



EStat 6.0

2次元有限要素法静電場解析ソフト

Field Precision LLC

PO Box 13595, Albuquerque, NM 87192 U.S.A.

E mail: techinfo@fieldp.com

Internet: <http://www.fieldp.com>

日本国内総代理店

株式会社アドバンスト・サイエンス・ラボラトリー

URL: <http://asl-i.com>

Eメール: info@asl-i.com

予備Eメール: info_asl@yahoo.co.jp

目次

1	はじめに	3
1.1	プログラムの機能	3
1.2	EStat の学習方法	4
1.3	有限要素法解析の手順	5
1.4	スクリプトとデータファイル	8
1.5	理論的背景	9
2	EStat による解の生成と分析	13
2.1	メッシュの生成	13
2.2	EStat スクリプトの作成	15
2.3	有限要素計算	17
2.4	解の分析	17
3	EStat 解析リファレンス	21
3.1	EStat スクリプトフォーマット	21
3.2	プログラム制御コマンド	23
3.3	物質特性のコマンド	24
3.4	異方性物質	25
3.5	Boundary(境界)および Superposition(重ね合せ)コマンド	27
3.6	EStat の実行	31
3.7	EStat 出力ファイルの形式	33
4	ポテンシャルと物質量の空間的变化を表す関数式	36
4.1	プログラムの機能	36
4.2	関数の構文規則	38
4.3	ベンチマーク例題	40
5	計算結果の分析	43
5.1	「FILE」メニューのコマンド	43
5.2	「PLOTS」メニューのコマンド	45
5.3	「ANALYSIS」メニューのコマンド	50
5.4	「SCANS」メニューのコマンド	56
5.5	分析スクリプトのコマンド	58
5.6	電気力線プロッタ	61
5.7	等高線ツール	62

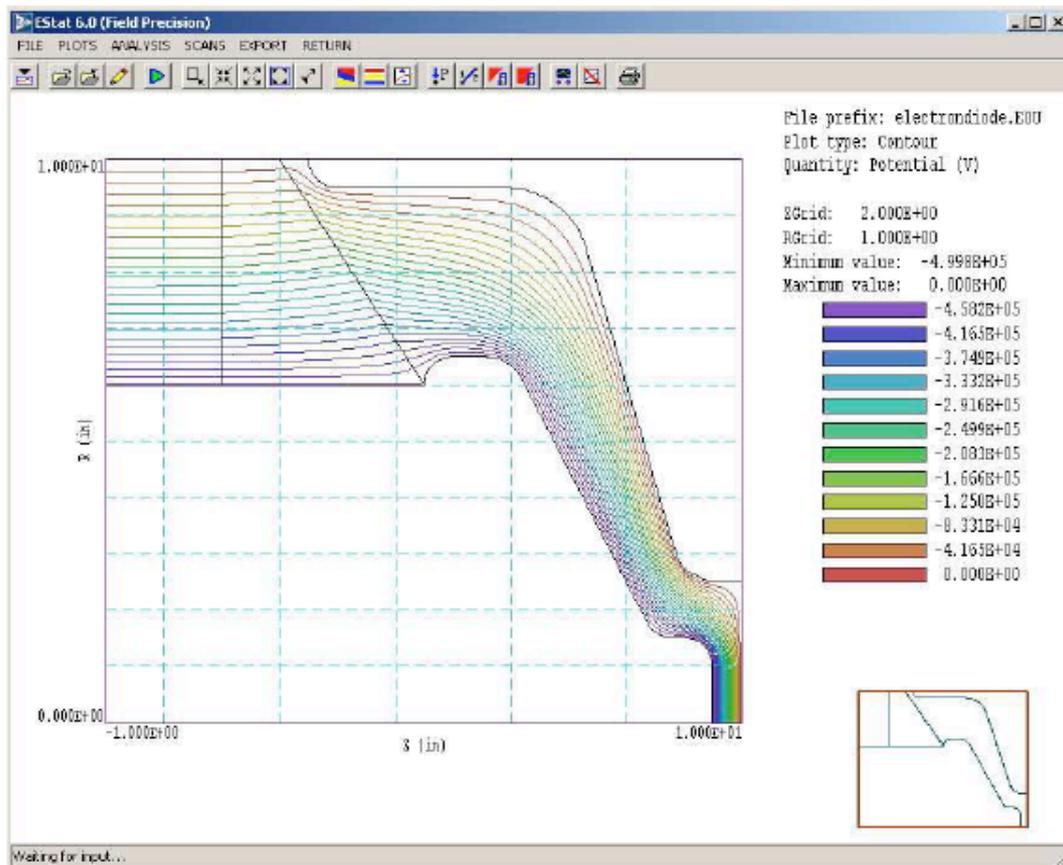


図1 スクリーンショット：Analysis モードにおける EStat

第1章 はじめに

1.1 プログラムの機能

EStat は、複雑な 2 次元の幾何形状を持つ物質からなる空間において、静電場を数値解析する多機能なツールです。数値解析によりシミュレートする体系には、電極、導体、誘電体、および空間電荷が含まれます。EStat を構成するパッケージは一体化していて、しかも自己完結型であり、メッシュの生成、有限要素解析、解の分析とプロット図作成など、問題のすべての局面に対処します。EStat は、サイズが変化する 3 角形要素に体系を分割することにより物質形状に適合させ、この 3 角形メッシュに有限要素法を適用して、高精度で高速な解析を行います。メッシュのサイズは、コンピュータにインストールされているメモリの大きさにより制限される以外は、自由に決めることができます。EStat のプログラムは、(方位角 θ に対称な) 3 次元の円筒座標系および (z 方向には無限で、x 方向と y 方向に任意に変化する) 2 次元の直交座標

系の問題を対象として解析します。Gauss の表面積分、静電エネルギー、および誘導電荷の自動計算のほかに、多くの種類の ϕ および E プロット図作成にも、解析関数を用います。

わかりやすいグラフィカルなユーザインターフェイスを用いているので、EStat を習得し、アプリケーションの実行準備作業を早く行うことが容易にできます。ほかの電場解析ソフトウェアに比べて、(異方性物質に対応するなど) 高度な機能と完全なデータ透過性が EStat の特長です。入力操作は、作業を文書化するテキストスクリプトに自動的に記録されます。このスクリプトがあると、解析の再構成が容易になり、共同作業者との分担がしやすくなります。

EStat は、次の 2 つの極限における静電場解析を行います。

■ 誘電(Dielectric)解析

この解析における物質とは、比誘電率 ϵ_r と (空間電荷が存在するとき) 空間電荷密度 ρ の値を異にする絶縁体 ($\sigma=0.0$) の集まりです。

■ 導電(Conductive)解析

物質は電気伝導率 $\sigma>0.0$ を持つ導体です。静電的極限においては、比誘電率 ϵ_r は電場の分布に影響を与えることなく、空間電荷密度は $\rho=0.0$ です。

“誘電”解析は、完全な絶縁体からなる系、または短いパルス電圧が良絶縁体にかかる場合に該当します。電気めっき装置は“導電”解析の例です。場合によっては、理想絶縁体と理想導体の混合系をモデル化することも可能です (1.5 節参照)。

1.2 EStat の学習方法

このマニュアルが対象とする範囲は、Mesh/EStat パッケージが幅広く機能することを反映しています。多くのアプリケーションに対処するため、この文書全体を読む必要はありません。解析を早く開始できるように、章全体を構成しました。経験を徐々に重ねていくに従い、高度な各種の事項を調べることができます。

- 本章の以下の節を大体読み、静電気学の基礎を多少おさらいしてください。プログラムにより深く関わっていくにつれ、(境界条件などの) 問題を解決するために、この内容に立ち戻ることになることでしょう。

- 次章にざっと目を通し、TriComp プログラムを起動するソフト、TC を理解してください。
- 「Mesh」のマニュアルの第2章に有限要素解析における形状適合メッシュの基本的な概念の説明がされていますので、必ず読んでください。
- Mesh マニュアルの第3章では、対話的な Mesh 描画エディタを用いた解析幾何形状の作成法を説明するために、ウォークスルーの例を取り上げます。この例を説明しながら、ユーザの皆様が行われるシミュレーションにおいて必要になるとと思われる基本的なツールを紹介します。Mesh マニュアルの第5章では、スクリプトを形状適合メッシュに変換する仕方について述べます。
- 本マニュアル第2章を必ず読んでください。ウォークスルーの例では、EStat を用いて有限要素解析を行い、分析する手順を述べます。
- 本パッケージの中(Examples フォルダ)に提供されている解析例をいくつか実行してみてください。これらの例を実行することにより、解析オプションについての知ることができ、ユーザの皆様がご自身で行われる解析の規範となります。
- 経験するにつれ、Mesh/EStat の持つすべての機能を利用したいと思うようになることでしょう。Mesh マニュアルの第4章は、Mesh 描画エディタの総合的なリファレンスです。また第5章では、メッシュの処理、プロット図作成、および補修について取り上げます。本マニュアル第3章と5章で、EStat の計算機能および分析機能について概略します。
- そのあとに続く章では、Mesh における高度な技法について説明します。第6章と7章においては、スクリプトに直接入力して、高度な制御機能を呼び出す仕方を示します。第8章においては、写真およびデータイメージから直接メッシュを生成する仕方について述べます。この機能は、簡単な幾何形状仕様で描くのは困難な複雑で不規則なシステムをモデル化するときに役立ちます。

1.3 有限要素法解析の手順

EStat で解析するには、有限要素数値解析法を詳細に理解している必要はありません。それ

でも、解析を有効に行うために、基本的な考え方を明確に把握しておくことが大切です。本節では、EStat 解析における処理手順を理解するうえで必要な参考事項について述べます。

場 (field) という用語は、空間のある領域全体にわたり定義された (スカラーまたはベクトル) 量のことです。場の例として、静電解析に電場ベクトル E 、電磁場解析における電場と磁場、および熱解析におけるスカラー量の温度などがあります。場の量の変化は、Poisson 方程式などの連続偏微分方程式により表されるのが普通です (1.5 節参照)。これらの方程式は、(たとえば、同心円筒間で、一様な比誘電率 ϵ_r を持つ誘電層など) 系の幾何形状および物質特性が簡単であるときには、解析的方法によって直接解けます。解析的に解くことは、非対称または非線形物質を持つ系においては、非常に困難なことになります。さらに、閉形式解は、数値的に評価しなければならない級数展開で表されることがよくあります。最も簡単な問題は別として、それ以外のすべての問題では、直接的な数値解法を用いる方がより早く、正確であるのが普通です。

場の数値解法において基本的に問題となるのは、デジタルコンピュータでは連続方程式を直接解くことができないことです。その代わりに、コンピュータは大きな組を構成する線形連立方程式を解くのによく適しています。(有限差分、有限要素、または境界要素など) すべての場の数値解法が目標とすることは、支配微分方程式を線形連立方程式に変換することです。線形方程式の解は、方程式の組が大きくなると、微分方程式の結果に近づきます。

有限要素法の基礎になるのは、解析空間全体を多くの小さな体積要素 (element) に分割することです。ここで、小さいという用語は、要素の大きさが場の量の変化を表すスケール長より非常に小さいということです。解析空間を小さな要素に分割したものは、計算メッシュと呼ばれています。EStat の 2 次元解析で用いるメッシュの一例を図 2 に示します。この図は、本マニュアルを通して用いられる 3 つの用語の定義を示すものです。

- 要素 (Element)。系を分割したときの体積単位。
- 節点 (Node)。要素どうしが交差する点。
- ファセット (Facet、切子面)。2 つの要素間の境界面。

図 2 で示した要素は、3 角形断面を持っています。平面解析では、断面は x - y 面内にあり、 z 方向には無限長です。円筒解析における要素は、 z - r 面内に 3 角形の断面を持つ軸に関する回転図形です。

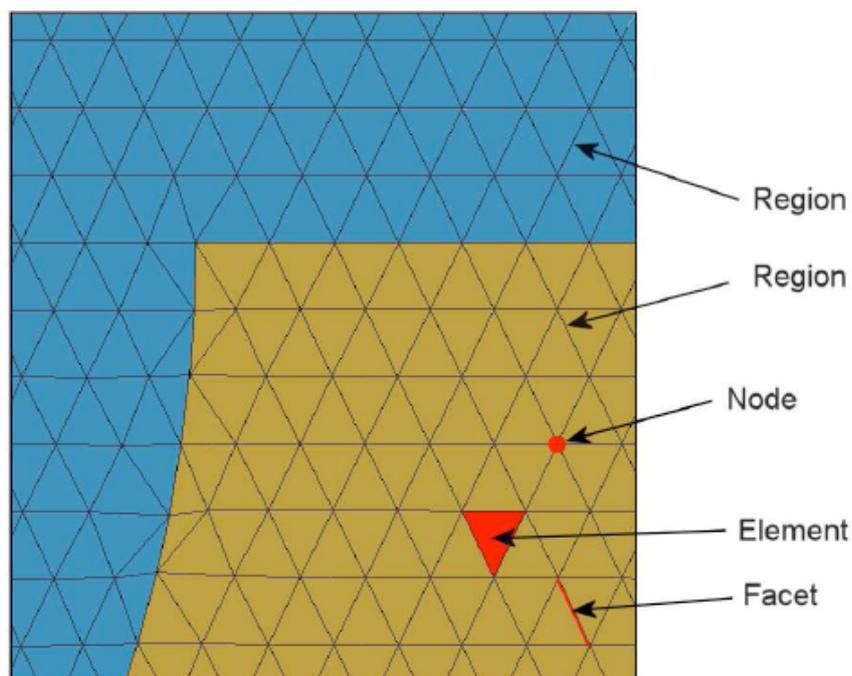


図2 形状適合3角形メッシュにおける用語の定義。

図2に示されたメッシュは、形状適合 (conformality) という重要な特性を持っています。この用語の意味は、メッシュを構成する3角形要素が領域 (region) 間の境界形状に特に適合するように形成されているということです。その結果、各要素がどの物質に属するかについて、あいまいさはありません。有限要素法は、次の2つの近似に基づいて成り立っています。1) 任意の要素内では物質特性が一様であること。2) 要素が十分に小さく、場の量が簡単な補間法により近似できること。この2つの仮定により、微分支配方程式はある節点を取り囲む要素について積分することができ、線形方程式が得られることとなります。この方程式は、その節点における場の量を、その周りの節点における場の量に関係付けます。メッシュの各節点に1つの線形方程式が結合して、方程式の組を構成しています。EStatにおいては、Poisson方程式の解が各節点における静電ポテンシャルを与えます。それから2次元補間を行い、間にある各点でのポテンシャルを見出すことができ、空間微分を数値的に行い、電場の成分を求めることができます。

こうしたことを背景として、EStat解析における手順を理解することができるようになります。

1. ユーザは、アプリケーション (EStatで計算する問題) に対し、その解析空間における物体の境界を定義します。通常、この作業はMeshの描画エディタを用いて仕上げ

ます。解析の精度と実行時間に影響を与える、解析対象の要素サイズなどの制御情報もまた指定できます。その結果として、たとえば電極や誘電体など、物体の輪郭を形成する直線や円弧の組が記録されたテキスト（スクリプト）が出来上がります。

2. **Mesh** は指定された境界を解析し、図 2 に示されたような形状に適合する 3 角形の組を自動的に生成します。プログラムは、節点の位置および要素の属する領域をリストとして記述した出力ファイルを作成します。
3. ユーザは、解析空間における領域の物質特性を定義します。通常、この作業は **EStat** における対話型ダイアログにより行われます。
4. **EStat** はメッシュの幾何形状を読み取り、物質パラメータを適用して、大規模な線形連立方程式を生成します。
5. **EStat** は反復法を用いて連結方程式を解き、節点のポテンシャルと座標を出力ファイルに記録します。このファイルは、その後に行う解析のときに再ロードすることができることで、解の不変な記録となります。
6. ユーザは、**EStat** のグラフィカルな環境を用いて対話的に解析や検討を行うことができます。プログラムはさまざまなプロット図を作成でき、場の量を定量的に計算します。ユーザの皆様は、解の複雑な分析を自動的に制御するスクリプトを記述することができます。

1.4 スクリプトとデータファイル

Mesh と **EStat** はいくつかの種類 of ファイルを読み取り、また作成します。標準的な解析では、ユーザがファイルを直接処理する必要はありません。ユーザインターフェイスがデータ編成を管理します。しかし、ユーザが大量のデータを作成する場合は、各計算の結果を個別のフォルダに保管しておくのが良いでしょう。また、**Mesh** と **EStat** の一部の高度な機能では入力スクリプトファイルに直接コマンドの入力を必要とするものがあります。利便性のため、すべての入力スクリプトと出力データファイルはテキスト形式となっています。また **Mesh** と **EStat** はともに、テキストエディタを組み込んでいます。**EStat** パッケージのファイルの種類と機能を

表 1 にリストします。拡張子がファイルの機能を表していることに留意してください。

表 1 EStat のファイル

ファイル名	機 能
MName.MIN	Mesh の入力スクリプト (基礎メッシュと領域輪郭の定義)
MName.MLS	Mesh の診断リスト
MName.MOU	Mesh の出力 (節点の位置と要素の領域属性)
EName.EIN	EStat の入力スクリプト (実行制御と物質特性)
EName.ELS	EStat の診断リスト (ログファイル)
EName.EOU	EStat の出力ファイル (節点位置と静電ポテンシャル)
AName.SCR	自動データ分析用の EStat スクリプト

1.5 理論的背景

参考文献の「S. Humphries, Filed Solution on Computers」 (CRC Press, Boca Raton, 1997)に、静電気学の理論と、EStatにおける有限要素法の応用が、詳細に論じられています。本節では、解析を行う上で役に立つ静電気理論の基礎となる考え方について概説します。

理想的な誘電体および空間電荷の領域においては、静電ポテンシャル ϕ はポアソン方程式

$$\nabla \cdot \epsilon_r \nabla \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}. \quad (1)$$

