

## 4. LaserNet Fines® Q200

### パーティクルカウンターとパーティクル形状識別を含む広範囲なオイル分析の解決法

#### 概要

本章では、オイル中の摩耗粒子を分析する従来の方法に対して、最新式の LaserNet Fines®(LNF)-Q200 装置を使用して、正確かつ費用効果の良い解決法について記述いたします。潤滑油中の摩耗した堆積物の大きさ、分布、発生率、形状特性「シルエット」を測定して、その種類、発生率、および機械的故障の過酷度などを識別できます。この方法は、熟練した分析担当者、また時間のかかる指定流量の条件で行う校正の手順を必須としません。

この章での焦点は、いかに LNF が操作するかまたはいかに粒子を数えるか、そして光学画像分析法とレーザー法式のパーティクルカウンターおよび従来のフェログラフィー分析とを比較して、その詳細を説明いたします。最後に、2 件のケーススタディについての論議を加えます。「慣らし運転エンジンテスト」と「変速機の欠陥加速試験」は、従来のフェログラフィー分析の定量的な主観性および高額の経費を必要としないで、LNF 技術が独特で活発な機械摩耗の結果を提供します。

#### 序論-LNF 技法

Lockheed Martin 社と米国海軍研究事務所の海軍研究試験所で共同開発された LNF は、粒子の形状を類別する装置で、レーザーの画像技術および高精度の画像処理ソフトを使用して 4μm 以上の粒子を高精度で測定することが可能な装置です。主な大きさである 20μm 以上の全ての粒子のシルエット画像は次の種類に自動的に分類されます。

- 切断
- 滑り重摩耗
- 疲労
- 非金属
- 繊維
- 水滴

この装置はこれらの種類の粒子を数え、活発な機械摩耗の定量測定を提供します。画像はビットマップフォーマットで保存され、また再検討できるように報告書にプリントする事ができます。信頼性技術者は LNF データを使用して、総合した粒子サイズ分布および二次元の粒子の両方の動向を示す情報により、一層知識のある決定をすることができます。固体粒子に加えて、20μm 以上の気泡を確認後に除去し、20μm 以上の検出された水滴の容積を計算し、遊離水の濃度を推定します。この装置は、液体の色を自動的に補正して、使用中のエンジンオイルのような本質的に明るくそして暗い色の液体を正確に測定します。基本的な LNF の動作原理は図 4-1 に示されています。

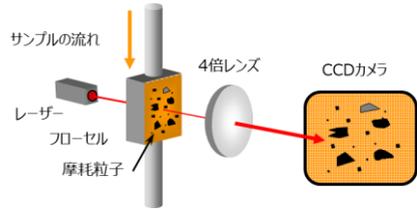


図 4-1 LaserNet Fines® 動作原理

- 1) 潤滑装置からオイルの試料を採集し、分析装置に装填する
- 2) オイルは特許を持った観察用セルに導かれ、粒子の動きを止めるバルス半導体レーザーによって背面照射される
- 3) 干渉性を持つ光は液体を透過し、電子カメラに画像を形成する
- 4) 各々の形成された画像から粒子を分析する

潤滑油内にある摩耗した粒子の数は、最大コード(弦長)で表示されます。水圧装置内の粒子は、ISO の清浄度の基準に適合し、円の直径と同等値で表示されます。どちらの液体でも、形状の特徴は 20μm 以上の大きい粒子を計算し、摩耗粒子か不純物粒子かに類別されます。

この分類は人工神経細胞工学を利用して LNF 装置のために特別に開発されたネットワークにより行われます。形状の特徴は、最適の識別条件を提供するために、疲労、切断、滑り重摩耗、非金属材料、繊維、水泡および気泡の 6 部門に組分けされ選定されました(図 4-2)。人間の専門家によって識別された粒子の広範なライブラリーを使って、人工の神経細胞工学ネットワークを訓練しました。

