3. 舶用ディーゼル主機関のシステム油分析調査

舶用ディーゼル主機関のシステム油分析調査

1. 研究調査の背景

本会では主機関の予防保全を目的とした研究を行っているが，特にディーゼル機関については，機関を構成する要素の数が極めて多く，損傷形態も多様であるため，状態監視の方法および診断基準は研究レベル段階のものを含め多岐にわたる。

機関の状態監視診断の一例として，本会では機関計画保全検査（PMS）の状態監視保全方式（CBM）の中で，監視対象機関の運転状態（温度など）を定期的に計測し，データからトレンド解析等で状態の劣化傾向を診断することを規定している。機関，装置および部品のうち，要件を満たす状態監視システムを有するものについては，状態監視の診断結果に異常が認められるまで開放間隔を延長することができる。

一方，ディーゼル機関の他の状態監視診断方法としては，主機の潤滑油（システム油）の状態監視が考えられる。システム油の劣化度合いや金属摩耗粉の濃度などのデータを，シリンダライナをはじめとする主機の潤滑摺動面の摩耗・損傷状態と対応させ，関連付けることで，システム油の補油・交換の目安とすることや，異常を早期に発見し重大な損傷を未然に防ぐことが期待できる。

そこで，潤滑油として使用される主機関システム油の状態を分析し，その結果と開放検査時の主機関（主に潤滑摺動面）の状態との関係を調べるのが今回の調査実施の背景である。

2. 調査対象

今回システム油の分析調査を行ったのは，4 サイクルのトランクピストン型ディーゼル機関を搭載する就航船 7 隻（うち主機関として用いているのが 6 隻，発電用機関として用いているのが 1 隻）であり，表 1 に示す項目について分析を行った。船舶の総トン数は約 2,000~20,000 GT，分析のインターバルも各船で異なるが，およそ 2~6 ヶ月である。

表 1　システム油分析項目

分析項目
密度
動粘度@40℃
全アルカリ価
赤外(IR)酸化度
IR 水分
フェログラフィ DR
各金属元素(Fe, Sn, Pb, Cu, Ni, Cr, Na, V)

主機関システム油分析における表 1 の項目には，規則による標準の管理基準値は定められていない。他方，本会が行っている潤滑油の監視診断の一例として，プロペラ軸系の予防保全管理方式の承認を得た場合に付記される船級符号 PSCM(Propeller Shaft Condition Monitoring System)を有する船舶には，船尾管潤滑油の基準値による管理を要求している。表 2 に同管理基準値を示す。

主機関システム油は，使用条件など船尾管潤滑油とは異なるため，この管理基準値を分析結果にそのまま適用することはできない。しかし，油の劣化や摺動面の状態を監視しているという点では共通しており，それゆえ船尾管予防保全で用いる管理基準値をシステム油分析で一つの指標とすることは一定の意義があると考えられる。したがって，以下の分析結果において同管理基準値を参考値として示してある。

表 2　船尾管潤滑油の管理基準値
（出典：鋼船規則 B 編　表 B8.1.3-1）

標準的な分析項目	上限値の指標	標準的な分析法
Fe [ppm]	50	ICP (SOAP 法)
Sn [ppm]	20	ICP (SOAP 法)
Pb [ppm]	20	ICP (SOAP 法)
Na [ppm]	80	ICP (SOAP 法)
IR 酸化度@5.85μm [Abs.unit/cm]	10	FT-IR
分離水 [%]	1.0	Visual (24 settling hrs)

3.　分析項目

表 1 の分析項目のうち，今回は主機の潤滑面の状態と関係が強いと考えられる表 3 の項目の分析結果についてグラフ化を行い，報告する。

表 3　分析結果報告項目

分析項目	予想される分析値上昇要因
IR 酸化度	システム油の酸化劣化
Fe	ピストンリング/シリンダライナの摩耗
Sn	軸受メタルの損傷
Pb	軸受メタルの損傷

3.1　IR 酸化度

システム油の劣化を調査する一つの指標として，赤外分光法（IR 法）による酸化度（以下，IR 酸化度）を取り上げる。酸化劣化の他の指標として全酸価というものもあるが，全酸価は無機酸と添加剤中の酸性物質や使用中に生成した有機酸をすべて含んだ量である一方，IR 酸化度は油膜 1cm 当りの赤外線（波長：5.85μm）の吸収度であり，油の劣化（使用時間など）とともに増加する C=O 基を持つ酸化生成物の量を測定する。したがって，IR

酸化度は全酸価の中で油の劣化に関係する部分のみ定量するものとして取り扱うことができると考えられる。

システム油酸化劣化の影響として粘度上昇，酸化腐食，スラッジやワニスの形成などが挙げられるが，本報で主として注目するのは軸受の酸化腐食，すなわち異常摩耗・融解についてである。金属摩耗粉の検出が異常摩耗を初期段階で発見するものであるのに対して，IR 酸化度は軸受損傷を未然に防止するための指標となることが期待される。

IR 酸化度上昇の主な原因としては，使用時間による劣化の他に，燃焼残渣および摩耗粉などの混入，ピストンリングの性能低下およびブローバイによる高温ガス吹き抜けなどが考えられる。

