

2012 年度「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、保全を行う上で重要となるのが『予防保全（設備の性能を維持するための予防的な措置）』である。特に、なかでも「状態基準保全（設備の状態を基準にして保全の時期を決定する方法）」として、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『予知保全』に関する技術の向上は必要不可欠である。近年、振動・音響法、電気抵抗法、AE 法など数多くの診断法が提案されているところであるが、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、船艇の運航に支障が生じないまでも、搭載されている各種機器の運転時において振動や騒音、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場合には、担当者は対象機器の負担を軽減する等苦慮しながら、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、その整備に係る知識・技術の習得や蓄積等に船艇運航者が十分に関わることができないことから、その後の保守管理等において十分な保全計画を策定することができない。

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。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いことから、これらに関する情報を蓄積していくことは、機器故障に起因する海難事故等の分析においても役立つ情報となりうるため、非常に重要である。

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必要な保全技術に関して調査を行い、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、ここでは船艇の機関における故障として件数も多く、故障した場合のシステムに与える影響が大きいと考えられる機器を対象として、予知保全に関し診断可能性について実験解析等を行うこととした。

2 調査の概要

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、保全管理に関する調査を行った。

まず、2010年度の故障箇所等の調査結果の一例として、図1に機関室内における故障の分類結果を示す。この図をみると、高速機関や中低速機関及び発電機用原動機などにおける故障発生が全体の46%、管類及び弁類が24%、諸ポンプが4%などとなっている。ここで、これらの故障に関し具体的に故障箇所について調べてみると、例えば高速機関における故障発生箇所としては、ピストン、ピストンリング、高圧管、軸受及びポンプなど様々である。また、諸ポンプの故障発生箇所についてみてみると、電動機、配管系、ポンプ（インペラー）及び軸受など様々である。そこで、機関室内における故障に関し、配管、バルブ、ポンプ（ポンプ内部のインペラーの不具合）、及び、軸受（ポンプの軸受けの不具合）など各種機関においても共通する部分について、再度抽出しなおした結果を図2に示す。この図をみるとポンプに関する故障として、ポンプの故障が8%、ポンプ軸受関係が3%となり、ポンプに関する故障が全体の1割を占めることがわかる。すなわち、高速機関や中低速機関、及び、発電機においても機付の各種ポンプの故障の発生が多いことがわかる。

次に、最近では国際的な安全基準の見直し等が国際海事機関¹⁾（IMO：International Maritime Organization）の海上安全委員会（MSC：Maritime Safety Committee）の設計設備小委員会（DE：Ship Design and Equipment）において議論され、SOLAS条約附属書第II-1章等に規定されている各種設備に関する要件や、高速船の安全に関する国際規則（以下、HSCコードという）に基づく高速船の安全要件など、船舶の保全管理に関する規制が見直し強化されたところである²⁾³⁾。そこで、高速船の建造にあたってはHSCコードに基づきFEMA解析を行うこととなっている。ここで、このFEMA解析⁴⁾

