

W/Ti-6Al-4V複合材料のゴルフヘッドへの検討

— ホットプレス(HP)処理による材料製作 —

Examination of W/Ti-6Al-4V Composite Materials to Golf Club Head

— Material Production by Hot Press Processing —

松尾 忠利・佐東 信司

福島工業高等専門学校機械工学科

Tadatoshi Matsuo and Shinji Sato

Fukushima National College of Technology, Department of Mechanical Engineering

(2009年9月25日受理)

Powerless amateur golfers like old people or women want the high repulsion golf club can fly golf ball far away. Recently, titanium alloy is mainly used for golf club head. Therefore, in this research, Ti-6Al-4V alloy as the base material, the high elasticity and repulsion materials are developed by the following method. The method is that composite materials of the titanium alloy and the tungsten mesh are made using hot press processing. We obtained following observation from the former method.

- (1) The high elasticity and repulsion materials are developed. It is found the golf club that using this material can fly golf ball far away.
- (2) However the welding was remained on the golf club surface. Strength of the golf club surface decreased.

Key words: Ti-6Al-4V, Tungsten mesh, Golf robot, Hot Press processing, FEM

1. 緒言

全米ゴルフ協会において、2008年よりゴルフクラブの反発係数は規制された¹⁾。日本でもプロツアーおよび一部のアマツアーにおいて、高反発のゴルフクラブは規制の対象となる。しかし、アマチュアゴルファーがスポーツを目的として高反発クラブを用いてラウンドすることは可能であるため、飛距離を追及するアマチュアゴルファー、特に、非力な女性や高齢のゴルファーからは、高反発な長飛距離ドライバーが要求されている。したがって、従来の材料よりも高反発特性を持つ材料開発を行い、ゴルフクラブを作製することには意義があると考えられる^{2)~5)}。

TiAl系の金属間化合物は主に耐熱材料として活用されているが、室温における用途の拡充を図ることも重要である。TiやAlの弾性率はそれぞれ100と70GPaであるが、TiAl合金にすることで150MPa以上へと向上し、比弾性は特に優れる材料である。しかし、TiAl合金は高温に優れた特性を有する材料であ

るため、室温での活用はそれほど多くない。本研究ではTiAl合金の高弾性・高強度の材料特性を生かしながら、高強度で高弾性材料の短繊維や長繊維などを強化材として複合化させ、“高弾性で高反発力の高いTiAl合金の開発”を行うものである。前報⁶⁾において、熱間等方圧加圧処理（HIP）による材料開発を行った。その結果、材料開発の指針は得られたが、ゴルフクラブヘッドに使用可能な大型の材料の開発には至らなかった。

本論文では、現在のゴルフクラブヘッドの主流材料であるチタン合金(Ti-6Al-4V)を母材とした複合材料を、ホットプレス処理によって作製し、弾性・反発特性を向上させたゴルフクラブの開発を目的とする。具体的には、作製した複合材料を組織観察と硬さ試験によって評価を行う。さらに、複合材料を用いたゴルフクラブを作製し、ゴルフロボットによる試打実験を通して、ゴルフクラブの性能を評価する。

2. 複合材料クラブヘッドの作製

2.1 ホットプレスによる複合材料の作製

Ti-6Al-4V 合金よりも密度および弾性率の高いタングステン繊維を強化材として複合化することによって、より高弾性の W/Ti-6Al-4V 複合材料を作製する。また、タングステン繊維は密度が大きいため、ゴルフヘッドにした場合、低重心化の効果も期待できる。Fig.1 に示すように、2 枚の Ti-6Al-4V 合金板 (100^o×100¹×2.0⁺mm) で、粒径 150 μ m 未満にスクリーニングされた Ti-6Al-4V 合金粉と線径 0.1mm のタングステン繊維平織り材を挟む積層構造とし、ホットプレスで材料作製する。

