

# 音源探査装置の開発とその活用

Development and its utilizing method of the equipment which search the position of sound source and display visually

中部電力(株)	和田 浩之	Hiroyuki WADA	Member
(株)熊谷組	大脇 雅直	Masanao Owaki	Non-Member
信州大学名誉教授	山下 恒弘	Yasuhiro YAMASHITA	Non-Member

The symptom often appears as a sound change before equipment breaks down. Therefore, it is important to observe the state of the noise and the vibration caused while equipment is driving, and to detect abnormality of equipment at the early stage. However, even if abnormality of the sound can be perceived, it is difficult to specify abnormal parts. Then, we developed the equipment which search the position of sound source and display visually. In this paper, we explain the principle of the equipment.

**Keywords:** Sound source, Visualization, Frequency, Phase difference, Electro luminescence display

## 1. はじめに

設備が故障に至る前には、その予兆が音の変化として現れることが多い。そのため、設備が運転中に生じる音や振動の状態監視を行い、設備の異常を早期に検知することが重要である。しかし、音や振動で異常を検知したとしても、設備を構成している部位が多い場合や大型設備の場合は異常箇所を特定することは困難である。そのため音源の特定が必要となっている。

音源を特定する場合、指向性マイクロホンを用れば比較的安価に探査が可能であるが、音響パワーレベルの卓越周波数が低音域にある場合、音源の指向性が低く音源の特定が困難である場合が多い。

また、音源探査手法として音響インテンシティ法やマイクロホンアレーによる推定が広く用いられているが測定機材が多く測定準備に時間を要する。

筆者らは、5 本のマイクロホンを用いて音の位相差から音の到来方向を計算し、同時に小型カメラで撮影される画像上に音情報を重ね合わせることで、音の発生状況を視覚的に表示させる音源探査装置「音カメラ」の開発を進めている[1][2][3][4]。

本報では、音源探査装置「音カメラ」の推定理論と装置の概要、設備の異常音探査例を報告する。また、この技術を応用した振動源探査装置や透明ディスプレイを用いた音源探査装置「音メガネ」の概要についても報告する。

## 2. 音源方向推定式

音源位置を計算するために用いる5 個のマイクロホンの位置関係をFig.1 に示す。M1～M5 はマイクロ

ホン、Lはマイクロホン間の距離(m)とする。この時、水平角  $\theta$  (°) 及び仰角  $\phi$  (°) は、以下のように表される。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{D_{35}}{D_{24}} \quad \dots \quad (1)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{D_{12} + D_{13} + D_{14} + D_{15}}{2\sqrt{3} \cdot \sqrt{D_{24}^2 + D_{35}^2}} \right) \quad \dots \quad (2)$$

但し、 $D_{ij}$ はFig.1 において  $M_i$  に対する  $M_j$  の時間の遅れ(sec)であり、2 個のマイクロホンに入力される信号のクロススペクトル  $P_{ij}(f)$  を求め、対象とする周波数の位相角情報  $\Psi$  (rad) から求める。なお、 $f$  は周波数とする。

$$D_{ij} = \frac{1}{2\pi f} \Psi [P_{ij}(f)] \quad \dots \quad (3)$$

(1)、(2)式は、音源と受音点間で平面波が仮定でき、マイクロホン間の距離を半波長とする周波数以下で成立する。

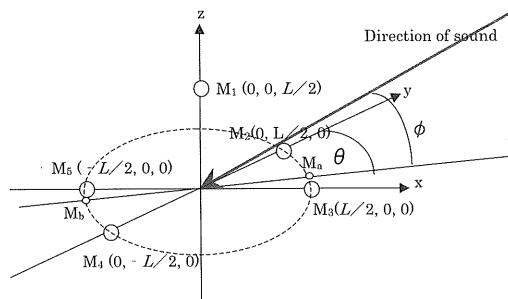


Fig.1 Position of microphones

連絡先: 和田浩之,〒437-1695 静岡県御前崎市佐倉 5561, 中部電力(株)浜岡原子力発電所保修部建築課,  
電話: 0537-85-2524, E-mail: Wada.Hiroyuki@chuden.co.jp

