長時間運動時における心周期の変化

中原 凱文

東京工業大学工学部保健体育群

Variation of Cardiac Cycle during Prolonged Cycling Exercise

Yoshibumi NAKAHARA

Department of Physical Education, Tokyo Institute of Technology, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152, Japan

The purpose of this study was to elucidate the changes in heart rate (HR), systolic and diastolic time intervals accompanying prolonged cycling exercise. Seven healthy male students (N group) and seven male collegiate long distance runners (LDR group) underwent 60-min bicycle ergometer exercise loaded at 30% and 50% HRmax. Electrocardiogram (ECG) and phonocardiogram (PCG) were recorded throughout the exercise and recovery period, and then left ventricular ejection time (LVET) and left ventricular diastolic time (LVDT) were calculated from tracings of the cardiac cycle. In the N group, HR increased to the target HR level (30% and 50% HRmax) in the initial phase of exercise, but there was a tendency to increase 10-15 b/min in the latter half of the exercise period. The LDR group showed the same trend as in the N group at 50% HRmax level (i.e., 120 b/min) exercise. These increments of the HR were due to the decrease of stroke volume, the elevation of body temperature and changes in the volume of the venous return. In the initial phase of exercise (within five minutes), LVDT decreased markedly resulting in a rapid increase of the HR in both groups. The decrease in LVDT was 250-400 msec (60-70% decrement for resting value) at the 30% HRmax level load and 270-480 msec (73-80% decrement for resting value) at the 50% HRmax level load, and then transient slight increment was recognized. Subsequently, there was a tendency to decrease. The major factor for the increase of the HR was that the LVDT decreased markedly that implied the shortening of the inflow time to the left ventricle. Finally, LVET decreased slightly throughout the exercise period than LVDT. Accordingly, LVET decreased 60-120 msec (20-40% of resting levels) within the initial five minutes and remained stable thereafter. The changes in LVET seem to depend on the excitation of sympathetic nerves, decrease of SV, changes of venous return and elevation of body temperature.

Key words: Cardiac cycle, LVET, LVDT, HR

今日、エロビック・ダンスをはじめとし、ジョギングなどの健康維持・増進のための運動が盛んとなり、いわゆる健康産業がブームとなっている。

このような社会背景の中で、特に必要とされているのは、より正確で、有効性があり、かつ安全性の高い運動処方である。健康のための運動として、運動時間を考えてみると、心拍数が120～150拍/分の強度での約

30～60分間の運動が主流をなしている。

しかし、運動を長時間持続させた場合、その強度が一定でも、時間経過に伴い、心拍数は徐々に増加する (Ekelund, 1967; Ekelund, et al., 1967; Hartley, 1977; 平木場・浅野, 1983)。この心拍数増加の要因として、一回拍出量の減少、体温の上昇、血圧の低下などが考えられている。

運動時における心拍数の増加は、心周期 cardiac cycle の中で、収縮期よりも拡張期の著しい短縮によるものであるとされている (Gauer, 1960; 中原, 1982; 中原, 1989; Sugiura, et al., 1987)。

左心室の拡張期は、左心房より左心室への血液流入期であり (Ferro, et al., 1984; Henry and Meehan, 1971), 特に冠状動脈からの血流は、主にこの拡張期に行われている (Boudlas, et al., 1979; Henry and Meehan, 1971)。したがって、身体運動時に左心室拡張期が著しく短縮しても、運動遂行に必要な血液量を拍出するためには、心筋の強い収縮力が要求されるものと思われる。

そこで本研究は、一般的に広く採用されている運動強度である最高心拍数 (HRmax) の30%, 50%相当レベルの運動を、60分間継続させることにより、左心室収縮時間・拡張時間が運動継続時間の時間経過に伴って、いかなる変化を示すのかを検討した。

実験方法および測定項目

①被験者：健康正常人であり、かつ高校時代より規則的な運動経験のない大学生(男子)7名を対象群

(Normal, N 群)とした。運動群として、運動種目の中で最も呼吸循環系機能のトレーニング効果が認められている長距離選手7名(男子) (Long Distance Runners, LDR 群)を用いた。両群の各被験者の身体的特徴は、表1 (群平均値) に示した通りである。

