

Title	左室局所壁運動定量評価のための各種アルゴリズムの精度検証-心筋タギングシネMR法を用いた検討-
Author(s)	寺島, 幹雄; 内藤, 博昭; 黒澤, 努 他
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1996, 56(11), p. 720-725
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/17809">https://hdl.handle.net/11094/17809</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

# 左室局所壁運動定量評価のための各種アルゴリズムの精度検証

—心筋タギングシネMR法を用いた検討—

寺島 幹雄 内藤 博昭 黒澤 努\*  
佐藤 嘉伸 田村 進一

大阪大学医学部バイオメディカル教育研究センター機能画像診断学研究所 \*大阪大学医学部動物実験施設

## Verification of Accuracy of Several Algorithms to Quantitate Left Ventricular Regional Wall Motion: A study using cine MR imaging with myocardial tagging

Mikio Terashima, Hiroaki Naito,  
Tsutomu Kurosawa\*, Yoshinobu Sato  
and Shinichi Tamura

To verify the accuracy of several algorithms used to quantitate left ventricular (LV) regional wall motion, five volunteers were examined by cine MR imaging with presaturation myocardial tagging in short-axis and 4-chamber sections. Three algorithms for the wall motion analysis, radial, centerline, and originally developed "modified-Hildreth" methods, were applied to the cine MR images, and dissociation of the end-systolic position of the tags estimated by each algorithm from the true position was examined.

The modified-Hildreth method was comparable in accuracy to the other methods for estimating end-systolic tag position. Significantly worse estimation of the tag position by the three algorithms occurred in the 4-chamber section compared with the short-axis section ( $p < 0.001, 0.005$ ), indicating difficulties in the wall motion analysis of "long-axis" LV images. Among the algorithms, the centerline method showed the highest accuracy of the estimation in the 4-chamber section, and the modified-Hildreth method was the best in the short-axis section. In the 4-chamber section, correction of the position of end-diastolic and end-systolic images around the luminal centroids improved the estimation ( $p < 0.01, 0.05$ ).

Tagging cine MR imaging was proved to be useful for determining the most suitable algorithm for quantitative wall motion analysis of LV images obtained from conventional angiocardiology and other imaging modalities.

Research Code No. : 507

Key words : Left ventricle, Regional wall motion, Tagging, MR imaging

Received Sep. 4, 1995 ; revision accepted Feb. 20, 1996

Division of Functional Diagnostic Imaging, Biomedical Research Center, Osaka University Medical School

\*The Institute of Experimental Animal Science, Osaka University Medical School

## はじめに

心臓病、特に虚血性心疾患の臨床において左室の局所収縮性や局所機能の評価が大きな意義を持つことは言うまでもない。しかし局所収縮性は、動物実験では心筋内の植え込みマーカーを超音波やX線検査で観察することにより精度よく計測できるが<sup>1)-3)</sup>、臨床レベルでは定量評価が難しく、依然としてhypokinesis, akinesis, dyskinesisなどの定性的な評価法<sup>4)</sup>が広く用いられている。これは拡張期における左室壁のある部分が収縮期にどこに移動したかという動きベクトルを確実に評価できる臨床手法がなかったためであろう。たとえば冠動脈造影での冠動脈分岐部をマーカーとする方法があるが、精度は低いといわれる<sup>5),6)</sup>。そこで特に心カテーテル左室造影への応用を目的として、センターライン法<sup>7),8)</sup>など種々の局所壁運動の「推定」法が開発されて定量評価が行われてきたが<sup>9)</sup>、それらの方法にどの程度の精度があるのかは確定していない。また最近ではそれらの方法が心エコー図や超高速X線CTなど、他の画像診断法の左室像にも応用されるが、その正当性は明らかでない。臨床レベルで各種アルゴリズムの精度を検証する適当な手段がなかったのである。

最近、心筋の非観血的なマーク法としてMRIのタギング法が出現し注目を集めている。これはpresaturationと呼ばれる操作によって心筋に黒い線状の印(タグ)を付けるもので、種々のデザインのマーク法が開発され<sup>10)-12)</sup>、正常や病的な心室の局所収縮性や壁の変形の解析に応用され始めた<sup>13)-15)</sup>。しかしこの手法はMRIをベースとするため、装置や検査法の制約、画像の空間・時間分解能の制限、タグ線があまり精細なものでないことなどの理由により、臨床で汎用されるには至っていない。もし左室造影や心エコー図のような、より一般的な画像に応用できる精度の高い局所壁運動推定法があるなら、その方が意義は大きいと言えるだろう。そこでこの心筋タギング法を検証の手段に用いて、既存の代表的な局所壁運動評価法であるラジアル法<sup>16)</sup>とセンターライン法、およびわれわれが開発した新しいアルゴリズムのHildreth変法<sup>17)</sup>の精度の検討を行った。

