

液体金属中のキャビテーション壊食に関する基礎的研究

-液体金属中のキャビテーション壊食による液体パラメータの影響-

(共同研究)

Fundamental Study on Cavitation Erosion in Liquid Metal

- Effect of Liquid Parameter on Cavitation Erosion in Liquid Metals -

(Joint Research)

服部 修次* 井上 文貴* 倉地 宏晃* 渡士 克己
月森 和之 橋本 貴司 矢田 浩基

Shuji HATTORI*, Fumitaka INOUE*, Hiroaki KURACHI*
Katsumi WATASHI, Kazuyuki TSUKIMORI, Takashi HASHIMOTO
and Hiroki YADA

次世代原子力システム研究開発部門

プラント信頼性グループ

Component Integrity Research Group

Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

JAEA
Research

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（<http://www.jaea.go.jp>）
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

液体金属中のキャビテーション壊食に関する基礎的研究
—液体金属中のキャビテーション壊食による液体パラメータの影響—
(共同研究)

日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門 FBR プラント技術ユニット

服部 修次^{*1}、井上 文貴^{*2}、倉地 宏晃^{*1}、
渡士 克己⁺¹、月森 和之、橋本 貴司⁺²、矢田 浩基

(2008年8月18日 受理)

キャビテーション壊食は、多くの産業機械や部材で流体に接している箇所に生じて、材料表面を海綿状に壊食し、機器の性能低下や寿命低下、騒音、振動の発生をもたらすだけでなく、機器全体の破壊にもつながる重要な問題である。本研究で行った液体金属中のキャビテーション壊食に関する研究は、ナトリウムを冷却材とする高速増殖炉の安全性の確認、水銀を使用する核破碎中性子源ターゲット容器の問題を解決する上で非常に重要であるが、極めて特殊なケースであるため水中に比べてほとんど研究が進展していない状況である。本研究では、まず低融点の液体金属中でキャビテーション試験を行うことができる試験装置の開発を行った。次いで、鉛・ビスマスの液体金属中とイオン交換水中で壊食試験を行い、両試験液中での壊食速度の違いについて検討し、壊食速度に及ぼす液体の影響、および壊食速度の温度依存性について考察し、以下の成果を得た。

- ・試験温度を融点と沸点の間を百分率で定義した相対温度で壊食速度を整理したところ、相対温度が14°Cにおける鉛・ビスマス中の壊食速度はイオン交換水中に比べて約10倍、ナトリウム中では約2～5倍である。(相対温度14°Cでのナトリウム中の結果についてはThiruvengadamら⁽³⁾とYoungら⁽⁵⁾の文献より引用)
- ・液体種類による壊食速度の影響を検討したところ、液体の相対温度が14°Cのとき、次式のパラメータにより評価できる。

$$\frac{1}{(1/\rho_L C_L + 1/\rho_S C_S) \sqrt{\rho_L}}$$

ρ 、Cは液体の密度及び音速で、添字L、Sは液体及び固体を表す。

- ・相対温度14～30°Cにおける壊食速度增加の温度依存性は、液体の飽和蒸気圧の増加によるものである。

本研究は日本原子力研究開発機構と福井大学との共同研究契約に基づいて平成16、17、18年度に実施したものである。

高速増殖炉研究開発センター（駐在）：〒919-1279 福井県敦賀市白木1丁目

*1 福井大学大学院

*2 今仙電機（福井大学大学院卒）

+1 安全研究センター 軽水炉長期化対応研究ユニット

+2 高速増殖炉研究開発センターもんじゅ開発部

**Fundamental Study on Cavitation Erosion in Liquid Metal
- Effect of Liquid Parameter on Cavitation Erosion in Liquid Metals -
(Joint Research)**

Shuji HATTORI^{*1}, Fumitaka INOUE^{*2}, Hiroaki KURACHI^{*1},
Katsumi WATASHI⁺¹, Kazuyuki TSUKIMORI, Takashi HASHIMOTO⁺² and Hiroki YADA

FBR Plant Technology Unit
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tsuruga-shi, Fukui-ken

(Received August 18, 2008)

Cavitation erosion, which possibly occurs on the surfaces of fluid machineries and components contacting flowing liquid and causes sponge-like damage on the material surface, is important problem, since it may become the cause of performance deduction, life shortening, noise, vibration of mechanical components and moreover failure of machine.

Research on cavitation erosion in liquid metal is very important to confirm the safety of fast breeder reactor using sodium coolant and to avoid serious damage of the target vessel of spallation neutron source containing liquid-mercury.

But the research on cavitation erosion in liquid metal has been hardly performed because of its specialty in comparison with that in water.

In this study, a cavitation erosion test apparatus was developed to carry out the erosion tests in low-temperature liquid metals. Cavitation erosion tests were carried out in liquid lead-bismuth alloy and in deionized water. We discuss the effect of liquid parameters and temperature effects on the erosion rate. We reach to the following conclusions.

- The erosion rate was evaluated in terms of a relative temperature which was defined as the percentage between freezing and boiling points. At 14 °C relative temperature, the erosion rate is 10 times in lead-bismuth alloy, and 2 to 5 times in sodium, compared with that in deionized water.

This work has been performed in JAEA as a joint research with Fukui University

*1 Fukui University

*2 Imasen Electric Industrial (Graduate student university of Fukui)

+1 LWR Long-Term Reliability Research Unit, Nuclear Safety Research Center

+2 Monju Development Department, Fast Breeder Reactor Research and Development Center

- At 14°C relative temperature, the erosion rate can be evaluated in terms of the following parameter.

$$\frac{1}{(1/\rho_L C_L + 1/\rho_s C_s) \sqrt{\rho_L}}$$

Where ρ is the material density and c is the velocity of sound, L and S denote liquid and solid.

- In the relative temperature between 14 and 30°C, the temperature dependence on the erosion rate is due to the increase in vapor pressure.

Keywords: Cavitation Erosion, Iron and Steel, Flow Velocity, Cavitation Number

This is a blank page.

目次

1. 研究の背景及び目的 -----	1
2. 試験材料及び試験方法 -----	3
試験液及び試験材料 -----	3
試験装置の開発 -----	7
試験方法 -----	10
3. 試験結果及び考察 -----	12
キャビテーション壊食試験結果 -----	12
壊食速度に及ぼす液体種類の影響 -----	18
壊食速度の温度依存性に及ぼす液体因子の影響 -----	22
4. 結言 -----	25
参考文献 -----	26
付録 -----	27

Contents

1. Introduction -----	1
2. Test material and experiment procedures -----	3
2.1 Test liquid and test material -----	3
2.2 Test apparatus -----	7
2.3 Experimental procedure -----	10
3. Results and discussion -----	12
3.1 Erosion curves -----	12
3.2 Influence of kind of liquids on erosion rate -----	18
3.3 Influence of liquid properties on temperature dependency of erosion rate -----	22
4. Conclusions -----	25
References -----	26
Appendices -----	27

表目次

表 1	鉛・ビスマス合金の化学成分	4
表 2	鉛・ビスマス合金の物理的及び機械的性質	4
表 3	熱重量測定の試験条件	5
表 4	試験片の化学成分	6
表 5	試験片の機械的性質	6
表 6	ナトリウムの物性値	17
表 7	Young らの試験結果の換算 MDERmax	17
表 8	各種液体の物性値と式(6)の値	21

図目次

図 1	一般のプラント配管で最近発生したキャビテーション壊食の例	2
図 2	試験液の熱分析曲線	4
図 3	試験液の熱重量測定結果	5
図 4	試験片の形状	6
図 5	液体金属用キャビテーション壊食試験装置	7
図 6	壊食試験における試験液の温度変化(非制御時)	8
図 7	温度制御装置の概略図	9
図 8	試験片振動の全振幅と電圧の関係	11
図 9	各試験温度における試験液の温度変化	11
図 10	質量減少量曲線	14
図 11	MDER(平均壊食深さ速度)曲線	14
図 12	試験片表面写真	15
図 13	イオン交換水中と Pb-Bi 中の壊食表面形状(質量減少量約 100mg)	15
図 14	イオン交換水中と Pb-Bi 中の温度と MDERmax の関係	16
図 15	イオン交換水中と Pb-Bi 中の相対温度と MDERmax の関係	16
図 16	液体金属中の B_{eff} と温度の関係 ⁽⁴⁾	20
図 17	音響インピーダンス ρLC_L と MDERmax の関係	20
図 18	式(6)と MDERmax の関係	21
図 19	ナトリウムと水の相対温度と表面張力の関係	23
図 20	ナトリウムと水の相対温度と粘性の関係	23
図 21	ナトリウムと水の相対温度と相対飽和蒸気圧の関係	24

1. 研究の背景及び目的

キャビテーション壊食は、水車やポンプ、トルクコンバータなどの流体機械をはじめ、船用プロペラ、バルブ、ディーゼルエンジンのシリングライナなど多くの産業機械や部材で流体に接している箇所に生じて、材料表面を海綿状に壊食する損傷である。キャビテーション壊食が発生すると機器の性能低下や寿命低下、騒音、振動の発生をもたらすだけでなく、機器全体の破壊にもつながる重要な問題である。

米国の Surry 原子力発電所で発生した冷却系大口径配管の壊食に起因する破断以降、キャビテーション壊食問題に対して産業界では種々検討されている。しかし、液体金属中のキャビテーション壊食に関する研究は、ナトリウムを冷却材とする高速増殖炉の安全性を確認し、また水銀を使用する核破碎中性子源ターゲット容器の問題⁽¹⁾を解決する上で非常に重要であるが、極めて特殊なケースであるため、水中に比べてほとんど研究が進展していない状況である。

高速増殖原型炉もんじゅでは冷却材として液体ナトリウムを使用しているが、冷却系の平均流速は ASME B&PV コードのエロージョン防止規定（キャビテーションが発生しない領域であること）に適合するものである。しかし、図 1 に示すように一般の化学プラント配管で発生した事故例ではキャビテーションが配管内で発生し、壊食現象を引き起こしていることから、キャビテーションが発生してからの壊食機構について解明することは重要である。（図 1 中の白丸の部分はキャビシヨーション壊食の特徴であり、塑性変形が起こっている。）

過去の液体金属の研究として、Thiruvengadam らは磁わい振動装置を用いてナトリウム中の純チタン⁽²⁾と SUS316⁽³⁾の壊食速度の温度依存性について検討し、純チタンでは 399°C で壊食速度の極大があり、SUS316 では高温になるほど壊食速度が減少する傾向を示すことを報告している。しかし、Thiruvengadam らの研究では、最終安定期の壊食速度を使用しており、ASTM(American Society for Testing and Materials)で規定されている壊食速度のピーク値と異なるので、従来の壊食速度と比較できない欠点がある。Garcia と Hammitt⁽⁴⁾は、水、水銀、リチウム、鉛・ビスマス中で SUS304 の壊食試験を行うと共に、ナトリウムについては Thiruvengadam らの試験結果を引用し、260°C のナトリウム中の壊食速度は 18°C の水中に比べて約 9 倍速いことを報告している。また、液体金属中の壊食は沸点近傍では熱移動支配であるが、それ以外の温度領域では慣性力支配であることを見出している。Young と Johnston⁽⁵⁾はナトリウム中で圧力と温度を変化させて、コバルト基合金 L-605 の振動キャビテーション壊食試験を行い、壊食速度は圧力の増加と共に増加し、温度依存性については、ある温度で極大があることを示唆しているが、詳細な傾向については明らかにしていない。

本研究では、まず低融点の液体金属中でキャビテーション壊食試験を行うことが可能な試験装置の開発を行った。次いで、鉛・ビスマスを用いた液体金属中とイオン交換水中で壊食試験を行い、両試験液中での壊食速度の違いについて検討し、壊食速度に及ぼす液体の影響及び壊食速度の温度依存性について考察した。

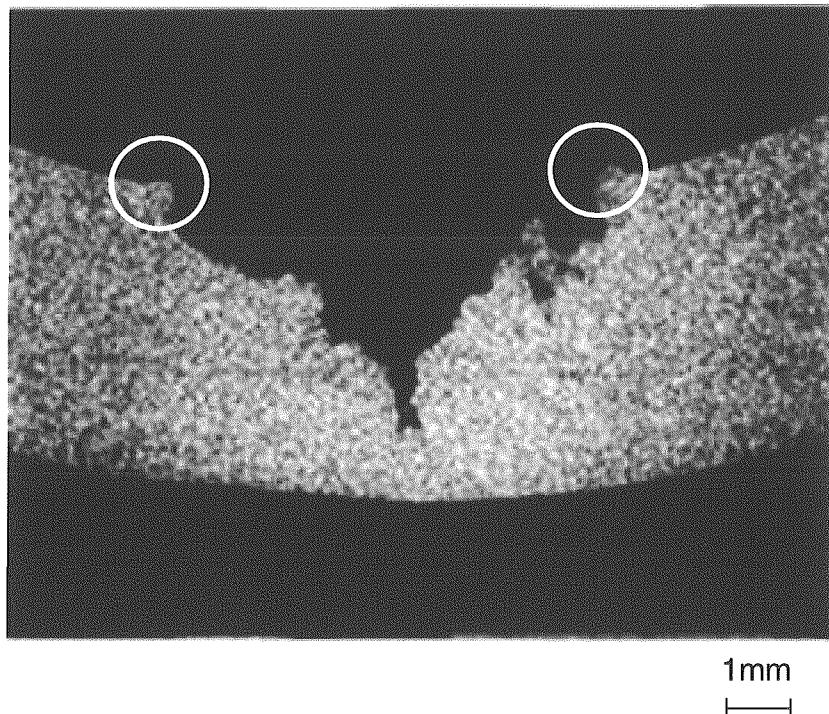


図1 一般のプラント配管で最近発生したキャビテーション壊食の例

2. 試験材料及び試験方法

2.1 試験液及び試験材料

試験液は、低融点合金の鉛・ビスマス及びイオン交換水を使用した。表 1 に本研究に用いた鉛・ビスマス合金の化学成分を示す。鉛・ビスマス系の低融点合金の融点は、Sn、Cd の添加量に応じて 47°C から 180°C まで変化する。今回は汎用材である Sn が 13.3%、Cd が 10% 添加されている鉛・ビスマス合金を使用した。表 2 に鉛・ビスマス合金の物理的性質及び機械的性質を示す。鉛・ビスマス合金の融点は自然冷却する際の熱冷却曲線によって求め、沸点は熱重量測定から求めた。図 2 は融点の測定に用いた熱分析曲線である。100°C の液体時から自然冷却を始め、15 分後から温度はほぼ一定となり 85 分後に再び温度が減少し、その後完全に固体となる。一定温度を示す領域（15～85 分の間）の平坦部から平均温度を求め、融点を 68.4°C とした。図 3 は沸点の計測に用いた熱重量測定の結果であり、表 3 は熱重量測定の試験条件である。熱重量測定試験は、時間と共に試験液を加熱、液体の気化に伴う質量比の減少を測定した。質量比は、一定状態から約 40 分後、液温 460°C 付近で減少を始め、その後徐々に減少し、80 分後、液温約 800°C で一定値となる。この結果より、鉛・ビスマス合金の沸点は、質量比が減少し始めた 460°C とした。なお、表中の密度の値から線膨張係数までは製造業者のカタログデータであり、鉛・ビスマス合金の密度は水に比べて 10 倍大きいことがわかる。

表 4、表 5 は、キャビテーション壊食試験片に用いたオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 の化学成分と機械的性質をそれぞれ示したものである。

高速増殖炉のナトリウム配管では SUS304 が使用されていることを考慮して、本研究では SUS304 鋼を試験片に使用した。ブリネル硬さは本研究での測定値であり、ビッカース硬さは SAEJ417b の硬さ変換表⁽⁶⁾に基づく換算値である。

本研究で使用する試験片の形状を図 4 に示す。本研究では試験片をキャビテーション壊食試験装置に取り付けるため、試験片側面に直径 3mm の穴を開けている。

表1 鉛・ビスマス合金の化学成分
(mass%)

	Bi	Pb	Sn	Cd
Pb-Bi	50	26.7	13.3	10

表2 鉛・ビスマス合金の物理的及び機械的性質

Freezing Point [°C]	68.4
Boiling Point [°C]	460
Density at 20°C [g / cm ³]	9.38
Tensile strength [g / cm ²]	421
Brinell hardness	9.20
Conductance [%pure copper]	4.00
Specific heat (fluid) [cal / g / °C]	0.04
Specific heat (vapor) [cal / g / °C]	0.04
Fusion linear thermal [cal / g / °C]	6.67
Coefficient of linear expansion [1 / °C]	0.22×10 ⁻⁵

