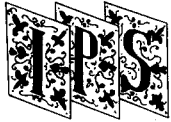


解説

音響と情報



4. 音による機械診断†

鈴木 英 男††

1. はじめに

診断という言葉を辞書で引くと、「医者が患者を診察して病状を判断すること」とある。医者への診断には問診や打診がある。素人でも、電話を通じた相手の声のぐあい、風邪をひいているかどうかの診断程度は可能である。世の中に機械なるものが生まれてからは、機械の診断という新しい業務が発生した。機械は話さないで問診というわけにはいかないが、機械の場合でも打診や聴診器による診断は結構行われる。

ここで、診断(対象を機械として)に関連する用語について見直してみる。診断は英語では、diagnosisとなる。これと類似する言葉が maintenance (保全)である。plant maintenance (設備診断, 保全)はよく使われる。診断と関連して monitoring (監視)という言葉もよく使われる。この場合は condition monitoring (状態監視)と続く場合が多い。言葉の関係からいえば一般に、監視→診断→保全という順序になるといえる。診断技術の歴史からいうと、1950年代から始まった予防保全(preventive maintenance)から、現在は予知保全(predictive maintenance)の時代に入っている。定期的な(time-based)オーバーホールによる故障の予防(prevention)と比較して、状態の監視(condition-based)により故障が予想(prediction)されるときにのみ、オーバーホールなどの対策を実施するほうが、経済的に安上がりとなり、トータルの生産効率も上がると考えられるからである¹⁾。

機械の診断手法には振動法、音響法、超音波法、AE法、物理化学分析法その他種々の方法があるが、ここでは特に音響法を取り上げてその特

† Fault Diagnosis From Machine Radiated Noise by Hideo SUZUKI (Ontek R & D Co., Ltd.).

†† オンテック R & D 株式会社

徴と診断の実例を紹介する。

2. 振動法と音響法

振動法と音響法は機器の診断において対比されるが、現場で診断に用いられる方法は振動法が圧倒的に多い²⁾。その最大の理由は一般的に振動法のほうが使いやすいし、効果も大きいことである。それと機械系の一部の人にとっては音放射が分かりにくいための不安感も音響法を敬遠する一因のように思われる。ただし、音響法には振動法にない特徴があるので、ここではそれに重点をおいて説明する。

図-1は振動法と音響法の違いを説明したものである。振動法では、種々の加振力(つりあい、軸受異常、歯車の傷、ピストンスラップなどの異常要因)により生じる機械系の応答振動をセンシングして診断を行う。音響法では振動系にさらに音響系が加わり、結果として生じる音圧を測定して診断を行う。このように、振動法では機器の特定の箇所における振動(変位、速度、または加速度)の大きさを直接測定するので、その意味が明確に理解できる。また、異常要因によりどこかの部位の振動が大きくなるかの判断が比較的容易にできる。一方、音響法で用いる音圧は機器の振動そのものを表すのではなく、音放射という現象(音響系)が間に介在するので、間接的な測定法になる。その分、センシングの最適位置を決めるのが多少やっかいである。しかしながら、図-1でも分かるようにセンシング後の処理は基本的には同じである。これは異常が発生する周波数は振動でも音響でも同じことによる。FFTアナライザによるスペクトル分析、エンベロープ処理などの振動法の手法は音響法でも有効である。

ここで音響法の特徴を振動系に対する長所としてあげてみる。

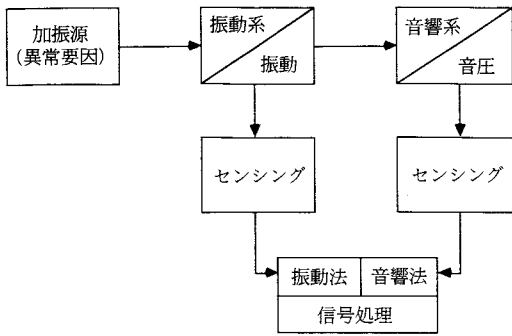


図-1 振動法と音響法の比較

(1) 原理的に非接触 (リモート) センシングであり、回転体や高速で移動する物体、高温の対象物などセンサを取り付けにくいものの診断に有効である。逆にコンベアのように長い対象物を診断するとき、診断装置自身が移動する場合もある。また、生産ラインでの製品の検査の場合、センサを固定することが作業上困難な場合などにも有効である。

