壁面走行ロボットによる鋼構造物非破壊検査の実用化に向けた取組み

Toward Practical NDT of Steel Structures Using Wall-Climbing Robot

●衞藤 晴彦* Haruhiko ETO　豊嶋 崇** Takashi TOYOSHIMA　村田 勇樹*** Yuki MURATA　Mohak VYAS***

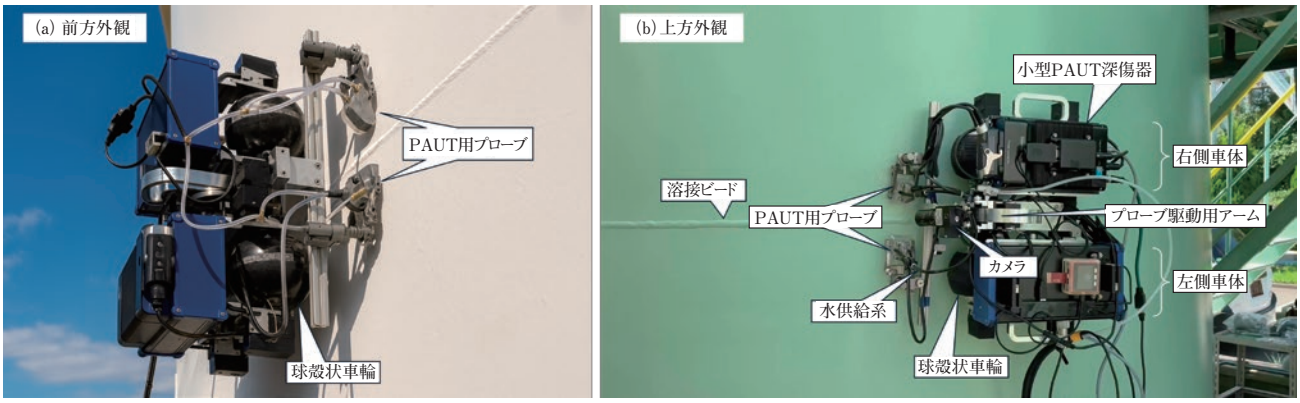

図1　PAUT 用検査装置を搭載した磁気吸着型壁面走行ロボット
Magnetic adhesion wall-climbing robot equipped with PAUT inspection system

1　はじめに

当社は，ボイラ，圧力容器，クレーン，船舶などの大型鋼構造物を手がけている。これらの建造・保守・解体に伴う各種作業の効率化と安全性向上を目的として，多用途への活用が可能なうえ，曲面や段差等を有する複雑な鋼製壁面も移動できる磁気吸着型壁面走行ロボットの開発を進めている(1)(2)。

現在は車体性能の向上を進めながら，適用先の一つである非破壊検査に着目し，本ロボットを共通の走行プラットフォームとするロボット検査ソリューションの実用化を目指している。本ロボットの活用により，高所・狭隘部における検査の効率化と安全性の向上に加え，従来は困難であった部位の検査が可能になることが期待される。

現在，高所・狭隘部の点検にはドローンの活用が進んでおり，非接触の広域計測や局所的な板厚計測が行われている。一方，本ロボットは壁面上で安定した姿勢を保持でき，精密な位置決めや連続走査を要する接触式検査に適している。ドローンと壁面走行ロボット，それぞれ異なる特長を相補的に組み合わせることで，設備状態をより効率的かつ詳細に把握できると期待されている。

2　磁気吸着型壁面走行ロボットの概要

図1に，後述するフェーズドアレイ超音波探傷(PAUT)用検査装置を搭載した本ロボットの外観を示す。本ロボットは４つの球殻状車輪と，左右に分割された車体から構成されている。左右の車体フレームはピッチ方向に相対回転し，壁面形状に受動追従する。この機構と球殻状車輪により，曲面上でも四輪の接地を維持できる。

図2に，車輪の内部構造を示す。球殻状車輪には，車軸およびこれと直交する軸の周りに受動回転可能な永久磁石ユニットを内蔵している。磁石ユニットは，鋼製壁面との磁気吸引力により壁面方向へ向きを変え，曲率が変化する面においても特別な制御を必要とせずに吸着力を維持できる。

また，磁石ユニットの車軸周りの回転角度は，アクチュエータによって能動的に制御できる。吸着力の作用方向を変えることで壁面から天井への面間遷移が可能となるほか，磁石ユニットを壁面から遠ざけ吸着力を低減させることで，ロボットを容易に取り外すことができる。こうした曲面への適応性に加え，磁石ユニットの受動追従と能動制御を選択できることが，本ロボットの特長である。

3　非破壊検査への適用と実環境検証

本ロボットは，検査対象および検査目的に応じて各種検査装置を搭載できる。本章では，実用化に向けて機能高度化を進めている各検査システムの実環境検証事例を示す。

3.1　溶接部および広域面の探傷・肉厚計測

本ロボットにPAUT用プローブまたは渦電流アレイ探傷(ECA)用プローブを搭載し，溶接部や広域面の非破壊検査を行う。PAUTでは，内部きずの探傷と肉厚計測が可能であり，壁面を連続走査することで，それぞれの計測結果を面状に把握できる。一方，ECAでは，表面および表層部のきずや腐食を検出できる。

図1に示すように，本ロボットには小型PAUT探傷器，PAUT用プローブ，その押付け・退避を行うプローブ駆動用アームを搭載している。PAUT計測システムは，これらの装置を搭載したロボット，プローブと検査面との間に接触媒質として水を供給する水供給系およびオペレータ側に設置した計測データ処理用PCから構成される。

