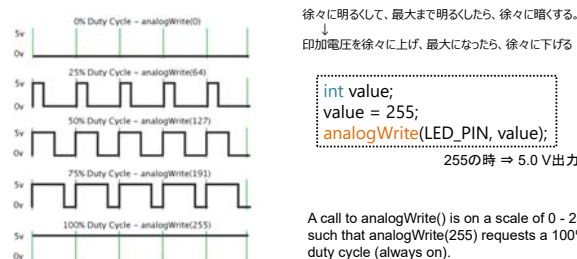




内容：ブレッドボード上のLEDの調光をArduinoで制御する。  
目標：Arduinoのアナログ出力方法（PWM制御）を学ぶ。

手順：

- ① PWM制御の原理説明。
- ② スケッチを作成、実行する。
- ③ スケッチを改良し、連続的に調光段階を制御する。



考察：調光のスピードやステップを変えることで、明かりの雰囲気を変えてみよう。（イルミネーション、緊急信号）



内容：MEMSセンサ-Arduino-PCを接続して、センサから得た加速度をPC画面上に表示する。

目標：MEMS加速度センサの原理、センサ-Arduinoの入力形式（アナログ入力、I2C通信、SPI通信など）、Arduino-PC間のシリアル接続について学ぶ。

手順：

- ① MEMS加速度センサの原理説明。
- ② SPI通信の原理説明。
- ③ ブレッドボード上に、加速度センサとArduinoを用いた回路を組む。
- ④ スケッチを作成、実行する。
- ⑤ センサを取り付けたブレッドボードを傾けたり、動かしたりして、加速度変化を計測する。



STmicroelectronics社の超小型3軸加速度センサ LIS3DHを、14ピンDIPモジュール化（ブレッドボードに簡単に挿せる）したもの。

MEMS加速度センサには、いくつかの原理があるが、LIS3DHは静電容量型である。出力は、SPIまたはI2Cであり、給電用3.3V、およびGNDを接続すると使用できる。

P27



| 事象                  | 加速度 (G)   |
|---------------------|-----------|
| 乗用車の加速              | 0.2 - 0.3 |
| 地球の重力（定義）           | 1         |
| 緊急ブレーキ（Formula 1）   | 1         |
| ランニング（腰）            | <5        |
| コーナーでのボブスレーライダー     | 5         |
| 階段の昇降（足首）           | 7.4-8     |
| ランニング（足首）           | 8-12      |
| 車の正面衝突@15Km/h       | 10-15     |
| 車の正面衝突@高速（頭：エアバック有） | 35        |
| 車の正面衝突@高速（車両）       | 40        |
| 車の正面衝突@高速（頭：エアバック無） | 65        |
| テニスボール              | 500-700   |

$$1\text{ G} \approx 9.8\text{ m/s}^2$$



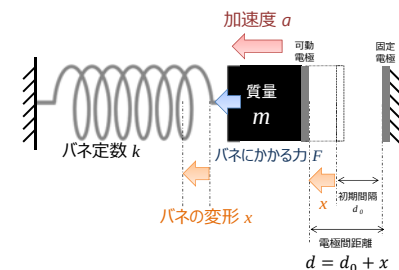
①運動方程式

$$ma = F$$

②フックの法則

$$F = kx$$

$$a = \frac{k}{m}x$$



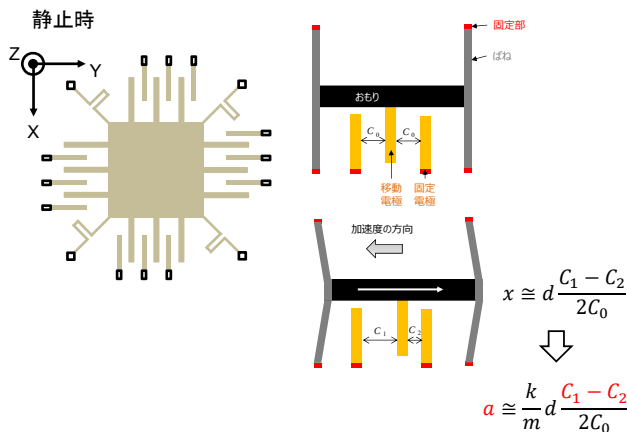
③静電容量の公式

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

電極面積A、誘電率ε  
たとえば、簡単なために、初期間隔がゼロだったとすると、 $d_0 = 0$ より、 $d = x$

$$a = \frac{C}{\epsilon A m} \frac{k}{d}$$

静電容量（の変化）を計測できれば加速度がわかる  
※実際には、xとCの関係式は少し違います。



STMicro LIS3DH: 3.0x3.0x1.0mm Package  
STMicroelectronics standard component  
Package Marking: C3H

