

D-1

ボールルームダンスおよびその他のスポーツにおける身体のスウェイの解析

Analysis of Sway in Ballroom Dancing and Other Sports

塩谷 義^{*1}, 〇正Tadashi SHIOYA^{*1}^{*1} Independent

The “Sway” is one of the important techniques in ballroom dancing and also is seen in many other sports such as skate, ski, running, and sports with vehicles etc. According to the authorized syllabi of the ballroom dancing, the sway is defined as the inclination of the body away from the moving foot and towards the inside of the turn. However, there are some questions to this definition of sway, which is cleared in the present analysis and a more precise classification is given with mechanical analysis introducing a new concept of inclination and bending. First, basic mechanism of the sway is explained as the balance of the inertia force of the dancer’s body and the force exerted by the inclination of the body using an inclined one bar element model. Mathematical functions are introduced to simulate the translational body movement and the amount of inclination in the sway is estimated by the analytical solution. Further a two-element model is introduced in the present analysis which includes both the inclination and the bending effects. This model explains the control and stability of the sway and to match the function of the force to explain the swing movement and the function of force by the sway analysis. The sway process is classified in the three stages, and the change of the inclination and bending angles with time is demonstrated for each stage with taking examples for some figures.

Key Words : Ballroom Dancing, Sway, Movement, Walking and gait, Energy, Music, Kinesiology

1. 緒 言

ボールルームダンスにおける身体の動きを力学的な観点から解析を試みたものに、重心の上下運動に関するもの(塩谷, 2016)があるが、ボールルームダンスの各動作に関してはほとんど解析が行われていない。ボールルームダンスにおける重要な技術のひとつに Sway がある。Sway は身体の傾斜であり、ボールルームダンスのシラバスや教科書(ISTD, 1982, Moore, 2002, Silvester, 1977 and ISTD, 2001)には、各基本フィギュアの各歩に対し明確に示されている。Sway の必然性に関しては、回転に伴うことが示唆されているが、理論的な説明はされていない。

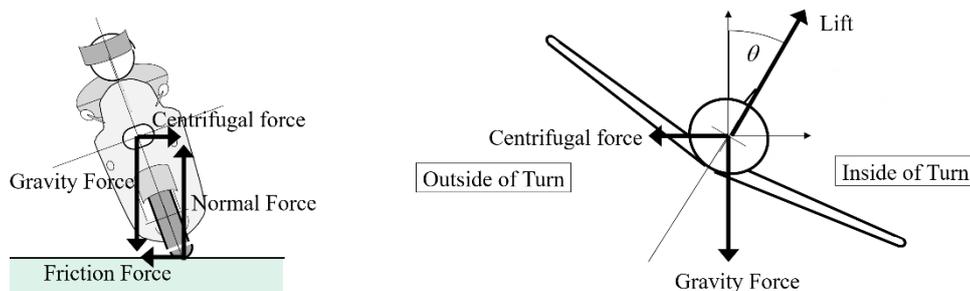


Fig. 1 Balancing Forces Acting on Vehicles in Turning Movement. (a) Motorcycle (b) Aircraft

身体の傾斜や乗り物の傾斜に関しては、Sway という用語は使われていない場合でも、他の多くのスポーツにおいてもみられる。トラック競技、アイススケート、スキー、自転車、オートバイなどにおける身体や乗り物の傾斜は、物体（人間を含む）の進行経路がカーブしているとき、物体に働く遠心力と釣り合うよう接地点からの反力に遠心力と反対の向きの成分をもたせると説明される（図 1-a）。航空機の場合は傾斜により揚力の成分に旋回を中心方向の成分を持たせている（図 1-b）。

ダンス指導の現場においても Sway を回転における遠心力との釣り合いで説明を行なっている場合がよくみられるが、観念的な類推に過ぎず、適切とはいえない。実際、ボールルームダンスにおける代表的な回転のフィギュアである Natural Turn や Reverse Turn においても、身体の向きは変化（回転）するが、身体の重心の経路はほとんど直線に近く、身体（重心）に大きな遠心力がかかるとは考えにくい。ただ、身体移動経路上での加減速はかなりあるので、身体にかかる物体力（Body force, 慣性力）として扱うことは適当と考えられる。本報においては、ボールルームダンスにおける Sway の解析を簡単な力学的モデルを用いて行ない、Sway の正しい理解を目的とする。

力学的に身体の傾斜を解析するにあたっては、身体のどの方向の傾斜であっても同じような扱いが可能であるが、ボールルームダンスにおける Sway は一般的に身体の横方向の傾斜（体側方向、全額面内の傾斜）を意味している。

Sway はボールルームダンスのスタンダード種目、さらにその中の Swing Dance (Waltz, Foxtrot, Quickstep および Viennese Waltz) において重要であることがシラバス (ISTD, 1982) にも記されており、本解析の対象も主に Swing Dance における Sway であるが、Latin American Dance (Lavelle, 1975), その他のダンス、さらにダンス以外のスポーツ等においても基本的に適用が可能と考えている。

