

# AE と油分析による歯車減速機設備診断法および 潤滑油改良による歯車減速機設備運転周期延長法

里永 憲昭\*, 日高 良輔\*, 山路 信之\*, 陳山 鵬\*\*

Condition Diagnosis Method by AE and Lubricating Oil Analysis,  
And Extension Method of Running Period by Improvement of Lubricating Oil for Gearbox Machinery

Noriaki SATONAGA\*, Ryosuke HIDAKA\*, Nobuyuki YAMAJI\* and Ho JINYAMA\*\*

**Abstract :** This paper proposes a condition diagnosis method by using AE (Acoustic Emission) and lubrication oil analysis together for gearbox machinery, in order to detect faults and identify failure type at an early stage. For fitting the schedule of plant production and the plan of machinery maintenance after the detection and identification of a machine fault at early stage, we propose an extension method of running period for gearbox machine by improvement of lubricating oil as the lubricating oil control of gearbox machinery. The improvement method of lubricating oil is adding a proper fortifier into the oil. The efficiency of the methods proposed in this paper has been verified by applying them to a reducing gears, and we show the result of verification by AE diagnosis, oil analysis and actual evidence in the real plant maintenance.

**Key words :** Condition diagnosis, gearbox machinery, Acoustic emission, Lubrication oil analysis, Reducing gears

## 1. はじめに

近年, 日本国内の製造業において, 安全・安定運転を大前提として更なるコストダウンが求められている。保全費削減の一施策として, 保全周期の延長が挙げられる。保全周期延長のためには, 機器の現状を把握し, その後の異常の進行状況を推定する技術, つまり余寿命予測技術が最も有効な手段のひとつと考えられる。しかし, 技術確立には高度な知識と豊富な経験を要するため, 現実的には非常に困難である [1], [2], [3]。

また, 設備異常の検出手法としては, 振動法, AE 法, 油分析法などがよく用いられるが, 異常診断の精度を高めるためには, 単一の手法より複数の手法で得られた診断情報を融合・総合して診断を行った方が有効と考えられる。さらに, 現場において設備異常が検出されても, 生産の都合上, ただちにその設備を停止して修理することができない場合が多く, 生産スケジュールや停修計画に合わせた設備保全が望ましい。設備異常が初期, 中期, 末期に分けられるので, 初期と中期の異常は適切な措置を取れば, 末期異常までの時間を延ばすことができ, 運転周期の延長により生産に与える悪影響を最小限に抑えることができる。

振動の周波数分析および油分析により歯車装置の異常箇所を推定する手法を論じている例<sup>(4)</sup>があるが, 生産現場においては, 遊星歯車式の減速機のような複雑な構造に対する診断において異常振動に現れる時点では, 損傷状況が激しく生産および設備復旧に与える悪影響が大きいので, 異常の早期検知が重要である。また, 早期発見の異常に対して潤滑油管理などの適切な措置を取り, 生産スケジュールに合った保全活動も必要である。

したがって, 本報では, 重要な回転機械設備である遊星歯車式減速機の診断・保全管理を実例として, 早期に検出の可能なAE法と油分析法を併用することによる異常検出と簡易・精密診断法を提案し, また, 設備管理の中で重要な潤滑油管理法として潤滑被膜生成添加剤の使用による回転機械設備の運転周期延長法を検討・提案する。

## 2. AE法と油分析法を用いた異常診断法

### 2. 1 AEによる異常診断法

#### (1) AEについて

AEとは, アコースティック・エミッション (Acoustic Emission) の略語であり, 固定材料の変形や破壊に伴う急激なエネルギーの解放によって発生する弾性波 (音波) のことである。つまりAE診断とは, その発生する弾性波をセンサーにより検出し, 増幅器などを介して事象率 (カウント数) 測定, もしくはFFT解析 (周波数分析) を行なうことにより, 初期異常を把握する診断手法である<sup>(5)</sup>。

Fig. 1はAE信号を計測するためのセンサー, 信号処理装置および信号の流れなどを示す。

設備診断において最も多用される振動法とAE法との違

† 「第4回評価・診断に関するシポジウム」にて講演

\* 昭和エンジニアリング(株) 大分事業所 大分市大字中の洲2番

\*\* 三重大学 津市栗真町屋町1577

\* Showa Engineering, Co., LTD

\*\* Mie University

いは、Fig. 2 に示すように、振動法が振動値上昇・温度上昇・異音などの異常の二次的現象に対応して用いられるのに対し、AE法は、接触・クラックの発生、成長・剥離・溶融などの初期異常時に見られる一次的現象を捉えるのに有効な診断手法であるということである。AE法は、ノイズの混入が問題化することが多いという欠点もあるが、現場では振動法で検出しにくい初期異常（一次的現象）の早期発見に多く用いられている。なお、ノイズ混入の問題については、診断対象の設備や部位に応じてフィルタや検知精度・感度の閾値を設定することによりノイズを除去し、また、AE信号のFFT解析により異常の特徴周波数成分を検出しノイズ成分と異常成分の識別を行っている。

前述のように、AE診断には事象率測定とFFT解析がある。事象率とはAE信号波形の中から閾値となる電圧以上の波形のみを抽出し、単位時間におけるカウント数をプロットしたものである。またFFT解析は、信号波形をフーリエ変換し、周波数とそのレベルをプロットしたものである (Fig. 3)。これらの結果をもとに診断を行なう。

