

音響センシングによる異音検知

高嶋 昭一

OKIは水中音響に関わる水中音響システムを設計、製造し、お客様に提供してきた。現在、水中音響システムの開発で培ってきた音響処理技術を、空中音響の分野へ活用し、機械設備などの異音検知に取り組んでいる。本稿では、異音検知に関する取組みやAIに関連する技術を述べる。

なぜ、異音検知？

我々の生活には、異音に関わる事柄がいくつもある。例えば身近な例としては、普段使っているパソコンのファンの作動音が挙げられる。自分が使用しているパソコンのファンの作動音が、通常と違うことに気付いたことがある人もいないのだろうか。ほかにも、我々の生活を支えるトンネルや道路のようなインフラ構造物の点検方法として、打音検査によって異音を検知する方法が欠かせないものとなっている。

異音は、誰でも身近に感じる現象ではあるが、視覚化して定量的に評価しにくい。しかし、そのような異音が更に重大な事象の兆候を示す可能性もあり、異音を検知し、視覚化して定量的に評価することは重要である。

OKIが設計、製造している水中音響システムは、水中の音を受信し、処理する水中音響システムである。水中では電波も光も伝搬しにくく、唯一、音だけが周囲を知る手段である。水中音響システムを扱うお客様は、処理された音を耳で聴くこともできるが、処理された音の周波数分析結果などを見ることで、周囲の状況を分析し、把握することができる。

OKIは、水中の音から情報を引き出すことに拘ったシステムを構築しているので、必然的に、音に関わる多数のノウハウがシステムに詰め込まれている。異音を検知し、定量化、視覚化することに対してOKIのノウハウが活用できると考え、異音検知の取組みを進めている。

この異音検知の取組みを進め、OKIのお客様が保有している機械設備の異常を音によって検知、視覚化することで、お客様のオペレーション継続サポート、機械設備メンテナンスサイクルの最適化などに貢献できると考えている。

異音を検知する手法

我々が目指していることは、稼動している機械設備から絶えず放射される音を頼りに異常を検知し、人に知らせることである。ここでは、異常を検知したい対象の機械設備が放射する音を、「所望音」と表現する。

図1は、ある機械設備の異音を検知したい状況のイメージ図である。検査対象の機械設備が稼動している状況で、対象としている機械設備だけが音を発しているとは限らず、周囲には別の機械設備が稼動しているかもしれない。若しくは、対象となる機械設備の周囲に人がいて、音声が入り混じることも考えられる。このような、異音検知したい対象の機械設備以外の音を、ここでは「妨害音」と表現する。

熟練の点検作業員は、このような状況であっても特定の機械設備の音を聞き分け、正常であるか異常であるかの判断ができるかもしれない。しかし、そのような点検作業員は多くはないのが実情であり、いつ発生するか分からない異音のために、絶えず音を聞き続けることも非効率である。このようなときに、異音を検知し、人に知らせる手法が望まれる。



図1 機械設備の異音を検知したい状況のイメージ

図2は、我々が検討している異音検知手法の構成の概要である。この手法は、マイクアレイ、ビームフォーミング¹⁾、特徴抽出部及び異音判定部から構成される。

マイクアレイは複数の無指向性マイクによって構成され、これら無指向性マイクはある一定の規則に基づいて並べられている。無指向性マイクとは、周囲から到来する音を、音の到来方位に関係なく、全て同じ感度で受信するもので、通常のマイクは無指向性である。

無指向性マイクそれ自体は、所望音と妨害音の両方が入り混じった状態の音を受信する。これら複数の無指向性マイクが出力する音響データを入力として、後段のビームフォーミングでは妨害音を抑圧し、所望音を効果的に受信するような指向性を形成する。妨害音を抑圧することによって、特徴抽出部ではより適切に所望音の持つ特徴を抽出できる。その結果、異音判定部では、正常音が異音であるかの判定誤りを抑えられる。

