SUS304 ステンレス鋼を用いたキャビテーション壊食の温度依存性

服部 修次^{*1}, 本井 嘉浩^{*2}

Effect of temperature on cavitation erosion of SUS304 stainless steel

Shuji HATTORI^{*1} and Yoshihiro MOTOI^{*2}^{*1,*2} Graduate School of Engineering, University of Fukui
3-9-1 Bunkyo, Fukui-shi, Fukui, 910-8507 Japan

Received 24 December 2013

Abstract

The effect of liquid temperature on cavitation erosion has been studied by several researchers. The general trend is that the erosion rate shows a maximum at approximate average of boiling and freezing temperatures in some liquids. However, the erosion mechanisms of these phenomena have not been clarified. In this study, cavitation erosion tests were carried out by using a SUS304 stainless steel in deionized water at different liquid temperatures and pressures. We summarized the test results by using the Celsius temperature and the relative temperature as a temperature parameter, and discussed the effect of temperature on the mass loss rate. In addition, cavitation bubble behavior depending on the thermodynamic effect was observed by high speed camera. Moreover, the cause of the temperature effect of cavitation erosion is discussed in terms of viscosity, air content, surface tension and distribution of bubble collapse impact loads. As a result, the mass loss rate of SUS304 indicates a maximum at a relative temperature T_R of 40-50 ° and the rate decreases with increasing or decreasing the relative temperature in deionized water. These tendencies are similar to that in other researches. Therefore, the relative temperature is suitable for the evaluation of temperature dependency under different pressures. In addition, we explained that the cause of the decreased mass loss rate is to strengthen the thermodynamic effect in high temperature region and to change in the distribution of bubble collapse impact loads in low temperature region.

Key words : Cavitation, Erosion, Temperature, Viscosity, Air concentration, Surface tension, Collapse impact load

1. 緒 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。またキャビテーション壊食は、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重要な問題となっている。

キャビテーション壊食に及ぼす液温の影響は、これまで様々な研究者によって研究されてきた。Plesset は、蒸留水中で各種の工業材料のキャビテーション壊食試験を行い、試験温度が 40 °C から 50 °C の間で壊食速度が最大を示すこと、この傾向は材料にほとんど依存しないことを報告している (Plesset, 1972)。Hammit は、壊食速度の最大が各種液体の沸点と凝固点のほぼ中間の温度で生じることを報告している (Hammit, 1980)。また Hammit と Rogers は、1 気圧より高い圧力でも 1 気圧の結果とほぼ同様に、壊食速度が中間温度で最大を迎え、それ以上またはそれ以下の温度では壊食速度が単調に低下することを報告している (Hammit and Rogers, 1970)。さらにアメリカ材料試験協会規格 ASTM-G32 では、水中の 25 °C 近傍で液温が 1 °C 増加すると壊食速度が 1~2 % 増加することを記述している (ASTM ed, 2005)。しかしこれらの現象のメカニズムはこれまでほとんど解明されていない。

本研究では、試験中の腐食の影響が小さいステンレス鋼の SUS304 試験片を用い、圧力のパラメータ（有効外

圧 $p - p_v$) を一定としながら液温を変化させてキャビテーション壊食試験を行った。その後、質量減少速度を試験液温及び相対温度で整理して液温の影響について検討した。また高速度カメラを使用して、キャビテーション発生挙動に及ぼす液温の影響について考察した。さらに温度の依存性に関連すると考えられる種々の因子の中から粘性、空気含有量、表面張力、気泡崩壊時の衝撃力のそれぞれがキャビテーション壊食に及ぼす影響について検討した。

2. 試験材料及び試験方法

2・1 試験材料及び試験装置

試験材料は、壊食試験中の腐食の影響が小さい SUS304 ステンレス鋼を用いた。表 1 に試験材料の化学成分、表 2 に物理的及び機械的性質を示す。なお表 2 のビッカース硬さは、ロックウェル硬さ試験の結果から換算した値である。試験片は、図 1 に示すように ASTM-G32 に規定されている直径 16 mm、厚さ 10 mm の試験部と取付け用ねじ部によって構成されている形状のものである (ASTM ed, 2005)。試験面は、試験前にエメリー紙 #1200 番まで研磨した後、バフで鏡面状に仕上げた。

Table 1 Chemical composition of the test material. (mass %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SUS304	0.06	0.45	1.49	0.29	0.23	-	8.15	18.30	-

Table 2 Mechanical and physical property of the test material.

