

振動解析による新しい左室 心筋弾性値測定法

New method for estimating left ventricular myocardial elasticity by vibration analysis

本田 英行
小岩 喜郎
大山 匡
高木 壮彦
菊池 淳一
星 信夫
James P Butler*
滝島 任

Hideyuki HONDA
Yoshiro KOIWA
Tadasu OHYAMA
Takehiko TAKAGI
Jun-ichi KIKUCHI
Nobuo HOSHI
James P Butler*
Tamotsu TAKISHIMA

Summary

We solved numerical solutions of Advani-Lee's equation, which treats free vibrations of fluid-filled spherical shells, and forms the basis for non-invasive estimation of left ventricular myocardial elasticity. Numerical results showed that elasticity is approximated by $E=86.5 \cdot a^2 \cdot f^2$ (E : elasticity (dyn/cm²), a : internal radius (cm), f : eigenfrequency (Hz)). To examine the accuracy of this theoretical equation in estimating elasticity, we made 7 spherical shells of silicone rubber, and compared the estimated elasticity by this equation with that by a standard stretch test. The elasticity calculated by Advani-Lee's equation and by stretch test proved to be nearly identical. Therefore, we concluded that we can estimate the elasticity of a spherical shell using this equation. We calculated the myocardial elasticity at the first heart sound emission in 25 normal persons with a simplified (approximated form of) Advani-Lee's equation. The mean elasticity in normal subjects was $(7.04 \pm 2.46) \times 10^5$ dyn/cm².

Key words

Myocardial elasticity Left ventricle Heart sound

はじめに

現在までに提案された心筋弾性値測定法^{1,2)}は、

観血的に心内圧を定測するものであり、臨床の現場において、容易、かつ頻回に施行できるものではなかった。これに対して、非観血的心筋弾性値

東北大学医学部 第一内科
仙台市青葉区星陵町 1-1 (〒980)

The First Department of Internal Medicine, Tohoku University School of Medicine, Seiryō-machi 1-1, Aoba-ku Sendai 980

*Department of Environmental Science and Physiology, Harvard School of Public Health

Received for publication October 6, 1989; accepted December 8, 1989 (Ref. No. 36-216)

測定の可能性を持つものとしては Advani と Lee とにより提案された方程式³⁾, すなわち弾性球殻の自由振動を扱った方程式の応用が考えられる. この式を用いることにより, 弾性球殻の内径, 壁の厚さ, 振動モード, 固有振動数が求められれば, 単位心筋あたりの固さである弾性値が圧測定を必要とせず非観血的に求めることができる. すでに 1975 年, Ghista らは, この方程式を用いて第 I 音発生時の左室心筋弾性値を求める試みを行っている⁴⁾. しかしながら彼らの研究においては, 左室振動の正確な検出法が未決定であったため, 最も重要なパラメーターである左室固有振動数の測定に著しい誤差を生じたと考えられ, また, 造影により左室 dimension の測定を行っているため, 方法が観血的であったことなど問題点があり, 臨床検査法としてこの方程式を実用化することはできなかった.

今回我々はこれらの問題点につき検討した結果, 1) 微量振動センサーを食道内に嚥下させ, 左室後壁に位置させることにより, 左室壁振動がかなり忠実に検査できる⁵⁾, 2) 測定した早期第 I 心音のピーク振動数が, 左室のモード 2 の固有振動数にほとんど等しく, このことから左室は早期 I 音発生時に主としてモード 2 で振動していると考えられる⁵⁾, 3) 近年の心エコー図法診断技術の進歩により, 内径と壁の厚さはかなり正確に求め得るため, これらの修正を加えると, Ghista らとは異なり, Advani-Lee 式を適用し得る条件が整い, 非観血的左室弾性値測定の可能性が現実のものとなったと言えよう. 今回我々は Advani-Lee 方程式の数値解を求め, 弾性値と固有振動数, 内径, 壁の厚さの間の理論的關係を明らかにし, 更に calibration study として種々の内径や, 厚さのシリコンゴム球殻を作製し, この方程式より計算された弾性値と, 同一素材の試験棒を用いて引っ張り試験で得られた弾性値と比較した. 次に臨床応用の第一歩として, 正常者を対象として I 音発生時の心筋弾性値を算定し, Advani-Lee 式の有用性について評価を行った.