対象と方法

1. 画像データ獲得と前処理

正常ボランティア 5 例 (28~39 歳, 男性) を対象に, 1.5 テスラの超伝導型 MRI 装置 (マグネトム H15, シーメンス社製) を使用し, 左室中部の短軸断面と四腔断面で心筋タギング併用シネ MR 法の撮像を行った. シネ MR 法はグラジエントエコー法による心電図同期シングルスライス撮像で, 心周期内での R 波から 50 ミリ秒間隔の連続画像を得た. 撮像条件はフリップ角 30 度, エコー時間 8 ミリ秒, 断面厚み 10 mm, FOV 35 cm, マトリックス 192×256 である. タギング方法は撮像断面に垂直な厚み 5 mm の 2 枚の平行断面の形での presaturation 操作 (フリップ角 90 度の電磁波照射による) を心電図 R 波の時点で行うもので, 操作に数ミリ秒を要し, 拡張末期の心筋に幅 5 mm の無信号線 (タッグ線) が同時に 2 本付く. 左室短軸と四腔断面でそれぞれ画像の縦方向と横方向にタッグ線を付ける各 2 回, 1 例あたり合計 4 回のシネ MR 法の撮像を行った.

次に 1 つのシネ MR 法のシリーズから拡張末期像 (R 波直後のもの) と収縮末期像 (心室内腔が最も小さいもの) を抽出し, 左室内腔, 外縁とタッグ線を心臓放射線科医 (内藤) が手動的にトレースしたのち, これをスキャナーを用いてパソコン (Macintosh Quadra 850AV, アップル社製) に取り込み, 入力画像データとした. Fig. 1, 2 に原画像とトレース像の例を示す. ここでタッグ線と左室内腔辺縁との交点を壁運動評価のためのリファレンス点とすると, 短軸断面では 1 例あたり 8 個 (中隔, 前壁, 側壁, 下壁各 2 個) で合計 40 個, 四腔断面では 1 例あたり 6 個 (中隔, 心尖, 側壁各 2 個) で合計 30 個のリファレンス点を取得できた.

2. 精度検証の対象アルゴリズムの概略

本研究ではラジアル法<sup>16)</sup>, センターライン法<sup>7), 8)</sup>と, われわれが開発した Hildreth 変法<sup>17)</sup>の 3 方法を取り上げた.

ラジアル法は左室内腔の基準点から放射状に伸ばした線で拡張末期と収縮末期の内腔辺縁を対応づけるもので, 今回は画像の平行移動によって拡張期と収縮期の内腔の面積重心 (centroid) を重ねあわせ (重心補正), その面積重心を基準点とする方法を用いた. センターライン法は拡張末期と収縮末期の辺縁の中線を作成し, この線から垂

