

第1音前成分の発生機序に関する実験的研究: Miniature accelerometer による検討

Experimental studies on the genesis of low-frequency vibrations (M-sound) of the first heart sound using a miniature accelerometer

小沢友紀雄  
長沢 正樹  
谷川 直  
徳竹 英一  
弓倉 整  
辻 正純  
渡辺 一郎  
斎藤 友昭  
斎藤 颯  
波多野道信  
Damon SMITE  
Ernest CRAIGE

Yukio OZAWA  
Masaki NAGASAWA  
Naoshi TANIGAWA  
Eiichi TOKUTAKE  
Hajime YUMIKURA  
Masazumi TSUZI  
Ichiro WATANABE  
Tomoaki SAITO  
Satoshi SAITO  
Michinobu HATANNO  
Damon SMITH  
Ernest CRAIGE

**Summary**

We studied eight mongrel dogs, weighing 15 to 35 kg, in which an initial low-frequency vibration of the first heart sound (M-sound) was recognized on the chest wall. A miniature accelerometer weighing 0.5 gm was used to record surface velocity signals and surface acceleration signals as well as phonocardiograms over the cardiac apex of the closed chest wall and over the pericardium or epicardium.

The frequency response of accelerometer was essentially flat ( $\pm 1.5$  dB) from 1 to 200 Hz. The accelerometer mounted was such that its sensitive axis was perpendicular to the recording surface. Equisensitive phonocardiograms were obtained to compare the signal size of M-sound on the epicardium at several positions including the cardiac apex, the left ventricular anterior wall near the inter-ventricular septum, the left ventricular antero-lateral wall and the right ventricular anterior wall. Intraventricular phonocardiograms and pressure curves were obtained by a Millar catheter directly inserted through the left ventricular wall near the apex to keep the tip near the apex. Furthermore,

日本大学医学部 第二内科  
東京都板橋区大谷口上町 30-1 (〒173)

The Second Department of Internal Medicine, Nihon University School of Medicine, Ohyaguchi-kamimachi 30-1, Itabashi-ku, Tokyo 173

Presented at the 25th Meeting of the Cardiography Society held in Tokushima, October 9-11, 1982  
Received for publication November 10, 1982

the relationship between M-sound and the shortening of the myocardium at the apex was investigated by means of ultrasonic dimension system and phonocardiography.

Studies of M-sound were performed not only in sinus rhythm, but also in atrio-ventricular dissociation and ventricular pacing after crushing sinus node or electrical vagus stimulation.

The results were as follows:

1. The M-sounds over the chest wall, pericardium and epicardium were recorded coincidentally with the onsets of the left ventricular pressure curve, its  $dP/dt$ , low-frequency vibration of the first heart sound of intraventricular phonocardiogram, positive velocity, and acceleration of myocardial surface.

2. The M-sound on the epicardium was maximal in intensity at or near the cardiac apex, in comparison with those recorded on the left ventricular anterior wall near the interventricular septum, left ventricular antero-lateral wall, and right ventricular anterior wall.

3. The M-sound was observed between A and C points of the mitral valve echogram.

4. There was no effect of atrial contraction on the M-sound in cases of atrio-ventricular dissociation.

5. The onset of the M-sound on the epicardium at the apex was not always coincident with the onset of shortening of the myocardium at the same position.

6. The size and shape of the M-sound could be changed by intraventricular conduction abnormalities, such as left ventricular and right ventricular pacing.

We conclude that the M-sound originates at the cardiac apex coincidentally in time with the onset of left ventricular myocardial contraction, but it has no relationship to the onset of myocardial contraction at the same location. Furthermore, the shape and size of the M-sound is changed by intraventricular conduction abnormalities, but not changed by atrial contraction.

#### Key words

M-sound      Miniature accelerometer      Low frequency component of the first heart sound      Left ventricular contraction

### はじめに

第1音前成分である低周波振動は M-sound ともいわれ、心電図の QRS の開始より 0.01~0.02 秒(ときに 0.04 秒)後に始まり、0.02~0.06 秒間持続するとされているが<sup>1)</sup>、その成因については諸説があつて一定していない。

そのうち、成因が residual atrial vibration であろうという考え<sup>2)</sup>は、心房細動においても M-sound がみられることより否定的であり、房室弁の辺縁の coaptation<sup>3)</sup>、三尖弁の閉鎖<sup>4)</sup>などによるとする弁膜説も、心エコー図との対比や、左右両側の房室弁置換例にも M-sound が認められる<sup>5)</sup>ことより否定的である。また最近では initial muscular vibration であるとする説<sup>5-8)</sup>が有力で

