

W/Ti - 6Al - 4V 複合材料のゴルフヘッドへの検討

— 熱間等方圧加圧（HIP）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 Isostatic Pressing (H. I. P.) Processing — (平成19年9月受理)

松尾 忠利* (MATSUO Tadatoshi)

佐東 信司* (SATO Shinji)

ABSTRACT

United States Golf Association (U.S.G.A.) started the test of golf clubs in 1998. Then the golf club which coefficient of restitution is 0.83 or more is prohibition of use. However, many amateur golfers are not under the application of this rule. In this paper, therefore, W/Ti-6Al-4V composite materials were made as a high repulsion material for the golf head. The composite materials were made by Hot Isostatic Pressing (H.I.P.) processing and were evaluated mechanical properties.

1. 緒言

一般にゴルフクラブは、ボールをより速くに、より正確に飛ばすことを目標として開発がなされてきたが、1998年より全米ゴルフ協会（USGA）では高反発クラブのテストを開始し、反発係数（COR）が0.830を超えるクラブは使用禁止とする規制を設けた¹⁾。日本のツアーにおいても、2006年からドライバーの反発係数の上限値を0.830までとする特別規則を採用した。しかし、ゴルフをスポーツとして楽しむアマチュアゴルファーにおいては、飛距離に対する要求は依然として大きいと考えられる。したがって、一般的にゴルフヘッドのフェース面に用いられているチタン合金（Ti-6Al-4V）よりも高反発な材料を開発し、ゴルファーに最適なゴルフクラブとして提供する^{2)~5)}ことには意義がある。

本論文ではTiAlの高弾性・高強度の材料特性を生かしながら、さらに常温での脆性破壊を向上させるため、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TiAl合金を開発し、ゴルフヘッドへの応用”を検討するものである。特に、1) 高反発力型複合材料として、①Ti-6Al-4V合金の微粒子と粉碎したタングステンを混合した短繊維強化材料、②Ti-6Al-4V

合金板間に、Ti-6Al-4Vパウダーとタングステンの100 μ mのメッシュとを挿入した長繊維強化材料、を熱間等方圧加圧処理（HIP）を行い、W/Ti-6Al-4V複合材料を作製する。2) 複合材料の評価試験は、複合材料の微細組織観察によるマトリックスと繊維界面の状況の評価、材料厚さによる高反発力の検出、複合材料の曲げ試験を行い、材料評価を行う。以上のことから高反発特性を持つ複合材料を開発し、ゴルフクラブヘッド開発への指針を得ることを目的とする。

2. HIP処理による複合材料の作製

2.1 HIP装置

Fig.2-1に本研究において使用した小型HIP装置、Fig.2-2に大型HIP装置を示す。どちらもアルゴンガスを圧力媒体としている。Fig.2-1の小型HIP装置は神戸製鋼製の標準小型HIP処理機(SY50X)である⁶⁾。この装置では直径200mm×高さ300mmまでの材料を作製できるため、HIP処理による基礎実験として使用した。Fig.2-2の大型HIP装置は神戸製鋼製のKOBELCO SYSTEM125である。標準小型処理機HIP(SY50X)よりも大きな材料を作製できるため、ゴルフヘッド材の作製実験に使用した。

* 福島工業高等専門学校 機械工学科 (いわき市平上荒川字長尾30)



Fig. 2-1 Small type HIP machine

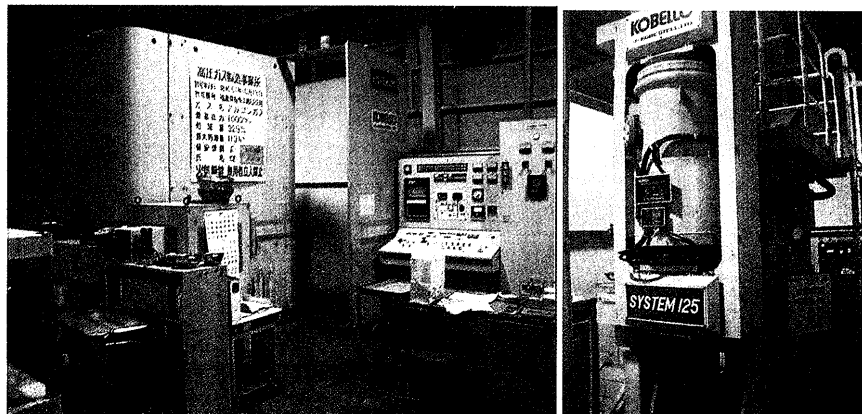
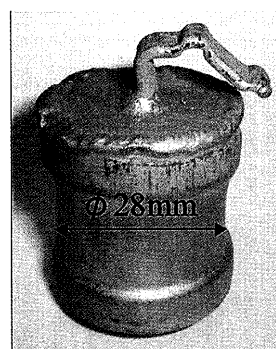


