原著論文

ガス内圧を加えたチタン・ゴルフクラブヘッドシェルの力学特性[†]

西田 政 弘* 田 中 皓 一* 林 浩 一*
日 高 正 雄**

Mechanical Characteristics of Golf Club Head-Shells Filled with High-Pressure Gas

Masahiro NISHIDA*, Koichi TANAKA*, Koichi HAYASHI*
and Masao HIDAKA**

Abstract

In order to increase flying distance of golf balls and to improve controllability of flying trajectory of golf balls, a lot of developments in materials and designing of golf clubs are being made. A new type of golf club head-shell made of titanium alloy filled with compressed nitrogen gas is proposed. In this paper, experimental investigations of three kinds are made on the static and dynamic deformation of the pressurized head-shells and also on the restitution of balls. First, the elastic and plastic changes of volume of head-shells are measured by static pressure tests. Capacity to resist pressure is also determined. Next, the relationships among the impact velocity, pressure of gas, and velocity of golf ball are investigated. Finally, transient strain histories on the crown face and sole face of the head-shells are measured by strain gauges under impact. Effects of the pressurized gas on the transient deformation of the head-shells are discussed by means of the frequency analysis of strain histories. As a result, we found that all of the head-shells were deformed elastically in a pressure range between 0MPa and 2MPa and that plastic deformation occurred for higher pressures than 2 MPa. One of the head-shells was cracked at approximately 7.4MPa. When the head-shells were pressurized, the velocities of golf ball, the strain histories on the face of the head-shells, and the frequency spectra of the strain histories were changed slightly.

Key words: Golf Club Head, Elastic/Plastic Deformation, Impact Deformation, Restitution, High-Pressure, Sport-Goods

[†]原稿受付 1998年3月3日

1997年10月 スポーツ工学シンポジウム1997にて発表

*名古屋工業大学

〒466-8555 愛知県名古屋市中昭和区御器所町

**株式会社ホットスタッフ

〒511-0838 三重県桑名市和泉371-1

*Nagoya Institute of Technology, Gokiso, Showa, Nagoya, Aichi, Japan (466-8555)

**Hot Staff Co. Ltd., 371-1, Izumi, Kuwana, Mie, Japan (511-0838)

1. 緒 言

ゴルフクラブヘッドシェル（以下ではヘッドと略す）の素材は、パーシモン、鉄合金、非鉄合金、繊維強化複合材料など著しく変化に富み、またその形状設計技術の発達も著しい。最近では、比強度が高いためにヘッドの容積を大きくできてかつ設計自由度が高いことから、チタン合金が多用されるようになった。しかし、打球の飛距離の大きさと方向の安定性はあらゆるゴルファーにとって大きな要求であるために、ゴルフクラブに関する様々な研究および開発が続けられている^{1)~6)}。その一つとして、ヘッドの空洞内に高压のガスを封入して、薄いチタン板から成るヘッドに予荷重（張力）を与えると同時にボールのインパクト時の内圧上昇を反発力の向上に利用しようとする試みがある^{7)~9)}。しかし、このようなアイデアがヘッド性能の向上にどの程度有効であるかは不明である。本研究では、最近製品化された高压窒素ガス充填チタンヘッドの静的加圧変形挙動、衝撃変形挙動および反発特性を力学的な観点から実験的に調べた。なお、実際のヘッドの試打時のひずみ変形を測定した例は少ないと思われる。

2. 実験装置および方法

ここで実験対象としたドライバー用ヘッドは次の3種類である。

試料(A)：公称容積 235cc,

試料(B)：公称容積 245cc,

試料(C)：公称容積 250cc.

いずれもチタン合金 (6Al-4V) のフェイスプレート (板厚3.0mm)、純チタン (第4種) のクラウンプレート (平均板厚1.3mm)、純チタン (第2種) のソールプレート (平均板厚1.5mm) の3つを溶接によって一体化したものであるが、それらの形状と容積はそれぞれ少しずつ異なる。図1には試料(A)のヘッドのクラウン面およびソール面を示す。なお、窒素ガスを充填するためにソール面にシールド付きバルブが設けられている。また、以下で示す充填圧力はゲージ圧である。

2. 1 静的加圧試験

このヘッドには高压ガスを充填することを前提としているために、耐圧試験を兼ねて充填圧力とヘッド容積変化量の関係を調べた。図2には実験装置を示す。図2(B)はヘッド内部を静水

図1 Golf club head (specimen A)

