



一般財団法人 日本海事協会 共同研究 STEP1最終報告会資料

「主機主軸受状態監視技術の実用化 STEP1 診断方法立証試験」

2016年3月23日

株式会社商船三井 旭化成エンジニアリング株式会社 一般財団法人日本海事協会



- 1.はじめに
- 2. 周波数変調解析法について
- 3.研究開発結果(要約)
- 4.信号レベル(ケプストラムレベル)(要約)
- 5.今後の予定
- 6.研究結果報告(詳細)
- 参考資料 ケプストラムレベル別データ(詳細)

1.はじめに



1. 共同研究の目的

- ・従来の振動解析法と異なる周波数変調解析(後述)による、すべり軸受の状態監 視技術の開発。
- ・本研究では、主機主軸受を研究対象とする。(船尾管・過給機軸受など展開可)

2. 共同研究の効果

- 船級に資する検査技術の高度化: 状態監視技術の発展による開放周期の延長。
- ・事故防止と保全費の最適化:軸受異常を未然に検知。時間基準から状態基準へ。

3. 共同研究STEP1の目標

- ・信号レベル(ケプストラムレベル)とメタルの損傷の相関を確認し、当診断技術の基 礎的科学的なメカニズムを解明すること。
- ・得られたデータはSTEP2以降に計画している実機で試験を行う上での評価基準 策定の基礎データとすること。

4. 共同研究内容

- ・静荷重下で損傷試験を行う。
- ・以下の各段階においてケプストラムレベルごとにメタルを取り外し、損傷状態を観 察する。
 - ・油量低下方式において、4段階の損傷状態において、8データ
 - ・荷重増加方式において、3段階の損傷状態において、6データ



1.はじめに



5. 業務実施場所

旭化成エンジニアリング(株) プラントライフ事業部 メンテナンス研究所内

6. 実施期間

自 2015年 12月

至 2016年 3月



2. 周波数変調解析法について(従来の振動診断技術との違い)

	従来法	今回	
解析名称	振動診断技術 (振幅や波形の変化に基づ	周波数変調解析	
	軸振動	軸受箱振動	軸受箱振動
使用する振動センサ	渦電流変位計	圧電型加速度計	圧電型加速度計
信号処理方法	リサージュ、FFT	FFT (高速フーリエ変 換)、エンベロープ解析	ケプストラム解析
主にモニタリングする 対象	振動値、リサージュ形状、 回転周波数とその高次成分	振動値、回転周波数とそ の高次成分	回転周期に現れる ケプストラムレベル
ノイズに対する強さ	弱い (外部からの伝搬振動の影	強い	
すべり軸受のラビング 異常検出感度	低い	高い	





回転軸には必ず偏心による振れ回りが発生する



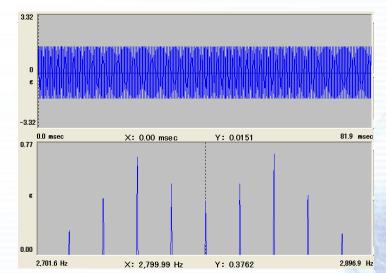
接触すると、1回転に1回の接触応力の強弱が発生する



回転周期の規則性を持った周波数変調波形が発生する



周波数変調 スペクトル

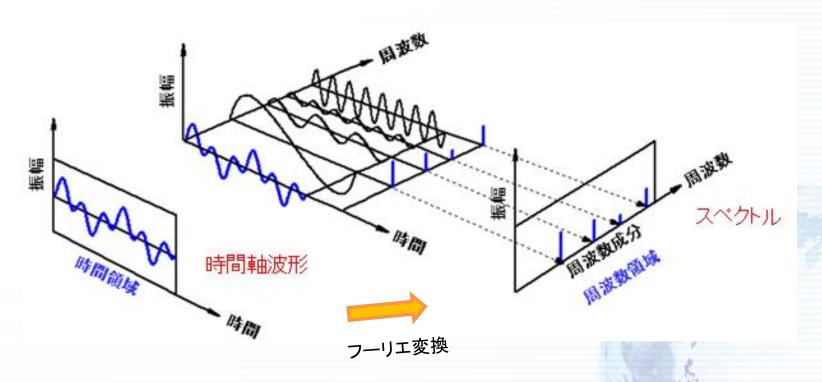






いかなる波形もある周波数のある振幅の正弦波の和で表すことができる

フーリエ変換の概念図





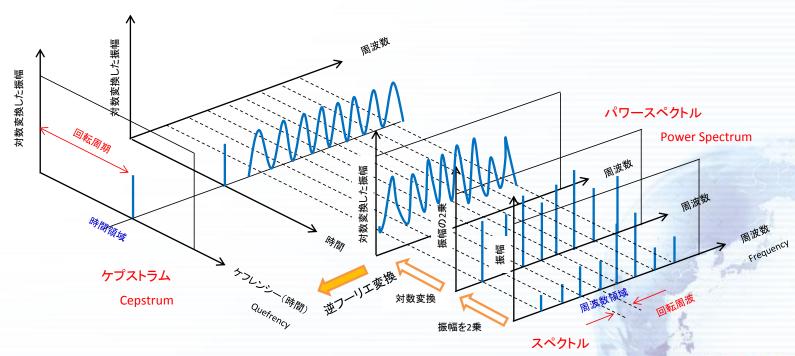
3 ケプストラム解析

信号f(t)のパワースペクトルFxx(f)

