

# 超音波で病気を診る

～超音波エコー法の原理と実際～

首都大学東京 システムデザイン学部  
情報通信システムコース

田川 憲男

# 講義内容

1. 序論（医用画像診断装置の概要）
2. 超音波の基礎
3. 超音波診断装置（Bモード画像）
4. 超音波診断装置（ドプラ画像）
5. 最近の話題

# 医用工学の特徴

## ➤ 医用工学とは

工学→医学

### ● 医用工学 (medical engineering)

医療に工学的な理論や技術手法を導入することにより、その科学化を図ることを主眼とした学問領域

医学→工学

### ● 生体工学 (biological engineering)

医学や生物学の概念を工学に導入し応用を図る領域  
生体構造や生体機能を工学分野に応用しようとするもの

### ● 医用生体工学 (bio-medical engineering)

医用工学と生体工学を合わせて、医用生体工学BMEと呼ばれる。近年では医用工学と生体工学を区別せずMEと呼ぶことが多い。

### ● 医用画像工学 (medical image engineering)

医用工学で、画像を扱う領域

# 代表的な医用画像



## ➤ X線画像

- ✓ 単純撮影法(透視)、CT(Computed Tomography)

## ➤ MRI(Magnetic Resonance Image)

- ✓ 水素原子( $^1\text{H}$ ;プロトン)の密度、緩和時間など

## ➤ RI(Radio Isotope)画像

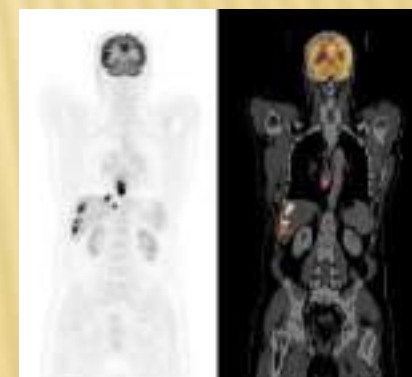
- ✓ Scintigraphy、SPECT(Single Photon Emission CT)、PET(Positron Emission CT)

## ➤ 超音波画像

- ✓ パルスエコー法、ドプラ法

## ➤ 光学画像

- 顕微鏡画像、内視鏡画像



# 代表的な医用画像

---

## ➤ 医用画像の歴史

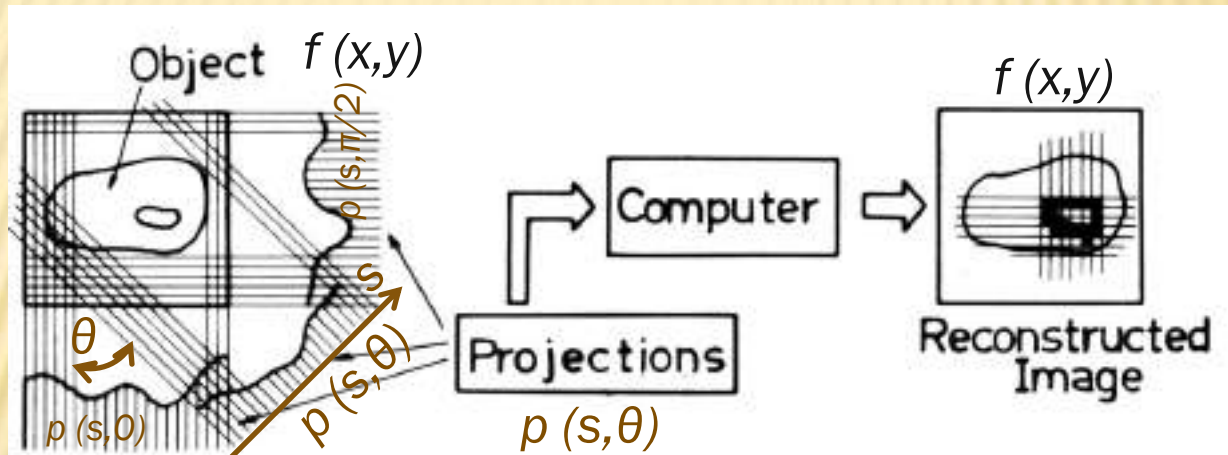
- 1853 デソルモ(Desormeaux) 尿道や膀胱を観察する特殊な器具を製作、内視鏡(endoscope)という名称を与える
- 1895 Röntgen X線を発見
- 1951 RI(Radio Isotope)スキャナ実用化 (シンチグラフィ)
- 1958 Anger ガンマカメラを発表
- 1951 Wild 超音波パルス反射法
- 1960 アロカ 超音波診断装置を商品化
- 1967 EMI社(G.Hounsfield) EMIスキャナ(X線CT)実験開始
- 1973 R.A. Lauterbur NMRイメージング(MRI)発表

# 代表的な医用画像

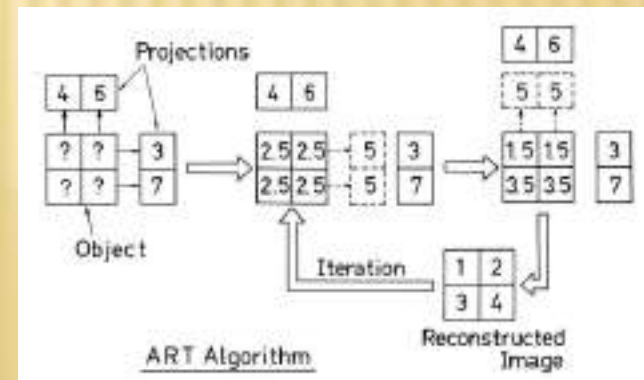
## CT ( Computed Tomography ) の原理

➤ 物理量の2次元分布  $f(x,y)$  の  
投影データ  $p(s,\theta)$  を計測する

- X線CT: X線の吸収係数
- PET/SPECT: 放射性同位元素(RI)の濃度
- 超音波CT: 超音波の吸収係数、音速



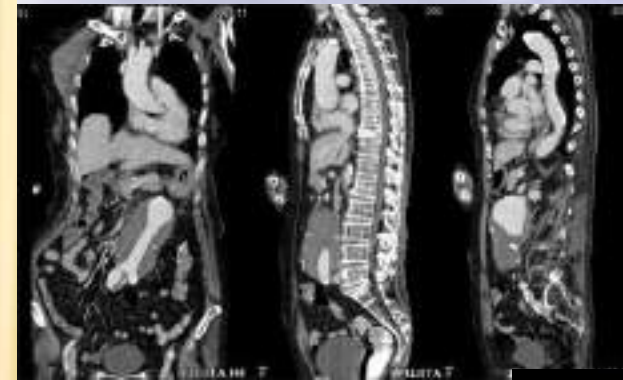
➤ 投影データ  $p(s,\theta)$  から  
物理量分布  $f(x,y)$  を計測



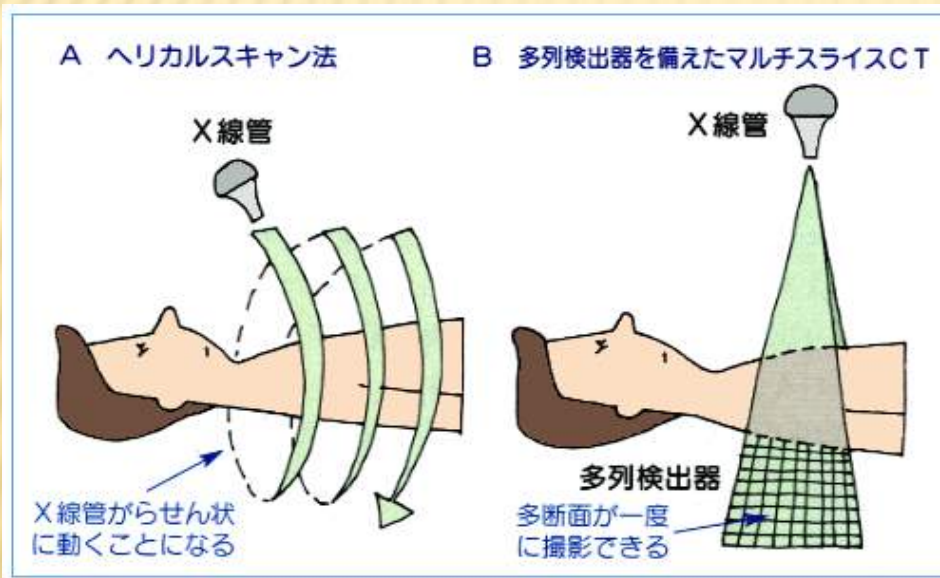
# 代表的な医用画像

## X線CT装置

- 「ヘリカルスキャン」と「マルチスライス装置」により撮影時間 短縮
- 心臓の検査も可能に



東芝メディカルのホームページより



国立循環器病センターのホームページより

# 代表的な医用画像

## 核医学機器

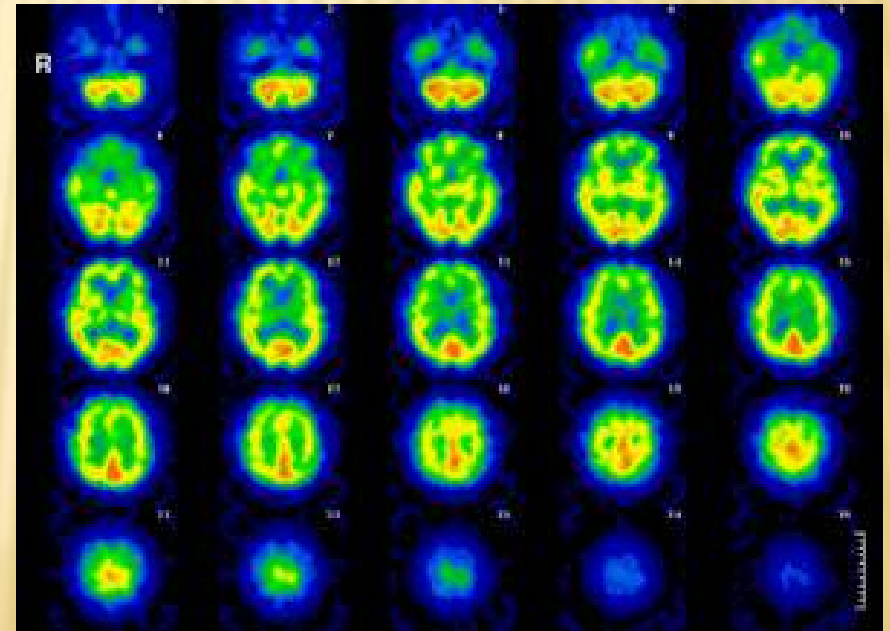
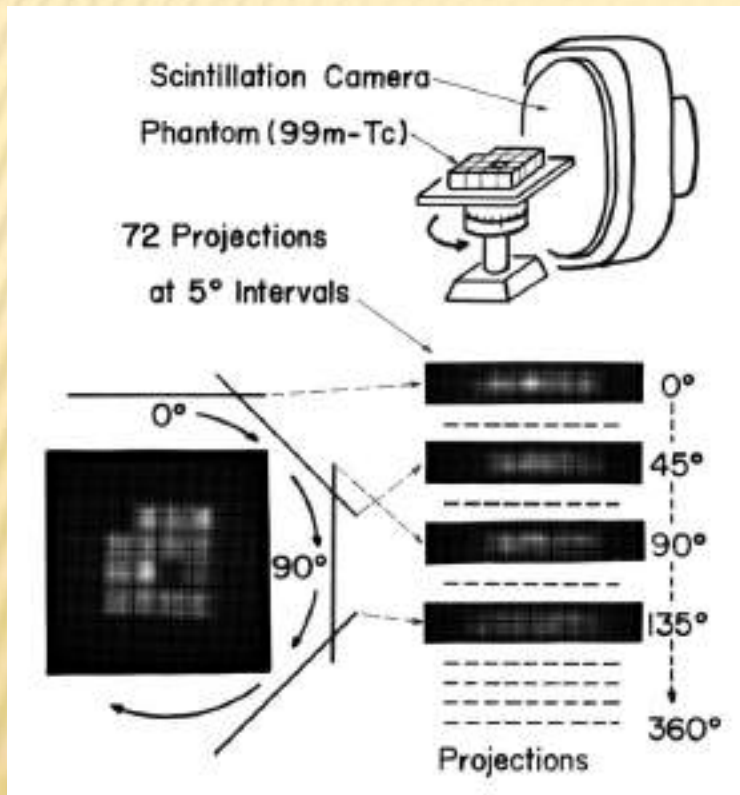
- 生体内に放射性同位元素 (RI) をラベルした試薬を投与
  - ⇒ 特定の臓器や組織に取り込まれる。
  - ⇒ RIからの放射線を体外から検出して診断する。
  
- 利用されるRI
  - ガンマ線放出核種→SPECT
    - $^{99m}\text{Tc}$ ( $\gamma$ 線エネルギー 141keV, 半減期6時間)、
    - $^{201}\text{Tl}$  (70keV, 73時間)、 $^{67}\text{Ga}$  ( 300keV, 3日)、
    - $^{123}\text{I}$ (159keV, 13時間) 、など
  
  - 陽電子放出核種→PET
    - $^{18}\text{F}$ (511keV, 110分)、 $^{13}\text{N}$ (511keV, 10分)、など
  
