特集≫≫ 河川・海洋・海岸・港湾

作業船における予知保全技術と適用事例紹介

柴 田 勝 規・宮 崎 信 弥・戸 村 雅 一

現在の作業船を取り巻く環境は厳しさを増しており，メンテナンスに投入するリソースの最適化が求められるようになっている。そのためには，損傷時期を予測し，適切な時期に，適切な内容のメンテナンスを行う予知保全の手法を導入することが有効である。従来，予知保全は導入運用が難しいものと考えられてきたが，安価で高機能な計測機器の登場や新しいデータ処理手法の開発によって，以前よりも導入へのハードルは低くなっている。ここに紹介する予知保全技術は，既に一部の作業船で実施されているものであり，これら技術，ノウハウが普及することによって，作業船のメンテナンス品質は大いに改善されるものと考えている。

キーワード：作業船，予知保全，振動，AE，SI-F 法，ベイズ推論

1. はじめに

現在国内における作業船の運用環境は，工事量の減少による稼働率低下や円安等による燃料費の高騰などによる収支悪化の影響により，大幅な運用コスト削減を余儀なくされているものが多い。そのため，老朽船の更新は進まず，更にその老朽船も維持整備に必ずしも十分なリソースが投入できていない事例が見られる状況である。加えて，常時海上に浮かんでいる作業船は，ただでさえ塩害による腐食を受けやすく，経年が同じであれば，他の建設機械類と比べて劣化の進行が速い。予め腐食を考慮した設計をしているといえども，一部の作業船は十分な補修整備がなされず，重大なリスクを抱えたまま運用されていることも事実である。

今回紹介する「予知保全」は，日頃の点検データから損傷時期を予測し，機器や部位ごとのリスクに序列をつけ，ハイリスクな対象を優先的に補修することにより，限られたリソースで可能な限り高い品質を確保する保全手法である。よって，この手法を用いれば，作業船の維持管理における課題をかなりの部分で改善可能であると考えている。現在すでに複数の作業船において実運用も始まっており，本誌面を借りて予知保全技術の概要と作業船における適用事例紹介を行う。

2. 予知保全技術の概要

予知保全は基本的に以下のようにして行う。

①対象（船体, 機器）の傷み具合を, 計測や点検によって定量的に評価する。なお，計測値や点検結果が運転状態の影響を受けるものの場合は，下記何れかの方法で影響を排除する。

・特定運転領域のデータのみを使用する。

・データを無次元化する。

②上記の時系列傾向分析結果から，機能不全に陥る時期を予測し，早過ぎず，遅過ぎない最適な整備時期を決定する。

このように, 予知保全技術は「劣化の定量評価技術」と「劣化の進行予測技術」のふたつで構成される。

まずは「劣化の定量評価技術」から解説する。

これまでに手掛けた事例では，**表―1** の計測を行うことで回転機械（電動機，ポンプ等）と船体構造物（船体，スパッド等）の損傷を定量評価している。

表―1 予知保全で利用する計測

		適用対象	診断内容
1	振動計測	中・高速回転機械	軸系の損傷
2	AE 計測	低速回転機械	構造内部での疲労破壊
3	板厚計測	船体構造物	腐食，摩耗
4	応力計測	船体構造物	疲労破壊の推定

(1) 振動計測

回転速度が 100 rpm 以上の機器における軸系の異常監視に用いられる。具体的には下記のような事象を

監視する。
①軸のゆがみ（アンバランス）
②カップリングの調整不良（ミスアライメント）
③軸受損傷
④歯車損傷

何れの場合においても劣化の進行とともに振幅が大きくなるので，簡易的な診断としては振幅値（OA 値）をもって劣化指標とする。この OA 値監視は回転機械の異常監視において最も多く用いられる手法であり，その理由のひとつとして良否判定に JIS や ISO が適用できることがある。放射されるエネルギー強度のトレンドから劣化進行を評価する手法は，他にも色々とあるが，多くの場合において設置直後に計測した正常値を基準にして，そこからの相対変化によって劣化を評価することが多い（振動でも通常は相対評価が基本である。）のに対して，振動の場合は初期状態が不明であっても，JIS または ISO を適用することにより良否判定が可能である。そのため，初期状態が不明な老朽船に適用する場合でも良否判定が可能である。**図―１**は JIS 基準の例である。

