

Topics for Your Update

**Machinery
Lubrication**

2010

Vol.19 オイル分析と振動解析の統合

Integrating Vibration and Oil Analysis for Machine Condition Monitoring

著者：Nicole J. Kessissoglou &
Zhongxiao Peng (School of Engineering, James Cook University)

翻訳：稲子みどり (コンパス・トゥーワン) Tel. 03-5609-9829 midori@compass21.jp

▼TYUバックナンバー

- Vol. 1 RCM分析からみる52の潤滑故障モード
- Vol. 2 ワールドクラス潤滑プログラムへの転換
- Vol. 3 オイル分析を成功に導く9ステップ
- Vol. 4 鉄粉濃度を理解する
- Vol. 5 今どきのオイル分析士には今どきの秘策がある
- Vol. 6 潤滑剤の貯蔵限界 - その推奨値を求めて -
- Vol. 7 グリース選定 一歩ずつ戦略
- Vol. 8 オイル分析統計情報入門
- Vol. 9 粒子計数技術 - ふるい式と減光式 -
- Vol.10 信頼性プロよ、内省すべし
- Vol.11 オイルサンプリングの"べし・べからず"リスト
- Vol.12 現場のメンテナンスと粘度計測
- Vol.13 オイル分析 vs. 顕微鏡分析 状況に応じた選択法
- Vol.14 油中水分汚染の除去
- Vol.15 お粗末な潤滑管理で損しないために
- Vol.16 フィルター・エレメントの検査

- Vol.17 ギヤ油に関する7つのQ&A
- Vol.18 潤滑貯蔵庫 - 改善の機会を逃すな -
- Vol.19
- Vol.20

状態基準保全が、設備機器の寿命を最大化する最も効果的かつコストメリットの高いアプローチであるのは、周知の事実である。振動解析と摩耗粉分析は、状態監視プログラムにおいて、常に成功の鍵となる二大要素であり、進行する機械の摩耗と、機械内部で起こりつつある故障の診断を判断するための、予防的・原因除去的なツールとなり得る。これらの技術が単独で用いられても、不具合の一部は、通常検出されるだろう。しかし、機械の状態監視プログラムにおいて、これらの二つの技術を組み合わせることが、さらに大きな、そして信頼性の高い情報を提供し、顕著なコスト効果をもたらすことが、実践的な事例によって示されている。

とりわけ、振動解析は、予知保全の手段として、そして、機械保全の判断のための支援ツールとして知られている。一般に機械は、振動レベルの増加のような兆候がなく故障することはない。機械の振動計測と解析により、欠陥の特徴とシビアさ双方を判断することが可能であり、それが機械の故障の予知につながる。機械からの相対的な振動の信号は、多くの部品や構成要素を組み合わせたものから来ている。しかしながら、機械的な欠陥は、特定の機械故障状態に相関する異なった周波数を有する特徴的な振動を起こす。時間と周波数スペクトルの分析によって、そして信号処理技術を適用することによって、様々な構成要素の欠陥ならびに元来の周波数の双方が判断可能となる。

オイル分析の実践者たちは、油中の摩耗粉分析に実践と優位性を持って取り組んでいる。振動解析と、確実な優位性を持つオイル分析や粒子計数技術を比較してみよう。オイル分析は、摩耗モードや機械の状態の直接的かつ早期の情報を提供できる。実際、多くの事例において、特に進行性の機械摩耗におい

ては、振動解析と比べても、先導的な指標であることが証明されてきた。さらにオイル分析は、低速の機器（5rpm未満など）の監視においては、確かな優位性を発揮する。逆に、振動解析では、このような時は判断が難しい。しかしまた、摩耗粉分析が、単独で故障メカニズムのすべてを効果的に見つけることができるというわけではない。この理由から、オイル分析と振動解析の双方が、効果的な保全プログラムに必須の要素ということになる。

