

周波数変調解析法によるすべり軸受ラビング早期検出技術

2023年10月13日

迫 孝司 博士 (工学)

ISO機械状態監視診断技術者 (振動) カテゴリーIV
設備診断研究所 合同会社

1

1. はじめに

周波数変調解析法とは、軽微な回転軸と静止部の接触(ラビング)状態からでも明確に発生する周波数変調現象をとらえることで異常を早期に検出する技術である。従来の振動法は、異常の発生による振幅の変化を基に診断する方法であるが、軽微な段階のラビング現象においては、振幅の変化はごく僅かであり、検出困難である。本方式ではラビング現象により回転周期の規則性を持った粗密波(周波数変調を受けた加速度波形)が発生することに着目した診断法である。通常、設備の回転軸は多少の偏心を伴っているため、軽微な状態でも接触が発生すると接触応力が1回転に1回変動する。これにより、振動加速度波形が回転周波数の規則性を持った周波数変調を受けた粗密波に変化する。振幅の変化が極く僅かな接触状態でも明確な変化を示すことがわかった。この波形のスペクトルでは接触部の固有振動数を中心として回転周波数毎の側帯波が発生することがわかった。この特性をモニタリングするためにケプストラム解析法を採用し、回転周期ケプレンシーのピークレベルをモニタリングすることで軽微なラビング状態から焼付き損傷に至るまでをモニタリングできる技術を開発した。本方式は、すべり軸受のモニタリングをはじめ、回転軸と静止部の接触状態のモニタリングに活用されている。すべり軸受は、タービンや高圧ポンプなどの大型回転機器や空気圧縮機などの高速回転機器に用いられている重要な機械要素であるが、施工不良によるミスアライメントや熱変形による軸曲がり、あるいは異常振動などが原因で油膜が破断し、焼き付き損傷による設備停止に至ることがある。特に、高速回転機械の場合はリードタイムが短いために、異常の早期検出が求められる。

3

周波数変調解析法によるすべり軸受ラビング早期検出技術

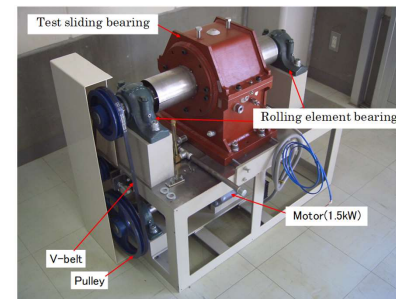
- 1.はじめに
- 2.ラビング試験による振動特性の把握
- 3.周波数変調現象とは
- 4.ケプストラムを用いた周波数変調解析法
- 5.偏心が無い回転軸でのラビング現象
- 6.すべり軸受焼付き試験による評価
- 7.すべり軸受異物混入試験による評価
- 8.軸回転数とケプストラムレベルの関係
- 9.船舶エンジンモニタリングへの活用
- 10.スクリーコンプレッサーへの適用
- 11.おわりに

2

2. ラビング試験による振動特性の把握

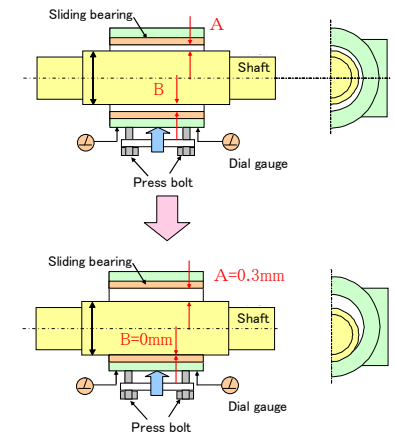
トータルギャップA+B: 0.3mm

供試軸受(軸径100mm,幅100mm,
材質ホワイトメタルWJ2)



試験回転数: 1200rpm, 1800rpm, 2800rpm

実験装置外観

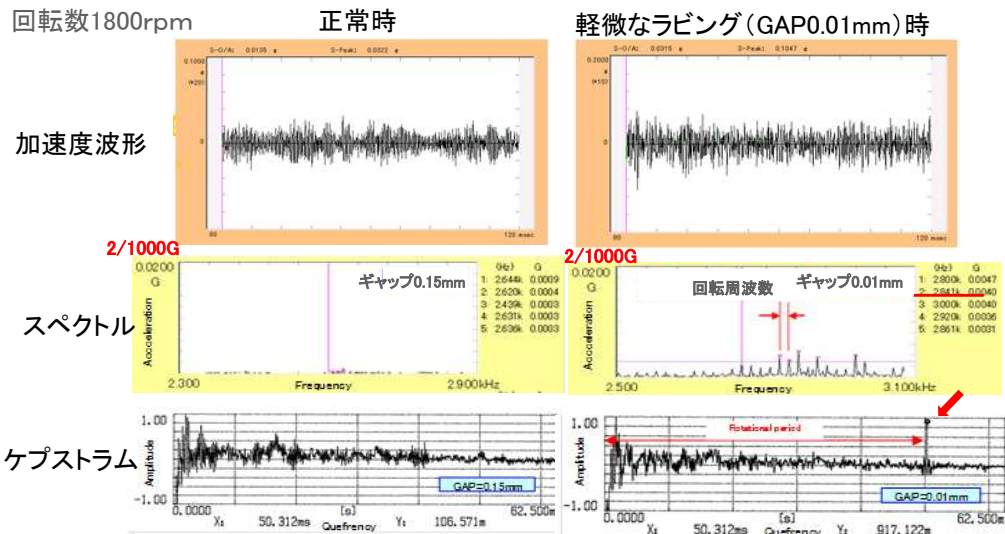


供試軸受部模式図(上から見た図)

押しボルトで供試軸受ケーシングを移動させ、回転軸とメタル部を接触させる。軸受ケーシングの両端に取り付けたダイヤルゲージにより主軸と供試軸受の距離(ギャップ)Bを計測することで軸受との接触状態を確認した。

