

平成 22 年 5 月 13 日現在

研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19560083  
 研究課題名（和文）キャビテーション減肉評価技術の確立と耐キャビテーション被覆材料の開発  
 研究課題名（英文）Evaluation Techniques on Wall Thinning Rate due to Cavitation and Development of Cavitation-Resistant Materials

研究代表者  
 服部 修次 (HATTORI SHUJI)  
 福井大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：00143933

研究成果の概要（和文）：本研究では、各種配管材料に用いる鉄鋼材料について長時間の損傷試験を行った。今まで本研究室で得られているデータベースと比較した結果、鉄鋼材料の長時間使用後の損傷量の予測モデルを作成し、損傷量の定式化を行い鉄鋼材料の長時間に対する損傷を評価した。また、配管に施す表面被覆材料に Ti-Ni 合金の使用を検討し、実際に表面被覆材料を作製し損傷試験を行い、Ti-Ni 形状記憶合金が表面被覆材料に適していることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Cavitation erosion tests for long exposure were carried out on the specimens made of iron and steels used for piping system. We compared these results with database constructed in our laboratory. We also developed a damage model for erosion process. In order to estimate the erosion for a longer exposure quantitatively, the erosion behavior was formulated. Damage tests were carried out for surface coatings fabricated by ourselves. It was found that Ti-Ni shape memory alloys are suitable for materials of surface coatings.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料，材料力学

キーワード：環境強度，キャビテーション・エロージョン

## 1. 研究開始当初の背景

(1)配管の減肉は、特に高温液体を取り扱う原子力プラントや一般プラントにおいて、非常に重要な問題となっている。配管からの漏水、破裂事故は、現場作業者の負傷、汚染物質の

漏洩等の重大な問題を引き起こす。

キャビテーション壊食は、配管・機器の中でオリフィスや弁で流体の静圧が局所的に蒸気圧以下に低下したとき、発生したキャビテーション気泡が後流の圧力の回復する場所

で消滅するとき衝撃波やマイクロジェットが発生して壁面を海綿状に壊食する現象である。漏水事故を引き起こしたプラント配管の内面では、材料が大きく塑性変形し、断面での壊食が非常に局所的に進行していることから気泡崩壊圧によって材料に繰返し荷重が作用して減肉したことがわかる。このように、配管では腐食だけでなくエロージョン（壊食）の進行を考慮しなければならない。

(2)配管部品には流量や圧力を調節する弁やオリフィスがあり、特に弁体はキャビテーション壊食による減肉の危険にさらされている。また、原子力発電所の配管部品としてコバルト合金を使用する場合、放射能化の半減期が非常に長いのでコバルト合金ステライトの代替材料が望まれている。このように、配管材料や配管部品に対してキャビテーション減肉評価技術の確立と耐キャビテーション被覆材料を開発することは、原子力プラントの配管管理に対しては急務な課題である。

## 2. 研究の目的

減肉現象を解決するためには、プラント現場での減肉測定、実験室試験による減肉メカニズムの解明を実験結果に基づく減肉モデルの作成、モデルに基づく減肉予測手法の確立が必要である。本研究では、これまでのASTM規格に規定されていない減肉量の大きな領域も含めた長時間の壊食試験を行い、試験後の試験片を切断して断面上の壊食部を観察して、最大深さに基づいて実験結果のとりまとめを行うと同時に、減肉が生じにくい被覆方法を検討する。主要な研究目的は以下に示す通りである。

- (1)各種配管材料の壊食試験の実施と本研究室データベースとの比較検討
  - (2)長時間使用後の壊食量予測モデルの作成と評価
  - (3)弁などの配管部材を対象とした、表面被覆材料の壊食試験の実施と評価
  - (4)最適耐壊食性被覆材料創製のための指針作成
- を実施する。以上を総合して、キャビテーション減肉評価技術を確立し、耐キャビテーション被覆材料の開発を行う。

