

《原 著》

多結晶型ガンマカメラを使用した第1回循環時法 による左室位相解析

—統計精度および再現性の検討—

二谷 立介* 濑戸 光* 山西 潤一** 亀井 哲也*

柿下 正雄* 杉本 恒明***

要旨 計数率特性のすぐれた多結晶型ガンマカメラを使用して、第1回循環時法により左室長軸像の位相解析を行うプログラムを開発し、データの統計精度および再現性を検討した。そして下記の結果を得た。1) 左室位相解析に必要な1心拍の分割数は16以上であった。また16以上なら位相解析データの統計精度は変化しなかった。2) 位相値の統計精度は局所駆出率が低下すると悪くなかった。このため壁運動低下部の位相値の評価には注意する必要があった。3) $\text{Na}^{99m}\text{TcO}_4$ 20 mCi 投与して、多結晶型ガンマカメラを使用した第1回循環時法による左室位相解析を行うと、各画素の振幅値の統計誤差は3%以内(1 S.D.)、駆出率20%での位相値の統計誤差は 10° 以内(1 S.D.)と良好だった。4) 20例の検討で、本法による振幅イメージ、位相イメージ、左室位相分布ヒストグラムの再現性は、良好だった。

虚血性心疾患者における壁運動評価法として、本法の有用性は高いと考えられた。

I. 緒 言

近年、左室局所の壁運動の評価法として、位相解析^{1~3)}が臨床に導入されている。この方法は局所ごとの心周期時間・放射能曲線よりフーリエ解析の基本波の振幅値および位相値を求め、局所の収縮の大きさと収縮の時間的ずれの情報を得るものである。この方法は刺激伝導系の異常における心収縮様式の変化^{4,5)}や、虚血性心疾患における壁運動異常の評価^{6,7)}に応用され、どちらも有用と報告されている。

左室局所ごとの心周期時間・放射能曲線を解析する際、精度の良い値を得るためにには十分な計数

値を得て統計変動による誤差の影響を少なくする必要がある。このため一般にデータ収集には平衡時法が採用されており、観察は右室と左室の分離が可能な左前斜位方向に限られる。左室壁運動の評価には左室長軸像の観察が重要である。しかしこのために必要な第1回循環時法によるデータは、特に単結晶型ガンマカメラを使用すると計数値の制限により統計精度が悪く、局所ごとの機能を評価する時の誤差が大きくなる欠点がある。

多結晶型ガンマカメラは計数率特性がすぐれており、第1回循環時法で単結晶型ガンマカメラより統計精度の高い心臓データが得られる特徴がある。われわれは精度の高い左室長軸像の位相解析を目的として、多結晶型ガンマカメラを使用した第1回循環時法による左室位相解析プログラムを開発した。今回はこの方法による位相解析データの統計精度および臨床例でのデータの再現性を検討し、精度の高い位相解析結果が得られたので、単結晶型ガンマカメラのデータと比較して報告する。

* 富山医科大学医学部放射線医学教室

** 富山大学教育学部附属教育実践研究指導センター
*** 東京大学医学部第二内科学教室

受付：57年12月22日

最終稿受付：58年6月17日

別刷請求先：富山市杉谷2630 (番号930-01)

富山医科大学医学部放射線医学教室

二 谷 立 介

II. 方 法

1. 多結晶型ガンマカメラによる左室位相解析
 多結晶型ガンマカメラ (Baird 社製オートフローラスコープ System-77) を使用して、第1回循環時法により左室相の3~5心拍を重ねて、心周期左室連続画像データを作成した。このデータを磁気テープを介して小型電算機 (DEC 製 Gamma-11システム、PDP-11/34A) に転送した。この1画素の大きさが 1.1×1.1 cm で画素数が 14×21 の画像データを 28×42 に内挿補間した後、各画素ごとの心周期時間・放射能曲線よりフーリエ解析の基本波の振幅値と位相値を求め、振幅イメージと位相イメージを作成した。振幅値は近似した正弦曲線の駆出率に対応させて 100% に基準化した。振幅イメージは 0% から 100% までを、位相イメージは -90° から 90° までを 16段階に分けてカラー表示した。また左室内位相分布のヒストグラムも作成し、その標準偏差を求めた。