Fig. 2-2 Large type HIP machine

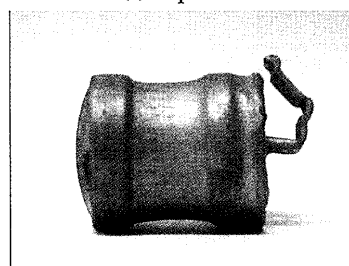
2.2 作製条件と製作

(1) 小型試験片の作製条件と製作

Fig. 2-3 に製造工程フロー図を示す⁽⁷⁾。複合材料作製に用いた Ti-6Al-4 合金粉はアトマイズ法によって製造されたもので、粒径 $150\ \mu\text{m}$ 未満でスクリーニングされている。タングステン短繊維は、表面が電解研磨された径 $20\ \mu\text{m}$ のタングステンワイヤーボールミルで粉碎したものである。この Ti-6Al-4V 合金粉とタングステン短繊維を繊維の体積含有率が 9% となるように配合し、V ミル混合機を用いて均一に分散・混合する。その混合された材料をカプセルに封入し、 950°C 、 98MPa 、 1.5hr の条件で HIP 処理を行う。HIP 後のカプセルを Fig. 2-4 に示す。カプセル自体は、高温に耐え、高圧をかけて容易に変形できる SS400 を使用した。使用機器は神戸製鋼製の標準小型 HIP(SY50X) を用いて行った。



(a) capsule front



(b) capsule side

Fig. 2-4 Capsule after HIP

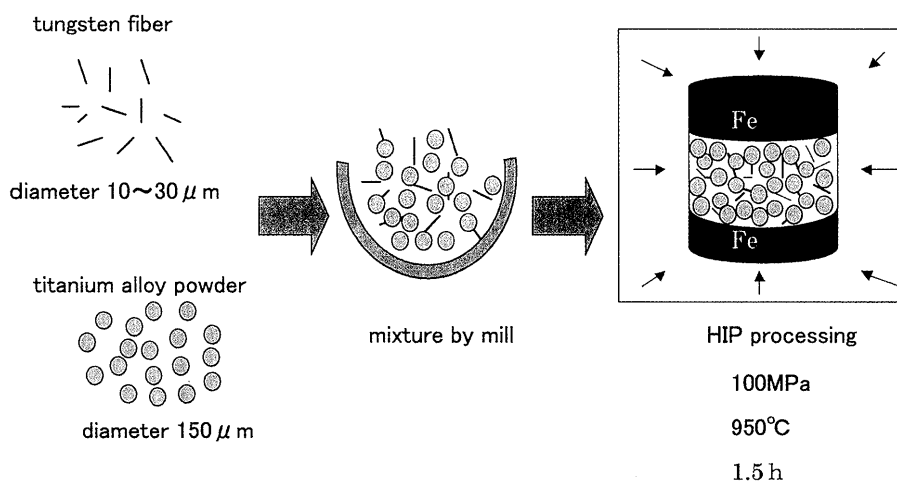
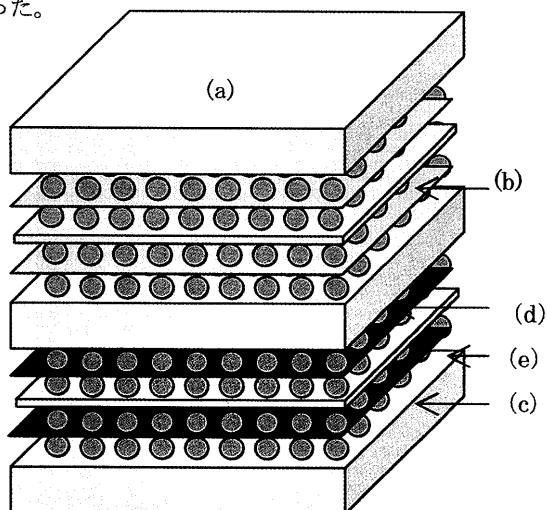


