

はじめに

医用超音波の講義を始めた頃、初めて医用超音波を学ぶ学生向けに基礎的なことからわかりやすく解説され、かつ、所定の時間の講義に対応する適切にまとまった教科書あるいは参考書が見当たらなかった。学生にとっては、やはり適切な教科書があるほうが勉強しやすいであろうと考え、独自に教科書を作成して使用してきた。

年々改訂を行い、新しい技術開発にも対応できるようにしてきたが、今般国際医療福祉大学以外の学生にも利用していただきたいと考え、いままでのものに改訂を加えてコロナ社から出版していただくことになった。

タイトルに「診療放射線技師を目指す学生のための」としたのは本書の対象を明確にするためである。「知識に命を吹き込むのはなぜかを理解することだ」という考えのもとで、講義では単に知識を教えるのではなく、なぜそうなるのかという「なぜ」を理解してもらうことを重視してきたが、本書でも可能な範囲で「なぜ」を考えられるよう配慮したつもりである。

本書は超音波診断装置の中の医用機器工学に関する部分の教科書という位置づけであるため、医用超音波検査学・診断学は扱っていない。医用超音波検査学を中心に、画像解剖学、画像診断学や医用画像学関連の実験等で学び、超音波、超音波診断装置、超音波検査および超音波診断について総合的に理解を進めていってほしい。

各章末には演習問題を掲載している。基礎的事項の確認や知識の応用力の確認に活用してほしい。それらは、診療放射線技師国家試験への対応にも役立つはずである。

本書の作成に当たって日本超音波医学会名誉会員である竹原靖明先生、および、東芝メディカルシステムズ株式会社より数々のデータのご提供をいただきました。心より感謝申し上げます。

2015年1月

佐々木 博
飯沼 一浩

目 次

1. 超音波と超音波診断法

1.1 音波と超音波	1
1.2 超音波診断法の原理 — 反射法	2
1.3 超音波診断法の特徴	2

2. 超音波の物理的基礎

2.1 音波と超音波	4
2.1.1 音波, 粒子変位, 粒子速度	4
2.1.2 縦波と横波	5
2.1.3 ひずみと音圧	5
2.1.4 正弦波	6
2.1.5 音速	7
2.1.6 パワーとエネルギー	9
2.2 音波の伝搬	10
2.2.1 波面, 平面波と球面波	10
2.2.2 ホイヘンスの原理	11
2.3 音波の反射, 透過, 屈折, 散乱, 減衰	11
2.3.1 固有音響インピーダンス	11
2.3.2 反射角と屈折角	12
2.3.3 どうして屈折が起こるのか	13
2.3.4 臨界角	13
2.3.5 屈折を利用した音波の集束: 音響	13
2.3.6 レンズ	13
2.3.7 反射と透過	15
2.3.8 散乱	16
2.3.9 減衰	17
2.3.10 減衰量	18
2.4 連続波とパルス波	20
2.4.1 波形とその周波数スペクトル	21
2.4.2 パルス波の伝搬距離と時間	22
2.5 超音波の発生と検出	23
2.6 音場と指向性	26
2.6.1 近距離音場と遠距離音場	26
2.6.2 遠距離音場の形	27
2.6.3 集束音場	30
2.6.4 アレイ振動子の音場	31
2.6.5 パルス波の音場	33
2.7 超音波ドブラ	34
2.7.1 ドブラ効果	34
2.7.2 超音波による血流速度の検出	36
2.7.3 連続波ドブラとパルスドブラ	38
2.7.4 折り返し (エリアシング) 現象	39
2.7.5 連続波ドブラとパルスドブラの特徴	39
演習問題	40

3. 表示モードと画像の生成法

3.1 Aモード, Mモード, Bモード	44
3.1.1 Aモード	44
3.1.2 Mモード	45
3.1.3 Bモード	45
3.2 グレースケール表示	46
3.3 Bモードの生成法	47
3.3.1 リニア走査, コンベックス走査のやり方	48
3.3.2 セクタ走査と電子偏向	48
3.3.3 電子集束	50
3.3.4 電子集束と音響レンズによる集束の組合せ	51
3.3.5 Bモードのリアルタイム性	51
3.4 2D ド プ ラ	52
3.4.1 カラー Doppler	52
3.4.2 パワー Doppler	53
3.4.3 組織 Doppler	54
演習問題	55