振動計測の第二の特徴としては，周波数分析による精密診断の自動化が容易なことである。回転軸が発する振動は，その原因と回転数が決まれば発生する周波数が特定できる。よって計測した振動波形から FFT（高速フーリエ変換）により周波数分布を求め，ピークの発生周波数と振幅を理論値と比較することで，原因と劣化レベルを自動的に診断することができる。現実にはあるひとつの原因のみで振動していることはなく，複合的であるため，机上で言うほど簡単ではないが，それでも他の手法に比べれば，はるかに容易に精密診断の自動化が可能である。

振動計測の欠点としては，低速回転機械への適用が困難である点である。振動計測には一般的に加速度センサーが用いられるため，低速回転機械が発する低周波数の振動は捉えづらい（**図―２**）。これらの機器に対しては次に紹介する AE（Acoustic Emission）計測を用いる。

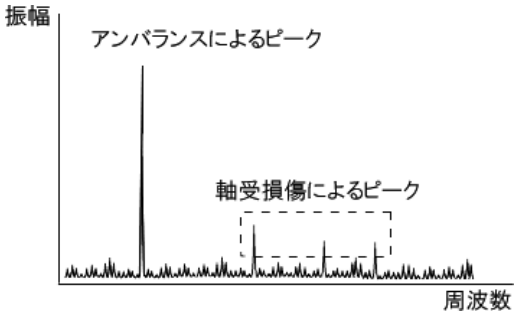
	Class 1	Class 2	Class 2	Class 2
0.71mm/s	ゾーン A	ゾーン A	ゾーン A	ゾーン A
1.12mm/s	ゾーン B			
1.8mm/s		ゾーン B		
2.8mm/s	ゾーン C		ゾーン B	
4.5mm/s		ゾーン C		ゾーン B
7.1mm/s			ゾーン C	
11.2mm/s	ゾーン D			ゾーン C
18mm/s		ゾーン D	ゾーン D	
				ゾーン D

Class1 15kW以下の汎用電動機等
Class2 15kW～75kWの電動機等
Class3 剛基礎上の大型回転機械
Class4 比較的柔らかい基礎上の大型回転機械

ゾーン A 新設機械許容値
ゾーン B 制限なく長期運転が可能
ゾーン C 長期運転は避けた方が良い
ゾーン D 直ちに整備すべき状態

図―１　JIS による回転機械振動基準

写真―１　軸受の振動計測作業



図―２　周波数分布例

(2) AE（Acoustic Emission）計測

AE とは，計測対象の内部において弾性破壊が進行する際に発せられる超音波（20 kHz ～）を捉えることで破壊の発生及び進行具合を調べる手法である。複数個所同時計測することで発生位置の特定も可能である。原理上回転数に依存しないので，150 rpm 以下の低速回転機械における軸系の異常監視に用いている。

AE は前述の通り軸や軸受内部で発生する弾性破壊を捉えるものなので，振動計測のようにアンバランスやミスアライメントの監視には適さないが，低速回転機械においては，これらが問題となることは少ない。

AE における最大の課題は，特に軸受損傷の検出などにおいて，それを定量的に評価する手法が確立していないことにある。一般的には損傷の進行に応じて発生する弾性波も大きくなることから，下式で表される AE 事象率（AE_{rms}）の時系列変化を見ることで損傷の進行を知ることは可能である。

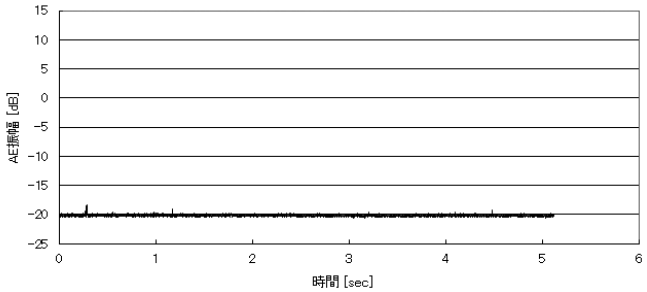
$$AE_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T f(t)^2 dt}$$

