

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23561021

研究課題名(和文)液体金属を内包する構造体の音響振動によるその場予寿命診断技術の開発研究

研究課題名(英文)Development of diagnostic technique for structure filled with liquid metal using acoustic vibration

研究代表者

涌井 隆(Wakui, Takashi)

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・研究員

研究者番号：50377214

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：接触式かつ遠隔操作可能な計測方法により、機器の内表面にある損傷を評価するために、超音波波形と損傷量の関係を明らかにした。また、微小な損傷を検知するための最適な計測条件を見出した。液体を内包する構造物では、構造物中を伝搬する超音波は液体の影響を受けるため、超音波計測ではその影響を加味する必要がある。以上の結果を考慮して、水銀ターゲット容器の状態監視のために、レーザードップラ振動計をベースとした計測システムを開発し、陽子ビーム入射に伴う振動を精度良く計測できた。本計測システムは、極限環境下に使用する機器の監視システムとして適用できる。

研究成果の概要(英文)：In order to estimate the damage on the inner surface of the structure, relationships between ultrasonic waveform and the amount of damage was clarified by using the contactless and remote controlled measuring technique. The optimal measurement conditions for detecting minute damage were found out. Because the ultrasonic wave propagating in the structure which includes the liquid was influenced the liquid, the influence was taken into account in the ultrasonic measurement. In consideration of the above result, the measuring system based on the laser Doppler vibrometer was developed and the vibration due to proton beams could be measured with sufficient accuracy to monitor the mercury target vessel. This measuring system can be applied as the monitoring system for the apparatus used under the extreme environment.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学、原子力

キーワード：診断技術 超音波計測 損傷評価 固液連成振動 ガイド波 水銀ターゲット容器

1. 研究開始当初の背景

中性子散乱法による物質生命科学の推進のため、大強度のパルス陽子ビームを利用した核破砕中性子源が世界的に開発・建造されている。その開発過程で、我々は、国際共同実験において、陽子線が入射したときに励起される圧力波の計測に世界に先駆けて成功すると共に、ターゲット構造体における固液界面に発生するキャビテーションに起因したピitting損傷を初めて指摘した。また、米国の中性子利用実験施設に設置されていたターゲット構造体を解体・観察した結果、水銀に接する最内壁の陽子ビーム入射部に無数の微小な穴が開いていることが確認され、ターゲット構造体の健全性確保のためには、ターゲット構造体内部の状態を外部から常時監視することが重要となってきた。我々は、ピitting損傷付加時に発生する音響振動に着目し、レーザー振動計により計測された 15kHz 以上の高周波数成分波形の時間積分値とピitting損傷の大きさとはよい相関があることを見出した。また、固液界面を有する構造体を伝播する音響振動は、構造体中の液体の影響を受けることが想定される。そこで、液体を内包する構造体における音響振動に関する厳密解を導き、実験との一致を確認する必要がある。一方、ピitting損傷のほかに、構造材を液体金属中に浸すことにより、接液界面表層部が硬化することや低サイクル疲労試験における疲労強度の低下を起こす表面状態の劣化を確認した。

2. 研究の目的

レーザービーム等によるパルス照射により励起される音響振動から、構造体の接液界面損傷量を評価することにより、液体金属を内包する構造体の予寿命診断技術の構築を目指す。具体的には、まず、各損傷量と音響振動挙動の関係及び固液連成振動挙動を音響振動の伝播過程から個別に把握する。蓄積した基礎データを基に、実規模体系に対する本材料損傷評価手法の適応性を検証する。

3. 研究の方法

(1) 音響振動挙動と構造体の損傷の関係に関する基礎データを取得するために、超音波探触子を用いた超音波計測を実施した。電磁式衝撃圧負荷装置を用いて、陽子線ビームに入射に起因したピitting損傷と同等の損傷を付加した試験片を作成した。超音波計測として、閉じたき裂を含めた微小な損傷を検知できる非線形超音波計測を適用した。

(2) 高放射線場など極環境下では、非接触式かつ遠隔操作可能な計測方法が必要となる。そこで、レーザードップラ振動計を用いた音響振動計測を採用した。振動励起には、パルス陽子ビーム入射を模擬して、パルスレーザーを用いた。試験に用いた試験片は、非

