

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

キャビテーション噴流法による ロケットポンプ材料の壊食特性の比較

川崎 聡, 菊田 研吾, 吉田 義樹

2011年2月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

キャビテーション噴流法によるロケットポンプ材料の壊食特性の比較*

川崎 聡*¹、菊田 研吾*²、吉田 義樹*¹

Comparison of Cavitation Erosion Properties of the Materials Used in Rocket Turbopump by Cavitating Jet Method *

Satoshi KAWASAKI *¹, Kengo KIKUTA *² and Yoshiki YOSHIDA *¹

ABSTRACT

To compare the cavitation erosion properties, the typical materials used in the rocket engine turbopump were tested by cavitating water jet method. Generally, the solid materials of inducer or impeller have high erosion resistance, but the silver plating used in the inducer liner is much lower one. The addition agents can improve the erosion resistance of silver plating, which was about ten times higher than normal silver plating. Furthermore, we tried an experiment with cavitating liquid nitrogen jet. The specimen of pure aluminum was slightly damaged by cavitating liquid nitrogen jet after ten minutes test. It indicated possibility of cryogenic cavitation erosion test.

Keywords : Cavitation, Erosion, Rocket, Turbopump, Cavitating Jet, Cryogenic

1. 緒言

ロケットエンジン用ターボポンプに発生するキャビテーションは、旋回キャビテーションやキャビテーションサージなどの不安定現象の要因となるため、流体的側面からの研究は数多く進められてきた¹⁾。一方、ロケット用ポンプは一般産業用ポンプと比べて運転時間が極端に短いため、キャビテーション壊食に関する研究は余り見当たらない。一般産業用ポンプの分野ではキャビテーション壊食の研究は古くから行われており、壊食特性のデータベース化や壊食予測方法の提案などが進んでいる²⁾、³⁾、⁴⁾。今後、ロケットの再使用化を目指す場合、長時間運転におけるキャビテーション壊食の問題はターボポンプの信頼性やメンテナンスの観点から重要な課題となる。

本研究ではロケット用ポンプに使用される代表的な種々の材料（無垢材）に対してキャビテーション噴流法による壊食試験を行い、壊食特性を調べた。また、インデ

ューサライナはインデューサとの接触に対する発火の抑制やインデューサ損傷の抑制のために、銀メッキなどの処置が施されている。銀メッキはインデューサに用いられる材料と比較して柔らかいため、ポンプ部品の中ではキャビテーション壊食が進行し易いと考えられる。そこで銀メッキ材の壊食特性を調べるとともに、数種類のメッキ材の壊食特性も計測して比較した。

上記試験は水により実施したが、実機の推進剤は液体水素や液体酸素などの極低温流体である。そこで、液体窒素を用いたキャビテーション噴流実験装置を製作し、試験片にキャビテーション噴流を当てる実験を実施した。その実験方法および実験結果についても報告する。

2. 供試材料

表1に供試材料の一覧をビッカース硬さとともに示す。ロケット用ポンプでキャビテーションの影響を受ける部品としては、インデューサやインペラ、それらの周囲のケーシングやライナが挙げられる。これらの部品に使用

* 平成23年2月2日受付 (Received 2 February 2011)

*¹ 宇宙輸送ミッション本部 宇宙輸送系推進技術研究開発センター (Space Transportation Propulsion Research and Development Center, Space Transportation Mission Directorate)

*² (株) IHI (IHI Corporation)

Table 1 Test specimens

Material	Vickers Hardness	Remarks
Solid		
SUS304	200	Stainless steel
Ti-6Al-4V	340	Titanium alloy
Ni Alloy 718	443	Ni-base superalloy
A286	350	Fe-base superalloy
A356	75	Cast Aluminum Alloy
A1050BD-H14	41 ³⁾	Pure Aluminum
C1100BD-H	92 ³⁾	Pure Copper
C3604	107	Free-cutting brass
Plating (Base material : SUS304)		
Silver(Ag) plating	60	
Silver(Ag) plating with addition agents	132	Addition agents : Selenium, Antimony
Gold(Au) plating	—	
Nickel(Ni) plating	190	
Chromium (Cr) plating	260	