Material	Yield point [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]	HRB	HV
SUS304	307	659	56	85.3	171

Fig. 1 Dimension of specimen.

(a) Schematic drawing.

(b) Set up photograph.

Fig. 2 Test apparatus.

Fig. 3 Dimension of impact load sensor.

Table 3 Test Conditions.

Test temperature [°C]	Test pressure abs. [MPa]	Suppression pressure $p - p_v$ [MPa]	Test temperature [°C]	Test pressure abs. [MPa]	Suppression pressure $p - p_v$ [MPa]
25	0.10	0.10	53	0.28	0.27
25	0.19	0.18	79	0.14	0.10
25	0.27	0.27	127	0.34	0.10
53	0.11	0.10	127	0.43	0.18
53	0.20	0.18	127	0.50	0.27

キャビテーション壊食試験には、ASTM-G32 (ASTM ed, 2005)に規定されている振動キャビテーション試験に基づいて作成した試験装置を使用した。壊食試験は、試験片先端の peak-to-peak 振幅が大気圧下で 50 μm となる 10.0 V を、いずれの圧力下でも同様に印加して行った。また共振周波数を 19.5 kHz として振動試験片法で試験を行った。図 2(a), (b)は試験装置の概略図と概観写真である。試験では、試験液温と試験圧力を制御した。試験液温は、マントルヒーター（株AS ONE 製 HB-1000T）と冷却コイルを用いて温度調節器（株AS ONE 製 TC-2000）で制御した。温度調節器は、加熱により設定温度まで温度が上昇すると加熱を停止し、冷却コイルには冷却水が流れる。逆に冷却水により設定温度より温度が低下すると、冷却水を停止して加熱を行う動作を繰返す。液温の変動範囲は設定温度 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内である。試験圧力は、加圧可能な試験槽に最大加圧能力 0.5 MPa（絶対圧）のコンプレッサで加圧した空気を送り、レギュレータで調整した。試験液は、試験の目的に応じて脱イオン水、脱イオン水とグリセリンの混合液、脱気水を使用した。詳細については後述する。各試験では、ホーンの先端に試験片を取り付けてキャビテーション壊食試験を行い、所定時間ごとに試験片の質量減少量を測定し、表面形状を計測して表面写真を撮影した。質量は精密天秤（感度 0.01 mg）で測定した。表面形状は、2次元粗さ計（ステージ コムス 株製 MAP-3D 100XY：移動分解能 0.1 μm / センサ 株キーエンス製 LJ-G015：高さ分解能 0.2 μm ，レーザ配置間隔 10 μm ，サンプリング周期 3.8 ms）を用いて測定した。

その他、各試験の目的に応じて以下のような装置を用いた。キャビテーションの発生挙動は、高速度カメラ（株フォトロン製 FASTCSM SA1.1：フル解像度 1024 $\times$ 1024 画素，フルフレーム 5400 fps，最高撮影速度 675000 fps）を用いて撮影した。液体の動粘度は、粘度計（柴田科学株製：キャノン・フェンスケ(SO) No 25：測定範囲 0.5 $\sim$ 2 $\times 10^{-6}$ m^2/s ，No 100：測定範囲 3 $\sim$ 15 $\times 10^{-6}$ m^2/s ）を用いて測定した。液体中の空気含有量の検討には、溶存酸素メータ（株堀場製作所製 OM-51）を用いて溶存酸素量（DO 値）を測定した。気泡崩壊時の衝撃力分布は、図 3 に示すようなピエゾ素子を用いたセンサ（直径 5 mm，受圧棒長さ 20 mm，反射棒長さ 15 mm）と本研究室で開発した気泡崩壊圧計測システムを用いて測定した (Hattori, et al., 2010)。

