

# 計測情報処理論 講義資料

篠田 裕之

[https://hapislab.org/public/hiroyuki\\_shinoda/keisoku\\_joho](https://hapislab.org/public/hiroyuki_shinoda/keisoku_joho)

hiroyuki\_shinoda@k.u-tokyo.ac.jp

## 講義の進行

6/4	計測情報処理とは？ 何が問題か？
6/11	信号とノイズ ①
6/18	信号とノイズ ②
6/25	アナログパターンの情報量
7/2	休講
7/9	計測の直交性

計測に共通する問題の整理と思考の道具を提供

# 「計測情報処理」の問題

1. 知りたい情報(測りたい物理量  $Q$ )がある。
2. 物理量  $Q$  が変化すると出力電圧値  $V$  が変化するセンサ(計測装置)がある。

→ これだけなら問題は何もない

3. センサ出力  $V$  は  $Q$  だけでなく他の量  $P$  の変化によっても変化する。また、予測できない誤差が加算される。

注意:  $P$  や  $Q$  は1つの値(スカラー)である場合だけでなく、複数の値の組(ベクトル、パターン)である場合もある。

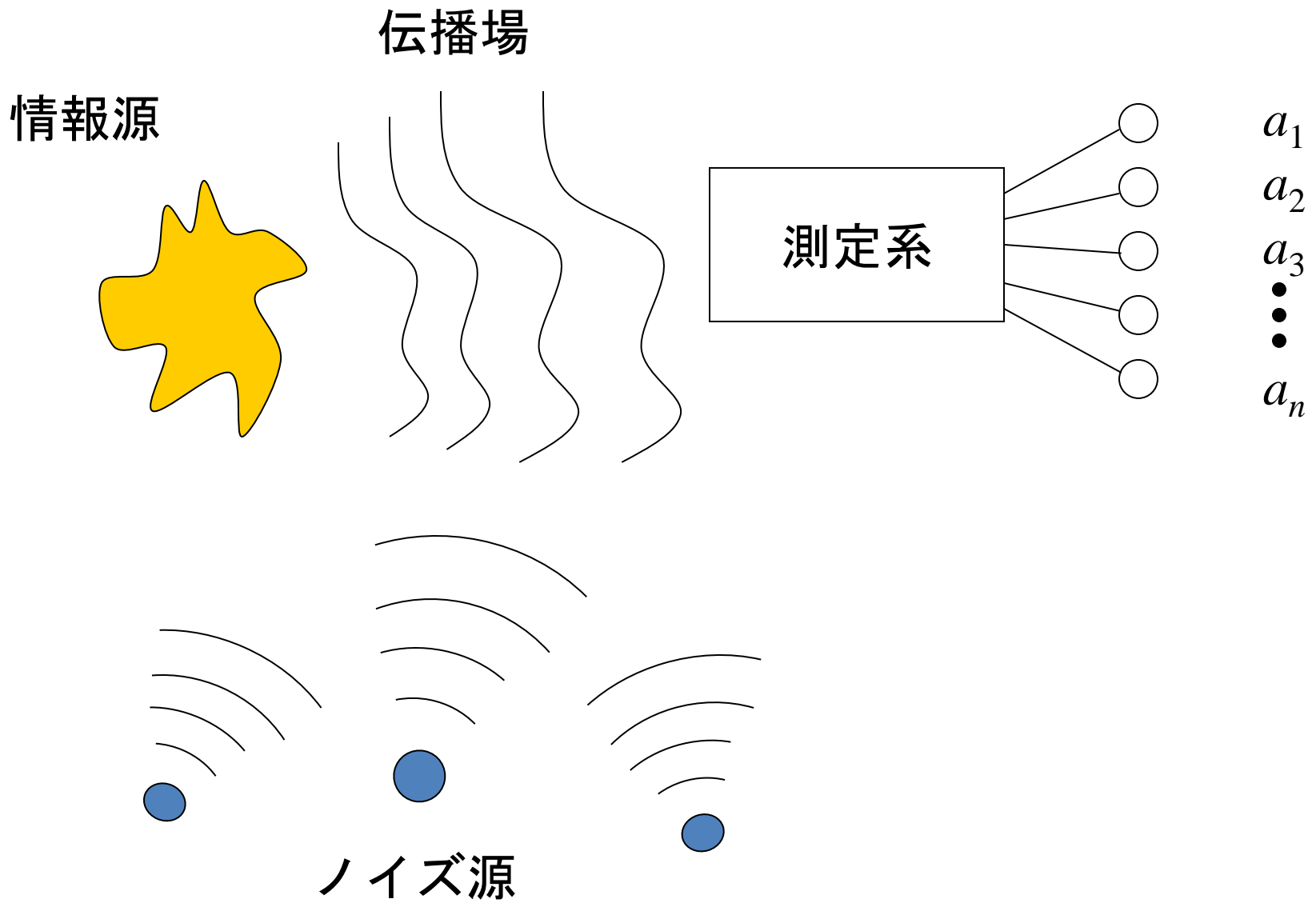
## 「計測情報処理」の問題（つづき）

複数の センサ出力値の組（ベクトル、パターン）

$$\mathbf{V} = (V_1, V_2, \dots, V_n)$$

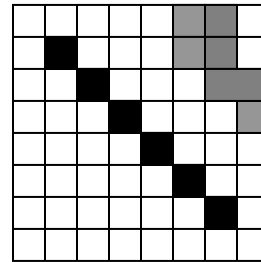
が得られたとき、  
本来知りたかった量  $Q$  をどれだけ正確に決定できるだろうか？

また、誤差を最小化するためには、計測システムをどのように設計したらよいただろうか？



# 「パターン」の種類

## 1) 空間的なパターン

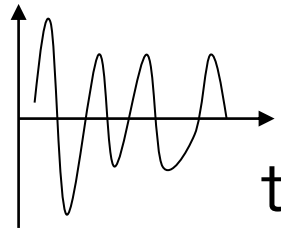


例：画像

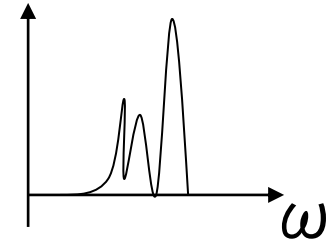
静止画 -- 2次元

動画 --- 3次元

## 2) 時間的なパターン



時間軸でのパターン



周波数軸でのパターン

## 3) 物理的パラメータのパターン

光のスペクトル、カベクトル

## 4) 上記の複合的なパターン

## 身近なパターン計測の例

### 1) デジカメやビデオで風景を撮影する

- 解像度の限界は何で決まるのだろうか？
- 撮影後の処理でノイズはどれだけ除去できるだろうか？
- 指名手配されている人間の顔をどうしたら発見できるだろうか？

### 2) 携帯電話で通話する、録音する

- 多くの人が同時に通話している状況で、どうすれば自分の無線信号を拾いだせるだろうか？

Q. 「計測」と「通信」の違いは何か？

- 決まった人の音声だけを録音するにはどうすればよいだろうか？
- 音源の位置をどれだけ精度よく決定できるだろうか？

## 身近なパターン計測の例 つづき

- 3) GPS で自分の位置をどこまで精度よく特定できるだろうか?
- 4) その他  
車、電子レンジ、エアコン、、、あらゆる装置の中はセンサだらけ



# 今回の授業の内容 ～問題を俯瞰する

(1) 20 世紀パターン計測の代表的ブレークスルーを紹介

(2) パターン計測の新しい問題 (状況) を紹介

## 授業全体の目標

上記の計測システム全てに適用できる、設計のための思考の道具を身につける

## (1) 20 世紀パターン計測の代表的ブレークスルー

- 点計測からパターン計測へ物理的に拡張する方法を知る
- 「パターンがあってはじめて伝わる情報」があることをあらためて確認する
- パターン計測には様々な種類があるが、その本質部分は同じ問題に定式化できることを知る

### 1. 走査

--- 空間を時間に変換

### 2. アレイデバイス

--- 波動伝播特性を利用したパターンのコピー

--- リソグラフィ技術を活用したデバイス作製

### 3. 開口合成

--- レンズの一般化

### 4. CT

--- 計算による逆問題の解

### 5. 空間変調による信号の分離

--- MRI, 構造化照明

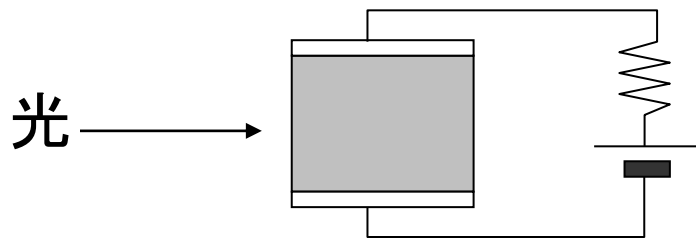
# 1. パターン計測の基本「走査」

例：二次元の明暗パターン（画像）を計測する

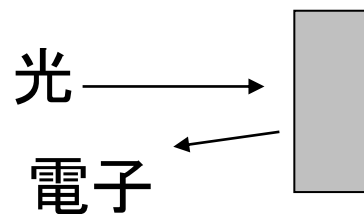
## 出発点

○光によって電気的特性（キャリア数）が変化する物質

Si, Se, CdS, CsSe, . . .



