T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報 Article / Book Information

論題(和文)	 福島復興・廃炉へ向けたリモート環境での超音波非破壊計測技術研究 の新展開
Title(English)	New Direction of Ultrasonic Non-destructive Measurement Technology Research in Remote Environment for Fukushima Revitalization and Decommissioning
著者(和文)	高橋秀治, 荘司成熙, 遠藤玄, 木倉宏成
Authors(English)	Hideharu Takahashi, Naruki Shoji, Gen Endo, Hiroshige Kikura
出典(和文)	 非破壊検査, Vol. 71, No. 2, pp. 64-68
Citation(English)	Journal of The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, Vol. 71, No. 2, pp. 64-68
発行日 / Pub. date	2022, 2



超音波等の非破壊試験分野におけるリモート環境の活用

福島復興・廃炉へ向けたリモート環境での 超音波非破壊計測技術研究の新展開

東京工業大学 高橋 秀治 荘司 成熙 遠藤 玄 木倉 宏成

New Direction of Ultrasonic Non-destructive Measurement Technology Research in Remote Environment for Fukushima Revitalization and Decommissioning

Tokyo Institute of Technology Hideharu TAKAHASHI, Naruki SHOJI, Gen ENDO and Hiroshige KIKURA

メキーワード 超音波,遠隔計測,ロボット,福島,廃炉

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震,ならびに地震・津波等の影響による東京電力HD(株)福島第一 原子力発電所事故を伴う東日本大震災から10年が経過した。 著者らはこれまでに福島県被災地において,福島の復興へ向 けて,東京工業大学の「復興学」研究の推進,大学生・大学 院生実習,小中学生教育支援,大学等研究者間ネットワーク 構築を行うとともに,浜通り地域の産業振興へ向けた活動を 行ってきた。また,未だ様々な技術的課題が残されている東 京電力HD(株)福島第一原子力発電所の廃炉の加速化へ向 けた研究活動を行ってきた。

かかる状況下,2019年より世界的に大流行した新型コロナ ウイルスの猛威により世界中の人々の生活は一変した。2021 年現在,日本では新規感染者数が低下しているものの,オミ クロン株の流行なども危惧され,新しい生活様式の一つとし て,テレワークやオンライン授業等に代表されるリモート環 境の活用が世界中の人々の生活に急激に浸透した。また,リ モート環境と現場を繋ぐハイブリッドというべき新たな生活 様式も身近になってきた。

本稿では、福島復興活動における産業振興に関わる取り組 みの例としての IoT (Internet of Things) 技術による工場や プラント等における配管異常のモニタリングへ向けた超音波 計測システム開発例や、廃炉へ向けた取り組みの例として、 ウィールロボット及びワイヤ駆動による世界最長級の超長尺 多関節ロボットアーム「スーパードラゴン」を活用した福島 第一原子力発電所の炉内状況把握のための超音波計測システ ム開発例等をリモート環境での超音波計測システムの構築例 としてその概要を紹介する。

2. 福島復興へ向けた超音波計測システム開発例

著者らは、これまでに、国が推し進める東日本大震災及び原 子力災害によって失われた福島県浜通り地域等において新たな 産業基盤の構築を目指す「イノベーションコースト(福島・国 際研究産業都市)構想」の早期実現へ向けて、1.原子力災害 で汚染された土壌等の環境回復へ向けた取り組み(除染科学)、 2.ロボット計測による廃炉の加速化へ向けた取り組み(ロボッ ト計測工学)、3.リスクに対する責任の共有と信頼の構築への 取り組み(リスク・コミュニケーション工学)等の三つの研究 課題を選定し、分野横断型研究を精力的に進めてきた。 浜通り被災地の産業振興に向けた活動のなかで,従来の非 破壊診断の超音波探傷法に著者らの特許技術であるフェーズ ドアレイ超音波流速分布計測法と新規技術の流速ベクトル再 構成法^{1),2)}を実装したポータブルハードウェアを開発し製 品化・サービス展開を検討してきた。パルス超音波を用いて 流速ベクトル分布と配管欠陥を同時計測し,配管システム健 全性評価や流れに伴う配管破断リスク評価が行える新しい装 置であり,プラント配管検査の高効率化と低い熟練度要求で の検査が可能で,独自開発したテレメトリ(遠隔計測)技術 を用いて with/post コロナ社会に対応するプラント配管非破壊 検査システムを開発し,持続的電力供給に資することを目指 したシステムの開発を進めている。

