

ゴルフヘッドの表面窒化処理による打球延長効果

Carry Extension Effect by Surface Nitride of Golf Head

佐東 信司・國分 康志*・松尾 忠利・福島 澄雄**

福島工業高等専門学校機械工学科

*福島工業高等専門学校機械電気システム工学専攻

**ヤナギスポーツ

Shinji Sato, Yasushi Kokubun*, Tadatoshi Matsuo, Sumio Fukushima

Fukushima National College of Technology, Department of Mechanical Engineering

*Fukushima National College of Technology, Advanced Course in Mechanical and Electrical System Engineering

**Yanagi Sport Co. Ltd.

(2009年9月16日受理)

The purpose of this research is to improve the golf head to the high repulsion. The method is that the nitride layer was formed on the golf head by the nitride treatment. The nitride layer of about 50nm was formed as a result of the nitride processing the golf head for 120min at 850°C. In the endurance test, the flaking off of the nitride layer and crack were not generated. Moreover, the decrease of the batted ball speed was not observed. In case of the head speed 35m/s, it is found that the carry became longer by 5%. It is found that nitride treatment golf head can be commercialized from the results of these experiments.

Key words: golf head, high repulsive force, titanium alloy, nitrided layer, golf robot.

1. 緒言

これまでゴルフは「紳士のスポーツ」と呼ばれて来ていたが、最近ではゴルフ代も安価になり、男女を問わず庶民的なスポーツとして年齢層も広く、多くのゴルファーが楽しんでいる。特に、ゴルフは高年齢になってもプレーを楽しめるといった点から中高年には根強い人気がある。また、若年のプロゴルファーの影響もあり、若年層への広まりも見られるようになってきている。

我々はゴルフシャフトの開発¹⁻³⁾からスタートして現在ではゴルフクラブの開発⁴⁾に移行してきている。しかし、国内におけるゴルフヘッドの製造が減少し、その背景には、国内でのゴルフヘッドの開発はコスト高で非常に困難になってきていることが挙げられる。そのため、優れたゴルフヘッドを開発するには表面改質処理などの方策は安価にでき、検討課題の一つと考えられる。

また、一般的なゴルファーは高飛距離が得られるゴルフクラブを使用したいと願っている。この改善策として、ゴルフヘッド表面を高弾性に構築するこ

とが考えられる。

本研究では、飛距離の向上を図るため、ゴルフヘッドを窒化処理して、表面層に窒化膜を形成し、高弾性・高反発型のゴルフヘッドへ改善することを目的としている。また、福島高専ブランドゴルフクラブを市場に出すことも視野に入れている。

2. 実験方法

2.1 ゴルフヘッドと表面改質条件

使用ヘッドは市販のTi-6Al-4V製で容積は450cc、重量は200g程度である。ヘッド表面の研磨条件はバフ研磨による鏡面仕上げ後、アセトン洗浄して窒化処理用ヘッドとした。

表面改質方法はCVD法(Chemical Vapor Deposit)による窒化処理を選択した。窒化処理装置は研究用炉(小型炉)と実用炉(商品化を目指した炉)の2種類を用いた。処理条件を以下に示す。

処理温度：850°C、処理時間：60、120、210min、導入窒素ガス圧：1.3atm、
である。1回に処理できるゴルフヘッドの数は、研

究用炉では2個、実用炉では数百個まで可能である。

2.2 硬さ試験

ビッカース硬さ用試験片はFig. 1のようにゴルフヘッドから5mm幅に切出し、鏡面研磨後窒化処理を行った。

硬さ試験にはFig. 2に示す微小表面材料特性評価システムMZT-4を用いた。硬さ試験の実験条件を以下に示す。

- ・試験荷重：100～1000mN
- ・負荷時間：10sec
- ・保持時間：15sec
- ・除荷時間：5sec

本システムは100mNから測定できるため、極薄の表面層の評価には適している装置である。測定は1条件で5回行い、その平均値で求めた。

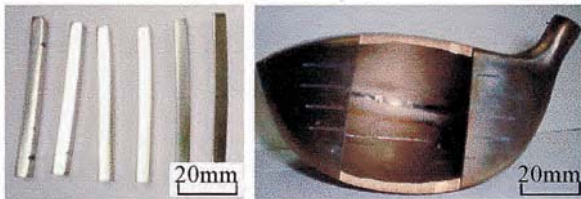


Fig.1 Test piece for hardness measurement specimen from the golf head.



