熱力学的効果を考慮した銀めっき材料のキャビテーション壊食*

服部 修次^{*1}, 樽谷 佳祐^{*2}, 籠谷 勇^{*2}, 菊田 研吾^{*3}, 都丸 裕司^{*4}

Cavitation Erosion of Silver Plated Coating Considering Thermodynamic Effect

Shuji HATTORI^{*1}, Keisuke TARUYA, Isamu KOMORIYA, Kengo KIKUTA
and Hiroshi TOMARU^{*1}Graduate School of Engineering, University of Fukui,
3-9-1 Bunkyo, Fukui-shi, Fukui, 910-8507 Japan

Cavitation often occurs in inducer pumps of space rockets. Silver plated coating on the inducer liner faces the damage of cavitation. In this study, we carried out cavitation erosion tests using silver plated coatings with different thermodynamic parameter at a constant cavitation number. Then we carried out cavitation erosion tests using some liquid with the same thermodynamic parameter and cavitation number as liquid oxygen condition. Thermodynamic parameter Σ proposed by Brennen was used as a thermodynamic parameter. The fluids used for the cavitation erosion tests were water, ethanol and hexane. We discussed the relation between thermodynamic parameter and mass loss rate, and the relation between acoustic impedance and mass loss rate.

Key Words : Cavitation, Erosion, Inducer, Thermodynamic Parameter, Cavitation Number

1. 結 言

キャビテーション壊食は、気泡崩壊時の衝撃力が材料表面に繰返し作用して材料表面が塑性変形し、き裂が発生、進展して起こる一種の疲労破壊現象である。ポンプやプラント配管、船用プロペラなど液体と接する部材で生じ、機器の性能や寿命低下につながる問題となっている。ロケット用ターボポンプのインデューサでは、キャビテーションが発生することがよく知られている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。上條ら⁽¹⁾は、入口流量係数の変更と昇圧を下げる設計を行ったインデューサにより逆流キャビテーションの発生が抑制され、旋回失速現象が抑制されることを報告している。山田ら⁽²⁾は、ポンプ内部のキャビテーションに起因する事故例や不安定振動などを報告している。内海ら⁽³⁾はロケット用インデューサの羽根とキャビティ形状との関係の解析法を提案している。ロケット用ターボポンプのケーシングとインデューサとのクリアランス部には、高速回転する羽根車と接触しても摩擦面を高温にせず、また接触時の損傷を軽減するために銀めっき等の軟質材料が使用されている^{(4),(5)}。

服部ら⁽⁶⁾は、銀めっき施工後、熱処理なしで実機と同様に表面加工した試験片を用いて、脱イオン水中、液体窒素中、エタノール中で振動試験片法によるキャビテーション壊食試験を行い、壊食挙動に及ぼす試験液や試験温度の影響について検討した。その結果、脱イオン水中では微小な気泡群が下方へすじ状に発生して速く壊食するのにに対し、液体窒素中では水中に比べて大きい気泡が沸き出すように多数発生するが、ほとんど壊食しないことを見出した。液体窒素中でキャビテーション壊食が生じなかった原因は、振動キャビテーション試験の際に生じる運動エネルギーが流体中に熱エネルギーとして伝わることにより、液体窒素の温度が上がり、液体窒素の飽和蒸気圧が上昇したために、試験面周囲の液体が大気圧になっても気体のままで崩壊しなかったことによると考えられるが、この点については未検討である。

* 原稿受付 2012 年 1 月 5 日

^{*1} 正員, フェロー, 福井大学大学院工学研究科 (〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1)^{*2} 福井大学大学院工学研究科^{*3} 正員, (株) IHI^{*4} (株) IHI

E-mail: hattori@u-fukui.ac.jp

一方 Brennen⁽⁷⁾は、流れ中の単一蒸気泡の熱力学により、熱物性のみを抽出した熱力学的パラメータ Σ を導出し、水素、酸素、窒素、水、メタン、フロン⁽⁸⁾の Σ と液温(流体の三重点 T_t と臨界点 T_c で無次元化)の関係について検討している。また、Brennen は Σ の無次元パラメータ Σ^* により、遠心ポンプおよび液体ロケット用インジェクタの揚程低下点におけるキャビテーション数がうまく整理できることを報告⁽⁸⁾している。最近渡邊ら⁽⁹⁾は、キャビテーションの熱力学的効果とその理論解析について解説している。しかし、これらの研究はキャビテーションの発生に及ぼす熱力学的効果を検討したもので、壊食挙動についてはほとんど明らかになっていない。

