

呼吸と体肢運動間の協調： 換気運動，胸部と腹部呼吸運動のダイナミクスの違い¹

高 瀬 弘 樹（信州大学）

Coordination of breathing and limb movement: Difference of dynamics of ventilation, rib cage and abdomen

Hiroki Takase (Shinshu University)

要 約

本論文では、高瀬・三嶋・春木（2004）の実験データを用い、呼吸運動の種類（部位）による呼吸—逆さ振り子運動間の相対位相のダイナミクスの違いについて新たに分析を行い、検討した。実験で計測された換気運動，胸部呼吸運動，腹部呼吸運動の3つの呼吸運動データから，「換気運動—逆さ振り子運動」，「胸部呼吸運動—逆さ振り子運動」，「腹部呼吸運動—逆さ振り子運動」の間の相対位相を比較したところ有意な差がみられたことから，換気運動，胸部呼吸運動，腹部呼吸運動は，それぞれ異なる運動特性を持つことが示唆された。腹部呼吸運動が他の2つの運動に比べて，逆さ振り子運動と相対位相が小さく抑えられていることから，腹部呼吸運動の固有な周波数が他の2つの運動より速いことが示された。また，胸部と腹部呼吸運動に比べ，換気運動と逆さ振り子運動間の相対位相の標準偏差が小さいことから，換気運動の下位系である胸部と腹部呼吸運動の揺らぎが相殺していることによって，換気運動は逆さ振り子運動との協調が安定していると推測された。

キーワード：協調，呼吸，胸部呼吸運動，腹部呼吸運動，調和性

問 題

高瀬・三嶋・春木（2004）は，呼吸と身体運動間の協調について検討するため，ダイナミカル・システム・アプローチ（Kelso, 1995; Kugler & Turvey, 1987; Turvey, 1990）の観点から，呼吸—逆さ振り子運動（Wrist Pendulum: WP）間の協調について2つの実験を行った。高瀬他（2004）の実験1で，呼吸運動とWPを1:1の周波数比で，かつ快適なテンポで同

¹ 本論文は，高瀬・三嶋・春木（2004）の実験2データについて，新たに追加分析を行い呼吸と体肢運動の協調について検討したものである。

期させたときの両運動間の位相関係、特に位相関係の収束について検討した結果、逆さ振り子を橈屈させる時に吸気し尺屈させる時に呼気するモード（RIUE[Radial flexion - Inspiration & Ulnar flexion - Expiration]モード、以下 RIUE モード）と、逆さ振り子を橈屈させる時に呼気し尺屈させる時に吸気するモード（UIRE [Ulnar flexion - Inspiration & Radial flexion - Expiration]モード、以下 UIRE モード）の、2つの安定的な位相モードが観察された。また、2つの位相モードとも、運動のテンポが速まると「呼吸—逆さ振り子運動」間位相のずれが大きくなることが示された。

高瀬他（2004）の実験2では、実験1で観察された2つの位相モード（RIUE, UIRE モード）を用いて、1）位相モード、2）呼吸—逆さ振り子運動間の固有周波数の差、3）運動のテンポ（振動周波数）、の3つの変数を独立操作したときの、呼吸（換気運動）—逆さ振り子運動の協調について検討した。その結果、運動のテンポが速くなったとき、意図的に行っていた逆さ振り子を橈屈させる時に呼気し尺屈させる時に吸気するモード（UIRE モード）から、意図していない、逆さ振り子を橈屈させる時に吸気し尺屈させる時に呼気するモード（RIUE モード）へと自発的にスイッチする相転移現象が観察された。そして、この相転移付近で $SD\phi$ （ ϕ は呼吸と逆さ振り子運動間の相対位相であり、 $SD\phi$ は相対位相の標準偏差である。 $SD\phi$ の増加は協調性の低下を示す）の揺らぎの増大（臨界揺らぎ）が認められた。これらの結果は、手や脚といった身体各部位間に働く協調原理を示す HKB（Haken, Kelso, & Bunz, 1985）方程式(1)に従うものであった。また、相転移や臨界揺らぎは、自己組織化系に特徴的に観察される現象であり、呼吸と身体運動（逆さ振り子運動）が自己組織的に制御されていることが示された。

$$\dot{\phi} = \Delta\omega - a\sin(\phi) - 2b\sin(2\phi) + \sqrt{Q}\xi \quad (1)$$

$\dot{\phi}$ は ϕ の変化率であり、また $\Delta\omega$ は問題とする振動子の固有周波数の差を表す（Kelso, DelColle, & Schöner, 1990）。 a と b は係数で、 b/a は振動周波数と反比例する。 ξ_t は下位系の活動から生じるガウシアン白色ノイズ過程で、強さ $Q>0$ の確率的力（stochastic force）として機能する（Schöner, Haken, & Kelso, 1986 によって加えられた）。

高瀬他（2004）で分析された呼吸は、換気量（換気運動）であった。一方、呼吸の重要な機能である換気運動は、主に肋間筋と横隔膜の運動によって行われる。肋間筋による胸郭の主に体軸に対して垂直方向への収縮・拡張と、体軸に対して平行方向への横隔膜の運動により、胸腔内の容積が変化しそれにともない圧力が変化する。その胸腔内圧の影響を受け肺が収縮・膨張し、空気の流入出が生じる。このとき肋間筋による胸郭の運動は、胸部の収縮・拡張として外部から観察可能である。また、横隔膜の運動は腹部の内臓の位置に影響を及ぼし、横隔膜が足方向に移動した場合、腹部は体軸に対して垂直方向に拡張し、横隔膜が頭方向に移動した場合は腹部は収縮する。つまり、横隔膜の運動は、腹部の収縮・拡張という形で観察可能である。このように空気の流入出という換気運動は、胸部と腹部の収縮・拡張運動といった下位系から構成されているといえる。

