

eTRACKING機能の紹介

Introduction of eTRACKING function

渡邊 哲夫¹⁾ Tetsuo Watanabe
原田 烈光²⁾ Akimitsu Harada

岡田 孝¹⁾ Takashi Okada

¹⁾日立アロカメディカル株式会社 第一メディカルシステム技術本部

²⁾日立アロカメディカル株式会社 技術統括本部

超音波診断装置は非侵襲的で簡便性や可搬性の高い画像診断モダリティの一つとして広く普及している。特に近年は、超音波の信号処理技術の目覚ましい進歩により、心臓や血管など臓器の形態的な変化の観察だけでなく、機能的変化の評価も可能となってきた。

本稿では、日立アロカメディカルが予防医学の観点に立って、超音波診断装置を用いた早期動脈硬化診断の実現に取り組み開発したeTRACKING機能について紹介する。

Diagnostic ultrasound system is widely used as one of the diagnostic imaging modalities due to its non-invasive nature as well as convenient method of use and high portability. Especially, in recent years, the remarkable progress of ultrasound signal processing technology has made it possible for us not only to observe the morphological changes of organs such as heart, blood vessels and others but also to evaluate their functional changes. In this article, we will introduce eTRACKING function which is developed by Hitachi Aloka Medical, Ltd. from the standpoint of preventive medicine in efforts to achieve early diagnosis of arteriosclerosis by using a diagnostic ultrasound system.

Key Words: Echo Tracking, eTRACKING, Stiffness Parameter, Augmentation Index

1. はじめに¹⁾²⁾³⁾

生活習慣の欧米化に伴い、日本でも高血圧、虚血性心疾患や脳血管障害などの心血管病変が死因の上位を占めている。これらの疾患は、多くの場合、動脈硬化に起因していることから、動脈硬化の管理が心血管病の予防につながる。つまり、動脈硬化の早期発見が重要であると言える。そのため、日立アロカメディカルでは予防医学の観点に立って、超音波診断装置における早期動脈硬化診断の実現に取り組んできた。具体的には、動脈壁に内膜肥厚やプラークなど形態的な変化が出現する前の段階で、動脈硬化を検出することを目指し、生体の情報により忠実な生の超音波信号であるRF信号に着目し、動脈の機能的評価が可能な独自の技術eTRACKINGの開発に至った。eTRACKING機能を用いたArterial Stiffness解析は、簡便に動脈壁の硬さを評価できる機能である。

従来、動脈硬化診断には種々の方法が用いられている。中でも定量的に診断できる方法として、頸動脈の壁厚やプラークの厚さを測定するIMT(Intima Media Thickness)計測法、脈波伝搬速度PWV(Pulse Wave Velocity)を測定する方法がある。しかし、IMT計測は血管の硬さを評価するものではなく、器質的な変化の度合いを測定することで、脳梗塞の可能性や治療方針の決定に有用とされている。つまり、器質的な変化が起こって初めて変化の度合いを測定できると言える。一方、硬い血管ほど脈波の伝搬速度が増すことから、上腕と足首にカフを巻いて計測する脈波伝搬速度(Brachial-ankle PWV: baPWV)は、動脈全体の平均的な硬さを知る上で有用だが、初期の動脈硬化が起きる心臓に近い血管の評価ではない。

これに対し、局所の血管の硬さを直接的に評価する指標として、1980年代から、次式で定義されるStiffness Parameter(β)などが提唱されていた⁴⁾。しかし、簡便かつ精度良く測定する方法がなかったため、一般ルーチン検査では用いられてこなかった。

β (Stiffness Parameter)

$$= \ln(Ps/Pd) / [(Ds - Dd) / Dd]^{4)}$$

ここで、Ps：収縮期の最高血圧、Pd：拡張期の最低血圧、Ds：収縮期の最大血管径、Dd：拡張期の最小血管径、ln：自然対数である。

eTRACKINGでは、血管の前壁と後壁に設定されたトラッキングゲートが、拍動による血管壁の動きにリアルタイムに自動追従する。そのため、0.01mmという高い精度で、血管径変化を計測可能である。この血管径変化から、動脈硬化の指標として有用であると言われているStiffness Parameter(β)などの指標を瞬時に算出し、レポート表示する。 β 値は、血圧の影響を受けにくい動脈壁の「硬さ」を示す指標の一つで、血管壁の肥厚やプラークが形成される前段階の血管の硬さの評価に有用と言われており、頸動脈の β 値は、冠動脈や脳血管の動脈硬化をよく反映するという報告がされている。

