

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22246125

研究課題名(和文) 先進小型高エネルギー X 線源・高品質中性子源の原子力状態監視保全応用

研究課題名(英文) Practical application of innovative small X-ray beam source and neutron beam source for condition monitoring maintenance on atomic power plants.

研究代表者

上坂 充 (UESAKA MITSURU)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：30232739

研究成果の概要(和文)：発電所等の安全運転のための最も重要な方策のひとつである状態監視保全の革新的技術開発が必要とされている。一方で、先進小型 X 線源と安定高品質中性子ビーム源が開発され実用化されつつあり、これらビーム源を利用した状態監視保全を実施できる状況となった。中性子回折によるボールベアリングの残留応力の測定のための中性子検出器の開発を行った。また、高エネルギー小型 X 線源の改良により、回転体の非破壊検査の高度化を図った。さらに、オンサイト残留応力測定のための基礎的実験を行った。

研究成果の概要(英文)：Development of innovative technology of condition monitoring maintenance for power plant is required. On the other hand, innovative small X-ray beam source and neutron beam source become available for condition monitoring maintenance. In this study, new neutron detector for residual stress measurement is developed. Also, fundamental experiment of onsite residual stress measurement by X-ray is conducted

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	18,100,000	5,430,000	23,530,000
2011 年度	10,300,000	3,090,000	13,390,000
2012 年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
総計	36,700,000	11,010,000	47,710,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：放射線工学・ビーム科学

1. 研究開始当初の背景

発電所等の安全運転のための最も重要な方策のひとつである状態監視保全の革新的技術開発が必要とされている。一方で、先進小型 X 線源と安定高品質中性子ビーム源が開発され実用化されつつある。これらビーム源を利用した状態監視保全を実施できる状況となった。先進小型 X 線源としては大型タービン用すべり軸受けの残留応力・表面粗さのその場検査用 5mm 径チューブ型 10-60keV X 線源・検出システムと、小・中型ポンプ軸受けのシングルショット透視検査

950keV X バンド(9.3GHz)ライナック X 線源を活用できるようになった。また、日本原子力研究開発機構の研究炉 JRR3 と J-PARC からの安定高品質中性子ビームによる 3 次元残留応力測定を行い、上記 X 線による残留応力測定の精度保証、軸受けの余寿命評価を補ってん支援する必要がある。

2. 研究の目的

先進高周波・レーザー技術等の導入により、小型可搬型高エネルギー電子ライナック X 線源の開発と利用が可能になった。また現放

放射線障害防止法においても管理区域外にて使用可能な（電離放射線障害防止規則に準じた安全規制のもと）1MeV以下の電子加速器X線源も複数開発されている。しかもX線エネルギーを2色化して、物質との透過など相互作用の違いを計測して数値解析処理して、元素・物質識別も可搬型のシステムで可能になってきた。一方、中性子源もR Iを使ったシステムや、放電型・加速器型核融合中性子源が実用化されている。X線の場合、高原子番号や重い元素で強い吸収があり、検知が容易になる。また、中性子は水に強く散乱・吸収されるため、水分やそれによる金属腐食の検知が可能である。また U,Np,Pu など核分裂反応を起こして、2次中性子・ γ 線を高精度に検出することにより、核物質の高精度検出と定量管理も可能になりつつある。

X線回折による残留応力の課題は、表面の残留応力しか評価できず、表面粗さの影響を受けてしまうことである。X線ターゲットとして Cr を選択すると特性X線は 5keV で鉄鋼材への浸透深さは 10 μ m 以下である。しかし現場での鉄鋼機器の表面はほとんどの場合で滑らかでない。たとえば大型の滑り軸受けの滑り面は交換かどうかの判断基準の表面粗さは 7 μ m 程度である。これをX線回折で残留応力を評価しようとする、X線回折の角度分布が平坦になる傾向があり、残留応力を低めに評価してしまうことが知られている。一方、中性子回折では中性子のエネルギーにも依存するが、中性子はかなりの深層まで透過するため、たとえば深さ方向分布を測定するなど、表面粗さの影響を除去することができる。本研究では、適当数の表面粗さを変えた試料を用いて、X線回折と中性子回折による残留応力測定を行い相互比較を行い、X線回折による結果から表面粗さの影響を差し引く手法を検討する。そこには、逆問題解析手法を適用していく。適当な表面粗さとパターンを想定して、X線回折角度分布への影響を調べる。その順問題結果データから、表面粗さとパターンを推定していく。上記手法が確立すれば、残留応力が既知、あるいは無視できるケースでは、X線回折によって、表面粗さが評価できることになる。

