

人体軟部組織の超音波による描出

The ultrasonic visualization of soft tissue structures in the human body

Holmes JH, Howry DH, Posakony GJ, Cushman R. Tran Am Clin Climatol Assoc 66:208-23,1954

読者の多くは、超音波技術が現在主に医学の3つの分野で利用されていることを承知されていると思う。すなわち、中枢神経系や腫瘍に対する破壊的作用、関節炎の治療における理学療法、そして現行の診断法が不備な領域における解剖学的構造、特に軟部組織の診断的描出である。本稿は、診断技術に限って述べるものである。我々の装置の出力は、治療や理学療法に利用されるものに比べて僅かなものである。このため、我々の研究では組織の傷害は認められていない。この装置の使用者、実験動物に組織傷害の徴候はない。一般に、超音波による組織傷害では、強い疼痛が前兆となる。我々の方法では、いかなる疼痛や組織傷害の徴候も認められていない。

他にもいくつかのグループがこの問題を研究しているが[1-5],ここでは我々の実験に限って述べる[6,7].我々の方法を説明するには、一連の問答形式が良いであろう。

超音波技術は、現状の他の診断法で得られないどのようなものをもたらすか？

図1(中段)は、術前に触知し得なかった乳腺硬癌の組織標本である。我々の装置で撮影したソマグラム(somagram)を並べて提示した。標本の皮膚面の輪郭が見え、病理切片で癌組織が認められたレベルには一連のコントラストが認められる。組織の他の部分には、陰影が見られない。下段のように癌がない部分では、ソマグラムに陰影は認められない。上段はリンパ節転移を含む組織であるが、癌組織を含むリンパ節の位置に一致して明らかな陰影が見られる。このように、癌のような異なる組織濃度の領域がソマグラムに描出される。

これはいかにして描出されるのか？

図2下段は、腎嚢胞の病理標本である。上段には、この腎嚢胞がどのようにソマスコープ(somscope)に表示されるかを示す。嚢胞壁の大きな輪郭と、透明な嚢胞液を含む嚢胞内の均一な領域が見える。嚢胞に接して腎の輪郭がみえ、腎内の構造の一部、特に中心部が描出されている。

一般的な描出方法は、ソナーやレーダーで利用されているエコー測定技術に非常に良く似ている。本質的に、我々はレーダーの電子技術を超音波に応用している。

トリガー発生器(タイミング機構)によって、パルスジェネレーターが持続時間約0.25 μ 秒の矩形波を発生する。その振幅は、0から3,000ボルトまで制御できる。このパルスが、防水容器に入れた超音波クリスタル(ultrasonic crystal)を通過すると、クリスタルはパルス電圧の影響で短時間激しく膨張、収縮して機械的に波動を発生する。超音波レンズの使用により、この機械的波動はクリスタルよりも狭い断面積に制限される。超音波ビームのエネルギーは、被写体のような不連続領域に衝突するまで液体中を伝播する。この物体の表面で、音波パルスの一部が反射されて液体中に戻り、再びクリスタルに衝突する。クリスタル駆動装置は、音波を送信した後、エコーが戻ってくるまで静止状態となり、クリスタルは受信機となる。機械的波動はクリスタルによって電気信号に変換される。この信号を、受信アンプによって増幅し、オシロスコープ上に1つの輝点として表示する。物体中の構造的な不連続がそれぞれエコーを発生し、これがオシロスコープ上の輝点となる。このように、エネルギービームが物体を通過すると、反射面を表わす輝線がオシロスコープ上に描画され、各点間の距離は物体中の反射面の距離に相当する。最初の超音波パルスからのエコーがすべて戻るとただちに新しいパルスが発生するが、これは発生装置の位置が機械的に移動するため前回とやや異なる経路で送信される。新しいパルスは先行パルスに隣接する位置を通過し、新しい輝線がオシロスコープ上に描画される。このようにして毎秒数千回のパルスが生成され、それぞれが物体中をやや異なる方向で通過する。ビームは機械的走査機構と同期機構によって物体中を往復運動しながら、個々のパルスがスクリーン上に基線を描いてゆく。この動作は非常に速いため、オシロスコープ上にテレビのような視覚的に連続する画像を描くことができる。この動作によってソマスコープは、組織標本をナイフで切断して上から見たような断面像を表示することになる。

メガヘルツ領域の超音波は、空気中では大きく減衰する。従って、被写体や標本は、液体に浸すか、音波が通過する何らかの個体と直接接触させる必要がある。我々の研究は、被写体を水槽に浸して行なった。

ソマスコープの実物を図3に示す。電源、パルスジェネレーター、アンプ、同期装置、オシロスコープが、大きなスチール製キャビネットに収められている。機械的走査システムと音響発生装置は、大きな水槽に取付けられている。患者を温水を満たした水槽に入れ、音響ヘッドを検査位置に移動する。キャビネット上部

*コロラド州デンバー。Veterans Administration および U. S. Public Health Service (Grant no.C-2422 NSS) の援助による。