本論文では、高瀬他（2004）の実験2の胸部（Rib Cage: RC）と腹部（Abdomen: Ab）の呼吸運動データを分析し、WP-RC 間、WP-Ab 間の協調（相対位相のダイナミクス）と、

WP-VT 間の協調を比較することで、呼吸運動の種類（部位）が呼吸—逆さ振り子運動間の協調に対して如何に影響を及ぼすかについて検討する。

方 法

実験計画 位相モード（RIUE, UIRE）×振り子（SHORT, MEDIUM, LONG）×振動周波数（1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 Hz）の $2 \times 3 \times 6$ の参加者内計画であった。

実験参加者 大学生 9 名（男性 4 名、女性 5 名）。全員右手利きであり、呼吸器官と運動器官に障害はなかった。

装置と材料 参加者に振らせる逆さ振り子は 3 種類（25.0 cm, 104 g [以下 SHORT]；37.5 cm, 139 g [以下 MEDIUM]；50.0 cm, 178 g [以下 LONG]）。それぞれの WP の固有周波数は、体重が 60 kg の人の場合、順に 1.516, 1.200, 0.970 Hz である。計算の原理と方法等詳細は Kugler & Turvey, 1987 参照）で、それらはすべて直径 1.2 cm のアルミ製の棒と、柄となる直径 2.5 cm 長さ 12 cm の木製の円筒から組み立てられた。試行中、参加者から逆さ振り子棒が見えないようにするため、黒い布で遮蔽した。呼吸運動については、レスピトレース（Ambulatory Monitoring Inc.）による胸部と腹部の収縮・拡張運動（それぞれ RC, Ab）の測定と、フェイスマスクを取り付けた呼吸流量計（METABO 社）による呼吸流速の測定を行った。逆さ振り子を振る手首の橈屈・尺屈運動はゴニオメータ（Penny & Giles 社）によって測定された。呼吸流速、RC, Ab と WP の各データと、提示されたパルス音はすべて DAT データレコーダ（RD-135T, TEAC 社）によって記録され、実験終了後に PC に接続した A/D 変換ボード（National Instruments 社, NB-MIO-16L）を使って、サンプリング周波数 200 Hz で A/D 変換された。参加者による WP と呼吸運動の振動周波数を操作するため、PC に接続された外部スピーカから周期的なパルス音が出力された。一試行中のパルス音は、1.0 Hz から 2.0 Hz まで、0.2 Hz ステップの計 6 振動周波数が連続した状態で構成された。各振動周波数の持続時間は 5 秒間であった。各試行で最初に提示される 1.0 Hz のパルス音に対して参加者が呼吸運動と WP をすぐに合わせられるようにするため、各試行を行う前に 1.0 Hz のパルス音を約 10 秒間提示し、参加者に練習するように教示した。

手続き 参加者は、3 種類の逆さ振り子の 1 つを振る運動（WP）と呼吸運動を、RIUE または UIRE のどちらかの位相モードで、パルス音と同じ振動周波数で協調させるように求められた。逆さ振り子を右手に持ち、矢状面（sagittal plane）に平行になるように振ること、手首関節を支点にして強弱をつけずに滑らかに振ること、が教示された。参加者が指示通りに WP を行えるようになるまで、各試行の前に数回の練習試行を設けた。また、いくつかの課題では協調パターンを維持することが困難なものもあると教示され、また求められた協調パターンが試行の途中で遂行できなくなった場合には、その時点での振動周波数と位相モードでその試行を再開するように教示された。このような教示は、ある協調パターン時の定常的な協調の振る舞いを調べる協調実験において、特定の種類の協調課題を遂行しているときに、参加者がその課題の協調パターンを崩し意図的にそのパターンを変化させるという可能性を排除するために行われた。参加者は、1 試行 30 秒間（6 振動周波数×5 秒間）の 6 通りの課題（位相モード×振り子）を 3 セット、合計 18 試行行った。課題の順序は各セット内

でランダム化された。

データ分析 呼吸流速, RC と Ab, WP の時系列データは, 三角移動平均法 (前後 2 点, 合計 5 点の平均) によって平滑化された。呼吸流速データを積分した VT 及び RC, Ab は, FIR フィルターを用いてそれらの低周波成分 (0.5 Hz 以下) を除去した。各運動の振動周波数の時系列 (f_n) は, 各時系列のピーク時点を検出した後, 以下の式(2)によって算出した。

$$f_n = 1 / (\text{time of peak extension}_{n+1} - \text{time of peak extension}_n) \quad (2)$$

