

論文

流れの可視化による複合誘電体界面の電界解析

金古 喜代治*, 福岡 醇一*, 松元 崇*

大村 英之*, 立野利浩*

(1986年4月26日受理)

Analysis of Electric Field at Boundary of Complex Dielectrics
by Fluid Flow Visualization

K. KANEKO,* J. FUKUOKA,* T. MATUMOTO,* H. OHMURA*

and T. TATENO*

(Received April 26, 1986)

A fluid flow mapper is used as the equipment to visualize and simulate two dimensional and axially symmetric three dimensional potential fields. The fluid flow mapper consists mainly of a glass plate and a plaster slab which constitute a narrow space, where a steady potential water flow appears in a low Reynolds number. The stream lines in the potential flow are visualized by the methylene blue crystals posted on the lower surface of the glass plate. This paper analyzes, by the use of a fluid flow mapper, an electric field at the boundary in the complex dielectrics inserted in parallel plate electrodes. The stream lines developed in the fluid flow mapper represent the lines of electric force in the electric field. Hence two dimensional electric field can visually be simulated by the fluid flow mapper techniques. Furthermore, the results obtained from the fluid flow mapper for the potential fields are able to verify the results obtained by numerical methods. The fluid mapper techniques give a whole and continuous pattern of a potential field. They can be used in the analysis of complex boundary, multi-media and axially symmetric problems. The use of a sand bed in fluid flow mapper can be applied to analyze widely distributed source problems.

1. まえがき

電界計算は、静電気現象や放電現象などを解明するうえできわめて重要であり、従来より精力的に研究がなされ発展してきている。とくに最近では、大型電算機の急速な発達に伴って、数値電界計算法が飛躍的に進歩し、相当に複雑な電極配置に対しても、種々の境界条件下で電界を数値計算することが可能になってきた。従来から電界の計算に関しては、おもに電界強度や等電位線について検討されてきているが、静電気現象などの解析をする場合には、電界の方向(電気力線あるいは電束)を求めることが必要である。最近、加藤¹⁾が電気力線管法により、電気力線の数値計算を行なっているが、その計算精度をより向上させるためには、今後さらに詳しい検討が必要であると考えられる。

このような観点から、著者らは操作が比較的簡単なフルイド・マッパ装置を用いて、複合誘電体の界面における電界の様子を可視化する手法について検討した。フルイド・マッパは Michigan 大学の Moore により創始^{2,3)}されたもので、流体(主として水道水)の流れの場を利用して、一般の二次元または軸対称三次元のポテンシャル場を解析する可視アナログ装置である。著者らの一人は、このフルイド・マッパに関する基礎理論とその応用面について研究し、数多くの成果を挙げてきた⁴⁻⁶⁾。

本論文は、複合誘電体の直線状界面における二次元場の電界を可視的に解明するために、フルイド・マッパ装置を用いて、静電界をシミュレーションする手法について検討し、その流線图形を観測撮影した。また、フルイド・マッパにより得られた流線图形と有限要素法を用いて数値計算した等電位線との直交性を検討した結果、両者の対応性が良好であることから、本装置により簡単に電気力線を可視化できることを示した。さらに、流線图形を円入法^{3,6)}により図式解析した結果、ほぼ満足す

* 東海大学工学部電気工学科 (259-12 平塚市北金目 1117)
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Tokai, 1117, Kitakata-naka, Hiratsuka, 259-12 Japan

べき結果が得られた。これらの諸事項について考察した結果、本手法が電算機による数値計算の検証にも有効であることが判明した。このことは、本研究の重要な応用の一つであると考える。

2. フルイド・マッパの基本方程式

2.1 基本方程式^{4,6)}

ラプラス場を解析するフルイド・マッパは、石膏板の部分に流孔 (well) を設けて、通常の吹口 (source) または吸口 (sink) として使用し、石膏板とガラス板の間に構成された細隙流路に、流体の定常流を形成させるものである。一般に細隙流路のレイノルズ数 Re は、次のように表わすことができる。

$$Re = vd/\nu \quad (1)$$

ここで v (cm/s) は流体の速度、 d (cm) は細隙間隔、 $\nu = \mu/\rho$ (cm²/s) は流体の動粘性係数、ただし μ (dyn·s/cm²) は粘性係数、 ρ (g/cm³) は密度を表わす。細隙流路の流れを緩慢な規則正しい定常流とするには、レイノルズ数 Re をできるだけ小さくする必要がある。常温の水道水で流速を毎秒数 cm とし、細隙間隔を 1.5 mm 程度で Re が数十程度までが適切な範囲と考えられる^{4,6)}。