により決定されます。

式(1)において、 ϵ_r は比誘電率、 ρ は空間電荷密度 (C/m^3) です。一般に、 ϕ 、 ϵ_r 、および ρ の値は位置により変化します。空間電荷がない場合、式(1)はラプラス方程式の形になります。

$$\nabla \cdot \epsilon_r \nabla \phi = 0. \quad (2)$$

電場とポテンシャルには、次のような関係があります。

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi. \quad (3)$$

電極と誘電体表面上の電荷の分布が主として変位電流により影響を受けるとき、式(1) が成り立ちます。導電性媒質における実電流の定常流をモデル化するときにも、EStatを用いることができます。導体では、電流密度はポテンシャルのこう配と次のような関係があります。

$$\mathbf{j}_r = \sigma \mathbf{E} = -\sigma \nabla \phi. \quad (4)$$

ここで、 σ は導電率（単位S/m）です。媒質中の電荷の保存は、

$$\nabla \cdot \mathbf{j}_r = 0. \quad (5)$$

で表すことができ、式(4)を用いると、

$$\nabla \cdot \sigma \nabla \phi = 0. \quad (6)$$

となります。

式(6)において、

$$\epsilon \Rightarrow \sigma. \quad (7)$$

と置き換えると、式(2)と同じ形になります。このことは、EStatにおいて、同じプログラムルーチンが誘電体解析と導体解析のどちらにも適用できることを意味します。

誘電体解析または導体解析のどちらを行うのが適切であるかを定める判定条件を導くことができます。周波数 f で振動するRF（高周波）電場を印加したときに、誘電媒質における変位電流密度の大きさは、

$$|\mathbf{j}_d| = 2\pi f \epsilon_r \epsilon_0 |\mathbf{E}|. \quad (8)$$

により与えられます。

実電流の大きさは式(4)により与えられます。誘電的極限が適用されるのは、

$$|\mathbf{j}_r| \ll |\mathbf{j}_d|$$

のとき、または

$$\sigma \ll 2\pi f \epsilon_r \epsilon_0 \cong \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\Delta t}. \quad (9)$$

であるときです。式(9)における Δt は、非調和な場の変化に対する近似的な時間の長さを示すスケールです。たとえば、100 nsの電圧パルスの際に、導電率が $\sigma \ll 7.2 \times 10^{-3} \text{S/m}$ 、または体積抵抗率が $140 \Omega\text{-m}$ よりはるかに高いときに、脱イオン水を理想的誘電体として取り扱うことができます。静電解析が導電的であるのは、

$$\sigma \gg 2\pi f \epsilon_r \epsilon_0 \cong \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\Delta t}. \quad (10)$$

のときです。

EStatは、実電流と変位電流がともに顕著な大きさを持つ一般的な解析を取り扱いません。Field Precision社のRFE2パッケージがこの領域の解析を対象としています。EStatは、混合物質を構成するいくつかの物質が式(9)を満たし、他の物質が式(10)を満たすような系をモデル化するときに役立ちます。たとえば、パルス電圧の抵抗プローブを図3に示します。プローブ内部の導電解析では、式(10)を満たすように調整しました。プラスチックハウジングと真空空間は $\sigma = 0.0$ ですので、式(9)を満たします。図3の誘電解析では、プラスチック領域と真空領域の比誘電率は、それぞれ $\epsilon_r = 2.7$ および $\epsilon_r = 1.0$ です。導電領域の解析では、大きな比誘電率の値 $\epsilon_r = 1.0 \times 10^4$ を指定しました。したがって、抵抗プローブ内の静電解析は、周囲の誘電体にほとんど依存することなく、導電媒質の形状により決まりました。解析において電場は一律な振幅を持ち、主に軸方向に向いていることに留意してください。導体内部の解析は、導体を取り囲む絶縁体内部の静電場解析に対する境界条件を与えます。

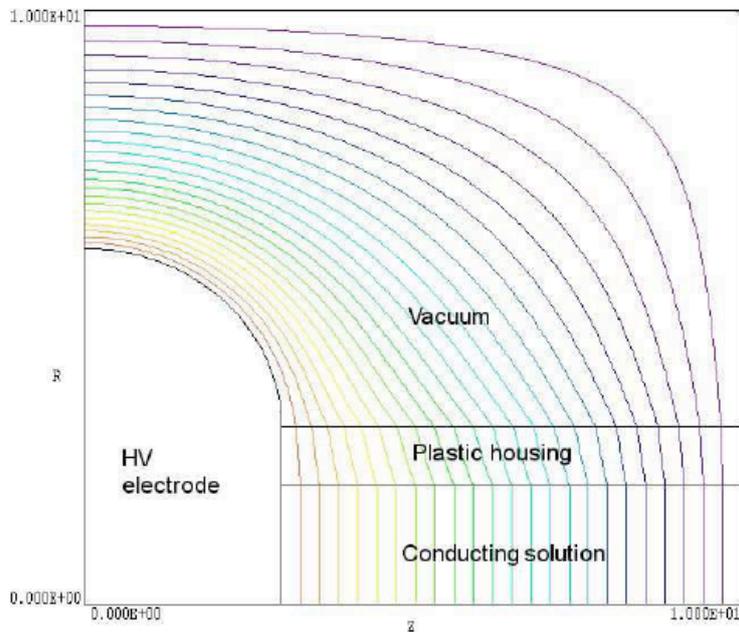


図3 誘電体と導体が混在する解析例

最後に、静電解析における境界条件について概説しておきます。境界 (boundary) は有限な解析領域の外縁です。境界上の節点は、次の2つの条件のうち一方を仮定することになります。

- Dirichlet境界上の点は、EStatの緩和処理で変化することのない、固定ポテンシャルを

持ちます。一様なポテンシャルを持つ節点の領域（等ポテンシャル領域）は電極を表します。電気力線は表面に垂直です。

- Neumann境界は、ポテンシャルの垂直微分係数が指定される境界です。EStatにおける境界条件は $\partial\phi/\partial n=0$ の場合に限られます。この特定のNeumann境界条件は、電場が境界に平行であることを意味します。有限要素法の利点の一つは、固定ポテンシャルとして設定されていないすべての境界は、この特定のNeumann境界条件を自動的に満たすことです。この条件は、境界が傾斜していても湾曲していても適用されます。

Neumann境界とDirichlet境界は、対称性のある系に対して、計算時間を短縮するために用いられることがよくあります。たとえば、バイポーラ平面電極を持つ系の等電位線のプロットを図4に示します。

$y=0.0$ における中央平面においては条件 $\phi=0.0$ が、 $x=0.0$ に沿っては条件 $E_{\perp}=0.0$ が満たされます。解析空間を $x\geq 0.0$ 、 $y\geq 0.0$ の範囲に限定し、左側境界にNeumann境界条件を下端境界にDirichlet境界条件を適用することにより、解析時間が1/4に短縮されます。

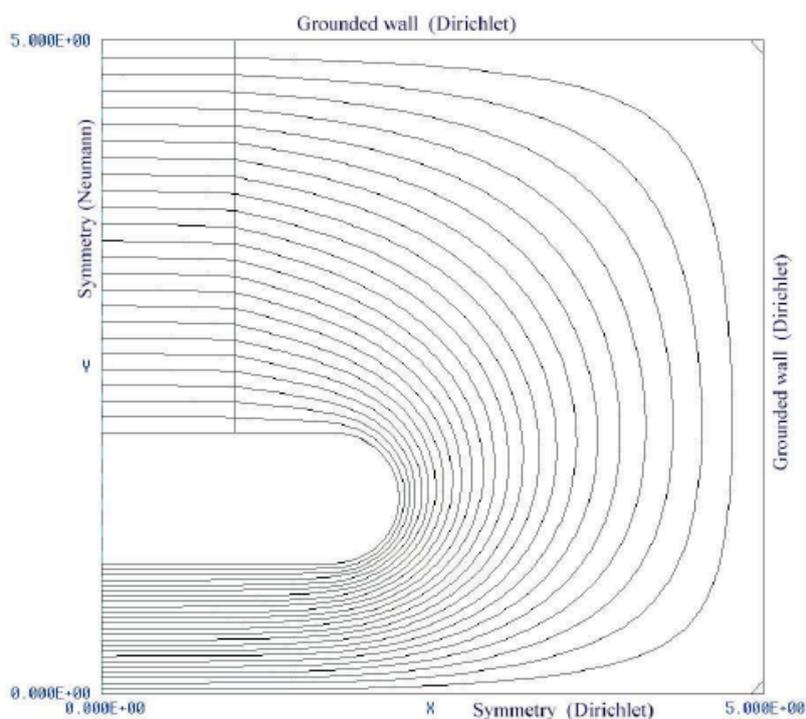


図4 最上端と最下端にバイポーラ電極のある対称系へのNeumann境界条件の適用。解析は解析空間の1/4についてのみ行います。特殊なNeumann条件が左端境界に、Dirichlet条件 $\phi=0.0$ が最下端境界に適用します。

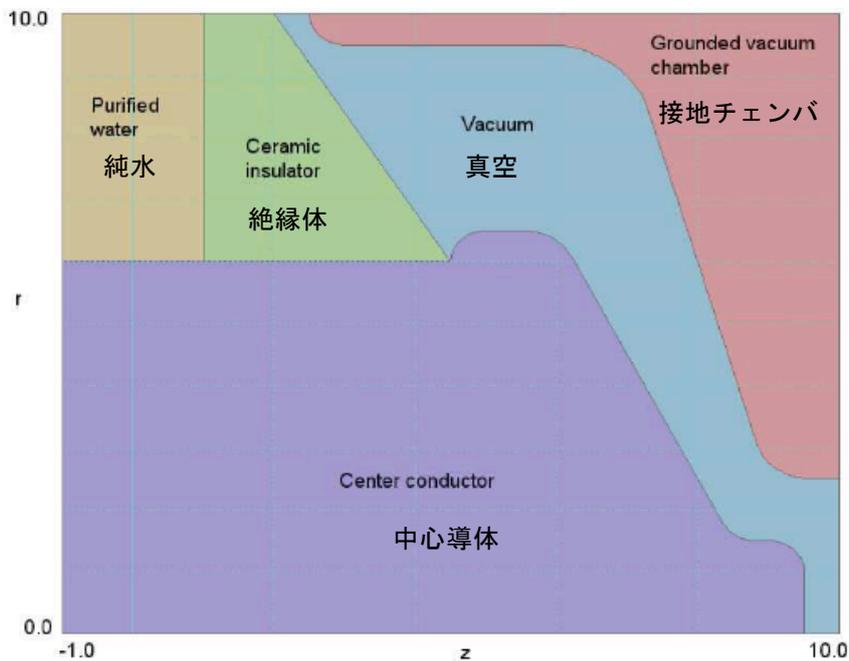


図5 EStatの例題計算：大電流電子ビームダイオード

第2章 EStatによる解の生成と分析

2.1 メッシュの生成

EStatの技法と機能の手っ取り早い入門として、図5に示す例を通して作業を進めていくことにします。解析空間は、大電流、パルス電力発生装置の出力部を表します。系は円筒対称であり、寸法の単位はインチです。電圧パルスが、同軸の水充填伝播路から真空絶縁体を経て、大電流電子ビーム負荷に送られます。電圧パルスの持続時間 100ns は、静電場解析が良い近似を与えるには十分な長さですが、水中における電気伝導率の影響が無視できる程度の長さです。Mesh スクリプトの（例題ライブラリとして「EStatExamples」フォルダ内に提供されている）ElectronDiode.MIN が、この解析に必要です。このファイルを作業ディレクトリにコピーして、TC プログラムランチャのデータフォルダ (Data folder) に正しく設定されていることを確認してください。

Mesh を起動し、ElectronDiode.MIN をロードしてください。「Edit script/graphics」コマ

ンドを指定し、描画エディタに入ってください。ここで、表示機能を用いて、次の領域が設定されていることを確認してください。

1. 真空 (Filled)
2. 水 (Filled)
3. 真空断熱材 (Filled)
4. 成形高電圧内部導体 (Filled)
5. 接地真空チェンバ (Filled) の成形部
6. 領域 5 により被覆されない、解析領域の上端部と右側部に沿って設定された接地条件

描画モードを終わらせて(「EXIT」メニューの「Abondan」)、メインメニューに戻ってください。Process コマンドをクリックしてください。「PLOT-REPAIR」メニューをクリックス津と完成されたメッシュが表示されます(図 6)。「Save mesh (MOU)」コマンドを選んでメッシュを保存してください。これで、Mesh を閉じるかまたは最小化しても構いません。

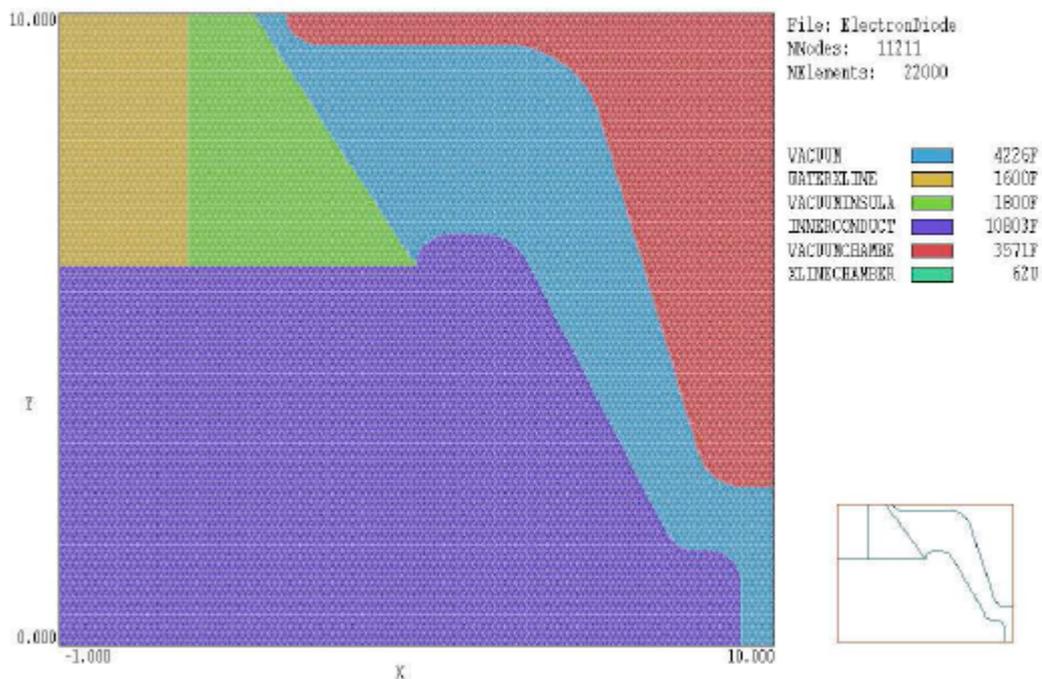


図 6 電子ダイオードの例に対する完成されたメッシュ

2.2 EStat スクリプトの作成

TC から EStat を起動してください。画面は始め空白で、ステータスバーはプログラムが入力待ちであることを示します。1、2 および 3 と数字が付いたボタンに注目してください。この数字は、静電場解析における 3 つの手順を示すものです。

1. プログラム制御と物質特性の設定
2. 有限要素方程式の生成と計算
3. 計算した解の分析

最初の操作を始めるには、システムの幾何形状を定義する **Mesh** の出力ファイルを指定する必要があります。ボタン「1」または「Setup」メニューコマンドをクリックしてください。ダイアログで、ファイル「ElectronDiode.MOU」を選んでください。EStat はこの情報をロードし、図 7 のダイアログを表示します。表には、各メッシュ領域の行があり、フィル (Fill) ステータスの表示があります。デフォルトの誘電モードでは、この表に値を入力する 3 つの列、Potential (固定電圧)、EpsilonR (比誘電率)、および Rho (オプションの空間電荷密度、単位 Coulomb/cm³) があります。

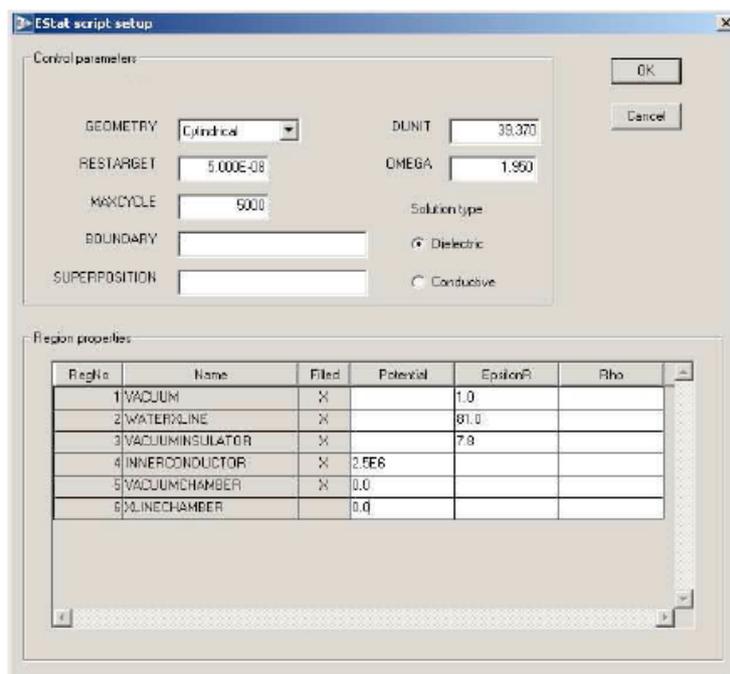


図 7 EStat の制御パラメータと領域特性を設定するダイアログ

このダイアログの「Control parameter」セクションには、次の入力項目があります。

- **GEOMETRY**：解析の対称性としての、平面 (planar) または円筒 (cylindrical) を選択します。平面解析は x - y 面内での変化を解析し、 z 軸方向に無限に一定です。円筒解析は θ に関して対称です。
- **RESTART**：有限要素方程式の要素マトリクス反復計算の精度許容値です。
- **MAXCYCLE**：反復計算におけるサイクル (試行回数) の最大数です。
- **BOUNDARY** と **SUPERPOSITION**：3.5 節で述べる高度なプログラム機能です。
- **DUNIT**：Mesh ファイルにおいて座標に用いた単位をメートル単位に変換する因子です。メートルあたりのメッシュ単位数で表します。例えば 39.37 ではインチ単位になり、100.0 では cm 単位となります。
- **OMEGA**：反復マトリクス計算を制御する 0.0 から 2.0 を範囲とするパラメータです。
- **SOLUTION TYPE**：オプションとして、誘電型 (Dielectric) または導電型 (Conductive) を選択します。解析の型については 1.5 節で述べました。