4

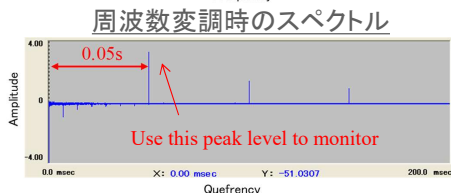
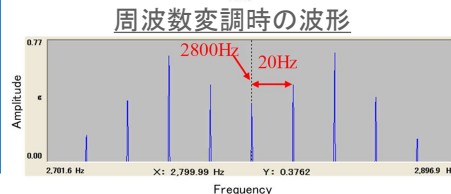
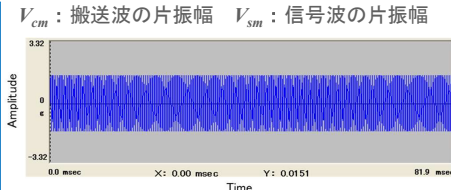
軽微なラビング状態での加速度スペクトルレベルは最大0.005G程度とごく僅かであるが、**回転周波数間隔の側帯波の発生が明確に見られることがわかる。ケプストラム解析では軽微なラビング状態でも回転周期の位置に明確にピークが発生する。**



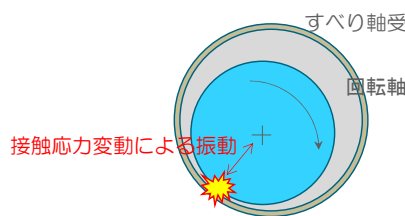
3. 周波数変調 (Frequency Modulation) 現象とは

$$V_{fm} = V_{cm} \sin\{2\pi f_c t + m \sin(2\pi f_s t)\}$$

周波数変調現象とは**粗密波**となる現象であり、右図は信号波2.8kHz、搬送波20Hzの変調波形とスペクトルである。軽微なラビング時の加速度スペクトルと酷似していることがわかる。この中心周波数は有限要素法から**すべり軸受部の固有振動数**の高次成分であることがわかった。これは、回転軸の偏心により一回転に一回の接触応力の変動により、摩擦力が変動することに起因している。この側帯波の発生を**ケプストラム解析**を用いてモニタリングする。

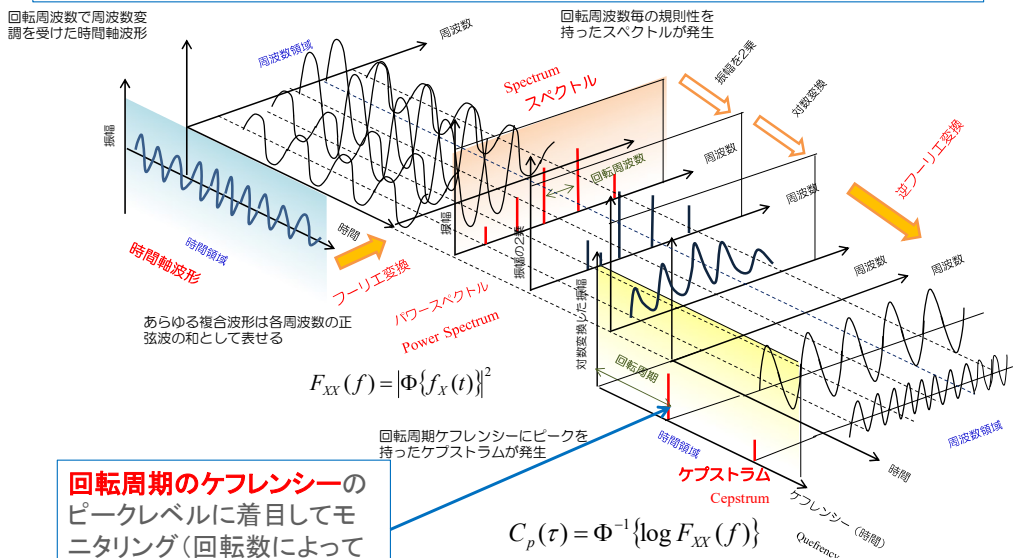


周波数変調時のケプストラム



4. ケプストラムを用いた周波数変調解析法

ケプストラムとは、規則性を持ったパワースペクトルを対数変換後に逆フーリエ変換して得たものである。



回転周期のケプレンシーのピークレベルに着目してモニタリング (回転数によって位置が変化)

5. 偏心が無い回転軸でのラビング現象 (確認試験)

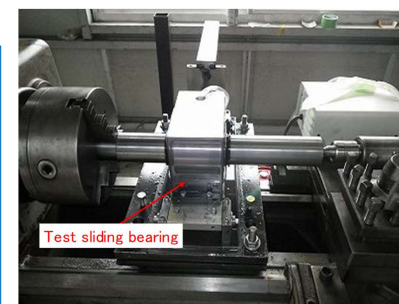
仮説

通常、設備の回転軸は多少の偏心を伴っているため、軽微な状態でも接触が発生すると接触応力が1回転に1回変動する。これにより、振動加速度波形が回転周波数の規則性を持った周波数変調を受けた粗密波に変化する。

検証方法

偏心が無い回転軸で軽微なラビングを発生させても側帯波の発生は見られないはずである。それを検証するため、旋盤にて削り出したままの軸 (偏心がほとんどない) を用いてラビング試験を実施。供試軸受には、前節の軸受の1/4周に切断したもの (軸受径100mm、幅80mm) を使用し、荷重は「てこ」の要領で下方から作用させる。

