

# MIMTM を用いた水銀キャビテーション による金属の壊食損傷構造

義家敏正<sup>1)\*</sup> 二川正敏<sup>1)\*\*</sup> 直江 崇<sup>2)\*\*</sup> 小松正雄<sup>\*\*\*</sup>  
佐藤紘一<sup>2)\*</sup> 徐 虬<sup>3)\*</sup> 川合将義<sup>\*\*\*\*</sup>

## 1. はじめに

大強度陽子加速器研究施設群, J-PARC の物質生命科学実験施設 (MLF) 及び米国オークリッジ国立研究所核破砕中性子源 (SNS) には, 水銀を標的に用いたパルス核破砕中性子源が設置されている<sup>(1)(2)</sup>. 大強度の陽子線が水銀標的 (ターゲット) に入射すると, 核破砕反応による中性子の発生と共に, 熱衝撃に伴う圧力波が発生する<sup>(3)</sup>. この圧力波が水銀中からターゲット容器へ伝ばする過程で, 水銀とステンレス鋼製の容器の界面では負圧が発生する. この負圧によって水銀中にはキャビテーションが発生し, キャビテーション気泡の崩壊時に発生するマイクロジェットと衝撃圧により, 容器に微小ピット群からなるエロージョン面が形成される<sup>(4)-(8)</sup>. MLF に陽子ビームは 25 Hz で入射する. 従って, キャビテーションによる損傷 (ピッチング損傷) は水銀ターゲット容器の寿命を決定する上で重要な因子となる. Futakawa らは, 水銀中でのピッチング損傷を系統的に評価するために, 電磁力駆動の衝撃圧負荷試験装置 MIMTM (electro-Magnetic IMPact Testing Machine) を開発した<sup>(9)</sup>. 本稿では MIMTM を用いた材料の損傷構造研究の一端について紹介する.

## 2. MIMTM 実験装置の概要

### (1) 装置の構造

図 1 に MIMTM 実験装置とその断面図を示す. 水銀を充填する容器の直径及び高さはそれぞれ 100 mm, 15 mm である. 容器底部に固定したアルミ合金製のストライカーを, 電磁力により振動させることで水銀中に衝撃圧力を負荷する. 電磁コイルへ負荷するパワーを変化させることで衝撃圧を制御できる<sup>(9)</sup>. 水銀容器内の圧力変化を計測するために, 容器上部に圧力計が設置されている. 水銀と容器内壁の界面, 即ち, 底板, 上部, 側面にピッチング損傷が形成される. MIMTM のパワー 560 W で観測されたピッチング損傷の形態は, MW 級の陽子線入射実験で観測された損傷と凡そ等価である<sup>(9)</sup>. 衝撃圧の繰り返し周期は, J-PARC の水銀ターゲットに入射する陽子ビームと同じ 25 Hz である.

### (2) 気泡の観察結果

水銀中の圧力変化に伴う気泡挙動を観察するために, 水銀容器上部に  $\phi 50$  mm のガラス窓を設け, 容器壁面で発生した気泡の動的挙動を高速度ビデオカメラ (20000 frames/s) により撮影した<sup>(10)</sup>. 図 2 に観測された気泡と圧力及び振動加速度の時刻歴応答を示す. 図中の時刻 0 は, 電磁コイルへの電圧を印加した時刻, 即ち撮影と波形収集のトリガー時刻である. 圧力は  $-0.12$  MPa まで低下し, 0.4 ms から 1.5 ms

\* 京都大学原子炉実験所; 1) 研究員 2) 助教 3) 准教授 (〒590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝代西 2 丁目1010)

\*\* 日本原子力研究開発機構; 1) 研究主席 2) 研究員

\*\*\* 広島工業大学; 教授

\*\*\*\* 高エネルギー加速器研究機構; 名誉教授

Pitting Damage in Metals by Mercury Cavitation with MIMTM; Toshimasa Yoshiie\*, Masatoshi Futakawa\*\*, Takashi Naoe\*\*, Masao Komatsu\*\*\*, Koichi Sato\*, Qui Xu\* and Masayoshi Kawai\*\*\*\* (\*Research Reactor Institute, Kyoto University, Sennan-gun, Osaka. \*\* Japan Atomic Energy Agency, Ibaraki. \*\*\*Hiroshima Institute of Technology, Hiroshima. \*\*\*\*High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba)