また、eTRACKINGは、わずか数心拍のデータを一回取り込むだけの簡便な操作で信頼性の高い結果が得られるため、より総合的かつ客観的評価が可能となりルーチン検査への導入が容易となった。

2. eTRACKING原理

eTRACKINGによる動脈硬化診断は、駆出期における動脈の径の膨らみ度合いを測定し、血管の柔らかさを直接評価しようとするものである。具体的には、圧力の変化が同じ場合、柔らかい血管ならばDsとDdの差が大きく、硬ければ差が小さいということの評価する。

従来もMモードで動脈の硬さの指標である β やEpを求めていた。Mモード計測の距離分解能は、超音波診断装置の距離分解能および解像度(画像のピクセルの細かさ)に依存する。超音波診断装置の距離分解能は、10MHzの高周波プロ

ブを用いても、せいぜい0.2mm程度である。また、計測キャリパーの設定位置も、画素のステップでしか動かさない制約を受ける。つまり、図1のようにMモードの計測は、画素を数えているため、超音波診断装置で持っている画素以上の分解能は得られない。さらに、計測する画像ごとに手で計測キャリパーを設定するという点も、精度や再現性を低くする要因となってしまう。

一方、拍動による血管径変化は血管径の10%程度であり、血管径が5mmなら一心周期内で0.5mm変化する。また、硬い動脈では血管径の変化がさらに小さくなってしまふ。

したがって、通常のMモード計測の分解能では、血管径変化を高い精度で計測することは困難である。

Mモード計測のさまざまな問題を解決するために、eTRACKINGでは、計測にRF信号を用いている。RFとはRadio Frequencyの頭文字で、BモードやMモードの元になっている生の超音波受信信号である。血管径の変化をとらえるために、図2に示すように、血管の両端にトラッキングゲートをBモード上で設定する。超音波診断装置内部では、RF信号のゼロクロス点にトラッキングゲートが設定される。次のRF信号を受信した際は、図2の破線のトラッキングゲートのように、ゼロクロス点を自動的に追いかける。つまり、血管壁の位置が動くと、トラッキングゲートもその壁の動きに追従してリアルタイムに動く。その結果、リアルタイムでMモード上に血管壁の動きをグラフ表示可能となる。