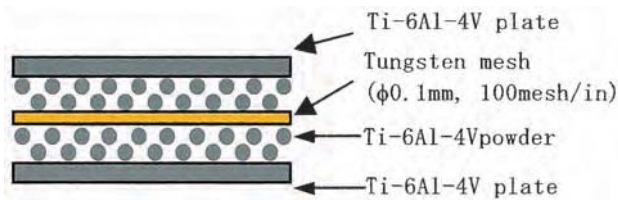


Fig.1 Lamination model



Fig.2 Hotpress machine

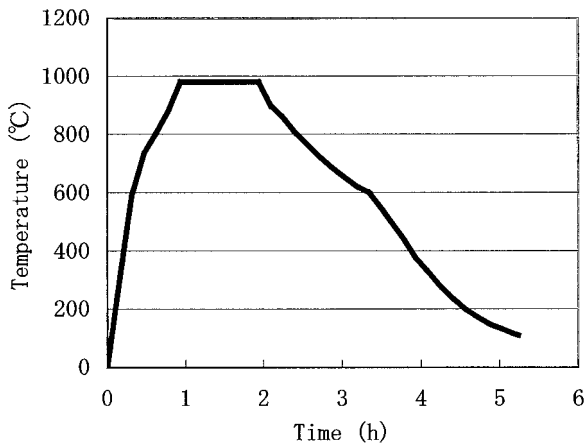


Fig.3 Heat treatment of hot press

材料作製に用いたホットプレス機を Fig.2 に示す。ホットプレス処理時熱履歴を Fig.3 に示す。温度は 1 時間で 980 $^{\circ}$ C まで上昇させた後、1 時間保持し冷却した。また、圧力は 1 時間で 196kN まで上昇させた後、2 時間保持し、1 時間かけて除荷した。作製した W/Ti-6Al-4V 複合材料を Fig.4 に示す。

2.2 複合材料によるクラブヘッドの作製

Fig.4 に示した W/Ti-6Al-4V 複合材料から、以下の手順でクラブヘッドの作製を行った。

- (1) 既製品のクラブヘッドからフェース面を除去する。
- (2) 複合材料をワイヤ放電加工機でフェース面形状に切り出し、所定の厚さに研磨する。
- (3) ヘッドと複合材料の接合面が合致するように、両者にヤスリがけを行う。
- (4) 複合材料をゴルフクラブのフェース面に溶接する。

なお、(4)は、ゴルフヘッドの溶接に優れた企業で行い、完成したクラブヘッドを Fig.5 に示す。



Fig.4 W/Ti-6Al-4V composite materials



Fig.5 Golf club head made in composite material

3. 実験方法

3.1 組織観察

組織観察に用いた試験片は、Fig. 4 に示した W/Ti-6Al-4V 複合材料の端部から、ワイヤ放電加工機を用いて、 $5^{\circ} \times 30^{\circ} \times 3^{\circ}$ mm の大きさで切り出した。Ti-6Al-4V 合金板に挟まれた断面を鏡面に研磨した後、光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡による組織の観察を行った。

3.2 ビッカース硬さ試験

硬さ試験は、微小押し込み試験機を用いて行った。試験は組織観察に用いた試験片で行った。試験条件は、押し込み荷重 1000mN、押し込み速度 100mm/min、圧子保持時間 5s とした。

3.3 ゴルフロボットによる試打実験

作製したクラブの性能を定量的に評価するため、実験室内において、ゴルフロボットによる試打実験を行った。実験は、ヘッドスピードを 28.0～35.0m/s の範囲で変化させて行った。同一ヘッドスピードで、5 球の試打を行い、ボールスピードの平均値を求めた。また、ゴルフロボットによる試打実験は、いわき市の小名浜オーシャンゴルフクラブにおいても実施した (Fig. 6)。



Fig.6 Hitting test in the golf course

4. 実験結果と考察

4.1 組織観察

組織観察によって、作製した複合材料のタングステン繊維と母材の界面における接合の状態を確認した。光学顕微鏡による組織写真を Fig. 7 に示す。母材である Ti-6Al-4V 合金とタングステン繊維との界面が明瞭に観察された。したがって、ホットプレス処理による母材と繊維の接合は良好であると考えられる。また、走査型電子顕微鏡による組織写真を Fig. 8 に示す。タングステン繊維に

き裂が発生していることが認められる。これは、タングステン繊維を平織りしているときの高い曲げひずみによって、繊維表面にき裂が入ったと考えられる。また、材料の厚さを 2mm とした時の繊維体積率を算出すると 3.1% となる。これは、体積率としては低いですが、材料中心部に外力を荷重させた時に発生する押し込みひずみ(曲げひずみ)をタングステン繊維の高弾性が分担し、ひずみ量の低減に寄与する。また、材料が最大ひずみの状態から元の状態に復帰しようとする反発作用の原動力として、タングステン繊維の高弾性が寄与すると考えられる。