図2 Experimental setup of the pressure-resistant tests

加圧するための油圧シリンダーであり、ヘッドとの接続管の間には圧力センサーが設けられている。(A)は上部に細いガラス管の付いた密閉容器である。この密封容器内にヘッドを設置した後、ガラス管の適当な位置まで水を満たす。ネジ送り機構によって油圧シリンダーのピストンを押込み、水をヘッドに圧入することによってヘッド内部を静的に加圧する。このとき負荷圧力を測定すると同時にガラス管内の液面変化からヘッド容積変化を測定する。

2. 2 反発特性

図3に示すような試打装置を製作し、上記3種類のヘッドについて、窒素ガス充填圧力およびインパクト速度とボール打出し速度の関係を調べた。試打装置の鋼製アームは速度可変型の電動モーター回転軸と歯車を介して回転軸で支持されている。アーム先端部にはコックドベルトで駆動されるベルト車が付けられており、それにはクラブシャフトを2点（ベルト車の回転軸中心とベルト車に取り付けたアームの先端部）で支持してある。ヘッドのインパクト速度測定およびボールの打出し速度測定にはレーザー光切断法を用いた。また、図1に示すように、クラウン面には直交2軸のひずみゲージを1枚、ソール面には単軸のひずみゲージを1枚貼ってインパクト時の変形挙動を調べた。なお、3種

類のヘッドには同一種類のCFRP シャフトが装着されており、ゴルフボールは市販品（プリヂストン；Newing）を1種類のみ用いた。

3. 実験結果および考察

3. 1 静的加圧試験

図4には、充填液圧とヘッド容積変化の関係を示す。内圧上昇とともに階段状に部材の伸び変形が進行する。試料により値は若干異なるものの、負荷圧力が約2MPaを越えるとヘッドの塑性変形が見られた。さらに試料(B)においては約7.4MPaでソール中心部に亀裂が生じ、亀裂発生時で約3.6%の容積増加があった。試料(A)および試料(C)については、本実験で行った約8.0MPaまでの耐圧試験に対して亀裂などの発生はなかった。また、同じ圧力に対して試料(B)の体積膨張率が大きく、試料(C)の体積膨張率は小さい。これは試料の容積以外に、試料の形状およびソール部の補強材の形状が異なることによると考えられる。

図に見られる階段状の容積変化挙動を示すのは、以下の理由によるものと思われる。加圧力を増加するに従って始めは弾性変形が進行する。しかし、ある程度高い圧力を負荷してから一旦加圧を中断しても、素材はクリープによってしばらく（この場合約30分）塑性変形が進行した後、定常値に到達する。したがって、容積膨張

図3 Experimental setup of the hitting tests

(a) Specimen A

(b) Specimen B

(c) Specimen C

図4 Results of the pressure-resistant tests,
(a) specimen A, (b) specimen B,
(c) specimen C

図5 Plastic deformation of the specimen A
after the pressure-resistant test

によって内圧も減少する。このような昇圧過程を繰り返すことによって亀裂発生まで階段状の容積変化が生ずる。ただし、このクリープ現象はヘッドの素材に大きく依存すると思われる。なお、ソールはリブ補強されているものの薄い平板状であるために、他の部材に比べて凸形の塑性変形量が多い。

加圧実験後の試料(A)について、ソール部の塑性変形量を図1(b)に示す線に沿ってマイクロメータで測定した結果を図5に示す。縦軸は塑性変形量の最大値を基準に百分率で示した。ソール中央の打球線方向に設けられた直線状リブを中心として打球線と直交する方向に膨張変形が著しい。また試料(B)および(C)においてもほぼ同様の結果が得られた。

したがって、実際の使用においては、窒素ガスを2MPa以上に充填したり、温度変化に伴う圧力上昇が見込まれる場合には注意が必要である。特にヘッドが炎天下に放置される場合(80℃)にガスの熱膨張が起こることを想定すると、本試料ヘッドに塑性変形を生じないためには、常温(20℃)での許容充填圧力は約1.6MPaであると推定できる。

3. 2 反発特性

図6に、試料(A)におけるインパクト速度およびガス充填圧力とボール打出し速度の関係を示

表1 Measured meet ratio

Compressed pressure	Average of meet ratio	Standard deviation
0 MPa	1.47	0.0084
12MPa	1.48	0.0079

