

大口径配管向け手動式・自走式管内検査装置の開発

Development of a manual and self-propelled device for inspection in a pipe with a large diameter

松本 正和 (法務部)

國本 学 (原子力事業部)

小出 鷹史 (技術本部 企画開発部)

Masakazu MATSUMOTO (Legal Affairs Department), Manabu KUNIMOTO (Nuclear Power Plant Department), Takahumi KOIDE (Technology Planning & Development Department, Technology & Engineering Division)

大口径配管用として、その内面の目視検査をするための手動式および自走式の装置を開発した。本装置は、これまで困難であった垂直部の検査を可能にするとともに、水平部の検査においても人による検査に代わる方法として活用が期待できる。今回、開発の概要、装置の仕様や性能およびこれまでの検査実績について述べ、装置の概要を知っていただくとともに、あらゆる産業分野のプラントにおいて活用していただけることを期待する。

For large-diameter pipes, we developed a manual and self-propelled device to conduct visual inspection inside a pipe. This device enables inspection of vertical parts, which have been difficult to inspect, and this device is also expected to be a substitute for a manual inspection method of horizontal parts. In this paper, we explain the outline of this development, the specification and characteristics of this device, and the inspection results obtained to date to present an overview of the device. We expect utilization of the device in plants of all industrial fields.

1. はじめに

1.1 プラント・設備における配管検査

製鉄、石油・化学といったプラントや、橋梁、トンネル、ダムといった社会インフラ設備などでは、多種多様な機器や装置はもとより、設備全体としての機能維持のため、各々に適した検査が定期的実施され、健全性が確認される。

配管については、建設時に溶接部を検査するため、外観検査や浸透探傷試験、放射線透過試験といった非破壊検査が行われ、合格したものが供用される。供用中においても、漏えいや腐食を早期に発見するため、定期的な外観検査や各種の非破壊検査が行われる。検査は主に管外から行われるが、配管は高所や地中、水中とあらゆる場所に敷設され、また保温材等が取り付けられていることもあり、管外からの検査が容易であるとは限らない¹⁾。

管外からの検査が難しい場合や、管内の詰まり、異物堆積、洗浄後の状態、腐食、溶接部、内面ライニングの状況を確認する場合は、カメラや非破壊検査のための機材を管内に入れて検査が行われる。

1.2 管内の検査方法

小口径配管の管内検査は、ボアスコープあるいはファイバースコープと呼ばれる工業用内視鏡を使って行われる。これらの方法は、検査員が内視鏡を手で管内に送り込み、管外から操作を行って、管内の状況を画像・映像で確認し、その記録を行うものである。エルボの通過性、操作性、強度、防水性、メンテナンス性に優れた性能を

備えた工業用内視鏡が多く市販されており、プラント配管、下水道配管、ビルやマンションなどの建物の配管の点検で用いられている²⁾。

大口径配管の管内検査においても工業用内視鏡の活用が考えられるが、

- ・先端部にあるカメラの位置を固定できない。
 - ・ズーム機能が無い。
 - ・近接して撮影する必要があるため撮影範囲が狭い。
- といった理由から、大口径配管の検査には適していない。

一方、検査員が配管に入り、直接目視検査を行う場合、水平部では可能であるが、垂直部や枝管部では困難である。当社では、お客様のプラントで 650A および 750A の配管に検査員が入り、内面ライニングの目視検査、膜厚測定、ピンホール検査を実施した実績があるが、酸欠などの事故のリスクや作業負担が多くなるため、できる限り代替の方法で対応する方が望ましい。

1.3 ロボットによる管内検査

最近、介護や福祉の分野でロボットが人に代わる、または人を補助するといった事例をよく耳にするようになった。これまでロボットの活用は自動車生産ラインの溶接ロボットに代表されるような製造分野への適用が主であったが、これからは図 1 に示すようにサービス分野の市場規模が急速に伸びると予測されている。

