

球形ガスホルダ自動検査ロボットの開発

Development of Inspection Robots for Spherical Gas Storage Tanks

都市ガスの安定供給に不可欠な設備である球形ガスホルダは、定期的に開放され内外面の溶接部の全面検査が行なわれる。現在、手作業による磁粉探傷検査が行なわれているが、この方法では約半年間にわたるホルダの開放と足場の仮設、塗装のはく離などの大がかりな付帯作業を必要とし、また高所作業の危険も伴う。このため、球形ガスホルダを稼動状態のまま自動的に検査可能な技術の開発が強く求められている。

このような現状にかんがみ、ホルダ外面から内外面の溶接線を検査できる超音波探傷技術を適用・開発し、合わせてそのセンサ部を搭載してホルダ外面を自在に吸着移動しながら自動検査ができるロボットシステムを開発した。この結果、実際のフィールドで検査性能を確認し、実用化への見通しを得た。

柘植宗紀*
藤田明孝*
園田真治**
窪田 純***
佐藤主税****
山下 良**

Munenori Tsuge
Akinari Fujita
Shinji Sonoda
Jun Kubota
Chikara Satō
Ryō Yamashita

1 緒 言

球形ガスホルダは、図1の例に示すように高張力鋼を用いた溶接構造物であり、その溶接線は内外面合わせて約4 km以上にわたる。

現在、東京ガス株式会社だけで57基のガスホルダが稼動中であるが、このうち毎年10基前後が開放され溶接線の検査が行なわれている。現状の磁粉探傷を用いた検査では、例えば下半球の外面を検査する場合、検査用足場の仮設も必要とし、この作業だけで約2箇月を要するなど、最終的に全面の検査を完了するには半年間の開放期間を要し、これに伴う多大の費用を必要としている。

このため、ホルダを稼動状態で検査可能な技術の開発が以前から強く求められており、昭和58年に東京ガス株式会社と日立製作所は、その実用化を目的とした共同開発に着手した。

今回、ガスホルダ外表面塗膜上から稼動状態のまま内外面の溶接線を自動的に探傷できる、唯一かつ最適な手段として超音波探傷方式を選定し、実用化を図った。現状原子力発電所の供用期間中検査では、既に自動超音波検査が実用化されるなど超音波探傷技術の性能、信頼性は飛躍的に向上しつつ

あり、また自動化に際しては、設備と要求性能を踏まえた最適な方式が選定されている。ガスホルダに適用する上での課題としては、凹凸部のある溶接ビードを避けて1回の走査で溶接線に発生すると想定されるあらゆる方向を向いたきずを塗膜上から検出する技術を開発することである。

また、溶接線に沿ってそのセンサ部を搭載して移動できるロボット技術の開発が必要である。現在、磁気吸着方式あるいは真空吸着方式の各種壁面移動装置の開発例が見られるが、作業機能をもち安定して位置決めができるようなロボットの例はほとんどない。今回の実用化では特にセンサ及びその走査機構と移動機構を保持するための強力な吸着手段を備え、また段差などのある球面上を全姿勢で安定して吸着しながら移動できるメカニズムをもつロボットを開発することが課題であった。

以上を踏まえ、第一ステップとして超音波技術、走査及び移動技術の各々についての要素開発、第二ステップとしてシステム化開発を進め、最終ステップとして実用化開発を行ない、フィールドテストによる性能検証を行なった。

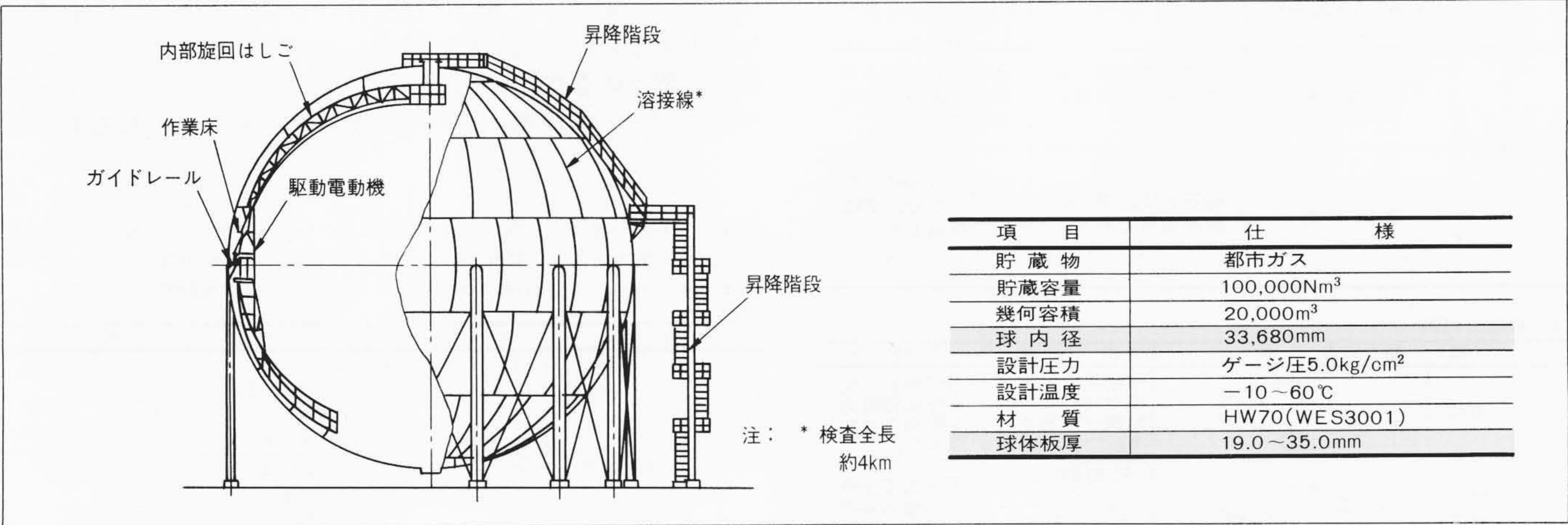


図1 球形ガスホルダ仕様例 球形ガスホルダは高張力鋼を用いた溶接構造物であり、内外面の検査全長は約4 kmとなる。また、付表に示すような直径約30～40m規模の大きさのものが多い。