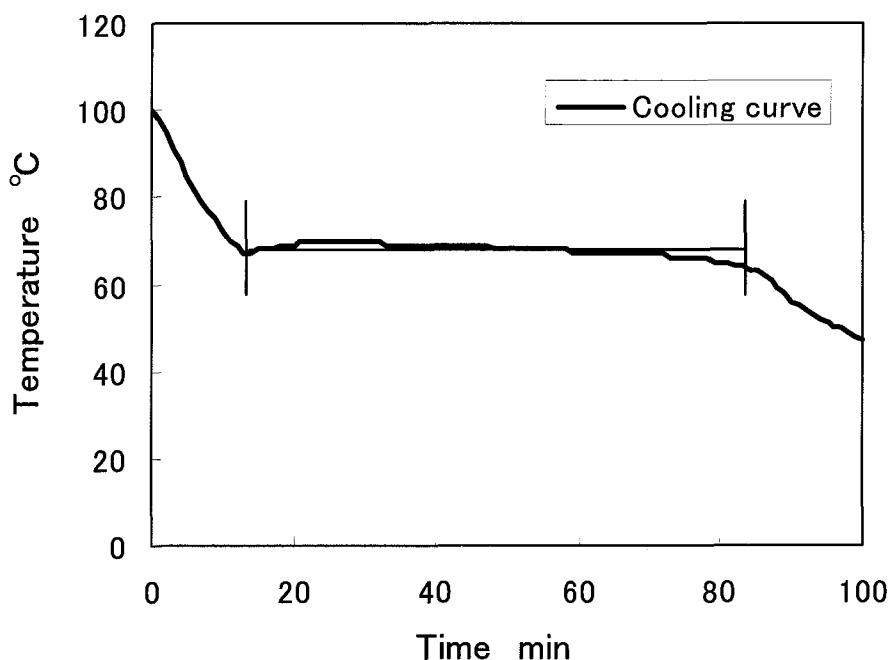


図2 試験液の熱分析曲線

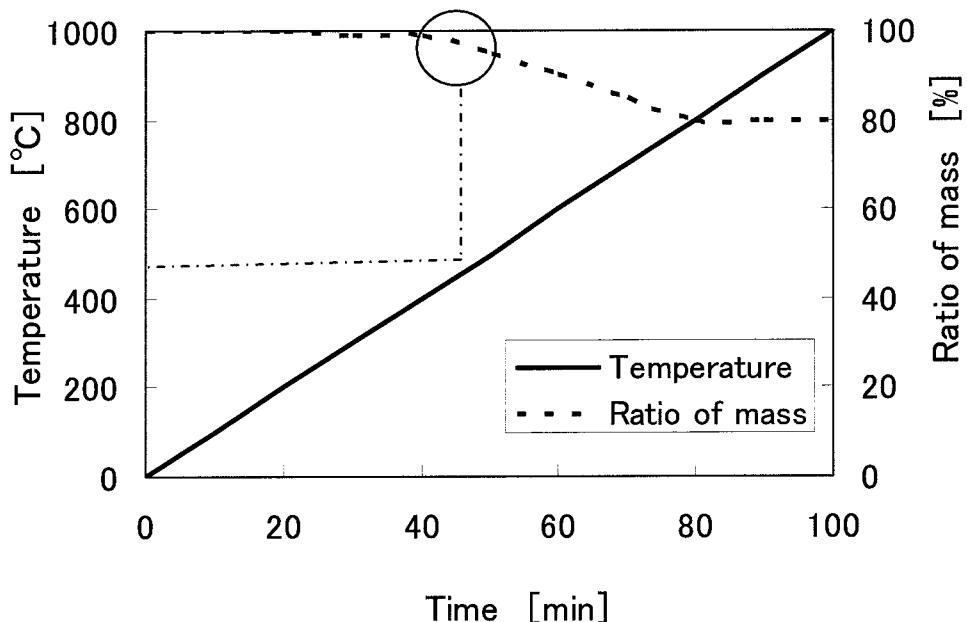


図3 試験液の熱重量測定結果

表3 热重量測定の試験条件

Sample weight [mg]	22.5
Range [μ V]	± 50
Temp.Range [mV]	50
Temp.Rate [°C/min]	10
Gas N ₂ [ml/min]	50
Chart speed [mm/min]	5

表4 試験片の化学成分

(mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304	0.05	0.33	1.76	0.36	0.22	8.49	18.18

表5 試験片の機械的性質

Tensile strength [MPa]	HB	HV
672	180	189

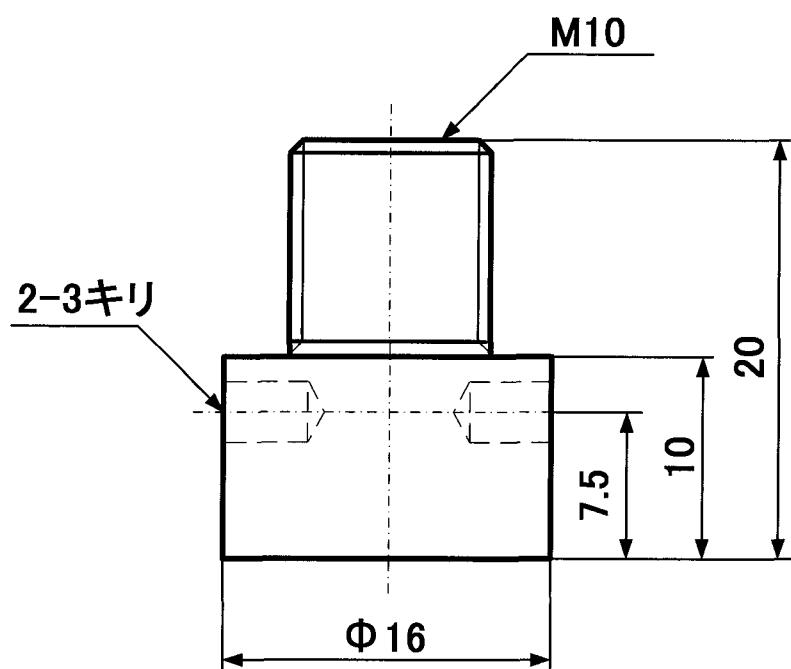


図4 試験片の形状

2.2 試験装置の開発

今回開発した液体金属用キャビテーション壊食試験装置の概略図を図 5 に示す。試験装置は ASTM G32-03⁽⁷⁾にて設定されている超音波振動装置と液体金属を一定の温度に保持する恒温液槽から構成される。試験液から振動装置への熱の影響を防ぐために振動ホーン取り付け部に銅管を巻きつけ、冷却材を流した。恒温液槽は、室温から 150°C の温度範囲で試験できるよう 0.8ℓ のステンレス製ビーカと 300W のマントルヒータ（アスワン製 型式 HB10001）を用いた。試験液の温度制御は、ビーカ内の試験液中に熱電対を設置し、試験液が所定の温度に保持できるようヒータの電源を ON-OFF 制御した。図 6 はキャビテーション壊食試験を振幅 50 μm、初期温度 100°C で行った場合の試験液の温度変化である。試験液は試験片の振動によって 1 分間に約 4°C ずつ温度が上昇する。これは振動子からの振動エネルギーが熱エネルギーに変換されたために生ずるもので、試験液を冷却し、試験温度を一定に保つ必要があった。そこで、試験液槽内部に冷却用として熱伝導性の良い銅管を配置し、試験液温度が上昇すると銅管の先端に取り付けた電磁弁が開いて冷却水が流れる仕組みとした。図 7 に温度制御装置の概略図を示す。

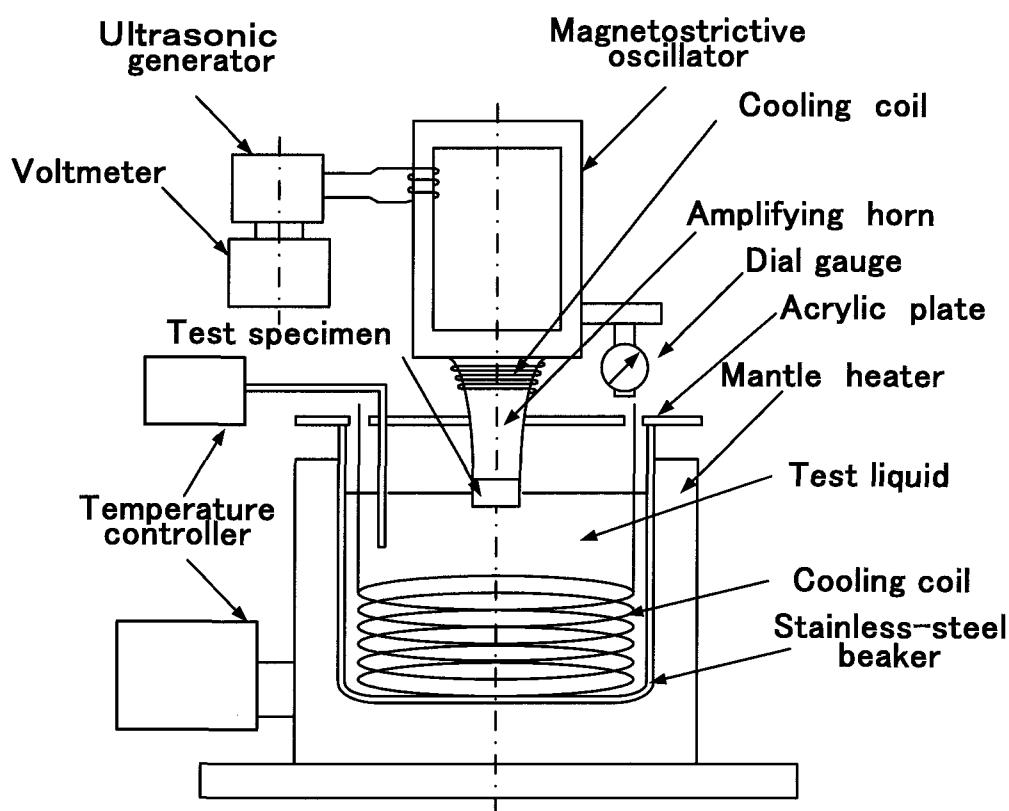


図 5 液体金属用キャビテーション壊食試験装置

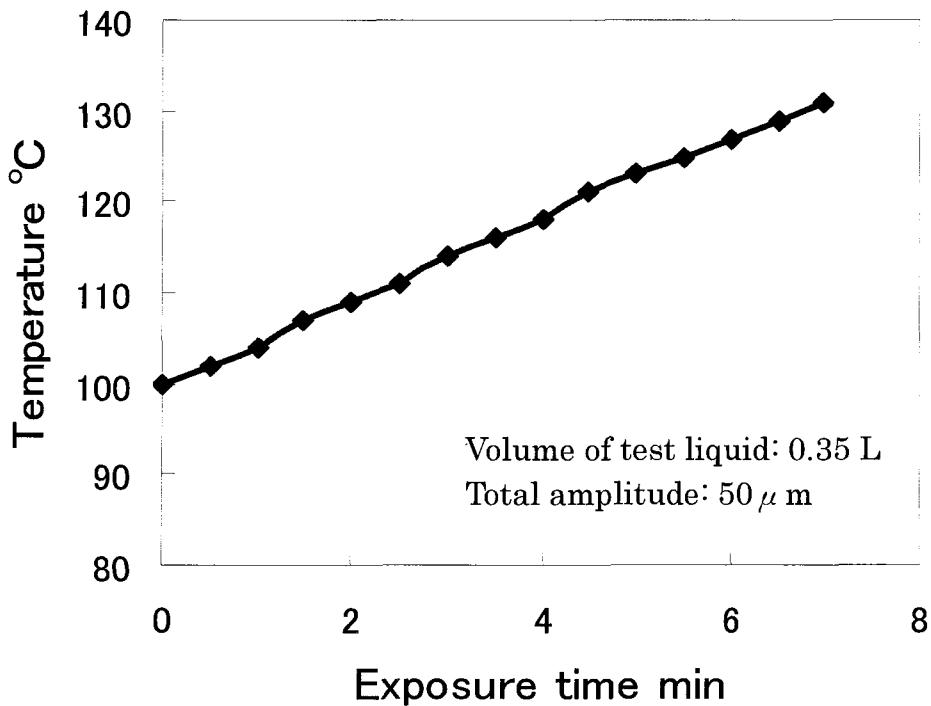


図6 壊食試験における試験液の温度変化(非制御時)

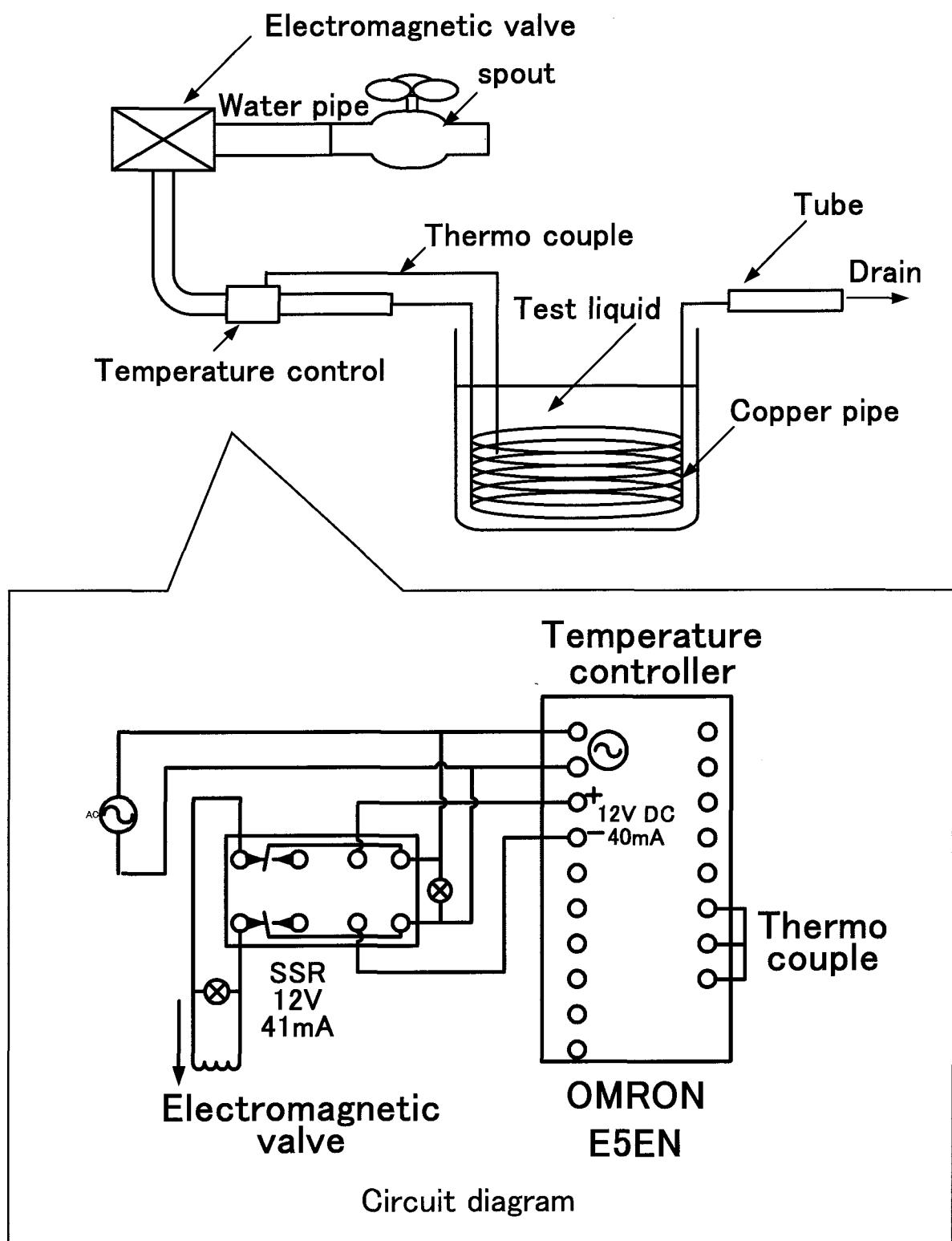


図 7 温度制御装置の概略図

2.3 試験方法

キャビテーション壊食試験は、振動子の増振ホーンの先端に直径 16mm の試験材料のディスクを取り付けて壊食試験を行う振動試験片法で行った。振動子の振動（共振）周波数は 19.5kHz、ディスク端面の全振幅（peak to peak）は $50 \mu\text{m}$ で一定とした。図 8 に試験装置の電圧と振動振幅の関係を示す。試験液は液体状融解した鉛・ビスマス合金を用い、液温を 75°C、100°C、150°C、（制御範囲±2°C）とした。図 9 はキャビテーション壊食試験中の各試験温度における試験液の温度変化である。各試験温度ともにほぼ一定値となっており、温度制御できているといえる。また、イオン交換水中の試験は 10°C、25°C、40°C の液温に保って試験を行った。イオン交換水中の試験も鉛・ビスマスと同じ方法で温度制御した。試験片側面には直径 3mm の穴が開いているため、穴に試験液が付着しないように、いずれの液中の試験でも、試験面が液面から約 5mm 浸漬するように設定した。所定時間ごとに試験片を取り出し、液体金属を試験片から取り除くため、沸騰させたイオン交換水中で洗浄した。その後、アセトン中で超音波洗浄し、精密天秤（感度 0.01mg）で質量を測定した。試験結果は質量減少量を材料の密度で除して求めた体積減少量を、壊食面積及び試験時間間隔で除して求められる MDER（平均壊食深さ速度）で整理した。また、壊食面の形状は非接触表面形状測定システム（キーエンス製 LMS-3D：分解能 $0.1 \mu\text{m}$ 、測定間隔 $2.0 \mu\text{m}$ ）で測定した。

