

海水中における純チタン及びチタン合金のキャビテーション壊食

横田源弘^{1†}, 秋江四郎², 林田圭介³

Cavitation Erosion of Pure Titanium and Titanium Alloy in Seawater

Motohiro Yokota^{1†}, Shirou Akie² and Keisuke Hayashida³

Abstract : Cavitation erosion was studied for various pure titanium and titanium alloy samples using the cavitating liquid jet method in seawater, the erosion rate of which is more than five times that of the rotating disc method. For that reason, their respective erosion resistances were evaluated in terms of Vickers hardness (*HV*). The resistance increased in order of increasing hardness : pure titanium samples of first, second, and third types, and titanium alloy (Ti-6Al-4V), as well as in cases using vibratory and rotating disk apparatuses.

Key words : Cavitation, Erosion, Titanium, Seawater, Hardness, Cavitating liquid jet method

緒 言

近年、流体機械・機器の高速化および高性能化とともに、致命的な障害を伴うキャビテーションが次第に顕著になり、問題になっている¹⁾。特に、海水ポンプは海水による腐食と運転中に発生する激しいキャビテーション壊食のため損傷量は著しく増大し、長時間の運転に支障を来している。このため、ポンプの材料に耐食性の優れたチタンを使用することが検討されている²⁾。従って、海水中などの腐食環境下における純チタンおよびチタン合金の耐壊食性を明らかにすることは、機械の信頼性および耐久性の向上のためには緊要な課題である。

純チタンのキャビテーション壊食の研究は岡田ら³⁾が磁歪式振動装置を使用して行っており、波状的に発生したうねりの山の部分から粒子の脱落が始まり亀裂が生じて進展することなどを明らかにした。しかし、これはイオン交換水中の結果である。服部ら⁴⁾はイオン交換水中で磁歪

式振動装置を用いて行っており、チタン合金の耐壊食性は β 型合金が最も優れ、 $\alpha + \beta$ 型合金、 α 型の純チタンの順に低下すること、耐壊食性は材料のビッカース硬さ HV から求めた HV^2/E (E : 弾性係数) が大きいほど耐壊食性が高いことを明らかにしている。また、著者ら⁵⁾は海水中で回転円板装置を用いて行っており、硬さの高くなる純チタン1種、2種、3種、チタン合金の順に壊食抵抗が高くなること、海水温度を相対温度で評価すると289~316Kでの壊食速度は振動法および噴流法と同様に増加し、勾配はほとんど同じであることを明らかにした。このように、海水中における純チタンおよびチタン合金のデータは少なく、海水中の耐壊食性に関して十分に把握されているとは言えない。また、振動法、回転円板法、および噴流法による壊食試験法が広く用いられているが、これらの試験結果の比較はほとんど行われておらず、研究成果が十分に活用されているとは言えない^{6, 7)}。

本報では激しいキャビテーション壊食¹⁾を対象に考

2009年3月3日受付. Received March 3, 2009.

1 水産大学校海洋機械工学科 (Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University)

2 水産大学校練習船天鷹丸 (Training Ship Tenyo Maru, National Fisheries University)

3 水産大学校練習船耕洋丸 (Training Ship Koyo Maru, National Fisheries University)

† 別刷り請求先 (corresponding author) : yokota@fish-u.ac.jp

え、壊食率が回転円板装置の5倍以上も高い噴流装置を用いて、チタン1種 (TB270H), 2種 (TB340C), 3種 (TB480H), およびチタン合金 (Ti-6Al-4V) の壊食試験を海水中で行い、耐壊食性を調べた。併せて、壊食抵抗と材料強度の関係性を求め、これら三つの壊食試験法の試験結果も比較した。

試験装置および方法

Fig. 1には噴流式キャビテーション壊食試験装置の概略を示す。試験水槽はSUS304製試験水槽⑬ (内径80mm, 長さ100mm) とし、側面に取り付けられた透明アクリル樹脂製窓からキャビテーションの様相を観察できるようになっている。始めに、タンク① (容積0.2m³) に貯留された試料水を給水ポンプ②を用いて密閉された試験水槽内⑬へ貯水しながら任意の圧力に設定する。次に、三連プランジャポンプ⑤によって加圧された高压試料水が、高压ホース⑨で供試ノズル⑫に導かれ、試験室内に取り付けた試験片⑭に噴射される。壊食試験は、噴流軸に垂直に固定した試験片にキャビテーション噴流を衝突させて行った。所定

