

スペクトルトラッキング法によるストレイン解析

山崎 歌音

(藤田医科大学病院・臨床検査部)

心エコー検査は心機能評価を行う上で重要な検査の一つである。心機能評価とりわけ収縮機能評価は長らく左室駆出率(left ventricular ejection fraction : LVEF)が臨床的に広く用いられてきた。しかし、左室駆出率は左室の容量変化のみを捉える指標であり壁運動を直接的に評価するものではないこと、またその測定は解析者の手技や主観に左右される場合も少なからずあることが欠点であった。近年、心エコー検査においてスペクトルトラッキング法による心筋ストレイン解析が臨床応用され、壁運動の定量化や心筋の回転やねじれの解析が可能となった。心筋ストレイン解析では従来よりも微小かつ早期の心機能異常を捉えることが可能となり、心疾患の有無に関わらない潜在的な心機能異常の検出や心疾患の予後評価など、この値の活用による非侵襲的な病態把握が期待されている。スペクトルトラッキング法とは、Bモードエコー画像上のスペクトルを追跡し、心筋局所の機能だけでなく壁運動の協調・同期不全・虚血や、心室全体としての機能も同時に評価できる心エコーの評価法である。長軸方向への伸縮を表す longitudinal strain (LS)、心筋の中心部方向への縮みを表す radial strain (RS)、心筋の円周方向への縮みを表す circumferential strain (CS) として評価し、心尖部四腔像、心尖部二腔像、心尖部左室長軸像における全 segment の LS から求めた global longitudinal strain (GLS) は LVEF と並ぶ左室収縮機能指標として期待されている。さらに左室心筋線維の走行により発生する左室の回転やねじれの解析も可能となった。現在では、左室のストレイン解析のみならず、右室や左房のストレイン解析そして、2D から 3D エコーでのストレイン解析も可能となり、ますます臨床応用が期待されている。この項では、スペクトルトラッキング法による心機能評価の紹介と今後の展望について述べる。

心臓の解剖および心筋線維の走行

左室心筋は、心内膜側から心外膜側にかけて、内斜走筋、輪状筋、外斜走筋の3層からなり、全体的には螺旋状に走行している。左室の中層では心筋線維は円周方向に走行しており、心内膜側、心外膜側に向かうにつれて次第に角度は長軸に近い方向で走行する。この角度の変化は、心外膜で -60° 、中層で 0° 、心内膜で $+60^\circ$ である(図1)。この走行により、左室は心尖部から見て、心尖部は反時計回り、心基部は時計回りに回転し、左室全体にねじれを生じている(図2)。また、心筋線維は束になり、sheet 状に配列されている。左室の収縮に伴い、心内膜側ではこの sheet の配列の角度が大きく変化し、この変化は心基部より心尖部で大きい。この sheet のずれのおかげで心内膜側での大きな壁厚増加が得られる。これらは左室が有効に血液



図1 心筋の走行
左室の心筋線維の角度の変化は、心外膜で -60° 、中層で 0° 、心内膜で $+60^\circ$ である。

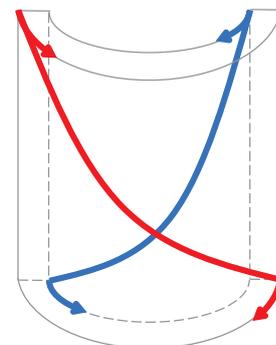


図2 左室全体のねじれ
左室は心尖部から見て、心尖部は反時計回り、心基部は時計回りに回転し、左室全体にねじれを生じている。
(文献1より引用改変)

を駆出することに寄与している^{1,2}。

スペックルトラッキング法

スペックルトラッキング法を用いたストレイン解析について説明する。ストレインとは、「歪み」と訳され、物体に力が加わったときに、物体の硬さに応じて、どの程度の変形が起こるのかを示すものである。ここで変形とは物体内の任意の2点間の距離が変化することで定義されるので、ストレインは物理的に距離という1次元の量で表され、心筋の初期長に対し何%心筋が変化したかを表すものである。つまりスペックルトラッキング法による心筋ストレイン解析とは、心筋上の任意の点（スペックル）の拡張期から収縮期にかけて移動した距離・角度であるストレインを経時的