## 3. 研究の方法

### (1)キャビテーション減肉評価技術の確立

試験材料に、铸造性に優れていて安価であることからポンプのケーシング材に用いられるねずみ鋳鉄FC250、及び耐食性に優れていることからステンレス鋼管やポンプの羽根車に使用されるオーステナイト系ステンレス鋼SUS304を用いた。また、参照材料として既に報告した圧力配管用炭素鋼鋼管に相当する炭素鋼S15C（焼ならし材）の結果を

用いた。試験片は、直径25mmの丸棒を厚さ5mmに切り出して製作した。試験面は丸棒の断面とし、エメリー紙#1200番まで研磨した後、バフ仕上げにより鏡面に仕上げた。

キャビテーション壊食試験には、ASTM G32-03規格に基づいて製作した磁わい振動装置を用いて静置試験片法で行った。振動子の増幅ホーンの先端に直径16mmのSUS304製のディスクを取り付け、このディスクと平行にすき間1mm隔てて試験片を対向させて静置した。振動子の共振周波数は19.5 kHzで、ディスク端面の全振幅（peak to peak）は50  $\mu\text{m}$ 一定とした。ディスクは端面を鏡面状に磨いたものを用い、10時間使用するごとに新しいものと交換した。試験液はイオン交換水を用いて、恒温装置で液温を $25 \pm 1$   $^{\circ}\text{C}$ に保持した。壊食試験はFC250については30時間まで、SUS304については100時間まで試験を行った。試験後の試験片はアセトン中で超音波洗浄した後、精密天秤（感度0.01 mg）で質量を測定した。また、マイクロカッタを用いて試験片を切断し、光学顕微鏡で壊食断面の観察を行った。

### (2)耐キャビテーション被覆材料の開発

Ti45-Ni55とTi55-Ni45の肉盛材料を使用した。Ti45-Ni55は純Ti粉体と純Ni粉体を形状記憶効果を示す原子量%50:50となる割合で混合して肉盛したものであり、Ti55-Ni45は下地肉盛にNiを使用したために、Niが肉盛部に拡散することを予想してTiを多く含むようにしたものである。Ti-Ni形状記憶合金粉を用いた合金粉肉盛材を3種類使用した。キャビテーション壊食試験片は、オーステナイト系ステンレス鋼SUS304の母材に純Ni粉体で下地肉盛を作成し、その上に純Tiと純Niの混合粉やTi-Ni合金粉を用いてプラズマ移行アーク粉体（PTA）肉盛法を施した試験材料を用いた。参照材料としてオーステナイト系ステンレス鋼SUS304単一材を用いた。各試験片の試験面はエメリー紙#1200で研磨した後、バフ仕上げにより鏡面状とした。

キャビテーション壊食試験方法は、磁わい振動装置を用いて、静置試験片法でキャビテーション壊食試験を行った。壊食による質量減少量は、精密天秤（感度0.01mg）で測定した。試験結果は、質量減少量を材料の密度で除して体積減少量を求めた。密度はTi45-Ni55~Ti55-Ni45でやや変化すると考えられるが、本研究では、これらの混合粉肉盛材や形状記憶合金肉盛材いずれも $6.45 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ で計算した。体積減少量を試験面積（201mm<sup>2</sup>）で除した平均壊食深さ（MDE）で整理した。壊食面の形状は非接触表面形状測定システムで測定した。壊食面の観察は走査型電子顕微鏡（SEM）で行った。また、成分分析はエネル

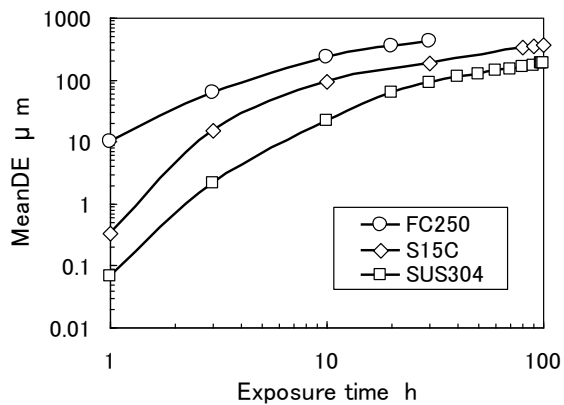


Fig. 1 MeanDE

ギ一分散型 X 線分析装置で行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) キャビテーション減肉評価技術の確立