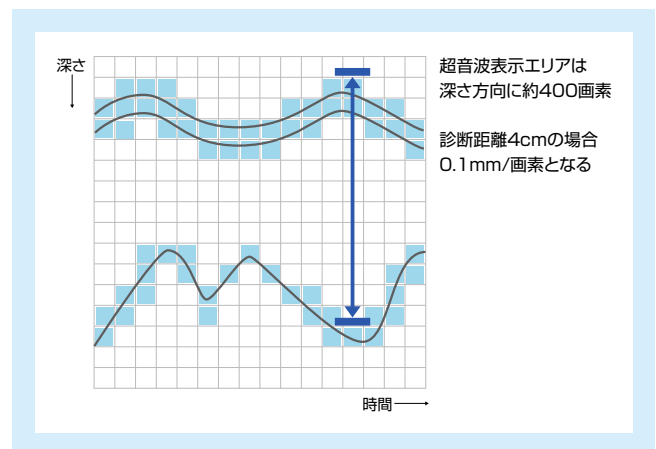


図1：Mモード計測の距離分解能

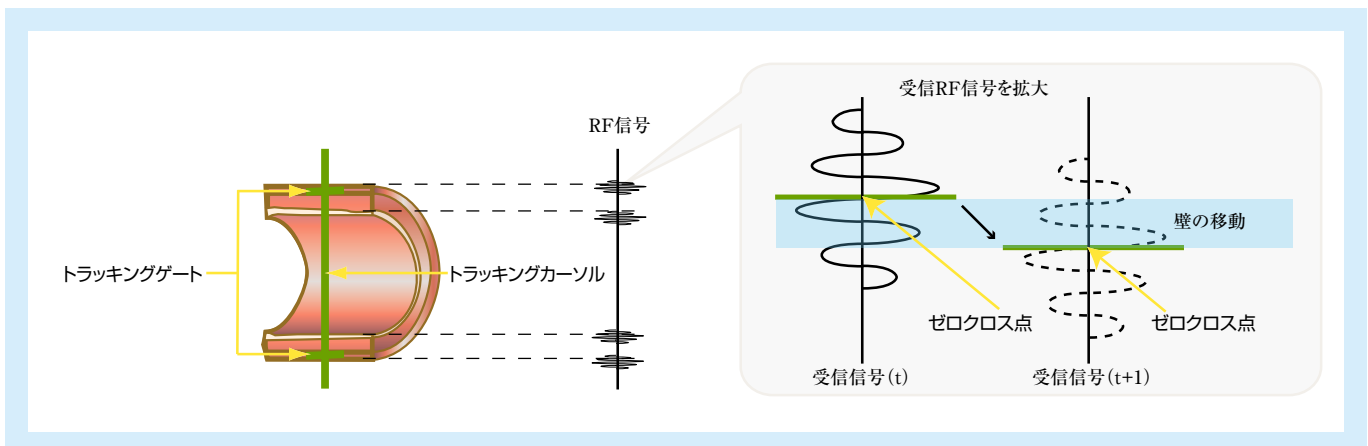


図2：RF信号とゼロクロス点

トラッキングゲートのゼロクロス位置は、図3に示すように、超音波受信周波数の16倍のクロックを用いて計測する。16倍の周波数のクロックとは、超音波受信信号の1波を16分割することに相当する。超音波受信周波数が10MHzとすると、1波長は0.15mmで、16分の1は約0.01mmの分解能と言える。よって、2つのトラッキングゲート間のクロックを数えれば、血管壁の移動距離を0.01mmの分解能で計測できるので、血管径の変化量を同じ分解能で知ることができる。

このようにして精度良く測定された血管径が、1秒間あたり1000個の解析データとして取得される。ここで、頸動脈の最大と最小径をカフ型血圧計で測定した最高と最低血圧で較正すると、血管径変化波形を血圧波形とみなすことができ、 β などの指標が自動算出され表示される。

1心拍のデータのみの測定では、呼吸性的変動やノイズなどの影響が考えられるため、解析には連続した4~5心拍分をアンサンブル平均し、この影響を低減している。アンサンブル平均とは、時相をそろえて加算平均処理をする方法である。本機能では、心電図のR波を基準に時相をそろえている。

3. eTRACKINGの製品搭載

3.1 eTRACKINGの製品搭載の一例

eTRACKINGを搭載した超音波診断装置ProSound* F75の外観を図4に示す。

eTRACKINGは、F75のほか、ProSoundシリーズのa7

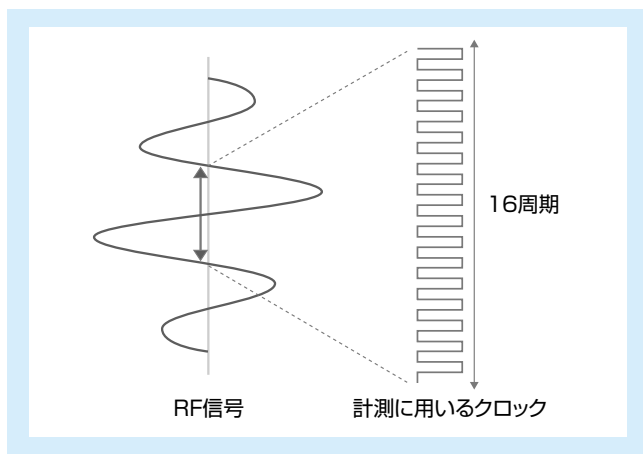


図3：計測に用いるクロック

やa6など、多くの超音波診断装置に搭載されている。また、eTRACKINGが広く普及するように、複数種類の標準的な高周波の超音波リニアプローブで対応している。

3.2 対象部位の描出の方法

対象部位は、Bモードが観察可能な、血管、総頸動脈、頸動脈分岐部、内頸動脈、椎骨動脈、上腕動脈などが挙げられる。

総頸動脈の場合、分岐部から中枢側へ1~2cm付近、または鎖骨上部から分岐部の中間付近で計測している施設が多い。施設内で部位を統一して計測することを推奨している。

また、左右差を示す場合もあるため、左右両方で計測を行う方が良い。短軸画像と長軸画像は、どちらで計測しても構わないが、内中膜、外膜が良好に描出されている部位を選ぶことが重要である。プローブは、できるだけ血管を圧迫しないよう、軽く当てる。特に、静脈の拍動が強い場合は、通常より軽くプローブを押し付けた方が、拍動の影響を小さくできる場合もある(図5)。

