

# 電力機器設備絶縁劣化診断のための 電磁波センシングシステムの開発

川田 昌武<sup>1</sup>

## Development of Remote Sensing System using Electromagnetic Waves for Insulation Diagnosis of Electric Power Apparatus and Facilities

by  
Masatake KAWADA

Partial discharge (PD) is a symptom of the insulation degradation of the electric power apparatus and facilities. In this study a new method was developed for finding the direction of arrival (DOA) of the electromagnetic waves emitted from PD using Bayesian Network. The time delay between two antennas computed from digital data generally has error because of the effect of sampling time. Therefore the angle of arrival estimated from the time delay also has the estimation error. The probabilistic method of reasoning with uncertain information was investigated. This method provides the probabilities of each angle based on Bayes' Theorem. The proposed method is able to estimate the angle of arrival of the electromagnetic waves.

**Keywords** : Bayesian Networks, Partial Discharge, Radio Sensing, Electric Power Apparatus and Facilities

### 1. まえがき

電力機器・設備の絶縁材料の劣化に伴って生じる部分放電(Partial Discharge:PD)は、広帯域電磁波を放射すると報告されており、電磁波センシング技術による電力機器・設備の絶縁診断技術が重要となっている<sup>(1)</sup>。また、ガス絶縁開閉装置(Gas Insulated Switchgear:GIS)や配電線碍子、発電機固定子巻線等におけるPDによる絶縁診断技術が報告されている<sup>(1)-(8)</sup>。

絶縁破壊を未然に予知するにはPD発生位置の標定を行うことが有用であり、そのためには電磁波到来方向の特定が必要である。PDによる放射電磁波の到来方向特定に複数アンテナへの到達時間差を利用する場合、デジタルデータから到達時間差を求めると、サンプリング時間刻みの時間差より到来角を推定することになり、推定誤差が生じる。

例えば、サンプリング周波数500MHzでは、サンプリング時間が2nsとなり、到達時間差は2ns刻みで求まる。すなわち、推定誤差の範囲としては、 $\pm 1ns$ となる<sup>(6)</sup>。

そこで、本研究では確率的にPDによる放射電磁波の到来角特定を行う方法として、ベイジアンネットワークを用いた電磁波到来角の確率分布を推定する手法を提案し、シミュレーションと実験によりその有効性を検討する。

### 2. 電磁波到来角の確率的推定

2.1 到達時間差 2つのアンテナで受信したデジタル信号を $ch1(n)$ 、 $ch2(n)$ とすると信号モデルは次式で表すことができる。

$$ch1(n) = s(n) + n_1(n) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (1)$$

$$ch2(n) = \alpha s(n+D) + n_2(n) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (2)$$

ただし、 $s(n)$ は信号源からの信号、 $n_1(n)$ 、 $n_2(n)$ は雑音信号であり、 $s(n)$ とは無相関とする。ここで、 $n=0,1,2,\dots,N-1$ である。また、 $\alpha$ は減衰、 $D$ は遅延を表す定数であり、サンプリング時間 $T_s$ を用いて受信信号の到達時間差を $D \times T_s$  [s]で表す<sup>(9)</sup>。従って、 $D$ を求めることにより到達時間差の計算が可能となる。 $D$ を求める最も標準的な方法は相互相関法で

1 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部  
Socio Techno Science  
Graduate School of Engineering,  
The University of Tokushima  
連絡先：〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1

表 1 条件付き確率表

Table 1. Conditional probability table.

$P(y_1 x_1)$	$P(y_2 x_1)$	...	$P(y_n x_1)$
$P(y_1 x_2)$	$P(y_2 x_2)$	...	$P(y_n x_2)$
⋮	⋮		⋮
$P(y_1 x_m)$	$P(y_2 x_m)$	...	$P(y_n x_m)$

Node  $Y=\{y_1,y_2,\dots,y_n\}$ , all of its parents  $X=\{x_1,x_2,\dots,x_m\}$ .

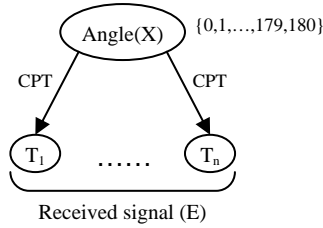


図 1 ベイジアンネットワーク  
Fig. 1. Bayesian Network.

あるが、受信信号の到達時間差がサンプリング時間  $T_s$  の整数倍の到達時間差であれば良いが、その他の場合では推定誤差が生じる。

そこで、本研究ではこの誤差を減じる方法として、以下で説明するベイジアンネットワークを用いた確率的手法を提案する。なお、文献(6)では、標準的な相互相関法 (Standard Cross Correlation Method :SCC) とコヒーレンスによる重み付け方法 (Smooth Coherence Transform :SCOT) により到達時間差を求めている。よって、本研究の到来角の算出手法とは異なるとともに、到達時間差の分解能においても異なる。また、文献(7)では、相互相関法により求めた到達時間差に 20 次の多項式をあてはめ、精度を向上させているが、本研究とは原理的に異なる。