摩耗粉分析と振動解析は、それぞれの分析の要求と、人間の専門知識と経験の度合いによって、要求される仕様が厳しくなっていく。この二つの分野の専門士は、お互い単独に分離して働くことが多い。それゆえに、特に海洋掘削、鉱山など孤立した遠隔地域が現場である産業界においては、二つの状態監視技術の効果的な統合は、この環境的な課題から、難しくも必要とされてきている。近年、この目的を達するため、限られた案件ではあるが、将来展望がリサーチされた。しかし、新たな機械の状態監視技術の統合に向け、技術革新（人工知能や先進のコンピュータ分析技術を含む）の進歩が、障壁を克服するだろうと結論づけられ、見通しは一転し、楽観的になってきている。

試験機の作製

振動解析と摩耗粉分析の統合の効果を検証するために、オーストラリアのジェームズ・クック大学エンジニアリング校の研究者たちが、振動解析と摩耗粉分析の相関性の研究を実施した。試験を実施するため、電気モーターで稼働するウォームギヤから成る実験装置が作製された。一連の研究は、いくつかの異なる機械の欠陥状況が、制御された動作環境下に置かれたギヤボックス試験トレーラー上で実施さ

れた。機械の故障を予測して診断する際に、振動解析と摩耗粉分析の効果を定量化する目的で、摩耗粉分析によって得られた数値データが、逐一振動解析スペクトルと比較された。

摩耗粉分析の多様な技術、例えば高性能粒子アナライザー、共焦点レーザー走査顕微鏡法 (CLSM)、電子線プローブ・マイクロアナライザーなどを含む分析技術を駆使し、信頼できる客観的なデータが集められていった。三つの試験は、それぞれ以下の状況下にて実施された。

1. 通常稼働状態

2. 潤滑不良状態

3. 潤滑油に汚染粒子 (鉄粉) を加えた状態

各試験において、オイルサンプルと振動のデータが採取されていった。粒子の濃度とサイズ分布を含む摩耗粉分析は、粒子の形態学に則り、また起こりうる摩耗メカニズムを判断するため、摩耗粉の種類、摩耗率、摩耗源などが含まれている。振動解析は、時間と実験装置からの振動信号の周波数によって、進行性の摩耗のシビアさと兆候が判断され、根本原因の診断への助力となった。

この研究に使用されたウォームギヤの選定は、慎重に実施された。転がり摩耗、そして滑り摩耗のプロセスは、産業界においては汎用性が高く、一つの実験装置において二つの機械的摩擦を再現する必要があったからだ。

この装置で使われたウォームギヤは、1:28の減速率を有し、0.37kWの四極モーターによって稼働している。回転速度は1,488rpmである。ウォーム・シャフトは、歯面に鋼合金の表面硬化仕上げがなされ、同時にウォーム・ピニオンギヤは、高張力リン青銅のシェル鑄造によって作られている。ウォームギヤの表面硬度は、ロックウェル硬さC58/60で、0.2mm

である。表面仕上げ深さは0.8mmであった。ピニオンギヤの表面は、研磨仕上げであり、ウォームギヤより柔らかい。

試験が実施される前に、このギヤボックスの稼働条件 (モーターの稼働速度、ギヤボックス出力速度、モーター消費電流、モーター周辺の温度など) が決定された。三つの試験を実施するため、2種類の潤滑油が使用された。最初の、通常稼働状態のギヤボックスの試験には、PAG系ISO VG 320 (cSt) 油が推奨され、使用された。試験1は、清浄なりザーバーから適切に供給された潤滑剤を適用しながら、実験結果を提供していった。

試験2の潤滑油としては、ギヤボックスの潤滑不足状態と一致した状況を作成するため、AW添加剤やEP添加物の入っていない鉱油 ISO VG 68 (cSt) 油



図1 新規のウォームギヤ (上) とピニオンギヤ (下)

を用いた。試験3においては、ISO VG 320油 (Trivela 320) が再度用いられたが、ここにはNC100鉄粉が模擬汚染物質として加えられた。この鉄粉は、粉末冶金用として最も広く使われているものである。

