

## 第4章 電極形状の最適性決定手法の開発

### 4.1 まえがき

数値計算による電界最適化計算技術の開発は、多方面で活発に行われている。本研究においても、前章において、パソコンを用いた電界最適化自動計算技術の開発を行った。このような電界最適化計算においては、得られた電極形状が真に最適なものかどうか、言い換えれば可能な限りの電界の低減を行っているかどうかを確かめる必要がある。また、このような最適性の判断を定量的に行うことができれば、その結果から、目標とする最適形状がどこに位置するかを計算によって求めることができ、極めて効率の高い電界最適化計算を行うことができる。しかしながら、定量化が難しいことなどの理由により、このような電極形状の最適性についての報告例はほとんど見られない。

本章においては、はじめに、電極形状の最適性を定量的に求める手法の開発について述べる。また、これを解析的に最適形状が求解可能な同軸電極系に適用し、この手法の妥当性を確認する。次に、この手法により得られた電極形状の最適性から、目標とする最適形状を見だし、この目標最適形状を電界最適化計算の中で用いるための計算手順を示す。最後に、主として計算速度・計算効率の観点から、本電界最適化手法の有用性についての検証を行う。

### 4.2 電極形状の最適性決定手法

#### <4.2.1> 電極形状の最適性決定手法の基本的原理

ここでは、計算で得られた電極形状が真に最適なものかどうかの判断を行う手法を開発した<sup>1)・4)</sup>。その基本的考え方を、図4.1を用いて説明する。図4.1

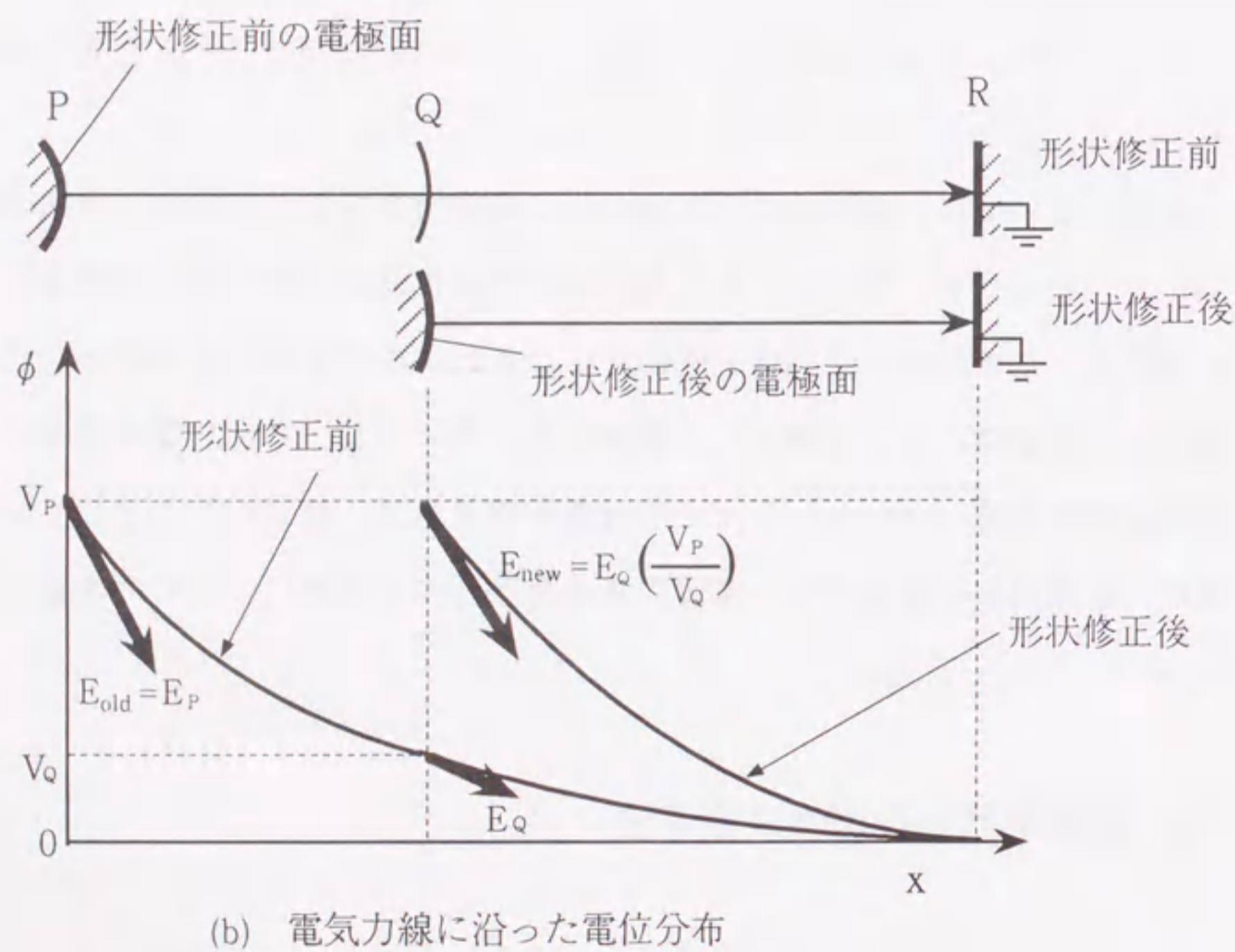
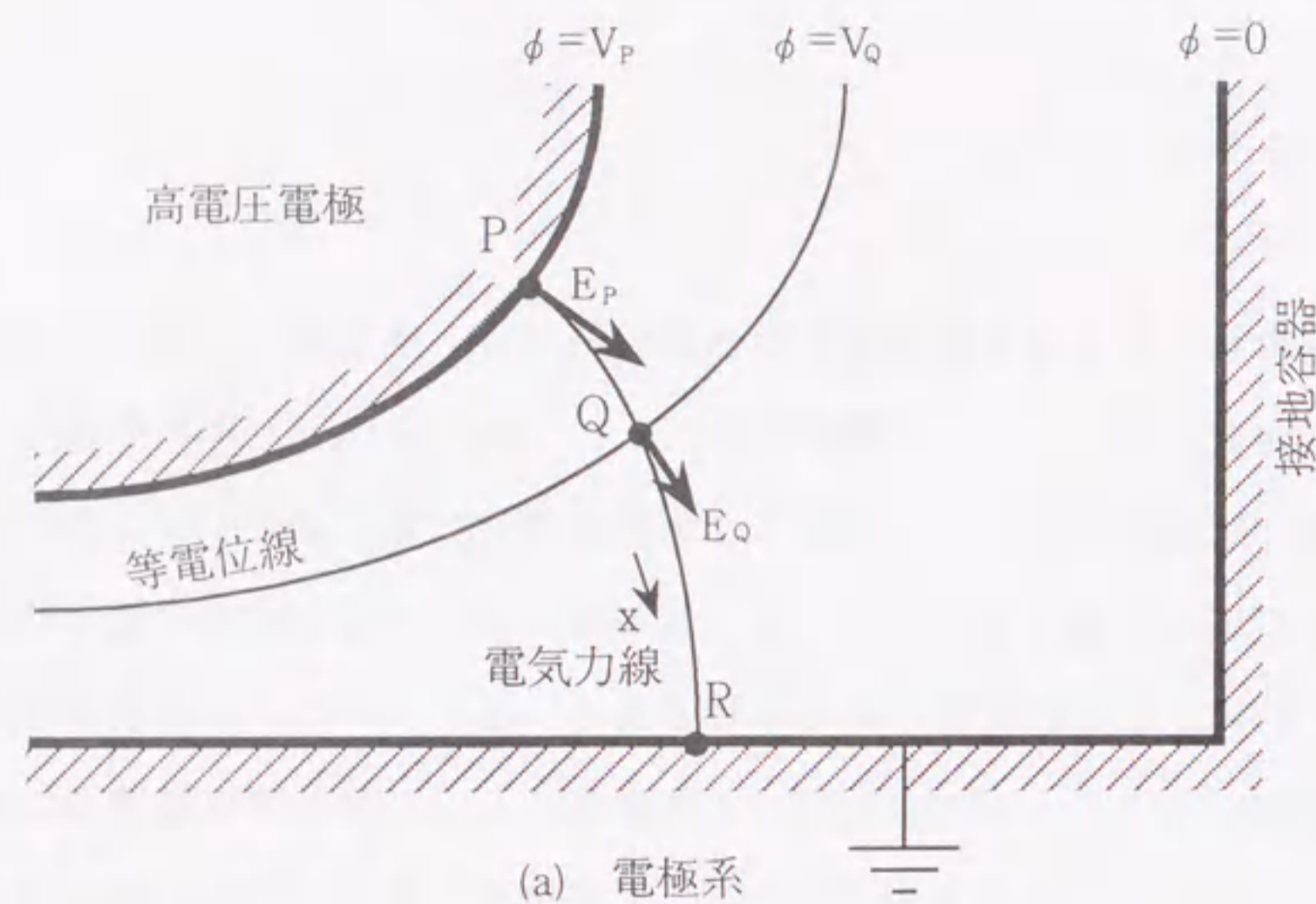


図4.1 パラメータ f の計算のための説明図

(a)において、接地円筒容器内に対し、電位 $V_p$ を持つ高電圧電極の電界最適化を行う場合を考える。仮想的に、電極面を電位 $V_q$ の位置まで形状修正した場合、形状修正後の電位分布は、図4.1(b)に示すように修正前の点Qと点Rに間の電位分布に電位変換分 $(V_p/V_q)$ を乗じたものとなる。従って、形状修正後の電極面上の点Qにおける電界 $E_{new}$ は、次の式で表せる。

$$\text{形状修正後の電界 } E_{new} = E_q \left( \frac{V_p}{V_q} \right) \quad (4.1)$$

そこで、電極形状修正前後の電極面上における電界強度の比を、次のパラメータ $f$ として定義する。

$$f = \frac{\text{形状修正前の電界}}{\text{形状修正後の電界}} = \frac{E_p}{E_q \left( \frac{V_p}{V_q} \right)} = \frac{E_p}{E_q} \times \frac{V_q}{V_p} \quad (4.2)$$

すなわち、 $f > 1$ となる点まで電極面を移動することにより、電極面上の電界を低減することができる。

高電圧電極面上の点Pから電気力線に沿って求めた $f$ の分布は、電極面からの距離 $x$ に対して図4.2に示すような3通りの場合が考えられる。各ケースに対し、電極形状の最適性を次のように決定できる。

#a:  $x > 0$ において極大を有する分布の場合

電極面を外側へ移動することにより最適形状が得られる。例えば、図4.2の#aのような $f$ の分布が求められた場合には、電極面を $x=a$ の点まで外側へ移動させることにより、電界を $1/f_{max}$ に低減できる。

#b:  $x < 0$ において極大を有する分布の場合

電極面を内側へ移動することにより最適形状が得られる。すなわち、空間

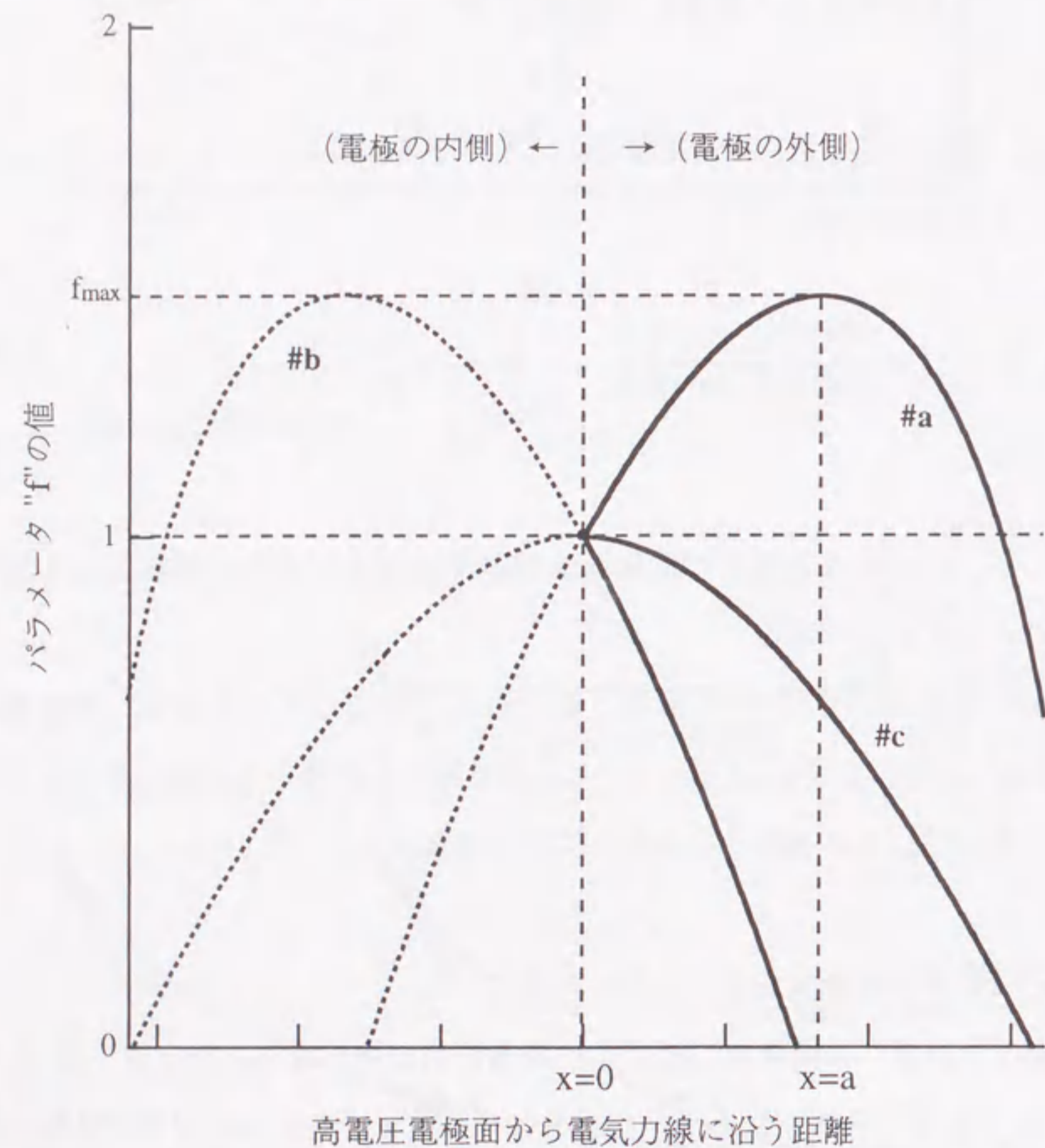


図4.2 電極面から電気力線に沿って得られるパラメータ  $f$  の分布

中には  $f$  の極大点は存在しないが、仮想的に電極内部に  $f$  の極大点を持つと考えることができる。

#c:  $x=0$ において極大を有する分布の場合

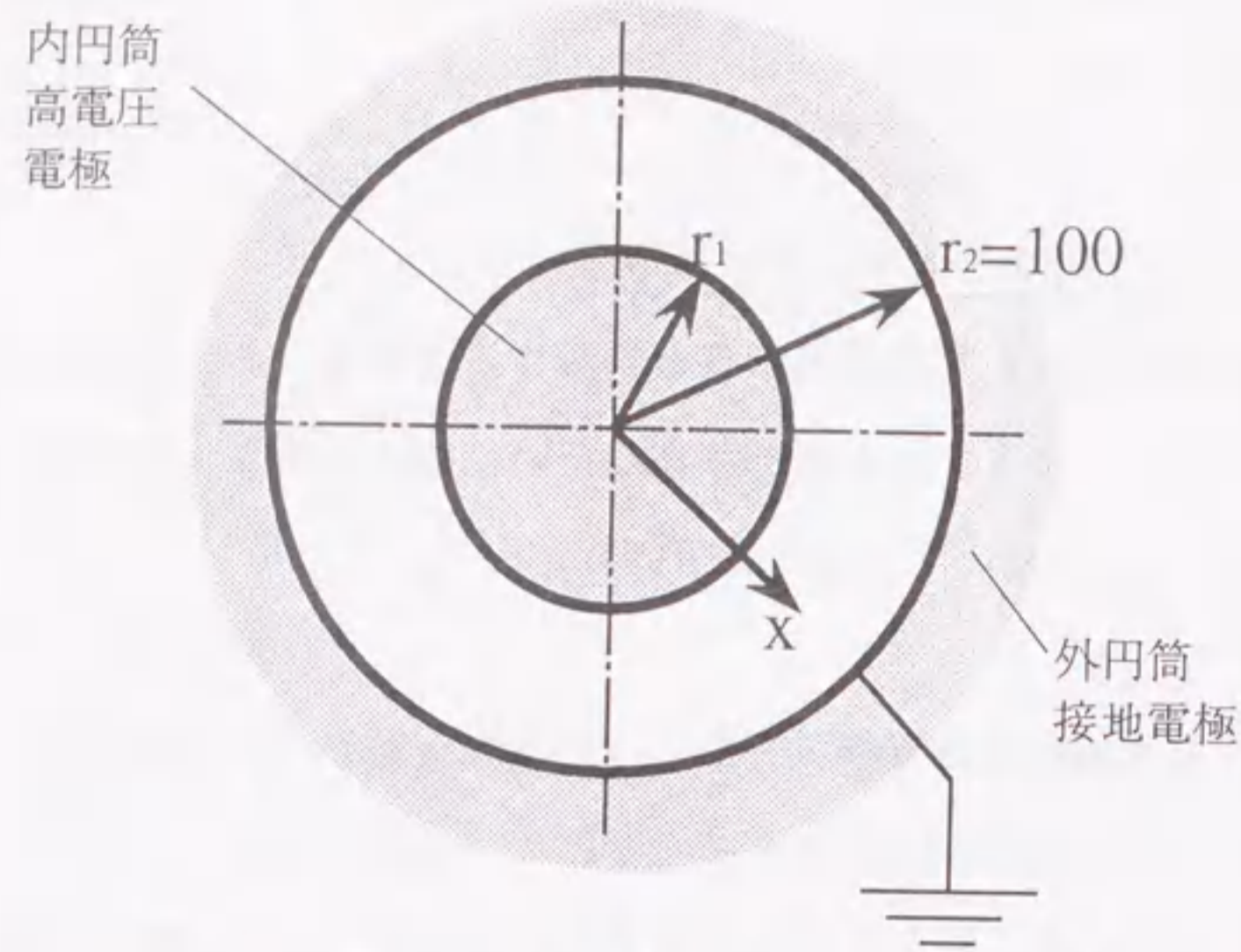
この時の電極形状を真の最適形状と判断する。すなわち、電極面の外側にも内側にも  $f > 1$  となるような点が存在しないため、このような判断が可能である。

<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

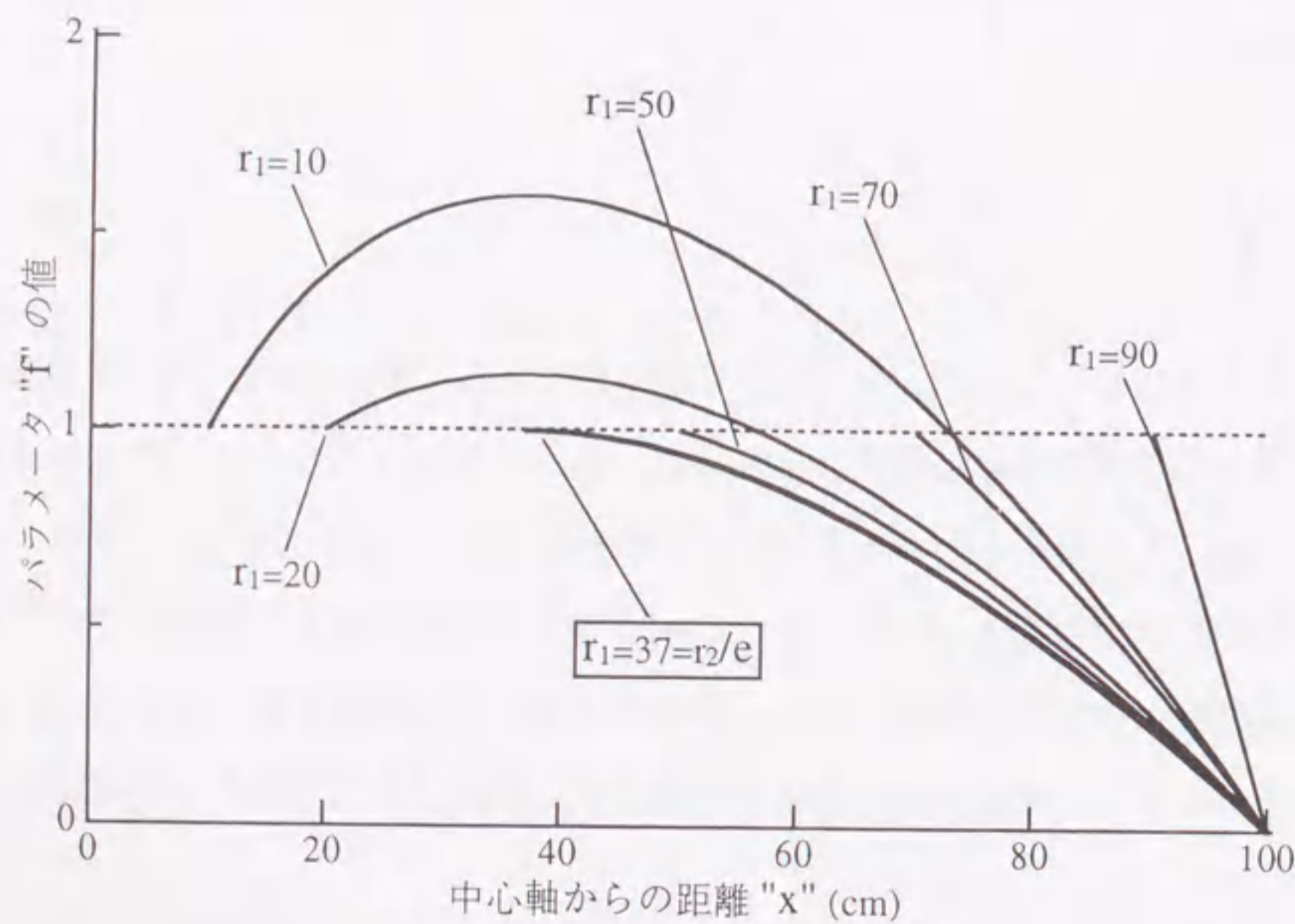
前項で述べた電極形状の最適性決定手法の妥当性を検証するために、解析解を持つ電極系に本手法を適用した場合の計算を行った<sup>[11]</sup>。図4.3(a)に示すような同軸円筒電極系において外円筒電極の半径  $r_2$  を一定のまま内円筒電極の半径  $r_1$  を変化させた場合に、電極表面電界が最小となるような  $r_1$  の値は、解析的に、

$$r_1 = (r_2 / e) \quad (4.3)$$

で与えられる<sup>[5]</sup>。ただし、 $e$  は自然対数の底である。図4.3(b)は、内円筒電極の表面から外円筒電極に向かう電気力線に沿って得られたパラメータ  $f$  の分布である。この図からわかるように、 $f$  の分布は、 $r_1 = 37 = 100/e$  の点で極大点をもつことがわかる。すなわち、 $r_1 = 37$  の点まで電極面を移動することにより電極面上の電界は最小になり、理論的に得られた値と一致する。このことから、パラメータ  $f$  を用いて真の最適形状を求める本手法の妥当性が確かめられた。



(a) 電極系



(b) パラメータ f の分布

図4.3 同軸円筒電極系における電極形状の最適性決定

### 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

#### <4.3.1> 電極形状の最適性決定手法の流れ

前節で述べた電極形状の最適性決定手法を電界最適化の中で用いることにより、目標とする最適形状がどの位置に存在するかを定量的に求めることが可能となる。これを繰り返し計算の初期の段階で行うことにより、形状修正を1度行うのみで、最終的に得られるべき最適形状に非常に近い電極形状を得ることができる。

このような観点から、本節においては、電極形状の最適性決定手法を導入した電界最適化計算手法について述べる<sup>[4]</sup>。図4.4に、本電界最適化手法の流れを示す。これを用いて、以下に説明する。

#### (1) 電極面上の電界分布を求める。

(2)項の計算において最大電界をとる点の位置を知る必要があるため、まず、電極面上の電界分布を求める。

#### (2) 最大電界を持つ点から電気力線に沿ってパラメータ f を求める。

計算された f の分布を基に、電極形状の最適性を決定する。<4.2.1> で述べた方法により、このときの電極が最適なものかどうかを決定し、もし最適なものでない場合には、電極面を内側・外側のどちらに移動させればよいかを決定する。

#### (3) 等電位面まで電極を移動させた場合の修正後の電界を計算する。

形状修正後の電極面上の電界を計算する。高電圧電極の有する電位を 1.0p.u. とおく。ここでは、電極面を外側へ移動させる場合を考える。電位 0.99p.u., 0.98p.u., ... の等電位面まで電極面を移動させ、電極形状の修正後の電極面における電界を求めていく。この時、(2)で得られたパラメータ f の値を用いる。ただし、 $f < 1$  となるような点まで電極面を移動させると、形状修正によって電界が逆に増大してしまう。このため、計算を行うのは、 $f >$

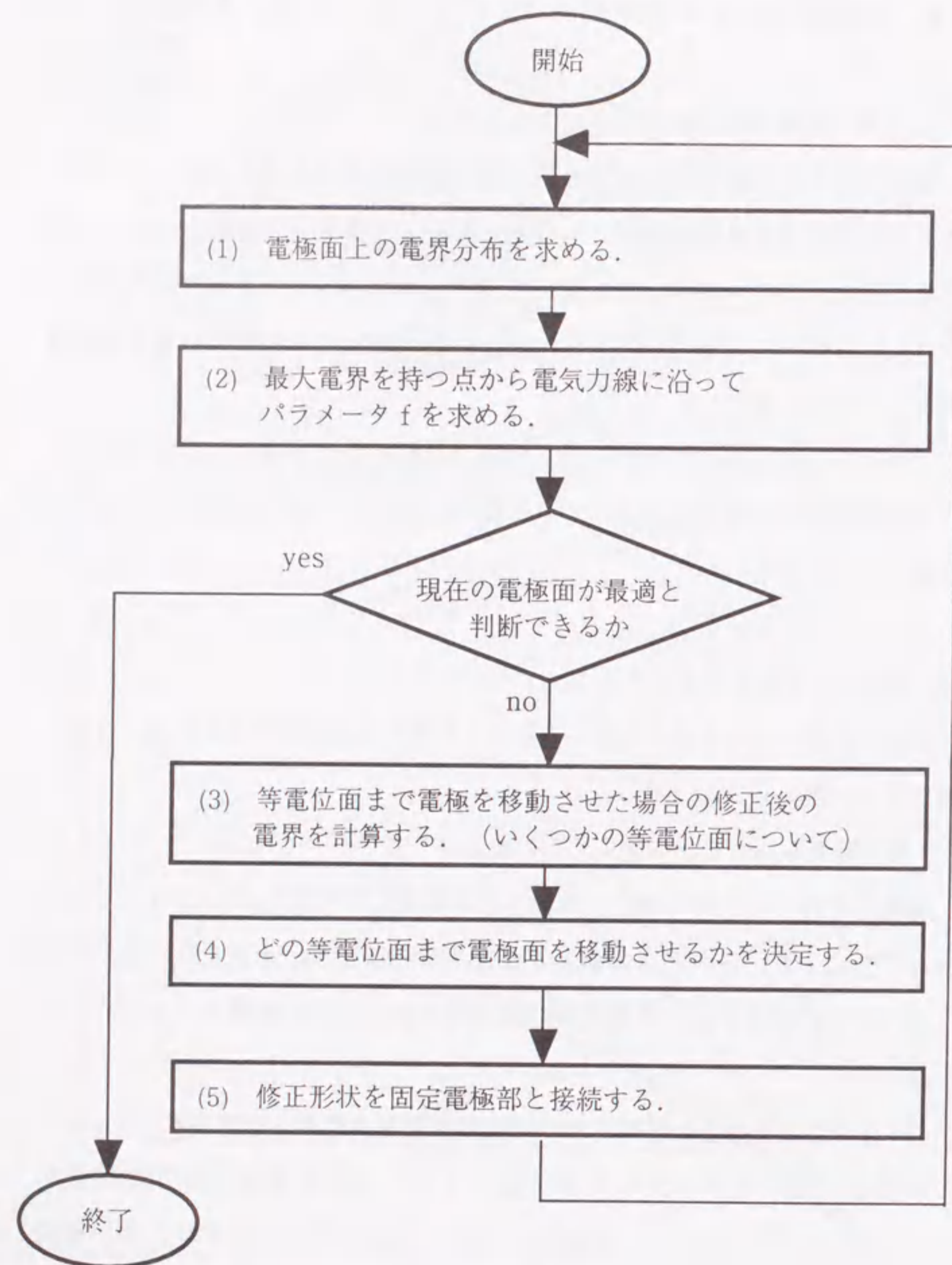


図4.4 パラメータ f による電極形状の最適性決定手法を用いた電界最適化の流れ図

1を満たす点のうち最も電極面から遠い等電位面までとする。同様に、内側へ移動する場合には、1.01p.u., 1.02p.u., ... の等電位面を考え計算を行う。ただし、等電位面の電位が高くなるにつれて、等電位面と仮想電荷が接近していくので、電荷との距離が近い等電位面は計算に用いることができない。したがって、電荷との距離が離れている等電位面までを計算に用いる。

(4) どの等電位面まで電極面を移動させるか決定する。

(3)において、各等電位面まで高電圧電極面を移動させた後の電界の値が求められる。そこで、これらの等電位面の中で電極面移動後の電界の最大値が最も小さいものを、目標とする電極形状として選ぶ。

(5) 修正形状を固定電極部と接続する。

実際の電界最適化計算においては、固定電極領域が存在する。固定電極領域は電極面を移動させることができない。このため、例えば図4.5(a)のように移動先の等電位面が得られた場合、その移動量は図4.5(b)に示すように、固定電極領域と最適化領域との接続部において不連続となってしまう。従って、最適化領域において得られた目標電極形状と固定電極部を接続するための方法を考える必要がある。ここでは次のような手順を用いることにした。

(i) 電極面上の各点における移動量が、図4.5(b)のように得られるとする。

(ii) 図4.5(c)に示す重み関数

$$y = 1 - (1 - x)^w \quad (4.4)$$

を図4.5(b)に乗じる。このような重み関数を採用した理由は、次の通りである。まず、 $x=1$ において移動先の等電位面となめらかに接続する必要がある。このためには、重み関数が、 $x=1$ において $y=1$ 、かつ、傾き0となる必要がある。また、固定電極領域と接続するような修正形状にするために、 $x=0$ において $y=0$ となる必要がある。以上の条件を

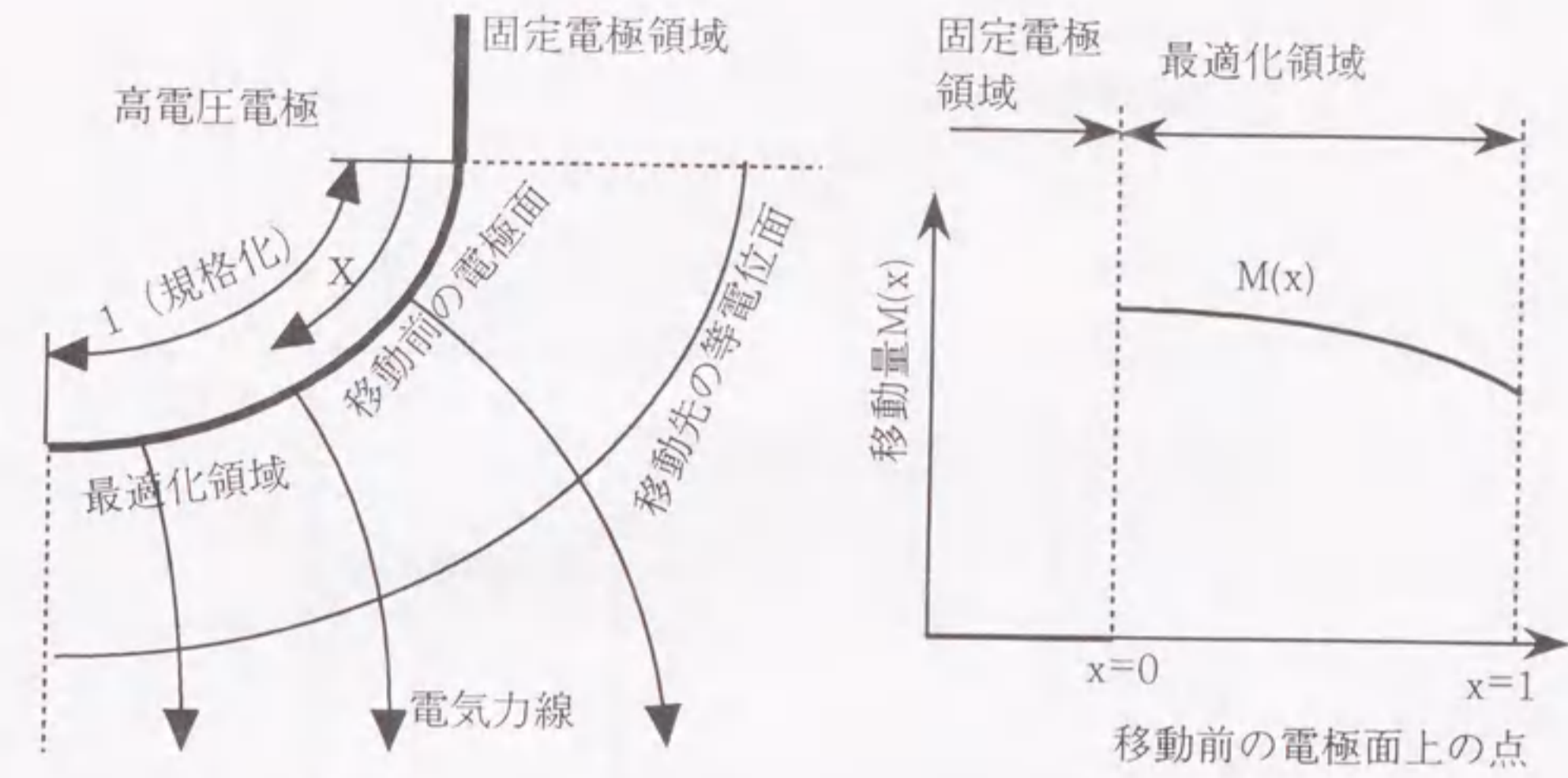
満たす関数の中で、最も取り扱いやすい「べき関数」を用いると、式(4.4)が得られる。また、式(4.4)中の $w$ の値として、ここでは経験的に4を与えている。

