

乳房超音波診断の今昔 —乳房超音波と私の歩み—

竹 原 靖 明

乳癌の臨床 第20巻 第6号 (2005)

Jpn J Breast Cancer Vol.20 No.6 2005

篠 原 出 版 新 社

本稿は、2006年7月15日に、篠原出版新社および竹原先生の許諾を得て転載したものである。

創刊20周年記念論文

乳房超音波診断の今昔
－乳房超音波と私の歩み－

竹原 靖明

相和会 横浜総合検診センター所長

● はじめに

乳房は超音波検査（以下，US）の好個の対象とされ，その臨床応用は脳について古い．その発祥は大雑把に見ると1950年代初頭，透過法から現行のパルス反射法に主流が移行したときに始まり，その研究は海外ではWild J.J. (1991, 日本国際賞受賞)，Ludwig G.D.およびHowry D.H.そして本邦においては菊地，田中，和賀井らによって着手された．この時期，使用された機器は金属用超音波探傷器に少し手を加えた程度のAモード表示装置で，臨床的にはほとんど無用であったが，今日の輝かしい乳房USの端緒を開いたという点ではきわめて大きな意義がある．

筆者は1965年(昭和40年)より外科の傍らUS診断に着手した(後述)．最初はAモードで乳腺腫瘍の診断を試みたが，現れるパターンに戸惑うばかりで，失望の日が続いた．

当時，世にはすでにBモード装置が実用化されていたが，画質，解像度ともに低劣で臨床的評価は無に等しかった．しかし，超音波医学研究会(日超医学会の前身)に集う研究者は皆若く意気盛んで，刺激的であり，失望に明け暮れる筆者は年2回開催されるこの学会への参加が何よりも楽しく，「生気の蘇り」を感じた．

以来40年，超音波とともに歩んだ筆者の足跡と，本邦における乳房USの発展の軌跡を重ね合わせながら，筆を進めていきたい．

● 1. 乳房超音波の進歩の軌跡

1) 診断機器の進歩と表示方式の変遷

前述したごとく，Aモードに始まった診断装置は臨床的評価がきわめて低く，1952年にはBモードが実用化された．当時，探触子はシングルビーム型（1本の探触子より1本のビームが放射されるもの）で，乳房USでは，直接乳房をスキャンすることが困難なため水浸法が採用された．

欧米では乳房を直接水中に没入させて行ったが，本邦では脱気水をビニールバッグに入れ，これを乳房に乗せ，そのバッグの中を探触子が運動（走査）する方式を採用した．したがって，水浸法は乳房超音波独特の方式で，乳腺疾患に関する種々の知見はこの方式で得られ，乳房USの進歩に大きく貢献した．

水浸法には探触子の走査方式に，リニア，アーク（図1），コンパウンドがあるが普及したのは前二者で，それぞれ長短がある（図2）が，共通する欠点としては腋窩部などの狭隘な部位では脱気水を入れたビニールバッグの皮膚への密着が悪く，また大きい乳房では2～3回ビニールを移動しなければならない煩雑さがあった．



図1 水浸法アークスキャン方式の乳腺超音波診断装置（1971年）

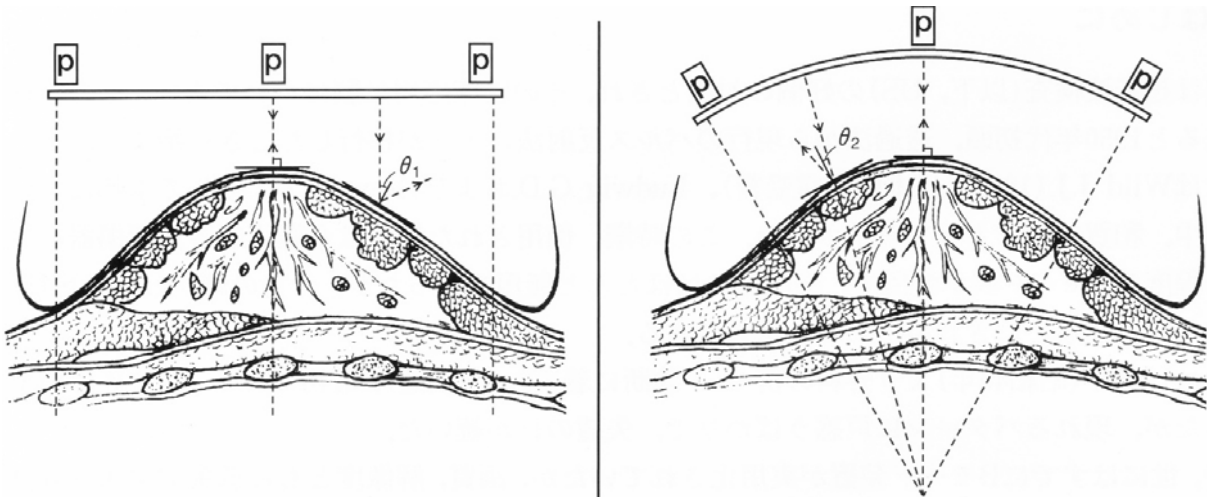


図2 乳房に対するリニア走査とアーク走査の違い

リニアは乳房の表面に対して、ビームの入射角が大きく、屈折による縞模様が現れる欠点があったが、走査の範囲が広い利点があった。これに対してアークは乳房表面に垂直に入射して良い画質が得られたが、プローブの移動範囲に比して、乳房内の描出範囲が狭い欠点があった。

一方、ビニールバッグで乳房を圧迫・固定するため再現性があり、同じ断面が得られやすいという利点があった。

当時の装置はダイナミックレンジの幅が狭く、画像は on-off 的で、僅かな感度（ゲイン）の調整で表示パターンが大きく変化し、重要な情報（エコー）が消失したり識別不能になったりした。

1965年、菊地はこの欠点を補い、かつエコーの強さに定量性を持たせるために「感度断層法」(sensitivity-graded tomography)なる方式を提案、提唱した。この方式は乳房内にエコーがほぼ充満する感度を 0db とし、これより 5db 間隔で感度を下げて4～5断面を撮影し、この一連の断面像から所見を読み取るもので、水浸法を用いた乳房USにのみ利用できる本邦独自の方式であった(図3)。しかし、この方式はUSを専攻する少数の医師には理解されたが、多くの臨床医にはその操作の煩雑さのため歓迎されなかった。

1967年、井出らはダイナミックレンジの広い装置を用い、生体から返ってくる種々の強さのエコーを1枚の表示画像の中に、そのエコーレベルに応じた白黒の濃淡として表示する「階調性断層法」を報告し、その翌年、和賀井が臨床評価した。

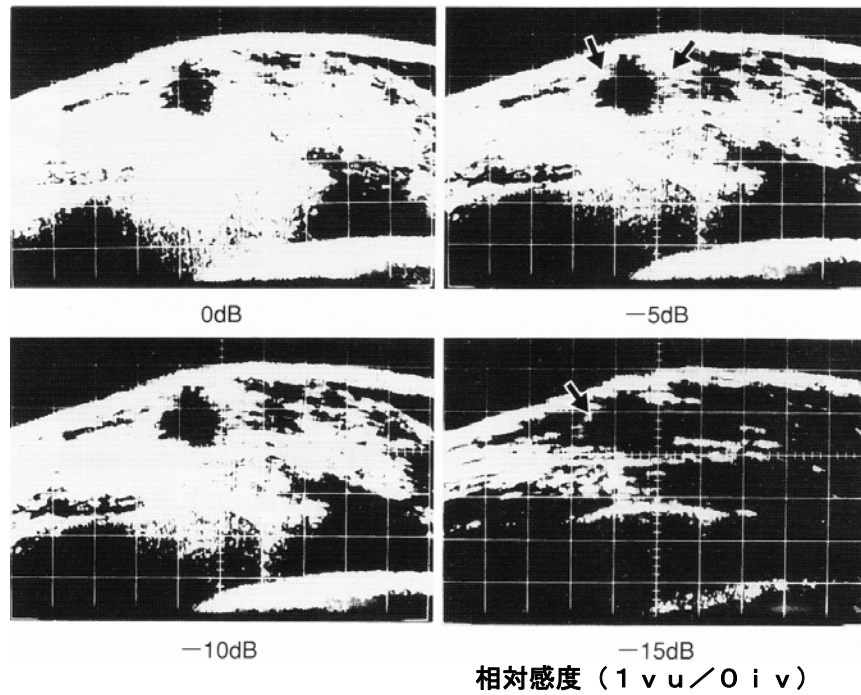


図3 「感度断層法」による乳癌のエコーグラム

相対感度 0db では、乳房内にエコーが充満し、乳癌像の特徴である halo は不明であるが、-5 db では明瞭に現れる (↓).
そして、-15db でも消えないで微かに認められる (↓).

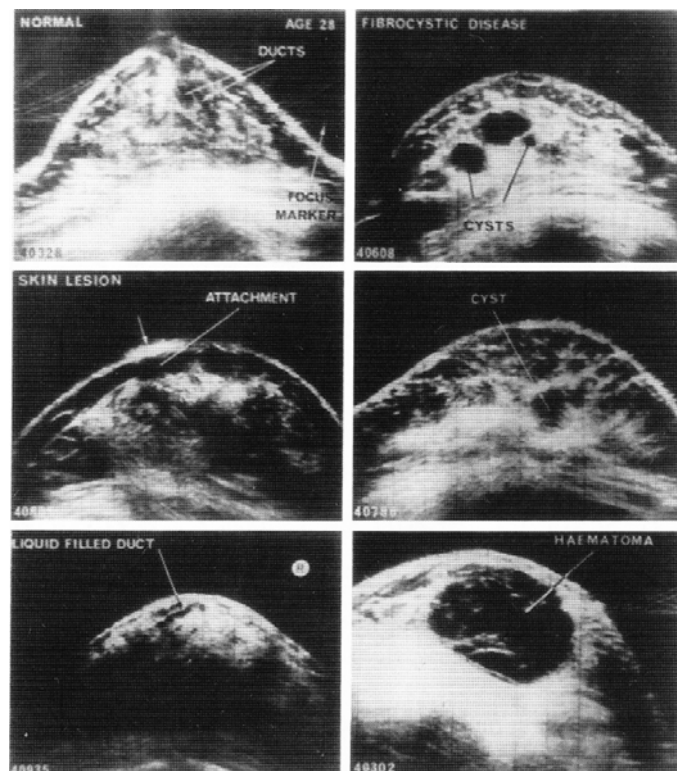


図4 Kossoff G (豪) の提唱した「グレイスケール」による乳腺像

1976年8月、サンフランシスコで開催された第1回世界超音波医学連合大会で本人より直接贈呈され、これが超音波の画像かと驚嘆した.