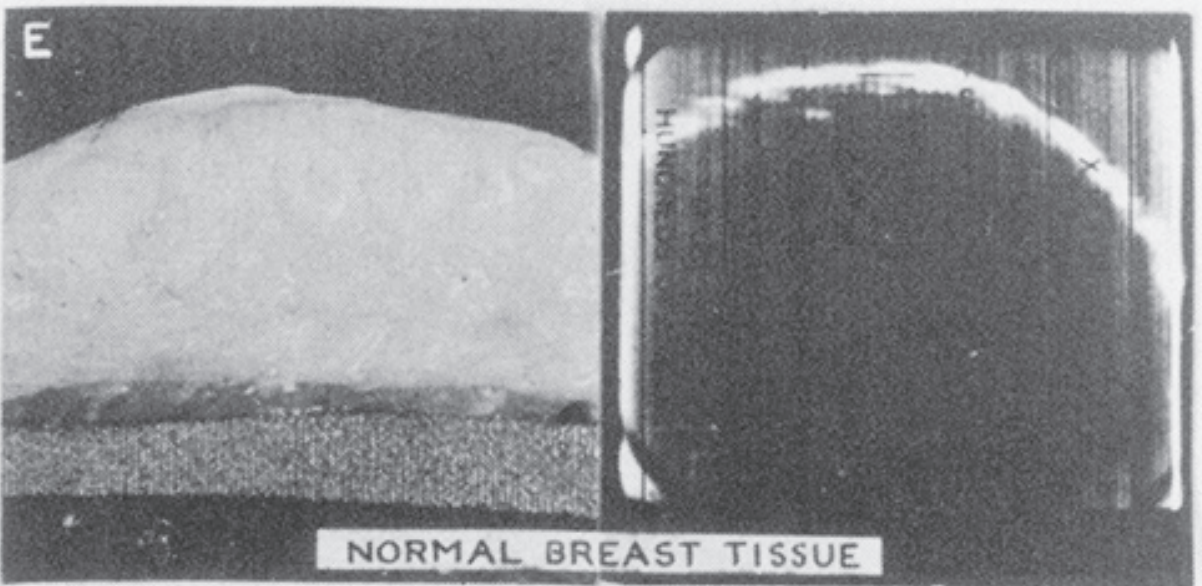
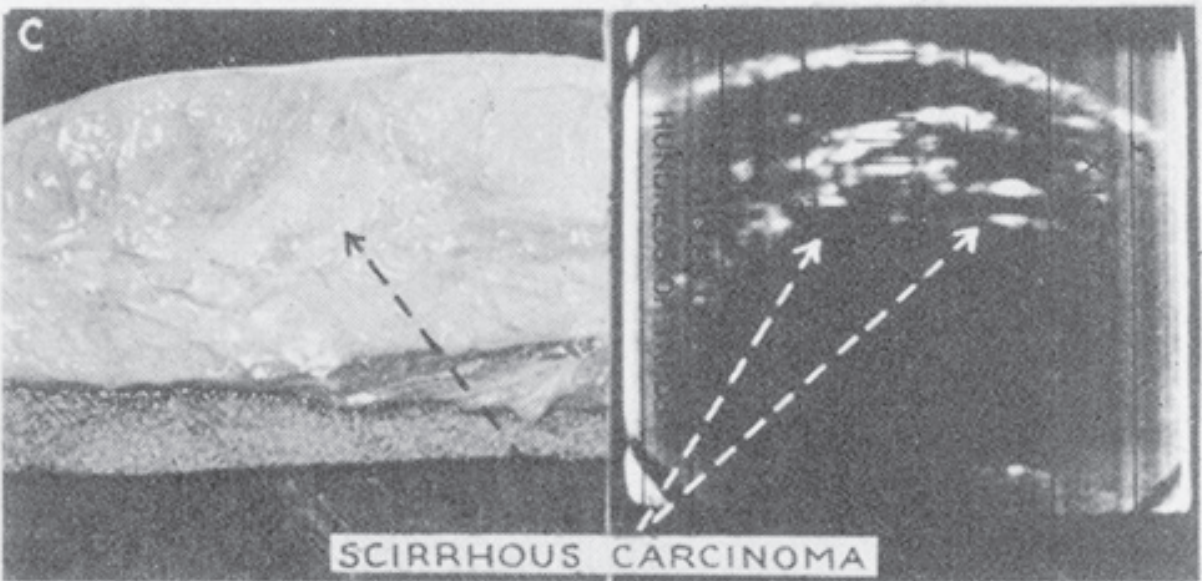
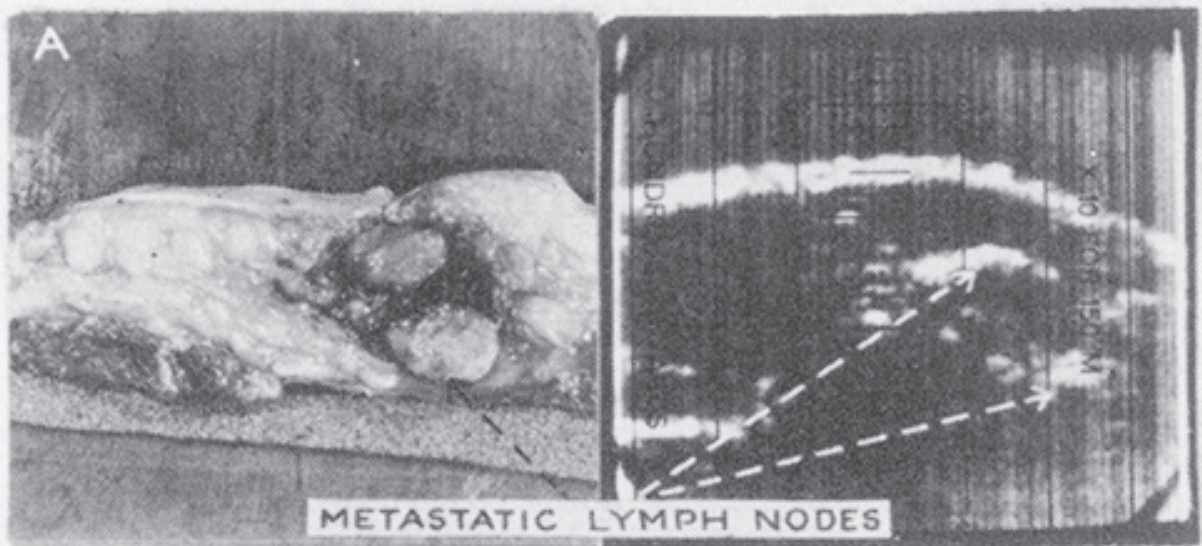


図 1. 中段：乳腺硬癌の切除標本. 上段：同症例のリンパ節転移. 下段：同じ乳腺の非癌部. それぞれ標本に対応するソマグラムを Xie 髓膜腫. 癌部では、乳腺の輪郭内に白斑陰影が認められる.