##### ① 壊食量の変化

試験材料 FC250 及び SUS304 は試験開始 1 時間, 3 時間, 10 時間, その後 10 時間ごとに試験片の質量を測定した。ただし, SUS304 の 90 時間から 100 時間までの間は 98 時間, 99 時間でも質量を測定し, 参照材料である S15C は 1 時間, 3 時間, 10 時間, 30 時間, 80 時間, 90 時間, 100 時間で測定を行なった。

平均壊食深さ MeanDE (Mean Depth of Erosion) を用いて試験結果を検討した。MeanDE は質量減少量を材料の密度と壊食面積で除して求めた平均的な壊食深さである。壊食面積は, いずれの試験片も磁わい振動装置の振動ディスクの直径 16 mm に対応する円形面積 201 mm<sup>2</sup> とした。図 1 は各材料の MeanDE を両対数紙上に示したものである。各 MeanDE 曲線に関して, 試験開始直後ではそれぞれ壊食挙動が異なり, 1 時間後と比較すると, FC250 は S15C の 30 倍, S15C は SUS304 の 5 倍と壊食深さに大きな差が見られるのに対し, 長時間の範囲では壊食深さの比はほぼ一定となっていることがわかる。30 時間後の MeanDE で比較すると FC250 は S15C の 2.3 倍, S15C は SUS304 の 2.0 倍であり, 耐キャビテーション壊食特性はステンレス鋼 SUS304 が最も優れ, 次いで炭素鋼 S15C, 鋳鉄 FC250 が最も劣っていることがわかる。

##### ② 最大壊食深さの変化

従来のキャビテーション壊食試験の評価は MeanDE で整理されているが, 配管やポンプ部材の減肉量を評価する場合には漏水事故の観点から, 材料の局所的に深い部分の壊食が重要になるため最大壊食深さ MaxDE (Maximum Depth of Erosion) で評価する方が適切であると考えられる。従って, 非接触表面形状測定システム (粗さ計) で表面形状を測定し, 最大深さを計測した。さらに, 長時間試験後の試験片では, 粗さ計での測定が困難な, 複雑で深い壊食部が存在するため,