$$F_{XX}(f) = \left| \Phi \left\{ f_X(t) \right\} \right|^2$$

パワーケプストラムを $C_p(\tau)$ とすると $C_p(\tau) = \Phi^{-1} \{ \log F_{XX}(f) \}$

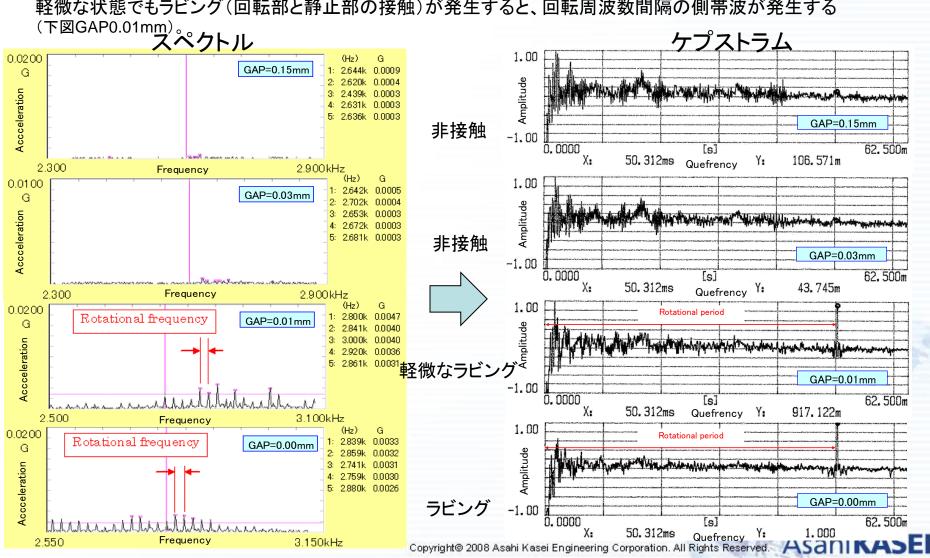
ケプストラムの概念図



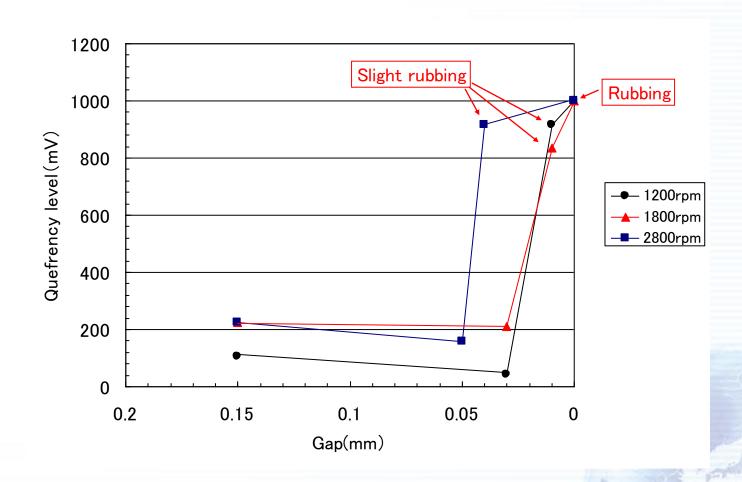


周波数変調解析法によるすべり軸受状態監視技術

軽微な状態でもラビング(回転部と静止部の接触)が発生すると、回転周波数間隔の側帯波が発生する





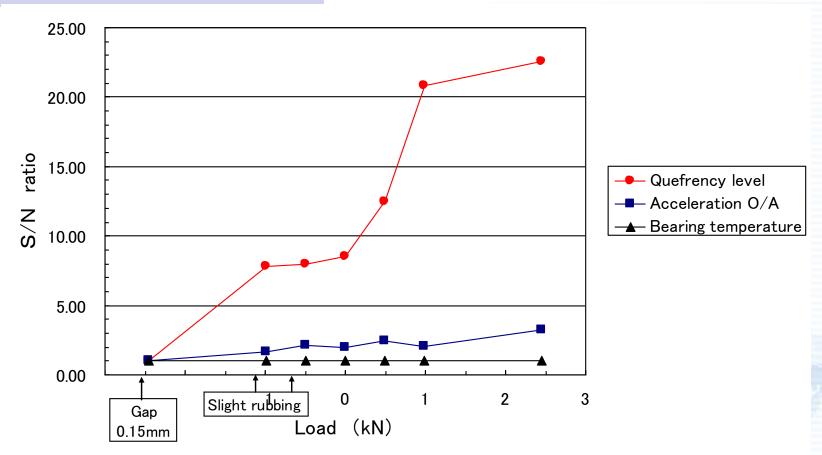


各回転数とも軽微なラビングが発生すると回転周期のケフレンシーレベル の上昇が見られる。

2. 周波数変調解析法について(特徴)



すべり軸受片当たり試験



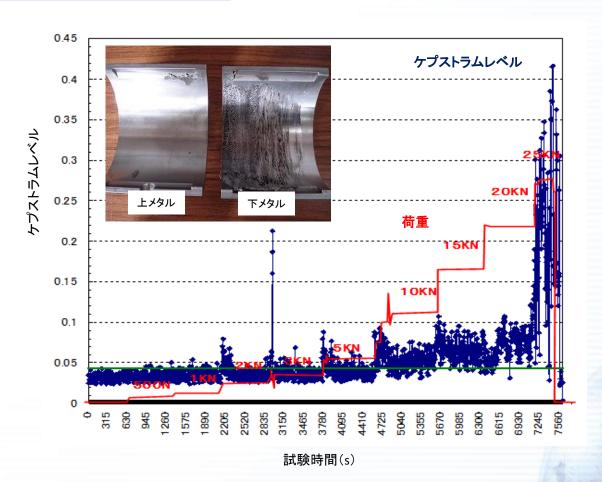
ケプストラムは、従来の状態監視法(振動レベル、温度)よりもS/N比が高い



2. 周波数変調解析法について(特徴)