(iii) 図4.5(b)に図4.5(c)を掛け合わせた結果は図4.5(d)のようになり、最終的に電極面上の各点の移動量が決定できる。

以上のような手順で、電極形状の最適性を決定し、電界最適化自動計算を行った。その計算事例を以下に示す。

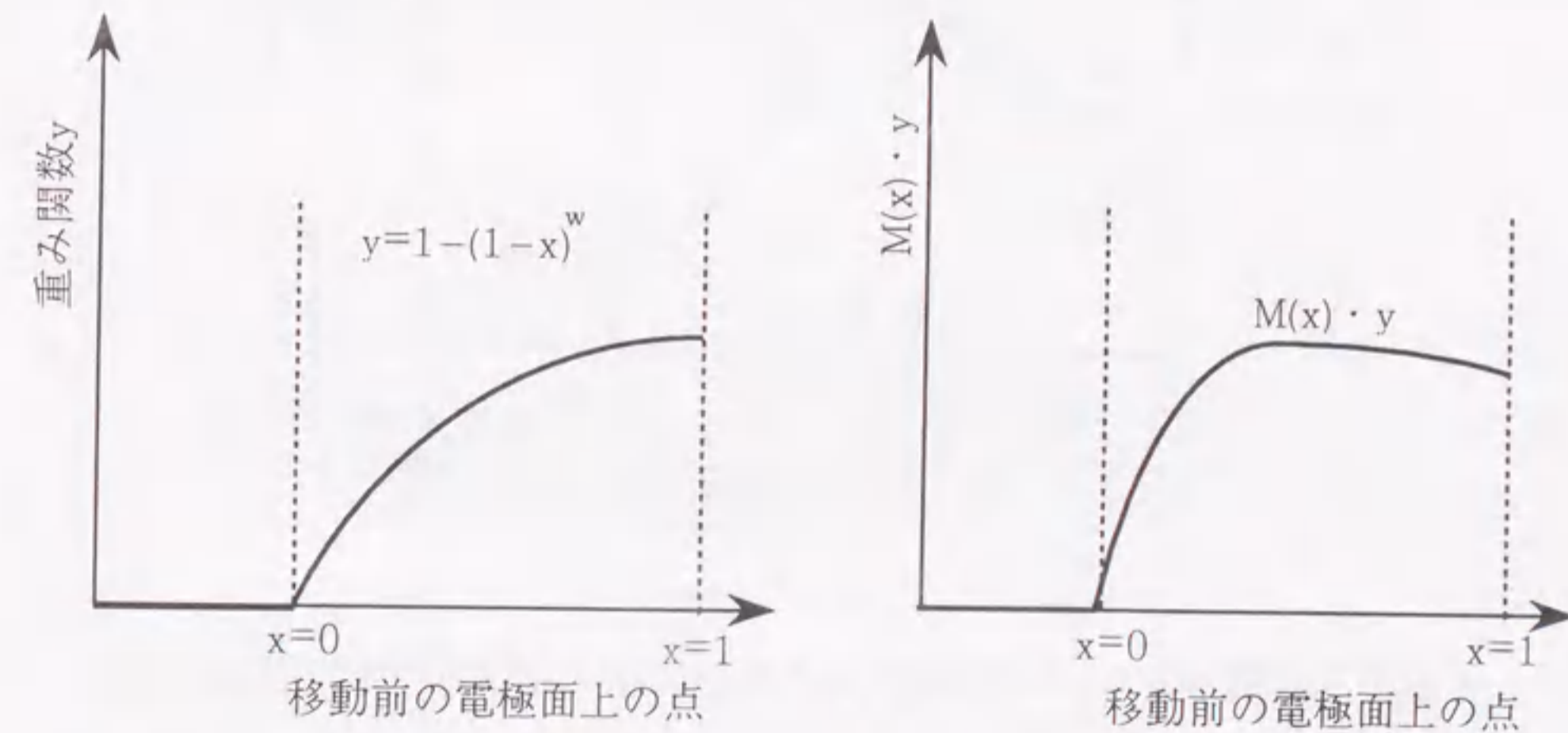
#### <4.3.2> 電力機器形状を対象とした本手法の性能検証

ここでは、本手法の有用性を、計算事例を用いて検証する<sup>[2-4]</sup>。図4.6は、接地円筒容器内における高電圧棒電極先端部を表しており、GIS母線の端部を模擬している。図において、破線で示すような初期形状を与え、本手法を適用して電界最適化計算を行った。本事例の場合、3回の形状修正の後、同図の実線で示すような最適形状が得られた。電界最適化の計算過程で得られた各修正形状を、図4.7に示す。この図からわかるように、1回目の形状修正により、最終的に得られる最適形状に極めて近い形状が得られていることがわかる。このことから、本手法が高い収束性を持った電界最適化手法であることがわかる。次に、電極面上の最大電界を有する点から、電気力線に沿って得られるパラメータ $f$ の分布を、図4.8に示す。この図からわかるように、形状修正を行うに従って、パラメータ $f$ の分布が図4.2における#aの分布から#cの分布に近づき、最終的に#cの分布が得られている。図4.9に、形状修正による電極面上の電界分布の低減の様子を示す。この図から、形状修正が進むにつれて電界の低減がみられ、特に全低減量の約80%が最初の形状修正によるものであることがわかる。これは、パラメータ $f$ の空間的分布から目標とする最適形状を定量的に見いだすことができ、したがって、1回の形状修正で最適電極形状に近い形状が得られたためである。なおこの電界最適化計



(a) 電極面の移動の様子

(b) 電極面の移動量



(c) 固定領域との接続のための重み関数

(d) 最終的に得られる電極面の移動量

図4.5 固定電極領域と修正電極面との接続方法

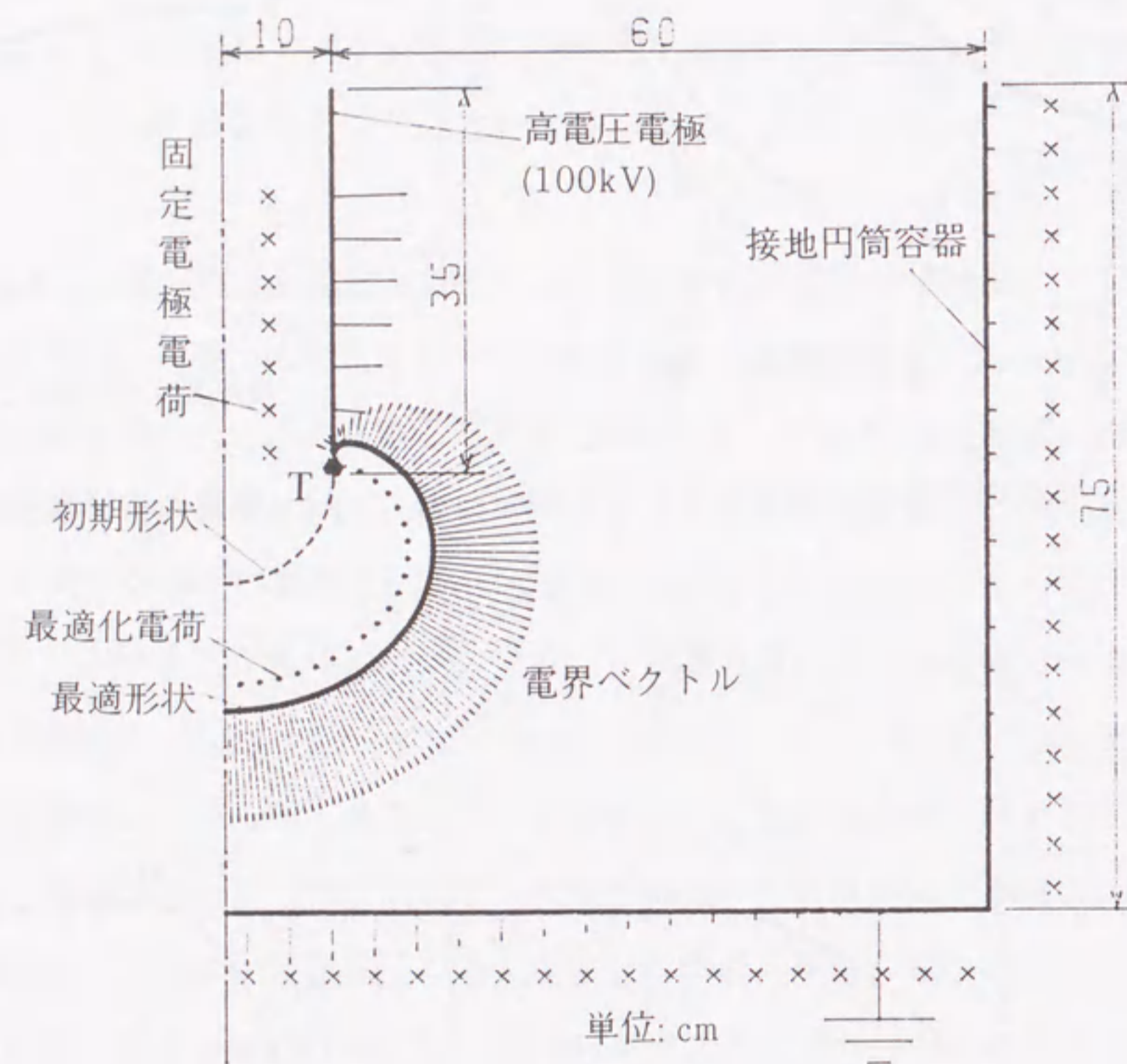


図4.6 電極形状の最適性決定手法により求めた最適電極形状

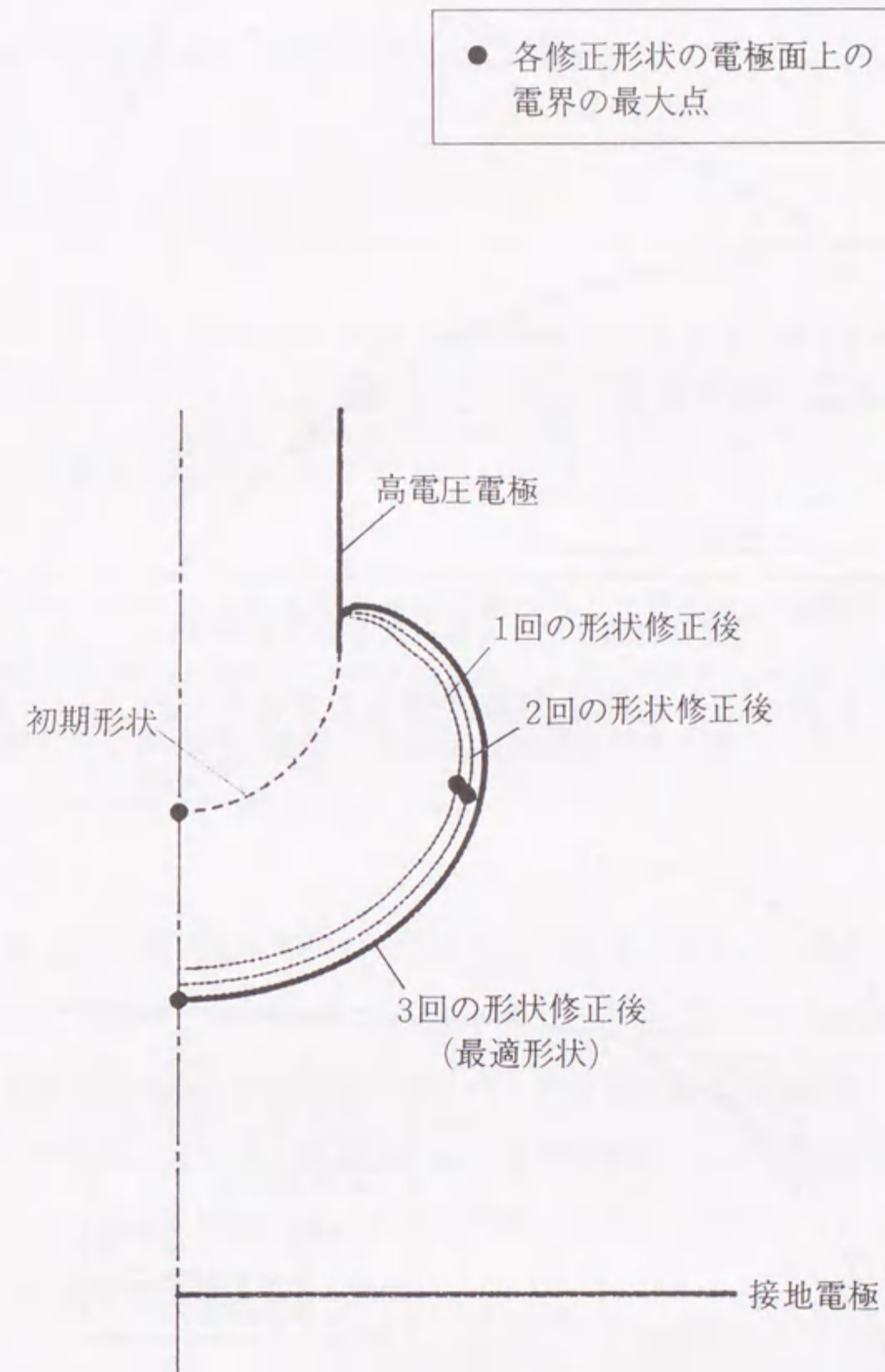


図4.7 電界最適化過程における修正形状の変化 (高電圧電極線端付近を拡大)

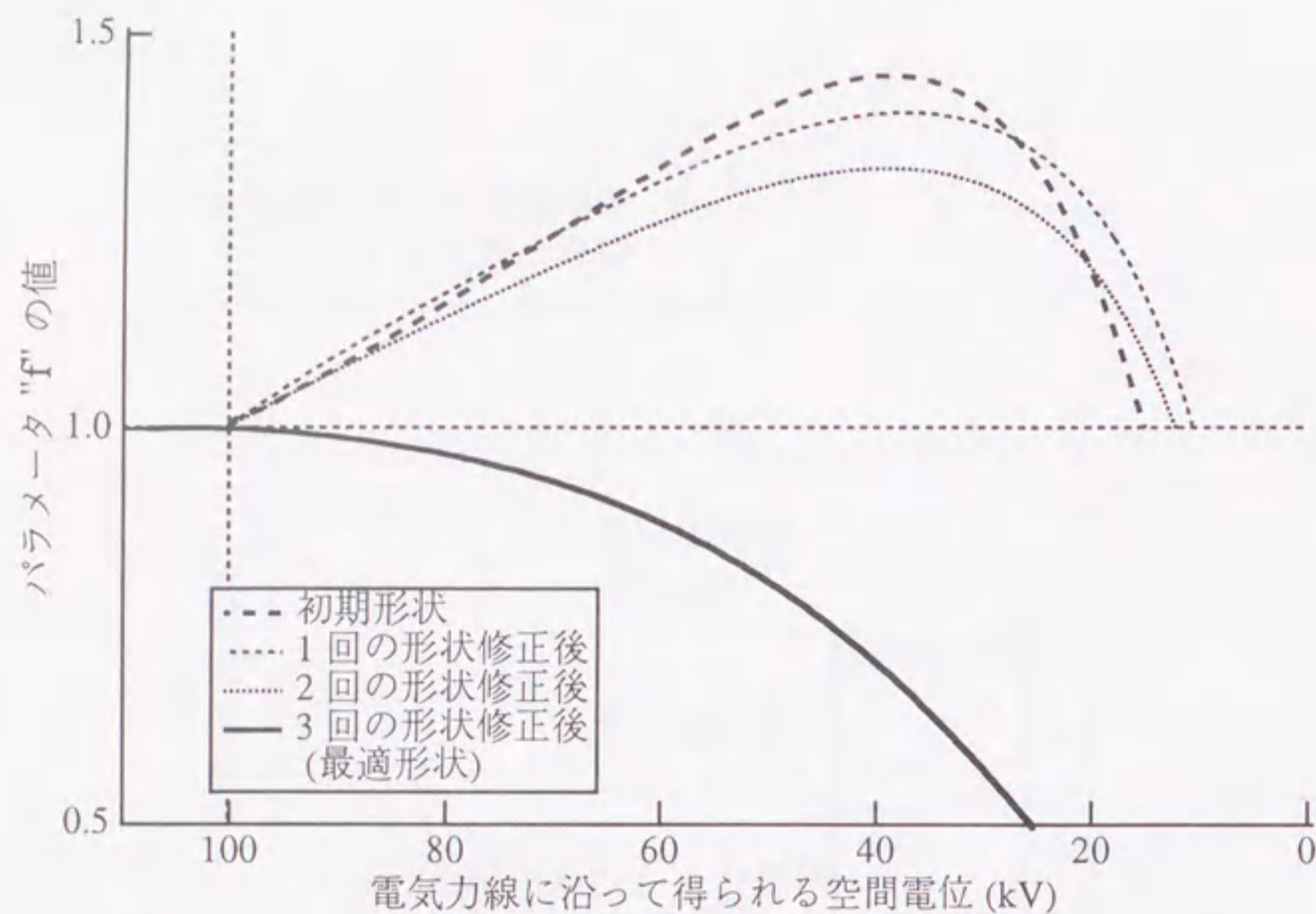


図4.8 最大電界の点から電気力線に沿って求めたパラメータ  $f$  の分布

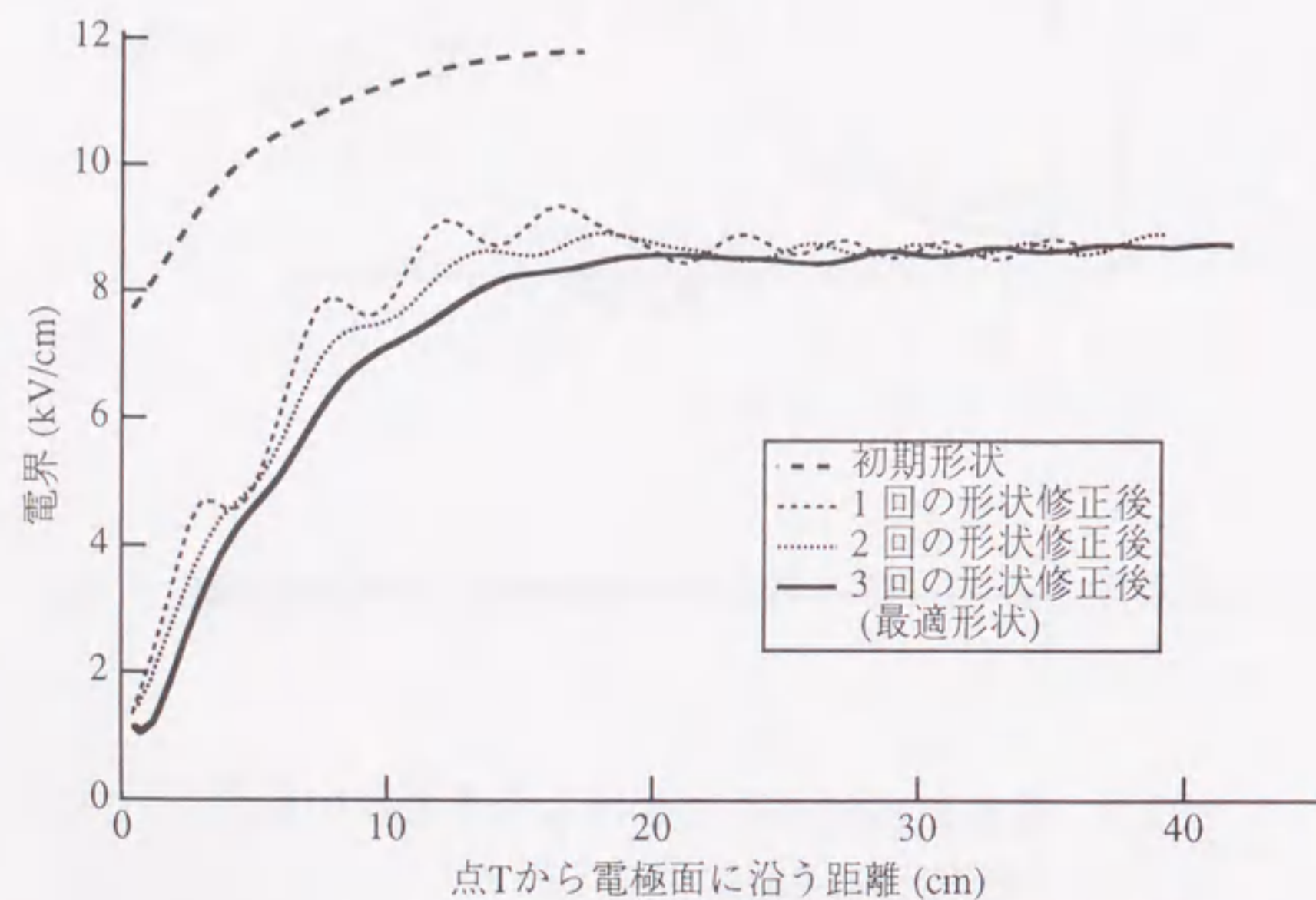


図4.9 電極形状最適性決定手法を用いて得られた最適電界分布

算に必要な時間は、32ビットパソコンを用いて約7分であった。

このように、最適形状が初期形状に対してどの位置に存在するかをパラメータ  $f$  によって判断し、目標とする修正形状を見いだすことができた、その結果、極めて収束性が高い電界最適化自動計算が可能となった。

#### 4.4 まとめ

本章では、電極形状の修正前後の電界強度の比として定義したパラメータ  $f$  を最適性判断の手法として提案した。このようなパラメータの導入により、次に示す計算を可能とした。

- (1) このパラメータ  $f$  の空間的分布を求めることにより、電極形状の真の最適性を判断・決定することができた。これを用いて、最適化計算の初期段階で、目標とする最適電極形状が初期形状の内側・外側のどちらに存在するかを判断・決定可能とした。
- (2) 目標とする最適電極形状がどの位置に存在するかをを定量的に見いだすことを可能とした。このことから、1回の形状修正で最適電極形状に近い電極を求めることが可能となった。すなわち極めて収束性の高い、効率的な形状修正を電界最適化計算の過程で可能とした。最後に、本手法が、パソコンを用いた電界最適化計算に極めて有用であることを、計算事例を用いて確認した。



## 第4章の文献

- [1] K.Kato, M.Hikita, N.Hayakawa, Y.Kito, H.Okubo: "Electric Field Optimization by Personal Computer", The 3rd World Congress on Computational Mechanics, No.D2-3, 1994.
- [2] K.Kato, M.Hikita, N.Hayakawa, H.Okubo: "A Highly Efficient Method for Determination of Electric Field Optimum Contour of High Voltage Electrode", 9th International Symposium on High Voltage Engineering, No.8358, 1995.
- [3] K.Kato, M.Hikita, N.Hayakawa, Y.Kito, H.Okubo: "A Highly Efficient Method for Optimum Electrode-Contour Determination", European Trans. on Electrical Power Engineering, Vol.6, No.6, 1996.
- [4] 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.28-44, 1995
- [5] 河野, 宅間: 「数値電界計算法」, p.208 (1980), コロナ社

## 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

### 5.1 まえがき

近年, 人間の経験的知識などを必要とする問題に対応できる計算手法として, ニューラルネットワーク (Neural Network, 以下NN) への関心が高まっている。電力・エネルギー分野においても, 経験に基づいた予測・判断が必要な方面への適用が急速に広がっている<sup>[1]</sup>。しかし, 電界最適化問題への応用例はほとんど見られない。本章では, 一層の計算効率・汎用性の向上を目指し, NNを用いた電界最適化技術の開発を行う。特に, NNが一度学習を行うと, 要求仕様を満足する最適解が繰り返しなしで高速に計算可能である点を電界最適化技術に適用する。これにより, 非常に効率の高い電界最適化計算の実現に大きく貢献できるものと考えられる。そればかりでなく, 様々な計算対象において学習を積み重ねていくことにより, NNは高度に知的化されていく。このような学習の積み重ねにより, 最終的には計算対象ごとに学習を行う必要はなくなり, それまでの学習結果から最適解を効率よく予測し獲得可能となることも期待できる。

以下では, はじめに本最適化計算で使用したNNの基本構成について述べる。次に, NNを応用した電界最適化アルゴリズムを構築する。最後に, 本手法を用いて実際に電界最適化計算を行い, 得られた結果について検証する。NNの有する学習機能の利用により, 一度学習を行ったNNから, 非常に高速に最適電極形状が得られることを確かめる。

### 5.2 ニューラルネットワークの基本構成

電界最適化計算にNNを適用するにあたり, 最適化問題やパターン認識問題

などへの有効性が確認されているバックプロパゲーション法 (Back Propagation, 以下BP) [2, 3] を使用する。BPは、図5.1に示すように入力層と1層以上の中間層および出力層からなる階層型の構造を有し、教師付の学習を行うNNモデルである。このNNモデルは、学習により、入力と出力との汎用的な関係をシステムに与えることができる。同図においては、中間層を1層とした3層構造について示している。ユニットの出力応答関数である図5.2のシグモイド関数は広範囲の入力に対しては感度が低下し、また出力は0~1の範囲である。したがって、入力データおよび教師データの値がこの出力範囲内になるように規格化する必要がある。そこで、次式を用いて規格化を行った。

$$I_{pi}^{nor} = \frac{I_{pi} - I_{av}}{\sigma} \quad (5.1)$$

$$T_{pk}^{nor} = \frac{T_{pk} - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (5.2)$$

ここで、 $I_{pi}$ : パターンpのi番目の入力データ、 $I_{pi}^{nor}$ : 規格化された入力データ、 $I_{av}$ : 入力データ全体の平均、 $\sigma$ : 入力データの標準偏差、 $T_{pk}$ : パターンpのk番目の教師データ、 $T_{pk}^{nor}$ : 規格化された教師データ、 $T_{max}$ : 教師データの最大値、 $T_{min}$ : 教師データの最小値である。

また、1回の学習における誤差の評価値として、次のように全パターンの出力について教師データとの誤差平均Err (0~100) をとる。以後、学習誤差とはこの値を指すことにする。

$$Err = \frac{\sum_{p=1}^{PN} \sum_{k=1}^{ON} |T_{pk} - O_{pk}|}{PN \cdot ON} \times 100 (\%) \quad (5.3)$$

ここで、 $O_{pk}$ : パターンpのk番目の出力データ、PN: 学習パターン数、ON: 出力層のユニット数である。

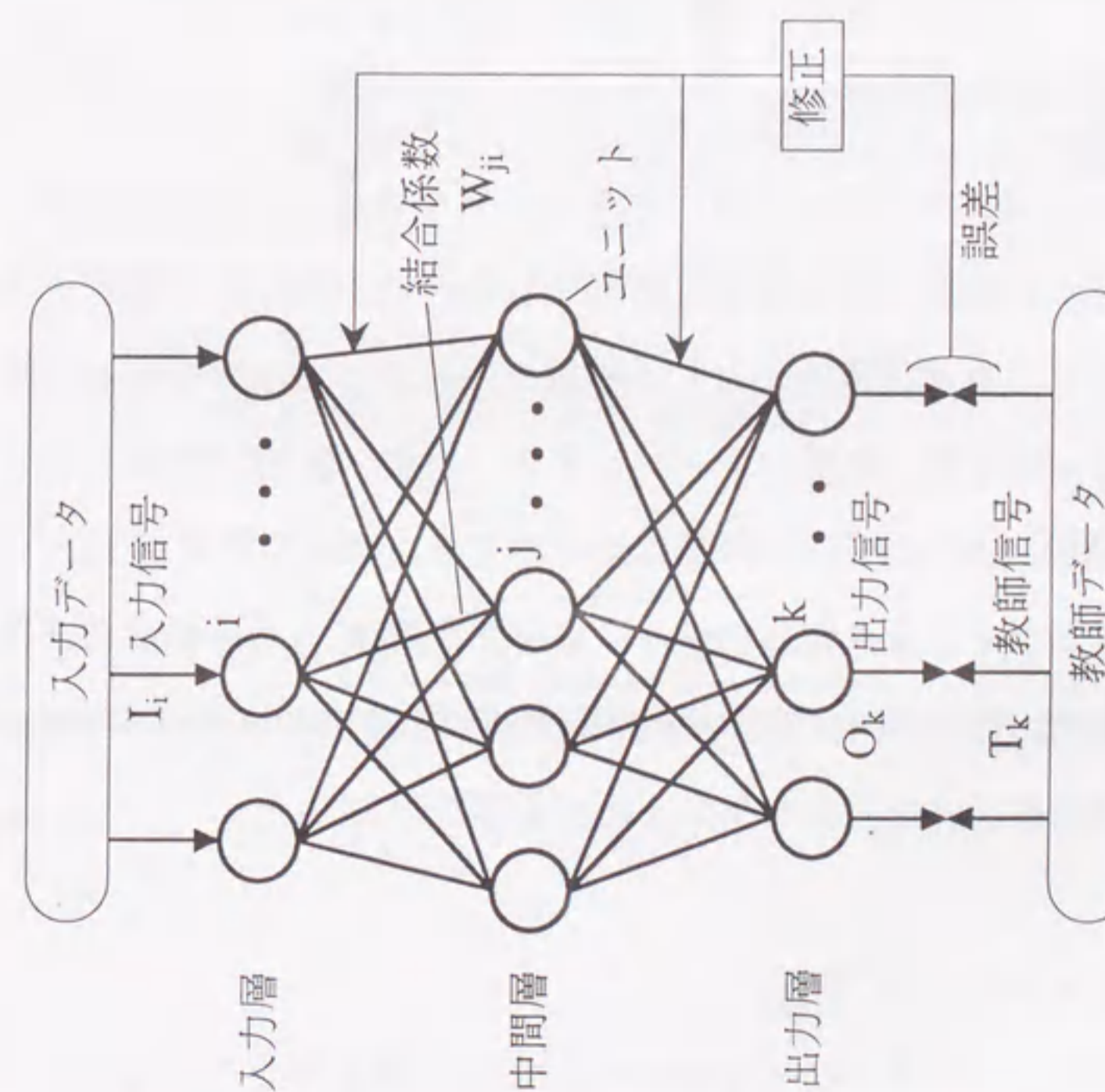


図5.1 ニューラルネットワークの基本構成

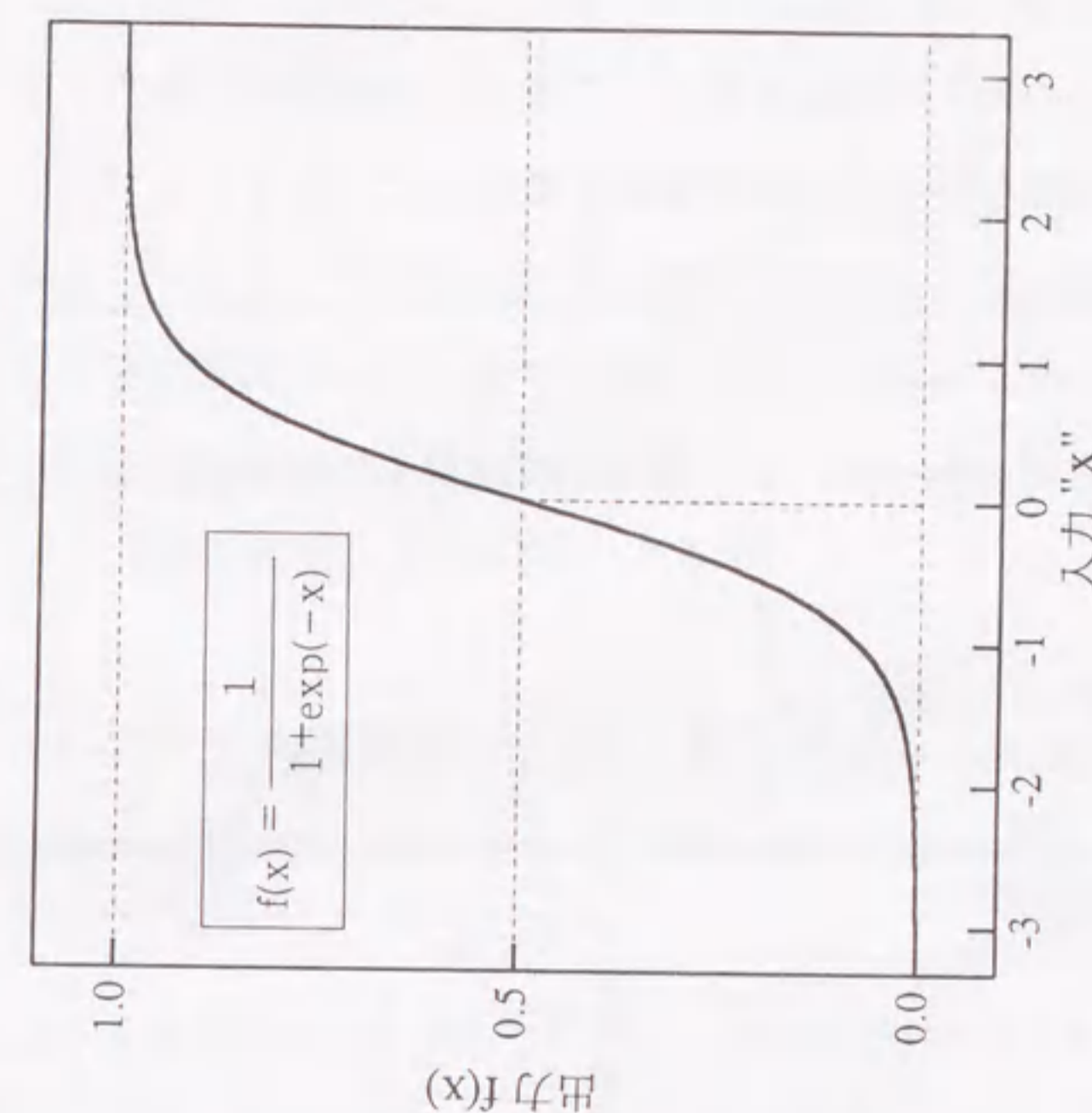


図5.2 シグモイド関数

現在のBPにおいては、学習パターンとしてどのような入力-出力関係を与えるかが、1つの大きな問題である。これらは学習効率に多大な影響を与えるため、より有効な適用法の研究報告が数多くなされている<sup>14,51</sup>。しかし、汎用性の高い学習パターンの与え方はいまだ完成されておらず、人間の経験に頼る部分が多いのが現状である。今回、学習パターンの設定や学習パラメータの値などを各種変化させ、その最良な解が得られた適用法を用いることにした。