②負荷方法：モナーク社製自転車 ergometer を負荷装置とし、回転数は60rpm とした。十分に自転車 ergometer 作業に慣れさせた後、以下の要領で最高心拍数 HRmax を求めた。負荷1.0kp で2分間の warming-up を行い、2分間の休息をとらせた。その後、1.0 kp より2分間隔で0.5kp ずつ3.0kp まで漸増させ、以後1分毎に0.5kp ずつ増加させた。記録された心電図

Table 1 Physical characteristics of the subjects (mean $\pm$ SD)

	n	Age yrs	Height cm	Weight kg	Heart Rate (b/min)		ALL-out Record Time
					Rest	Max	
Normal	7	22.3 ± 2.5	170.7 ± 3.6	65.1 ± 4.7	75.76 ± 3.23	191.90 ± 4.69	12'08" $\pm 1'20"$
Long Distance Runner	7	19.8 ± 1.7	168.8 ± 7.3	58.7 ± 5.2	52.35 ± 6.11	172.89 ± 4.77	14'58" 5000m $\pm 30"$ 15'36" ~17'35"

Fig. 1 Selection of measurement points of ECG and PCG.

④ position was recorded most clearly.

PCG was recorded at ④ position.

ならびに被験者の運動に対する反応状態を監視しながら、安全性を考慮しつつ、メトロノームのリズムに追従できなくなるまで作業させた。追従できなくなった時点を all-out と判断し、最高心拍数を求めた。この最高心拍数を基準にし、下記の方式 (American College of Sports Medicine, 1980) より各被験者毎の 30% HRmax・50%HRmax 相当心拍数を算出し、夫々の作業強度と心拍数との関係から、30%HRmax, 50%HRmax レベルの負荷強度を求め、60分間の作業を負荷した。

$$30\%HR_{\max} = (HR_{\max} - HR_{\text{rest}}) \times 0.3 + HR_{\text{rest}}$$

$$50\%HR_{\max} = (HR_{\max} - HR_{\text{rest}}) \times 0.5 + HR_{\text{rest}}$$

③測定および分析：心電計は日本光電社製 (ECG-6303型) を用い、胸部誘導による心電図を記録した。同時に、同社製の加速度心音マイク (TA-601T 型) を明療第 I 音、第 II 音の記録される胸骨左縁第 3～第 4 肋間部位 (図 1) に装着し、テープで付着固定をし、心音図を記録した。これらの記録は、安静・運動中な

らびに回復の全過程において、連続して行った。記録紙の速度は、波形分析に用いる部分を 100mm/sec で行い (Lewis, et al., 1977), その他の部分は 5～25mm/sec とした。

心周期の分析は、図 2 に示すごとく、Wiggers, 1952; Wiggers, 1959; Luisada, et al., 1976; Lewis, et al., 1977 の報告に準じて行った。第 I 音開始点は、左心室圧の急激な上昇開始に伴う大動脈血流開始と大動脈弁開放と一致し (Piemme, et al., 1966), 第 II 音開始点は、大動脈血流の急速な減速に伴い、大動脈弁閉鎖、肺動脈弁閉鎖などに一致するとされている (Sakamoto, et al., 1965)。

従って、心音図 (PCG) 第 I 音開始時より第 II 音開始時までを電気的な左心室駆出時間 (Left Ventricular Ejection Time, LVET) (林, 1987; Luisada, et al., 1977), 第 II 音開始時より心電図 P 波の peak まで (通常は P 波開始点であるが、測定誤差を極力少なくするため、本研究では peak を用いた) を左心室拡張時間 (Left Ventricular Diastolic Time, LVDT), P 波の peak より第 I 音開始時までを心房収縮期 (Atrial Contraction Period, ACP) として心周期を三つに区分した。呼吸性変動などを考慮し、7～10 心拍を連続分析し (中原, 1989), その平均値を測定値とした。ECG, PCG の測定時には、特に止息などの規制をせず、通常呼吸を行わせた。

結果

安静時心拍数は N 群で 75.8 ± 3.23 拍/分, LDR 群で 52.4 ± 6.11 拍/分であり, LDR 群は有意 ($p < 0.05$) に低値を示した。自転車 ergometer 作業による最高心拍数 HRmax は, N 群で 191.9 ± 4.69 拍/分, LDR 群 172.9 ± 4.77 拍/分であり (図 3 および表 1), N 群と比較して LDR 群の方が 20 拍/分も低値を示した ($p < 0.05$)。All-out に至るまでの作業時間は, N 群が $12' 08'' \pm 1' 20''$ であるのに対して, LDR 群では $14' 58'' \pm 30''$ と、約 3 分程 LDR 群の方が長く、そして個人差が小さかった。

