

船舶の機関保全技術の向上に関する研究

海上保安大学校 海事工学講座 東 明彦
水口 文洋

1 はじめに

機械設備の高速化や大型化、さらに高機能化や自動化などに伴い、機械設備のわずかな故障によって設備全体が受ける影響は非常に大きくなってきている。このことから、様々な陸上プラント設備では、『保全』への関心が非常に高くなってきており、様々な取組が行われている。また、船舶においては、機関故障により自力航行に支障をきたすような状況が生じれば重大事故へとつながる恐れがあるため、常に安全運航に供するために備えておかなければならない。ここで、『保全』とは、「システムや装置（設備）を整備、調整しておき、その機能がいつでも必要な時に最適な状態で発揮できるようにしておくこと」をいう。そして、その保全の中の 1 つとして『予防保全』がある。予防保全とは、設備の性能を維持するための予防的な措置として、日常的な点検や定期検査、修理・整備などのことをいい、保全の中で重要な部分である。しかし、近年では、予防保全は、予防の程度を高めるほどコストがかかり、オーバーメンテナンスになる危険性があることから「生産の経済性を高めるための保全」として、「時間基準保全」、「状態基準保全」とに分けて考えられるようになってきている。ここで、「時間基準保全」とは、従来から行われているように、過去の実績を基に一定周期で行われる点検や検査、修理・整備などであり、定期保全ともいわれるものである。一方、「状態基準保全」とは、設備の状態を基準にして保全の時期を決定する方法であり、種々の設備診断技術により設備の各構成部品等の劣化状況を定量的に傾向把握し、劣化の進行を定量的に予測して修理・整備を実施するものであり、予知保全ともいわれ、振動・音響法、電気抵抗法、AE 法など数多くの診断法がある。しかし、定量的な評価を行うことは非常に難しく、熟練した技術者の五感による診断に頼っているところも少なくない。

また、予防保全とは別に、設備の機能低下や機能停止した後に修理等を実施する『事後保全』がある。この事後保全には、突発的な事案に対応する「緊急保全」と、計画的に行われる「計画通常事後保全」の 2 種類がある。なお、この事後保全においては、設備の機能低下や機能停止に至った原因を究明し、改善していく必要があることから故障解析を行うことが効果的である。なお、故障解析については、PM 分析、FTA、FMEA、FMEDA など、故障原因の分析を行う手法が幾つか提案されている。

そこで、海上保安庁においても、船艇の運航に支障は生じないが、搭載されている各種機器の運転時には、振動や騒音、熱問題などの異常現象が発生することがある。特に、ドック整備直前の船艇では、近い将来に整備の機会があることや異常現象が実際に機器の運

転ができない程の故障として顕在化していないこともあり、担当者は苦慮しながら、いわゆる“だまし運転”を行うことも多い。さらに、それらの異常現象は、ドックでの外部業者による整備という過程を経ることで解消されるが、どの箇所のを整備したのかは、ドックのノウハウとして蓄積されるだけで、船艇運航者側は、その技術の習得や蓄積等に一般的には関わることができないことから、その後の保守管理において十分な保全計画を策定することができていない。

したがって、船舶に搭載されている各種機器を対象とし、これらの保守・整備の効率化や保全技術の向上を目的とした研究を行うことは、各種機器の運転時に発生する振動や騒音、熱問題などの異常現象に対する対策技術の向上につながり、さらには、巡視船艇を効率的かつ的確に運用できることにもつながることから、海上保安業務を遂行する上で必要かつ重要なことであると考えられる。また、これらの振動や騒音、熱などの異常現象を伴う機器の不具合が船舶の運航を阻害する重大な問題へ発展する場合も少なくなく、これらに関する問題発生要因等の系統的な整理を行い、その情報を蓄積していくことは、海難事故等の分析においても役立つ情報となりうることから、当該研究が船舶の安全運航に資することはもちろんのこと、海上保安業務遂行の上でも非常に重要である。また、当該研究によって得られる成果をまとめることで技術データベースの1つとなりうることから非常に有用であると考えられる。

