長間隔平行平板空気コンデンサの静電容量に対する シールドとダミー電極の効果について

正員 相知政司 (佐賀大)

正員 信太克規 (佐賀大)

正員 古川達也 (佐賀大)

Effect of Shielding and Dummy Plates for Electro Static Capacity of Air Capacitor with Long Distance Parallel Plates

Masashi Ohchi, Member, Katsunori Shida, Member, Tatsuya Furukawa, Member (Saga University)

We are investigating a non-invasive measurement method of the temperature in a head in terms of the temperature dependency of its permittivity. We have to get the method that an electro static capacity of capacitor with long distance is measured precisely. The capacitor is composed of a pair of the measurement plates mounted on a head. However the above approach is virtually very difficult because of the fringing of the electric fields at the extremities and the system shielding.

To realize the present research, we are now studying the measurement method of an air capacitor composed of a pair of small parallel plates and a pair of additional plates called dummy, where the distance between the small plates is long and the electric potential of each dummy electrode is equal to that of each measurement plate.

In this paper are described the effects of dummy plates and shielding, and is discussed a feasibility of non-invasive measurement method of the temperature in the head. The experiment resulted in that the capacitance value between the measurement plates of $0.01\text{ m} \times 0.01\text{ m}$ converged on constant value having no concern with a shielding and a fringe of plates when the length between the inner edge and the outer edge of the dummy plate amounted to about twice the distance between both measurement plates.

キーワード：静電容量，長間隔コンデンサ，ダミー電極，シールド

1. ま え が き

近年の医療機器の進歩は著しく、X線CTやMRIなどの出現により生体内の臓器や脳の状態を、非侵襲でコンピュータのディスプレイ上にビジュアルに表現できるようになっている。これらは、X線の吸収率や電磁波を利用したものであるが、温度変化による影響は微小なため、まだ生体内部の非侵襲温度計測には至っていない。

最近では、マイクロ波⁽¹⁾などを利用した生体の測温についての報告が多数みられ、研究者の関心が大きいことがわかる。そこで著者らは、人体、特に頭部を誘電体とみなし、その頭部を挟む2枚の微小電極の静電容量を精密に測定することによって、比誘電率が温度に依存⁽²⁾することを利用した頭深部非侵襲温度計測を目指している⁽³⁾⁽⁴⁾。

微小静電容量を計測するためには、外乱や浮遊容量を取り除くために必ずシールドが必要であるが、頭部の静電容

量を計測する場合には、微小平板を電極とするにもかかわらず、電極間距離が約0.2mという、かなり特殊な平行平板コンデンサの形状となり、従来の三端子コンデンサ測定方式⁽⁵⁾では精密な測定がきわめて困難である。そこで、測定電極をとりまいて測定電極と同電位となる電極(本論文では、この電極をダミー電極と呼ぶ)を配置し、測定電極とダミー電極双方に電圧を加えながら、測定電極に流れる電流のみを計測する方法をとる。図1に示すように、1対の測定電極以外の電極はダミー電極とし、スイッチングを行い1対の測定電極を対極面上に回転させることによって頭部全体の誘電率の計測を行い、CTの手法を用いることによって、温度マッピングを得ることを意図している。

本研究では、図1の測定電極とその周囲のダミー電極を近似的に図2のように、シールドを備え、一対の測定電極とその周囲に測定電極と同電位のダミー電極を設けた、平行平板三端子空気コンデンサとみなし、この長間隔平行平

図 1 マトリックス微小電極
Fig. 1. Matrix small plates.

図 2 ダミー電極を併用した長間隔コンデンサ
Fig. 2. Long distance capacitor with dummy plates and shielding.

板コンデンサの静電容量に対するシールドとダミー電極の効果について調べた。図 2 に示すコンデンサの電界分布シミュレーションも行っている⁽⁴⁾が、ここでは実験結果を示し、それを基にして長間隔の平行平板コンデンサで、ダミー電極の大きさや、シールドの位置をどのように決定したらよいかを明らかにする。

2. 長間隔平行平板コンデンサ

〈2・1〉 長間隔係数の定義 従来、通常の平行平板コンデンサは図 3 (a) に示すように、電極の大きさに対して、その電極間隔は微小なものである。しかし、(b) 図に示すように電極間隔が長くなると、従来の平行平板コンデンサの考え方が適用できなくなる。そこで、長間隔を以下のように定義し、議論を進めることにする。

一般に、平行平板コンデンサの静電容量は次式で表される。

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon \frac{S}{d} \quad (\text{F}) \quad (1)$$

ϵ_0 : 真空の誘電率 (F/m), ϵ : 比誘電率, S : 電極の面積 (m^2), d : 電極間距離 (m)

そこで、電極間距離 d と電極面積 S との比 α を

$$\alpha = d/S \quad (\text{m}^{-1}) \quad (2)$$

とおき、この α が 1 を超える場合を長間隔と称し、この場合の α を長間隔係数と呼ぶことにする。

(a) 通常の平行平板コンデンサ

(b) 長間隔平行平板コンデンサ

図 3 平行平板コンデンサ
Fig. 3. Parallel plates capacitor.