すべり軸受焼付き試験例

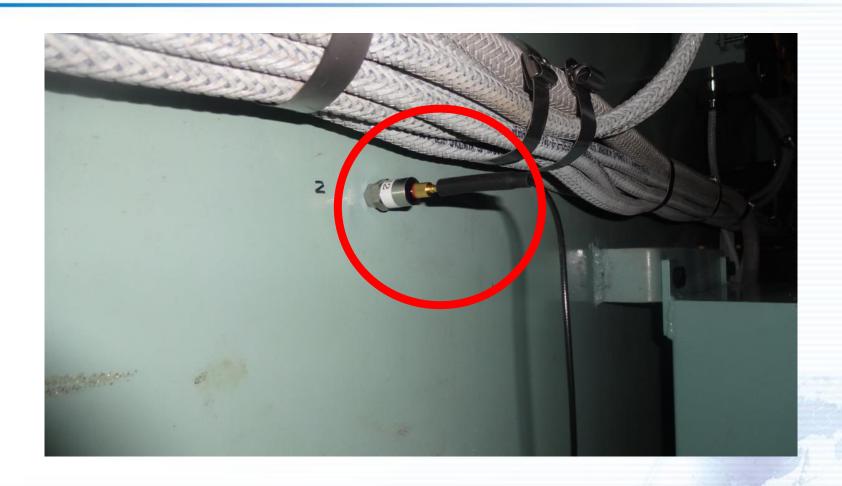


焼付き損傷に至るまでに、ケプストラムレベルの上昇が確認できている。





2. 周波数変調解析法について(特徴)



センサ設置状況(ケーシングの外から測定が可能)



3.研究開発結果(要約)

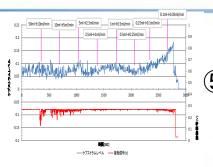


- 1.信号レベル(ケプストラムレベル)は、油膜の形成状態(接触状態)と相関が 見られる。つまり、油膜破断から遅滞なくすべり軸受の損傷状態をモニタリン グできていると言える。
- 2.損傷発生状態から油量を増加すると油膜の再形成が行われ、それに伴いケプストラ ムレベルも瞬時に反応し、低下する。つまり、現場で損傷発生時に延命措置として油 量の増加を行ったときに、その効果をケプストラムレベルによって評価・監視できる。
- 3.メタル表層温度や油膜による電気抵抗値も油膜形成状態との相関が見られ、損傷程 度とも関係が見られたが、現実的に実機における計測は困難であることから、これら と相関が見られるケプストラムレベルのモニタリング方法が有効である。
- 4.メタル内部温度は、ケプストラムレベルとの相関はなく、急上昇を示した。また、振動 加速度は各試験とも異常検出感度は低く、損傷が進展してからの検出となり、その上 昇も僅かな値となっていた。これらの方法はすべり軸受の状態監視には不向きである と考える。

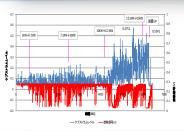
4.ケプストラムレベル別データ(要約)

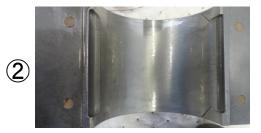


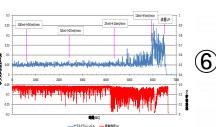


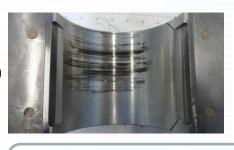


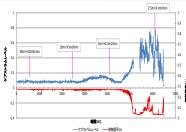




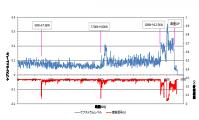








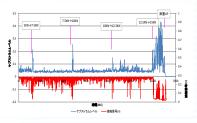




損傷とケプストラムレベルの 関連性を明確に示せた。

図番	最大値	最大値・試験日	図番	最大値	最大値・試験日
1	~0.2	0.1839•1/15	⑤	~0.6	0.5751 • 3/4
2	~ 0.3	0.2606 • 1/22	6	~ 0.8	0.7745 • 1/25
3	~0.4	0.3535•3/12			
4	~0.5	0. 4327•3/5			





4.今後の予定



1.(検証)変動荷重下での損傷とケプストラムレ ベルの相関関係の確認。

2.(実証1)軸受接触状態を再現した実証。

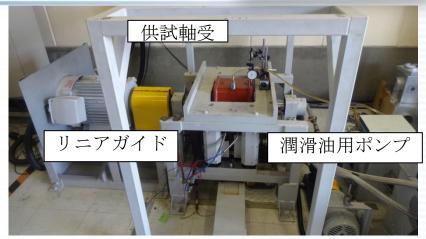
3.(実証2)船舶での実証。

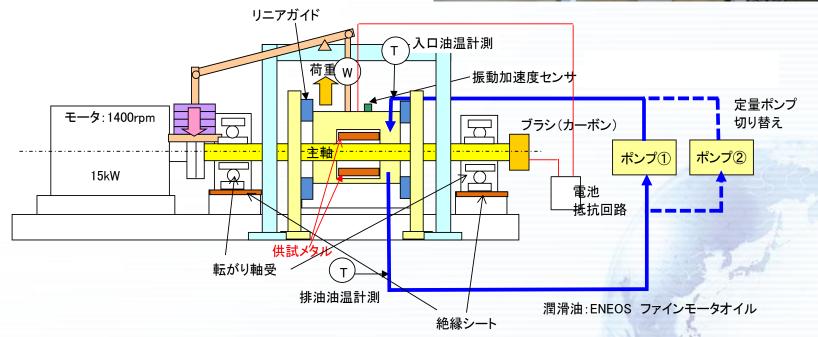
その他.船尾管軸受等への適用



試験方法(試験装置, 試験条件)

転がり軸受(型式6310)に両支持された回転 軸(Φ50mm)にすべり軸受(すべり軸受部の 軸径はΦ100mm)のケーシングを垂直にスラ イドできる様にリニアガイドを設置しており、吊 り下げ方式にて荷重を掛ける。