この振動周波数の時系列からその平均値を算出し, 各試行におけるそれぞれの運動の振動周波数とした。WP と VT の位相変位間の相対位相 ϕ_{VT-WP} の時系列データが以下の手順で算出された。まず WP と VT の位相角度 (それぞれ θ_{WP} , θ_{VT}) が, 1 秒間に 200 個のデータを元に計算された。運動 i (i : WP, VT) の j 番目の位相角度 θ_{ij} は以下の式(3)で算出された。

$$\theta_{ij} = \arctan(\dot{x}_{ij}/\Delta x_{ij}) \quad (3)$$

\dot{x}_{ij} は WP または VT の速度時系列データの j 番目をその試行時の角周波数の平均値で割った数値, Δx_{ij} は WP または VT の時系列データの j 番目からその試行時の平均値を減算した数値である。WP と VT 間の ϕ の時系列 $\phi_{WP-VTj} = \theta_{WPj} - \theta_{VTj}$ から, 各振動周波数持続期間の ϕ_{WP-VT} の平均値 ($mean\phi_{WP-VT}$) と標準偏差 ($SD\phi_{WP-VT}$) をそれぞれ算出した。上記と同様に, 各振動周波数持続期間の RC 及び Ab の振動周波数, WP-RC 及び WP-Ab 間の相対位相の平均値 ($mean\phi_{WP-RC}$, $mean\phi_{WP-Ab}$) と標準偏差 ($SD\phi_{WP-RC}$, $SD\phi_{WP-Ab}$) をそれぞれ算出した。振動周波数を増加させることによって生じた瞬間的な相対位相を除去するために, 各振動周波数持続期間の最初と最後のそれぞれ 0.5 秒間のデータは, ϕ_{WP-VT} , ϕ_{WP-RC} , ϕ_{WP-Ab} の計算に含めなかった。

また ϕ_{WP-VT} , ϕ_{WP-RC} , ϕ_{WP-Ab} について, その時系列の視認から, 全参加者の試行 (2 [位相モード] \times 3 [振り子] \times 3 [セット数] \times 9 [参加者数] = 162 試行) の各振動周波数 (162 試行 \times 6 振動周波数 = 972 振動周波数) を, Schmidt, Bienvenu, Fitzpatrick, & Amazeen (1998) の分類法を参考に, ϕ_{WP-VT} , ϕ_{WP-RC} , ϕ_{WP-Ab} がある一定の平均値で安定している状態である「安定」と, それ以外の状態である「不安定」に分類した。本研究では, 安定的な ϕ_{WP-VT} , ϕ_{WP-RC} , ϕ_{WP-Ab} について, 統計的分析を行った。

結 果

振動周波数

WP, VT, RC, Ab の振動周波数について, 2 (位相モード) \times 3 (振り子) \times 6 (振動周波数) の 3 要因分散分析を行った結果, それぞれ振動周波数の要因についてのみ主効果が有意であり (順に $F(5, 40)=5734.59$, $p<.001$, $F(5, 40)=5863.33$, $p<.001$, $F(5, 40)=352.01$, $p<.001$, $F(5, 40)=3401.56$, $p<.001$), 参加者が教示された振動周波数を実際に達成していることが確認された。

Mean ϕ

意図した位相モードの相対位相（RIUE は $\phi = 0$ 、UIRE は $\phi = \pi$ ）と実験で達成された相対位相とが平均的にどの程度逸脱しているかについて、それぞれ RIUE と UIRE で比較を行うために、相対位相の値から意図した相対位相の値を減算し（RIUE は $\phi - 0$ 、UIRE は $\phi - \pi$ ）、 $mean\phi$ （それぞれ $mean\phi_{WP-VT}$ 、 $mean\phi_{WP-RC}$ 、 $mean\phi_{WP-Ab}$ ）とした。 $Mean\phi$ は意図した位相モードからの相対位相の逸脱の平均の指標となる。

Mean ϕ_{WP-VT} $Mean\phi_{WP-VT}$ について、2（位相モード） \times 3（振り子） \times 6（振動周波数）の 3 要因分散分析を行った結果、振り子の要因の主効果が有意であり（ $F(2, 16)=18.63, p<.001$ ）、 $mean\phi_{WP-VT}$ は「SHORT・MEDIUM>LONG」であることが示された。また、振り子と振動周波数の要因間の有意な交互作用がみられ（ $F(10, 80)=5.46, p<.001$ ）、1.2-1.8 Hz では $mean\phi_{WP-VT}$ が「SHORT・MEDIUM>LONG」、2.0 Hz では「SHORT>MEDIUM>LONG」であることが示された。また、SHORT 使用時の $mean\phi_{WP-VT}$ は「1.0<1.6-2.0 Hz」及び「1.2-1.4<2.0 Hz」であった（Figure 1a, b）。

Mean ϕ_{WP-RC} $Mean\phi_{WP-RC}$ について 3 要因分散分析を行った結果、振り子の要因の主効果が有意であり（ $F(2, 16)=19.76, p<.001$ ）、 $mean\phi_{WP-RC}$ は「SHORT・MEDIUM>LONG」であることが示された。また、振り子と振動周波数の要因間の有意な交互作用がみられた（ $F(10, 80)=5.13, p<.001$ ）。1.0-1.8 Hz では $mean\phi_{WP-RC}$ が「SHORT・MEDIUM>LONG」、2.0 Hz では $mean\phi_{WP-RC}$ が「SHORT>MEDIUM>LONG」であることが示された。また、LONG 使用時の $mean\phi_{WP-RC}$ は「1.0-1.4>1.8-2.0 Hz」であった（Figure 1c, d）。