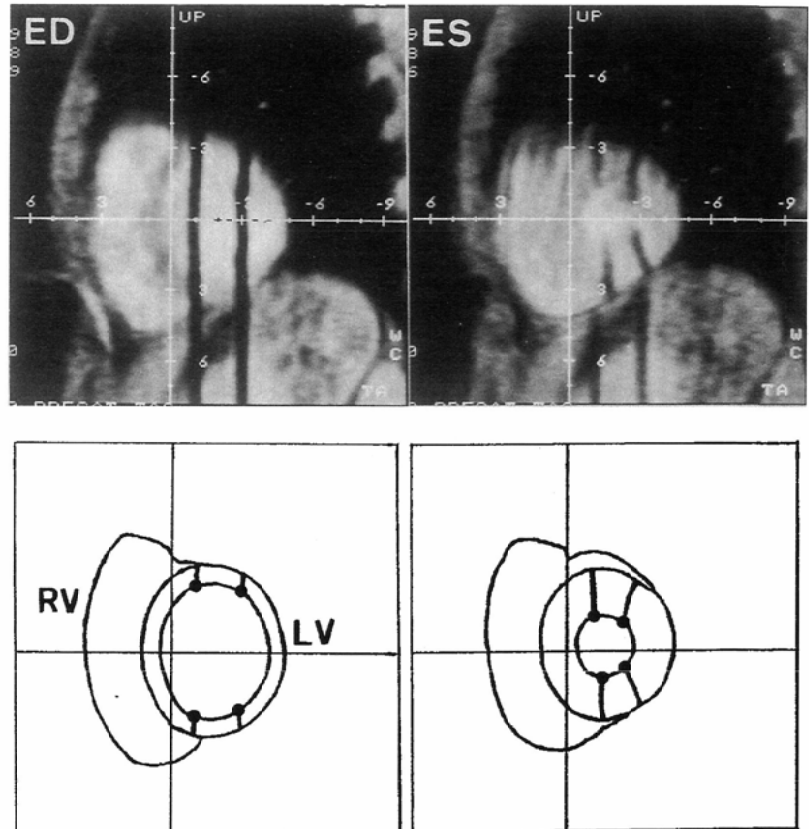


Fig. 1 Original end-diastolic (ED) and end-systolic (ES) cine MR images with myocardial tag-lines in the left ventricular (LV) short-axis section, and traced images of those. Crossing points of tag-lines and LV endocardial contour (indicated by black dots) were used as references for regional wall motion analysis. RV: right ventricle

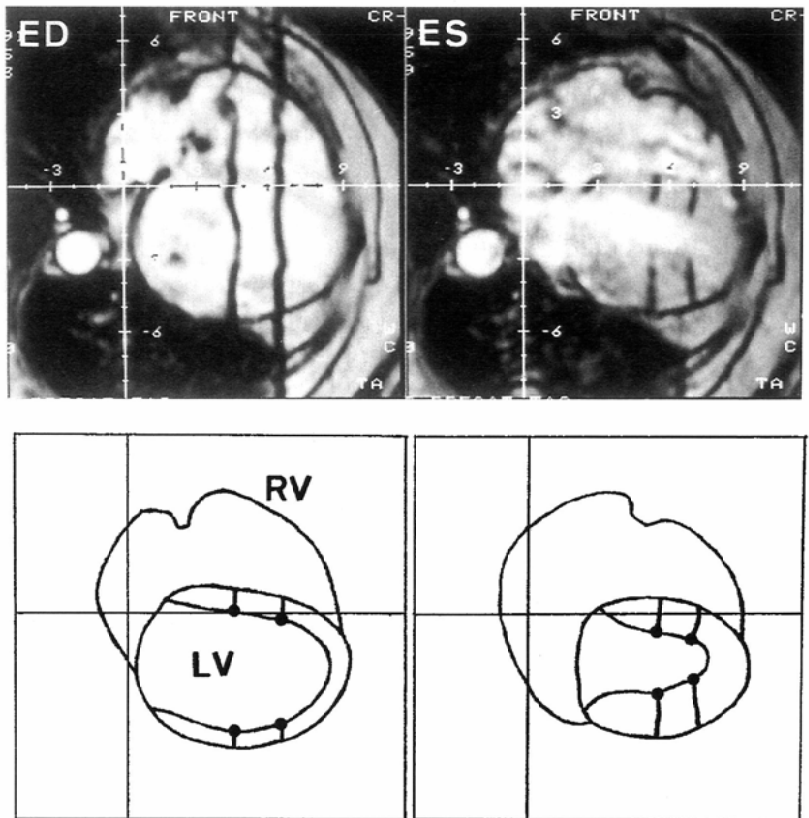


Fig. 2 Original cine MR images in the 4-chamber section and traced images of those. Reference points for regional wall motion analysis are indicated by black dots. ED: end-diastole, ES: end-systole, LV: left ventricle, RV: right ventricle

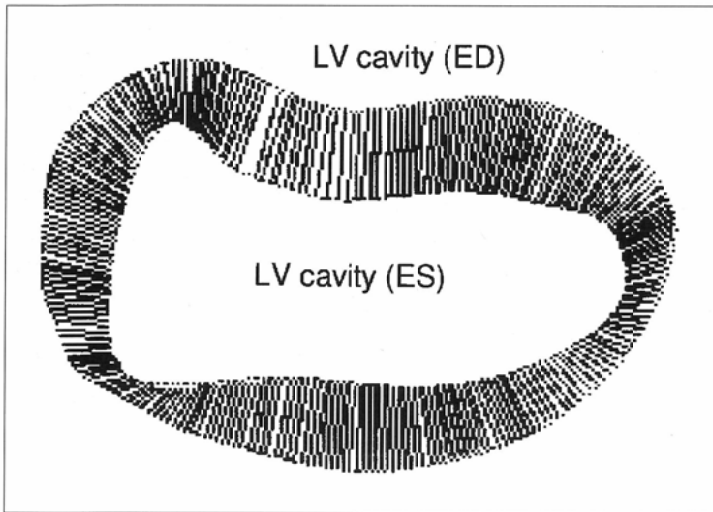


Fig.3 An example of left ventricular (LV) wall motion analysis in the 4-chamber section by modified-Hildreth method. End-systolic (ES) contour of LV cavity was superimposed on end-diastolic (ED) contour around the centroids by translating the images (centroid correction).