このような条件の下で Navier-Stokes の方程式から、細隙面の単位幅時間当たりの流量、すなわち流れの密度 i (cm³/cm·s) と流れの場の強さ F (dyn/cm²) は、次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} i_{x,y} &= \sigma F_{x,y} \\ F_{x,y} &= -(\text{grad } p)_{x,y} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし石膏板面を x, y 面としている。ここで σ (cm⁵/dyn·s) は流れの伝導率(単位幅長さ当たりのコンダクタンス)、 p (dyn/cm²) は流れの圧力である。また流れの伝導率 σ は

$$\sigma = d^3/12 \mu \quad (3)$$

で表わすことができる。石膏板の部分に砂床(sand bed)を付加すれば、ポアソン場を解析することのできる砂床形マッパ(sand bed mapper)が形成できる⁵⁾。この場合、砂床は分布吹口または分布吸口として動作させるものである。このような非圧縮性流体における連続の方程式は、次のように表わされる。

$$(\text{div } i)_{x,y} = W_{x,y}/\rho \quad (4)$$

ここで W (g/cm²·s) は単位面積、時間当たりの吹出し(吸込み)の質量であり、 W/ρ (cm³/cm²·s) は単位面積、時間当たりの吹出し(吸込み)の容積、すなわち砂床の強さである。(2), (3), (4)式より伝導率 σ が一定であれば、圧力 p に関する次の関係が成立する。

$$(\nabla^2 p)_{x,y} = -W_{x,y}/\rho\sigma \quad (5)$$

また分布吹口(吸口)が存在しない領域においては、 W

=0 であるから

$$(\nabla^2 p)_{x,y} = 0 \quad (6)$$

が成立する。すなわち、砂床の有無により、流れの圧力 p に関するポアソンあるいはラプラスの方程式が成立することがわかる。また、砂床外においては流線関数 M (cm³/s) が存在し、これはラプラスの方程式を満足して

$$(\nabla^2 M)_{x,y} = 0 \quad (7)$$

さらに線素を dl とするとき、流れの場の強さを表わす線、すなわち、等圧線および流線の方程式は、それぞれ次のように表わされる。

$$(dl \times F)_z = 0 \quad (8)$$

$$(dl \cdot F)_{x,y} = 0 \quad \text{または } p = \text{const.} \quad (9)$$

$$(dl \times i)_z = 0 \quad \text{または } M = \text{const.} \quad (\text{砂床外}) \quad (10)$$

したがって、伝導率 σ が一定であれば、流線の方程式は場の強さを表わす線の方程式に一致するとともに、流線は等圧線に直交することになる。

次にフルイド・マッパと静電界との対応性について考える。まず圧力 p が電位 ϕ に、場の強さ F は電界の強さ E に対応する。また流れの密度 i は、単位幅当たりの電束密度 D (C/m²) t (m) に対応する。ただし t は二次元場の厚さである。また、流れの伝導率 σ は単位幅、長さ当たりのキャパシタンス $\epsilon(F/m) t(m)$ に対応する。分布吹口(吸口)の強さ W/ρ は単位面積当たりの電荷密度 $\rho_e(C/m^3) t(m)$ に対応する。さらに、砂床外の流線関数 M は電束関数 ψ に、等圧線は等電位線に、流線は電気力線にそれぞれ対応している。

2.2 境界条件

細隙流路内において石膏板面にステップを設ければ、流れの伝導率が異なる二つの領域の境界を表わすことができる。すなわち、細隙間隔 d_1, d_2 に応ずる伝導率を σ_1, σ_2 とすれば(3)式より

$$(\sigma_1/\sigma_2) = (d_1/d_2)^3 \quad (11)$$

となる。また、圧力と流れ密度の連続から流線の屈折角 α について

$$(\tan \alpha_1 / \tan \alpha_2) = (\sigma_1 / \sigma_2) = (d_1 / d_2)^3 \quad (12)$$

の関係が成立する。すでに 2.1 で述べたように、フルイド・マッパと静電界との対応を考えれば、伝導率の異なる境界は誘電率の異なる境界に対応する。 ϵ_1/ϵ_2 は σ_1/σ_2 に対応し、電気力線は流線と同様の屈折をする。