Mean ϕ_{WP-Ab} $Mean\phi_{WP-Ab}$ について 3 要因分散分析を行った結果、振り子の要因の主効果が有意であり（ $F(2, 16)=15.99, p<.001$ ）、 $mean\phi_{WP-Ab}$ は「SHORT・MEDIUM>LONG」であることが示された。振動周波数による要因の主効果も有意であり（ $F(5, 40)=7.67, p<.001$ ）、 $mean\phi_{WP-Ab}$ は「1.0-1.6>1.8-2.0 Hz」であった。また、振り子と振動周波数の要因間に有意な交互作用が認められ（ $F(10, 80)=3.92, p<.001$ ）、1.0 Hz では $mean\phi_{WP-Ab}$ が「SHORT>MEDIUM・LONG」、1.2-1.8 Hz では $mean\phi_{WP-Ab}$ が「SHORT・MEDIUM>LONG」、2.0 Hz では $mean\phi_{WP-Ab}$ が「SHORT>MEDIUM>LONG」であることが示された。また、SHORT 使用時の $mean\phi_{WP-Ab}$ は「1.0>1.8-2.0 Hz」及び「1.2>2.0 Hz」、MEDIUM 使用時の $mean\phi_{WP-Ab}$ は「1.0-1.2>1.8-2.0 Hz」及び「1.4-1.6>2.0 Hz」、LONG 使用時の $mean\phi_{WP-Ab}$ は「1.0-1.4>1.8-2.0 Hz」及び「1.0>1.4-1.6 Hz」であった（Figure 1e, f）。

SD ϕ

$Mean\phi$ と同様に、VT, RC, Ab の各々と WP の間の各 $SD\phi$ （順に $SD\phi_{WP-VT}$ 、 $SD\phi_{WP-RC}$ 、 $SD\phi_{WP-Ab}$ ）について、2（位相モード） \times 3（振り子） \times 6（振動周波数）の 3 要因分散分析を行った。

SD ϕ_{WP-VT} $SD\phi_{WP-VT}$ について、3 要因分散分析を行った結果、位相モードによる要因の主効果が有意であり（ $F(1, 8)=8.94, p<.05$ ）、「RIUE<UIRE」であることが示された。振動周波数による要因の主効果も有意であり（ $F(5, 40)=16.22, p<.001$ ）、「1.0-1.4<1.6<1.8<2.0 Hz」で、 $SD\phi_{WP-VT}$ は振動周波数の増加とともに大きくなることが示された。また、位相モードと振動周波数間に有意な交互作用が認められ（ $F(5, 40)=5.02, p<.001$ ）、1.6-2.0 Hz で、 $SD\phi_{WP-VT}$ は

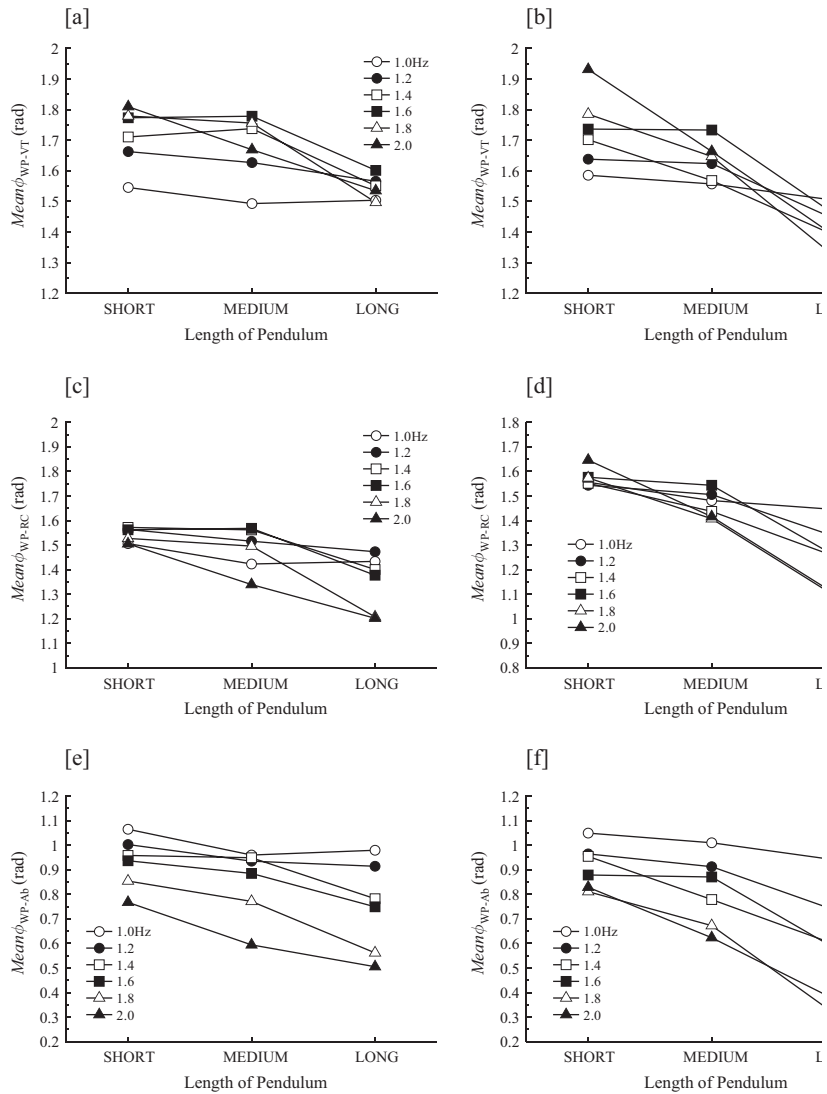


Figure 1. 振動周波数と振り子の種類に応じて変化する, WP-VT (a, b), WP-RC (c, d), WP-Ab (e, f) 間の意図した相対位相からの逸脱。左側は RIUE モード (a, c, e), 右側は UIRE モード (b, d, f) の意図した相対位相からの逸脱である。

「RIUE<UIRE」であることが示された。また, $SD\phi_{WP-VT}$ は, RIUE では「1.0-1.6<1.8<2.0 Hz」, UIRE では「1.0-1.4<1.8<2.0 Hz」及び「1.6<2.0 Hz」であった (Figure 2a)。

