

船体検査用水中ロボット (RTV-SHIP) の開発

——新しい船体検査法の一提案——

正員 中 田 宣 久* 大 塚 正 剛*
正員 小 澤 宏 臣* 鴻 巣 真**

Development of the Hull Inspection Robot (RTV-SHIP)

by Yoshihisa Nakata, *Member* Masatake Otsuka
Hiroomi Ozawa, *Member* Makoto Konosu

Summary

Recently, demands for increased safe operation and ocean environment protection, especially preventing oil pollution in the sea are remarkable as the international tendency. On the other hand, the trend of the shipping world indicates clearly a strong demands to reduce the cost for operations and maintenance of ships. From the viewpoint of survey and inspection of ship hull structure, the improvement of reliability of inspection, safety of work and reduction of costs for inspections are one of the most required subjects today. In order to correspond to the social requirements for surveys and inspections of hull structures, the authors are studying and developing the new monitoring system by the underwater RTV robot (MITSUI RTV-SHIP). The advantages of the RTV-SHIP are as follows: 1) All the tank walls can be inspected and easily recorded on video tapes. 2) All the operations can be controlled on the upper deck by minimum operators. 3) All the surveys can be performed on voyage. The basic tests of RTV-SHIP with regard to positioning in the tank, measurement of plate thickness and large deflection of panels were carried out and satisfactory results were obtained. The utility of the RTV-SHIP was proved in this study and further tests for the actual ships are now planned with the aim of realizing this system. The RTV-SHIP is expected to make a major contribution to the safe operations and ocean environment protection.

1. 緒 言

近年、船舶の海難事故による地球環境汚染防止の観点から、船体構造に関する検査の重要性が増大している。大気汚染、海洋汚染、地上汚染といったように、今、地球は全ての面で人間の造り出す物質により日増しに汚染が進んでいる。この様な状況の中で、船舶による海洋汚染の防止は、内外を問わず我々船舶・海洋に関わる人間にとっての責任であるとともに、義務でもあると考えている。そのためには先ず、船体の状況を的確に把握し、その情報に基づいて適正な船舶の運航を実行する必要がある。一方、海運界ではサブスタンダード船の排除、タンカーの二重殻構造の採

用等、何れも船体の検査業務にとって多大な負担の掛る状況が生まれつつある。こうした中で著者等は船体状況を適確に把握するための一助となるべく、当社が開発した水中テレビロボット (RTV) の技術を応用した新しい船体検査システムの開発を実施してきた。今回の研究で船体検査専用の中水テレビロボット、RTV-SHIP を完成して基礎的な水槽実験を行ったので、その成果をまとめて報告する。ここで現状の船体構造検査法の実態を翻ってみるに、船体外部は入渠中の目視による外観検査、ダイバーによる水中目視検査であり、船体内部のカーゴタンクやバラスタタンクは足場を架設しての目視検査、あるいはゴムボートに乗り込んでの目視検査が殆どである。本論文で提案する船体検査用水中ロボットによる検査システムは地球環境の汚染防止に貢献するだけでなく、その検査の過程において、検査結果の信頼性向上、検査の安全性向上、更には全体を通じての経済性の向上にも充分に効果が期待できるものである。

* 三井造船(株)船舶・艦艇事業本部

** 三井造船(株)メカトロ・システム事業部

原稿受理 平成9年1月10日

春季講演会において講演 平成9年5月15日

2. 開発目標と要求性能

2.1 開発目標

本システムの開発目標を下記に示す。

1) 現行の船体検査において最も労力と時間を要するタンク内の目視検査は、人間の経験と目の正確さ及び作業環境の変化に対応する柔軟性を備えており、これらの利点を損なわずに検査作業の安全性と効率性を高めることが可能なシステムを開発すること。

2) 今後、急増が予想される二重殻構造のタンカーの二重殻内検査機能に重点を置いたシステムを開発すること。

3) 入渠期間を短縮して船主側の負担を軽減するために、入渠時だけでなく、回航中に洋上での検査作業を可能にすること。入渠期間の短縮は修繕工場にとっては必ずしも好ましい方向とは言えないが、これが海運全体の経済効果を高め、さらに、造船・海運が一体となって地球環境保全に貢献できるものと期待している。