この最高心拍数 HRmax を基準にし、各被験者の 30%HRmax, 50%HRmax 相当の負荷レベルを算出し、60分間の作業を行わせた。N 群の 30%HRmax は約 107 拍/分, LDR 群は約 92 拍/分であり、50%HRmax は、N 群約 131 拍/分, LDR 群約 117 拍/分であった。

Fig. 2 Scheme of cardiac cycle. Cardiac cycle was analyzed to LVET, LVDT and ACP.

60分間自転車 ergometer 作業時における心拍数の時間経過に伴う変動をみると(図4), 両負荷レベル共に, 運動開始後ほぼ3分前後で目標心拍数レベルまたはそれより10拍/分程高い値に急増した。

30%HRmax レベルでは, N 群で運動開始後20分までは, ほぼ目標心拍数レベルを示したが, 30分以後は

Fig. 3 Variation of HR during bicycle ergometer exercise.

Open circles connected by solid line show normal group (N group) and solid circles connected by broken line long distance runner group (LDR group). Plotted by mean value and SD.

Fig. 4 Variation of HR on each exercise level. Open circles show N group and solid circles LDR group. Horizontal lines show target HR level at 50% HRmax (solid) and 30% HRmax (dotted).

Fig. 5 Variation of LVET (left side) and LVDT (right side) during 60-min cycling exercise. R: resting value. Plotted by mean values on each group.

徐々に増加する傾向を示し、60分目では10拍/分程度高い値であった。一方、LDR 群では、終始目標心拍数より10拍/分前後高い値で、ほぼ一定の値を示した。しかし、50%HRmax レベルにおいては、両群共に30分以後心拍数の増加傾向が認められた。

安静時の LVET, LVDT(図 5)は、N 群では LVET284msec, LVDT403msec であり、従来の著者の報告とほぼ同様な結果を示し(中原, 1982), LVDT/LVET 比は1.4であった。LDR 群においては、LVET312msec, LVDT586msec と N 群と比較して、有意($p<0.05$)に延長していた。LVDT/LVET 比は1.9となり、LVDT の延長が著しかった。

運動時の LVET, LVDT は(図 5), 運動開始後数分以内に著しい短縮を示し、これは心拍数の増加と連動するものであった。すなわち、LVET は運動開始後3分目で、30%HRmax レベル作業において、N 群では約60msec(安静時に対して約20%程度)、LDR 群で約80msec(約25%)の短縮をし、そして、5分目では約65msec(約23%), 約85msec(約27%)の短縮を示した後、30分までに僅かに(3~5 msec)延長する傾向となった。LDR 群ではその後ほぼ一定の値を示したのに対して、N 群では30分以後もさらに15msec 程度の短縮(210~215msec の範囲)が認められた。

50%HRmax レベルの運動においては、運動開始後3分目までに N 群で約80msec(約28%), LDR 群で約100msec(約32%)の短縮、5分目では各々約100msec(約35%), 約120msec(約38%)程度の短縮を示した。その後は、30%HRmax 運動と同様に、僅かな延長傾向を示しながら、30分以後に再び短縮を示した。60分目では N 群180msec(37%の短縮), LDR 群約200msec(約37%短縮)であった(図 5 の左側)。

LVDT(図 5 の右側)も、LVET と同様な短縮傾向を示したが、LVET に比較して、短縮の程度はより顕著であった。すなわち、安静値(N 群約400msec, LDR 群約590msec)と比較して、運動開始後5分後に N 群が250~300msec, LDR 群が400~450msec の短縮(63~76%, 65~78%の短縮率となっていた)であった。

これら LVET, LVDT の安静時に対する変化率を示したのが、図 6 である。運動時の心拍数増加に伴って、LVDT の著明な短縮が認められた。先述のごとく、30%HRmax レベルにおいては、運動開始後5分で両群共に、安静値の60%相当の値を示した後、比較的緩

Fig. 6 Changing ratio for resting value of LVET (upper) and LVDT (down).
Open circles: N group
Solid circles: LDR group
Broken lines: 30% HRmax level Solid lines: 50% HRmax level