- 生体の機能を画像化
  - 分子イメージングとしての研究が進められている。



# 代表的な医用画像

核医学機器 SPECT(Single Photon Emission CT)

- ▶ ガンマカメラで得られるデータは RI の分布の投影データ  
⇒ CTの演算を行えば、断層像が得られる。

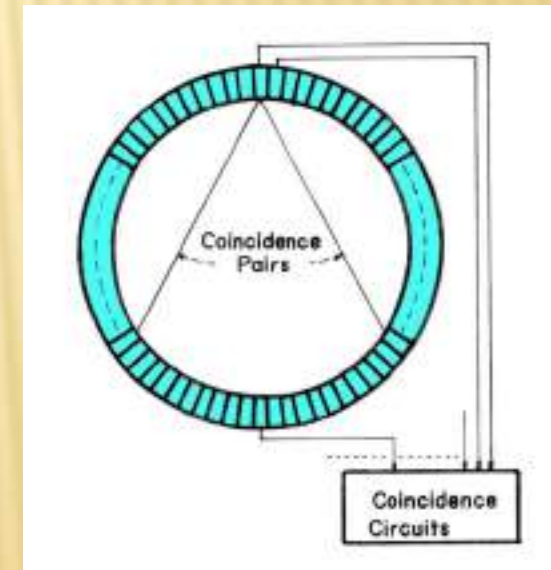
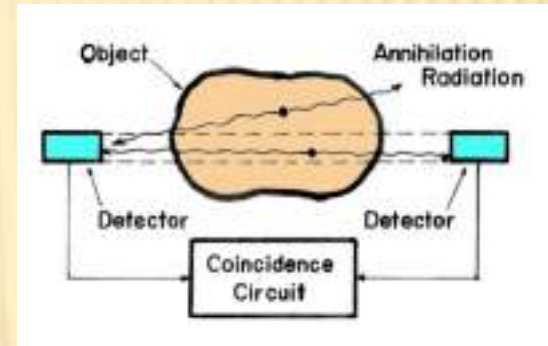


$^{123}\text{I}$ -IMP による脳血流シンチグラフィ  
福島県立医大のホームページより

# 代表的な医用画像

## 核医学機器 PET(Positron Emission Tomography)

- 陽電子が電子と結合すると、消滅ガンマ線(511keV)が放出される。
  - ⇒ 反対方向に放射される消滅ガンマ線を同時に計測する。
- 検出器を円形に配置し、投影データを得る。
  - ⇒ CT演算を行い、断層像を得る。
- 分解能は高くないため、X線CTと組み合わせた PET/CT も利用される。



PET/CT 装置の例

島津製作所のホームページより

# 代表的な医用画像

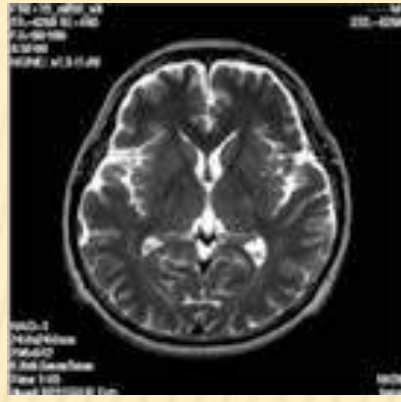
## MRI (Magnetic Resonance Imaging)

### ➤ MRI装置の例



T1 強調像

東芝メディカルのホームページより



T2 強調像



FLAIR 強調像

(fluid attenuated inversion recovery)



東芝メディカルのホームページより

- T1強調画像: 縦緩和によってコントラストのついた画像  
高信号(白): 脂肪、亜急性期の出血、銅や鉄の沈着物、メラニンなど  
低信号(黒): 水、血液などである。
- T2強調画像: 横緩和によってコントラストのついた画像  
高信号(白): 水、血液、脂肪など  
低信号(黒): 出血、石灰化、線維組織、メラニンなど

# 代表的な医用画像

## 医用画像診断機器の特徴比較

	単純X線	X線CT	MRI	核医学	超音波
用途	・妊産婦を除く すべて	・胸部、腹部、 肝、 胆、膵 ・心臓(冠動脈)、 血管	・中枢神経系、 脊髄、関節は 独壇場 ・乳腺、子宮、 前立腺、卵巣 ・肺は不可	・脳血流、糖代謝 ・肺換気 ・心筋梗塞 ・腫瘍 ・腎臓機能	・肺、骨を除く 軟部組織、 ・胎児、 産科領域
特徴	透過像	高分解能	高コントラスト fMRI(機能画像)	機能画像 分子イメージング	リアルタイム画像
検査室	放射線 管理区域	放射線 管理区域	高磁場遮蔽	放射線 管理区域	特殊な検査室 不要
患者への 侵襲性	放射線被曝	放射線被曝	被曝なし	放射線被曝	被曝なし
トレンド	・低線量化	・低線量化 ・高速化 ・高分解能化	・高分解能化 (高磁場化) ・機能画像 ・各種造影剤 の開発	・各種造影剤 の開発 ・分子イメージ ング ・マルチモダリ ティ化	・高分解能化 ・造影剤による 機能診断
コスト	¥650 (単純撮影)	¥8,500 (マルチスライス型)	¥13,000 (1.5T以上)	¥75,000 (PET)	¥3,500

# 超音波の基礎

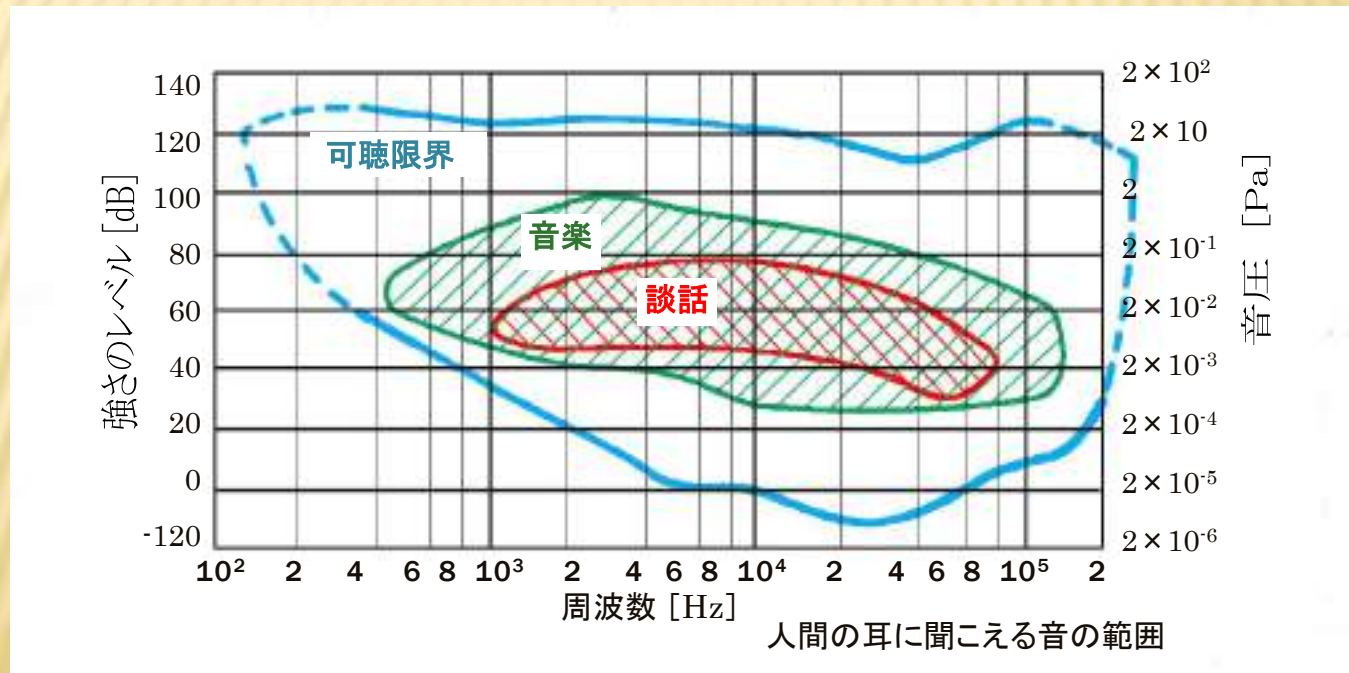
## 超音波の特徴

### ➤ 超音波の定義

一般には 「周波数が高くて耳に聞こえない音」

より厳密には 「聞くことを目的としない音波」

音波 とは 弾性と慣性によって起こる波動



超音波技術便覧(日刊工業新聞社)より

# 超音波の基礎

## 超音波の特徴

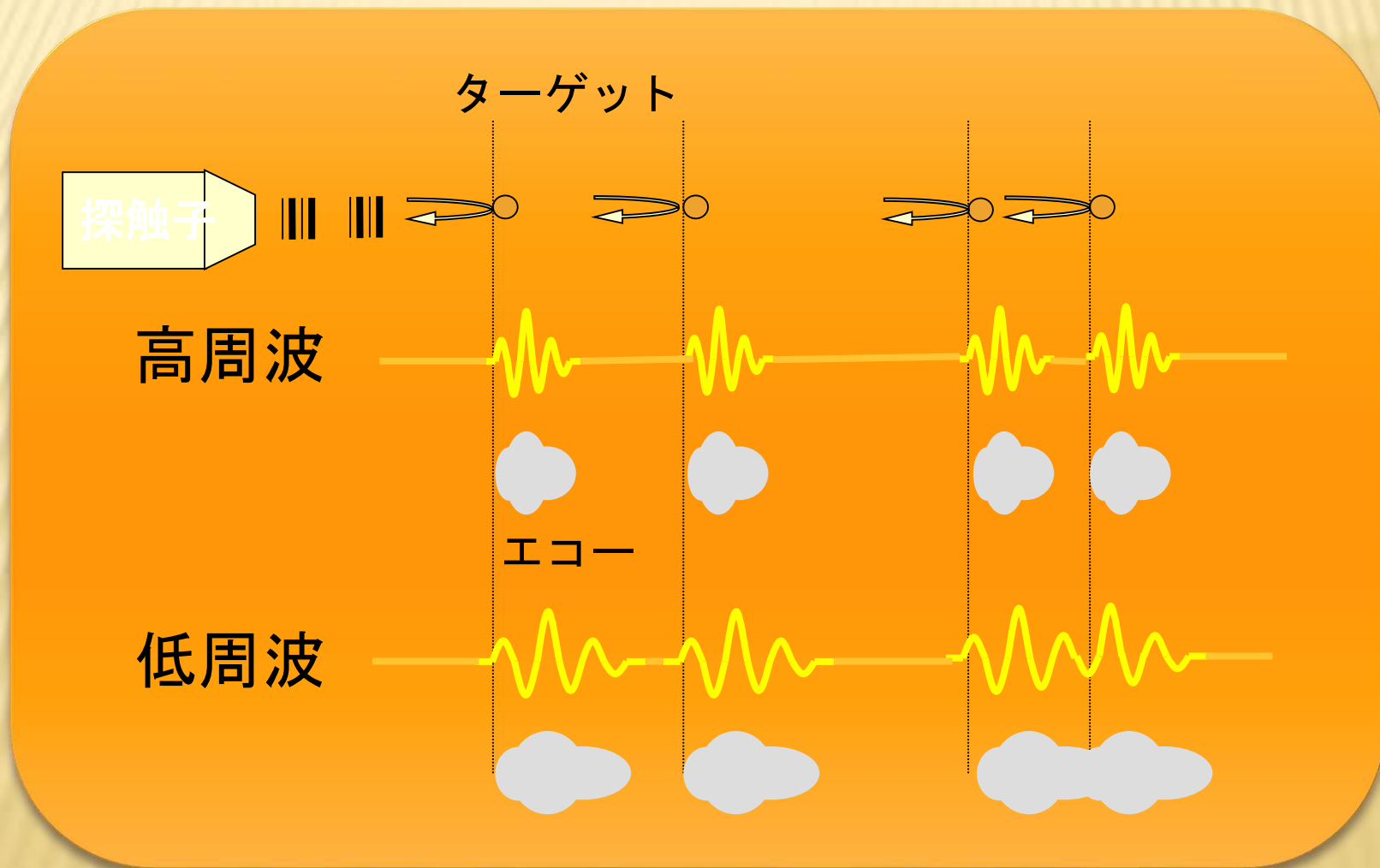
---

- 波長が短い
  - + 短いパルスが得られる
  - + 指向性が鋭い
  - + 直進する(幾何光学的扱いが可能)
- 電波、光に比べて生体内減衰が少ない
  - + 減衰係数は  $\sim 1\text{dB} / \text{cm} / \text{MHz}$
- 大きな強度が得られる
  - + 治療等に利用できる

