

音響ホログラフィによる設備診断装置

技 術 総 括 本 部

Mechanical Installation Diagnosis System Using Acoustical Holography Techniques

Corporate Technical Research & Development Headquarters

All the important items of the machinery and equipment installed in petroleum refining plants and others should be subject to day-and-night monitoring to ensure the safety of plant operations. While, in many cases, such monitoring work together with diagnosis incidental thereto is now non-automatically carried out by a maintenance staff, there has recently been aroused an urgent need for an automated diagnosis system as applicable to the above plant installations.

Under the circumstances, Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. has developed a diagnosis system for mechanical installations using acoustical holography techniques to form a link in the chain of the plant diagnosis automation program. This new system has already been delivered to the client, KOA OIL Co., Ltd. for research purposes in the future.

In this paper, we explain the outline of this system and, by virtue of intelligent understanding of esteemed KOA OIL Co., also refer to a part of the study results concerning this system as disclosed by the same client.

石油精製プラントなどに設置されている重要機器は、プラントの健全な操業を行うために、その状態を常に監視する必要がある(設備診断)。現在、設備診断は主に保守員によってなされているが、設備診断の自動化が急務となっている。

この度、興亜石油株式会社向けに、設備診断自動化の研究用として音響ホログラフィ法を応用した設備診断装置を開発した。本稿では本装置の概要を述べる。また、興亜石油株式会社のご好意により、本装置を用いて得られた研究成果の一部についても述べる。

1. は じ め に

石油精製プラントなどの機械設備に設置されている重要機器は、プラントの健全な操業を行うためにその状態を常に監視する必要がある(設備診断)。現在、設備診断は保守員がプラント内を巡回し、設備から生じる振動・騒音や機器周囲の温度などを監視することによって行われている。しかしながら、昨今、コスト低減と人手不足に伴う省力化の要求は高く、設備診断の自動化が望まれている。

従来、自動化の方法として、設備が発生する振動を監視する方法(以後振動法と称する)が開発されており、一部実プラントへも応用されている。しかしながら、振動法は診断精度は高いものの、センサ付近の局所的な情報しか得られないため多数のセンサを必要とし、装置が煩雑で高価なものになること、ケーシングなどが介在し計測が不可能になることもあるなどの問題点も指摘されている。

一方、機器の放射騒音を監視する方法(以後音響法と称する)の実用化も望まれているが、この方法は広い範囲の情報を非接触で得られるという利点がある半面、暗騒音の影響を強く受けるため振動法と同様な信号処理方法で診断することは不可能で、実用化には到っていない。

ところで、三井造船は音響ホログラフィ法を利用した騒音源探索装置を商品化しているが、この装置は暗騒音の存在する環境においても騒音の発生位置を検出する機能を持っている。従って、音響ホログラフィ法を適用すれば、暗騒音が存在するプラント内においても、異常音を発生している機器の同定を行うことができ、設備の診断が可能となることが期待できる。

このような観点から、この度興亜石油株式会社麻里布製油所向けに、設備診断研究用として音響ホログラフィ法を応用した設備診断装置を世界に先駆けて開発した。本装置は騒音源の探查機能と登録された診断ルールを基にモデルプラント内機器の自動診断を行う機能を持っており、音響による設備診断の基礎研究、及び自動診断方法の開発に供することができる。

以下、本装置の概要と興亜石油株式会社において得られた成果の一部について述べる。

2. 設備診断装置について

2.1 音響ホログラフィ法について

音響ホログラフィ法は機器周囲の多数の点で騒音を計測し、計測された騒音に対してホログラフィの原理を適用して騒音の発生位置を計測する技術である^{1),2)}。

音響ホログラフィ法を適用すると騒音の発生位置がわかるが、これは以下の原理によるものである。図1に示すように、純音を放射する無指向性点音源が存在するとする。このとき音響ホログラフィ法では、まず実線で示す音源から放射される騒音を音源の周囲の多数の点で計測し(ホログラム計測)、破線で示すように計測された波形の位相を計測点と再生点の距離に相当する分だけ逆に戻して位相補正し、その後これらの波形の総和を求めるという処理(再生計算)を行う。従って、実際に音源が存在する点においては伝播によって進んだ位相が完全に補正されるため、全ての位相補正波形は同相となり総和は大きな値になる。ところが、実際に音源が存在しない点

