

浚渫ロボット「ふたば2号」の概要と耐用設計について

中丸 英司* 山内 定義*
 猪足 昇** 米田 啓治***
 小山 和秋*** 白井 豊***

要 旨

浚渫ロボット1号機「ふたば」¹⁾は平成元年の稼働開始以来、約10年間で土量約140万m³、延べ2万8千時間の運転実績を残した。その後継機である「ふたば2号」は1号機の稼働実績を受け、さらなる施工能力の向上を目指し、平成11年3月建造された。1号機は耐用5年を目安に製作したが、さらなる稼働延長のため2度にわたる延命対策を実施し、10年間に及ぶ稼働を達成した。「ふたば2号」は耐用年数8年を目標として設計製作したが、その設計手法には1号機の延命検討成果を取り入れ、構造各部の作業時負荷量、作業回数、波浪外力等を加味し、JSSCによる累積疲労被害度計算法から耐用年数を算定し強度設計に反映した。

本報は、ふたば2号の設備の概要や施工能力の紹介と同時に、2号機の耐用設計手法を紹介し、今後の各種作業ロボットの製作・運用技術の向上に資するべく報告するものである。

1. はじめに

当社では発電所専用港湾の湾内に流入堆積する土砂の浚渫作業を、自動浚渫工法(浚渫ロボット)により施工してきた。浚渫ロボット1号機「ふたば」は、平成元年以来10年間、この浚渫工事に従事し、総土量140万m³、延べ運転時間2万8千時間の稼働実績を残した。

1号機は建造時の耐用年数を約5年と設定し設計製作したが、さらなる延長稼働のため、途中2度にわたる延命対策を実施した。しかしながら、それ以上の延命は主要構造部の大幅な作り替えによる工事への支障が予想されたことから、2号機の建造となった。

このたび建造した「ふたば2号」は、陸上からの遠隔指令による海底自動歩行、最大波高2m、潮流2ノットの条件下での浚渫作業、陸上中継ポンプを介しての長さ2kmを越える送泥能力など1号機同等の能力に加え、連続自動浚渫、遠隔沈設・浮上、GPS測位、遠隔TV監視などの新たな機能を装備したことで、1号機を数段上回る施工能力を有している。

本報では、浚渫ロボット「ふたば2号」の概要の紹介に加え、1号機で実施したロボットの寿命予測、実応力計測に基づく寿命検証、およびそれらデータから設計した「ふたば2号」の耐用設計に関し紹介する。

2. 「ふたば2号」の概要

浚渫ロボット「ふたば2号」は、1号機の実績を基に、更なる高能率、高精度、省力化を目指し開発建造した。2号機では、本体および移動フレームいずれの歩行脚で着地しても浚渫可能としたこと、またラダー装置を中折れ式としたことなどにより、連続的な自動浚渫作業が可能

となった。加えて、ロボット本体に海水ポンプを装備し、陸上から遠隔操作で沈設浮上を可能としたことで、一連の浚渫作業(沈設 移動 浚渫 移動 浮上)の完全な遠隔化を実現した。

2.1 ロボットの製作

2号機は約2年間の設計製作期間を経て、平成11年3月に完成し、4月に現地実証実験工事を行い各部の性能を確認ののち、1号機に替わり浚渫工事に就工した。写真-1に浚渫ロボット全景を、図-1にロボット外形図を示す。



写真-1 「ふたば2号」全景

2.2 ロボットの特色

(1) 能力向上

1号機に比較し、歩行能力を約10%、浚渫能力で約30%の増加を目標とし設計製作した。そのため以下のような諸施策を実施した。

* 機械部 ** 技術研究所 *** 東京支社

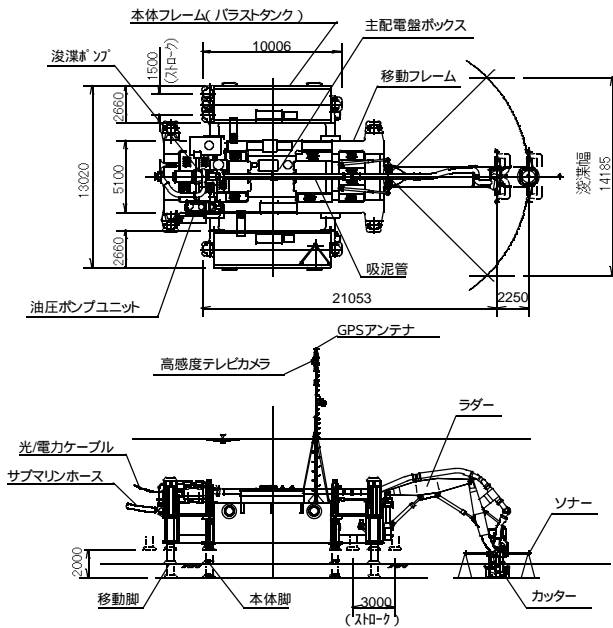


図 - 1 「ふたば 2号」外形図

1号機では、歩行中は浚渫を行うことができなかったが、2号機では、本体および移動フレームいずれの歩行脚で着地しても浚渫可能としたこと、ラダー構造を中折れとしたこと、および自動浚渫制御システムを導入したことで、連続自動浚渫を可能とした。