される代表的な材料として、SUS304、Ti合金、Ni基超合金、Fe基超合金、鋳造Al合金を供試材料として用いた。また、参照材料として純アルミ、純銅、真鍮による壊食試験も行った。メッキ材については、インデューサライナで用いられる通常の銀メッキ材とともに、添加剤（セレン、アンチモン等）を加えた銀メッキ材、金メッキ材、Niメッキ材、Crメッキ材を供試材料とした。メッキ材の母材は全てSUS304であり、メッキ厚さは200 μ mである。

供試材料の硬さ計測はロックウェル硬さ試験機により行い、表1にはピッカース硬さに換算した値を示している。ただし、いくつかの材料についてはロックウェル硬さ計測にて正確にデータが取得できなかったため、素材メーカーでの計測結果や各種資料、文献等から推定した値を参考値として示す。

3. 試験方法

壊食試験は、Lichtarowiczによって考案され、ASTM G134⁵⁾規格に定められたキャビテーション噴流による方法に準じて実施した（市販ノズルを用いており、ノズル径はASTMと同一であるが、ノズル構造が異なる）。図1

に試験装置の概略図と写真を示す。フィルターにより清浄された水をプランジャーポンプにて加圧し、ノズルによってキャビテーションジェットを発生させて試験片にジェットを当てて壊食を生じさせる。

使用流体は水であり、使用ノズル径は ϕ 0.40、ノズル出口と試験片の距離（スタンドオフ距離）は15mmとした。圧力条件は上流圧力 $P_u = 17.7$ MPaA、下流圧力 $P_d = 0.56$ MPaAとし、次式の定義により求めたキャビテーション数は $\sigma = 0.032$ である。

$$\sigma = \frac{P_d - P_v}{P_u - P_d}$$

P_v : 飽和蒸気圧

本研究はできるだけ多種の材料についてデータを収集する方針で進めたため、壊食速度が最大速度期に達したと判断した段階で、その試験片による壊食試験は終了した。

壊食による質量減少量は電子天秤を用いて1mgの精度で計測した。体積減少量は質量減少量を試験材料の密度で除して求めた。表面形状はレーザ変位計により計測した。また、いくつかの壊食試験において高速度ビデオカメラによる撮影を行い、キャビテーション噴流の挙動を観察した。

液体窒素によるキャビテーション噴流試験の詳細については、4.3項に示す。

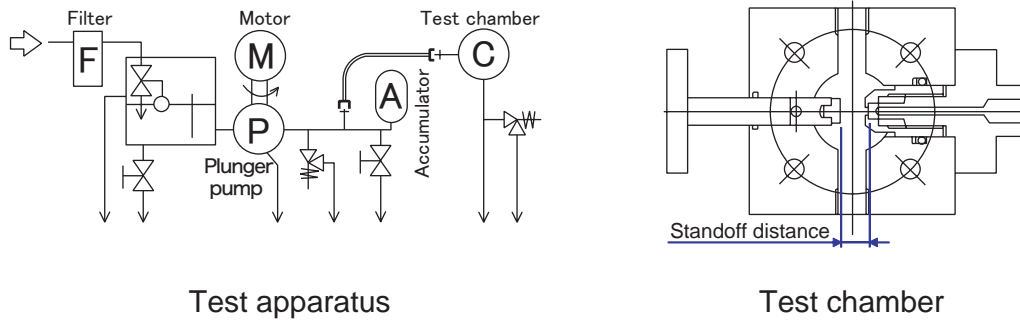
4. 試験結果と考察

4.1 キャビテーション噴流の挙動

図2に高速度ビデオカメラで撮影したキャビテーション噴流の挙動を示す。キャビテーション噴流の挙動は祖山らが高速度写真によって詳細を明らかにしているが⁶⁾、本試験においてもその挙動を鮮明に確認することができた。ノズルから断続的な気泡雲が放出され（図2①）、気泡雲が試験片に衝突し（図2②）、リング状の渦キャビテーションが試験片表面上に生じて拡大し（図2③）、リング状の渦キャビテーションが崩壊し（図2④）、その近傍で壊食が進行している。断続的に発生する気泡雲の発生周波数は4~5kHzであり、祖山らの研究で計測した気泡雲放出周期⁶⁾とオーダは一致している（ノズル形状は異なる）。