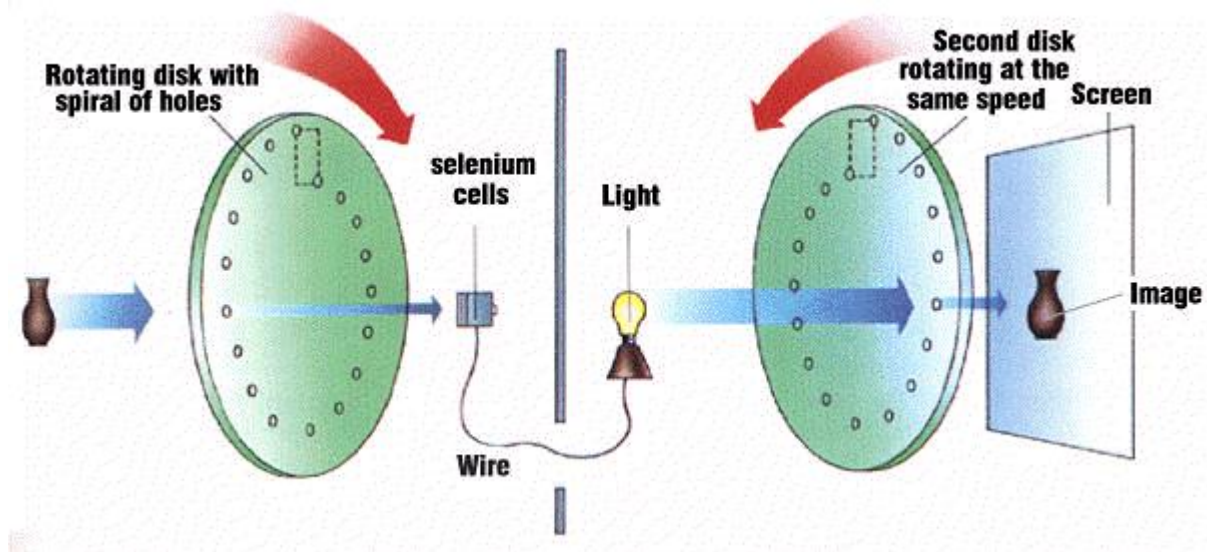
○光電効果



# 1. 走査

## 機械式テレビ

Paul Nipkow 1884



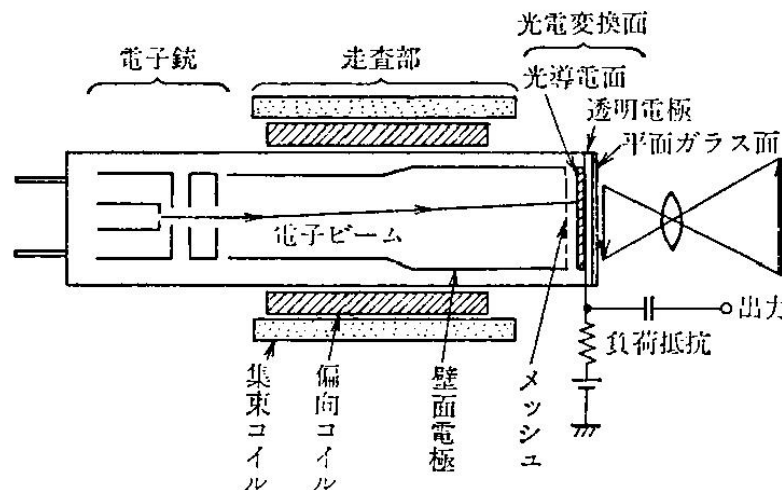
<http://www.databahn.net/library/inet/history/tv/>

# 1. 走査

## 電子銃による走査

(外部) 光電効果 Iconoscope, Vladimir Zworykin 1929

光導電効果 ビジコン 1950 ~



参考 電子銃による受像

オシロスコープ用 CRT (cathode ray tube) Karl Braun 1897

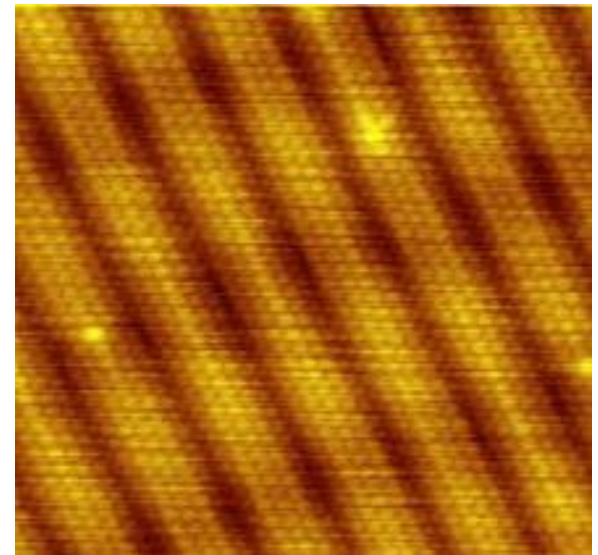
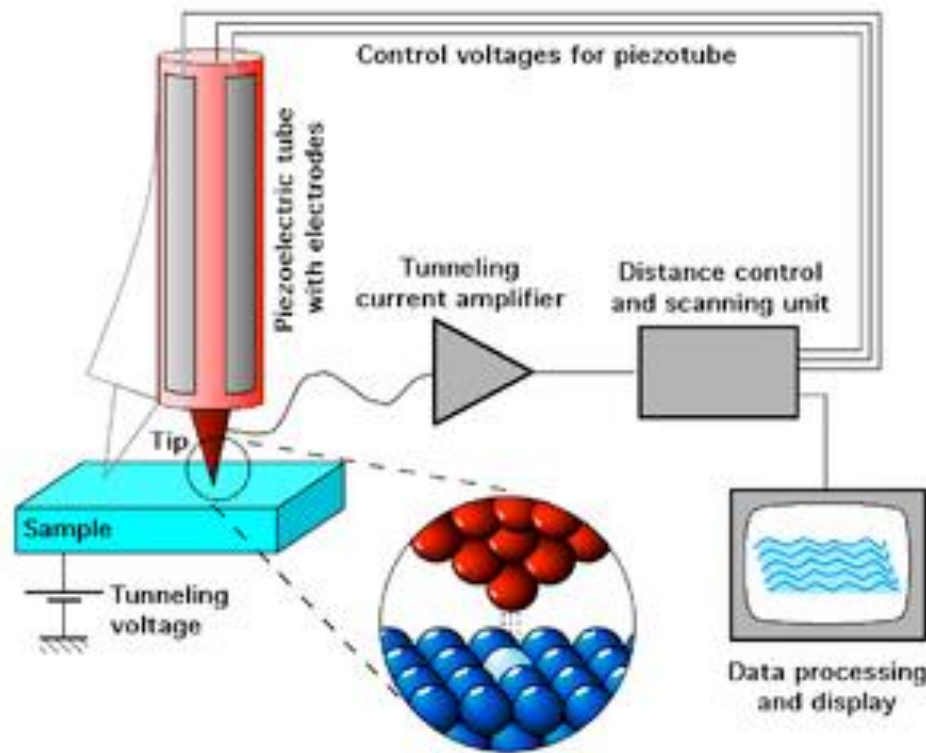
ブラウン管に「イ」の字を受像 (送像側は機械式)