(2) 1個のセンサで一つの機器の異なる複数の部分、または複数の機器の監視が可能である。ただし、複数の機器の異なる現象を同時に分離するには、高度な信号処理が必要となる。

(3) 感性に対応した診断が可能である。聴感で異常と判断された現象の大きさと対比して、音圧レベルを診断の基準値とすることもできる。

3. 診断の信号処理

図-2は振動法、音響法に共通な信号処理のプロセスを示したものである。プロセス①は信号をそのまま周波数分析する最も一般的な方法である。これにより、卓越した振動がどこにあるか(異常要因の判定)、その大きさが正常限界値以下かどうかの判定ができる(正常か異常か)。

プロセス②は信号を帯域制限した後に包絡線を求め、それを周波数分析する方法である。現象が高い周波数領域で存在し、しかも低い周波数の周期性をもつ場合に有効である。たとえば転がり軸受の診断において外輪に傷がある場合、ボールが当たるとに支持部(またはケース)を加振する。支持部の共振は比較的高い周波数にあるので、それを含むバンドパスフィルタを通す。その後エンベロープを求めその周波数分析をするとボールが外輪を叩く周波数成分が明確に現れる。

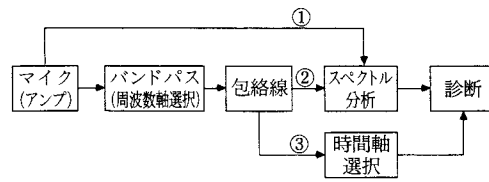


図-2 診断によく用いられる信号処理

プロセス③はバンドパスフィルタを通してエンベロープを求めた後、ある特定の時間帯域のレベルに注目する方法である。たとえばエンジンの異常の場合には1サイクル(720度)の回転のある特定の時間帯域に現象が発生することが多い。特定の周波数および時間帯域のレベルと全体の平均レベル、または同じ特定帯域の正常値との相対比較により正常、異常の判定が可能になる。プロセス①、②とプロセス③の違いは前者は信号の周波数分析が基本であるが、後者は信号を周波数と時間の2軸からなる平面上で分析するいわゆる時間/周波数(t/f)分析となることである。特定の狭い周波数帯域を決めるには振動系の共振がどこにあるかの情報が不可欠である。

4. 診断の実例

(1) エンジン異打音の診断 (音響法)

エンジンのような多くの部品と複雑な機構をもち、しかも爆発音のようなそのつど変化する機械系の診断はやっかいである。 n 個の気筒をもつエンジンでは注目する気筒に関する特定の現象は $1/n$ の割合でしか発生しないので、エンベロープの周波数分析を行ったとしても、注目する気筒の現象の大きさが $1/n$ に低下してしまう。このような場合には特定の時間帯(または回転角度)に注目した分析法(プロセス③)が有効となる。

図-3に測定系のブロック図を示す。この装置の特徴は帯域制限(フィルタリング)、エンベロープ処理、時間軸上の選択などをすべてDSP上で行うことで、ハード上の負担を軽減するとともに多様な要因に対応できるようにしていることである。また、指向性マイクロホンを用いることで気筒ごとの診断が可能となっている。音響法を用いている理由は、ラインで本方式を使用する場合には振動センサよりも非接触のマイクロホンのほうが便利であるからである。この装置では点火パルスを用いてそれを時間軸の基準としているが、同