2・2 試験方法

質量減少速度に及ぼす液温の影響を検討するため、圧力のパラメータを一定として各種の液温で試験を行った。圧力のパラメータには、有効外圧 $p-p_v$ を用いた。 p は試験圧力、 p_v は液体の飽和蒸気圧である。 p_v は温度の関数であるが、先に試験液温を設定するため、 $p-p_v$ は試験圧力のみの関数として表される。

表 3 は、温度依存性を検討するための試験における試験液温、試験圧力、有効外圧 $p-p_v$ を示したものである。本研究室での銀めっきを用いた以前の結果 (服部他, 2012) と比較するため、試験温度には 25 °C, 53 °C, 79 °C, 127 °C を用いた。また試験圧力の基準には、大気圧、25 °C の脱イオン水から算出した $p-p_v=0.10$ MPa, 及び試験条件の中で最も蒸気圧が高い (液温が高い) 127 °C の脱イオン水に試験装置の限界圧力(0.50 MPa)で加圧した際の $p-p_v=0.25$ MPa に加え、それらのほぼ中間値である $p-p_v=0.18$ MPa の 3 種類を用い、各温度での試験圧力を算出した。

3. 試験結果及び考察

3・1 各種液温下でのキャピテーション壊食試験結果

図 4 は、 $p-p_v$ が一定下における各種の液温の脱イオン水中での質量減少曲線であり、各図は $p-p_v$ ごとに表示している。本試験では試験槽を加圧しているため、127 °C でも脱イオン水は沸騰せずに壊食試験が可能である。また曲線の近くの数字は、各曲線において勾配の最も大きな箇所の傾きを最大質量減少速度として示したものである。図 4(a) は $p-p_v=0.10$ MPa の試験結果である。25 °C の曲線は、試験開始から 5 時間後に質量減少速度が約 13 mg/h で最大に達し、その後は質量減少速度がやや変動しながら壊食が進行し、試験終了時の 10 時間後には質量減少量が約 100 mg に達する。53 °C の曲線は、25 °C の曲線に比べて質量減少速度が大きい。質量減少速

Fig. 4 Mass loss-time curves in deionized water. The mass loss exhibits an incubation period of the initial stage of erosion rate-time pattern during which the erosion rate is zero or negligible compared to later stage which then increased linearly for all curves.

Fig. 5 Relation between test temperature and mass loss rate in maximum rate stage. Mass loss rate indicates a maximum at a test temperature of 70-80 °C under various suppression pressures.

Fig. 6 Relation between relative temperature T_R and mass loss rate in maximum rate stage. Mass loss rate indicates a maximum at a relative temperature T_R of 50-60 ° under various suppression pressures.

度は試験開始直後の 0.75 時間 (45 分) 後には最大速度の 95 % 以上に達し、その後も速度はほぼ低下せず壊食が直線的に進行する。最大質量減少速度は 3 時間後の 36 mg/h であり、試験終了時 (5 時間後) の質量減少量は約 165 mg である。79 °C の曲線は、53 °C の曲線の質量減少量や質量減少速度の時間変化とほぼ同様である。最大質量減少速度は 2 時間後の 37 mg/h であり、試験終了時 (5 時間後) の質量減少量は約 155 mg である。127 °C の曲線は、他の 3 本の曲線と比べて最も質量減少速度が小さく、質量減少量や質量減少速度の時間変化は 25 °C のものとほぼ同様である。最大質量減少速度は 6 時間後の 11 mg/h であり、試験終了時 (10 時間後) の質量減少量は約 75 mg である。図 4(b)や(c)の結果は紙面の関係で説明を省略するが、図 4(a)の結果と同様に質量が減少する。図 4 中の多くの曲線では、壊食の初期に比較的質量減少速度の緩やかな潜伏期を迎え、次に急激に質量減少速度が増加して最大を迎えた後、速度がやや低下して壊食が進行する。また同一の液温でも、有効外圧 $p - p_v$ の増加に伴って質量減少速度が増加する傾向が見られる。

