

# 潤滑油中の摩耗粒子解析による設備の診断技術

# C

近年、設備・機械の自動化、可動部の高速化がいちじるしく進み、生産性が向上したが、設備・機械の故障は生産性を大きく阻害することから、稼働率および信頼性向上のための保守管理の重要性がますます高まっている。

設備・機械保全のポイントは、劣化進行がいちばん早く生じる機械の可動部分が、いま正常状態にあるのか、あるいは異常状態がはじまりつつあるのかを見分けることである。設備・機械の可動部分には潤滑油・作動油が用いられており、それらの中に含まれている摩耗粒子を分析・解析することによって、設備・機械の“健康状態”を診断することができる。

ここでは、当社におけるその診断技術“K O A S” (KOBELCO Oil Analysis System) について紹介する。

## 潤滑系診断法の種類

## C - 1

潤滑油は機械の内部を、人体における血液のように循環している。このような潤滑系に異物が混入したり、潤滑油量が不足したり、また潤滑油が劣化したりすると、機械の可動部の潤滑部（金属—潤滑油—金属）に負荷がかかり、潤滑状態が境界潤滑〔単分子膜ないしは数分子膜程度の厚さ（ $10^{-3}\mu\text{m}$ 程度）の液体・気体分子類による潤滑〕となることがある。このような境界潤滑が生じ、さらに可動部分の金属が接触するような状態になると、①電気的導通、②摩擦による発熱、③振動、④摩耗粉発生量の増加などの異常の兆候が現れる。潤滑系の診断には、これらのおおのの兆候に対応した各種診断法として①電気抵抗測定法、②温度測定法、③振動測定法、④音響測定法、⑤Spectrometric Oil Analysis Program（以下S O A Pと略す）法、⑥フェログラフィー、⑦汚染分析法および⑧油劣化分析法などがある。

これらの診断法の中でS O A P法、フェログラフィー、汚染分析法および油劣化分析法は機械の潤滑系より潤滑油を採取し、その検査を行う診断法であり、いわば人間の血液検査に相当する。

油劣化分析法は油の交換時期の適正化をはかることを目的として実施されており、汚染分析法は油中の汚染物の量を測定するもので設備・機械の保守管理に簡便的に用いられている。

これに対して、油中の金属元素濃度を分析するS O A P法と、摩耗粒子の形態・量などを解析するフェログラフィーは、設備・機械を分解することなしに異状の原因や部位、程度の推定が可能であり、これらを用いることによって設備・機械の“健康状態”について精度の高い診断が可能である。

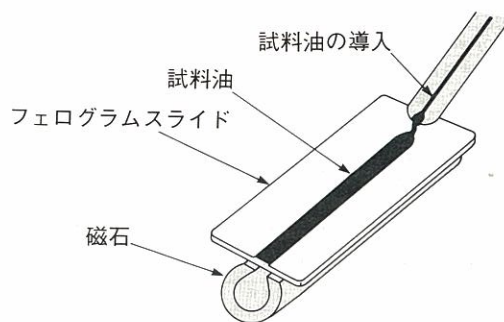
当社における診断技術“K O A S”は上記フェログラフィーとS O A P法とをシステム化したもので、以下それぞれについて紹介する。

## フェログラフィー

## C - 2

フェログラフィーには、定量フェログラフィーと分析フェログラフィーの2種類がある。前者は摩耗粒子の量的な変化を追跡することによって、後者は摩耗粒子の形態（大きさ、形状、材質、色の変化）を解析することによって、摩耗状態、潤滑状態の異常を判定する。ここでは、現在“K O A S”に用いている後者の分析フェログラフィーについて述べる。