油圧ポンプ容量を増大し、歩行脚の昇降速度やフレーム移動速度を高速化し、歩行および浚渫サイクルタイムを短縮した。

制御コンピュータと通信システムの高機能化により、制御・監視やデータ伝送の高速化を図った。

RTK-GPS測位システムの導入により、高精度な三次元測量を可能とし、全天候に対応可能となった。

(2) 省力化

本体搭載の海水ポンプによる遠隔操作で浚渫機の浮上・沈設を可能とした。これにより、1号機で使用した支援台船を不要とし、省力化を図った。

自動集中給脂システムを装備し摺動部の摩耗の低減とメンテナンス時間の短縮、省力化を図った。

浚渫機が着底状態のままラダー・先端のカッターを水面上まで上げ障害物を除去可能とした。

(3) 耐用性

構造強度に疲労強度の考え方を導入し、主要構造部の耐用年数を8年として設計した。これに関しては後半にて詳述する。

(4) 環境保全

油圧作動油に生分解性オイルを使用し、万一漏油しても海水の汚染のないよう配慮した。

2.3 ロボット構造・機器

2号機の構造・機器構成は基本的には1号機と同様であるが、自動浚渫システムや遠隔沈設・浮上、制御監視システムの高度化などのため、以下のような改良をした。表-1に1号機との変更点を付記した主要目を示す。

表 - 1 ふたば 2号主要目

項目	2号機	1号機
型式	本体型式 / 全水没型 8脚歩行式 駆動型式 / 電動油圧駆動式 運転方式 / 有線遠隔操縦式 (光通信) 浚渫方式 / 連続歩行浚渫方式 (前後進浚渫可能) ラダー形式 / 本体部 : 中折れアーム・ブーム方式 ラダー部 : 鉛直姿勢自動制御式	自動歩行手動浚渫方式 ブーム方式
外形寸法	全長 / 全幅 / 全高 27.0 m / 13.0 m / 6.0 m 重量 150.0t (気中) 90.0t (水中)	26.5m / 13.0m / 5.1m 70t (水中)
歩行機能	歩行脚伸縮ストローク / 2.0 m スライドストローク前後 / 左右 3.0 m / 1.5 m 方向修正 / ±2.0 deg.	
能力	公称揚土量 / 70.0 m ³ /h 砂 N=30 (運転時間当たり) / 90.0 m ³ /h シルト 排送距離 / 1,400.0 m 歩行速度 / 前後進 約 110 m/h 左右進 約 60 m/h 前後進距離 / 3.0 m / 歩 浚渫幅 / 約 11 ~ 14 m	57m ³ /h 76m ³ /h 100m/h 50m/h 12m
主要機器	浚渫ポンプユニット 電動機 / 320 kw 流量 / 800 m ³ /h (送水時) 揚程 / 76 m 口径 / 300/300 mm 油圧ポンプユニット 電動機 / 250 kw 吐出量 / 620 l/min 使用作動油 生分解性作動油	70m 150kw 550l/min 鉱物性作動油
制御監視	浚渫 / 自動浚渫制御監視システム 歩行 / 自動歩行制御監視システム 測位 / RTK-GPS測位システム 方向 / 静止型ジャイロコンパス 深度 / RTK-GPS 圧力補正型水深計	手動浚渫制御監視 自動追尾レーザー測位 回転型ジャイロコンパス 圧力補正型水圧計
浮沈機能	浮上 / 遠隔操作海水ポンプ 排水方式 沈設 / 自然注水方式 (空気圧縮機注水方式併用)	空気圧縮機排水方式

1号機での空白は、2号機と同仕様

(1) 本体フレーム

本体フレームは、バラストタンクを兼用した構造体を両側に配置し、左右を連結部材でつなぐ構成となっている。1号機との相違は、タンク断面を1号機の円形に対し、頂面が平坦、下部片舷が円弧の略矩形とし、断面積を増やし、タンク長さを短縮した。右舷フレーム上にはGPSアンテナ、ITVカメラ、ロボット沈設浮上のための注排気弁などを取り付けたポストを装備している。

(2) 移動フレーム

移動フレームは、平面形状は1号機同様桁状で高さ方向は2層フレーム構造となっている。中折れラダーの採用などにより1号機より前方重量が重くなったため、前部をバラストタンクを兼ねた構造とした。フレーム上には浚渫ロボットの主要機器である浚渫ポンプ装置、油圧ポンプ装置、電装ボックス、吸排泥管などを、またフレーム中央の水密室には高圧コントロール盤などの電気

機器を搭載した。

(3) ラダー装置

ラダーは、ブームとアームから構成される中折れ式で、移動フレーム前方にラダー旋回装置を介して取り付けられる。アーム先端のサブラダーは1号機と同一で、カッター装置や音響測深機(前後左右4台)が装備されている。

(4) 歩行脚

歩行脚は1号機同様、本体フレームと移動フレームに各4本あるが、2号機はどちらで立脚時も浚渫を行うため、脚昇降シリングは両脚用とも同一力量とし、移動脚間隔を広げ安定性を増した。脚昇降速度は、微速、低速、高速の3段切換とし、高速時には歩行サイクルタイムを1号機より約10%短縮させた。

(5) バラストシステム

バラストタンクは、本体フレーム両舷(3室分割)の他、移動フレーム前部にも設けた。遠隔操作のため各室に油圧駆動の注排水弁と注排気弁を、各タンク横に3台の電動海水ポンプを装備した。沈設は自然注水で、浮上は海水ポンプで排水する。また片舷ポンプ故障時他の海水ポンプで注排水できるようバイパスラインを設けた。さらに海水ポンプが運転不能となっても圧縮空気によるタンクプロ-ができるシステムを備えた。

(6) 浚渫ポンプ

浚渫ポンプは移動フレーム後方に搭載する。インペラは1号機より径を大きくし、ポンプ揚程を上げ、耐摩耗性に優れた材質を使用した。

(7) 油圧装置

移動フレーム上に油圧ポンプユニット、タンクユニット、バルブスタンドを搭載する。浚渫ロボットは全没するためタンクは内部加圧式とし、油圧アクチュエータや配管ラインは漏油対策に十分考慮した構造、材質とした。連続浚渫を行う関係上、各装置の同時動作が多いため、1号機より油圧容量を増加した。浚渫パターンから各装置の使用油量を積算し、油圧ポンプの吐出量を620L/min、電動機を250kWと容量アップした。