我が国におけるエネルギー供給の安定化に向けては,既存 原子力発電プラントや火力発電プラントなどの健全性維持に 加え将来型発電プラントの安全性確保は重要課題である。プ ラント健全性維持には稼働期間中における非破壊検査が必須 だが、たとえば美浜原子力発電所3号機の復水系配管破損事 故のように, 配管内欠陥や減肉等が流体流れによる侵食・腐 食などの作用で引き起こされ,配管破損事故へと繋がる場合 もある。従ってプラント配管の健全性維持には、非破壊での 配管内流体流動モニタリングが不可欠であり、また配管破断 へと至る前に配管システム異常の早期検知を行うことは安全 性向上のため重要である。また一方新型コロナウイルス感染 症流行下においては、発電プラント内にて仮に多くの感染者 が確認された場合、電力の持続的な供給が脅かされる可能性 もあり、通信や物流といった社会インフラへの打撃及び医療 現場への影響は計り知れず,多大な社会的・経済的ダメージ が予想される。そのため, with/post コロナ社会における発電 プラントの持続的運用は重大な社会的課題であり、遠隔制御 によるプラントシステムのデータ取得を可能とするテレメト リ技術を応用して、発電プラントの安全性と持続性を両立さ せるためのプラント配管非破壊検査モニタリング技術が必要 である。

かかる状況下,著者らはプラント配管内等における流体流 動計測技術である超音波流速分布計測法(Ultrasonic Velocity Profiler;UVP)を用いた,非破壊・非侵襲での配管内の流 れ場可視化が可能な計測システムを開発してきた。ここで, UVPとは流体内に超音波パルスを発信し,流体内で移動する 反射体からのエコー信号を解析することで流体の流速分布を 計測する基礎技術(図1)であり,著者らは本基礎技術を発



図1 超音波流速分布計測法の原理

展させ,複数の超音波送受信素子を用いて各素子の超音波送 信タイミングを制御することで超音波ビームを任意の角度に 送信可能な超音波フェーズドアレイ法と流速ベクトル再構成 アルゴリズムを用いた多次元流速ベクトル UVP 計測システム を構築し(図2),特許を取得している¹⁾。また超音波フェー ズドアレイセンサを利用し,超音波探傷と UVP による流速分 布計測を同時的に行う,超音波探傷式流速分布計測法を開発 し,本技術の特許出願に至っている²⁾。これにより,従来の 超音波探傷による配管壁内き裂の検出に加え,曲がり管等で 発生する渦などの二次流れによる潜在的欠陥要因の特定を容 易にした。またこれに加え,これら計測技術開発の基礎的知 見のもと,計測システムに必要なハードウェア要素を一体化 させたポータブルハードウェアとして可搬型 UVP デバイスを 開発することで,大幅な装置の小型・軽量化を達成している。

著者らは、これら技術を組み合わせた可搬型流速ベクトル UVP 計測デバイスによる非破壊検査モニタリング技術の開発 を提案し、発電プラントの安全性及び持続性に寄与する非破 壊検査技術の実現(図3)に向け、取り扱いが簡易であり熟 練度に比較的依存しない超音波計測技術の開発を行っている。 本技術はその可搬性及び簡便さからスマートグラスなどの ディスプレイ装置との親和性が高く、そのため、ディスプレ イとして装着型のスマートグラスなどを用いることで、ハン ズフリーでの検査の実現も容易である。実際のスマートグラ



図2 超音波フェーズドアレイ法による流速ベクトルの計測1)



図3 超音波探傷式流速分布計測法による超音波非破壊検査システム のイメージ







図 4 スマートグラス使用例と流速分布計測例

(図中:検査者スマートグラスのビデオ画像に配管映像と流速分布計測結果 が重畳表示されている)³⁾

ス使用例と円管配管内の流速分布計測例を図4に示す³⁾。配 管内の放物線状の流速分布が計測されている。また定期的な 検査での使用に限らず,常設することで流れ場の常時モニタ リングが可能であり,テレメトリ技術を応用することで遠隔 的にデータを集約可能である。これにより一層の with/post コ ロナ社会におけるプラントの安全性・持続性に貢献するもの であり,福島復興の産業振興に対して技術面からの支援とな ることを考えている。