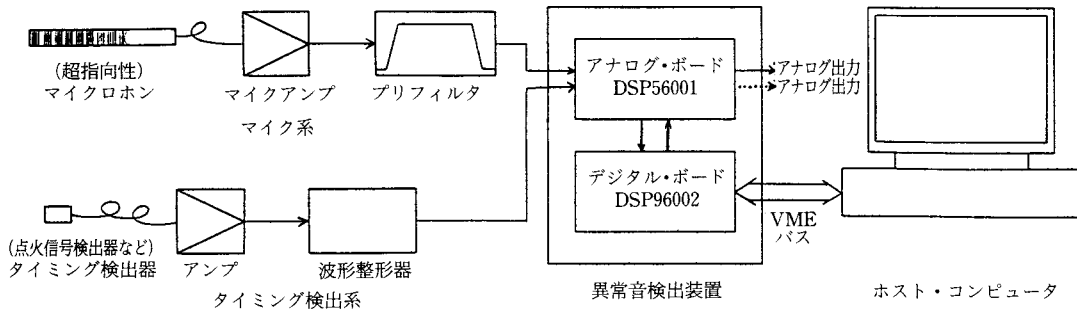


図-3 エンジン異打音の計測・解析システム

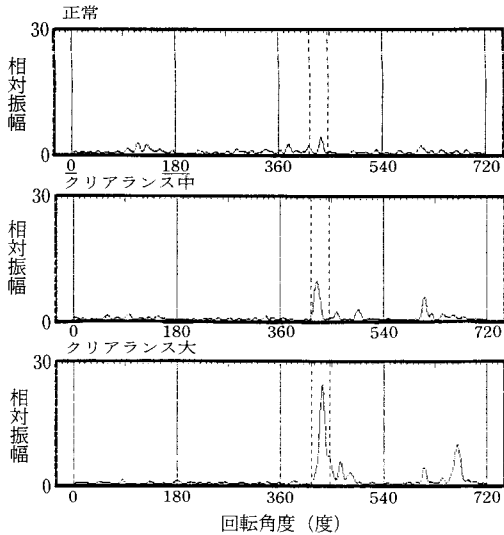


図-4 バルブクリアランスの診断結果

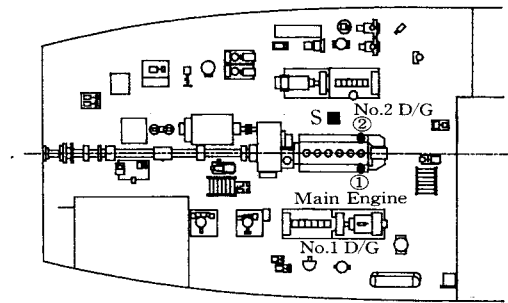


図-5 機関室

一気筒の連続する4個の点火パルス間隔に3次曲線を用いた補間法を適用し、注目する1周期(0°-720°)内の回転変動による回転角度推定の誤差を補正する機能も備えている。図-4はバルブクリアランスを正常値から増したときのタペット音の大きさを検出したものである。バンドパスフィルタは4kHzを中心とする1/3オクターブである。異常の度合に対応して注目する周波数・時間領域での成分が大きくなっていることが分かる。

周波数帯域は正常、異常の差が最も大きく現れるように選ぶが、場合によってはそれでも安定した診断が困難な場合もある。そのようなときには二つの異なる帯域を選び判定を2次元平面で行うようにすることも可能である。二つの周波数帯域を自動的に決める方法も提案されている³⁾。

(2) ディーゼルエンジンの診断

船舶用や発電用ディーゼルエンジンなどのよう

に評価対象が大きいシステムの場合には、エンジンの個々の故障要因(たとえば弁隙間異常など)に関する診断と、突発的に発生しそのまま運転を継続すると大きなトラブルに至るような異常診断の二つのタイプがある。ここでは、後者の方法に関する研究を紹介する。木村らは船舶のディーゼルエンジンを用いて、インジェクタバルブを開くことによって発生するガス噴射音と、ボルト類の緩みなどで往復運動する物体が周囲の固定物に当たるなどして発生するであろう打撃音の検出が可能かどうかを、図-5に示す船舶の機関室内で実験的に検討した⁴⁾。打撃音は実際に鉄板を叩いて発生させている。20kHzまでの周波数帯域を100Hzごとにスペクトル分析するが、さらにそれらのスペクトルを20個束ねて最終的に20kHzを10分割している。時間軸は、1サイクル(クランク角度で720°)を40分割する。このようにして時間周波数平面を計400セクションの領域に分け、それぞれのセクションについて正常/異常の判定を行う。ただし、爆発音は常時変動しているので、セクションごとの値の平均値(正常値)からの差が統計的にみて異常と判定されても、必ずしも異常があるわけではない。図-6