3.2　Fe（鉄）濃度

システム油の Fe（鉄）濃度が急上昇した場合，主に燃焼室のピストンリングおよびシリンダライナがスカッフィング等の異常摩耗を起こしていることが予想される。クランク軸に異常摩耗が発生した場合も Fe 濃度は上昇するが，この場合は軸受部の摩耗により軸受金属成分の濃度が先行して上昇するはずであり，その軸受の状態は軸受金属成分の濃度監視で判定するのが合理的である。

3.3　Sn（スズ）又は Pb（鉛）濃度

本会の機関計画保全検査の状態監視保全方式では，主軸受の温度による状態監視を標準としており，温度上昇が確認された場合，軸受メタルの損傷を早期に発見できることが予測される。これに加え，システム油中の摩耗による軸受金属分の濃度を監視することで，より初期段階で軸受の劣化・損傷を検知できる一つの指標となることが期待される。船尾管潤滑油の監視では，すでに基準値による管理が有効であることが検証されており，したがって軸受ホワイトメタル（WJ2）の主な化学成分である Sn 濃度が上昇傾向を示した場合，船尾管同様に主機軸受の損傷を初期段階で検知できる可能性がある。

今回の調査対象である 4 サイクルのトランクピストン型ディーゼル機関においては，一般に銅鉛合金（ケルメット）や Sn を含むアルミ合金製の軸受が多用されている。この場合は，軸受に特有の成分として，それぞれ Pb 及び Sn の濃度が監視対象となる。

4.　分析結果

以下，主機の潤滑摺動面との関係が強いと考えられる IR 酸化度，Fe，Sn，Pb 濃度についての調査結果を報告する。

4.1　IR 酸化度

図 1 は A 船における IR 酸化度の分析結果である。本船はシステム油の全替えを定期的に実行しており，全替え直後の分析結果は赤色で示してある。前半部分ではシステム油が全替え直後の分析から酸化劣化が進行し，IR 酸化度は 30[Abs./cm]近くまで上昇している様子が見られるが，開放検査の記録からは軸受の損傷は確認されていない。

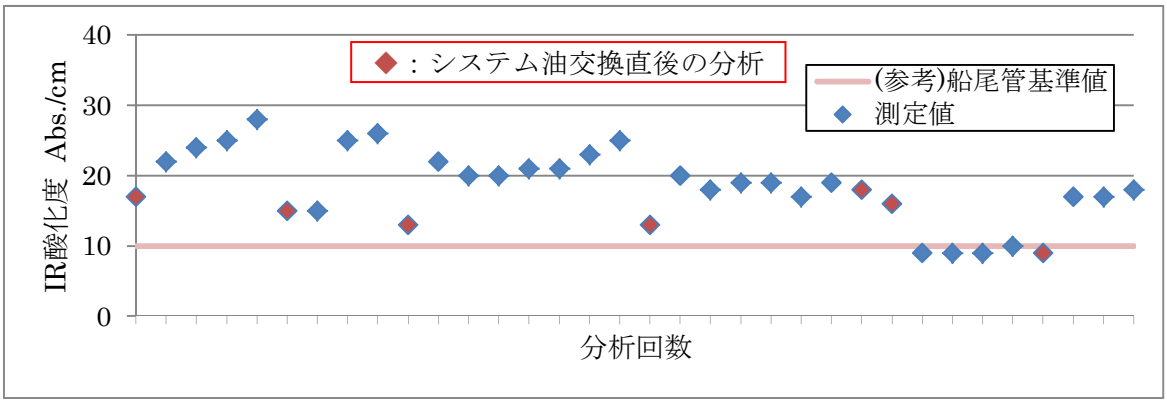


図 1　A 船　IR 酸化度

また，図 2 は A 船システム油の V（バナジウム）濃度の分析結果であるが，この元素は元々のシステム油に含まれないことから燃料油由来の成分と考えられる。V 濃度の分析結果において同様に前半部分で濃度上昇傾向が見られ，IR 酸化度の上昇時との時期が重なっていることから，A 船の IR 酸化度上昇は燃焼ガスのシステム油への混入が原因の一つであると考えられる。

