

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 荏司 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

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

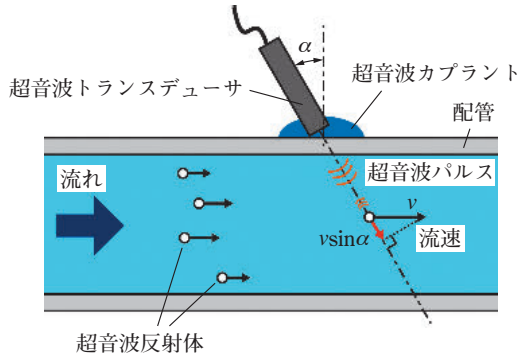


図1 超音波流速分布計測法の原理

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

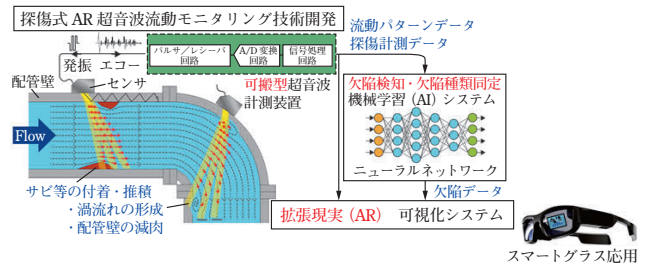
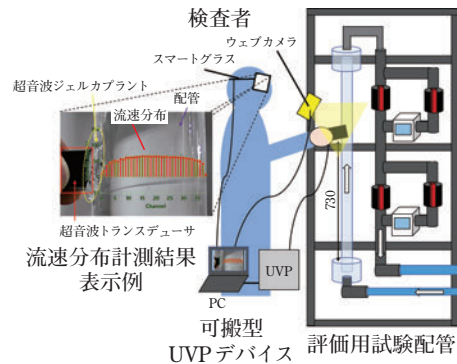


図3 超音波探傷式流速分布計測法による超音波非破壊検査システムのイメージ



(a) 計測風景



(b) 試験配管概要図と計測結果

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⁾

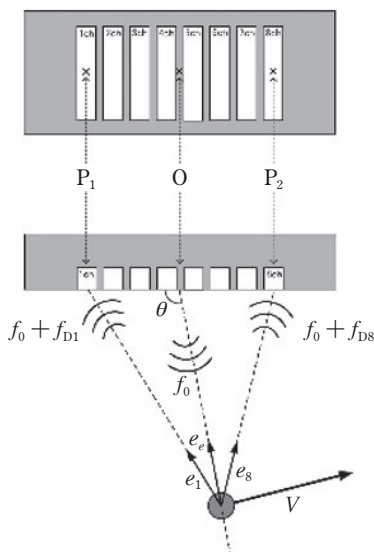


図2 超音波フェーズドアレイ法による流速ベクトルの計測¹⁾

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DESTAL内にてカメラを積載した調査装置や水中を泳ぐロ

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⁾

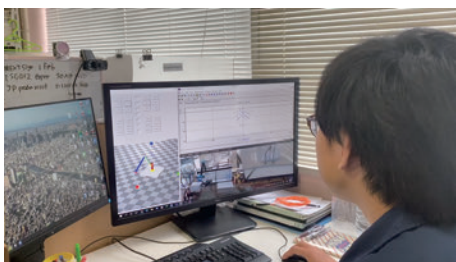


図6 遠隔計測システム操作風景⁵⁾

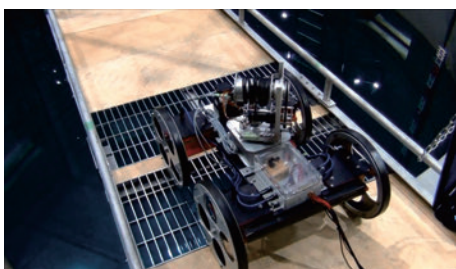


図7 遠隔計測システム構築例 (ウインチ型)⁴⁾

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ど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、压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、压力容器底部に直径数10cm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压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压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。ベDESTAL上部に位置する压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

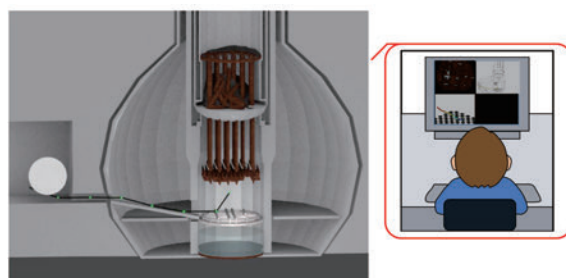


図8 拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームの開発と原子炉压力容器下部へのアクセスの概念図^{6), 7)}

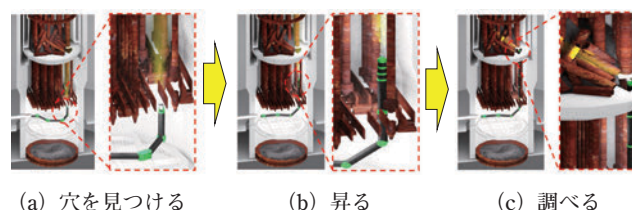


図9 新たな遠隔計測アプローチの提案^{6), 7)}



(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

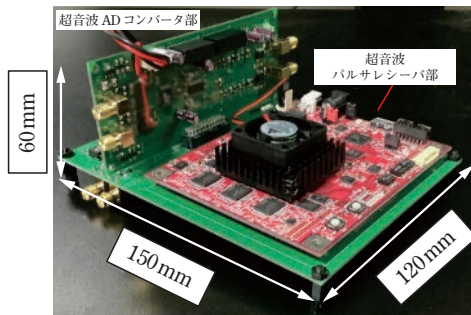


図 11 小型の超音波計測システム試作機外観⁷⁾

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 A-STEP、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

- 1) 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, 莊司成熙: 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, 莊司成熙, 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/>



莊司 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-I1-60) 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/>