2. 一要素モデルによる基本解析

2・1 基本解析 一要素解析

Sway は身体の運動時に片足に重心があるとき、加減速等の Body force とバランスするためと考えられるので、まず、ボールルームダンスにおいてどの程度の Body Force があるかを見積もってみる。代表例として、Waltz の Natural Turn のカウント 2 から 3 の時点（Sway が生じる時点）の男子の運動を解析する。身体の重心の移動に関して前報（塩谷, 2016）においては、鉛直方向の調和運動（正弦運動）を仮定して解析したが、本報においては、移動経路に沿った水平方向に関して正弦運動を仮定する。Natural Turn のカウント 3 で（カウント 3 の前半終了時、両足が揃い Rise が終了した時点）を時間 t の原点とし、この時点で水平方向速度が消失すると考えて、1 小節周期の正弦運動を考える。重心の経路に沿って座標をとり、水平方向（ x 方向）重心変位 x_G 、鉛直方向

（ y 方向）重心変位 y_G 、1 小節の時間長さ（周期） T 、1 小節での重心の移動距離 L とする。重心位置 x_G 、およびその速度、加速度はそれぞれ

$$x_G = \frac{L}{T} \left\{ t - \frac{T}{2\pi} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} \right) \right\}, \quad \frac{dx_G}{dt} = \frac{L}{T} \left\{ 1 - \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} \right) \right\}, \quad \frac{d^2 x_G}{dt^2} = \frac{2\pi L}{T^2} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} \right) \quad (1)$$

と表わせる。Sway が生じるのはカウント 2, 3 の減速過程であり、最大の減速度は $\frac{d^2 x_G}{dt^2} = -\frac{2\pi L}{T^2}$ である。

この減速度の値は、1 小節での移動距離を $L = 2$ (m)、Waltz の演奏速度を 30bpm すなわち、 $T = 60/30 = 2$ (sec.) とすれば、 $\frac{d^2 x_G}{dt^2} = -\frac{2\pi L}{T^2} = -3.14$ (m/s²) となる。なお、加速度の最大時には身体はほとんど進行方向を向いており、身体傾斜が前後方向（矢状面内）であるので、Sway の解析からは除く。

次に、身体の重心の傾斜により水平方向の力がどの程度になるかを見積もってみる。Sway の力学的解析を行なうにあたり、まずもっとも単純なモデルとして、踊り手を 1 本の細長い縦の要素（柱）が下端を接地している

場合を考える。要素の質量を m ，重心の位置は下端から l_G とする。接地点は下端（片足）1点で原点とする。接地点においては垂直力および水平力（摩擦力）のみでモーメントは持たないとする。接地点を原点にとり、重心の位置を、横位置 $x = x_G$ ，高さ $y = y_G$ とし面内の運動のみを解析する。要素の Sway を、接地点と重心を結ぶ線の鉛直線からの角度 θ （傾斜角度，Inclination）で表わすとする。

$$\frac{x_G}{l_G} = \sin \theta \quad \frac{y_G}{l_G} = \cos \theta$$

Inclination θ に関する運動方程式は $l_G \frac{d^2\theta}{dt^2} = g \sin \theta$ となるが、通常ボールルームダンスにおける Sway は

あまり大きくないので簡単のため本解析においては θ が微小範囲の場合の近似を用いて、すなわち、

$$\frac{x_G}{y_G} = \tan \theta \cong \sin \theta \cong \theta, \quad \cos \theta \cong 1 \quad \text{として,}$$

$$l_G \frac{d^2\theta}{dt^2} = g\theta \quad (2)$$

と表せる。この一般解は

$$\theta = B' \sinh \left(\sqrt{\frac{g}{l_G}} t \right) \quad (3)$$

$$\text{である。}\theta\text{の小さい範囲では}\theta = B' \sqrt{\frac{g}{l_G}} t, \quad x_G \text{ で表せば } x_G = B \sqrt{\frac{g}{l_G}} t \quad (4)$$

となる。関数形が若干違うが、重心が支持脚上に近いときに線形近似を用いれば

$$\text{このときの加速度 } \frac{d^2 x_G}{dt^2} = \left(\frac{g}{y_G} \right) B \sinh \left\{ \left(\frac{g}{y_G} \right)^{\frac{1}{2}} t \right\} \quad \text{と前出の加速度 } \frac{d^2 x_G}{dt^2} = \frac{2\pi L}{T^2} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} \right)$$

を比較，原点近くで， \sin と \sinh を近いものとして

$$\left(\frac{g}{y_G} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{2\pi}{T}, \quad B = \frac{L}{2\pi} \quad \text{とおく.}$$