ンプを用いてフェログラフィー用のスライドガラス上に流す。このスライドガラスは強力な磁石上



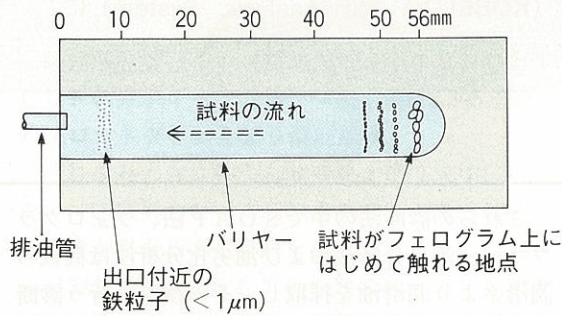
第1図 分析フェログラフィーの原理図

### 分析フェログラフィー

分析フェログラフィーに用いるフェログラフアナライザーの原理図を第1図に示す。設備・機械の潤滑系から採取した試料油を溶剤でうすめ、ポ



にわずかに傾けて固定されており、スライドガラス表面付近の磁場は下流にいくほど強くなっている。試料油中の粒子には、磁力のほか、流体によって押し流される力と重力が作用する。粒子の大きさや材質によって、これらの力の受け方が異なり、これらの力が釣り合ったところで、粒子はスライドガラス上に沈着する。上流側に大きい粒子が沈着し、下流にいくほど沈着粒子は小さくなる。この粒子が沈着したスライドガラスをフェログラムと呼んでおり、第2図に示す。



第2図 フェログラム

このようにして作製したフェログラムを、フェロスコープと呼ばれる2色光学顕微鏡を用いて粒子を観察する。

摩耗粒子の形態は摩耗の発生原因、履歴を表している。その形態と異状の原因および機械要素(軸受け、歯車など)との間には相関関係がある。したがってフェログラム上の摩耗粒子の形態をフェロスコープで観察し、解析することによって潤滑異状の原因および予知の診断が可能となる。

## 潤滑油中に含まれる粒子の種類と発生要因

潤滑油中に含まれる代表的な摩耗粒子の形態と特徴を第1表に示す。以下、これら代表的な摩耗粒子の発生要因について簡単に述べる。

第1表 潤滑油中に含まれる代表的な粒子の種類と特徴

種類	特徴	
正常摩耗粒子	薄片状、大きさ $15\mu\text{m}$ 以下、表面は平滑	
異常摩耗粒子	異常すべり摩耗	直線的なエッジ、大きさ $15\mu\text{m}$ 以上、表面に条こん、テンパーカラーを示すものもある
	切削摩耗	切りくず状、カール状、細長い、 $3\sim 200\mu\text{m}$
	疲労摩耗	平板状、周囲は不規則な形状、 $10\sim 100\mu\text{m}$ 、表面は平滑
		薄片状、非常に薄い、 $25\mu\text{m}$ 以上、表面は平滑、孔があいているものもある
	球状、 $1\sim 5\mu\text{m}$	
腐食摩耗	半透明、 $1\sim 3\mu\text{m}$	
その他	酸化物	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ など
	非鉄金属	銅、アルミニウム合金などの摩耗粒子
	非金属異物	フリクションポリマー、黒鉛など
	砂、プラスチック、繊維など	

### 1) 正常摩耗粒子

正常摩耗粒子は機械の正常なすべり摩耗により発生する。正常摩耗粒子の例を写真1に示す。写真1の $15\mu\text{m}$ 以下の小さな粒子が正常摩耗粒子である。

### 2) 異常すべり摩耗粒子

異常すべり摩耗粒子は金属表面にかかる応力が、負荷と速度の両方またはどちらか一方の原因で、過剰になったときに発生する。表面に激しいすべり状態を示す条こんをとともなうことが多い。異常すべり摩耗粒子の例を写真2に示す。写真2の中央の大きな粒子が異常すべり摩耗粒子である。

### 3) 切削摩耗粒子

切削摩耗粒子は、接触している金属表面で硬いほうの金属表面の突起物が軟かい金属表面に食い込んだり、潤滑油中に混入した硬い粒子によって表面が削られて生成する。表面は酸化している場合が多く、このような粒子の発生は機械の破損につながる。切削摩耗粒子の例を写真3に示す。写真3の中央付近の2個のカール状の粒子が切削摩耗粒子で、焼付きのため黒色になっている。