Fig.2 Used micro Vickers hardness.

2.3 ゴルフロボットによる試打実験

2.3.1 ゴルフロボット

用いたゴルフロボットSHOTROBOVをFig. 3に示す。本ロボットはアーム部、リスト部、グリップ部の3軸3関節で構成され、それぞれを駆動させることで、人間により近いスイングを再現することができる。また、ゴルフロボットの打球の評価には、ハイスピードカメラシステムを用いた。このシステムは、



Fig.3 Outline of the golf robot.

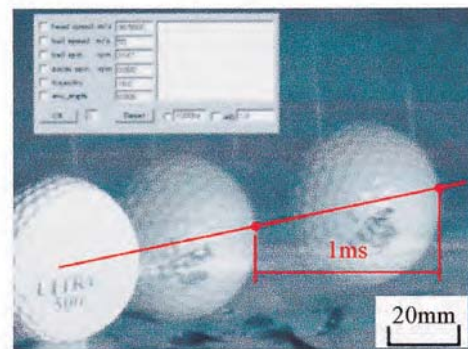


Fig.4 Photographing of golf ball in the 1ms interval.

ボールが打ち出される様子を1000Hzで写真撮影し(Fig. 4)、画像解析ソフトによってボール速度、打ち出し角度、ボールバックスピン等を求めることができる。ゴルフクラブのヘッドスピードは専用のスピードメータで測定した。画像解析ソフトでもヘッドスピード測定が可能で、双方の比較により定量的な測定が可能である。

ゴルフヘッドスピードはゴルフクラブのシャフト長さによって異なるが、自由にスピードをコントロールすることが可能である。

2.3.2 ゴルフヘッドの耐久試験

耐久試験を用いたボール自動送り機はFig. 5で、この時の試験条件を以下に示す。

- ①ヘッドスピード35m/s (ゴルフロボットの出力50%)
- ②試験打数…3000発を目標とする。
- ③500発毎に打球のボールスピードを測定する。

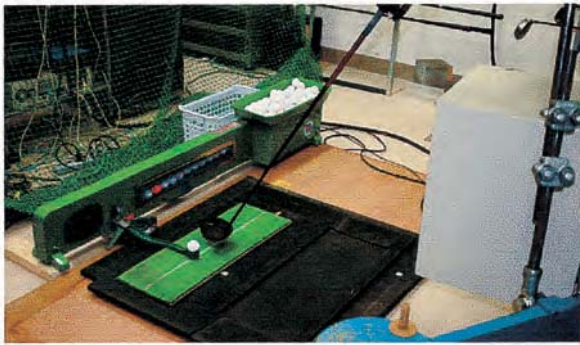


Fig.5 Automatic feed equipment of golf ball used in the endurance test.

2.3.3 屋外実験

ゴルフロボットをいわき市の小名浜オーシャンホテル&ゴルフクラブの建屋に移動し、10番コースへ打球を飛ばしFig.6の状態を実測した。打球の飛距離測定は打球の測定項目は①ボールスピード、②バックスピン、③打ち出し角で、飛距離に関してはキャリー値と左右へのぶれ位置を求めた。これらの項目は試打5回の平均値で求めた。



Fig.6 Golf experiment in golf course.

3. 実験結果と考察

3.1 窒化処理による窒化層厚さの推定

金属中への溶質原子の拡散係数 $D\text{m}^2/\text{s}$ は一般的に(1)式で与えられる⁵⁻⁶⁾。

$$D = D_0 \exp(-R/QT) \quad (1)$$

ここで、

D_0 は振動因子 m^2/s 、 Q は活性化エネルギー J/mol 、 R は気体定数 $\text{J}/\text{mol} \cdot \text{K}$ 、 T は処理温度 K である。 D は熱処理温度によって大きく変化する。

また、溶質原子が t_{sec} で材料表面より拡散する距離 X は(2)式で与えられる。

$$X = \sqrt{Dt} \quad (2)$$

750℃、800℃、850℃におけるTiへのN原子の拡散の計算結果から求めた拡散距離 X_m をFig.7に示す。ここで $X=50\text{nm}$ における熱処理時間は850℃で2時間、800℃で6時間、750℃で20時間と推定される。

