

漸増負荷運動時の最大心拍数とその評価

—シャトルランの生理的運動強度はパフォーマンスに比例する—

Maximal heart rate during incremental exercise and the evaluation.

—Physiological exercise intensity during the shuttle run is proportional to the performance—

伊藤 智式 Tomonori Ito

(愛知学泉短期大学幼児教育学科)

抄 録

持久力のテストとして用いられるシャトルランテストは往復走の速度を増加していく漸増負荷運動であり、疲労困憊に至る最大運動にて運動が終了する。この時に呼吸循環機能の指標である心拍数(HR)は最大値に達すると思われる。この最大心拍数(HRmax)は持久力に影響されず、個人差が少ないことから、HRmaxを100%、安静時のHRを0%として、運動中のHRの割合を個々の生理的運動強度の指標として用いられてきた。そこで本研究では、シャトルラン運動中のHRを測定しその最大値と評価について検討した。実験は一般女子大学生74名を被験者としてシャトルランテストを実施した。この運動中のHRを光学式心拍センサーを装着して測定した。

その結果、シャトルランテストの折り返し回数は 43.2 ± 12.7 回、運動終了時間は5分26秒 \pm 1分23秒であり、この時のHRmaxは 192.8 ± 8.9 拍/分であった。そして、持久力を示すこのテストの折り返し回数とHRmaxとは正の相関関係が有意に認められた。つまり、持久力が低い者はHRmaxが低く、持久力が高い者はHRmaxが高い結果となった。したがって、最大運動時においては、持久力が低い者は高い者に比べ、循環機能を低いところまでしか発揮しない傾向にあることが示唆された。また、持久力が高い者は持久的最大努力の課題に対して、その能力を最大限に発揮できる傾向にあることが示唆された。言い換えれば、持久力の高い者は最後まで意欲的によく頑張る者である。このような運動実践の積み重ねが持久力の差として現れていくものと推測する。

キーワード

最大心拍数 maximal heart rate シャトルラン shuttle run 漸増負荷運動 incremental exercise

目 次

- 1 緒言
- 2 方法
- 3 結果
- 4 考察
- 5 まとめ

1 緒言

運動を開始し運動強度が増加すると新たなエネルギーが必要となる。この需要に対して、生体では呼吸循環機能が応答し、酸素摂取量を増大させ、有酸

素性エネルギーが供給される。短時間の運動であれば、酸素を使わずに無酸素性エネルギーの供給に頼ることもできる。また、高強度の運動においては有酸素エネルギーの供給だけでは補えず、無酸素性エネルギーが供給される。しかしながら、無酸素性エ

エネルギーは供給量に限界があり、乳酸の過度な蓄積により運動の継続が制限させる。したがって長時間の運動においては有酸素性エネルギーの供給割合が増大する。そして、高い強度の運動を継続させるためには有酸素性エネルギー供給のための高い酸素摂取能力が必要となる。故に、この最大値である最大酸素摂取量($\dot{V}O_2\max$)は持久力にとって重要な要素であり長距離走者の $\dot{V}O_2\max$ は必然的に高い。

尚、酸素摂取量($\dot{V}O_2$)は換気及び循環の指標において以下の式で表される。

[換気]

$$\begin{aligned} \text{酸素摂取量} &= \text{肺換気量} \times \text{酸素摂取率} \\ &= (\text{一回換気量} \times \text{呼吸数}) \times \\ &\quad (\text{吸気酸素濃度} - \text{呼気酸素濃度}) \end{aligned}$$

[循環]

$$\begin{aligned} \text{酸素摂取量} &= \text{心拍出量} \times \text{動静脈酸素較差} \\ &= (\text{一回拍出量} \times \text{心拍数}) \times \\ &\quad (\text{動脈血酸素含有量} - \text{静脈血酸素含有量}) \end{aligned}$$