### 3. 音源探査装置の構成

音源探査装置の外観および収録部の拡大写真を Fig.2 に示す。マイクロホンの間隔を35(mm)として、4500(Hz)まで解析できるようにした。A/D 変換は、多チャンネルA/D カードを使用し、サンプリング周波数は、10(kHz)とした。なお、チャンネル間変換速度が $10(\mu\text{sec})$ あるため、解析時に時間の補正を行っている。また、ローパスフィルタは、遮断周波数 1.6(kHz), 40(dB/oct)とした。

一目で音の到来方向がわかるように音情報を小型 CCD カメラで捉えた画像上(PC モニター上)に座標を合わせ表示させている (Fig.3)。

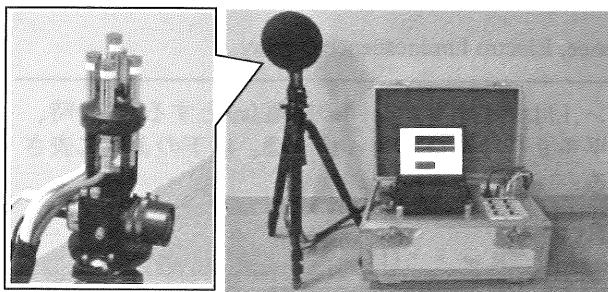


Fig.2 Sound camera

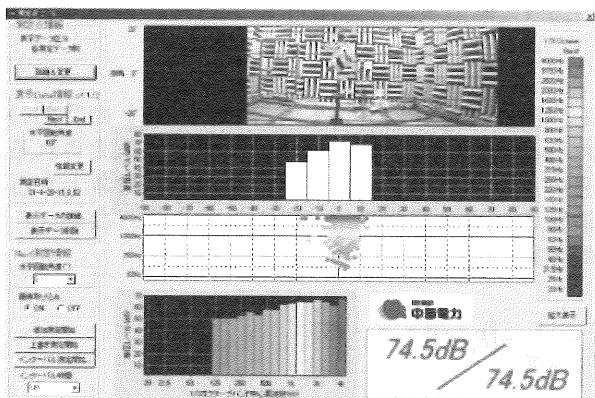


Fig.3 display of sound camera

画像上における音の到来方向の表示は、音圧レベルの大小を点(円)の大小で表し、周波数は色の違いで表示している。これによりどちらの方向からどのような周波数の音が到来しているかを判別することができる。また、表示設定で音圧レベルや周波数範囲を指定することで、特定の音圧レベル以上の音のみを表示させることや、特定の周波数範囲のみを表示させることができる。この機能を駆使すれば、通常と異なる音だけを表示させることができる。

### 4. 異常音探査事例

変電所内にある変圧器ファンの異常音探査事例を紹介する。複数あるファンから通常とは異なる周波

音が出ていた場合、何らかの異常が想定されるため、故障に至る前に点検、修理を行う必要がある。しかし、すべてのファンを分解点検していっては多くの時間と労力を要する。実際に異常音が観測された状態と修理後の音の変化を Fig.4,5 に示す。

