

# 電波源位置特定システムの構築に関する検討

加藤 崇<sup>\*1</sup>

Keywords : location of leak, visualization technique, direction of arrival, electromagnetic shielding

位置推定, 可視化技術, 到来方向推定, 電磁シールド

## 1. はじめに

電磁シールド工事の漏えい検査において、漏えいに起因する不良箇所を短時間で特定することは非常に困難である。従来は、図-1に示す小型アンテナを利用して、電磁シールド材料をなぞるように測定し、漏えい位置を特定していた。この手法は、電化製品のような評価する範囲が小規模の場合には有効であるが、建築のように大規模な場合には、膨大な測定時間を要するため非現実的であった。しかし、これまで他の有効な特定手法が提案されていないため、この手法を適用する以外に方法がなかった。漏えい位置の特定は、数日を要する場合もあり、運と経験に頼らざるを得ない状況であった。また、検査中は、他の施工ができないため、検査期間が長引くと全体の工期にも影響を及ぼす。そのため、短時間に電波の漏えい位置を評価できるシステムが望まれており、電波源の位置を短時間に特定できるシステムの開発を進めている。第40号<sup>1)</sup>では基礎原理について紹介した。本稿では、基礎検討を踏まえ、現場でも評価可能な可搬型システムを構築する上で検討した内容について紹介する。



図-1 従来の漏えい位置の特定方法

Fig.1 Traditional determining method of the leak location

\*1 技術センター建築技術開発部ニューフロンティア技術開発室

## 2. システム構築に向けた基礎検討

漏えい電波の到来方向を推定するためには、複数の位置で漏えい電波を測定する必要がある。これまでの検討では、1つのアンテナを機械式ポジショナを利用して移動させていた。しかし、現場で漏えい位置を評価する場合、機械式のポジショナでは、装置が大掛かりとなり非現実的である。そこで、本検討では、予めアンテナを配置するアーレアンテナで検討する。

### 2.1 アンテナの形状

本システムでは、到来方向の推定結果とカメラで取得した画像とを合成して電波源の位置を特定する。その際、図-2に示すように、アーレアンテナの中央とカメラの基準点とが同一である必要がある。この点が異なると画像の角度情報と到来方向の角度情報に誤差が生じ、電波源の位置を正確に特定することができない。

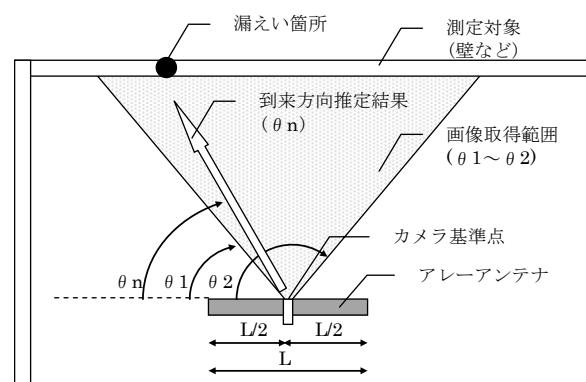


図-2 取得画像と推定結果の関係

Fig.2 An image and relations with the estimated result

アンテナを設計する上で、アンテナのエレメントに厚みがあると、正確に基準点(電波を受信している点)を定義できないため、推定結果に誤差が生じることはこれまでの検討により明らかとなっている<sup>2)</sup>。この影

響を低減するにはできるだけ薄いエレメント形状のアンテナを選択する必要がある。一方、MUSICアルゴリズム<sup>3)</sup>では、アンテナのエレメント間隔(d)と測定周波数の波長( $\lambda$ )の関係に制限があり  $d < 0.5\lambda$  を満足させる必要がある。アンテナの背後には装置類を設置することを予定しているため、アレーインテナ背後からの電波を受信しないように指向性を検討する必要がある。

以上を考慮した上で、本システムでは、厚み 1.6mm のガラスエポキシ基板を用いたパッチアンテナを採用した。設計では、FDTD 法を用いてエレメントの大きさ等を決定した。2.45GHz 用に設計したアンテナ形状を図-3 に示す。エレメント長は  $0.24\lambda$  となっており、アレー化した場合においても  $d < 0.5\lambda$  という条件を満足でき、また、隣接のエレメントとは接触しない。製作したパッチアンテナの周波数特性を図-4 に示す。横軸は周波数を、縦軸は VSWR(Voltage Standing Wave Ratio)を表している。VSWR は、アンテナに入力した電圧と反射して戻ってくる電圧の比から求められ、 $VSWR=1.0$  が最もアンテナとして感度が良く、入力した電圧が全て放射していることを表している。本システムでは、無線通信で代表される周波数を始め、シールド検査で採用される周波数帯を中心にパッチアンテナを構築していた。2.45GHz 用のアンテナでは  $VSWR=1.21$ 、3GHz 用アンテナでは  $VSWR=1.19$  となっており、高感度なアンテナとなっている。ただし、パッチアンテナは使用できる周波数範囲が狭いと言われており、VSWR が 5 以下を使用できる帯域と定義した場合、周波数範囲は 55MHz(2.45GHz)、70MHz(3GHz)となる。しかし、MUSIC アルゴリズムを適用する際、エレメント間隔を  $0.5\lambda$  程度に設定することが好ましく、広帯域化しても、推定精度が劣化するため、狭帯域アンテナを周波数ごとに用意する。

