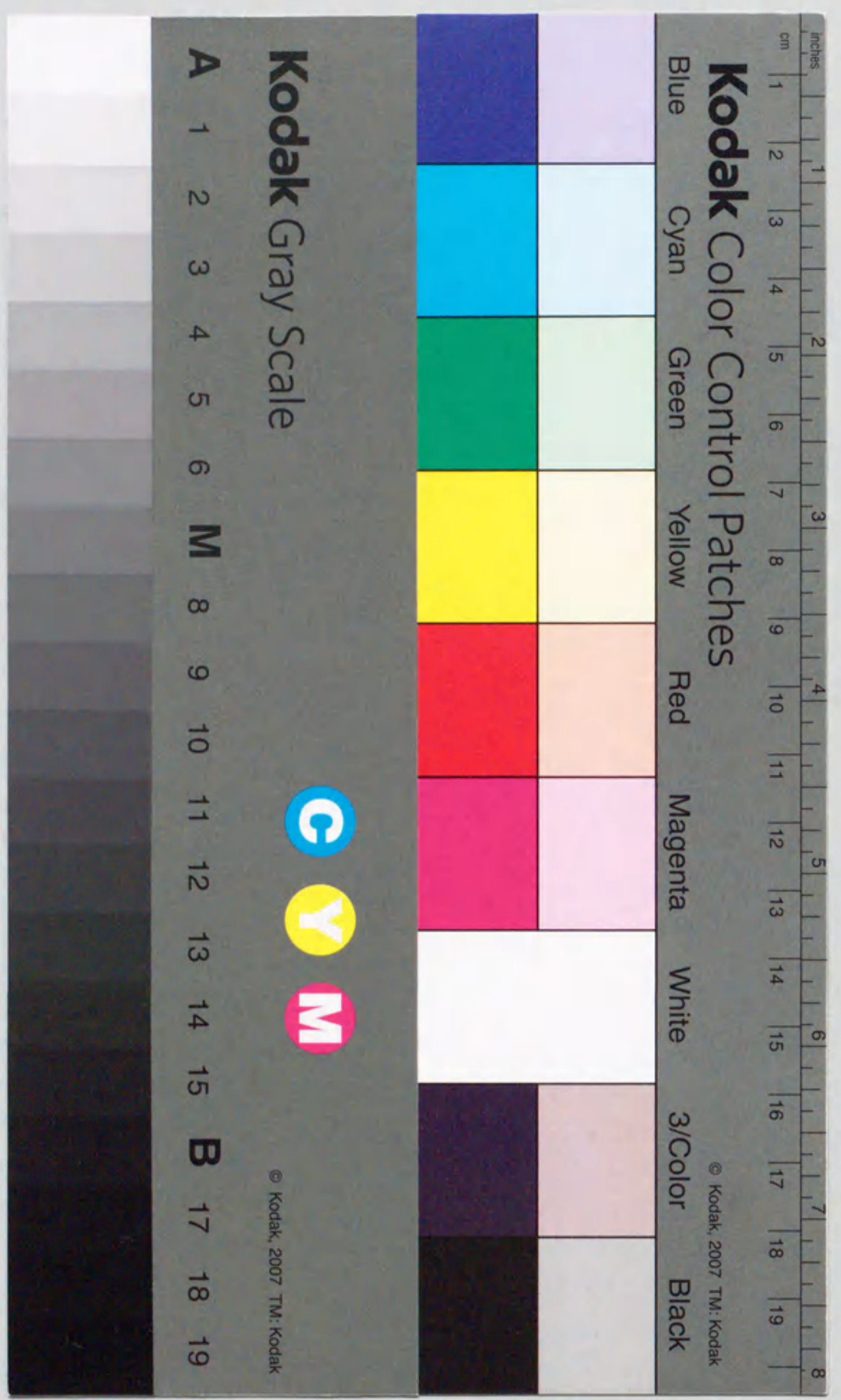


報告番号 甲第、 3726 号

# 電力機器の最適絶縁設計用 知的CADシステムの開発

加藤克巳





電力機器の最適絶縁設計用  
知的CADシステムの開発

加藤克巳



# 電力機器の最適絶縁設計用 知的CADシステムの開発

## 目次

第1章 緒論	1
1.1 電気エネルギーと電力機器	1
1.2 電力・高電圧分野における電界解析技術の適用	2
1.3 種々の電界解析手法とその特徴	4
1.4 電界解析技術の最近の研究開発動向	7
1.5 CADに関する最近の研究開発動向	18
1.6 本研究の目的および内容	20
<1.6.1> 本研究の目的	20
<1.6.2> 本研究の内容および本論文の構成	20
第1章の文献	25
第2章 電界解析機能付CAD"CADEF"の開発	31
2.1 まえがき	31
2.2 CADEFの概念とその利点	31
2.3 CADEFシステムの概要	32
<2.3.1> CADと電荷重畳法	32
<2.3.2> ハードウェアおよびソフトウェアの構成	33
<2.3.3> CADと電界解析の結合のための必要技術	35



<2.3.4> CADEFによる実機器を対象とした 自動電界解析のための必要技術	36
<2.3.5> CADEFにおける最適化計算のための必要技術	38
2.4 CADEFの基本構成	39
2.5 領域自動認識法の開発	46
2.6 仮想電荷配置に関する専門家知識の導入による知的化	52
2.7 実用高電圧機器図面を対象とした自動電界解析	62
2.8 まとめ	69
第2章の文献	70
第3章 パソコンによる電界最適化自動計算技術の開発	71
3.1 まえがき	71
3.2 CADEFにおける電界最適化の定義	71
3.3 CADEFにおける電界最適化自動計算技術の開発	72
<3.3.1> Metzの電界最適化手法の基本原理	72
<3.3.2> 正・負両極性の最適化電荷配置	74
<3.3.3> 電荷再配置	76
<3.3.4> 形状修正の自由度を拡大した 電界最適化手法の計算手順	77
<3.3.5> 形状修正回数と計算時間の関係に関する定量的検討	80
<3.3.6> 初期形状が異なる場合の最適形状	83
<3.3.7> 実機器規模の適用事例に対する電界最適化計算	88
<3.3.8> 電界最適化技術のCADEFへの組み込み	88
3.4 まとめ	92
第3章の文献	93

第4章 電極形状の最適性決定手法の開発	95
4.1 まえがき	95
4.2 電極形状の最適性決定手法	95
<4.2.1> 電極形状の最適性決定手法の基本的原理	95
<4.2.2> 解析解を持つ電極系を用いた 最適性決定手法の性能検証	99
4.3 電極形状の最適性決定手法を用いた電界最適化の高速化	101
<4.3.1> 電極形状の最適性決定手法の流れ	101
<4.3.2> 電力機器形状を対象とした本手法の性能検証	104
4.4 まとめ	109
第4章の文献	110
第5章 ニューラルネットワークを用いた 電界最適化技術の開発	111
5.1 まえがき	111
5.2 ニューラルネットワークの基本構成	111
5.3 ニューラルネットワークを用いた電界最適化アルゴリズム	114
5.4 ニューラルネットワークを用いた電界最適化手法の検証	118
<5.4.1> 学習データの作成	120
<5.4.2> ニューラルネットワークの学習	120
<5.4.3> 電界最適値の決定	120
<5.4.4> 電界最適電極形状の求解	123
5.5 まとめ	126
第5章の文献	129



第6章 電界最適電極の絶縁特性に関する実験的検証	131
6.1 まえがき	131
6.2 電界最適電極形状	131
6.3 実験方法	132
6.4 実験結果および検討	137
6.5 まとめ	143
第6章の文献	145
第7章 絶縁最適化自動計算技術の構築	147
7.1 まえがき	147
7.2 絶縁最適化において考慮すべき絶縁特性	147
7.3 電極面積効果を考慮に入れた最適化計算	148
<7.3.1> 絶縁媒質の電極面積効果	148
<7.3.2> 面積効果を考慮に入れた最適化計算の基本的原理	149
<7.3.3> 計算結果およびその検討	151
7.4 気体の放電開始特性を考慮に入れた最適化計算	153
<7.4.1> 空気・SF <sub>6</sub> ガスの放電開始特性および 絶縁破壊電圧の計算方法	153
<7.4.2> 絶縁最適化における最適条件	156
<7.4.3> 気体の放電開始特性を考慮に入れた 絶縁最適化計算の基本的原理	157
<7.4.4> 気体の放電開始特性を考慮に入れた絶縁最適化結果 およびその検討	159
7.5 Borda形状への絶縁最適化技術の適用	163
<7.5.1> Borda電極形状	163

<7.5.2> 絶縁最適化結果とBorda形状との比較	163
7.6 まとめ	170
第7章の文献	172
第8章 総括	173
8.1 まえがき	173
8.2 本研究で得られた成果	174
<8.2.1> 電界解析機能付CAD"CADEF"の開発	174
<8.2.2> パソコンによる電界最適化自動計算技術の開発	174
<8.2.3> 電極形状の最適性決定手法の開発	175
<8.2.4> ニューラルネットワークを用いた 電界最適化技術の開発	176
<8.2.5> 電界最適電極の絶縁特性に関する実験的検証	176
<8.2.6> 絶縁最適化自動計算技術の構築	177
8.3 今後の課題	178
謝辞	179
本研究に関して発表した論文	181



## 第1章 緒論

### 1.1 電気エネルギーと電力機器

近年，わが国においては，産業構造・生活様式などの変化に伴い，エネルギーの使用量が着実に増加しつつある．その中でも，とりわけ電気エネルギーは，クリーンで使いやすいことから，使用量の伸びが著しい．最近の電力使用量の増加率は年3～4%程度と高い値を示しており，今後も着実に増加していくと見込まれている<sup>[1]</sup>．また，全エネルギー使用量に占める電力の割合（電力化率）も年々増加しており，その値は10年前には35%であったものが，現在約40%になっている<sup>[2]</sup>．

このような電力需要の増加に対応した電力システムを構築するためには，発電・送電・変電・配電といった各設備について，均衡のとれた強化を行っていく必要がある．とりわけ，送電・変電設備は，発電所からの大電力を需要地へ経済的にかつ確実に送り届けるという重要な役割を担っている．このため，架空送電線や電力ケーブル，およびガス絶縁開閉装置（GIS）や変圧器といった送変電機器は，より一層の高電圧化・高信頼化が要求されている．さらに，わが国の都市部においては過密化が進んでおり，送変電設備用地の獲得は困難となりつつある．このため，これらの機器は，一層の縮小化が要請されている．このような要請に対して，電気絶縁技術の果たす役割はますます増加している．

現在，21世紀初頭の運転開始を目指し，1000kV（UHV）送電の実現計画が着実に進められている<sup>[3]</sup>．また，従来の架空送電方式に加え，地中ケーブル送電，ガス絶縁送電線路（GIL）などの様々な方式による送電計画が進められている<sup>[3-5]</sup>．これらの高電圧・大電力送電システムに適用される送変電機器の開発が活発に行われている<sup>[6-10]</sup>．



## 1.2 電力・高電圧分野における電界解析技術の適用

図1.1に、現在UHV機器実証試験で使用されている1000kV GIS・変圧器の概観を示す<sup>[3]</sup>。また図1.2に、直流送電用に開発された±500kV GISを示す<sup>[4]</sup>。前節で述べたように、これらの送変電機器に要求される仕様は、絶縁的にますます厳しさを増している。そのため、これらの機器の開発においては、その絶縁設計の重要性が非常に高くなってきている。高電圧電力機器の絶縁設計においては、機器内部の絶縁空間における電界分布の求解が必要不可欠である。とりわけ、最近になって導入が増大しているSF<sub>6</sub>ガスを用いた機器の絶縁設計においては、SF<sub>6</sub>ガスの絶縁破壊特性が空間中の最大電界に強く依存することから、高い精度で電界分布を把握する必要がある。言い換えれば、電界の空間的分布を高精度に、かつ高効率に知ることができれば、機器の絶縁設計に対する信頼性の向上、および設計効率の向上が可能となり、ひいては電力供給の信頼性向上に貢献することになる。このような目的から、電力機器の絶縁設計において、電界解析が必須の技術として導入され、特にコンピュータにより電界を数値的に求める電界解析技術が広く使用されるようになってきている<sup>[7-9, 11-14]</sup>。

近年では、上述のように、機器の高電圧化・縮小化に伴い、機器内部空間中の高電界化がますます進んでいる。そのため、機器内部の電界分布をより高精度に求めたいという要請は非常に強まってきており、今後、電界解析技術の適用範囲はますます拡大していくものと予想される。

一方、より高い絶縁性能を有する機器の開発を行う場合、試行錯誤的に電極形状を与え、それに電界解析を適用する従来の設計手順では、計算精度・計算効率の観点から限界となってくる。この場合、従来の電界解析技術を発展させ、自動的に最低かつ一様な電界分布をもつ電極形状を逆求解する、いわゆる「電界最適化」技術の開発が必要になる。このように、最低かつ一様

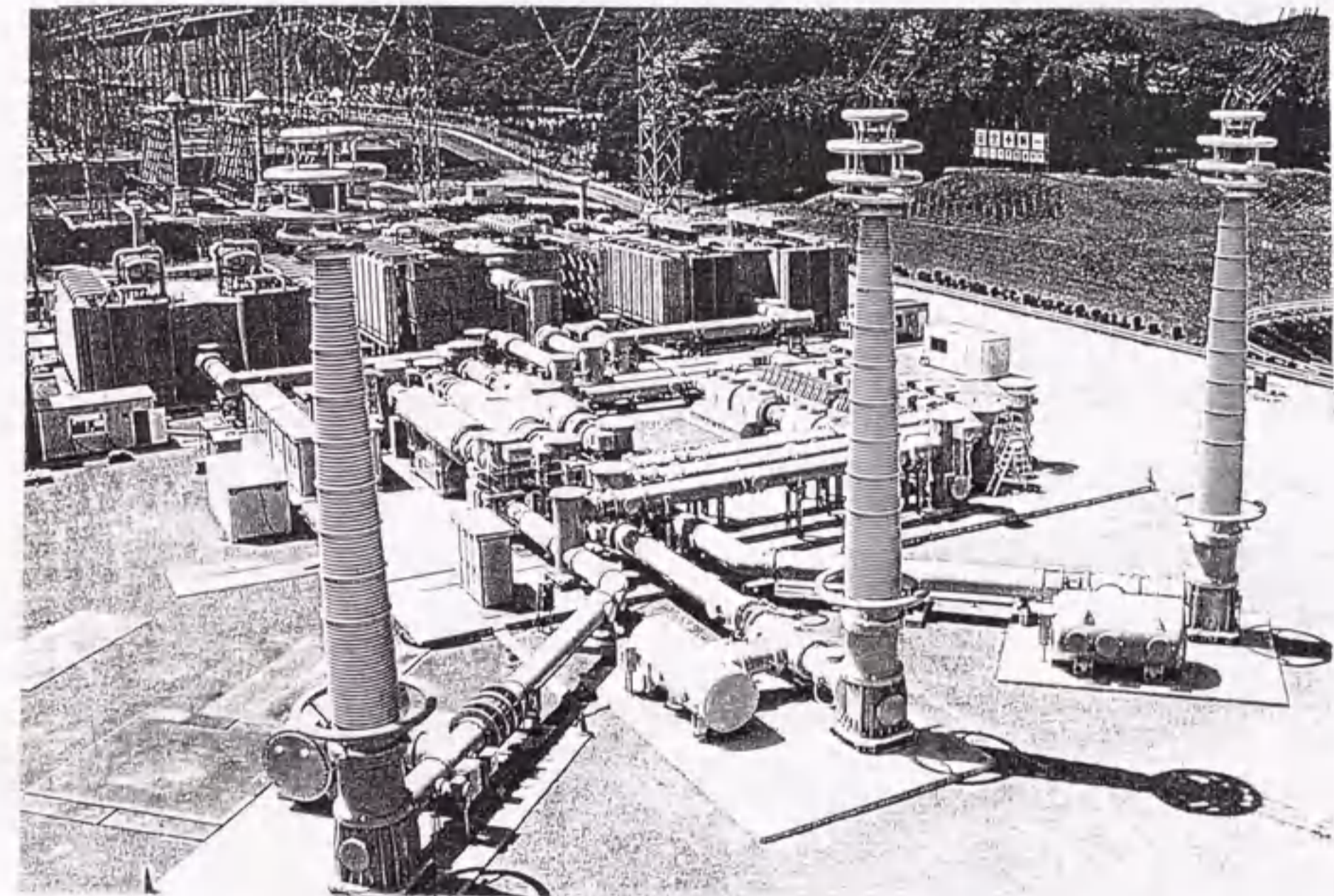


図1.1 実証試験用1000kV GIS・変圧器の概観<sup>[3]</sup>

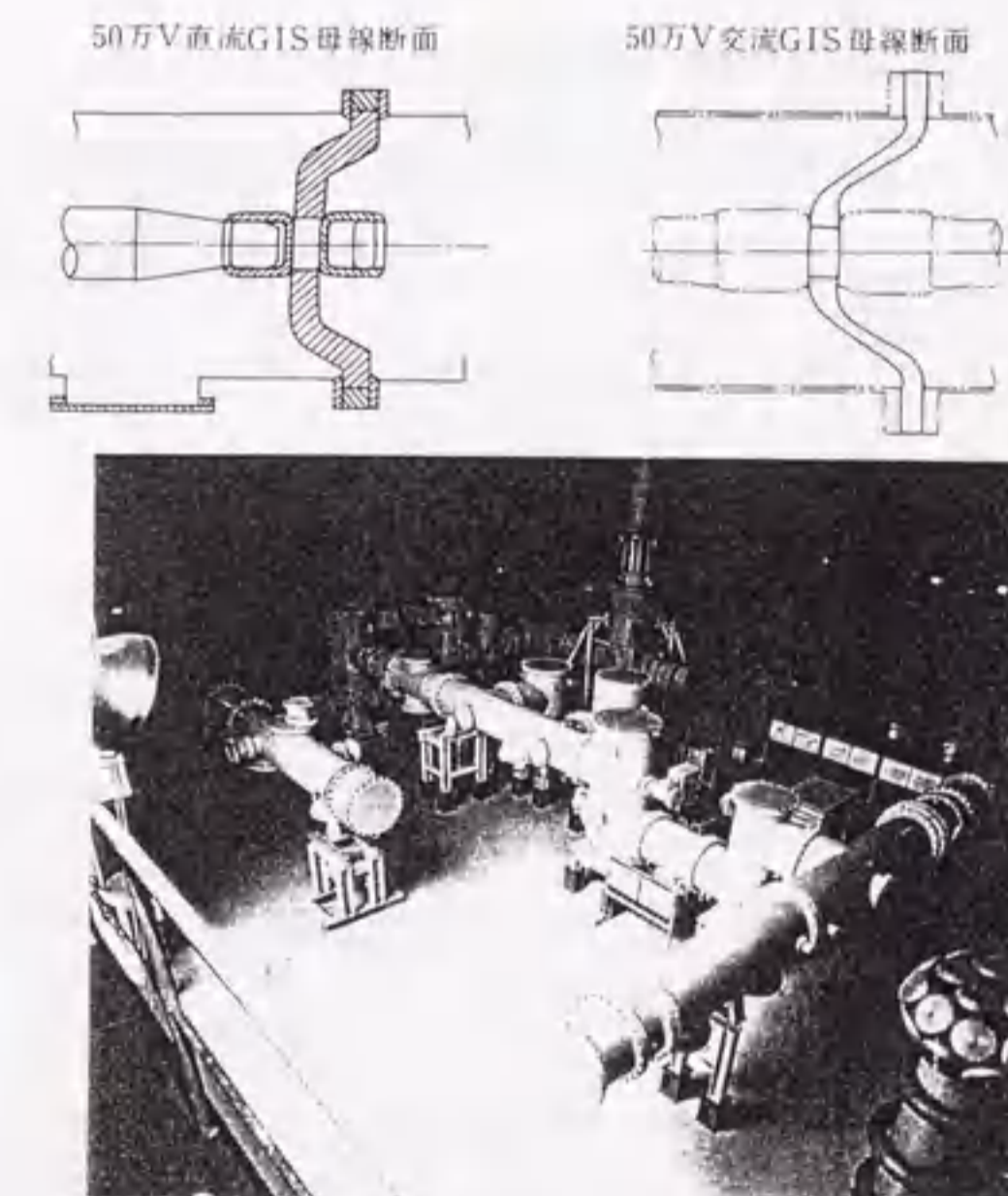


図1.2 ±500kV用直流GIS<sup>[4]</sup>



な電界分布をもつ電極形状を求めることは、機器内部の電界空間の有効利用という観点から、機器の縮小化および信頼性の向上に極めて有用であるといえる。さらに、より精度の高い絶縁設計のためには、電界分布のみを対象とするのではなく、機器の周囲条件によって決定される絶縁特性を同時に考慮に入れる必要がある。すなわち、電力機器に使用する絶縁媒質の種類・考慮すべき印加電圧波形・電極面積・絶縁空間の体積といった条件から、絶縁的な最適条件を決定し、これに基づき最適化計算を行う「絶縁最適化」技術の構築が必要になる。

ところで近年、機器などの設計においては、CADの適用が拡大しつつある。CADは Computer Aided Design の略であり、「計算機支援設計」と称されるものである<sup>[15]・[17]</sup>。最近ではパーソナルコンピュータ（パソコン）に基づいたPC-CADが汎用性および経済性から多用されている<sup>[17]</sup>。従って、PC-CADと電界解析技術を結合させたシステムの導入により、CADと電界解析相互のデータ融通が可能となり、設計の精度および効率の向上が期待できる。このように、電力機器の絶縁設計においては、電界解析技術あるいは最適化技術を単独で適用するのではなく、CADなどと有機的に結合された条件下で使用できる環境の構築が必要である。

### 1.3 種々の電界解析手法とその特徴

電界解析の最も基本的な問題は、電極に一定電圧が印加されている時、電極内部以外の空間の電界を求めるものである。空間電荷が存在しない場合、この問題はラプラスの方程式

$$\text{div grad } \phi = 0 \quad (1.1)$$

を満足する電位 $\phi$ の空間分布を、電極上での電位が一定という条件のもとに求める境界値問題となり、ディリクレの問題といわれる。

この問題を解く方法として、映像法・等角写像法・座標変換法などの解析的手法が存在する<sup>[18]</sup>。しかし、これらの方法で解析可能な電極形状には制限があり、実際の高電圧機器などの電界解析には対応できない場合がほとんどである。そこで、現実の複雑な形状や、導体と誘電体を含んだ電極配置などについて電界を求めるための技術として、数値電界解析技術が導入されてきた<sup>[19]</sup>。数値電界解析とは、連続的に変化する電界・電位などの量を「離散化・有限化」して、コンピュータで求めようという方法である。電界分布を有限に取り扱えるように分割するには、領域を分割するか境界を分割するかの2通りしかない。従って、数値電界解析は、大きく「領域分割法」と「境界分割法」に分けることができる。

領域分割法は、領域を有限個に分割し、分割点の電位を未知数とする方法で、電界は電位を数値微分することによって得られる。差分法と有限要素法がこれに属する。これに対し境界分割法は、電極や誘電体の表面を分割し、表面上の電荷を離散化し未知数とする方法である。電界は、これらの電荷の重ね合わせにより計算する。電荷重畳法と表面電荷法がこれに属する。

これら4つの手法が現在一般的に使用されている。これら電界解析手法の原理および特徴の比較を表1.1に示す<sup>[19]</sup>。

各手法のこれまでの発展の状況は次のようである<sup>[19]・[20]</sup>。1970年代から電荷重畳法や有限要素法などの数値電界解析手法の開発が急激に立ち上がった。続いて1980年代には表面電荷法などがこれらに加わった。この段階で、2次元場及び軸対称3次元場の静電界を中心とする解析はほぼ完成の域に達した。また、これらの手法に基づいて、漏洩抵抗場や空間電荷電界などの、より現実的な場に対する解析手法の開発が進められてきた。



表1.1 数値電界解析手法の比較<sup>[19]</sup>

数値計算法	領域分割法		境界分割法	
	差分法	有限要素法	電荷重畳法	表面電荷法
離散化の方法	領域全体の分割		境界と電荷の分割	
未知数	分割点(格子点)電位	分割点(節点)電位	電極内仮想電荷	表面電荷密度
係数行列	ほとんどの項が0		ほとんどの項が0でない	
方程式解法	係数行列の番号付けを工夫した直接法か反復法(SOR法)		一般に直接法(消去法), たまに反復法	
電界値の計算	電位を数値微分		電荷から解析計算	電位の数値微分か電荷から計算
適する問題の種類	一般的であるが境界・界面が複雑になると取扱いが困難	複雑な境界, 誘電体の数が多い場合, 電界の変化が大きい場合	対称性を有する場の精密計算, 場が無遠慮まで及ぶ場合	電荷重畳法とほぼ同じだが, 特殊な形状, 誘電体の種類の多い場合
その他	電界計算に最も古くから使用された. 分割方法や無限遠の処理が面倒である.	入力データの作成が面倒であるが, 複雑な問題に対して柔軟性がある. 無限遠の境界処理が面倒である.	仮想電荷の配置方法に経験と勘が必要である. 薄い電極は取扱いが難しい.	プログラミングが面倒である. 電荷重畳法と併用することが望ましい. 電荷の配置に経験が不要である.

#### 1.4 電界解析技術の最近の研究開発動向

電界解析技術に関する現在の研究開発項目の主体は, 以下の通りである.

- (1) 電界解析を中心としたCAE技術
- (2) 電界最適化技術
- (3) 一般三次元解析技術
- (4) 高速計算技術
- (5) 実際の使用条件により近い場を対象とした解析技術
- (6) ハイブリッド手法
- (7) 過渡電磁界解析技術

以下, それぞれの概要について述べる.

##### (1) 電界解析を中心としたCAE技術

CAE (Computer Aided Engineering) とは, 設計過程において必要になる各種数値解析技術, 解析モデルの作成を支援するプリプロセッシング技術, および解析結果の表示を支援するポストプロセッシング技術を1つのシステム内で統合するための技術である<sup>[21]</sup>. これによって, 機器データの一元化および操作性の向上を実現し, 実際の設計作業において, 解析をより容易に, より効率良く行うことができる. 電力機器の設計におけるCAEの構築として, 図1.3のような概念が考えられる<sup>[22]</sup>.

このCAEシステムの開発に関して, Schwabら, Singerらが報告しているVENUS (Verteilte Entwicklung und Nutzung eines Softwaresystems in der numerischen Feld Berechnung) プロジェクトがある<sup>[23, 24]</sup>. VENUSプロジェクトは, プリプロセッシング技術・電界解析技術・ポストプロセッシング技術の統一したソフトウェアの構築, および知識ベースを用いた自動計算を目指

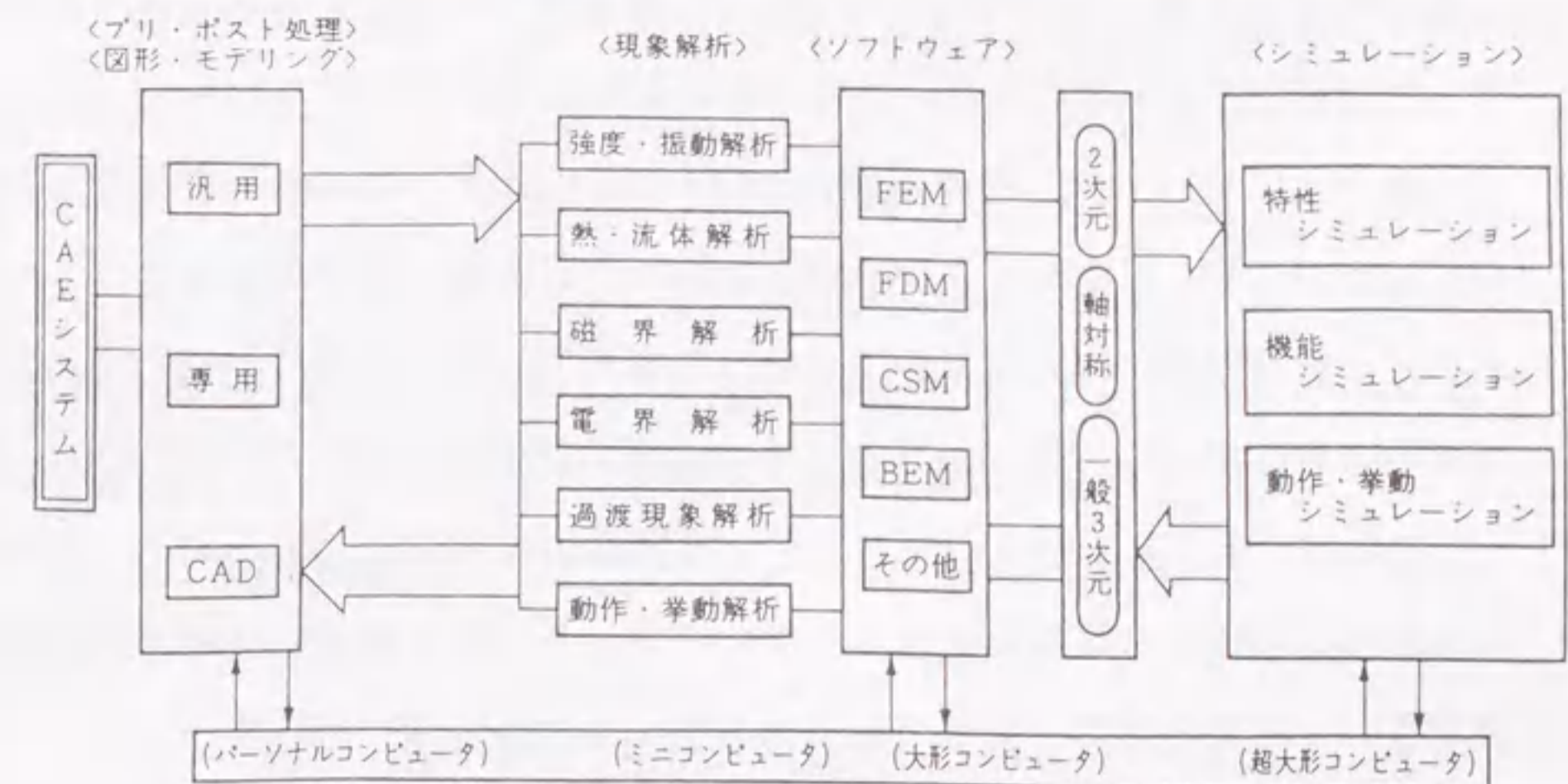


したものである。VENUSシステムの基本構成を図1.4に示す。VENUSプロジェクトに関連して、Deisterらは、専門家の知識をベースとして個々の電界問題に対して最適な解析プログラムを選択、指示するコンサルタントシステム NUMEX (NUMerical field calculation EXpert) の開発を行っている<sup>[25]</sup>。また、Gutfleischらは、VENUSシステムにおいて、GISポストペーサ等の電界解析を行っている<sup>[26]</sup>。その他、大久保らは、送変電機器を対象としたCAEシステムの構築を行っている<sup>[27]</sup>。Pappらは、いくつかの電磁界解析ソフトウェアモジュールおよび設計ソフトウェアモジュールなどを統合したシステムの開発例を報告している<sup>[28]</sup>。このシステムはエンジニアリングワークステーション (EWS) をベースとしており、操作性の観点からウインドー上でこれらを起動し使用できるようにしている。また、Sundararajanらは、碍子の設計のための計算機支援システムを構築している<sup>[29]</sup>。Andersenは、パソコンを使用した有限要素法による電磁界解析システムの構築例を報告している<sup>[30]</sup>。向井らは、パソコンを用いた絶縁裕度表示システムの開発を行っている<sup>[31]</sup>。

しかし、電力機器の設計支援への適用を考えた場合、従来のCAE技術をさらに発展させ、計算効率・計算精度の一層の向上を行う必要がある。すなわち、高精度での電界解析に必要なノウハウや経験的要素のCAEシステムへの組み込み、プリプロセッシング過程での解析モデル作成に必要な労力の一層の低減など、開発すべき項目は多い。このように、電力機器の絶縁設計に適用可能なCAEシステムの構築のためには、今後も多大の技術開発が必要不可欠である。

## (2) 電界最適化技術

一般に「最適とは何か」を一意に決定することは難しい。その理由としては、最適という概念が、個々の問題に与えられた条件などにより大きく異なるためである。電力機器の絶縁の観点から、「最適化」のためには、第一に空間中の最大電界を低減させ、かつ電界分布を一様とすることを指すのが



FEM: 有限要素法, FDM: 差分法, CSM: 電荷重畳法, BEM: 境界要素法

図1.3 CAEシステムの構築例<sup>[22]</sup>

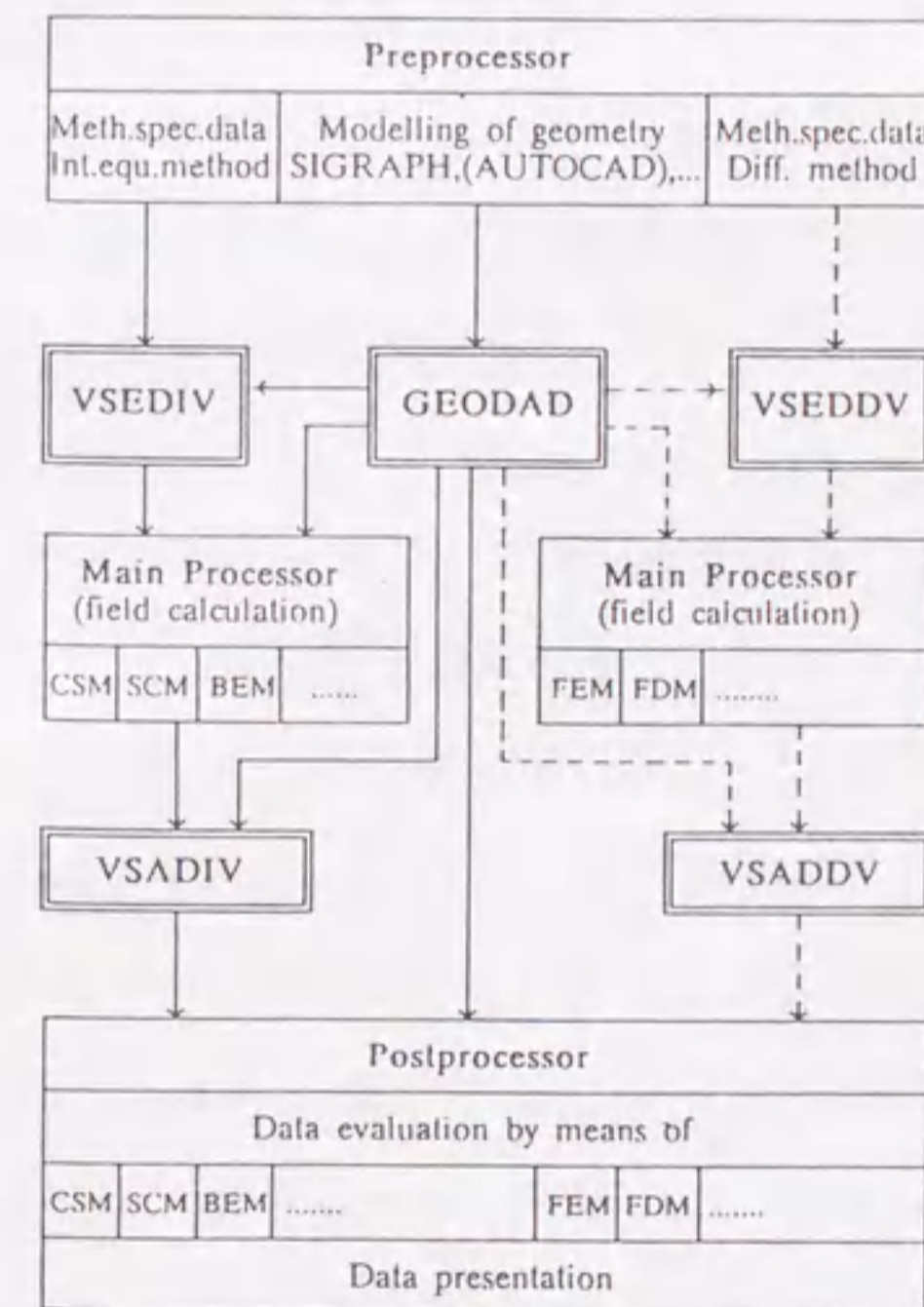


図1.4 VENUSシステムの基本構成<sup>[23, 24]</sup>



一般的であると考えられる。このように、最低かつ一様となる電界分布を有する電極形状を求める問題は、通常、電界最適化問題と呼ばれている。

二次元場においては、等角写像を用いたBorda電極、Rogowski電極などが知られている<sup>[18]</sup>。しかし、三次元場あるいは多媒質場で電界最適化を行うためには、数値計算に頼らざるを得ない。これまで、数値電界最適化手法およびその応用に関して、表1.2に示すように多数の報告がなされている<sup>[32-48]</sup>。

Singerは、電荷重畳法をベースとした電界最適化手法として、電界と電極の曲率の関係式から電極形状修正条件を導き、その修正条件に従って形状修正を行い、最適な電界分布を求めている<sup>[33]</sup>。この方法は、形状修正に制約がある一方、自動計算は比較的容易という特徴を有する。一方、Metzは、同じく電荷重畳法をベースとした電界最適化手法として、仮想電荷群が形成する等電位面を電極表面形状とみなし、これら仮想電荷の位置および大きさを変化させることによって形状修正を行っている<sup>[34]</sup>。この手法は、電荷の与え方に関する自由度が大きく、かなりの経験を必要とするので、自動計算には向いていない。しかしその反面、形状修正における制約は小さい。大久保らは、この方法をさらに発展させ、電界強度に対応した大きさを持った電荷を電極内部に順次追加することによって、電界最適化自動計算を行った例を報告している<sup>[35]</sup>。

その他、坪井らは、表面電荷法に基づいた電界最適化を行っている<sup>[36, 37]</sup>。電極表面に生じる応力に基づいた修正条件を使用し、収束性の高い計算を可能としている。またLeeらは、同じく表面電荷法に基づいた一般三次元電界最適化において、スプライン曲線を利用することによって形状を表現するためのパラメータの個数を減らし、計算の高速化をはかっている<sup>[45]</sup>。さらに、Trinitisらは、表面電荷法をベースとした一般三次元における電界最適化をEWSを用いて行っている<sup>[43]</sup>。この中で、変圧器巻線シールドリング電極の電界最適化を行っている。図1.5に、その計算結果を示す。またGomollónらは、高電圧絶縁支持筒の表面形状の最適化を、スプライン曲線により求めている

<sup>[44]</sup>。この中で、変圧器ブッシング形状の最適化を行っている。図1.6に、その計算結果を示す。

その一方で、ファジー理論<sup>[49]</sup>、ニューラルネットワーク (NN)<sup>[50]</sup>、シミュレーテッドアニーリング (SA)<sup>[51]</sup>、遺伝的アルゴリズム (GA)<sup>[52]</sup>といった技術を最適化問題に積極的に取り入れる動きが見られる。Chakravortiら、Bhattacharyaらは、NNを用いた電界最適化計算を行っている<sup>[41, 46]</sup>。

その他、電界最適化についてのレビューが、宅間ら、坪井らによりなされている<sup>[53-55]</sup>。

しかし、これらの電界最適化技術を電力機器の絶縁設計に適用するためには、従来の電界最適化技術を発展させ、一層の汎用性の拡大および計算効率の向上などが強く求められる。特に、従来の電界最適化技術においては、電界最適化で得られる最適形状の初期形状依存性のため、初期形状の与え方に関する経験が必要になる。このため、電界最適化過程における形状修正の自由度を従来より向上させ、初期形状依存性を低減させることにより、汎用性の高い電界最適化が可能となる。さらに、汎用性・経済性・操作性などの観点から、パソコンに基づいた電界最適化技術の開発が要請されており、計算効率の一層の向上が必要不可欠である。このように、電力機器の絶縁設計支援への電界最適化技術の適用という観点から、今後も多大の技術開発が必要である。

### (3) 一般三次元解析技術

一般三次元解析において最も問題となるのは、電界解析に必要な形状データの作成に、多大の手間と労力を必要とする点である<sup>[56]</sup>。そのため、これら機器形状データの入力過程を支援し、解析に必要なデータ生成を容易にするための技術が必須となってくる。

Okuboらは、電荷重畳法をベースとした一般三次元電界解析手法として、セグメント法という方法を開発している<sup>[57]</sup>。これは、あらかじめ電極内部に