熱処理でマトリックスの軟化現象は起きるが、窒化層の形成では処理温度の高い方が形成速度も速くなる。このため、低温で長時間の処理を行うか、高温で短時間の処理をするかの選択となる。本研究では短時間での窒化層形成について評価することとし、850℃での実験を行った。

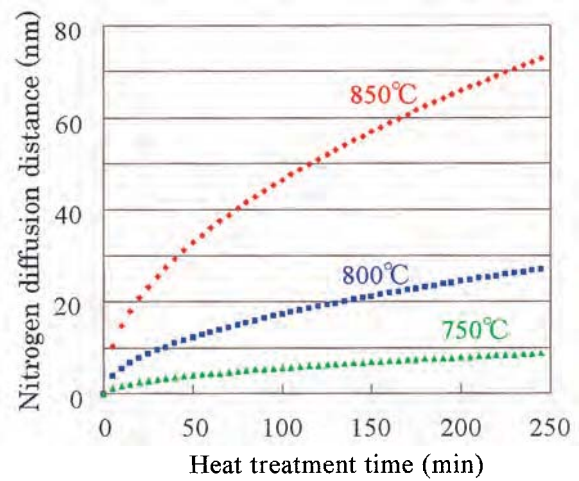


Fig.7 Nitrogen diffusion distance.

3.2 ゴルフヘッドの表面窒化処理の評価

窒化層の厚さは100nm以下であることを考慮するとゴルフヘッド表面の凹凸は均一な窒化層形成には不適切となるため、表面の鏡面仕上げが必要不可欠となる。

表面改質の窒化処理は850℃で行っているが、処理時間を60、120、210minに変化させたときの熱履歴工程をFig.8に示す。室温から250℃までは脱ガスを考慮して1.1℃/minで昇温し、250℃で120min保持後、10℃/minで850℃まで最昇温した後に、60、120、210minの処理を行った。処理後は250℃まで炉冷し、その後空冷した。

窒化処理前後のゴルフヘッドの様子をFig.9に示す。窒化処理によってヘッド表面が金色に変化し、Ti合金が十分に窒化処理された光沢を示した。

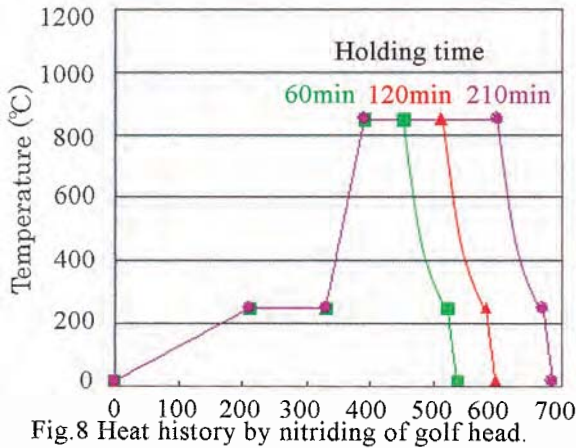


Fig.8 Heat history by nitriding of golf head.

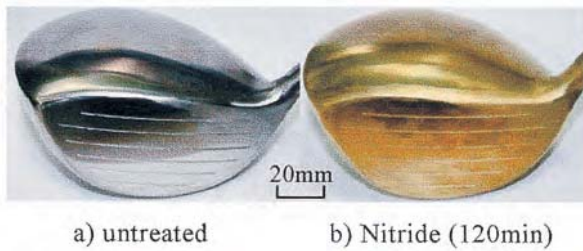


Fig.9 Change in outline golf head.