4.2 各供試材料の壊食状況と壊食特性

図3および図4には、無垢材およびメッキ材の壊食試験後の試験片表面状態の写真をそれぞれ示す。十分に壊食が進行していないクロムメッキを除いては、図2に示したキャビテーション噴流の挙動に対応してリング状に壊



Test apparatus

Test chamber

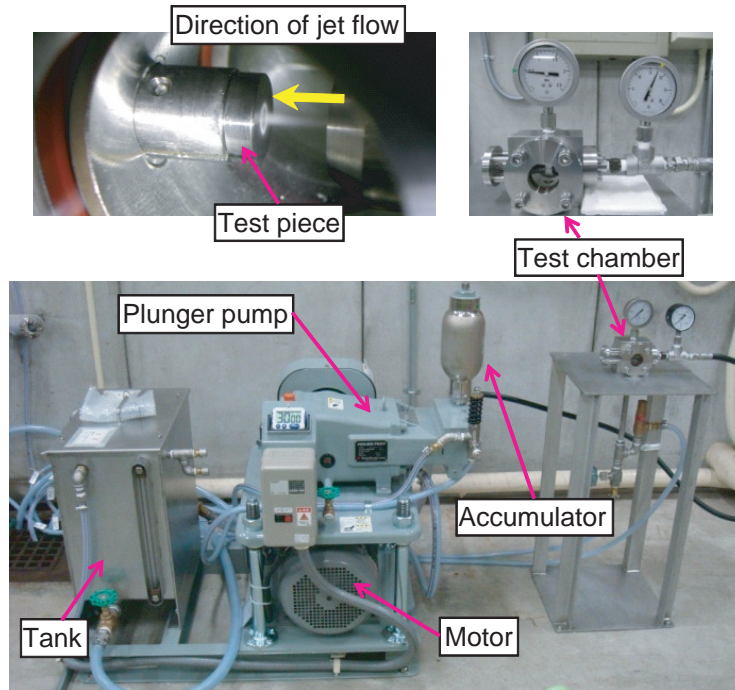


Fig.1 Erosion test apparatus by cavitating water jet

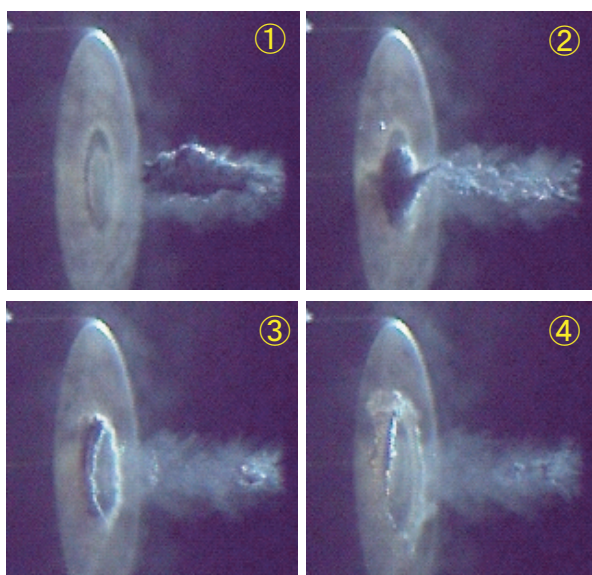


Fig.2 Behavior of cavitating jet onto the test specimen

食が進んでいる様子が分かる。これらの壊食のマクロな様相は無垢材およびメッキ材とも同じである。硬い材料 (Ni Alloy 718、Ti-6Al-4V、ニッケルメッキなど) では壊食が進行したリング状の部分と壊食が進んでいない中央部が明確に分かれているが、比較的柔らかい材料 (A1050BD-H14、A356、銀メッキ材など) では中央部まで壊食が進んでいる。

