〔研究ノート〕

ランニング動作中の心拍・呼吸・運動リズム間での同期現象誘発と酸素摂取量

野村国彦
谷所慶
楠本秀忠
中尾美喜夫

要旨

移動動作のような周期的に繰り返される運動時には，心拍・呼吸・運動リズム間でリズムが整数比で一致する現象（同期現象）が数多く観察されている。しかし，これらリズム間での同期現象を誘発させた場合に，運動経済性が向上するのかどうかについては，不明な点が残されている。本研究は，同一運動強度でのランニング中に，リズムを強調した楽曲を用いて呼吸－運動リズム間で同期を誘発させる条件と脱同期させる条件で酸素摂取量を比較検討した。その結果，心拍・呼吸・運動リズム間で生じる同期は個人差があるものの酸素摂取量低減効果があることが示唆された。しかし，個人により同期を発生させる最適な走動作のテンポの速さや運動強度が異なると考えられ，同期の生じやすい条件には個人差があるものと考える。また，リラックスした状態で同期を生じさせることが運動経済性を向上させると考えられる。

１．緒　　言

ヒトに限らず四足動物も含め生活の中で移動動作は重要である。この移動動作は四肢がある一定範囲内で周期的に繰り返す運動で成り立っている。この運動中には，生理的指標である心臓の拍動や呼吸動作の吸息呼息が周期的に繰り返されており，これら生理的指標と四肢の運動が律動的に繰り返されることで移動が達成できる。周期的な心臓の拍動（心拍リズム），吸息呼息（呼吸リズム），足取りテンポ（運動リズム）のリズムは互いに独立に刻むのではなく，相互作用あるいは一方的な作用により，リズム間での同期が生じるとされている。運動生理学の分野では呼吸と運動のテンポが一致すること（LRS；locomotor-respiratory synchronization）はよく知られている（Bramble & Carrier, 1983；Bramble & Jenkins, 1993）。また，心拍－運動リズム間での同期現象（CLS；cardiac-locomotor synchronization）については，着地動作を伴うあるいは筋内圧が高くなる歩行やランニング中の方がよく観察される（Niizeki et al., 1993；Nomura et al., 2003, 2006）。さらに心拍リズムと呼吸リズムの関係においても呼吸性洞性不整脈（RSA；respiratory sinus arrhythmia）とは別に心拍－呼吸リズム間での同期現象が報告されている（Schäfer et al., 1999；Seidel

& Herzel, 1998；狩生ら，2009）。

それぞれの同期現象の報告は古くからあるが，いずれにおいても生理学的意義が不明確な部分が残されている。LRS においては同期発生時に酸素摂取量（$\dot{V}O_2$）が少なくなるとする報告（Bernasconi & Kohl, 1993；Garlando et al., 1985）と否定する報告（Rassler & Kohl, 1996；van Alphen & Duffin, 1994）がある。CLS に関しては，ランニング中の同期発生が $\dot{V}O_2$ を減少させるとの報告（Udo et al., 1990）はあるが，ケースが少なく一般化できるものではない。このような背景のもと，同期を誘発すれば運動経済性が高まるのかどうかはまだ不明確である。

本論文では，ランニング動作中に，ある程度随意的にコントロール可能な運動リズムと呼吸リズムを制御することで，LRS を誘発あるいは脱同期させる条件下において，運動経済性がどのように影響を受けるのかを明らかにすることを目的とした。そこで，ランニング動作時の心電図，呼吸流速，筋電図に基づき心拍リズム，呼吸リズム，運動リズムを算出し，其々のリズムの間での位相差および呼気ガスから酸素摂取量（$\dot{V}O_2$）を評価し，同期発生時と脱同期時での $\dot{V}O_2$ の違いを定量化することで検討を行った。

２．方　　法

被験者

男子大学生11名（平均年齢21歳，内１名は陸上競技部長距離部門所属）が被験者として参加した。被験者には事前に，心電図および筋電図計測に必要な電極の貼り付けのため，アルコールを含ませた脱脂綿で皮膚を擦ること，電極貼り付け位置の体毛が多い場合剃毛すること，運動中の呼気ガスを測るためマスクをつけた状態で30分以上トレッドミル上を走ることを伝え，実験途中で被験者にとって不都合が生じた場合はいかなる時でも被験者を辞退することが出来ることを伝えた上で，研究参加への承諾を得た。実験に参加したうちの一名については，運動強度が低い段階で心拍数が高かったため，途中で計測を中止した。