2. 位相解析データの統計精度

1) 分割数と統計精度の関係

心周期時間・放射能曲線より基本波の振幅値と位相値を求めるとき、曲線上の各点の計数値の統計変動のため誤差が生ずる。1心拍の分割数を大きくすると、フーリエ解析に用いるデータ数は多くなるが、個々のデータの精度は計数値が小さくなるために悪くなる。位相解析を行うときに、最も統計精度が良くなる分割数を決定するため以下の検討を行った。

まず統計誤差のないモデル曲線を用いて、位相解析に必要な分割数を決定した。50歳以上の20例で、 ^{99m}Tc -DTPA (diethylene triamine pentacetic acid) あるいは ^{99m}Tc -MDP (methylene diphosphonate) 30 mCi を急速静注後、1インチ高感度型コリメータを装着した多結晶型ガンマカメラを使用して、10ミリ秒間隔で40秒間心臓データを収集した。これより分割数が 70~100 で拡張終期の計数値が 1,500~2,500 カウントの心周期時間放射能曲線が得られた。これを64分割データに再編集した後、Fig. 1 に示すように高速フーリエ変換に

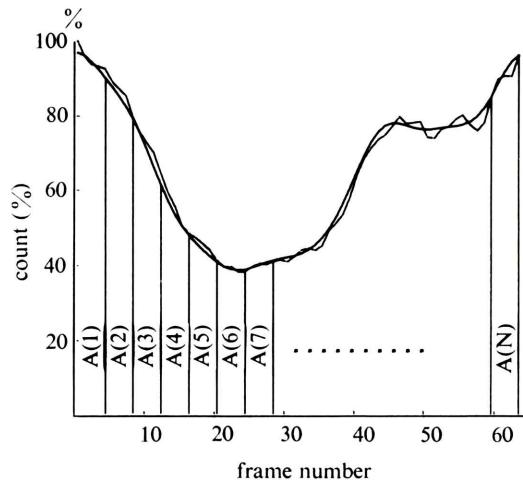


Fig. 1 Left ventricular time-activity curve of a cardiac cycle and its regression curve by Fourier series with 8 orders in a normal case.

よる 8 次項までを用いて近似し、連続関数のモデル曲線を作成した。Figure 1 に示すように、n 分割のときの時間・放射能曲線上の各点の計数値は、モデル曲線を X 軸方向に n 等分した時の各区域の曲線下の面積に相当する。分割数を 4 から 64 まで 4 間隔で変化させ、各分割数における心周期時間・放射能曲線を作成した。そして各分割数における振幅値と位相値を求め、64分割のときの値と比較することにより、位相解析に必要な分割数を検討した。

次に電算機を用いて、心周期時間・放射能曲線上の各点の統計変動のシミュレーションを行い、分割数を変化させた時の振幅値と位相値の統計誤差の変化を検討した。時間・放射能曲線上の計数値 N_i は、統計変動により標準偏差 $\sqrt{N_i}$ となるような正規分布をする。各点を計数値に応じた正規分布となるようにばらつかせ、振幅値と位相値を 100 回づつ求め、それぞれの値の標準偏差を求めた。1心拍の総カウント数を一定にした条件で分割数を 4 から 64 まで変化させ、統計誤差による振幅値と位相値の標準偏差を最小とする分割数を検討した。

2) 計数値、駆出率と統計精度の関係

心周期時間・放射能曲線上の各点の計数値が増えれば、振幅値と位相値の統計精度も良くなる。左室位相解析に必要な計数値を検討するため、種々の駆出率の心周期時間・放射能曲線で、拡張終期の計数値と振幅値および位相値のばらつきの標準偏差を比較した。正常者の左室の心周期時間・放射能曲線に定数を加えることにより、駆出率が10%から90%までの9種の時間・放射能曲線を作成した。さらにこれらの時間・放射能曲線に定数を乗じ、拡張終期の計数値が10~3,000カウントの時間・放射能曲線を作成した。前述の電算機ミュレーションを用いて、それぞれの場合の振幅値と位相値の標準偏差を求め、拡張終期の計数値、駆出率と、位相解析の統計精度の関係を検討した。