3. フルイド・マッパの作製

本論文において解析の対象とした例題は、平行平板電極間に配置された二つの誘電率が異なる複合誘電体の直線状界面における静電界解析である。この問題については、古くは高木⁷⁾により等角写像を用いて解析的に検

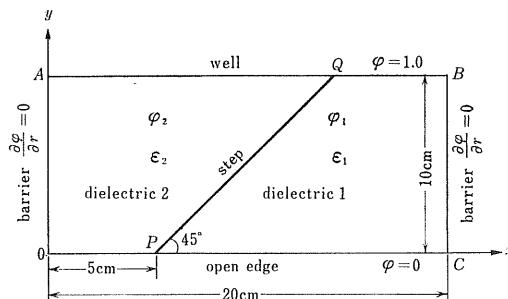


図1 フルイド・マッパ装置の石膏板

Fig. 1 Plaster slab of fluid flow mapper equipment.

討され、直線状境界面と電極との接觸点で電界が零、あるいは無限大になるという、いわゆる高木効果（この呼称は宅間の提案による¹⁰⁾）と呼ばれる有名な問題である。その後、同様の問題が電荷重畠法を複合誘電体の電界計算に適用する過程で Weiss⁸⁾によって、埋込み効果として報告されている。宅間ら^{9,10)}は、この問題についてのみならず、絶縁物中のボイドや誘電体の突起など誘電体境界面端部での電界を検討し、二次元場ならびに回転対称場において電荷重畠法による数値計算を実施するとともに、変数分離法による解析により詳細に考察している。

フルイド・マッパを用いてラプラス静電界を模擬するには、前述したように両者の対応関係を考え、両者の幾何学的相似条件を保てばよい。著者らは、宅間らの結果と比較検討するために、できるだけ同様の条件で実験するようとしたが、本問題を取扱うためのフルイド・マッパの石膏板は、作製と操作上の理由から、その大きさが事実上制約を受ける。そこで、図1において電気力線に平行する境界となる障壁間の距離を20cm一定とし、電極間隔となる流孔と開口端の距離を6~14cmと変化させて流線図形を観測した結果、この範囲ではまったく流線に変化がなかったので、図1のように20×10cmの石膏板を成形した。

図1において、中央斜線（ステップ部分）を境とした二つの領域に注目する。フルイド・マッパとしては、それぞれ細隙間隔が d_1 , d_2 で、伝導率が $\sigma_1=d_1^3/12\ \mu$, $\sigma_2=d_2^3/12\ \mu$ の領域である。各部の圧力を p_1 , p_2 とすれば、(6)式により p_1 , p_2 に関してラプラスの方程式が成立する。静電界としての各部は、対応関係を考慮すれば誘電率 ϵ_1 , ϵ_2 の媒質に相当する。各領域部分の電位を φ_1 , φ_2 とすれば ϵ_1 の媒質においては、 φ_1 についてのラプラスの方程式が成立する。

$$(\partial^2\varphi_1/\partial x^2) + (\partial^2\varphi_1/\partial y^2) = 0 \quad (13)$$

また、 ϵ_2 の媒質においても同形の方程式が成立する。

流孔は外部の水タンクから圧力が与えられる部分であり、最高の圧力 p_{\max} の領域である。また開口端は大水槽に開放される部分で基準圧力 $p_0=0$ の領域である。これらは静電界における電位最高と電位最低の電極に対応し $\varphi=\varphi_{\max}=1.0$, $\varphi=\varphi_{\min}=0$ が成立する。図の左右は障壁で、流れに平行な境界を形成し、 $\partial p/\partial x=0$ の関係が成立する。静電界におけるこの部分は、電気力線に平行な境界に対応して $\partial\varphi/\partial x=0$ が成立する。

フルイド・マッパの中央斜線のステップ部分では、伝導率の比が(11)式により細隙間隔の比の3乗に比例し、また(12)式によって流線は屈折する。静電界では伝導率の比が誘電率の比に対応する。電位と電束密度の連続条件 $\varphi_1=\varphi_2$ および $\epsilon_1(\partial\varphi_1/\partial r)=\epsilon_2(\partial\varphi_2/\partial r)$ の条件により誘電率の比に応ずる(12)式と同形の屈折条件が成立する。ただし r は界面に垂直な距離である。したがって、静電界を模擬するフルイド・マッパの細隙間隔 d は、次式を満足しなければならない。