運動強度の上昇に伴い、呼吸循環機能である換気量、呼吸数、心拍出量、心拍数などが増加する。それにより酸素摂取量は増加する。

この各項目の容量の個人差により、 $\dot{V}O_2\max$ に差が出てくる。しかしながら、最大心拍数(HRmax)においては年齢による差はあるものの個人差が少ないと言われている。すなわち、同年齢であれば持久力の高低に関係なく、ほぼ同じ HRmax となる。そして、HRmax の予測式には[220-年齢(bpm)]など、幾つかの式が使われている¹⁾²⁾⁶⁾⁸⁾。また、中強度以上の運動では1回拍出量に大きな変化がないことから¹²⁾、運動時の HR と $\dot{V}O_2$ には直線関係が認められており、最大下の運動中の HR と $\dot{V}O_2$ の回帰式から $\dot{V}O_2\max$ を推定することもできる¹⁰⁾。

これらのことから、HR は生理的運動強度の指標として活用することができる。これは、安静時の HR を 0%の運動強度、年齢から予測される HRmax を 100%の運動強度とするものである。有酸素運動のトレーニング処方においては、その何割かの強度を目標値として HR をモニターし、その強度に合わせて運動を実施する方法が多くのトレーニング施設で使われている。

このように、HR は各個人の生理的運動強度を測る上で有用であるが、その基準となる最大値の個人差についてはまだ十分に明らかとはなっていない。

また、最大限の運動課題に対して、その能力を全て発揮できるかの個人差についても検討の余地がある。

そこで本研究では、シャトルランを使った持久力テストの最大運動時における HRmax を実測し、その評価について検討した。

2 方法

2.1 被験者

被験者は一般女子大学生74名とし、その身体的特徴を Table 1 に示した。測定においては、被験者の体調に合わせて実施日を選択させて実施した。

Table 1. 被験者の身体的特徴. (n=74)

Age	(yr)	18.6 ± 0.55
Height	(cm)	156.7 ± 4.96
Weight	(kg)	52.7 ± 7.48

Values are means ± SD

2.2 測定方法

測定は、十分な準備運動の後にシャトルランテストを実施した。このテストは20mの両端に線を引き、その間の往復走を繰り返し行いながら、速度を漸増していくものである。この時、速度に合わせて電子音を一音ずつ鳴らし、最後の電子音が鳴るまでに20m先の線に達し足が線を越えるか触れたら向きを変え、往復走をくり返すものとした。また、早く線に到達した場合はそこで待機し、次の電子音が鳴った後に走り始めることとした。走速度のレベルは約1分毎に増加し、設定された速度を維持できなくなるまで運動を続けた。尚、折り返しの電子音に一度遅れても、次の回までに遅れを解消できれば、テストを継続するものとした。この最後の返し回数をこのテストの記録とした。また、テスト終了後は動作を止めることなく、動的なクーリングダウンを意識して実施させた。

このシャトルランテストの走速度及び繰り返し回数、距離、時間の様子を Fig. 1、Table 2 に示した。

このシャトルランテストは、漸増していく負荷強度に対して、継続できるところまで最大努力で運動を実施するものであり、全身持久力のテストと位置づけて実施した。

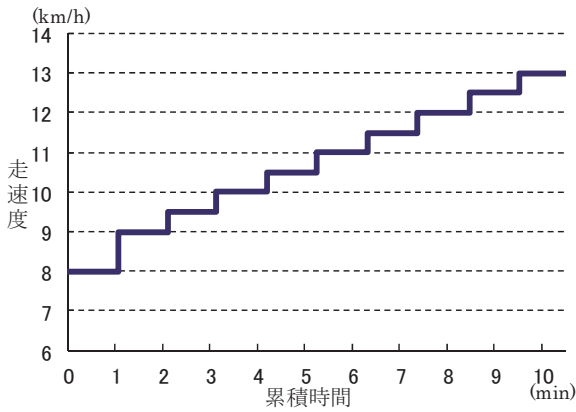


Fig. 1. シャトルランの走速度
(電子音に合わせて約 1 分毎に速度が速くなる)