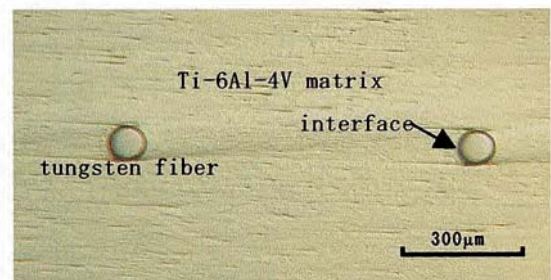


Fig.7 Interface between matrix and fiber

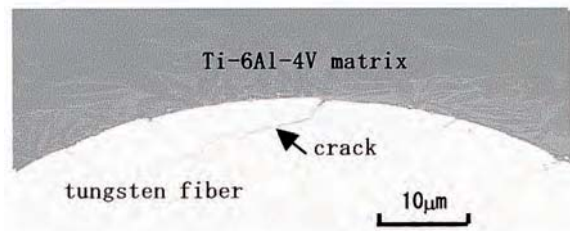


Fig.8 Cracks of tungsten surface

4.2 ビッカース硬さ試験

Fig. 4 に示した W/Ti-6Al-4V 複合材料の厚さ方向に硬さ試験を行った。ここで、材料の厚さ方向とは、Fig. 1 のタングステンメッシュに対して鉛直方向に相当している。また、タングステン繊維上では、母材である Ti-6Al-4V 合金のビッカース硬さ(約 300Hv)よりも高い値になると予想され、タングステンメッシュの位置を求めた。さらにタングステンメッシュの位置で硬さ試験を行った。

ビッカース硬さ試験をタングステンメッシュに対して垂直方向に行った結果を Fig. 9 に示す。試験片表面から 1.5mm の測定点でビッカース硬さが

491Hv と高い値を示しているが、これはタングステン繊維を測定しているためである。その他の測定点のビッカース硬さは 300Hv 程度で、母材のビッカース硬さとほぼ一致している。したがって試験片表面から 1.5mm の位置にタングステンメッシュがあると考えられる。

また、試験片表面から 1.5mm の位置で平行に、(タングステン繊維の位置 : Fig. 7 の水平方向) において、1mm 間隔でビッカース硬さ試験を行った。測定結果を Fig. 10 に示す。Ti-6Al-4V 合金のビッカース硬さは 300Hv 程度であったが、試験片表面から 1.5mm の位置におけるビッカース硬さは、平均で 420Hv 程度であり、硬度が向上していることが確認された。材料の反発係数と硬度の間には比例関係が成立する⁶⁾ため、W/Ti-6Al-4V 複合材料が高反発材料となっていることが期待される。