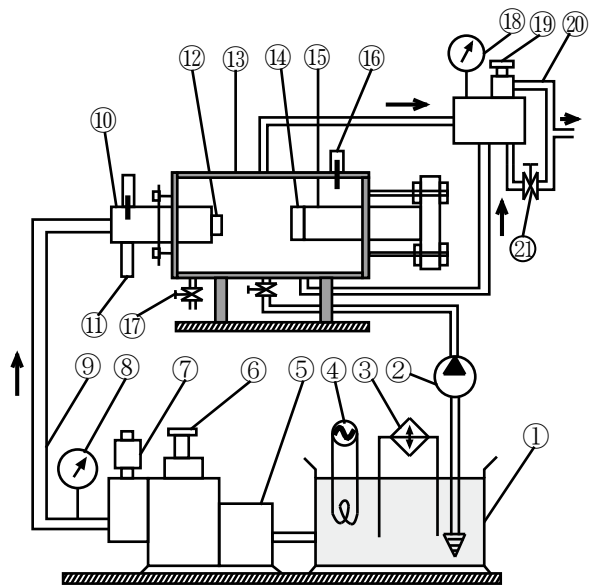
時間の壊食試験後に試験片を取り外し洗浄した後、直示天秤 (分解能0.1mg) により質量を測定した。また、試験面の壊食の過程を走査電子顕微鏡 (SEM) により詳細に観察し、同時に光学顕微鏡による写真撮影を行った。試料水には自然海水を用い、タンク①に補給しながら実験した。タンク内の海水は294±1Kに保っている。自然海水の酸素溶存濃度は飽和状態である。なお、ノズルまわりの周囲圧力 (試験水槽内圧力) P_2 は圧力計⑮, 噴流の吐出し圧力 P_1 は圧力変換器⑩により常時モニタされている。周囲圧力 P_2 は圧力調節弁⑲により、高速噴流が噴射された場合でもほぼ一定に保持されている。

Fig. 2には円筒ノズルの詳細を示す。ノズルスロート直径 $d=0.49\text{mm}$, スロート長さ $L=2.0\text{mm}$ で、材質はサファイヤ製である。ノズルホルダの材質はSUS304である。なお、 $P_1=15.0\text{MPa}$, $P_2=0.1\sim 0.2\text{MPa}$ における供試ノズルの流量係数 $C_d=0.68$ であった。

キャビテーション流れの支配パラメータであるキャビテーション係数 σ は、キャビテーション噴流のようなノズル流れの場合は、吐出側圧力 P_1 , 液中噴流の下流側圧力 (試験水槽内の圧力) P_2 , および、試料液の飽和蒸気圧 P_V から次式のように定義される。

$$\sigma = \frac{(P_2 - P_V)}{(P_1 - P_2)} \cong \frac{P_2}{P_1} \dots\dots\dots(1)$$

なお、本研究のキャビテーション噴流では、 $P_1 \gg P_2 \gg P_V$ であるから式 (1) のように簡略化して表すことができる。以下の各実験では最大壊食量を示す $\sigma = 0.014$ で行った。なお、最大壊食量を示す条件、すなわちキャビテー



- ① Tank ② Feed pump ③ Cooler ④ Heater ⑤ Plunger pump
- ⑥ Relief valve ⑦ Accumulator ⑧ Upstream pressure gauge
- ⑨ High pressure hose ⑩ Nozzle adapter ⑪ Pressure transducer
- ⑫ Nozzle ⑬ Test chamber ⑭ Specimen ⑮ Specimen holder
- ⑯ Thermocouple ⑰ Drain valve ⑱ Downstream pressure gauge
- ⑲ Pressure regulating valve ⑳ Drain hose ㉑ Cock

Fig. 1. Cavitating liquid jet apparatus and the test loop.