本研究では、キャビテーション数をほぼ一定にして熱力学的パラメータを変化させたキャビテーション壊食試験を行い、熱力学的効果が壊食にどのように影響するか検討した。具体的には、キャビテーション数がほぼ等しくなるように試験圧力を設定し、脱イオン水とエタノールを使用して異なる数種類の液温で試験を行い、キャビテーション壊食速度と熱力学的パラメータの関係について検討した。また、実機で使用されている 0.3MPa、90K の液体酸素(LOX)の熱力学的パラメータ、キャビテーション数と同等になるように液温と圧力を設定した脱イオン水中、エタノール中、ヘキサン中で試験を行い、壊食速度に及ぼす音響インピーダンスの影響について検討した。

2. 試験材料及び試験方法

試験片は、図 1 に示すように直径 16mm の SUS304 製の振動チップ端面に銀めっきを施したものである。銀めっき厚さは 150~200 μm 、銀の密度は 10.5mg/mm³ である。試験片の素材名、めっきの主成分、母材名、熱処理条件、ビッカース硬さ、表面仕上げを表 1 に示す。熱処理は施しておらず、ビッカース硬さ(HV0.2)は 72.5 である。表面仕上げは製品と同等である。

キャビテーション壊食試験は ASTM G32-03 に規定されている磁わい振動装置(共振周波数 19.5kHz)を用いて振動試験片法で行った。0.6MPa まで加圧可能な試験槽(有宮下製作所製)とマントルヒーター(株AS ONE 製 HB-1000T)を用いて試験液の温度と圧力を調節して試験を行った。試験装置の概略図と概観写真をそれぞれ図 2(a), (b)に示す。温度は、マントルヒーターに温度調節器(株AS ONE 製 TC-2000) を接続して調節した。設定温度で加熱は停止するが、加熱が停止した後もキャビテーションによって液温が上昇するため、加熱が停止した時に冷却コイルに冷水が流れるようにして温度を制御した。温度制御の範囲は設定温度 $\pm 2^\circ\text{C}$ である。圧力は、密閉した試験槽内にコンプレッサーを用いて空気を送り込むことにより設定した。壊食試験は、振動子の先端に試験片を取付け、試験液を所定の圧力に加圧後、設定温度に加熱して開始した。試験片先端の peak-to-peak 振幅は 50 μm 一定とした。

Fig.1 Dimension of specimen

Table 1 Condition of silver plated coating

Designation	Coating metal	Base metal	Heat treatment	HV0.2	Surface finish
C1	Ag	SUS304	None	72.5	Same as the product

Fig.2 Test apparatus

壊食による質量減少量は、精密天秤(感度 0.01mg)で測定した。壊食面の形状は非接触表面形状測定システム(株式会社キーエンス製 LMS-3D: 分解能 0.1 μ m, 測定間隔 2.0 μ m)で測定した。硬さ試験にはショア硬さ計を使用し、銀めっき試験片の温度変化させたときの硬さを測定した。試験片の加熱は、硬さ計の台の上にシリコンラバーヒーターを設置して温度調節器(株式会社AS ONE 製 TC-2000)を接続して一定温度で行った。

3. 試験結果及び考察

3・1 298K, 0.1MPa の脱イオン水を基準にしたキャビテーション壊食試験

本試験では、熱力学的効果が壊食速度に及ぼす影響を検討するために熱力学的パラメータが異なる数種類の液温で試験を行った。熱力学的効果の大きさを表すパラメータには、Brennen⁽⁷⁾が提案している熱力学的パラメータ Σ を用いた。 Σ は液体物性と液温に依存し、次式で表される。

$$\Sigma(T_{\infty}) = (\rho_v L) / (\rho_l c_{pl} T_{\infty} \alpha_l^{1/2}) \quad (1)$$