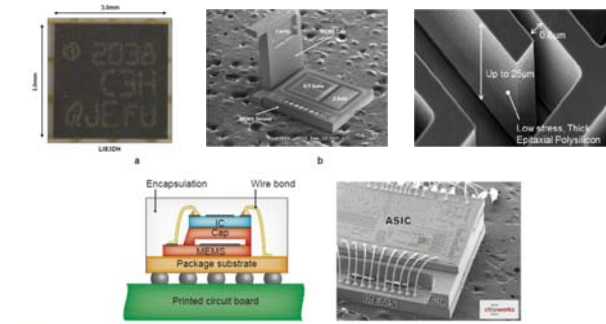
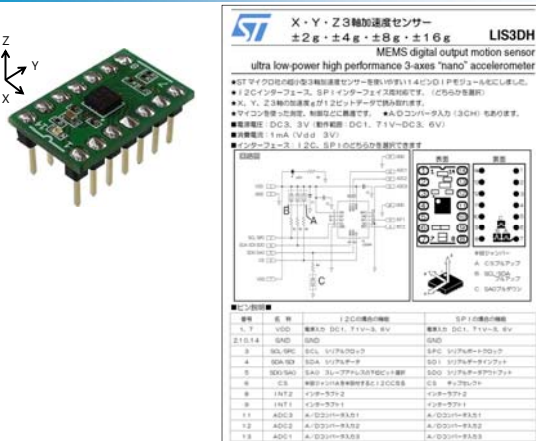
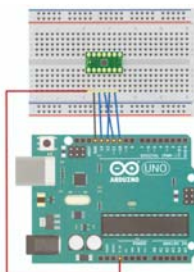


Figure 3: (a) System-in-package solution constructed via 3D stacking with wire bonded interconnects. (b) SEM image of a decapsulated STMicroelectronics LIS3DH 3-axis accelerometer (STMicroelectronics, Geneva, Switzerland). An ASIC chip is stacked on an encapsulated MEMS chip and interconnected via wire bonds. Package dimensions:  $3 \times 3 \times 1\text{ mm}^3$ . From Ref 54.



- ① MEMS加速度センサの原理説明。
- ② SPI通信の原理説明。
- ③ ブレッドボード上に、加速度センサとArduinoを用いた回路を組む。
- ④ スケッチを作成、実行する。
- ⑤ センサを取り付けたブレッドボードを傾けたり、動かしたりして、加速度変化を計測する。



| 番号        | 名称      | SPIの接合の機能           |
|-----------|---------|---------------------|
| 1, 7      | VDD     | 電源入力 DC1, 7.1V~3.6V |
| 2, 10, 14 | GND     | GND                 |
| 3         | SCL/SPI | SPI シリアルポートクロック     |
| 4         | SDA/SPI | SPI シリアルデータライン      |
| 5         | SDO/SAD | SPI シリアルデータアウト      |
| 6         | CS      | チップセレクト             |
| 8         | INT2    | インターラフト2            |
| 9         | INT1    | インターラフト1            |
| 11        | ADC3    | A/Dコンバータ入力1         |
| 12        | ADC2    | A/Dコンバータ入力2         |
| 13        | ADC1    | A/Dコンバータ入力3         |

- ← DC 3.3V
- ← GND
- ← SCK：同期用クロック
- ← MOSI：データ送信
- ← MISO：データ受信
- ← CS：デバイス選択

P31

$$1\text{ G} \approx 9.8\text{ m/s}^2$$



| 事象                  | 加速度 (G)   |
|---------------------|-----------|
| 乗用車の加速              | 0.2 - 0.3 |
| 地球の重力（定義）           | 1         |
| 緊急ブレーキ（Formula 1）   | 1         |
| ランニング（腰）            | <5        |
| コーナーでのボブスレーライダー     | 5         |
| 階段の昇降（足首）           | 7.4-8     |
| ランニング（足首）           | 8-12      |
| 車の正面衝突@15Km/h       | 10-15     |
| 車の正面衝突@高速（頭：エアバック有） | 35        |
| 車の正面衝突@高速（車両）       | 40        |
| 車の正面衝突@高速（頭：エアバック無） | 65        |
| テニスボール              | 500-700   |

