最近の研究

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^{*}1) 二川正敏^{**}直江 崇^{**}小松正雄^{***} 佐藤紘一^{*}2) 徐 虬^{*}3) 川合將義^{****}

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⁽¹⁾⁽²⁾.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(3). 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⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾. 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(ピッティング損傷)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、水銀中でのピッティ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⁽⁹⁾.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⁽⁹⁾.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,側面にピッティング損傷が形成される. MIMTM のパワー 560 W で観測されたピッティング損傷の 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⁽⁹⁾.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 $\phi50 \text{ mm}$ 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⁽¹⁰⁾. 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

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]

^{*} 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)

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、ピッティング損傷を 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ッティング損傷形 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する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200~300 m/s であると予測した⁽¹¹⁾.

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

ピッティング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200~300 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⁽¹²⁾.

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 けた試料にピッティング損傷を与えた.試料は純度99.99% の Ni と SUS304SS で, ¢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⁽¹³⁾.図3に示すように高 速の重錘をストッパ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⁽¹⁴⁾.更に 繰り返しが増加すると,表面層がはく離する⁽¹⁵⁾.

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 トリッ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⁽¹⁶⁾. 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⁽¹⁷⁾.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~10µm 程度にある欠陥も検出できることから,



図3 高速圧縮変形装置.

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、ピッティング損傷に 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⁽¹³⁾.

図6は100m/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,100m/sの重錘の衝撃によ る変形よりも遥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200~300m/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

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	短寿命	長寿命	長寿命強度
Ni(1000) Ni(2000) Ni*(2000)	$(psec) \\ 125.6 \pm 0.4 \\ 131.6 \pm 0.5 \\ 133.3 \pm 0.4$	$(psec) \\ 79.2 \pm 12.4 \\ 100.2 \pm 14.5 \\ 99.3 \pm 9.3$	$(psec) \\ 143.9 \pm 6.9 \\ 160.7 \pm 16.6 \\ 168.3 \pm 11.1 \\$	(%) 54.1±8.3 38.9±17.6 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のピッティング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、ピッティ ング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.



図5 MIMTMによる1000回の衝撃試験後のNiの表 面構造(560W, 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.

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 生成するピッティング損傷は,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⁽¹⁴⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾.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1MW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).



図8 SUS304SS の高速変形による損傷構造. (a) 損傷前, (b) 重錘速度 50 m/sec, (c) 重錘速度 100 m/sec.

構造の改良が試みられている. 微細なバブルを外部から強制 的に導入して柔らかい水銀に変質させることで、陽子線入射 時に励起した圧力波を抑制させる方法である.これは福島の 震災後に更新した J-PARC の水銀ターゲット容器に応用さ れ,非常に良好な結果が得られている.

以上のことは, 大型機器に使用される材料の長寿命化が, 材料研究ばかりに留まらず、工学設計と協力して行うことが 必要不可欠であることを示している.

文 献

- (1) S. Nagamiya: Neutron News, 16(2005), 16-19.
- (2) Y. Ikeda: Neutron News, 16 (2005), 20-22.
- (3) M. Futakawa, K. Kikuchi, H. Conrad and H. Stechemesser: Nucl. Inst. Meth. Phys. Res., A439(2000), 1-7.
- (4) M. Futakawa, H. Kogawa and R. Hino: J. Phys. IV, Proc., 10 (PR9) (2000), 237-242.
- (5) M. Futakawa, H. Kogawa, R. Hino, H. Date and H. Takeishi: Int. J. Impact Eng., 28(2003), 123-135.
- (6) J. R. Haines, K. Farrell, J. D. Hunn, D. C. Lousteau, L. K. Mansur, T. J. McManamy, S. J. Pawel and B. W. Riemer: Summary of mercury target pitting issue, SNS-101060100-TR0004 (2002).
- (7) M. Futakawa, T. Naoe, C. C. Tsai, H. Kogawa, S. Ishikura, Y. Ikeda, H. Soyama and H. Date: J. Nucl. Mater., 343(2005), 70 - 80.
- (8) M. Futakawa, T. Wakui, H. Kogawa and Y. Ikeda: Nucl. Inst. Meth. Phys. Res., A562 (2006), 676-679.
- (9) M. Futakawa, T. Naoe, H. Kogawa, C. C. Tsai and Y. Ikeda: J. Nucl. Sci. Technol., 40(2003), 895-904.
- (10) 直江 崇, 二川正敏, 小川智史, 粉川広行: 日本実験力学会 誌, 実験力学, 6(2006), 301-307.
- (11) M. Futakawa, T. Naoe, H. Kogawa, H. Date and Y. Ikeda: JSME Int. J., A48(2005), 234–239.
- (12) T. Yoshiie, K. Sato and Q. Xu, M. Komatsu, M. Futakawa, T. Naoe and M. Kawai: J. Nucl. Mater., 398(2010), 227-231.
- (13) M. Kiritani, T. Sota, T. Tawara, H. Arimura, K. Yasunaga, Y. Matsukawa and M. Komatsu: Rad. Eff. Def. Sol., 157(2002), 53-74.

- (14) M. Kawai, M. Futakawa, T. Naoe, T. Yamamura and T. Igarashi: J. Nucl. Mater., 398 (2010), 193-198.
- (15) T. Wakui, T. Naoe, H. Kogawa and M. Futakawa: Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., A600 (2006), 150–153.
- (16) 永井康介,長谷川雅幸:まてりあ,44(2005),667-673.
- (17) E. Kuramoto, T. Tsutsumi, K. Ueno, M. Ohmura and Y. Kamimura: Comp. Mater. Sci., 14(1999), 28.
- (18)直江 崇,大井俊志,粉川広行,涌井 隆,二川正敏:材料, **57**(2008), 159–166.
- (19) T. Naoe, M. Futakawa, T. Shoubu, T. Wakui, H. Kogawa, H. Takeuchi and M. Kawai: J. Nucl. Sci. Technol., 45(2008), 698-703.



******* 1973年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了 1987年4月 北海道大学助教授 1992年12月 京都大学原子炉実験所教授 2013年3月 京都大学定年退職 専門分野:格子欠陥,材料照射損傷 ◎最近は加速器駆動未臨界炉開発を目的とした高エネ ルギー陽子による照射効果の研究に従事. ******

義家敏正



佐藤紘



徐

蚏.





川合將義

最近の研究

394