図 4 長間隔コンデンサの概略図
Fig. 4. Diagram of long distance capacitor.

一般に、(1) 式は電極間距離が短くエッジ効果が無視される場合の計算値であり、電極間距離が長くなった場合には、シールドの位置や電極のエッジ効果が増大し、(1) 式のように単純ではなくなると考えられる。そこで、これらの問題を解決するために、測定電極をとりまいて、ダミー電極を配置した測定方法が考えられる。

〈2・2〉 ダミー電極を併用した長間隔コンデンサ

ダミー電極を併用した長間隔コンデンサの概略図を図 4 に示す。同図にも示すように、測定電極と同電位になるダミー電極⁽³⁾を測定電極と微小な間隔をあけてとりまきように配置する。ダミー電極の端部では電気力線が広がると考えられるが、中心部の測定電極付近では測定電極間の各電気力線は平行に近い状態とみることができることから、ダミー電極のない場合に比べて、測定電極のエッジの影響は抑えられていると予想される。

このように等価的に電極面積を拡大し、その中心部にある測定電極に流れる電流だけを測定することによって、シールドの影響や、エッジ効果が減少する。これによって、電極間距離が長くなった場合でも 2 枚の測定電極に挟まれた部分のみの静電容量測定が可能になる。

本論文では、電極間が長くなった場合に電気力線が一様にならない問題を、ダミー電極を併用することによって解決しようとしているので、(1) 式を基本式とみなし、(1) 式で得られる計算値 C_0 を、基本的な値として用いること

にし、実験値 C と比較しながら考察を行う。

3. 実験装置および実験方法

〈3・1〉 実験装置 今回作成した実験装置においては、単位を mm としたほうが直観的にわかりやすいので、実験装置の説明と電極に関する説明は mm を使うことにする。

実験装置の概略図を図 5 に示す。測定電極とダミー電極は、厚さ 0.05 mm の銅箔を用い 1 mm 厚の亚克力板に接着した後、塩化ビニルパイプ(10 mmφ)に固定し、シールドからの距離を自由に設定できるようにした。また、シールドと電極との距離 L が 40, 80, 160 mm と変更できるようにした。シールドには厚さ 1.5 mm のアルミ板を使用した。この実験装置を温度が $20 \pm 1^\circ\text{C}$ に制御されてい

図 5 実験装置の概略図
Fig. 5. Experiment system.

図 6 測定電極とダミー電極およびシールドとの関係

Fig. 6. Relation of measurement plates, dummy plates and shielding.

る恒温室内に設置した。

静電容量の測定には HP 社のプレジジョン LCR メータ 4284 A を用いた。図中の C_H は同軸ケーブルを用いた電源端子, C_L は電流計端子, P_H と P_L は電圧計端子である。また、データはコンピュータと電子計測機器間のデータ転送規格である GP-IB (General Purpose Interface Bus) を介して NEC 社のパーソナルコンピュータ PC 9801 に取り込み、フロッピーディスクに蓄積される。

〈3・2〉 測定電極とダミー電極およびシールドとの関係

測定電極とダミー電極およびシールドとの関係を図 6 に示す。今回実験に用いた測定電極の面積 S は 10 mm×10 mm であり、その周辺にダミー電極を設け、また更にその外側をシールドでおおった。その状態で、ダミー電極の大きさおよびシールドの位置を変化させた場合の静電容量の測定を行った。

なお、 L_D は図 6 にも示したように、測定電極の外郭からダミー電極の外郭までの長さである。 L は図 5 と図 6 にも示したように、測定電極の端部からシールドまでの距離である。

〈3・3〉 実験方法 今回作成した実験装置では、測定電極の間隔を 1 回設定するごとに静電容量を 10 回測定し、これを一つの間隔について 3 回繰り返した。そして、その平均値と標準偏差をもって測定結果とした。また、予備実験の結果、測定値に顕著な周波数特性および電圧特性がみられなかったため、測定周波数は 500 kHz, 測定電圧は 20 V と一定にして実験を行った。

4. 実験結果および考察

〈4・1〉 ダミー電極を併用しない場合との比較 図 7 にダミー電極を併用した場合と併用しない場合の実験結果

図 7 ダミー電極を併用しない場合との比較
Fig. 7. Comparison of with measurement without dummy plate.