図5に、Ni Alloy 718とA356および銀メッキ材の表面形状を示す。Ni Alloy 718は中心に対してほぼ対称的で均一に壊食しているが、A356では非対称で不均一に壊食している。銀メッキ材では中央部に基準面より盛り上がる部分が見られるが、ニッケルメッキや添加剤を加えた銀メッキのような硬いメッキ材ではNi Alloy 718と同じような表面形状を示し、中央部表面の極端な変形や盛り上がりは確認されなかった。

キャピテーション噴流による各供試材料のマクロな壊食状況の違いは硬さによる影響が支配的であり、無垢材

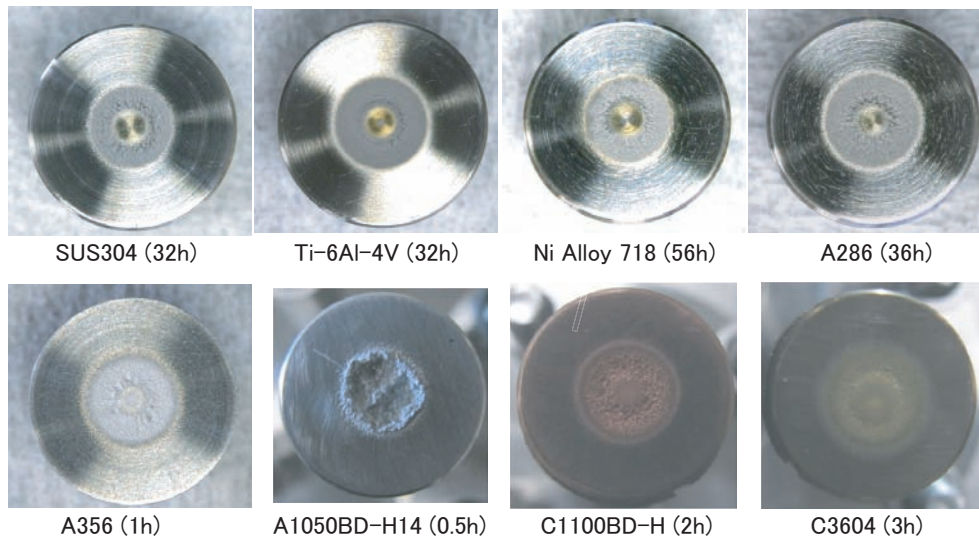


Fig.3 Eroded surfaces of test specimens (solid materials)

とメッキ材による影響は小さいと考えられる。メッキ材の場合、壊食深さがメッキ厚さ程度まで進むと母材の影響により無垢材とは異なる壊食状況を示す可能性も考えられるが、本研究で確認した最大壊食深さ100～150 μm 程度（メッキ厚さは200 μm ）までは、特に母材の影響が出現するような特徴は見られなかった。

図6に各供試材料の体積減少量の変化を示す。いずれの供試材料も試験開始後は壊食がほとんど進まない（壊食速度が小さい）潜伏期が確認され、その後、体積減少量は直線的に増加して壊食速度が最大となる最大速度期に至っている。体積減少量の変化パターンは無垢材とメッキ材とも同様であり、メッキ材特有のパターンは見られなかった。なお、クロムメッキ材は8時間の壊食試験後も質量変化は見られず、薄い跡がついている程度であった（図4参照）。

図7に各供試材料のビッカース硬さと壊食抵抗の関係を示す。ここで、壊食抵抗は最大速度期での体積減少量の傾き（図6の体積減少量の傾きの最大値）の逆数として求めた。参照材料である純アルミ、純銅、真鍮は壊食が進んだ状態での計測のみであるため、ここでは体積減少量を総試験時間で除いた値を壊食抵抗として扱った。なお、図中の一点鎖線はNi Alloy 718と銀メッキ材の点を結んだ比較用の補助線である。