### 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

図5.3に、今回開発したNNを用いた電界最適化の流れ図を示す<sup>16-81</sup>。また、上記アルゴリズムの概念図を図5.4に示す。図5.3からわかるように、本アルゴリズムは、大きく3つの手順に大別することができる。以下、手順ごとに具体的な内容を述べる。

#### (1) ニューラルネットワークの学習のためのデータ作成

電界最適化にNNを適用するにあたり、学習データを作成する必要がある。そのため、表面電界や電極形状に関する情報を数値データ化し、学習データとして用いる。まず、最適化領域に対し、直線や円弧などの簡単な形状で模擬した電極形状をm個用意し学習パターンとする。次に、学習パターン上に等間隔にn個の輪郭点を配置する。学習パターン p (p:1~m) の輪郭点 i (i:1~n) に対し、図5.5に示すような電界 ( $E_{pi}$ )、縦断面曲率 ( $C_{pi}$ )、横断面曲率 ( $A_{pi}$ )、ギャップ長 ( $G_{pi}$ )、座標 ( $X_{pi}, Y_{pi}$ ) を計算し、学習データとする。なお、以下では、縦断面曲率・横断面曲率をまとめて曲率と呼ぶ。

#### (2) ニューラルネットワークの学習

次に、上で作成された学習データを用いて、NNの学習を行う。ここでは、

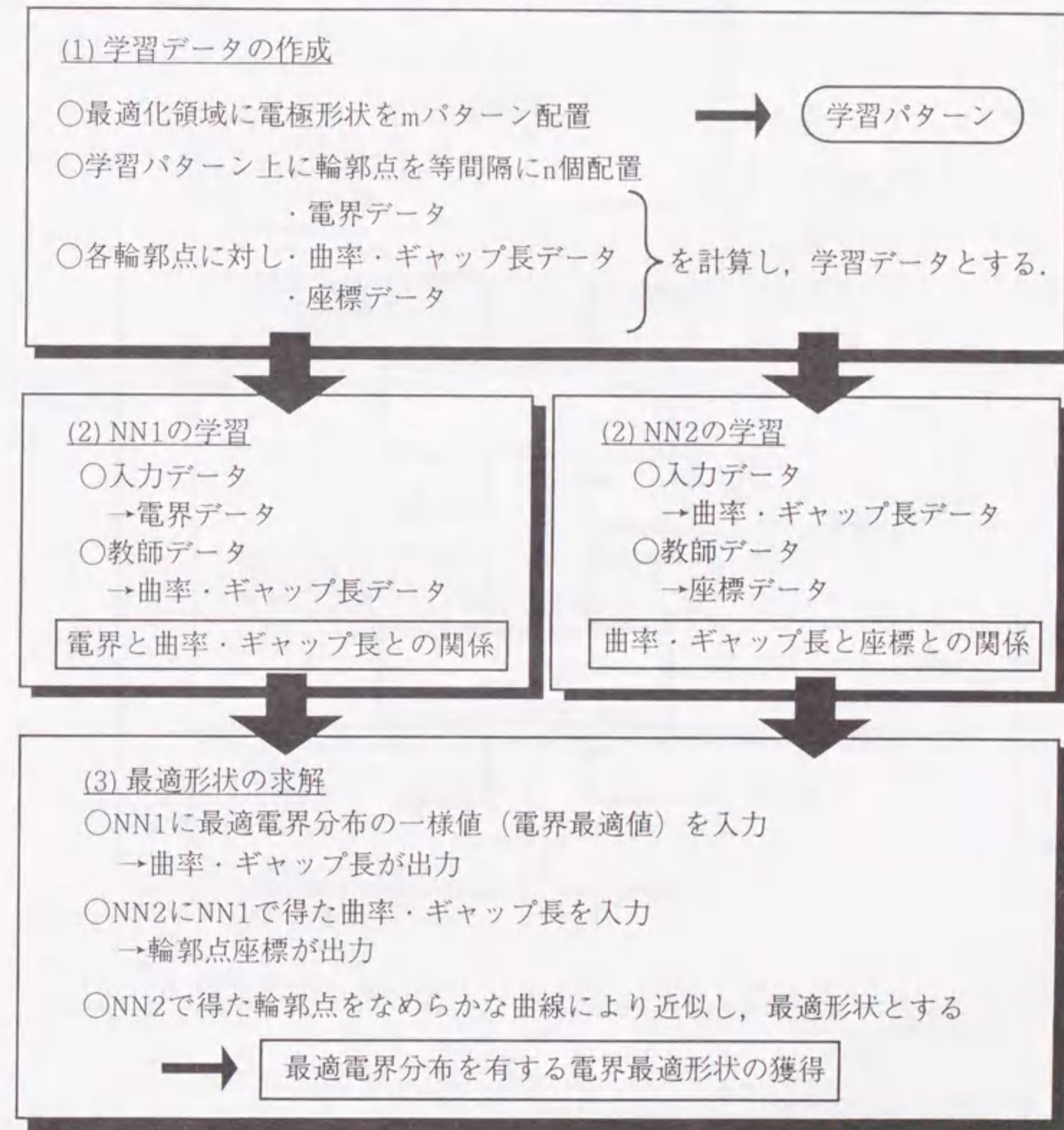


図5.3 ニューラルネットワークを用いた電界最適化手法の計算手順

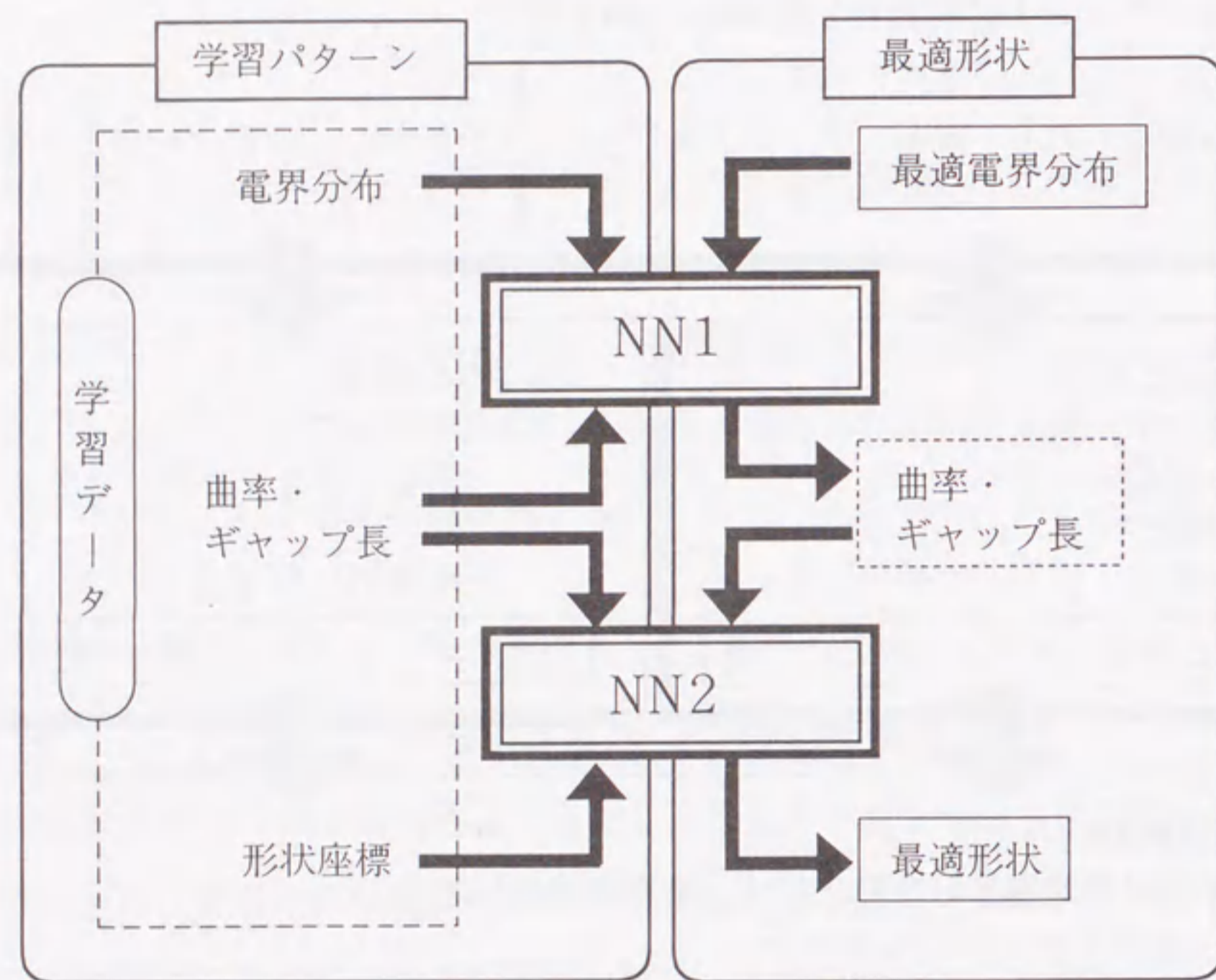
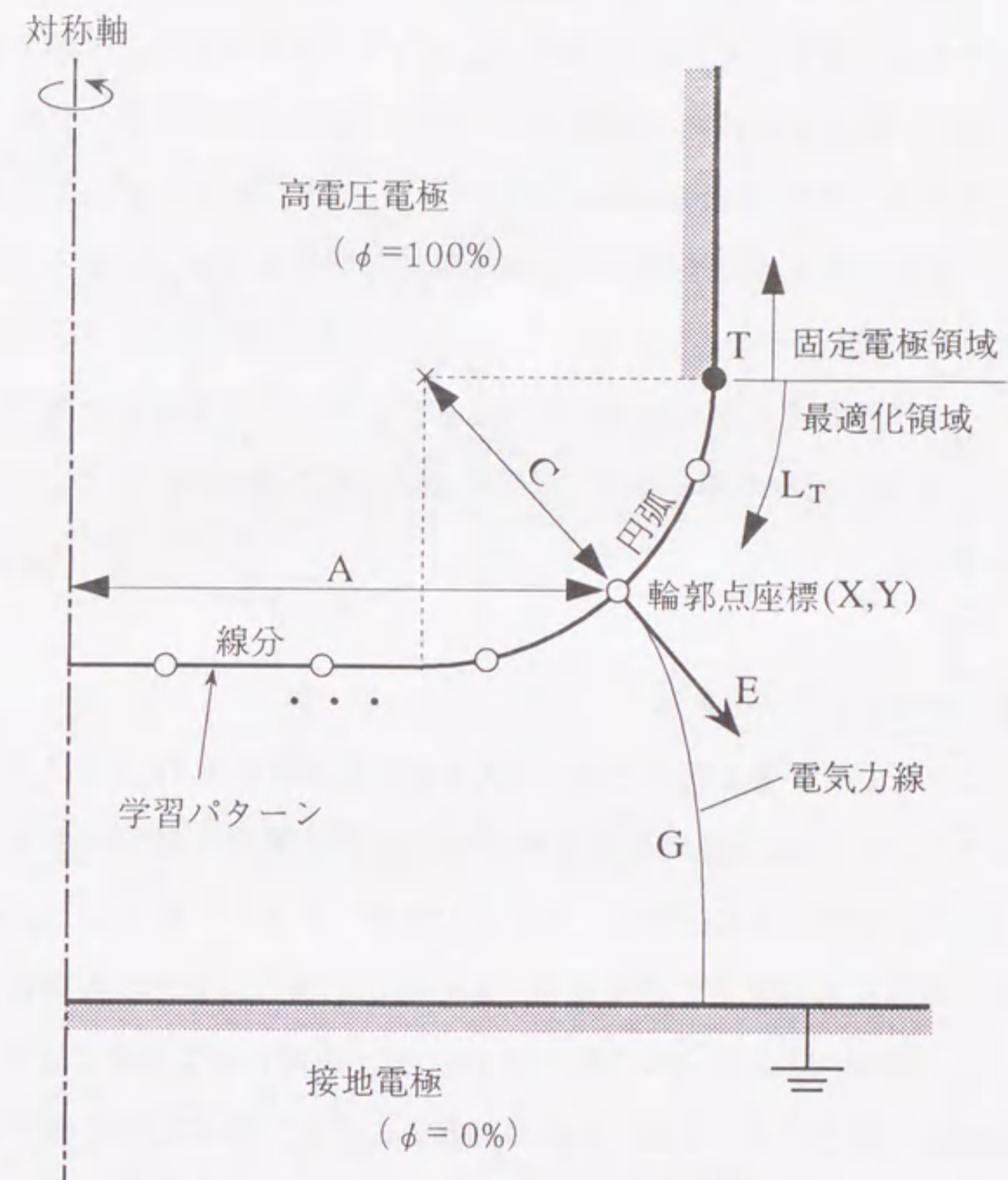


図5.4 ニューラルネットワークを用いた電界最適化手法の概念図



電界データ	E	電界
曲率・ギャップ長データ	C	縦断面における曲率
	A	横断面における曲率
	G	電気力線に沿ったギャップ長
座標データ	X	X座標
	Y	Y座標

図5.5 学習パターンおよび学習データ

図5.6に示すように、NNを2種類用意し、NN1、NN2とする。電極表面電界 ( $E_{pi}$ ) と、曲率・ギャップ長 ( $C_{pi}, A_{pi}, G_{pi}$ ) との関係をNN1に学習させる。また、曲率・ギャップ長 ( $C_{pi}, A_{pi}, G_{pi}$ ) と座標 ( $X_{pi}, Y_{pi}$ ) との関係をNN2に学習させる。このように、NN1とNN2の2種類のNNを用いる理由は、次の通りである。電極表面電界は、電極表面の曲率・ギャップ長に強く依存する。このため、NN1は、電極表面電界と表面形状との汎用的な関係を与え、対象とする電極形状に対する依存性が小さい。従って、NN1は学習を積み重ねることにより、問題ごとに学習を行う必要性が小さくなる。すなわち、最適化対象ごとに必要なNNの学習はNN2のみとなり、学習時間の大幅な短縮が可能となると考えたためである。

### (3) 電界最適電極形状の求解

このようにして学習を行ったNN1の入力層に最適電界値 ( $E_0$ ) を入力することにより、NN1の出力層に最適電界分布を有する電極の曲率・ギャップ長 ( $C_{i0}, A_{i0}, G_{i0}$ ) が得られる。次に、得られた曲率・ギャップ長 ( $C_{i0}, A_{i0}, G_{i0}$ ) をNN2の入力層に入力することにより、NN2の出力層に最適形状の輪郭点座標 ( $X_{i0}, Y_{i0}$ ) が得られる。得られた輪郭点 ( $X_{i0}, Y_{i0}$ ) を滑らかな曲線で近似し、電界最適電極形状とする。なお、上述の計算に先立ち、最適電界値 ( $E_0$ ) の決定を行う必要がある。この決定手順については、次節で述べる。

## 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

前節で述べたNNによる電界最適化手法を検証するため、図5.7に示す接地円筒容器中における高電圧棒電極先端形状の電界最適化計算を行った<sup>[6-8]</sup>。同図に示すように、棒電極と接地円筒容器の壁面との距離をdとする。また、太線部分を固定領域とし、棒電極の先端部分を最適化対象領域とする。

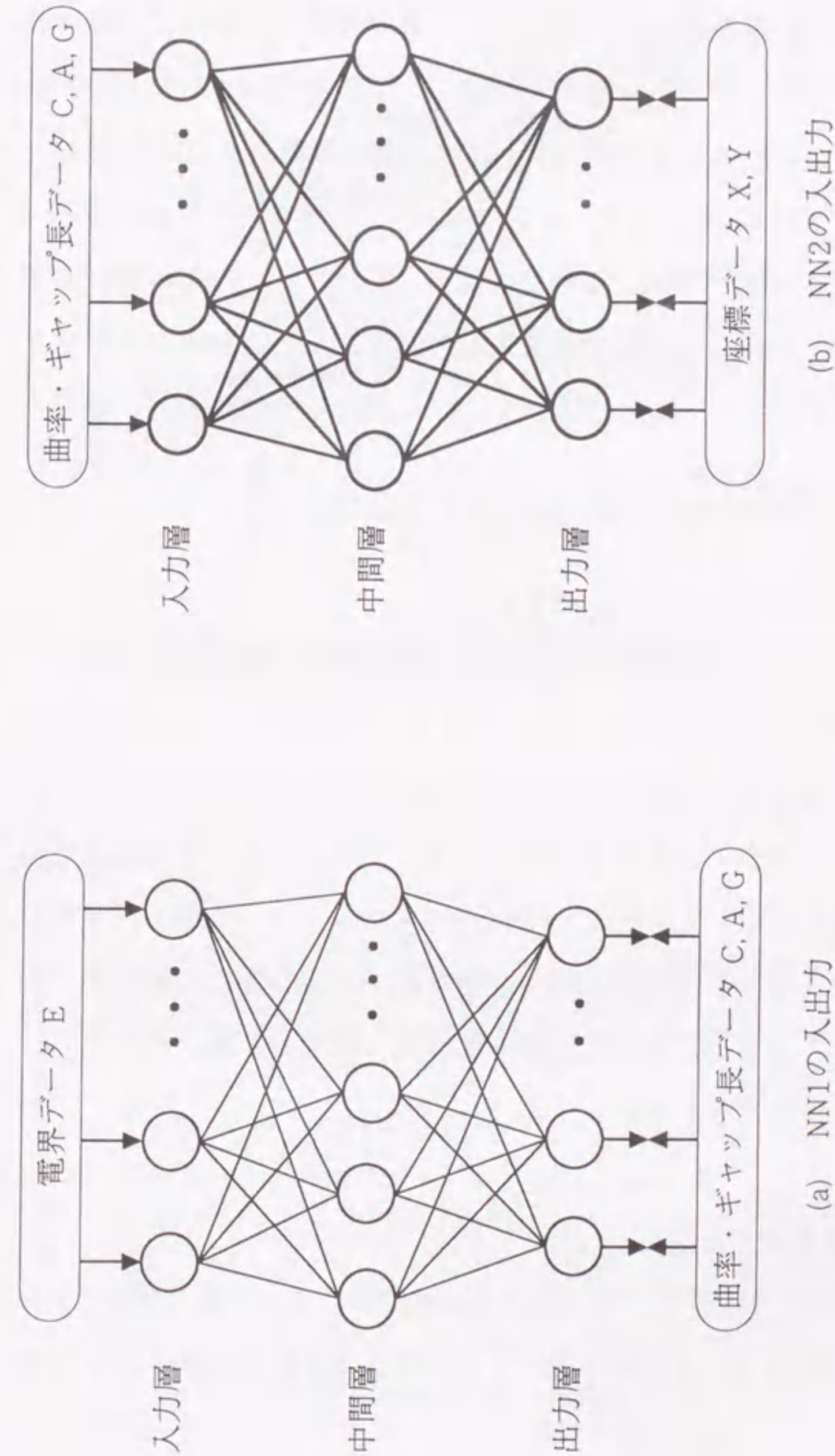


図5.6 ニューラルネットワーク NN1, NN2の基本構成

<5.4.1> 学習データの作成

今回、電極形状の学習パターンとして、図5.7の#1~#10の細線で示すような10パターンを用意した。d=20cmとした場合、学習パターン#1~#10に対する電極表面上の各電界分布は、図5.8のように得られる。この図から、どの学習形状においても、その表面電界分布は、一様電界分布とかなりかけ離れていることがわかる。各学習パターン上に等間隔に輪郭点を10点配置し、図5.5に示す諸学習データを計算した。その結果、1つの学習パターンにつき、10個の電界データと30個の曲率・ギャップ長データおよび20個の輪郭点座標データが得られた。これらの学習データをもとにユニット数や学習比率などの学習パラメータを決定し、図5.7および図5.8から得られる電極形状（曲率・ギャップ長）と電極表面電界分布との関係をNNに学習させることができる。

<5.4.2> ニューラルネットワークの学習

次に、NNの学習結果を示す。学習回数はNN1, NN2とも各3000回とした。d=20cmの時の誤差Errの収束状況を図5.9に示す。同図より、3000回の学習により初期状態と比較して学習誤差Errは0.5%以下とほとんど誤差のない状態に収束している。これらの学習における学習パラメータおよび学習結果を表5.1および表5.2に示す。実用上は、図5.9からもわかるように500回程度の学習回数で十分であり、学習時間は6分の1程度の6~7分以内に短縮可能である。したがって、これらの結果は、計算の精度および速度の観点から見て、実用上問題ないと言うことができる。

<5.4.3> 電界最適値の決定

次に、電界最適値 $E_0$ を決定し、NNに入力する必要がある。今回、学習パターンにおける電界分布より、以下の手順により電界最適値 $E_0$ を決定するアルゴリズムを考案した。その概念を以下に示す。

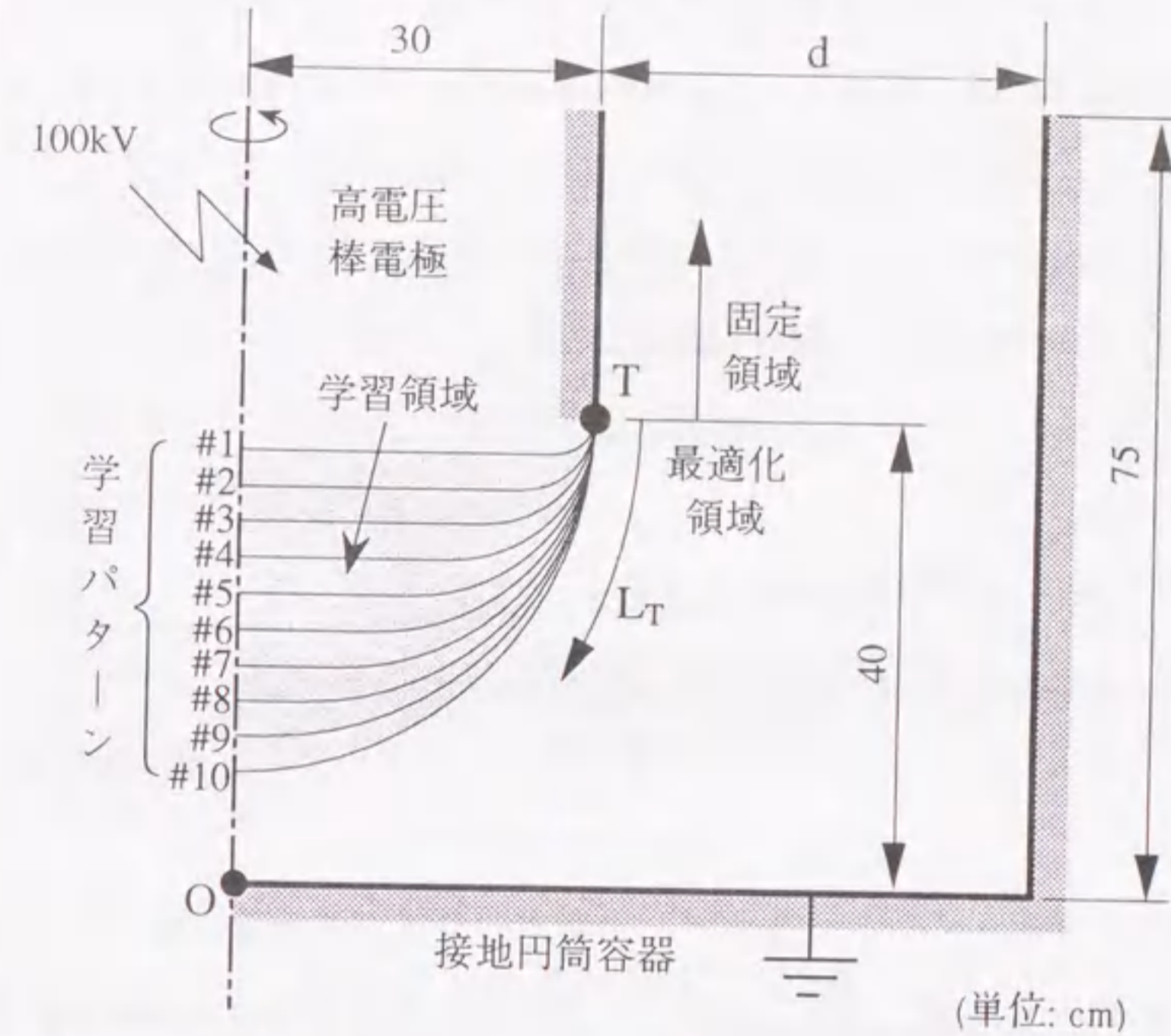


図5.7 最適化対象形状 (GIS母線端部) および学習パターン

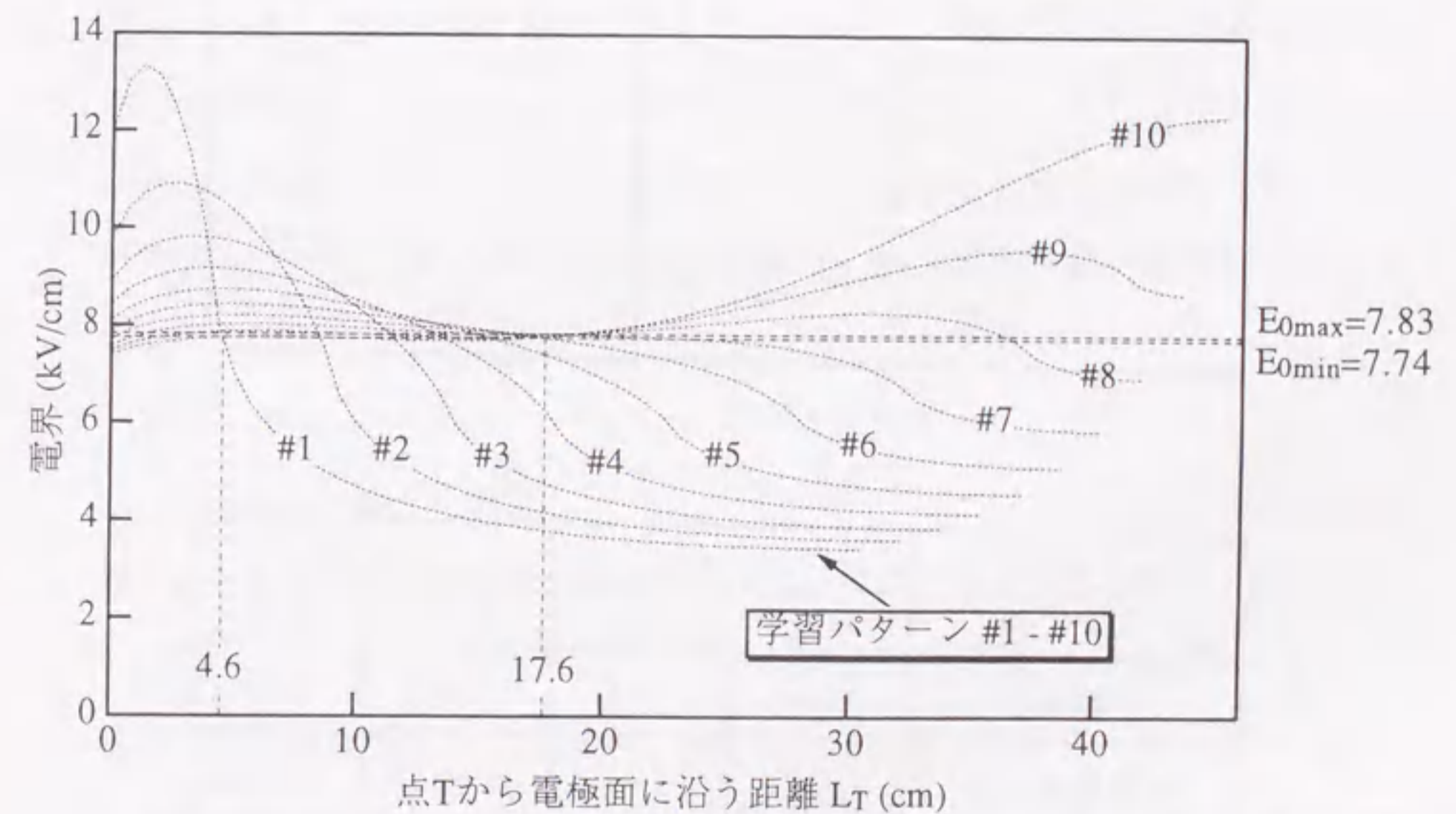


図5.8 d=20cmにおける学習パターン電極面上の電界分布

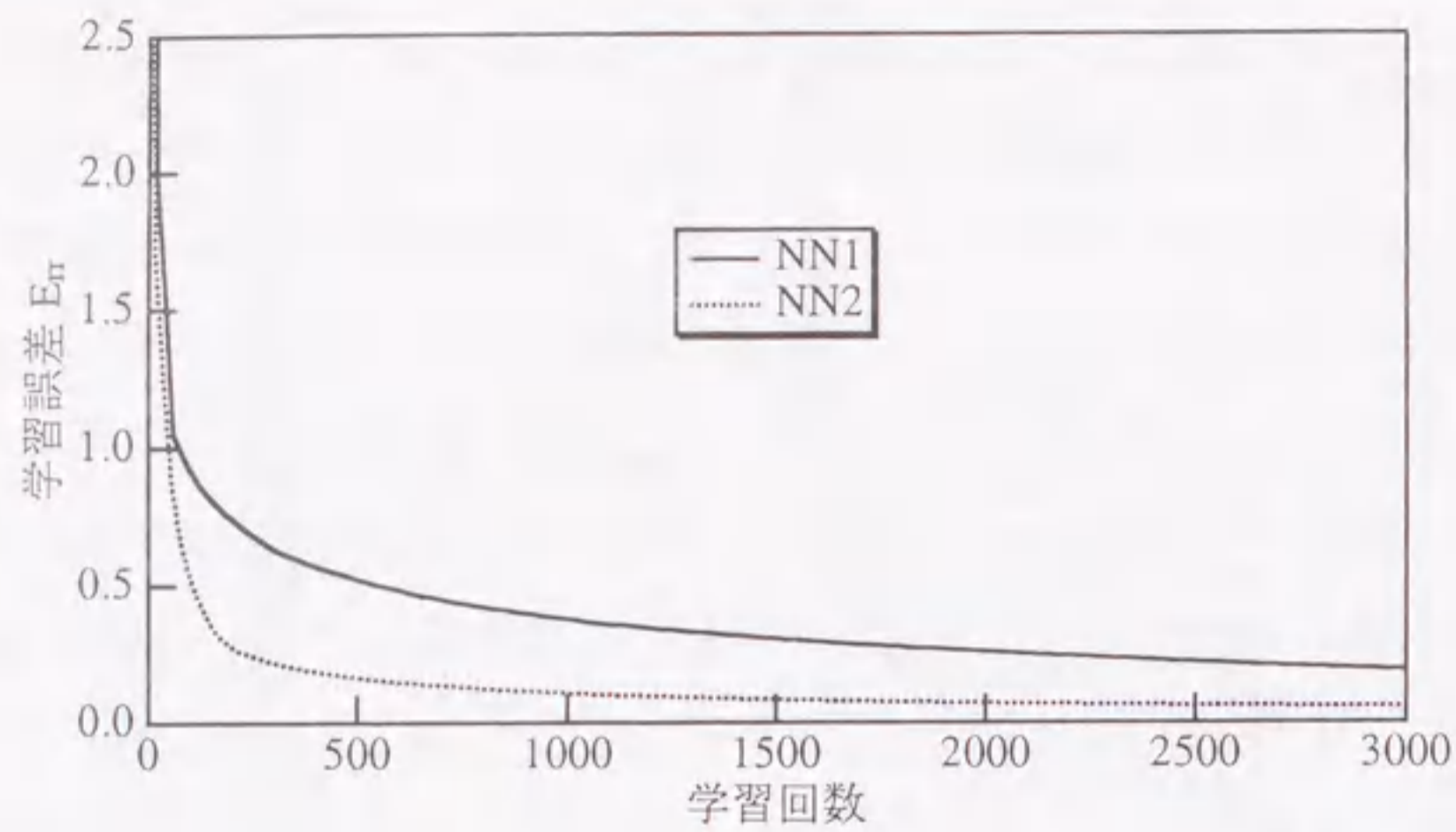


図5.9 学習誤差の収束状況

表5.1 学習パラメータの値

	NN1	NN2
学習パターン数 PN	10	10
入力層ニューロン数 IN	10	30
中間層層数 HL	2	2
中間層ニューロン数 HN	30	30
出力層ニューロン数 ON	30	20
結合係数更新用定数 <sup>12)</sup> $\alpha$	0.4	0.4
閾値更新用定数 <sup>12)</sup> $\beta$	0.3	0.3
モーメント係数 <sup>12)</sup> m	0.3	0.3

表5.2 NNの学習結果

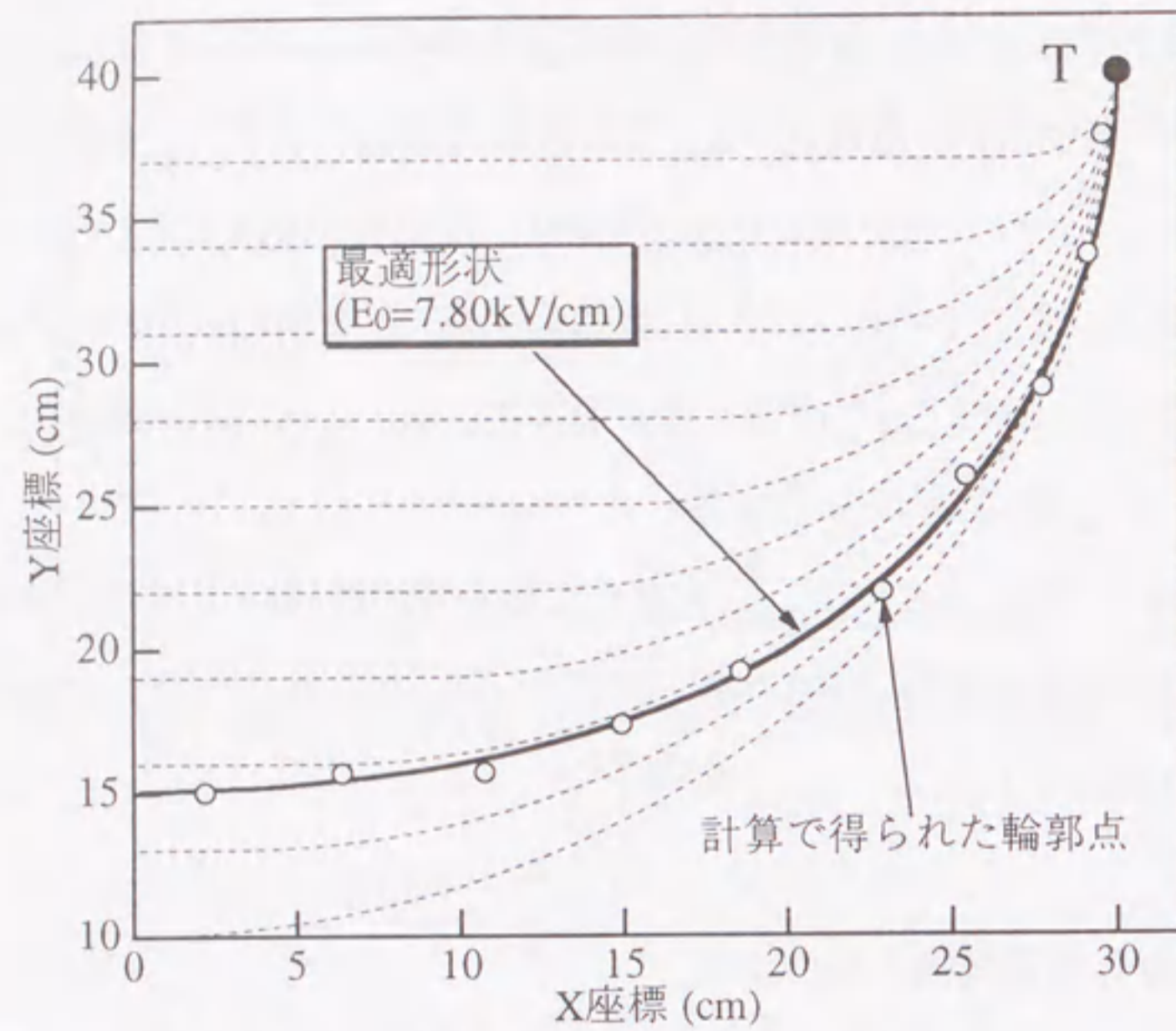
	d=20cm		d=40cm	
	NN1	NN2	NN1	NN2
学習回数	3000	3000	3000	3000
学習誤差 Err	0.1895	0.0495	0.1816	0.0494
学習時間	36分	39分	36分	39分

- (1) 図5.8の各学習パターン#1~#10における電界分布より, 点Tから電極面に沿った距離 $L_T$ における電界最小値 $E_{min}$ を求める. すべての $L_T$ について $E_{min}$ を求め, その中から最大の $E_{min}$ を電界最適値 $E_0$ の下限 $E_{0min}$ と決定する. 図5.8では,  $L_T=4.6\text{cm}$ の時の $E_{min}$ の値より,  $E_{0min}=7.74\text{kV/cm}$ となる.
- (2) (1)とは逆に, すべての $L_T$ について電界最大値 $E_{max}$ を求め, 最小の $E_{max}$ を電界最適値 $E_0$ の上限 $E_{0max}$ と決定する. 図5.8では,  $L_T=17.6\text{cm}$ の時の $E_{max}$ の値より,  $E_{0max}=7.83\text{kV/cm}$ とする.
- (3) (1), (2)より,  $E_{0min} \leq E_0 \leq E_{0max}$ を満たす $E_0$ を電界最適値とする. 本事例においては,  $7.74 \leq E_0 \leq 7.83$ である. このうちの代表的な値 $7.80\text{kV/cm}$ を電界最適値 $E_0$ とした.

