

大動脈病変における血管内腔表面形態：経食道三次元心エコー図法による評価

Aortic Inner Surface Morphology in Aortic Disease by Three-Dimensional Transesophageal Echocardiography

松村 誠
許 俊 鋭
尾本 良三
松中 敏行*
望月 剛*

Makoto MATSUMURA, MD
Shunei KYO, MD, FJCC
Ryozo OMOTO, MD, FJCC
Toshiyuki MATSUNAKA*
Tsuyoshi MOCHIZUKI*

Abstract

Aortic inner surface morphology in various pathologies was investigated using three-dimensional (3D) transesophageal echocardiography to clarify the feasibility and limitations for clinical application. Transesophageal echocardiography was performed in 16 patients with aortic disease (12 aortic dissection, 4 aortic sclerosis) and 5 with normal aorta. The transesophageal transverse view of the descending aorta was taken every 2 mm by manually withdrawing the probe. Each image was recorded using VTR during one heart beat, then stored in the memory of a personal computer as a data base for the subsequent 3D reconstruction. The aortic inner surface was displayed using distance and gradient shading. Three-dimensional reconstruction images were obtained in all patients. The aortic inner surface was reconstructed as a wall with ringed protrusion in patients with normal aorta and a rugged wall with various sized protrusions in patients with atherosclerotic plaques by 3D transesophageal echocardiography. However, it was impossible to differentiate calcified lesions from non-calcified areas of plaques. In aortic dissection, 3D reconstruction provided information regarding the spatial anatomy of the dissection in 10 of 12 patients, accurate shape and location of the intimal tears in 3 of 5 patients, and movement of the intimal flap in 9 of 12 patients. However, reconstruction of the false lumen failed in two patients who had false lumens filled with spontaneous contrast echo. Three-dimensional transesophageal echocardiography is potentially useful for estimating the inner surface morphology and spatial extent and actual location of the aortic abnormalities, but there are limitations in evaluating tissue characterization and reconstructing the lumen with spontaneous contrast echo.

Key Words

echocardiography (transesophageal), image processing (computer-assisted three-dimensional reconstruction), atherosclerosis, aortic disease (dissection)

はじめに

経食道心エコー図法は大動脈の血管内腔や壁構造異常の診断、壁肥厚や内腔狭窄、拡大の定性的・定量的評価に有用であり、現在、大動脈解離¹⁾や大動脈瘤、大動脈硬化²⁾などの大動脈疾患の診断に広く用いられている。しかし、断層エコー図から病変部の立体構造や

表面形態、空間的な広がり把握するためには、各部位で得られた断層像をもとに検者自身が頭の中で三次元的に再構築する必要がある。そのため、病変部の三次元的評価は熟練度や経験度によって異なり、また、それを客観的に第三者に説明することは容易ではない。

本研究では、多数の経食道心エコー像をコンピュー

埼玉医科大学 心臓病センター：〒350-04 埼玉県入間郡毛呂山町毛呂本郷 38; *アロカ株式会社研究所
Saitama Heart Institute, Saitama Medical School, Saitama; *Aloka Research Laboratory, Aloka Co., Ltd., Tokyo

Address for reprints: MATSUMURA M, MD, Saitama Heart Institute, Saitama Medical School, Morohongo 38, Moroyama-cho, Iruma-gun, Saitama 350-04

Manuscript received June 5, 1995; revised December 28, 1995; accepted December 28, 1995

ター処理して三次元的に再構築する新しい手法，経食道三次元心エコー図法を用いて大動脈内腔表面の再構築を試み，大動脈疾患への臨床応用に対する本法の可能性と限界について検討した。

対象と方法

1. 対象

対象は経食道心エコー図検査で下行大動脈の連続像が得られた大動脈疾患 16 例と心疾患 5 例の計 21 例である。前者の内訳は大動脈解離 12 例 (Stanford A 型 2 例, B 型 10 例), 大動脈硬化 4 例である。大動脈硬化例はいずれも腹部大動脈瘤を有する例であり，経食道心エコー図検査では，下行大動脈に Fazio ら³⁾ の分類で III, IV 度に相当する著明な粥状硬化所見，すなわち，内膜の肥厚，突出，エコー輝度上昇，内腔不整，潰瘍形成などの所見が認められた。心疾患 5 例の内訳は僧帽弁閉鎖不全 2 例，大動脈弁閉鎖不全 2 例，陳旧性心筋梗塞 1 例である。経食道心エコー図検査では，大動脈の内腔面は平滑で連続性があり，かつエコー輝度上昇所見を認めず，Fazio ら³⁾ の分類で I 度に相当する正常像を示した。平均年齢は 59±12 歳 (28-74 歳)，男 15 例，女 6 例である。心電図は全例，正常洞調律であった。5 MHz, 32 pixel の biplane 経食道心エコー探触子 (Aloka 製, UST5247-SSD870) を使用し，セクターアングル 90°，毎秒 30 フレームで画像を収集した。三次元エコー像処理システムで使用したワークステーションの機種は DEC 3000・MEDEL300 (ハードディスク容量 1 GB, メモリー容量 64 MB, CPU- α , クロック周波数 130 MHz) で，三次元エコーソフト (Aloka 製, ECHO VIEW) を用いて下行大動脈の再構築を行った。

