

50. 作業船設備予知保全における診断システムの開発

予知保全技術の作業船への適用事例

東亜建設工業株式会社 ○ 長澤 太一
ジャパンマリユナイテッド株式会社 戸村 雅一
株式会社 IMC 柴田 勝規

1. 開発の経緯

近年、公共工事を初めとする建設事業費の縮減が社会から強く求められている。作業船を使用する大規模な港湾工事においてもコスト縮減は大きな課題であり、工事費で大きな割合を占める大型作業船のライフサイクルコストを削減することは、作業船を保有する事業者共通の課題となっている。作業船のライフサイクルコストを削減するためには、主に次のような問題を解決する必要がある。

第一に作業船の更新時期に関する問題である。作業船の更新には多額の費用が必要となるため、現在の作業船の設備状況をできるかぎり正確に把握し、今後予想される設備トラブルとメンテナンス費用を想定したうえで、更新時期を判断することが望ましい。

一般的に作業船においては、限られたスペースに必要な機材を配置していることが多く、重要部品の状態を点検するために設備を撤去解体する必要性が生じることもある。民間企業においては、設備更新の有無を判断するためだけの目的で多額の費用を要する設備の撤去解体や点検調査を行うことは少なく、通常整備による作業船の延命を図ることが多い。これは、耐用年数を超えた作業船を、割高なメンテナンス費用を支払いながら使用し続けることに等しく、結果として割高な費用を事業者が負担している状況が続いている。

第二に作業船に適した効果的メンテナンス手法の確立である。特殊な形態を持つ作業船で使用する設備部品には、必要なものをその都度発注する受注生産方式で生産されている部品もある。

作業船の故障に伴い発生する経済的損害を最小限にするために、特殊部品や重要部品の交換を決められた運転時間で定期的に行うことも多い。ただし、正常な状態の部品を交換することで故障のリスクが高まるいわゆる『いじり壊し』の事例や、整備する必要のない設備を整備するオーバーメンテナンスによる弊害が発生している。

上記問題を解決するため、当社は JMU 及び IMC と共同で、作業船設備診断及び予知保全を行う作

業船設備診断システムの開発を開始した。このシステムは、作業船設備の振動データと弾性波データを取得し、軸受けや歯車等の状態をモニタリングするものであり、設備の劣化兆候と異常原因を迅速に把握し、設備事故防止、補修時期の事前予測、設備保全員の省力化、保全コストの低減、設備の現状把握を目的としている。

2. 作業船の特徴

2.1 主な作業船設備

東亜グループでは、ポンプ浚渫船、地盤改良船、杭打ち船などの多くの作業船を保有している。

作業船の主な設備としては、船用ディーゼルエンジン、発電機、係留ウインチ、大型ウインチ、浚渫ポンプ、スパッド、プラント等がある。

これらの設備の中でも、地盤改良装置や浚渫装置の昇降ウインチやスパッド昇降ウインチ、浚渫ポンプは、施工中に故障が発生した場合、現場で短期間に復旧させることが困難であり、定期的な整備と日常の保守管理が非常に重要である。

構造的には、エンジンや電動機、軸と軸受け、減速機、駆動用歯車で構成されているが、非常に大型の設備であり、解放点検やオーバーホールには多くの費用が必要である。



写真-1 地盤改良船「黄鶴」

2.2 老朽化した作業船のトラブル事例

作業船の老朽化に伴い、これまでには発生しなかった故障が発生している。その多くは減速機歯車やベアリングの損傷であり、故障個所によっては、復旧に多くの時間を要するものもある。

写真-2に、異常摩耗が発生した歯車を示す。これは、当社が保有するポンプ作業船に搭載されている、浚渫装置昇降ウインチ遊星減速機の太陽歯車が摩耗した状態である。材質はクロムモリブデン鋼で、施工前に歯面の点検・寸法確認を実施しており、異常な摩耗は見られなかった。しかし、施工中に急激に摩耗が進行し、浚渫装置の昇降が不可能となり、施工を中断して復旧作業を行った。

写真-3に、破断した歯車を示す。この歯車は、当社が保有する作業船のウインチ駆動軸ピニオンギヤであり、キー溝部の歯面側の谷部に裂が生じ、最終的に破断した状況である。材質は炭素鋼鋼材で、定期的に歯面の点検、浸透探傷検査を実施していたが、破損に繋がると思われる亀裂は発見されなかった。