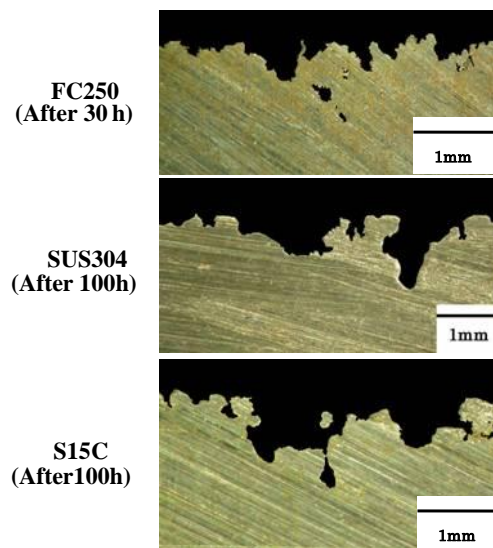


Fig. 2 Deepest part of eroded

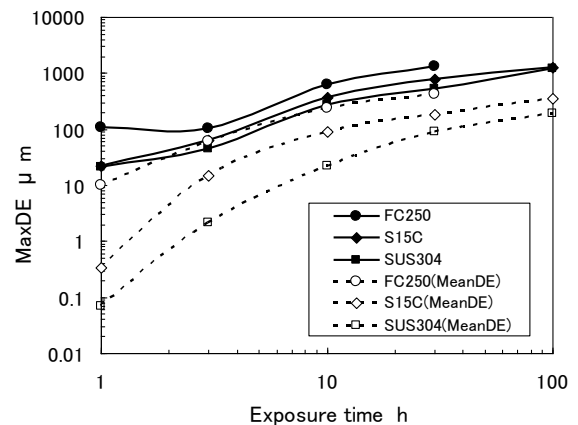


Fig. 3 MaxDE

試験片を壊食面から垂直に切断し, 光学顕微鏡を用いて断面観察を行い最大深さを測定した。図 2 は MaxDE の測定に使用した各試験片の壊食最深部の断面写真であり, 激しく深く損傷している部分が見られる。粗さ計と断面写真による測定で, 深い方の値を MaxDE として採用した。

図 3 は測定した各種試験材料の MaxDE と MeanDE を両対数紙上に示したものである。必ずしも試験片切断面で MaxDE が測定できるかどうかかわからないため, SUS304 の 30 時間後の MaxDE の値は小さめとなったが, いずれの材料でも MaxDE は試験時間が経過すると両対数紙上でほぼ直線的に増加することがわかる。また, 各試験材料の長時間領域の MeanDE と MaxDE を比較すると, FC250 の 10 時間以上で MaxDE は MeanDE の約 3 倍, 30 時間以上の SUS304 で約 6 倍, 及び S15C で約 4 倍であり, 長時間では MaxDE と MeanDE は時間変化に伴って同じ割合で増加することから, 従来の平均壊食深さのデータから最大壊食深さを推定できる。また, 各材料を MaxDE と MeanDE の比の大きさはステンレス鋼 SUS304, 炭素鋼

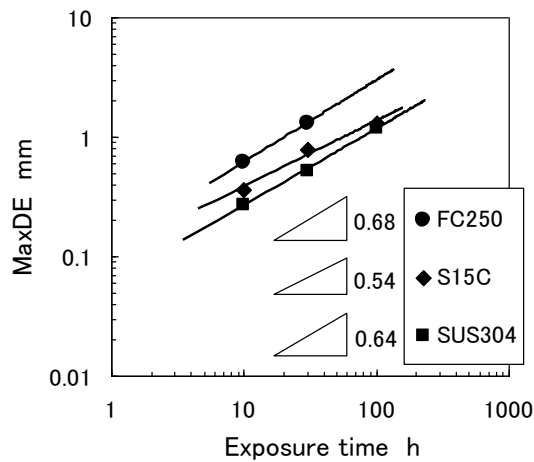


Fig. 4 Prediction line of

S15C, 鋳鉄 FC250 の順であり、この順に壊食は局所的に進行すると考えられる。

試験データよりさらに長時間領域の MaxDE を予測するために、深さ 200  $\mu\text{m}$  以上の MaxDE に注目して考察した。図 4 は長時間領域の MaxDE 値を示したものであり、図中の直線は各 MaxDE の値から求めた近似線である。近似線の傾きから FC250 の MaxDE は時間の 0.68 乗、SUS304 は 0.64 乗、S15C は 0.54 乗に比例することがわかり、いずれの鉄鋼材料も長時間後の MaxDE を予測できることが明らかとなった。

#### ③壊食面形状の変化

次に、全体の断面形状の観察を行い、壊食がどのように進展するかを検討した。図 5 は FC250 の壊食部全域を示した断面形状写真である。時間と共に複雑な壊食ピットが形成され、壊食面が不均一になることがわかる。壊食ピットは必ずしも一様に深くなるのではなく、30 時間後の断面では最深部が壊食部から離れて存在する。SUS304 の断面形状写真である。FC250 と同様に時間と共に壊食ピットは大きく深くなるが、FC250 ほどは複雑な形状ではなく、一つ一つのピットの大きさは大きく、局所的に進行しているピットが見られる。S15C の断面形状写真である。30 時間後では FC250 や SUS304 に比べて明瞭な蝸壺状のピットが見られるが、100 時間後では FC250 と類似した複雑な形状となり、最深部が壊食部から離れて存在する。FC250 と S15C は共に結晶構造が bcc 構造であるため、へき開破壊が生じて凹凸がはっきりとした複雑な壊食面形状になると考えられる。壊食面はキャビテーション気泡が消滅する際に発生するマイクロジェットや気泡の消滅による衝撃波を繰り返し受けることにより、疲労的に弱い部分から脱落するため、いずれの鉄鋼材料でも長時間後の壊食面は複雑な形状となり、壊食は局所的に進行することが明らかとなった。また、長時間になるにつれて壊食面の凹凸は非常に大きくなり、凹凸にはキャビテー