$f(t)$は AE 信号の振幅

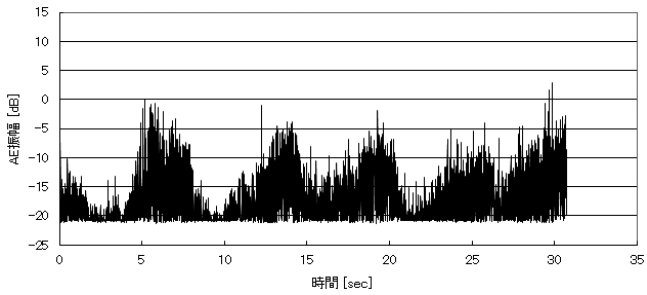
ただし，振動のようにJISやISOによる絶対的な基準がないため，相対トレンド監視を行う必要がある。そのため初期状態が不明な老朽船では，AE_{rms}によって良否判定をすることは困難である。そこで精密診断に頼ることになるが，これも振動ほど容易ではない。AEの場合は破壊が進行する際の弾性波を捉えるため，AE波形を単純に周波数分析しても原因を示すピークが現れない。よって通常はAE波形を技術者が直接確認し，その波形の特徴から損傷の発生と原因を推定することを行う。しかし，このような事を多くの計測点において行うことは現実的ではない。

そこで，現在作業船向け予知保全においてはJFEアドバンテックが開発した「E-area」という解析手法を用いている。

図―3，4は正常な場合と不具合が生じている場合の軸受が発するAE波形（振幅変動）の例である。このように正常な場合は振幅がほぼ一定であるのに対し，不具合が生じている場合は振幅が周期的な変動を示す。



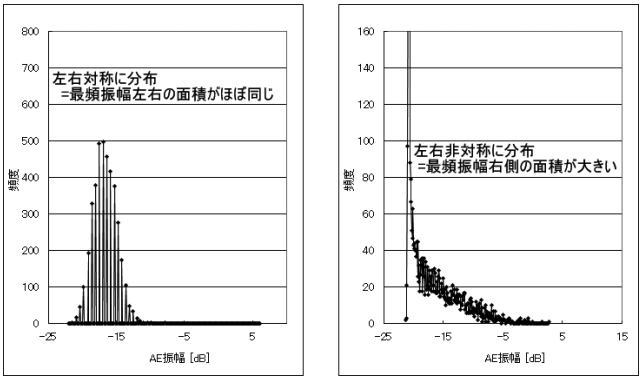
図―3　正常時のAE波形（振幅変動）例



図―4　不具合時のAE波形（振幅変動）例

これを振幅の出現頻度分布に展開すると**図―5**のようになる。左側が正常時で右側が不具合時の頻度分布である。これを見て判るように，振幅が周期変動している場合は，大きな振幅が定期的に出現するために分布が非対称になる。よって最頻振幅を中心に左右の面積比を求めることで劣化の程度を評価することができる。

これが「E-area」と呼ばれる方法であり，この方法であれば判定の自動化も容易である。



図―5　振幅出現頻度分布図

なおAE計測は回転に依存しないため，船体やタンクなどの構造物の疲労破壊の監視にも適用可能である。

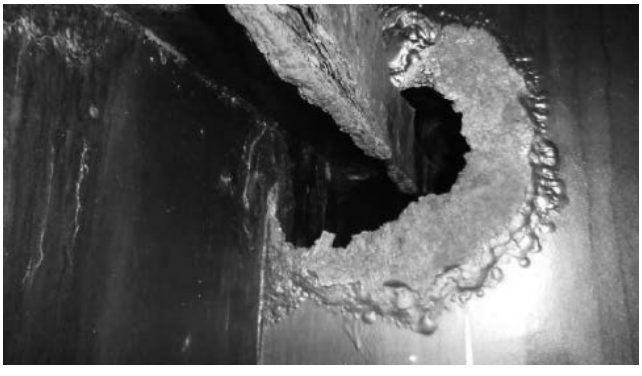
(3) 板厚計測

これは言わずと知れた，従来より最も良く行われている計測項目のひとつであるが，船舶にとっては最も重要な監視項目でもある。

言うまでもなく，船舶には常に塩害による腐食の問題が付きまとう。特に開放周期などに厳密なルールが定められていない作業船の場合は，容易に目視確認可能な箇所はともかく，バラストタンク内部のように日常的な確認や補修が難しい箇所では，気付かぬうちに腐食が限界まで進んでいるということもあり得る。ゆえに，その状態を外部からの観測により把握しようというのが板厚を計測する目的である。

ただし，一般的にはタンク外板のような所から腐食が進むことはなく，**写真―2**のようにロンジのスロットやブラケットのような場所がまず先に腐食する。当然，これらの状態は外板の厚さ計測では捉えることができない。しかし，下例の腐食であれば，いずれ外板との溶接部から外板側へと腐食が進行する。それを捉えることで，内部の状態を評価する。