DIAGRAM OF SOMASCOPE SCANNING TISSUE SPECIMEN

A

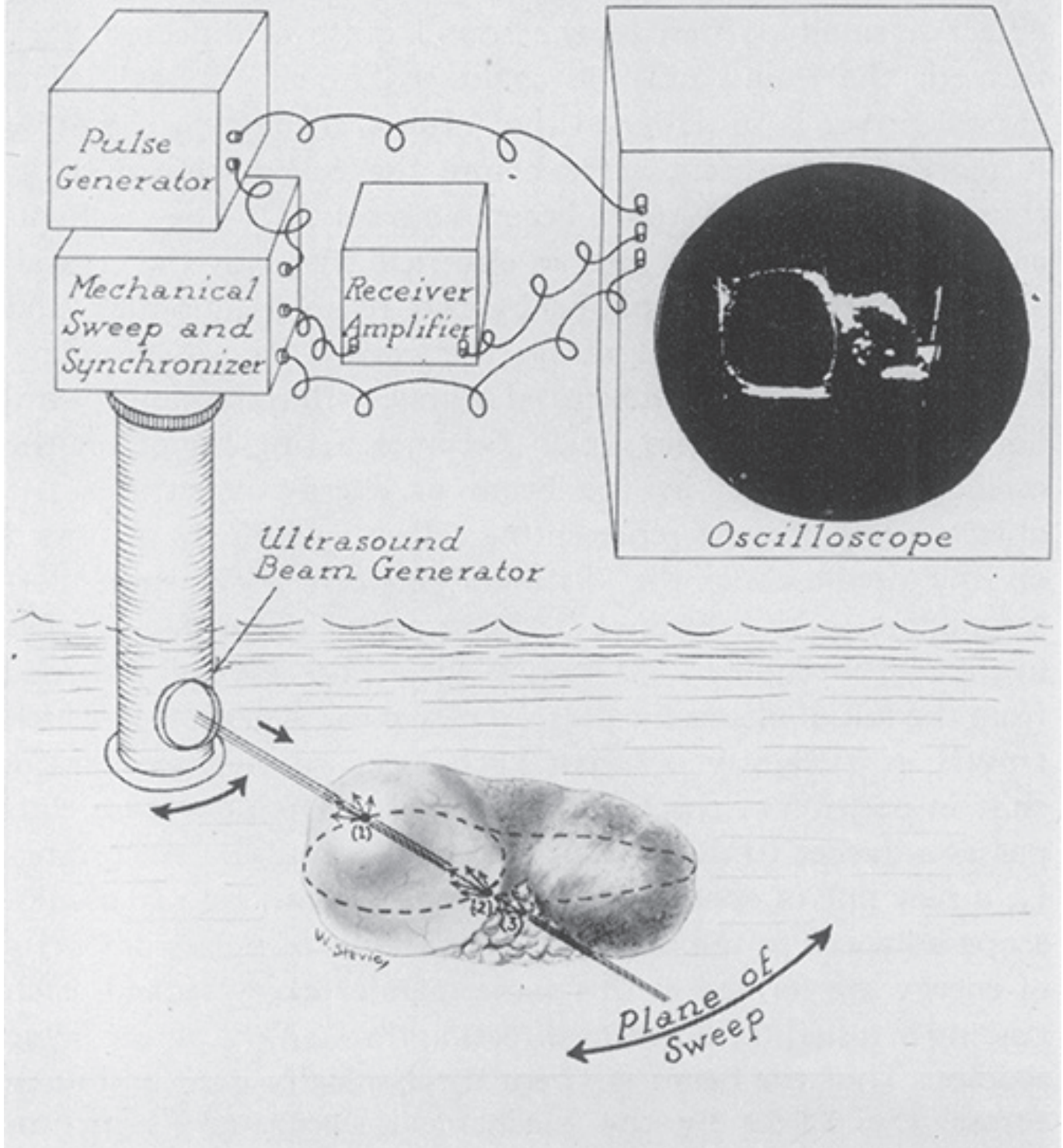


図2. ソマスコープの主な構成. 下部には腎嚢胞がソマスコープのスクリーンに描画され状態を示す.