$SD\phi_{WP-RC}$ $SD\phi_{WP-RC}$ について 3 要因分散分析を行った結果, $SD\phi_{WP-RC}$ と同様に, 位相モードによる要因の主効果が有意であり ($F(1,8)=11.64, p<.01$), UIRE モードと比べて RIUE モードの $SD\phi_{WP-RC}$ が大きいことが示された。振動周波数による要因の主効果も有意であり ($F(5,40)=18.41, p<.001$), $SD\phi_{WP-RC}$ は「1.0-1.4<1.6<1.8<2.0 Hz」で振動周波数の増加とともに大きくなることが示された。また, 位相モードと振動周波数間に有意な交互作用が認められた ($F(5,40)=5.74, p<.001$)。1.6-2.0 Hz で, UIRE モードの $SD\phi_{WP-RC}$ が RIUE モードのそれより

も大きいことが示された。また、 $SD\phi_{WP-RC}$ は、RIUE では「1.0-1.6<1.8<2.0 Hz」、UIRE では「1.0-1.4<1.8<2.0 Hz」及び「1.6<2.0 Hz」であった (Figure 2b)。

$SD\phi_{WP-Ab}$ $SD\phi_{WP-Ab}$ について 3 要因分散分析を行った結果、位相モードによる要因の主効果に有意な傾向 ($F(1,8)=3.58, p<.10$)、振動周波数による要因の主効果に有意な差が認められた ($F(5,40)=17.56, p<.001$)。UIRE モードと比べて RIUE モードの $SD\phi_{WP-Ab}$ が大きい傾向があり、また、振動周波数の増加とともに $SD\phi_{WP-Ab}$ は大きくなること (「1.0-1.6<1.8<2.0 Hz」) が示された。位相モードと振動周波数間に有意な交互作用が認められた ($F(5,40)=5.71, p<.001$)。1.6-2.0 Hz で、UIRE の $SD\phi_{WP-Ab}$ が RIUE モードのそれよりも大きいことが示された。また、 $SD\phi_{WP-Ab}$ は、RIUE では「1.0-1.6<2.0 Hz」、UIRE モードでは「1.0-1.4<1.8<2.0 Hz」及び「1.6<2.0 Hz」であった (Figure 2c)。

呼吸運動の種類の違いによる呼吸—逆さ振り子運動間の位相特性の違い

Figure 1 及び Figure 2 をみると、呼吸運動の種類 (VT, RC, Ab) によって $mean\phi$ 及び $SD\phi$ の値に差がみられる。そこで、 $mean\phi$ 及び $SD\phi$ について呼吸運動の種類 (VT, RC, Ab) と各要因 (位相モード、振り子、振動周波数) を含めた 4 要因の分散分析を行った。

まず $mean\phi$ について、3 (呼吸運動の種類) \times 2 (位相モード) \times 3 (振り子) \times 6 (振動周波数) の 4 要因分散分析を行った結果、呼吸運動の種類による要因に関する有意差として、呼吸運動の種類の主効果 ($F(1,8)=66.38, p<.001$)、呼吸運動の種類と振動周波数間の交互作用 ($F(2,80)=36.23, p<.001$) がそれぞれ認められた。上記のそれぞれの呼吸運動の種類に関する $mean\phi$ の結果との重複を避けて記述すると、1.0-1.2 Hz で「 $mean\phi_{WP-VT} \cdot mean\phi_{WP-RC} > mean\phi_{WP-Ab}$ 」, 1.4-2.0 Hz で「 $mean\phi_{WP-VT} > mean\phi_{WP-RC} > mean\phi_{WP-Ab}$ 」であった。

同様に、 $SD\phi$ について、3 (呼吸運動の種類) \times 2 (位相モード) \times 3 (振り子) \times 6 (振動周波数) の 4 要因分散分析を行った。その結果、呼吸運動の種類による要因に関する有意差として、呼吸運動の種類の主効果 ($F(1,8)=19.33, p<.001$)、呼吸運動の種類と位相モード間の交互作用 ($F(2,10)=7.07, p<.01$)、呼吸運動の種類と振動周波数間の交互作用

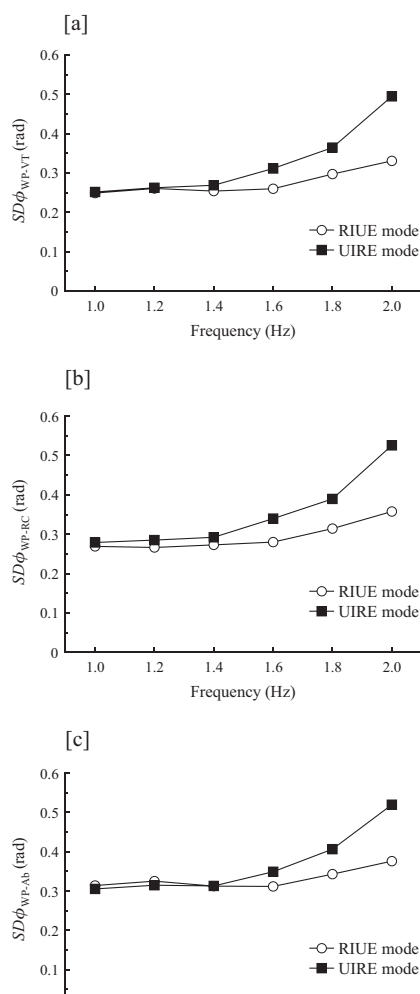


Figure 2. 振動周波数と位相モードに応じて変化する、WP-VT (a), WP-RC (b), WP-Ab (c) 間の相対位相の標準偏差

($F(2,10)=2.59, p<.01$) がそれぞれ認められた。上記のそれぞれの呼吸運動の種類に関する $SD\phi$ の結果との重複を避けて記述すると、RIUE では「 $SD\phi_{WP-VT} < SD\phi_{WP-RC} < SD\phi_{WP-Ab}$ 」, UIRE では「 $SD\phi_{WP-VT} < SD\phi_{WP-RC} \cdot SD\phi_{WP-Ab}$ 」であった。

