

研究論文 船舶プロペラ用アルミニウム青銅の表面硬化特性

川添 強* 古川友紀** 神田和久** 錦戸真吾**

Surface Hardening Characteristics of Aluminum Bronze for Marine Propeller

Tsuyoshi Kawazoe, Tomonori Furukawa, Kazuhisa Kanda and Shingo Nishikido

Surface hardening of propeller material brings many advantages such as superior erosion resistance and increase of propeller efficiency. This study investigates the surface hardening characteristics and erosion resistance of AlBC3 treated by flame, induction and laser hardenings in view of the metallographic aspect. The microstructures and distributions of alloying elements of the test specimens were examined using a microscope and EPMA. Jominy test and ultrasonic erosion test were also conducted to evaluate the depth of surface hardening and the cavitation erosion resistance. The tests revealed that surface hardened by flame hardening is about 1.5 times harder than the as-cast and the hardness is closely related to the area ratio of the hard $\beta + \beta'$ phase to α phase on the microstructure. Laser hardening also produces harder surface, but the hardened layer is much thinner as compared to flame hardening thus contributing to the improvement of the erosion resistance of AlBC3 and is suitable for application to actual propellers.

Keywords : Al-bronze casting, surface hardening, quenching treatment, erosion resistance, marine propeller

1. 緒 言

アルミニウム青銅鋳物(JIS : AlBC3)は、腐食疲労強度、耐食性、鋳造性に優れているため、船用プロペラ、海水ポンプ、歯車等の材料¹⁾²⁾として使用されている。特に中大型の船用プロペラにおいては、その90%以上

がこの材料で製造されているが、常に推進効率向上の命題が課せられる。すなわち、Fig. 1 に示すように主機馬力当たりの船速増加をねらって推進効率の向上を図ろうとすると、プロペラ翼面積の低減が必至となり、最終的には翼部に過大なキャビテーション・エロージョン損傷(Fig. 2)を招き推進効率も低下する。この問題を解決す

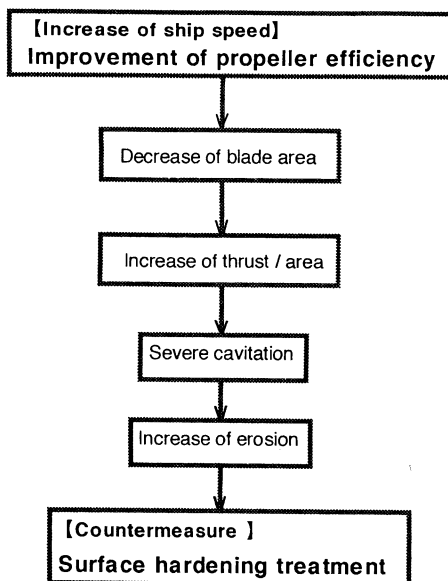


Fig. 1 Necessity of surface hardening treatment



Fig. 2 Cavitation erosion of propeller blade

平成 8 年 10 月 14 日 原稿受理

* 長崎大学工学部 工博

** 三菱重工業(株)

る一手段として、高硬度ステンレス・プロペラ材料が開発・実用化されているが³⁾、大型焼鈍炉の確保など設備上の問題がある。ここでは AIBC3 の材料特性を生かしながら表面のみを硬化させる対応策を検討した。

一般に鋼の焼入れ性については数多くの研究がなされているが、AIBC3 のような銅合金の焼入れ性の研究はあまり見られない。また最近注目されているレーザ焼入れにおいても、エンジンのピストンリング溝への適用例はあるが⁴⁾、銅合金への応用例はほとんどない。

本研究では AIBC3 の表面硬化法として、炎焼入れ、高周波焼入れおよびレーザ焼入れ試験を行い、焼入れ性とマイクロ組織およびキャビテーション・エロージョンの関係の解明を目的として実験を行った。また実用化の観点より、船用プロペラに対する最適な表面硬化法についても検討を加えた。