回転数: 1250rpm



旋盤によるメタルラビング試験装置

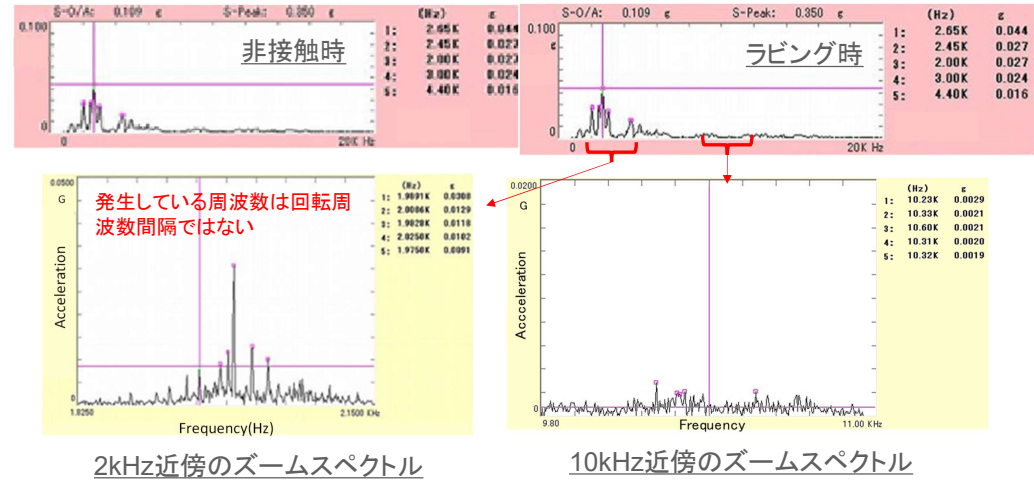
試験1

旋盤を用いた試験により、ラビング発生時に上昇した加速度スペクトルの確認を実施した。ダイヤルゲージにて軸の振れが1/100mm以下であることを確認。



(1) 試験1(偏心なし)の結果

接触時に2kHz近傍にスペクトルの発生が見られるが、これは正常時でも発生している周波数成分であり、ズームしても回転周期の側帯波の発生は見られない。



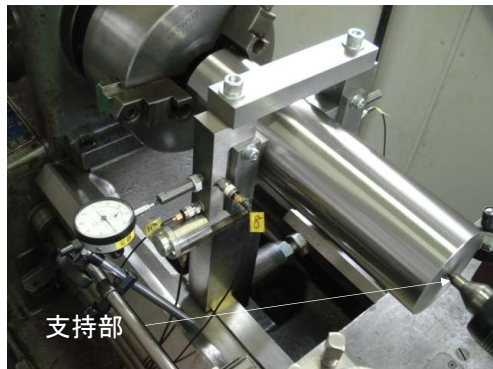
2kHz近傍のズームスペクトル

10kHz近傍のズームスペクトル

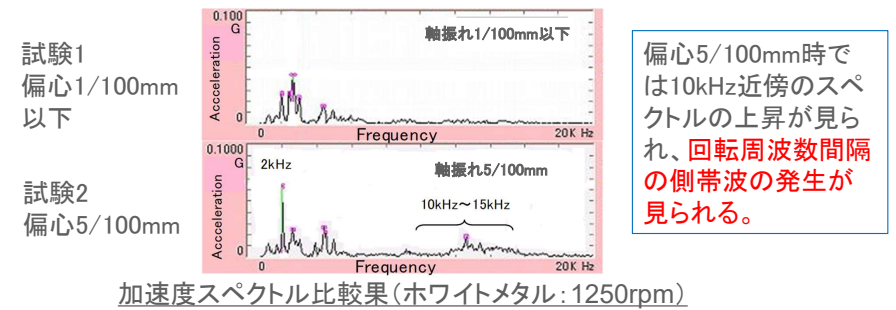
偏心がない回転軸でのラビングでは、側帯波の発生見られていない。

試験2

片側の支持部を緩めて軸の振れを5/100mmに設定。試験1との加速度スペクトルの差異を確認(僅かな偏心時)。



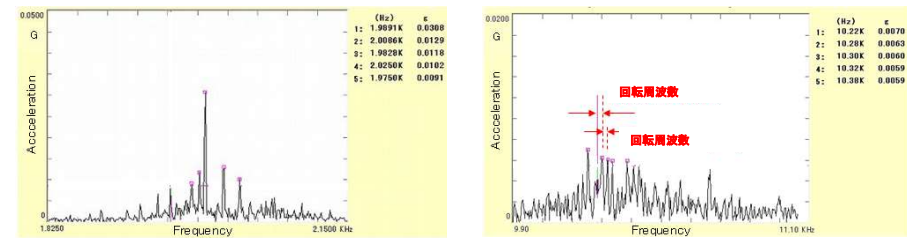
(2) 試験2(偏心5/100mm)の結果



加速度スペクトル比較果(ホワイトメタル: 1250rpm)

発生周波数の規則性は見られない

回転周波数の側帯波の発生が見られる

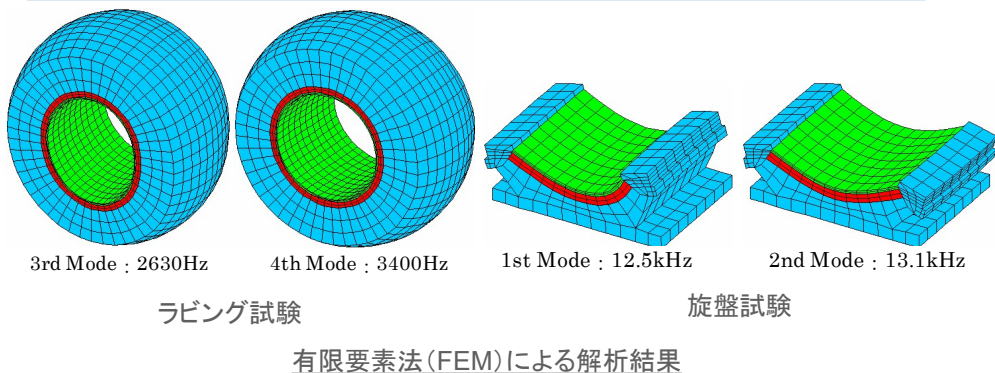


2kHz近傍のズームスペクトル

10kHz近傍のズームスペクトル

(3) ラビング時に発生する周波数の検討

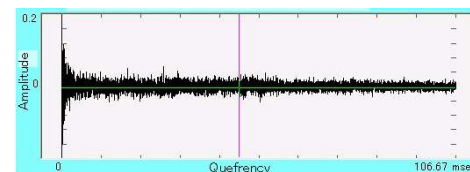
前節のラビング試験時には、軽微なラビング発生時に2kHz近傍にスペクトルの上昇が見られ、旋盤によるラビング試験時には10kHz近傍のスペクトルが上昇している。この発生周波数の違いを明確にするため、有限要素法を用いてそれぞれの軸受部の固有振動数を求めた。