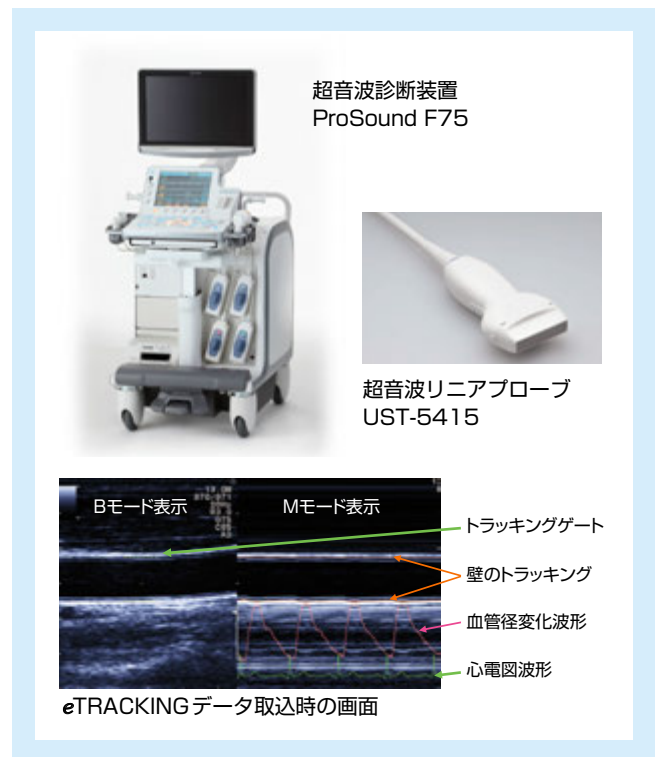


図4：eTRACKING搭載製品の一例



図5：血管の超音波画像

3.3 トラッキングカーソルおよびゲート設定の方法

短軸像を用いる場合、図6に示すようにトラッキングカーソル(黄緑色のグラフィック)が血管の中心を通るように(血管の最大径をとらえるように)トラッキングカーソルの位置を設定する。

長軸像を用いる場合、図7に示すように、血管とトラッキングカーソルが直角に交差するようにトラッキングカーソルの角度を調整する。そうすることで、内膜等の描出も良好となり、また正確な血管直径を計測できる。トラッキングカーソルの角度は簡便に調節することができる。

また、トラッキングゲートを設定する位置によっても、 β 値は変わってくる。図8に示すように、内膜側に設定する方が、外膜側に設定するよりも β 値は小さくなる。それは、血管壁の体積は心周期を通して一定で、内径(内膜-内膜間の血管直径)の方が外径(外膜-外膜間の血管直径)より拍動による径の変化が大きいためである。計測を行う場合は、常に一定の場所にゲートを設定することが重要となる。菅原らは、内膜中膜複合体と外膜の境界近くの外膜側に設定することを推奨している⁵⁾。この理由は、この位置が外弾性板に相当し、主として血圧を支えていること、年齢に対する依存度が強いので、加齢の指標として利用しやすいことなどからである。

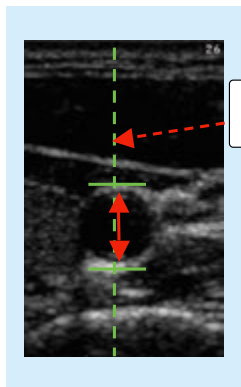


図6：血管短軸像

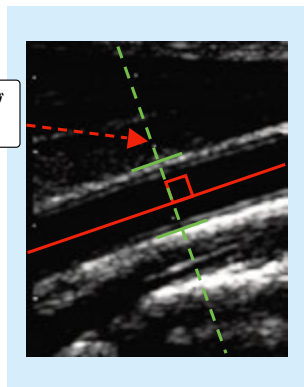


図7：血管長軸像

3.4 解析結果表示

血管径変化波形が良好に表示されている状態で、超音波診断装置のSTOREスイッチを押すと、血管径変化波形データを装置内のハードディスクに取り込んだ後、自動的にArterial Stiffness解析を起動し、図9に示すような解析画面に切り替わる。

この状態で、eTRACKINGにより検出された血管径変化波形の数心拍分を選択するとアンサンブル平均され、アンサンブル波形から読み取った最大、最小血管径を用いて動脈硬化の評価に役立つ種々のパラメータが自動算出される。

