

Supported by  日本 THE NIPPON  
財団 FOUNDATION

平成 2 5 年度  
高感度軸受け摩耗センサーの技術開発  
成果報告書

平成 2 6 年 3 月

一般社団法人 日本船用工業会



## はしがき

本報告書は、BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて、平成 25 年度に一般社団法人日本船用工業会が実施した「高感度軸受け摩耗センサーの技術開発」の成果をとりまとめたものである。

船用機関の故障の中でも、主機のクランク軸損傷は、自航不能等に陥る極めて重要な問題であるが、未然に防止する有効な方法がないのが現状である。そこで、主機の潤滑油に含まれる軸受け摩耗粉の検出が可能な非磁性金属粉センサーを 2 年計画で技術開発を行うものである。

本開発は、平成 24 年度、25 年度の 2 年計画で、明陽電機株式会社に委託して実施しており、その成果をここにまとめたものである。

ここに、貴重な開発資金を助成いただいた日本財団、並びに関係者の皆様に厚く御礼申し上げる次第である。

平成 26 年 3 月  
(一社)日本船用工業会



## 目 次

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 1. 事業の目的                       | 1  |
| 2. 事業の目標                       | 3  |
| 2.1 本事業の最終目標                   | 3  |
| 2.2 平成24年度の目標                  | 3  |
| 3. 事業内容                        | 3  |
| 3.1 平成24年度の実施内容                | 3  |
| 3.2 平成25年度の実施内容                | 3  |
| 3.3 事業結果の概要                    | 4  |
| 3.3.1 平成24年度事業結果の概要            | 4  |
| 3.3.2 平成25年度事業結果の概要            | 4  |
| 4. 実施結果                        | 5  |
| 4.1 高感度センサーの設計・試作              | 5  |
| 4.1.1 高感度センサーの設計・試作            | 5  |
| 4.1.2 金属粉サンプルの製作               | 10 |
| 4.1.3 センサーの出力信号                | 11 |
| 4.2 高感度センサーの性能及び環境試験           | 12 |
| 4.2.1 振動試験                     | 12 |
| 4.2.2 高温試験                     | 14 |
| 4.2.3 高温油（100℃）通過試験            | 15 |
| 4.2.4 気密・耐圧試験                  | 16 |
| 4.3 実機試験のための準備                 | 17 |
| 4.3.1 中速4サイクルエンジンでの調査（1回目、2回目） | 17 |
| 4.3.2 中速4サイクルエンジンでの調査（3回目）     | 21 |
| 4.4 採取した潤滑油の分析                 | 24 |
| 4.4.1 採取した潤滑油の分析結果             | 24 |
| 4.4.2 金属粉の抽出                   | 25 |
| 4.5 潤滑油循環試験機の製作                | 27 |
| 4.6 磨耗粉数量カウント装置の製作             | 30 |
| 4.7 実機及び実船試験準備                 | 30 |
| 4.7.1 装置設計及び製作                 | 30 |
| 4.7.2 試験装置の改善                  | 31 |
| 4.8 実機試験                       | 32 |
| 4.8.1 高速エンジンでの実機試験と改善作業        | 32 |
| 4.8.2 高速エンジンの潤滑油分析             | 33 |
| 4.9 最適装備方法の確立                  | 36 |
| 4.10 実船試験                      | 36 |
| 4.10.1 新衛丸                     | 36 |
| 4.10.2 さがみ                     | 48 |
| 5. まとめ                         | 29 |



## 1. 事業の目的

船用4サイクルディーゼルエンジンの不具合の中で、クランク軸関係の損傷が、過給機やシリンダーユニットの損傷に次いで、高い確率で生じていることが船級協会などの調査機関から報告されている。特に主機のクランク軸受けの損傷は、エンジンの正常運転を阻害し、損傷が進行した場合には、自航不能などの船舶の運航に大きな影響を与える重大な問題となる。

このクランク軸の損傷は、回転摺動部の潤滑油切れから始まり、摺動部のメタルタッチ、摩擦による軸受けの発熱、軸受けの焼き付きとなって進行していく。一般的に主軸受けの異状は、軸受けや潤滑油の温度上昇により監視されているが、軸受け温度の上昇は、軸受けの異常摩擦により引き起こされた結果であり、トラブルの未然防止にはなり難い。

一方、温度上昇が確認される前のかなり早い段階から、軸受けの磨耗粉の量が徐々に多くなることが知られているため、潤滑油中の金属粉量を連続的に測定し、その傾向が把握できれば、軸受けの異常磨耗の予兆を捉えることが可能となる。この予兆が捕捉できれば、エンジン負荷を低減し、潤滑油の増圧などの対策を講じることで損傷の進行を抑え、重大なトラブルから回避することが可能となる。

実施社は、高感度の鉄粉磨耗センサーを(株)ディーゼルユナイテッド様と協同開発した。このセンサーは、船用ディーゼルエンジンのシリンダーライナーとピストンリング間の磨耗監視に供している。しかし、この鉄粉磨耗センサーは磁性粉を検出するセンサーであり、軸受けを構成するホワイトメタル（錫を主成分とした軸受け材料）や、ケルメット（銅鉛合金）及びオーバーレイ材質（鉛や錫）は、非磁性金属であるため、これらの軸受け磨耗粉を検出することができない。また、一般的に用いられている非磁性金属粉検出器は、表1に示すように軸受け磨耗センサーとして必要とされる機能の全てを満足しているものはない。これは、振動等過酷な環境、取り付け寸法の制約、油の汚損の影響を受けない、微粒粉の高感度検出など相反する厳しい必須事項が本センサーに求められるからである。

本事業では、表1の5項に示す渦電流式の原理を用い、以下に示す従来のセンサーには用いられていない技術を用いることで、粒径 $\phi 0.2\text{mm}$ 以下の非磁性金属粉も測定できるON-LINE型センサーを開発する。

センサーは、以下の機能を有するようにする。

- ①耐圧性を有する碍子管内に測定対象の潤滑油を常時流し耐圧性能と連続測定を可能にする
- ②検出コイルを複数個内蔵することで高感度検出を可能とする
- ③温度による抵抗変化を生じないコイル材料を用いることで計測値の安定性確保
- ④安定化した高周波電磁界発生回路、高速差動回路を用いることで計測値の安定性確保する
- ⑤機構部品、プリント基板、検出用碍子管などを小形化しセンサーの小形・堅牢化を図る

表1 各検出方法の機能比較表

| 番号 | 測定方式                    | 機能・特徴 |        |      |        |        |         |      | 実用の可否 |
|----|-------------------------|-------|--------|------|--------|--------|---------|------|-------|
|    |                         | 感度    | 混合物の影響 | 連続測定 | 実装可能形状 | 堅牢・耐久性 | 潤滑油の前処理 | 出力信号 |       |
| 1  | フェログラフイー目視での確認          | ○     | ○      | ×    | ×      | ×      | ×       | ○    | 否     |
| 2  | パーティクルカウンタによる粒子カウント     | ○     | ×      | ○    | ○      | ×      | ○       | ○    | 否     |
| 3  | ICP 発光分光分析アーク、プラズマ放電方式等 | ○     | ○      | ×    | ×      | ×      | ×       | ○    | 否     |
| 4  | 化学的／定量分析                | ○     | ○      | ×    | ×      | ×      | ×       | ×    | 否     |
| 5  | 渦電流式                    | ×     | ○      | ○    | ○      | ○      | ○       | ○    | 否     |
| 6  | 超音波式                    | ×     | ×      | ○    | ○      | ○      | ○       | ○    | 否     |
| 7  | 静電容量式                   | ×     | ×      | ○    | ×      | ○      | ○       | ○    | 否     |
| 8  | 電流導通法                   | ×     | ○      | ○    | ○      | ○      | ○       | ○    | 否     |

注記 比較項目の説明

1. 感度 粒径 0.2mm φ の非磁性金属を感知できるもの
2. 混合物の影響 気泡、カーボンなどの混入物質を金属摩耗粉と誤認識しないこと
3. 連続測定 油のつまりなどが生じずメンテナンス性に優れること
4. 実用可能形状 4サイクルエンジンに直接または配管に実装できる大きさであること
5. 堅牢・耐久性 実装に耐える耐振、耐熱、耐圧を有すること
6. 前処理 サンプル油の希釈等測定にあたって前処理が不要であること
7. 出力信号 データロガーなどにアナログまたはデジタル信号を出力できること

更に早期の実用化を実現するために、船用エンジンへの実装試験を行い、その最適装備方法や最適運用方法についても確立させる。

この高感度軸受け摩耗センサーを開発することにより、船用4サイクルディーゼルエンジンのクランク室内の潤滑油に含まれる微細かつ微量の金属磨耗粉を常時監視し異常磨耗の予兆を捉えることで、クランク軸の損傷に係わる重大事故の未然防止が可能となる。また、このことにより国土交通省が推奨している「高度船舶安全管理システム」のより一層の信頼性確保につながる。更に、安全規制に係わる船舶検査の方法等の合理化に取り組む環境整備の一助になるとともに、我が国造船関連技術の向上に資することができるものである。



## 2. 事業の目標

### 2.1 本事業の最終目標

- 1) 非磁性金属の検知粒径が $\phi 0.2\text{mm}$ 以下の高感度軸受け磨耗センサーを開発する。
- 2) 同センサーが連続使用に耐えることを実機試験で確かめる。
- 3) 工場運転での実機試験及び実船を行うことで最適装備方法及び最適運用方法を確立する。

### 2.2 平成24年度の目標

- 1) 非磁性金属の検知粒径が $\phi 0.2\text{mm}$ 以下の高感度軸受け磨耗センサーを開発する。
- 2) 実機及び実船のための装置設計を行う。

## 3. 事業内容

### 3.1 平成24年度の実施内容

#### 1) 高感度センサーの設計

実際に使用された潤滑油の分析など実用化に必要な情報を収集いたうえで、検出部、機構部及び信号処理電子回路の設計を行った。

#### 2) 高感度センサーの試作

作成した設計書に基づき、高感度センサーを試作した。

#### 3) 高感度センサーの性能試験

試作した高感度センサーの性能試験及び環境試験を行い、その評価を行なった。また、目標性能が得られるまで改良し、性能試験を行った。

#### 4) 実機試験のための準備

船用エンジンの実機試験のための装置・計装設計を行った。

### 3.2 平成25年度の実施内容

#### 1) 実機及び実船試験準備

船用エンジンの実機及び実船のための装置設計を製作した。

#### 2) 実機試験

船用エンジンの実機試験を行いセンサーの耐久性を確認した。また、実機エンジンから採取した潤滑油の分析を行い、センサーの測定値と比較・評価した。

#### 3) 最適装備方法の確立

工場運転での実機試験及び実船を行うことで、最適装備方法及び最適運用方法を確立した。

#### 4) 実船試験

3) 項で確立した装備方法にて実船試験を行い、実船に装備しても正常な計測が可能であることを確かめた。また、実機エンジンから採取した潤滑油の分析を行い、センサーの測定値と比較・評価した。

#### 5) 総合評価と報告書の作成

平成24年度の成果を盛り込んだ、本事業全体の報告書を作成した。

### 3.3 事業結果の概要

#### 3.3.1 平成24年度事業結果の概要

軸受け金属の磨耗粉である非磁性金属粉が、センサーの検出端であるコイルを通過する際に、金属内に発生する渦電流などの影響によりコイルのインダクタンスが変化する。この原理を応用したセンサーを設計、試作、評価試験を行い、更に、改良を行い、粒径が $\phi 0.2\text{mm}$ の非磁性軸受磨耗粉を検出することが出来た。

一方、センサーの目標感度が妥当であるか、本船にて使用された潤滑油中の金属粉を採取し、材料分析及び電子顕微鏡による観察を行った。また、平成25年度に行う実機試験の準備のために簡易の試験装置を製作し、実機事前試験を行った。事前試験は3回行い、逐次不具合部分の改善を行い、実際に金属粉を検出することが出来た。更に、この試験の際に採取した潤滑油を上記と同様に分析した。

上記の試験を踏まえ、社内でも同様の試験が出来るように、油循環試験装置を設計・製作し、これに金属粉を流し、今回開発した高感度軸受け磨耗センサーで金属粉を検出できることを確かめた。このセンサーの信号を受けて、その検出粒径を3分類し積算カウントができるカウンタ装置を製作した。

#### 3.3.2 平成25年度事業結果の概要

実機及び実船試験を行うことで、装置の改善すべき点が明確になり、25年度の事業内で以下のとおり解決した。

##### 1) 検出感度

実機、実船試験にて採取した金属粉のサンプルの分析から、24年度の事業で達成された検出最小粒径 $\phi 0.20\text{mm}$ の感度では、検出可能な金属粉の数量（検出率）が低いことが判明した。

改善：検出コイル、アンプ回路の改善などを行い、検出感度を $\phi 0.10\text{mm}$ まで高めた。

##### 2) 外乱対策

実機・実装試験において装置の位置、分割配置、装置近傍に配置されている機器からの影響を受け微小な検出信号が外乱信号に埋もれて検出不能となる。

改善：マルチプライヤ回路やアクティブフィルタ回路を付加することで外乱を減衰させた。

##### 3) 気泡の発生防止対策

潤滑油を吸引する装置内で、吸引側でキャビテーションによる気泡が発生し、この気泡を金属信号として誤検知する。

改善：潤滑油の温度が高く、粘性が低い場合のみ計測するよう、温度センサーを装置に付加し、低温時は計測リポーズを掛けた。また、吸引側の配管径を大きくすることで改善を図った。

## 4. 実施結果

### 4.1 高感度センサーの設計・試作

#### 4.1.1 高感度センサーの設計・試作

本センサーの性能は $\phi 0.5\text{mm}$ の粒径の非磁性体金属の検出が可能であった。このセンサーの感度を実用に供するように $\phi 0.2\text{mm}$ まで高めることが目標である。金属粉の粒径とセンサー感度は、粒径の3乗（体積）に比例する。従って、センサー感度を約16倍に高めることを目標とした。

センサーの原理は、検出端であるコイルを通過する際に、金属内に発生する渦電流などの影響により生じるコイルのインダクタンスの変化を応用したものである。このインダクタンスの変化を、コイルの共振周波数変化で捕らえ、この変化量から金属粉の大小を判定する。なお、アルミニウム、錫、銅などの非磁性金属はコイルのインダクタンスを下げ、また、鉄などの磁性体はインダクタンスを高めるように働く。

センサーには図 4.1.1.1 に示すように一對のコイルと LC 共振回路が内蔵されている。このコイルの中に潤滑油を流して、金属粉通過による各コイルの共振周波数の変化を、ミキシング回路を用いて測定する。

本開発事業ではこのセンサー部の共振回路、ミキシング回路の試作検討を行い、最適化した。また、周波数/電圧変換回路、電圧変化通過回路、バンドパスフィルター回路、マルチプライヤ回路（4 乗）、ピークホールド回路などを適切に設計・付加し感度を向上させた A 型を設計した。その結果 $\phi 0.20\text{mm}$ の金属粉を安定的に検知することが出来た。

また、これに留まることなく、堅牢性とコストダウンを目的とした B 型を設計試作した。図 4.2.1.2、4.2.1.3 に A 型の外形図及び外観写真を示す。図 4.2.1.4、4.2.1.5 に B 型の外形図及び外観写真を示す。