レベル	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
速度(km/h)	8	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13
折り返し回数	7	8	8	9	9	10	10	11	11	11
累積回数	7	15	23	32	41	51	61	72	83	94
累積距離(m)	140	300	460	640	820	1020	1220	1440	1660	1880
累積時間(分秒)	1:03	2:07	3:08	4:12	5:14	6:20	7:22	8:28	9:31	10:32

レベル	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
速度(km/h)	13.5	14	14.5	15	15.5	16	16.5	17	17.5	18
折り返し回数	12	12	13	13	13	14	14	15	15	16
累積回数	106	118	131	144	157	171	185	200	215	231
累積距離(m)	2120	2360	2620	2880	3140	3420	3700	4000	4300	4620
累積時間(分秒)	11:36	12:38	13:43	14:45	15:46	16:49	17:50	18:53	19:55	20:59

そして、この運動中の HR は POLAR 社製光学式心拍センサー [Polar-OH1] を上腕に装着して測定した。

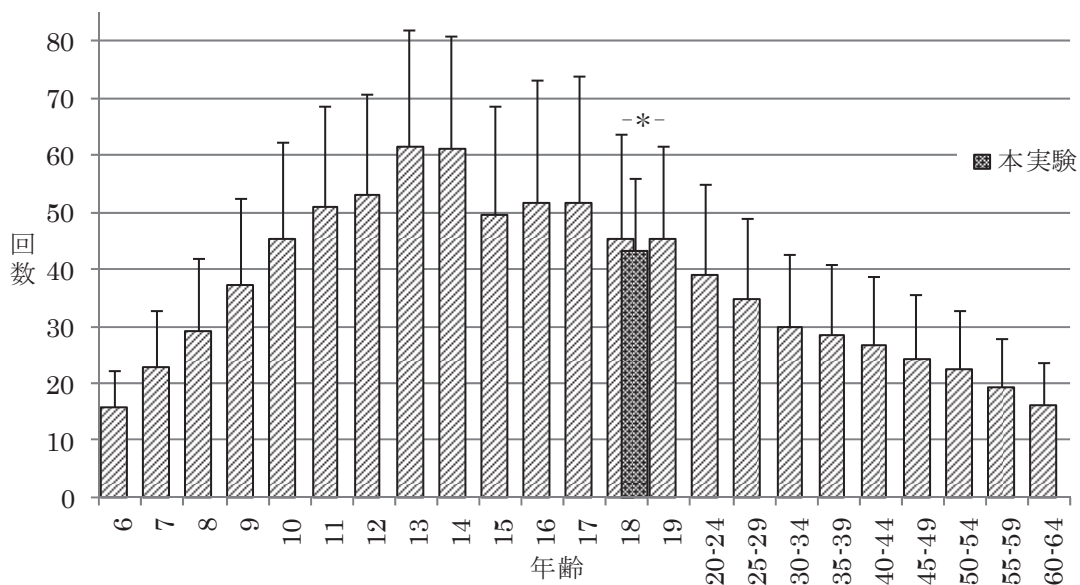


Fig. 2. シャトルランテスト・女子全国平均
(2017スポーツ庁調査結果資料より作図)

* : p < 0.05

この装置は 6 つの光学センサーを用いており、従来のセンサーに比べかなり精度の高いものであると思われる。しかしながら、不整脈などで正常でないと思われるような数値を記録したものは対象から除外した。

3 結果

シャトルランテストの得点である折り返し回数、スタートからテスト終了までの運動終了時間、運動時の最大心拍数(HRmax)の結果を Table 3 に示した。

Table 3. シャトルランの成績と最大心拍数

折り返し回数	43.2 ± 12.7
運動終了時間(min:sec)	5:26 ± 1:23
最大心拍数(bpm)	192.8 ± 8.9

Values are means ± SD

本実験でのシャトルランの平均値は 43.2 ± 12.7 回となり、スポーツ庁調査による全国平均値(18 才・45.6、19 才・45.3)に比べやや低い値となった¹⁷⁾。この女子年齢別平均値との比較を Fig. 2 に示した。このテストは、女子においては 13,14 才をピークとして加齢と共に減少傾向を示していた。