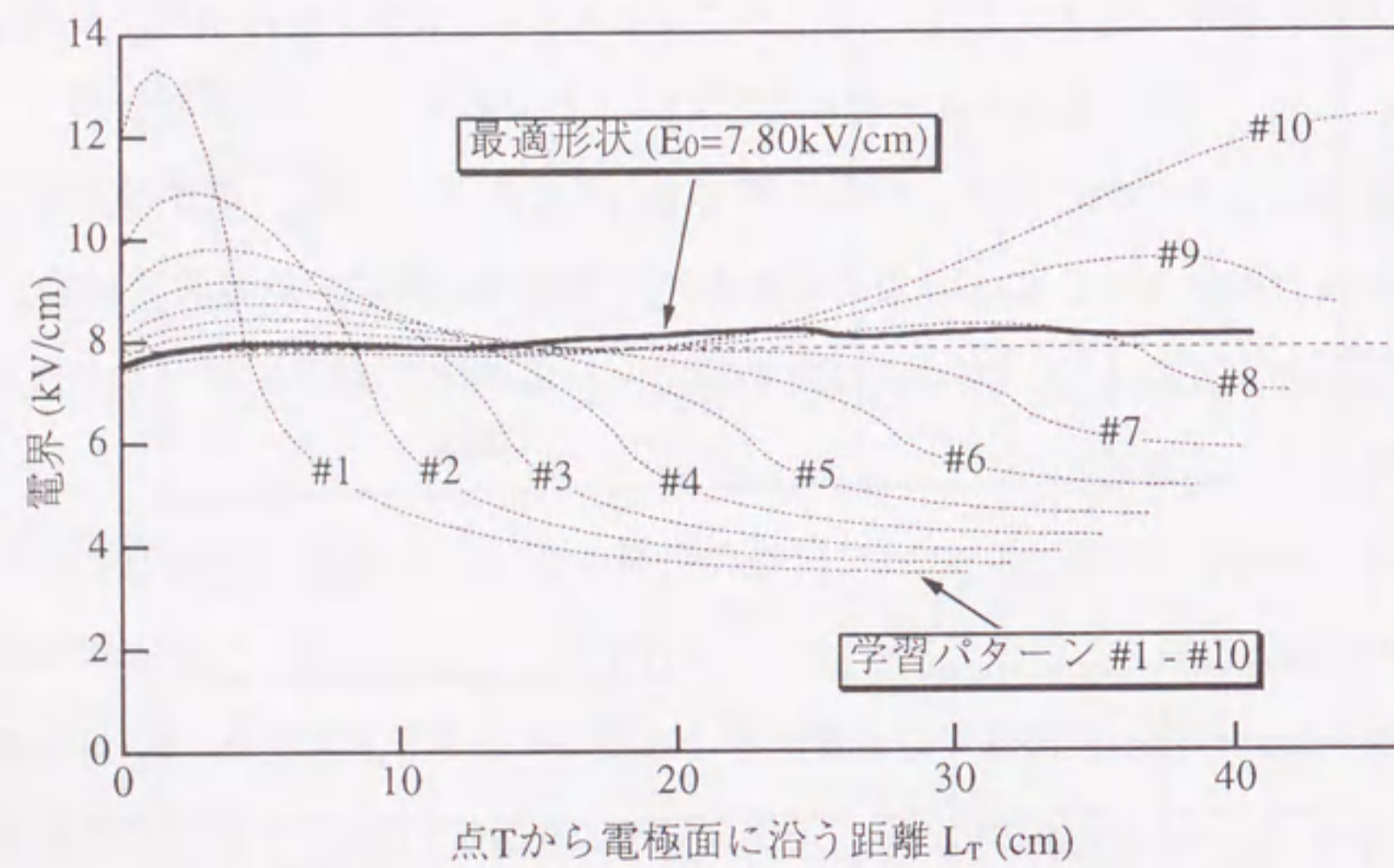
#### <5.4.4> 電界最適電極形状の求解

前節で決定した電界最適値をNN1の入力層に与え, 輪郭点座標および最適電極形状を図5.10(a)のように得た. また, この最適電極上の表面電界分布を図5.10(b)に実線で示す. 図5.10(b)からわかるように, NNを用いた電界最適化手法により, 一様な電界分布が得られていることがわかる. この電界分布と, 電界最適値 $E_0=7.80\text{kV/cm}$ との最大誤差は5%である. なお, 電界最適値をNN1の入力層に入力してから最適電極形状を獲得するまでの計算時間は約12秒であった. このように本手法は計算精度, 計算時間において実用上十分良い結果が得られた.

次に,  $d=40\text{cm}$ の場合について同様の計算を行った. 学習パターンとしては,  $d=20\text{cm}$ の場合と同様の10パターンを用いた. 図5.11に#1~#10の各学習パターンにおける表面電界分布を示す. 上述のアルゴリズムから,  $5.7 \leq E_0 \leq 7.0$ と得られ,  $d=20\text{cm}$ の時と同じ理由により $E_0=6.5\text{kV/cm}$ とした. このとき獲得した最適電極上の表面電界分布を図5.11に実線で示す. この図からわかるように,  $d=20\text{cm}$ のときと同様に, 最適電極面上ではほぼ一様な電界分布が得られることを確認した. この電界分布と, 電界最適値 $E_0=6.5\text{kV/cm}$ との最



(a) 計算で得られた輪郭点および最適形状



(b) 最適形状が有する電界分布

図5.10 d=20cmにおける電界最適化結果

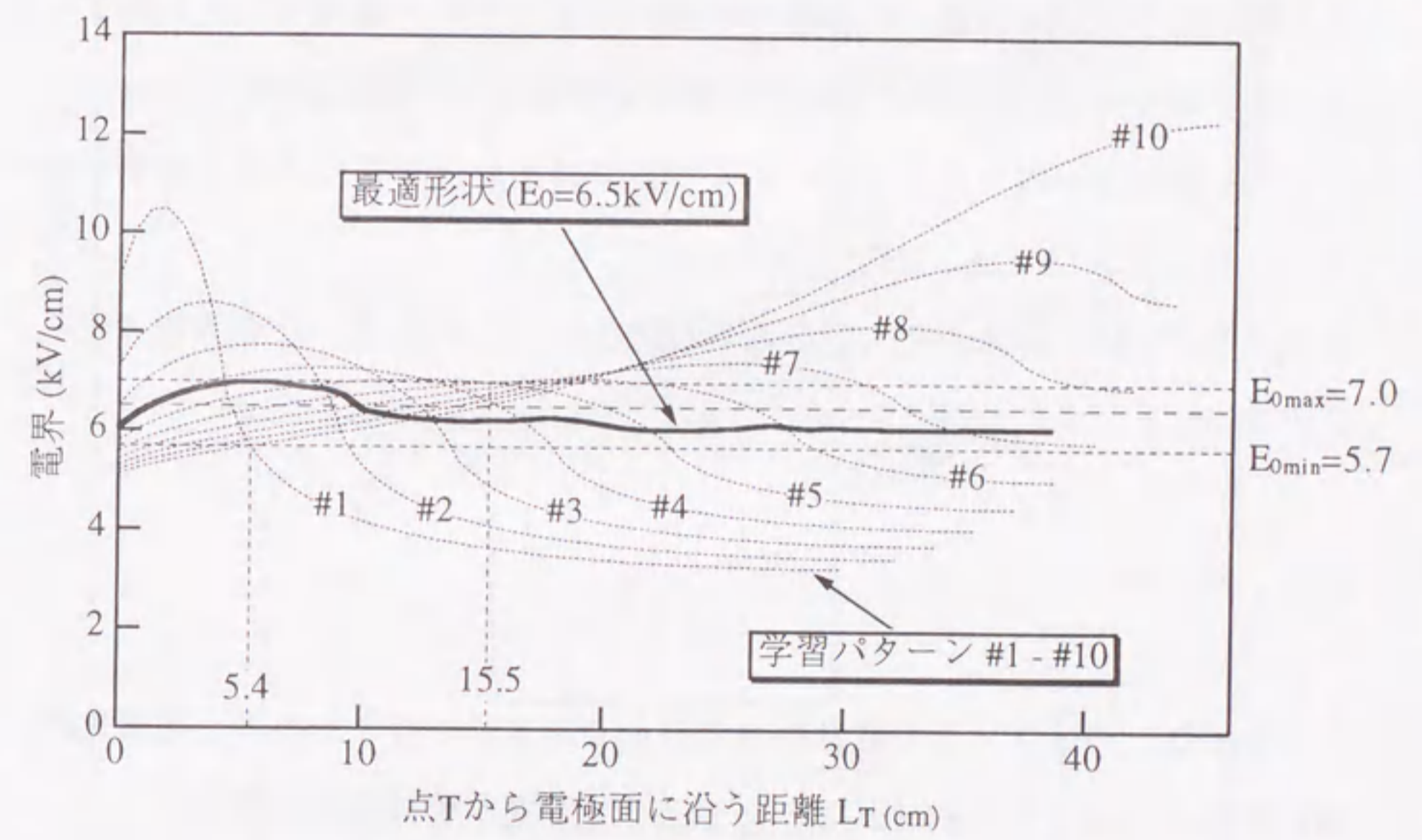


図5.11 d=40cmにおける最適形状が有する電界分布



大誤差は7%であり、 $d=20\text{cm}$ の時に比べ、やや増加している。この理由としては、 $E_0$ の範囲にやや広がりがあり、得られる電界分布に多少ばらつきが生じたためといえる。なお、同一の $d=40\text{cm}$ の電極配置において、第3章で開発した電界最適化手法で得た解は $6.4\text{kV/cm}$ となり、NNによる電界最適化においてもほぼ同じ値が得られていることを確認した。その一方で、計算時間は、NNを用いることにより20分の1に短縮できた。

最後に、電力機器設計への適用例として、断路器内部の接続部における電界最適化を行った。図5.12に、得られた結果を示す。同図において、対称軸の左側が最適化対象図面、対称軸の右側が最適化結果の電界ベクトル図である。上で得られた計算結果と同様に、最適電極面上で一様な電界が得られた。なお、計算結果が得られるまでに必要な計算時間は、学習に必要な時間を含めて、32ビットパソコンで約25分であった。

以上のように、計算速度・計算効率の観点から、NNを用いた電界最適化手法の有用性を示すことができた。

## 5.5 まとめ

本章では、パソコン上で電界最適化をより効率的に行うために、最適化問題に有効なニューラルネットワークを適用した電界解析技術の開発を行い、その有用性について検証した。その概要は以下の通りである。

- (1) NNを用いた電界最適化を行うにあたり、2種のNNを用いた電界最適化アルゴリズムを考案した。
- (2) 電界最適値を決定するにあたり、学習パターンの電極形状における電界分布より判断するアルゴリズムを考案した。

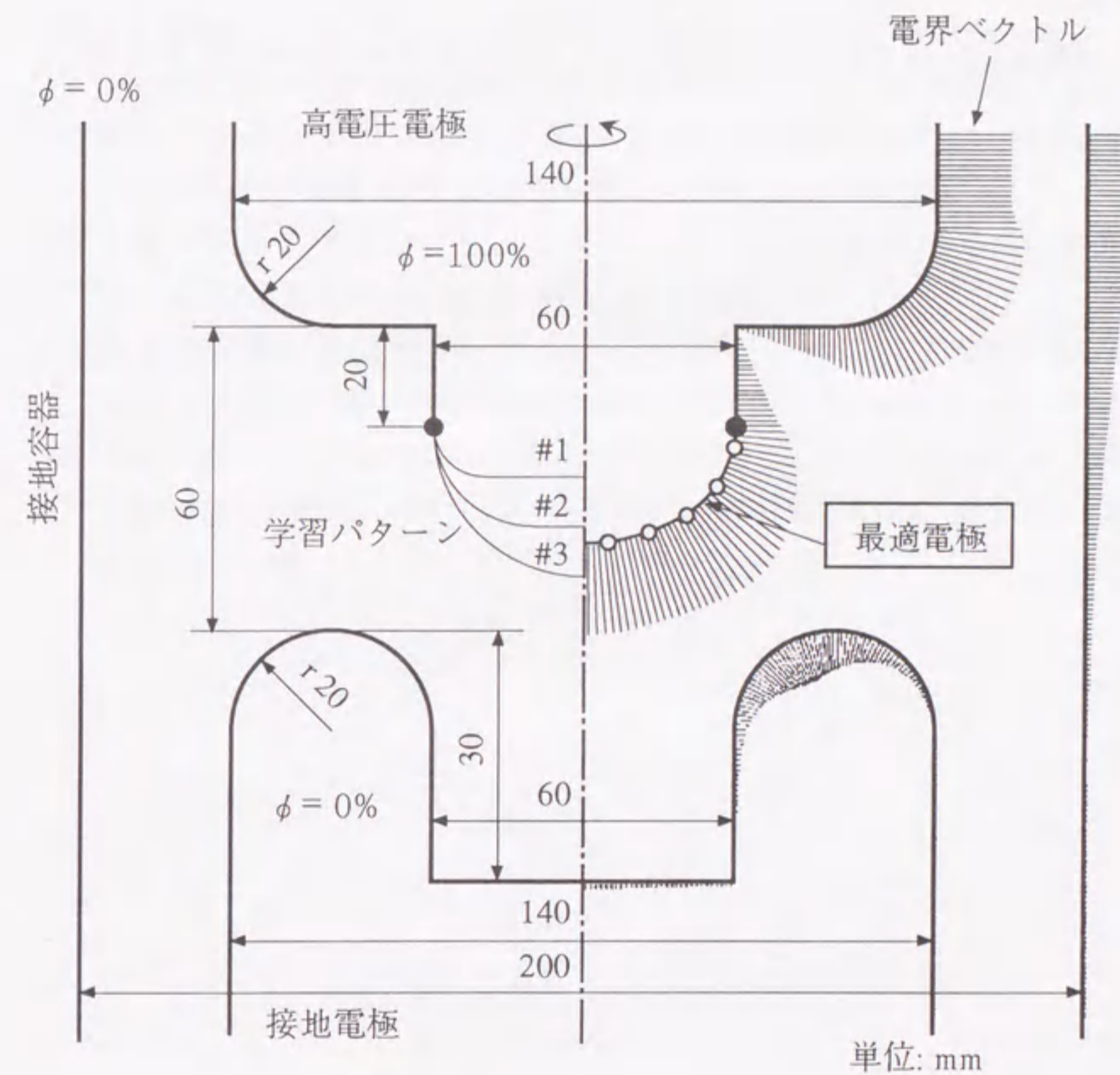


図5.12 断路器における電界最適化計算結果

- (3) 計算事例を用いて、開発したNNによる電界最適化手法の有用性を検証した。その結果、最適化前の学習パターンに比べ一様性の高い最適電極形状が求解でき、(2)の電界最適値決定アルゴリズムの妥当性が示された。また、一度学習を行えば、最適電極形状はパソコンを用いて12秒程度で求めることが可能であることが確かめられた。このことから、NNを用いた電界最適化は、特に計算効率という点からその有用性が検証できた。

## 第5章の文献

- [1] 泉井, 田岡: 「電力システムへの応用」, 電気学会雑誌, Vol.111, No.1, pp.17-19, 1991
- [2] 中野, 飯沼, ニューロンネットグループ, 桐谷: 「ニューロコンピュータ」, pp.11-84 (1989), 技術評論社
- [3] 矢川編: 「ニューラルネットワーク」, pp.1-46 (1992), 培風館
- [4] S.Ergezinger, E.Thomsen: "An Accelerated Learning Algorithm for Multilayer Perceptrons: Optimization Layer by Layer", IEEE Trans. on Neural Networks, Vol.6, No.1, pp.31-42, 1995.
- [5] 渡辺, 三谷, 西田, 大塚: 「しきい値揺らぎを利用した多層パーセプトロンの並列相関学習法」, 情報通信学会論文誌論 (D-II), Vol.J78-D-II, No.1, pp.140-146, 1995
- [6] 大塚, 加藤, 早川, 匹田, 大久保: 「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」, 電気学会論文誌B, Vol.115-B, No.11, pp.1387-1392, 1995
- [7] 大塚, 加藤, 早川, 匹田, 大久保: 「ニューラルネットワークを用いた電界最適電極形状の求解手法の開発」, 電気学会開閉保護・高電圧合同研究会, SP-94-54 HV-94-125, 1994
- [8] 大塚, 加藤, 早川, 匹田, 大久保: 「ニューラルネットワークの学習機能を用いた高効率電界最適化手法の開発」, 日本シミュレーション学会第15回計算電気・電子工学シンポジウム, No.IV-8, 1995

## 第6章 電界最適電極の絶縁特性に関する 実験的検証

### 6.1 まえがき

前章までに述べてきたような自動電界解析・電界最適化といった計算技術によって、より優れた絶縁性能を有する電力機器形状を机上で容易に求めることが可能となった。一方、より精密な最適絶縁設計のためには、このように机上の計算で得られた電界最適電極形状について、その絶縁性能を実験的に検証することが必要である。

このような観点から、本章においては、電界最適化計算により得られた形状を有する電極（電界最適電極）を実際に製作する。そして、電界最適電極の絶縁破壊特性について実験的検証を行う。第一段階として、GISなどで広く使用されているSF<sub>6</sub>ガスを絶縁媒質として用い、交流および標準雷インパルス電圧を印加した場合の、電界最適電極の有する絶縁破壊特性の測定を行う。また、空気を絶縁媒質とした場合の同様の実験も行い、両者の結果を比較・検討する。

### 6.2 電界最適電極形状

ここでは、実験で用いる電界最適電極の形状を得るために、次のような計算を行った。

#### (1) 電界最適電極形状および電極面上の電界分布の求解

第3章で開発した手法により電界最適化計算を行い、最適電極形状およびその電極面上の電界分布を得た。得られた電極形状を図6.1に示す。図6.1は、軸対称電極系であり、図中CからC'に至る領域が最適化領域である。なお、こ

の最適電極は、直径70mm、ギャップ長が10mmのものを示している。この電界最適電極に100kVの電圧を加えたときの電極面上の電界分布を図6.2に示す。この図からわかるように、電界最適化領域全体にわたって電界の変動幅は2%以内であり、一様な電界が得られているとみなすことができる。また、最適化領域の外側においては、最適化領域から離れるにつれて電界が急激に低減することがわかる。

## (2) 電界最適電極の製作

まず、電極製造加工を容易に行うために、計算で得られた複雑な形状を8種類の曲率半径をもつ円弧で近似した。この円弧近似の前後で電極面上の電界分布の変化は最大で1%程度であり、この近似が実用上十分な精度で行われていることを電界解析により確認した。次に、互いに相似形で、サイズの異なる4つの電極を製作した。すなわち図6.3に示すように、ギャップ長 10, 7, 5, 3mm に対応して、直径が 70, 49, 35, 21mm となるように電極の製作を行った。この場合、電界最適化領域の電極面積は、約3000~300mm<sup>2</sup>である。なお、電極の表面粗さは、絶縁特性を決定する重要な要素である。本実験においては、バフ研磨により電極面の粗さを1μm以下とした。また、本実験で用いた電極は、全てステンレス製である。実際に製作した電極の写真を図6.4(a)に、そのうち、ギャップ長10mmとして用いる電極の写真を図6.4(b)に拡大して示す。

## 6.3 実験方法

実験に用いた回路を図6.5に示す。空気中および大気圧SF<sub>6</sub>ガス中において、電界最適電極に交流(60Hz)および正・負極性の標準雷インパルス電圧(1.2/50μs)を印加し、絶縁破壊電圧を測定した。交流電圧については上昇法<sup>(1)</sup>(電圧上昇率約1kV/s)、雷インパルス電圧については昇降法<sup>(1)</sup>(電圧昇

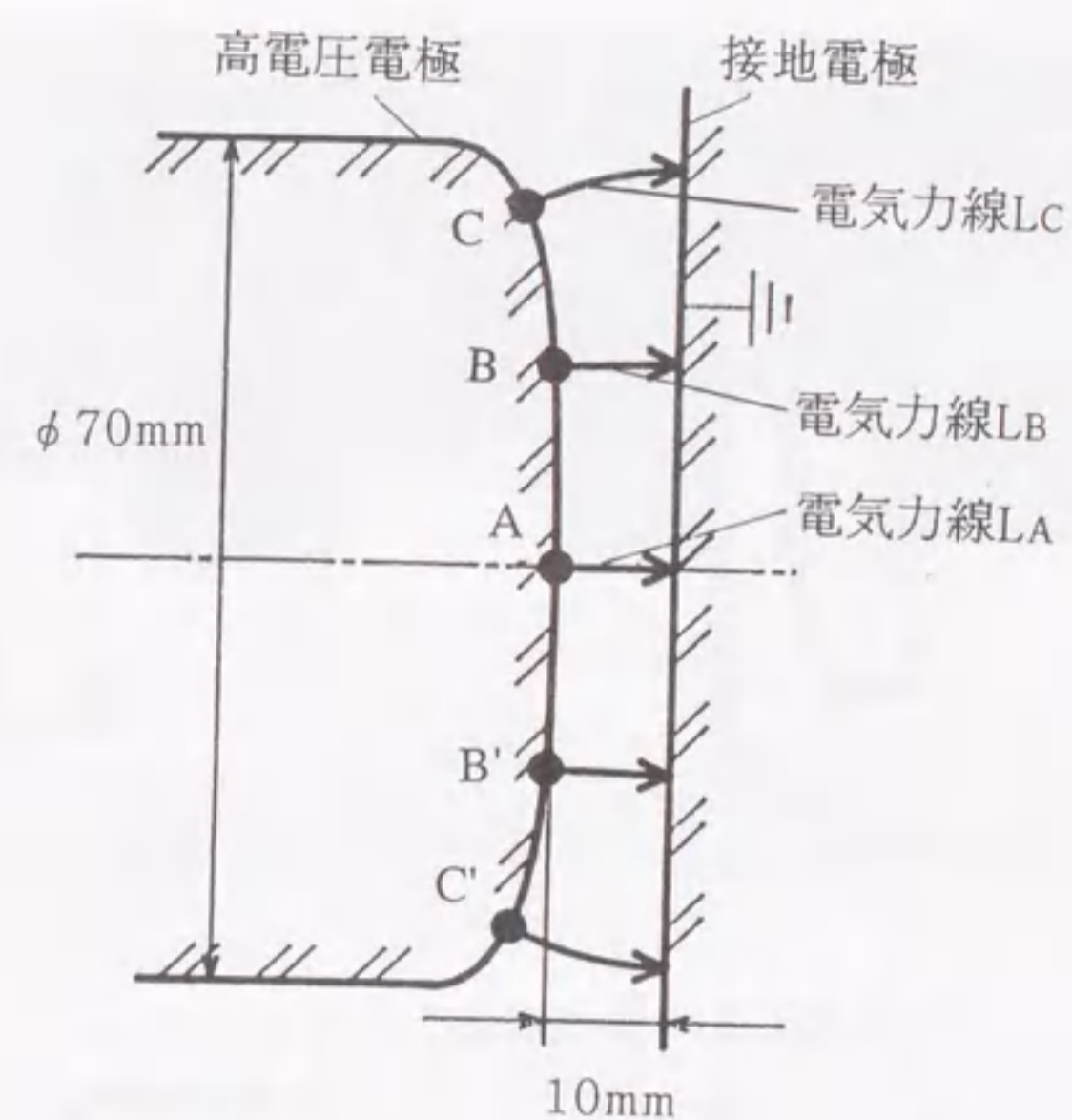


図6.1 電界最適電極の形状 (軸対称系)

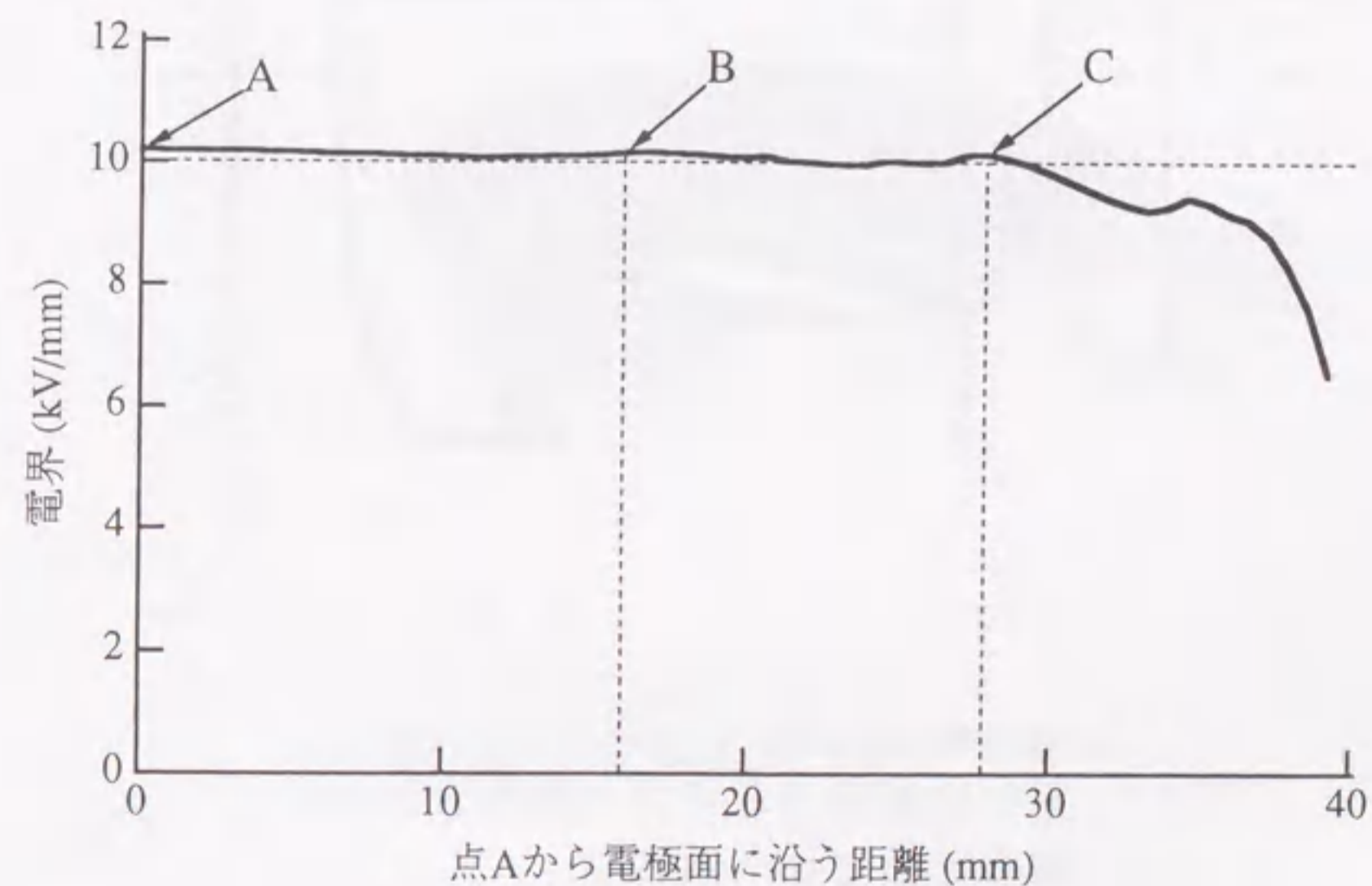
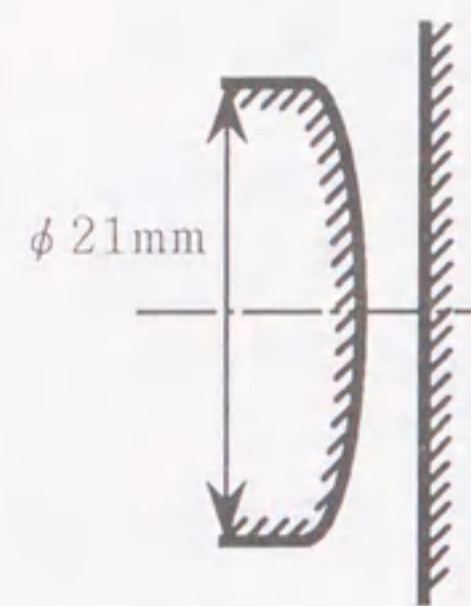
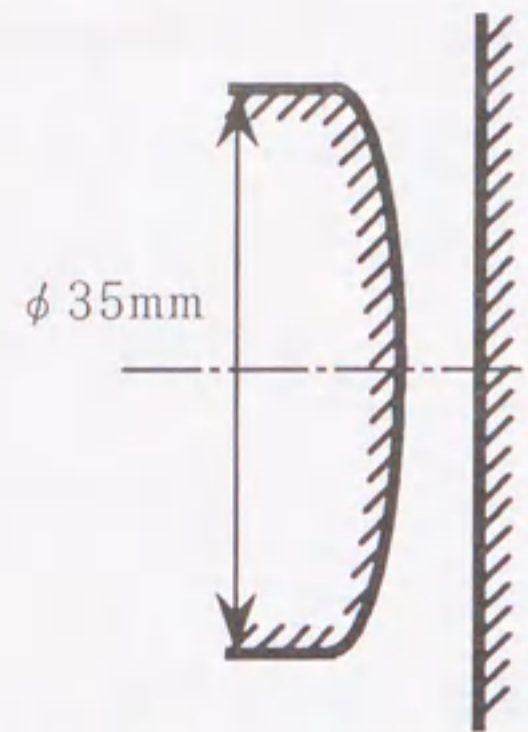