考察：地球の重力を利用して、x,y,z方向の正負に1Gの加速度を印加したときのx,y,z方向の数値を計測する。

|          | X方向加速度 | Y方向加速度 | Z方向加速度 |
|----------|--------|--------|--------|
| X方向 +1 G |        |        |        |
| X方向 -1 G |        |        |        |
| Y方向 +1 G |        |        |        |
| Y方向 -1 G |        |        |        |
| Z方向 +1 G |        |        |        |
| Z方向 -1 G |        |        |        |

← 水平面に表向きに置く？

← 水平面に裏向きに置く？

## 実験 5 : 加速度センサのデータから傾斜角を求める

28

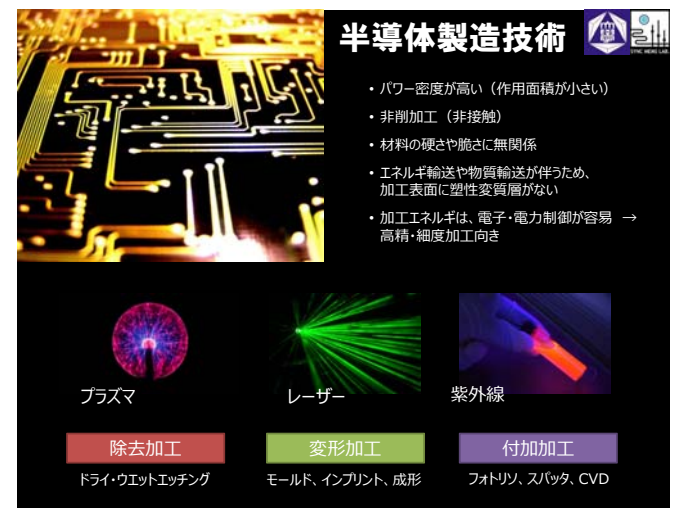


内容：センサの3軸加速度データから、水平面に対するセンサの傾斜角度を計算し、PC画面に表示するシステムを構築する。  
目標：MEMS加速度センサの作製方法（加工装置見学）を学び、これまでの内容をまとめたシステム構築を実践する。  
手順：  
① MEMS加速度センサの作製方法の説明と、加工装置見学（②の時にグループ毎に）。  
② 3軸加速度データから傾斜角を求める計算式を検討する。  
③ スケッチを作成、実行する。  
④ ゴニオステージ上で、センサを取り付けたブレッドボードを傾け、加速度と傾斜角の変化を計測する。

P.27



## 機械加工技術



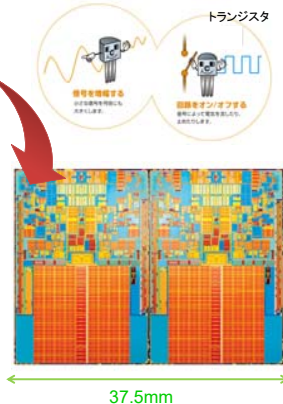
## 半導体製造技術

- ・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

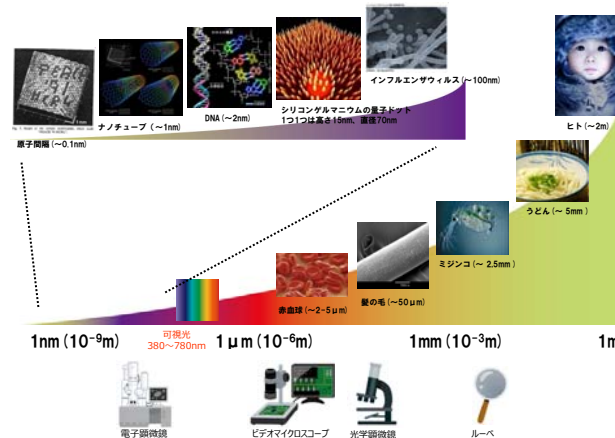
## CPU : Central Processing Unit 中央演算処理装置 31