2. 実験方法

Table 1, 2 に表面硬化処理前(鑄放し材)の供試材の化学成分と機械的性質を示す。供試材 A は JIS 規定値の平均的な Mn 含有量とし、供試材 B は船級協会規定値の平均的な Mn 含有量とした。炎焼入れでは 220 L × 50 B × 65 H mm 直方体の試験片を用い、予備試験として供試材をガスバーナで 1173 K に加熱し 30 分間保持した後、3 種類の冷却法(水噴射, 強制空冷, 自然放冷)により熱処理を実施した。また残留応力除去の最適焼戻温度を求めるために、温度を 673 から 773 K まで変化させて焼戻処理を行った。さらに炎焼入れ試験では、AIBC3 の焼入れ性と Mn 含有量およびマイクロ組織の関係を調べるために、ジョミニー試験を行った。その試験片形状を Fig. 3 に示す。焼入れ端より 5 mm, 25 mm, 45 mm, 65 mm の位置に深さ 5 mm までクロメル-アルメル型、線径 1 mm の熱電対を挿入し冷却速度を測定した。

高周波焼入れは、350 KHz の高周波発振器により 100 L × 50 B × 20 H mm の試験片を 1173 K の 30 分間加熱した後、水中で急冷した。

レーザ焼入れでは、高周波焼入れと同形状の試験片に出力 5 kW で CO₂ レーザ(ノズル径 8 mm, ビード幅約 5 mm)を照射し、移動速度を 200~2000 mm/min に変化させて実験した。また銅合金は CO₂ レーザを反射しやすいため、りん酸マンガンのビーム吸収剤を試験片表面に塗布し入熱の増加を図った。

上記の表面硬化処理の中で、炎焼入れによる耐キャビテーション・エロージョン性を評価するために、直径 16 mm, 長さ 3 mm の試験片と超音波エロージョン試験

Table 1 Chemical compositions of test specimens

mass %		Al	Ni	Fe	Mn	Cu
AIBC3 of as cast	A	9.19	4.55	5.33	0.52	Bal.
	B	9.10	4.33	4.90	1.75	Bal.

Table 2 Mechanical properties of test specimens

----	Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Brinell Hardness HB(10/3000/30)
AIBC3 of as cast	665	20.8	156

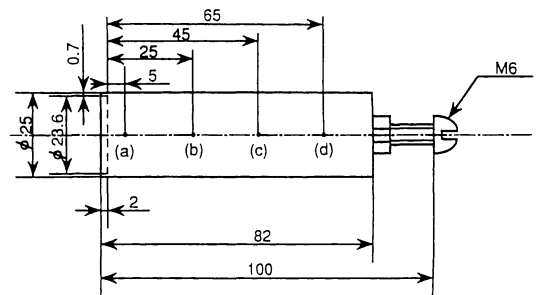


Fig. 3 Schematic diagram of Jominy test specimen

機を用い、振幅 110 μm, 振動数 6.5 kHz, 海水中で 120 分間の試験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 炎焼入れ試験

Fig. 4 と Table 3 に炎焼入れの予備試験結果を示す。表面硬さは水噴射冷却が最も高く、鑄放し材の約 1.5 倍を示し AIBC3 合金が焼入れ性をもつことが分かる。強制空冷および自然放冷は、鑄放し材に比べ表面硬化が認められるが、水噴射冷却よりも硬さが低い。Table 3 に注目すると、引張強さと耐力は硬さとともに増加し、水噴射冷却法が最大値を示すが、伸びと衝撃値はこれと反対の傾向となる。これらの試験結果をもとに、本試験での炎焼入れはすべて水噴射冷却法を採用することとした。本実験に使用した鑄放し材のマイクロ組織を Fig. 5 に示す。白色で平均径約 40 μm の α 相が約 95% を占め、残りは黒色の平均径約 5 μm の β 相と粒径 5 μm 以下の κ 相 (κ₁, κ₂, κ₃) により構成されている。