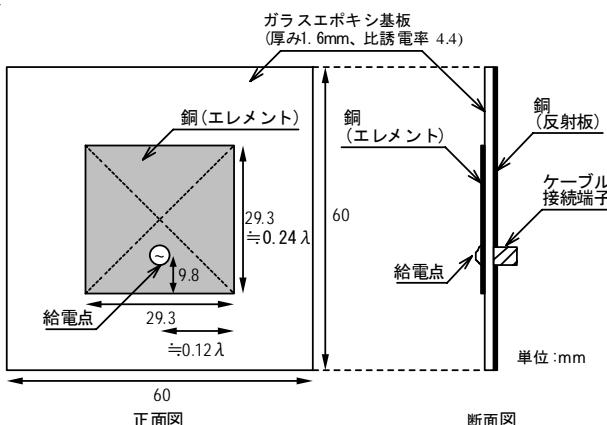


図-3 パッチアンテナ(2.45GHz)

Fig.3 Patch antenna

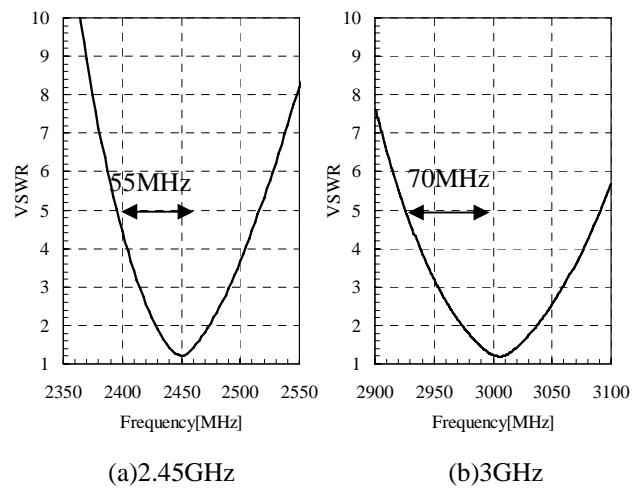


図-4 周波数特性

Fig.4 Frequency characteristic

## 2.2 単一アンテナとアレーインテナとの比較検証

アンテナをアレー化することにより、隣のエレメントが近いことによる影響(素子間相互結合)が懸念される。そこで、図-5 に示す単一アンテナ(図中左)とアレーインテナ(図中右)との差異について比較検証する。アンテナ形状は同一である。アレーインテナは従来の検討結果より  $4 \times 4$  になるようにエレメントを配置し、アンテナの中央部には画像取得用のカメラ開口を設けている。

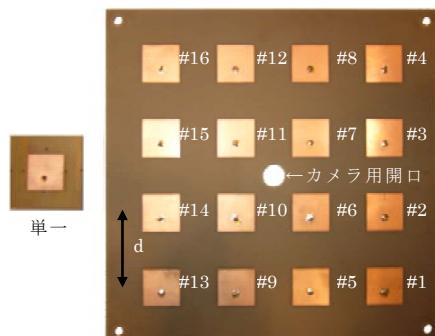


図-5 単一アンテナとアレーインテナ

Fig.5 Single antenna and array antenna

まずは、それぞれのアンテナの指向性について評価する。図-6 は、単一アンテナおよびアレーインテナの右上側(エレメント番号#3,#4,#7,#8)のそれぞれの指向性の結果である。なお、受信レベルは最大値で正規化している。この結果より、カメラで取得できる画角(-30deg ~ +30deg)の範囲において、単一アンテナとアレーインテナとの差は、1dB 以内である結果が得られ、指向性についてはアレー化したことによる影響は少ないと考えられる。なお、アンテナの背後に設けている銅