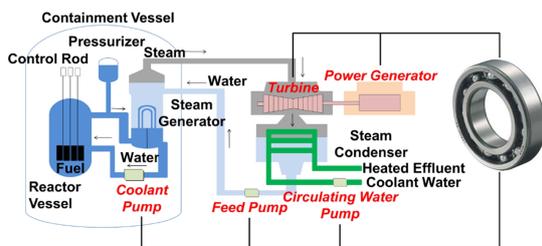


図 1. 原子力発電所で使用される横型ポンプでの軸受け

本研究で対象とするもうひとつのX線・中性子融合手法は、図 1 及び図 2、図 3 に示すような原子力発電所で使用される横型ポンプでの軸受け（ベアリング）の定量的余寿命評価である。



図 2. 軸受け(ボールベアリング)



図 3. ボールベアリングに使用される鋼球

原子力発電に安全確保・稼働率向上に、状態監視保全、つまりプラントを稼働させながら検査評価する保全手法が重要となっている。最も故障事象の多い機器はポンプなど回転機、部品はベアリングである。ここまでの評価は、振動計によって、加速度信号発生頻度の上昇カーブをフィッティングして、破壊までの余寿命を推測している。しかし機器や運転条件によって結果のパラッキは甚大となっている。ここまで実機軸受けの劣化加速試験を行い、振動法、Acoustic Emission(AE)、潤滑油分析中の摩耗粒子分析の同時計測を行って精度向上を図っている。実際のベアリングの劣化損傷は、玉と内・外輪の衝突による疲労破壊と考えられる。末期のマクロ的損傷は振動法や摩耗粒子分析で評価できる。そこでさらに軽度劣化の段階的的過程での残留応力が把握できれば、劣化の度合いが疲労破壊曲線 (SN カーブ) と照らし合わせて評価することが可能になる。この手法が確立すれば、回転機というシステムの軽度・重度劣化が、軸受け材料の疲労破壊として捉えられ、

ここまで蓄積されかつ信頼性のある材料データを活用して、余寿命を評価することができる。中性子回折法によって、劣化軸受け部品の残留応力の深さ方向分布を測定したいと考えている。それによって内部表面劣化起因説など基礎科学も議論できる。

3. 研究の方法

残留応力・表面粗さのその場検査用の5mm径チューブ型10-60keV X線源・検出システムについてはまず60keV X線源・ゴニオメータ・小型X線CCDカメラによるシステムを構築して原理実証、精度、測定時間を把握する。そのあと実機システムを設計する。実験的には、半導体型数列センサアレイを用いたX線検出システムの設計・製作・実証する。また、日本原子力研究開発機構の研究炉JRR3とJ-PARCからの安定高品質中性子ビームによる3次元残留応力測定を行い、上記X線による残留応力測定の精度保証、および逆問題解析による残留応力と表面粗さの識別評価を行う。小・中型ポンプ軸受けのシングルショット透視検査には950keV Xバンド(11.424GHz)ライナックX線源を活用する。使用前・およびAE信号ピーク時・振動信号増大時に劣化加速試験を中止したときの、玉・内外輪の損傷部周辺の残留応力を中性子回折で3次元に評価する。その場合の疲労破壊曲線での位置を評価する。2つの方法論により、軽度・重度損傷の軸受けの余寿命評価を定量的に評価する。

(1) 残留応力・表面粗さ検出

(株) エーイーティージャパン・アキュセラが開発中の60keVチューブ型X線源を用いて、そこに半導体型数列センサアレイを取り付け、回転型コリメータで、被検査体へのX線入射角を変えられるプローブを設計・製作する。概念設計図を図5に示す。平成22年度の実証実験では、既存の60keVチューブ型X線源、市販のゴニオメータ、市販のX線CCDカメラを使って、感度・測定時間を把握する。平成23年度はその結果に基づき、電子エネルギーを10keVにして小型化を図り、陽極であるX線ターゲットはCr(特性X線5keV)とし、外径5mmを実現させる実用システムを基本設計する。平成24年は、下記のようにX線検出ラインセンサを既存60keV X線源にとりつけ、図5のシステムを実証できる体系を構築し、実験的検証を行う。アルゴリズム等を候補として定式化する。さらに、実証チューブ型X線プローブからの実機試料に適用し、残留応力および表面粗さの弁別判定を試みる。