今回の実験では，心拍・呼吸・運動リズムの其々のリズムの間での同期を評価することが必要であったため，運動強度として30分以上のランニングが可能な160拍/分程度とした。それに伴い，走動作のテンポ（運動リズム）を160 bpm 程度に設定した。この運動リズムの制限にはエクサミュージックの楽曲を用いた。また，其々のリズムの間での同期および脱同期状態の違いを検討するために，呼吸の仕方に条件を与えるものと条件なしの自由呼吸の場合を設定した。

プロトコル

図１に実験の流れを示した。計測時間はトータル35分とした。その内訳は，最初９分間のステージを３分毎に分け，120，150，180 m/min と段階的に速度を上げた。計測開始９分以降15分までの６分間において，心拍数が155拍/分以上160拍/分以下になるように速度を調整した。心拍数は計測中連続してモニタした。計測開始後15分以降35分までを同一

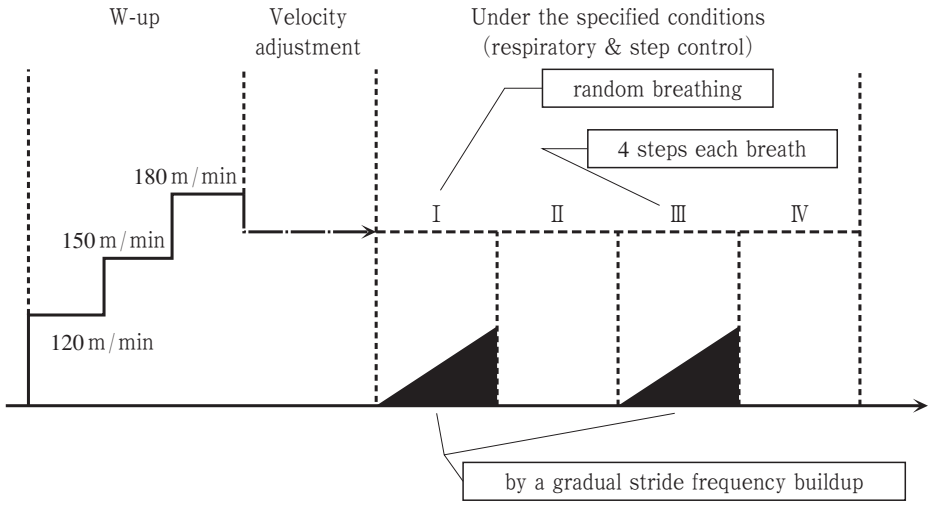

図1　実験プロトコル

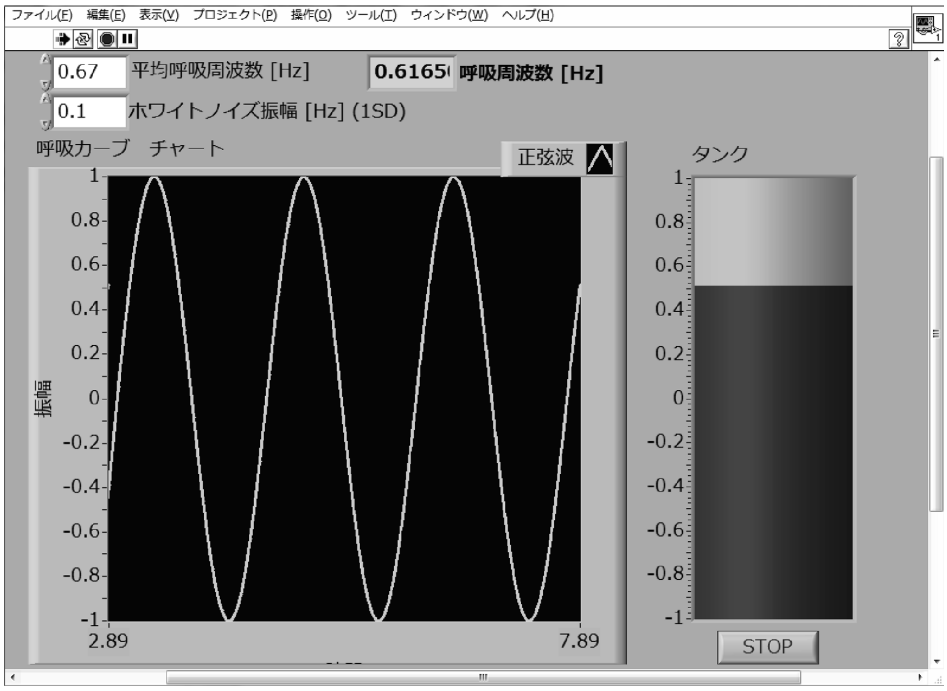

図2　ランダム呼吸制限時に被験者前方に提示した呼吸制限指示アプリケーション

速度でのランニングを行わせた。この20分間を5分毎の4ステージに分けた。最初のステージ（STAGE I）では，運動リズムを155 bpmから165 bpmまで直線的に漸増させる条件で，ビートを強調した歌詞抜きの音源に運動リズムを合わせるようにした。このステージでは，