やかな延長(7~8%)傾向を示した。30分以後は、心拍数が僅かに増加したことに対応する短縮をみた。50%HRmax レベルでは、5分後に75%前後の急激な短縮を示した後、30%HRmax レベルと同様な変化を示した。

一方、LVET は、LVDT と比較すると、変化は緩やかであり、30%HRmax の運動開始後5分で20~25%の短縮を示した後、30分目まで両群間において5%前後の差が認められた($p<0.05$)後、25%短縮とほぼ一定値を示した。50%HRmax レベルでは、両群間に差が認められず、5分目で35%短縮の後、時間経過に伴った緩慢な減少を示した。このように、N 群と LDR 群との間において、多少の差は認められたが、30・50%HRmax の両負荷において、LVET と LVDT 共にほぼ同程度の短縮率が認められたことは、心周期の時間変化に関しては、鍛練の度合いによる差がほとんど見られないという興味ある結果と言えよう。

60分間の自転車 ergometer 作業後における心拍数(Δ , $\blacktriangle$), LVET(実線)ならびに LVDT(破線)の変化

Fig. 7 Variation of HR (dotted line connecting triangles), LVET (solid line) and LVDT (broken line) during recovery period after 60-min cycling exercise.

LVET and LVDT were plotted by recovery ratio for resting level.

Open circles and triangles: N group

Solid circles and triangles: LDR group

を示したのが、図7である。

心拍数は、30%HRmax レベル作業後において、N群で5分後、LDR群では2分後に各々70拍/分、60拍/分とほぼ安静レベル近くまでの早い回復を示した。しかし、50%HRmax レベル作業では、両群共に10分後でも完全な安静レベルまでの回復が認められず、特に、N群では85拍/分前後であった。

LVETは、30%HRmax レベルにおいて、両群間に数%以内の差が認められたが、運動後2分以後で、両群共に90%以上の回復を示した。50%HRmax レベルでは、両群共同様な回復曲線を示し、4分後で約90%、7分後で約95%の回復であった。

一方、LVDTは、LVETに比べ、両負荷レベル共に心拍数が80拍/分前後に回復しているにもかかわらず、回復が遅延し、特に50%HRmax レベルでは、2～4分間に両群間の大きな差が生じた。すなわち、N群では2分目で53%、8分目で63%の回復で、LDR群に比し15～40%程度回復が遅い結果となった。

考 察

安静時におけるR-R間隔の変動は、交感神経系よりも副交感神経系に依存し(景山, 1983)、心臓の特殊刺激伝導系の洞結節による心拍変化は、迷走神経による抑制と交感神経による促進との平衡に依存している(Henry and Meehan, 1971)とされている。本研究の結果、安静時におけるN群のLVETが284msec、LVDTが408msecであったのに対して、LDR群では各々312msec、586msecとなり、特にLVDTにおいて約180msec(43%程度)程有意な延長を示した。この延長は、左心室拡張期よりも、休息期の延長の影響を強く受けるものであるが、いずれにせよ、training vagotomieとしての迷走神経緊張状態によるものと思われる。

LVETとLVDTの比率は、従来の著者の報告(中原, 1982; 中原, 1989)、Ganongの報告(林, 1987)とほぼ同様な範囲であり、N群で1.3～1.6、LDR群では1.8～2.0であった。

心臓機能、特に、左心室機能を評価するに当っては、一般的にポンプ機能と心機能とに分けて論じられてい

る (Katz, 1977). 前者は、心電図などによる心室の時間変化の検討、後者は心収縮機能や心室容積変化などの検討といえる。

本研究では、ポンプ機能としての左心室機能の変化を、一定強度の負荷を長時間継続させた際の LVET, LVDT の運動時間経過に伴う変動の面から検討した。

30%HRmax レベル, 50%HRmax レベルの負荷と、かなり軽い負荷を60分間継続させたのであるが、心拍数は N 群において、運動開始後30分以後で10拍/分前後の上昇を認めた。LDR 群においても、50%HRmax レベルの作業で、同様な傾向を認めた。これらの事からすると、心拍数110~130拍/分程度の運動であっても、運動開始後30分前後で、ポンプ機能として、何らかの変化を起こしたと考えられる。すなわち、SV の減少、静脈性還流量の変化、体温上昇などの影響が挙げられる。