壊食抵抗は材料の硬さと良い相関を示すことが報告されているが³⁾、本試験においても無垢材およびメッキ材とも併せて良い相関を示している。ステンレスは加工硬化の影響により硬さに対して耐壊食性が優れていると報告されているが²⁾、本試験においてもSUS304では同様の結果が得られた。インデューサやインペラの素材として用いられるNi Alloy 718、Ti-6Al-4V、A286は材料その

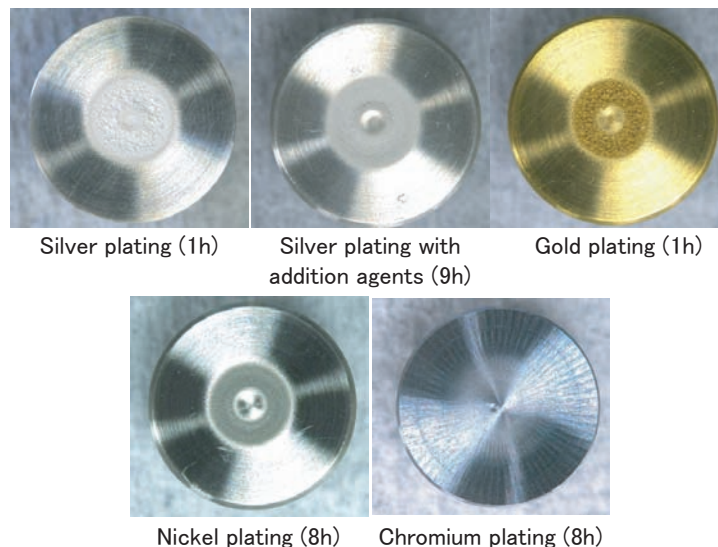


Fig.4 Eroded surfaces of test specimens (plated materials)

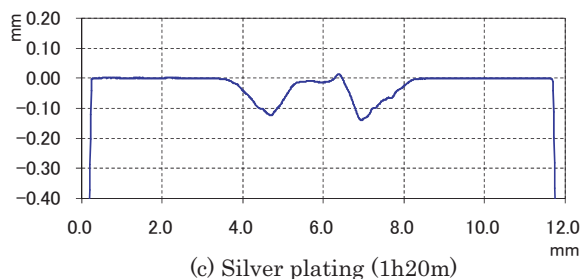
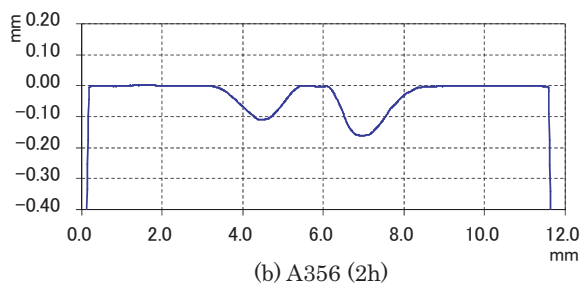
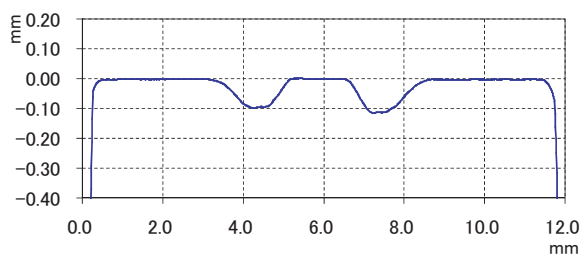