(長間隔係数 $\alpha = 200\text{m}^{-1}$ の場合)

図 8 ダミー電極の効果
Fig. 8. Effect of dummy plate.

(長間隔係数 $\alpha = 400\text{m}^{-1}$ の場合)

図 9 ダミー電極の効果
Fig. 9. Effect of dummy plate.

の一例を示す。

縦軸の値 C/C_0 は、測定値 C を(1)式から求めた目安の値 C_0 で除した値である。横軸は、電極間距離 d を電極面積 S で除算した長間隔係数 α である。

図中の○印はダミー電極を併用しない場合で、測定電極とシールドとの距離 L を 0.04 m としたときの結果である。また、図中の●印はダミー電極の大きさ L_D を 0.04 m にし、シールドはこれに接近させたときの結果である。測定値の標準偏差は 0.01 程度であり極めて小さいゆえ、図中に示していない。

同図を見ると、ダミー電極を併用しないときには(図中の○印)、 C/C_0 は長間隔係数 α の増加とともに最大で 1.5 から最小で 0.7 まで変化しており、 α の変化に伴い静電容量測定が電極のエッジの影響やシールドの影響を強く受けていることがわかる。しかし、ダミー電極を併用すると(図中の●印)、 C/C_0 は α の変化にもかかわらずほとんど 1 前後で安定しており、ダミー電極の効果が顕著に現れていることがわかる。

〈4・2〉 ダミー電極の効果 電極間距離 d を 0.02 m 、すなわち長間隔係数 $\alpha = 200\text{ m}^{-1}$ とし、測定電極とシールドとの距離 L を一定にし、横軸はダミー電極の大きさ L_D を電極間距離 d で除した値にしたときの C/C_0 の測定結果を図 8 に示す。図中の○印は測定電極とシールドとの距離 L と電極間距離 d の比 L/d を 2 にした場合であり、図中の□印は L/d を 4 にした場合である。 $L_D/d = 1$ の場合のみ約 ± 0.05 の誤差バーが示されているが、これは同じ構成の 3 種類の測定電極を用いてそれぞれ 30 回の測定を行い、合計 90 回をまとめた標準偏差を示したもので、本実験における測定装置の製作上の誤差を意味している。

同図を見ると、 L_D/d が 1 より小さい、すなわちダミー電極が比較的小さい場合には、 C/C_0 は L/d の大きさによ

図 10 シールドの影響(ダミー電極あり)
Fig. 10. Effect of shielding for measurement plates with dummy.

って、その程度は異なるが、 L_D/d の変化に従い大きく変わることがわかる。しかし、 L_D/d が 1 以上、すなわちダミー電極が大きくなるにつれ、エッジやシールドの影響はダミー電極によって抑えられており、 C/C_0 は一定していくことがわかる。

図 9 には電極間距離 $d = 0.04\text{ m}$ 、すなわち長間隔係数 $\alpha = 400\text{ m}^{-1}$ の場合の結果を示す。ダミー電極なし ($L_D/d = 0$) の場合には C/C_0 が 1 より大きくなっている。しかし、 L_D/d が増加するに従って C/C_0 は減少し、 L_D/d が 0.25 から 1 までは増加する傾向にある。これらの原因としては、〈4・4〉節で議論することであるが、 L/d が 2 あるいは 4 程度では測定電極間距離に対して、低電位側電極と同電位になっているシールドが電極に接近しすぎているために、ダミー電極を併用した場合であっても L_D/d が 1 以下ではその効果が十分でないことから生じるものと考えられる。すなわち、図 10 に示すように、電気力線が高電位側の測定電極から低電位側のダミー電極に向かう結果、 C/C_0 が減少するとみることができる。図 9 から、 L_D/d が 1 以上で初めて C/C_0 が一定した状態になることがわかる。

〈4・3〉 シールドの大きさによる影響 ダミー電極の

図 11 シールドの大きさによる影響
Fig. 11. Effect of dimension of shielding.