あり、羽田ら<sup>9)</sup>は心エコー図と心尖拍動図を用いて、I 音前成分が僧帽弁の緊張に先行する左室心筋の収縮に基づく振動であるとしている。

我々はこの低周波振動(以下 M-sound)の成因を動物実験により検討することを目的として、以下の研究を行った。すなわち

1. 実験犬においても胸壁上から M-sound を記録しうるか、
2. 心筋表面からでも、胸壁上と同様の M-sound が得られるか、
3. M-sound がもっとも明瞭に記録される部位はどこか、
4. 心房収縮は M-sound にどの程度影響を与えるか、
5. 心室内興奮伝導様式が変ると M-sound が

変化するか、

6. 胸壁 および 心筋表面の velocity, acceleration の方向性と M-sound との関連はどうか、

7. M-sound とその測定部位の局所的な心筋収縮との関係はどうか。

### 対象および方法

心尖部胸壁上から M-sound を記録できた 8 頭の雑種成犬 (15~35 kg) を、ペントバルビタール静脈麻酔下、および ventilator による人工呼吸下で実験に用いた。

心音図および surface velocity signal, surface acceleration signal 記録には Entran Devices 製の超小型加速度計 (accelerometer) Model EGA 125 R-30D を用い、Smith の考案による surface velocity analyzer (SVA), surface acceleration analyzer (SAA) によって、胸壁上、ついで胸骨正中切開にて開胸後の心膜 (pericardium) 上、さらに心膜切開後の心外膜 (epicardium) 上のそれぞれからこれらを記録した。

さらに心外膜上からの記録は、記録感度を固定して、心尖部、左室前壁の心室中隔付近、左室前側壁、右室前壁のおのおのから行った。

この超小型加速度計は直径 3.43 mm、長さ 6.75 mm の円筒形で、重量は 0.5 gm であり、接着した表面の垂直方向への速度、加速度の解析に優れている。またその周波数特性は、記録器を含め、1~200 Hz まで基本的に平坦である ( $\pm 1.5$  dB)。

心尖部の M-sound は、M モード心エコー図の僧帽弁および三尖弁エコーグラムと比較する目的で、IREX 製 101 型多素子記録器、またはフクダ電子製ポリグラフ MIC 500T および RMV-540A 型記録器を用いて検討した。また左室内圧、左室内心音図による検討を、左室壁を通じて心腔内の心尖部付近に留置した Millar カテーテルを用いて行った。

加速度計による心音図の記録には、遮断周波数 (corner frequency) 33 Hz の高域通過濾波器を用い、Millar カテーテルによる心音図記録には、

Table 1. Methods

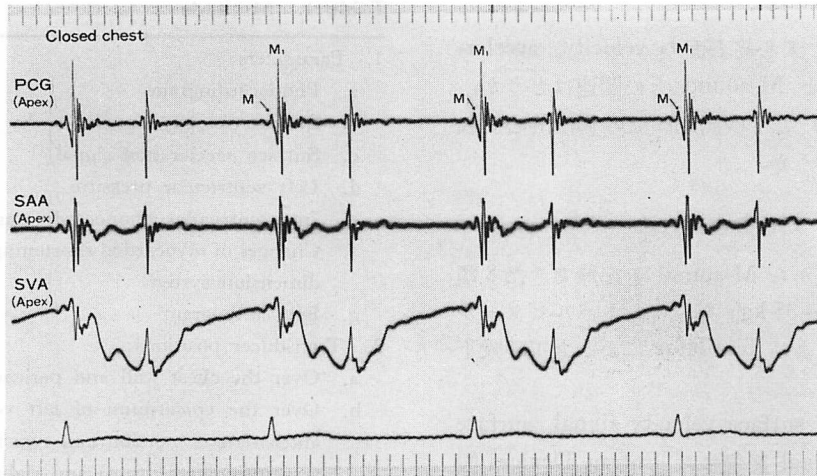
1. Parameters:	
a. Phonocardiogram	} by accelerometer
b. Surface velocity signal	
c. Surface acceleration signal	
d. Left ventricular pressure	} by Millar catheter
e. Intraventricular phonocardiogram	
f. Changes of myocardial shortening by ultrasonic dimension system	
g. Echocardiogram	
2. Transducer positions:	
a. Over the chest wall and pericardium	
b. Over the epicardium of left ventricle (apex, antero-lateral portion and region near the interventricular septum) and right ventricle	
c. Left ventricular cavity	
3. Special procedures:	
a. Sinus rhythm	
b. Electrical vagus stimulation	
c. Atrial and ventricular pacing after crushing sinus node	
d. Escaped rhythm after crushing sinus node	