T_{∞} は試験温度, ρ_v は気体の密度, ρ_l は液体の密度, L は蒸発潜熱, c_{pl} は定圧比熱, α_l は液体の熱拡散率である。

図 3 は、試験液の三重点から臨界点までの熱力学的パラメータ Σ の変化を示した図である⁽¹⁰⁾。各プロット点は、(1)式を用いて計算した点である。いずれの試験液も温度が上昇するに伴って Σ の値は大きくなる。本試験では、比較的試験の容易な脱イオン水とエタノールを使用して壊食試験を行った。

表 2 は、本研究で用いた試験液の種類、試験温度、熱力学的パラメータ Σ 、試験圧力、飽和蒸気圧、液体の密度、キャビテーション数を示したものである。試験条件は、90K の LOX 中($\Sigma=14500$)及び、磁わい振動装置による壊食試験結果が豊富に存在する 298K(25 $^{\circ}$ C)の脱イオン水中($\Sigma=7$)の 2 つを基本条件とした。脱イオン水中では、 $\Sigma=7$ となる 298K(25 $^{\circ}$ C)及び $\Sigma=14500$ となる 401K(128 $^{\circ}$ C)で試験を行った。また、 $\Sigma=7$ と 14500 の間を対数的にほぼ等間隔になるように $\Sigma=100$ と 1028 を設定し、この Σ に対応する 324K(51 $^{\circ}$ C), 352K(79 $^{\circ}$ C)でも試験を行った。エタノール中では、 $\Sigma=14500$ に対応する 354K 及び $\Sigma=225, 1950$ に対応する 303K(30 $^{\circ}$ C), 327K(54 $^{\circ}$ C)で試験を行った。試験圧力は、基本条件の 1 つである大気圧、298K(25 $^{\circ}$ C)の脱イオン水中のキャビテーション数 51.8 と一致するように設定した。キャビテーション数は以下の式で定義した。

$$\sigma = (P - P_v) / (1/2 \rho_l v^2) \quad (2)$$

P は試験圧力, P_v は飽和蒸気圧, v は流速である。振動法で流速を測定することは難しいが、流速は試験端

Fig.3 Thermodynamic parameter Σ

Table 2 Test conditions based on deionized water at 298K

Test liquid	Temperature [K]	Thermodynamic parameter Σ	Test pressure [MPa]	Saturated vapor pressure [MPa]	Liquid density [kg/m³]	Cavitation number
Liquid oxygen	90	14500	—	0.0994	1142	—
Deionized water	298	7	0.101	0.0031	997	51.8
Deionized water	324	100	0.110	0.0129	988	51.8
Deionized water	352	1028	0.141	0.0452	972	51.8
Deionized water	401	14500	0.345	0.2530	937	51.8
Ethanol	303	225	0.101	0.0105	781	61.2
Ethanol	327	1950	0.110	0.0356	760	51.8
Ethanol	354	14500	0.184	0.1120	732	51.8
Ethanol	243	(0.9)	0.101	0.0002	831	63.9

面の振動振幅と振動速度(共振周波数)から求めた($50 \times 10^{-6} \text{m} \times 2 \times 19500 = 1.95 \text{m/s}$). また、いずれのキャビテーション条件下でも流速は等しいと考えると、試験圧力の算出式は以下の式で表される。

$$P_{ex} = (\rho_{l_{ex}} / \rho_l) (P - P_V) + P_{V_{ex}} \quad (3)$$

ex が表記されているものは、実施する試験条件の数値であり、表記されていないものは、基準とする試験条件における数値である。243K、303K のエタノール中における試験では、キャビテーション数を一致させると試験圧力が大気圧を下回るため、大気圧下で試験を行った。

キャビテーション壊食試験を行う前に、試験温度の変化に伴って銀めっき材料の強度が変化するかどうかを確かめるため、母材の SUS304 と銀めっき材の 303K~403K の硬さ測定を行った。SUS304 は耐熱材料であり、303K~403K では硬さは変化しないが、念のため硬さ測定を行った。硬さ測定の結果を図 4 に示す。SUS304 のショア硬さは 303K で 35.5 であり、この値はビッカース硬さでは 236 に相当⁽¹¹⁾し、SUS304 の値としてはほ