Fig. 6 は、Mn 含有量をパラメータに水噴射焼入れ材のジョミニー試験結果を示す。表層の硬さは母材深部に比べ約 1.4 倍(鑄放し材に比べ約 1.5 倍)硬化しており、本試験でも AIBC3 の焼入れ性が実証された。Fig. 7 にジョミニー試験片の冷却曲線を示す。1173 K から 773 K

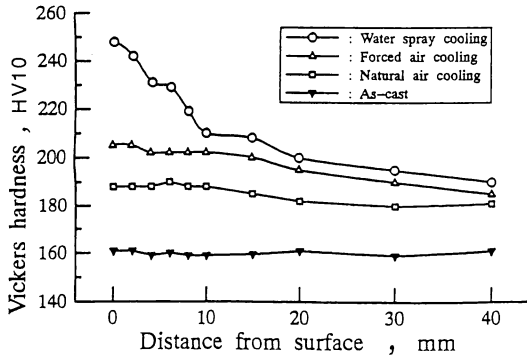


Fig. 4 Preliminary test results of flame hardening

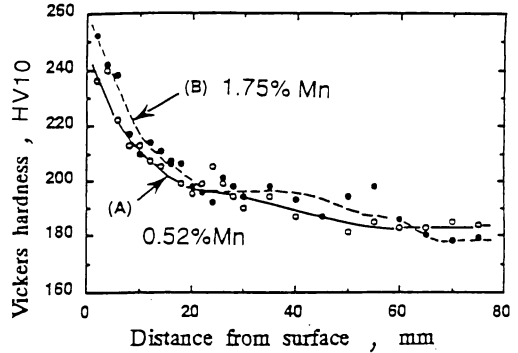


Fig. 6 Jominy test results of flame hardening

Table 3 Mechanical properties after preliminary test

----	0.2% Proof Stress (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Vickers Hardness HV10	Charpy Impact Value (Nm/cm ²)
Water Cooling	288	703	12	240	24.5
Forced Air	270	691	20.4	202	28.4
Natural Air	267	689	22	188	33.3
As cast	256	664	20.8	160	34.3

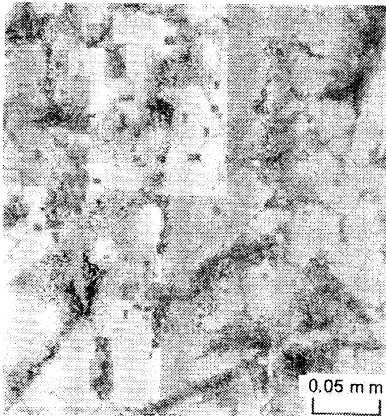


Fig. 5 Microstructure of as cast specimen

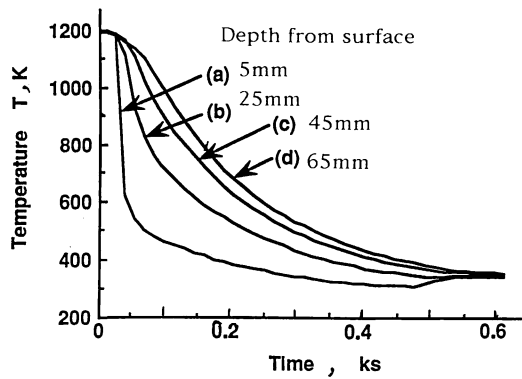


Fig. 7 Cooling curves of Jominy test specimens (A)

て、翼厚 50 mm 以下で 1173 K から 773 K までの冷却時間が 50 s 以内であれば実用上有効と考える⁵⁾。

Mn 含有量と焼入性の関係に注目すると、プロペラ材料としての平均含有量 1.75 mass % の方が、JIS 規格値内の A (0.52 mass % Mn) よりも焼入性が良好で、表面硬さが高いことが分かる。AIBC3 のような $(\alpha + \beta)$ 相を有する合金では、Mn 含有量が増加すると α 相が減少して硬い β 相が増加するといわれているが⁶⁾、本結果はこれと焼入れの相乗効果が現れたと考えられる。