200 Hz および 50 Hz の高域通過濾波器を用いた。心尖部心外膜上では、その部分の心筋収縮との関係をみるために、加速度計の両側に約 2 cm の間隔で、クリスタルエコー法 (ultrasonic dimension system UDM-5) のクリスタル電極 (5 MHz, 径 2 mm) を心内膜下心筋に植込んだ。それによって得られた心筋長の変化をさらに微分して、 $d/dt$  の変化を記録した。

まず洞調律について検討し、ついで電気的な迷走神経刺激あるいは洞破碎により徐脈をおこさせ、補充調律による房室干渉解離作成により、心房収縮と M-sound の関係について検討した。またさらに心房ペースング、および右室または左室ペースングを施行し、心室内伝導異常のときの M-sound についての検討も行った。

### 成 績

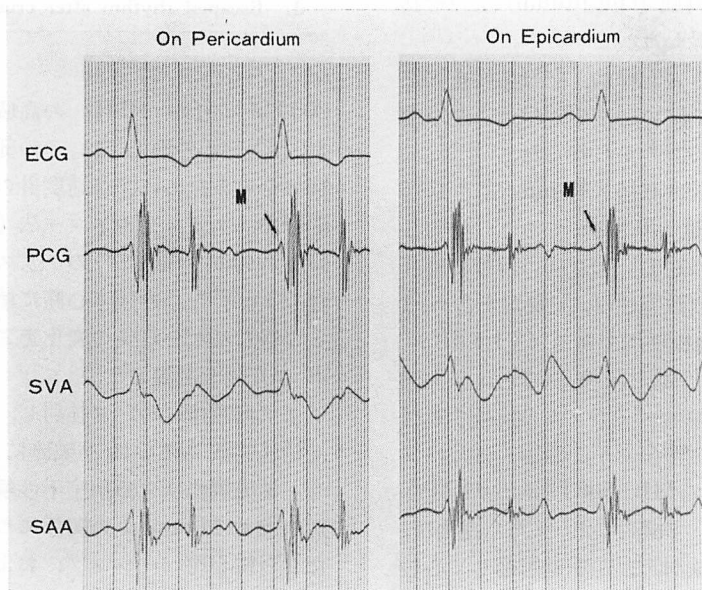
Fig. 1 は心音図 (PCG), surface velocity signal



**Fig. 1. Phonocardiogram, surface acceleration signal and surface velocity signal at the apex over the chest wall of a dog.**

An initial low-frequency vibration (M-sound) of the first heart sound is distinguishable from a main component of the first heart sound ( $M_1$ ) on the phonocardiogram (PCG).

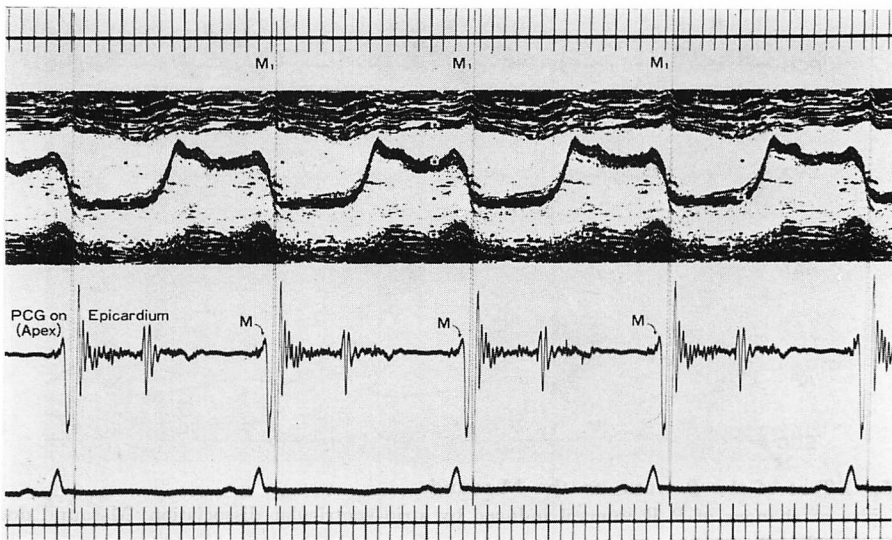
SAA=surface acceleration analyzer; SVA=surface velocity analyzer.