(8) 自動給脂装置

自動給脂装置を新設した。電動給脂ポンプは本体フレーム右舷上に搭載し、タイマー制御により各摺動部、旋回軸受け部等に自動給脂する。

(9) 電気部

ロボット動力は、高压電力(6.9kV、3、50Hz)を、陸上の受電ユニットで3.3kVに変圧し、中継ポンプ、遠隔操作室、浚渫ロボットの高压コントロール盤に供給する。受電ユニットから浚渫ロボット間の3kV配電システムには、石英系光ファイバーを組み込んだ60mm²光/電力複合ケーブルを使用した。給電システムを図-2に示す。

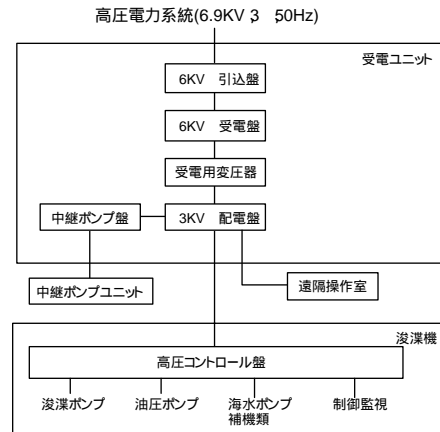


図-2 給電系統図

2.4 ロボットの運転制御

2.4.1 作業の概要

(1) 浚渫作業

ラダーを左右にスイングし、水平回転するディスクカッターで掘削した土砂を、浚渫ポンプから海上および陸上配管を経て、中継ポンプで加圧のうえ処分場へ送る。ラダーが中折れ式となったことで、旋回半径を変え浚渫幅が自由に設定でき、11~14m幅、1スイング前進量0.75~1mで前後進浚渫する。1号機同様サブラダーはラダー動作に追従して常に垂直に姿勢制御され、濁り防止のため、シャッター装置を浚渫およびスイング方向に連動して開閉動作させている。図-3に中折れラダーの動作要領を示す。

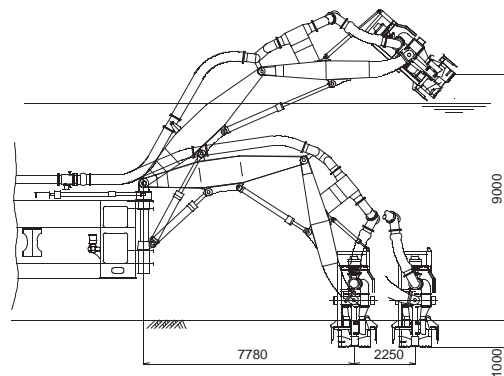


図-3 ラダー動作要領

(2) 歩行作業

歩行は本体脚、移動脚の各4本の脚を交互に踏み替え、脚の接地していないフレームを前後左右にスライドさせる。このため両フレームの交差部にスライド装置を組み込み、油圧シリンダにより押し引きする。またこのスライド装置のクリアランスを利用して浚渫方位の修正や、

巡回歩行も可能である。

(3) 沈設・浮上作業

沈設は、目標海面にてアンカーリング固定したロボットのバラスタック付き注水弁・排気弁を遠隔操作で開き、海水を自然注入し行う。浮上時は海水ポンプを運転し、排水弁・注気弁を開いてタンク内の海水を排出する。

2.4.2 運転操作

(1) 基本操作

手動操作では、遠隔操作盤に設けられた操作レバー、スイッチ、または制御用ディスプレイのタッチパネル上からカッター、走行・横行シリンダ、脚装置、ラダー（ブーム、アーム）などの操作対象を個別に操作する。写真-2に操作室外観を示す。



写真-2 操作室外観

(2) 自動運転

自動歩行

制御画面に目標位置までの歩数、方向等を入力することにより、設定された条件に従い自動で前後、左右および巡回歩行を実行する。

自動歩行中は常に姿勢を監視しており、傾斜した際は、自動で脚長を変更し、傾斜修正を行い歩行を続ける。

プレロード

4脚中の対角に位置する脚シリンダを同時に伸ばし、2脚に全荷重をかける動作をプレロードといい、他の2脚も同様にし、その後4脚着地にもどす。この一連の動作を自動運転する。

ラダー位置制御

2号機ではラダーが中折れ式になり、手動での操作は運転が複雑なため、操作画面に設定値を入力することで、設定されたカッター深度とスイング半径となるようアーム、ブーム、サブラダーを自動調整し、位置を制御する。

自動浚渫

浚渫方式(1サイクル当たりスイング数)、浚渫層数、浚渫方向、スイング幅、土厚、前後進回数およびカッター深度を入力することにより、設定されたシケンスに従い

浚渫作業を自動的に行う。連続浚渫には歩行を伴うため、自動歩行の要素とプレロード、精密傾斜修正、シャッタ開閉の動作をすべて自動制御により行う制御フロートしている。

2.4.3 制御・監視

制御・監視システムは全ての操作をワンマンコントロールする。システムは1号機と同様、浚渫機の制御・監視、位置出し、浚渫支援の各システムで構成されるが、2号機では液晶画面を採用し、タッチパネルから迅速な操作が可能となった。

(1) 制御・監視システム

制御・監視はシケンサネットワークにより処理することで、陸上にマスタシケンサ、制御指令用および監視用PCを、ロボット内にロカルシケンサを設け、2重化光ネットワークにより結合する構成とした。通信は10MBPSの高速光通信バスを使用し伝送の高速化を図った。制御用PCは、各装置の手動操作、自動運転の設定値の入力、実行を行う。監視用PCは、浚渫ロボットの姿勢、脚荷重等(A画面)、浚渫ポンプおよび油圧ポンプ用電動機軸受温度、母線電圧、電流および油温、タンクレベルなど(B画面)の状態を監視できる。図-4に画面例(A)を示す。