Fig. 8 はジョミニー試験に用いた供試材の (a) 焼入れ表面直下および (b) 65 mm 深さ位置の断面マイクロ組織写真を示す。(a) では平均径約 30 μm の白い α 相と黒い ($\beta + \beta'$) 相および κ 相 (κ_5) が現れ、焼入れ端からの距離が増加するとともに α 相は粒径 [(b) では平均径 40 μm] が大きくなっている。ここで β' 相は β 相の急冷マルテンサイト状組織である。コンピュータ画像解析により、各相の占有率と表面からの深さの関係を調査した結果、Fig. 9 を得た。これによると、表面からの深さが増加するにつれて α 相の量が増加し、($\beta + \beta'$) 相の量が減少している。また Fig. 10 に示すように、各相のマイクロ

までの冷却時間に注目すると、深さ 5 mm と 65 mm ではそれぞれ 30 s、150 s となる。このように、硬さは冷却速度に深く関係し、冷却速度が遅い深さ 25 mm 以上では硬さの上昇はあまりみられない。船用プロペラに対する水噴射炎焼入れの適用性を考えるとき、硬さ HV 240 の焼入れ深さが約 5 mm で製品の仕上げ代 (約 3 mm) よりも大きいこと、またプロペラのキャビテーション・エロージョンが翼先端に発生することを考慮し

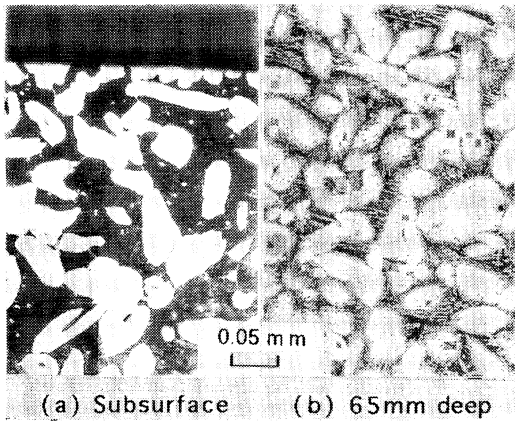


Fig. 8 Microstructures of flame hardening specimen

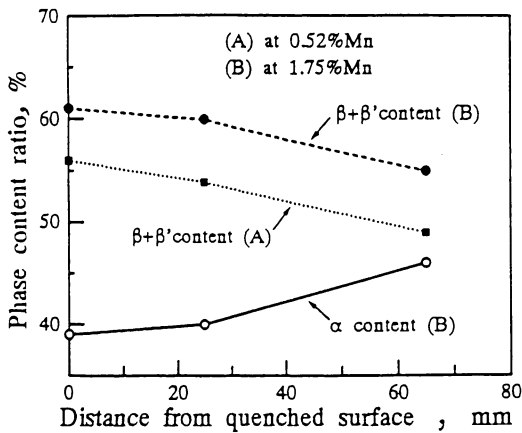


Fig. 9 Possessory area ratio of each phase by computer image analysis

ピッカース硬さを測定した結果、 $(\beta + \beta')$ 相の硬さが α 相よりも著しく高いことが確認され、これらの相の占有率が硬さに直接影響することを裏付けている。また Fig. 11 の EPMA 分析結果では、同じ $(\beta + \beta')$ 相でも表面に近い方に Al および Ni の金属間化合物が多く固溶されており、これが表面硬さの上昇に寄与すると考えられる。