線をのばして両辺縁の交点を対応させる方法であり、重心補正をする場合としない場合の両方での検討を行った。

Hildreth 変法は画像工学で動きの解析に用いられる Hildreth アルゴリズム<sup>18)</sup>を改良したもので、拡張期と収縮期の内腔辺縁の中線を使って一次、二次微分係数を得て、この中線を起点として滑らかさ拘束を使用し両輪郭線に対して動きベクトルを推定する方法である。この方法についても重心補正をする場合としない場合の両者を検討した。

### 3. 解析方法

タギング併用シネMR法による左室像のトレース画像に対して、UNIXワークステーション (Pana Station S10TX4M51, 松下コンピュータ社製) 上で上記の 5 方法、即ち重心補正ラジアル法、センターライン法(重心補正なしとあり)、Hildreth 変法(重心補正なしとあり)を適用し、拡張末期の内腔辺縁の各点が収縮末期にどこに移動したと推定されるかを算出した。Fig.3に重心補正を行った場合の

Hildreth 変法による四腔断面像の処理結果の例を示す。

次に前述のリファレンス点(内腔辺縁とタグ線の交点)に注目し、拡張末期でのリファレンス点に対して収縮末期のリファレンス点を結ぶ線分と、各種アルゴリズムによる収縮末期のリファレンス点の推定位置を結ぶ線分のなす角度を求め、そのコサイン値を精度検証のための指標とした(Fig.4)。したがって収縮期でのリファレンス点の真の位置と推定位置のずれが小さいほど角度は小さく、コサイン値は 1 に近づくことになる。そして短軸断面像と四腔断面像での上記 5 方法のコサイン値を相互に比較検討した。

検定法について<sup>19)</sup>、関連多群間の変動の有無は、Bartlett法による分散均一性検定の後、Friedman testにより判定した。関連 2 群間の有意差検定には標本数が十分多いためpaired t-testを、同じ方法における短軸断面と四腔断面の結果の差の検定には(標本の非正規分布型と不等分散性を考慮して)Mann-Whitney testを用いた。また各方法の安定性を比較するために、F検定を用いて 2 群間の等分散の検定を行った。これらはいずれも確率 5 %未満を有意差ありとした。

## 結 果

短軸断面像と四腔断面像に各アルゴリズムを適応した場合のコサイン値をTable 1に示す。短軸断面での各方法の平均値はいずれも0.95以上(角度にして約18度未満)の高値を示し、関連多群の比較で 5 方法間の有意変動がなかったのに対し、四腔断面の値は低くてばらつきも大きく、5 方法間に有意の変動を認めた( $p < 0.05$ )。また両断面の結果の比較では、同じ方法での両断面のコサイン値間に強い有意差があった( $*p < 0.001$ ,  $**p < 0.005$ )。これは左室の長軸型の画像での心収縮に伴う辺縁の対応点の移動の推定が、短軸型の画像に比べて難しいことを意味している。

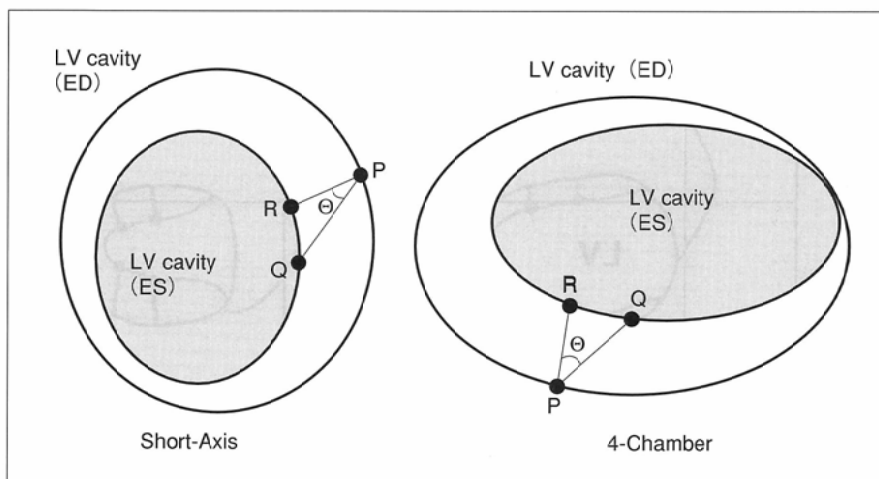


Fig.4 Cosine value of angle ( $\Theta$ ) was a parameter for verification of an accuracy of several algorithms for left ventricular (LV) wall motion analysis. P: end-diastolic (ED) position of reference point (crossing point of tag-line and endocardial contour), Q: true end-systolic (ES) position of the point, R: ES position of the point estimated by several algorithms,  $\Theta$ : angle QPR

Table 1 Cosine values in the verified methods

	Rad + cc	CL	CL + cc	M-H	M-H + cc	var.
Short-Axis (n = 40)						
Cosine Value	0.958 * ± 0.075	0.964 * ± 0.039	0.955 ** ± 0.064	0.962 * ± 0.059	0.969 * ± 0.051	ns
4-Chamber (n = 30)						
Cosine Value	0.745 ± 0.373	0.748 ± 0.266	0.886 ± 0.123	0.731 ± 0.279	0.812 ± 0.221	p < 0.05

Values are mean ± 1SD.

