

研究ノート：海水中のキャビテーション壊食

著者	望月 敬美
雑誌名	東京海洋大学研究報告
巻	17
ページ	52-56
発行年	2021-03-01
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00002039/

[資料]

研究ノート：海水中のキャビテーション壊食

望月敬美*¹

(Accepted November 26, 2020)

Research Note: Cavitation Erosion in Seawater

Hiromi MOCHIZUKI*¹

Abstract: Cavitation erosion mechanisms of fluid materials and resins were studied in seawater. The cavitation erosion resistance of corrosion-resistant materials correlates with their hardness, but the resistance of austenitic stainless steel and copper alloys are lowered by the effects of corrosive action. When arranged by relative temperature based on the pressure, relationships are almost identical between the temperature and the maximum volume loss rate in seawater in a flow condition and in fresh water in a non-flow condition. With a volume loss rate at 1 °C, fluctuation of 1% is inferred for seawater of 30–60 °C. However, the volume loss rate decreases rapidly when fresh water is substituted for seawater. It increases rapidly by corrosive action when seawater is substituted for fresh water. Moreover, the maximum volume loss rate increases rapidly when the coating silicone-resin thickness becomes thinner than the critical thickness. Results show that the rate depends on the relationship of acoustic impedance between the coating resin and an undercoating resin with high adhesive strength.

Key words: Cavitation erosion, Seawater, Corrosion, Erosion resistance, Hardness, Mass loss

第一章 はじめに

キャビテーションは、流体中で圧力低下により気泡の発生・消滅が短時間に起きる物理現象である。この現象は、19世紀末に高速船（駆逐艦）用のプロペラが、計画した速度を出せなかったことから発見されたり。

気泡1個の大きさは数ミクロンと小さいものでも、衝突して破裂するときは数万気圧・数千度にも達すると言われている。無限の気泡が長時間にわたり流体機械材料に衝突して損傷を起こすことを「壊食」と呼称する。壊食の事故例には、1995年に起きた高速増殖炉「もんじゅ」のナトリウム配管破裂、1999年のH2ロケット液体水素燃料ポンプ破損、2004年の美浜原子力発電所復水管破裂などがある。

私がキャビテーション壊食を研究テーマとして考えたのは、1981年東京水産大学練習船に機関士として赴任した時から5年後頃である。流体機械などのキャビテーション壊食については、清水中の研究報告は多数あるが、海水中では「腐食」損傷も発生し、報告例は少ない。また、練習船では同一船の勤務期間と停泊時間が長く、プロペラや海水ポンプの損傷の追跡に好適である。そこで、海水中におけるキャビテーション壊食のメカニズムを調べることにした。

第二章 実験装置と供試材料

1. 実験装置

流体機械と同様な現場環境を再現できる回転円板装置を採用した。この装置は、流水中でキャビテーションを発生させる孔を設けた円板を高速回転し、気泡崩壊位置に取付けた試験片の壊食量を計測する。気泡崩壊衝撃力増強のために改造し、円孔中心速度は44.7 m/secまで増速した。

回転円板装置は運転中に激しい回転音と流れの衝突音を発生し、騒音が問題となる。そこで、流れはほとんど生じないが、運転音が回転円板装置に比べて著しく低い磁歪振動装置をも併用した。この装置は振幅と周波数を調節することにより衝撃力が容易に変更でき、試験結果の統一性を図るため国際標準規格（ASTM規格）が定められている。

噴流法はジェット噴流の水平衝突による壊食であり、斜流壁面衝突の回転円板法のシンプル型試験方法である。

2. 供試材料

供試材料として、耐食材の実験では純銅と銅合金（5種類）、ステンレス鋼（7種類）、純チタン（3種類）とチタン合金（2種類）、樹脂（2種類）、温度の影響の実験では純チタン、環境変化の実験では低耐食材料の炭素鋼（2種

*¹ Formerly professor of Tokyo University of Marine Science and Technology, 491-20 Kashiwagi, Komoro-shi, Nagano-ken 384-0055, Japan., 東京海洋大学元教授

