

《原 著》

心プール断層法における壁運動定量化と収縮位相の解析

——長さの変化に基づくフーリエ解析法を用いて——

中嶋 憲一* 分校 久志* 多田 明** 小島 一彦***
 滝 淳一* 南部 一朗* 四位例 靖* 利波 紀久*
 久田 欣一*

要旨 心室中心から辺縁までの長さの変化に基づく位相解析法を心電図同期心プール断層法に応用し、断層での壁運動定量化を行った。2つのパラメータ、壁運動の短縮率(%LS)、位相(length-based phase)を求め、従来のカウント法に基づく位相、振幅解析と比較した。数学的モデルによる検討では、従来法より異常運動の程度の評価が容易であり、精度も良好であった。心室中心となる重心については、各フレームについて重心を求める移動座標を用いる方法に比較し、全フレームで中心を固定した方が、正確な値が得られた。本法を用いて、冠動脈疾患患者において壁運動の定量化が容易にでき、また WPW 症候群においては、本法で推定された早期収縮部位と副刺激伝導路の位置に良好な相関を認めた。ゲート心プール断層像では本質的に輪郭の動きが意味をもつため長さの変化に基づく位相解析法が合理的であり、かつ有用な方法である。

I. 結 言

コンピュータ技術の進歩により、心臓核医学は、大きく進歩したが、非侵襲的に容易に検査できるのみならず、従来得られなかったパラメータについての解析も可能となってきた¹⁻⁶⁾。心電図同期心プールシンチグラフィを用いた壁運動解析や、functional image もその一つであり¹⁾、循環器領域でも広く応用されるようになってきている。Functional image は、心室の接線方向だけでなく3次元的情報を含むという利点はあるものの、一般に行われている心臓輪郭のセグメントとの対応が容易でない症例がしばしばあるため、著者らは、辺縁の動きに着目して、心室中心からの長さの変化に基づく位相解析法を考案した^{2,3)}。

断層の心プール検査における解析では、特にこの辺縁の動きが意味を持つため、中心からの長さの変化から算出された位相や短縮率の評価が、より合理的と考えられる。そこで、長さの変化に基づく位相解析法の応用を検討するため、心臓断層画像のモデルおよび臨床症例において、その位相値と短縮率の精度、有用性を検討した。

II. 方 法

心電図同期心プール検査は、ピロリン酸を用いた in vivo 標識法による Tc-99m 標識赤血球 20 mCi (740 MBq) を用いて、平衡時データを収集した。プラナー像は、64×64 マトリクス、1心拍24分割のフレームモードで、核医学データ処理装置* に収集した。患者の体位は、modified LAO (左前斜位、スラントホールコリメータにより頭側より 35° 傾斜)、RAO (右前斜位) および左側面像の多方向像を得た。Gated emission computed tomography (ECT) は、対向型カメラ 2 台を有するシステムで、1方向1分、64×64マトリクス、

* 金沢大学医学部核医学科

** 国立金沢病院放射線科

*** 金沢大学医療技術短期大学部

受付：59年9月26日

最終稿受付：59年12月19日

別刷請求先：金沢市宝町 13-1 (☎ 920)

金沢大学医学部核医学科

中嶋 憲 一

* Ohio Nuclear 社 VIP 460

島津製作所 Scintipac 2400S

10°ごとの投影データを360°にわたって、ミニコンピュータに収集した。1心拍の分割数は、12とした。画像再構成には、Shepp & Loganのフィルターを用いて、filtered back projectionを行い、体軸横断断層像を作製後、心長軸を回転させて再構成し、心長軸断層および短軸断層像を得た。なお、減弱補正は行わなかった。

心プール断層像の数学的モデルとしては、次の3種類を作製した。(A)円柱状モデルで、半径が33%短縮するもの、(B)同モデルで、半径が93%短縮するもの、(C)半径が15の正円から、長軸18、短軸10の楕円に連続的に収縮し、かつ中心が拡張期から収縮期にかけて3画素ずれるもの。すなわち、一端はakinesis、他端は,dyskinesisに相当する。以上の3種について、円柱の厚さはいずれも100カウントとして、12フレームのデータを作製し、さらに辺縁のボケの効果を考慮して、3回の空間スムージング(1-2-1)および3回の時間軸スムージング(1-2-1)をかけた。(A)は心基部近くの短軸断層、(B)は心尖部近くの短軸断層、(C)はasynergyを有する断面像に相当する。