高柳健次郎 (浜松高等工業学校) 1926~27

# 1. 走査

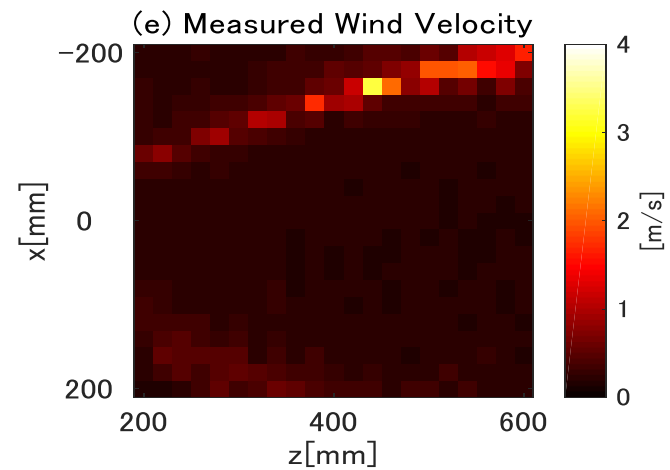
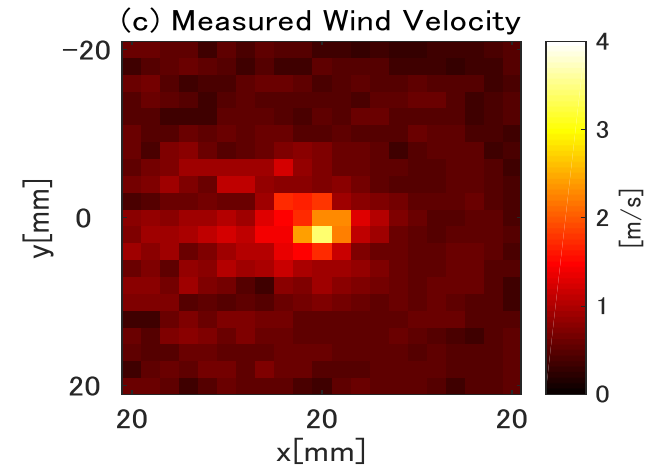
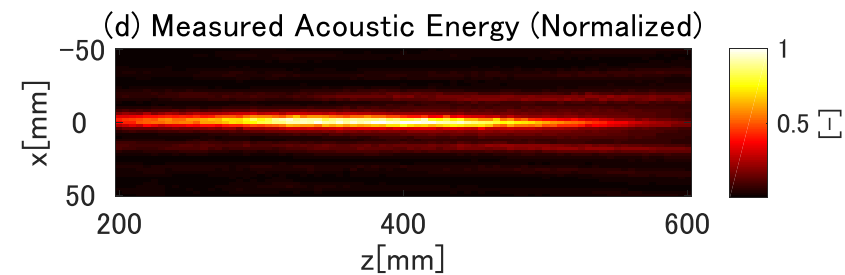
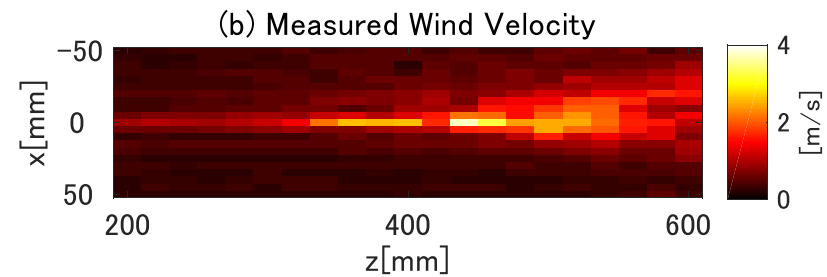
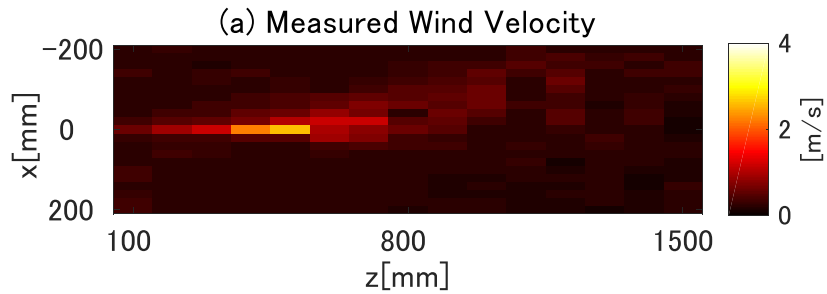
STM (Scanning Tunneling Microscope)

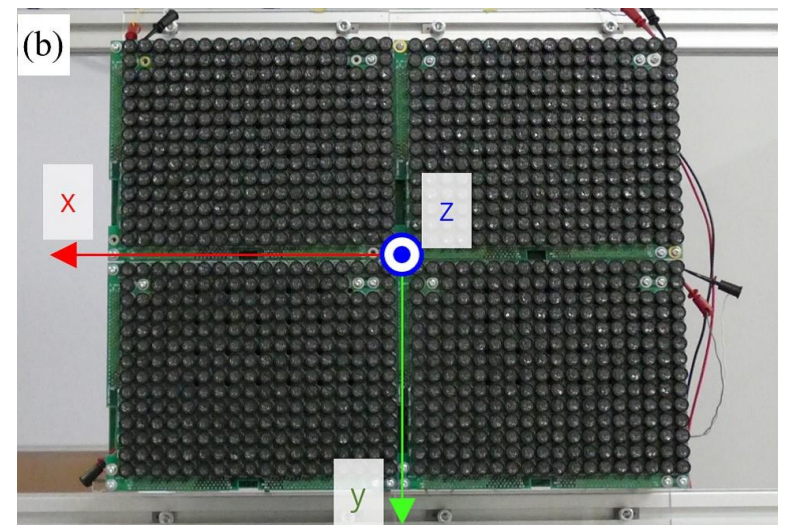
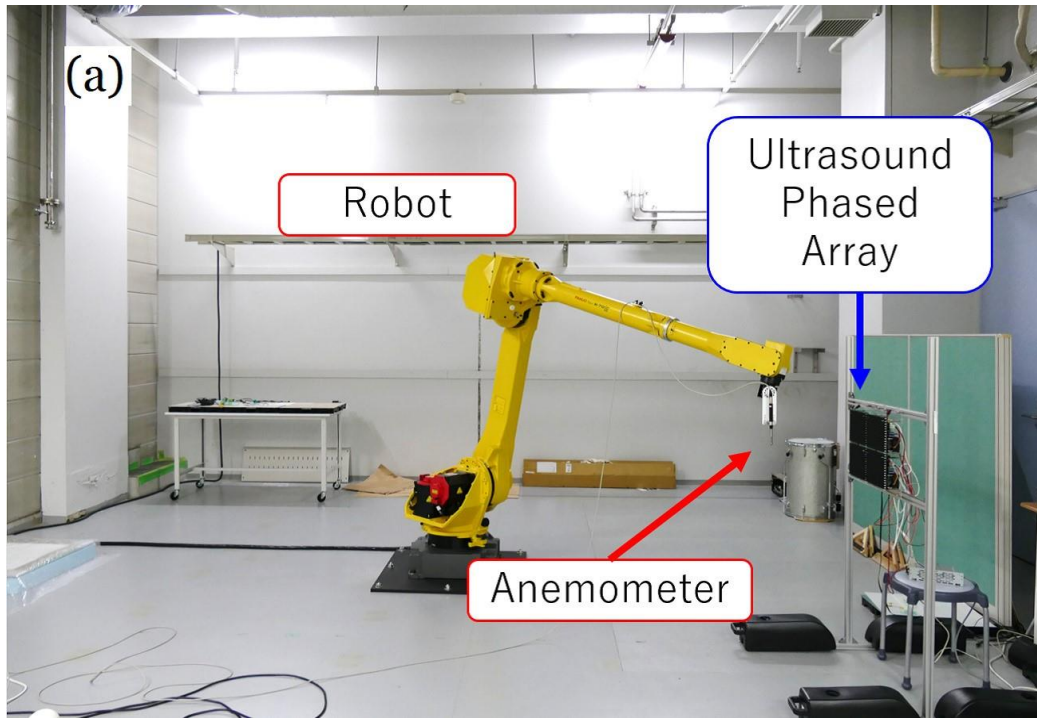
走査型トンネル顕微鏡



Wikipedia より転載

# 空中超音波が生じさせる気流の3次元分布(流速の計測値)

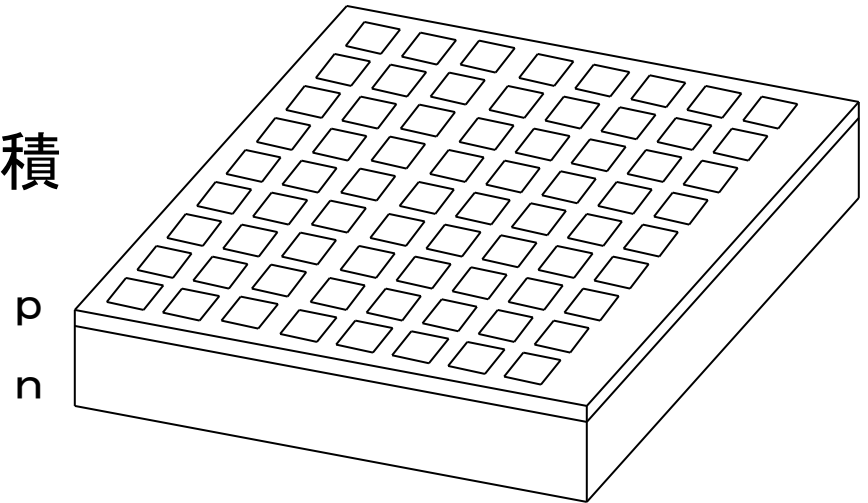




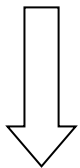


## 2. アレイ型センサ

### フォトリソグラフィによる回路集積



- ・CCD ----- 下記 MOS 型に比べ SN比を上げやすい(なぜか?)  
(1970 Boyle & Smith ベル研)
- ・MOS型 ----- 各サイトに読み出し線(縦横2n本)  
高機能化が容易