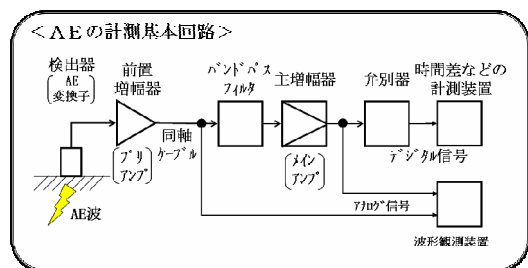


Fig. 1 Measurement basis circuit of AE diagnosis



Fig. 2 AE method and vibration method

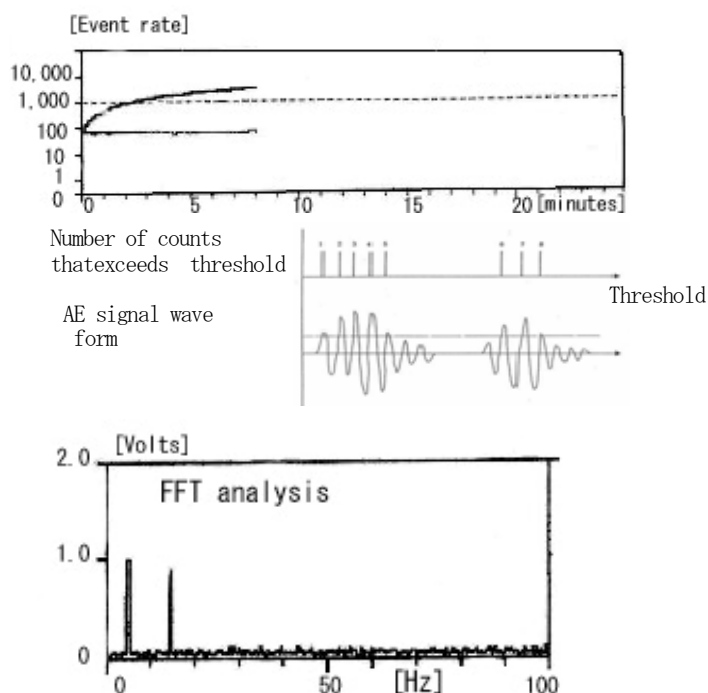
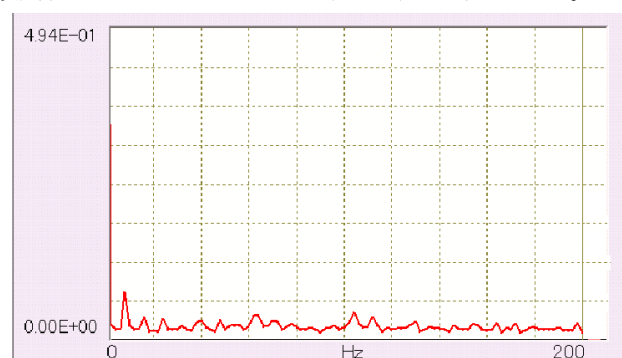
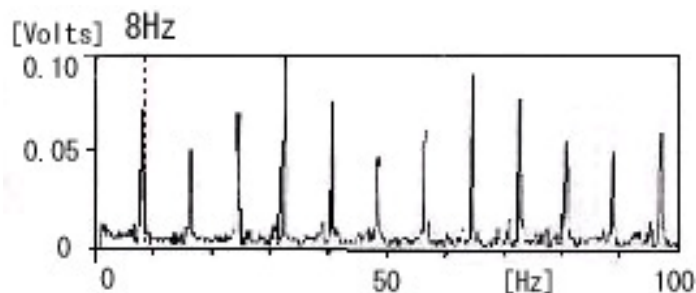


Fig. 3 Event rate measurement and FFT analysis

Fig. 4 は、ある減速機の軸受の初期摩耗状態時に測定した振動信号と AE 信号のスペクトルの比較例を示す。この減速機は、サイクロ減速機であり出力軸が 30rpm (22kw) である。低速運転を行った時に微小な異音が生じていたので、設備診断にて振動法、AE 法、潤滑油診断を併用して実施した。Fig. 4 (b) に示すように、AE 信号のスペクトルには軸受の摩耗時に発生する内輪特徴周波数成分 (8Hz) とその高調波の増大が見られたが、Fig. 4(a) に示す振動信号のスペクトルには全体的なレベルが低く特定周波数が明白に確認できていなかった。今回の事象は、軸受の軽微な摩耗が確認された。したがって、比較的軽微な早期損傷に関する現象を検出する手法として AE 法の感度が良いと考えられる。



(a) Spectrum of vibration signal



(b) Spectrum of AE signal

Fig. 4 An example of spectrum comparison of AE and vibration signals

## (2) 診断対象の減速機

本研究で対象とした減速機の仕様を以下に示す。当機は押し出し機で、モータ駆動でプーリーを介し、減速機・増速機にて変速されている (Fig. 5)。

減速機仕様：入力軸 1845 rpm

出力軸 255 rpm (減速比 1 / 7.24)

なお、当機はさまざまな製品グレードを製造しているが、データの採取については、運転負荷の大きい製品グレード (モータ電流 240~250A, 樹脂圧力 5.6~7.2MPa) を対象に実施した。

## (3) 減速機の特徴周波数解析

当減速機を含む押し出し機は、1995年5月に設置されたもので、以前から回転音上昇や遊星歯車のピン摩耗などが原因で頻繁に点検を実施していた。今回も点検後わずか1ヶ月で回転音が大きくなった。以下は、AEによる異常診断法を示す。

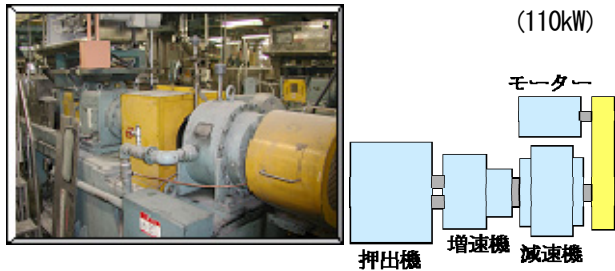


Fig. 5 Equipment arrangement chart

1) 遊星歯車減速機で発生する特性周波数計算式の導出

遊星歯車減速機で発生する振動の特性周波数の計算式は文献[14]に一部示されているが、その誘導過程が示されていない。ここで、遊星歯車減速機の異常診断時に必要な諸計算式とその導出法を示す。

Fig. 6に示す遊星歯車減速機においては、太陽歯車、遊星歯車、内歯車の回転により、以下のような特性周波数が発生する。

- (a) 太陽歯車の回転周波数
- (b) 噛み合い周波数
- (c) 遊星歯車の自転周波数
- (d) 遊星歯車の公転周波数
- (e) 太陽歯車異常周波数
- (f) 遊星歯車異常周波数
- (g) 内歯車異常周波数