に測定することで心筋の壁運動を定量化する方法である（図3）。

左室の壁運動で評価するストレインには3つの成分がある（図4）。まずは壁厚変化で、これは心筋壁の内膜面ないし外膜面に垂直な方向でありRSと呼ばれる。次に弁輪の動きと一緒に長軸方向への伸縮を見ており、これがLSである。そして円周方向への伸縮もみており、短軸像での内径変化に相当するCSとなる。2Dスペックルトラッキング法の場合、RSとCSは短軸像で得られ、LSは心尖部（二腔、三腔、四腔）像で得られる。なお、心尖部像における壁厚変化はtransverse strain（TS）と呼ばれる。通常、左室は収縮期に壁厚は増加するのでRSは正、長軸および内径方向へは縮むためLSとCSは負の値となる。また、心筋の

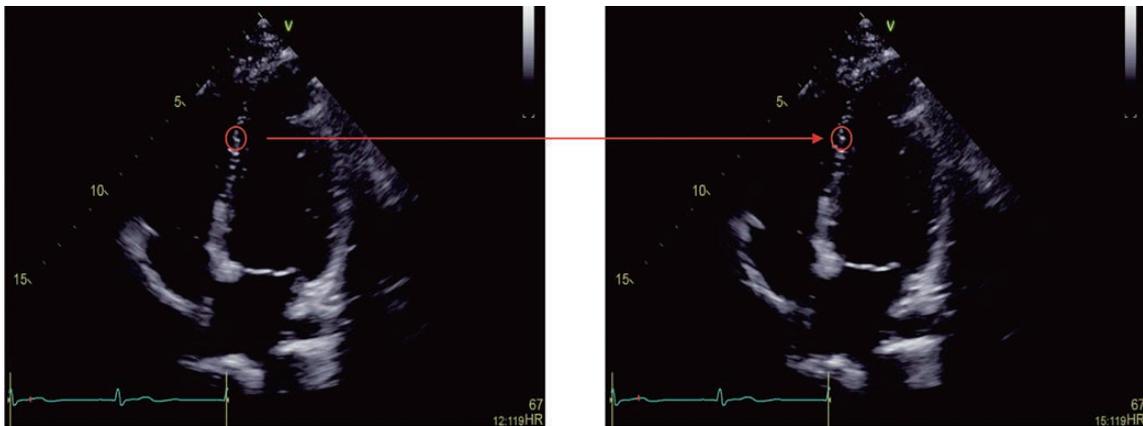
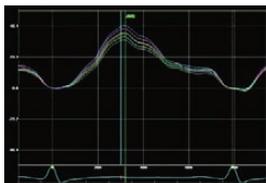


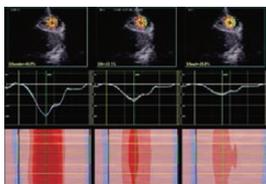
図3 スペックルトラッキング法
 スペックルトラッキング法とは、心筋上の任意の点（スペックル、つまり画像上で赤丸に囲まれた白つぶ）の拡張期から収縮期にかけて移動した距離・角度を経時的に測定することで心筋の壁運動を定量化する方法。

・ RS

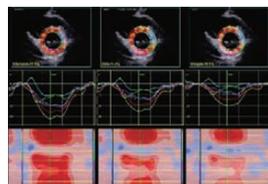


RSを示す。短軸像から得られ、大動脈弁閉鎖のタイミングで値は正となる。

・ 心尖部CS

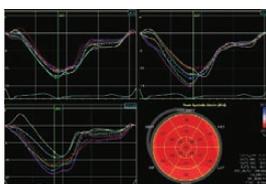


・ 心基部CS



CSは心筋の円周方向への伸縮を見ているストレイン。短軸像から得られ、ピーク値は負となる。3枚の写真は左から、心内膜側、平均、心外膜側のストレインを表す。

・ GLS



GLSは心尖部四腔像、心尖部二腔像、心尖部左室長軸像におけるLSの平均値で算出される。左上のグラフは心尖部四腔像のLS、右上は心尖部二腔像のLS、左下は心尖部左室長軸像におけるLSを表す。