そこで本研究では、今後熟練した技術者が大量に退職していくなかにおいて設備の安全管理を行うために重要な保全技術に関して調査を行い、巡視船艇に存在する振動や騒音、熱などの異常現象を伴う様々な不具合や故障事例について調査等を実施すると共に、ここでは予知保全に関し実際に船内で使用中のポンプを対象として実験解析等を行うこととした。

2 調査の例（近年の研究動向等の調査）

海上保安庁の巡視船艇の故障情報に関する調査を実施すると共に、設備管理に関する診断技術動向について調査を行った。

まず、故障情報については過去数年分にわたり蓄積された故障情報を調査した。その結果、故障の予兆に関する分析を行うために必要な情報は十分に得ることは非常に困難であり、また、故障の多くがその原因を経年劣化として処理されている等、故障に至る直前での状況が不明な場合が多いことから故障の箇所と頻度の調査を行った。なお、設備の保全を行う上では、故障診断を行うための設備投資や検査にかかる時間などを考えた場合、故障後に交換整備するほうが効果的である場合も多い。したがって、故障等の整備や修理等によって、船舶の運航に支障を与える影響、いわゆるリスクを考慮しながら、診断技術が必要となる機器について調査を実施する必要がある。そこで、比較的故障の頻度が多く、さらに、故障によって機関システムに及ぼす影響が大きいものとしてポンプを対象とした不具合事例について調査を進めると共に、実際の不具合事例について実験解析を行うこと

とした。

また、設備管理に関する診断技術に関し、専門家である日本機械学会の機械状態監視診断技術者（振動）資格認証試験の講師と設備診断について意見交換を行い、配管系の設備診断の重要性について認識した。これまで配管系の振動等については、問題が起きれば対処するという場当たりの対応がとられてきていた。しかし、配管系の問題は様々な分野においていろいろな問題を抱えていることから、近年では配管系の流体に起因する振動等の諸現象について理論的に解明し配管系の設備診断を行う必要があり、様々なところで研究が行われていることがわかった。また、構造と流体を連成させて解析することによって、配管系のみならず流体機械などに発生する諸現象の原因究明に関する研究も併せて進めていくべきであり、さらに、これらの研究成果を設備診断に活かす方策について検討する必要性のあることを再認識した。

つぎに、日本学術総合会議主催の「安全工学シンポジウム 2011」（2011年7月7、8日、東京港区の機械振興会館にて開催）においては、グローバル化と安全と題して多くの研究発表や講演が行われた。なかでも、今年3月に発生した東日本大震災とその後の津波、原子力発電所事故に関するものについては活発な議論が行われていた。さらに、安全・安心については、個々の科学技術分野における固有の問題と多くの分野に共通の問題が混在していることから、各学協会の横断的な取り組みと学術会議との連携が非常に重要である。そのため、様々な分野における安全・安心を実現するための安全性評価や保安力（評価）などをはじめとして、予防安全やリスクアセスメント、事故事例データベース、ヒューマンエラー、安全性と信頼性などに関する発表が行われていた。そして、機械においては従来からフェールセーフという考えの基で様々な制御装置が構成されているが、フェールセーフによれないプラント設備における安全の確保の重要性や、安全を確保する上での解析法の問題や人材の育成の必要性など、種々の問題について考える機会を得ることができた。これらのことから本研究における機械の保全のみならず、保全にあたる人材の教育・育成の重要性を強く感じた。

また、日本機械学会主催の「Dynamics & Design Conference 2011」（2011年9月5日～9日、高知工科大学にて開催）においては、様々な機械の動特性や制御に関する講演が行われた。また、同講演会のなかの企画の1つである v_BASE フォーラムにおいて、振動・騒音問題に関する種々の経験データの講演があり、プラントにおける構造物の異常について、その状況や分析結果、改善方法などについての報告がなされた。なかでも、診断技術に関するものとして、モーター駆動でカップリングを介しロータを回転させる回転機械を対象としたモデルベースの学習型振動診断支援手法に関するものや、遠心ポンプや斜流ポンプなどのポンプに関する諸現象として、入り口逆流による振動やキャビテーション、圧力脈動などによる振動現象に関するもの、さらに、タービンなどの回転機械における異常振動などについての対策事例について講演があった。これらの講演は、各企業において実際にあった故障事例とその対策について講演が行われるものであり、構造物の状況が異なれば