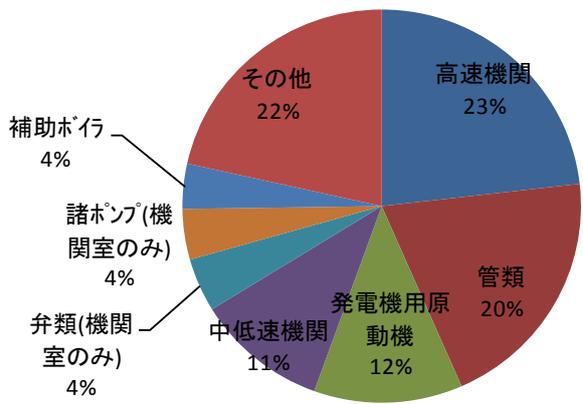


図1 故障の分類

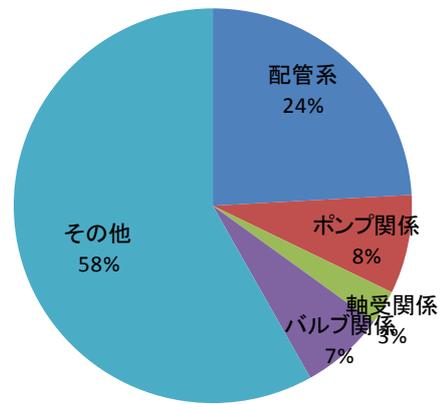


図2 故障箇所の分類

でおこなわれるシステムとしては、①方向制御システム、②機関システム及びその関連装置、③電氣的システム、④安定化システムの4つについて、全速時の通常航行、過密海域において許容される最高速力航行、及び、離接岸航行などの運航モードについて評価が行われる。そして、機能の完全喪失、最大出力または最小出力への急激な切り替え、制御不能または出力変動、及び、時期尚早の操作、指定時の動作不良、動作停止不能などの故障モードを考慮し、その影響の大きさについて評価されることとなる。また、先にも述べたが、故障全体の40%を超える機関故障の中で、ポンプ（本体及び軸受等含む）の故障も多く、ポンプの故障が単独で完結しシステム全体に影響を及ぼさないものもあるが、多くの場合はポンプ性能の低下や故障はピストンや軸受の焼損等に至る機関システムへの重大な損傷につながる恐れがある。そこで、FEMA解析に関して機関システムについて調べた結果、故障原因として様々な故障が考慮されているが、機関システムを作動させるために必要なポンプの故障が数多くあげられており、ポンプの故障によって「大きな影響がある」との評価が行われている。これは、機関を運転するために燃料ポンプ、潤滑油ポンプ及び冷却ポンプなど様々なポンプが必要不可欠であるためであり、これらのポンプの故障は機関システム全体に与える影響が非常に大きいということである。

ここで、予知保全に関する研究としては、日本機械学会をはじめ様々な学会において、企業や大学等の研究者によって構造物の診断や各種機械等に関する様々な研究が行われているところである^{5)~7)}。また、回転機械に着目すると、歯車、ベアリング等の軸受け、ロータなど多種多様である。なお、これらの機器においては、それぞれ異常の発生によって特有の振動現象があり、それらの発生原因の特定や、振動の発生メカニズムについて研究が行われているところである。なかでも、ポンプは様々な設備において必要不可欠な機器であるため、さらに研究を進めていく必要があると考えられる。

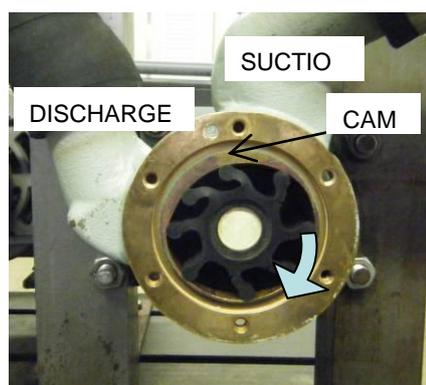
そこで、予知保全を行う上で重要となるポンプの異常診断に関する研究についてみて

みると、各種プラントシステムにおいてもポンプが非常に重要であることから、従来から多くの研究がなされている⁸⁾。また、各種回転機械の診断について、近年では主成分分析手法を用いた研究⁹⁾なども行われている。さらに、日本機械学会では機械状態監視資格認証¹⁰⁾を行い、ポンプなどの回転機械の異常診断に関し、技術者の知識・技能についてのレベルアップをはかっている。このように、産業分野においてもポンプの異常診断は非常に重要且つ関心が高い。しかしながら、現場で既存の設備に対して容易に活用できる簡易な診断方法や、異常診断に有意なパラメータ等については、まだ十分であるとは言い難い。

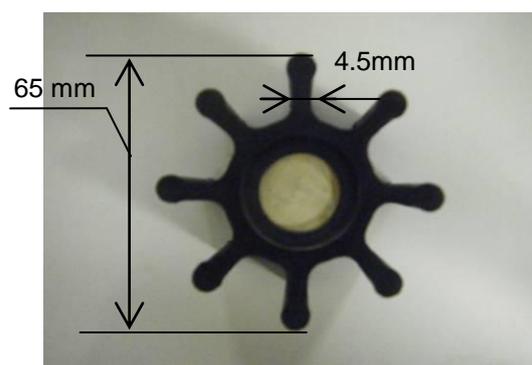
そこで本研究では、最近機付の海水ポンプなどに多用されているゴムインペラーポンプに着目し、ポンプの異常状態における振動を測定し、振動情報を用いた予知保全としてポンプの異常診断の可能性について検討を行うこととした。