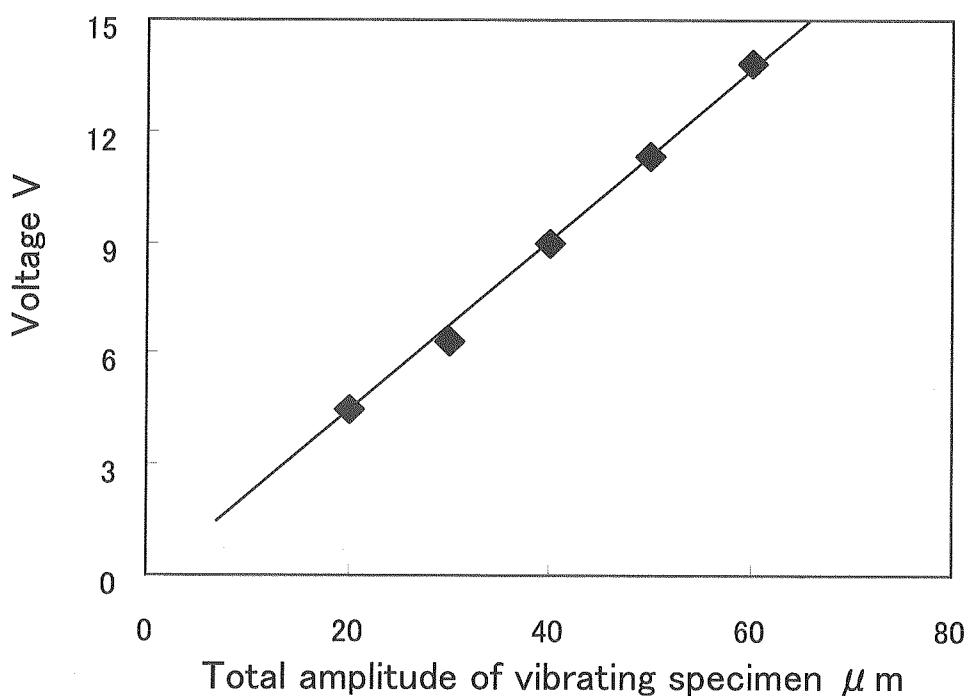


図8 試験片振動の全振幅と電圧の関係

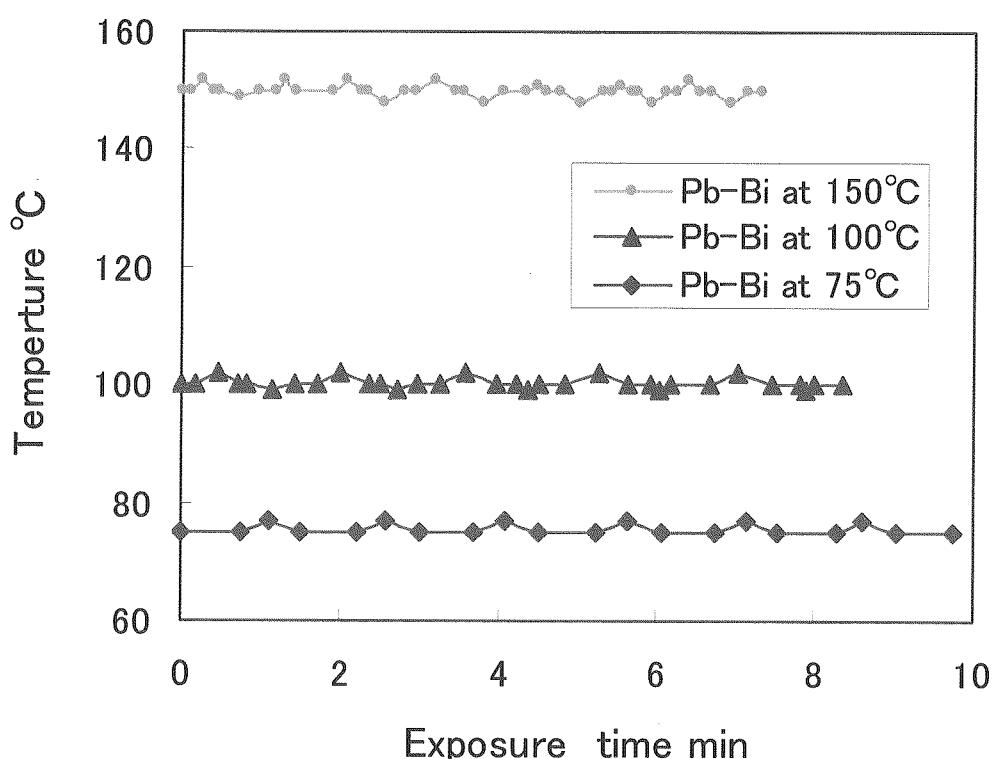


図9 各試験温度における試験液の温度変化

3 試験結果及び考察

3.1 キャビテーション壊食試験結果

図 10 は、各試験温度での低融点合金の鉛・ビスマス中及びイオン交換水中の質量減少量曲線である。両試験液のいずれの温度においても質量減少量が非常に小さい潜伏期の後、壊食が急速に増加する最大速度期に至る。質量減少量曲線の最大勾配部の延長線と時間軸の交点を潜伏期とすると、全ての温度のイオン交換水中及び 75°C、100°C の鉛・ビスマス中では潜伏期間は 1~2 時間であり、150°C の鉛・ビスマス中では 0.5 時間と短くなる。

図 11 は MDER (平均壊食深さ速度) 曲線である。いずれの曲線も初期に MDER が増加した後、一定値もしくは減少する傾向を示す。特に 150°C の鉛・ビスマス中は減少傾向が著しい。これは試験片の凹凸が激しくなって、凹凸の底面に気泡が滞留してクッション効果が生じ、気泡崩壊時の衝撃力が小さくなつたために生じたものと考えられる。また、MDER 曲線のピーク値を MDERmax とすると、鉛・ビスマス中での MDERmax は 24~82 μm となりイオン交換水中の 6~12 μm に比べて、壊食速度が極めて大きいことが分かる。また、ピーク値が大きくなるほど、ピークに至る時間が短くなる。

図 12 は 25°C のイオン交換水中及び 150°C の鉛・ビスマス中の試験終了後（それぞれ 10 時間後及び 5 時間後）の試験片表面を写真撮影したものである。イオン交換水中の壊食面は試験片の外周から約 1mm がほとんど壊食されておらず、その内部は一様に壊食している。一方、150°C の鉛・ビスマス中では全面にわたつて激しく壊食しており、イオン交換水中のような試験片周辺の非壊食領域が見られない。これは、イオン交換水中では試験片の振動による空気の巻き込みによって壊食面の外周部に空気によるクッション効果が存在するのに対して、液体金属では空気含有量がほとんど零に近い状態⁽⁴⁾であるためイオン交換水中のようなクッション効果が存在しなかつたためであると考えられる。また、液体金属中で壊食が激しくなることは、Young らのナトリウム中の試験結果⁽⁵⁾と一致している。

図 13 は、試験前の表面形状と 25°C のイオン交換水中及び 150°C の鉛・ビスマス中で約 100mg の質量減少量を示した時点での壊食面形状である。イオン交換水中では図 12 のマクロ写真に一致して両端に非壊食部が存在し、その周辺の局所的に深い部分を除いて一様に壊食する。一方、150°C の鉛・ビスマス中では、両端の非壊食部分がないので、処女面からどの程度の深さに壊食されているのか不明であるが、イオン交換水中に比べ凹凸が激しく、凹凸の差が 120 μm に達するところもある。このように液体金属では試験片の凹凸が激しくなる特徴がある。

両試験液中の壊食試験から得られた MDERmax と試験温度の関係を図 14 に示す。イオン交換水中は 10°C から 40°C の範囲で試験温度の上昇とともに MDERmax は直線的に増加し、また鉛・ビスマス中では 75°C から 150°C の範囲で、イオン交換水よりも急勾配で直線的に増加する傾向が見られる。服部ら⁽⁸⁾は、キャビテーション噴流法を用いて各種のキャビテーション数下で水道水中の壊食速度に及ぼす液温の影響について検討した。種々のキャビテーション数を用いたために、下流圧を上昇させているので 120°C でも沸騰しない条件もあったが、相対温度を使用することにより壊食速度が噴流法と振動法に区別なく整理できることを報告した。そこで本研究でも MDERmax を相対温度で整理した。相対温度は、試験温度が融点と沸点の間のどの位置にあるかを示す指標であり、以下のように定義した。

Relative temperature

$$= \frac{\text{Test temperature} - \text{Freezing point}}{\text{Boiling point} - \text{Freezing point}} \times 100 \quad \dots (1)$$

図 15 は MDERmax を相対温度で整理したものである。図中には、本研究の鉛・ビスマス中及びイオン交換水中の結果のほかに、Thiruvengadam ら⁽³⁾と Young ら⁽⁵⁾のナトリウム中の結果も併せて示した。ナトリウムの物性値を表 6 に示す。

Thiruvengadam ら⁽³⁾は 400°F (204°C) のナトリウム中で SUS316 の試験片（直径 1/2 インチ (12.7mm)）で質量減少速度曲線を得ているので、本研究の試験片直径に換算して MDERmax を求めた。さらに服部らは SUS316 の壊食速度が SUS304 の約 1.5 倍であることを報告している⁽⁹⁾ので、この換算係数を用いて SUS304 の値に換算した。一方、Young ら⁽⁵⁾は Co 基合金 L605 の試験片（直径 14.3mm）を用いて 3 種類の温度のナトリウム中で磁わい振動のキャビテーション壊食試験を行っているが、SUS316 の試験片を用いた試験は 427°C のナトリウム中のみである。この結果を Thiruvengadam らの換算係数を用いて SUS316 の MDERmax を係数 1.5 で除して、SUS304 の結果に換算した。表 7 は、Co 基合金 L605 の結果を SUS304 に変換したものである。図 15 のイオン交換水中は、本研究の結果及び Plesset⁽¹⁰⁾の結果を総合すると 50°C 付近でピーケー値を示す山形の曲線になる。また、ナトリウム中でも Young らの結果から同様の山形の曲線になることが分かる。さらに相対温度が 14°C の場合を比較すると、ナトリウム中の MDERmax はイオン交換水中の約 2~5 倍、鉛・ビスマス中は約 10 倍になる。図中にある三角形は MDERmax の温度依存性を示しており、MDERmax はイオン交換水中で $0.15 \mu \text{m}/\text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 、ナトリウム中で $0.59 \mu \text{m}/\text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 、鉛・ビスマス中で $3.1 \mu \text{m}/\text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ となる。液体金属ではイオン交換水に比べて 1°C 当たりの壊食量の増加率が非常に大きいことが分かる。

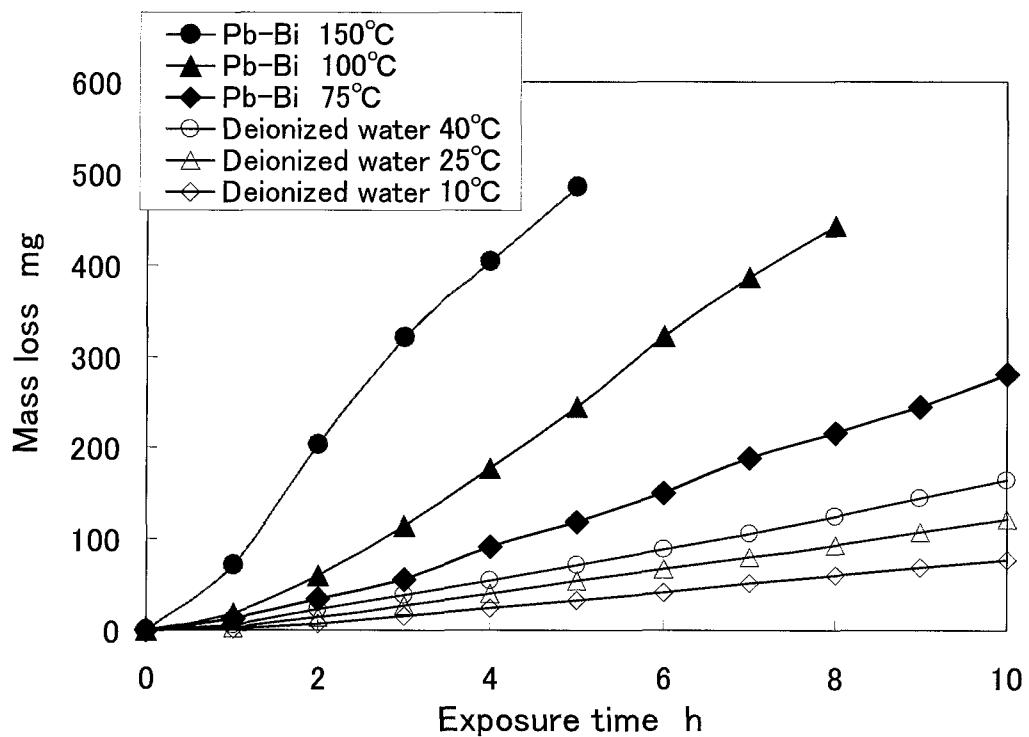


図 10 質量減少量曲線

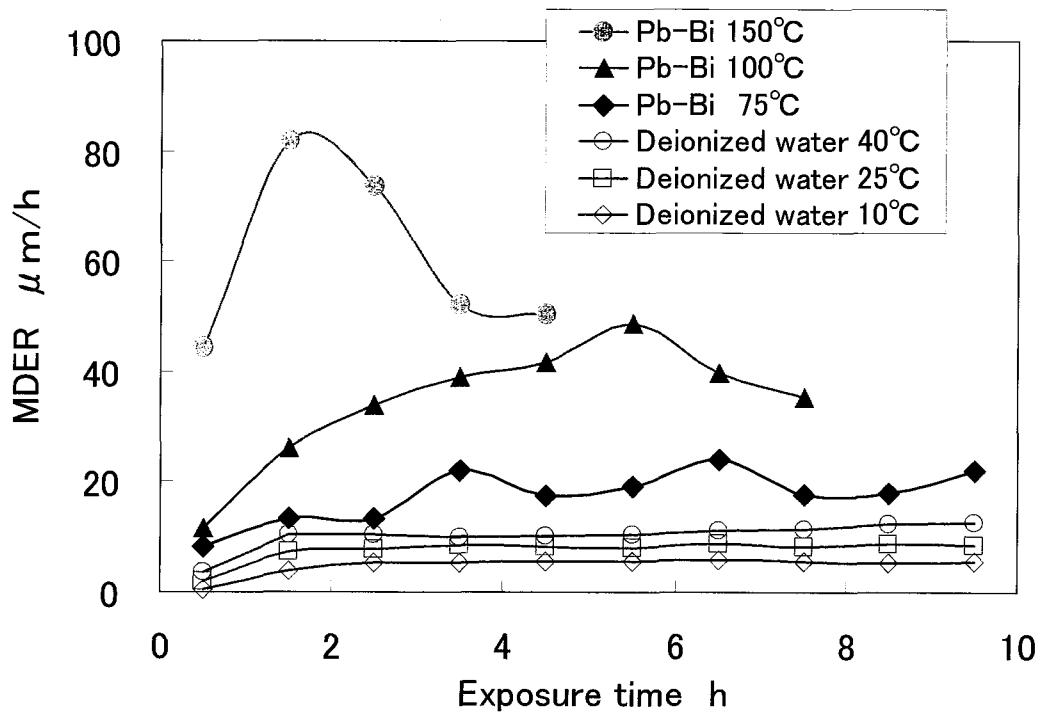
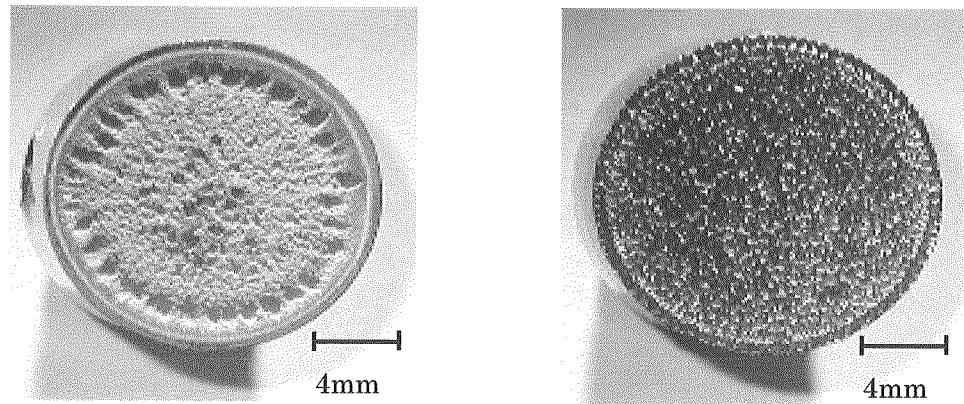


図 11 MDER(平均壊食深さ速度)曲線



(a) 液温25°Cのイオン交換水中 (10h) (b) 液温150°CのPb-Bi中 (5h)

