

# 2次元流体方程式を用いた心電図同期 SPECTによる局所心機能の定量法 — Quantification of segmental function by solving poisson equation, QFSP —

名古屋大学医学部 保健学科<sup>\*1</sup> / 名古屋第2赤十字病院 放射線科<sup>\*2</sup>

前田尚利<sup>\*1</sup> / 新美孝永<sup>\*2</sup>

## はじめに

局所心機能評価の目的で、心電図同期SPECTが広く行われている。代表的な方法として、Germanoらが開発したQGS法<sup>1)</sup> (Quantitative gated SPECT) やP-FAST法<sup>2)</sup>などが知られている。壁運動解析とは、心内壁面または心外壁面の腔内に向かう動き、すなわち壁面と垂直な方向の変位を数値的または視覚的にとらえ、局所心機能を評価することである。心筋は解剖学的に壁面と平行に走行しているので、腔内に向かう運動ベクトルは、周囲の筋肉の収縮によって生じ、壁運動そのものは心筋の収縮方向とは直角をなしている。したがって、壁運動の良否は、壁面に平行な方向の心筋の収縮を反映しているわけではない<sup>3)</sup>。

心臓壁面と平行に走行している心筋の収縮を測定するためには、心筋に固定された2点間の距離の変化を知る必要がある。核磁気共鳴<sup>4)</sup> (MRI) や超音波<sup>5, 6)</sup> (US) を用いる方法があるが、これに代わる方法として、核医学では収縮期と拡張期の壁厚変化より測定する方法<sup>7, 8)</sup>が用いられる。これらの方法を用いた場合、心臓のねじれや長軸方向への収縮運動により測定部位が移動するので、同一部位を測定しているとは限らない。この欠点を補う方法として、SPECT像の最小カウント部位の

移動を用いて、測定部位を補正する方法<sup>9)</sup>が試みられている。

以下に、数学的に心臓壁にマス目を描き、そのマス目の変形(四角形の辺縁の伸び縮み)を計算することによって、心筋の収縮を測定する方法<sup>10)</sup> (Quantification of segmental function by solving poisson equation, QSFP、2次元流体方程式を用いた心筋収縮測定法)を解説するとともに、3枝病変の診断に有用であった症例を呈示する。

## 理論

図1に示すように、心臓の長軸を中心軸とする円筒スクリーン上に心筋のカウントを投影する。図2は円筒スクリーンを開いた時の拡張期と収縮期のカウントの分布を示す。心筋に集まった放射性物質(RI)は、SPECTデータ収集の時間内では、心筋に固定され心筋とともに移動する。心筋は収縮とともに形を変える。この心筋をゼラチン状の液体と捉えることにより、RI分布のスクリーンに投影されたカウントの時間的変化を2次元流体方程式で記述することが可能である<sup>10, 11)</sup>。2次元の2階偏微分方程式をコンピューターで解き、流れの方向とスピードを求め、液体の移動した軌跡を得る。流体方程式を解くということは、マス目の中のカウントが、それぞれの時相で一定に保