長さの変化に基づく位相解析法の処理方法については、すでに報告したので簡単に述べる^{2,3)}。まず目的とする心室の領域についてマスクを設定し、この関心領域内を分離した。次いでこの重心を求めて心室中心とし、第1フレームにおいて、角度 α° (3時の方向を 0° として、反時計回り)について、辺縁までの長さを計算し、距離 $r(\alpha, i)$ を求めた。この $r(\alpha, i)$ の数値について、離散的フーリエ変換を施行し、角度ごとに、直流成分(DC)、位相(Phase)、振幅(Amp)を算出した。さらに短縮率(%length shortening, %LS)を

$$\%LS = (2 \times \text{Amp}) / (\text{DC} + \text{Amp}) \times 100$$

として換算した。位相および%LSは、極座標を用いて表示し、角度はそのまま原画像の角度方向に対応するようにした。

なお、振幅が小さくなると位相の信頼性が低下するため⁷⁾、%LSが5%以下のときはakinesisとみなし、表示しなかった。一方、カウント変化に基づく従来の位相解析法については、すでに報告

されているように^{5,6)}、フーリエ変換の基本波成分の位相、振幅を計算しfunctional imageとして表示を行った。ただし、振幅の値は、直流成分の値を用いて補正し、駆出分画に相当するパラメータで表示した。重心の移動を検討するため、重心を第1フレームにおいて求め全フレームで固定する場合と、各フレームにおいて重心を求めこの中心から辺縁までの距離を求める。いわゆる移動座標系を用いる場合とを前壁梗塞症例において比較した。WPW症候群では、心表面マッピングと手術により副刺激伝導路の位置を確認した症例について短軸断層像に本法を応用した。

III. 結 果

均等収縮モデル(A)の位相、振幅イメージ、長さの変化に基づく位相解析の結果をFig. 1Aに示した。カウント変化に基づく位相解析では、輪郭の動きを示す位相(-15°)と収縮期輪郭内の位相の2重の輪になった。収縮末期心室内は、理論的には振幅が0になるため計算されないはずであるが、平滑化の効果と、割算の分母が0になるときの処理の都合上、 90° と表示されている。長さの変化に基づく位相解析法では位相 165° 、%LS= $28.9 \pm 2.4^\circ$ (S.D.)と均等な収縮を示した。モデル(B)では、カウント変化に基づく位相イメージでも均一な分布を示すが、長さの変化に基づく位相解析では、Fig. 1Bに示すように、位相 165° 、%LS= $95.1 \pm 3.5^\circ$ となった。モデル(C)の不均等収縮のシミュレーションでは、Fig. 1Cに示すように、 0° の方向が位相 344° 、%LS=24%とdyskinesisを表わし、 90° の方向が%LS=35%、位相 165° 、 180° の方向が%LS=0%、位相 0° (計算されず)でありakinesisと容易に判定できる。従来の位相イメージでは、3種の位相値を示し、dyskinesisが判るが、振幅イメージは、辺縁が高値で中心部に近づくると低値になる殻を作っている。いずれもasynergyの程度に定量には、長さの変化に基づく位相解析法が容易であり、精度も良好であった。