大きさ L_D を電極間距離 d で除した値 L_D/d を 1 とした場合の、シールドと電極との距離 L の C/C_0 に及ぼす影響についての実験結果を図 11 に示す。横軸はシールドと測定電極との距離 L を電極間距離 d で除した値であり、縦軸は C/C_0 である。

同図から、 $L_D/d=1$ のときには、 α が大きいほうが C/C_0 の変化は多少大きい、シールドの位置による影響は L/d が 1 から 4 になっても C/C_0 は 10% 程度の変化しか見られない。従って、シールドの影響を 10% 程度まで許容するときには $L/d=1$ であれば十分である。しかし、シールドの影響を数%以内にする必要がある場合には、 L/d は 2 以上にすることがわかった。

〈4・4〉 電極のエッジの影響 図 8 に見られるように、 C/C_0 が 1 を超えている場合があるが、これはダミー電極も含めて考えたトータルの電極のエッジの影響によるものと考えられる。この場合のエッジの影響とは、電極の四隅の角の部分だけではなく、電極の厚み部分も含まれる。電極間の電気力線の分布は、巨視的にみると図 12 に示すようになっていると推察されるが、これは C_0 を得るための平行平板コンデンサの計算式 (1) 式に用いる電極面積よりは、等価的に面積が増加しているかのような状態になり、その結果、測定値 C が大きくなることから、 C/C_0 が 1 より大きくなると考えることができる。

微視的にみると、図 13 に示すように、電極の厚みにあたる側面から発生する電気力線の影響も無視できず、この原因による C/C_0 の増大も考えられる。これらの現象を検証するために、電極の大きさが $0.01\text{ m} \times 0.01\text{ m}$ の場合で長間隔係数 $\alpha=100\text{ m}^{-1}$ とし、電極の厚みを変化させたときの測定結果を図 14 に示す。同図を見ると、全体的に電極の厚みが増加するに従い、 C/C_0 が大きくなることがわかる。

更に、電極の面積、厚みは同一で、その電極が四角の場合と円形にした場合との比較を図 15 に示す。全般的に、同一条件では、電極の形状が四角のほうが円形より C/C_0

図 12 巨視的にみたエッジ効果
Fig. 12. Macroscopic edge effect.

図 13 微視的にみたエッジ効果
Fig. 13. Microscopic edge effect.

図 14 電極の厚さの影響 ($\alpha=100\text{ m}^{-1}$)
Fig. 14. Effect of plate thickness ($\alpha=100\text{ m}^{-1}$).

は大きくなっていることから、四隅の角の影響は無視できないが、それ以上に電極の厚み方向のエッジの影響が大きくなることが明らかになった。

〈4・5〉 エッジとシールドに関する総合的考察 以上述べたように、測定値 C には、シールドの位置および電極のエッジの双方による影響が考えられ、個別にみると、長間隔平行平板コンデンサにおいては図 16 に示すようにエッジの影響が C/C_0 を増加させ、シールドの影響は C/C_0 を減少させる効果を与えていると考えられる。それゆえ、実際の測定ではこれらの効果の相殺された値 C が

□:四角 厚さ 5.0×10^{-5} m ■:四角 厚さ0.001m
○:丸 厚さ 5.0×10^{-5} m ●:丸 厚さ0.001m

図 15 電極の形状の影響 ($\alpha=100 \text{ m}^{-1}$)
Fig. 15. Effect of plate form ($\alpha=100 \text{ m}^{-1}$).

図 16 エッジとシールドの影響
Fig. 16. Effect of edge and shielding.

得られ、その結果、状況に応じて、単純な形状のコンデンサの(1)式による計算値 C_0 との比 C/C_0 が様々な値をとることが説明できる。なお、図 16 は図 8 の実験結果より求めたもので、 $L/d=4$ のとき(図中の□印)にはシールドの影響は無視できるものと仮定してエッジの影響の値とした。シールドの影響は、 L_0/d が同じ値での $L/d=4$ と $L/d=2$ との C/C_0 の差を用いて求めた。

5. むすび

非侵襲頭深部温度計測へ向けて、その基礎研究として、長間隔微小電極平行平板コンデンサの静電容量の精密測定を行うために、その測定電極の面積 S を $0.01 \text{ m} \times 0.01 \text{ m}$ とし、測定電極と同電位としたダミー電極を近接して配置した空気コンデンサを製作し、安定した測定値を得るための最適なダミー電極の大きさおよびシールドの位置を知るための実験を行った。