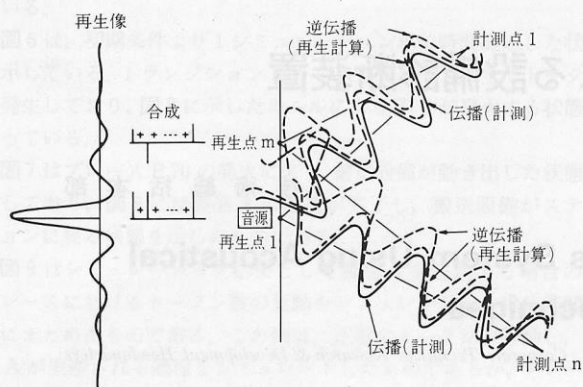


図1 音響ホログラムの原理
Principle of Acoustical Holography

においては、位相補正された逆伝播波動の位相が不揃いになるため相殺され、総和は大きな値にはならない。この結果、再生像は図に示すように、 $\sin(x)/x$ となり、音源が存在する点での総和が最大となるため音源の位置がわかることになる。

音響ホログラフィ法の計測は次のように行う(図2)。

- (1) 設定された位置において、計測マイクロホンと基準マイクロホンの測定音圧信号を同時に A/D 変換し、FFT 計算を実行する。
- (2) 基準マイクロホンのスペクトルの正規化を行う。
- (3) 計測マイクロホンで計測された音圧のスペクトルを(2)で得られた正規化されたスペクトルで除し、計算結果を外部記憶装置に記録する。
- (4) 全ての計測点に対して(1)~(3)を繰り返す、ホログラムを得る。
- (5) 再生したい周波数を選択し、その周波数のホログラムデータを外部記憶装置から読み込み、再生計算式を用いて再生計算を行う。

なお、通常計測点数が多数になるためマイクロホンをアレイ状に並べ、当該マイクロホン列を移動させて自動的に計測を行う。

2.2 設備診断装置の特長

本装置は以下の特長を有する。

- (1) 音響の利用

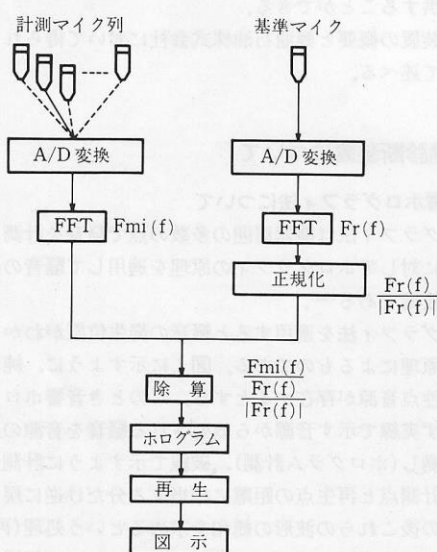


図2 計測・データ処理フロー
Measuring Method of Acoustical Holography

本装置は音響を利用して設備の自動診断を行う装置であるが、音響を利用したシステムは他に類を見ない。

(2) 自動計測

本装置は音響ホログラフィ法を適用するため、平面上の多数点で騒音を計測する必要があるが、マイクロホンの移動や位置決めを自動的に行うため計測が容易である。また、診断も完全に自動化されており、診断対象機器(本モデルプラントでは3台のポンプユニット)への移動、騒音計測、診断、診断結果の出力を人手を全く介さずに自動的に行うことができる。

(3) 高速処理

本装置のホストコンピュータはパソコンであるが、時間を要するFFT計算や再生計算をDSPボードを用いて行うため計算を高速に行うことができ、コスト・パフォーマンスが高い。