図4 3つのストレイン成分

ねじれや回転を解析することも可能で rotation や LV twist として評価できる。rotation は前述のような心筋線維の内斜走筋および外斜走筋の走行の違いにより発生し、心筋の回転の程度を角度で表す。左室のねじれは LV twist として表され、心尖部 rotation と心基部 rotation の差から求められる。

スペックルトラッキング法によるストレイン解析の長所としては、ドプラストレイン法のようにドプラ原理を使用していないため、角度依存性がなく、短軸像でも心尖部断層像でも自由に観察できる点や、ROI が心筋の動きに自動的に追従する点があげられる。

GLS

GLS は心尖部四腔像、心尖部二腔像、心尖部左室長軸像における LS の平均値で算出される。ストレイン(%)は(ある時間のセグメントの長さ-初めのセグメントの長さ)÷初めのセグメントの長さで表される。つまり LS は、(収縮末期の心筋長-拡張末期心筋長)÷拡張末期心筋長という式から求められる相対的な心筋長の変化率である。LVEF と GLS はともに左室収縮能を表す指標であるがこの2つの指標の間に強い相関関係はなく、GLS は心筋の局所的な動きをとらえた LS を左室全体として表した指標であり、容量変化を捉えた LVEF だけでは判定できない早期の微細な異常を捉えることができると考えられている。GLS の正常値は -20%程度と言われているが、GLS は初期長を基準とした指標であるため、体表面積が大きいほど GLS は低値を示す可能性がある。つまり、性別や体重が影響する。また、年齢も GLS に影響を与えると言われている。ただし、GLS の年齢差や性差は 1%前後である。

GLS が臨床応用されている疾患として HFpEF (heart failure with preserved ejection fraction) や HFrEF (heart failure with reduced ejection fraction)、心アミロイドーシスなどがあげられる。HFpEF とは LVEF の低下がみられない慢性心不全の状態のことを言う。この疾患において GLS は優れた指標で、HFpEF 症例の 50~60%に GLS の低下がみられると言われている。GLS の低下は心血管複合イベント、心血管死、心不全入院の予測因子となり、GLS が 1%減少すると心臓死または心不全入院のイベントリスクが 13%上昇するという報告がある⁴。HFpEF において GLS が低下する原因としては、この疾患では心内膜と心外膜を比較すると心内膜に相対的に虚血が起こっている可能性があり、このことが GLS の低下を引き起こしている可能性があると考えられる。また、HFrEF 症例でも予後予測において LVEF と比較して GLS のほうが優位であり、GLS が 1%減少すると全死亡リスクが 15%上昇したという報告がある⁵。

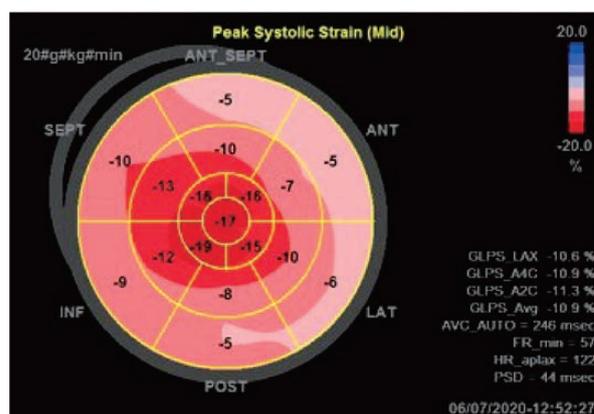


図5 心アミロイドーシスにおける Apical sparing
心アミロイドーシスにおける GLS の Bull's eye 表示画像を示す。心尖部を表す中央が赤、つまり LS が保たれており、心基部を表す円の外側が薄い赤色、つまり LS が低下している (apical sparing)。