3.3 SEMによる窒化層の組織観察

120min窒化処理のゴルフヘッド材から切り出した組織観察用試料のSEM組織写真をFig. 10に示す。850°C処理は融点 T_m の58%(0.58 T_m)に相当するため、材料中の原子が拡散できる組織の回復温度領域にある。即ち、強度の低下と結晶粒の成長が起こるが、本材料では、結晶粒径が3~5 μm と微細粒であった。また、850°Cで120min. 処理した材料では、材料表面で白く観察される領域を質量分析した結果、窒素が多く検出され、その厚さは50~80nmである。同じ熱処理条件での理論計算から求めた窒化層は50nm程度と推定されるため、概ね理論値に近い値で形成されていることが得られた。

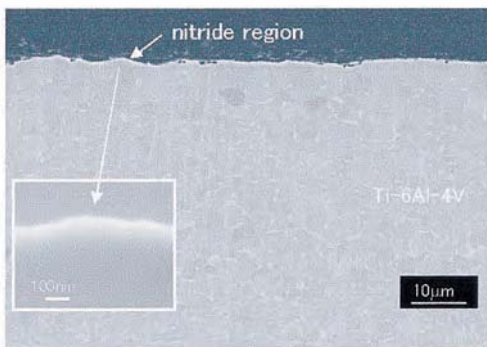


Fig.10 SEM image of the nitride region.

3.4 硬さ試験の評価

窒化処理(850°C x 120min)の処理前後における硬さ試験の荷重-変位曲線をFig. 11に示す。試験荷重100mNにおけるマトリックスの曲線を基準にして、曲線の変化について考える。マトリックスは一般的な荷重-変位曲線を示したが、窒化処理材では押し込み量の減少が見られた。また、図中のS部での曲線は山形になっていることがわかる。この現象は表面層の窒化膜が硬くなっていることを示しており、その後は圧子がマトリックスに侵入することで、緩やかなカーブへと変化したことがわかる。また、100mNに近づくとしたがつて曲線の立ち上がり急になるが、これは表面窒化層が圧子に与えている影響と考えられ、窒化層形成の影響を明瞭に捉えられた結果である。

硬さ試験での試験荷重依存性の結果をFig. 12に示す。荷重が小さくなると表面の極薄酸化膜等が敏感に影響するため、小荷重になるに従って硬さは高くなる傾向を示す。

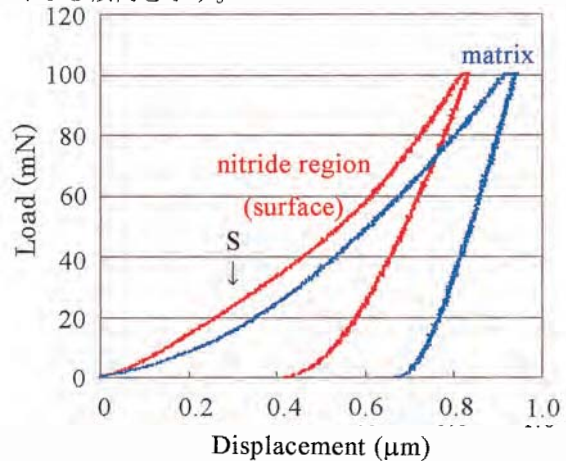


Fig.11 Indentation curve of micro Vickers hardness.

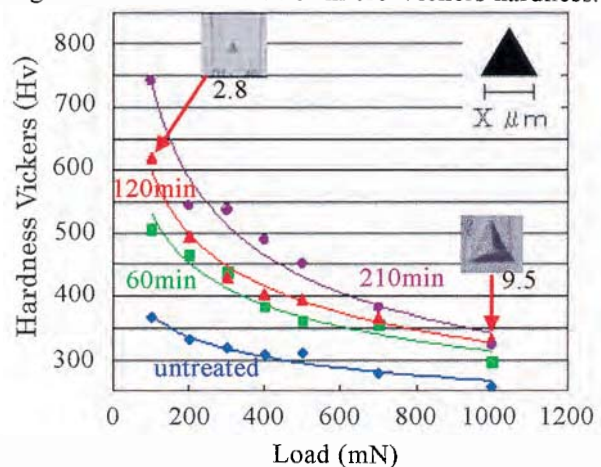


Fig.12 Load dependence of micro Vickers hardness.