3 実験方法

本研究では、近年の船用エンジンの機付のポンプとして多用されているゴムインペラーポンプについて実験を実施した。なお、このポンプのインペラーはゴム製であることから、ゴムの劣化による性能低下が考えられるため、ポンプの性能を維持するためには、ある一定の時間運転した場合、あるいは、使用していない場合でも一定の時間経過した場合には交換することとなっている。しかしながら、異物の混入や何らかの原因によってゴムの劣化（インペラーの損傷など）が生じることによって、ポンプの性能を維持できないばかりか、インペラーが回転する際の摩擦によって非常に多くの熱を発生させ、周囲の環境によっては火災の原因にもなり得る。そこで、図3に示すゴムインペラーポンプを対象として、異常の早期発見及び診断の可能性について検討を行うこととした。



(a) ギュムインペラーポンプの概要



(b) ギュムインペラーの概要

図3 ポンプの概要

3. 1 実験装置

図4にポンプ及びポンプの駆動に使用する電動機の概要を示す。図に示しているように、

ポンプはVベルトを介して電動機によって駆動されている。なお、電動機の回転数は1790rpm (29.8Hz) であり、ポンプの回転数は1650rpm (27.5Hz) である。また、VベルトにはS A-30を使用しており、Vベルトの回転数は696rpm (11.6Hz) である。

図5及び表1に計測位置の概要について示す。これらに示すとおり振動の計測は8か所とし、各計測場所において振動加速度を計測した。また、計測には加速度ピックアップ (RION製 PV-90B) を用い、計測された信号は、チャージアンプ (RION製 UV-90B) を介し、周波数分析器 (ONO SOKKI製 CF-5210) でモニタリングすると共に、データレコーダ (RION製 DA-40) に保存し、パソコンで分析を行うこととした。

3. 2 実験 I

まず、前節で示した実験装置を用いて、表2に示すようにゴムインペラーが正常な場合とゴムインペラーに異常のある場合についての振動の計測を実施した。また、ゴムインペラーとゴムインペラーに異常のある場合についての振動の計測を実施した。また、ゴムインペラーに異常がある場合としては、図6に示すようにゴムインペラーの付け根の部分に軸方向に一樣な深さの傷を入れ、傷が浅い場合と深い場合の2種類について実験を行うこととした。

3. 3 実験 II

ゴムインペラーが損傷を有するとき、ゴムインペラーの剛性が変化することから、ゴムインペラーがカムにあたる際の力が変化することが予想される。ここでは、このことについて確認を行うこととした。そのため、ポンプのケーシングを外し、ゴムインペラーをとりつけた状態で、図7に示すようにゴムインペラーをカムに見立てた平板で押さえ、インペラーを回転させたときの平板の振動を計測することとした。

ここでは、損傷を有するインペラーの羽根の枚数によって、計測される振動にどのような変化が生じるかを調べることにした。そのため、表3に示すように、インペラーの8枚の羽

表1 計測場所

番号	場所	計測方向
①	ポンプ 本体	鉛直方向 (カム上部)
②		水平方向 (カム無部分)
③		ポンプ軸方向
④	支持材	鉛直方向
⑤		水平方向
⑥		ポンプ軸方向
⑦	土台	鉛直方向
⑧		水平方向