図 12 試験片表面写真

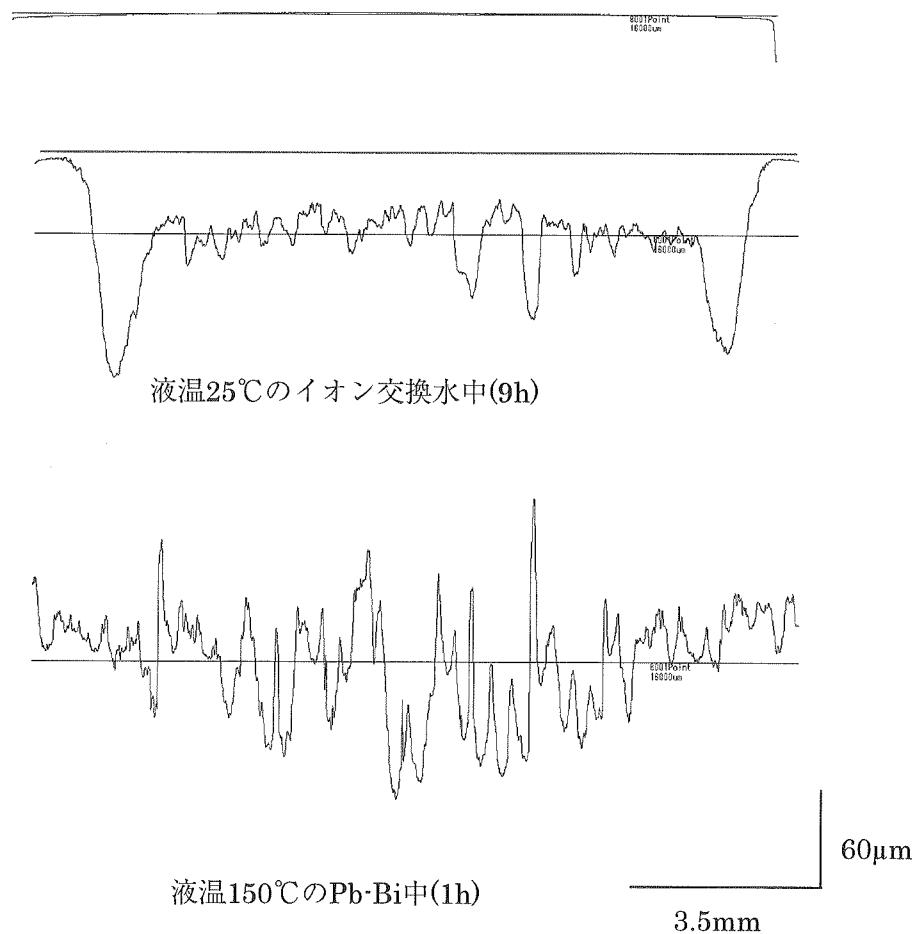


図13 イオン交換水中とPb-Bi中の壞食表面形状(質量減少量約100mg)

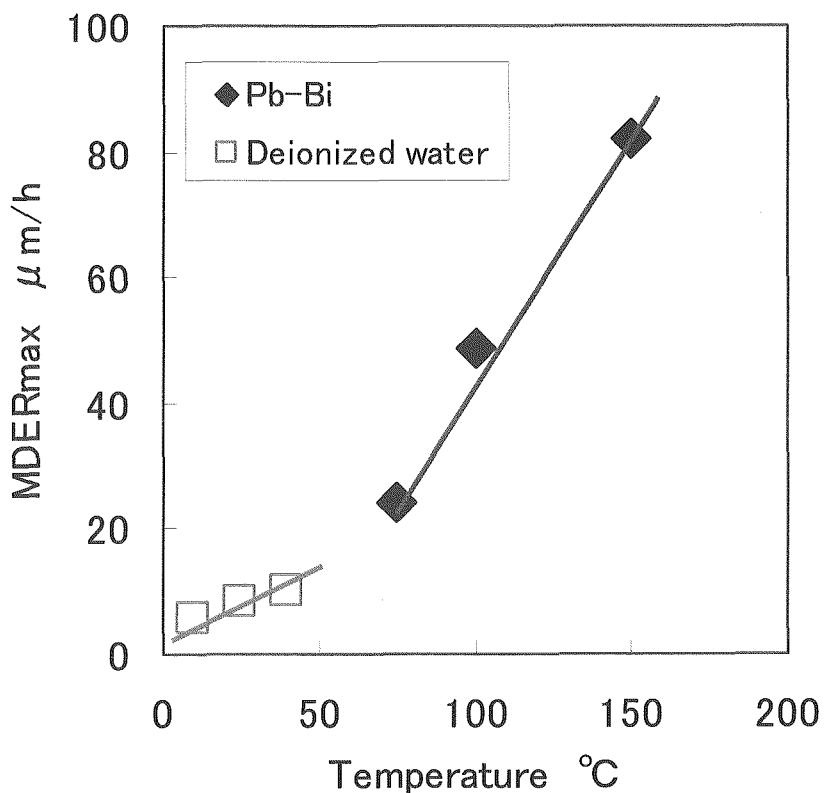


図14 イオン交換水中とPb-Bi中の温度とMDERmaxの関係

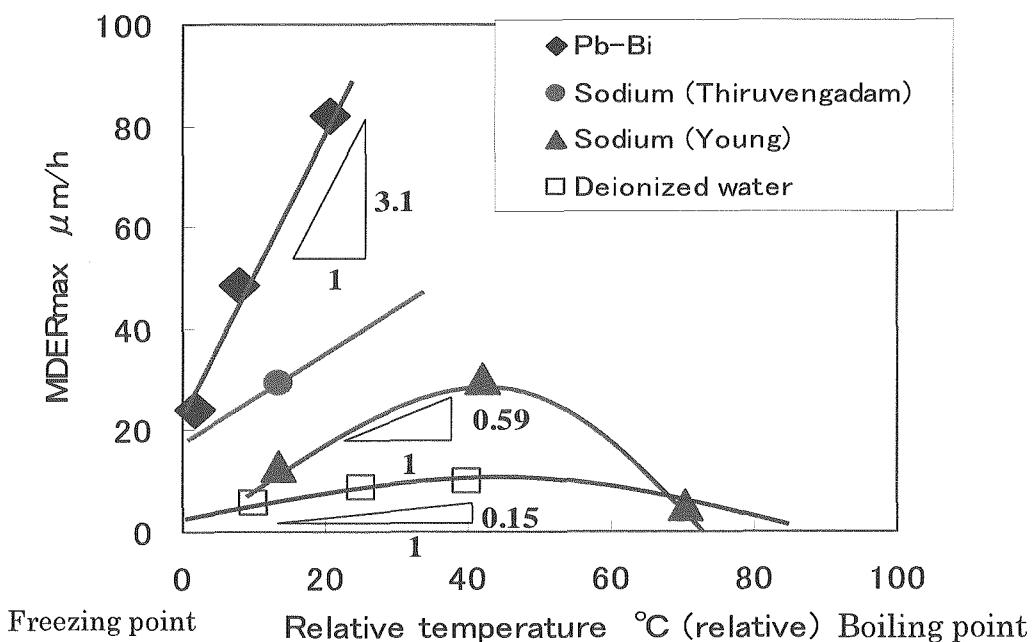


図15 イオン交換水中とPb-Bi中の相対温度とMDERmaxの関係

表6 ナトリウムの物性値

Atomic number	11
Atomic mass	22.9898
Freezing point [°C]	97.82
Boiling point [°C]	881.4
Melting latent heat [kJ/kg]	113.07
Evaporation latent heat [kJ/kg]	3869

表7 Youngらの試験結果の換算MDERmax

Material	Temperature [°C]		
	204 (13.5)	427 (42)	649 (70.3)
L605	11.1	25.6	4.3
SUS304	13.1*	29.9	5.0*

() shows relative temperature.

* obtained by calculation.

3.2 壊食速度に及ぼす液体種類の影響

キャビテーションの発達過程における液体の蒸発には液体の熱力学的性質が関与しており、液体の圧力、温度、潜熱、比熱などが異なれば、キャビテーション気泡の成長や壊食速度に影響すると考えられる。そこで Florschuetz ら⁽¹¹⁾によって考えられた熱力学的效果を示すキャビテーションパラメータ B_{eff} を用いて考察した。 B_{eff} はキャビテーション発達過程における熱伝達の影響も含めた形での熱力学的キャビテーションパラメータであり、以下のように表される。

$$B_{eff} = \left(\frac{\rho_L C_L \Delta T}{\rho_v L} \right)^2 \frac{K_L}{R_0} \left(\frac{\rho_L}{\Delta P} \right)^{1/2} \quad \dots \quad (2)$$

ここで、 ρ_L : 液体の密度 (kg/m^3)、 C_L : 水の音速 (m/s)、 ΔT : 気化による熱温降下 (K)、 ρ_v : 蒸気の密度 (kg/m^3)、 L : 液体の潜熱 (kJ)、 K_L : 液体の熱伝導率 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)、 R_0 : 気泡半径の初期値 (m)、 ΔP : ΔT に伴う液圧の降下 (Pa) である。

Garcia と Hammitt⁽⁴⁾は $B_{eff}=1000$ を境界とし、 $B_{eff}>1000$ では慣性支配、 $B_{eff}<1000$ では熱移動支配となることを報告している。図 16 は Hammitt らが計算した液体金属中の $\log B_{eff}$ と温度の関係である。液体金属類では沸点付近だけが熱移動支配で、それ以外の温度では慣性支配である。よって、図 15 の相対温度 40°C 以下の MDERmax は、液体金属では慣性支配によるものとして検討した。慣性支配における方程式としての Rayleigh-Plesset の方程式⁽¹²⁾を解くと（付録 1 参照）、気泡界面の移動速度 V (m/s) は以下のように導かれる。

$$V = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(P_\infty - P_v)}{\rho_L} \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - 1 \right] + \frac{2\gamma}{R_0 \rho_L} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3} \quad \dots \quad (3)$$

ここで、 V : 気泡界面の移動速度 (m/s)、 P_∞ : 液体の静止圧 (Pa)、 P_v : 液体の蒸気圧 (Pa)、 R : 気泡半径の瞬間値 (m)、 γ : 表面張力 (N/m) である。一方、ウォータハンマによる圧力 p は次式で与えられる⁽¹³⁾。

$$p = \frac{V}{\frac{1}{\rho_L C_L} + \frac{1}{\rho_s C_s}} \quad \dots \quad (4)$$

ここで、 ρ_s 、 C_s はそれぞれ固体の密度 (kg/m^3)、音速 (m/s)、 V は液体の速度 (m/s) を表す。

一般に、固体の音響インピーダンスは液体の音響インピーダンスよりも大きいため (4) は以下のように表される。

$$p = \rho_L C_L V \quad \dots \quad (5)$$

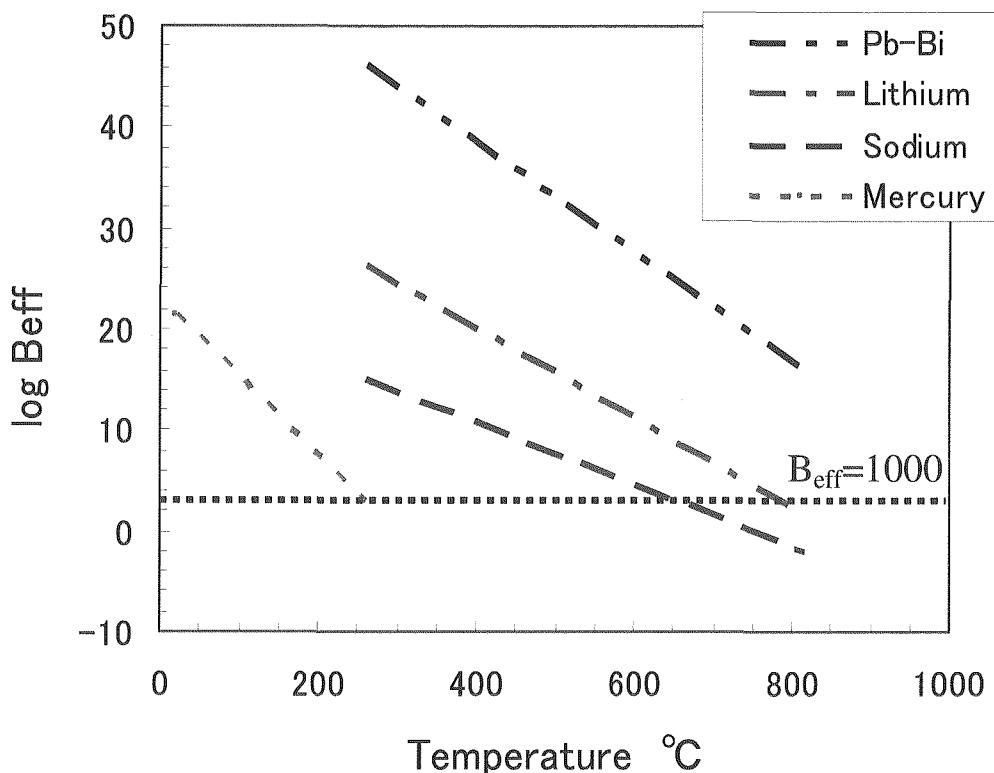
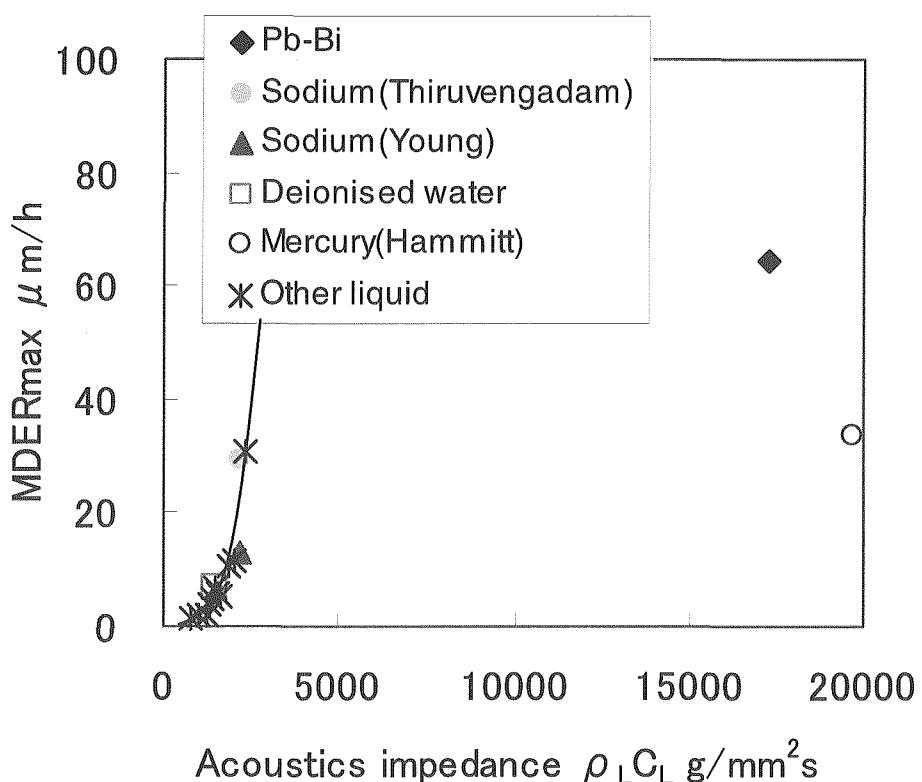
これまで様々な液体中の壊食速度は音響インピーダンス $\rho_L C_L$ に対して指数関数的に増加することが報告されている⁽¹⁴⁾（付録 2 参照）。そのため、液体金属においても音響インピーダンスで壊

食速度を整理した。図 17 は音響インピーダンス $\rho_L C_L$ と MDERmax の関係である。*印でプロットしている他の液体は Wilson ら⁽¹⁴⁾ が行ったヘプタン、ブチルアルコール、ベンゼン、アニソール、アニソン、エチレングリコール、三塩化エタン、四塩化炭素、二臭化エチレン、プロモホルムの結果である。水銀のデータは Garcia と Hammitt の文献⁽⁴⁾から引用した。ナトリウムのデータは従来の結果付近に位置し、指數関数的に増加しているが、鉛・ビスマスや水銀のように $\rho_L C_L$ が著しく大きい液体金属の壞食速度は整理できない。

鉛・ビスマスや水銀のような液体金属では、音響インピーダンス $\rho_L C_L$ が大きいために壞食試験片の SUS304 の音響インピーダンスと同程度になると予想され、(4) 式を使用する必要がある。また、(3) 式では $\sqrt{\cdot}$ 内の各項の分母に ρ_L がある。したがって、液体、固体の密度及び音速が影響を与えるパラメータとしては次式の通りとなる。

$$\frac{I}{\left(\frac{I}{\rho_L C_L} + \frac{I}{\rho_s C_s}\right)\sqrt{\rho_L}} \quad \dots (6)$$

図 18 は、相対温度 14°Cにおける式 (6) と MDERmax の関係である。表 8 は計算に使用した音響インピーダンスと式 (6) の値を取りまとめたものである。このパラメータを使用すると MDERmax が両対数紙上ではほぼ直線で表示でき、壞食速度は式 (6) のパラメータによって整理できることがわかる。