Figure 2 および Table 1 は、前壁梗塞症例であり、短軸断層像に、長さの位相解析を施行したも

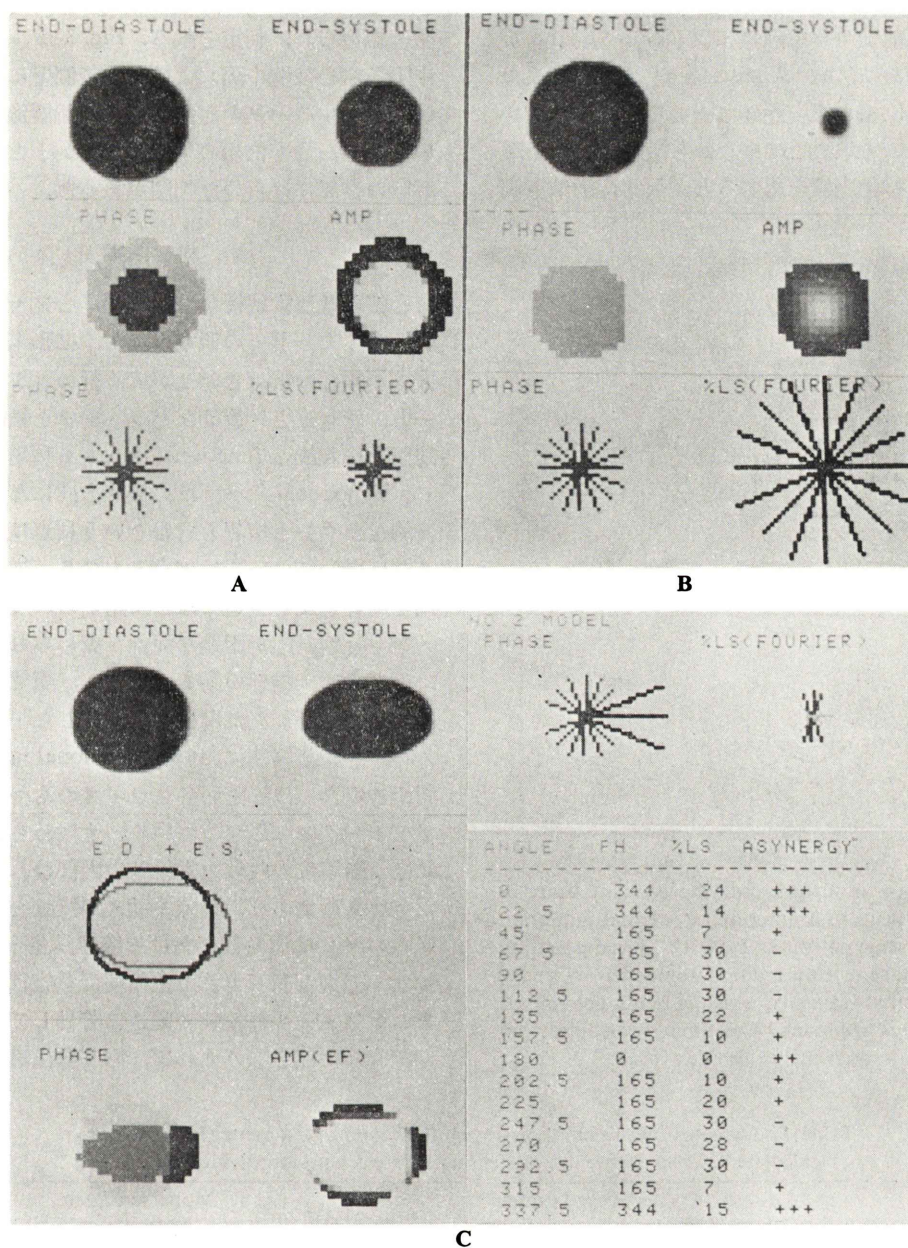


Fig. 1 Mathematical models for tomographic short-axis images without asynergy. The theoretical values of percent-length-shortening (%LS) are 33% (A) and 93% (B). Length-based Fourier analysis showed $\%LS = 28.9 \pm 2.4^\circ$ (S.D.) and $95.1 \pm 3.5^\circ$ respectively. Phase values are uniform (165°) in all segments. Panel C is a model with asynergy. Dyskinesis is observed at 0° (3 o'clock) and akinesis at 180° . Count-based Fourier analysis shows delayed phase in the right lateral segment. Although phase values are calculated interior to end-systolic perimeter, it is considered to be meaningless in tomography. Length-based Fourier analysis and its numeric display are on the right side. Each circle is a scale indicating 90° in the phase display and 25% in the %LS. The signs of (-), (+), (++) and (+++) mean normokinesis, hypokinesis, akinesis and dyskinesis, respectively. The severity of asynergy is well differentiated by length-based method.