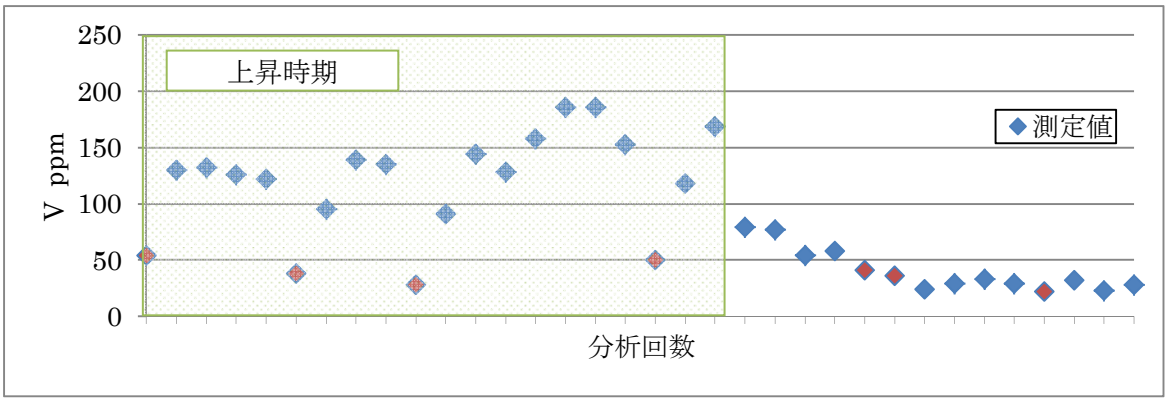


図 2　A 船　バナジウム濃度

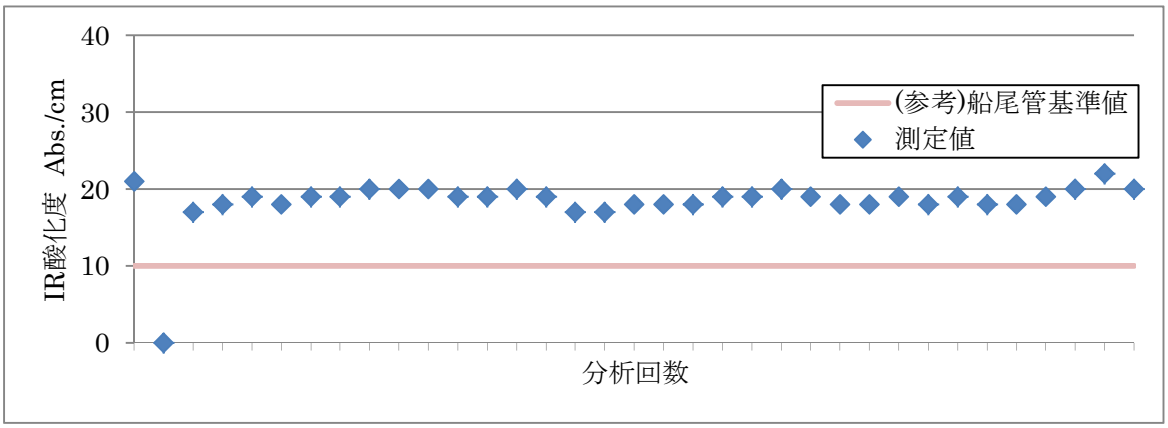


図 3　B 船　IR 酸化度

図 3 は B 船の IR 酸化度の分析結果であり，分析値の上昇傾向は見られないが，システム油の全替えは行わずコンスタントに 20[Abs./cm]と，参考値である船尾管基準値 10[Abs./cm]よりも大きい値をとっているケースである。この場合においても軸受の損傷は確認されていない。

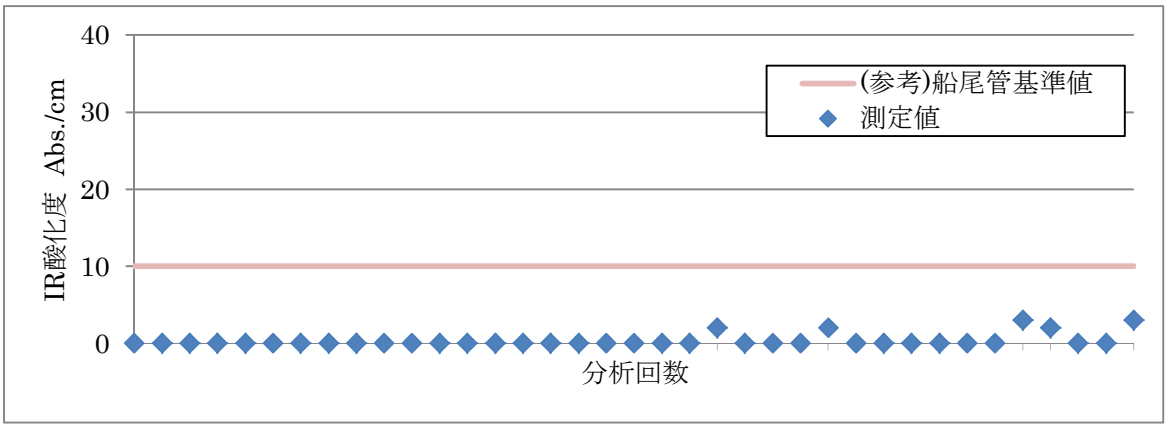


図 4　C 船　IR 酸化度

また，図 4 は C 船の IR 酸化度の分析結果である。本船は船尾管基準値と比較しても酸化度は十分に小さく，軸受の損傷も確認されていない。

以上紹介した例以外においても，IR 酸化度の上昇が何らかの損傷に関係したと思われるケースは確認できなかった。一般に，4 サイクルディーゼル機関のシステム油はシリンダ油としての役割も兼ねており，燃焼室で高温に曝され，循環しながら繰り返し使用されるため，船尾管潤滑油と比べて劣化が進みやすく，IR 酸化度が高い傾向を示すと考えられる。したがって 4 サイクルディーゼル機関の IR 酸化度については，船尾管予防保全における基準値はあくまで参考値としてのみ扱い，これをある程度上回っても直ちに機関の状態異常，あるいは軸受の酸化腐食による損傷に繋がる可能性は低いと考えられる。

4.2　Fe 濃度

図 5 は A 船システム油の Fe 濃度の分析結果である。分析の前半部分では分析値の上昇傾向が見られ，参考値 50[ppm]（船尾管予防保全における基準値）も上回っているが，開放検査時にリング/ライナの異常は確認されなかった。