なお、各回路間の接続を図 4.2.1.6 に示す。

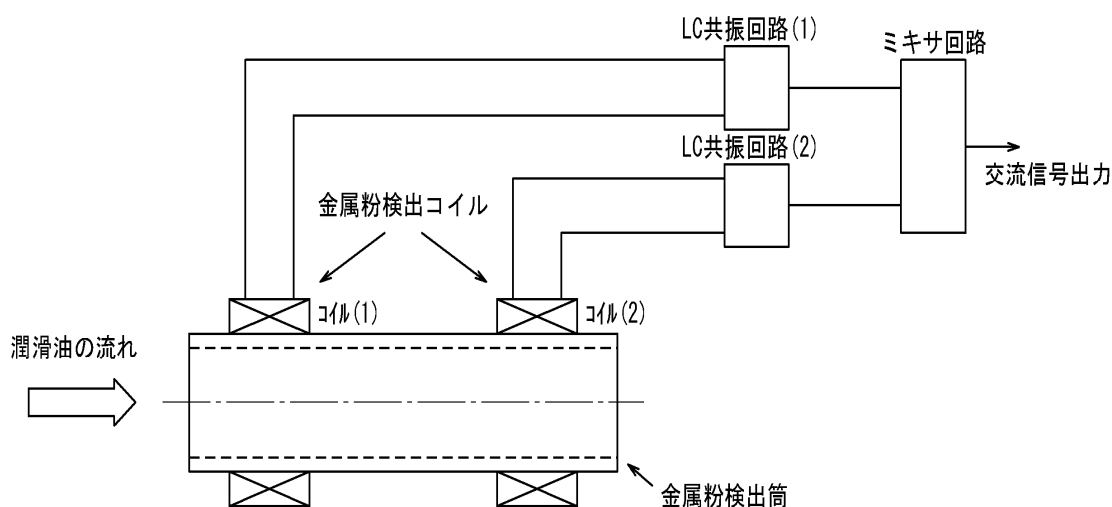


図 4.1.1.1 センサーの原理図

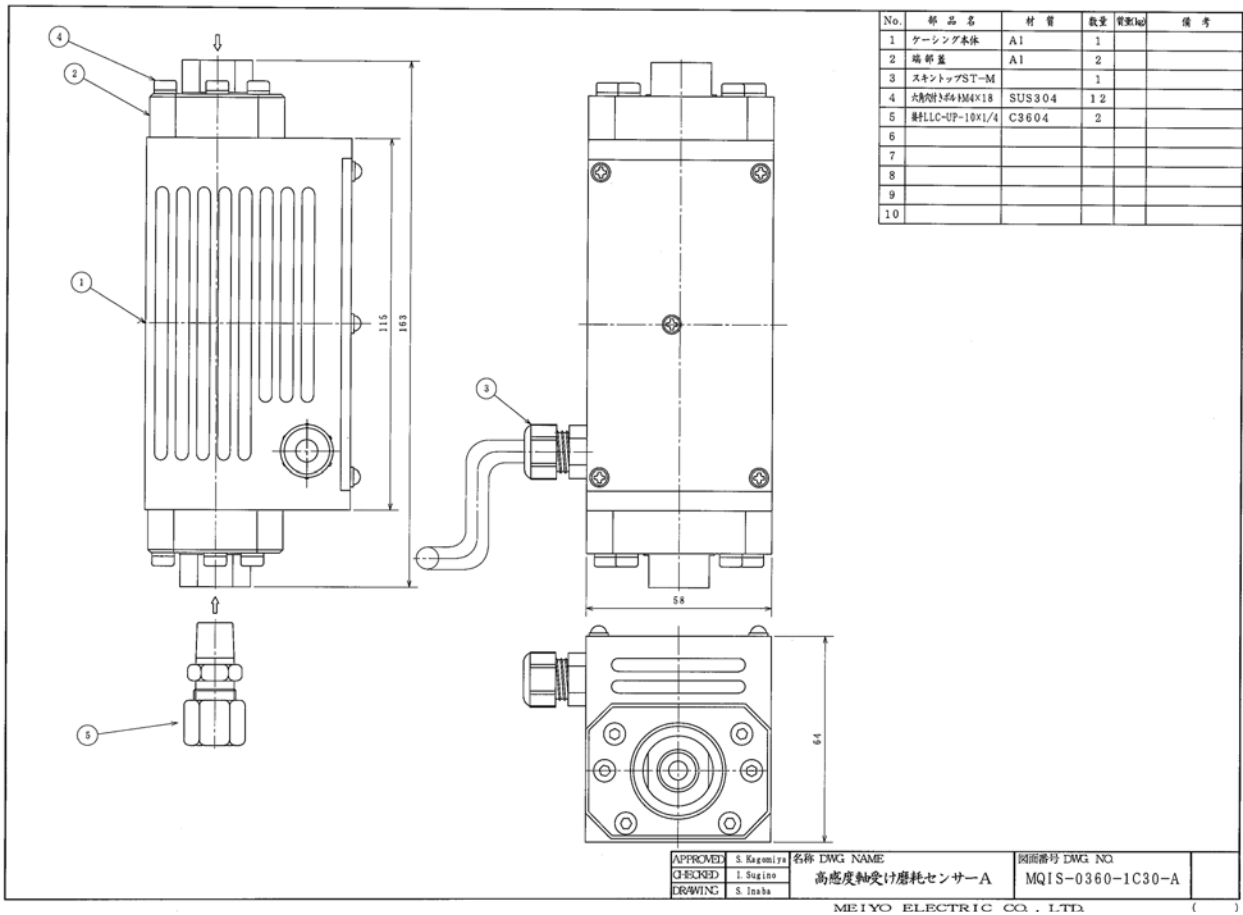


図 4. 1. 1. 2 高感度軸磨耗センサーA の外形図

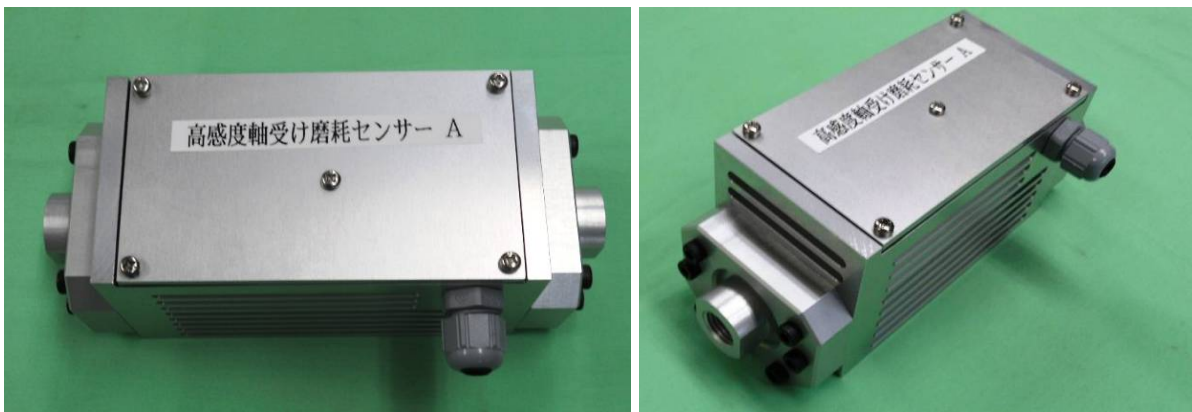


図 4. 1. 1. 3 高感度軸磨耗センサーA の外観写真

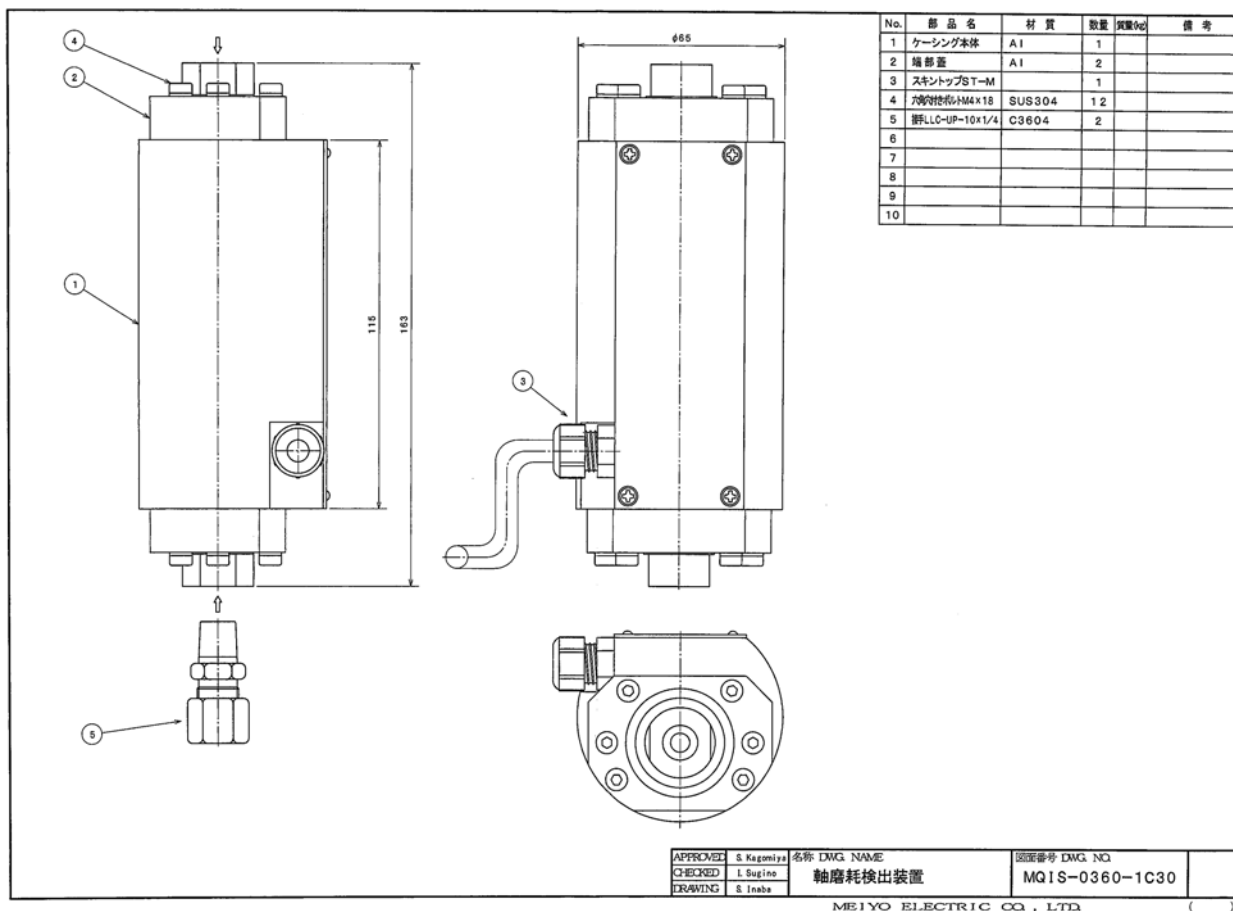


図 4. 1. 1. 4 高感度軸磨耗センサーB の外形図

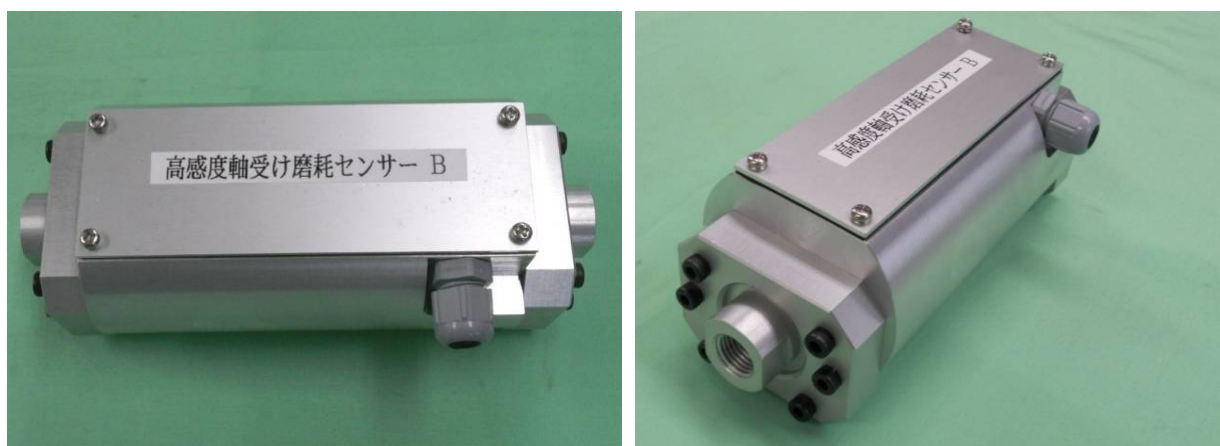


図 4. 1. 1. 5 高感度軸磨耗センサーB の外観写真

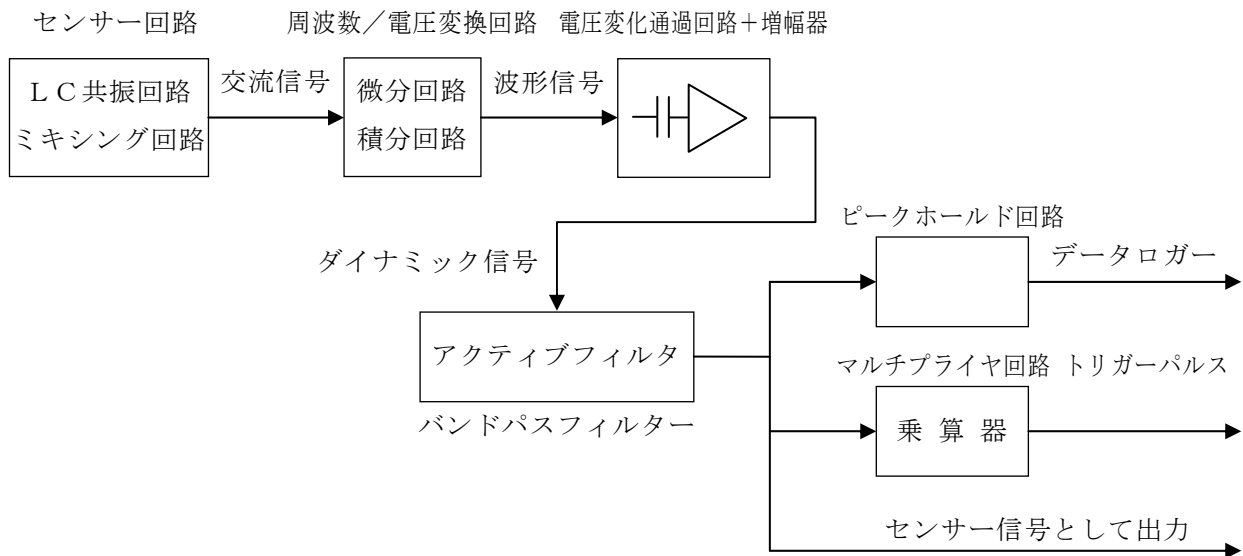


図 4.1.1.6 高感度回路構成

図 4.1.1.6 に示す構成回路の機能は以下のとおりである。

1) 周波数/電圧変換器 (以降 F/V 変換器という)

センサーからの信号は方形波の交流信号で、金属を検出するとその周波数が変化する。この変化をアナログ信号として捉え、オシロスコープで目視確認が出来るようにする。入出力特性は図 4.1.1.7 に示すように、0~100kHz の周波数に対して DC0~10V を出力する。直線性は±1.0%、応答速度は 1msec である。

2) 電圧変化通過回路+増幅器

本センサーは金属が通過するときの変化量を検出できれば良いため、カップリングコンデンサで変化信号だけを通過させ、後段の増幅器で約 100 倍増幅させる。

3) バンドパスフィルター

目標とする金属粉の粒径が小さいため、金属粉検出信号対ノイズ比率即ち S/N (シグナル/ノイズ) 比が小さい。φ0.2mm の金属粉の場合、S/N 比は 2/1 程度で金属粉の信号とノイズ信号とを識別し難い。そのために、ノイズを減衰させ、金属粉信号を明確にする目的で本回路を製作した。なお、このフィルターの減衰特性を 4.1.1.8 に示す。バンドパスフィルターのカットオフ周波数  $f_0$  は、金属粉がセンサー内を通過する速度 (約 1m/sec) を考慮して決めた。また、このフィルターは独立したローパスフィルターとハイパスフィルターとを組み合わせた。このフィルターから出力されたセンサー信号波形を図 4.1.1.9 に示す。

4) マルチプライヤ回路

ノイズと識別できない微弱な信号を際立たせ、その信号をトリガーとしてセンサー信号波形をメモリーする回路である。図 4.1.1.10 に示す水色の波形がセンサー波形で黄色の波形がマルチプライヤ波形である。乗算回路 (4 乗) で製作した。

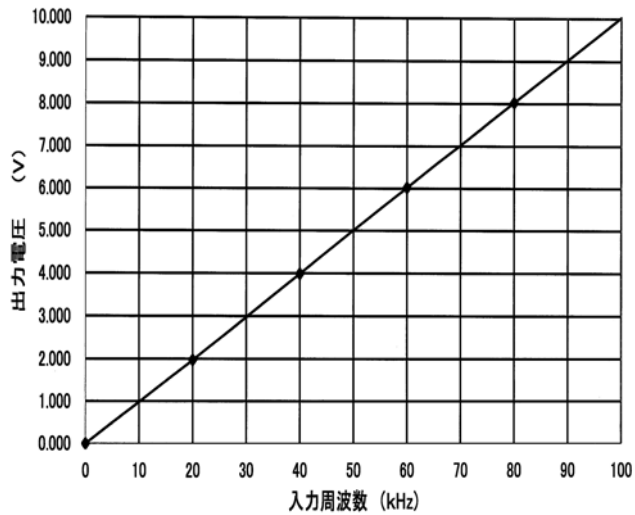


図 4.1.1.7 F/V 変換器の出力特性

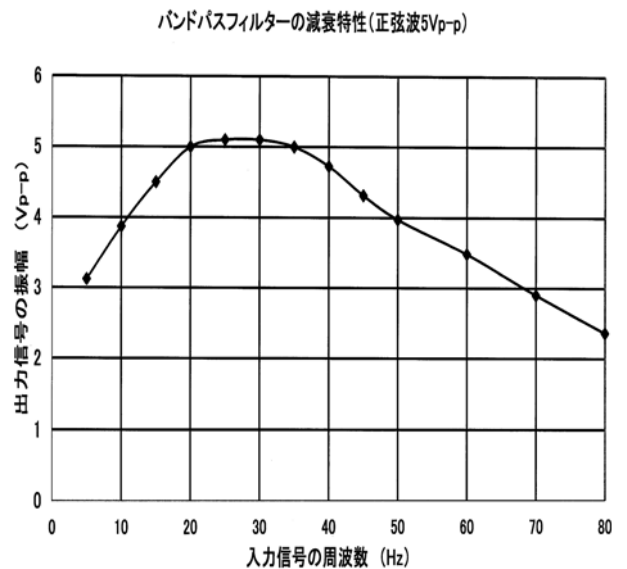


図 4.1.1.8 バンドパスフィルターの減衰特性

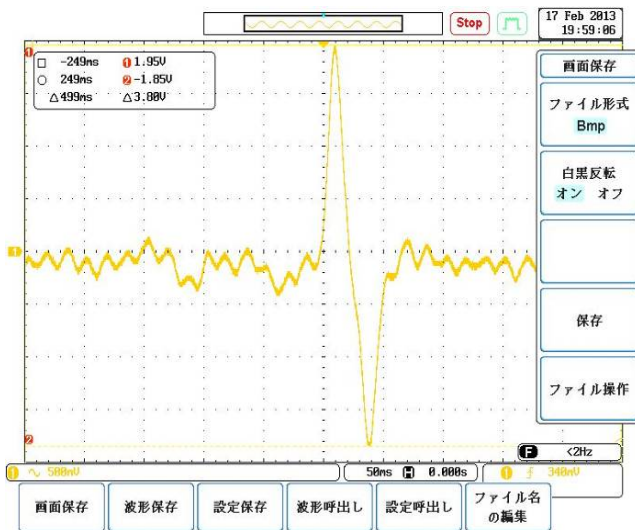


図 4.1.1.9 センサー信号波形

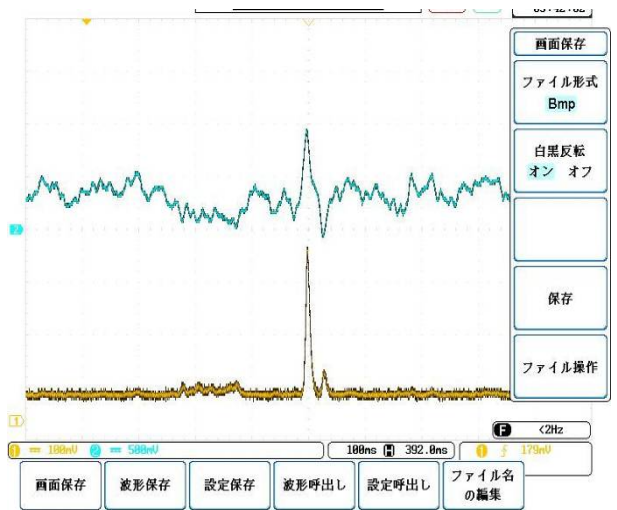


図 4.1.1.10 マルチプレイヤー波形



#### 4.1.2 金属粉サンプルの製作

サンプルとなる球形金属は極めて小さく、粒径も同一ではないので、選別のための各種ふるいを製作し、これにより合一粒径の金属を収集した。ふるいの寸法図と写真を4.1.2.1、4.1.2.2に示す。また、選別作業を図4.1.2.3に示す。

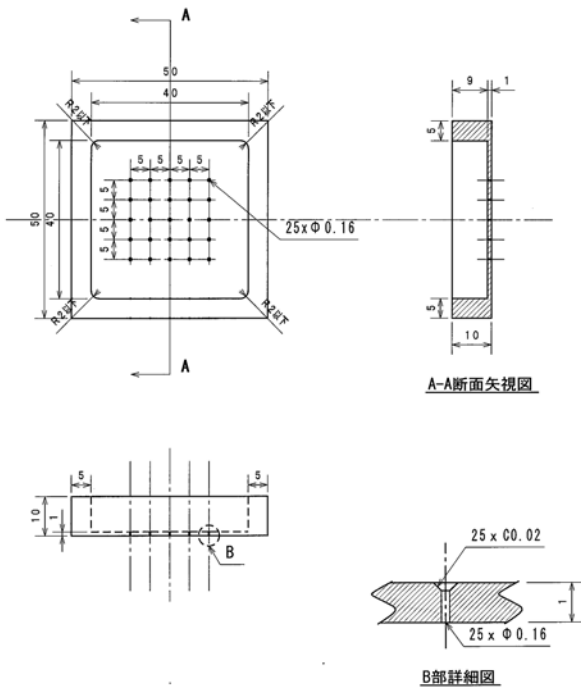


図 4.1.2.1 ふるいの寸法

また、この金属をピンセットでつまみやすくするために、図4.1.2.4に示すように、粘着テープに挟んで用いた。なお、薄いテフロン粘着テープは、センサー出力特性に影響を与え難い。



図 4.1.2.2 各種ふるい

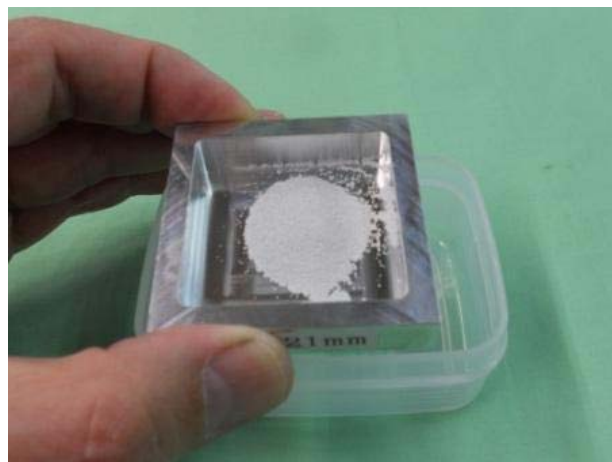


図 4.1.2.3 サンプル選別作業

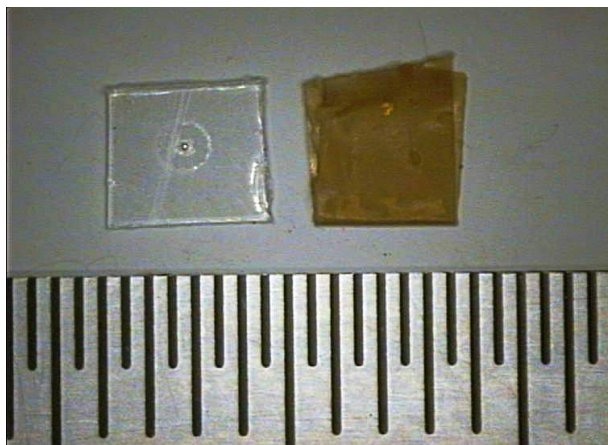


図 4.1.2.4 サンプル写真



図 4.1.2.5 サンプルのマイクロスコープ観察



#### 4.1.3 センサーの出力信号

4.1.2 項で述べた方法により選別したサンプル金属（アルミ粉）を用いて得られたセンサー信号波形を図 4.1.3.1、2、3 に示す。

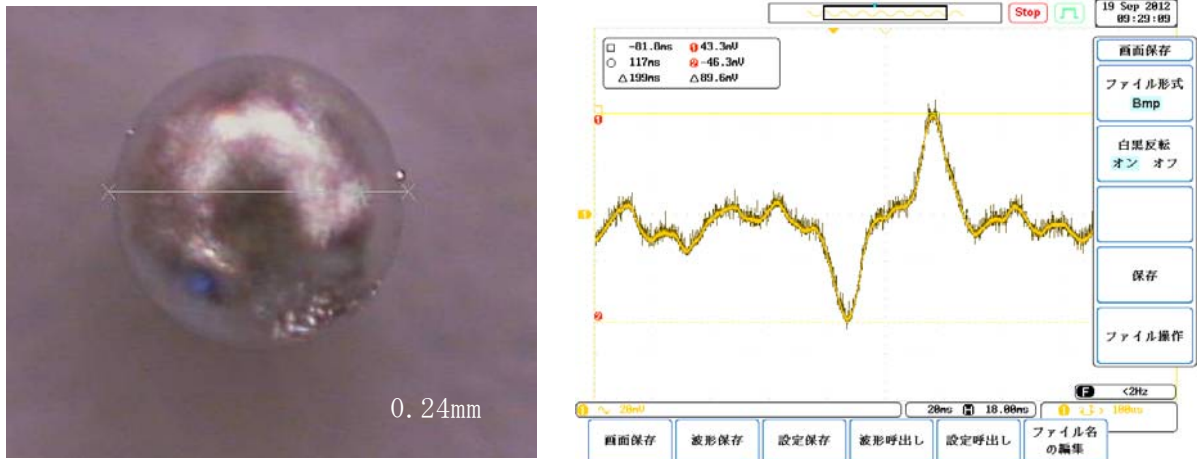


図 4.1.3.1 φ 0.24mm のサンプルとセンサー信号波形

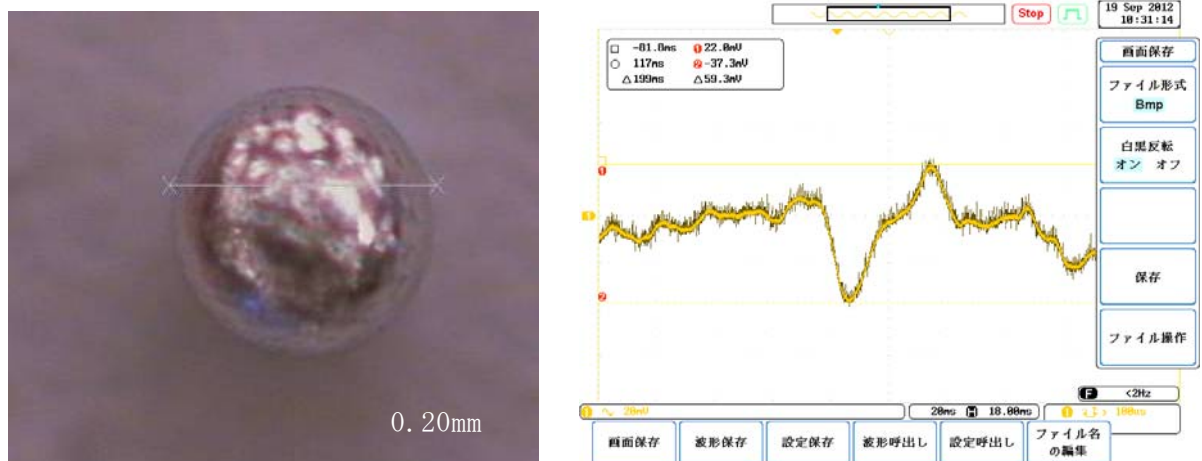


図 4.1.3.2 φ 0.20mm のサンプルとセンサー信号波形

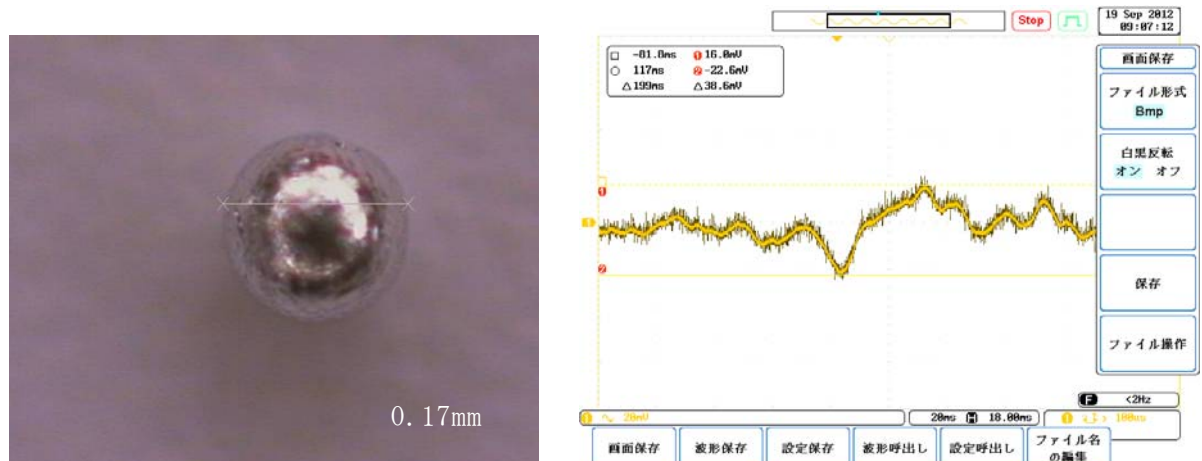


図 4.1.3.3 φ 0.17mm のサンプルとセンサー信号波形

アルミ粉の粒径とセンサーの出力信号の関係を図 4.1.3.4 に示す。この特性に金属粉の体積近似曲線を重ね合わせると完全に一致する。従って、センサーの出力信号の大きさは、金属粉の体積、即ち粒径の 3 乗に比例することが判る。

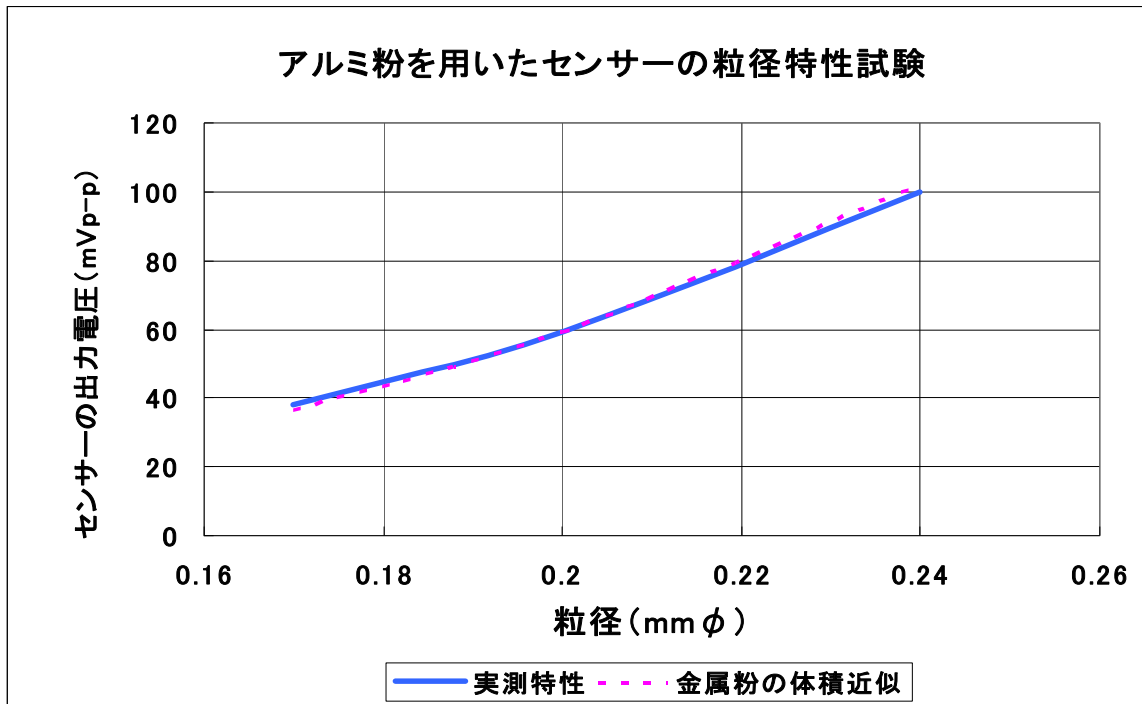


図 4.1.3.4 アルミ粉の粒径とセンサー信号との関係

以上に述べたとおり、目標としていた  $\phi 0.20\text{mm}$  の金属粉の検出が可能となった。

#### 4.2 高感度センサーの性能及び環境試験

本センサーは、ディーゼル機関に直接取り付けられるため、振動試験、高温試験、高温油通過試験及び気密・耐圧試験などの環境試験を行い実装に耐えることを確かめた。その結果を 4.2.1～4.2.4 に示す。なお、本試験では A 型センサーを用いた。