図 16 液体金属中の B_{eff} と温度の関係⁽⁴⁾図 17 音響インピーダンス $\rho_L C_L$ と MDERmax の関係

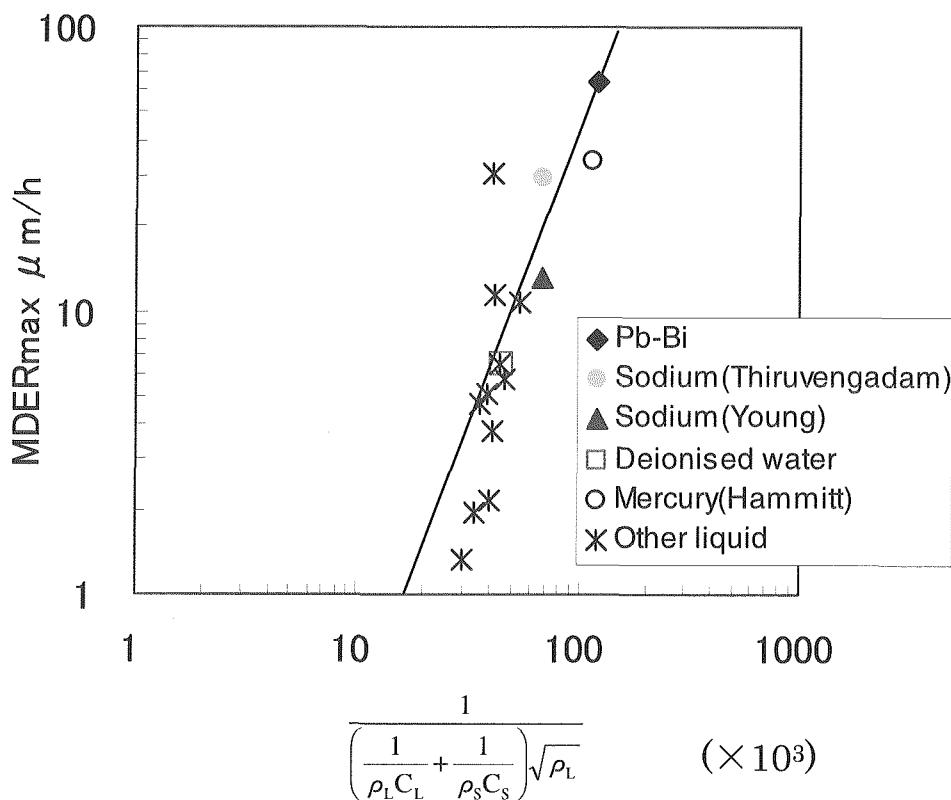
図 18 式(6)と MDER_{max} の関係

表 8 各種液体の物性値と式(6)の値

Liquid	Density [kg/m ³]	acoustic velocity [m/s]	acoustic impedance [g/mm ² s]	$\frac{1}{\left(\frac{1}{\rho_L C_L} + \frac{1}{\rho_S C_S}\right) \sqrt{\rho_L}} (\times 10^3)$	MDER _{max} [μm/h]
Pb-Bi	9380	1693	15880	117.8	64.33
Sodium	891	2440	2175	69.0	13.1
Sodium	891	2440	2175	69.0	29.1
Deionised water	998	1486	1483	45.0	6.55
Mercury	13546	1451.4	19660	114.0	33.6
SUS304(specimen)	7800	5188	40466		

3.3 壊食速度の温度依存性に及ぼす液体因子の影響

液体金属とイオン交換水での壊食速度の温度依存性の違いを考察するため、キャビテーション壊食に影響する液体因子について検討した。因子としては、表面張力、粘性係数、飽和蒸気圧などが挙げられる。鉛・ビスマスの物性値は極めて少ないために、イオン交換水とナトリウムの物性値⁽¹⁵⁾で検討した。

図19はナトリウムと水の表面張力と相対温度の関係を示したものである。両試験液とも相対温度が上がるにつれて表面張力が減少する。(3)式において表面張力 γ が小さい場合、気泡壁面の移動速度 V が低下して衝撃力が小さくなり、壊食速度が低下すると予想される。しかし、本研究の温度依存性とは逆の傾向であるので、表面張力はあまり温度依存性に影響していないものと考えられる。

図20はナトリウムと水の粘度と相対温度の関係を示したものである。ナトリウムの粘度はイオン交換水よりも小さいため、粘性の影響はないと考えられる。また、鉛・ビスマス合金中の各種の温度で粘性の変化によって試験片の振動振幅が変化するか実験を行ったが、ほとんど変化しなかった。よって、粘性の影響は小さいものと思われる(付録3参照)。

最後に、飽和蒸気圧 p_v の影響について考察した。飽和蒸気圧は気泡密度に影響することがこれまでに報告されている⁽⁴⁾。相対温度14°Cでの飽和蒸気圧を1とし、相対温度14~30°Cまでの飽和蒸気圧の対数紙上で整理した。図21にナトリウムと水の相対飽和蒸気圧と相対温度の関係を示す。飽和蒸気圧と温度の近似式⁽¹⁶⁾から、沸点近傍のみを考慮すると、飽和蒸気圧 p_v と相対温度 t の関係は次式で与えられる(付録4参照)。

$$\log p_v = a + ct \quad \dots (7)$$

ここで a 、 c は定数である。そのため、相対飽和蒸気圧を対数として整理したもので、ナトリウムの傾きはイオン交換水に比べ約5倍である。この結果は図15の傾向と符合しており、壊食速度の温度依存性は液体の飽和蒸気圧によるものと考えられる。

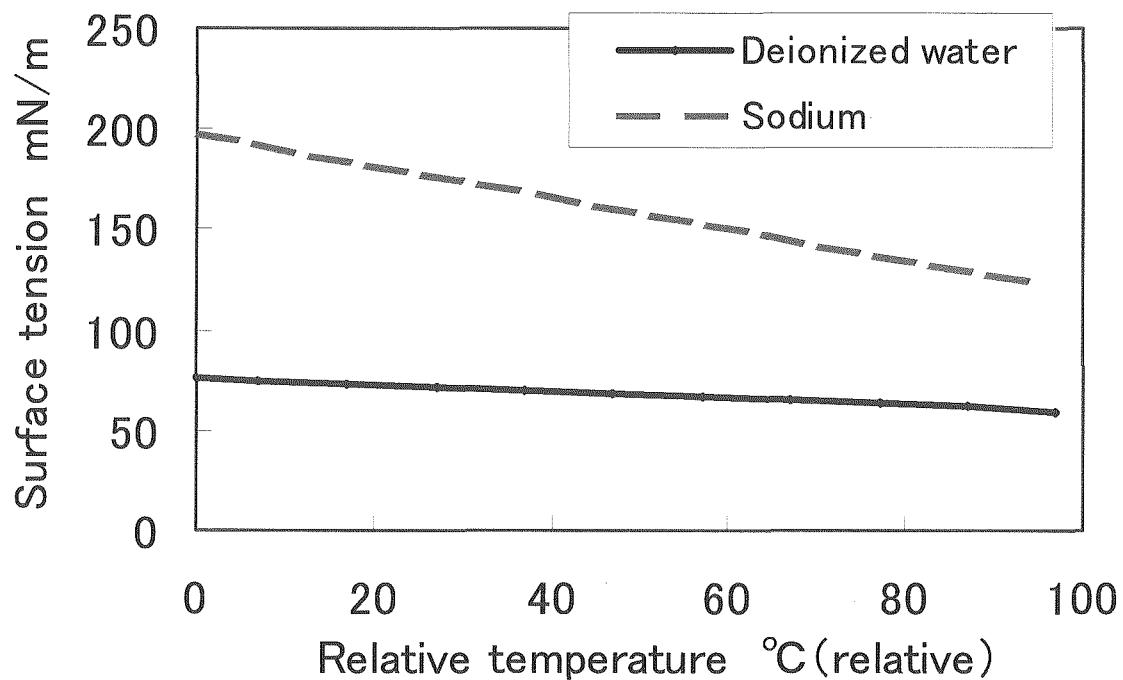


図 19 ナトリウムと水の相対温度と表面張力の関係

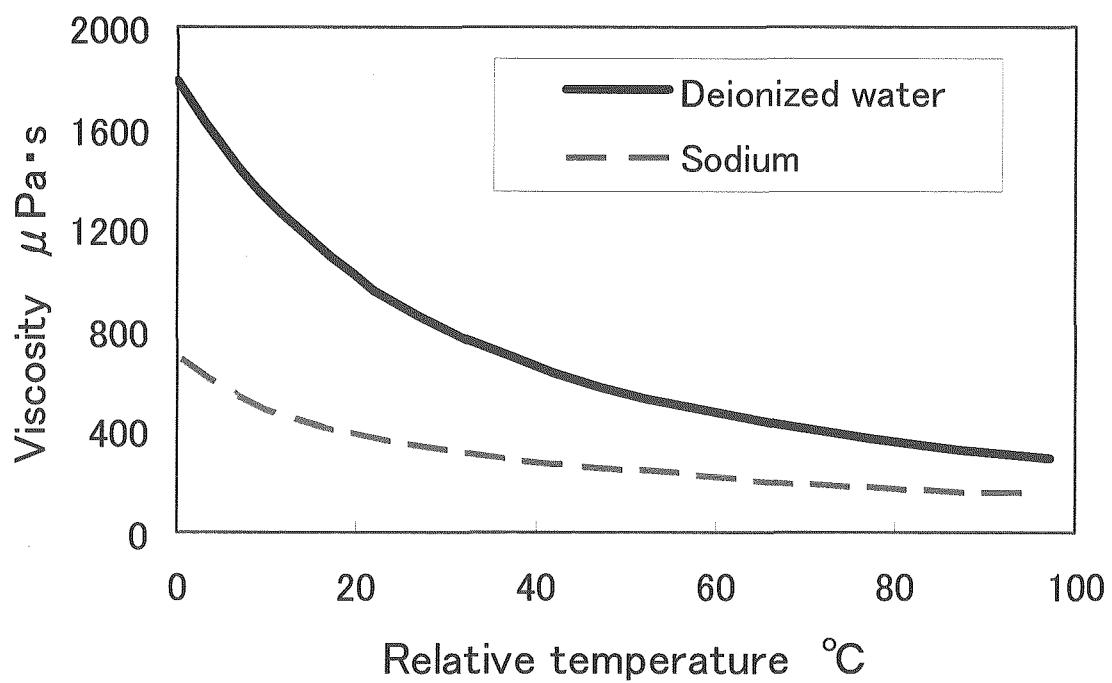


図 20 ナトリウムと水の相対温度と粘性の関係

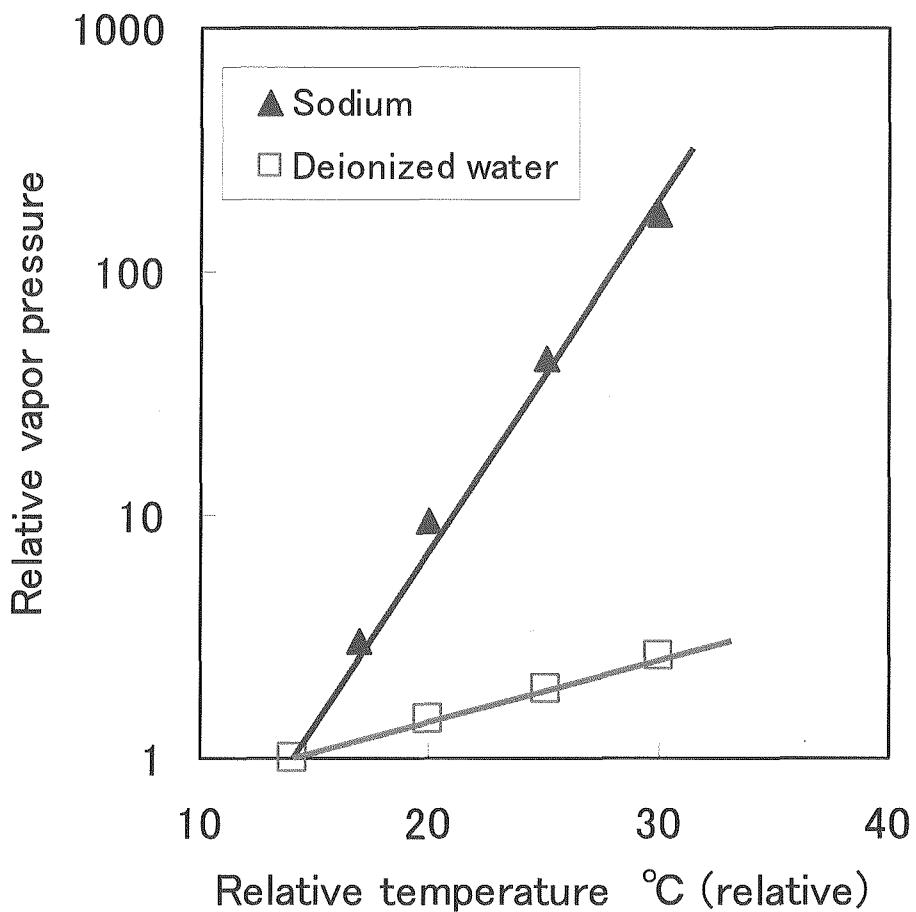


図 21 ナトリウムと水の相対温度と相対飽和蒸気圧の関係

4. 結言

本研究では、低融点合金用のキャビテーション壊食試験装置を開発し、鉛・ビスマスの液体金属中とイオン交換水中で壊食試験を行い、壊食速度に及ぼす液体種類の影響及び温度依存性について検討した。本研究の結果として、下記の成果を得た。

- (1) 液体金属用に室温から 150°Cまで実験可能な磁わい振動の壊食試験装置を開発した。
- (2) 試験温度を融点と沸点の間を百分率で定義した相対温度で壊食速度を整理したところ、相対温度が 14°Cにおける鉛・ビスマス中の壊食速度はイオン交換水中に比べて約 10 倍、ナトリウム中では約 2~5 倍である。
- (3) 液体種類による壊食速度の影響を検討したところ、液体の相対温度が 14°Cのとき、次式のパラメータにより評価できる。

$$\frac{I}{\left(\frac{I}{\rho_L C_L} + \frac{I}{\rho_s C_s} \right) \sqrt{\rho_L}}$$

ρ 、C は液体の密度及び音速で、添字 L、S は液体及び固体を表す。

- (4) 相対温度 14~30°Cにおける壊食速度增加の温度依存性は、液体の飽和蒸気圧の増加によるものである。

参考文献

- (1) Futakawa, M. et al, "Cavitation erosion in mercury target of spallation neutron source "GS-11-006, Cav2003, Osaka, Japan, November 1-4, (2003).
- (2) Thiruvengadam, A, et al, "Cavitation Damage in Liquid Metals" NASACR-54071, TPR-235-1, HYDRONAUTICS, Incorporated, Laurel, Maryland, April 1964.
- (3) Thiruvengadam, A, et al, "Cavitation Damage in Liquid Metals" NASACR-54459, TPR467-3, HYDRONAUTICS, Incorporated, Laurel, Maryland, 30 June 1965.
- (4) Garcia, R. and Hammitt, F.G, "Cavitation Damage and Correlations with Material and Fluid Properties" Trans. ASME, J. Basic Eng., (1967), pp.753-763.
- (5) Young, S.G and Johnston, J.R., "Effect of Temperature and Pressure on Cavitation Damage in Sodium," ASTM STEP 474, American Society for Testing and Materials, (1970), pp.67-108.
- (6) SAE J417b, Handbook of Japanese Industrial Standards, (2002), pp.1283-1286
- (7) ASTM Designation G32-03, (2003), 106-119, Annual Book of ASTM Standards.
- (8) Hattori, S. et al., "Influence of Temperature on Erosion By a Cavitating Liquid Jet" Wear, Vol.260, No.11-12 (2006), pp.1217-1223.
- (9) Hattori, S., and Ishikura, R. , "Construction of database on Cavitation Erosion and Analyses of stainless Steel Data" Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.71, No.708 (2005), pp.1182-1189.
- (10) Plesset, M.S., "Temperature Effects in Cavitation Damage" Trans. ASME, J.Basic Eng., 94(1972), pp.559-566.
- (11) Frorschuetz, L.W. and Chao, B.T., "On the Mechanics of Vapor Bubble Collapse", Trans. ASME, Ser. C, 87-2 (1965), pp.209-220.
- (12) Rayleigh, L., "On the Pressure Developed in a Liquid during the Collapse of a Spherical Cavity", Phill. Mag. S. 6, 34, 200 (1917), p.94.
- (13) Kato, H., Cavitation, (1999), p.223, Maki-shoten.
- (14) Wilson R.W. and R. Graham, "Cavitation of Metal Surfaces in Contact with Lubricants", Conf. Lubrication and Wear, IME, London (1957) pp.707-712.
- (15) The Japan Society of Mechanical Engineers ed., J.SME Data Handbook: Heat Transfer, (1975), pp.321-322, The Japan Society of Mechanical Engineers.
- (16) Mori, Y. et al., Introduction to Thermodynamics, p.169(1971), Yokendo.

付録

[付録 1] 表面張力を考慮した気泡の成長・崩壊 (Rayleigh-Plesset の方程式⁽¹²⁾)

[付録 2] Willson らによる様々な液体における試験結果

[付録 3] ひずみゲージによる測定

[付録 4] Cox の関係式

[付録 5] 外部発表資料

This is a blank page.