Fig. 4 Relation between Shore hardness and temperature

Fig. 5 Mass loss curves of deionized water

Fig. 6 Mass loss curves of ethanol

ば妥当であると考えられる。温度を 20K ずつ上昇させても、ショア硬さは 35~38 の間で、温度が変化してもショア硬さはほとんど変化していない。銀めっき材料の硬さは 303K で 12.3 であり、この値はビッカース硬さでは 73 に相当し、C1 銀めっき材の値としては妥当であると考えられる。温度を 20K ずつ上昇させても、ショア硬さは 11~13 の間で、温度が変化してもショア硬さはほとんど変化していない。そのため、303K~403K のキャビテーション壊食試験では材料特性の温度依存性を考える必要はなく、液体特性の温度依存性のみ考えれば十分である。

図 5 は脱イオン水の各種条件下での累積質量減少量曲線である。脱イオン水の空気飽和度は 92.9% である。いずれの曲線も明瞭な潜伏期は現れておらず、最大速度期は試験直後に現れている。めっき材は軟らかいため、潜伏期が極めて短いと考えられる。298K での試験は、試験開始直後からほぼ直線的に壊食が進み、試験時間が 40 分を過ぎると徐々に壊食速度が小さくなり、1 時間後には質量減少量が 320mg となる。324K での試験もほぼ直線的に壊食が進んでおり、298K での試験より壊食速度が大きい。352K での試験もほぼ直線的に壊食が進んでおり、298K での試験より壊食速度が大きい。401K での試験は、他の試験と比べると壊食速度が著しく小さい。試験開始直後から試験終了までほぼ直線的に壊食が進むが、298K での試験と同じ壊食量に達するまでに約 3 倍の時間を要する。図中の数値は、各曲線の最大速度期の勾配である。

図 6 はエタノール中での質量減少量の曲線である。エタノール中での試験においても明瞭な潜伏期は現れておらず、最大速度期が試験直後に現れている。脱イオン水中での試験と比べると壊食速度が小さく、試験時間が脱イオン水に比べて約 6 倍長くなっている。303K での試験は、試験開始直後が最も壊食速度が大きく、

徐々に壊食速度が小さくなっている。327Kでの試験は、303Kでの試験より壊食速度が小さく、303Kでの試験と同様に試験開始直後が最も壊食速度が大きく、徐々に壊食速度が小さくなっている。354Kでの試験は、327Kでの試験より壊食速度が小さく、試験開始5時間までほぼ直線的に壊食が進むが、試験開始5時間以降は壊食速度が徐々に小さくなり、10時間後には約5mg/hとなっている。その後、壊食速度はほとんど変化せず、ほぼ直線的に壊食が進んでいる。また、243Kでの試験は327Kでの試験とほぼ同じ壊食速度を示している。

図7は、図5、図6の曲線の最大速度期の壊食速度と熱力学的効果の関係を表したものである。一般に揚程低下点におけるキャビテーション数は、熱力学的パラメータ Σ が増加しても一定値のままである⁽⁸⁾が、さらに Σ が増加するとキャビテーション数は低下することが報告されている。Grossら⁽¹²⁾は、液体酸素中でキャビテーション試験を行い $\Sigma=1.5\sim7.0\times10^4\text{ m/s}^{3/2}$ で、Yoshidaらは液体窒素中の $\Sigma=4.7\times10^4\text{ m/s}^{3/2}$ ⁽¹³⁾及び $1.3\sim8.1\times10^4\text{ m/s}^{3/2}$ ⁽¹⁴⁾で、菊田ら⁽¹⁵⁾は液体窒素中の $\Sigma=3.8\times10^4\text{ m/s}^{3/2}$ 及び $1.3\times10^4\text{ m/s}^{3/2}$ で、Francら⁽¹⁶⁾はR114中の $\Sigma=2.4\sim7.1\times10^4\text{ m/s}^{3/2}$ で熱力学的効果が現れることを報告している。本研究では、 Σ が 1×10^2 より大きくなると熱

