

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：82110

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25600145

研究課題名(和文)大強度パルス中性子による疲労荷重下の機械内部応力測定システムの開発

研究課題名(英文)Development of in-situ internal stress measurement system under fatigue loading based on high intensity pulsed neutron beams

研究代表者

秋田 貢一 (AKITA, Koichi)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・リーダー

研究者番号：10231820

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：大強度陽子加速器施設の物質・生命科学実験施設(J-PARC, MLF)に設置されている中性子工学回折装置TAKUMIにおいて、その場中性子応力測定システムを構築した。本システムは、DAQミドルウェアとデータ収集モジュールTrigNETから成り、中性子データと荷重、ひずみ、温度などの実験パラメータとを同期して記録できる。また、システムの有効性を示すために、TAKUMIにおいて疲労荷重負荷中のその場中性子回折測定を実施した。その結果、疲労負荷中の荷重に対応した回折ピークシフトの記録に成功し、構築したシステムの有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：An in-situ neutron stress measurement system has been developed at the neutron engineering diffractometer TAKUMI in the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) of J-PARC. The system can record experiment parameters, such as load, strain and temperature, as an event with a synchronized time tag along a same timeline for a neutron detection event by using a DAQ-Middleware and a TrigNET, which is a universal signal readout module. In-situ neutron diffraction measurements during fatigue loading have been performed using the system at TAKUMI to demonstrate its advantages. As a consequence, diffraction peak shifts which correspond to the fatigue load have been successfully recorded, and therefore the effectiveness of the system has been confirmed.

研究分野：材料強度

キーワード：応力 疲労 パルス中性子 中性子回折 その場測定

### 1. 研究開始当初の背景

機械・構造物に作用する応力は、製造段階で発生する残留応力と稼働時の外的要因による負荷応力とが重畳した状態になっており、さらにその残留応力は稼働中に変化することがあることなどから、数値解析的に求めることは容易ではない。そのため、実機の稼働状態における各部の応力を実測することが望まれる。

中性子回折を利用する中性子応力測定法 [1, 2] は、非破壊、非接触で部材内部の残留応力測定が可能であり、これまでにエンジンブロックやプラント用配管溶接部など様々な機械・構造物内部の応力測定が実施されている。ただし、いずれも静的状態下の残留応力測定であり、実働中の機械における内部応力測定の実施例はみられない。その原因は、中性子の輝度が比較的低いことから、測定に分単位の時間を要するためである。これに対し、大強度陽子加速器施設物質・生命科学実験施設 (J-PARC/MLF) で発生するパルス中性子は、瞬間輝度が従来の定常中性子より 2 桁高いため、機械内部の応力が時分割測定できる可能性がある。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、J-PARC/MLF で発生するパルス中性子を利用した「高時間分解能」と「内部測定」が両立した応力測定システムを構築し、疲労負荷中の材料内部の応力測定を実現することである。開発したシステムを応用することで、疲労荷重下における機械内部の実応力や損傷の挙動が初めて把握できるため、実機の疲労損傷メカニズムに関する理解の進展が期待できる。

### 3. 研究の方法

J-PARC/MLF のパルス中性子にもとづく工学回折装置 TAKUMI (図 1(a), (b)) において、まず、時分割回折測定システムを構築した。次いで、TAKUMI に荷重試験機を設置し、開発したシステムにより荷重負荷中のその場回折測定を試みた。

### 4. 研究成果

#### (1) 実験方法

J-PARC/MLF ではデータ収集システムにイベントレコーディング方式が採用されている (図 2)。また、電気信号を中性子データと同期したイベントデータへ変換できるデータ収集モジュール TrigNET が、高エネルギー加速器研究機構によって開発されている [3]。ここでは、この TrigNET を本研究費によって TAKUMI に導入し、回折データ収集システム (DAQ) と連携させることで、荷重やひずみ、温度などの実験パラメータを、中性子データと同期して記録するシステムを構築した (図 3)。

次いで、システムの有効性を確認するために、繰返し負荷中の中性子データ取得を行っ

た [4, 5]。試験片は Ni 合金 Inconel 617 とし、荷重試験機を TAKUMI の試料ステージに設置した。図 3 にレイアウトを示すように、荷重試験機はビーム入射方向に対して 45° 傾けて設置し、TAKUMI の +90° および -90° の両検出器バンクで、荷重方向およびその直交方向のひずみを同時測定した。回折データ信号と荷重試験機からの荷重データ信号を同時かつ連続的に記録した。信号の測定間隔は 1 msec とした。負荷は、引張負荷を段階的に増加させていく場合 (実験 1) と、負荷除荷を連続的に繰返す場合 (実験 2) の 2 パターンを試した。

測定したデータは、中性子散乱データ解析用オブジェクト指向データ解析システム *Manyo-Lib* [6, 7, 8] により、時間や荷重などの必要なパラメータでスライスして、ヒストグラムデータに変換した (図 4)。



(a) パルス中性子工学回折装置 (TAKUMI)