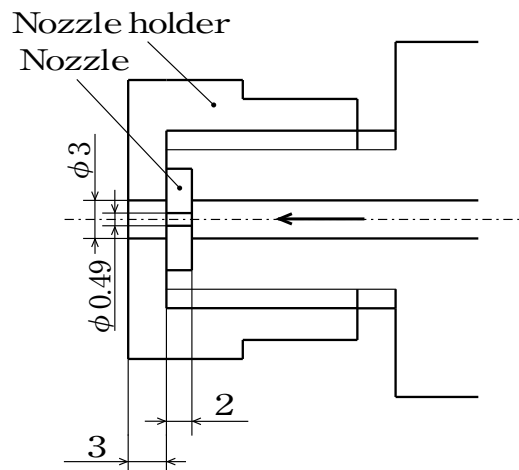


Fig. 2. Test nozzle and holder.

シオン係数 $\sigma = 0.014$ とスタンドオフ距離 $X = 20\text{mm}$ の決定においては、アルミニウム合金 (A5056BD) 試験片を用い、吐出し圧力 $P_1 = 15.0\text{MPa}$ として各キャビテーション係数におけるスタンドオフ距離と壊食量の関係を実験的に求めた結果である。

供試材料の化学成分をTable 1に、物理的・機械的性質をTable 2に示す。供試材料はチタン1種 (TB270H)、チタン2種 (TB340C)、チタン3種 (TB480H)、およびチタン合金 (Ti-6Al-4V) である。試験片は直径27mm、厚さ10mmの円板に機械加工したもので、粗さの影響をなるべく低く抑えるために、試験面は研磨後バフ仕上げにより鏡面に仕上げた。試験片⑭は試験片ホルダ⑮に取り付けられており、所定のスタンドオフ距離 (ノズル出口から試験片までの距離) $X = 20\text{mm}$ (最大壊食量を示す位置) に固定している。

試験条件はキャビテーション係数 $\sigma = 0.014$ 、吐出し圧力 $P_1 = 15.0\text{MPa}$ 、下流側圧力 (試験水槽内の圧力) $P_2 = 0.2\text{MPa}$ 、試験水槽内の海水温 $T = 293 \sim 295\text{K}$ 、スタンドオフ距離 $X = 20\text{mm}$ 、試験時間 $t = 0 \sim 15\text{h}$ である。

結果および考察

純チタンおよびチタン合金の耐壊食性

Fig. 3には、海水中のチタン1種、2種、3種、およびチタン合金の壊食量を示す。壊食量は試験片の質量減少量を計測し密度で除して求めた体積減少量である。ここに、実機においては壊食による形状変化が重視されることから、壊食量は体積減少量で表した。どの材料も僅かな量

Table 1. Chemical compositions (mass%)

Material	H	O	N	Fe	Al	V	Ti
TB270H	0.002	0.04	0.01	0.2	-	-	Bal.
TB340C	0.0015	0.1	0.004	0.06	-	-	Bal.
TB480H	<0.001	0.16	<0.01	0.1	-	-	Bal.
Ti-6Al-4V	0.001	0.11	0.01	0.17	6.69	4.3	Bal.

Table 2. Physical and mechanical properties

Material	Density (g/cm ³)	Vickers hardenes (HV)	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	0.2% Yield strength (MPa)	Elongation (%)
TB270H	4.51	119	106.3	308	205	60
TB340C	4.51	153	106.3	420	-	34.3
TB480H	4.51	186	106.3	524	377	27
Ti-6Al-4V	4.32	319	116	986	974	16

しか示さない潜伏期を経た後、体積減少量はほぼ直線的に増加し定常期に至る (Fig. 4も参照)。壊食量はチタン1種が最も多く、2種、3種、チタン合金の順に減少した。壊食時間が15hにおけるチタン2種、3種、およびチタン合金の壊食量はチタン1種の約72%、48%、および21%となった。このことから、純チタンやチタン合金の耐壊食性はチタン合金が最も優れ、チタン3種、2種、1種の順に低下することがわかる。