同時に呼吸条件として呼吸周期が一呼吸毎にランダムに変化するようにさせた。このランダム呼吸条件では，前方目の高さにモニタを設置し，一回換気量が正弦波状に変化するよう上下に変化するタンクおよび正弦波波形を表示した（図２）。被験者には，そのスライダーの上下変化に合わせて吸気呼気してもらった。このとき平均呼吸周波数を0.67 Hz になるようにし，その平均値回りで標準偏差0.1 Hz になるよう正規乱数を用いてランダムに増減させた。次のステージでは，運動リズムおよび呼吸リズムに制限のない自由ランニングとした（STAGE II）。STAGE III では，運動リズムの条件を STAGE I と同様に，呼吸条件を４歩１呼吸になるようにした。このとき可能な限り，正弦波状に変化するよう滑らかな吸気呼気を心掛けてもらった。最後のステージ（STAGE IV）は STAGE II と同じ条件で行った。

計測および分析方法

本実験では，ランニング中の心拍，呼吸，運動リズムと酸素摂取量の変化を知る必要があった。そのため，心電図（ECG）および右外側広筋の筋電図（EMG）を生体アンプ（㈱デジテックス研究所，BA1104-CM）で増幅し，一呼吸毎の呼吸流速および $\dot{V}O_2$ のデータを呼気ガス分析器（AE-300S，MINATO 社製）よりアナログ信号として出力させ，これら信号を1000 Hz で A/D変換（ナショナルインスツルメンツ社製，USB-6211）して PC に取り込んだ。

ランニングのように律動的な運動時には，心拍，呼吸，そして脚の動きが周期的に繰り返される。それぞれ，心室の収縮開始を特徴づける R 波ピーク時点，呼吸動作の呼息から吸息に切り替わる時点（呼吸流速の正負が反転する吸気開始時点），ランニング中に繰り返される一方の脚の地面への着地に伴う外側広筋の筋放電開始時点を一周期の開始および終了時点とした。これら検出には自作のソフトにより行い，ECG からは R-R 間隔（RRI, R-R interval）を，呼吸流速からは吸気開始から次の吸気開始までの間隔（BRI, breath interval）を，右脚外側広筋の EMG からは筋放電開始から次の筋放電開始までの間隔（MCI, muscle construction interval）を算出した。

心拍，呼吸，運動の三つリズムから二つのリズム間での位相差を算出することで位相同期図（Nomura et al., 2003, 2006; Schäfer, 1998）をそれぞれの組み合わせにおいて求めた。位相同期図は二つのリズムの間で，位相差がある特定の位相で固定されるのかどうかを明確にすることが出来る。位相同期図では視覚的に明確化するが，定量的に同期の強さを表現できない。そこで位相同期指標 λ（Nomura et al., 2003; Stefanovska et al., 2000; Tass, et al., 1998）を求めた。位相同期が最も強いと位相差が固定され，位相同期図の中で表現される点が時間軸と平行に表現される。この場合は $\lambda=1$ となり，全く位相同期が生じていない場合（脱同期状態）は $\lambda=0$ となる。本研究では $\lambda>0.8$ を強い位相同期として判定した。

呼気ガスからは，心拍・呼吸・運動リズム間の同期状態と $\dot{V}O_2$ の変化を対応付けるため，breath-by-breath で得た $\dot{V}O_2$ データを10秒毎に平均して評価した。また，ステージ毎

の比較では各ステージに含まれる $\dot{V}O_2$ データの平均を用いた。

3．結果と議論

計測データを得ることが出来た10名の被験者のデータのうち，1名分については心電図および筋電図に含まれるノイズが多くデータ分析から除外した。以後，9名分のデータ分析についてまとめる。