各領域の特性を入力する表の列は、解析の型 (SOLUTION TYPE) により異なります。誘電解析においては比誘電率 ϵ_r と空間電荷密度 ρ で、導電解析においては電気伝導率 σ です。図 7 の表に示されている値は、次の特性を持つことを示しています。

- 領域 1：誘電体 (真空)、 $\epsilon_r = 1.0$
- 領域 2：誘電体 (水)、 $\epsilon_r = 81.0$
- 領域 3：誘電体 (セラミクス)、 $\epsilon_r = 7.8$
- 領域 4：固定ポテンシャル (内部導体)、 $\phi = 2.5 \times 10^6$
- 領域 5：固定ポテンシャル (真空チェンバ)、 $\phi = 0.0$
- 領域 6：固定ポテンシャル (境界)、 $\phi = 0.0$

図 7 に示された値をダイアログに設定し、「OK」ボタンをクリックしてください。EStat はダイアログの情報に基づいて、表 4 に示すスクリプト「ElectronDiode.EIN」を作成します。第 7 章において、スクリプトのフォーマットと高度なプログラム機能について概説します。

表2 電子ビームダイオードの例に対する EStat の解析スクリプト

```
* File: ElectronDiode.EIN
Mesh = ElectronDiode
Geometry = Cylin
DUnit = 3.9370E+01
ResTarget = 5.0000E-08
Omega = 1.9500E+00
MaxCycle = 5000
Epsi(1) = 1.0000E+00
Epsi(2) = 8.1000E+01
Epsi(3) = 7.8000E+00
Potential(4) = 2.5000E+06
Potential(5) = 0.0000E+00
Potential(6) = 0.0000E+00
EndFile
```

2.3 有限要素計算

次のステップは、有限要素方程式を解くことです。「2」という数字の付いたボタンまたはメニューコマンド「Solve」をクリックしてください。ダイアログにデフォルトで入力されている ElectronDiode.EIN を受け入れて、「OK」ボタンをクリックしてください。画面は青色になり、プログラムが計算モードになっていることを示し、ステータスバーは実行進度を表示します。この場合、数字は読み取ることができないほど早く変化するのは、解析が 1 秒もかからないからです。終了すると、EStat は出力ファイル「ElectronDiode.EOU」を作成しますが、このファイルには各節点における静電ポテンシャルの値のほか、メッシュに関するすべての情報が含まれています。3.7 節において、このファイルのフォーマットを述べます。

2.4 解の分析

ここで、「ElectronDiode.EOU」の情報に基づいて、プロットを作成し、定量的な分析を行うことができます。「3」という数字の付いたボタンまたはメニューコマンド「Analyze」を選びます。そのダイアログで、デフォルトで選択されているデータファイルを選択してください。EStat はこのファイルをロードし、分析メニューとツールバーを設定し、図 8 に示すような等高線プロットをデフォルトで作成します。作業環境の構成を調べてみてください。画面下端のステータスバーには、出力ファイル名、データファイル名、プロットしている物理量、プロット

タイプ、補間法、およびマウスのスナップス状態などの情報が表示されています。分析操作の結果をテキストフォーマットでデータファイルに記録するか否かを選択するオプションがあります。メインのプロット図は上方左側、プロット図の色分け凡例は上方右側に表示されています。下方右側にある配向エリアには、解析空間に現在表示しているプロット図を輪郭線で示す縮小図が表示されています。「Point calculation」または「Region properties」などの分析コマンドに応じて、情報エリアが下方左側に現れます。

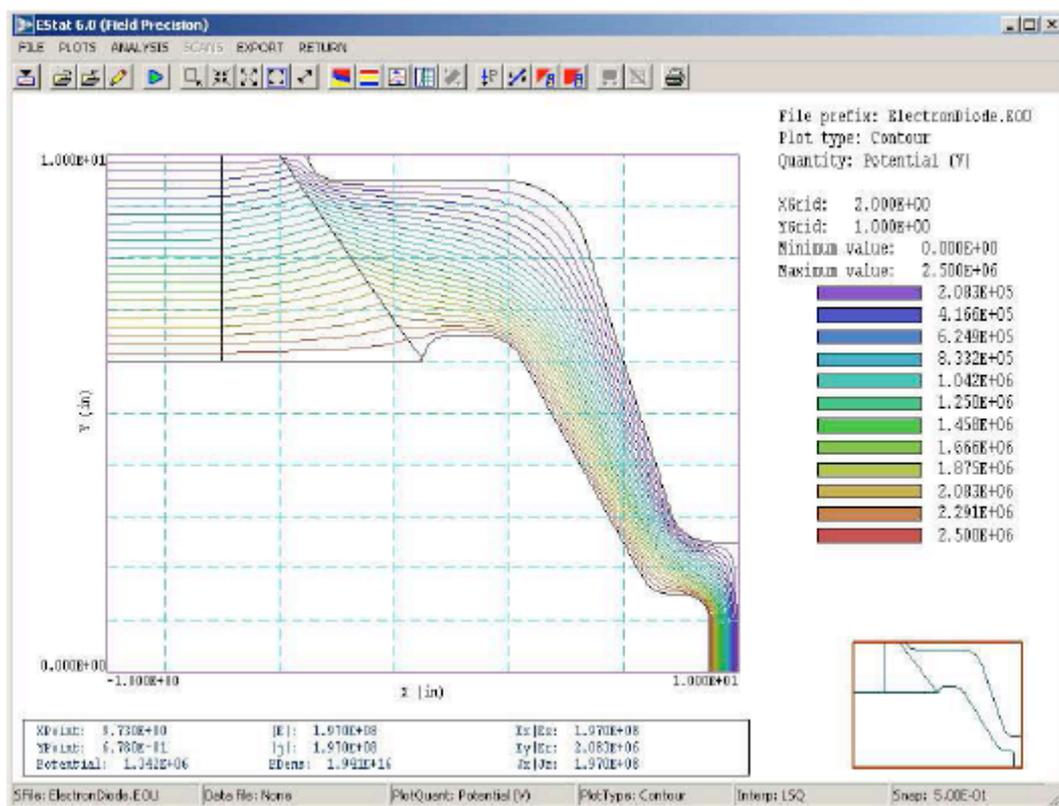


図 8 分析モードにおける EStat の作業環境

次章で、EStat の分析機能についての詳細な参考資料を示します。図 9 の 3 次元表面プロット図などの広範囲におよぶプロットを作成して、プログラムの機能を実験してみることができます。このセッションを終るにあたり、自動計算を制御するスクリプトを実行してみましょう。ファイルの内容を調べるには、「File」メニューの「Edit script」をクリックし、ファイル「ElectronDiode.SCR」を選んでください。表 3 にファイルの内容を示します。始めのコマンドでファイル ElectronDiode.EOU をロードさせ、次のコマンドでデータファイル ElectronDiode.DAT を開かせます。「VolumeInt」コマンドは、静電場エネルギーの体積積分を

自動的に開始させます。「Scan」コマンドは、陽極面上のポテンシャルと電場成分からなる 25 のデータ行の組をリスト表示させます。表 4 はそのリストからの抜粋です。領域 1 (真空ダイオード) における場のエネルギー U_e は 143.9 ジュールです。公式 $U_e = CV^2/2$ に $V = 2.6 \times 10^6$ を代入すると、真空ダイオード領域の静電容量は約 44.36 pF となります。

表 3 EStat 解析スクリプト「ElectronDiode.SCR」

```
INPUT ElectronDiode.EOU
OUTPUT ElectronDiode
VOLUMEINT
NSCAN 25
SCAN 9.9999 0.0000 9.9999 2.5000
ENDFILE
```

表 4 ElectronDiode.SCR により作成したデータファイルのデータ

```
--- Volume Integrals ---
Energy: 1.681E+03 J
Power: 1.899E+14 W
Epeak: 2.474E+08 V/m
ZPeak: 9.482E+00
RPeak: 1.238E+00

Integrals by region
NRReg Volume Energy Power PeakE PeakZ PeakR
(m3) (J) (W) (V/m)
=====
```

NRReg	Volume (m3)	Energy (J)	Power (W)	PeakE (V/m)	PeakZ	PeakR
1	1.372E-02	1.439E+02	1.625E+13	2.474E+08	9.482E+00	1.238E+00
2	6.590E-03	1.401E+03	1.582E+14	3.164E+07	-9.344E-01	6.033E+00
3	7.073E-03	1.366E+02	1.543E+13	3.849E+07	2.014E+00	9.931E+00
4	1.583E-02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5	1.342E-02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

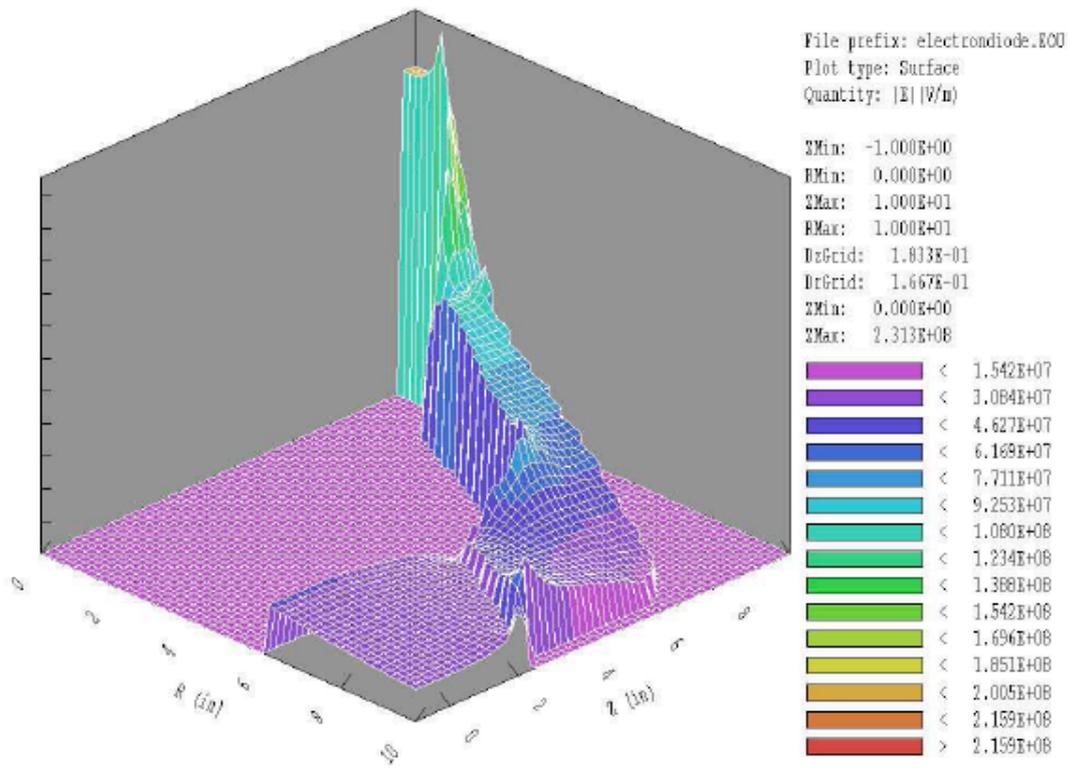


図9 表面プロット：高さは、 $|E|$ を (z, r) の関数として表した値です。

表 5 EStat ダイアログにおける入力から物質モデルを設定

マテリアルタイプ	Potential	EpsilonR	Rho
固定電位電極	X		
等方性誘電体		X	
等方性導体			X

第 3 章 EStat 解析リファレンス

3.1 EStat のスクリプトフォーマット

2.2 節で示したダイアログを用いて対話的に、またはテキストエディタを用いて、コマンドを直接編集することにより、EStat の制御スクリプトを作成できます。エディタにより、容易に任意のスクリプトを修正できます。本章では、制御スクリプトを構成するコマンドの構文規則と機能について詳細に説明します。3.2 節では、プログラムの動作を制御するコマンドについて説明します。これらのコマンドは、(図 7 に示した) ダイアログの Command parameters セクションにおける入力に基づいて生成されます。3.3 節では、簡単な物質特性を設定するコマンドについて概説します。これらのコマンドは、ダイアログの「Region properties」の表に対する入力に基づいて作成されます。表 5 は、各領域(region)に設定された物質の種類が、ダイアログにおける入力によって、どのように決まるかを表に示しています。残りのセクションでは、プログラムの動作と出力ファイルのフォーマットとともに、EStat の高度な機能について説明します。

EStat のスクリプトは、コマンドとパラメータを含むデータ行からなるテキストファイルです。EStat の「Setup」ダイアログを用いて、スクリプトを作成することができます。テキストエディタを用いても、スクリプトを記述したり、修正したりできます。一部高度な機能には、直接スクリプトを編集する必要があるものもあります。

スクリプトは「EndFile」コマンドで終わらなければなりません。1つのデータ行の入力項目は、Mesh のマニュアルで説明した標準の区切り記号により分けて入力することができます。標準の区切り記号とは、

- スペース “ ”
- コンマ “,”

- タブ
- コロン “:”
- 左括弧 “(“
- 右括弧 “)”
- 等号 “=”

です。

区切り記号は、1つのデータ行にいくつでも用いることができます。空白行とコメント行は無視されます。コメント行はアスタリスク (*) で始めます。EStat では、コマンドの順序を問題にしません。次の例は完全なスクリプトを例示しています。

```
* File CYLPROBE.EIN
GEOMETRY = Cylin
DUNIT = 100
* Region 1: Set to EpsiR = 1.0
EPSI(1) = 1.0
* Region 2: Dielectric sheath
EPSI(2) = 1.0E-6
* Region 3: Probe
POTENTIAL(3) = 1.0
* Region 4: Chamber wall
POTENTIAL(4) = 0.0
ENDFILE
```

プログラム制御と領域特性設定の 2 種類のコマンドがあります。プログラム制御コマンドには、キーワードと値が含まれています。領域コマンドは、要素と節点に関連する物理的性質を設定します。領域コマンドは以下のようなフォーマットとなります。

Keyword RegNo Value

ここで整数の「RegNo」は、Mesh の入力ファイルで定義された領域番号です。文字列の「Keyword」は物理的性質を指定します。「Value」は 1 つ以上の数値です。一例として、コマンド

POTENTIAL 2 -5500.0

は、領域番号 2 を持つ節点に、固定ポテンシャル-5.5 kV を設定します。(注記：以前のバージョンとの互換性を保つため、Version 1.0 から 5.0 までの、Set で始まるプログラム制御コマンド、Region で始まる領域コマンドを EStat は認識します。)

3.2 プログラム制御コマンド

以下のセクションでは、コマンドを記号を用いて象徴的に表すとともに、実際の **EStat** のスクリプトでの書式例を表記します。

MESH MPrefix

MESH SparkGap

シミュレーションの幾何形状を定義する、**Mesh** の出力ファイルを指定します。このファイルは「MPrefix.MOU」という名前を持ち、作業ディレクトリ内になければなりません。もし、例えば「EPrefix.EIN」という名前のスクリプト中において、このコマンドが現れないときは、**EStat** はデフォルトのメッシュファイルとして、「EPrefix.MOU」という名前のファイルを探します。

DUNIT DUnit

DUNIT = 1.0E4

Mesh においては、都合のよい長さの単位を使うことができます。このコマンドは、**Mesh** で用いられた座標を、**EStat** で用いる標準の単位メートルに変換する係数を定義します。量「DUnit」は、1メートルあたりの、**Mesh** で用いられている単位の数を表します。たとえば、**Mesh** においてミクロンを単位としているとき、 $DUnit=1.0 \times 10^6$ としてください。デフォルトの値は 1.00 です。

(注：出力ファイル FPrefix.EOU に記録されている空間量は常にメートルを単位としています。**EStat** を用いた解析セッションにおいては、グラフおよびリストファイルにおける空間量は **Mesh** の単位にスケール変更されています。たとえば、**Mesh** の単位がセンチメートルであり、 $DUnit=100.0$ であるときは、プロット図における空間量はセンチメートル単位となります。)

GEOMETRY [Rect, Cylin]

GEOMETRY = Cylin

EStat は、直交座標系および円筒座標系の幾何形状を取り扱います。直交座標の系においては、解析する量は x および y 軸方向に変化し、 z 軸方向に無限遠まで一定であるとして処理します。円筒座標の系においては、解析する量は方位角対称性を持ち、 r および z 軸方向に変化するとして処理します。パラメータのオプションは Rect (直交座標系) および Cylin (円筒座標系) です。円筒解析においては、プログラムは **Mesh** の x 軸方向を z 軸とし、 y 軸方向を r 軸とします。この場合、節点の y 座標が 0.0 より小さいと、プログラムはエラーメッセージを表示します。

OMEGA Omega

OMEGA = 1.96

このコマンドは、マトリックス反復演算の過緩和因子(over-relaxation factor)を、0.0 から 2.0 までの範囲で値を設定します。一般に、この値が大きいほど、収束が速くなります。解析が収束しないときは、過緩和因子の値を小さくしてください。このコマンドが現れないとき、プログラムは Chebyshev の加速法を用いて過緩和因子として最適の値を選びます。

MAXCYCLE MaxCycle

MAXCYCLE = 500

マトリックス反復演算の最大サイクル数です。デフォルト値は 2500 です。

RESTART ResTarget

RESTART = 5.0E-6

EStat はマトリックス反復演算をしている間、ポテンシャルの大きさの相対誤差を計算します。誤差が ResTarget の値より小さくなるとプログラムは計算を終了します。一般に ResTarget の値が約 1.0×10^{-6} より小さいとき、十分な精度で解析されます。デフォルト値は、 5.0×10^{-8} です。