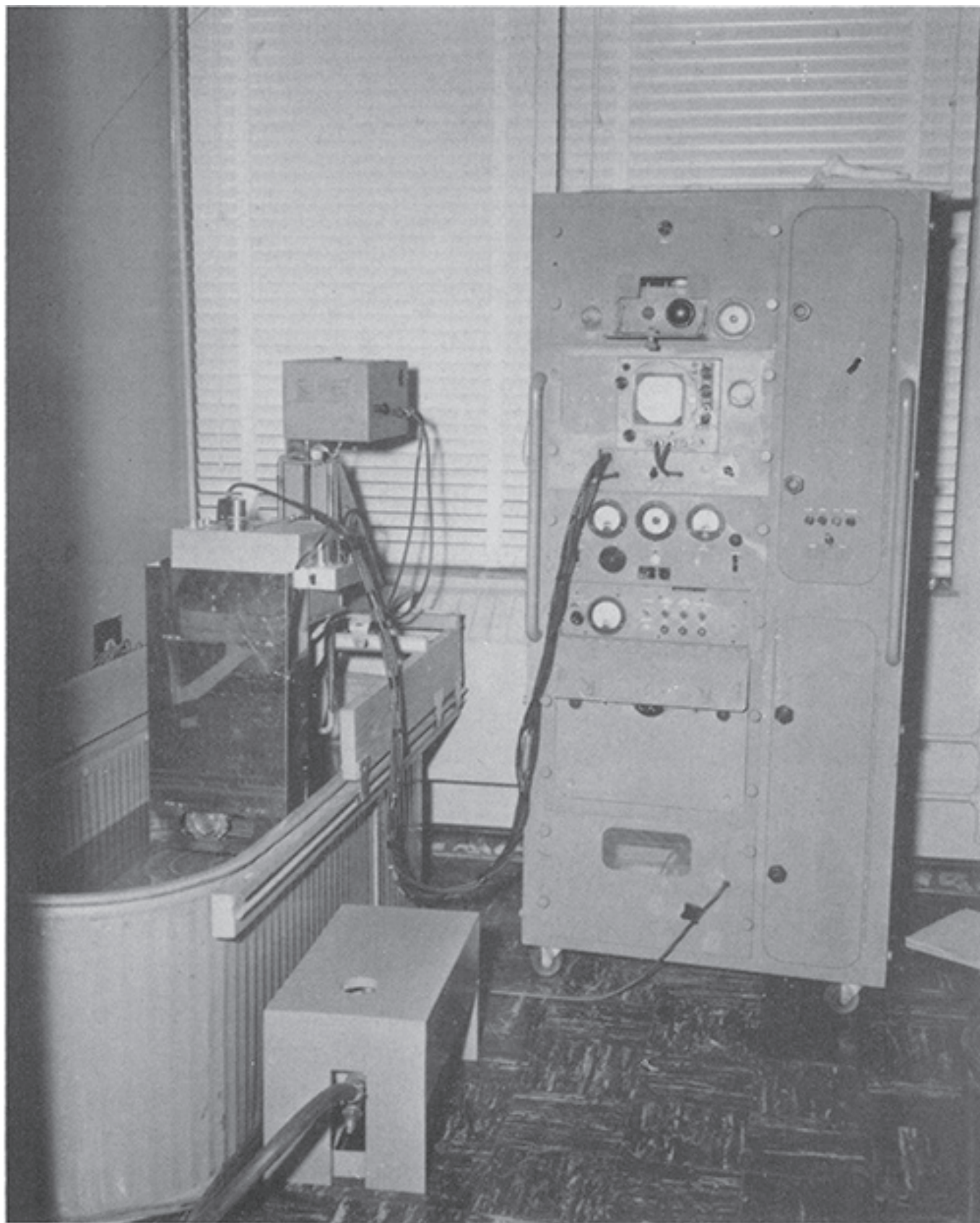


図 3. 現状のソマスコープ.

の白い四角部分 (オシロスコープ画面) にソマグラム (音響画像) が表示される。画像は、X線透視検査のように術者が直接観察するか、あるいは標準的なカメラで写真に記録できる。すべてのソマグラムを異なる角度から慎重に検討してから最終的な写真を撮影することにより、写真だけでは同定が難しい構造も同定することができる。

近接した異なる濃度の構造をどの程度識別できるか？

図4に、健常人の第5頸椎高位の頸部横断像を示す。頸部の輪郭が見え、その内部に皮膚、気管、頸動脈、頸静脈、筋膜に被われた筋束が見える。頸部は、構造が密接して相互に分離することが難しいため、最も描出が難しい領域である。動脈のように動きのある構造は比較的同定が容易である。図の下部には、動脈の動きと、1本の深部静脈のA, C, V波が見える。最上段は、頸動脈上の皮膚の波動を反映したものである。飛行機の位置や、車の速度を測定する「移動標的」法をこの装置に採用すれば、心臓や大血管の波動を詳しく検査することができるであろう。従って将来的には、様々な収縮状態における心室の大きさ、様々な心周期における大血管の径、血管壁異常による収縮の異常などをとらえることができるであろう。

解剖学的構造の異常からどのような診断的有用性が得られるか？

腫瘍は、それ自体が音波を異常に反射することに加え、隣接構造を偏位することで検出できるであろう。良性コロイド甲状腺腫の患者の頸部のソマグラムでは、甲状腺は非常に均一で、エコーは主にその表面からのみ得られ、腫大した甲状腺の輪郭のみが認められた。腺腫や嚢胞変性があれば、これらがソマグラムに描出されるであろう。

非金属異物はどのように見えるか？

この方法では、プラスチックやゴムなどの異物の存在を容易に検出できる。肝切片内に金属、プラスチック、ゴム、木の小片を埋め込んだところ、X線は金属しか検出できなかったが、ソマスコープは4つの異物を容易に描出できた。

液体はどのようにみえるか？

予備実験から、ソマスコープは体内の透明な液体、混濁した液体を区別できる。薄いゴムのコンドームを透明な液体で満たすと、ソマグラムではコンドームの輪郭だけが見える。透明、均一な液体は、スクリーン上に陰影を生じない。液体にタルクを混ぜると、音波はタルクの粒子に反射されて、均一な液体の像は「スノーストーム」状に変化する。

その他どのような部位を描出できるか？

現状の我々の装置では、肝、脾は部分的描出の良い適応である。図5上段は、健常者の腹部のソマグラムである。右腹直筋と腹壁のその他の層の輪郭を容易に識別できる。X線透視上でバリウムの動きを追うように、ソマグラムで腸管蠕動、小腸内の食塊の移動を追跡することができる。図5のソマグラムは、中等度の肝硬変と肝腫大のある患者で、検査時に顕著な腹水が認められた。ソマグラムでは、診察所見で認められた薄い萎縮性の腹壁に対応して、薄い前腹壁が描出されている。その直下には、おそらく腹壁と肝前面の間に貯留した腹水を表わすと思われる暗い透亮帯が認められる。この暗い帯は、腹水除去後に消失した。肝両葉が部分的に見えており、前壁、後壁を区別できる。肝内にはほとんどエコーの反射がなく、いずれの部位でもほぼ均一であることが示唆される。