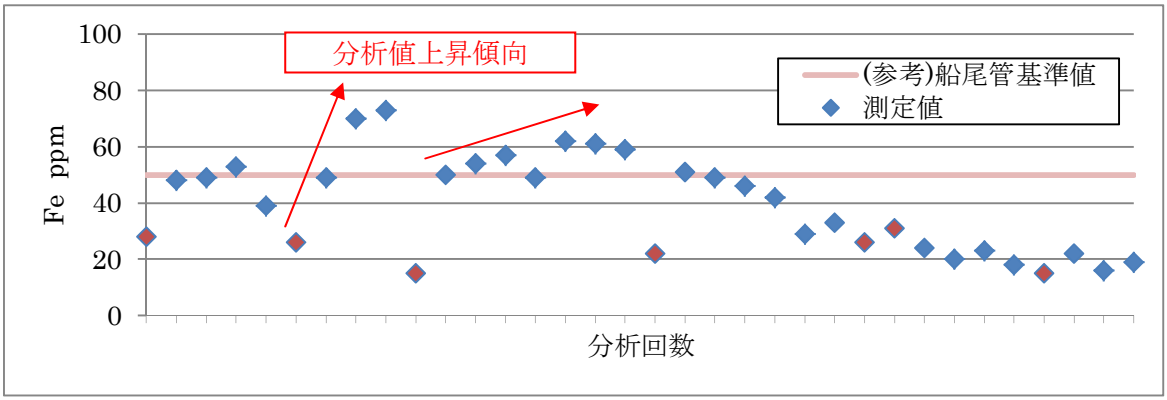


図 5　A 船　Fe 摩耗粉濃度

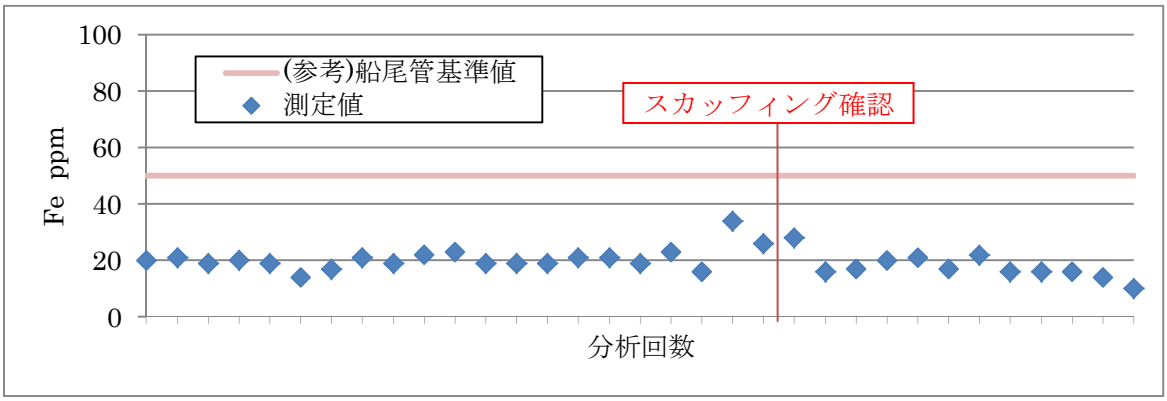


図 6　D 船　Fe 摩耗粉濃度

一方，D 船では分析結果に大きな値の上昇がほとんど確認できないのにもかかわらず，図 6 に示した時期で開放検査時にシリンダライナのスカッフィングが確認され，ライナが交換されている。本船のシステム油分析のインターバルは約 3 ヶ月であるが，このケースでは，スカッフィング発生の直前に Fe 濃度が急上昇したのではないかと考えられ，その場合システム油の分析で損傷を検知するのは困難と考えられる。

以上のケースから，Fe 濃度の分析結果がリング/ライナの損傷状態と対応しているとは言い難く，監視の基準として使用するには課題が残る。

4.3　Sn 又は Pb 濃度

Sn 又は Pb 濃度と軸受状態の対応について軸受の焼付，融解等の損傷は今回の調査では確認されなかった。開放検査時に確認されたのはいずれも軸受摩耗による交換のみである。

図 7 は C 船システム油の Sn 濃度分析結果であるが，分析値が船尾管基準値 20[ppm]を超える 33[ppm]を示した直後の開放検査において軸受の損傷は確認されていない。一方，交換と示してある時期に開放検査を行い軸受の交換が行われたが，その直前の分析では Sn 濃度の上昇は見られない。