Keywords: Hg cavitation, pitting damage, high-speed deformation, spallation material, nickel, SUS304

2013年1月15日受理 [doi:10.2320/materia.52.390]

の間は  $-0.12$  MPa でほぼ一定値を示し、その後急激に上昇する。振動加速度は、 $1.4$  ms までは水銀容器下部に固定したストライカーの振動であるが、 $1.4$  ms 後では、ストライカーの振動に  $15$  kHz 以上の高周波数成分が重畳している。また、気泡は  $0.4$  ms 前後に出現し、 $0.4$  ms から  $1.5$  ms の間で急激に膨張し、 $1.5$  ms 後に急激に収縮する。これらの結果より、キャビテーション気泡が負圧下で形成され、正圧に戻ったときに崩壊し高周波数の振動を誘発することが分かる。

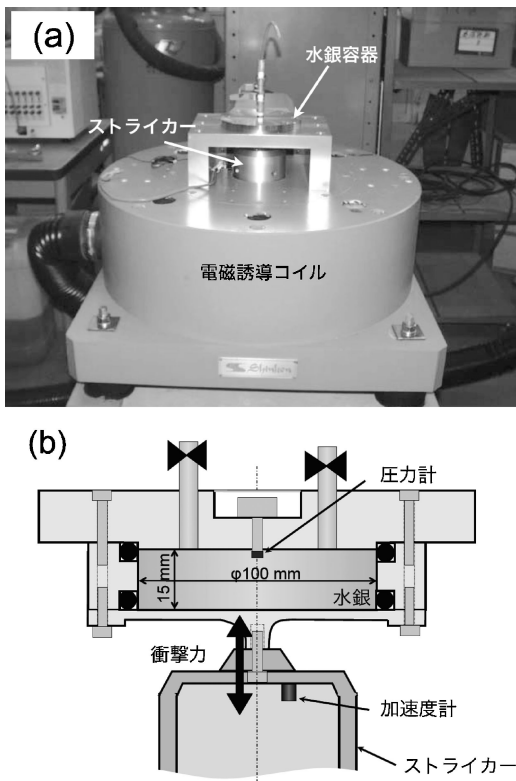


図1 MIMTM 実験装置。(a) 装置本体の写真、(b) 装置の断面図。

### (3) マイクロジェット

キャビテーション気泡の崩壊挙動は、ピitting損傷を形成する衝撃力を定量的に評価する上で重要である。一般的に、衝撃波とマイクロジェットの衝突がピitting損傷形成に大きな影響を与えることが知られている。水銀中でのキャビテーションでは、水と比較して密度が非常に大きいために、衝撃波よりもマイクロジェットの衝突が損傷形成の支配因子である。Futakawa らは高速度ビデオカメラによりマイクロジェットが壁面衝突後に飛散の様子を克明に観察し、数値計算結果と比較検討することにより、MIMTM の  $560$  W で生じたマイクロジェットの衝突速度は  $200\sim 300$  m/s であると予測した<sup>(11)</sup>。

## 3. 水銀キャビテーションによる金属の壊食損傷構造

### (1) Ni の衝撃試験による損傷構造

ピitting損傷により材料に導入される欠陥構造を調べるために、MIMTM を用いて、Ni と SUS304SS の衝撃試験と構造観察を行った。水銀マイクロジェットの衝突速度を  $200\sim 300$  m/s とすると、ピットの形成は高速変形による損傷と考えられるので、同じ試料の高速圧縮変形の結果と比較した<sup>(12)</sup>。

衝撃試験は MIMTM を用いて  $560$  W、 $25$  Hz で水銀に繰り返し衝撃を与えることにより、水銀と容器の界面に張り付けた試料にピitting損傷を与えた。試料は純度  $99.99\%$  の Ni と SUS304SS で、 $\phi 3$  mm、厚さ  $0.1$  mm のディスクを用いた。高速圧縮変形には、高速の重錘を材料に当てて変形させる高速圧縮変形装置を用いた<sup>(13)</sup>。図3に示すように高速の重錘をストップ付きの試料に当てて変形させるものである。試料の損傷後、透過型電子顕微鏡観察と陽電子消滅寿命測定を行った。