次のソマグラムは、高度肝硬変の患者で、腹壁と肝両面が認められる。肝の輪郭内には、いずれの出力レベルでも相応の「スノーストーム」状の所見が認められる。3週後に剖検が行なわれ、肉眼所見では典型的な鉤釘肝 (hobnail liver) が見られ、断面には強い線維化組織の粟粒病変と肝壊死領域が認められた。前掲の写真と比較すると、肝硬変の程度の評価における診断的意義が示唆される。

18ヵ月前に後頸部の悪性黒色腫を切除した若い男性でも、同様の画像が得られた。検査時、皮膚転移、肝転移と思われる著明な肝腫大が認められた。図5のソマグラムに、この「スノーストーム」状の像を示す。個々の転移性腫瘍は区別できない。1ヵ月後の剖検では、肝の断面に悪性黒色腫のびまん性粟粒性転移に対応する濃い黒色斑状像が認められた。

次の症例は、手術および放射線ヨード検査で確認された甲状腺癌である。二酸化トリウム造影検査 (図5, 5番目) では、肝は著しく腫大し、明らかな結節状転移が認められる。ソマグラムでは、他のいかなる肝臓検査よりも、限局性の高い強いエコーが認められた。ソマスコープのスクリーン上では、これらの陰影の多くは類円形で、X線所見に一致すると思われた (図5, 6番目)。

この装置を一般的な臨床医が臨床利用できるように解決すべき問題は何か？

表示される画像がすべて解剖学的構造の断面像であることに留意する必要がある。多くの医師は、解剖学的構造を3次元的に見ることに慣れ親しんでおり、断面像には不慣れである。中等度の大きさの腫瘍の全体像、大きさを知るには、48枚もの断面像が必要である。最近我々は、被写体のステレオ像が得られる3次元法を開発した。これは電子的に、連続する断面像を部分的