4. 超音波診断装置の構成

4.1 装置の全体構成	57
4.2 電子回路	58
4.2.1 CPU	58
4.2.2 送信系電子回路	58
4.2.3 受信系電子回路	59
4.3 操作パネル	60
演習問題	61

5. 分解能とS/N

5.1 空間分解能	63
5.1.1 距離分解能	63
5.1.2 方位分解能	65
5.2 濃度分解能	67
5.3 時間分解能	67
5.4 速度分解能	68
5.5 S/N (信号対雑音比)	70
演習問題	71

6. アーチファクトとその成因

6.1 サイドローブアーチファクト	72
-------------------	----

6.2	グレーティングローブアーチファクト	74
6.3	多重反射アーチファクト	75
6.4	ミラーアーチファクト	76
6.5	音響陰影と後方エコーの増強	77
6.6	外側陰影	79
6.7	屈折によるアーチファクト	79
6.8	スライス厚によるアーチファクト	80
	演習問題	81

7. 適用部位によるプローブの選択とその理由

7.1	適用部位と選択されるおもなプローブ	82
7.2	プローブの選択とその理由	83
7.2.1	腹部	84
7.2.2	胸部—心臓	84
7.2.3	体表	85
7.3	その他の各種プローブ	85
	演習問題	86

8. 医用超音波技術の進展

8.1	高調波イメージング (THI)	88
8.2	造影超音波	92
8.3	リアルタイム3次元表示	93
8.4	超音波エラストグラフィ	95
8.5	その他の最近の技術進歩	97
	演習問題	98

9. 超音波の安全性

9.1	強力超音波の医療応用	99
9.2	超音波の機械的作用と熱的作用	100
9.2.1	超音波の機械的作用	100
9.2.2	超音波の熱的作用	100
	演習問題	101

索 引		102
-----	--	-----

1. 超音波と超音波診断法

1.1 音波と超音波

われわれが話をしているときの声は咽頭で空気の振動を作り出し、それが耳に到達して声として認識されている。声は空気の振動が波として空気中を広がっていくもので、これは音波である。音波とは振動を伝えるもの（これを媒質という）が振動し、その振動が近接する媒質を振動させることをつぎつぎと繰り返すことで、波として伝わっていくことである。

単位時間当りの振動回数を周波数といい、単位はサイクル/秒 (cycle/s) あるいはヘルツ (Hz) で表される。

声はわれわれの耳で聞こえるが、周波数があるレベル以上高い場合や低い場合はわれわれの耳では聞こえなくなる。人間の耳に聞こえる周波数範囲の音を可聴音という。人間の耳には聞こえない、周波数の高い音波のことを超音波という。可聴音の周波数範囲は、個人差もあるがおよそ 16 Hz 以上 20 kHz 以下である (図 1.1)。

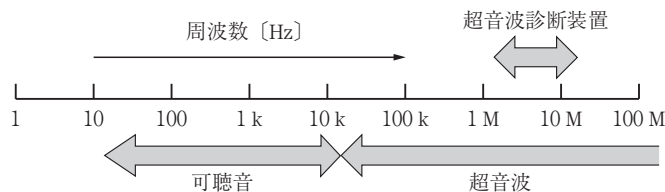


図 1.1 可聴音と超音波および超音波診断装置が利用する超音波の周波数帯

音波が伝わる速さは媒質によって異なる。空気中ではおよそ 340 m/s (より正確には $331.5 + 0.6T$: T は気温) で、これを時速に直すと 1224 km/h となる。水の中では 1520 m/s (水温 30°C のとき)、すなわち 5500 km/h で、空気中の音速と比べると約 4.5 倍になる。

超音波診断装置で利用している超音波の周波数は、特殊な場合を除いておよそ 2.0 MHz から 15 MHz の範囲であり、可聴音に比べるとはるかに周波数が高く、超音波の領域にある。

1.2 超音波診断法の原理 — 反射法

山に向かって「ヤッホー」と叫ぶと少し時間をおいて「ヤッホー」というエコー（こだま、やまびこ）が返ってくる。超音波診断法の基本的な原理はこのエコーと見てよい（図 1.2 (a)）。山が近いとエコーはすぐ返ってくるが、山が遠いと少し時間をおいてからエコーが返ってくる。山がないと「ヤッホー」と叫んでもエコーは返ってこない。声は音波であり、音波を反射する物体（反射体）があるとエコー、つまり反射した音波が返ってきて耳に聞こえるので反射物体の存在がわかり、反射して返ってくるまでの時間から反射物体までの距離がわかる。