よって，板厚計測を行う場合には，内部構造を考慮



写真―2　バラストタンク内における腐食事例

した上で，計測ポイントを選定することが重要である。

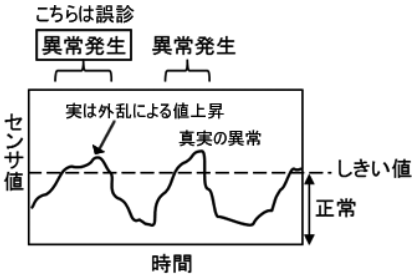
なお，従来板厚計測を行う場合には，計測面の塗装を剥がす必要があり，これが定期的な計測を困難にしていたが，現在は塗膜の厚さを考慮し，塗装の上から計測可能な厚さ計が複数メーカーから製品化されており，定期的な計測を容易にしている。

(4) 応力計測

応力計測は従来から過大な応力や繰返し応力による損傷の予測などに用いられているが，今回我々は従来とは異なるアプローチで応力計測による疲労劣化予測を行っている。

今回一連の作業船向け予知保全において採用した手法は，SI-F 法によるものである。この SI-F 法とは，東京工業大学の轟研究室により提案された，統計的手法により異常発生の有無を検知する技術である。

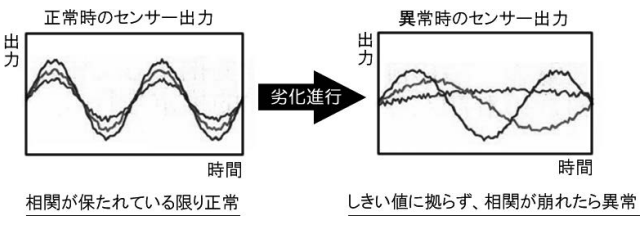
従来の異常検知では個々のセンサーデータにしきい値を設け，個々にしきい値を超えたか否かで良否判定を行っていた。この方法では外乱（温度変化，荷重変化など）によって，特に問題が無くてもしきい値を超える場合があり，誤った診断を行うことが多かった。また，誤診断を防ぐためにしきい値を緩めに設定すると異常検知精度が下がり，実は異常が発生していてもこれを見逃してしまう危険性があった（**図**―6）。



図―6　従来の異常検知技術

これを防ぐため，SI-F 法では相関性が確認されている複数センサーのデータを同時計測し，その比例関係に着目し，その関係に変化が生じたか否かによって異常であるか否かを判定する（**図**―7）。

これを具体的に応力計測の例で説明する。例えば，船体の疲労劣化を監視したいとする。その場合，まず疲労劣化を監視したい場所（構造的弱点）の周囲に，それを取り囲むように複数の歪ゲージを設置する。個々の歪ゲージ出力は，波や風，搭載貨物量等の条件によって大きく変動する。しかし，これら外力（外乱）は船体構造が健全であれば全ての歪ゲージに作用するため，各出力間の比例関係は一定のままである。もしも歪ゲージ A，B，C に "A：B：C ≒ 1：2：3" の関係があるならば，外力の大小にかかわらず，計測される A，B，C の値には "A：B：C ≒ 1：2：3" の関係が保たれる。



図―7　SI-F 法による異常診断

ここで船体にクラックが発生したとする。そうすると，クラック開口部が力を伝えなくなり，周辺に応力が集中することにより歪ゲージ A，B，C への外力の伝わり方が変わることになる。その結果として，正常時には保たれていた "A：B：C ≒ 1：2：3" の関係が崩れることになる。

SI-F 法では，このような比例関係の崩れ具合を評価するための手法として，データ同士の同等性を検定するための統計的手法である F 検定を用いる。F 検定についての詳細は別に譲るとして，ここで重要なのは，F 検定を用いると，複数の異なるデータ群が，どの程度似ているかが F 値と言う数値で表されることである。正常時における比例関係と概ね同じ比例関係が保たれていれば F 値は小さくなり，正常時とは異なる比例関係が現れると F 値は大きくなる。よって，この F 値の大小が即ち正常時との状態のかい離を表し，これを監視，評価することで外乱に拠らず良否の判定が可能となる。

今のところ，本手法は実験段階であり，まだ実船での適用事例は無いが，今後いくつかの深層混合改良船，サンドコンパクション船，グラブ式浚渫船などに適用し，主に櫓やスパッド周辺の疲労劣化監視を行う予定である。