Fig. 2-3 Flowchart of manufacturing process

（２）大型試験片の作製条件と製作

ゴルフクラブのフェース面に使用できるように、100mm×100mm の試験片を作製する。この試験片は Fig. 2-5 に示すように、2 枚の Ti-6Al-4V 板で Ti-6Al-4V 合金粉とタングステンメッシュを挟む積層構造になっている。なお、Ti-6Al-4V 合金粉は 30 g 使用した。積層モデルの中には、Table 2-1 に示した仕様の金メッキしたタングステンメッシュと金メッキしていないタングステンメッシュを挿入している。これはタングステンメッシュが非常に酸化しやすいため、金メッキにより酸化防止した材料と防止していない材料を作製し、強度特性試験において比較するためである。試験片のカプセルへの封入手順を Fig. 2-6 に示す。また、熱処理時の温度勾配を Fig. 2-7 に示す。

その後 HIP 処理を行った。HIP 処理後のカプセルと試験片を Fig. 2-8 に示す。カプセルの上蓋が盛り上がっているのが確認できるが、これはカプセルまたは材料からガスが発生したのが原因だと考えられる。材料の結晶粒径の成長を防ぐため、1000℃まで上昇後、すぐに温度が下がるようにしたため、十分にガスが排出されていなかったものと考えられる。このガスが原因で Fig. 2-9 のように材料を緻密にすることができず、大型試験片の材料評価ができなかった。



- (a) Ti-6Al-4V 板(t=3mm)
- (b) タングステンメッシュ(金メッキ)
- (c) タングステンメッシュ(メッキなし)
- (d) Ti-6Al-4V 合金粉
- (e) Ti-6Al-4V (t=1mm)

Fig. 2-5 Laminated structure

Table 2-1 Specification of tungsten mesh

diameter of fiber (mm)	0.05
mesh (mesh/inch)	100
size (mm)	100×100

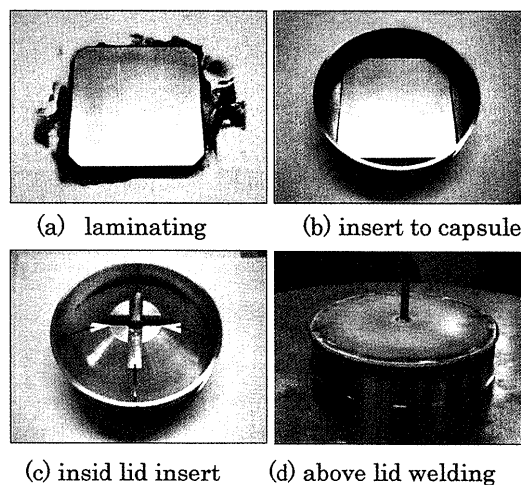


Fig. 2-6 Enclosed procedure

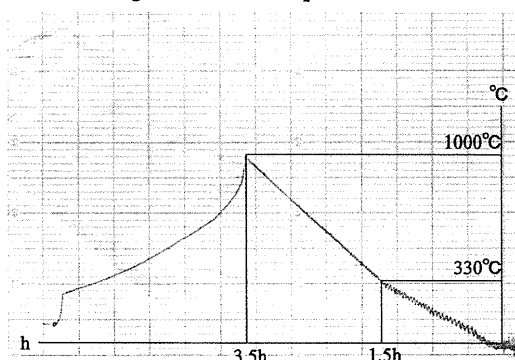
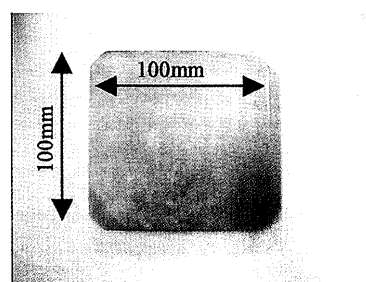


Fig. 2-7 Heat-treatment temperature



(a) capsule (diameter:136mm)