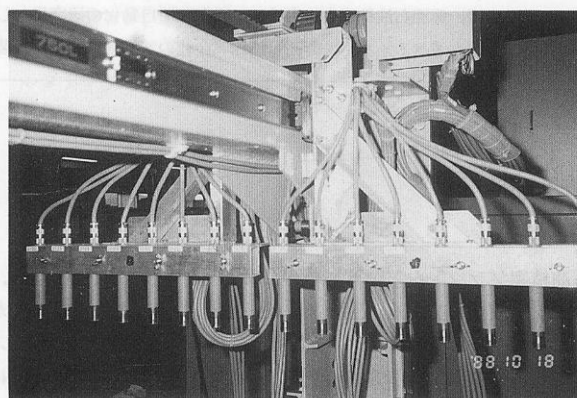
2.3 設備診断装置の構成

本装置は写真1に示す騒音測定部と図3に示す演算処理部で構成される。

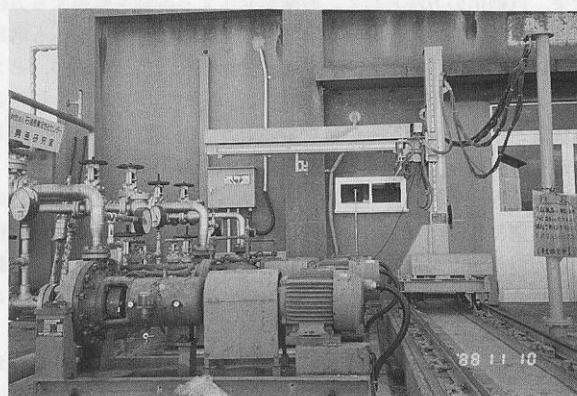
騒音測定部は機器の放射音を計測する部分である。本装置は平面上で騒音計測を行うため、直線状に並べられた16個のマイクロホン列(写真1(a))をそれと直角方向に移動させ、計測点において停止して騒音を計測する。騒音測定部は以下の要素で構成され、音源探索と自動診断で共通に使用される。

(1) マイクロホン・システム

精密級エレクトレット・コンデンサ・マイクロホンを使用した騒



(a) 計測マイクロホン
Microphone Array



(b) モデルプラント内に設置された計測台車
Mesuring Truck Installed in Model Plant

写真1 騒音測定部
Noise Measuring Unit

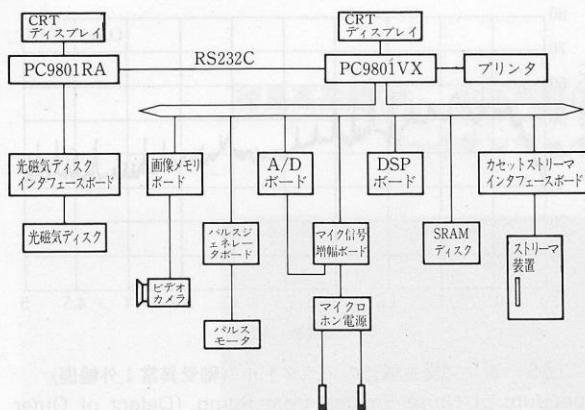


図3 演算処理部ブロック図
Block Diagram of Processing Unit

音計測システムである。

(2) 計測台車

計測台車は写真1に示すようにマイクロホン支持ビームと移動機構で構成される。マイクロホン支持ビームはパルスモーターにより自動的に移動する。計測台車はパルスモーターで駆動される移動機構によりレール上を移動することができ、計測対象となる機器への移動が可能である。

演算処理部はホログラムの計測、再生計算、図形出力を行う部分で、以下の要素で構成される。

(1) ホスト計算機

音源探査を行う場合はNEC製パソコンPC9801VXをホスト計算機とする。ホスト計算機は各種拡張ボードの制御や各種計算、I/O制御など音響ホログラフィ処理の全般を統括する。自動診断を行う場合はPC9801RAをホスト計算機とし、音源探査用ホスト計算機とRS232Cインターフェースで結び音源探査用機器をサブ機器として使用する。

(2) プリンタ

プリンタはモノクロ・インクジェット方式のプリンタで、音源の等強度線図や自動診断結果などの出力を行う。

(3) パルスジェネレータボード

パルスジェネレータボードはマイクロホン列や計測台車の駆動用パルスモーターの制御信号を送出する。

(4) マイクロホン用増幅ボード

マイクロホン用増幅ボードはマイクロホンからの信号の増幅、フィルタリングを行うボードである。ローパスフィルタの遮断周波数やアンプゲインはソフトウェアで設定する。

(5) DSPボード

DSPボードはFFT計算や再生計算などを高速に実行するために使用した。本ボードは32ビット浮動小数点演算を約20MFLOPSの速度で行う。

(6) ビデオカメラ

ビデオカメラは計測対象機器の光学画像を撮影するために使用する。

(7) 画像メモリーボード

画像メモリーボードはビデオカメラで撮影された画像信号をA/D変換し、映像情報をボード上のメモリーに記録する。記録されたデータはパソコンに転送され、画像データ・ファイルとして記録される。

(8) 光磁気ディスク、ストリーマ

計測された大量データを記録するために使用する。

2.4 音源探査機能

音源探査機能は機器から放射される騒音を計測し、指定した周波数の騒音強度分布図を出力する機能である。この機能を利用して、機器の正常状態や各種異常状態での機器放射音の音響特性を把握することができ、これらの音源特性を利用して、設備の診断ルールを導出することができる。