その結果、長間隔平行平板コンデンサに関して、以下のようことが明らかになった。

(1) ダミー電極を併用しない場合には、測定電極のエ

ッジの影響やシールドの位置による影響を強く受け、その測定値はきわめて信頼性のないものとなるが、ダミー電極の使用により、測定値は一定な数字を示す。

(2) 測定値 C には、電極のエッジとシールドの位置の双方による影響が考えられ、個別にみると、エッジの影響は測定値を増加させ、シールドの影響は測定値を減少させる傾向があることがわかった。

(3) 測定電極とシールドとの距離 L を測定電極間距離 d で除した値 L/d を 2 以上にすると、測定電極の外郭からダミー電極の外郭までの長さ L_0 を、測定電極間距離 d と同じにすることで、距離 d の平行平板空気コンデンサの静電容量測定において、シールドの位置やエッジの影響を数%以内にすることが可能である。

以上述べてきたように、測定電極をとりまくようにダミー電極を配置し、シールドの位置やダミー電極の大きさを変化した実験により、電極間距離が長くなった場合でもシールドやエッジの効果が抑えられ、安定した静電容量の測定が可能となることを確認した。

電極間距離 d と測定電極面積 S の比である長間隔係数 α が 400 m^{-1} の場合には、ダミー電極の大きさ L_0 と電極間距離 d の比 L_0/d が 1 以上としなければ静電容量は安定にならず、ダミー電極の大きさは比較的大きなものになってしまった。これは、電極間が空気の場合のコンデンサを用いた結果であり、頭部を挟む 2 枚の微小電極の静電容量を精密に測定する場合に、そのまま適用することはできないが、実際の頭部は空気よりも高誘電率であるので、空気の場合より電極間に電気力線が集中し、今回の実験結果で得られた値より小さいダミー電極でシールドや電極のエッジの効果を受けない安定した静電容量の非侵襲測定が可能であると考えられる。

従来からの、ダミー電極を併用しない測定方法では、高電位側測定電極から発生した電気力線がシールドに向かったり、エッジの効果により測定電極間の中央部で測定電極面積より広がったりして、電気力線の分布が様にならず CT の手法を利用した温度マッピングを得るのが不可能であると考えられていた。しかし、測定電極をとりまくようにダミー電極を配置することによって、測定電極間の電気力線は測定電極面積内で様になると予想でき、頭深部の相対的な温度マッピングの可能性を見いだすことができた。

今後、これらの結果はダミー電極を微小なマトリックス電極に置き換えることによって、測定電極とダミー電極とのスイッチングを行い、非侵襲温度計測の実現へ向けて頭部の相対的な温度マッピングの研究に応用される。

(平成 5 年 4 月 2 日受付)

文 献

- (1) 宮川道夫:「チャープ信号を利用した生体計測用マイクロ波 CT の試み」, 通信学論 D II, J75-D-II, 1447 (平 4-8)
- (2) 岡 小天:誘電体論, p. 172 (昭 29) 岩波書店

- (3) 相知・信太・古川：「脳深部温度計測のためのガードリング型三端子精密静電容量計測法」，第6回生体・生理工学シンポジウム，p.1 (平3)
- (4) 相知・信太・古川・塩野：「脳深部温度計測のためのダミー電極を用いた長間隔微小静電容量の精密測定」，第9回センシングフォーラム，p.1 (平4)
- (5) 菅野 允：「微小静電容量の測定法」，静電気学誌，9，196 (昭60-3)

相知 政司 (正員) 1964年12月8日生。1989年3月長崎大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月NTT入社。1991年4月佐賀大学理工学部助手，1993年4月同電子工学科助手へ配置替え，現在に至る。精密計測に関する研究に従事。計測自動制御学会，電子情報通信学会，日本ME学会会員。

信太 克規 (正員) 1943年5月6日生。1970年3月東北大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月通産省工業技術院電気試験所(現，電子技術総合研究所)入所。1987年同所標準計測部電気標準室長。1990年佐賀大学理工学部電気工学科教授，現在に至る。精密電気計測に関する研究に従事。工学博士。計測自動制御学会，応用物理学会，電子情報通信学会，日本ME学会会員。

古川 達也 (正員) 1956年6月21日生。1984年3月九州大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年4月長崎大学工学部助手。1986年佐賀大学理工学部電気工学科講師，1987年同助教授，1993年4月同電子工学科助教授へ配置替え，現在に至る。数値解析，計算機応用工学に関する研究に従事。工学博士。計測自動制御学会，日本シミュレーション学会会員。