このため、窒化処理していない曲線を初期の硬さ基準として考える。いずれの窒化処理材も未処理のものに比べて硬さが上昇した。本研究では薄膜に相当するため、小荷重で評価することが重要である。小荷重領域では210min処理材が最も硬化した。これらの実験条件では窒化層が最も厚くなっているためである。また、大荷重になるにしたがって硬さ試験機のダイヤモンド圧子が深くまで押し込まれるため、極薄窒化層を破壊して、マトリックスに進入することでマトリックスの硬さへと近づくと考えられる。

4. ゴルフロボットによるゴルフヘッドの評価

4.1 商品化へ向けたゴルフヘッドの耐久試験

850℃で短時間の処理は窒化層の厚さを薄くしてマトリックスとの傾斜材料の形成を試みている。例えば窒化時間を長くして表面窒化層を厚くすると、マトリックスと窒化層境界が明瞭に現れてくる。ボールの打撃を受けたときに窒化層は強烈に固く、マトリックスは軟化して強度低下を起しており、両者の強度変化が明瞭に現れてくる。大きな外力が伴わない場合には表面硬化として有益であるが、外力が作用する場合には、それらの界面に歪みが蓄積され、界面剥離あるいは窒化層へのヘアークラックが導入され⁷⁾、ゴルフヘッドとしての役割を果たすことが不可能となる。即ち、明瞭な界面が形成されない傾斜材料がゴルフヘッドには望ましいと考えている。

商品化する場合には、打撃時における表面剥離や改質面でのヘアークラックの発生の有無を確認するため、耐久試験評価が必須課題となる。そのため、耐久試験を以下の条件で行った。

- ①ヘッドスピード…35m/s（ゴルフロボットの出力50%）
- ②試験打数…3000発を目標とする。

力の弱いゴルファーあるいは女性を対象に製品化を目指しているため、女性の平均ヘッドスピードより高い35m/sを試験条件として安全性に配慮した。

500発撃つごとにボールスピードを測定した結果をFig. 13に示す。ボールスピードは約52m/sを維持した。3000発達成後のゴルフヘッドの様子をFig. 14に示す。打球はヘッドの中心部に当たっているが、

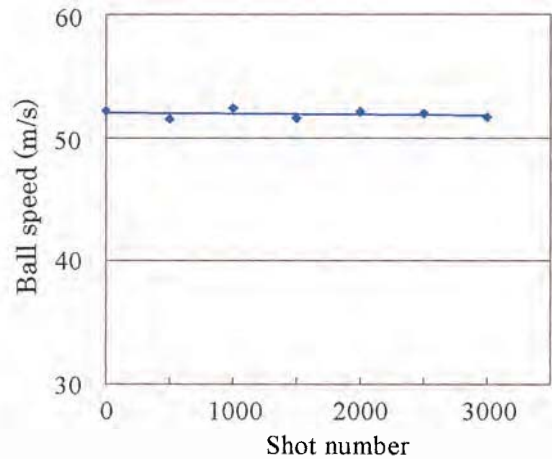


Fig.13 Speed change of batting in the endurance test.



Fig.14 Outline of golf head after endurance test.

表面にヘアークラックや表面剥離が目視では観察されず良好な状態を保っていた。したがって今回の窒化処理条件は、商品として使用に耐えうる良好なものであると判断している。

4.2 ゴルフ場での飛距離測定

飛距離測定実験は、1)最適窒化条件の選定を目的とした基礎実験、2)商品化への量産を視野に入れた実験を行った。これは実用炉処理ヘッドと研究用炉処理ヘッドの比較による、窒化処理効果の再現実験である。

1) 研究炉による窒化処理ヘッドの打撃評価

ゴルフクラブの各ヘッドスピードにおける打球の飛距離(Carry)の測定結果をFig. 15に示す。窒化処理時間60minと120minで行ったが、120minの方が処理前に比べて全てのヘッドスピードにおいて6m程度飛距離が増した。すなわち、窒化層が飛距離延長に効果的であることを示した結果である。この条件内で判断すると処理温度850℃の場合、最適窒化時間は120min以上であることが理解できる。また、力の弱いゴルファーへのクラブ提供を目標として

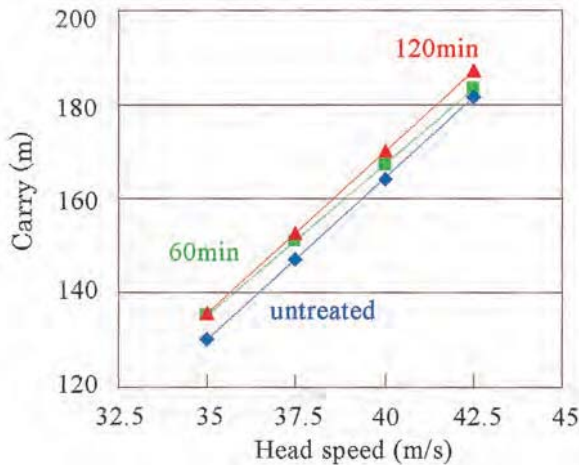


Fig.15 Change of carry extension by nitriding condition.