* 東京ガス株式会社導管技術センター検査技術グループ ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所日立研究所
**** 日立製作所エネルギー研究所

2 ロボットの仕様

2.1 ロボット方式

壁面に吸着しながら移動するための各種のロボット方式例と、一般的な特徴を表1にまとめて示す^{1)~3)}。今回球形ガスホルダ用として適用するには、

- (1) 溶接線上及び塗膜上で十分な吸着力が得られること。
- (2) 塗膜に損傷を与えないこと。
- (3) 溶接余盛のような凸状断面部をもつ球面上を連続して吸着しながら踏破できること。

などを満足する必要がある。同表(a)の吸着方式に関して見ると、真空吸着式では集中形で上記(1)と(3)の条件が、また磁気吸着方式では(1)と(2)の条件がネックとなり採用しにくい。一方、同表(b)の移動方式については、車輪又は無限軌道方式で上記(3)の条件がネックとなる。以上から判断し、真空吸着方式で分散形の吸着素子を配置した歩行タイプのロボット方式を適用するものとし、本方式の欠点である移動速度が低い点については、実用上支障のない範囲まで向上させるものとした。なお、球面上を全姿勢で移動するためには、どのような方式を選定するにせよ、あらゆる条件で滑り、落下を防止するのに必要かつ十分な吸着力が実用上必要となり、これを設計の基本条件として数値計算及びモデル検討を行なった。

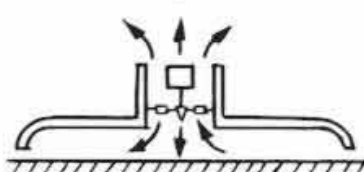
2.2 ロボットの仕様

2.2.1 主な仕様と機能

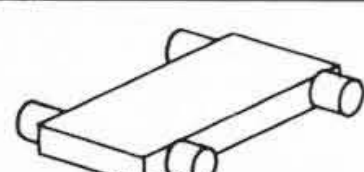
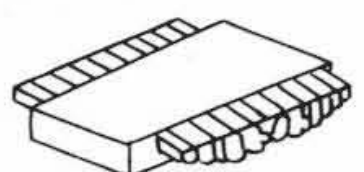
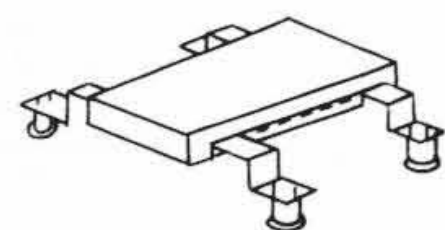
最終的に試作したロボットシステムの仕様を表2に、またロボット本体部及び検査装置の外観を図2に示す。

表1 吸着方式と移動方式 一般に真空式と磁気式の吸着方式があり、本表に示すようなロボット形態が現状検討されている。今回球形ガスホルダ用として欠点の少ない歩行式+真空吸着式の組合せによるロボット方式を採用した。

(a) 吸着方式例

吸着方式	特徴	問題点
真空吸着	分散形 (吸盤形)	小形・軽量化が容易である。
	集中形 	凹凸面でのある程度の空気漏れは許容される。
磁気吸着	永久磁石形	吸着力の維持にエネルギーを必要としない。
	電磁石形	磁石と壁面間の着脱が容易である。

(b) 移動方式例

移動方式	特徴	問題点
走行式	車輪 	移動速度が速い。操だ(舵)などの制御が容易である。
	無限軌道 	吸着面積を大きくできる。不整地面の走行ができる。
歩行式		確実な吸着力が得られる。操だ(舵)が容易である。

ロボットの移動は前進・後退と旋回の組合せによるものとし、特に移動時のバランス、強度などを考慮して円状のフレーム構造を採用した。その構造の概要を図3に示す。移動部は、真空吸盤とこれに一体となったエアシリンダによる伸縮脚を、各々8組保持した同心円状の内側と外側の二つのフレームの組合せから成り、これらをボールねじ機構と旋回ギヤ機構により接合し、吸着フリーとなった一方のフレームが相対的に前後進又は旋回できる構造とした。また、内側フレームの内部にX・Yテーブル駆動部を搭載し、その最下部に超音波センサを設置し、探傷に必要なX・Y走査を行なう方式とした。

ロボットの操作は最大100m離れた地上の操作盤から自動又は手動操作により各々歩行、旋回、探傷の動作を行なう方式とした。また、探傷作業は次の一連の操作により行なうものとした。

- (1) 所定の溶接線までロボットを移動させる。
- (2) 歩行、旋回機能を用いて、走査方向と溶接線及び大まかなスタート位置を合わせる。
- (3) X・Yテーブルを駆動し、探傷のスタート点を正確に合わせる。
- (4) 約400mmのストロークを自動走査する。この際に溶接線の傾斜などがなければ固定走査を行ない、傾斜などがあれば渦流センサによる自動溶接線追従走査又はティーチング走査を行ない、探傷を完了する。
- (5) 走査終了点で溶接線にマーキングを行なう。
- (6) ロボットを約400mm移動させ、上記マーキングを基準点として走査を繰り返す。