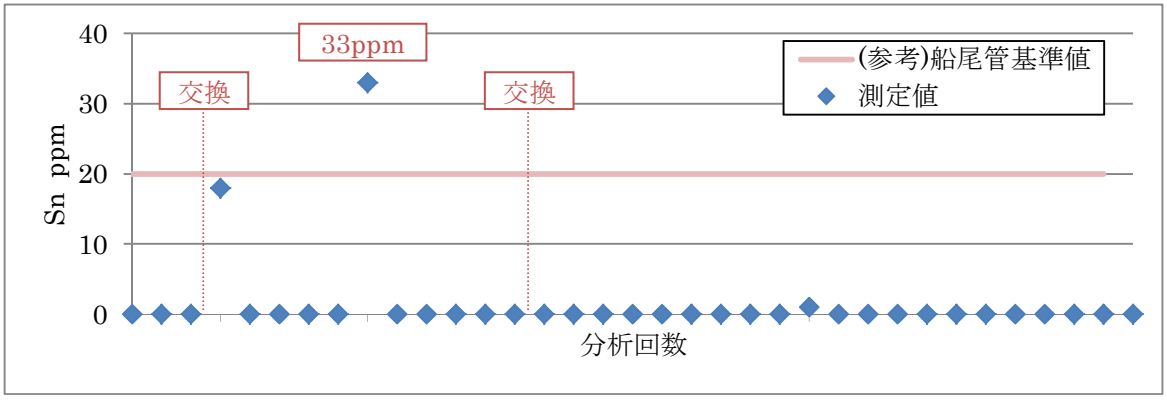


図 7　C 船　Sn 摩耗粉濃度

全体の分析で Sn 濃度が 20[ppm]（船尾管基準値）を超えたケースは 5 件あったが，いずれも開放検査時の軸受の交換時期とは重ならず，また摩耗によって交換する直前の分析でも，上記船の分析結果のように Sn 濃度が上がらないケースが多く見受けられた。

なお，今回の調査では Pb 濃度が 20[ppm]（船尾管基準値）を上回るケースは確認されなかった。

5. まとめ

状態監視による予防保全は，潤滑油性状等を監視することにより特定部品（軸受等）の状態を診断し，開放点検の時期を予測することが目的であり，船尾管軸受においては既に多くの採用実績がある。しかし，主機関の場合は，すべての主軸受，クランクピン軸受，ピストンピン軸受に加え，ピストンリングやシリンダライナの摩耗粉もシステム油に混入することから，部品を特定してその損傷状態を診断することは困難である。ただし，例えば軸受の成分である Sn や Pb の濃度がある値以下であれば，すべての軸受が正常状態であると判断することは可能であり，このように主機関潤滑油性状の監視はすべての部品が正常状態にあることを確認する目的においては有効な一つの指標であると考えられる。

本報では，4 サイクルディーゼル機関のシステム油について分析調査を紹介し，機関開放時の検査記録との対応について検討した結果，以下の知見を得た。

(1) 調査実施船においては NK の検査記録上で軸受の異常摩耗は確認されていない。よって，IR 酸化度が 30[Abs./cm]以下の場合，システム油の酸化劣化による軸受の腐食が起こる可能性は低いと考えられる。

(2) Fe 濃度とリング/ライナの異常摩耗について対応が確認されなかったため，損傷を検知するためには情報として十分ではない可能性がある。

(3) Sn,Pb 濃度について，調査実施船においては軸受焼付などの損傷が開放検査時に確認できなかったが，船尾管管理基準値の 20[ppm]を大きく超える分析結果がなかったことから，システム油の分析においても同基準値内においては軸受メタル損傷の可能性は低いと考えられる。

参考文献

日本海事協会：平成 12 年度 ClassNK 研究発表会
日本海事協会：平成 18 年度 ClassNK 研究発表会

ClassNK

2014 ClassNK 春季技術セミナー

舶用ディーゼル主機関の
システム油分析調査

目次

ClassNK

1. 研究調査の背景
2. 調査対象
3. 分析項目
4. 分析結果
5. まとめ

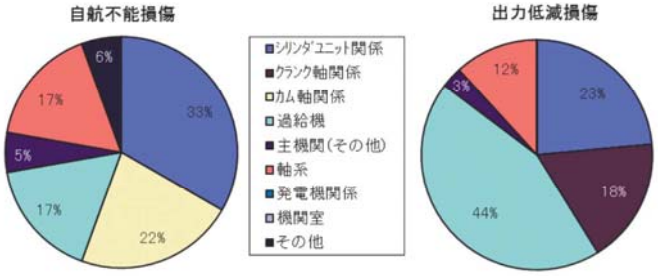
2

研究調査の背景

ClassNK

ディーゼル機関の状態監視

- 機関を構成する要素の数が極めて多く，損傷形態も多様であるため，状態監視方法・診断基準は様々。



例：機関計画保全検査の状態監視保全方式(PMS-CBM)

- 監視対象機器の運転状態（温度など）を定期的に測定しトレンド解析から状態の劣化傾向を診断する。
  - ➢ 異常が認められるまで開放間隔を延長可

研究調査の背景

ClassNK

主機潤滑油（システム油）による状態監視

システム油劣化度合い
金属摩耗粉の濃度

↓↑

主機潤滑摺動面の
摩耗・損傷状態

対応調査

システム油補油・
交換の目安
重大な損傷防止

目的

- *主機関システム油の状態と開放検査時の主機関（主に潤滑摺動面）の状態の関係を調査*

目次

ClassNK

1. 研究調査の背景
2. 調査対象
3. 分析項目
4. 分析結果
5. まとめ

調査対象

ClassNK

調査対象と分析項目

調査対象船	4サイクルディーゼル機関を搭載した就航船7隻 ➢ 主機として使用:6隻 ➢ 発電機として使用:1隻
総トン数	約2,000~20,000 GT
分析インターバル	2~6ヶ月 （船によって異なる）

分析項目
密度
動粘度@40℃
全アルカリ価
赤外(IR)酸化度
IR水分
フェログラフィDR
各金属元素(Fe, Sn, Pb, Cu, Ni, Cr, Na, V)