のである。前壁から中隔のセグメントで %LS が 25%以下であり, hypokinesis と判定でき, またこの部位の位相も軽度遅延している。一方, 重心を各フレームで求めこの中心から辺縁までの距離を計算する移動座標を用いると, 異常運動は下側

壁に認められ, 判定を誤る。Fig. 3 は, 右心前壁中隔, 右心後壁中隔および左心後側壁に副刺激伝導路を有する WPW 症候群の短軸断層像である。いずれも, 最も位相の早いセグメントと副刺激伝導路の位置には良好な相関があった。

IV. 考 案

心臓の壁運動解析については, 心プールデータの, シネモードでの観察のほか, 拡張末期, 収縮末期の輪郭の重ね合わせが広く行われているが, 一方, 画素ごとに適切なパラメータを抽出しその地図を作製する functional image も利用されている。Functional image は, 接線方向にない, 3 次元的なカウント情報を含むという利点は有るが, これは場合によっては欠点ともなり, 従来の造影剤を用いた左心室造影などで用いられているセグメントとの対応が困難な症例が認められる。そこで著者らは, 輪郭の動きに着目し, 短縮率に収縮位相の情報を加えた解析法を報告した^{2,3)}。

心プール断層法において functional image を作製する場合には, 断層各スライスのもつ意味が, プラナー画像と異なっている。すなわち, 原理的には, 断層像の収縮末期輪郭の内部は, 意味を持たないものであり, 輪郭の動きが意味を持つ。著者らの WPW 症候群における壁運動解析の結果では, 従来と同じ方法で位相解析を施行しても, その血液プールの輪郭の動きに着目して, 収縮末期輪郭の内部を除外すれば, 副刺激伝導路の検出

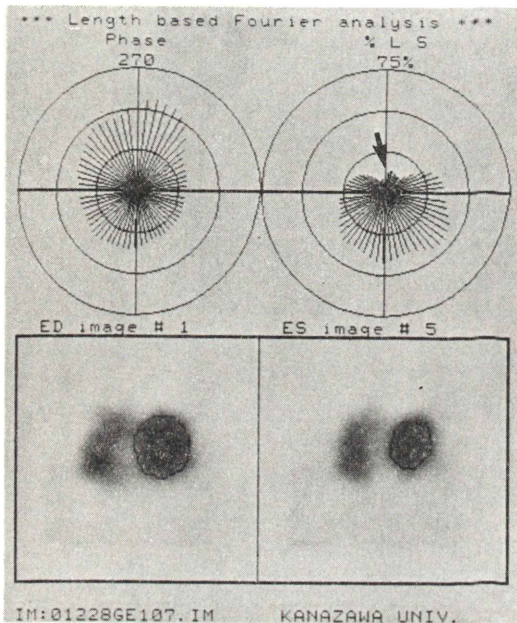
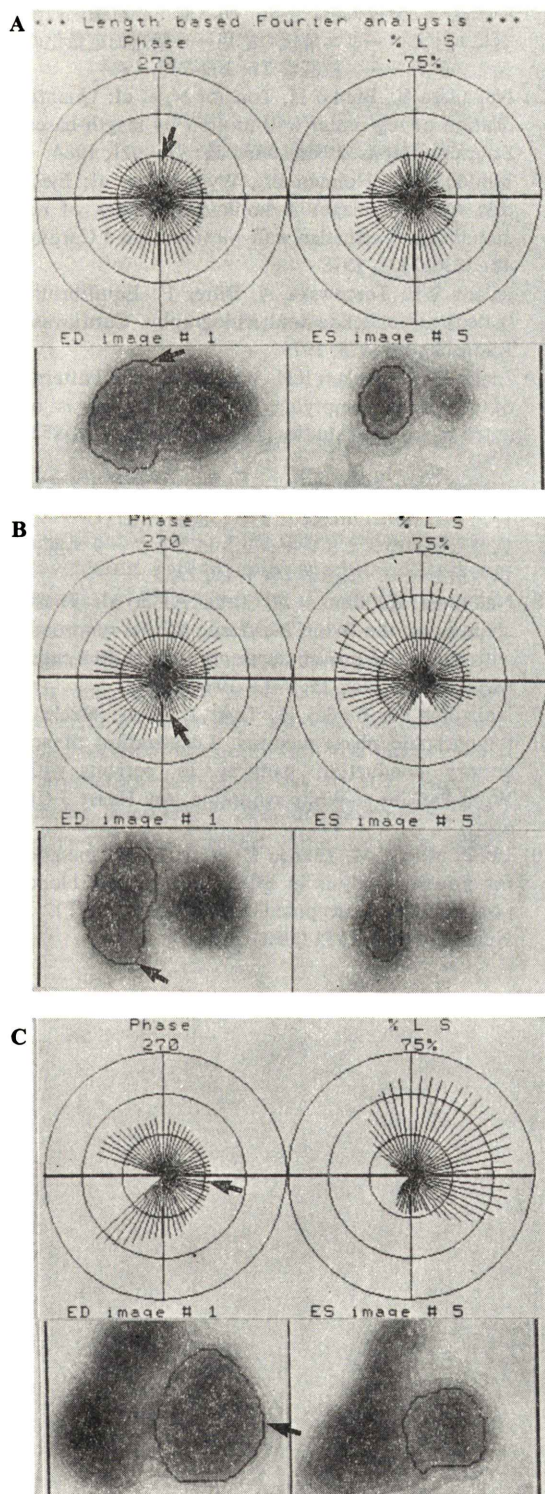