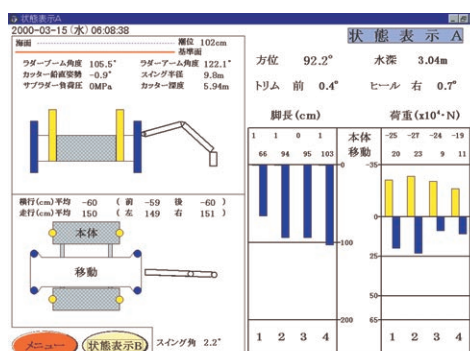


図-4 状態監視画面A

(2) 浚渫運転支援システム

浚渫断面形状、カッター負荷土厚、カッター軌跡等を常時CRTにグラフィック表示し、前スイングの掘跡状況を視覚的に把握し、効率的な浚渫作業を行える。掘削深度は、サブラダー付の音響測深機によりスイング中に計測し、GPSからの高さ情報および潮位計の値を基に演算処理を行う。また、その情報と浚渫ロボットの前進量から掘削土量などの施工管理を行える。

(3) 本体位置出し装置

RTK-GPS測位装置の位置情報とロボット内蔵のジャイロコンパスの方位情報により、ロボットの現在位置を計算し、湾内地形とともに、CRTに常時表示する。図-5

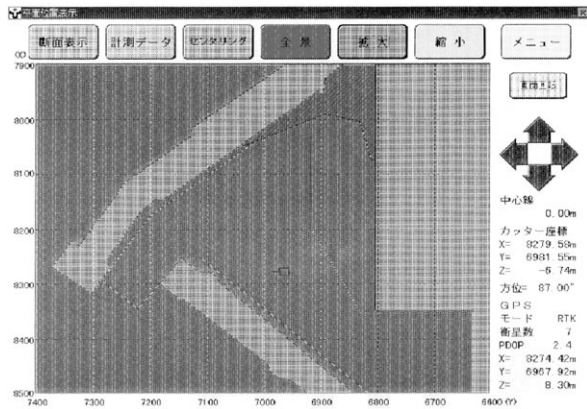


図 - 5 位置出し画面

に画面例を示す。

(4) 監視装置

作業中の水中音や、故障に伴う異音の発生を検知するため、ロボット本体に水中マイクを取付けている。またボスト上のITVカメラにより、海上ラインの展張状態を監視し、浮沈時にはロボット状態も確認できる。

2.4.4 陸上設備

(1) 遠隔操作室

遠隔操作室は海上のロボット位置周辺が見通せる陸上に設置され、屋外には浚渫機位置出し用のGPS固定局が設けてある。

(2) 受電ユニット

受電ユニットは6kV引き込み盤および受電盤、3kV変圧器および配電盤で構成され、操作室近くに設置されている。

(3) 中継ポンプ

中継ポンプは浚渫ロボットからの配管距離約1,400mの陸上に設置され、処分場まで送泥している。中継ポンプの運転と監視は遠隔操作室から制御用PCにて行う。

2.4.5 海上設備

1号機使用のロボット後方支援台船及び鋼製フロートラインを廃止し、海上ラインを全て耐波性フローティングホースとした。台船の廃止は、浮沈作業が陸上からの遠隔操作となったため、この改善により、台船上作業やライン係留作業が軽減した。

2.4.6 ロボットの施工能力

2号機主要機器のうちカッタや浚渫ポンプ、電気設備などは1号機と同程度の能力としたが、連続自動浚渫など種々の機能アップを図った。以下に平成11年4月から6月までに行った実工事のデータを基に、1号機との比較で2号機の施工能力について述べる。

(1) 歩行能力

表 - 2 に示すように前/後進で約26%、左/右進で約16%の能力が向上された。ただし海底地盤状態による傾斜修正の頻度等によっては、実質的歩行速度は前後進で10~20%、左右進で10%程度の上昇率と考えられる。

表 - 2 歩行速度比較表

	サイクルタイム (s)		速度(m/h)		能力向上率
	2号	1号	2号	1号	
前/後進	83	112	130	96	26%
左/右進	83	99	65	55	16%

(2) 浚渫能力

表 - 3 に1号機と2号機の土質別の浚渫能力比較表を示す。また、浚渫能力は図 - 6, 7 のパターン別能力図のように掘削土厚により大きく変化するため、同一土厚に換算し比較した。

表 - 3 土質別浚渫能力

土質	比較項目	1号実績	2号機	
			自動	手動
砂	平均土厚(cm)	39.2	39.2	39.2
	運転時間当たり能力(m³/h)	47.3	60.3	46.5
	能力アップ率		1.27	0.98
シルト	平均土厚(cm)	39.4	39.4	
	運転時間当たり能力(m³/h)	54.8	65.1	
	能力アップ率		1.19	

表中の砂質部で自動と手動運転の差が顕著に現れている。2号機の1号機に対する能力アップ率が、自動では27%、手動では1号機と同程度であった。手動運転は法面部を施工し、小刻みなラダー操作を繰り返すため時間がかかり、かつ土厚が大きく2層掘りを行うなど、地形の影響により能力低下を招いた。

シルト部に関しては自動運転のみであったが、能力アップ率は全体では1.19倍となった。これは30cm以下の土厚の薄い区域も2層掘り(3sw2)等で施工したため、土厚に見合った1層掘り運転を行えば、図 - 7 から分かるとおり、土厚30cmで60m³/h、40cmでは70m³/hと高い能力を発揮できる。

以上から可能な限り自動運転を行い、砂、シルトとも小土厚は1層掘り4スイング、大土厚は2層掘り3スイングなど、適正なパターンで浚渫すれば、2号機の能力は1号機を30%程度上回るものと期待される。