表1.2 数値電界最適化手法による最適設計の報告

文献	著者	年	計算法	対象	計算例
[32]	K.Antolic	1972	FEM	絶縁物形状	単相の円板スベーク
[33]	H.Singer	1979	CSM	電極形状 (RS)	棒対平板ギャップ, 断路器ギャップ
[34]	D.Metz	1979	CSM	電極形状 (RS)	単相線路端末, Borda電極 (RS)
[35]	大久保, 他	1980	CSM	電極形状 (RS)	Borda電極 (RS), 単相線路端末
[36]	T.Misaki, 他	1982	SCM	電極形状 (3D)	対向電極, 球対球, 立方体中球
[37]	坪井, 他	1982	SCM	電極および絶縁物形状 (3D)	単相線路スベーク
[38]	Z.Stih	1986	SCM	電極および絶縁物形状 (RS)	変圧器巻線シールド電極, ブッシング
[39]	M.Abdel-Salam, 他	1987	CSM	絶縁物形状 (RS)	電極支持絶縁物
[40]	H.Deng, 他	1989	CSM	電極寸法と位置 (RS)	抵抗分圧器の浮遊電位シールド電極
[41]	S.Chakravorti, 他	1994	*	電極形状 (RS)	平行平板電極端部 (RS)
[42]	M.Abdel-Salam, 他	1994	CSM	絶縁物形状 (RS)	変圧器ブッシング
[43]	C.Trinitis, 他	1995	BEM	電極形状 (3D)	変圧器巻線シールド電極
[44]	J.A.Gomollón, 他	1995	*	絶縁物形状 (RS)	変圧器ブッシング
[45]	B.Y.Lee, 他	1995	SCM	電極形状 (3D)	立方体中球
[46]	K.Bhattacharya, 他	1995	*	絶縁物形状 (RS)	電極支持絶縁物
[47]	河本, 他	1996	CSM	電極形状 (RS)	単相線路端末
[48]	P.D.Pedrow, 他	1996	*	電極形状 (RS)	送電線用コロナ緩和リングなど

(注1) SCM: 表面電荷法, CSM: 電荷重畳法, BEM: 境界要素法, FEM: 有限要素法, \*: 電界解析手法に依存しない  
(注2) RS: 軸対称三次元, 3D: 一般三次元

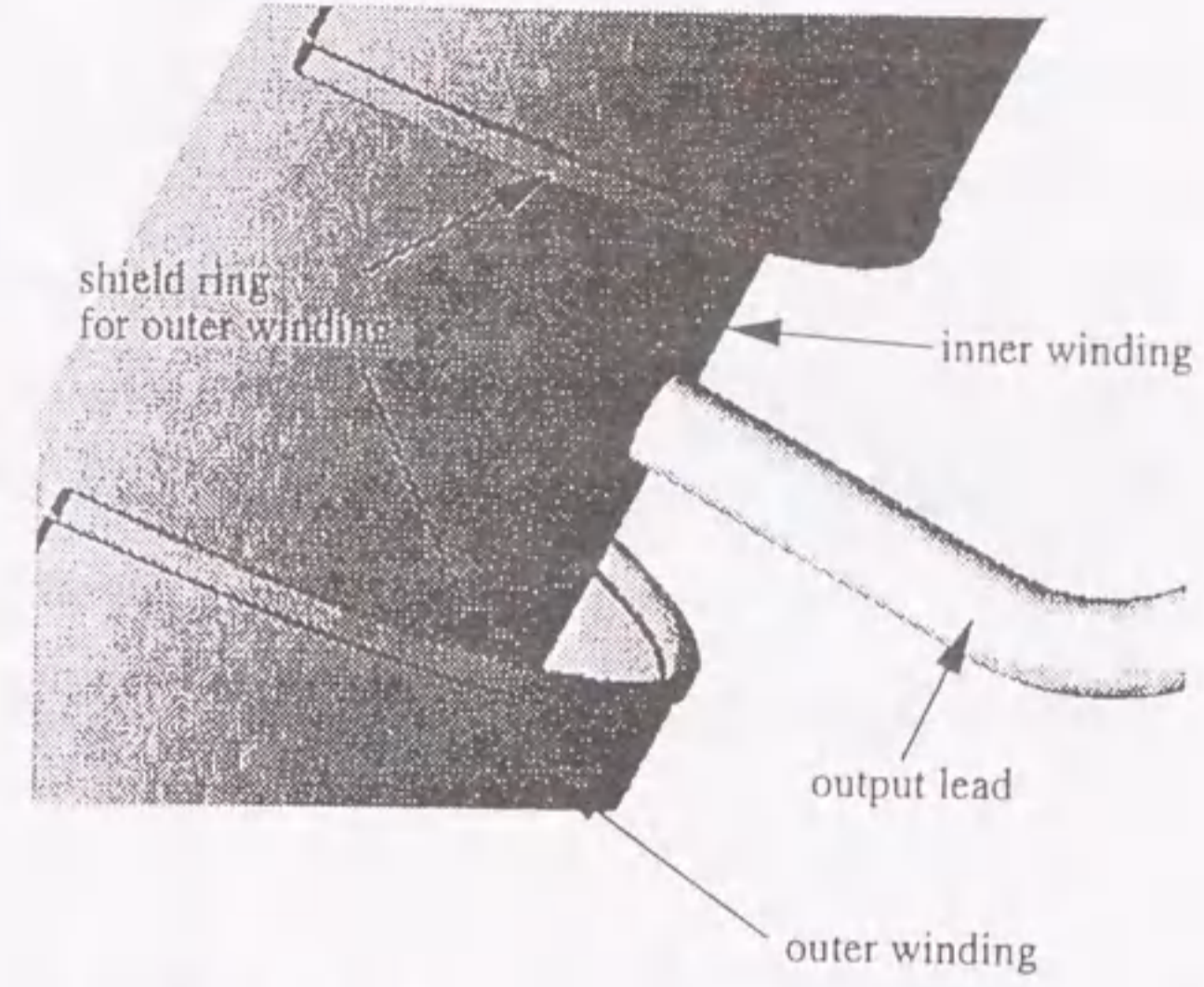


図1.5 変圧器巻線のシールド用電極の電界最適化計算結果<sup>[43]</sup>

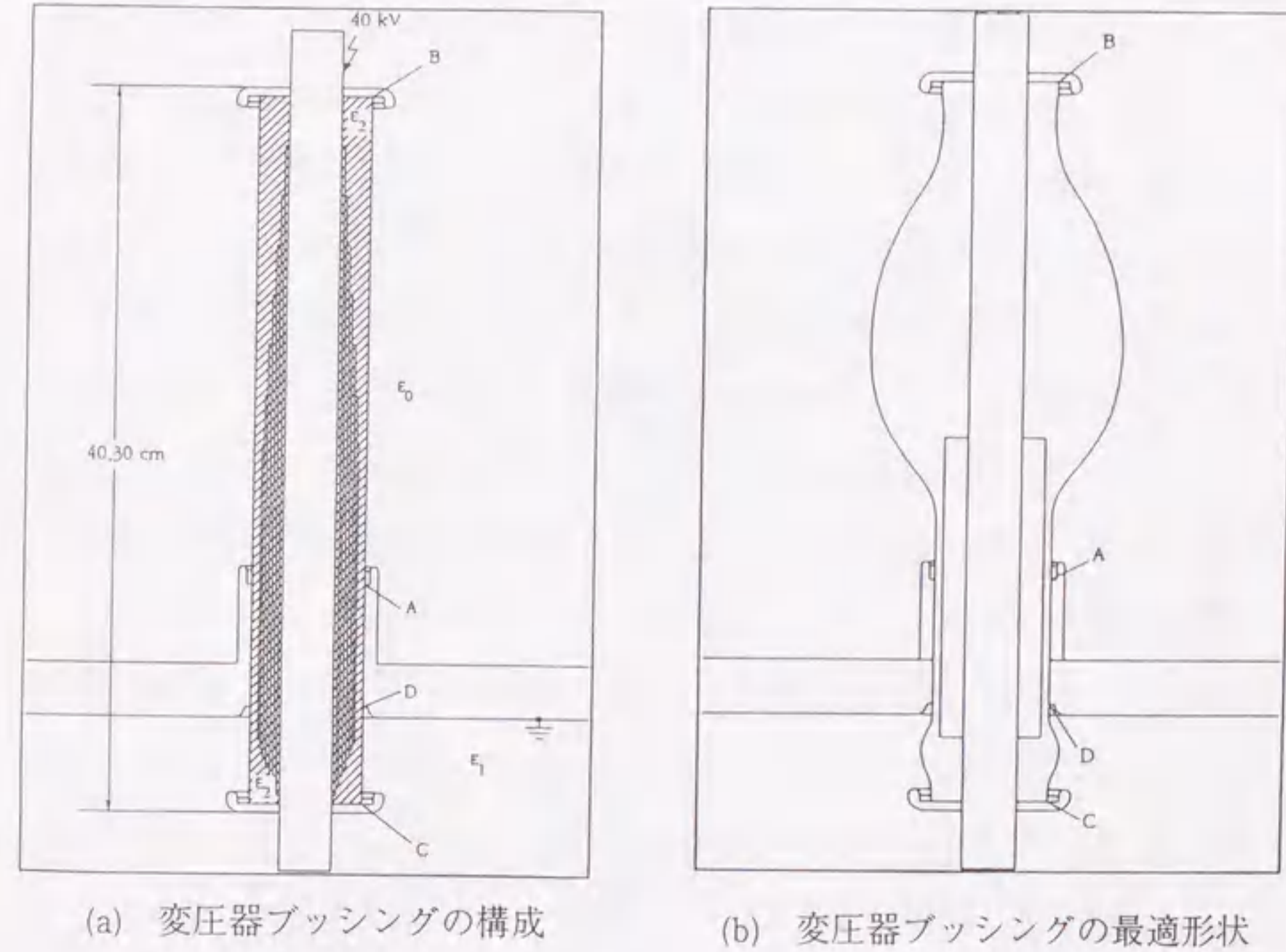


図1.6 変圧器ブッシング形状の電界最適化計算結果<sup>[44]</sup>



仮想電荷が配置されているいくつかのセグメントを組み合わせて機器形状を構成し、これを解析用の入力データとして使用しようとするものである。この中で、4000kV高電圧発生装置周辺の一般三次元電界解析を行っている。図1.7に、電界解析結果を示す。その他、美咲らは、表面電荷法を使用し、GILスパーサ周辺の一般三次元電界解析を行っている<sup>[58]</sup>。Hanaiらは、固体誘電体の表面抵抗および体積抵抗を考慮した一般三次元電界解析を表面電荷法を用いて行っている<sup>[59]</sup>。さらにMyungらは、電荷重畳法に基づいた手法により、変電所における400kV高電圧母線周囲の一般三次元電界解析を行っている<sup>[60]</sup>。

#### (4) 高速計算技術

近年では、計算精度向上の観点から、より大規模な電界解析が要請されている。このような大規模な電界解析を高速に行う技術の開発が進んでいる。

Saadらは、電荷重畳法や表面電荷法において現れる非対称・密行列を伴った大規模な連立一次方程式の高速解法として、GMRES (Generalized Minimal RESidual Method) と呼ばれる方法を開発している<sup>[61-63]</sup>。従来のガウスの消去法による手法と比較して30倍の高速化が可能であるとしている。また、Satoらは、GMRESを電界解析に適用する場合の最終的な到達精度について検討を行っている<sup>[64,65]</sup>。

その一方で、パソコンにより、より手軽に電界解析を行いたいという要請が強くなっている。この場合もまた、より高効率・高速計算可能な計算手法の開発が要請される。

里らは、高速表面電荷法と呼ばれる手法の開発を行っており、図1.8に示すように、分圧器周辺の電位分布をパソコンにより計算している<sup>[66]</sup>。また、坪井らは、ケーブル中の異物などを模擬した解析モデルにおいて、異物が存在しない場合の解を同軸解析解として利用することにより、異物の存在するときの電界を重畳する方法で高速計算を可能としている<sup>[67]</sup>。

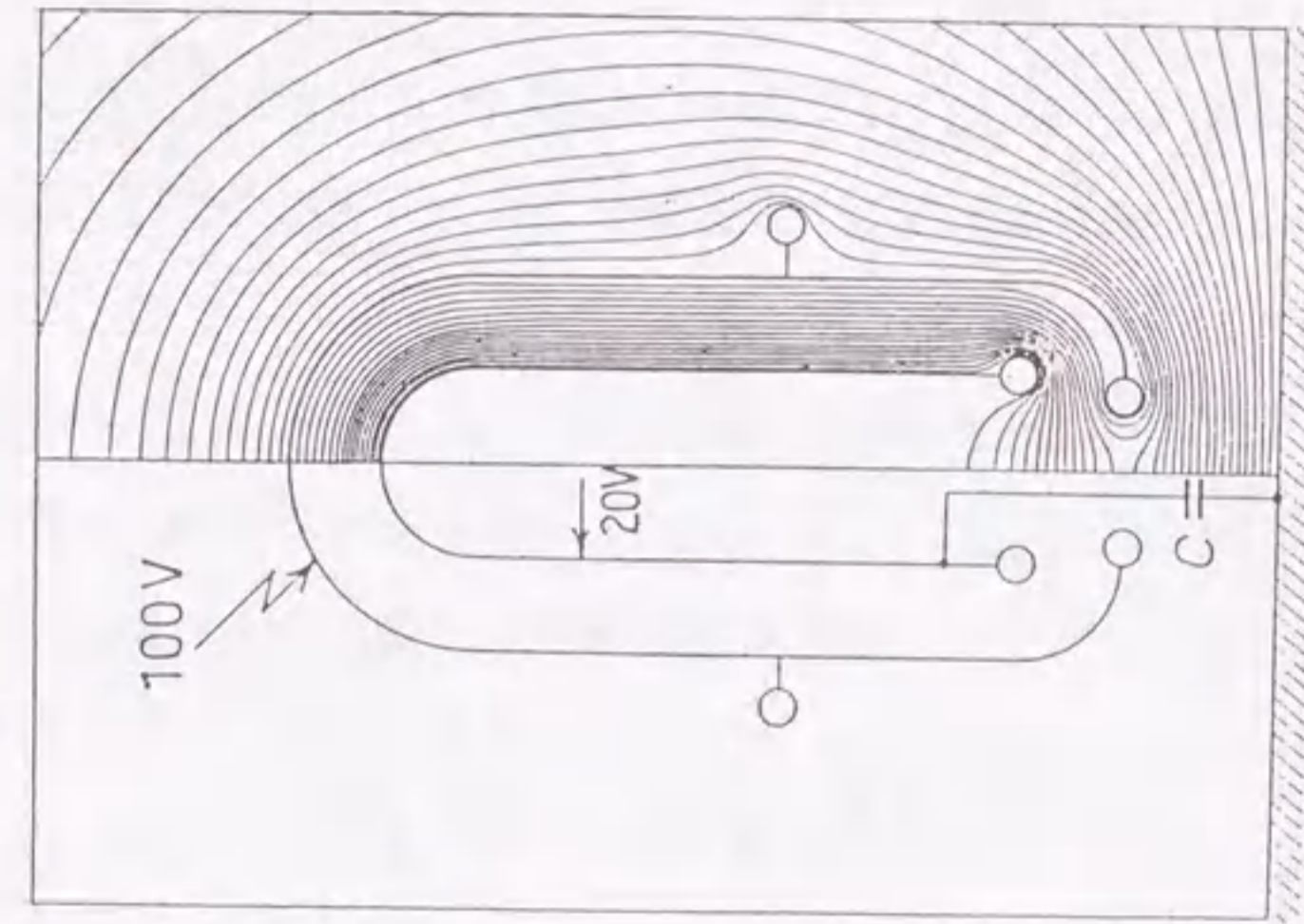


図1.8 高速表面電荷法による電界解析結果<sup>[66]</sup>  
(空気コンデンサ分圧器周辺部)

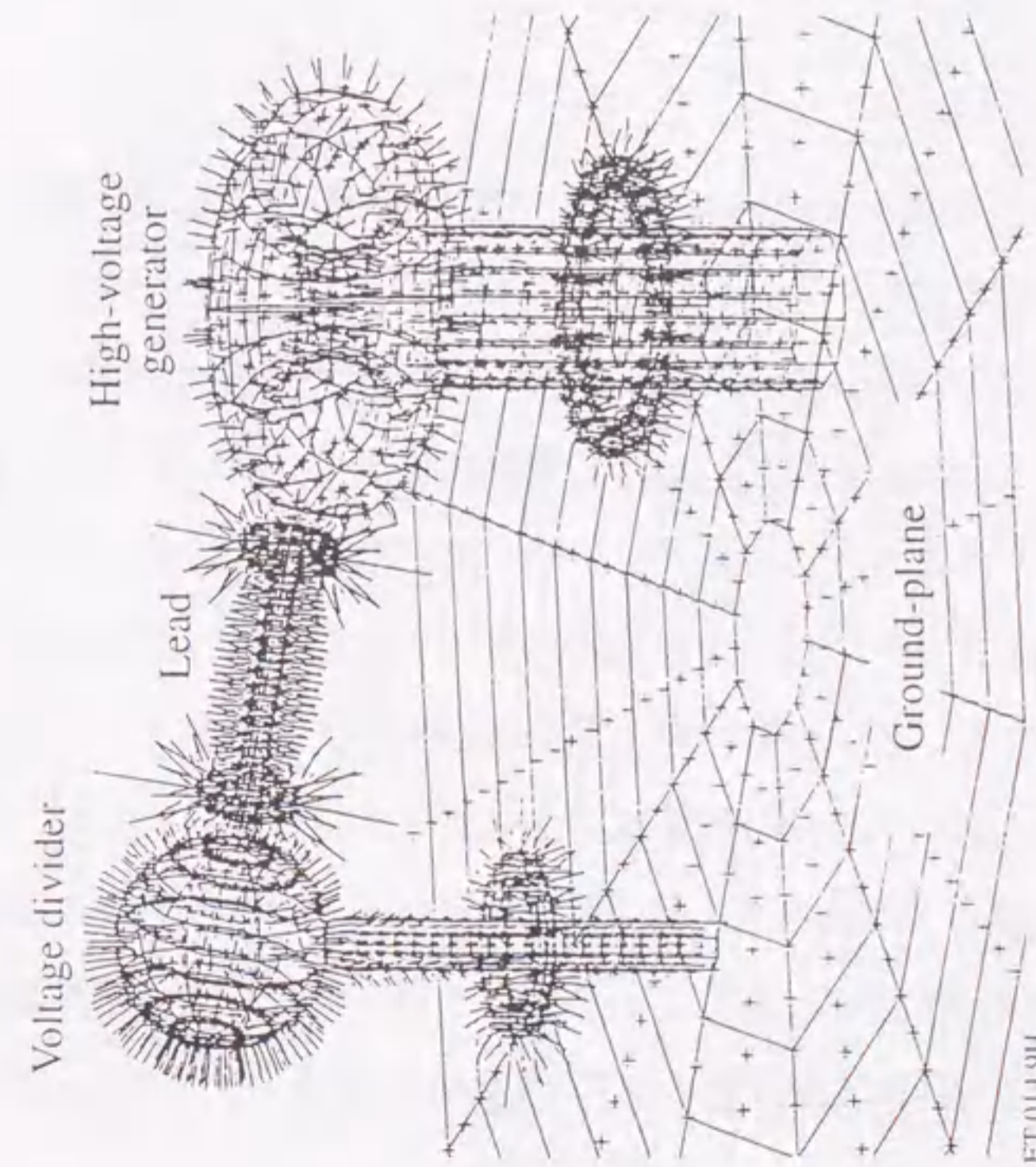


図1.7 セグメント法による一般三次元電界解析結果<sup>[57]</sup>  
(4000kV高電圧発生装置周辺部)



(5) 実際の使用条件により近い場を対象とした解析技術

1.3節で述べた各種電界解析手法は、通常、簡単化された、理想的な解析系を対象としている。これに対して、漏洩抵抗場、空間電荷場、イオン流場、非線形、表面帯電、異物の影響などを考慮に入れた、実際の使用条件により近い場を対象とした解析が行われている。

Takumaら<sup>[68]</sup>は、浮き電極（電位が境界条件として与えられず、外部の導体と静電的に結合することによってある未知の電位を有する電極）が漏洩抵抗をもつ絶縁物で支えられている場合の解析を電荷重畳法により行っている。その他、Satoら<sup>[69]</sup>は、一般三次元において空間電荷の影響を考慮した電界解析を行い、図1.9に示すような計算結果を得ている。また、Skopecらは、碍子の表面に汚損が存在する場合の電界計算を行っている<sup>[70]</sup>。また、Ghoshらは、碍子の表面抵抗・体積抵抗を考慮に入れた電界計算を行っている<sup>[71]</sup>。さらに、Abdel-Salamらは、直流イオン流場における電界計算を有限要素法により行っている<sup>[72]</sup>。

(6) ハイブリッド手法

1.3節で述べた各種の電界解析手法は、それぞれ長所・短所を有する。そこで、2つ以上の解析手法を組み合わせたハイブリッド手法の開発により、これらの長所・短所を補い合い、より高効率・高精度の解析が可能となる。

Okuboらは、有限要素法（FEM）と電荷重畳法（CSM）の併用法を開発し報告している<sup>[73]</sup>。この方法を用いて、図1.10に示す高電圧油入ブッシング周辺の電界解析を行っている。複雑な内部構造を有する油入ブッシング内部を有限要素法により、また開放空間の電界緩和用のシールドリング電極部などの比較的単純な形状の部分は電荷重畳法により計算を行っている。その他、Guillenらは、境界要素法と電荷重畳法の併用により、高精度かつ高効率な電界解析システムの構築を目指している<sup>[74]</sup>。また、大西らは、境界要素法と有限要素法を併用し、油入変圧器内部の電界分布の計算を行っている<sup>[75]</sup>。

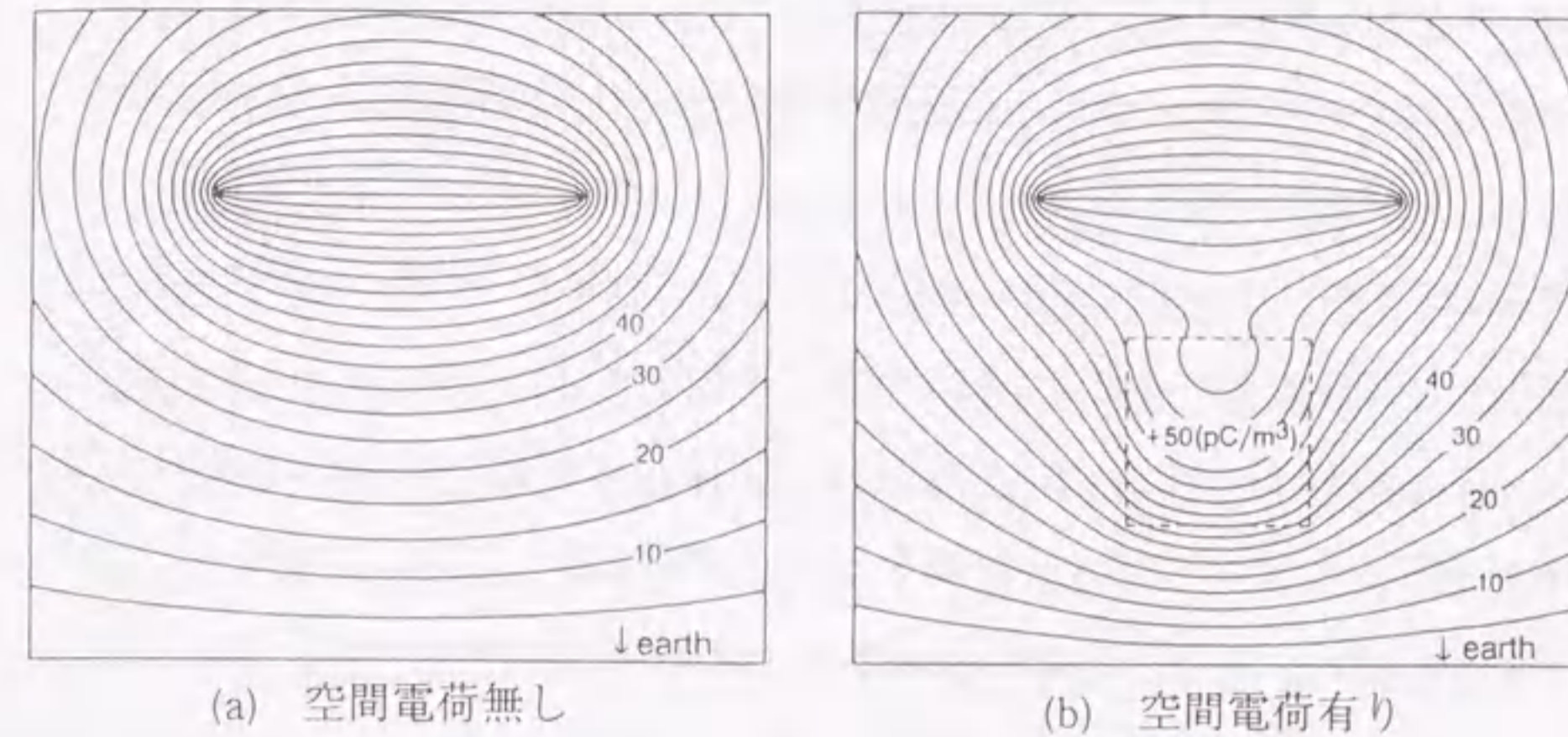


図1.9 空間電荷が存在する場合の電界解析結果<sup>[69]</sup>

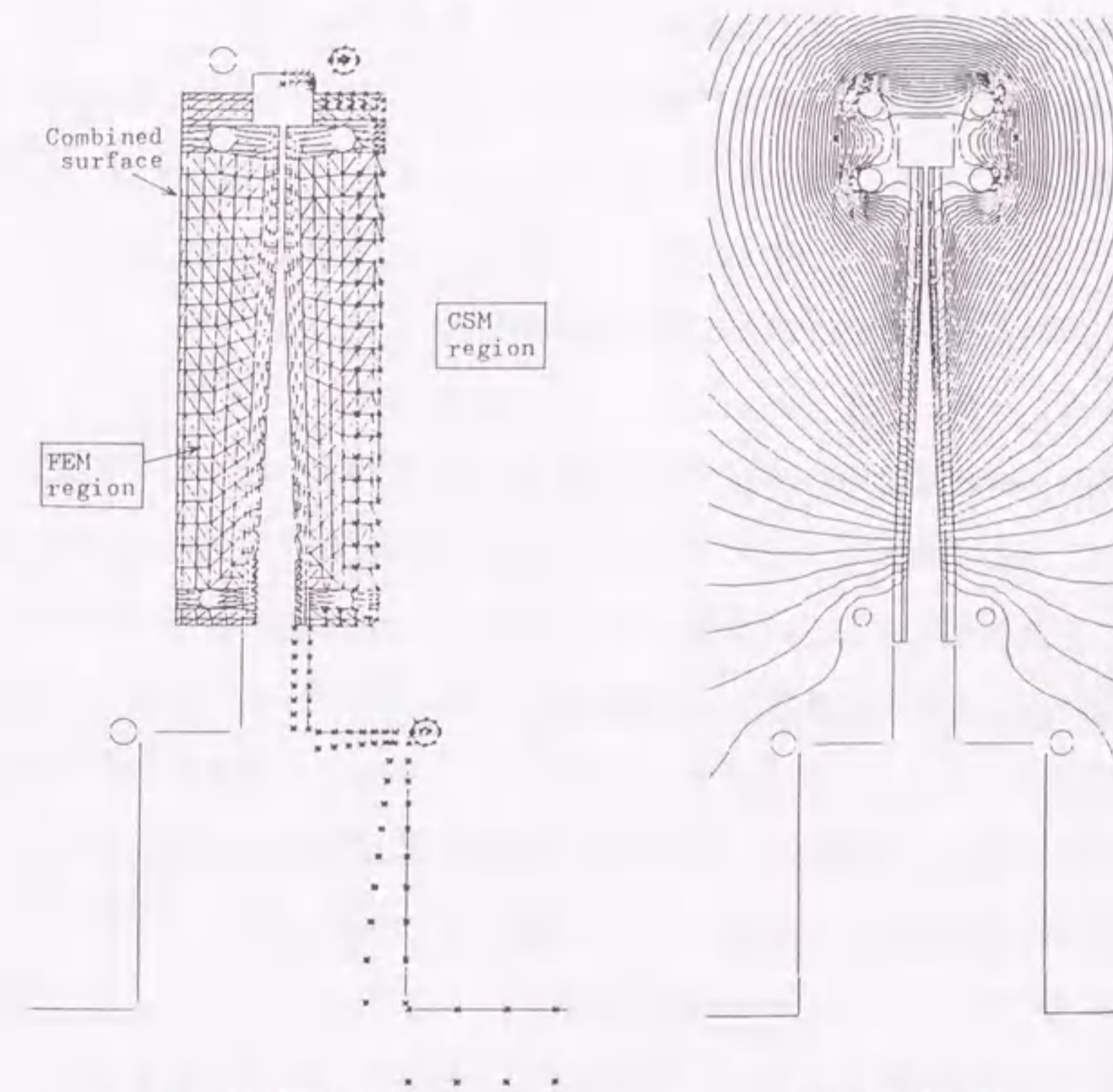


図1.10 ハイブリッド手法による電界解析<sup>[73]</sup>  
(高電圧油入ブッシング周辺部)



### (7) 過渡電磁界解析技術

最近では、時間的に変化しない静電界のみでなく、過渡電磁界解析がいたるところで必要になりつつある。とりわけ、GISのスイッチング操作時に生じるVFTO (Very Fast Transient Overvoltages) は、絶縁上の問題点となっており、数値的な解析が広く用いられている。

Yamagataらは、1000kV GISにおいて、高速接地装置 (HSGS) でのVFTOの解析を行っており、図1.11に示すような結果を得ている<sup>[76]</sup>。解析モデルをTLMと呼ばれる等価回路網に置き換え、過渡現象解析を行っている。また、Katohは、分圧器の過渡応答特性をモーメント法により求めている<sup>[77]</sup>。

その他、電荷重畳法に関する総レビューが、Malikにより示されている<sup>[78]</sup>。また、最近の電界解析に関する技術動向が、文献<sup>[20, 56]</sup>などによってまとめられている。

## 1.5 CADに関する最近の研究開発動向

CAD (Computer Aided Design) とはもともと、設計作業のうち定型的な作業を行う部分を計算機に行わせることによって、設計の効率を高めることを目的とした設計支援システムである<sup>[15-17]</sup>。すなわちCADとは、設計の過程における構想設計、構想図の作成、詳細設計および詳細図面の作成、そしてその製品の性能検証のために行われる種々のシミュレーション計算を含めたシステムを指す。しかし最近では、CADとは「機器設計のうち主に機器図面の編集・作成を対話処理によって行うシステム」として位置づけられるようになってきている<sup>[17]</sup>。

本論文においては、CADという言葉の後者の意味で用いることにする。これに対し、前者の意味でのCADは、1.4節(1)で述べたCAE (Computer Aided Engineering) という名前でよばれることが多い。CADはすでにほとんどあら

ゆる設計現場で一般的に使用され、大きな成果をあげている。一方、CAEはまだ開発段階にあるといえる。すなわち、CADは、機器図面作成・編集の効率化に大きく貢献しているものの、真の意味での設計支援を可能とするためには、設計過程において必要になる様々なノウハウ、経験をシステムへ導入し、CADのインテリジェント化を推進していく必要があると言える。

CADに関連して、CAM (Computer Aided Manufacturing) , CIM (Computer Integrated Manufacturing) などの言葉もよく使用されている<sup>[17]</sup>。CAMは、設計データに基づき工程設計、生産設計や作業計画を作成し、それらを数値の形で数値制御 (NC) 工作機械に出力するような製造支援システムである。CIMとは、設計、製造からその周辺の部門もシステム化の範囲に含め、生産システム全体においてコンピュータを中心に情報の流れを統一し、生産活動を合理化するシステムを指す。

最近、設計支援における新しい概念としてCE (Concurrent Engineering) , またはSE (Simultaneous Engineering) などが提案され、一部で実用化が始まっている<sup>[79, 80]</sup>。図1.12に、CEの概念を示す。CEまたはSEとは、「協調工学」と呼ぶべきものであり、製品あるいはシステム開発に従事するすべてのグループが協調して同時並行的に作業にあたるオープンな計算機環境を指す。あらゆる分野の専門家が協調して作業にあたることのできる環境を作り出すことによって、最近の製品の多様化に伴う大幅な設計条件の変更に対処すると同時に、製品のライフサイクルの短縮化に伴う頻繁な条件変更にも対応できることを目指している。

また、世界規模の情報システムにおけるデータの標準化、共有を目的としたプロジェクトであるCALS (Commerce At Light Speed) が注目されている<sup>[17, 81]</sup>。CALSは、さまざまなデータ形式を体系的にとらえ、共通データ形式を決定するためのプロジェクトである。すなわち、一度入力したデータを何度も使うことにより、業務の効率化とグローバル化を実現する活動であり、物品の調達・設計・生産・運用を支援する世界規模の情報システムと捉える



ことができる。このうち、製品モデルのデータ表現およびデータ交換のための国際標準規格として、STEP (STandard for Exchange of Product model data) の制定が進められている<sup>[17,81]</sup>。図1.13に、STEPの概念を示す。

これらの新しい概念においても、CADおよび現象のシミュレーション技術は、中心的な役割を果たすことが期待されている。このように将来においては、CADを中心として、コンピュータ支援によるデータ交換を通して、機器の開発から設計・製造まで一貫して効率化を目指す試みが推進されていくものと思われる。

## 1.6 本研究の目的および内容

### <1.6.1> 本研究の目的

前節までに見てきたように、電界解析技術および電界最適化技術に関して、これまでに数多くの研究成果が報告されている。しかし、1.2節で述べたように、電力機器の絶縁設計において、電界解析技術が果たす役割は、今後もますます増大することが予想される。この場合、電界解析を中心とした絶縁設計支援システムにおいては、より一層の解析精度・操作性・計算効率・計算速度の向上などによって、設計の高精度化・高信頼化・高効率化を行っていくことが強く求められる。また、これらの要請にこたえるためには、「電界最適化」技術の開発、あるいはこれをさらに発展させた、「絶縁最適化」技術の開発が必要になってくる。従って本研究においては、絶縁設計の高精度化・高信頼化・高効率化を目的とした電力機器の絶縁設計支援システムの開発を行う。

### <1.6.2> 本研究の内容および本論文の構成

電力機器を対象とした絶縁設計支援システムの開発にあたり、はじめに、

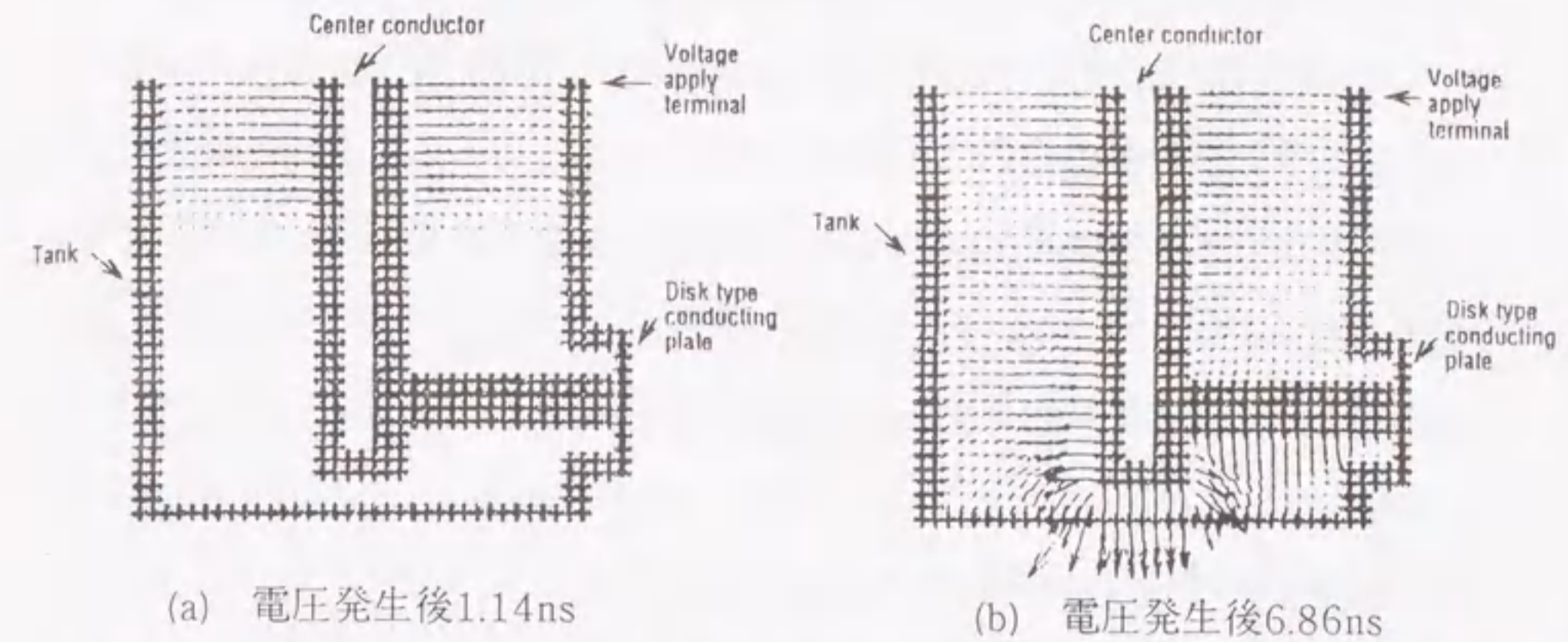


図1.11 高速接地装置 (HSGS) 中を伝搬するVFTOの解析結果<sup>[76]</sup>

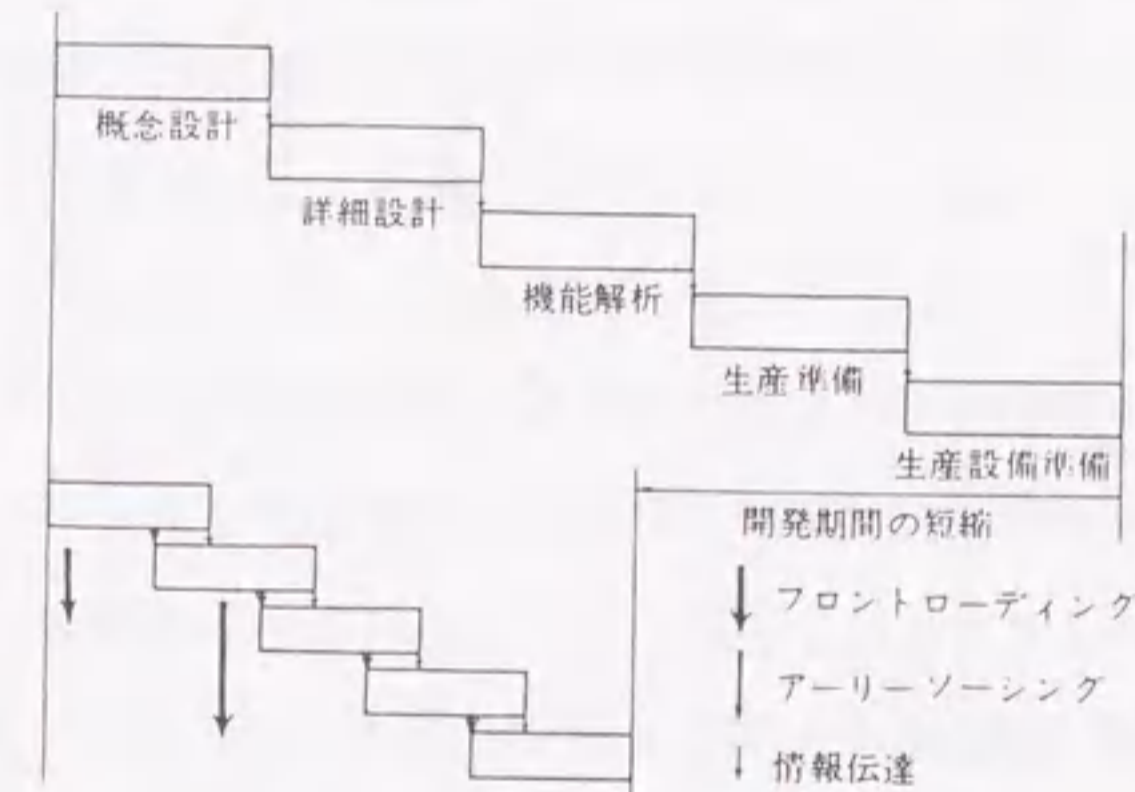


図1.12 コンカレントエンジニアリング (CE) の概念<sup>[79]</sup>

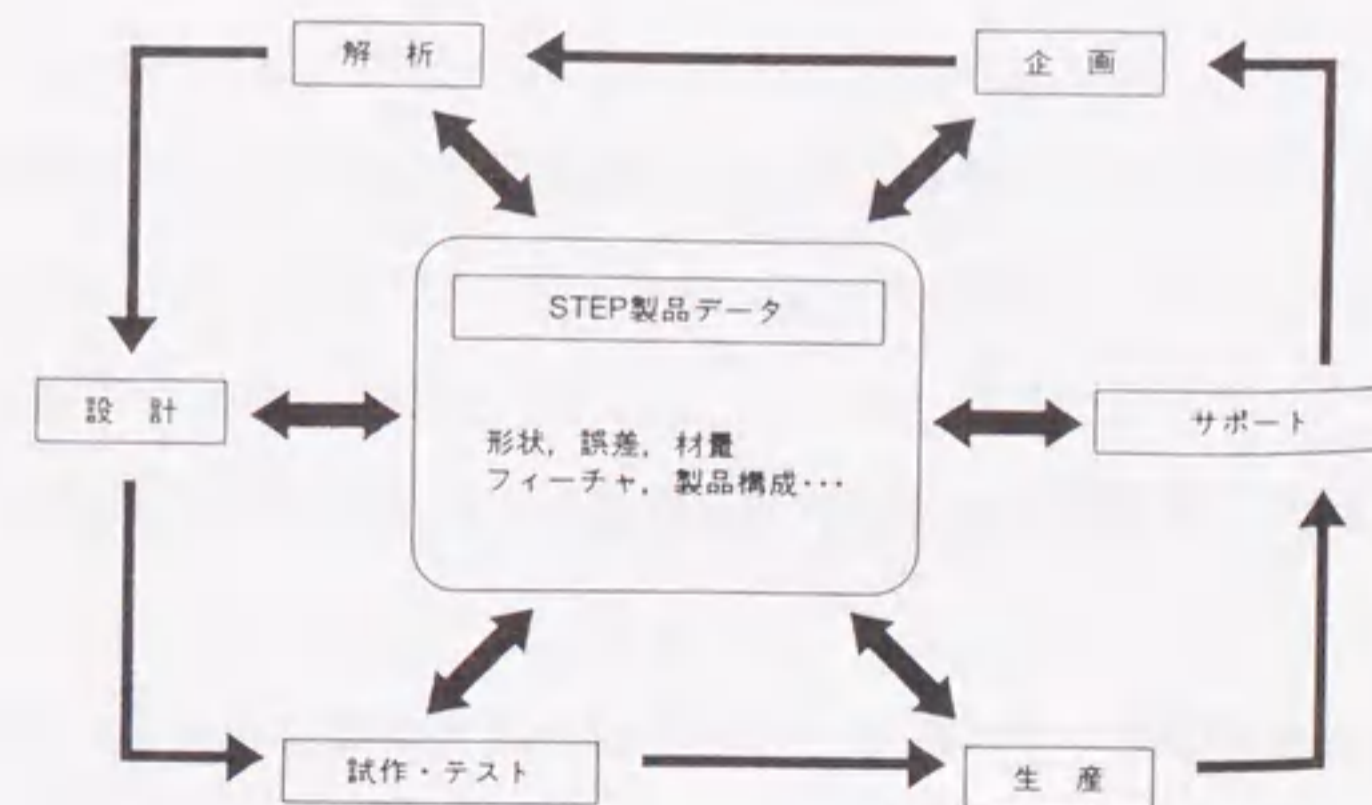


図1.13 STEP適用の概念<sup>[17]</sup>



(1) 電力機器の設計に広く用いられているCADと電界解析を結合したシステム“CADEF”(CAD with Electric Field analysis)の開発を行う。これにより、CADと電界解析相互のデータ融通を容易にする。これにより、設計作業の高効率化を目指す。特に、汎用性・操作性・経済性に優れ、設計作業において多用されているパーソナルコンピュータ(パソコン)をベースとしたシステムの構築を行う。