図 5 は、図 4 の試験結果を横軸に試験液温、縦軸に最大質量減少速度をとり整理したものである。また同図中には、比較データとして服部らが銀めっき材を用いて行った試験結果 (服部他, 2012) も示している。図中の曲線は、実験点を通るように 2 次曲線で近似したものである。SUS304 の $p - p_v = 0.10 \text{ MPa}$ の試験結果は、80 °C 付近で質量減少速度が最大を示し、液温がそれ以上でもそれ以下でも質量減少速度は低下する傾向が見られる。しかし Plesset の結果 (Plesset, 1972) では 40 °C ~ 50 °C の間、服部らの結果 (服部他, 2012) では約 62 °C で質量減少速度が最大を示しており、相違がみられる。これは、本研究では試験を行う際に圧力を負荷したことで沸点が上昇するため、同一温度でも圧力の違いにより蒸発のしやすさが変化しているのではないかと考えられる。そこで、相対温度を用いて図 4 の結果を再度整理した。相対温度は、以下の式 (1) で表される (服部他, 2005)。

$$T_R = \frac{T - T_f}{T_b - T_f} \times 100 \quad (1)$$

ここで T_R は相対温度、 T は試験液温 [°C]、 T_f は凝固点 [°C]、 T_b は沸点 [°C] である。また相対温度の算出に際して、凝固点は 0 °C 一定とし、沸点は以下の式 (2) を用いた (服部他, 2005)。なお、 p は試験圧力 [MPa] である。

$$T_b = \frac{5173}{11.58 - \ln p} - 273.16 \quad (2)$$

図 6 は、相対温度と質量減少速度の関係を示したものである。また図 5 と同様に、服部らの銀めっきの結果 (服部他, 2012) も示している。図 6 から、SUS304 の質量減少速度は相対温度が 50 ° ~ 60 ° の間で最大を示しており、

Fig. 7 Photographs and schematics of bubbles in deionized water at different temperatures under atmospheric pressure. The number of bubbles at 80 °C ($T_R=80^\circ$) is much lower than that at 50 °C ($T_R=50^\circ$). The number of bubbles at 30 °C ($T_R=30^\circ$) is similar to that at 50 °C ($T_R=50^\circ$).

服部らの銀めっきの結果 (服部他, 2012)とも類似している。また大気圧下では、試験液温と相対温度が同一の値であることから、Plessetの結果 (Plesset, 1972)は相対温度 $40^\circ \sim 50^\circ$ の間で質量減少速度が最大を示したものと等価であり、この結果は図6の本研究のものとも類似している。これらのことから、異なる圧力下で温度の影響を検討する場合には、相対温度を用いた評価が有効であると考えられる。

3・2 高温領域における質量減少速度に及ぼす温度の影響

図6の高温領域 (T_R が 50° から 90° の範囲) において液温の上昇に伴って質量減少速度が低下する原因について検討した。Plessetは、大気圧下で液温を変化させながらキャビテーション壊食試験を行い、高温領域で温度の上昇に伴って壊食速度が低下することを報告している (Plesset, 1972)。またその現象は、液温の上昇に伴う飽和蒸気圧 p_v の増加によって、 $p - p_v$ が低下することが原因であるとしている。しかし本研究では $p - p_v$ を一定として液温を変化させながら試験を行ったが、Plessetの試験結果 (Plesset, 1972)と同様に高温領域で液温の上昇に伴って質量減少速度が低下する結果が得られたことから、高温領域での質量減少速度の変化には飽和蒸気圧はあまり関係していないと考えられる。そこで本研究では、高速度カメラを用いて異なる液温でのキャビテーションの発生挙動を撮影した。