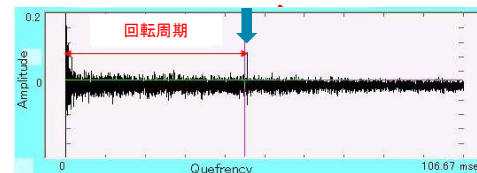
有限要素法による解析の結果、ラビング時に発生しているスペクトル(側帯波)は軸受部材の固有振動数周りであることがわかる。

(4) ケプストラム解析による確認

固有振動数近傍の周波数領域においても、偏心がない回転軸の場合には回転周期ケプレンシーは発生していない



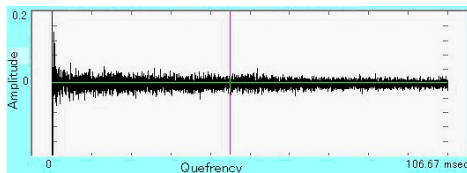
試験1における10k~20kHz帯域のケプストラム(偏心なし)



試験2における10k~20kHz帯域のケプストラム(偏心有り)

偏心有りの回転軸において、固有振動数近傍の周波数領域において回転周期ケプレンシーの発生がみられる

偏心有りの回転軸においても、固有振動数以外の周波数領域では、回転周期ケプレンシーは発生していない



試験2における2~5kHz帯域のケプストラム(偏心有り)



ラビングが発生すると、回転軸の偏心に起因した1回転に1回の押し付け圧の強弱により周波数変調が発生し、それにより軸受部固有振動数周りに側帯波が発生しているものと考えられる。

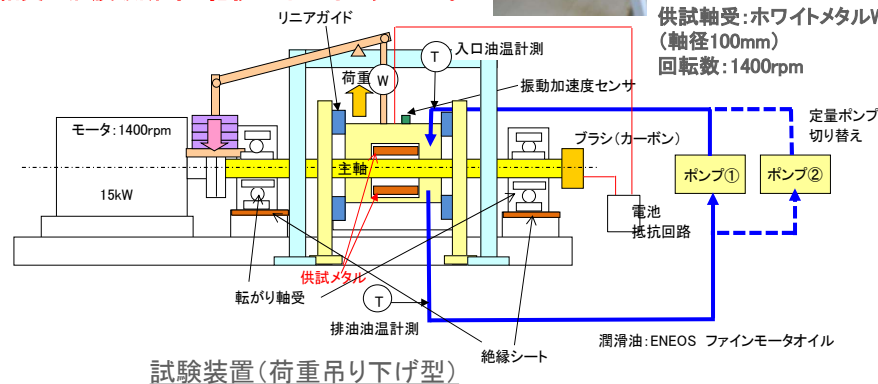
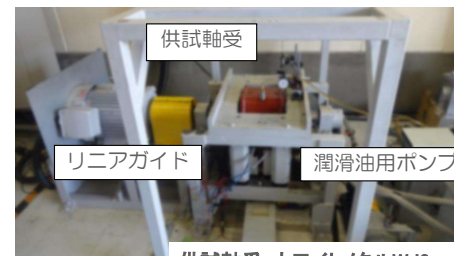
6. すべり軸受焼付き試験による評価

① 試験装置と試験方法

下図試験装置を用いて潤滑油量を低下させることで焼き付きに至らせる試験と荷重をこの要領で軸受下部から押し上げて増加させることで焼き付きに至らせる試験を合計18回実施した。

主軸には電流を流し、転がり軸受部を絶縁して、すべり軸受の油膜破断時に抵抗が下がるようにした。

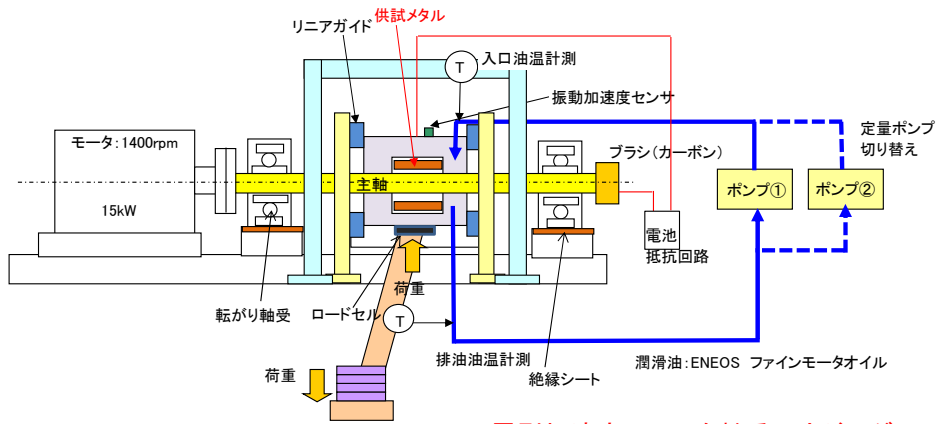
ケーシング内部の軸受直近に設置した温度計(熱電対)が100°Cを超えた時点で停止する。



試験装置(荷重吊り下げ型)

軸受ハウジングを上部へ吊り上げることで一定荷重を掛け、潤滑油の供給量を段階的に低下させて、焼付き損傷を発生させる。

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取り、潤滑量を一定とし、荷重を段階的に増加させて焼付き損傷を発生させる(軸受ハウジング下部のロードセルにて荷重を計測)。



試験装置(押し上げ型)

圧電型加速度センサを軸受ハウジングの水平方向に設置

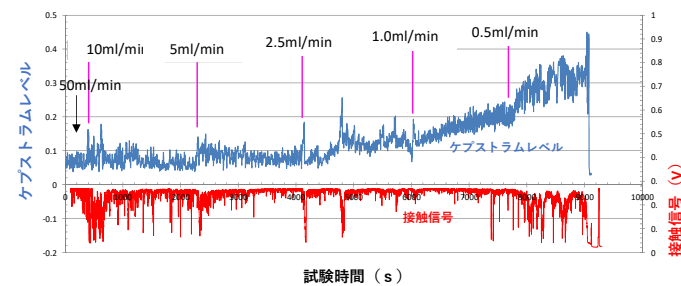
②試験結果(油膜形成状態とケプストラムの関係)