次に、上記のシステムにおいて、

(2) 電界解析に必要な専門家知識・経験的要素を導入し、CADEFシステムの知的化・インテリジェント化を行う。これにより、電界解析の非専門家でも、専門家が行う場合と同等の高い計算精度で解析可能とする。

また、

(3) パソコンによる電界最適化技術の確立を目指し、上記で開発したCADEFシステム中で電界最適化自動計算を可能とする。

さらに、より精密な最適設計を可能とするために、

(4) 電界のみではなく、絶縁媒質の種類・印加電圧の種類などの周囲条件から決定される絶縁特性を考慮に入れた絶縁最適化自動計算技術を確立する。

以上(1)から(4)の研究開発結果を統合し、電力機器を対象とした最適絶縁設計のためのCADシステムの構築を行う。

本論文は8章から構成されており、第2章以降の各章の概要は以下の通りである。

第2章では、今回開発したCADEFの概念、システムの概要およびその特徴などについて述べる。ここでは、CADEFに必要なハードウェア・ソフトウェア

アの選定を行った後、CADと電界解析の基本的結合を行い、CADデータの電界解析への利用を可能としている。さらに、CADデータから電界解析に必要な、領域に関するデータを自動生成するための、領域自動認識法の開発を行う。これにより、領域に関するデータ入力の大幅な簡略化を実現する。その後、CADEFの知的化を行う。知的化として、電荷重畳法を用いた高精度電界解析に必要なとされる仮想電荷配置に関する専門家知識・経験的要素を、仮想電荷配置ルールとしてCADEFに導入する。これによって、仮想電荷の適切な配置の自動化を可能とする。以上の開発の結果、実用のCAD図面を対象とした自動電界解析を実行し、これら開発事項の妥当性・有用性の検証を行う。

第3章では、パソコンによる、形状修正の自由度の高い電界最適化自動計算手法を確立する。電界最適化手法として、電荷重畳法をベースとした電界最適化技術を開発する。本最適化アルゴリズムにおいては、電極面上の電界分布を基に、追加電荷として正負両符号を与えることにより、電極形状を内側・外側の両方向へ移動可能とする。これにより、初期形状の与え方にほとんど依存することなく最適電極形状が得られることを明らかにする。またこれによって、実用高電圧電力機器の電界最適化自動計算が実用許容時間内で可能であることを示す。これらの結果より、本電界最適化アルゴリズムの有用性を確認する。

第4章では、実際に計算で得られた電極形状が、真に最適であるかどうかを決定するための電極形状の最適性決定手法の開発を行う。また、この手法を用いることにより、目標とする電極形状を定量的に見出す。すなわち、繰り返し計算の初期段階において、空間中のどの位置に目標とする最適形状が存在するかを定量的に求めることを可能とする。これによって、形状修正に必要な繰り返し計算の収束性を大幅に向上することが可能であることを示す。

第5章では、一層の高効率電界最適化を目指し、ニューラルネットワーク(NN)を応用した電界最適化技術の開発を行う。NNの有する学習機能を利用することにより、非常に効率的な電界最適化計算が可能となる。すなわち、



一度学習を行ったNNを利用して、要求仕様を満足する最適形状が、繰り返し計算なしで計算可能である。本章では、このようなNNの有する特徴を利用し、NNをベースとした電界最適化アルゴリズムを構築する。これにより、最適電極形状を非常に高速に求められることを明らかにする。

第6章では、第3章から第5章により得られる電界最適電極形状が有する絶縁特性の実験的検証を行う。計算によって得られた電界最適電極は1つに決定される。しかし、その電極形状の有する絶縁特性は、様々な周囲条件により異なる。すなわち、用いる絶縁媒質、印加電圧波形、電極の大きさ、電極表面状態などにより、同じ電界最適電極を使用した場合でもその特性は異なる。ここでは、絶縁媒質として、空気およびSF<sub>6</sub>ガスを使用した場合に、電界最適電極が有する絶縁特性の相違を明らかにする。

第7章では、第6章で行った実験結果をうけて、絶縁媒質が有する絶縁特性を考慮に入れた最適化計算技術の構築を行う。より精密な絶縁設計を可能とするためには、第3章から第5章で行った電界最適化計算をさらに発展させ、使用する絶縁媒質などの有する絶縁特性を考慮に入れた絶縁最適化計算技術の構築を必要とする。ここでは、はじめに絶縁媒質の有する面積効果を考慮に入れた最適化計算を行う。次に、ガスの放電特性を考慮に入れた最適化計算を行う。そして、いずれの場合も、電界最適化計算で得られた計算結果よりもさらに高精度の絶縁最適化が可能であることを計算事例を用いて確認する。

第8章では、本論文を総括し、本研究で得られた主要な成果をまとめ、電力機器を対象とした絶縁設計支援システムとしてのCADEFの有用性を明らかにする。

## 第1章の文献

- [1] 資源エネルギー庁:「電気事業便覧(平成8年度版)」, pp.266-267 (1996)
- [2] 資源エネルギー庁:「総合エネルギー統計(平成7年度版)」, pp.284-367 (1995)
- [3] 武部, 駒場:「大きく進歩した送電技術」, 電気学会誌, Vol.116, No.10, pp.651-653, 1996
- [4] 長谷川:「開発が進む直流送電システム」, 電気学会誌, Vol.116, No.10, pp.658-661, 1996
- [5] I.Murasawa, M.Ichihara, T.Kawai, A.Miyazaki, N.Takinami: "Development of Long-distance 275kV Gas Insulated Transmission Line (GIL)", The 11th International Conference on Gas Discharge and Their Applications, No.I-326, 1995.
- [6] 山形:「100万変電機器の開発はここまで進んだ」, 電気学会論文誌B, Vol.115, No.11, pp.1276-1283, 1995
- [7] T.Hasegawa, K.Yamaji, M.Hatano, F.Endo, T.Rokunohe, T.Yamagiwa: "Control of Particle Motion and Reliability Improvement in High Voltage DC GIS", The 11th International Conference on Gas Discharge and Their Applications, No.I-346, 1995.
- [8] 山地, 中越:「500kV直流ガス絶縁開閉装置の開発」, 電気学会開閉保護・高電圧合同研究会, SP-96-63 HV-96-135, 1996
- [9] 吉田, 高塚, 高畑, 土江, 畑野:「±500kV直流GISの開発」, 三菱電機技報, Vol.70, No.5, 1996
- [10] 荒木, 林, 黒柳:「8000A級275kV管路気中送電線の実用化」, 電気学会論文誌B, Vol.110, No.7, pp.591-597, 1990
- [11] 宅間:「ガス絶縁およびガス絶縁機器の基礎」, 電気学会論文誌B, Vol.116, No.10, pp.1168-1171, 1996
- [12] M.Utamura, M.Koizumi: "Boundary Element Analysis of Three Dimensional Electric Field in SF<sub>6</sub> Gas Insulated Switchgears", Engineering Analysis, Vol.3, No.4, pp.217-220, 1986.
- [13] Y.Yoshida, K.Yamaji, M.Sampe, K.Ibuki: "Charge Accumulation and Dielectric Characteristics of DC-GIS", Gaseous Dielectrics VII, pp.495-501, 1994.
- [14] 吉田, 浅野, 山地, 中越, 三瓶, 畑野, 伊吹, 仲西:「実規模DC-GISモデルにおけるスペーサ帯電と金属粒子の絶縁特性に及ぼす影響」, 電気学会論文誌B, Vol.115, No.11, pp.1343-1351, 1995
- [15] 樋口, 吉永:「CAD解説—その導入のために—」, pp.18-36 (1984), 実教出版
- [16] 吉川, 木村:「設計とCAD」, pp.1-35 (1993), 朝倉書店
- [17] 日経CG編著:「新CADの基礎知識」, pp.1-498 (1996), 日経BP社
- [18] H.Prinz (増田, 河野共訳):「電界計算法」, pp.38-168 (1974), 朝倉書店
- [19] 河野, 宅間:「数値電界計算法」, pp.1-81 (1980), コロナ社
- [20] 大久保:「最近の電界解析技術の動向」, 電気学会論文誌A, Vol.110, No.9, pp.523-526, 1990



- [21] 大久保: 「最近の電界解析とCAE技術の展開」, 電気学会論文誌B, Vol.111, No.10, pp.1036-1039, 1991
- [22] 宅間: 「電磁界解析が設計法をどのように変えたかー総論」, 平成7年電気学会全国大会シンポジウム, S.18-1, 1995
- [23] A.J.Schwab, H.L.Singer, H.Steinbigler, P.F.Deister, F.E.Gutfleisch, B.J.Schaub: "VENUS-A Distributed Software Environment for Numerical Field Calculation", 6th International Symposium on High Voltage Engineering, No.24.10, 1989.
- [24] H.Singer, A.J.Schwab, H.Steinbigler, K.Förger, P.Deister, A.Blaszczyk, M.Wohlmuth, J.A.Gomollón, A.Meroth, B.Schaub: "VENUS-An Open Field Calculation System with Defined Data Interfaces", 7th International Symposium on High Voltage Engineering, No.11.08, 1991.
- [25] P.F.Deister, A.J.Schwab: "NUMEX: A Knowledge-based Consulting System for Numerical Field Calculation", 7th International Symposium on High Voltage Engineering, No.11.09, 1991.
- [26] F.Gutfleisch, H.Singer, K.Förger, J.A.Gomollón: "Calculation of High-voltage Fields by Means of the Boundary Element Method", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.9, No.2, pp.743-749, 1994.
- [27] 大久保, 小山, 保田, 柳父: 「送変電機器開発における電界を中心としたCAEシステム」, 日本シミュレーション学会第9回計算電気・電子工学シンポジウム, No.II-27, 1988
- [28] J.Pappa, G.Ben-Yaacov: "Windowed Access to Electric and Magnetic Fields Software", Computer Application in Power, Vol.5, No.4, pp.24-28, 1992.
- [29] R.Sundararajan, N.R.Sadherreddy, R.S.Gorur: "Computer-aided Design of Porcelain Insulators under Polluted Conditions", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.2, No.1, pp.121-127, 1995.
- [30] O.W.Andersen: "PC-based Field Calculations for Electric Power Applications", IEEE Computer Applications in Power, Vol.2, No.4, pp.22-25, 1989.
- [31] 向井, 大島, 大山, 金古: 「パソコンCAEによる電界・絶縁裕度分布の表示システム」, 静電気学会講演論文集'91, No.30a-A19, 1991
- [32] K.Antolic: "Die Ermittlung von Randgeometrien mit Hilfe der Differenzenrechnung", 1st International Symposium on High Voltage Engineering, pp.1-8, 1972.
- [33] H.Singer: "Computation of Optimized Electrode Geometries", 3rd International Symposium on High Voltage Engineering, No.11.06, 1979.
- [34] D.Metz: "Optimization of High Voltage Fields", 3rd International Symposium on High Voltage Engineering, No.11.12, 1979.
- [35] 大久保, 雨宮, 池田, 本多: 「反復自動計算による電界強度分布の一樣化とBorda形状ー電極形状の最適化へのアプローチ」, 電気学会論文誌A, Vol.100, No.8, pp.441-448, 1980
- [36] T.Misaki, T.Tsuboi, K.Itaka, T.Hara: "Computation of Three-Dimensional Electric Field Problems by a Surface Charge Method and its Application to Optimum Insulator Design", IEEE Trans. on

- Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-101, No.3, pp.627-634, 1982.
- [37] 坪井, 美咲: 「表面電荷法による電極形状の最適化について」, 電気学会論文誌A, Vol.103, No.12, pp.675-682, 1982
- [38] Z.Stih: "High Voltage Insulating System Design by Application of Electrode and Insulator Contour Optimization", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.EI-21, No.4, pp.579-584, 1986.
- [39] M.Abdel-Salam, E.K.Stanek: "Optimizing Field Stress on High-voltage Insulators", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.EI-22, No.1, pp.47-56, 1987.
- [40] H.Deng, Y.Li, G.Jiang: "Optimization of High Voltage Fields of Multielectrode Systems", 6th International Symposium on High Voltage Engineering, No.40.03, 1989.
- [41] S.Chakravorti, P.K.Mukherjee: "Application of Artificial Neural Networks for Optimization of Electrode Contour", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.1, No.2, pp.254-264, 1994.
- [42] M.Abdel-Salam, A.Mufti: "Optimizing Field Stress on High-voltage Bushings", Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp.225-228, 1994.
- [43] C.Trinitis, H.Steinbigler, M.Spasojevic, P.L.Levin, Z.Andjelic: "Accelerated 3-D Optimization of High Voltage Apparatus", 9th International Symposium on High Voltage Engineering, No.8867, 1995.
- [44] J.A.Gomollón, H.Singer: "Contour Optimization of High-voltage Insulators by Means of Smoothing Cubic Splines", 9th International Symposium on High Voltage Engineering, No.8343, 1995.
- [45] B.Y.Lee, S.H.Myung, J.K.Park, E.S.Kim, S.W.Min: "An Application of the Properties of NURB Surface to Three Dimensional Electric Field Optimization", 9th International Symposium on High Voltage Engineering, No.8362, 1995.
- [46] K.Bhattacharya, S.Chakravorti, P.K.Mukherjee: "Optimization of HV Support Insulator by Artificial Neural Network", 9th International Symposium on High Voltage Engineering, No.8868, 1995.
- [47] 河本, 宅間: 「導体形状最適化問題の検討」, 電気学会静止器・回転機合同研究会, SA-96-2 RM-96-52, 1996
- [48] P.D.Pedrow, R.G.Olsen: "Corona Streamer Onset as an Optimization Criterion for Design of High Voltage Hardware on Transmission Lines", Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp.312-315, 1996.
- [49] 矢川編: 「計算力学とCAEシリーズ4 ファジイ推論」, pp.1-8 (1991), 培風館
- [50] 矢川編: 「計算力学とCAEシリーズ12 ニューラルネットワーク」, pp.1-10 (1992), 培風館
- [51] S.Kirpatrick, C.D.Gelatt, Jr., M.P.Vecchi: "Optimization by Simulated Annealing", SCIENCE, Vol.220, No.4598, pp.671-680, 1983.
- [52] 北野編: 「遺伝的アルゴリズム」, pp.3-41 (1993), 産業図書



- [53] T.Takuma, T.Kawamoto: "Optimization in Electric Field Domain", The 4th Japan-Hungary Joint Seminar on Applied Electromagnetics in Materials and Computational Technology, pp.1-4, 1996.
- [54] 坪井: 「最適設計へのアプローチ (電界問題)」, 平成7年電気学会全国大会シンポジウム, S.18-2, 1995
- [55] 宅間, 河本: 「電界問題の最適設計法」, 第5回電磁界数値解析に関する若手セミナー講演論文集, pp.1-10, 1994
- [56] T.Takuma, T.Kawamoto: "Recent Developments in Electric Field Calculation", IEEE CEFC'96, Invited Paper, 1996.
- [57] H.Okubo, Y.Kito: "Three-Dimensional Electric Field Analysis Using Segment Arrangement of High-Voltage Apparatus Component Based on Charge Simulation Method", European Trans. on Electrical Power Engineering, Vol.1, No.3, pp.123-129, 1991.
- [58] 美咲, 坪井, 位高, 原: 「表面電荷法による一般三次元電界の一解析法とその応用」, 電気学会論文誌A, Vol.101, No.10, pp.499-506, 1981
- [59] E.Hanai, M.Oyama, H.Aoyagi, H.Murase, I.Ohshima: "Progress of Three-dimensional Electric Field Analysis by Surface Charge Method", 8th International Symposium on High Voltage Engineering, No.11.03, 1993.
- [60] S.H.Myung, B.Y.Lee, J.K.Park, E.S.Kim, S.W.Min: "Three Dimensional Electric Field Analysis of Substation using Nonuniform Optimal Charge Simulation", 9th International Symposium on High Voltage Engineering, No.8363, 1995.
- [61] Y.Saad, M.H.Schultz: "GMRES: A Generalized Minimal Residual Algorithm for Solving Nonsymmetric Linear Systems", SIAM J. Sci. Stat. Comput., Vol.7, No.3, pp.856-869, 1986.
- [62] K.Nabors, J.White: "FastCap: A Multipole Accelerated 3-D Capacitance Extraction Program", IEEE Trans. on Computer-Aided Design, Vol.10, No.11, pp.1447-1459, 1991.
- [63] D.Beatovic, P.L.Levin, A.Meroth, M.Spasojevic, W.R.Michalson, A.Ustungdag: "Iterative Matrix Solvers for Large Full Systems", 8th International Symposium on High Voltage Engineering, No.11.06.
- [64] S.Sato, T.Yonekawa: "Application of GMRES in Solving 3D Electric Field Problems", The 4th Japan-Hungary Joint Seminar on Applied Electromagnetics in Materials and Computational Technology, pp.5-8, 1996.
- [65] 米川, 里, 佐藤, 村瀬: 「GMRESを用いた巨大連立1次方程式の解法」, 平成8年電気学会全国大会, No.10, 1996
- [66] 里, 青柳, 澄川, 本多: 「高速表面電荷法」, 電気学会論文誌A, Vol.101, No.9, pp.455-462, 1981
- [67] 坪井, 田中, 美咲, 八束, 岸: 「既知解を重畳した表面電荷法による高速電界解析」, 電気学会論文誌B, Vol.113, No.10, pp.1088-1094, 1993

- [68] T.Takuma, T.Kawamoto: "Calculation of Electric Field Including Floating Conductor", 8th International Symposium on High Voltage Engineering, No.11.01, 1993.
- [69] S.Sato: "Application of Poisson's Equation for Three-dimensional Fields", 7th International Symposium on High Voltage Engineering, No.11.02, 1991.
- [70] A.Skopec, J.G.Wankowicz, B.Sikorski: "Electric Field Calculation for an Axially-symmetric Insulator with Surface Contamination", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.1, No.2, pp.332-339, 1994.
- [71] P.K.Ghosh, M.E.Azimi: "Numerical Calculation of Effective Permittivity of Lossless Dielectric Mixtures using Boundary Integral Method", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.1, No.6, pp.975-981, 1994.
- [72] M.Abdel-Salam, Z.Al-Hamouz: "Finite-element Analysis of Monopolar Ionized Fields Including Ion Diffusion", J.Phys. D: Appl. Phys., Vo.26, pp.2202-2211, 1993.
- [73] H.Okubo, M.Ikeda, M.Honda, T.Yanari: "Electric Field Analysis by Combination Method", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-101, No.10, pp.4039-4048, 1972.
- [74] M.Guillen, C.Aucourt, L.Krähenbühl, A.Nicolas: "Development of a Numerical Hybrid Model Based on the Boundary Element Method and the Charge Simulation Method for Computation of 3D Electric Fields", 8th International Symposium on High Voltage Engineering, No.11.05, 1993.
- [75] 大西, 山下, 中前: 「境界要素法・有限要素法併用による高精度電界分布計算」, 電気学会論文誌D, Vol.109, No.6, pp.439-445, 1989
- [76] Y.Yamagata, K.Tanaka, Y.Terasawa, H.Aoyagi, K.Nojima, I.Hioki, H.Murase, T.Yokota: "Very Fast Transients in 1000kV HSGS Grounding Circuit", Proc. of EMPD'95, Vol.2, pp.534-539, 1995.
- [77] S.Kato: "Numerical Electromagnetic Field Analysis of Impulse Measuring Systems", Proc. of the 1994 Japan-U.S. Science Seminar on Electromagnetic Field Effects Caused by High Voltage Systems (Modeling, Characterization, Measurements, Mitigation), pp.177-186, 1994.
- [78] N.H.Malik: "A Review of the Charge Simulation Method and its Applications", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.24, No.1, pp.3-20, 1989.
- [79] 佐田: 「コンカレントエンジニアリング I.コンカレントエンジニアリングについて」, 電気学会雑誌, Vol.113, No.3, pp.178-182, 1993
- [80] 福田: 「コンカレントエンジニアリング」, pp.1-13 (1993), 培風館
- [81] 宇田川: 「CALCの動向と各国の取り組み」, 電気学会誌, Vol.116, No.6, pp.343-346, 1996



## 第2章 電界解析機能付CAD"CADEF"の開発

### 2.1 まえがき

電力機器の設計においては、CADが広く用いられており、最近ではパソコンに基づいたPC-CADが多用されている。CADを用いて機器形状の入力を行うことにより、機器形状を記述するCADデータがコンピュータに取り込まれる。このCADデータを電界解析などのデータとして利用することにより、設計作業の効率化が可能となる。このように、PC-CADと電界解析技術を結合させたシステムを実現し、CADと電界解析相互の一貫したデータ利用を可能とする設計支援システムの開発が期待されている。

そこで、このような電力機器の絶縁設計支援を目的とした電界解析機能付パソコンCAD "CADEF" (CAD with Electric Field analysis) の構築を行った。本章においては、はじめに、CADEFの概念および開発目的について述べる。次に、CADEFの基本構成を示し、その動作の様子を紹介する。その後、電界解析に必要な領域データをCADの図形データを基に効率的に生成するために、領域自動認識法を開発し、CADEFへ導入する。また、専門家が有するノウハウに従って仮想電荷の自動配置を行うアルゴリズムを開発し、CADEFの知的化を進める。また、実際に簡単な計算例を用いて電界の自動計算を行い、知的化の導入効果を定量的に評価する。最後に、実用CAD図面を対象とした自動電界解析を行い、CADEFにおける上記開発項目の有用性について検証する。

### 2.2 CADEFの概念とその利点

図2.1に、CADEFの概念を示す。同図は、CADEFが電力機器製造工程全体の流れの中でどのような位置を占めているかということも示している。このように、CADEFは、各種機器の設計から製造に至る一貫した行程の中に組み



込まれるべきものである。このようなCADEFの開発によって得られる利点をあげると次のようになる。

- (a) CADデータを電界解析用入力データとして利用することにより、解析に必要な入力データ作成時間を短縮できる。
- (b) 電界解析に必要な図形要素の選択や、機器形状の修正などのさいに、CADの対話型図形処理機能を用いることができる。
- (c) 電界解析の結果の表示に、CADのグラフィック表示機能を活用することができる。
- (d) 各種解析に必要となる専門家の経験的知識を組み込むことにより、電界解析の専門家以外でも高精度解析が可能となる。
- (e) 最適化技術の導入により、最適形状を自動的に求めることが可能である。
- (f) 電界解析・機器形状修正を繰り返して得た最適形状（CADデータ）を、機器製造プロセス（CAM）へ転送し、製造データとして利用できる。
- (g) 電界解析以外の、いくつかのシミュレーション技術を組み込むことによって、機器の総合的开发を行うことのできるCAEシステムを構築することができる。

## 2.3 CADEFシステムの概要

### <2.3.1> CADと電荷重畳法

CADと電界解析との結合を考えた場合、電界解析手法として電荷重畳法を用いるのが有利であると考えられる。その理由はまず、CADが有するデータは境界形状に関するものであるということが挙げられる。したがって、そのCADデータを電界解析に利用するためには、境界形状のみで解析可能な境界分割法の適用が有利である。電荷重畳法は、

- (a) CADとの整合性・連携性が高い、
- (b) 計算原理が簡単でプログラミングが容易、
- (c) 計算精度が高い、
- (d) 計算時間が短い、

といった長所を有する<sup>[1,2]</sup>。このような理由から、CADEFシステムにおける電界解析手法には、電荷重畳法を用いた。

一方、電荷重畳法の最大の短所は、仮想電荷の適切な配置に専門家が持つ経験的知識を必要とする点である<sup>[1,2]</sup>。そして、仮想電荷配置の良否が、解析精度を大きく左右する<sup>[1,2]</sup>。したがって、自動計算を行うためには、そのような経験的知識を何らかの形でCADEFに組み込み、自動的に適切な仮想電荷配置を行えるようにする必要がある。

### <2.3.2> ハードウェアおよびソフトウェアの構成

#### (a) ハードウェアの構成

数値電界解析は、巨大な連立方程式を解くという必要から、従来主に大型コンピュータを用いて行われてきた。しかし最近では、とりわけ電力機器の絶縁設計分野ではパソコンを用いる電界解析も要請されている。現在広く普及しているパソコンを用いれば、電界解析を誰もが手軽に効率的に行うことができるようになるからである。また最近ではパソコンCADも普及し、手軽にCADを使うことができるようになりつつあるという背景がある<sup>[4]</sup>。

そこでCADEFにおいては、技術者個人ベースで使用できるようなシステムを目指し、ハードウェアとして32ビットパソコン（PC9801XL2, CPU: 80386, 16MHz）を用いた。

一般に、電荷重畳法においては、その計算過程において、すべての係数が非零である非対称の連立方程式を解く必要がある<sup>[1,2]</sup>。特に、場の複雑さが増すと計算量は急激に増大する。そのため、パソコン単体を用いた計算ではメ



メモリ容量・計算速度の点で制限をうける。この制限を撤廃するために、高速演算用トランスピュータボード (KTR-B10, CPU: T-800, 25MHz) をパソコンに付加した。トランスピュータの付加により、8MByteのメモリ容量が得られ、単精度計算で未知数1200、倍精度計算で未知数900の連立方程式を解くことができる。すなわち、パソコン単体で用いるときに比べ約4倍の個数の未知数が使用でき、それだけ大規模な解析が可能となる。また、このトランスピュータは1.87MFlopsの計算速度を有し、単精度計算で未知数1000の連立方程式を1時間弱で解くことができる。このトランスピュータ用のプログラム言語としては、FORTRAN77の仕様に上位互換性を有しているパラレルFORTRANというコンパイラが用意されている。

#### (b) ソフトウェアの構成

電界解析プログラムとしては、電荷重畳法による軸対称場用プログラムを用いている。このプログラムはFORTRANで記述されており、トランスピュータボード上で動作させることができる。

CADとしては、設計製図用2次元汎用パソコンCAD, CADTIMEを用いている。このCADTIMEは、次に示す特徴を有する。

##### (1) マクロ機能を有する

マクロ機能とは、CADTIMEの命令をプログラム化し、一度に実行する機能である。MS-DOSで言えばバッチに相当する。またマクロの中では、変数や条件分岐を用いることができるので、様々な応用が可能である。CADの対話型図形処理機能を使用するプログラムを作成するには、このマクロ機能の利用が不可欠である。

##### (2) 図面データの入出力が容易

CADシステムには、中間ファイルとよばれる異種CADシステム間のデータ

交換のためのファイルを出力する機能を有している場合が多い<sup>14)</sup>。CADTIMEにおける中間ファイルとしては、IGC (Inter Graphic Code) という独自の規格が用意されている。IGCファイルはASCIIコードのみからなり、FORTRANで容易に扱うことが可能である。

#### <2.3.3> CADと電界解析の結合のための必要技術

CADはもともと機器の設計・製図用として作られており、電界解析をするために作られたものではない。そのため、特にパソコンCADは、通常図形の境界(座標)のデータしか持たず、電位や誘電率などの電界解析に特有のデータを持つことができない。したがって電位や誘電率などの非図形データは、CAD以外の段階で入力されなければならない。また輪郭以外の付加的なデータを持つことができるCADにおいても、何らかの形式変換の処理を行わなければ電界解析に利用することはできない。さらに、CADEFに電界解析のノウハウを組み込んで知的化することを考えた場合、そのノウハウは何らかのプログラムとして表現されなければならない。同様に電界解析もCADを想定して作られたものではないため、その出力をCADで読み込むには形式変換のためのプログラムを必要とする。

これらの理由から、CADと電界解析を結合し、両者間のデータの相互利用を可能とするためには、以下に示すようなプログラムおよびアルゴリズムなどの開発が必要となる。

##### (1) 図形データ抽出プログラム

パソコンCADの図形処理機能を利用した上で、人間との対話によってCADデータ中から電界解析用図形データを抽出する。さらに、回転対称軸の設定や、電極・誘電体領域の抽出、電位および誘電率などの入力を行う。この作業は、CADTIMEのマクロプログラムを用いて行われる。指定された図形データの座標の値は自動的に呼び出され、定められた変数に書き込まれる。また、



電位・誘電率などの非図形データもマクロを通じて変数に書き込まれる。この変数の値を外部に出力することによってCAD中に存在する図形データおよびマクロプログラムを用いて入力した電位・誘電率などの値を抽出できる。

(2) ASCII形式への変換プログラム

(1)で抽出されたCADデータは、バイナリ形式で記述されている。これをFORTRANで扱いやすいASCII形式に変換する。このプログラムは、バイナリデータの扱いが容易なC言語で記述されている。

(3) 電界解析用データ生成プログラム

抽出されたCADの図形データから、電荷重量法のための電界解析用入力データを自動生成する。すなわち、CADの図形データに基づいて仮想電荷の自動配置を行い、電界解析プログラムに適合した書式で出力する。このプログラムは、数値計算が中心であり、FORTRANで記述されている。

(4) CAD形式への変換プログラム

電界解析結果をCADで読み込み、CADの持つ図形処理機能を用いて解析結果をグラフィック表示するために、IGCフォーマットに変換する。数値処理が中心であり、FORTRANで記述されている。

<2.3.4> CADEFによる実機器を対象とした自動電界解析のための必要技術

上記の結合プログラム群の開発により、CADと電界解析の基本的結合はほぼ完成した。しかし、この段階でのCADEFを用いた自動電界解析は、解析対象が複雑になるに従って困難となる。それは、次の2つの理由による。

(a) CADから領域に関するデータを抽出する手順が複雑である。

図2.2に示すように、CADデータを電界解析に利用するためには、(i) 交点

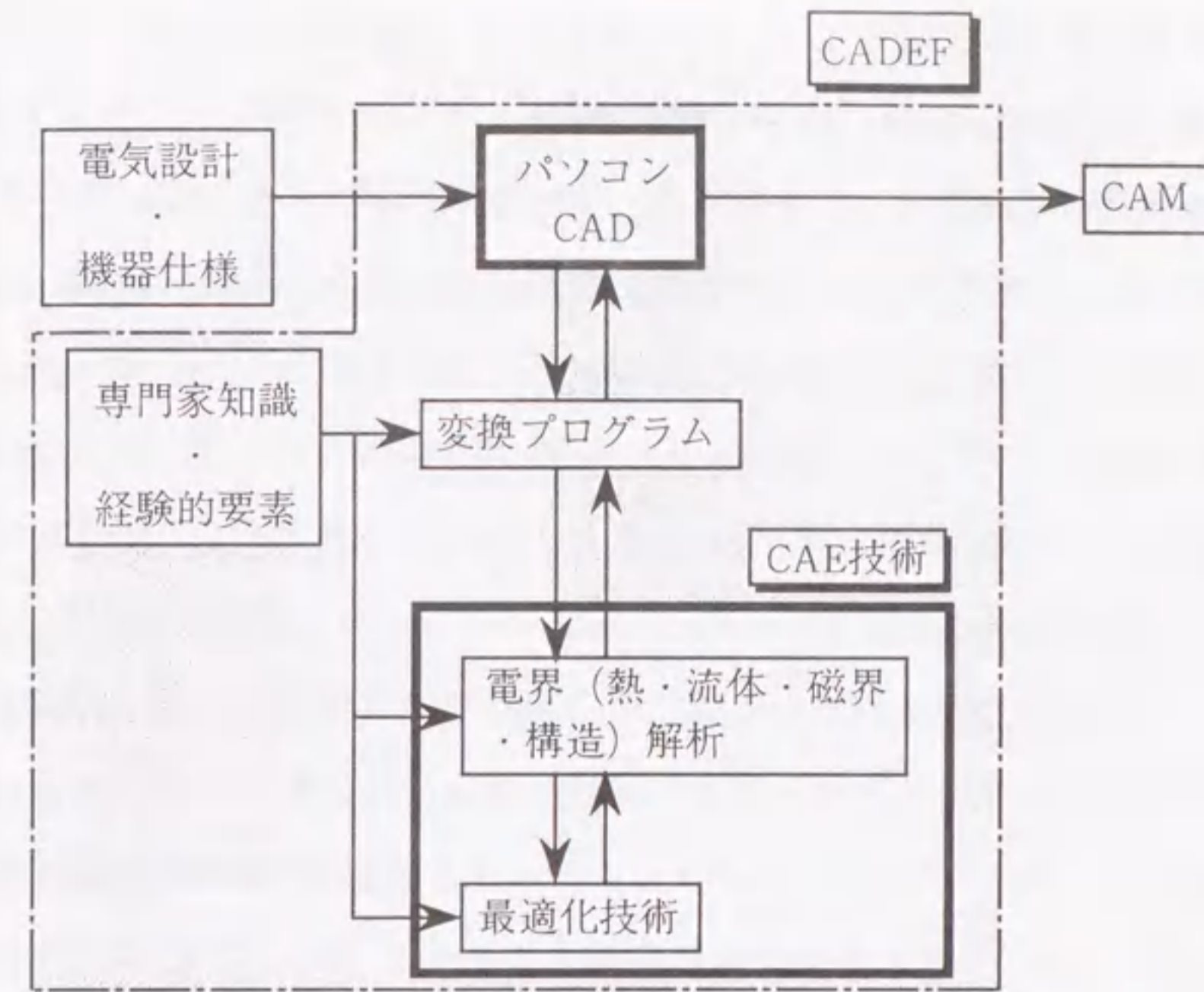


図2.1 CADEFの概念

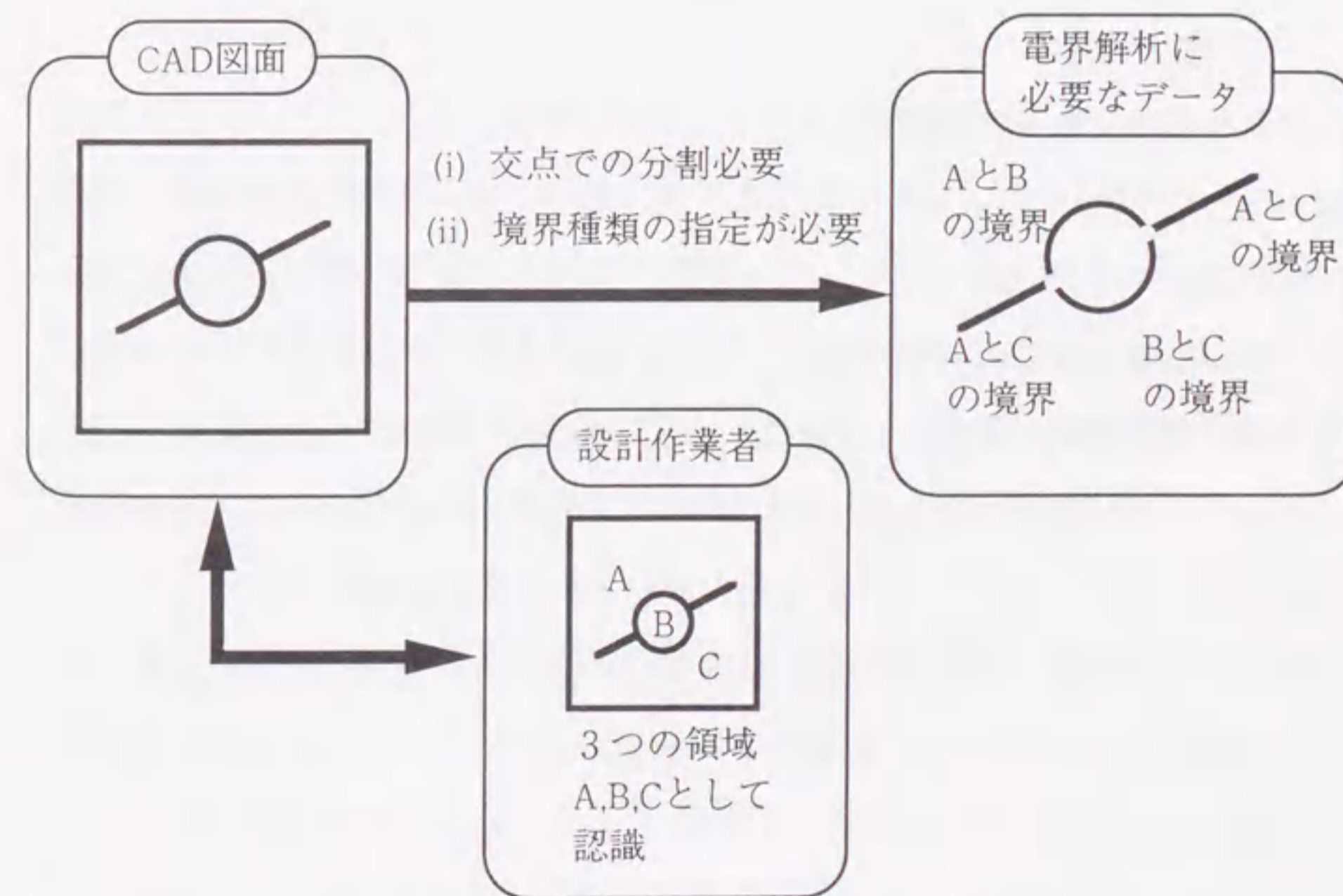


図2.2 CADデータと電界解析に必要なデータの相違  
およびCADの内部表現形式と設計作業者の図面認識の相違



ごとに境界要素の分割を行い、(ii) CADの持つ円弧・線分の座標データに、境界種類（例えば、電極とガスの境界、ガスと誘電体の境界、など）のデータを付加する必要がある。しかしこれらは、設計作業にとって、余分の労力を必要とするものである。とりわけ、実機器を対象とした場合には、このような処理を手作業で行うことは、CADと電界解析を結合することによる設計作業の効率化というメリットが十分に活かされない。そこでこれらの処理は計算機による自動計算により行い、設計作業は必要最小限の作業を行えばすむようなシステムが求められる。