**Fig. 2. M-sound over the pericardium and epicardium.**

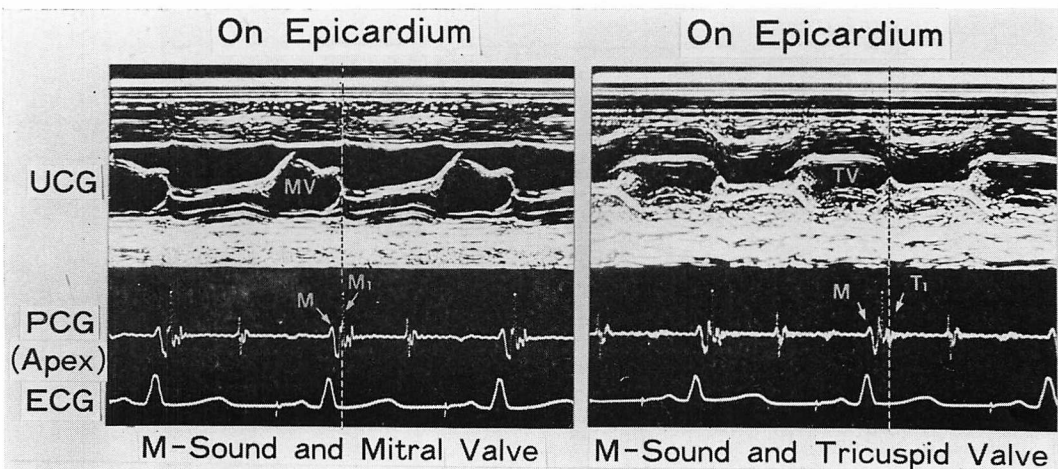
A M-sound is separated from the high-frequency component of the first heart sound over the pericardium or epicardium.

M=M-sound; ECG=electrocardiogram; PCG=phonocardiogram; SVA=surface velocity analyzer; SAA=surface acceleration analyzer.



**Fig. 3. Relationship between the echocardiogram of the mitral valve and the M-sound over the apical epicardium.**

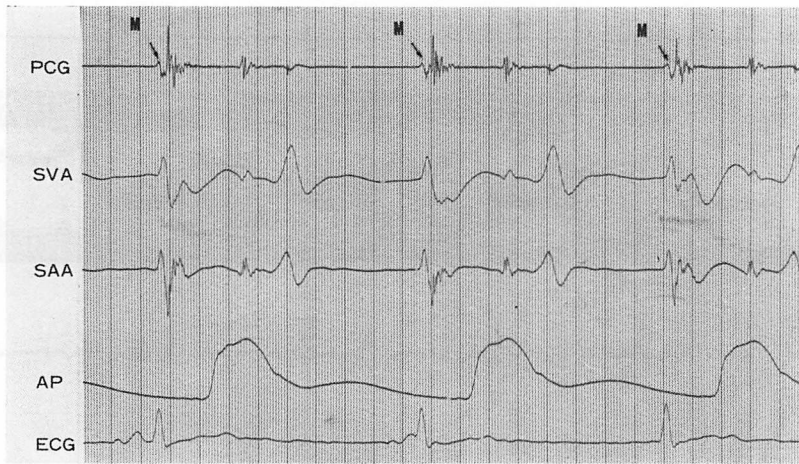
The main component of the first heart sound ( $M_1$ ) coincided in time with the closure of mitral valve. M-sound (M) is recognized to occur during AC slope of the mitral valve echogram.



**Fig. 4. Relationship between the main components and the M-sound of the first heart sound.**

The deflection of M-sounds (M) occurs before the mitral and tricuspid valve components of the first heart sound.