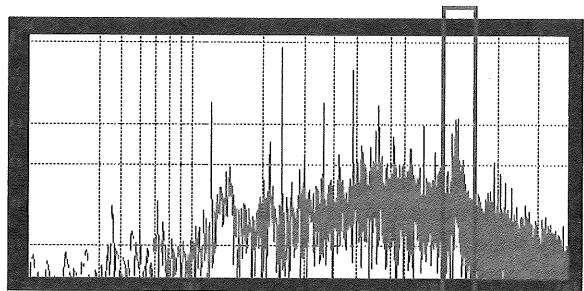


Fig.4 Spectrum before repair

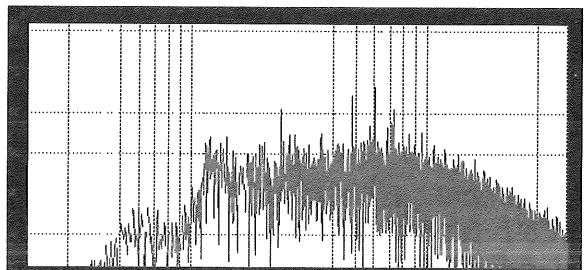


Fig.5 Spectrum after repair

これらの周波数特性を比較すると 1.2~1.5(kHz)の周波数で音圧レベルに顕著な差が出ている。

音カメラは画面設定で、画面に表示させる周波数および音圧レベルの範囲を指定することが可能である。そこで、1.2~1.5(kHz)かつ 50(dB)以上の周波数のみ表示させると Fig.6(右上)のように表示され、特異な周波数を出しているファンを特定することができる。実際にこのファンを分解点検した結果、ベアリング部に不具合があることが発覚した (Fig.7)。修理を行い再度測定した結果、特異な周波数が出でていないことを確認した (Fig.6 右下)。

このような異常音探査に限らず、騒音対策として防音壁を設置した場合、音カメラを用いることで防音効果を目で見て確認することができる。

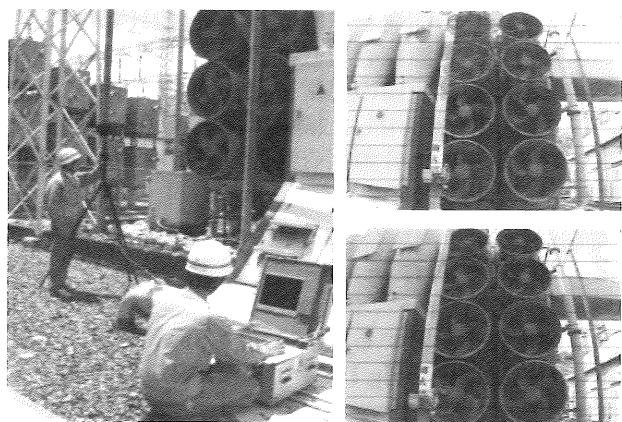


Fig.6 Measurement situation and result of a measurement

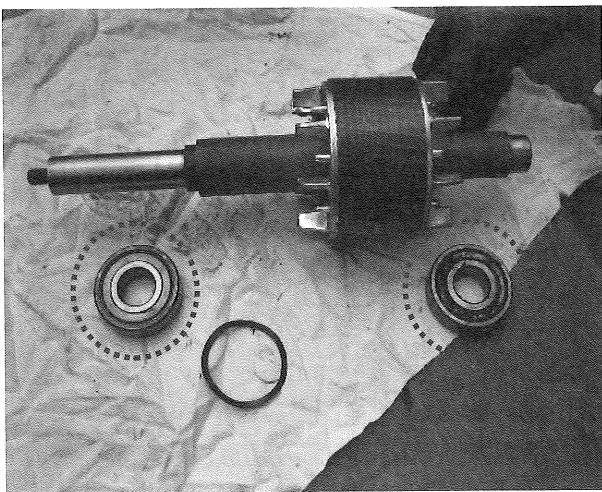


Fig.7 Abnormal part ;bearing of motor

## 5. 振動方向推定理論

設備が運転中に生じる音や振動には固有の周波数を持っている。同じ固有周波数を持つ設備が複数設置されている場所においては、音が共鳴しうなり音を発生させことがあるが、振動の場合、設備の振動が増幅（共振）することで疲労破壊を引き起こす場合がある。そこで、振動の発生方向を画像上に表示させる振動源探査装置「振動カメラ」の開発を行った。