ヘッドスピード35m/sを想定しているが、この場合飛距離の延長は5%に及ぶことが明らかになった。

2) 実用炉を用いた窒化処理ヘッドの打撃評価

実用炉では120minの窒化処理を行い、実用炉でも同様の処理を行って処理炉の異なりによる評価を行った。また、窒化時間を延長した場合の比較として研究用炉での210minの窒化処理材をFig. 16示す。実用炉と研究用炉で熱処理を行った場合の飛距離の比較では、両窒化処理炉の効果に再現性があり、結果は良い一致を得ることができた。すなわち、量産化に適した処理方法であるという結論が得られた。また、210min処理ヘッドと120min処理ヘッドとを比較した場合、120min処理の方が飛距離を得られた。これは210min処理の場合、窒化層は成長してき

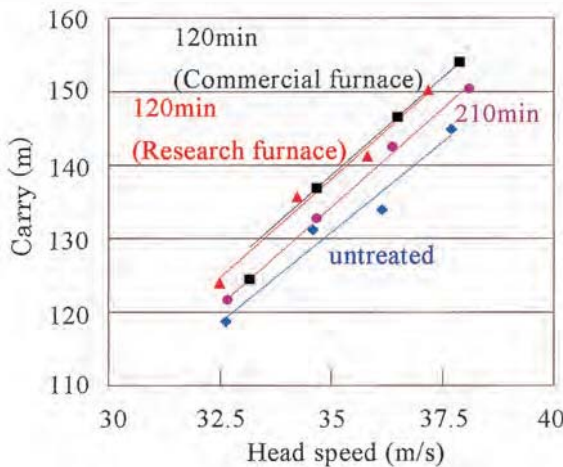


Fig.16 Change of carry extension by heat treating furnace.

ているが、マトリックスがより軟化してきていると考えられ、両者の兼ね合いで反発力が低下し、飛距離が下がったと考えている。今回の結果から850℃における最適処理時間は120min付近に存在することがわかった。

5. 結言

- 1) 窒化処理による窒化層の形成は理論式と概ね一致した厚さになり、850℃×120minの窒化処理の場合、50nm程度の窒化層が形成されていることがわかった。
- 2) ゴルフヘッドの耐久試験では窒化層の剥離やヘアークラックは発生せず、打球のボールスピードの劣化も見られなかった。
- 3) 120min処理を施したもので約6mの飛距離延長が認められた。特にヘッドスピード35m/sでは5%の延長になることがわかった。
- 4) 最適な窒化処理条件の指針が得られ、窒化処理ゴルフヘッドの商品化への目途が立った。

参考文献

- 1) 佐東信司、岩松幸雄：ゴルフクラブ用炭素繊維／エポキシ樹脂複合材料の弾性率特性とゴルフシャフトの振動数特性、福島工業高等専門学校、研究紀要、第39号、1-7(1999)
- 2) 佐東信司、松尾忠利、岩松幸雄：ゴルフクラブの振動数による許容ヘッドスピードの評価、福島工業高等専門学校、研究紀要、第41号、1-5(2001)
- 3) 松尾忠利、佐東信司、岩松幸雄：ゴルフロボットを用いたゴルフクリニックへの試み＝診断ソフトの開発と屋外試打による評価＝、福島工業高等専門学校、研究紀要、第42号、7-11(2002)
- 4) 松尾忠利、鈴木浩史、福島澄雄、佐東信司：ゴルファーの諸特性に合致した最適クラブの開発と評価、研究紀要第46号、7-12(2005)
- 5) 日本金属学会、金属データブック、丸善株式会社
- 6) C. R. バレット、W. D. ニックス、A. S. テテルマン：材料科学1、培風館
- 7) 泉久司：先端材料、パワー社