Inclination θ を重心の加速度で表すと

$$\theta = \frac{\left(\frac{d^2 x_G}{dt^2} \right)}{g}, \quad \text{減速度最大のときは } \theta_{\max} = \frac{\left| \frac{d^2 x_G}{dt^2} \right|_{\max}}{g} = \frac{2\pi L}{T^2 g} \quad (5)$$

前出の 30bpm, $L=2$ のとき，最大の Inclination は， $\theta=0.32$ (rad.)，やや遅い 28bpm, $L=1.5$ のとき，最大の Inclination は， $\theta=0.21$ (rad.) となり，Inclination は音楽の速度，歩幅に依存することが示される。実際に Sway の量を計測した例は見られないが，これらの値は無理のない値と考えられる。参考までに，遠心力による加速度に対応する Inclination は，半径 R 速度 v のとき， $\theta = \frac{v^2}{gR}$ であり，陸上競技のトラックで $R=36.5$

(m), $v=9$ (m/s) とすれば， $\theta=0.23$ となる。

なお，本項の一要素解析においては，Sway が解消する原点における静止の解は厳密な意味では得られない。静止の制御のためには後述の二要素モデルが必要となる。

2・2 Sway による減速と加速

一般的にボールルームダンスにおいては、Sway は上述のように減速の過程に用いられることが多い。すなわち、身体の傾斜は進行方向と逆である。しかし、少数のフィギュアにおいては進行方向と身体の傾斜が同方向となり加速となる場合もある。たとえば、通常の Sway が生じる Feather Step の 2 歩目（男子左足，右 Sway）は減速段階であるが、Hover Feather の 1 歩目（男子左足）においては、先行歩（Heel Pull）との関係により、加速段階であるとみなせる。したがって、通常の Feather Step とは逆の左 Sway になる。Hover Feather の加速は緩く、すぐに消失するものであるため、次歩（右足）では Sway も消える。

加速の Sway を含むもうひとつの例としては Turning lock to Right がある。Waltz の通常の Turning lock は、男子左 Sway であり、先行フィギュア（Natural Spin Turn など）の最終歩からの速度（右 Side Lead があるので Body からみて右方向速度）を減じている。しかし、Turning Lock to Right においては、左 Sway でも右 Sway でも可となっている。左 Sway の場合は、通常の Turning Lock と同様に、減速と解釈できるが、右 Sway の場合は、力学的には、右方向に加速しているとする理にかなっていない。速度を定量的に測定してはいないが、Dancer の体感のおよび、観測者の視覚的には男性の右 Sway では実際に右方向の加速があるように感じられる。特に速度を増して大きく踊ろうとする競技選手などにはこの傾向が強くみられる。

3. 二要素モデルによる応用解析

3・1 Inclination Sway と Bending Sway の区別

以上までは、身体の傾斜すなわち Sway として身体の傾斜角 θ のみを変数として解析をしてきた。しかし、Sway はシラバス上で定義としては、身体傾斜 Inclination とされているものの、実際、各フィギュアの記述においては必ずしも身体全体としての（重心の）傾斜と一致していない場合も多い。例えば、Waltz の Natural Turn の 3 歩目においては水平方向の運動がほとんどないにもかかわらず、Sway は 2 歩目から継続している。これは、身体が弯曲しているだけであって、重心の位置はほぼ足の鉛直線上にあるので、ほぼ水平方向の加速度はないのである。これらの矛盾を整理するため、ここで Sway の定義を新たに提案する。身体全体の傾斜（重心の傾斜）を Inclination Sway（傾斜 Sway）とする。また、身体が左右に弯曲する形を Bending Sway（曲げ Sway）とする。ISTD のシラバスにおいては、定義上は Inclination Sway であるが、実際のフィギュアの記述ではほとんど Bending Sway となっている。ここで定義した 2 種類の Sway のそれぞれについて、右(R), 左(L), 直(S)があり、その組み合わせにより図 2 の 9 種類の Sway (LR, LL, LS, SL, SS, SR, RS, RR, RL) がある。

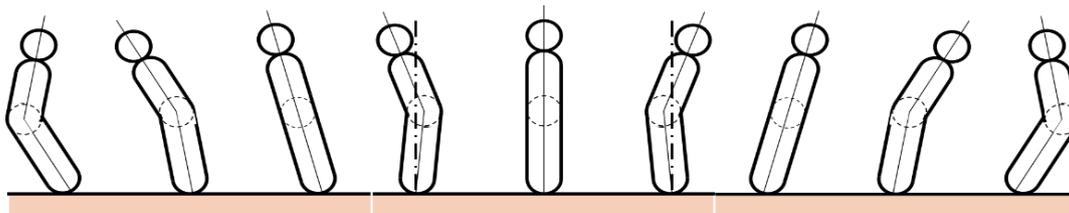


Fig. 2. Combination of Inclination Sway and Bending Sway ; LR, LL, LS, SL, SS, SR, RS, RR, and RL. (Back view)