Fig.8 に 4 個の振動センサーの位置関係を示す。ただし、M1～M4 は振動センサー、L はセンサー間距離(m)とする。また、Dij は Mi に対する Mj の時間遅れ(sec)であると仮定し、c は振動の伝播速度(m/s)であるとする。なお、振動源は、振動センサー位置から十分離れており、平面波として入射すると仮定する。このとき、平面波の進行距離を表すことを考える。例えば、Fig.9 に示すような振動センサー Mi, Mj があるとき、通過する平面波の進行距離は Dij·c (m) と表される。このとき水平角  $\theta$  (°) は以下の式で表される。

$$\tan \theta = \frac{D_{24}}{D_{13}} \quad \dots \quad (4)$$

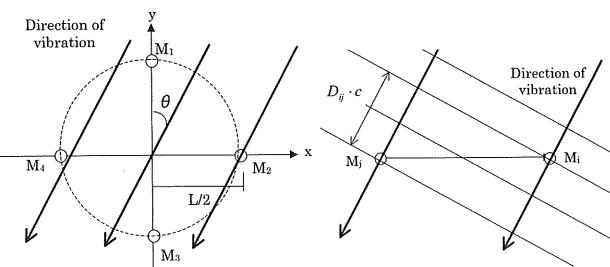


Fig.8,9 Position of Vibration sensors

サンプリング間隔は、波動の伝搬速度が最大 1000(m/s)と仮定すれば、センサーの間隔が 60(cm)の場合、通過時間は 0.0006(sec)となる。安定した位相差時間を得るためにサンプリング周波数を 16(kHz)、記録長は 1(sec)以上とした。対象とする環境振動の振動レベルは、常時微動よりやや大きい振動であるため、振動の信号を増幅する必要があるため、入力信号を  $\times 1, \times 5, \times 10, \times 50, \times 100, \times 500, \times 2000, \times 5000$  の 8 段階の増幅切替えを可能とした。システム構成を Fig.10 に示す。

振動到来方向の解析にあたっては、センサー間距離と伝搬振動のデータ収録サンプリング間隔が重要な要素となる。しかし、各センサーを固定した場合、地盤面ではなく固定治具を振動が伝わり、正確な振動到来方向が算出できない。そこで、センサー固定のための治具については振動センサーが接地するまでは位置が固定され、接地と同時に縁が切れる仕組みとした。(Fig.11,12) また、可搬性および操作性を考え折り畳み式とした。(Fig.13,14)