2. 三次元エコー像処理システム

1) 画像収集，データ入力

経食道心エコー検査中，再構築目的部位の末梢側からエンコーダー (ワイヤーに連動させた計測器) をモニターとして探触子を手動的に 2 mm 間隔で引き抜き，下行大動脈の連続 60 部位における横断面動画像をビデオレコーダーに記録した。オフラインで各部位の動画像を心電図同期下に 1 心周期分コンピューター内に取り込み，フレームグラバー内でアナログ信号からデジタル信号 (512×512×8 bit) に変換した後，画像圧縮を行わずに全フレームの情報をメモリー内に保存した。

2) 画像処理

各部位における同一時相の画像データをメモリー空間内に配列したものを三次元静止画像用データとし，さらにそれらを時相別に格納したものを動画像用データとした。エコーノイズ，アーティファクト除去フィルターで画像処理した後，メモリー空間上で視点を設定し，その視線にある画像に対してエコー輝度情報をもとに表面位置を決定した。すなわち，視線上の各点におけるエコー輝度を順次検索し，設定した“しきい値”より高い値を示した最初の部位を表面境界点とした。

3) 画像表示方法

表面表示法 (surface rendering technique) は，まずメモリー空間上に視点と光源の位置を設定する。次に内腔の境界点と判定された隣り合う 3 個の pixel を 1 個の微小表面とみなし，視点方向に対する微小表面上での光源からの反射ベクトルを Phong のアルゴリズムを使って求め，その強さに応じておのおのの微小表面に明度差をつけた (Phong shading)。また，平面上で遠近感を表現させるため，視点からの距離に応じて明度 (depth shading) と大きさ (中心投影法) を調整した。さらに各時相の管腔内三次元表面像を時間軸でつなぎ合わせるにより，三次元動画像 (30 フレーム/分) として表示した。これらの処理はすべて，ワークステーション内で行い，コンピューターモニター画面に三次元静止画像あるいは動画像として再構築した。Figs. 1, 2 はこれらの再構築過程を模式化したものである。

成績

1. 正常大動脈

視点からの距離に基づく depth shading だけを施した大動脈の三次元再構築像は大動脈を立体的に描出したが，内腔表面の形態は不明瞭であった (Fig. 3-左)。一方，微小表面の反射ベクトルをもとに各表面に明暗をつけた表面表示法では，5 例全例においてその程度は異なるが，内腔表面全体に不規則に配列された微細な凹凸像と血管の長軸方向に対して一定の間隔で出現する輪状の小隆起像が認められた (Fig. 3-右)。

2. 大動脈硬化

経食道心エコー図で下行大動脈全体に認めた多数のプラークは表面表示法により大動脈内腔面に不整形で

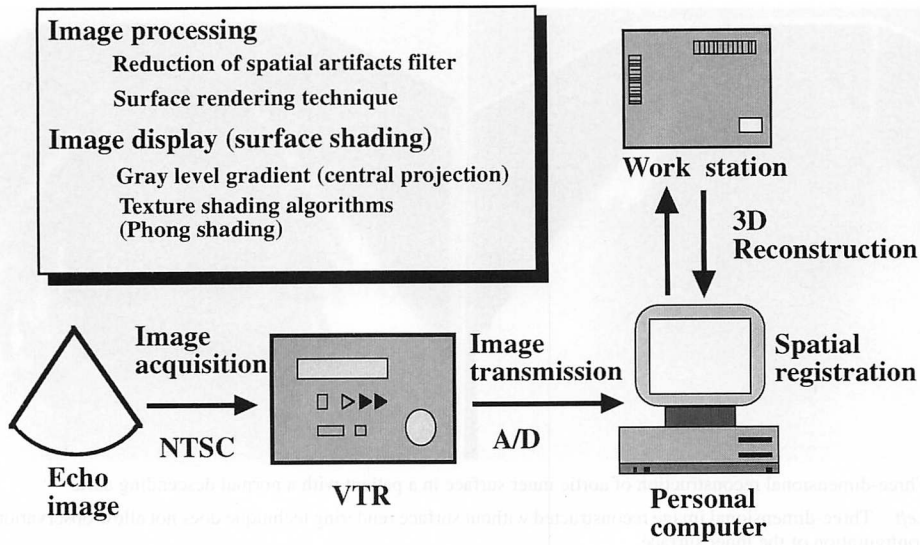


Fig. 1 Three-dimensional (3D) ultrasound imaging system diagram

NTSC=TV broadcasting method by National Television System Committee of USA; VTR=video tape recorder; A/D=analog-digital conversion.

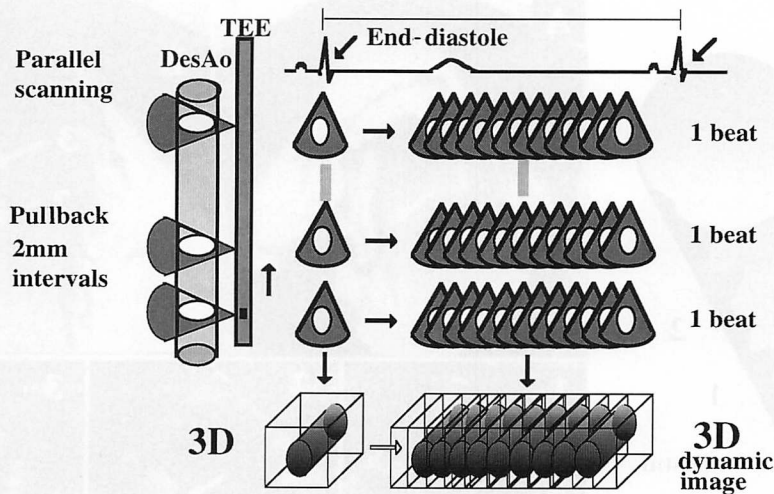


Fig. 2 Imaging data acquisition for 3D reconstruction using transesophageal echocardiography

TEE=transesophageal echocardiography; DesAo=descending aorta. Other abbreviation as in Fig. 1.