生じる現象も異なり、評価の難しさや対策の困難さがあることなどが報告された。これらの講演を通じ、異常であることの判断や、どのような原因が考えられるか、さらに、どのような対策を講じることが良いのかについて、系統立てた指針やマニュアルの有用性について再認識することができた。このように、Dynamics & Design Conference 2011に参加し調査を行うことによって、本研究における故障診断に関する有益な情報を多く得ることができた。

さらに、日本機械学会主催の「評価・診断に関するシンポジウム」(2011年12月14、15日、大阪市立大学学術総合情報センターにて開催)においては、非破壊検査、保守検査、異常検知、センサー技術、信号処理、計測、評価、診断、モニタリング及びメンテナンスなどをキーワードとして、これらに関する講演が行われた。特に本シンポジウムは国内最大の診断等に関する学術会議であり、状態監視技術や予知保全を行う上での諸現象の解析技術などの研究動向について調査を実施した。

3 ポンプの不具合事例調査

ポンプは様々な設備において必要不可欠な構成要素のひとつであり、ポンプの故障や性能の低下によって設備全体の機能低下や機能停止を引き起こすことから、ポンプの保全、管理は非常に重要である。また、ポンプには様々な型式のものがあるが、一般的には遠心ポンプ(渦巻きポンプ)が最も多く使用されていることから、遠心ポンプの保全のための知見を得ることは非常に有益であると考えられる。

そこで本研究では、定期点検や修理を行う前の船艇において遠心ポンプの不具合事例を調べることにした。その結果、練習船こじまに備え付けられていた主機室用のクリーンビルジポンプと補機室用のクリーンビルジポンプは同一型式の遠心ポンプであるが、一方のポンプの性能が低下し、十分な吐出量が確保できていない状況であることが判明した。そこで、これらのポンプについて通常運転中の情報から保全に関する知見を得るため、船舶が航行中のときにポンプを運転し振動計測を行うことにした。そして、得られたデータから性能の低下とその原因について評価を行うための解析を実施し、振動情報による予知保全の可能性について検討を行うことにした。

(1) 実験の方法

振動実験を行う際に、主機室と補機室のポンプでは吸い込み及び吐出の条件(揚程等)がわずかに異なることから、性能低下している主機室のポンプのインペラーを取り外し、正常な補機室のポンプにインペラーを取り付けることによって、ポンプに付属の電動機や、ポンプ周辺の各種機器の条件を同一にすることで、インペラーの異常の有無やその程度の変化による振動情報の違いについて調べることにした。

ポンプの概要を図1に示す。図1は、補機室のポンプ及び電動機等であり、ポンプ(遠心ポンプ)は図中に示した部分である。なお、ポンプのインペラーは図2のとおりであり、

インペラーをはずした際のポンプ内部の様子は図 3 のとおりである。ここで、インペラーの直径は 127.25mm、インペラーの羽根部分の厚さは 10.5mm である。また、インペラーの流体の通路となる羽根車の幅（軸方向）は 2mm であり、非常に狭いことがわかる。

また、電動機とポンプの軸継ぎ手の部分及びポンプのケーシングの部分で振動を計測することとし、図 4 に示すように鉛直方向と鉛直方向から左右に各 30 度ずつ傾いた部分（鉛直方向と水平方向成分の校正を行うため）に加速度センサーを取り付け振動情報の収集を行った。また、同時に、図 2 及び図 4 に示す点 R の位置において参照信号としての振動情報を計測することとした。

また、吐出の性能が低下していたポンプのインペラーを図 5 に示す。インペラーは 5 枚羽根で流体の通路が 5 箇所あるが、吐出の悪かったインペラーは 5 箇所のうち 4 箇所が閉塞していた。そこで、順次インペラーの閉塞箇所（図 6 参照）を清掃していき、その都度どのような振動情報が得られるか計測を実施した。その際の計測パターンを表 1 に示す。