Fig.5 Comparison of eroded surface profiles

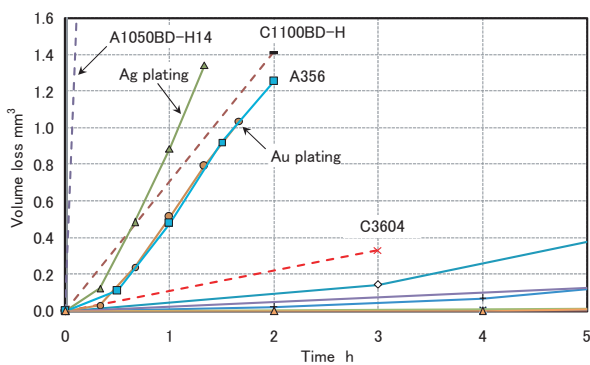
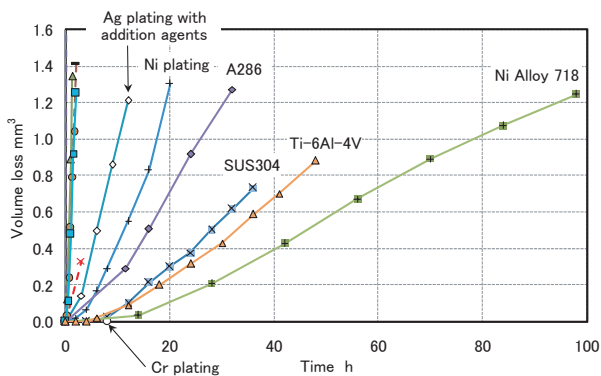


Fig.6 Volume loss curves

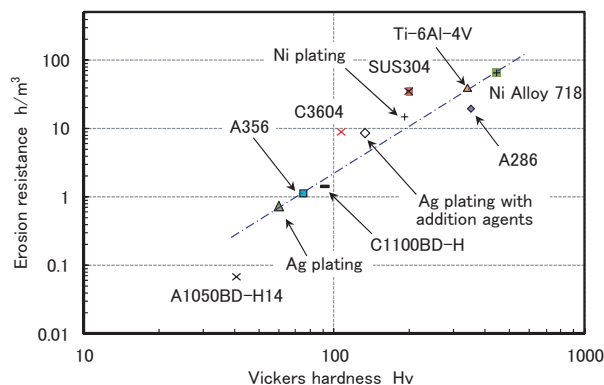


Fig.7 Relation between Hv and erosion resistance

ものが硬いため、いずれも壊食抵抗は大きい。ただし、A286は硬さに対する耐壊食性は他の材料と比べてやや劣っている。

銀メッキ材は、参照材料である純アルミを除けば本研究で用いた供試材料の中で壊食抵抗が最も小さい。インデューサライナの銀メッキ施工目的から、銀メッキはインデューサ材料より柔らかくする必要があり、壊食抵抗が小さくなることはある程度避けられない。従って繰り返し運用による長時間運転を目指す場合、銀メッキのキャビテーション壊食について十分注意する必要がある。しかし、添加剤を加えた銀メッキは通常の銀メッキより10倍壊食抵抗が大きく、ニッケルメッキに近い壊食抵抗を示し、硬さに対する耐壊食性も優れている。添加剤を加えた銀メッキおよびニッケルメッキとも通常の銀メッキと比べて壊食部の粗さが細かく、壊食メカニズムに違いがあると推定される。銀メッキ施工の目的や条件を満足することが前提となるが、銀メッキの耐壊食性向上のために添加剤を加えた銀メッキの適用は期待できる。

4.3 液体窒素によるキャビテーション噴流実験

図8に液体窒素によるキャビテーション噴流実験装置の概略図を示す。基本的な装置構成は水の試験装置と同じであるが、外部からの入熱をできるだけ防ぐために管路の断熱対策を行っている。真空断熱ガラス容器に水試験の場合と同じテストチャンバー（ガラス部は除去）を入れ、容器全体に液体窒素を入れて実験を行った。ガラス容器には断熱材を巻き、一部断熱材を切り取って観察窓とした。ガラス容器内は大気圧である。