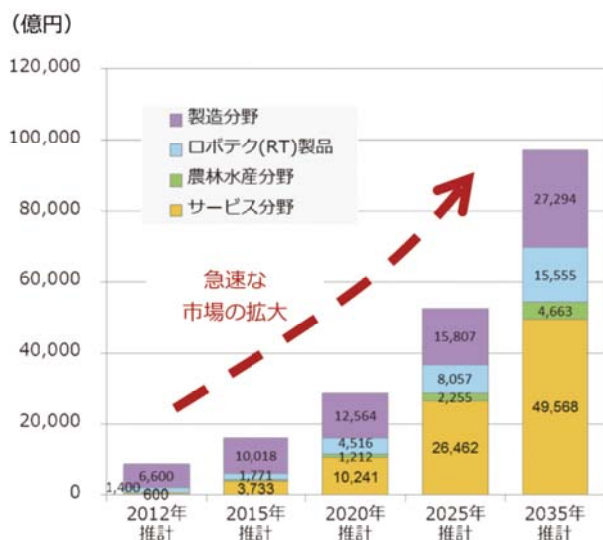


図1 日本のロボット産業の市場規模（推計）³⁾

サービス分野の一つとして、検査・メンテナンス領域もロボットの活用、開発が活発に行われており、インフラ設備の点検にドローンを活用する事例も発表されている⁴⁾。

配管内外の作業用ロボットについては、その走行機構や関係するセンサなど、以前より多くの研究や開発が行われており⁵⁾¹¹⁾、現在では国内外の様々なロボットメーカーから販売されているが、そのほとんどが垂直部を走行できないものであり、作業範囲が限定される。

こうした状況の中、「これまで見るのが難しかった大口径配管内の垂直部を検査できるようにしたい」というお客様の要望に応えるべく、目視機能を優先項目として検査装置の開発を行った。開発に際しては、検査員が配管に入って作業する際のリスク、作業負担の改善も考慮し、検査員が入っても作業しやすい口径では工業用カメラを活用して手動で検査する方式、検査員が入ることが困難な口径ではロボットを活用して自動で検査する方式を採用した。ここでは、その開発の概要、装置の仕様、検査実績について紹介する。

2. 手動式検査装置

2.1 開発の概要

図2に示すように検査員が配管に入り、検査可能な場合において、工業用カメラを手動で垂直方向に移動させて垂直部の検査が行える装置を開発した。

目視検査で重要なポイントである検査員の目の代わりになるカメラは、性能が優れている工業用製品が多く市販されており、ズーム機能や操作性など検査において要求される性能や機能を満たす製品を選定した。

カメラの向きやズームを操作するコントローラーおよびコントロールユニットは管外に設置した。管外の検査

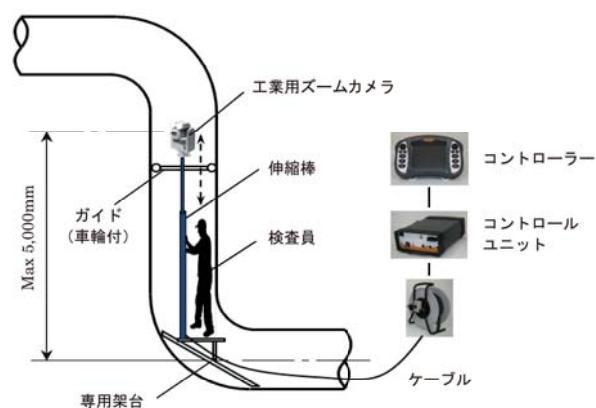


図2 垂直部の検査の模式図

員がコントローラーのモニターを見ながら操作し、カメラを水平方向に360°回転させて配管内面を撮影した動画や静止画で目視検査を行えるようにした。

カメラの高さを変更する手段は、検査員が操作しやすく、コンパクトかつ軽量で運搬しやすいことから、伸縮棒を活用した。また、カメラを配管の中心に保持するため、棒の先端にガイドを設け、運搬性を考慮し折り畳み式とした。

