

振動情報を用いたポンプの異常診断パラメータに関する基礎研究

|       |                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| メタデータ | 言語: Japanese<br>出版者:<br>公開日: 2023-05-31<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En): Diagnosis, Vibration, Kurtosis, Frequency Response, Higher-harmonic<br>作成者: 東, 明彦, 水口, 文洋, 荒堀, 紀美恵, 吉永, 聖, MIZUGUCHI, Fumihiro, ARAHORI, Kimie, YOSHINAGA, Satoshi<br>メールアドレス:<br>所属: |
| URL   | <a href="https://doi.org/10.15053/0000000201">https://doi.org/10.15053/0000000201</a>                                                                                                                                                                       |

# 振動情報を用いたポンプの異常診断パラメータに関する基礎研究

東 明彦<sup>1</sup> 水口 文洋<sup>2</sup> 荒堀 紀美恵<sup>3</sup> 吉永 聖<sup>3</sup>

## A Study on Diagnosis Parameter of the Pump with Vibration

Akihiko Higashi, Humihiro Mizuguchi, Kimie Arahori, and Satoshi Yoshinaga

### Abstract

In machinery in a ship and various plant systems, various pumps are used. Therefore the influence that the trouble of the pump gives to these facilities is very serious. In this study, we examined the evaluation parameter to be diagnosed abnormally of the pump with vibration information. The results are as follows. When abnormality occurs in a pump, the frequency response of the higher-harmonic of the pump speed change, and the frequency kurtosis varies. In other words an evaluation about the abnormality is possible by the kurtosis and frequency response.

**Keywords :** Diagnosis, Vibration, Kurtosis, Frequency Response, Higher-harmonic

### 1 はじめに

近年、各種プラントにおいては自動化や合理化が進んでおり、船舶においても高速化や大型化、さらに高機能化などが進んでいる。また、これらの機械設備では、わずかな故障によって設備全体が受ける影響が非常に大きくなってきている。特に船舶においては、運航中に故障が発生した場合、重大な海難事故へと発展する恐れもあることから、乗員による機器の保安全管理が十分に行われ、安全運航を確保することが非常に重要である。そこで、最近では国際的な安全基準の見直し等が国際海事機関（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、船舶の保安全管理に関する規制が見直し強化されたところである。一方、国内においては、熟練した技術者の大量退職などを背景として、現場における機器の保安全を適確に実施するため、技術の伝承の必要性が叫ばれている。このような中において、熟練した技術者の持つ技術の伝承

はもちろんのことであるが、十分な経験を有さない者でも容易に機器の異常診断を行うことが可能となるような保安全管理に関する研究を進めていく必要があるものと考ええる。

これまで船舶に搭載されている機関部の様々な機器の保守管理においては、定期的に行う通常の整備はもちろんのこと、運転中においてもこれらの機器の運転時に発生する振動や騒音、熱などの異常現象を早期に発見し、機器の故障に対する措置が取られてきた。しかし、先にも述べたように熟練した技能や経験を有する者でなければ、その発見が遅れ重大な事故へつながる可能性がある。また、重大事故に至らない場合においても、当該故障機器を含むシステム全体を停止しなければならない時間が増大し、効率的な運用が十分に行えなくなる可能性が非常に高い。このように、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は、早期に検出し対策を講じる必要があり、その対策が遅れた場合には、船舶の運航を阻害する重大な問題へと発展していくことがあることから、保安全管理技術の発展は非常に重要な課題である。

ここで、HSCコードに基づく高速船の安全要件の中で実施される故障モード影響度解析（FMEA : Failure Mode and Effects Analysis）の

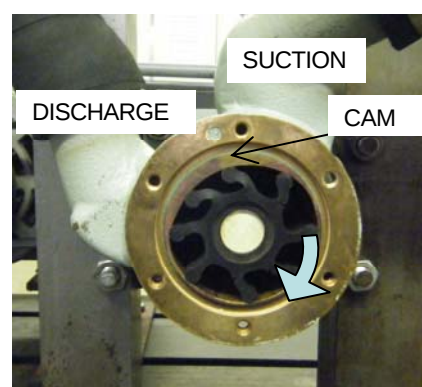
中では、機関システムの故障の原因としてポンプの故障が数多くあげられている<sup>1)</sup>。これは、機関を運転するために燃料ポンプ、潤滑油ポンプ及び冷却ポンプなど様々なポンプが必要不可欠であるためであり、これらのポンプの故障は機関に与える影響が非常に大きいことを示している。