3.5 eTRACKINGにより得られる各種指標

eTRACKINGから得られる各種指標の定義式を以下に示す。ここで用いるパラメータは、Ps：収縮期の最高血圧、Pd：拡張期の最低血圧、Ds：収縮期の最大血管径、Dd：拡張期の最小血管径、ln：自然対数、 ΔP ：反射圧、PP：脈圧(Ps-Pd)、 ρ ：血液密度(1,050 kg/m³)である。

・ β (Stiffness Parameter)：血管の弾性(硬さ)を表す指標⁴⁾

$$\beta = \ln (Ps/Pd) / [(Ds - Dd) / Dd]$$

血管が硬くなるにつれて β 値は高くなる。また、加齢に

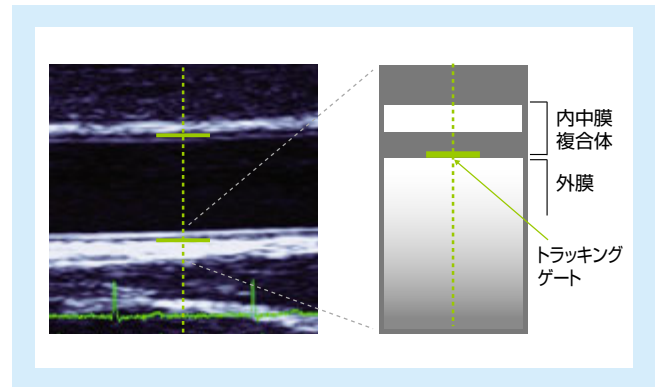


図8：トラッキングゲートの設定

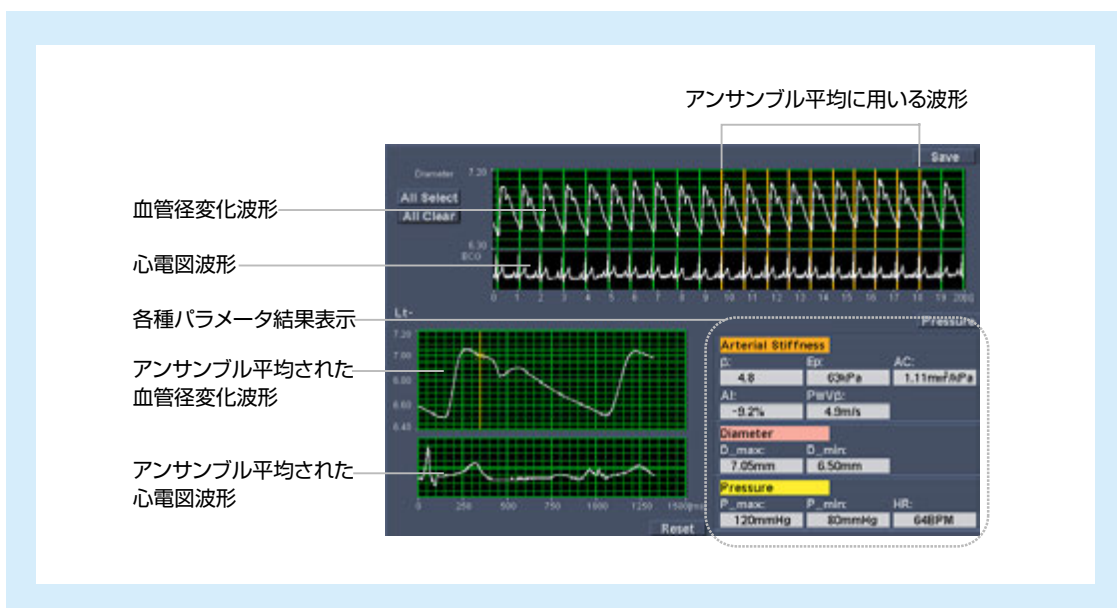


図9：eTRACKINGの解析結果表示画面

よっても高くなる。

血圧依存性が小さいため、臨床応用に有用と言われている。

- ・ Ep(圧力歪み弾性係数)：血管の弾性(硬さ)を表す指標

$$Ep = (Ps - Pd) / [(Ds - Dd) / Dd]$$

血管が硬くなるにつれて Ep 値は高くなる。

血圧の影響を受けやすい。

- ・ AC(Arterial Compliance)：血管の伸展性を表す指標

$$AC = \pi (Ds \times Ds - Dd \times Dd) / [4(Ps - Pd)]$$

血管の伸展性が高いほど AC は高くなる。

- ・ AI(Augmentation Index)：反射波による圧力の増加を表す指標

$$AI = \Delta P / PP$$

頸動脈では、“血管径の変化波形”と“血圧の変化波形”は相似型である⁶⁾。

図10の血圧波形において、反射波が到達する点を緑色で、最大血圧の点を赤色で示す。

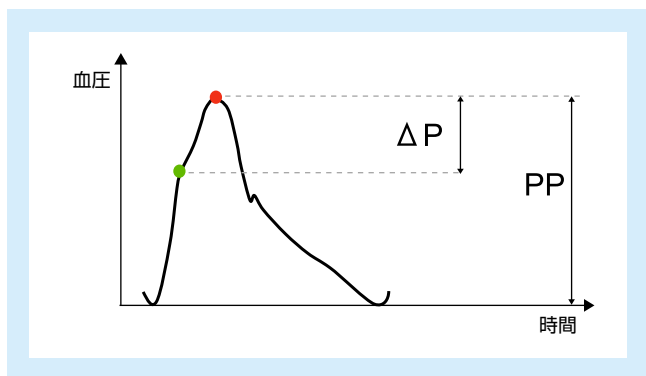


図10：血圧波形

脈波は駆出波と反射波の2つの成分で構成されており、この反射波は末梢血管抵抗が大きいほど、つまり加齢や動脈硬化の進行により大きくなる。

AIは脈圧に対する反射波の大きさを表す指標で、反射波が大きいほど、また反射波が返ってくるまでの時間が短いほど、高値を示す。AIを求めることにより、動脈硬化が早期に発見され、高血圧や心肥大の予防につながる事が期待される。

- ・ PWV β (One-Point Pulse wave velocity)：血管の硬さを表す指標^{7,8)}

$$PWV \beta = \sqrt{(\beta \times Pd / 2 \rho)}$$

Stiffness Parameter(β)から求めた局所の脈波伝播速度。