3) 多結晶型ガンマカメラによる左室位相解析の統計精度

$\text{Na}^{99m}\text{TcO}_4$ 20 mCiを急速静注後、1インチ高感度型コリメータを装着した多結晶型ガンマカメラを使用して、30ミリ秒間隔で心臓データを収集し、左室相の3~5心拍を重ねて、分割数24~30の左室の心周期連続画像データを作成した。このときの左室内の各画素の拡張終期の計数値を検討し、これより得られる位相解析データの統計精度を評価した。また同一症例で多結晶型ガンマカメラと単結晶型ガンマカメラ(東芝製GCA-401-3型)を使用して、第1回循環時法による左室位相解析を行い、結果を比較した。

3. 位相解析データの再現性

心疾患を疑われた20症例に、2-3)項で示したデータ収集法を用いて、2日以内に2回左室位相解析を行い、振幅イメージ、位相イメージ、左室位相ヒストグラムの再現性を検討した。振幅イメージと位相イメージは、左室を下壁、心尖部および前側壁の3区域に分けて、区域ごとに比較した。振幅イメージは各区域の2回の検査のカラーの差が1段階以内を一致、2段階以上を不一致とした。位相イメージは、カラー2段階以上の位相の遅れを異常として、各区域の異常の有無を比較した。左室位相ヒストグラムは、ヒストグラムの形状とヒストグラムの標準偏差を比較した。

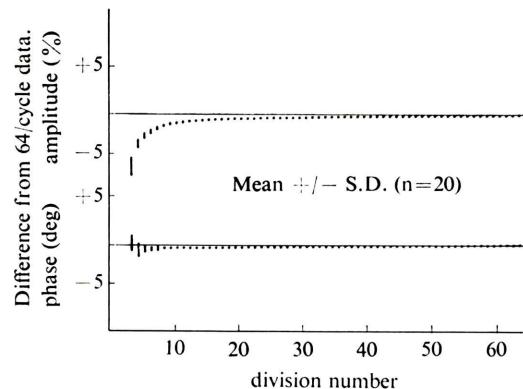


Fig. 2 Amplitude and phase values in various division numbers. Each vertical line shows the 1 s.d. range of 20 cases.

III. 結 果

1. 位相解析データの統計精度

1) 分割数と統計精度の関係

モデル曲線を使用して求めた、統計誤差のない条件での、各分割数における振幅値と位相値をFig. 2に示す。横軸が分割数で、縦軸は64分割のときの値を基準とした各分割数における振幅値と位相値のずれである。グラフ上の縦線は、20症例の平均値±標準偏差の範囲である。分割数8未満で、振幅値および位相値とも、64分割のときの値とのずれが症例間でばらつく傾向が見られた。また分割数16未満で振幅値は低下した。以上より心周期時間・放射能曲線をフーリエ解析の基本波で近似するときには、分割数は16以上必要であることが判明した。

Figure 3に1心拍の総カウント数を一定にした条件での、各駆出率の時間・放射能曲線における分割数と振幅値および位相値の標準偏差の関係を示す。総カウント数は $\text{Na}^{99m}\text{TcO}_4$ 20 mCi投与により多結晶型ガンマカメラで得られる左室の心周期連続画像データの、左室内の1画素の時間・放射能曲線と同等となるように決定した。分割数16以上で振幅値、位相値の標準偏差はほぼ一定である。データ数が増しても、個々の計数値の精度が下がるため、振幅値と位相値の精度が変化しない