(b) test piece

Fig. 2-8 Capsule after HIP

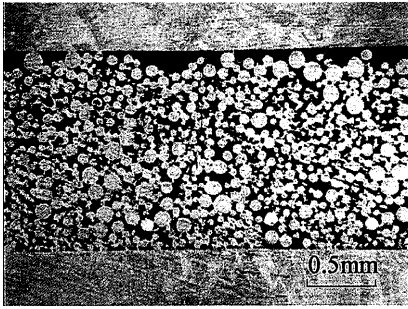


Fig. 2-9 expanded sectional view

3. W/Ti-6Al-4V 複合材料の評価

大型の試験片は、密度の高い材料を作成することができなかつたので、小型試験片を用いて材料の評価を行った。

3.1 硬さ測定

試験荷重ごとに5回測定し、その中で1番大きな測定値と小さな測定値を省き、残りの3つの測定値で縦と横の平均をだす。その縦と横の値をさらに平均化し式(1)を用いて、ビッカース硬さ H_v を算出した。

$$H_v = 0.1891 \times \left(\frac{0.98}{d^2} \right) \quad (1)$$

タングステンを付加した 20wt%W/Ti-6Al-4V のマトリックス部と、付加していない Ti-6Al-4V のマトリックス部のビッカース硬さを測定した結果を Table 3-1、Fig. 3-1 に示す。25g ではどちらも他の荷重に比べ高い硬度を示している。これは、HIP 処理を行うと気孔が除去され機械的性質が大幅に改善され、表面硬度が増すためであると考えられる。50g 付近でも圧痕の深さがまだ表面に近いため若干高い値を示している。75g では表面硬度の影響は無いと考えられるが高い硬度を示している。これは試験を行った試験片の位置に問題があったと考えられる。圧痕を押し付けた位置の下にタングステン繊維があったため硬度が高くなっていると考えられる。さらに、50g、100g、150g では似た値を示しており、タングステンを付加した効果が見られない。これは前述のとおり、測定場所がマトリックス部であったため、付近又は圧痕の下にタングステン繊維が無かつたためタングステンを付加したものと付加していないもので似た値を示してしまったと考えられる。

20wt%W/Ti-6Al-4V 及び Ti-6Al-4V で、それぞれビッカース硬さの平均を出した。20wt%W/Ti-6Al-4V では 423.15Hv、Ti-6Al-4V では 402.18Hv となりタングステンを付加した効果が見られた。

Table 3-1 Results of Vickers hardness test

	Test weight (g)						average
	25	50	75	100	125	150	
20wt%W/Ti-6Al-4V	562.3	405.6	450.3	390.2	389.0	341.5	423.15
Ti-6Al-4V	461.8	418.5	436.0	380.7	367.1	349.0	402.18

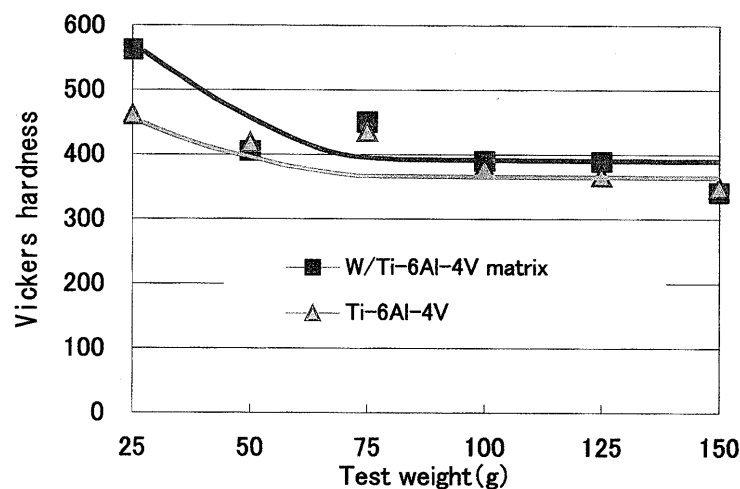


Fig.3-1 Vickers hardness curve

3.2 組織観察と繊維体積率

走査型電子顕微鏡(SEM)による組織観察を行い作製した材料のタングステン短繊維の分布を調べた。赤枠で囲まれた部分が作製した材料である。HIP 処理後のカプセルを Fig. 3-2 のように切断し、 1mm^3 の立方体を切り出した。その立方体の A 面、B 面、C 面それぞれに対し走査型電子顕微鏡(SEM)による組織観察を行った結果を Fig. 3-3 に示す。

Fig. 3-3 において灰色の部分がマトリックス部で、白色の部分がタングステン短繊維である。Fig. 3-3 より、ほぼ均一にタングステン短繊維が拡散・分布しているのが確認できる。また、繊維の拡散・分布を定量的に評価するために、画像処理を行い白黒画像に変換した結果を Fig. 3-4 に示す。マトリックス部が黒色で、タングステン短繊維が白色で表された。さらに Fig. 3-4 をコンピュータ処理してタングステン短繊維の含有率を調べた結果を Table3-2 に示す。Table3-2 においてタングステン短繊維の面積割合の平均を出すと、7.25%となった。この平均値 100%とすると A、B、C 面の差はそれぞれ 2.34%、8.27%、