全体の開発計画は、今回の基礎研究の成果を実船試験で確認し、さらに実用化への最終課題を抽出、解決した上で平成9年度中には本格的な実用システムを構築する計画である。

2.2 要求機能及び性能

全体システムのポイントとなる RTV-SHIP には、タンカーの二重殻内の遠隔検査を想定して次の条件を設定した。

(1) 外形寸法、重量等

可搬型であること、タンカー二重殻構造のマンホール (600 mm×400 mm) を自由に出入りできることを第一条件に外形寸法及び空中重量を設定した。

(2) 機能、性能等

- ・遠隔操縦による6自由度運動制御機能
- ・自己位置 (平面位置、深度、方位) の自動計測機能
- ・水中照明及びTVモニター機能
- ・ビデオ記録及び音声データ記録機能
- ・板厚計測機能

その他、プロファイラ最大測定レンジ 40 m、タンク最大深度 50 m、計測最大板厚 100 mm 等の要求性能値を設定した。

3. RTV-SHIP の概要

船体検査用水中ロボット RTV-SHIP は Fig. 1 に示すように、可搬型の小型 ROV (Remotely Operated Vehicle) である。その基本設計概念は、600 mm×400 mm のマンホールを通過できる小型なもので、タンカーなどのように防爆区域のある船の検査も可能なように非防爆区画から遠隔操縦できることとした。

3.1 RTV-SHIP の機能

本ロボットは、大別して以下の機能を有している。

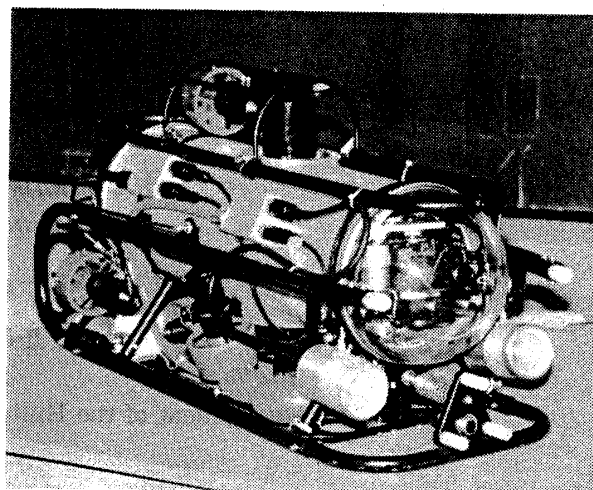


Fig. 1 General View of the RTV-SHIP

(1) 自己位置計測

これは、タンク内におけるロボットの自己位置を計測する機能であり、ソーナーの一種であるプロファイラーと水圧センサ及び方位センサをロボットに搭載している。その原理は、Fig. 2 に示すようにロボットからタンク内壁までの距離をプロファイラーで計測して水平断面位置を求め、さらに水圧センサによってタンク底からの高さを求めるものである。これによって3次元の位置が求められるが、水平断面位置を求める場合、ロボットのタンクに対する相対方位がわからなければ位置を知ることができないので、このために方位センサを設けている。

(2) カメラによるモニター

タンク内の重要な検査の一つは目視検査である。そのために本ロボットはカラーTVカメラ1台と水中照明灯を装備している。また映像伝送には光ファイバーを用いており、画質の劣化の少ない鮮明なビデオ映像を伝送することが出来る。

(3) ビデオ記録

検査の内容はビデオテープレコーダー (VTR) に記録さ

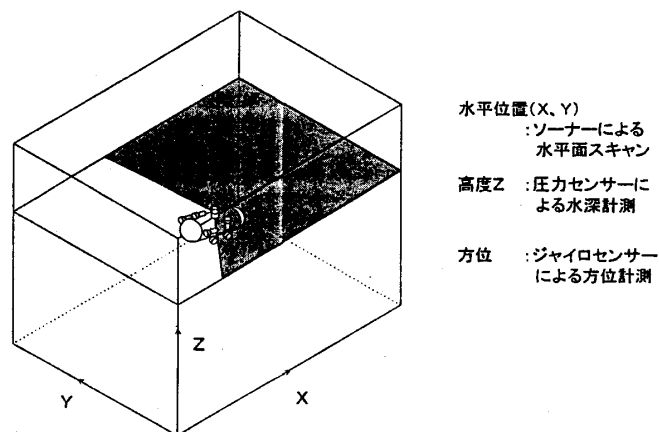


Fig. 2 Coordinate System of Vehicle Positioning

れる。本システムでは、単に TV カメラの水中映像を録画するだけではなく、ロボットの位置、板厚計測値、観察結果の定型化したコメントデータ、例えば、「変形有り」、「亀裂有り」などがスーパーインポーズできるとともに、計測者の音声によるコメントも録音される。