3. 廃炉へ向けた超音波計測システム開発例

福島第一原子力発電所の廃炉に関しては、未だに様々な技術的な課題が残されている。その中の大きな課題の一つとして、炉内状況の把握がある。事故を起こした原子炉の廃炉に関しては前例がなく、できる限りの情報を集めて、作業での危険性をできるだけ減らして廃炉を行う必要がある。現状、ペデスタル内にてカメラを積載した調査装置や水中を泳ぐロ

ボットからの写真画像はあるが、実際に燃料が存在していた はずの炉心該当部に関しては情報が少ない。実際の廃炉作業 の際には、作業の振動によって上から物が落ちてくる可能性、 作業によって舞い上がった放射性物質が格納容器外に漏れ出 す可能性等を含め、 炉の上部をも含めた全体の情報が必要と なる。

これまで著者らは福島第一原子力発電所の廃炉に向けた 様々な技術研究を行っている。図5はロボットを用いた遠隔 計測システム例を示しており、ウィール型の車体に積載され たロボットアームの先端に取り付けられた超音波センサが遠 隔操作により任意の位置に搬送可能となっている⁴⁾。図6は 遠隔計測システム操作風景を示しており、離れた場所にいな がら, 超音波センサを任意の位置に搬送し, 現場の状況をカ メラを見ながら把握することが可能である⁵⁾。超音波センサ の搬送形態として、ロボットアームによる搬送方法に加えて、 図7に示すようにウインチ機構により超音波センサを任意の 位置に降下させる機構も開発している4)。

また,東京工業大学で試作した超長尺多関節ロボットアー ム「スーパードラゴン」がある。軽量高張力の耐放射線性化 学繊維ワイヤで駆動することで多関節を自在に操作すること ができる全長10mの長尺多関節アームであり、この方式であ



図5 ロボットを用いた遠隔計測システム例(ロボットアーム型)⁴⁾



図6 遠隔計測システム操作風景⁵⁾



図7 遠隔計測システム構築例 (ウインチ型)4)

れば、狭い貫通部からでも計測用センサを含むアームを炉内 に侵入させることができる可能性がある。また、長尺アーム によって必要なところに近づきながらの計測が可能である。 ロボットアームの関節の配置を工夫することにより、アーム 先端を三次元に動かすことも可能であり、上下±10m、左右 ±4mの大きな可動範囲を持っていることから、上方へ計測 装置を搬送するためのロボットアームの拡張を行うことで, 圧力容器の底部にも近づくことができると考えられる。

かかる状況下,福島第一原子力発電所事故後,号機によっ ては, 圧力容器底部に直径数 10 cm の穴が開いている可能性 が高いとの報告を受けて,著者らは,2019 年度より,「拡張 型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる圧力容器内 燃料デブリ調査への挑戦 | と題して、日本原子力研究開発機 構 (JAEA)の研究者ら(若井田育夫ら)と共同で研究プロジェ クトを立ち上げ、炉内開口部より侵入し、①穴を見つける、② 昇る,③調べるの三つの段階的なアプローチの提案に向けた 基礎研究開発・概念の検討を行っている(図8,図9)^{6),7)}。 図10は上方へ計測装置を搬送するためのロボットアームの拡 張開発を行った拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアー ムの試験風景を示しており、この拡張開発により、多関節で 全長 10mの展開動作が可能であり(図 10 (a)),加えて,先 端部を約6mの高さまで垂直昇降できることが確認された(図 10(b))。将来的には全長約20mの長さまで拡張することを 検討している。

廃炉の加速化のためには圧力容器内部の損傷炉内構造物や 燃料デブリの状況把握が重要となる。ペデスタル上部に位置 する圧力容器底部の状況把握を可能とする技術の実現を目的 として,長尺の多関節ロボットアームにより,手先の位置姿 勢の制御をしながら,カメラの SfM (Structure from Motion) 技術及び超音波計測技術によりアーム先端部の自己位置を把 握しつつ炉内構造物の状況把握を行うとともに、レーザを用 いた LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) 技術に より核物質の分布状況把握を行う遠隔探査手法のアームへの 実装技術を開発している。中でも、超音波を活用した周囲環



図8 拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームの開発と原子炉 **圧力容器下部へのアクセスの概念図^{6),7)}**



(a) 穴を見つける

図9 新たな遠隔計測アプローチの提案^{6),7)}

非破壊検査第71巻2号(2022)