また、実験においては、図 4 に示した各計測場所に加速度センサー（Rion PV-10B）を取り付け、得られる加速度信号はチャージアンプ（Rion UV-16）を介してモニタリング用の FFT

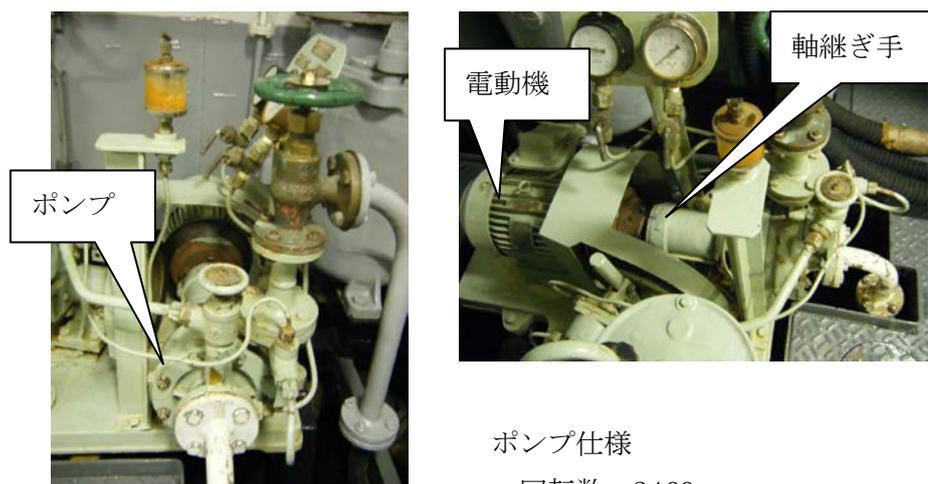


図 1 ポンプの概要



図 2 インペラーの様子

(Onosokki CF-5210) とデータ保存のためのデータレコーダ (Rion DA-40) に取り込むこととする。さらに、データレコーダに保存されたデータはデータレコーダビューアソフトにより読み取り可能なテキスト形式に変換し、数値解析ソフト (MATLAB) で作成したプログラムによって解析を行うこととする。