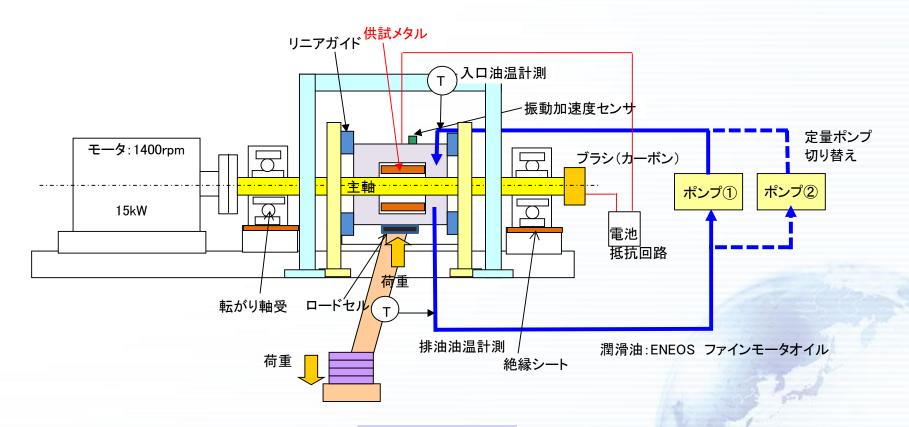


吊り下げ方式

gineering Corporation. All Rights Reserved. Asahi KASEI



軸受ハウジング下部から「てこ」の原理で荷重を掛けていく方式をとり、軸受ハウジング下部 のロードセルにて荷重を計測する。



押し上げ方式





供試軸受

材質:ホワイトメタルWJ2、サイズ:100×100mm

潤滑油

ENEOS ファインモーターオイル5W-40

モータ仕様

回転数:1400rpm(周速:1400rpm×100mm⇒実機200rpm×700mmを想定)

容量:15kW

5.研究結果報告



油量、荷重条件

各荷重にて段階的に以下の油量に低下させる。各条件下で30min保持。

(1)油量低下試験

- a)荷重2kN時
- $50 \text{ml/min} \Rightarrow 10 \text{ml/min} \Rightarrow 5 \text{ml/min} \Rightarrow 2.5 \text{ml/min} \Rightarrow 1 \text{ml/min} \Rightarrow 0.5 \text{ml/min} \Rightarrow 0.25 \text{ml/min}$
- $\Rightarrow 0.1 \text{min/min} \Rightarrow 0.05 \text{ml/min}$
- b)荷重2kN時
- $10 \text{ml/min} \Rightarrow 5 \text{ml/min} \Rightarrow 2.5 \text{ml/min} \Rightarrow 1 \text{ml/min} \Rightarrow 0.5 \text{ml/min} \Rightarrow 0.25 \text{ml/min}$
- \Rightarrow 0.1min/min \Rightarrow 0.05ml/min \Rightarrow 0ml/min
- c)荷重15kN時
- $100 \text{ml/min} \Rightarrow 50 \text{ml/min} \Rightarrow 25 \text{ml/min} = 100 \text{ml/min} \Rightarrow 2.5 \text{ml/min} \Rightarrow 1 \text{ml/min}$
- ⇒0.5ml/min

②荷重増加試験

- d)油量10ml/min $5kN \Rightarrow 7.5kN \Rightarrow 10kN \Rightarrow 12.5kN \Rightarrow 15kN$
- e)油量5ml/min $5kN \Rightarrow 7.5kN \Rightarrow 10kN \Rightarrow 12.5kN \Rightarrow 15kN$

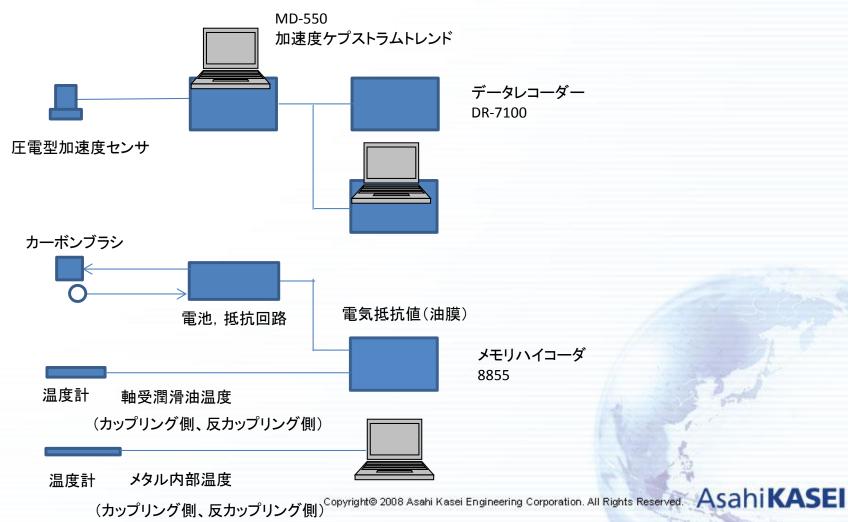
5.研究結果報告

ClassNK

計測系

振動: 周波数範囲 1k~30kHz

圧電型加速度センサ、振動精密診断器、データレコーダー、メモリハイコーダ



5.研究結果報告

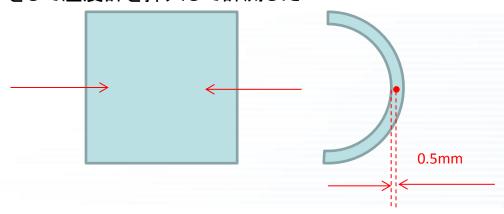


試験方法

設定された荷重と油量から、段階的に油量を低下して損傷に至らせる試験(油量低下試験)と油 量一定で荷重を段階的に増加していき損傷に至らせる試験(荷重増加試験)の2種類の試験で評 価する。