Fig. 12 には、焼入れ後の焼戻温度および時間と表面硬さの関係を示す。673 K では焼戻時間とともに硬さが下降し、723 K では 14.4 Ks まで焼戻処理しても硬さはほとんど変化しない。しかし、773 K では焼戻時間とともに硬さがさらに上昇している。ミクロ組織を観察した結果、いずれの焼戻温度でも $(\alpha + \beta + \beta' + \kappa)$ のほぼ同一組織を呈し、773 K のもの (Fig. 13) にだけ α 相中に微細分布した κ 相 (κ_5) が見られた。773 K の焼戻しでは κ 相の析出硬化によりさらに硬さが上昇した

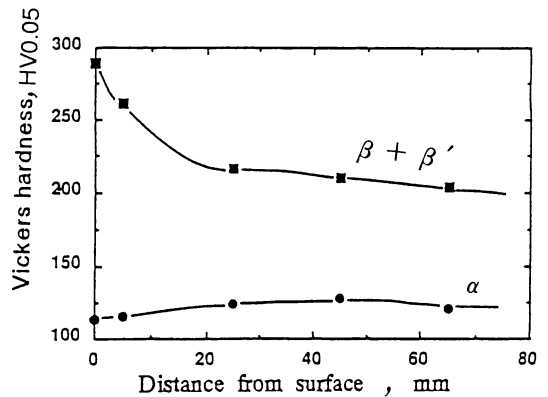


Fig. 10 Micro-Vickers hardness of α and $\beta + \beta'$ phase

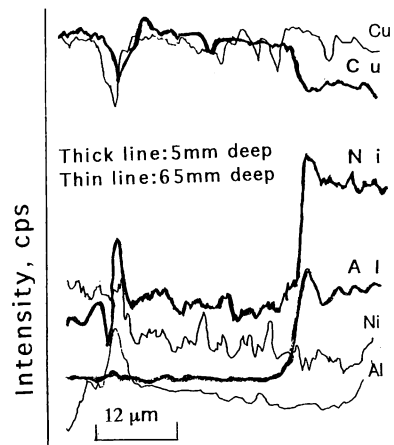


Fig. 11 Analysis of alloying elements

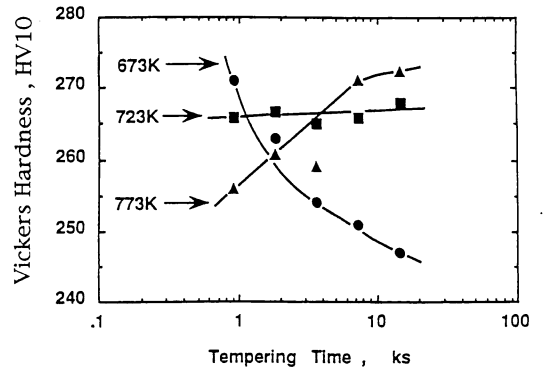


Fig. 12 Relation among tempering temperature, time and hardness

が、伸びが大幅に低下した。したがって、残留応力除去のための焼戻温度は 723 K が適当と考える。しかしながら実用上、焼戻しの必要性は薄い。すなわち、一般にプロペラのエロージョン損傷が翼先端の後縁部に発生し、スラストによる高応力発生部と一致せず、焼入れ