Rad: radial method, CL: centerline method, M-H: modified-Hildreth method

+cc: with centroid correction (superimposition of end-diastolic and end-systolic centroids)

var.: variations (examined by Friedman test)

\*p < 0.001, \*\*p < 0.005 vs. corresponding values in the 4-chamber section (by Mann-Whitney's U-test)

Fig. 5に短軸断面の結果を図示する。全体に高値を示すなかでも最も平均値の高いものは重心補正付きのHildreth変法、最も低いものは重心補正付きのセンターライン法であり、両者間に有意差を認めた(p < 0.01)。短軸断面においてはHildreth変法、センターライン法のいずれでも重心補正による有意の精度向上は認めなかった。また、標準偏差は重心補正なしのセンターライン法がF検定で他の4方法に対して有意に小さく(† p < 0.001, 0.01, 0.05), 重心補正ラジアル法と重心補正Hildreth変法の標準偏差間にも有意差があった(†† p < 0.01)。以上より、短軸型の左室像に応用する場合にはHildreth変法(特に位置補正を加えたもの)が優れており、位置補正なしのセンターライン法も安定性が高いと考えられた。

Fig. 6に四腔断面の結果を示す。この断面では重心補正付きのセンターライン法が他の4方法に対してコサイン値が0.886(角度約27度)と有意に高く(p < 0.01, 0.05), 標準偏差が有意に小さい(† p < 0.001)結果であった。またHildreth変

法でも重心補正による有意の精度向上がみられた(\*\*p < 0.05)。一方、重心補正ラジアル法はかなりばらつきが大きく、重心補正付きセンターライン法のほか、重心補正なしのセンターライン法や重心補正付きHildreth変法との間にも標準偏差に有意差があった(†† p < 0.05, ††† p < 0.01)。以上より左室の長軸型画像には位置補正付きのセンターライン法を用いるのが良く、また精度向上のためには何らかの位置補正が必要なることが明らかになった。

### 考 察

#### 1. 左室局所心機能や収縮性の定量評価法

心カテーテル左室造影や心エコー図法の左室像を用いた局所心機能・収縮性の定量評価法として従来、面積法<sup>20)</sup>、ラジアル法<sup>16)</sup>、センターライン法<sup>7),8)</sup>、セントラルポイント法<sup>21),22)</sup>などが提唱されている。このうち面積法は左室内腔

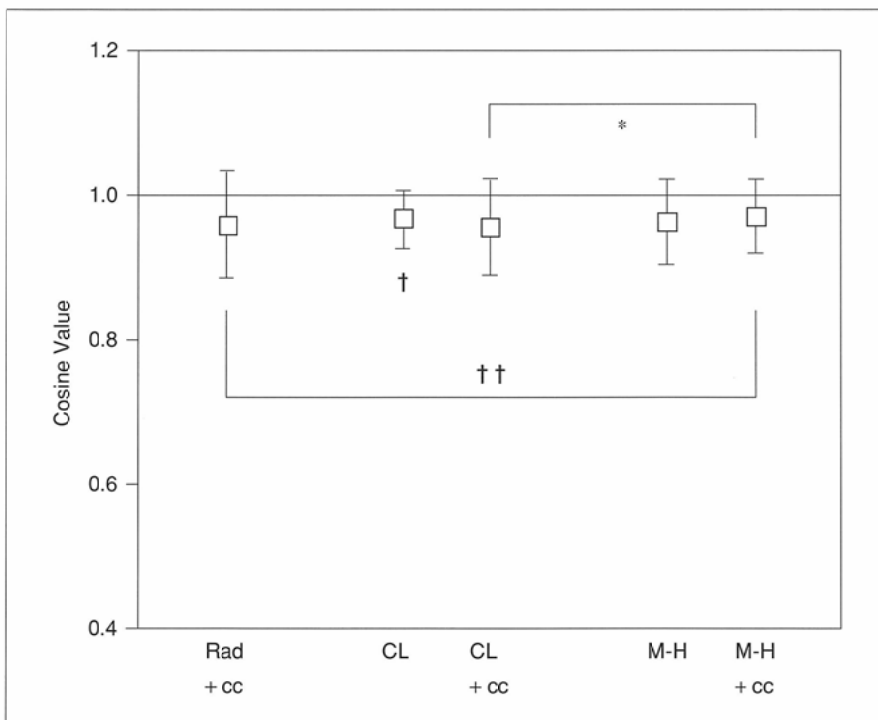


Fig.5 Cosine values of angle (θ) in the verified methods (short-axis section). Rad: radial method, CL: centerline method, M-H: modified-Hildreth method, + cc: with centroid correction (superimposition of end-diastolic and end-systolic centroids)