Ni の  $1000$  回の衝撃試験後の表面構造を図4に示す。浅いピットと深いピットが観察される。衝撃の回数が増すと浅い

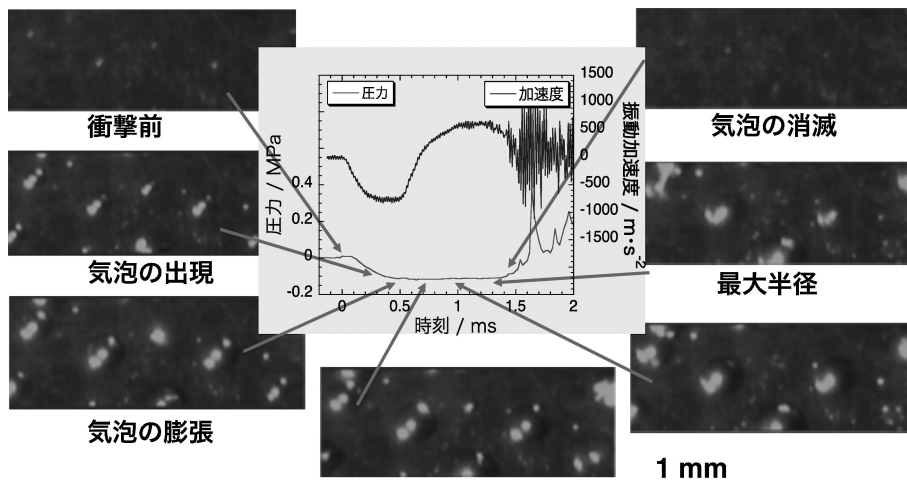


図2 気泡の成長、圧力、振動加速度の時刻歴応答(MIMTM のパワー  $560$  W)。

ピットの密度が増加しより深いピットが形成することから、浅いピットは1つの衝撃で、深いピットは複数の衝撃の重畳によることが分かる。水銀マイクロジェットの衝突によるピット形成については、数値解析もなされている<sup>(14)</sup>。更に繰り返しが増加すると、表面層がはく離する<sup>(15)</sup>。

表1はMIMTMで衝撃試験をした試料を水銀中から取り出して、陽電子消滅寿命測定を行った結果である。消滅寿命が短寿命と長寿命の2成分に分解できる場合、短寿命はマトリクス中での陽電子の消滅、長寿命は欠陥での消滅を示し、その寿命値から欠陥の同定が可能である<sup>(16)</sup>。Niの1000回の衝撃後の長寿命は、転位や積層欠陥四面体の存在を示す<sup>(17)</sup>。一方2000回の衝撃後は、原子空孔(寿命~170 ps)の存在を示す長寿命となった。これは衝撃により塑性変形が進み原子空孔が生成したためである。

以上の陽電子消滅寿命測定は、試料の衝撃面から行った。試料の衝撃面の反対面から陽電子消滅寿命を測定すると表1中のNi\*に示すように、衝撃面からの測定とほぼ同じ結果になった。欠陥の多い試料では陽電子の拡散距離が短く、表面から深さ~10 μm程度にある欠陥も検出できることから、

衝撃試験では欠陥が試料の厚さ0.1 mmの反対面近くまで生成していることが分かる。

透過型電子顕微鏡観察では、図5(a),(b)の模式図に示すように試料の衝撃の裏側から研磨して、小さな穴が開いた直後に研磨を中止し(図5(c)),穴の周辺や(図5(d))穴の開く直前(図5(e))の部分を観察することにより、衝撃面に形成されたピット近傍の欠陥構造を調べた。ピッチング損傷により導入された転位は一様に分布していた。

## (2) 高速圧縮変形との比較

比較のために高速圧縮変形装置による圧縮変形を行った。変形速度が低いと転位が多い場所と少ない場所に別れるセル構造になるが、速度が高くなるとセルの間隔が狭くなり、一様な転位分布となることが知られている<sup>(13)</sup>。

図6は100 m/sの重錘の衝撃を受けたNiである。多少のセル構造が見られる。高速圧縮変形の結果(図6)とMIMTMによる損傷構造(図5)を比較すると、後者はセル構造でないので非常に速い変形、100 m/sの重錘の衝撃による変形よりも遙かに速い変形を受けていることが示唆される。従って、水銀ジェットの速度の予測値200~300 m/sが欠陥構造からみても妥当であると結論できる。