実用化に際し最も重要と考えられるのは、検出データとその位置確認の精度を確保することであるが、上記のようにより位置検出精度の高いX・Y走査の位置情報を用い、400mmごとのブロックで処理することによって、位置検出精度の確保を図った。またこの方式の採用により、合わせてロボットの移動及び位置決め操作をいっそう簡略化することができた。

2.2.2 ロボットの特徴

図4に本ロボットの機構上の特徴を示す。まず、同図(a)は移動のメカニズムであり、球面上の段差(最大約15mm程度)上を連続して吸着可能な手段を採用した。すなわち、吸着している脚部を操作し、壁面にフレーム全体を引き付け、一方のパッドを一定予圧で壁面に押し付けることによって、溶接ビード上あるいは凹凸部など段差への吸着を確実にしている。また、個々の真空パッドについても高さ3mm以上、幅40mm程度のビード部段差上への吸着が可能な柔軟性のある素材と

表2 ロボットの仕様 ロボットは片フレームで80kg×8個=640kg以上の強力な吸着力があり、最大60m/hでの全姿勢歩行移動が可能である。また探傷は、長さ3mm、深さ1mmのスリットを基準として感度を設定している。

No.	分類	項目	仕様
1	走行装置本体	(1)吸盤数	16個
		(2)吸着力	80kg/個以上
		(3)歩幅	400mm
		(4)最大移動速度	60m/h以上
		(5)旋回角度	30°/歩以上
		(6)最大旋回速度	1°/s以上
		(7)直径	約1.8m
		(8)高さ	約0.7m
		(9)重量	約140kg
2	探傷装置	(1)探触子	5MHz、70°斜角探触子
		(2)探傷方式	探触子6個の時分割制御による8モード探傷方式
		(3)標準感度	長さ3mm×深さ1mm スリット80%
		(4)探傷ストローク	400mm/回

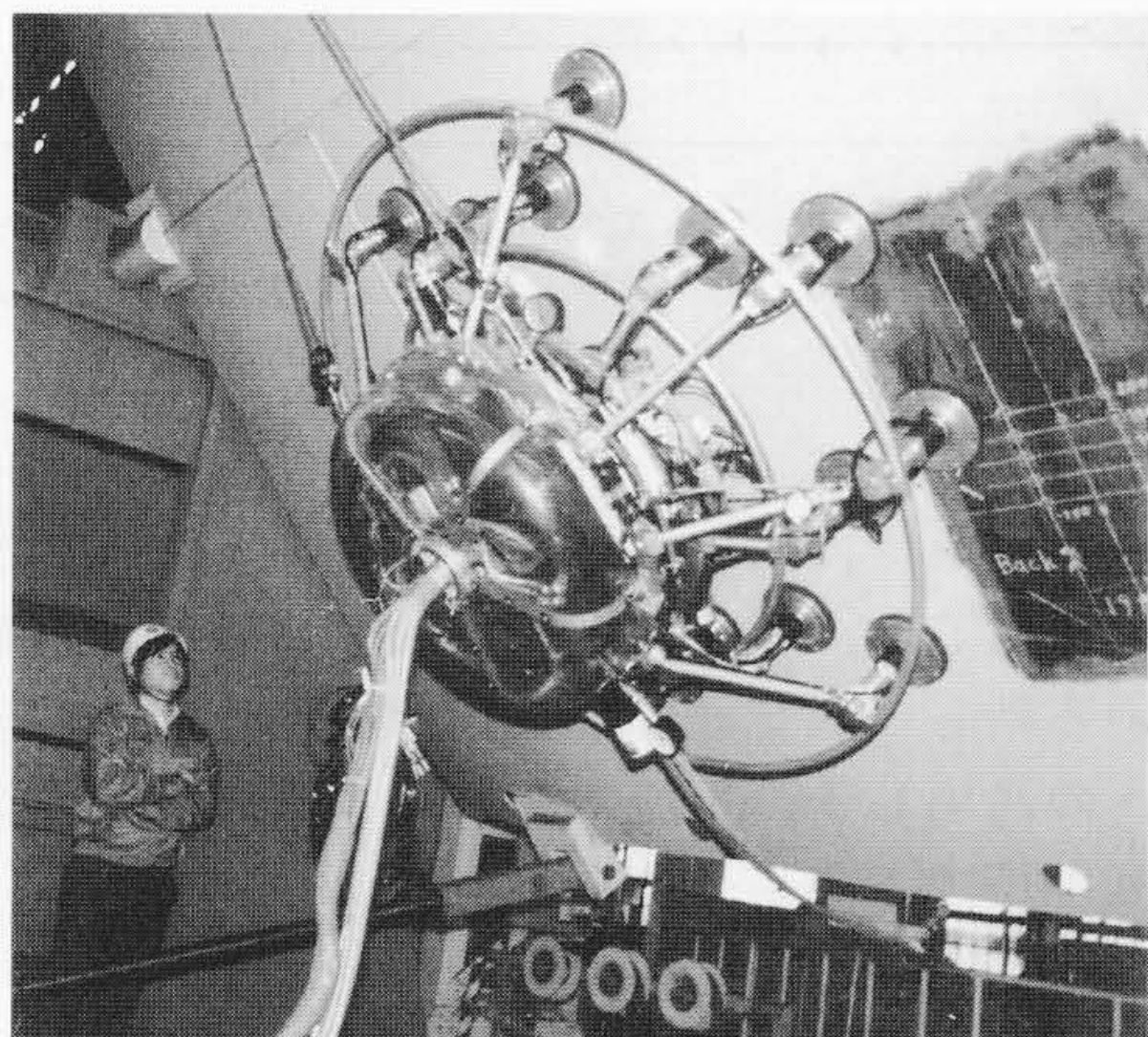
構造を採用した。

次に図4(b)は、もう一つの特徴である球面追従機構についてその原理を示したものである。対象としている球形ガスホルダの多くは直径30m程度の規模であり、全長約1.8mのロボットがストローク400mmで歩行する場合、壁面を単なる平面と見なした直線移動方式による歩行メカニズムを採用すると、進行前端のパッドと壁面の間に20mm以上のギャップが生じ吸着が困難な場合が発生する。この点を考慮し、同図に示すようなボールねじ送り機構に球面ガイドを組み合わせた自在送り機構を検討し採用した。ガスホルダの直径に応じてガイドの曲率を変更することにより、各種のホルダへの適用が可能となる。