##### 4.2.1 振動試験

【試験方法】 機関直接取付け条件で実施

5～25Hz  $\pm 1.6\text{mm}$  25～100Hz 4.0G 掃引：1 オクターブ/min

耐久振動 各軸 30Hz 90 分

センサー本体と加振台に振動ピックアップを取り付け、センサー本体の振動増幅率を測定した。

【試験結果】

- 1) 調査振動 前後、左右、上下 3 軸とも共振は認められず正常であった。
- 2) 耐久振動後の動作試験 正常



図 4.2.1 振動試験全景

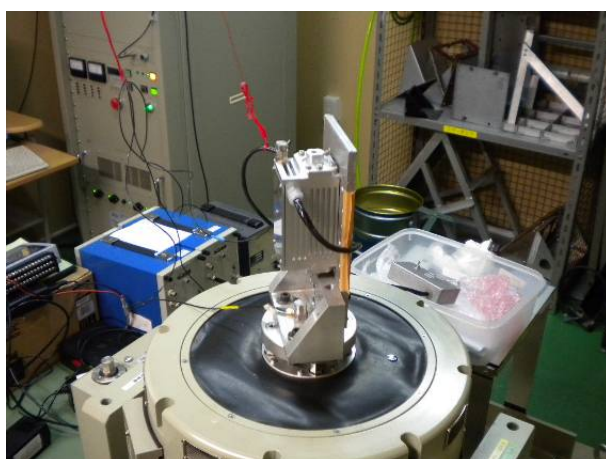


図 4.2.2 前後振動

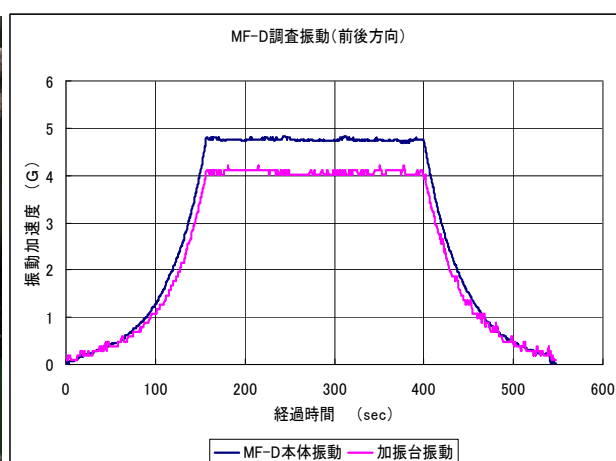


図 4.2.3 前後調査振動時の振動測定値

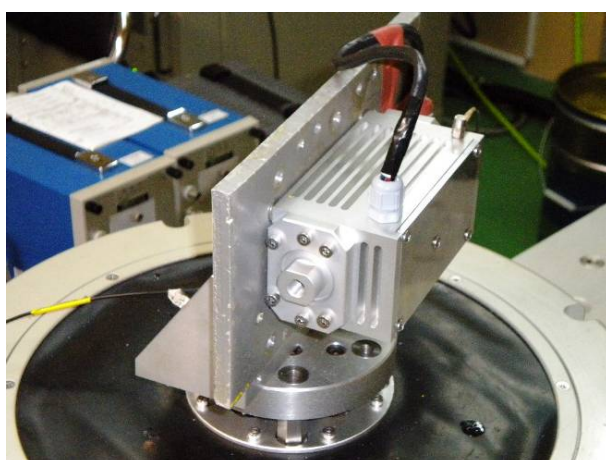


図 4.2.4 左右振動

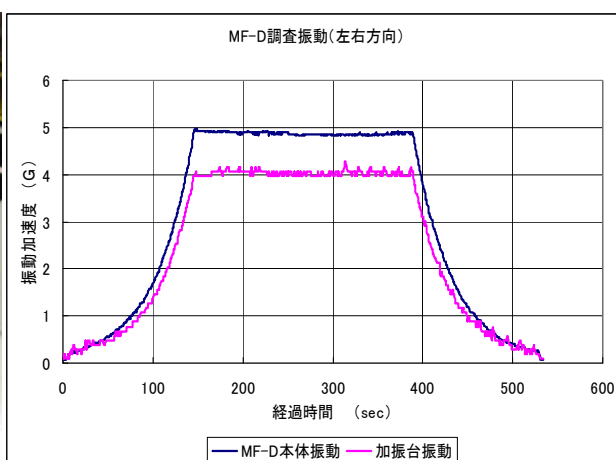


図 4.2.5 左右調査振動時の振動測定値





図 4.2.6 上下振動

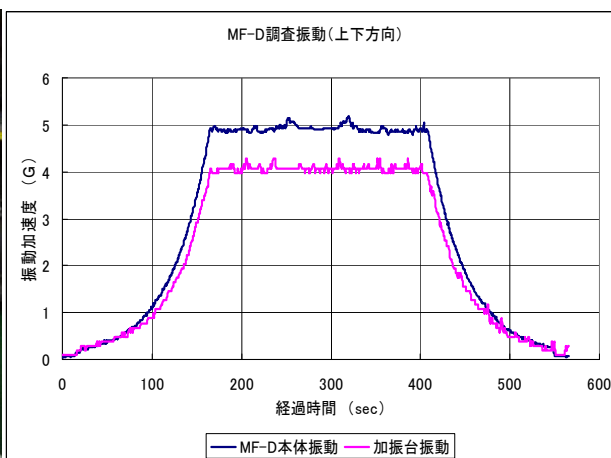


図 4.2.7 上下調査振動時の振動測定値

#### 4.2.2 高温試験

【試験方法】 70℃の高温槽内にセンサーを2時間放置し動作試験を行った。

なお、サンプル金属粉は、 $\phi 0.5\text{mm}$ の銅粉を使用した。金属粉の粒径と本センサーの出力との関係から $\phi 0.5\text{mm}$ サンプル金属粉で正常に動作すれば $\phi 0.2\text{mm}$ の検出も可能で、また、扱い易さと油に流し易さとを考慮し、大きい金属粉を用いた。

【試験結果】 正常に検出した。



図 4.2.8 高温試験装置全景

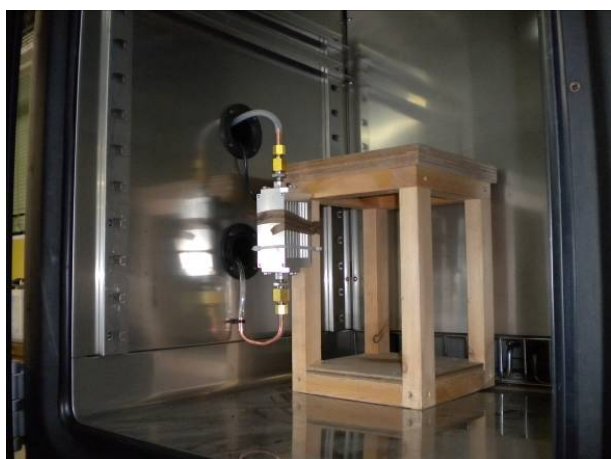


図 4.2.9 高温試験槽内部



図 4.2.10 給油

#### 4.2.3 高温油（100℃）通過試験

【試験方法】 100℃（油温の低下を考慮し油を 110℃に加熱）の油をセンサーに注油しミキシング回路の周波数を測定すると共に動作確認を行った。周波数変化は試験中の F/V コンバータの出力変化記録から逆算した。

【試験結果】 周波数の変化は、図に示すように 45kHz から 63kHz に変化したが、計測レンジの 100kHz を越えず計測可能状態であった。  
また、変化後の状態で  $\phi 0.5\text{mm}$  の銅粉を通して正常に動作することを確認した。

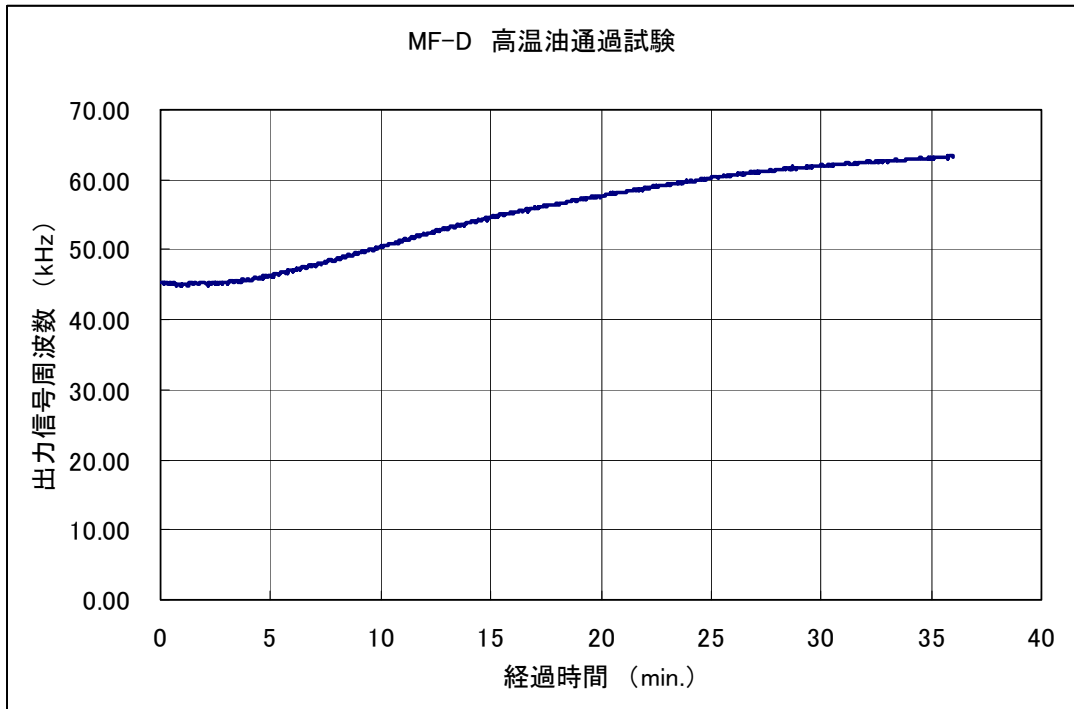


図 4.2.11 ミキシング回路出力周波数変化



図 4.2.11 試験装置全景（写真左はオイルバス）

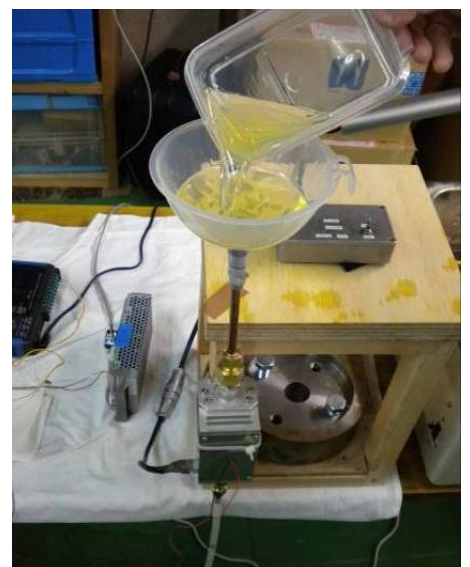


図 4.2.12 注油状態

#### 4.2.4 気密・耐圧試験

【試験方法】 センサーに 1.5MPa の空気圧を 15 分間加え、破管及び漏れを確かめた。

【試験結果】 破管は生じず図 4.2.14、15 に示すように空気漏れも生じなかった。



図 4.2.13 耐圧試験全景



図 4.2.14 試験スタート時の圧力表示



図 4.2.15 15 分後の圧力表示

試験の結果、表 4.2.1 に示すとおり、エンジン実装の環境でも正常に動作することが確認された。

表 4.2.1 試験結果

| No. | 試験項目              | 試験結果   | 備考（試験条件）                       |
|-----|-------------------|--|--------------------------------|
| 1   | 振動試験<br>調査振動、耐久振動 | 共振点は認められず、耐久振動後の動作も正常に動作した                                 | 5~100Hz 4G<br>耐久：30Hz 4G 90分/軸 |
| 2   | 高温試験              | 高温状態で金属粉を通し、正常に検出することを確認した。                                | 70℃ 2時間                        |
| 3   | 高温油通過試験           | 高温油の通過時、の周波数は変化したが発振は停止せず正常に動作した。<br>45kHz から 63kHz に変化した。 | 100℃ 高温油                       |
| 4   | 気密・耐圧試験           | 漏れ、破管は生じず。   | 1.5MPa 空気圧 15分                 |

#### 4.3 実機試験のための準備

以下の目的で実機試験を行った。

- 1) 平成25年度のエンジン実機試験のための予備調査
- 2) センサーの感度や環境性能などセンサー開発の目標が適切か否か判断するため
- 3) 実際に運転されているエンジンから採取した潤滑油中の金属粉を分析調査しセンサーの目標感度が適切であるか否かを検証する

##### 4.3.1 中速4サイクルエンジンでの調査（1回目、2回目）

1,300kW出力の中速4サイクルエンジンで、汎用性の高い機種を選定し、工場運転時に本センサーを取り付けた。

###### 4.3.1.1 試験装置の構成

測定装置の構成を図4.3.1.1に示す。潤滑油は、エンジン付きの潤滑油ポンプから取り出し、バルブを介して軸受け磨耗センサーに引き込み、後段に接続されたフィルターを介してエンジンのオイルパンに戻した。なお、後段のフィルターは、センサーに流す油量に見合ったオートバイ用のフィルターを用いた。フィルター用ケースはアルミ棒を切削して製作した。なお、2回目から流量計を潤滑油ポンプとセンサー間に取り付けた。

センサー信号はF/V変換器の信号をストレージオシロスコープに取り込むのと同時にピークホルダ回路で検出パルスを残存させ、これをデータレコーダに記録し、金属粉の通過が認識できるようにした。

図4.3.1.2、3に機側写真、図4.3.1.4に計測機器の設置状態、図4.3.1.5にフィルターの構成及び図4.3.1.6にフィルターの構造図を示す。

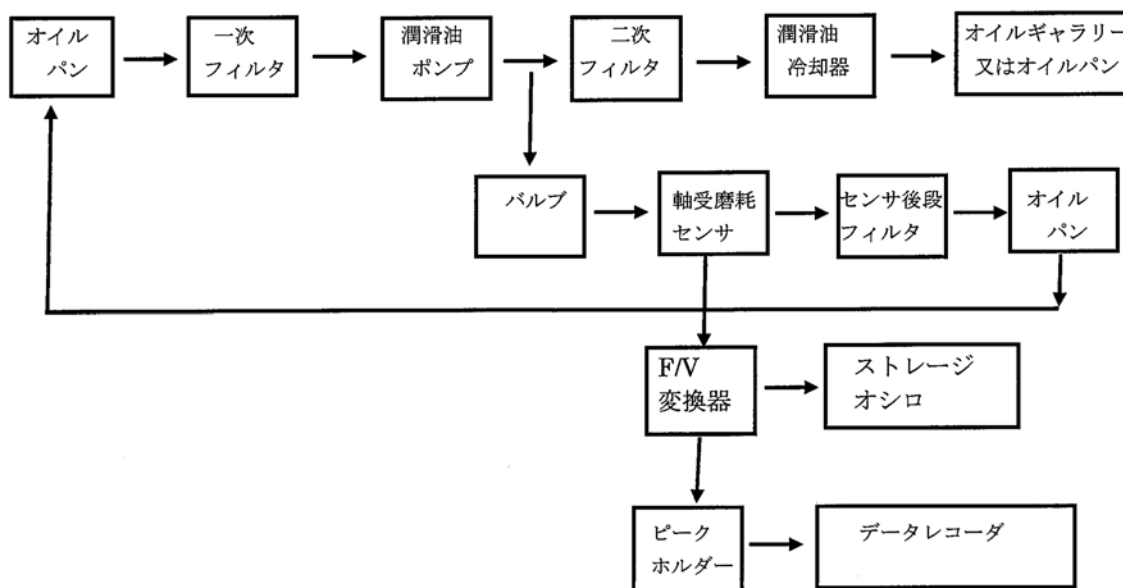


図 4.3.1.1 測定装置系統図





図 4.3.1.2 測定装置機側全景

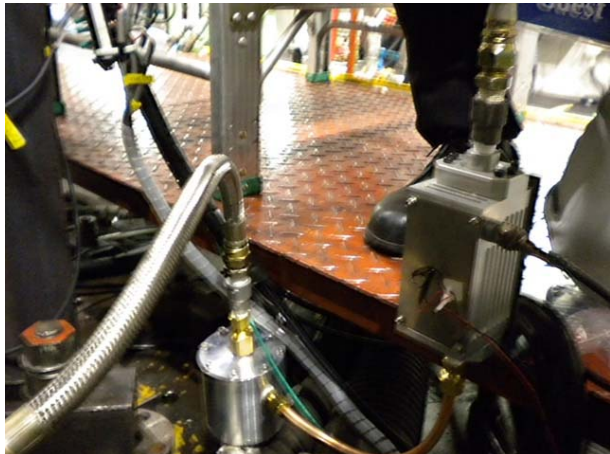


図 4.3.1.3 機側センサーとフィルター



図 4.3.1.4 計測機器の設置状態



図 4.3.1.5 フィルターの構成

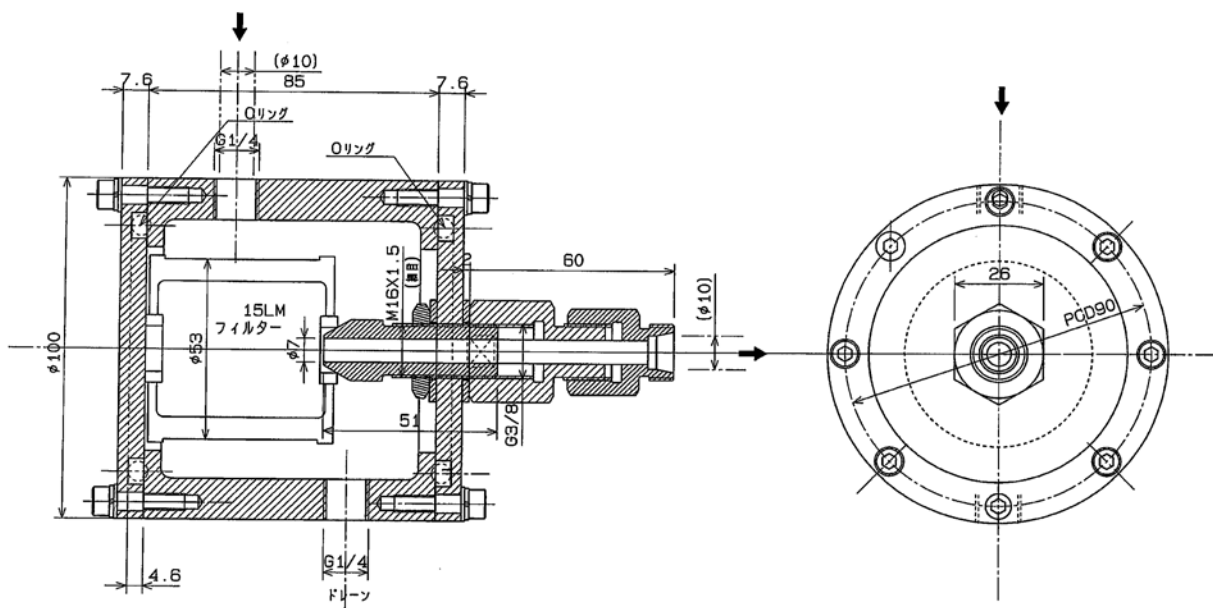


図 4.3.1.6 フィルターの構造図



#### 4.3.1.2 試験結果

エンジンの潤滑油ポンプから直接潤滑油を引き込んだので、流速の早い潤滑油がセンサー内を流れた。一回目の試験は流量計を取り付けず試験を行ったので、4.3.1.3項に示す計算にて流速を計算した。その結果は、16.5m/sec と非常に早いことが判った。センサー内の潤滑油流入管はφ6mm とセンサー以外の配管より細くなっているためにこの状況となった。この早い流速では金属の検出が出来ないと判断し、徐々にバルブを絞り、金属粉検出が出来るように流量を加減した。

流量を加減した結果、捕捉した金属粉検出信号の数は少なかったが、金属粉を検出することが出来た。本試験で検出した金属粉の信号を図4.3.1.7に示す。また、ピークホールド信号の記録データを図4.3.1.8に示す。

図4.3.1.9～10に採取（フィルターに付着）した金属の拡大（マイクروسコープ）写真を示す。なお、金属粉の分析結果を巻末の資料1に掲げる。

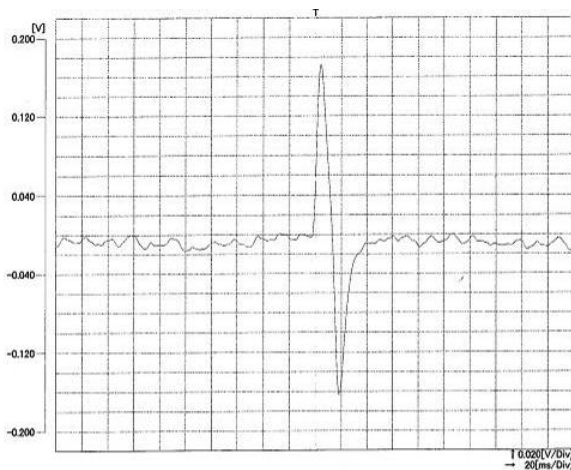


図 4.3.1.7 金属粉の検出信号

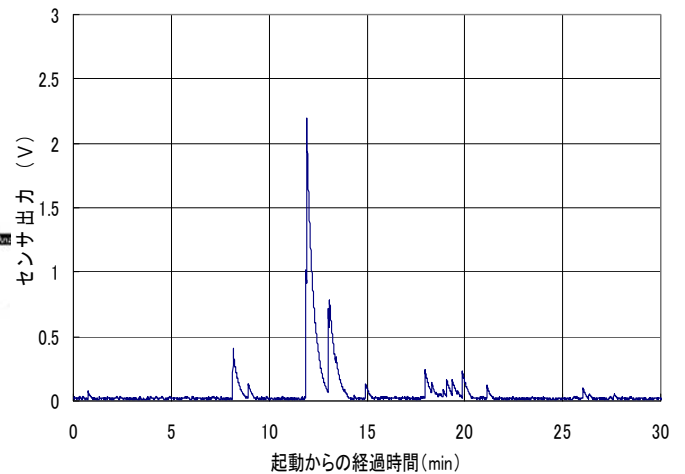


図 4.3.1.8 ピークホールド信号の記録データ



図 4.3.1.9 採取した金属粉  
(長さ 約 0.4mm)

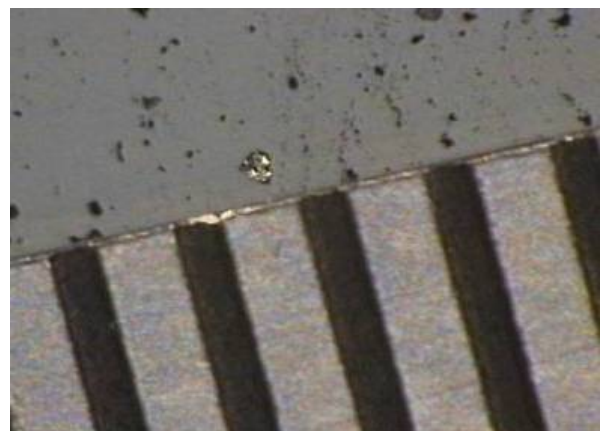


図 4.3.1.10 採取した金属粉  
(粒径 約 0.2mm)

### 4.3.1.3 流速計算

エンジン運転で使用された潤滑油の諸特性、温度、圧力及び断面積からセンサー内を流れる潤滑油の流速を計算する。

1秒間に流れる流量を計算し、流速を求める。

条件：ガラス管内の流れを層流と仮定する。

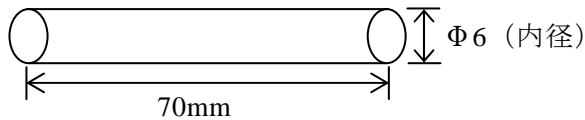
運転状況：L.O. 温度 73°C、圧力 0.53Mpa

使用流体：マリン T104 (JX 日鉱日石)

密度：0.8976 g/cm<sup>3</sup> (15°C)

動粘度：142.9 mm<sup>2</sup>/s (40°C)      14.54 mm<sup>2</sup>/s (100°C)

センサー内潤滑油



ポアズイユの法則

$$\cdot \alpha = 8 \mu Q \div \pi a^4 \quad - \text{①}$$

$\alpha$  : 圧力勾配 (Pa)

$\mu$  : 粘性係数 (Pa · s)

$Q$  : 流量 (m<sup>3</sup>/sec)

$a$  : ガラス管内半径 (m)

$$\cdot \nu = \mu \div \rho \quad - \text{②}$$

$\nu$  : 動粘度 (m<sup>2</sup>/sec)

$\rho$  : 密度 (kg/m<sup>3</sup>)

#### 1. 油温 73°C時の粘性係数

(1) 73°Cの時の密度  $\rho$  を求める。

膨張係数  $0.7 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$  とすると、 $\rho = 0.863 \text{ (g/cm}^3\text{)} = 863 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