\* p < 0.01 (by paired t-test)

†p < 0.001 vs. Rad+cc, 0.01 vs. CL + cc, M-H, 0.05 vs. M-H + cc, †† p < 0.01 (by F-test for equal variance)

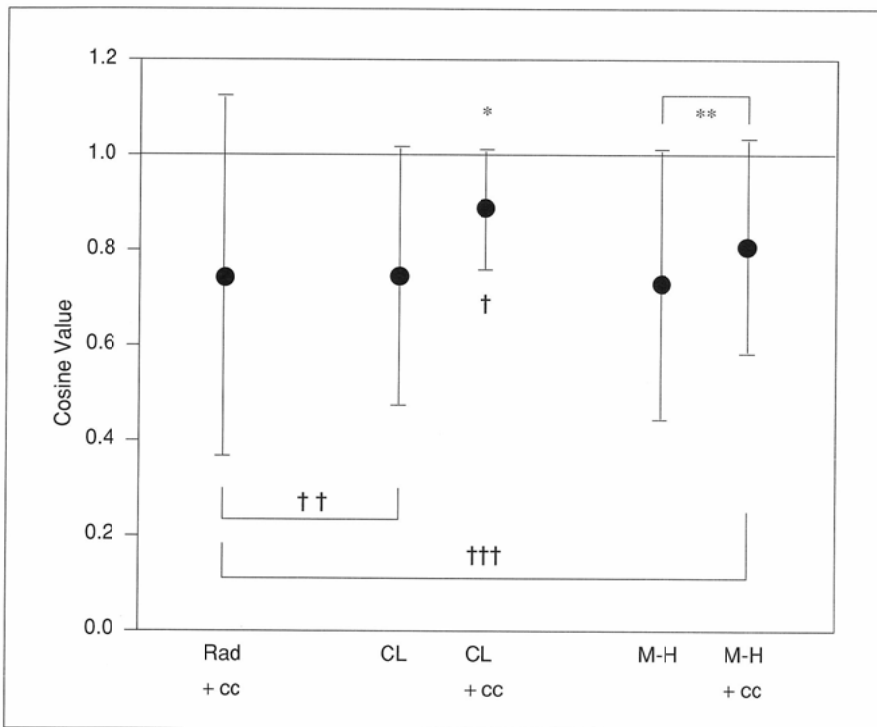


Fig.6 Cosine values of angle (Θ) in the verified methods (4-chamber section). Rad: radial method, CL: centerline method, M-H: modified-Hildreth method, + cc: with centroid correction (superimposition of end-diastolic and end-systolic centroids)

\*  $p < 0.01$  vs. CL, M-H, 0.05 vs. Rad + cc, M-H + cc, \*\*  $p < 0.05$  (by paired t-test)

†  $p < 0.001$  vs. the other 4 methods, ††  $p < 0.05$ , †††  $p < 0.01$  (by F-test for equal variance)

を複数箇所に区分して拡張期と収縮期での対応部の面積を比較するもので、局所の動きを推定する手法ではなく、またセントラルポイント法は左室造影右前斜位像のみに応用できる手法のため、両方法とも今回の検討では省略した。またラジアル法やセンターライン法では基準点のとり方や位置補正の方法などに多少の変法があるが<sup>20),23)</sup>、今回は比較的良好に用いられる方法を採用した。なお拡張期像と収縮期像の位置補正としては、面積重心の重ね合せによる平行移動の補正のみで、例えば長軸の重ね合せなどによる回転運動の補正は行わなかったが、これは短軸断面像での回転補正が困難なためである。

ラジアル法やセンターライン法での局所収縮性評価に辺縁の位置変位の程度が使われることが多いが、これには上記の平行移動や回転運動が大きく影響するため、可能なら辺縁上の2点間の距離短縮を計測する方が良いと思われる。この観点から今回の検討では拡張期での辺縁上の点が収縮期にどこに移動したかがどの程度推定できるかを、各アルゴリズムの精度検証の指標とした。これは心エコー図法のような断層画像で拡張期と収縮期の壁厚変化を局所収縮性の指標とする場合においても重要であろう。