## 光学パーティクルカウンターと比較した LNF

LNF は従来のレーザーパーティクルカウンターと同じ機能を持ち、また分析ソフトウェアの仕事も行います。一般のパーティクルカウンターは 1 次元配列を使用する一方、LNF は二次元配列(640X480 ピクセル)を使用します。この追加された空間的な多様性に粒子の形態論を加えて、LNF は特別な試料準備を必要としないで、より高い粒子の濃度を検査することができます。この形状を確認する機能は、LNF の粒子数は気泡または遊離水の存在によって影響を受けません。その代り、少量の遊離水が単独に識別されて、これらの両方の項目は堆積物の数から、差し引かれます。残りの摩擦による堆積物およびフィルターからの繊維は合計数に含まれ、また個別に分かれた項目でも表示されます。



図 4-2 粒子形状識別の例

既存のレーザーパーティクルカウンターを使用して粒子の大きさを断定する方法には、3 つの基礎的な問題があります。

- まず、LNF の装置には二次元検知器が使われていますが、従来の装置は点光源の感知器が使用されています。これは多車線の高速度道路上を走行している数台の車を側面から数えるようなものです。重なった粒子は一個の大きめの粒子として数えられ、最終的な分布に歪を与える結果となります。
- 2 番目に、パーティクルカウンターは校正が必要で、また指定通りの流量の条件で使用しなければなりません。検出チャネルの正確さは、正確な個数の計算と試料の総容積を定めるためには、既知の流量に依存します。LNF の検知器は瞬間的なレーザーのパルスによって粒子の動きを凍結させるので、流れの速度の変化に対して全く影響を受けません。試料の容積は、観察された容積の一定した寸法と処理された画像のフレーム数より算出されます。
- 最後に、従来の不明瞭なレーザーパーティクルカウンターは、非金属粒子(例えば二酸化シリコン、塵)は、使用しているレーザーが有する波長において、粒子の中心部が半透明のように見えるため、大きさが誤って報告されてしまいます(図 4-2 参照)。従って LNF は粒子の円の直径と同等値の計算をする前に、この半透明な中心部を「満たす」という画像処理法を使用し、特別な校正なしで酸化物および他の半透明に見える塵の大きさを正確に測定することができます。

LNF の測定の正確度は、その装置の構成に本質的なものであるため、標準試料による校正を必要としません。粒子の大きさの測定は、カメラのピクセルの大きさおよび光学系の倍率に依存し、これらは両方とも固定した要因であるため、実質的に経時変化がありません。容積の測定はこれらの不変の要素とまた観察用のセルの厚さに依存しますが、これも固定されているため時間と操作温度によってほとんど変動しません。

表 4-1 は、実際の異なった分析に関してパーティクルカウンターと LNF の比較を示します。LNF に対する最も共通の質問は「市場にあるレーザー光学パーティクルカウンターと比べてどの程度の相関性があるか」ということです。もし試料が正しく準備されていれば、LNF パーティクルカウンターの結果は従来のパーティクルカウンターと相関性がありますが、下記の注釈を付記します。LNF は希釈なしで極度に汚染された試料(5000 粒子/ml 以上)を数えることができますが、従来のパーティクルカウンターはこのような汚染度の高い試料を数えることは不可能です(試料を大幅に希釈する必要があります)。

- LNF の上限は 100 $\mu$ m です(フローセルとスクリーン フィルターの気孔の大きさによる)。但し、層流に流れる大きな縦横比を持つ 100 $\mu$ m 以上の粒子の測定も可能であることを示します。これらの粒子は繊維あるいは髪の毛などで、ある古い報告書には、従来のパーティクルカウンターを使用して 250 $\mu$ m の粒子数が報告されています。
- オイル中に干渉する柔らかい粒子(水滴、反形成添加物からのシリコンの粒子)が存在する条件のもとでは、LNF と従来のパーティクルカウンターとの相関関係は困難です。
- 煤からの干渉は希釈なしで 2%まで可能です。

表 4-1 LNF - パーティクルカウンター比較表

	分析時間	洗浄時間	検出上限	すす/不透明	遊離水	ファイバー	校正
パーティクルカウンター	1.5 分 (~20ml)	0.5 分	<90 x 10 <sup>3</sup> (個/ml)	スキュー カウント	スキュー カウント	スキュー カウント	標準校正液 (6ヶ月毎)
LNF	2.3 分 (0.65ml)	1.5 分	>1 x 10 <sup>6</sup> (個/ml)	自動補正	識別可能	識別可能	確認のみ (校正不要)