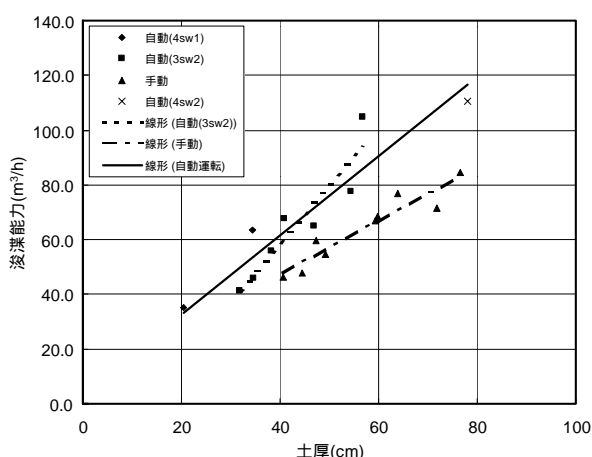


図 - 6 パターン別能力 (砂)

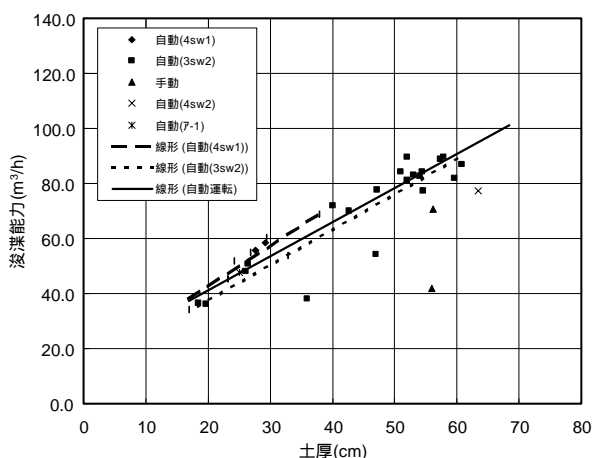


図 - 7 パターン別能力 (シルト)

3. 「1号機」の耐用検討

1号機は10年の間に2度にわたる延命対策を実施した。延命対策のため、机上寿命予測および実機応力計測に基づく検証調査をおこない延命補強を行った。

3.1 机上寿命予測

ロボットのような作業機械の寿命は、負荷荷重とその繰返し数から決まる。本ロボットの負荷荷重は、自重による着地反力や浚渫作業外力、および波、流れによる自然外力である。外力の繰返し数は作業回数で、ロボットの受ける波力や潮流力の繰返し数は、波浪観測データから受波回数を求めた。(詳細は4.1.1、2参照)

3.1.1 運転実績と予想量

机上寿命予測のため、1号機の3年余の運転実績から年間標準値を設定し、その後のロボット稼働予想量を表-4のように設定した。合わせ区域別波高出現率から、稼働期間中にロボットが受ける設計波高(最大2m)および1/2設計波高回数を予測した。

表 - 4 ロボット稼働予想量

項目	年間	予想量		
		5年後	8年後	10年後
運転時間(H × 10 ³)	2.85	15.5	24.1	29.8
浚渫土量(万m ³)	約14	約79	約122	約150
歩行回数(× 10 ³)	13.3	73.4	113.5	140.2
スイング回数(× 10 ³)	45	248	383	473
ロボット受波回数				
設計波高(× 10 ³)	22	130.4	208.6	260.7
1/2設計波高(× 10 ³)	55	310	485	590

3.1.2 ロボット各部応力

1号機建造時は、短期および長期許容応力を設定し各部構造を設計したが、寿命検討に当たり水圧、波力条件などを実状(水深6~8m)に応じた応力値に補正し、合わせ海水腐食による材料劣化度(0.92~0.96)を考慮のうえ、(歩行+設計波高)時および(歩行+1/2設計波高)時の繰返し応力を求めた。表-5に補正後の主要部繰返し応力の例を示す。

表 - 5 主要部繰返し応力(MPa)

構造名称	ケース1	ケース2	備考
本体フレーム(タンク) (横桁)	77	60	
	192	153	
移動フレーム(縦桁) (上下桁)	144	143	
	129	114	
ラダー本体 旋回テーブル	140		シリンダリリーフ庄/ スイング数
	185		
サブラダー	74		掘削反力/スイング数
ルームライド装置	83		スライド荷重/自重/歩行数

ケース1:(歩行+設計波力受圧)時の複合応力

ケース2:(歩行+1/2設計波力受圧)時の複合応力

3.1.3 机上寿命予測

繰返し応力と繰返し回数から、疲労(S-N)線図により各部の寿命予測を行った。疲労線図はASME(アメリカ機械学会)とJSSC(日本鋼構造協会)により比較検討し、安全側となるASMEにより評価した。予測耐用年数を表-6に示す。

表 - 6 机上寿命予測値(ASME)

構造名称	予想寿命(年)
本体フレーム(タンク) (横桁)	10<
	3余
移動フレーム(上部縦桁) (その他)	6余
	10余
ラダー (本体一部) (旋回テーブル)	4~6
	4
サブラダー	10<
ルームライド装置	10<

3.2 実機調査と検証

机上寿命予測の結果、重要構造物に耐用5年以下の予測値が出た。また予測値と異なり損傷の進んでいる構造物もあることから、予測の信頼度を増すため実機調査をおこない、疲労寿命予測システムによる検証を行った。

3.2.1 調査内容

調査は陸上動作テスト、海中動作テストによる各部応力計測、板厚経年変化、溶接部非破壊検査などを実施した。表-7に調査内容を、図-6に調査構造物を示す。

(1) 応力計測方法および計測箇所

計測方法は計測箇所に歪みゲージを貼り、データレコーダおよびパソコンに収録し、同時にオシログラフで経緯を観測した。計測点は34点を定め、内代表20点を同時計測した。図-8に応力計測位置図を併記する。

表-7 実機調査内容

項目	調査名	調査内容
1. 実機調査	・外観検査 ・非破壊検査 ・板厚計測	・損傷などを目視検査 ・磁粉探傷・カラーチェック ・主要部板厚計測
2. 応力計測	・陸上テスト ・海中テスト	・歩行・浚渫動作中の応力計測 ・歩行・浚渫動作中の応力計測