2.2 ベイジアンネットワーク 一般に不確実性を含む問題を体系的に扱うためには、確率変数を用いることができる。ベイジアンネットワーク<sup>(10)</sup>は確率変数の相関や依存関係をグラフ構造で表現したグラフィカルモデルの一種であり、移動ロボットの行動決定問題<sup>(11)(12)</sup>、プリンタの障害診断<sup>(13)</sup>など、幅広く応用されている。ベイジアンネットワークでは事象をノードとして表現し、事象間の依存関係を向きの付いたリンク (有向リンク) と条件付き確率で表すことにより問題領域をモデル化する。各事象には確率変数が与えられ、事象が取り得る各状態の可能性を表す。また事象の状態が離散値と対応するとき、事象間の依存関係を表 1 に示すような条件付き確率表 (Conditional Probability Table :CPT) で表す。

2.3 電磁波到来角推定への適用 電磁波の到来角推定に適用する場合、サンプリング時間毎の各時刻における

受信信号の電圧値の組合せを証拠  $E$  とし、到来角  $X$  を推論の対象とする。到来角推定に用いるベイジアンネットワークの例を図 1 に示す。ネットワークを構成する際には事前確率  $P(X)$  と CPT (到来角が  $X$  であるとき受信信号の状態が  $Y$  となる条件付き確率  $P(Y|X)$ ) を求めておき、到来角を推定する場合は、受信信号の電圧値の組合せ  $P(E)$  から到来角の確信度  $P(X|E)$  を計算する。

### 3. システム構成

3.1 仕様 本システムでは、半波長ダイポールアンテナ (アンリツ社製, MP534B, 周波数範囲 25-520MHz 可変) を使用し、アンテナ間距離を 1m とした。受信したアナログ信号はデジタルオシロスコープ (SONY Tektronix 社製, TDS7054 型, 周波数帯域 500MHz, 最高サンプルレート 2.5Gs/s, 垂直分解能 8bit) により A/D 変換し、デジタルデータを取得する。なお、サンプリングレートは 2.5GHz (サンプリング時間  $T_s=0.4ns$ ) とした<sup>(1)</sup>。

3.2 アンテナ配置による相互結合 本システムでは半波長ダイポールアンテナを 2 本並列に配置していることから、両アンテナ間の相互結合の影響を検討した。2 本の半波長ダイポールアンテナの開放端子電圧  $V_1, V_2$ , 誘導される電流  $I_1, I_2$  は、

$$V_1 = Z_{11} I_1 + Z_{12} I_2 \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$V_2 = Z_{21} I_1 + Z_{22} I_2 \quad \dots \dots \dots (4)$$

と表すことができる<sup>(14)</sup>。ここで  $Z_{11}, Z_{22}$  は各アンテナの自己インピーダンスであり、 $Z_{12}, Z_{21}$  は相互インピーダンスである。なお、同じアンテナを使用していることから、次式が成立する。

$$Z_{11} = Z_{22} \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$Z_{21} = Z_{12} \quad \dots \dots \dots (6)$$

2 本のアンテナ間の相互インピーダンスは起電力法により計算することができ、相互インピーダンス  $Z_{21} (=Z_{12})$  の相互抵抗  $R_{21} (=R_{12})$ , 相互リアクタンス  $X_{21} (=X_{12})$  は、次式により求まる。

$$Z_{21} = R_{21} + jX_{21} \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$R_{21} \approx 30 \left[ 2Ci(kd) - Ci \left\{ \sqrt{(kd)^2 + \pi^2} + \pi^2 \right\} - Ci \left\{ \sqrt{(kd)^2 + \pi^2} - \pi^2 \right\} \right] \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$X_{21} \approx -30 \left[ 2Si(kd) - Si \left\{ \sqrt{(kd)^2 + \pi^2} + \pi^2 \right\} - Si \left\{ \sqrt{(kd)^2 + \pi^2} - \pi^2 \right\} \right] \quad \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 $Ci(x)$  は余弦積分、 $Si(x)$  は正弦積分であり、次式で表される。

$$Ci(x) = - \int_x^\infty \frac{\cos \xi}{\xi} d\xi \quad \dots \dots \dots (10)$$

$$Si(x) = \int_0^x \frac{\sin \xi}{\xi} d\xi \quad \dots \dots \dots (11)$$

本システムでは、アンテナ素子長を周波数 500MHz に対応する半波長 0.3m としたことから 相互インピーダンス  $Z_{21}$  ( $=Z_{12}$ ) は

$$Z_{21} = R_{21} + jX_{21} = -11.33 - j4.66 [ \ ] \dots \dots \dots (12)$$

と求まる。

なお、自己インピーダンス  $Z_{11}$  ( $=Z_{22}$ ) は、

$$Z_{11} = R_{11} + jX_{11} = 73.08 + j42.52 [ \ ] \dots \dots \dots (13)$$

である。但し、実験時にはアンテナのリアクタンス成分を  $X=0$  とするために、アンテナ素子長を半波長より数%短くした<sup>(1)</sup>。

以上より、自己インピーダンス  $Z_{11}$  ( $=Z_{22}$ ) が相互インピーダンス  $Z_{21}$  ( $=Z_{12}$ ) より大きな値となり、開放端子電圧への関与が大きいことが分かる。