3.3 物質特性のコマンド

次の 4 つのコマンドは等方性物質の特性を定義します。これらの値は、EStat の Setup ダイアログを用いるか、直接テキストエディタを用いて生成できます。

POTENTIAL RegNo Pot

POTENTIAL(5) = 3500.0

キーワード「Potential」は、ある領域に属する節点のポテンシャルが固定され、マトリクス緩和により変化しないことを指定します。このコマンドは、ポテンシャルの大きさをボルト (Volt) の単位で設定します。固定されたすべての領域に対して、デフォルト値は 0.0V です。このコマンドは、誘電型(dielectric)と導電型(conductive)の解析の両方で使用されます。

EPSI RegNo EpsiR

EPSI(3) = 5.8

誘電領域に比誘電率 $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ を設定します。デフォルト値は、 $\epsilon_r = 1.0$ です。このコマンドは誘電型(dielectric)解析にのみ適用します。

RHO RegNo Rho

RHO(7) = 3.6E-3

空間電荷密度を C/m^3 の単位で設定します。この量は導体の問題では物理的に意味がないことから、誘電解析においてのみ機能するコマンドです。この場合、コマンド Epsi と Rho はともに同じ誘電体領域に適用します。

SIGMA RegNo Sigma

SIGMA(2) = 0.145

伝導率を S/m の単位で設定します。伝導率は $\Omega\cdot m$ を単位とする体積抵抗率の逆数に等しい値です。このコマンドは導電型(conductive)解析にのみ適用します。

単一の解析においては、Sigma コマンドかまたは Epsi/Rho コマンドのいずれかを用います。誘電型と導電型の量が混在しているとき、EStat はエラーメッセージを表示します。

3.4 異方性物質

EStat は、2 つの基準軸方向で ϵ_r の値が異なる異方性誘電体、および σ の値が異なる異方性導体を取り扱うことができます。

EPSI RegNo Epsi1 Epsi2 Theta

EPSI(5) = (5.8, 2.6, 45.0)

2 つの基準軸方向で比誘電率が異なる異方性誘電物質を定義します。領域番号のあとの最初の実数値 (ϵ_1) は軸 1 方向の比誘電率で、2 番目の実数値 (ϵ_2) は軸 2 方向の比誘電率です。デフォルト値は $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1.0$ です。3 番目の値 (θ) は軸 1 の x (または z) 軸に対する相対角度で、度 ($^\circ$) を単位とします。軸 2 の角度は $\theta + 90^\circ$ です。円筒座標解析に対しては、構造全体が円筒対称性を持たなければならないことに留意することが重要です。したがって、 $\theta \neq 0.0^\circ$ であると、軸 1 と軸 2 は円錐状になります。そのような物質に出会うことはありそうもないことなので、実際の円筒座標系のシミュレーションは一般に $\theta = 0.0^\circ$ の場合に限られます (すなわち、 z 軸方向と r 軸方向の比誘電率が異なる場合だけになります。)

SIGMA RegNo Sigma1 Sigma2 Theta

SIGMA(8) = (5.0, 0.1, 45.0)

異方性の導体を定義します。領域番号のあとの実数値 (σ_1) は軸 1 方向の電気伝導率、2 番目の実数値 (σ_2) は軸 2 方向の電気伝導率で、S/m を単位とします。3 番目の数値 (θ) は、 x 軸 (または z 軸) 方向に対する軸 1 の角度です。

EStat の解析機能は、場のエネルギー、抵抗による電力損失、誘導電荷、および電流密度の計算に物質の異方性の効果を含めることができます。次の式は直交座標解析に適用しますが、 $x \rightarrow z$ 、 $y \rightarrow r$ と置換することにより、円筒座標解析にも適用します。異方性導電物質に対して、電流密度の局所成分と電場には、次の関係があります。

$$\begin{bmatrix} j_x \\ j_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}. \quad (15)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_2 \sin^2 \theta, \\ \sigma_{xy} &= \sigma_{yx} = (\sigma_1 - \sigma_2) \cos \theta \sin \theta, \\ \sigma_{yy} &= \sigma_1 \sin^2 \theta + \sigma_2 \cos^2 \theta. \end{aligned} \quad (16)$$

電場と電流密度が与えられると、抵抗による電力損失は、

$$p = \frac{1}{2} [j_x E_x + j_y E_y]. \quad (17)$$

となります。

異方性誘電体は、2 つの基準軸方向の比誘電率が異なる値 (ϵ_1 および ϵ_2) を持っています。印加電場 \mathbf{E}_0 (全電場から誘電物質が寄与する電場を差し引いた値) で方程式を表すことにします。印加電場は変位ベクトルと次の関係があります。

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}_0. \quad (18)$$

印加電場は全電場と次の関係があります。

$$\begin{bmatrix} E_{0x} \\ E_{0y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}. \quad (19)$$

ここで、

$$\begin{aligned}\epsilon_{xx} &= \epsilon_1 \cos^2 \theta + \epsilon_2 \sin^2 \theta , \\ \epsilon_{xy} &= \epsilon_{yx} = (\epsilon_1 - \epsilon_2) \cos \theta \sin \theta , \\ \epsilon_{yy} &= \epsilon_1 \sin^2 \theta + \epsilon_2 \cos^2 \theta .\end{aligned}\tag{20}$$

となります。静電場エネルギー密度は、

$$u = \frac{\epsilon_0}{2} [E_{0x} E_x + E_{0y} E_y] .\tag{21}$$

と表すことができます。

導体表面上の誘導電荷密度は、表面に垂直な電場成分で表すことができます。全表面の電荷密度 (C/m²) は、次式によって与えられます。

$$\rho = \epsilon_0 E_{\perp} .\tag{22}$$

全電荷は、電極上の自由電荷および隣接する誘電体における分極電荷の寄与からなります。自由電荷密度と印加電場の関係は、

$$\rho = \epsilon_0 E_{0\perp} .\tag{23}$$

により与えられます。

EStat の解析ルーチンは誘電性の量と抵抗性の量のどちらも計算できます。ユーザは、問題とする特定の計算にどちらが適切かを判断することになります。EStat の動作は、どちらの解析に対しても同様です。この場合、誘電解析において電流密度として現れる量は、導電解析における印加電場に等価な量として処理されます。

3.5 Boundary(境界)および Superposition(重ね合せ)コマンド

EStat は、大きな解析空間における小さな特徴的部分の近くの場合を正確に計算することができます。例として、電界放出チップ近傍の電場の計算を正確に行いたいとします。チップの半径は、支持電極の外形寸法よりはるかに小さいものです。巨視的な場 (解 1) を求めるために大きなスケール(大きな要素)で計算を行う必要がありますが、一方でチップ先端付近の電位のカーブを計算するには、非常に小さな要素が必要です。アプローチの 1 つとして、サイズ変化メッシュ分割を行って小さな要素を生成する方法があります。しかしながら TriComp で用いる構造

化メッシュでは、小さな要素の範囲が解析空間の全長に及ぶことから、この方法には限界があります。

図 10 は、もう 1 つのアプローチを例示しています。もとの解析空間内の小区域（緑色の線で囲んだ区域）を占める第 2 の解析空間を設定します。この小区域での微視的な解析には、小区域を貫く電極が含まれています。もとのアプローチとの違いは、電極形状が詳細に記述されることです。課題となるのは、巨視的な場の影響をどのように微視的な解析に正しく取り入れるかということです。このアプローチでは、EStat が第 2 の解析空間を可変ポテンシャル Dirichlet 境界の中に囲い込みます。境界上の ϕ の値は、巨視的解析との対応点（赤い破線で結んだ対応点）で補間することにより計算します。全解析は、（丸みを帯びたチップなど）新たな特徴的部分が境界に近くない限り近似的に正しくなることでしょう。可変ポテンシャル境界は、解析 2 の制御スクリプト中の次のコマンドにより取り入れることができます。

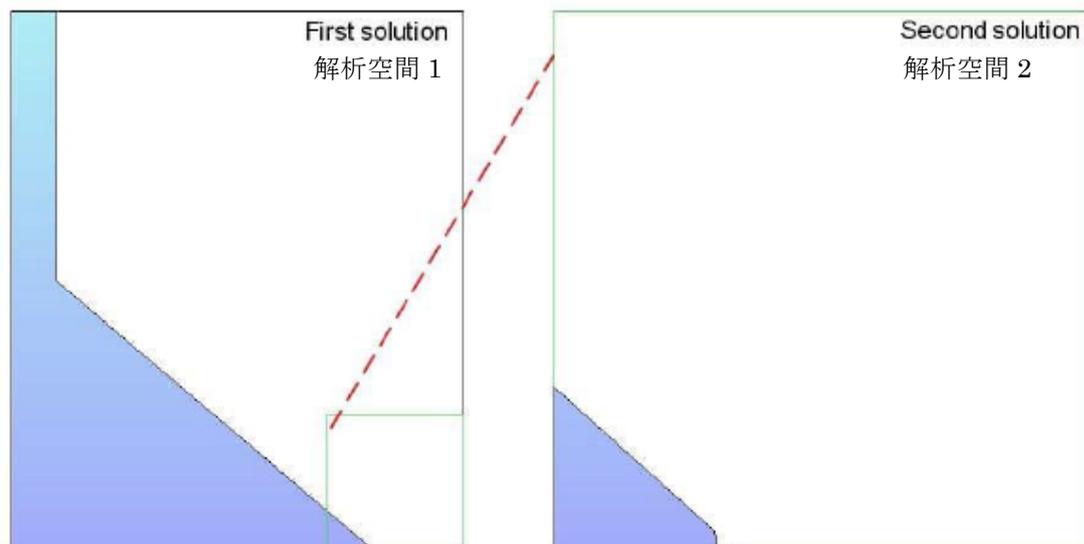


図 10 微視的解析のために補間した Dirichlet 境界

BOUNDARY FPrefix 「BndScale」

BOUNDARY FEmitMacro

文字列「FPrefix」は、解析 1 の出力ファイルの拡張子を除いたファイル名です。オプションである BndScale (実数) は、解析 1 から解析 2 に受け渡したポテンシャル値に適用する倍率です。デフォルトでは、BndScale = 1.0 です。

EStat は次の場合、エラーメッセージを表示します。

- 解析 1 の出力ファイル 1 (FPrefix.EOU) が作業ディレクトリで使用可能でないとき
- 解析 2 が解析 1 の内部に完全に納まっていないとき
- 解析 1 と解析 2 の対称性が異なるとき
- 補間できなかったとき

プログラムはそれ以上の有効性チェックをしません。解析 2 の幾何形状が解析 1 の小区域に正しくなっていることを、ユーザは確認する必要があります。

解析 2 の各節点は、次の 2 つの条件を満たすとき、境界上にあるとみなされます。

- $K = 1$ 、 $K = K_{max}$ 、 $L = 1$ 、 $L = L_{max}$ のいずれかの添字(index)を持つ。円筒対称性のある解析では、軸上の点 ($L = 1$ および $r = 0.0$) に Dirichlet 条件を設定しません。
- 隣接する要素の 1 つが、RegNo = 0 を持つ。この条件は、解析 2 に矩形でない境界を設定できることを意味します。

図 11 に境界点の基準を例示します。解析 1 は 3.00 インチのギャップで離れた位置にある 2 つの球面電極間の電場を表しています。ギャップの中央に挿入した小さな誘電体上の場を求めたいとします。解析 2 は、ギャップの中点を中心とする (半径 1.00 インチの) 球面領域です。微視的解析は、半径 0.10 インチの誘電体球を含んでいます。解析 2 の円形外側境界上のポテンシャル値の指定に注目してください。円筒対称な解析の下側境界では、Dirichlet 条件は設定されていません。したがって、軸上ポテンシャルを誘電体の存在に適合させることができます。この例の入力スクリプトは、BoundaryVal01 および BoundaryVal02 という名前で、EStat の実例ライブラリ (EStatExamples フォルダ) に入っています。

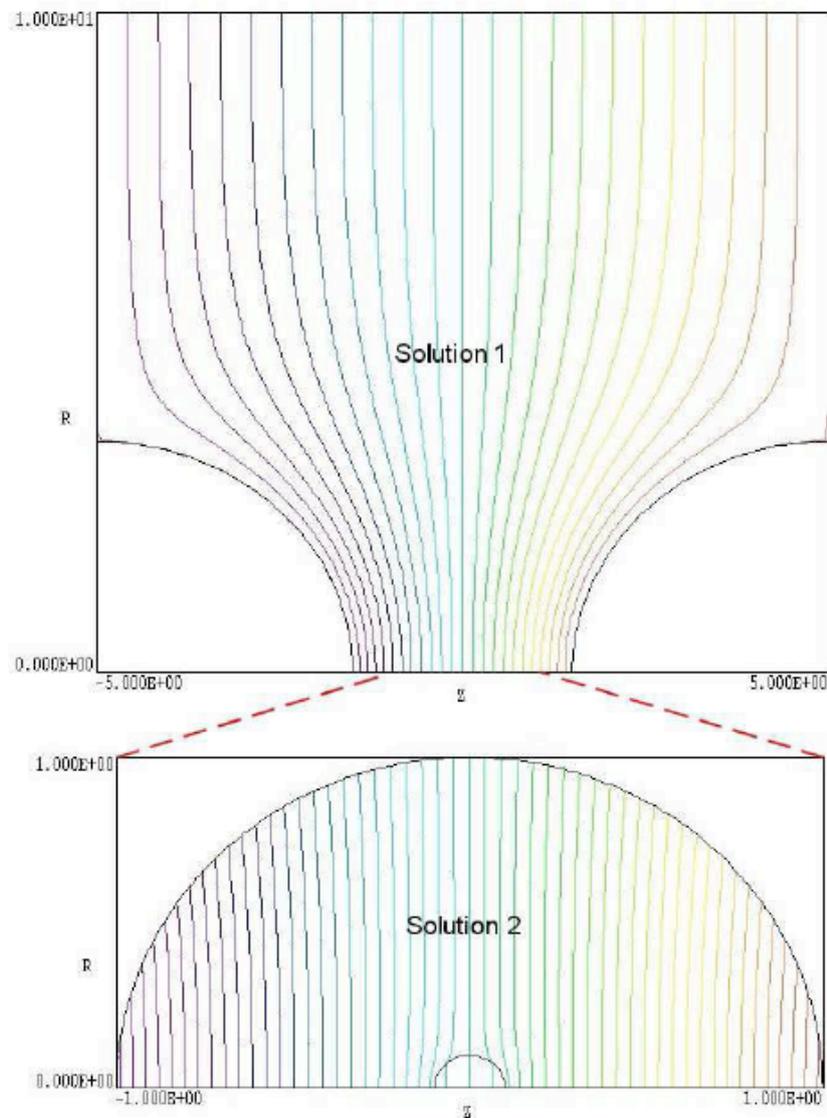


図 11 Boundary コマンドを用いた 2 段階解析の例

Superposition コマンドは、大きなスケールの解析（解析 1）で求めた値を小さなスケールの解析（解析 2）に重ね合わせるように `EStat` に指示します。次のステートメントが解析 2 のコマンドスクリプトに現れます。

SUPERPOSITION FPrefix [SScale]

SUPERPOSITION UniField

文字列 `FPrefix` は、解析 1 の出力ファイルの拡張を除いたファイル名です。オプションの `SScale`（実数）は解析 1 から解析 2 に受け渡したポテンシャル値に適用する倍率です。デフォルトでは、`SScale = 1.0` です。

このコマンドに対応して、EStat は解析 2 が完了したあと、ファイル FPrefix.EOU を開きます。出力ファイルに結果を書き込む前に、プログラムは解析 1 の空間において補間を行い、解析 2 の各節点位置におけるポテンシャル ϕ_1 を決定し、ポテンシャル値を次式に従って調整します。

$$\phi'_2 = \phi_2 + SScale \phi_1, \quad (24)$$

ユーザは重ね合わせが正しいことを確認する必要があります。静電場解析においては、解析 2 に電極と誘電体が存在することによって、解析 1 の巨視的場に著しい局所的变化を生じさせることがありますので、単純な重ね合わせは有効にはならないでしょう。

3.6 EStat の実行

EStat は一つのウィンドウでの対話的プログラムとして、またバックグラウンドタスクとして実行することができます。コマンドプロンプトからプログラムを実行するには、次の形式のコマンドを用いてください。

```
[ProgPath¥]ESTAT [DataPath¥]FPrefix <ENTER>
```

ここで、ファイル FPrefix.EIN、およびそれに対応する Mesh 出力ファイルがデータディレクトリに存在する必要があります。この機能により、DOS バッチファイルまたは Perl スクリプトを用いて、EStat の長時間にわたる自律的な実行を設定することができます。

本節の残りの部分では、EStat を対話的モードで実行したときのメインメニューにおけるコマンドについて説明します。プログラムを TC から起動するか、入力ファイルのファイル名なしで実行したときに、この対話的モードに入ります。「File」メニュー内には、次のコマンドが現れます。

EDIT SCRIPT (EIN)

EDIT LISTING (ELS)

EDIT FILES

これらのコマンドは、内部エディタを呼び出し、EStat の入力ファイルと出力ファイルをチェックしたり、修正するときに用います。ほかのディレクトリからファイルを選んでも、作業ディ

レクトリは変わりません。Edit script (EIN)コマンドは、FPREFIX.EIN という形の名前の付いたすべてのファイルをリスト表示し、Edit listing (ELS)は FPREFIX.ELS という名前の付いたファイルをリスト表示します。