# 超音波の基礎

## 超音波の特徴

- 短いパルス ⇒ 距離分解能向上

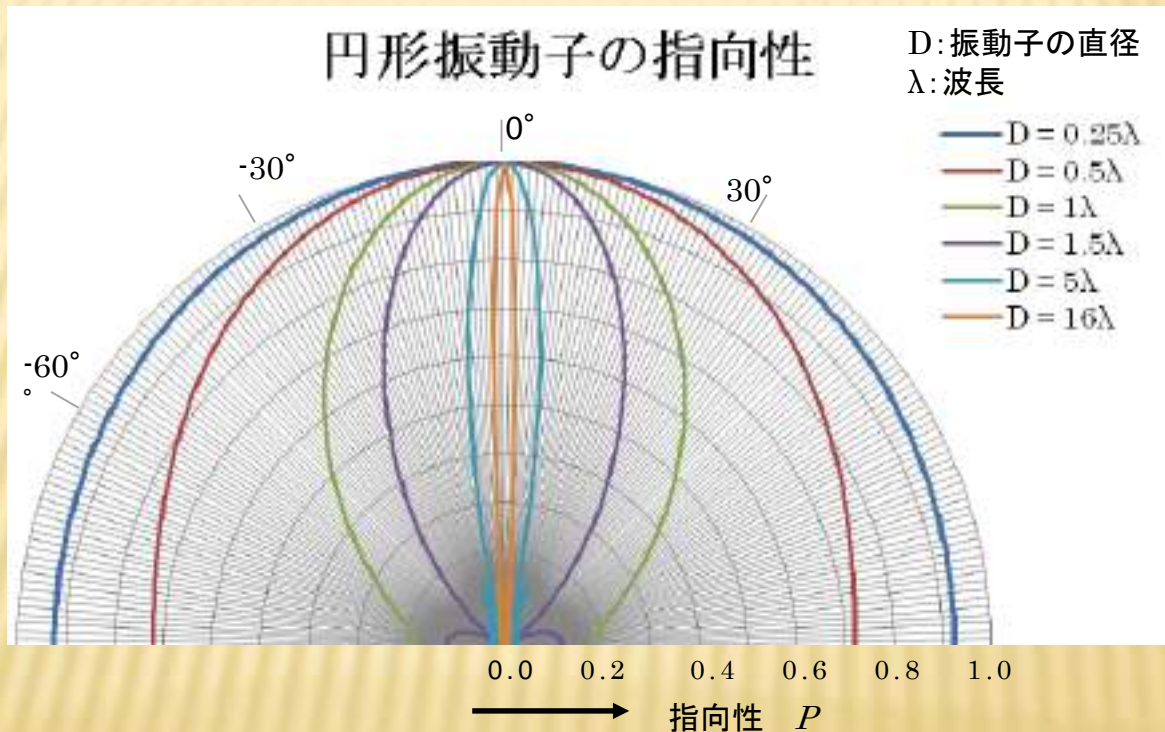


# 超音波の基礎

## 超音波の特徴

- 鋭い指向性

周波数 2.4MHz (波長  $\lambda = 0.625\text{mm}$ )  
振動子直径  $D: 10\text{mm}$  }  $D = 16\lambda$



指向性  $P(\theta) = 2 J_1(\pi (D/\lambda) \sin(\theta)) / (\pi (D/\lambda) \sin(\theta))$



# 超音波の基礎

## 超音波の医学での応用

---

### ➤ 通信・計測的応用

- 超音波診断装置
- 超音波顕微鏡

パルスエコー法  
ドプラ法  
透過法

### ➤ エネルギー的応用

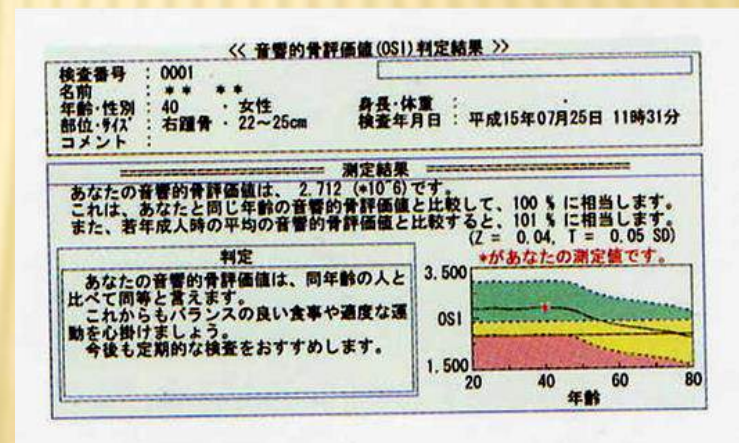
- 超音波メス
- 結石破碎装置
- ネブライザー
- 遺伝子導入 (Sonoporation)