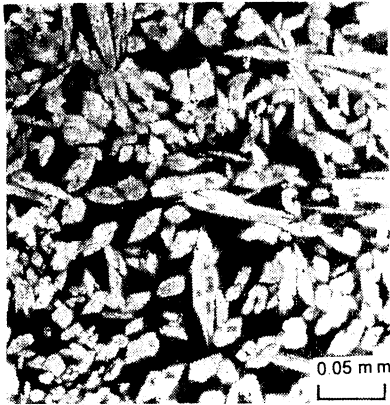


Fig. 13 Microstructures of tempered specimen at 773 K for 14.4 ks

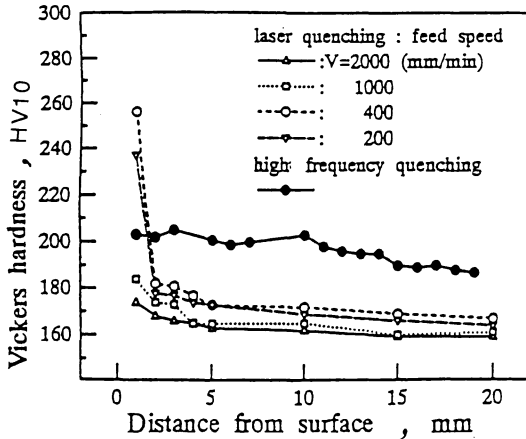


Fig. 14 Surface Hardening characteristics of laser and induction hardenings

による残留応力を十分除去する必要性が薄れる。

3.2 レーザおよび高周波焼入れ試験

Fig. 14 は、レーザ焼入れと高周波焼入れの硬さを比較したものである。レーザ焼入れにおいては、レーザ移動速度が増加すると入熱量が減少し表面硬さが低下する傾向にありますが、表面は母材の約 1.6 倍まで硬化している。しかし、レーザ焼入れによる硬化層は、表面下 1.5 mm と非常に薄く、これを実機プロペラに適用するには、仕上げりに直接施工するような工夫が必要となる。一方、高周波焼入れでは硬化層はかなり厚くなるが、表面硬さがレーザ焼入れおよび炎焼入れの約 80% と低い。また高周波焼入れが装置の関係上、大形部材に適用し難いことを考え合わせると、大翼面積のプロペラへの適用には問題がある。

Fig. 15 (a), (b)にはレーザ焼入れ材と高周波焼入れ材の断面マイクロ組織写真を示す。前者の表面近傍では、

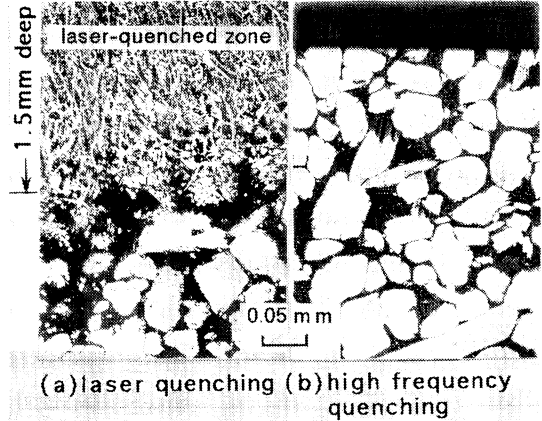


Fig. 15 Microstructures of laser and induction hardenings

Table 4 Results of supersonic erosion test

Treatments	Flame Heat & Water-Spray Cooling	Flame Heat Water-Spray Cooling & Tempering	As cast
Erosion Loss (mg)	5.3	4.8	14.0

レーザ照射により ($\beta + \beta'$) 相が微細化して全面に分布しており、これが表面硬さを大幅に上昇させる。一方、表面下 1.5 mm より深くなると、焼入れ効果のある微細化組織の直下に平均粒径約 40 μm の α 相が大部分を占める鋳放し材の組織が現れ、ミクロ組織の相違がそのまま硬さの相違につながることを示す。

高周波焼入れ材の断面ミクロ組織においては、表面からの深さが増加しても平均粒径約 40 μm の α 相と β 相の分離した組織が一樣に現れ、表面近傍では熱影響を受けた α 相が一部 β 相を取込む組織が観察された。

3.3 エロージョン試験

Table 4 には、耐キャビテーション・エロージョン性を評価するための超音波エロージョン試験結果を示す。水噴射炎焼入れ材および焼入れ焼戻し材のように、表面硬さが増加しているものはエロージョンによる重量損失が少ない⁸⁾。これらは鋳放し材と比較して約 35% の重量損失にとどまり、耐キャビテーション・エロージョン性が確実に向上したことを示す。また Fig. 16 には試験後の表面粗さと損傷写真を示すが、炎焼入れ材の表面は鋳放し材に比べて、エロージョンが極めて少ないことが分かる。