(4) 板厚計測

ロボットの先端には非接触型の超音波板厚計測センサが設けられている。このセンサの送受信器はロボット内部に設けられており、Fig. 3 に示すような A スコープ波形を光ファイバーで水面上の信号処理装置に転送している。信号処理装置は塗膜の上からでも計測できるよう S エコーおよび B1 エコーのピーク間を計測して板厚をデジタルデータに変換している。基礎試験の結果、塗膜に関しては膜厚 0.8 mm のタールエポキシ塗料の上から板厚が計測できることを確認している。ただし錆に関しては、実船から切り出した錆部試験片の計測では、B1 エコーが錆に吸収されてしまい、良い測定ができないとの結果を得ている。周知のように船体に発生する錆は非常に堅く、ハンマーや空気圧によるジェットたがねを用いなければ短時間での錆落しができない。このため、錆落し作業は専用の錆落しロボットを開発する必要があると判断し、この錆落し機能は RTV-SHIP には設けていない。

(5) 大変形計測

大変形計測とは、船体外板が大きなスパンで変形しているかどうかを計測するものである。TV カメラの視野を越える大きな範囲で発生している変形は、TV カメラのみでは視認し難い。本ロボットでは、位置検出用に使用しているプロファイラーによってこの計測ができる。すなわち、プロファイラーによりタンクの水平断面図が実測できるので、その断面と本来あるべき断面との違いを比較すること

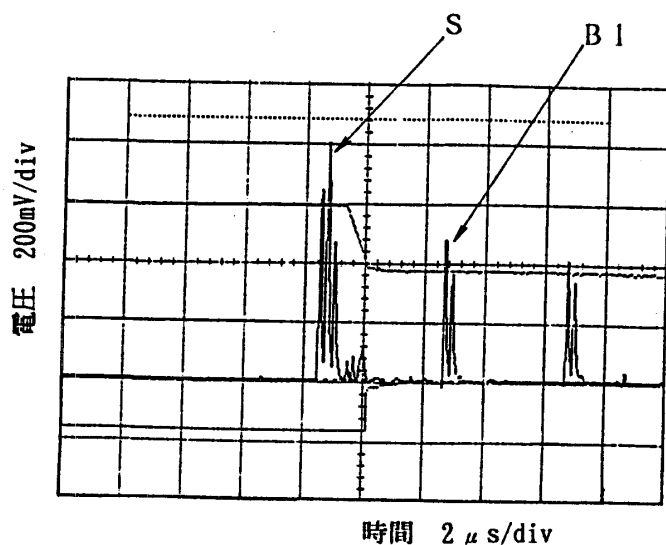


Fig. 3 Supersonic Wave Data from the Thickness Sensor

でその場所及び変形量が確認出来る。

3.2 全体システム構成

全体システムを Fig. 4 に示す。システムは次の機器により構成される。すなわち、ビークル(ロボット本体)、テザーケーブル、制御装置、ジョイスティック装置、電源装置、超音波板厚計測装置、ソナー制御装置、CPU 装置、TV モニター/VTR、発電機であり、各機器の詳細を以下に示す。

(1) ビークル

ビークルの外形図を Fig. 5 に示す。主な要目は下記の通りである。

- ・質量 : 約 34 kg
- ・寸法 : 長さ 840 mm × 幅 335 mm × 高さ 435 mm
- ・スラスト : 水平 3 台 (出力 100 W)
垂直 2 台 (出力 100 W)
横 2 台 (出力 100 W)
- ・プロファイラ : 周波数 1.25 MHz
ビーム角 1°
レンジ分解能 ±1.4 mm
最小レンジ 0.4 m
最大レンジ 40 m
- ・方位センサ : 3 軸ジャイロ
角速度 ±100°/s
ロール角 ±60°
ピッチ角 ±60°
方位角 ±180°
- ・深度計 : 水圧センサ
測定範囲 0~0.5 MPa
- ・板圧計 : 探触子周波数 5 MHz
測定板厚範囲 100 mm 以下
計測分解能 0.1 mm
精度 ±0.15 mm
- ・TV カメラ : 1/3 インチ, 38 万画素 CCD カラー
レンズ 焦点距離 2.8 mm
水平画角 95°
- ・水中照明灯 : ハロゲン 150 W 2 灯