RUN ANALYSIS SCRIPT

一連の似た内容の解析について、複雑な、または繰り返しの分析を行いたい場合に、解析スクリプトを使います。このコマンドをクリックすると、「.SCR」という拡張子の付いたファイルをリスト表示するダイアログが現れます。リストからファイルを選んで、OK ボタンをクリックしてください。このスクリプトによって、出力ファイルのロード、データ記録ファイルのオープンおよびクローズ、本章で述べたすべての定量的解析機能を実行できます。スクリプトのコマンド言語については 5.5 節で述べます。解析スクリプトは、データファイルと同じディレクトリになければなりません。

SETUP

このコマンドの機能は、静電解析を制御する EStat スクリプトを作成します。プログラムは、始めに **Mesh** の出力ファイルの入力を促し、系の幾何形状を定義します。ファイルのプレフィックスは、*Mesh* スクリプトコマンドの引数 (argument) として用います。次に、プログラムは図 27 に示したダイアログを表示します。ダイアログにおける領域の数は、**Mesh** の出力ファイルにより決められます。上側のボックスにおける制御パラメータの機能については 7.2 節で述べました。下側のボックスには表があり、領域の基本的な物理的性質を入力することができます (7.3 節参照)。異方性物質のような高度な機能を実行するには、スクリプトの編集を直接行う必要があります。

「SOLVE」メニューには、次の 2 つのコマンドがあります。

RUN

(FPrefix.EIN などの) 入力ファイルを選んで、計算を始めます。ほかのディレクトリからファイルを選ぶと、作業ディレクトリが変わります。ファイル FPrefix.MOU または Mesh コマンドで指定したファイルがあると、計算が始まります。計算を行っている間、画面の色が青くなり、進行状態がステータスバーに示されます。

STOP

このコマンドは EStat の実行を停止し、緩和計算の現在の状態を保存します。たとえば、収束

の途中で、問題が正しく定義されているかチェックしたいときに、緩和計算を停止したい場合などです。

ANALYZE メニュー

FPrefix.EOU という形式のファイルを選び、プロット図作成と数値解析をするための分析モードメニューを呼び出します。

HELP メニュー/ESTAT MANUAL

デフォルトの PDF 表示ソフトに本マニュアル(estat.pdf)を表示させます。ファイル「estat.pdf」は estat.exe と同じディレクトリになければなりません。

3.7 EStat 出力ファイルの形式

EStat の出力ファイル FPrefix.EOU はテキストフォーマットです。このファイルは、次の 3 つのセクションからなります。

- 実行内容についての一般情報を記述するヘッダ
- 節点と要素についての情報
- 領域についての情報

ヘッダセクションは、タイトル行と 9 つのデータ行からなります。

```
--- Run parameters ---
XMin: -1.270003E-01
XMax:  1.270003E-01
KMax:  101
YMin:  0.000000E+00
YMax:  2.540005E-01
LMax:  101
DUnit:  3.937000E+01
NReg:   5
ICylin:  1
```

2 行目と 3 行目は、解析領域の水平軸 (x または z) 方向の下限 x_{min} と上限 x_{max} を表しています。

寸法はメートル (m) 単位です。4 行目の K_{max} は水平軸方向の節点の数です。5~7 行目は、垂直軸方向 (y または r) に関する同様の項目です。8 行目は、**Mesh** で使用した寸法をメートル (m) の単位に変換する換算係数 DUnit です。9 行目は解析に含まれる領域の数です。10 行目は対称性の指定です (0: 直交、1: 円筒)。

節点セクションは、4 行のタイトルと、解析空間の各節点に 1 行が対応する $K_{max} \times L_{max}$ のデータ行です。

```

--- Nodes ---
  k   l  RgNo RgUp RgDn      x          y          Phi
-----
   1   1   -2   2    0 -1.270003E-01  0.000000E+00 -1.000000E+03
   2   1   -2   2    0 -1.243827E-01  0.000000E+00 -1.000000E+03
   3   1   -2   2    0 -1.217702E-01  0.000000E+00 -1.000000E+03
   4   1   -2   2    0 -1.191645E-01  0.000000E+00 -1.000000E+03
   5   1   -2   2    0 -1.165665E-01  0.000000E+00 -1.000000E+03
   ...
  98  101  -1    0    1  1.198864E-01  2.540005E-01  9.449078E+02
  99  101  -1    0    1  1.224252E-01  2.540005E-01  9.645715E+02
 100  101  -1    0    1  1.249641E-01  2.540005E-01  9.842325E+02
 101  101  -5    0    0  1.270003E-01  2.540005E-01  9.999997E+02

```

各データ行には、次の量が表示されています。

- 節点の添字 (K, L)
- 節点の領域番号 ($RgNo$) と、その節点に伴う 2 つの要素の領域番号 ($RgUp$ と $RgDn$)
上側の要素は節点 (K, L) と ($K+1, L$) を結ぶ線の上側にあり、下側の要素はその線の下側にあります。
- メートル (m) 単位で表した節点の座標 (x, y) または (z, r)
- ボルト (V) 単位で表した節点における静電ポテンシャル ϕ

領域セクションは、4 行のタイトルに続き、各領域に 1 つの行が対応する行数 NReg のデータ行です。誘電体の解析における領域セクションは、次のようになります。

```

--- Regions ---
RegNo Fix                               Epsilon   Space charge   Potential
=====
  1   0   0   0   0   0  1.000000E+00  0.000000E+00  0.000000E+00
  2   0   0   0   0   0  2.700000E+00  0.000000E+00  0.000000E+00

```

導体の解析における領域セクションは、次のようになります。

```

--- Regions ---
RegNo Fix                               Sigma                               Potential
=====
  1   0   0   0   0   0  1.000000E+00  0.000000E+00  0.000000E+00
  2   0   0   0   0   0  2.700000E+00  0.000000E+00  0.000000E+00

```

第2列目における1は、固定ポテンシャル領域（電極）を指定します。

第4章 ポテンシャルと物質量の空間的変化を表す関数式

4.1 プログラムの機能

3.3節では、領域全体にわたり一様なポテンシャル値または物質特性 (ϵ_r , σ , および ρ) を定義するコマンドについて説明しました。本節では、空間で連続的に変化する量を数学的記述により指定する方法について述べます。以下のコマンドを用いると、空間的に変化する領域特性の指定が容易になります。

POTENTIAL RegNo > 関数

```
POTENTIAL(5) > 1.50E4*cos($x/20.5)*sin($y/15.0) + 1.3E03
```

```
POTENTIAL(2) > 80.245*(1.0 - 0.0625*$z ^2 + $r^2)
```

空間の関数を指定して、固定ポテンシャル領域の節点における ϕ の値 (単位 V) を設定します。キーワード「Potential」のあとに領域番号と記号 > を、そのあとに関数の文字列を入力します。関数の英数文字列の長さは 230 字までで、次節で述べるフォーマットに従って入力します。直交座標解析では $f(x, y)$ 、円筒座標解析では $f(z, r)$ により、空間において変化する量を表す関数を定義します。パーサ (構文解析プログラム) は、変数に Perl 標準 (Perl standard) フォーマットを用い、変数 x を $\$x$ 、変数 y を $\$y$ 、といったように表します。節点におけるポテンシャルは、節点の位置で求めた関数の値です。

- 用いる関数の数に制限はありません。どの領域にも一つの関数を指定できます。
- 位置は DUnit (cm、インチ、 μm 等) により設定した単位で関数に渡されます。
- ある空間を 2 つ以上の領域に分割することにより、不連続な関数をモデル化できます。
- 空間的変化は、充填された領域 (Filled regions) だけでなく線状領域(繋がった線、繋がっていない線)領域に対しても、設定できます。

POTENTIAL RegNo TABLE [x,y,z,r] TabName

```
POTENTIAL(3) = TABLE R ZUpBoundary.DAT
```

空間分布を表す表(table)を指定して、固定ポテンシャル領域の節点における ϕ の値 (単位V) を設定します。ここで表とは、次節で説明される書式で記述されたテキストファイルで、作業ディレクトリに置いておく必要があります。キーワード「Potential」のあとに領域番号とキーワ

ード「Table」を入力します。表は一次元でなくてはならないので、コマンドは空間分布の方向を示す記号を含む必要があります。直交座標系では x 、 y 、 r が使用可能です。この場合、 r は以下のように解釈されます。

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (21)$$

円筒座標系では z と r が使用可能です。「TabName」の部分には表のファイル名を入力します。節点位置はDUnit (cm、インチ、 μm 等)により設定した単位で表補間ルーチンに渡されます。表はV単位でポテンシャル値が記述されている必要があります。

EPSI RegNo > 関数

EPSI(7) > 1.0 + (\$x - 0.25)/5.50

EPSI(4) > 1.0 - 0.625*\$z^2

関数によって指定した空間変化に従って、比誘電率 ϵ_r の値を領域の要素に設定します。空間的分布関数の値は、各要素の重心における値として解釈されます。関数の値が $\epsilon_r \leq 0.0$ となる要素がある場合、EStatはエラーメッセージを表示します。

注：異方性誘電率を持つ他の物質が存在する計算では、関数を使うことはできません。

EPSI RegNo TABLE [x,y,z,r] TabName

EPSI(5) = TABLE Z GradedDielectric.DAT

空間分布を表す表(table)を指定して、領域の節点における比誘電率の値 ϵ_r を設定します。要素の重心の位置(DUnitの単位による)が表補間ルーチンに渡されます。

表によって値が $\epsilon_r \leq 0.0$ となる要素がある場合、EStatはエラーメッセージを表示します。

注：異方性誘電率を持つ他の物質が存在する計算では、表を使うことはできません。

SIGMA RegNo > 関数

SIGMA(7) > 0.5 + 2.0*(1.0 - cos(3.14156*\$x/15.0))

SIGMA(4) > 100.0 - 50*exp((\$z/10)^2)

関数によって指定した空間変化に従って、電気伝導率の値を領域の要素に設定します。空間的分布関数の値は、各要素の重心における値として解釈されます。電気伝導率の単位はS/mで指定します。

関数の値が $\sigma < 0.0$ となる要素があるときに、EStatはエラーメッセージを表示します。

注：異方性電気伝導率を持つ他の物質が存在する計算では、関数を使うことはできません。

SIGMA RegNo TABLE [x,y,z,r] TabName

SIGMA(5) = TABLE X SwitchBreakdown.DAT

空間分布を表す表(table)を指定して、領域の節点における導電率の値 σ を設定します。要素の重心の位置(DUnitの単位による)が表補間ルーチンに渡されます。 σ の値の単位はS/mとなります。表によって値が $\sigma < 0.0$ となる要素がある場合、EStatはエラーメッセージを表示します。

注：異方性導電率を持つ他の物質が存在する計算では、表を使うことはできません。

RHO RegNo > 関数

RHO(5) > 5.235E-6 + 4.33E-6 *(\$x/2.3E-6)

関数によって指定した空間変化に従って、空間電荷密度の値を領域の要素に設定します。空間的分布関数の値は、各要素の重心における値として解釈されます。空間電荷密度の単位は C/m^3 で指定します。

RHO RegNo TABLE [x,y,z,r] TabName

RHO(2) = TABLE Y PulsedBeam.DAT

表によって指定した空間変化に従って、空間電荷密度の値を領域の要素に設定します。空間的分布の表の値は、各要素の重心における値として解釈されます。空間電荷密度の単位は C/m^3 で指定します。

4.2 関数の構文規則と表のフォーマット

EStatは、柔軟で強力な代数関数インタープリタ（解釈プログラム）を持っています。関数は（英数文字 230 字までの）文字列からなり、次の構成要素を含みます。

- 空間変数：直交座標解析では（\$x, \$y）、円筒座標解析では（\$z, \$r）
- 任意の有効なフォーマットで表された実数および整数（例、3,1415、476、1.367E23、6.25E-02、8.92E+04、・・・） 整数は解釈の際に実数に変換されます。
- 2項演算子：+（加算）、-（減算）、*（乗算）、/（除算）および^（べき乗算）
- 関数：abs（絶対値）、sin（正弦）、cos（余弦）、tan（正接）、ln（自然対数）、log（10を底とする常用対数）、exp（自然指数）、およびsqrt（平方根）
- 20組までの、任意の深さまでの括弧
- 任意の数の区切り記号

パーサ（構文解析プログラム）は、標準的な代数規則に従って、包括的なエラーチェックを行います。エラーには、左右括弧の不一致、未知の文字、および連続した 2 項演算子があります。有効な例を例示すると、表式

$$1-\exp(-1.0*((\$z^2 + \$r^2)/24))$$

は、

$$1 - \exp \left[- \left(\frac{z^2 + r^2}{24} \right) \right]. \quad (22)$$

に対応します。

表(table)は次のようなフォーマットのデータ行が含まれるテキストファイルです。

IndVar DepVar

最後の行には「EndFile」コマンドが書かれている必要があります。独立変数(IndVar)はDUnitで設定された単位のx、y、z、rです。すなわち、もしメッシュの寸法がセンチ単位で表されていた場合、独立変数も同じ単位で表されていなければなりません。独立変数の間隔は一定値である必要はありません。つまり、変化の大きい所では間隔を短くすることもできます。従属変数(DepVar)は、ポテンシャル(V)、比誘電率、導電率(S/m)、空間電荷密度(C/m³)などです。表の各項目は、有効な浮動小数点表示であればどのような形で記述することも可能であり、また、3.1節で述べた区切り記号のいずれでも区切ることが可能です。

アスタリスク「*」で行を始めることによってコメントを記述することも可能です。また「EndFile」コマンドの後にはどのような形のテキストも記入できます。

表の補間方法は、「Interp」コマンドによって、線形もしくは三次スプライン補間で行うこともできます。デフォルトでは「Spline」が選択されます。三次スプラインを利用するには、関数とその導関数が連続的な値を持った良いデータセットであることが必要です。データにノイズが多い場合や、不連続なデータの場合は「Linear」オプションを使います。補間ルーチンは、独立変数の値が範囲外になった場合は、0を返します。

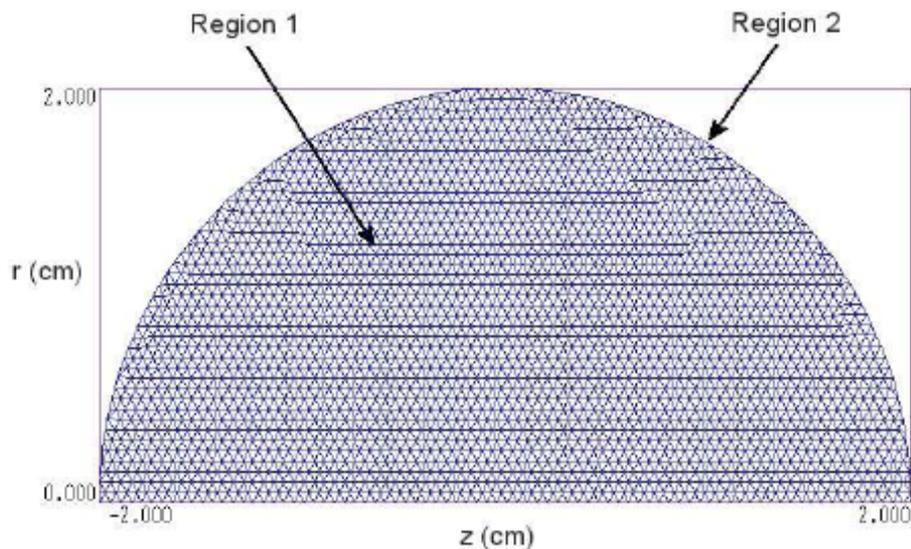


図 12 例題ファイル「CHARGEFUNC」の幾何形状の要素表示。寸法の単位は cm。

4.3 ベンチマーク例題

「CHARGEFUNC」の例題（図 12）は、空間電荷密度の連続的な変化を設定する方法を示しています。手計算による解析解と比較できるように、簡単な幾何形状を選びました。半径 $R_0=2.0\text{cm}$ の接地した金属球の内部に分布する対称的な電荷密度 $\rho(R)$ により生成された静電ポテンシャルを計算で求めます。この場合、ポテンシャルは Poisson 方程式により決まります。

$$\frac{1}{R^2} \frac{d}{dR} R^2 \frac{d\phi}{dR} = -\frac{\rho(R)}{\epsilon_0}. \quad (23)$$

空間電荷密度が一様な値 ρ_0 であるとき、(23)式の解は、球の中心におけるポテンシャルとして、 $\phi_0 = \rho_0 R_0^2 / 6 \epsilon_0$ を与えます。 $\rho_0 = 1.0 \times 10^{-6} \text{ C/m}^3$ 、 $R_0 = 0.02 \text{ m}$ であるとき、ポテンシャルの値は $\phi_0 = 7.529 \text{ V}$ です。空間電荷密度の半径による変化が

$$\rho(R) = \rho_0 \left[1 - \left(\frac{R}{R_0} \right)^2 \right], \quad (24)$$

であるとき、球の中心におけるポテンシャルは、 $\phi_0 = (\rho_0 R_0^2 / \epsilon_0) (1/6 - 1/20) = 5.271 \text{ V}$ となります。

図 12 は、円筒座標において数値解析するときの幾何形状です。要素サイズは約 0.05 cm です。領域(region) 1 は解析空間を満たす $\epsilon_r = 1.0$ の誘電体であり、領域 2 は固定ポテンシャル

