223 ゴルフスイングにおける内力を利用したエネルギー伝達

Energy transfer through the internal force during the golf swing

○正 太田 憲 (慶應大)

正 仰木 裕嗣 (慶應大)

澁谷和宏 (エプソン)

Ken OHTA

Keio University, 5322 Endo, Fujisawa, Kanagawa 252-0882

Yuji OHGI

Keio University

Kazuhiro SHIBUYA

Seiko Epson Corporation

Maximum shot distance is one of the goals of the golf swing. In order to hit a shot of maximum distance, swing linear velocity at the impact of the ball, must be maximal. Since the dynamics of club and arm dominates the overall behavior of the swing, these variables must be clarified for understanding the mechanism to produce the maximum velocity of the club. As a step toward understanding the mechanism, we investigated how non-muscular (e.g. centrifugal and gravity) forces of the each link; generates, absorbs, and transfers mechanical energy in order to produce the maximal velocity. This was accomplished using a mathematical analysis, derived entirely from dynamical equations of a three-dimensional double pendulum with a moving pivot model. We elucidated the role of the internal force for natural golf swing.

Key word: Golf swing, Transmissibility of energy, Internal force, Natural uncock, Energy pipeline, IMU

1 はじめに

ゴルフに限らず多くのスイング運動では体幹に近い近位側から遠位側に逐次運動が連鎖する様子が観察されることから、スポーツバイオメカニクスではこの運動をムチ運動やkinetic chainなどと呼び、古くから多くの研究対象としている[1, 2]. このムチ運動は、末端の筋肉が体幹側の大きな筋肉の動力と比較して小さい動力しか発揮できないことから、拘束を受けず負荷の小さい末端部位へ体幹側のエネルギーを伝達する機構として用いられている。また、このようなスイング運動は、ヒトの運動に限らず二重振子にも共通して観察される「自然な」運動とも言える。ヒトのスイング運動における「自然さ」に厳密な定義を下すのはきわめて困難であるが、工学的な観点から内力を利用した効率の良い腕からクラブへのエネルギー伝達と、安定性や正確性との両立と考えられる。

このような観点からスイング運動における自然で効率の良い運動を考察する上で、受動歩行が参考になる[3]. 受動歩行はアクチュエータを用いていないにもかかわらず、またなんら制御機構を持たないにもかかわらず、わずかな斜面の傾きから得られる重力ポテンシャルを利用し、安定した歩行運動を力学的原理から自律的に実現している点が注目される。この受動歩行は振り子のダイナミクスの特性を巧みに利用した運動と考えられ、アクチュエータを利用した受動歩行規範型の歩行ロボットを実現する場合にも、この受動歩行の特性を利用した効率の良い自然な歩行運動を実現することができる[4].

同様にゴルフのような高速なスイング運動のメカニズムを理解するために、受動的な二重振子のエネルギー伝達のメカニズムや安定性がどのような機構によって実現されているかを理解することによって、筋肉を動力とするスイング運動におけるエネルギー伝達や安定性の原理の示唆も得ることができると考える。そこで本研究では、その自然なスイング運動の力学的なメカニズムを明らかにした上で、二重振子規範型のスイング運動の力学原理を考察する。

また、このような原理を明らかにした上で、計測が簡便なIMUを用いてゴルフスイングの診断システムに応用していく予定である。

2 スイング動作の二重振子モデル

本研究では、スイング運動を解析するため3次元的に運動する二重振子モデルを考える。

2.1 二重振子モデルと運動学

Fig. 1 Double pendulum model

Fig. 1に示すように、左右の両肩の中心に相当する振子の支点は、位置の3自由度と回転の3自由度の合計6自由度をもち、その位置ベクトルを x_0 とする。一方、グリップ部分に相当するリンク間の関節は、回転の3自由度を有し、その位置ベクトルを x_1 とする。両肩の中心 x_0 からグリップ部 x_1 までを結び、左右の上腕・前腕を1つの剛体と見なした部位をリンク1とし、その先のゴルフクラブに相当する部位をリンク2とし、3次元空間を自由に運動する二重振子を考える。

$m_1, m_2, J_1, J_2, l_1, l_2, l_{g1}, l_{g2}$ を各リンクの質量、慣性テンソル、各リンクの長さ重心位置までの長さとした。 x_{g1}, x_{g2} をリンク2の重心位置の各位置ベクトルとし、 ω_1, ω_2 をリンク1とリンク2の角速度ベクトルとした。