アミロイドーシスとはアミロイド蛋白が様々な臓器に沈着して機能障害を引き起こす疾患である。特に心筋細胞間質に沈着する心アミロイドーシスでは左室拡張不全および左室駆出率の低下が起こる。心エコー所見としては求心性の左室肥大、右室肥大、僧帽弁の肥厚などがある。肥厚した心筋中に不均一に顆粒状の高輝度エコーを認める granular sparkling sign は心アミロイドーシスに特徴的な所見であると考えられてきたが、ほかの心疾患でも認められ、特異度に乏しいことが分かってきた。従来、高齢者の剖検例では心臓へのアミロイド沈着は高頻度で認められるが、臨床的には心アミロイドーシスと診断される割合は少なかった。しかし、近年予想以上に頻度が高いことが明らかとなってきた。そこで近年心アミロイドーシスの診断に有用な所見として注目されているのが apical sparing と呼ばれる心エコー所見である (図5)。これは GLS の Bull's eye 表示において心尖部は濃い赤、心基部などは青や薄い赤を示し、LS、つまり長軸方向のストレインが心基部よりも心尖部において保たれることを示す所見である。apical sparing の機序としてアミロイドが心尖部よりも心基部に沈着しやすいこと、その結果心基部のリモデリングが発生しやすいことなどが挙げられる。左室肥大患者から高い感度、特異度で心アミロイドーシスが鑑別できると所見として臨床応用が進んでいる。

Rotation

rotation は心尖部レベルおよび僧帽弁レベルの左室短軸像を使用する。短軸像の内膜をトレースし、心内膜から心外膜までの ROI 幅を設定後、自動トラッキングで解析する。rotation とは心筋の回転の程度を表し、心尖部レベルの左室短軸像では波形のピークは陽性、僧帽弁レベルの左室短軸像では波形のピークは陰

性となる(図6)。LV twistは心尖部レベルrotationと僧帽弁レベルの左室短軸像から求められる心基部レベルrotationの差から求められ、心筋のねじれの程度を表す。心尖部rotationの基準値は健常例での検討では $12 \sim 20^\circ$ とされている⁶⁻⁸。

Parkらは急性心筋梗塞(acute myocardial infarction: AMI)に対し、左室機能の回復には、前壁AMIでは左室のねじれが、下壁AMIでは心基部rotationが関与しており、心基部rotationは左室機能の回復に重要な役割を持っていることを示唆するという結果を報告している⁶。Changらは心尖部肥大型心筋症に対し、左室のねじれは心尖部rotationの低下により有意に低下し、心尖部肥大型心筋症の局所的な変化が全体的な左室のねじれに影響を与えることを示唆し、左室のねじれの障害は最終的に心尖部肥大型心筋症で拡張機能障害を引き起こす可能性があるという結果を報告している⁷。

たこつぼ心筋症

我々はたこつぼ心筋症の病態と循環生理機能検査指

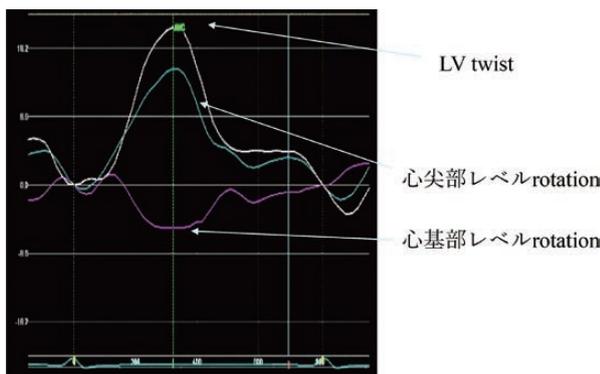


図6 rotation, LV twist rotationとは心筋の回転の程度を表し、LV twistは心尖部レベルrotationと心基部レベルrotationの差から求められ、心筋のねじれの程度を表す。

・拡張期



・収縮期



図7 たこつぼ心筋症 心尖部型たこつぼ心筋症の心エコー画像における心尖部四腔像を示す。左の写真は拡張期、右の写真は収縮期を表しており、収縮期には心基部は収縮しているが心尖部は収縮していない。

標や各種心エコー指標との関連についての研究を行っている。たこつぼ心筋症(takotsubo cardiomyopathy: TTC)とは1990年にはじめて佐藤らにより報告された比較的新しい疾患である。心尖部の無収縮に加え心基部の過収縮に伴い左室がたこつぼのような特徴的な収縮形態を呈することから「たこつぼ心筋症」と命名された(図7)。