表面に凹凸を伴った大小さまざまな隆起像として明瞭に描出され、管腔内で散在しているところと集合している部位が示された (Fig. 4)。また、正常大動脈例と同様に、大動脈全体にわたり一定の間隔で出現する輪状小隆起像を認めた。しかし、経食道心エコー図で石灰化像(シャドーウィングを伴った高輝度領域)を示した部位、また隆起を伴わずび慢性に内膜が肥厚した領域の同定は困難であった。

3. 大動脈解離

大動脈解離 12 例中、解離腔が残存し血栓形成を認めなかった 10 例において明瞭な大動脈解離の三次元再構築像が得られ、また他の症例と同様に内腔表面に不規則な凹凸像と輪状小隆起像が認められた。しかし、解離腔の形や内膜フラップ表面は、視点の設定部位により異なった再構築像を示した。Fig. 5-A は視点を大動脈の側方、Fig. 5-B は大動脈腔内の真腔側、Fig. 5-C は中央、Fig. 5-D は偽腔側、Fig. 5-E は中枢側の中央に設定した場合の再構築である。解離腔の形状や大

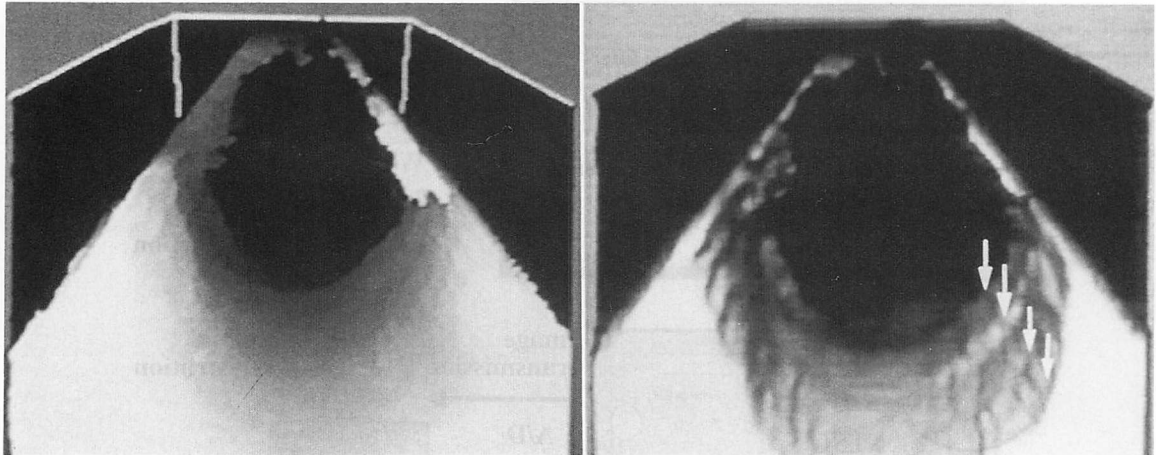


Fig. 3 Three-dimensional reconstruction of aortic inner surface in a patient with a normal descending aorta
Left : Three-dimensional image reconstructed without surface rendering technique does not allow observation of the configuration of the inner surface.
Right : Three-dimensional image reconstructed with the surface rendering technique used in this study shows the aortic inner surface as a smooth wall with ringed protrusions (arrows).

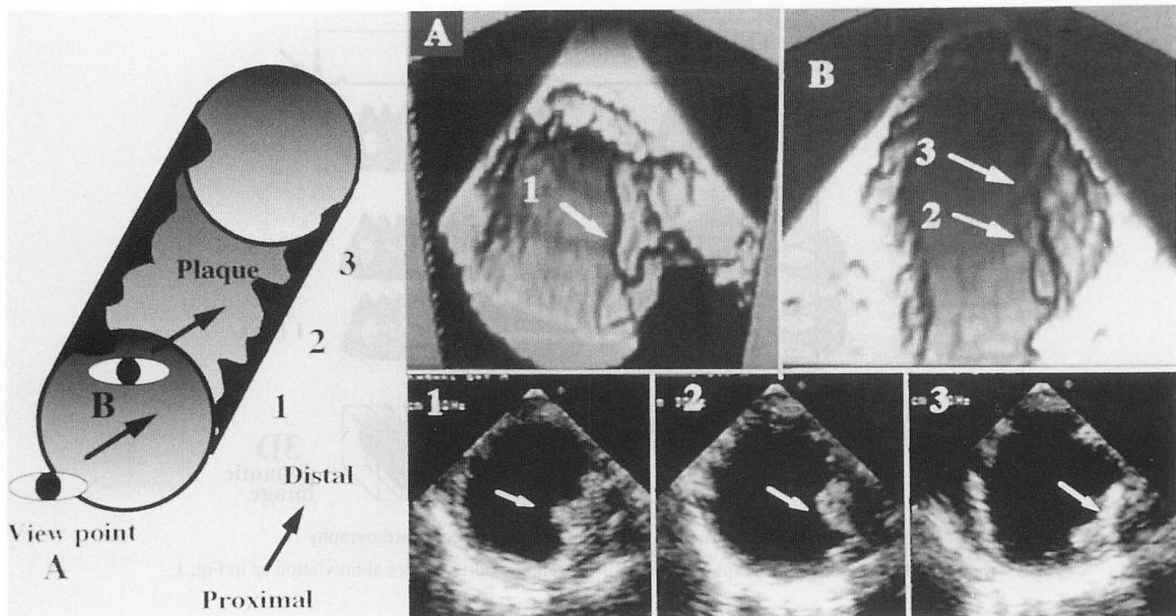


Fig. 4 Transesophageal echocardiographic (TEE) images and 3D reconstruction of descending aorta in a 75-year-old man with aortic sclerosis
 TEE shows the large protruding plaques (arrows). Plaque with a calcified lesion can be seen (3).
 The 3D image shows the view from inside the aortic lumen at the proximal (A) and distal (B) portions of the descending aorta.
 Abbreviation as in Fig. 1.