(2) 73°Cの時の動粘度  $\nu$  を求める。

40°C及び100°Cの動粘度より

対数グラフの近似曲線から算出すると  $\nu = 40 \text{ (mm}^2\text{/s)} = 40 \times 10^{-6} \text{ (m}^2\text{/s)}$

(3) 73°Cの時の粘性係数  $\mu$  を求める。

②式より  $\mu = \nu \times \rho$

$$\mu = 863 \text{ (kg/m}^3\text{)} \times 40 \times 10^{-6} \text{ (m}^2\text{/s)}$$

$$= 3.452 \times 10^{-2} \text{ (kg/ms)} = 0.0345 \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$$

## 2. 流量計算

①式より

$$\cdot Q = \alpha \pi a^4 \div 8 \mu \quad - \text{③}$$

ここで各値は、

$$\alpha = 0.5 \text{ (MPa)} = 0.5 \times 10^6 \text{ (Pa)} \quad \dots \text{全圧力がセンサー内で損失したと仮定}$$

$$\mu = 0.0345 \text{ (Pa} \cdot \text{s)} \quad \dots \text{1項(3)より}$$

$$a = 3 \text{ (mm)} = 0.3 \times 10^{-6} \text{ (m)}$$

③式に代入し、流量を求める。

$$Q = 0.5 \times 10^6 \times \pi \times (3 \times 10^{-3})^4 \div 8 \times 0.0345$$

$$= 4.61 \times 10^{-6} \text{ (m}^3\text{/s)}$$

$$= 0.461 \text{ (l /sec)}$$

## 3. 流速計算

$$\cdot V = Q \div S \quad - \text{④}$$

V : 流速 (m/sec)

$$\cdot S = \pi \times a^2 \quad - \text{⑤}$$

S : ガラス管内面積 (m<sup>2</sup>)

⑤を④に代入し計算すると

$$V = 4.61 \times 10^{-6} \div \pi \div (3 \times 10^{-3})^2$$

$$= 16.5 \text{ (m/sec)}$$

よってセンサー内を流れる油の流速は、16.5m/sec と計算される。

### 4.3.2 中速4サイクルエンジンでの調査 (3回目)

漁船主機用として数多く搭載されている 600kW 出力の4サイクルエンジンにセンサーを実装し、工場運転時に試験を行った。

図 4.3.2.1 に示す機器構成で試験を行った。今回は、機器側にトロコイドポンプを設け、潤滑油はエンジンのオイルパンから引き込んだ。トロコイドポンプは流量調整器が付属されており、約 4 リットル/min の流量で試験を行った。センサー内を流れる潤滑油の速度は 9m/sec である。

図 4.3.2.2、3 に機側試験機器、また、図 4.3.2.4、5 に計測機器を示す。

図 4.3.2.6、7 は金属粉の写真で、図 4.3.2.6 は非磁性金属、図 4.3.2.7 は鉄粉が燃焼残渣である炭素に付着したものである。この2個の金属の検出信号は逆特性を示す。今回捉えた金属粉信号を、非磁性金属と鉄粉とに分けて図 4.3.2.8 及び図 4.3.2.9 に示す。

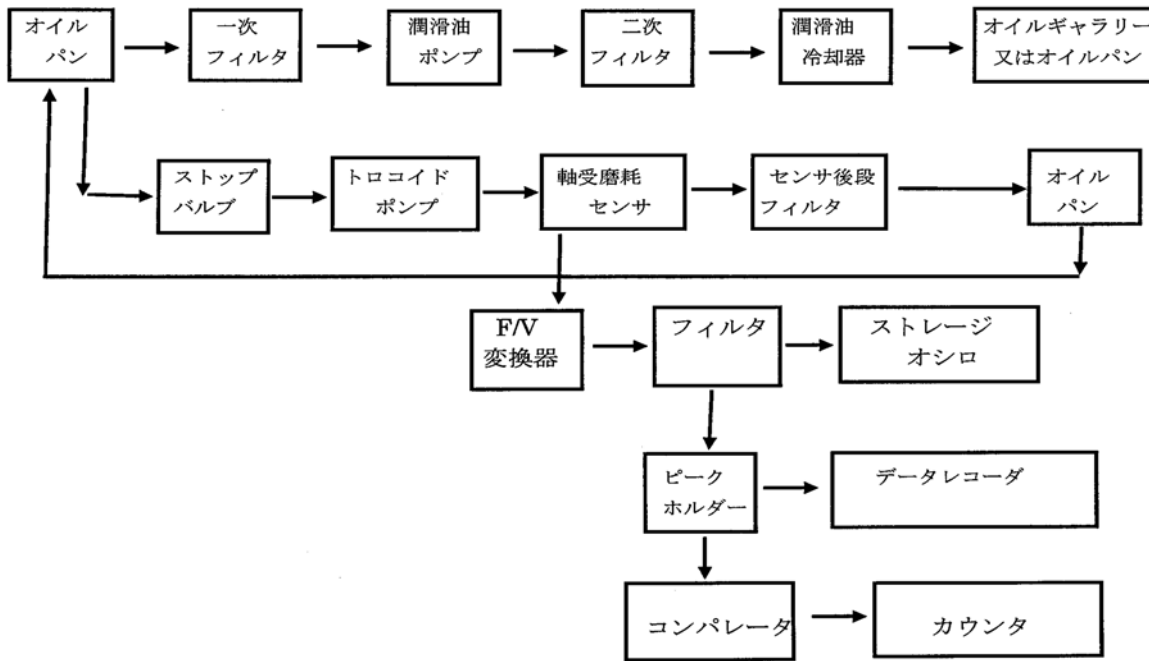


図 4.3.2.1 測定装置系統図

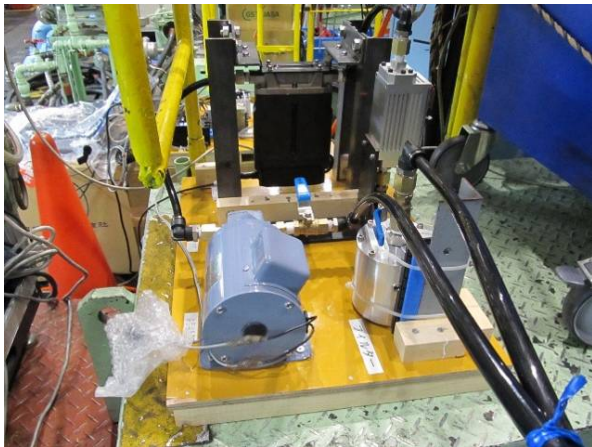


図 4.3.2.2 機側試験機器 (1)

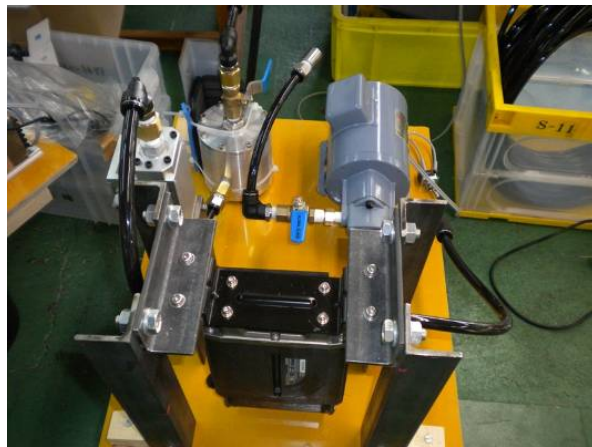


図 4.3.2.3 機側試験機器 (2)



図 4.3.2.4 計測機器 (1)



図 4.3.2.5 計測機器 (2)



図 4.3.2.6 非磁性金属粉拡大写真



図 4.3.2.7 鉄粉付着した炭素

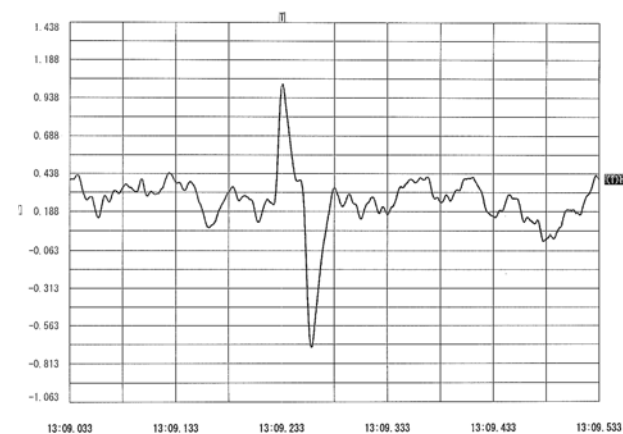
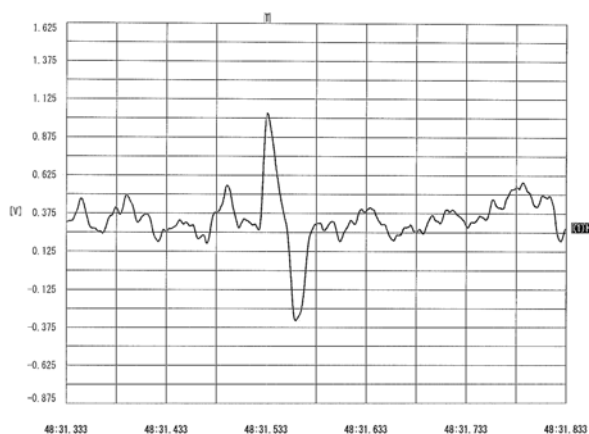
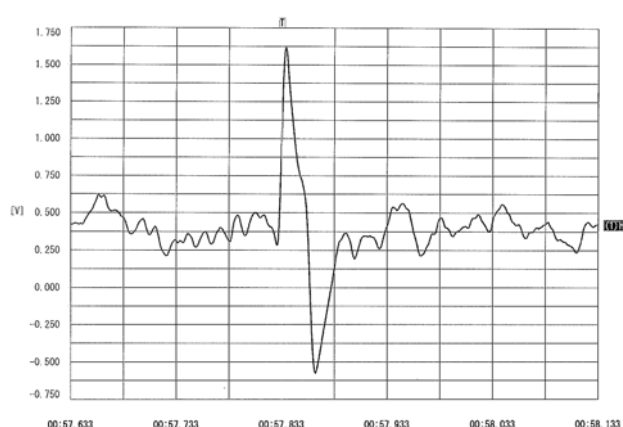
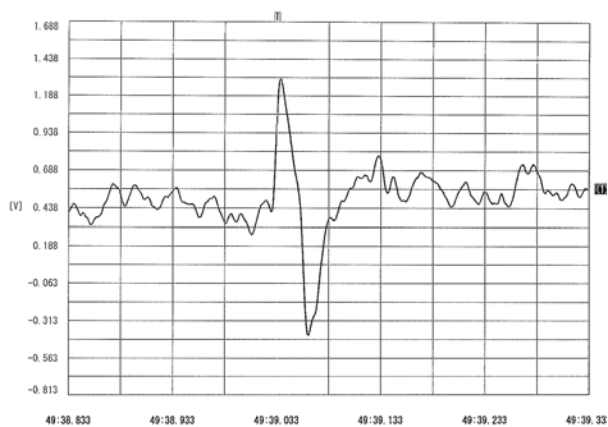


図 4.3.2.8 非磁性金属検出信号波形



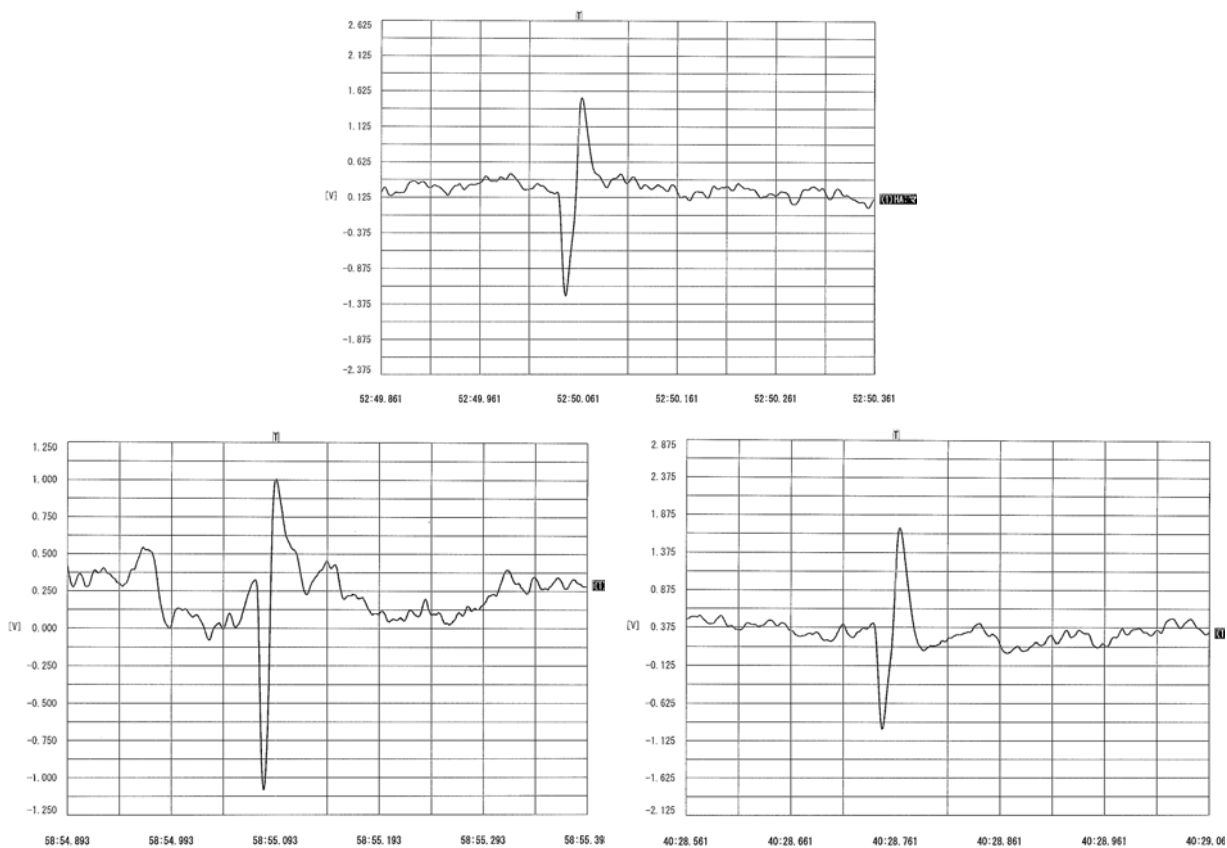


図 4.3.2.9 強磁性金属 (Fe) 検出信号波形

#### 4.4 採取した潤滑油の分析

##### 4.4.1 採取した潤滑油の分析結果

以下の潤滑油を採取し、その中に含まれる金属粉の粒径と材料分析を図 4.4.1.1 に示す分析装置で調査した。その分析結果を表 4.4.1.1 及び資料 1 に示す。



図 4.4.1.1 材料分析装置 (EPMA-1610)

- 1) 分析依頼先 日本軽金属株式会社 グループ技術センター
- 2) 定性分析に使用した測定器  
     エックス線マイクロアナライザーシステム EPMA-1610 (島津製作所社製)
- 3) 分析依頼内容 金属粉の定性分析と走査型電子顕微鏡による撮影

表 4.4.1.1 材料分析結果表

| 採取場所          | 調査結果の概要                                 |
|---------------|---|
| 漁船操業中／遠心分離機   | 粒径が小さく、Fe 粉が多い                          |
| 同 上           | 粒径が小さく、Cu 粉が多い                          |
| 実機試験 (1、2 回目) | 粒径が大きく Al 粉が多い                          |
| 同 上           | 粒径が小さく、Fe 粉と Al 粉が半々                    |
| 実機試験 (3 回目)   | 粒径の大きな Al 粉が存在するがほとんど<br>細かい Fe、Al、Sn 粉 |
| 同 上           | 粒径の細かな Fe、Al、Cu 粉                       |

#### 4.4.2 金属粉の抽出

金属粉の抽出は、図 4.4.2.1、2 に示すように、フィルターを分解し、図 4.4.2.3、4 に示すようにその表面を希釈液であるベンゼンを用い、フィルター表面から掻き落とす。さらに、希釈液で油分を取り除き、金属粉や炭素の固形分を沈殿させる。その後図 4.4.2.5~7 に示すように、沈殿液をフィルターに流し、固形分を抽出する。この作業では、天婦羅油用フィルター、和紙など種々試したが、60 $\mu$ m メッシュのフィルターが目詰まりを生ぜず最も使い易かった。



図 4.4.2.1 フィルターの分解 (1)



図 4.4.2.2 フィルターの分解 (2)



図 4.4.2.3 フィルターからの掻き落とし作業



図 4.4.2.4 油分の分離作業



図 4.4.2.5 和紙フィルター



図 4.4.2.6 天婦羅油用フィルター



図 4.4.2.7 60  $\mu$ m メッシュフィルター



#### 4.5 潤滑油循環試験機の製作

社内で実機試験と同様の試験が出来るように、油循環試験装置を設計・製作した。これに金属粉を流し、今回開発した高感度軸受け摩耗センサーで金属粉を検出できることを確かめた。

試験装置の概要図を図 4.5.1 に、配管系統図を図 4.5.2 に、装置の外観及び試験風景の写真を図 4.5.3、4 に示す。また、本装置に軸受け摩耗センサーを装備し、測定した信号波形を図 4.5.5、6 に示す。なお、本装置に流した金属粉の粒径は  $\phi 0.19\sim 0.21\text{mm}$  である。

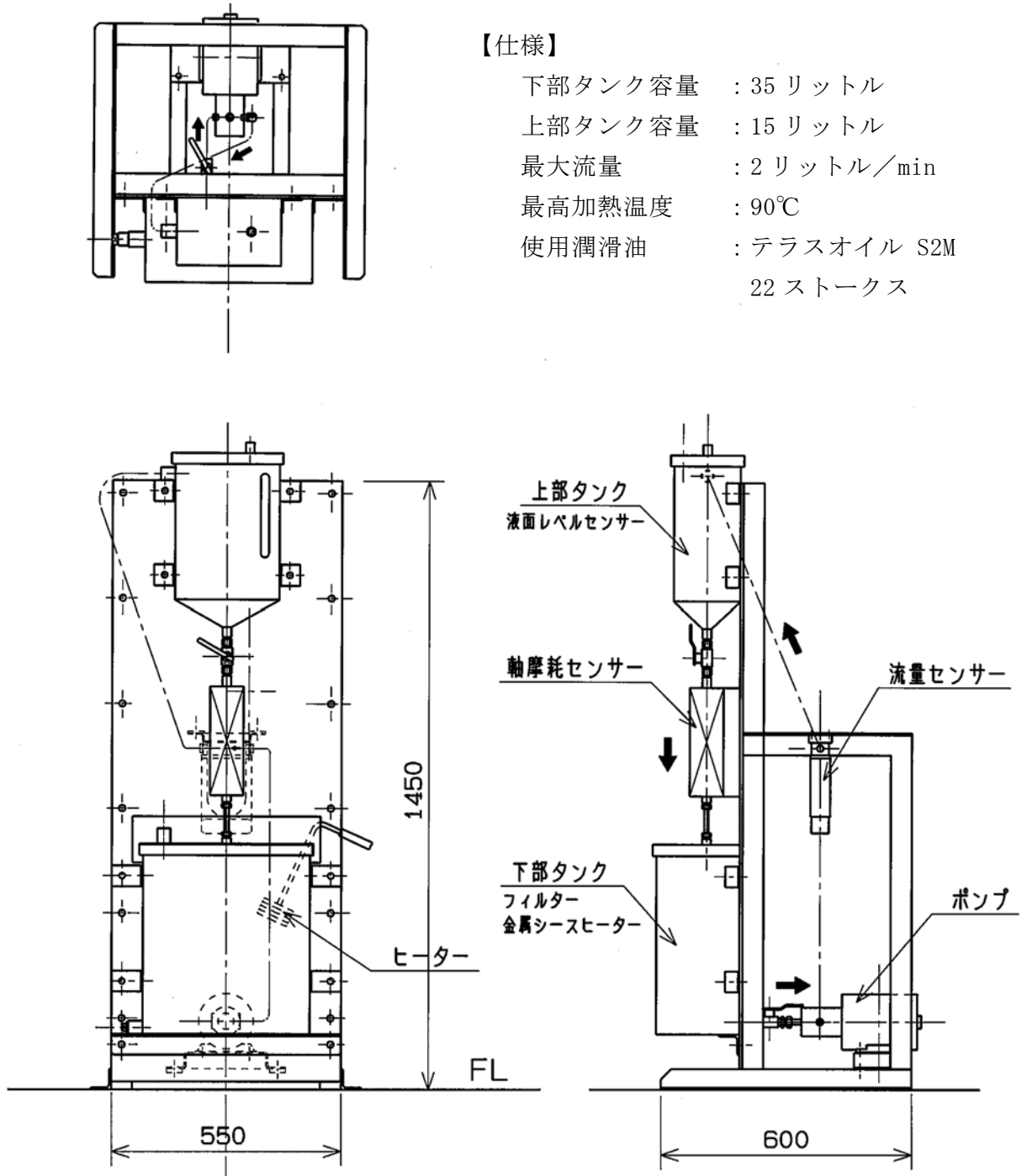


図 4.5.1 潤滑油循環試験装置概要図

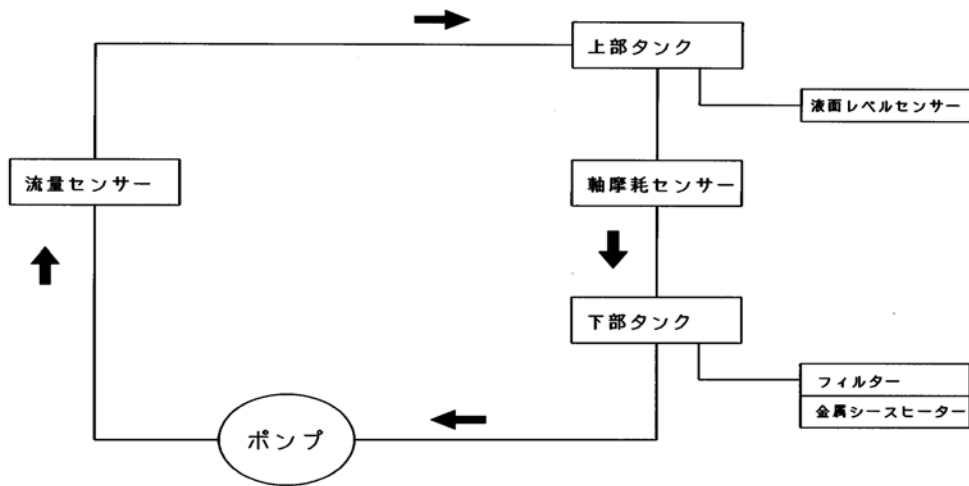


図 4.5.2 潤滑油循環試験装置配管系統図

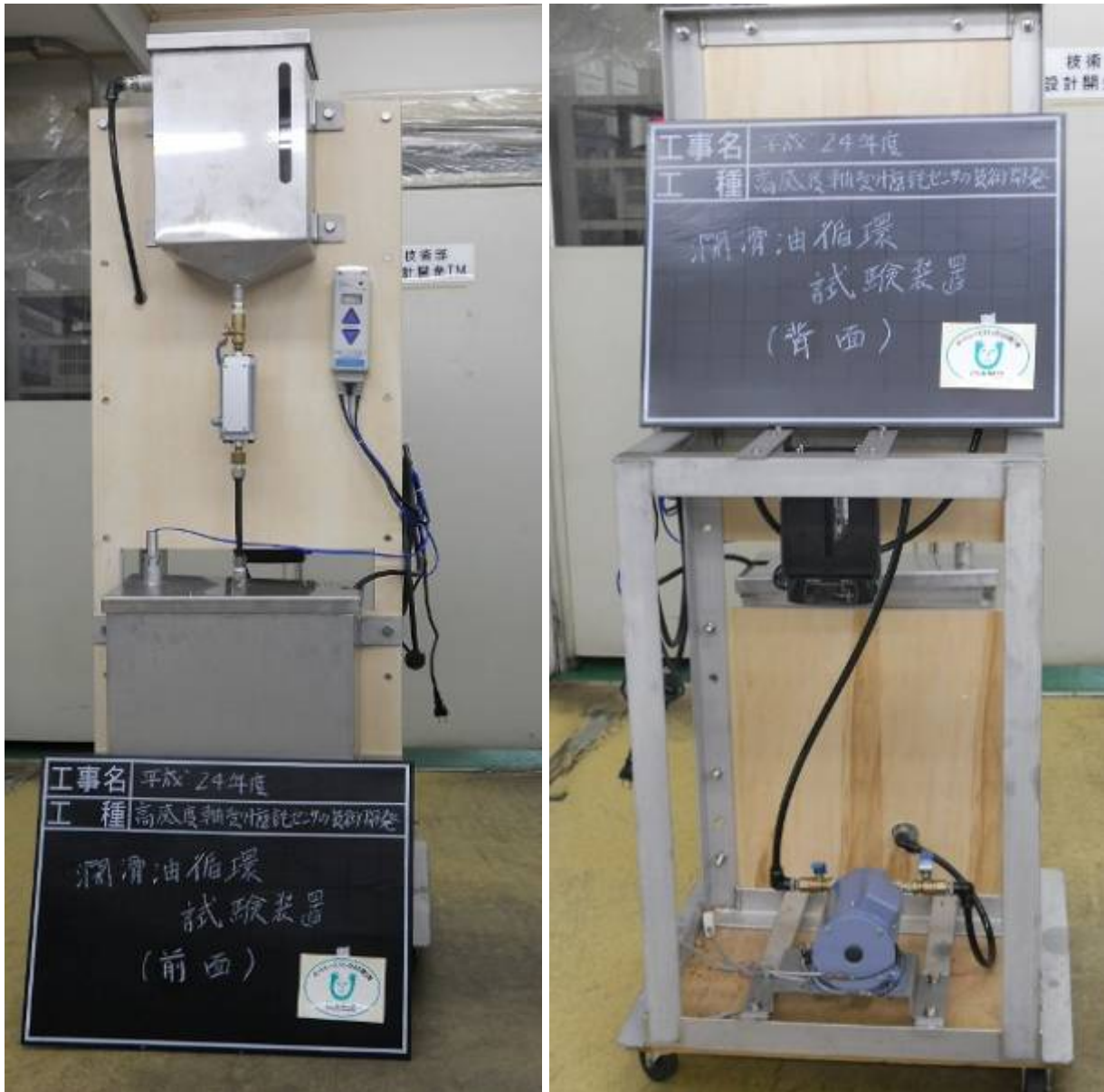


図 4.5.3 潤滑油循環試験装置外観



図 4.5.4 試験風景

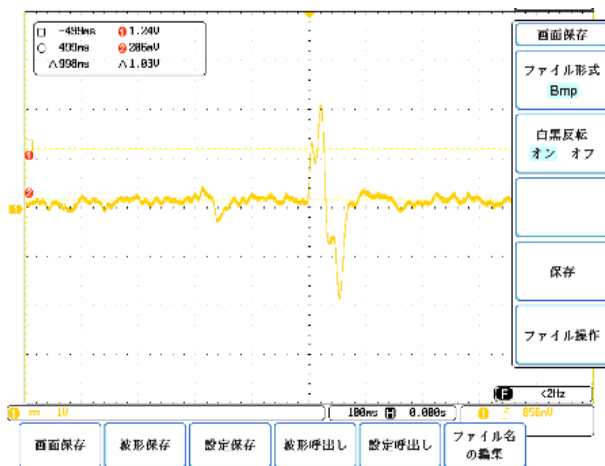


図 4.5.5 センサー信号波形 (1)