# 透過法を用いた装置の例



超音波骨評価装置

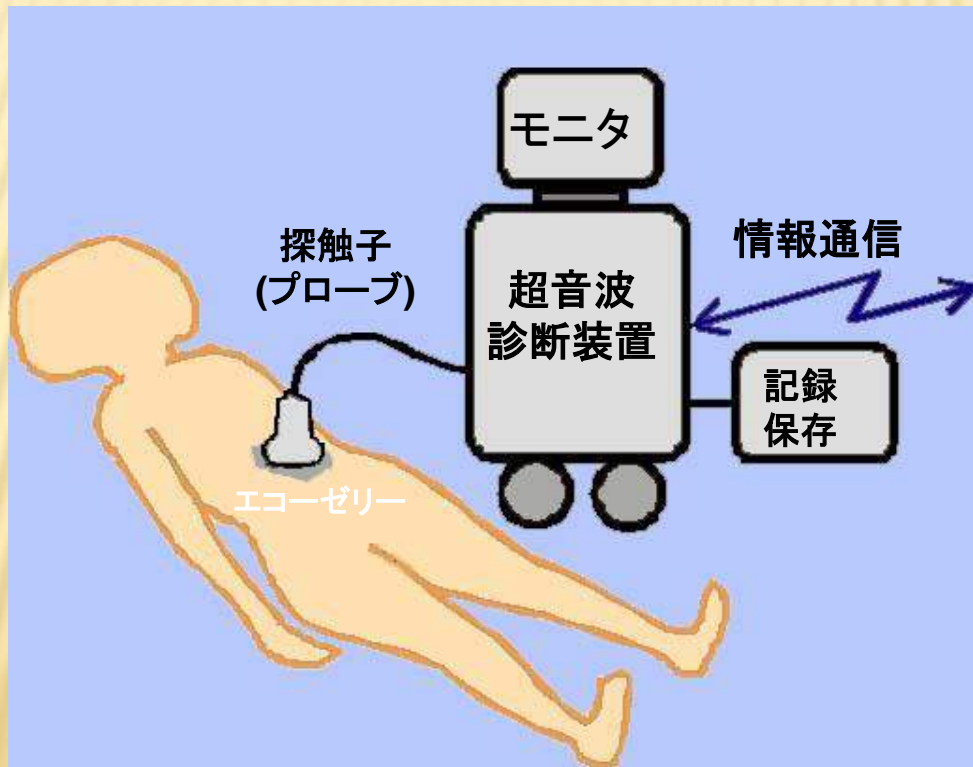
AOS-100NW



# 超音波診断装置

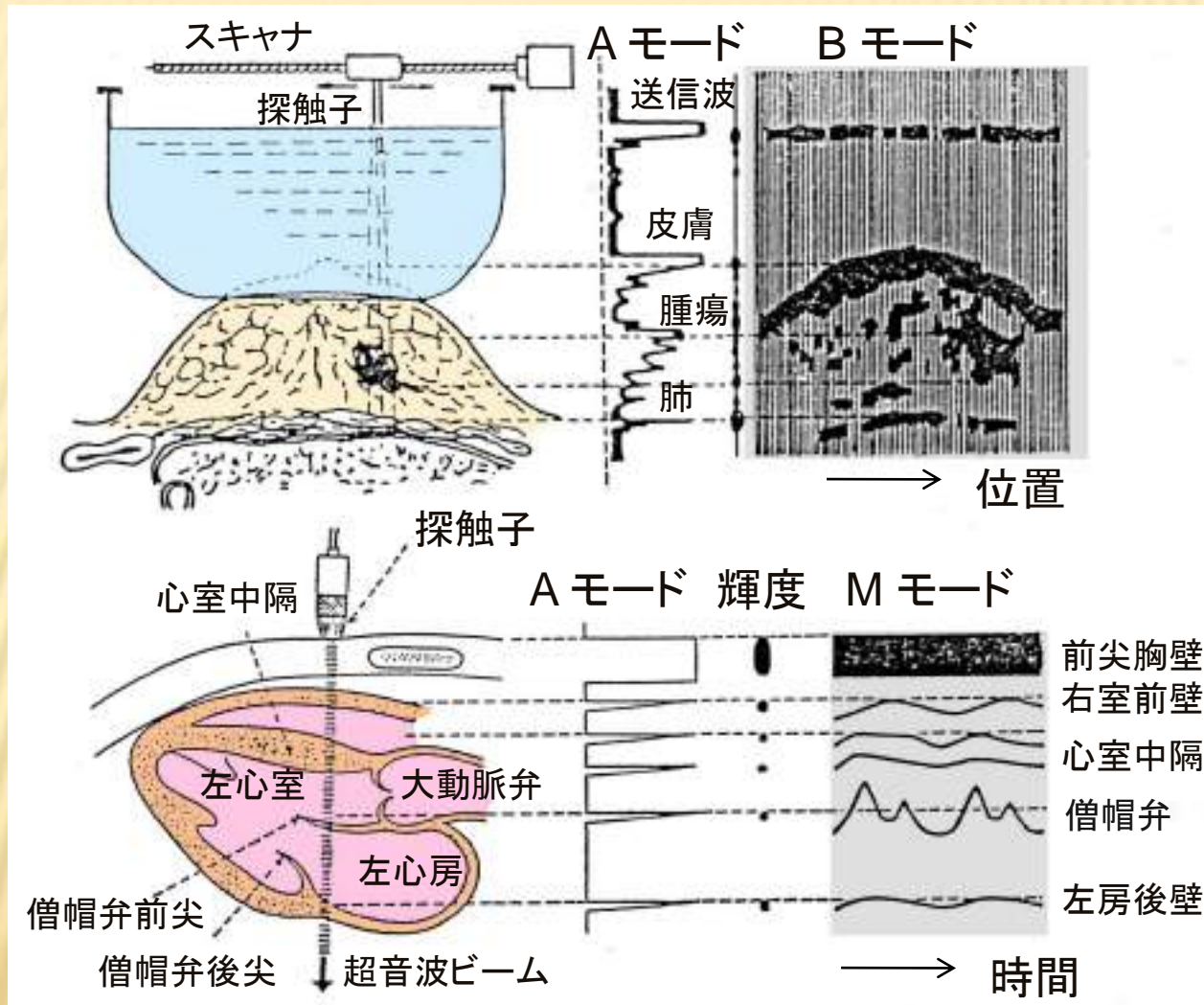
## 特徴

- 非侵襲的に、リアルタイムの動画が得られる
- 血流情報など、臓器の動きが診断できる
- 装置が比較的安価

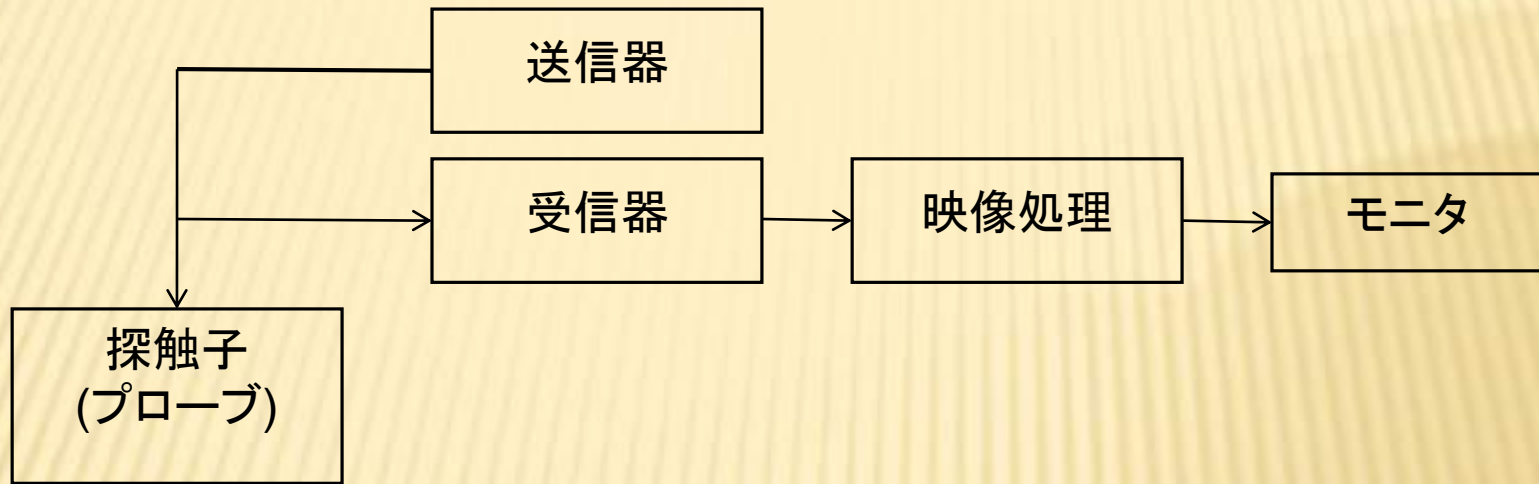


# 超音波診断装置

## パルスエコー法の原理

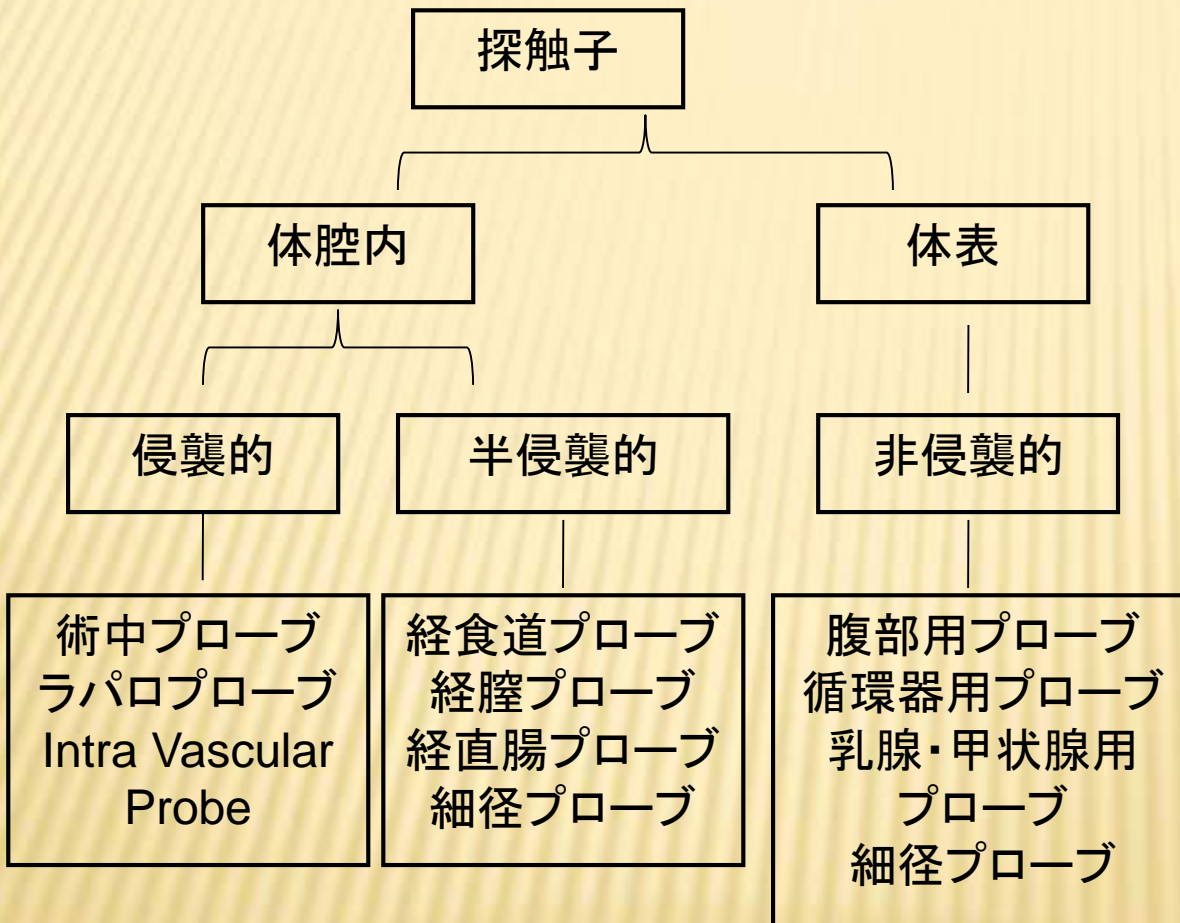


# 超音波診断装置 基本構成



- 探触子: 電気音響変換
- 送信器: 送信ビームフォーミング
- 受信器: 増幅、受信ビームフォーミング(整相加算)、検波
- 映像処理: 走査変換(超音波走査からTV走査への変換)

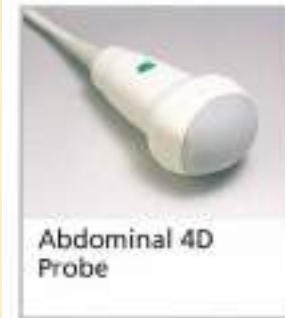
# 超音波診断装置 探触子(プローブ)



Convex Array Probe



Linear Array Probe



Abdominal 4D Probe



Transvaginal 4D Probe



Phased Array Sector Probe



Micro Convex Probe



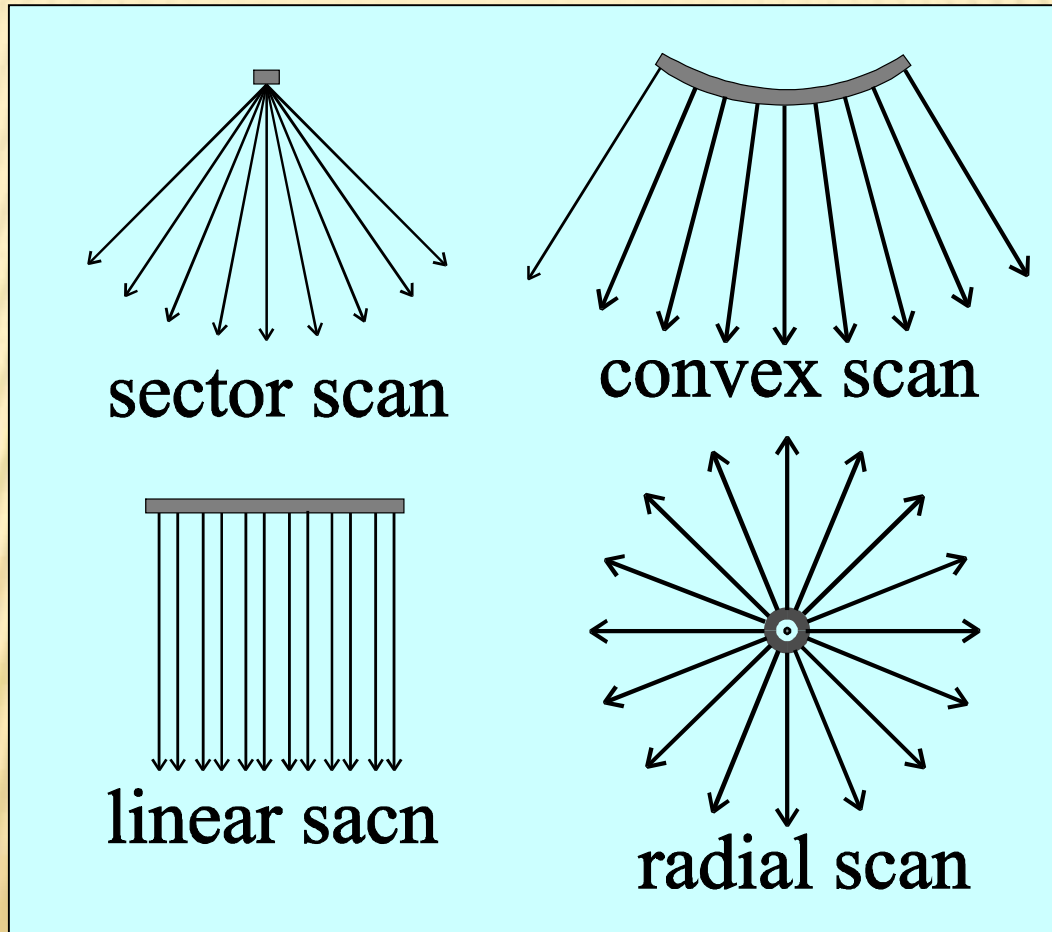
Annular Array Probe



Mechanical Radial Probe

# 超音波診断装置 探触子(プローブ)

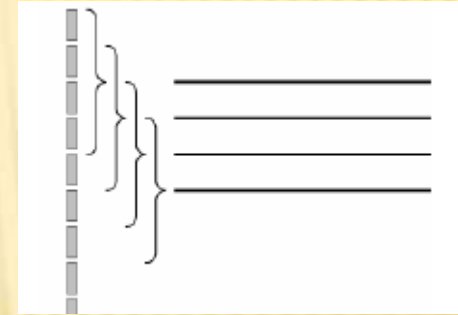
## 超音波ビームの走査形態



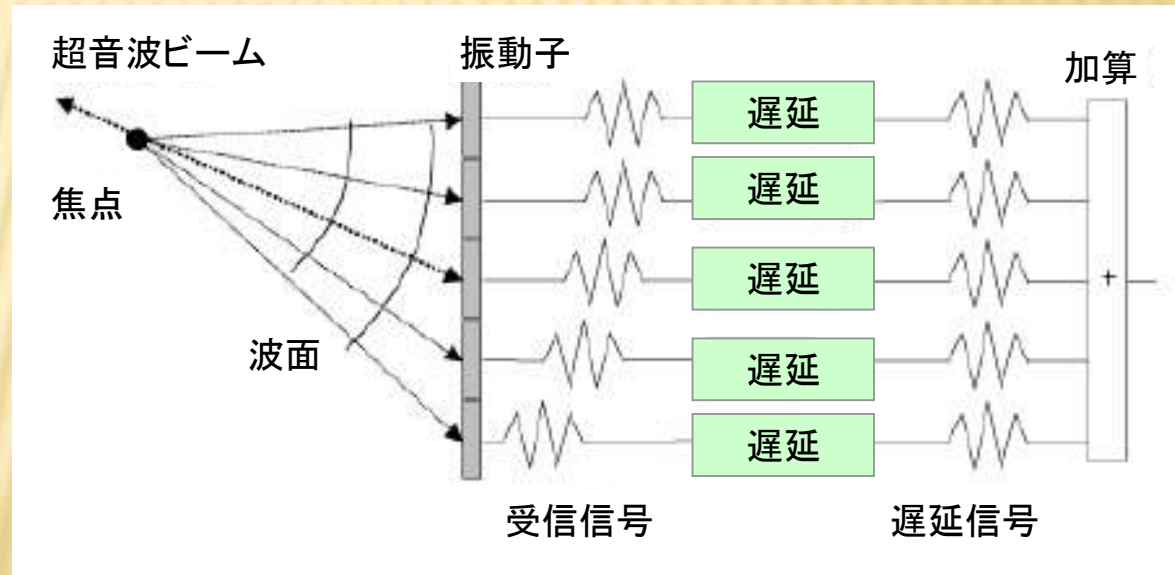
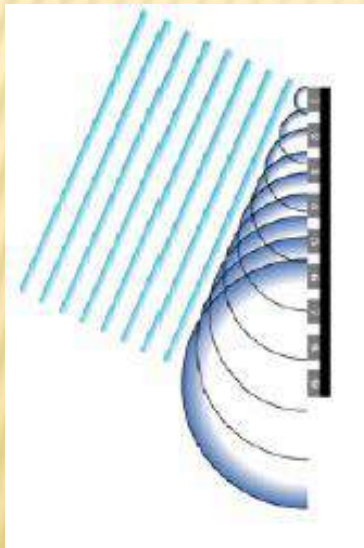
# 超音波診断装置