類)を用いた。塗膜材の実験では、ビニール樹脂塗料(2種類)とシリコン樹脂塗料(3種類)を用いた。

流水は海水(天然海水と食塩水)と清水(蒸留水と水道水)である。

第三章 得られた知見

1. 耐食材の壊食量

海水中の壊食²⁾で、銅合金の表面に酸化物の保護被膜(厚さ数マイクロメートル)が形成された場合、クッション効果により気泡崩壊衝撃力が減少して蒸留水中より壊食量は少なくなる。蒸留水中で壊食量が一番少ないアルミニウム青銅は、海水中ではさらに少ないと推測され、プロペラ材料として採用されてきている。海水中で壊食量の一番多い青銅は、衝撃力が弱くなると脱成分腐食³⁾による損傷量が多くなり、蒸留水中より壊食量は増加する。海水中で、腐食環境下での工業材料の防食法の一つであるカソード防食を施すと、カソード電流の増加に伴い壊食量は大幅に減少した。この要因は、海水中の溶存カルシウム等の有機物の付着や発生水素ガスのクッション効果など⁴⁾である。

ステンレス鋼(オーステナイト系)は、海水中で応力腐食割れや孔食(腐食の一形態)が生起し、壊食量が清水中より著しく多くなる⁵⁾。このステンレス鋼は、そもそも鉄にクロムなどを添加して通常環境下(腐食作用が僅少であ

る水道水中など)の耐食材として開発された合金であり、当然とも言える。

対応力腐食割れに優れているフェライト相(体心立方構造)をオーステナイト相(面心立方構造)と共存させた二層組織のステンレス鋼の場合、フェライト相が強化するクロム当量を増加すると壊食抵抗はやや向上するが、海水中と蒸留水中の壊食機構に大きな差異は無く、壊食は硬度の低いフェライト相から始まる。したがって、両相の面積は成分量により異なるので、壊食量は面積割合から求めた平均表面硬さと相関した⁶⁾。

純チタンはすべりが生じにくい結晶構造(稠密六方晶)で、海水中では水道中より壊食の進展は若干早い、壊食量の差は少ない。稠密六方晶と体心立方晶が共存するチタン合金になると、軽量(密度はステンレス鋼の約60%)でも硬さ・引っ張り強さなどの機械的強度が大幅に向上し、壊食に及ぼす腐食の影響も少ない⁷⁾。

2. 壊食抵抗の評価

実験方法が異なる場合のキャビテーション壊食抵抗は、基準材料を用いて比較・評価する方法が推奨されている⁷⁾。そこで、供試材料の海水中の抵抗値を、オーステナイト系ステンレス鋼(SUS316とSUS316L)の水道水中の抵抗値で換算して検討した^{8,9)}。