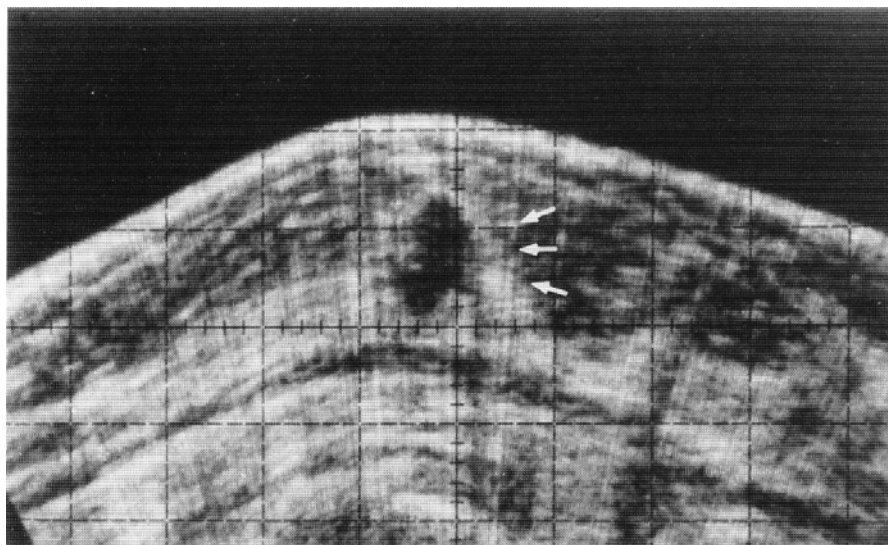


図5 井出により提唱された「階調性断層法」で撮った乳癌像(↓: halo)

ところが、1973年、オーストラリアのK o s s o f f G. が「グレイスケールエコーグラフィ」と称して階調性の優れたエコーグラムを発表し、世界的な脚光を浴びた(図4)。

「グレイスケールエコーグラフィ」とか「階調性断層法」といえばK o s s o f f G. の提唱によるものと一般的には認識されているが、この原理はすでにその5年前、井出らによって発表されていたのである(図5)。

ともあれ、この表示方式の出現により、本邦独自の「感度断層法」は完全に消滅した。その2年後の1975年、高解像度の2次元画像がリアルタイムに得られる「リニア電子スキャン」が飯沼らによって実用化され、前述の表示方法と相俟って、輝かしい近代超音波の幕開けを迎えたのである。この表示方法と走査方式の登場は乳房USにもいろいろな刺激を与え、諸家により種々の走査方式が試みられ、乳癌US検診装置も試作された。

1970年代後半に出現した乳房US装置の動向には大きく2つの流れがある。

その1つは触診によって腫瘍の存在を確かめた後、腫瘍の質的診断を行う精査用の装置と他の1つは触診を行わないで腫瘍を発見、診断するいわゆる集検用の装置である。

前者には前述した水浸法リニアやアーク走査方式が最も多く、消化器用リニア電子スキャンを転用するもの(接触法)や手動による接触複合走査、眼科用の機械走査を転用するものが現れた。この機械走査方式の装置はプローブの動きを円滑にするため、皮膚との間に液体を介在させるため「液浸法」とも呼ばれた(Bronson-Turner 社, B-Scanner)。筆者のメモによると、これらの転用装置はいずれも簡便だけが取り柄で、画質ではアーク走査の水浸法に劣っていた。この理由は使用波数もさることながら、フォーカルポイントが体表から5cm前後で、分解能の低い近距離部分のビームで描かれているためであろう。

当時、水浸法の装置で注目を集めたものは、K o s s o f f G. の開発した U.I. Octoson と Baum G. が試作した座位による直接水浸法の装置で両者とも画質、分解能に優れていたが、操作が煩雑で検査時間が長く、多数の受診者を消化しなければならない本邦の医療事情に適さず、あまり普及しなかった。

次いで、1990年暮、アニュラアレイプローブを搭載した診断装置が実用化された。この装置は現在、この領域で最も多く利用されているが、これについては次項「私の歩んだ道」の中で詳説する。

後者の集検用装置と銘打って試作されている装置は、筆者のメモによれば3種類ある。

海外の装置で注目を集めたのは、アメリカの Life Instrument 社によって開発された「Ultrasound Brest Scanning System」である。この装置は被検者を腹臥位にして、水槽中に乳房を没入させ、水槽内にある Transducer wheels と呼ばれる2個のスキヤナ(6角形状のスキヤナ1個に3個の振動子が装着された(図6))がペアーでメカニカルに走査し、図7のような範囲の断面を描く仕組みになっている。

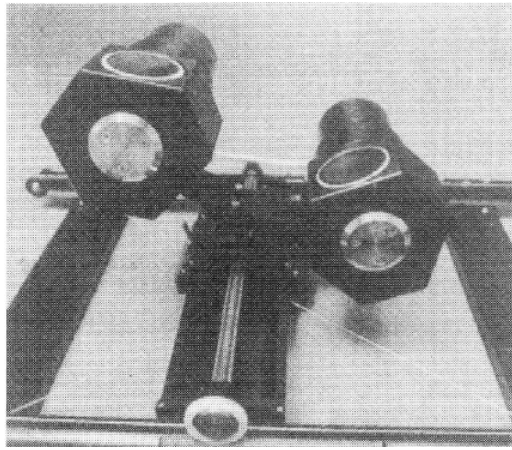


図6 Transducer wheels

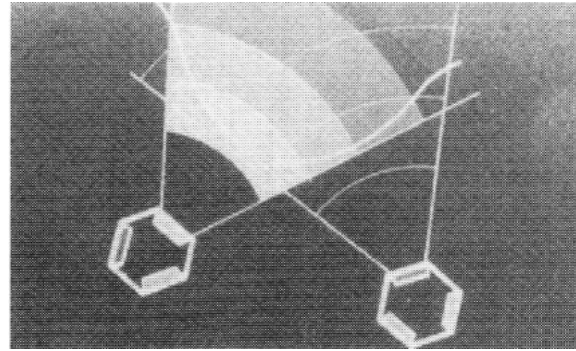


図7 Transducer wheels による走査範囲

表1 乳腺超音波診断装置の変遷

表示方式	機種・走査方式	使用周波数	開発者または発表者	年代	備考
反射法					
Aモード	○水浸法	} 15MHzまたは 10~5 MHz _Z	Wild J. J	1951	
	○接触法		田中, 和賀井	1954	
Bモード	○機械的扇形走査	15MHz _Z	Reid J. M	1952	two-dimentional echo-scope
	○手持ちチャンバー式扇形走査		Wild J. J		
	○水浸法リニア走査	5~10MHz _Z	菊池, 田中, 和賀井, 内田	1957	水浸法装置のプロトタイプ
	○水浸法アーク走査	5~10MHz _Z	和賀井ら	1970	集束型探触子の利用
	○水浸法複合走査	2 MHz _Z	Kossoff G*1	1970	試作機
	○水浸法アーク走査	5 MHz _Z	竹村ら, 和賀井ら*2	1973	グレイスケール表示 (集検用)
	○水浸法高速リニア走査	2.25MHz _Z		1975	Vidoson 635型 (腹部用)
	○水浸密閉式リニア走査	5 MHz _Z	米田ら, 和賀井ら*3	1975	(集検用)
	○接触法	7~8 MHz _Z	Cole-Beuglet C	1975	Bronson-Türner
			Beique R. A.		B-Scanner (眼科用)
	○腹臥位, 水浸式, 複合走査	2.25MHz _Z	Kossoff G	1976	Ausonics U. I. Octoson
	○坐位, 水浸式		Baum G	1977	試作機
	○腹臥位, 水浸式, 機械的セクタ走査 (2回組合せ)		Elliott R. D*4	1978	Life Instrument Co.
			Metz R. L.		Ultrasound Breast Scanning (集検用)
	○水浸法アーク走査, 同時多層断層法 (8分割)	5 MHz _Z	井出, 増澤*5	1978	試作機 (集検用)
	○立位, 水浸式, リニア電子走査と扇形機械走査の組合せ	4.7MHz _Z	飯沼, 竹原ら*6	1979	試作機 (集検用)

*1; リニア走査とセクタ走査を組み合わせた複合走査. 図4のエコーグラムは多分この試作機で撮られたものであろう

*2, 3; 集検用となっているが, 医師の触診を前提とした装置

*4; 図6, 7で供覧した装置

*5; 図12で供覧した装置

*6; Cモード表示に変換される前のBモード表示装置 (図15)

一人当たりの検査時間は4分とされている. 問題の画像は不明にして忘却したが, 走査法には従来にない斬新さがあり, 興味を抱いたことを記憶している.

本邦では井出らと筆者の共同研究で試作した「同時多面断層装置」とT社の超音波グループと筆者らとの共同研究で挑戦したリニア電子スキャンを利用し「Cモード表示」を採用した集検装置がある.

これらについても, 「私の歩んだ道」の中で述べることにする.

その他, 表1に示すように, いくつかの試作機が登場したが, 詳細な記録や資料がないので割愛させていただく.

一方、臨床上特筆すべきものとしては、一つは良性腫瘍の特異的な所見である「後方エコー」に着目し、良・悪性の鑑別点として提唱されたことと、他の一つは超音波による施設外乳癌集検の端緒を開いたことである。

前者は、1972年、小林（当時、国立がんセンター）の研究によるもので、水浸法アークスキャン方式を用いて、嚢胞などの良性腫瘍を走査した場合、後方エコーが増強し逆三角形状を呈することに着目し、その形状から「Tadpole-tail Sign」と命名され、当時一世を風靡した¹⁾。彼は、筆者より数年おくれて超音波診断の研究に着手された良きライバルで、この仕事に少なからず刺激された。

後者は、1975年、和賀井や堤らによって実施された本邦初の集検車による乳癌検診のことで、その内容は移動用に改造された通常の超音波診断装置と多数の記録が消化可能な自動記録装置を小型バスに搭載し、富山県下各地で視触診を併用して行うもので、種々の乳癌集検に関わる問題点が浮き彫りにされ、乳癌集検装置開発の良き前轍となった²⁾。その一つは医師の視触診は集検地域を著しく制限することであった。

2) 私の歩んだ道

すでに述べたごとく、筆者は1965年（昭和40年）一般外科の傍ら超音波診断の研究に着手した。理由は術前「手洗い」のときのブラッシングによる接触皮膚炎で、酷いときはグローブのように手指が腫れあがり、冬になると亀裂ができて、正規の消毒ができなくなり、外科を断念するよう皮膚科医より宣告された。大いに悩み迷った結果、今まで治療に専念してきたので、これからは診断学をやろうと考えた。