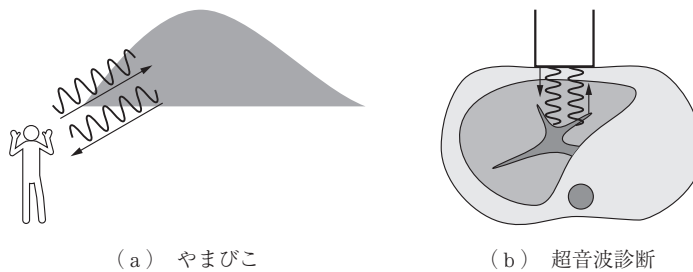


図 1.2 超音波診断法の原理

身体の中に超音波を発射しても同じことが起こる。身体の中に超音波を反射するものがあると反射波が返ってくるので、超音波を反射するものがあることがわかる。反射波の強さは反射するものの性質を反映している。超音波を送信した方向と反射波が返ってくる時間とから、その反射を起こしたものがどの方向のどの深さにあるかがわかる。基本的には、このエコーの原理で超音波診断法は成り立っている（図 (b)）。このため、超音波診断装置をエコー装置あるいは単にエコーということがある。超音波診断法で用いている反射法の原理は、潜水艦のソナーや魚群探知機、あるいは金属探傷機などで医用応用以前から使われていた。

1.3 超音波診断法の特徴

超音波診断法の長所としては

- ① 放射線被ばくの心配がなく安全であり、妊婦や胎児の診断にも使えること
- ② 軟部組織の描出能に優れていること
- ③ リアルタイムで画像が得られること
- ④ 得られる画像断面の自由度が大きいこと

- ⑤ 身体に当てて超音波の送受信を行うプローブ（探触子）を選択することで多様な目的に使えること
- ⑥ 装置が小型で容易に移動可能なこと
- ⑦ 他の画像診断装置に比べて安価なこと

などがあげられる。一方、欠点としては

- ① 視野（画像の空間的広がり）が狭く、かつ、得られる画像断面の自由度が高いため解剖学的な位置がわかりづらいこと
- ② 骨の影や肺野は見るできないこと
- ③ 画像の良し悪しが操作者の手技に依存すること

などがあげられる。

超音波診断法には多くの長所があるため、超音波診断装置は診断に欠くことのできない装置となっている。

なお、後でも説明するが、超音波もその強さをどんどん大きくしていけば生体組織に損傷を与える。超音波診断装置が安全なのは超音波の強さを安全な範囲に限定しているからである。

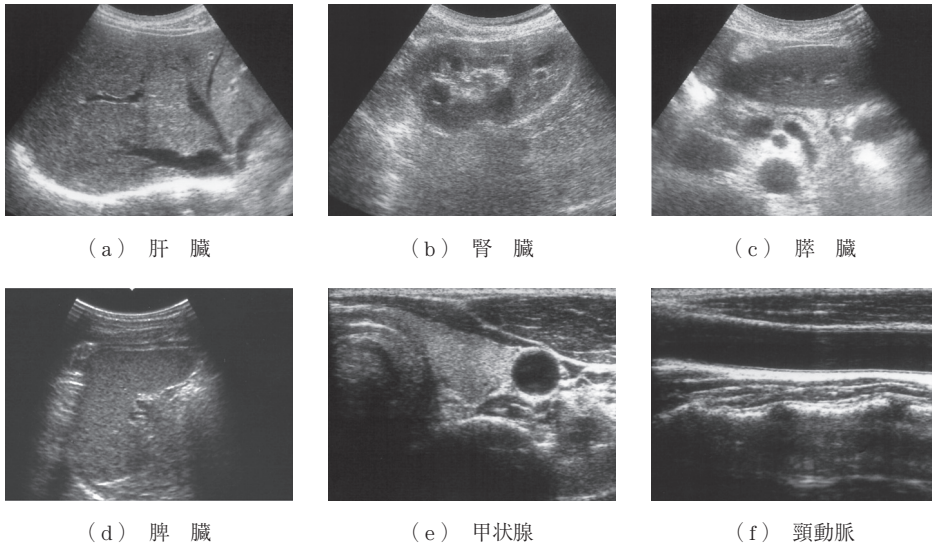


図 1.3 超音波診断装置による画像の例

索引

【あ】

アコースティックシャドウ	77
アーチファクト	72
圧電セラミック	24
圧電体	23
圧電単結晶	25
アナログ-デジタル変換	59
アレイ状探触子	25
アレイ振動子	25, 31
アレイファクタ	31
アレイプローブ	25