長時間運動時の LVET, LVDT は、心拍数が運動開始後 5 分程度で目標心拍数またはその値より10拍/分程度高い値まで急増したのに対応し、両負荷レベル共に、顕著な短縮を示した。しかし、その急激な短縮経過に関しては、LVET と LVDT との間において、多少の相違が認められた。

鍋倉ら(1988)も同様な結果を報告し、その中で70% $\dot{V}_{O_2max}$ (最大酸素摂取量の70%相当) の負荷において、運動開始後 2 分目で DT (本報告の LVDT に相当) は運動中全短縮の93%の短縮が認められたとしている。今回の負荷は、鍋倉らの負荷と比較して軽度のものであったが、ほぼ95~97%程度の短縮を示した。本報告の方が、多少短縮率が大きい結果を示したのは、より軽負荷であったため、比較的短時間で心機能 (一回拍出量の増大、静脈性還流量の変化など) の運動に対する適応がなされたためと考えられる。LVDT に比較し、LVET の短縮率が少ないのは、一回抽出量を確保し、運動に適応させるためのものと考えられるが、この調節機構が心臓自体(刺激伝導系または心筋固有)のものなのか、または、上位中枢からのものなのかは、今回の結果からは明らかでない。

安静時に比べて、身体活動時においては、交感神経系の緊張が高まり、筋ポンプ作用による静脈性還流量が増大するため、心室筋が伸展され、それにより収縮力が増強される (Rowell, et al., 1966; Shaver, et al., 1986; Sonnenblich, et al., 1987; Sugiura, et al., 1987)

ことも考えられ、その結果として一回拍出量が増大すると思われる (Chapman, et al., 1960). しかし、心拍数120拍/分前後 (最大酸素摂取量の40%相当) で、一回拍出量がほぼ最大値を示し、以後心拍数が増加しても一回心拍出量はほとんど増加しない (Åstrand, et al., 1964; 矢端, 1987) とする報告もある。

安静時の LVET の値に対する運動時の変化率 (図 6) は、N 群・LDR 群との間で差がなく、時間経過による変化もほぼ15msec (図 5 左側) であった。しかし、Wolf ら(1987)の報告によれば、LVET が同一の場合には、心筋の収縮性の高い方が、一回拍出量が大いとしている。今回、心臓の形態などを測定していないために確認はできていないが、LDR 群の心機能特性を考慮するならば、心室容積が大きく、心筋の収縮力が強いことが考えられる。

長時間運動継続時において、LVDT に顕著な短縮が認められたが、この短縮は心拍数増加の要因でもある。この LVDT の短縮は、心室への血液流入時間短縮を意味するものである。したがって、冠状動脈血流は、主に拡張期に流れるため、心拍数増加による拡張期短縮は、心臓にとって、必要な一回拍出量を確保するためには、好ましくない要因である (Henry and Meehan, 1971) と考えられる。これらのことから、LDR 群においては、トレーニングにより、心筋の肥大および心筋短縮速度の増大、心室容積の増大などがあるため、Staling の法則による収縮力増大が考えられる。

総 括

健康な男子学生 (N 群) 7 名と長距離選手 (LDR 群) 7 名に対して、最高心拍数の30%相当 (30%HRmax), 50%相当 (50%HRmax) の負荷で、60分間の自転車 ergometer 作業を行わせた。運動前・中および運動後の心電図、心音図の記録から、長時間運動の時間経過に伴う心拍数、LVET および LVDT の変化特性を明らかにすることを目的として検討したところ、次の様な結果が得られた。

1) N 群においては、心拍数110~130拍/分程度の運動強度であるが、運動開始後30分までは、ほぼ目標心拍数レベルの値を示した。それ以後、10~15拍/分程度心拍数が増加する傾向を認めた。LDR 群では、120拍/分相当 (50%HRmax) の運動において、運動後半に N 群と同程度の心拍数増加を示した。

この心拍数の増加は、一回拍出量の減少、体温上昇、静脈性還流量変化などの要因が関与していると推察された。

2) LVET に比較し、LVDT の運動時間経過による短縮率が顕著であり、運動開始後 5 分以内で、N 群・LDR 群共に 30%HRmax レベルで 250~400msec 減 (43~48% の短縮)、50%HRmax レベルで 270~500 msec 減 (33~80% の短縮) を示した後、一時的延長を示し、以後再び減少する傾向であった。