3.6 eTRACKINGによって測定されたβの健常例における年齢別の分布および再現性⁹⁾

20代から70代の健康な日本人を対象に測定されたβの健常例における年齢別の分布を表1に示す。β値は年齢とともに

増加し、平均値の10を超えると血管が硬くなっていることが示唆される。女性の場合は、閉経後にβ値が急増する傾向がある。また、喫煙や高脂血症など、心血管疾患のリスクファクターの集積に伴い、β値も増加すると報告されている。

Intraobserver, intrasessionにて9.3%という良好なVariabilityが得られている(表2)。Variabilityが15%以下であれば臨床応用可能と考えられる。

β値の再現性検討において、13%という良好な変動係数が得られた(図11)。

表1：健常例における年齢別の頸動脈β分布(外膜側にトラッキングゲートを設定した場合)

age group(years)	n	age(years)		β			
		Man	Woman	Man	Woman		
20	under25	12	10	23±2	21±5	5.8±1.4	4.7±0.7
30	26-35	12	11	31±2	30±3	8.9±3.1	6.5±1.0
40	36-45	17	10	40±2	39±3	9.8±2.6	8.4±2.0
50	46-55	10	9	50±2	49±2	12.1±3.5	9.9±1.8
60	56-65	11	12	60±2	60±3	11.8±2.5	14.6±4.0
70	over66	12	9	70±2	71±3	16.5±6.8	15.4±5.4
	total	135		45±17		10.4±4.8	
		correlation to age				0.66*	0.81*

Adapted from a table by K. Niki, M. Sugawara, et al. of Tokyo Women's Medical College, originally published in Heart and Vessels (2002) 17:12-21.

表2：βのVariability

	N	BP (Sys)	BP (Dia)	D (Sys)	D (Dia)	β
Intraobserver, Intrasession Mean(SD)	10	1.8 (1.2)	2.5 (2.4)	2.1 (0.9)	2.3 (1.0)	9.3 (3.2)
Intraobserver, Intersession(%)	10	4.2	6.4	6.8	7	14.4
Interobserver, Intrasession(%)	10	4.5	5.8	6	6.8	16.5

Niki K, Sugawara M et al. Tokyo Women's Medical College. Heart and Vessels (2002) 17:12-21