Fig.1は、一連の実験の壊食抵抗と硬度の関係を示す。硬

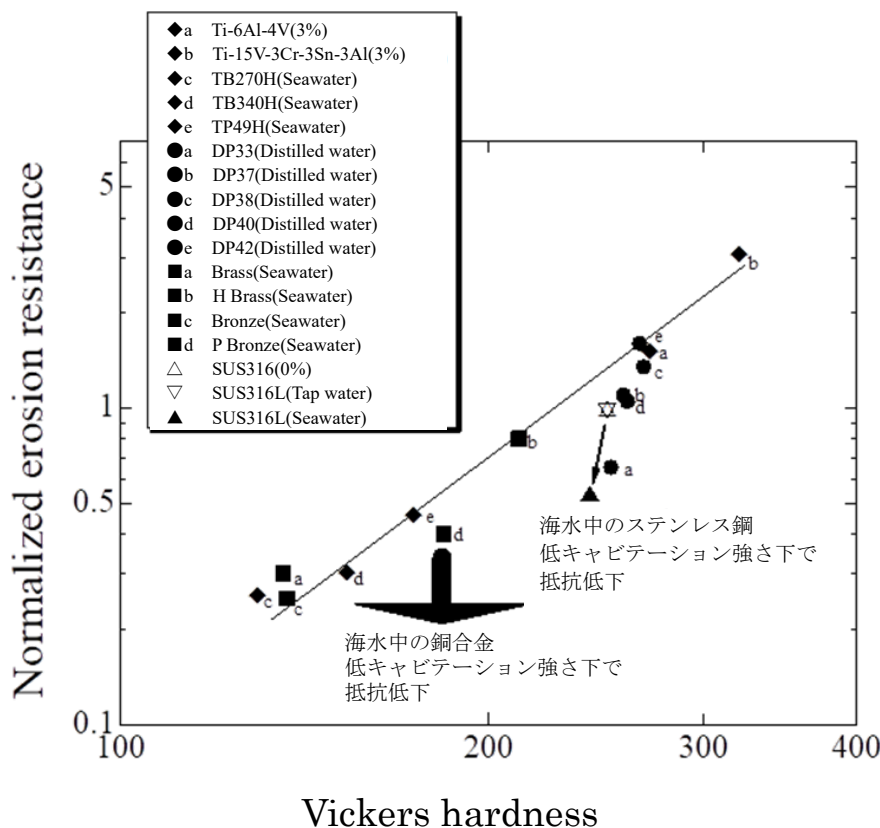


Fig. 1 Relationship between normalized erosion resistance and Vickers hardness of experimental materials.

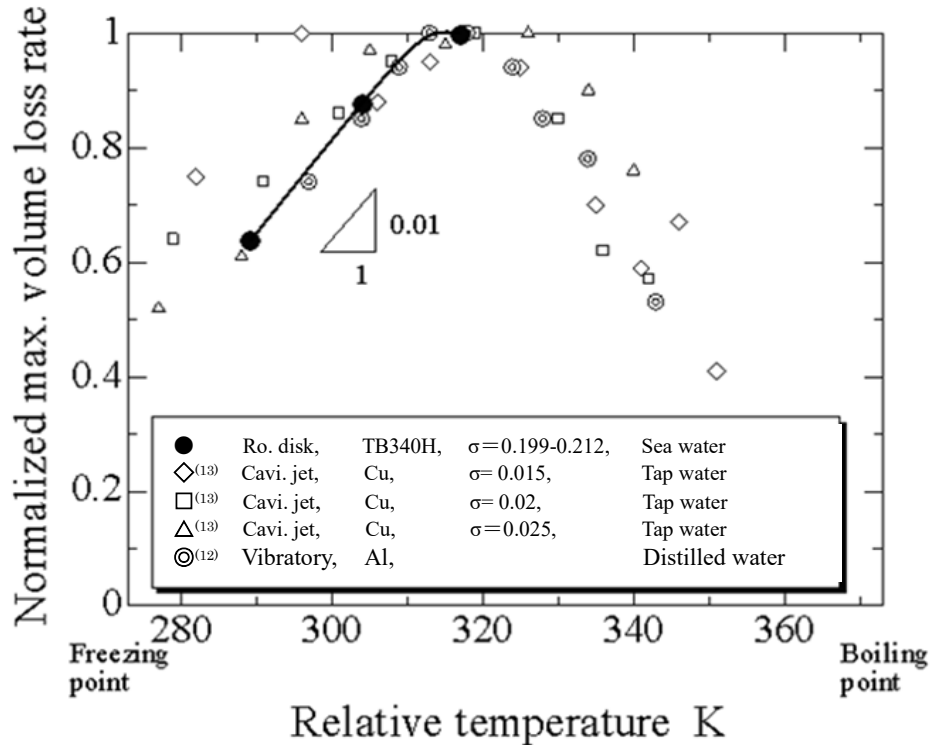


Fig. 2 Relationship between relative temperature and normalized maximum volume loss rate.

度が高くなると壊食抵抗は向上し、食塩水中の結果ではあるが、最高硬度のチタン合金が最強である。オーステナイト系ステンレス鋼と青銅などの抵抗は、低キャビテーション強さ下では腐食作用により低下する。なお、磁歪振動法で海水中と蒸留水中の気泡崩壊衝撃圧を計測したが、両液の壊食量に及ぼす影響は僅少と推測された²⁾。

材料の耐食性は表面の不導体被膜（厚さ数ナノメートル）に依存するので、海水中の壊食抵抗は被膜の生成速度・厚さ・物性、および、衝撃力、材料の機械的性質・結晶構造・成分などの影響を受ける。また、食塩水中の炭素鋼の場合、機械的衝撃と腐食の相乗効果による損傷量は壊食の増加期に多い¹⁰⁾。腐食性スラリー液中の軟鋼で、機械的衝撃と腐食の損傷速度がほぼ等しい場合に、両者の相乗効果を認めた報告¹¹⁾もある。壊食実験は衝撃力を増加する加速試験であり、使用環境と用途を材料別に考慮する必要がある。