以上の条件下で、スイング動作の二重振子モデルを考え

る。各位置ベクトル $\mathbf{x}_{g1}, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ は

$$\mathbf{x}_{g1} = \mathbf{x}_0 + l_{g1}\mathbf{e}_{l1} \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}_0 + l_1\mathbf{e}_{l1} \quad (2)$$

$$\mathbf{x}_{g2} = \mathbf{x}_0 + l_1\mathbf{e}_{l1} + l_{g2}\mathbf{e}_{l2} \quad (3)$$

で与えられ、これらを二階微分することにより、各加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{x}}_{g1}, \ddot{\mathbf{x}}_1, \ddot{\mathbf{x}}_{g2}$

$$\ddot{\mathbf{x}}_{g1} = \ddot{\mathbf{x}}_0 + \dot{\omega}_1 \times l_{g1}\mathbf{e}_{l1} + \omega_1 \times (\omega_1 \times l_{g1}\mathbf{e}_{l1}) \quad (4)$$

$$\ddot{\mathbf{x}}_1 = \ddot{\mathbf{x}}_0 + \dot{\omega}_1 \times l_1\mathbf{e}_{l1} + \omega_1 \times (\omega_1 \times l_1\mathbf{e}_{l1}) \quad (5)$$

$$\ddot{\mathbf{x}}_{g2} = \ddot{\mathbf{x}}_1 + \dot{\omega}_2 \times l_{g2}\mathbf{e}_{l2} + \omega_2 \times (\omega_2 \times l_{g2}\mathbf{e}_{l2}) \quad (6)$$

$$= \ddot{\mathbf{x}}_0 + \dot{\omega}_1 \times l_1\mathbf{e}_{l1} + \omega_1 \times (\omega_1 \times l_1\mathbf{e}_{l1}) + \dot{\omega}_2 \times l_{g2}\mathbf{e}_{l2} + \omega_2 \times (\omega_2 \times l_{g2}\mathbf{e}_{l2}) \quad (7)$$

を得る。ここで、 $\mathbf{e}_{l1}, \mathbf{e}_{l2}$ はリンク1, 2の各法線方向の単位ベクトルである。

2.2 二重振子のダイナミクス

両肩の中心に相当する支点 $\mathbf{x}_0$ に力 $\mathbf{F}_1$ とトルク τ_1 がリンク1へ作用し、グリップ位置に相当する関節位置 $\mathbf{x}_1$ には力 $\mathbf{F}_2$ とトルク τ_2 がリンク2へ作用するので、リンク1, 2の各並進のダイナミクスは

$$m_1(\ddot{\mathbf{x}}_{g1} - \mathbf{g}) = \mathbf{F}_1 - \mathbf{F}_2 \quad (8)$$

$$m_2(\ddot{\mathbf{x}}_{g2} - \mathbf{g}) = \mathbf{F}_2 \quad (9)$$

となり、このダイナミクスから得られた関節に作用する力 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2$ を利用し、各回転のダイナミクスは

$$J_1\dot{\omega}_1 + \omega_1 \times J_1\omega_1 = \tau_1 - \tau_2 - l_{g1}\mathbf{e}_{l1} \times \mathbf{F}_1 + (l_1 - l_{g1})\mathbf{e}_{l1} \times (-\mathbf{F}_2) \quad (10)$$

$$J_2\dot{\omega}_2 + \omega_2 \times J_2\omega_2 = \tau_2 - l_{g2}\mathbf{e}_{l2} \times \mathbf{F}_2 \quad (11)$$

となり、Newton-Eulerの運動方程式を得る。ここで、Eq. (7)を用いて

$$\mathbf{F}_2 = m_2(\ddot{\mathbf{x}}_{g2} - \mathbf{g}) \quad (12)$$

$$= \underbrace{m_2(\ddot{\mathbf{x}}_0 - \mathbf{g})}_{{}^2\mathbf{F}_{x0}} + \underbrace{m_2(\dot{\omega}_1 \times l_1\mathbf{e}_{l1})}_{{}^2\mathbf{F}_{eq1}} + \underbrace{m_2(\omega_1 \times (\omega_1 \times l_1\mathbf{e}_{l1}))}_{{}^2\mathbf{F}_{el1}} + \underbrace{m_2(\dot{\omega}_2 \times l_{g2}\mathbf{e}_{l2})}_{{}^2\mathbf{F}_{eq2}} + \underbrace{m_2(\omega_2 \times (\omega_2 \times l_{g2}\mathbf{e}_{l2}))}_{{}^2\mathbf{F}_{el2}} \quad (13)$$