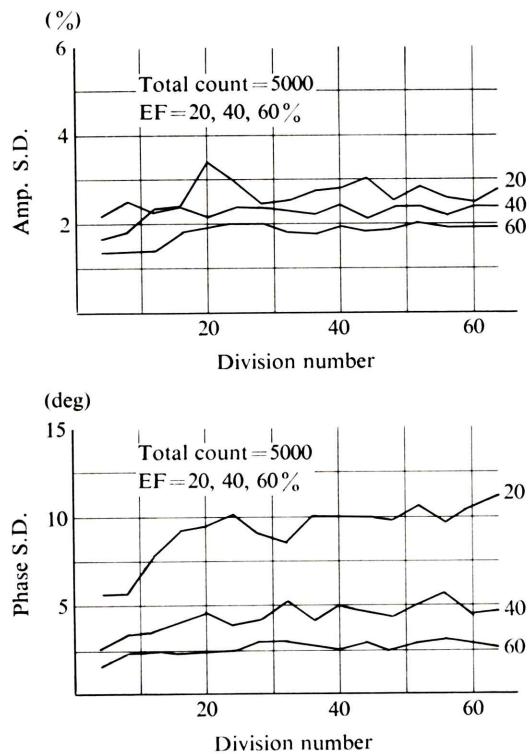


Fig. 3 Amplitude and phase S.D. values in various division numbers.

と考えられた。われわれはルーチンの左室機能検査は30ミリ秒間隔のデータ収集で行っており、分割数は24～30となる。よって検討は分割数を24に固定して行った。

2) 計数値、駆出率と統計精度の関係

Figure 4に分割数が24で、心周期時間放射能曲線の駆出率が20%, 40%, 60%のときの、拡張終期の計数値と、振幅値および位相値の統計変動による標準偏差の関係を示す。振幅値の標準偏差は拡張終期の計数値300カウント以上で3%以内となった。また位相値の標準偏差は、駆出率20%のときでも拡張終期の計数値が300カウント以上で10°以内となった。

Figure 5に拡張終期の計数値が一定のときの、駆出率と、振幅値および位相値の標準偏差の関係を示す。振幅値の標準偏差は駆出率が変化してもあまり変化しないが、位相値の標準偏差は駆出率

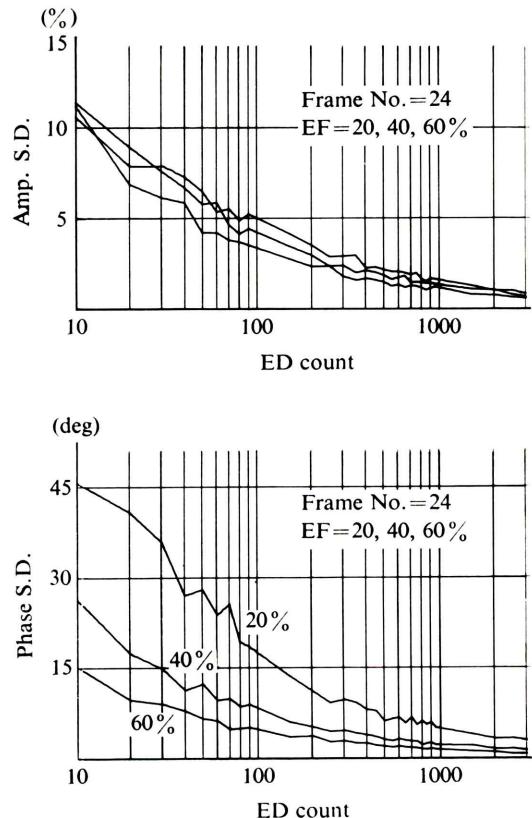


Fig. 4 Amplitude and phase S.D. values in various end-diastolic counts.