$\phi = 0.0$ Vを持つ境界上の節点の集まりです。 一様な空間電荷密度 $\rho_0 = 1.0 \times 10^{-6}$ C/m³ を EStat のスクリプトにおけるデータとして入力するときには、

$$\text{Rho}(1) = 1.0000\text{E}-06$$

と表します。

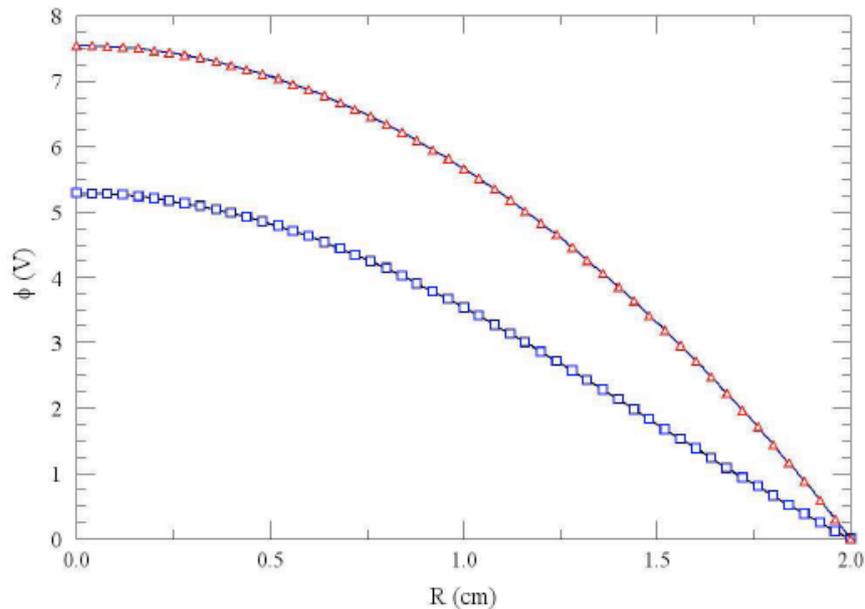


図 13 例題 CHARGEFUNC におけるポテンシャルの R による変化。

赤色の曲線：一様な空間電荷密度の場合。青色の曲線：一様でない空間電荷密度の場合。

図 13 における赤色の曲線は、空間電荷密度が一様なときに計算したポテンシャルの半径方向の変化を示しています。中心におけるポテンシャルは $\phi_0 = 7.541$ V で、理論値と 0.16% 以内で一致しています。式 24 に示した半径とともに変化する空間電荷密度の場合を EStat で計算するには、一様な場合の式を、

$$\text{Rho}(1) > 1.0\text{E}-6*(1.0 - 0.25*(r^2 + z^2))$$

と書き換えます。この結果得られる ϕ の半径方向の変化をプロットすると、図 13 の青色の曲線になります。中心におけるポテンシャルは $\phi_0 = 5.280$ V となり、理論値と 0.17% 以内で一致します。

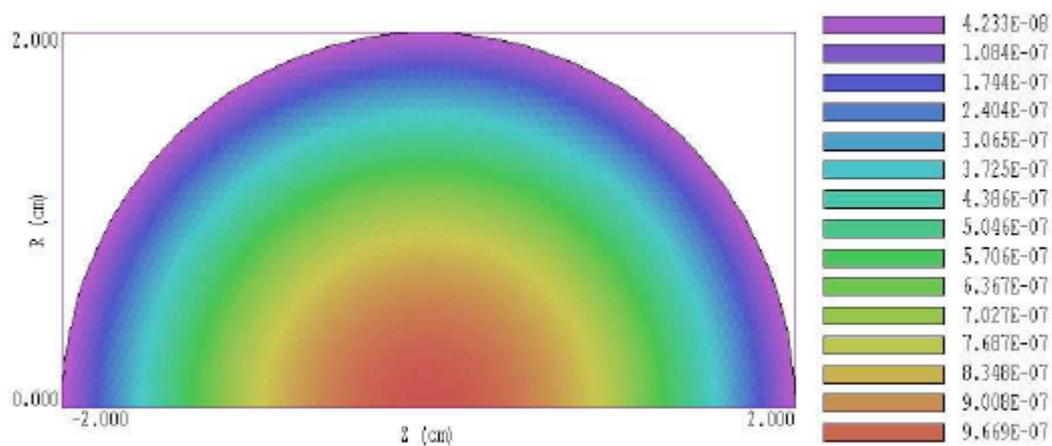


図 14 例題「CHARGEFUNC」における $\rho(r, z)$ の要素プロット図

EStat のプロット機能と解析(Analysis)機能を用いて、関数式の妥当性をチェックできます。プログラムは ϕ 、 ϵ_r 、 σ 、 ρ の空間的变化を表示できます。図 14 は $\rho(r, z)$ の要素プロット図です。このプロットから、球の中心 ($z = 0.0, r = 0.0$) においては $\rho(r, z) = 1.0 \times 10^{-6}$ であり、中心から R とともに放物線的に変化していくことが分かります。

表 6 EStat の標準単位

量	単位
空間的寸法	m (メートル) または DUnit で設定した単位
ポテンシャルの大きさ	V (ボルト)
電場	V/m (ボルト/メートル)
空間電荷密度	C/m ³ (クーロン/立方メートル)
電流密度	A/m ² (アンペア/平方メートル)
エネルギー密度	J/m ³ (ジュール/立方メートル)
電力密度	W/m ³ (ワット/立方メートル)

第 5 章 計算結果の分析

プロット図を作成したり、数値的な分析を行ったりするには、EStat のメインメニューで Analyze コマンドをクリックし、データファイルを選んでください。分析ルーチンは、計算が誘電型(dielectric)であるか導電型(conductive)であるかにより、ラベルと計算量を自動的に調整します。表 6 に静電解析に用いる標準的な単位をリスト表示します。

メニュー項目は、「File」、「Plots」、「Analysis」、「Scans」、「Export」、および「Return」です。印刷やプロットファイル生成を行う「Export」メニューのコマンドは、**Mesh** の場合と同じです。Return コマンドは、追加の計算を行うためにメインメニューに戻る場合に使います。

5.1 「FILE」メニューのコマンド

LOAD SOLUTION FILE

メインメニューに戻ることなく、別の解析結果ファイルを読み込みます。ダイアログで新たなファイル FPrefix.EOU を選んでください。ダイアログでディレクトリを変えると、プログラムの作業ディレクトリも変わります。

OPEN DATA RECORD

「Point calculation」および「Line scan」などのコマンドは定量的な情報を生成します。デー

タ記録ファイルを開くことにより、これらの解析セッションの間に生成したデータを自動的に記録できます。ダイアログでファイル名(拡張子不要)を入力するか、デフォルトで表示されるファイル名を受け入れてください。データファイルは、ファイル名.DAT という形式の名前を持ち、作業ディレクトリに保存されます。このファイルはテキストフォーマットです。このファイルはテキストエディタを用いて内容を見たり、数学的な分析ソフトや表計算ソフトに送るために情報を抽出したりすることができます。

CLOSE DATA RECORD

開いているデータ記録ファイルを閉じます。新たな記録ファイルで作業を始めたいときは、このコマンドを用いてください。内部エディタを用いて新たなファイルを開く前に、データ記録ファイルを閉じる必要があることに留意してください。

RUN SCRIPT

スクリプトを用いることによって、一連の同じような計算結果に対して、複雑な分析や反復的な分析を行うことができます。このコマンドは、拡張子「.SCR」の付いたファイルをリストしたダイアログを表示します。ファイルを指定し、OK ボタンをクリックしてください。スクリプトは、データファイルのロード、データ記録ファイルを開閉、そして本章で述べる定量的解析機能のどれでも実行できます。スクリプトコマンドの言語については、5.5 節で説明します。分析スクリプトはデータファイルと同じディレクトリになければならないことに留意してください。

CREAT SCRIPT

内部テキストエディタにより分析スクリプトを作成するにはこのコマンドを用います。ダイアログで、拡張子を除くファイル名(SPrefix)を入力してください。作成したスクリプトは、SPrefix.SCR という名前で保存されることになります。プログラムは内部エディタでファイルを開き、そこに参照用に使用可能なコマンドのリストを書き出します。このリストは EndFile コマンドの下に書き出されますので、スクリプトパーサ（構文解析プログラム）により無視されます。実際の分析コマンドは EndFile コマンドより前に入力してください。

EDIT SCRIPT

EDIT DATA FILE

EDIT FILES

すでに作成したファイルを閲覧したり、修正したりするにはこれらのコマンドを用います。ダ

ダイアログは、Edit script コマンドの場合には拡張子「.SCR」の付いたファイルを、Edit data file コマンドの場合には拡張子「DAT」の付いたファイルを表示します。ダイアログの中でディレクトリを変えても、作業ディレクトリは変わりません。

5.2 PLOTS メニューのコマンド

空間プロット図は、シミュレーションの 2 次元空間における物理量の分布を示します。次のプロットタイプ(plot type)が可能です。

- Mesh 計算メッシュの要素ファセット（輪郭）。
- Region 領域番号により要素を色分した計算メッシュ。
- Contour 計算した物理量の同一の値を持つ点を結んだ等高線図。
静電解析では、ポテンシャル ϕ の等高線は電気力線に垂直となります。等高線の間隔は、電場の強さに反比例します。電場の大きさは、一般に空間の連続関数ではありませんので、 $|E|$ の等高線図は、いくつかの線が圧縮された領域ができることがあります。
- Element (電場の大きさなど) 計算した物理量の大きさにより要素を色分けした解析空間のプロット。
- Vector ベクトル量の局所的な方向を示す方向線を、各要素毎に表示した要素(element)プロット。
- Surface 計算した量を高さで表した、 x - y または z - r 面上の 3 次元プロット。プロット図の空間的範囲は、Mesh、Region、Contour、Element、または Vector のプロット図の、その時のビューウィンドウの範囲に対応します。大きなメッシュでは、Surface プロットの作成に時間がかかることがあります。プログラムが処理している物理量を格子上にマッピングするため、多数の補間を行う必要があるためです。

「Plot Settings」メニューには、次のコマンドがあります。

PLOT TYPE

プロットタイプを上で述べたリストから選びます。プロットタイプは、すでにプロットされている物理量に必ずしも対応しないことがあります。たとえば、静電ポテンシャルのベクトルプロットは定義できません。プロットタイプを切り替えたときに、問題とする量がプロットできませんというメッセージが現れたなら、「Plot quantity」コマンドを用いて、有効な選択肢を選んでください。

PLOT QUANTITY

ダイアログは、現在のプロットタイプに対応する使用可能な量のリストを示します（表 7）。電流および電力密度などの量は、誘電型解析では定義されていないことに留意してください。Mesh および Region プロットの場合、このリストは空白です。

表 7 有効なプロット量

プロットタイプ	量
Contour (等高線)	静電ポテンシャル ϕ 電場の大きさ $ E $ 電流密度の大きさ $ j $ 抵抗電力密度 P 比誘電率または電気伝導率 ϵ_r, σ 空間電荷密度 ρ
Element (要素)	静電ポテンシャル ϕ 電場の大きさ $ E $ 電流密度の大きさ $ j $ 抵抗電力密度 P 比誘電率または電気伝導率 ϵ_r, σ 空間電荷密度 ρ
Vector (ベクトル)	電場 E 電流密度 j
Surface (面)	静電ポテンシャル ϕ 電場の大きさ $ E $ 電流密度の大きさ $ j $ 抵抗電力密度 P 水平方向の電場 E_x または E_z 垂直方向の電場 E_y または E_r 水平方向の電流密度 j_x または j_z 垂直方向の電流密度 j_y または j_r 比誘電率または電気伝導率 ϵ_r, σ 空間電荷密度 ρ

PLOT LIMITS

Contour、Element、Vector、Surface のプロット図において、デフォルトのオートスケール（自動目盛割り当て）モードでは、物理量の値のプロット範囲は、全レンジとなっています。このコマンドを用いると、プロットする値の範囲を設定できます。ダイアログにおける「AutoScale」ボックスのチェックを外し、プロット範囲の最小値(Minimum value)と最大値(Maximum value)を入力してください。入力した値の物理的な妥当性を、プログラムがチェックすることはありません。この操作は、他のプロット量のスケージングに影響しません。オートスケールモードに戻るには、AutoScale チェックボックスにチェックを入れてください。

TOGGLE GRID DISPLAY

Mesh、Region、Contour、Element、Vector のプロット図において、グリッド(格子線)の表示・非表示を切り替えるとき、このコマンドを用います。座標軸 ($x=0.0$ または $y=0.0$) に対応する格子線は、実線として表示されます。

GRID CONTROL

このコマンドは、グリッド(格子線)の設定をするダイアログ (図 15) を表示させます。デフォルトの自動スケールモードにおいては、グリッドの座標位置が x または y の都合のよい値になるように (たとえば、 0.01153 ではなく 0.01 というように)、グリッドの間隔と位置を自動的に設定されます。グリッドの間隔は、ビュー (視野) の縮小/拡大とともに変わります。グリッドを手動で設定するには、「Automatic intervals」ボックスのチェックを外し、 x および y 方向の間隔の値(XGrid および YGrid)を入力してください。



図 15 グリッド設定ダイアログ

MOUSE/KEYBOARD

ラインスキャン(Line scan)やズーム(Zoom window)などのコマンドに必要な座標入力に、デフォルトではマウスを用いた対話的な入力を用いるようになっています。このコマンドは、マウス入力とキーボード入力の切り替えをプログラムに指示します。キーボードから座標を入力するときには、**Mesh** で用いた距離の単位を用いてください。例えば、計算プログラム(EStat)において $DUnit = 1.0 \times 10^6$ であるときは、寸法をミクロンの単位で入力してください。

TOGGLE SNAP MODE

スナップモード(snap mode)であるとき、マウスで指定した点の座標値は、DSnap の値の整数倍の値で、その点に最も近い値になります。たとえば、DSnap=0.5 であり、マウスの位置が [5.4331, -2.6253] であるとき、マウスで指定して得られる座標値 (戻り値) は [5.500, -2.500] となります。デフォルトでは、スナップモードが ON になっています。「Point calculation」や「Element properties」のようなコマンドでの座標入力においては、自動的にスナップモードは OFF になります。OFF にしておかないと、マウスの矢印の先端が指定する点ではなく、その点に最も近いスナップモードで決まる点の座標値を指定することになり、プログラムは誤った情報を与えることになるからです。

SNAP DISTANCE

マウス入力におけるスナップモードの距離スケール DSnap を設定します。

TOGGLE ELEMENT OUTLINE

Element と Vector のプロット図に要素境界 (ファセット) を表示するか、しないかの切り替えを行います。多数のメッシュからなるビューを見やすくするには、要素境界を表す輪郭線は表示しないことが必要でしょう。

TOGGLE FIXED POINT DISPLAY

デフォルトのモードにおいては、EStat は要素情報を用いて、等高線 (Contour)、要素 (Element)、およびベクトル (Vector) プロットを作成します。したがって、(固定ポテンシャルグリッドまたはシートのような構造を表す) 孤立節点は表示されません。このコマンドに応じて、プログラムは物質の要素に囲まれた固定ポテンシャルの節点の円をプロットします。

CONTOUR STYLE

このコマンドは、プロットタイプが Contour であるときのみ有効です。単色（モノクロ）、ラベル付き単色、多色、ラベル付き多色の 4 つの表示が選択できます。多色モードにおいては、等高線はプロットされる量に応じて色分けされます。色分けの凡例が、プロット図右の情報ウィンドウに示されます。ラベル付き多色モードでは、プロットされる量の値が等高線に表示されます（図 16）。等高線が近接してラベルが重なり合うときには、ビューを拡大すると見やすくなります。

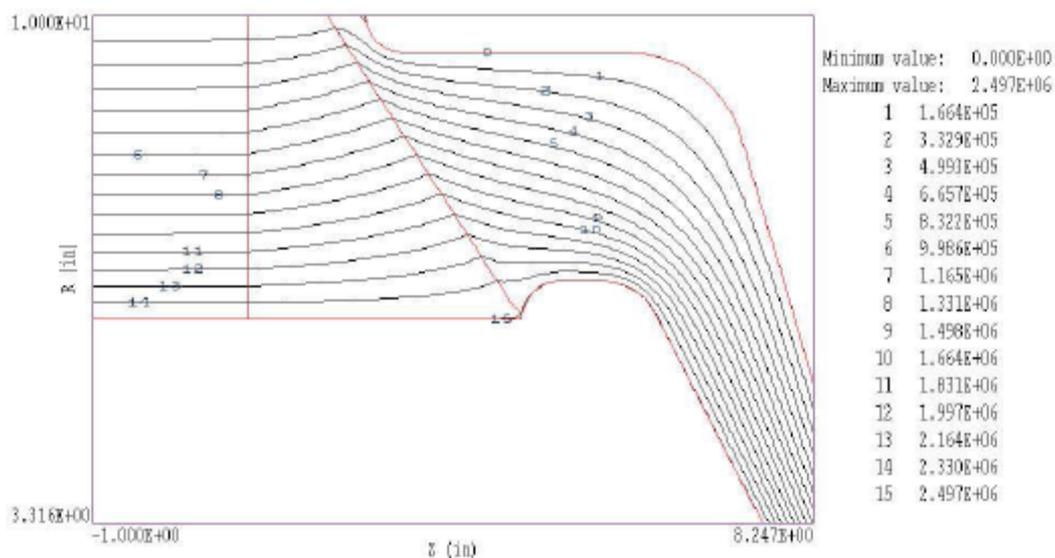


図 16 ラベル付き単色等高線プロット

NUMBER OF CONTOURS

プロットする等高線の数を変えることができます。このコマンドは、プロットタイプが Contour であるときのみ有効です。

次のコマンドは **Mesh** マニュアル(mesh.pdf)において説明されていますが、Mesh、Region、Contour、Element、Vector のプロットにおいてビューの範囲を変えます。2次元プロットの現在のビューの範囲は、3次元 Surface プロットを作成するときのビューの範囲となります。

ZOOM WINDOW

ZOOM IN

EXPAND VIEW

GLOBAL VIEW

PAN

次のコマンドは、Surface プロットの見え方を制御します。これらのコマンドは、Surface プロットが表示されているときのみ有効です。

FLIP 3D IMAGE

Surface プロットを、空間の平面内で 90°回転します。

VIEW ANGLE 3D

視点の仰角を設定します。

SET GRID 3D

表面プロット図の解像度を変えます。surface プロットを作成するときに、プロットする量が大きさ $N_x \times N_y$ の格子にマッピング（写像）されます。また、これらの数により、Surface プロットの格子線の合計数が決まります。デフォルト値は $N_x = N_y = 40$ です。