力値を得る。その情報をX線システムからの残留応力・表面粗さの弁別評価に活用する。

(2) 軸受け余寿命評価

平成21年度950keV XバンドライナックX

線源の強度増強・安定化の改良を完了する見込みである。また電子ビーム収束コイルも用いて電子ビームサイズ、すなわちX線サイズを2mmから1mmに小さくする。その改良ライナックX線源と、前述の高感度半導体フラットパネル検出器を用いて、感度・空間分解能を確認する。まずは市販の半導体フラットパネル検出器を導入して、シングルショット透視撮像を行う。その後、強度0.2Gy/min@1m、X線サイズ約1mmでの、シングルショットで0.1mmの分解能のセンサアレイを設計し、製作し、実証する。X線シングルショットによって軸受けが回転中であっても透過静止画像を鮮明に撮影できる。これにより、損傷した軸受けの損傷状態が機器動作中であっても確認できることとなる。これまでに回転機器(送風機など)に対して同様の実験を行ってきており、静止画像を取得することが可能であることは実証済みである。しかし、検出器の感度などの影響を受けシングルショットでは鮮明な画像としては得られず、取得画像の重ね合わせを行ってきた。この手法であると、回転機器の回転周波数のずれやライナックX線との同期の際に生じるジッターの影響により、画像ににじみが生じてしまっている。そこで、高感度のX線検出器により画像を重ね合わせることなく、シングルショットで鮮明な画像取得を行っていく。950keV X線システムでは軸受け損傷が進んだ状態を観察することで、軸受け残余駆動時間を評価する。

(3) 中性子回折

実機軸受け横荷重劣化加速試験で、使用前、およびAE信号ピーク時、振動信号増大時に劣化加速試験を中止したときの、玉・内外輪の損傷試料を用意する。試料は測定用に適当に分解・切り出しし、XYZステージに登載して、効率よく3次元分布測定を行う。損傷部周辺の残留応力を評価する。その損傷部の疲労破壊曲線での劣化の度合いを評価する。中性子回折による残留応力測定は、原理的には同様なX線回折による残留応力測定に比べ、試験体深部の状態まで測定できるというメリットがある。それゆえ、上記のような複数の損傷状態に対し損傷の過程を測定できる可能性がある。この測定により、軸受けの劣化損傷の進展状況が損傷部分の残留応力という物理的指標によって評価できる。劣化加速試験で作成された複数の試料により従来の評価指標の測定データに中性子回折法で得られた応力状態をプロットし、余寿命評価へ適用する。中性子源として茨城県東海村にある日本原子力研究開発機構の研究炉JRR-3Mおよび大強度陽子加速器研究施設J-PARCを使用する。mm単位の空間分解能による物体内部(数cm)の応力分布測定は中性子回折法でしか不可能、従来の原子炉中性子

源を利用した角度分散法では、溶接金属など集合組織が強く、粗大粒の領域での測定はほぼ不可能であった。

加速器中性子源による飛行時間法を利用すると、多くの回折ピークを多方向から一度に得られるので、集合組織を考慮して格子面間隔変化から弾性ひずみを同定できる可能性が高い。試料揺動法を取り入れることによって、従来困難であった粗大粒集合組織部材の測定が可能になると期待される。実現すれば、原子炉機器の溶接継手の信頼性向上に役立つ。ニッケル基合金ほかの応力腐食割れに及ぼす残留応力の影響解明などにも貢献できる。また、中性子ラジオグラフィやブラッグエッジ測定を併用する測定技法の開発が興味深いところである。サブミリメートル単位の空間分解能で残留応力を評価するには、放射光 X 線回折が適しており、この場合の透過深さは数 mm であり、表面直下の応力分布しか測定できない。表面の残留応力は、数 10 μm の微小点 X 線回折によって、表面直下の応力分布を平面応力状態として測定できる。このような表面直下の測定は中性子では困難である。さらに結晶粒内数 μm からサブ μm の空間分解能で測定を行うには、近年、進歩が目覚ましい FESEM/EBSD 測定における Wilkinson 法の適用が考えられる (Si などで良い結果が得られているが、実用鋼やアルミニウム合金などでは、まだ成功していない模様)。加熱・引張その場測定を可能にしつつあり、結晶粒内外のひずみ分布の検出が、応力腐食割れ抑制研究などでは、きわめて重要である。

上記の測定方法を相補的に用いて、 μm から数 cm にわたるスケール毎の評価を行い。全体像の把握を狙いたい。スケールブリッジング測定として、相補的に活用する方法を確立を目指した。