心拍・呼吸・運動リズムの時間変化と位相同期図による解析

図3は，実験中に得られた心拍，呼吸，運動リズムの時間変化について，それぞれRRIから心拍数（HR, heart rate），BRIから呼吸間隔，MCIから足取り周期（GC, gait cycle）の時系列として，また三つのリズムに対してそれぞれの組の位相同期図を心拍－運動リズム間（$\Psi_{C\text{-}L}$），心拍－呼吸リズム間（$\Psi_{C\text{-}R}$），運動－呼吸リズム間（$\Psi_{L\text{-}R}$）として，ある一人の被験者の結果を示している。呼吸リズムは，STAGE IとSTAGE IIIとで大きな違いが見られないが，$\Psi_{L\text{-}R}$ においてSTAGE IIIの方では位相同期が観察される一方，STAGE Iの方では位相差のバラツキが大きいことが示されていた。これはランダム呼吸により運動－呼吸リズム間の同期を生じさせず，4歩1呼吸制限で運動－呼吸リズム間で同期（LRS）を生じさせる条件が達成されていることを示す。このように，呼吸条件を与えたことに対

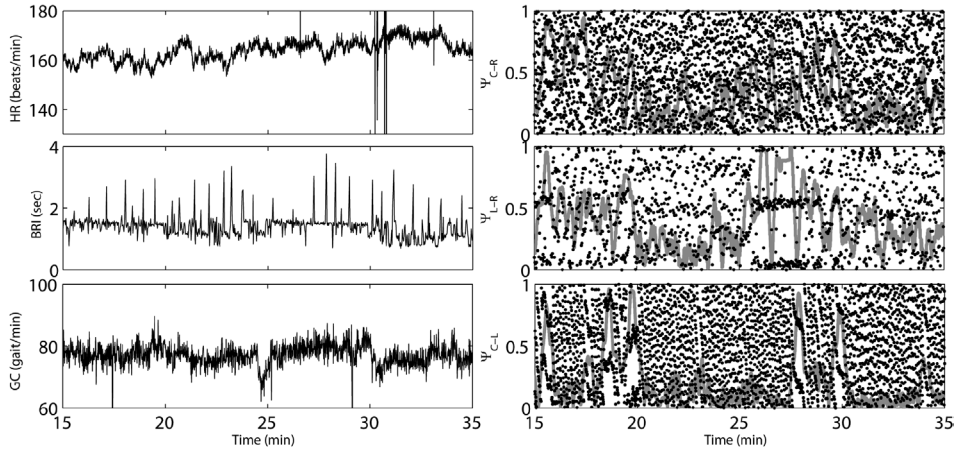

図3　心拍・呼吸・運動リズムの時系列とリズム間の位相同期図

各図は，左列最上段が心拍数，中段が呼吸間隔，最下段が足取り周期の時系列を，右列最上段が心拍－呼吸リズム間（$\Psi_{C\text{-}R}$），中段が呼吸－運動リズム間（$\Psi_{L\text{-}R}$），最下段が心拍－呼吸リズム間（$\Psi_{C\text{-}L}$）の位相同期図を示している。位相同期図内の灰色実線は位相同期指標（λ）の時間変化を示している。GC時系列においては，右脚の筋活動により評価したため，2ステップに付き1足取り周期として評価される。そのため160 bpmの場合80 gait/minと表現される。位相同期図内の・印（ドット）は位相差を表している。25－30分の $\Psi_{L\text{-}R}$ は時間軸に対して平行に点が並んでいることを示している。これが同期を表している。$\Psi_{C\text{-}L}$ においても，17.5－20分と27.5－30分辺りで点が平行に並んでおり，CLSが観察された。LRSはSTAGE IIIにおいて最も観察された。これは，与えられた条件を被験者が正確に行ったことを意味する。この被験者の場合，CRSは観察されなかった。

して，全被験者がクリアしていた。

もう１つの条件は，運動リズムを STAGE I と STAGE III において155 bpm から165 bpm に漸増させるものであった。足取り周期時系列からは，STAGE III において漸増している様子が見て取れるものの，STAGE I においては不明確であった。９名中３名がこのような状態であった。これは，被験者前方のモニタに提示されたタンクあるいは正弦波カーブの上下動に吸息呼息を合わせながら，これとは一致しない音楽のリズムに運動リズムを合わせること，すなわち呼吸と脚動作テンポを別のリズムに合わせるというタスクの難しさが表れたものと考える。これは単にヒトが２つの動作を別々のリズムで行うことが難しい上に，運動－呼吸リズム間では引き込みが起こることがこれまでの先行研究（Bramble & Carrier, 1983）でも示されていることから妥当な結果である。

また，本研究では心拍数を160 bpm 程度に設定予定であったが，運動時間が30分間以上と長く，多くの被験者において最後５～10分間は165 bpm 以上になった。