試験1と2では、このギヤボックスを1週間 (168時間) 連続運転し、第一次オイルサンプルと振動データを採取した。第二次オイルサンプルと振動データは、1週間後に採取され、以後同様に繰り返し、それぞれ4週間にわたって実施された。オイル交換は実施していない。試験3は10週間にわたって実施され、オイルサンプルと振動データが1週間ごとに採取された。試験3においては、オイルは1週目、3週目、6週目、10週目に交換された。それぞれのオイル交換後、ギヤボックスは完璧に清浄化され、新油がギヤボックスに充填された。ギヤボックスの再稼働後、直ちに0.3gのNC100鉄粉が油中に加えられた。

これらの試験で使われるウォーム・ドライブのオイルリザーバーは小さく、ほとんどマージンがなかった。これにより、機械が稼働する間、粒子と潤滑剤の良好な混合状態をもたらし、結果として、粒子がギヤメッシュを通過して循環する、代表性の高いオイルサンプルが提供されることになった。

摩耗粉分析と振動解析

オイルサンプルは、計18週間にわたって、三つの試験のために毎週集められた。そしてそれぞれを検証し、慎重に比較された。粒子アナライザーは、ギヤボックスの通常の傾向を評価するために、オイルサンプルの粒子分布の計測に使用された。試験のため発生した摩耗粉は、オイルサンプルから分離され、定量フェログラフィ用ガラススライド上に載せられた。これらの粒子は、標準的な光学顕微鏡を使用し

て観察され、続いてPC上のデジタルイメージ分析技術と共焦点レーザー走査顕微鏡 (CLSM) を使用して、量的観察を実施した。粒子の種類、表面の相対的な特徴、色などが、光学顕微鏡によって研究された。

CLSMは、深さを変えることで、一連のイメージを得ることができる。最適化された三次元イメージの粒子は、連続した二次元のイメージを編集することによって作製することができる。表面粗さ (Ra) は、粒子の表面粗さを表すのに用いられる数値的パラメータである。この研究では、摩耗粉に関する高さ符号化画像の測定でRaを入手した。

実験1：適切な潤滑と実験設定

摩耗粉分析

この研究のため、特に推奨されたISO VG 320は、新規ギヤボックスの最初の試験において使用された。新規ウォームギヤおよびピニオンギヤの仕上げ表面は、図1の通りである。試験1のため、4週にわたって採取されたオイルサンプルから、4枚のスライドが作製された。試験1のため採取されたオイルは、終始にわたって清浄であり、明るい色相をしていた。試験から発生した粒子の数は、スライド1から4に至るまで継続的に減少し続けた。これは、ギヤボックスの慣らし運転期間後に、摩耗率が減少したことを示している。

最初のスライド上には、ラビング粒子、切削粒子、層状粒子に一致する形状の摩耗粒子が発見された。粒子の色から、これは、大半がより柔らかいピニオンギヤからきた切削粒子であると決定づけられた。通常の慣らし運転で発生すると予測された通りである。ピニオンギヤ、ウォームギヤ両方から、微小なラビング粒子と層状粒子が発生していることが認められた。スライド2の粒子が減っていたのは、切削粒

表1 三つの試験から発生した粒子の性状

	試験1	試験2	試験3
粒子数	全体に少ない。1から4へ徐々に減少	全体に多い。1から4へ徐々に増加	非常に多い
粒子径 (μm)	最大50	最大100	最大50
粒子の種類	ラビング、切削、層状	ラビング、切削、層状、滑り摩耗、疲労摩耗	ラビング、層状、切削 (少量)
表面の特徴	滑らか~わずかに粗い	粗い	滑らか。一部の粒子にピットが見られたり表面に下層が現れている
表面粗さ (Ra)	0.06	0.26	0.13