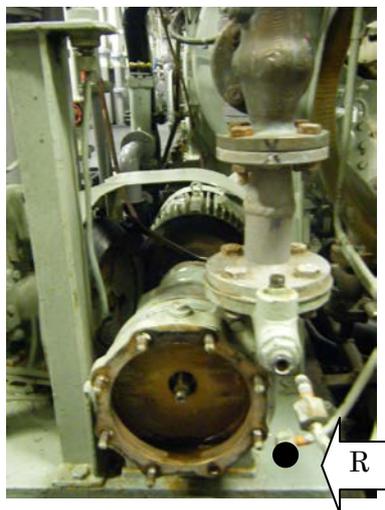


図3 ポンプ内部の様子

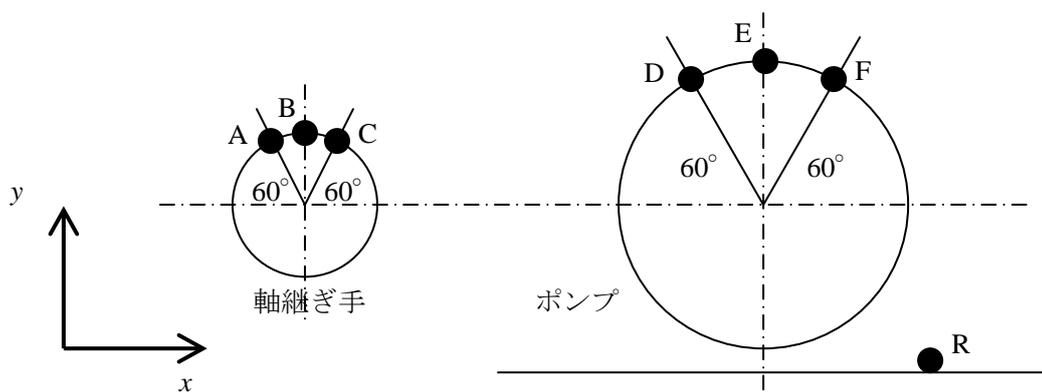


図4 加速度センサー取り付け位置



図5 流路が閉塞したインペラーの様子

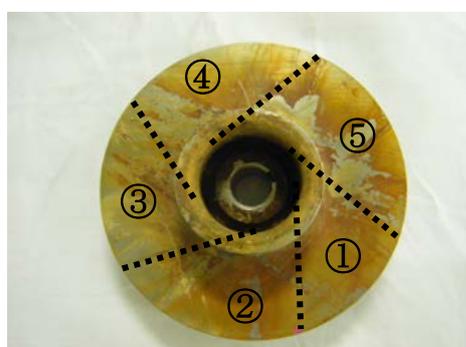


図6 インペラーの流路 (イメージ)

表1 計測パターン（インペラーの閉塞場所等）

No.	インペラーの 閉塞箇所	流量 (m ³ /s)	吐出圧 (MPa)	吸入圧 (MPa)	備考
Exp1	-	-	-	-	電動機・ポンプ停止中
Exp2	②③④⑤	0.0003	0.0098	-0.02	運転中
Exp3	③④⑤	0.0008	0.0196	-0.048	運転中
Exp4	③⑤※	0.0011	0.0588	-0.06	運転中
Exp5	⑤	0.0016	0.0637	-0.08	運転中
Exp6	-	0.0015	0.0686	-0.09	運転中

※閉塞箇所を連続的にせず、反対の位置とした。

※表中の圧力はゲージ圧

(2) 実験の結果及び考察

まず、ポンプ停止中において周囲の種々の機械を起振源とした時のポンプ等の振動計測結果と、ポンプのインペラーに閉塞箇所が無い正常な場合のポンプ運転時の振動の比較を図7に示す。また、ここでは例として、図7の上段に鉛直方向（計測点E）の振動測定結果を示し、下段に鉛直方向から右へ30度傾いた方向（計測点F）の振動測定結果を示している。また、黒がポンプ停止時の波形で、赤色がポンプ運転時の波形である。なお、両者とも実験の最中に機関室内の主機や発電機等が通常運転されている状況である。

図7をみると、鉛直方向と30度傾いた方向の振動波形から、両者の間で大きな違いは無い。また、ポンプが運転されている状態においては振動の加速度が大きくなっており、ランダム信号のような波形となっていることがわかる。また、計測方向による違いについては、加速度の大きさもほぼ同程度であり、その違いの評価は非常に困難であることがわかる。

そこで、これらの波形について周波数分析を行った結果を図8に示す。図8の上段に鉛直方向（計測点E）の周波数分析結果を示し、下段に鉛直方向から右へ30度傾いた方向（計測点F）の周波数分析結果を示している。また、グラフ中の黒色がポンプ停止時であり、赤色がポンプ運転時の結果を示している。

図8を見ると、周波数のスペクトルの大きさがポンプを運転することで大きくなっているが、ポンプを運転することによって特定の周波数成分が著しく大きくなっていることがわかる。遠心ポンプにおいては、機械的な振動のほか、流体力に起因する振動が発生するため、ポンプの回転数（周波数）を n とし、羽根車の枚数を a とすると、 $n \times a$ の周波数成分及びその整数倍成分の振動が励起される。したがって、これらの周波数成分が顕著に現れていることがわかる。このことから、これらの周波数成分に着目することによって、ポンプの異常について評価ができる可能性のあることがわかる。

つぎに、ポンプが正常な場合（インペラーに閉塞が無い場合）と、ポンプが異常な場合

(インペラーに閉塞がある場合) との比較を行った結果を図9、図10に示す。図9は振動計測によって得られた時系列の振動加速度の波形であり、図10は、それらの波形に対して周波数分析を行った結果を示している。なお、これらの図においては、正常時である Exp6 を赤色で示しており、青色で示す結果は、上段からインペラー内部の閉塞個所が多い順に、Exp2、Exp3、Exp4、及び、Exp5 の結果を示している。