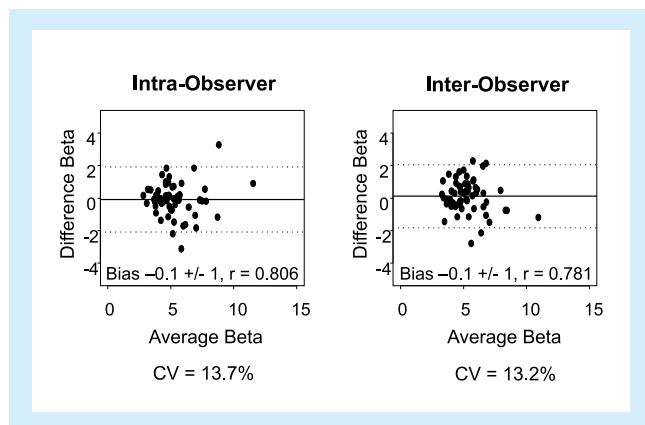


図11：β value Reproducibility Study (University of Wales College of Medicine)

4. まとめ

eTRACKINGは、予防医学への貢献を目指して開発された、超音波による早期動脈硬化の診断を総合的にサポートする“非侵襲”“高精度”“簡便”な機能である。

4.1 eTRACKINGの特徴

- ・汎用超音波診断装置の1機能として実現しており、特別な設備が不要。
- ・リアルタイムに血管径変化を表示し、Bモード画像上のトラッキングゲートを設定するだけで、自動的に拍動による血管壁の動きを追尾する。そのため、簡便な操作で短時間に測定可能。
- ・超音波診断装置上で解析ツールが動作し、瞬時に種々の指標を自動算出して表示するため、検査中に数値を知ることができる。
- ・RF信号を利用し、高い精度で血管径計測を実現。10MHz探触子で0.01mmの精度。
- ・1秒間に1000回という高いサンプリングレートで血管径計測を行うため、時間分解能に優れた結果が得られる。
- ・計測データを超音波診断装置に保存できる。保存したデータは、装置上で再計算が可能。
また、計測データはCSV形式で出力でき、パソコンの表計算ソフトを用いたデータ解析が可能。
- ・非侵襲検査のため、繰り返し検査が可能で、容易に日常検査に取り入れられる。

4.2 eTRACKINGの臨床的有用性

(1)動脈硬化の早期発見

血管壁の肥厚やプラークなど器質的変化が現れる前段階で血管の硬さを定量評価することが可能である。

(2)治療効果判定および経過観察の指標

薬物治療の効果判定や生活習慣改善によるリスクファクター除去後、動脈硬化が改善されたかどうかを経過観察する際の一つの指標として期待されている。

4.3 その他の動脈硬化病変評価のための機能

本稿では紹介できなかったが、ProSoundシリーズではeTRACKINGのみならず、FMD計測、自動IMT計測、さらにはリニアCW機能など、動脈硬化病変の診断に寄与する機能や評価方法の開発も積極的に行っている。

簡便で、侵襲性の低い超音波診断装置が、動脈硬化性病変のさまざまなステージの診断に利用されることで、早期診断に寄与することを期待している。

※ ProSound／プロサウンドは日立アロカメディカル株式会社の登録商標です。

参考文献

- 1) 菅原基晃, ほか: エコー法による動脈硬化の評価ーステイフネスパラメーター. 心エコー, Vol.6, No.10: 2005.
- 2) 原田烈光: eTRACKING, 超音波による血管弾性計測. Vascular Lab, vol.1, no.2: 2004.
- 3) 原田烈光: エコトラッキング法による動脈硬化指標の計測, 超音波検査技術, vol.23, No.3: 2003.
- 4) Hayashi K, et al.: Mechanical Properties of human cerebral arteries. Biorheology, 17: 211-218, 1980.
- 5) 菅原基晃, ほか: 動脈硬化における血管の硬さとは. Heart View, Vol.9, No.9: 2005.
- 6) Sugawara M, et al.: Relationship between the pressure and diameter of the carotid artery in humans. Heart vessels, 15: 49-51, 2000.
- 7) 菅原基晃, ほか: 局所脈波速度の非侵襲的1点測定. 最新医学, 6: 279-288, 2003.
- 8) Harada A, et al.: On-line noninvasive one-point measurements of pulse wave velocity. Heart Vessels, 17: 61-68, 2002.
- 9) Niki K, et al.: A New noninvasive measurement system for wave intensity. Evaluation of carotid arterial wave intensity and reproducibility, Heart Vessels, 17: 12-21, 2002.