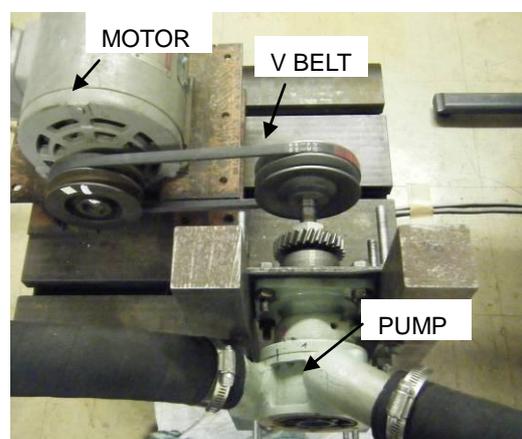


図4 ポンプとポンプ駆動に用いた電動機

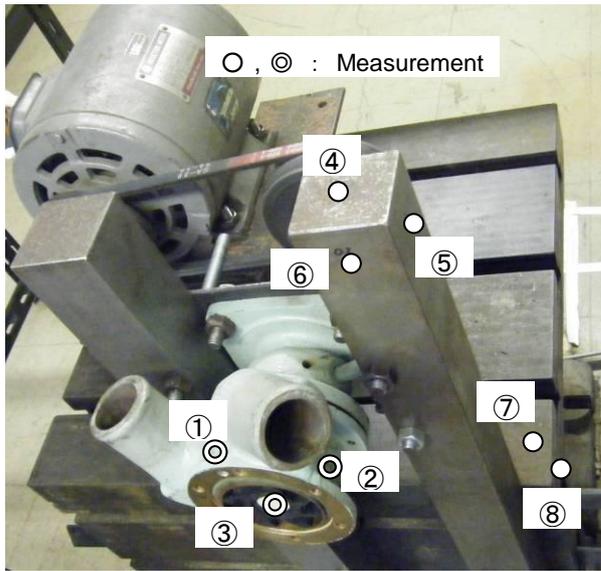
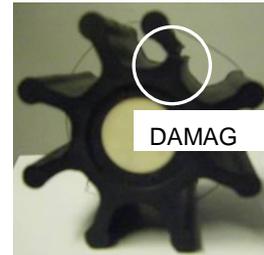