音源探査機能はホログラム計測機能、再生計算機能、音源撮影機能に大別される。これらの機能はメニュー方式で動作させることができ、音源探査を容易に行うことができる。

ホログラム計測機能は対象とする機器のホログラムを計測する機能で、指定されたポンプ・ユニットまで台車を移動させる機能、ホログラムの自動計測機能、放射騒音のパワースペクトル計算機能、計測条件の入力・参照機能からなる。

再生計算機能は再生計算の条件設定機能、再生計算機能、音響強度分布図作成機能からなる。音響強度分布図作成機能を用いると対象機器の光学画像と音響強度分布図をCRT上で合成表示することができ、容易に騒音の発生部位が確認できる。また、この図をプリンタを用いてハードコピー出力することもできる。

音源撮影機能は音源の光学画像を得る機能で、台車を対象ポンプ・ユニットまで移動させる機能、画像メモリーボードを用いてデジタル画像を得る機能からなる。

2.5 設備の自動診断機能

設備の自動診断機能は、自動的に設備の音源探査を行い、登録された診断ルールに基づき設備の診断を行う機能である。診断ルールは簡単に登録・修正できるため、診断ルールの妥当性を検討することができる。

自動診断機能は診断ルール登録機能と正常時データの記録機能、診断実行機能からなる。

診断ルール登録機能は診断を行うためのモニター点の座標と再生周波数、正常・異常の判定しきい値などをデータ・ファイルに記録するための機能である。モニター点の座標指定はCRT上に表示されたポンプ・ユニットの画像上に表示される円カーソルを用いて行うことができるため、実機での座標計測を必要とせず容易に行うことができる。

正常データの記録機能は、正常状態のポンプ・ユニットの音源探査を行い、モニター点における音響強度を計測し、計測結果を正常時データ・ファイルに記録する機能である。

診断実行機能は台車移動機能、機器の音響強度計測機能、診断ルールに基づく診断機能、診断結果表示機能からなる。

機器放射音の強度計測機能はPC9801VXをホスト計算機とする音源探査端末を用いてホログラムの計測を行い、PC9801RAから転送される診断ルールを基に指定された点の指定された周波数において再生計算を行い、再生結果をPC9801RAに転送する機能である。

診断機能は計測された強度分布の値と、既に記録されている正常時の強度値を読み込みこれらの値の差を取り、しきい値と比較し正常・異常の判定を行い結果をファイルに記録する機能である。

診断結果表示機能は機器が異常であると判定されたときにポンプ・ユニットを示す線画に異常部位を反転表示すると共に、異常の種類を表示する機能である。

2.6 設備診断装置の仕様

型 式：AHP-D001

ホログラム寸法：0.8m×1.8m

周波数範囲：500～4000 Hz
 測定レベル：40～120 dB(A)
 マイクロホン数：16本
 計測時間：4分/ポンプ1台
 再生範囲：0.5m×1.5m
 再生時間：8秒/周波数
 作図時間：20秒/枚
 対象異常：軸受傷、ローターアンバランス、軸のミスアライメント、軸曲がり、基礎の緩み、ガタ

3. 設備診断の研究について

興亜石油株式会社において、写真1(b)に示すモデル・プラント内に当社開発の設備診断装置を設置し、設備の自動診断に関する研究が行われている。ここでは興亜石油株式会社のご好意により研究成果の一部を紹介し³⁾、本装置の機能の一端を示す。

本研究は異常機器の発生する騒音の特性の把握（基礎研究）と、これらの特性を反映させた設備の自動診断方法の開発からなる。基礎研究はポンプ・ユニットに種々の異常を発生させ、音源探索を行うことにより各状態における騒音強度分布図を作画し、これらの図から各異常の特性を把握することにより行われている。自動診断研究は基礎研究で得られた特性から診断ルールを開発し、これらのルールを診断ルール・ファイルに記録し、診断を実行することによって行われている。対象異常はローターのアンバランスや軸のミスアライメントなどの低周波異常と玉軸受の異常である。以下、玉軸受に関する研究結果を示す。

最初に、玉軸受の異常時の音響特性を把握するために、玉軸受の外輪に人工欠陥を付けて行われた実験結果を示す。図4はポンプに異常が無い場合のポンプ発生騒音のスペクトルである。図5は外輪傷がある場合のスペクトルである。外輪傷によって正常時にはなかった多数のピークが発生しており、外輪傷音が捕捉されていることがわかる。図6に図5のピークの内、転動体通過振動数の整数倍に当たる周波数3662 Hzの騒音発生部位を探索した結果を示す。図6は発生騒音の強度を等高線表示したものであるが、正常時にはなかった高いレベルの等高線が軸受箱に現れており、異常部位が同定されていることがわかる。このように、暗騒音が存在するモデルプラント内においても騒音の発生源を捉えることができ、音響ホログラフィ法を設備診断に適用できる可能性があることがわかった。