## ビームフォーミング(フォーカシング)

### 電子走査の原理



リニア、コンベックス走査



セクタ走査 およびフォーカシング



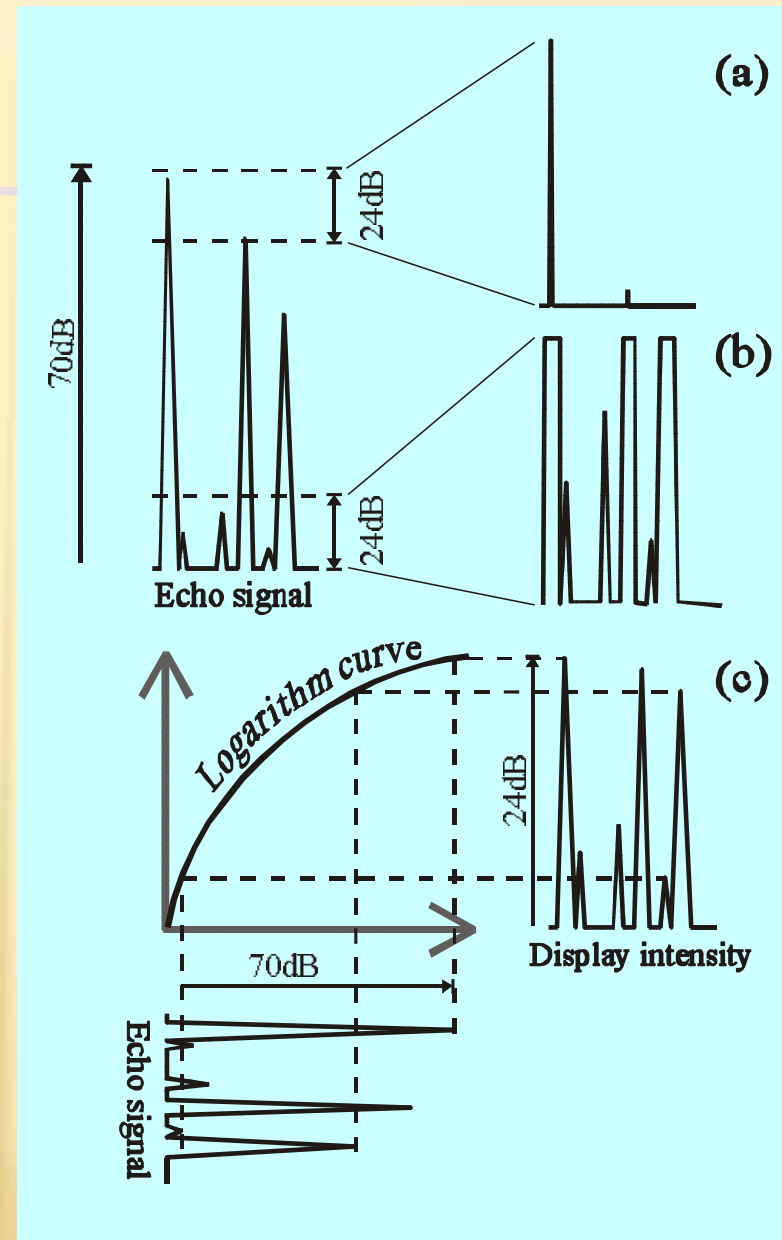
# 超音波診断装置

## 受信信号処理 (対数増幅)



Bモード画像

- ・受信信号のダイナミックレンジは極めて広い。
- ・これをモニタで認識できるように圧縮して表示する。



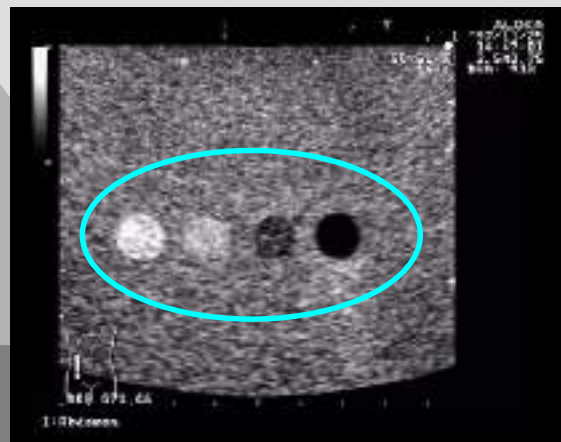
# 超音波診断装置 技術の進歩

## 分解能

空間分解能



コントラスト分解能



時間分解能

# 超音波診断装置 技術の進歩

## ➤ 性能の向上

- **空間分解能** (距離方向、スライス方向、方位方向)  
振動子の広帯域化 (微細加工技術、圧電材料)  
ビームフォーミングの高精度化 (電子回路の高集積化)
- **時間分解能**  
走査の高速化 (機械走査から電子走査)  
信号の多重化 (多方向同時送受信)
- **コントラスト分解能**  
対数増幅 (2値から多値へ)  
スペックルリダクション (アダプティブフィルタなど)

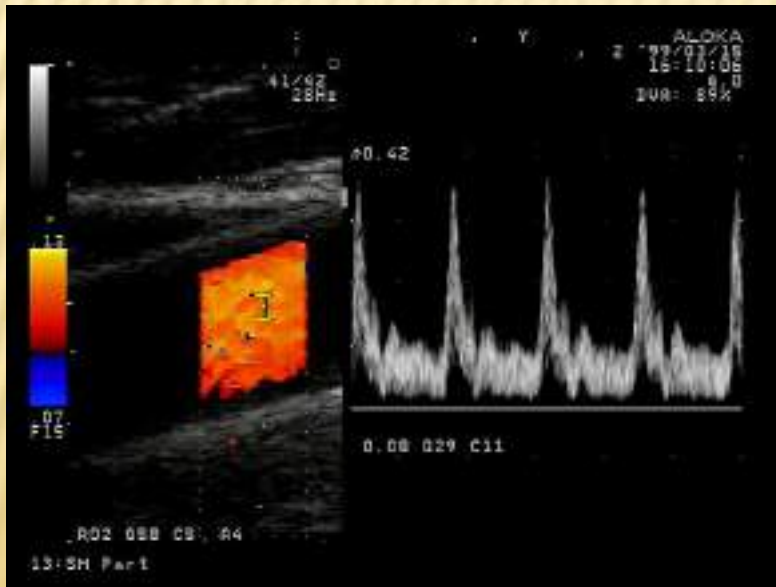
## ➤ 多次元化

1次元 (Aモード) ⇒ 2次元 (Bモード) ⇒ 3次元 ⇒ 4次元

# 超音波診断装置（ドプラ画像）

## ドプラ法の歴史

- 1842      ドプラ効果      J.C. Doppler  
“On the coloured light of the double stars and certain other stars of the heavens.”
- 1957      血流検出に応用      里村茂夫
- 1970      パルスドプラ      D.W. Baker
- 1982      カラードプラ      滑川孝六



# 超音波診断装置

## ドプラ法の原理

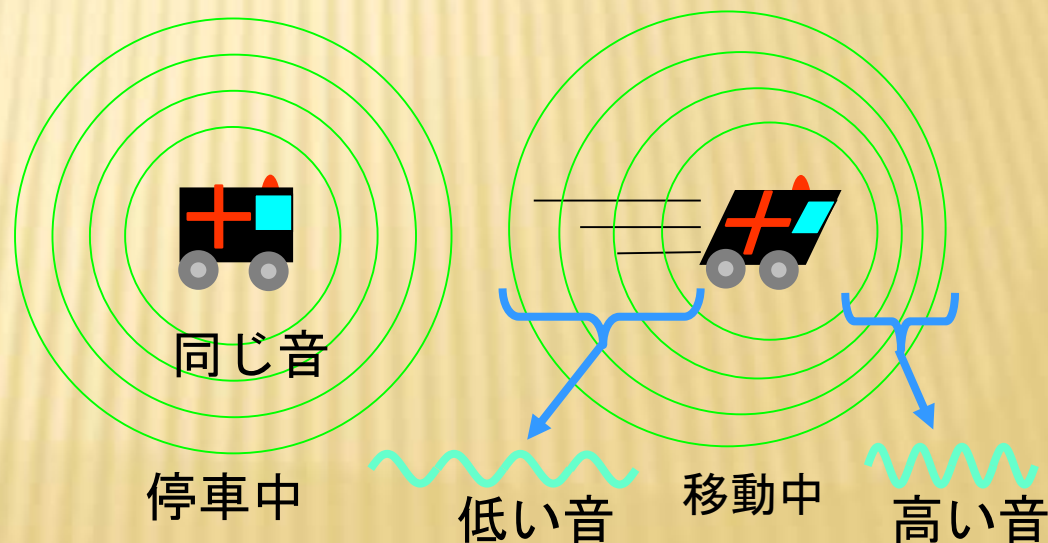
### ➤ ドプラ効果

血球が音源に向かって速さ  $v$  で移動していると

- 血球が感じる周波数は  $(c+v)/c$  倍
- 血球から後方に散乱される音波の周波数は  $c/(c-v)$  倍
- 血球からのエコー信号の周波数は  $(c+v)/(c-v)$  倍

ドプラ周波数  $f_d$  は

$$f_d = f_s \frac{c+v}{c-v} - f_s$$
$$\approx \frac{2v f_s}{c}, \quad c: \text{音速}$$

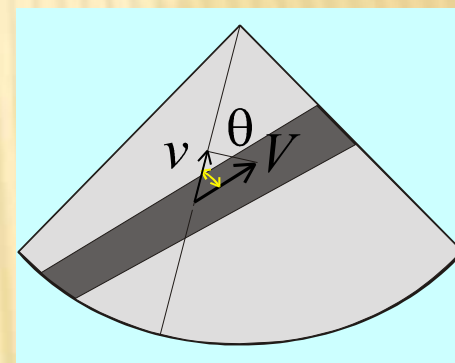


# 超音波診断装置 ドプラ法の原理

## 角度補正による流速測定

移動速度  $v$  は超音波ビーム方向の成分である。

$$f_d = \frac{2v}{c} f_s = \frac{2V \cos \theta}{c} f_s$$



## ドプラ解析による速度計測

ドプラ周波数を計測すれば移動速度が分かる。

$$v = \frac{c}{2f_s} f_d = \frac{\lambda}{2} f_d, \quad V = \frac{v}{\cos \theta}$$

# 超音波診断装置

## ドプラ法の分類

### ➤ ドプラ法の分類

- スペクトラムドプラ

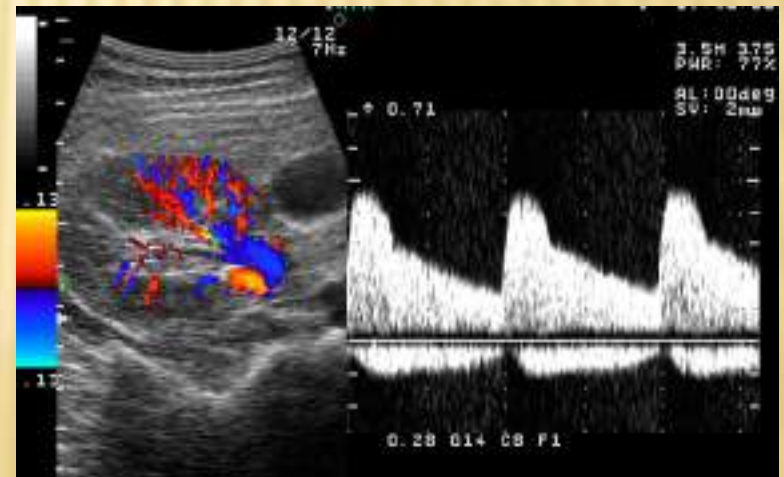
PW (Pulse Wave)ドプラ

CW (Continuous Wave)ドプラ

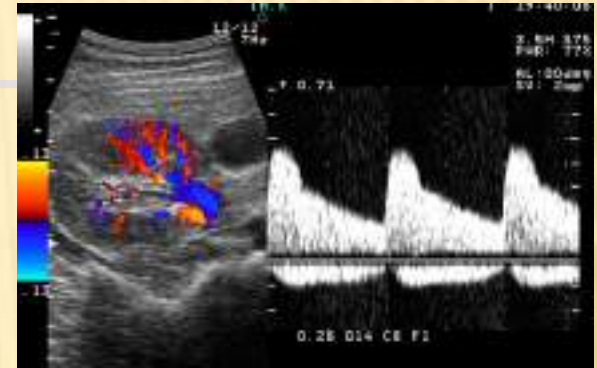
- カラードプラ [血流／組織]

速度モード

パワーモード

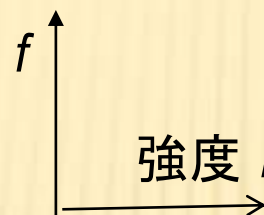
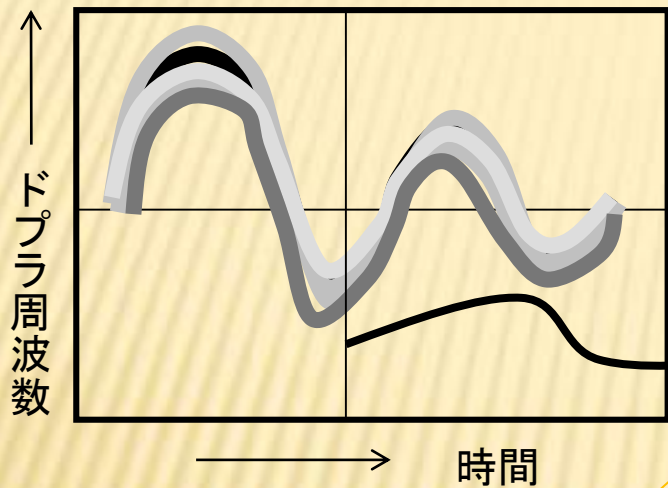


# 超音波診断装置 ドプラ法の分類



## ➤ スペクトル表示とカラーモード表示

スペクトルドプラ

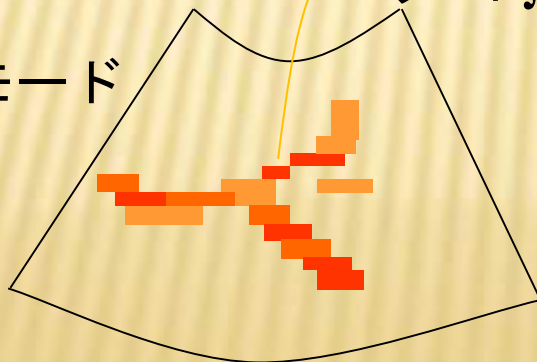


平均周波数:

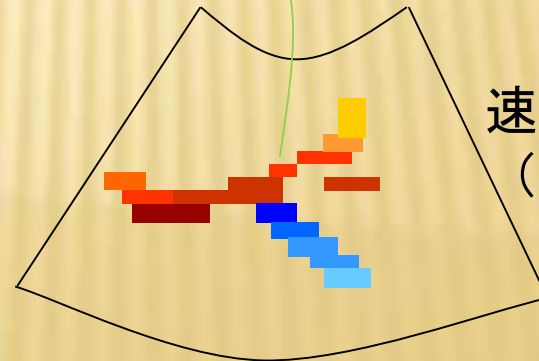
$$f_m = \int f P(f) df / \int P(f) df$$

パワー:  $\int P(f) df$

パワーモード

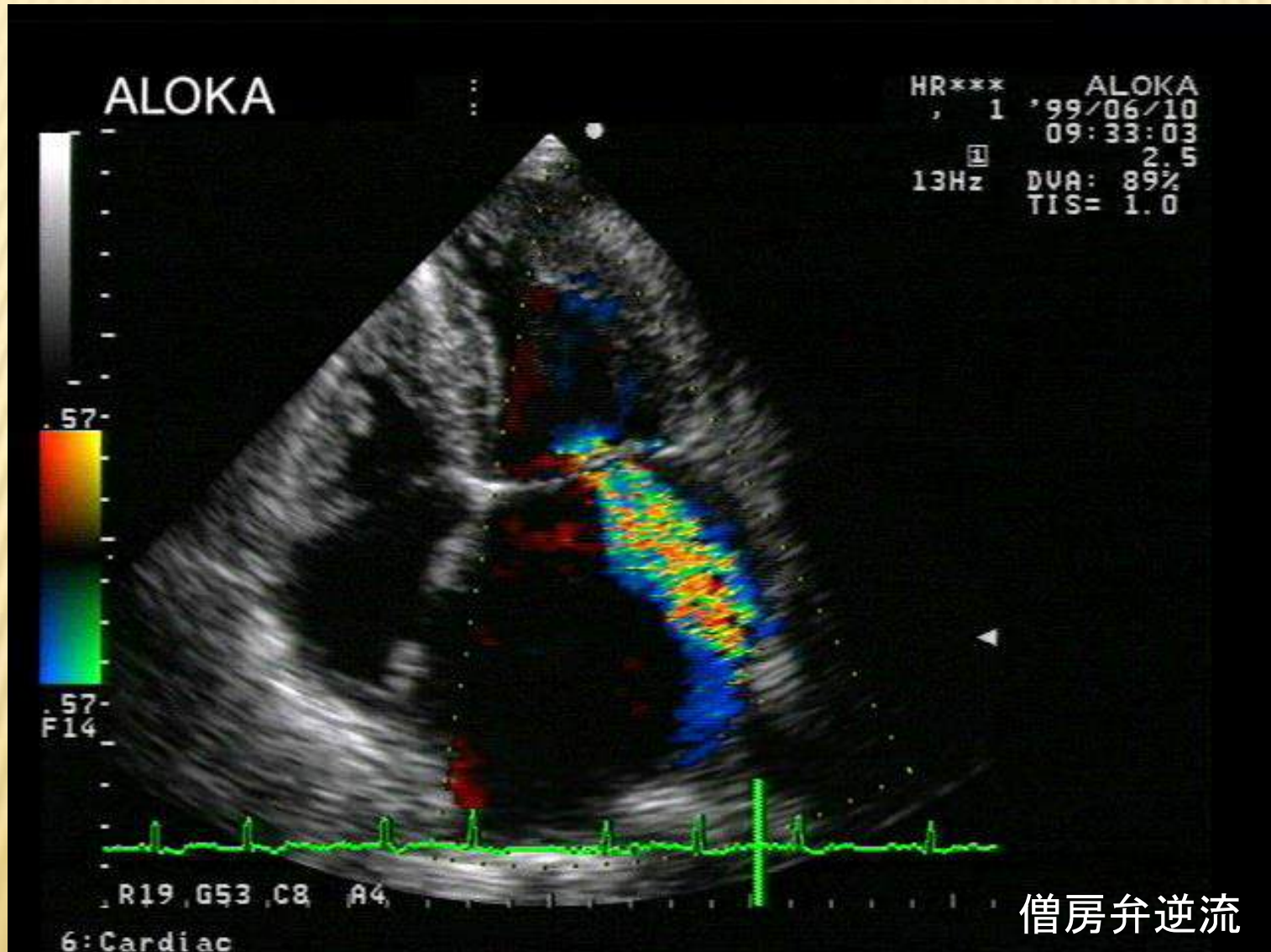


速度モード  
(カラー Doppler)





# 超音波診断装置 ドプラ断層法の臨床例



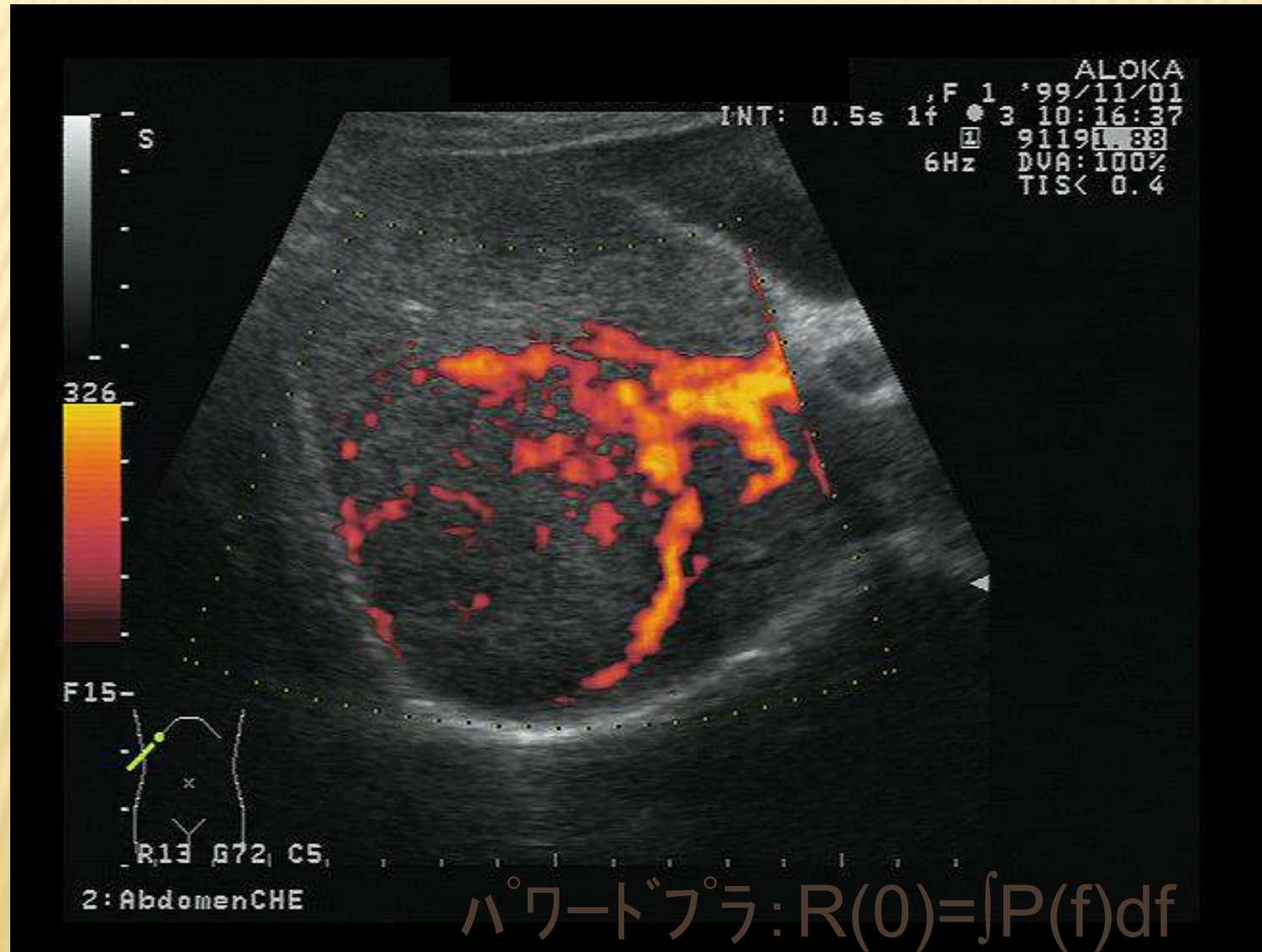
# 超音波診断装置 ドプラ断層法の臨床例



胎児心臓

# 超音波診断装置

## パワードプラの例



# 超音波診断装置

## カラードプラの応用

### ➤ Tissue Doppler Imaging (TDI)

- カラードプラの速度表示モードを利用し、組織の変位速度を表示する。

応用：心筋組織の変位速度の定量化  
虚血性心疾患の診断

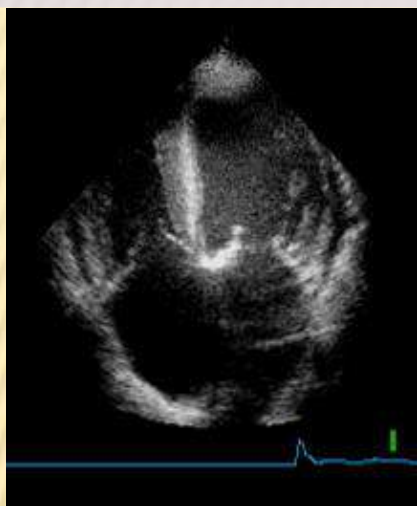
- Strain Imaging, Strain Rate Imaging

歪  $:\varepsilon = \partial\xi / \partial z$

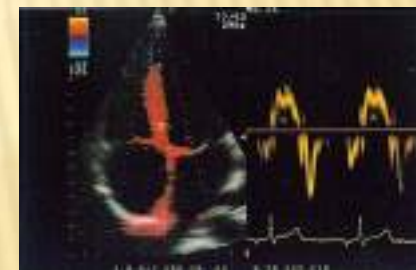
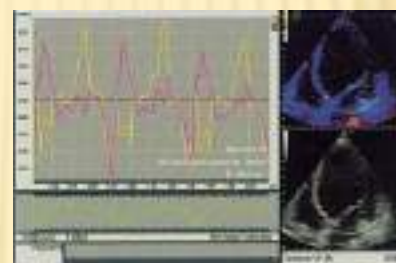
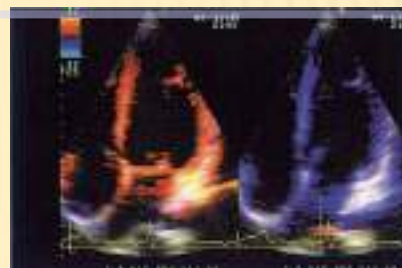
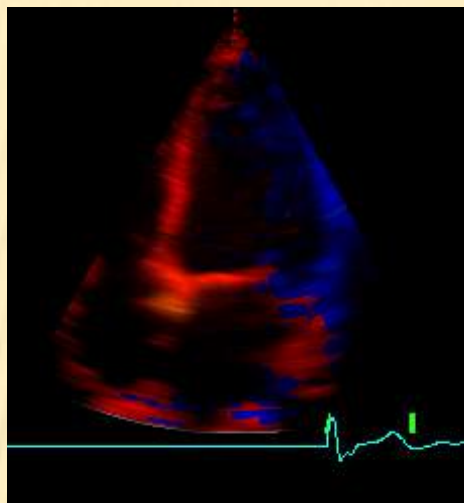
歪速度  $:\partial\varepsilon / \partial t = \partial(\partial\xi / \partial z) / \partial t = \partial u / \partial z$

# 超音波診断装置

## TDI の画像例



TDI : 左室長軸像

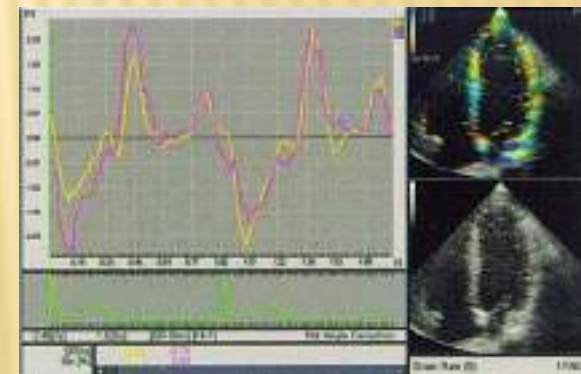
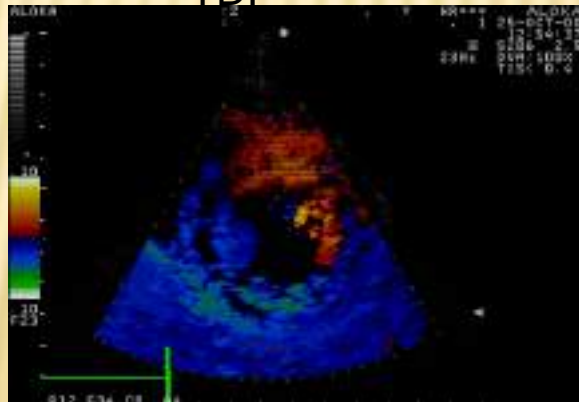