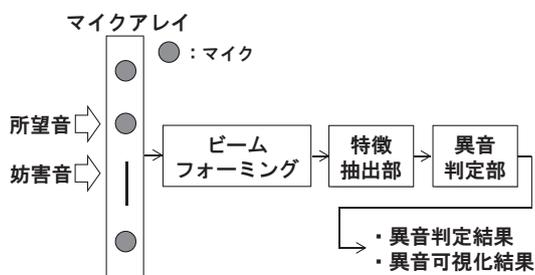


図2 異音検知手法の構成概要

これ以降、異音検知手法の各構成要素を、人が関与せずにアルゴリズムが動的に状況判断する、言わばAI的に動作する部分の細部を説明する。

ビームフォーミング

図3は、ビームフォーミング処理の構成である。ビームフォーミングで実施される処理は大きく4つあり、「各マイク出力に対するゲイン調整」、「遅延付与」、「加算」、「適応アルゴリズム」である。このうち、ゲイン調整と遅延付与の方法に応じて、ビームフォーミングには、CBFとABFの2つの方式がある。

・CBF(Conventional Beamforming)

CBFは、あらかじめ設計したゲインと遅延を用いて処理するビームフォーミングであり、周囲状況によらずに、固定的な指向性を形成する方式である。CBFでは、図3に示した、適応アルゴリズムを用いない。

・ABF(Adaptive Beamforming)

ABFは、周囲状況(具体的には、妨害音の到来方位の状況)に応じて、妨害音を最大限抑圧するように、適応アルゴリズムが動的にゲインと遅延を調整し、指向性を変える方式である。

以下、OKIが開発している自動的に妨害音抑圧のための指向性を形成するABFを説明する。

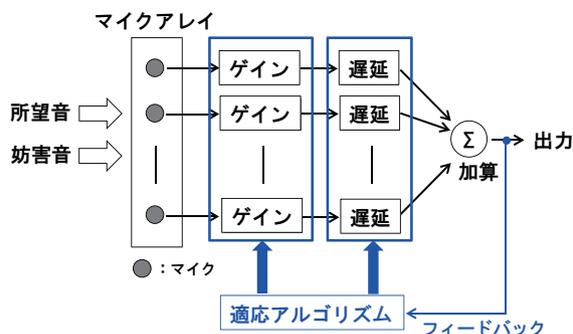


図3 ビームフォーミング処理の構成

(1) 適応アルゴリズム

ABFの特徴的な動作は、その出力をフィードバックし、ゲインと遅延の再調整を繰り返すことである。このフィードバック処理によって、所望音を適切に受信しつつ、妨害音を最大限抑圧する指向性が自動的に形成される。ABFの代表的な適応アルゴリズムとして、MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) があるが、このアルゴリズムはマイクアレイの位置誤差やマイク間の特性のバラつきに弱く、所望音そのものを抑制してしまう現象が生じ、実用的なアルゴリズムではない。そこで、OKIではEBAE (Eigenvector/Beam Association and Excision) という適応アルゴリズムをベースに、マイク間の特性バラつきに対して耐性のある独自のアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムによって、所望音を受信しつつ、妨害音を抑制する能力を向上することができる。

(2) 効果

図4は、ABFの効果を示すシミュレーションの結果である。図4(a)は、所望音(90度から到来。周波数1000Hz及び1500Hz。1500Hz成分は周波数自体が揺らいている。)と妨害音(45度、120度、135度から到来。広帯域成分)が、マイクアレイ(10個のマイクで構成されている)へ到来する様子である。図4(b)は1個のマイク出力の周波数分析結果であり、500Hz以下の帯域では低周波ほどレベルが高く、500Hz以上の帯域ではレベルがほぼ一定である。この周波数分析結果からは、所望音である1000Hz及び1500Hzの成分が全く確認できない。このような状況は、正常音/異音の判断をする以前の問題であり、これがビームフォーミングによる妨害音抑圧の必要性を示している。図4(c)はABF出力の周波数分析結果であり、図4(b)と同様に低周波ほどレベルが高く、500Hz以上の帯域では背景部分のレベルがほぼ一定である。この結果からは、1個のマイク出力の周波数分析結果と比べ、妨害音が抑圧され、所望音の成分である1000Hz及び1500Hzを明瞭に抽出できていることが分かる。図4(d)は、ABFによって形成された、所望