表 4-2 考慮すべき要因

考慮すべき要因	光学式パーティクルカウンター (OPC)	LaserNetFines (LNF)	相関性
校正標準試料	校正作業に標準校正試料が必要	設計上、校正は不要だが、校正確認ように標準試料を使用する	良好
希釈	汚れの酷い試料ならびに高粘度試料は希釈が必要	高粘度試料は希釈が必要	希釈による相関性はあるが、LNFは多くの試料で希釈不要
同時通過	粒子の重なりは汚れの酷い試料で発生しやすい	セルの清流作用ならびに粒子の直接画像化により発生しない	汚れが酷い試料ではOPCは粒子の重なりにより大きくカウントすることがある
サチュレーション	粒子が上限(30~399 千個/mL)を超えると飽和する	汚れた試料油でも 5~10 百万個/mLの粒子の検出が可能	OPC は高い粒子数の領域で正確度が低下する
電氣的なドリフト	検出器の電氣的なドリフトを年に 1 度校正が必要	校正不要	ドリフトの状態により、OPC は計測値にズレが生じる
粒子沈降	複数の計測が必要な為、1 検体の測定時間は通常 5~15 分要する	1 検体の測定時間は 2~4 分要し、粒子沈降が少ない	粒子沈降が少ないほど、繰り返し精度の良い結果が得られる
試料前処理	オートメーションには適していない	専用オートサンプラーにより完全自動化が可能	LNF は完全自動化により、前処理が一定手法になり再現性ある結果が得られる

## 従来のフェログラフィー法と比較した LNF

フェログラフィー法は長い期間に渡って、摩耗の構造種類および潤滑されている機械装置における欠陥の厳格さを測定する目的として、標準的な方法でした。しかし、この従来のフェログラフィー法には 3 つの基本的な欠点が目指されます。

- はじめに、このテストは長い時間を必要とするため、頻りにケース バイ ケースで行われます。RDE および LNF のような他の試験法が、フェログラフィー法テストのスクリーニングとして使用されています。
- 2 番目に、信頼できる結果を達成するためには、訓練された分析者が要求されます。
- 3 番目に、最終的な結果は厳密にいうと定性分析にすぎません。各分析者は準備が整ったスライドを分析するのに、各自固有の方法と好みがあります。ほとんどのオイル分析の試験所は、分析者が同一の測定法をするように訓練を徹底しますが、不均一性はまだ存在し、試験所相互の違いはさらに明白です。

短時間でそして熟練した分析者を必要とせず、試料毎のスリーニングによって、摩耗が発生する可能性がある機械故障と欠陥の深刻さを洞察できる LNF 法により、これらの問題を解決することができます。LNF 法は、観察セル内の全ての粒子を数えそして分類し、繰返し精度の良い定量測定を提供ができるため、機械故障の状態を早期に査定するのに有効です。

表 4-3 分析フェログラフィーと LNF の比較

	前処理時間	分析時間	粒子識別	鉄/非鉄識別	遊離水	技術要求	結果
分析フェログラフィー	20 分	5-15 分	形状識別 表面識別	色, 加熱	検出不可	高	半定量
LaserNetFines	2.5 分	2.3 分	形状識別	識別可能	識別可能	中	定量

## フェログラフィー法をフォローアップとして使う分析テクニック

LNF 法は粒子の輪郭の形、即ち「シルエット」を分析します。LNF の光学系は透過光(背照照明)を使用するため、粒子の色、質感または表面に起因する特性を識別することは不可能です。これらは重要な根本的原因の診断を下す際に考慮すべき非常に重要な要因です。従って、分類毎に得られた摩耗の結果は、粒子がシルエットとして観察されたときの、その粒子のタイプの一般的な資料にすぎません。

そこで、異常な摩耗による粒子の部門(過酷さ、疲労または切断のような)に属する粒子の大きさと量が長い期間にわたって増加した際は、顕微鏡検査を行って LNF 法によって行われた粒子の分類を実証することを推薦いたします。フェログラフィー法(従来のフェログラフィーが回転式粒子沈殿法)または膜濾過法(filtergram)などの方法は、フォローアップの技術として可能です。二硫化モリブデンのような機械摩耗以外に関連した粒子の部門では、炭素の剥がれた破片、密閉材料などと共に、その形状によって過酷さ、疲労または切断による摩耗の部門の一つとして分類されます。