溶接部の探傷検査では，ロボット前方に設置したカメラの画像から溶接ビードを自動検出し，これに沿って走行する。**図1(b)**に，タンク側板の溶接ビードを追従走行する様子を示す。溶接ビードの検出にはAIによる画像認識を用いており，溶接種別，塗装色，付着物，表面劣化および陰影等による外観変化に対応できる。溶接部探傷検査は，タンク以外の各種

＊メカトロニクスセグメント　＊＊住重アテックス株式会社　＊＊＊技術本部

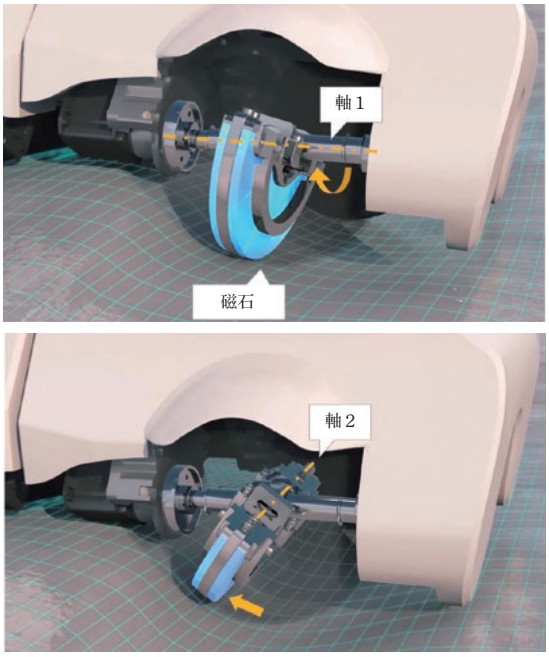

図2　可動磁石ユニットを内蔵した球殻状車輪の内部構造
Internal structure of spherical-shell wheel with movable magnet unit



図3　各種鋼構造物における非破壊検査の実環境検証
Field validation of nondestructive testing on various steel structures

鋼構造物にも可能である。**図3 (a)** に，風力発電設備の塔体溶接部を対象とした検証試験の様子を示す。

図3 (b) に，タンク側板を面状に連続走査する様子を示す。溶接ビードのように走行の基準となる特徴物がないことから，外部計測器で取得した壁面上のロボット位置に基づいて走行軌道を制御している。走行軌道は，上下方向の直線走行と左右方向への所定ピッチの移動を繰り返すラスタ状とし，所定領域を隙間なく走査する。結果，検査位置と計測データを関連付けた探傷・肉厚分布のマップを作成することが可能である。

3.2　CFB ボイラ火炉水管の局所減肉計測

当社製品の一つであるCFBボイラの火炉水管減肉検査に，本ロボットの適用を進めている。**図3 (c)** に，CFBボイラ火炉水管検証試験の様子を示す。火炉水管の減肉検査は，通常，定期修繕工事では火炉内に足場を設置した後に行われるが，本ロボットを用いることで，足場設置前に減肉状況や補修要否を把握できる。このことから補修計画の早期策定と修繕工事期間の短縮が期待できる。

本システムでは，火炉水管に生じるさまざまな減肉のうち，水管外表面の局所的な溝状減肉を対象としている。肉厚は一般に超音波厚さ計のプローブ (UTプローブ) を管外表面に接触させて計測する。しかし，こうした溝状減肉では，溝の形状や寸法によってUTプローブを最深部に密着させられず，最小残存肉厚の直接計測が難しい。そこで，ロボットにはUTプローブに加えてレーザプロファイルセンサを搭載し，レーザプロファイルセンサで計測した溝深さと，UTプローブで計測した溝近傍の健全部における肉厚との差から，溝直下の最小残存肉厚を算出する。

3.3　ばら積み船の船体板厚計測

鉄鉱石，石炭，穀物等を運搬するばら積み船の船体板厚計測に，本ロボットの適用を進めている。船体構造の板厚計測は，ばら積み船に限らず，船級規則に基づく検査や船主による自主検査において，健全性評価の重要な項目である。本ロボットにより，従来の人手検査で必要となる足場や高所作業車などのアクセス設備が削減され，作業の効率化と安全性の向上が期待できる。

図3 (d) に，貨物を積載する船倉を対象とした走行試験および板厚計測試験の様子を示す。ロボットには，UTプローブ，プローブ駆動用アームおよびUT用接触媒質 (グリセリンペースト) の供給装置を搭載している。また，前述した車輪機構の特長を生かし，船倉内の角部や隅部を越えて走行できる。本システムは，海事・海洋分野における革新的取組みとして評価され，一般財団法人日本海事協会のInnovation Endorsement認証を取得した[3]。

4　おわりに

(1) 本報では，磁気吸着型壁面走行ロボットの機構と，非破壊検査への適用について紹介した。
(2) タンク側板や風車塔体溶接部の探傷および肉厚分布計測，CFBボイラ火炉水管の局所減肉計測，ばら積み船の船体板厚計測について，実環境での検証事例を示した。

今後も機能高度化と現場検証を進め，安全で効率的な非破壊検査ソリューションを実用化し，大型鋼構造物の保全に貢献していく。

(参考文献)
(1) Eto, H. and Asada, H. H., Development of a Wheeled Wall-Climbing Robot with a Shape-Adaptive Magnetic Adhesion Mechanism, 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), (2020), 9329-9335.
(2) 衞藤晴彦，蔡麗佳，村野賢一，坂井郁也，鉄鋼壁面走行ロボットの開発，住友重機械技報，208 (2022)，15-20.
(3) 住友重機械工業株式会社，鉄鋼壁面走行ロボットが一般財団法人日本海事協会のInnovation Endorsement認証を取得 – ロボット技術で船舶保全のイノベーション，乗組員の安全性向上を推進 –，(2024-4-2)，https://www.shi.co.jp/info/2024/6kgpsq000000n139.html
(参照日：2026年8月25日)