これらの特性周波数は各歯車の動きをモデル化することにより算出することができる。第一段階として、各特性周波数の算出に必要な基本式の導出を行なう。

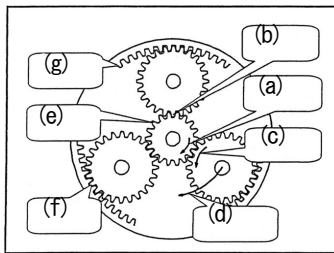


Fig. 6 Characteristic frequency generated in planetary gear

Fig. 7より、遊星歯車部のモデル化として以下の関係が成り立つ。

$$\widehat{ac} = \widehat{ab} + \widehat{bc} \dots ①, \quad \widehat{uv} = \widehat{bc} \dots ②$$

また、上式中の $\widehat{ac}$ 、 $\widehat{bc}$ 、 $\widehat{uv}$ は、遊星歯車公転角 $\theta_1$ 、太陽歯車自転角 $\theta_2$ を用いて、以下のように表わされる。

ここで、 $r_r$ ：内歯車のピッチ円半径、 $r_s$ ：太陽歯車のピッチ円半径、 $r_p$ ：遊星歯車のピッチ円半径を示す。

$$\widehat{ab} = r_s \cdot \theta_1 \dots ③, \quad \widehat{bc} = r_s \cdot \theta_2 \dots ④$$

$$\widehat{uv} = r_r \cdot \theta_1 \dots ⑤$$

ここで、 $\widehat{ac} = L$ とし、以下の式を基本式とする。

$$L = r_s \cdot \theta_1 + r_s \cdot \theta_2 \dots ⑥$$

$$r_r \cdot \theta_1 = r_s \cdot \theta_2 \dots ⑦$$

$$r_r \cdot \theta_1 = r_p \cdot \theta_a \dots ⑧$$

上式中の $\theta_a$ は、自転角 $\theta_p$ と公転角 $\theta_1$ の和である。

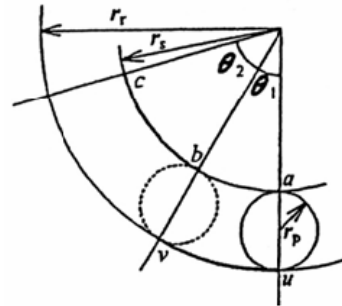


Fig. 7 Simple model 1 of planetary gear

つぎに、代表的な各特性周波数式の導出を行なう。

<噛み合い周波数  $f_z$ >

⑥、⑦式、 $L = 2\pi r_s \cdot f_s$ より、

$$r_s \cdot \theta_2 = \frac{2\pi r_s \cdot r_r}{r_s + r_r} \cdot f_s$$

歯のピッチをPとすると、 $r = (P/2\pi) \times T$ となる。この関係式を用いて歯車径rを歯数Tに書き換えると、以下のようなになる。ここで $T_s$ 、 $T_r$ は、それぞれ太陽歯車、内歯車の歯数である。

$$r_s \cdot \theta_2 = \frac{P \cdot T_s \cdot T_r}{T_r + T_s} \cdot f_s$$

この式は、太陽歯車が1秒間に歯を噛み合わせて回った円周距離を表わしている。したがって、この値を歯のピッチで除することにより、噛み合い周波数が算出される。

$$f_z = \frac{r_s \cdot \theta_2}{P} = \frac{T_s \cdot T_r}{T_s + T_r} \cdot f_s \text{ (Hz)}$$

<遊星歯車の公転周波数  $f_c$ >

⑥、⑦式、 $L = 2\pi r_s \cdot f_s$ より、

$$\theta_1 = \frac{2\pi r_s}{r_s + r_r} \cdot f_s$$

この式は、遊星歯車の1秒間の公転角度を表わしている。従って、この値を $2\pi$ で除することにより、公転周波数が算出される。また、(b)と同様に歯車径rを歯数Tに書き換えると、以下のようなになる。

$$f_c = \frac{T_s}{T_s + T_r} \cdot f_s \text{ (Hz)}$$

2) 本事例における遊星歯車減速機の特性周波数算出

(1)の周波数算出の考え方をもとに導出した式により、各特性周波数を算出した。結果をTable 1に示す。

- ・太陽歯車歯数 ( $T_s$ )  $\dots$  17
- ・遊星歯車歯数 ( $T_p$ )  $\dots$  44
- ・内歯車歯数 ( $T_r$ )  $\dots$  106

Table 1 Characteristic frequency generated from planetary gear decelerator

Characteristic frequency [Hz]			Calculation type
①太陽歯車の 回転周波数	$f_s$	30.75	$f_s = \frac{N}{60}$
②噛み合い 周波数	$f_z$	450.5	$f_z = \frac{T_s \cdot T_r}{T_s + T_r} \cdot f_s$
③遊星歯車の 自転周波数	$f_p$	6.0	$f_p = \frac{T_s \cdot (T_r - T_p)}{T_p \cdot (T_s + T_r)} \cdot f_s$
④遊星歯車の 公転周波数	$f_c$	4.25	$f_c = \frac{T_s}{T_s + T_r} \cdot f_s$
⑤太陽歯車 異常	$f_{ds}$	26.5	$f_{ds} = \frac{T_r}{T_s + T_r} \cdot f_s$
⑥遊星歯車 異常	$f_{dp}$	10.2	$f_{dp} = \frac{T_s \cdot T_r}{T_p \cdot (T_s + T_r)} \cdot f_s$
⑦内歯車 異常	$f_{dr}$	4.25 12.75	$f_{dr} = n \cdot \frac{T_s}{T_s + T_r} \cdot f_s$ ( $n=1, 3$ )

#### (4) AEによる診断結果

AE診断のエンベロープ処理データ (Fig. 8) では、4.25Hz、特にその3倍成分である12.75Hzが顕著に検出された。Table 1より、この値は遊星歯車の公転周波数、内歯車異常周波数と一致していることから、異常箇所は遊星歯車もしくは内歯車であることが推定される。事象率測定 (Fig. 9) においては、500カウント/分を超えるカウント数であった。生産現場での実績として1000カウント/分を超えるケースでは歯車表面に重大な剥離などを発生し、運転継続不可能という評価をしており、今回の500カウント/分は現時点では微小なクラックや剥離が生じていると推測される。