調査対象

ClassNK

PSCMで要求される船尾管潤滑油の管理基準値

使用条件の違い → システム油分析値にそのまま適用は不可

☛ 油の劣化，摺動面の監視という点で共通しているため，船尾管予防保全で用いる管理値を本分析で参考値とする

標準的な分析項目	上限値の指標	標準的な分析法
Fe [ppm]	50	ICP (SOAP法)
Sn [ppm]	20	ICP (SOAP法)
Pb [ppm]	20	ICP (SOAP法)
Na [ppm]	80	ICP (SOAP法)
IR酸化度@5.85μm [Abs.unit/cm]	10	FT-IR
分離水 [%]	1.0	Visual (24 settling hrs)

PSCM：プロペラ軸系の予防保全管理方式の承認を得た場合に付記される符号

7

目次

ClassNK

1. 研究調査の背景
2. 調査対象
3. 分析項目
4. 分析結果
5. まとめ

8

分析項目

ClassNK

報告について

分析項目のうち，主機潤滑摺動面の状態と関係が強い以下の項目について分析結果を報告する。

分析項目	予想される分析値の上昇要因
IR酸化度	システム油の酸化劣化
Fe	ピストンリング/シリンダライナの摩耗
Sn	軸受メタルの損傷
Pb	軸受メタルの損傷

分析項目（IR酸化度）

ClassNK

IR酸化度について

cf. 全酸価

- ✓ 赤外分光法（IR法）による酸化度
- ✓ 油膜1cm当りの赤外線（波長：5.85μm）の吸収度であり，油の劣化（使用時間など）とともに増加するC=O基を持つ酸化生成物の量を測定する

システム油酸化劣化 → 酸化腐食 → 軸受の異常摩耗・融解

☛ **軸受損傷を未然に防止するための指標となる**

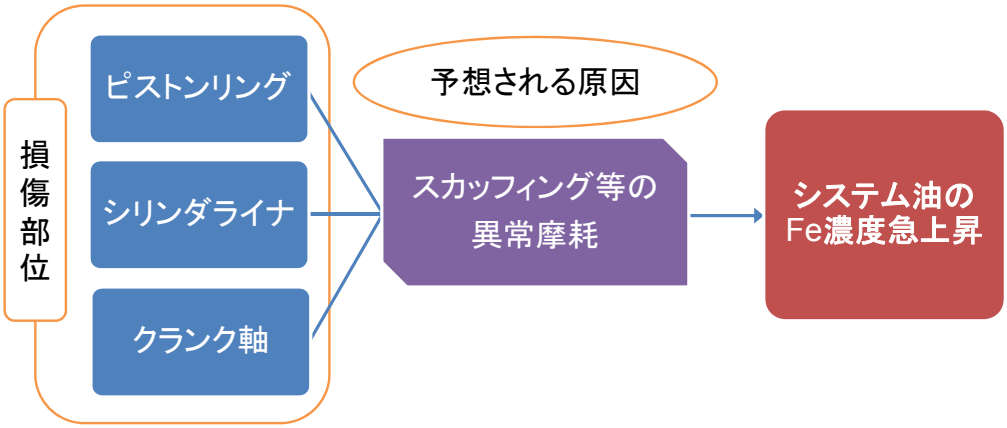
上昇原因

- □ 燃焼残渣・金属摩耗粉などの混入
- □ ピストンリングの性能低下・ブローバイによる高温ガス吹き抜け

分析項目（Fe濃度）

ClassNK

Fe（鉄）濃度について



□ ただし，クランク軸の異常摩耗の場合は先行して軸受金属成分の濃度が上昇

☛ 軸受金属成分の濃度監視で判定するのが合理的

分析項目（Sn, Pb濃度）

ClassNK

Sn(スズ)又はPb(鉛)濃度について

主軸受の温度センサによる温度上昇が確認 ➡ 軸受メタルの損傷早期発見

＋軸受金属成分の監視による軸受の劣化・損傷検知（一つの指標）

✓ 船尾管潤滑油の監視では，すでに基準値による管理が有効であることが検証済

軸受ホワイトメタル（WJ2）の主な化学成分であるSn濃度が上昇傾向を示した場合，船尾管同様に主機軸受の損傷を初期段階で検知できる可能性がある。

4サイクルのトランクピストン型ディーゼル機関においては，銅鉛合金（ケルメット）やSnを含むアルミ合金製の軸受が多用

☛ 軸受に特有の成分として，それぞれPb及びSnの濃度が監視対象

目次

ClassNK

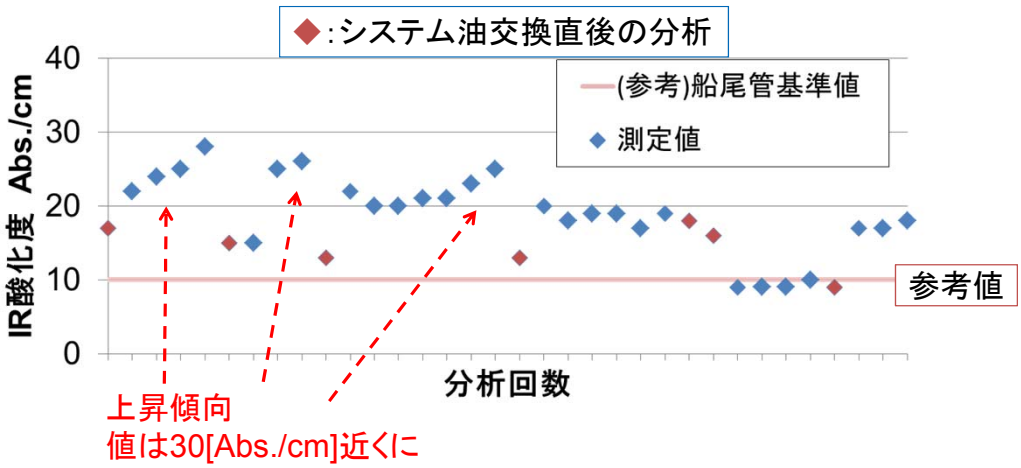
1. 研究調査の背景
2. 調査対象
3. 分析項目
4. 分析結果
5. まとめ