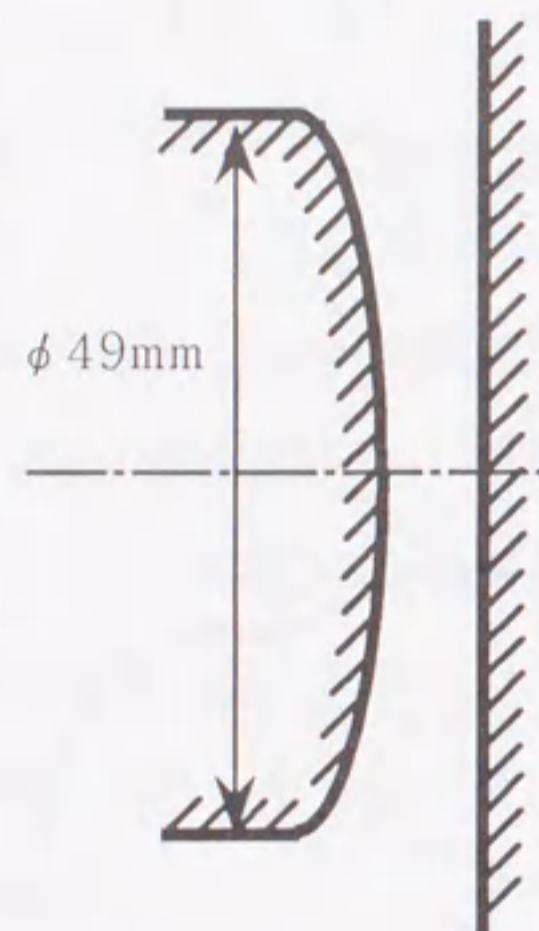
図6.2 電界最適電極面上の電界分布 (印加電圧100kV, ギャップ長10mm)



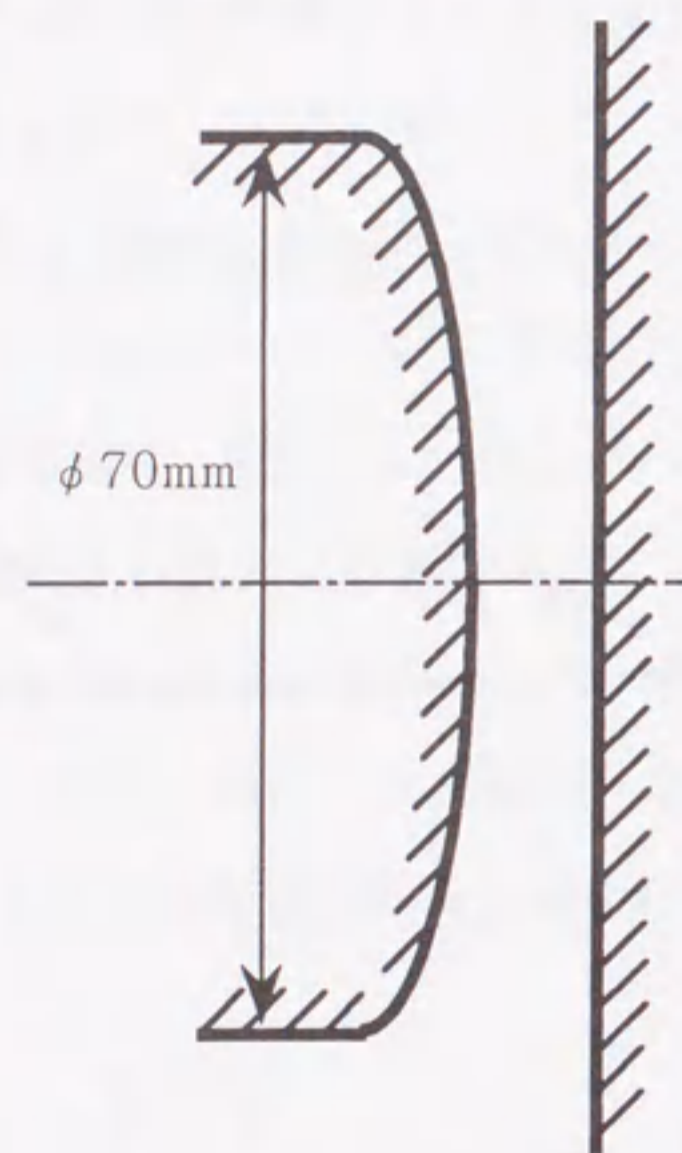
(a) ギャップ長=3mm



(b) ギャップ長=5mm



(c) ギャップ長=7mm



(d) ギャップ長=10mm

図6.3 互いに相似でサイズの異なる4つの電界最適電極の模式図



(a) 4つの互いに相似な電界最適電極



(b) ギャップ長10mmの電界最適電極

図6.4 製作された電界最適電極

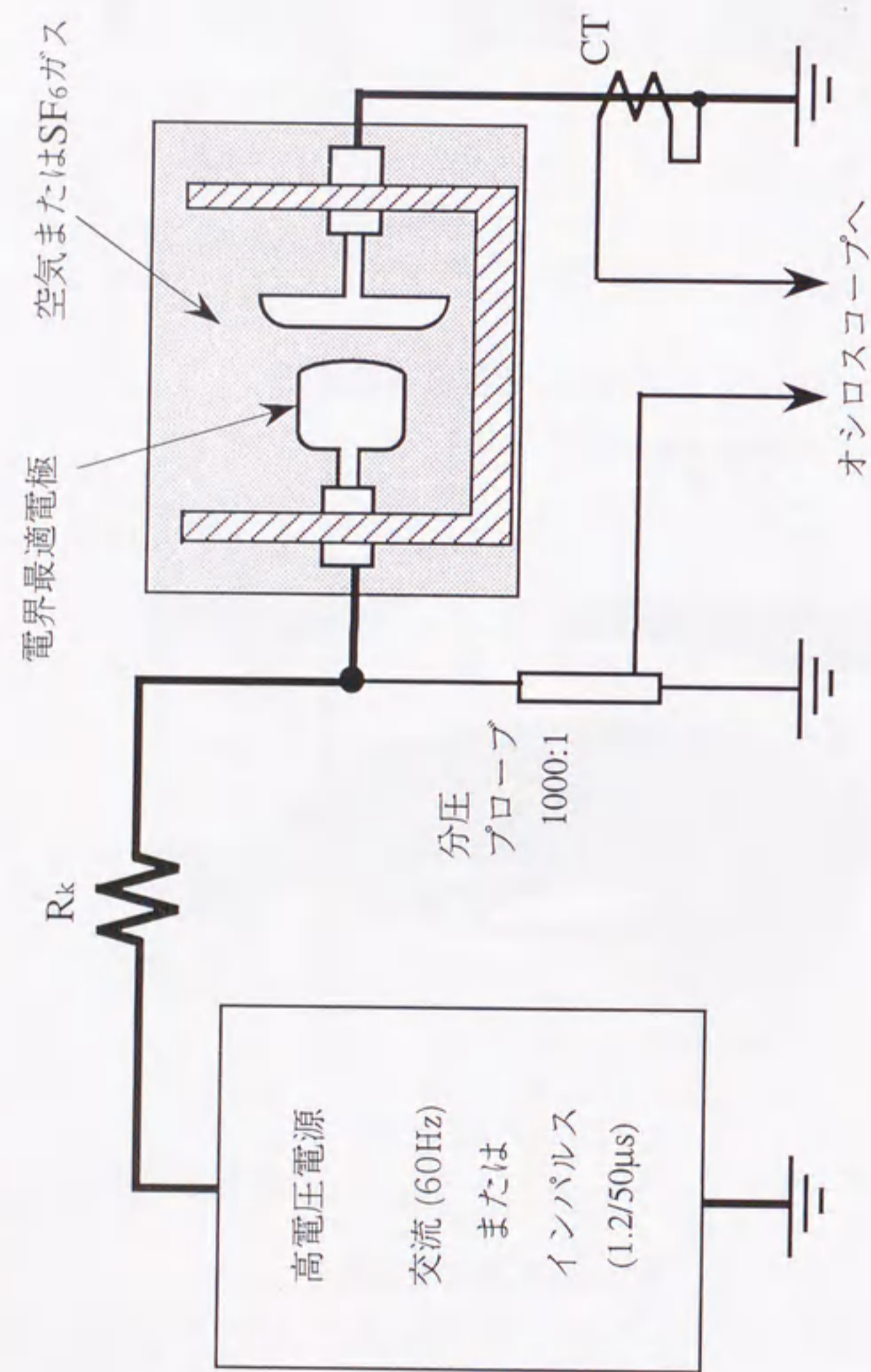


図6.5 絶縁破壊特性の測定用回路

降幅約1kV)を用い、それぞれの条件について電圧印加回数を50回とした。また、絶縁破壊によって生じるギャップ空間中の残存イオンの影響を抑えるため、絶縁破壊の後、次の測定までに約5分の時間間隔をおいた。

#### 6.4 実験結果および検討

測定された絶縁破壊電圧を電界値 $E_0$  (波高値)に換算し、それを理論値 $E_c$ で規格化したものを、電界最適電極のギャップ長に対してプロットした。これを図6.6に示す。ただし、破壊電界の理論値としては、ストリーマ転換条件式

$$\int_x (\alpha - \eta) dx = K \quad (6.1)$$

から得られる値を用いている。ここで、積分は電気力線に沿って行われ、積分区間は実効電離係数 $\alpha - \eta$ が正の領域である。また、右辺の係数 $K$ の値として、ここでは $K=18$ を用いた<sup>2)</sup>。衝突電離係数 $\alpha$ および電子付着係数 $\eta$ は、電界 $E$ (kV/cm)およびガス圧力 $P$ (atm)を用いて次式で与えられるとする<sup>3, 4)</sup>。

$$\text{空気中} \quad \frac{\alpha - \eta}{P} = 0.18 \left( \frac{E}{P} - 24.2 \right)^2 \quad \left( 24.2 \leq \frac{E}{P} \leq 50 \right) \quad (6.2)$$

$$\text{SF}_6\text{ガス中} \quad \frac{\alpha - \eta}{P} = 26.2 \left( \frac{E}{P} - 88.9 \right) \quad \left( 88.9 \leq \frac{E}{P} \leq 120 \right) \quad (6.3)$$

なお、空気中および $\text{SF}_6$ ガス中においては、大気圧付近の平等・準平等電界下での破壊電界が上式(6.1)～(6.3)で実用上十分な精度で求められることは、宅間<sup>5)</sup>、Malikら<sup>6)</sup>によって示されている。

図6.6より、 $\text{SF}_6$ ガス中においては、電界最適電極においても破壊電界の電極サイズ依存性が顕著であることがわかる。これに対して、本実験条件下で

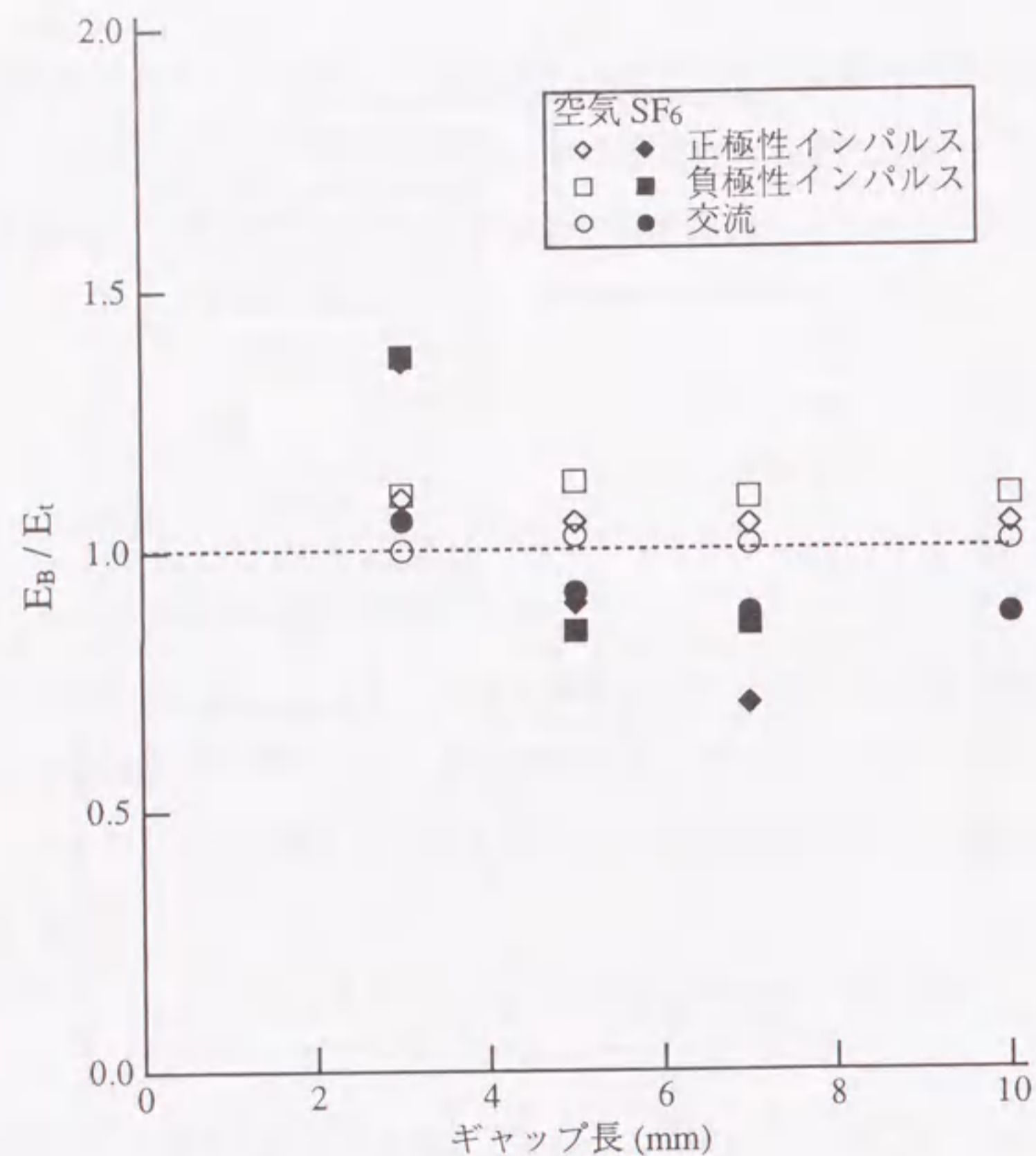


図6.6 空气中およびSF<sub>6</sub>ガス中における電界最適電極の絶縁破壊電界

は、空气の絶縁破壊電界のサイズ依存性は非常に小さいことがわかる。

次に、交流および負極性インパルス電圧印加時の、空气中およびSF<sub>6</sub>ガス中における放電痕分布を図6.7に示す。この図は、図6.1において電界最適電極を右方から見たものである。この図から、空气中では電極面の中央付近に放電痕が集中しているのに対して、SF<sub>6</sub>ガス中では一様電界範囲のほぼ全体に放電痕が広がっていることがわかる。また、ギャップ長や電圧波形、およびインパルス電圧の極性による放電痕分布の違いはほとんど見られず、ガスの種類による放電痕分布の違いがより顕著であることがわかった。

このように、同一の電界最適電極を用いた場合でも、空气中とSF<sub>6</sub>ガス中の絶縁破壊特性に違いが見られることがわかった<sup>7), 8)</sup>。このような絶縁破壊特性の違いを、図6.8を用いて議論する。図6.8は、電界最適電極面上の3点 A, B, C (図6.1参照) から接地電極まで電気力線に沿って得られるギャップ空間中の電界分布を示す。この図から、点Aのような、電極の中央から出発して電気力線に沿って得られる電界分布の場合には、ギャップ空間全体にわたって電界はほぼ一定に保たれている。一方、点BやCのように、電極の中央から離れた点から出発した場合には、電気力線に沿って得られる電界分布が一定でなく、接地電極に近づくにつれて電界が低減していく様子が見られる。

表6.1は、今回得られた実験結果および空間中の電界のうち、どの部分が絶縁破壊に大きく貢献しているかを模式的に示したものである。絶縁破壊の発生は、SF<sub>6</sub>ガス中においては電極表面電界に強く依存する<sup>9)</sup>。このため、電極表面の電界が一様である範囲全体、すなわち電界最適化領域全体にわたり破壊が発生していると考えることができる。一方、空气中においては、電極表面の電界のみならず、ギャップ間の電界分布にも強く依存している<sup>9)</sup>。このため、空气中では電極面の中央付近に放電痕が集中していると考えられる。図6.6に示したような電極のサイズの変化による破壊電界の変化も同様に考えることができる。すなわち、SF<sub>6</sub>ガス中においては、破壊の発生しうる電極面のサイズは、電界最適化領域のサイズと等しく、空气の場合と比較して大き

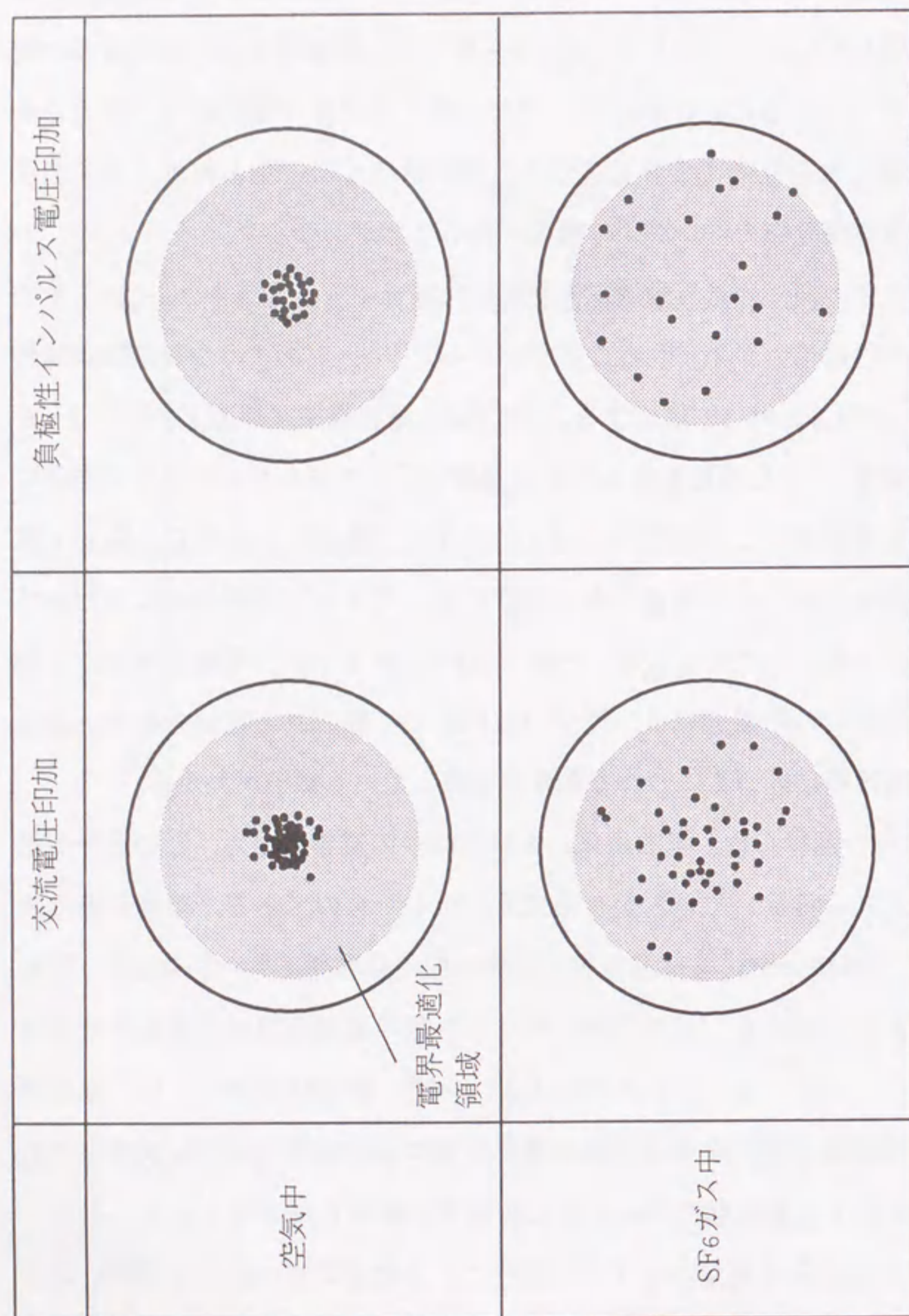


図6.7 電界最適電極面上の放電痕の分布 (ギャップ長5mm)

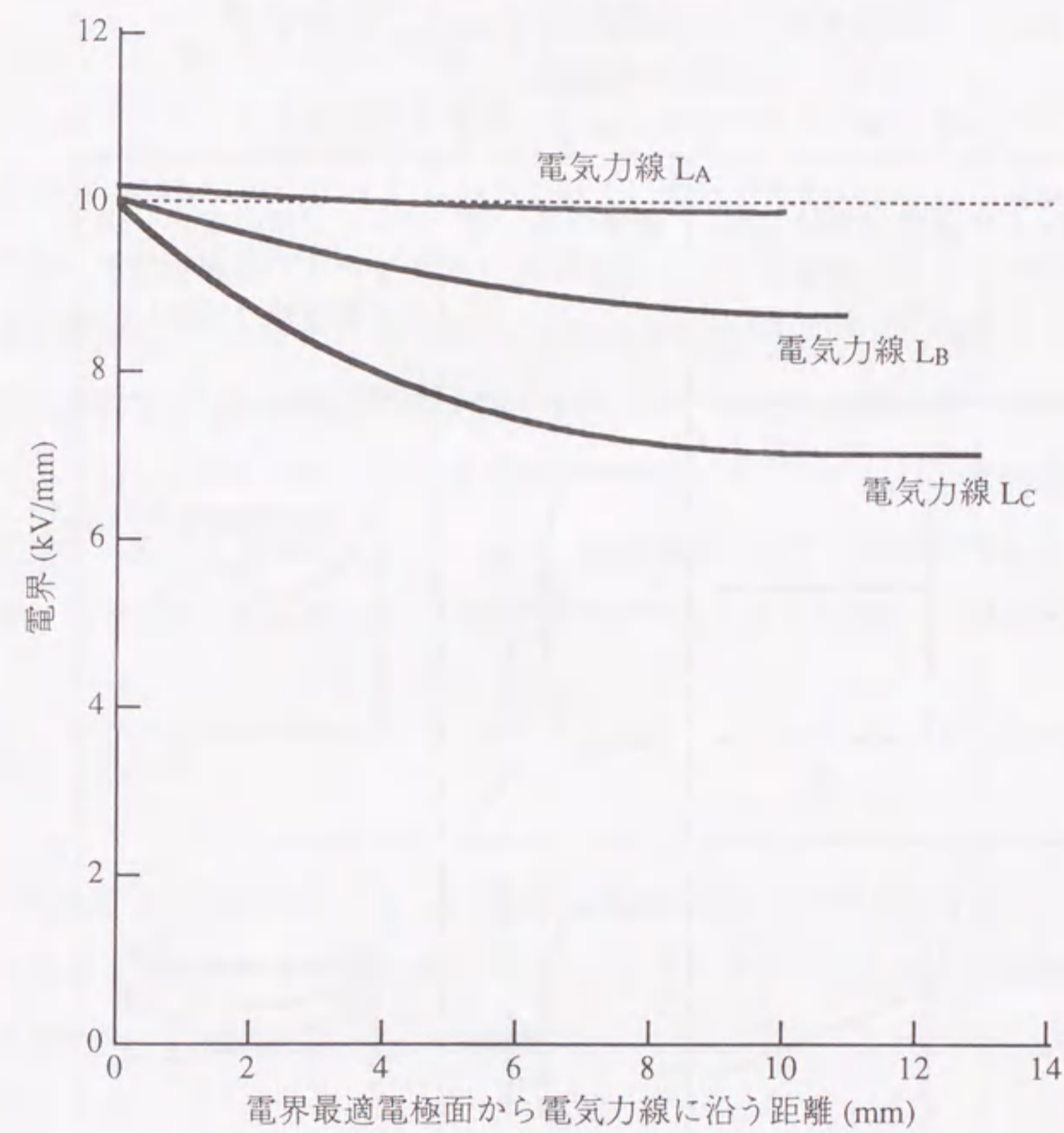
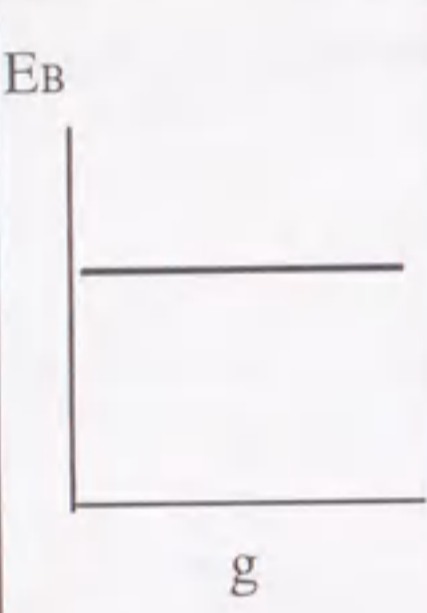
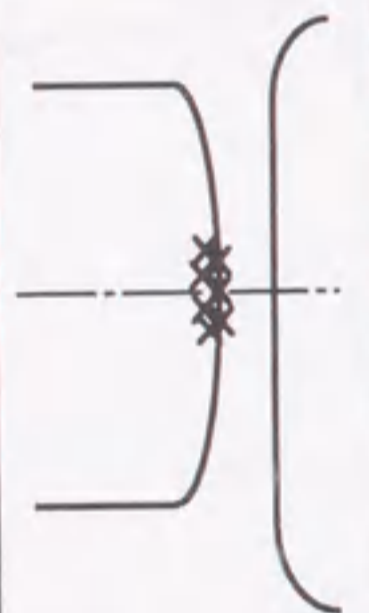
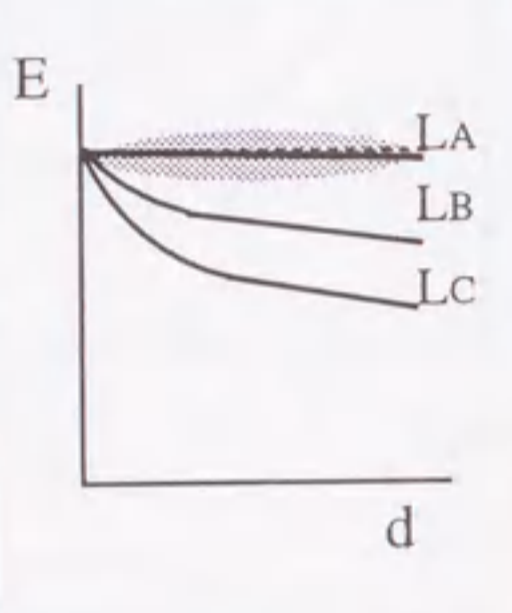
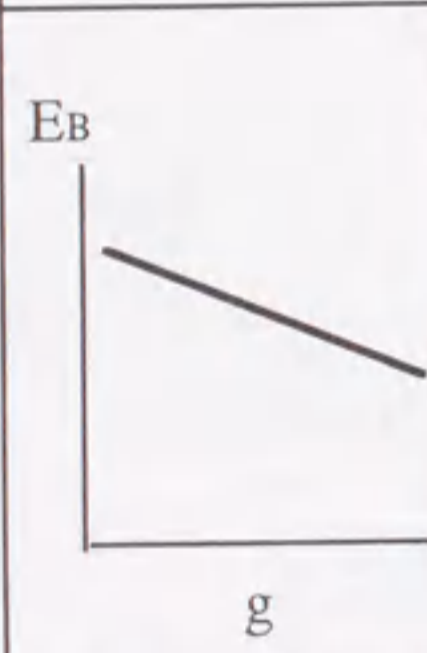
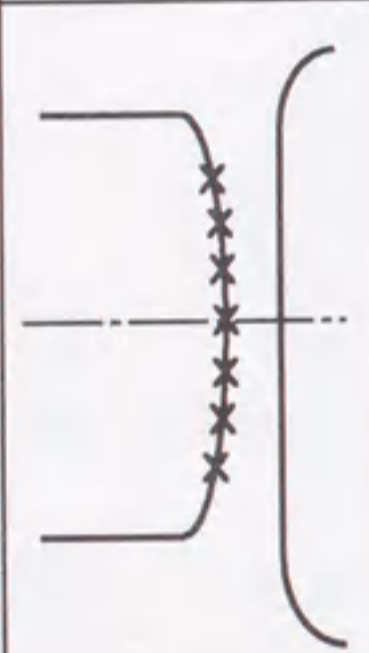
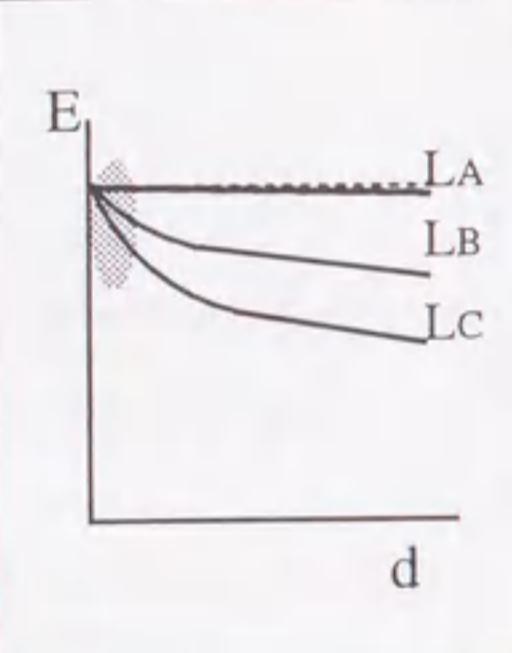


図6.8 電界最適電極から接地電極まで電磁力線に沿って得られる電界分布



表6.1 実験で得られた絶縁特性および絶縁破壊に寄与する空間中の領域

ガスの種類	破壊電界の電極サイズ依存性 (図6.6)	破壊痕の分布 (図6.7)	ギャップ間の電界分布およびその絶縁破壊への貢献領域 (●)
空気			
SF <sub>6</sub>			
d: 電気力線に沿う距離    g: ギャップ長    EB: 破壊電界			

い、従って、電極のサイズが大きくなるほどサイズ効果により破壊電界は低下する。一方、空気中においては、電極面の中央部近傍のみで破壊が発生し得るため、電極サイズが大きくなっても破壊の発生し得る電極面の領域の大きさは変化しない。したがって、空気中ではサイズ効果による破壊電界の変化が非常に小さいと解釈できる。

このように、計算で得られる同一の電界最適電極を用いた場合でも、空気中とSF<sub>6</sub>ガス中とでは、その絶縁破壊特性に違いが見られることを実験的に明らかにすることができた。特に、電極形状の絶縁特性を記述するためには、単に電極面に沿った電界の一様性が重要であるばかりでなく、電気力線に沿った電界分布が重要であることを明らかにした。以上の結果から、電力機器を対象とした、高い精度の最適絶縁設計を可能とするためには、電極面上の電界分布に関する最適化のみではなく、絶縁媒質の有する絶縁特性を総合的に考慮に入れた「絶縁最適化」技術が不可欠であることが確かめられた。

## 6.5 まとめ

高電圧電力機器に対して、より精密な最適絶縁設計を可能とするためには、電界最適化計算で得られた電極形状について、その絶縁性能を実験的に検証することが必要である。そこで本章では、

- (1) 電界最適化計算で得られた電界最適電極を実際に製作した。

次に、製作した電極を用いて、空気中およびSF<sub>6</sub>ガス中において電界最適電極の絶縁破壊特性を調べることにより、絶縁最適性の実験的検証を行った。その結果、

- (2) 同一の電界最適電極を用いた場合でも、空気中とSF<sub>6</sub>ガス中とでは、絶

縁破壊特性に違いがみられることを実験的に検証できた。特に、SF<sub>6</sub>ガスにおいては、絶縁破壊が電極表面電界によってほぼ決定されるのに対し、空気中においてはギャップ空間の電界分布が寄与するなど、絶縁媒質によって電界最適電極の有する絶縁特性が異なることを確認した。

以上の実験結果から、

- (3) 電力機器を対象とした、より精度の高い最適絶縁設計を可能とするためには、電極面上の電界分布のみではなく、絶縁媒質の有する絶縁特性を総合的に考慮に入れた、「絶縁最適化」技術の構築が必要であることを明らかにした。

## 第6章の文献

- [1] 電気学会: 「高電圧試験ハンドブック」, p.269 (1983)
- [2] H.Raether: "Electron Avalanche and Breakdown in Gases", London, Betterworths (1964).
- [3] M.S.Bhalla, J.D.Craggs: "Measurement of Ionization and Attachment Coefficient in Sulphur Hexafluoride in Uniform Fields", Proc. Phys. Soc. Vol.80, pp.151-160, 1962.
- [4] M.A.Harrison, R.Geballe: "Simultaneous Measurement of Ionization and Attachment Coefficients", Phys. Rev., Vol.91, pp.1-7, 1953.
- [5] 宅間: 「気体の放電機構の考察と大気圧空気中球ギャップフラッシュオーバー電圧の計算への応用」, 電気学会雑誌, Vol.91, No.7, pp.148-156, 1971
- [6] N.H.Malik, A.H.Qureshi: "Breakdown Mechanisms in Sulphur-Hexafluoride", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.EI-13, No.3, 1978.
- [7] K.Kato, N.Hayakawa, M.Hikita, H.Okubo: "Breakdown Characteristics in SF<sub>6</sub> Gas with Electric Field Optimized Electrode", 11th International Conference on Gas Discharges and Their Applications, I-264, 1995.
- [8] 加藤, 大塚, 早川, 匹田, 大久保: 「電界最適化計算で得られた電極形状における絶縁最適性の実験的検証」, 日本シミュレーション学会第15回計算電気・電子工学シンポジウム, IV-4, 1995
- [9] 毛受: 「SF<sub>6</sub>ガス絶縁開閉装置 (GIS) の高電圧絶縁設計に関する研究」, 名古屋大学博士論文, 1995