診断学といえば、当時、発展の兆しのあった内視鏡が最初に浮かんだが、苦痛や障害を伴うことから踏み込めなかった。第2に脳裏をよぎったのはUSで、文献を漁り、工学系の人々の意見を聞き、微かな光を感じたが、やはり最後の決め手は苦痛、障害のない検査という点であった。

専門は当然、消化器と乳房でAモード装置で始めたが全く診断とは程遠いものであった。当時、USの研究で知られていたのは、東京では順天堂大、大阪では阪大、仙台では好酸菌研究所で、筆者は順天堂大の超音波センター（当時、和賀井講師）の門を叩き、教えを乞うた。超音波センターは各科の若い医師が集い、熱気が漲っていた。僅か3週間であったし、Bモード装置の経験のない筆者には理解できないことが多かったが、多くの友人を得たという点では大変有意義であった。

そして5年後（昭和45年）、熱意が認められてBモード装置購入の予算がおりたが、当時、この業界の最大手であるA社に、その予算では消化器用（接触複合走査）か乳房用（水浸法、リニア走査）のどちらか、2台なら1世代古い装置になると拒否され、痛く失望落胆した。これが原因か後日、胃潰瘍になり入院を余儀なくされた。このとき、T社の若い社員が訪れ「当社もこれから超音波装置を製作、販売することになった。その予算内で希望通りにする」と熱心に説得された。これを契機にT社の若い技術者と交流が始まり、第1号機の改良が昼夜を分かたず体日も返上して関東中央病院で行われ、超音波室はさながらT社の工場と化した。この時期は筆者にとって超音波の基礎を習得する最良の機会となり、自然発生的に共同研究の気運が生まれ、定期的な研究会が開かれるようになった。1975年暮、実用化された高解像度を有するリニア電子スキャンもこの共同研究の成果の一つである。

納入された機器のうち、消化器用の接触複合走査は触診で触知できる病変に対しては内部構造の描写に有用であったが、胆嚢や膵臓の小病変の検出やスクリーニングには全く無能であった。これに対して、乳房用の水浸法アークスキャンは購入時はダイナミックレンジが狭く、「感度断層法」を利用せざるを得なかったが、腫瘍の描出には有用であった。

当時筆者を最も悩ませたのは腫瘍の良・悪性の判定であった。ダイナミックレンジが狭く、画像はon-off的ではあったが、分解能を上げるために凹面振動子が使用されており、既存の診断基準はほとんど無用であった。

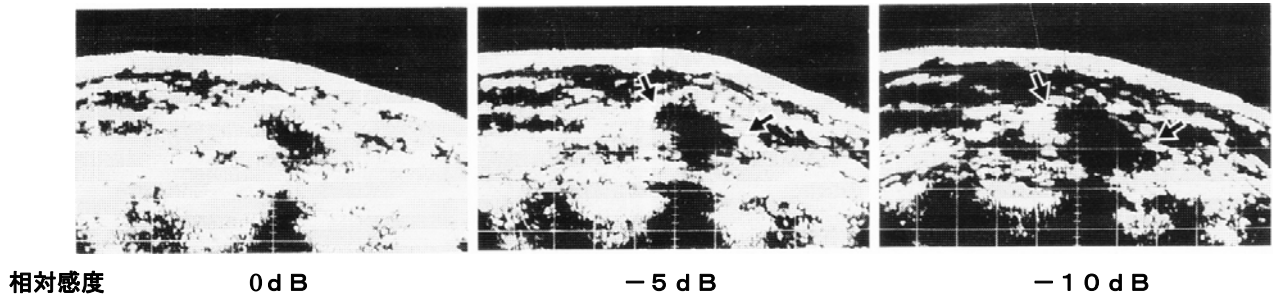


図8 「感度断層法」による乳癌のエコーグラム：(↓)；h a l o

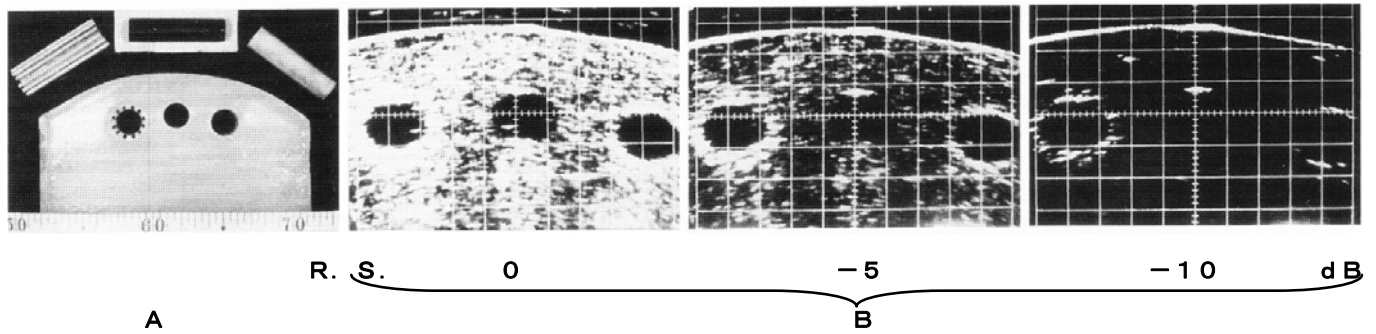


図9 寒天モデル (A) とそのエコーグラム (B)

寒天モデルの穴 (A)：(左) は内面に2.5 mmの凹凸，(中) は内面平滑，(右) は内面ザラザラ。

寒天モデルの上に並べられた筒を寒天に埋め，固まった後，抜去した。

(B) は各穴のエコーグラム，左と右の穴の側面は散乱によって描出されている。

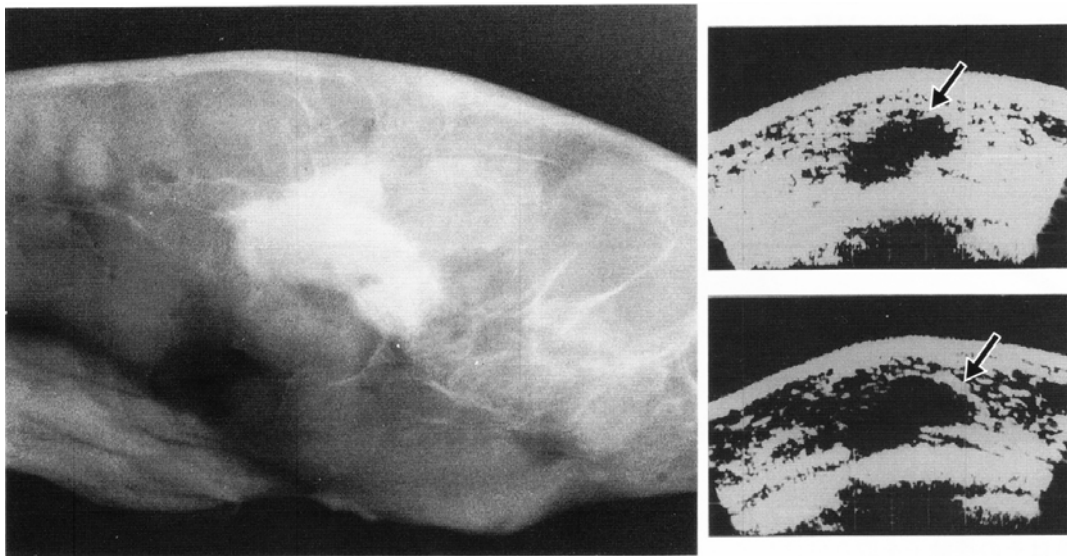


図10 乳癌の肉眼標本とエコーグラムの対比

(左) は微細な樹枝状の癌性突起を伴う乳癌の切除標本，(右) はそのエコーグラム (感度断層法による) (↓)：halo

1965年からUS検査に着手したといっても，この時期，USだけで給料が頂けるほどUS診断は評価されておらず，専ら乳腺外科とUSを兼務していた。しかし，視触診からUS，生検そして乳房切除という一連の作業が独占的に許されていたことは筆者にとって大変有益であった。

その1つが乳癌像の辺縁に現れる「h a l o」の発見とその原因の究明である。

乳癌像に現れるh a l oは腫瘍像の側面において強調されること (図8) に気づき，分解能以下の小さい凹凸は「散乱」によって太い線上エコーとして現れることを，まず寒天モデルで示した³⁾。