このような 2 種類の Sway の組み合わせは他のスポーツにおいても（用語は異なっても）しばしばみられる。具体例としてカーブして走行するバイクの傾斜とライダーの姿勢の関係がある。基本的な Lean with は、バイクの傾きとライダーの上半身が同じ角度であり、上記の分類にしたがうと、Inclination Sway はあるが Bending Sway がない場合に相当する。上記の 1 要素解析で説明できる。Lean in はバイクの傾きに対して上半身が回転の内側に入ったフォームであり、上記の分類にしたがうと、Inclination Sway と Bending Sway が同方向の場合に相当する。Lean out はバイクの傾きに対して上半身を回転の外側にずらしたフォームであり、Inclination Sway と Bending Sway が逆方向の場合に相当する。ISTD のシラバスでは、通常でない Sway として Broken Sway が例示されているがこれが Lean out に相当するとも解釈できる。ただしシラバスでは上述のように厳密な Sway の記述は

されていない。以下の解析では、わかりやすさのため、この、バイク用語である Lean with, Lean in, Lean out を Ballroom Dancing の Sway の説明に借用する。

実際のダンスにおいて Sway が単なる Inclination だけ (Lean with) でなく、なぜ Bending Sway を伴うかについては、**加速度の制御**に寄与していると考えられる。もし、重心が片足上のみにあるとすれば、身体の左右の有効な傾斜を増減しようとしても、接地点の足の横幅でモーメントを生じさせて直接 Inclination Sway を生じさせることはできない。身体の横曲げに関しては、筋肉の働きで可能であるから、この Bending Sway による加速度の制御を直接的および間接的に行なう仕組みになっていると考える。また、Inclination の角度 θ が釣り合いの位置からずれを生じる場合の制御に関しても、身体の曲げ Bending に関しては、Dancer の意志で、モーメントの制御ができ結果として必要な曲げ角度実現が可能と考えられる。これらの変数の効果が身体の加速度にどのように影響するかを力学的に解析することに意義がある。

3・2 二要素解析

上記のように Sway には加減速に直接影響する Inclination Sway と実際に一般的に認識されている形態的な身体曲げである Bending Sway の区別があるので、以下、具体的モデルをたて解析を行なう。図3で示すように身体を細長い縦の直線柱が途中の1点 (Hinge) で折れ曲がっていて下端を原点で接地している2要素のモデルを考える。

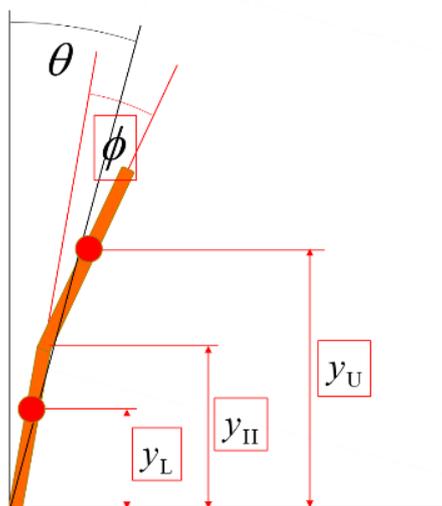


Fig. 3. Two-elements Model with Inclination Sway θ and Bending Sway ϕ

一要素解析と同様、Sway 角度は小さいものとする。座標は、横方向 x 縦 (鉛直) 方向 y とする。Hinge の位置を $y = y_H$, $x = x_H$ とし、それより上部の要素の重心位置を $y = y_U$, $x = x_U$, 上部要素の質量を m_U ,

Hinge より下部の要素の重心位置を $y = y_L$, $x = x_L$, 下部の質量を m_L とする。全体の質量 m は、

$m = m_U + m_L$, 上下の質量配分は $m_U' = \frac{m_U}{m}$, $m_L' = \frac{m_L}{m}$, 全体の重心位置 x_G , y_G は

$x_G = m_U' x_U + m_L' x_L$, $y_G = m_U' y_U + m_L' y_L$ である。高さ, y_U , y_L , y_H , y_G は微小角の条件より、運動中も変化なしとみなす。全体の重心の Inclination 角度 θ , Hinge 部分の Bending 角度 ϕ はそれぞれ

$$\theta = \frac{m_U x_U}{m_U y_U + m_L y_L} + \frac{m_L x_L}{m_U y_U + m_L y_L} \quad \phi = \frac{x_U}{(y_U - y_H)} - \frac{y_U}{y_L (y_U - y_H)} x_L \quad (6)$$

で表される.

上部要素, 下部要素それぞれの重心にかかる水平力は $F_U = m_U \frac{d^2 x_U}{dt^2}$, $F_L = m_L \frac{d^2 x_L}{dt^2}$ である.