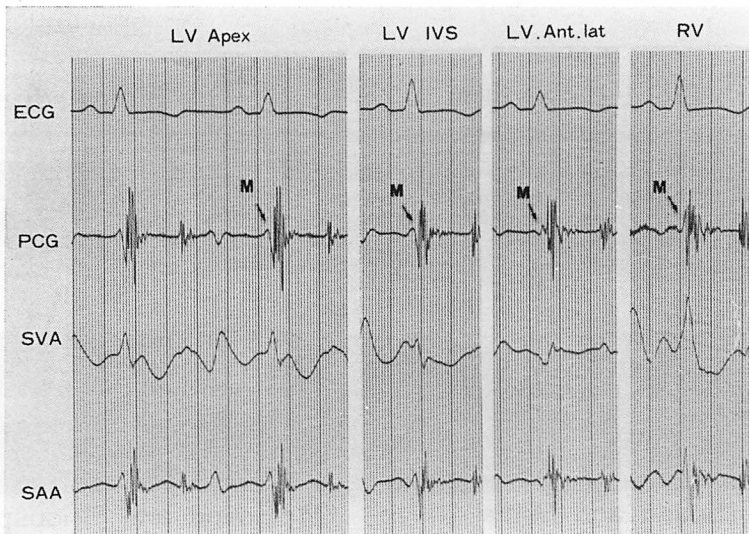
MV=mitral valve; TV=tricuspid valve; M=M-sound;  $M_1$ =mitral valve component of the first heart sound;  $T_1$ =tricuspid valve component of the first heart sound.



**Fig. 5. Effect of the P wave on the M-sound.**

In spite of changes of P-R interval induced by atrio-ventricular dissociation, M-sound does not change significantly.

M=M-sound; PCG=phonocardiogram; SVA=surface velocity analyzer; SAA=surface acceleration analyzer; AP=arterial blood pressure; ECG=electrocardiogram.



**Fig. 6. Relative intensity of the M-sound at the various areas over the epicardium.**

M=M-sound; LV Apex=left ventricular apex; LV IVS=left ventricular anterior wall near the interventricular septum; LV. Ant. lat.=left ventricular antero-lateral wall; RV=right ventricular anterior wall; ECG=electrocardiogram; PCG=phonocardiogram; SVA=surface velocity analyzer; SAA=surface acceleration analyzer.

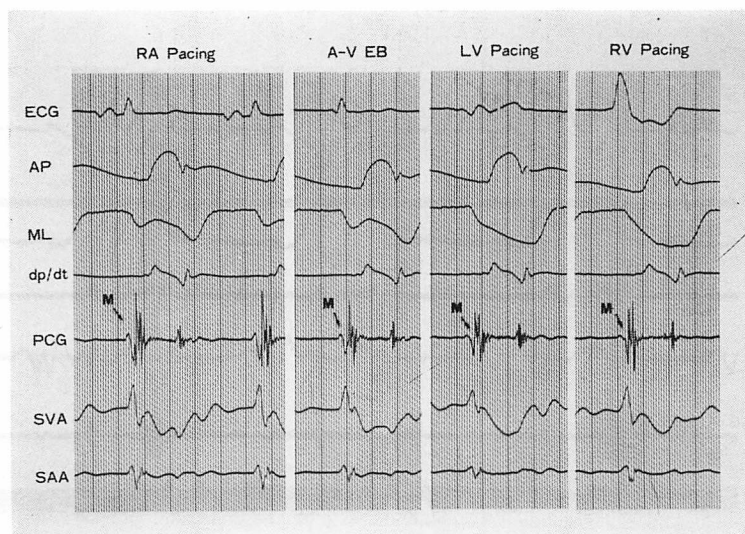


Fig. 7. Changes of the M-sound induced by various experimental conditions.

Shape and size of the M-sound (M) is changed by ventricular pacing, especially right ventricular pacing.

RA Pacing=right atrial pacing; A-V EB=atrio-ventricular escaped beat; LV Pacing=left ventricular pacing; RV Pacing=right ventricular pacing; ECG=electrocardiogram; AP=arterial pressure; ML=myocardial length at cardiac apex by ultrasonic dimension system; dp/dt=dP/dt of arterial pressure; PCG=phonocardiogram; SVA=surface velocity analyzer; SAA=surface acceleration analyzer.

(SVA), surface acceleration signal (SAA) の記録の実例である。大きな振幅を有する高調な I 音主成分 ( $M_1$ ) の前に、低調性の前成分である M-sound (M) が記録されている。

1. M-sound は、開胸後の心尖部心膜上のみならず、心膜切開後、心尖部心外膜上からも記録され (Fig. 2), これらは全例胸壁上の M-sound とほぼ同じタイミングと形態を有していた。

2. 心尖部心外膜上に記録された M-sound は、僧帽弁エコーグラムの閉鎖点 C に一致する I 音主成分 ( $M_1$ ) よりも明らかに先行し、僧帽弁エコーの A-C 間に存在した (Fig. 3)。