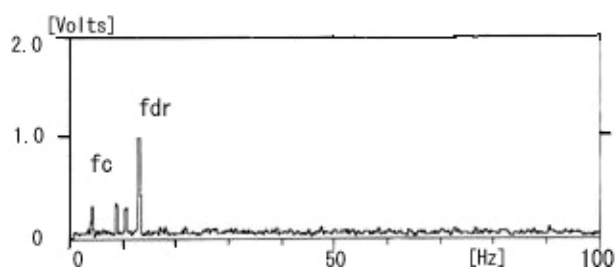


Fig. 8 AE frequency analysis result

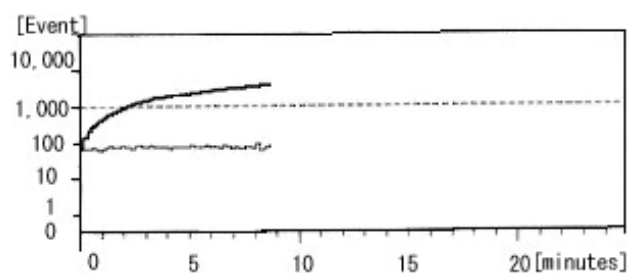


Fig. 9 AE event rate (number of counts)

## 2.2 油分析による異常診断法

### (1) 油分析について

設備診断において、油分析は非常に有効な診断法のひとつである。油分析にはフェログラフィ法、SOAP法、チップディテクター法などがあるが、本研究ではフェログラフィ法を用いた。さらにフェログラフィ法は、摩耗粉量から機器の異常を診断する定量フェログラフィ法と摩耗粉の形態と量から機器の異常と異常の原因を診断する分析フェログラフィ法に分類されるが、今回は後者を採用した。

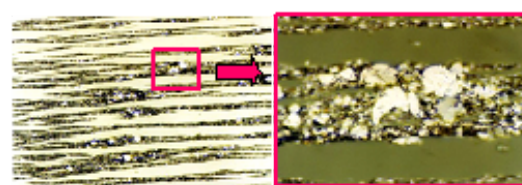
分析フェログラフィ法は、サンプル油をフェログラムスライド上に流すと、スライド下部の磁石によって発生した磁束線上に摩耗粒子が配列する。その摩耗粒子を顕微鏡にて観察し、顕微鏡の可視範囲内にある摩耗粉の数や形状によって、摩耗の原因を推定する。また、材質の特定にはテンパーカラーによる材質判定法が用いられる。これは摩耗粉を300~550°Cに加熱した時の変色によって材質を特定するという方法である。<sup>[6]</sup>

### (2) 油分析による減速機異常診断法

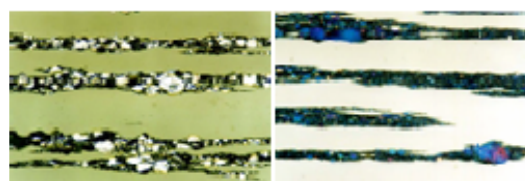
フェログラフィの結果を Fig. 10 に示す。フェログラフィ分析では、やや多くの金属摩耗粉が観察され、その中には約180 μmの薄片状摩耗粒子や疲労摩耗粒子も混在していた。これらの摩耗粉は、加熱により青色に変色したことから、軸受鋼であると考えられる。<sup>[6]</sup>

### 2.3 総合判定結果

以上のAE、オイルフェログラフィ結果と当機の過去の運転実績から、異常原因は「減速機内部の遊星歯車軸受部が潤滑不良となり、軽微な摩耗が生じている」と推定した。開放点検の結果は後述するが診断結果と一致していた。当機は今までに軸受型式変更などの構造的な改善は多く行なってきたが十分な改善効果を得られていない。そこで、今回は潤滑改善 (添加剤使用) を実施した。添加剤には極圧添加剤、固体潤滑剤などがあるが、今回は潤滑被膜生成添加剤を使用した。



(a) The Ferrogram upstream



(b) The Ferrogram downstream (c) After it heats it

Fig. 10 Ferrogaphy analysis result

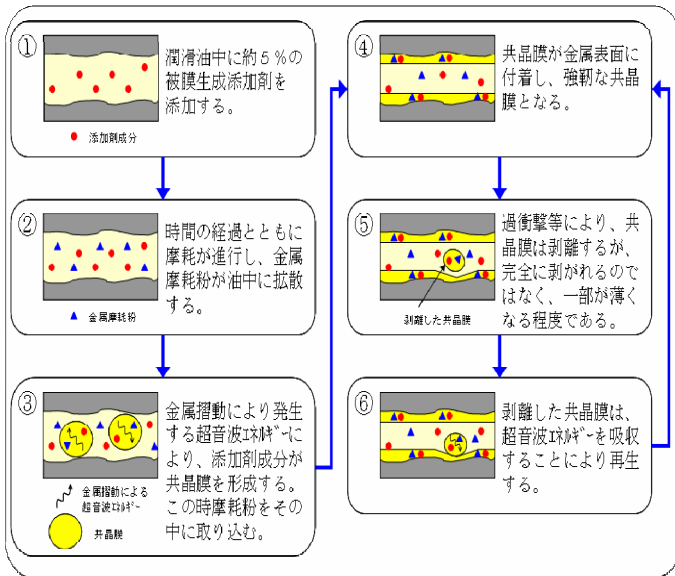


Fig. 11 Mechanism of additive

### 3. 添加剤使用による減速機寿命延長法

#### 3.1 潤滑被膜生成添加剤について

潤滑被膜生成添加剤（以下、添加剤という）は金属が擦れている部分に特殊な共晶膜を作り出す。この共晶膜は非常に強靱で、高荷重に耐えることができる超潤滑フィルムである。