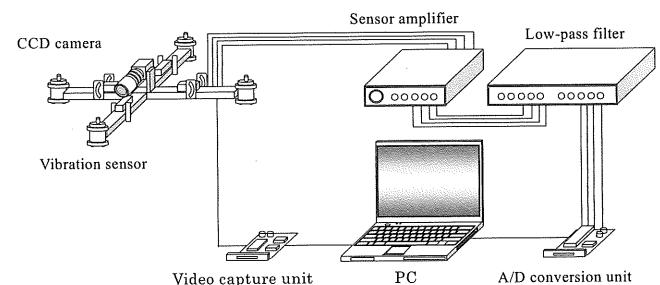


Fig.10 System configuration

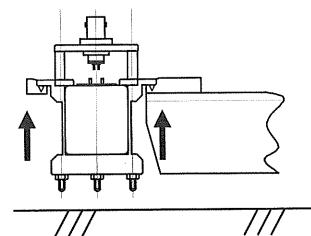


Fig.11 State of lifted

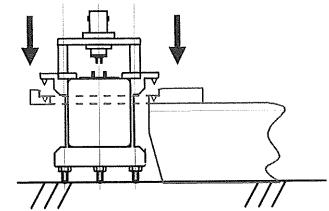


Fig.12 State of put

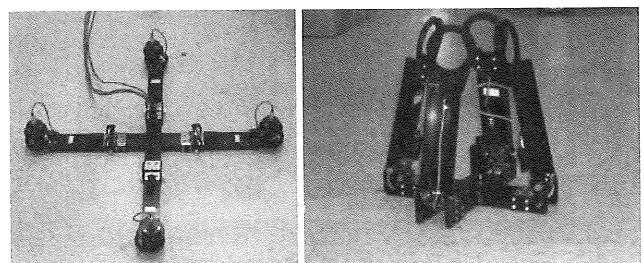


Fig.13 Fixed hardware

Fig.14 State of fold

## 6. 振動源探査事例

水力発電所では、水車や放水路につながるドラフトトンネルなどで、様々な振動が発生している。また、振動を発生する設備が強固な鉄筋コンクリート製の壁や基礎で固定され、それらの振動が伝搬しやすい状況下にある。通常、このような場所で振動発生状況を評価することは非常に困難であるが、「振動カメラ」を用いて振動を可視化する実験を試みた(Fig.15)。測定結果を Fig.16,17 に示す。(Fig.17 は Fig.16 の裏側から計測)

Fig.16 では画面右側、Fig.17 では画面左側から振動レベルの大きな振動が到来していることが確認できる。振動探査では構造物や埋設物等による反射の影響を受ける場合があるため、このように多角的に測定し確認することが望ましい。そして振動レベルの大きな表示に向かって測定位置をずらしていく、最終的な振動源を特定する。