従来、この疾患の壁運動異常、心機能低下、心電図異常などは一過性で、心機能異常は、発症後2、3日から数週間程度の短期間で正常化する可逆性の心筋障害であり、予後は一般的に良好であると考えられてきた。しかし、近年、心電図の正常化には6か月程度の時間がかかるという報告や、心内膜心筋生検による病理学的検討によると、壁運動異常は可逆性であると考えられてきたTTCに炎症性細胞浸潤や収縮帯壊死などが観察されたなど、従来とは異なる報告がされるようになった¹⁰⁻¹²。そのため、従来、TTCに対する治療は対症療法のみで特定の治療はなされなかったが、積極的な治療介入や、患者管理に向けた正しい病態把握および心機能評価が必要となってきた。我々は、たこつぼ心筋症の中でもLVEFが50%以下の症例に着目し、左室の回転やねじれを解析し心拍出量との関係および合併症併発との関連を検討した。その結果、LVEFが50%以下の心尖部型TTCにおいて1回拍出量の維持に関与するのはGLS、心尖部rotation、LV twistであり、その中でも特に心尖部rotationが一回拍出量の独立した規定因子であった。さらに、心尖部rotationが 8.08° 未満の群では心不全の合併率が有意に高かった。

その他のストレイン解析

○右室ストレイン解析と臨床応用

従来、左心系と比較すると評価が必ずしも容易ではなかった右室機能が、心疾患の予後を決定する重要な評価対象として重要視されている。右室機能評価指標

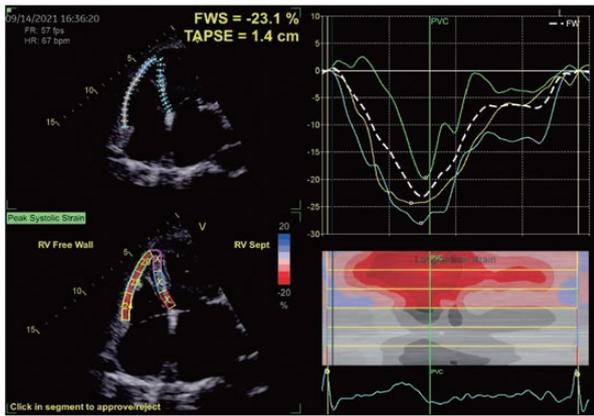


図8 右室ストレイン

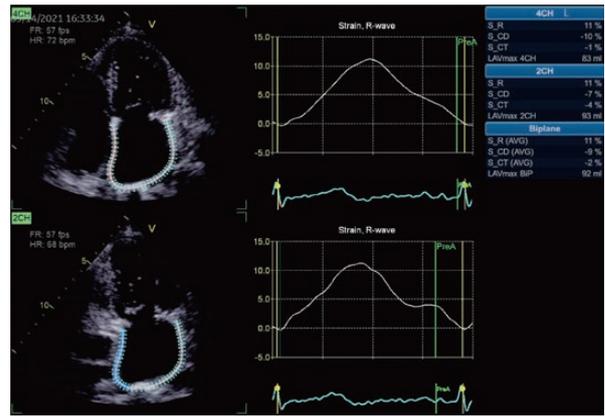


図9 左房ストレイン

としてMモード法による三尖弁輪移動距離 (tricuspid annular plane systolic excursion : TAPSE), 三尖弁輪収縮期速度, 右室面積変化率などがあるが, これらの加えて右室ストレイン解析が予後評価因子としても有用であると報告され, ますます重要となった。現在では検査方法の統一化や基準値の設定などがなされ臨床応用への期待が高まっている。右室ストレインの規定因子としては, 右室固有の心筋の収縮性, 右室前および後負荷, 右室拡大などが挙げられるが, 最も影響を与えるのは後負荷である。負荷により右室拡大が起こると, 初期長が大きくなり, 短縮率が同じであっても右室ストレインは低値になる。右室ストレインは, 通常的心尖部四腔像ではなく右室をメインとした心尖部四腔像から計測され, 正常値は絶対値で20%以上とされている (図8)。TAPSEは右室機能の指標として多く使用されている指標だが, TAPSEは保たれているにもかかわらず, 右室ストレインは低値となることがある。MRIによる右室駆出率が35%以下の症例では, TAPSEよりも右室ストレインにおいて, 分別能がより良好であったという報告がある。また, 急性心不全の症例において, LVEFが保たれているかどうかにかかわらず, 右室ストレイン低値例では心不全再発による入院や心血管死亡例が多いことが報告されており, この基準値は絶対値で13%以下であった¹⁴。右室ストレインは, 心室中隔を含む右室全体のストレインよりも, 右室自由壁を対象としたストレインのほうが重要であると考えられている。心室中隔は左室機能の影響を受け, 右室自由壁は肺高血圧症の影響を鋭敏に受け, 右室の一回拍出量および右室ストレインが低下するためであると考えられる。

○左房ストレイン解析と臨床応用