そこで、設計作業が、各要素についてその境界種類を一つ一つ指定する方法ではなく、領域を代表する点（領域代表点）の位置およびその領域種類を指定するだけで、自動的にその領域を取り囲むすべての境界を自動認識し、その結果からすべての要素の境界種類を自動的に求めることができる手法（これを以下では領域自動認識法と呼ぶ）を開発した。これについての詳細なアルゴリズムは2.5節で述べる。

(b) 仮想電荷の適切な自動配置を行うことができない。

<2.3.1>で述べたように、電荷重畳法においては、仮想電荷の配置の良否が解析精度を大きく左右する。このため、高精度自動電界解析のためには、仮想電荷の適切な自動配置を必要とする。仮想電荷の自動配置のためには、専門家の持つ経験的知識をシステムへ組み込む必要がある。

そこで、CADEFにおいては、仮想電荷配置に関する専門家知識・経験的要素をルールという形でシステムへ組み込み、システムの知的化を行った。これにより、適切な仮想電荷配置を自動的に行うことを可能とした。これについての詳細は、2.6節において述べる。

#### <2.3.5> CADEFにおける最適化計算のための必要技術

最適化技術は、真の意味でのCAE技術の中核をなすものであり、CADEFに

においても、最適化技術の導入は必要不可欠なものといえる<sup>15)</sup>。

電界最適化計算をパソコンを用いて行うことは、メモリ容量および計算速度に関する制約のため困難とされてきた。そして、これを解決するためには、従来よりも一層計算効率の高い電界最適化技術の開発が必要とされてきた。そこで、電界最適化計算において必要とされる繰り返し計算を高速に行う手法の導入により、パソコンを用いた電界最適化を可能とした。また、電界最適化における形状修正の自由度を向上させた手法の開発を行い、汎用性の高い電界最適化自動計算技術を確立した。さらに、絶縁特性を考慮に入れた最適化技術をCADEFにおいて使用可能とするための技術構築を行った。

## 2.4 CADEFの基本構成

前節で、CADEFにおいて必要となる各種技術開発の概要を示した。このような技術開発の結果得られたCADEFの基本構成を示すと、図2.3のようになる。その計算手順を示すと、次のようになる<sup>16) 17)</sup>。まず、(1)CAD図面から、解析に必要な図形データが抽出される。さらに領域代表点や、電位・誘電率などの非図形データが入力される。ここで抽出および入力されたデータは(2)ASCII形式への変換の後、(3)電界解析用データ生成プログラムに送られる。このプログラムにおいては、電界特異点の自動認識、領域の自動認識などを行い、これらの認識結果に基づき仮想電荷配置を行う。仮想電荷配置の際に、専門家知識・経験的要素を適用し、適切な仮想電荷配置となるようにする。ここで行われた仮想電荷配置データを基に、電荷重畳法による電界解析を行う。得られた結果は、(4)CAD形式へデータ変換された後、電界ベクトル図・仮想電荷配置図・および等電位面の形でCADでグラフィック表示できる。これら一連の動作の様子を図2.4(a)~(f)に示す。図では、絶縁筒耐電圧試験装置のCAD図面を対象として用いた。



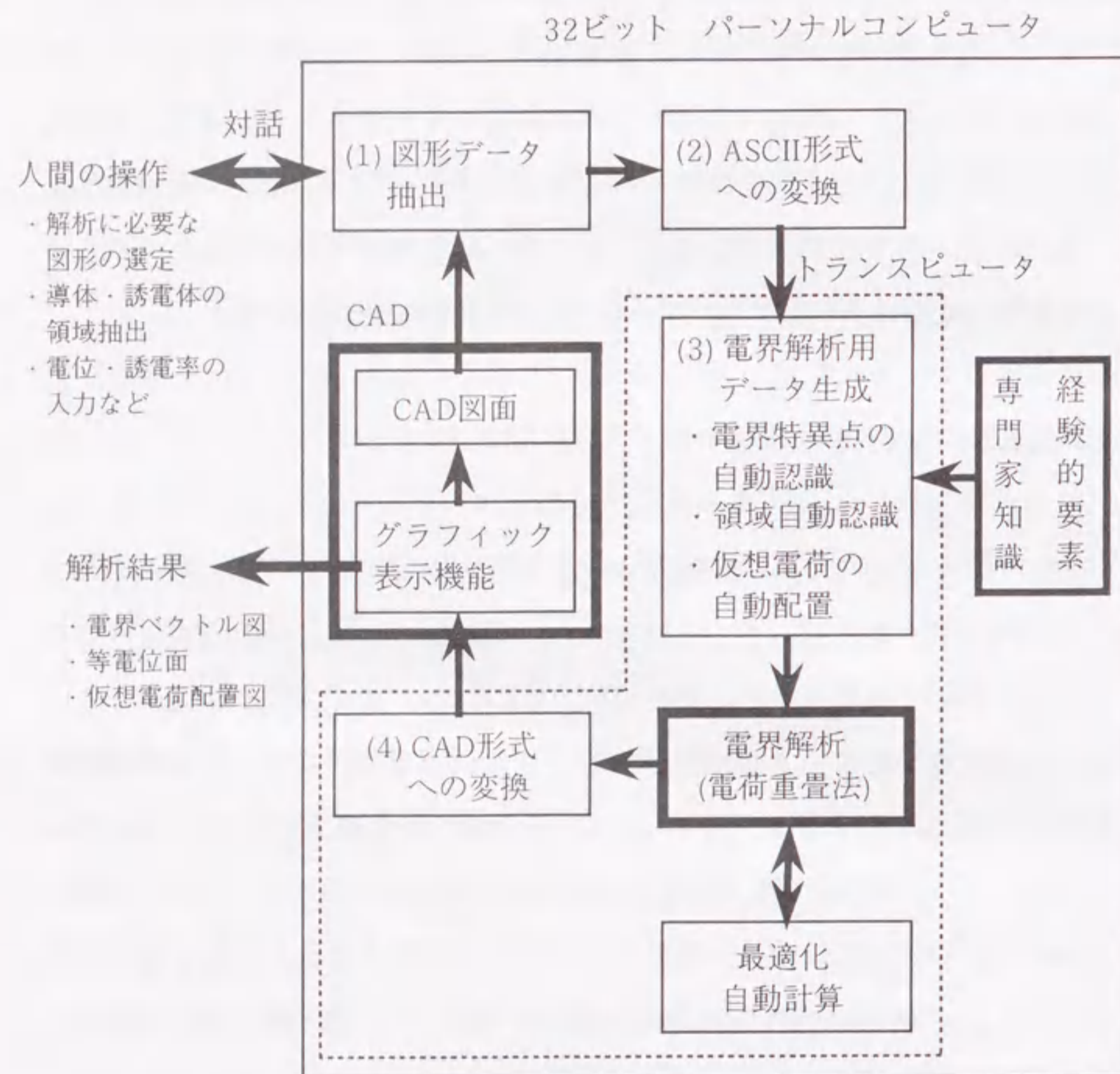
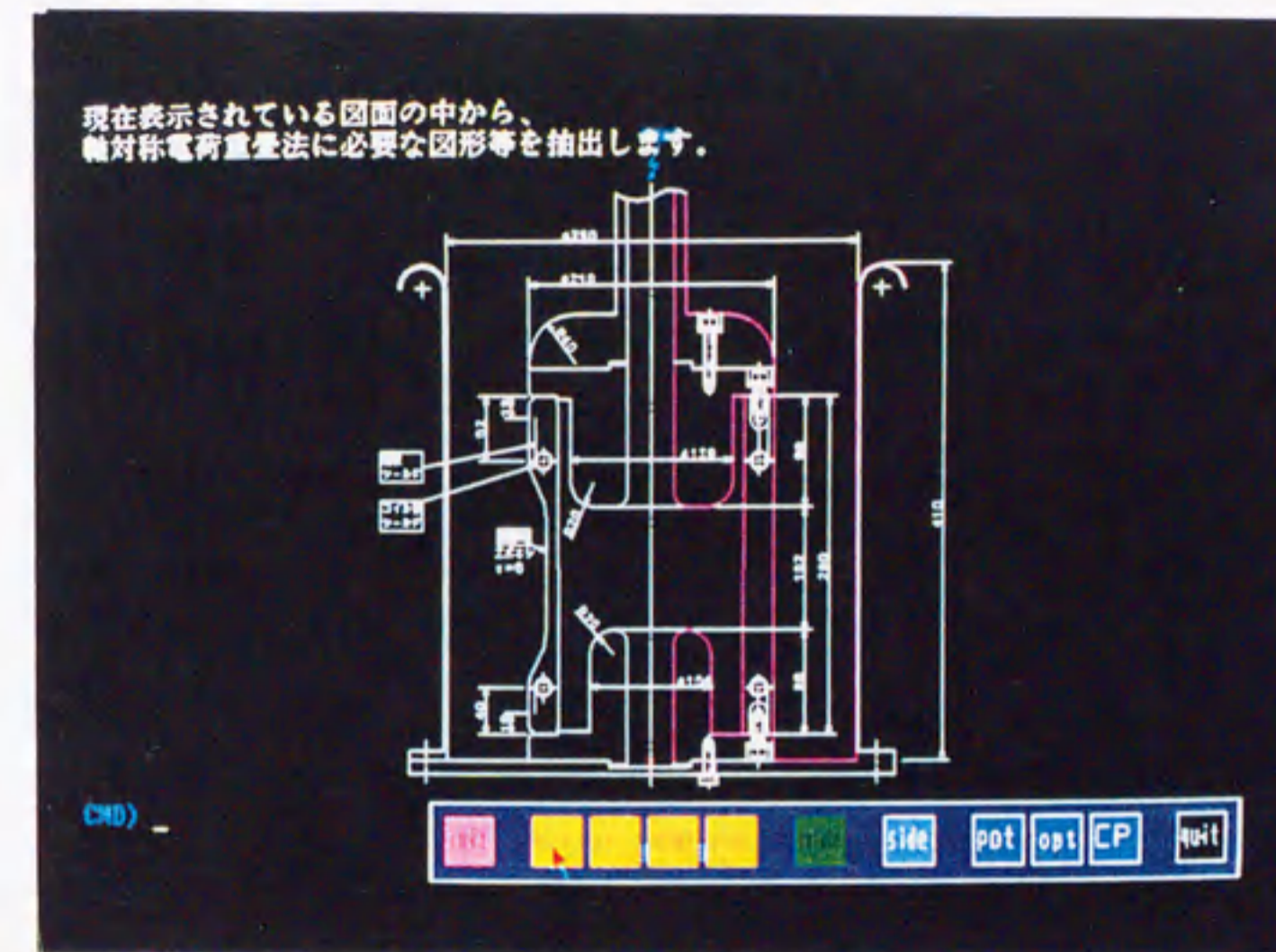
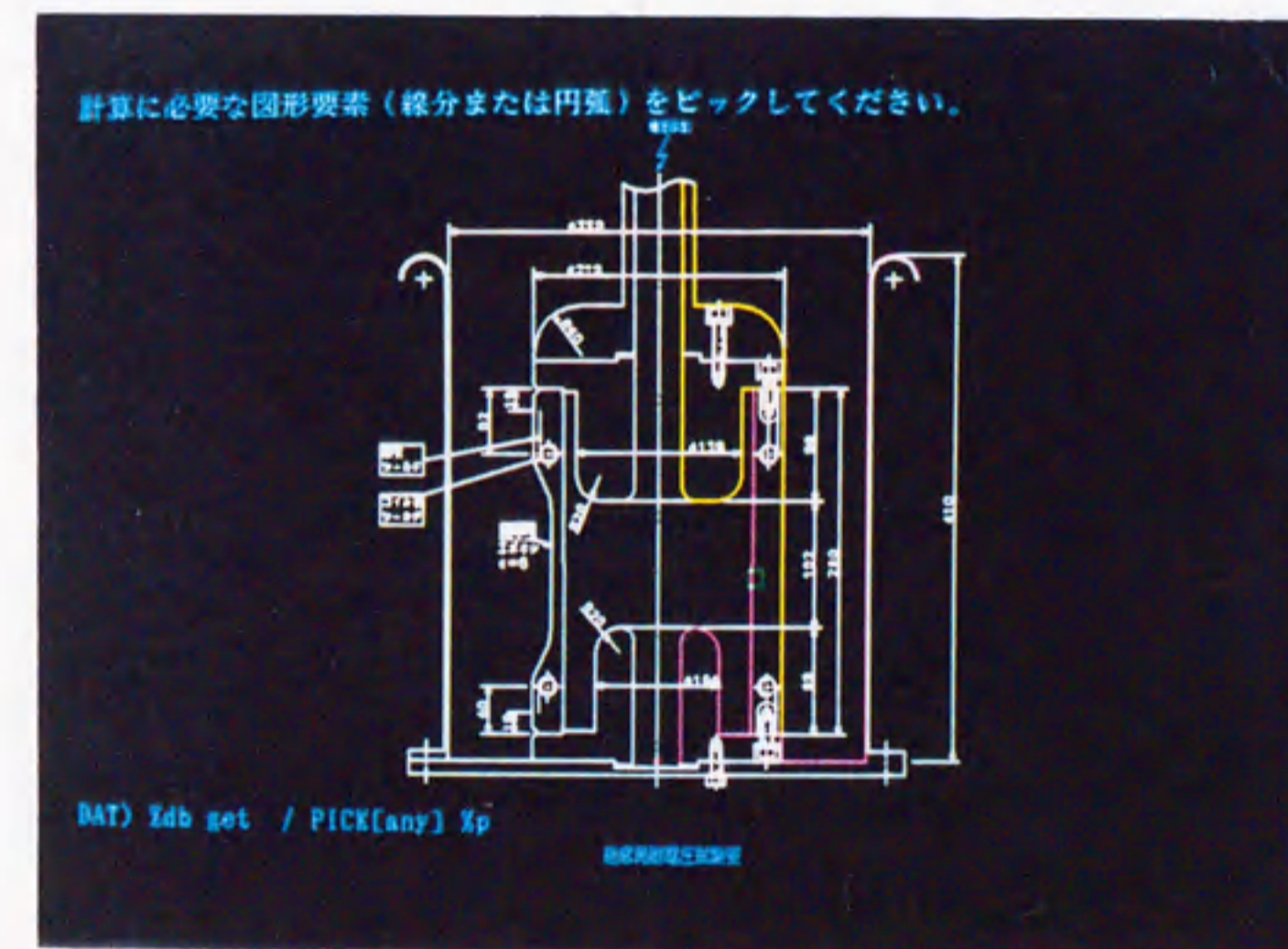


図2.3 CADEFの基本構成



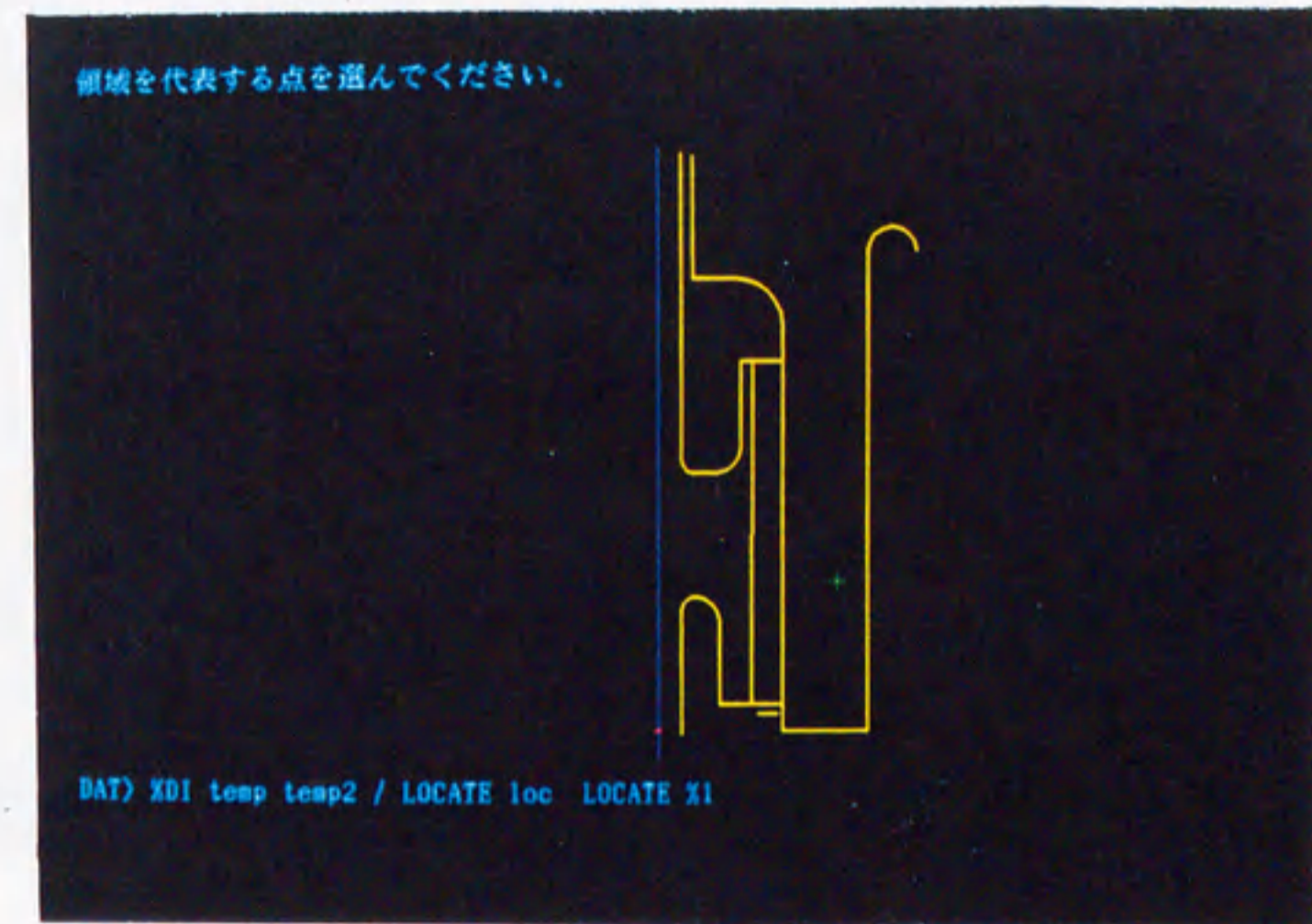
(a) 実用機器のCAD図面 (絶縁筒耐電圧試験装置)



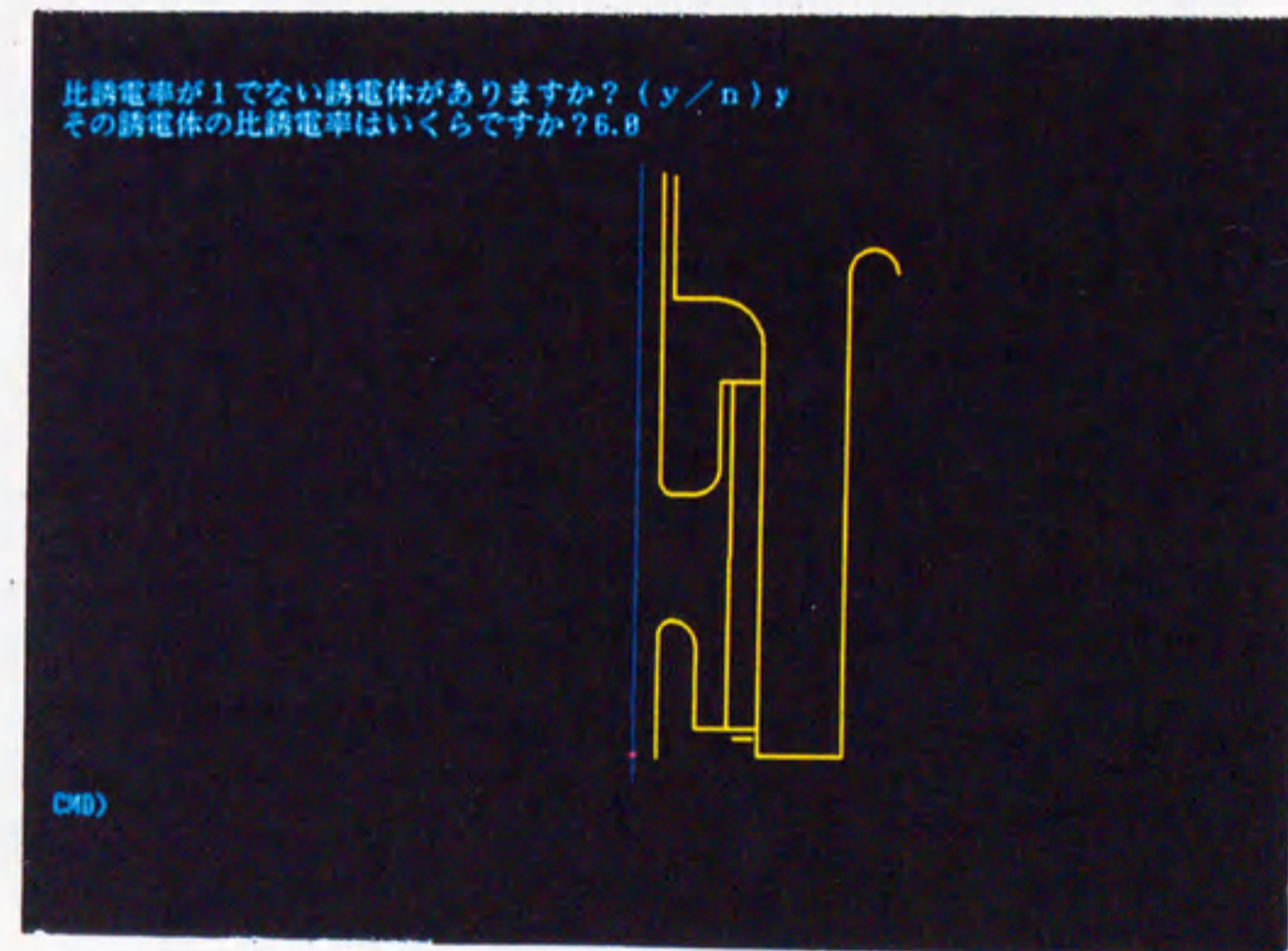
(b) 解析に必要な図形の選定  
(図中緑色□印で指示された線分を選定しようとしている)

図2.4 CADEFにおける操作の流れ





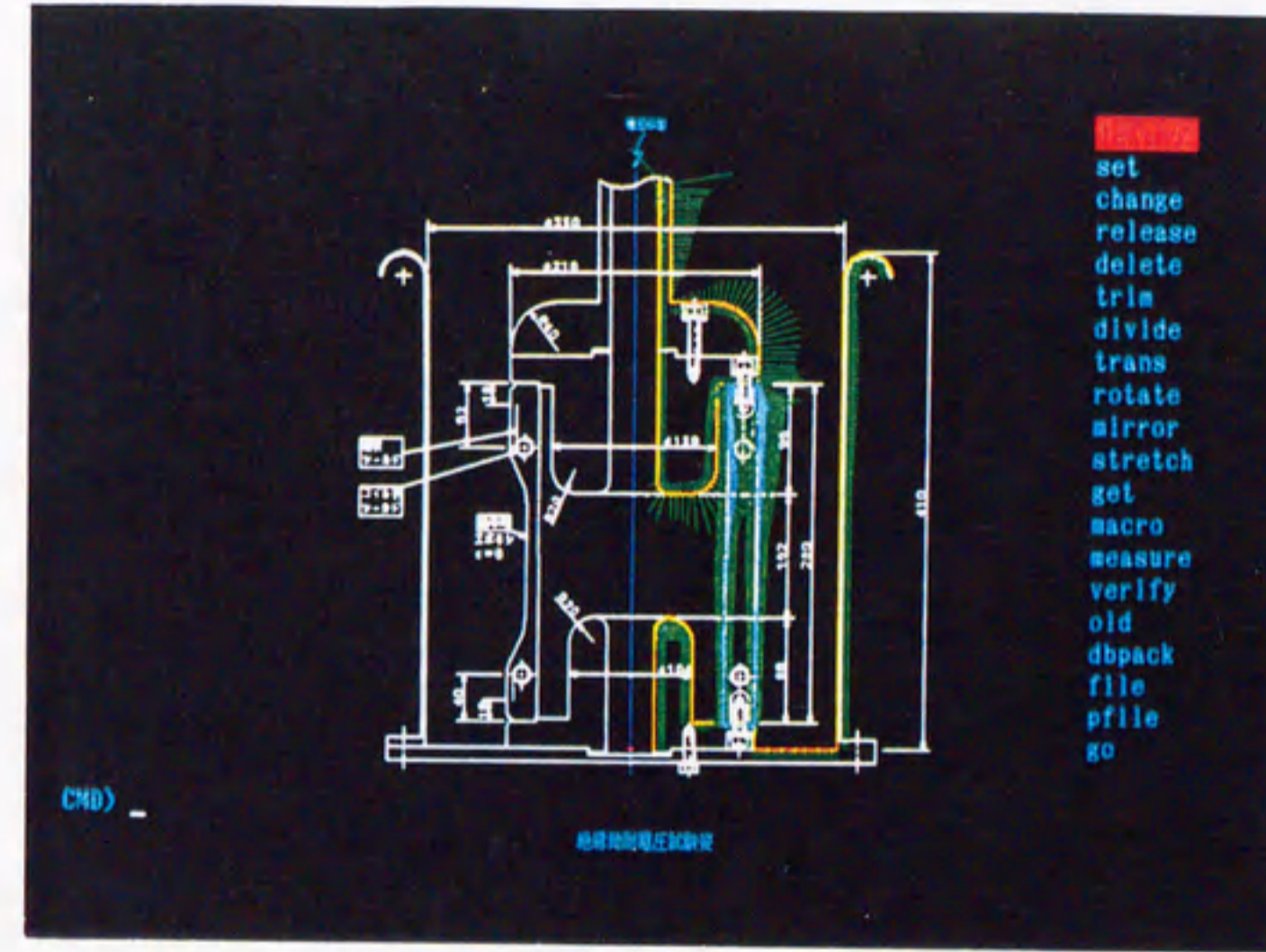
(c) 領域の抽出 (緑色+印)



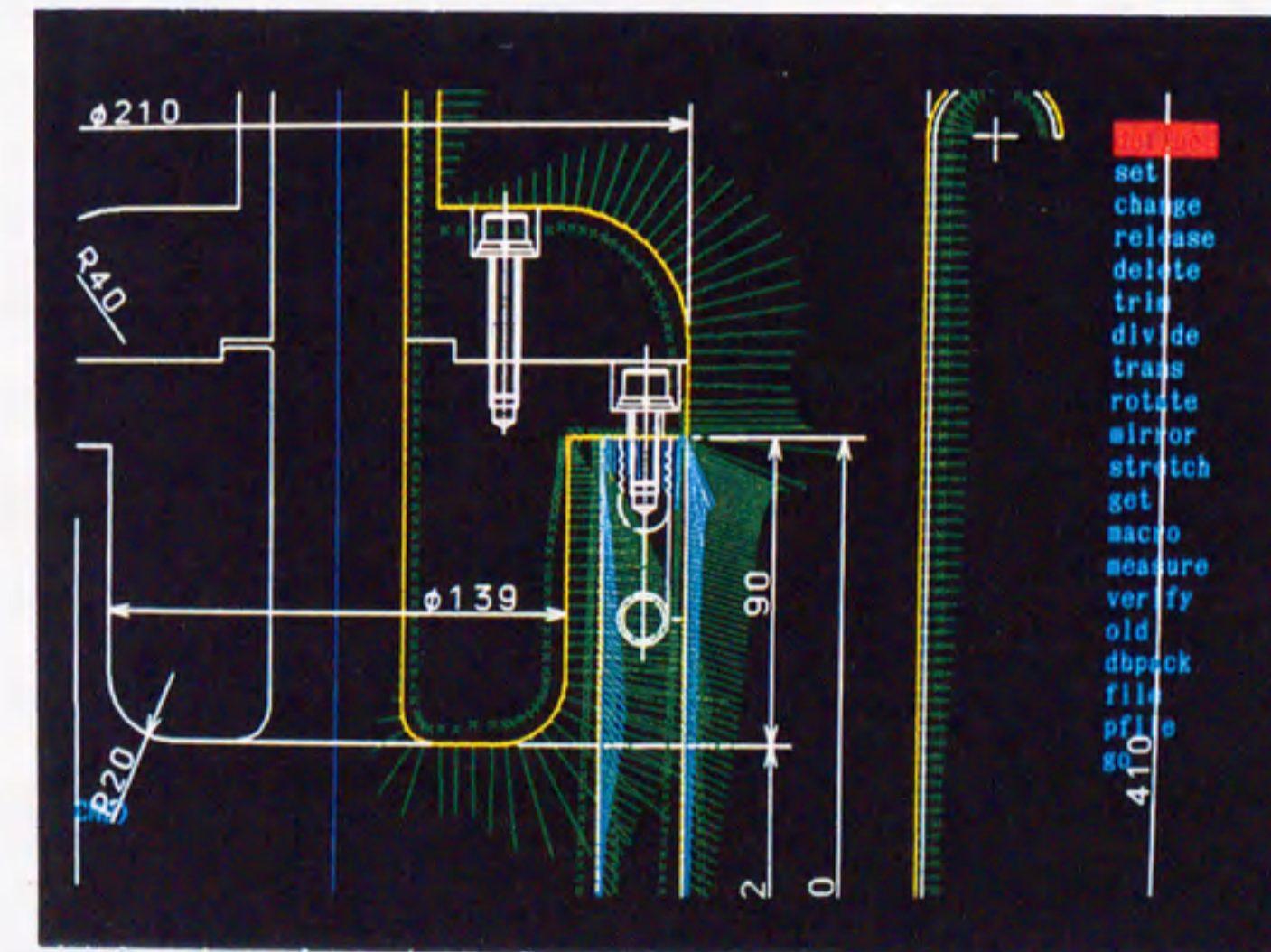
(d) 比誘電率の入力

図2.4 CADEFにおける操作の流れ (つづき)





(e) 電界ベクトル図および仮想電荷配置図  
(対称軸の右側のみ表示)



(f) 高電圧電極部分の拡大図  
(— 電界ベクトル)  
(× 仮想電荷配置)

図2.4 CADEFにおける操作の流れ (つづき)



## 2.5 領域自動認識法の開発

<2.3.4>(a)で述べたように、CADと電界解析の結合の効果を最大限に引き出すため、CADデータから電界解析に必要な領域データを自動生成することが可能な、領域自動認識法を開発した<sup>[6,7]</sup>。この領域自動認識法により、領域中の任意の一点（以下これを領域代表点と呼ぶ）を指定するだけで、その領域を囲むすべての境界要素を計算によって自動的に認識することができる。これをすべての領域に対して行うことにより、最終的にすべての要素の境界種類を自動的に求めることができる。

領域自動認識法の開発の初期段階として、まず図面中に線分のみが存在する場合の領域自動認識を実現した。その流れ図を図2.5に示す。この中には8つのステップが含まれている。このうち、(3)~(6)は、領域の周りを一周走査することによって、領域を囲む境界要素を順に発見していくための計算処理であり、本アルゴリズムのうちで最も重要な部分である。以下では、この部分の計算を"Walk-around法"と呼ぶ。そのアルゴリズムを図2.6~図2.8を例にとり説明する。

図2.6は、同軸電極構造の断面図を示す。この図において、2つの直線状電極#L1および#L2に挟まれた空間にガスが封入されており、電極を支える固体誘電体が間に存在する。この図は、図形データ抽出プログラムを用いてCAD図面から電界解析に必要な図形要素を抽出した後のものであり、理解を助けるために、要素端点を○印で示すなどの処理をしている。#L1~#L4は抽出された要素につけられた要素番号である。また、点A~点Eは、各領域A~Eの領域代表点である。この代表点の座標と属性（どの領域を代表する点であるか）は、図形抽出プログラムの中で入力される。また、領域自動認識に先立ってあらかじめ要素間の交点での分割を計算機により自動的に行っており、その結果、図2.7が得られる。以下、領域自動認識の原理について、図2.5の各ステップに対応させて順を追って説明する。

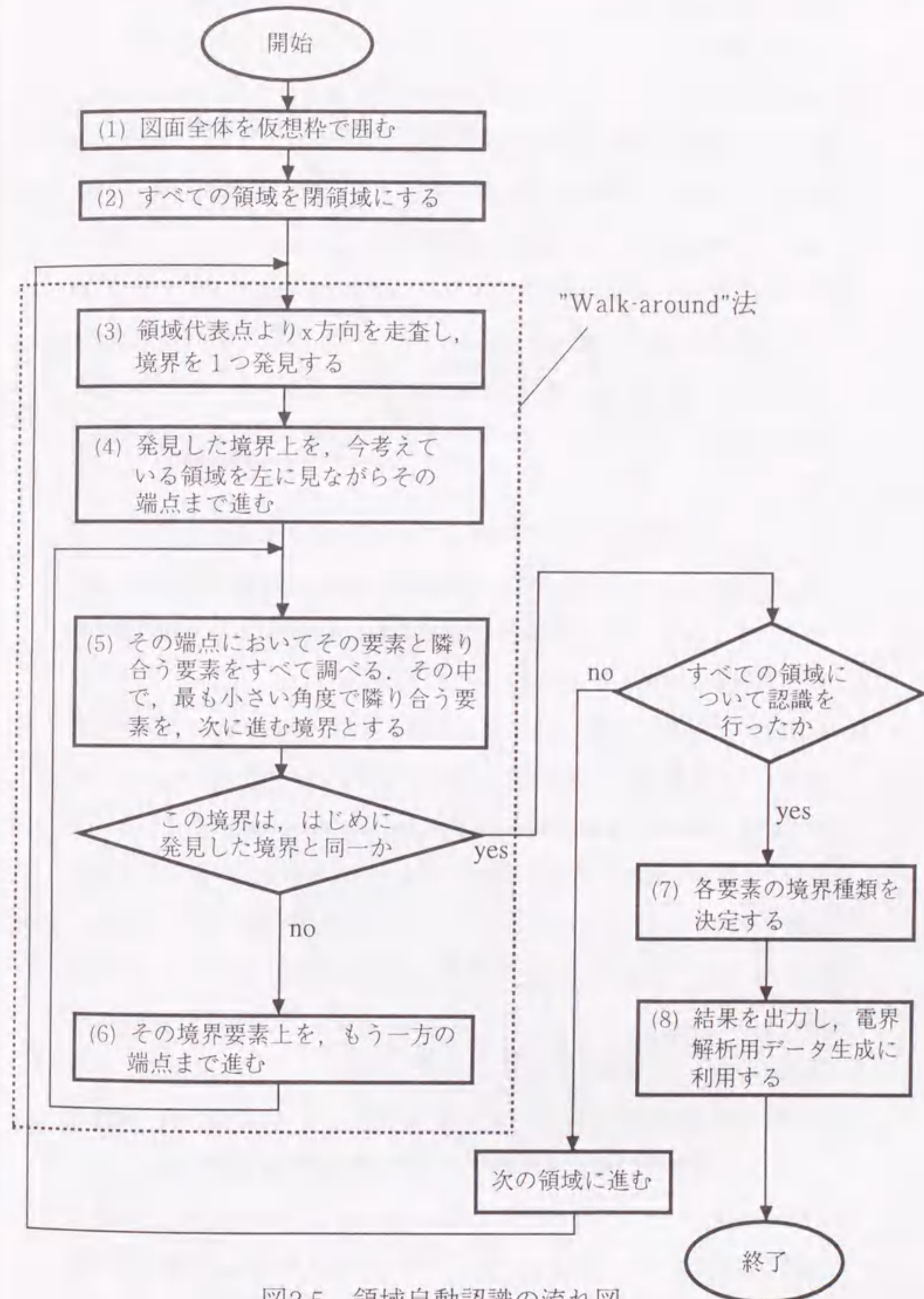


図2.5 領域自動認識の流れ図



- (1) 図2.7の認識対象図面について、図面全体を囲む仮想枠（図2.8の#L9～#L16）を描く。
- (2) 開領域がなくなるように、他のどの要素とも接合していない端点（例えば#L1の両端点）を仮想的に枠の位置まで延長する。さらに、枠との交点において枠を分割する。以上の処理により、図2.7は図2.8のように変換され、Walk-around法の適用準備が整った。
- (3) 図2.8の状態では、各領域の代表点を用いて領域自動認識を行う。その手順を、領域代表点Dの場合を例にとって示す。まず領域代表点Dを起点にx軸の正の方向に走査し、最初に交差する要素を探索する。ここでは要素#L8が該当する。したがって、まず要素#L8を第一の境界として認識する。
- (4) 次に、この要素#L8に沿って今考えている領域を左に見ながら進み、端点に到達する。これを具体的な計算処理の形で表現すると、次のようになる。すなわち、線分の両端点のy座標の大きさを比較し、その値の大きい方の端点に向かって進めばよいことがわかる。
- (5) (4)において到達した端点において、要素#L8は、要素#L4および#L7と交わることがわかる。このような場合、各要素間の時計回りに測った角度（同図における $\alpha$ および $\beta$ ）を求める。そして、角度の小さい方の要素（この場合 $\alpha < \beta$ であるから要素#L4）を領域の第二の境界であると認識する。そして、今度はこの#L4に沿って領域Dを左に見ながら進む。
- (6) 以下同様に、はじめに発見した要素#L8に戻るまで点線のように走査を続けることにより、領域Dは要素#L8、#L4、#L6、#L14の境界に囲まれていることが認識できる。
- (7) 同様に他の領域代表点A、B、C、Eについても上で示したような一周走査を行うことにより、各領域がどのような境界の組み合わせで成り立っているかを決定できる。その結果は表2.1のようにまとめられる。この表を処理し各要素についてみると、表2.2のようにまとめられ、これより各要