図1 円筒スクリーンへのカウントの投影

心臓の長軸を中心軸とする半径 $r_0$ をもつ仮想的な円筒スクリーンを考え、短軸像の中心軸から見たRIの集積をスクリーン上に投影する。

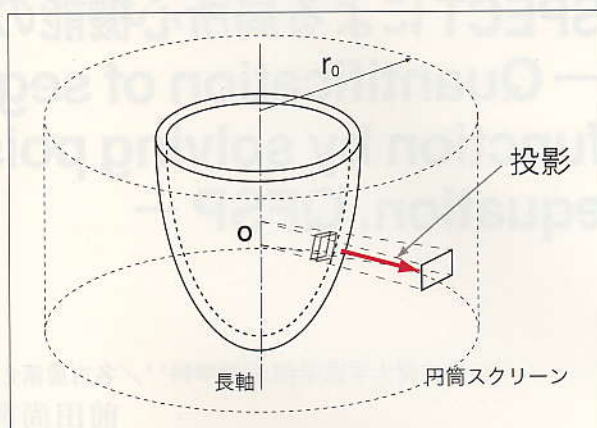
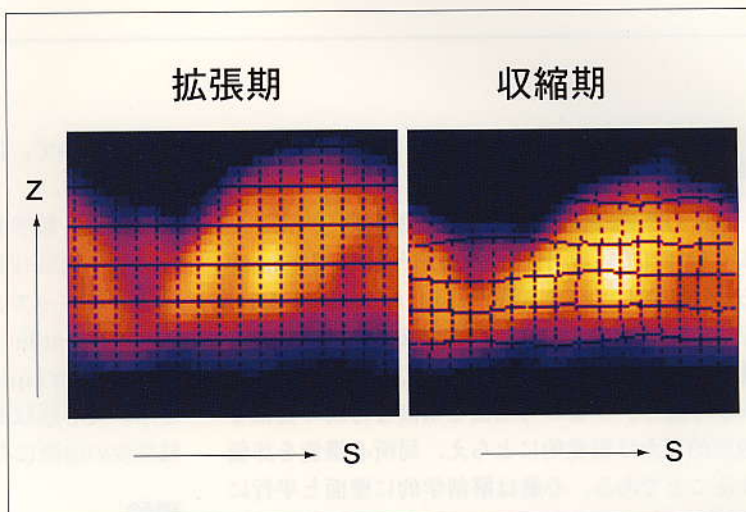


図2 円筒スクリーン上のカウント分布の変化

図1に示した方法を使って投影された円筒スクリーンを平面に展開したもの。横軸方向(s)は短軸像の円周方向に、縦軸方向(z)は心臓の長軸方向に平行に取ったものである。北方向が心基部で、南方が心尖部、中央は前壁の位置を、東方が側壁、西方が中隔方向を表す。左は拡張末期、右は収縮末期のもので、拡張期に縦軸・横軸に平行に引かれたマス目(左図)の収縮期における変形を右図に示す。水平線が変形と同時に上下に移動しており、収縮期に長軸方向へ心臓が移動・収縮していることが理解される。



たれるようにマス目の線を、全ての領域で矛盾なく線を引くことに他ならない。この軌跡を、心筋上に逆投影することによって、心筋上に固定された点の軌跡を描くことができる(図3)。拡張期に描かれたスクリーンの辺と平行な直線よりなるマス目の経時的な変形(図2)を心筋に逆投影することにより、心臓の変形をワイヤフレームで表現された3次元像として描出する(図4)。局所的な歪み(strain)は、心筋に固定されたワイヤフレームの変形として計算する。

得られた心壁面に平行な心筋の収縮(伸び縮み)

の良否は視覚的に推定することができるが、より客観的に心筋の収縮を評価する目的で、収縮の振幅<sup>10)</sup>(amplitude)、収縮の協調指標<sup>12)</sup>(synchronous contraction index, SCI)を導入した。振幅は、拡張期における値を100%として、マス目の1辺、またはマス目の面積(心筋上に描かれたマス目1つ1つの面積)の、1心拍における最大値と最小値の差である。SCIはマス目の面積と、左室容積の時間変化の相関係数(パーセント表示)に-1をかけたものと定義した。SCIは心筋がどの程度、心室の駆出と同期して、協調的に収縮を行っている