のように関節間力 $\mathbf{F}_2$ における近傍のリンクの加速度の寄与を表現でき、 $\mathbf{F}_{x0}$ は肩の並進運動、 $\mathbf{F}_{eq1}$ は腕の角加速度、 $\mathbf{F}_{el1}$ は腕の向心加速度、 $\mathbf{F}_{eq2}$ はクラブの角加速度、 $\mathbf{F}_{el2}$ はクラブの向心加速度、の各寄与に分解できることを示している (Fig. 2参照)。ここで、向心加速度成分 $\mathbf{F}_{el1}, \mathbf{F}_{el2}$ は各リンクの単位法線ベクトル $\mathbf{e}_{l1}, \mathbf{e}_{l2}$ の負の方向を、角速度成分 $\mathbf{F}_{eq1}, \mathbf{F}_{eq2}$ は各 $\mathbf{e}_{l1}, \mathbf{e}_{l2}$ に直交する方向を向いている。また、グリップ部に作用するベクトル $\mathbf{F}_{eq2}$ の反対方向にクラブヘッドの回転運動が生じることに注意したい。

なお、 $\mathbf{F}_2$ は内力であり、Lagrange運動方程式のような一般化座標で表現する運動方程式では陽に表現されないが、ここで示したマルチボディダイナミクス解析を用い近傍のリンクの運動の影響を示すことが可能となる。

Fig. 2 Components of internal force $\mathbf{F}_2$

3 各リンクのエネルギー変化率

腕とクラブの各力学的エネルギーを微分することによって、腕とクラブのエネルギー変化率 (パワー)

$$\dot{E}_1 = \mathbf{F}_1^T \dot{\mathbf{x}}_0 - \mathbf{F}_2^T \dot{\mathbf{x}}_1 + \tau_1^T \omega_1 - \tau_2^T \omega_1 \quad (14)$$

$$\dot{E}_2 = \mathbf{F}_2^T \dot{\mathbf{x}}_1 + \tau_2^T \omega_2 \quad (15)$$

を得る (途中の計算過程の詳細は[5]を参照されたい)。Eq. (14)の $\mathbf{F}_1^T \dot{\mathbf{x}}_0$ は関節間力 (外力) によるエネルギーの伝達を、 $-\mathbf{F}_2^T \dot{\mathbf{x}}_1$ は内力によるリンク間のエネルギー伝達を表し、 $\tau_1^T \omega_1, -\tau_2^T \omega_1$ は筋力 (外力) によるエネルギー生成と吸収の項を表している。同様に、Eq. (15)の右辺の第1項 $\mathbf{F}_2^T \dot{\mathbf{x}}_1$ は関節間力 (内力) によるリンク間のエネルギー伝達を表し、第2項 $\tau_2^T \omega_2$ が筋力 (外力) によるエネルギーの生成と吸収を表している。

Eq. (14),(15)より系全体の力学エネルギーの変化率

$$\dot{E} = \dot{E}_1 + \dot{E}_2 \quad (16)$$

$$= \mathbf{F}_1^T \dot{\mathbf{x}}_0 + \tau_1^T \omega_1 + \tau_2^T (\omega_2 - \omega_1) \quad (17)$$

を得て、リンク1に供給される外力 $\mathbf{F}_1$ と関節トルク τ_1 とリンク間に作用する関節トルク τ_2 の全外力が、腕とクラブの系全体のエネルギーに影響していることがわかる。このように、関節間力 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2$ は系全体には寄与しない力のためLagrange運動方程式では陽に表現されないため、 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2$ を用いた解析を行うためにはNewton-Euler法のような冗長なシステムの記述の仕方が必要である。

4 内力を用いたエネルギー伝達

Eq. (14),(15)を注意深く見ると、リンク1のエネルギー変化率 $\dot{E}_1$ には $\mathbf{F}_2^T \dot{\mathbf{x}}_1$ を含み、リンク2のエネルギー変化率 $\dot{E}_2$ には $-\mathbf{F}_2^T \dot{\mathbf{x}}_1$ を含む。したがって系全体 $\dot{E}_1 + \dot{E}_2$ では $\mathbf{F}_2$ に起因するエネルギーの授受は相殺され、この力は系全体のエネルギー変化に寄与しない。すなわち、 $\mathbf{F}_2$ が系全体では仕事をを行わない内力であることを示している。