今回用いた運動リズムを制限するための刺激として歌詞を含まない楽曲を用いた。これはメトロノームのような単純なビープ音ではないため，被験者にとっては楽曲からリズムを抽出するというタスクを課すことにもなる。そのため，楽曲のリズムに合わせるというタスクは音楽に関する能力差を生じさせたのかもしれない。

ランニング中の心拍・呼吸・運動リズム間での同期と酸素摂取量

図４は，$\dot{V}O_2$ が呼吸制限区間で低いこと示している。計測開始後15－35分までの $\dot{V}O_2$ は，STAGE II と IV で山の頂点となり，STAGE I と III で谷となるような変化を示した。さらに STAGE III は呼吸制限により LRS が発生している。これらのことから，LRS が $\dot{V}O_2$ の低下と関係していることが考えられる。また，STAGE I においてはランダム呼吸を課していることから LRS はほとんど生じていない，一方で CLS が観察された。このことから，STAGE I における少ない $\dot{V}O_2$ は，CLS の結果の可能性が考えられる。

このような結果とは逆に，呼吸制限のある STAGE I および III で $\dot{V}O_2$ が高い被験者もいた（図５）。このことは呼吸制限によりランニングの効率を下げてしまった可能性が考えられる。すなわち，被験者にとっての最適な呼吸周期に合っていなかったと考える。特に，大学陸上競技者の場合，自らの走速度に対する運動リズムおよび呼吸リズムというものが確立されていると考えられ，今回のような選択の余地のない呼吸制限が加わると，運動経済性が低下してしまうのかもしれない。

STAGE I，II，III，IV と酸素摂取量

図６上図は，ステージ毎の全被験者からの $\dot{V}O_2$ 結果を示している。一名大学陸上部長距離を専門にする学生が含まれていたため，図の最大を示すバーが高い値を示した。この一名を除いた全被験者の走速度は143.8±24.0 m/min であったが，この被験者は235 m/min で他の被験者より高かった。また，一定負荷強度の長時間運動では，$\dot{V}O_2$ が漸増していくと考えることが妥当である。すなわち，ステージが上がるにつれて $\dot{V}O_2$ も増加する。

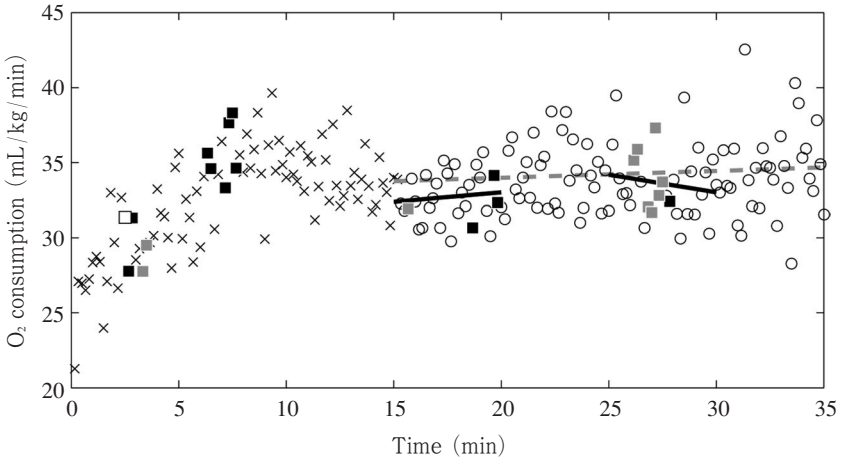

図４　心拍・呼吸・運動リズム間の同期と $\dot{V}O_2$ の時間変化

0−15分の $\dot{V}O_2$ は×印で，15−35分のそれは○印で表している。また LRS が発生しているときの $\dot{V}O_2$ を灰色の四角で，CLS 発生時の $\dot{V}O_2$ を黒四角，LRS および CLS が同時発生したときの $\dot{V}O_2$ を白抜き四角で表した。STAGE I および III においてどちらかの同期が発生しているときの方が STAGE II および IV での脱同期状態での $\dot{V}O_2$ よりも低いことが示されている。灰色破線は STAGE II および IV の $\dot{V}O_2$ 時間変化から求めた回帰直線である。実線は STAGE I および III それぞれの $\dot{V}O_2$ 時間変化から求めた回帰直線である。