### 4) 平板状摩耗粒子

平板状摩耗粒子は、ころがり軸受けの疲労および歯車の歯面の疲労により発生する。粒子表面は比較的なめらかで、不規則な形状をしている。焼付きが発生した場合には、高熱のため粒子が酸化され、褐色や青色のテンパーカラーを示す。平板状摩耗粒子の例を写真4に示す。写真4の中央付近の $10\mu\text{m}$ 以上の大きな粒子が平板状摩耗粒子である。

### 5) 薄片状粒子

薄片状粒子はころがり軸受けの摩耗に見られ、摩耗粒子が圧延されて発生する。粒子には孔があいたものもあり、多量にこの粒子が観察される場合は軸受けのトラブルが近いと考えられる。

### 6) 球形粒子

球形粒子はころがり軸受けの疲労、キャピテーション(液体中で高速運転する金属体の表面に生ずる圧壊現象)、表面溶融などによって発生する。球形粒子の例を写真5に示す。写真5の中央の丸く黒色に見えるのが球形粒子である。

### 7) その他の粒子

#### ①酸化物

赤さびは潤滑系に水などが混入して生じるもの





写真1 正常摩耗粒子の例



写真2 異常すべり粒子の例

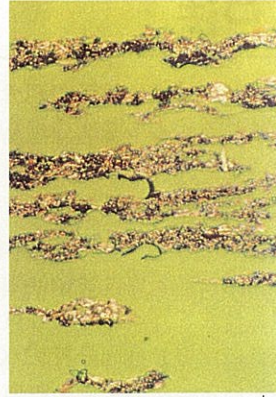


写真3 切削摩耗粒子の例



写真4 平板状摩耗粒子の例



写真5 球形粒子の例



写真6 アルミニウム合金粒子の例

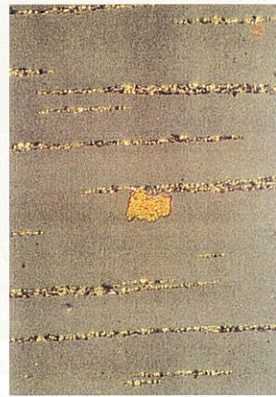


写真7 銅合金粒子の例



写真8 砂および繊維の例

で、ヘマタイト ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) が主成分である。

黒さびは高負荷による焼付きが発生した場合に見られ、マグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) が主成分である。

#### ②非鉄金属

機械要素に用いられる非鉄金属材料の摩耗によって生ずる。銅合金、アルミニウム合金、鉛すず合金などの摩耗粒子である。これらの非磁性体の粒子は、フェログラム上では下流の位置に沈着し、配列方向もランダムである。

アルミニウム合金粒子の例を写真6に示す。白色に見える粒子がアルミニウム合金粒子である。銅合金粒子の例を写真7に示す。中央の黄色に輝く大きな粒子が銅合金粒子である。

#### ③非金属

フリクションポリマーは、はげしい摩擦によって潤滑油中の添加剤が化学反応を起して生成する物質で、その中には鉄粒子などが多量に含まれている。このフリクションポリマーが観察されたときは、油が酸化し劣化がはじまっていることや潤滑状態が高負荷となっていることを示す。黒鉛はエンジンオイルに多く認められ、油の燃焼によって生じたものである。

#### ④異物

異物は砂や油ろ過器に用いられているフィルターの繊維などが、潤滑系に混入したものである。砂および繊維の例を写真8に示す。白色やオレンジ色および黒色に見えるのが砂で、線状で白色に見えるのが繊維である。

### 摩耗粒子の材質の判定方法

フェログラムを大気中の熱板上で加熱すると、鉄系の摩耗粒子はテンパーカラーを示すので、第2表に示すようにおおよその材質の判定が可能である。

第2表 テンパーカラーによる材質判定例 (時間: 90sec)

材質	色		
	330℃	400℃	480℃
炭素鋼、低合金鋼	青色	灰色	
鋳鉄	淡黄~黄褐色	黄褐色、部分的に青色	
ステンレス鋼	変化せず	わずかに黄色	部分的に青・黄色または黄褐色