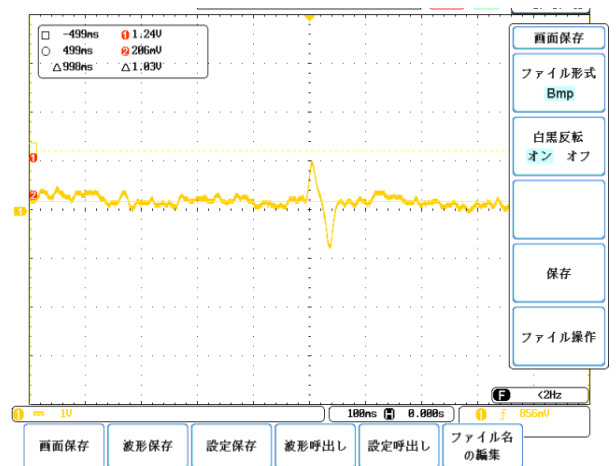


図 4.5.6 センサー信号波形 (2)

#### 4.6 磨耗粉数量カウント装置の製作

金属粉を3種類（ $\phi 0.2\text{mm}$  以上、 $\phi 0.3\text{mm}$  以上、 $\phi 0.4\text{mm}$  以上）に分類してカウントできるように、コンパレータ回路を内蔵した磨耗粉数量カウント装置製作した。装置の写真を図 4.6.1 に示す。なお、本カウンタを今後実際に使い易くなるように改善を図る。



図 4.6.1 磨耗粉数量カウント装置

#### 4.7 実機及び実船試験準備

##### 4.7.1 装置設計及び製作

船用エンジンに実機及び実船するための装置を設計し製作した。平成 24 年に実施した実機試験の準備作業では、解析に必要な計測用機器を単に繋ぎ合わせ、磨耗粉の計測可否を確かめた。平成 25 年度の実機及び実船試験準備作業では、記録計とデータ収集用 PC を除いた各計測用機器を一まとめにして、装備の小形・簡素化を目的として装置を設計し、これを製作した。図 4.7.1 に製作した試験装置を示す。

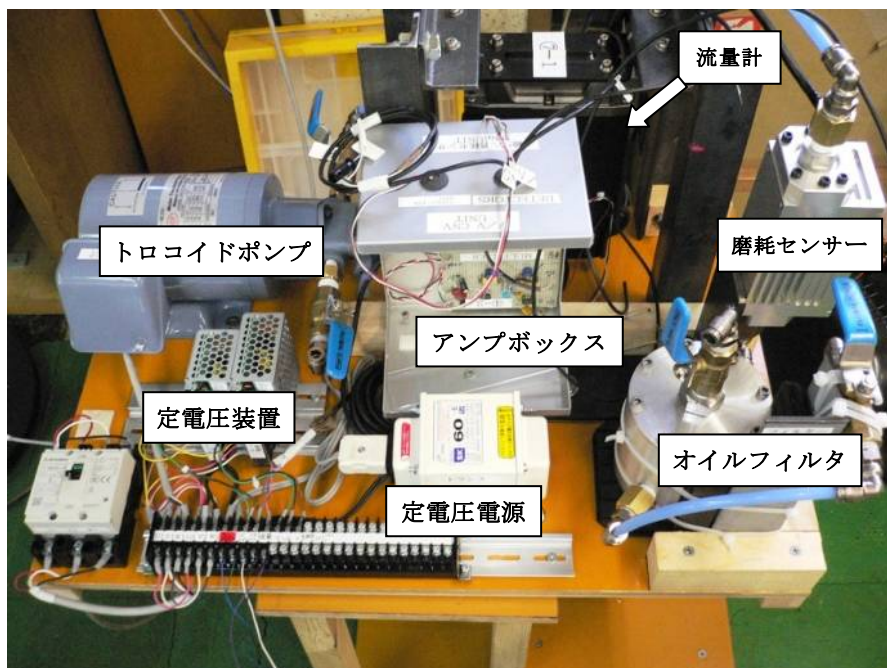


図 4.7.1 実機及び実船試験装置

#### 4.7.2 試験装置の改善

この試験準備作業では、平成 24 年度で行った試験の結果を踏まえ、磨耗センサーやアンプ回路の改善も行った。

平成 24 年度の事業にて採取・分析した金属粉の粒径とその分布を図 4.7.2.1 及び 4.7.2.2 に示す。なお、同図に示す粒径は、採取された金属粉を球形と置き換えて算出した値である。

図 4.7.2.1 のデータでは、 $\phi 0.20\text{mm}$  以上の非磁性金属は 10 個、Fe は 12 個である。一方、 $\phi 0.10\text{mm}$  以上の非磁性金属は 27 個、Fe も 27 個である。また、図 4.7.2.2 のデータでは、 $\phi 0.20\text{mm}$  以上の非磁性金属は 7 個、Fe は 2 個である。同様に  $\phi 0.10\text{mm}$  以上の非磁性金属は 19 個、Fe も 8 個である。センサーが  $\phi 0.10\text{mm}$  までの金属を検出することが出来れば、 $\phi 0.20\text{mm}$  の感度のセンサーの 2.5 倍の金属粉を検出することが可能となり、計測結果の信頼性が大きく高まることが、この測定結果から解る。

この試験結果を得て、平成 24 年度の事業で到達した目標感度  $\phi 0.20\text{mm}$  を、更に  $\phi 0.10\text{mm}$  目標として高感度化を図ることにした。

センサー内の誘導コイル径及び巻き数の最適化、ミキシング回路の改善、F/V 変換器等アンプ回路の改善を行い、 $\phi 0.10\text{mm}$  以上の粒径の非磁性金属を検出できるようにした。

| 粒径(mm)  | 非磁性金属(個) |    | F e(個) |    |
|---------|----------|----|--------|----|
| 0.30 以上 | 5        | 10 | 3      | 12 |
| 0.25 以上 | 0        |    | 5      |    |
| 0.20 以上 | 5        |    | 4      |    |
| 0.15 以上 | 7        | 17 | 3      | 15 |
| 0.10 以上 | 10       |    | 12     |    |
| 0.10 未満 | 12       |    | 11     |    |

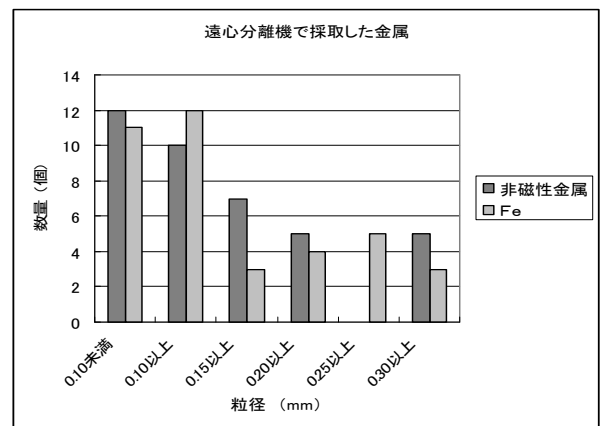


図 4.7.2.1 操業中漁船／遠心分離機で捕捉した金属粉の粒径分布

| 粒径(mm)  | 非磁性金属(個) |    | F e(個) |   |
|---------|----------|----|--------|---|
| 0.30 以上 | 1        | 7  | 1      | 2 |
| 0.25 以上 | 3        |    | 0      |   |
| 0.20 以上 | 3        |    | 1      |   |
| 0.15 以上 | 4        | 12 | 1      | 6 |
| 0.10 以上 | 8        |    | 5      |   |
| 0.10 未満 | 16       |    | 20     |   |

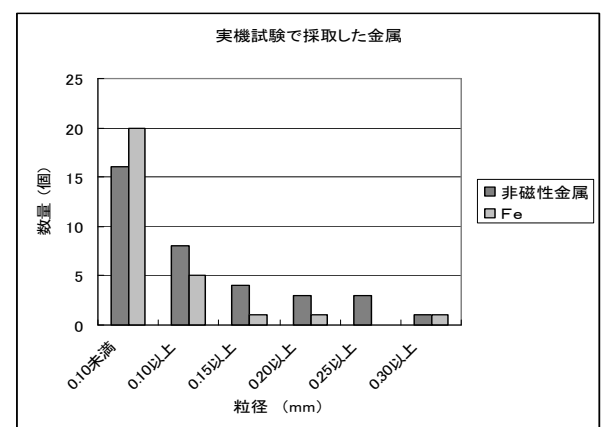


図 4.7.2.2 実機試験で採取した金属粉の粒径分布

## 4.8 実機試験

小型高速の4サイクル船用エンジンへの実機試験を行いセンサーの耐久性を確認した。また、実機エンジンから採取した潤滑油の分析結果の解析を行い、センサーの測定値と比較・評価した。

### 4.8.1 高速エンジンでの実機試験と改善作業

図 4.7.1 に示す試験装置を用い実機試験を行った。機器構成は図 4.8.1 に示すように、粒子数積算信号変換器を付加し、この信号を記録計に出力した。なお、粒子数積算信号変換器は、粒子一個の信号をアナログ積算信号に変換するアンプで、0~100個の粒子をカウントすると DC4~20mA の信号を出力する変換器である。潤滑油については、エンジンのオイルパンから引き出し、同所に戻した。

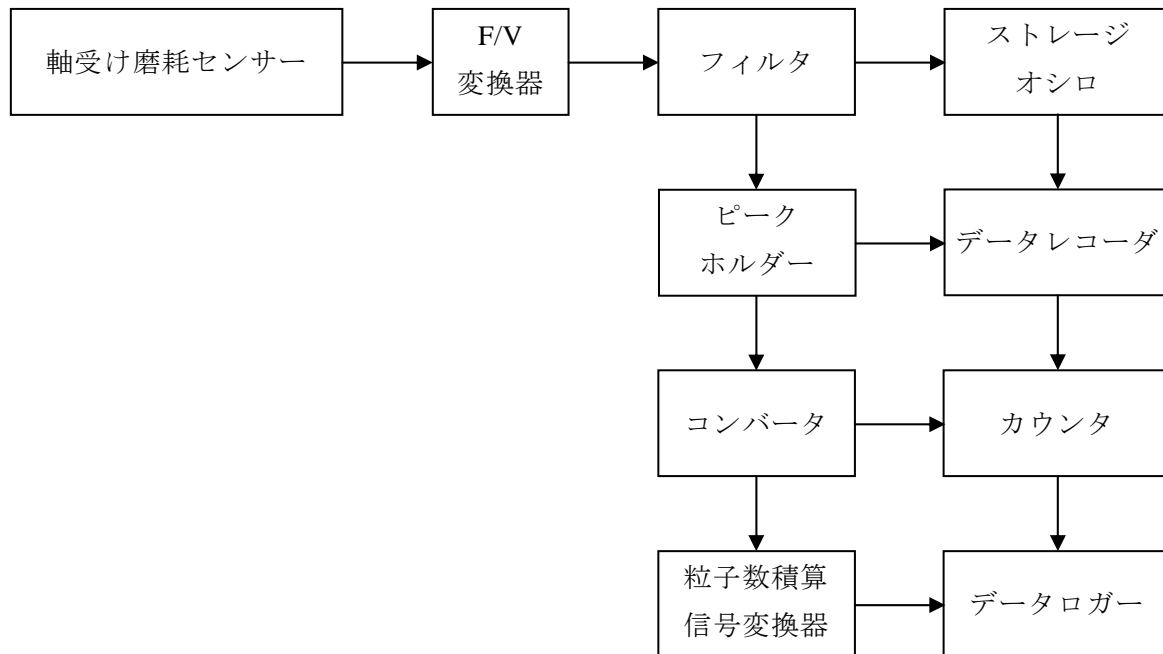


図 4.8.1 実機試験計測機器構成

4.7 項で述べたセンサー感度を上げる改善を、エンジン実装試験と並行して行った。一方、センサー感度を高めたために、ノイズなどの外乱の影響が大きくなり、センサー信号が不安定となった。この不具合に対する改善作業もセンサー感度の向上作業と並行して行った。

上記の改善を施した後、約 40 時間（5 日間）の実機試験を行い、正常に動作することを確かめた。なお、本試験では、110%オーバースピード試験や油温加熱（100℃）など、苛酷試験も行った。



#### 4.8.2 高速エンジンの潤滑油分析

##### 4.8.2.1 分析装置 (図 4.8.2.1 参照)

- 1) 電子顕微鏡観察装置：日立ハイテクノロジーズ製 走査電子顕微鏡 S-3400
- 2) EDX 分析装置：堀場製 エネルギー分散型 X 線分析装置：EMAX X-actEMAX EX-370

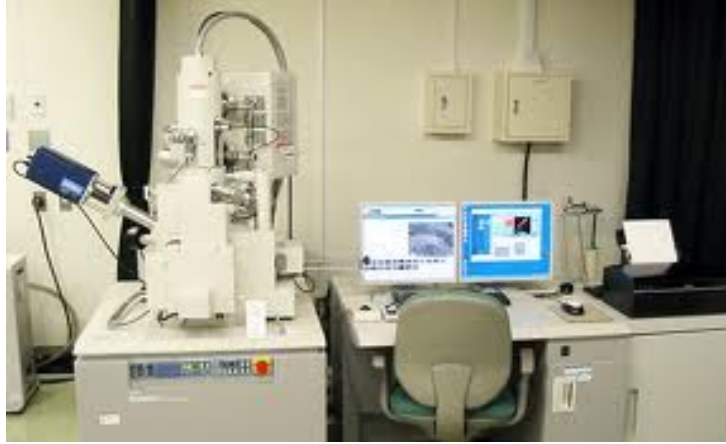


図 4.8.2.1 電子顕微鏡及びEDX分析装置

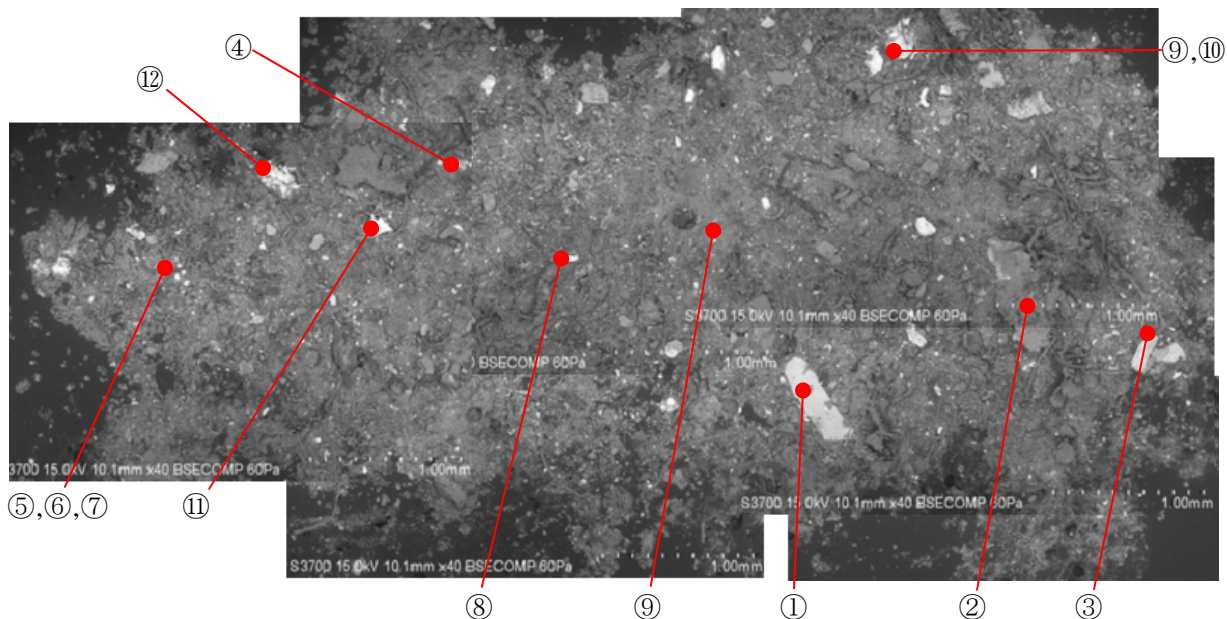
##### 4.8.2.2 分析結果

表 8.2.1 電子顕微鏡観察及びEDX組成分析の結果 (原子数比)

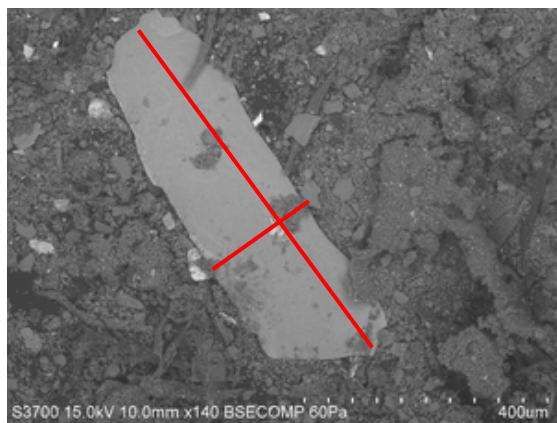
| 分析箇所                   | 粒子の大きさ<br>(mm×mm)      | Fe           | Al         | Ca         | Sn/Zn       | Na          | Si         | 備考              |
|------------------------|------------------------|--------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|-----------------|
| ① No. 1                | 0.66×0.19              | —            | —          | —          | —           | —           | —          |                 |
| ② No. 2                | 0.08×0.07<br>0.07×0.05 | —            | —          | —          | —           | —           | —          |                 |
| ③ No. 3 (EDX)          | 0.27×0.10<br>0.14×0.13 | 7.6          | 6.6        | 9.7        | 1.2/0.3     | 0.3         | 0.8        | 全観察エリア内にて全元素分析  |
| ④ No. 4 (EDX)          | 0.08×0.08              | 5.2          | 3.9        | 18.6       | —/0.9       | 0.4         | 1.4        | 全観察エリア内にて全元素分析  |
| ⑤ No. 5                | 0.10×0.04              | —            | —          | —          | —           | —           | —          |                 |
| ⑥, ⑦<br>No. 6, 7 (EDX) | 0.04×0.03<br>0.05×0.03 | 53.7<br>55.8 | 2.0<br>1.7 | 7.7<br>6.3 | —/1.1<br>—  | 0.2<br>0.5  | 0.9<br>0.8 | 対象粒子のみ<br>全元素分析 |
| ⑧ No. 8 (EDX)          | 0.14×0.05              | 13.2         | 3.6        | 11.6       | —<br>Cu:4.0 | —<br>Ni:3.6 | 0.8        | 全観察エリア内にて全元素分析  |
| ⑨, ⑩<br>No. 9, 10      | 0.18×0.16<br>0.17×0.13 | —            | —          | —          | —           | —           | —          |                 |
| ⑪ No. 11               | 0.17×0.12              | —            | —          | —          | —           | —           | —          |                 |
| ⑫ No. 12 (EDX)         | 0.21×0.08              | 22.6         | 1.9        | 11.4       | —           | 0.6         | 0.7        | 全観察エリア内にて全元素分析  |

(1) 分析試料

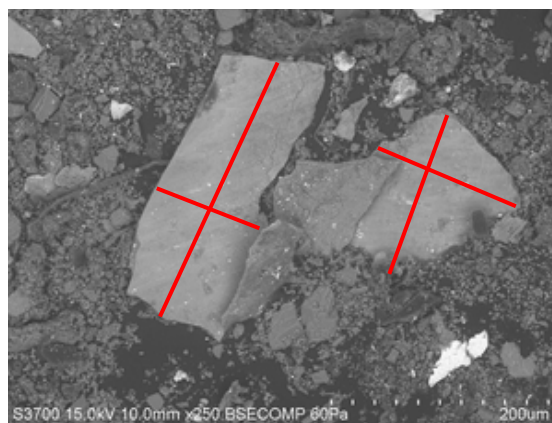
下記に分析に使用した磨耗粉試料：磨耗粉の全体観察写真（SEM 像）を示す。



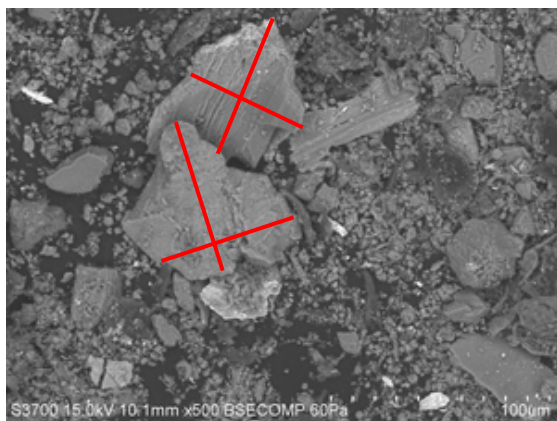
(2) 上記(1)試料の拡大写真（アルミ系の磨耗粉を以下4枚の電子顕微鏡写真にて示す）



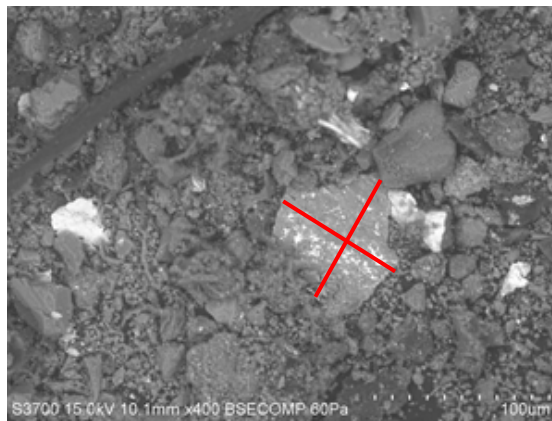
① SEM 観察 No. 1



③ SEM 観察 No. 3 (EDX 分析)



