

# 心拍数と心筋酸素消費量 — 1 心拍当りの心筋酸素消費量 と心拍数の関係 —

岡山大学医学部第一内科教室（主任：長島秀夫教授）

原岡 昭一 ・ 斉藤 大治 ・ 庵谷 和夫

長花 晴樹 ・ 藤井 章伸 ・ 間嶋 行造

（昭和55年 5 月23日受稿）

**Key words:** 心拍数, 心筋酸素消費量  
左室内圧, 収縮時間

心筋酸素需要が心拍数と密接な関係を有することは古くから知られている<sup>1)</sup>。しかし、この両者が厳密な意味で直線的関係を有するのか、あるいは心拍レベルにより心拍当りの酸素消費量に差があるのかについては、殆んど報告がない。そこで著者らは、麻酔開胸犬を用いてほぼ一定の血圧下で心拍数を変化させ、各心拍レベルでの1心拍当りの酸素消費量を測定した。さらにその両者の関係を生ずる機構についても、左室圧を中心に2～3の検討を行った。

## 方 法

9～17kgの雑種成犬12頭を opium hydrochloride (3mg/kg)の皮下注射にて前麻酔し、30分後 sodium chloralose (110mg/kg)にて静脈麻酔した。70%空気と30%酸素の混合気体にて人工呼吸下に左第4肋間で開胸し、左鎖骨下動脈経由で左冠動脈主幹部に Gregg 型 cannula を挿入固定した。左冠動脈は左頸動脈に挿入したカテーテルを Gregg 型 cannula に接続して by-pass を作成することにより、自己血液にて灌流を行った。冠血流量は by-pass 中に電磁血流計を挿入して測定した。次いで大動脈より腹部大動脈にカテーテルを挿入して動脈血圧を電気血圧計 (Statham Model p23Db)にて測定した。また冠静脈血を採取するため、側孔

を有し、先端の閉じた小カテーテルを心外膜より冠静脈洞に刺入し、カテーテルの側孔が洞入口部より1～1.5cm上流になるように固定した。血液酸素含量は Lex-O<sub>2</sub>-con TL にて測定し、ガス分圧の測定には Corning Model 165 を使用した。動脈血 pO<sub>2</sub>, pCO<sub>2</sub> 及び pH はくり返し測定し、必要に応じて1.3%重炭酸ナトリウム液の点滴静注および呼吸量の調整を行うことで、動脈血ガスの値を生理的範囲内に維持した。

まず control 時の血圧、冠血流量の記録と動脈血及び冠静脈血を採取した後、control 時(洞調律)の心拍数より20～90beats/min 高い頻度で左心房を pacing した。2～3分後新しい steady-state に達すると、再び同様の記録及び血液採取を行った。その後さらに別の頻度で pacing して、1頭につき2～3種類の異った心拍数での観察を行った。

心拍数の変化に伴う心筋酸素消費量の変動を規定する因子を検討するため、別に5頭の犬を用いて以下の実験を行った。麻酔、手術方法等は前述と同様であるが、心尖部より硬く短いカテーテルを左室内に挿入し、左室圧を冠血流量、大動脈血圧とともに Jet-Recorder(Shiemen Model 800)を用いて紙送り速度100mm/sec で記録し、Sarnoff らの Tension-Time-Index<sup>2)</sup> の概念に従って分析した。

心筋酸素消費量は冠動静脈酸素較差 (vol %) と冠血流量 (ml/min/100g LV muscle) の積から求めた。

### 成 績

12頭102回の実験のうち、平均大動脈血圧が95~105mmHgにあった46頭の成績について分析した。洞調律時の心拍数は $112 \pm 18$  beats/min (平均 $\pm$ 標準偏差), 左室拡張末期圧は $6 \pm 2$  mmHgであった。左房 pacing により、左室拡張末期圧は不変ないしやや低下する傾向を認めたが ( $4 \pm 2$  mmHg), 統計的には有意ではなかった。分時心筋酸素消費量 ( $\dot{M}V\dot{O}_2$ ) は図1に示すごとく心拍数 (HR) の変化と密接な正相関を示し、