$$(d_1/d_2) = (\epsilon_1/\epsilon_2)^{1/3} \quad (14)$$

したがって、誘電率の条件として $\epsilon_2/\epsilon_1=2, 4, 6$ を与えれば $d_2/d_1=2^{1/3}, 4^{1/3}, 6^{1/3}$ としなければならない。そこで、実際の寸法は $d_1=1\text{ mm}$ とし $d_2=2^{1/3}, 4^{1/3}, 6^{1/3}\text{ mm}$ とした。 d_2 の最大値に対するレイノルズ数 Re が問題であるが、本実験においては流速が毎秒およそ1cmであり、かつ水に増粘剤としてメソセルを重量比で0.5%添加して、動粘性係数を約10倍にしているので $Re=1\times 6^{1/3}/(1/100)\times 10=18.2$ である。前にも述べたように、この値は十分に規則正しいポテンシャル流を生じる範囲内にあるものと考えられる。また、ステップの高さは d_2-d_1 であるから、それぞれ0.260, 0.587, 0.817mmである。

フルイド・マッパに使用する石膏板は、寸法が正確で板面に歪のないことが要求される。本研究においては凝結硬化時間が比較的短く、また膨張率の小さいサクラ印歯科用焼石膏（吉野石膏 KK 製、JIS-T 6604）を用いた。石膏板の作製手順は以下のようである。まず石膏の量を検量して、これを一つの容器に収め、次に約20°Cの水を混水率（水と石膏の重量比）が55~60%になるように水量を定めて、これを別の容器にとる。石膏粉を水面上にふりかけるように注いで、逸早くむらのないようく攪拌して石膏泥漿を作る。本実験における攪拌時間は約45秒であった。あらかじめ石膏板の作製用図面上にガラス板を置き、その上に図面に合わせて金属製型枠（真鍮製）類を配置して、これを石膏で固定して硬化させる。次に固定された型枠内に石膏泥漿を静かに流し込む。この流し込みの作業は、石膏が硬化しないような時間の範囲内で終了しなければならない。ここでは3分以

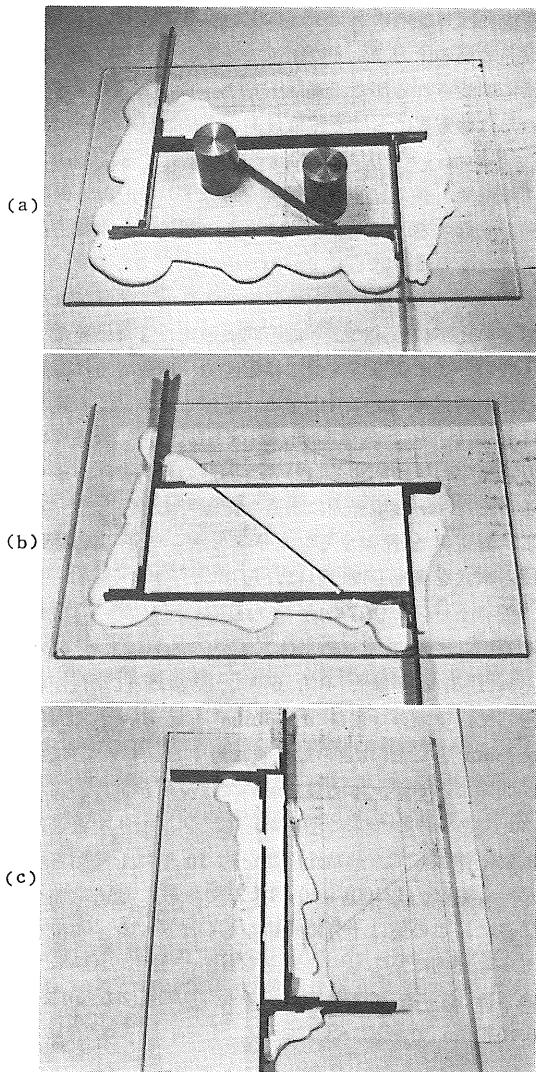


図2 フルイド・マッパの作成状況

Fig. 2 Plaster techniques in fluid flow mappers.