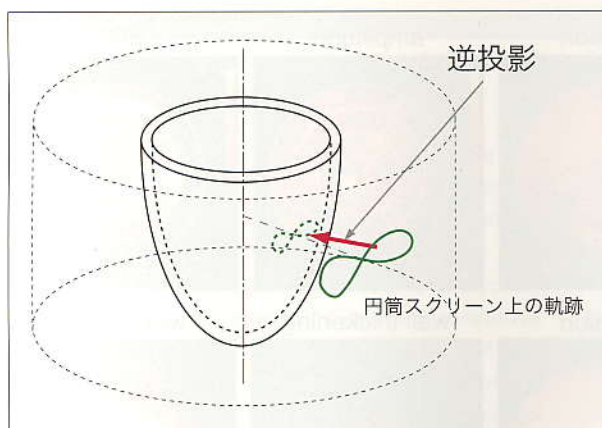


図3 軌跡の逆投影

たとえば円筒スクリーン上で8の時を描く軌跡があったとすると、これに対応する時相の心筋像上に点を逆投影する。

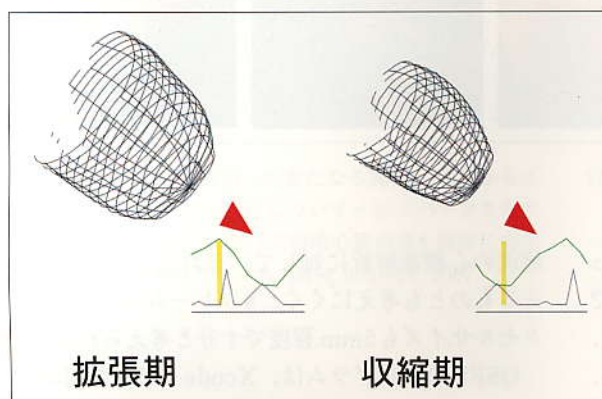


図4 心筋上に描かれたワイヤーフレームの変形  
赤の大きな三角は心尖部の方向を、右下挿入図の緑の線は左室容積を、黄色の縦線は表示しているときの時相を表す。心電図は模式図で、実際の心電図ではない。

るかの指標であり、+100%の場合は完全な協調（エネルギー効率が最も良い状態）を、一方-100%の場合は、心室瘤（dyskinesis）の状態を表している。正常健康人の自験例では、おおむね90～95%以上を正常と考えるべきであると思われる。

### 臨床応用例

図5に、47才男性、冠動脈造影にて証明された3枝病変患者の症例を示す。上段にQSFPによる解析を、下段にはQGS (QGS 3.0) による解析結果を示す。カラースケールが異なるので、単純な比較は困難であるが、集積（perfusion）に関しては、ほぼ同じである。amplitudeに関しては、QGSの

wall thickening、wall motionのどちらとも着かない分布を示している。詳しい数学的な関連については、文献10)を見て欲しい。SCIについては、心筋の時間的な収縮運動に関係した量であり、QGSにおける壁運動、壁厚変化のどれとも関連づけができない量である。本症例では下後壁に dyskinesisが、中隔・側壁にも軽度 akinesisが認められ、3枝病変であることが理解される。

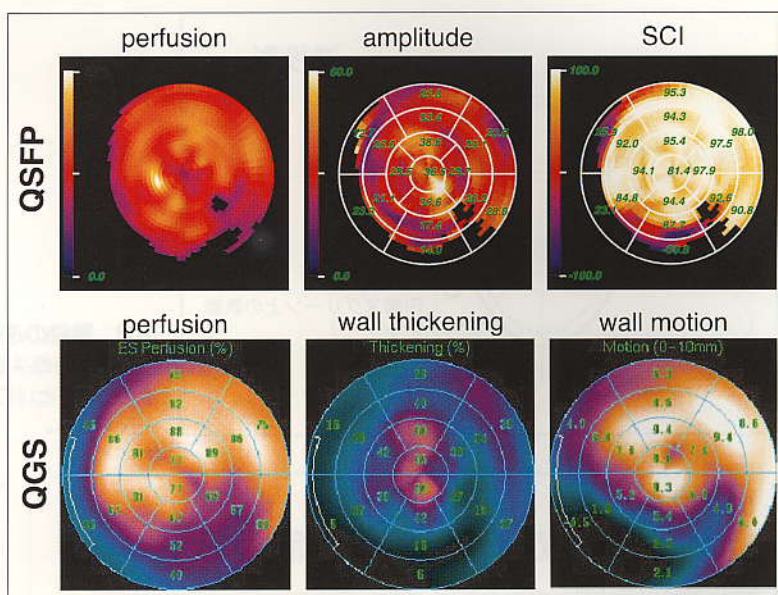
### 考察

本法が用いるデーターは、従来のQGSで使用されるものと同じデーターを使っているのも、新しい装置や新しいデーター採集は不要である。QGS解析の目的で収集したものと同一データーを使っ



図5 QGSとの比較

上段・下段はそれぞれQSFPとQGSによる局所的な心機能を示す。perfusionでは、同様な分布を示しているものの、amplitudeにおいては、wall thickeningやwall motionとは若干異なった結果を示している。SCI (synchronous contraction index) とは同時性を示す指標で、収縮と左室容積の間の時間的な相関量である。



て、心壁面に平行な面の、心筋の走行方向に沿った心筋の収縮を、左室の全領域にわたって測定できるので、局所的な冠動脈不全ばかりでなく、microangiopathy、心筋症などの治療法の選択、治療効果の評価などにも用いられることが期待できる。