成分が摺動部で発生するエネルギーを吸収し、共晶膜の形成を進行する。したがって、過酷な条件（高荷重、高温など）になればなるほど効果を発揮する。

剥がれ落ちた共晶膜は、もとの成分に還元し共晶膜を再現することから、経時劣化するオイルとは異なり、潤滑効果が長期に持続する。

本添加剤のメカニズムについては、複雑な流体や摩耗粉などの要因が絡み、理論解析により精密に解明することが困難であるが、著者らの知見や分析により Fig. 11 に示すような仮説を立て、油分析法などによる検証を行った。

すなわち、摺動エネルギーにより活性化された成分が共晶膜となり、金属表面に固着コーティングされ、超潤滑膜を形成する。この成分は特殊な有機の High Carbon 系の流体であるが、詳細成分については公表されていない。

#### 3.2 添加剤使用前後の診断結果比較による効果検証

本研究では、添加剤使用開始直前の点検からつぎの点検までの1年3ヶ月間の診断結果を基にして、本添加剤の効果を検証した。本節では、AE法と油分析法を用いて添加剤使用前後の診断結果を比較し、本添加剤の効果を定性的に評価する。

##### (1) ティムケン試験機による潤滑性能の測定結果

試験方法は、リングとブロックを線接触させ、注油しながら10分間リングを回転させる。摩耗痕の状況から焼付きの有無を確認し、焼き付かない最高荷重を求める。その値を摩耗痕の大きさに除することにより、平均接触圧力が求められる。

Table 2 はティムケン試験機による潤滑性能の測定結果である。

Table 2 Analysis result by Timken test machine

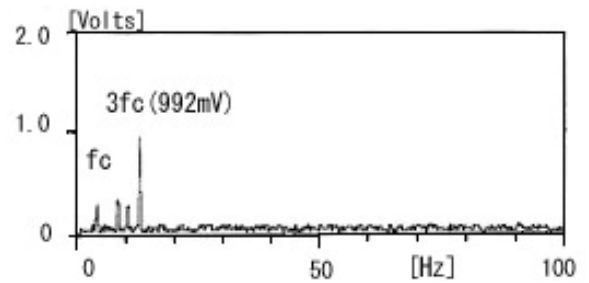
テスト油	焼付き時の荷重	摩耗痕	荷重/摩耗痕面積
(1) 新油	114 kg	23.8 mm <sup>2</sup>	4.83 kg/mm <sup>2</sup>
(2) 新油+被膜生成添加剤(5%含有)	437kgで焼付かず	3.45 mm <sup>2</sup>	127 kg/mm <sup>2</sup>
(3) 使用油(6ヶ月)<被膜生成添加剤含む>	437kgで焼付かず	3.87 mm <sup>2</sup>	110 kg/mm <sup>2</sup>

(使用オイル: 出光タフニギヤオイル #220)

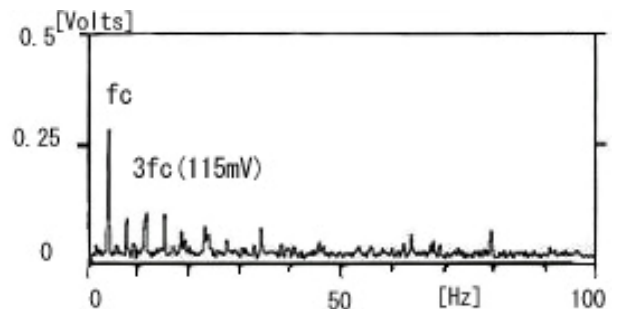
使用油は新油に比べ、焼付き時の荷重で4倍以上の差があることから、潤滑性能の改善が見られ、本添加剤の効果が確認できた。[7][8][9][10]

##### (2) AEによる診断結果の比較

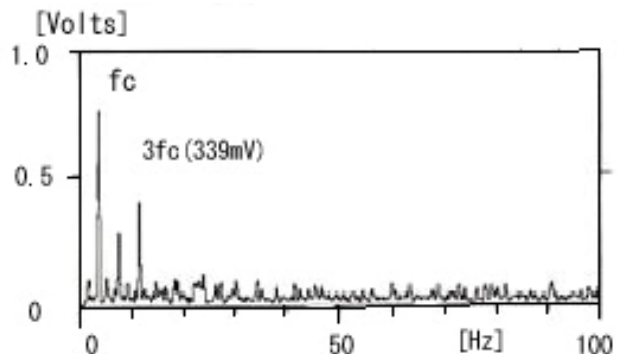
###### ① AEエンベロップ処理データ



(a) Before using the additive



(b) One month after beginning of the additive



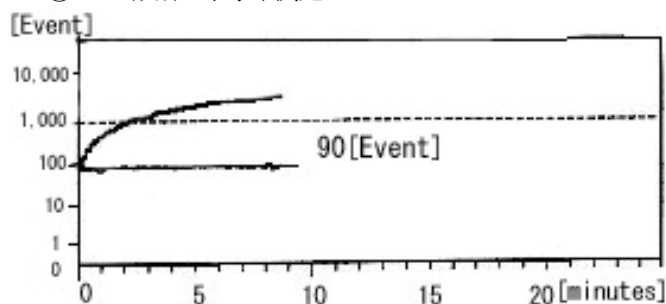
(c) One year and three months after beginning of the additive use

Fig. 12 AE frequency analysis result

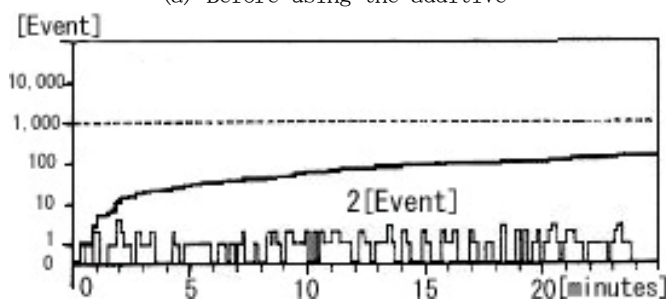
エンベロップ処理データによる分析においては、添加剤使用前は回転数の3倍成分が支配的であった (Fig. 12(a))。一方、添加剤使用開始後1ヶ月の測定結果では、回転数成分が支配的となり、以前高かった回転数の3倍成分のレベ