潤滑量を50ml/minから0.5ml/minに段階的に低下させることで、すべり軸受の油膜破断を発生させて損傷に至るまでの試験を実施した。

上段がケプストラムレベルの推移を、下段が接触信号(油膜による電気抵抗値)の推移を示す。

◆ケプストラムレベルは油量減少して損傷に至る過程において、徐々に上昇傾向を示している。

◆油膜が破断すると、ケプストラムレベルは遅延することなく上昇を示し、再度油膜が形成されると低下を示しており、相関が見られている。



ケプストラムレベルと接触信号の推移(試験No.1)

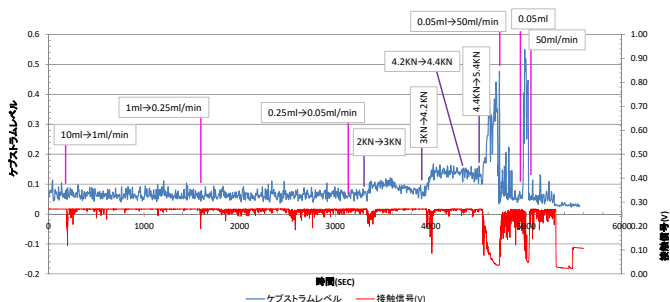


試験後の軸受(試験No.1)

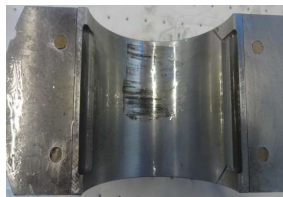
ケプストラムレベルの上昇が見られた後、給油量を増加させて油膜を再形成させた時、その後再度油量を減少して油膜を再度破断させた時のケプストラムレベルの変化を確認した。

◆油量を増加させて油膜を形成させるとケプストラムレベルは遅延無く低下を示し、再度油膜を破断させると遅延無く上昇する。

◆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・監視できると言える。



ケプストラムレベルと接触信号の推移(試験No.2)

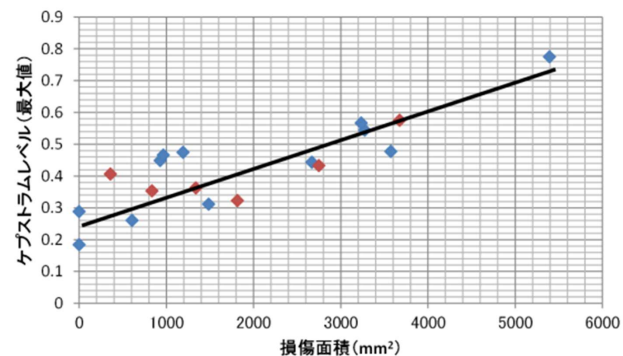


試験後の軸受(試験No.2)

様々なケプストラムレベルが発生した時点で停止するという試験を18回行った結果得られたケプストラム最大値と損傷面積の関係を下図に示す。

◆油量低下試験と荷重増加試験は同じ傾向を示しており、両試験ともケプストラム最大値と損傷面積には相関が見られていることがわかる。

これより、すべり軸受のラビング発生から損傷に至るまでをケプストラムレベルにより状態監視できると言える。

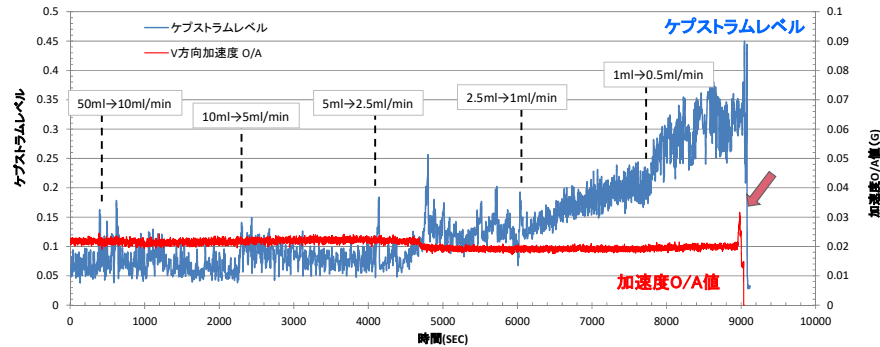


ケプストラム最大値と損傷面積の関係



③従来法(振動加速度振幅)の評価

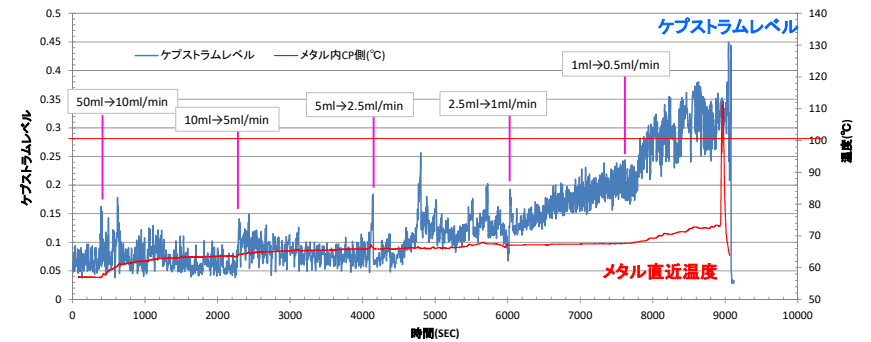
上段がケプストラムレベルの推移を、下段に加速度振幅の推移を示す。
 ◆ケプストラムレベルが上昇傾向を示しているのに対し、加速度レベルは停止直前に僅か0.012Gの上昇を示すだけであった。
 ◆**加速度レベルは油膜の破断には反応せず、損傷に至る兆候をモニタリングできていない。**



ケプストラムレベルと加速度振幅の推移(試験No.1)

④メタル内部温度の評価

油量を10ml/minに低下した段階で5°C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°C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。



ケプストラムレベルとメタル温度の推移(試験No.1)

7. すべり軸受異物混入試験による評価

潤滑油に異物を混入させた状態で回転数1800rpmで回転する。荷重は、「てこ」の原理により下方から段階的に増加させることで、焼き付かせる。試験は軸受内部に設置した温度計(カップリング側, 反カップリング側)のいずれかが100°Cを超えた時点で停止する。供試軸受はカップリング側が接触するように若干傾かせている。