しかしながら、相互インピーダンス  $Z_{21}$  ( $=Z_{12}$ ) が存在することから、本システムでは上記の相互結合の影響を考慮して、2本のアンテナ受信信号のうち、先に閾値を超えた時間から 10 ポイントのみのデータ、つまり 時間幅 4ns(0.4ns × 10point)のデータを用いて方位を決定することとした。

電磁波のアンテナ間到達時間が 3.33ns(1/(3 × 10<sup>8</sup>m/s))であることから、相互結合の影響は最後の 1,2 ポイント部分に生じる可能性がある。これは角度で 0 ~ 16°, 164 ~ 180° の範囲に相当する。このように解析ポイント数を 10 ポイントとすることで、相互結合の影響をベースライン付近の到来角のみに抑えている。

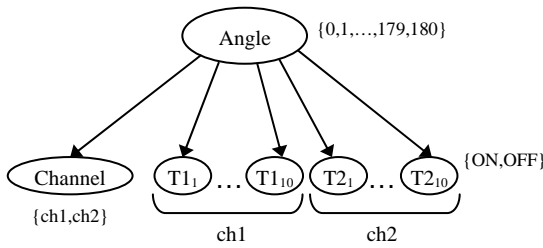


図2 ベイジアンネットの構成  
Fig. 2. Configuration of Bayesian Network.

表2 標準偏差:

Table 2. Standard deviation.

Angle[deg]	0 ~ 40	41 ~ 60	61 ~ 120	121 ~ 140	141 ~ 180
[deg]	0.2	0.18	0.16	0.18	0.2

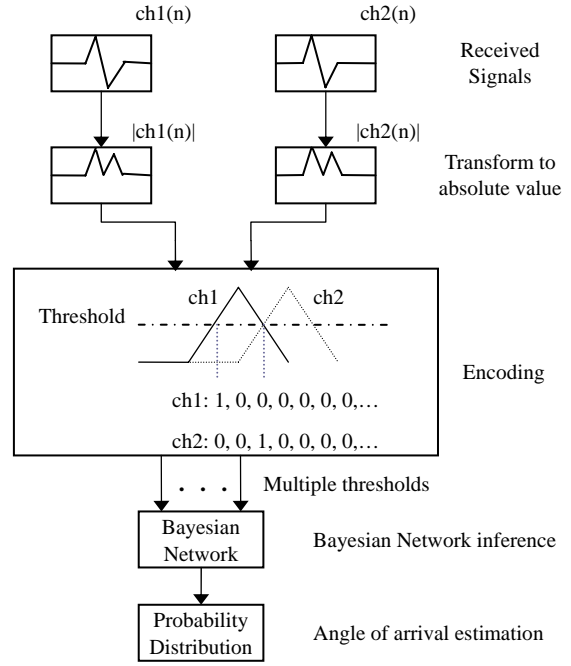


図3 推定手順  
Fig. 3. Estimation procedure.

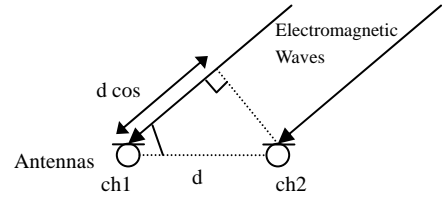


図4 アンテナ配置  
Fig. 4. Antennas setting location.

3.3 ベイジアンネットの構成 本システムで用いるベイジアンネットの構成を図2に推定手順を図3に示す。電磁波到来角の推定を行うため、各時刻における両アンテナの受信信号の状態を表すノード (T1<sub>n</sub>, T2<sub>n</sub>) を図2に示すように用意する。ノードへの受信信号の入力は図3に示すように絶対値で行い、両アンテナで受信した信号のどちらか一方でも閾値を超えた時刻から開始する。ノードの状態は{ON, OFF}の2値であり、入力開始から最初に受信信号が閾値を超えた時刻に“ON”，それ以外は“OFF”とする。ノード数はアンテナ間距離を考慮して両チャンネルともに10とし4ns(0.4ns × 10 point)の間、信号を入力する。これらのノードにより、両チャンネルにおける受信信号の到達時間差を表す。次に、最初に閾値を超えたチャンネルを表すノード (Channel) を用意し、{ch1, ch2}の2状態を持たせる。た

表3 条件付き確率表：P(T1<sub>3</sub>|Angle) (ch1, node:T1<sub>3</sub>)

Table 3. Conditional probability table: P(T1<sub>3</sub>|Angle) (ch1, node:T1<sub>3</sub>).

Angle[deg]	0	1	...	68	69	70	71	72	73	74	75	76
T1 <sub>3</sub> (on)	0	0	...	0	0.04396	0.10078	0.20888	0.38470	0.59804	0.78055	0.89519	0.91885
T1 <sub>3</sub> (off)	1	1	...	1	0.95604	0.89922	0.79112	0.61530	0.40196	0.21945	0.10481	0.08115
Angle[deg]	77	78	79	80	81	82	83	84	85	...	179	180
T1 <sub>3</sub> (on)	0.91223	0.81057	0.63714	0.41804	0.22664	0.10656	0.04450	0	0	...	0	0
T1 <sub>3</sub> (off)	0.08777	0.18943	0.36286	0.58196	0.77336	0.89344	0.95550	1	1	...	1	1

T1<sub>3</sub> means the time delay is Ts(Sampling time) × (3-1) at ch1.