図5 計測位置の概要



(a)ポンプ取付け時



(b) インペラーのみ

図6 ゴムインペラーの損傷の様子

表2 実験に使用したインペラーの種類

	異常の有無	損傷の概要
Type N	無	
Type D1	有	傷の深さ 2 mm
Type D2	有	傷の深さ 4 mm

表3 実験に使用したインペラーの種類

	異常の有無	損傷の概要
Type BN	無	
Type BD1	有	1枚
Type BD2	有	2枚
Type BD3	有	3枚
Type BD4	有	4枚

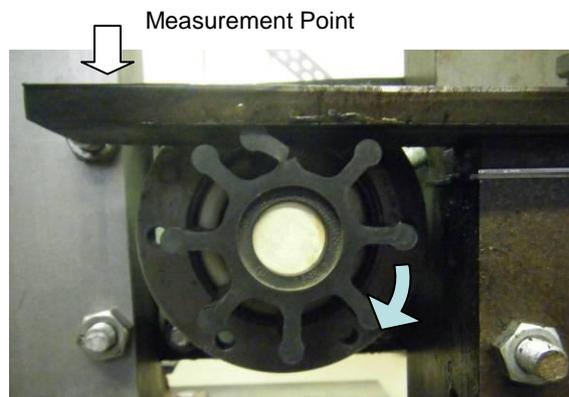


図7 計測位置及びゴムインペラーの概要

根のうち1枚、2枚、3枚、4枚と順次隣り合う羽根に深さ3 mm程度の切り込みを軸方向に一様に与え実験を行った。

4 実験結果及び考察

実験Ⅰ及び実験Ⅱの方法による結果を以下に示す。まず、図8に例として、インペラーに異常がない場合のポンプの鉛直方向、水平方向及び軸方向の周波数応答について示す。

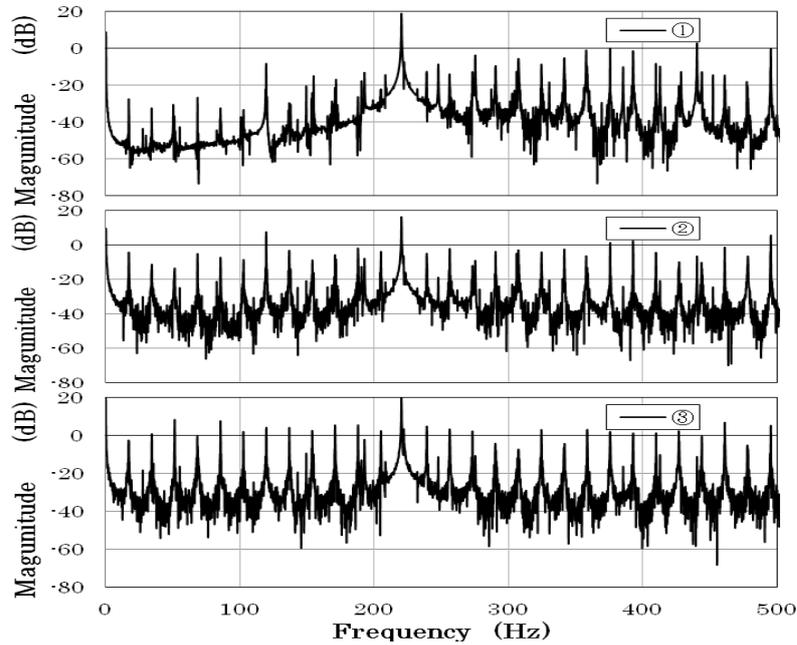
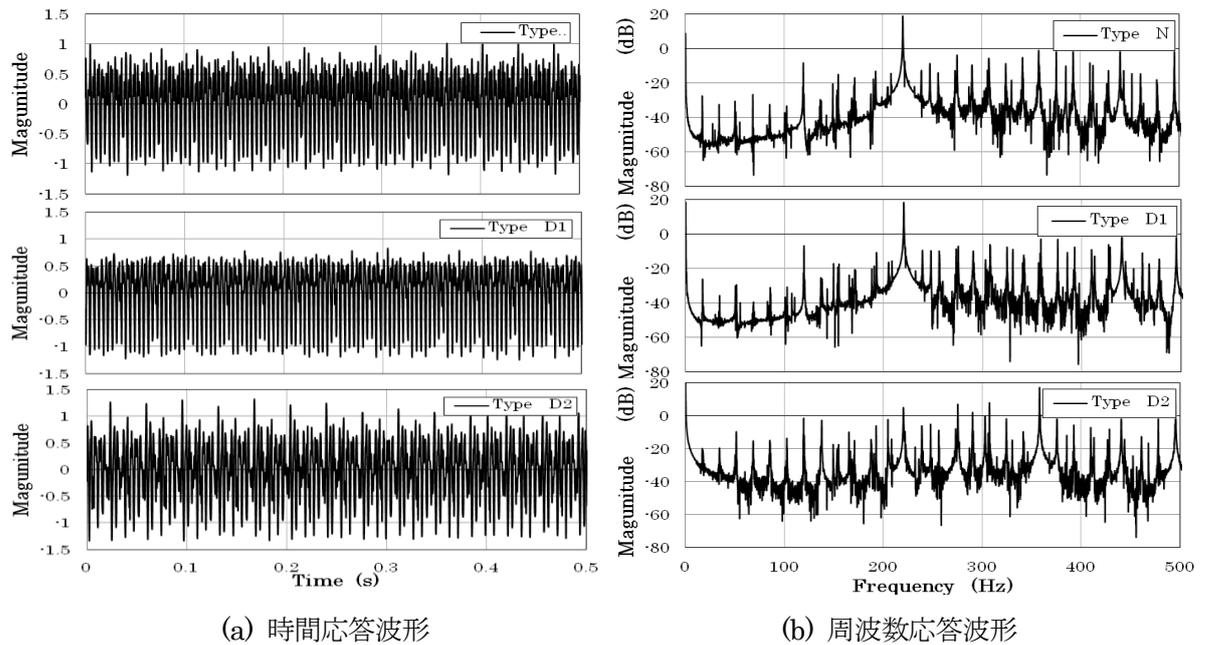


図8 ポンプ本体各部の周波数応答(上：鉛直方向、中：水平方向、下：軸方向)