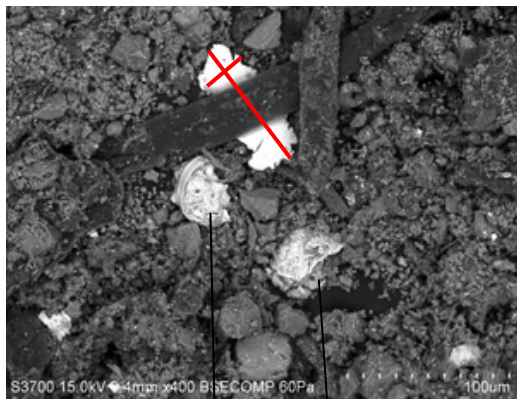
② SEM 観察 No. 2



④ SEM 観察 No. 4 (EDX 分析)



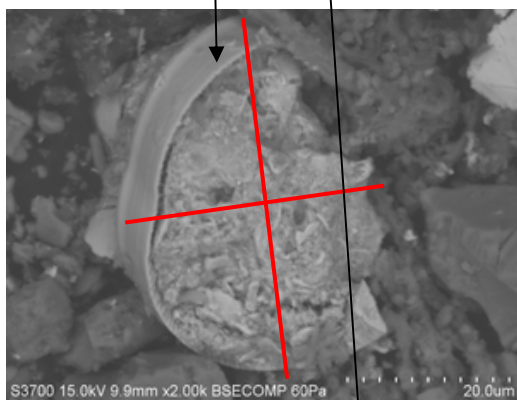
(3) 上記(1)試料の拡大写真（鉄系の磨耗粉を、以下8枚の電子顕微鏡写真にて示す）



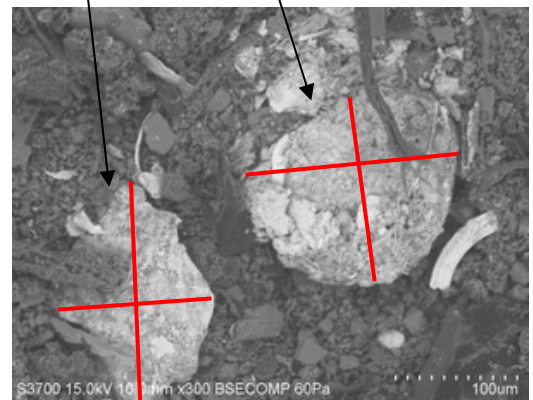
⑤ SEM 観察 No. 5



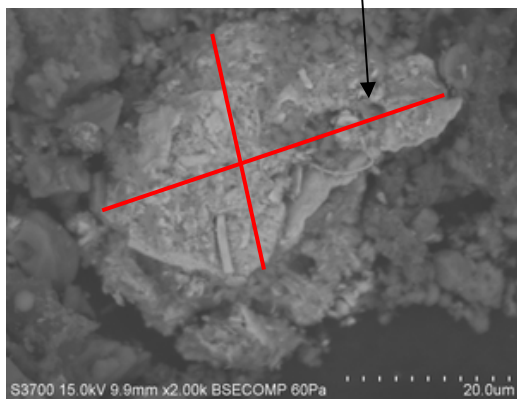
⑨ SEM 観察 No. 9 (EDX 分析)



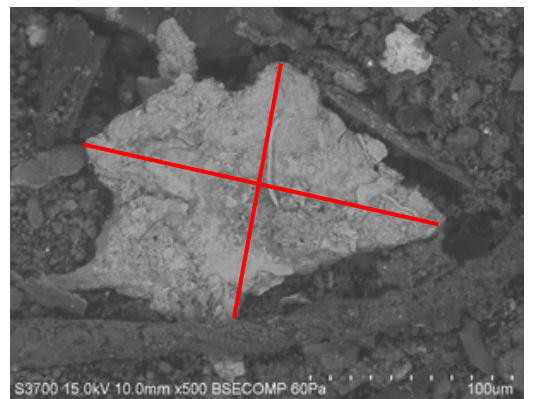
⑥ SEM 観察 No. 6 (EDX 分析)



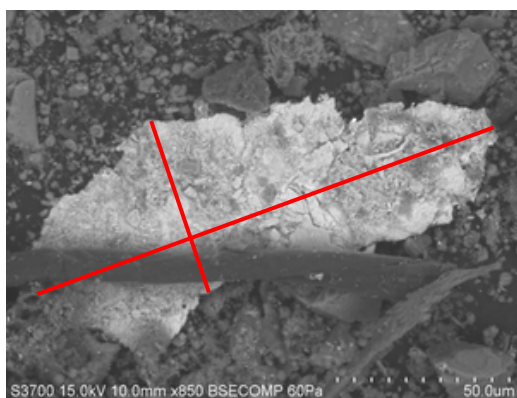
⑩ SEM 観察 No. 10



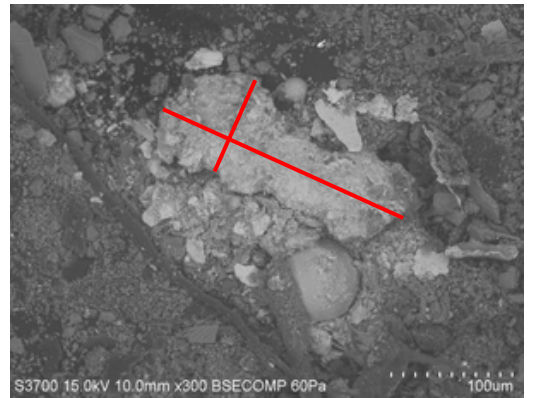
⑦ SEM 観察 No. 7 (EDX 分析)



⑪ SEM 観察 No. 11



⑧ SEM 観察 No. 8 (EDX 分析)



⑫ SEM 観察 No. 12

#### 4.9 最適装備方法の確立

4.7 及び 4.8 項で述べたとおり、実機試験では主要機器である磨耗センサー、トロコイドポンプ、流量計、オイルフィルタ、アンプボックス（F/V 変換器、ノイズフィルター、ピークホルダー等）をコンパクトにまとめ、また、センサー感度の向上、ノイズ軽減が図れ、最適な装備方法を確立した。

次に、実船試験を予定している新衛丸を訪船し、上記の装備方法を考慮し、実船試験での装備方法を検討した。就航船である新衛丸は、エンジンや発電機など既に本船に装備されており、これらの機器の操作の邪魔にならないように、試験装置の配置を検討した。

調査の結果、実機試験で用いた装置をそのまま装備できるスペースが無く、以下のよう分散して装備することにした。潤滑油を通す機器は、センサーユニットパネルひとつにまとめ、電子機器を、計測ユニット・電源ボックスとデータレコーダボックス（パソコン、磨耗粒子カウンタを近接配置）に二分して配置することにし、装置設計を行った。機器系統図を次項の図 4.10.1.4 に示す。

#### 4.10 実船試験

発電機関と主機関の 2 種類の機関にて実船試験を行った。発電機関として「新衛丸」（ヤンマー(株)製）、また、主機関として「さがみ」（阪神内燃機工業(株)製）に装備した。

##### 4.10.1 新衛丸

###### 4.10.1.1 搭載船（図 4.10.1.1 参照）

新島物産(株) 電気推進貨物船兼油送船

総トン数 492GT

航路 東京辰巳埠頭－新島他伊豆七島

実船工事場所 極洋船舶工業(株)（千葉県／館山）

###### 4.10.1.2 搭載エンジン 3号発電機関（図 4.10.1.2 参照）

型式・メーカー 6N18AL-HV 型 ヤンマー(株)製 No.5741

機関出力×回転数 500kW×900min<sup>-1</sup>（発電機出力 400kW）

ピストンストローク 280mm



図 4.10.1.1 新衛丸



図 4.10.1.2 搭載エンジン

#### 4.10.1.3 試験装置

試験装置の配管、構成及び配線系統を図 4.10.1.3～4.10.1.5 に示す。本船に実装した装置は、センサーユニットパネル、計測ユニット・電源ボックス、データレコーダボックス、磨耗粒子カウンタ及びレコーダPCで構成されている。

個々の試験装置については、センサーユニットパネルを3号機右舷側中央部プレート下の空間に、計測ユニット・電源ボックスを発電機脇の支柱上部に、また、データレコーダボックス及びカウンタを機関日誌台の中段に装備した。エンジン共通台床の封止フランジ部に潤滑油取り出し口を設け、また、取り出した潤滑油の戻り口をチャンバー側蓋に設けた。なお、本工事の際に、潤滑油を新油(900L)に、また、軸受けメタルを新品に交換した。

オイルパン内の潤滑油をセンサーユニットパネルに内蔵されているトロコイドポンプにてセンサーに流入させ、この潤滑油中の金属粉をセンサーで検出し、クランクケースに戻した。

センサーユニットパネルにはトロコイドポンプ、流量計、軸受け磨耗センサー及びオイルフィルタが内蔵されている。計測ユニット・電源ボックスには、アンプボックス、電圧レギュレータ、変圧器等が内蔵されている。データレコーダボックスには、データレコーダ、計測波形監視・記録用ノート型パソコン、バックアップ電源及びカウンタを設けた。なお、各装置の内部部品構成は図 4.10.1.6～8 に示す。また、参考として取り付けたオイルミストディテクタを図 4.10.1.9 に示す。

#### 4.10.1.4 装置の仕様

##### 1) センサーユニットパネル

##### 1.1) 装置全体の仕様

- (a) 質量 28kg
- (b) 電源電圧 AC220V 三相 1A
- (c) 配管の最高使用圧力 1.0MPa
- (d) 配管の最高使用温度 80°C

##### 1.2) 軸受け磨耗センサー

- (a) センサー感度 最小検出粒径 0.10mm
- (b) 電源電圧 ±15V (AC220V を変圧、定電圧化)
- (c) 出力信号 0～100kHz の矩形波信号  
金属粉がコイルを通過したときに粒径の大きさに応じて周波数に変化する
- (d) 測定流体 100°C max. 1.0MPa max.
- (e) 振動 4G、100Hz 以下

##### 1.3) トロコイドポンプ

- (a) 電源電圧 AC100V 単相 75W
- (b) 最高加圧 0.5MPa
- (c) 空回り保護 内部リリーフバルブ付
- (d) 流体温度 80°C max.
- (e) 定格流量 2.2 リットル/min.

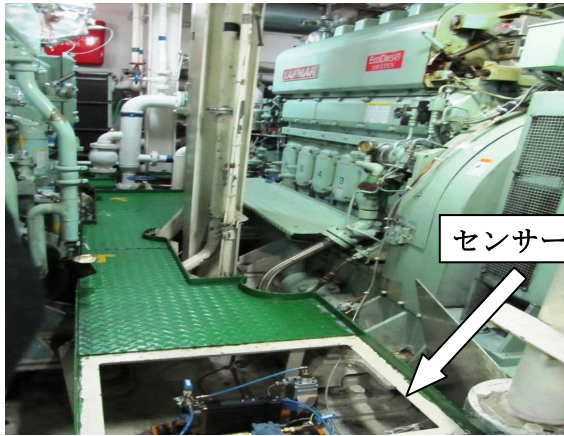
- 1.4) 流量計
- |          |                       |
|----------|-----------------------|
| (a) 電源電圧 | AC100V 単相             |
| (b) 最高加圧 | 5MPa                  |
| (c) 計測範囲 | 0～2 リットル／min. (コリオリ式) |
| (d) 流体温度 | 80℃ max.              |
- 1.5) オイルフィルタ 10 μm
- 2) 計測ユニット・電源ボックス
- 2.1) 装置全体の仕様
- |          |              |
|----------|--------------|
| (a) 質量   | 8 kg         |
| (b) 電源電圧 | AC220V 三相 1A |
- 2.2) アンプボックス
- |            |                     |
|------------|---------------------|
| (a) 電源     | DC±15V 1VA          |
| (b) 入力信号   | 0～5V 矩形波信号          |
| (c) 出力信号   | DC4～20mA            |
| (d) 内蔵回路基板 | ①F/V (周波数／電圧信号) 変換器 |
- ・センサーからの周波数信号を電圧信号に変換する回路
  - 金属粉による電圧変化信号だけを捕らえる回路 (微分回路) を内蔵している
- ②アクティブフィルタ回路
- ・ノイズなどの外乱を減衰させる回路
- ③マルチプライヤ回路
- ・F/V (周波数／電圧信号) 変換器の出力信号を鋭敏化させ、この信号をデータレコーダの計測開始トリガ信号とする。
- 3) データレコーダ箱
- 3.1) 装置全体の仕様
- |          |              |
|----------|--------------|
| (a) 質量   | 8 kg         |
| (b) 電源電圧 | AC100V 単相 3A |
- 3.2) データレコーダ (内蔵品) 1台
- |             |           |
|-------------|-----------|
| (a) 電源電圧    | AC100V 単相 |
| (b) サンプルレート | 200 μ sec |
| (c) 計測範囲    | ±10V      |
- 3.3) バックアップ電源 255Wh
- 3.4) コンパレータ 測定信号の大きさと金属粉の大きさを大、中及び小に分類する回路
- 4) レコーダPC 1台  
金属粉粒子に応じた検出信号を表示する
- 5) カウンタ  
粒子の大きさと3種に区分  
大：φ0.25mm より大きい粒径  
中：φ0.15～0.25mm の粒径  
小：φ0.15mm より小さい粒径





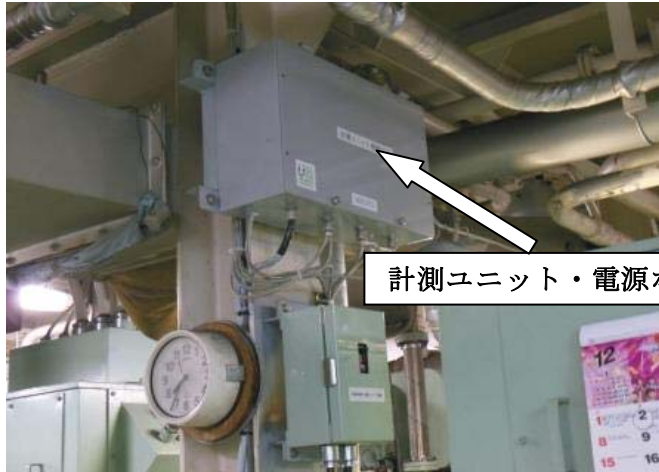


センサーユニット  
パネル



センサーユニット  
パネル

計測ユニット  
電源ボックス



計測ユニット・電源ボックス

データレコーダ  
ボックス



レコーダPC

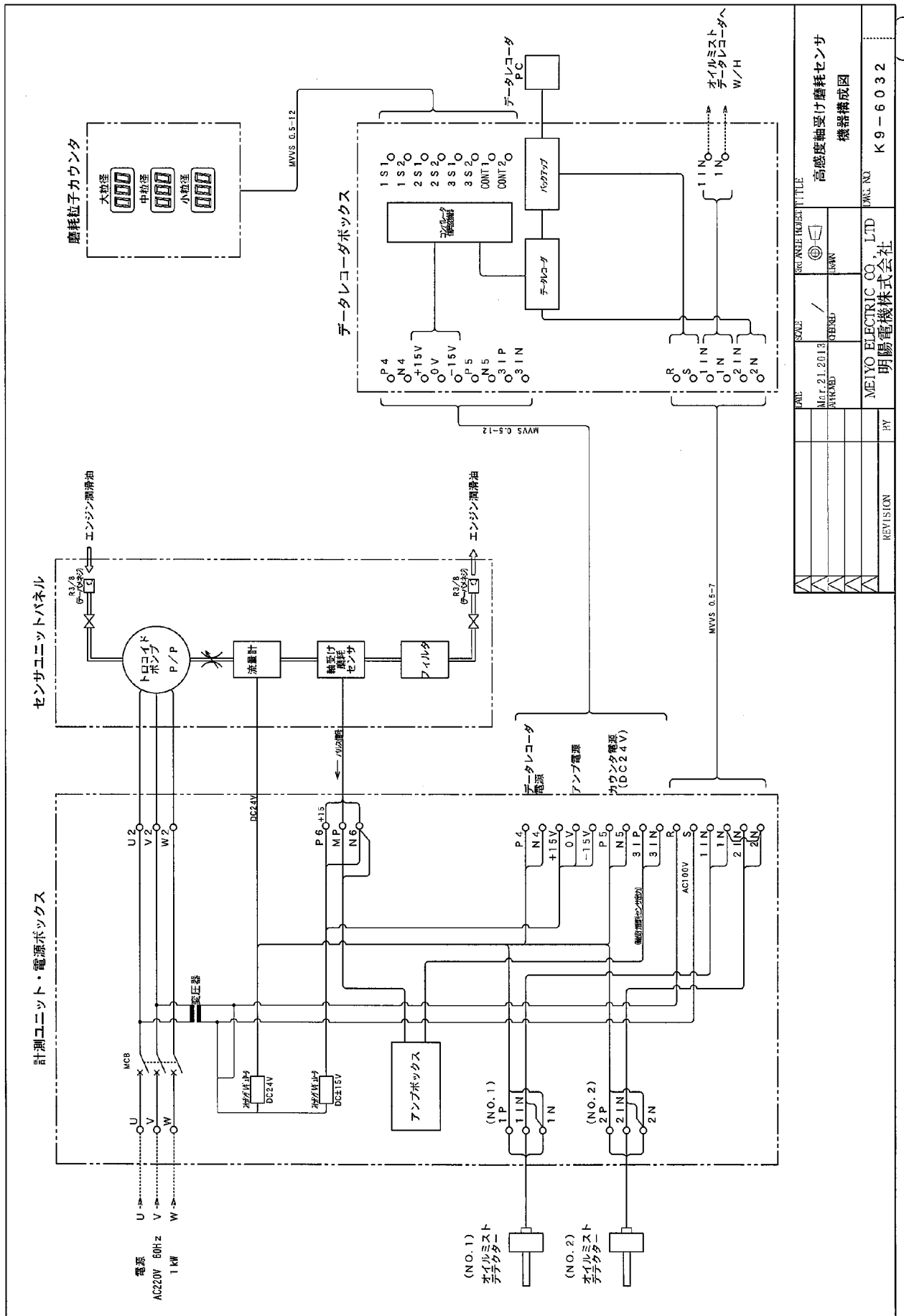
データレコーダボックス

レコーダPC

磨耗粒子カウンタ



図 4.10.1.4 機器系統図



| REV.                              | DATE          | SCALE    | REVISED PROJECT TITLE |
|-----------------------------------|---------------|----------|-----------------------|
| 1                                 | MAR. 21. 2018 |          | 高感度軸受け磨耗センサ           |
| 2                                 |               | REVISION | 機器構成図                 |
| 3                                 |               |          |                       |
| 4                                 |               |          |                       |
| 5                                 |               |          |                       |
| 6                                 |               |          |                       |
| MELYO ELECTRIC CO., LTD. 明陽電機株式会社 |               |          | 機種 NO. K9-6032        |

図 4.10.1.5 機器間配線図

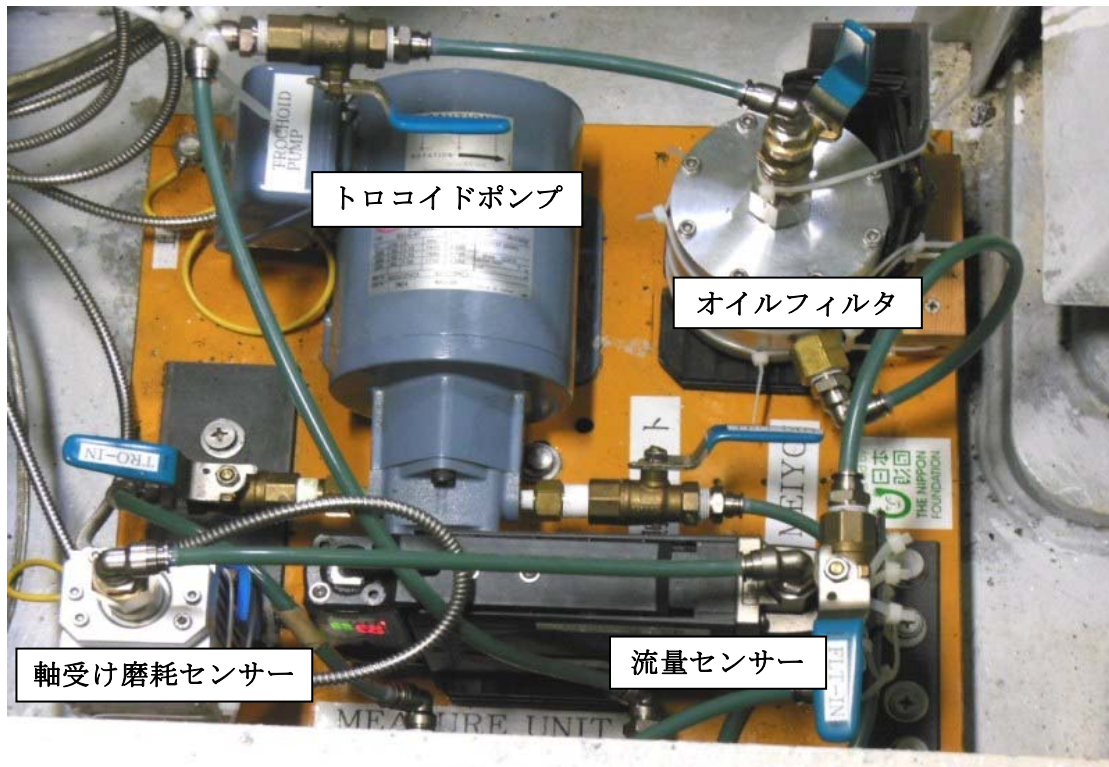


図 4.10.1.6 センサーユニットパネル内部

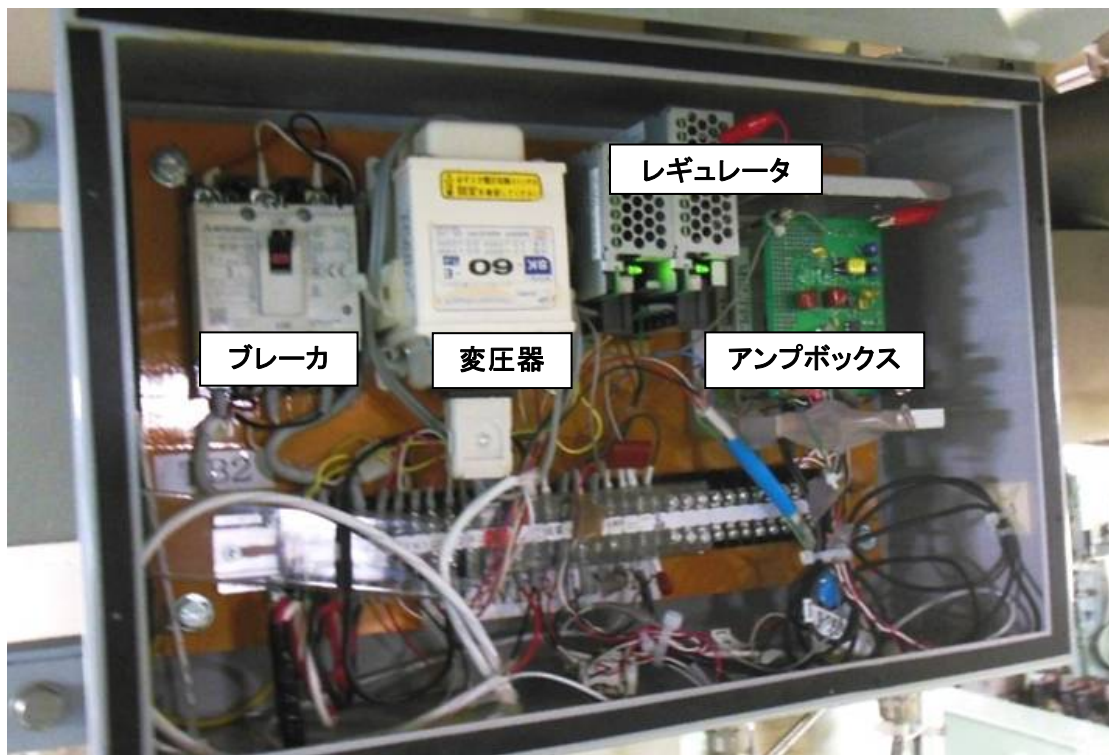


図 4.10.1.7 計測ユニット・電源ボックス



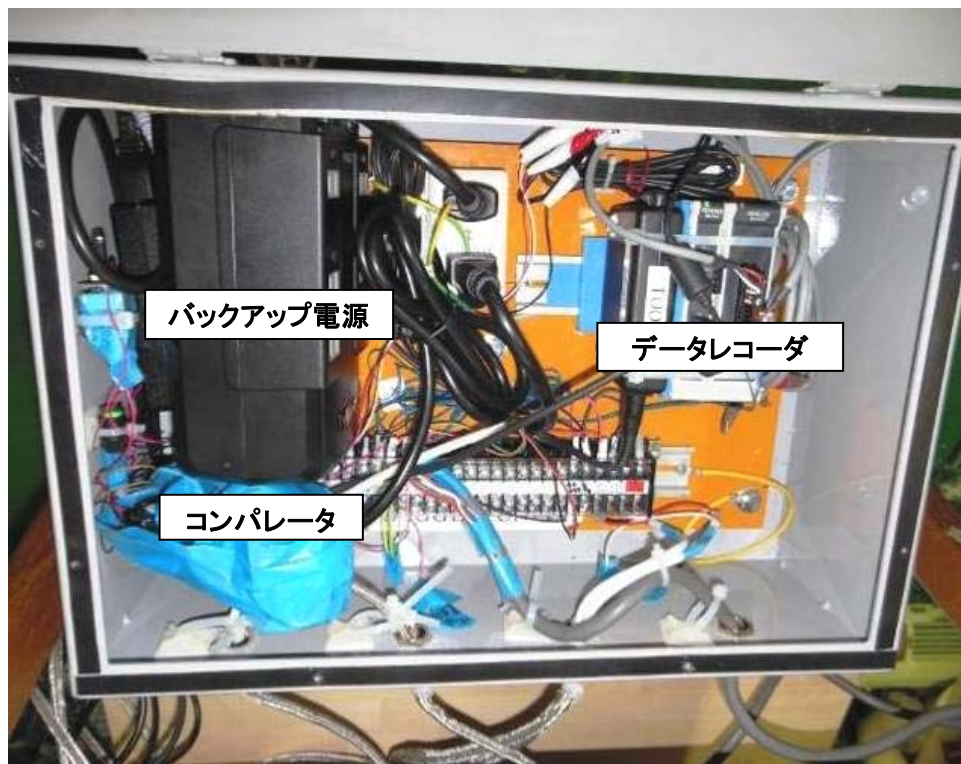


図 4.10.1.8 データレコーダボックス、P C、磨耗粒子カウンタ



図 4.10.1.9 オイルミストディテクタ

#### 4.10.1.5 装置の動作

軸受け磨耗センサーに金属粉が通過するとセンサーの出力信号の周波数が変化する。この信号変化を計測ユニット内のF/V（周波数／電圧信号）変換器にて電圧信号に変換する。この電圧信号を、高速データレコーダを用い、CSV形式で記録した。連続的にデータを記録するとデータ量が膨大になるために、磨耗粉がセンサーを通過したときのみデータを記録した。なお、データレコーダの計測開始トリガは、計測信号をマルチプライヤ回路にて鋭敏化させ、この信号を用いた。