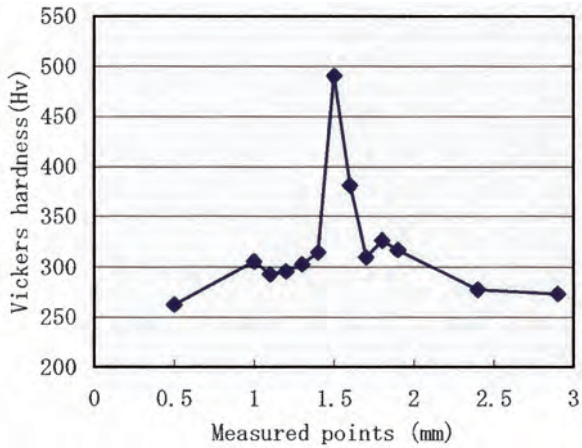


Fig.9 Vickers hardness distribution by plate thickness direction

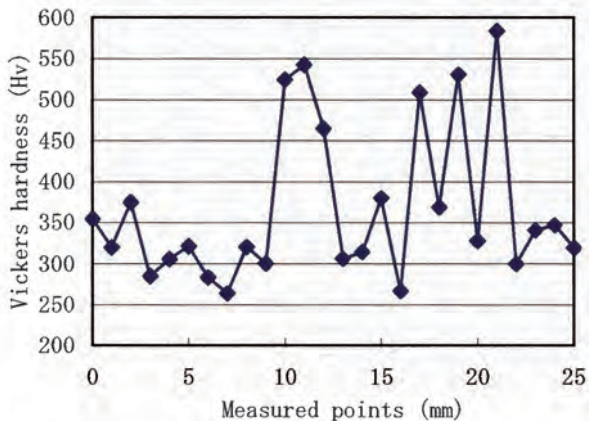


Fig.10 Vickers hardness according to tungsten mesh distribution

4.2 有限要素法による最適板厚の検討

作製した複合材料からゴルフクラブを作製するにあたり、有限要素法によるフェース面厚さの最適設計を行った。一般に、板厚が薄くなるにつれて、弾性的挙動を示すフェース面の変形が大きくなり、そのため粘弾性的挙動を示すボールの変形は逆に抑制され、その結果として、エネルギー損失が小さくなり、反発係数は高くなるといわれている^{7), 8)}。また、ゴルフボールを打球したとき、フェース面は 1.5 mm 程度たわむ解析結果が示されている⁹⁾。したがって、本研究では、作製した複合材料 (Fig. 4) を Fig. 11 に示す解析モデルとし、1.5 mm のたわみが生じる板厚の最適値を求めた。なお、解析を簡単にするため、線径 0.1mm のタングステンメッシュを、厚さ 0.1mm のタングステンシートとして解析を行った。解析に用いた物性値を Table 1 に示す。また、解析では、作製材料を 50mm×50mm の 1/4 カットモデルとし、対称軸上の境界条件は対称軸に垂直な方向のみ拘束とし、他 2 辺は全自由度拘束とした。

板厚を変化させたときの最大たわみの値を Table 2 に示す。板厚とたわみ間には線形関係が成立することから、内挿によりたわみが 1.5mm となる板厚を求めると、2.3mm となる。このときのモデルの z 軸方向の変形を Fig. 12 に示す。したがって、フェース面の形状に切り出した材料を、タングステンメッシュを中心として 2.3mm 程度の厚さまで研磨し、ゴルフクラブを作製した。

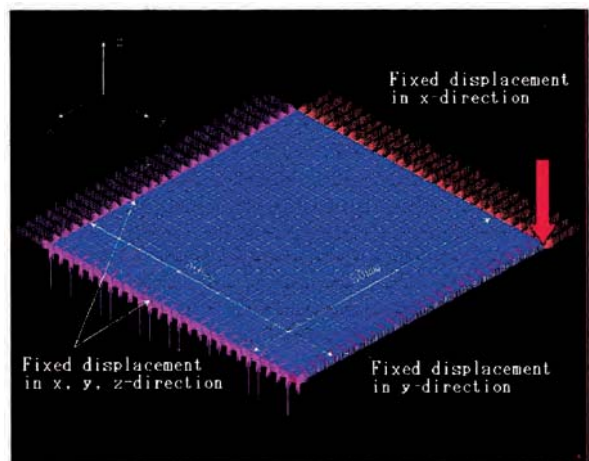


Fig.11 FEM model

Table 1 Material properties

	Ti-6Al-4V	Tungsten
Young' s modulus	114GPa	362GPa
Poisson' s ratio	0.3	0.3

Table 2 Results of FEM analysis

Thickness (mm)	1.8	2.1	2.4	2.7
Deflection (mm)	2.076	1.652	1.280	0.982

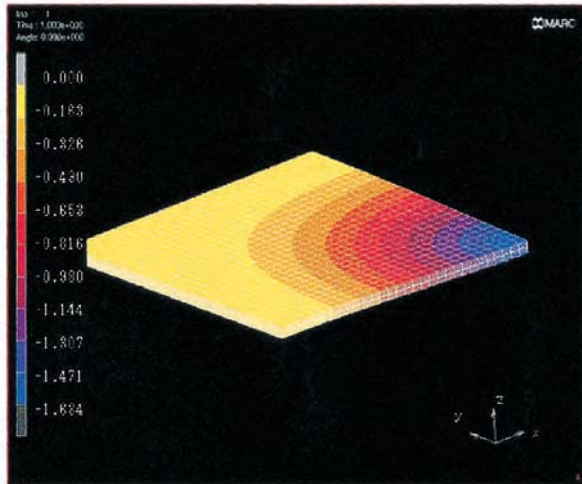


Fig.12 Deformation of z axial direction

4.3 試打実験結果

Fig. 5 に示した、W/Ti-6Al-4V 複合材料を用いたクラブヘッドをシャフトに取り付け、ゴルフロボットを用いて試打実験を行った。実験に用いたクラブの仕様を Table 3 に示す。