原点 (接地点) の水平力 $F_0 = F_U + F_L$, F_0 の符号は Dancer の加速度が x 方向に正なら正で, Floor が Dancer の

身体合計質量 $m = m_U + m_L$ にかかる力であり, 解析において求めるべき変数である. Hinge 部分の曲げの条件

は, 生体であるので通常の場合とかなり異なる. 曲げ Moment M_H は Dancer が自分の意志で与え

ることができる変数と考える. また, 曲げ角度 ϕ は Moment の履歴を含む時間経過で結果的に決まるものと

考える.

力学的な解析としては, 身体の Sway 姿勢を示すパラメータ θ , ϕ または x_U , x_L に対し, 身体にかかる

力 F_0 を求めることである. Inclination angle θ と Bending angle ϕ で表わすと,

$$F_0 = mg\theta + \frac{y_U - y_L}{y_L(y_U - y_H)} \left\{ M_H - \frac{m_U(y_U - y_H)(m_U y_H + m_L y_L)}{m y_G} g\phi \right\} \quad (7)$$

となる. 右辺第 1 項目 θ の項は, 全体の重心に質量が集中した仮定の 1 要素モデルの傾斜の項である. 2 項目

Hinge Moment M_H と Hinge 角 ϕ との項は, Bending Sway の効果である. θ と M_H は F_0 に対して正の関係, ϕ

は負の関係である. すなわち, 減速過程においては Bending Moment M_H を増加させることは, 瞬間的により減速効果があるが, 結果として増加した Bending Angle はその効果を減らすことになることを示している. 重心の

傾斜 Inclination 角度の変化率は, $\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{F_0}{m y_G}$ で与え, $M_F = M_H - \frac{m_U(y_U - y_H)(m_U y_H + m_L y_L)}{m y_G} g\phi$ とおく

と,

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{g}{y_G} \theta + \frac{y_U - y_L}{m y_G y_L (y_U - y_H)} M_F \quad (8)$$

となる. 一方, Bending 角度の変化率は,

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} = -\frac{y_U - y_L}{y_L(y_U - y_H)} g\theta - \frac{m_U y_U^2 + m_L y_L^2}{m_U m_L y_L^2 (y_U - y_H)^2} M_F \quad (9)$$

である. これらの加速度の式により, Dancer により与えられる曲げモーメント M_H のもと, 刻々の時間積分により Inclination および Bending の姿勢変化がきまることになる. 上 2 式より M_F を消去すると

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{m_U y_U + m_L y_L}{m_U y_U^2 + m_L y_L^2} g\theta + \frac{m_U m_L y_L (y_U - y_H)(y_U - y_L)}{(m_U y_U + m_L y_L)(m_U y_U^2 + m_L y_L^2)} \frac{d^2\phi}{dt^2} \quad (10)$$

となる. 右辺第 1 項目 θ の項は, Hinge の角変化のない項, すなわち Inclination Sway のみの項であり Hinge 固定の 1 要素モデルの解である. 2 項目 Hinge 角 ϕ の変化率の項は, Bending Sway の効果であり, Dancer による制御可能な項である. 第 1 項目 θ の項は θ が小さいときは効果が小さくなるので重心位置が支点上に近づいたときに速度が残っていると安定制御のためには, Bending Sway による制御が必須となる.

上式はパラメータを集約し, Bending Sway の加速度を Inclination 角度とその加速度で Normalized Parameter として表すと

$$\frac{d^2\phi'}{dt'^2} = -\left(\frac{d^2\theta'}{dt'^2}\right) + Q'\theta' \quad (11)$$

となる。ここで

$$\phi' = \frac{\phi}{P}, \quad \theta' = \left(\frac{y_G}{L}\theta\right), \quad t' = \left(\frac{t}{T}\right),$$

$$Q' = \left\{1 - \frac{m_U' m_L' (y_U - y_L)^2}{(m_U' y_U^2 + m_L' y_L^2)}\right\} \left(\frac{gT^2}{y_G}\right), \quad P = \frac{(m_U' y_U^2 + m_L' y_L^2)}{m_U' m_L' y_L (y_U - y_H)} \frac{y_G}{(y_U - y_L)} \quad (12)$$

である。角度の Normalization (ϕ' , θ') は, Dancer の身体の形状の相違 (上下の重心位置など) の影響をまとめる意味がある。 ϕ' と θ' は上式の関係の条件のもとで変化することができる。具体的には Hinge における Moment M_H を Dancer が与えることにより制御することになる。なお, Hinge における Moment M_H と Hinge 角 ϕ の関係は材料力学における剛性のような一定の値ではなく, 動作進行に伴い変化する。すなわち, 間接的に人間が Control する Parameter である。