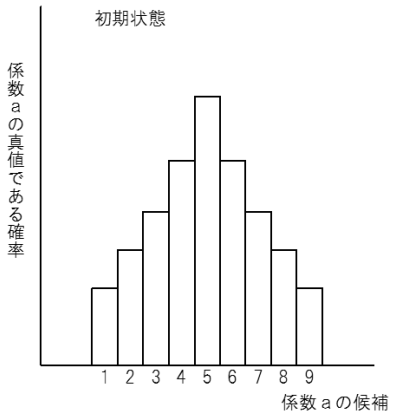
3. ベイズ推論による劣化予測

我々が手掛けている作業船における予知保全では，計測データに基づく将来予測においても，新しい手法を用いている。

これまでの劣化予測は，時系列に並べた計測値に対して回帰分析することで行ってきた。しかし，回帰分析は本来全てのサンプルデータが揃った状態で行うべきものであり，計測を行いながら逐一予測式を補正するような用法には向かない。そこで今回新たに採用したのがベイズ推論による劣化予測手法である。この手法では，まず最初に過去の事例や類似案件での結果などを基にして大雑把に劣化曲線を定める。例えば次のような式を当てはめる。

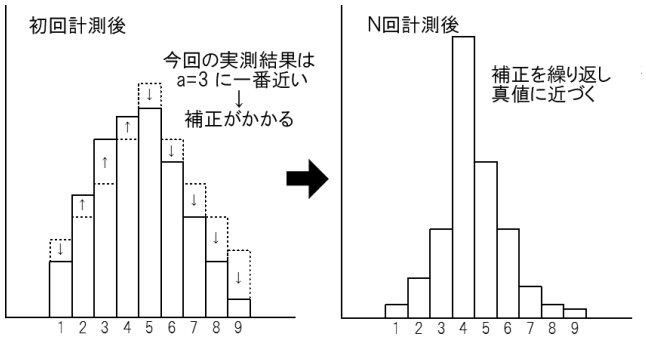
$$\lambda(t) = a \cdot \exp(bt)$$

併せて，予め定めた劣化曲線が状況次第で，どの程度ブレる可能性があるかも定めておく。具体的には上記式における係数ａとして取り得る値範囲と，確からしさの分布を決める。例として，仮にａ＝５を初期値として，**図―８**の分布を想定する。



図―８　係数ａの確率分布例

そのうえで計測を行うが，多くの場合，結果は当初定めた係数ａ＝５で計算した予測値とは異なるものとなる。例えば，ａ＝３での計算結果に最も近い値が計測されたと仮定する。ここでベイズ推論を用いる。この手法の詳細については説明を省くが，これを用いると，係数ａの確率分布を再計算することができる。当然３が期待値である確率は大きく上昇し，その周辺２や４も若干上昇する。逆に当初期待値であると仮定した５は確率を下げ，６以上については大きく確率が下がる（**図―９**）。



図―９　補正後の確率分布例

この作業を計測するたびに行うことにより，係数ａは徐々に真値に近づき，劣化予測精度も向上する。そして，最も確からしいａが入れ替わったら，その値を新たな係数ａとして劣化曲線を引き直す。ちなみに，上記例ではａを変動値としたが，これはｂであっても構わないし，両方を変動値としても良い。

この手法が，優れている点はふたつある。

①指数関数で近似される劣化曲線の予測が精度よく行える。

②離散的な計測データでも予測が行える。

回帰分析が劣化予測に適さない最大の理由は，この手法では，「各データの誤差はサンプル全体で相殺される」ことを前提としているため，離散的なデータでは正しい近似ができないことにある。そもそも回帰分析は，サンプルが存在する範囲内の近似に用いるものであり，未来予測に用いること自体に無理がある。

それに対して今回紹介した手法では，初期劣化曲線に基づく計算値と実測値のズレから，係数ａの確率分布を補正すると言う方法を取ることにより，一回だけ計算値と大きく異なるデータを投入しても，劣化曲線は小幅にしか修正されない。しかし，同じ傾向が連続すると，徐々に修正幅が大きくなる性質がある。これにより，計測誤差による値のブレは予測修正にあまり影響を与えないため，離散的データであっても精度の良い予測ができるようになっている。また，元々信頼性工学などの知見やノウハウから，一般論として対象の劣化を表すのに妥当な曲線を初期曲線として設定しているので，回帰分析よりも遥かに高い未来予測精度が期待できる。