- ・ 問題点 : kTC雑音が大きい

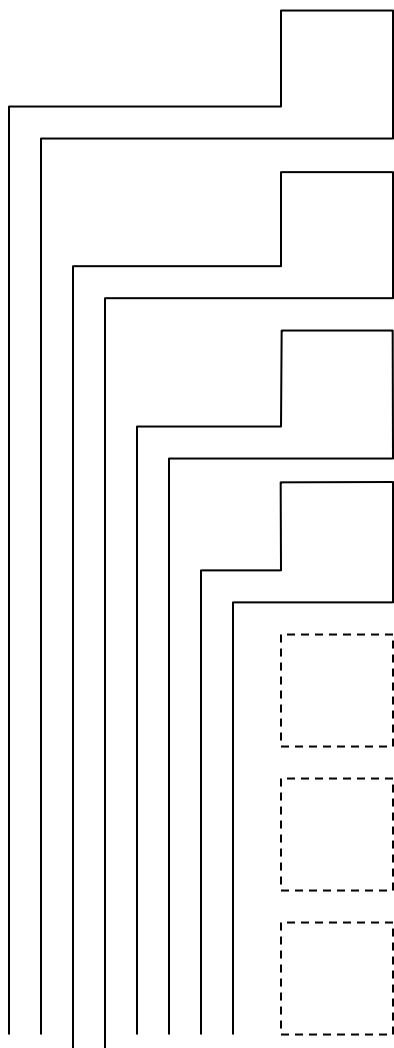
$$\left( \text{配線部の雑音電荷} \quad \frac{Q^2}{2C} = \frac{kT}{2} \right)$$

CMOS

イメージセンサ(各サイトにアンプを実装)