きさ、その空間的連続性の評価は視点を中央にした場合に有効であり、内膜フラップや大動脈壁の表面構造の評価は視点を真腔側あるいは偽腔側に設定し、内腔を斜方向から観察することにより可能であった。

三次元動画像では、9例において内膜フラップ面に拍動流のために中枢側から末梢側に伝搬するような波

動運動が観察された。また、経食道断層エコー図で下行大動脈に解離口(エントリー, リエントリー)を認めた5例中、径が3 mm以下の小さな2例において解離口の再構築像は得られなかったが、3例では至適視点部位の設定により解離口が描出された。Fig. 6は下行大動脈にエントリーとリエントリーを認めた症例の三

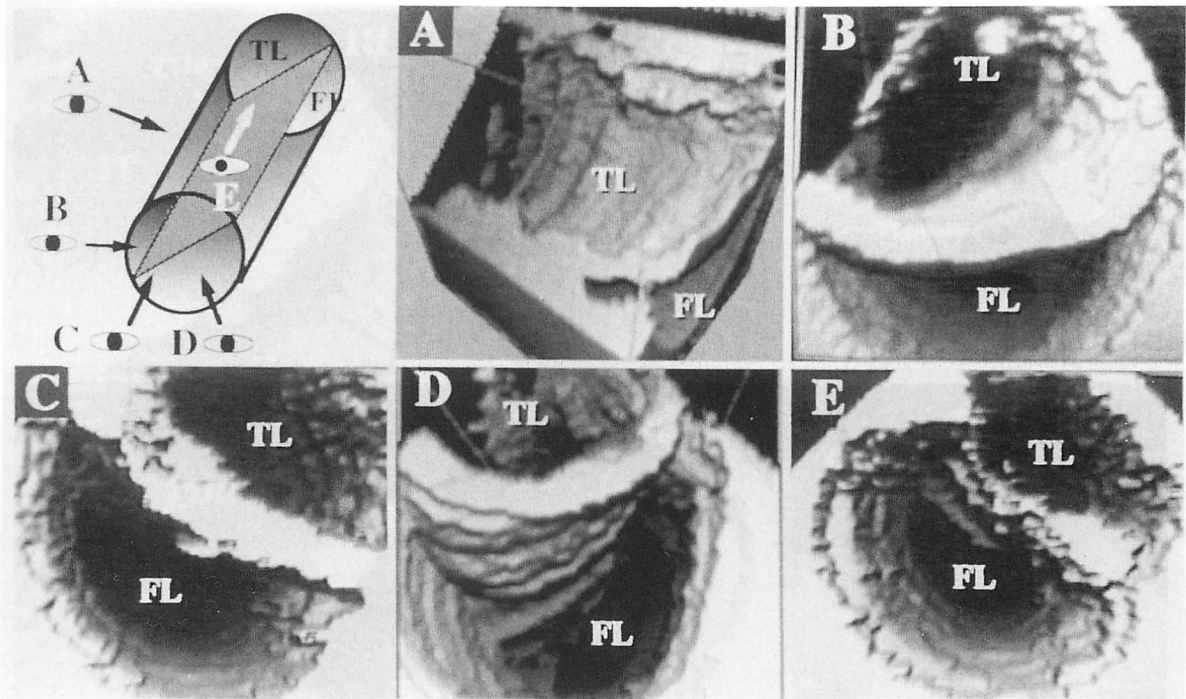


Fig. 5 Three-dimensional reconstruction of descending aorta in a 62-year-old man with aortic dissection, DeBakey type III
 Images of the dissecting aorta are viewed from the lateral (A), upward oblique (B), front (C), downward oblique at the proximal portion (D) and front at the distal portion (E) of the descending aorta. Configuration and shape of the true and false lumen are well recognized in views from the front of the aortic lumen (C, E). Inner surface morphology of the aortic wall and intimal flap are clearly observed from the lateral (A) or oblique views (B, D).
 TL=true lumen; FL=false lumen.