本ビークルは通常の ROV と異なり、Fig. 6 に示す 6 自由度の運動制御ができるように、7 台のスラストを装備している。原理的にはスラストは 6 台あれば 6 自由度の運動制御ができるが、配置のバランスから横スラストを 2 台装備している。6 自由度の運動制御が可能なこと機首の上げ下げも自由に行えるため、タンク内部を隅々まで検査できるようになる。通常の ROV は、ヘリコプターと同じように機首をいつも水平に保ったままの 4 自由度運動なので、真上や真下が見にくい。目視検査のできる範囲が制限され、また水平面のマンホール大の穴を垂直に通過する事も困難である。ビークルに使用しているスラストは、

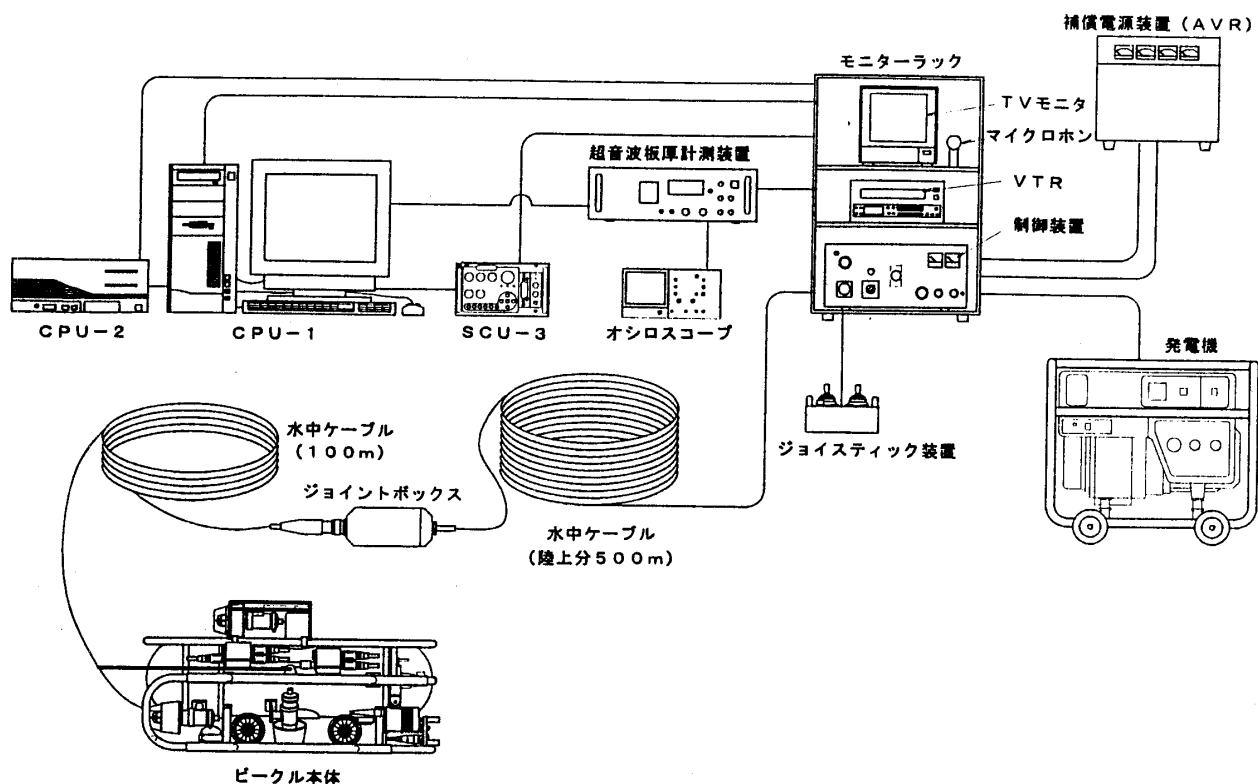


Fig. 4 Total System of the RTV-SHIP

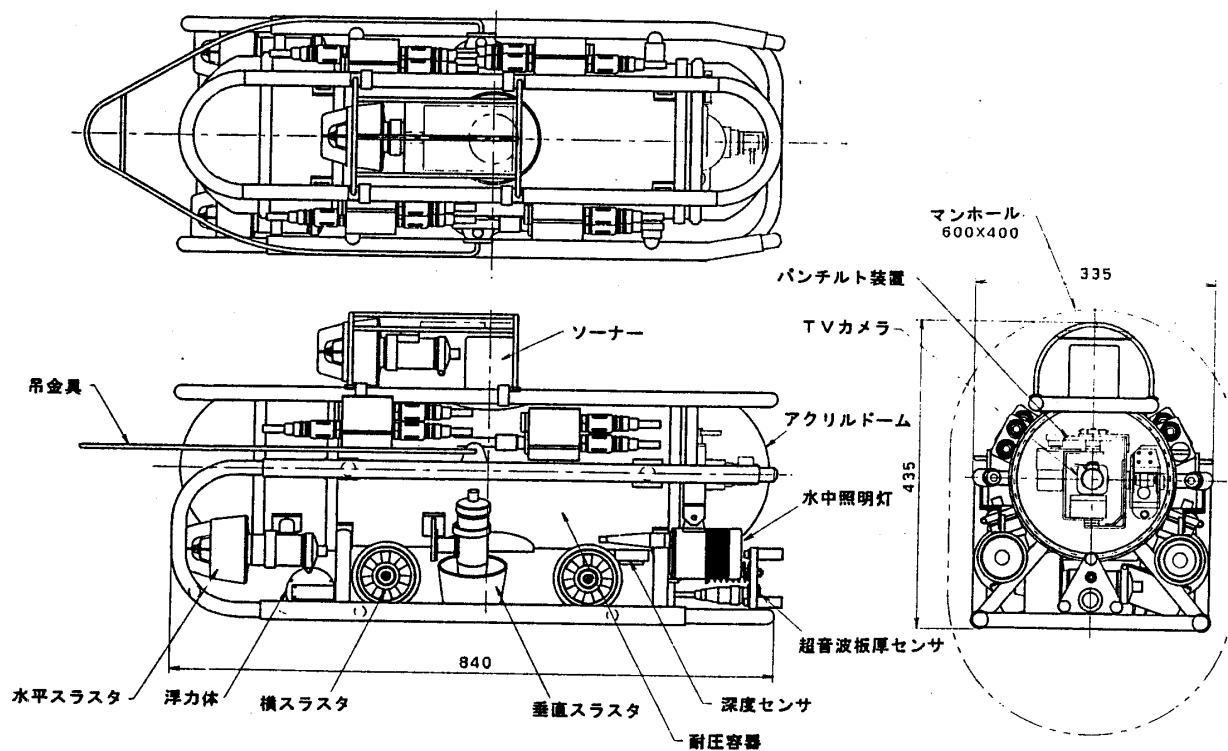


Fig. 5 Outline Drawing of the Vehicle

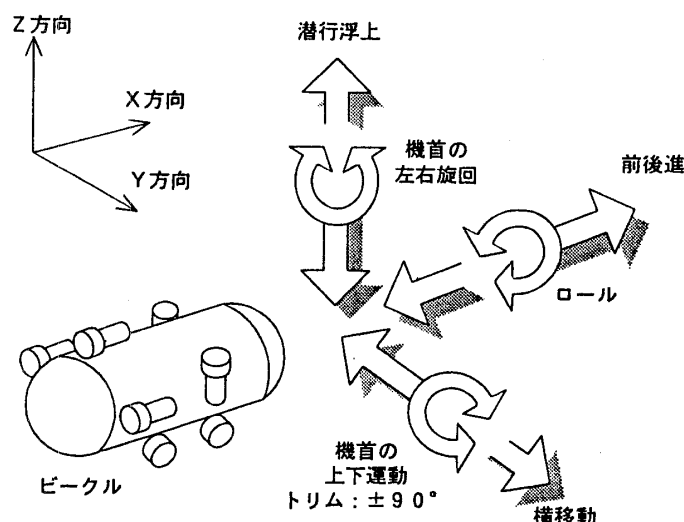


Fig. 6 Controllable Axes of the Vehicle

マンホール大の穴を通過することができるように特に小型化したノズル付きスラストであり、プロペラ径 75 mm でマグネットカップリング、減速機、ブラシレスモーター及びその制御装置を一体化して質量 1 kg 以下に収まっている。推力は正転約 4.5 kgf、逆転約 1.5 kgf である。ちなみに従来のスラストは、ほぼ同質量のもので正転時約 1.5 kgf、逆転時約 1 kgf である。なお、船体は一般に強磁性体なのでマグネットコンパスでは誤差が大きくなるため、方位センサには振動ジャイロと加速度センサーで構成した 3 軸ジャイロを使用している。当然このような角速度積分型のジャイロは方位ドリフト誤差が発生するため、ドリフト誤差が大きく発生した場合は、基準に定めたタンクの内壁に向けるなど、既知の方向に向けて方位の再設定を行う必要がある。