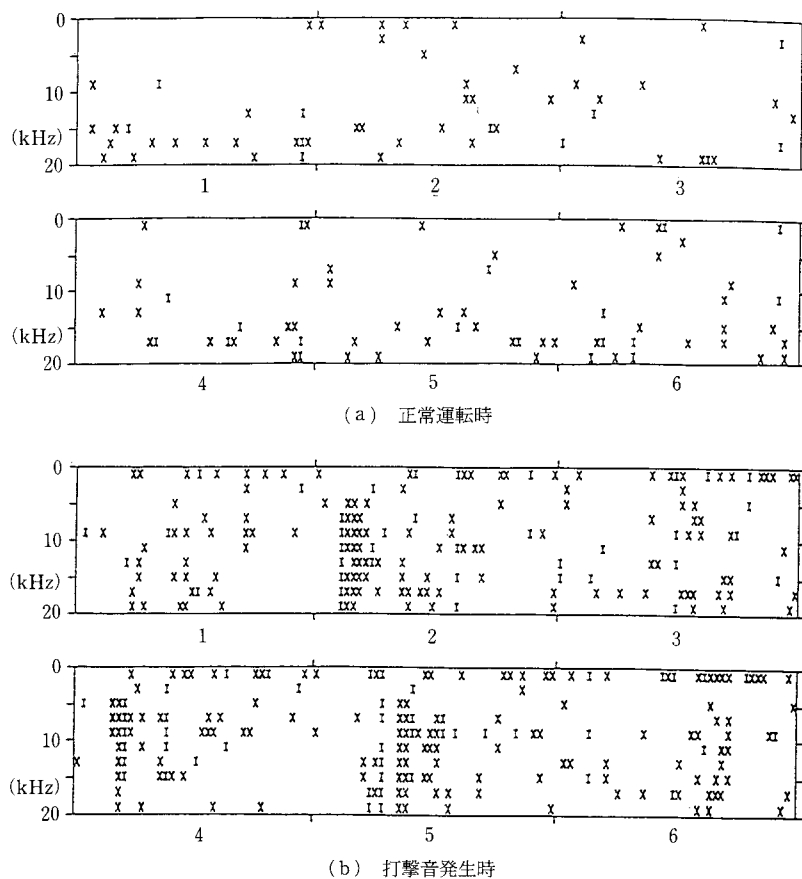


図-6 放射音に対する異常判定結果 (計測点②)

(a)は正常運転条件下で6サイクルにわたって各セクションごとに異常と診断された箇所を×印で表したものである。打撃音を加えたときのそれを図-6 (b) に示す。×印の数ははるかに増えていることが明瞭である。実際には正常時の×印に対し、どのような増加を示したら異常と判定するかの問題があるが、それについても検討している。

本研究は突発的に発生する異常を音で判定することを目的としているので、リアルタイムで判定を行う必要がある。それは今後の課題として残されている。

(3) コンベアの診断 (音響法)

オーストラリアには鉱石の長距離コンベアによる運びだし (数十キロ)、列車による長距離運搬 (数千キロ) が珍しくない、という特殊事情がある。オーストラリアのバイバック社ではこのような場合に有効な音響法による診断技術の一部実用化し、現在も開発を進めている。特に走行中の列

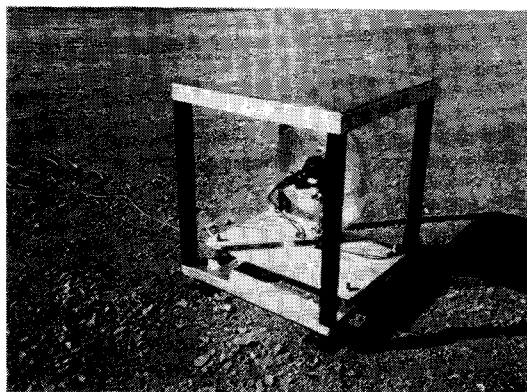


図-7 パラボラとダイナミックマイクロホンの組合せによる收音装置 (オーストラリア バイバック社製)