考 察

呼吸運動の種類の要因

本研究では、「 $mean\phi_{WP-VT} > mean\phi_{WP-RC} > mean\phi_{WP-Ab} > 0$ 」という結果であり、呼吸運動の種類によって $mean\phi$ に有意な差が認められた。HKB 方程式を参考にすると、この結果は、VT, RC, Ab それぞれがもつ運動特性（例えば、固有周波数）が異なることによるものと推測される。RC と Ab は構造的に異なり、そしてそれらの総体的な運動である VT もそれらと構造的に異なる。RC の運動は主に内肋間筋と外肋間筋によって行われているが、肋骨があるため、その可動域（運動の振幅）もそれほど大きくない。一方、Ab の運動は横隔膜や腹直筋といった大きな筋群によって行われ、また胸部の肋骨のような骨格がないためその運動の振幅も大きい。換気運動は主にこれらの筋群の協働的な運動によって達成されており、口腔などの動きも多少関与していると考えられる。RC と Ab は完全に独立した運動体ではなく、多くの場合、協働的に運動しているが、その位相関係は意図的に変えることができることから、独立した運動体として捉えることができ（e.g., Konno & Mead, 1967）、その運動特性も異なるといえる。

また、 $SD\phi$ にも呼吸運動の種類によって有意な差が認められ、その大小関係は RIUE モードで「 $SD\phi_{WP-VT} < SD\phi_{WP-RC} < SD\phi_{WP-Ab}$ 」であった（Figure 3）。この結果を HKB 方程式に当てはめて考えると、「 $mean\phi_{WP-VT} > mean\phi_{WP-RC} > mean\phi_{WP-Ab} > 0$ 」であったことから「 $SD\phi_{WP-VT} < SD\phi_{WP-RC} < SD\phi_{WP-Ab}$ 」にならなくてはならない。この矛盾の原因として、Ab, RC, VT の順に摩擦関数がより多く影響していることが推測される。特に Ab の相図上の軌道を見ると、VT や RC