(2) テザーケーブル

光・電気複合型のテザーケーブルとなっており、長さは最大 1000 m まで使用できる。ここでは、タンカーの船体検査において非防爆エリアから操縦することを想定し、船槽内使用部分 100 m、甲板上を這わせる部分 500 m の合計 600 m としている。

(3) 制御装置/ジョイスティック装置/電源装置

これらの装置は、ロボット本体を作動させるための基本装置である。

(4) 超音波板厚計測装置

この装置は、計測した板厚を数値表示し、また CPU 装置へのデータ出力機能がある。また、オシロスコープを接続すれば A スコープ波形のモニターができるようになっている。

(5) ソナー制御装置

プロファイターの制御装置である。ビームのスキャンは 0.9°/1.8°/3.6° ステップのいずれかで 360° 全周にわたって実行され、対象物までの距離を測定し CPU に出力する。ま

た極座標 PPI 表示でモニターにプロファイラー映像が表示される。

(6) CPU 装置

本装置の主な用途は、検査データの処理収録、ビデオ画面へのデータの表示及び自己位置計測である。

3.3 オペレーションの方法

3.3.1 計測準備

(1) 機材の設置

本ロボットシステム一式を被検査船上に搬入し所定の位置に設置する。

(2) データ入力

被検査船のタンク内形状を前もって図面で調査し、自己位置計測による位置表示のためのタンク形状データを CPU 装置に入力する。

3.3.2 オペレーション

本ロボットシステムは下記のように 2~3 名を 1 組としたチームでオペレーションを行う。

(1) 検査責任者