焼き付き損傷に至った試験時のデータから正常時から焼き付きに至った最終段階までのケプスト ラムの上昇傾向を求め、それよりも低いレベルを目標値(試験停止値)として、3段階での試験を 行う。

尚、軸受直下の潤滑油温度が100℃を超えた時点で焼き付きと判断し試験を停止する。 メタル内部温度はメタル表面から0.5mmの位置にカップリング側と反カップリング側 の2箇所に穴加工をして温度計を挿入して計測した



油膜の電気抵抗を計るため、回転軸とすべり軸受は電気的に絶縁しており転がり軸受 ハウジングの下部には絶縁シートを挿入している。軸端からカーボンブラシにより電流 を流している。油膜が破断した場合に電気抵抗値が低下するので、油膜の形成状況が モニタリングできる。



2 試験結果まとめ

油量低下方式12回、荷重増加方式6回の計18回の試験を実施した。

	試験No.	油量、荷重 条件	試験実施日
	1	а	1月13日
	2	а	1月15日
	3	а	1月18日
	4	а	1月19日
	5	а	1月25日
油量低下	6	b	2月1日
試験	7	b	2月2日
	8	С	2月20日
	9	С	2月22日
	10	С	2月22日
	11	С	2月23日
	12	С	2月26日
	13	d	3月4日
荷重増加試験	14	d	3月4日
	15	d	3月5日
	16	d	3月5日
	17	е	3月7日
	18	е	3月12日 asei Engineering Co

(1)ケプストラムレベルの最大値とメタル損傷面積の関係



	試験No.	油量、荷重条件	試験実施日	ケプストラム 積分値(5min)	メタル損傷面積 (mm²)
	1	а	1月13日	21.0695	929
	2	а	1月15日	8.7874	0
	3	а	1月18日	25.2935	1192.5
	4	а	1月19日	14.7624	0
	5	а	1月25日	31.7073	5393.5
油量低下	6	b	2月1日	10.1999	2670
試験	7	b	2月2日	17.7488	3277
	8	С	2月20日	23.2236	3235
	9	С	2月22日	7.3684	607.3
	10	С	2月22日	11.7739	1485
	11	С	2月23日	17.0437	965
	12	С	2月26日	12.692	3575
	13	Р	3月4日	16.2501	3677
	14	d	3月4日	7.8876	1815
荷重増加	15	Р	3月5日	11.7266	1338.7
試験	16	d	3月5日	12.1061	2748.7
	17	е	3月7日	17.3875	360
	18	е	3月12日	11.9588	835

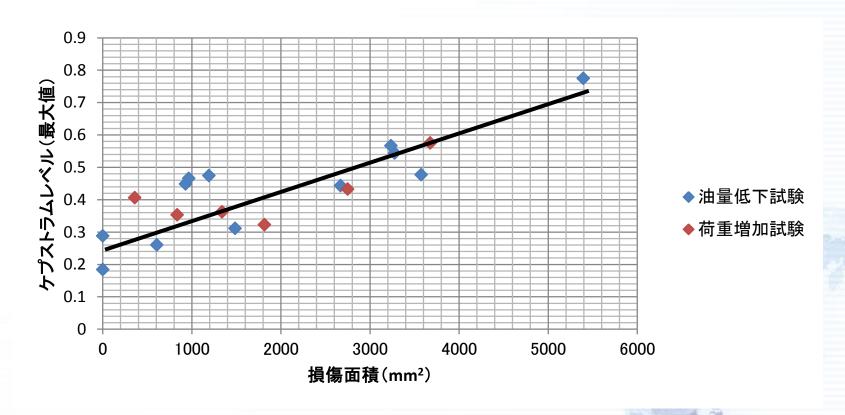
メタル損傷面積は、顕微鏡による観察にて四角形部分と三角形部分に分け て算出している。



- 5.研究開発結果報告(詳細)
- (1)ケプストラムレベルの最大値とメタル損傷面積の関係



ケプストラムレベル(最大値)と損傷面積には相 関がある。

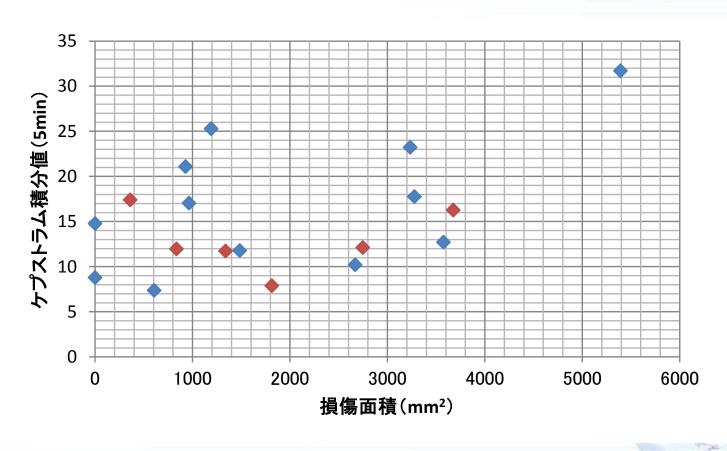


(1.参考) ケプストラム積分値と損傷面積の関係



ケプストラムの最大値よりも、高いケプストラムレベルが継続した時間の方がより損傷面積と関係があると考えられた為、停止前の5min間の積分値と損傷面積との関係を検討した。