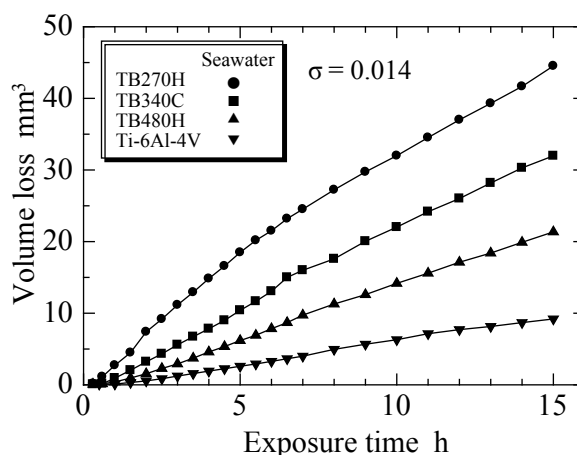


Fig. 3. Volume loss curves.

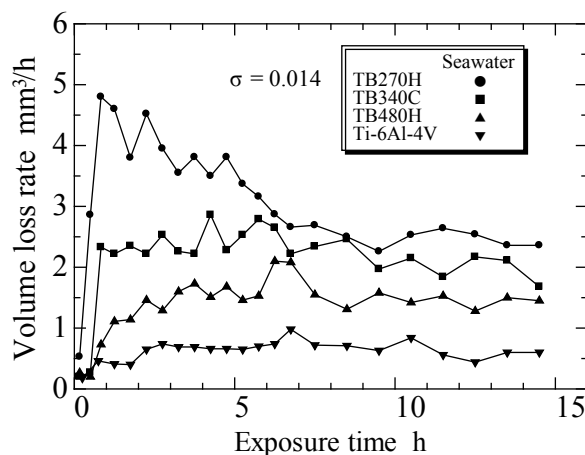


Fig. 4. Volume loss rate curves.

壊食量曲線の挙動をより詳細に検討するために、試験時間ごとの壊食量の差を試験時間間隔で除して壊食速度を求めた。Fig. 4には、各々の材料の壊食速度曲線を示す。振動法および回転円板法の試験結果^{4, 5, 9)}と同様に、いずれの材料も短い潜伏期の後、壊食速度が急激に増大し最大値を達した後穏やかに減少し、その後一定で推移するような傾向を示している。最大壊食速度に達する時間はチタン1種、2種、3種、チタン合金の順に長くなり、最大壊食速度および定常期の壊食速度は同順に小さくなることわかった。

なお、壊食量と同様に壊食速度の低下要因については次節「壊食面のSEM観察」および「壊食抵抗と材料強度の

関係」で論ずる。

壊食面のSEM観察

Fig. 5には、チタン1種、2種、3種、およびチタン合金の試験終了後における壊食面のマクロ写真を示す。いずれの材料も主たる壊食領域はリング状の壊食痕を呈し、海綿状になっていた。これはキャビテーションが噴流衝突面上でリング渦キャビテーションとして発達した後に、崩壊して壊食を生じるためである⁸⁾。噴流衝突面の中心部は壊食を生じていないが、壊食が発達するにつれて中心部にもやがて壊食を生じることになる。それを裏付けるように、チタン1種では中心部の壊食が進行していた。また、