## ケーススタディ:LNF 法の機能を示す研究 2 例

### 例 1: 慣らし運転エンジンテスト

この例では、オイルの初期慣らし運転の期間中に、エンジンから使用中のオイルの試料を採集し、LNF 法と他の技術である分光摩耗金属分析とフェログラフィー法と併用し、その共同作用による効果を示しています。LNF 法の結果は、初期慣らし運転の期間中によく見られる一般的な大量の摩耗の大粒子を予測通りに明確に描写しています。

図 4-3 の摩耗のサマリースクリーンのバーグラフは、多数の 15µm 以下の粒子を示しています。20µm 以上の粒子の数は、切断、滑り重摩耗、疲労および非金属の摩耗の部門で示されています。



図 4-3 摩耗粒子結果画面

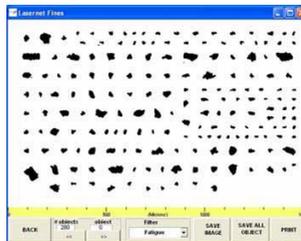


図 4-4 摩耗粒子画像一覧

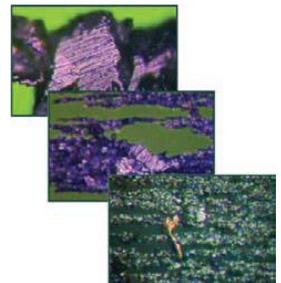


図 4-5 フェログラム画像  
慣らし運転中のシビアスライディング  
粒子と銅の摩耗粒子

この試料の粒子のシルエットの LNF の画像マップは、図 4-4 で示されています。大きい粒子の大半は LNF によって識別され、摩耗の概要スクリーンで、滑り重摩耗および疲労による粒子としてその量が示されています。この事実は図 4-5 で示されているように、従来の分析フェログラフィー法によって確認されています。この試料の分光オイル分析は、高いレベルのアルミニウム、銅およびシリコンを含む摩耗した金属を同様に示しています。

この場合、LNF は、粒子はエンジン初期慣らし運転期間のプロセスの間に形成されたということを示し、明確に確認し、従って、正常な摩耗であるという断定を下すことができます。分光、フェログラフィー法、LNF データ間の類似性により、LNF 装置はフル装備のフェログラフィー分析に必要な経費あるは主観性なしで動作中の機械摩耗の種類あるいは構成物を識別できることを例証しています。但し、問題の根本原因の立証があるはそれ以上の確認が必要な場合は、完全なフェログラフィー分析を推奨いたします。

## 例 2：変速機の欠陥加速化試験

加速化された変速機の欠陥試験はペンシルベニア州立大学の機械診断試験の検査台(MDTB)設備にて ONR CBM プログラムの下に行われました。この試験は 10 馬力の変速機で単一の減速段階の条件で行われました。変速機の出力シャフトに、正常な負荷として最大の電気発電機を繋ぎ、およそ 4 日間にわたって加速化条件のもとに稼働しました。その後、3 倍のトルクが架けられ、その結果装置は不具合を生じました。約 2 時間毎に停止して、筒径部分の観察およびオイル試料の採集をしました。

総粒子の濃度のヒストグラムは、粒子の大きさの範囲毎に分けた濃度を図 4-6 に示しています。4 組の大きさの範囲に対応する棒グラフは同じ試料です。これらのグラフに示されている試料は、この試験の期間中に渡って継続的に採集されました。疲労摩耗、シビアスライディング摩耗、および切削摩耗に分類された摩耗粒子に対して、同様なデータセットが図 4-7、図 4-8、図 4-9 に示されています。試料が採集された毎に、レベルを保つのに新規のオイルを補給したため、全ての粒子の濃度に対して流体希釈の補正計算を行いました。