図7は、大気圧下での脱イオン水において 80°C ($T_R=80^\circ$) と 50°C ($T_R=50^\circ$)、 30°C ($T_R=30^\circ$) でキャビテーション気泡の発生状況を高速度カメラを用いて撮影した際のキャプチャ写真とその概略図である。なお $p - p_v$ の値は 80°C で 0.05 MPa 、 50°C で 0.09 MPa 、 30°C で 0.10 MPa である。 $p - p_v$ の値はそれぞれ異なるが、(b)の 50°C は図6の最大質量減少速度付近の温度、(a)の 80°C はそれより高い温度、(c)の 30°C はそれより低い温度として示している。図7(a)と(b)を比較すると、気泡の発生個数は 50°C より 80°C の方が少ないことがわかる。もし $p - p_v$ の値が同一であれば、気泡の発生個数の差はより大きくなることが一般的に予想できる。しかし図7(b)と(c)を比較すると、 50°C と 30°C の間で気泡の発生個数にあまり変化は見られない。これらのことから、 80°C のみで気泡の発生個数が極端に少ないことが分かり、これは熱力学的効果によって気泡の発生が抑制されているためであると考えられる。液温の高い領域では、気泡生成時に多くの蒸発潜熱が奪われて気泡周辺の液温が低下し、それに伴って蒸気圧が減少するため気泡の成長が抑制される (渡邊と古川, 2006)。また熱力学的効果により気泡崩壊時には、気泡周辺の温度が上昇し蒸気圧が増加するので、衝撃圧が低減して壊食が抑制される。以上から、図6の高温領域では液温の上昇に伴って熱力学的効果が増大することにより、質量減少速度が低下すると考えられる。

3・3 低温領域における質量減少速度に及ぼす温度の影響

図6の低温領域 (T_R が 20° から 50° の範囲) において、液温の減少に伴って質量減少速度が低下する現象には様々な原因が考えられる。本節では粘性、表面張力、空気含有量、気泡崩壊時の衝撃力のそれぞれがキャビテー

Table 4 Kinetic viscosity of glycerin compounded water

Liquid type	Temperature [°C]	Kinetic viscosity [$\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$]
Glycerin 0 mass % (Deionized water)	20	0.95
	35	0.73
	50	0.59
Glycerin 20 mass %	20	1.73
	50	0.97
Glycerin 63 mass %	20	8.96

Fig. 8 Relation between kinetic viscosity and mass loss after 5 h (40 min for Wilson's study). There is big difference in mass loss even if the kinetic viscosity is same.

Table 5 Liquid type and DO of test liquids.

Liquid type	Degassing temperature [°C]	Test temperature [°C]	DO [mg/L]
Deionized water			3.59
Degassed water 1	100	25	0.03~0.21
Degassed water 2	50		1.17~1.7

Fig. 9 Comparison of mass loss-time curves of deionized water with deaerated waters at 25 °C. There is little difference in mass loss when DO is different.

シオン壊食の温度依存性に及ぼす影響について検討した。

まずキャビテーション壊食の温度依存性に及ぼす粘性の影響について検討した。本影響を検討するための試験では、混合配分の異なる3種類のグリセリン-脱イオン水混合液を用いて、大気圧下で温度を変えながら5時間壊食試験を行った。表4は各試験液の種類、及び試験液温と各試験液温における動粘度を示しており、試験液は脱イオン水にグリセリンをそれぞれ0%、20%、63%混合したものをを用い、試験液温を20°C、35°C、50°Cのそれぞれに設定して試験を行った。図8は壊食試験を行った結果であり、動粘度と質量減少量の関係を示している。また同図中には、比較データとしてWilsonとGrahamが銀めっき材を用いて動粘度を変えながら40分壊食試験を行った結果も示している(Wilson and Graham, 1957)。本研究の試験結果から、同一の温度において動粘度が10倍程度増加すると、質量減少量は大きく低下する傾向が見られ、WilsonとGrahamの試験結果とも同一の傾向である。しかし脱イオン水の動粘度である $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (破線)付近に注目すると、20°Cまたは50°Cのグリセリン0%溶液とグリセリン20%溶液では質量減少量に大きな違いが見られない。このことから、グリセリンを混合させたことによる粘度以外の因子の影響は小さいと考えられる。一方20°Cのグリセリン0%溶液と50°Cのグリセリン20%溶液を比較すると、同一の動粘度でも温度によって質量減少量は大きく異なるため、粘性の違いのみでは質量減少量の違いを説明することができない。また図6の低温領域において液温の減少に伴って質量減少速度が低下する現象についても、同様に説明することができないと考えられる。

次にキャビテーション壊食の温度依存性に及ぼす空気含有量の影響について検討した。本影響を検討するための試験では、表5に示す脱イオン水と脱気条件の異なる2種類の脱気水を用いて同一条件(25°C、大気圧)で

Fig. 10 Measurements of bubble collapse pressure. The collapse number at 25 °C is much lower than that at 50 °C.