内に注入を完了している。石膏は常温において30~40分程度で、ほぼ完全に硬化する。フルイド・マッパにおいては、すでに述べたように複合媒質を細隙間隔の異なる領域で表現すればよい。媒質の境界では(14)式が満足されるように石膏板面にステップを作らなければならぬ。石膏板面上にステップを作る場合には、2枚の石膏板を別々に作製して、裏側で石膏を用いて接合する接合成型法⁶⁾を用いる。

石膏板の製作状況を図2(a),(b),(c)に示す。同図(a)は石膏板の本体を成型するために、種々の型枠を石膏で固定した状態を示している。また、同図(b)は型枠内に石膏泥漿を流し込み硬化させている状態である。同

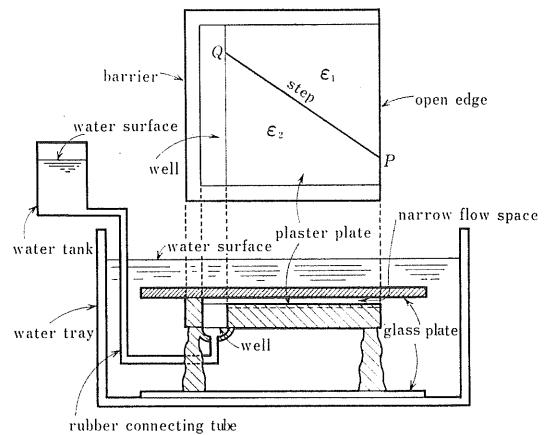


図3 フルイド・マッパ装置

Fig. 3 Fluid flow mapper equipment.

図(c)は流体の障壁である流れ止めを製作している状態を示す。最後に石膏板本体に流孔、開口端、流れ止めおよび脚部を付けてフルイド・マッパ装置の本体部分を完成する。フルイド・マッパを作製する過程で、種々の作成条件を維持しないと石膏板の精度に著しい影響を与えることがあるから、注意深く作業を進める必要がある。一般に金属製型枠には、真鍮製の型枠を使用するが、不規則な境界に対しては柔軟性のあるアルミ板等を用いることもできる。これらの型枠を用いて流孔、開口端および流れ止め(障壁)などを任意の形状に成型できることは、石膏技術の大きな利点である。

4. 流線图形とその検証

図3に示すように、ガラス板($35 \times 25 \times 0.5 \text{ cm}^3$)を水槽($46 \times 36 \times 8 \text{ cm}^3$)内に沈めて、その上に石膏板を乗せて、流孔をゴム管で外部の水タンクと連結する。フルイド・マッパの上に、もう1枚のガラス板を置いて正確に支持し、細隙流路を形成させる。細隙流路の伝導率 σ は(3)式で示したように細隙間隔 d^3 に比例するから、 σ を正確に保持することが最も重要である。外部の水タンクを上下して、水槽との間に水位差を与えることによって、細隙中に定常流が形成される。流線を可視化するには、メチレンブルーの人工結晶片をガラス板の下面の開口端に沿って張りつける。

流孔に連結した水タンクを操作し、水槽の水位よりも下げる吸口として動作させる。開口端と流孔に水位差を与えることによって、10数秒で流線图形が可視化されて現われる。この場合、流孔内の圧力は一定である。したがって流孔端は一つの等圧線を形成している。流孔の圧力(流速)は流線图形に直接関係しないが、慣性効果や着色流線の色素の拡散などが大きくならない範囲に制約され

る。これに対して水槽は、流孔とは異なった別の圧力一定の領域である。したがって、開口端は別の等圧線を形成することになる。また細隙流路を完全に閉じた流れ止めの境界(障壁)は、流線が平行する境界となつてゐる。

本実験においては、媒質の相違を表わすのに細隙間隔を不連続的に変化させて対応している。そのためにフルイド・マッパの流路中にステップを設けるが、相接する2領域のステップ境界において、レイノルズ数が過大な状態となれば、慣性効果のために流線が正しい屈折をしない。これを避けるために、前述したように増粘剤の添加によりレイノルズ数を十分に低く抑えた。

水タンクの位置を水槽より下げて、流線を可視的に現わし、その图形に欠点のないことを確かめた上で写真撮影した。本実験において流線图形の障壁における平行性、ならびに流孔端と開口端における直交性に関しては良好であった。流線图形の妥当性を検証するために、図1において流孔端に相当する電極の電位を $\varphi_{\max}=1.0$ とし、開口端に相当する電極の電位を $\varphi_{\min}=0$ として有限要素法により二次元の電界を数値計算し、その等電位線を求めた。図4(a), (b), (c)には、それぞれ $\epsilon_2/\epsilon_1=2, 4, 6$ である場合の流線图形を示す。また同図には、電算機による数値計算で求めた等電位線图形を重ね合わせてある。等電位線は相対電位が 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0 に相当するものを描いた。両图形の直交性は、それぞれの場合についてかなりよく満足されていることが認められる。したがって、フルイド・マッパの流線图形は電気力線图形として妥当なものであることが確かめられた。