ルは低くなっている (Fig. 12 (b))。しかし、その後周波数レベルは全体的に上昇した。この結果から、異常の進行とともに3倍成分が上昇してくる傾向があるといえる。(Fig. 12 (c))

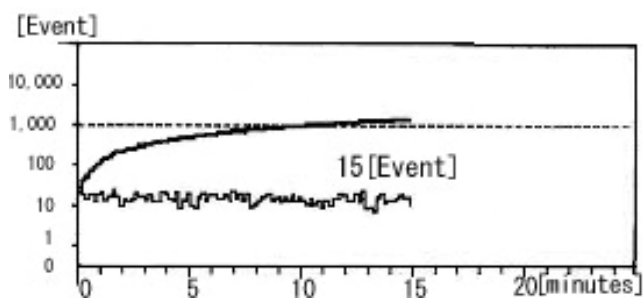
### ② AE診断の事象率測定



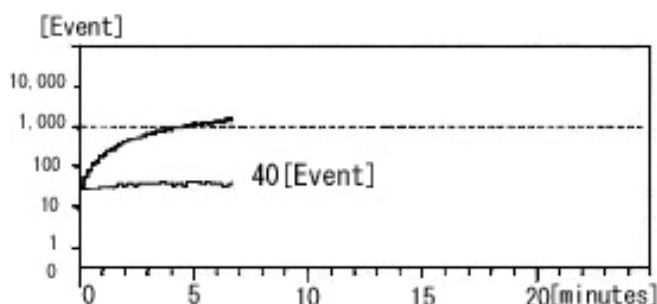
(a) Before using the additive



(b) One month after beginning of the additive use



(c) Five months after beginning of the additive use



(d) One year and three months after beginning of the additive use

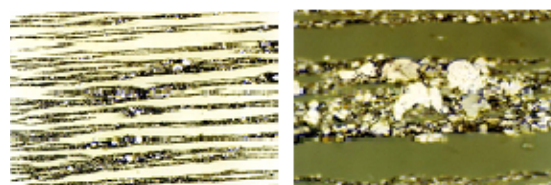
Fig. 13 Event rate measurement result

添加剤使用前の事象率では、カウント数が500カウント/分を超えており、弾性波を発生するクラックや剥離が多少発生していたと推定される。一方、添加剤使用開始1ヶ月後はカウント数が10カウント/分以下となり、その後はややカウント数が多くなっている。このように事象率

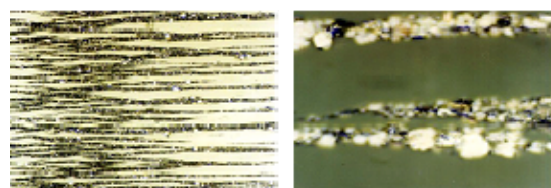
が緩やかな上昇傾向を示している原因としては、潤滑油の劣化による異常摩耗が発生しているわけではなく、共晶膜の剥離による金属接触が検知されてると考え劣化は緩やかに進んでいると考えている。したがって、使用開始1年以上経過しても添加剤の効果は継続しているといえる。( Fig. 13(a), (b), (c), (d) ) [5][12]

### (3) 油分析による診断結果の比較

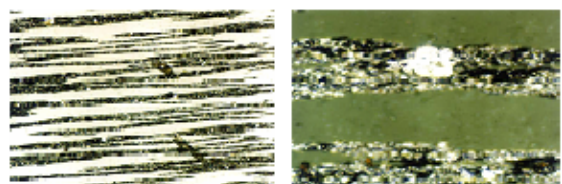
添加剤使用前は、軸受鋼と推定される約 $180\mu\text{m}$ の薄片状摩耗粒子や疲労摩耗粒子がやや多く見られた (Fig. 14(a))。使用開始1ヶ月後の結果では、金属摩耗粒子の数に変化は見られないが、サイズの大きい摩耗粒子は減少している (Fig. 14(b))。また使用開始5ヶ月後になると、摩耗粒子の数も僅かに減少した (Fig. 14(c))。



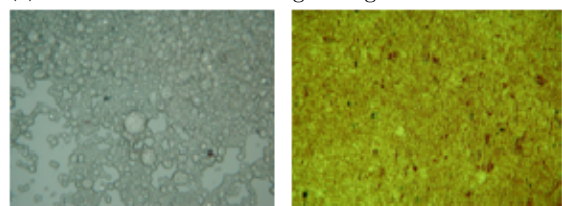
(a) Before using the additive



(b) One month after beginning of the additive use



(c) Five months after beginning of the additive use



(d) One year and three months after beginning of the additive use

Fig. 14 Ferography analysis result

また、添加剤使用開始1年3ヶ月後の分析結果では、使用開始5ヶ月後までとは全く異なった形態を呈している (Fig. 14(d))。このフェログラフィ結果について製造元と共に調査研究を行ったところ、共晶膜がミクロン～サブミクロンレベルの摩耗粉を共晶膜中に吸収し、潤滑被膜を形成する活性化成分となっている状態であり、この成分が金属面に固着皮膜を形成するため、従来の一般オイルを用いた時のような摩耗粉は観測されることが分かった。この現象は本添加剤が摩耗を抑制し、金属摩

耗粉量が大幅に減少しているといえる。

**(4) 定量分析 (パーティクルカウンター) 結果**

AEと油分析の診断結果により、添加剤の効果を定性的に確認することができた。さらにパーティクルカウンターにより定量的に分析を行なった。

結果を Table 3 に示す。添加剤使用直後と使用開始 5ヶ月後、1年3ヶ月後を比較すると、使用直後に比べて5ヶ月後はY-NAS等級も15級から14級になり、明らかな改善が見られる。しかし、1年3ヶ月後の結果を見ると、2μ以下の摩耗粉は減少しているのに対し、2μ以上の磨耗粉は極端に増加している(Y-NAS等級18級)。この原因としては、以下のことが考えられる。

Table 3 Quantitative analysis result

	使用開始直後	5ヵ月後	1年3ヵ月後
1μ~	196,579	175,510	161,549
2μ~	167,234	141,604	158,892
5μ~	73,128	43,881	146,434
10μ~	4,339	868	97,947
15μ~	643	123	52,447
25μ~	123	30	17,769
50μ~	13	7	297
100μ~	2	3	13
Y-NAS等級	15級	14級	18級