4. 研究成果

(1) ボールベアリング鋼球の加速度劣化試験
 トライボテックス(株)において、転がり軸受に対し定格荷重より強い力を加えて回転させる加速劣化試験を行い、異なる3つの劣化度の転動体試料を作成した。この試験では振動法と潤滑油診断法、それと AE 法の3つのパラメータを破壊が起きるまで計測した(図4)。横軸は試験時間(=回転数)、左縦軸は振動加速度信号、右縦軸は AE 信号カウント数である。各パラメータの変化と転動体の劣化度を比較すると、AE 信号数がピークに達した後に油中の摩耗粒子数が増大し、最後に大規模な破損が起き、その時振動加速度が急激に大きくなっている。つまり転動体の破損を検出したパラメータの順序は AE 信号→油中粒子数→振動であった。作成した転動体試料は(1)実験前(2)AE 信号ピーク発生直後(3)破損後

の3種類であった。

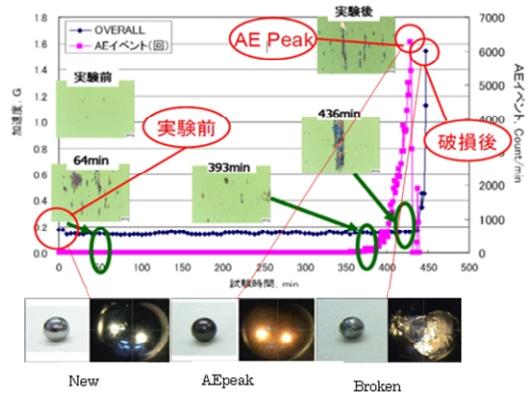


図3 加速劣化試験と作成試料

図4. ボールベアリング鋼球の加速劣化試験

それぞれ New、AEpeak、Broken と称することにす。各試料の残留応力を測定し、その変化と加速劣化試験のパラメータを比較することで軸受の正確な余寿命評価を試みた。

4つの施設・実験装置で試験的に転動体(鋼球)試料の残留応力測定を行った。表1に施設・実験装置での実験結果を示す。

施設・装置	測定手法	測定領域	成果
AutoMATE (リガク(株))	実験室 X 線による sin ² 回折法	表面(5 μm 深さ)	表面の残留応力の変化を測定
RESA-1 (JRR-3)	中性子による角度 分散法	-1mm~1mm	new と AEpeak に応力分布の差異を確認
匠 (J-PARC)	中性子による飛行 時間法	-1mm~1mm	AEpeak の残留応力を計算
BL14B1 (Spring-8)	白色 X 線による エネルギー分散法	-3.5mm~3.5mm	AEpeak の格子間隔を高分解能で測定

表1. 施設・実験装置での実験結果

結果としては、RESA-1での測定後に相補的に匠と Spring-8の測定を試験的に行ったが、それらの方が RESA-1よりも高い分解能と適合性を当転動体試料に示した。従って、ベアリング材料のように、100 μm 程度の空間分解能で数 mm の範囲の残留応力・ひずみの分布を 50MPa、0.3%程度の分解能で評価するには、放射光で 70keV 程度単色 X 線回折法が最適であることがわかった

(2) 中性子回折の高度化

中性子回折を用いた残留応力測定は工業的に非常に重要であり、すでに日本原子力研究開発機構の JRR-3 RESA や J-PARC TAKUMI な

どで産業利用が開始されている。産業利用の要望が高まるにつれ、測定の高効率化が求められている。高効率化のためには中性子フラックスの増加とともに、中性子検出器の大面积化、検出効率の高効率化が求められている。しかし、中性子回折実験で用いられる検出器の要求性能を満たすためには、中性子の反応媒体として He-3 を使うのが一般的であったが、He-3 の価格の高騰から代替する検出器の開発が求められている。

Ce:LiCAF シンチレータ (Ce:6LiCaAlF₆ (LiCAF)) は株式会社トクヤマによって開発された高速な単結晶シンチレータである。LiCAF は熱中性子に対して、Li(n, α) 反応により、高い検出感度を有するとともに、波高値のみで従来のガスカウンタ並の中性子・ガンマ線の弁別能に優れたシンチレータとして期待されている。しかしながら LiCAF シンチレータの発光ピークが 280nm であり、APD の有感領域から外れているため APD との組み合わせでは有効に機能しなかった。そこで今回の実験では 2 種類の波長シフタ (POPOP, MSB) を用いることで、LiCAF:Ce 中性子との反応による発光に対する APD の感度を向上させた。LiCAF に波長シフタ (POPOP, MSB) を組み合わせ、受光体に APD を用いた中性子波長スペクトル測定を行った。いずれの波長シフタを用いた場合でも、中性子のピークを観察することができたが、POPOP を用いた場合、特に良好な結果が得られた。検出効率も He-3 比例計数管に対して、83% となっており、今後 He-3 検出器の代替に十分なる可能性を示した。