## 第7章 絶縁最適化自動計算技術の構築

### 7.1 まえがき

電力用高電圧機器の絶縁設計における究極の目的は、与えられた条件のもとで、可能な限り高い絶縁性能を有する機器形状を求めることである。このためには、絶縁空間中の最大電界を低減させることのみでなく、様々な周囲条件を考慮に入れる必要がある。すなわち、最適絶縁設計のためには、機器に使用する絶縁媒質の種類・電極面積・印加電圧波形・電極表面状態などの周囲条件が絶縁特性に与える影響を総合的に考慮する必要がある。これまで、破壊電圧の最大化を目的として、経験式によって最適化計算を行った例が報告されている<sup>[1]</sup>。しかし、上述したような、周囲条件によって決定される絶縁特性を総合的に考慮に入れた最適化計算は行われていない。さらに、周囲条件の変化が、最適形状にどのように影響を与えるか、などといった検討はなされていない。

このような観点から、本章においては、絶縁に対する最適化技術の構築を行う。第一段階として、絶縁媒質の有する電極面積効果を考慮した場合の最適電極形状を求解するアルゴリズムを開発する。また、このアルゴリズムを用いて最適化計算を行い、絶縁媒質の絶縁特性に適応した最適電極形状を自動求解する。次に、空気、SF<sub>6</sub>ガスの放電開始特性を考慮に入れた最適化自動計算アルゴリズムを開発する。このアルゴリズムにより、電極面上で一様な破壊電圧を有する電極形状の求解を行い、得られた結果について検討を行う。

### 7.2 絶縁最適化において考慮すべき絶縁特性

電力機器の絶縁設計において、究極の計算技術となるのは、使用される諸条件の絶縁特性を考慮に入れて最適化を行う、いわゆる絶縁最適化自動計算

技術である。この絶縁最適化計算を行うためには、空間中の電界分布のみでなく、様々な絶縁特性を考慮に入れる必要がある。代表的なものとして、以下に示す特性が挙げられる。

- 用いる絶縁媒質
- 印加電圧波形
- 気体の実効電離係数の電界依存性
- 電極面積効果
- 体積効果
- V-t特性
- 電極表面粗さ効果、被覆効果
- その他

以下では、絶縁最適化技術の第一段階として、電極面積効果を考慮に入れた最適化計算技術の開発を行う。次に、気体の放電開始特性を考慮に入れた絶縁最適化自動計算技術の構築を行う。

### 7.3 電極面積効果を考慮に入れた最適化計算

#### <7.3.1> 絶縁媒質の電極面積効果

電極面積効果とは、高電界の加わる電極面積が大きいほど電極系全体の絶縁破壊電界が低下する現象である。これは、電極面積が大きくなるほど絶縁上の弱点の数が増大するために起こるものである。電極面積と破壊電界の関係は弱点破壊理論に基づいたワイブル分布により次式で与えられる<sup>[2-4]</sup>。

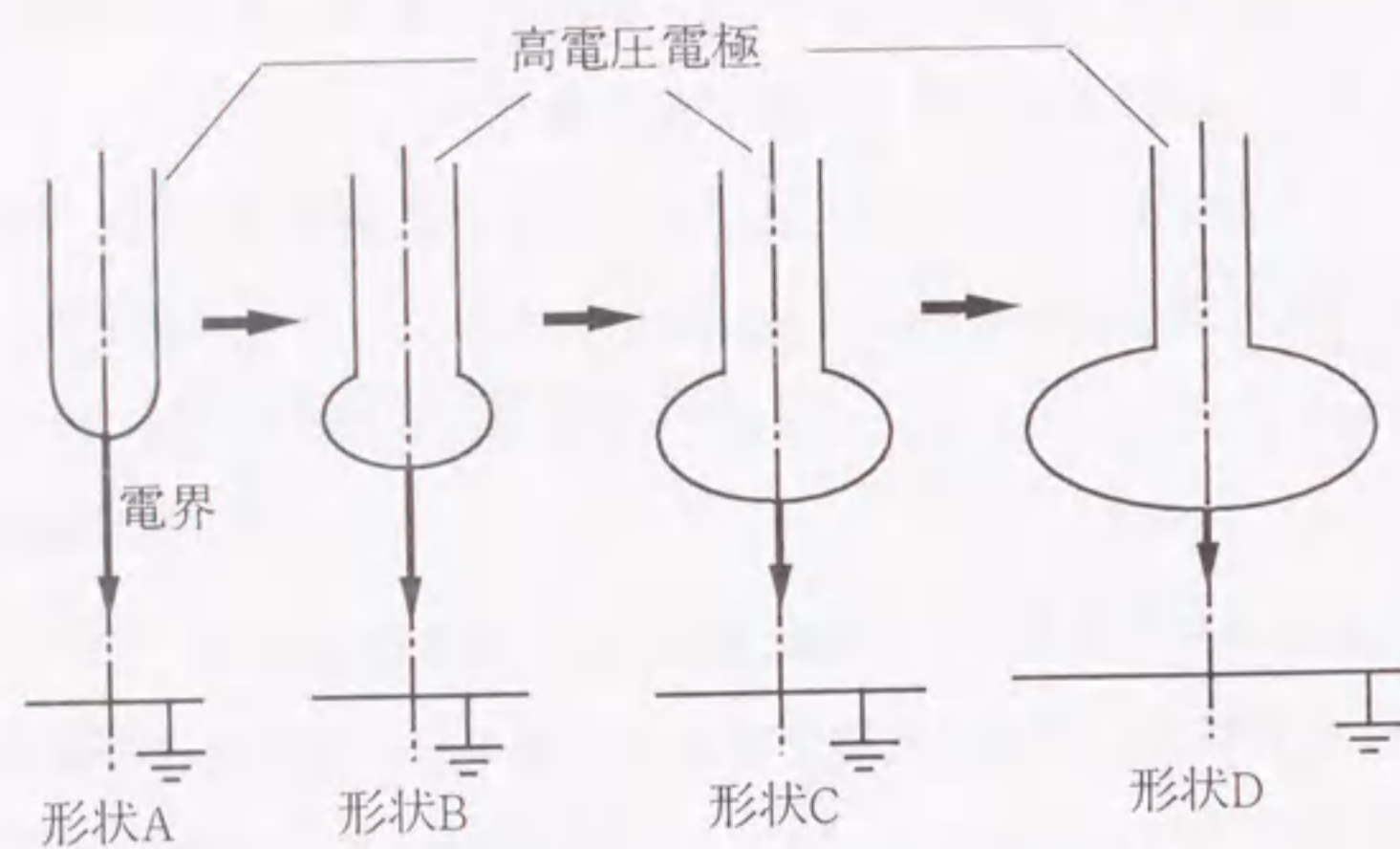
$$(\text{破壊電界}) \propto (\text{電極面積})^{-\frac{1}{m}} \quad (7.1)$$

この式において、重要なパラメータは $m$ であり、破壊電界の電極面積への依存度を直接的に表すものである。この $m$ の値が小さいほど依存度が大きくなる。この式に現れる種々のパラメータは、基本的な電極系を用いて実験的に求められており、広い電極面積の範囲で実験値がワイブル分布に従うことが示されている。また実用上、(7.1)式における電極面積の値として、電極面上の電界が最大電界の90%を超える領域の面積を与える方法が最も広く用いられている<sup>[2-4]</sup>。

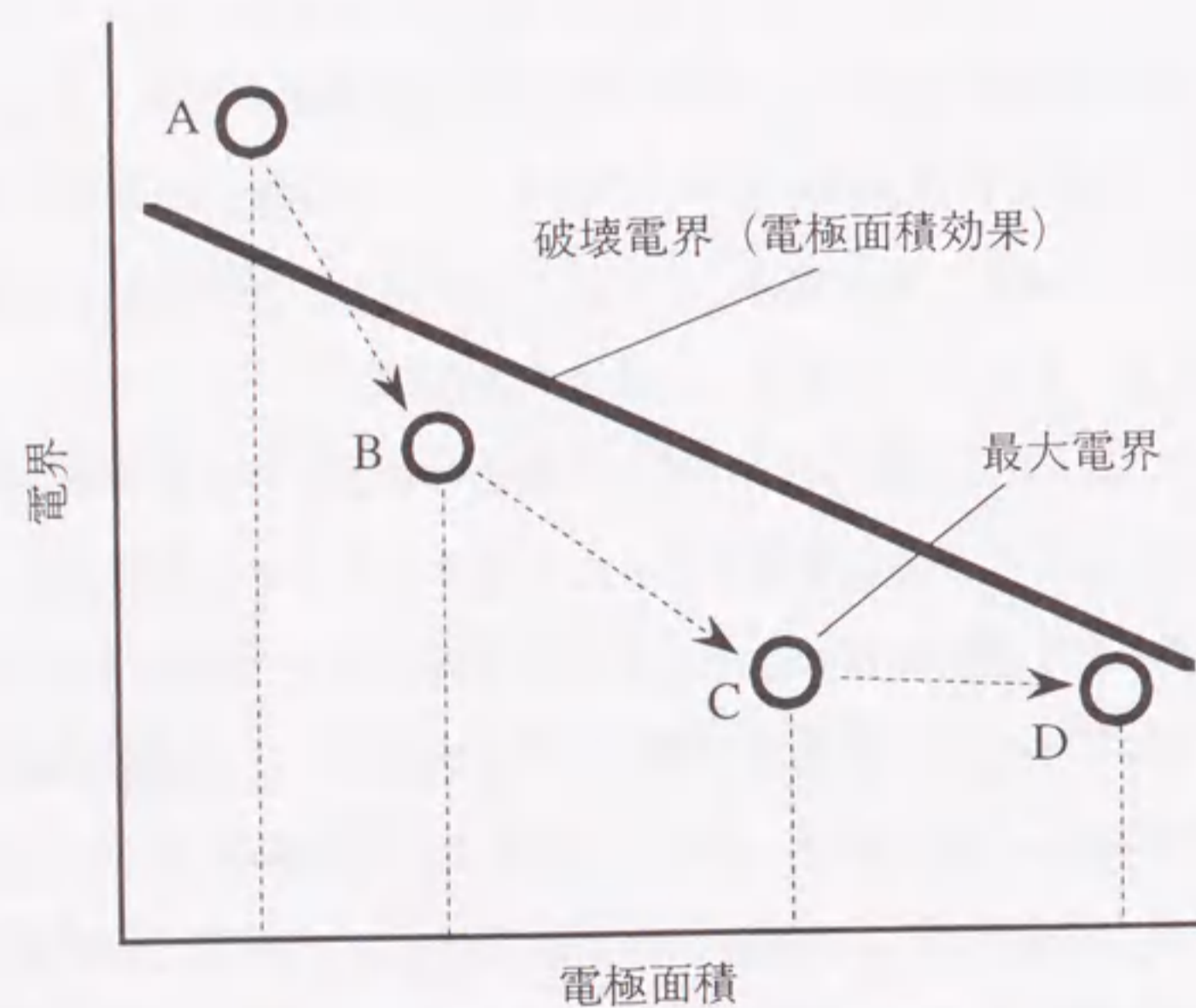
#### <7.3.2> 面積効果を考慮に入れた最適化計算の基本的原理

第3章において開発した電界最適化手法を発展させ、電極面積効果を考慮に入れた最適電極形状の求解アルゴリズムを開発した。その概要を図7.1を用いて示す。最適化計算の過程においては、繰り返し電極形状の修正を行う。図7.1(a)において、形状A→B→C→Dの順に形状修正が行われたとする。これによって空間中の電界が変化し、同時に電極面積が変化する。この様子は、図7.1(b)のグラフ上で、点A→B→C→Dの動きとして表される。従来の電界最適化においては、通常、最大電界をできるだけ低減し、かつ空間的に電界を均一化すること、すなわち「電界」の最適化を目指していた。したがって、図7.1の場合には、電界が最も低い形状Dが最適であるとみなされる。一方、電極形状の修正により、最大電界とともに高電界部分の電極面積が変化し、電極面積効果により破壊電界の変化が生じる。図7.1(b)の場合、形状がA→B→C→Dと変化するのに伴って高電界電極面積が増大し、破壊電界は面積効果の実験式に従い徐々に低下する。このような場合、各形状において、破壊電界と最大電界とを比較し、破壊電界に対する裕度が最も高い形状が絶縁強度からみて最適な電極形状であると言える。図7.1の場合には、形状Cが最も高い絶縁破壊電圧を有し、従って絶縁的に最適であるとみなすことができる。

以上のことを考慮に入れ、電極形状の修正によって生じる最大電界の変化と破壊電界の変化との比較を行うパラメータ $\psi$ を次式のように定義する。



(a) 形状修正に伴う最大電界と電極面積の変化



(b) 電極面積、最大電界と破壊電界との関係

図7.1 面積効果を考慮に入れた絶縁最適化計算の概念

$$\psi = \frac{\text{最大電界の変化}}{\text{破壊電界の変化}} = \frac{(E_m/E_{mi})}{(S_e/S_{ei})^{-1/m}} \quad (7.2)$$

ただし、 $E_m$ : 最大電界、 $S_e$ : 90%電界面積、 $E_{mi}$ : 初期形状時の最大電界、 $S_{ei}$ : 初期形状時の90%電界面積である。上式から明らかなように、面積効果を考慮した最適化計算は、最小の $\psi$ を有する電極形状を求解することに帰着する。

このような考え方に基づいた、面積効果を考慮に入れた最適化計算の流れ図を図7.2に示す。この流れ図からわかるように、電極形状の修正により $\psi$ が低減する場合には、そのまま電極形状の修正を行う。一方、逆に電極形状修正により $\psi$ の値が増加する場合には、電極形状の修正量を小さくして（今回、修正量を2分の1とするようにおいた）もう一度計算を行う。これを行っても $\psi$ の値が増加する場合には、さらに修正量を小さくする。修正量が反復計算の打ち切り誤差よりも小さくなった時点で計算を終了する。

### <7.3.3> 計算結果およびその検討

前節で示したアルゴリズムの妥当性を検証するため、実計算例に本アルゴリズムを適用し、最適化計算を行った<sup>[9]</sup>。ここでは、同一の電極系に対し、異なる絶縁媒質を使用した場合の計算を行った。それぞれの絶縁媒質が有する電極面積依存性に対応した最適電極形状が本アルゴリズムにより得られるかどうかの検証を行う。

絶縁媒質として、電力機器における代表的な絶縁媒質であるSF<sub>6</sub>ガス、変圧器油、真空の3種類について考え、それぞれに対して最適電極形状の求解を行った。ここでは、破壊電界が電極面積の(-1/m)乗に比例するとし、文献<sup>[2-4]</sup>により各媒質の有するmの値を表7.1のように決定した。なお、変圧器油は本来体積効果<sup>[9]</sup>について考えるべきであるが、ここでは他媒質との比較のため面積効果を考慮に入れた場合の計算を行った。計算対象電極系として、図7.3に示すような接地容器中の高電圧棒電極先端の最適化計算を考える。同図に

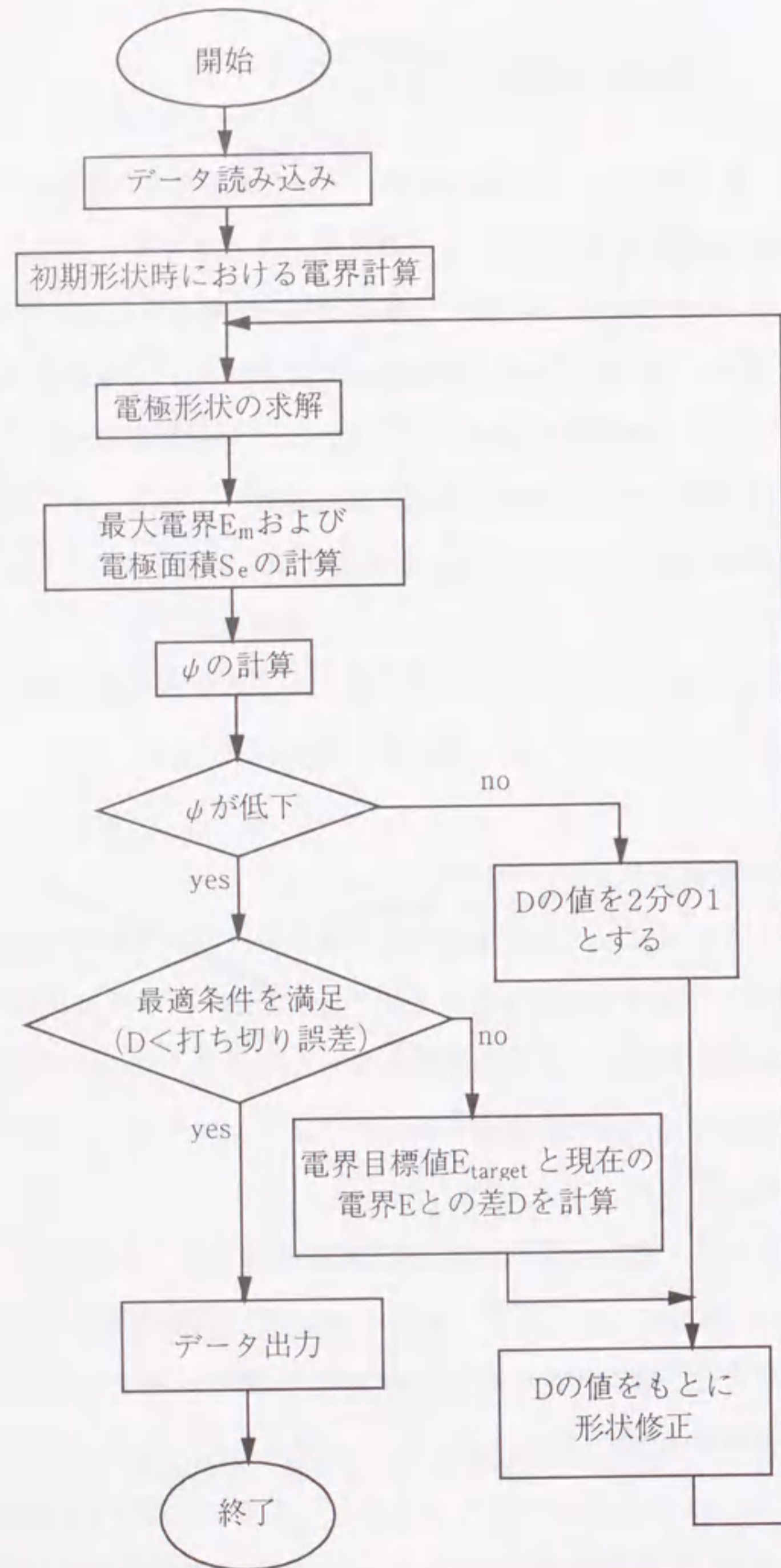


図7.2 面積効果を考慮した最適化計算の流れ図

示す初期形状から計算を開始し、繰り返し計算により、各絶縁媒質に対する最適電極形状を求めた。これを図7.3に併せて示す。また、図7.3で得られた最適電極面に沿って得られる電界分布を図7.4に示す。なお、従来の電界最適化により得られた計算結果は、両図におけるSF<sub>6</sub>ガスの結果とほぼ同一のものであった。

図7.3および図7.4から、用いる絶縁媒質ごとに、得られる最適電極形状および最適電界分布は異なることがわかる。特に、真空の場合に得られる最適電界分布は、従来の電界最適化において得られる一様電界分布と大きく異なることがわかる。この理由は、真空の場合、表7.1からわかるように、電極面積依存性が大きいいため、最大電界の低減よりも電極面積の低減の方が絶縁上好ましいことを意味しており、妥当な結果と言える。

以上のように、上述したアルゴリズムを使用することにより、絶縁媒質の違いを考慮に入れた最適電極形状を求解可能であることが確かめられた。

#### 7.4 気体の放電開始特性を考慮に入れた最適化計算

##### <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

ここでは、絶縁気体として空気およびSF<sub>6</sub>ガスを考え、それぞれの気体の放電開始特性を考慮に入れた絶縁最適化計算を行う。はじめに、空気およびSF<sub>6</sub>ガスを絶縁媒質として用いたときの絶縁破壊電圧の計算手法について述べる。

第6章で述べたように、空気およびSF<sub>6</sub>ガスを絶縁媒質として用いた場合の絶縁破壊電圧（絶縁破壊電界）は、電界分布が著しい不平等でない限り、実効電離係数 $\alpha - \eta$ により、実用上十分な精度で求められることが示されている<sup>[6,7]</sup>。文献<sup>[8,9]</sup>に紹介されている空気およびSF<sub>6</sub>ガス中の実効電離係数 $\alpha - \eta$ は、式(6.2)および(6.3)で表される。これを以下に再掲する。

$$\text{空気} \quad \frac{\alpha - \eta}{P} = 0.18 \left( \frac{E}{P} - 24.2 \right)^2 \quad \left( 24.2 \leq \frac{E}{P} \leq 50 \right) \quad (7.3)$$

表7.1 各絶縁媒質が有する面積効果  
のパラメータmの値  
(インパルス電圧印加時)

絶縁媒質	mの値
SF <sub>6</sub> ガス	30
変圧器油	15
真空	4.4

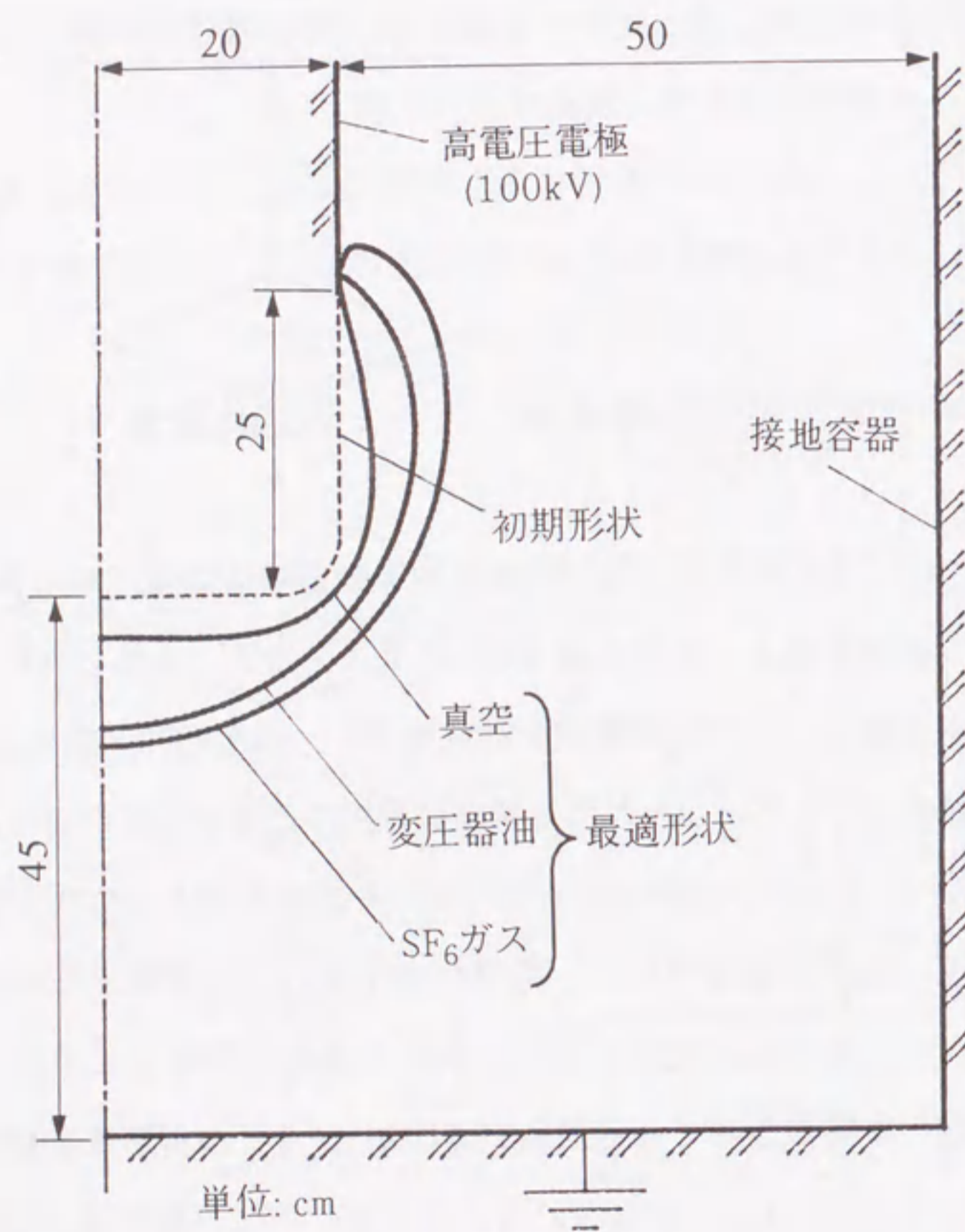


図7.3 種々の絶縁媒質に対して得られる最適電極形状

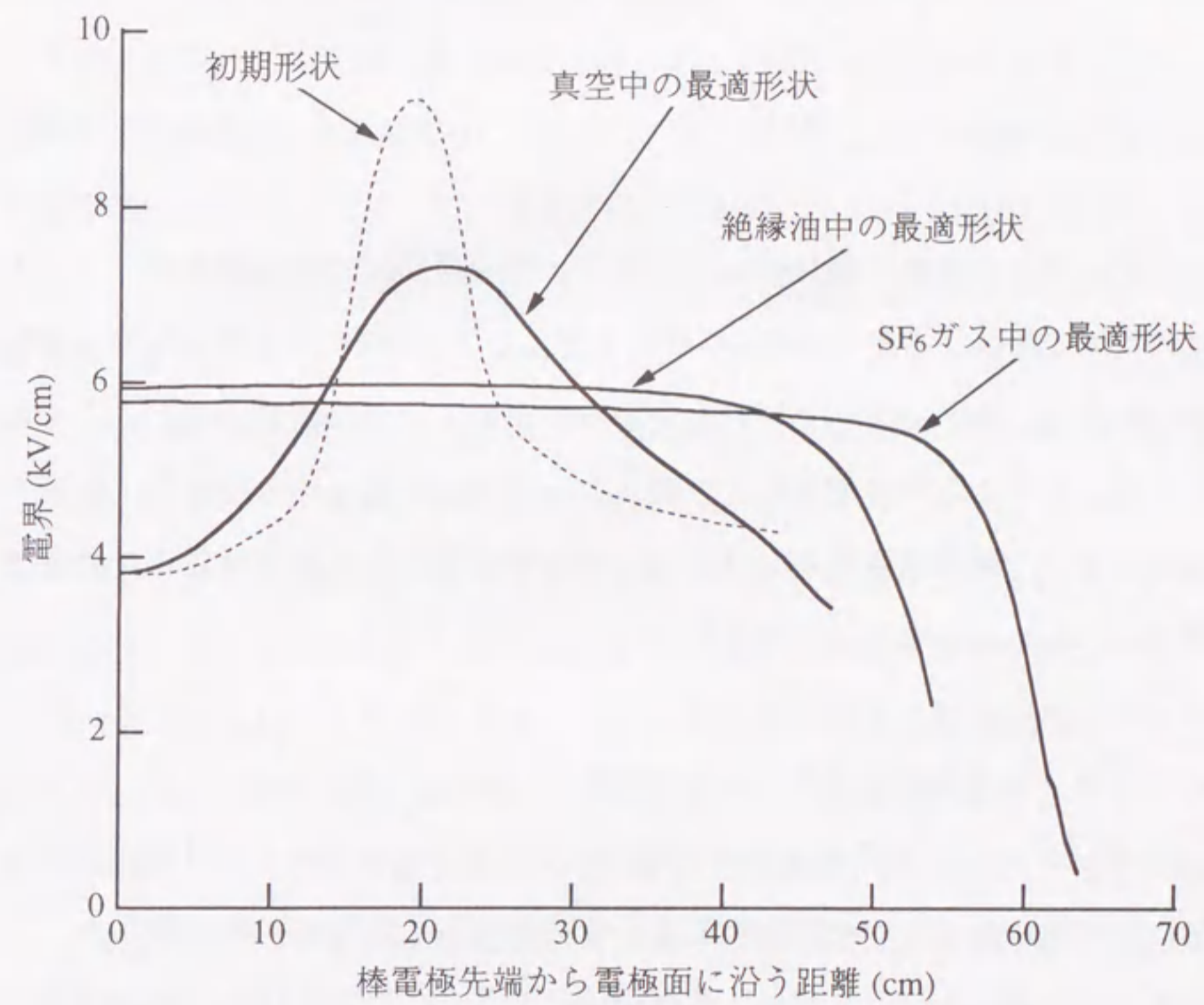


図7.4 最適電極形状における電界分布の絶縁媒質依存性

$$\text{SF}_6 \text{ガス} \quad \frac{\alpha - \eta}{P} = 26.2 \left( \frac{E}{P} - 88.9 \right) \quad \left( 88.9 \leq \frac{E}{P} \leq 120 \right) \quad (7.4)$$

ただし,  $\alpha$ : 衝突電離係数 (1/cm),  $\eta$ : 電子付着係数 (1/cm),  $P$ : 圧力 (atm),  $E$ : 電界 (kV/cm) である. また, 破壊電圧の値は, 式 (6.1) のストリーマ転換式を用いることにより実用上十分な精度で求められる.

$$\int_x (\alpha - \eta) dx = K \quad (7.5)$$

ここで, 積分は電気力線に沿って行われ, 積分区間は実効電離係数  $\alpha - \eta$  が正の領域である. 右辺の係数  $K$  の値として, ここでは  $K=18$  を用いた<sup>[10]</sup>. 電極面上のある1点から式 (7.5) にしたがって求められた破壊電圧を, ここではその点における臨界破壊電圧と定義する. また, 対象とする電極面上の全ての点において臨界破壊電圧を計算し, その中で最小の値を系全体の絶縁破壊電圧レベルとみなすことができる.

#### <7.4.2> 絶縁最適化における最適条件

3.2節において, 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」と定義した. この考え方に基づき, ここでは, 絶縁最適化計算について同様の定義を行う. すなわち, 「電極系全体の破壊電圧を最大化し, かつ対象とする電極表面上の全ての点において一様な臨界破壊電圧を有する電極形状」を最適条件と定義する. 換言すると, 系全体で破壊電圧を最大化するとともに, 系全体の破壊電圧レベルが, 電極面上のある限られた領域での破壊電圧レベルで決定されることがないように電極形状を最適とみなすことになる. このような定義は, 絶縁空間の有効利用という観点から, 妥当なものであると考えられる.

#### <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

臨界破壊電圧の一様化を行い, 系全体の破壊電圧レベルを向上させるため, 絶縁最適化アルゴリズムを開発した. この絶縁最適化アルゴリズムは電荷重畳法をベースとしており, その基本的考え方は第3章で述べたものと同じである. 異なるのは, 目標値の決定アルゴリズムと, 追加電荷の大きさの決定アルゴリズムのみである. 以下に, その手順について示す.

このアルゴリズムの基本的原理を図7.5および図7.6を用いて以下に示す. 対象とする電極面上の  $n$  個の点  $C_1, C_2, \dots, C_n$  において, ある電圧を印加したときの電界が  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , 臨界破壊電圧が式 (7.3) ~ (7.5) により  $V_{b1}, V_{b2}, \dots, V_{bn}$  と求められたとする.  $V_{b1}, V_{b2}, \dots, V_{bn}$  より, 各点における臨界破壊電界が  $E_{b1}, E_{b2}, \dots, E_{bn}$  と求められる. このとき, 現在の電界分布  $E_1, E_2, \dots, E_n$  を臨界破壊電界  $E_{b1}, E_{b2}, \dots, E_{bn}$  と同様の分布にすれば, 全ての点  $C_1, C_2, \dots, C_n$  において臨界破壊電圧が一様になる.