しかし内力 $\mathbf{F}_2$ は、一方のリンクにはエネルギーを増加させ、もう一方のリンクのエネルギーを減少させる作用がある。つまり内力が作用し、そこに内力方向の速度成分を持つ限り ($\mathbf{F}_2^T \dot{\mathbf{x}}_1 \neq 0$)、内力を媒介してエネルギーがリンク間を伝達する。このように内力はリンク間のエネルギー伝達のための重要な橋渡しの役割を果たす。そこで我々は内力によってエネルギーを伝達するこの機構を **energy pipeline** と呼んでいる [6]。

また、ゴルフスイングのようなフルアクチュエートの二重振子運動や、アクチュエータのない受動的な二重振子運動においても遅延のともなう運動がともに観察されることから、どのスイング運動においても内力がエネルギーの伝達において重要な役割を果たしていることが予想される。実際、受動的な二重振子では内力以外の伝達方法は存在せず、ゴルフスイングにおいてもクラブへのエネルギー伝達の大半はリンク間に作用する内力が寄与していることから、リンク間に作用する内力がエネルギー伝達を媒介することにスイング運動の力学的な基本メカニズムの本質があると考えられる。また、受動的な二重振子運動では内力として重力が支配的であるが、スポーツのような高速の運動では回転速度がより増大することから、向心力が支配的となる。したがって向心力をいかに制御するかが効率の良いエネルギー伝達をもたらすと言える。

5 座標系

5.1 腕とクラブ固定座標系

Fig. 3 Coordinates system for analysis

Fig. 3に座標系を示す。スイング運動中クラブシャフト軸回りの回転が存在するため、クラブの進行（速度）方向と、クラブに固定された座標軸は一致しない。そこで、分析用のクラブの座標系 Σ_{q2} を定義する。クラブシャフト軸に固定された単位ベクトル e_{l2} の速度、 de_{l2}/dt の単位ベクトル $e_{q2} \equiv \frac{de_{l2}/dt}{|de_{l2}/dt|}$ を定義する。この e_{q2} 方向はクラブのシャフト軸方向の単位ベクトル e_{l2} に垂直な向きを持つ。また、 e_{l2} とこの e_{q2} に垂直な方向の単位ベクトルを $e_{t2} \equiv e_{l2} \times e_{q2}$ とし、これらの単位ベクトル方向を座標系 Σ_{q2} の各軸を $(q2, t2, l2)$ とする。

また同様に、リンク1の長軸に固定された単位ベクトル e_{l1} の速度 de_{l1}/dt の単位ベクトルを $e_{q1} \equiv \frac{de_{l1}/dt}{|de_{l1}/dt|}$ とした。

6 実験

数値モデルと実験結果と比較することによって、エネルギー伝達とクラブの回転のメカニズムを検証する。男性6名の被験者が、約7m前方のネットに向かってドライバーによる実打を行った。腕とクラブの運動計測にモーションキャプチャ (Vicon MXシリーズ) を使用し500Hzで計測し、同時にIMU (M-Tracer: セイコーエプソン社) をクラブと腕に装着し同様に500Hzで計測を行った。

なお、以後代表的な男子1名の被験者のおおよそのダウンスイング開始（クラブヘッドの運動の向きが変わる）時刻 $t_s = -0.3 \text{ sec}$ からインパクト $t_i = 0.0 \text{ sec}$ までのデータを

示す。この分析区間のうち、腕のエネルギー変化率が正から負へ切り替わる $\dot{E}_1 = 0$ の時刻 $t_{E10} = -0.076 \text{ sec}$ を境に、スイング運動を前後半に分ける。

7 解析と考察

7.1 スイングにおけるムチ運動

Fig. 4 Angular velocity for each link

Fig. 4にクラブと腕の角速度の大きさを示した。ここで、各リンクの長軸方向の単位ベクトルの速度のノルム $(|\dot{e}_{l1}|, |\dot{e}_{l2}|)$ を計算しているが、 $\dot{E}_1 = 0$ となる時刻 t_{E10} 近辺で腕の角速度が最大値を示している。このように腕の運動が減速し始めてからクラブが加速し、腕とクラブの角速度の最大値の出現時間に遅延が生じるムチ運動の特徴が観察され、遅延のともなうこのような運動を通して腕の力学的エネルギーがクラブに伝達されていることを示唆している。以後、この遅延がどのように生じるか主としてエネルギーベースで考察し、ムチ運動の力学メカニズムを考察していく。

7.2 内力を用いた効率良いエネルギー伝達

Fig. 5 Comparison of power for each link

Fig. 5(a)に腕、クラブ、系全体のエネルギー変化率 $\dot{E}_1, \dot{E}_2, \dot{E} = \dot{E}_1 + \dot{E}_2$ を、Fig. 5(b)に全てのリンクに作用する各力に由来するエネルギー変化率を示した。Fig. 5(b)から特にスイング後半、クラブに伝わるエネルギーの多くが