ケプストラムレベルの積分値(5min)とメタル損傷面積の関係を示す。 ケプストラムレベル(最大値)に比べて、バラツキが多くなっている結果となっている。

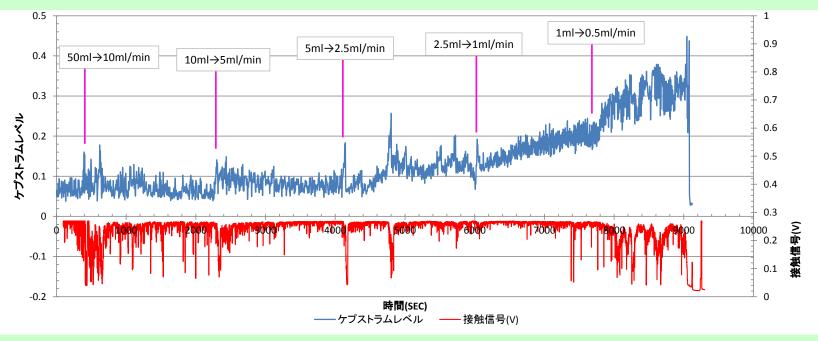


- ◆油量低下試験
- ◆荷重増加試験

- 5.研究開発結果報告(詳細)
- (2)ケプストラムレベルの変化と油膜形成状態の関係



ケプストラムレベルは油膜の形成状態と相関が 見られる。



振動加速度のケプストラムレベルは、油膜の形成状態(接触状態)と相関が 見られ、油膜破断から時間遅れなく感度良く検出できており、早期に異常を 検知できる。

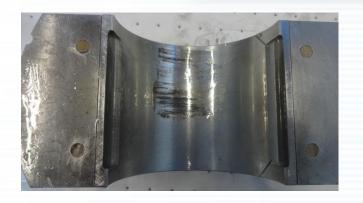
1月13日(油量、荷重条件a)No.1

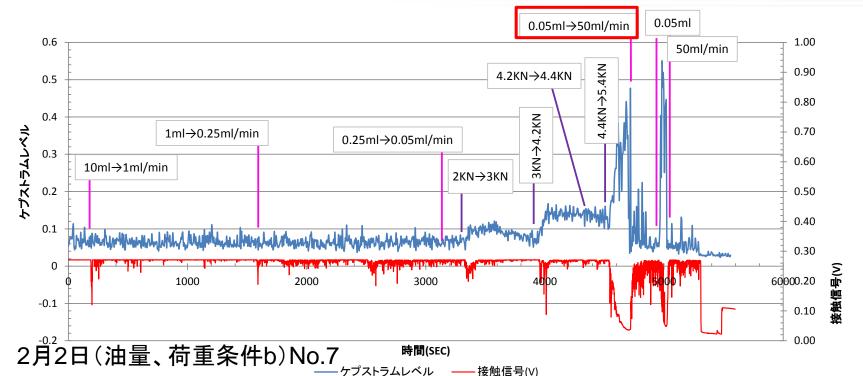


ClassNK

(2.立会い試験) ケプストラムレベルの変化と油膜形成状態の関係

損傷発生状態から油量を増加すると油膜の 再形成が行われ、それに伴いケプストラムレベルも低下する。つまり、現場で損傷発生時 に延命措置として油量の増加などを行ったと きにその効果をケプストラムレベルによって評 価・監視できる



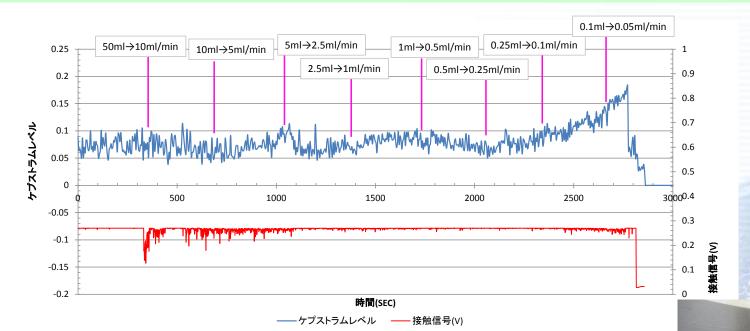




(2.補足)ケプストラムレベルの変化と油膜形成状態の関係

油膜が破断するとケプストラムレベルの上昇が見られており、ケプストラムレベルにより油膜破断状況がモニタリングできると言える。

但し、油膜の形成状況を示す電気抵抗値が変化していないときに、ケプストラムレベルが上昇しているケースがいくつか見られる。このような状態である試験No.2、No.3、No.4、No.17などを見ると損傷面は鏡面状態であり摩耗粉の発生がほとんど無い。このように摩耗に至らない、オイルフィルムの厚みが極薄い状態でもケプストラムは反応していると考えられるが、これらの時のケプストラムレベルは0.3未満の低いレベルである。

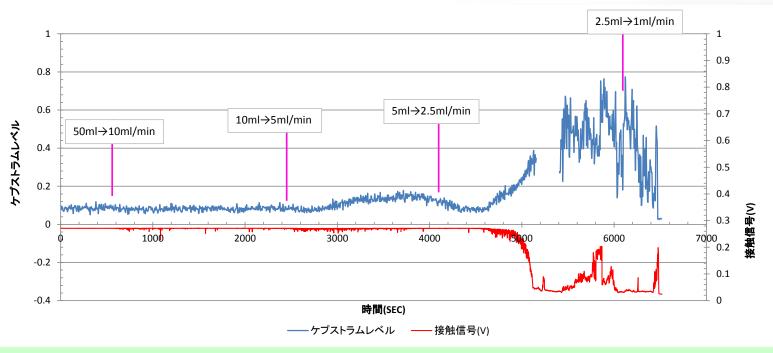


1月15日(油量、荷重条件a)No.2

Copyright@ 2008 Asahi Kasei Engineering Corporation. All Righ

(2)ケプストラムレベルの変化と油膜形成状態の関係





一方、試験No.5、No.12、No.13、No.15などのように、深みのある損傷で摩耗粉の 発生が想定される場合では、電気抵抗値の変化と呼応してケプストラムレベルが変 化している。これらの時は比較的ケプストラムレベルが高い場合であった。