左房には3つの機能がある。すなわち収縮期には左房の弛緩と進展で血液を貯留するリザーバー機能, 心室の拡張早期における導管機能, そして拡張後期に左

房内に貯留した血液を左室へ駆出するプースター機能である。心エコー図検査による左房機能評価は従来, パルスドプラ法, 組織ドプラ法, 左房をトレースして得られる左房容積係数などが用いられてきた。しかし, 各疾患の血行動態や必ずしも一定ではない左房拡大の形態, 画像の描出などの観点から限界もあった。一方, 2Dスペックルトラッキング法で評価した左房ストレインは, リザーバー機能を反映する収縮期ストレイン, プースター機能を反映する拡張後期ストレインなど比較的簡便に評価可能であり, 左室の挙動に左右されにくく再現性も良好といわれている。左房ストレインに影響を与える因子としては年齢, 性別があり, 特に収縮期ストレインは加齢により低下するという報告がある¹⁶。性別については, 収縮期・拡張後期ストレインともに女性のほうが男性に比べて高値を示すという報告もあるが, いまだはっきりとは分かっていない。また, 機種により収縮期ストレインでは差があることが報告されているため, 左房ストレイン計測の際には, 年齢, 性別, 機種間差に注意する必要がある¹⁷。左房ストレインの図を示す (図9)。左房ストレイン計測時には, 心尖部四腔像にて左房がすべて表示できるように深度を調整する必要がある。このように求められた左房ストレインの正常値は, リザーバー機能を反映する収縮期ストレインは39%程度, プースター機能を反映する拡張後期ストレインは17%程度といわれており, 収縮期ストレインが38%未満となるとリザーバー機能の低下を表し, 拡張後期ストレインが16%未満となるとプースター機能の低下があると考えられている。左房ストレイン測定は, 発作性心房細動や高血圧症, 糖尿病における左房機能低下に有用であると考えられている。また, 左房のストレインおよびその変化率を示すストレインレートは急性心筋梗塞や僧帽弁閉鎖不全症, 大動脈弁狭窄症, HFpEFなどの心事故予測に有用であることが報告されている¹⁸⁻²¹。

○ 3D ストレイン解析と臨床応用

2D スペックルトラッキング法は GLS, RS, CS の 3 つのストレイン指標を心尖部からの像および短軸像から求めるため、同一心拍による解析は不可能であった。一方、3D スペックルトラッキング法ではフルボリューム画像を解析することにより、同一心拍で解析可能となった。また、3D スペックルトラッキング法では新たな指標として area strain がある。これは心内膜面の局所面積変化率を表し、2D スペックルトラッキング法における LS と CS を加味した指標である。3D スペックルトラッキング法は、2D スペックルトラッキング法と比較して三次元で動く心臓の立体構造を理解しやすいという利点があり、より正確な心機能評価を期待されている検査法である。また、2D スペックルトラッキング法では対象が断面から逃げてしまう through plane 現象という問題があるが、3D スペックルトラッキング法ではこの問題がなく、正確に心筋機能を表している可能性が高い。心筋を含めた 3D データの獲得や 2D 断面上にはない構造物の評価も可能となる。欠点としては、プローブが大きいと患者の肋間に入りづらく 3D 画質の取得が難しいことがあることや、2D のフレームレートと比較するとボリュームレートが低く、正しいピーク値ではない可能性があることが挙げられる。