表4 条件付き確率表：P(T1<sub>4</sub>|Angle) (ch1, node:T1<sub>4</sub>)

Table 4. Conditional probability table: P(T1<sub>4</sub>|Angle) (ch1, node:T1<sub>4</sub>).

Angle[deg]	0	1	...	59	60	61	62	63	64	65	66	67
T1 <sub>4</sub> (on)	0	0	...	0	0.03022	0.03136	0.06903	0.14550	0.27751	0.46596	0.66615	0.82119
T1 <sub>4</sub> (off)	1	1	...	1	0.96978	0.96864	0.93097	0.85450	0.72249	0.53404	0.33386	0.17881
Angle[deg]	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	...	180
T1 <sub>4</sub> (on)	0.91406	0.91896	0.89922	0.79112	0.61530	0.40196	0.21945	0.10481	0.04462	0	...	0
T1 <sub>4</sub> (off)	0.08594	0.08104	0.10078	0.20888	0.38470	0.59804	0.78055	0.89519	0.95538	1	...	1

T1<sub>4</sub> means the time delay is Ts(Sampling time) × (4-1) at ch1.

だし、受信信号が同時刻に閾値を超えた場合はこのノードへの入力を行わない。ノード T1<sub>n</sub>, T2<sub>n</sub> のみでも到来角の確率分布を求めることは可能であるが、ノード Channel を導入することでより明確な分布を得ることができる。到来角を表すノード (Angle) については 0 ~ 180° の整数として {0,1,...,179,180} の 181 状態を用意し、1° 単位で到来角を推定する。

図2において Angle 以外の全ての観測可能なノードの値が確定したとき、本システムにおいて求めたい確率は

$$P(\text{Angle}/T1_1, T1_2, \dots, T1_{10}, T2_1, T2_2, \dots, T2_{10}, \text{Channel}) = P(X/E) \dots \dots \dots (14)$$

と表される。左辺の記号は図2に対応する。

Angle がとる値 X の確率はベイズの定理<sup>(15)</sup>より

$$P(X|E) = P(E|X)P(X) / \sum_x P(E|X)P(X) \dots (15)$$

で計算することができる。ただし、P(X)は到来角の事前確率である。また、P(E|X)は値が確定したノードの条件付き確率の組合せであり、CPT を参照することで次式により求めることができる。

$$P(E|X) = P(\text{Channel}|X) \prod_n P(T1_n|X) \prod_m P(T2_m|X) \dots \dots \dots (16)$$

なお、複数のノードが階層構造を持つ一般的なベイジアンネットワーク上における確率計算は文献(10)を参照されたい。

3.4 到来角の推定 実際の現場におけるの電力機

器・設備診断では、対象である PD がどの程度の状態であるか、また、どの程度のレベルの電磁波が放射しているのかという情報は、計測して初めて知り得るため、事前に得ることができない。そこで、本研究では電磁波到来角の推定において、受信電圧の閾値を複数設定し、それぞれの閾値について確率が最大となる到来角を推定した。推定した到来角は次式により重み付き平均値を求め、最終的な推定値とする。

$$Y = \sum_i y_i P_i(y_i) / \sum_i P_i(y_i) \dots \dots \dots (17)$$

- Y : 到来角の重み付き平均値
- i : 閾値を区別するための番号
- y<sub>i</sub> : 閾値 i で推定した到来角
- P<sub>i</sub>(y<sub>i</sub>) : 閾値 i における到来角 y<sub>i</sub> の確率

4. 電磁波到来角推定モデルの獲得

ベイジアンネットワークを構築するには CPT を求める必要がある。本研究では受信信号の到達時間差と到来角の関係式から、任意の到来角における到達時間差の分布を生成することで、条件付き確率を計算する。

図4において、アンテナ間距離を d [m]、電磁波到来角を [deg] とすると、両アンテナで受信した信号の到達時間差 [s] と到来角の関係は次式で表すことができる。

$$\tau = \frac{d \cos \theta}{c} \dots \dots \dots (18)$$

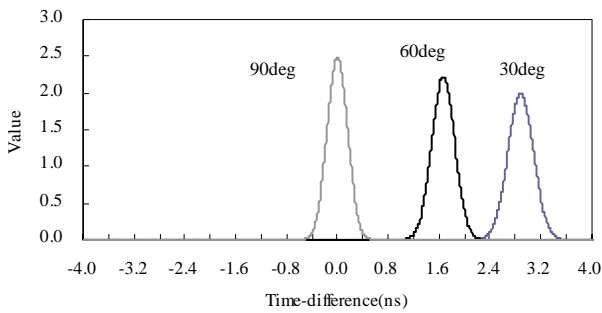


図5 時間差の分布 (ch1 - ch2)

Fig. 5. Distribution of time delay (ch1 - ch2)