Fig. 7 Relation between mass loss and thermodynamic parameter Σ

Fig. 8 Relation between mass loss and relative temperature

Fig.9 Eroded surface of test specimens

Fig.10 Surface profile in deionized water

Fig.11 Surface profile in ethanol

力学的効果によって壊食速度が小さくなったものと考えられる．しかし、 $\Sigma=1 \times 10^2$ 以下になると壊食速度が小さくなり、揚程低下点のキャビテーション係数の Σ 依存性の報告⁽⁸⁾とは傾向が異なっている．そのため、相対温度と壊食速度の関係で整理した．相対温度は次式で表される．

$$\text{相対温度} = (\text{試験温度} - \text{融点}) / (\text{沸点} - \text{融点}) \quad (4)$$

この結果を図 8 に示す．図 8 はこれまで報告されている結果⁽¹⁷⁾と類似した曲線になる．これまでの報告⁽¹⁶⁾と同様に相対温度が約 25℃になると、蒸気圧が低くなって気泡数が減少したためであると考えられる．

図 9 は試験前及び試験後の試験面の様子である．処女面は滑らかであり、凹凸は見られない．試験後の試験面は凹凸が激しく、壊食が端面付近で進んでいる．脱イオン水中での試験は、壊食速度が大きいため母材の露出している箇所が多く見られる．エタノール中での試験は、脱イオン水中に比べると壊食は浅いが、端面付近では母材が露出している箇所が見られる．

図 10 は、脱イオン水中で温度と圧力を変化させた場合の表面形状を示したものである．同程度の壊食量で表面形状の違いを比較するため、いずれの図も壊食量は約 150mg である．298K, 0.1MPa の試験は端面付近の壊食が大きく、中心付近はほぼ同じ壊食深さで壊食が進んでいる．324K, 0.11MPa の表面形状と 352K, 0.14MPa の表面形状は類似しており、298K, 0.1MPa の表面形状に比べて壊食の大きい箇所と壊食の小さい箇所が顕著に現れている．401K, 0.35MPa の表面形状では、壊食の大きい箇所と壊食の小さい箇所がさらに顕著になり、壊食の進行が早い箇所では母材が露出し、壊食の進行が遅い箇所はほとんど変化していない．壊食の生じた箇所から徐々に壊食が広がっている．

図 11 は、エタノール中で温度と圧力を変化させた場合の表面形状を示した図である．図 11 も図 10 と同様、壊食量が約 150mg の時の表面形状である．303K, 0.1MPa の試験は端面付近の壊食が大きく、中心付近は壊食の進行にばらつきが見られる．327K, 0.11MPa の表面形状は、303K, 0.1MPa の表面形状と類似しているが中心付近の壊食のばらつきがより顕著である．354K, 0.19MPa の表面形状は、脱イオン水中での 401K, 0.35MPa の表面形状と同様に壊食の進行がはっきりと分かれている．

以上より、熱力学的パラメータ Σ が $100 \text{ m/s}^{3/2}$ 以上になると熱力学的効果が現れて壊食が局所化されて壊食速度が低下することが分かった。しかし、 Σ が $100 \text{ m/s}^{3/2}$ 以下では蒸気圧が低下して気泡数が減少するために壊食速度は小さくなったものと考えられる。

3・2 90K, 0.3MPa の LOX を基準にしたキャビテーション壊食試験

298K, 0.1MPa の脱イオン水を基準にした試験では、LOX 中での圧力の影響を考慮していないので、極低温流体の壊食量を予測するには不十分であると考えられる。本節では、90K で実機に使用されている 0.3MPa の条件での LOX を基準にした。この時のキャビテーション数は 92.4 である。熱力学的パラメータの値は前節と同様にいずれの試験も 14500 である。試験液、試験条件を表 3 に示す。試験液にはヘキサンを追加した。本試験は、LOX 中での条件と同一になるように熱力学的パラメータ及びキャビテーション数を一致するように試験液の液温と加える圧力を調節した。そのため、壊食速度に影響を及ぼすのは、試験液の特性であり、主に音響インピーダンスの違いが壊食速度に影響を及ぼすと考えられる。試験液の音響インピーダンスを表 4 に示す。

図 12 に累積質量減少量曲線を示す。いずれの曲線も明瞭な潜伏期は現れず、試験直後に最大速度期が現れている。脱イオン水中での試験は、試験開始 10 分間で 80mg、その後は 10 分毎に約 50mg 質量減少してほぼ