原 理

Advani-Lee 方程式は, 弾性球殻の自由振動を扱った式である. その内部は粘性の無い圧縮性流体で満たされていると考えている. したがって心臓にこの方程式を応用する場合, 左室は弾性球殻と考える. 弾性球殻に衝撃等何らかの原因で振動が生じた場合, ある程度以上の時間にわたって振動を持続し得るのは, 特定の変形パターンを持つ振動のみである. このような持続性をもって振動することのできる特定の変形パターンを振動モードと言う. 例えば, モード 2 の振動とは, 球殻が回転楕円体形に変形する振動である. また, 振動数も任意の値をとり得るのではなく, 変形パターンに対応した振動数を持った振動数のみが存在する. これを固有振動数と言う. したがって弾性球殻に振動が生じた場合, 弾性球殻は固有振動数という特定の振動数を持ち, 振動モードという特定の変形パターンを起こす振動のみが存在することになる. Advani と Lee によると, この時固有振動数は次の式を充たす.

$$C_1\beta^6 + C_2\beta^4 + C_3\beta^2 + C_4 = 0 \quad (1)$$

β : 弾性球殻の non-dimensional な固有振動数, $C_1 \sim C_4$: 壁厚, 内径, 振動モード数, および弾性値の関数.

(1) 式は弾性球殻において, 内径, 壁の厚さ, 振動モード数, 弾性値, 固有振動数が 1 つの方程式を満たしていることを意味する. したがって内径, 壁の厚さ, 振動モード数および固有振動数の値が測定できれば, (1) 式を用いることにより球殻を作っている材料の弾性値を計算することができる (Fig. 1).

1. Advani-Lee 式の数値解法

我々は, コンピューターを用いて (1) 式の数値解法を行った. Fig. 2 の実線は, モード 2 ($n=2$), 壁の厚さ (h) が 1 cm の時の弾性値と固有振動数の關係を示したものである. 図中の 1.0, 2.0, 3.0 は内径を表わす (単位 cm). これによると, 内半径の値にかかわらず, 同じ振動数であれば, 内半

Vibration mode	(n)		
Eigenfrequency	(f)		Young modulus
Left ventricular internal radius	(a)	→ Advani-Lee's equation →	(=Left ventricular myocardial elasticity per unit)
Left ventricular wall thickness	(h)		

Fig. 1. Schematic explanation of the new method to estimate left ventricular myocardial elasticity.

By measuring determination of left ventricular internal radius, wall thickness, vibration mode and eigenfrequency, left ventricular myocardial elasticity can be estimated from Advani-Lee's equation.

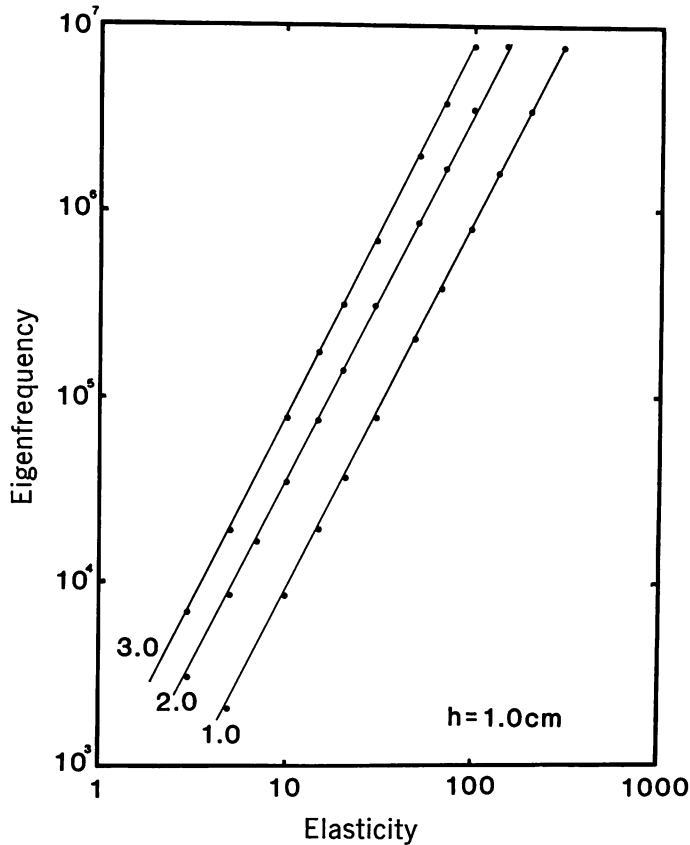


Fig. 2. An example of numerical solutions of Advani-Lee's equation (vibration mode is 2 and wall thickness (h) is 1 cm).