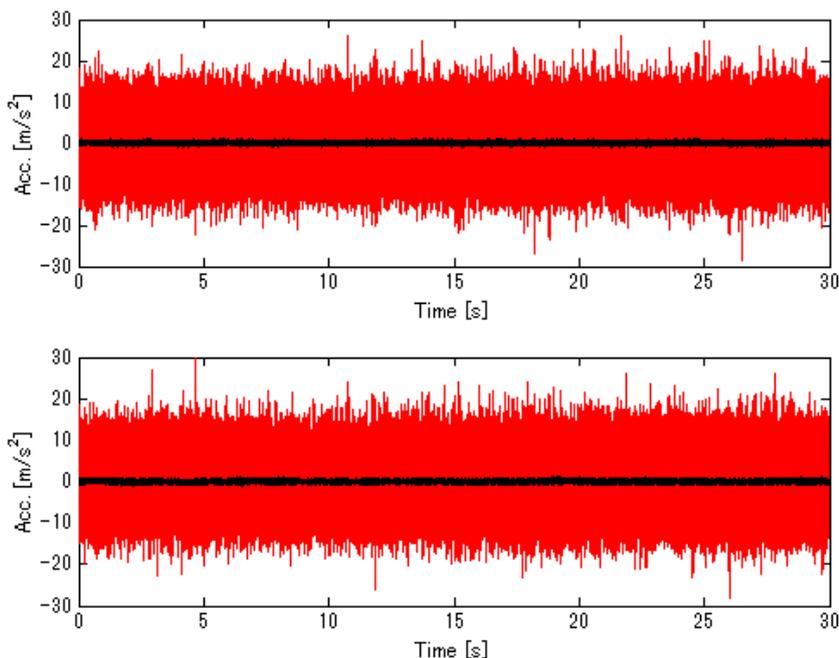


図7 振動加速度波形 (ポンプ停止時と正常なポンプ運転時の比較)

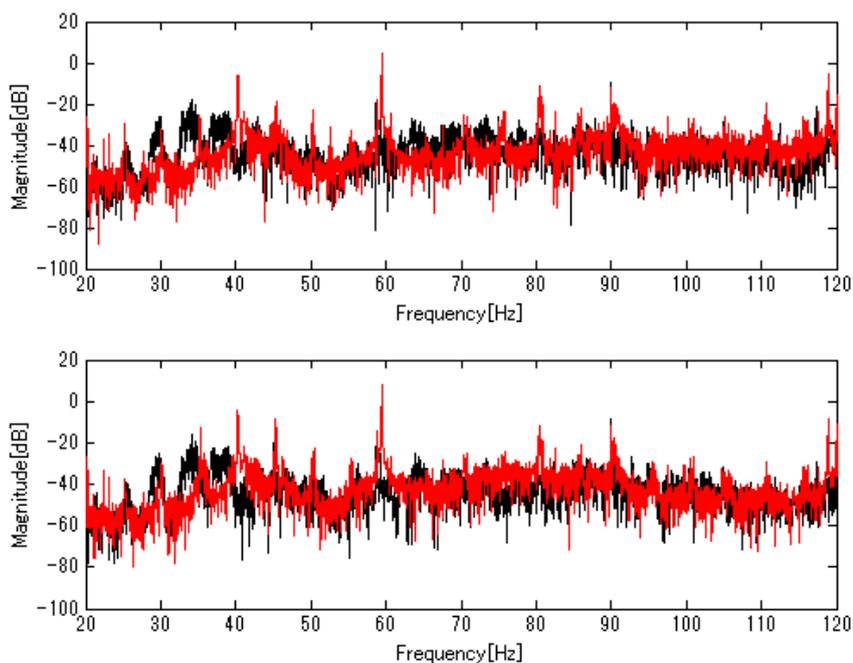


図8 周波数分析結果 (ポンプ停止時と正常なポンプ運転時の比較)