垂直部の検査を行う場合、垂直部下部のエルボ部で検査員が伸縮棒を保持する必要がある。エルボ部は曲面で滑りやすく転倒する可能性があるため、エルボの形状に合わせた専用架台を設けた。また、滑り止めおよび配管への固定治具も取り付け、安全対策も施した。

管内での作業時において、配管内面を傷つけないよう、装置の角部にはゴムシートの貼付処理などを施した。

2.2 装置の仕様

手動式検査装置は図3に示すように、開発したガイド付伸縮棒、General Electric社製工業用ズームカメラ、カメラのコントロールユニット、液晶モニター付コントローラー、ケーブル、専用架台にて構成される。その仕様を表1に示す。

2.3 垂直部の検査

管内の検査員が、カメラを取り付けたガイド付きの伸縮棒と専用架台を垂直部下部のエルボ部に設置する。管外の検査員はカメラを操作し、目視検査を行う。カメラの高さを変更したい場合は、管外の検査員から管内の検査員へ有線式のインカムにて指示し、伸縮棒の長さを変えカメラの高さを変更する。また、図4に示すように、伸縮棒に設けた3本のガイドにより、カメラは常に配管の中心に配置される。異常が見つかった場合は当該箇所を拡大撮影し、寸法（大きさ、面積）を測定することができる。



図3 手動式検査装置の構成

表1 手動式検査装置の仕様

項 目		仕 様
検査可能範囲	配管口径	650A～750A
	垂直高さ	5,000mm
カメラ	動 作 (遠隔操作)	パン, チルト, ズーム 水平動作角度 360° 垂直動作角度 234°
	ズーム倍率	光学 36 倍 デジタル 12 倍
	照 明	35W×2 個
	大 き さ	φ139.7mm×287mm
	重 量	3.0kg
	材 質	アルミニウム
	記 録	動画, 静止画
ケーブル	ケーブル長さ	50m

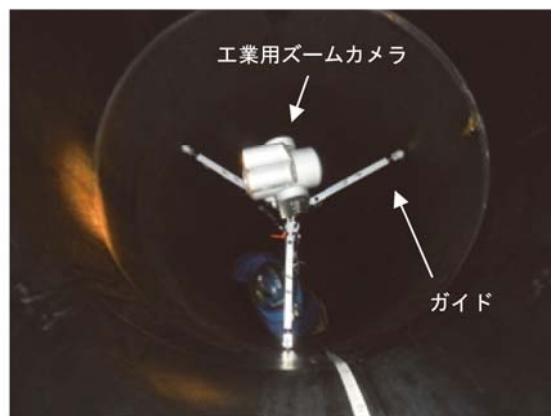


図4 配管上部から見た垂直部の検査の状況

2.4 管内検査以外の活用

本装置のカメラは、φ140mm以上の開口部がある容器等もノズルを通して内部の目視検査が可能である。

管内の検査では装置の運搬性から伸縮棒の大きさが制限され、検査可能高さが最大5,000mmまでとなっているが、管外で使用する場合は、伸縮棒を更に長いものに取り換えることでより高い位置の状況を確認できる。また、高さを電動ウィンチで変更できるようなバリエーションもある。

屋内で検査した実績として、高さ5,000mmの位置にある配管外面の腐食検査がある。

3. 自走式検査装置

3.1 開発の概要

検査員が入ることが困難な口径、高さが5,000mm以上ある垂直部に対応すべく、自走式検査装置を開発した。

管内を走行し、検査するために以下の機能が要求される。

(1) 管内の走行

エルボ部の通過および垂直部の昇降を含めた管内の走行ができる。

(2) 落下防止

垂直部を走行中に電源が切れても落下しない。

(3) 部品脱落防止

部品が脱落しても回収することができないため、脱落防止対策が施されている。

(4) 緊急時の回収

異常時に装置を管内から回収しやすくするために軽量である。

(5) カメラ性能

手動式検査装置と同様にパン、チルト、ズーム操作が可能で、撮影した動画や静止画は鮮明な画質である。

このような機能を満たす装置を開発するため、走行機構の検討、試作、実験、搭載するカメラの選定、軽量化の設計検討などを進めた。それと並行して国内外で市販されているロボットについて調査を行った結果、垂直部を走行できる海外製ロボットの情報を得た。