13

分析結果（IR酸化度）

ClassNK

A船　IR酸化度



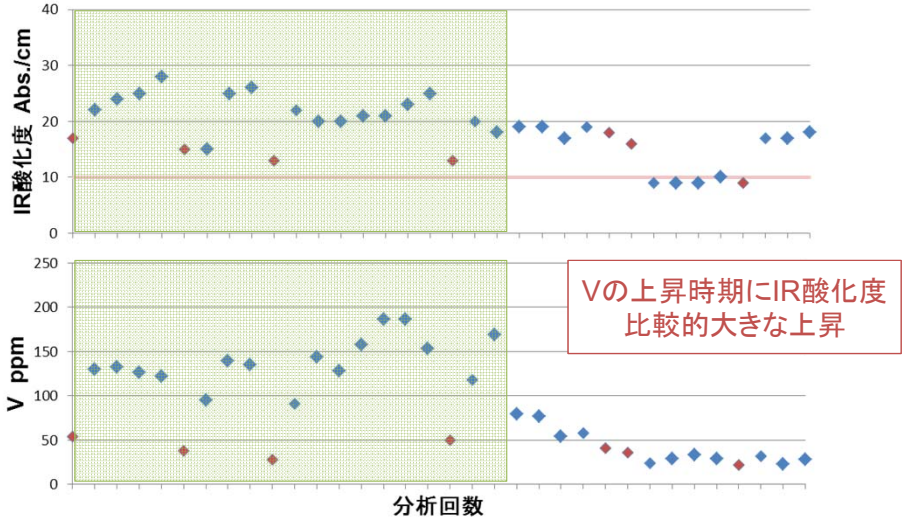
✓ 船尾管基準値に比べ高い値を示すが，軸受の異常摩耗等は確認されなかった。

14

分析結果（IR酸化度）

ClassNK

A船　IR酸化度とV(バナジウム)濃度



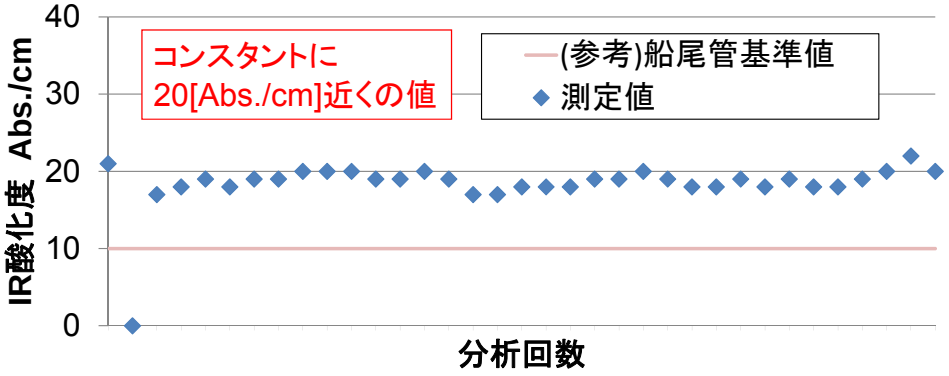
Vは燃料油由来の金属成分

燃焼ガス混入が酸化度上昇原因の一つと推定

分析結果（IR酸化度）

ClassNK

B船　IR酸化度



✓ 船尾管基準値に比べ高い値を示すが，軸受の異常摩耗等は確認されなかった。

分析結果（IR酸化度）

ClassNK

C船　IR酸化度

✓ 船尾管基準値に比べ十分低い値を示している。軸受の異常摩耗等は確認されていない。

分析結果（IR酸化度）

ClassNK

IR酸化度による状態診断

✓ 本調査で，IR酸化度と損傷が関係したと思われるケースなし

一般に，4サイクルディーゼル機関のシステム油は
シリンダ油としての役割も兼ねる

燃焼室で高温に曝され，循環しながら繰り返し使用される

船尾管潤滑油と比べて劣化が進みやすい（IR酸化度は高くなる）

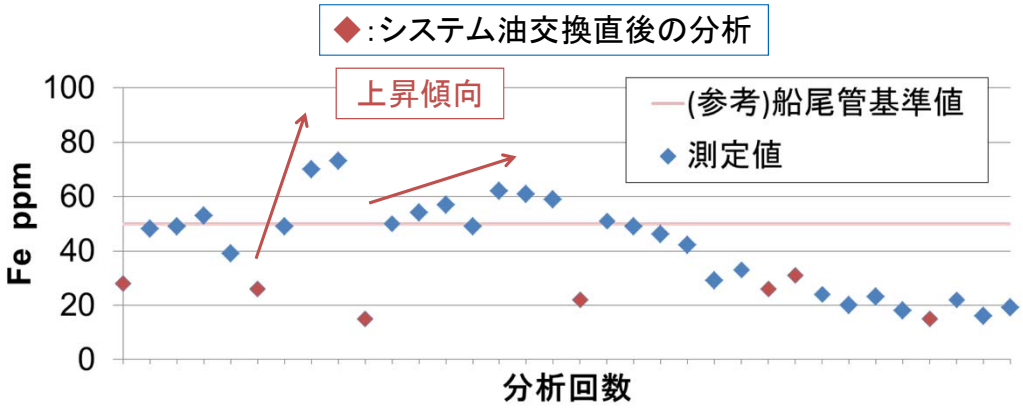
船尾管基準値よりある程度上昇しても，直ちに
- 機関の状態異常
- 軸受の酸化腐食が起こる