子が減少したのが原因であった。これは、二つのギヤの表面の間に適切な潤滑膜が存在していたことを示す。摩耗プロセスは、試験の間安定していた。

振動解析

振動の信号は、モーターのドライブエンド、ウォームギヤ・シャフトのドライブエンドと非ドライブエンド、ピニオンギヤのドライブエンドから採取された。試験1においては、ギヤボックスの稼働時間は短く、摩耗は相対的に少なかった。ウォーム・シャフトの非ドライブエンド (フリーエンド) の速度周波数スペクトルが示したのは、優位周波数が、シャフト速度 (24.7Hz) と、電源周波数の2倍 (100Hz) に一致していることであった。電源周波数の2倍のピークは、モーター内部の電氣的な不具合を代表しており、ウォームギヤにおける摩耗の兆候との相関ではない。試験1を実施している間に記録される時間と周波数帯域図の検証から、ギヤボックスの摩耗は最小の状態であることがわかった。時間の経過につれ、シャフト速度のピークは劇的に減少した。これは、ギヤボックスの慣らし運転期間に起因する摩耗の減少に帰するものであった。

実験2：不適切な潤滑の影響

摩耗粉分析

試験2においては、ギヤボックスの製造元の推奨し

た汎用のISO VG 68油に変更された。AWおよびEP添加剤は含まれていない。これは、意図的に不適切な潤滑状態を作り出すためである。交差汚染や適合性の問題を避けるため、このギヤボックスは徹底的にフラッシュされ、清浄化された。オイルサンプルが再度、4週間にわたって1週ごとに採取された。試験2の慎重なフェログラフィ分析の結果、5種類の摩耗粒子の存在が明らかになった。すなわち、ラビング粒子、切削粒子、層状粒子、すべり摩耗粒子、疲労摩耗粒子である。これらは、全てのスライド上にあった。図2は、オイルサンプルから検出された5種類の粒子である。

この試験用のオイルの粘度は過度に低く、摩耗を防止するための添加剤もなかったため、境界潤滑状態の効果を妨げ、それぞれのスライドから相当量の摩耗粉が発見される要因となった。

このピニオンギヤの表面は柔らかく、フェログラフィ分析によって、ギヤボックス内部の二体摩耗と三体摩耗の両方が発見された。一般的な形状の切削粒子は、スライド1から3に進むにつれ、長い粒子へ

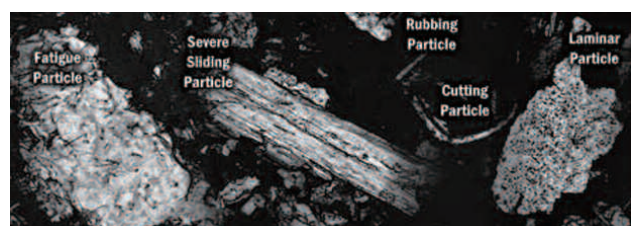


図2 ウォームギヤから発生した摩耗粒子

と変化していった。つまり、摩耗がシビアに進行していることが示されたのだ。スライド4上の粒子の粒径と数の減少は、摩耗の初期段階が終わり、その後、表面が滑らかに変化したことを示している。ギヤが機械加工仕上げであるため、スライド4の上の多くの粒子が、直線的あるいは通常の端面を有している。上記のような傾向を受け、粒子表面の粗さはスライド1から3へ進むにつれ粗くなり、スライド4では滑らかになった。試験2の摩耗粉の分析結果は、表1にまとめた。

顕著なすべり摩耗粒子は、試験2のオイルサンプルから発見された。すべり摩耗粒子は通常、せん断混合膜の欠損により見られる。このすべり摩耗粒子は、試験2の間、粒径が小さくなり続け、初期の摩耗段階において、相当量の金属間接触を引き起こす潤滑不足があったことを示した。相当量の表面すべり接触が、粒子を潰し、粒径が大幅に減らされるまで、徐々に表面を滑らかにした。ギヤ面の事後検査によって、この予測結果を視覚的に確認した。

図3に、試験2を実施した後のギヤの写真を示す。図1に比べ、ピニオンギヤ表面に顕著な摩耗が生じているのがわかる。ピニオンギヤに相当量の表面摩耗が生じており、短期間に異常摩耗が発生していることを示す。ピニオンとのウォームギヤの接触から引き起こされる引っ掻き傷であることは明白である。これは、不適切な潤滑状態に起因する、直接的な金属間接触に起因する、すべり摩耗とアブレーションであることを示している。