が低いと大きくなる。例えば駆出率60%と20%を比較すると、拡張終期の計数値が300カウントでは位相値の標準偏差は3°および9.8°であり、拡張終期の計数値が40カウントではそれぞれ7.9°および27°だった。これより壁運動低下区域の位相値の精度が悪いことが判明した。

3) 多結晶型ガンマカメラによる左室位相解析の統計精度

多結晶型ガンマカメラを使用して $\text{Na}^{99m}\text{TcO}_4$ 20 mCi 投与により得られる左室領域の 1.1×1.1 cm の各画素の拡張終期の計数値は300～600カウントだった。分割数は24～30であり、上記の結果より各画素の振幅値の標準偏差は3%以内、位相値の標準偏差は駆出率20%と壁運動が低下していても10°以内だった。

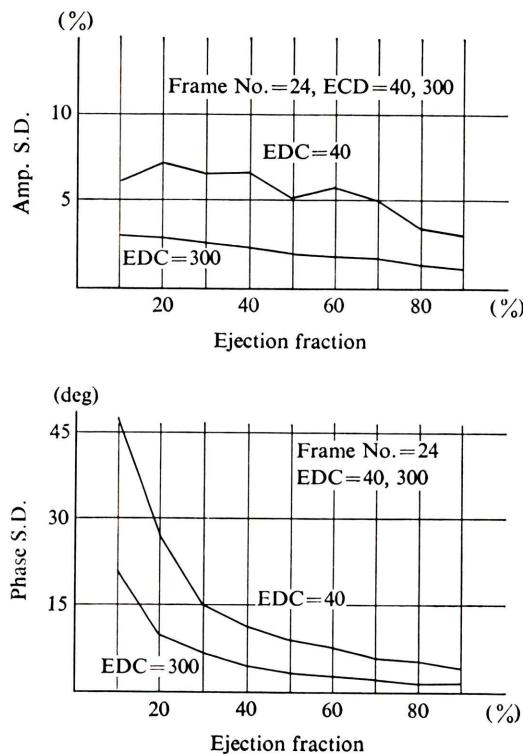


Fig. 5 Amplitude and phase values in various ejection fractions.

Figure 6 に多結晶型ガンマカメラと単結晶型ガンマカメラを使用して、陳旧性心筋梗塞例に左室位相解析を行った結果の比較を示す。当施設の単結晶型ガンマカメラは計数率 60 kcps まで直線性を保つ。汎用コリメータを装着し、 $\text{Na}^{99m}\text{TcO}_4$ 20 mCi 投与により視野全体の計数率は左室相で約 60 kcps に達するが、この条件で得られた左室領域の約 1 cm 角の画素の拡張終期の計数値は 30~50 カウントだった。この結果、単結晶型ガンマカメラを使用した場合、第1回循環時法による左室位相解析の精度は、振幅値の標準偏差が 5% 以上、駆出率 20% のときの位相値の標準偏差が 25° 以上であった。Figure 6 は左側より振幅イメージ、位相イメージ、左室位相ヒストグラムである。全体に多結晶型ガンマカメラのデータはばらつきが少なく、特に位相イメージと左室位相ヒストグラムで統計誤差の影響がはっきりしている。

本例の左室駆出率は 29% だった。

2. 位相解析データの再現性

20症例の60区域全部で、振幅イメージおよび位相イメージの2回の検査の評価は一致した。左室位相ヒストグラムは、収縮の遅れた区域があると左室のピークが非対称形となる。2回の検査でヒストグラム形状の評価が異なる症例はなかった。また左室位相ヒストグラムの標準偏差も2回の検査の値は良く一致した。Figure 7 に1回目と2回目のヒストグラムの標準偏差の比較を示す。相関係数は $r=0.94$ で、差の平均および標準偏差(1 S.D.)は $0.8 \pm 1.7^\circ$ だった。以上より多結晶型ガンマカメラを使用して $\text{Na}^{99m}\text{TcO}_4$ 20 mCi 投与で行った左室位相解析の再現性が非常に良好なことが判明した。

IV. 討 論

心臓核医学検査は非侵襲的であり、精度が高く、現在では循環器疾患の臨床に重要な地位を占めている。左室機能検査としては、一般には左室駆出率などの左室全体を定量的に評価する方法と、動画表示による心壁運動観察などの局所を定性的に評価する方法が良く用いられている。また近年、局所の機能を定量的に数値として評価する方法として、左室局所駆出率イメージ^{8,9)}などの各種の機能イメージが提唱され、臨床的に有用とされている。しかし局所ごとの定量的指標を評価するときは、左室全体の指標を評価するときより計数値が小さいため統計誤差の影響が大きく、得られた数値の信頼性を検討することが重要である。