全てを当社で開発する方法と、この海外製ロボットをベースに改良を加える方法を比較し、コスト・期間の面から後者を採用した。

開発のベースとしたのは、海外での販売実績があるドイツの Endo-Service 社製のカメラ搭載自走式ロボットである。このロボットは管外から操作し、口径が 50mm から 600mm までの管内検査が可能である。今回は、お客様の要望から口径 500mm～650mm の配管に対応できる特別仕様のロボットを導入した。

ロボット導入後、管内検査装置として要求される機能を満たしているか確認するために実験を行い、都度改良を加え、開発を進めた。実験用配管設備は図 5 に示すように、水平部・エルボ部・垂直部での実験が行えるよう L 型の構造とし、配管口径や内面処理の違いによる走行性の評価を行うため、配管口径は 550A、600A、650A の 3 種類とし、内面処理はタールエポキシ塗装、ノンタールエポキシ塗装、ポリエチレンライニングの 3 種類とした。

各種実験を行った結果、改良内容を以下に示す。

(1) 管内の走行

エルボ部の走行時、配管口径が大きくなるにつれてバランスを崩しやすく、特に 650A ではその傾向が顕著

であったため、タイヤ配置を 1mm 単位で調整し、エルボ部の上昇時、下降時のバランス状態をチェックし、最適なタイヤの配置条件を見つけた。

(2) 落下防止

このロボットを管内にセットする機構として、先端にタイヤを備えたドライビングロッドがスプリングの張力で機械的に配管内面を押さえるようになっているため、垂直部で電源が切れた場合においても、落下しないことを確認した。

(3) 部品脱落防止

ロボットに取り付けた全てのボルトおよびナット類について、ボルトは液体のゆるみ止め接着剤を塗布し、ナットはゆるみ止めナットを使用した。また、検査前後において、部品の装着状況、ボルト・ナット類の点検を行うようにした。

(4) 緊急時の回収

ロボットが走行不能となった場合、回収しなければならないため、回収用ワイヤーをロボットに取り付け、回収時にワイヤーを引くことによって、セット機構のスプリングの張力を弱める機能を設けた。また、回収時にワイヤーで配管内面を傷つけないように、テフロンチューブをワイヤーに被覆した。