3・3 Sway の形成, 解消過程の分析

ボールルームダンスにおける具体的な Sway は, 典型的には, Swing の後半から生じ, 次の Swing の前に解消するように記述されている。具体例の Waltz の Natural Turn では Sway は 2 歩目, 3 歩目で生じるとなっている。しかし先に述べたように, ほとんど静止となる 3 歩目では左右への Inclination はほとんどゼロに向かっていくが, Bending Sway により見かけ上の Sway が残っているということになる。Foxtrot の Natural Turn, Reverse Turn などにおいても, 3 歩目は Open (足を閉じない) で移動するが, 身体の横方向には慣性力はないとみなせるので, Sway は Bending Sway のみと考えられる。これらのフィギュアでは 3 歩目後半で Sway は解消に向かう。ここでは, これらの考察により Sway の過程を, Sway の形成過程(Development Process), Sway の維持過程(Maintaining Process), 解消過程(Diminishing Process) の 3 段階に分け, 具体的な Sway の進行過程を解析する。Sway 運動の解としては, Inclination Sway $\theta'(t')$ および Bending Sway $\phi'(t')$ を時間進行に対して求めることである。

Sway の形成過程

一般的に Sway は Natural Turn や Reverse Turn など Swing 動作の後半の Rise の過程に形成されることが多い。具体的に Natural Turn 前半の男子を例として考える。Waltz の場合はカウント 3 の前半まで Rise が継続するのでそれまで Swing とみなしてもよいかもしれないが, Foxtrot や Quickstep の場合は, 3 歩目は Rise がなく, Swing は 2 歩目で終了とみなした方がよい。いずれにせよ, Swing 後半で Swing 方向の重心の移動が停止するまでを Swing とし, その時点までの Sway の形成過程を解析する。具体的に Natural Turn 前半の男子の動作を参照して説明する。Natural Turn 1 歩目において身体の移動方向と身体の向きが同じとみなせる間は左右への加速はなく, Sway はない, とされる。CBM により身体の向きが進行方向に対して横向きになるにつれ, 身体の運動は左右の運動成分が増加してくる。そして身体の運動が加速から減速に転じるころから Sway が問題となってくる。ただし, 身体重心を支える足が 1 歩目 (右足) と 2 歩目 (左足) にまたがっている間は左右の安定は両足の荷重分配に依るところが大きい。体重がほとんど 2 歩目の左足に載る状態からは, Sway が主役割を担うことになる。Sway のはじめは Inclination Sway が主で, 次第に減少していき, Bending Sway が増加することになる。そして身体移動は静止点 (2, 3 歩目) に向かう。この間, 2 歩目 (左足) に 3 歩目右足を閉じる (Close) ことになる。閉じる両足間には靴の横幅分の支点幅があり, 2 歩目から 3 歩目にかけての支点移動による若干の Inclination Sway の減少はあるが, とりあえず, この影響を考慮しない解析を示す。

Swing の自然な動きとして正弦運動が適切と考えられるが, 一要素モデルにおいては, 身体の重心が支点上にある原点付近においては, 双曲線関数である。一要素モデルにおいては, 大体の釣り合い位置が求められたが, 加速度 (慣性力) を考えて運動の解析をすると, 一要素モデルでは不可能であった。ここでは, 二要素モデルによ

り、重心の運動としては正弦関数を用い、運動方程式として上記二要素モデルの式を用いた具体的解析を行なう。

Inclination Sway の条件としては

Swing 開始時

$$\text{at } t'=0 \quad \theta'(t')=\theta'_0 \quad \frac{d\theta'}{dt'}=0 \quad \theta'_0=1 \quad (13)$$

Swing 終了時

$$\text{at } t'=1 \quad \theta'(t')=\theta'_1 \quad \frac{d\theta'}{dt'}=0 \quad \theta'_1=0 \quad (14)$$

重心の運動 (Inclination Sway の解) に関しては一要素の正弦運動解とする。

$$\frac{d^2\theta'}{dt'^2} = -2\pi \sin(2\pi t') \quad \frac{d\theta'}{dt'} = -1 + \cos(2\pi t') \quad \theta' = 1 - t' + \frac{1}{2\pi} \sin(2\pi t') \quad (15)$$

対応する微分方程式は以下となる

$$\left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \frac{d^2\theta'}{dt'^2} + \theta' = (1-t') \quad (16)$$

Bending Sway の開始時点は $t'=t'_s$ とし、終了時点 $t'=1$ までの区間 ($t'_s \leq t' \leq 1$) の Sway を解析する。

Bending Sway 開始時

$$\text{at } t'=t'_s \quad \phi'=0 \quad \frac{d\phi'}{dt'}=0 \quad (17)$$

Bending Sway 終了時

$$\text{at } t'=1 \quad \frac{d\phi'}{dt'}=0 \quad \frac{d^2\phi'}{dt'^2}=0 \quad (18)$$

と上記条件と 2 要素の運動方程式

$$\frac{d^2\phi'}{dt'^2} = -\left(\frac{d^2\theta'}{dt'^2}\right) + Q'\theta' \quad (19)$$