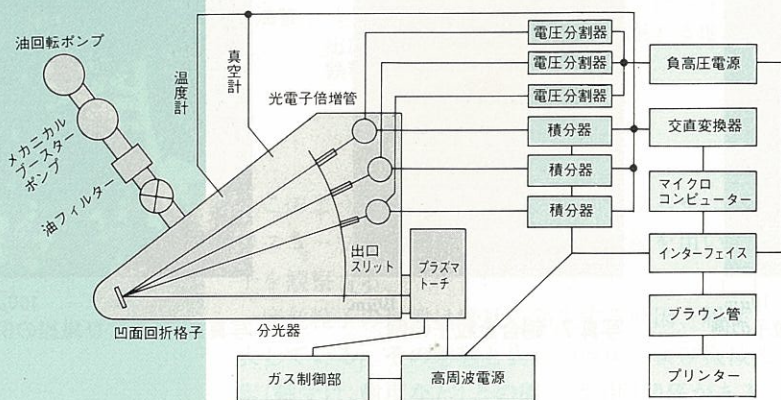
SOAP法は、設備・機械の潤滑系から採取した油中に含まれる元素の濃度分析を定期的に行い、金属元素の濃度の経時変化を調査して、設備・機械の異常摩耗を早期に発見しようとするものである。SOAP法に用いられる分析装置には大別すると、原子吸光分析装置と発光分光分析装置があり、当社“KOAS”におけるSOAP法では、誘導結合プラズマ発光分光分析(ICP-AES)装置を用いている。この装置の概要図を第3図に示す。

設備・機械の潤滑系から採取した油試料中の粒子をろ過または遠心分離によって分離し、分離した粒子を酸などの試薬を用いて溶液化する。この

ようにして調製した溶液試料を噴霧器により霧状にして、ICP-AES装置のプラズマトーチ(Arプラズマ)に導入して発光させる。その光の中には試料中に含まれている各元素に固有のスペクトル線が含まれており、また、このスペクトル線の強度は各元素の含有量に比例する。各元素に固有のスペクトル線の光を回折格子によって分光し、それらの光の強度を光電子増倍管によって測定する。試料を測定して得られた光強度と、分析対象元素の濃度既知の標準溶液で得られた光強度との比較によって、それらの濃度が算出される。

第3表 SOAP法における分析対象元素

B	Na	Mg
Al	Si	P
Ca	Ti	V
Cr	Mn	Fe
Co	Ni	Cu
Zn	Mo	Ag
Sn	Ba	Pb



第3図 誘導結合プラズマ発光分光分析(ICP-AES)装置概要図

SOAP法で分析する油中の元素を第3表に示す。ただし第3表の元素をすべて分析する必要はなく、設備・機械に用いられている材質によって、その主要な元素を分析すればよい。たとえば、減速機ではFe、Cr、NiおよびCuをおもに分析する。設備・機械の潤滑部に異常が生じると、金属摩耗粒子は増加する。したがって定期的にSOAP法を実施し、金属元素の濃度変化の度合いを把握することによって、異常摩耗の発生を早期に発見することができる。

減速機(稼働時間:4,000h)から採取した潤滑油を“KOAS”によって分析・解析した例を紹介する。油中の摩耗粒子を分析フェログラフィーで解析した結果、全体的に摩耗粒子が極めて多く、異常摩耗粒子として10~30μmの多数の平板状摩耗粒子(写真4)および銅合金粒子(写真7)が観察された。また、この油についてSOAP法でFe、Cr、NiおよびCuを分析した結果を第4表に示す。減速機の場合、通常ではFeは

300ppm程度、Cuは数ppm程度であり、この事例の油についてはFeおよびCuがかなり高濃度で存在することがわかる。

以上の結果より、この減速機については潤滑状態の不良を示す兆候が顕著であり、歯車の歯面の疲労による損傷や銅の使用部位(ピニオンギヤブッシュ)の損傷がかなり進行していると判断された。

第4表 SOAP法による減速機油中の金属元素濃度(ppm)

元素	Fe	Cr	Ni	Cu
含有率	700	10	5	200

潤滑油中の摩耗粒子の解析による設備診断技術についてその概要を紹介した。

当社の設備・機械の診断技術“KOAS”は設備・機械の故障防止に利用できると考えている。

[神戸事業所 材料分析室 河村恒夫]