3.4 実機船用プロペラへの適用

既述の表面硬化処理法を実機プロペラへ適用する場合、焼入れ性(表面硬さと硬化層厚さ)、作業性およびコス

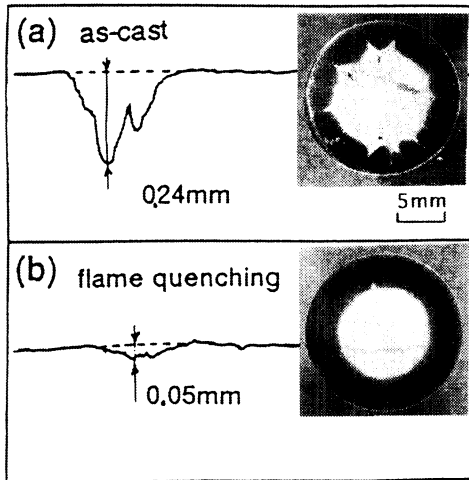


Fig. 16 Surface roughness after erosion test

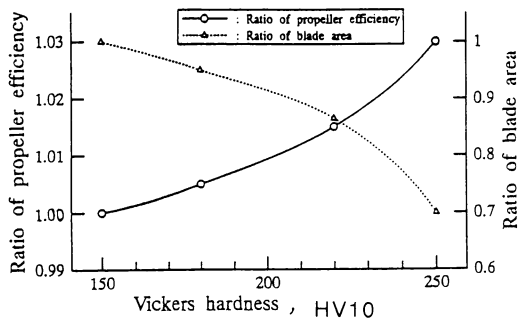


Fig. 17 Relation among hardness, ratio of blade area and propeller efficiency

トを考慮して水噴射炎焼入法が最適と考える。幸いプロペラのキャビテーション・エロージョンは流速は速いが応力の小さい翼先端から後縁の領域に発生するため、この領域に限定して焼入れを適用すればよい。

Fig. 17 はプロペラ翼面の硬さから翼展開面積とプロペラ効率を推定したものである⁸⁾。本図より炎焼入れに

よる高硬度 AIBC3 プロペラ材は、従来のものに比べて翼展開面積を約 15% 低減でき、プロペラ効率として約 1.5% の向上が可能となる。

4. 結 言

船用プロペラ材料 AIBC3 を対象に、3 種類の表面硬化試験とキャビテーション・エロージョン試験を行い、焼入性とマイクロ組織および耐エロージョン性の関係について次のような結果を得た。

- (1) 鑄放し材と比較した各焼入れ材の表面硬さは、水噴射炎焼入れが約 1.5 倍、レーザー焼入れが約 1.6 倍、高周波焼入れが約 1.3 倍を示した。
- (2) 硬さはマイクロ組織と密接に関係し、炎焼入れでは表面に硬い ($\beta + \beta'$) 相が多量に分布し、深くなるに従って軟らかい α 相の占有率が增加する。レーザー焼入れでは微細化した β 相が全面に分布し、表面硬さの上昇に寄与している。
- (3) 炎焼入れ材のエロージョンによる重量損失は、鑄放し材の約 35% にとどまり、耐エロージョン性の向上を示す。
- (4) 本試験の表面硬化処理法を実機プロペラへ適用する場合、表面硬さ、硬化層厚さ、作業性等を考慮して水噴射炎焼入れ法が最適と考えられる。

文 献

- 1) 川添強, 松尾信太郎: 鑄物 65 (1993) 284
- 2) S. J. Shaffer: Wear 181-183 (1995) 889
- 3) 川添強, 松尾信太郎: 船機学会誌 28 (1991) 279
- 4) 入江宏定: 溶接学会誌 61 (1992) 168
- 5) 鑄物便覧(丸善) (1986) 865
- 6) 三島徳七: アルミニウム青銅(日刊工業新聞社) (1967) 68
- 7) K. Sang and Y. Li: Wear 189 (1995) 20
- 8) 川添強, 笹島孝夫: 三菱重工技報 25 (1988) 1