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:   
・サイズ: 37.5mm x 37.5mm

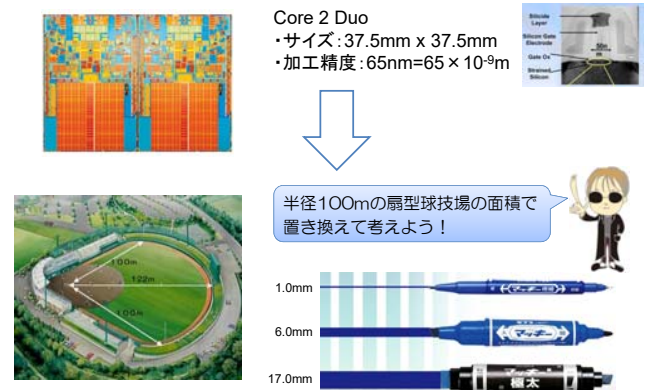


## どのくらい小さいか？



## どのくらい細かいのか？

33

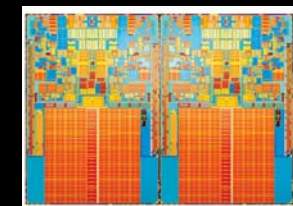


## 半導体製造技術の中心はフォトリソグラフィ

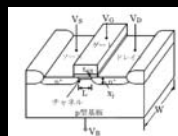
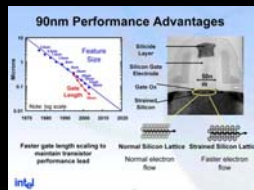


## どうやってつくる？

34



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



## Photolithography

写真

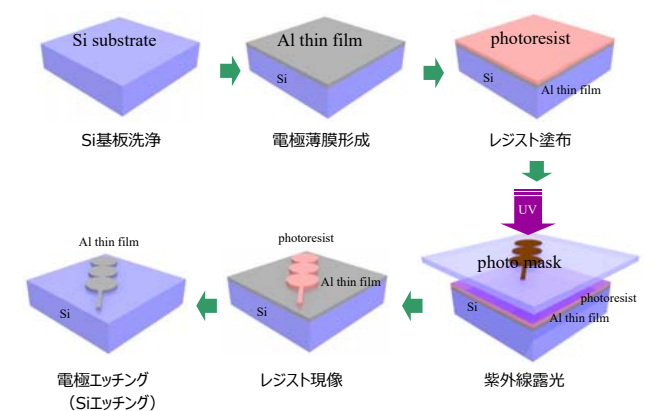
石版印刷(リトグラフ)



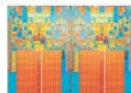
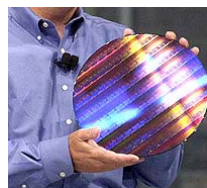
フォトリソグラフィ = 写真技術に応用した印刷技術

## 半導体製造技術（フォトリソグラフィ）

36

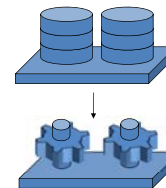
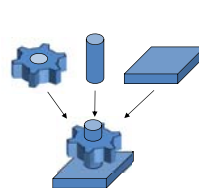






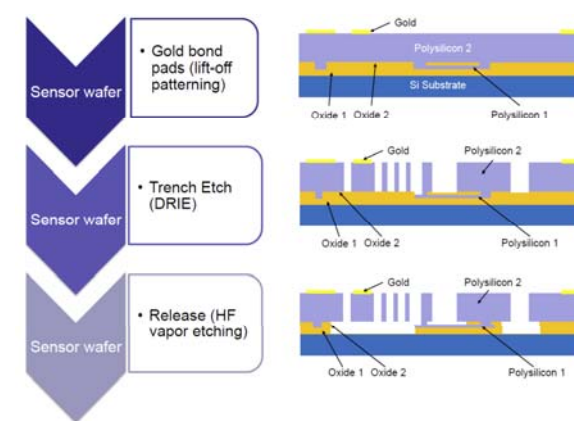
|       | 機械加工  | 微細加工<br>(マイクロマシニング) |
|-------|-------|---------------------|
| 加工    | 並列    | 直列                  |
| 組立    | 直列    | 並列                  |
| 複製レベル | 部品レベル | システムレベル             |

加工工程



微細加工の方向性  
部品点数が多い複雑なシステム  
(小型化・集積化・量産化)