今後の課題と展望

このように、スペックルトラッキング法を用いた心筋ストレイン解析は、非侵襲的、かつリアルタイムに解析することが可能であり、微細な壁運動異常を定量的に検出することで心疾患の病態把握が期待され多く心エコー診断装置に搭載が進み普及してきた。しかし、これらの解析方法や解析結果をルーチン業務に導入するにはまだ課題もある。まず、第一に画像をトラッキングする部位や計算式などが定まっていなかったためベンダー間での計算値に違いがあるという点である。しかし、これらは 2011 年以降、定義が統一化され、また統一定義に基づきファントムと臨床データによる検証が行われることにより、現在ではベンダー間格差は細かな計測値以外は許容範囲に収まってきている。第二にソフトウェアのバージョンによる値の不統一性である。定期的にバージョンアップされるソフトウェアは、その度に解析の精度が向上し以前のバージョンで解析した値と新たなバージョンで解析した値を比較することができない。これはルーチン内での臨床応用を展開する上で大きく課題となる点である。第三に解析の煩雑さが挙げられる。ルーチン業務では重要度の高さから記録断面と計測項目が設定されているため、現時点ではルーチン業務に取り入れている施設は少ない。しかし、最新の機器では比較的簡単に計測が可能と

なっている。心筋ストレイン解析から得られる心機能情報はとても多く、疾患の層別化や予後にも大きく影響する新たな指標として多くの施設で臨床応用されることを期待している。

文 献

- 1) 高山康夫：心臓の筋層の配置配列. 心エコー. 2006 ; 7 : 762 - 771.
- 2) 納富雄一：心筋のねじれ—評価の方法—. 心エコー. 2006 ; 7 : 812 - 819.
- 3) 阿部康彦：スペックルトラッキング法からどのようにストレインは計測されるか. 心エコー. 2019 ; 20 : 246 - 252.
- 4) Shah AM, Claggett B, Sweitzer NK, Shah SJ, Anand IS, Liu L, Pitt B, Pfeiffer MA, and Solomon SD : Prognostic importance of impaired systolic function in heart failure with preserved ejection fraction and the impact of spironolactone. *Circulation*. 2015 ; 132 : 402 - 414.
- 5) Sengeløv M, Jørgensen PG, Jensen JS, Bruun NE, Olsen FJ, Fritz-Hansen T, Nochioka K, and Biering-Sørensen T : Global longitudinal strain is a superior predictor of all-cause mortality in heart failure with reduced ejection fraction. *JACC. Cardiovasc. Imaging*. 2015 ; 8 : 1351 - 1359.
- 6) Park SM, Hong SJ, Ahn CM, Kim YH, Kim JS, Park JH, Lim DS, and Shim WJ : Different impacts of acute myocardial infarction on left ventricular apical and basal rotation. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging*. 2012 ; 13 : 483 - 489.
- 7) Chang SA, Kim HK, Kim DH, Kim JC, Kim YJ, Kim HC, Sohn DW, Oh BH, and Park YB : Left ventricular twist mechanics in patients with apical hypertrophic cardiomyopathy : assessment with 2D speckle tracking echocardiography. *Heart*. 2010 ; 96 : 49 - 55.
- 8) Meimoun P, Passos P, Benali T, Boulanger J, Elmkies F, Zemir H, Clerc J, and Lucycx-Bore A : Assessment of left ventricular twist mechanics in Tako-tsubo cardiomyopathy by two-dimensional speckle-tracking echocardiography. *Eur. J. Echocardiogr*. 2011 ; 12 : 931 - 939.
- 9) 坂田好美, 吉川 勉, 馬原啓太郎, 前川裕一郎, 上田哲郎, 磯貝俊明, 小西裕二, 長尾 建, 山本剛, 高山守正：たこつぼ型心筋症の臨床および心エコーの特徴—東京都 CCU ネットワークよりの