また、本実験でのシャトルランスタートからの運動終了時間は5分26秒±1分23秒であった。そして、この運動中の最大心拍数は192.8±8.9bpmであった。

一般に年齢からのHRmaxの予測値は[220-年齢]の式が広く用いられており、この式から予測される本実験被験者のHRmaxは18.6才-201.4bpmとなる。しかしながら、この他にも多くの予測式が提示されている。Tanakaら⁴⁾の女子の予測式[207.2-0.65×年齢]を使うと、195.1bpmとなる。Gulatiら²⁾の[206-0.88×年齢]では189.6bpmである。また、Robertら¹¹⁾の比較によると、[220-年齢]の式よりもInbarら⁵⁾が示した[205.8-0.685×年齢]の式が適切であると示唆しており、この式からの予測では193.1bpmとなり、本実験結果と近い値となった。村瀬ら¹⁵⁾の自転車エルゴメーターを用いた実験のHRmaxの測定では、予測式は成人男子[205-0.75×年齢]、成人女子[195-0.62×年齢]であり、女子の方がHRmaxは低い傾向にあると示唆しており、この予測値の女子183.5bpmに比べると本実験結果は高い値となった。

シャトルラン運動中のHRの経時変化の一例をFig. 3-1,2,3に示した。HRは、スタート直後にやや急激に立ち上がり、その後負荷強度の直線的な上昇にほぼ比例して増加し、運動終了時又はその直後を頂点として、回復していった。

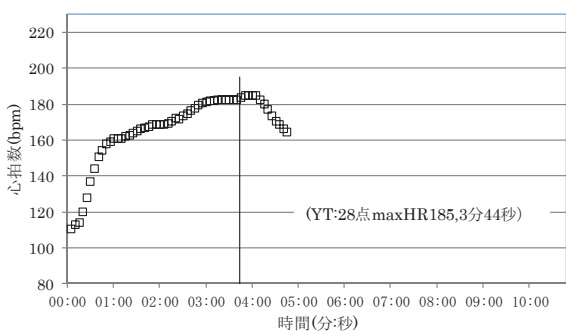


Fig. 3-1 運動中の心拍数経時変化の1例 (YT:28点maxHR185,3分44秒)

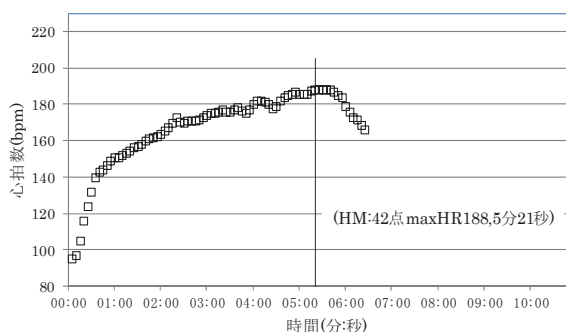


Fig. 3-2 運動中の心拍数経時変化の1例 (HM:42点maxHR188,5分21秒)

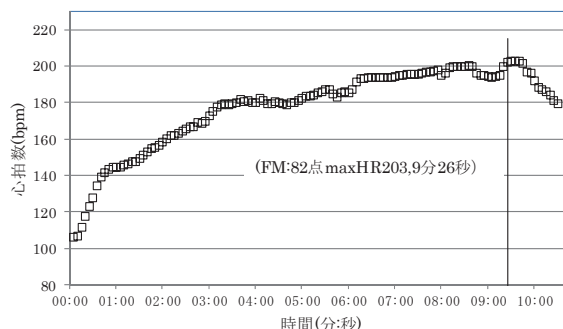


Fig. 3-3 運動中の心拍数経時変化の代表例 (FM:82点maxHR203,9分26秒で終了)

この運動時のHRの経時変化の平均値をFig. 4にまとめた。尚、運動開始時のHRは121.3±17.1bpmであり、この標準偏差17.1bpmは個人差の大きいものであった。これは運動開始時のHRは安静時の値を示すものではなく、スタート前の動的な準備状態の影響または心理的状态の個人差によりこのような値となったものと考えられる。