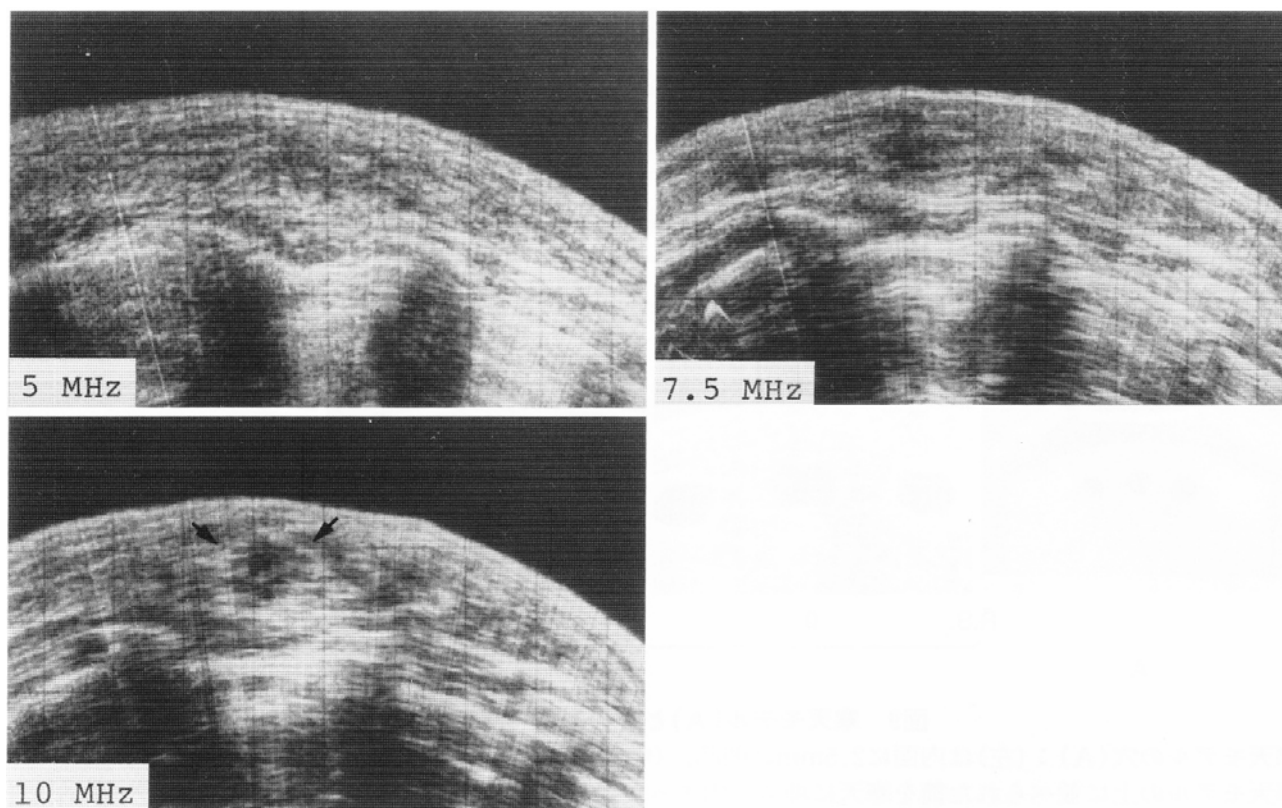


図11 周波数の変化による「halo」の現れ方を示したもの

この1cm強の乳癌は5MHz, 7.5MHzでは「halo」は出現していないが10MHzでは出現している。(↓): halo

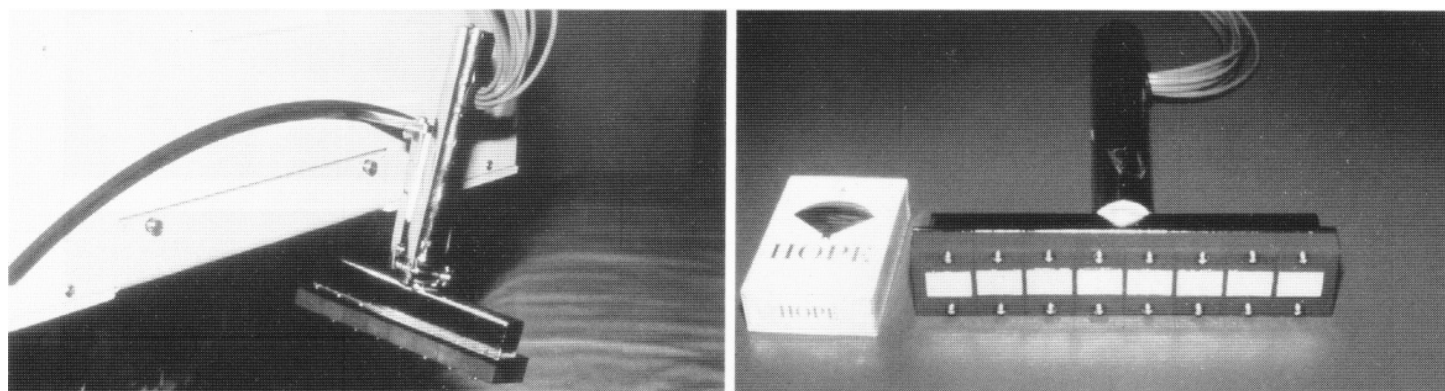


図12 同時多面断層装置

(左) はその探触子を取り付けたアークスキャナ

(右) は8個の振動子を並列した探触子

この研究は1973年(昭和48年)5月, 武蔵工業大学で開催された第23回日超医研究発表会で発表したが, 初日の第1席の発表で参加者はほとんどなく, 全く反響のない発表に終わり, プログラム編成を恨めしく思ったことが今でも忘れられない。また, この寒天モデルを使った実験で2.5mmの凹凸も凹凸として表現されないで, 数ミリの太い線状エコーを呈することを知り, USの空間分解能の悪さに驚いたことを覚えている(図9)。

その後, 乳癌のエコーグラムとマンモグラムを対比して, haloの現れる乳癌ではスピキュラがほとんどに現れることを証明した⁴⁾(図10)。そして, 最後にhaloの本体は超音波の波長より小さい癌性突起で起こる「散乱」であることを証明するために, 11例の乳癌症例に対して波長の異なるプローブ(5、7.5、10MHz)を用いて haloの現れ方を調べ, 周波数が高いほどhaloが良く現れることを示した^{5, 6)}。この研究はhaloの僅かな変化を描出する必要があるため, ダイナミックレンジの広いグレイスケール表示の装置を使用した(図11)。

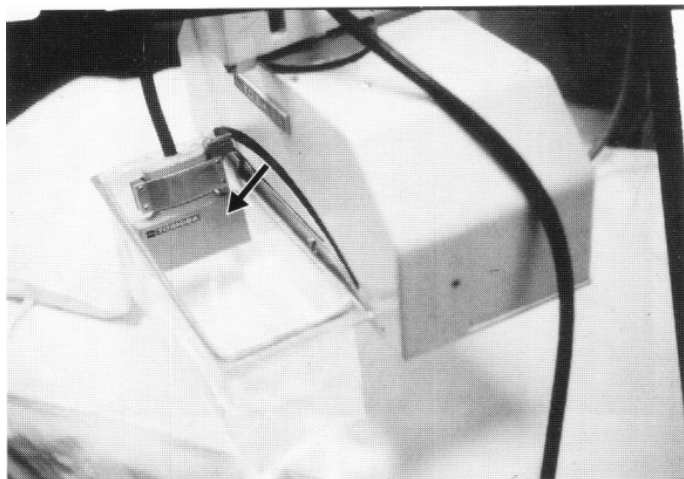


図13 アーク式スキヤナに装着したリニア電子スキャン用プローブ(↓)

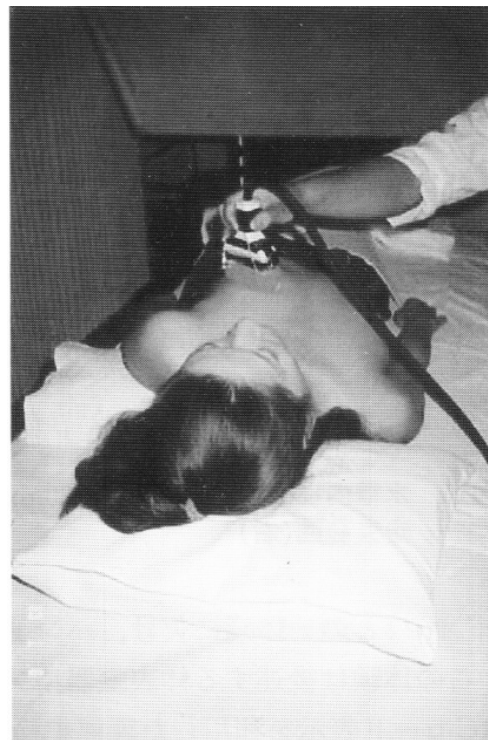


図14 リニア電子スキャン用プローブの先端にウォーターパツグを取り付けた簡易接触法の実施風景

Ha1 oは入射角の大きい側面において良く現れ、周波数に対応して増強するというこの一連の研究により、その本体は微細な癌性突起における「散乱」であると確信している。

この時期、寒天モデルを用いた実験に凝り、腫瘍像の内部エコーや後部エコーについても発表しているが、これらについては紙幅の関係から割愛させていただく^{7, 8)}。

次に集検装置の試作について述べる。

第1は前述した井出らとの共同研究で試作した「同時多面断層装置」である。この装置は角型振動子(5MHz)8個を、当時使用中のアークスキヤナに並列し、1走査で8断面を同時に記録する方式である(図12)。プローブの大きさは15×10mmで17mm間隔で取り付けられているため、走査漏れの危険性があり、1回の走査後プローブ間隔の半分だけシフトさせ、往復で16断面を記録するようになっている。

この装置の長所は検査時間が短く、フィルムの消費量が少ないことなどであったが、反面、画像が小さく読影しにくいことと、振動子が平面振動子で分解能に問題があるなどの欠点があり、実用化には至らなかった⁹⁾。

第2はリニア電子スキャンのプローブを水浸法アーク式スキヤナに取り付け、乳房を一往復走査し、全断面を描出するもの(図13)で、これも見事に失敗した。失敗の原因はきわめて単純で、電子スキャンのプローブで得られるリアルタイム画像をアーク式スキヤナのスピードの中で読み取ることは、人間の目には不可能ということであった。乳癌検診装置の開発が強く求められているとき、今一度、アーク式スキヤナのスピードをコントロールできる装置で試してみたいと考えている。

第3は多くの超音波愛好家が行ったことであるが、リニア電子スキャンのプローブをハンドヘルドで操作する方法で、直接皮膚に接触させる方式ではフォーカルゾンの関係から、鮮明な画像が得られないことから、プローブと皮膚の間に、ウォーターバッグかキテコ(シリコン性で音波の透過性が良く、皮膚との音響インピーダンスの差が少ないもの)を介在させた(図14)。この方式の欠点はプローブと介在物(スタンドオフ)との一体感に欠け、ハンドヘルド型本来の特徴である自由なプローブ操作が制限されることで、この体験は後述する体表臓器用アニュラアレイプローブの実用化に大いに役立った。

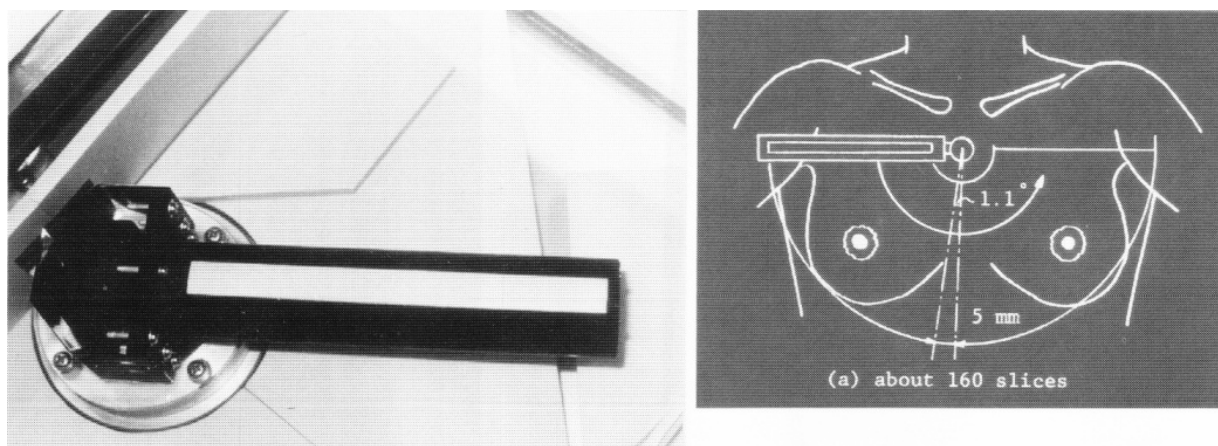


図15 水槽内に装着された長さ200mmのリニア電子スキャン用プローブ（左）とそのプローブの走査範囲（右）

第4はCモード表示を利用した乳癌集検装置の試作である。

筆者は水浸法アークスキャンの装置を購入した翌年（1971年）4月より視触診—MMG—細胞・組織診という乳癌検診システムにUSを加え、視触診US—MMG細胞・組織診というシステムで、世田谷区を中心に乳癌検診を実施していた。この当時、MMGは精度が悪く、またUSは水浸法では検査時間が長く困惑していた。1975年暮、リニア電子スキャンが実用化され、このリアルタイム表示の利点を生かして乳癌集検装置を開発することがT社の超音波グループと筆者らのグループで決まった（1978年）。