5.93%となり 10%以上の大きな誤差がないことが確認できた。しかし B 面と C 面だけで比較すると差が 1.03%あり、タングステン短繊維の平均面積割合が 7.25%という事から考えると大きな差であると考えられる。これは図 3-4 の C 面を見ると理由がわかる。図 3-4 の C 面は A 面、B 面に比べ黒い点が多く存在している。その点は空隙であり、材料作製時にカプセル内から Ti-6Al-4V 合金粉やタングステン短繊維が外に漏れてしまったためできたものと考えられる。

この小型 HIP 装置による基礎実験では理論上密度が $7.42\text{g}/\text{cm}^2$ の材料が作製できる。しかし実際に作製した材料の密度を測定した結果 $4.80\text{g}/\text{cm}^2$ である事がわかった。この結果も前述で述べた Ti-6Al-4V 合金粉やタングステン短繊維がカプセル外に漏れてしまったためにできた空隙が原因であると考えられる。この差を考慮すれば C 面のタングステン短繊維の面積割合もあがり、他の面と遜色の無い値が得られタングステン短繊維の十分な分布・拡散が確認できたものと考えられる。

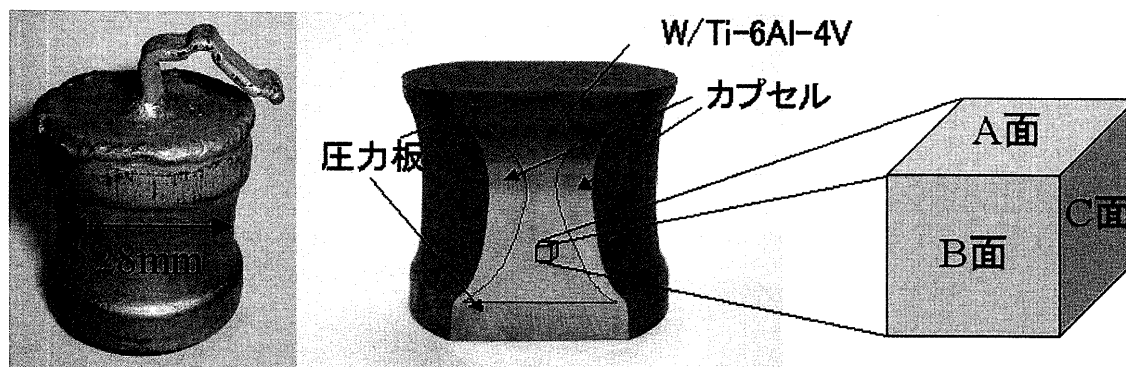


Fig. 3-2 Capsule cutting surface

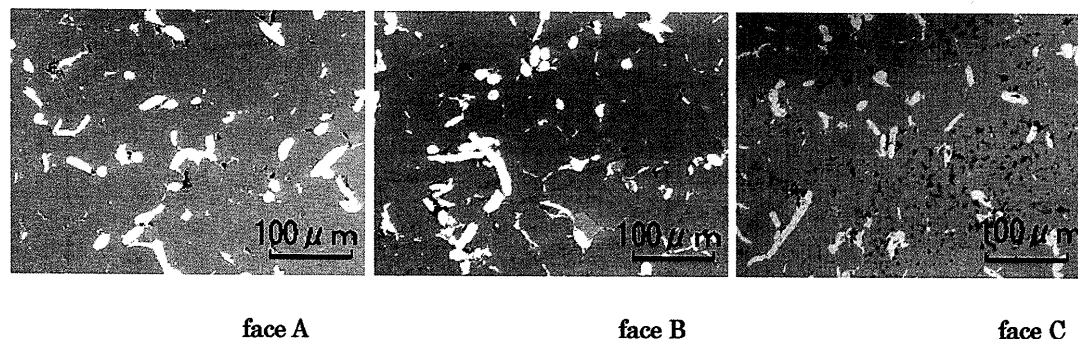


Fig. 3-3 Photograph of surface

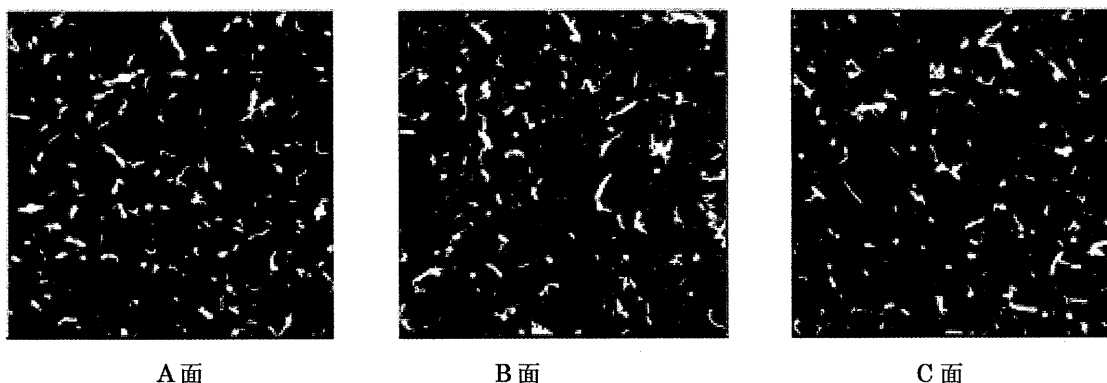


Fig. 3-4 Isotropy of tungsten short fiber

Table 3-2 Ratio of tungsten short fiber

	Face A	Face B	Face C
ratio of W short fiber [%]	7.08	7.85	6.82

3.2 反発力の測定

反発係数を評価するため、厚さ2mmの試験片について測定を行った。母材の反発係数との比較のため、2.0mm厚のHIP処理Ti-6Al-4V材でも測定する。Fig. 3-5のように材料を固定し、真上からゴルフボールを落とした時のボールの跳ね返り高さから反発力の大きさを調べる。測定結果をTable 3.3に示す。表より、Ti-6Al-4Vの反発係数が0.850、タングステン短繊維を複合したものが0.872と、およそ0.02の反発係数の上昇が認められた。反発係数が0.01増えると、飛距離が2yard程度増加するとされている⁽⁸⁾ので、ゴルフヘッドのフェース面に搭載したと場合、飛距離が4yard程度増加すると考えられる。