(5) カメラ性能

実験用配管内に故意に傷をつけて、その傷を撮影した。図 6 に示すように、ズーム撮影ができ、撮影した動画や静止画は鮮明な画質であることが確認できた。

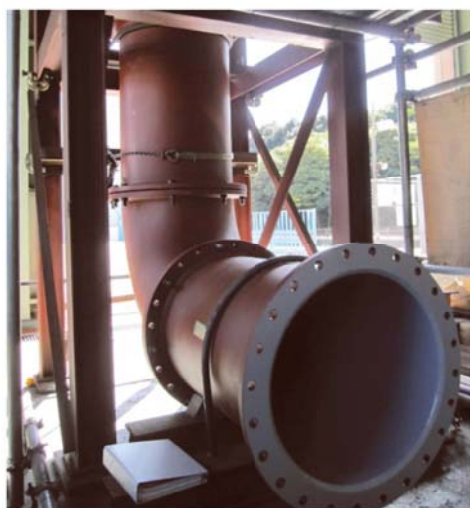


図 5 実験用配管設備

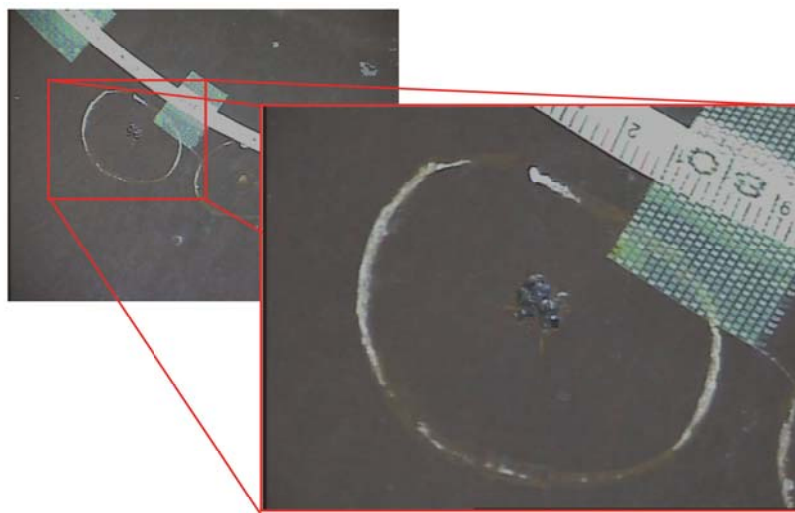


図 6 撮影画像（ズーム前とズーム後）

3.2 装置の仕様

自走式検査装置は図7に示すように、本体、カメラ、補助照明、コントローラー、画像記録装置、ケーブル、距離計によって構成される。その仕様を表2に示す。

本装置は、タイヤを駆動するモーターを内蔵したドライビングロッドが6本あり、前後の2枚のプレートと結合されている。プレートの間隔を変えることにより、タ

イヤの張り出し幅を対象とする配管口径に合わせ機械的にセットする機構となっている。先にも述べているように、セット機構はスプリングによってタイヤを配管内面に押し付けるとともに、もし段差があった場合はそれを乗り越えるタイヤの動きを吸収するようになっている。図8に垂直部の検査の状況を示す。