振動解析

試験2において設定された試験状況は、不適切な潤滑状態を意図的に作り出すために設計されたものである。この試験の間、時間の経過につれて、ピーク

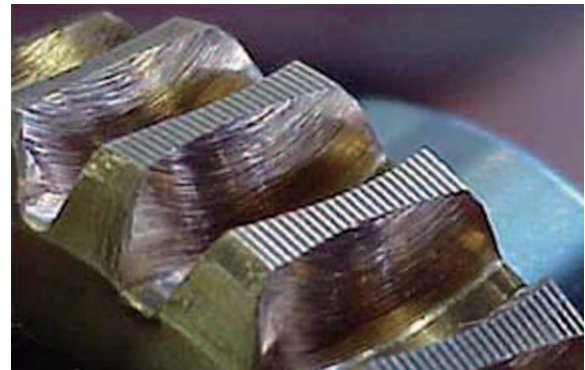


図3 上：試験2実施後のウォームギヤ表面
下：ピニオンギヤ表面

値のエネルギーレベルが増加していった。ウォームギヤは通常、特にウォームギヤが硬化鋼、ピニオンギヤが柔らかいブロンズ製の場合、1,000時間稼働以下程度では摩耗しない。しかし、図1と3の示すピニオンギヤの事前観察かつ事後観察がそれぞれ示すように、顕著な表面摩耗が見られる。しゅう動面の欠陥の進行が不適切な潤滑であることは矛盾がなく、結果として、ウォームギヤとピニオンギヤの直接的な金属間接触が増加し、両者の接触方向に合致した引っ掻き傷が形成されていったと見られる。

実験3：鉄粉の影響

摩耗粉分析

この試験用ギヤボックスは、試験2が完了した後、徹底的に清浄化され、Trivela 320油が充填された。試験用の鉄汚染粒子が油中に投入され、ギヤの摩耗

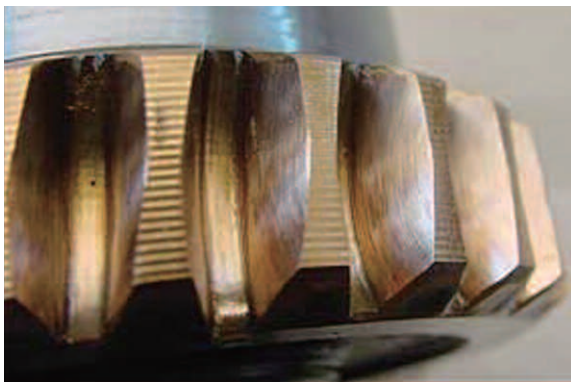


図4 上：試験3実施後のウォームギヤ表面
下：ピニオンギヤ表面

における過度の粒子汚染の効果の模擬試験とした。オイルサンプルが10週にわたり、毎週採取された。表1に分析結果をまとめている。

この試験によって生成された摩耗粒子は2種類で、ラビング粒子と層状粒子である。試験3によって発生した粒子は、試験1の粒子よりいくらか大きかった。加えて、粒子数もかなり多かった。両方の結果が、このギヤボックスの状態が徐々に悪化していることを示している。試験3で生じた粒子の大半が、相対的に滑らかな表面を有し、意図的に加えた鉄粉ではなく、金属表面ならびに境界潤滑の形態からくるものと認められた。

電子線プローブ・マイクロアナライザーを使って調べてみると、油中の鉄粉はウォームギヤから発生した摩耗粒子であり、三体アブレーションに該当す

る相当量のアブレイブ摩耗が見られた。ウォームギヤの表面と比べ、鉄粉の硬度は比較的良かったため、摩耗プロセスの鉄粉の影響は、砂のような硬い汚染物質とは異なる。その結果、切削摩耗粒子はあまり発生しなかった。そして、ギヤと摩耗粉の表面は、ラビング摩耗のために比較的滑らかだった。図4は、試験3の後であり、摩滅して滑らかになったギヤ表面が見られる。