音方向の指向性である。所望音は90度から到来しているので、その方向に対する感度は0dB、つまり、到来した所望音をそのまま受信するように指向性が形成されている。一方で、妨害音が到来している45度、120度及び135度に対しては、それぞれ-20dB、-40dB、-35dBの感度の指向性が形成され、妨害音の大きさを1/100以下に抑圧している。

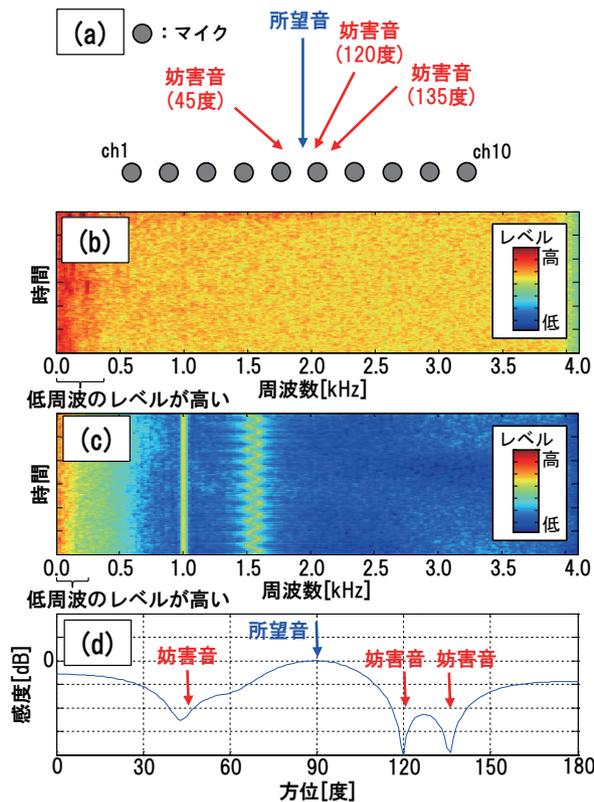


図4 ビームフォーミングによる妨害音抑圧のシミュレーション結果

特徴抽出部及び異常判定部

ビームフォーミングが妨害音を抑圧するため、所望音を効果的に抽出できることは前節で述べた。次に、抽出された所望音を用いて、どのように正常音が異常音であるかを判断する手法を述べる。

(1) 特徴抽出部

ここでは、音の特徴を数値データに変換する手法として、ホテリングの T 法を例として説明する。なお、異常を検知するための手法は、異常検知の領域に分類され、異常検知のさまざまな手法は参考文献⁹⁾説明されている。

ホテリングの T 法を異常検知へ適用する場合、まず、機械設備の正常時の音響データからパワーを計算し、正常

時パワー平均値 μ と、パワーの大きさのバラつきである標準偏差 σ を学習しておく。次に、正常／異常判定したい音響データのパワー p を正規化し、正規化出力 $q=(p-\mu)^2/\sigma^2$ を得る。特徴抽出部でホテリングの T 法を用いる場合は、このようにして、入力された音響データから正規化出力 q を計算し、出力する。正常時の音響データのパワーがある値を中心に正規分布に従って変動する場合、正規化出力 q の大きさは、自由度1のカイ2乗に従うことが知られている。図5は、正規化出力 q の頻度分布のイメージである。横軸は正規化出力の大きさ、縦軸は正規化出力の発生確率である。

(2) 異常判定部

次に、異常判定部の動作を説明する。まず、異常が発生した場合、正規化出力がどのようになるかを考える。異常が発生すると、機械設備から発生する音の大きさが正常時よりも大きくなるのが容易に予想される。この結果、異常時には正規化出力 q が大きくなる。ここで、正規化出力 q の大きさとその発生確率は図5に従うことが分かっているので、正規化出力の大きさを抛り所に、観測した音が正常音であるか異常音であるかを定量的に判定できる。

例えば、図5の右側の車線部分の面積が、カイ2乗分布の関数で囲まれた面積の1%になるように、正規化出力 q に対するしきい値を決める。このようにしきい値を決めることによって、「正常時であれば確率1%でしか起こらないほど大きな正規化出力を受信したので、今受信している音は異常音である」と判定し、異常を検知する。