す。実験したインパクト速度範囲のうち、12m/s～20 m/s の領域においては、充填圧力0.9MPa の場合（図中×印）ほぼ同じインパクト速度に対してボール打ち出し速度がわずかに小さく、22m/s～26m/s の領域においては、0MPa の場合（図中△印）ボール打ち出し速度がわずかに小さくなる傾向が見られた。しかし28m/s～36m/s の領域では充填圧力の違いによるボール打ち出し速度の相違はほとんど見られなかった。そこで、約30m/s において、0MPa および12MPa の場合について反発性能を詳しく調べた。それぞれ10回ずつ試打を行い、ミート率（インパクト速度に対するボール打ち出し速度の比）およびその標準偏差を求めた結果を表1に示す。充填圧力12MPaの方がミート率は約0.01大きい、その差はわずかで、標準偏差とほぼ同程度である。

図7および図8には、試料(B)および試料(C)についてインパクト速度およびガス充填圧力とボール打ち出し速度の関係を示す。試料(A)の場合と

同様、インパクト速度範囲によっては、充填圧力の違いによる打ち出し速度の差異が見られる場合もあるが、測定結果のばらつきと同程度で

図6 Relationship between the ball velocity and filled pressure for the specimen A

図7 Relationship between the ball velocity and filled pressure for the specimen B

図8 Relationship between the ball velocity and filled pressure for the specimen C

あり、有意な差は見られない。

次にインパクト時のヘッドの変形挙動を調べるために、ヘッド上2ヶ所のひずみ波形を測定した結果を示す。図9ではインパクト速度の違いによるひずみ波形の違い(試料(B), クラウン面の打球線と直交する方向, 0MPa)を比較した。インパクト速度が大きくなるに従いひずみ波形は相似的に大きくなっている。また、すべての場合において、ひずみはまず急激に増加し、その約0.1ms後ひずみの増加勾配は一度緩やかになり、その後再び急勾配となる二段階のひずみ変化が特徴的である。この現象はボールの衝撃変形挙動と関連すると考えられる。一方、ひずみの持続時間はいずれの場合もほぼ同じで、約0.5msであった。この時間はゴルフボールの特性の報告結果¹⁰⁾とほぼ一致する結果であった。

図10、図11および図12に、試料(A)、試料(B)および試料(C)におけるクラウン面とソール面のひずみ波形を充填圧力0MPa、0.6MPaおよび1.2MPaで比較した結果を示す。ただし、ここではインパクト速度が約30m/sの場合の結果を示す。いずれの場合にも、ひずみ波形にはスパイク状

の雑音が見られるものの、クラウン面の打球線方向(図(a))およびクラウン面の打球線と直交する方向(図(b))では引張りひずみが支配的であり、小さな振動挙動も観察できる。ソール面の打球線方向(図(c))では、非常に小さい引張りに加え、高次の振動挙動が明確に現れる。ソール面でひずみ量が小さくなっているのはリブの補強作用によると考えられる。さらに、クラウン面の引張りひずみはクラブ毎にその波形および大きさがわずかに異なり、試料(A)ではクラウン面の打球線方向のひずみ(図(a))は打球線

図9 Strain histories in the transverse direction on the crown face of the specimen B for the various impact velocities at 0MPa

図10 Strain histories of the specimen A

と直交する方向 (図(b)) より小さく, 試料(B)および試料(C)ではクラウン面の打球線方向 (図(a)) のひずみは打球線と直交する方向 (図(b)) と同程度であった。充填圧力の違いによるひずみ波形の差を見ると, 0MPaの方がひずみ波形の立ち上がりがわずかに鋭い場合や, ひずみ波形の

図11 Strain histories of the specimen B

図12 Strain histories of the specimen C

表2 Static strain of the pressurized head-shells (unit : strain/MPa)

Specimen	Crown face		Sole face
	Longitudinal	Transverse	Longitudinal
A	2.3×10^{-4}	-0.1×10^{-4}	3.9×10^{-4}
B	-0.6×10^{-4}	-0.2×10^{-4}	0.1×10^{-4}
C	-0.6×10^{-4}	-0.6×10^{-4}	1.2×10^{-4}

立ち下がりがなだらかになる場合(試料(B)の0MPaのクラウン面の打球線方向の結果など)もあるが、実験したインパクト速度範囲では充填圧力の違いによるひずみ波形の明確な差は観察できなかった。

ヘッドに内圧を静的に負荷した場合について、図1で示したゲージ位置で測定した充填圧力1MPa当りのひずみを表2に示す。実験を行った範囲において、充填圧力とひずみ量はほぼ比例した。試料(A)および(C)のソール面では、内圧の負荷による静ひずみの大きさはインパクト時の動ひずみ(図10および図12)とほぼ同じであった。この結果から、図10および図12のうち内圧を負荷した試料(A)および(C)のソール面では、内圧による引張りひずみ状態に、インパクトによる動的圧縮ひずみ(内圧による引張りひずみと