3 検査システム

3.1 探傷方式

凹凸のある溶接線の探傷を行なうには、図5(a)に示すような斜角探傷が必要である。また、連続した走査を行なうには、接触媒質を連続して供給する必要がある。今回水ギャップ探傷方式を採用した。更に1回のX・Y走査で溶接線上の全方向の反射体を探傷するための方法が必要であり、このため探傷方向と探触子配置条件による検出性の検証を実験的、理論的に行ない、最終的に最もシンプルかつ効率のよい方式として同図(b)に示すような6個の探触子による8モードの探傷方式



(a) ロボット本体



(b) 検査装置

図2 ロボット及び検査装置の外観 (a)は完成したロボットの本体部外観を示す。また(b)は検査装置の外観を示す。ロボットは内と外の円形フレームから成り、走行、旋回によって球面上での自在な走行を行なう。

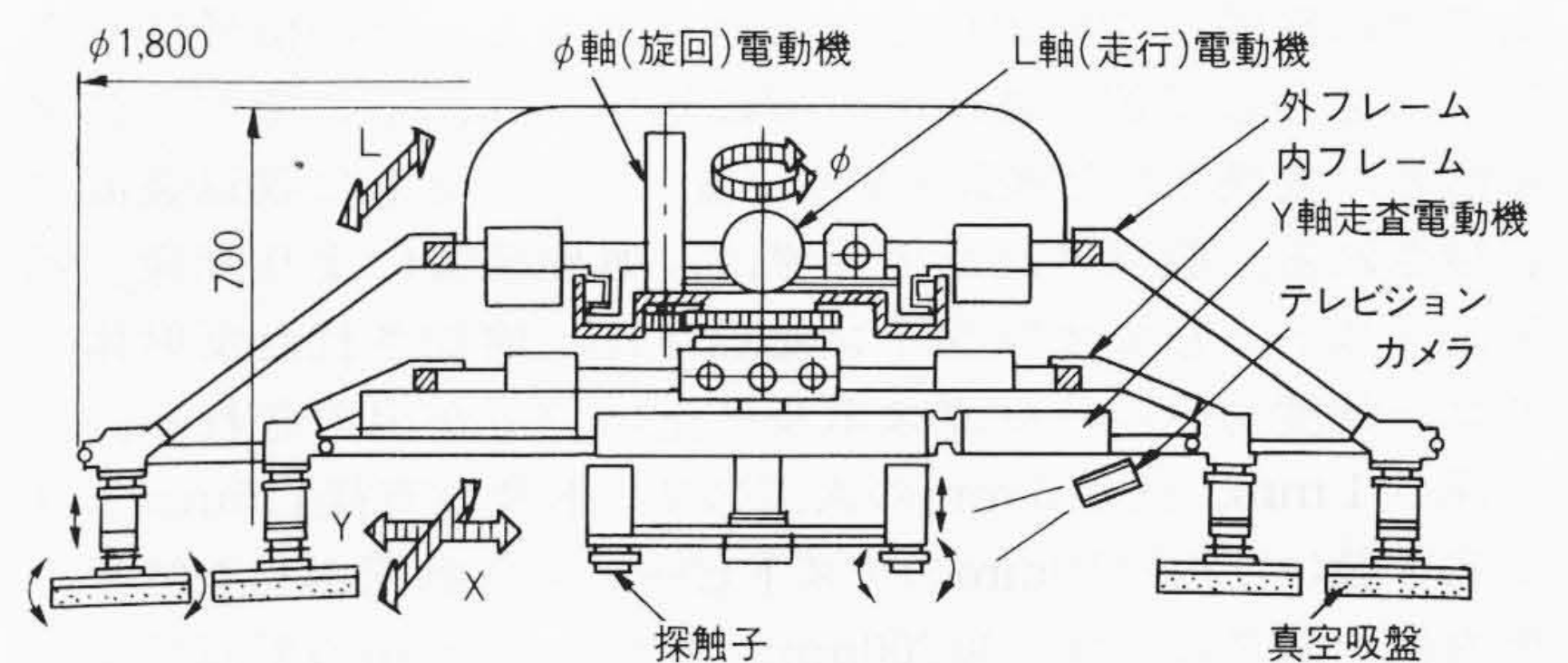
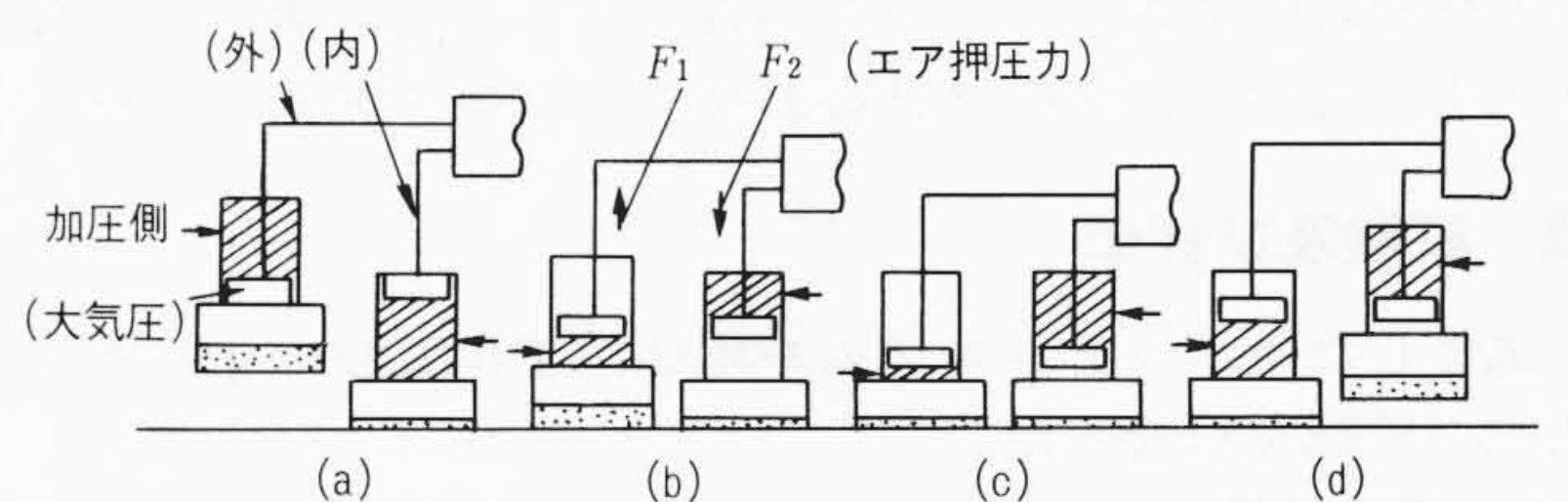
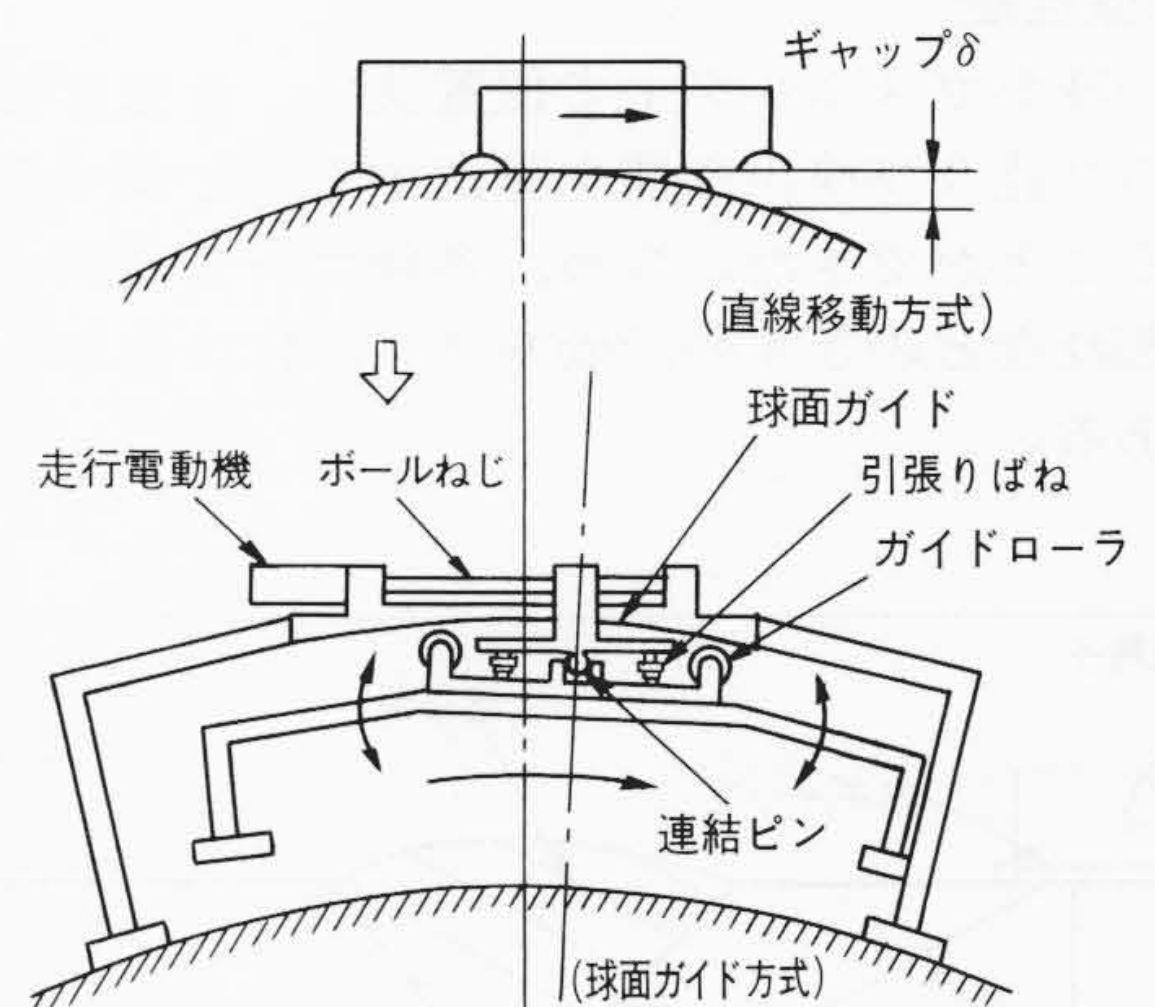


