

ゴルフスイング時の体幹動作によるバランスに関する研究

(運動解析とエネルギー収支の観点からの検討)

Study on Balance in Golf Swing by Trunk Motion: From the View Point of Motion Analysis and Energy Flow

知能機械システム工学コース

ヒューマンメカトロダイナミクス研究室 1225048 福本 稔

1. 緒言

ゴルファーが標準的なスイングを行った場合には、スイング初期での腕やクラブを加速する際の接線方向の慣性力やヘッドスピードが大きくなった段階での遠心力など、スイングに起因する慣性力が発生しそれらがゴルファーに加わる。このような力により大きいモーメントが発生するため、アマチュアゴルファーの平均的なスイングでも、ゴルファーが何も対策を行わなければ転倒モーメントを超えてしまう。加わるモーメントが転倒モーメント以下であれば、圧力中心がゴルファーの両足の内側(支持基底面)にあり姿勢は保てるが、転倒モーメントを超えた場合には、地面と足底の間では引張力が発生しないと姿勢を維持できない。しかし実際には引張力は発生できないので足が浮き上がりよろめいてしまう。すなわち、足が浮き上がらないと仮定した場合の圧力中心は支持基底面の外にでてしまう。特に飛距離を求めヘッドスピードを高めようとすれば、スイングによるモーメントは大きくなってしまふ。しかし、実際には多くのゴルファーがよろめかずにスイングしていることを考えれば、スイングにより転倒モーメントを超えるモーメントが加わっても、スイング以外の動作でそれを相殺する方向のモーメントを発生させ、圧力中心が支持基底面内に入るようにしていると考ええる。

力学的な観点からのゴルフスイングに関する研究は、1970年前後から盛んになり、平面の剛体2リンクモデル(2重振子)を用いた研究⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾や3次元での多自由度モデルを用いた研究⁽⁵⁾⁽⁶⁾などが多く報告されている。しかし、スイングのメカニズムやヘッドスピードなどのスイングそのものに係わるものが多く、どのようにしてバランスをとっているかを取り上げた研究は見当たらなかった。そこで既報⁽⁷⁾では、打球方向および前後方向についてゴルファーがどのような動作を行ってバランスをとっているかを実験的に検討した。その結果、ゴルファーは体幹を中心とした動作で加速度を変動させることにより、スイングによるモーメントを相殺しバランスを取っていることが示した。

前述のように、バランスを取るための動作を行わなければ、よろめいてしまい、まともにスイングすることが困難になることを考えれば、バランス動作はスイングには必須の動作であると考えられる。しかし、本来体幹の主要な役割はスイングの駆動力を伝達することである。この駆動源となる体幹を動かしてバランスを取るのであれば、バランス動作がヘッドスピードの増減にも影響する可能性があると考ええる。

そこで、本研究では、バランス動作がヘッドスピードにどのように影響するかを明らかにすることを目的とする。バランス動作によりインパクト時までにクラブ、腕に流入したエネルギーが多くなれば、結果的にクラブヘッドの運動エネルギーも多くなりヘッドスピードも上昇すると考え、バランス

動作がクラブ、腕の運動エネルギーにどのように影響するかについて、エネルギー収支という観点から、3次元動作解析装置で計測したデータを処理することによって検討する。

これまでに、既報⁽⁸⁾にてバランス動作がヘッドスピードに影響を与える3種類のメカニズムを提案し、1名の被験者を対象としてバランス動作のヘッドスピードへの影響を報告した。本報では、複数の被験者において同様の計測実験を行い、提案する3種類のメカニズムの効果について被験者共通の現象と被験者による差異を確認する。

2. スイングの計測

モーションキャプチャ(Motion Analysis 社製 MAC3D)と床反力計(テック技販社製 TF6090)を用いてスイング中の各部の運動を測定する。スイングによる慣性力を生じるクラブ、腕(S系)と、それ以外のバランス動作に関わる頭部、体幹上部、下部、大腿、下腿、足(B系)に分け、各系によるエネルギー収支について検討する。被験者の全身にマーカを貼り付けて、床反力計の上に乗った状態でスイングの計測を行う。身体各部を阿江の方法⁽⁹⁾にしたがって分割し、図1のように床面上に打球方向(x)、前後方向(y)、鉛直方向(z)に軸を取り、計測により得られたマーカ位置の3次元座標から身体各部の重心位置の座標値および加速度を求め、各部による慣性力、重力を算出する。今回の実験では右打ちの男性で4名のゴルファーのスイングをサンプリング周波数 300Hz で5回撮影した。被験者情報を表1に示す。

Table 1 Detailed subject information.

Subject	Age (years)	Height (m)	Weight (kg)	Experience (years)	Average score
#1	66	1.74	76	35	85
#2	69	1.76	74	45	88
#3	23	1.69	56	5	107
#4	24	1.88	91	1	126

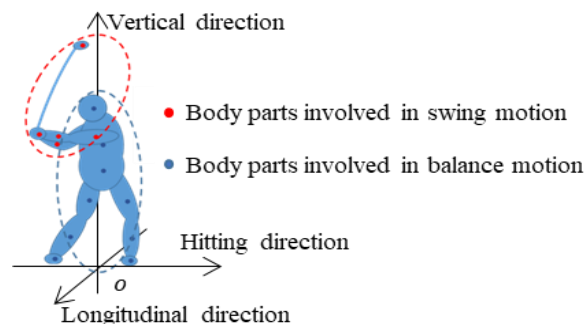


Fig. 1 Classification of body parts.

3. エネルギー収支のメカニズム

B系でのバランス動作は、安定したスイングを実施するための必須の動作ではあるが、B系を構成する体幹や下肢の本来の役割は、スイングを支えスイングを駆動する原動力である。すなわちB系ではバランスのための動作と駆動のための動作が同時に行われていることになる。そのような状況であれば、バランスのための動作がスイングの駆動に影響する可能性は十分あると考えられる。そこでバランス動作がS系に影響するメカニズムとして以下の3種類を考え、その影響をエネルギー収支の観点から検討する。

(1) 回転中心の移動によるエネルギー流入メカニズム

バランスをとるためにB系である体幹を動かせば、図2のようにスイングの回転中心(左右の肩の中心)も動くが、スイングによるクラブや腕の慣性力・重力に起因する力が回転中心には働いている。回転中心を介して接続されたS系とB系の間で仕事が行なわれるので、その時のエネルギー収支を考える。回転中心でB系からS系に働く各方向の力は、腕とクラブに働く慣性力と重力の反力として計算できる。打球方向について、力を $-F_x$ 、回転中心の速度を $\dot{x}_c$ とすると、B系がS系にする仕事の仕事率 P_x は、

$$P_x = -F_x \dot{x}_c \quad (1)$$

となり、それをダウンスイング開始からインパクトまで積分すれば、打球方向でB系からS系に流入したエネルギーが計算できる。それを3方向分加算すればB系からS系に流入するエネルギーが得られ、そこから位置エネルギーの変化分を差し引けばS系の運動エネルギーの増加分が算出できる。

(2) 体幹軸の傾斜によるエネルギー流入メカニズム

多くのゴルファーはバランスのための動作を行った結果、図3のようにダウンスイング開始時とインパクト時での前方から見た体幹軸の傾斜角が変化する。スイングの主たる動力源である腕トルクは体幹軸の傾斜により変化しないとし、また、傾斜角の分だけ腕の回転ストロークが増えたと考えれば、腕トルクによる仕事は、傾斜角を考慮しない場合と比べ

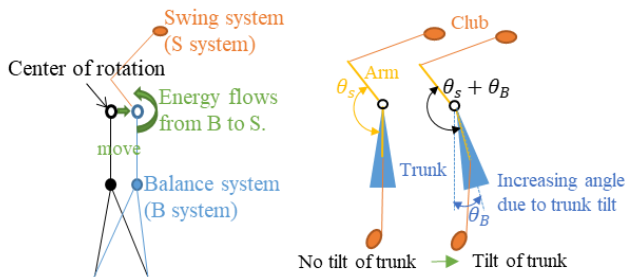


Fig. 2 Increase of energy by moving the center of rotation.

Fig. 3 Increasing energy flowing into S system due to trunk axis tilt.

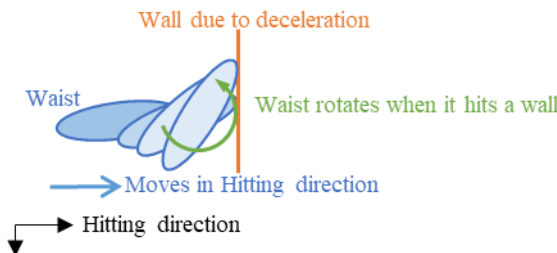
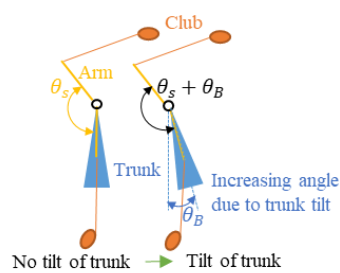


Fig. 4 Conversion of decelerated translation motion of waist into rotational motion.

てストロークの増加に比例して増加すると考え、その増加分の仕事 T_θ は、次式で表現できる。

$$T_\theta = T_s \{1 - \sqrt{\theta_s / (\theta_s + \theta_B)}\} \quad (2)$$

ここで、 T_s は本来のS系の運動エネルギー、 θ_s は体幹を傾斜させないとした場合の腕の可動角度、 θ_B 体幹軸の傾斜角度を表わす。

(3) 体幹の並進運動から回転運動への変換によるエネルギー流入メカニズム

図4に示すように打球方向へ並進運動させた体幹を減速させバランスを取る際、その減速に腰の回転を助ける効果があると考えられる。次章に示すようにこの効果は他の2つと比べ十分小さかったため、詳しい計算法は省略する(既報⁽⁸⁾参照)。

4. エネルギー収支の計算結果

インパクト付近でのエネルギー収支の結果を、表1の被験者ごとにまとめて図5に示す。この結果を基に3種のメカニズム(1)~(3)の効果を確認する。

図5の青が(1)の結果を示している。これは各被験者において結果が異なった。次に、橙で示したものが(2)の結果で、これについては、大きさにバラツキはあるものの4人の被験者とも10J前後の正の値をとっている。最後に、図中の灰色が(3)の計算結果であるが、こちらのエネルギー変化は非常に小さい値となった。

以下では、各メカニズムについて、被験者による違いについて詳しく調べた結果を示す

図6に上級者の被験者#1の(1)のメカニズムによるエネルギー収支の詳細な結果を示す。図には、回転中心の打球方向(青)、前後方向(橙)、鉛直方向(灰色)の各方向のエネルギー変化と位置エネルギー(黄色)、そして各方向のエネルギー変化の総和から位置エネルギーを引いて求めた運動エネルギー(緑)の変化を示している。各方向のエネルギーは正の値を取り、運動エネルギーはインパクトの前で増加している。これはB系を動かすことで回転中心を介してS系にエネルギーが流入していることを示している。

エネルギー変化は式(1)で示したように回転中心に働く力と回転中心移動速度の積を積分することで求めているので、図7から図9に被験者#1の打球方向、前後方向、鉛直方向の各方向の力(青)と速度(橙)の変化を示す。エネルギーが力と速度の積であることを考えると、各パラメータの符号が同じ時にエネルギーは増加して、異なる時に減少することになる。被験者#1の結果は図7, 8, 9から力と速度の関係がどの方向においても同符号になるような変化をしている。

次に、(1)のメカニズムにおいて結果が負になった初心者の被験者#4について先程と同様に詳細を観察する。まず、図10に各方向のエネルギー変化と位置エネルギー、運動エネルギーの変化を示す。結果を見ると、インパクトの直前で打球方向と前後方向でのエネルギーが負の方向に変化していて、合

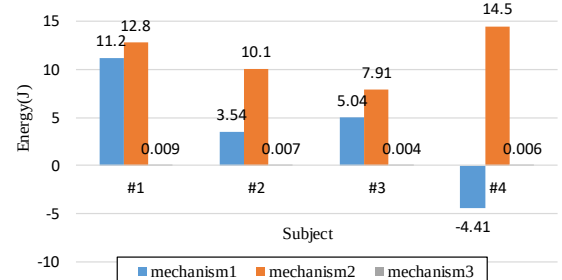


Fig. 5 Energy balance by trunk motion due to B system.

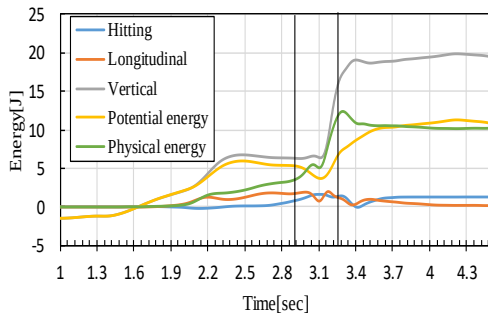


Fig. 6 Energy balance by mechanism1 for subject #1.

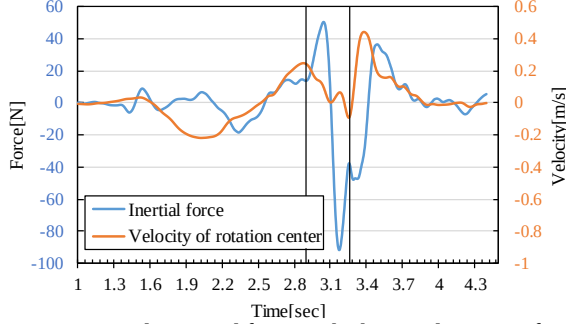


Fig. 7 Velocity and force in the hitting direction of subject #1.

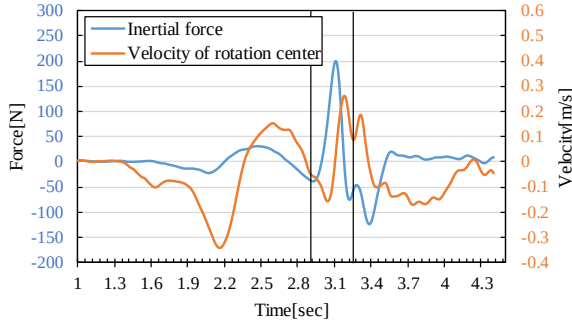


Fig. 8 Velocity and force in the longitudinal direction of subject #1.

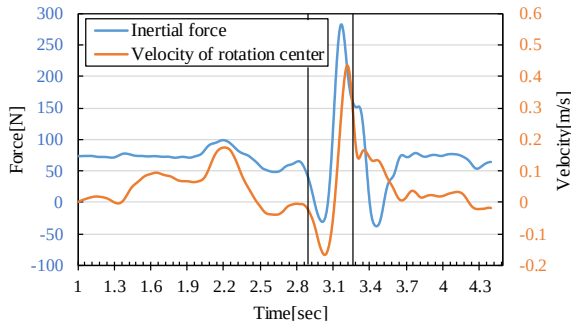


Fig. 9 Velocity and force in the vertical direction of subject #1.

計の運動エネルギー(緑)が負の値を示している。これは先程の被験者#1とは逆に、回転中心にS系側から仕事をしていることになる。この被験者についても力と速度の関係を図11, 12, 13にまとめて示す。結果、インパクト前での打球方向と前後方向の力と速度の関係が異なる符号になっている。図7～9, および図11～図13の各方向の力と速度の図の形は、両被験者でおよそ同じであるが、各パラメータの変化のタイミングが異なることでB系が仕事をするのか、あるいは仕事をされるのか結果が変わることがわかった。

次に、(2)のメカニズムの結果について考える。図5の結果、各被験者においていずれも正の値を取る結果になった。表2に各被験者のダウンスイング開始からインパクトまでの体

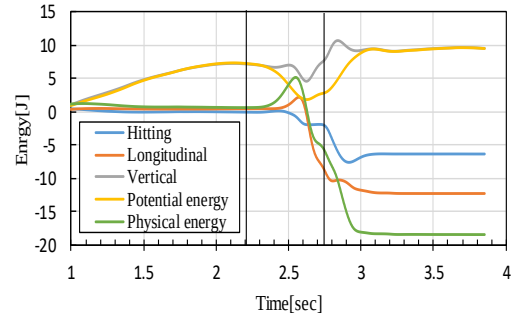


Fig. 10 Energy balance by mechanism1 for subject #4.

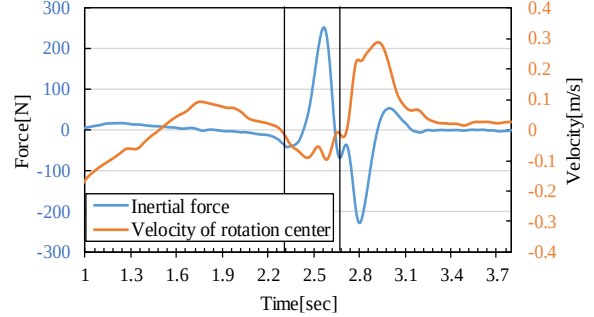


Fig. 11 Velocity and force in the hitting direction of subject #4.

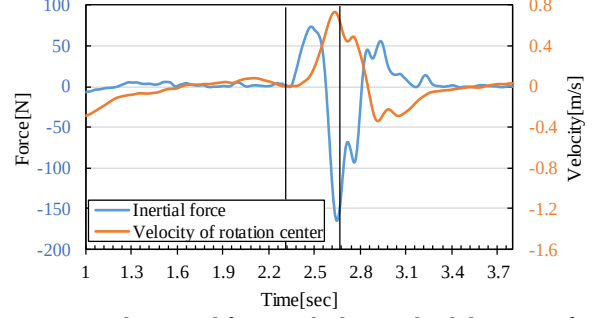


Fig. 12 Velocity and force in the longitudinal direction of subject #4.

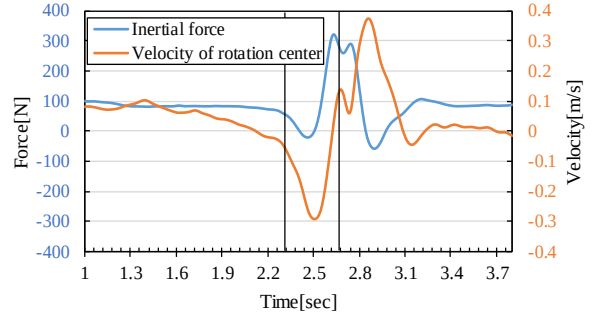


Fig. 13 Velocity and force in the vertical direction of subject #4.

幹軸の傾斜角度 θ_B と腕の可動角度 θ_S を示す。各被験者に多少の差があるものの、体幹の傾斜角度は 0.35rad から 0.50rad の間の量となっていて、腕の可動角度もおおよそ同じ量を示している。しかし、被験者#3については、他の被験者に比べると腕の可動角度が大きくなっている。この(2)のメカニズムは、式(2)よりそれぞれの角度の比によって増加するエネルギーの量が決まるので、腕の可動角度が大きい被験者#3のエネルギー流入が小さくなった。

最後に、(3)の計算結果について、非常に小さな値ではあるが、エネルギーを増加させる方向にあることが確認された。このことから打球方向に腰をスライドさせる際、並進運動を回転の方向に変換する効果があることが確かめられた。

Table 2 Parameters used for calculation of mechanism2.

Subject	Tile angle of trunk axis(rad)	Movable angle of arm(rad)	Energy balance (J)
# 1	0.468	2.195	12.84
# 2	0.379	2.191	10.08
# 3	0.354	3.136	7.90
# 4	0.497	2.342	14.52

5. 結言

ゴルファーはクラブ・腕からなるスイング系(S 系)に生じるスイング時の慣性力によるモーメントによってよろめかないために、それを相殺する頭、体幹、下肢からなるバランス系(B 系)でバランスをとる動作を行なっているが、B 系を構成している部位の体幹や下肢には本来 S 系を支えヘッドを加速する駆動源であるという重要な役割がある。両方の動作は同時に実施されているのでバランス動作がスイングの駆動にも影響している可能性があると考え、4 名の被験者においてバランス動作のヘッドスピードへの影響について検討を行った。

被験者が行うバランス動作のなかで、S 系へのエネルギー流入に関する主要メカニズムとして、2 リンクモデルの回転中心の移動に伴う S 系へのエネルギー流入、体幹軸の傾斜による腕トルク有効期間の伸長による流入エネルギーの増加、体幹の打球方向への並進運動が減速する際の回転運動への変換、以上 3 つを取り上げて検討した。

その結果、エネルギーの総和については、すべての被験者において系にエネルギーが流入しておりヘッドスピードを上昇させる効果を有していることを確認した。体幹の打球方向速度が減速する際の回転速度への変換の効果については全被験者で非常に小さく、体幹軸の傾斜による腕トルク有効期間の伸長による流入エネルギーの増加については被験者による差は多少あるものの全員エネルギーが増加の方向で

あった。回転中心の移動に伴う S 系へのエネルギー流入については、3 名がエネルギー増加であったが、1 名は減少という結果が得られた。そのような差が生じることは、回転中心の速度と回転中心に加わる力の符号の関係が被験者によりかなり異なっていることに起因していることがわかった。

文献

- (1) Cochran, A. and Stobbs, J., The search for the perfect swing, Heinemann, London. (1968).
- (2) Jorgensen, T.P. The physics of golf, American Institute of Physics, New York. (1994).
- (3) Pickerring, W.M and Vickers, G.T., On the Double Pendulum Model of the Golf Swing, Sports Engineering, Vol.2-3(1999), pp.161-17.
- (4) 井上喜雄, 劉濤, 芝田京子, 園部元康, ゴルフスイングにおけるリストターンの動力学解析 (モード解析によるメカニズム検討), 日本機械学会論文集, Vol.83, No.851 (2017), DOI:10.1299/transjsme.17-00029/transjsme.17-00029.
- (5) Nesbit, M.S., and Serano, M., Work and power analysis of the golf swing, Journal of Sports Science and Medicine 4(2005), pp.520-533.
- (6) MacKenzie, S.J., Sprigings, E.J., A three-dimensional forward dynamics model of the golf swing, Sports Engineering, Vol.11-4 (2009), pp.165-175.
- (7) 福本稔, 井上喜雄, 芝田京子, 園部元康, ゴルフスイングにおけるバランスメカニズムの実験的解明 (打球方向と前後方向におけるバランス), 日本機械学会, SHD2018 講演論文集(2018), B9.
- (8) 福本稔, 井上喜雄, 芝田京子, ゴルフスイングにおけるバランスメカニズムの実験的解明 (バランス動作によるエネルギー収支), 日本機械学会, SHD2019 講演論文集(2019), B25.
- (9) 阿江道良, 湯海鵬, 横井孝志, 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定, バイオメカニズム, 11-ヒトの形態と運動機能, (1992), pp.22-23.