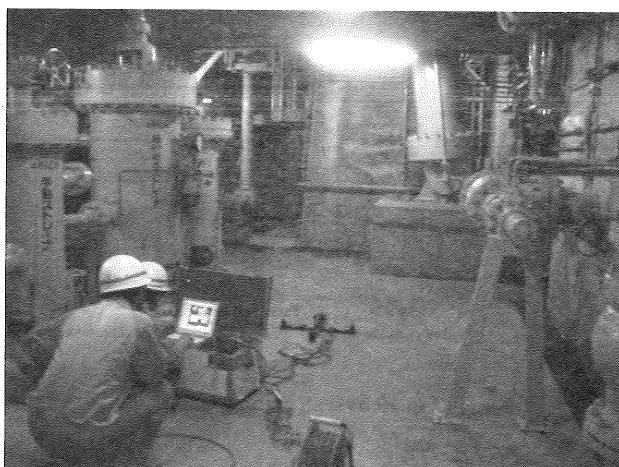


Fig.15 Measurement situation

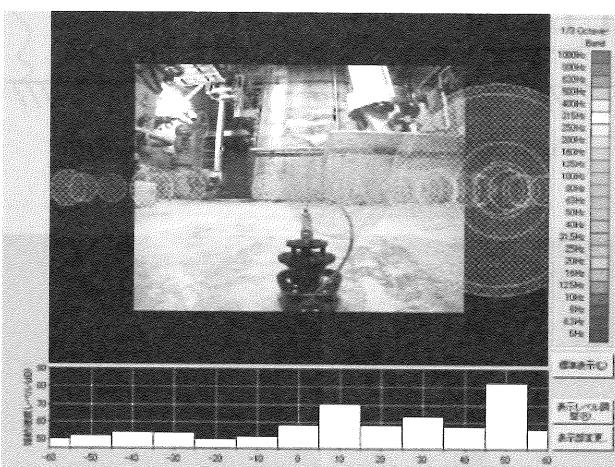


Fig.16 display of vibration camera

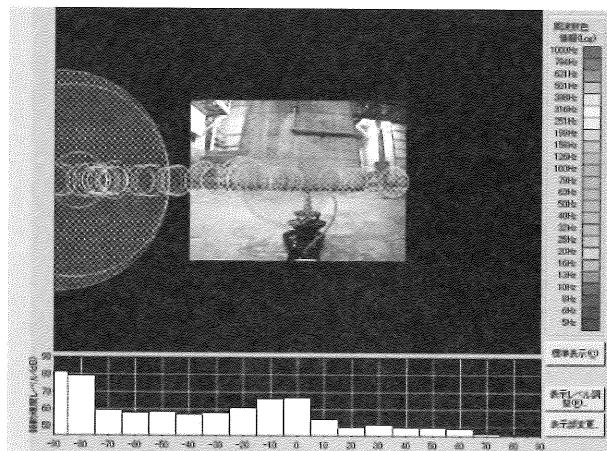


Fig.17 display of vibration camera ;the other side

## 7. 透明ディスプレイを用いた音源探査

設備機器の異常音探査では他の設備や床・壁面等の反射の影響を受けることが多いため、対象設備からの距離や方向を変えながら多角的に測定を行うことで反射の影響を確認しながら測定を行ってきた。しかし、従来の「音カメラ」はマイクロホンと小型カメラが一体となった収録部と、音を表示するディスプレイ部が離れていたため、ディスプレイで音の発生状況を確認しながら収録部を移動させることは困難であった。また、音の到来方向を解析し、画像情報と合成させる処理で負荷がかかっていた。

そこで、透明なディスプレイ上に音の情報を表示させる「音メガネ」を開発した。これは透明ディスプレイの上部に小型マイクロホンが付いており、音源対象物に本機をかざすことで、透明ディスプレイ上に音の表示が現れる仕組みになっている。本機はディスプレイが透明であるため、小型カメラから画像を取り込む必要がなく、ディスプレイ越しに見ている対象設備からどのような音が出ているか判別することができる。また、画像処理も不要となる。(Fig.18,19)

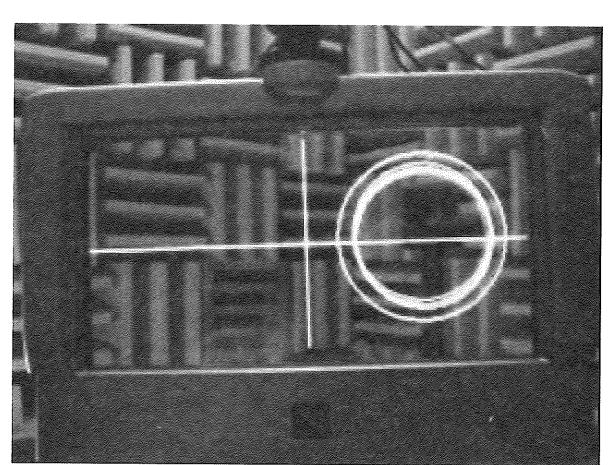


Fig.19 display of sound glass

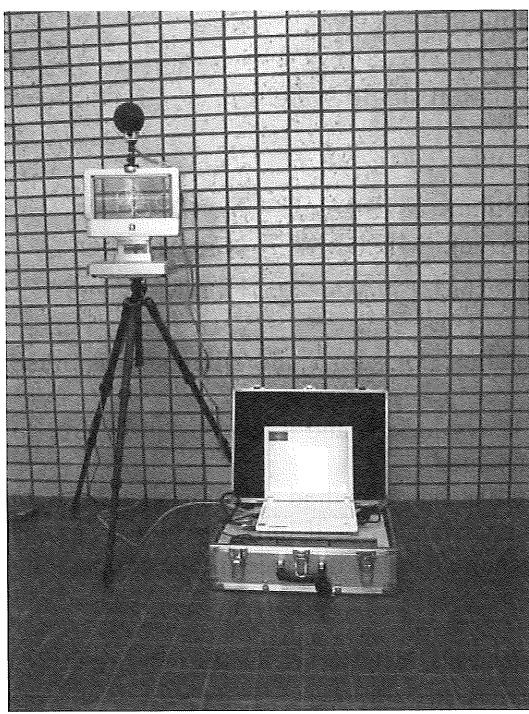


Fig.18 Sound glass

音メガネのシステム構成図を Fig.20 に示す。基本構成は、マイクロホン 5 本、無機ELディスプレイ、ローパスフィルタ、アンプ、解析器（パソコン）からなる。サンプリング周波数は 16 (kHz)、測定対象周波数帯は 100 (Hz) から 4,500 (Hz)、音圧レベルは 20 (dB) から 110 (dB)、A/D 変換は、多チャンネル A/D カードを使用している。無機ELディスプレイの有効表示部は 108 (mm) × 230 (mm)、表示色はアンバー 4 階調、輝度は 150 (cd)、ドットピッチは 0.9 (mm) × 0.9 (mm) である。マイクロホン群は、小型マイクロホンを採用したことに加え、マイクロホン間隔も従来型が 35 (mm) であったのに対し、2 (mm) に改良した。これにより小型軽量化を実現した。