## 2. Hildreth 変法について

現在かなり広く用いられているセンターライン法では、時に拡張期と収縮期の対応点を結ぶ線分同士が交差する場合があります。辺縁上の2点間の短縮を評価する上で大きな問題となる。そこでわれわれは、ある輪郭線が滑らかに別の

輪郭線に形を変えたとして対応点を求める画像工学手法であるHildreth法<sup>18)</sup>を応用した左室局所壁運動評価法を開発した。Hildrethの原法は第1輪郭線のみを一次、二次微分係数をパラメータとして滑らかさ拘束を使用して動きベクトルを推定する手法のため、動きの推定点が第2の輪郭線から大きくはずれる場合がある。そこで第1, 第2輪郭線(具体的には拡張期と収縮期の内腔辺縁)の中線を使って一次、二次微分係数を求め、この中線を起点として滑らかさ拘束を使い両輪郭線に動きベクトルを推定するものがわれわれの変法であり<sup>17)</sup>、この方法では動きの推定点が両輪郭線から殆どはずれないことは確認した。

センターライン法と対比してのシミュレーション画像を用いた予備実験で、本法は形状がスムーズで曲率変化の小さな場合に極めて優れた動きの推定結果が得られる反面、急激な曲率変化に敏感に反応し、また滑らかさ拘束のために一カ所のジャンクデータが全体に影響するなど、センターライン法に比べてややロバスト性が低い結果であった<sup>17)</sup>。そして今回の生体への応用で、ラジアル法に勝り、センターライン法にほぼ匹敵する精度や安定性があることが確認できたと考える。

## 3. 検討結果の要約と解釈

今回の正常例の検討では、左室の長軸型の画像では短軸型の画像に比べて動きの推定が難しく、拡張期と収縮期の画像間の位置補正が必要なこと、方法として特に位置補正を加えたセンターライン法が優れること、短軸型の画像ではどの方法もかなり良い精度があるが、中ではHildreth 変法が優れること、また短軸像では位置補正の効果がなかったことが明らかとなった。

今井らのMRIタギング法を用いた検討<sup>24)</sup>では、左室の短軸面での拡張期から収縮期の平行移動による位置変位は前壁、側壁で8 mm前後、中隔、後壁で5 mm前後なのに対し、長軸方向の変位は特に心基部で14mm前後と大きく、これが長軸型の画像で位置補正が有効であった原因であろう。また、われわれのHildreth 変法が短軸画像に特に有効で、長軸型の画像でセンターライン法に劣ったのは、曲率変化の少ない滑らかな画像で効力を示す本法の性質に対応する結果と思われる。

## 4. 検証方法の問題点と今後の展望

今回、検証に用いたタギングシネMR法の画像は断層像であり、心エコー図やCTの画像でも同様の結果が予想される。しかし左室が撮像断面を出入りする動きの影響が考え



られるため、心カテーテル左室造影像のような投影画像での厳密な検討には3次元的なアプローチが必要であろう。ただし今井らの報告<sup>24)</sup>からは断面出入りの動きは概ね断面の厚みの範囲内と思われ、したがって、今回の結果は左室造影像に対してもおおそ適用できると思われる。またシネMR法の画像では左室壁と内腔の境界が不明瞭なことがあるが、隣接する心時相の画像やタグ線を参考にして内腔辺縁のトレースが可能であった。

以上の問題点にもかかわらず、MRIのタギング法は非観血的な唯一の心筋マーク法である。画像やタグ線の時間・空間分解能や装置の制約などのため、タギング法自身は左室の局所壁運動評価法として広く用いられてはいないが、左室造影などに使用する壁運動推定アルゴリズムの精度検証には極めて有用であろう。今後、病的な左室での検討はもちろん、左室の部位別の精度や回転運動補正の効果などについても検討が必要だが、そのような研究の基礎として今回のデータは大きな意義を持つものと考えられる。

## まとめ

- 1) 左室の局所壁運動定量評価法であるラジアル法、センターライン法、およびわれわれが開発したHildreth 変法の精度を、正常例の心筋タギングシネMR法の画像を用いて検証した。
- 2) Hildreth 変法にはラジアル法、センターライン法に匹敵する精度や安定性があった。
- 3) 左室の長軸型の画像での壁運動の推定は短軸に比べて困難で、拡張期・収縮期像の位置補正が必要であり、方法としてはセンターライン法が最も優れていた。
- 4) 左室の短軸型の画像の壁運動推定ではいずれの方法も高い精度を示したが、中では位置補正を併用したHildreth 変法が優秀であった。
- 5) 心筋タギングシネMR法は左室壁運動推定法の精度検証に有用なことが明らかになるとともに、今後、病的な左室での検討や、左室の部位別の検討などが必要と考えられた。