Solid lines indicate the relationship between eigenfrequency and elasticity with equation (1). Closed circles indicate the values from equation (2). The figures 1.0, 2.0, 3.0 are internal radii of the sphere.

Equation 1 = $C_1\beta^6 + C_2\beta^4 + C_3\beta^2 + C_4$; equation 2 = $86.5 \cdot a^2 \cdot f^2$.

径の値が大きい程弾性値も大きくなっている。様々な数値解を求めた結果、(1)式は内径が3cm以内の時は最大約8%の誤差で、(2)式により近似されることが判った。

$$E = 86.5 \cdot a^2 \cdot f^2 \quad (2)$$

E: 弾性値 (dyn/cm²), a: 内半径 (cm), f: 固有振動数 (Hz).

Fig. 2 のドット印は (2) 式による値を示す。ド

ット印はほとんど実線と重なっていることがわかる。

2. Advani-Lee 式の calibration

我々は同一素材のシリコンゴムを用いて、大きさや厚さの異なる球殻を 7 個作製した。この球殻の固有振動数から Advani-Lee 式を用いて求めた弾性値と、標準的な引っ張り試験による弾性値との比較を行った。すなわち、この球殻の一方に振動を加え、球殻に生じた振動を、反対側より微小振動センサーにて検出した。振動数は 60 Hz から 500 Hz まで変化させ、伝達関数 (= 出力加速度/入力加速度) の値を各振動数ごとに求めた。伝達関数の絶対値のピーク振動数が球殻の固有振動数である。Fig. 3 に伝達関数の 1 例を示す。伝達関数に明瞭な peak 振動数が存在しており、容易に球殻の固有振動数を求めることができる。また、slow motion illuminated image⁵⁾を用いて、ピーク振動数に対応する各個有振動数の振動モード数の確認を行った。この方法は固有振動数で振動している球殻を、固有振動数と僅かに異なる振動数 (例えば固有振動数+1 Hz) で点滅しているストロボで照明すると、球殻の振動モードが、あたかも slow motion を見るかのように可視化されるものである。その結果、固有振動数から Advani-Lee 式を用いて求めた弾性値は $(1.11 \pm 0.24) \times 10^7 \text{ dyn/cm}^2$ であるのに対し、引っ張り試験より求めた弾性値は $1.06 \times 10^7 \text{ dyn/cm}^2$ と、両者はおおむね一致した。

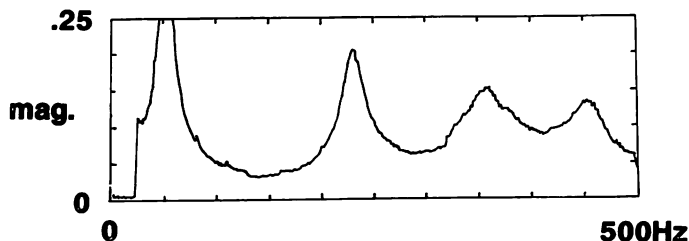


Fig. 3. An example of transfer function of a silicone spherical shell.

Horizontal axis represents frequency applied to the silicone spherical shell (Hz). Vertical axis (mag) represents absolute magnitude of the transfer function. The peak frequency of the transfer function is an eigenfrequency of the silicone spherical shell.

臨床応用

Advani-Lee 式の実用性が確認されたので、正常者 25 名を対象に早期第 I 音発生時の左室心筋弾性値を非観血的に算定した。食道内の左室後壁に接した位置に微小振動センサーを挿入し、早期第 I 音発生時の左室振動を検出した。この振動の振動数分析を行い、ピーク振動数を左室固有振動数とした⁵⁾。心エコー図法にて Gibson 法による左室内容積を求め、これと等しい容積を持つ球を仮定し、その半径を内径とした。これより簡易式 (2) を用いて弾性値が計算できた。その結果、正常者の平均は $(7.03 \pm 2.46) \times 10^5 \text{ dyn/cm}^2$ であった (Fig. 4)。