検査責任者は検査作業全体の統括を行う。作業の開始から終了まで、安全管理、作業遂行をスムーズに行うための船側との各種検査内容などの調整折衝、作業指揮などを行い、作業中は検査箇所の抜けのチェック、検査結果記録作業などを行う。

(2) ビークルオペレータ

ビークルオペレータは、本ロボットシステム全ての取り扱いに十分習熟した者が担当し、ロボットの操縦、計測装置、ビデオ装置、CPU 装置の操作を行う。

(3) ケーブルオペレータ

ケーブルオペレータはトランシーバーなどの通信装置でビークルオペレータと連絡を取り合いながら、テザーケーブルの繰り出し巻き込み作業を行う。またケーブルが何かに引っかかった場合には、それを引きはずすためのロボットの移動方向など、経験に基づいた現場の判断をビークルオペレータに伝え、連携操作を行う。ケーブルオペレータの作業は地味ではあるが重要な役割であり、検査責任者が兼務してもよい。

3.3.3 検査報告書の作成

検査報告書としては、現地立ち会い検査官への検査結果速報と、データを整理した後、ビデオテープを編集して正式な報告書として提出するものと 2 種類を想定している。その形態はケースバイケースとなるであろうが、検査結果速報に関しては証拠を残す意味で、その場でビデオテープと CPU データのコピーを取り、それを生データとして提出する方法が適当ではないかと考えている。

上記については、造船所側だけでは決められないので、今後、さらに船主側及び船級協会側のご協力を得た上で、詳細に検討して行きたいと考えている。

4. 水槽内の基礎実験

4.1 運動性能試験

三井造船(株)昭島研究所の潮流水槽 ($L \times B \times D = 55 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 3 \text{ m}$) において、各種の試験を実施した。試験項目と結果を以下に示す。