一方、HRmaxの標準偏差は8.9bpmであり、スタート時に比べ少ないものの個人差が認められた。HRmaxの予測式に集束するわけではなかった。このことは、予測式を示唆した幾つかの報告においても同様の傾向が見られている⁸⁾¹¹⁾。

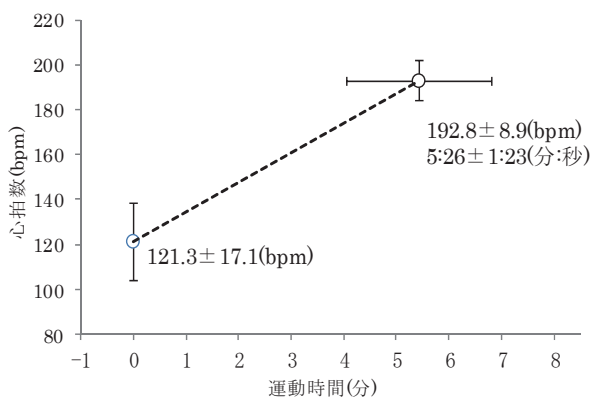


Fig. 4. スタート時の心拍数と運動時の最大心拍数の経時変化

次に、シャトルラン運動中のHRの経時変化について、その代表例を比較したものをFig. 5に示した。シャトルランテストの得点の低い者はHRが若干高めに進んでいくが、その増加曲線は類似した傾向にあった。この例で示したようにHRmaxの低い者は、あたかもHR上昇途中の低いところで運動が終了したように見受けられる例もあった。

そこで、シャトルラン得点とそのHRmaxとの関係をFig. 6に示した。この両者には正の相関関係が有意に認められた。すなわち、持久力が低い者はHRmaxが低く、持久力が高い者はHRmaxが高い傾向にあることが認められた。

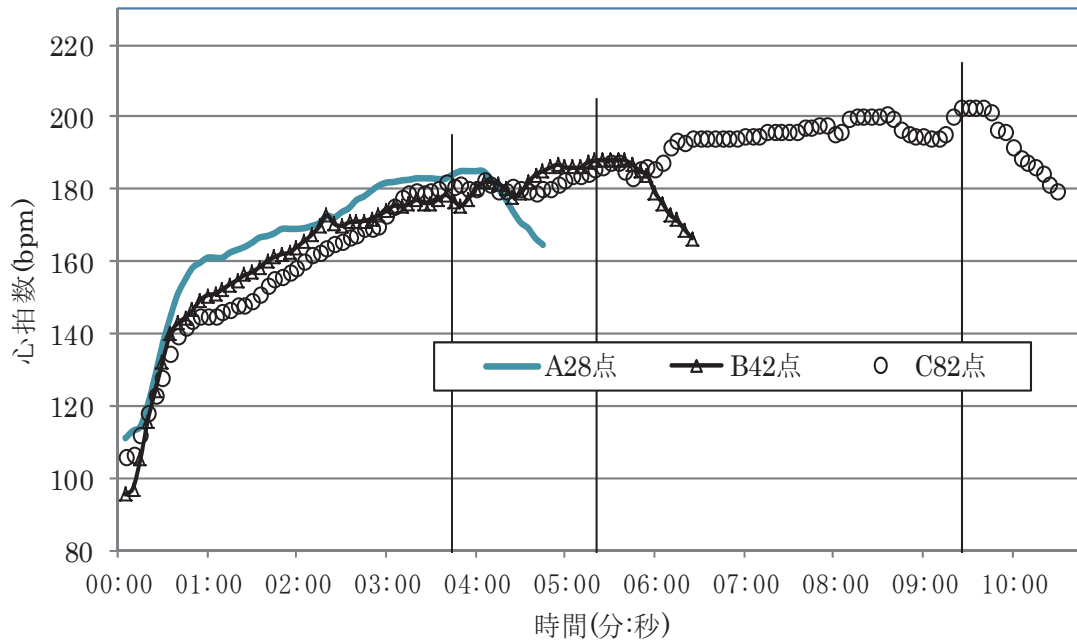


Fig. 5. 運動中の心拍数経時変化の代表例の比較
 (A: 28点maxHR185, 3分44秒、B: 42点maxHR185, 5分21秒、
 C: 82点maxHR203, 9分26秒で終了)