次に、軸受の自動診断結果について述べる。対象とした軸受の異常は外輪傷と内輪傷、ボール傷の3種類である。現在のところ、診断正常率は約80%で、実用的な性能が得られている。

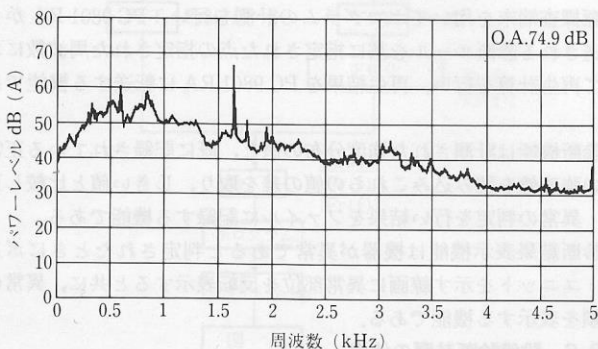


図4 ポンプ発生騒音のスペクトル（軸受正常）
 Spectrum of Noise Emitted from Pump (Normal State)

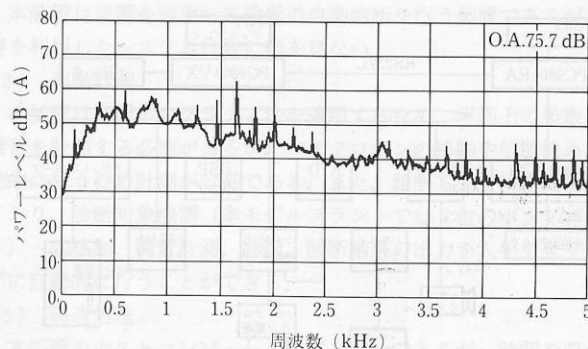


図5 ポンプ発生騒音のスペクトル（軸受異常：外輪傷）
 Spectrum of Noise Emitted from Pump (Defect of Outer Ring of Ball Bearing)

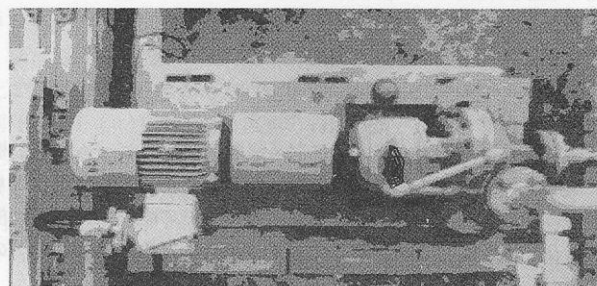


図6 ポンプの音源探索結果
 Reconstructed Noise Image of Pump

4. おわりに

従来、音響ホログラフィ法は騒音源の探索に適用されその有用性が実証されてきたが、暗騒音が存在する環境においても騒音の放射されている位置が検知できるという音響ホログラフィ法の基本的な機能を適用すれば種々の応用が考えられる。本稿では音源探索以外への応用としては世界に先駆けて実施した設備の自動診断への応用について述べた。

ここで紹介した設備診断装置は、既に商品化を行った音源探索装置に診断ルール登録機能、及び計測台車制御機能、診断機能などからなる自動診断機能を付加して製作したものである。

現在、回転機械に取り付けられた軸受の異常や軸のミスアライメントなどの低周波異常を診断することができるようになっているが、今後更に軸受の異常の種類（外輪傷、内輪傷など）の判定、キャビテーションの判定などができるよう診断ルールの改良が必要である。また、プラントの設備診断の自動化が急務となっている昨今、本装置が実用されることを期待する。

最後に、本装置を製作する機会を頂くと共に、研究資料を提供していただいた興亜石油株式会社の関係各位に感謝する。

（執筆 玉野研究所 竹田博、岡富士男）

参考文献

- 1) 上羽：音波ホログラフィと騒音源探索，計測と制御，Vol.16，No.5，p.472
- 2) 竹田：音響ホログラフィに関する研究，機論，51-468，C，p.1991
- 3) 岡村：音響ホログラフィを利用した設備診断ロボットの研究，昭和63年度新シーズ開拓研究成果報告書，PEC-88-T 20，石油産業活性化センター