予備実験として液体窒素を入れたガラス容器内で試験片を設置せずにノズルから加圧液体窒素を噴射させたところ、キャビテーション噴流と考えられる白色のジェットが確認された（図9 (a)）。

続いて純アルミの試験片に液体窒素噴流を当てる実験を行った。スタンドオフ距離、上流圧力は水試験と同じ

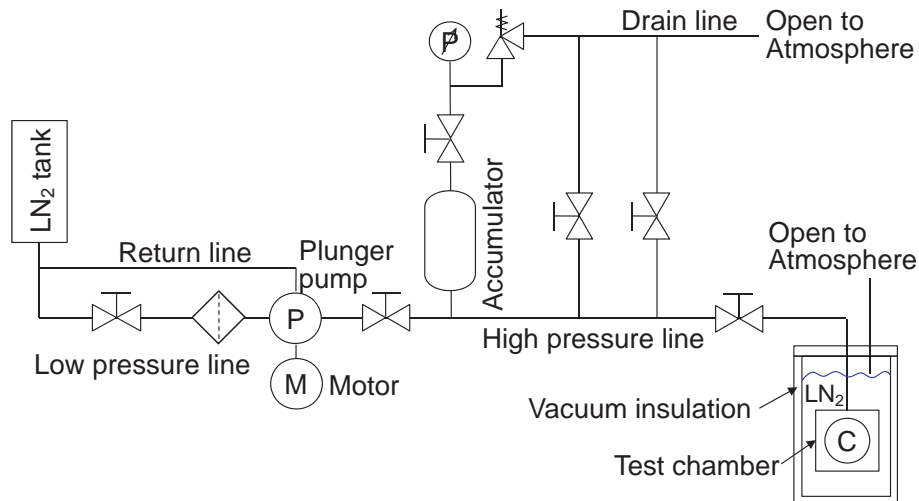


Fig.8 Test apparatus of cavitating liquid nitrogen jet

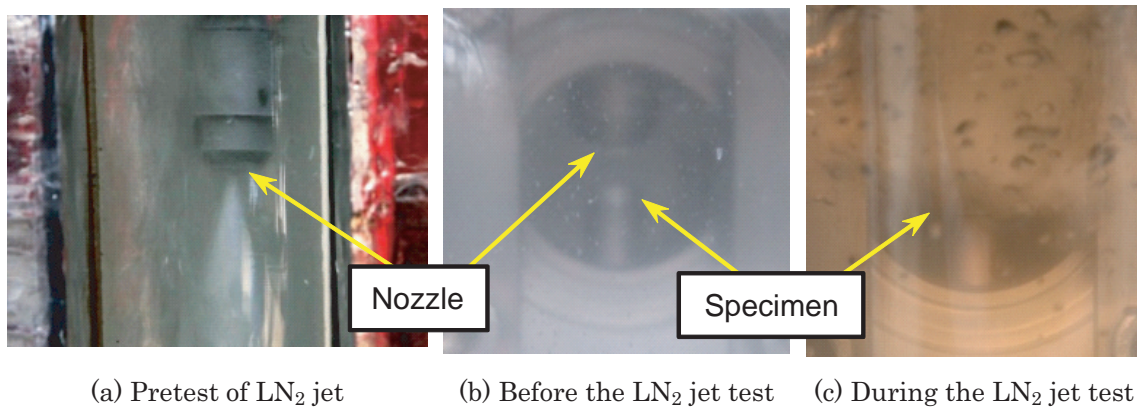
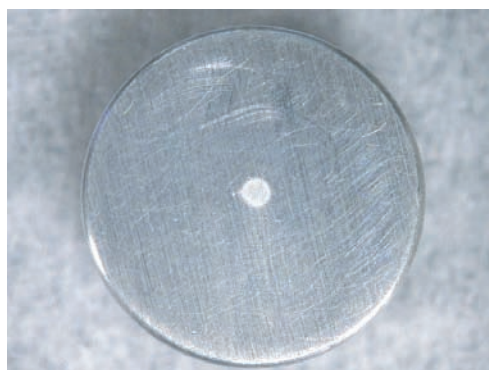
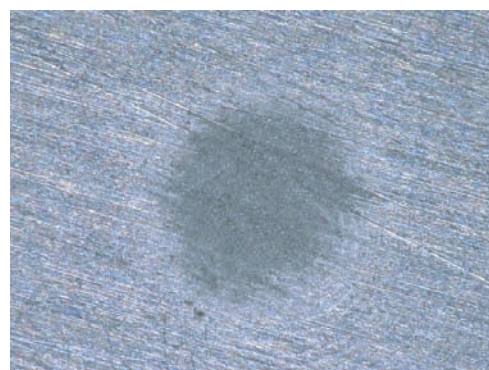
(a) Pretest of LN₂ jet(b) Before the LN₂ jet test(c) During the LN₂ jet test