運動開始後 5 分目の値は、運動中全短縮の 95~97% を示していた。

両負荷共に、N 群の方が LDR 群に比べて、50~70 msec 程減少を示したが、安静時に対する変化率をみると、両群の変化は酷似していた。すなわち、運動開始後 5 分以内で 30%HRmax レベル負荷で 70% の短縮、50%HRmax レベル負荷で 80% の短縮を示した後、僅かな延長傾向がみられた後、緩慢な減少を示した。

LVDT の短縮は、心拍数増加の要因であるが、左心室への血液流入時間の短縮をも意味するものである。したがって、運動を遂行する上で必要な血液拍出量を確保するためには、心筋の収縮速度、短時間での心室拡張差が大であることなどが、必要となることが推察される。

これらの事から考慮するならば、50%HRmax (130 拍/分) 程度の強度の運動でも、一般人にとっては、60 分間運動継続することは、特に運動の後半において、心機能上、かなり負荷になっていることが推察された。

3) LVET は LVDT に比べ、比較的緩慢な短縮傾向を示した。すなわち、運動開始後 5 分で N 群は 60~100msec 減 (安静時に対して 20~30% の短縮率である)、LDR 群は 80~120msec 減 (25~40% の短縮率) を示した後、運動時間経過に伴って、ほぼ一定の値を示す (LDR 群) か、僅かな減少 (N 群) を示した。

この短縮は、交感神経系の緊張、一回拍出量の減少、静脈性還流量の変化、体温の上昇などによるものである。N 群における LVET は LDR 群に比し、両負荷レベル共に 10~20msec 程短く、特に 30 分以後において、この差が拡大する傾向を示した。これは、心室容積の差、心筋厚の差および心筋収縮力の差などが大きく関与していると思われる。

これらの結果から、運動を長時間継続させる上で、必要な血液量を供給するために、LVET がある程度

(180~220msen) の時間を確保されていたが、この機構が心臓自体にあるのが、上位中枢によるものかは、今後の問題である。

また、運動時の心拍数増加に伴う LVET と LVDT の変化に関する生理学的意義について、今後さらに検討する必要があると考えられる。

本研究の一部は、生理人類学会第 20 回大会ならびに、第 43 回日本体力医学会大会にて報告した。

論文投稿にあたり、論文のご校閲、ご示唆をいただきました聖マリアンナ医科大学第 2 生理学教室吉岡利忠教授および Dr. Barron 教授に感謝致します。

文 献

- American College of Sports Medicine, 1980: Guideline for Graded Exercise Testing and Exercise Prescription. Lea & Febiger, p31 (日本体力医学会編, 南江堂, 1982)
- Åstrand, P.O., T.E. Cuddy, B. Saltin and J. Stenberg, 1964: Cardiac Output Submaximal and maximal work. *J. Appl. Physiol.*, 19: 268-274.
- Boudlas, H., S.E. Rittgers, R.P. Lewis, C.V. Leiter and A.M. Weissler, 1979: Changes in diastolic time with various pharmacologic agents. Implication for myocardial perfusion. *Circulation.*, 60: 164-169.
- Chapman, C.B., J.N. Fisher and B.J. Sproule, 1960: Behavior of stroke volume at rest and during exercise in human beings. *J. Clin. Invest.*, 39: 1208-1213.
- Ekelund, L.G., 1967: Circulatory and respiratory adaptation during prolonged exercise of moderate intensity in the sitting position. *Acta. Physiol. Scand.*, 69: 327-340.
- Ekelund, L.G., A. Holmgren and C.O. Ovenfors, 1967: Heart volume during prolonged exercise in the supine and sitting position. *Acta. Physiol. Scand.*, 70: 88-89.
- Ferro, G., A. Giunta, S. Maione, G. Carella, A. Genovese and M. Chiariello, 1984: Diastolic time during exercise in normal subjects and in patients with coronary disease. *Cardiology.*, 71: 266-272.
- Gauer, O.H., in Landois-Rosemann, 1960: Lehr-