また M-sound は、Fig. 4 のように、三尖弁エコーの閉鎖点とも無関係であった。

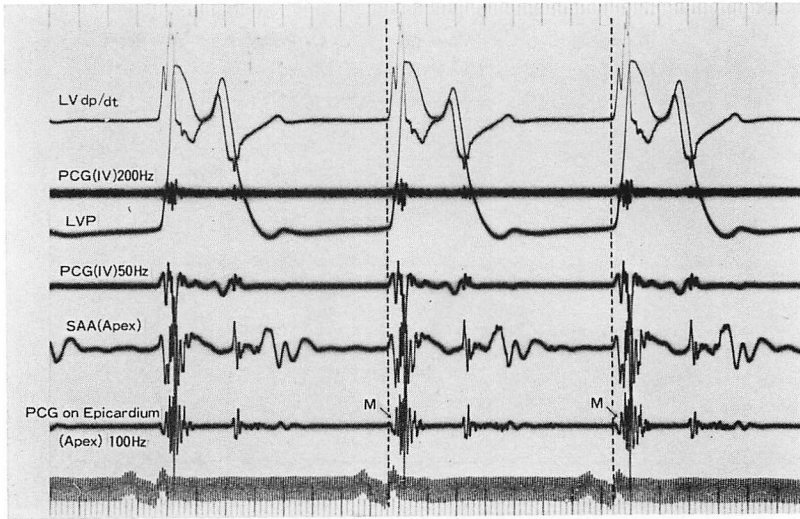
3. Fig. 5 に洞破碎による洞性徐脈と、房室接合部補充調律による房室干渉解離にみられる M-sound を示す。各心拍ごとに心電図の P 波と QRS の位置関係が異なり、第 1 拍では P 波が

QRS に先行し、第 2 拍目では両者が重なっており、第 3 拍目では QRS の前に P 波は存在しない。しかしながら各心拍における M-sound にはほとんど変化がみられず、心房収縮の影響を受けていないことが示された。

4. 直接に心筋表面より記録される M-sound (Fig. 6) は、左室心尖部 (LV Apex) においてもっとも明瞭、ついで心室中隔に接する左室前壁 (LV IVS) で明瞭であった。しかし左室前側壁 (LV. Ant. lat) や右室前壁 (RV) においては小さく不明瞭であった。また胸壁上の心尖部で記録された M-sound は、当然のことであるが、その形態からみて、左室心尖部心筋のそれが胸壁に伝達されたものであると考えられた。

5. 心室の興奮伝導様式の変化が心尖部心外膜上の M-sound に与える影響の 1 例を Fig. 7 に示す。右房ペースング時と房室接合部調律時、すなわち心房収縮の影響のない部分の M-sound は、





**Fig. 8. Relationship between the vibration over the apical epicardium and intraventricular phenomena recorded by a Millar catheter.**

The M-sound (M) is synchronous with the onset of upstroke of left ventricular pressure curve and its  $dP/dt$ , and is coincident with the beginning of the low-frequency component of the first heart sound of the intraventricular phonocardiogram.

LV  $dP/dt = dP/dt$  of left ventricular pressure; PCG (IV)=intraventricular phonocardiogram; LVP=left ventricular pressure curve; SAA=surface acceleration analyzer; PCG on epicardium=phonocardiogram on epicardium at apex.

ほぼ同じであった。それに対し、左室または右室ペーシングでは、その形態が変化し、特に右室ペーシング時には小さく記録された。

**Fig. 8** は Millar カテーテルによる心内現象と左室心尖部心外膜上の心音図、および surface acceleration signal (SAA) の関係を示したものである。このさいカテーテルは心尖部より直接左室内に挿入し、心尖部近辺に留置しているが、その操作により左室上の心音図には著変を生ぜず、M-sound への影響はみられなかった。この図に示す如く、心尖部心膜上における M-sound の開始は左室圧およびその一次微分 ( $dP/dt$ ) の立ち上がり一致しており、また心腔内心音図の低音域 (50 Hz) の振動開始にも一致した (高音域のそれには M-sound は出現していない)。