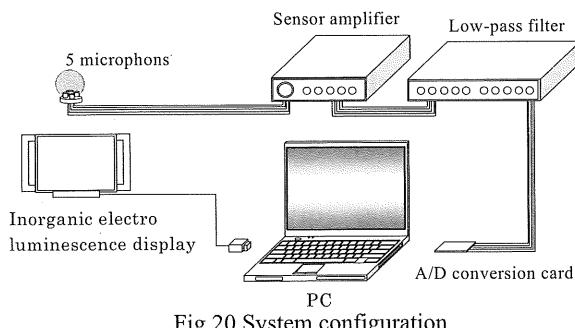


Fig.20 System configuration

従来の音カメラは、水平 360° 方向の発生音をマイクロホン群により捉え、デジタルカメラの画角に合わせ画面表示を行っており、音情報と画像の合成範囲は、デジタルカメラの画角に合わせ画面表示を行っている。一方、音メガネの測定範囲（表示可能範囲）は、測定者がディスプレイ越しに視認でき

る範囲内の音情報のみとし、ディスプレイを持って、音を探すという使用方法になる。

音メガネは、反射の影響を受けやすい場所や設備を構成している部位が多い場合での測定を前提としており、対象設備に本ディスプレイを近接させて音を「見る」ことで異常音を探査する。状態監視において特異な周波数もしくは音圧レベルを把握できれば、画面設定を行うことで対象の音だけが表示されるため、より異常部位を特定しやすくなる。

## 8. おわりに

設備の異常を早期に発見するため、平成 11 年より音の発生状況を可視化する装置「音カメラ」の開発を行い、平成 13 年に初号機を開発した。その後、実際の設備を対象として異常音探査を積み重ね、低周波音探査装置や振動探査装置の機器開発も行ってきた。現在では火力設備、水力設備、変電設備、送電設備など多くの設備の異常音探査を行っている。

適用範囲を広げるため、更なる小型軽量化、測定範囲（周波数帯域）の拡大、測定精度の向上など異なる改良が求められている。

今後も、設備保守のニーズを把握しながら技術開発をすすめ、電力の安定供給に貢献できるよう努めていきたい。

## 参考文献

- [1] 上明戸昇, 山下恭弘, 財満健史, 大脇雅直, 杉山 武: 画像情報を組み合わせた音源方向推定システムの開発—野外実験による方向推定精度の検討—, 日本音響学会講演論文集, p689-690, 2001 年 3 月
- [2] 大脇雅直, 財満健史, 上明戸昇, 野上英和, 山下恭弘, 杉山 武, 和田浩之: 音源探査システムを利用した遮音効果の可視化への適用, 日本音響学会建築音響研究会資料, AA2001-25, 2001 年 8 月
- [3] 野上英和, 上明戸昇, 山下恭弘, 大脇雅直, 財満健史, 杉山 武, 和田浩之: 音情報と画像を組み込んだ音源探査システムの開発—移動音源への適用—, 日本音響学会講演論文集, p843-844, 2002 年 3 月
- [4] 上明戸昇, 野上英和, 富永大祐, 山下恭弘, 財満健史, 大脇雅直, 杉山 武, 和田浩之: 画像に音情報を組み込んだ音源探査システムの開発—反射影響の低減に関する検討—, 日本建築学会計画系論文集, 第 564 号, p1-7, 2003 年 2 月
- [5] 富永大祐, 野上英和, 山下恭弘, 財満健史, 大脇雅直, 杉山 武, 和田浩之: 音情報と画像を組み込んだ音源探査システムの開発—パッシブ制御による反射影響の低減に関する検討—, 日本音響学会講演論文集, p889-890, 2003 年 3 月