TDI 速度解析

Bモード



TDI



Strain 解析

TDI : 左室短軸像

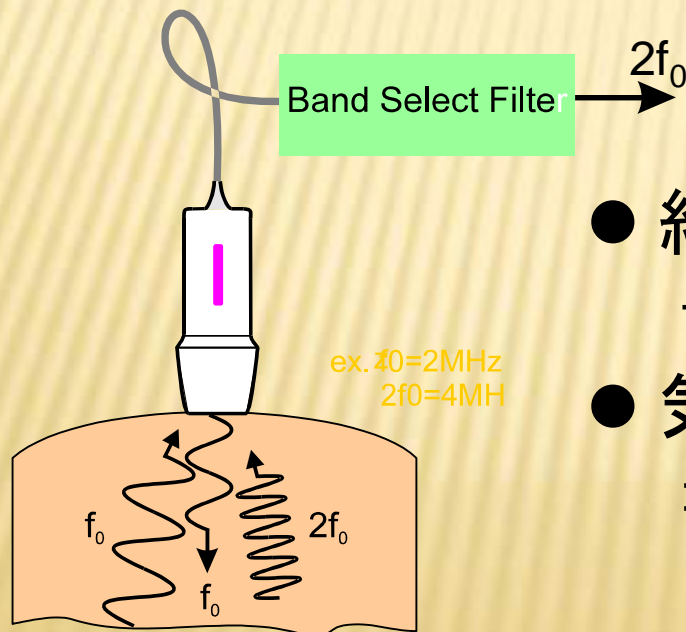
# Harmonic Imaging

## ➤ Harmonic Imagingとは

### ● 高調波を映像化する技術

「超音波が生体組織などの媒質中を伝搬する際に媒質の非線形性から発生する高調波を利用した映像法」

### ● 高調波は、組織、気泡から発生する。



### ● 組織からの高調波：『伝搬ひずみ』

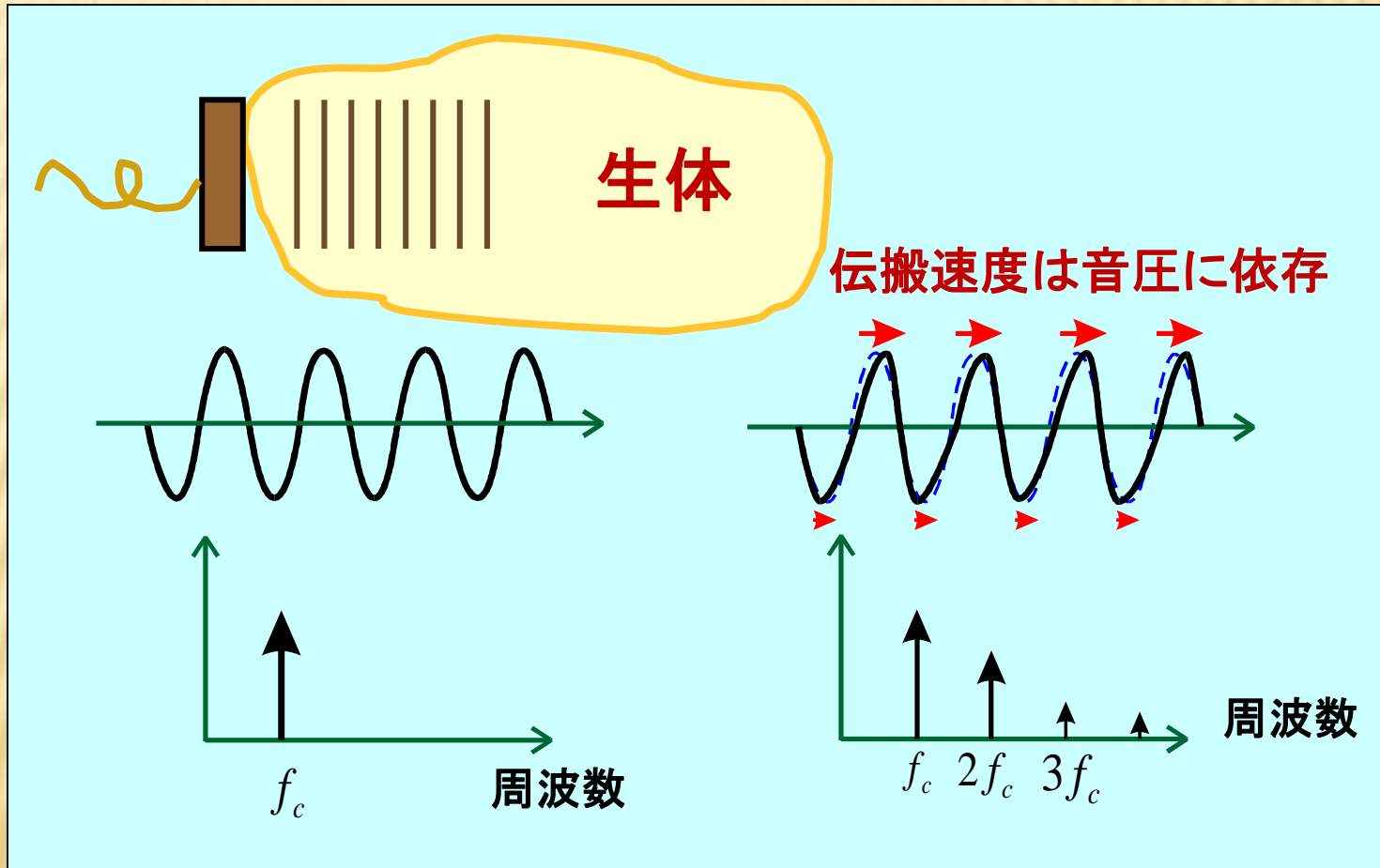
ティッシュ ハーモニックイメージング (THI)

### ● 気泡からの高調波：『非線形性』

コントラスト ハーモニックイメージング (CHI)

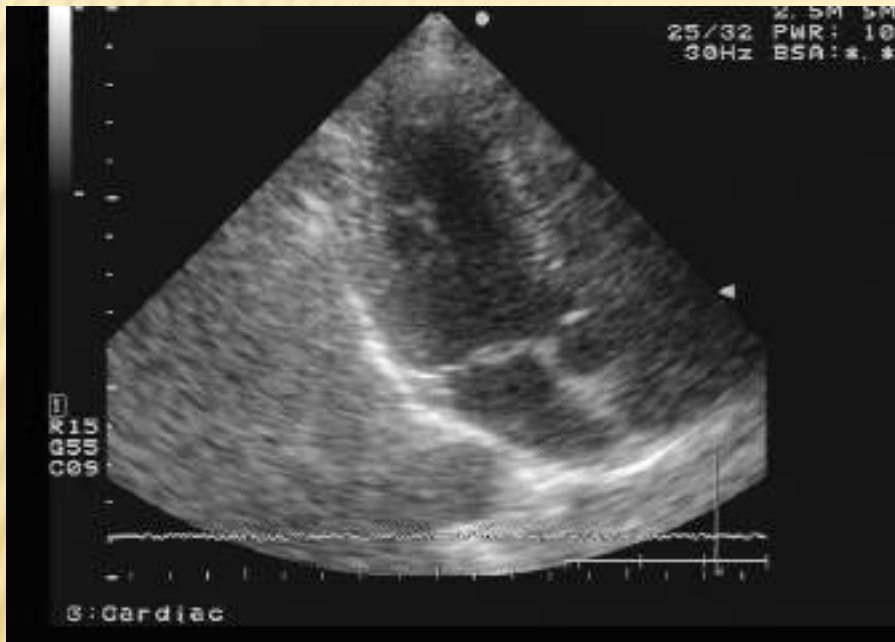
# Tissue Harmonic Imaging

## ➤ 高調波の発生



# Tissue Harmonic Imaging

## 組織ハーモニクイメージングの有効性



Conventional B-Mode



Tissue Harmonic Imaging



# Tissue Harmonic Imaging

## 組織ハーモニックイメージングの有効性



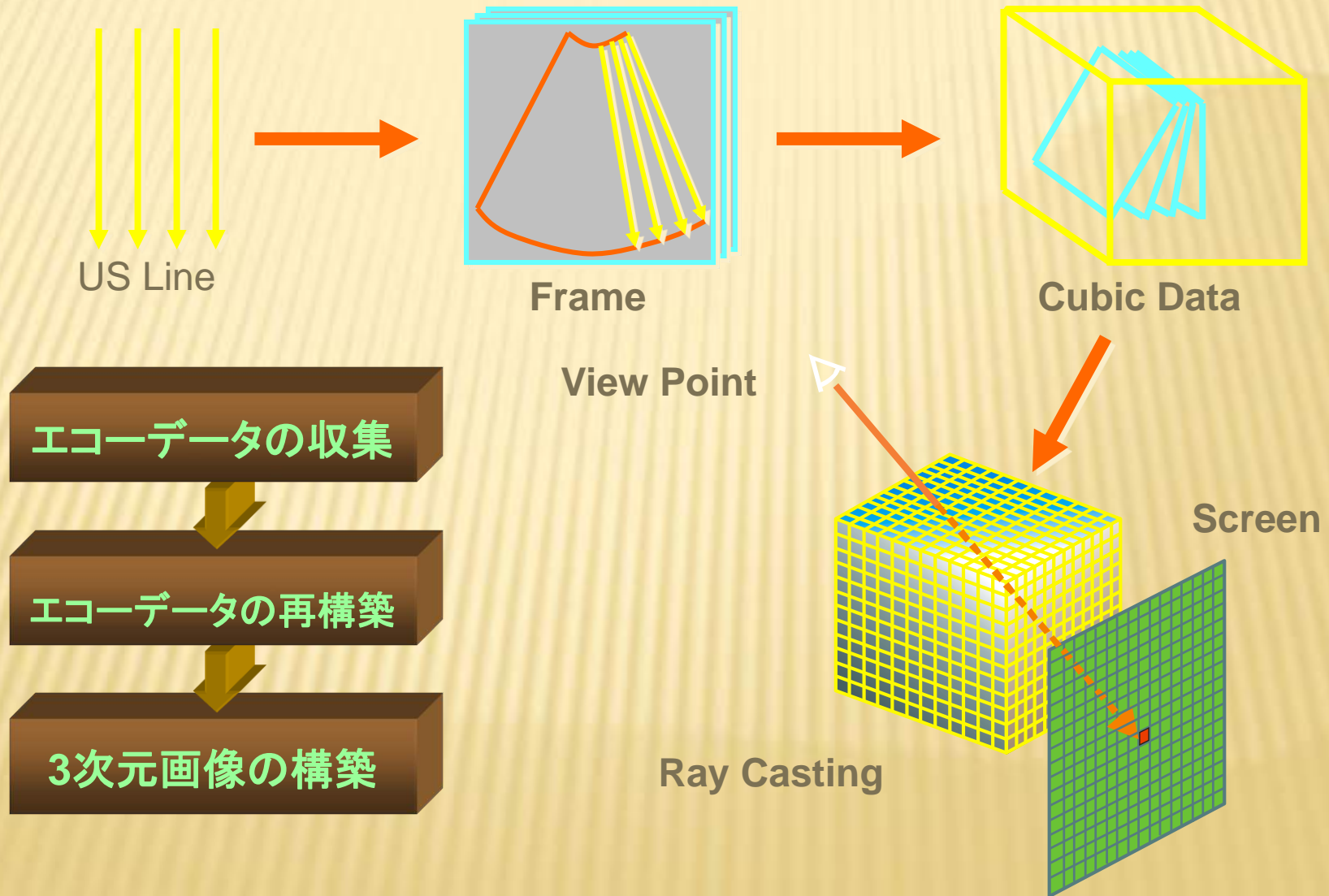
胆嚢ポリープ  
胆嚢内の抜け



腹部大動脈  
大動脈壁の描  
写力

# 3次元表示

## ➤ 3次元画像の構築



# 3次元表示

## ➤ 3次元表示の種類

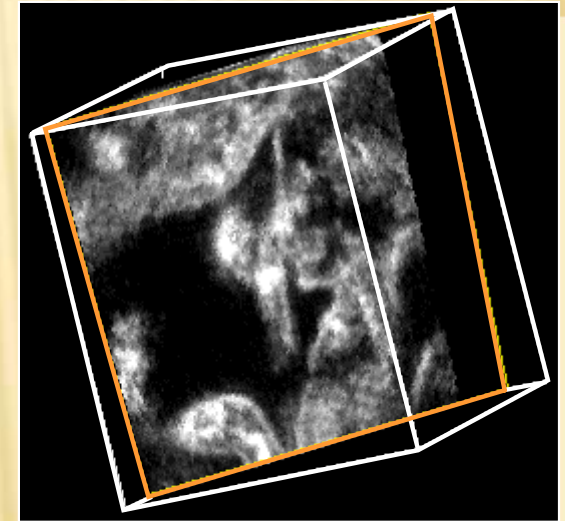
透過表示



表面表示



断面表示



## ➤ 3D表示の有用性

- ・ わかり易い画像  
全体が形状が把握しやすい。
- ・ 検査での見落とし防止

Dr. Dhiraphongs Charoenvidhya and  
Dr. Boonchai Uerpairojkit  
Chulalongkorn University, Thailand  
Dr. Kazunori Baba, Tokyo University