しかしながら、図5に見られるように、集積の低いところに一致してBull's-eye表示に抜けた部位があるが、これは流れの方向とスピードが、2次元流体方程式において計算不能となるためである。血流製剤でSPECT検査を行った場合、最も必要な情報、すなわち血流欠損部の心機能情報を得ることができないという欠点がある。

核医学検査においては、空間分解能・時間分解能ともに低く、フレーム数は1心拍あたり、8から16、せいぜい32までで、空間分解能も1cmが最高と考えられる。しかしながら、臨床的にasynchrony、dysynchronyを調べるためには1心拍を通した解析が必要であり、1心拍あたりの分割数を多くし、データ数を多くしても、得られるメリットが多くなるとは考えにくい。また空間分解能も同様に、細かすぎる画像が、血管の支配領

域別の心機能解析に対して、それほど利点を与えるものとも考えにくく、8フレーム/心拍で、ピクセルサイズも5mm程度で十分と考えられる。

QSFPのプログラムは、Xcode v 2.2で書かれたもので、使用したコンピューターは、iMac (1.8GHz、Intel Core 2 Duo、1GBメモリ)、処理時間はスライスの位置決めなどの用手的な全処理を含め30秒足らずで、実際の処理計算は5秒以下であった。現在は、複雑な内部のファイル処理をしているので、他のiMacへのプログラムの移植は複雑であるが、今後プログラムを改善することにより、コンピューター間での移植の簡素化を目指している。

## 結語

QSFP法を用いることにより、従来の核医学的方法では測定できなかった壁面に平行に走行している心筋の収縮を、数学的に心筋に固定された2点間の距離の変化から、計算することが可能となり、特にSCIが局所心機能の評価に有用であると考えられた。

## 参考文献

- 1) Germano G et al: Automatic Quantification of Ejection Fraction from Gated Myocardial Perfusion SPECT. *J Nucl Med* 36(11): 2138-2147, 1995
- 2) 片桐好美ほか: 心筋血流製剤を使用した心電図同期 SPECT による心機能解析 - Windows 上での解析プログラム pFAST の開発 -, 映像情報メディカル 30(18): 1125-1129, 1998
- 3) Herman MV et al: Localized disorders in myocardial contraction. Asynergy and its role in congestive heart failure. *N Engl J Med* 277(5): 222-232, 1967
- 4) Palmon LC et al: Intramural myocardial shortening in hypertensive left ventricular hypertrophy with normal pump function. *Circulation* 89(1): 122-131, 1994
- 5) 竹中克: 心機能評価への新たな挑戦 - TDI からスベックルトラッキング法について - 1. 東芝社製スベックルトラッキング法について, 映像情報メディカル 39(9): 862-863, 2007
- 6) 瀬尾由広: 心機能評価への新たな挑戦 - TDI からスベックルトラッキング法について - 2. スベックルトラッキング法により知りうる局所心筋の歪を臨床に応用する, 映像情報メディカル 39(9): 864-867, 2007
- 7) Narita M et al: [Assessment of left ventricular contraction kinetics by ECG-gated myocardial SPECT with 99mTc-MIBI: a new attempt with multi-plane long axial tomography]. *Kaku Igaku* 32(11): 1227-1239, 1995
- 8) Fukuchi K et al: Quantification of Systolic Count Increase in Technetium-99m-MIBI Gated Myocardial SPECT. *J Nucl Med* 38(7): 1067-1073, 1997
- 9) Nichols K et al: Feasibility of detecting cardiac torsion in myocardial perfusion gated SPECT data. *J Nucl Cardiol* 9(5): 500-507, 2002
- 10) Maeda H et al: Segmental cardiac function computed from ECG-gated SPECT images through solution of equations of continuity for fluids. *Phys Med Biol* 46(2): 347-367, 2001
- 11) 前田尚利: SPECT による心筋収縮の解析とその臨床応用 - 流体方程式を用いた心筋収縮の計算 -, 放射線 28(3): 229-233, 2002
- 12) Maeda H: Quantification of synchronous contraction of left ventricle in normal subjects using ECG-gated-SPECT images. *Physiol Meas* 25(1): 71-84, 2004