5.3 ANALYSIS メニューのコマンド

「ANALYSIS」（分析）メニューにおけるコマンドは数値データを生成します。ほとんどの機能は座標入力を必要とし、通常はマウスにより入力します。ANALYSIS メニューは、Mesh、Region、Contour、Element、Vector のプロットを表示しているときのみ有効です。

POINT CALCULATION

EStat は、物質境界での不連続性を保持する高度な補間法を取り入れており、誘電体境界の両側における電場の値を正しく計算することができます。このコマンドをクリックし、任意の位置を指定します。（座標を入力するときには、スナップモードが使えないことに注意してください。）プログラムは、補間した量の値の一覧をプロットの下の実線枠内に表示し、またデータ記録ファイルが開いているときには、完全な情報を記録します。キーボードにより座標を入力するときには、「Mouse/keyboard」コマンドを用いてください。

LINE SCAN

ラインスキャンは **EStat** の最も便利な機能の一つです。このコマンドをクリックし、Mesh、

Region、Contour、Element、Vector プロットの中の 2 点をマウスで指定して、スキャンする線を指定してください。この操作にはスナップモードが有用です（たとえば、0.067 から 4.985 までを指定するよりは、0.000 から 5.000 までを指定してスキャンしたいことでしょう）。プログラムは、このスキャン線に沿って等間隔に電場の量を計算します。データ記録ファイルが開いているとき、この情報が記録されます。また、プログラムは、スキャン線に沿った距離に対する現在選択した物理量のプロットを作成し、「SCAN」メニューのコマンドが使えるようにします（5.4 節）。

ELEMENT PROPERTIES

マウス（またはキーボード）により要素を指定してください。指定に応じて、EStat 内蔵ポストプロセッサはその要素の物質と電場特性を画面に表示します。データ記録ファイルが開いているときは、その情報が記録されます。

REGION PROPERTIES

解析空間内の任意の領域(region)に関する物理的特性を見出すときには、その領域(region)内の任意の点でマウスをクリックしてください。解析結果の一部が画面に表示され、また完全な解析結果がデータ記録ファイルに記録されます。EStat は、電場のエネルギー密度と電力密度の体積積分を、指定した領域(region)にわたり計算します。

EStat は「Region properties」コマンドに応じて、次の線積分を領域(region)境界の周囲で計算します。

- 電極上の誘導電荷を求めるための表面電荷密度の積分。

この計算は、有限の体積を持つ固定ポテンシャルの充填 (Filled) 領域表面上においてのみ行われます。表面上の自由電荷密度は、 $\sigma_{\text{free}} = \epsilon_0 \epsilon_r E_{\perp}$ (C/m^2) です。ここで、 E_{\perp} は電極のすぐ外側における電場の垂直成分です。表面における全電荷密度は、 $\sigma_{\text{tot}} = \epsilon_0 E_{\perp}$ です。EStat は領域(region)境界上にあるすべての要素境界を特定します。プログラムは各境界のセグメント（線分構成要素）に対し、隣接する要素における電場の垂直成分を計算し、その結果に表面積を乗じます。直交座標解析のときには C/m 単位、円筒座標解析のときには C 単位で結果が得られます。鋭角を持つ電極に対しては、この処理が不正確になることに留意してください。この場合、線積分を用いるには、電極の周囲でガウス表面を定義するほうが良いでしょう。

- 導電型(conductive)シミュレーションにおいて電極に流れる全電流を求めるための電流密度の積分。

この計算は、計算する量が $j_{\perp} = \sigma E_{\perp}$ という点を除くと、誘導電荷の計算のときと同じ方法を用います。平面解析での結果は A/m 単位であり、円筒座標解析では A 単位です。

- 力の成分を求めるための、領域(region)境界周囲での Maxwell の応力テンソルの積分。
この結果は、その領域(region)が真空/空気要素 ($\epsilon_r = 1.0$) で囲まれているときのみ有効です。その領域が誘電体または電極で囲まれているときには、分析スクリプトの「FORCE」コマンド (5.5 節) を用いて、それらの集まりに作用する正味の力を求めることができます。

データ記録ファイルが開いているとき、EStat は領域(region)境界面を構成するファセット (要素の境界) 上の電場の値を、順番にリストに書き出します。このようなリスト表示は、高電圧装置を設計するときに有用になります。以下は、領域境界面のリストの例です。

X	Y	D	E	Ex	Ey	NBorder
-1.7709E+00	1.0009E+00	0.0000E+00	3.8431E+06	-1.6070E+05	-3.8397E+06	1
-1.8150E+00	1.0048E+00	4.4245E-02	4.0071E+06	-5.2130E+05	-3.9730E+06	1
-1.8616E+00	1.0132E+00	9.1649E-02	4.1001E+06	-9.1630E+05	-3.9964E+06	1
-1.9025E+00	1.0242E+00	1.3400E-01	4.3106E+06	-1.3157E+06	-4.1049E+06	1
-1.9415E+00	1.0387E+00	1.7565E-01	4.2288E+06	-1.6218E+06	-3.9055E+06	1
-1.9826E+00	1.0580E+00	2.2100E-01	4.2118E+06	-1.9614E+06	-3.7272E+06	1
...						

データ項目は、ファセットの中点の座標、および対象領域(target region)に隣接する要素において計算した $|E|$ 、 E_x および E_y (または E_z および E_r) の対応値です。つまり、対象領域が電極のとき、隣接する誘電体について計算が行われます。パラメータ「NBorder」は、隣接要素の領域番号です。このルーチンは、誘電体間の境界についても機能します。2つの物質の領域分析をすることにより、誘電体界面の両側における電場の値を求めることができます。この機能は、真空絶縁体のストレスを調べるときに有用です。

EStat は連続表面における順序でファセットを配置することに注意してください。1番始めのファセットは、(直交座標解析では) x 軸、または (円筒座標解析では) z 軸に最も近い中点をもつファセットです。領域表面が閉じていて、解析領域の境界上にないとき、このリストは1周して始めの点に戻ります。量「D」は始点からの表面距離です。すべての座標と距離は DUnit で設定した単位で与えられます。領域表面が閉じていないか、領域が解析領域境界と交差する

ときに、順序は完全でないことがあります。

LINE INTEGRAL

このコマンドに対する入力は、Line scan コマンドの場合と同じです。2点を入力して直線を定義してください。EStat は静電容量と抵抗の計算のための線積分を行います。

線積分に関して、直交座標の誘電体のシミュレーションにおけるガウスの法則は、次の式で表せます。

$$\oint dl \epsilon_o \epsilon_r E_{\perp} = q_{free},$$

$$\oint dl \epsilon_o E_{\perp} = q_{tot}. \quad (25)$$

積分は x - y 面内の閉じた積分路で行います。 E_{\perp} は積分路に垂直な電場成分で、閉領域の外側に向いています。 q_{free} は積分路に囲まれた 1m あたりの自由電荷で、 q_{tot} は積分路に囲まれた全電荷（自由電荷+誘電体の分極電荷）です。円筒座標系の誘電体のシミュレーションにおけるガウスの法則は、次の式で表せます。

$$\oint dl 2\pi r \epsilon_o \epsilon_r E_{\perp} = Q_{free},$$

$$\oint dl 2\pi r \epsilon_o E_{\perp} = Q_{tot}. \quad (26)$$

閉じた積分路は r - z 面内にあり、 Q_{free} は積分路に囲まれた電荷です。

EStat は誘電解析に対し、幾何形状が直交座標であるか円筒座標であるかに応じて、次の線積分を計算します。

$$\int dl \epsilon_o \epsilon_r E_{\perp},$$

$$\int dl \epsilon_o E_{\perp},$$

$$\int dl 2\pi r \epsilon_o \epsilon_r E_{\perp},$$

$$\int dl 2\pi r \epsilon_o E_{\perp}, \quad (27)$$

複数の線積分で全電荷を囲むか、解析の対称性を利用することによって、電極上での全電荷を求めることができます。複数の積分を用いるときは、時計回りの方向に積分領域を囲むようにしてください。

また、EStat は線積分路に沿って Maxwell の応力テンソルを計算します。対象物体を囲む線積分からの寄与を総和して、全静電力を求めることができます。線積分路が電極または誘電体領域 ($\epsilon_r \neq 1.0$) を通らないときにのみ、その結果が有効であることに注意してください。

導電型解析に対しては、直線により定義された面を通る 1m あたりの電流(直交座標のとき)、または電流(円筒座標のとき)は、それぞれ次の積分により与えられます。

$$\int dl \sigma E_{\perp},$$

$$\int dl 2\pi r \sigma E_{\perp}. \quad (28)$$

VOLUME INTEGRAL

このコマンドには、特に入力が必要はありません。EStat は、全解析領域および各領域(region)にわたる積分を自動的に計算します。情報は画面上またはデータ記録ファイルに記録されます。このコマンドでは次の解析を実行します。

1. 静電場エネルギー密度 $u = \epsilon_0 \epsilon_r E^2/2$ を、誘電型解析の全領域および各領域(region)にわたり体積積分します。出力の単位は、直交座標では J/m、円筒座標では J です。
2. 電力損失 (ワット損) $p = \sigma E^2/2$ を、導電型解析の全領域および各領域(region)にわたり体積積分します。解析の出力単位は、直交座標では W/m、円筒座標では W です。
3. 解析空間および各領域(region)における最大電場の位置と値。

MATRIX FILE

EStat は、ユーザーが他のソフトを利用/作成して計算結果データを解析する際に役に立つ、電場の値のマトリックスファイルを作成できます。計算結果の情報は EStat の出力ファイルから利用可能ですが、通常、3 角形メッシュ上のデータを処理することは難しいでしょう。「Matrix file」コマンドは、プログラムの補間機能を用いて、 x - y または z - r 空間内の直交格子上における電場の値のテキストデータファイルを作成します。このコマンドのダイアログは、マトリックスファイルの拡張子を除くファイル名(FPrefix)、ボックス(出力領域)の大きさ、 x および y 方向

(または z および r 方向) の区間数の入力を求めます。プログラムは、現在作業中のディレクトリに、Fprefix(ファイル名).MTX という形の名前のファイルを作成します。

「Analysis settings」メニューには次の項目があります。

INTERPOLATION METHOD

Point calculation および Line scan コマンドにおけるデフォルトの補間法は、インテリジェントにデータ点を収集する 2 次の最小二乗法適合です。たとえば、境界における電場の不連続性を正しく与えるために、対象とする点を含む誘電体境界側の点のみを計算に取り入れます。プログラムが十分にデータ点を識別できないと、非常に小さな領域または閉じた領域においては、最小二乗適合が機能しなくなることがあります。この場合、線形モードに切り替えてください。このモードでは、対象とする点を含む要素において、電場の値が 1 次補間により決定されます。ステータスバーは、現在用いている補間法を通知します。

SCAN PLOT QUANTITY

このコマンドにより、ラインスキャン(Line scan)する量を選択して、画面およびハードコピー(印刷)のプロットに表示させることができます。リストボックスから表示する量を選択し、OK ボタンをクリックしてください。なお、データ記録ファイルは、すべての場の量が記録されるので、この設定は、影響を与えることはありません。どのラインスキャン量が有効かは、解析タイプにより異なります。ラインスキャン量として選択できるのは、静電ポテンシャル (ϕ)、電場の大きさ ($|\mathbf{E}|$)、電場の水平成分 (E_x または E_z)、電場の垂直成分 (E_y または E_r)、電流密度の大きさ ($|\mathbf{j}|$)、電流密度の水平成分 (j_x または j_z)、電流密度の垂直成分 (j_y または j_r)、および電力密度 (σE^2) です。最後の 4 つの量は、導電型解析においてのみ有効です。

NUMBER OF SCAN POINTS

画面プロットおよびデータ記録ファイルに出力されるラインスキャン点の総数を設定するコマンドです。デフォルトで選択されている数は 50 で、最大数は 500 です。

SET RECORDED QUANTITIES

ラインスキャン(Line scan)とマトリックスファイル(Matrix file)でデータ記録ファイルに保存されるのは、デフォルトではすべてのプロット量ですが、ユーザーにとって不必要な情報によりファイルサイズが大きくなります。このコマンドを用いることにより、必要な量のみ記録するように指定できます。なお以下のルールがあります。

- 物理量の指定は、プログラムが一つのウィンドウでインタラクティブ(対話型)モードで動いているときのみ可能です。プログラムがバックグラウンドで動いている場合は使えません。
- インタラクティブモードでは、物理量の指定はLine scanおよびMatrix fileコマンドへは直接呼び出しですが、分析スクリプトからは間接呼び出しとなります。
- すべてのプロット量はプログラムが実行開始したときからアクティブです。
- アクティブなプロット量の状態は、新しいデータファイルが読み込まれた際も保持されています。

5.4 SCANS メニューのコマンド

SCANS メニューのコマンドは、Line scan コマンドによってスキャンプロットを作成したときに使用可能になります。

OSCILLOSCOPE MODE

このオシロスコープモード(Oscilloscope mode)では、スキャンプロットはデジタル・オシロスコープの方式を取り入れています (図 17)。プログラムは、グラフ上に十字線のパターンを表示します。十字線が交差する点の位置におけるプロットの値が情報ウィンドウに表示されます。マウスにより十字線パターンのマーカをプロット線に沿って動かしてください。プロット線上の任意の位置でマウスの左ボタンをクリックすると、その位置での曲線の微分係数および積分の数値とともにプロット値を表示します。定積分は、プロット図の左側から現在の点まで行います。これらの値は画面上に表示され、データ記録ファイルが開いているとき、データが書き込まれます。オシロスコープモードを抜け出すためには、マウスの右ボタンを押してください。

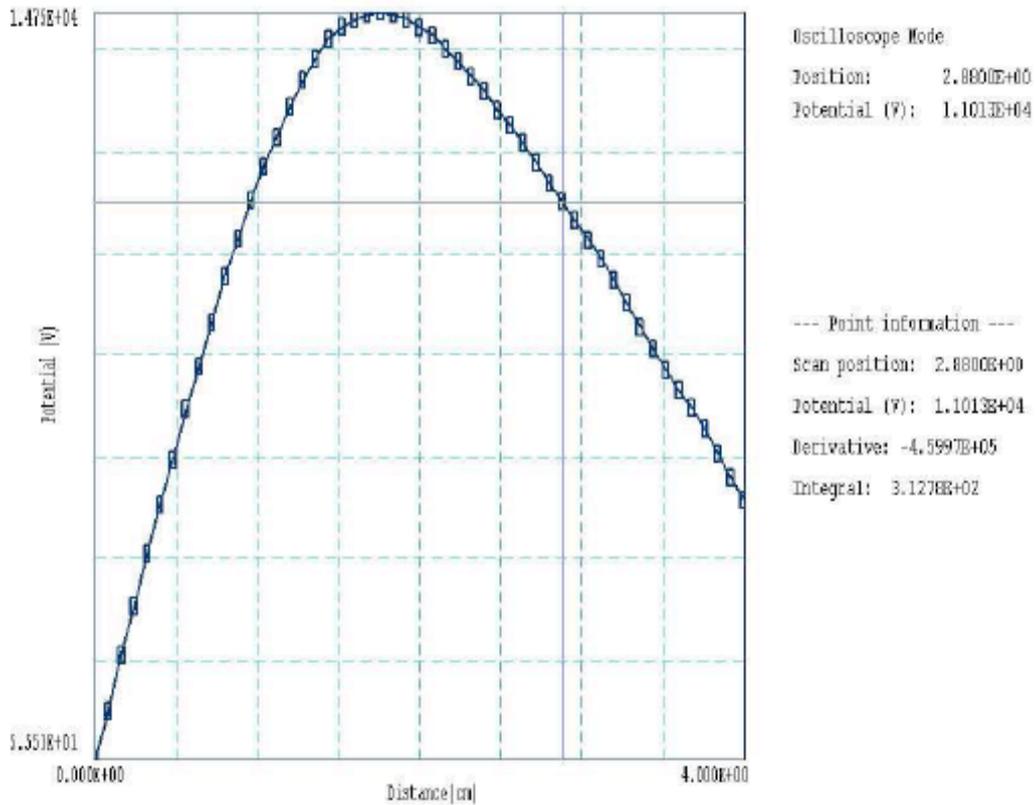


図 17 オシロスコープモードにおけるスキャンプロット図

TOGGLE SCAN SYMBOLS

スキャンプロット図に、計算した点を示すプロットシンボルを表示するか否かを定める設定です。

TOGGLE GRID

画面およびハードコピー(印刷)のスキャンプロット図に格子線を表示するか否かを定める設定です。

CLOSE SCAN PLOT

EStat の FILE、PLOTS、ANALYSIS メニューを利用するには、スキャンプロット図を閉じる必要があります。このコマンドはスキャンプロット図を閉じ、以前に表示していたプロット図にプログラムを戻します。

5.5 分析スクリプトのコマンド

分析(analysis)セッションを制御するスクリプトファイルは、FPrefix.SCR という形の名前を持ちます。このファイルは、データファイルと同じディレクトリになければなりません。スクリプトは TriComp の構文仕様に従うテキストファイルです。プログラムは空白行と字下げを無視します。データ行は標準の区切り記号を用いて記述され、コメント行はアスタリスク「*」で始まります。プログラムは「Endfile」コマンドに出会うと処理を終了します。

スクリプトを実行するには、「FILE」メニューの「Run script」コマンドを選んでください。プログラムは、利用可能なスクリプトのリストを示します。ファイルを指定して OK ボタンをクリックしてください。スクリプトは現在読み込んでいるデータファイルに対して処理を行います。スクリプトの中から他のファイルを読み込むこともできます。1 つ以上のデータファイルを順次開くこともできます。

コマンドプロンプトから、スクリプトファイルの制御のもとで、自律的な分析を EStat に行わせることができます。ファイル「GTest.SCR」がデータディレクトリにあるとき、

```
[プログラムディレクトリ]¥ESTAT GTEST <Enter>
```

という形式のコマンドを用いてください。コマンドプロンプトモードの主な利用方法は、データファイルを作成や、バッチファイル制御のもとで長時間にわたる解析を行うことです。