この集検装置の位置付けは、医師の視触診を前提としない、すなわち医師の触診を代行して省力化を図り、担当者の技術・経験の差による影響の少ない装置の実用化で、このためには次の4条件を満たすような装置ということになった。

- ① 乳癌の発生可能範囲（乳房の上外象限から腋窩に至る範囲を含む）が、スキャナの移動や体位の変換なくして走査できること
 - ② 直径5mmの腫瘍を検出する能力を有すること
 - ③ 検査時間は、受診者の脱着衣に要する時間を含めて、1人5分以内であること
 - ④ 読画が短時間にでき、かつ検出された病変の位置が容易に判定できるような記録装置を持つこと
- 今思うと、あの時期の技術で、こんな難しい条件によく挑んだものと驚いている。

この装置は計3回の大改良が行われた。その主な改良点は、①表示法、②走査法、③画像記録の3点で、改良期に分けて後述するが、1986年初頭、当初の条件を満たし得ず、断腸の思いで実用化を断念した。

< I > 最初はBモード表示を採用した。被検者は立位前屈位で、両乳房を脱気水の入った水槽に没入する。水槽底部には長さ200mm、幅15mmのリニア電子スキャンプローブがあり、図15のように扇状に機械走査する。走査のスピードは180°が30秒から2分の間で可変調整でき、水槽中には厚さ100μmのビニール膜が張られている。これは乳房とプローブの間隔を一定に保つためである。プローブの周波数は4.7MHz、フォーカルポイントは振動子面より7.5cmでフレームレートは7.5/秒である。記録は35mmフィルムを用い、静止画像で判定した。1979年4月より1980年6月までの臨床テスト（983例）の結果、次の問題点が浮き彫りにされた。

- ① 記録枚数が非常に多く、1回の走査で160枚以上になり、読画、ファイリングが困難であること
- ② 水槽中に張られたビニール膜によるアーチファクト（多重反射やサイドロープが現れ、読画に支障を来たすこと）（図16）
- ③ 病変の位置判定が困難なこと、など

問題の分解能については5mmの嚢胞は描出可能であったが、同大の乳癌症例は経験しなかった^{10, 11)}。

以上の問題点を解消するため、Cモード表示を採用することになった。Cモード表示装置については、本邦では、すでに横井、伊藤ら、桑島らによって試みられていたが、広く普及するには至らなかった^{12, 13)}。

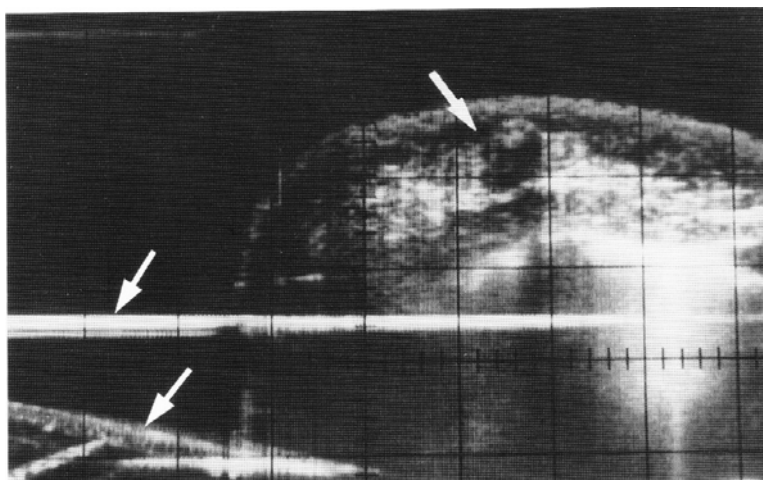


図16 図15の装置で検出された約8mmの乳癌(↓)と
画像中に現れたアーチファクト(↓↓)

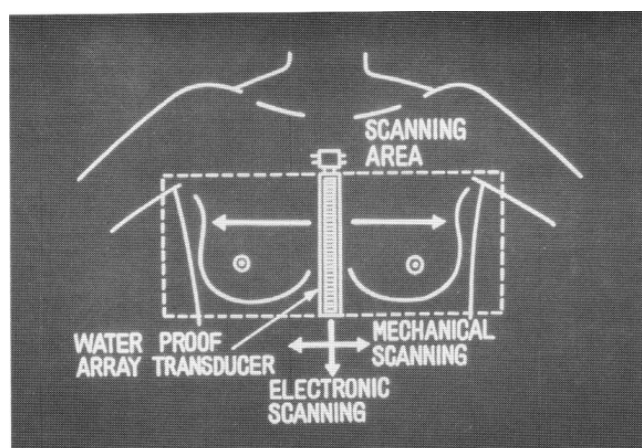


図17 Cモード表示の採用に伴い、断面像の間隔を一定にして、画素の密度を平均化する必要から、
リニア電子プローブ(中央)の走査をセクターからリニアに変換した。

プローブは矢印のように走査し、中央(胸骨)で一
時停止し、体位を右から左と変換して走査した。

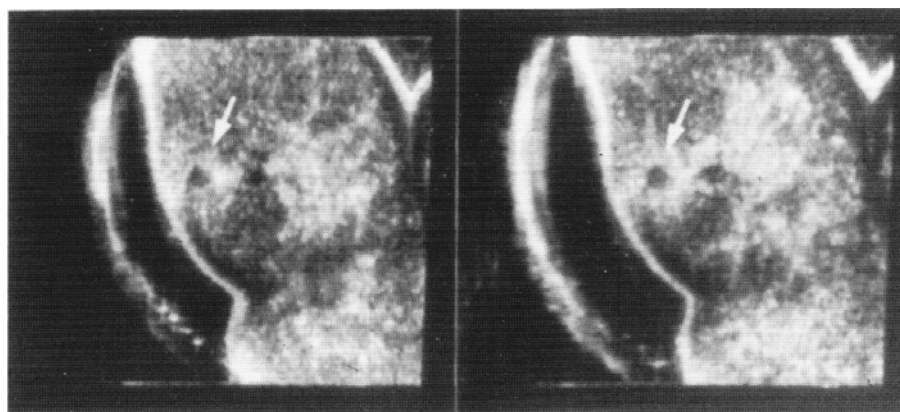
<Ⅱ> Cモード表示を採用した主な理由は、

- ① 水槽中に張られたビニール膜による乳房の圧迫で、その厚みがかなり薄くなり、細かい計算は割愛するが、記録枚数は160枚から20枚前後に減少する、
- ② 病変の位置が乳頭を中心に一目瞭然とわかる点などが挙げられる。

このためには画素の密度を平均化する必要があり、電子リニアアレイプローブのセクター走査を図17のようにリニアに変換した。プローブの長さ(視野幅)は200mm、集束点は85mmで、3.5mm間隔の断面像を片側8枚記録することにした。また、被検者の体位は同じ立位前屈位であるが、乳房全体を広く描出するためには、乳房を水槽中のビニール膜に強く押し当てる必要があり、右側を走査するときは右側を強く押しつけ、走査を中央線(胸骨)(図17)で一時間停止し、次に左側を強く押しつけて走査するようにした。また、記録はマルチフォーマットカメラを用いて、「六ツ切り」フィルムに記録した。

1981年9月より1982年3月までの7カ月間、一般外来で304例の検診を行い、9例の乳癌を経験した。

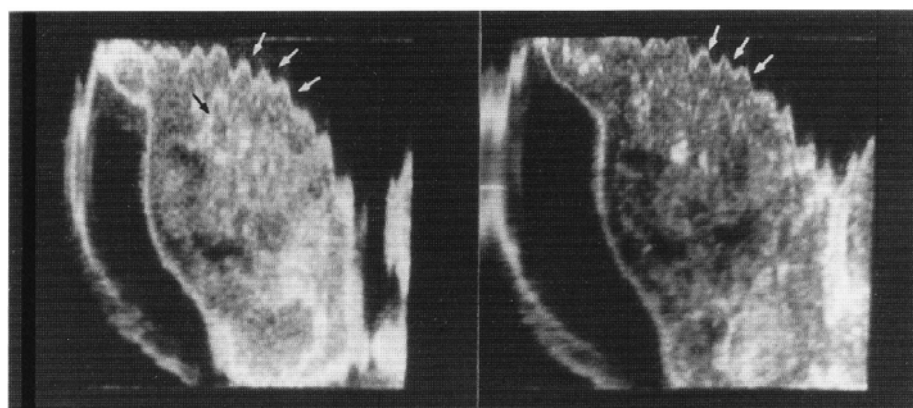
C A R C I N O M A



R. Breast

図18 Cモード表示装置で描出された乳癌像とその周辺に認められたhalo (↓)

C A R C I N O M A



R. Breast

図19 走査中の乳房の動きにより不鮮明になった乳癌像 (↓) と
画像のブレを示す曲線 (↓↓↓)

この使用経験で評価された点は、①記録枚数がBモード表示に比べて1桁減少し、片側が10～14断面で十分カバーでき、ファイリングにも便利になった、②病変の位置がドーナツ状を呈する乳頭を基準に方向および距離が容易にわかる、③乳癌像の特徴であるhaloは腫瘍像の側面に強く現れるが、Cモード表示ではこれが全周に現れるため判読が容易になる(図18)、などである。一方、改善すべき点として、①走査中に呼吸運動や体動により乳房が動き、断面が重複して画像が不鮮明になり読画が困難になる(図19)、②乳房を直接水槽に没入し、ビニール膜に強く押しつけるため、溢水により被検者の衣服が濡れる、③腫瘍内部の音響的性質を反映する腫瘍像の後部エコーはBモード表示では腫瘍像の後方に現れるが、Cモード表示では腫瘍像の次の断面にこれを求めなければならない、などが挙げられる。

<Ⅲ>この対策として、次のように改良した。

- ① 乳房の圧迫を強め、また溢水による衣服の汚染を避けるため、水槽中に張られたビニール袋を廃止し、水槽の表面にビニール膜を張った。また図20のように体位を「立位」から「四ツ這い」にし、体動による画像のブレをできるだけ抑制した。しかし、水槽表面に張る膜は厚くせざるを得ず結果的に画質の低下を招いた。
- ② 記録は「大四ツ」フィルムを用いて、図21のように連続して記録することで、腫瘍像とその後部エコーが関連づけられるように工夫した^{14～17)}。