を満たす Bending Inclination の解を求めると

$$\frac{d^2\phi'}{dt'^2} = \left\{ \left(\frac{1}{2\pi}\right) Q' + 2\pi \right\} \sin(2\pi t') + Q'(1-t') \quad (20)$$

$$\frac{d\phi'}{dt'} = \left\{ \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 Q' + 1 \right\} \{1 - \cos(2\pi t')\} - \frac{1}{2} Q'(1-t')^2 \quad (21)$$

$$\phi' = \left\{ \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 Q' + 1 \right\} (t' - t'_s) - \left(\frac{1}{2\pi}\right) \left\{ \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 Q' + 1 \right\} \{ \sin(2\pi t') - \sin(2\pi t'_s) \} + \frac{1}{6} Q' \{ (1-t')^3 - (1-t'_s)^3 \} \quad (22)$$

となる。上式における $t'=t'_s$ は、Bending Sway 開始時の $\frac{d\phi'}{dt'}=0$ を満たす時点として与えられる。具体的な

Inclination と Bending の成長過程の例を図 4 に示す。

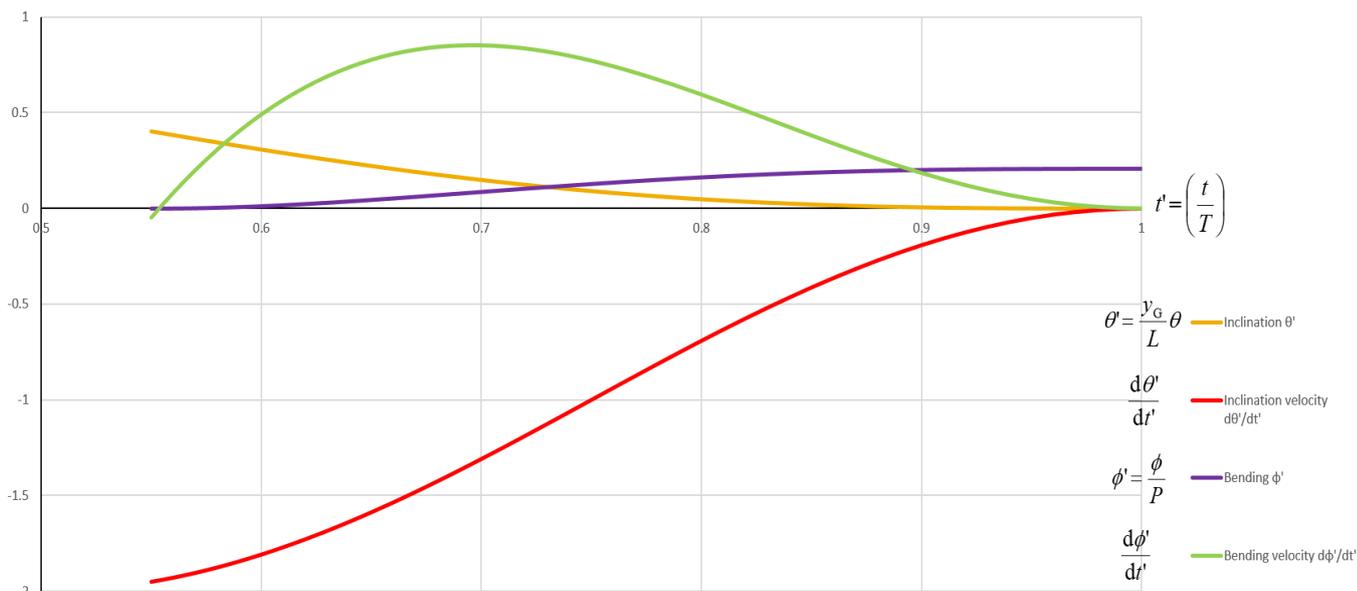


Fig. 4. Development of Inclination Sway $\theta'(t')$, $\frac{d\theta'}{dt'}(t')$ and Bending Sway $\phi'(t')$, $\frac{d\phi'}{dt'}(t')$ in Normalized Form,

in case of $Q=38.57$ (example: 28bpm in Waltz, with body proportion of
 $y_G=1.0\text{m}$, $y_U=1.6\text{m}$, $y_L=0.6\text{m}$, $y_H=1.0\text{m}$, $m_U'=0.6$, $m_L'=0.4$)

Sway の維持過程

Inclination Sway はなく、Bending Sway のみで見かけ上の Sway を保ちながら進行する過程であり、身体の横方向の無いが、Bending Sway を維持するため Hinge 部での Moment は保つ。

$$\text{Inclination Sway } \theta'(t')=0 \quad \frac{d\theta'}{dt'}=0 \quad \frac{d^2\theta'}{dt'^2}=0 \quad (23)$$

$$\text{Bending Sway } \phi'(t')=\phi'_0 \text{ (Constant)} \quad \frac{d\phi'}{dt'}=0 \quad \frac{d^2\phi'}{dt'^2}=0 \quad (24)$$