[付録 1] 表面張力を考慮した気泡の成長・崩壊 (Rayleigh-Plesset の方程式⁽¹²⁾)

気泡の成長方程式は

$$\mathbf{R}\ddot{\mathbf{R}} + \frac{3}{2}\dot{\mathbf{R}} = \frac{\mathbf{P} - \mathbf{P}_{\infty}}{\rho} \quad \dots \quad (\text{A1})$$

$$\rho = \mathbf{P}_v - \frac{2\gamma}{R} \quad \text{を代入} \quad \mathbf{R}\ddot{\mathbf{R}} + \frac{3}{2}\dot{\mathbf{R}} = -\frac{2\gamma}{\rho R} + \frac{\mathbf{P} - \mathbf{P}_{\infty}}{\rho}$$

$$\dot{\mathbf{R}} = \mathbf{V} \quad \dots \quad (\text{A2})$$

とおくと

$$\ddot{\mathbf{R}} = \frac{d^2\mathbf{R}}{dt^2} = \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \frac{d\mathbf{V}}{dR} \frac{dR}{dt} = \mathbf{V} \frac{d\mathbf{V}}{dR} \quad \dots \quad (\text{A3})$$

(A2)、(A3) 式を (A1) 式に代入すると

$$RV \frac{dV}{dR} + \frac{3}{2}V^2 + \frac{2\gamma}{\rho R} - \frac{\mathbf{P}_v - \mathbf{P}_{\infty}}{\rho} = 0$$

$$\left(\frac{3}{2}V^2 + \frac{2\gamma}{\rho R} - \frac{\mathbf{P}_v - \mathbf{P}_{\infty}}{\rho} \right) dR + RV dV = 0$$

$$\underbrace{\qquad\qquad\qquad}_{= \mathbf{P}} \quad \underbrace{\qquad\qquad\qquad}_{= \mathbf{Q}} \quad \text{とする} \quad \dots \quad (\text{A4})$$

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial R} - \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial V} = \frac{V - 3V}{RV} = -\frac{2}{R}$$

$$\lambda = e^{-\int \frac{2}{R} dR} = e^{2 \log R} = R^2$$

は (A4) 式の積分因数である。 (A4) 式に R^2 をかけると

$$\left(\frac{3}{2}R^2V^2 + 2\frac{\gamma R}{\rho} - \frac{\mathbf{P}_v - \mathbf{P}_{\infty}}{\rho} R^2 \right) dR - R^3 V dV = 0$$

$$d\left(\frac{1}{2}R^3 V^2 + \frac{\gamma R^2}{\rho} - \frac{\mathbf{P}_v - \mathbf{P}_{\infty}}{\rho} \frac{R^3}{3} \right) = 0$$

$$\frac{1}{2}R^3 V^2 + \frac{\gamma R^2}{\rho} - \frac{\mathbf{P}_v - \mathbf{P}_{\infty}}{\rho} \frac{R^3}{3} = C_1$$

$$\therefore V^2 = \frac{2(P_v - P_\infty)}{3\rho} - \frac{2\gamma}{\rho R} + \frac{2C_1}{R^3}$$

$R = R_0$ のとき $V = 0$ とおいて

$$\begin{aligned} \frac{2(P_v - P_\infty)}{3\rho} - \frac{2\gamma}{R_0} &= -\frac{2C_1}{R_0^3} \quad \therefore C_1 = -\frac{P_v - P_\infty}{3\rho} R_0^3 + \frac{\gamma}{\rho} R_0^2 \\ \therefore V^2 &= \frac{2(P_v - P_\infty)}{3\rho} - \frac{2\gamma}{\rho R} + \frac{2}{R^3} \left(-\frac{P_v - P_\infty}{3\rho} R_0^3 + \frac{\gamma}{\rho} R_0^2 \right) \\ &= \frac{2(P_v - P_\infty)}{3\rho} \left(1 - \frac{R_0^3}{R^3} \right) - \frac{2\gamma}{\rho R^3} (R^2 - R_0^2) \\ &= \frac{2(P_\infty - P_v)}{3\rho} \left(\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right) + \frac{2\gamma}{\rho R^3} (R_0^2 - R^2) \end{aligned}$$

$R \ll R_0$ とすれば

$$V^2 = \frac{2(P_\infty - P_v)}{3\rho} \left(\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right) + \frac{2\gamma R_0^2}{\rho R^3} \quad \dots \quad (A5)$$

$$\therefore V = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(P_\infty - P_v)}{\rho} \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - 1 \right] + \frac{2\gamma}{R_0 \rho} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3} \quad \dots \quad (A6)$$

このときの衝撃圧 P は

$$P = \rho c V = \rho c \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(P_\infty - P_v)}{\rho} \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - 1 \right] + \frac{2\gamma}{R_0 \rho} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3} \quad \dots \quad (A7)$$

となる。ただし c は音速である。

[付録 2] Wilson らによる様々な液体における試験結果

図 付・1 は Wilson らが行った様々な液体中の質量減少量の関係⁽¹⁴⁾である。ヘプタン、ブチルアルコール、ベンゼン、アニソール、アニソン、エチレングリコール、水、三塩化エタン、四塩化炭素、二臭化エチレン、プロモホルムの結果である。表 付・1 は様々な液体の音響インピーダンスと質量減少量の値である。液体の音響インピーダンスが増加するにつれて質量減少量も指数関数的に増加することがわかる。

本研究では MDERmax で整理しているため、図 付・1 の質量減少量を MDERmax に換算した。本研究における水中での MDERmax 値が Wilson らの水中の結果と同一として、各液体と水中の質量減少量の比率から MDERmax に換算した。表 付・2 は様々な液体で換算したときの MDERmax の値である。本章の図 18 に用いた式(6)の値も合わせて示す。

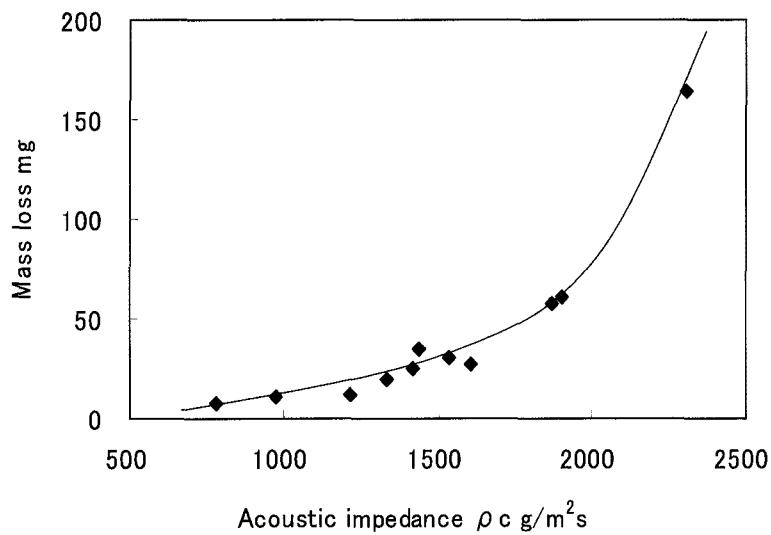


図 付・1 Wilson らによる様々な液体中の音響インピーダンスと質量減少量の関係⁽¹⁴⁾

表付・1 様々な液体中の音響インピーダンスと質量減少量⁽¹⁴⁾

liquid	symbol	mass loss (mg)	ρc (g/m ² s)
Heptane	A	7.09	782
Butyl alcohol	B	10.44	976
Benzene	C	11.49	1216
Anisole	D	19.97	1333
Aniline	E	30.37	1531
Water	F	34.90	1436
Ethylene glycol	G	57.63	1868
Trichloroethane	H	25.15	1418
Carbon tetrachloride	J	27.21	1602
Ethylene dibromide	K	60.46	1905
Bromoform	L	163.74	2303

表付・2 様々な液体中の MDERmax 換算値と式(6)値

liquid	symbol	conversion of MDERmax (μ m/h)	$\left(\frac{1}{\rho_l C_l} + \frac{1}{\rho_s C_s} \right)^{\frac{1}{2}} \rho_l$
Heptane	A	1.34	30
Butyl alcohol	B	1.97	34
Benzene	C	2.17	40
Anisole	D	3.77	41
Aniline	E	5.73	47
Water	F	6.58	44
Ethylene glycol	G	10.87	54
Trichloroethane	H	4.74	36
Carbon tetrachloride	J	5.13	38
Ethylene dibromide	K	11.41	42
Bromoform	L	30.89	41

[付録 3] ひずみゲージによる測定

鉛・ビスマス合金中で粘性による影響があるならば、試験片を試験液に浸漬されて試験を行ったときに振動振幅が変化していると考えられる。よって、ひずみゲージを試験装置の振動ホーンに取り付け、試験片を試験液に浸漬させて壊食試験を行ったときの振動に影響するひずみを直流型動ひずみ測定器((株)東京測器研究所 DC-96A)とオシロスコープを用いて計測した。図 付・2 はひずみゲージの接続方法であり、振動ホーンに対して垂直方向と水平方向に 2 箇所接続する 2 ゲージ法を用いた。A1 ひずみゲージによって振動時のひずみを計測し、D1 ひずみゲージは余計な振動によるひずみを取り除くために取り付けた。ひずみゲージより直流型動ひずみ測定器で計測した波形を、オシロスコープで読み、オシロスコープ上の振幅電圧(振動波形の最大値から最小値までの電圧)をひずみに変換した。試験液は鉛・ビスマス合金 Pb-Bi68 とイオン交換水を用いた。また、試験液に浸漬せずに大気中でも試験を行った。表 付・3 は大気中の全振幅の変化によるひずみである。試験機の振動振幅が大きくなるにつれてひずみが大きくなる。表 付・4 は Pb-Bi68 中とイオン交換水中で振動振幅 $50 \mu\text{m}$ におけるひずみの測定結果である。Pb-Bi68 は 75°C 、 100°C 、 150°C と異なった温度で試験をしてもひずみが等しくなる。イオン交換水中のひずみは Pb-Bi68 中と大気中のひずみと比較すると若干小さい。しかし、影響があると考えられた Pb-Bi68 は大気中のひずみと等しいことから、イオン交換水中のデータは誤差程度であると考えられる。従って、全振幅は温度変化においても、液体の変化においても粘性係数に影響されないと考えられる。

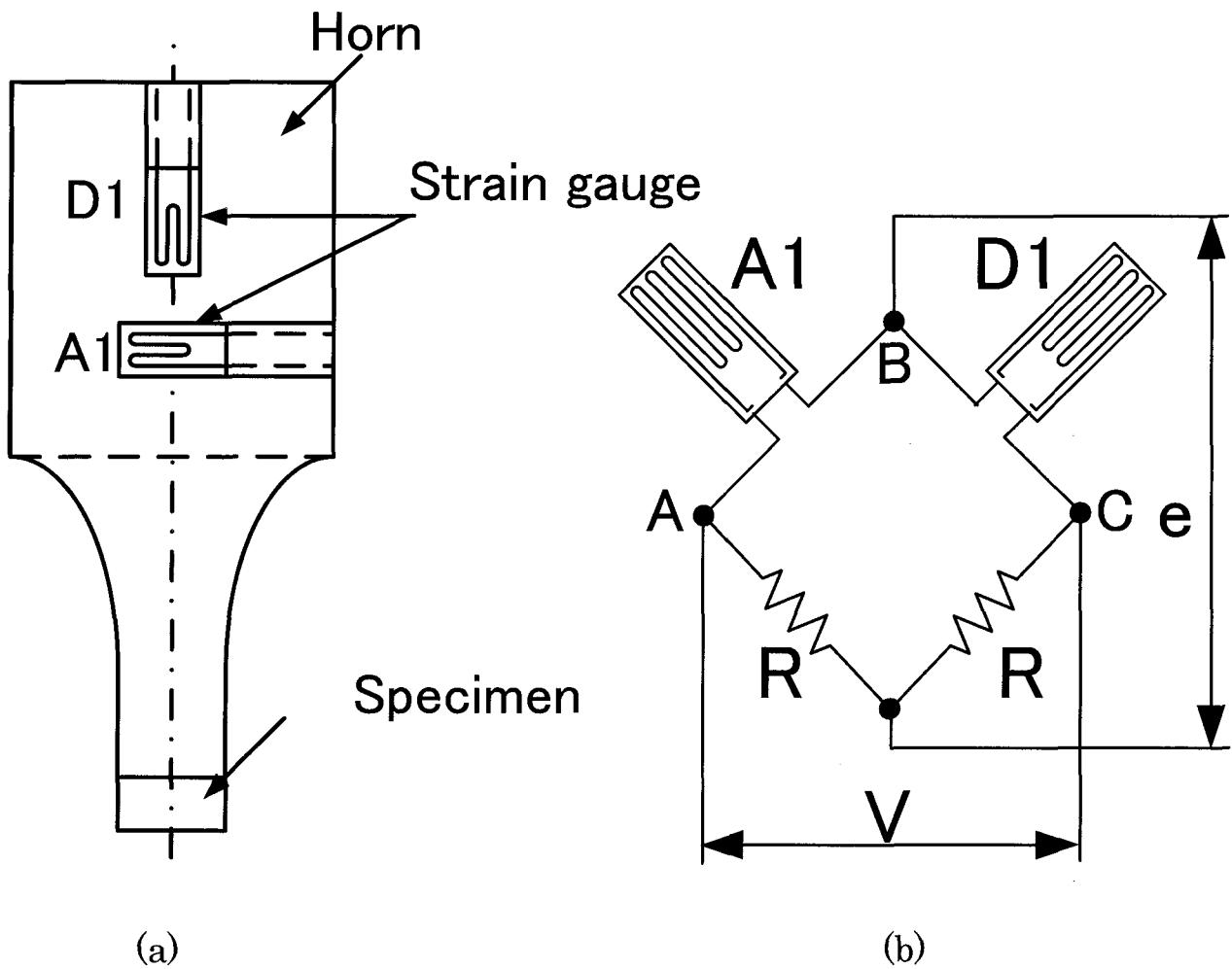


図 付・2 ひずみゲージの接続方法

表付・3 大気中の全振幅の変化によるひずみ

Total amplitude [μm]	Strain [ϵ]
20	0.0022
30	0.0025
40	0.0028
50	0.0038
60	0.0042

表付・4 ひずみゲージの測定結果（全振幅 $50\mu\text{m}$ ）

	Temperature [°C]	Voltage magnitude [V]	Strain [ϵ]
Air	20	3.8	0.0038
Water	25	3.6	0.0036
Pb-Bi68	75	3.8	0.0038
	100	3.8	0.0038
	150	3.8	0.0038

[付録 4] Cox の関係式

Cox の関係式より液体の飽和蒸気圧と温度は以下の式で表される。

$$\log P_v = A - \frac{C}{T} \quad \dots \quad (\text{A8})$$

ここで、 P_v ：飽和蒸気圧(Pa)、 T ：温度(K)、 A 、 C ：定数

温度の単位を K(ケルビン)から摂氏温度 $t(^{\circ}\text{C})$ で表すと

$$\begin{aligned} \log P_v &= A - \frac{C}{273+t} = A - \frac{C}{273} \frac{1}{1 + \frac{t}{273}} \\ &= A - \frac{C}{273} \left(1 - \frac{t}{273} \right) = A - \frac{C}{273} + \frac{C}{273^2} t \quad \dots \quad (\text{A9}) \end{aligned}$$

である。さらに A 、 C は定数であるので、以下の関係式が導かれる。

$$\log p_v = a + ct \quad \dots \quad (\text{A10})$$

ここで、 a 、 c ：定数

[付録 5] 外部発表資料

“液体金属中のキャビテーション壊食に及ぼす液体パラメータの影響”
日本機械学会論文集（A編），73巻726号（2007-2），pp.120-126
(日本機械学会の許可を得て転載)

This is a blank page.

液体金属中のキャビテーション壊食に及ぼす液体パラメータの影響

服部修次^{*1}, 井上文貴^{*2}
渡士克己^{*3}, 橋本貴司^{*3}

Effect of liquid parameters on cavitation erosion in liquid metals

Shuji HATTORI^{*4}, Fumitaka INOUE, Katsumi WATASHI and
Takashi HASHIMOTO

^{*4} Department of Mechanical Engineering, University of Fukui,
3-9-1 Bunkyo, Fukui-shi, Fukui, 910-8507 Japan

A cavitation erosion vibratory apparatus was developed for low-temperature melting alloys. The temperature can be changed from room temperature to 150°C. The erosion tests of SUS304 were carried out in liquid lead-bismuth metal and in deionized water. The erosion rate was parameterized in terms of a relative temperature defined as the percentage between freezing and boiling points. At 14°C relative temperature, the erosion rate was 10 times in lead-bismuth, and 2 to 5 times in sodium, compared with that in deionized water. The erosion rate can be evaluated as a function of material density and sound velocity. Finally, the temperature dependence was discussed in terms of liquid vapor pressure.