図6は、正規化出力 q を用いた、音響データの正常／異常判定を行う処理のイメージである。図6(a)は正常時の音響データの波形のイメージであり、図6(b)はその波形のパワーをイメージである。このパワーから、その平均値 μ と標準偏差 σ を求める。図6(c)は、異常時に観測される音響データの波形のイメージである。異常時に観測される音は大きくなると予想され、図6(c)での時刻 t_0 の時点で音が大きくなる様子を示している。図6(d)は、異常時に観測される音響データを入力として、正規化出力 q を計算した結果のイメージである。正常時の音響データであれば、正規化出力の大きさは図5に示すようなカイ2乗分布に従って分布することとなり、その大きさは小さい。一方で時刻 t_0 以降のように音が大きくなると正規化出力も大きくなり、その値がしきい値を超え、異常であると判定される。

このようなホテリングの T 法に基づく異常検知の手法は有用であると考えられるが、この方法では、正常時の音響データのパワー p が正規分布に従い、その結果の正規化出力 q がカイ2乗分布に従っているという前提がある。この前提はよく用いられるが、機械設備から放射される音のパワーが正規分布に従って変動する保証はない。

そこで、運用開始時は、機械設備から放射される音のパワーの変化は正規分布であると仮定しつつも、運用後に収集した正常時の音響データからパワーのヒストグラムを求め、そのヒストグラムに基づいて正規化出力の発生確率を計算することによって、より適切に異音を検知できると考える。

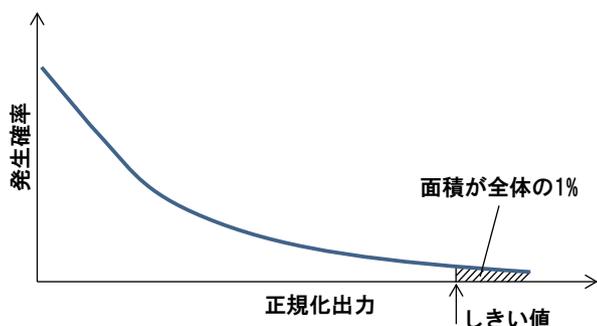


図5 正規化出力 q の分布の様子

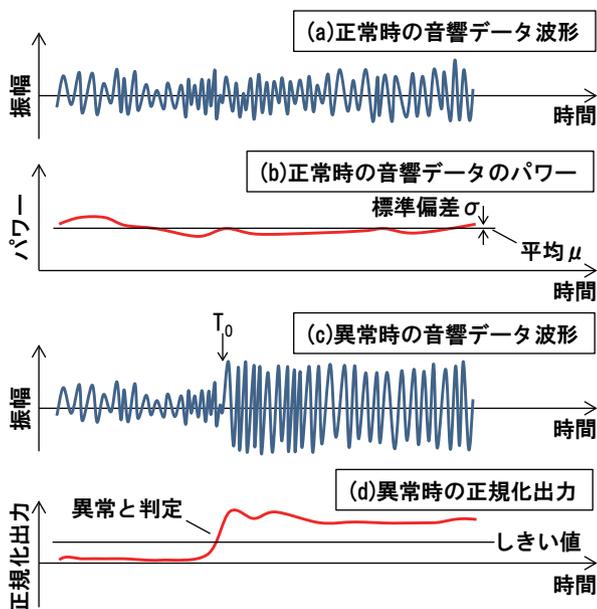


図6 正規化出力 q の表示イメージ

まとめ

本稿では、OKIが取り組んでいる異音検知に関連した一般的な技術の概要を述べた。現状では、さまざまなお客様へのヒアリングを通して、実証実験や音響データの分析で、実績を蓄積している段階である。今後更に実績を積み、異音検知手法の検討及びお客様の課題解決に貢献していく。

参考文献

- 1) 川崎良道:パッシブソーナーの整相処理、OKIテクニカルレビュー 第224号、Vol.224、Vol.81、No.2、pp.72-75、2014年10月
- 2) 井出剛、杉山将:異常検知と変化検知、2015年、講談社

筆者紹介

高嶋昭一:Shoichi Takashima. 情報通信事業本部 ディフェンスシステム事業部 研究開発部