## 2. アレイ型センサ

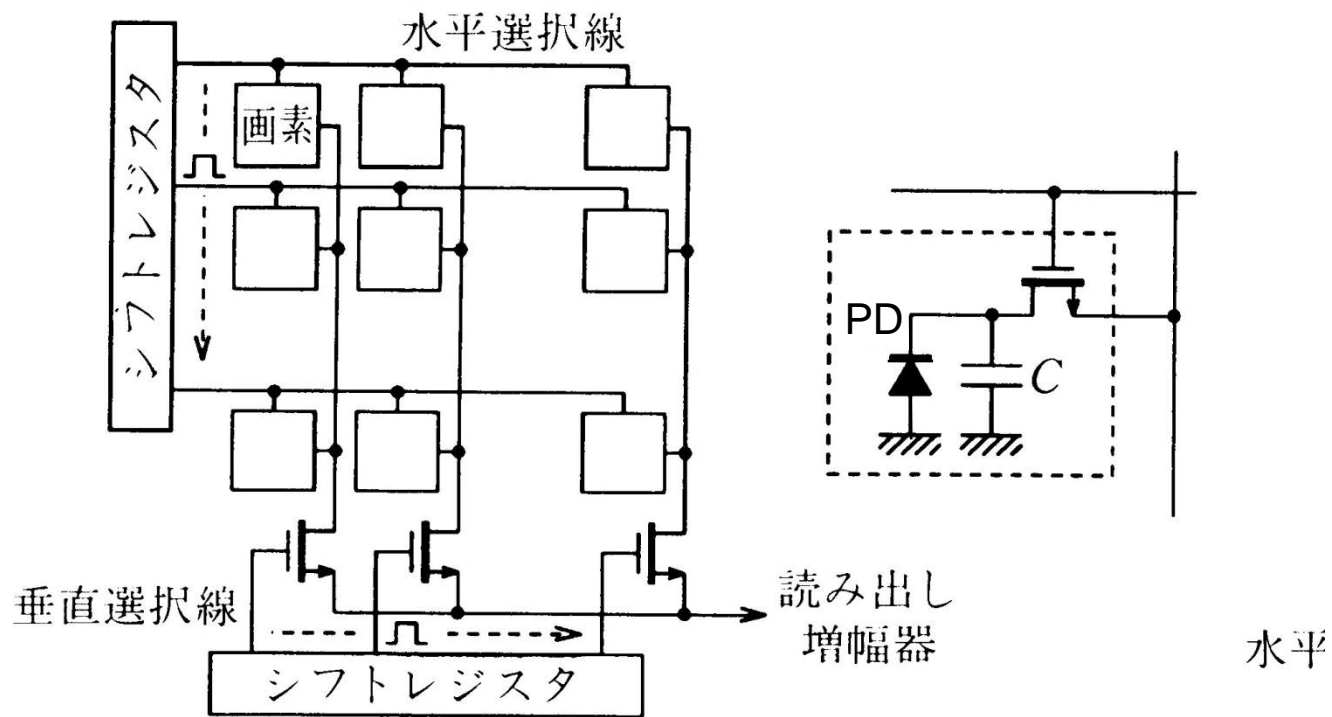
各素子への配線が問題



各素子へ個別配線しようとする  
と、すぐに配線だらけになって  
しまう！

## 2. アレイ型センサ

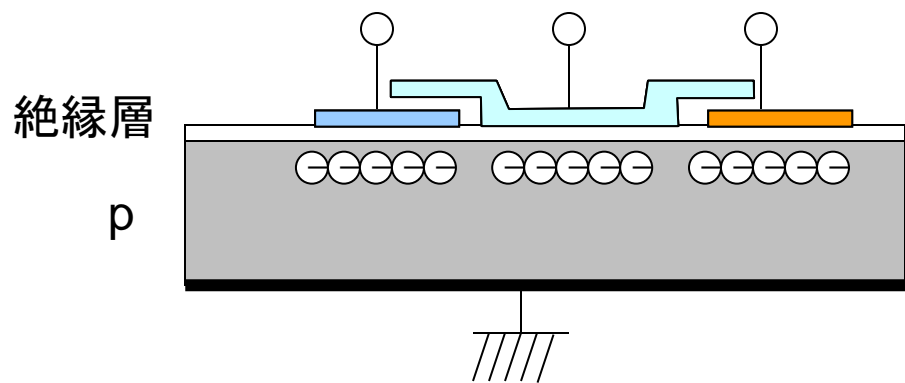
### MOS型撮像素子



(a) MOS型撮像素子の構造

## 2. アレイ型センサ

CCD --- 個別配線を無くす工夫



概念図

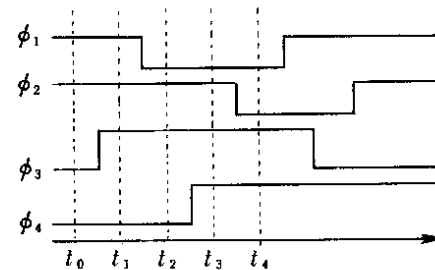
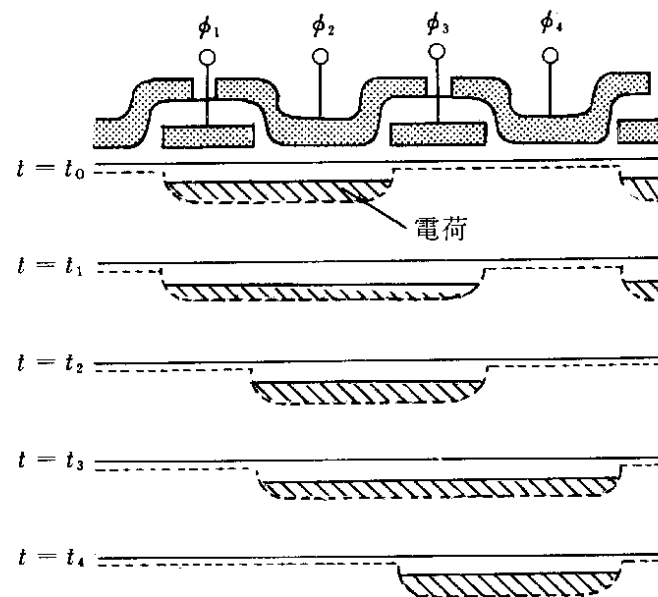
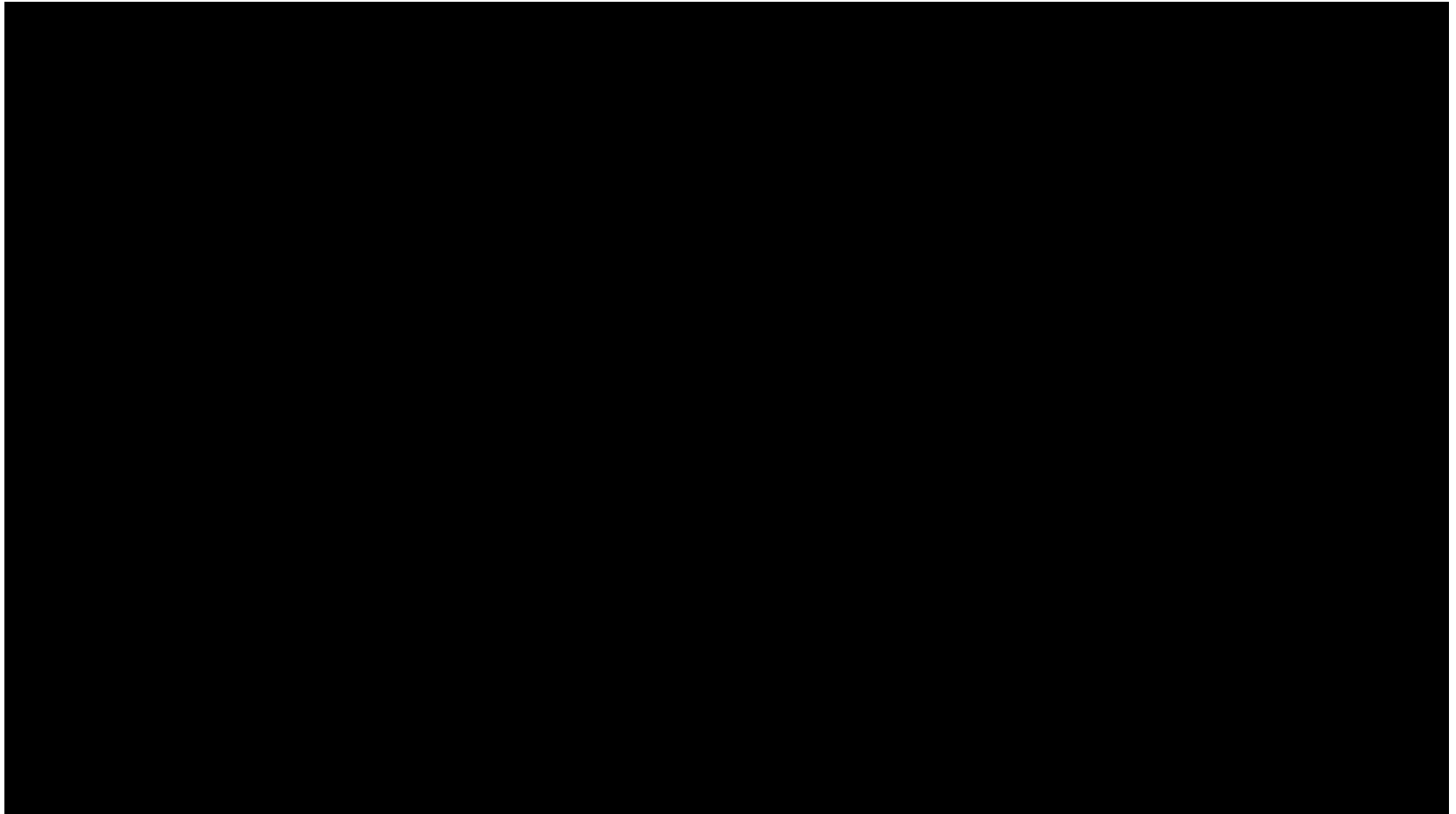


図2 CCDの電荷転送機能



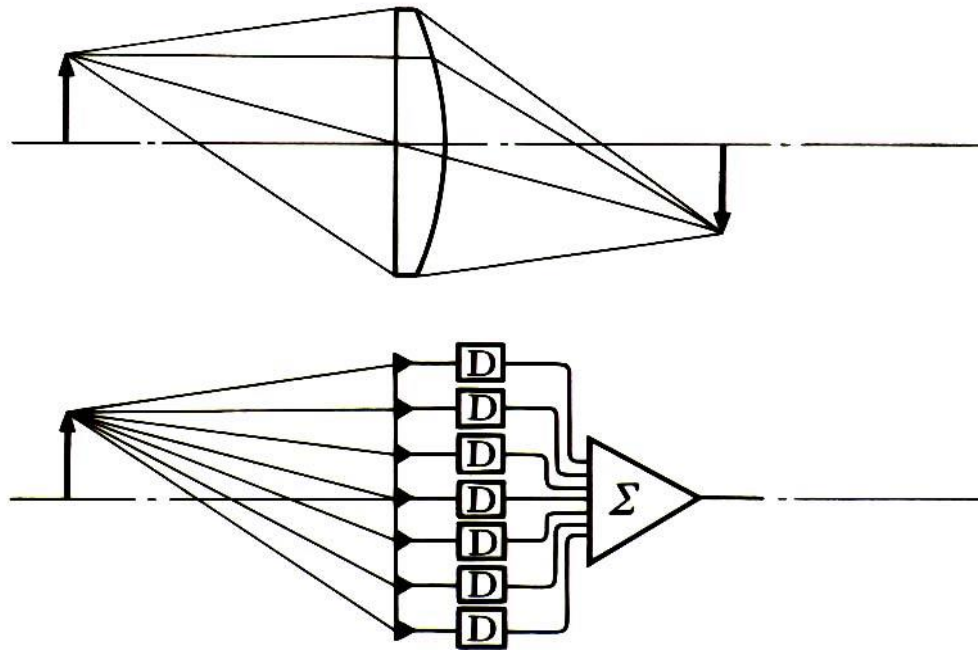
参考： フォトン1個のエネルギー

$$\lambda = 500 \text{ nm (緑) の場合 } hf = h \frac{c}{\lambda} = 3.97 \times 10^{-19} \text{ J}$$

- 走査した場合と、2次元アレイで計測した場合とで、究極の計測性能にどのような違いがあるだろうか？
- 「2次元アレイ」にはどのような特別の意味があるだろうか？
- イメージセンサと同じ(あるいはそれ以上の)計測を実現できる他の方法は無いだろうか？