最近刺激伝導系異常や虚血性心疾患における壁運動異常に応用されている位相解析法は、局所壁運動の大きさおよび時間的ずれを評価する方法だが、局所ごとの心周期時間・放射能曲線を解析しており、通常は十分な計数の得られる平衡時法により左前斜位方向の観察が行われている^{1~3)}。左室壁運動異常の評価には、左室長軸像の観察が、異常の検出および部位同定に重要である。しかし単結晶型ガンマカメラを使用して第1回循環時法で左室長軸像のデータを得ても、画素ごとの機能

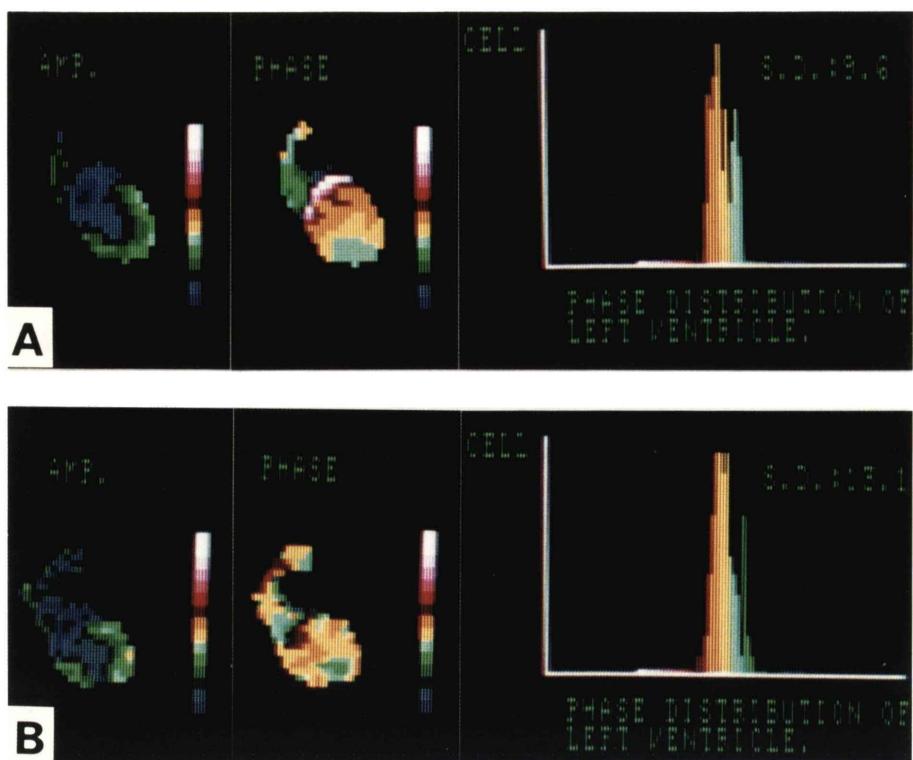


Fig. 6 Comparison of the phase analysis data with first-pass method. A. Multi-crystal camera data. B. Single-crystal camera data.

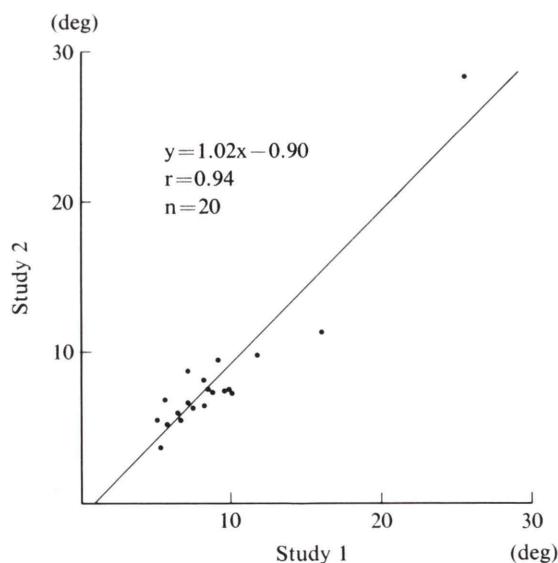


Fig. 7 Comparison of S.D. values of the left ventricular phase distribution between 2 studies.