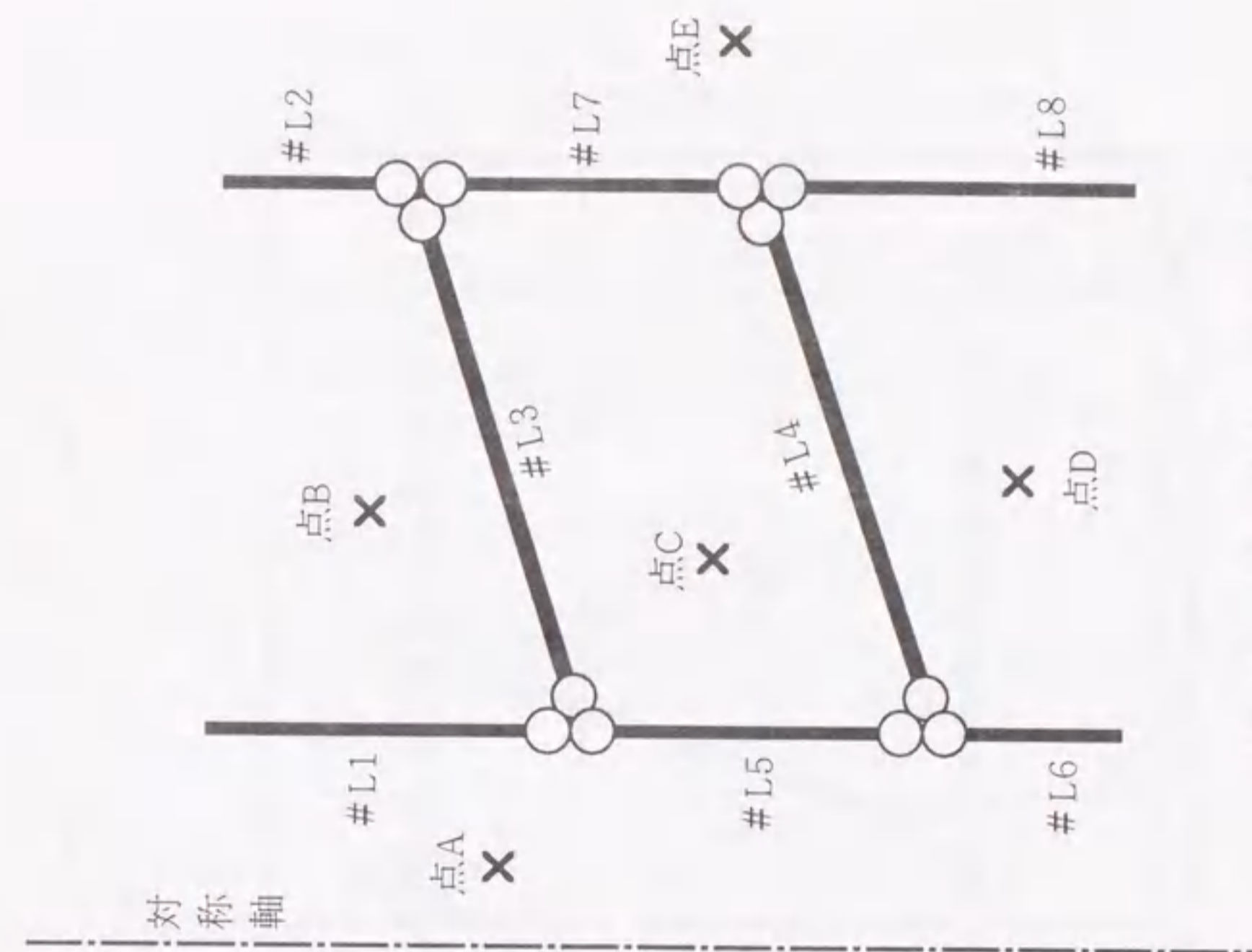


図2.7 交点で分割された図面

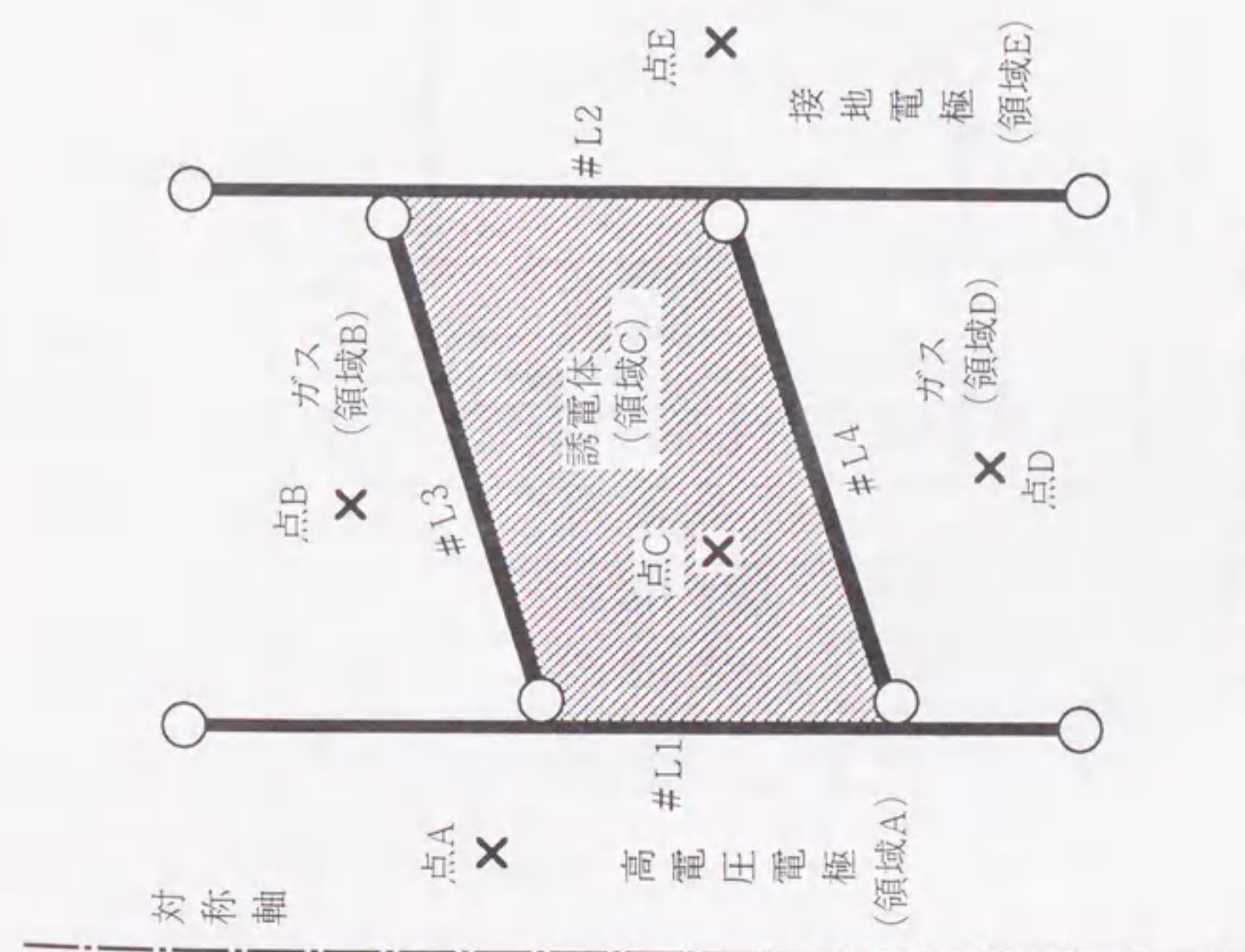


図2.6 領域認識対象図面



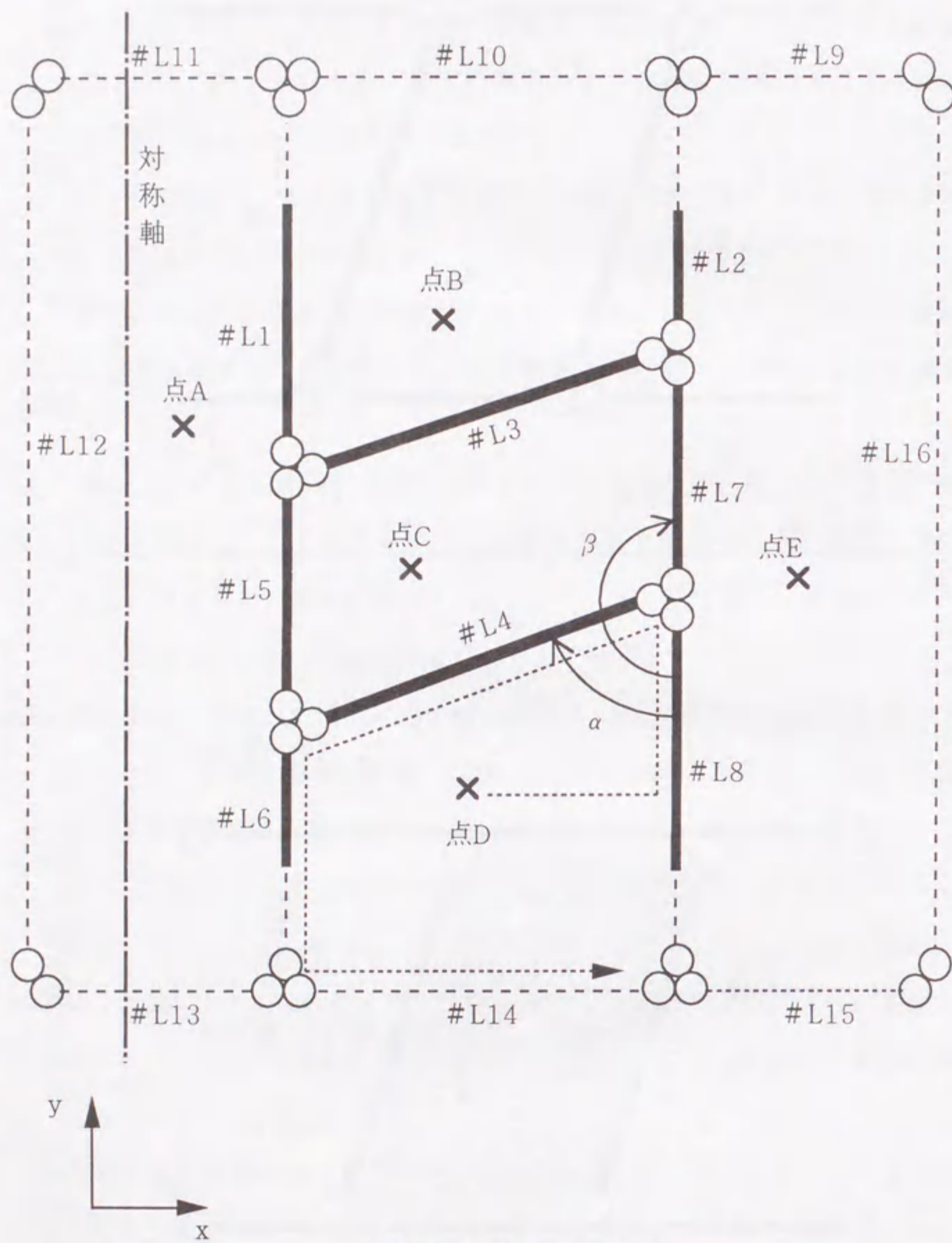


図2.8 領域認識過程

表2.1 Walk-around法により認識された各領域を囲む境界要素

領域	その領域を囲む要素 (括弧内は仮想枠の要素)
A (高電圧電極)	#L1, #L5, #L6 (#L11, #L12, #L13)
B (ガス)	#L1, #L2, #L3 (#L10)
C (誘電体)	#L3, #L4, #L5, #L7
D (ガス)	#L4, #L6, #L8 (#L14)
E (接地電極)	#L2, #L7, #L8 (#L9, #L15, #L16)

表2.2 領域自動認識によって得られた各境界要素の種類

要素番号	境界種類
#L1	A (高電圧電極) と B (ガス)
#L2	B (ガス) と E (接地電極)
#L3	B (ガス) と C (誘電体)
#L4	C (誘電体) と D (ガス)
#L5	A (高電圧電極) と C (誘電体)
#L6	A (高電圧電極) と D (ガス)
#L7	C (誘電体) と E (接地電極)
#L8	D (ガス) と E (接地電極)



素の境界種類を決定することができる。

- (8) 各要素の境界種類がこのように決定されると、既に入力されている電極・誘電体の属性に関するデータをもとに、電荷重畳法による電界解析用データを生成することができる。

このようにして、領域の代表点を指定するだけで、領域の自動認識が行われ、各要素の境界種類が自動的に設定される。

以上が線分のみからなる図面の領域自動認識のアルゴリズムである。しかし、実際のCAD図面中には円弧も含まれる。そこで、線分と円弧を図面中に含む場合の領域自動認識アルゴリズムを開発した<sup>6)</sup>。

## 2.6 仮想電荷配置に関する専門家知識の導入による知的化

電荷重畳法による自動電界解析のためには、仮想電荷配置に関する専門家知識・経験的要素をシステムへ導入する必要がある。そこで、このような専門家の経験的な判断をルールで明らかにし、CADEFに組み込むことにより、専門家が行う場合と同等の精度で自動解析が可能となると考えられる。

CADEFにおいては、図2.9に示す5つの仮想電荷配置パラメータ

depth: 仮想電荷深さの輪郭点間隔に対する比

ratio: 輪郭点間隔比

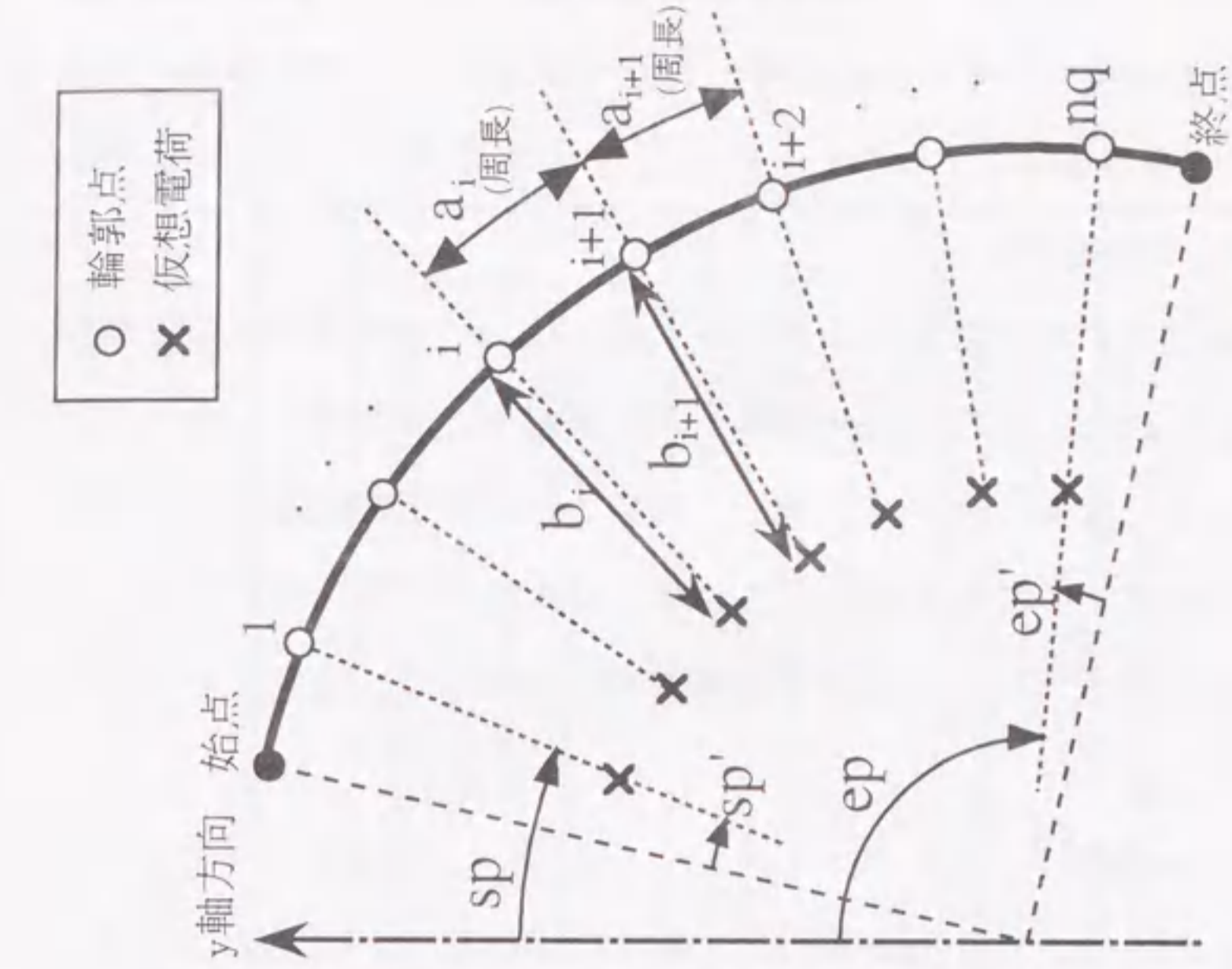
nq: その要素に置かれる輪郭点の数

sp: 線分の場合、始点から最初の輪郭点までの長さ

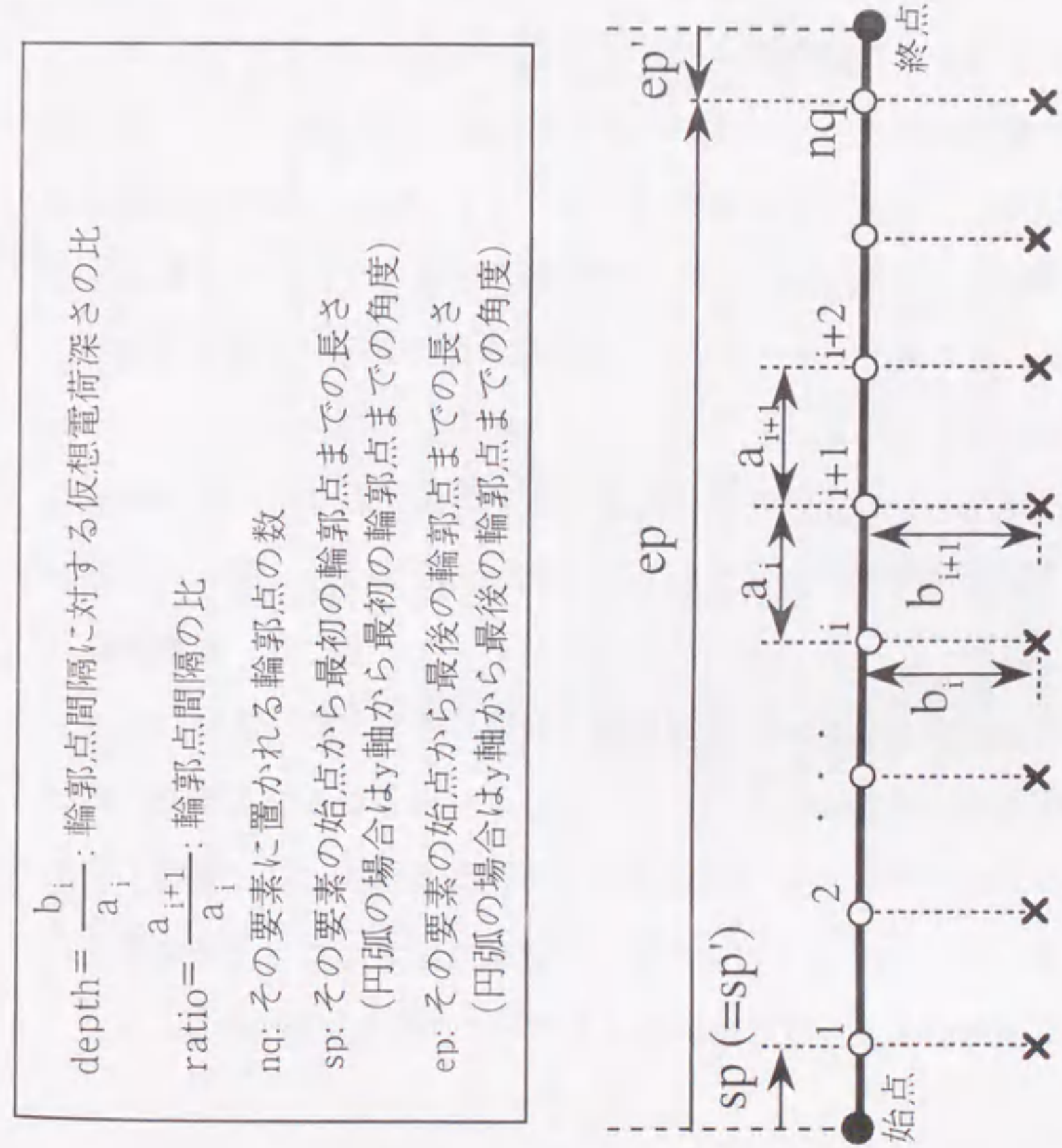
円弧の場合、y軸から最初の輪郭点までの角度

ep: 線分の場合、始点から最後の輪郭点までの長さ

円弧の場合、y軸から最後の輪郭点までの角度



(b) 円弧における仮想電荷配置パラメータ



(a) 線分における仮想電荷配置パラメータ

図2.9 仮想電荷配置パラメータの定義

depth =  $\frac{b_i}{a_i}$ : 輪郭点間隔に対する仮想電荷深さの比  
 ratio =  $\frac{a_{i+1}}{a_i}$ : 輪郭点間隔の比  
 nq: その要素に置かれる輪郭点の数  
 sp: その要素の始点から最初の輪郭点までの長さ  
 (円弧の場合はy軸から最初の輪郭点までの角度)  
 ep: その要素の始点から最後の輪郭点までの長さ  
 (円弧の場合はy軸から最後の輪郭点までの角度)



を各要素に与えることによって、仮想電荷配置が決定される。仮想電荷配置ルールは、この5つのパラメータを適切に決定するための方法である。なお以下の説明では便宜的に、パラメータsp, epの代わりに、図2.9に示すsp', ep'をしばしば使用する。

まず、専門家に対するインタビューから、表2.3に示す8種類の仮想電荷配置ルール案をまとめた。表2.3であげたルール以外にも、まだ多くのルールが実際には存在すると考えられる。しかし、式あるいは言葉で定義することが難しいもの、プログラムで実現することが難しいものが少なくない。そこでまず最も基本的でかつプログラムが比較的作成しやすい上記8つのルールを導入することにした。

表2.3に示した8種類のルールのうち、ルールA~Eは上記5つのパラメータの初期値を与えるもので、一度の解析につき1回通過するだけである。一方、ルールF~Hは、仮想電荷配置が満たすべき条件を表しており、いわば仮想電荷配置の経験的要素を含む部分である。

そこで、仮想電荷配置ルールの適用手順を次のように決定した<sup>6-9)</sup>。その概略を図2.10に示す。プログラム中では、ルールF~Hは、仮想電荷配置をチェックする部分と、それに従い5つの仮想電荷配置パラメータを修正する部分との組み合わせで実現する。そして、仮想電荷配置が条件を満たすまで、チェックと修正が繰り返し適用される。

図2.11は、これら8つの仮想電荷配置ルールを組み合わせ、電界解析用入力データを生成する手順について示している。同図中太枠で囲んだ部分がルールである。まず、CADから抽出された図形データに基づき、電界特異点認識および領域認識が行われる。その結果、各境界要素が持つ属性（始点または終点に電界特異点を持つかどうか、など）が決定される。各要素の持つ属性を考慮しながら、ルールA~Eの適用により、仮想電荷の初期配置が行われる。最後にルールF~Hにより、仮想電荷が適切な配置となるまで修正される。このような過程により、電界解析用入力データの生成が行われる。

表2.3 仮想電荷配置ルール

ルール	内容
A	[仮想電荷総数N] 要素総数Eに対し、使用する仮想電荷総数Nの初期値を次のように与える。 $1 \leq E \leq 4 \rightarrow N=50, 5 \leq E \leq 9 \rightarrow N=100, 10 \leq E \leq 19 \rightarrow N=200, 20 \leq E \rightarrow N=500$
B	[各要素に与える仮想電荷数nq] 全ての要素の長さの和がLであるとき、長さlの要素に $nq = N(l/L)$ 個の仮想電荷を与える（長さ比例配分）。
C	[仮想電荷の要素表面からの深さdepth] 初期値として、 $depth=1.5$ とする。
D	[電界特異点への電荷集中度ratio] 電界特異点近傍には、仮想電荷を集中させる。その際、 （輪郭点の最大間隔）/（輪郭点の最小間隔）=4となるようにratioを設定する。 電界特異点を持たない要素に対しては、 $ratio=1.0$ （等間隔）とする。
E	[輪郭点始位置sp', 終点位置ep'] spおよびepは、近傍の輪郭点間隔の2分の1とする。
F	[仮想電荷のはみ出し] 仮想電荷が、配置すべき領域からはみ出してはならない。
G	[輪郭点と仮想電荷との距離] 輪郭点から対応する仮想電荷までの距離以内に、 他の仮想電荷が存在してはならない。
H	[二つの仮想電荷間の距離] 二つの仮想電荷が、一定距離以内に近づいてはならない。



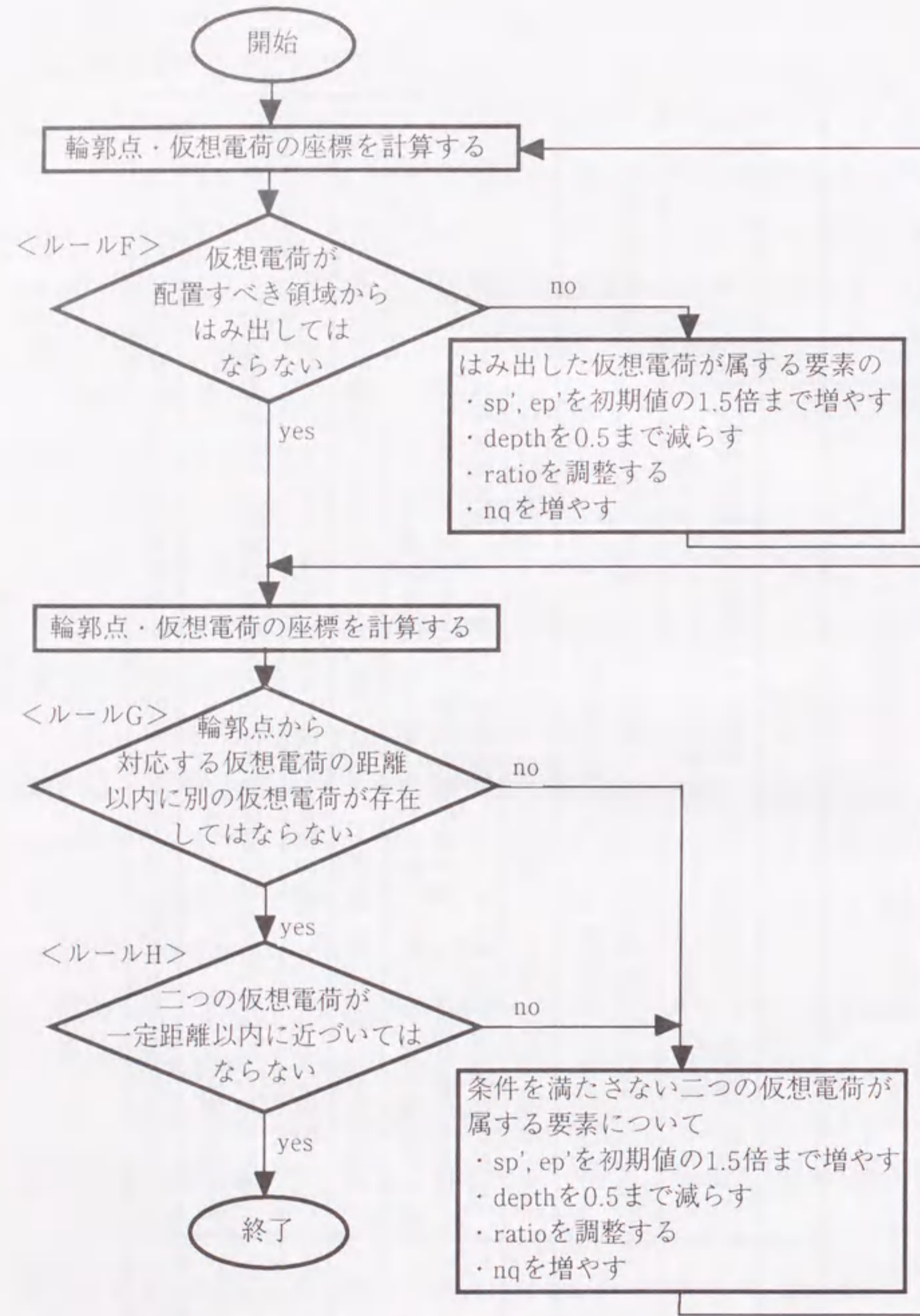


図2.10 仮想電荷配置ルール適用手順

図中大枠で囲ったデータの決定の際、専門家知識・経験的要素が必要となる。他のデータは、「1.図面から抽出するデータ」に基づき機械的に決定できる。

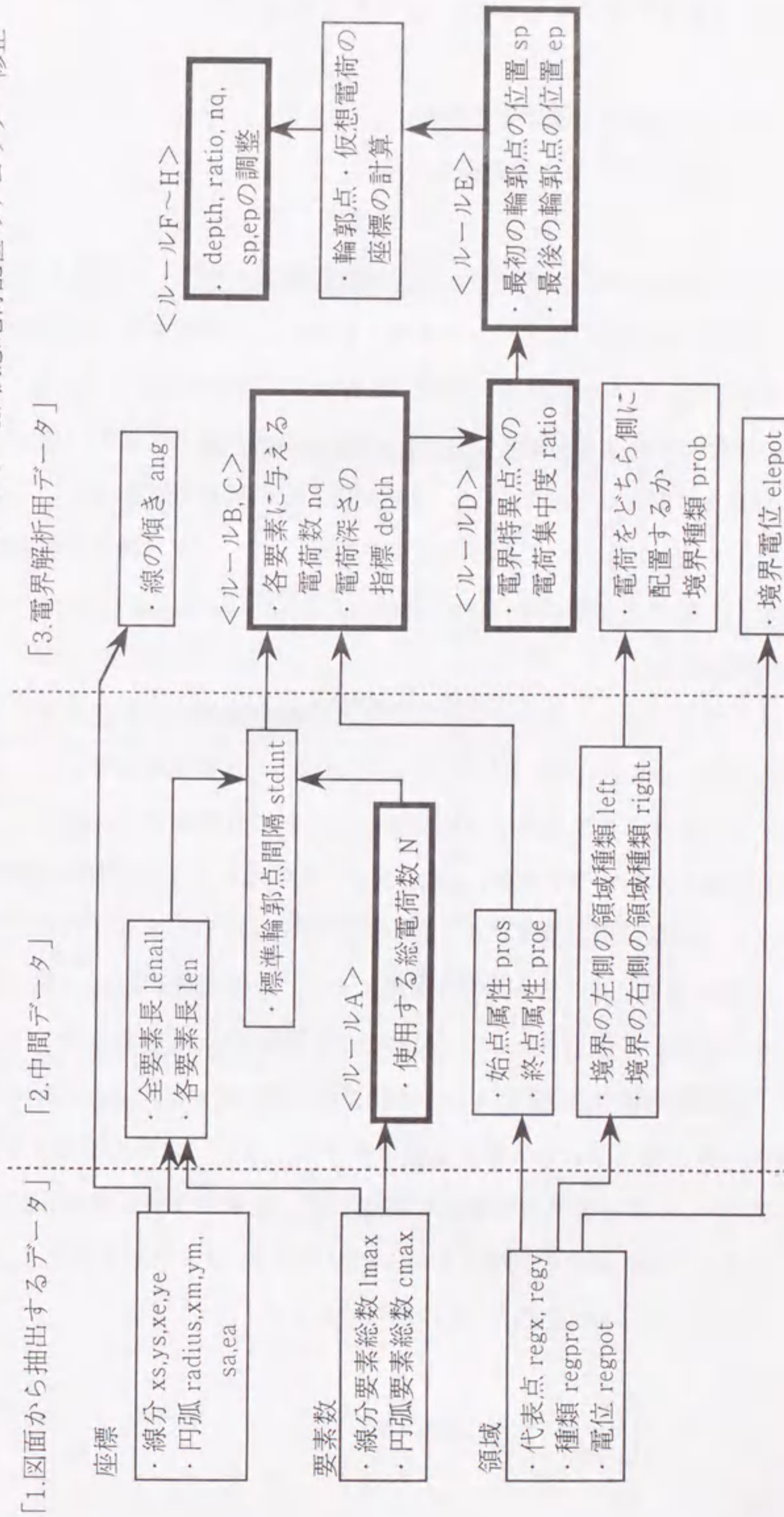


図2.11 電界解析用データの決定手順



次に、上述した仮想電荷配置ルールの導入効果を調べる。ここでは、

- (I) ルールA~Eのみを適用した場合、
- (II) ルールA~Hのすべてを適用した場合、

について、解析結果の比較を行った。解析対象として用いた図面を図2.12に示す。図は、絶縁筒で支えられた高電圧電極に、シールド用リング付き円板電極を取り付けたものである。なお、解析は全て倍精度で行っている。

(I)の場合の解析結果を図2.13に、(II)の場合の解析結果を図2.14に示す。図2.13(a)および図2.14(a)において、対称軸の左側に仮想電荷配置を、右側に電界ベクトル図を示す。また、仮想電荷配置のうちシールド用の円板電極部分を拡大し、電荷と輪郭点との対応関係を示したものが、図2.13(b)および図2.14(b)である。

これらの結果から、次のことがわかる。円板電極部分の厚さが他に比べて薄いために、図2.13(b)に示すように(I)の場合には円板電極部分において、輪郭点から対応する仮想電荷までの距離以内に別の仮想電荷が存在する。このため、正確な解析が行われず、図2.13(a)にみられるように円板電極部分で電界ベクトルが電極面に垂直でなく誤った方向を向いてしまっている。これに対し、(II)の場合には、ルールGの適用により、電荷配置が図2.14(b)にみられるように自動的に修正される。したがって、図2.14(a)にみられるように電界ベクトルは電極面にほぼ垂直であり、精度よく解析できていることがわかる。

次に、薄い電極部分を構成する要素のうち、図2.15に示す要素#1および#2について、解析結果を定量的に評価した。定量的な解析精度の評価のために、ここでは、誤差の指標として、電位誤差 $\delta p$ および電界誤差 $\delta e$ を用いた<sup>1)</sup>。 $\delta p$ および $\delta e$ の定義は、次の通りである。

$$\delta p = \left| \frac{\phi - \phi_m}{\phi} \right| \times 100 \quad (\%) \quad (2.1)$$

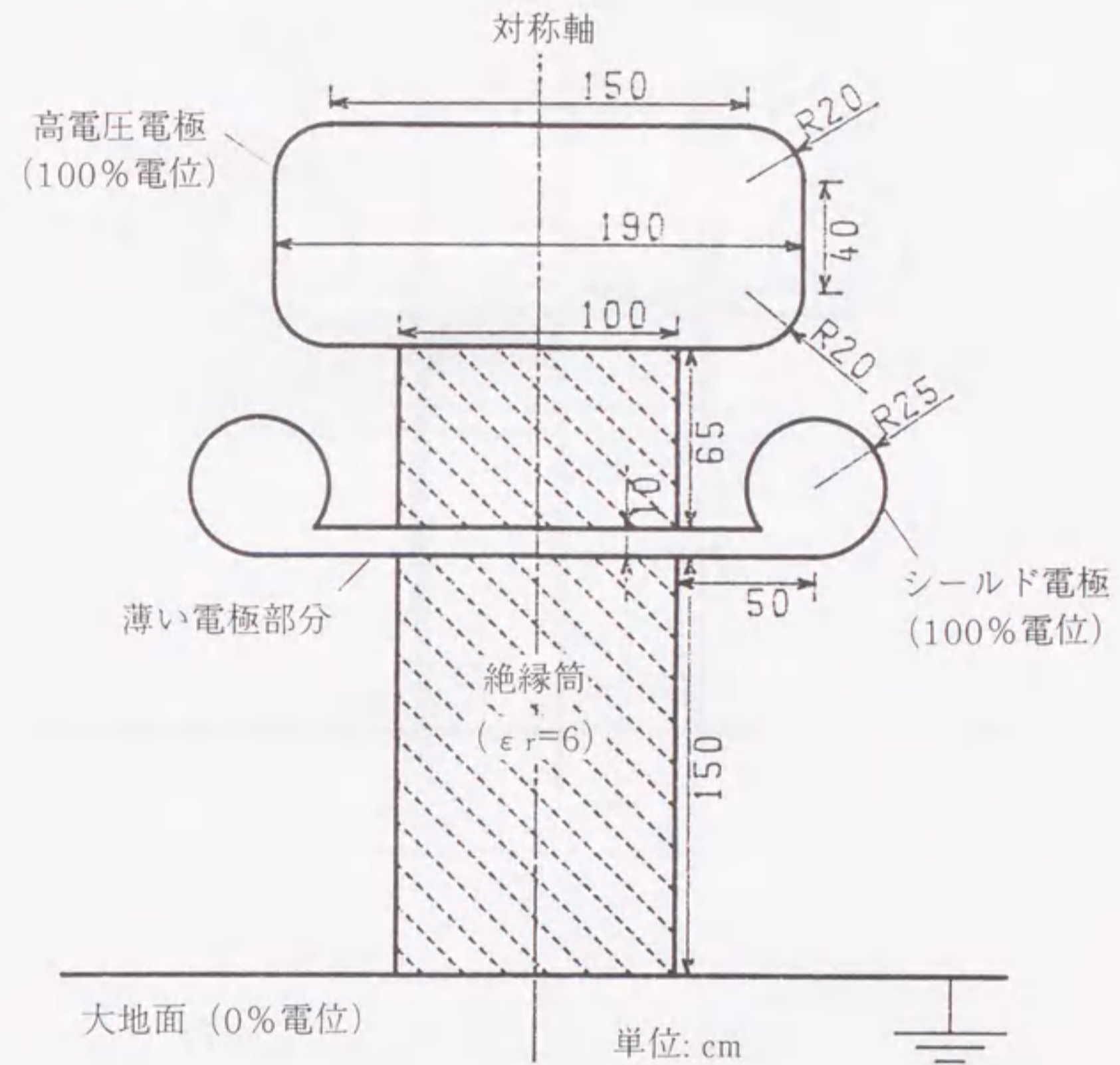
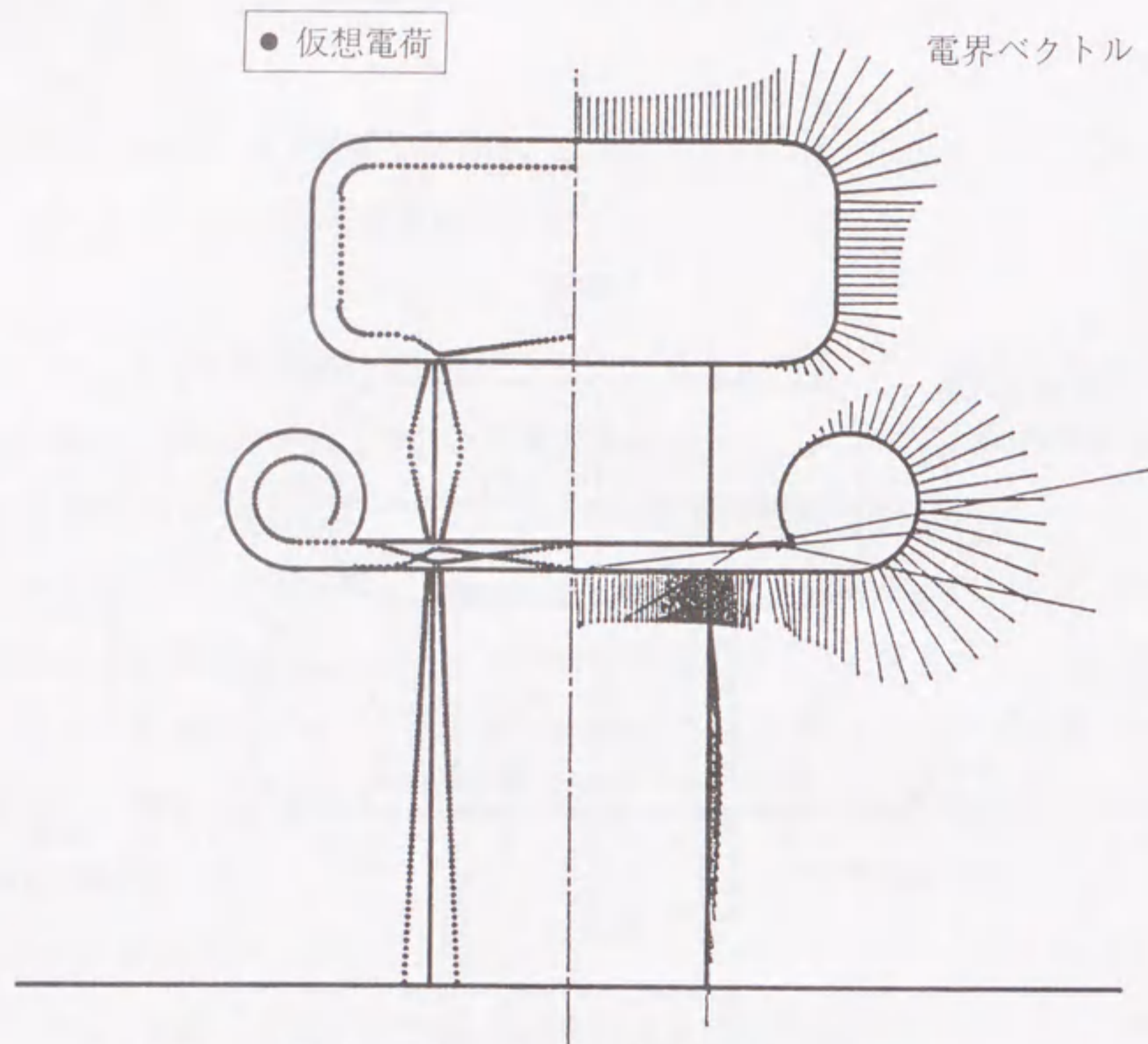
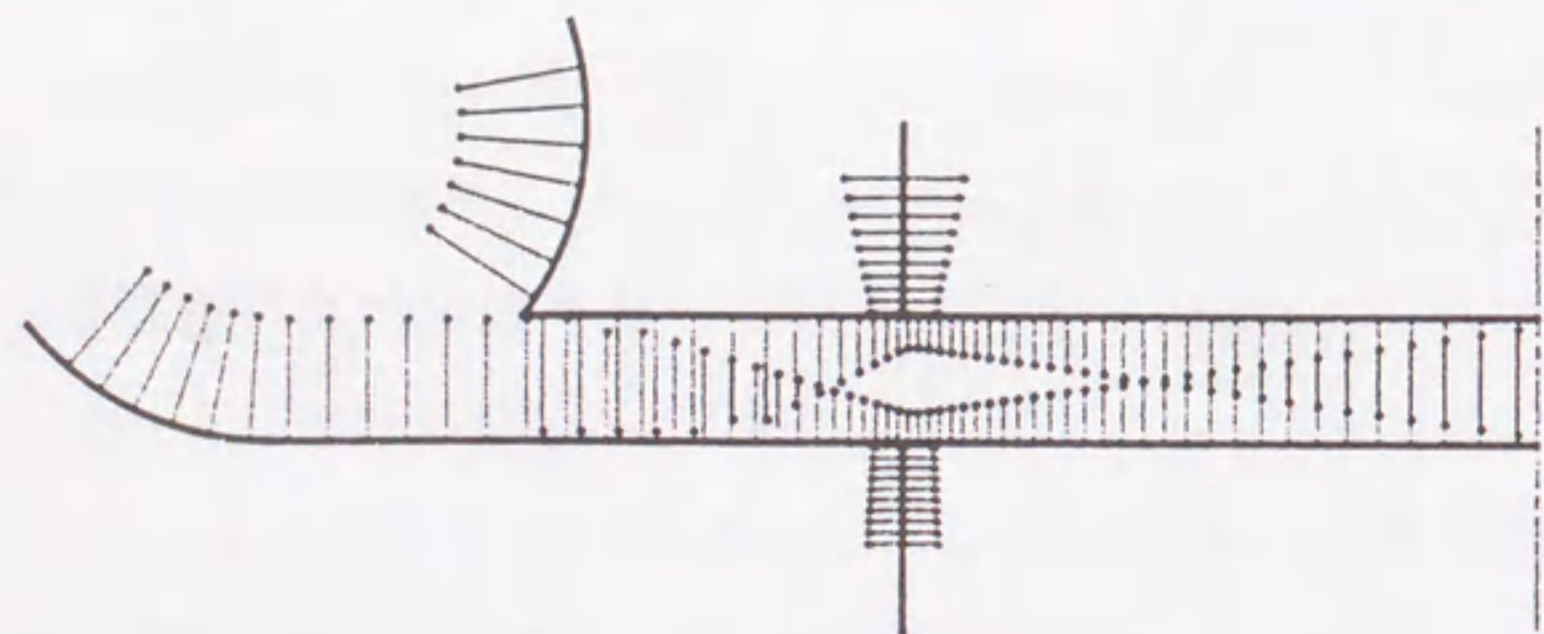