## 文 献

- 1) LeWinter MM, Kent RS, Kroener JM, et al: Regional differences in myocardial performance in the left ventricle of the dog. *Circ Res* 37: 191-199, 1975
- 2) Homans DC, Sublett E, Lindstrom P, et al: Subendocardial and subepicardial wall thickening during ischemia in exercising dogs. *Circulation* 78: 1267-1276, 1988
- 3) Waldman LK, Fung YC, Covell JW: Transmural myocardial deformation in the canine left ventricle: Normal in vivo three-dimensional finite strains. *Circ Res* 57: 152-163, 1985
- 4) Herman MV, Heinle RA, Klein MD, et al: Localized disorders in myocardial contraction: Asynergy and its role in congestive heart failure. *New England J Med* 277: 222-232, 1967
- 5) Kong Y, Morris JJ Jr., McIntosh HD: Assessment of regional myocardial performance from biplane coronary cineangiograms. *Am J Cardiol* 27: 529-537, 1971
- 6) 後藤葉一, 二木志保, 大越祐一, 他: 左室局所収縮機能の評価. 循環器病研究の進歩 10: 72-93, 1989
- 7) Sheehan FH, Mathey DG, Schofer J, et al: Effect of interventions in salvaging left ventricular function in acute myocardial infarction: A study of intracoronary streptokinase. *Am J Cardiol* 52: 431-438, 1983
- 8) Sheehan FH, Bolson EL, Dodge HT, et al: Advantages and applications of the centerline method for characterizing regional ventricular function. *Circulation* 74: 293-305, 1986
- 9) 内藤博昭: 心臓循環機能の臨床計測(X線). 二宮石雄 編: 循環生理機能と病態. p. 284-293, 1993, 南江堂, 東京
- 10) Zerhouni EA, Parish DM, Rogers WJ, et al: Human heart: Tagging with MR imaging. A method for noninvasive assessment of myocardial motion. *Radiology* 169: 59-63, 1988
- 11) Axel L, Dougherty L: Heart wall motion: Improved method of spatial modulation of magnetization for MR imaging. *Radiology* 172: 349-350, 1989
- 12) 内藤博昭, 有沢 淳, 小塚隆弘, 他: 心筋のMR Tagging法. *Molecular Medicine* 31: 594-597, 1994
- 13) Clark NR, Reichek N, Bergey P, et al: Circumferential myocardial shortening in the normal human left ventricle: Assessment by magnetic resonance imaging using spatial modulation of magnetization. *Circulation* 84: 67-74, 1991
- 14) Buchalter MB, Weiss JL, Rogers WJ, et al: Noninvasive quantification of left ventricular rotational deformation in normal humans using magnetic resonance imaging myocardial tagging. *Circulation* 81: 1236-1244, 1990
- 15) Kramer CM, Reichek N, Ferrari VA, et al: Regional heterogeneity of function in hypertrophic cardiomyopathy. *Circulation* 90: 186-194, 1994
- 16) Rickards A, Seabra-Gomes R, Thurston P: The assessment of regional abnormalities of the left ventricle by angiography. *Europ J Cardiol* 5/2: 167-182, 1977
- 17) 寺島幹雄, 佐藤嘉伸, 内藤博昭, 他: 心臓壁運動の画像解析. JAMIT Frontier'94 研究報告 21: 1-10, 1994
- 18) Hildreth EC: *The Measurement of Visual Motion*. 1983, MIT Press, London
- 19) 市原清志: バイオサイエンスの統計学. p. 27-201, 1990, 南江堂, 東京
- 20) Gelberg HJ, Brundage BH, Glantz S, et al: Quantitative left ventricular wall motion analysis: A comparison of area, chord and radial methods. *Circulation* 59: 991-1000, 1979
- 21) Ingels NB Jr., Daughters GT, Stinson EB, et al: Evaluation of methods for quantitating left ventricular segmental wall motion in man using myocardial markers as a standard. *Circulation* 61: 966-972, 1980
- 22) Ingels NB Jr., Daughters GT, Stinson EB, et al: Left ventricular midwall dynamics in the right anterior oblique projection in intact unanesthetized man. *J Biomechanics* 14: 221-233, 1981
- 23) 篠山重威: 左室造影の画像処理. 阿部 裕, 桑原道義 編: 心臓イメージング. p. 159-175, 1985, 朝倉書店, 東京
- 24) 今井 均, Axel L: MRI心筋タギング法による正常心筋の壁運動の定量化. 呼吸と循環 41: 541-549, 1993