キャビテーション壊食試験を5時間行った。それぞれの脱気水は、100 °Cまで一度加熱した後、大気との接触を極力遮断しながら試験温度の25 °Cまで冷却した脱気水1と、同様の手法で50 °Cまで加熱した後25 °Cまで冷却した脱気水2である。本研究室では試験液中の空気含有量を直接測定することが困難であったため、それぞれの試験液中の溶存酸素量(DO値)を測定した。ヘンリーの法則から溶存状態では酸素:窒素=1:2であり、空気含有量は溶存酸素量の3倍である(岡村, 2007)。また本試験で行った脱気操作は、窒素置換や酸素置換等の操作とは異なり溶存気体の溶存比に大きな影響を与えるものではない。これらのことから、溶存酸素量の大小が空気含有量の大小と等価であると考えられる。溶存酸素量の測定結果は、未操作の脱イオン水では3.59 mg/L、脱気水1では脱気直後には0.03 mg/L、試験後には0.21 mg/L、脱気水2では脱気直後には1.17 mg/L、試験後には1.71 mg/Lであった。脱気水1と2では、試験を行うことで若干溶存酸素量が増加したが、試験液の違いに対する溶存酸素量の違いと比べると非常に小さなものである。図9は、3種類の試験液での質量減少量曲線である。図9の結果から、溶存酸素量が大きく変化しても質量減少量や質量減少速度には大きな違いが見られない。また図6の質量減少速度の変化率(傾き)と比べても、図9の溶存酸素量の変化に対する質量減少量や質量減少速度の変化率は非常に小さなものである。これらのことから空気含有量(溶存酸素量)の違いのみでは、図6の低温領域で液温の減少に伴って質量減少速度が低下する現象を説明できないと考えられる。

第3としてキャビテーション壊食の温度依存性に及ぼす表面張力の影響について検討した。表面張力は、一般的に液温の上昇に伴って低下し(加藤, 1979)、また表面張力が低下するとキャビテーション気泡が崩壊する際の衝撃力も小さくなる。そのため液温が上昇すると、質量減少速度も低下すると予想される。しかし図6の低温領域では、液温が上昇すると質量減少速度も上昇しており、表面張力の影響から予測した傾向と逆の結果である。このことから、表面張力の影響のみでは、図6の低温領域で液温の減少に伴って質量減少速度が低下する現象を説明できない。一方高温領域では、表面張力が影響した場合の質量減少速度の傾向と一致しているが、表面張力は温度に対してほぼ線形に変化するので高温側のみに影響することは考えにくい。

最後に、キャビテーション壊食の温度依存性に及ぼす気泡崩壊時の衝撃力の影響について検討した。図10は、図2の試験装置の振動子直下に1 mm間隔を空けて図3のピエゾ素子センサを固定し、1分間キャビテーションに曝した時に得られる気泡崩壊時の衝撃力 F_i を、25 °Cと50 °Cの脱イオン水中で各4回測定した結果である。また図中の一点鎖線及び実線は、25 °Cと50 °Cの4回の測定における平均値に沿って曲線を引いたものである。試験結果の平均値は、 $F_i=0$ Nから3 N付近までの範囲では50 °Cよりも25 °Cの方が衝撃回数が多く、 F_i がそれ以上の範囲では逆に25 °Cよりも50 °Cの方が衝撃回数が多い。しかし50 °Cの平均値の曲線(実線)を見ると、衝撃回数が最大を迎える付近から F_i が5 N付近までの範囲での曲線の傾き(変化率)は、 F_i がそれ以上の範囲に比べてやや小さくなっており、これは測定装置による影響を受けている。本試験では、装置の関係上どちらの温度でもセンサへの入力を100 μ s間隔でピークホールドした後、センサへの入力の回数をカウントしている。そのため大きな衝撃力(入力)の回数が増加すると、ピークホールドの影響によって必然的に衝撃力の小さなものがカウントされていない。このことから実際には、図10の点線(.....)のように、衝撃力の全範囲において25 °Cの衝撃回数(気泡崩壊数)が50 °Cよりも少なくなったと考えている。なお図10中の点線は、概念的に説明した