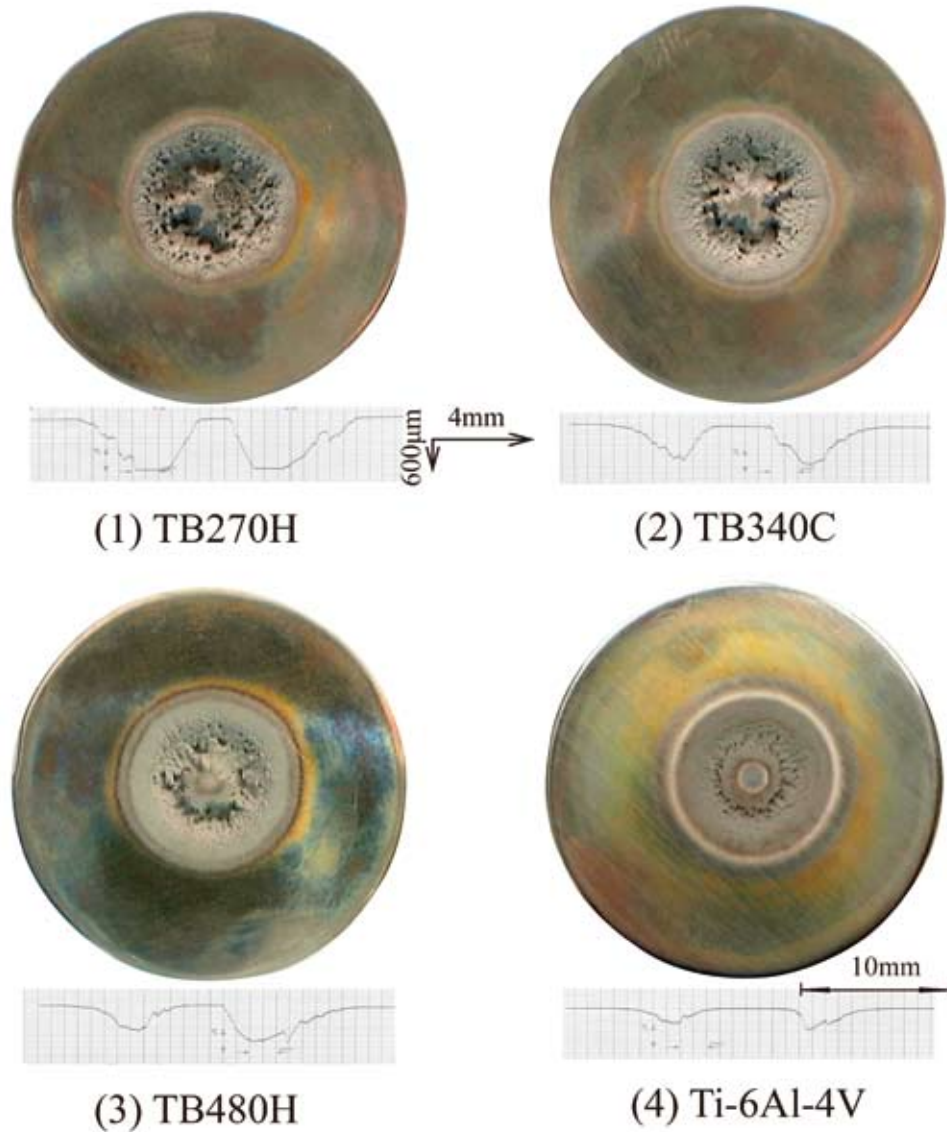


Fig. 5. Aspects of eroded area ($t=15$ h).

いずれの材料も同様な断面形状を示したが、最大壊食深さはチタン1種、2種、3種、チタン合金の順に浅くなった。

壊食機構を明らかにするため壊食面をSEMにより観察した。Fig. 6には、試験終了後の軽微な壊食面のマイクロ写真を示す。まずこれらの写真から、破壊モードが粒界あるいは粒内の脆性破壊によることを明示していた。すなわち、純チタンの場合岡田ら³⁾がイオン交換水中での試験結果を報告しているように、うねりが生じて表面が大きく塑性変形し、うねりの山の部分（白い部分）および研磨痕（横じま状に見える）に疲労き裂が微小粒子の脱落を伴って発生した。塑性変形が進行すると、微小き裂がさらに合体しつつ大きなき裂へと成長し、ついには多くの粒子群の脱落を結果した。そして壊食痕同士が合体して、さらに大

きな壊食痕を形成して壊食が進行していた。2種は1種より微細なき裂が各所に現れ、脱落が小さな単位で生じることを示唆していた。3種では1種、2種より結晶粒子径が小さく、さらに細かく脱落していることがわかった。一方チタン合金の場合、服部ら⁴⁾は第二層の β 層が脱落し、次いでマトリックスの a 相が壊食されることを報告している。これはイオン交換水中での結果であるが、本結果の海水中においても同様な壊食過程で進行していることを伺わせた。チタン合金の結晶粒径は供試材料の中では最小であり、粒子周辺で微細粉が脱落していることを示唆していた。