また、ポンプの異常診断に関する研究については、プラントシステムにおけるポンプの重要性から、従来から多くの研究がなされている<sup>2)</sup>。また、ポンプなどの回転機械の診断についても近年では主成分分析手法を用いた研究<sup>3)</sup>なども行われているところである。また、日本機械学会では機械状態監視資格認証を行い、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、ポンプの異常診断は非常に重要である。しかしながら、現場で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。

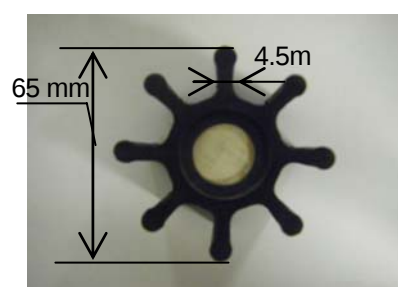
そこで本研究では、最近多用されているゴムインペラーポンプに着目し、ポンプの異常状態における振動を測定し、振動情報を用いたポンプの異常診断の可能性について検討を行うこととした。その結果、異常診断を行うパラメータとして、周波数尖り度が異常診断を行う上で非常に有効なパラメータであると共に、ポンプケーシング内のカム上部での計測が最も診断に適していることについて示す。

## 2 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1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) ギョムインペラーポンプの概要



(b) ギョムインペラーの概要

図1 ポンプの概要

## 2.1 実験装置

図2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SA-30を使用しており、Vベルトの回転数は696 rpm (11.6Hz) である。

図3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

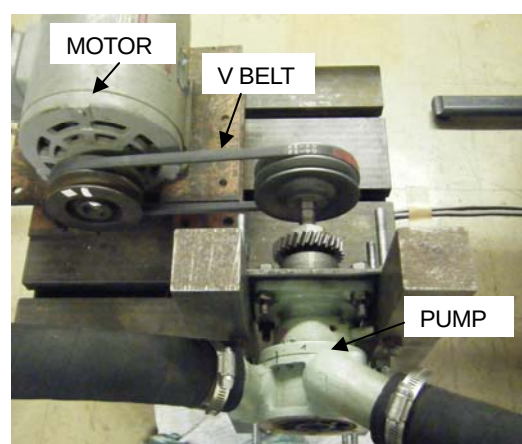


図2 ポンプとポンプ駆動に用いた電動機

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         |

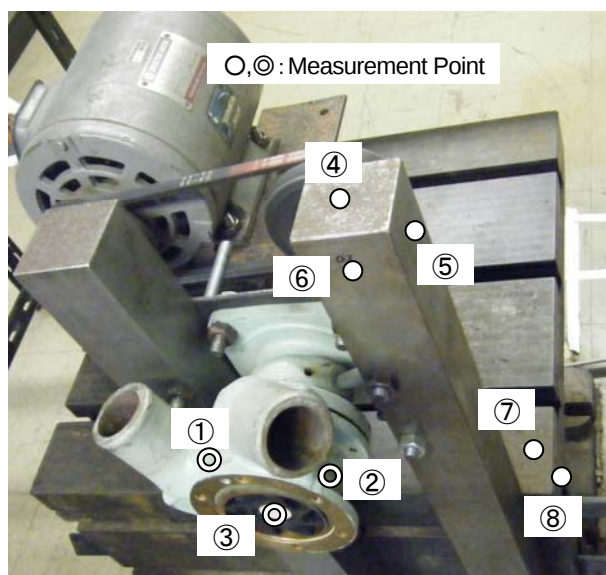


図3 計測位置の概要

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 D A-40) に保存し、パソコンで分析を行うこととした。

## 2.2 実験Ⅰ

まず、2.1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、ゴムインペラーに異常がある場合としては、図4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。

## 2.3 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5に示すようにゴムインペラーを



(a)ポンプ取付け時



(b) インペラーのみ

図4 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 |

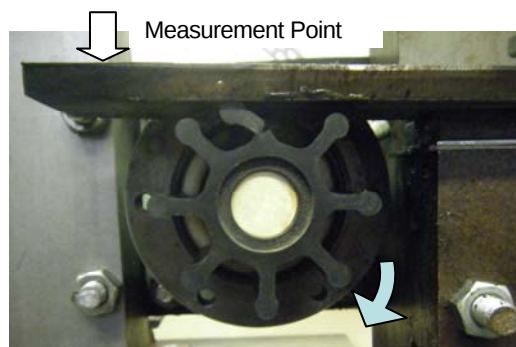


図5 計測位置及びゴムインペラーの概要

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   |

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とした。そのため、表3に示すように、インペラーの8枚の羽根のうち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