考 按

Ghista らの結果²⁾では、前胸壁で測定した第 I 音の固有振動数は 13 から 160 Hz であった。このときの振動数は本文の記述から判断すると ω (単位 radian/sec) であると思われる。これを通常の Hz に直すと 2.1 から 25 Hz (平均 \pm SD = 13.4 ± 7.0 Hz) である。また、弾性値は 2.1 から 30.3 dyn/cm^2 (平均 \pm SD = $(9.6 \pm 9.1) \times 10^5 \text{ dyn/cm}^2$) であった。症例は異なるが、我々の結果では第 I 音の固有振動数は平均 28.7 ± 4.4 Hz であり、弾性値は $(7.04 \pm 2.46) \times 10^5 \text{ dyn/cm}^2$ であった。Ghista らの結果では、我々の結果に比べて固有振動数が低く、固有振動数および弾性値は大きなバラツキ

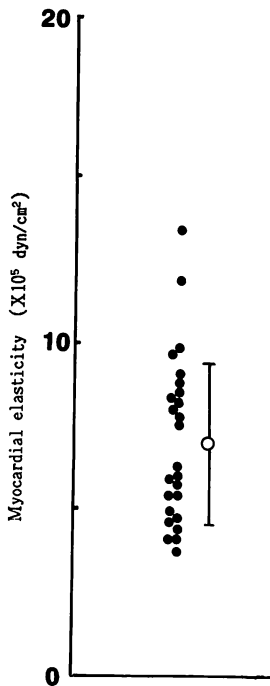


Fig. 4. Distribution of myocardial elasticity at the moment of the first heart sound emission in 25 normal persons.

がある。このバラツキは、前胸壁での固有振動測定が大きな誤差の原因になることを示している。

Calibrationの結果より Advani-Lee 式は、多少のバラツキはあるものの、平均としてはかなり正確な弾性値を与えることが判った。このことはこの式を使用して、弾性球殻の弾性値を測定することが、基本的には妥当であることを示している。Mirsky ら¹⁾は観血的に求めた拡張末期における正常者心筋弾性値を $(2.19 \pm 0.34) \times 10^5$ dyn/cm² と報告している。拡張末期以降は時間経過とともに心筋弾性値が上昇することを考えると、今回の結果はこの値と矛盾しないと思われる。このように本法は容易に繰り返して施行できるという利点があり、臨床的に意味のある方法と思われる。

要 約

我々は Advani-Lee 方程式の数値解を求めてそ

の性質を検討した。この方程式は弾性球殻の自由振動を扱うもので、非観血的左室心筋弾性値測定法の基礎となるものである。その結果、弾性値は $E = 86.5 \cdot a^2 \cdot f^2$ (E : 弾性値 (dyn/cm²), a : 内径 (cm), f : 固有振動数 (Hz)) で近似されることが判った。更にシリコンゴムで様々な厚さと内径を持つ球殻を 7 個作製し、この方程式から弾性値を計算し、引き延ばし試験による値と比較した。その結果、両者の値はよい一致を示し、この方程式を用いることにより、弾性球殻の弾性値を求めることができることが判った。そこで我々は正常者 25 名において、近似化した Advani-Lee 式を用い第 I 音発生時の左室心筋弾性値を測定した。その結果、弾性値の平均値は $(7.04 \pm 2.46) \times 10^5$ dyn/cm² であった。

今回の研究においては、東北大学流体力学研究所 谷順二教授、大学院生 山本弘之技官、大友規矩雄各氏の御協力をいただき深謝いたします。

文 献

- 1) Mirsky I, Parmley WW: Assessment of passive elastic stiffness for isolated heart muscle and the intact heart. *Circ Res* **33**: 233-243, 1973
- 2) Ghista DN, Vayo HW: The time-varying elastic properties of the left ventricular muscle. *Bull Math Biophys* **31**: 75-92, 1969
- 3) Advani SH, Lee YC: Free vibration of fluid-filled spherical shells. *J Sound Vib* **12**: 453-462, 1970
- 4) Ghista DN, Rao BN, Advani SH: In vitro elastic modulus of the left ventricle: Its determination by means of a left ventricular vibrational mode and its physiological significance and clinical utility. *Med Biol Engng* **13**: 162-170, 1975
- 5) Koiwa Y, Ohyama T, Takagi T, Kikuchi J, Honda H, Hashiguchi R, Shimizu Y, Butler JP, Takishima T: The left ventricular vibration mode in the ventricular function method and at the moment of the first heart sound. *Med Biol Engng* **1**: 59-70, 1988
- 6) Mirsky I, Cohn PF, Levine JA, Gorlin R, Herman MV, Kleulen TH, Sonnenblick EH: Assessment of left ventricular stiffness in primary myocardial disease and coronary artery disease. *Circulation* **50**: 128-136, 1975