Sway の解消過程

Sway を解消する過程は、Sway がある状態から Inclination も Bending もない平衡状態に戻す過程である。代表的には Sway 解消の開始時点ですでに慣性力がなく、すなわち Inclination Sway がなく、したがって Bending Sway

$$\text{の解消過程となる。運動方程式としては、Sway 形成過程の場合と同様} \quad \frac{d^2\phi'}{dt'^2} = -\left(\frac{d^2\theta'}{dt'^2}\right) + Q'\theta' \quad (25)$$

である。Sway 解消開始時を $t'=0$ 、終了時を $t'=1$ として両端の条件としては

$$\text{開始時 at } t'=0 \quad \text{Inclination Sway } \theta'(t')=0 \quad \frac{d\theta'}{dt'}=0 \quad \text{Bending Sway } \phi'(t')=\phi'_s \quad \frac{d\phi'}{dt'}=0 \quad (26)$$

Sway 解消は Bending Sway のみとし、

$$\text{終了時 at } t'=1 \quad \phi'(t')=0 \quad \frac{d\phi'}{dt'}=0 \quad \text{とする。} \quad (27)$$

Sway の解消も正弦関数とし、両端の条件を満たす関数として

$$\left(\frac{1}{\phi'_s}\right)\phi' = \left\{1 - t' + \frac{1}{2\pi} \sin(2\pi t')\right\} \quad \left(\frac{1}{\phi'_s}\right)\frac{d\phi'}{dt'} = -\{1 - \cos(2\pi t')\} \quad \left(\frac{1}{\phi'_s}\right)\frac{d^2\phi'}{dt'^2} = -(2\pi)\sin(2\pi t') \quad (28)$$

対応して運動方程式を満たす Inclination Sway を求めると

$$\left(\frac{1}{\phi'_s}\right)\theta' = \frac{2\pi}{Q'+(2\pi)^2} \left\{ -\sin(2\pi t') + (2\pi)Q'^{\frac{1}{2}} \sinh\left(Q'^{\frac{1}{2}} t'\right) \right\} \quad (29)$$

この解は $t'=0$ における Inclination Sway なしの条件は満たすが、時間経過とともに θ' は大きくなっていく。ただし、実際の Inclination θ は

$$\theta = \left(\frac{L}{y_G}\right)\theta' \text{ で表されるので、身体横方向の動き } L \text{ が小さければ } \theta \text{ も無視できる。実際には、多少の } \theta \text{ があ}$$

っても Bending Sway 解消時点では他方の足への支点移動が行われる。

4. 考 察 と 結 語

Dance における Swing 運動に関し、前報では上下運動、本報では水平方向の解析の解析をしめた。寸法の影響については、上下運動に関しては Dancer の身長に関係なく絶対的な寸法であったが、本報による水平方向に関しては、身長（重心高さ）と Swing 距離（歩幅）の比が Parameter であることが示された。

本報の Sway 解析の結論

1. Sway は、回転に伴う場合が多いが、遠心力で説明するよりも Swing など加減速運動の慣性力との釣り合いで説明する方が適切である。
2. Sway は Dance 用語としては単に身体の横方向の傾斜とされているが、力学面からは、重心の傾斜 Inclination と、身体の曲げ Bending に分けて解析が必要である。
3. 本解析の 1 要素モデルにより、Inclination と、慣性力との関係が示され、具体的に自然な調和運動の Swing による慣性力と実際の Sway の量が定量的に妥当であることが示された。
4. Sway の過程は Inclination のみを表す 1 要素モデルではできない。本解析では Bending の効果を含む 2 要素モデルをたて、Sway の過程を、形成過程、維持過程、解消過程に分け、進行過程を具体的に示した。このモデルの解析により、見かけ上の Sway と慣性力を生じる Sway との区別も明確にした。
5. Bending による Sway は片足上での制御のためにも必要であることを示した。
6. 本解析は身体や乗り物の傾斜を生じる他のスポーツにも応用可能である。慣性力を伴う運動、動作に対して、必要な Inclination、適切な Bending の組み合わせを定量的に求めることが可能である。

文 献

- (1) 塩谷義, “ボールルームダンスにおける身体の上下運動の解析”, 日本機械学会講演論文集 No. 16-40 (2016), C9.
- (2) ISTD (The Imperial Society of Teachers of Dancing). “The ballroom technique”, 1st edition (1944), 10th edition (1982), pp. 1-134.
- (3) ISTD (The Imperial Society of Teachers of Dancing), “Viennese waltz”, B.D.C. recommended version (2001). Code 105, 1-8.
- (4) Lavelle, D., “Latin & American dances”, 1st edition (1965), revised edition (1975), pp. 1-194
- (5) Moore, A., “Ballroom dancing”, (1st edition 1936, Pitman Publishing Ltd, 10th edition 2002, A&C Black Publishers Ltd), pp. 1-308.
- (6) Silvester, V., “Modern ballroom dancing: History and practice”, (1977) pp. 1-249., Barrie and Jenkins, Ltd.