Table 3 Test conditions based on LOX at 90K

Test liquid	Temperature [K]	Thermodynamic parameter Σ	Test pressure [MPa]	Saturated vapor pressure [MPa]	Cavitation number
Liquid oxygen	90	14500	0.300	0.0994	92.4
Deionized water	401	14500	0.418	0.2530	92.4
Ethanol	354	14500	0.241	0.1120	92.4
Hexane	343	14500	0.213	0.1050	92.4

Table 4 Acoustic impedance of test liquid

Test liquid	Density of liquid [kg/m ³]	Sound velocity [m/s]	Acoustic impedance [kg/(m ² s)]
Liquid oxygen	1142	906	1.03×10^6
Deionized water	937	1508	1.41×10^6
Ethanol	732	1000	0.73×10^6
Hexane	612	868	0.53×10^6

Fig. 12 Mass loss curves

Fig. 13 Relation between mass loss rate and acoustic impedance

Fig. 14 Eroded surface of test specimens

Fig. 15 Surface profile

直線的に壊食が進んでいる。エタノール中での試験は、イオン交換中での試験よりも壊食速度が小さい。試験開始 30 分までは壊食速度が約 40mg/h で壊食が進むが、壊食速度は徐々に小さくなり、2 時間後には約 30mg/h、5 時間後には約 20mg/h となっている。ヘキサン中での試験は、エタノール中での試験よりも壊食速度が小さい。試験開始 5 時間は壊食速度が約 12mg/h で壊食が進むが、その後、壊食速度は徐々に小さくなり 10 時間後には約 5mg/h、20 時間後には約 3mg/h となっている。表 4 の音響インピーダンスと図 12 の試験結果を比較すると、音響インピーダンスが大きいほど壊食速度が大きくなることが分かる。図中の数字は最大速度期の勾配を示している。

図 13 は、各種試験液の壊食速度と音響インピーダンスの関係を示したものである。3 種類の試験液でキャビテーション試験を行った結果、図 13 のように両対数紙上で直線関係が得られる。この直線の傾きは 3.2 であり、Wilson ら⁽¹⁸⁾による質量減少量と音響インピーダンスの関係の傾き 2.8 と類似している。そのため、キャビテーション発生状況を模擬した場合、図の直線で LOX 中での壊食速度を推測することができると考えられる。音響インピーダンスを基に LOX 中での磁わい振動試験を行った場合の結果を推測した点が、図 13 の※印である。この結果より LOX 中で磁わい振動試験を行った場合、キャビテーション壊食が発生する可能性がある。また、この結果より熱力学的パラメータ及びキャビテーション数に加え、音響インピーダンスを考慮することにより壊食速度を整理できると考えられる。

図 14 は試験前及び 3 種類の試験液での壊食試験後の試験面の様子である。処女面は、滑らかであり凹凸はない。試験後の試験面はいずれも端面付近の壊食が大きく、中心付近では壊食の大きい箇所と小さい箇所が混在し凸凹が見られる。図 15 は、3 種類の試験液で試験を行った時の表面形状であり、いずれの図も壊食量は約 150mg である。いずれの試験面形状も大差は認められないが、ヘキサン中では中央部に深い壊食痕が現れる特徴がある。

以上より、熱力学的パラメータ及びキャビテーション数が等しい場合には、各種液体の音響インピーダンスにより壊食速度を評価できると考えられる。

4. 結 言

銀めっき材料のキャビテーション壊食試験を行い、試験結果の比較検討を行った結果、以下の結論が得られた。

1. 303K から 403K までの温度範囲では銀めっき材料の硬さは変化しない。そのため、壊食速度の温度依存性は、材料特性によるものではなく、液体特性の変化によるものである。

2. 脱イオン水中やエタノール中の303Kから403Kの変化は、熱力学的パラメータ Σ としては $10 \sim 2.0 \times 10^5 \text{ m/s}^{3/2}$ に対応する。熱力学的パラメータ Σ が $100 \text{ m/s}^{3/2}$ 以上になると熱力学的効果が現れ壊食が局所化されて壊食速度が低下する。しかし、 Σ が $100 \text{ m/s}^{3/2}$ 以下では蒸気圧が低下して発生する気泡数が減少するために壊食速度は小さくなる。
3. 各種液体中の壊食速度は、熱力学的パラメータ及びキャビテーション数が等しい場合には、液体の音響インピーダンスにより評価できる。