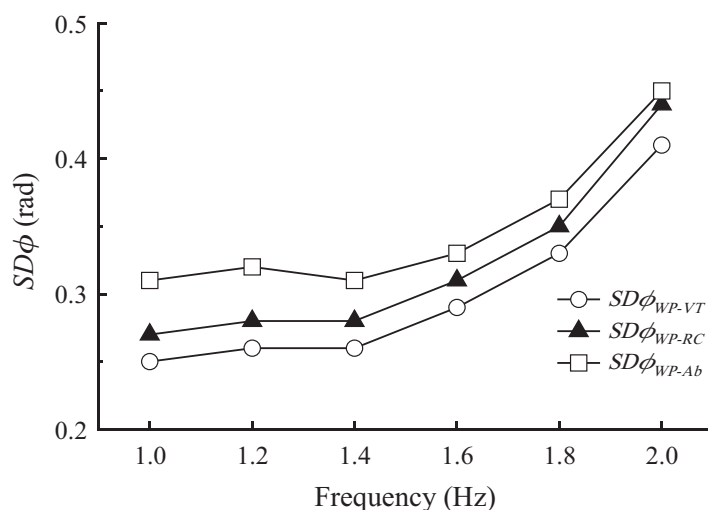


Figure 3. 振動周波数と呼吸運動の種類に応じて変化する相対位相の標準偏差

のそれと比べて、低い振動周波数で（1.2 Hz）乱れた円になっている（Figure 4）。

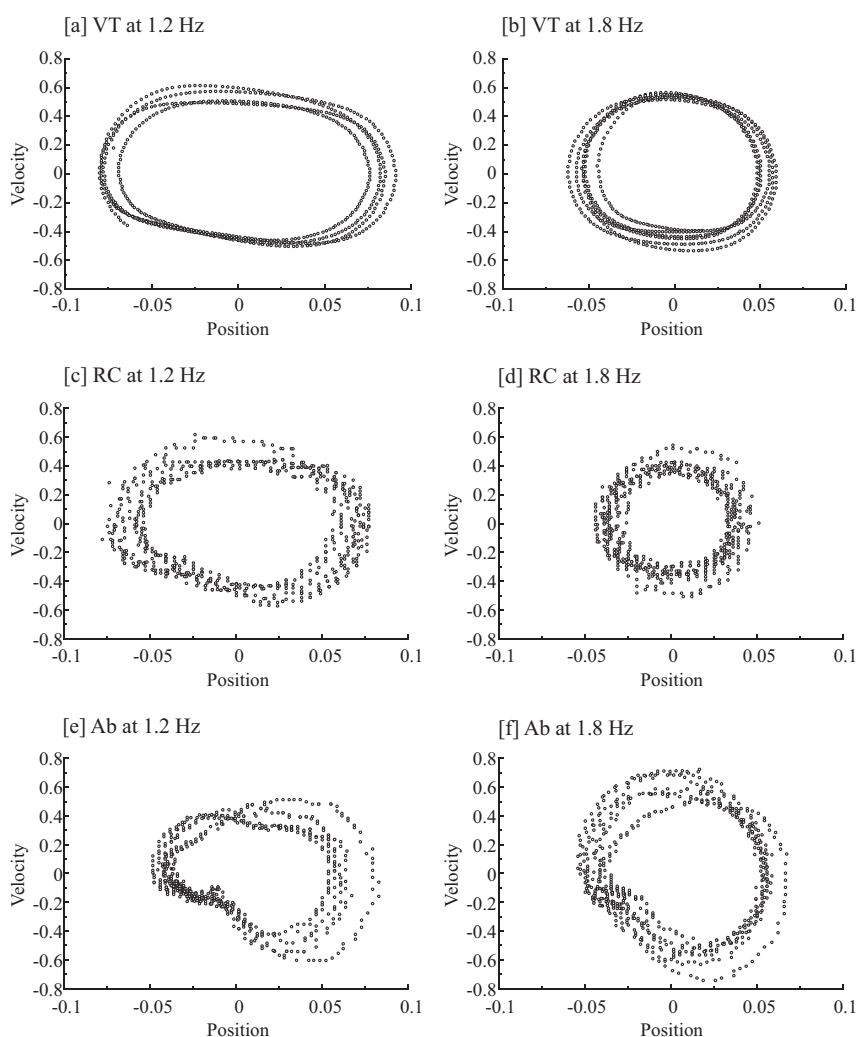


Figure 4. 呼吸運動の位相ポートレート。左側は振動周波数が^s 1.2 Hz のとき、右側は 1.8 Hz のときの位相ポートレートであり、また、上列から換気運動（a, b）、胸部呼吸運動（c, d）、腹部呼吸運動（e, f）の位相ポートレートである。

そこで、VT、RC、Ab 時系列の軌道の規則性を評価するため、調和的な運動からの逸脱を示す指標「調和性（ h ）」（Riley, Santana, & Turvey, 2001）を、VT、RC、Ab について算出した。まず、各試行の各時系列について、位置－速度を座標とする位相平面における軌道の原点からの距離 r （半径）を下式(4)より算出した。

$$r = \sqrt{x^2 + (\dot{x}/\omega)^2} \quad (4)$$

x は位置, $(\dot{x}/\omega)^2$ は角周波数の平均によって正規化された速度の二乗である。次に, 位相平面における各運動の位置—速度座標の位相角度 θ を算出し, $\theta=1^\circ$ 区間毎に半径 r の平均値を求めた後, この平均 r の時系列 (360 データポイント) を正規化した時系列 (r 時系列の平均値で除した) と完全に調和的な運動の r 時系列 ($r=1$) 間の平均二乗誤差のルート (h : 値が大きいほど調和性が低い) を算出した。

調和性 h について, 3 (呼吸運動の種類) \times 2 (位相モード) \times 3 (振子) \times 6 (振動周波数) の 4 要因分散分析を行った結果, 呼吸運動の種類, 位相モード, 振動周波数の要因の主効果がそれぞれ認められた (順に $F(2,16)=30.35, p<.001, F(1,8)=11.70, p<.01, F(5,40)=17.28, p<.001$)。下位検定の結果, h は「VT<RC<Ab」, 「RIUE<UIRE」, 「1.0>1.2>1.4・2.0>1.6-1.8 Hz」であることが示された。また, 呼吸運動の種類と位相モード間の交互作用が認められ ($F(2,16)=4.03, p<.05$), RIUE と UIRE の両モードとも「VT<RC<Ab」であり, VT と Ab では「RIUE<UIRE」であることが示された。さらに, 呼吸運動の種類と振動周波数間の交互作用が認められ ($F(10,80)=5.26, p<.001$), 1.0 Hz では「VT・RC<Ab」, 1.2-1.8 Hz では「VT<RC<Ab」, 2.0 Hz では「VT<RC・Ab」であることが示された。また, VT では「1.0>1.2>1.4・2.0>1.6-1.8 Hz」, RC では「1.0>1.2・2.0>1.4-1.8 Hz」, Ab では「1.0>1.2>1.4>1.6-2.0 Hz」であることが示された (Figure 5)。

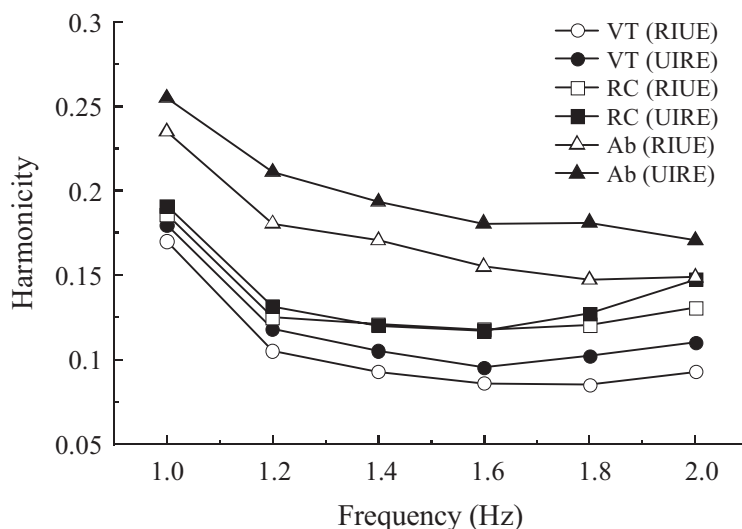


Figure 5. 振動周波数と呼吸運動の種類に応じて変化する調和性

これらの結果から, 概して Ab が調和的な運動から最も逸脱しており, VT がより調和的な運動であること, また, VT, RC, Ab とともに低振動周波数では調和的でなく, 振動周波数が増加するとともに調和的になることが示された。慣性モーメントが小さい運動体が, 低振動周波数では調和性が低いが, 運動の振動周波数の増加に伴い調和的運動になるという知見がある (Beek, Schmidt, Morris, Sim, & Turvey, 1995)。Beek et al. (1995) によると, 相図上の円軌道の乱れは, 振動子に含まれる摩擦関数 (van der Pol 振動子や Rayleigh 振動子) に