Fig. 7には、激しい壊食面のマイクロ写真を示す。1種の壊食面は塑性変形による粒内・粒界破壊が進み粒子規模で脱落していた。2種、3種、およびチタン合金は1種と

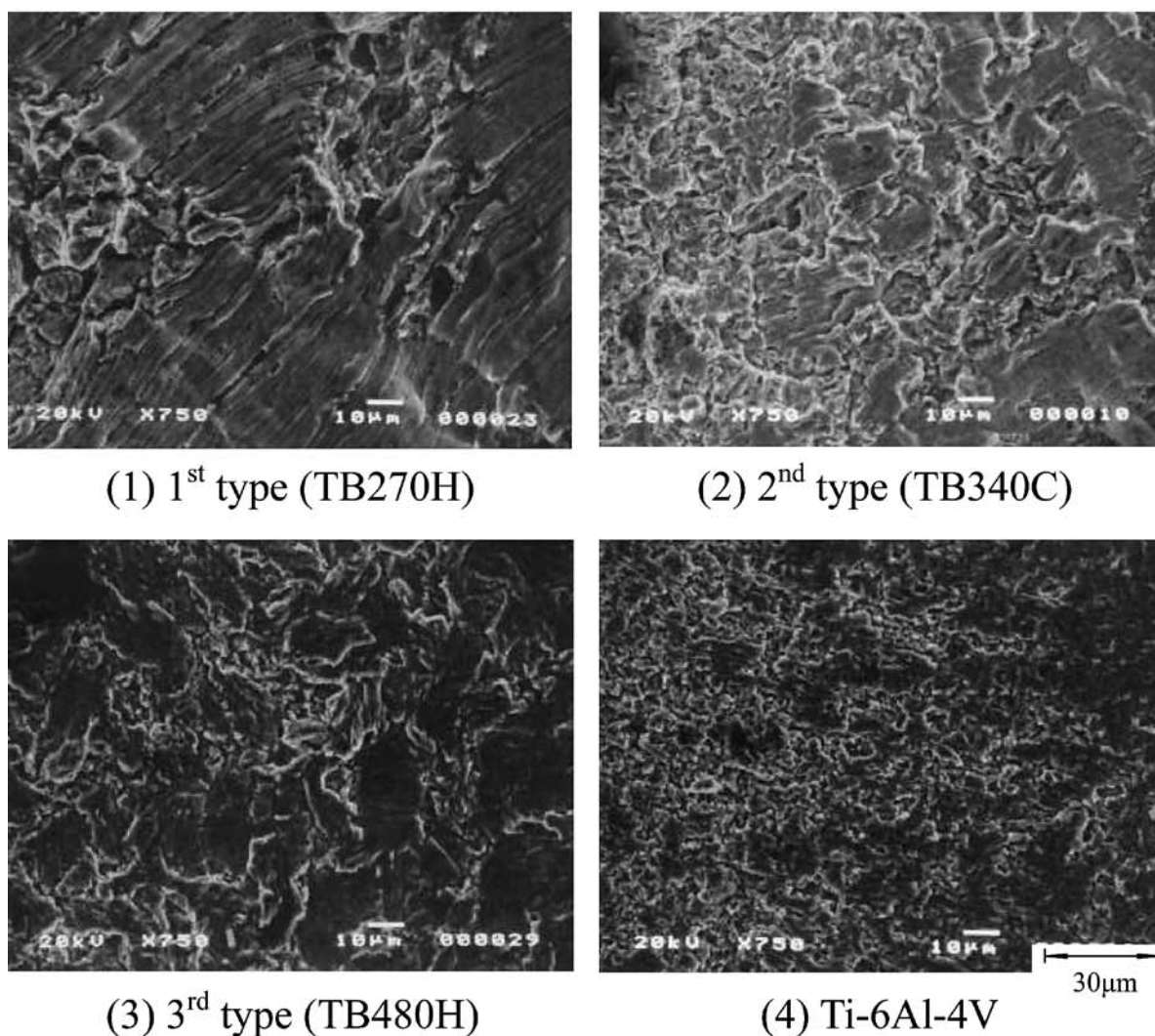


Fig. 6. SEM photographs of the eroded surfaces around the ring-like erosion ($t=15$ h).