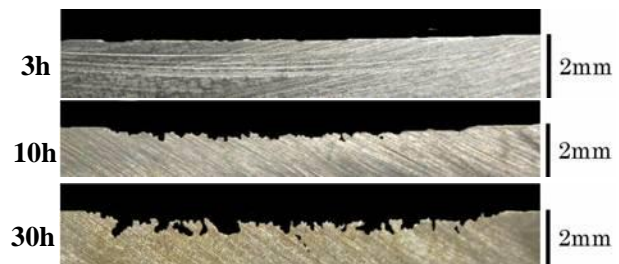


Fig. 5 Cross section of FC250

ション気泡が溜まり易くなる。その結果、キャビテーションの衝撃を和らげる気泡のクッション効果が生じ、長時間領域では壊食速度は小さくなると考えられる。

#### ④壊食量の定式化

鉄鋼材料の壊食は MeanDE 及び MeanDER を用いて表されたが、さらなる長時間における壊食を定量的に評価するために、壊食量の定式化を行った。著者らは先に、アルミニウムなどの軟質材のキャビテーション壊食過程における MeanDE 及び MeanDER は修正ロジスティック曲線により表現できることを報告し<sup>(1)</sup>、炭素鋼 S15C の長時間の壊食挙動については既に修正ロジスティック曲線を用いて示せることを報告した。従って、同じ鉄鋼材料に分類される FC250 及び SUS304 についても修正ロジスティック曲線を用いて、長時間に対するキャビテーション壊食挙動を表せるかどうかについて検討した。修正ロジスティック曲線は  $\alpha, \beta, c, k$  の 4 つのパラメータを用いた式であり、MeanDER は式 (1) で表される。また、MeanDE は壊食速度を表す式 (1) を積分した式 (2) で表される。

$$\text{MeanDER} = \frac{\alpha}{\beta} \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\beta} c_1 e^{-\alpha t} + kt} \dots\dots\dots (1)$$

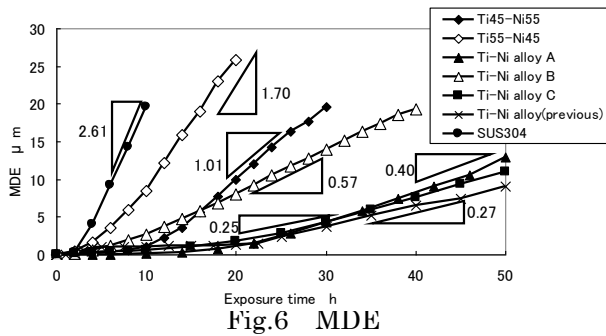
$$\text{MeanDE} = \frac{\alpha}{\beta k} \ln(1+kt) - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{1+c_2}{1+c_2 e^{-\alpha t}}\right) \quad (2)$$

各パラメータは MeanDER 曲線を用いて初期値を設定した。即ち、 $\alpha$  は壊食速度が最大壊食速度の 5% であるときの時間の逆数、 $\alpha/\beta$  は壊食速度のピーク値、 $k$  は MeanDER 曲線の減速期におけるこう配の絶対値、 $d_0$  は初期壊食速度である。炭素鋼、ステンレス鋼、鋳鉄のいずれの鉄鋼材料においても、修正ロジスティック曲線を表す式を用いれば、わずか 4 つのパラメータにより長時間後の平均壊食深さを推定でき、さらには材料別に MaxDE と MeanDE は同じ割合で増加することから最大壊食深さを推定できる。