図2.12 解析対象図面  
(絶縁筒に支えられたシールド電極付高電圧電極)



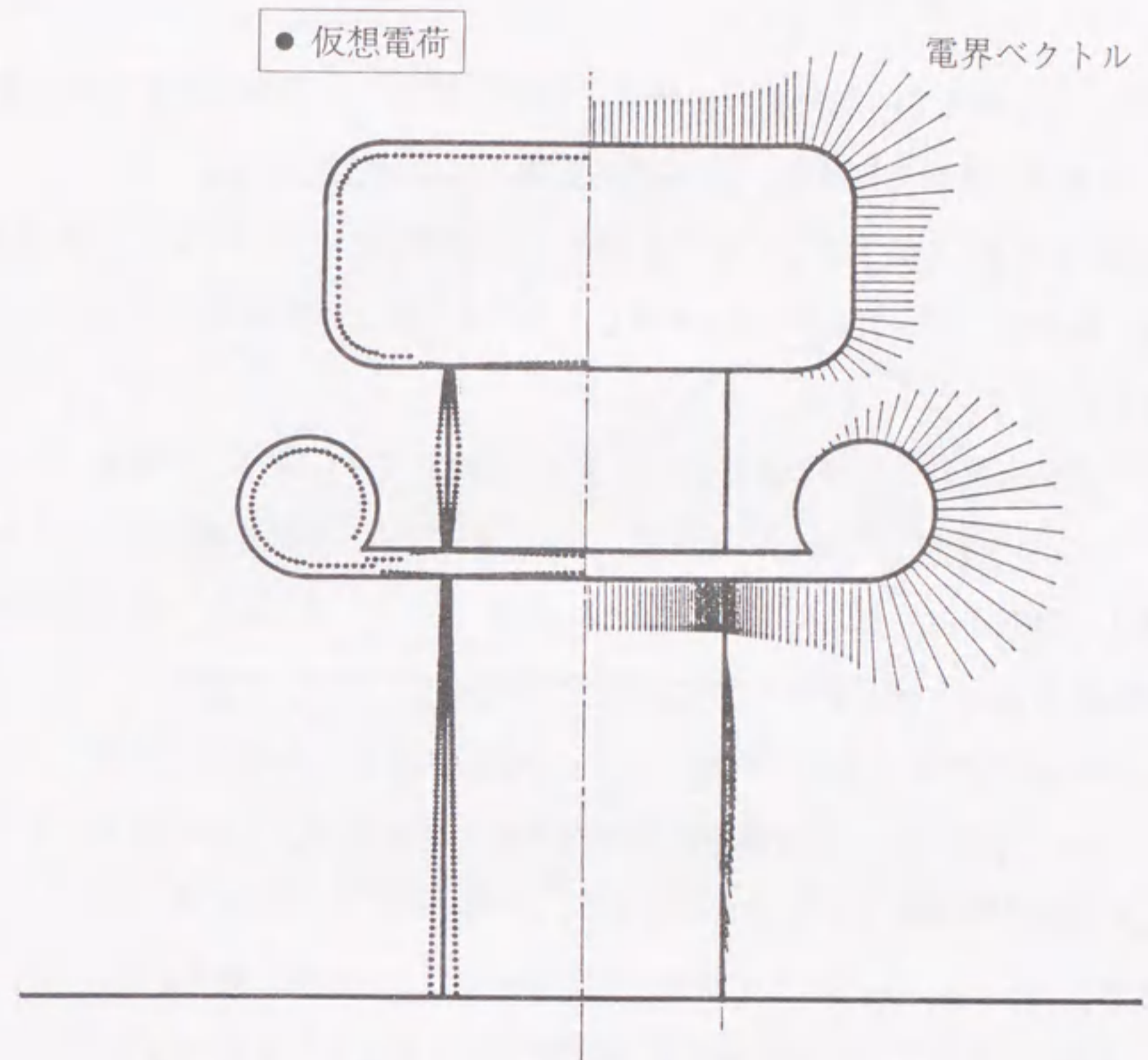


(a) 電界ベクトル図および仮想電荷配置図

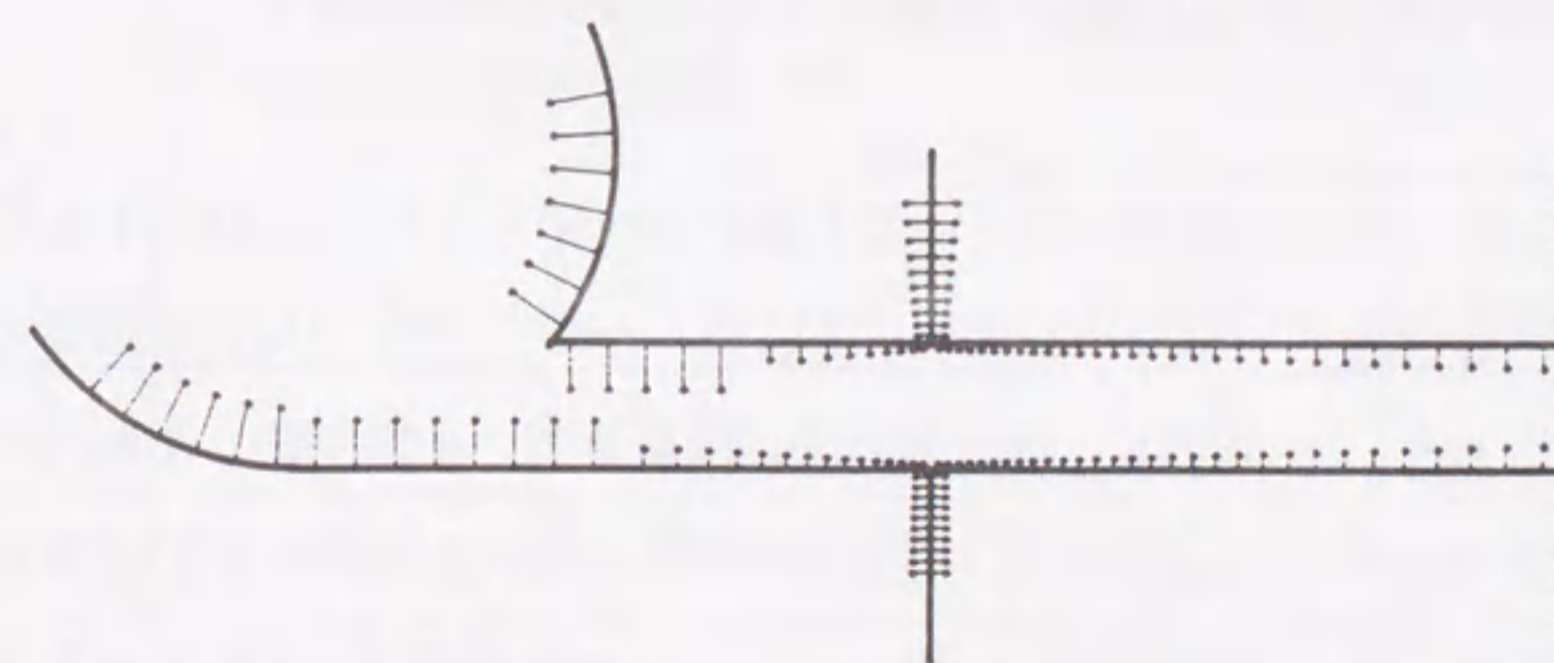


(b) 薄い電極部分における仮想電荷配置図

図2.13 仮想電荷配置ルールA～Eのみを適用した場合の電界解析結果



(a) 電界ベクトル図および仮想電荷配置図



(b) 薄い電極部分における仮想電荷配置図

図2.14 仮想電荷配置ルールA～Hのすべてを適用した場合の電界解析結果



$$\delta e = \left| \frac{E_t}{E_n} \right| \times 100 \quad (\%) \quad (2.2)$$

ただし、 $\phi_m$ : 隣り合う輪郭点の中間点における電位、 $\phi$ : 電極に与えられた電位、 $E_t$ : 電界の接線方向成分、 $E_n$ : 電界の法線方向成分である。

#1および#2の各要素について、隣り合う輪郭点の中間点において $\delta p$ の値を、輪郭点において $\delta e$ の値を計算し、その最大値と平均値を求めた。これを表2.4に示す。

この表から次のことがわかる。ルールA~Hのすべてを適用した場合、ルールA~Eのみを適用した場合に比べて、 $\delta p$ 、 $\delta e$ とも1~2桁程度低減し、ルール導入の効果がみられる。また、特に $\delta e$ に関しては、次のような明らかな差異がみられることがわかる。

ルールA~Eのみを適用した場合、 $\delta e$ の値は、最大20%程度である。このことから、電界ベクトルは電極面に垂直となっておらず、この場合明らかに正しい解析が行われていないといえる。

一方、ルールA~Hのすべてを適用した場合は、 $\delta e$ の値は最大1%以下である。このことから、この場合解析結果は正しいとみなすことができる。

## 2.7 実用高電圧機器図面を対象とした自動電界解析

本節では、上述した各開発項目の導入効果を検証するため、CADEFを用いて実用のCAD図面から電界の自動解析を実行した<sup>[6,7]</sup>。ここでは、実機器の一例として、図2.16に示すような実用のCAD図面を用いて、上述した知的化の導入効果を検証した。図2.16は、絶縁筒耐電圧試験装置のCAD図面であり、図2.4と同一のものである。この図面に対して領域自動認識を実行した例を示す。

前段階として、図形データ抽出プログラムによって、電極・誘電体形状を

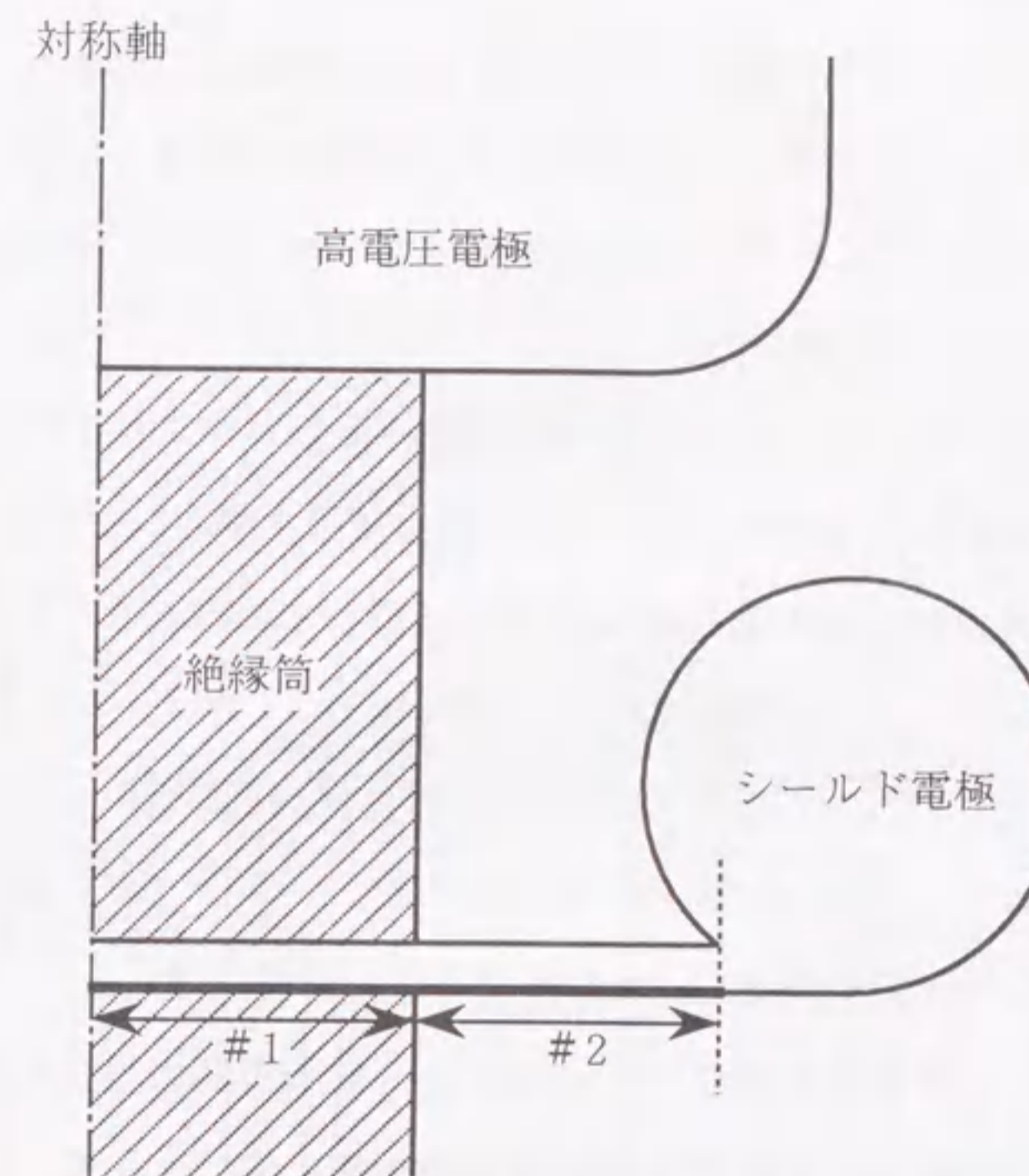


図2.15 計算誤差の定量的評価を行った部分

表2.4 薄い電極部分における電位及び電界誤差

境界要素の 番号		隣り合う輪郭点の中間の点における電位誤差 $\delta p$ (%)		輪郭点における電界ベクトルの角度誤差 $\delta e$ (%)	
		ルールA~Eのみ適用	ルールA~Hの全て適用	ルールA~Eのみ適用	ルールA~Hの全て適用
#1	最大値	0.084	0.014	1.601	0.785
	平均値	0.010	0.008	0.155	0.141
#2	最大値	0.171	0.021	20.152	0.551
	平均値	0.029	0.010	4.883	0.122



図2.17のように抽出した。また、領域代表点を同図のように与えた。

以降はプログラムによる自動処理である。まず、抽出した図面全体が仮想枠で囲まれ、さらにどの要素にも接していない単独点が延長される。その結果、図2.18が得られた。ここで、高電圧電極部分を拡大して、その要素番号を調べた結果が図2.19である。

その後、Walk-around法により、領域が自動認識された。図2.19に拡大して示した高電圧電極部（領域番号1）の領域認識結果を表2.5に示す。この表から、21個の境界要素からなる複雑な領域も、正しく認識されていることがわかる。

また、領域代表点の入力に必要な時間は全体で1分程度であり、境界種類の指定に必要な時間の約20%に短縮可能となった。このように、境界種類に関する作業者の入力負担を軽減し、入力時間の短縮を可能とした。

次に、上述した仮想電荷配置ルールに基づき、仮想電荷の自動配置を行った。仮想電荷の自動配置により得られた電界解析用入力データを用いて、電荷重畳法により電界解析を行った。図2.20にその解析結果を示す。同図において、対称軸の左側が仮想電荷配置、右側が電界ベクトル図である。また、図2.21に、空間中の電位分布を等電位面で示す。

図2.20からわかるように、このような複雑な図面に対しても適切に仮想電荷が配置されていることがわかる。また、電界ベクトルは、電極に垂直に向いている。以上から、CADEFにより正しい解析が行われていると結論できる。この解析において、仮想電荷の初期値は500個であった。最終的には、主にルールGの繰り返し適用によって、仮想電荷は794個となった。全解析所要時間は約45分であった。

このように、実用のCAD図面を利用して自動電界計算を行うシステムを構築することができ、実用の電力機器の自動電界解析が可能であることが検証された。

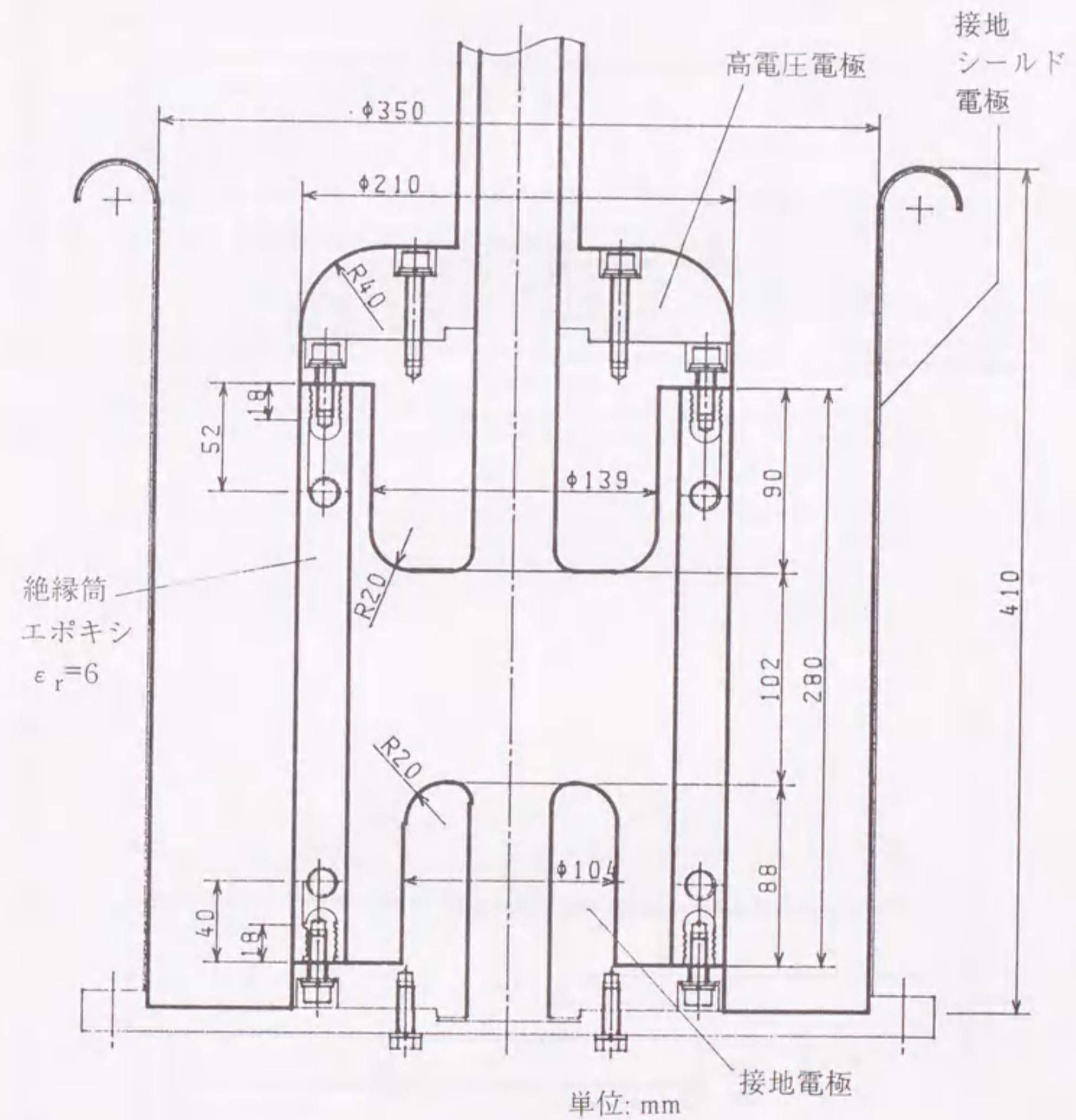


図2.16 絶縁筒耐電圧試験装置のCAD図面



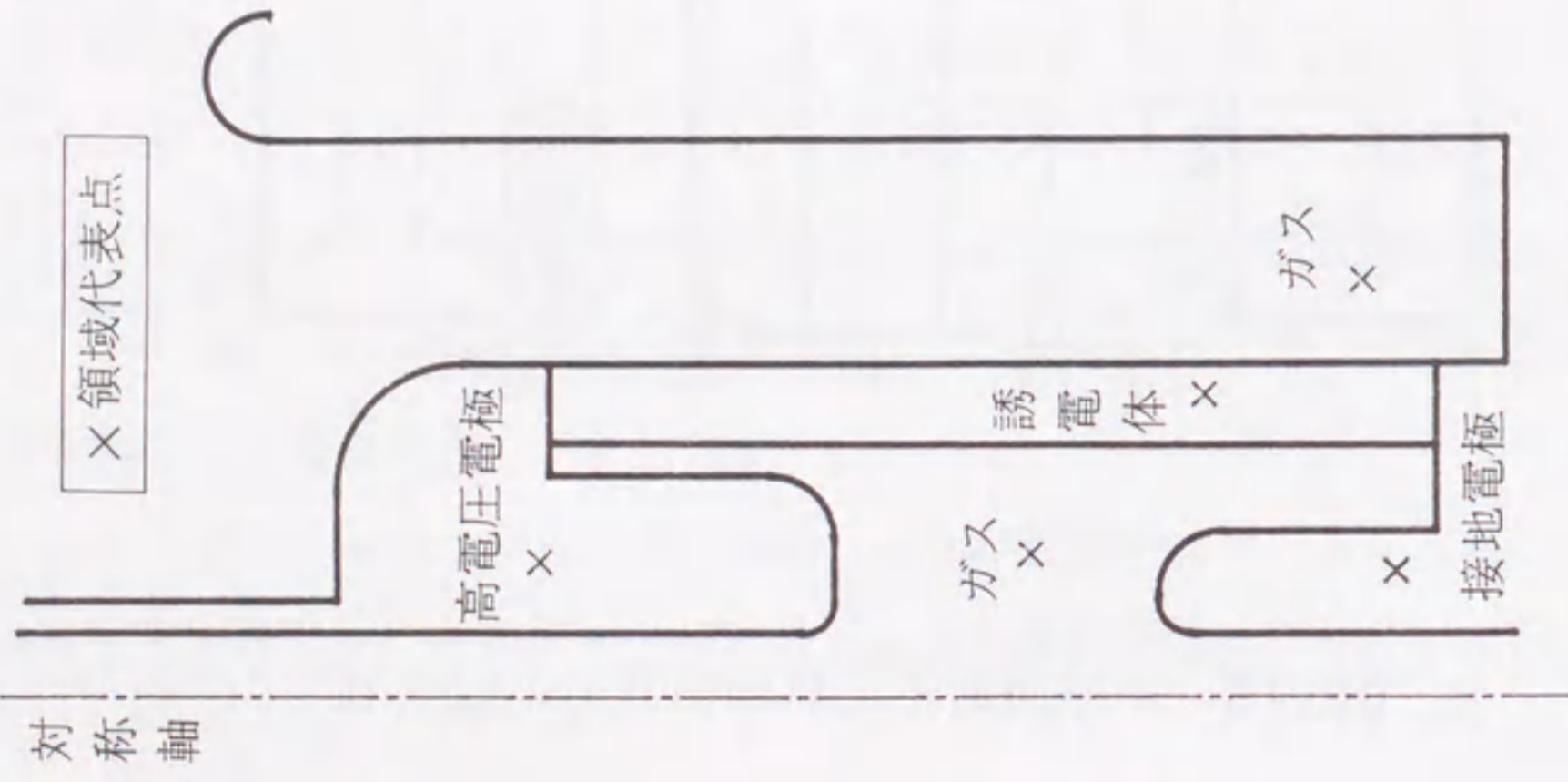


図2.17 CAD図面より抽出された解析対象

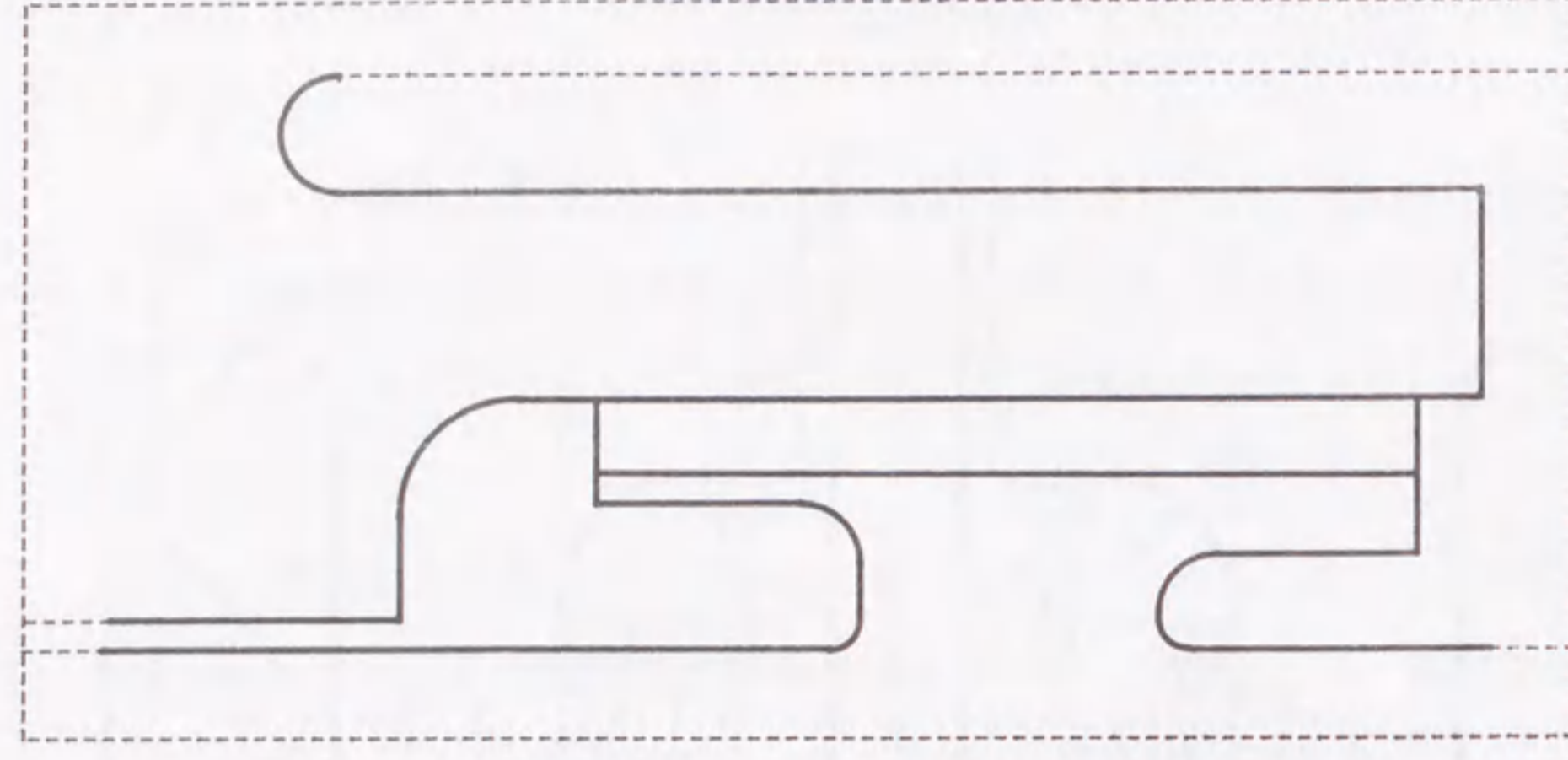


図2.18 領域認識のための前処理

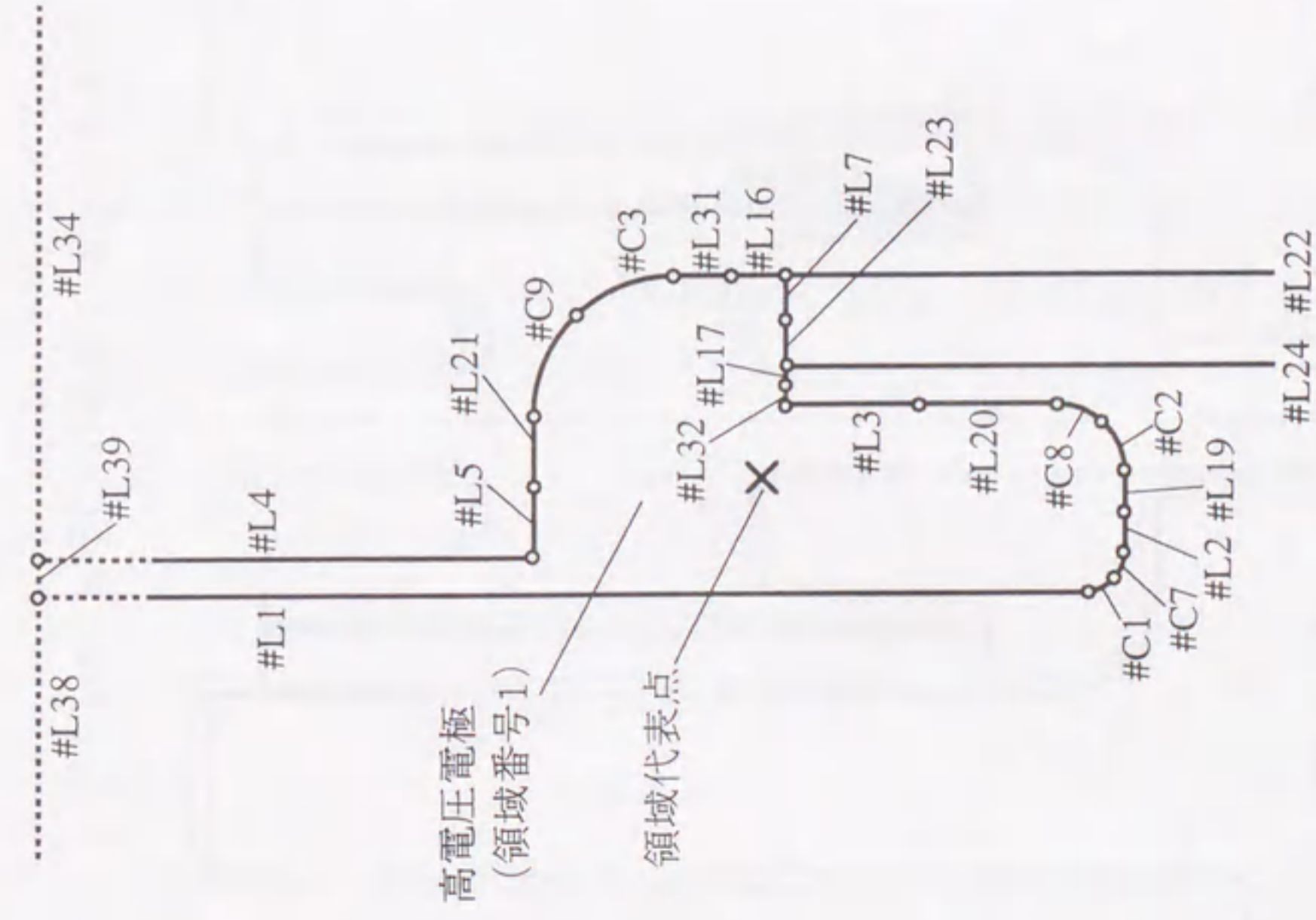


図2.19 高電圧電極部分の要素番号

表2.5 領域自動認識結果

Region #	1	start.
1st boundary element	2#	16
2nd boundary element	2#	31
3rd boundary element	1#	3
4th boundary element	1#	9
5th boundary element	2#	21
6th boundary element	2#	5
7th boundary element	2#	4
8th boundary element	2#	39
9th boundary element	2#	1
10th boundary element	1#	1
11th boundary element	1#	7
12th boundary element	2#	2
13th boundary element	2#	19
14th boundary element	1#	2
15th boundary element	1#	8
16th boundary element	2#	20
17th boundary element	2#	3
18th boundary element	2#	32
19th boundary element	2#	17
20th boundary element	2#	23
21st boundary element	2#	7
region # 1 recognition ended		

- ・ #の前の数字が1：円弧を表す  
2：線分を表す
- ・ #の後の数字は要素番号

(例えば, 1st boundary elementの2#16は, 図2.19中の#L16に対応する.)



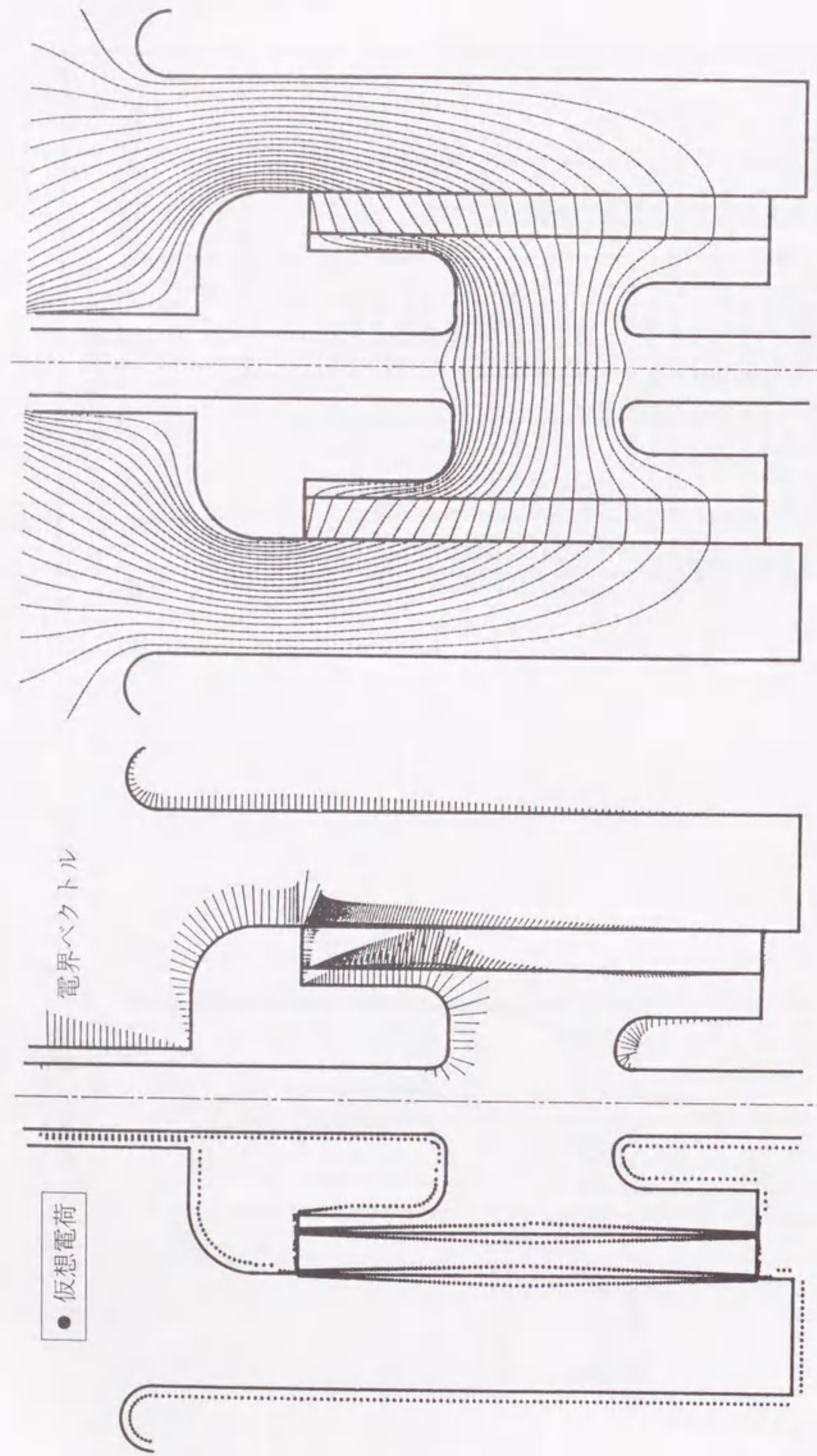


図2.20 実用CAD図面の電界解析結果

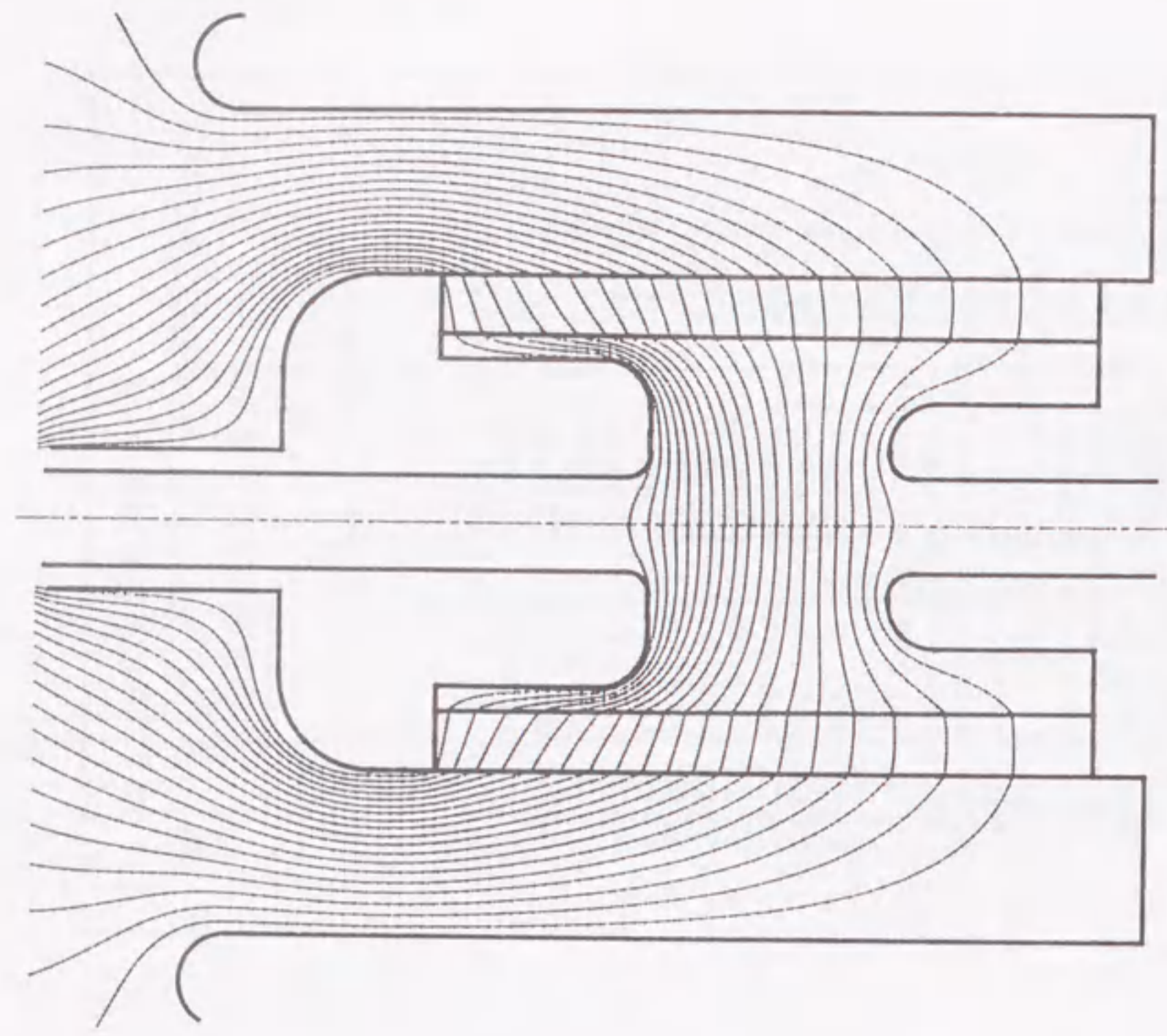


図2.21 絶縁筒およびギャップ中の電位分布

## 2.8 まとめ

電力機器を対象とした絶縁設計支援システムCADEFの開発にあたり、本章においては、次に挙げる技術開発を行った。

- (1) CADEFにおいて必要なハードウェア・ソフトウェアの選定を行った。
- (2) CADと電界解析の基本的結合を行い、CAD内部の機器形状データを電界解析のための入力データとして利用可能とした。
- (3) 電界解析に必要な領域に関するデータをCADデータから自動生成するための領域自動認識法を開発し、その計算処理の手順について述べた。
- (4) 専門家に対するインタビューなどに基づき仮想電荷配置ルールをまとめ、CADEFに導入した。これにより、専門家の有する経験的要素のいくつかをシステムに組み入れ、CADEFの知的化を行った。
- (5) 最後に、これらの導入効果を検証するために、実用のCAD図面を用いて電界解析の自動計算を行った。その結果、電界解析に必要な機器形状データ入力の大幅な省力化、および電界解析の専門家と同等の高い精度で実用機器の自動電界解析が可能であることを確認した。



## 第2章の文献

- [1] 河野, 宅間: 「数値電界計算法」, pp.38-81 (1980), コロナ社
- [2] N.H.Malik: "A Review of the Charge Simulation Method and its Application", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.24 No.1, pp.3-20, 1989
- [3] 村島: 「代用電荷法とその応用」, pp.115-126 (1983), 森北出版
- [4] 日経CG編著: 「新CADの基礎知識」, pp.162-498 (1996), 日経BP社
- [5] 大久保: 「最近の電界解析とCAE技術の展開」, 電気学会論文誌B, Vol.111, No10, pp.1036-1039, 1991
- [6] H.Okubo, H.Maehara, K.Kato, M.Hikita, Y.Kito: "Electric Field Calculation Combined with a CAD System for the Personal Computer", European Trans. on Electrical Power Engineering, Vol.3, No.3, pp.227-233, 1993.
- [7] 大久保, 加藤, 大塚, 早川, 匹田: 「CADを用いた高電圧機器の電界解析」, 第6回電磁界数値解析に関するセミナー講演論文集, pp.13-27, 1995
- [8] H.Okubo, K.Kato, N.Hayakawa, M.Hikita: "The PC-CAD System Combined with the Electric Field Analysis", The 3rd World Congress on Computational Mechanics, No.D1-5, 1994.
- [9] 加藤, 匹田, 大久保, 鬼頭: 「CADを用いた自動電界解析システムの開発」, 平成4年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.298, 1992

## 第3章 パソコンによる電界最適化 自動計算技術の開発

### 3.1 まえがき

電力機器の絶縁設計に電界最適化技術を導入することにより, 最適な機器形状を計算機によって自動的に, かつ高い精度で求めることが可能となる. このように最適な電界分布を持つ電極形状を求めることは, 電界空間の有効利用という観点から, 機器の縮小化および信頼性向上に極めて有用である. そのためには, 従来の電界最適化における課題となっている計算効率を一層高め, また汎用化という観点から, パソコンによる電界最適化自動計算を可能とする必要がある. さらに, 従来の電界最適化においては, 形状修正に関する制約が大きく, 従って実機器への適用という観点から形状修正の自由度の大きい手法の開発が求められている.