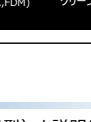
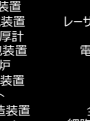
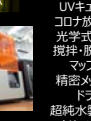
出典：「はじめてのMEMS」江刺正義 著



無い装置はナノプラをお借りする



解析 材料 塗布 露光 現像 エッチング 評価



- MEMS加速度センサの原理（静電容量型）を説明せよ。
- 加速度（3軸）から傾斜角を求める式を導出せよ。
- 測定した傾斜角（加速度センサの出力値）とステージ傾斜角の関係について、考察せよ。
- 加速度センサ以外で、市販されているMEMSセンサを一つ以上取りあげ、以下を説明せよ。
  - 選んだMEMSセンサの原理
  - 選んだMEMSセンサとArduinoを組み合わせたシステムの提案
    - システムの名称（商品名、あるいは、研究題目のようなもの）
    - システムの目的（何ができるか）
    - システムの原理・構成（センサで何を測定し、Arduinoでどうするか。）
- MEMSデバイスの製造設備見学の感想を述べよ。（200字以上）

【本テーマにおけるレポート作成のポイント】

※「1. 目的」、「2. 方法と装置」は、1～2頁に簡潔にまとめよう。

それ以降の章と「課題」に注力しましょう。

※ボールペン使用を推奨しますが、鉛筆でもかまいません。

点数の付け方に差はありませんが、濃い字で書いてください。

P.28

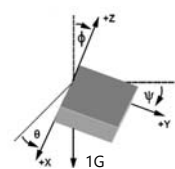


内容：センサの3軸加速度データから、水平面に対するセンサの傾斜角度を計算し、PC画面に表示するシステムを構築する。

目標：MEMS加速度センサの作製方法（加工装置見学）を学び、これまでの内容をまとめたシステム構築を実践する。

手順：

- MEMS加速度センサの作製方法の説明と、加工装置見学（②の時にグループ毎に）。
- 3軸加速度データから傾斜角を求める計算式を検討する。
- スケッチを作成、実行する。
- ゴニオステージ上で、センサを取り付けたブレッドボードを傾け、加速度と傾斜角の変化を計測する。

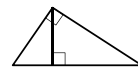


加速度1Gを、  
3方向成分に分けて考える。

加速度1Gのx方向成分： $a_x$

加速度1Gのy方向成分： $a_y$

加速度1Gのz方向成分： $a_z$



スケッチの素  
exercise5.ino

P.27



値がばらつくので、5～10点程度を記録し、平均値と標準偏差を求めて、傾斜角センサの値と比較する。  
(どの方向にMEMS加速度センサを配置したか、記録しておくこと。)

| 計測No. | X方向<br>加速度 | Y方向<br>加速度 | Z方向<br>加速度 | X軸<br>傾き | Y軸<br>傾き | Z軸<br>傾き |
|-------|------------|------------|------------|----------|----------|----------|
| 1     |            |            |            |          |          |          |
| 2     |            |            |            |          |          |          |
| 3     |            |            |            |          |          |          |
| 4     |            |            |            |          |          |          |
| 5     |            |            |            |          |          |          |
| 6     |            |            |            |          |          |          |
| 7     |            |            |            |          |          |          |
| 8     |            |            |            |          |          |          |
| 9     |            |            |            |          |          |          |
| 10    |            |            |            |          |          |          |
| 平均    |            |            |            |          |          |          |
| 標準偏差  |            |            |            |          |          |          |

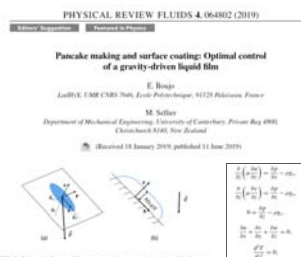
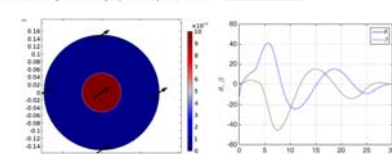


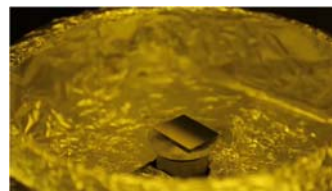
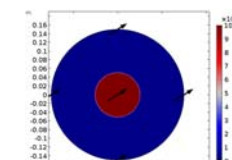
FIG. 1. Schematic diagram of the pancake making system: (a) top view, (b) side view.