(b) TAKUMI 用油圧疲労試験機 (容量 50 kN)

図 1 J-PARC/MLF の中性子工学回折装置

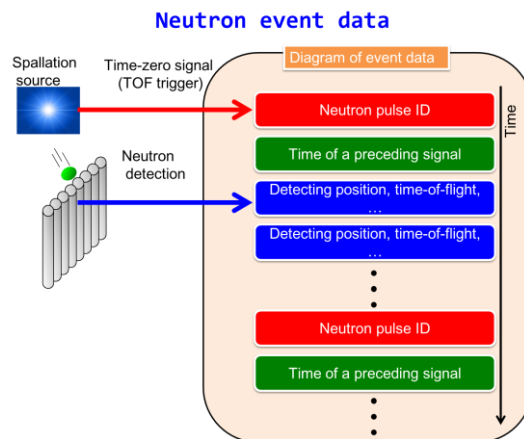


図 2 J-PARC/MLF のイベントレコーディング方式

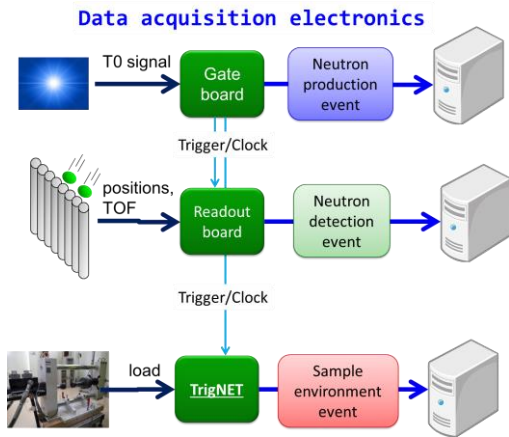


図3 TAKUMIにおける TrigNET を利用したその場中性子回折データ取得システム

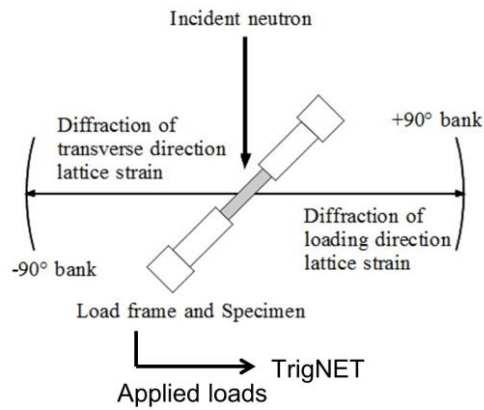


図4 TAKUMI における実験セットアップ

Schematic diagram of data reduction

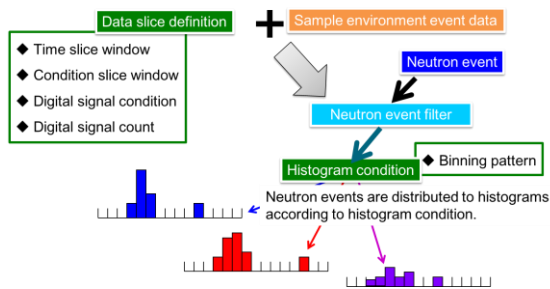
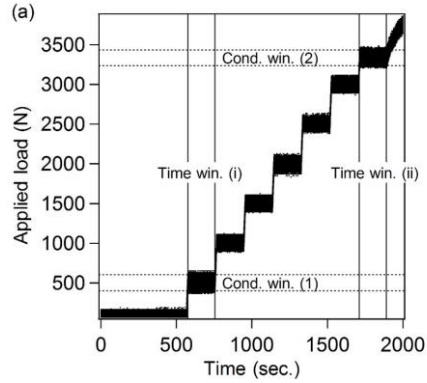


図5 データ変換の模式図

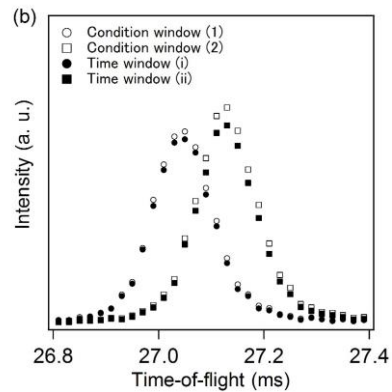
(2) 結果および考察

実験1で得られた結果を図6(a)および(b)に示す。図6(a)は、引張負荷を段階的に増加していく間に TrigNET で記録した荷重である。図中に示す時間ウインドウ (Time window) および荷重ウインドウ (Condition window) によってイベントデータをスライスした。図6(b)は、そうして得られた200回折線の例である。時間ウインドウおよび荷重ウインドウでスライスして得られた回折線がほぼ一致している。また、

荷重が高いほうが (図6(a)、(b)における(2)のケース)、中性子の飛行時間 (TOF: Time of flight) が長くなっており、これは、引張方向の格子面間隔が増加していることを示している。以上から構築したシステムが計画通りに機能していることが確認された。