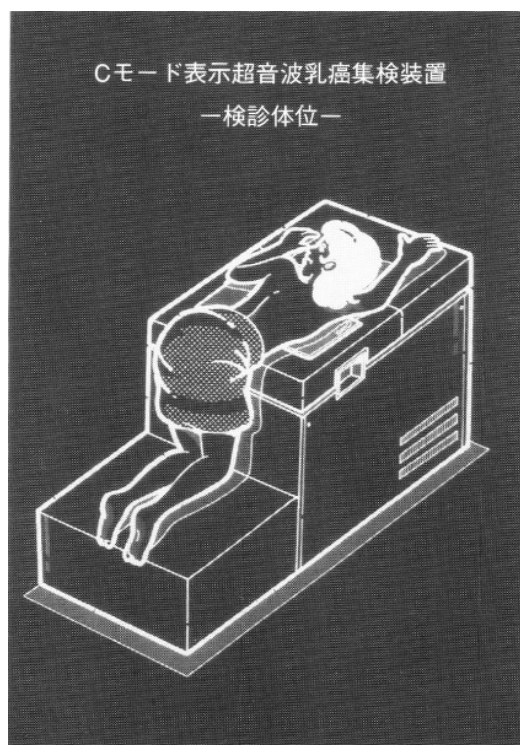


図20 最後に改良された水槽と被験者の体位

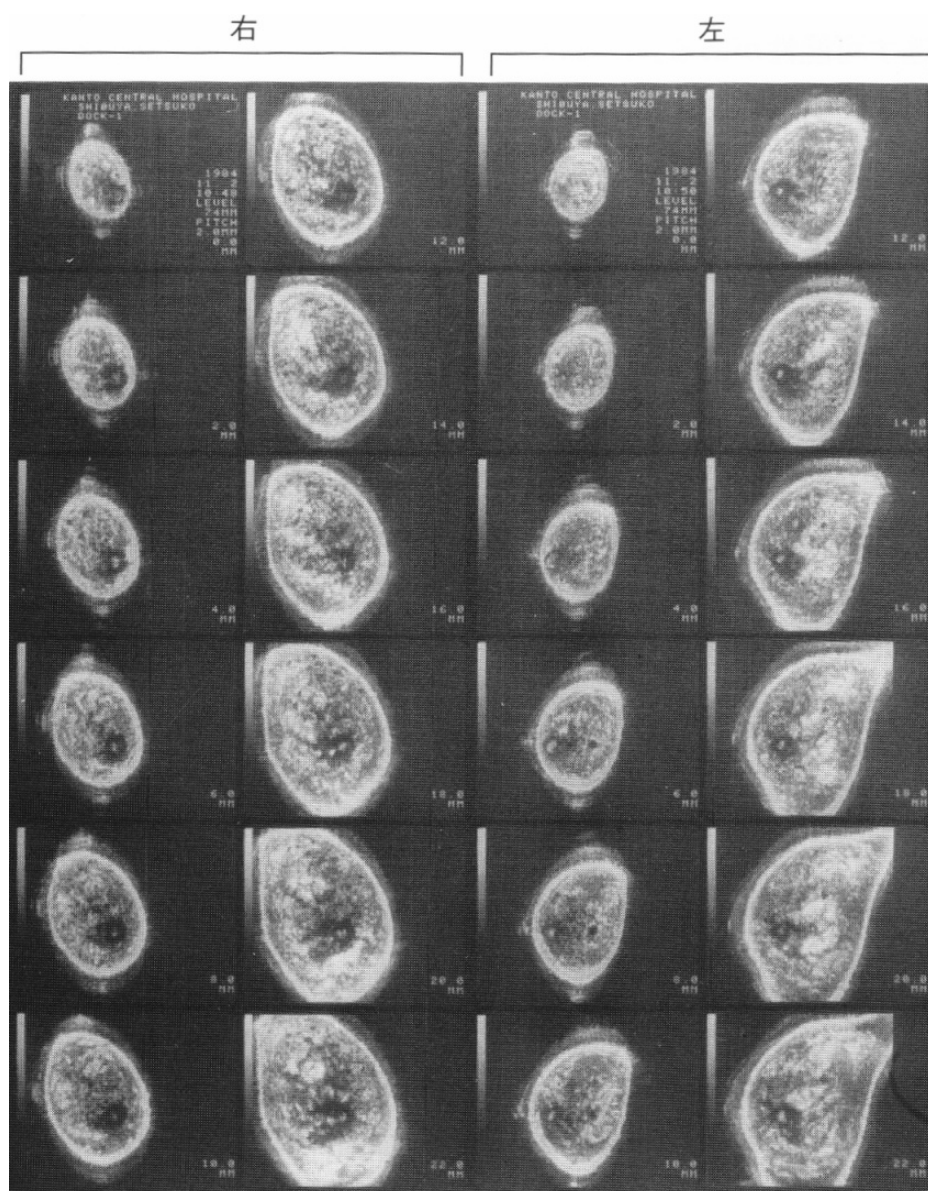


図21 最後に改良された試作機の記録方式：左右各12断面

表2 Cモード表示乳癌集検成績

	I	II	III
正 常	103	293	340
乳 腺 症	126	529	746
線維腺腫	41	42	97
囊 胞	17	42	63
膿 瘍	0	0	2
細 胞 腫	0	0	3
乳癌(疑)	3	4	1
乳 癌	9	19	10
豊胸術後	0	0	3
そ の 他	5	6	7
計	304	934	1,272

(I, II, IIIは改良期) 1986.1.KCH

その後もいくつかの微細な改良を加えながら、Cモード表示に変換してから、表2に示すように臨床テストを重ねた。しかし、残念ながらどうしても実用化には踏み込めなかった。

その理由について、当時の筆者のメモには次のように記録されている。

「①このCモード表示では分解能が足りない。基礎となるBモードの分解能を向上させなければ、5mmの充実性腫瘍を見逃す可能性がある。

②乳房のCモード画像では、胸廓の一部が乳腺内部に現れて、予想以上に読画が難しい。このような危惧のある検診装置を実用化すれば、USは社会的に信頼を失うだろう。願わくば、もっと分解能の良い装置を用いて、単純なCモード法ではなく、胸壁に沿った横断面像が得られる方式を考案して、検診装置の実用化にもう一度挑戦したい」と。

第5は体表臓器用アニュラアレイプローブの開発である。

Cモード表示による乳癌集検装置実用化の夢は消えたが、乳癌診断用装置の現状には飽き足りないものがあつた。超音波診断装置が急速に進歩したといっても、乳房USでは専用機といえるものは、水浸法リニアとアークスキャン以後は皆無に等しく、ほとんどが消化器超音波を転用したもので、独自性あるいは専用機能の点では満足できるものではなかった。

1989年10月、久保田ら（東海大）、川内ら（昭和大）、田中、小島、筆者ら（関東中央）の同好の士にT社の技術陣を加えて乳房US装置の実用化について議論した。そして、臨床要求として次の4項目を設定し、専用装置の実用化に取り組むことになった。

- ①正常乳管が描出でき、その内腔の観察ができること。
- ②乳癌の乳管内進展の状態が描出できること。
- ③径5mmの腫瘍の質的判定ができること。
- ④狹隘で凹凸の多い部分も自由に走査できること。

このうち①②③は正に分解能と画質に関する事項であり、④はプローブの操作性に関わる事項である。

この装置は臨床要求の内容でもわかるように乳腺病変の質的診断を目的としたもので、前者の条件を満たすには、乳房内を細くて均一なビームで走査し、アーチファクトを極力抑え、S/Nを向上させることが求められる。また、後者の条件を満たし、常に皮膚に垂直にビームが入射できるようにハンドヘルド型が考えられた。数回にわたる議論と実験の結果、前者には焦点点の異なる同心円状に分割された複数の円形振動子によるダイナミックフォーカス（図22）が必要であり、皮膚と振動子間の多重エコーを防ぐためにプローブ内にスタンドオフ（振動子面と皮膚との間隔）を内蔵することにした。

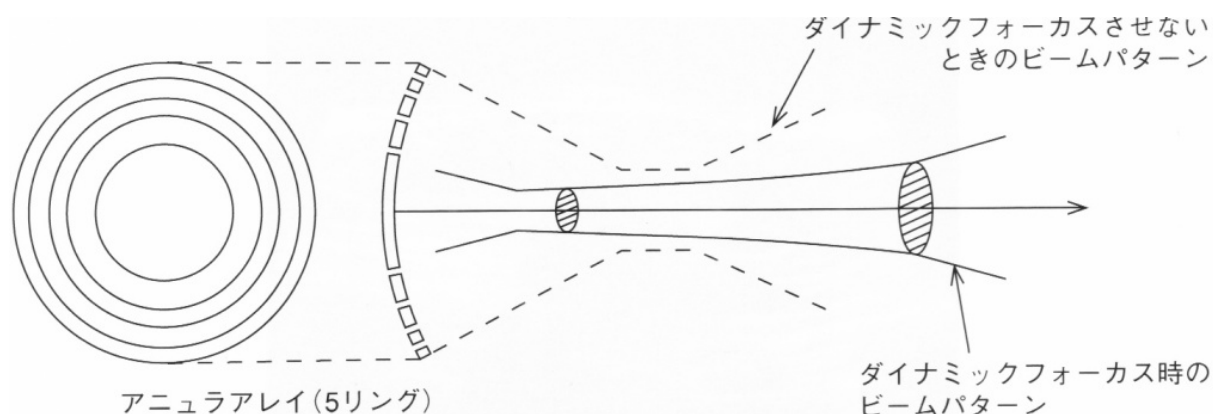


図22 5リングによるダイナミックフォーカスのビームパターンを示すシェーマ
(実用化された装置は12リングからなる)



図23 実用化されたアニュラアレイプローブ

T社の優秀な技術陣は高周波（7.5MHz）、大口径の12分割されたリング状の振動子を用いて、サイドローブを極力抑え、高い空間分解能が得られるアニュラアレイプローブを考案し、メカニカルにセクター走査する方式を採用した。また、プローブ内にスタンドオフ（45mm）を内蔵することにより、多重エコーの消去とともに、スタンドオフの違和感が消え、高い操作性が保たれるようになった。

1990年11月、遂に前述の目標をほぼ満たすアニュラアレイプローブが実用化された（図23）。図24はこの装置によって得られた乳癌症例である。

この装置の診断能については、翌年11月、日本超音波医学会第59回研究発表会（千葉、金子敏郎会長）および7th International Congress on the Ultrasonic Examination of the Breast（1991年5月、東京、霞富士雄会長）において発表した^{18~20）}。