箔(反射板)により、アンテナ背後からの電波を受信していないことも確認できる。これによりアンテナ背後に機器類が存在しても測定値には殆ど影響されないことが示された。

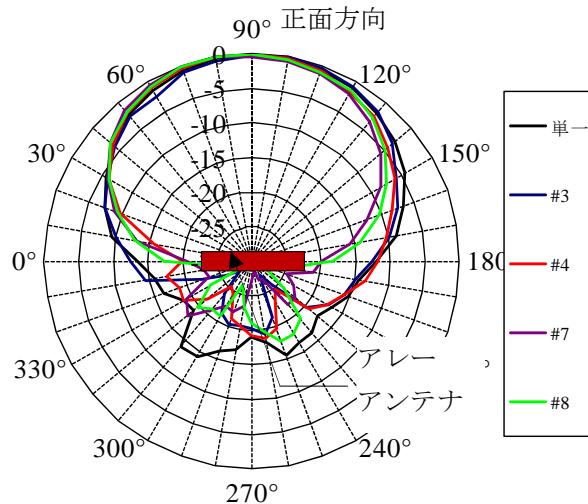


図-6 アンテナ指向性  
Fig.6 Antenna directivity

### 2.3 電界強度に関する検討

高性能な電磁シールドの漏えい位置を評価する場合、微弱な漏えい電波を用いて評価できる必要がある。そこで、本システムで推定することが可能な最低の電界強度を求める。電波源は、アレーアンテナの正面方向( $\theta = 90\text{deg}$ )に設置し、電界強度を変化させて位相を測定した。理論値(cal)と測定値を比較した結果を図-7に示す。横軸はアレーアンテナのエレメント数、縦軸は受信された位相である。この結果より、電界強度が 20, 25dB $\mu$ V/m の測定値は、理論値と比較すると、大きく異なることがわかる。一方、35dB $\mu$ V/m 以上の条件では、ほぼ理論値と同一の測定結果が得られ、S/N 比が大きく測定結果に寄与していることがわかる。

次に、この測定値を用いて到来方向を推定した結果を図-8に示す。横軸が角度、縦軸が MUSIC スペクトラムである。なお、MUSIC スペクトラムは最大値で正規化し、推定した到来方向の角度にピーカーが得られる。ピーカーの位置は、全条件とも正確に設置方向( $\theta = 90\text{deg}$ )を推定しているが、電界強度が 20, 25dB $\mu$ V/m の条件では理論値と比較した位相差が大きいため、ピーカーが鈍化している。一方、電界強度が 30dB $\mu$ V/m 以上の条件では、理論値との差が小さいためピーカーが鋭くなる結果が得られ、本システムでは 30dB $\mu$ V/m 以上であれば正確に位置を特定できることが明確となった。

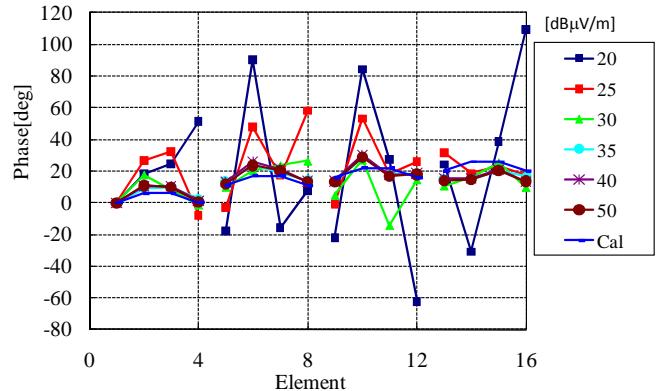


図-7 受信位相

Fig.7 Received phase

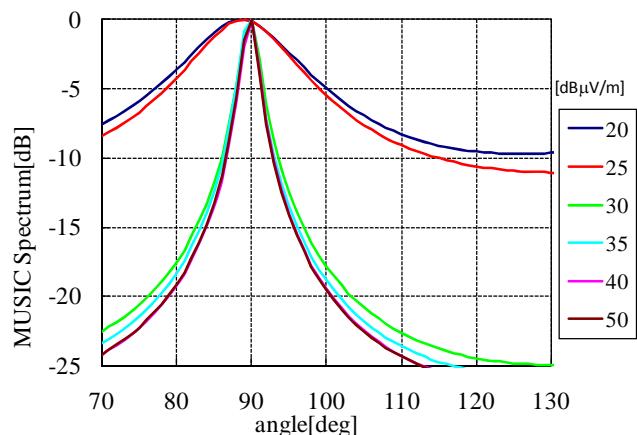


図-8 到来方向推定結果

Fig.8 Estimated result of direction of arrival

### 3. 電波源位置特定システム

構築した電波源位置特定システムを図-9に示す。現場での評価を想定し、横幅は 900mm 弱で移動可能なタイプとした。また、測定時間は、#2～#16 のエレメントをスイッチで切り替えていたため 6sec 程度、到来方向推定と画像合成に 10sec 程度それぞれ要し、本システムでは、合計 16sec 程度で電波源の位置を特定でき、目的である短時間化を実現できている。本システムの電波源の位置特定手法の流れを図-10に示す。まず、アレーアンテナの中央部に設置したカメラを用いて評価範囲となる画像を取得する(図中 a)。次に、MUSIC アルゴリズムを用いて電波の到来方向を推定する(図中 b)。到来方向の推定結果のみでは、角度しか把握することができない。そこで、取得画像と推定結果とを角度情報にそれぞれ変換し、同一の角度どうしで合成することにより、電波源の位置を特定する(図中 c)。