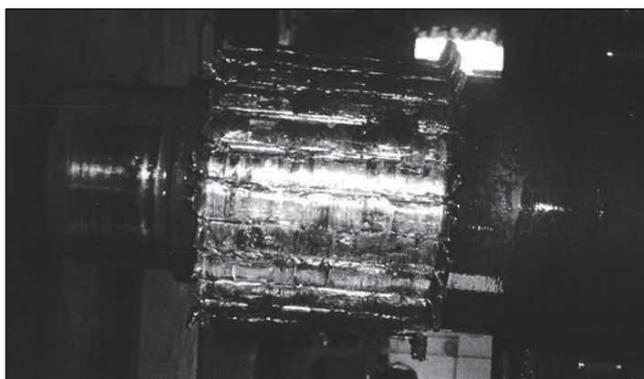


写真-2 太陽ギヤ摩耗状況



写真-3 ピニオンギヤ破損状況

こうしたトラブルは、施工中に振動計測を定期的実施し、摩耗や亀裂の兆候を事前に把握していれば、大きなトラブルを避けることが可能であったと考えられる。

3. 予知保全技術

3.1 振動計測による回転機械の予知保全

設備保全では、運転中の設備の、振動・音響・熱・歪みなどの損失するエネルギーを定量的にとらえ、設備の使用限界の判定を行う。そのうち、振動を測定し、解析することにより設備の異常を診断する方法は、設備診断の中でも最も一般的で有効な手段として知られている。測定する振動は、10Hzまでは変位、10～1kHzまでは速度、1kHz以上は加速度が最も感度が良い事がわかっている。下表に、測定モードと診断項目を示す。

計測された振動データを評価・診断する方法として、一次的な簡易診断とその簡易診断で異常な兆候が見られた場合に行う精密診断の2つがある。

表-1 計測モード

モード	単位	周波数帯	異常内容
変位 (DISP)	μ	0～10Hz	構造物の緩やかな振動
速度 (VEL)	cm/s	10～1kHz	アンバランス、ミスアライメント 基礎不良、ガタ、基礎ボルトの緩み 転がり軸受の著しい損傷
加速度 (ACC)	G	1kHz～	転がり軸受の損傷 潤滑不良 歯車損傷

(1) 簡易診断

簡易診断とは、「振動レベルを基準と比較し、設備が正常／異常を判定する方法」で、相対判定法と絶対判定法、相互判定法の3種類の方法がある。1つの方法だけで判定するのではなく、最低2つ以上の方法を組み合わせて判定する事が重要である。

相対判定法とは、一般的には「傾向管理」と呼ばれる方法で、定期的に振動レベル値を測定し、初期値（新設時またはオーバーホール後）・正常時の振動レベル値の何倍（n倍）になったかで判定する方法である。機器ごとの設置状態や運用による振動レベルの差による影響を受けにくい、基準となる初期値が必要となるので、既に運用が始まっている機器の診断には適さない。

絶対判定法とは、一般的には「絶対値判定」と呼ばれる方法で、振動レベル値をISOやメーカー独自の絶対値判定基準表に当てはめ、判定する方法である。予め基準が定められているため、判定が容易かつ既運用中の機器でも判定可能だが、運用や設置状態が判定基準における想定と大きく異なると、正しい診断ができない場合もある。絶対値判定表には、速度モード（機構部）と加速度モード（軸受）の2種類の判定表がある。

相互判定法とは、同一機種または能力・方式が類似している複数の機器間で振動値を比較し、他と比べて値が突出して大きいものを異常と判定する方法である。機器間相互に比較するため、初期値が不要であり、似たような運用に就いている機器間で比較するため、運用や設置状態による影響を受けにくく、既運用中の機器への適用が容易だが、比較対象となる機器が複数なければならず、また経年劣化の評価が難しい。

(2) 精密診断

精密診断とは、簡易診断で異常と判断した設備に対し、振動に含まれる周期性を解析して、振動の原因、すなわち損傷発生箇所、原因を推定する方法であり、解析手法には高速フーリエ変換FFTを用いる。

通常、回転機械から発生する振動は複雑であり、単純な振動はほとんど無い。この複雑な信号の中にどのような周波数と振幅をもった振動が混ざっているかを判別するのが周波数解析で、この解析に用いられる手法がFFTである。通常の振動信号は、下図のように、種々の周波数と振幅を持つ正弦波（サイン波）になっている。