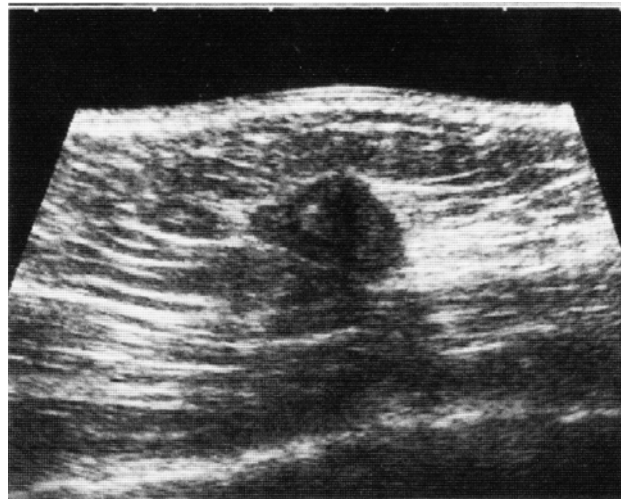


図24 アニュラアレイプローブで描出された乳癌像
(8 X 14 mm)

その後、体表臓器用プローブと銘打って、10MHzあるいはそれ以上の高周波プローブが実用化されているが、乳房画像においては、このアニュラアレイを凌ぐ装置は未だないと自画自賛している。この装置の欠点を敢えて挙げるならば、ドプラ情報が得られない点にあるが、乳房USの現状では、ドプラ情報は必ずしも必要不可欠とは考えていない。

● 2. 乳癌診断装置と乳癌検診の現状

1) 最近の乳癌診断装置

現在、本邦において多く利用されている診断装置は、前述したアニュラアレイプローブ(7.5MHz)を搭載した装置と電子リニア装置(10MHz)による装置である。一時、試作機として二次元走査(従来のリニアプローブのスライス方向にも振動子を配列して、電子フォーカスを可能にする)が注目を集めたが、実用化については寡聞にして知らない。アニュラアレイ装置の画質を凌駕する装置が出現するとしたら、この二次元走査による装置ではないかと秘かに期待している。

もう一つの話は、組織弾性イメージング(Elastography)である。周知のごとく、これは1999年、椎名、植野らによって実用化されたもので、圧迫によって誘起される組織の変位・変形の状態(歪み像)を視覚化したものである^{21, 22)}。換言すれば、触診所見に客観性を付加したものであるということが出来る。現在は5mm以下の小腫瘍や非浸潤癌と乳腺症の鑑別、抗癌剤の治療効果の判定などに利用されつつある。技術の進歩に伴い、将来は組織の変位・変形の定量化や三次元表示も可能になり、有用性は更に高まるものと期待されている。

2) 乳癌検診および診断の現状と筆者の意見

現在、本邦で行われている乳癌検診および診断の方式については、すでに多くの雑誌やセミナーで教宣、指導されているので敢えて割愛するが、筆者の渉猟したところでは、現在、検診方式はマンモグラフィ(MMG)の信奉者はMMGを中心に、USの愛好家はUSを優先的に利用する傾向が見受けられる。筆者も御多分に洩れず、USを主軸に検診、診断を進めている。

その理由はすでに多く語られていることであるが、単純にUSは、

①無害で被爆などの副作用がない、②情報量が多い、③経過観察に利用しやすい、の3点で、臨床的に使いやすいからである。筆者の所属する施設は検診が主体で、その方式は受診者側の要望を受け入れざるを得ないことが多いが、筆者は可能な限り、USとMMGの併用を奨めている。

また、診断では初回にはMMGとUSを撮り、その後はUSのみを用いている。USは限局性の病変が見られる場合、その所見に応じて3カ月後、6カ月後の再検を行い、異常所見のない場合でも逐年検査を奨めている。一方、2回目からのMMGは、USで「境界不整不鮮明で内部に点状エコーを伴う低エコー域」を示す所見が見られる場合は再検を強要するが、無所見の場含は3～4年毎の再検でよいと最近考えている。その理由はMMGで検出される非浸潤癌は進行が遅く、USで描出される腫瘍形成性乳癌は進行が速いからである。

ここで、今後の乳癌検診の在り方を考えるために、検診上あるいは、臨床上必要な項目を挙げて、現用のMMGとUSを比較してみたい。

<方式と表示>

MMG：透過法で、全体像が1枚のフィルムに映像され、情報は重層して表示される。

US：反射法で、多数の走査断面が描出され、情報は個々に分離されて表示される。

<解像度>

MMG：空間分解能は頗る良く、 $50\mu\sim 200\mu$ の微細石灰化の1個々が描出される。しかし、コントラスト分解能は低く、脂肪、石灰化（微細～粗大）、水は識別されるが、高濃度乳腺組織内では、水、間質、腫瘍組織の識別は容易ではない。

US：空間分解能はMMGに比べると、かなり悪く、微細石灰化はかなり密集したもの（高密度なもの）でないと描出できない。この場合も1個々を分離描出するのではなく、スペックルパターンとして映像されるに過ぎない。これに対して、コントラスト分解能は頗る良く、脂肪、液体、腫瘍、乳腺組織、石灰化（粗大、高密度）などの音速の異なる物質では必ず反射が起こり、そのエコーの強弱に応じた輝度の濃淡として表される。

<装置>

MMG：専用の装置と周辺機器

US：7.5MHz以上の高周波プローブを搭載した汎用装置

<記録>

MMG：少数のX線フィルムに記録

US：多数の断面像の記録

<苦痛と被爆>

MMG：あり

US：なし

<対象となる癌の種類>

MMG：非浸潤癌（微細石灰化を伴う）、乳癌の10%以下

US：浸潤癌（腫瘍形成性）

<経過観察>

MMG：困難

US：容易（**図25**）、（また、簡便にエコーガイド下ABCが可能）

<検査時間>—脱着衣時間も含めて—

MMG：約10分

US：約10分

<検者の技術依存度>

MMG：中

US：大（具体的な基準がないため、MMGを<中>として、USはそれより依存度が大きいという意味）などの相違がある。

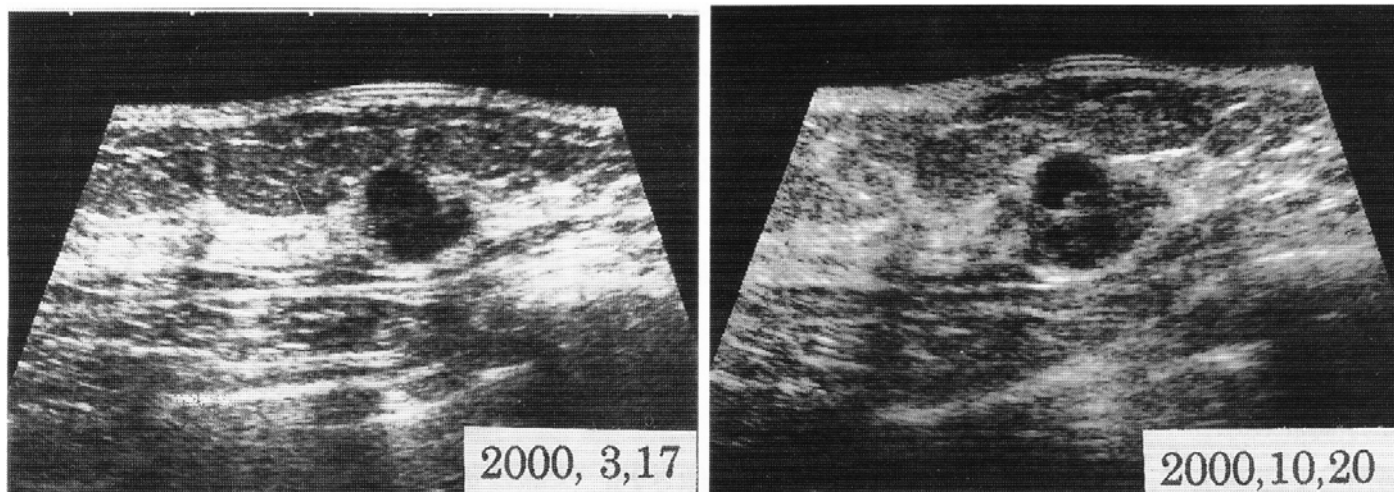


図25 経過観察により乳癌と診断された症例

これらには「方式と表示」「解像度」「装置」「苦痛と被爆」などに示されているように電磁波と音波という基本的な性質、透過法と反射法という情報収集方式の差異に起因するものがあり、病変の検出能、临床上の利便性を合わせて考慮するならば、本邦における乳癌検診ではUSが第1の選択肢に挙げられるべきではなかったかと今も疑問を禁じ得ない。EBMが叫ばれて久しいが、このような両者の基本的な性質、これに基づく临床上の有用性は古くから認められているところであり、無視することのできないEBMではなかろうか。加えて、欧米と日本人女性の乳房の組織形態上の差異や彼我の年齢別乳癌罹患率の違い、また、MMGの得意とする非浸潤癌の本邦における罹患率の低さなどから考えても、MMGを主軸とする検診システムの在り方は、US愛好家の立場を離れても理解に苦しむところである。幸いなことに、現行の検診システムにUSの導入が検討され、カテゴリー分類も完成に近いと聞く、被検者にとっても同慶の至りである。

●3. 近未来の乳房USに期待するもの

乳房USの発展にとって重要な課題は

- ① 高い性能を有する検診装置の実用化
- ② 反射強度（輝度）以外の音響因子の映像化
- ③ 本邦独自の検診システムの構築
- ④ 検診担当者の教育、育成

と考えている。

1) 検診装置の開発

現在、本邦における乳癌検診は多くはハンドヘルド型の診断用装置で行われている。この方式は形、大きさにバラツキのある乳房などの走査に適しており、ゆっくり（フレームレイトの関係から）と丹念に走査すれば、きわめて有用である。この装置の最大の欠点は病変の位置が表示できないことと、プローブを握る検者の集中力と技術に大きく依存することである。後者の欠点は検者の教育・訓練でかなり改善されるが、前者は装置の構造上の問題であり、基本的には検診専用装置としての機能を付加すべく検討、企画される必要がある。

その機能とは、前述のCモード表示装置の項で述べた4条件で、強いて加えれば、病変を拡大して観察できるモニターを設置することであろう。筆者にもし再度の挑戦が許されるなら、次のような事項の改善に留意して臨むであろう。

- ① 画質・分解能とプローブについて

乳癌発生可能範囲をスキャナの移動や体位の変換なくして、走査するためには、前回と同様に電子リニアアレイプローブを用い、これを2次元アレイに改良して、バランスの良いビームを確保し、多段フォーカスを採用する。周波数は7.5MHz、ハーモニック法で映像化する。