本章においては, パソコンを用いた電界最適化自動計算技術の開発について述べる. はじめに, CADEFにおける電界最適化の定義を示す. 次に, 今回開発を行った電界最適化技術のベースとなったMetzの方法の原理により, 電界最適化において必要になる連立一次方程式の繰り返し計算を高速に行うことができることを定量的に示す. さらに, ここで開発した手法により, 従来の電界最適化手法よりも形状修正の自由度を向上させた計算結果をまとめる. 最後に, 実機器規模の電界最適化計算がパソコンを用いて可能であることを, 計算事例を用いて確認する.

### 3.2 CADEFにおける電界最適化の定義

一般に, 絶縁上最適な電極形状とは何かを一意に定義するのは難しい. 絶縁媒質の種類・印加電圧の種類・電極材料などによって絶縁特性が異なるた



めである。しかし、ここでは、その前段階として、まず電界を対象とし、電界最適化計算における最適な電極形状を、「電極表面における電界が最小かつ一様となるような分布を有する形状」と定義する。この定義は、電界依存性の強い絶縁特性をもつSF<sub>6</sub>ガスを媒質として用いた絶縁設計には特に有用である。また、それ以外の絶縁媒質を用いた場合でも、電極面上の最大電界を低減させることが、絶縁性能の向上に重要である。以上のことから、次節以降で、上の定義に基づいた電界最適化技術の開発を行っていく。

### 3.3 CADEFにおける電界最適化自動計算技術の開発

#### <3.3.1> Metzの電界最適化手法の基本原則

Metz法は、電荷重畳法をベースとしており、電極内部に配置された仮想電荷群が生成する等電位面が、電極面と等価であることを利用して、電界最適化を行う<sup>1)</sup>。すなわち、形状修正を行いたい部分の仮想電荷の位置および大きさを変化させ、これにともない生じる等電位面形状の変化を電極形状の変化とみなす。実際の計算手順を図3.1を用いて以下に示す。

まず、電極領域全体を、形状修正を行わない部分（以下、これを固定電極領域と呼ぶ）と、形状修正を行う部分（以下、これを最適化領域と呼ぶ）に分ける。例えば、図3.1の高電圧棒電極先端形状の電界最適化の場合には、棒電極先端のみが最適化領域であり、棒電極のうち先端部分を除いた領域と接地容器が固定電極領域となる。固定電極領域においては、通常の電荷重畳法と同様に輪郭点を配置する。一方、最適化領域においては、最適化電荷と呼ばれる仮想電荷のみを与えて輪郭点を配置しない。従って、輪郭点での電位境界条件は、固定電極領域においてのみ成立する。この時、次式が成立する。

$$[P_{ij}][Q_j] + [P'_{ij}][Q'_j] = [\phi_i] \quad (3.1)$$

ただし、 $[P_{ij}]$ : 固定電極電荷に対する電位係数行列、 $[P'_{ij}]$ : 最適化電荷に対する電位係数行列、 $[Q_j]$ : 固定電極電荷、 $[Q'_j]$ : 最適化電荷、 $[\phi_i]$ : 電極電位、である。形状修正を行う場合には、最適化領域に配置された電荷 $[Q'_j]$ の位置および大きさを変化させる。そのたびに、固定電極領域における電位境界条件を満足する必要がある。すなわち、形状修正ごとに、次式から固定電極電荷 $[Q_j]$ の値を求める。

$$[Q_j] = [P_{ij}]^{-1} \{ [\phi_i] - [P'_{ij}][Q'_j] \} = [P_{ij}]^{-1} [\phi'_i] \quad (3.2)$$

ただし、 $[\phi'_i]$ を次のようにおいた。

$$[\phi'_i] = [\phi_i] - [P'_{ij}][Q'_j] \quad (3.3)$$

ここで、固定電極領域においては、その輪郭点および仮想電荷の位置が不変であることから、電位係数行列 $[P_{ij}]$ は形状修正を行っても変化しない。従って、膨大な量の電位係数行列の逆行列の計算は一回のみでよいことから、高速計算が可能である<sup>1),2)</sup>。以上がMetzの方法の基本原則であり、高速計算可能であることが最大の長所である。このように、高速計算可能なMetzの方法は、パソコンを用いた電界最適化というCADEFの目的に適合する。

しかし、実際に形状修正を行う場合に、最適化電荷の位置・大きさを決定するためには経験を要する。また、高電圧電極面を内側へ移動させた場合には、電極面と電荷が接近し、解析精度の低下につながることもあり得る<sup>3)</sup>。このような理由から、Metzの方法を用いた電界最適化においては、形状修正のたびに電極面は外側のみ移動し、内側へ移動させることはできない。このように、電極形状修正において電極面の移動方向が外側一方向のみに限定されてしまうことが、Metzの方法の短所である。

このような問題点を解決するため、新しいアルゴリズムを考案した。この







とができる。

### (c) 追加する最適化電荷の大きさの決定

(a)で電荷を与えた点における電界がすべて(b)で定めた電界目標値になるように、追加電荷の大きさを決定する。例えば、図3.2において、電荷 $Q'_j$ が点 $i'$ に誘起する電界を $dE'_{ij}$ とする。このうち、実効的に点 $i'$ に誘起する電界強度は $dE'_{ij}\cos X'_{ij}$ となる。電荷追加前の $i'$ 番目の点における電界を $E'_i$ 、電界目標値を $E_{\text{target}}$ 、電荷 $Q'_j$ と点 $i'$ 間の電界係数を $F'_{ij}$ とすると、次の関係式

$$[E'_i] + [F'_{ef\ ij}] [Q'_j] = E_{\text{target}} [I_i] \quad (3.4)$$

ただし、

$$[I_i] = [1, 1, \dots, 1]^t \quad (3.5)$$

$$F'_{ef\ ij} = F'_{ij} \cos X'_{ij} \quad (3.6)$$

が成り立つ。これを解くことによって全ての追加電荷の大きさを求めることができる。

### <3.3.3> 電荷再配置

前項において追加する最適化電荷の大きさを求めることができた。ここで、最適化電荷として負の電荷が用いられた場合について考える。最適化電荷として負の電荷を用いた場合には、電荷追加によって電極面が最適化電荷に接近する方向に移動する。場合によっては、最適化電荷と電極面が接近しすぎて、電極面上の点と電荷との相互作用により、解析精度の悪化を生じる<sup>[3]</sup>。このような理由により、電極面を内側へ移動させる場合には、必要に応じて図3.3(a)のように最適化電荷の配置を適切なものに修正するアルゴリズム（以

下、これを電荷再配置と呼ぶ）の開発が必要になる。この電荷再配置の過程においては、電極形状を変更することなく、最適化電荷の配置だけを修正する必要がある（以下、このようにして修正された最適化電荷を再配置電荷と呼ぶ）。そのアルゴリズムを以下に示す<sup>[4-6]</sup>。

- (1) 求められた等電位面上にいくつかの点  $R'_1, \dots, R'_n$  を等間隔に設定し、それに対応して再配置電荷  $Q'_{r1}, \dots, Q'_m$  を配置する。
- (2) 再配置電荷  $Q'_{r1}, \dots, Q'_m$  の大きさは、点  $R'_1, \dots, R'_n$  における電位境界条件から得られる。

以上のアルゴリズムにより、電極形状を保ったままその内部の電荷配置のみを適切なものに修正する電荷再配置が可能となる。

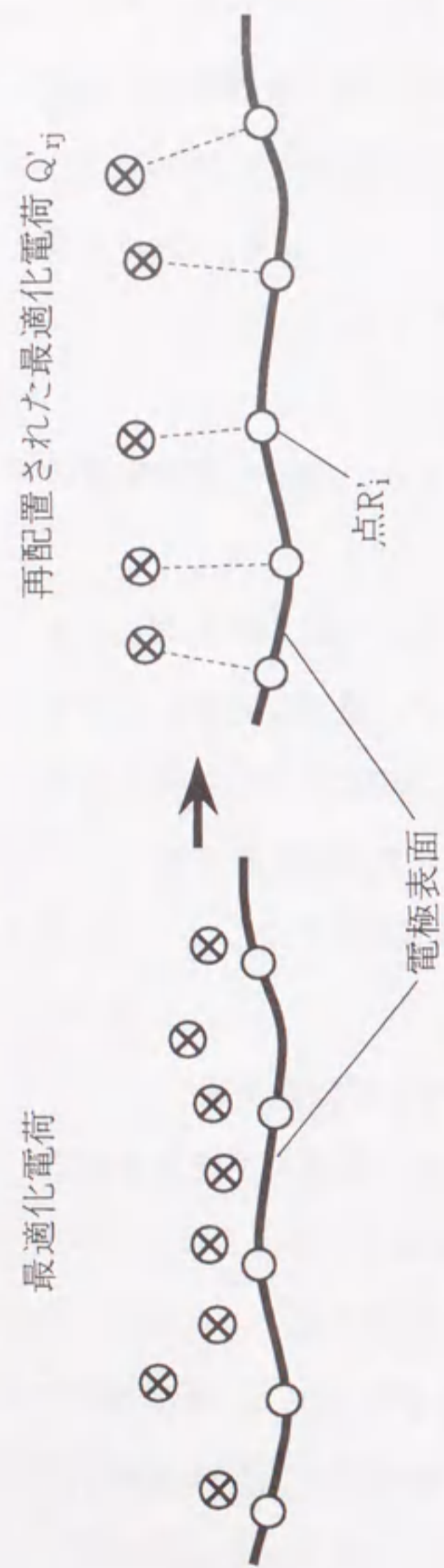
また、この電荷再配置を次のように利用することによって、繰り返し計算の高速化も可能となる。これは、図3.3(b)に示すように、最適化過程において電極内部に追加された最適化電荷の個数が必要以上に多くなってしまった場合である。これをより少ない電荷で置き換えることが電荷再配置アルゴリズムによって可能であり、計算を高速化することができる。

### <3.3.4> 形状修正の自由度を拡大した電界最適化手法の計算手順

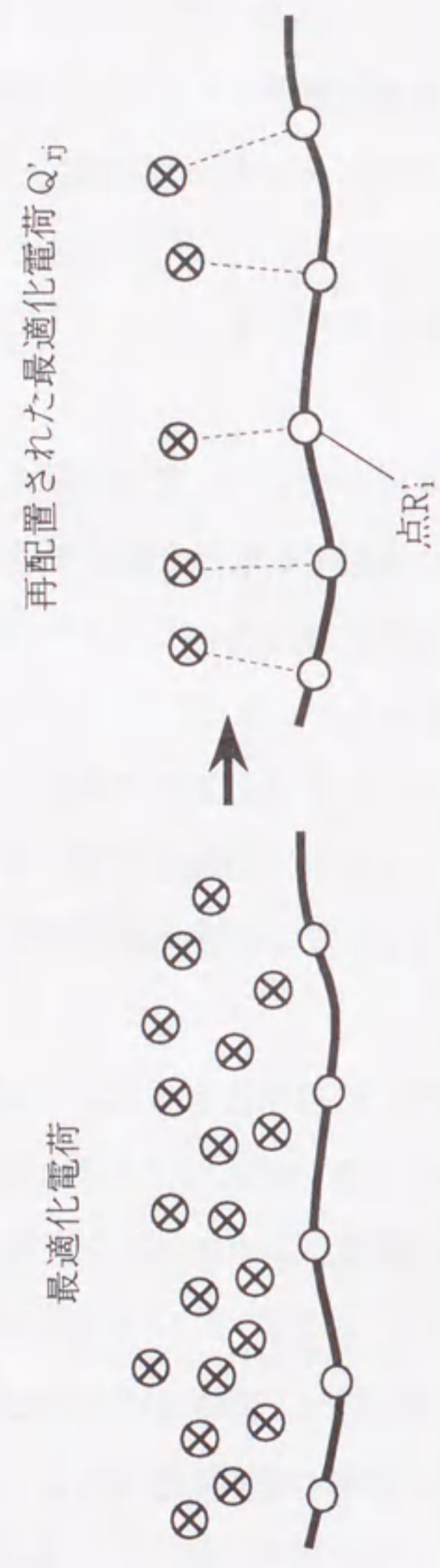
図3.4に、両極性電荷の使用により形状修正の自由度を拡大した電界最適化手法の計算手順を示す。その手順は、以下の通りである。

- (i) 最適化領域において、電極電位を持つ等電位面を計算する。すなわち、最適化領域における電極面を求める。同時に、電極面上の電界分布を求める。
- (ii) <1>最適化電荷と電極面の距離を計算し、電荷と電極面が近づきすぎているかを調べる。また、<2>配置された最適化電荷の個数が多すぎ





(a) 最適化電荷と電極面が接近した場合の電荷再配置



(b) 最適化電荷が必要以上に多数配置された場合の電荷再配置

図3.3 電荷再配置

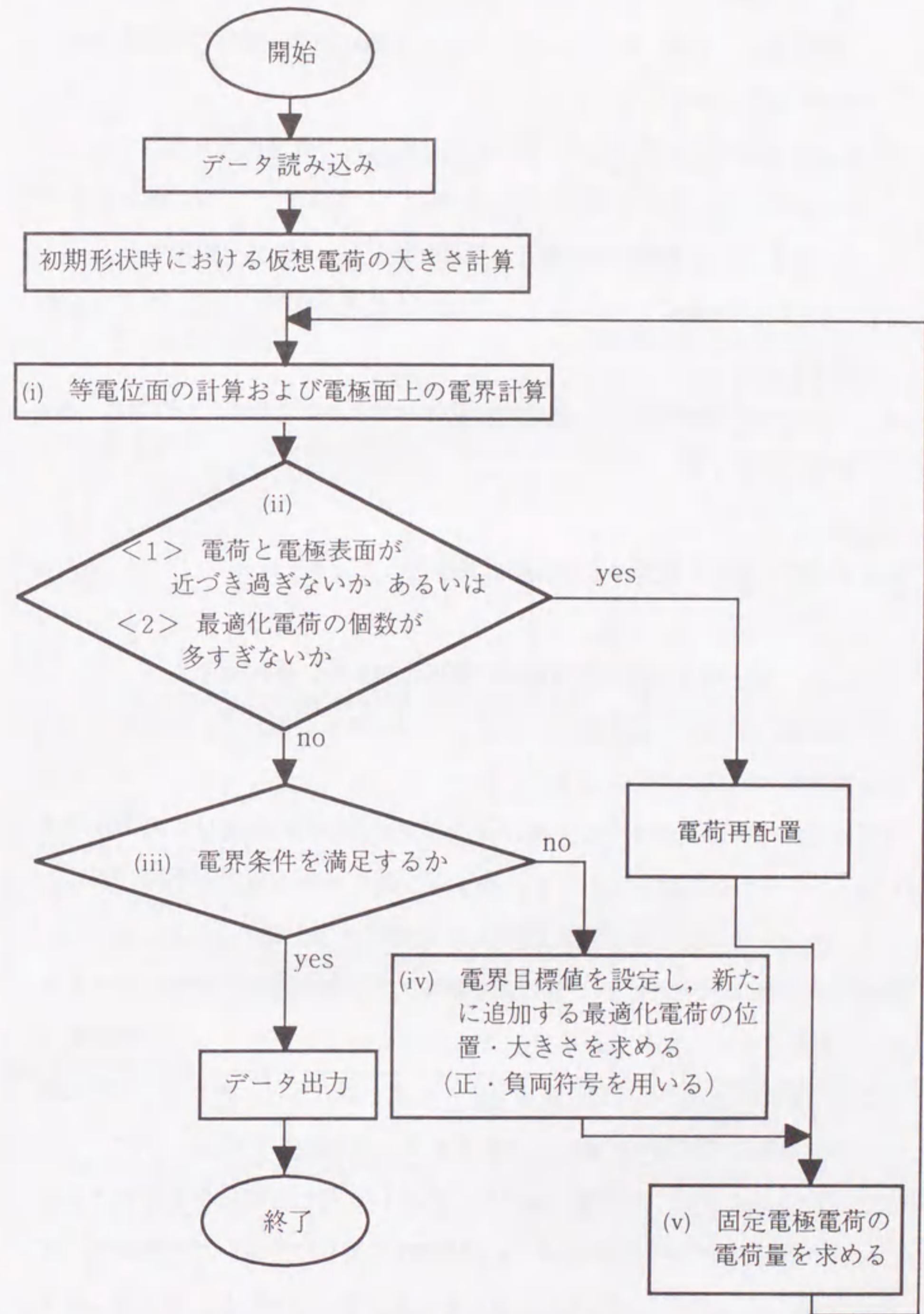


図3.4 正・負両極性の最適化電荷を用いる電界最適化計算の流れ図



ないかを調べる。これらの結果から、電荷再配置を行うべきかどうかの判断を行う。必要であれば、<3.3.3>の手順により、電荷再配置を行い、(v)の処理へ移動する。

(iii) (i)で計算された電界分布が、3.2節で定義された最適条件を満足するかどうかを調べる。条件を満足している場合、計算を終了する。満足していない場合には、電極形状の修正を行うため、(iv)の処理へ移動する。

(iv) <3.3.2>の手順により、新たに追加する最適化電荷の位置・大きさを決定する。

(v) <3.3.1>の手順により、固定電極電荷の大きさを求める。その後、(i)の処理へ移動する。

以上の手順により、電界最適化自動計算を行うことができる。

### <3.3.5> 形状修正回数と計算時間の関係に関する定量的検討

ここでは、上述した電界最適化計算アルゴリズムに関して、形状修正回数と計算時間の関係について定量的に検討する。既に述べたように、本アルゴリズムにおいては、膨大な量の電位係数行列の逆行列の計算は一回のみでよい<sup>7)</sup>。このような性質を利用して、繰り返し連立一次方程式を高速に解くことができる。その方法を、図3.5を例にとり説明する。繰り返しの1回目は、通常のガウスの消去法により方程式を解く。2回目以降は、同図に示すように、1回目で行った計算過程をそのまま利用することができる。この計算方法に基づいて、未知数がn個の連立一次方程式を解く場合、繰り返し回数の増加に伴う計算量の増加を計算によって求めた。その結果を図3.6に示す。この図からわかるように、計算量が繰り返し回数に比例して増加する特性と比較して、計算量の増加割合は6分の1~20分の1と非常に小さい。すなわち、未知数の個数nによらず、繰り返し計算による計算量の増加はほとんど見られないとみなすことができる。このように、本アルゴリズムによって、極めて効

(計算例)

$$\begin{pmatrix} 3 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 3 \\ 3 & 0 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 11 \\ 14 \\ 9 \end{pmatrix} \text{ を解いた後, } \begin{pmatrix} 3 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 3 \\ 3 & 0 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \\ 1 \\ 4 \end{pmatrix} \text{ を解く.}$$

(左辺の係数行列は、変化しない。)

(i) 繰り返しの1回目

(ii) 繰り返しの2回目以降

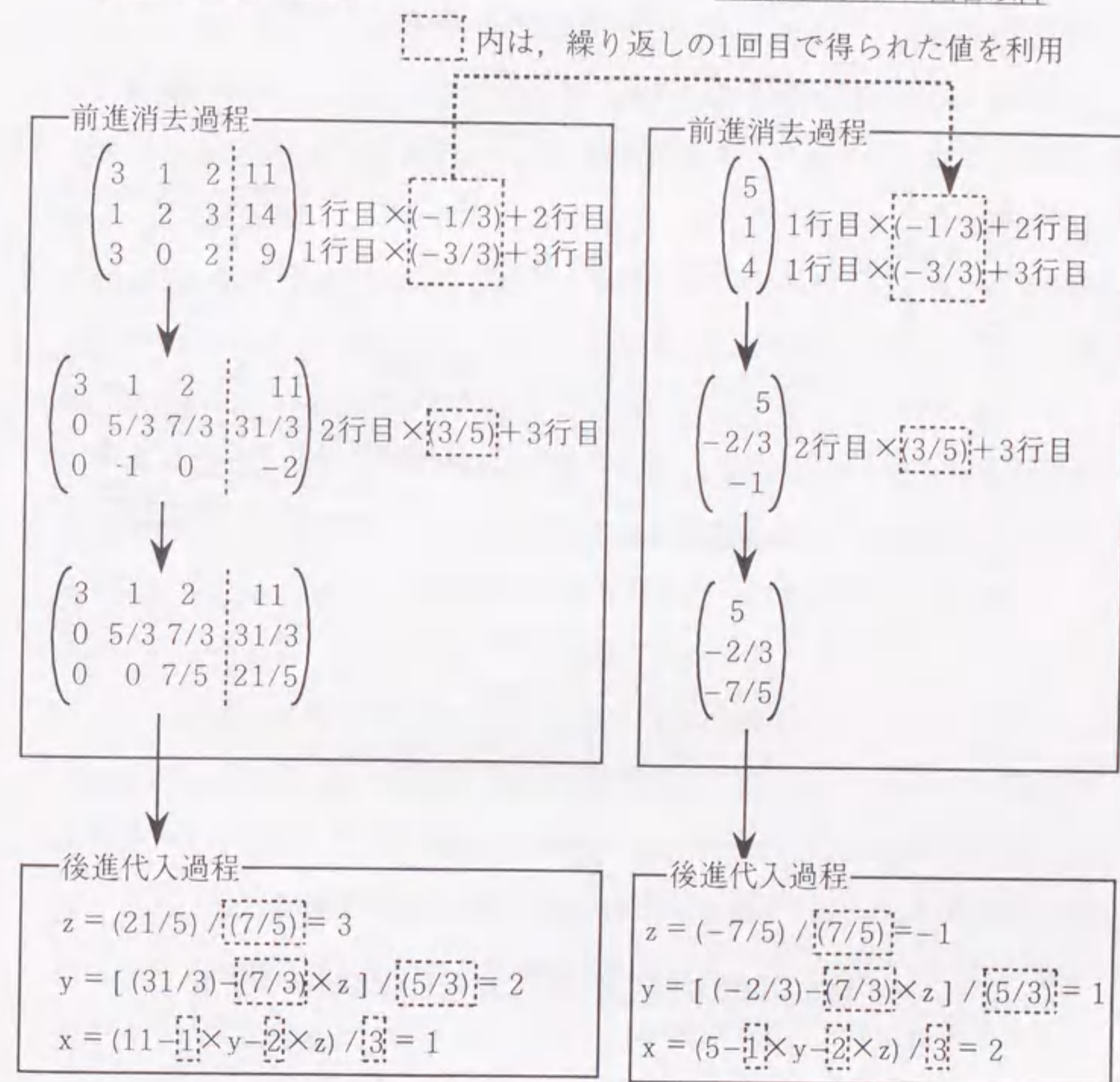


図3.5 繰り返し連立一次方程式を解く方法  
(係数行列が不変の場合)



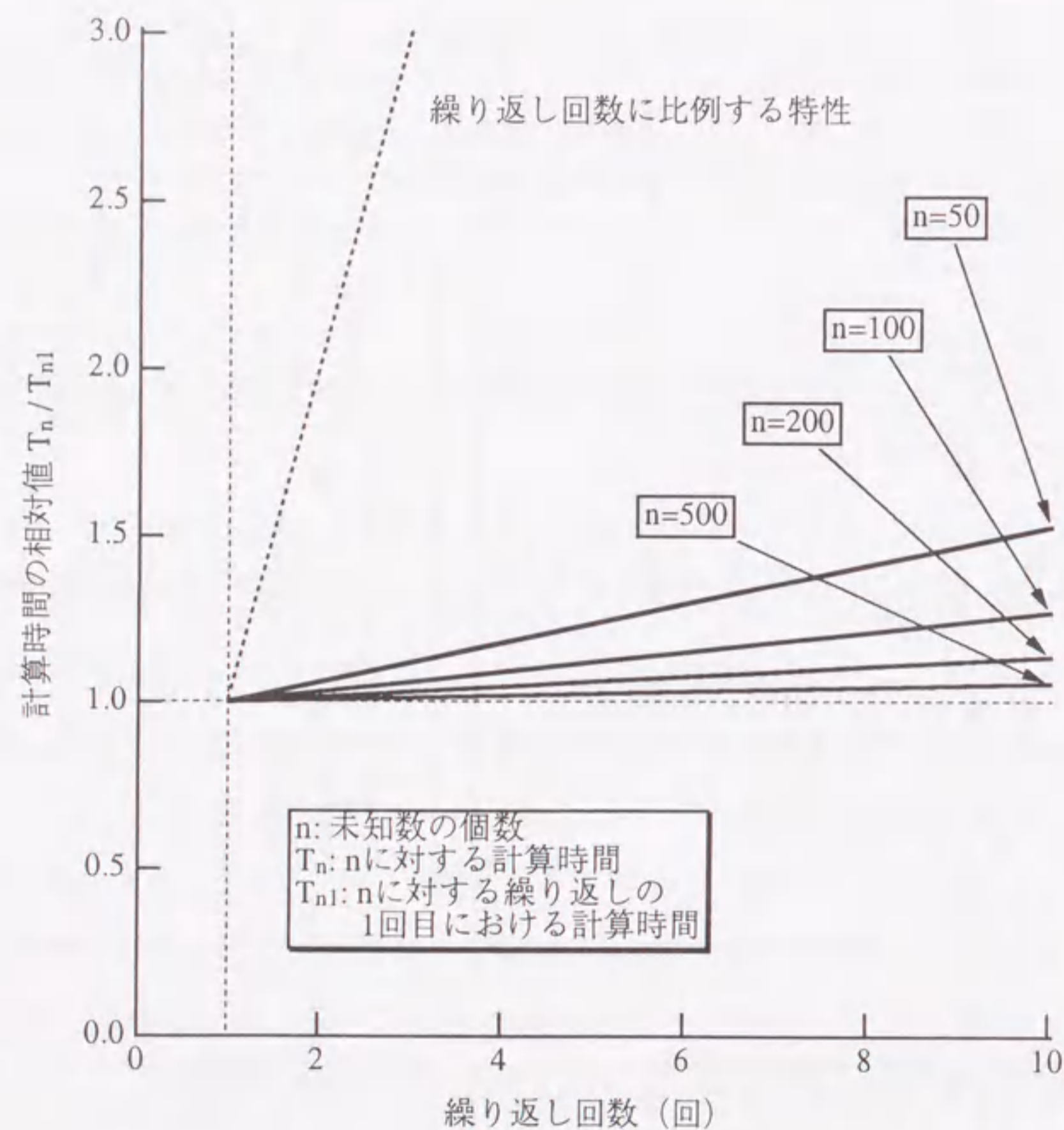


図3.6 繰り返し計算に伴う計算時間の増加

率良く最適化の繰り返し計算が可能であることが確認できた。

### <3.3.6> 初期形状が異なる場合の最適形状

<3.3.4>で示した電界最適化アルゴリズムの有用性について、実用事例を用いた検証を行った<sup>[4]・[6]</sup>。ここでは図3.7に示すように、接地円筒容器内における高電圧棒電極先端の電界最適化を行った。同図に示すように、3つの異なる初期形状を与え、それぞれについて電界最適化計算を行った。なおこの場合、計算に使用した仮想電荷の個数は約100個であった。同図の実線部分が、初期形状A, B, Cに対して最終的に得られた最適形状である。初期形状が大きく異なっているにも関わらず、最適形状として得られた結果は非常に良く一致していることがわかる。このときの初期形状時および最適形状時の電極面上の電界分布を、図3.8に示す。同図からわかるように、あらゆる初期電界分布に対しても最終的に得られた電界分布はほぼ同じであり、かつ一様な分布となっている。

このとき、繰り返し計算によって電極表面上の電界分布が変化する様子を図3.9に示す。この図からもわかるように、ほとんど全ての電極領域において繰り返しが進むにつれて、領域各点の電界強度が一様電界値に近づいており、優れた収束性を示している。

次に、最適化過程で追加された全電荷の分布を図3.10に示す。図からわかるように、正および負の最適化電荷を追加することにより、それぞれ電極面を外側および内側へ移動させることができる。特に、図3.10(b)に示されているように、最適化領域のうち、電極面が内側へ移動する領域に負電荷が、外側へ移動する領域に正電荷が多く配置されている。以上のように、正・負電荷を同時に配置する方法により、初期形状に依存することなく最適形状を求めることが可能となった。

表3.1に、上記の電界最適化計算における形状修正回数、電荷再配置回数および計算時間を示す。この表からわかるように、形状修正を1~2回行うごと



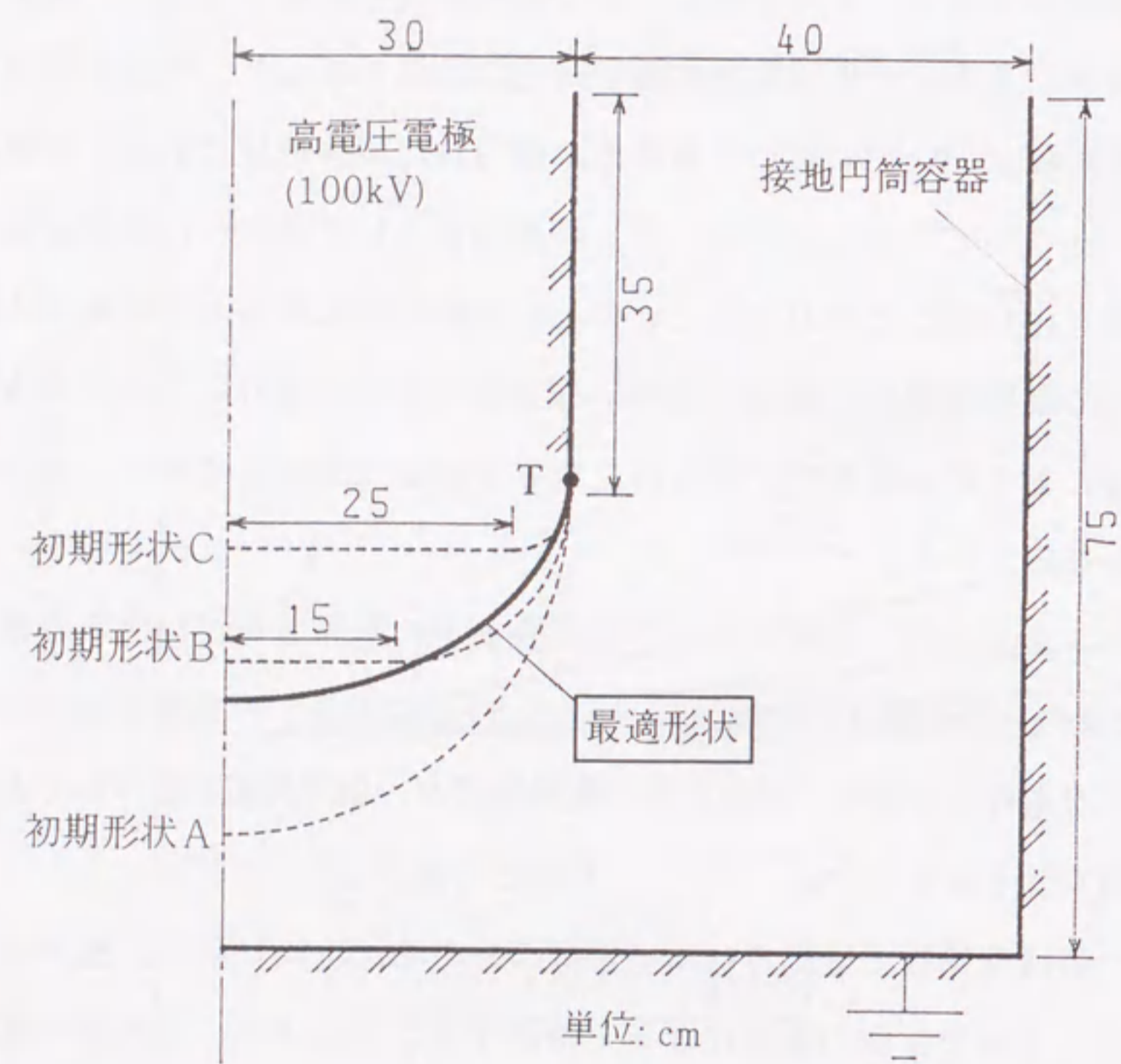


図3.7 3つの異なる初期形状を与えたときの最適形状

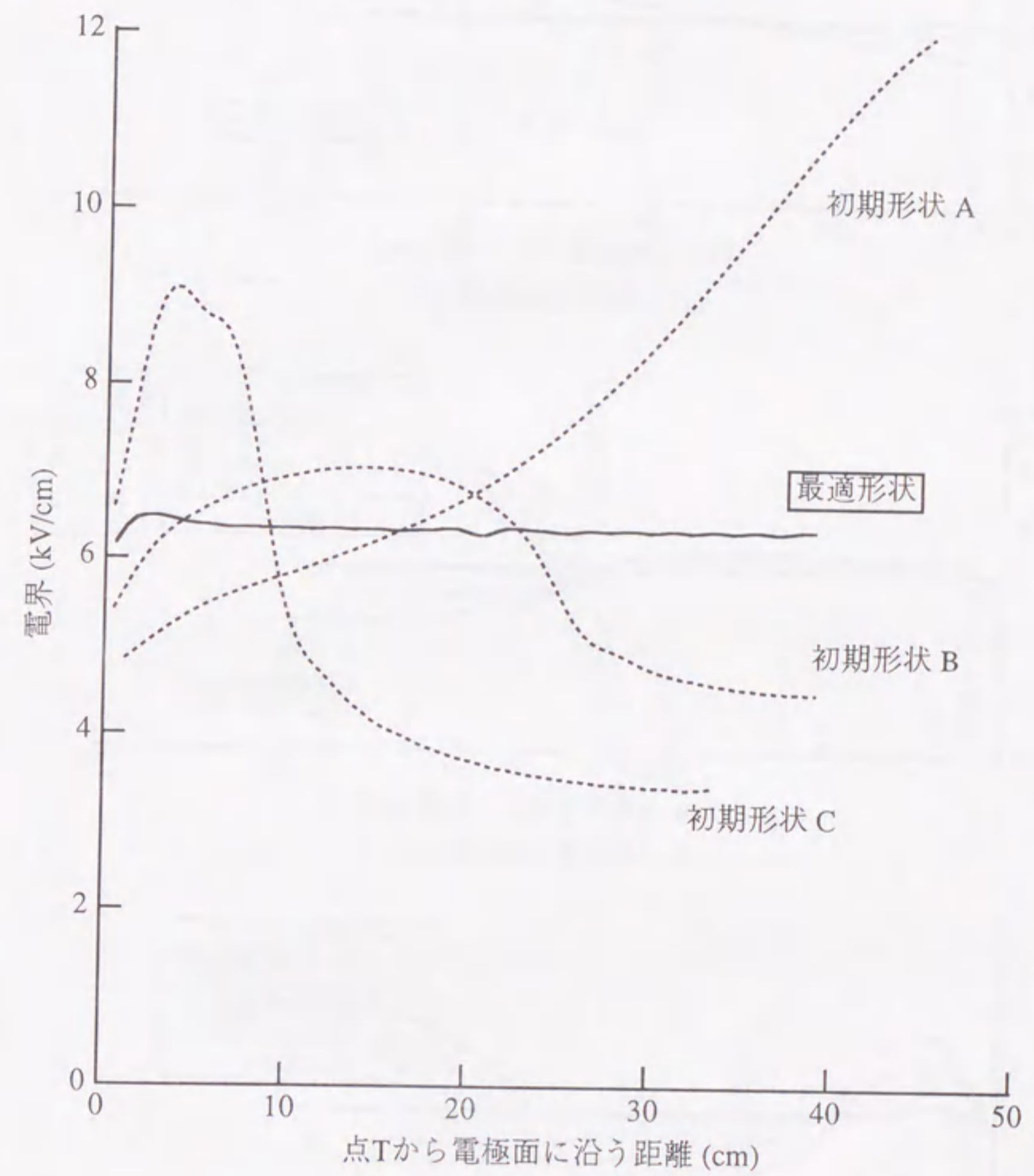
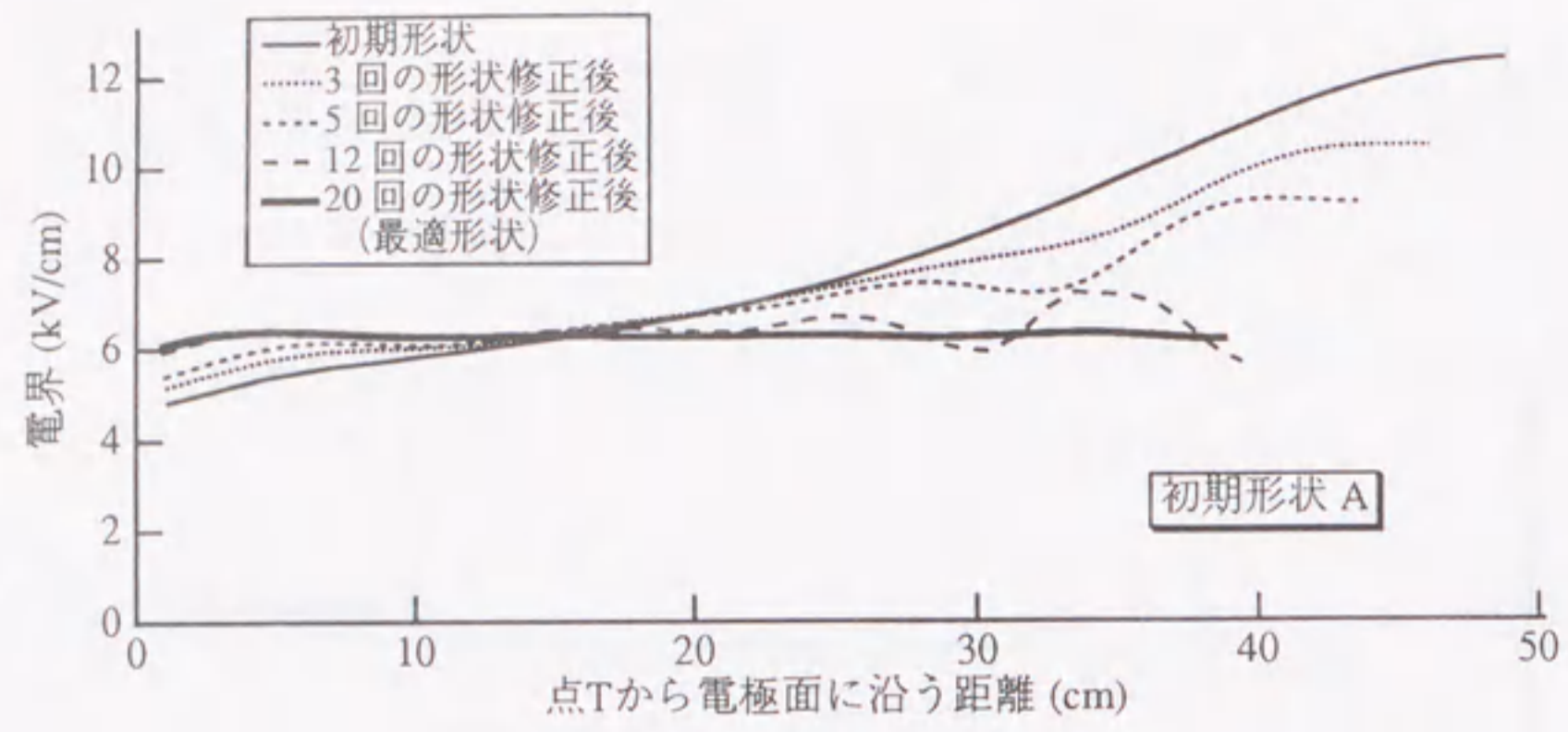
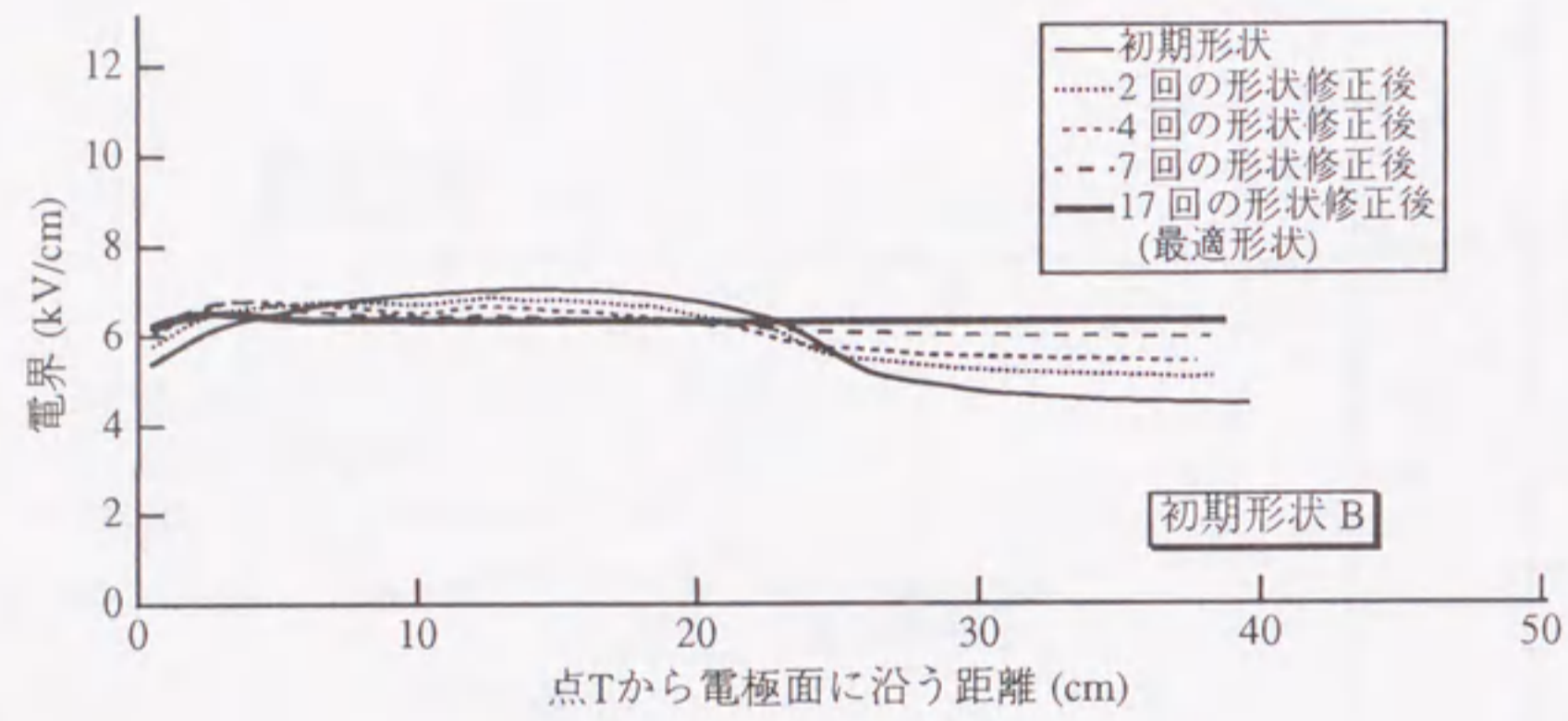