次元再構築像である。Fig. 6-Aは視点を大動脈腔内中央部に設定した映像で解離口は描出されなかったが、Fig. 6-Bの真腔側からの映像では不整形を呈する解離口の再構築像が得られた。一方、解離腔内に血栓を認め、著明な“もやもやエコー”を有する2症例では、このエコーが内膜フラップ表面の構造物としてコンピューターでは認識されるため、良好な偽腔内腔の三次元再構築像は得られなかった (Fig. 7)。

考 案

エコーを用いた三次元再構築の概念は1961年, Baumら⁴⁾によって報告された。スキャン断面を平行移動させ、その連続画像を積み重ねることにより眼窩の腫瘍病変を三次元的に描画したものである。心臓領域では、探触子の空間位置を認識できる機械アームを用い、胸壁上の任意の方向から収集したエコーのデータを三次元情報としてコンピューターで処理する手法が Dekkerら⁵⁾によって報告された。その後、音響効果 (spark gap) を利用して正確に空間位置を認識できる機器⁶⁾ が考案され、現在、心腔内容積などの定量的評

価⁷⁻¹⁰⁾に関する研究に用いられている。

一方、われわれと同様に形態診断を目的とした研究は、三次元再構築像の表示法として surface rendering technique¹¹⁾ や volume rendering technique¹²⁾、また鮮明な画像を収集する手段として経食道心エコー図法¹³⁾ が用いられ、管腔内構造物の表面像が得られるようになってから活発になった。心臓に対しては、biplane¹³⁻¹⁵⁾ や multiplane 経食道探触子¹⁶⁻¹⁹⁾ を利用して、スキャン断面を一定の間隔で回転させて画像を収集した報告が多く、僧帽弁疾患¹³⁻¹⁵⁾ や先天性疾患¹⁹⁾ における心腔内構造物の形態診断に関する研究が行われている。大動脈では、われわれと同様に経食道探触子を引き抜きながら一定の間隔で横断面像を収集した報告^{20,21)} が多く、大動脈解離や大動脈硬化症例における下行大動脈の三次元再構築に関する研究が行われている。しかし、これらは管腔構造全体の立体再構築について検討したものであり、今回、われわれが注目した大動脈病変の内腔表面構造の再構築に関して検討した報告は少ない。

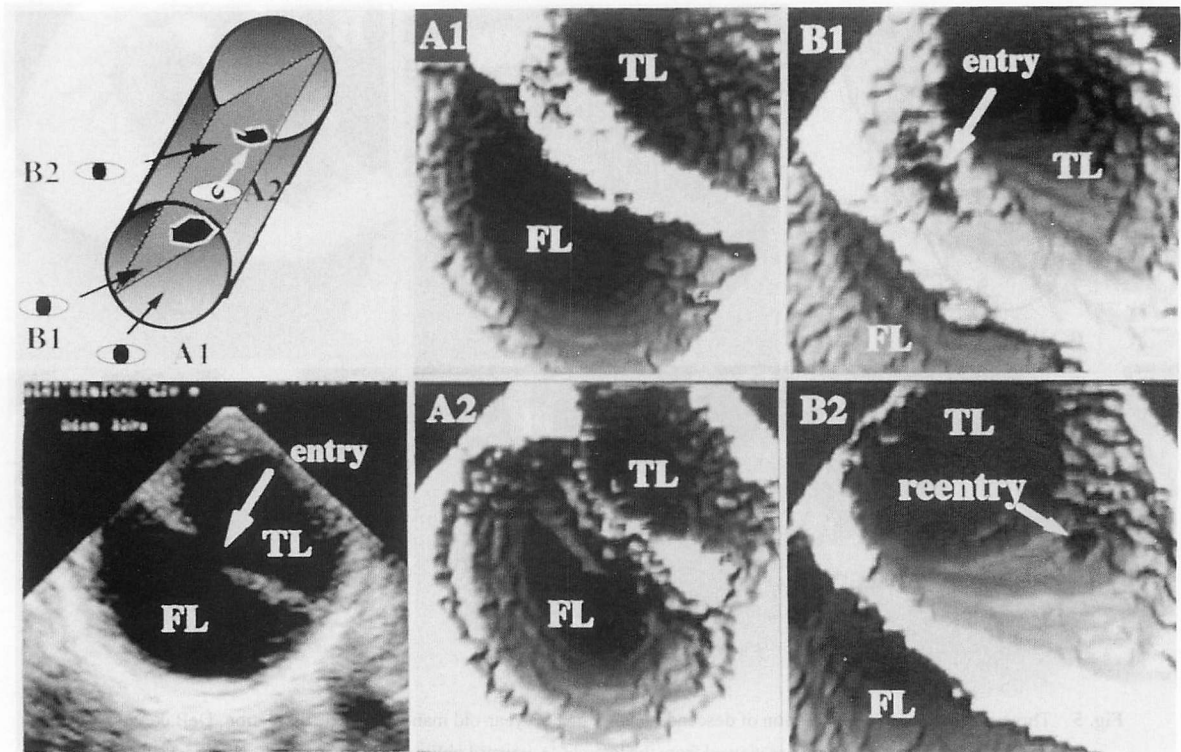


Fig. 6 Transesophageal echocardiography and 3D reconstruction of descending aorta in a 68-year-old man with aortic dissection, DeBakey type III

The intimal tear (arrow) is observed on TEE. Images of the dissecting aorta are viewed from the front and upward oblique directions at the proximal (A1, B1) and distal (A2, B2) portions of the descending aorta. The intimal tears are well observed on oblique but not frontal views. Three-dimensional images demonstrate the irregular shape of the intimal tears.

Abbreviations as in Fig. 5.