[単位: 個/mL]

定量分析の原理は、Fig. 15 に示すように、採取した潤滑油を一定の流速で計測セル内に流し、計測セルの片側に設置された発光源(レーザーダイオード)から出される平行光線を粒子が遮った領域を、フォトディテクターによって計測するというものである。この平行光線を遮る粒子は金属でなくてもカウントされる。2μ以下の摩耗粉は、前述のとおり共晶膜の中に取り込まれるため、減少する。しかし、その取り込まれた摩耗粉は、共晶膜の中で光線に対して重なった状態で遮光すればサイズの大きい摩耗粉として測定される。また、泡、汚れ、色相変化などの現象がオイルの劣化に伴って目立ってくることも一因と考えられる。したがって、今回の添加剤使用開始1年3ヶ月後の結果は、サイズの大きい金属磨耗粒子の数ではなく、小さな摩耗粉の集合体やオイルの劣化に伴って発生する汚れなどを検出していると考えられる。

今回の仮説の再現性評価として、同機器において開放検査後の状況について次章にて検証する。

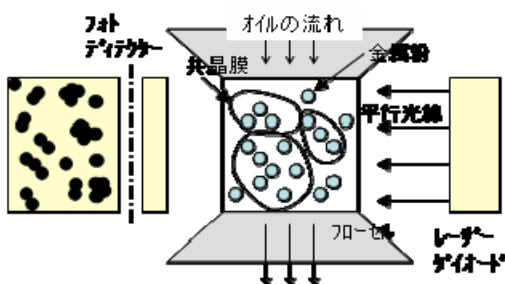


Fig. 15 Formation of eutectic film at quantitative analysis

**(5) 効果検証の結論**

- ① 5%程度の添加剤を含む使用油において、焼付き時の荷重を新油と比べると、4倍以上の差があることから潤滑性能は改善されている。
- ② AEエンベロープ分析より、異常の進行とともに3倍成分が上昇してくる傾向があることが確認できた。これは、遊星歯車数に起因すると考えられる。
- ③ フェログラフィ分析において、添加剤使用1年3ヶ月後の結果は、それ以前の結果と全く異なった形態を示しており、サイズの大きい金属磨耗粒子は検出されていない。これは本添加剤が摩耗を抑制し、金属磨耗粉量が大幅に減少したためと考えられる。
- ④ 使用開始後1年3ヶ月の定量分析では、2μ以下の磨耗粉は減少しているのに対し、2μ以上の磨耗粉は極端に増加している。これは、サイズの大きい金属磨耗粒子の数ではなく、小さな磨耗粉の集合体やオイルの劣化に伴って発生する汚れなどを検出していると考えられる。

**4. 開放点検検証および開放点検周期の推定**

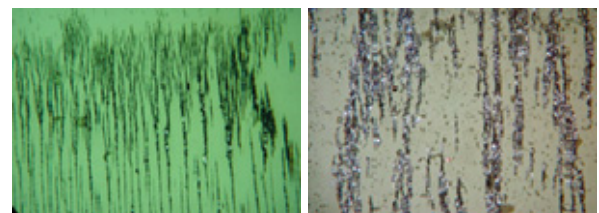
**4. 1 開放点検結果および開放点検後の運転状況**

当機は添加剤使用開始1年3ヶ月後に定期点検を実施した。点検結果を以下に示す。

- ① 入力軸
  - 入力軸のギヤ歯面に異常はなく、軸受の磨耗損傷も特に見られなかった。
- ② 遊星軸
  - 添加剤使用前の異音発生時の診断において、軽微な磨耗が生じていると推定された遊星軸軸受に末期的な異常磨耗は見られなかった。すなわち、異常の初期段階にAEと油分析により異常を検出し、潤滑油に本添加剤の使用により磨耗の進行を大幅に遅らせ、設備使用寿命の延長効果が得られた。

点検実施後、潤滑油に再び本添加剤を添加し、定期的に診断を実施した。Fig. 16 添加剤使用2回目のフェログラフィ分析結果を示す。

2回目の結果では、1回目と比べてサイズの小さい正常磨耗粉が観測され、共晶膜が確認された。



(a) Seven months (b) One year and three months after beginning of the additive use

Fig. 16 Ferrography analysis result

(The second in additive use)

Fig. 14 に示す1回目の結果と比較すると、結果に若干の違いが見られる。その原因としては、1回目は機器の異

常が確認された後に添加剤を使用したのに対し、2回目は開放点検(軸受交換)後、新油に使用しており、使用開始条件が異なることが考えられる。

今回は使用条件の違いにより、1回目と2回目の診断結果を直接比較することは困難であるが、両ケースいずれの場合にも、異常成分は確認されず、添加剤を使用した効果が確認できた。

これらの検証結果より、本添加剤が摩耗の抑制に非常に有効であることを再確認することができた。

#### 4. 2 AE 事象率を用いた開放点検周期の推定

前述のように、今回の開放点検ではギヤ歯面、軸受等に末期的な異常は検出されなかった。そこで、仮に点検を実施しなかった場合、あとどのくらいの期間運転を継続できたのか、事象率結果を用いて推定した。Fig. 17は添加剤使用前後での10秒間のカウント数の変化である。仮に添加剤使用前のカウント数 90[10sec]を使用限界レベルと考えると、多項式近似により、次回の点検(使用限界レベルに達する)時期を推定することができる。この結果より、あと1年間運転継続可能であったと考えることができる。<sup>[11][12][13]</sup>

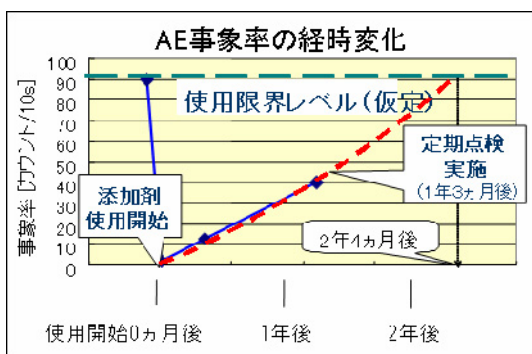


Fig. 17 A change with the lapse of time of event rate

### 5. まとめ

本報では、AE法(Acoustic Emission)と油分析法を用いて、重要な回転機械設備である遊星歯車式減速機の異常検出・診断法を提案し、また、潤滑被膜生成添加剤の使用による使用寿命延長法を検討・提案した。主な成果はつぎのようにまとめられる。