SOMAGRAPHIC CROSS-SECTION OF A NORMAL NECK AT THE C 5 LEVEL

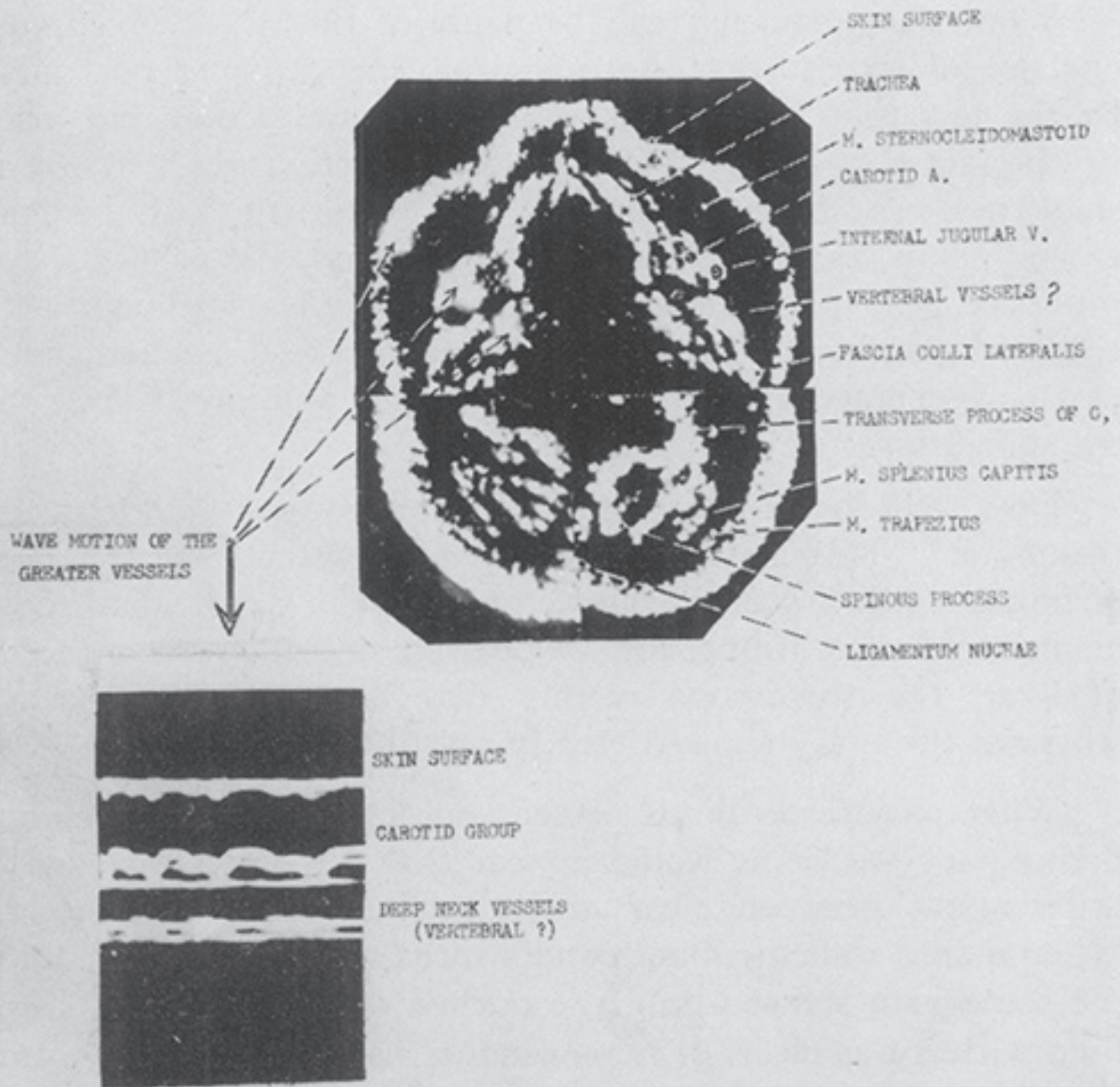


図 4. 健常人の第 5 頸椎レベルの頸部断面。左下は、頸動脈上の皮膚、頸動脈、深部静脈の波動のソマグラム。

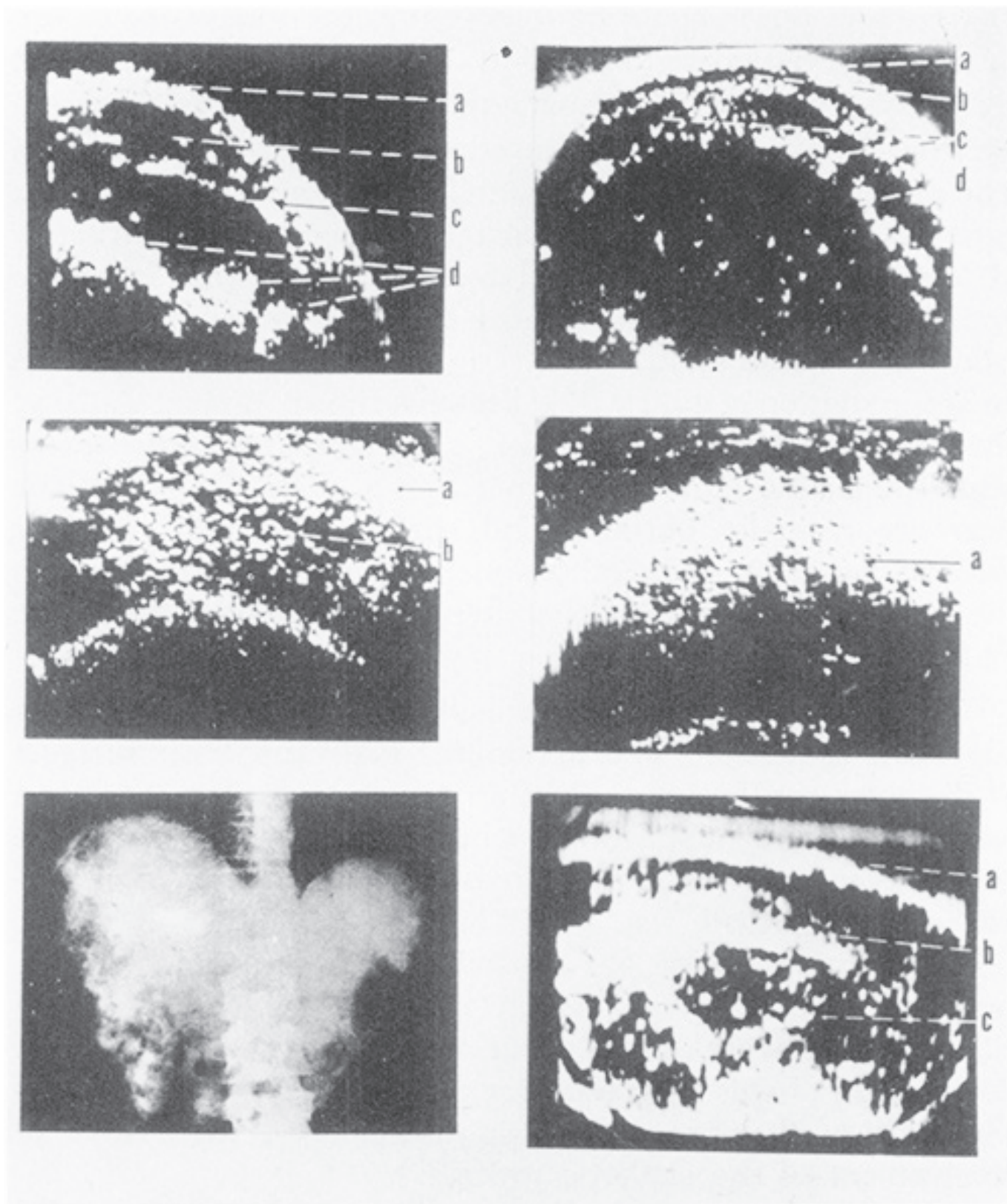


図5 腹部肝領域のソマグラム。(1) 健常人。腸管内を食物が通過するところ。(2) 中等度の肝硬変, 肝腫大。(3) 高度肝硬変。肝には「スノーストーム」状の陰影が認められる。(4) 悪性黒色腫の肝のびまん性粟粒性転移。(5) 肝結節性転移の二酸化トリウム造影像。(6) 同症例のソマグラム。