Fig.9 Cavitating liquid nitrogen jet



(a) Damaged surface of Al specimen



(b) Expanded view

Fig.10 Eroded surfaces by cavitating liquid nitrogen jet

とし、下流圧力は大気圧（ガラス容器内圧）である。実験は約10分間実施した。ガラス容器内が大気圧であるためキャビテーション噴流が試験片に衝突した後もキャビテーションが崩壊し難く気泡が残る状態となり、噴流の衝突状況を詳細に観察することはできなかった（図9(c)）。

図10に実験後の純アルミ試験片の損傷状況を示す。水試験のようなリング状の壊食とは異なり中央部に損傷痕が見られ、ウォータージェットによる損傷に似ている。下流圧力が大気圧でありキャビテーションが崩壊し難いので、この損傷はキャビテーションよりジェットによる影響が大きいと考えられるが、詳細については更なる実験が必

要である。本実験では液体窒素中にキャビテーション噴流を発生させ、試験片に衝突させることに成功した。今後、液体窒素でのキャビテーション壊食試験を実現させるためには、下流圧力を加圧して試験片表面にてキャビテーションが崩壊する状況を作り出す検討が必要である。

5. 結言

ロケット用ポンプに用いられる材料を中心にキャビテーション噴流法による壊食試験を行い、キャビテーション壊食特性を取得した。インデューサやインペラに用いられる材料は総じて耐壊食性が優れている。一方、銀メッキ材は柔らかいため耐壊食性は低いが、添加剤を加えることにより壊食抵抗が約10倍増加し、硬度に対する耐壊食性も向上する。

また、極低温噴流実験装置を製作して液体窒素によるキャビテーション噴流実験を行った。液体窒素中のキャビテーション噴流の発生を確認し、噴流を当てた試験片表面には損傷痕が認められた。壊食を進行させて壊食特性を取得するためには更なる装置の改良が必要であるが、極低温流体によるキャビテーション壊食実験が実現可能であることが示された。

謝辞

本研究の試験装置に関して福井大学の服部修次教授には数多くの助言を頂き、試験片メッキ施工等に関して榎高秋化学の高橋正行氏、五十嵐徳明氏に、多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Tsujimoto, Y., et al., Observations of oscillating cavitation of an inducer, ASME J. Fluids Eng., 119(1997), pp. 775-781.
- 2) Hattori, S., Ishikura, R. and Zhang, Q., Construction of data base on cavitation erosion and analyses of carbon steel data, Wear, 257, (2004), pp. 1023-1029.
- 3) 服部・北川, データベースに基づく鋳鉄および非鉄材料のキャビテーション壊食抵抗の解析と炭素鋼データとの比較, 機論A, 74-738 (2008-2), pp. 248-253.
- 4) TSJ G 001:2011, 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 (2011).
- 5) ASTM G134-95, Standard test method for erosion of solid materials by a cavitating liquid jet, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02 (1997), pp. 537-548.
- 6) 祖山・他5名, 高速水中水噴流まわりのキャビテーション気泡運の高速写真観察, 機論B, 59-562(1993-6), pp. 1919-19240.