また、磨耗粉の計測信号はコンパレータ回路により大、中、小の粒径に分類し、各粒子用カウンタでカウントした。

#### 4.10.1.6 実機エンジンの運転状況

本船は、1週間に3回辰巳埠頭－新島間を往復している。主発電機は3機搭載されており、エンジンの運転状況は、航行時2機運転、停泊荷役時は1機運転である。荷役をしていない状態では陸電を使用している。従って、センサー実機後のエンジンの運転時間は、表4.10.1.6のとおりである。

一方、センサーには約1L/min.を流した。流した総量も同表に記載した。

表 4.10.1.6 3号主発電機運転時間と潤滑油の流量

| 採取回数 | 潤滑油採取日 | エンジン（三号主機）<br>運転時間（時間） | 流れた潤滑油量<br>（リットル）           | 備考                  |
|------|--------|------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 1    | 6月29日  | 154                    | 9240                        |                     |
| 2    | 7月27日  | 196                    | 11760                       |                     |
| 3    | 11月27日 | 861                    | 51660                       |                     |
| 4    | 1月7日   | 287                    | 17220                       |                     |
|      | 総計     | 1498<br>(約62日)         | 89,880リットル<br>エンジン総油量の10倍循環 | (90m <sup>3</sup> ) |

#### 4.10.1.7 試験結果

約8ヶ月の試験を行ったが、機械的及び電氣的な破損は起こらず正常に動作し、また、軸受けの磨耗粉と思われる非磁性金属粉を捉えることが出来た。その検出信号を図4.10.1.10に示す。また、採取した金属粉を社内の試験器に通して得られた信号波形を図4.10.1.12に示す。なお、この信号はオシロスコープで確認した。

実機試験において種々問題が発生し、試験を行いながら改善を施した。改善の内容を以下に示す。

##### 1) 外乱ノイズ対策

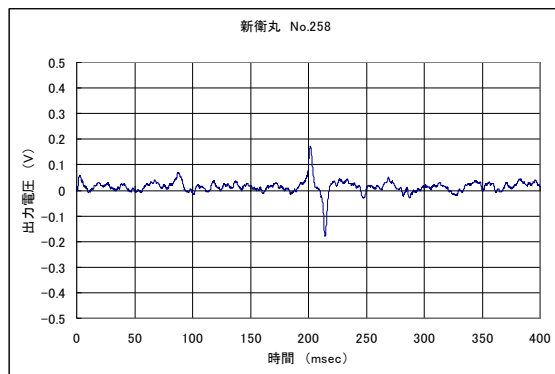
本船の装備スペースの都合から、計測ユニットを図4.10.1.4に示すようにノイズが生じやすい電機の近傍に装備することになった。検出感度を高めたこともあいまって、センサーの出力に重畳されるノイズが大きくなった。この不具合を、アンプボックス内のアクティブフィルタやマルチプライヤ回路の改善を図ることで解決した。



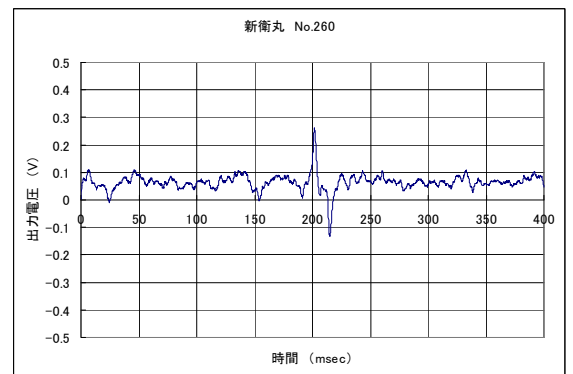
## 2) 気泡の発生防止対策

潤滑油を吸引する装置内の吸引側でキャビテーションによる気泡が発生し、センサーがこの気泡を金属粉として誤検出する不具合が生じた。潤滑油の温度が低い場合、潤滑油の粘性抵抗が高くなりこの現象が生じる。実船試験においては、エンジンが長時間停止し潤滑油の温度が低くなることがある。エンジンが運転されている場合は、油温が 60℃以上上昇しているためこの現象は生じない。

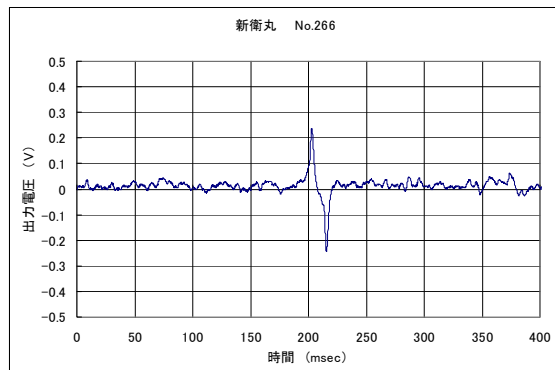
このことから、温度センサーを吸引側配管に取り付けて油温が 55℃以下の状態では、計測信号を出力しないようにリポーズ回路を追加し、この不具合を改善した。なお、キャビテーションによる気泡が生じると、図 4.10.1.11 に示すよう短時間に連続して検出パルスが生じるので、金属粉との識別が出来る。



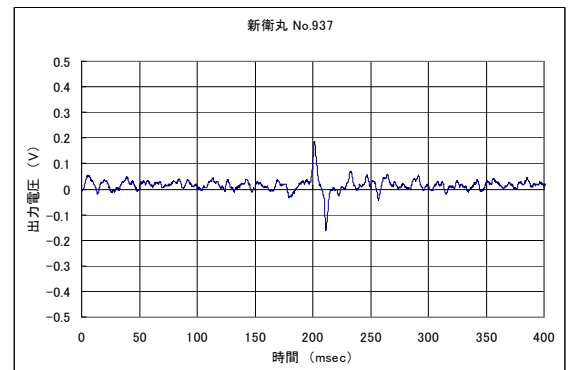
(a) 粒径 0.11mm に相当



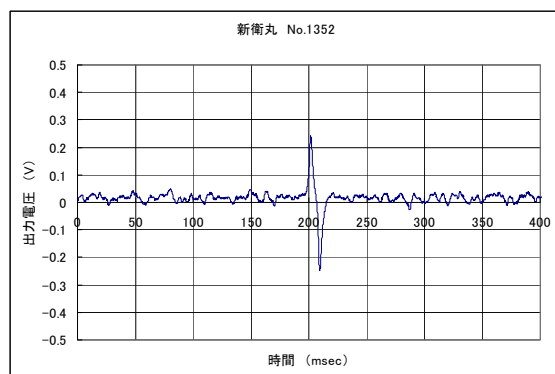
(b) 粒径 0.12mm に相当



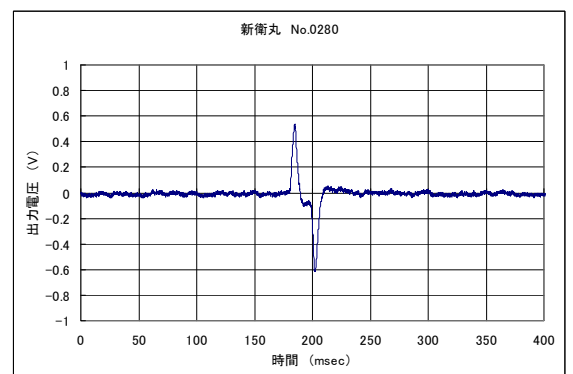
(c) 粒径 0.13mm に相当



(d) 粒径 0.11mm に相当



(e) 粒径 0.13mm に相当



(f) 粒径 0.18mm に相当

図 4.10.1.10 計測信号波形

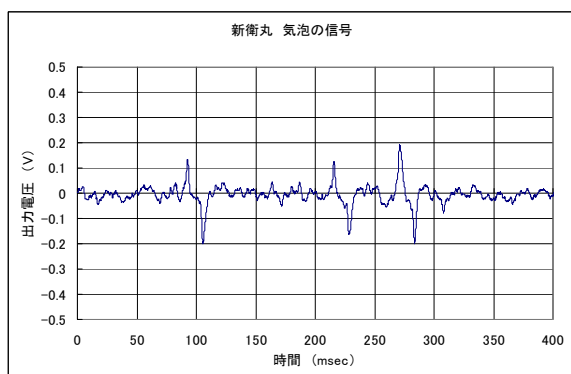


図 4.10.1.11 気泡の信号波形

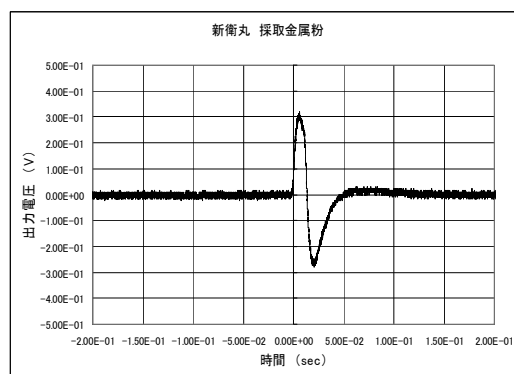


図 4.10.1.12 採取金属の社内装置での測定波形

#### 4.10.1.8 潤滑油の分析

実船試験中に回収したフィルタ内の潤滑油を、ベンゼンを用いて洗浄、希釈し、更に粉体を沈殿させ、粉体だけを抽出した。この粉体について材質、形状、粒度分布を調査した。なお、洗浄したフィルタと抽出した粉体の写真を図 4.10.1.13 及び図 4.10.1.14 に示す。



図 4.10.1.13 ベンゼンで洗浄したフィルタ



図 4.10.1.14 抽出した粉体

分析結果の概要を以下に示す。

##### 1) 定性分析及び走査型電子顕微鏡による寸法測定

日本軽金属株式会社技術センター

使用装置：EPMA-1610 (島津製作所製)

調査結果：約 30 個の粒子について分析した。その結果、実機試験での分析結果と同様に、 $\phi 0.10\text{mm}$  の金属粉が相当数含まれることが判った。なお、分析結果の一例を表 4.10.1.8.1 に示す。

表 4.10.1.8.1 粒子寸法

定性・半定量分析結果 単位：% (質量分率) 寸法単位：mm

| 分析箇所 | 寸法        | Al  | C  | Si  | Cu  | Zn  | O   | Fe  | Mn  | Mg  | Ca  | Ti  | P   | Ni  | S   | K   | Cl  | Cr  | Na  | Pb |
|------|-----------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 1    | 0.45*0.45 | 69  | 14 | 12  | 2   | 1   | 0.8 | 0.7 | 0.3 | 0.3 | 0.1 | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -  |
| 2    | 0.25*0.2  | 0.5 | 10 | -   | 53  | 34  | 2   | 0.3 | -   | -   | 0.1 | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -  |
| 3    | 0.9*0.18  | 59  | 17 | 15  | 3   | 1   | 3   | 2   | 0.4 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -  |
| 4    | 0.15*0.03 | 66  | 14 | 14  | 2   | 1   | 1   | 0.9 | 0.3 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -  |
| 5    | 0.3*0.2   | 66  | 21 | 7   | 2   | 1   | 1   | 1   | 0.3 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -  |
| 6    | 0.45*0.2  | 62  | 17 | 15  | 2   | 1   | 1   | 1   | 0.4 | 0.3 | 0.1 | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -  |
| 7    | 0.3*0.2   | 0.8 | 52 | 5   | 0.9 | 2   | 20  | 8   | 4   | 0.6 | 4   | 0.1 | 1   | 0.5 | 0.4 | 0.1 | 0.1 | -   | -   | -  |
| 8    | 0.35*0.15 | 59  | 20 | 13  | 2   | 1   | 1   | 2   | 0.8 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | -   | -   | 0.1 | -   | -   | 0.2 | -   | -  |
| 9    | 0.15*0.5  | -   | 10 | 3   | -   | -   | 1   | 85  | 0.3 | -   | 0.1 | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -  |
| 10   | 0.02*0.02 | 1   | 37 | 2   | -   | 4   | 34  | 1   | -   | 0.6 | 1   | 15  | 3   | -   | 0.3 | 0.2 | -   | -   | 1   | -  |
| 11   | 0.02*0.02 | 0.3 | 21 | 0.4 | -   | 13  | 7   | 53  | 0.4 | -   | 0.3 | 5   | -   | -   | 0.1 | -   | -   | 0.4 | -   | -  |
| 12   | 0.45*0.1  | 1   | 35 | 0.8 | -   | 0.7 | 25  | 0.6 | -   | -   | 0.9 | 26  | 0.3 | -   | 0.6 | -   | -   | 2   | 0.2 | 6  |
| 13   | 0.1*0.1   | 67  | 13 | 12  | 3   | 1   | 1   | 1   | 0.3 | 0.4 | -   | 0.1 | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -  |
| 14   | 0.3*0.15  | 65  | 13 | 12  | 4   | 1   | 3   | 1   | 0.2 | 0.4 | 0.2 | -   | -   | 0.5 | -   | -   | -   | -   | -   | -  |
| 15   | 0.2*0.15  | -   | 4  | -   | -   | -   | 1   | 94  | 0.7 | -   | 0.1 | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -  |

\*表中の“-”印は検出されなかった。

2) 光学式粒度分析

株式会社 東レリサーチセンター

使用装置：レーザー回折式粒度分析装置

SALD-2000J (島津製作所製)

調査結果：燃焼残渣物で多量に存在する炭素の微粉が多くカウントされ、数少ない金属粉はその膨大な数に埋もれてしまい、個数としての比率を検知することが出来なかった。

3) 粒度分布測定

JFEテクノロジー株式会社

使用機器：極低加速電圧走査電子顕微鏡 ULV-SEM

エネルギー分散型X線分光器 EDX

調査結果：多量に含まれている金属である Al と Fe 及び炭素粉末について、5,000 個の粒度分析を行った。勿論、微細な炭素粉末の数は圧倒的に多かったが、金属の分離方法によってはφ0.10mm以上の金属粉が多量に確認された検体もあった。なお、分析結果の一例を表 4.10.1.8.2 に示す。

表 4.10.1.8.2 粒度分析

粒子解析結果 (Feret Mean Diameter 単位：μm)

|         | Number | 10~30 | 30~50 | 50~100 | 100~300 | 300~500 | 500≤ |
|---------|--------|-------|-------|--------|---------|---------|------|
| C系      | 5058   | 3797  | 487   | 419    | 320     | 24      | 11   |
| Al系     | 228    | 59    | 30    | 63     | 67      | 7       | 2    |
| Fe系     | 83     | 38    | 17    | 7      | 18      | 3       | 0    |
| Unknown | 596    | 407   | 60    | 71     | 51      | 7       | 0    |
| Total   | 5965   | 4301  | 594   | 560    | 456     | 41      | 13   |

図2 試料:「No.2」の粒子解析結果

#### 4.10.2 さがみ

##### 4.10.2.1 搭載船 (図 4.10.2.1 参照)

井本船舶株式会社 内航コンテナ船 400TEU

総トン数 2446 (3850 DW)

航路 京浜～東北・苫小牧

実船工事場所 小池造船海運株式会社 (広島県/大崎上島)

##### 4.10.2.2 搭載エンジン 主機関 (図 4.10.2.2 参照)

型式・メーカー LH46LA 型 阪神内燃機工業(株) No. LH46L-513

機関出力×回転数 3309 kW×220 min<sup>-1</sup>

シリンダ径×行程 460×880 mm



図 4.10.2.1 さがみ



図 4.10.2.2 搭載主機関

##### 4.10.2.3 試験装置

装置の配置は、図 4.10.2.3～14 に示すように、機関室に設置された計測ユニット箱、機関監視室に設置されたデータレコーダ箱及び金属粉の通過信号をモニタしデータ収集するコンピュータで構成されている。セッティングタンクの底部から計測ユニット箱に潤滑油を引き込み、この油中の金属粉を軸磨耗センサーで検出する。その検出信号をデータレコーダ箱で自動的に記録するとともに、検出した金属粒子の数量信号を粒子数積算信号変換器で電流信号に変換し、機関監視室のデータロガーに出力し、この数をデータロガー (HANASYS EXPERT ハンシン高度船舶安全管理システム) に表示させた。

データレコーダ箱で記録された金属粉は、金属粒子の大きさに比例した振幅を有する正弦波信号で、機関監視室に設置されたデータ収集用 PC でモニタすることができる。一方、セッティングタンクから給油された油は計測ユニット箱内のオイルフィルタで金属粉を除去した後、セッティングタンクに戻される。

#### 4.10.2.4 装置の仕様

##### 1) 計測ユニット箱

###### 1.1) 装置全体

- (a) 質量 52kg
- (b) 電源電圧 AC100V 単相 2A
- (c) 配管の最高使用圧力 1.5MPa
- (d) 配管の最高使用温度 80°C

###### 1.2) 軸受け磨耗センサー (内蔵品)

- (a) センサー感度 最小検出粒径 0.10mm
- (b) 電源電圧 ±15V (AC100~220V を変圧、定電圧化)
- (c) 出力信号 DC4~20mA (信号変換器使用時)
- (d) 測定流体 100°C max. 1.0MPa max.
- (e) 振動 4G、100Hz 以下

###### 1.3) F/V 変換器他 (内蔵品)

- (a) 電源 DC±15V 1VA
- (b) 出力信号 DC4~20mA

###### 1.4) 粒子数積算信号変換器 (内蔵品) 2台内蔵

- (a) 電源 DC24V 0.7VA (1台分)
- (b) 出力信号 0~100 粒子にて DC4~20mA (1台)  
0~500 粒子にて DC4~20mA (1台)  
本信号はハンシン高度船舶安全管理システムのロガーに出力される
- (c) 積算信号のリセット カウントアップした場合または電源をオフした場合にはリセット (0カウント) される

###### 1.5) トロコイドポンプ (内蔵品)

- (a) 電源電圧 AC100V 単相 75W
- (b) 最高加圧 0.5MPa
- (c) 空回り保護 内部リリーフバルブ付
- (d) 流体温度 80°C max.
- (e) 流量 2.2 リットル/min. (装置では 1.5 リットル/min. で使用)

###### 1.6) 流量計 (内蔵品)

- (a) 電源電圧 AC100V 単相
- (b) 最高加圧 5MPa
- (c) 計測範囲 0~2 リットル/min. (コリオリ式)
- (d) 流体温度 80°C max.

###### 1.7) フィルタ (内蔵品) 10 μm



2) データレコーダ箱

2.1) 装置全体

- (a) 質量 16kg
- (b) 電源電圧 AC100V 単相 3A

2.2) データレコーダ (内蔵品) 1台

- (a) 電源電圧 AC100V 単相
- (b) サンプルレート 200  $\mu$  sec
- (c) 計測範囲  $\pm 10V$

2.3) レコーダPC 1台

金属粉粒子に応じた検出信号を表示する

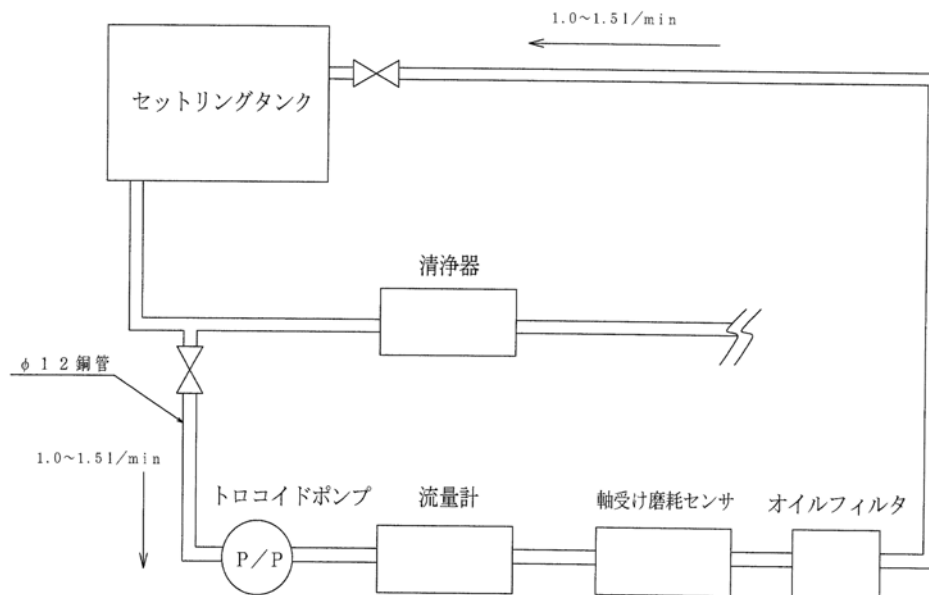
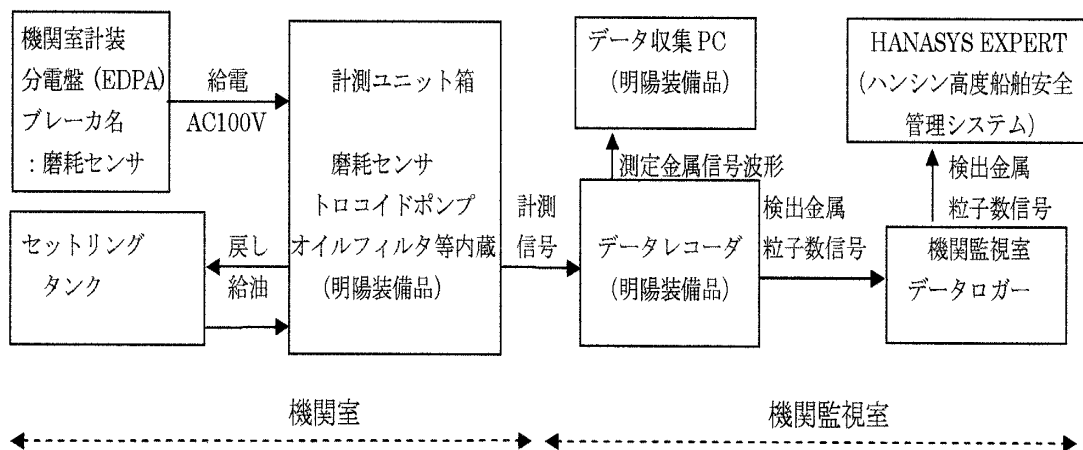