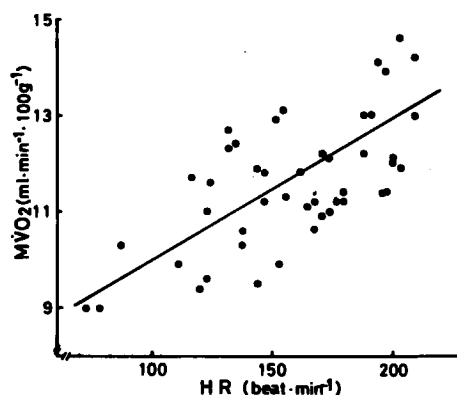


図1 心拍数と心筋酸素消費量。  
分時心筋酸素消費量 ( $\dot{M}V\dot{O}_2$ ) は心拍数 (HR) と正相関を示す。  $\dot{M}V\dot{O}_2 = 0.027HR + 7.5$ ,  $r = 0.71$ ,  $P < 0.01$

両者の関係は  $\dot{M}V\dot{O}_2$  (ml/min/100g LV muscle)  $= 0.027HR + 7.5$  ( $r = 0.71$ ,  $P < 0.01$ ) で示された。一方、1心拍当りの心筋酸素消費量 ( $\dot{M}V\dot{O}_2\text{-Beat}$ ) は、心拍数と負の相関を示し (図2), 心拍数の増加とともに1心拍当りの心筋酸素消費は減少した。 [ $\dot{M}V\dot{O}_2\text{-Beat}$  (ml/100g LV muscle)  $= -0.00036HR + 0.13$ ,  $r = -0.86$ ,  $P < 0.01$ ]

$\dot{M}V\dot{O}_2\text{-Beat}$  が心拍数と負の相関を示す機構を分析するため、5頭、15回の実験について、左室内圧曲線下の面積と心拍数及び  $\dot{M}V\dot{O}_2\text{-Beat}$  との関係を検討した。左室圧曲線下の面積 (LV-Parea) は、Numonics Model 1239 を用いて、1心拍の左室圧曲線と左室圧ゼロ線とで囲まれる面積を測定し、連続する5拍の平均値をmmHg・

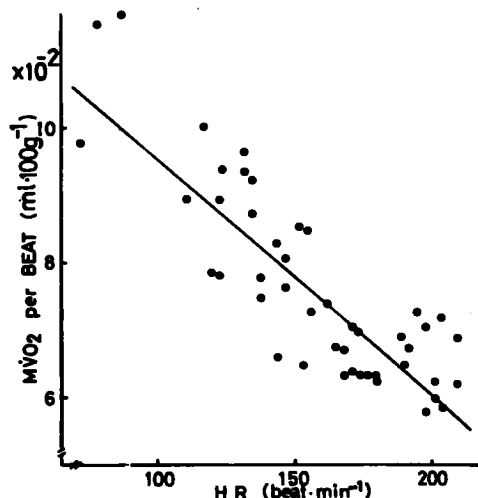


図2 心拍当りの心筋酸素消費量と心拍数。  
心拍当りの心筋酸素消費量 ( $\dot{M}V\dot{O}_2\text{ per Beat}$ ) は心拍数 (HR) と密接な負の相関を示す。  
 $\dot{M}V\dot{O}_2\text{ per Beat} = -0.00036HR + 0.13$ ,  $r = -0.86$ ,  $P < 0.01$ .

sec で表わした。図3に示すごとく、LV-Parea は、心拍数とは負の (LV-Parea  $= -0.091HR + 35.15$ ,  $r = -0.86$ ),  $\dot{M}V\dot{O}_2\text{-Beat}$  とは正の相関 ( $\dot{M}V\dot{O}_2\text{-Beat} = 0.0034 \times \text{LV-Parea} - 0.0063$ ,  $r = 0.88$ ) を示した。

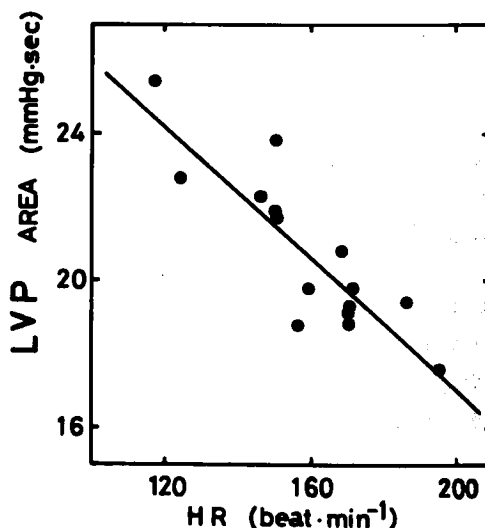


図3 左室圧曲線下面積と心拍数  
左室圧曲線下の面積 (LV-Parea) は心拍数 (HR) と負の相関を示す。  
Ventricular Area  $= -0.091HR + 35.15$ ,  $r = -0.86$ ,  $P < 0.01$