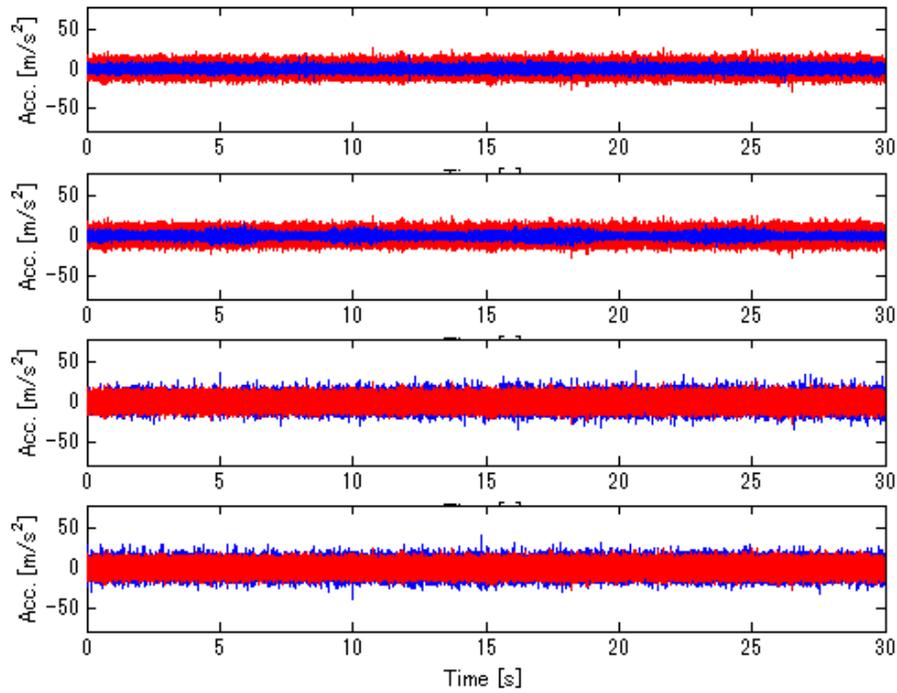


図9 振動加速度波形（正常なポンプと異常を有するポンプの比較）

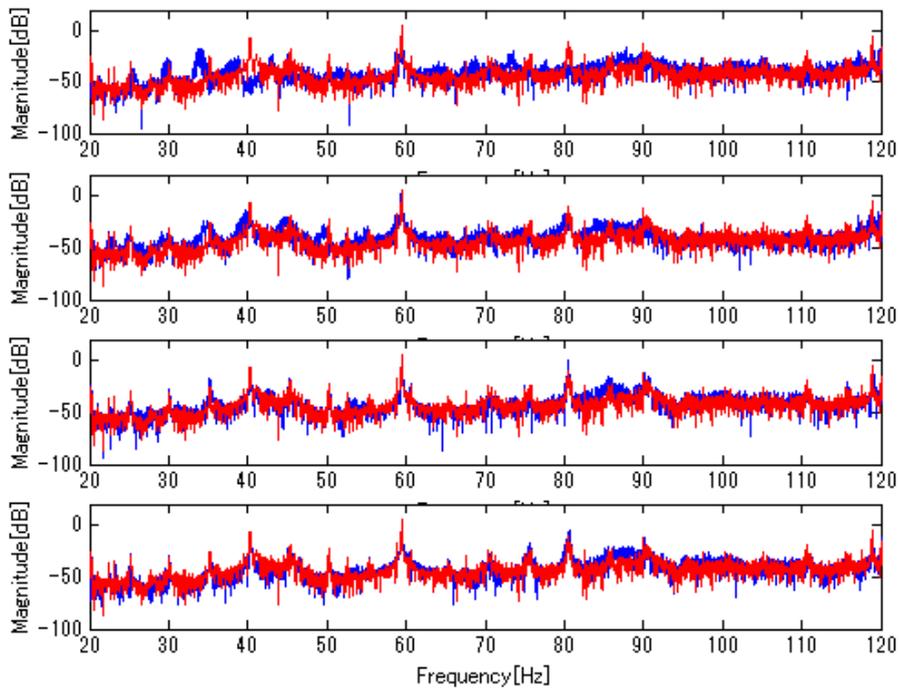


図10 周波数分析結果（正常なポンプと異常を有するポンプの比較）

まず、図9に示す時系列波形においては、正常時に比べインペラー内部に閉塞がある場合には振動加速度が小さくなっていることがわかる。このことは、インペラー内部の閉塞によって流体力による加振力が小さくなっていることに起因するものと考えられ、通常の