#### (2) 耐キャビテーション被覆材料の開発

##### ①Ti-Ni 肉盛材の壊食挙動

図 6 は、Ti-Ni 肉盛材と参照材料である SUS304 と以前研究室で得られていた Ti-Ni alloy (previous) のキャビテーション壊食



試験の MDE (平均壊食深さ) 曲線である。いずれの試験材料も、MDE は壊食速度が極めて小さい潜伏期を過ぎた後急激に増加し、直線的に増加する最大速度期に至る。潜伏期は最大速度期の傾き部の延長線と時間軸との交点から求めた値と定義し、キャピテーション壊食試験結果を潜伏期で評価した。図中の三角形は、最大速度期の直線部のこう配 (MDER) を示したものである。Ti-Ni alloy A (0.40 μm/h) のこう配は SUS304 (2.61 μm/h) の約 1/7 倍であり、非常に優れた表面被覆材であることがわかる。Ti-Ni alloy A と Ti-Ni alloy B を比べると、潜伏期については Ti-Ni alloy B (約 6 時間) は Ti-Ni alloy A (約 19 時間) の約 1/3 倍であるが、最大速度期のこう配は Ti-Ni alloy B (0.57 μm/h) が、Ti-Ni alloy A (0.40 μm/h) の約 1.5 倍とほぼ等しい傾きなので、いずれも優れた耐壊食性を示すことがわかる。Ti-Ni alloy C は、最大速度期のこう配が 0.25 μm/h と非常に小さい値であり、他の Ti-Ni 形状記憶合金肉盛材と比較して約 1/10~1/2 のこう配を示すので、耐壊食性に非常に優れていることがわかる。純 Ti、純 Ni 混合粉肉盛材は、Ti-Ni 形状記憶合金肉盛材より耐壊食性に劣る。これは、純 Ti、純 Ni 混合粉肉盛材では粉体同士が均一に混ぜ合わされていないためと考えられる。しかし、最大速度期のこう配は、混合粉肉盛材が SUS304 の約 1.5~2.6 倍を示すので、優れた耐壊食性を示す肉盛材料であるといえる。また、2 種類の純 Ti、純 Ni 混合粉肉盛材では、金属間化合物である Ti45-Ni55 が、Ti55-Ni45 より約 1.7 倍優れた耐壊食性を示す。

#### ②走査型電子顕微鏡による壊食面の観察

Ti-Ni 肉盛材の壊食機構を明らかにするために、処女面と壊食面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した。

図 7 は、SEM で撮影した各種 Ti-Ni 合金肉盛材の壊食面を示す。Ti45-Ni55 では、壊食面の領域 a は Ti を多く含有している Ti rich の箇所、領域 b は Ti と Ni の質量濃度がほぼ等しい Ti-Ni の箇所である。また、領域 b は領域 a に比べて Ni の含有率が高いことから元々 Ni の領域に Ti が入り込んできたものと考えられる。領域 b の Ni 粒子同士が結合しているのは、Ni の融点が Ti の融点より低