よるものであり、また回転慣性（慣性モーメント）は振動子の振る舞いに影響を及ぼしているとしている。一方、構造的に、胸部は肋骨があるためその動きの振幅は腹部に比べて小さく制限されており動かしにくいといえる。これらのことから、RC と Ab については、相対的に RC は慣性モーメントが大きく（弾力的である）、Ab は慣性モーメントが小さい（摩擦が大きい）と考えられる。

HKB 方程式というポテンシャル関数を基盤としたアプローチが、主に協調的な振る舞いの水準（相対位相）に焦点を当てているのに対し、調和性の分析はその協調運動を構成する個々の運動（振動子）の水準（本研究の WP, VT, RC, Ab にあたる）に焦点を当てている。前述したように、前者の HKB 方程式だけでは、本実験で得られた $mean\phi$ と $SD\phi$ の結果は説明できない。一方、後者の調和性の分析から、調和的な運動からの逸脱の大きさは「 $VT < RC < Ab$ 」であり、これが $SD\phi$ に影響していると考えられる。従って、本実験で観察された ϕ の揺らぎ（ $SD\phi$ ）は、HKB 方程式から計算されるものと、位相平面上で観察される個々の振動子のダイナミクスを原因系とするものの総和と考えられる（Riley et al., 2001; Schmidt, Shaw, & Turvey, 1993）。

ところで、 $SD\phi_{WP-RC}$ と $SD\phi_{WP-Ab}$ に比べて $SD\phi_{WP-VT}$ が相対的に最も小さい値という結果は、射撃手が的を狙っているときに、その肩と手首との運動が互いに関連しつつ相殺しあっていること（Tuller, Turvey, & Fitch, 1982）と同様の現象であるかもしれない。つまり、換気運動の下位系である胸部と腹部呼吸運動の揺らぎが相殺していることによって、 $SD\phi_{WP-VT}$ が小さくなっているのではないか。一連の体肢間協調研究で得られた身体の各部位間の協調関係、本研究で明らかにされた身体運動と換気運動（呼吸運動）間の協調関係、Goldfield, Schmidt, & Fitzpatrick（1999）によって示された胸部と腹部呼吸運動間の協調関係というように、様々なレベルにおいて協調関係が存在し身体全体の協調システムを形成していると考えられる。

引用文献

- Beek, P. J., Schmidt, R. C., Morris, A. W., Sim, M. Y., & Turvey, M. T. (1995). Linear and nonlinear stiffness and friction in biological movements. *Biological Cybernetics*, **73**, 499-507.
- Goldfield, E. C., Schmidt, R. C., & Fitzpatrick, P. (1999). Coordination dynamics of abdomen and chest during infant breathing: A comparison of full-term and preterm infants at 38 weeks postconceptional age. *Ecological Psychology*, **11**, 209-232.
- Haken, H., Kelso, J. A. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, **51**, 347-356.
- Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic patterns: The self-organization of brain and behavior*. Cambridge, MA: MIT press.
- Kelso, J. A. S., DelColle, J. D., & Schöner, G. (1990). Action-perception as a pattern formation process. In M. Jeannerod (Ed.), *Attention and performance XIII*. Hillsdale, NJ: Erlbaum. pp. 139-169.
- Konno, K., & Mead, J. (1967). Measurement of the separate volume changes of rib cage and abdomen during breathing. *Journal of Applied Physiology*, **22**, 407-422.
- Kugler, P. N., & Turvey, M. T. (1987). *Information, natural law and the self-assembly of rhythmic*

- movement*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Riley, M. A., Santana, M. V., & Turvey, M. T. (2001). Deterministic variability and stability in detuned bimanual rhythmic coordination. *Human Movement Science*, **20**, 343-369.
- Schmidt, R. C., Bienvenu, M., Fitzpatrick, P. A., & Amazeen, P. G. (1998). A comparison of intra- and interpersonal interlimb coordination: coordination breakdowns and coupling strength. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **24**, 884-900.
- Schmidt, R. C., Shaw, B. K., & Turvey, M. T. (1993). Coupling dynamics in interlimb coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **19**, 397-415.
- Schöner, G., Haken, H., & Kelso, J. A. S. (1986). A stochastic theory of phase transitions in human hand movement. *Biological Cybernetics*, **53**, 27-35.
- 高瀬 弘樹・三嶋 博之・春木 豊 (2004). 呼吸と体肢運動の意図的協調：ダイナミカル・システム・アプローチからの検討 認知心理学研究, **1**, 63-73 .
(Takase, H., Mishima, H., & Haruki, Y. (2004). Intentional coordination of breathing and limb movement from the perspective of the dynamical systems approach. *Japanese Journal of Cognitive Psychology*, **1**, 63-73.)
- Tuller, B., Turvey, M. T., & Fitch, H. L. (1982). The Bernstein perspective: II. The concept of muscle linkage or coordinative structure. In J. A. S. Kelso (Ed.), *Human motor behavior: An introduction*. Hillsdale, NJ: Erlbaum. pp. 253-270.
- Turvey, M. T. (1990). Coordination. *American Psychologist*, **45**, 938-953.

(2014年10月31日受理 12月 3 日掲載承認)