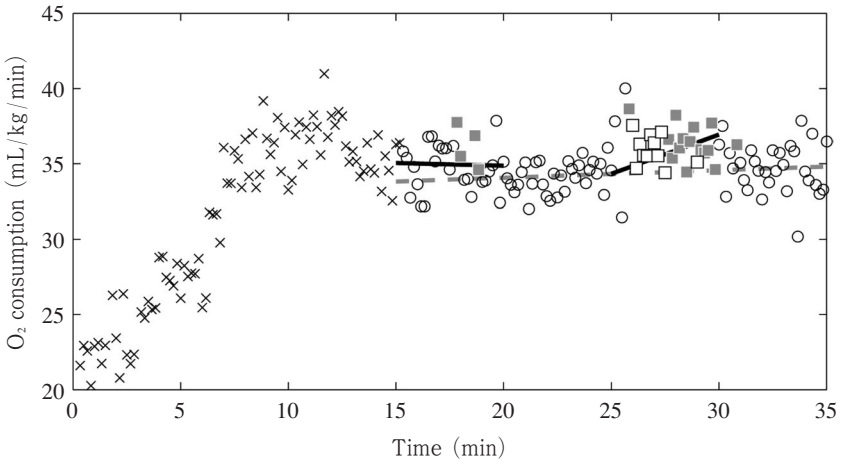

図５　呼吸制限により酸素摂取量が増加した被験者の例

本学陸上競技部長距離部門所属の学生被験者の結果。図の表示方法は図４と同じである。STAGE I および III において LRS が発生しており，STAGE II および IV では強い同期状態にはなく，今回の分析においては脱同期状態と判定された。

図６上図に示すように，ステージが上がるにつれて中央値は徐々に増加している。一方，STAGE II と IV の平均値を基準に STAGE I および III が低いグループと高いグループにわけて検討すると，図６下図のように，ステージが上がるにつれて酸素摂取量が増加する中

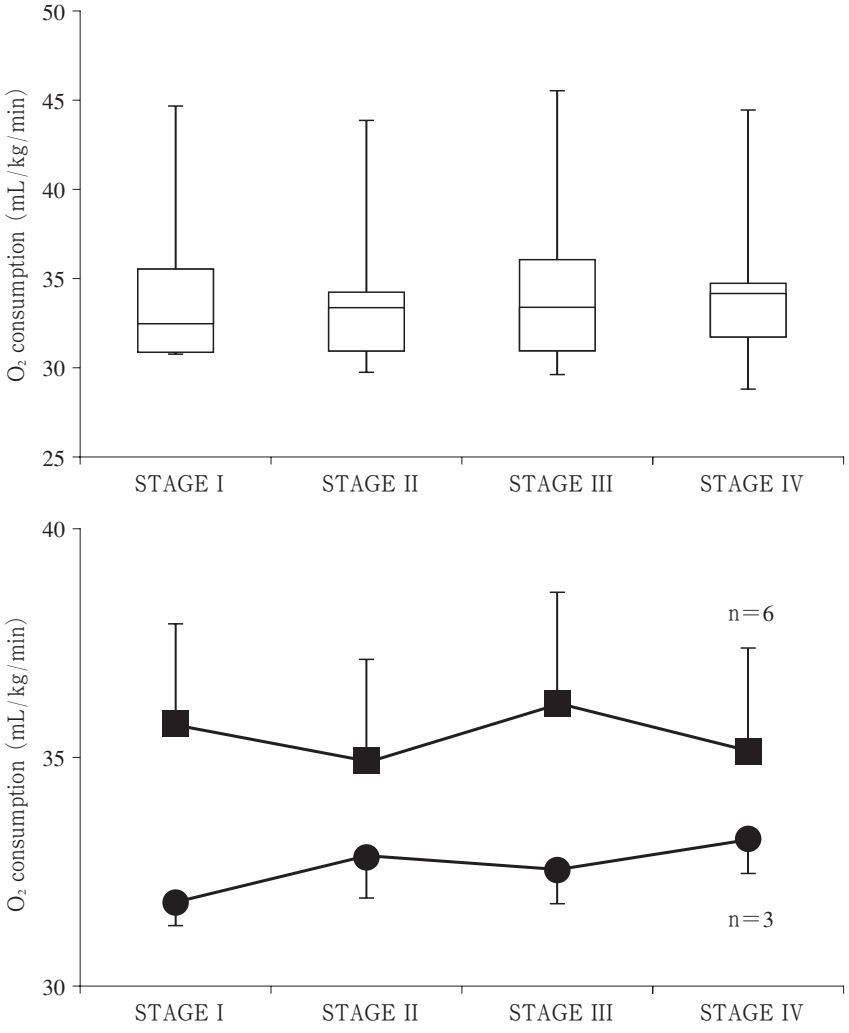

図6　各STAGEと酸素摂取量

上図はSTAGE毎に全被験者の $\dot{V}O_2$ を平均したものであり，下図は，STAGE IIとSTAGEIVの $\dot{V}O_2$ 平均値より，STAGE IおよびIIIの $\dot{V}O_2$ が低い者3名と（●）と高い者5名（■）で分けて，各グループで平均したものである。下図のエラーバーは標準誤差を意味する。