1月25日(油量、荷重条件a)No.5

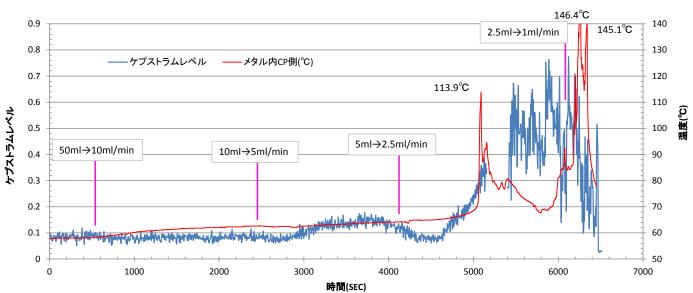


(3)ケプストラムレベルとメタル表層部温度の関係



ケプストラムレベルは、メタル表層部(表面から0.5mm位置)の温度と相関が見られている。メタル表層部の温度はケプストラムレベルと同様、油膜形成の変化に瞬時に反応している。但し、実機で油膜の電気抵抗と同様、メタル表層部の温度を計測することは困難なので、ケプストラムレベルによるモニタリングが有効と言える。

また、メタル直近の潤滑油温度においては、温度伝搬により反応するまで約3分遅れ、40℃ほど低い温度の検出となっている。このことから、軸受箱の温度はそれ以上に遅れ、低くなることが想定されるので、温度によるモニタリングは実機での使用は困難と考える。



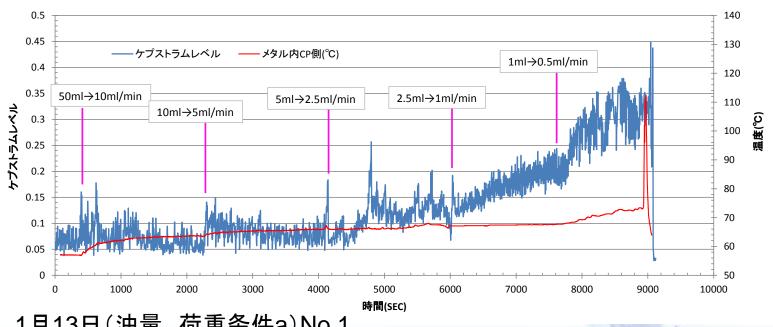
1月25日(油量、荷重条件a)No.5



(4) ケプストラムレベルとメタル内部温度の比較



油量を10ml/minに低下した段階で5℃程度上昇するが、その後ほとんど変化が 見られず、油量0.5ml/minに低下後若干の上昇を示し、停止直前で73.4℃から 112.3°Cまで急上昇を示している。ケプストラムレベルが油膜の形成状態と相 関が見られ、その前から上昇傾向を示しているのに対し、メタル内部温度は接 触信号の変化との相関は見られていない。

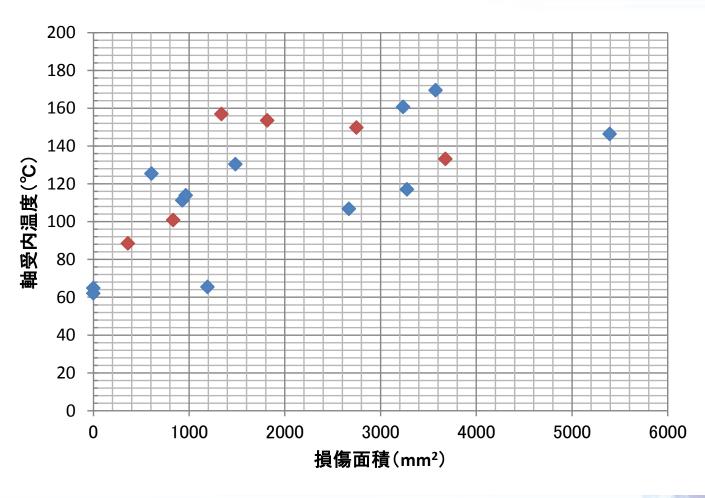


1月13日(油量、荷重条件a)No.1

(4.参考)メタル内部温度とメタル損傷面積の関係



ケプストラムレベルと同様に、メタル内部温度が高いほど損傷面積が大きい 傾向は見られるが、バラツキが大きい。



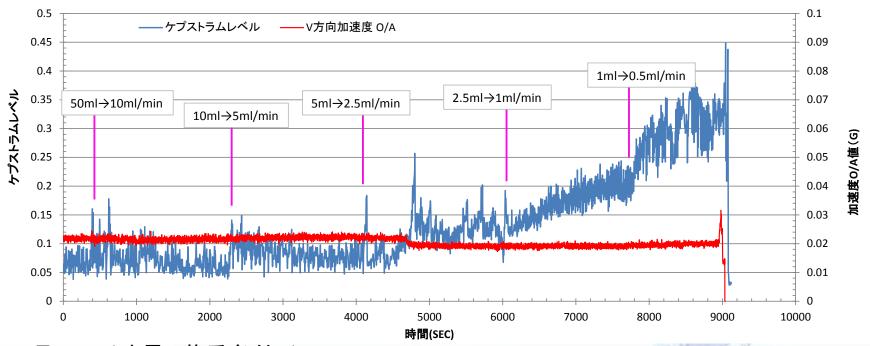
- ◆油量低下試験
- ◆荷重増加試験

(5) ケプストラムレベルと振動加速度O/A値レベルの比較



軸受箱の振動加速度値は各試験とも異常検出感度は低く、損傷が進展してから の検出となり、その上昇も僅かな値となっている。

接触信号の変化に合わせて変化しているケプストラムレベルに対し、振動加速度 レベルにほとんど変化は見られず、最終段階になって0.019Gから0.031Gに僅か 0.012Gの上昇を示すだけであった。