フルイド・マッパ装置は石膏成型技術を利用したもので、二次元場はもとより軸対称三次元のポテンシャル場の電界解析にも応用することができる。また、石膏板面に砂床(微小金属粒を利用した分布吹口、吸口)を設ければポアソン場の電界解析も可能である。したがって、フルイド・マッパは各種の空間電荷問題にも適用することができる。しかも、アルミ板のような柔軟性のある型枠を使用すれば、任意の形状のマッパを成形することができるから、相當に複雑な電極形状の解析にも応用できる。さらに、比較的簡単に簡単な装置を操作することによって、電算機による数値計算の結果を検証できることは、本研究の重要な応用の一つであると考えられる。

5. 流線图形の円入法による図式解析

フルイド・マッパに現われる流線图形(電気力線图形)から、図式的に等圧線图形(等電位線图形)を求めることができる^{3,6)}。図解析の要領は次のようである。ま

ず、流線を適當な太さの何本かの流管に分割する。任意の流管について、円定規を用いて円が内接するか、あるいは円が等距離に収まるような弧状正方形(curvilinear square)を描く。この弧状正方形を作図するときの要点は、円の内接性または等距離性とともに、2本の流線と2本の等圧線との間の直交性である。弧状正方形は紙面上に垂直で厚みをもつ立体として考えるべきであるが、ここでは便宜上これを弧状正方形と呼ぶことにする。弧状正方形は微小な正方形が直並列に同数だけ並べられたものであるから、そのコンダクタンスまたは抵抗は微小な正方形1個のコンダクタンスまたは抵抗に等しい。したがって、弧状正方形のコンダクタンス G はフルイド・マッパの伝導率 σ に等しい。さらに伝導率 σ は、フルイド・マッパと一般的のポテンシャル場とのアナロジを考えれば、静電界では単位幅長さ当たりのキャパシタンス ϵt に対応し、また電流の場では単位幅長さ当たりのコンダクタンス κt に対応する。ただし $\epsilon(F/m)$ は誘電率、 $\kappa(S/m)$ は導電率、 $t(m)$ は二次元場の厚さである。

いま、弧状正方形で直列に分割された流管を考えると、静電界のアナロジを用いれば $V=(1/C)\phi$ が成立する。ただし $V(V)$ は流管の両端にかかる電位差、 $\phi(C)$ は流管を通る電束、 $C(F)$ は流管の両端間のキャパシタンスで、この場合は弧状正方形のキャパシタンスの直列接続の和である。ある流管について電束 ϕ は一定であるから、電位差 V は全容量 C の逆数に比例する。さらに、 $(1/C)=(1/C_0)+(1/C_0)+\dots$ の関係がある。ただし C_0 は弧状正方形のキャパシタンスで $C_0=\epsilon t(F)$ である。いま $\epsilon=1$ 、 $t=1$ の弧状正方形は、1相対ファラッドのキャパシタンスをもつと考える。流管を解析する場合には、この相対ファラッドで評価し、必要なら最後に ϵ や t を考えて絶対評価をすればよい。

ある流管について、流管全体の $1/C$ に対する部分流管の $1/C_0$ の比率は、全体の流管の電位差に対する部分流管の電位差の比率を表わす。したがって、各流管の同じ電位差比率の点を結んで、その比率の等電位線とする。

円入法により図解析を正確に、かつ容易に行なうためには、薄手で硬調な印画紙を用いて流線图形の写真を引き伸ばし、これを透視台の上に置いて、下方からの透過光線によって流線を正確に把握しながら、円定規を用いて直接鉛筆で書き入れる。

図5に $\epsilon_2/\epsilon_1=4$ の場合における円入法による図式解析結果の一例を示す。円の内接性あるいは等距離性、等圧線と流線の直交性などに十分な注意をすれば、円入法による図解析法の精度はきわめて向上する。著者らが有限要素法により数値計算した等電位線と流線图形を円入