最初の試料を、加速化条件の期間の終りに採集し、その後はトルクが荷重している間に連続的に試料を採集しました。2 回の試料採集時に全粒子数が変動している可能性があるため、採集位置を午後 2 時と 4 時の間に変更しました。テストの終了間際、午前 5 時の試料採集の前に、出力側ギヤの数個の歯に損傷が表れました。

図 4-6 では、加速化条件の期間に試料を採集した毎に新規の液体が加えられたため、発生した堆積物が徐々に取り除かれた理由で、5-15 $\mu\text{m}$  の範囲における総粒子の濃度は、全般的な減少を示しています。しかし図 4-7 では、3 倍のトルクが架かった後、別の大きさの範囲でも、疲労した粒子が増加した濃度が見られます。この兆候は、究極的な不具合が発生した以前に既に表れており、不具合を引き起こした過剰な摩耗の状態と多分関連していることが予想されます。滑り重摩耗、切断摩耗による粒子の濃度では、どの大きさの範囲を見ても、同様な増加は見られませんでした(図 4-8、図 4-9)。ローリングの動きが半ギヤのピッチが並んでいる箇所に沿って、極端な応力が集中する部分では、過剰トルクが効くと疲労の粒子の増加は予想されます。

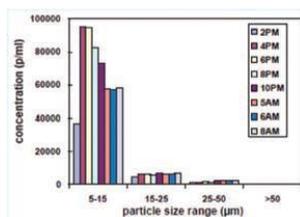


図 4-6 ギヤボックス-総粒子粒度分布

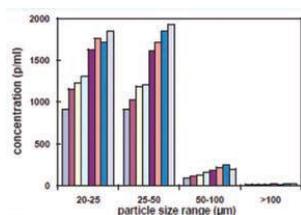


図 4-7 ギヤボックス  
疲労摩耗粒度分布

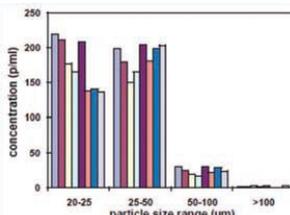


図 4-8 ギヤボックス  
シビアスライディング摩耗粒度分布

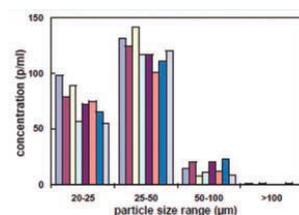


図 4-9 ギヤボックス  
切削摩耗粒度分布

## 結論

LNF法は、使用済みのオイル中の粒子分析に必要な二つの基本的な機能、粒子の自動形状分類およびパーティクルカウンターを結合した独特な法式を備えた分析装置です。実例の説明のように、これらの二つの特徴を両立させて、全面的な粒子の濃度増加を検知することにより、潜在的問題の早期の表れを探知することが可能です。同時に、粒子の形状の分類化から考えられる故障の根本的原因を診断することができます。総合した分析フェログラフィー(反射光の機能なし)に類似したLNFは、総合的にフェログラフィー分析が持つ定性的な観念と高額な費用なしで、活発な機械摩耗に対する独特な洞察を提供します。LNFは、試料毎にデータを処理することを可能にし、分析フェログラフィーをさらに必要とするかというスクリーニング機能に理想的な装置です。LaserNet Fines® Q200の装置は、光学パーティクルカウンターおよび従来のフェログラフィー法に比較して費用の面で相当な便益があり、また詳細なオイル分析を必要とする精力的な解決策を提供します。

## 参考文献

- [1] Thomas Barracough, Malte Lukas and Daniel P. Anderson, "Comparison of Wear and Contaminant Particle Analysis Techniques in an Engine Test Cell Run to Failure" Pages 1-11
- [2] Malte Lukas, Daniel P. Anderson, Thomas Sebok and David Filicky, "LaserNet Fines® – A New Tool for the Oil Analysis Toolbox" a reprint from "Practicing Oil Analysis" Magazine
- [3] C. Holloway, T. Sebok, D. Filicky, J Reintjes, J.E. Tucker, P.L. Howard, "Beyond Particle Counting – LaserNet Fines® Optical Wear/Debris Analyzer," Pages 1-14
- [4] Mark Smith, Analysts, Inc., "Oil Analysis vs. Microscopic Debris Analysis– When and Why to Choose," Pages 1-9