図3 ロボットの構造 ロボットは円形の内外フレームの組合せから成り、片フレーム8個、合計16個の真空吸盤を備えている。ロボットの移動は走行、旋回により行ない、内側に搭載したX軸、Y軸の走査により探傷を行なう。



	外	内
(a)	これから吸着動作へ移る。	吸着中
(b)	吸気を下室に切り換え脚を伸ばす。	脚を縮め外脚を壁面へ押し付ける。
(c)	吸着完了。このとき内外の脚は突っ張り合っている。(F ₂ > F ₁)	
(d)	脚を伸ばし内脚を離す。	脚を縮め離脱する。

(a) 移動メカニズム



(b) 球面追従機構

図4 ロボットの特徴 移動は吸着フリーとなった片側のフレームを動かすことを行ない、吸着時は吸盤をエアシリンダによりホルダ表面に押し付けて予圧を加えるようなメカニズムである。また球面追従ガイドを設け、球面に沿った連続走行を可能としている。

を開発した。この方式は、溶接線に対し45度方向から超音波ビームを入射できるように探触子を配置したもので、6個のうち3個は溶接線中心から左半分のエリアを、残りの3個は右半分のエリアを一探法と二探法を組み合わせ各々四つの超音波送受信モードで探傷する方式である。本方式は合計八つの各モードに対する探触子の送受信の組合せを時分割で制御し、かつ探傷信号を抽出できる探傷装置と、その信号を同時に収録可能な装置を組み合わせることにより行なうものとした。

なお、個々の探触子は、エアシリンダにより各々壁面に自在に一定圧力で接触できるようなメカニズムで保持するものとし、これにより良好な接触性を得ることができた。

3.2 検査システム

図6に検査システム全体の構成を示す。超音波探傷装置からの超音波制御信号が100m先端のパルサを一定時間ごとにモード順に駆動し、これに応じて探触子から超音波が送られる。

走査中に探触子で検出信号が受信されると、その信号はプリアンプを介して超音波探傷装置に送信され、そこでデジタル信号に変換された後X・Yの位置データとともに収録装置に記憶される。収録されたデータは、処理装置により画像表示又はリストとしてオフライン処理され、検知された反射体のエコー強度レベル及びガスホルダ上の位置が出力される。

深さ1mm、長さ3mmの人工スリット及び直径1.5mmドリル穴を設けた板厚19mmのテストピースを自動探傷した結果の出力例を図7に示す。幅200mm、長さ約400mmの平面投影図でスリットの大略の形態と大きさの程度に応じた画像が出力されている。

実際の探傷では、ガスホルダの名称、溶接線の番号など各種の探傷条件パラメータの記録が必要であり、データ収録装置及び処理装置の入力部からあらかじめ必要なすべての条件を入力しておき、データと合わせて出力する方式とした。

4 試験及び評価

試作したロボットシステムを用い、工場及びフィールドで性能の検証を行なった。

4.1 移動性能

最終的に実際のフィールドで全姿勢で良好な吸着・移動性能を確認し、実用化への見通しを得ることができた。今後、実用に供するため、耐久性の確保と使い勝手の改善を図ってゆく必要がある。

4.2 探傷性能

実際の球形ガスホルダ上で位置決め、走査など、一連の探傷作業の性能及び検出性能を確認することができ、実用性を検証することができた。今後、各種データの積み上げと考察による割れなどのきずの評価基準又は検出基準の確立が主な課題である。