を軸方向に一樣に与え実験を行った。

### 3 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6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6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7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え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200Hz以下に表れてい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8に示

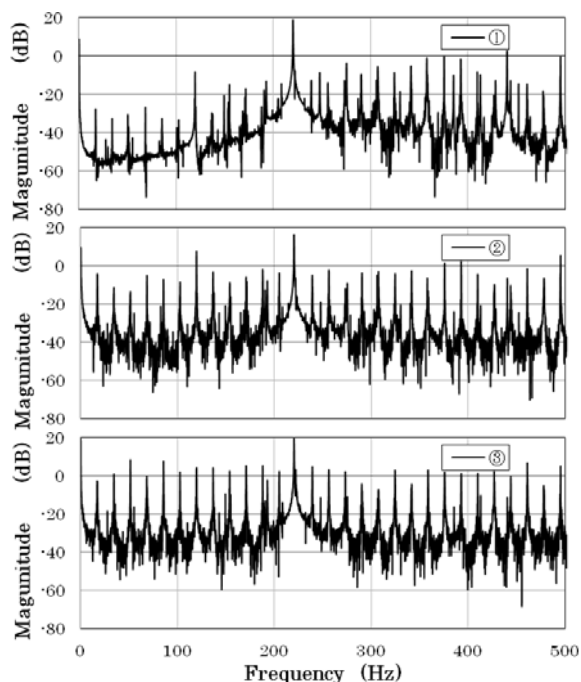
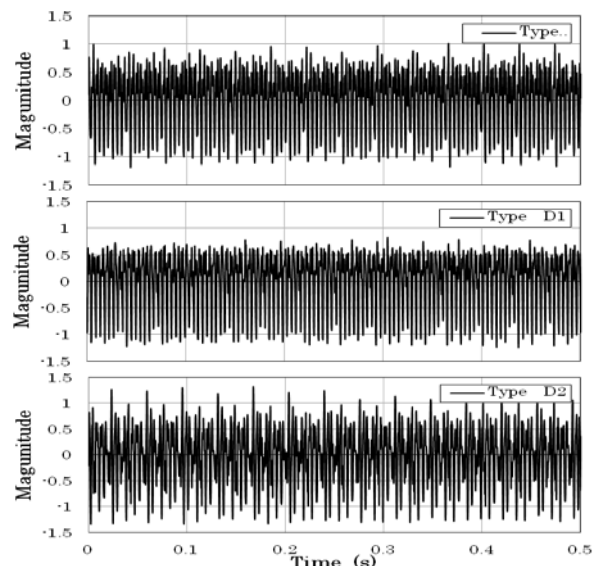
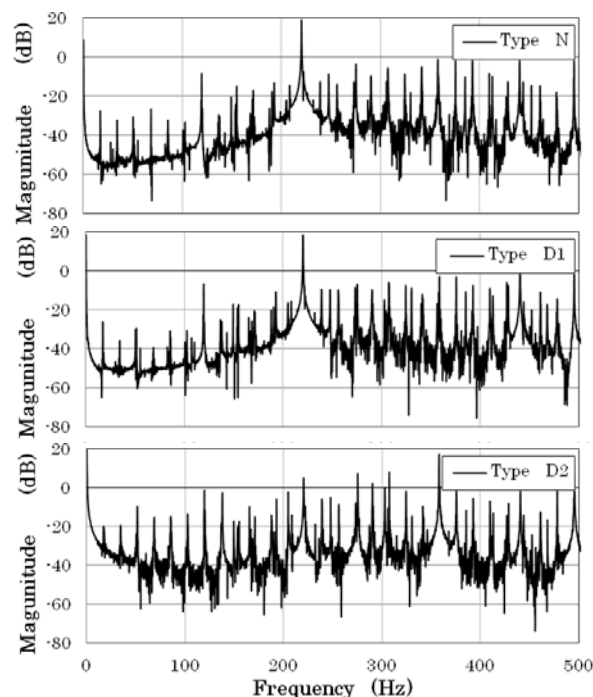


図6 ポンプ本体各部の周波数応答  
(上：鉛直方向、中：水平方向、下：軸方向)



(a) 時間応答波形



(b) 周波数応答波形

図7 実験Ⅰの実験結果

(インペラーの損傷による変化)