線形超音波計測で損傷評価を実施試験片である。

(3) 液界面を有する構造体を伝播する音響振動は、構造体中の液体の影響を受ける。そこで、水を満たしたパイプを伝播するガイド波について、理論解析を行う共に、PFA パイプを用いた比較実験を実施した。さらに、パイプの材料として、ステンレス鋼を用いることにより、水に比べて音響インピーダンスが極端に大きい場合について検討した。

(4) 核破砕中性子源における音響振動計測は、高放射線環境であるため、非接触式かつ遠隔操作可能なレーザードップラ振動計をベースとした計測システムを行う必要がある。高精度の振動計測を行うために、レーザー光の光伝送の効率化や振動計測対象に設置する再帰性反射ミラーの高反射化及び高耐久性について検討した。

4. 研究成果

(1) 非線形超音波計測装置を用いて、キャビテーション損傷を評価するための最適な計測条件及び特徴抽出方法について検討した。その結果、出射する超音波の周波数が高く、試験片内を伝播する超音波が共振する周波数を選択して、多数波入射することにより、微小な損傷を検知することができることが分かった。超音波の受信では、入射波の周波数の整数倍となる超音波(高調波)を抽出することにより、閉じたき裂などでのクラッピングで生じる超音波が計測できる。これにより、ピット底に形成されるき裂や疲労き裂を検知できる。また、超音波波形における減衰傾向に着目することにより、超音波波形とピitting損傷量の相関があることが分かった。最適な条件を基に計測した損傷材の超音波画像を図1に示す。ピitting損傷だけでなく、試験片表面上の引っ掻き傷や微小なき裂が確認できる。計測における最適な条件を用いることにより、一般の超音波計測では検知できなかった微小な損傷や閉じた疲労き裂を検知することができ、機器の非破壊検査技術と有用である。

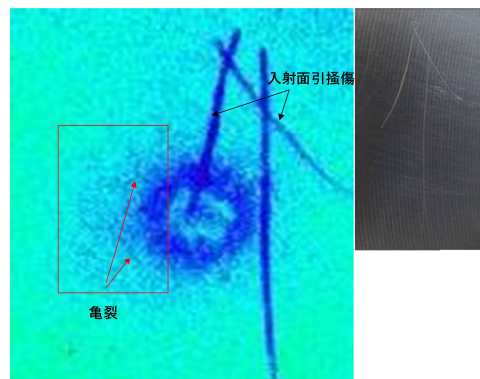


図 1. 非線形超音波法によるピitting損傷部の損傷イメージ画像

(2) 陽子ビーム入射により励起される振動を用いた損傷評価を行うために、ピッチング損傷を有する試験片に対して、パルスレーザー入射を行い、レーザードップラ振動計による超音波計測を行った。その結果、計測波形における第1ピーク及び減衰率と損傷量に相関があることを見出した、また、実験を模擬した超音波伝播に関する数値解析を行い、実験結果と同様な結果が得られた。従って、損傷材に対する計測波形から損傷量を評価できることが示された。以上の結果は、レーザー超音波計測技術の基礎データであり、様々な機器・構造物の非破壊検査技術が可能となる。また、陽子ビーム入射により励起される振動を用いた損傷評価が行えることを意味している。

(3) Gazis の手法を拡張し、全てのモードに対応した水を満たしたPFAパイプを伝搬するガイド波の解析解を得て速度分散を計算し、検証実験を行った。ガイド波はモードや周波数によって振動の分布が異なるため、その計算方法を開発し、有限要素法で検証した。さらに、プラントで使用されている配管の非破壊検査を想定し、水に比べて音響インピーダンスが極端に大きいステンレスパイプにおいて同様な評価を実施した。中空及び内部に水を満たしたステンレス配管の群速度の理論値及び実験値を図2に示す。