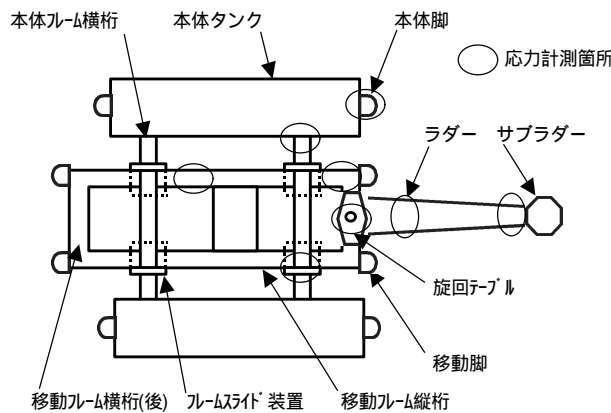


図-6 調査構造物および応力計測箇所

(2) 応力計測ケース

応力計測は、計算値との対比、クリティカル箇所の検討、実働応力把握などの観点から、陸上および海中で実施した。計測ケースは設計時の外力条件および実作業で実施している作業パターンから、表-8のように設定した。

3.2.2 実機調査結果

(1) 外観および非破壊検査結果

外観検査および磁粉探傷検査(96点)の結果、異常は認められず、また板厚測定(102点)の結果も、一部約5%(0.6mm)の減肉以外は、誤差内(2%)であった。

表-8 応力計測ケース

項目	計測ケース	ロボット動作
陸上試験	a.プレロード : 本体/移動フレームの相対位置を数種類変化 b.連続歩行 : 前後左右各3歩、左右旋回 c.ラダー動作 : ラダー上下、スイング、油圧リリーフ d.浚渫模擬動作 : 前後進浚渫サイクル	
海中試験	a.プレロード : 本体/移動フレームの相対位置を数種類変化 b.連続歩行 : 前後左右各3歩、左右旋回 c.ラダー動作 : ラダー上下、スイング、油圧リリーフ d.浚渫動作 : 前後進浚渫サイクル、 カッタ回転有・無、ポンプ送水有・無	

(2) 応力計測結果

計測結果をパソコン処理し、最大・最小応力の一覧や連続応力波形データに整理した。前者は設計値との比較検証に、後者は寿命推定に利用した。

1) 最大最小応力表

最大最小応力表は、最大最小応力のほか、平均応力、応力振幅、片振り換算応力を演算し一覧表に作成した。

最大応力値の設計値との比較例を表-9に示す。両者にはかなりの差がみられるが、これは設計時の構造条件や荷重条件の設定の違いが大きな理由と考えられる。

表-9 計測/設計応力の比較例(MPa)

構造名称	計測ケース	計測値	設計値
本体フレーム	陸上プレロード	172	162
	海中プレロード	92	132
移動フレーム	陸上プレロード	75	170
	海中プレロード	38	164
ラダー本体 旋回テーブル (リリーフ圧)	ラダー動作	47	128
		48	146
ルームスライド装置	陸上プレロード	139	122

2) 連続応力波形データ

連続応力波形データを計測部材別および作業パターン別に応力頻度処理し、疲労寿命検証に利用した。以下に詳細を述べる。

3.2.3 疲労寿命の検証

(1) 検証方法

検証は三菱重工業(株)開発の建設機械用寿命評価プログラム"MALIAN"により行った。この手法はASMEおよびJSSCの疲労線図から年間疲労被害度を求め、累積被害度が1.00に達するまでの年数=耐用年数を算出する。なお、応力計測時には再現できない波・潮流外力は別途負荷係数として設定し、解析に付加した。データ処理フローを図-9に示す。

(2) 応力頻度処理

応力頻度処理はレインフローカウント法により行った。これは応力と歪みの曲線関係のヒステリシスループから、歪み振幅頻度をカウントする方法である。

応力計測

応力波形 & 最大・最小応力・応力振幅

応力頻度処理 (レインフローカウント法)

作業パターン別の応力と頻度

MALIANによる寿命評価 負荷係数

推定寿命 = 1 / 疲労被害度 (年)

図 - 9 データ処理フロー

(3) 負荷係数

建造時の設計ではロボットフレーム構造部の静水中、2m波高中双方の波・流れ外力による抵抗値が求められており、両者の応力差から補正した負荷係数を各部材ごとに設定した。表 - 10 に係数一覧を示す。

表 - 10 負荷係数

対象部位	負荷係数	
	波高2m	波高1m
本体フレーム(タンク)	1.85	1.43
本体フレーム(横桁)	1.69	1.35
移動フレーム(縦桁下)	1.20	1.11
移動フレーム(横桁前上)	1.47	1.24
移動フレーム(上下桁)	1.32	1.16

(4) 疲労被害度

各構造部材にかかる繰返し応力と回数を、各作業(浚渫、歩行)ごとに算出し、年間当たりの累積疲労被害度を積算した。算出例を表 - 11 に示す。

表 - 11 年間疲労被害度(本体フレーム横桁)

作業区分		疲労被害度
水中	浚渫歩行(前後)	1.404×10^{-1}
	移動歩行(前後)	2.335×10^{-2}
	移動歩行(左右・旋回)	2.683×10^{-2}
陸上	全ての移動歩行	3.672×10^{-3}
合計		1.942×10^{-1}

(5) 推定寿命

算出された疲労被害度から、累積被害度が1.0に至るまでの年数を計算したものが、その部材の寿命年数となる。表 - 12 に検証結果得られた推定寿命を示す。

3.2.4 ロボット延命対策

寿命検証結果を受けて、耐用年数が短い部材の延命対策をおこなった。対象箇所は表 - 12 中の太字部材の3

表 - 12 検証による推定寿命

構造名称	予想寿命(年)
本体フレーム(タンク)	10 <
(横桁)	5.1
移動フレーム各部	10 <
ラダー(本体)	14.4
(旋回テーブル)	10 <
サブラダー	10 <
フレームスライド装置	5.7