3. 壊食速度に及ぼす海水温度の影響

流れが無い清水の場合、壊食速度は蒸気圧の上昇に伴う気泡密度の増加により凝固点と沸点のほぼ中間の 318 K (45 °C) まで増加し、それ以上では滞留気泡のクッション効果により低下する¹²⁾。流れのある（噴流法）清水の場合は、下流の圧力を考慮した相対温度（試験温度での蒸気圧を下流圧で除し、大気圧における 373 K (100 °C) の飽和蒸気圧を乗じて求めた試験圧力に対応した温度）で整理すると、流れの無い場合の相関と同様になる¹³⁾。

流れのある海水の場合を回転円板法で検討した¹⁴⁾。Fig.2 は、333 K (60 °C) での最大壊食速度に対する 318 K と 303 K (30 °C) の最大壊食速度の比と相対温度の関係を示す。図中には振動法による蒸留水中と噴流法による水道水中の結果¹²⁾も示している。流れのある海水でも流れの無い清水の相関とほぼ同じであり、下流絶対圧 0.225 MPa では約 333 K (相対温度 316 K) で最大壊食速度になると推測された。

また、303~333 K での壊食速度は、1 K で約 1% の変化が見込まれた。このことは、低温海域で使用する流体機械や冷凍装置のブライン循環ポンプで、損傷量が少ないことを裏付けている。

4. 壊食速度に及ぼす環境変化の影響

蒸留水から海水、そして蒸留水と取替えて壊食速度の変化を調べた¹⁵⁾。Fig.3 は、それぞれ計三回 (S55C) と五回 (S15C) 取替えた場合の平均壊食深さ速度 (*MDER*) の経時変化を示す。蒸留水から海水に変わると、気泡崩壊衝撃力による破壊作用に腐食作用が相乗して、壊食速度は急増する。逆に、海水から蒸留水に変わると腐食作用が無くなるため壊食速度は急減する。すなわち、海水中では蒸留水中で減少した壊食量が増加することになる。

運転環境が海水中に変わって、海水ポンプインペラなどの損傷量急増に驚くことがあるが、これは淡水中での減少分が増量したことによるもので、環境の変化には注意を要する。

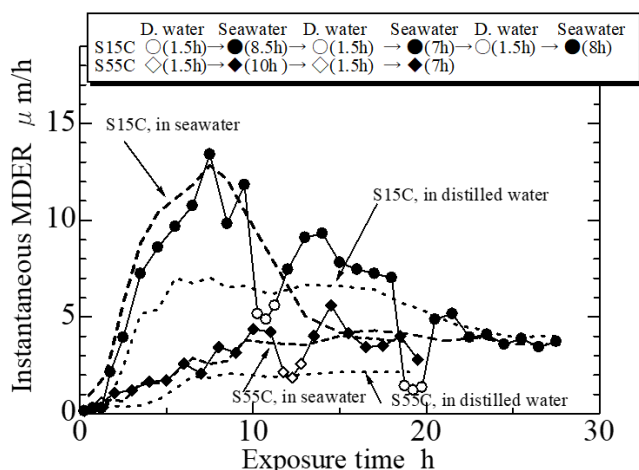


Fig.3 Instantaneous mean depth of erosion rate (MDER) curves of two-stage cavitation erosion tests.

5. 塗膜壊食に及ぼす膜厚の影響

プロペラ自体の壊食量は形状の改良により僅少であるが、後方に位置する舵板はこの回転により生起するキャビテーション気泡の崩壊衝撃力をまともに受け、塗装材の壊食量は極めて多い。

衝撃力にさらされている場合の膜厚と壊食速度の相関を検討した¹⁶⁾。これまで多用されてきたビニール樹脂系塗料に比べ、シリコン樹脂系塗料の壊食量は著しく少ない。

表面被覆材料では、厚さが一定値以下になると、母材との音響インピーダンスの差により壊食量が増加・不変・減少する臨界膜厚が存在する¹⁷⁾。Fig.4は、シリコン塗料の膜厚と最大壊食速度 (MVL) 関係を示す。この場合、膜厚が臨界厚さ (約 0.04 mm) より薄くなると最大壊食速度は急激に増加する。この臨界膜厚も塗料の接着力を向上させる下塗材との音響インピーダンスの係に依存する。すなわち、気泡崩壊の圧縮波が塗装材表面に到達し、シリコン塗料と下塗材の音響インピーダンス差により圧縮波は反射・通過の干渉を受けて壊食速度は変化する。この臨界膜厚は、塗装材の縦波の伝ば速度と気泡崩壊衝撃力の持続時間により算出できる。