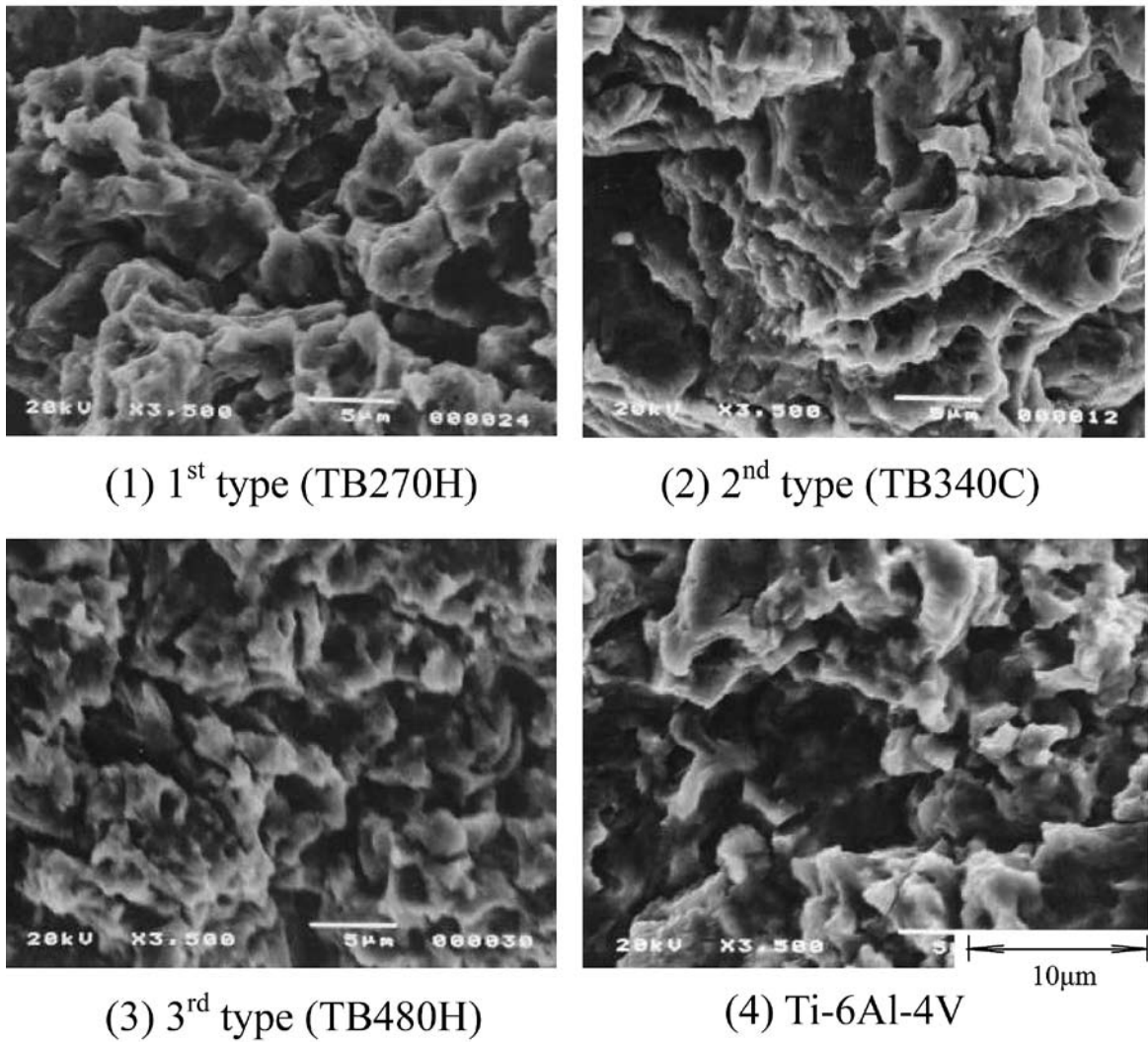


Fig. 7. SEM photographs of the eroded surfaces near the point of severe erosion ($t=15$ h).