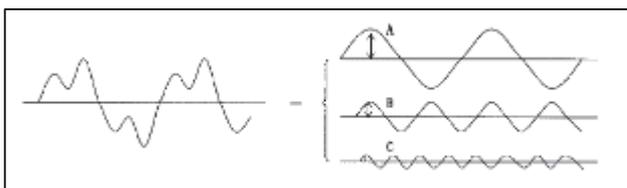


図-1 振動信号

この信号をそれぞれの周波数を持った正弦波に分析し、その振幅の大きさを求めることが周波数分析、または周波数解析である。その解析をFFTという手法を用いて行った場合、FFT解析と言い、解析により求めた振幅値を、周波数の近いものから順に並べたものがスペクトラムである。この解析を行うことにより、測定したポイントの振動がどのような周期成分を持っているかが判り、その発生原因を特定することが可能となる。

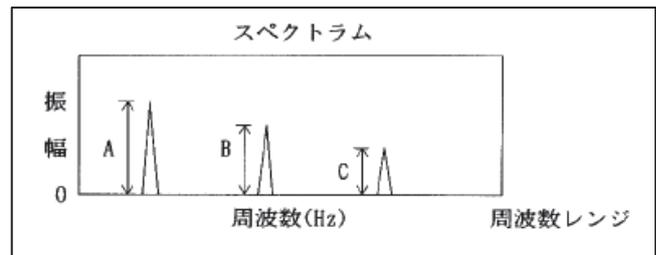


図-2 スペクトラム図

3.2 AE計測による回転機械の予知保全

アコースティックエミッション (AE) とは、「材料が変形したりき裂が発生したりする際に材料が内部に蓄えていたひずみエネルギーを弾性波として放出する現象」と定義されている。この弾性波を材料の表面に設置した変換子すなわち AE センサで検出し、信号処理を行うことにより材料の破壊過程を評価する手法がアコースティックエミッション (AE) 法である。

検出されるAE信号は通常、数kHz～数MHzに周波数帯域を持っている。例えば金属材料では発生するAEは主として100～1000kHzの周波数領域に成分をもつ信号が多く放出される。信号を検出する為に使用するAEセンサは、一般的にPZT（ジルコン酸チタン酸鉛）などの圧電素子を内蔵し、接着剤やシリコングリースなどの音響カップラを介し、材料表面に密着させてAE信号を検出する。



図-3 AE計測概念図

(1) E_area

E_area イーエリアはこの診断器の代表的な診断パラメータで、基本的にこのパラメータにより軸受診断を行う。軸受に異常が発生すると、通常は現れない振幅の大きなAEが発生する。このことに着目し、AE波形において『正常な軸受状態から逸脱したAE成分』のみを抽出・定量化する。

測定したAE検波信号 (①) の振幅頻度分布を求めると、損傷軸受の場合、最頻振幅 (②) に対し高振幅側に非対称な分布 (③) が現れる。一方、正常軸受の場合は、ほぼ対称に分布することから、振幅分布の非対称な広がり数値化し、比較することで診断する。その数値がパラメータE_areaである。

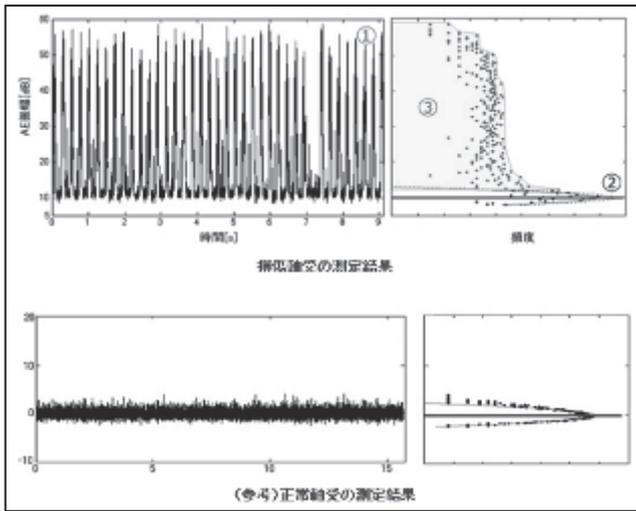


図-4 E_area

E_area は、異常の程度が大きいほど高い値となり、損傷の前駆現象である潤滑不良、異物混入等があると増大し始める。そして、異常状態が悪化したり剥離損傷が広範囲に発生するとさらに大きな値を示す。

(2) E_ratio

E_ratio イーレシオは、軸が一回転する間の『平均的な振幅 (①：後述のAve値)』に対し、設定したイベント検出レベル (②) を超えたAE (イベントAE) の割合を軸受状態の診断指標とし、その割合を測定回転数分で平均した値がパラメータ E_ratio である。異常の範囲が広がるほど、高い値となる。