# 3次元表示

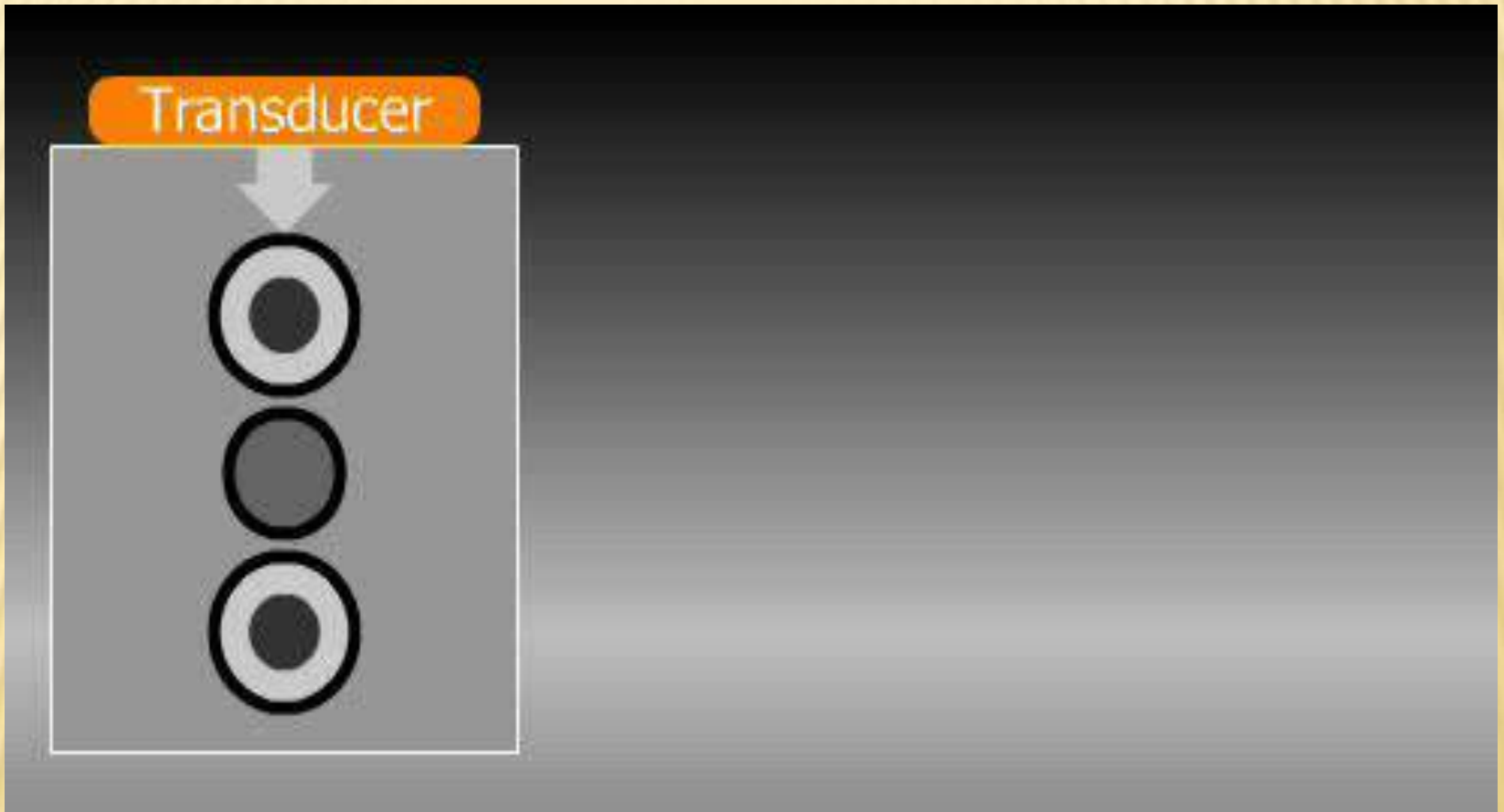
## 3次元画像の例



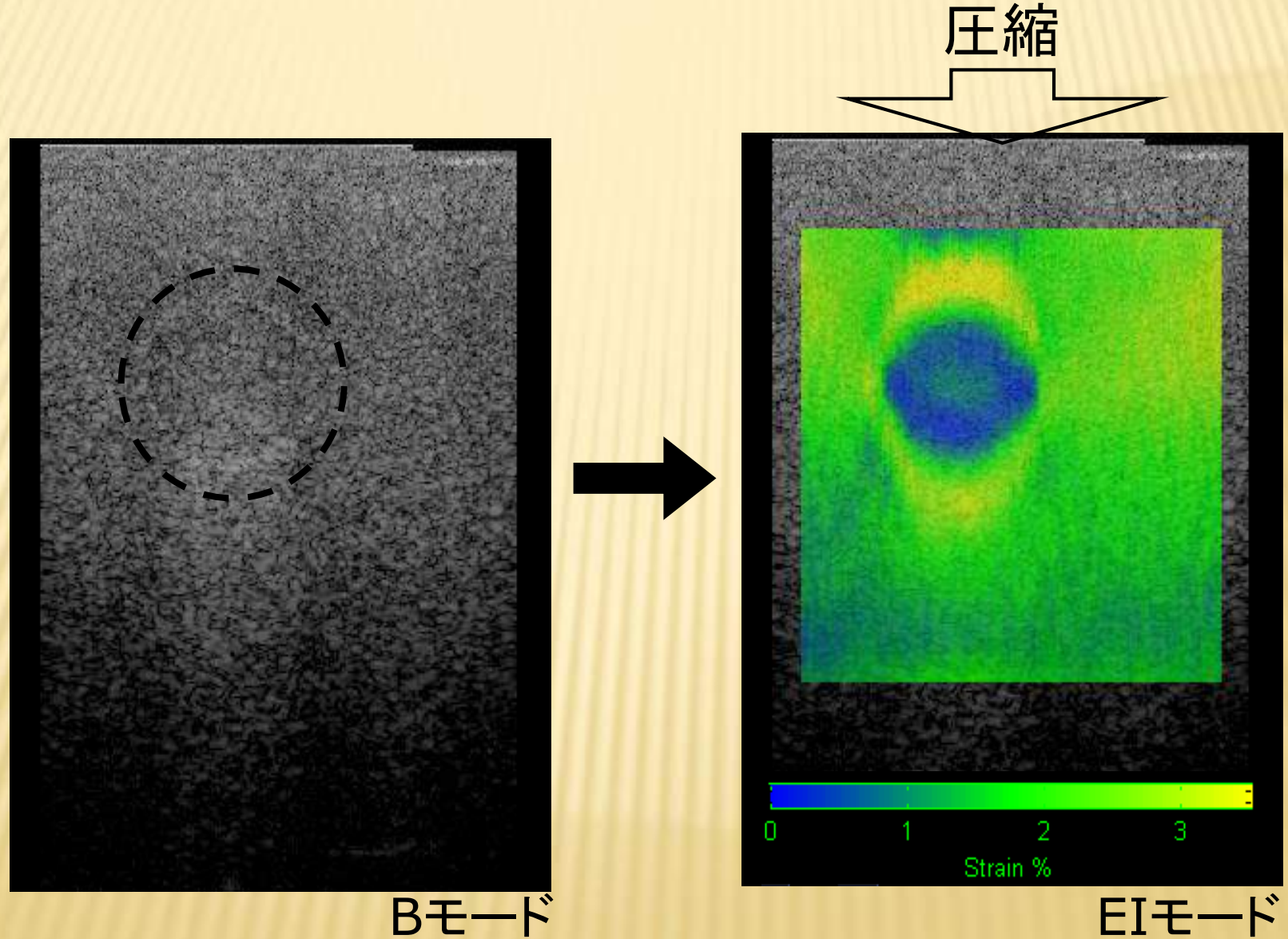
# 弾性イメージング（組織の性状診断）

---

原理：模式図



# 弾性イメージング (ファントム像)

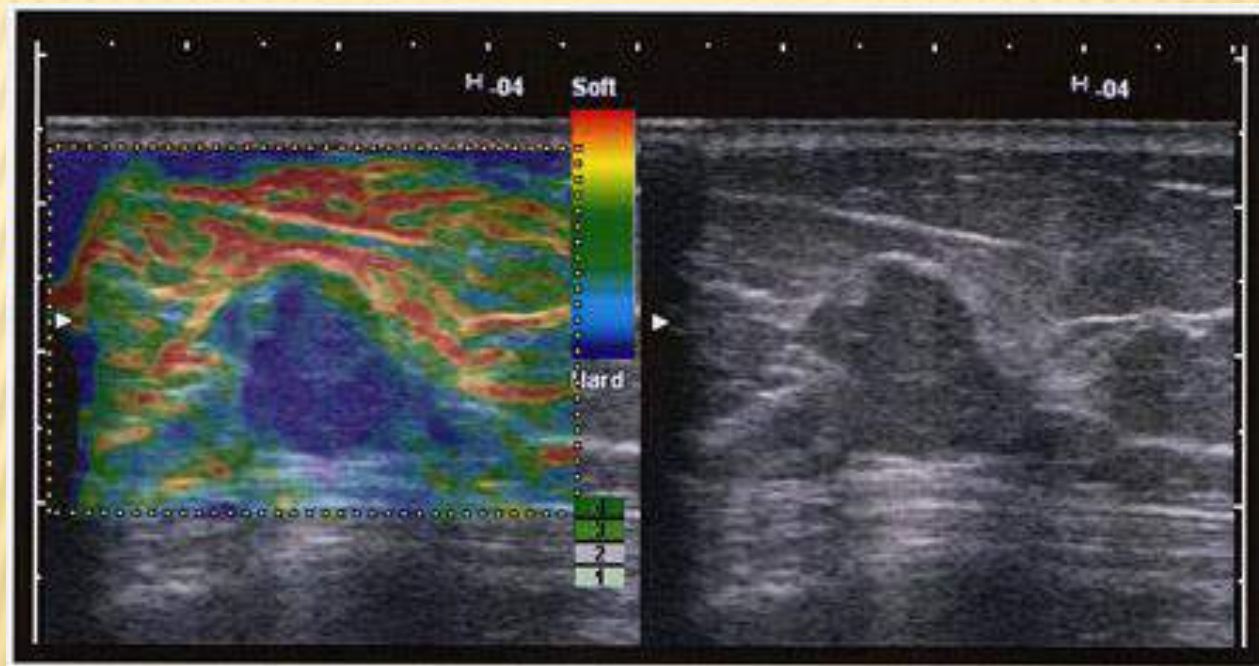


# 弾性イメージング（組織の性状診断）

## 乳がん

[http://www.innervision.co.jp/041products/2008/p0804\\_04son.html](http://www.innervision.co.jp/041products/2008/p0804_04son.html)

INNERVISION記事, 日立メディコ社製



# 超音波治療

## ✕ 集束型強力超音波

(HIFU: High Intensity Focused Ultrasound)  
前立腺肥大症治療



[http://teikyo-urology.jp/ope/hifu\\_02.html](http://teikyo-urology.jp/ope/hifu_02.html)  
<http://www.focus-surgery.com/index.htm>

## ✕ MRIガイド下集束超音波治療

(MRgFUS: MR guided Focused Ultrasound)

子宮筋腫治療  
乳がん治療



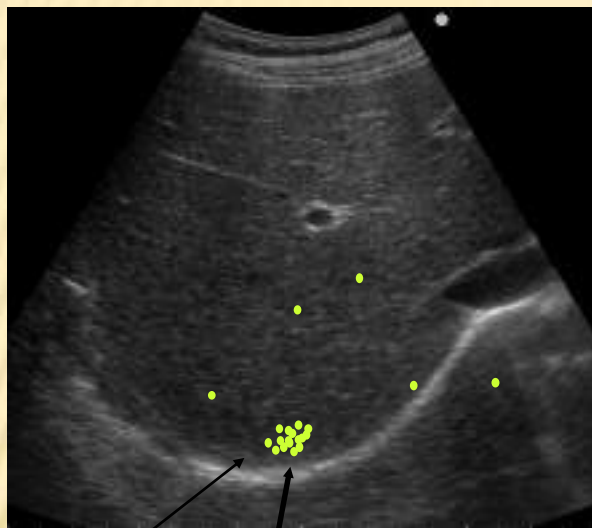
Courtesy of InSightec

<http://www.insightec.com/36-66-en-r10/MRgFUS-Technology.aspx>

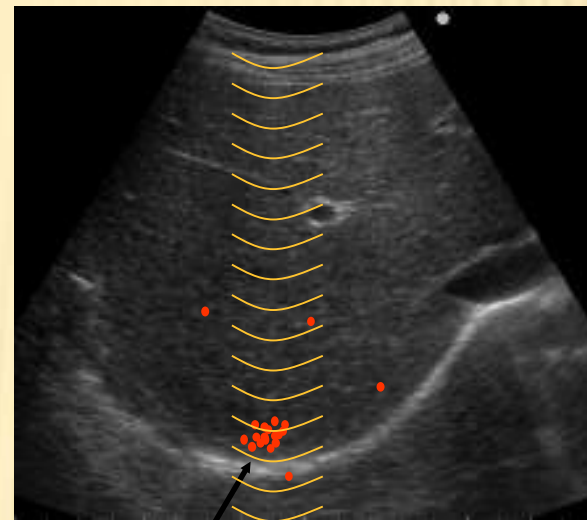


# 分子イメージングと治療

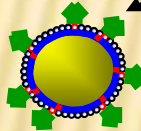
## 診断



## 治療

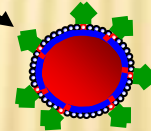


腫瘍  
領域



マイクロ／ナノバブル

CD147  
抗体



マイクロ／ナノカプセル

応用:

- DDS
- Sonication

NEDO 分子イメージング機器研究開発プロジェクト 06990125-0