Key Words: Cavitation Erosion, Iron and Steel, Cavitation, Liquid Metal

1. 緒 言

液体金属中のキャビテーション壊食に関する研究は、ナトリウムを冷却材とする高速増殖炉の安全性を確認したり、水銀を使用する核破碎中性源ターゲット容器の問題⁽¹⁾を解決する上で非常に重要である。

Thiruvengadam⁽²⁾は磁歪振動装置を用いてナトリウム中の純チタン⁽³⁾と SUS316⁽⁴⁾の壊食速度の温度依存性について検討し、純チタンでは 750°F (399°C) で壊食速度の極大があり、SUS316 では高温になるほど壊食速度が減少する傾向を示すことを報告している。しかし Thiruvengadam の研究では、最終定期の壊食速度を使用していて、ASTM で規定されている壊食速度のピーク値と異なるので、従来の壊食速度と比較できない欠点がある。Garcia と Hammit⁽⁵⁾は、水、水銀、リチウム、鉛ビスマス中で SUS304 の壊食試験を行うと共に、ナトリウムについては Thiruvengadam の試験結果を引用し、260°C のナトリウム中の壊食速度は 18°C の水中に比べて約 9 倍大きいことを報告している。また、液体

金属中の壊食は沸点近傍では熱移動支配であるが、それ以外の温度領域では慣性力支配であることを見出している。Young と Johnston⁽⁶⁾はナトリウム中で圧力と温度を変化させて、コバルト基合金 L-605 の振動キャビテーション壊食試験を行い、壊食速度は圧力の増加と共に増加し、温度依存性については、ある温度で極大があることを示唆しているが、詳細な傾向については明らかにしていない。

本研究では最初に低融点の液体金属中でキャビテーション壊食試験を行うことができるよう試験装置の開発を行った。次いで、鉛ビスマスの液体金属中とイオン交換水で壊食試験を行い、両試験液中の壊食速度の違いについて検討し、壊食速度に及ぼす液体の影響及び壊食速度の温度依存性について考察した。

2. 試験材料および試験方法

2.1 試験材料及び試験装置

試験液は低融点合金の鉛・ビスマス合金及びイオン交換水を使用した。表 1 は本研究に用いた鉛・ビスマス合金の化学成分を示す。鉛・ビスマス系の低融点合金では、Sn,Cd の添加量に応じて融点が 20°C から 180°C まで変化する。今回は凡用材である Sn

* 原稿受付 2006 年 8 月 日

*1 正員、福井大学大学院（〒910-8507 福井市文京 3-9-1）

*2 福井大学大学院（〒910-8507 福井市文京 3-9-1）

*3 原子力研究開発機構（〒919-1279 敦賀市白木 1）

が 13.3%, Cd が 10% 添加されている鉛・ビスマス合金を使用した。表 2 は鉛・ビスマス合金の物理的、機械的性質を示す。融点は、100°C から自然冷却する熱分析曲線において一定温度を示す領域の平坦部の平均温度から求め 68.4°C の結果を得た。一方沸点は熱質量測定から求めた。表中の密度の値から線膨張係数までは製造業者のカタログデータである。

表 3 と表 4 は、キャビテーション壊食試験片に用いたオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 の化学成分と機械的性質を示したものである。高速増殖炉のナトリウム配管では SUS304 が使用されていることを考慮して、本研究でも SUS304 鋼を使用した。ブリネリ硬さは本研究での測定値であり、ピッカース硬さは SAE J417b⁽⁶⁾ の硬さ換算表に基づく換算値である。

図 1 は今回開発した液体金属用キャビテーション壊食試験装置の概略図である。試験装置は ASTMG32-98⁽⁷⁾ に設定されている超音波振動装置と液体金属を一定の温度に保持する恒温液槽から構成される。試験液から振動装置への熱の影響を防ぐために振動ホーン取り付け部に銅管を巻きつけ、冷却水を流した。恒温液槽は、室温から 150°C の温度範囲で試験できるように 0.8L のステンレス製ビーカと 300W のマントルヒータを用いた。試験液の温度制御は、ビーカ内の試験液中に熱電対を設置し、試験液が所定の温度に保持できるようにヒータの電源を ON-OFF 制御した。試験液温度が所定温度に達した後でキャビテ

Table 1 Chemical composition of lead-bismuth alloy (mass%)

Pb-Bi	Bi	Pb	Sn	Cd
	50	26.7	13.3	10

Table 2 Physical and mechanical properties of lead-bismuth alloy

Freezing Point [°C]	68.4
Boiling Point [°C]	460
Density 20°C [g / cm ³]	9.38
Tensile strength [g / cm ²]	421
Brinell hardness	9.20
Conductance [%pure copper]	4.00
Specific heat (fluid) [cal / g / °C]	0.04
Specific heat (vapor) [cal / g / °C]	0.04
Fusion linear thermal [cal / g / °C]	6.67
Coefficient of linear expansion	0.22×10 ⁻⁵

Table 3 Chemical composition of test material (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304	0.05	0.33	1.76	0.36	0.22	8.49	18.18

Table 4 Mechanical properties of test material

Tensile strength [MPa]	HB	HV
672	180	189

ーション壊食試験を開始したところ、試験時間の経過と共に液温が上昇する傾向が見られた。これは振動子からの振動エネルギーが熱エネルギーに変換されたために生ずるもので、試験液を冷却する必要が生じた。そのために、試験液槽内部に冷却用として銅管を配置し、試験液が温度上昇すると銅管の先端に取り付けた電磁弁が開いて冷却水が流れるように温度制御した。

2.2 試験方法

キャビテーション壊食試験は、振動子の増振ホーンの先端に直径 16mm の試験材料のディスクを取り付けて壊食試験を行う振動試験片法で行った。振動子の共振周波数は 19.5kHz、ディスク端面の全振幅 (peak to peak) は 50μm 一定とした。試験液は液体状融解した鉛・ビスマス合金を用い、液温を 75°C、100°C、150°C とした。また、イオン交換水中の試験は 10°C、25°C、40°C の液温に保って試験した。いずれの液中の試験でも、試験面が液面から約 5mm 浸漬するように設定した。所定時間ごとに試験片を取り外し、液体金属を試験片から取り除くため、沸騰させたイオン交換水中で洗浄した。その後、アセトン中で超音波洗浄し、精密天秤で質量を測定した。試験結果は質量減少量を材料の密度で除して求めめた体積減少量を、壊食面積及び試験時間で除して求められる MDER (平均壊食深さ速度) で整理した。

3. 試験結果及び考察

3.1 キャビテーション壊食試験結果

図 2 は、各試験温度での低融点合金鉛・ビスマス

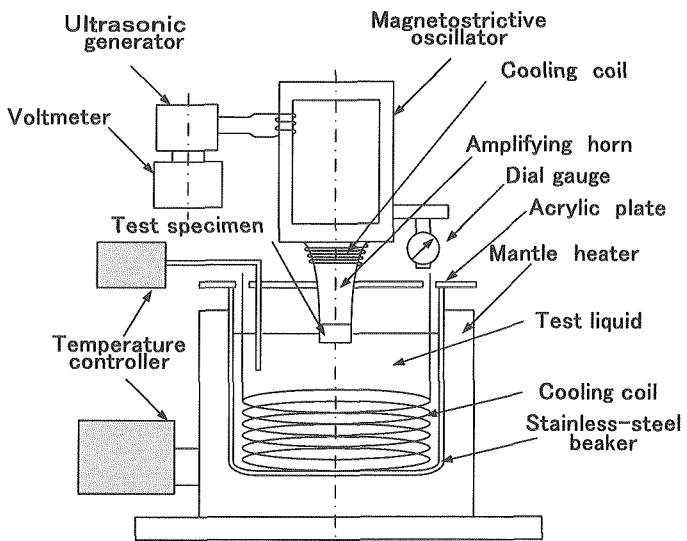


Fig.1 Vibratory apparatus

中及びイオン交換水中の質量減少量曲線である。両試験液のいずれの温度においても質量減少量が非常に小さい潜伏期の後、壊食が急速に増加する最大速度期に至る。質量減少量曲線の最大勾配部の延長線と時間軸の交点を潜伏期間とすると、イオン交換水の全ての温度及び鉛・ビスマス合金の75°C、100°Cでは潜伏期間は1~2時間であり、鉛・ビスマス合金の150°Cでは0.5時間と短くなる。

図3はMDER曲線(平均壊食深さ速度曲線)である。いずれの曲線も初期に急増した後、一定値もしくは減少する傾向を示す。特に鉛・ビスマス合金の150°Cは減少傾向が著しい。これは試験片の凹凸が激しくなって、凹凸の底面に気泡が滞留してクッション効果が生じ、気泡崩壊の衝撃力が小さくなつたために生じたものと考えられる。また、MDER曲線のピーク値をMDERmaxとすると、鉛・ビスマス合金中のMDERmaxは24~82μm/hとなり、イオン交換水中の6~12μm/hに比べて、壊食速度が極めて大きいことが分かる。またピーク値が大きくなるほど、ピークに至る時間が短くなる。

図4は25°Cのイオン交換水中及び150°Cの鉛・ビ

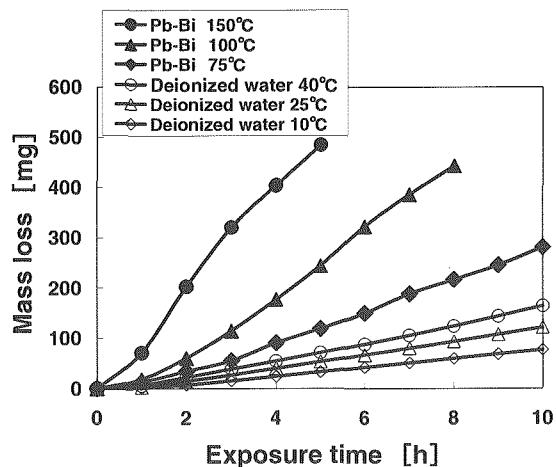


Fig.2 Mass loss curves

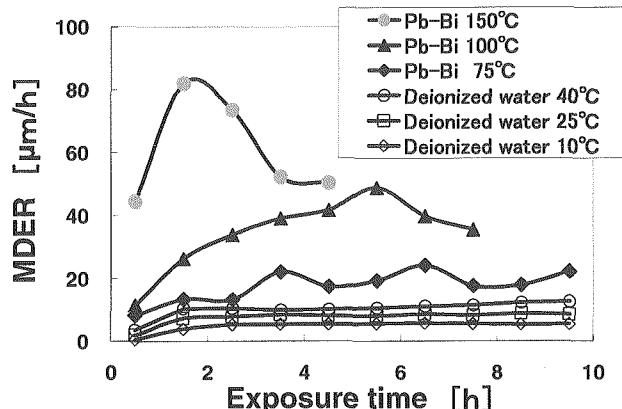


Fig.3 MDER curves

スマス合金中の試験終了後(それぞれ10時間後及び5時間後)の試験片表面を写真撮影したものである。イオン交換水中的壊食面は試験片の外周から約1mmの距離がほとんど壊食されていない領域があり、その内部が一様に壊食している。一方、150°Cの鉛・ビスマス合金中では全面にわたって激しく壊食してイオン交換水中的ような試験片周辺の非壊食域が見られない。これは、イオン交換水中では試験片の振動による空気の巻き込みによって試験片の周辺部に空気によるクッション効果が存在するのにに対して、液体金属では空気含有量がほとんどゼロに近い状態⁽⁴⁾であるのでこのようなクッション効果が存在しなかつたためであると考えられる。また、液体金属中で壊食が激しくなることは、Youngらのナトリウム中の試験結果⁽⁵⁾と一致している。

図5は、25°Cのイオン交換水及び150°Cの鉛・ビスマス中で約100mgの質量減少量を示した時点での壊食面形状である。イオン交換水中では図5のマクロ写真に一致して両端に非壊食部が存在し、そ

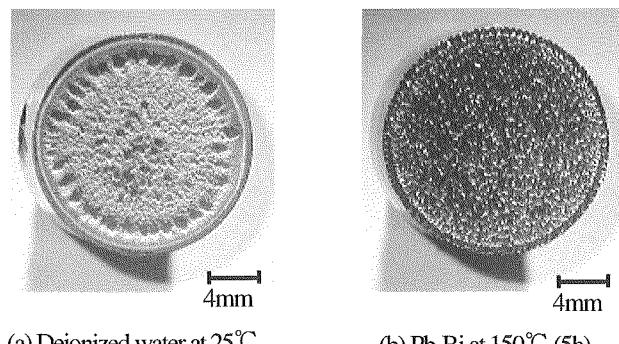


Fig.4 Optical micrographs of eroded surface

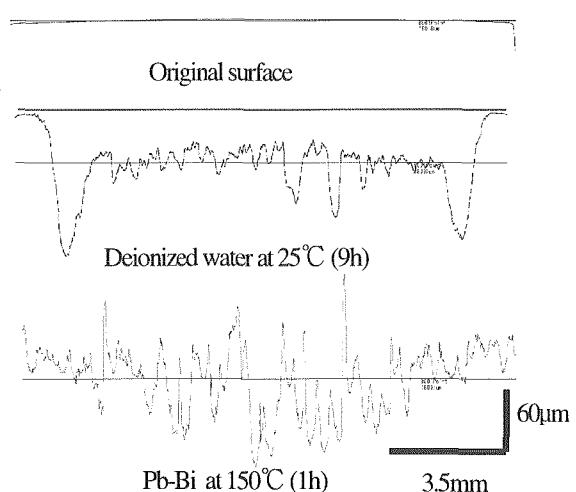


Fig.5 Surface profile in Pb-Bi and deionized water (Mass loss 100mg)

の周辺の局所的に深い部分を除いて一様に壊食する。一方、150°Cの鉛・ビスマス中では、両端の非壊食部がないので、処女面からどの程度の深さに壊食されているのか不明であるが、イオン交換水中に比べ凹凸が激しく、120μmに達するところもある。このように液体金属では試験片の凹凸が激しくなる特徴がある。両試験液中での壊食試験から得られた MDER の最大値 MDERmax と試験温度の関係を図 6 に示す。イオン交換水は 10°Cから 40°Cの範囲で試験温度の上昇とともに MDERmax は直線的に増加し、また鉛・ビスマスでは 75°Cから 150°Cの範囲で、イオン交換水より急勾配で、直線的に増加する傾向が見られる。著者ら^⑨は先に、キャビテーション噴流法を用いて各種のキャビテーション数下で水道水中の壊食速度に及ぼす液温の影響について検討した。種々のキャビテーション数を用いたために、下流圧を上昇させているので 120°Cでも沸騰しない条件もあったが、相対温度を使用することにより壊食速度が噴流法と振動法に区別なく整理できることを報告した。そこで本研究でも MDERmax を

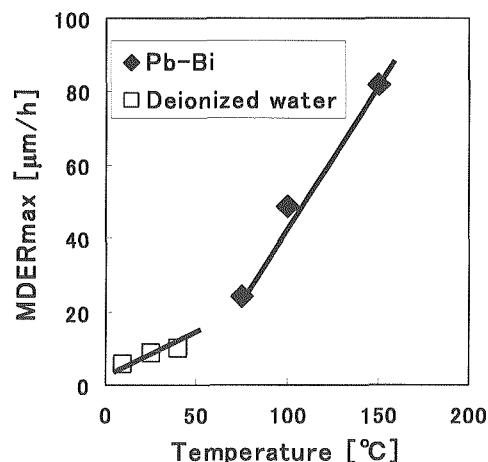


Fig.6 Relation between temperature and MDERmax

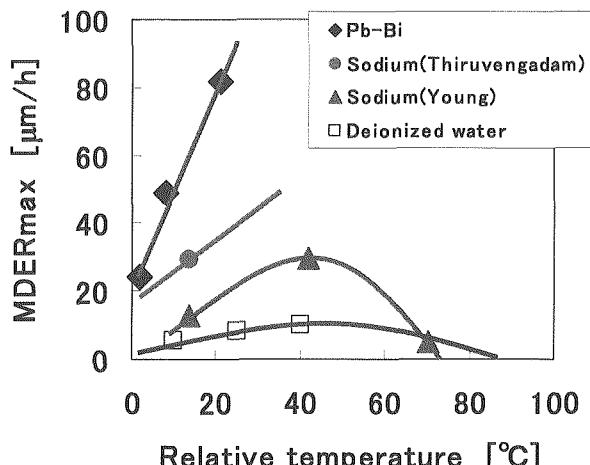


Fig.7 Relation between relative temperature and MDERmax

相対温度で整理した。相対温度は、試験温度が融点と沸点の間のどの位置にあるかを示す指標であり、以下のように定義した。

Relative temperature

$$= \frac{\text{Test temperature} - \text{Freezing point}}{\text{Boiling point} - \text{Freezing point}} \times 100 \quad (1)$$

図 7 は MDERmax を相対温度で整理したものである。図中には、本研究の鉛・ビスマス及びイオン交換水中の結果のほかに、Thiruvengadam^③と Young^⑤のナトリウム中の結果も併せて示した。

Thiruvengadam ら^③は 400°F (204°C) のナトリウム中で SUS316 の試験片(直径 1/2 インチ(12.7mm))で質量減少速度曲線を得ているので、本研究の試験片直径に換算して MDERmax を求めた。さらに、著者らは SUS316 の壊食速度が SUS304 の約 1.5 倍であることを報告している^⑨ので、この換算係数を用いて SUS304 の値に換算した。一方、Young ら^⑤は Co 基合金 L605 の試験片(直径 14.3mm)を用いて 3 種類の温度のナトリウム中で磁わい振動のキャビテーション壊食試験を行っているが SUS316 は 427°C のナトリウム中のみである。さらに、Thiruvengadam らの換算係数を用いて SUS316 の MDERmax を係数 1.5 で除して、SUS304 の結果に換算した。表 5 は、Co 基合金 L605 の結果を SUS304 に換算したものである。図 7 のイオン交換水中は、本研究の結果及び Plesset^⑩の結果を総合すると 50°C付近でピーク値を示す山形の曲線になる。また、ナトリウム中でも Young らの結果から同様の山形の曲線になることがわかる。さらに相対温度が 14°Cの場合を比較すると、ナトリウム中の MDERmax はイオン交換水の約 2~5 倍、鉛・ビスマスは約 10 倍になる。図中にある三角形は MDERmax の温度依存性を示しており、MDERmax はイオン交換水で $0.15\mu\text{m}/\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ 、ナトリウムで $0.59\mu\text{m}/\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ 、鉛・ビスマスで $3.1\mu\text{m}/\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ 上昇する。液体金属ではイオン交換水に比べて 1°C当たりの壊食量の増加率が非常に大きいことがわかる。

Table 5 MDERmax (μm/h)

Material	Temperature [°C]		
	204 (13.5)	427 (42)	649 (70.3)
L605	11.1	25.6	4.3
SUS304	13.1*	29.9	5.0*

() shows relative temperature.