(a) 時間応答波形

(b) 周波数応答波形

図9 実験 I の実験結果 (インペラーの損傷による変化)

図8をみると、水平方向及び軸方向の周波数応答解析の結果は、鉛直方向に比べノイズが大きく、且つ、ポンプ回転数の高調波成分以外のモータやVベルト回転数の高調波成分の影響が非常に大きくなっており、ポンプの異常を把握するためには適していないものと考えられる。そのため、ここではポンプ本体の鉛直方向についての解析結果について示していくこととする。

そこで、図9に実験Ⅰのポンプ本体の鉛直方向の時間応答波形と周波数応答波形の結果を示す。この図をみると、傷が小さい場合には時間応答波形からは大きな特徴の変化は見てとることができないが、傷が大きくなると明らかに周期の異なる振動成分の影響が大きくなっていることがわかる。また、周波数応答波形をみると、幾つかの高調波成分のピーク値が変化しており、特に1次から7次までの低次における高調波成分のピーク値が変化していることがわかる。したがって、このピーク値の変化はインペラーの異常によって影響を受けるものであることが推察される。また、図10に示すようにポンプ回転数の8次高調波成分（インペラーの羽根の枚数8枚×ポンプ回転数）である220Hz付近に着目すると、周波数応答の波形がインペラーに傷がある場合には裾野が狭くなり鋭くなっていることがわかる。また、他の高調波成分でもピーク値付近の特性に変化のあることがわかる。

そこで、このことを評価するため、次式で示される統計量の1つである尖り度 K を用いて解析を行うこととした¹⁾。

$$K_f = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^4}{N} \right] / P_{rms}^4 \quad (1)$$

ここで、周波数を離散値として、 $f=f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$ と表し、 P_i は周波数 i 番目のパワースペクトルを表わし、 \bar{P} は平均値、 P_{rms} は実効値を表わす。

尖り度を求めた結果を図11に示す。この図をみると、インペラーに傷を有する場合の尖り度の値が傷のない場合に比べ大きくなっていることがわかる。このことから、周波数領域において算出する尖り度の値をモニタリングすることによって、インペラーの劣化について診断できる可能性のあることがわかる。

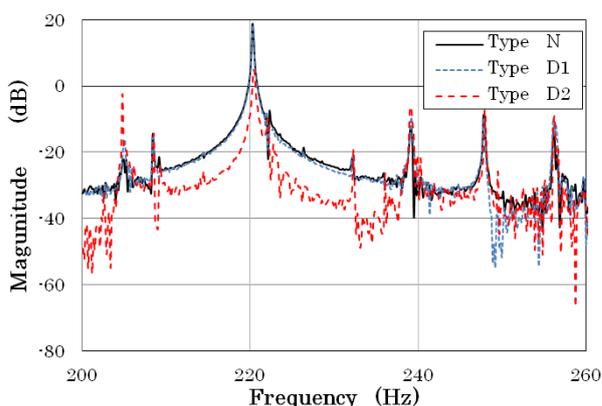


図10 実験Ⅰの周波数応答波形
(ポンプ回転数の8次高調波成分付近)

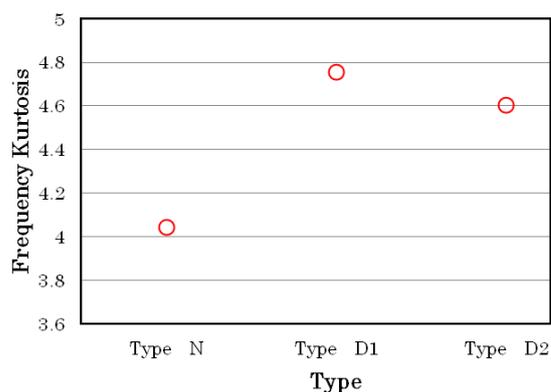


図11 実験Ⅰの周波数尖り度
(インペラーの損傷による変化)