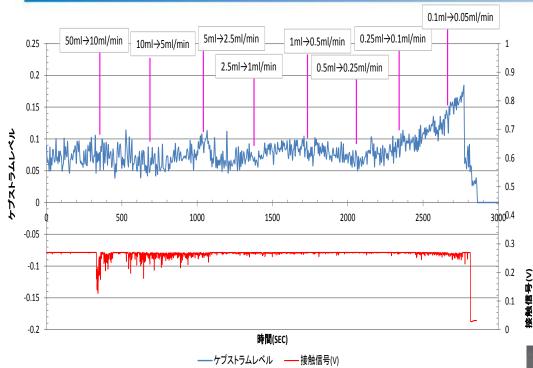


1月13日(油量、荷重条件a)No.1



参考.ケプストラムレベル別データ(詳細)①



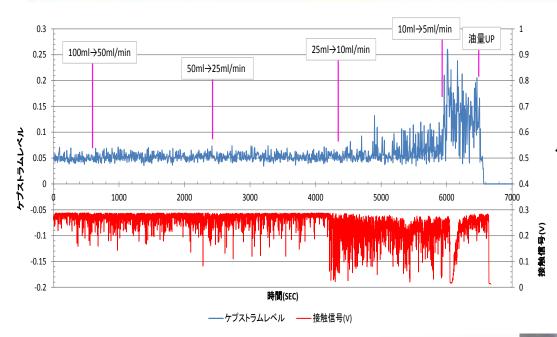


ケプストラムレベル最大値 0.1839



参考.ケプストラムレベル別データ(詳細)



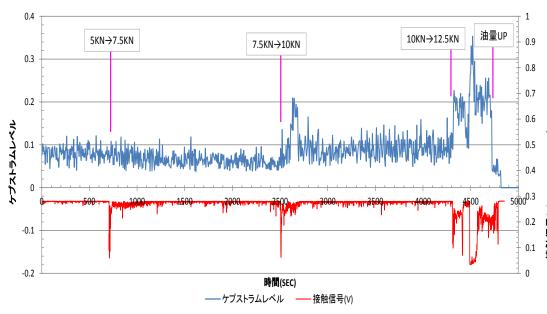


ケプストラムレベル最大値 0.2606

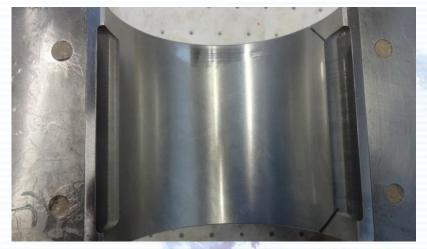


参考.ケプストラムレベル別データ(詳細)③



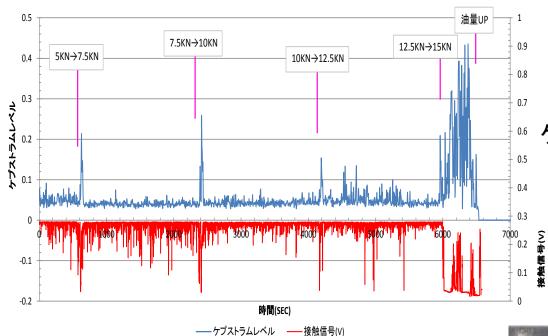


ケプストラムレベル最大値 0.3535



参考.ケプストラムレベル別データ(詳細) ④



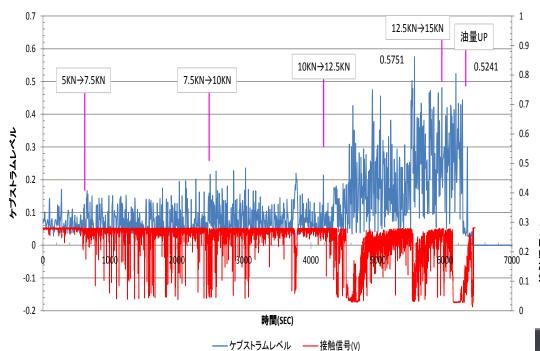


ケプストラムレベル最大値 0.4327



参考.ケプストラムレベル別データ(詳細)⑤



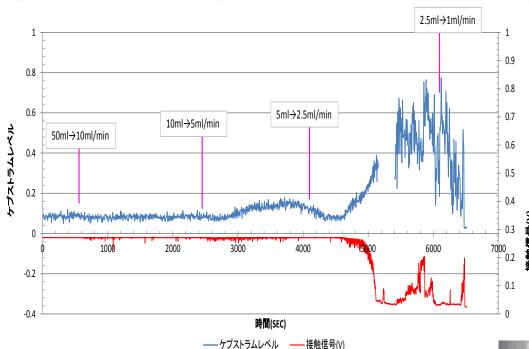


ケプストラムレベル最大値 0.5751

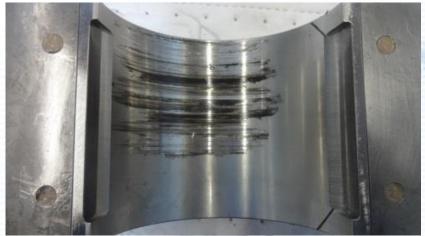


参考.ケプストラムレベル別データ(詳細)⑥





ケプストラムレベル最大値 0.7745





ご清聴ありがとうございました。

本研究開発は、株式会社商船三井、旭化成エンジニアリング 株式会社、一般財団法人日本海事協会との共同研究体制に より実施するとともに、日本海事協会の「業界要望による共同 研究」のスキームにより研究支援を受けて実施しております。 研究開発にあたってアドバイス頂きました多くの関係者の皆 様へ感謝申し上げます。