SUS304SSの場合もNiと同様、MIMTMによる損傷では一様に分布した転位構造と共に多数のツインが観察され

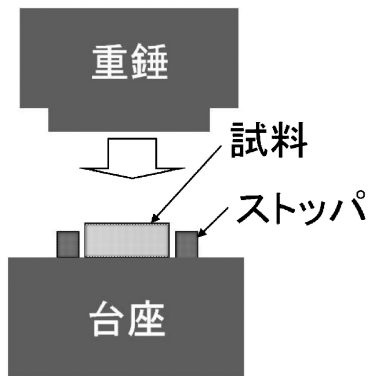


図3 高速圧縮変形装置。

表1 MIMTMによる衝撃試験後のNiにおける陽電子消滅寿命。試料の後ろの括弧内の数字は衝撃回数。Ni\*は衝撃の裏面より測定。

試料	平均寿命 (psec)	短寿命 (psec)	長寿命 (psec)	長寿命強度 (%)
Ni(1000)	125.6±0.4	79.2±12.4	143.9±6.9	54.1±8.3
Ni(2000)	131.6±0.5	100.2±14.5	160.7±16.6	38.9±17.6
Ni*(2000)	133.3±0.4	99.3±9.3	168.3±11.1	38.2±10.1

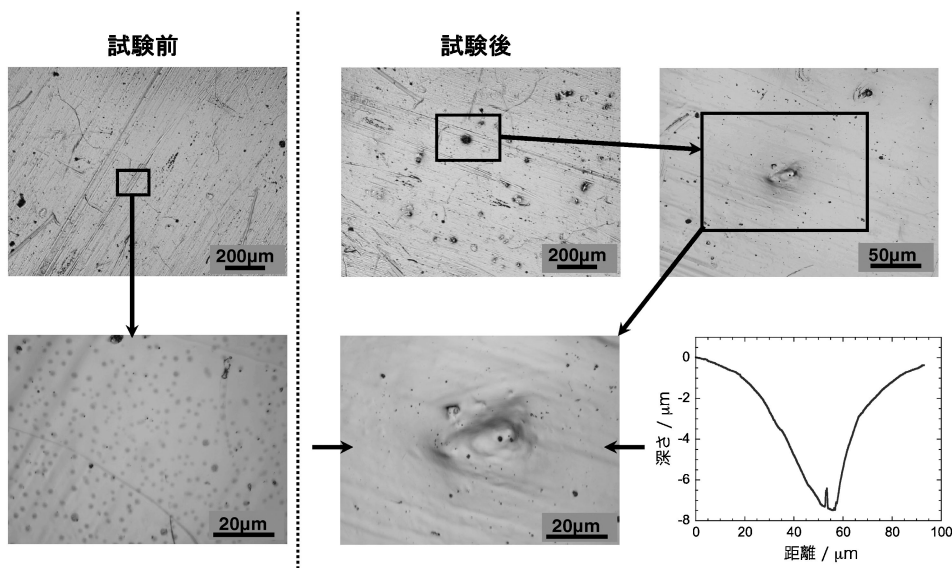


図4 MIMTMによる衝撃試験前後のNiにおける表面構造の変化。衝撃1000回, 560 W, 25 Hz.

た. 図7は SUS304SS のピitting損傷後の断面透過型電子顕微鏡観察の結果である. 高速圧縮変形による変形構造である図8と比較すると, ツイン組織には大きな差が無いが転位密度は MIMTM による損傷構造の方が高く, ピitting損傷ではやはり非常に速い変形を受けていると結論される.

#### 4. おわりに

水銀中への陽子線照射により, 水銀ターゲット容器内面に生成するピitting損傷は, 現在既に稼働している施設の運転安全性に関わる重要な課題である. そのため容器材料開発も行われた. 即ち, 水銀中のキャビテーションによる損傷形成を低減するために, 材料表面を硬化することでマイクロジェットによる局所変形が緩和すること, 或いは多層膜化することで局所衝撃波の伝ば挙動を変化させてある程度損傷を低減できることが, MIMTM を用いたキャビテーション損傷試験により明らかになっている<sup>(14)(18)(19)</sup>. しかし, 水銀ターゲット容器の設計で定められた寿命は, 延性が確保できる照射量という点から 1 MW の運転で陽子線入射回数にして約 2 億回とされており, 現在のところこの条件を満足する損傷抑制効果が材料改質では得られていない.