### 3. アレイの拡張

合成開口（レンズを用いない撮像）



波動計測において、各素子が強度だけでなく位相も計測できればレンズは不要

### 3. 合成開口

## 超音波フェーズドアレイ

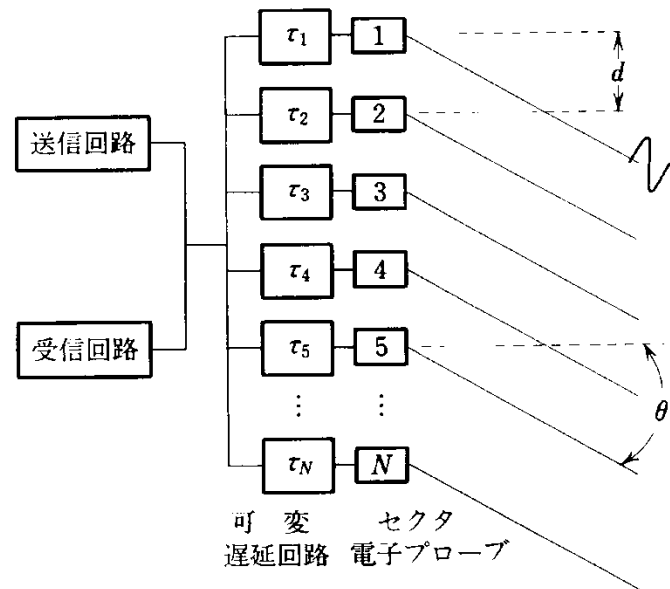
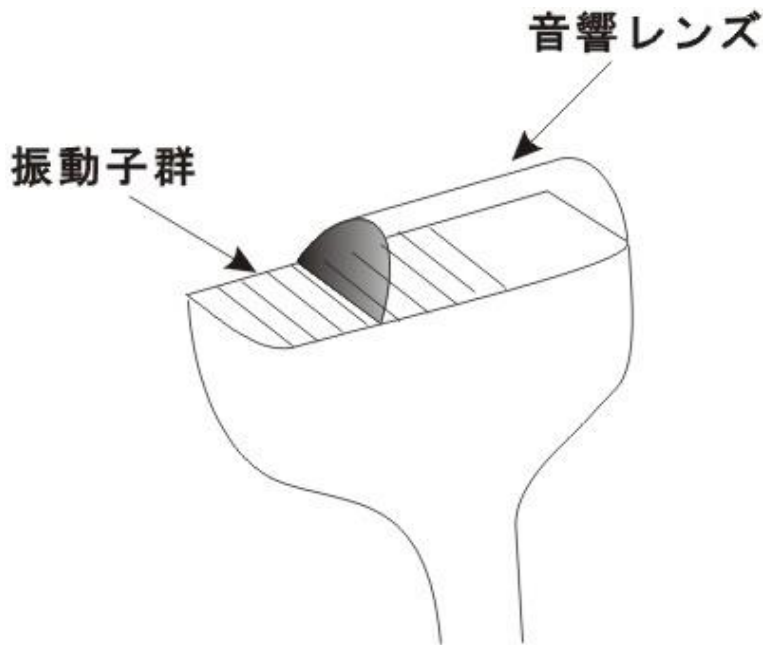
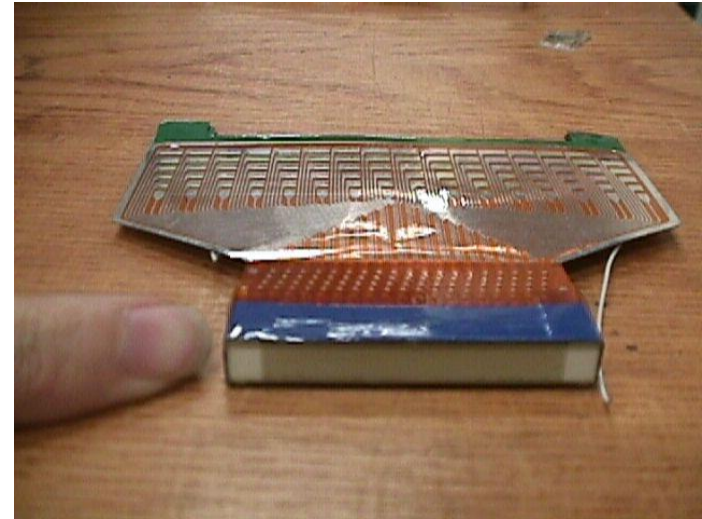
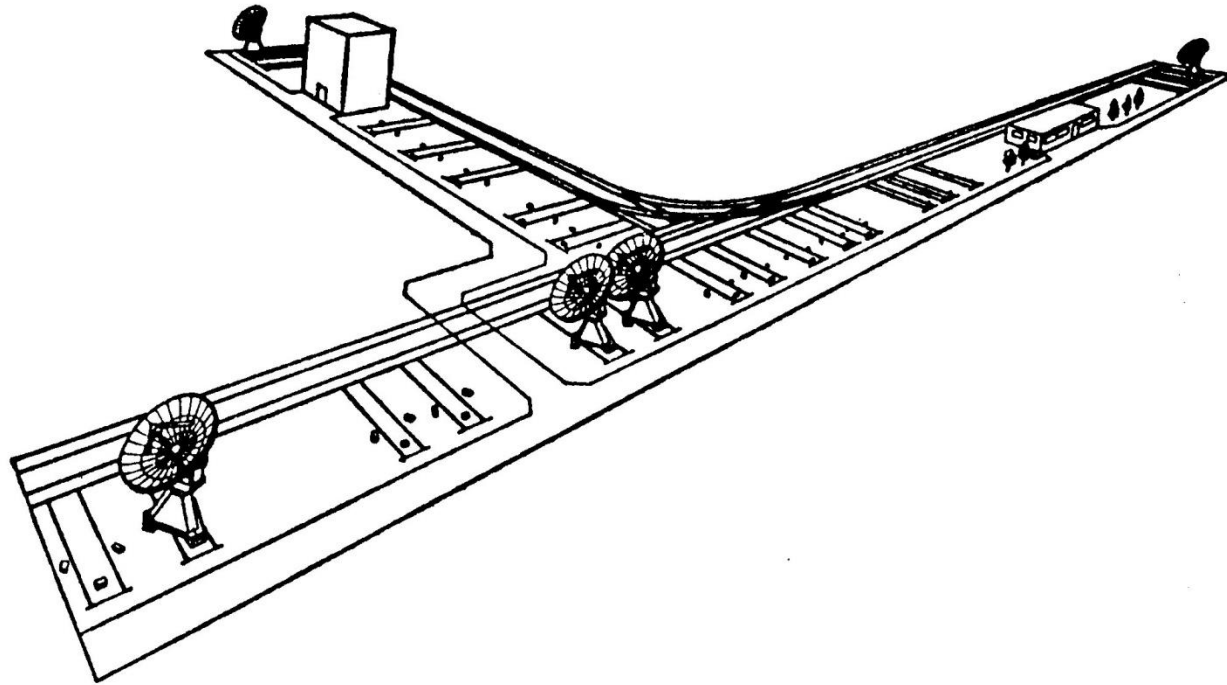