図 4.10.2.3 潤滑油吸入・吐出バルブ配管系統



図 4.10.2.4 計測ユニット箱

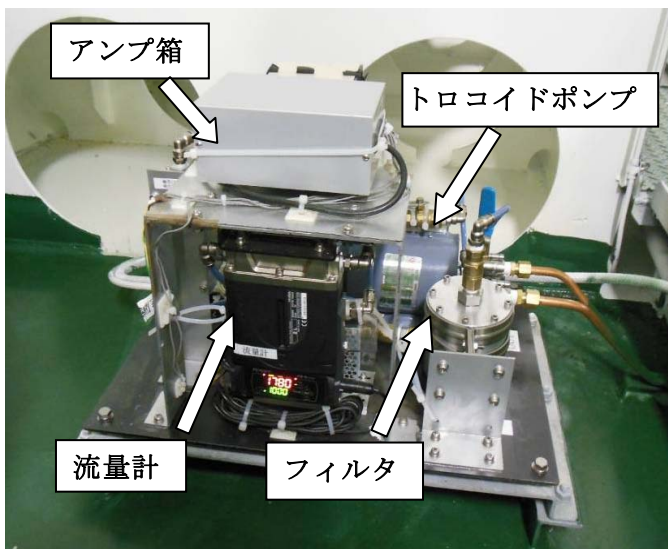


図 4.10.2.5 計測ユニット箱内部 (1)



図 4.10.2.6 計測ユニット箱内部 (2)



図 4.10.2.7 潤滑油の吸入・排出



図 4.10.2.8 セツリングタンク



図 4.10.2.9 データレコーダ箱

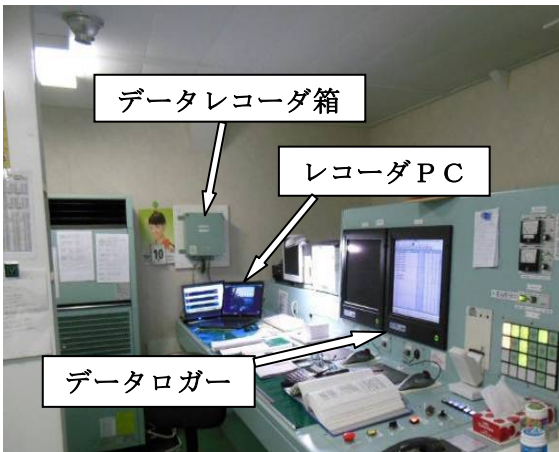


図 4.10.2.10 コントロールルーム



図 4.10.2.11 レコーダPC

BEMAC 主機関一般

パーティンド カウンタ ビュー ポイント グループ アラーム ヒストリ イベント 初期設定 ツール

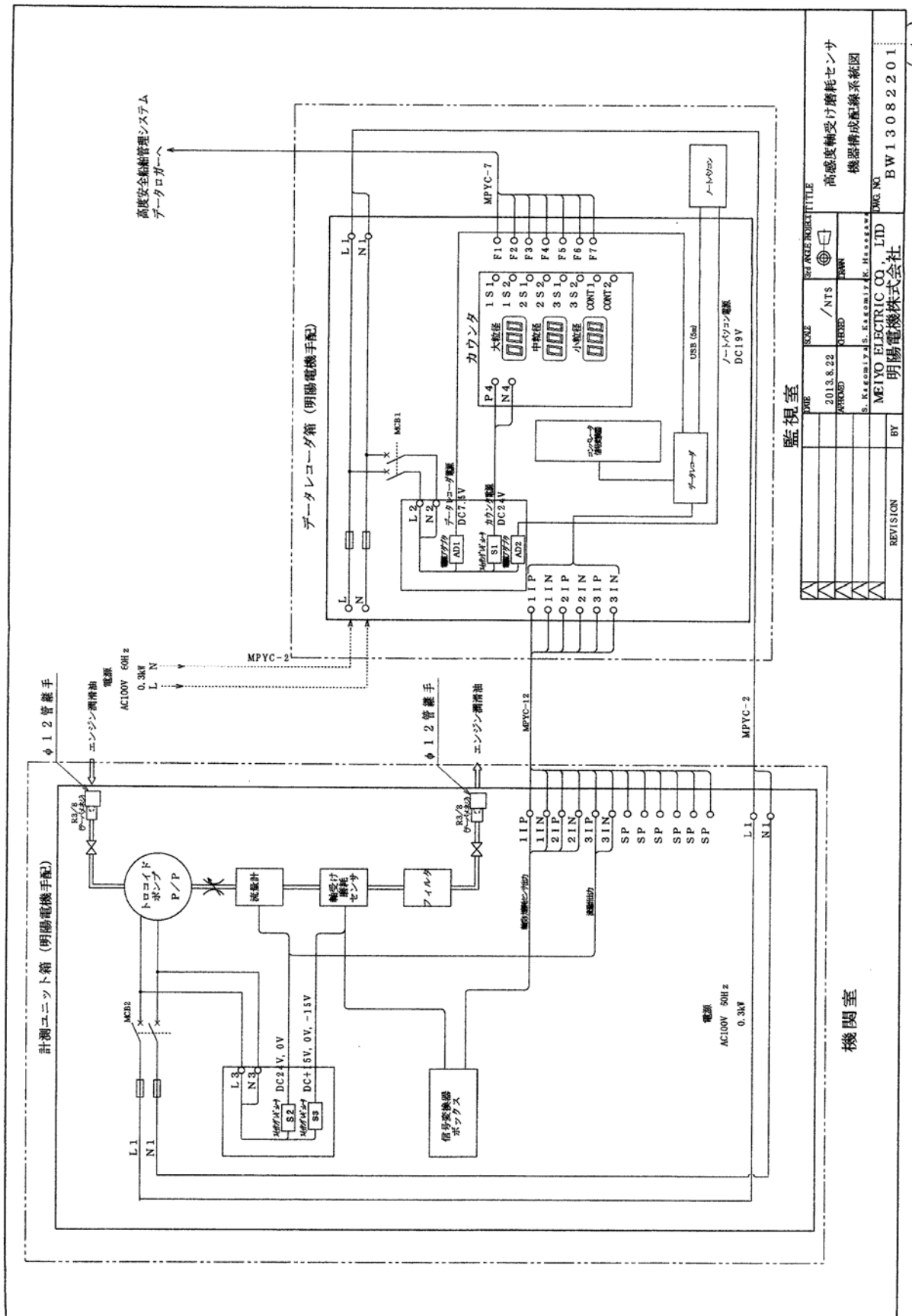
| Tagname | Tag description | Value | Low   | High  | Unit  | Tm |
|---------|-----------------|-------|-------|-------|-------|----|
| 01041   | 主機 #1 主軸受温度     | 42.6  | ----- | 70.0  | °C    | 0  |
| 01042   | 主機 #2 主軸受温度     | 43.6  | ----- | 70.0  | °C    | 0  |
| 01043   | 主機 #3 主軸受温度     | 44.2  | ----- | 70.0  | °C    | 0  |
| 01044   | 主機 #4 主軸受温度     | 44.1  | ----- | 70.0  | °C    | 0  |
| 01045   | 主機 #5 主軸受温度     | 43.7  | ----- | 70.0  | °C    | 0  |
| 01046   | 主機 #6 主軸受温度     | 43.7  | ----- | 70.0  | °C    | 0  |
| 01047   | 主機 #7 主軸受温度     | 42.4  | ----- | 70.0  | °C    | 0  |
| 01049   | 金属粉 1           | 15    | ----- | ----- | Piece | 0  |
| 01050   | 金属粉 2           | 15    | ----- | ----- | Piece | 0  |

検出粒子数を記録

F1 F2 F3 F4 F5 F6 F7 F8 F9 F10 F11 F12

調整キー UTC:14.03.05 08:43 Local:14.03.05 08:43

図 4.10.2.12 データロガーの画面



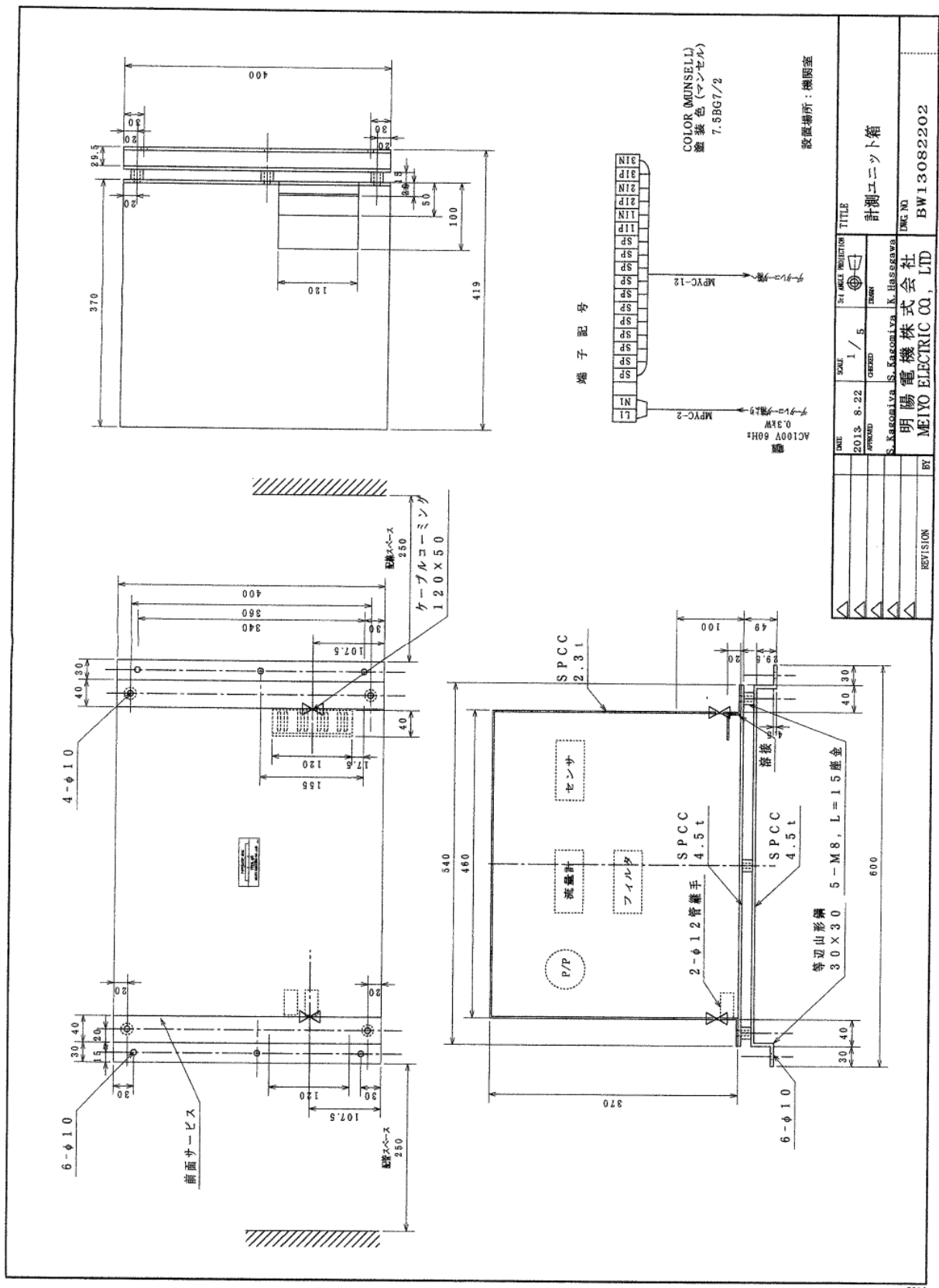
|     |            |           |          |
|-----|------------|-----------|----------|
| REV | REVISED BY | DATE      | REVISION |
| 1   |            | 2013.8.22 |          |
| 2   |            | 2013.8.22 |          |
| 3   |            |           |          |
| 4   |            |           |          |
| 5   |            |           |          |
| 6   |            |           |          |
| 7   |            |           |          |
| 8   |            |           |          |
| 9   |            |           |          |
| 10  |            |           |          |

監視室

機関室

高感度軸受け磨耗センサ  
機器構成配線系統図  
DWG No. BW13082201

図 4.10.2.13 配線系統図



|                         |         |                          |         |
|-------------------------|---------|--------------------------|---------|
| DATE                    | SCALE   | 1 / 5                    | TITLE   |
| 2013. 8. 22             | CREATED | 5                        | 計測ユニット箱 |
| APPROVED                | DESIGN  |                          |         |
| S. Kasomiva             |         | S. Kasomiva, K. Hasegawa |         |
| 明陽電機株式会社                |         | DWG NO                   |         |
| MEIYO ELECTRIC CO., LTD |         | BW13082202               |         |
| REVISION                | BY      |                          |         |

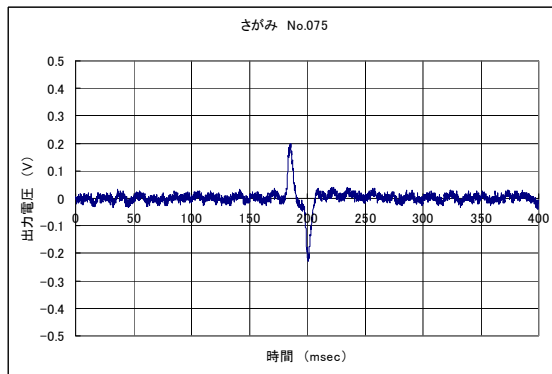
図 4.10.2.14 計測ユニット箱



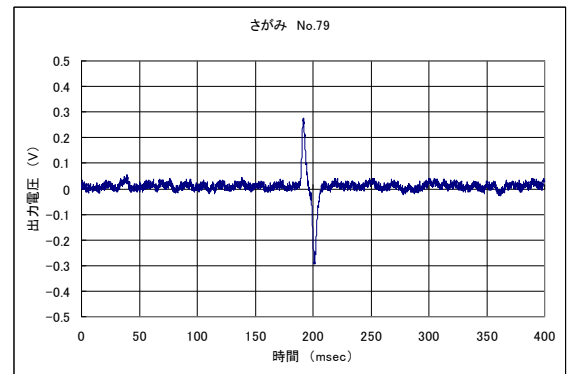
#### 4.10.2.5 試験結果

約3ヶ月の試験を行ったが、機械的及び電氣的な破損は起こらず正常に動作し、潤滑油中の磨耗粉と思われる非磁性金属粉を捉えることが出来た。その検出信号を図4.10.2.15に示す。また、採取した金属粉を社内の試験器に通して得られた信号波形を図4.10.2.16に示す。なお、この信号はオシロスコープで確認した。

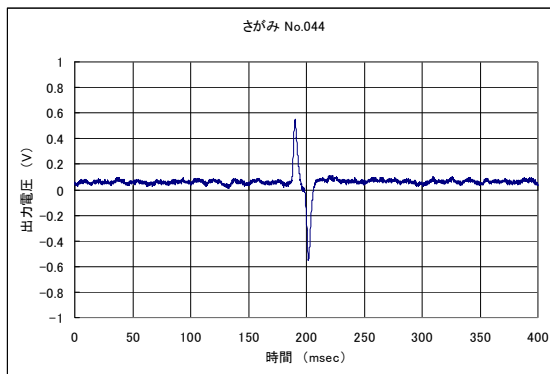
実機試験において種々問題が発生したが、新衛丸での改善が図られていたこと、ノイズの少ない場所に装置が取り付けられたこと、セッティングタンクの油温が60℃に保たれていたことなど環境条件が比較的良かった。



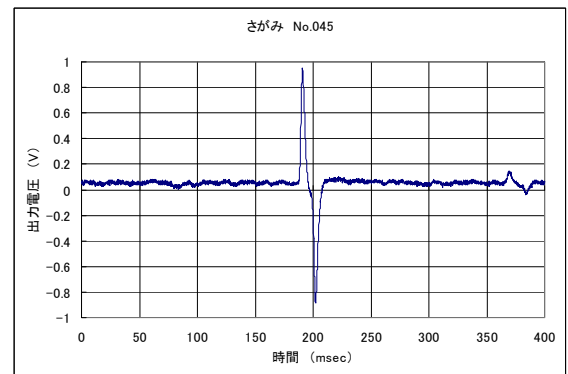
(a) 粒径 0.12mm に相当



(b) 粒径 0.13mm に相当



(c) 粒径 0.13mm に相当



(d) 粒径 0.20mm に相当

図 4.10.2.15 計測信号波形

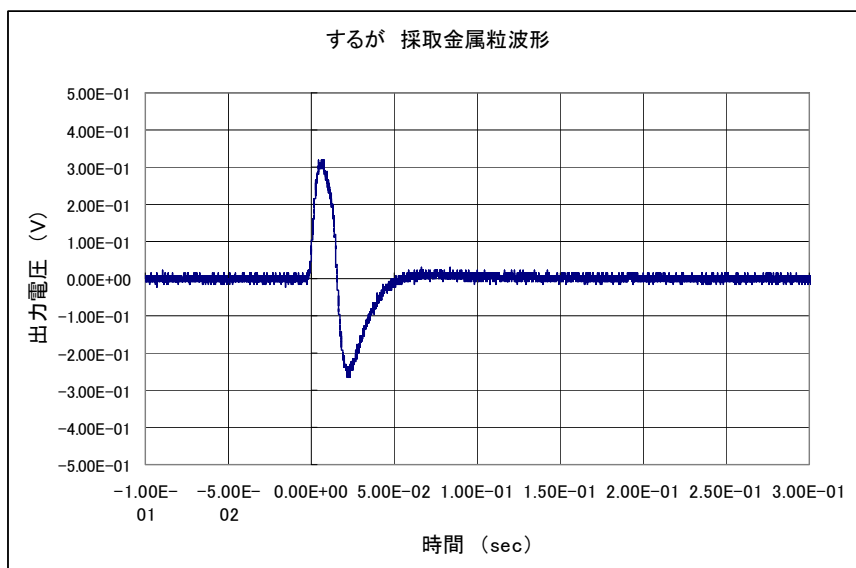


図 4. 10. 2. 16 採取金属の社内装置での測定波形

#### 4. 10. 2. 6 潤滑油の分析

実船試験中に複数回潤滑油オイルフィルタを回収した。新衛丸と同様に、採取した潤滑油はベンゼンで洗浄・希釈と粉体の沈殿を繰り返し、粉体だけを抽出した。この粉体について材料分析、電子顕微鏡やマイクロスコブによる観察、粒度分析等を行った。

##### 1) 定性分析及び走査型電子顕微鏡による寸法測定

日本軽金属株式会社 グループ技術センター

使用装置：EPMA-1610 (島津製作所製)

分析結果：φ 0. 10mm 以上の金属も認められた。分析結果の一例を表 4. 10. 2. 6. 1 に示す。

表 4. 10. 2. 6. 1 粒子寸法

| 定性・半定量分析結果 |           | 単位：% (質量分率) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 寸法単位：mm |     |     |    |     |     |    |
|------------|-----------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|-----|-----|----|-----|-----|----|
| 分析箇所       | 寸法        | C           | Si  | Fe  | Ti  | Ca  | O   | Zn  | Ba  | S   | Pb  | Al  | Na  | Mg  | K   | Cl  | P   | Co      | Cr  | Sn  | Sb | Cu  | Ni  | Mn |
| 1          | 0.20*0.15 | 80          | 4   | 4   | 3   | 2   | 2   | 1   | 1   | 1   | 0.6 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | -   | -       | -   | -   | -  | -   | -   | -  |
| 2          | 0.09*0.01 | 3           | 26  | 0.5 | 0.4 | 10  | 52  | -   | 0.2 | -   | -   | 6   | -   | 2   | 0.1 | 0.1 | -   | -       | -   | -   | -  | -   | -   | -  |
| 3          | 0.2*0.02  | 33          | -   | -   | -   | 0.4 | 3   | -   | -   | 0.1 | -   | 60  | -   | 3   | -   | -   | -   | -       | -   | -   | -  | -   | -   | -  |
| 4          | 0.23*0.2  | 18          | -   | 0.7 | -   | 0.1 | 2   | -   | -   | 0.1 | -   | 75  | -   | 4   | -   | -   | -   | -       | -   | -   | -  | -   | -   | -  |
| 5          | 0.02*0.02 | 2           | -   | 2   | -   | 0.1 | 36  | 43  | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | 16  | 0.5     | -   | -   | -  | -   | -   | -  |
| 6          | 0.4*0.01  | -           | 28  | 0.4 | 0.5 | 11  | 51  | -   | -   | -   | -   | 7   | -   | 2   | 0.1 | 0.1 | -   | -       | -   | -   | -  | -   | -   | -  |
| 7          | 0.23*0.15 | 41          | 0.8 | 0.6 | -   | 1   | 10  | 0.9 | 2   | 1   | 34  | 0.4 | -   | -   | 0.1 | 0.3 | -   | -       | 8   | -   | -  | -   | -   | -  |
| 8          | 0.02*0.02 | 4           | -   | -   | -   | -   | 2   | 3   | -   | 0.1 | -   | -   | -   | -   | -   | -   | 0.5 | -       | -   | 86  | 3  | 0.9 | -   | -  |
| 9          | 0.13*0.08 | 4           | -   | 0.6 | -   | 0.2 | 3   | 37  | -   | 0.1 | 0.5 | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -       | -   | 0.5 | -  | 54  | 0.5 | -  |
| 10         | 0.06*0.05 | 5           | 3   | 3   | 49  | 0.4 | 36  | -   | -   | 0.2 | -   | 1   | 1   | -   | 0.6 | -   | -   | -       | 0.3 | -   | -  | -   | -   | -  |
| 11         | 0.05*0.03 | 40          | 59  | -   | -   | -   | 0.7 | -   | -   | -   | -   | 0.1 | -   | 0.1 | -   | -   | -   | -       | -   | -   | -  | -   | -   | -  |
| 12         | 0.01*0.01 | 3           | -   | 16  | -   | 0.1 | 43  | 29  | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | 9   | -       | -   | -   | -  | -   | -   | -  |
| 13         | 0.02*0.01 | 12          | 2   | 83  | -   | 0.2 | 1   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -       | -   | -   | -  | 0.7 | -   | 1  |
| 14         | 0.01*0.01 | 26          | 0.1 | 2   | -   | 2   | 25  | 34  | 0.4 | 0.9 | -   | -   | -   | -   | -   | -   | 9   | -       | -   | -   | -  | -   | -   | -  |
| 15         | 0.6*0.01  | -           | 31  | 0.6 | 0.6 | 13  | 44  | -   | 0.3 | -   | -   | 8   | -   | 3   | 0.1 | 0.1 | -   | -       | -   | -   | -  | -   | -   | -  |

\*表中の“-”印は検出されなかった。

## 2) 走査型顕微鏡による観察

スター精密株式会社

使用機器：T i n y - S E M (テクネックス工房)

観察結果： $\phi 0.10\text{mm}$ 以上の金属も認められた。観察された Al の薄片の一例を図 4.10.2.17 に示す。

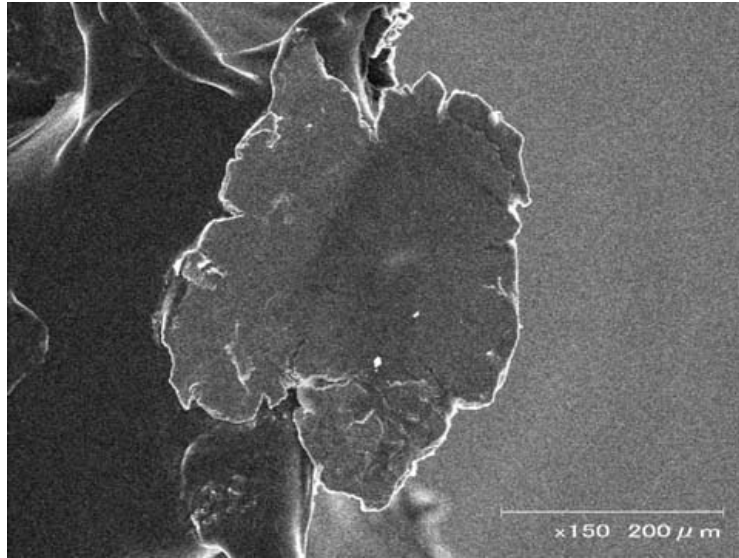


図 4.10.2.17 Al の薄片

## 5. まとめ

本事業で、粒径が $\phi 0.10\text{mm}$ まで検出可能な高感度軸受け磨耗センサーを開発した。また、軸受け磨耗センサー及び試験装置について、環境試験、実機試験、実船試験を行い、その使用に耐えることを確認した。

本試験において多数の潤滑油サンプルの分析及び観察を行い、 $\phi 0.10\text{mm}$ 程度の金属粉が相当数潤滑油に含まれていることが判った。従って、今回開発したセンサーが軸受け損傷事故の未然予知に供せるものと判断する。

本試験では、関連情報を収集するために、また、外乱対策としてさまざまな電子回路やモジュールを装置に組み込んだが、製品化にあたっては、これらを整理統合し小形・単純化を図る必要がある。また、より信頼性が高まるよう更なる改善を図り、国土交通省が推奨している「高度船舶安全管理システム」のより一層の信頼性確保につなげるセンサーとして完成させる計画である。



「この報告書は BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました」

(一社)日本舶用工業会

〒105-0001

東京都港区虎ノ門一丁目13番3号(虎ノ門東洋共同ビル)

電話：03-3502-2041 FAX:03-3591-2206

<http://www.jsmea.or.jp>