ただし,  $c$  を光速 ( $=3 \times 10^8$  [m/s]) とする。

また, 到達時間差の誤差は平均を  $\mu$ , 分散を  $\sigma^2$  とすると,

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \dots \dots \dots (19)$$

で表されるガウス分布に従うものとし, 平均値  $\mu$  には(18)式により求めた到達時間差を用いる。例として, 到来角が  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  であるときの到達時間差の分布を図5に示す。なお, 本研究では各到来角について標準偏差を決定するため, 予め簡単な模擬波形 (10MHz 刻みで 10MHz から 500MHz の正弦波の合成波) による到来角推定 ( $0 \sim 90^\circ$ ) のシミュレーションを行い, 推定誤差が小さくなるような標準偏差を探索した。シミュレーションでは到来角  $10^\circ$  刻みでランダムに 300 パターンの標準偏差を生成し, その中で平均推定誤差が最も小さくなる組合せを求めた。本研究で用いた標準偏差の値を表2に示す。

次に, (19)式の  $\mu$  を(18)式の  $d \cos \theta / c$  で置換した後,

$$f(t, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(t - d \cos \theta / c)^2}{2\sigma^2}\right\} \dots \dots \dots (20)$$

とすると, 到来角が  $X$  であるとき受信信号の到達時間差が  $T$  となる条件付き確率  $P(T|X)$  は次式で表すことができる。

$$P(T|X) = \frac{f(T, X)}{\sum_T f(T, X)} \dots \dots \dots (21)$$

ただし,  $T$  はサンプリング時間  $T_s$  を用いて,  $T_s \times D$  ( $D$ : 整数) で表される離散値である。また,  $D$  の値域はサンプ

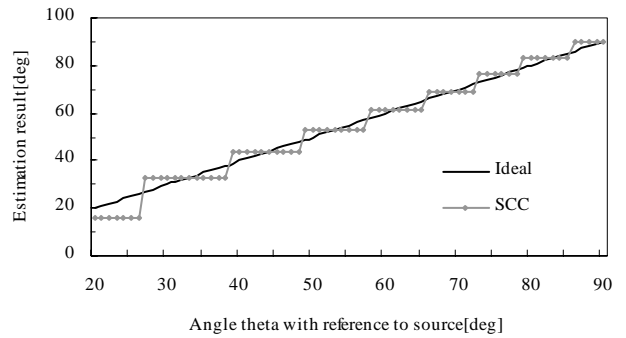


図6 到来角推定 (SCC)

Fig. 6. Angle of arrival estimation(SCC).

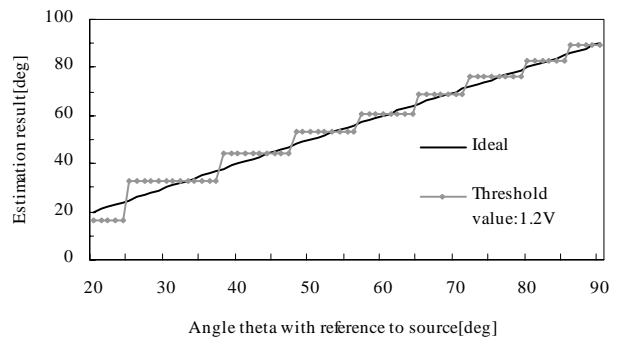


図7 到来角推定 (閾値: 1.2V)

Fig. 7. Angle of arrival estimation(Threshold value:1.2V).

リング時間  $T_s$  とアンテナ間距離  $d$  から  $d/(cT_s) |D|$  とする。(21)式を用いることで, 各時刻 (ノード) について到来角が  $X$  であるとき受信信号の状態が  $Y$  となる条件付き確率  $P(Y|X)$  を計算し, CPT を作成する。例として, ノード  $T_{13}, T_{14}$  における CPT を表3, 表4に示す。なお, CPT の計算では分布の過剰な広がり为了避免するため, (20)式の値が 0.05 以下の値は 0 とした。

また, 本研究では事前に放射電磁波の到来角 (放電源) に関する情報が与えられていないものと仮定し, 全ての到来角  $X$  (状態数 181) について事前確率を  $P(X)=1/181$  とする。

### 5. 推定精度の検討

一般的な従来の相互相関手法と提案手法についてシミュレーションによる到来角推定精度の比較を行った。(22)式に示す信号を用いて, 到来角  $20^\circ$  から  $90^\circ$  まで  $1^\circ$

刻みで時間差を両チャンネルに与えた信号を受信した場合について到来角の推定を行った。信号は 50MHz 刻みの 50MHz から 500MHz の正弦波 (sin) と余弦波 (cos) の合成波で構成されている。

$$ch1(n) = \sum_{m=1}^{10} \{0.15 \sin(2\pi \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot m \cdot n \cdot \Delta t) + 0.07 \cos(2\pi \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot m \cdot n \cdot \Delta t)\} \quad \dots(22a)$$

$$ch2(n) = \sum_{m=1}^{10} \{0.15 \sin(2\pi \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot m \cdot (n \cdot \Delta t + \tau)) + 0.07 \cos(2\pi \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot m \cdot (n \cdot \Delta t + \tau))\} \quad \dots(22b)$$