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、統計量の一つであり、正規分布に比べ鋭いピークで裾野が狭くなればなるほど正の大きな値を示す尖り度 $K_f$ を用いて解析を行うこととした<sup>4)</sup>。

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

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であり、 $\bar{P}$ は平均値、 $P_{rms}$ は実効値、 $N$ はデータの個数を表す。なお、ここでは尖り度の解析に1 kHz以下の周波数応答解析結果を用いることとした。

尖り度を求めた結果を図9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。

つぎに、実験Ⅱの周波数応答波形の例を図10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

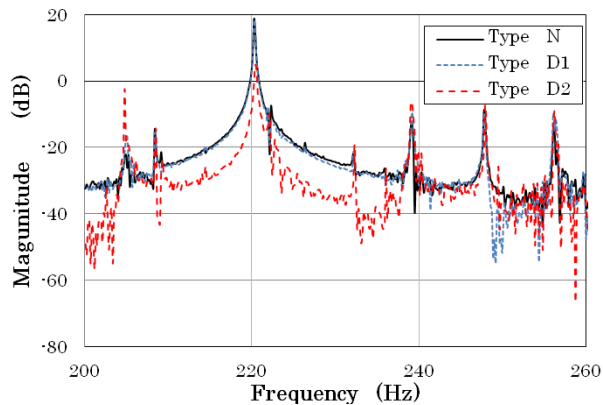


図8 実験Ⅰの周波数応答波形  
(ポンプ回転数の8次高調波成分付近)

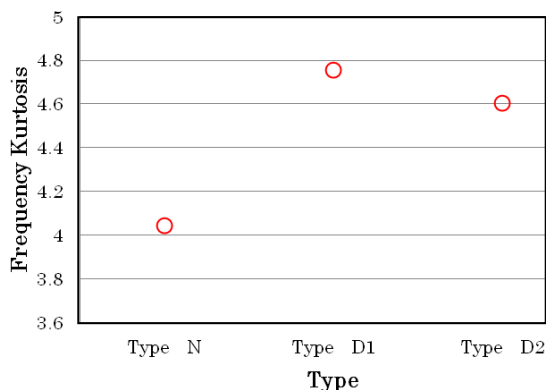


図9 実験Ⅰの周波数尖り度  
(インペラーの損傷による尖り度の変化)

り、損傷が羽根1枚の時は200Hz以下に表れる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。

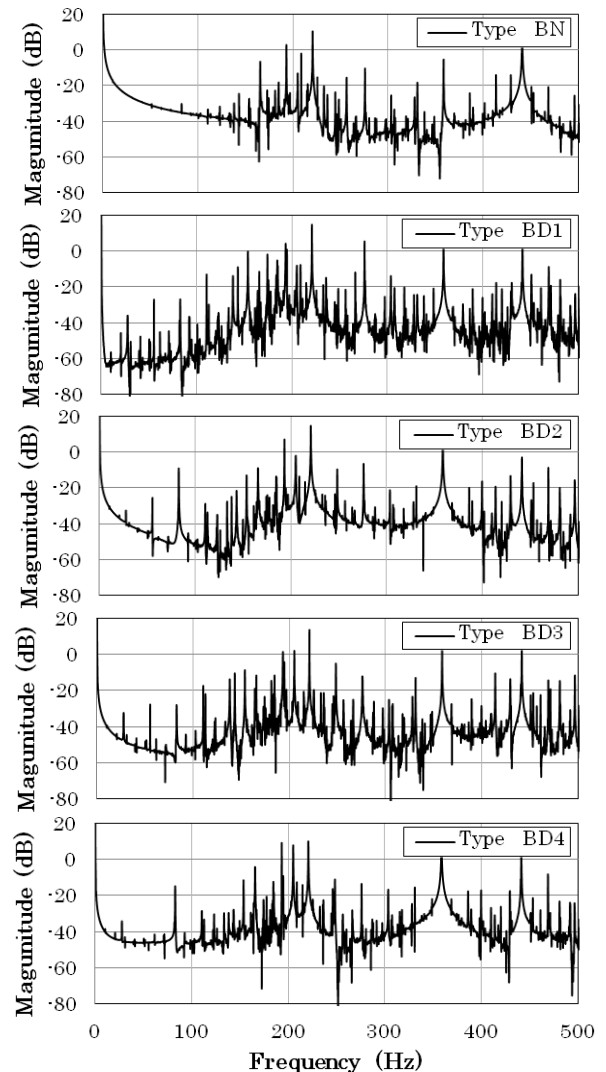


図10 実験Ⅱの周波数応答波形  
(インペラーの損傷による変化)