Table 3 Specification of golf clubs

	Material	Weight (g)	Length (in)	Frequency (cpm)
A	Ti-6Al-4V	315	45	232
B	W/Ti-6Al-4V	272	45	235
C	W/Ti-6Al-4V	312	45	230

ここで、クラブ A は既製品のクラブヘッドである。クラブ A と同一特性のクラブヘッドのフェース面をくり抜き、新たに W/Ti-6Al-4V 複合材料を溶接したクラブヘッドをクラブ B とした。また、クラブ B の重量がクラブ A と比べて軽いため、クラブヘッドにおもりを貼り付け、クラブ A と重量

を同一にしたものをクラブ C とした。なお、クラブのスイングバランスが変化しないように、測定器を用いて、おもりの貼り付け位置を決定した。

W/Ti-6Al-4V 複合材料を用いたクラブヘッドの試打実験結果を Fig. 13 に示す。屋内実験において打球瞬間の画像解析を行った結果、全ヘッドスピード領域において、クラブ B、C のボールスピードがクラブ A よりも 5% 程度高くなっていることが確認された。

また、画像解析結果を基に、自作した飛距離計算ソフトを用いて飛距離（キャリー：打球の落下地点）を計算した結果を Fig. 14 に示す。全ヘッドスピード領域においてクラブ B、C は、クラブ A と比較して 10m 程度の飛距離向上が推定できる。

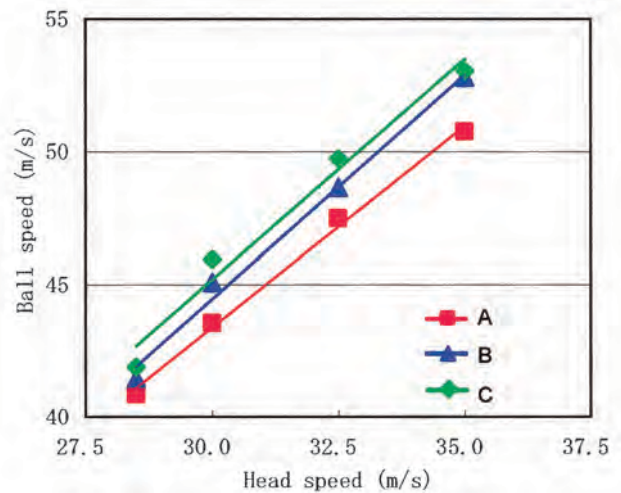


Fig.13 Relationship between head speed and ball speed in indoor hitting test

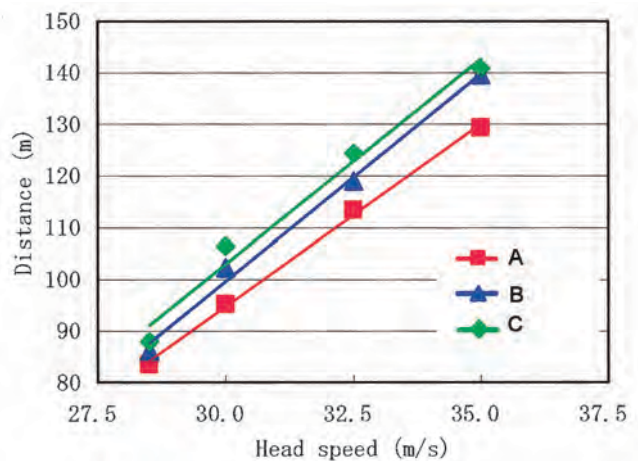


Fig.14 Relationship between head speed and distance in indoor hitting test

また、クラブ A とクラブ C の屋外試打実験の結果を Fig. 15 に示す。屋外試打実験ではクラブ C はクラブ A に比べて約 6m 飛距離 (キャリー) が向上した。