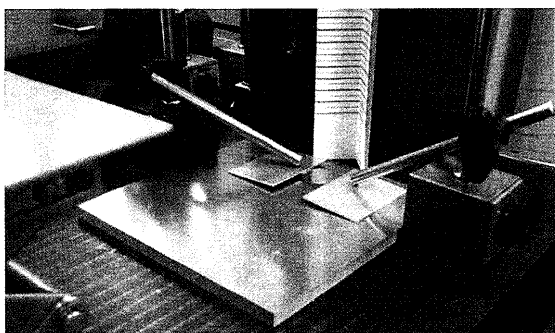


Fig.3-5 Measurement of restitution coefficient

Table 3-3 Restitution coefficient

W fiber content ratio (wt%)	thickness (mm)	restitution coefficient
0	2	0.850
20	2	0.872

5. 結 言

本研究では高反発特性を持つ複合材料開発を開発し、ゴルフクラブヘッド開発への指針を得ることを目的として、HIP 処理による材料作製と特性試験を行い以下の知見を得た。

小型 HIP 装置による基礎実験を行った結果、

(1) 材料中の短繊維タングステンは均一に分散していることが確認できた。

(2) 短繊維タングステンを付加した事によるビッカース硬さおよび反発係数の上昇が認められた。

大型 HIP 装置による実用型材料作製では、満足できる材料の作製には至らなかった。しかし、HIP 処理を行う前処理として、熱処理・カプセル内の真空脱気及び真空封入を実施できる装置を設置・作製することができ、その装置により、カプセル内の真空脱気及び真空封入を行うことができた。以上のことから、高反発特性を有するゴルフクラブヘッド開発への指針を得ることができたと考えられる。

参考文献

- (1) United States Golf Association HP, Clubs & 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、第40号、pp.1-6、2000.
- (3) 佐東信司、松尾忠利、岩松幸雄、福島高専研究紀要、第41号、pp.1-5、2001.
- (4) 佐東信司、松尾忠利、岩松幸雄、福島高専研究紀要、第42号、pp.7-11、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、第45号、pp.7-11、2005.
- (6) 神戸製鋼 HP, [http:// www.kobelco.co.jp/p109/05/p164.htm](http://www.kobelco.co.jp/p109/05/p164.htm)
- (7) 小金丸正明他 4 名、タングステン短繊維強化 Ti-6Al-4V 合金の高温強度(2001)
- (8) 増田正美、ゴルフの物理、裳華房(1995)