図3.8 3つの異なる初期形状を与えたときのそれぞれの初期電界分布および最適電界分布

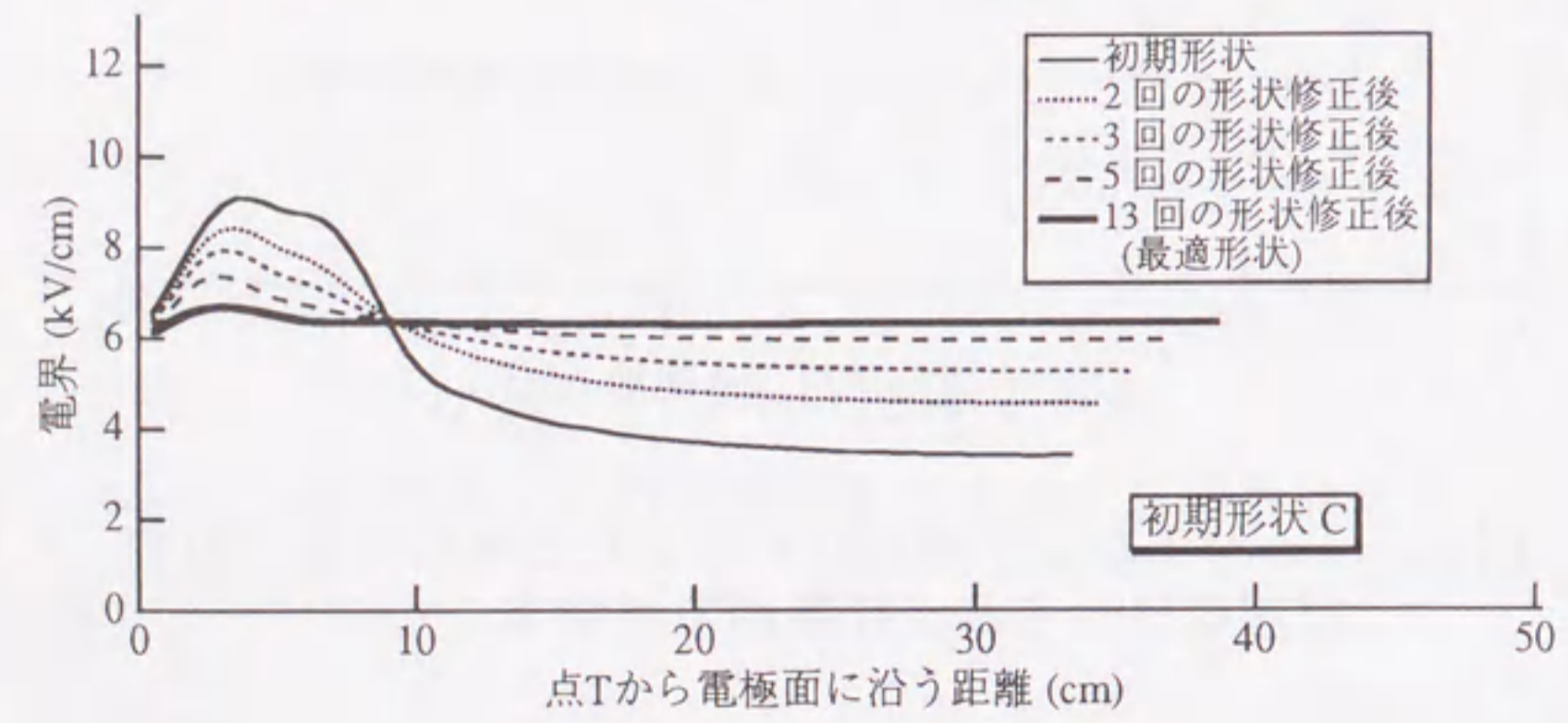




(a) 初期形状Aの場合



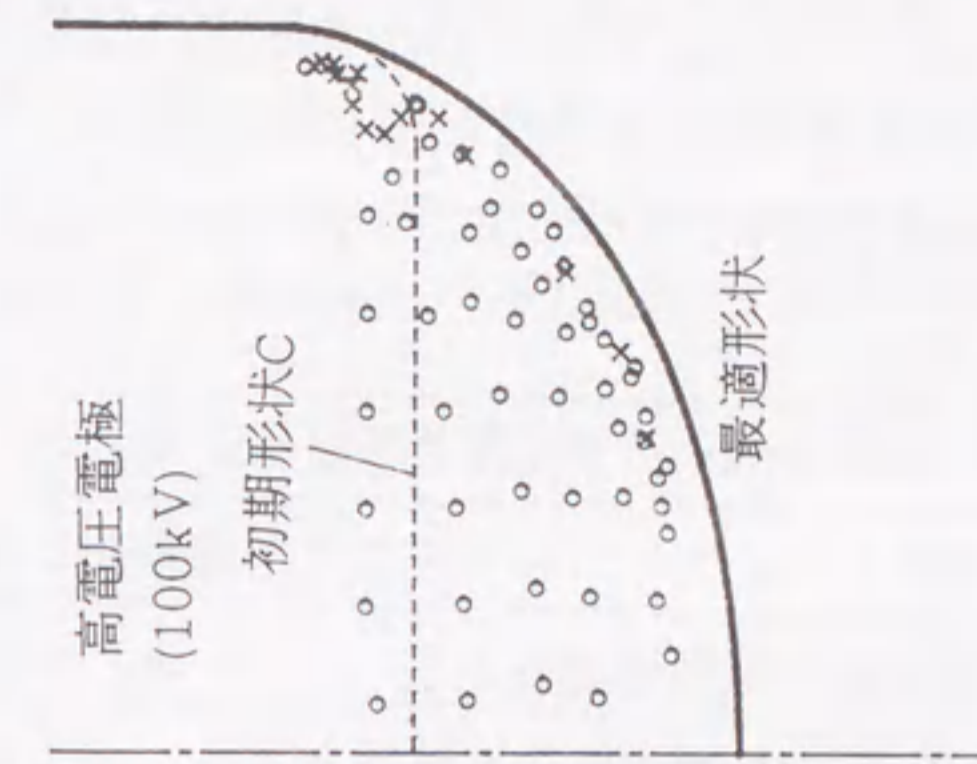
(b) 初期形状Bの場合



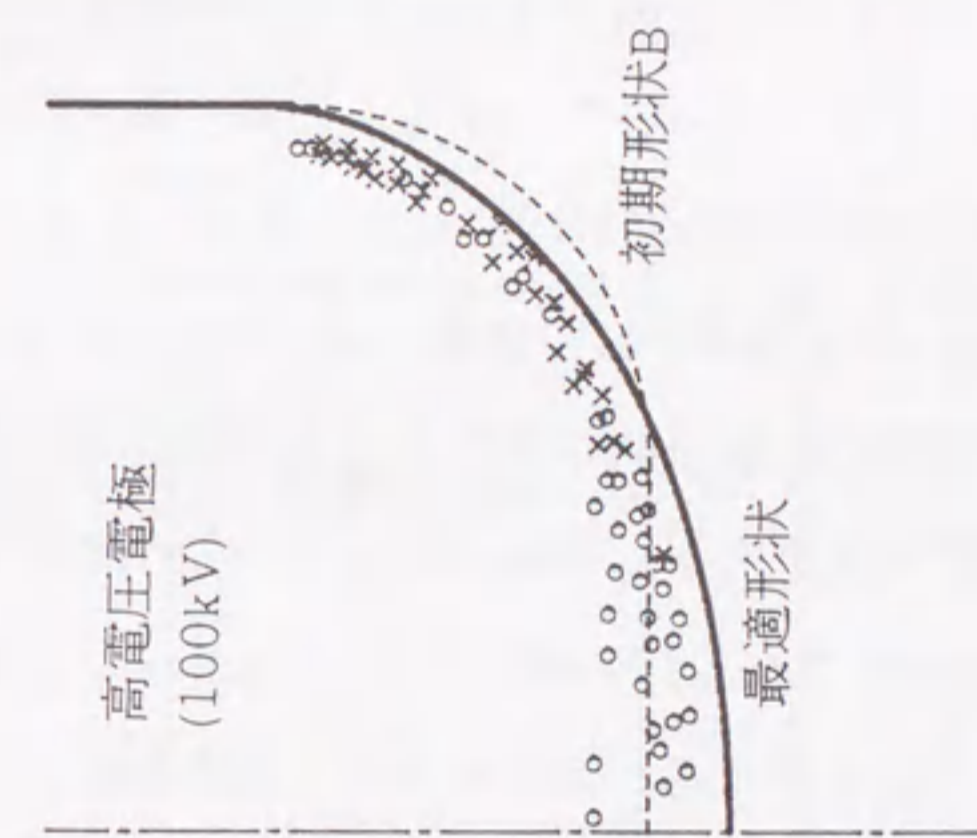
(c) 初期形状Cの場合

図3.9 初期電界分布から最適電界分布までの過程

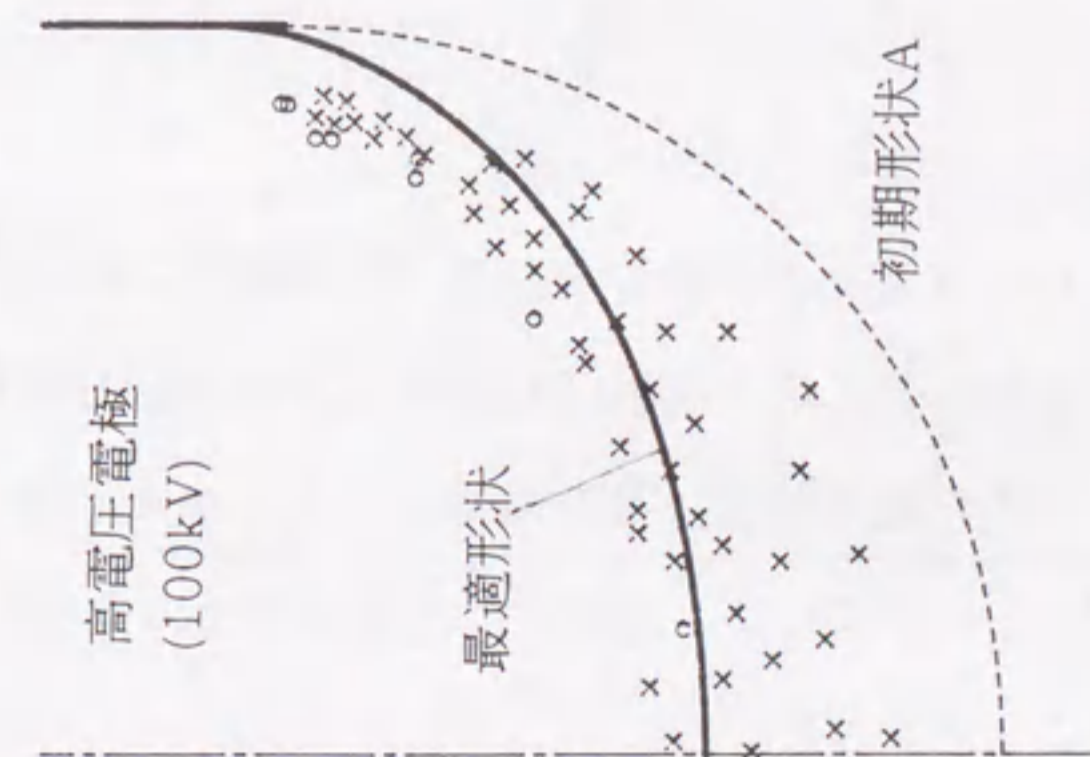
○ 正電荷  
× 負電荷



(c) 初期形状Cの場合



(b) 初期形状Bの場合



(a) 初期形状Aの場合

図3.10 形状修正の過程において追加された最適化電荷の配置



に、電荷再配置を1回行っている。ただし、初期形状A, Bの場合には、計算途中において電極面が内側へ移動する部分があり、そのため電荷再配置の回数が多くなっている。また、最適形状を求めるのに要した計算時間は、32ビットパソコンを用いて3~4分であり、十分に実用許容時間内であるといえる。

<3.3.7> 実機器規模の適用事例に対する電界最適化計算

実機器により近い事例として、図3.11に示すような絶縁筒を含む接地円筒容器内の、高電圧棒電極先端の電界最適化を行った<sup>14)</sup>。ここで使用した仮想電荷の個数は約400個であり、実機器を対象とする場合に使用される仮想電荷数とはほぼ同じである。ここでは、同図破線で示す初期形状から、絶縁筒の比誘電率 $\epsilon_r=1, 3, 6$ の各場合について、棒電極先端の最適形状をそれぞれ導いた。また、この時の電界分布を図3.12に示す。図3.11より、 $\epsilon_r$ が大きくなるに従って、最適電極はより接地容器の底面に近づいていることがわかる。この結果は次のように解釈できる。 $\epsilon_r$ が大きくなるに従って、高電圧電極の絶縁筒に近い部分での電界値が大きくなる。従って、この部分の電界を緩和するように、棒電極先端部がより外側へ移動する。以上のように解釈すれば、妥当な結果が得られていると言える。計算時間は、3通り全てに対して、およそ20分であった。このように、実機器に近い事例に本手法を適用した場合でも、パソコンを用いて実用時間内で計算可能であることが確認された。

<3.3.8> 電界最適化技術のCADEFへの組み込み

最後に、上述した電界最適化自動計算技術をCADEFに組み込み、CADEFによる電界最適化を可能とした。図3.13における太枠の部分に電界最適化技術を組み込み、CADから電界解析、電界最適化へといった一貫したデータの流れを可能とした。これによって、絶縁設計支援システムとしてのCADEFの有用性を向上することができた。

表3.1 電界最適化計算における形状修正回数、電荷再配置回数および計算時間

初期形状	繰り返し回数	形状修正回数	電荷再配置回数	計算時間
A	20	10	10	4分16秒
B	17	9	8	3分55秒
C	13	8	5	3分08秒

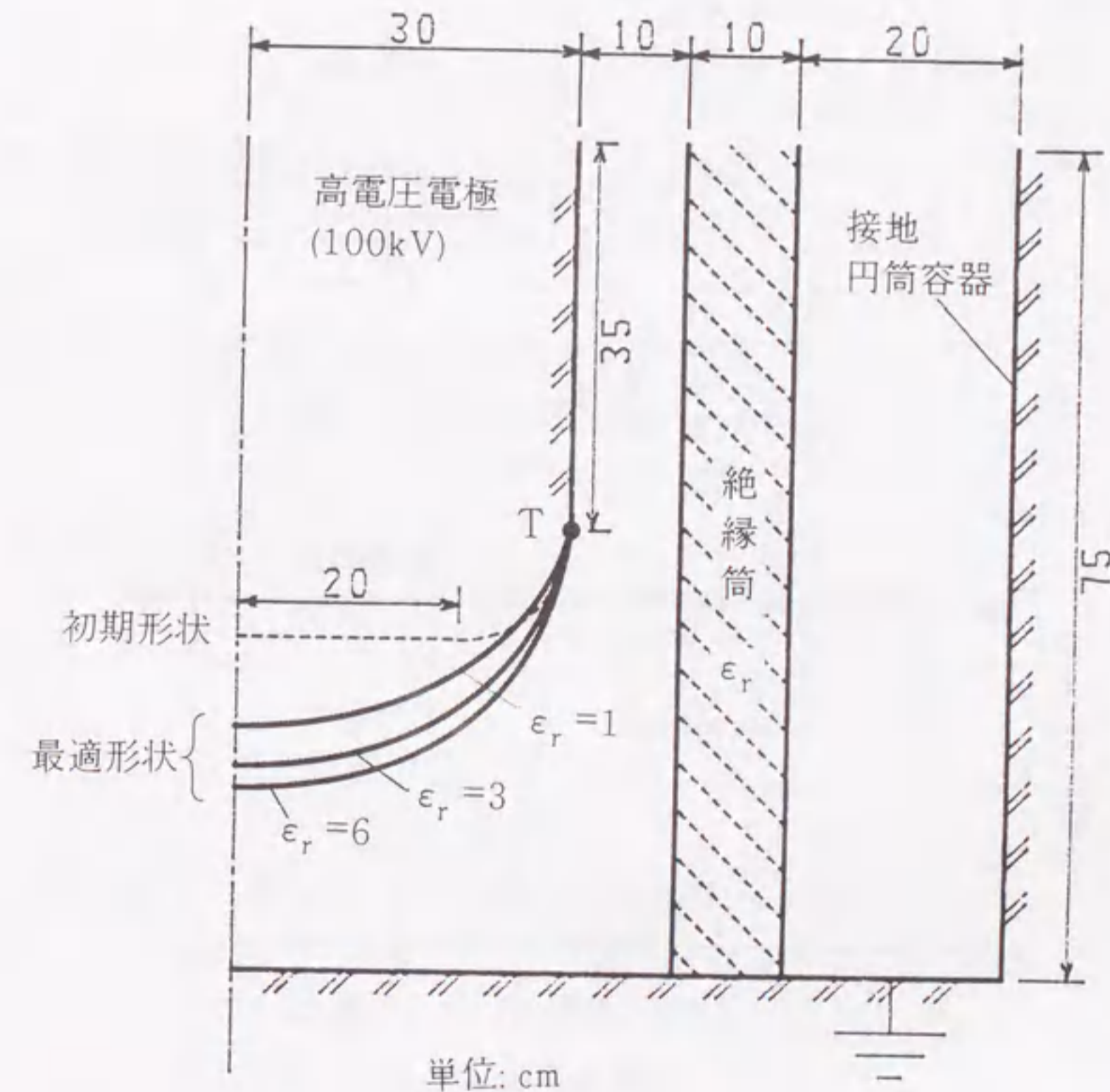
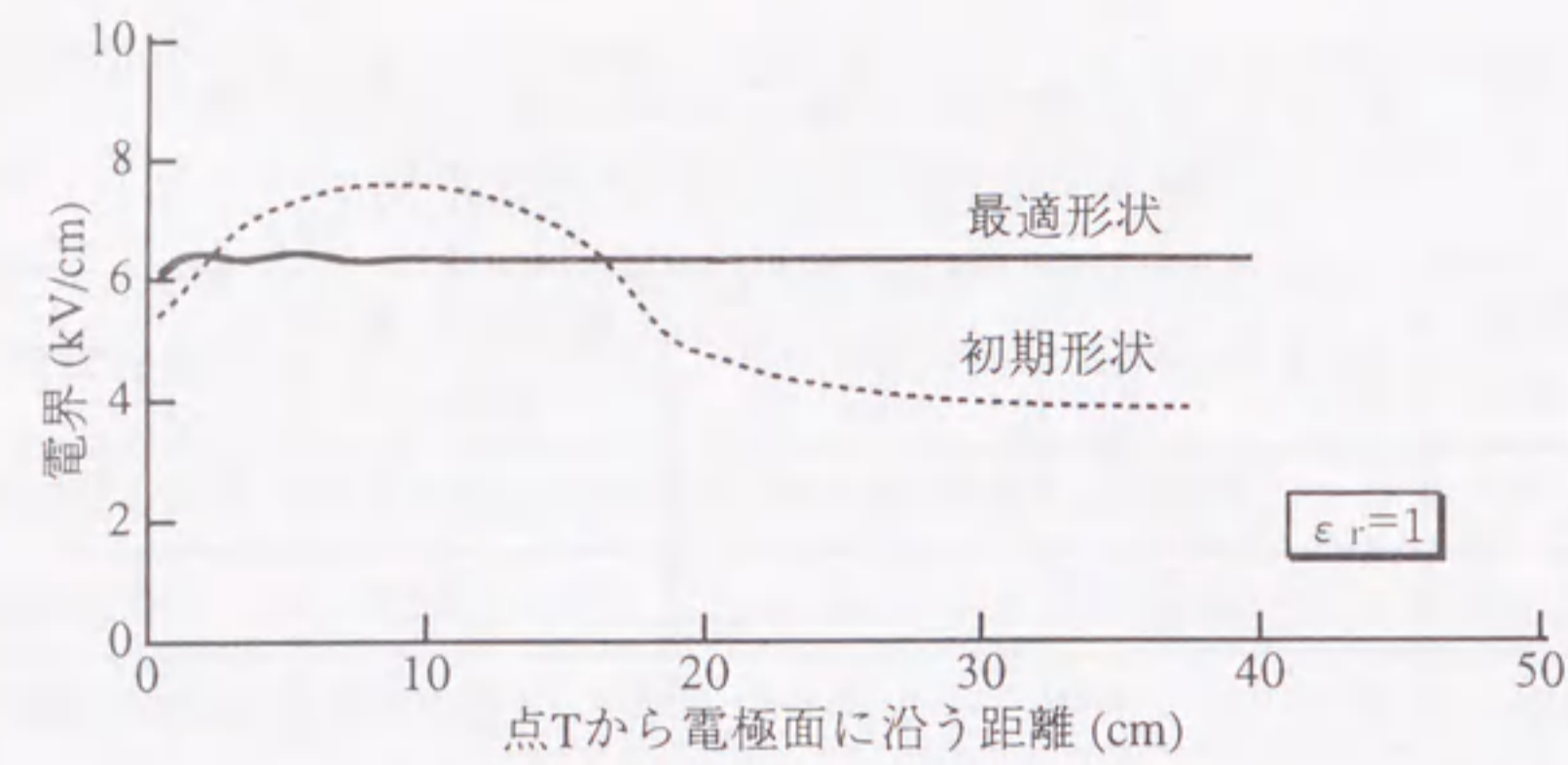
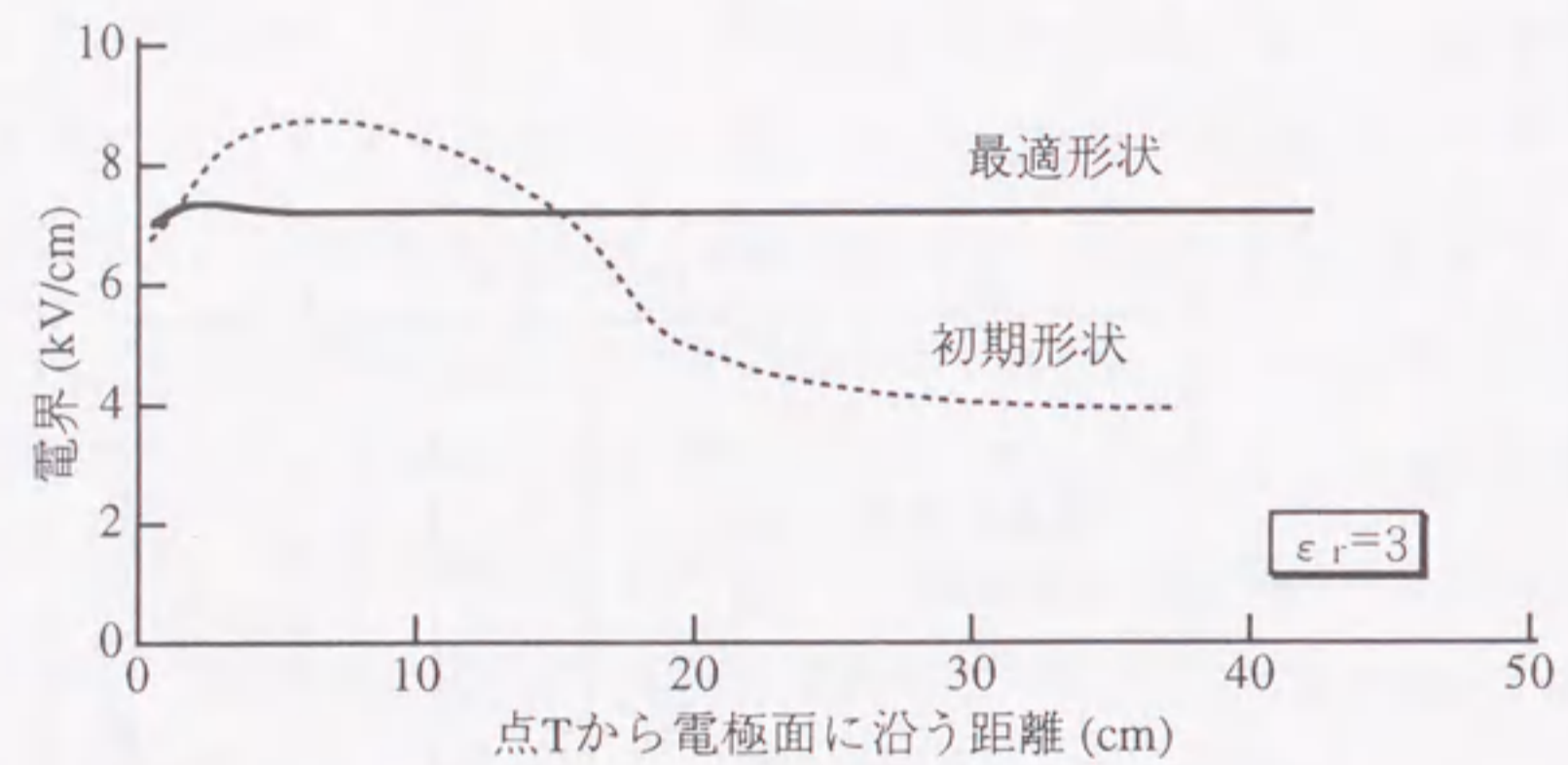


図3.11 実機器規模の電界最適化計算結果

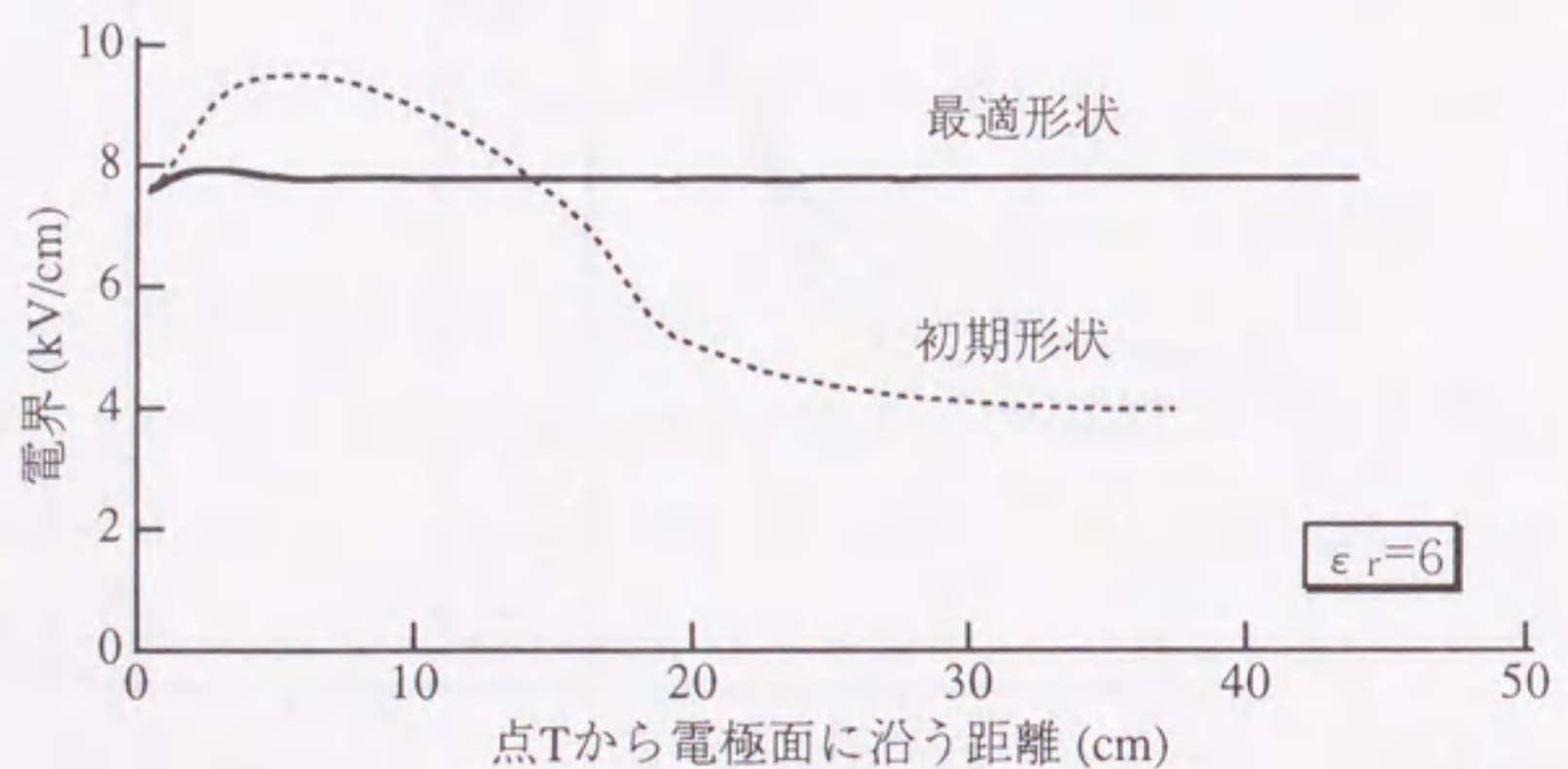




(a) 絶縁筒の比誘電率=1の場合



(b) 絶縁筒の比誘電率=3の場合



(c) 絶縁筒の比誘電率=6の場合

図3.12 実機器規模の電界最適化計算における初期電界分布および最適電界分布

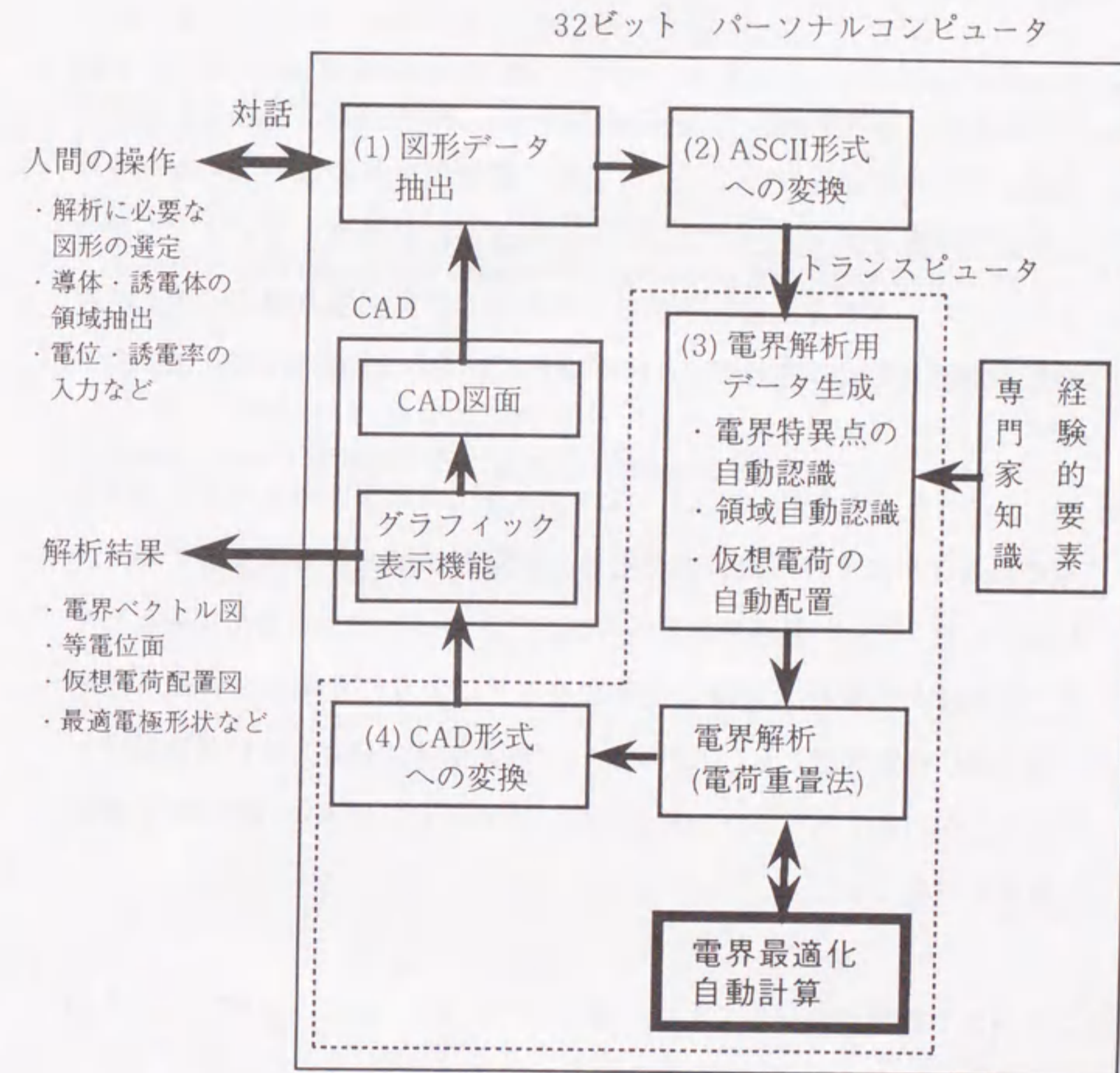


図3.13 電界最適化技術のCADEFへの組み込み



### 3.4 まとめ

本章においては、従来の電界最適化手法であったMetzの方法を発展させ、パソコンによる電界最適化自動計算を可能とした。その開発内容は、次のようにまとめることができる。

- (1) 汎用性の高い電界最適化を実現するために、Metzの方法を改良した電界最適化手法の開発を行った。ここでは、最適化電荷として正・負両符号を同時に使用するアルゴリズム、および電荷再配置アルゴリズムを開発した。また、本電界最適化手法は、繰り返し計算回数の増加に伴う計算時間の増加を大幅に抑えることが可能であることを定量的に示した。
- (2) (1)で述べた手法を用いて、互いに大きく異なる初期形状を与えた場合の電界最適化計算を行った。その結果、初期形状が大きく異なっているにも関わらず、同一の最適形状が得られた。このように、最適化電荷として正・負両符号の電荷を同時に使用することにより、電極面を外側・内側の両方向に移動可能とし、これによって初期形状に依存しない最適形状を得ることが可能であることを検証した。すなわち、汎用性の高い電界最適化計算を可能とした。
- (3) この手法を実機器レベルの事例に適用した結果、32ビットパソコンを用いて実用時間内で解析可能であることが確認できた。
- (4) 上述した電界最適化技術をCADEFシステムへ組み込むことによって、電力機器を対象とした絶縁設計支援の観点からCADEFシステムをより有用なものとした。

### 第3章の文献

- [1] D.Metz: "Optimization of High Voltage Fields", 3rd International Symposium on High Voltage Engineering, No.11.12, 1979.
- [2] 河野, 宅間: 「数値電界計算法」, pp.213-215 (1980), コロナ社
- [3] 加藤, 匹田, 大久保, 鬼頭: 「CADを用いた自動電界解析システムの開発」, 平成4年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.298, 1992
- [4] K.Kato, M.Hikita, N.Hayakawa, Y.Kito, H.Okubo: "Development of Personal-Computer-Based High Efficient Technique for Electric Field Optimization", European Trans. on Electrical Power Engineering, Vol.5, No.6, pp.401-407, 1995.
- [5] H.Okubo, K.Kato, M.Hikita, Y.Kito: "The Development of Electric Field Optimization Technique Using Personal Computer", 8th International Symposium on High Voltage Engineering, No.11.04, 1993.
- [6] 加藤, 大塚, 早川, 匹田, 大久保: 「電界最適化技術の開発」, 第6回電磁界数値解析に関するセミナー講演論文集, pp.29-44, 1995
- [7] 日本数学会編: 「数学辞典大版」, pp.1334-1335 (1985), 岩波書店