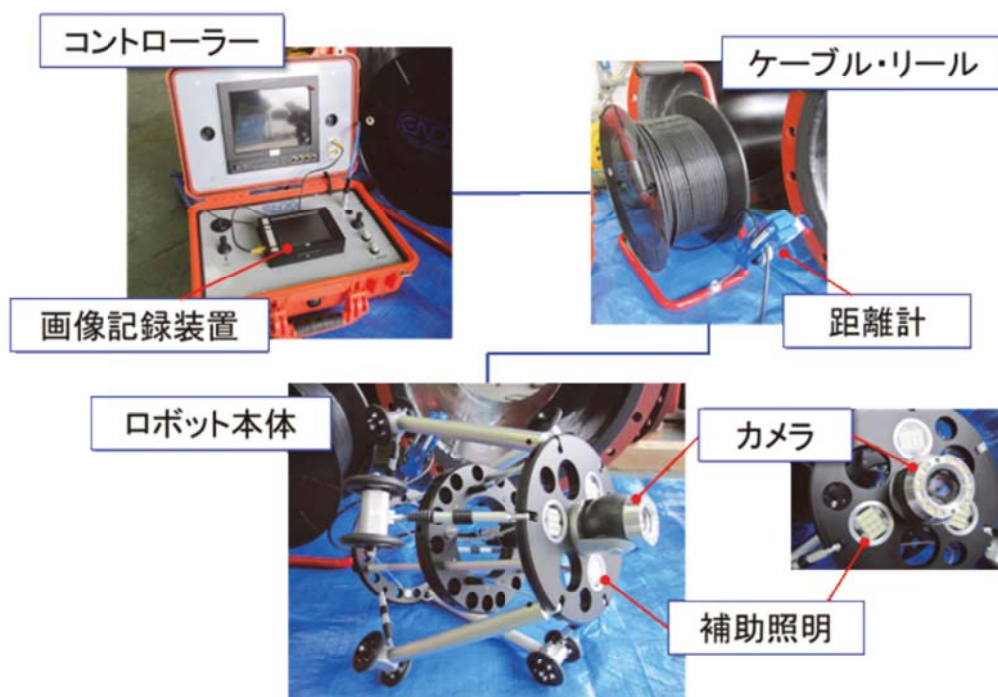


図7 自走式検査装置の構成

表2 自走式検査装置の仕様

項 目	仕 様
検査可能範囲	配管口径 550A～650A
ロボット	全 長 430mm
	重 量 5.2kg
	材 質 アルミニウム
	最大走行速度 6.5m/min
	走行可能エルボ ショート, ロング
	垂直可搬力 6.7kg
カメラ	動 作 パン, チルト, ズーム
	ズーム倍率 光学 10 倍
	フォーカス 手動
	画素数 44 万画素
	照 明 LED 内蔵
	重 量 0.66kg
	記 録 動画, 静止画
ケーブル・リール	ケーブル長さ 90m
	リール機能 距離計付き
電 源	商用電源 AC100V

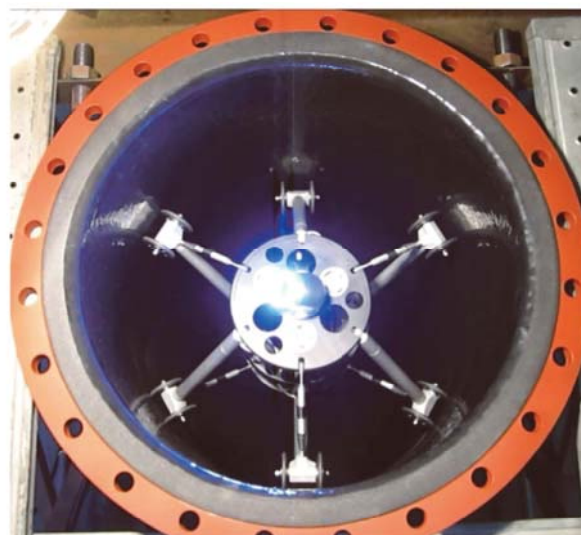


図8 配管上部から見た垂直部の検査の状況

また、構造上および走行性能の特徴を以下に述べる。

- ・配管内面へのタイヤの押付力をスプリングで保持する構造のため、垂直部走行時に電源が切れても落下しない。
- ・ショートエルボも走行できる。
- ・段差 10mm まで走行できる。
- ・理論上は 67m の高さまで上昇できる。（ただし、ロボット搬入口からの距離、ケーブルと配管内面の摩擦抵抗により変わる。）

3.3 検査の概要および実績

図 9 に検査作業イメージを示す。ロボット本体をマンホールなどから管内に搬入し、配管口径に合わせてセットする。管外に設置したコントローラーのモニターを見ながら操作し、動画や静止画を撮影し保存する。

検査自体は、検査したい箇所までロボットを停止し、カメラを水平方向に 360° 回転させて配管内面を検査する。その箇所の検査が終われば、進行方向の状況をモニターで確認し、少し前進して同じように検査するということを繰り返す。

検査実績としては、配管内面のライニングや塗装の状況確認が多い。図 10 にその一例を示す。これまでの検査では、直管部では異常は少なく、フランジ部やエルボ部のような配管継手で異常が発生しやすい傾向がある。特に、フランジ部や溶接部では、経年変化によるライニングの割れや錆が発生している事例もあった。これは配管継手でのライニングや塗装の密着性、内部流体の乱流などによる影響を受けているのではないかと考える。

検査報告を行った後、異常が確認された箇所をお客様が補修し、一年後に状況確認を行った実績もある。

検査した配管ルートとしては、水平部を 10m 進んで垂直部を下りるケース、ショートエルボを 3ヶ所通過したケース、垂直部を下りながら 45 度エルボを通過したケースなど、特に垂直部の検査を中心としたものが多く、トラブルも無く実施してきた。