で，STAGE IIIの「4歩1呼吸」の呼吸制限時に $\dot{V}O_2$ が低くなる被験者が9名中3名いた。これは，LRSが生じやすいSTAGE IIIで $\dot{V}O_2$ が抑えられたことを示している。一方，今回，呼吸制限区間（STAGE IおよびIII）で $\dot{V}O_2$ が増加したグループは，STAGE IVにおいて，再度，STAGE IIと同程度の $\dot{V}O_2$ まで低下したことが認められた。このことは，呼吸制限がこのグループに属する被験者にとって必要以上に努力を強いられたものと考えられる。呼吸困難感は呼吸筋による酸素消費量の増加と関係している（Takano & Deguchi, 1997）ことから，本研究での被験者の多くは呼吸制限により呼吸筋による酸素消費量の

増加が全体の $\dot{V}O_2$ 増加を招いたと考えられる。これらのことから，LRS は強制的に発生させるものではなく，リラックスした状態で発生することが最も効果があるものと考える。すなわち，呼吸努力なしに LRS を生じさせると運動経済性は増すことが期待できる。

心拍・呼吸・運動リズム間での同期の種類と酸素摂取量

速度を一定にした区間（15－35分）において，LRS，CRS，CLS のいずれかの同期発生時の酸素摂取量を同期の種類に分けて検討した（図 7 ）。その結果，CLS 時の $\dot{V}O_2$ が最も低いことを示した。自律的に調整される心拍リズムと随意性の高い運動リズムとの間での同期は意図的に発生させることが困難である。すなわち，R 波に同期させたビープ音のようなものに足取りを合わさない限り，意図的に CLS を発生させることは出来ない。このことを考慮すると，努力したり意識したりすることがない状態で同期が発生すると，より運動経済性が向上することを示唆している。本実験で観察される CLRS は，呼吸制限による努力感が付随している可能性が含まれる。そのため，CLS 時の $\dot{V}O_2$ よりも高くなったと考えることは妥当かもしれない。先行研究では，CLS 発生時に $\dot{V}O_2$ が低下する可能性が示されている（Udo et al., 1990）。本研究の結果もこれを指示する結果となった。

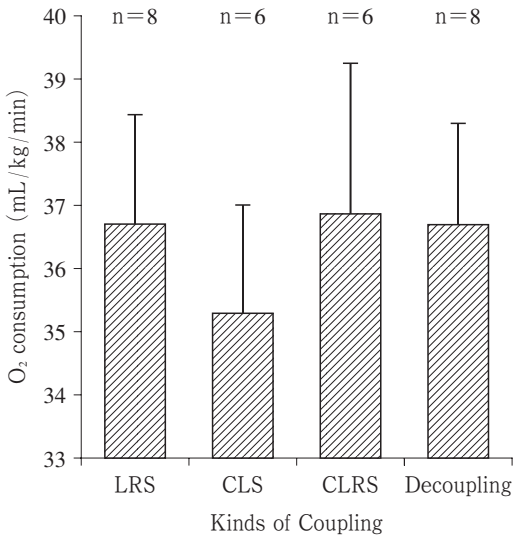

図 7　心拍・呼吸・運動リズムのそれぞれの組み合わせにおける同期と酸素摂取量

速度一定区間（15－35分）において，同期が生じているときの $\dot{V}O_2$ をそれぞれの組み合わせの同期に分けて求めた。LRS：呼吸－運動リズム間同期，CLS：心拍－運動リズム間同期，CLRS：LRS と CLS が同時に発生しているとき，Decoupling：脱同期状態。棒グラフの上に記載している n の値は速度一定区間で同期が発生した被験者数を意味している。エラーバーは標準誤差を意味する。

４．ま と め

心拍・呼吸・運動リズム間で生じる同期は以下の点から酸素摂取量低減効果があるものと考える。ただし，個人により同期を発生させる最適な走動作のテンポの速さや運動強度が異なると考えられ，同期の生じやすい条件には個人差があるものと考えられる。また，リラックスした状態で同期が生じることにより運動経済性は向上するものと考えられる。