Fig. 6 Relative angle between club and arm

内力に由来する $F_2^T \dot{x}_1$ によって伝達されていることがわかる。このことから、内力を用いた効率の良いエネルギー伝達のメカニズムを考察する。

Fig. 5(c)に各姿勢における力ベクトル F_2 と速度ベクトル $\dot{x}_1$ を示し、さらにその内積であるエネルギー変化率 $F_2^T \dot{x}_1$ をクラブのヘッド部分にクラブのシャフト軸方向に沿った矢印で示した。 $F_2^T \dot{x}_1$ を最大化するためには、力ベクトル F_2 と速度ベクトル $\dot{x}_1$ が大きいことも重要である。 F_2 のほとんどはクラブの向心力であるため[5]、クラブのシャフト軸方向 e_{l2} と一致する。また、グリップ部の速度 $\dot{x}_1$ は腕の回転運動に依存して決まるので、グリップ部の接線方向 e_{q1} と一致する。以上のことから、二つのベクトルの向きが一致するのは、クラブと腕の角度が約90 degのときと考えられる。

Fig. 6にはクラブと腕のなす相対角度を示した。Fig. 5(a)の $\dot{E}_2$ の最大値と相対角が90 degになっている時刻がおおよそ一致している。ところがFig. 5(c)のインパクト付近に注目すると、力ベクトル F_2 と速度ベクトル $\dot{x}_1$ の両ベクトルの大きさは大きいものの、ベクトルの向きが直交しているため、クラブにエネルギーを伝達できない状態を示している。

7.3 ナチュラルアンコック

井上[7]やWhite[8]らは、自然にクラブの回転（リストターン）が始まる条件を、グリップの角度を拘束したモデルや外力の作用しない受動的な二重振子モデルで考察している。ここでは、動力学モデルによってより厳密に自然なクラブの回転条件を定義し、自然な回転を誘発する条件も考察する。

7.4 カレベルの自然な回転

これまでリンク間に作用する内力 F_2 を媒介してエネルギーがクラブへ伝達されることと、Eq. (13)からその内力が5つの成分に分けられることを示した[5]。以下では、この内力 F_2 の各成分がクラブの回転にどのように寄与するかをトルクレベルで議論する。ここで、

$$R_{t2}(X) \equiv e_{l2}^T (-l_{g2} e_{l2} \times X) \quad (18)$$

によって定義されるベクトル X に対するオペレータ $R_{t2}(\cdot)$ を定義する。これは力ベクトル X に対してクラブの回転 $(-l_{g2} e_{l2} \times X)$ を起こすトルクベクトルのうち、クラブの接線方向の成分 (t_2 軸成分) だけを取り出すことを意味している。また、Eq. (13)より、このオペレータを用いた下記の計算

$$R_{t2}(F_2) = R_{t2}(^2F_{x0}) + R_{t2}(^2F_{eq1}) + R_{t2}(^2F_{el1}) + R_{t2}(^2F_{eq2}) + R_{t2}(^2F_{el2}) \quad (19)$$

Fig. 7 Torque due to muscle torque and internal force F_2

も満たす。

クラブの向心力に由来する $^2F_{el2}$ は第2リンクの法線方向 e_{l2} に作用し、第2リンクの回転運動には寄与しない ($R_{t2}(^2F_{el2}) = 0$)。また、ゴルフスイングでは両肩の中心はあまり動かさず肩回りの回転運動が行われるため、 $^2F_{x0}$ の貢献を無視することができる ($R_{t2}(^2F_{x0}) \approx 0$)。さらにグリップ部のトルク τ_2 が作用する場合は、第1リンクの角加速の寄与も小さい ($R_{t2}(^2F_{eq1}) \approx 0$)。以上のことから、クラブの回転運動は、腕の向心力に由来する $R_{t2}(^2F_{el1})$ と、クラブの角加速度に由来する $R_{t2}(^2F_{eq2})$ によって決まる。また、スイング中のリンク間の角度を考慮すると、これらの回転力の向きはクラブに対して互いに反対向きに作用するので、これらの二つの回転力のバランスによってクラブの回転の向きが変わると言える。