② 表示について

記録枚数を制限し、かつ病変の位置を明示するためには、Cモード表示が必要である。ただし、単純なCモード表示では前述したように胸廓の一部が乳房像内に表示されて、著しく読画が妨げられる。胸廓に沿った横断面像を表示する方式（Fモード、Fは flexible の頭文字）の実用化は現在では可能という。積極的な取り組みが強く望まれる。

③ 水槽表面に張るビニール膜の分解能に与える影響は大きい。

あらゆる方向から材質を検討する必要がある。

検査装置に限らず、新しい機器の開発・実用化を目指す場合、最も重要なことは、確かな臨床要求に基づく装置の条件（機能）を定め、これを丹念に克服していくことである。臨床要求を無視した装置は有用な検診（診断）装置たり得ないと思う。

2) 精検装置の開発

エラストグラフィの使用経験がないため、多くは語れないが、乳癌の精検装置として筆者が期待しているものの1つは、腫瘍組織の弾性率の「定量化」である。また、かつて消化器USで、筆者はT社との共同研究で、肝臓腫瘍の質的診断のために「音速分布」の映像化を試みたが、肝臓内には門脈、胆管などの強い反射源があり、実用化には至らなかった。しかし、音速は反射法USでは定量化できる因子の1つであり、再度試みる価値はあると考えている。

表3 地区医師会講演などで示した筆者の乳癌検診方式

I	視触診による単独検診は廃止
II	USを主軸にした検診の実施（1回／年）
	・綿密な視診を併用する
	・熟年者（45歳以上）にはマンモグラフィを併用する（1回／2年）
	・不整、不均一、境界不鮮明な低エコー域が見られる場合はマンモグラフィを併用する。
	竹原（2004.4）

3) これからの乳癌検診

筆者は本邦における乳癌検診の現状について、数カ所の地区医師会などで講演し、その中でこれからの乳癌検診の在り方を示した（表3）。この検診システムの基本的な考え方は日本人女性に適した乳癌検診は逐年にUSを行い、これにMMG、視診を併用することである。

その後、1年半を経過した現在、次のような理由で一部変更し試行している。

I. 視触診による単独検診は廃止する

II. USを主軸に次のように検診を行う

- ・USは逐年で行う
- ・綿密な視診を併用する
- ・MMGは初回、30歳以上全員に実施する

初回以降は無所見の場合は3～4年毎、またUSで境界不整不鮮明な低エコー域が認められた場合に行うこの理由は

- ① USは触診の延長ともいわれ、触診の役割を十分果たし得るからである。したがって、USを中心に置いた検診では触診は無用である。また昨今、触診に練達の医師は少なく、未熟な触診は却って有害になることがあるからである。

- ② US検診を逐年に行う理由は腫瘍を形成する乳癌（浸潤癌）は非浸潤癌に比べて発育が速く、隔年検査では早期を逸する可能性があるからである。
- ③ 視診所見を重要視する理由は、Page 病に見られるびらんはUSやMMGでは見逃される可能性が高い。この他 dimpling sign, pigs skinなどを伴う癌を見逃すことは絶対に避けなければならないからである。
- ④ MMGを初回、30歳以上全員（妊婦は除く）に行う理由は、30歳代でもMMG適応者が多いことと微細石灰化を伴う症例をかなり経験したからである。また、無所見の被検者には3～4年に1回としたのは浸潤癌は逐年のUSで検出されるし、USで検出困難な非浸潤癌は発育が遅いからである。
そして、このMMGでよく検出される非浸潤癌は、USでも丹念に観察すれば「境界不整不鮮明な内部に点状エコーを伴う低エコー域」として描出されるからである。

この筆者の試行している乳癌検診方式は、今後各種装置の進歩、乳癌の新知見の出現などにより多少は変化するであろう。しかし、本邦における乳癌検診の主軸はUSであることは変わらないであろう。それはUSが日本人女性に最も適した検査法であるからである。

4) 担当者の教育・育成

担当者教育・育成の問題は古く1980年初頭、リニア電子スキャンによる集検（検診）が試行されるようになった時期に始まる。

消化器領域では1984年、超音波集検の抱える種々の問題点を討議し、共通の基盤に立った超音波集検の「輪」を広げ、発展させることを目的に「消化器超音波集検懇話会」が発足した。この懇話会での種々の討議事項の中で最重要課題となったのは「精度の向上」で、その中心は直接プローブを握る技師の教育・育成をいかに行うかであった。多くの試行錯誤の結果、懇話会発足15年目に思い立ったのは「草の根」運動ともいべき全国規模の「教育」の展開であった。

この運動の基本的な考え方は、本学会を運動の基点に据え、教育現場を広く各地方会に移すことであった。1999年に発足したこの運動は多くの人の理解と協力により、2003年8月、全国各地地方会に医師・技師合同による「超音波部会」なるグループが誕生し活発に活動している。

関東甲信越地方を例に挙げれば、年6回セミナーを開催、更にこの運動を県単位に拡大すべく取り組みが開始されている。また、他学会にも呼び掛け合同セミナーなどを開催している^{23, 24)}。

検診担当者の「教育」について、消化器US検診を例に挙げて説明してきたが、この「教育」は1つの運動であり、1学会が単独に行うよりも、共通の認識に立った研究会や学会が慣例を越え、学会の枠に捉われることなく、広く合同して実施されなければ、その「実」を挙げることはできないと考えている。

● おわりに

周知のごとく、超音波はいかに機器が進歩しても、その基本的な性質からその精度は大きく担当者の技術、知識、経験に依存する検査法である。

乳房US検診に関する「教育」は日本乳腺・甲状腺超音波診断会（JABTS）を中心にかなり熱心に取り組まれつつあると聞くが、今後は他学会とも連携して、この運動を全国規模に展開していただきたいと願っている。

検診における究極の目的は、その疾患による死亡率の低下である。この実現には高い受診率、高精度の検診、高い精検受診率、優れた精検処理能力、緻密な事後管理などが要求される。

このために、筆者ら担当者が当面なし得ることは、精度の高いUS検診を主軸にした受診者に優しい検診システムを提供することで、全国規模での担当者教育・育成が最重要課題と考えている。

ペンを握るにあたり、本誌記念号に執筆の機会を与えて下さった編集委員各位に衷心より感謝いたします。

文 献

- 1) 小林利次, 高谷治, 服部信, 他: 乳腺超音波感度断層法の研究(第2報), Tadpole-tale Sign with Lateral Shadow (良性) と Acoustic Middle Shadow Sign (悪性) の鑑別診断上の意義とその臨床評価. 日本超音波医学会講演論文集(日超医論文集) 22: 23-24, 1972
- 2) 堤正夫, 和賀井敏夫, 集団検診の現況と将来. 小林利次編, 臨床超音波シリーズ乳腺・甲状腺. 南江堂, 1983, 66-92
- 3) 竹原靖明, 渡嘉敷 暁, 山下宏治, 他: 乳癌の超音波診断における新発見, 日超医論文集 23: 1-2, 1973
- 4) 竹原靖明, 渡嘉敷暁, 森田 健, 他: 乳癌のエコーグラムとマンモグラムとの対比—主として反射量の成因について—. 日超医論文集 28: 125-126, 1975
- 5) 竹原靖明, 久田祐一, 松川正男: 周波数の違いによる腫瘍辺縁像. とくに反射量の現れ方について—早期乳癌診断のために—. 超音波医学 10: 129-133, 1983
- 6) Takehara Y, Hisada Y, Yamada K: Ultrasonic diagnostic of early breast carcinoma—Advantage of high-Frequency transducer—, Ultrasonic Examination of the Breast (Jellins J, Kobayashi T, eds) 33-88. John Wiley & Sons Ltd, 1983
- 7) 竹原靖明, 久田祐一, 松川正男: 周波数の違いによる腫瘍辺縁像. とくに反射量の現れ方について—. 日超医論文集 27: 163-164, 1975
- 8) 竹原靖明, 渡嘉敷暁, 山下宏治, 他: 乳腺疾患の超音波断層像—腫瘍後部エコーに関する臨床的実験的研究. 日超医論文集 25: 141-142, 1974
- 9) 井出正男, 増沢信義, 竹原靖明: 乳腺集検用同時多層断層像超音波診断装置. 超音波医学 8: 211, 1981
- 10) Iinuma K, Kidokoro T, et al: Ultrasonic mass-screening system for the breast examination, 2nd Meeting of WFUMB(abstract). 386, 1979
- 11) 竹原靖明, 森田健, 松川正男, 他: 乳癌集団検診用試作機とその臨床応用. 日超医論文集 35: 339, 1979
- 12) 桑島章, 浦野民雄, 利波紀久, 他: 電子走査装置によるCモード法の臨床的意義. 日超医論文集 34: 247, 1978
- 13) 横井浩, 伊藤健一, 伊藤正安, 他: 電子スキャン超音波診断装置を用いた高速Cモード法の臨床応用. 日超医論文集 34: 247, 1978
- 14) 松本賢三, 内海 勲, 高見沢欣也, 他: Cモード超音波乳癌集団検診装置. 日超医論文集 39: 567, 1981
- 15) 竹原靖明, 松川正男, 久田祐一, 他: Cモード表示超音波乳癌集検装置の臨床応用. 日超医論文集 40: 631, 1982
- 16) 竹原靖明, 久田祐一, 飯沼一浩, 他: 乳癌集検における超音波検査の役割—Cモード表示装置を中心に—. 映像情報 15: 213, 1983
- 17) 竹原靖明, 久田祐一, 高見沢欣也, 他: Cモード乳癌集検装置の臨床応用. 画像診断 3: 505-512, 1983
- 18) 田中一成, 竹原靖明, 川内章裕, 他: 体表臓器のための高分解能試作機の実用化とその使用経験. 日超医論文集 58: 609, 1991
- 19) Tanaka I, Takehara Y, Kawauti A, et al: The development of new high resolution ultrasonic diagnostic equipment for surface organs. Topics in Breast Ultrasound at 7th International Congress on the Ultrasonic Examination of the Breast (Kasumi F, Ueno E, eds), 143-146, Shinohara
- 20) 乳腺・甲状腺超音波診断アトラス(竹原靖明監修). 初版, 秀潤社, 1992, 東京
- 21) 椎名 毅, 他: 複合自己相関法による実時間 Tissue Elasticity Imaging. *J Med Ultrasonics* 26(2): 57-66, 1999
- 22) 伊藤吾子, 他: 乳腺疾患における Elastography の臨床応用. J A B T S 抄録集 6 (2): 50-51, 2003
- 23) 竹原靖明, 他: 腹部集検における超音波検査の役割と今後の課題. 超音波医学 10: 350, 1983
- 24) 竹原靖明: 消化器超音波検診(集検)の歩み. 消化器検診 Newsletter 70: 1-4, 2005