図-11に電磁シールド窓から漏えいする位置を特

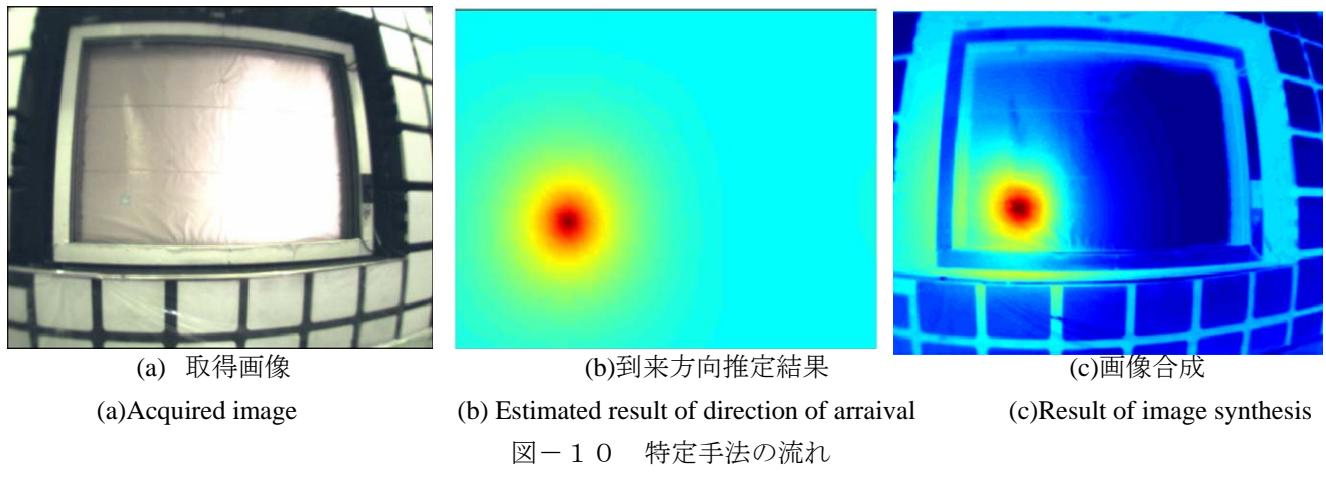


図-10 特定手法の流れ

Fig.10 Flow of determining method

定した結果を示す。この結果から明らかなように、電波源の位置を可視化して特定することにより、漏えい部分を容易に対策することができる。



図-9 電波源位置特定システム

Fig.9 System of determining the source locations

Fig.11 Specific result

#### 4. まとめ

電磁シールドルームからの漏えい位置を短時間で特定できる電波源位置特定システムを構築した。従来は、漏えい位置を評価するために時間を要していたが、本システムを用いることにより、16sec程度で特定が可能となった。これにより、漏えい位置の評価時間を大幅に短縮でき、工事全体の工程短縮にも繋がることが期待される。さらに、本システムは、漏えい位置の評価を目的として構築されたが、その他の放射源の位置の特定や無線通信で問題となる周囲からの反射位置の特定にも展開が可能である。今後、ICTの普及に伴い電磁環境を考慮する場面は多くなることが想定され、当システムが電磁環境の総合評価システムとして広まることを期待する。

#### 参考文献

- 1) 加藤：電波源位置特定システムの開発，大成建設技術センター報，Vol. 40, pp. 34, 2007.
- 2) 加藤：広帯域アンテナを用いた電波源位置推定手法の検討，日本建築学会学術講演梗概集, pp. 559, 2007
- 3) R.O.Schmit, IEEE Trans. Antenna Propag., vol.34,no.3, March, 1986.

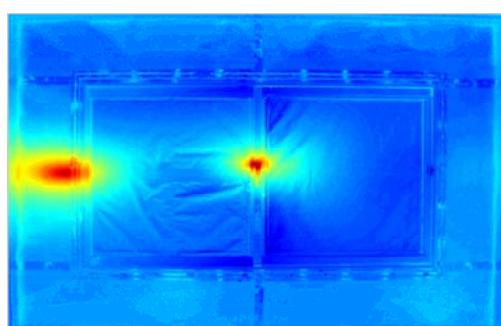


図-11 特定結果