振動解析

試験3の間、シャフトの稼働速度の振動振幅が顕著に増加し、摩耗状態が進行していることを示唆した。

図5は、260~280Hz近傍のエネルギー量が増加していく狭帯域を示している。この領域は、しゅう動面の欠陥を代表しており、摩耗が進行したことを示している。この欠陥はまた、図6に示す復調信号によって補足される。

この図において、シャフトの稼働スピードの高調波の散逸が見られる。これは恐らくしゅう動部分のさらなる劣化の現れであろう。振動のデータは再び、摩耗粉分析と試験後の目視検査の双方に合致していることがわかった。

相関関係

摩耗粉分析技術と振動解析技術の双方は、これらの試験の間、ギヤボックスの状態と診断の問題を評価するために適用された。試験1の摩耗粉分析の結果から、試験の最終段階に近づいた粗いギヤ表面に起因した、わずかに上昇した摩耗粒子の数によって、通常摩耗であることが示された。

試験2においては、摩耗粉分析の方が決定的な結果を与えたとはいえ、摩耗粉分析、振動解析双方から、ギヤ表面間の潤滑不足の問題が発見された。金属間

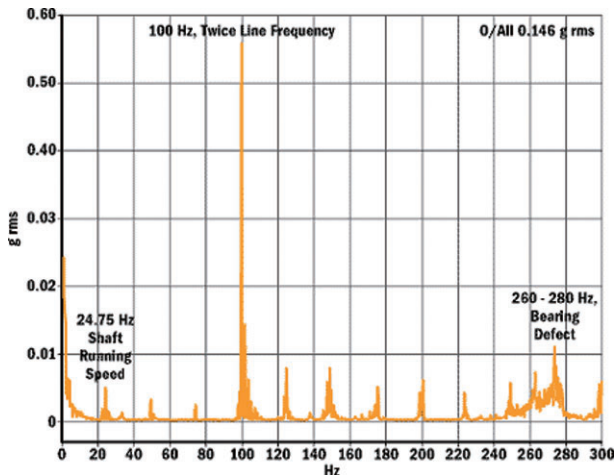


図5 ピニオンギヤ・ドライブエンド部の加速周波数スペクトル

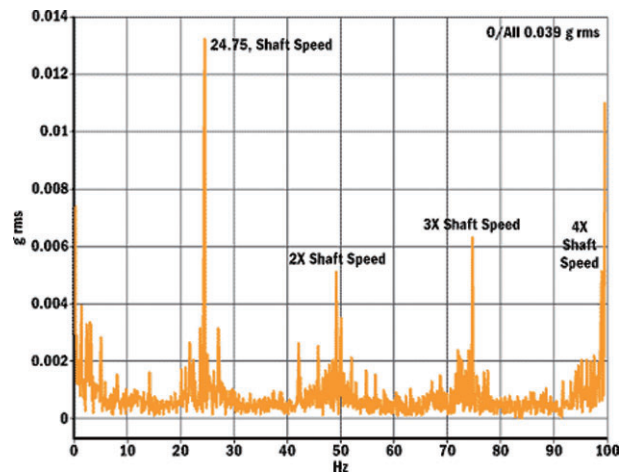


図6 ピニオンギヤ・ドライブエンド部の復調信号

のすべりを起因としたシビアすべり摩耗粒子の存在は、不適切な潤滑の指標として、良質のものである。

試験3の摩耗粉分析によって、相対的に滑らかな表面を有した、相当量の摩耗粒子が発見された。用意された鉄粉は、摩耗プロセスに取り込まれつつ、摩耗形態が形成されたため、この摩耗はおそらく三体ラビング摩耗プロセスと言うべきものであろう。砂のような硬い汚染物質を含む通常の三体摩耗プロセスと対照的に、今回の研究で見られた三体摩耗プロセスは切削摩耗に関連した切削粒子が生成されなかった。しかしながら、顕著な摩耗粉が発生した。鉄粉が摩耗プロセスを加速したのだ。シャフトの稼働速度におけるピーク値の増加傾向、そしてしゅう動部近くのエネルギー値から、振動解析によって摩耗プロセスが確認されることがわかった。