指標の統計精度が悪く、実用性に乏しい。外山ら¹⁰は単結晶型ガンマカメラを使用して、第1回循環時法による右前斜位像の左室位相解析を報告しているが、各画素ごとの振幅値と位相値の精度は述べていない。

多結晶型ガンマカメラは計数率特性がすぐれしており、数え落とし補正により視野全体で約500kcpsまで計数可能である。このため第1回循環時法による左室機能検査施行時に、当施設の比較で単結晶型ガンマカメラの約10倍の計数値を得ることが出来る。われわれは多結晶型ガンマカメラを使用すれば、左室長軸像で統計精度の高い位相解析が可能と予想し、本研究を施行した。

今回の分割数の検討により、位相解析の目的では1心拍の分割数は16以上必要で、また16分割以上なら何分割でも位相解析の精度は変化しないことが判明した。さらに位相値は分割数8以上で一定値となり、心周期時間・放射能曲線の基本波による近似が、かなり粗い方法であることを再認識させられた。収縮期相や拡張期相の詳細な変化を問題にするときは、高次項までを含めた近似¹¹や、他の関数による近似¹²が必要と考えられる。

位相解析データの統計精度の検討は、電算機で種々の心周期時間・放射能曲線の統計変動をシミュレーションすることにより行った。この結果多結晶型ガンマカメラを使用すれば、第1回循環時法で各画素の振幅値の統計誤差は3%以内(1S.D.)、位相値の統計誤差は駆出率20%でも10°以内(1S.D.)だった。左室壁運動評価の際、左室内各画素の振幅値および位相値の精度が臨床的にどの程度必要かは、種々の壁運動異常の症例に実際に位相解析を適用し、検討していかなければならない。しかし従来の報告で正常者の左室位相分布の標準偏差が10°以下であることより、今回多結晶型ガンマカメラを使用して得られた、位相値の統計変動による標準偏差が10°以内というのは、最低条件と考えられる。比較のため単結晶型ガンマカメラを使用した第1回循環時法のデータの統計精度も検討したが、各画素の位相値の統計変動による標準偏差が、駆出率20%で25°以上と不良

だった。単結晶型ガンマカメラを使用して左室長軸像の位相解析を行うときは、いくつかの画素をまとめた地域ごとの評価しか出来ない。

局所駆出率が低下すると位相値の精度も低下するので、位相値で壁運動異常における収縮の時間的ずれを評価するときは、刺激伝導系異常を評価するときにも増して、計数を十分に得ることが重要である。また左室位相分布の標準偏差は、壁壁運動が低下すると位相値の統計誤差の増大により、たとえ左室全体が均等に収縮していても上昇する。左室位相分布ヒストグラムで左室収縮の同期性を評価するときは、標準偏差値だけでなく、ヒストグラムの形状や位相イメージも合わせて比較検討することが重要である。

20症例での検討で、多結晶型ガンマカメラを使用した第1回循環時法によるデータより得た振幅イメージ、位相イメージ、左室位相分布ヒストグラムの再現性は非常に良好だった。

以上より多結晶型ガンマカメラを使用すれば、統計精度が高く、再現性の良好な、信頼出来る左室長軸像の位相解析が可能なことが判明した。虚血性心疾患における壁運動評価法として、本法の有用性は高いと考えられる。今後症例を重ねて、臨床的有用性についても報告する予定である。