Fig. 2 Short-axis images near the apex of heart in a patient with anterior myocardial infarction (the same patient as Table 1). The contractility of left ventricle is reduced from anterior (arrow) to septal segments, which is easily determined by this approach. The timing of contraction in these segments is also delayed.

Table 1 Comparison of parameters when the center of left ventricle is fixed or calculated in each frame in a patient with anterior myocardial infarction

Segment deg.		Fixed center			Movable center		
		%LS	Phase	Asynergy	%LS	Phase	Asynergy
0	Lateral	27	86	norm	20	94	hypo
45		10	150	hypo	13	143	hypo
90	Anterior	19	180	hypo	27	133	norm
135		12	140	hypo	33	105	norm
180	Septum	21	82	hypo	25	81	norm
225		37	99	norm	31	105	norm
270	Inferior	29	106	norm	14	127	hypo
315		30	86	norm	18	89	hypo

hypo = hypokinesis ($5\% \leq \%LS < 25\%$), norm = normokinesis ($\%LS \geq 25\%$)



率は向上した^{8,9)}。しかしながら、中心からの長さの変化を解析する方が、より合理的と考えられるため、長さの変化に基づく位相解析法をゲート心プール断層に応用した。他の functional image の作製法としては、各スライスを左心室のみについて加算し、位相、振幅解析を行う試みも報告されている¹⁰⁾。しかし、再構成による歪みを伴う画像を加算すること、各断層を作ることにより得られた辺縁の情報を再び加算により失ってしまうこと、断層の性格上、バックグラウンドがほとんどない収縮期の部分も入れて時間-放射能曲線を作製し、位相を計算していることは、不利な点であろう。一方、著者らの方法では断層の数が多くなることが問題点となる。

長さの変化に基づく位相解析のプログラムについてはすでに報告したが、マスクイメージの設定が影響を与える重心が、中心点の再現性に影響した³⁾。この変動は小さいが、今回さらに、マスクイメージの中の一定の閾値以上(通常65%とした)のカウントを持つ画素についてのみ重心の計算を行うことにより、設定者間の再現性は、ほとんど100%になった。輪郭抽出は、threshold法で最高値の65%の点と仮定して行ったが、断層画像では有効かつ簡便な方法であった。重心の移動については、それを補正する必要がないと考えており、結果に示したごとく、移動座標を用いると検出率が低下する恐れがある。

断層の心プール解析は、WPW 症候群における

Fig. 3 Length-based Fourier analysis is applied to detect the site of accessory conduction pathway (ACP) in patients with Wolff-Parkinson-White syndrome. (A) right cardiac type. An ACP was confirmed at anterior septal region. Length-based phase is minimum at anterior segment (arrow), showing this is the site of initial inward movement. (B) right cardiac type with posteroseptal ACP. Initial contraction, as indicated by phase, is observed at posteroseptal segment of right ventricle. (C) left cardiac type with posterolateral ACP. Earliest phase was on the left lateral segment. Parameters in the septal segment are not calculated because the %LS is small (<5%).