また、エネルギー伝達を媒介する向心力は角速度の二乗に比例するため、その増大には積分的に時間がかかり、このことがムチ運動におけるリンク間の速度の遅延の原因となっている。したがって一般には、スイング運動前半は腕の角加速度による寄与 $R_{t2}(^2F_{eq2})$ が、後半になるほど腕の向心力による寄与 $R_{t2}(^2F_{el1})$ が大きくなると言える。したがって、スイング運動前半では $R_{t2}(^2F_{eq2})$ によってスイングの回転に対して反対方向に、またスイング後半では $R_{t2}(^2F_{el1})$ によって次第に腕とクラブが真っ直ぐになるような方向へ（スイングの回転方向に）、クラブを引っ張っていく力が作用し、スイングの途中からこのバランスが変わる。そこでグリップ部のトルク τ_2 に頼らずにクラブが自然に回転を始める条件

$$R_{t2}(^2F_2) > 0 \quad (20)$$

を定義することができ、ここではこの条件を満たして回転を始めることをカレベルのナチュラルアンコックと呼ぶことにする。

なお、ダウンスイング開始からインパクトまでの期間に、クラブヘッドをボールの方向に近づけるようにクラブを回転させたいが、もしジョイント部のトルク τ_2 の作用がないと（劣駆動の状態）、スイング前半のクラブの運動が不安定となるが、グリップ部のトルク τ_2 はクラブを逆向きに動かないようにストップすることによって、後述するよ

うにクラブにエネルギーを効率よく伝達するとともに、クラブの運動を安定化することにも貢献している。

7.5 エネルギーレベルでの自然な回転

クラブの自然な回転開始条件をトルクのバランスによって定義したが、エネルギーレベルでも自然な回転開始を定義することができる。腕とクラブのエネルギーの大半は肩回りのトルクによって生成される。そのエネルギーの多くは腕とクラブ間に作用する内力 F_2 による energy pipeline によってクラブへ伝達される。このことから、腕のエネルギーは肩回りのトルクによって生成されるエネルギーと、energy pipeline によってクラブへ伝達するエネルギーとのバランスによって、腕のエネルギーの増減が決まる。したがって、腕のエネルギーが正から負へ切り替わる

$$\dot{E}_1 < 0 \quad (21)$$

ことは、腕からクラブに自然にエネルギーが流れ始める条件を意味し、それ以降自然にクラブのエネルギーが増え始めるという意味で、ここではエネルギーレベルでのナチュラルアンコックと呼ぶ。また、本研究ではすでに、腕のエネルギー変化率の符号が切り替わる ($\dot{E}_1 = 0$) 時刻を t_{E10} と定義し、この前後でスイング運動を前後半に分割したが、このことを裏付けるように、Fig. 4では t_{E10} で腕の角速度の最大値をむかえ、Fig. 6では t_{E10} 以降、腕とクラブ間の相対角度が急速に大きくなっている。そこで、この条件によって分割されたスイング前半をエネルギー蓄積フェーズ、後半をエネルギー解放フェーズと呼ぶこととする。

7.6 自然な回転を導く条件

エネルギーレベルでの自然な回転の開始条件が明らかになった。そこで次に、 $\dot{E}_1 < 0$ となるための条件を考察する。

Fig. 5(a)より、腕とクラブに流入するエネルギー変化を比較すると、肩から流入したエネルギーが腕を経由し、時間遅れをとめないながらも、その多くがクラブへ伝達されていることを示している。Eq. (14),(15)と Fig. 5(b)から、 $\tau_1^T \omega_1$ が腕への主なエネルギー源であり、 $F_2^T \dot{x}_1$ によって多くのエネルギーが腕からクラブへ伝達していることが分かる。

腕のエネルギーがクラブへ遅れながら伝達し、クラブのエネルギー E_2 が単調増加であることを考えると、スイング途中で肩回りのトルクによるエネルギー変化率 $P_{r2} \equiv \tau_1^T \omega_1$ の微分が負になることによって ($\dot{P}_{r2} < 0$)、ナチュラルアンコックの開始条件 $\dot{E}_1 < 0$ を満たすことになる。このことは、若干肩のトルクの大きさを緩めることによって、自然とクラブの回転が誘発されることを示しており、クラブの回転運動は肩からのエネルギー流入の変化によって制御が行われていることが、すなわち、主に肩のトルク τ_2 によってクラブの回転運動を制御していると言える。また、このことが腕とクラブの角速度の最大値の位相遅れの理由となっている。なお、エネルギーベースのこの開始条件は厳密にはクラブの回転開始を意味しないが、伝達されるエネルギーはクラブの向心力として伝達され、クラブを外側に引っ張ることによってクラブの回転運動を誘発することにつながっているため、これをナチュラルアンコック開始条件と考えることができる。また、トルクベースで計算された開始条件との時間差は1 ms 以下であった。

7.7 エネルギー伝達率

ゴルフスイングのエネルギー供給の大半が肩回りのトルクに由来することから、ここでは肩から流入したエネルギーがどの程度内力を媒介してクラブに伝達されたか、そ

Fig. 8 Transmission efficiency of energy

の割合によってエネルギー伝達率を定義する。伝達率を定義するため、Fig. 5(b)に示した $\tau_1^T \omega_1$ と $F_2^T \dot{x}_1$ だけを抽出し、Fig. 8に示す。二つの曲線が囲む面積が、肩のトルクによって生成したスイング中のエネルギーと、内力によってクラブに伝達されたエネルギーを示している。したがって、この面積（エネルギー）比を計算することによって、ここではエネルギー伝達率を定義する。積分区間をダウンスイング開始 t_s からインパクト t_i までとして、生成したエネルギー $\bar{E}_1$ と伝達されたエネルギー $\bar{E}_2$

$$\bar{E}_1 \equiv \int_{t_s}^{t_i} \tau_1^T \omega_1 dt \quad (22)$$

$$\bar{E}_2 \equiv \int_{t_s}^{t_i} F_2^T \dot{x}_1 dt \quad (23)$$

を定義すると、ゴルフスイングにおけるエネルギー伝達率

$$\eta \equiv \bar{E}_2 / \bar{E}_1 \quad (24)$$

を定義できる。この解析データの場合、エネルギー伝達率 η は63%である。一見するとこの値は小さく、伝達率が100%に近い方が望ましいと思われるが、内力による伝達に遅延が生じることと、 $\bar{E}_2$ を最大化するため肩からのエネルギー流入をインパクトまで続けることから、実際のスイングでは100%とはならない。

White[8]は、通常の受動的な二重振子モデルを用い、クラブ側のリンクの質量を重くすることによって、エネルギー伝達率が100%に近づくことを示した。ただしこの場合、全てのエネルギーを伝達することは腕側のリンクの運動エネルギーが0になることを示しており、ゴルフスイングにおいても100%に近づけるためには肩の運動を急激に止める必要がある。したがって、ゴルフスイングで滑らかな腕の運動を妨げないためにも、また伝達に遅延が生じることを考慮すると、 $\bar{E}_2$ を最大化するという意味で、肩のトルクによるエネルギー流入はインパクトまで継続するのが望ましいと考えられる。なお、他の被験者の実験データは50%から65%程度の間を示し、一般に上級者ほどエネルギー伝達率は高い傾向にある。

7.8 グリップ部の制御

これまでの議論で、クラブの回転が肩からのエネルギー流入によって制御できることを示した。さらにその結果、肩のトルクとクラブの向心力とのバランスによってクラブの姿勢が変化する。そこで次に、グリップ部の関節トルクがどのようにクラブの回転を調節しているのかという観点からスイング運動を分析する。

ゴルフの物理モデルではリンク1とリンク2を固定する拘束 ($\omega_1 = \omega_2$) を与えて、モデル化されることが多い[7, 8]。実際のゴルフスイングでも、完全には拘束はしないが、エ

Fig. 9 Joint torque $e_{t2}^T \tau_1, e_{t2}^T \tau_2$

エネルギー伝達を効率よく伝達するため、グリップ部のトルクによってクラブと腕間の相対角度は90 deg近くに保持されていることを示した。また、一般に知られているように、二重振子運動は典型的な非線形システムで通常カオティックな運動となる。ところがヒトがスイング運動を制御する場合、このようなカオスが生じないのは、腕の回転方向と逆向きに動こうとする ${}^2F_{L1a}$ によるクラブの回転を、グリップ部分でクラブの反対方向の回転をストップするように手首のトルクが作用するため、特にスイング前半にこの力が寄与している。すなわち、エネルギー蓄積フェーズでは主にクラブヘッドをスイング方向とは反対に戻そうとする不安定な状態を防ぐために、関節トルク τ_2 が寄与していると考えられる。また、ナチュラルアンコック時のクラブと腕の相対角が大きくなる（開きすぎる）ことによって、インパクト時のクラブの制御が困難にならないようにしている可能性もある。

一方、エネルギー解放フェーズでは、特にグリップ部に関節トルク τ_2 を与えなくとも自然にクラブの回転運動が生じる安定な状態に移行するので、エネルギー供給という意味で余分な関節トルク τ_2 を加える必要がなく、スイング方向の回転に寄与する関節トルク $e_{t2}^T \tau_2$ は小さくなるが、インパクト時の目標姿勢を実現するために、フィードバック的な制御が必要になると思われる。実際のスイングでも、リストを一定の角度に拘束する以上の関節トルク τ_2 が与えられていることから、インパクト時のクラブの目標の姿勢を実現するためにグリップ部にトルクを与えていると考えられる。

8 おわりに

ゴルフスイングに限らずスイング系の運動はムチ運動などと呼ばれ、肩や近位側の筋肉が生成した大きな動力を、筋力（外力）ではなく内力によってクラブに伝達するメカニズムがスイング運動の基本パターンを形成している。ハンマー投のように一見するとムチ運動のように見えない動作でも、同じ原理を繰り返し用いてハンマーを加速していることは驚きである[9]。また効率の良いエネルギー伝達を実現する内力の制御方法を考察することによって、ムチ運動と呼ばれる一般のスイング運動に共通する運動パターン生成の原理について明らかにした。さらにムチ運動のリンク間の遅延は、向心力を用いてエネルギーを伝達する機構から発生することも明らかにした。

本研究では $\dot{E}_1 = 0$ という条件のもとでスイング運動を前半と後半に分けたが、そのときを境にスイングに物理的な違いが表れた。前半のエネルギー蓄積フェーズでは肩回りのトルクによってエネルギーを流入しているものの、この動力が二重振子の不安定性を招いている。この問題に対してグ

リップ部のトルクを与えることによってスイング運動を安定させ、かつ効率よくエネルギーを伝達させている。また、エネルギー解放フェーズではグリップ部に与える関節トルクに頼らずとも、自然にエネルギー伝達がクラブに進み、かつそのエネルギーをクラブの回転運動に変換することによって自然で安定なスイング運動を実現している。したがって、この条件の物理的意味は、不安定なエネルギー蓄積フェーズから、自然にクラブの回転運動が生じる安定なエネルギー解放フェーズに移行する条件と言える。

また、我々は今後これらの全てのダイナミクス計算をIMU (Inertial Measurement Unit) と呼ばれる3軸加速度計と3軸ジャイロセンサの慣性センサを含む計測システムで置き換えて、動力学計算にIMUを使用した診断システムを開発する予定である。IMUは直接位置や姿勢の情報は直接計測することが出来ないものの、加速度信号や角速度信号を計測するために、ノイズという点で利点がある。また小型化されたIMUを直接計測部位に装着することによって、簡便な動力学計算が可能となる。たとえば、内力 F_2 を計算する場合、Eq. (9)の $\ddot{x}_{g2} - g$ を直接IMUが計測するので、リンク2の質量 m_2 の情報と加速度信号だけで、微分演算を用いず内力 F_2 を推定することが可能となる。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究 (B) (課題番号:22300220) の支援を受けた。

参考文献

- (1) Arthur E. Chapman, Robert Lonegrgan, and Graham E. Caldwell. Kinetic sources of lower-limb angular displacement in the recovery phase of sprinting. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, Vol. 16, No. 4, pp. 382–388, 1984.
- (2) Michael Feltner and Jesús Dapena. Dynamics of the shoulder and elbow joints of the throwing arm during a baseball pitch. *International Journal of Sport Biomechanics*, Vol. 2, No. 4, pp. 235 – 259, 1986.
- (3) Tad McGeer. Passive dynamic walking. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 62–82, 1990.
- (4) 浅野文彦, 羅志偉, 山北昌毅. 力学的エネルギー回復に基づく動的歩容生成と制御. *日本ロボット学会誌*, Vol. 23, No. 7, pp. 821–830, 2005.
- (5) 太田憲, 仰木裕嗣, 滋谷和宏. 二重振子モデルによるゴルフスイングの数理解析. シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011, pp. 447–452, 2011.
- (6) Ken Ohta, Yuji Ohgi, and Kazuhiro Shibuya. Energy transfer through the internal force in the golf swing. *The World Scientific Congress of Golf*, 2012.
- (7) 井上喜雄. ゴルフスイングの感覚と力学. *スポーツ工学*, No. 5, pp. 27–34, 2010.
- (8) Rod White. On the efficiency of the golf swing. *American Journal of Physics*, Vol. 74, No. 12, pp. 1088–1094, 2006.
- (9) 太田憲, 梅垣浩二, 室伏広治, 羅志偉. 二重振子のパラメータ励振原理によるハンマー投運動の数理解析. *日本機械学会スポーツ・アンド・ヒューマンダイナミクス 2010 講演論文集*, pp. 319–324, 11 2010.