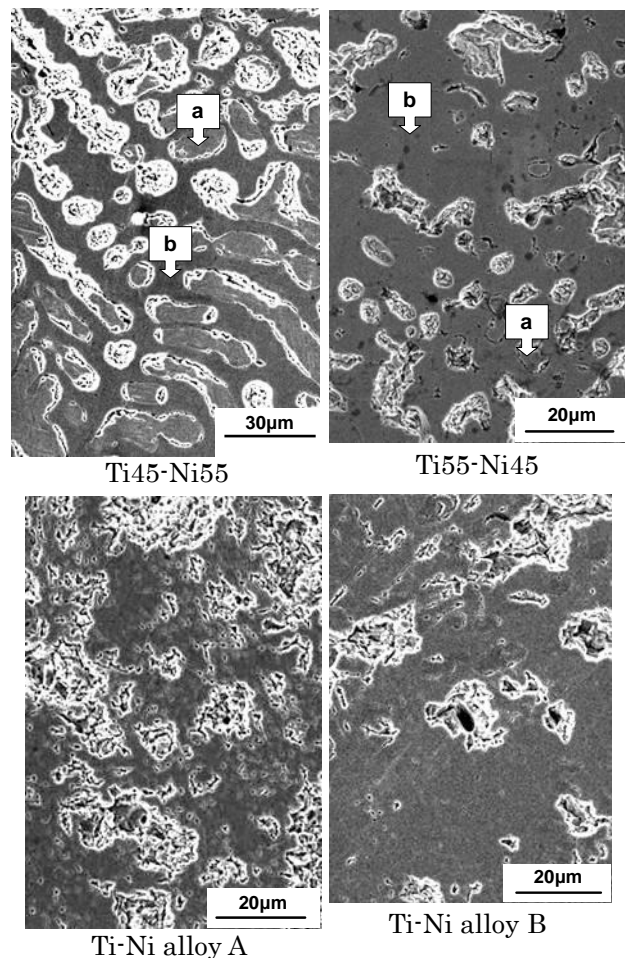


Fig. 7 SEM photographs of eroded surface of Ti-Ni alloy weld overlays

いためと考えられる。壊食は領域 a と領域 b の境界で発生し、領域 a が脱落している。領域 a は Ti の含有率が高いため、TiNi 金属間化合物だけでなく、形状記憶の性質も有していない Ti<sub>2</sub>Ni 金属間化合物も含まれていたと考えられる。また、領域 a と領域 b の硬さでは、壊食を受けた領域 a の方が大きい。領域 a が領域 b より硬いにも関わらず先に壊食を受けた原因は、ステライトの壊食で先に報告<sup>(4)</sup>したように、壊食は領域 a と領域 b の境界で始まり、領域 b で壊食が進行するが、その後領域 a の硬い粒子が脆性的に脱落したためであると考えられる。Ti55-Ni45 では、Ti の含有率の比較から、領域 a はもともと Ni の、領域 b はもともと Ti の領域であったもので、Ti45-Ni55 の結果とは大きく異なる。最初に領域 a が溶解するが、Ni の領域が少ないために、引き続き Ti の領域 b も溶解し、Ti 粒子同士が結合したのと考えられる。壊食は、Ti45-Ni55 と同様に領域 a と領域 b の境界で発生し、軟らかい領域 a が優先的に脱落したのと考えられる。そのために、Ti45-Ni55 に比べて、境界でき裂が残存したままの状態のものが少なく、壊食が速く進行したのと考えられる。また、領域 a が壊食