1. 臨床応用の可能性

大動脈の粥状硬化病変の存在は他臓器の動脈硬化と深く関連している。中でも、下行大動脈におけるプラークの存在は閉塞性冠動脈疾患の合併を強く示唆することが報告されており³⁾、経食道心エコー図法によるプラーク診断の臨床的意義は大きい。今回、われわれが用いた三次元心エコー図法では、内膜肥厚の程度や石灰化病変は診断されなかったが、内腔に突出するプラークの形態や表面構造、血管内での連続性や広がりなどが立体的に描出された。これは断層エコー像では得られない情報である。今後、臨床データの蓄積、病理所見との対比が必要であるが、プラークの形態、表面構造、分布状態からみた粥状硬化病変の重症度判定などに有効かもしれない。

一方、大動脈解離例において解離の存在診断に対する経食道心エコー図法の有用性は高く、Hashimotoら¹⁾の報告では内膜フラップの検出率は100%である。しかし、従来の断層エコー図法では、外科治療症例にお

いて重要な真腔と偽腔の立体的位置関係を、必ずしも十分に評価できないことがある。解離が螺旋状を呈したり、解離腔内にさらに内膜フラップを認め、いわゆる“三腔構造”を示し、真偽腔の立体的把握が困難な症例では、本法の有用性が期待できる。また、下行大動脈に径3 mm以上の解離口を有する3症例において、解離口の形態とその空間位置を三次元心エコー図法により描出できたことは、現在、研究段階であるがカテーテルを用いたグラフト移植術やステント留置術²²⁾などでは、術前に解離口の位置や大きさ、形態などを正確に評価することが必要であり、その場合、本法が有力な補助手段となりうることを示唆するものである。

2. 本研究の限界

経食道三次元心エコー図法は大動脈病変を立体的、空間的に理解するうえで有力な補助的手段であるが、現時点ではまだ多くの限界があり、断層エコー図法に対する明らかな優位性は示されなかった。再構築時間

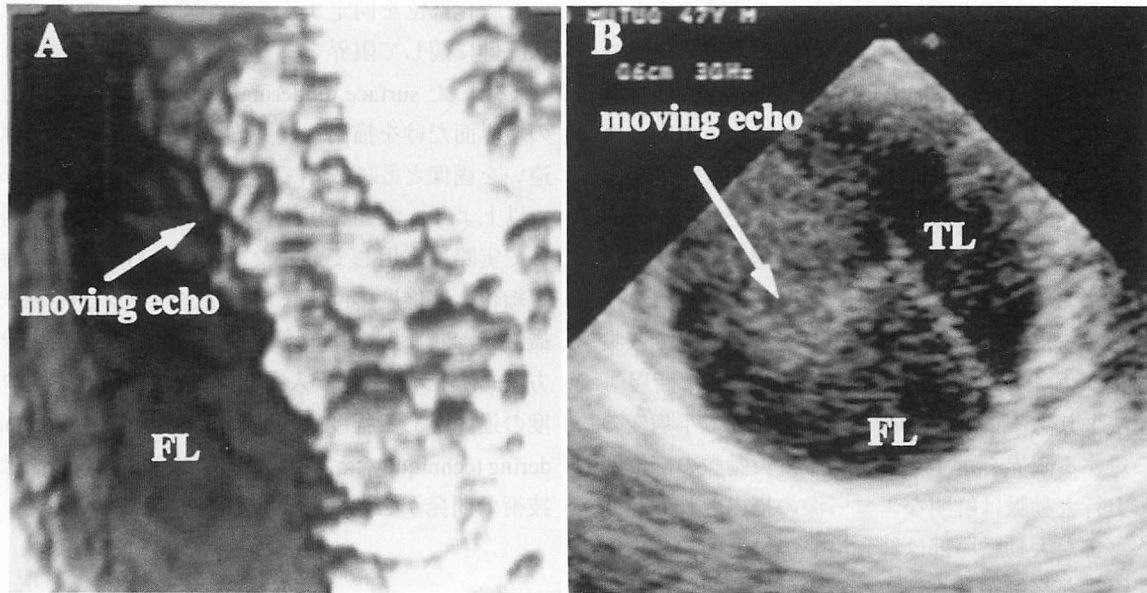


Fig. 7 Transesophageal echocardiography and 3D reconstruction of descending aorta in a 47-year-old man with aortic dissection, DeBakey type I

TEE reveals a spontaneous contrast echo in the false lumen (B). Three-dimensional reconstruction viewed from inside the false lumen cannot provide a distinct picture of the inner surface of the dissected lumen because the spontaneous contrast echo obscured the surface of the intimal flap. Abbreviations as in Fig. 5.

に関して、画像取り込みは5-10分でエコー図検査に支障のない時間であったが、オフラインで画像をコンピュータ入力するための整理時間とデータ処理時間の合計は静止画像で数時間、動画で十数時間を要したことは、実用化への大きな問題点である。ただし、オンライン化とハードウェアの充実により処理時間は大幅に短縮されるため、現時点では問題になるが、近い将来、改善される項目である。

また、大動脈内腔表面の三次元再構築像で、今回、全症例に共通して、大動脈全体に微細な凹凸像と輪状の小隆起像の2種類のアーティファクトを認めた。前者は正常大動脈例においても認められ、また、それらの形態が各症例で類似していること、さらに、AQ法(acoustic quantification)で自動表示される内膜境界線がしばしば視覚による推定線に一致しない²³⁾ことから、コンピュータの境界点認識方法に基づくアーティファクトの可能性が高い、すなわち、断層エコー図上でわれわれが内膜境界線を推定する場合、線上に小さな凹凸やエコー輝度の異なる部分があっても、視覚的にはそれを補正して連続性のある境界線として認識するのに対して、三次元心エコー図法はあくまで設定した“しきい値”に基づいて境界線を判定し、そのまま表