(a) 多関節展開動作



(b) 垂直昇降動作

図10 拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアーム試験風景



図11 小型の超音波計測システム試作機外観⁷⁾

境の計測技術(主に空中超音波を利用した形状計測)や液体の流れを測る非常に小型の超音波計測システムを試作開発している(図11)⁷⁾。

4. おわりに

福島復興・廃炉へ向けたリモート環境での超音波非破壊計 測技術の新展開に関わる著者らの取り組みを紹介した。東日 本大震災及び原子力災害によって失われた福島県浜通り地域 等の新たな産業基盤の構築を目指す「イノベーションコース ト(福島・国際研究産業都市)構想」の早期実現へ向けた産 業振興の取り組みの例としての超音波探傷式流速分布計測法 による超音波非破壊検査システムの開発概要を紹介した。ま た,福島第一原子力発電所の廃炉の加速化へ向けた炉内状況 把握技術の例としてのウィール型の車体に積載されたロボッ トアームの先端に取り付けられた超音波センサが遠隔操作に より任意の位置に搬送可能なロボットを用いた遠隔計測シス テム例や,拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームを 活用した福島第一原子力発電所の炉内状況把握のための超音 波計測システム開発の例等を紹介した。

現在,世界で猛威を振るうオミクロン株の影響はどの程度 まで及ぶか計り知れないが,リモート環境の活用は新型コロ ナウイルス感染症対策で加速化した新しい生活様式の発展に 伴い今後さらに世界中の人々の生活に浸透することが予想さ れ,本稿で概説したものは一例に過ぎないが,リモート環境 での超音波非破壊計測技術の需要は今後ますます高くなると 思われる。

謝辞

本稿で紹介した活動・研究内容の一部は,福島イノベー ション・コースト構想推進機構学術研究活動支援事業,文部 科学省研究成果最適展開支援プログラム ASTEP,文部科学 省英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 JPMX 15D15658587, JPJA19P 19210348の助成を受けたものである。 ここに謝意を表します。

参考文献

- 木倉宏成,井原智則,塚田圭祐,福本拓哉:流速ベクトル分布 計測装置,方法およびプログラム,特許第6501384号,東京工 業大学,(2014)
- 2) 木倉宏成,高橋秀治,荘司成熙:超音波式探傷装置及び超音 波式探傷プログラム,特開2020-190534,東京工業大学,(2020)
- 3)中田達也, 荘司成熙, 高橋秀治, 木倉宏成:スマートグラス を用いた可搬型超音波流速分布計測システムに関する基礎 研究, 日本機械学会第99期流体工学部門講演会, OS14-06, (2021)
- 4) H. Kikura : UK-Japan Collaboration Project for Fukushima, 26th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE26), (2018)
- 5) Z. Zhang, N. Shoji, M. Batsaikhan, H. Takahashi and W. Wongsaroj : Telemetry system for 2D flow map using ultrasonic velocity profiler, 2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS), No.149, p.901, (2021)
- 6)拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦(委託研究), JAEA-Review,日本原子力研究開発機構, 2020-040, (2021)
- 7) 拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる圧力容 器内燃料デブリ調査への挑戦(委託研究), JAEA-Review,日本原子力研究開発機構, 2021-045, (2022), (To be published)



高橋 秀治 東京工業大学(152-8550 東京都 目黒区大岡山 2-12-1-N1-7) 科学技術創成研 究院 ゼロカーボンエネルギー研究所 助教 博士(工学)。2019年より現職。専門は熱流 体工学,化学工学,廃棄物処理・処分 URL:http://www.nr.titech.ac.jp/~kikura/



荘司 成熙 東京工業大学 (152-8550 東京都 目黒区大岡山 2-12-1-N1-7) 工学院 機械系 博士後期課程 大学院学生 2019 年 東京工業大学博士後期課程に入学。 専門は熱流体工学,計測工学 URL: http://www.nr.titech.ac.jp/~kikura/



遠藤 玄 東京工業大学(152-8550 東京都 目黒区大岡山 2-12-1-11-60) 工学院 機械系 教授

博士 (工学)。2021 年より現職, 専門はロボッ ト工学

URL: http://www.robotics.mech.e.titech.ac.jp



木倉 宏成 東京工業大学(152-8550東京都 目黒区大岡山 2-12-1-N1-7) 科学技術創成研 究院 ゼロカーボンエネルギー研究所 准教授 博士(工学)。2009年より現職,専門は原子 炉安全工学,熱流体計測工学,核燃料物質の 輸送・中間貯蔵 URL:http://www.nr.titech.ac.jp/~kikura/