カ所とした。なおフレームスライド装置は一式新替えし、ラダーに関しては安全のため、負荷変動が激しいシリンダ取り付け部周辺の面板を増厚(二重化)した。図 - 10 に本体横桁延命補強図を示す。

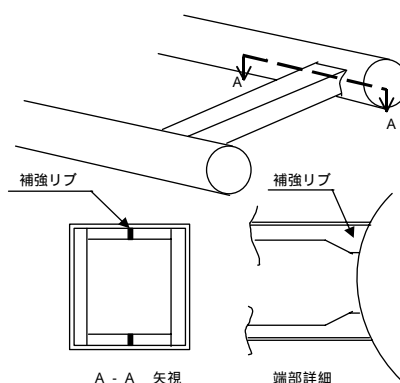


図 - 10 本体フレーム横桁補強図

その結果、断面性能が17%改善したことで、以下の算式により寿命は約1.6倍に改善された。

$$^3 \times N = K (\text{const.}) \quad (1)$$

$$N / N_0 = (\quad / \quad)^3 \quad (2)$$

N_0 、 \quad : 現状の繰返し数と応力

N 、 \quad : 補強後の繰返し数と応力

$$N / N_0 = (1.17)^3 = 1.60 \quad (3)$$

繰返し数Nと応力範囲の式(1)の関係から(3)式より、
<現状予測値> <補強後予想値>

$$5.1 \text{年} \times 1.6 = \text{約} 8 \text{年}$$

以上の延命対策(8年を目標)の後、さらに横桁端部に外部補強を加え10年の延命を行った。なお延命対策工事に当たっては、その他のロボット上用品(油圧機器、電装品、配管類、配線類等)についてもオーバーホールし、新替え・整備を実施した。

4. 「ふたば2号」の耐用設計

4.1 設計フロー

1号機の経験を踏まえ、2号機では建造時点から耐用に留意し、耐用年数8年を目標に構造設計を行った。対象

構造物は本体および移動フレーム、ラダー(ブーム・アーム)である。図-11に耐用設計フローを示す。

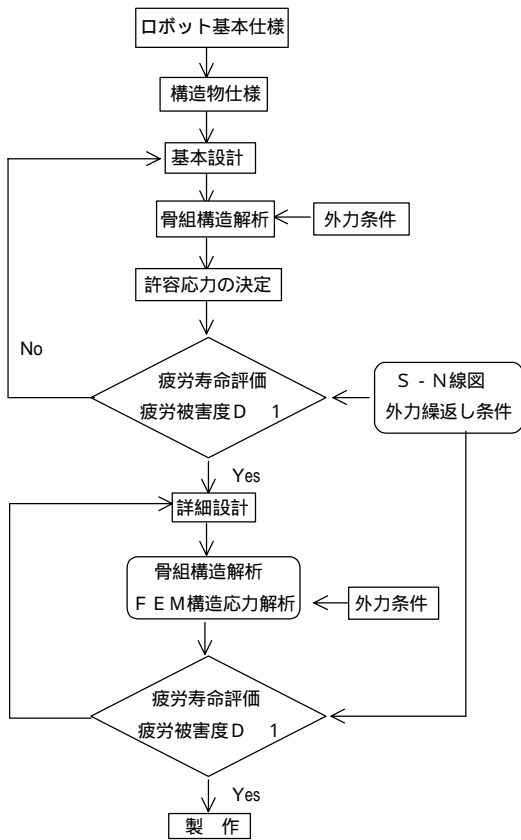


図-11 耐用設計フロー

4.1.1 外力条件の整理

1号機の耐用検討結果から繰返しを考慮した波・潮流外力を表-13のように整理した。

表-13 ロボット設計外力

項目	区域	港口部	港奥部
波高・潮流条件	最大波高 (m)	2.0	0.5
	潮流速 (m/s)	0.92	0.6
ロボットにかかる外力 (波・潮流力)	平均水深 (m)	7.0	
	外力(kN) 前後左右	191 424	19.6 39.2

4.1.2 波浪条件の整理

ロボットの稼働する港湾外海域に設置された波浪観測データから得られたシミュレーション結果に基づき、港内静穏度(波高比)分布から区域別波高出現率を整理した。表-14に1号機運転実績から得られた区域別ロボット稼働比率と波出現率を示す。なお卓越する波向きはE方向、平均周期は8.4secである。

表-14 ロボット稼働比率と波出現率

工事区域	区域別稼働比率 (%)	最大波高 (m) 別出現率 (%)		
		0.8 >	0.8 ~ 1.4	1.4 ~ 2.0
港口部	35.8	88.4	9.5	1.6
港奥部	58.1	97.8	1.9	0.2
物揚場前面	6.1	100.0		

4.2 許容応力の検討

前述の1号機検証調査の手法をもとに、以下のように耐用8年を満足する許容応力を検討した。

(1) 外力負荷条件の設定

1号機計測に基づく外力条件と応力、および2号機基本設計時点の骨組計算の外力条件と計算応力から、最大負荷レベル(=陸上プレロード時)に対する各作業負荷レベルを表-15のように設定した。表には1号機実績から設定した8年間の繰返し回数を併記する。

表-15 各作業の負荷レベルと繰返し回数

作業	作業内容	負荷応力レベル	繰返し数n(8年)
陸上	プレロード	A ₁	n _{A1} =2.56 × 10 ³
	歩行	A ₂ = 0.79 A ₁	n _{A2} =2.56 × 10 ³
	旋回	A ₃ = 0.52 A ₁	n _{A3} =1.60 × 10 ³
水中	プレロード	B ₁ = 0.59(0.69) A ₁	n _{B1} =0.99 × 10 ⁵
	歩行	B ₂ = 0.68(0.79) A ₁	n _{B2} =3.76 × 10 ⁴
	旋回	B ₃ = 0.45(0.52) A ₁	n _{B3} =5.28 × 10 ³
	浚渫	B ₄ = 0.68(0.79) A ₁	n _{B4} =9.33 × 10 ⁴
	ダブスイング	別途設定	3.96 × 10 ⁵