示するためと考えられる。また、後者は長軸方向に平行してほぼ一定の間隔で出現していることから、画像収集過程における呼吸変動に伴うアーティファクトと考えられる。大動脈の位置は拍動や呼吸によって多少変化するが、今回、呼吸同期を行わなかったため各呼吸によって大動脈の位置が変わり、内腔表面にズレが生じたものと思われる。また、曲がっている食道を直線と仮定して再構築したこと、探触子の移動を手式的に行ったことによる距離測定の見誤差なども要因と考えられる。機械的に探触子を平行移動させる装置の使用は、被験者への侵襲度が高く実用化は困難であるが、呼吸モニターは無侵襲であり、今後、導入すべき同期手段である。

一方、大動脈疾患に対する応用では、“もやもやエコー”を有する場合の内腔表面の再構築、小病変の再構築、上行および弓部大動脈領域の描出、大動脈壁の組織性状診断に関する限界が示された。大動脈解離例では、偽腔内に“もやもやエコー”を有する2例において、実際の内腔表面構造は描出されず、明らかにアーティファクトと思われる再構築像が認められた。画像処理過程において、視線上で内腔表面の内側に実際の構造物に由来しないエコーがある場合、コンピュー

ターではそれを内腔表面の境界点として認識するために生じる現象であり、エコー図法自体に基づく限界である。ゲインと STC (sensitivity time control) 機能を調節して、“もやもやエコー”を減少させてから再度、再構築を試みたが、内腔表面の弱いエコー像も消失するため鮮明な表面像は得られなかった。また、三次元心エコー図法は経食道心エコー図法で解離口を認めた5例中2例において、径3 mm以下の小さな解離口を描出しえなかった。これは、断層像を一定の間隔で収集して再構築した場合、三次元画像の解像度は断層エコー図法より劣ることを意味し、本法による小病変の描出に対する限界を示すものである。大動脈の部位別では、上行大動脈は鮮明なエコー像の描出される範囲が狭く、また大動脈弓部は経食道心エコー図法による描出が困難な症例が多く、これらの部位で明瞭な三次元再構築像は得られなかった。三次元心エコー図法の原理的な限界に基づくものではないが、大動脈の観察には経食道心エコー図法が必要であり、また Stanford A型では上行大動脈と大動脈弓部の評価が重要であることから、大動脈解離例における本法の問題点の一つと考えられる。大動脈硬化例では三次元心エコー図法は内腔に突出していない壁肥厚領域やエコー輝度の高

い石灰化部位を同定することができず、粥腫の組織性状評価に関して限界を示した。今回、画像表示方法として用いた surface rendering technique が大動脈内腔との境界面だけを描出し、壁内の構造物やエコー輝度の違いを画像として表示できないためと考えられる。

以上より、大動脈疾患に対して本法を臨床の場において実際に応用していくためには、再構築処理時間の短縮化、解像度の向上、アーティファクトの軽減、組織性状診断などの対策が重要であり、今後、画像入力方法(オンライン化、入力間隔など)の改善やエコー輝度の違いをある程度表現することが可能な volume rendering technique などの導入、あるいは新しい画像処理技術の開発が必要と考えられる。

結 論

経食道三次元心エコー図法は再構築処理時間、アーティファクトや“もやもやエコー”の処理、小病変の再構築、組織診断への対応に今後の課題を残しているが、大動脈内腔の病変や表面構造を立体的、空間的に描出できることから、エコーを用いた大動脈病変の新しい診断法としての可能性が示唆される。

要 約

経食道三次元心エコー図法を用いて大動脈内腔表面の三次元再構築を試み、大動脈疾患の臨床応用に対する可能性と限界について検討した。対象は大動脈解離12例、大動脈硬化4例、正常大動脈5例の計21例、平均年齢は59±12歳(28-74歳)、男15例、女6例である。

5 MHz, biplane 探触子 (Aloka 製 UST 5247-SSD 870) を使用し、経食道心エコー図検査中、手動的に探触子を引き抜きながら、2 mm 間隔で下行大動脈の横断面動画を1心拍分ビデオレコーダーに記録した。その後、画像データをデジタル変換し、コンピューター内のメモリー空間に三次元再構築用データとして保存した。Phong のアルゴリズムを用いて各画像データをコンピューター処理し、下行大動脈内腔表面の三次元再構築を行った。

全症例において、経食道エコー画像から下行大動脈の三次元再構築像が得られた。大動脈内腔表面は、正常大動脈例では呼吸や心拍動による輪状の小隆起を伴う表面像として、また大動脈硬化例ではプラークと思われる大小さまざまな隆起を有する凹凸不整の表面像として描出された。しかし三次元再構築像による石灰化病変と非石灰化部分の鑑別は困難であった。大動脈解離12例中10例で解離腔が立体的に描出され、9例で内膜フラップの波動運動が観察された。また、内膜破綻を有する5例中3例で解離口の形態が描出された。しかし偽腔内に“もやもやエコー”を認める2例では、良好な偽腔内腔表面の再構築像は得られなかった。経食道三次元心エコー図法は、大動脈腔内に“もやもやエコー”を認める症例や組織性状診断への応用にまだ課題を残しているが、大動脈内腔表面を立体的に描出することにより、異常病変の部位や空間的広がりを正確に診断できる可能性があり、今後、大動脈疾患に対する新しい画像診断法として有望である。