まとめ

これらの試験は、多くのオイル分析の実践者たちが、現場の経験において何を学ばなければならないかを示す第一歩である。摩耗粉分析と振動試験は、互いに緊密に補足しあうものである。これらは、各技術の指標を補強し、特定の摩耗状態を浮上させる

ユニークな診断力を持っている。摩耗粉分析は、摩耗率やギヤのメカニズムの洞察に優れ、一方の振動解析はしゅう動部の高信頼の情報を迅速に提供できる。三つのウォームギヤボックス試験における、統合された二つの状態監視技術は、総合的な洞察を提供し得るものであった。

将来は、進行性の機械の不具合と、他の多くの一般的な摩耗機器の事例を通して、二つの技術の関係において、より多くの詳細な事実を発見することを期待している。 **ML**

参考文献

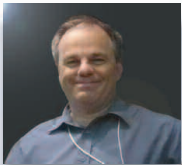
1. Anderson, D. (1982). Wear Particle Atlas (revised edition). Report NAEC-92-163.
2. Barron, T. (1996). Engineering Condition Monitoring. Boston: Addison Wesley Longman.
3. Berry, J. (1999, November-December). Good Vibes about Oil Analysis. Practicing Oil Analysis.
4. Byington, C., Merdes, T. and Kozlowski, J. (1999). Fusion techniques for vibration and oil debris/quality in gearbox failure testing. Proceedings of the International Conference on Condition Monitoring. University College of Swansea, Swansea, UK. pp. 113-128.
5. Hunt, T. (1996). Condition Monitoring of Mechanical and Hydraulic Plant: A Concise Introduction and Guide. Norwell, Mass: Kluwer Academic Publishers.
6. Luo, G., Osypiw, D. and Irlle, M. (2000). Real-time condition monitor-

- ing by significant and natural frequencies analysis of vibration signal with wavelet filter and autocorrelation enhancement. Journal of Sound and Vibration 236.
7. Mathew, J. and Stecki, J. (1987). Comparison of vibration and direct reading ferrographic techniques in application to high-speed gears operating under steady and varying load conditions. Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers 43. pp. 646-653.
 8. Maxwell, H. and Johnson B. (1997). Vibration and lube oil analysis in an integrated predictive maintenance program. Proceedings of the 21st Annual Meeting of the Vibration Institute. pp. 117-124.
 9. Newell, G. (1999). Oil Analysis-Cost Effective Machine Condition Monitoring Technique. Condition Monitoring 199 387.
 10. Optimas Technical Reference (9th edition) (1999). Media Cybernetic.

11. Roylance B., Williams J. and Dwyer-Joyce R (2000, February 7). Wear Debris and Associated Wear Phenomena - Fundamental Research and Practice. Proceedings of the I MECH E Part J Journal of Engineering Tribology 214. pp. 79-105.
12. Toms, L. (1998). Machinery Oil Analysis: Methods, Automation and Benefits (2nd edition). Virginia Beach, Va: Coastal Skills Training.
13. Troyer, D. and Williamson, M. (1999). Effective integration of vibration analysis and oil analysis. Proceedings of the International Conference on Condition Monitoring. University College of Swansea, Swansea, UK. pp. 411-420.
14. Want, W. and McFadden, P. (1996). Application of wavelets to gearbox vibration signals for fault detection. Journal of Sound and Vibration 192. pp. 927-939.



国内総代理店: コンパス・トゥーワン



セミナー講師:
Martin Williamson,
KEW Engineering Ltd.

潤滑管理のすべて
カスタマイズバージョン

Mastering Lubrication Management



講師との相互コミュニケーションで進行する
臨場感あふれるセミナーです。

日程・会場・内容に応じて設計いたします。

- ☑ 潤滑とオイル分析の基礎が理解できます。
- ☑ 潤滑戦略のアイデアが培われます。
- ☑ オイル分析の結果が改善できます。
- ☑ 信頼性を引き上げることができます。
- ☑ 利益率や投資効率が上がります。
- ☑ 品質ゴールが改善できます。
- ☑ ICML試験対策に実績があります。

まずはお問い合わせください。

KEW@compass21.jp Tel. 035609-9829