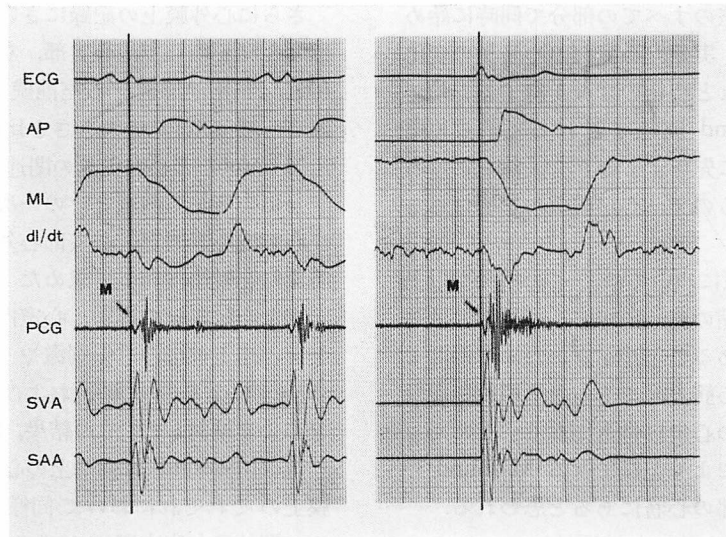
心尖部で記録される M-sound が、心尖部の心筋自体の収縮に由来するものか否かを明らかにす

る検討は、**Fig. 9** に示す如くである。上述して来た諸計測に、微小加速度計装着部位の心筋長 (ML) の変化およびその変化速度 ( $dL/dt$ ) を加えた記録では、この ML の短縮開始は M-sound に一致せず、やや遅れて出現していた。

#### 考 案

第1音の前成分である低調な M-sound は、イヌの実験においても胸壁の心尖部で記録でき、その形態および時相は、開胸後の心尖部記録におけるそれとほとんど同じである。このことは胸壁上の M-sound が心筋の振動そのものに由来するものであろうことを示唆している。またその起源については、すでに指摘されているように、心房細動のときにも M-sound がみられることより、心房起源説は否定的である。我々の実験においても、房室接合部調律で P 波が QRS の前に存在しな





**Fig. 9. Relationship between the M-sound and the shortening of myocardial length at the cardiac apex by ultrasonic dimension system.**

The M-sound starts before the beginning of shortening of myocardium at the same location of the apex. In the left panel, P wave is present before QRS, but not in the right panel.

M=M-sound; ECG=electrocardiogram; AP=arterial pressure; ML=myocardial length at the cardiac apex by ultrasonic dimension system;  $dl/dt=dl/dt$  of changes of myocardial length; PCG=phonocardiogram; SVA=surface velocity analyzer; SAA=surface acceleration analyzer.

い場合とか、心室ペースングで P 波がみられないときにも M-sound が存在することから、心房起源説は否定できる。

また房室干渉解離で P 波と QRS の位置関係が変化しても、M-sound の形態にさほどの影響が現われないのは、通常心房収縮の場合には M-sound はその影響をほとんど受けないことを意味している。しかし明瞭な第 4 音がみられる例では、P 波の位置によっては M-sound に影響する心房収縮があるであろうと思われるが、我々の実験では第 4 音の明らかに認められた例はなく、この点は確認されなかった。

M-sound が房室弁の閉鎖や腱索、乳頭筋などに由来するものでないことは、両房室弁の人工弁置換後においても M-sound がみられる<sup>5)</sup> ことより明らかである。また、我々も示したように、その時相は僧帽弁や三尖弁の閉鎖よりも明らかに先

行し、羽田<sup>9)</sup> も述べているように、僧帽弁エコーの A 点と C 点の間に存在している。すなわち M-sound は房室弁が閉鎖する以前にすでにみられるので、厳密には等容収縮期の前より始るといえることができる。

この振動が左室心筋の収縮によるものであろうとする説<sup>9)</sup> は、Smith<sup>6)</sup>、Counihan<sup>7)</sup>、Luisada<sup>8)</sup> も述べており、我々の実験でも、M-sound は左室圧上昇開始に一致して始まり、これは一見、左室収縮開始によって生じる左室筋の振動が M-sound の由来であることを示唆しているようにみえる。しかし心筋長およびその変化速度の検討では、M-sound と心内膜下心筋長の短縮開始との間には僅かなズレがあり、これらが互いに無関係であることが示されている。すなわち、M-sound は必ずしもその記録部位における心筋の収縮によるものではないと思われる。

左室の収縮は左室のすべての部分で同時に始められるのではない。実際、心尖部の心筋長の変化は、他の部分のそれと時相のズレを有する。Fig. 9 の示した M-sound 開始に遅れる心筋長短縮は、P 波が QRS に先行するときも、然らざるときも同様にみられるので、心房収縮の影響はここでも否定できる。