ⅰ）今回設定した運動強度では，30分間のランニングで酸素摂取量が漸増した。しかし，呼吸制限により，同時に酸素摂取量の低下も確認した（図４および図６下の黒丸）。逆に，呼吸制限により酸素摂取量が増加したものもいた（図５および図６下の黒四角）。

ⅱ）LRS よりも，CLS の方が，酸素摂取量は低い結果となった（図７）。これは随意的には調整できない同期であり，このことは「意識しない」，「カップリングのために努力し過ぎない」ことが運動経済性を高めることを暗に意味していると考えられる。

謝辞

本研究は，株式会社エクシングからの受託研究終了後に発展させたものが一部含まれている。本研究を進めるきっかけを与えて下さった株式会社エクシングに深謝申し上げる。

参考文献

Bernasconi, P., & Kohl, J. (1993). Analysis of co-ordination between breathing and exercise rhythms in man. J Physiol (London). *471*, 693-706.

Bramble, D., & Carrier, D. (1983). Running and breathing in mammals. Science. *219*, 252-256.

Bramble, D., & Jenkins, F. (1993). Mammalian locomotor-respiratory interation: implications for diaphragmatic and pulmonary design. Science. *262*, 235-240.

Garlando, F., Kohl, J., Koller, E., & Pietsch, P. (1985). Effect of coupling the breathing- and cycling rhythms on oxygen uptake during bicycle ergometry. Eur J Appl Physiol. *54*, 497-501.

狩生咲，富田豊，牛場潤一．(2009)．心拍呼吸協調が肺ガス交換効率に及ぼす影響．電子情報通信学会技術研究報告．MBE，ME とバイオサイバネティックス．109（50），33-38.

Niizeki, K., Kawahara, K., & Miyamoto, Y. (1993). Interaction among cardiac, respiratory and locomotor rhythms during cariolocomotor synchronization. J Appl Physiol. *75*, 1815-182.

Nomura, K., Takei, Y., & Yanagida, Y. (2003). Comparison of cardio-locomotor synchronization during running and cycling. Eur J Appl Physiol. *89*, 221-229.

Nomura, K., Takei, Y., Yoshida, M., & Yanagida, Y. (2006). Phase-dependent chronotropic response of the heart during running in humans. Eur J Appl Physiol. *97*, 240-247.

Rassler, B., & Kohl, J. (1996). Analysis of coordination between breathing and walking rhythms in humans. Respir Physiol. *106*, 317-327.

Rosenblum, M., Kurths, J., Pikovsky, A., Schafer, C., Tass, P., & Abel, H. (1998). Synchronization in noisy systems and cardiorespiratory interaction. IEEE Eng Med Biol Mag. *17*, 46-53.

Schafer, C., Rosenblum, M., Abel, H., & Kurths, J. (1999). Synchronization in the human cariorespiratory system. Physical Rev E. *60*, 857-870.

Schafer, C., Rosenblum, M., Kurths, J., & Abel, H. (1998). Heartbeat synchronized with ventilation. Nature. *392*, 239-240.

Seidel, H., & Herzel, H. (1998). Analyzing entrainment of heartbeat and respiration with surrogates. IEEE Eng Med Biol Mag. *14*, 54-57.

Stefanovska, A., Haken, H., McClintock, P., Bajrovic, M., & Ribaric, S. (2000). Reversible transitions between synchronization states of the cardiorespiratory system. Physical Rev Lett. *81*, 3291-3294.

Takano, N., & Deguchi, H. (1997). Sensation of breathlessness and respiratory oxygen cost during cycle exercise with and without conscious entrainment of the breathing rhythm. Eur J Appl Physiol. *76*, 209-213.

Tass, P., Rosenblum, M., Weule, J., Kurths, J., Pikovsky, A., Volkmann, J., et al. (1998). Detection of n:m phase locking form noisy data: application to magnetoencephalography. Physical Rev Lett. *81*, 3291-3294.

Udo, M., Yoshida, T., Nakazumi, T., Kinugawa, K., & Watanabe, A. (1990). Occurrence of entrainment of heart beat into endurance running pitch and its significance in energy consumption. In M. Kaneko, *Fitness for the aged, disabled, and industrial worker* (Vol. 20, pp. 79-83). Human Kinetics Books.

van Alphen, J., & Duffin, J. (1994). Entrained breathing and oxygen consumption during treadmill walking. Can J Appl Physiol. *19*, 432-440.