以上の結果から、Ti-6Al-4V 合金を母材、タングステン繊維を強化材とした、W/Ti-6Al-4V 複合材料をクラブヘッドフェース面に用いることで、ゴルフクラブの高反発化が確認された。

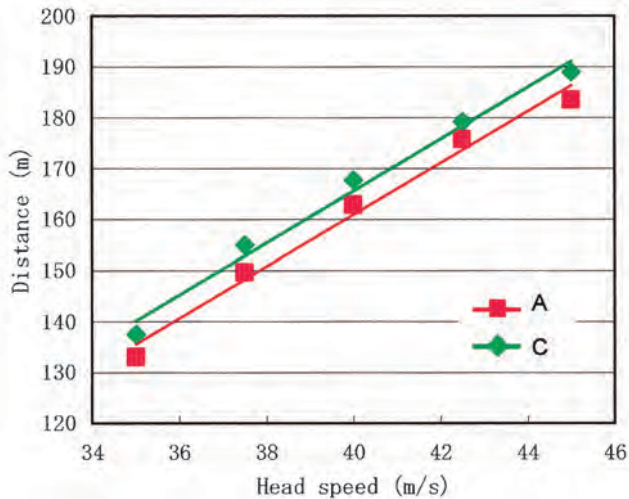


Fig.15 Relationship between head speed and distance in outdoor hitting test

4. 4 クラブヘッドの評価

クラブ B、C の試打実験を通して、高弾性・高反発のゴルフクラブを作製するために、W/Ti-6Al-4V 複合材料を用いる方法が有効であることが確認された。一方、市販化を想定した場合、バックスピンを得るためのラインの加工や、ギア効果を得るためのフェース面のラウンド化も必要で、今後検討する必要がある。しかし、最終加工が施されていない状態にも関わらず、市販のクラブよりも飛距離が伸びた本ゴルフクラブは、高反発のゴルフクラブとして期待できる。

5. 結 言

本研究では、より遠くへ飛ばすことができる高弾性・高反発型ゴルフクラブの開発を目的として、ホットプレスによる複合材料の作製を行った。材料の評価試験および、作製したクラブヘッドの試打実験を通して以下の知見を得た。

(1)ホットプレス処理によって材料を作製した結果、タングステン繊維母材の界面が明瞭に観察され、W/Ti-6Al-4V 複合材料の接合は良好であった。また、ビッカース硬さの向上が確認された。

(2)作製材料をモデル化して有限要素法による解析を行った。フェース面に生じるたわみを基準にして、最適な板厚を得た。

(3)W/Ti-6Al-4V 複合材料をクラブヘッドのフェース面に取り付けたことで、ゴルフクラブの反発特性に向上が見られた。飛距離計算ソフトによる計算では、約 10m 飛距離 (キャリー) の向上が予想され、実際の屋外試打実験では 6m 飛距離 (キャリー) が伸びた。

文 献

- 1) United States Golf Association HP, Club & Balls, <http://www.usga.org/home/index.html>
- 2) 佐東信司、松尾忠利、岩松幸雄：福島高専研究紀要、No.40, 1-6 (2000)
- 3) 佐東信司、松尾忠利、岩松幸雄：福島高専研究紀要、No.41, 1 (2001)
- 4) 佐東信司、松尾忠利、岩松幸雄：福島高専研究紀要、No.42, 7 (2002)
- 5) 松尾忠利、鈴木浩史、福島澄夫、佐東信司：福島高専研究紀要、No.45, 7 (2005)
- 6) 松尾忠利、佐東信司：福島高専研究紀要、No.47号, 7 (2007)
- 7) 中井賢治、吳志強、曾我部雄次、横山隆：日本機械学会 No. 04-26 シンポジウム講演論文集、記事連番 31 (2004)
- 8) 小西貴行、長谷川哲、宇治橋貞幸、伊能教夫、田中克昌、佐藤文宣、金子靖仙、伊藤幸司：日本機械学会 No.01-5 Dynamics and Design Conference 2001 CD-ROM 論文集、記事連番 5(2001)
- 9) 黒川知明、浦部大介：日本機械学会 No. 00-38 シンポジウム講演論文集、記事連番 21 (2000)