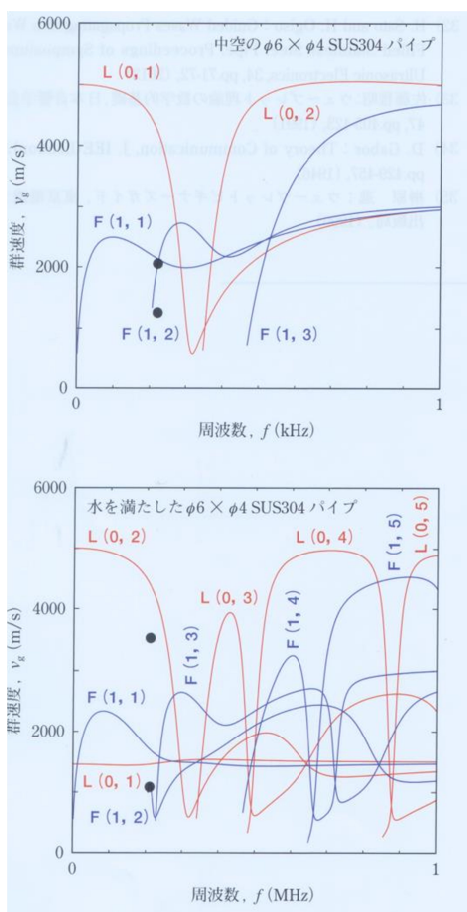


図 2. 中空及び水を満たしたステンレスパイプ上を伝播するガイド波の群速度

理論値は、実験値とほぼ一致しており、ステンレスパイプのように音響インピーダンスが大きいものであっても、内部の水の影響を受けることが示された。このことから、内部に液体を満たしたパイプの非破壊検査には、その条件での解析結果が必要であることが示された。

(4) 独立行政法人 日本原子力原子力機構 J-PARC センターの物質・生命科学実験に施設に設置されている核破砕中性子源の水銀ターゲット容器の状態監視として、図3に示すレーザードップラ振動計をベースとした計測システムを導入した。本研究では、レーザーの光伝送効率を向上させるために、光伝送部の最短化及び光伝送部品における伝送損失の低減を図った。特に、水銀ターゲット容器上に設置する再帰性ミラーは、反射率及び耐食性の観点から、材料を金にするとともに、放射効率が高い素子構造にした。レーザー光のスポット径は0.4mm程度であるため、1素子の寸法は約0.2mmである。超精密加工機を適用する共に、楕円振動切削法という新たな加工技術を取り入れることにより、高精度の加工を実現した。

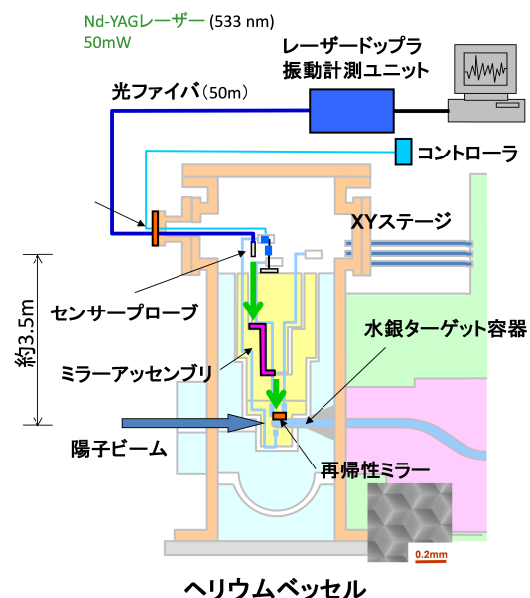


図 3. 水銀ターゲット容器状態監視のために開発した計測システムの概略図

これらにより、水銀ターゲット容器1号機に採用していたニッケル製再帰性ミラーの反射率(約12%)の4倍以上の反射率(54%)を得ることができた。この結果、図4に示すように、再現性の良い振動波形を精度良く取得することが可能となった。この計測システムは、他国の核破砕中性子源施設だけでなく、原子力施設や宇宙空間など極限環境下にある機器の監視システムとして適用できると言える。