このような考えに基づいて, 以下の手順で電極形状修正を行う. まず, 電極面上の各点における電界・臨界破壊電圧・臨界破壊電界を求める. 次に, <3.3.2> で述べたのと同様の理由により, 固定電極領域と最適化領域の境界点である点  $T$  における臨界破壊電圧を目標値とし, 電極形状修正を行う. まず,  $E_1, E_2, \dots, E_n$  を点  $T$  における破壊電圧印加時の値に換算し,  $E'_1, E'_2, \dots, E'_n$  で表す. これを図7.6において実線で示す. 次に, 同図中●で示した臨界破壊電界が, 上述したように各点における目標電界に相当する. したがって, <3.3.2> で述べた考え方と同様の方法で, 次式により追加電荷量の大きさを決定する.

$$[E'_i] + [F'_{ef\ ij}] [Q'_j] = [E_{bi}] \quad (7.6)$$

ただし,

$$F'_{ef\ ij} = F_{ij} \cos X_{ij} \quad (7.7)$$



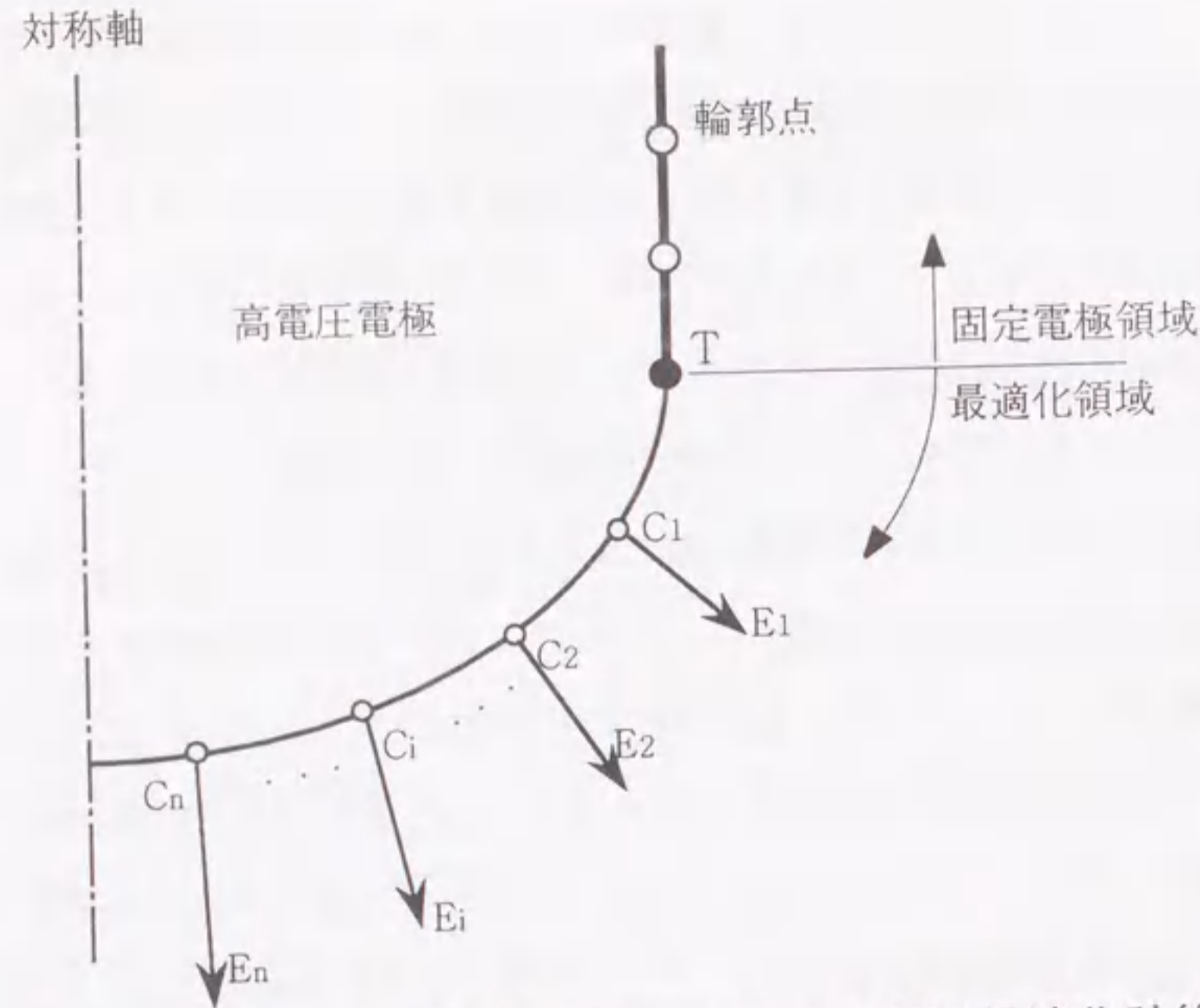


図7.5 気体の放電開始特性を考慮に入れた絶縁最適化計算の説明図

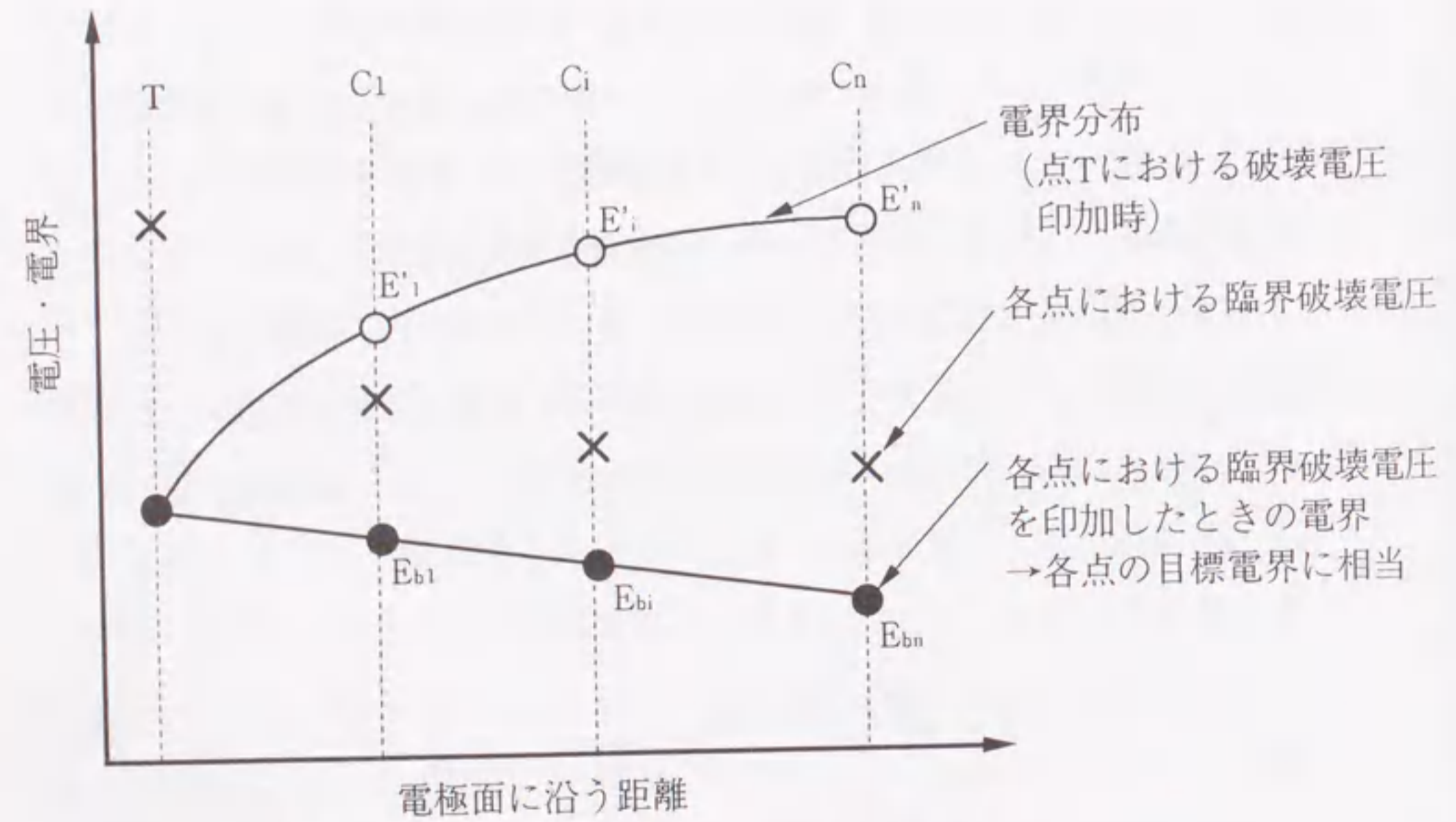


図7.6 破壊電圧最大化・一様化の方法

とおいた。また、 $F_{ij}$ は点 $i$ と電荷 $j$ 間の電界係数である。これを解くことによってすべての追加電荷の大きさを求めることができる。

<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

図7.7に、今回計算に用いた電極系を示す。同図において、高電圧棒電極先端部分の最適化を行った。図中に示すような初期形状から出発して、空気中および $SF_6$ ガス中の絶縁最適化計算を行った。この時に得られた絶縁最適電極形状を図7.7に併せて示す。また、同図には、第3章で示した電界最適化計算によって得られた形状も併記する。それぞれの最適形状が有する臨界破壊電圧分布を、図7.8に示す。さらに、それぞれの最適形状が有する電極面上の電界分布を図7.9に示す。また、初期形状および最適形状における破壊電圧を表7.2に示す。これらの図、表から、次のことがわかる。

- (1) 空気、 $SF_6$ ガスいずれの場合においても、絶縁最適形状時において破壊電圧は初期形状時に比べて向上し、かつ電極面上で一様な臨界破壊電圧が得られた。
- (2) 絶縁媒質が $SF_6$ ガスの場合に比べて、空気の場合の方が絶縁最適形状と電界最適形状の差が大きい。これは、 $SF_6$ ガスの場合には、絶縁破壊電圧が電極面上の最大電界に強く依存しており、電界最適化による電界の低減がそのまま絶縁破壊電圧の向上に結び付いたためと考えられる。
- (3) 絶縁媒質が空気の場合には、電界最適化による絶縁破壊電圧の向上がみられず、この計算事例の場合には逆に破壊電圧が低下してしまう現象が見られる。この結果から、電界最適化で行うような電極表面電界の低減のみでは不十分であり、従って絶縁空間中の電界分布が破壊電圧に与える影響を考慮に入れた絶縁最適化計算が必要であることが結論づけられる。

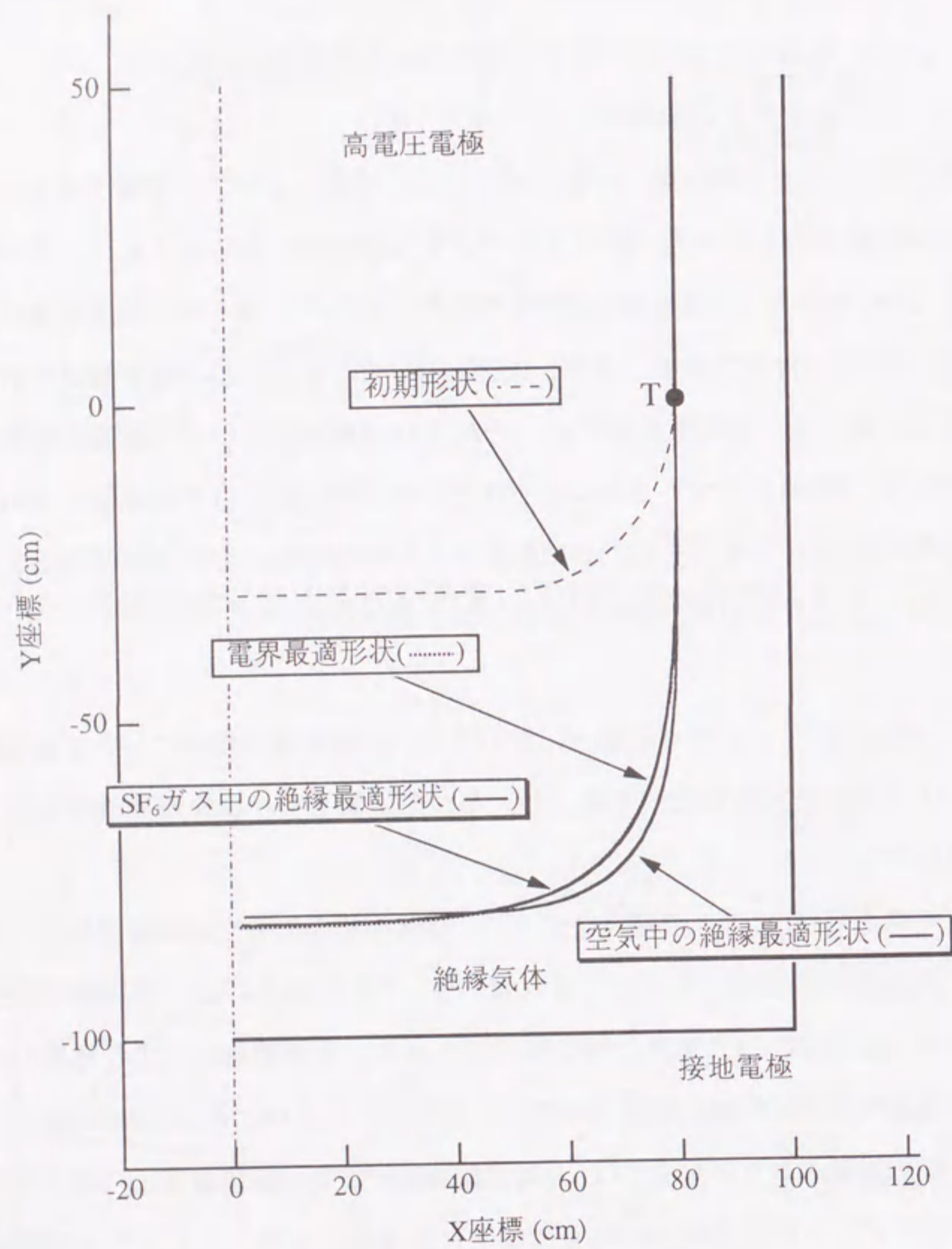
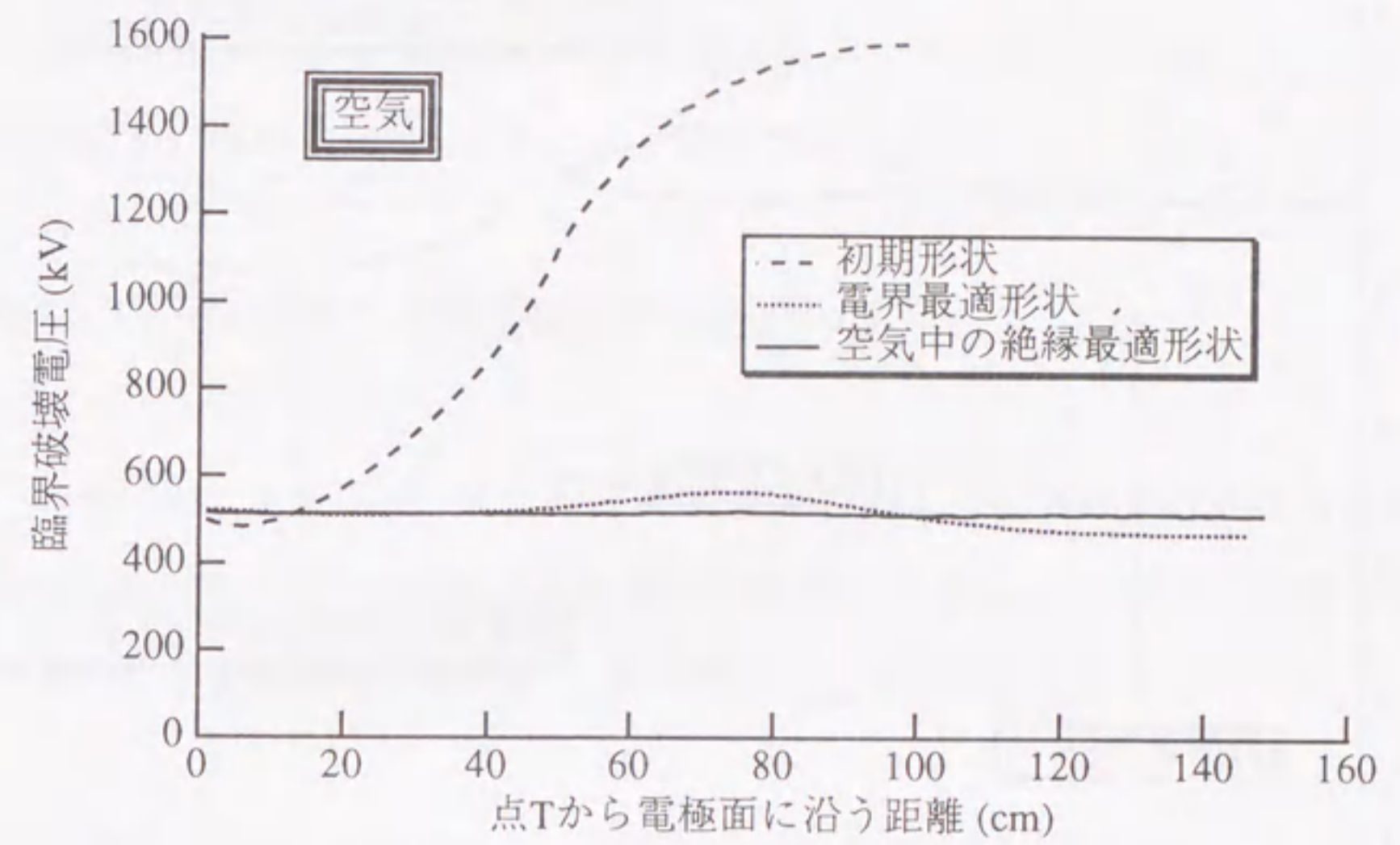
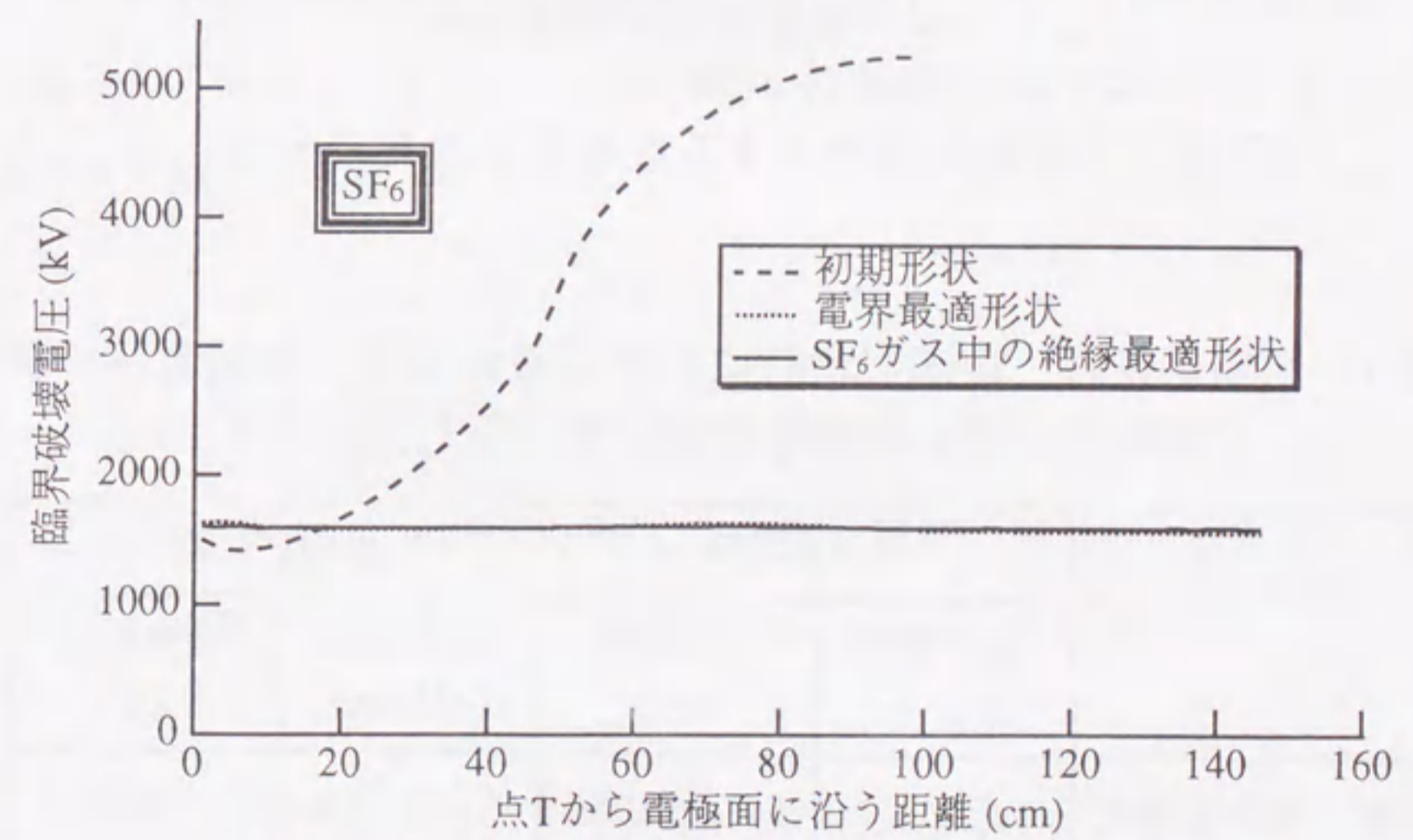


図7.7 絶縁最適化計算で得られた最適電極形状



(a) 空气中



(b) SF<sub>6</sub>ガス中

図7.8 各最適電極が有する臨界破壊電圧分布

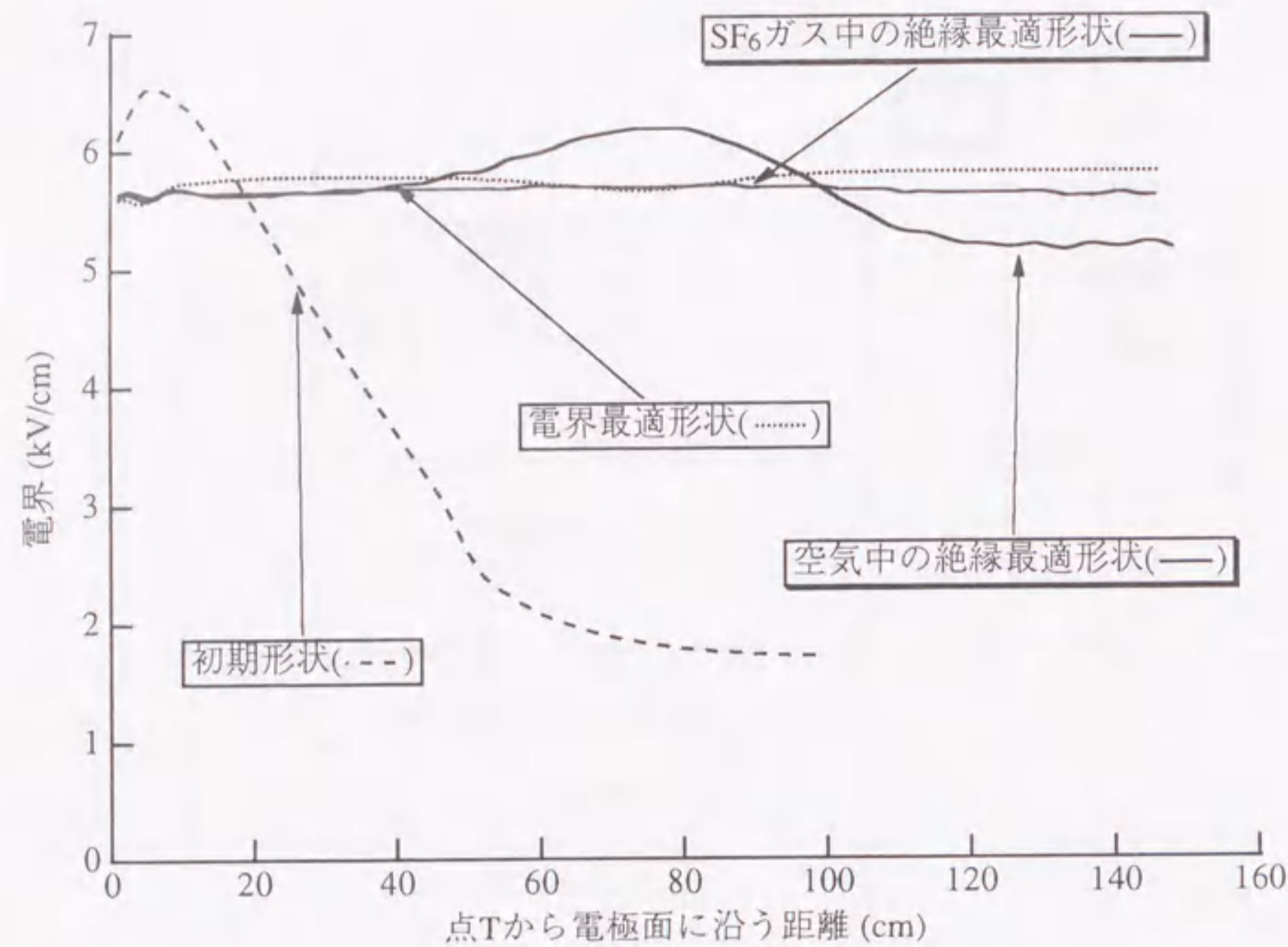


図7.9 各最適電極が有する電極面上の電界分布

表7.2 初期形状時・最適形状時における最大電界・破壊電圧の値  
(電界は100kV印加時の値, ガス圧力はすべて1atm)

	初期形状時		最適形状時	
	最大電界 (kV/cm)	破壊電圧 (kV)	最大電界 (kV/cm)	破壊電圧 (kV)
空気, 電界最適化	6.528	478.91	5.781	466.24
SF <sub>6</sub> , 電界最適化		1402.05		1545.29
空気, 絶縁最適化		478.91	6.165	511.36
SF <sub>6</sub> , 絶縁最適化		1402.05	5.686	1590.93

これらの結果から, 本アルゴリズムを絶縁設計において適用することにより, より精度の高い最適絶縁設計が実現可能であることを, 計算事例を用いて示すことができた. すなわち, 本絶縁最適化アルゴリズムは, 電力機器の絶縁設計に極めて有用であることが結論づけられた.

### 7.5 Borda形状への絶縁最適化技術の適用

本節では, 上述の絶縁最適化技術の妥当性および有用性を検証するため, 2次元系での一様電界電極として解析的に得られるBorda形状と, 絶縁最適化で得られる電極形状との比較・検討を行う.

#### <7.5.1> Borda電極形状

Borda電極は, 2次元系において, 電極面上の電界が一様となる電極形状として, 解析的に求められる<sup>[11]</sup>. 今回, 図7.10に示すような対向型Borda形状を対象として最適化計算を行う. 対向型Borda電極の表面形状を与える表式は, 変数 $\theta$ を用いて次式で表される.

$$\begin{aligned} x &= -2 \ln \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2}\right) \\ y &= -2 \ln \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{aligned} \quad (7.8)$$

ただし,  $0 \leq \theta \leq \pi/2$ である. またこの時, 電極間電位を $\phi$ とすると, 対向電極との最短ギャップは $\pi$ , 一様電界値は $(\phi/\pi)$ となる.

#### <7.5.2> 絶縁最適化結果とBorda形状との比較

図7.11に, 最適化計算に用いた電極系を示す. 図7.11(a)は2次元電極系, 同図(b)は軸対称電極系である. 後の説明のため, 3点T, U, Vを図のように定める. それぞれの図中に示す初期形状Aおよび初期形状Bから出発し, 最適化計算を行った. ここでは, (i) 電界最適化計算, (ii) 空気を絶縁媒質とした

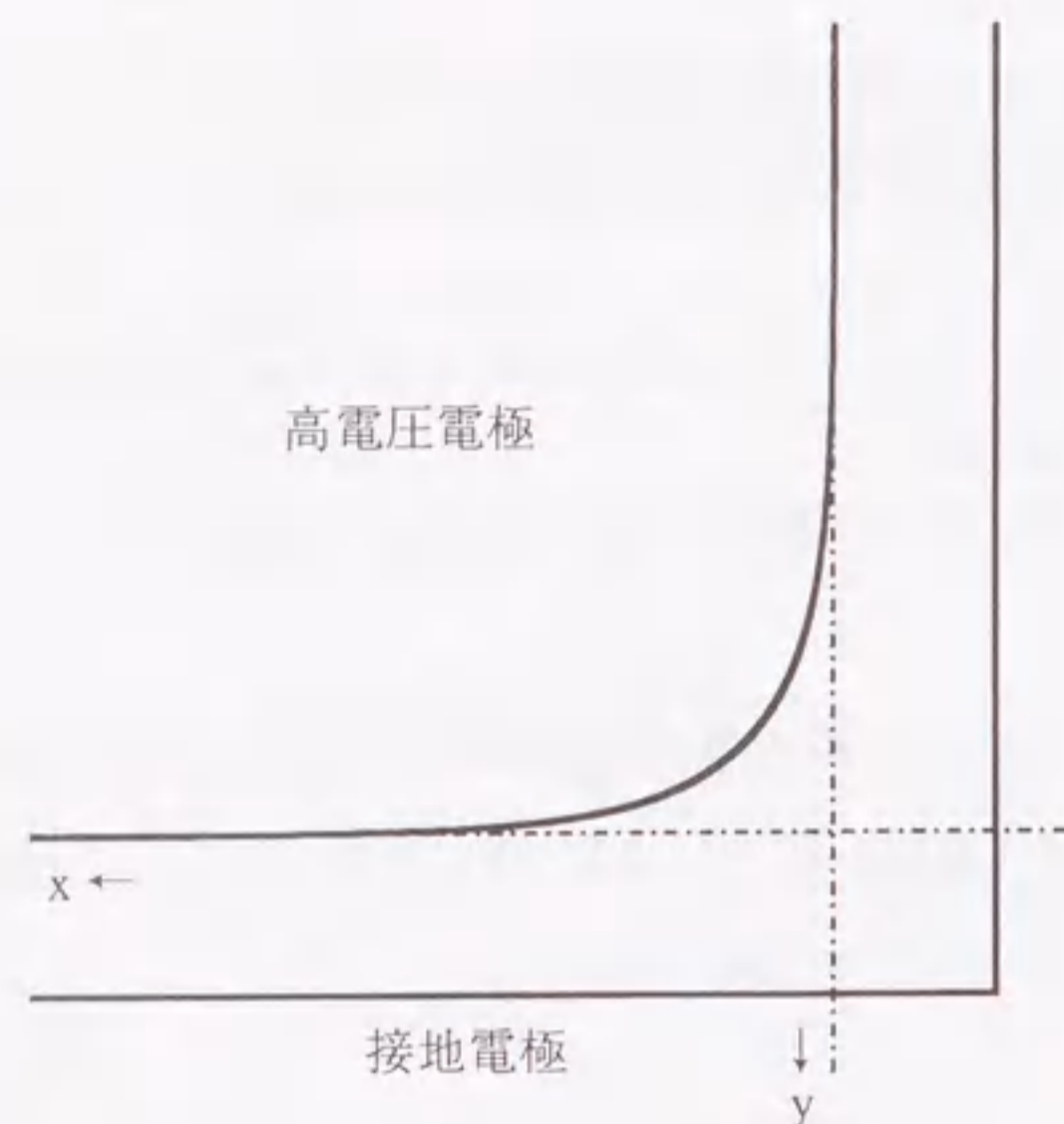


図7.10 対向型Borda形状

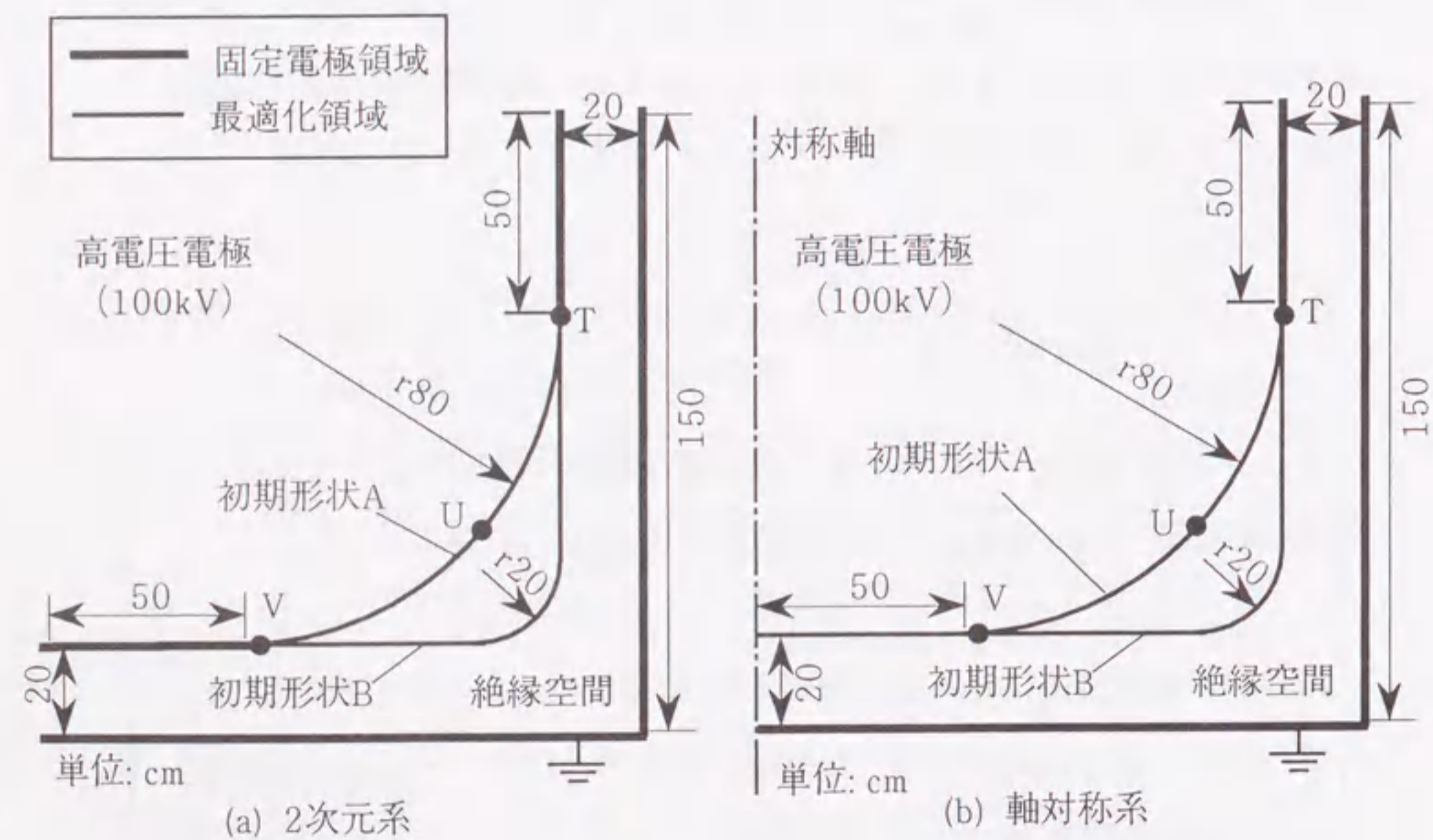


図7.11 対向型Borda形状への絶縁最適化計算の適用電極系

場合の絶縁最適化計算, および (iii) SF<sub>6</sub> ガスを絶縁媒質とした場合の絶縁最適化計算, の3種類の計算を行った.

図7.12(a)および(b)に, 2次元系および軸対称系においてそれぞれ得られた最適形状を示す. また, 図7.13(a)および(b)に, 空気中での電極面上における臨界破壊電圧の分布を, 図7.14(a)および(b)に, SF<sub>6</sub>ガス中での電極面上における臨界破壊電圧の分布を示す. さらに, 図7.15(a)および(b)に, 電極面上における電界分布を示す. これらのことから, 次のことが言える.