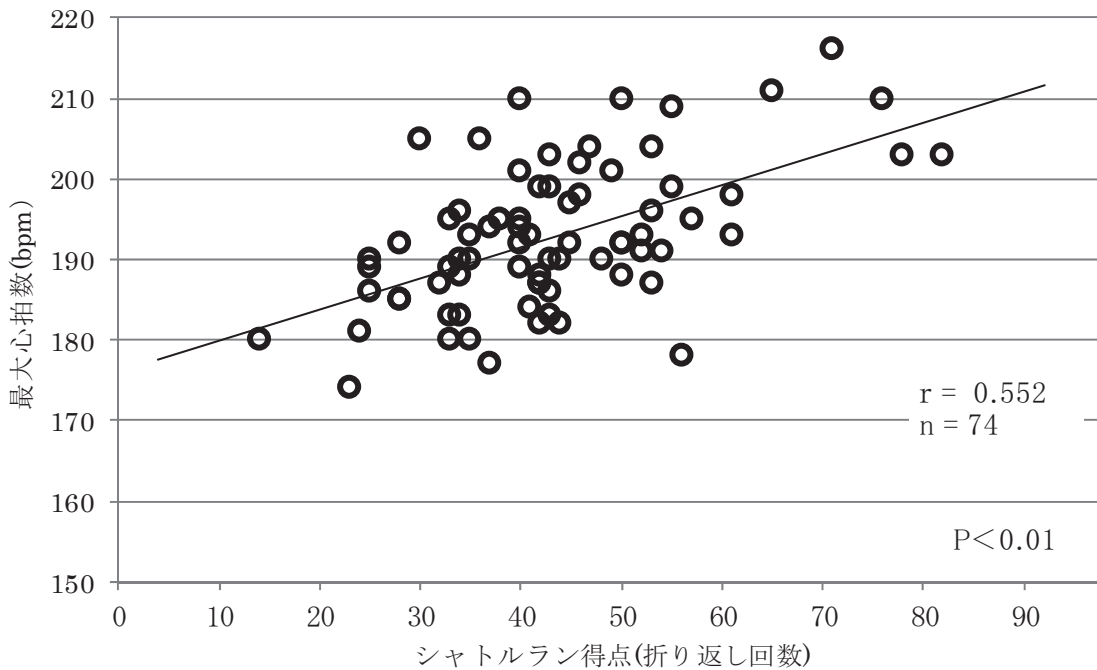


Fig. 6. シャトルラン得点と最大心拍数との関係
 シャトルラン得点と最大心拍数(HRmax)には
 正の相関関係が認められた。

4 考察

シャトルラン運動を終了する要因は以下のことが考えられる。第一に物理的に走速度が速すぎてついていけない可能性がある。このテストのレベル10にはどの被験者も到達していないが、この走速度は $13\text{km/h}=3.61\text{m/s}$ である。50m 走換算で 13.8s の速さになる。本実験での終了時の平均であるレベル6では同換算で 16.4s 。ターンの時間を考えても概ね短距離走でついていけない速さではない。

第二には運動時の酸素借が蓄積し、無酸素性エネルギーの上限により運動が終了する可能性がある。Fig. 7の上図に示したように、負荷強度による酸素需要量の上昇に酸素摂取量が追いついて行けず、 $\dot{V}O_2\text{max}$ や HRmax になる前に終了してしまう。酸素借測定時に負荷上昇の速いランブ負荷運動において、 $\dot{V}O_2\text{max}$ よりも低い $\dot{V}O_2$ の負荷強度で終了するという報告がある¹⁴⁾。この可能性については今後の検討課題である。