第四章 キャビテーションとの共存

海水ポンプの気泡発生抑制には、ポンプ本体を大きくして回転数を下げることが推奨されており¹⁸⁾、一定の効果が期待できる。高硬度の耐食材としてコバルト含有のステンレス鋼¹⁹⁾も推奨されているが、近年接液部がチタン素材のポータブル省エネ海水ポンプが製品化されている。また、港湾施設や逆浸透式造水装置の大型ポンプでは腐食をカソード防食法で抑制しており²⁰⁾、より小型の船舶海水ポンプへの応用も考えられる。種々の対策で、実用化にはコストパフォーマンスがポイントである。

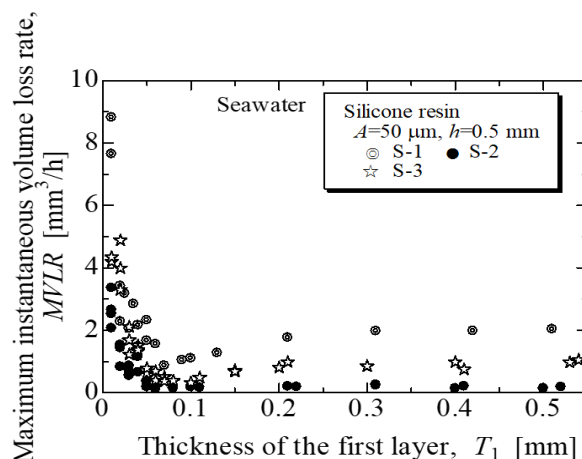


Fig.4 Relationship between film thickness of the first layer and maximum instantaneous volume loss rate of silicone resin.

冒頭で述べた高速増殖炉の事故は、配管温度計感温部後方で発生したキャビテーションが原因となる。液体水素燃料ポンプでは、壊食に対する考慮が全く無い構造によるためと聞き及んでおり、真に残念な事故であった。

これまで機械にとってマイナス面の解明がキャビテーション研究の主流であったが、有効利用の研究も推奨されている²¹⁾。金属の高強度化や硬質物の粉碎、機械部品や半導体の洗浄、医療でのジェットメス、さらには美容機器にも応用され、耳にした読者は多いと推察する。流動キャビテーションによる水処理で、養殖に有害な微生物の粉碎と水耕栽培における発育効果なども認められており²²⁾、更なる有効利用の開発が望まれる。

謝辞

本研究にご理解とご支援を頂いた国立大学法人東京海洋大学旧海洋科学部練習船船長、機関長、航海士、機関士、通信長、事務長、他乗組員の皆様に深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 鬼頭史城. キャビテーションの話. 第15版, オーム社, 1967, p.21.
- 2) 望月敬美, 服部修次, 横田源弘. 海水中における銅合金のキャビテーション壊食とカソード防食効果. 日本機械学会論文集 (A編). 2007, Vol. 73, No.733, p.1065-1070.
- 3) 望月敬美, 横田源弘, 岡野内順三. 回転円板法による海水中のキャビテーション損傷の評価. ターボ機械. 1995, Vol.23, No.4, p.212-217.
- 4) 横田源弘, 望月敬美, 平 雄一郎, 島崎 涉. 海水中噴流試験におけるキャビテーション壊食に及ぼすカソード防食効果. 日本マリンエンジニアリング学会誌. 2009, Vol.44, No.2, p.310-315.