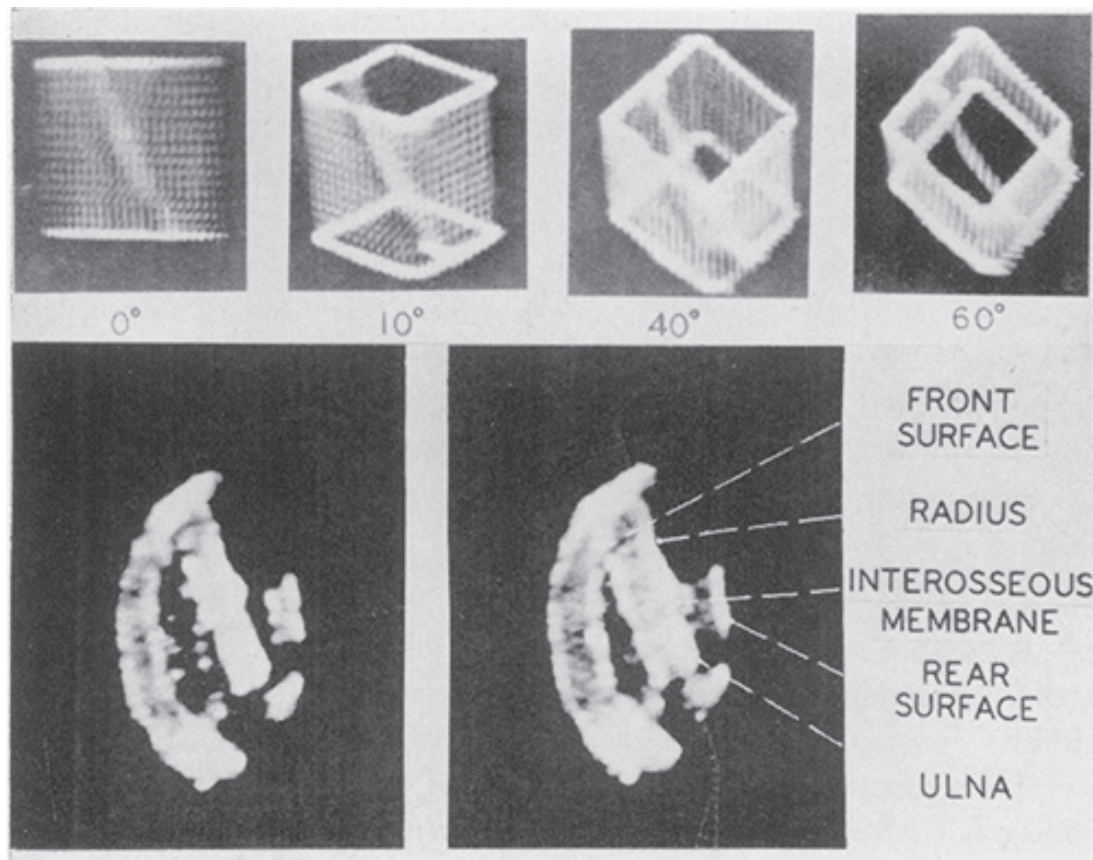


図 6. ワイヤ製の小さな箱の異なる角度からの投影像. 下段：健康者前腕の 3 次元像.

に重ねることで 3 次元像を作るものである。投影像は、電子的に 0 から 90 度まで可変である。図 6 上段は試験に使用した物体で、ワイヤで作った小さな箱の内部を、上壁から下壁まで細いワイヤが 1 本走っている。2 つの像を約 10 度離すと、ステレオ視が可能となる。下段は、正常前腕にこれを応用したものである。皮膚の表面、筋膜構造の一部を 3 次元的にみることができ

る。現状のもう一つの問題点は、骨のような高濃度の物体など、強い反射面の直後の構造を描出できないことである。この問題は、頸部のソマグラムでは (図 4)、異なる 4 つの象限に装置を置いて 4 枚の画像を組み合わせることにより解決している。ヘッドを 1 カ所にのみ置けば、脊椎や気管の背後にある解剖学的構造は見えないはずである。この問題については、被写体の周囲を回るような走査システムを開発中で、これによって例えば、頸部全体を 1 枚の画像に描出することができるであろう。

現状で最も重要な問題のひとつが、分解能の向上である。現在の分解能は約 16 本 / インチである。32 本 / インチまで向上できれば、理想的な分解能が得られる。様々なアーチファクトが問題となっており、その一部は除去されている。被写体の表面にあるもの、深部にあるもの、いずれもスクリーン上で同じ大きさ、濃度となるように、利得補償を組込むことにより組織中の

音波の吸収を補正している。迂回経路を伝播する音波は、クリスタルのパルスのタイミングを変えることによって除去し、直接反射される音波のみがスクリーン上に記録されるようにしている。

現状で検査できない部位はどこか？

多くの部位は、まだ検査していない。現状の装置では、臍のような臓器はその手前に多くの構造が存在するため検査不可能である。頭蓋については、超音波は骨で著しく減衰することから大きな問題である。Dr. Ballentine と Dr. Huerer は、異なるアプローチで超音波による脳組織の描出法を研究しているが、解決策は見いだされていない [8]。

この装置により診断学の将来に何が期待できるか？

明らかにこの装置は多くの異なる分野で有用性が考えられ、我々が思い及んでいない領域もあるであろう。心臓の内部構造を描出し、心室壁、弁構造、乳頭筋、中隔などの計測も可能であろう。外部からは不明な非金属異物の探索もできる。外傷後の軟部組織の深部病変の範囲を知ることもできる。腎、臍、肝、脾などを正確に描出することも期待できる。これらは、現行の診断方法には限界がある構造である。脂肪は音波をよく反射し、幸いにこれらの臓器の多くは脂肪層で被われていることから、ソマスコプで容易に描出しうるであろう。転移病変の範囲を知ることは、特に腫瘍内

の神経、動脈などを描出できれば外科医には大きな価値をもつであろう。

このような装置が臨床で使えるのはいつか？ またどのような装置になるか？

前述のように、我々は装置の改良に全力を傾けており、特にその分解能、深部組織の透過性の改良に努めている。もうひとつの重要な改良は、病気の患者の検査にさまざまな障害となる水槽を不要とする手段である。クリスタルと皮膚の間に液体を満たした薄いゴム製バッグを組込んだ探触子を使うことにより、音波を組織内に誘導することが可能である [4,5]。この装置の限界と能力を知るには、さらなる臨床経験が必要である。例えば、現状では造影剤の使用は試みていないが、0.9% 生理的食塩水は簡便な造影剤として使うことができ、検査後直ちに吸収され、X 線検査の造影剤のような危険もない。装置はおそらく大きなテレビ程度の大きさで、その操作も通常の X 線装置と同程度に容易なものとなろう。装置の価格については現時点では推測に過ぎないが、1 万ドルから 1 万 5 千ドル程度であろう。研究用に最近製作した装置は、1 万 8 千ドル程度であった (Denver 大学 Denver Research Institute で一部製作)。