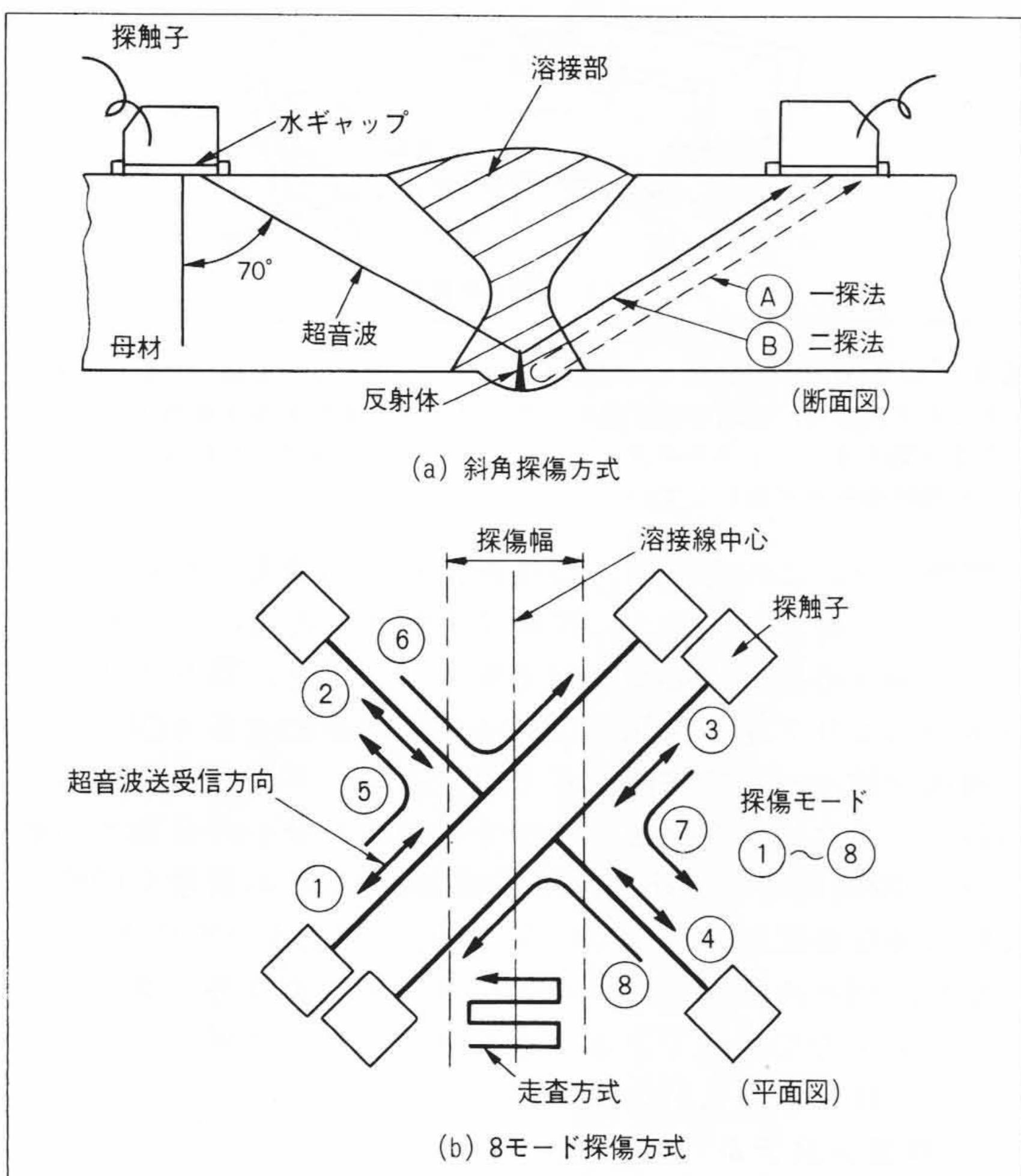


図5 探傷方式 (a)は断面図上での超音波送受信方向を示す。溶接ビード上からの探傷は困難なため斜角70度方向から入射する。(b)は平面配置を示し、6個の探触子で8モードの方位から探傷し、全方向の欠陥を探傷する。

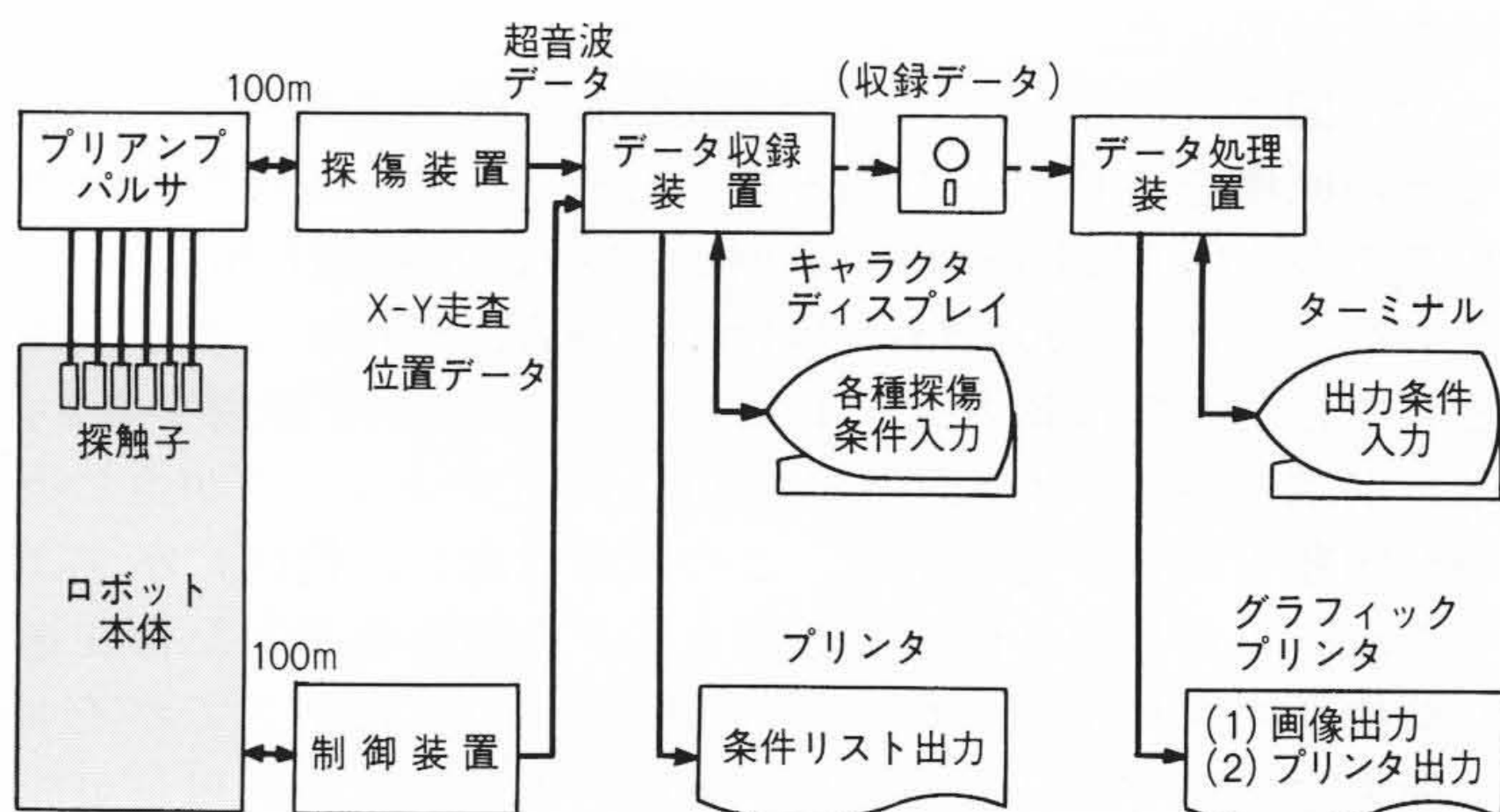


図6 検査システム構成 ロボット本体に搭載した6個の超音波探触子から超音波信号を送受信し、X-Y走査の位置信号とともに欠陥信号を収録し、オフラインで画像出力などに処理して出力する。