図 2.18 セクタ電子スキャンの原理



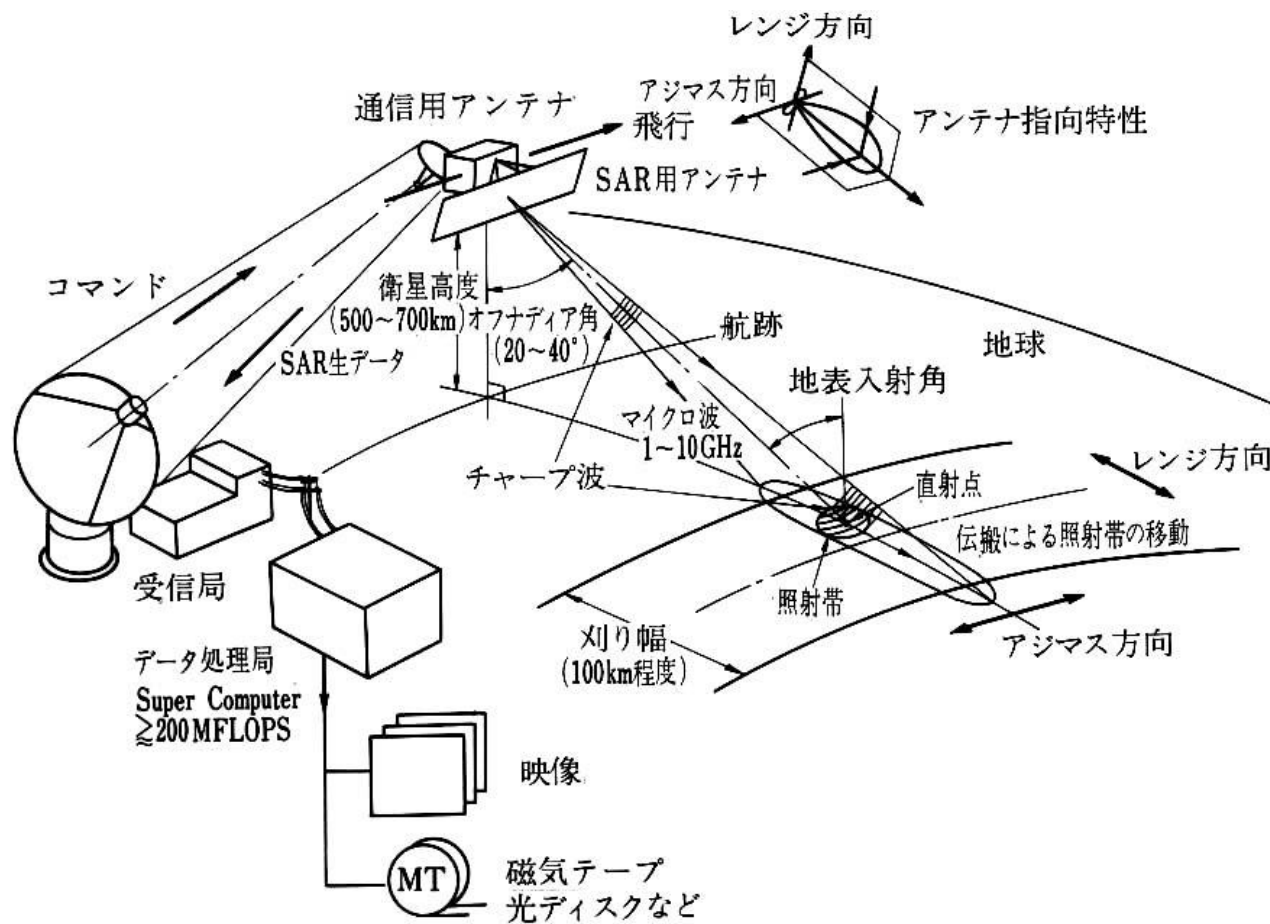
### 3. 合成開口



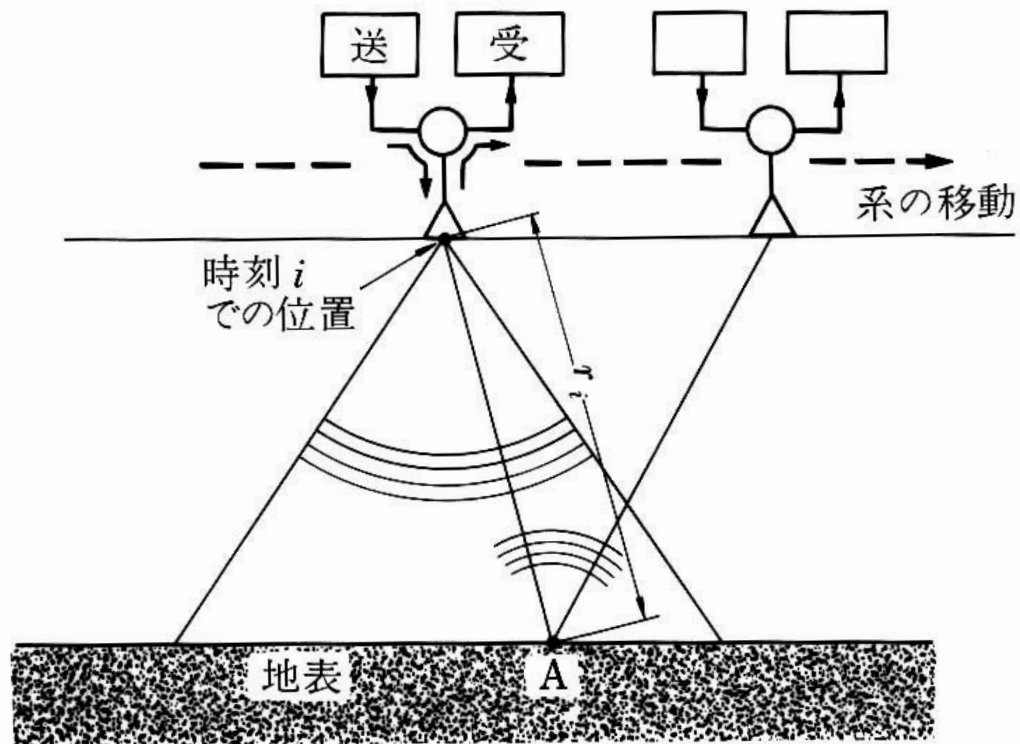
開口合成形電波望遠鏡(野辺山)  
東西・南北それぞれ約500mの範囲で直径10mの  
パラボラアンテナを30箇所配置する。

### 3. 合成開口

## 衛星搭載型SAR (Synthetic Aperture Radar)



### 3. 合成開口



衛星が取得する信号

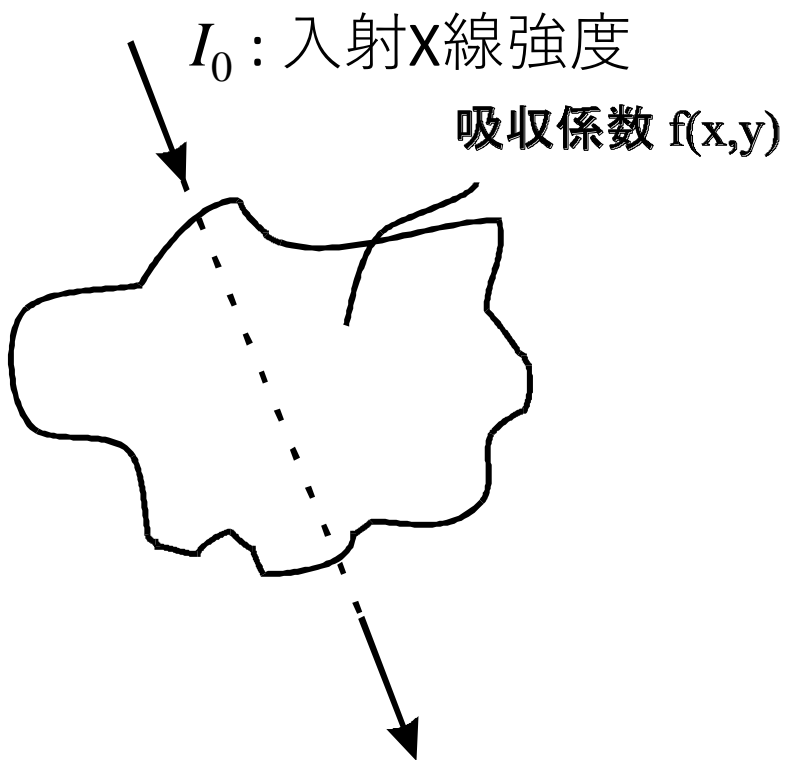
## 4. X線 CT ～逆問題を計算で解く

### X線の発見



Wilhelm Röntgen 1895

## 4. X線CT



$I$ : 対象を透過した後のX線強度

### X線の透過特性

$$I = I_0 \exp\left(-\int f ds\right) \text{ より}$$

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \int f ds$$

すなわち吸収係数の経路和が観測できる。

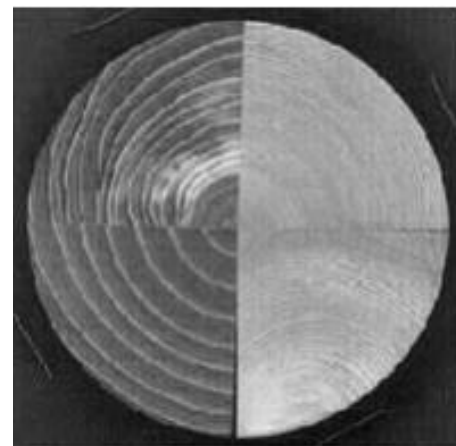
## 4. X線CT



X線写真



頭部断層像



木材断層像

## 5. MRI ～空間変調による位置特定

NMRからMRIへ

NMR : Nuclear Magnetic Resonance  
MRI : Magnetic Resonance Imaging

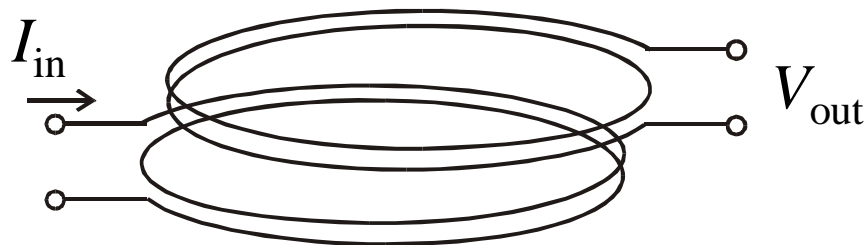
H の NMR  $\longrightarrow$  42.58 MHz/T

---

参考図



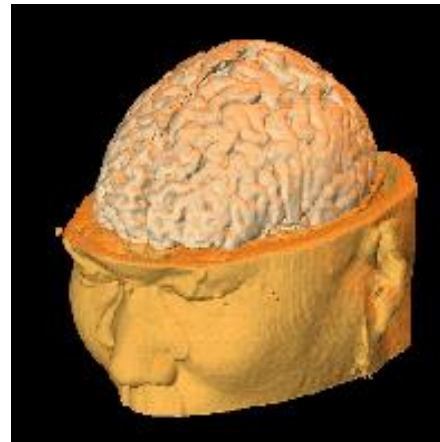
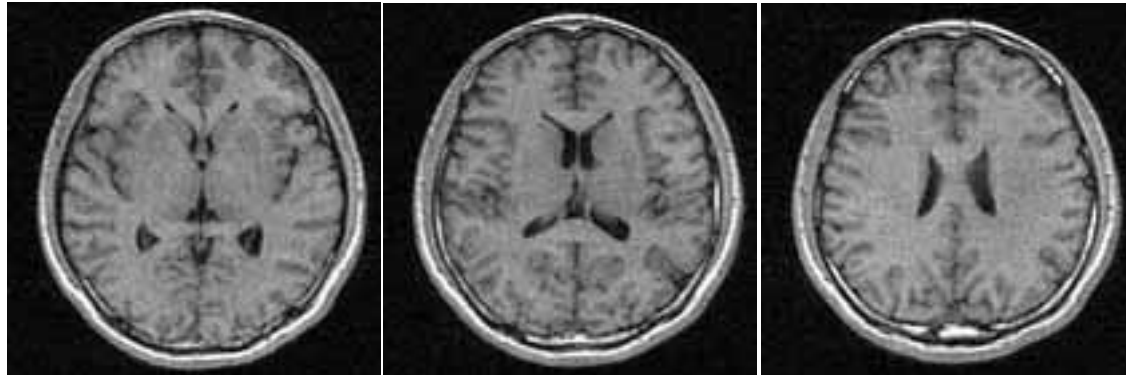
LC共振体