* is obtained by calculation.

3.2 壊食速度に及ぼす液体の影響

Garcia と Hammitt⁽⁴⁾は気泡崩壊時の熱力学的效果を検討し、 $B_{ef} = 1000$ を境界とし、 $B_{ef} > 1000$ では慣性支配、 $B_{ef} < 1000$ では熱移動支配となり、液体金属類では沸点付近だけが熱移動支配で、それ以外の温度では慣性支配であることを報告している。そのため、図7の相対温度 40°C以下のMDERmaxは、液体金属では慣性支配によるものとして検討した。慣性支配における方程式としての Rayleigh-Plesset の方程式⁽¹¹⁾を解くと、気泡壁面の移動速度 V(m/s)は以下のように導かれる。

$$V = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(P_\infty - P_v)}{\rho_L} \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - 1 \right] + \frac{2\gamma}{R_0 \rho_L} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3} \quad (2)$$

ρ_L :液体の密度(kg/m³)、 c_L :液体の音速(m/s)、V:気泡壁面の移動速度(m/s)、 P_∞ :液体の静止圧(Pa)、 P_v :液体の蒸気圧(Pa)、 R_0 :気泡半径の初期値(m)、R:気泡半径の瞬間値(m)、 γ :表面張力(N/m)である。一方、ウォータハンマによる圧力 p は次式で与えられる⁽¹²⁾。

$$p = -\frac{V}{\frac{1}{\rho_L c_L} + \frac{1}{\rho_s c_s}} \quad (3)$$

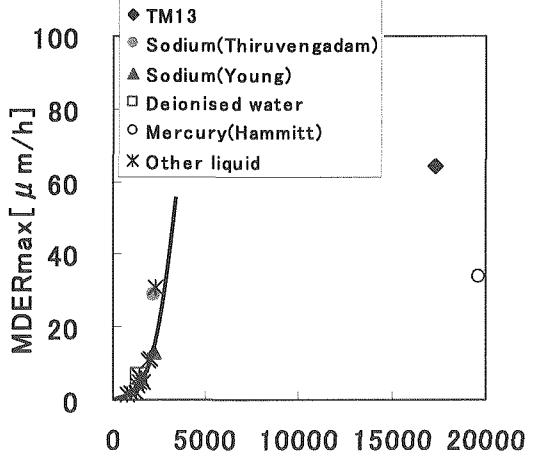


Fig.8 Relation between acoustics impedance and MDERmax

ρ_s, C_s はそれぞれの固体の密度(kg/m³)、音速(/s)、Vは液体の速度(m/s)である。

一般に、固体の音響インピーダンスは液体の音響インピーダンスよりも大きいので(3)式は $P = \rho_L C_L V$ で表示できる。これまで様々な液体中の壊食速度は音響インピーダンス $\rho_L C_L$ に対して指数関数的に増加することが報告されている⁽¹³⁾。そのため、液体金属においても音響インピーダンスで壊食速度を整理した。図8は音響インピーダンス $\rho_L C_L$ と MDERmax の関係である。*印は Wilson ら⁽¹³⁾が行ったヘプタン、ブチルアルコール、ベンゼン、アニソール、アニソン、ニチレンギリコール、三塩化エタン、四塩化炭素、二臭化エチレン、プロモホルムの結果である。水銀のデータは Garcia と Hammitt の文献⁽⁴⁾から引用した。ナトリウムのデータは従来の結果付近に位置し、指数関数的に増加しているが、鉛・ビスマスや水銀のように $\rho_L C_L$ が著しく大きい液体金属の壊食速度は整理できない。

鉛・ビスマスや水銀のような液体金属では、音響インピーダンス $\rho_L C_L$ が大きいために、壊食試験片の SUS304 の音響インピーダンスと同程度になると

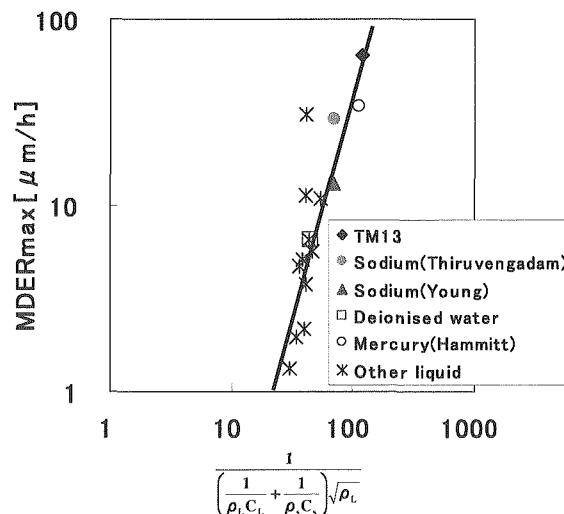


Fig.9 Relation between $1/(1/\rho_L C_L + 1/\rho_s C_s) \sqrt{\rho_L}$ and MDERmax

Table 6 Physical properties of liquids

Liquid	Density [kg/m ³]	acoustic velocity [m/s]	acoustic impedance [g/m ² s]	$\frac{1}{(\frac{1}{\rho_L C_L} + \frac{1}{\rho_s C_s}) \sqrt{\rho_L}}$	MDERmax [μm/h]
Pb-Bi	10209	1693	17284	120	64.33
Sodium	891	2440	2175	69	13.1
Sodium	891	2440	2175	69	29.1
Deionised water	998	1486	1483	45	6.55
Mercury	13546	1451.4	19660	114	33.6
SUS304(specimen)	7800	5188	40466		

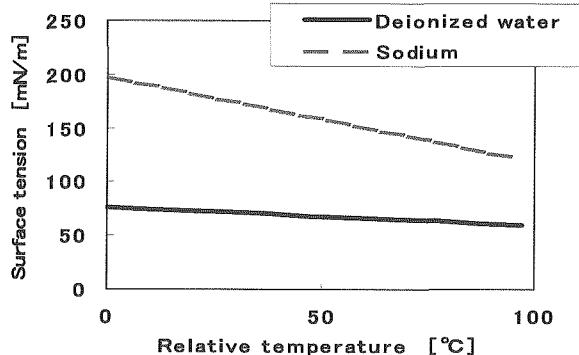


Fig.10 Relation between relative temperature and coefficient of viscosity

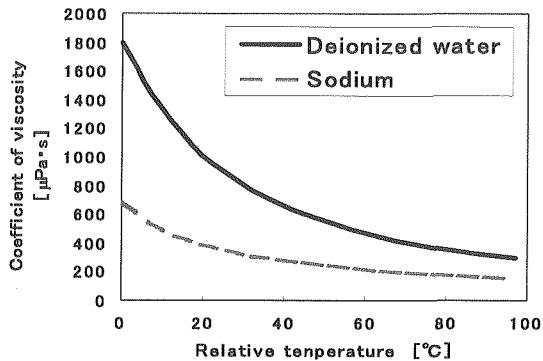


Fig.11 Relation between relative temperature and surface tension

予想され、(3)式を使用する必要がある。また(2)式では $\sqrt{\cdot}$ 内の各項の分母に ρ_L がある。従って、液体及び固体の密度及び音速が影響を与えるパラメータとしては次式の通りとなる。

$$\frac{1}{(1/\rho_L C_L + 1/\rho_s C_s)} \sqrt{\rho_L} \quad (5)$$

図9は相対温度14°Cにおける式(4)とMDERmaxの関係である。表6は計算に使用した音響インピーダンスと式(4)の値を取りまとめたものである。このパラメータを使用するとMDERmaxが両対数でほぼ直線で表示でき、壊食速度は式(4)のパラメータによって整理できることがわかる。

3.3 壊食速度の温度依存性に及ぼす液体因子の影響

液体金属とイオン交換水での壊食速度の温度依存性の違いを考察するため、キャビテーション壊食に影響する液体因子について検討した。因子としては、表面張力、粘性係数、飽和蒸気圧などが挙げられる。鉛・ビスマスの物性値は極めて少ないために、イオン交換水とナトリウムの物性値⁽¹⁴⁾で検討した。

図10はイオン交換水とナトリウムの表面張力と相対温度の関係を示したものである。両試験液とも相対温度が上がるにつれて表面張力が減少する。(2)式では表面張力 γ が小さくVが低下して衝撃力が

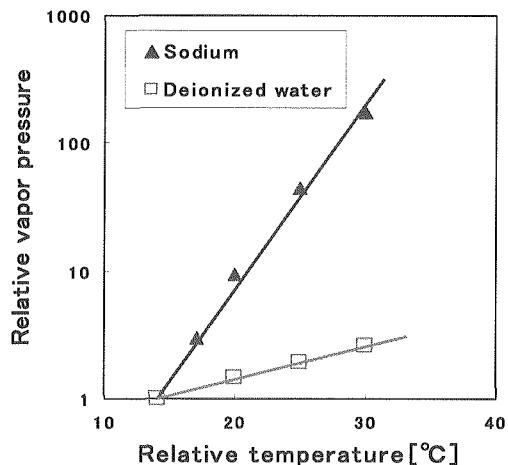


Fig.12 Relation between ratios of vapor pressure and relative temperature

小さくなり壊食速度が低下すると予想される。しかし、本研究の温度依存性とは逆の傾向であるので、表面張力はあまり温度依存性に影響していないものと考えられる。

図11はイオン交換水とナトリウムの粘性係数と相対温度の関係を示したものである。ナトリウムの粘性係数はイオン交換水よりも小さいため、粘性の影響はないと考えられる。また、鉛・ビスマス合金中の各種の温度で粘性の変化によって試験片の振動振幅が変化するかの実験を行ったが、ほとんど変化しなかった。粘性の影響は小さいものと考えられる。

最後に、飽和蒸気圧 p_v の影響について考察した。飽和蒸気圧は気泡密度に影響することがこれまで報告されている⁽⁴⁾。相対温度14°Cでの飽和蒸気圧を1とし、相対温度14~30°Cまでの飽和蒸気圧の対数で整理した。図12にイオン交換水とナトリウムの相対飽和蒸気圧と相対温度の関係を示す。飽和蒸気圧と温度の近似式⁽¹⁵⁾から、融点近傍のみを考慮すると、飽和蒸気圧 p_v と相対温度 t の関係は次式で与えられる。

$$\log p_v = a + ct \quad (5)$$

a, cは定数である。そのため、相対飽和蒸気圧を対数として整理したので、ナトリウムの傾きはイオン交換水に比べ約5倍である。この結果は図8の傾向と符合していて、壊食速度の温度依存性は液体の飽和蒸気圧によるものと考えられる。

4. 結 言

本研究では低融点合金用のキャビテーション壊食試験装置を開発し、鉛・ビスマスの液体金属中とイオン交換水中で壊食試験を行い、壊食速度を検討したところ以下の点が明らかになった。

- (1) 液体金属用に室温から 150°Cまで実験可能な磁歪振動の壊食試験装置を開発した。
- (2) 試験温度を融点と沸点の間を百分率で定義した相対温度で壊食速度を整理したところ、相対温度が 14°Cにおける鉛・ビスマス中の壊食速度はイオン交換水中に比べて約 10 倍、ナトリウム中では 2~5 倍である。
- (3) 液体の相対温度が同一のとき、各種液体の壊食速度は、次式で評価できる。

$$I/(I/\rho_L C_L + I/\rho_s C_s) \sqrt{\rho_L}$$

ρ 、 C は液体の密度及び音速で、添字 L、S は液体および固体を示す。

- (4) 低温側における壊食速度の温度依存性は、液体の飽和蒸気圧の増加に依存する。

文 献

- (1) Futakawa, M. et al, "Cavitation erosion in mercury target of spallation neutron source" GS-11-006, Cav2003, Osaka, Japan, November 1-4, (2003)
- (2) Thiruvengadam, A., et al, "Cavitation Damage in Liquid Metals" NASACR-54071, TPR-235-1, HYDRONAUTICS, Incorporated, Laurel, Maryland, April 1964
- (3) Thiruvengadam, A., et al, "Cavitation Damage in Liquid Metals" NASACR-54459, TPR467-3, HYDRONAUTICS, Incorporated, Laurel, Maryland, 30 June 1965
- (4) Garcia, R. and Hammitt, FG, "Cavitation Damage and Correlations with Material and Fluid Properties" Trans. ASME, J. Basic Eng., (1967), 753-763
- (5) Young, S.G and Johnston, J.R, "Effect of Temperature and Pressure on Cavitation Damage in Sodium," ASTM STEP 474, American Society for Testing and Materials, (1970), pp.67-108
- (6) SAEJ417b, Handbook of Japanese Industrial Standards, (2002), pp1283-1286
- (7) ASTM Designation G32-98, (2000), 107-120, Annual Book of ASTM Standards
- (8) Hattori, S. et al, "Influence of Temperature on Erosion By a Cavitating Liquid Jet" Wear, Vol.260, No.11-12 (2006), pp.1217-1223.
- (9) Hattori, S., and Ishikura, R, "Construction of database on Cavitation Erosion and Analyses of stainless Steel Data" Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.71, No.708 (2005), pp.1182-1189.
- (10) Plesset, M.S., "Temperature Effects in Cavitation Damage" Trans. ASME, J.Basic Eng., 94(1972), 559-566
- (11) Rayleigh, L, "On the Pressure Developed in a Liquid during the Collapse of a Spherical Cavity", Phil. Mag. S. 6, 34, 200 (1917), 94
- (12) Kato, H, Cavitation, (1999), p.223, Maki-shoten
- (13) A Wilson R.W. and R. Graham, "Cavitation of Metal Surfaces in Contact with Lubricants", Conf. Lubrication and Wear, IME, London (1957) 707-712
- (14) The Japan Society of Mechanical Engineers ed, JSME Data Handbook: Heat Transfer, (1975), pp.321-322, The Japan Society of Mechanical Engineers.
- (15) Mori, Y. et al, Introduction to Thermodynamics, p.169 (1971), Yokendo

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位
名称	記号
面積	平方メートル
体積	立方メートル
速度	メートル毎秒
加速度	メートル毎秒毎秒
波数	毎メートル
密度、質量密度	キログラム毎立方メートル
面積密度	キログラム毎平方メートル
比体積	立方メートル毎キログラム
電流密度	アンペア毎平方メートル
磁界の強さ	アンペア毎メートル
量濃度 ^(a)	モル毎立方メートル
質量濃度	キログラム毎立方メートル
輝度	カンデラ毎平方メートル
屈折率 ^(b)	(数字の) 1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1
	1

(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度(substance concentration)とも呼ばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m kg s ⁻²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	m ² kg s ⁻²
仕事率、工率、放射束	ワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	m ² kg s ⁻³
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	シーメンス	S	A/V
磁束密度	ウエーバー	Wb	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	kg s ² A ⁻¹
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	Wb/A
光束度	ルーメン	lm	m ² kg s ⁻² A ⁻²
照度	ルクス	lx	cd sr ^(e)
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	cd
吸収線量、比エネルギー	グレイ	Gy	lm/m ²
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat	s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時は記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。

(c) 激光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の経過についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大さきは同一である。したがって、温差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で“radioactivity”と記される。

(g) 単位シーベルト(PV, 2002, 70, 206)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量、エンタルピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量、比エンタルピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強度	ボルト每メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ A
表面電荷密度	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電束密度、電気変位率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘電率	ファラード每メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁻⁴ A ²
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエンタルピー、モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ⁻² s ⁻³
放射射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール每立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼット	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バル	bar	1 bar=0.1MPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	A	1 A=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バーナー	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパー	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≡ 」は対応関係を示すものである。

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイナ	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マックスウェル	Mx	1 Mx=1G cm ⁻² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe≈(10 ³ /4π)A m ⁻¹

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1868J (15°Cカロリー), 4.1868J (ITカロリー)
ミクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