つぎに、実験Ⅱの周波数応答波形の例を図12に示す。この図をみると、損傷のないイン

ペラーのときの結果と比べ、インペラーに損傷を与えた場合の結果では、ポンプ回転数の高調波成分の周波数応答の値が変化し、損傷のない時と明らかに異なる特性となっており、損傷が羽根1枚の時は低次の高調波成分のピーク値が大きくなっていることがわかる。これは、実験Ⅰの時の結果と同様であり、インペラーの損傷によって周波数応答に変化が表れることがわかる。

また、図13に8次高調波成分である220Hz付近について示している。この図をみると、損傷を受けた場合の周波数応答に変化が生じており、ここでも実験Ⅰとほぼ同様の結果が得られていることがわかる。

そこで、図14に尖り度を求めた結果を示す。この図をみると、損傷のない時と比べ、インペラーに損傷がある場合には、尖り度の値が変化していることがわかる。このように実験Ⅰと同様の結果が得られていることから、尖り度によってインペラーの異常について評価ができるものと考えられる。

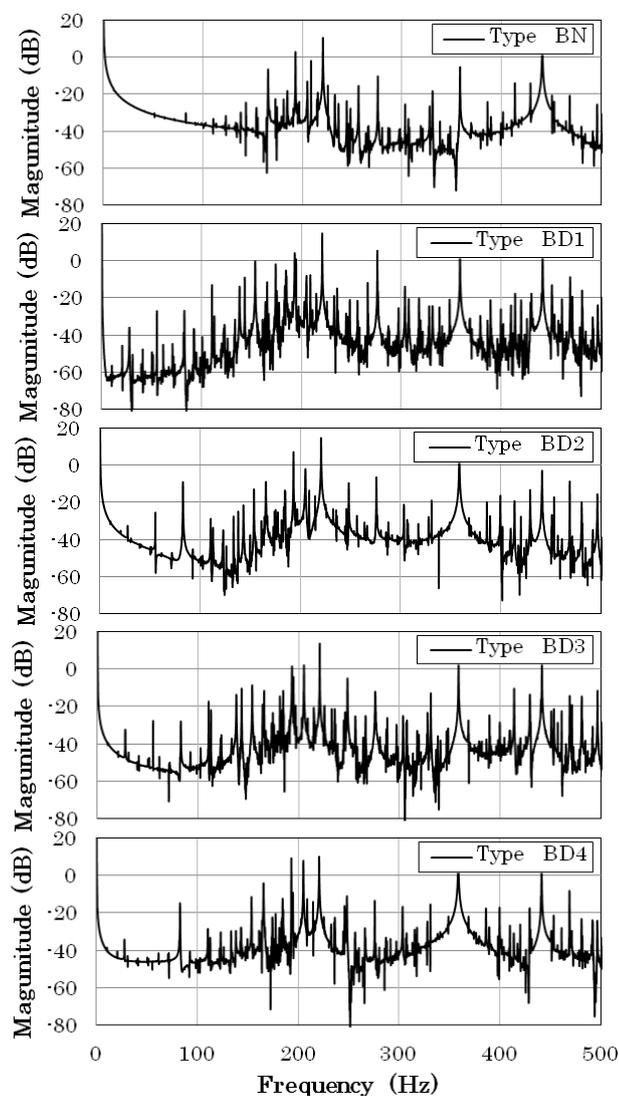


図12 実験Ⅱの周波数応答波形（インペラーの損傷による変化）

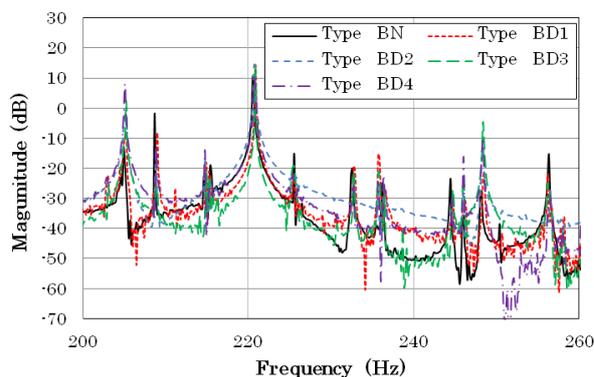


図 1 3 実験Ⅱの周波数応答波形
(ポンプ回転数の 8 次高調波成分付近)