<異物混入濃度>
 ・けい砂 26~8,721ppm
 ・関東ローム 170~712ppm

<供試軸受>
 軸径100mm
 軸受幅100mm
 材質ホワイトメタルWJ2

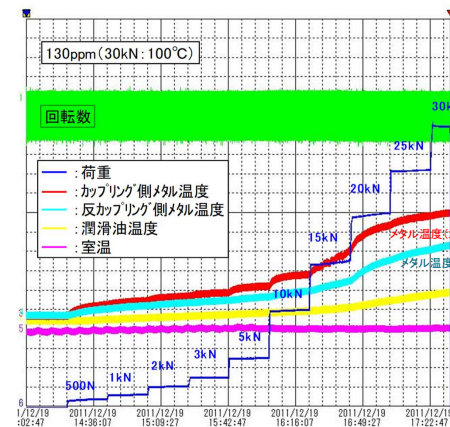
すべり軸受焼き付試験装置(異物混入)

①けい砂2,597ppm混入試験

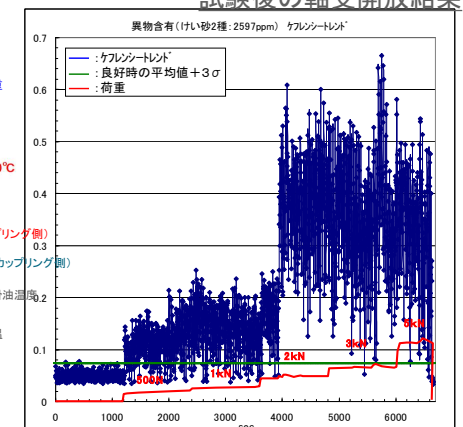
ケプストラムレベルの変動幅が大きい状態で荷重の上昇とともに上昇する。これは、異物との接触にてケプストラムレベルが上昇するが、異物が埋収することによって潤滑油が侵入し、レベル低下が起こる。これを繰り返しているものと考えられる。



試験後の軸受開放結果



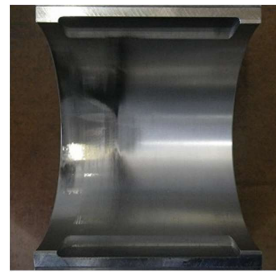
軸受内部温度(赤)



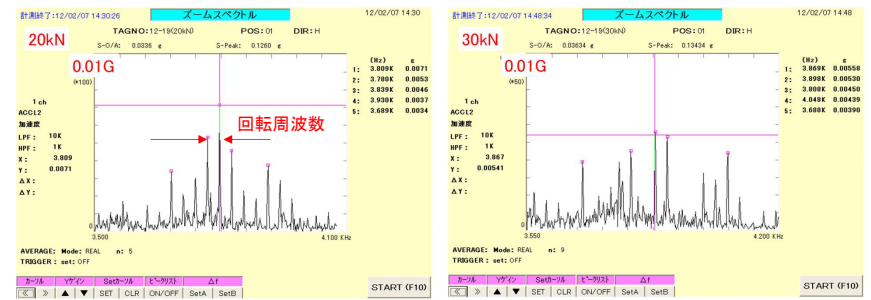
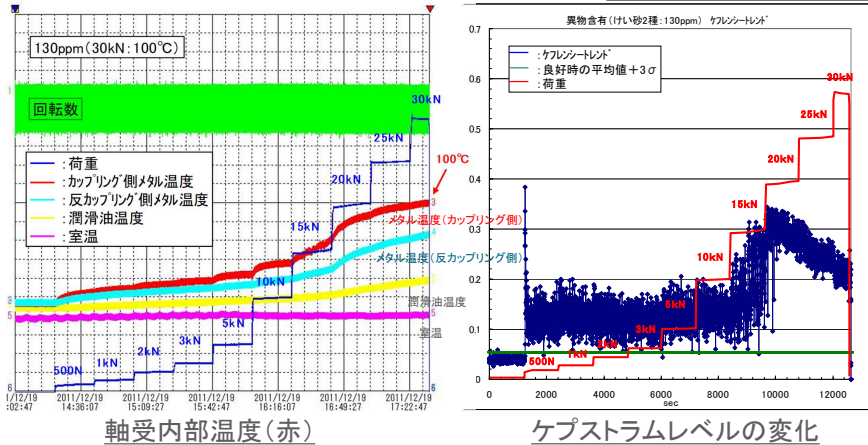
ケプストラムレベルの変化

②けい砂130ppm混入試験

荷重20kNをピークにケプストラムレベルが低下している。異物物理収とホワイトメタルの摩滅により接触レベルが低下するものと考えられ、試験後の軸受表面状態は研磨されたような状態であり、2,597ppm時とは異なる。



試験後の軸受開放結果

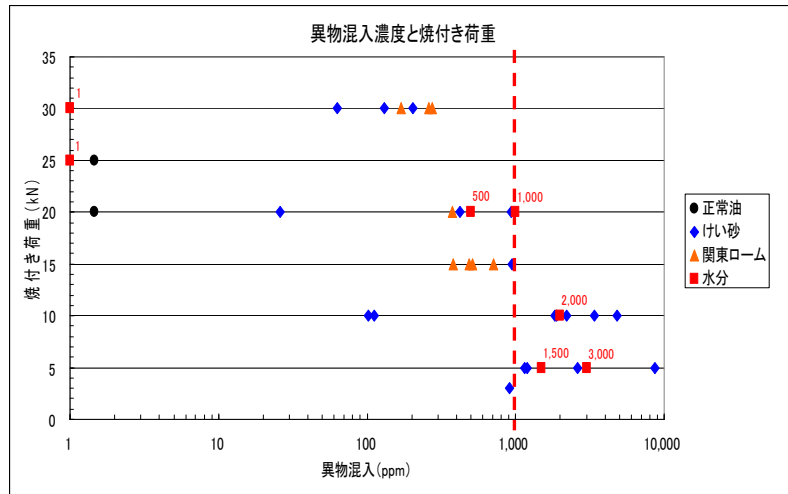


ケプストラムピークレベルが高い荷重20kN時の加速度スペクトルでは回転周波数の規則性を持った側帯波が発生しているが、荷重30kN時ではこの規則性が乱れていることがわかる。これにより、ケプストラムレベルが低下していると言える。損傷状態が研磨したような状態になっていることから推察すると接触面積が大きくなり、**回転数の変動が発生していたことが原因**であることを確認した(試験機のモータのトルクが低いため接触による負荷により回転数が変動するので規則性が乱れる)。