相互相関法 (SCC) により求めた到来角推定結果を図 6 に、ベイジアンネットの閾値を 1.2V に設定して推定した結果を図 7 に、ベイジアンネットの閾値を複数設定し、各閾値から得た推定値を(17)式により重み付き平均した結果 (提案手法) を図 8 に、SCC と提案手法の推定誤差を図 9 にそれぞれ示す。SCC による推定は信号の到達時間差を  $T_s \times D$  (D:整数) で算出した後、(18)式から到来角を求めた結果である。

図 6 より SCC では信号の到達時間差がサンプリング時間の整数倍と一致する角度 (16°, 33°, 44°, 53°, 61°, 69°, 76°, 83°, 90°) で推定値が理想値と重なるが、それ以外の角度では正確な時間差を求めることができないため、上記 9 通りの角度に近似して推定される。そのため、これら 9 通りの角度との差に比例して誤差が生じている。

図 7 はベイジアンネットに入力する信号の閾値を 1 つ (1.2V) に固定して解析を行い、最大確率を得る角度を求めた結果である。特定の閾値のみではサンプリング時間以下の時間差を捉えることができず、SCC による推定に類似した結果となった。

一方、図 8 が示すように提案手法による推定では SCC に比べて理想値に近づいており、高精度に到来角が求まっているのが分かる。

また、図 9 より提案手法では平均推定誤差が 1.06deg、最大推定誤差が 3.61deg であり、SCC では平均推定誤差が 2.66deg、最大推定誤差が 9.74deg であった。これらの結果から、提案手法では SCC よりも到来角推定について有効

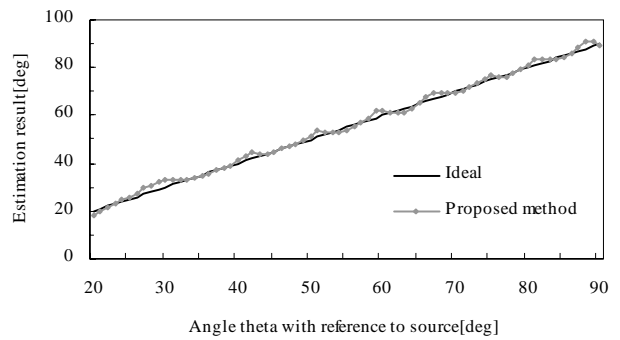


図 8 到来角推定 (提案手法)  
Fig. 8. Angle of arrival estimation(Proposed method).

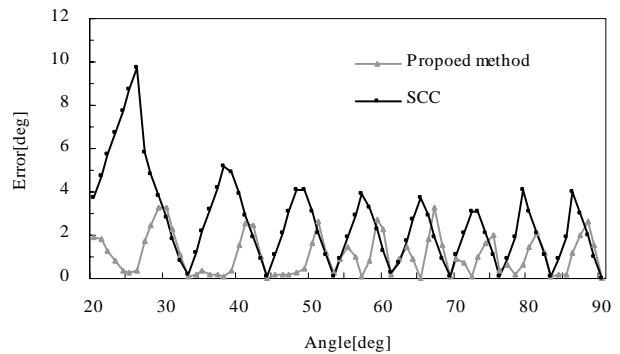


図 9 推定誤差  
Fig. 9. Estimation error.

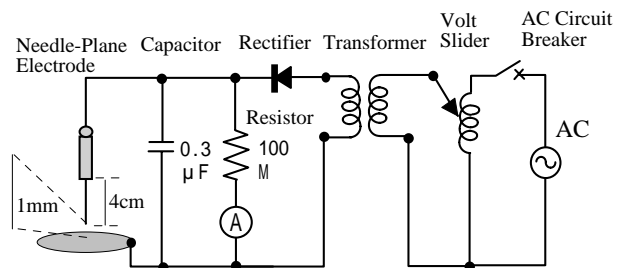


図 10 部分放電発生回路  
Fig. 10. The circuit of generating partial discharge.

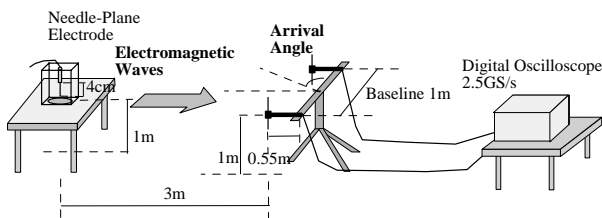


図 11 実験環境

Fig. 11. Experimental environment.