等のトラブルと繋がる可能性は低い

分析結果（Fe濃度）

ClassNK

A船　Fe濃度

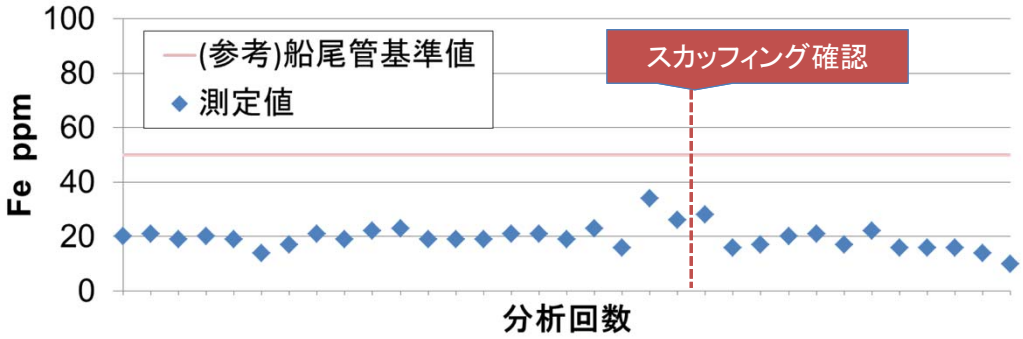


✓ 前半の分析で濃度上昇傾向にあるが，開放検査時に異常は確認されていない。

分析結果（Fe濃度）

ClassNK

D船　Fe濃度



✓ 値の変化はほとんど確認されていないが，ライナのスカッフィングが発生。損傷直前にFe濃度上昇？

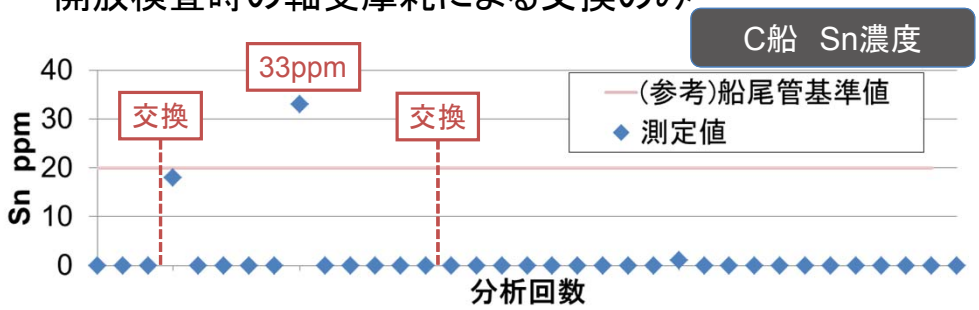
➡ 監視の基準とするには課題が残る

分析結果（Sn, Pb濃度）

ClassNK

Sn又はPb濃度

- 軸受の焼付・融解等の損傷が今回の調査では確認されず
- 開放検査時の軸受摩耗による交換のみ



✓ 全体の分析でSn濃度が20ppm（船尾管基準値）を超えたケースは**5件**
⇒開放検査時の軸受の交換時期とは重ならず
⇒交換直前の分析でも濃度が上がらないケースが多い

✓ Pb濃度が20ppm（船尾管基準値）を上回るケースは無し

目次

ClassNK

1. 研究調査の背景
2. 調査対象
3. 分析項目
4. 分析結果
5. まとめ

まとめ

ClassNK

状態監視による予防保全の目的 → 開放点検時期を予測

主機関

すべての
- 主軸受
- クランクピン軸受
- ピストンピン軸受
- シリンダライナ
- ピストンリング

摩耗粉 → システム油性状 → 部品特定・損傷状態診断が困難

出処は？

☛ただし，例えば軸受の成分であるSnやPbの濃度がある値以下であれば，すべての軸受が正常状態であると判断することは可能

システム油性状の監視は**すべての部品が正常状態にある**ことを確認する目的では有効な指標であると考えられる。

23

まとめ

ClassNK

1. IR酸化度

- 本調査では軸受の異常摩耗は検査記録上確認されていない
  - IR酸化度が30[Abs./cm]以下の場合，システム油の酸化劣化による軸受の腐食が起こる可能性は低いと考えられる。

2. Fe濃度

- リング/ライナの異常摩耗について対応が確認されなかった
  - 損傷検知のための情報として十分ではない可能性がある。

3. Sn又はPb濃度

- 軸受焼付などの損傷は検査記録上確認されていない
- 船尾管基準値の20ppmを大きく超える分析結果なし
  - システム油の分析においても同基準値内においては軸受メタル損傷の可能性は低いと考えられる。

24