謝辞：臨床検査に協力していただいた富山医科薬科大学附属病院核医学診療部門の技師諸氏ならびに技術的に協力していただいた日商メディサイエンス㈱に厚く謝意を表する。

文 献

- 1) Adam WE, Tarkowska A, Bitter F, et al: Equilibrium (gated) radionuclide ventriculography. *Cardiovasc Radiol* 2: 161-173, 1979
- 2) Byrom E, Pavel DG: Algorithm for quantification of regional wall motion abnormalities, using the phase image of the ECG-synchronized cardiac study. *J Nucl Med* 21: p 47, 1980
- 3) 向井孝夫, 玉木長良, 石井 靖, 他: 心拍同期心プローブ像の位相解析による局所心筋壁運動の評価. *核医学*, 18: 609-612, 1981
- 4) Links MJ, Douglass HK, Wagner NH, Jr.: Patterns of ventricular emptying by Fourier analysis

- of gated blood-pool studies. *J Nucl Med* **21**: 978-982, 1980
- 5) 村田 啓, 田渕博己: 刺激伝導系の診断——位相解析. 画像診断, **1**: 535-540, 1981
- 6) 玉木長良, 向井孝夫, 石井 靖, 他: Phase analysisによる左室局所壁運動の定量的評価——位相分布ヒストグラムによる検討——. 核医学, **18**: 1241-1248, 1981
- 7) Waltom S, Yiannikas J, Jarratt HP, et al: Phasic abnormalities of left ventricular emptying in coronary artery diseases. *Br Heart J* **46**: 245-253, 1981
- 8) Maddox DE, Holman BL, Wynne J, et al: Ejection fraction image: A noninvasive index of regional left ventricular wall motion. *Am J Cardiol* **41**: 1230-1238, 1978
- 9) Bodenheimer MM, Banka VS, Fooshee CM, et al: Comparison of wall motion and regional ejection fraction at rest and during isometric exercise. *J Nucl Med* **20**: 724-732, 1979
- 10) 外山比南子, 村田 啓, 飯尾正宏, 他: 位相分析法による第1回循環時および平衡時マルチゲートイメージの解析. 画像診断, **1**: 81-88, 1981
- 11) 前田寿登, 竹田 寛, 中川 素, 他: マルチゲート法心ピールデータについてのフーリエ解析応用による心 Functional imaging——基礎的検討およびその応用について——. 核医学, **19**: 765-776, 1982
- 12) 田渕博己, 村田 啓, 外山比南子, 他: 心筋梗塞症の局所壁運動の分析——フーリエ解析とチエビシエフ解析の比較——. 核医学, **19**: 919-928, 1982

Summary

Fourier Phase Analysis of the Left Ventricle by First-Pass Angiocardiography Using a Multi-Crystal Gamma Camera

Ryusuke FUTATSUYA*, Hikaru SETO*, Junichi YAMANISHI**, Tetsuya KAMEI*,
Masao KAKISHITA* and Tsuneaki SUGIMOTO***

*Department of Radiological Sciences, Faculty of Medicine, Toyama Medical and Pharmaceutical University

Faculty of Education, Toyama University, *Department of Medicine, Tokyo University

To assess the regional wall motion of the left ventricle, a long axis view is preferable to detect and locate the sites of ischemic lesions. However, first-pass cardiac data with a single-crystal camera is relatively erroneous for studies on a pixel-by-pixel basis.

Temporal Fourier analysis was applied to the data of first-pass angiography with a multi-crystal camera and its statistical error and reproducibility were assessed. In one pixel (1.21 cm), the statistical error of the standardized amplitude value was lower than 3% (1 S.D.). The statistical error of the phase value was increased as the regional ejection fraction of the pixel was decreased. However, the phase S.D. was lower than 10 degree

even though the regional ejection fraction decreased to 20%.

The reproducibility of the amplitude image, phase image and phase histogram of the left ventricle in 20 cases were very good. Correlation coefficient of the phase histogram S.D. between two studies is 0.94.

From the above results, Fourier phase analysis of the left ventricle using a multi-crystal camera is a statistically accurate and reliable method to assess the regional wall motion of the left ventricle in the long axis view.

Key words: Radionuclide angiography, Multicrystal camera, First pass method, Phase study, Regional wall motion.