- 報告— ICU と CCU. 2013 ; 37 : S35 – 41.
- 10) Bennett J, Ferdinande B, Kayaert P, Wiyono S, Goetschalkx K, Dubois C, Sinnaeve P, Adriaenssens T, Coosemans M, and Desmet W : Time course of electrocardiographic changes in transient left ventricular ballooning syndrome. *Int. J. Cardiol.* 2013 ; 169 : 276 – 280.
 - 11) Ohara Y, Hiasa Y, Hosokawa S, Tomokane T, Yamaguchi K, Ogura R, Miyajima H, Ogata T, Yuba K, Suzuki N, Takahashi T, Kishi K, and Ohtani R : Left ventricular free wall rupture in transient left ventricular apical ballooning. *Circ. J.* 2005 ; 69 : 621 – 623.
 - 12) Pilgrim TM and Wyss TR : Takotsubo cardiomyopathy or transient left ventricular apical ballooning syndrome : A systematic review. *Int. J. Cardiol.* 2008 ; 124 : 283 – 292.
 - 13) Ishizu T, Seo Y, Atsumi A, Tanaka Y, Yamamoto M, Machino-Ohtsuka T, Horigome H, Aonuma K, and Kawakami Y : Global and regional right ventricular function assessed by novel three-dimensional speckle-tracking echocardiography. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2017 ; 30 : 1203 – 1213.
 - 14) Hamada-Harimura Y, Seo Y, Ishizu T, Nishi I, Machino-Ohtsuka T, Yamamoto M, Sugano A, Sato K, Sai S, Obara K, Yoshida I, Aonuma K, and ICAS-HF Investigators : Incremental prognostic value of right ventricular strain in patients with acute decompensated heart failure. *Circ. Cardiovasc. Imaging.* 2018 ; 11 : e007249.
 - 15) Rimbaş RC, Mihăilă S, and Vinereanu D : Sources of variation in assessing left atrial functions by 2D speckle-tracking echocardiography. *Heart Vessels.* 2016 ; 31 : 370 – 381.
 - 16) Liao JN, Chao TF, Kuo JY, Sung KT, Tsai JP, Lo CI, Lai YH, Su CH, Hung CL, Yeh HI, and Chen SA : Age, sex, and blood pressure-related influences on reference values of left atrial deformation and mechanics from a large-scale Asian population. *Circ. Cardiovasc. Imaging.* 2017 ; 10 : e006077.
 - 17) Motoki H, Dahiya A, Bhargava M, Wazni OM, Saliba WI, Marwick TH, and Klein AL : Assessment of left atrial mechanics in patients with atrial fibrillation : comparison between two-dimensional speckle-based strain and velocity vector imaging. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2012 ; 25 : 428 – 435.
 - 18) Ersbøll M, Andersen MJ, Valeur N, Mogensen UM, Waziri H, Møller JE, Hassager C, Søgaard P, and Køber L : The prognostic value of left atrial peak reservoir strain in acute myocardial infarction is dependent on left ventricular longitudinal function and left atrial size. *Circ. Cardiovasc. Imaging.* 2013 ; 6 : 26 – 33.
 - 19) Yang LT, Liu YW, Shih JY, Li YH, Tsai LM, Luo CY, and Tsai WC : Predictive value of left atrial deformation on prognosis in severe primary mitral regurgitation. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2015 ; 28 : 1309 – 1317.
 - 20) Galli E, Fournet M, Chabanne C, Lelong B, Leguerrier A, Flecher E, Mabo P, and Donal E : Prognostic value of left atrial reservoir function in patients with severe aortic stenosis : a 2D speckle-tracking echocardiographic study. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2016 ; 17 : 533 – 541.
 - 21) Freed BH, Daruwalla V, Cheng JY, Aguilar FG, Beussink L, Choi A, Klein DA, Dixon D, Baldrige A, Rasmussen-Torvik LJ, Maganti K, and Shah SJ : Prognostic utility and clinical significance of cardiac mechanics in heart failure with preserved ejection fraction. *Circ. Cardiovasc. Imaging.* 2016 ; 9 : e003754.