文 献

- 1) Hashimoto S, Kumada T, Osakada G, Kubo S, Tokunaga S, Tamaki S, Yamazato A, Nishimura K, Ban T, Kawai C : Assessment of transesophageal Doppler echocardiography in dissecting aortic aneurysm. *J Am Coll Cardiol* 1989; **14** : 1253-1262
- 2) Matsuzaki M, Ono S, Tomochika Y, Michishige H, Tanaka N, Okuda F, Kusukawa R : Advances in transesophageal echocardiography for the evaluation of atherosclerotic lesions in thoracic aorta : The effects of hypertension, hypercholesterolemia, and aging on atherosclerotic lesions. *Jpn Circ J* 1992; **56** : 592-602
- 3) Fazio GP, Redberg RF, Winslow T, Schiller NB : Transesophageal echocardiographically detected atherosclerotic aortic plaque is a marker for coronary artery disease. *J Am Coll Cardiol* 1993; **21** : 144-150
- 4) Baum G, Greenwood I : Orbital lesion localization by three dimensional ultragraphy. *N Y State J Med* 1961; **61** : 4149-4157
- 5) Dekker DL, Piziali RL, Dong E Jr : A system for ultrasonically imaging the human heart in three dimensions. *Comput Biomed Res* 1974; **7** : 544-553
- 6) Moritz WE, Shreve PL : A microprocessor-based spatial locating system for use with diagnostic ultrasound. *Proc IEEE* 1976; **64** : 966-974
- 7) King DL, Harrison MR, King DL Jr, Gopal AS, Martin RP, DeMaria AN : Improved reproducibility of left atrial and left ventricular measurements by guided three-dimensional echocardiography. *J Am Coll Cardiol* 1992; **20** : 1238-1245
- 8) Siu SC, Rivera JM, Guerrero JL, Handschumacher MD, Lethor JP, Weyman AE, Levine RA, Picard MH : Three-dimensional echocardiography : In vivo validation for left ventricular volume and function. *Circulation* 1993; **88** (part 1) : 1715-1723
- 9) Gopal AS, Keller AM, Rigling R, King DL Jr, King DL : Left ventricular volume and endocardial surface area by three-dimensional echocardiography : Comparison with two-dimensional echocardiography and nuclear magnetic resonance imaging in normal subjects. *J Am Coll Cardiol* 1993; **22** : 258-270
- 10) Jiang L, Vazquez de Prada JA, Handschumacher MD, Vuille C, Guerrero JL, Picard MH, Joziatis JT, Fallon JT, Weyman AE, Levine RA : Quantitative three-dimensional reconstruction of aneurysmal left ventricles : In vitro and in vivo validation. *Circulation* 1995; **91** : 222-230
- 11) Robb RA, Barillot C : Interactive display and analysis of 3D medical images. *IEEE Trans Med Imaging* 1989; **8** : 217-226
- 12) Levoy M : Display of surfaces from volume data. *IEEE Comput Graph Applications* 1988; **8** : 29-37
- 13) Kuroda T, Kinter TM, Seward JB, Yanagi H, Greenleaf JF : Accuracy of three-dimensional volume measurement using biplane transesophageal echocardiographic probe : In vitro experiment. *J Am Soc Echocardiogr* 1991; **4** : 475-484
- 14) Cheng TO, Wang XF, Zheng LH, Li ZA, Lu P : Three-dimensional transesophageal echocardiography in the diagnosis of mitral valve prolapse. *Am Heart J* 1994; **128** : 1218-1224
- 15) 三神大世, 寺西純一, 宮本憲行, 高辻浩也, 福田洋之, 北畠顕, 坂本三哉, 山本 強 : 経食道心エコー図縦方向画像を用いた僧帽弁三次元動画画像作成の試み : 僧帽弁逸脱の描出. *J Cardiol* 1992; **23** (Suppl XXXIV) : 95-100
- 16) Roelandt JR, Ten Cate FJ, Vletter WB, Taams MA : Ultrasonic dynamic three-dimensional visualization of the heart with a multiplane transesophageal imaging transducer. *J Am Soc Echocardiogr* 1994; **7** : 217-229
- 17) Schneider AT, Hsu TL, Schwartz SL, Pandian NG : Single, biplane, multiplane, and three-dimensional transesophageal echocardiography : Echocardiographic-anatomic correlations. *Cardiol Clin* 1993; **11** : 361-387
- 18) Flachskampf FA, Hoffmann R, Verlande M, Schneider W, Ameling W, Hanrath P : Initial experience with a multiplane transesophageal echo-transducer : Assessment of diagnostic potential. *Eur Heart J* 1992; **13** : 1201-1206
- 19) Belohlavek M, Foley DA, Gerber TC, Greenleaf JF, Seward JB : Three-dimensional ultrasound imaging of the atrial septum : Normal and pathologic anatomy. *J Am Coll Cardiol* 1993; **22** : 1673-1678
- 20) Ross JJ Jr, D'Adamo AJ, Karalis DG, Chandrasekaran K : Three-dimensional transesophageal echo imaging of the descending thoracic aorta. *Am J Cardiol* 1993; **71** : 1000-1002
- 21) Hopkins WE, Miller E, D'Avila-Rom'an VG, Barzilai B, Lasala JM, Shelton ME : Three-dimensional reconstruction of the descending thoracic aorta from transesophageal echocardiographic images. *Am J Cardiol* 1993; **72** : 1087-1089
- 22) Walker PJ, Dake MD, Mitchell RS, Miller DC : The use of endovascular techniques for the treatment of complications of aortic dissection. *J Vasc Surg* 1993; **18** : 1042-1051
- 23) 八木登志員, 吉川純一, 吉田 清, 赤阪隆史, 赤土正洋, 高木 力, 三宅 仁, 大倉宏之, 穂積健之, 前西文秋 : Acoustic quantification を用いた左室内腔断面積と fractional area change の評価. *Jpn J Med Ultrasonics* 1993; **20** : 291-295