ほぼ同様な様相を示したが、1種より微細なき裂が各所に現れ、脱落は小さな単位で生じることを示唆していた。チタン1種、2種、3種、およびチタン合金の順に結晶粒子径が小さく、従って同順に脱落する粒子径は小さくなると考えられた。いずれにしても、これらの写真から破壊機構はほぼ同じであることがわかった。

壊食抵抗と材料強度の関係

海水中の壊食抵抗を明らかにするために、Fig. 8にはチタン1種、2種、3種、およびチタン合金の壊食抵抗（最大速度期の直線部の勾配の逆数）とビッカース硬さHVの関係を示す。図中には超音波振動法および回転円板法による海水中の結果^{4,5,9}も併記している。いずれの試験方法においても、壊食抵抗とHVは良い相関を示し、壊

食抵抗はチタン1種、2種、3種、およびチタン合金の順に高くなることがわかった。

結 言

チタン1種、2種、3種、およびチタン合金を用いて、噴流式試験装置により海水中でキャビテーション壊食試験を行った。その結果、回転円板法に比べて壊食率が5倍以上も高い噴流法においても、振動法および回転円板法と同様に純チタンおよびチタン合金の壊食抵抗と硬さHVは良い相関を示し、硬さの高くなる純チタン1種、2種、3種、チタン合金の順に壊食抵抗は高くなることが明示された。

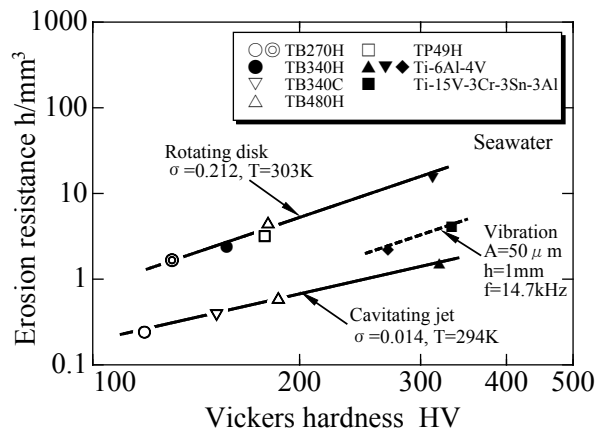


Fig. 8. Relation between erosion resistance and Vickers hardness.

文 献

- 1) 祖山 均, 浦西和夫, 伊藤幸雄, 加藤洋治, 市岡丈彦, 大場利三郎: 遠心ポンプにおける激しいキャビテーション壊食の発達過程 第1報 顕著な上流キャビテータの影響. ターボ機械, 18, 691-698 (1990)
- 2) 材料工学研究委員会編: 材料強度評価と新材料応用の新展開. 日本船舶機関学会誌, 31, 536-541 (1996)
- 3) 岡田庸敬, 岩本充司, 佐野 薫: キャビテーション・エロージョンに関する基礎的研究 (走査形電子顕微鏡による浸食面の観察). 機論 (A編), 43, 8-16 (1977)
- 4) 服部修次, 前川紀英, 河合良英: チタン合金のキャビテーション壊食. 機論 (A編), 66, 1627-1633 (2000)
- 5) 望月敬美, 横田源弘, 服部修次: 海水中の純チタン及びチタン合金のキャビテーション壊食に及ぼす材質及び液温の影響. 機論 (A編), 71, 1574-1579 (2005)
- 6) 山口 惇, 風間俊治, 井上康介, 尾上二郎: 振動法と噴流法によるキャビテーション壊食に関する研究. 油圧と空気圧, 23, 830-838 (1992)
- 7) 服部修次, 小木曾貴昭, 南 雄介, 山田郁生: 長時間後のキャビテーション壊食面の形成と進展. 機論 (A編), 73, 912-917 (2007)
- 8) 祖山 均: キャビテーション噴流による材料試験と表面改質. 材料, 47, 381-387 (1998)
- 9) 望月敬美, 横田源弘, 祖山 均, 服部修次: 海水中のTB340H純チタンとSUS316Lステンレス鋼のキャビテーション壊食. 機論 (A編), 72, 1370-1375 (2006)