(1) マンホール等穴の通過試験

水槽内にマンホール (600 mm $\times$ 400 mm) と同じ寸法の穴付き板を鉛直及び水平に設置し、ロボットのTVカメラを見ながら操縦してその穴を通過できることを確認した。

(2) 運動性能試験

このロボットは、船槽の中で内壁を観察しながらゆっくり移動しなければならない。従って潮流に対抗しながら運動する海中用ROVと異なり、スラスターの推力はそれほど大きなものは必要ない。ただしマンホールを通過しながらテザーケーブルを曳航してタンク内部に引き込む推力は必要である。このようなことから一連の試験を実施し、下記のような結果を得た。

前進速力: 2.0 kts

前進推力: 8.5 kgf

旋回速力: 右旋回 39.7°/s 左旋回 43.7°/s

上昇下降速力: 上昇側 0.87 m/s 下降側 0.27 m/s

4.2 水中機能試験

前述の潮流水槽を船槽に見立てて、下記のような機能確認試験を実施した。

(1) 自己位置計測試験

Fig. 7はプロファイラーで得られた水槽の水平断面図の生データの一例である。この情報をCPUに取り込み、データ処理して位置表示画面に表示した例をFig. 8に示す。実施した水槽内試験では位置表示機能は良好であった。しかしこの位置計測のソフトウェアは確定したものではない。船槽形状は単純な立方体形状が多いが、フォアピークタン

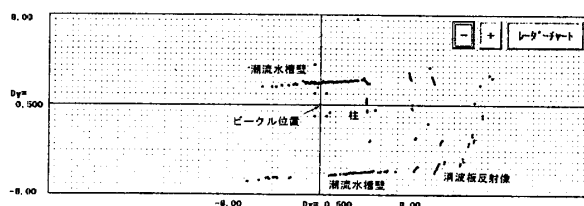


Fig. 7 Measured Data of the Tank Walls

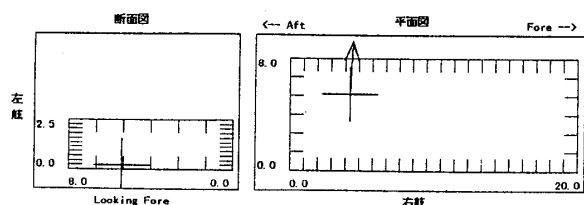


Fig. 8 Analyzed Data of the Vehicle Position

クやアフトピークタンクなどは形状が複雑であり、その3次元形状をCPUに入力する方法などに関して、より簡単な方法を考慮しなければならないと考えている。

(2) 大変形計測試験

Fig. 9はプロファイラーの生映像である。この映像は水槽の平坦な壁の上にスパン3mの間を高さ10cmで弓形に変化する突起物を置いたものである。画面表示では、10cmの突起物の高さが読み取れる。ここでは生データのグラフィック表示を行っているが、プロファイラー自身はmm単位の分解能でレンジを計測しているので、そのデータ処理をして凹凸を強調したグラフィック表示にすれば、より分かり易い計測が可能となる。

(3) 板厚計測試験

水中に水平及び鉛直に鉄板 (L 400 mm $\times$ B 400 mm $\times$ T 11.9 mm) を設置し、ロボットの姿勢制御により精度よく板厚計測ができることを確認した。(計測結果は11.9 mmであった)

(4) 色調試験

水中に設置されたカラーバーの水中TV映像記録と、陸上で撮影された同じカラーバーの映像記録を比較することにより、水中記録データの色調に問題がないことを確認した。

5. 今後の課題

今回の基礎実験で本システムの有効性が確認されたが、下記の課題も明らかとなった。

(1) ハード面では、動力装置、制御装置、計測及び記録装置等をさらに小型化した上で、これらをユニット化し、移動、設置等の効率化を図る必要がある。

(2) ソフト面では、計測前にプログラムに入力するタンク形状データを、現方法ではタンカーに合わせたアルゴリズムに沿って設定しているので、将来の検査対象船種の多様化に備えるためには、より複雑な形状に対応したアルゴリズムに改良しておく必要がある。