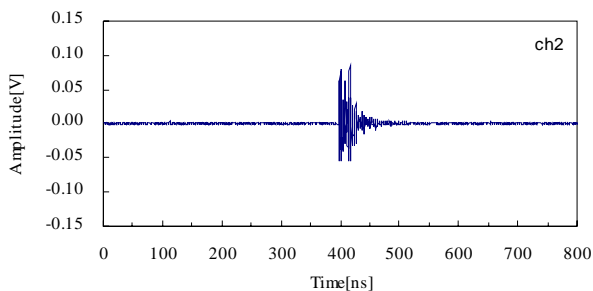
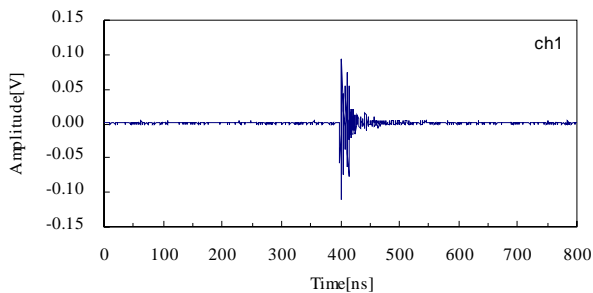


図 12 到来角 60 度の受信電磁波

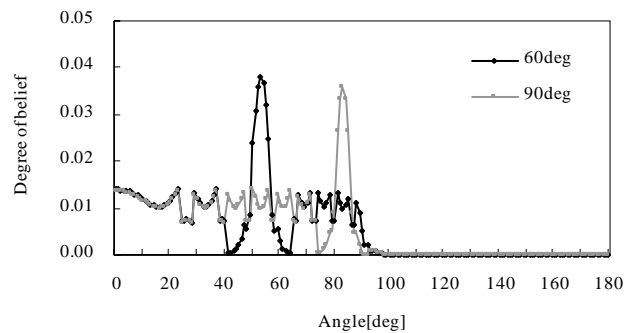
Fig. 12. The received electromagnetic waves at the arrival angle 60deg.

であることを確認した。

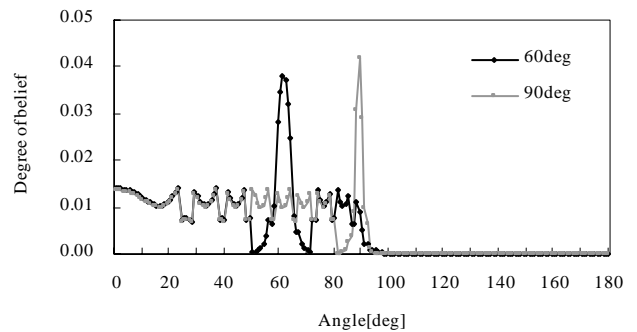
他の方法として文献(7)ではサンプリング時間  $T_s=1ns$  , アンテナ間距離 15cm の条件下において, 相互相関法により求めた到達時間差に 20 次の多項式をあてはめることで時間差を補間し, 到来角を 20deg という精度で推定しているが, 本研究では 1° 刻みで到来角の確率を算出するという点において異なる。

## 6. 放射電磁波到来角の推定

図 10 に示す回路中の針 - 平板電極間にて実際に PD を



(a) Threshold value: 0.01V



(b) Threshold value: 0.02V

図 13 到来角の推定結果 (確率分布)

Fig. 13. Inference results for the arrival angle.

発生させた。実験当日は, 気温 16 , 湿度 55% , 気圧 770mmHg であった<sup>(1)</sup>。

図 11 に示す実験環境において, 到来角 60° に配置した針 - 平板電極から放射された電磁波の受信結果を図 12 に示す<sup>(1)</sup>。本実験は屋内で行っており受信信号には放射電磁波の反射による影響も生じていると考えられる。

本システムにおける受信電圧の閾値の最小値を 0.005V に設定し, 信号の最大値まで等間隔で 100 種類の閾値を適用した。到来角 60° および 90° 方向からそれぞれ PD を発生させ, 受信した信号を基に各閾値より到来角を求めた。例として, 閾値 0.01V, 0.02V で推定した結果を図 13 に示す。同図より, 閾値が 0.01V のとき到来角 60° では 53° , 90° では 83° の確率が最大となった。同様に, 閾値が 0.02V のとき到来角 60° では 61deg , 90° では 89° が最大となった。このように各閾値から推定した到来角を (17)式により重み付き平均した結果, 推定角度は到来角

60deg では 59.8deg , 到来角 90deg では 83.3deg であった。

なお, 図 11 に示す実験環境では 2 つのアンテナの中点から放電源までの距離が 3m , アンテナ間隔が 1m であるので, 放射電磁波は図 4 のような平行波ではなく, 2 つのアンテナから見た到来角に差が生じていると考えられる。本実験の結果では, このような差をほぼ無視できる程度の推定誤差しか生じさせていないことが確認できる。また, 実験において放電源, アンテナを設置する際に生じる設置誤差を考慮すると, 本手法は高精度で到来角を推定できると考えられる。

## 7. おわりに

本研究ではベイジアンネットを用いることで確率的に放射電磁波の到来角を推定する方法を提案し, シミュレーションと実験によりその有効性を検討した。以下に本研究で得られた結果を述べる。

(1) シミュレーションによる模擬信号の到来角推定について本システムと相互相関法 (SCC) と比較した結果, 平均誤差は 1.06deg となり相互相関法(2.66deg)よりも高い精度で推定できることを確認した。