ほぼ同じ大きさ)が重畳していることがわかる。このような場合、内圧の有無によりインパクト時のひずみ挙動が変化する可能性があると考えたが、図10および図12からはひずみ挙動に顕著な差は見られなかった。また、表2の試料(A)および(C)のソール面以外では、内圧の負荷による静ひずみの大きさはインパクト時のひずみ変動の大きさに比べ小さい値を示した。さらにクラウン面ではほとんどの場合において内圧を負荷したにもかかわらず、わずかではあるが圧縮ひずみ(表中の負の値)を示した。これは、ヘッドが複雑な3次元形状をしていることおよび3種の異なる材質および板厚の部材から成ることにより複雑なひずみ分布を示したと推察される。本実験では、ひずみの測定点が少数であるので、ヘッド全域でのひずみ分布の詳細は明らかでな

図13 Frequency analyses of measured strain histories of the specimen A

いが、インパクト時にはクラウン面の動ひずみが大きいことから、クラウン面の材質や形状がヘッドの衝撃特性に大きな影響を与えると考えられる。

図13, 図14および図15に, 図10, 図11および図12に示したひずみ波形の周波数解析結果を示す。いずれの場合においても約7kHzにピークが見られ, 試料(C)のクラウン面の打球線と直交す

図14 Frequency analyses of measured strain histories of the specimen B

図15 Frequency analyses of measured strain histories of the specimen C

る方向(図(b))では特に顕著であるが、ソール面に顕著に見られる振動挙動に対応するピークは無い。充填圧力の違いによるひずみ波形の周波数解析結果には、小さなピークの有無などわずかな差は見られる。しかし、大きなピーク値をとる周波数が大きく変化するなどの明確な差は、試料(A)、試料(B)および試料(C)ともに観察できなかった。またひずみ波形の立ち上がり、立ち下がりのわずかな変化に対応する周波数の変化も見られなかった。以上のように、本実験で得られた結果は、予負荷により部材の剛性増加および内圧により気体振動の振動数が増加するという予想と必ずしも一致する結果とはならなかった。この点については、更に高いインパクト速度での測定を行い、その結果を含めた詳細な検討が必要である。

4. 結 言

本実験で得られた主な結果は、以下の通りである。

- (1) 実験に供したチタン製ゴルフクラブヘッドシェルが常温で塑性変形しないためには、許容内圧は約1.6MPaと推定できる。約2MPaを超える内圧では塑性変形を生じ、クリープ現象を伴いながらヘッド容積が増加する。また、供試体によっては約7.4MPaでソール面に亀裂を生じた。
- (2) 実験を行った圧力範囲では、インパクト速度によっては窒素ガス充填圧力によりボール打出し速度がわずかに変化する場合があった。しかしその差は測定結果の標準偏差と同程度

であった。ただし、ボールに与えるスピン量が変化する可能性はあり得る。

- (3) 窒素ガスの充填圧力を変化させることにより、等価的なヘッド剛性の増加によりクラブ表面でのひずみ変動およびその周波数分布はわずかに変化した。一方、ガス充填時には打球音の音質が明らかに異なるので、今後これらとクラウン面を主体としたヘッド全面での動的変形挙動との関係を調べていく必要がある。

参 考 文 献

- 1) 岩壺卓三, 他; ゴルフクラブヘッドの最適設計, 機論, Vol.56, No.524, pp.1053-1059, 1990.
- 2) 力石利生; ボールのあたりと飛び, 日本機械学会誌, Vol.95, No.888, pp.997-1000, 1992.
- 3) 佐藤文宣; スポーツ用具の設計—ゴルフクラブ, 精密工学会誌, Vol.59, No.10, pp.1609-1613, 1993.
- 4) 山口哲男, 他; 用具評価における精密工学, 精密工学会誌, Vol.59, No.10, pp.1614-1617, 1993.
- 5) 増田正美; ゴルフの物理, 裳華房, 1995.
- 6) 中須賀幹彦, 他; ゴルフ・インパクトにおけるゴルフボールに加わるフェイス面方向の力の測定, '97スポーツ工学シンポジウム講演論文集, pp.42-45, 1997.
- 7) 小村博; 公開特許公報, 昭59-189877.
- 8) ㈲エスケーサイエンス, 公開実用新案公報, 平4-44966.
- 9) ㈱ジースリー, 公開特許公報, 特開平7-8580.
- 10) 宇治橋貞幸, 他; ゴルフ・ボールの反発特性の計測と評価, 機論, Vol.60, No.577, pp.3150-3156, 1994.