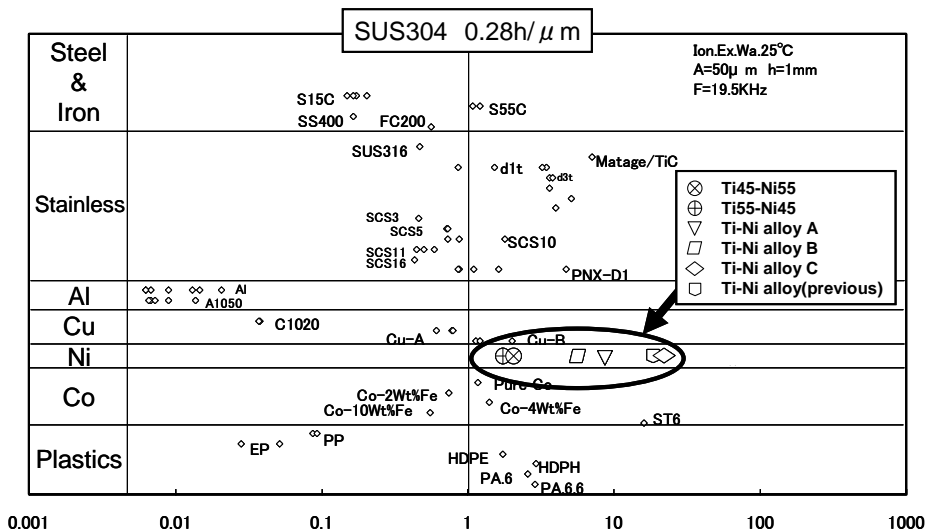


Fig.8 Normalized erosion resistance of various alloys

した後、Ti含有率の高い領域bが脆性的に壊食されたと思われる。Ti-Ni alloy Aでは、処女面に欠陥などは見られない。50時間後の壊食面では、微小な壊食ピット同士が結合し拡大する。処女面は少量のCoを含んでいる。Ti-Ni alloy Bでは、処女面に10 $\mu$ m程度の欠陥がいくつか観察できる。処女面に欠陥が存在すると、欠陥を起点に損傷を受けやすくなる。壊食面を見ても、欠陥の周囲から壊食されているのが観察できる。しかし、これらの材料はTi45-Ni55やTi55-Ni45に比べて潜伏期が長く、試験片表面が徐々に壊食されているので、Ti-Ni 混合粉肉盛材よりも耐壊食性に優れているとわかる。潜伏期の短い理由として考えられるのは、Ti-Ni alloy Bの処女面に欠陥が存在していることや、先に述べたTi-Ni alloy AとTi-Ni alloy Bの粉体形状の違いである。Ti-Ni alloy Bの粉体には鋭く尖った破片状の粒子があり、その影響により肉盛施工時に欠陥を生じると考えられる。以上の理由により、Ti-Ni alloy BはTi-Ni alloy Aより耐壊食性に劣る。Ti-Ni alloy Cの壊食面は、Ti-Ni alloy Aと似ているので省略する。

このように、純金属の混合粉による肉盛材料は、組織が完全に均一化していないので二相組織となり、組織によっては壊食速度が速い箇所が現れる。一方、Ti-Ni 形状記憶合金粉による肉盛材料は、組織が均一であるので混合粉の肉盛材料よりも耐壊食性に優れていることがわかる。

### ③各種工業材料の耐壊食性

図8は、本研究室でこれまで得られた各種工業材料の壊食抵抗を、SUS304を基準として対数目盛りで示したものである。コバルト合金はSUS304より優れた耐壊食性を示すものが多い。今回試験を行ったTi-Ni肉盛材は、SUS304より約2~14倍の優れた壊食抵抗を示す。またTi-Ni形状記憶合金肉盛材は、ステ

ライト6Bと比較しても同等以上の壊食抵抗を示し、ステライトに代わる材料として使用できることを示している。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

①服部修次, 板垣 学, 小木曾貴昭, 鉄鋼材料の長時間キャビテーション壊食, 日本機械学会論文集 (A編), 75, 759, 2009-11, 1639-1644

[学会発表] (計3件)

① S. Hattori, N. Moriyama, Cavitation Erosion Resistance of Ti-Ni Shape Memory Alloy Weld Overlays, ISAMPE, 2009. 11. 05, 上海理工大学

②服部修次, 守山なぎさ, Ti-Ni 形状記憶合金肉盛材の耐キャビテーション壊食性, 材料学会, 2008. 05. 24, 鹿児島大学

③板垣 学, 小木曾貴昭, 服部修次, キャビテーションによる鉄鋼材料の長時間後の減肉, 原子力学会2007秋の大会, 2007. 9. 27-11, 北九州国際会議場

[図書] (計0件)

[産業財産権]

[その他]

ホームページ等

### 6. 研究組織

#### (1) 研究者代表

服部 修次 (HATTORI SHUJI)  
福井大学・工学研究科・教授  
研究者番号: 00143933

#### (2) 研究分担者

前川 紀英 (MAEKAWA NORIHIDE,  
定年退職のため2009年まで)  
福井大学・工学研究科・助手  
研究者番号: 20262610