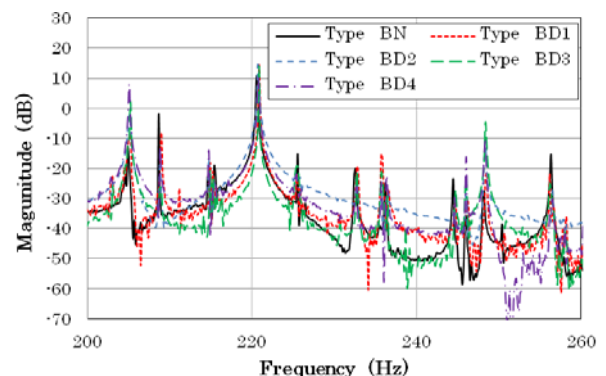


図11 実験Ⅱの周波数応答波形  
(ポンプ回転数の8次高調波成分付近)

また、図11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12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

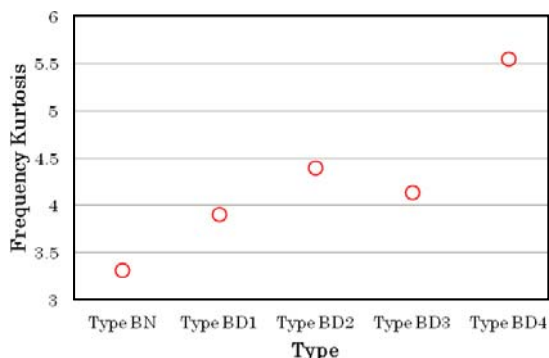


図12 実験Ⅱの周波数尖り度  
(インペラーの損傷による尖り度の変化)

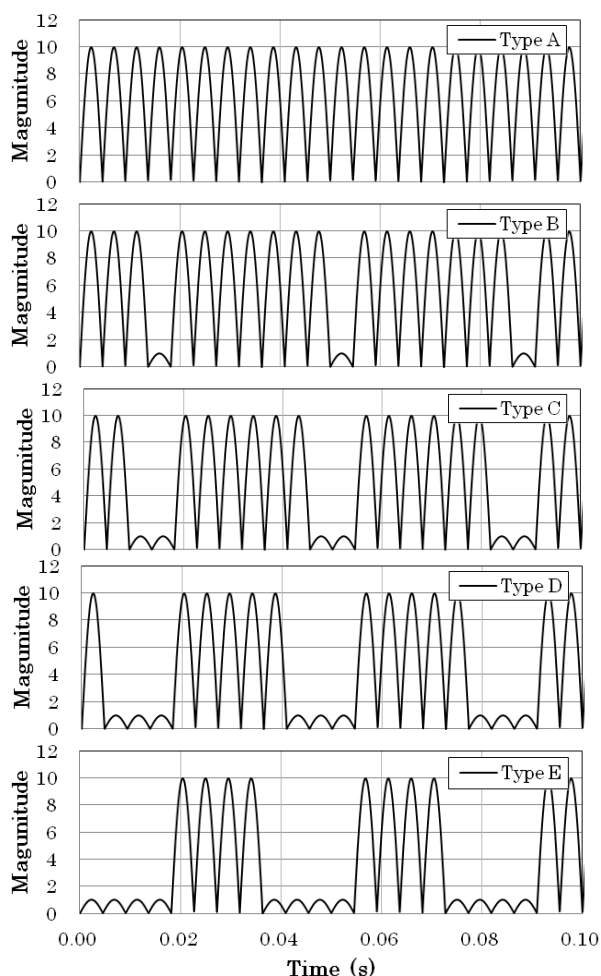


図13 簡易計算に用いる時間波形

評価ができるものと考えられる。

つぎに、実験Ⅱの結果について確認を行うため、図13に示すような時間波形に対して周波数分析を行った。なお、図13の時間波形はインペラーの8枚の羽根がそれぞれ順番にカムに押しつけられたときのカムの応答を想定したものであり、実験Ⅱを単純化したものと考えることができる。また、損傷を有する羽根の剛性は低いことからカムに与える力が小さいものと考えられる。そこで、損傷を有する羽根がカムにあたった場合には小さな力が加えられることを仮定し、図13のような時間波形を用いて解析することとしている。なお、計算におけるインペラーの損傷につ