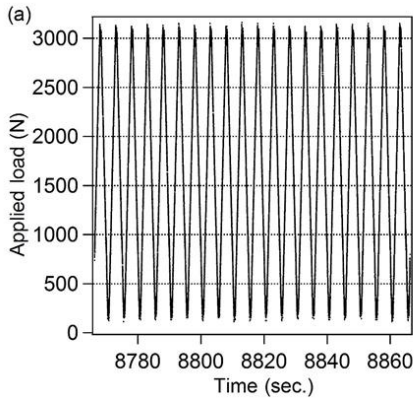
(a) TrigNET で記録した段階的引張負荷中の引張荷重。



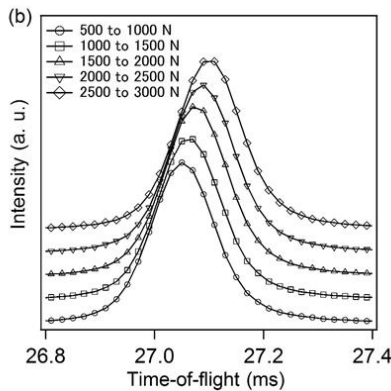
(b)200回折プロファイル(負荷方向)

図6 段階的引張試験における結果

次に、負荷-除荷繰返し実験 (実験2) の結果を図7(a)および(b)に示す。図7(a)は、実験で測定された20サイクルまでの負荷-除荷繰返しにおける荷重パターンである。この荷重パターンにおいて、500N から3000Nまでの範囲を荷重幅500Nステップで、200回折のプロファイルを積分した。その結果を図7(b)に示す。荷重の増加とともに、TOFすなわち格子面間隔が増加していく様子がとらえられている。したがって、繰返し荷重下においても構築したシステムが有効に機能していることが確認できた。



(a) TrigNET で記録した繰り返し荷重線図



(b)200 回折プロファイル(負荷方向)

図7 繰り返し荷重試験における結果

### (3) 結論

J-PARC/MLF の中性子工学回折装置 TAKUMI において、中性子データと荷重、ひずみ、温度などの実験パラメータとを同期して記録するその場中性子回折測定システムを構築し、負荷実験を実施してそのシステムの有効性を確認した。

謝辞：中性子回折実験は J-PARC において実施した (J-PARC 課題番号 2014P0805)。関係各位に謝意を表す。

### 参考文献：

- [1] A. Allen, C. Andreani, M.T. Hutchings and C.G. Windsor, NDT Int., 14 (1981) 249-254.
- [2] ISO/TS 21432:2005, "Non-destructive testing, Standard test method for determining residual stresses by neutron diffraction", 2005.
- [3] T. Seya, S. Muto and S. Satoh, MLF Annual Report (2010) 102-103.
- [4] T. Ito, S. Harjo, Y. Inamura, T. Nakatani, T. Kawasaki, J. Abe, K. Aizawa, Int. Conf. Processing & Manufacturing of Advanced Materials, THERMEC2013, Dec. 2013, in Las Vegas, USA.
- [5] 伊藤崇芳, ステファヌス・ハルヨ, 稲村泰弘, 川崎卓郎, 中谷健, 秋田貢一, ゴン・

ウー, 相澤一也, 第6回 MLF シンポジウム, 2015年3月, つくば市.

- [6] J. Suzuki, T. Nakatani, T. Ohhara, Y. Inamura, M. Yonemura, T. Morishima, T. Aoyagi, A. Manabe and T. Otomo, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 600 (2009) 123-125.
- [7] Y. Inamura, K. Nakajima, R. Kajimoto, T. Nakatani, T. Otomo, J. Suzuki, J-Y. So, J-G. Park and M. Arai, Proc. 19th Meet, Int. Collaboration on Advanced Neutron Sources, PSI-Proc. (2010) 10-01
- [8] T. Ito, T. Nakatani, S. Harjo, H. Arima, J. Abe, K. Aizawa and A. Moriai, Mater. Sci. Forum 652 (2010) 238-242.

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計2件)

- (1) 伊藤崇芳, ステファヌス・ハルヨ, 稲村泰弘, 川崎卓郎, 中谷健, 秋田貢一, ゴン・ウー, 相澤一也, 疲労試験その場中性子回折ストロボスコピック測定, 第6回 MLF シンポジウム, 2015年3月, つくば市.
- (2) T. Ito, S. Harjo, Y. Inamura, T. Kawasaki, W. Gong, K. Akita, T. Nakatani, J. Abe and K. Aizawa, Software development for in-situ neutron diffraction measurements during fatigue tests, 2nd Int. Symp. on Science at J-PARC (J-PARC 2014), July 2014, in Tsukuba, Japan.

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

秋田 貢一 (AKITA, Koichi)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・リーダー

研究者番号：10231820

#### (2) 研究分担者

ステファヌス・ハルヨ (HARJO, Stefanus)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARC センター・研究主幹

研究者番号：40391263

伊藤 崇芳 (ITO, Takayoshi)

一般財団法人総合科学研究機構・利用研究促進部・研究員

研究者番号：00537342