点検時には異常の発見が非常に困難であることがわかる。したがって、気付かないまま放置される可能性も大きく、緊急時での使用の際にポンプの性能を十分に発揮できない恐れがあることがわかる。一方、図 10 に示す周波数分析結果を見ると、先ほどのポンプ特有の振動成分についてわずかではあるが周波数が変化すると共に、正常時に比べスペクトルのピークの両サイドが広がっているような部分が見受けられる。これは、羽根車に閉塞があることによって、流体力による起振力が安定していないことによるものであると考えられ、振動の情報からインペラー内部の閉塞について予知できる可能性のあることがわかる。しかしながら、まだ十分な解析ができていないことから、今後閉塞について適正な評価を行うため、さらに解析を行う必要があると考えている。

また、ポンプの異常振動については、強制系振動異常として、圧力脈動による流体的な強制系振動と、アンバランスやミスアライメントによる機械的な強制系振動に大別できる。また、その他キャビテーションやサージング等流体内の自励系振動があり、原因によってそれぞれの異常現象として現れる振動現象に違いがある。

例えば、ポンプが正常な場合、振動波形は正規性のランダム波形を示し、アンバランスがある場合には回転数の基本波と第 2 高調波の加算された波形となることがわかっている。また、ポンプの圧力脈動誘起振動はブレードの数を Z 、吐出し弁の数を B 、回転周波数を f_r とすると、脈動周波数 $f_z (=ZBf_r)$ と、その高調波成分が表れることがわかっている。このように、原因ごとに生じる振動現象には違いがあることから、これらを適確に評価するパラメータ及び評価方法の確立することが必要である。

また、一般には、これらの異常振動に対して、正弦波からのずれやひずみの程度を表す波形率、波形の高さを表す波高率、振動波形の対象性（非対称性）を表すひずみ度、波形の衝撃度を表す尖り度、自己相関関数や等価相関幅などが用いられていることが多い。そこで、今後さらに解析を進め、ポンプの運転中において、他の振動による影響を受けずに、ポンプの状態を最もよく評価できるパラメータの抽出及び解析方法について検討を行っていく必要があると考える。

4 おわりに

船舶の機関保全技術の向上に関する研究として、船艇における故障情報の調査をはじめとして、船艇を効率的な運航に供するため、様々な機器の保全技術に関して調査を実施してきた。そして、効率的な保全に資するため、故障情報の分析の必要性とともに、予知保全のための診断技術の重要性も認識した。そこで、今後は、現在行っているポンプの異常診断の解析方法について検討をするとともに、故障診断に役立つデータベースの構築を見据え、研究をさらに推進していく必要があるものとする。

5 主な参考文献

- ・日本学術総合会議：「安全工学シンポジウム 2011 講演予稿集」（2011）

- 日本機械学会：「Dynamics & Design Conference 2011 アブストラクト集」(2011)
- 日本機械学会：「Dynamics & Design Conference 2011 v_BASE フォーラム資料集」(2011)
- プラントメンテナンス協会編：「新機械保全技能ハンドブック基礎編①」、JIPM ソリューション (2006)
- プラントメンテナンス協会編：「新機械保全技能ハンドブック基礎編②」、JIPM ソリューション (2007)
- プラントメンテナンス協会編：「新機械保全技能ハンドブック汎用機器編」、JIPM ソリューション (2010)
- 豊田利夫著：「図説・設備診断技術シリーズ③機械システム診断の進め方」、JIPM ソリューション (2005)
- 日本機械学会：「評価・診断に関するシンポジウム論文集」(2011)
- 松下・田中・神吉・小林著：「回転機械の振動-実用的振動解析の基本-」、コロナ社 (2010)