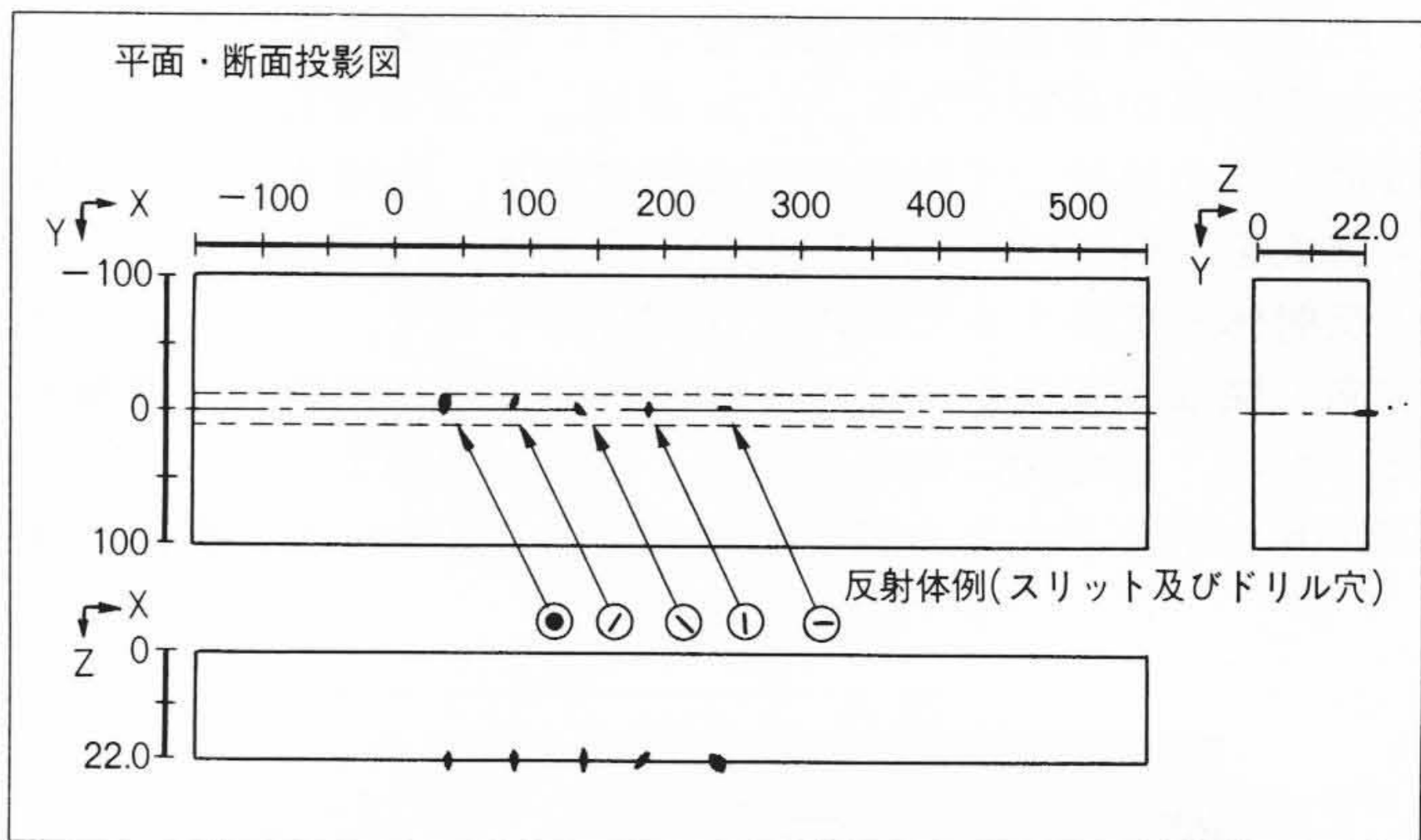


図7 探傷データ出力例 人工欠陥(スリット)を自動探傷した例を示す。本図のように平面及び断面図上で一定レベルを超えた欠陥信号が出力される。

なお、全体としては、検査作業効率のいっそうの改善を追求する必要があるが、電子スキャン、開口合成など最近研究の進んでいる新しい超音波探傷技術が実用化段階に至れば本システムへの適用も十分可能であり、将来の検査作業の大幅な合理化も期待できる。

5 結 言

現在、球形ガスホルダの溶接線検査は、ガスを開放した状態で大がかりな手作業により行なわれている。今回超音波探傷技術を採用し、球形ガスホルダ外面から稼動状態のまま全面を移動しながら探傷の可能な自動検査ロボット及びそのシステムを開発し、実用化への見通しを得ることができた。これにより、作業の大幅な合理化と合わせて信頼性の向上が期待される。

メンテナンス作業の自動化は、生産設備へのロボット導入による自動化と異なり、設備条件により制限されるケースが多く、従来技術の単純な応用だけでは実用に供するのは難しいと考えられる。本開発の例が、メンテナンスロボットの導入開発の一例になれば幸いと考える。

参考文献

- 1) 内藤, 外: 壁面移動ロボットの開発, ロボット, 48号, p.74 (1985-6)
- 2) 藤田, 外: 球形ガスホルダ自動検査ロボットの開発について, ロボット, 50号, p.98 (1986-1)
- 3) 出海, 外: 壁面歩行ロボット, 日立評論, 66, 10, 765~768 (昭59-10)