()内は波浪外力付加した場合

(2) 疲労設計曲線

適用する疲労設計曲線(図-12)はJSSCのグレードDとし、曲線より図のように各作業負荷応力に相応する繰返し数N_iを求めた。グレードDの2 × 10⁶回基本許容応力は100MPaである。

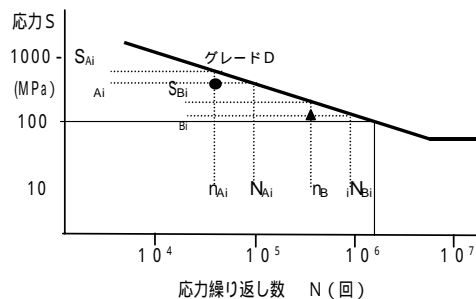


図-12 S-N線図 (JSSC)

(3) 許容応力算定

最大負荷レベル時の許容応力 A₁ を疲労被害度 D = 1.0

となるよう、以下のように算定した。

$$D = (n_1 / N_1) + n_{A1} / N_{A1} + n_{A2} / N_{A2} + n_{A3} / N_{A3} + n_{B1} / N_{B1} + n_{B2} / N_{B2} + n_{B3} / N_{B3} + n_{B4} / N_{B4} = 10.02 \times 10^4 / N_{A1} \quad \text{--- (4)}$$

式(2)より

$$N_{A1} / N_0 = (D / 10.02 \times 10^4)^3 \quad \text{--- (5)}$$

$$N_{A1} = 2 \times 10^6 \times (100 / N_0)^3 \quad \text{--- (6)}$$

式(4),(6)より、

$$D = 0.05 \times (100 / N_{A1})^3 = 1.0 \quad \text{--- (7)}$$

$$N_{A1} = 273 \text{ MPa}$$

海水腐食による強度低下率 (0.92) を考慮すると、

$$N_{A1} = 252 \text{ MPa}$$

となり、これを耐用8年を満足する耐用許容応力とした。なお主要構造材は溶接構造用圧延鋼材SM570であり、この材料の引張強度570MPaに対する N_{A1} の安全率は2.26となる。

4.3 詳細設計

以上の算定許容応力に基づき、本体および移動フレームの詳細設計をおこなった。図-13に骨組構造による計算応力例を示す。計算条件は波浪中・浚渫時で移動脚が着地し、移動フレームが前方、右舷に位置するケースである。最も応力の厳しい点は、部材 136で等価応力は210MPaである。

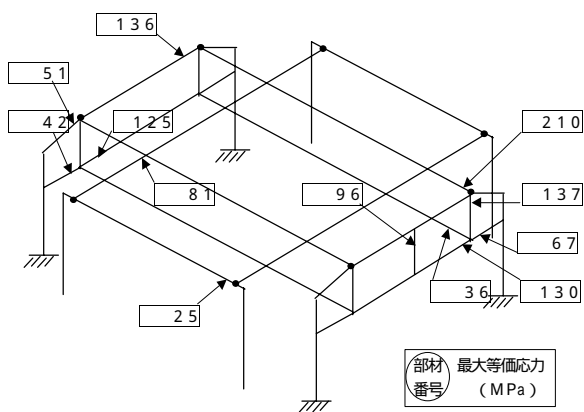


図-13 ロボットフレーム各部応力

なおラダーについても同様の手法で応力を押さえ、図-14の"NASTRAN"による骨組構造のFEM解析モデルにより、各部変位量、応力分布を照査のうえ設計した。

5. おわりに

「ふたば2号」は、実証実験の結果一部課題として残されていた、ロボット沈設時間の短縮や運転制御システムの簡素化などもその後改善され、約1年が経過した現在、

同機は順調に稼働中である。

本編のような水中作業機械の、しかも波浪や潮流外力を加味した疲労設計の事例は希と思われ、本報告が今後の水中ロボットの製作・運用技術向上の一助となれば幸いです。

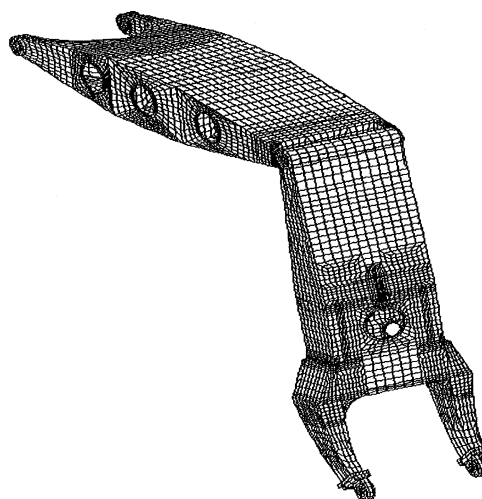


図-14 ラダーFEM解析モデル

謝辞

ふたば1号機の寿命検証および「ふたば2号」の設計製作とも、三菱重工業㈱神戸造船所殿の所掌による。ご尽力いただいた造船所担当者各位をはじめ、ご指導、ご協力いただいた関係者の皆様に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中丸英司・佐野泰三・近藤敏夫・梶村格太郎：自動浚渫ロボット「ふたば」の開発、五洋建設技術研究所年報、Vol.18、1989
- 2) 梶本勝也、村井亮介、井上克明、田中道夫、沢野井昭裕：疲労寿命評価システム "MALIAN" の開発、三菱重工技報、Vol.29、No.6、1992
- 3) 五洋建設株式会社ほか：浚渫ロボット「ふたば2号」作業船、No.246、1999、11
作業船、No.246、pp.4-11、1999
- 4) (社)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、pp.5-10