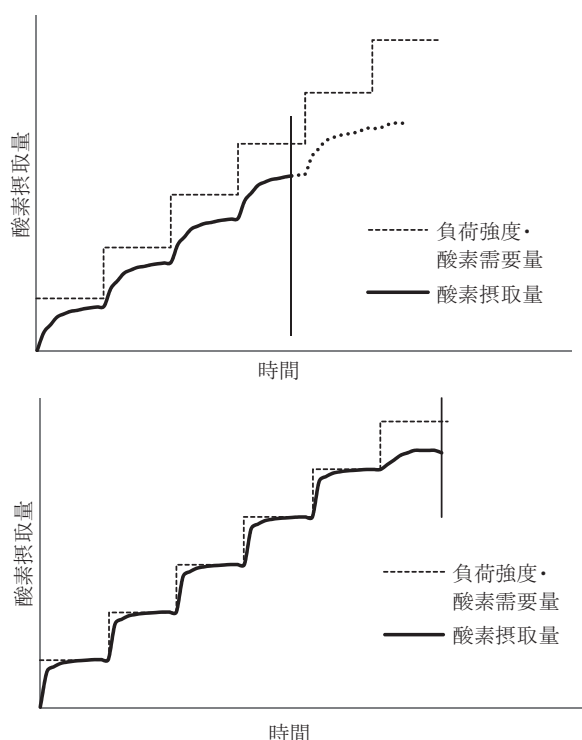


Fig. 7. 漸増負荷運動中の酸素摂取量の模式図
 上段: 酸素需要量と酸素摂取量の差である酸素借が蓄積し、運動が終了する。
 下段: 酸素摂取量のレベリングオフにより運動が終了する。

第三は Fig. 7 下図にあるように、 $\dot{V}O_2$ のレベリングオフに至る強度での $\dot{V}O_2\text{max}$ 及び HRmax 時の疲労困憊またはその後の酸素借限

界におよぶものであり、持久力のテストとしての意味をなすものである。

そして、第四に心理的要因で終了するものである。

一般に有酸素性能力の高いものは安静時の HR が低い傾向にあると言われている。これは心臓の一回拍出量が多さや、血中酸素の交換効率の良さにより、少ない HR でも安静時に見合う十分な酸素を供給できるからである。但しこれには換気に関わる呼吸機能とも関連している。

一方、 HRmax は加齢によって減少するものの個人差が少なく、一定値となると報告されている¹⁾²⁾³⁾⁵⁾⁶⁾⁸⁾¹¹⁾。

持久力が高い者が HRmax も高いわけではない。よって、最大努力を課す漸増負荷テストにおいては HRmax に差は出ないはずである。

ところが、本実験では、Fig. 6 に示したように、持久力が低い者は HRmax が低い傾向にあった。競技者間の比較では、 $\dot{V}O_2\text{max}$ の高い長距離走者は HRmax が中距離走者に比べて低い傾向にあるという報告もある¹⁶⁾。一般女子学生を対象とした本実験では逆の結果になった。

本来、個々に HRmax を測定しなくても、同年齢における同一の HRmax の推定値を使い、これを上限として安静値からの割合を $\% \text{HR}$ とし、生理的運動強度として活用してきた。

この考え方而言えば、本実験の結果は持久力の高い者は高い生理的運動強度、持久力の低い者は低い生理的運動強度で運動を終了したことになる。言い換えれば、持久力の低い者は 100% の能力を出さずに運動を終了したことになる。

つまり、個々の生理的運動強度において、持久力の高い者は限界ぎりぎりのところまで意欲的に頑張り、逆に持久力の低い者は、最後まで頑張らなかつたことになる。

漸増負荷方式の持久力テストでは、持久的最大努力の課題に対して、その能力を最大限に発揮するかしないかの心理的限界の差が影響すると考察する。

また、持久力が高い者は、与えられた課題に対していつでも最大限に力を発揮するモチベーションが高い。このような運動実践の積み重ねが持久力の差として現れていくものと推測する。