表4 計算で考慮したインペラーの損傷

|        | 異常の有無 | 損傷の概要 |
|--------|-------|-------|
| Type A | 無     |       |
| Type B | 有     | 1枚    |
| Type C | 有     | 2枚    |
| Type D | 有     | 3枚    |
| Type E | 有     | 4枚    |

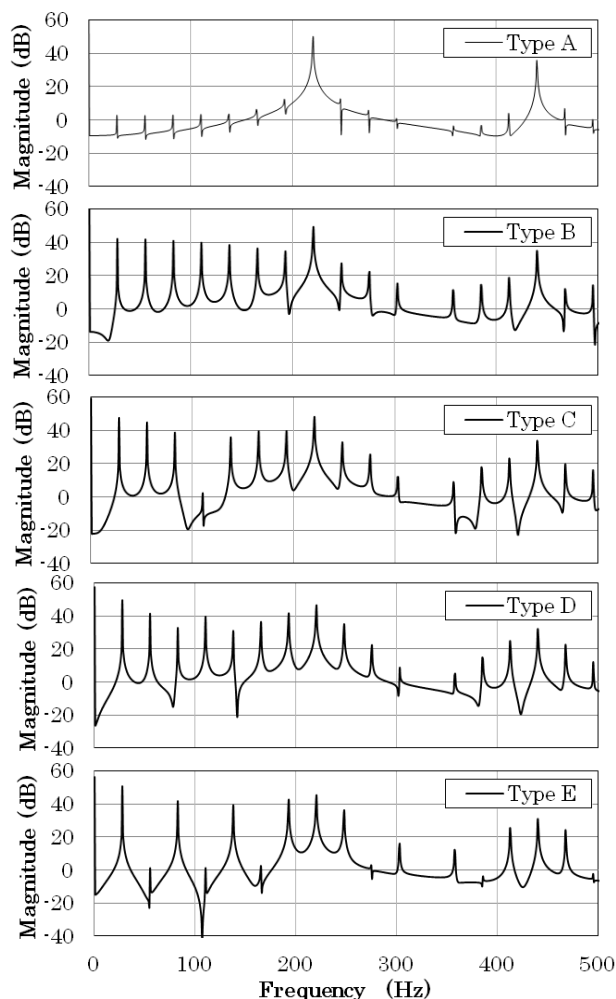


図14 簡易計算用時間波形の周波数分析結果

いては、実験Ⅱと同様に表4のような場合を考慮した。

そこで、解析結果を以下に示す。まず、図14は周波数応答波形を示している。この図をみると、実験Ⅱの結果と同様に、ポンプ回転数の高調波成分の周波数応答のピーク値に変化が表れていることがわかる。また、低次の高調波成分のピーク値に大きな変化のあることがわかる。さらに、8次高調波成分付近の応答波形においても実験と同様に裾野が狭くなり周波数応答曲線が鋭くなる傾向のあることがわかる。このことから、実験Ⅰ及び実験Ⅱの結果において、ポンプ回転数の高調波成分の周波数応答のピーク値の変化を評価することで、インペラーの異常の有無について診断できる可能性のあることがわかる。また、図15に尖り度を求めた結果を示す。この図をみると、実験Ⅰや実験Ⅱの結果と同様の結果が得られていることから、インペラーの損傷の有無について尖り度を用いることで評価が可能になることがわかる。

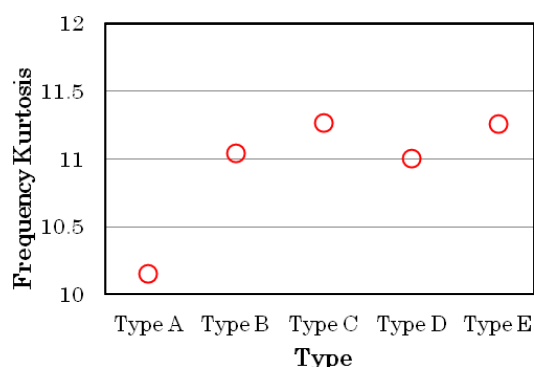


図15 簡易計算モデルの周波数尖り度

#### 4 結論

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8次高調波成分（220Hz）以下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詳細な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も、周波数応答や尖り度等のパラメータの有効性の検討を行うなど、ポンプの異常診断に関する検討を進めていく必要がある。

#### 謝辞

本研究は平成24年度「海上保安分野の諸問題に関する研究助成」の援助を受けてなされた。ここに深甚なる感謝の意を示す。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.