- 5) 望月敬美, 横田源弘, 祖山 均, 服部修次. 海中のTB340H純チタンとSUS316Lステンレス鋼のキャビテーション壊食. 日本機械学会論文集 (A編). 2006, 72, No.721, p.1370-1375.
- 6) 望月敬美, 横田源弘, 杉山健一, 岸本守央, 服部修次. 二相ステンレス鋼の耐キャビテーション壊食性. 日本機械学会論文集 (A編). 2008, Vol.74, No.740, p.605-610.
- 7) Heymann, F. J.. Toward Quantitative Prediction of Liquid Impact Erosion. ASTM STP. 1970, 474, p.212-248.
- 8) 望月敬美. 海中における各種流体機械材料のキャビテーション壊食抵抗に関する研究. 福井大学. 博士 (工学) 乙 40号, 2008, 113 p..
- 9) 横田源弘, 望月敬美, 平野尊之. 海中における純チタンTB340Cとステンレス鋼 SUS316 のキャビテーション・エロージョン. 日本マリンエンジニアリング学会誌. 2009, Vol.44, No.3, p.442-447.
- 10) 岡田庸敬, 浅井陽一. キャビテーション・エロージョンにおける腐食の影響. 日本機械学会論文集 (第1部). 1978, Vol.44, No.378, p.404-412.
- 11) M. M. Stack; S. Zhou; R. C. Newman. "Effects of particle velocity and applied potential on erosion of mild steel in carbonate/bicarbonate slurry". エロージョン-コロージョン入門. 村松昌信, 磯本良則, 矢吹彰広編. 日本工業出版, 2005, p.213.
- 12) Plesset, M.S.. Temperature Effects in Cavitation Damage. Trans. ASME. J. Basic Eng., 1972, 94, p.559-563.
- 13) Shuji Hattori; Yuki Goto; Takai Fukuyama; Yoshinori Yagi; Michio Murase. Influence of temperature on erosion by a cavitating liquid jet. Wear. 2006, 260, p.1217-1223.
- 14) Hiromi Mochizuki; Motohiro Yokota; Shuji Hattori. Effects of materials and solution temperatures on cavitation erosion of pure titanium and titanium alloy in seawater. Wear. 2007, 262, p.522-528.
- 15) 望月敬美, 服部修次, 横田源弘, 坂下武志. 二段環境下のキャビテーション壊食. 日本機械学会論文集 (A編). 2010, Vol.76, No.767, p.976-981.
- 16) 望月敬美, 鈴木 隆, 服部修次, 武田宗也, 横田源弘. 塗膜のキャビテーション壊食に及ぼす膜厚の影響. 日本機械学会論文集. 2018, Vol.84, No.864, doi:10.1299/transjsme.18-00100.
- 17) 森 啓之, 柴田勝博, 服部修次, 岡田庸敬. キャビテーション気泡崩壊圧の伝ば挙動から考察した表面被覆材料の壊食. 日本機械学会論文集(A編). 1997, Vol.63, No.615, p.2424-2430.
- 18) 尾崎敏範, 石川雄一, 穠山雅男. 海水機器の腐食—損傷とその対策—. 科学図書出版, 第2版, 2007. p.145.
- 19) 尾崎敏範, 小沼 勉. 海水流体機械用耐キャビテーション・エロージョン性ステンレス鋼の開発. 防食技術. 1987, Vol.36, No.2, p.83-90.
- 20) 宮坂松甫. 海水ポンプの腐食と対策技術. 材料と環境. 2012, Vol.61, No.12, p.464-470.
- 21) 加藤洋治. 新版キャビテーション 基礎と最近の進歩. 森北出版, POD, 2016, 430p..
- 22) 祖山 均. "流動キャビテーションを利用した洗浄技術". JST新技術説明会.
https://shingi.jst.go.jp/past_abst/p/15/tohoku/tohoku01.pdf (参照 2015-5-29).

海中のキャビテーション壊食

望月敬美*1

(*1 東京海洋大学元教授)

要旨: 海中における流体機械材料と塗装材のキャビテーション壊食のメカニズムを調べた。耐食材料の壊食抵抗は硬くなると向上するが、オーステナイト系ステンレス鋼や銅合金は腐食の影響により低下する。流れのある場合の最大壊食速度と海水温度の相関は、圧力を考慮した相対温度で整理すると、流れの無い清水場合の相関とほぼ同じである。海水温 30~60 °Cでの壊食速度は、1 °Cで約 1 %の変化が見込まれた。また、流水が海水中から清水中になると壊食速度は腐食作用が僅少になるため急減し、さらに清水中から海水中になると逆に急増する。シリコン樹脂の膜厚が臨界厚さより薄くなると最大壊食速度は急増し、この臨界膜厚は接着力を向上させる下塗材との音響インピーダンスの関係に依存する。

キーワード: キャビテーション壊食, 海水, 腐食, 壊食抵抗, 硬さ, 壊食量