(2) 実験により, PD による放射電磁波の到来角推定が可能であることを確認した。

なお, 本手法により部分放電源の位置標定を行うためには, 本システムを 2ヶ所に配置し, 求めた 2 つの到来角から交点を計算する方法が考えられる。

謝辞 本研究は, 平成 16 年度徳島大学工学部研究プロジェクトとして実施致しましたことを付記し, 謝意を表します。

また, 本研究の一部は科学技術振興機構, 文部科学省科学研究補助金(若手研究(B) 16760230), 財団法人近畿地方発明センター等より助成頂きましたことを付記し, 謝意を表します。

## 文 献

- (1) M. Kawada : "Fundamental Study on Locating Partial Discharge Source using VHF-UHF Radio Interferometer System", T. IEE Japan, Vol.122-B, No.5, pp.629-636 (2002-5) (in Japanese)  
川田昌武:「VHF-UHF 帯電波干渉計システムによる部分放電源特定のための基礎研究」, 電学論 B, 122, 5, pp.629-636 (2002-5)
- (2) M. Hikita : "Future Trend of Discharge Measurement Technique for Diagnosis of Insulation Performance of Electric Power Apparatus", T. IEE Japan, Vol.121-B, No.6, pp.695-698 (2001-6) (in Japanese)  
匹田政幸:「電力機器の絶縁診断における部分放電測定技術の動向」, 電学論 B, 121, 6, pp.695-698 (2001-6)
- (3) H. Maekawa, M. Doi, and S. Kawamoto : "Identification for Sources of Partial Discharge in Gas Insulated Switchgears", T. IEE Japan, Vol.120-B, No.8/9, pp.1106-1111 (2000-8/9) (in Japanese)  
前川洋, 土井雅史, 川本俊治:「ガス絶縁開閉装置における部分放電源の同定」, 電学論 B, 120, 8/9, pp.1106-1111 (2000-8/9)
- (4) H. Tsutada, N. Nagata, M. Miyashita, M. Kamei, S. Inoue, K. Takashima, T. Usami : "Detection of Partial Discharge Using First Peak Height and Cumulative Wave Parameter of Internal Electromagnetic Wave in GIS", T. IEE Japan, Vol.120-B, No.3, pp.333-339 (2000-3) (in Japanese)  
鷹田広幸, 長田典子, 宮下信, 亀井光仁, 井上悟, 高嶋和夫, 宇佐美照夫:「GIS 内部電磁波の第一波高値と累積波形指標を用いた部分放電識別」, 電学論 B, 120, 3, pp.333-339 (2000-3)
- (5) Y. Suzuki, M. Kawada, Z. Kawasaki, K. Matsuura, M. Kawasaki : "Location of Partial Discharge by Superimposed Positioning Optimization on the Time Delay of Arrival", T. IEE Japan, Vol.118-B, No.2, pp.157-163 (1998-2) (in Japanese)  
鈴木雄一, 川田昌武, 河崎善一郎, 松浦慶士, 川崎誠:「位置標定における重畳最適化法を用いた部分放電源空間標定」, 電学論 B, 118, 2, pp.157-163 (1998-2)
- (6) Ampol Tungkanawanich, Zen-Ichiro Kawasaki, Kenji Matsuura : "Location of Multiple PD Sources on Distribution Lines by Measuring Emitted Pulse-Train Electromagnetic Waves", T. IEE Japan, Vol.120-B, No.11, pp.1431-1436 (2000-11)
- (7) Chye Huat Peck, Philip J. Moore: "A Direction-Finding Technique for Wide-Band Impulsive Noise Source", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol.43, No.2, pp.149-154 (2001-5)
- (8) H. Okubo : "Recent Research Activity and Future Trend of Electrical Insulation Diagnostic Technique for Electric Power Apparatus", T. IEE Japan, Vol.119-B, No.4, pp.434-437 (1999-4) (in Japanese)  
大久保仁:「電力機器の診断技術の現状と今後の課題」, 電学論 B, 119, 4, pp.434-437 (1999-4)
- (9) 金井浩:「音・振動のスペクトル解析」, pp.276-278, コロナ社 (1999)
- (10) Judea Pearl : "Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference", Morgan Kaufmann (1988)
- (11) Cassandra, A. R., et al.: "Acting under Uncertainty: Discrete Bayesian Models for Mobile-Robot Navigation", Proc. IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robotics and Systems, pp.963-972 (1996)
- (12) T. Inamura, M. Inaba, and H. Inoue : "Incremental Acquisition of Behavior Decision Model based on Interaction between Human and Robots", RSJ Journal, Vol.19, No.8, pp.983-990 (2001-11) (in Japanese)  
稲邑哲也, 稲葉雅幸, 井上博允:「ユーザとの対話に基づく段階的な行動決定モデルの獲得」, 日本ロボット学会誌, 19, 8, pp.983-990 (2001-11)
- (13) Jensen, F. V., et al.: "The SACSO methodology for troubleshooting complex systems", Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing (AIEDAM), Vol.15, pp.321-333 (2001)
- (14) 例えば, 虫明康人, 安達三郎:「基礎電波工学」, pp.57-76, 共立出版社, (1975-11)
- (15) Stuart J. Russell, Peter Norvig 著, 古川康一 監訳:「エージェントアプローチ 人工知能」, pp.428, 共立出版 (1997-12)