(3) 高分解能中性子検出器の開発

中性子用いた鋼材の残留応力測定精度の向上のために高分解能中性子検出器の開発を行った。中性子の反応媒体として Li-6 を用いた無機シンチレータ Ce:LiCAF を用いた二次元中性子検出器を開発した。中性子の応答特性を Cf-252 の中性子源と J-PARC のビームラインで評価し、ガンマ線感度・中性子検出効率のいずれも He-3 ガスカウンターに匹敵するものであることが確認できた。また、従来の He-3 ガスを用いた多芯比例計数管と比べ、高計数率特性に優れており、100kHz/mm の安定動作を確認した。今後は有感面積の大面积化が課題となる。

また、改良した 950keV X バンドライナック X 線源 (図 5) では、十分な線量が得られたのでシングルショットでの撮像が可能になった。改良型 950keV X バンドライナック X 線源を外部同期信号と同期させる試験を行い、X 線源が外部トリガー入力で動作するように X 線源のタイミングシステムを構築し、外部からのトリガー信号を入力した。この結果、X 線の発生パルス幅 (3 μs) よりも小さいジッター (<300ns) で X 線と外部トリガー同期信

号を同期させることが出来ることを確認できた。これにより回転体の回転周期と同期させた静止画撮像が可能となった。

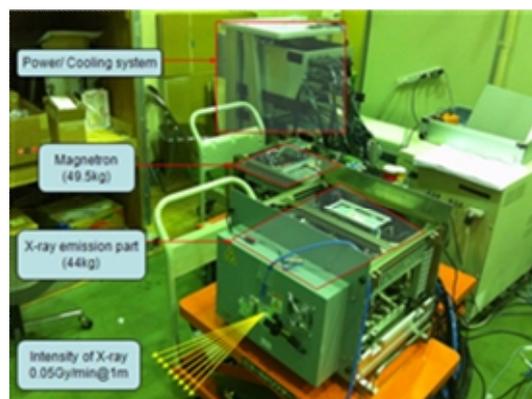


図 5. 950keV X バンドライナック X 線源

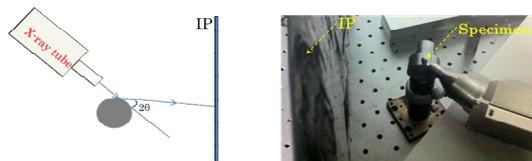


図 6. X 線回折原理実証実験のセットアップ

一方で、オンサイトでの残留応力の測定を実証するために、50keV の超小型 X 線源を用いた実証実験を行った (図 6)。X 線源本体は手のひらに乗る大きさであり、オンサイト残留応力測定の実現に向けて諸試験を行った。センサにはイメージングプレートと小型 CCD センサを用い、鉄鋼材に X 線ビームを照射したところ、小型 CCD センサにて鉄鋼の回折リングが観測できた (図 7)。

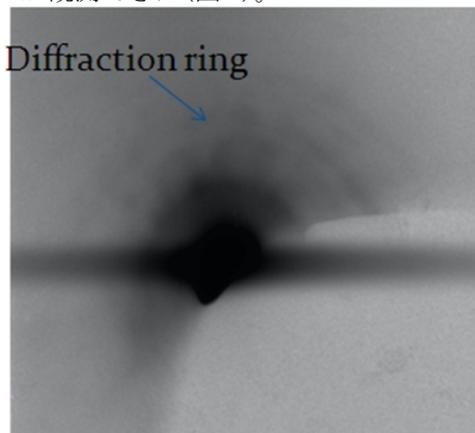


図 7. 得られた回折画像

今後は X 線源とセンサのアライメントを容易化する仕組みの構築が課題となる。

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)

〔雑誌論文〕（計 2 件）

- ① 藤原健、検査技術、最新の非破壊検査に活用される X 線技術、2013. 2、2013、pp. 144-147、
- ② Takeshi Fujiwara、Neutron News、Study on Ce:LiCAF scintillator for ^3He alternative detector、Volume 23, Issue 4、2013、pp.31-36、

〔学会発表〕（計 2 件）

- ① 上坂充、原子力学会、可搬型 950keVX バンドライナック X 線源の現場透視検査の開始、2012 年 09 月 19 日～2012 年 09 月 21 日、広島

〔その他〕

- ① 平井 俊輔、修士論文、先進量子ビーム残留応力分析による軸受の転動疲労の研究、2011

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上坂 充 (UESAKA MITSURU)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：3 0 2 3 2 7 3 9

(2) 研究分担者

友田 陽 (TOMODA YOU)

茨城大学・理工学研究科・教授

研究者番号：9 0 0 0 7 7 8 2