収縮解析や、冠動脈疾患に応用可能である。しかし現在のところ、断層法がルーチン検査となりにくい理由は、再構成の時間が長いことに一因がある。著者らのコンピュータシステムでは、体軸横断、心長軸短軸断層の再構成、functional imageの作製までを含めると2~3時間の処理が必要である。現状では、特別の場合を除いてルーチンの検査に用いるには、制限がある。しかし、従来の平衡時心プール検査の弱点であった血液プールの重なりを避けることができる点で有利である。冠動脈疾患において、平衡時心プール検査の多方向像と比較して、検出率の改善が得られるか否かは、今後検討が必要である。一方、壁運動の時間的解析が可能となることにより、WPW症候群において、副刺激伝導路の検出において有用性を示したが、この点についても症例を重ね検討予定である。以上、長さの変化に基づく位相解析法は、ゲート心プール断層像を用いた壁運動定量化や、壁の収縮順序の解析に有用な手段となり得ると、結論できた。

謝辞：症例についてご教示頂いた三崎拓郎先生はじめ第一外科の諸先生、島津製作所の田島廣巳氏に深謝致します。

文 献

- 1) Goris ML: Functional or parametric images. *J Nucl Med* **23**: 360-362, 1982
- 2) 中嶋憲一, 分校久志, 多田 明, 他: 心室輪郭の動きに対するフーリエ解析の応用——壁運動定量化の新しい試み——. *核医学* **21**: 209-213, 1984
- 3) Nakajima K, Bunko H, Tonami N, et al: Quantification of segmental wall motion by length-based Fourier analysis. *J Nucl Med* **25**: 917-921, 1984
- 4) Maddox DE, Holman BL, Wynne J, et al: Ejection fraction image: A noninvasive index of regional left ventricular wall motion. *Am J Cardiol* **41**: 1230-1237, 1978
- 5) Adam WE, Tarcowska A, Bitter F: Equilibrium (gated) radionuclide ventriculography. *Cardiovasc Radiol* **2**: 161-173, 1979
- 6) Links JM, Douglass KH, Wagner HN Jr: Patterns of ventricular emptying by Fourier analysis of gated blood pool studies. *J Nucl Med* **21**: 978-982, 1980
- 7) 中嶋憲一: 心電図同期心プールシンチグラフィを用いた functional image による心機能評価 (I)——心室容積曲線のシミュレーションによるフーリエ解析法の検討——. *核医学* **20**: 1-10, 1983
- 8) Nakajima K, Bunko H, Tada A, et al: Phase analysis in the Wolff-Parkinson-White syndrome with surgically proven accessory conduction pathways. *J Nucl Med* **25**: 7-13, 1984
- 9) Nakajima K, Bunko H, Tada A, et al: Nuclear tomographic phase analysis: Localization of accessory conduction pathway in patients with Wolff-Parkinson-White syndrome. *Am Heart J* (in press)
- 10) Ito T, Maeda M, Takeda K, et al: A new method for Fourier analysis in ECG-gated cardiac blood pool emission computed tomography (ECT). *J Nucl Med* **5**: 5, 1984 (abst)

Summary

Quantification of Wall Motion and Phase of Contraction in Tomographic Gated Blood Pool Studies Using Length-Based Fourier Analysis

Kenichi NAKAJIMA*, Hisashi BUNKO*, Akira TADA**, Kazuhiko KOJIMA***,
Junichi TAKI*, Ichiro NAMBU*, Yasushi SHIIRE*,
Nori-hisa TONAMI* and Kinichi HISADA*

**Department of Nuclear Medicine, School of Medicine, Kanazawa University*

***Department of Radiology, Kanazawa National Hospital*

****School of Paramedicine, Kanazawa University, Kanazawa*

Length-based Fourier analysis, a new method for quantification of wall motion and timing of contraction, was applied to tomographic gated blood pool study. Two parameters, percent-length shortening (%LS) and length-based phase were calculated based on the time-length curves from a center to ventricular edges, and compared with the count-based method. In mathematical models for tomographic gated blood pool images, the severity of asynergy was easily determined by length-based method, and the accuracy of the parameters was good. As to the setting of the center, fixed center provided more reliable parameters than the method using movable center, i.e.,

when a center of gravity was determined in each frame. By length-based Fourier analysis, quantification of wall motion was easily performed, and the initial inward movement caused by the accessory conduction pathway was assessed in patients with Wolff-Parkinson-White syndrome. Length-based approach was considered to be reasonable and effective because the movements of the ventricular edges are essential in tomographic gated blood pool images.

Key words: Length-based Fourier analysis, Gated blood pool study, Gated emission computed tomography, Phase analysis.