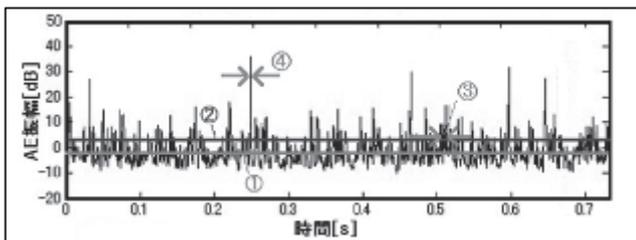


図-5 E_ratio

3.3 作業船に適用する場合の注意事項

作業船の主要機器であるウインチは電動機、減速機を介して最終的にドラム回転数は10回転以下の超低速となる。一般的に、このような低速回転 (100rpm以下) 軸受に振動法を適用しようとしても困難とされている。その理由は軸受部における傷等の衝突エネルギーが小さく、また衝突エネルギーによる異常信号に対してノイズ率が大きい (S/N比が低い) ためである。そこで、AE法を用いて150rpm以下の軸受部に対して使用可能な低速回転軸受け診断器を選定し採用した。

ウインチの軸受部にはすべり軸受が多く使用されている。すべり軸受は苛酷な条件下においても優れた性能を発揮し、高い信頼性を得ているが、適切な潤滑とそれに応じた軸受周辺設計がなされなければ、異常な摩耗や焼付きなどが短時間で発生する。すべり軸受に発生する損傷については、流体潤滑状態で使用されるため、理論的には連続運転中において固体間の接触は起きない。しかし、実際には様々な要因により固体間の接触を避けられず、流体油膜が破れ、摩耗が生じて重大な損傷につながる実例がある。

これらの損傷が起きる前に、AE診断器にて異常兆候としてとらえることができると考えられる。

4. 第三亜細亜丸での適用事例

4.1 第三亜細亜丸の概要

「第三亜細亜丸」は当社が保有する最大のポンプ浚渫船である。1979年の建造以来、国内外で多くの施工実績があり、現在も当社のポンプ浚渫工事の中心的な作業船である。おもな設備は、操船ウインチ、スパッド昇降ウインチ、ラダー昇降ウインチ、カッターヘッド駆動装置、浚渫ポンプ等である。全装備機関出力は10,830kWである。

しかし、近年は老朽化が進み、重大な故障の発生が懸念され、作業船設備診断システムを適用することを決定した。

表-2にポンプ浚渫船「第三亜細亜丸」の主要目を、写真-4に全景を示す。

表-2 「第三亜細亜丸」主要目

建造年	1979 年
長さ	78.0 m
幅	19.5 m
深さ	5.5 m
吃水	4.1 m
全装備機関出力	10,830 kW
浚渫ポンプ出力	5,880 kW



写真-4 「第三亜細亜丸」全景

4.2 対象機器と計測ポイント

計測箇所は第三亜細亜丸のラダーウインチ、スイングウインチ、スターンウインチの電動機軸受け、減速機及び減速機軸受け、ピニオン軸受け、ドラム軸受けの合計48カ所とした。

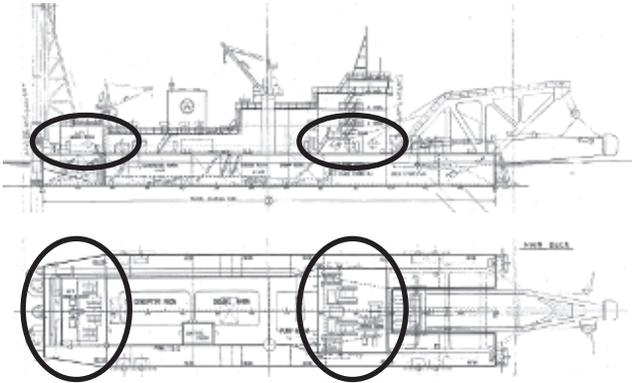


図-6 「第三亜細亜丸」計測箇所

4.3 計測機器

(1) 振動計測器

今回は、操作が簡易で、事前に計測箇所の情報データを設定し、計測時にその場で診断結果が確認できる振動計測器を採用した。取得したデータは、管理ソフトを用いることで、傾向管理、劣化予測、高速フーリエ変換による評価が可能である。



写真-5 振動計測器

(2) AE計測器

一般的に振動では難しいとされる超低速回転部分（150rpm以下）の診断用として低速回転軸受け診断器を採用した。この低速回転軸受け診断器は、測定箇所IDと軸回転速度の入力だけで計測が可能であり、診断結果を計測時に確認することができる。