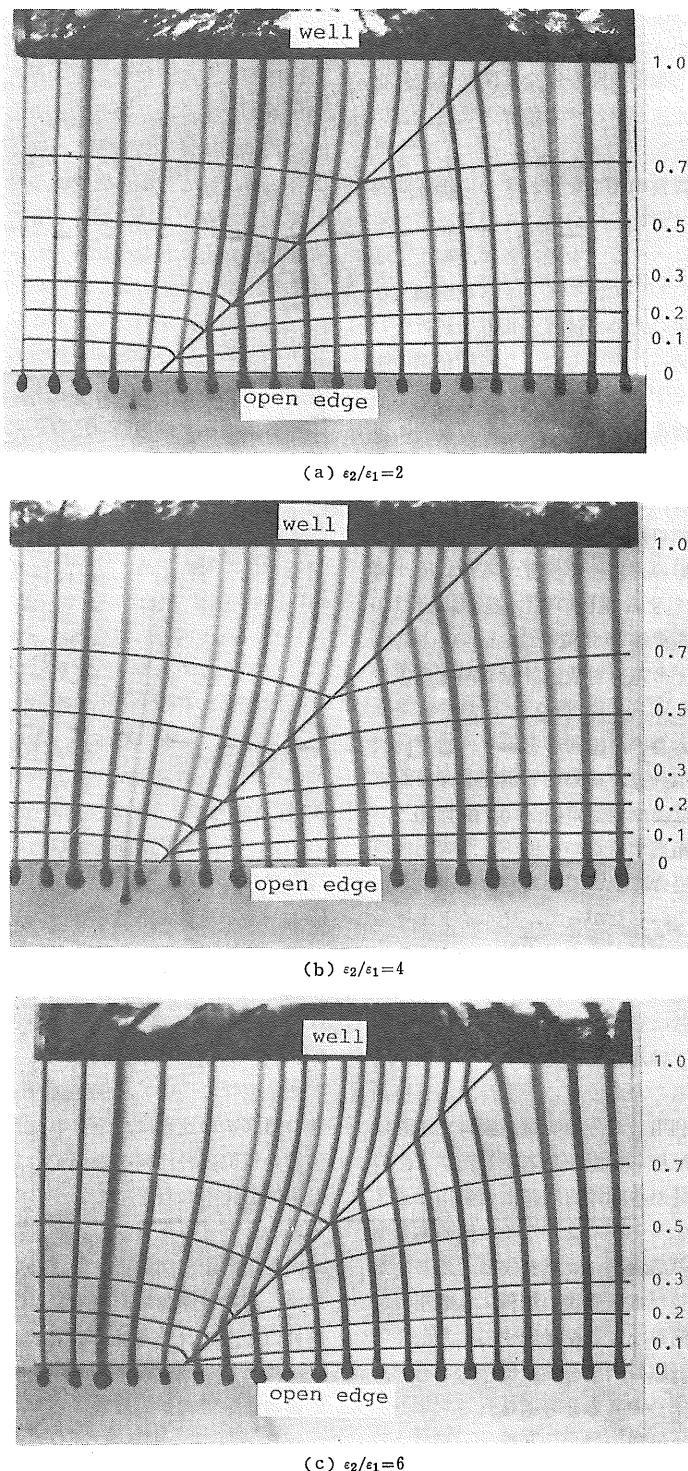


図4 流線图形と等電位線图形の重ね合せ图形

Fig. 4 Photographs obtained by superposition of analytical equipotential lines upon fluid flow lines.

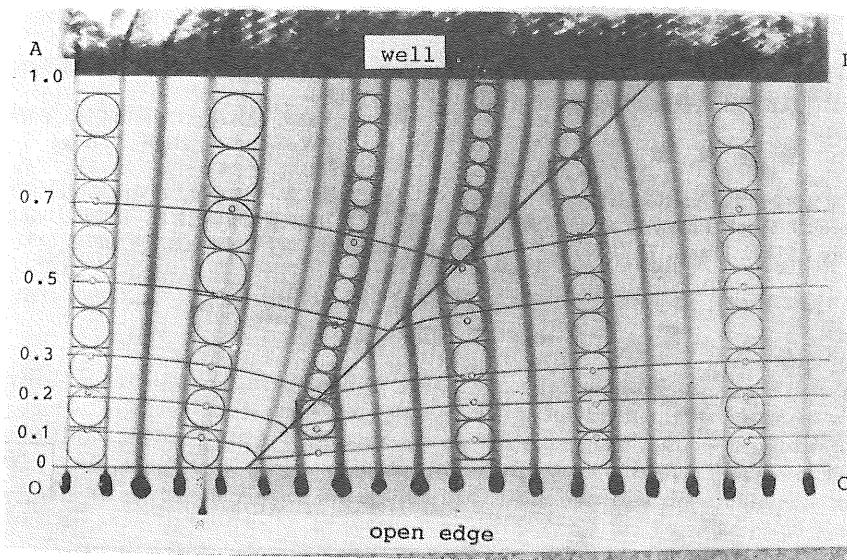


図5 流線図形と円入法による図式解析

Fig. 5 Flow line pattern and mapping analysis by circling-in method.