以下のコマンドがスクリプトに現れます。

INPUT FileName

INPUT Switch1.EOU

現在開いているデータファイルを閉じ、分析するためのファイルを読み込みます。パラメータはデータファイルのフルネーム（ファイル名+拡張子）です。例示した上記のコマンドにより、ポストプロセッサはファイル SWitch1.EOU を読み込みます。分析のため、順次いくつかのファイルを読み込むことができます。

OUTPUT FPrefix

OUTPUT SW02

現在開いているデータファイルを閉じ、FRrefix.DAT の形のファイル名を持つデータ記録ファイル(例では「SW02.DAT」)を開きます。

POINT X Y

POINT Z R

POINT = (5.65, 10.68)

指定した点において補間を行い、その結果をデータ記録ファイルに書き込みます。2つの実数パラメータは **Mesh** の単位で表した点の座標です。

SCAN Xs Ys Xe Ye

SCAN Zs Rs Ze Re

SCAN = (0.00, 0.00) (10.00, 0.00)

指定した点の間で行ったラインスキャンの結果をデータ記録ファイルに書き込みます。4つの実数パラメータは、**Mesh** の単位で表した始点と終点の座標です。

INTERPOLATION [LSQ, LINEAR]

INTERPOLATION = Linear

Point、Line scan、Matrix コマンドにて使用する補間法を指定します。オプションは「LSQ」(least-square fit: 最小二乗法)および「Linear」(線形)です。

ELEMENT X Y

ELEMENT Z R

ELEMENT = (5.65, 10.68)

指定した点における要素特性をデータ記録ファイルに書き込みます。2つの実数パラメータは **Mesh** の単位で表した点の座標です。

NSCAN NScan

NSCAN = 150

ラインスキャンにおけるプロット点の総数を設定します。デフォルト値は 50、最大数は 500 です。

REGION RegNo

REGION = 5

ある region(領域)に対する体積積分および面積分をデータ記録ファイルに書き込みます。整数パラメータは領域(region)番号です。

LINEINT Xs Ys Xe Ye

LINEINT Zs Rs Ze Re

LINEINT = (0.00, 0.00) (10.00, 0.00)

スキャン線に沿って行った線積分をデータ記録ファイルに書き込みます。4つの実数パラメータは、Meshの単位で表した始点と終点の座標です。

VOLUMEINT

全解析領域および各領域(region)に対する体積積分をデータ記録ファイルに書き込みます。

MATRIX FPrefix Nx Ny Xs Ys Xe Ye

MATRIX FPrefix Nz Nr Zs Rs Ze Re

MATRIX = Switch1 (10, 20) (0.00, 0.00, 5.00,10.00)

マトリックスファイルを作成し、値を記録します。このコマンドには、次の7つのパラメータが必要です。

- 1) マトリックスファイル FPrefix.MTX のプレフィックス(拡張子を除いたファイル名 FPrefix)、
- 2) x (または z) 方向における区間の数 (整数)、
- 3) y (または r) 方向における区間の数 (整数)、
- 4) 解析領域におけるボックス(データ書き出し対称領域)の対向する2角の点の座標 (実数)。

FORCE Reg01 Reg02 Reg03 ...

FORCE = 2, 4, 5

1つ以上の領域に作用する正味の静電気力を、Maxwellの応力テンソル積分を用いて計算します。これらの領域は、連続していることも、分離していることもあります。積分は次の2つの例外を除いて、すべての領域(region)境界にわたり行われます。

- リスト中の領域(region)間の共有面
- 解析領域の境界上の面

この機能は、誘電体と電極が接続した組み立て部品に作用する正味の力を計算したいときに重要です。Maxwellの積分は真空 ($\epsilon_r = 1.0$) に隣接する面にわたり行わなければなりません。共有境界にわたる積分の結果は有効ではありません。

ENDFILE

スクリプトの実行を終了します。このコマンドの後には、どのような形の説明文を付け加えることもできます。

次の例は、4 つの異なる解析軸に沿った電場の値を比較し、その結果をファイル「COMP.DAT」に書き込むスクリプトです。

```
NSCAN 200
OUTPUT COMP
INPUT SWITCH01.EOU
SCAN 0.00 -50.00 0.00 50.00

INPUT SWITCH02.EOU
SCAN 0.00 -50.00 0.00 50.00
INPUT SWITCH03.EOU
SCAN 0.00 -50.00 0.00 50.00
INPUT SWITCH04.EOU
SCAN 0.00 -50.00 0.00 50.00
ENDFILE
```

5.6 電気力線プロッタ

EStat は、電気力線をプロットし、分析できる対話的な環境をもっています。このコマンド「Field line plotter」(ANALYSIS メニュー内)は、表示されたプロットタイプが Contour または Element であるときに使用可能です。このコマンドをクリックすると、座標入力モードが使用可能になります。ここで、現在の座標モード設定(マウス/キーボード、スナップモード、...)を用いて、100 点までの点を指定します。プログラムは、その点から負方向と正方向に(点電荷を)移動することにより、その点を通る電気力線を計算します。電気力線は、解析空間を出るか、固定ポテンシャル物質の中に入ると、終端となります。EStat は、導体または境界と交差する点を正確に見出すために、補間を行います。element(要素)プロットモードにおける電気力線の様子を、図 18 に示します。電気力線の追加を終了するには、マウスの右ボタンをクリックしてください。後でさらに電気力線を追加することもできます。その後プロットから現在表示されている電気力線を除去するには、「ANALYSIS」メニューの「Clear field line」コマンドを用いてください。

データ記録ファイルが開いていると下記の様に、EStat は電気力線を追加するごとに、その電気力線に関する情報を記録します。リストされる量には、始点の位置および計算された電場の量のほかに、負方向と正方向における終点の座標も含まれます。

Field line calculation

Initiation point:

z: 4.4838E+00

r: 6.2142E+00

Phi: -4.9444E+05

Ez: 2.9798E+06

Er: -2.2680E+06

End point (negative direction):

Condition: Fixed potential region

z: 4.6154E+00

r: 9.4998E+00

End point (negative direction):

Condition: Fixed potential region

z: 4.5330E+00

r: 6.1789E+00

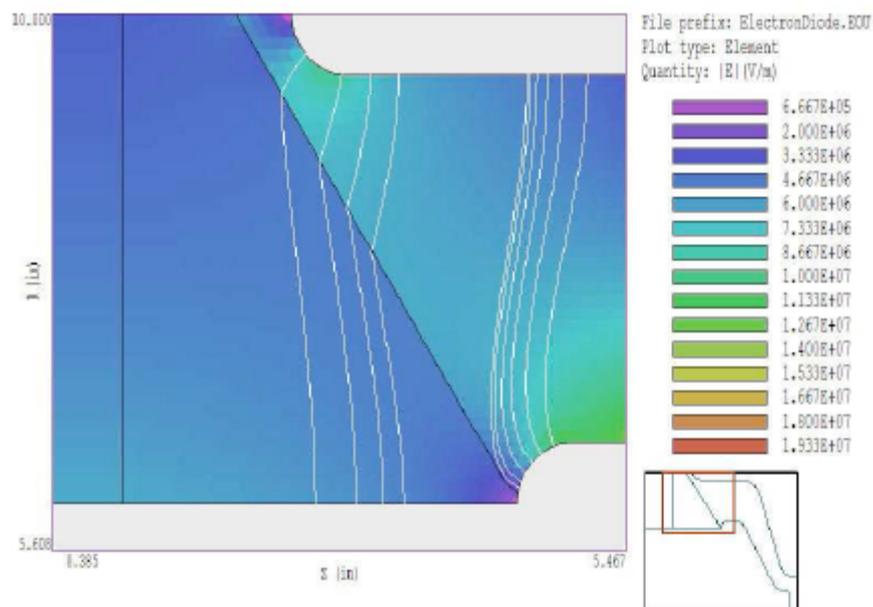


図 18 対話的な電気力線プロッタを用いた真空絶縁体近傍における電場の分析

5.7 等高線ツール

ANALYSIS メニューの「Equiline tool」コマンドは、等ポテンシャル面に沿ったベクトルの集合を順番にリストしたファイルを作成します。EStat は、現在開いているデータ記録ファイ

ルにベクトルのリストを加えます。開いているファイルがないとき、プログラムはファイル名(拡張子を除く)の入力を促し、ファイル FPrefix.DAT を開きます。その次に表示するダイアログで、 ϕ (等電位線の電位値) と整数パラメータ NMSkip の入力を促します。

実例を用いると、Equiline tool の方法と目的を最も良く説明することができます。接地箱内で接地面と長い電極の間の安定なガス放電を必要とする CO₂ パルスレーザを設計したいとします。電場の大きさの変化に関して、次のような2つの条件があります。1) $|E|$ は電極間の空間において近似的に一樣であること、2) $|E|$ は電極表面に沿って対称軸から離れるにしたがい単調に減少すること。2つ目の条件は、非一樣な放電またはスパークを回避するために必要です。電極の外側エッジの半径が単純に同じ場合は、表面の電場を増大させます。Rogowski の方法 [W. Rogowski, Arch. Elekt. 16, 73 (1926)] は、電極形状に関して多少の指針を与えますが、自由空間における無限幅の電極に適用されるものです。したがって、直接、数値解法でアプローチすることにします。

接地面から高さ 1.5cm にある、幅 8.0cm の薄い板を発生電極としたときの最初の計算の結果を図 19 に示します。系は $x = 0.0$ cm における y 軸に関して対称ですので、左端を Neumann 境界とする $x \geq 0.0$ の領域のみに限定して解析を済ますことができます。電極の電圧を 1.0V にしたときの等電位線を図 19a に、 $|E|$ の等高線図を図 19b に示します。グレーの領域は、電場の大きさがギャップ中央における大きさとほぼ等しい区域です。図 19b に赤い矢印で示した点 (4.00, 0.95) を通る等電位線を考えてみましょう。この等電位線は、左側はグレー領域の等電界強度線の内側にとどまり、右側に向かっては、より低い等電界強度線の方に動いています。したがって、等電位線に伴う表面電場は、電極に沿って第 2 の条件を満たします。

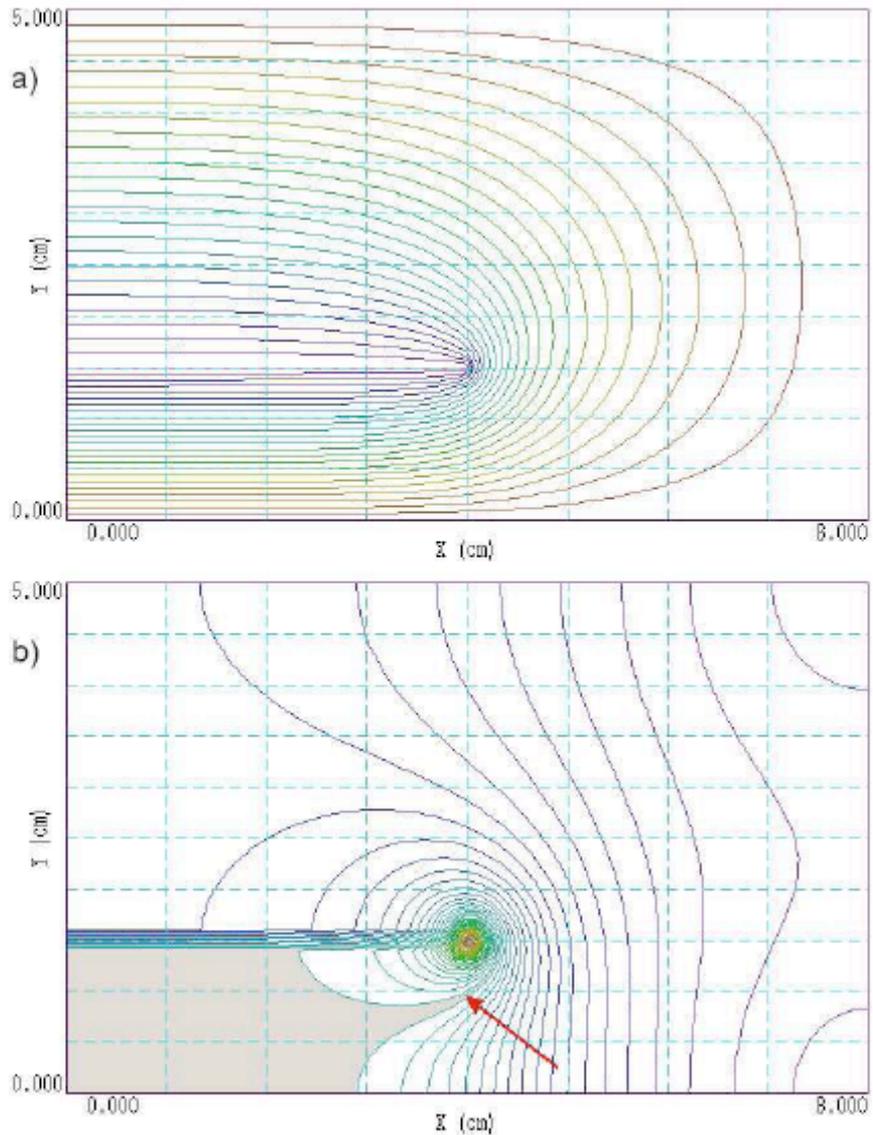


図 19 UNIFIELD01 の初期解。a) 等電位線図。b) 等電界強度線図

Point calculation コマンドを用いると、その点のポテンシャルが 0.504V であることがわかります。次に、Equiline tool を用いて電極表面に沿ったベクトルの集合を生成し、その結果を UNIFIELD01.DAT に保存します。このファイルには、2つのリストがあります。最初のリストは、要素サイズと同程度のスケール長さで計算した 209 個のベクトルすべてが含まれるデータです。

Full vector set along potential contour

Potential: 5.0400E-01

```

=====
0.0000    3.1997    0.0002    3.1997
0.0002    3.1997    0.1124    3.1995
0.1124    3.1995    0.1128    3.1995
0.1128    3.1995    0.2151    3.1990
0.2151    3.1990    0.2161    3.1990
0.2161    3.1990    0.3167    3.1983
...

```

ベクトルをすべて記録したリストは、コンピュータ制御フライス盤への入力データとして有用です。2番目のリストは、ベクトルの数を3分の1(3はNMSkipのデフォルトの設定値)に削減しています。

Reduced vector set for Mesh along potential contour

Potential: 5.0400E-01

```

=====
L    0.0000    3.1997    0.1128    3.1995
L    0.1128    3.1995    0.3167    3.1983
L    0.3167    3.1983    0.4206    3.1971
L    0.4206    3.1971    0.6181    3.1940
...

```

Meshでは線分が要素サイズより大きくなければなりませんので、Meshに入力するためにはベクトルの長い方が適切です。ベクトルのリストをMeshの領域(region)定義に直接取り入れることができるように、EStatはベクトルの各行の始めに文字Lを加えます。このリストを用いて、ファイル「UNIFIELD02.MIN」を作成しました。充填(Filled)領域のすべてを完成させるために、左側境界に沿ってベクトルを付け加えました。電極近傍の等電界強度線の詳細な表示を図20に示します。予想どおりに、電極表面上の電場の大きさは、電極の中心線から離れるに従って減少しています。このデザインは次の2種類の方法で変更できます。

- 電極幾何形状の任意な選択により、2番目の解析におけるギャップは0.7561cmになりました。ギャップまたは電極の幅を異なる長さにするために、発生電極のパラメータを変更することもできます。
- 加工コストを削減するために、先端における低電場領域での複雑な表面を、単純な平面に置き換えることもできます。

まとめると、EStat はベクトルを連続的に線上に配列する強力なソーティング（整列）機能を持っています。この手順は、図20のような比較的簡単な形状に対してはうまく機能しますが、形状が（たとえば鞍点のような）複雑な形状のとき、あるいは複数の不連続な線があるときには、問題が起きます。このような場合は、ベクトルのリストを編集することが必要になるでしょう。

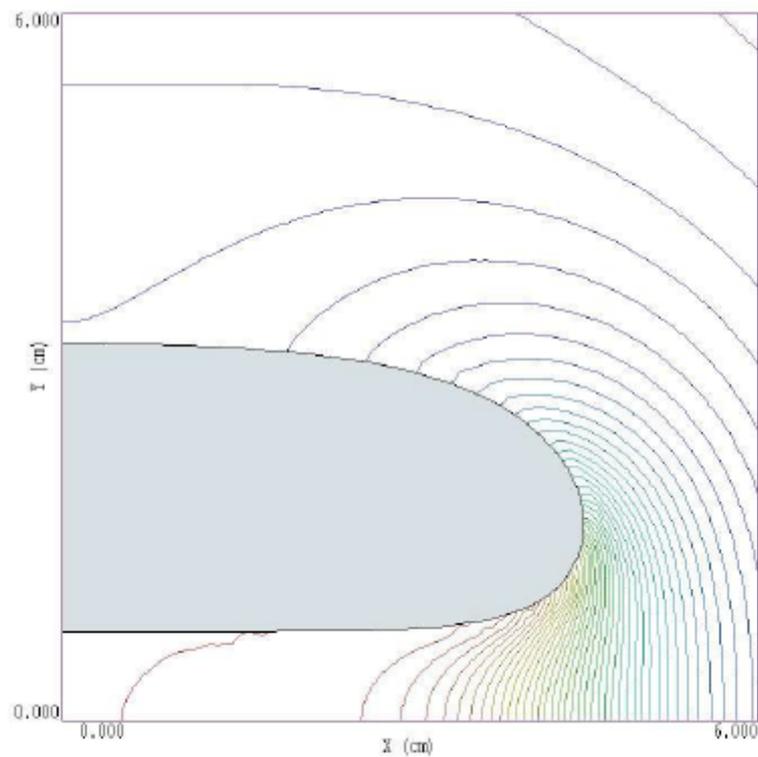


図 20 等電界強度線を示す 2 番目の解析「UNIFIELD02」。電極は、「UNIFIELD01」の 0.504V の等電位線の形状を持つ。