要約

我々がソマスコープ (somascop) と称する、ソナーやレーダーの原理を応用して体内軟部組織を画像化する新しい診断装置について述べた。画像はオシロスコープのスクリーン上に表示され、X 線透視のように観察したり、通常のカメラで写真撮影することができる。乳癌、腎嚢胞、肝硬変、転移性肝腫瘍など病変の例を供覧した。神経、動脈、静脈など小さな密接した構造の描出能を、頸部のソマグラムの例で示した。この装置の将来性、臨床的に有用なものとするために必要な改良点、診断的観点から期待される事項、最終的な装置の形態、価格について述べた。

【参考文献】

1. 3rd Annual Conference, American Institute of Ultrasonics in Medicine—Symposium to be published J. Phys. Med.
2. BALLANTINE, H. T., JR., BOLT, R. H., HUETER, T. F., and LUDWIG, G. D.: On the Detection of Intracranial Pathology by Ultrasound. *Science*. 112:525-528, 1950.
3. HUETER, T. F. and BOLT, R. H.: An Ultrasonic Method for Outlining the Cerebral Ventricles. *J. Acous. Soc. American*. 23:160-167, 1951.
4. WILD, J. J. and REID, JOHN M.: Further Pilot Echographic Studies on the Histologic Structure of Tumors of the Living Intact Human Breast. *Am. J. of Path.* 28:839-61, 1952.
5. WILD, J. J. and REID, JOHN M.: Application of Echo-ranging Techniques to the Determination of Structure of Biological Tissues. *Science*. 115:226, 1952.
6. HOWRY, D. H. and BLISS, W. R.: Ultrasonic Visualization of Soft Tissue Structures of the Body. *J. Lab. and Clin. Med.* 40:579-592, 1952.
7. HOWRY, D. H., STOTT, D. A. and BLISS, W. R.: The Ultrasonic Visualization of Carcinoma of the Breast and Other Soft Tissue Structures. *Cancer*. 7:354-58, March, 1954.
8. BALLANTINE, H. T., JR., HUETER, T. F., and BOLT, R. H.: On the Use of Ultrasound for Tumor Detection. *The Jour. Acous. Soc. American*, Vol. 26, 581, 1954.

質疑

Dr. Francis D. W. Lukens (フィラデルフィア): 検査が難しい部位に脾がありますが、この装置は正常脾を描出できるでしょうか？

Dr. Elliot V. Newman (ナッシュビル): この方法で先天性心疾患のような心臓内の欠損が描出できるかどうか伺いたいと思います。臨床的に有用と思いますが、価格はどの程度になるでしょうか？

Dr. Francis C. Wood (フィラデルフィア): 私の記憶では、戦時中、Dr. George Ludwig がこのようなものを胆石の検出に応用されていたと思います。腹部には空気と液体の間隙があるので、不可能という結論でした。この装置では、このような間隙は問題にならないのでしょうか？ もう一つ、Dr. Ludwig はじめその他の研究者が、空気を使わずに脳室を描出する方法を研究されていましたが、これは試みられたでしょうか？

Dr. Richard France (ナッシュビル): カルシウムは見えますか？

Dr. Holmes の回答: 我々は基本的に、我々以外の研究者が応用したいと考える部位に応じてこの方法を開発してきましたので、すべての可能性について試したわけではありません。

まず最初の Dr. Lukens の脾に関する御質問ですが、脾はまだソマスコープを試みていない臓器のひとつです。脾と肝の描出には成功していますが、脾は他の構造の背後にあるので、より難しいと思います。

心臓については、壁の厚さの計測、中隔の欠損、乳頭筋、さらには弁膜を描出できるであろうことは疑いありません。重要な問題は、レーダーやソナーで広く使われている「移動標的」技術を、心臓の動きに利用することです。この装置は毎秒数千回のパルスを発信していますから、心電図と組み合わせれば特定の心周期を見ることができるでしょう。このような技術の開発には時間がかかるでしょうが、技術的には難しくないと思います。

価格については、RCA 社がこの装置に関心をもって価格を検討しています。彼らは医用電子機器市場を調査して、この装置を興味深い重要なものとしています。推測に過ぎませんが、市販された場合の価格は 1 万ドルから 1 万 5 千ドルと思われます。ご覧に入れた装置の製作には 1 万 8 千ドルかかりましたが、商用ベースで生産されれば、より安価になるでしょう。

胆石については、我々はこの領域を完全に研究したわけではありませんが、X 線では見えない胆石も描出可能と考えています。我々は特に、X 線で描出が難しい構造について研究をすすめています。

私は、プラスチック異物のようなものが、非常に簡単

に描出できることをあらためて強調したいと思います
が、脳については、頭蓋による非常に大きな減衰がある
のでとても難しいでしょう。

我々は、この技術を医学以外の分野に応用したいとい
う要望を聞いています。例えば、ジェット燃料、ロケッ
ト燃料ですが、この場合はいかにタンクやカートリッ
ジに充填されているかが効率を左右するので、この種
の装置で充填状態を見ることができるかも知れません。
鋼材の欠陥試験に X 線が使用されていますが、プラス
チックや他の非金属に利用できるかも知れません。コ
ロラド獣医学校は、この装置がウシの評価、特に皮下
脂肪の厚さ、肉の「霜降り」状態の評価に使えるので
はないかとしています。数日おきに新しい用途が我々
のもとに提案されている状態です。