4. これまでの適用事例

次に，これまで紹介してきた予知保全技術を実際に適用した，または適用が決まっている作業船から，その事例を紹介する。

(1) ポンプ式浚渫船 第三亜細亜丸（写真―３）

所有者：東亜建設工業㈱殿

建造年：1979 年

写真―３　第三亜細亜丸

監視対象
①昇降ウインチ 軸系劣化監視
②操船ウインチ 軸系劣化監視

(2) ポンプ式浚渫船 第五越後（写真―4）
所有者：㈱本間組殿
建造年：1974 年

監視対象
①昇降ウインチ 軸系劣化監視
②操船ウインチ 軸系劣化監視

写真―4　第五越後

(3) 深層混合改良船 黄鶴（写真―5）
所有者：東亜建設工業㈱殿
建造年：2010 年

監視対象
①昇降ウインチ 軸系劣化監視
②操船ウインチ 軸系劣化監視
③改良機 軸系劣化監視

写真―5　黄鶴

(4) 深層混合改良船 ポコム 12 号（写真―6）
所有者：五洋建設㈱殿
建造年：2010 年

監視対象
①昇降ウインチ 軸系劣化監視
②操船ウインチ 軸系劣化監視
③改良機 軸系劣化監視
④改良機やぐら疲労劣化解析

写真―6　ポコム 12 号

(5) ケーソン作業台船 FD-No.10（写真―7）
所有者：五栄土木㈱殿
建造年：1990 年

監視対象
①船体・バラストタンク 減肉監視

写真―7　FD-No.10

(6) グラブ式浚渫船 若鷲丸（図―10）

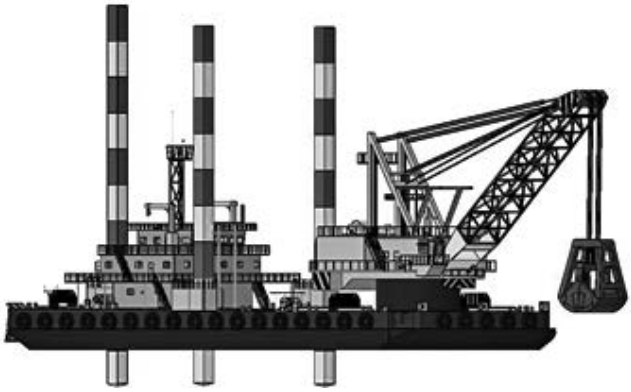
所有者：若築建設㈱殿

建造年：2014 年（建造中）

監視対象

①スパッド昇降ウインチ 軸系劣化監視

②スパッド 疲労劣化解析



図―10 若鷲丸

5. おわりに

このたびは機会を得て，今まさに作業船向けに展開を図っている予知保全技術について紹介させて頂いたが，予知保全と言う考え方自体は古くからあり，決して目新しいものではない。しかし，その有効性については常々評価されてはきたわりには普及が進まなかった。その理由はいくつか考えられるが，ひとつに従来の手法では，多くのオンラインセンサーを必要とするなど導入初期コストや手間が掛かっていたことが挙げられる。船舶の例で言えば，艦艇や LNG 船のように維持整備に元々コストが掛かる船に採用例があるくらいである。そのため筆者らも，つい最近まではあまり本格的には船舶向け予知保全に取り組んでこなかったが，技術や解析手法の進歩を受け，今ではかつてないほど容易に予知保全を導入できるようになったことから，改めて船舶向け予知保全技術の開発を始め，現在活動している次第である。そのターゲットとして作業船を選んだ理由は，商船と比べてメンテナンスに関する法令や規則が緩いため，予知保全によるメンテナンス適正化のメリットを享受しやすいと考えたためである。

今回紹介した予知保全技術は当然船舶に特化したものではなく，船舶と同じ鉄鋼構造物（橋梁等）のみならず，コンクリート構造物などにも適用可能である。社会インフラの老朽化にメンテナンスが追い付いていないことが問題視されて久しいが，これらの現場においても予知保全が有効であろうことは想像に難くなく，今後はこのような分野への適用も広がっていくものと考えている。

謝辞

最後に，この予知保全技術の開発に際して，採用頂きました各社には，作業船運用者としての様々な知見をご教示頂くなどの多大なるご協力を賜りましたこと，深く感謝の意を表します。

JCMA

［筆者紹介］

柴田 勝規（しばた かつき）
㈱ IMC
エンジニアリング事業本部
IT システム部長

宮崎 信弥（みやざき しんや）
㈱ IHI
技術開発本部
構造研究部 副主任研究員

戸村 雅一（とむら まさかず）
ジャパンマリンユナイテッド㈱
ライフサイクル本部
保船サポート部長