そこで水銀ターゲット容器の長寿命化を図るために, 容器材料に負荷される荷重を軽減させるといった観点からの容器

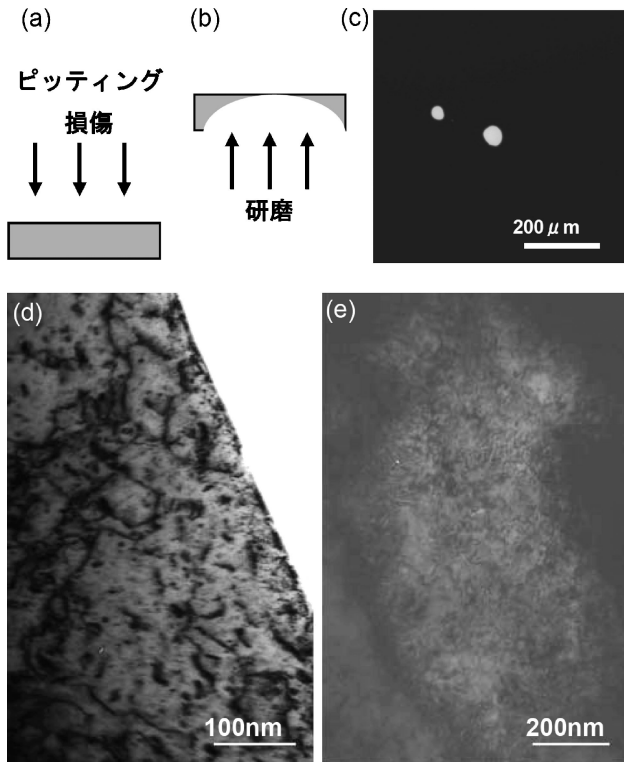


図5 MIMTM による1000回の衝撃試験後のNiの表面構造(560 W, 25 Hz). (a) ディスク試料と衝撃の模式図, (b) 裏面研磨, (c) 研磨により形成された穴, (d) 穴の周辺, (e) 穴が出来る直前, の透過型電子顕微鏡観察結果.

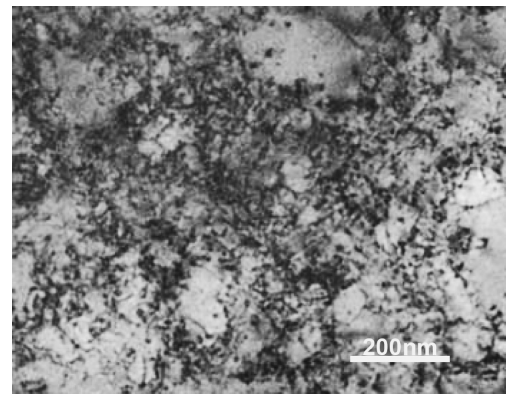


図6 重錘速度 100 m/sec で高速変形したNiの損傷構造.

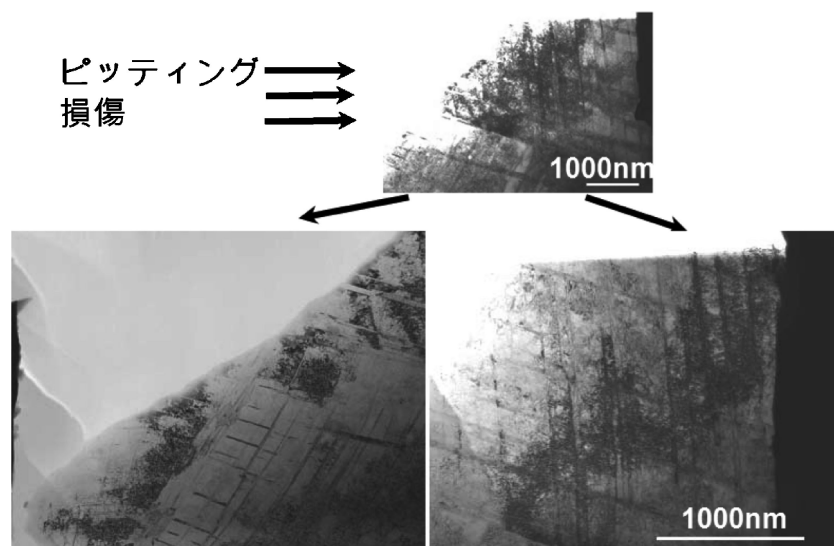


図7 MIMTM による衝撃試験後のSUS304SSにおける損傷構造(560 W, 25 Hz, 断面観察).