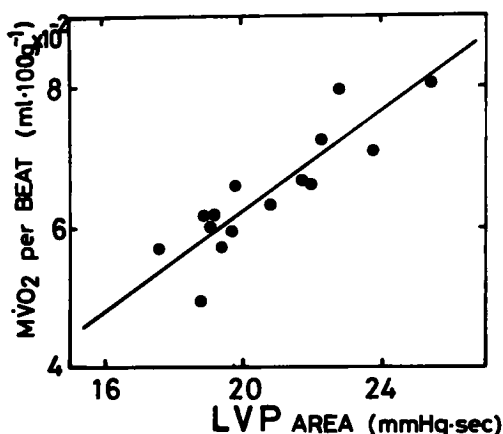


図4 心拍当りの心筋酸素消費量と左室圧曲線下面積

心拍当りの心筋酸素消費量 ( $\dot{M}V\text{O}_2$  per Beat) は左室圧曲線下の面積 (LVP area) と正相関する。  
 $\dot{M}V\text{O}_2$  per Beat =  $0.0034 \times (\text{Ventricular Area}) - 0.0063$ ,  $r = 0.88$ ,  $P < 0.01$

## 考 案

心筋酸素消費量を規定する因子として、心拍数、心筋収縮性および心筋張力の三者が最も重要なものと考えられている<sup>3)</sup>。このうちでも心拍数は容易に測定でき、しかも他の因子よりも生理的変動範囲が大きい点から、日常臨床上でも重要な心筋酸素消費量規定因子として採用されている。心電図運動負荷試験では、心負荷量、即ち心筋酸素需要増加の目安として心拍数の増加が用いられ<sup>4)</sup>、 $\beta$ -受容体遮断剤の抗狭心症作用の最も重要なものは、徐脈作用に基づく心筋酸素需要の低下と考えられている<sup>5)</sup>。しかし心拍数と心筋酸素需要とが正の関係を有することはよく知られているものの(図1)、はたして両者の関係が直線的関係を示すのか否か、即ち1心拍当りの心筋酸素需要が各心拍レベルで同等に評価し得るかどうかは不明である。Starling and Visscher<sup>6)</sup>は摘出心肺標本を用いた実験から、拡張期心室容量が一定であれば、心拍数の多い方が1心拍当りの酸素消費量が少ないことを報告した。また Cohn and Steele<sup>7)</sup>は同様の実験から、心筋酸素消費量 ( $\text{ml/g/hour}$ ) =  $-0.0187\text{HR} + 2.23$  (HR = 心拍数) なる式を導き出している。著者らの in situs の成績では、1心拍当りの心筋酸素消費量 ( $\text{ml/100g}$ ) =  $-0.00$

$036\text{HR} + 0.13$ 、即ち同一心拍数が持続した場合の分時心筋酸素消費量は ( $-0.00036\text{HR}^2 + 0.13\text{HR}$ ) と心拍数 (HR) の二次式で表現されることになる。従って  $\dot{M}V\text{O}_2\text{-Beat}$  が心拍数と負の直線関係を有することは、単位時間の心筋酸素消費量 ( $\dot{M}V\text{O}_2$ ) が、狭い心拍数の範囲内では図1の如く、心拍数とほぼ直線関係を示すものの、厳密には心拍数の二次式で表現されることを意味している。

心拍数増加とともに1心拍当りの酸素需要が減少する機構については報告がない。今回の成績では、1心拍当りの酸素需要即ち酸素消費量は左室圧曲線下の面積 (LVP area) と正相関を、またこの LVP area が心拍数と負の相関を認める点から、心筋張力と密接な関係を有することが考えられる。Sarnoff ら<sup>2)</sup>は左室心筋酸素消費量は、収縮期の左室圧曲線下の面積に比例するとして、Tension-Time-Index なる指標を提唱した。著者らの成績では、血圧はほぼ一定 ( $100 \pm 5\text{mmHg}$ ) に保たれており、左室拡張末期圧もほぼ不変である点から、LVP area が心拍数と負の相関を示すのは、主として収縮時間の短縮に起因するものと考えられる。即ち、心拍数の増加とともに収縮時間 (即ち心筋張力持続時間) が短縮し、この結果1心拍当りの酸素消費量を減少させたものであろう。