モンテカルロシミュレーションとAdjoint法（随伴法）を用いた最適制御の計算結果



- システムの名称  
クレープ焼けました！
- システムの目的  
家庭のフライパンで、薄く均一な厚みのクレープ生地を焼くための温度・角度ナビゲーション
- システムの原理・構成  
システム全体は、フライパンの柄に使用時のみ取り可能とする。システム内のMEMS加速度センサと非接触MEMS温度センサでフライパンの傾斜角と表面温度を読み取り、Arduinoに入力する。Arduinoに予め格納してある最適制御結果と現在の状況の差分を複数のLEDで分かりやすく出力し、フライパンの回し具合をLEDでナビゲーションする。



スピンドット法  
フォトレジストを膜厚1～100umに基板上に均一に塗布  
3000～5000rpm × 30sec



## マイクロマシン/MEMSとそのバイオ・IoT応用



### マイクロ・ナノ加工

- 3次元リソグラフィ
- プラズマエッチング
- 機能性薄膜成膜

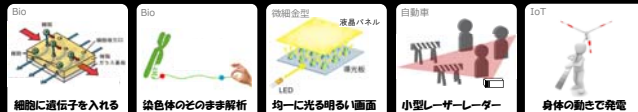
### マイクロデバイス

- パルプレスマイクロポンプ
- 多相流マイクロミキサ
- マイクロバルブ
- マイクロプロトタイプ
- シリコンマイクロフォン
- 細胞配置アレイ



### Bio-IoTシステム

- 高効率細胞遺伝子導入チップ
- 高速染色体DNA解析チップ
- 高均一液晶バックライト導光板
- 小型・大指向角MEMSミラー
- 柔軟ポリマー発電デバイス



## 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)

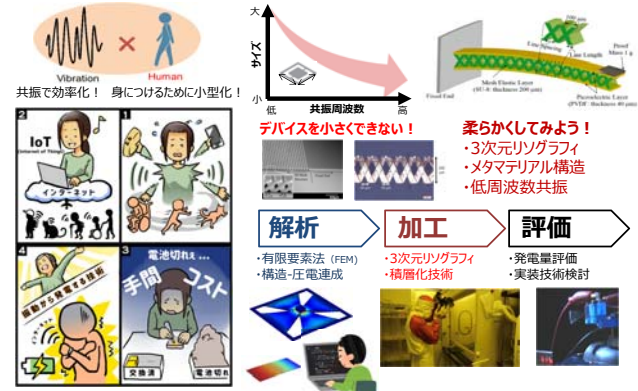
材料力学・機械力学      機械加工学      制御工学  
機械材料      計測学      電磁気学  
製図      (基礎・応用)      流体力学  
シミュレーション      精密・微細加工      医療・バイオ・光・環境  
(構造解析・動力学・ロボット・熱流体)      (大学教科目)      (専門家と連携)

- 研究を通して、機械工学を網羅的に体験できます。
- 各学生の希望・長所・進路を考慮に入れて、研究を進めます。
- 研究費（装置、消耗品、補助員、旅費、参加費など）は準備あります。

## IoT応用：電池レスIoTを実現するエナジーハーベスタ



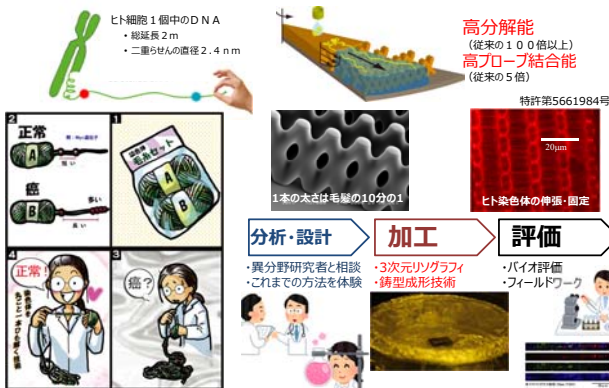
人のわずかな動作（10Hz以下）から、自家発電する超小型発電機



## 医療応用：DNAファイバ遺伝子解析チップ



臨床診断（ヒト染色体の高感度・高速分析）



## OB、OGの進路



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。



MEMS 大学

検索



見学は随時受付！

直接訪問：3213号室

Mail連絡：suzuki.taka@gunma-u.ac.jp