謝 辞

本研究においてご協力を頂きました JAXA の川崎聡氏に謝意を表します。

参考文献

- (1) 上條謙二郎, 山田仁, “ロケットポンプの液体水素インデューサ”, ターボ機械, Vol.35, No.9(2007), pp.47-52.
- (2) 山田仁, 内海政春, “ロケット用ターボポンプの流体関連振動事例”, ターボ機械, Vol.36, No.2(2008), pp.3-9.
- (3) 内海政春, 山田仁, 上條謙二郎, “キャビティとインデューサ羽根の干渉評価とその適応事例”, ターボ機械, Vol.38, No.6(2010), pp.327-333.
- (4) 菊池正孝, 長谷川敏, 野坂正隆, 陣内毅, “液体酸素, 液体窒素中における銀/硬質皮膜の摩擦摩耗特性”, (社)日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集, 金沢(1994-10), pp.579-582.
- (5) 野坂正隆, “低温環境下におけるトライボロジー”, トライボロジスト, Vol.52, No.11(2007), pp.759-764.
- (6) 服部修次, 籠谷勇, 川崎聡, 河野真一郎, “低温環境下における銀めっき材のキャビテーション壊食”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.77, No.775 (2011), pp.438-447.
- (7) Brennen, C., “The Dynamic Behavior and Compliance of a Stream of Cavitating Bubbles”, *Transaction of the ASME*, (1973), pp.533-541.
- (8) ターボ機械協会編, ポンプのキャビテーション損傷の予測と評価, ターボ機械協会指針 TSJ G 001 (2011), pp.63-64, ターボ機械協会.
- (9) 渡邊聡, 古川明德, “キャビテーションの熱力学的効果とその理論解析”, ターボ機械, Vol.36, No.3 (2006), pp.26-33.
- (10) ソフトウェア「Reference fluid thermodynamic and transport properties (REFPROP)」, データベース「National Institute of Standards and Technology, “Nist standard reference database 23, Version 8.0”」
- (11) 株式会社ミットヨ, “カタログ No.17001 硬さ試験機総合”, 株式会社ミットヨ, <http://www.mitutoyo.co.jp/support/service/catalog/index05.html> (参照日 2010 年 12 月 12 日)
- (12) Gross, L.A., “An Experimental Investigation of Two-phase Liquid Oxygen Pumping”, *NASA TN D-7451*, (1973).
- (13) Yoshida, Y., Kikuta, K., Hasegawa, S., Shimagaki, M., and Tokumasu, T., “Thermodynamic Effect on a Cavitating Inducer in Liquid Nitrogen”, *Transaction of the ASME, Journal of Fluid Engineering*, Vol.129, (2007), pp.273-278.
- (14) Yoshida, Y., Nanri, H., Kikuta, K., Kazami, Y., Iga, Y., and Ikohagi, T., “Thermodynamic Effect on Subsynchronous Rotating Cavitation and Surge Mode Oscillation in a Space Inducer”, *Transaction of the ASME, Journal of Fluid Engineering*, Vol.133, (2011), pp.06130-1-06130-7.
- (15) 菊田研吾, 吉田義樹, 橋本知之, 南里秀明, 水野勉, 四宮教行, “インデューサに発生するキャビテーションの熱力学的効果に与える回転数の影響”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.76, No.772 (2010), pp.102-110.
- (16) Franc, J.P., Rebattet, C., and Coulon, A., “An Experimental Investigation of Thermal Effects in a Cavitating Inducer”, *Transaction of the ASME, Journal of Fluid Engineering*, Vol.126, No.5 (2004), pp.716-723.
- (17) 服部修次, 後藤佑規, 福山岳樹, 八木良憲, 村瀬道雄, “キャビテーション噴流法による壊食に及ぼす液温の影響”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.71, No.707 (2005), pp.89-95.
- (18) Wilson, R.W., and Graham, R., “Cavitation of Surfaces in Contact with Lubricants”, *Conf. Lubrication and Wear, IME*, London (1957), pp.707-712.