- buch der Physiologie des Menschen, 28th ed., Urban & Schwarzenberg (堀鑑訳：循環生理の基礎と臨床, 医学書院, p12) .
- Hartley, L.H., 1977: Central circulatory function during prolonged exercise. *Ann. NY. Acad. Sci.*, 301: 189-194.
- 林 秀生, 1987: E.ポンプとしての心臓, 杉 他編<人体機能学> 15章, 心臓, 南江堂, 426-436.
- Henry, J.P. and J.P. Meehan, 1971: *The Circulation, An Integrative Physiologic Study*. Year Book Medical Publishers Inc. (堀鑑訳, 循環生理の基礎と臨床, 医学書院, 1980) 10-18.
- 平木場浩二, 浅野勝己, 1983: 持久性走者の長時間運動時における呼吸循環応答特性, *体力科学*, 32: 293-301.
- Katz, A.M., 1977: *Physiology of the Heart*, Raven Press., New York., 197-208.
- 景山 茂, 1983: 心電図 R-R 間隔の変動と自律神経系, *神経内科*, 19: 119-126.
- Lewis, R.P., S.E. Rittgers, W.F. Forester and H. Boudoulas, 1977: A Critical Review of the Systolic Time Intervals. *Circulation.*, 56: 146-158.
- Luisada, A.A., G.L. Perez and P.K. Bhat, 1976: *An Atlas of Non-Invasive Techniques.*, Springfield, C.C. Thomas. (坂本, 竹中訳: 心音, 基礎と臨床, p12, 東京大学出版会, 1986).
- Luisada, A.A., B. Coleman, D. Wallick and P.K. Bhat, 1977: On the function of the aortic valve and the mechanisms of the first and second heart sounds., *Jap. Heart J.*, 18: 81-91.
- 鍋倉賢司, 後藤真二, 永井 純, 池上晴夫, 1988: 一定強度の長時間運動中に起こる心周期分画の変動, *体力科学*, 37: 263-272.
- 中原凱文, 1982: ECG からみた左心室収縮時間・拡張時間の変化, *国士館大学体育研究所所報*, 2 巻: 67-80.
- 中原凱文, 1989: 心拍数の変化に伴う左心室駆出時間の検討, *東京工業大学人文論叢*, 14号: 227-233.
- Piemme, T.E., G.O. Barnet and L. Dextor, 1966: Relationship of heart sounds to acceleration of blood flow., *Circul. Res.*, 18: 303-315.
- Rowell, L.B., H.J. Marx, R.A. Bruece, R.D. Conn and F. Kusumi, 1966: Reductions in cardiac output, central blood volume and stroke volume with thermal stress in normal men during exercise., *J. Clin. Invest.*, 45: 1801-1816.
- Sakamoto, T., R. Kusukawa, D.M. MacCannon and A.A. Luisada, 1965: Hemodynamic determinant of the amplitude of the first heart sound., *Circul. Res.*, 16: 45-57.
- Shaver, L.A., F.W. Kroets, J.J. Leonard and H.W. Paley, 1986: The effects of steady-state increase in systemic arterial pressure on the duration of left ventricular ejection time., *J. Clin. Invest.*, 47: 217-230.
- Sonnenblic, E.H., E. Braunwald, J.F.Jr. Williams and G. Glick, 1965: Effects of exercise on myocardial force-velocity relation in intact unanesthetized man; Relative roles of changes in heart rate, sympathetic activity and ventricular dimensions., *J. Clin. Invest.*, 44: 2051-2062.
- Sugiura, T., T. Iwasaka, N. Takahashi, M. Matsunami, M. Inada and D.H. Sponck, 1987: Effect of exercise on ventricular diastolic time in artery disease., *Am. J. Cardiol.*, 59: 1089-1092.
- Wiggers, C.J., 1952: *Circulatory Dynamics.*, p57., Grune & Stratton in New York.
- Wiggers, C.J., 1952: Cardiac output, stroke volume and stroke work., in *Cardiology.*, Luisada, A.A., ed. vol. 1., part 2., p81., MacGraw-Hill in New York.
- Wolf, L.A., D.A. Cunningham, G.M. Davis and H. Rosenfeld, 1987: Relationship between maximal oxygen uptake and left ventricular function in exercise., *J. Appl. Physiol.*, 44: 44-49.
- 矢端幸夫, 野呂忠慈, 木川田隆一, 1987: 運動負荷時における非観血的指標の変化, *最新医学*, 33: 436-440.

(1988年11月30日受付)