車からの音を陸上の固定マイクロホンアレイで集音し、特殊な信号処理により車輪のフラットと車軸の傷の診断を行う装置を開発中である。

ここではコンベアのローラの診断に関して述べ

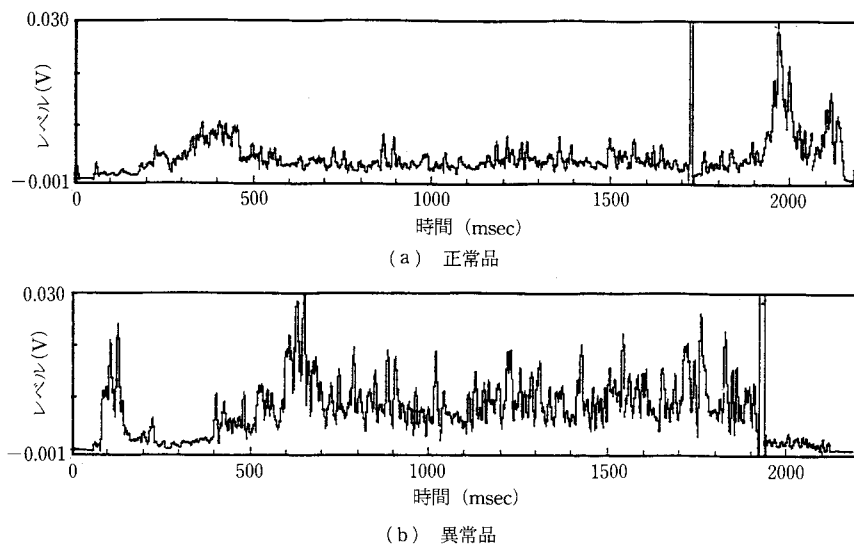


図-8 自動車用回転部品の診断例

る。コンベアの診断ではローラの診断が最も重要である。長距離のコンベアの場合は数多くのローラがあり、診断装置自身が移動する必要がある。そのためには音響法による非接触方式が有効である。図-7はトラックの荷台に積んで持ち運び可能にしたパラボラ式の指向性マイクロホンである⁵⁾。信号処理はプロセス③である。この場合でもバンドパスフィルタの周波数の決定は、振動系と音響系の特性を調べ暗騒音の影響を最も受けにくく、 S/N 比の高い帯域を選ぶ必要がある。

(4) 生産ラインでの検査

機械の診断とは多少異なるが、振動や騒音が問題となる製品の製造ラインでは製品の検査を官能検査に頼る場合が多い。しかしながら、工場内のうるさい環境で聴感に頼って製品の検査を行うことは判定の信頼性が少なく、きつい作業であり、慣れた作業者を育成することが困難であるという問題もある。そこで、検査を自動化することが行われる。図-8は自動車に使われる回転部品が発生する音を小型無響室内で記録し、プロセス③の処理を行い良否判定を行っている一例である。エンベロープ処理をすることにより、クリック的に発生する異音、フロアノイズなどの良否が明確に判定できる。官能検査を自動判定化する際の難しさは、基準となるべき主観的な判定そのものもかなり不安定なものであり、整合性の確認が容易でないことである。

5. ま と め

振動と音響法による診断の例を示した。診断といっても日常的に行われる一般的な回転体の診断と、大きな構造物の振動診断の場合ではアプローチの仕方がかなり異なる。特に後者の場合には問題となる現象の振動モードを理解することが不可欠であり、この点にモード解析と診断との共通点が存在する。また、音響法では捕まえたい現象の情報を最も含む観測点と周波数の選定が重要となる。ここで示した例でも分かるように、振動法でも音響法でも対象物の振動および音放射現象を十分理解していることが重要である。

参 考 文 献

- 1) メンテナンス便覧, 日本プラントメンテナンス協会編 (1992).
- 2) 設備診断技術に関する調査報告書, 社団法人日本プラントメンテナンス協会 (1993年7月).
- 3) 今井他: 異なる周波数帯域成分間の定量的計測法, 日本音響学会誌, Vol. 49, No. 6, pp. 389-396 (1993).
- 4) 木村, 水谷: 異常音検査による機関室内のディーゼル機関の監視システム, 船用機関学会誌, Vol. 25, No. 11, pp. 712-721 (1990).
- 5) Vipac Engineering & Scientists Ltd.: Acoustic Wheel Impact and Bearing Fault Detection System, Report Doc. No. VIPAC-AMS-2692-01 (1993).

(平成6年9月26日受付)



鈴木 英男

1967年三菱電機入社，1979年
までスピーカの研究開発に従事。
1972年～1974年および1979年
～1981年の2回ペンシルバニア

州立大学に留学，音響工学を専攻，1981年より1985
年までアメリカのCBS研究所に勤務，主にピアノの
研究を行った。1985年から1994年3月まで(株)小野
測器に在籍（現在は理事），音響計測装置の研究開発
を担当。1992年10月から音響・振動に関するコンサ
ルティングを主業務とするオンテック R & D(株)の
経営に携わり現在に至る。