すべり軸受に「疲労」が発生した場合、**クラックが発生した状態では検出できないが、はく離した段階で接触が発生するためにケプストラムレベルは上昇するため検出可能**となると考えられる。

③異物混入濃度と焼き付き荷重の関係

けい砂、関東ローム共に異物混入1,000ppmを超えると急激に焼き付き荷重が低下する傾向が見られる。また、水分についても同じ傾向が見られた。



異物混入濃度と焼き付き荷重の関係

8. 軸回転数とケプストラムレベルの関係

船舶エンジンの大きさによって回転数の様々*であり、可変速でもあるので、回転数と焼き付き損傷時のケプストラムレベルの関係を明確にする必要がある。供試軸受の軸径がφ100mmとφ400mmの試験機を用いて、以下のような試験条件にて実施した。

※例えば、12万トンの大型船舶の場合、軸径dはφ900mmであり回転数Nが60rpmの時 $dN^2: 3.24 \times 10^6$ であり、250トンの小型船舶の場合、軸径はφ200mmであり回転数が700rpmの時 98×10^6 となる。対象となる船舶はこの範囲と考えられる。

試験条件

メタルサイズ	荷重	回転数	潤滑油	試験停止(焼き付き)条件
φ100mm	1kN	60、80、110、130、150、200、400、600、800、1100、1300、1500	無負荷10ml/minで開始し、荷重付与後停止	メタル温度100℃で終了
φ400mm	14kN	30、40、55、60、65、100、140、200		

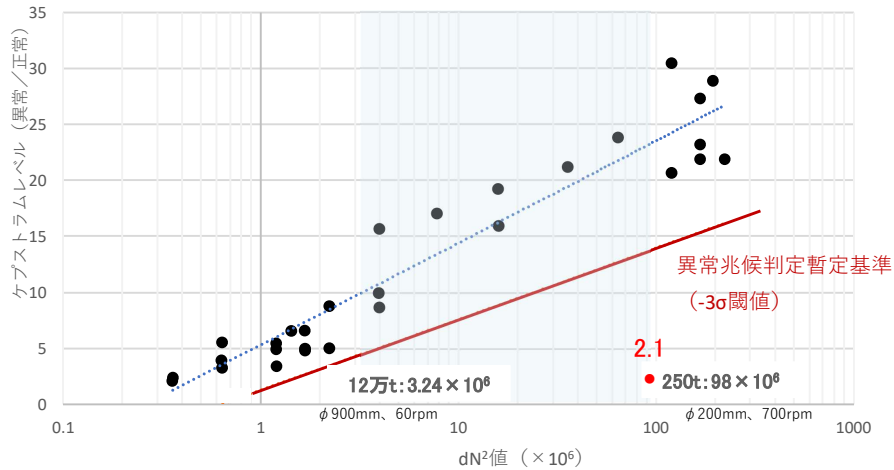
9. 船舶エンジンモニタリングへの活用

①周波数変調解析法の利点

◆センサをケーシング外壁部に設置することで計測可能であるため、エンジン内部を**改造する必要がない**(改造にはエンジンのライセンスの許可が必要となるが、ライセンスの許可は不要であるとMAN社の確認済み)。



◆エンジン燃焼音の影響を受けない(**ノイズに強い**)。通常の振動法やAE法では信号の振幅変調を利用するため、燃焼音の影響を受けるので異常検出が困難である。

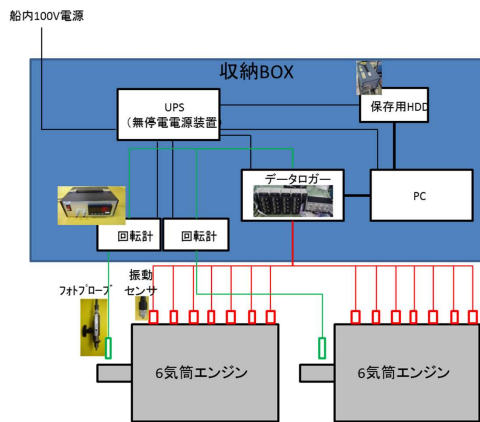


回転によるエネルギーとケプストラムレベル(異常/正常の相対値)には相関がある。データより -3σ を暫定基準として設定した。船舶のような可変速の機器の場合、回転数に合わせて基準値を自動変更する必要があるといえる。

29

②実船におけるオンラインデータ計測例

約10ヶ月の間、実船にデータ収集装置を搭載し、各主メタル部に設置した加速度センサにてオンライン計測したデータを解析した。

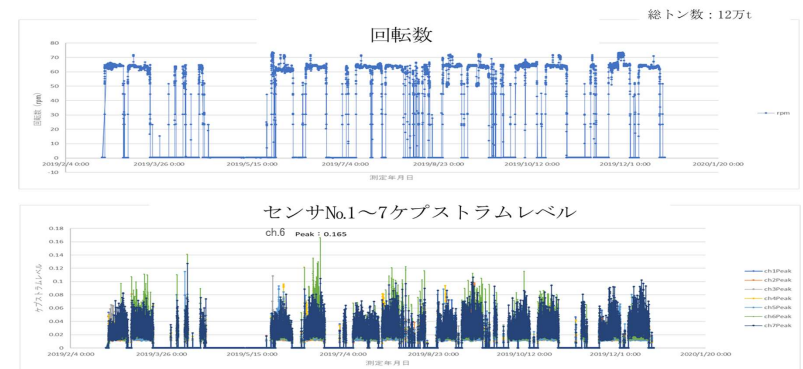


データ収集装置

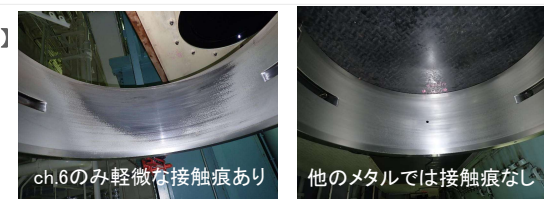


振動センサ設置状況

データ解析結果



【メタル開放結果】



ケプストラムピーク値の最大値0.165(ch.6)は暫定基準以下であった。開放結果においてCh.6のみに下半側に接触痕が認められたが、継続利用可能なレベル(軽度な接触)であった。