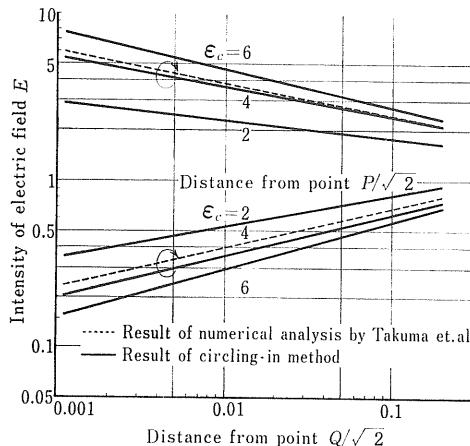


図6 誘電体境界面の電界値

Fig. 6 Electric field intensity at boundary surface of two dielectrics.

法によって図解析して求めた等電位線図形とは数%の範囲内で一致している。また、図6には $\epsilon_c = (\epsilon_2/\epsilon_1) = 2, 4, 6$ の場合について、図解析で得られた電位を微分して得た電界値を宅間ら^{9,10)}と同様に、それぞれ規格化して両対数グラフで表わしたものである。その結果、 $\epsilon_2/\epsilon_1 = 4$ における宅間らのデータとフルイド・マッパによる解析結果とが、かなりよく一致していることがわかる。

6. 結 言

本論文は平行平板電極間に配置された誘電率の異なる

直線状境界面をもつ複合誘電体の電界をフルイド・マッパ装置を用いて模擬し、可視化する手法に関して検討したものである。

フルイド・マッパにより得られた流線図形と有限要素法により数値計算した等電位線図形とを重ね合わせた結果、両図形の直交性はかなり良好であることが認められた。この実験事実から、フルイド・マッパの流線図形は電気力線図形として妥当なものであることが判明した。また、得られた流線図形を円入法を用いて図解析する手法を示し、この方法が等電位線を求めるのに有効な手段であることを示した。

フルイド・マッパは石膏技術を用いるものであるから自由に任意の形状に成型することができ、その操作も簡単なことから、かなり複雑な電極系のポテンシャル場の解析にも利用することができる。また、電算機によって数値計算された結果を検討するのにも有効な手段であることは、本研究の重要な応用例の一つでもある。

フルイド・マッパは二次元および軸対称三次元場のポテンシャル場を解析することが可能であり、しかも場の様子を全体的、連続的に観測することができる利点がある。また石膏板に分布吹口、吸口としての砂床を設ければ、ポアソン場の電界解析も可能である。現在のところポアソン場の流線を連続的に直視する装置としては、フルイド・マッパ装置が唯一のものである。今後の研究課題としては、各種の空間電荷問題に関して、砂床をもつフルイド・マッパにより解析するとともに、軸対称三次

元場の取扱いについても検討を進める必要がある。

最後に、本研究に関連して種々のご教示を賜わっている名古屋大学工学部長家田正之教授に深く感謝します。

参考文献

- 1) 加藤正平：電気学会論文誌A, 105 (1985) 429
- 2) A.D. Moore : J. Appl. Phys., 20 (1949) 790
- 3) A.D. Moore : AIEE Trans., 71 (1952) 1
- 4) 福岡醇一：静電気学会誌, 2 (1978) 224
- 5) 田中康博, 吉田則信, 福岡醇一：電気学会論文誌A, 102 (1982) 636
- 6) 福岡醇一：フルイド・マッパー, 北海道大学図書刊行会 (1983)
- 7) たとえば, 高木純一：早稲田電気工学会雑誌 (1939) 73
- 8) P. Weiss : Int. High Voltage Symp. Munich (1972)
- 9) 宅間 董, 河野照哉, 松葉博則, 渡辺恒雄, 河本 正：電力中央研究所研究報告, 176002 (1976)
- 10) 宅間 董：電気学会誌, 98 (1978) 549