ものである。一方図7において、30℃と50℃では気泡の発生個数に差があまり見られなかった。低温領域において温度の低下に伴って目視では観察できない小さな気泡の数が減少することにより、質量減少速度が低下したものと考えられるが、詳細については今後の検討課題である。

3・4 表面形状の変化

図11は、 $p-p_v=0.10$ MPa一定で液温を変化させた時の壊食面写真と表面形状である。それぞれの表面形状は、壊食面の中で最も壊食が深い箇所と試験片の中心を通る直線により得たものであり、またその直線と試験片外周との交点の一方を横軸の0 mm、もう一方を試験片直径の16 mmと表している。図11(a)は、25℃で10時間試験を行った結果である。表面形状より、外周から約1.1 mmの辺りに壊食の激しい環状領域（壊食深さ約150 μm ）が見られるが、それより内側の領域では壊食深さ50 μm 前後でほぼ均一に壊食している。図11(b)は53℃で3時間試験を行った結果であり、図11(a)の質量減少量とほぼ同一ものを選んでいく。図11(b)では、壊食の激しい環状領域は、外周から約1.5 mmの辺りに壊食深さ約220 μm で発生しており、図11(a)より試験片中心側に深く発生している。またその内側の領域では、図11(a)と同様に壊食深さ50 μm 前後でほぼ均一に壊食している。図11(c)は127℃で10時間試験を行った結果であり、試験の都合から図11(a)、(b)とは質量減少量がやや異なるものを選んでいく。図11(c)の表面形状から、壊食の激しい環状領域は外周から約1.8 mmの辺りに壊食深さ約420 μm で発生しており、図11(a)、(b)と比較すると最も試験片の中心側に発生し、壊食深さも最も倍以上大きい。またそれより内側の領域では、図11(a)、(b)と比較してもほとんど壊食が発生していない。これらは、熱力学的効果によって

Fig. 11 Photographs and profiles of eroded surface at $p-p_v=0.10$ MPa.

Fig. 12 Photographs and profiles of eroded surface at 127 °C.

壊食が極端に局所化したためであると考えられる。また以上の結果から、液温の上昇に伴って、壊食の激しい環状領域は試験片の中心側に発生し、壊食深さも大きくなる傾向が見られる。

図 12 は、液温を 127 °C 一定として圧力を変化させた時の壊食面写真と表面形状である。図 12(a)~(c)はほぼ同一の質量減少量の結果であり、また表面形状は図 11 のものと同様の方法で取得し表示している。図 12 のすべての圧力では、壊食の激しい環状領域とその内側及び外側に壊食のほとんど発生しない領域の 3 つの領域が見られる。これは、図 11 の結果から熱力学的効果によって局所的に壊食が発生しているためであると考えられる。また壊食の激しい環状領域は、0.34 MPa で試験片外周から 1.8 mm, 0.43 MPa で 2.3 mm, 0.50 MPa で 2.7 mm の辺りに発生し、それぞれの壊食深さは順に約 360 μm , 450 μm , 400 μm である。このことから圧力の上昇に伴って、壊食の激しい環状領域は試験片の中心側に移動する傾向が見られる。このように、ボイラーフィーダーポンプの羽根車などの高温高压でキャビテーションが発生している部材では、平均的な壊食量は少ないが局所的に壊食が深く進行することがあるので注意が必要である。

4. 結 言

SUS304 試験片を用いて各種の液温、圧力下でキャビテーション壊食試験を行った。またキャビテーション壊食の温度依存性に及ぼす粘性、空気含有量、表面張力、気泡崩壊時の衝撃力のそれぞれの影響について検討した。試験結果から以下の結論が得られた。