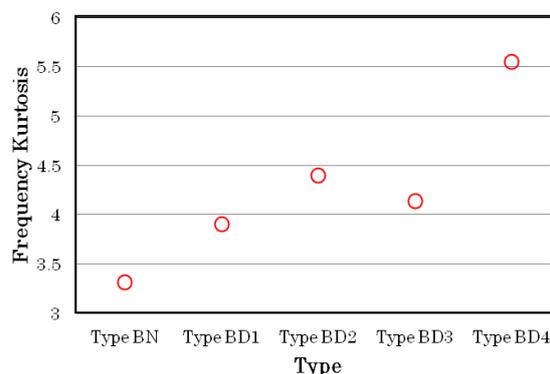


図 1 4 実験Ⅱの周波数尖り度
(インペラーの損傷による変化)

5 おわりに

本研究では、ゴムインペラーポンプを対象として、インペラーに損傷がある場合について、振動情報を用いて当該異常の診断可能性について検討を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) インペラーに異常がある場合、周波数応答において、ポンプ回転数の 1 次から 7 次までの高調波成分のピーク値が大きく変化し、異常を有するインペラーの羽根の枚数によって、大きくなる高調波成分と小さくなる高調波成分があることから、異常診断に活用できることを示した。
- (2) 周波数応答から算出する周波数尖り度は、インペラーに異常がある場合にその値が変化することから、異常診断を行う上で有用なパラメータとして活用できることを示した。
- (3) ゴムインペラーポンプの場合、インペラーの異常について有用な振動情報が得られる場所として、インペラーと接触するカムの上部分が最も適していることを示した。

そこで、今後は、インペラーの異常と周波数応答におけるポンプ回転数の高調波成分との関係について検討をさらに進めると共に、インペラーの損傷、ポンプ内の閉塞や配管異常に伴う流量低下など、様々な異常がある場合について、尖り度等のパラメータの有効性を確認し、ポンプの異常診断に関し検討を行い、機関保全技術の向上に寄与するためにデータ研究成果の集積をはかっていく必要がある。

参考文献

- 1) IMO ホームページ : <http://www.imo.org/>
- 2) IMO ホームページ各種資料 : [http://www.imo.org/KnowledgeCentre/HowAndWhereToFindIMOInformation/IndexofIMOResolutions/Pages/Maritime-Safety-Committee-\(MSC\).aspx](http://www.imo.org/KnowledgeCentre/HowAndWhereToFindIMOInformation/IndexofIMOResolutions/Pages/Maritime-Safety-Committee-(MSC).aspx)
- 3) NK ホームページ : http://www.classnk.or.jp/hp/ja/imo_conv_schedule/conv_schedule_list.asp?lang=j&kubun=1.%20SAFETY

- 4) 松岡猛・伊藤博子・他, FMEA(故障モード及び影響解析)実施手順, 海上技術安全研究所報告, 第6巻第2号, 2006, 1-37.
- 5) 例えば, 大山裕太・本田尚・他, 鋼心ワイヤロープの疲労損傷に及ぼす繰返し速度の影響, 安全工学シンポジウム2012, 2012, 226-227.
- 6) 例えば, 大獄晴佳・高井元・他, 構造健全性診断技術で検知する不確定性を有したCFRP板衝撃損傷のパッチ補修, 第54回構造強度に関する講演会, 2012, 242-244.
- 7) 例えば, v-Baseフォーラム, 日本機械学会D&D2012, 2012.
- 8) 江口真人, 遠心ポンプの振動 流体現象とロータダイナミクス, エバラ時報, No.221(2008), 22-31.
- 9) 明智吉弘・緑川悟・小林伸二, 高精度振動波形解析による機械の異常診断, JFE 技報, No.27(2011), 20-25.
- 10) 日本機械学会ホームページ : <http://www.jsme.or.jp/JOTAIWEB/>
- 11) 豊田利夫, 「機械システム診断の進め方」, JIPM ソリューション, 2005.