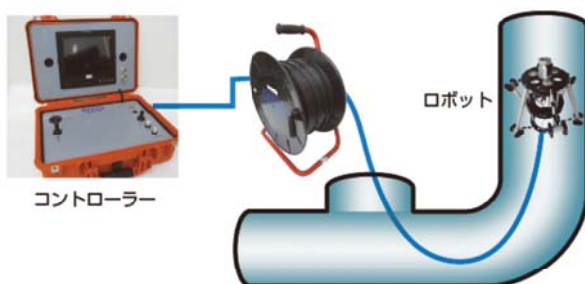


図 9 検査作業イメージ

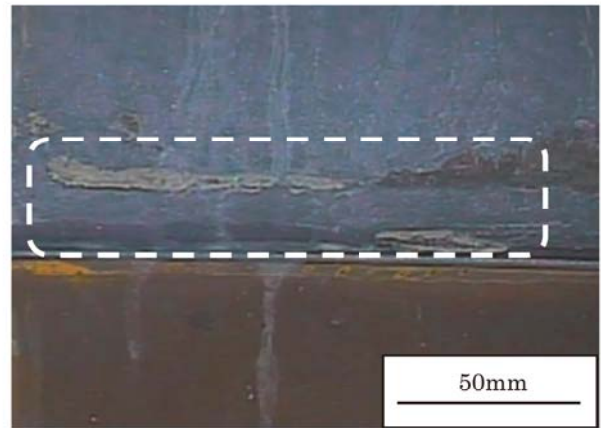


図 10 検査事例（ライニングの剥離）

4. おわりに

大口径配管における垂直部の目視検査技術について、口径の大きさによって、工業用カメラを活用して手動で検査する方式とロボットを活用して自動で検査する方式を開発した。これらの技術は、既にお客様の設備で検査実績をあげており、今後も更なる活用を図っていく。また、最近では問合せを頂く機会も多く、対応配管口径や目視以外の検査方法についての新たなニーズも出てきている。

検査技術については、最近ではドローンを代表例としてロボット技術が多く活用されるようになってきており、検査効率の向上、作業負荷の軽減、検査が困難な箇所への適用などが図られている。若年層の労働人口が今後も減少していくと予想されている一方、これまで建設されてきた設備の老朽化対応のニーズは増加しており、今後、ロボット技術などの新たな技術がますます活用されていくものと思われる。

参考文献

- 1) 藤原茂, 金原了二, 岡田徳次, 実森毅: 分節型主要配管内検査点検ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.12 No.2, pp.318-327, (1994)
- 2) 三縄聡久: 最新のプラント配管内検査, 配管技術, 773. Vol.57 No.13, pp.56-60, (2015)
- 3) 経済産業省: 2012 年 ロボット産業の市場動向, (2013)
- 4) 第 2 回 国際ドローンシンポジウム, (2016)
- 5) 福田敏男: プラント検査メンテナンスロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.4 No.5, pp.536-539, (1986)
- 6) 福田敏男, 細貝英実: 管内走行検査ロボットの研究 (検査ロボットの製作と走行・検査結果), 日本機械学会論文集, C 編 52 巻 477 号, pp.1584-1588, (1986)

- 7) 田口幹, 河原崎徳之: ユニット型小口径配管内走行
検査ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.15
No.2, pp.230-235, (1997)
- 8) 湯川俊浩, 小松原章吾, 大山主税, 岡野秀晴: 配管
検査ロボットの移動機構の開発, 日本機械学会論文
集, C 編 71 巻 701 号, pp.200-205, (2005)
- 9) 川口圭史, 吉田乙雄, 巖敬三, 菊田隆: 鉄管内走行
ロボットのセンサと円周方向走行, 日本ロボット学
会誌, Vol.15 No.8, pp.1164-1171, (1997)
- 10) 福澤修一郎: 水力発電所水圧鉄管内部の無線通信実
験について, 日本ロボット学会誌, Vol.31 No.9,
pp.703-711, (2013)
- 11) 新村稔: 配管外面腐食の自走式連続三次元計測と供
用適性評価, 配管技術, 773. Vol.57 No.13, pp.64-71,
(2015)



松本 正和 Masakazu MATSUMOTO
㈱高田工業所 法務部 部長