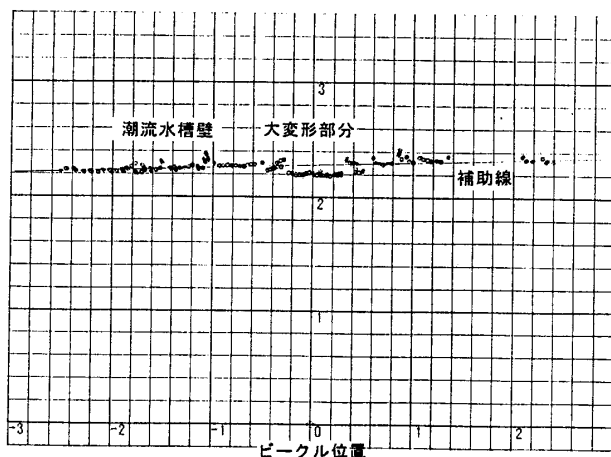


Fig. 9 Measured Data of Large Deflections

(3) 本システムの本格的実用化には、船主側及び船級協会側の協力のもとに、検査項目、検査内容、検査機器性能、計測員訓練、報告書形式等についての詳細検討を行う必要がある。

今後は3月初旬に当社由良工場に入渠予定のタンカーを対象に本システムの実船確認試験を実施する予定であり、この結果を踏まえてさらに実用上の課題を改善した上で、早期実用化を図る計画である。

6. 結 言

従来の可搬式水中ロボット (ROV) の技術を基に、これをタンカー二重殻構造内の遠隔探査が可能な寸法及び重量まで小型、軽量化し、さらに6自由度運動制御が可能な船体検査用水中ロボット (RTV-SHIP) を開発した。今回の実験研究により、下記の結論を得た。

- (1) 水槽内の運動性能試験により、本装置はタンカー二重殻構造内のマンホールを自由にアクセスすることが可能であり、タンク内の移動及び計測に必要な推力、旋回力を十分満足することが確認された。
- (2) 水槽内機能確認試験により、自己位置、パネル大変形量、板厚等の主要計測項目の測定精度が十分であること、及び目視と同等の色調判別能力を有することが確認された。
- (3) 計測時のタンク形状入力方法や記録装置の小型化等、実用までに改良すべき点が明らかになったので、今後の実船計測試験の結果を踏まえてこれらを改善する事により、本システムの実用化が可能となった。

あ と が き

折しも、本論文を執筆している間に、ロシア船籍のタンカー、ナホトカ号が島根県沖の日本海で沈没して大量の重油が流出したと言うニュースが飛び込んで来た。この大量

の重油が山陰地方の美しい海岸に押し寄せたことから、当地では甚大な海産物被害の発生が予想されている。また、今後の長期的な海洋環境破壊の面からも深刻な状況に直面しており、船舶・海洋関係者として心を傷めている次第である。過去にもアモコ・カジス号 (1978年3月、仏、ブルターニュ沖)、エクソン・バルディス号 (1989年3月、米、アラスカ沖)、ヘブン号 (1991年4月、伊、ジェノバ沖) と大きな海難油濁事故が発生し、その都度、環境汚染が世界的な問題となっており、被害地域では未だに深い傷痕を残している。一方、油の除去費用や漁業補償等の費用責任は、たとえ船側が無過失であっても船舶の所有者が負うことになり、これが船舶保険機関の経済的負担増を招く結果となっている。かなりのタンカーが船齢20年を超えた老朽化船であることと、今後の二重殻構造化促進状況を考え合わせると、ますます、船体検査の信頼性向上と、効率化が急がれる時代となったと言える。本 RTV-SHIP が今後の海洋環境汚染防止の一助となることを願う次第である。

謝 辞

今回の研究で船体検査用水中ロボットを用いた検査システムを提案し、水槽試験等の基礎実験によりその有効性を確認する事が出来た。今後は更に船主殿や船級協会殿のご意見を参考にして実船試験を積み重ねた上で、より精度の高い、また、より安全で経済的な検査システムを構築していく計画である。本システムの開発に当っては、日本海事協会殿検査技術部及び同研究所の方々に多大なご助言並びにご指導を頂いており、この場を借りて御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 三井造船技報第140号, (1990)