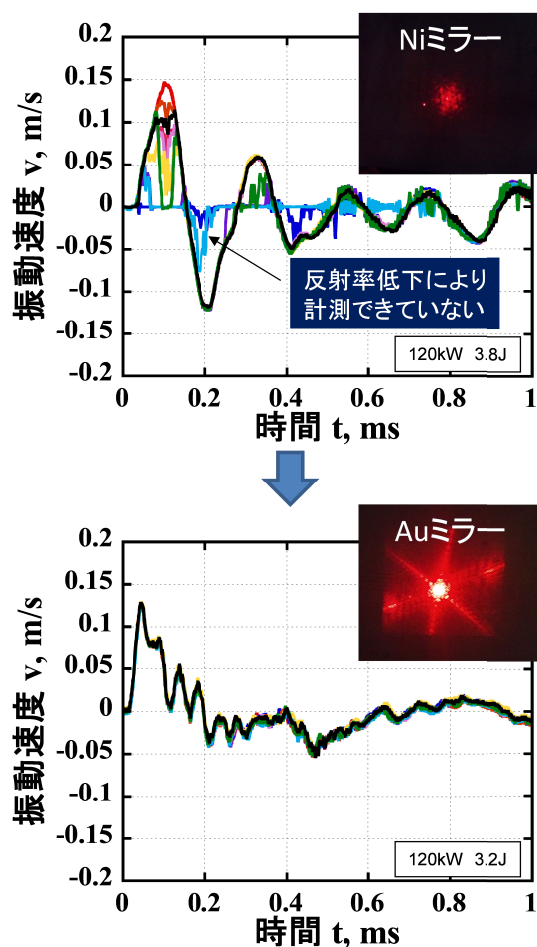


図 4. ニッケル製ミラーと金製ミラーを用いて計測した陽子ビーム入射に伴う水銀ターゲット容器の振動波形

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 10 件)

万濤、涌井隆、二川正敏、前川克博、Cavitation damage evaluation using laser impact、Material Transactions、査読有、(2014)、印刷中

佐藤治道、小木曾久人、Guided Waves Propagating in a water-filled stainless steel pipe、JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS、査読有、(2014)、印刷中

佐藤治道、小木曾久人、Analytical method for guided waves propagating in a fluid-filled pipe with attenuation、JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 52 (2013) 1-6

万濤、涌井隆、直江崇、二川正敏、前川克博、Ultrasonic evaluation process for cavitation damage、査読有、Journal of JSEM、13(2013)、57-64

万濤、涌井隆、二川正敏、直江崇、前川克博、Pitting damage imaging by nonlinear ultrasonic technique

-Comparison between resonance and non-resonance modes-、査読有、International Journal of Material Products and Technology、46(2013)、141-154

[学会発表](計 8 件)

佐藤治道、水を満たした SUS パイプを伝搬するガイド波、第 21 回 超音波による非破壊評価シンポジウム、2014 年 1 月 20 日、東京

涌井隆、Vibration Measurement of Mercury Target using Laser Doppler Vibrometer、the 3rd International Symposium on Laser Ultrasonics and Advanced Sensing、2013 年 6 月 28 日、横浜

佐藤治道、Theoretical Analysis of Guided Wave Propagating in SUS Pipe Filled with Water、the 3rd International Symposium on Laser Ultrasonics and Advanced Sensing、2013 年 6 月 28 日、横浜

涌井隆、非線形超音波法によるピitting 損傷評価、日本非破壊検査協会 平成 23 年度秋季講演大会、2011 年 10 月 18 日、姫路

6. 研究組織

(1) 研究代表者

涌井 隆 (Wakui Takashi)

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・研究員

研究者番号：50377214

(2) 研究分担者

二川 正敏 (Futakawa Masatoshi)

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・研究主席

研究者番号：90354802

勅使川原 誠 (Teshigawara Makoto)

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・研究副主幹

研究者番号：70354735

直江 崇 (Naoe Takashi)

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・研究員

研究者番号：00469826

佐藤 治道 (Sato Harumichi)

独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門・研究員

研究者番号：90357145

(3)連携研究者

山中 一司 (Yamanaka Kazushi)
東北大学・工学研究科・教授
研究者番号：00292227

小原 良和 (Ohara Yoshikazu)
東北大学・工学研究科・助教授
研究者番号：90520875

川嶋 紘一郎 (Kawashima Koichiro)
財団法人 名古屋産業科学研究所・研究員
研究者番号：50023239