【い】

位相検波回路	59
位相検波器	59

【え】

エコー	2
エコーエンハンスメント	77
エコー装置	2
エリアシング	39
エレメントファクタ	31
遠距離音場	26, 27

【お】

応力	6
折り返し現象	39
音圧	6
音圧透過係数	15
音圧反射係数	15
音響陰影	77
音響インピーダンス	12
音響エネルギー	9
音響整合層	23, 25
音響パワー	9
音響レンズ	13, 14, 29, 51
音響レンズ方向方位分解能	66
音源	11
音場	26
音場分布	26
音速	5, 7
音速最適化	97
音波	1, 4

【か】

回折	14, 18
角周波数	6
加算器	59
可聴音	1
可変遅延線	49
カラーアンジオ	53
カラーコード化	53
カラードブラ	52
観測時間	68

【き】

吸収	18
球面波	10
共振周波数	24
魚群探知機	2
距離分解能	63
近距離音場	26, 27
金属探傷機	2

【く】

空間コンパウンド	70
空間分解能	63
屈折	12
屈折角	12
屈折によるアーチファクト	79
クッパー細胞	93
クラッタフィルタ	54
グレースケール	46
グレースケール表示	47
グレーティングローブ	32, 33
グレーティングローブアーチファクト	74

【け】

経食道プローブ	86
経腔プローブ	82, 86
経直腸プローブ	82, 86
ゲイン	60, 61
ゲイン補正	61
血管内プローブ	82
結石破碎装置	99
減衰	17, 19

減衰定数	18
減衰量	19
検波回路	59

【こ】

高周波リニアプローブ	82
高速フーリエ変換	38
高調波	18, 88
高調波イメージング	88
高分子圧電体	25
後方エコーの増強	77
行路差	33
固定反射除去フィルタ	54
固有音響インピーダンス	7, 11
コンベックス走査	48
コンベックスプローブ	82, 84

【さ】

細径プローブ	86
サイドローブ	29
サイドローブアーチファクト	72
サーマルインデックス	101
サンプリング周波数	39
サンプリング定理	39
散乱	16, 18
散乱波	16

【し】

時間分解能	63, 67
指向性	26
周期	7
集束	14
集束音場	30
周波数	1, 6, 7
周波数コンパウンド	70
周波数スペクトル	20, 21
受信系電子回路	58, 59
受信系のダイナミックレンジ	46
受信遅延回路	59
術中プローブ	82, 86
シンク関数	28
信号対雑音比	70

心臓用セクタプローブ	84
振 幅	4
【す】	
スキャンコンバータ	59
スキャン方向方位分解能	65
スネルの法則	12
スペckル低減	69
スペckルパターン	69
スライス厚	80
スライス厚によるアーチファクト	80
【せ】	
正弦波	7
セクタ走査	48
セクタプローブ	82, 84
穿刺用プローブ	86
線スペckトル	21
前置増幅器	59
【そ】	
造影イメージング	93
走 査	46, 47
操作パネル	57, 58, 60
送信系電子回路	58
送信遅延回路	59
速度分解能	63, 68
速度/分散演算回路	59
組織ドブラ	54
外側陰影	79
ソナー	2
ソナゾイド	93
粗密波	5
【た】	
体腔内プローブ	82
台形スキャン法	85
対数圧縮	46, 59
対数増幅器	59
体積弾性率	89
ダイナミックレンジ	46, 47
体表用プローブ	85
体表用リニアプローブ	85
多重反射アーチファクト	75
多段集束	66
縦 波	5
弾性定数	6
【ち】	
超音波	1

超音波エラストグラフィ	95
超音波造影剤	92, 93
超音波探触子	25
超音波の機械的作用	100
超音波の熱的作用	100
超音波プローブ	24
【て】	
デジタル信号処理	59
デジタルスキャンコンバータ	59
デジタル超音波診断装置	59
デシベル	19
テッシュハーモニックイメージング	90
点音源	10
電子コンベックス走査	48
電子集束	30, 50
電子偏向	49
電子リニア走査	48
【と】	
透 過	12, 15
ドブラ効果	34
ドブラ偏移	35, 36
ドブラ偏移周波数	35, 37
トラックボール	61
【な】	
ナイキスト周波数	39
【に】	
入射角	12
【ね】	
ネーパー	19
【の】	
濃度分解能	63, 67
【は】	
媒 質	4
波 数	6
バースト波	21
バーストパルス波	21
波 長	4, 7
波 面	10
パルスインバージョン法	89
パルス繰り返し周波数	52
パルスドブラ	38, 39
パルス波	21