- (1) 脱イオン水中での SUS304 のキャビテーション壊食に及ぼす液温の影響では、相対温度 50 °~60 °の間で質量減少速度が最大を迎え、液温がそれ以上でもそれ以下でも質量減少速度が低下する山形の曲線形状を示す。また異なる圧力下では、相対温度を用いた液温の評価が有効である。
- (2) 質量減少速度が最大を迎える液温より高温の領域では、温度の上昇に伴う熱力学的効果が増大して質量減少速度が低下する。
- (3) 質量減少速度が最大を迎える液温より低温の領域では、温度の低下によって気泡崩壊による衝撃力の頻度分布が変化して質量減少速度が低下する。
- (4) ボイラーフィーダーポンプのように高温高压でキャビテーションが発生している部材では、平均的な壊食量は少ないが、局所的な壊食が深く進行するために注意が必要である。

謝 辞

本研究の実施に際して、実験に協力をいただいた福井大学元学生の江尻和広君に深く感謝の意を表します。

文 献

- ASTM ed, 2005 Annual Book of ASTM Standards, Section 03, Vol.03.02 (2005), pp.106-122, ASTM.
- Hammitt, F. G. and Rogers, D. O., Effect of pressure and temperature variation in vibratory cavitation damage test, Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, Vol.12, No.6 (1970), pp.432-439.
- Hammitt, F. G., Cavitation and multiphase flow phenomena (1980), p.251, McGraw-Hill.
- 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.1081-1087.
- Hattori, S., Hirose, T. and Sugiyama, K., Prediction method for cavitation erosion based on measurement of bubble collapse impact loads, Wear, Vol.269 (2010), pp.507-514.
- 服部修次, 本井嘉浩, 樽谷佳祐, 菊田研吾, 都丸裕司, 銀めつき材の振動キャビテーション壊食に及ぼす液温と圧力の影響, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.78, No.795 (2012), pp.1547-1557.
- 加藤洋治, キャビテーション(1979), p.8.
- 岡村共由, キャビテーション実験計測の基礎, ターボ機械, Vol.35, No.5 (2007), pp.282-288.
- Plesset, M. S., Temperature effects in cavitation damage, Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, Vol.94, No.3 (1972), pp.559-563.
- 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.154-161.
- Wilson, R. W. and Graham, R., Cavitation of metal surfaces in contact with lubricants, Conference of Lubrication and Wear

(1957) , pp.707-712.

References

- ASTM ed, 2005 Annual Book of ASTM Standards, Section 03, Vol.03.02 (2005), pp.106-122, ASTM.
- Hammit, F. G. and Rogers, D. O., Effect of pressure and temperature variation in vibratory cavitation damage test, Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, Vol.12, No.6 (1970), pp.432-439.
- Hammit, F. G., Cavitation and multiphase flow phenomena (1980), p.251, McGraw-Hill.
- Hattori, S., Goto, Y., Fukuyama, T., Yagi, Y. and Murase, M., Influence of temperature on erosion by a cavitating liquid jet, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.71, No.707 (2005), pp.1081-1087 (in Japanese).
- Hattori, S., Hirose, T. and Sugiyama, K., Prediction method for cavitation erosion based on measurement of bubble collapse impact loads, Wear, Vol.269 (2010), pp.507-514.
- Hattori, S., Motoi, Y., Taruya, K., Kikuta, K. and Tomaru, H., Effects of temperature and pressure on cavitation erosion of silver plated coating, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.78, No.795 (2012), pp.1547-1557 (in Japanese).
- Kato, H., Cavitation (1979), p.8, Makishoten (in Japanese).
- Okamura, T., Basic knowledge of experiment and instrument for cavitation, Turbomachinery, Vol.35, No.5 (2007), pp.282-288 (in Japanese).
- Plesset, M. S., Temperature effects in cavitation damage, Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, Vol.94, No.3 (1972), pp.559-563.
- Watanabe, S. and Furukawa, A., Theoretical investigations on thermodynamic effect of cavitation, Turbomachinery, Vol.36, No.3 (2006), pp.154-161 (in Japanese).
- Wilson, R. W. and Graham, R., Cavitation of metal surfaces in contact with lubricants, Conference of Lubrication and Wear (1957) , pp.707-712.