## 5. MRI

傾斜磁場によるイメージング

Paul Lauterbur 1973

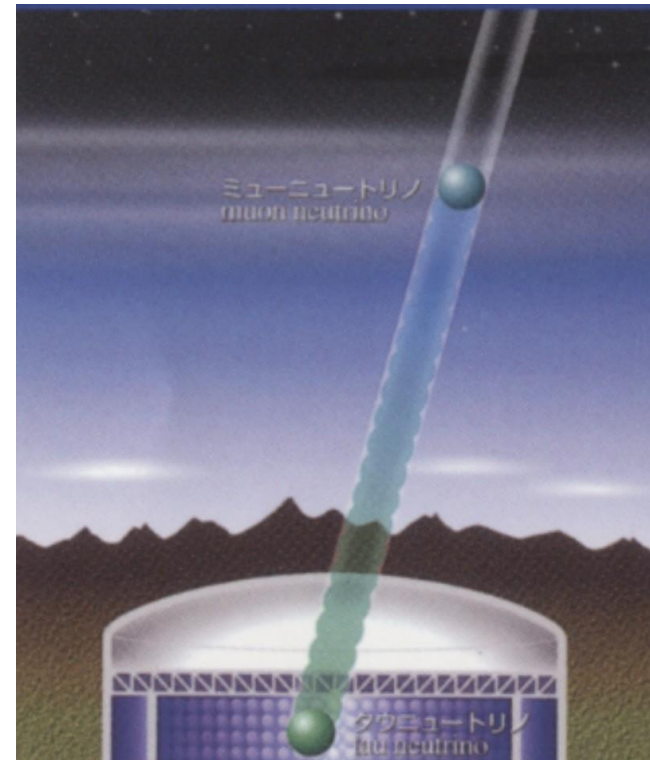
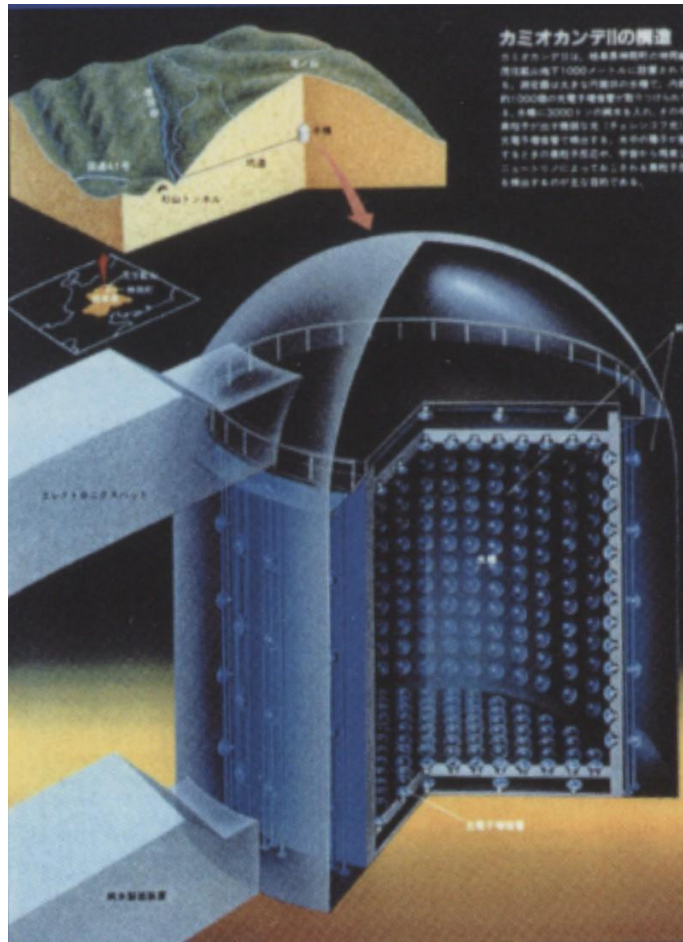


<http://www.nips.ac.jp/smf/mri/mri-brain.html>



## 6. カミオカンデ ～素粒子、放射線の分布計測

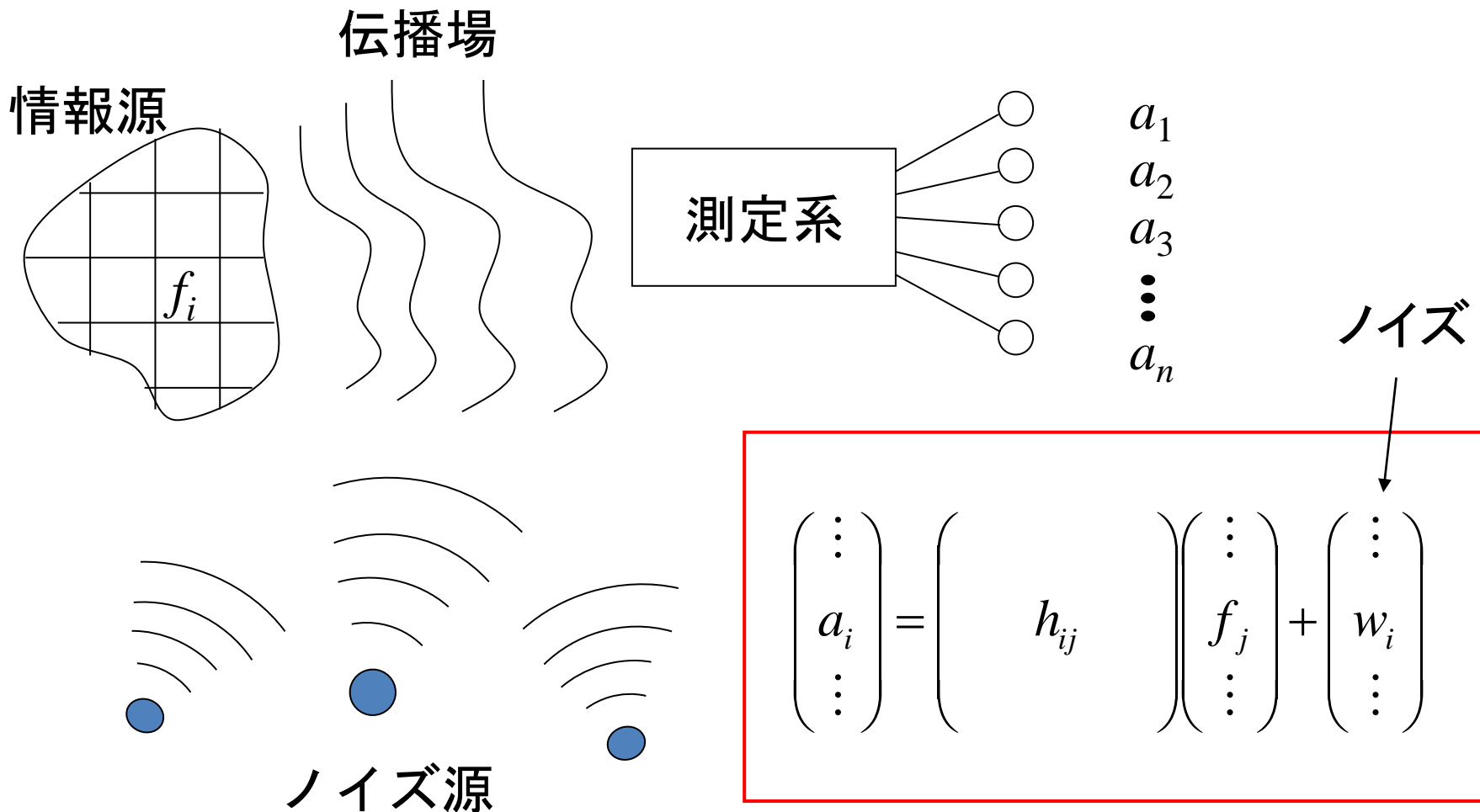
### 飛来するニュートリノの運動方向を推定



カミオカンデ 1983

衝撃波（チェレンコフ光）の観測により荷電粒子の運動方向を推定

# 線形系におけるパターン計測



測定値  $a$  から  $f$  を求める

## (2) パターン計測の新しい展開

### 背景の変化

- MEMS の発展
- 電子回路は小さく、速く、安い
  - 検出点での測定値を符号化し伝送することが容易
- 大規模な計算を短時間、低コストで実行可能
- 地球規模のネットワークが利用可能
- センサが自分の位置・時間を自分で計測できる
- 人々のニーズが変化

## 次回以降の講義の目的

計測システムの種類によらず、以下のことが考えられるようになり、現実の問題に適用できるようになること

複数の センサ出力値の組 (ベクトル、パターン)

$$\mathbf{V} = (V_1, V_2, \dots, V_n)$$

が得られたとき、  
本来知りたかった量  $Q$  をどれだけ正確に決定できるだろうか？

また、誤差を最小化するためには、計測システムをどのように設計したらよいただろうか？