パルス発生器	59
パルス幅	21, 65
パワードブラ	53
パワーの透過率	15
パワーの反射率	15
反 射	12, 15, 18
反射角	12
反射法	2
半値幅	21, 29
【ひ】	
ひずみ	6
ひずみイメージング	95
非線形イメージング法	91
非線形現象	89
非線形効果	18, 88
ビーム幅	29
表示装置	58, 59
表示のダイナミックレンジ	46
表示モード	44, 61
標準化定理	39
表面波	5
【ふ】	
フィルタ法	89
腹部用コンベックスプローブ	84
フーリエ逆変換	21
フーリエ変換	21
フリーズ	61
フレーム数	52
プローブ	58, 82, 83, 86
分解能	63
【へ】	
平面波	10
並列同時受信	68
ベッセル関数	28
変 位	4
【ほ】	
ホイヘンスの原理	11
方位分解能	63, 65
ボディマーク	60, 61
【み】	
水の音速	8, 9
ミラーアーチファクト	76
【め】	
メインローブ	29

メカニカルインデックス 100
 メカニカルセクタ走査 49, 50
 メカニカル走査 49
 メカニカルラジアル走査 49, 50

【よ】

横波 5
 横波イメージング 96

【5】

ラジアン 6

【b】

リアルタイム性 51

リニア走査 47, 48
 リニアプローブ 85
 粒子速度 4
 粒子点 4
 粒子変位 4
 臨界角 13

【れ】

レイリー散乱 16
 レート周波数 52
 レートパルス発生器 59
 連続集束 66
 連続波 20
 連続波ドブラ 38, 39

【数字】

1 次のベッセル関数 28
 2D ドブラ 52
 2 次元アレイプローブ 93
 3 次元表示 93

【A】

A/D 変換 59
 A モード 44

【B】

B, M 同時モード 45
 B モード 46, 47

【C】

CFM 53
 CMUT 25
 CPU 58

【D】

dB 19

DSC 59
 D モード 52

【F】

FFT 38
 FFT 回路 59
 FFT ドブラ 38

【I】

I_{SPTA} 100

【M】

MI 100
 MTI フィルタ 54, 55
 M モード 45

【N】

Np 19

【P】

PNP 100

【S】

S/N 70
 sinc 関数 28
 STC 61

【T】

TDI 54
 THI 90
 TI 101

— 著者略歴 —

佐々木 博 (ささき ひろし)

1965年 東北大学工学部電子工学科卒業
1968年 東北大学大学院修士課程修了(電気通信工学専攻)
1971年 東北大学大学院博士課程修了(電気通信工学専攻), 工学博士
1971年 東北大学助手
1980年 東北大学助教授
1981年 株式会社東芝入社
1990年 株式会社東芝医用機器事業部医用機器技術研究所所長
1993年 株式会社東芝医用機器事業部技師長
1995年 株式会社東芝医用機器事業部統括技師長
1997年 株式会社東芝首席技監
1999年 株式会社東芝医用システム社首席技監
2002年 国際医療福祉大学教授
現在に至る

飯沼 一浩 (いぬま かずひろ)

1961年 東北大学工学部通信工学科卒業
1963年 東北大学大学院修士課程修了(電気通信工学専攻)
1966年 東北大学大学院博士課程単位取得満期退学(電気通信工学専攻)
1966年 東北大学助手
1968年 工学博士(東北大学)
1970年 東北大学助教授
1971年 株式会社東芝入社
1982年 株式会社東芝医用機器事業部医用機器技術研究所所長
1987年 株式会社東芝医用機器事業部技師長
1993年 株式会社東芝首席技監
1997年 国際医療福祉大学教授
2012年 国際医療福祉大学名誉教授

診療放射線技師を目指す学生のための 医用超音波論

The Basics of Medical Ultrasound for Students Aiming to Become Radiological Technologists

© Hiroshi Sasaki, Kazuhiro Inuma 2015

2015年2月13日 初版第1刷発行



検印省略

著者 佐々木 博
飯沼 一浩
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 新日本印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-07238-9 (大井) (製本: 愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします