

《小特集》

ゴルフスイングのスキル解析

鈴木 聡一郎*

ABSTRACT Generally, the dynamic characteristic of sport materials is closely related to the motion of the sport player, and strongly affects the performance of the player. In this paper, for the skill analysis of the golf swing, it is noticed that the skillful player pays attention to the shaft elasticity, and that the difference of the characteristic of the swing motion between the skillful player and the beginner remarkably appears in their wrist turn. In order to clarify dynamic factor of the skills, the method that estimated the skilled motion from the simulation results of the golf swing by using the simplified dynamic model, and verified the results of the skill analysis by measuring the swing motion of the skillful player and the beginner was tried. Relationship between the skills in the wrist turn and the dynamic characteristic of a golf club was clarified by the results of the golf swing simulation and the experiment.

1. はじめに

一般に、スポーツ用具の動特性とプレーヤーの動作には密接な関係があり、プレーヤーが発揮するパフォーマンスに大きな影響を及ぼすといわれている。ゴルフにおいても、特に上級者は、技術向上や好成績を収めるため、ゴルフクラブの重量バランスやヘッドの重心位置などの調整に加え、シャフトの曲げ剛性分布に至るまで細心の注意を払い、ゴルフクラブの動特性を自分のスイング特性に合わせる努力をしている。そのため、古くからコンピュータシミュレーションによるゴルファーのスイング動作解析やクラブ特性の影響に関する検討が行われてきた^{1)~3)}。これらの先行研究では、ゴルファーの左腕とゴルフクラブを剛体リンクに置き換えた簡略化モデルを用いて、ゴルフスイングのダイナミクスを理解することに主眼が置かれていた。その後、クラブシャフトの弾性を考慮したモデルによる検討が主流となり、近年では有限要素モデルを適用することで、モデルの厳密化が推し進められてきた。その結果、ゴルファーのスイング解析やクラブ特性の最適化に関する多くの検討が行われるようになった^{4)~6)}。この場合、実測したスイングデータを基に逆動力学解析によって関節トルクを算出する方法が良く用いられる。しかしながらゴルフスイングは短時間で

大きな加速を伴うため、関節運動の実測値は一定の精度が保証されるものの、モデル化誤差の影響は無視することができず、ゴルファーのスキルについて言及できるほどの精度で解析結果が得られていないのが現状である。

著者らは、これまでにゴルフ上級者のスキル動作が再現可能な、ゴルフクラブ性能評価用スイングロボットの研究を行ってきた^{7)~9)}。スキル解析にあたり、上級者がクラブ特性の中でも特にシャフトの曲げ剛性を重要視すること、ならびにアンコックと呼ばれるリストターンの始動タイミングに、上級者と初級者のスイング特性における相違点が顕著に現れることに着目した。スキル動作の力学的背景を明らかにするため、敢えて簡略化したモデルによるシミュレーション結果からスキルを予測し、上級者のスイング計測結果により検証するという方法を試みた。本報では、リストターンのスキルとクラブ特性の関係を明らかにするとともに、計測実験による結果と比較し、解析結果を検証する。

2. モデリング

2.1 力学モデル

簡略化モデルは、図1(a)(b)に示すようにゴルファーの左腕とゴルフクラブのみをモデル化し、肘関節を考慮しない上腕部と前腕部、および手掌部とクラブのグリップ部をそれぞれ一つの剛体リンクに置き換える。またシャフトは一様な弾性はりとして取り扱い、その先端には中心軸から距離 r の位置にヘッドを剛体

Skill Analysis of the Golf Swing. By Soichiro Suzuki (Kitami Institute of Technology).

*北見工業大学

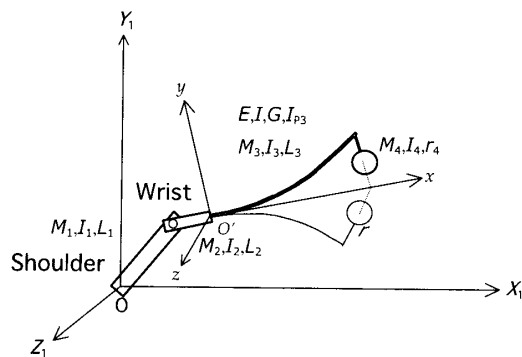
球として配置する．スイング動作は，固定座標系 $O-X_1Y_1Z_1$ に傾斜角をもつスイング平面を設定し，この平面内を腕とグリップ部が，それぞれ肩関節ならびに手首関節を中心に回転するものとする．さらに，実際のゴルフスイングでは左前腕部の回外動作を伴うため，グリップ部に固定した回転座標系 $o'-xyz$ において， x 軸まわりにグリップ部ならびにシャフトが回転するように設定する．なお，図 1(b) における Φ は回外動作によるグリップ部まわりの回転角度を示し， ϕ はシャフトのねじり振動変位を示す．

2.2 状態方程式

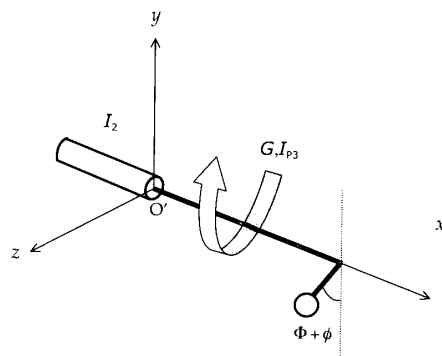
設定したモデルに対しハミルトンの原理を適用することで，肩および手首関節まわりならびに前腕の回外運動に関するモーメントの釣り合い式 (1)～(3) と，シャフトの面内，面外ならびにねじり振動方程式 (4)～(6) を得るが，その詳細は省略する．

$$C_1\ddot{\theta}_1 + (C_2L_C + D_1L_S)\ddot{\theta}_2 + (C_2L_S - D_1L_C)\ddot{\theta}_2^2 + 2\ddot{D}_1L_S\dot{\theta}_2 + \ddot{D}_1L_C + G_1L_C - Q_1 = 0 \quad (1)$$

$$(C_2L_C + D_1L_S)\ddot{\theta}_1 + (C_3 + D_2)\ddot{\theta}_2 - (C_2L_S + D_1L_C)\ddot{\theta}_1^2 + \ddot{D}_2\dot{\theta}_2 - D_3 - G_2\cos\theta_2 + S_1\sin\theta_2 - Q_2 = 0 \quad (2)$$



(a) 力学モデルと座標系



(b) 前腕の回外動作と座標系

図 1 簡略化モデル

$$E_1L_C\ddot{\theta}_1 + E_1(L_2 + L_3)\ddot{\theta}_2 - E_1L_S\dot{\theta}_1^2 - F_1\dot{\theta}_2^2 + E_1\ddot{y}_{L_3} - E_2\ddot{z}_{L_3} + \left(M_4r^2 + I_4 + \frac{1}{2}(M_2r_2^2 + M_3r_3^2)\right)\ddot{\Phi} + \rho_3I_{P3}\int_0^{L_3}\ddot{\phi}dx + (I_4 + M_2r^2)\ddot{\phi}_{L_3} - H_1 - Q_3 = 0 \quad (3)$$

$$\rho_3A_3\left\{\ddot{y} + L_C\ddot{\theta}_1 + (L_2 + r)\ddot{\theta}_2 - L_S\dot{\theta}_1^2 - y\dot{\theta}_2^2 + g\cos\theta_2\sin\alpha\right\} + ELy'''' = 0 \quad (4)$$

$$\rho_3A_3(\ddot{z} + g\cos\alpha) + ELz''' = 0 \quad (5)$$

$$\rho_3I_{P3}(\ddot{\Phi} + \ddot{\phi}) - GI_{P3}\phi'' = 0 \quad (6)$$

ここで，力学的境界条件は面内および面外に関する (7)，(8) 式および (9)，(10) 式，ねじりに関しては (11) 式となる．

$$M_4L_C\ddot{\theta}_1 + M_4(L_2 + L_3)\ddot{\theta}_2 - M_4L_S\dot{\theta}_1^2 - (M_4y_{L_3} + E_2)\dot{\theta}_2^2 - E_1(\ddot{\Phi} + \ddot{\phi}_{L_3}) - E_2(\ddot{\Phi} + \ddot{\phi}_{L_3})^2 + M_4\ddot{y}_{L_3} + M_4g\cos\theta_2\sin\alpha - ELy_{L_3}''' = 0 \quad (7)$$

$$ELy_{L_3}'' = 0 \quad (8)$$

$$E_2(\ddot{\Phi} + \ddot{\phi}_{L_3}) - E_1(\ddot{\Phi} + \ddot{\phi}_{L_3})^2 + M_4\ddot{z}_{L_3} + M_4g\cos\alpha - ELz_{L_3}''' = 0 \quad (9)$$

$$ELy_{L_3}' = 0 \quad (10)$$

$$E_1L_C\ddot{\theta}_1 + E_1(L_2 + L_3)\ddot{\theta}_2 - E_1L_S\dot{\theta}_1^2 - F_1\dot{\theta}_2^2 + E_1\ddot{y}_{L_3} - E_2\ddot{z}_{L_3} - (I_4 + M_4r^2)(\ddot{\Phi} + \ddot{\phi}_{L_3}) - GI_{P3}\phi_{L_3}' + H_1 = 0 \quad (11)$$

次に，先端に質点を有する片持ばりの運動方程式を基本に，弾性シャフトの固有関数ならびに固有円振動数を求める．幾何学的境界条件は，

$$y(0, t) = y'(0, t) = 0 \quad (12)$$

を満足し，力学的境界条件は

$$M_4\ddot{y}_{L_3} = ELy_{L_3}'', \quad ELy_{L_3}' = 0 \quad (13)$$

であるため，振動変位を

$$y(x, t) = \varphi(x)e^{j\omega t} \quad (14)$$

とおくと，次の振動数方程式が導かれる．

$$\frac{M_4\lambda}{M_3}\left(\cos\lambda\sinh\lambda - \sin\lambda\cosh\lambda\right) + \cos\lambda\cosh\lambda + 1 = 0 \quad (15)$$

ここで， λ は固有振動数パラメータであり

$$\lambda = kL_3, \quad k^4 = \frac{\rho_3A_3}{EI}\omega^2 \quad (16)$$

の関係がある．求められた式 (15) の数値解を求めることで，固有円振動数 ω が得られる．本研究では安定し

た解が得られやすいことから、二分法を採用した。さらに、モード間の直交条件式を片持ばりの運動方程式の一般解に適用すると、固有関数は次式となる。

$$\varphi_i(x) = \sqrt{\frac{\rho_3 A_3 L_3}{\zeta_i}} \left\{ \cos x - \cosh k_i x - f_i \left(\sin k_i x - \sinh k_i x \right) \right\} \quad (17)$$

ただし、詳細は省略する。

ゴルフスイングを数値シミュレーションするため、求めた運動方程式を状態方程式に変換する。そこで、弾性シャフトの面内、面外ならびにねじり振動変位を、それぞれ次のように固有関数と時間関数を用いて変数分離する。

$$y(x, t) = \sum_i \varphi_i(x) q_{1i}(t), \quad z(x, t) = \sum_i \eta_i(x) q_{2i}(t), \quad \phi(x, t) = \sum_i \xi_i(x) q_{3i}(t) \quad (18)$$

式(18)を運動方程式と力学的境界条件式に適用し、曲げ振動およびねじり振動に関するモード間の直交条件式を用いて整理すると、運動方程式は次式のようにまとめられる。

$$\mathbf{J}(\mathbf{v}) \ddot{\mathbf{v}}(t) + \mathbf{h}(\mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}) + \mathbf{g}(\mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}) = \mathbf{u}(t) \quad (19)$$

ここで、 \mathbf{v} は一般化座標ベクトル、 \mathbf{h} は非線形力ベクトル、 \mathbf{g} は重力ベクトルであり、 \mathbf{u} は入力ベクトルである。なお、簡単化のため各振動モードは1次振動のみを考慮する。 \mathbf{J} は正則マトリクスであり、式(19)に対し逆マトリクスを左から乗じることにより

$$\ddot{\mathbf{v}}(t) = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{v}) \left(-\mathbf{h}(\mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}) - \mathbf{g}(\mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}) + \mathbf{u}(t) \right) \quad (20)$$

となり、状態変数を

$$\mathbf{s}(t) = \left[\mathbf{v}(t)^T, \dot{\mathbf{v}}(t)^T \right]^T = \left[\theta_1, \theta_2, \phi, q_{11}, q_{22}, q_{33}, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\phi}, \dot{q}_{11}, \dot{q}_{21}, \dot{q}_{31} \right]^T \quad (21)$$

と定義すると

$$\dot{\mathbf{s}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}(t) \\ \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{v}) \left(-\mathbf{h}(\mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}) - \mathbf{g}(\mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}) + \mathbf{u}(t) \right) \end{bmatrix} = \mathbf{f}(\mathbf{s}, \mathbf{u}) \quad (22)$$

という状態方程式が得られる。数値計算は、刻み幅を 1.0×10^{-3} に設定した4次のルンゲ・クッタ法を用いて行う。

3. ゴルファーのスキル解析

本報では、スキル動作の力学的な要因をより明確にすることを目的として、簡略化したモデルを用いて順動力学的に数値シミュレーションを実施する。そのため、解析時の動作設定では、あらかじめ上級者の特徴を抽出しスキルを想定する必要がある。ゴルフプレス

ン書などで述べられている上級ゴルファーの特徴や理想的なスイング動作の記述を参考にすると、リストターンに関する記述が多いことに気づく。そこで、次に挙げるリストターンの特徴をゴルファーのスキルとして想定した。

- (a) コック角が小さい
- (b) 自然なアンコック
- (c) アンコックが遅い

ここで、コック角とはグリップ部と左前腕部のなす角度であり、ダウンスイング中にこれを維持することをコック、解放してリストターンを開始することをアンコックと表現する。また、多くの上級者が、打球の飛距離増大にはシャフトの弾性とスイング動作の適合度が重要であると指摘している。そのため、リストターンの有効性ならびにリストターンとシャフトの弾性との関係に的を絞る、スキルの力学的要因を検討する。

3.1 リストターンの有効性

シミュレーションの動作設定を図2に示す。問題を簡単化するため、ここでは重力の影響および前腕の回外動作と、それに伴うシャフトの面外振動およびねじり振動を無視し、スイング平面内の手首の運動とシャフトの面内振動との関係のみに着目する。想定したスキル(a)ならびに(b)を意識することで、コック角の初期値を $\pi/2$ rad とし、アンコックはトルク入力ではなく関節間の干渉で自然にリストターンが開始される設定とした。リストターンの有効性を明らかにするため、コック、アンコックの有無によるスイング中における各部の運動エネルギーの変化を比較した結果を図3(a)および(b)に示す。図3(a)のように、コックアンコックがなく手首が伸展した状態のまま $\theta_1(0) = \theta_2(0) = 0$ rad でスイングした場合、腕とゴルフクラブ各部の運動エネルギーは、肩関節の加速終了後に一定値をとる。一方、図3(b)のようにスイング中に自然なリストターン

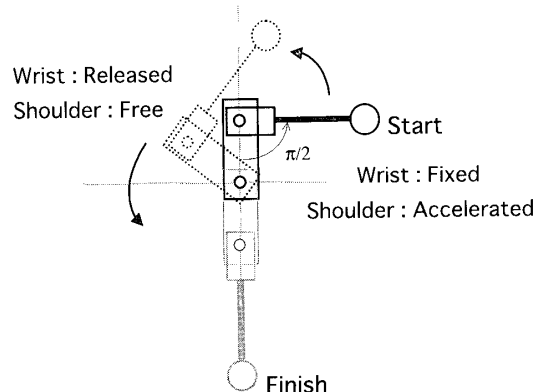


図2 リストターンの動作設定

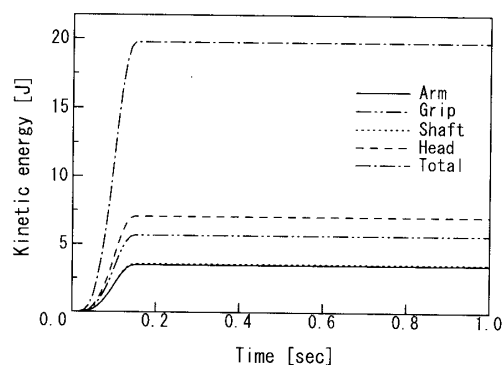
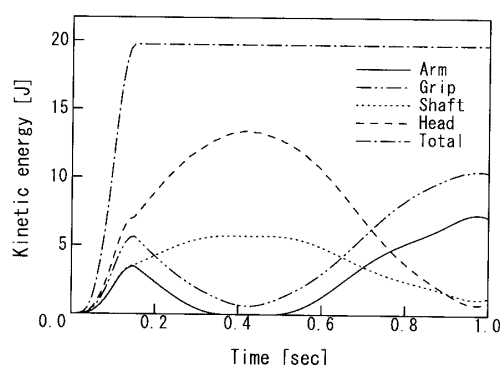
(a) リストターンなし ($\theta_1(0) = \theta_2(0) = 0$ rad)(b) リストターンあり ($\theta_1(0) = \pi/2$ rad, $\theta_2(0) = 0$ rad)

図3 モデル各部の運動エネルギー変化

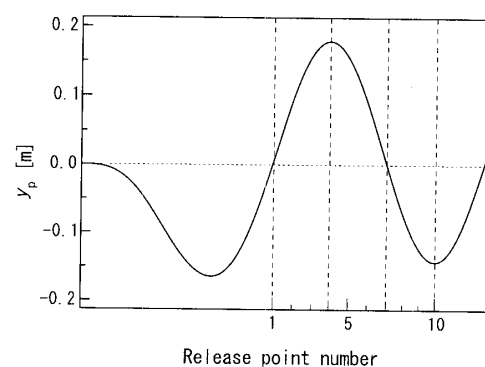


図4 アンコックのタイミングとシャフトの振動変位との関係

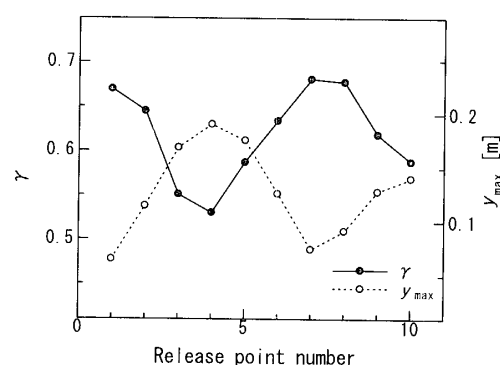


図5 スイング効率指数とシャフト先端の最大振幅の変化

が行われると、リストターンがない場合と比較してトータルの運動エネルギー値は変わらないものの、各部の値は大きく変化する。これは、特に手首関節より遠位にあるシャフトとヘッドの回転中心が急激に変わり、角速度が増大すると同時に、その遠心力によって腕が減速されることに起因している。この結果、ヘッド部の運動エネルギーの最大値は約2倍になり、より大きな速度で打球できることがわかる。上級者のように小さなコック角でダウンスイングを開始し、力むことなくリストターンを行えば、自然に腕よりもクラブが先行するとともに限られた筋力でも、大きく打球の飛距離を増大させることができるといえる。

3.2 アンコックのタイミングとクラブ特性

前節で検討した自然なリストターンのスキルは、ヘッドの運動エネルギーが最大になるときに打球する必要がある、アンコック後は二重振り子と同等の運動をすることから、クラブ全体の重量バランスによる慣性モーメントの調整が重要であることを示唆している。さらに上級者はシャフトの曲げ剛性分布を重要視することから、スイング中のシャフトの曲げ振動変位と、手首のリリースポイントであるアンコックのタイミン

グとの関係を検討する。アンコックのタイミングを図4に示すようにシャフト先端の面内振動変位 y_p により10種類設定する。このとき、重力の影響を受けながら運動するため、打球時の姿勢を一定にするためには肩関節のトルク入力を調整する必要がある。そこで、クラブ特性を有効に利用した動作であるかを判断するため、次式で示すスイング効率指数 λ を導入する。

$$\lambda = E_h / \int_{\theta_1} Q_1(t) d\theta_1 \quad (23)$$

ここで、 E_h は打球時のヘッドの運動エネルギーを表わし、 $Q_1(t)$ は肩の関節トルクを表わす。従って λ の値が大きければ、肩関節の仕事に対して効率よくヘッドスピードを向上できることを示す。10種類のタイミングでアンコックを行った場合の λ の値およびアンコック直後のシャフト先端の最大振幅 y_{\max} を図5に示す。この結果、振動変位がちょうどゼロクロスする1番と7番のタイミングでアンコックを行うと λ の値が高くなることが示された。 y_{\max} の値は、これとほぼ逆の傾向で変化していることから、シャフトの弾性ひずみエネルギーとして蓄えられた関節の仕事が、ゼロクロスでのアンコックにより大きな割合で運動エネルギーに変換

されていることを示している。以上の検討をまとめると、想定したスキル(a)および(b)は腕とクラブの剛体運動とシャフトの曲げ振動を効果的に打球の飛距離増大に利用するスキルであるといえる。

一方、想定したスキル(c)は、いわゆる「ため」のあるリストターンのことであり、上述のスキルと考え合わせると、シャフトの曲げ振動のゼロクロスポイントを遅らせることが必要となる。このためには、肩関節に作用する正のモーメントを常に増加させなければならず、上級者は体重移動や体幹の捻転をタイミングよく利用して実現していると予測できる。シミュレーションにおいてはトルクの増加率と入力時間により、アンコックタイミングを調整した。スイング平面を水平面から $\pi/3$ rad傾斜させ、肩関節の加速終了時を基準にしたアンコックタイミング T_s に対する λ の変化を図6に示す。この結果、アンコックが遅いほど λ の値が大きくなることが明らかになった。これは T_s が負の場合、すなわち肩関節の加速中にアンコックが行われると、リストターン中に腕の角速度も増大してしまい、結果的にヘッドスピードはそれほど大きくならないのが一因である。さらに、ダウンスイングの後半ほど、ポ

テンシャルエネルギーの減少により系全体の運動エネルギーは増加しており、リストターンにより生じる関節間の干渉で腕がほぼ停止状態になるときは、よりヘッドスピードが増大することになる。このように上級者は、全身運動の効果でゼロクロスポイントとアンコックを意図的に遅らせ、関節の仕事を増加させつつ効率よくヘッドスピード増大を実現するスキルを習得しているといえる。

4. 実験による検証

図7に示すように、シャフトのグリップ側にひずみゲージを貼付し、曲げ振動変位を計測するとともに、ゴニオメーターを用いて右手首関節角度を計測した。右手首に貼付した理由は、リストターンにおいて左手首の橈屈角度より右手首の掌屈角度が大きいため、より正確にアンコックタイミングを検出できるためである。3種類のクラブを用いてアンコックタイミングとゼロクロスポイントを計測し、上級者と初級者で比較した結果を図8および図9に示す。ここで、アンコックタイミングは、ダウンスイング時間で正規化した値をとる。図8の結果を比較すると、上級者のアンコッ

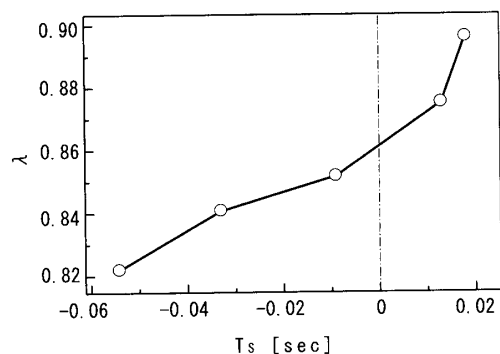


図6 アンコックのタイミングとスイング効率指数の関係

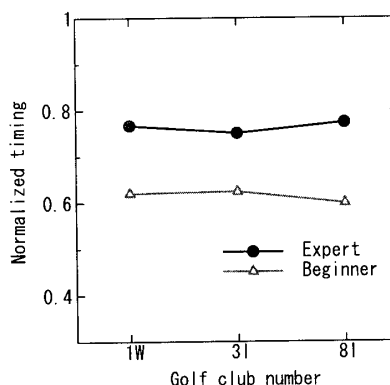
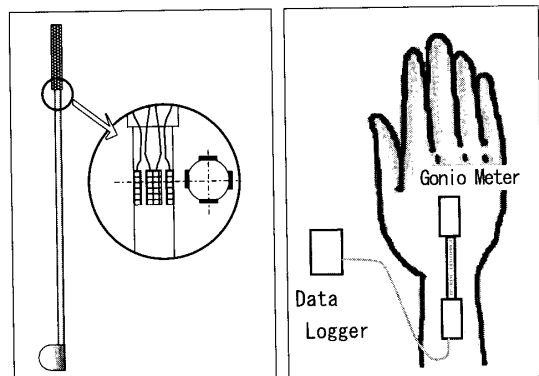


図8 アンコックタイミングの比較



(a) ひずみゲージの接着位置 (b) ゴニオメーターの装着位置

図7 シャフトの振動変位とアンコックの計測

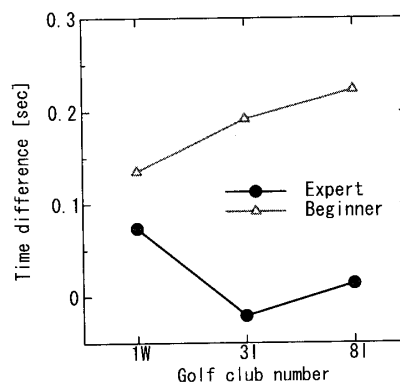


図9 ゼロクロスポイントとアンコックの時間差

クは初級者に比べ、よりダウンスイングの後半に行われている。またゼロクロスポイントとアンコックの時間差を示した図9の結果から、上級者のアンコックはどのクラブを用いても、ほぼゼロクロスポイントに一致することがわかる。以上の結果はシミュレーション結果とよく一致しており、その妥当性がスイング計測実験により検証された。

5. おわりに

ゴルフスイングのスキル解析のように、力学的要因が必ずしも明確でなく、なおかつモデル化誤差が大きく影響するような場合、モデルの厳密化を図るよりも、想定したスキルについて簡略化モデルを用いて、順動力学的に検討する手法が有効であることを示した。今後は、前腕の回外動作とシャフトのねじり剛性の関係についても明らかにしたい。

参 考 文 献

- 1) T. Jorgensen, Jr.: On the Dynamics of the Swing of a Golf Club, AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS, **38**-5, 644/651 (1970)
- 2) D. R. Budney and D. G. Bellow: On the Swing Mechanics of a Matched Set of Golf Clubs, RESEARCH QUARTELY FOR EXERCISE AND SPORTS, **53**-3, 185/192 (1982)
- 3) P. D. Milburn: Summation of Segmental Velocities in the Golf Swing, MEDICINE AND SCIENCE IN SPORTS AND EXERCISE, **14**-1, 60/64 (1982)
- 4) 岩壺, 小西, 山口: ゴルフクラブの最適設計に関する研究, 日本機械学会論文集(C 編), **56**-529, 2386/2391 (1990)
- 5) 金子, 佐藤: ゴルフクラブの運動に対する関節トルクの貢献, 日本機械学会スポーツ工学シンポジウム講演論文集, 99-41, 102/105 (2000)
- 6) Y. Inoue and Y. Kai: Study on the Dynamics of the Golf Swing and the Mechanism of the Wrist Turn, THE ENGINEERING OF SPORT 4, 680/687 (2002)
- 7) S. Suzuki and H. Inooka: A New Golf-Swing Robot Model Utilizing Shaft Elasticity, JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION, **217**-1, 17/31 (1998)
- 8) 鈴木, 猪岡: ゴルフクラブ特性に適應するゴルフスイングロボットの実験的検討, 日本機械学会論文集(C 編), **65**-637, 3694/3700 (1999)
- 9) S. Suzuki: Three-Dimensional Analysis of a New Golf-Swing Robot Emulating Skillful Golfers, THE ENGINEERING OF SPORT 4, 450/455 (2002)