M-sound の起源については、この振動が以上のように左室の収縮の開始に相応して生じ、低調性の心筋の振動であることが示された。しかしその局在、すなわち心筋表面でもっとも明瞭に記録できる部位は左室の心尖部付近であり、したがって胸壁上の心尖部でよく記録できる M-sound の起源は、左室心尖部の心筋にあると思われる。

M-sound が左室心筋の収縮開始によって起こるものとすれば、心室内の興奮伝導様式の変化によりその変化がもたらされると考えられるが、同一例で行った左室ペースングあるいは右室ペースング時の M-sound はいずれもその大きさ・形を変じ、左室ペースングでは右室ペースングによる場合よりも M-sound がより明瞭であった。また左室ペースングを左室の心外膜の種々な部分で行うと、それぞれ、多少異なった性質の M-sound が記録できた。

これらの事実より、M-sound は心室内伝導様式の変化の影響を受け、したがってこの振動の起源は左室心筋の収縮開始に関係するものと思われる。

## 要 約

胸壁上の心音図で低調性の第1音(I音)前成分(M-sound)が記録される雑種成犬8頭(15~35kg)を用い、ペントバルビタールの静脈麻酔下に、次の実験を行った。すなわち重さ0.5gの微小加速度計を用い、心音図、surface velocity signal、surface acceleration signalを胸壁上の心尖部で記録、ついでventilatorによる人工呼吸下に開胸、心膜、さらには直接心筋表面の心外膜上から同様の記録を行った。

さらに心外膜上の記録にさいしては、心音図の感度を同一にして、心尖部、左室前壁の心室中隔付近、左室前側壁、右室前壁より各 signal を記録し、M-sound の大きさを比較した。

M-sound と心内現象の関連は、Millar カテーターによる左室内圧とその一次微分(dP/dt)および心腔内心音図と、心尖部心外膜上の心音図と同時記録を対比検討して求めた。

また心房収縮の影響、心室内伝導異常の影響などを、迷走神経の電気刺激や sinus node の crushing による房室解離および心室ペースングなどにより検討した。その結果、以下の成績を得た。

1) M-sound は胸壁上の心尖部、心外膜、心膜上のそれぞれにおいて同様の形態で記録され、その開始は左室内圧およびその dP/dt の立ち上がり一致した。また低音域心腔内心音図の1音前成分、各 velocity および acceleration signal の positive signal の開始にも一致していた。

2) 心外膜上で記録された M-sound は心尖部付近でもっとも明瞭であった。

3) M-sound は M モード心エコー図の僧帽弁エコーの A 点と C 点の間に認められた。

4) 心房収縮は M-sound に影響を与えなかった。

5) 心尖部心外膜上の M-sound はその部の心内膜下心筋の収縮の開始に先行していた。

6) M-sound の形や大きさは、心室内の興奮伝導様式の変化により影響をうけた。

以上より、M-sound は心尖部付近でもっとも明瞭にみられる心筋の振動に由来すると考えられる。

## 文 献

- 1) 上田英雄, 海渡五郎, 坂本二哉: 臨床心音図学, 第3版, 南山堂, 東京, 1963
- 2) Oriás O, Braun-Menendez E: The Heart Sounds in Normal and Pathological Conditions. Oxford Medical Press, London, 1939
- 3) Lakier JB, Fritz VU, Pocock WA, Barlow JB: Mitral components of the first heart sound. Br Heart J 34: 160, 1972

- 4) Hultgren HN, Hubis H: A phonocardiographic study of patients with the Starr-Edwards mitral valve prosthesis. *Am Heart J* **69**: 306, 1965
- 5) Smith JR, Gilson AS, Kountz WB: Studies on the muscular element of the first heart sound. *Am Heart J* **21**: 17, 1941
- 6) Counihan T, Messer AL, Rappaport MB, Sprague HB: The initial vibrations of the first heart sound. *Circulation* **3**: 730, 1950
- 7) Luisada AA, Argano B: The sound of the heart. The initial component of the first heart sound. *Chest* **60**: 79, 1971
- 8) Armstrong TG, Gotsman MS: Initial low frequency vibrations of the first heart sound. *Br Heart J* **35**: 691, 1973
- 9) 羽田勝征, 坂本二哉, 天野恵子, 山口経男, 石光敏行, 竹中 克, 高橋久子, 滝川玲子: 心音・心エコー図法による I 音前成分の発生機序に関する検討. *J Cardiography* **12**: 655, 1982