検出したAE信号の波形からE_area、E_ratio、E_peak、E_ave等の診断パラメータを算出し、これらの診断パラメータを駆使することで、適切な状

態監視を行い、表計算ソフトを用いることで容易に管理、解析を行うことができる。



写真-6 AE計測器

4.4 計測結果

(1) 振動計測

図-7に振動計測結果の一例を示す。図-7に示すような管理ソフトに出力し、分析と評価を行った。その結果、とくに異常は見られなかった。

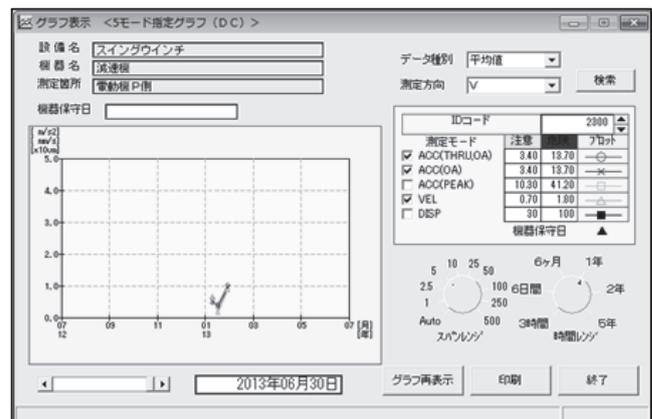


図-7 振動計測結果例



写真-7 振動計測状況

(2) AE 計測

図-8 に AE 計測結果の一例を示す。E_area, E_ratio は正常で、AE 波形に周期性の無い信号が見られる。傷等によるものではないと思われるが経過観察が必要である。

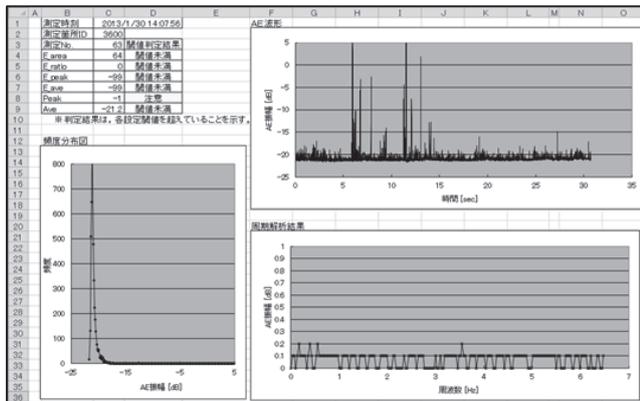


図-8 AE計測結果例

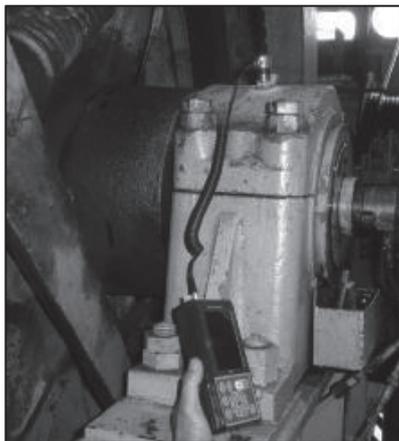


写真-8 AE計測状況

5. 今後の取り組みについて

今回導入した振動及びAE計測による予知保全システムにより、これまでのような感と経験による判断から、定量的なデータに基づく判断を行うことが可能となり、突発的な事故の防止や効果的なメンテナンスを行うことができると期待している。今後も継続して計測データを採取し、分析・評価を行う予定である。

さらに今後は、疲労損傷の危険部位を抽出し、その部位に歪み計を取付け、常時計測・劣化診断を行うことが可能な疲労劣化監視技術や、鋼製設備（構造、機械等）の板厚変化を、塗装・錆を除去せずに、孔食部も板厚が計測出来る超音波式有効板厚計測システムの導入を検討している。これらの技術を用いることで、回転機械だけでなく、船体部の状態を定量的に判断することが可能となり、メンテナンス効率のさらなる向上が見込まれる。

最後に、作業船に対する予知保全技術の適用にあたり、全面的にご協力いただきましたジャパンマリンユナイテッド株式会社様並びに株式会社 I MC様の皆様に心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本工業出版 検査技術 2012年3月号、6月号
- 2) 日本プラントメンテナンス協会プラントエンジニア 2008年3月号