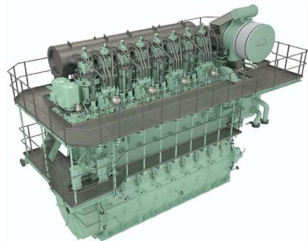
31

30

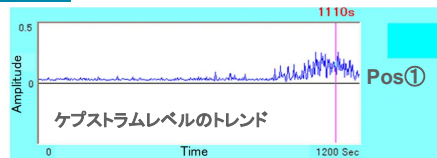
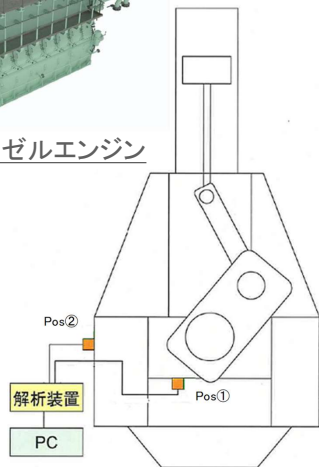
32

③ 実機における陸上公試における計測結果

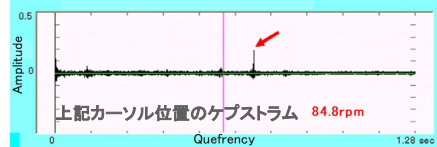
内部センサの方が外部センサよりも高めである



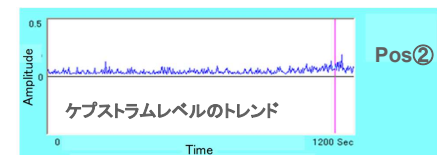
船舶ディーゼルエンジン



ケプストラムレベルのトレンド



ケーシング内部センサ (Pos①)



ケプストラムレベルのトレンド



ケーシング外部センサ (Pos②)

新造船のエンジンにおける陸上公試(エンジンのみの陸上での試験)において、ケプストラムレベルの上昇が見られた。この時、ケーシング内部(Pos①)とケーシング外部(Pos②)に設置して計測した。いずれのセンサ部でもケプストラムにて接触時に発生する回転周期のケブレンシーのピークが確認された。



Contact marks by rabbing

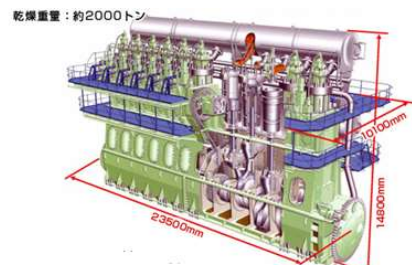
試験後の開放検査結果

運転には支障ないレベルではあるが、ラビングの発生による軽微な接触痕が確認された。

④ 外航船ディーゼルエンジンのモニタリングのIoT化



※本船のスタンダードローションシステムとしても使用可能



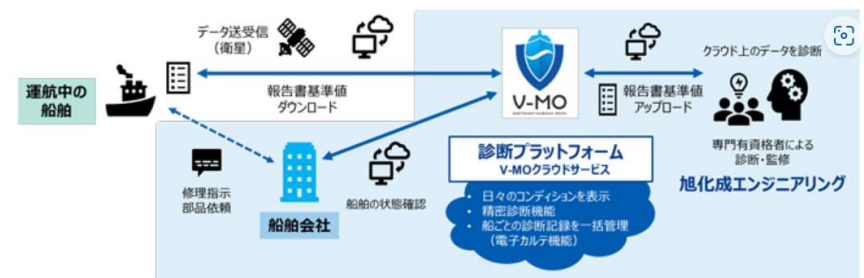
主機(すべり軸受): 周波数変調解析法

補機(転がり軸受): 振動法

結果および推奨対応表示

旭化成 精密診断

船用モーター向け状態監視サービス 「V-MO™ (Vessel Vibration Visualization Monitor)」

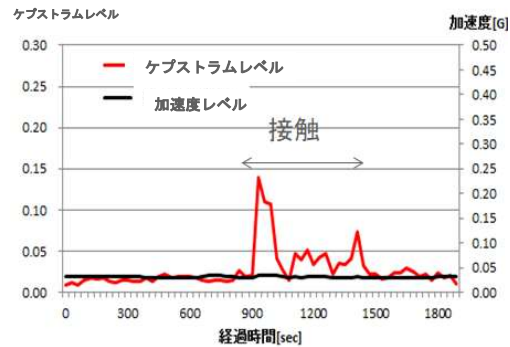


実証を行ったコンテナ船

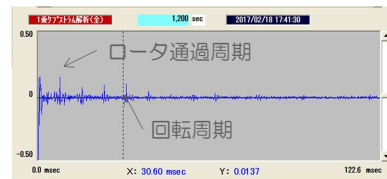
株式会社商船三井との共同開発

10. スクリューコンプレッサへの適用

スクリーコンプレッサのロータとケーシング接触のモニタリングに活用している。小型のスクリーコンプレッサ試験機を用いた接触試験において、加速度レベルが変化していない軽微な接触においてもケプストラムでは明確な異常検知ができています。また、この結果を基に生産現場における重要機器のオンライン監視に活用している。



接触試験におけるケプストラムと加速度のレベルの比較



接触時のケプストラム



ケプストラムオンライン監視装置

11. おわりに

回転軸と静止部の接触によって発生する周波数変調現象を捉える事で、従来法では捉えにくいラビング異常を早期に検出する方法を開発した。開発に注力した船舶ディーゼルエンジンの主メタルモニタリングを中心に紹介したが、すべり軸受以外でもスクリーコンプレッサのロータとケーシングの接触、レシプロコンプレッサのピストンの接触、ポンプのメカニカルシールの面荒れや片当たりの検出による漏れ予知など様々な機器へ活用範囲が広がっている。今後はフィールドでのデータ蓄積を加速し、良否判定基準の確立を図る必要がある。