以上の事実は、血圧、左室拡張末期圧等他の血行動態が一定であっても、たとえば心拍数が毎分100から101への増加と、150から151への増加では、同じ毎分1心拍の増加であっても心筋張力持続時間に差があるため、心筋酸素消費量の面からは同等に評価できないことを意味する。従って、運動負荷や心房ペースングにより心拍数増加を行う場合、あるいは  $\beta$ 遮断剤で心拍数が減少した場合、心筋酸素消費量の変動を推進するには心拍数のレベルを考慮する必要があることを示している。

## ま と め

心拍数と心筋酸素消費量、とくに1心拍当りの心筋酸素消費量と心拍数の関係を明らかにする目的で、雑種成犬を用いて実験を行い、次の結果を得た。

1) 血圧が一定である場合は、心筋酸素消費量として収縮時間（心筋張力持続時間）の短縮によるものと考えられた。  
 量は毎分  $(-0.00036\text{HR}^2 + 0.13\text{HR})$  となり、  
 心拍数の二次式で表現される。

2) 1心拍当りの酸素需要の減少機構は、主 (長島教授の御校閲を深謝します。)

## 文 献

1. Eckenhoff, J.E., Hafkenschiel, J.H., Landmesser, C.M. and Harmel, M.: Cardiac oxygen metabolism and control of the coronary circulation. *Am. J. Physiol.* **149**, 634—649, 1947.
2. Sarnoff, S.J., Braunwald, E., Welch, G.H., Jr., Case, R.B., Stainsby, W.N. and Macrutz, R.: Hemodynamic determinants of oxygen consumption of heart with special reference to tension-time index. *Am. J. Physiol.* **192**, 148—156, 1958.
3. Braunwald, E.: Control of myocardial oxygen consumption: physiologic and clinical considerations. *Am. J. Cardiol.* **27**, 416—432, 1971.
4. Bruce, R.A.: Exercise testing of patients with coronary heart disease. *Ann. Clin. Res.* **3**, 323, 1971.
5. Prichard, B.N.C.:  $\beta$ -adrenergic blocking drugs in angina pectoris. In  *$\beta$ -adrenoceptor Blocking Drugs*, ed. G.S. Avery, Univ. Park Press, Baltimore, London and Tokyo, pp.85—118, 1978.
6. Starling, E.H. and Visscher, M.B.: The regulation of the energy output of the heart. *J. physiol* **62**, 243—261, 1926—27.
7. Cohn, A.E. and Steele, J.M.: The influence of frequency of contraction of the isolated mammalian heart upon the consumption of oxygen. *Am. J. Physiol.* **113**, 654—658, 1935.

**Inverse relationship between heart rate  
and myocardial oxygen consumption per beat**

**Shoichi HARAOKA, Daiji SAITO, Kazuo IHORIYA,  
Haruki NAGAHANA, Akinobu FUJII and Ikuzo MASHIMA**

The First Department of Internal Medicine, Okayama University Medical School,

Okayama

(Director : Prof. H. Nagashima)

Relationship between heart rate and myocardial oxygen consumption per beat was studied in anesthetized open-chest dogs. Myocardial oxygen consumption per minute ( $\dot{MVO}_2$ ) was calculated as the product of the left coronary artery blood flow and coronary arterio-venous oxygen difference. Myocardial oxygen consumption per beat ( $\dot{MVO}_2$ -Beat) was the quotient of  $\dot{MVO}_2$  divided by heart rate (HR). HR was varied in 78–210 beats/min with left atrial pacing. Systemic arterial and left ventricular enddiastolic pressure were kept constant, and arterial blood gases were within physiological ranges. Although  $\dot{MVO}_2$  correlated significantly with HR ( $r=0.71$ ),  $\dot{MVO}_2$ -Beat decreased in association with an increase in heart rate. Closer relationship was observed between  $\dot{MVO}_2$ -Beat and HR;  $\dot{MVO}_2$ -Beat (ml/100g LV muscle)  $= -0.00036 + 0.13$ ,  $r = -0.86$ ,  $P < 0.001$ . As the results,  $\dot{MVO}_2$  was represented as a quadratic equation of HR;  $\dot{MVO}_2$  (ml/min/100g LV muscle)  $= -0.00036HR^2 + 0.13HR$ . There was a good correlation ( $r=0.88$ ) between  $\dot{MVO}_2$ -Beat and the area under a stroke left ventricular pressure curve. This finding and constant systemic arterial and left ventricular pressure suggest that the inverse relationship between  $\dot{MVO}_2$ -Beat and HR is mainly due to a reduction in duration of systolic left ventricular wall tension.