5 まとめ

- 一般女子大学生を対象として、速度を漸増していくシャトルラン運動を実施し、その最大心拍数(HRmax)とその評価について検討した。
- 運動時のHRmaxは 192.8 ± 8.9 bpmであった。また、シャトルラン得点とHRmaxには正の相関関係が有意に認められた。したがって、持久力の低い者は最大努力の課題において生理的運動強度の発揮は低い傾向にあった。
- 持久力が高い者はいつでも最大限に力を発揮する傾向があり、このような運動実践の積み重ねが持久力の差として現れていくものと推測された。

引用文献

- 1) B. M. Nes, I. Janszky, U. Wisløff, A. Støylen, T. Karlsen, (2013). Age - predicted maximal heart rate in healthy subjects: The HUNT Fitness Study. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 23(6) 697-704.
- 2) Gulati M1, Shaw LJ, Thisted RA, Black HR, Bairey Merz CN, Arnsdorf MF, (2010). Heart rate response to exercise stress testing in asymptomatic women: the st. James women take heart project. *Circulation* 122(2) 130-137.
- 3) Haruki Itoh, Ryuichi Ajisaka, Akira Koike, et al. (2013). Heart rate and blood pressure response to ramp exercise and exercise capacity in relation to age, gender, and mode of exercise in healthy population. *Journal of Cardiology* 61, 71-78.
- 4) Hirofumi Tanaka, Kevin D Monahan, Douglas R Seals, (2001). Age-predicted maximal heart rate revisited. *Journal of the American College of Cardiology*, 37(1) 153-156.
- 5) Inbar O, Oren A, Scheinowitz M, et al. (1994). Normal cardiopulmonary responses during incremental exercise in 20- to 70-yr-old men. *Med. Sci. Sports Exerc.* 26(5) 538-546.
- 6) Keiller D, Gordon D, (2018). Confirming Maximal Oxygen Uptake: Is Heart Rate the Answer? *Int. J. Sports Med.* 39(3)198-203.
- 7) Munch GD, Svendsen JH, Damsgaard R, et al. (2014). Maximal heart rate does not limit cardiovascular capacity in healthy humans: insight from right atrial pacing during maximal exercise. *The journal of Physiology* 592(2) 377-390.
- 8) Nikolaidis PT, (2015). Maximal heart rate in soccer players: measured versus age-predicted. *Biomed. J.* 38(1) 84-89.
- 9) Ozemek C, Whaley MH, Finch WH, Kaminsky LA, (2017). Maximal heart rate declines linearly with age independent of cardiorespiratory fitness levels. *Eur. J. Sport Sci.* 17(5) 563-570.
- 10) Per-Olof Astrand, Kaare Rodahl, (1976). *Test book of Work physiology.* 朝比奈和男、浅野勝巳訳「運動生理学」463-475.
- 11) Robert A. Robergs, Roberto Landwehr, (2002). The surprising history of the “HRmax=220-age” equation. *Journal of Exercise Physiology* 5(2) 1-10.
- 12) Vella CA, Robergs RA. (2005). A review of the stroke volume response to upright exercise in healthy subjects. *Br. J. Sports Med.* 39(4) 190-195.
- 13) 福田平、前川剛輝、小松裕、川原貴、松本晃裕 (2008). 「インピーダンス法による運動中の心拍出量の測定」、*体力科学* 57(3), 416.
- 14) 伊藤智式、小野隆、安田好文、高石鉄雄、宮村実晴 (1996). 「ランブ負荷運動を用いたアネロビックキャパシティ推定法の検討」、*体力科学* Vol.45 No.6,688.
- 15) 村瀬訓生、勝村俊仁、高宮朋子ら (2000). 「最高心拍数および最大酸素摂取量の性・年齢による変化」、*体力科学* Vol.49 No.6,835.
- 16) 佐伯徹郎、鍋倉賢治、高松薫 (1999). 「漸増負荷走テストにおける生理的応答からみた中距離走者と長距離走者の相違」、*体力科学* Vol.48 No.3, 385-392.
- 17) 総務省統計局 (2018,10). 「スポーツ庁、体力・運動能力調査」、平成 29 年度体力運動能力調査、政府統計 e-Stat.

(原稿受理年月日 2019年10月10日)