- 1) 対象の減速機は、振動法より早期に異常検知の可能なAEと油分析による診断結果および当機の過去の運転実績から、異常原因は「減速機内部の遊星歯車軸受部が潤滑不良となり、軽微な摩耗が生じている」と推定された。そこで、対策として潤滑改善が必要と判断し、潤滑被膜生成添加剤を使用した。
- 2) 潤滑被膜生成添加剤の潤滑メカニズムを提案した。
- 3) ティムケン試験、AE診断、油分析診断を時間軸で評価し、それらの分析結果と開放点検結果から、本添加剤は有効に作用していることが確認できた。
- 4) 油分析において、添加剤使用1年3ヶ月後の結果は、それ以前の結果と全く異なった形態を示しており、サイズの大きい金属摩耗粒子は検出されていない。

- 5) 使用開始後1年3ヶ月の定量分析では、 $2\mu$ 以下の摩耗粉は減少しているのに対し、 $2\mu$ 以上の摩耗粉は極端に増加しているが、これはサイズの大きい金属摩耗粒子の数ではなく、共晶膜中の小さな摩耗粉の集合体やオイルの劣化に伴って発生する汚れなどを検出していると考えられる。
- 6) 開放点検の結果、入力軸、遊星軸のギヤ歯面、軸受に末期的な異常は見られなかったため、潤滑油に本添加剤の使用により摩耗の進行を大幅に遅らせ、設備使用寿命の延長効果が得られた。
- 7) AE事象率測定において、添加剤使用前のカウント数90[10sec]を使用限界レベルと仮定し、余寿命予測を行なった。
- 8) 点検後、再度添加剤を使用し、定期的に診断を実施したが、フェログラフィ結果において異常成分は確認されなかった。

以上より、減速機のような回転機械設備の診断においては、簡易・精密診断の手法としてAE法と油分析の結果を併用することが非常に有効であることが実証できた。

また、潤滑油に適切な添加剤を使用することによって、摺動面の摩耗が抑制されることが確認でき、歯車減速機設備の寿命延長に充分寄与できることが分かった。

今後の課題としては、本添加剤と同じような特殊効果を持つ他のオイル添加剤についても、実機に使用し、その有効性の検証を行い、回転機械設備の寿命延長技術および余寿命予測技術を高めることと考えている。

### 【参考文献】

- [1] 豊田利夫著：予知保全の(CBM)の進め方，日本プラントメンテナンス協会(1992)
- [2] 山崎編著：異常の検出と予測，工業調査会(1988)
- [3] Pusey HC：Machinery condition monitoring, SOUND AND VIBRATION, 34-(5), 6/7(2000)
- [4] S. Kumar: Vibration and Oil Analysis Detect a Gearbox Problem, Vibrations, 30-3, 7/13(2004)
- [5] 魚本健人：コンクリート構造物の検査・診断，理工図書(2003)
- [6] 千住編著：メンテナンス便覧，日本プラントメンテナンス協会(1997)
- [7] B. J. Hamrock & Dowson: Ball Bearing Lubrication, John Wiley & Sons(1981)211
- [8] 大野信義：高圧下における潤滑油のレオロジーとEHL，トライボロジスト，49-4, 303/308(2004)
- [9] T. MAWATARI, et. al: The States of Oil Film Formation and Running Performance of Deep Groove Ball Bearings under Combined Load, Proc. of the First Asia International Conference on Tribology, 111/116. (1998)
- [10] S. Izumi et. al: Preventive Engineering in Development of Diesel Engine with Energy Saving,



Proc. of the 21st CIMAC in Interlaken, Switzerland,  
Paper No. D37, 1/18 (1995)

- [11]赤松良信：メンテナンスにおける転がり軸受の振動計測, トライボロジー, 50-2, 106/111(2005)
- [12]陳鵬他：可変運転条件における機械設備の異常診断, 日本機械学会論文集 (C編) 64, 640(1999)
- [13]小村英智他：振動診断の等価実効値におけるベアリングの簡易診断, 日本機械学会論文集 (C編) 67, 664(2001)
- [14]振動技術研究会編：ISO基準に基づく機械設備の状態監視と診断 (振動 カテゴリーIII), 振動技術研究会 (2005)

## [著者紹介]

### 里永 憲昭



1965年生。'90年佐賀大学大学院理工学研究科機械工学専攻修了。同年昭和電工(株)入社。同年昭和エンジニアリング(株)大分事業所出向。工務部 設備技術グループリーダー (課長) プロセスエンジニアリング, 設備診断技術の研究・開発に従事。日本機械学会, 日本設備管理学会, 日本トライボロジー学会, 日本石油学会, 溶接学会, 日本化学工学会, 分離技術会会員

### 日高 良輔



1975年生。2000年九州大学大学院工学研究科エネルギー量子工学専攻修了。同年昭和電工(株)入社。同年昭和エンジニアリング(株)大分事業所出向。工務部 設備技術グループ課長補佐プロセスエンジニアリング, 設備診断技術の研究・開発に従事 JIPM 西日本支部「設備診断技術研究会」会員

### 山路 信之



1952年生。'75年横浜国立大学工学部機械工学第2学科卒業。同年昭和電工(株)入社。2001年大分コンビナート工務技術部長, 2005年昭和エンジニアリング(株)大分事業所出向。工務部長  
JIPM 西日本支部幹事

### 陳山 鵬 (正会員)



1958年生。'92年九州大学大学院博士課程修了。同年九州工業大学情報工学部機械システム工学科助手。'94年同上助教授。2003年から三重大学大学院共生環境学専攻環境情報システム工学講座教授。日本プラントメンテナンス協会「最新保全技術研究会」副主査。日本機械学会, 日本設備管理学会会員, 工学博士。