- (1) 2次元系における電界最適化計算で得られた電極形状とBorda形状は一致した. また, 軸対称系においては, 軸曲率の影響が現れ, 初期形状時に点T付近の電界が点V付近の電界よりも高くなる. 従って, 点V付近の電極面が外側へ修正され, 点T付近の電界を緩和し, 最終的に電界を一様化している. これらの計算結果より, 電界最適化計算結果の妥当性を示すことができた.
- (2) 前節で得られた結果と同様, 2次元・軸対称系ともに, 空気中の絶縁最適形状とSF<sub>6</sub>ガス中のそれとは異なることがわかった. 絶縁媒質がSF<sub>6</sub>ガスの場合に比べて, 空気の場合の方が絶縁最適形状と電界最適形状の差が大きい. これは, SF<sub>6</sub>ガスの場合には, 絶縁破壊電圧が空間中の最大電界に強く依存しており, 電界最適化による電界の低減がそのまま絶縁破壊電圧の向上に結び付いたためと考えられる. 逆に, 絶縁媒質が空気の場合, 絶縁最適形状と, 電界最適形状とは大きく異なることがわかった. この結果から, 電界最適化で行うような電極表面電界の低減のみでは不十分であり, 絶縁空間中の電界分布が破壊電圧に与える影響を考慮に入れた最適化計算が必要であることが結論づけられる.
- (3) 軸対称系における空気中と SF<sub>6</sub>ガス中の絶縁最適形状を比較すると, 図7.11の点U付近では, 空気中の絶縁最適形状がSF<sub>6</sub>ガスのそれに比べて外側に位置しているのに対し, 点V付近では, この関係が逆になっている.

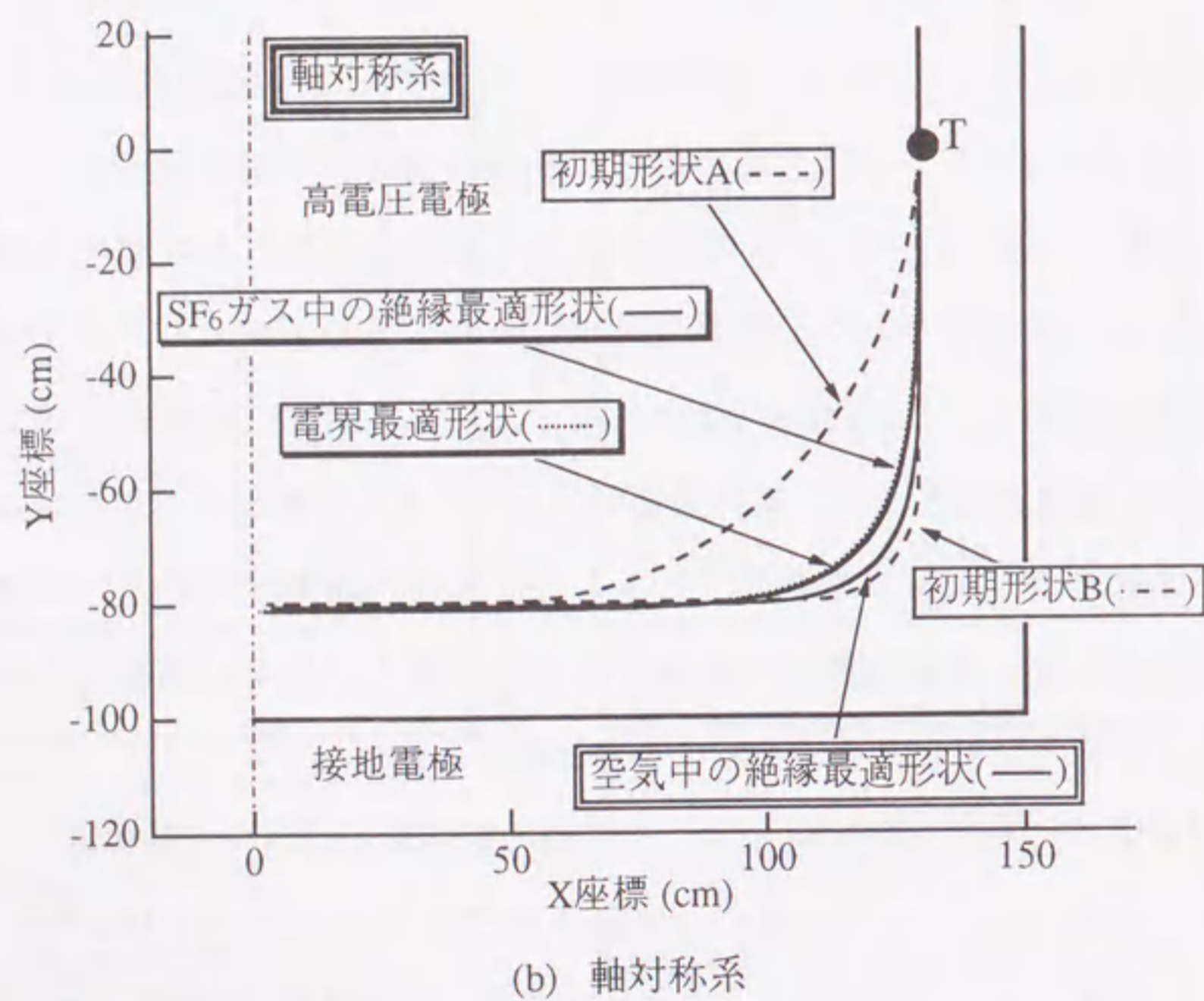
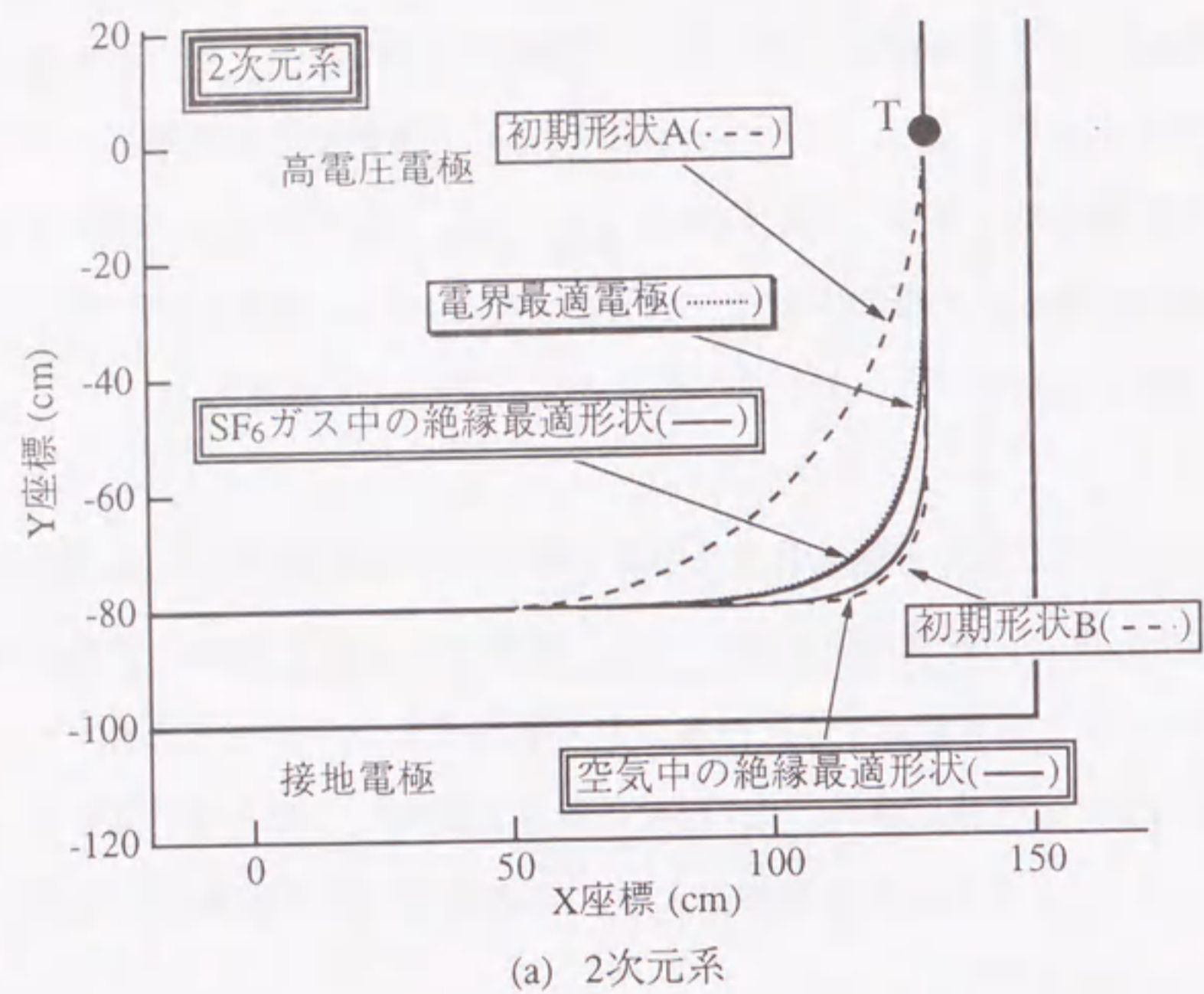


図7.12 対向型Borda電極系における電界最適電極および絶縁最適電極

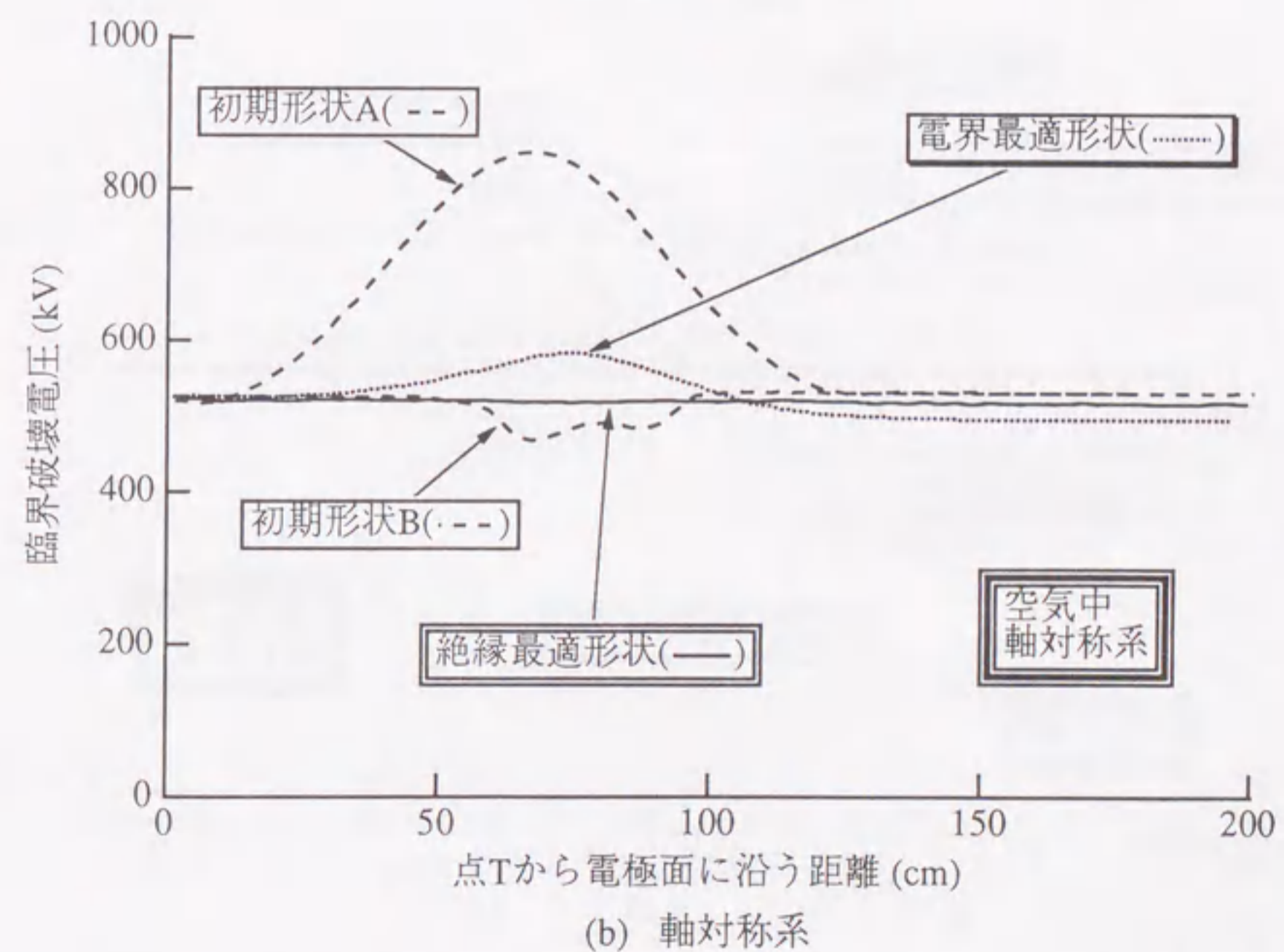
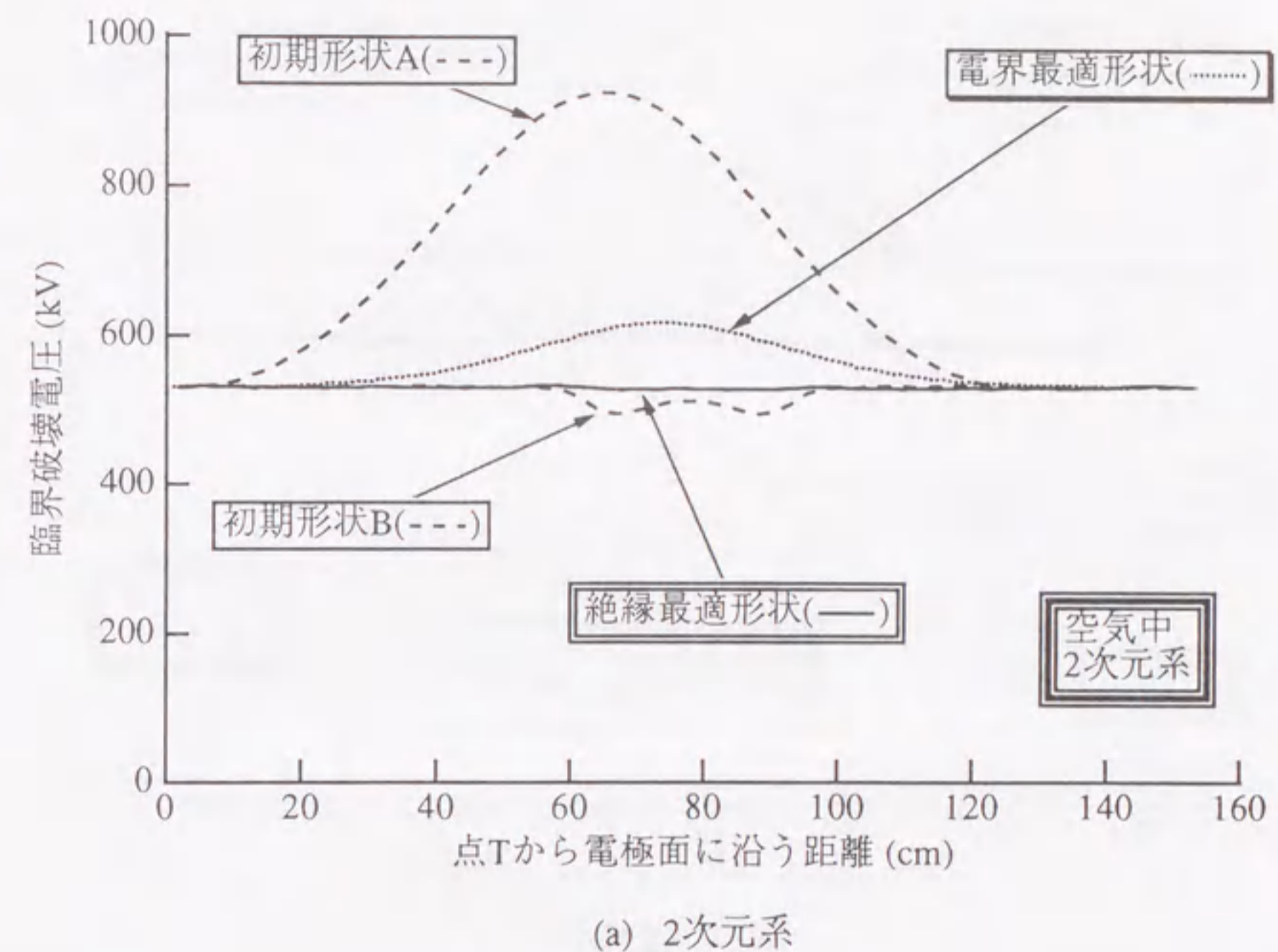
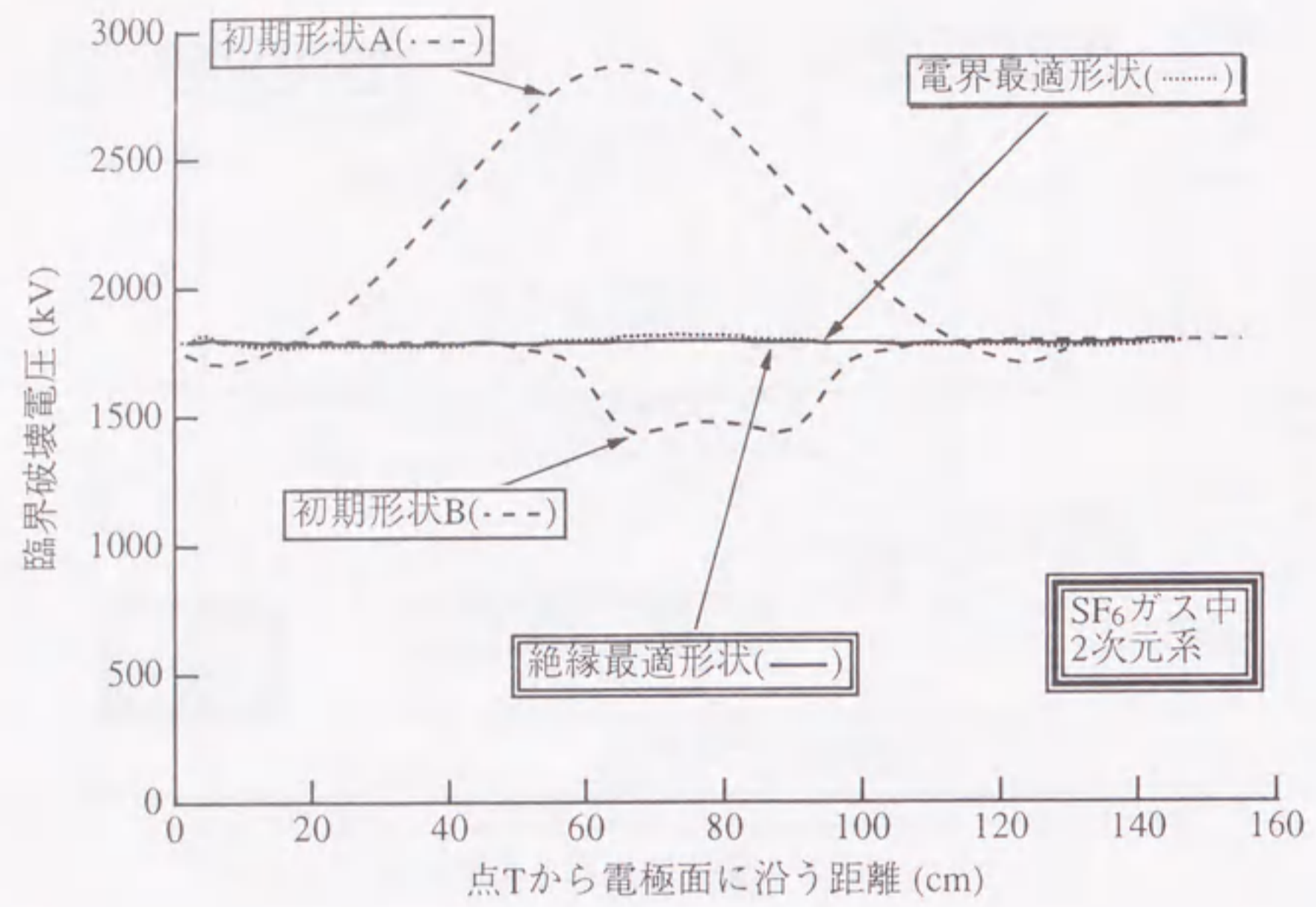
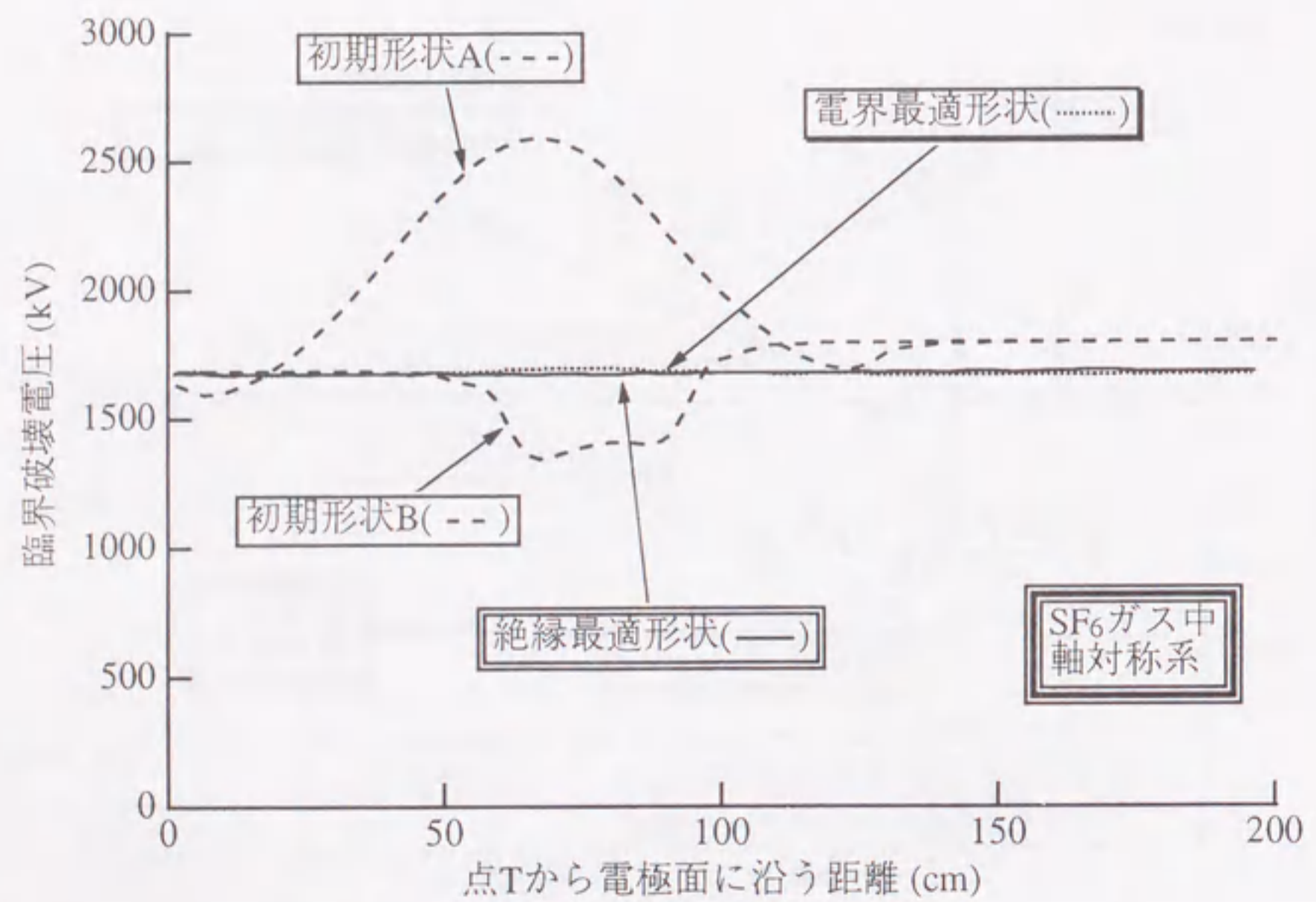


図7.13 対向型Borda電極系における最適電極面上の空気中の臨界破壊電圧

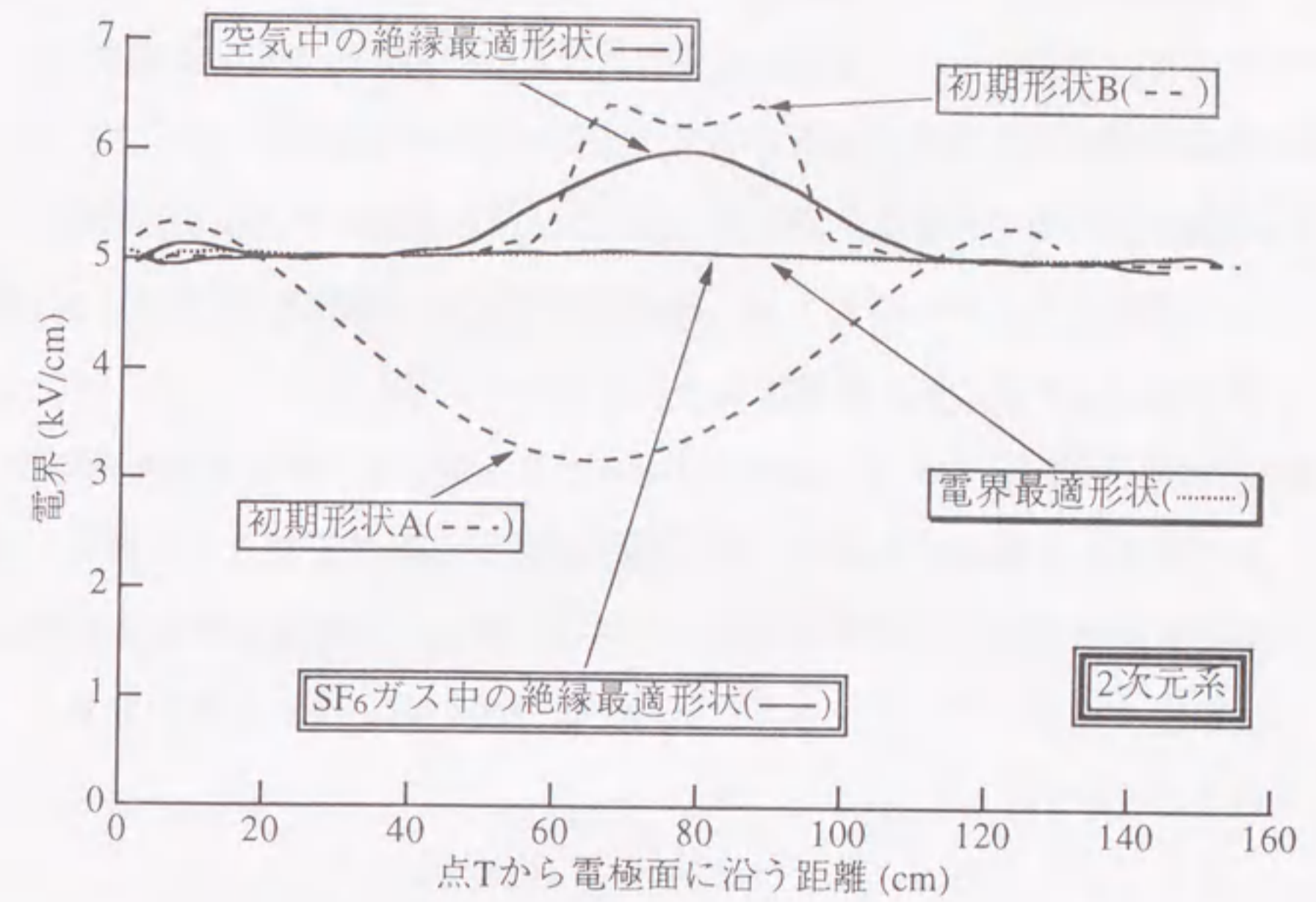


(a) 2次元系

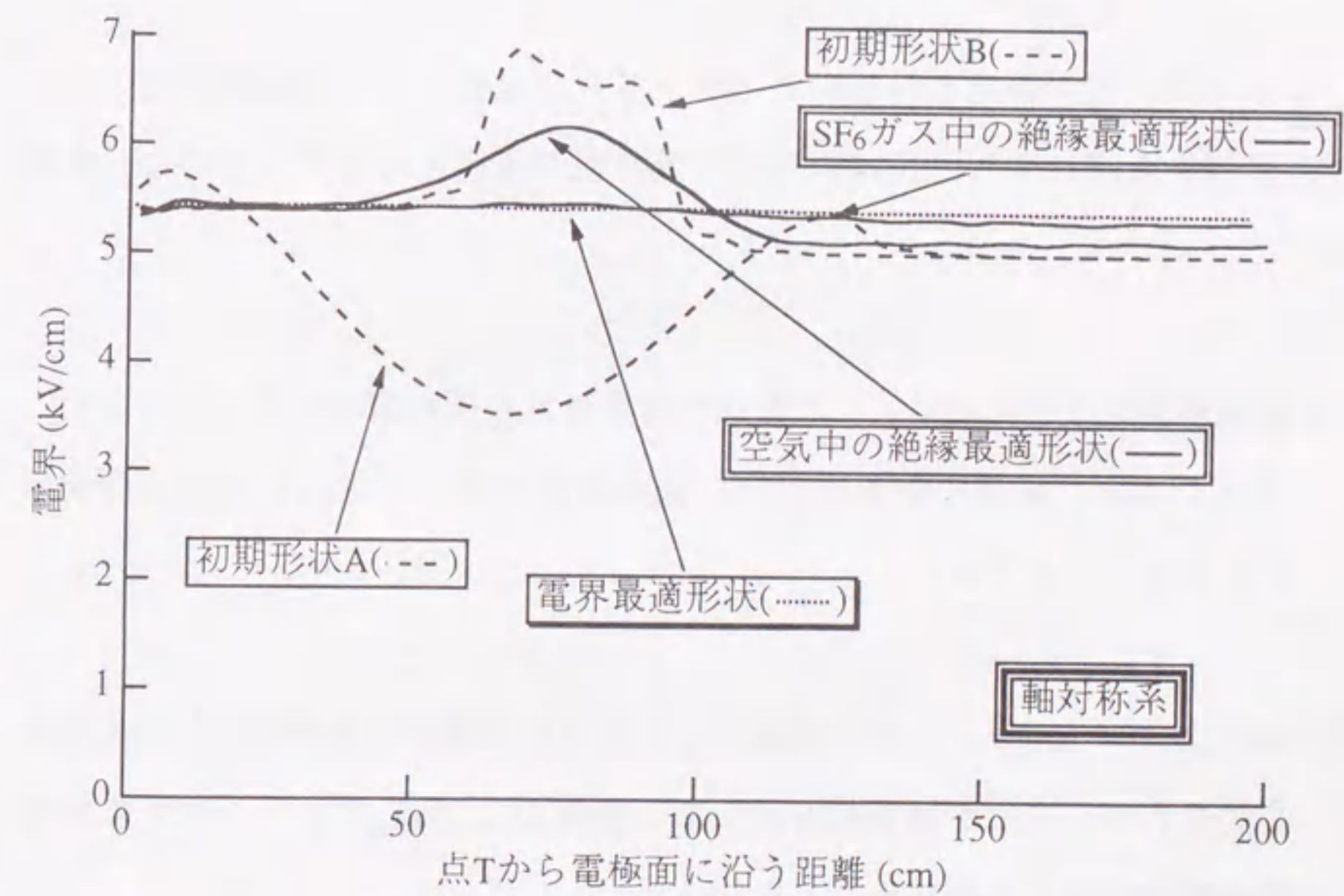


(b) 軸対称系

図7.14 対向型Borda電極系における最適電極面上のSF<sub>6</sub>ガス中の臨界破壊電圧



(a) 2次元系



(b) 軸対称系

図7.15 対向型Borda電極系における最適電極面上の電界分布

このような結果が得られたのは、空気中においては空間中の電界分布が破壊電圧に大きく寄与しているためと考えられる。すなわち、対向電極との間の空間において電界が高い値に保たれているのが点Vであり、点Uにおいては電極面から離れるにしたがい電界が低減する。従って、空気の場合、一様電界電極に対して、点Uにおける電極面を外側へ、点Vにおける電極面を内側へ移動させ、臨界破壊電圧の一様化を行っていると解釈でき、上で得られた計算結果は妥当なものと言える。

- (4) 上で得られた結果は、初期形状Aから計算を開始した場合でも初期形状Bから開始した場合でもほぼ一致していることを確認した。すなわち、本絶縁最適化計算アルゴリズムにおいては、得られる最適形状の初期形状依存性がみられず、形状修正において自由度の高い優れた手法であるといえることができる。

## 7.6 まとめ

本章では、電界最適化自動計算技術をさらに発展させ、絶縁媒質が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行った。その第一段階として、

- (1) 電極面積効果を考慮に入れた最適化自動計算技術の開発を行った。また、実例を用いて最適化計算を行い、絶縁媒質の違いに対応した絶縁最適形状を得ることができた。
- (2) 空気およびSF<sub>6</sub>ガスを絶縁媒質として使用した場合の絶縁最適化計算技術を開発した。また計算事例を用いて、空気およびSF<sub>6</sub>ガスそれぞれの絶縁最適電極形状を自動計算により求めることができた。
- (3) 対向型Borda形状に対して、空気およびSF<sub>6</sub>ガス中における絶縁最適形状

を求め、解析的に得られる2次元での電界一様電極との比較を行った。空気中においては、空間的な電界分布が破壊電圧に大きく影響を与えると考えることにより、絶縁最適化計算で得られた結果の妥当性を示すことができた。また、本アルゴリズムにおいては、最終的に得られる最適形状が初期形状の与え方に依存せず、異なる初期形状から同一の最適形状が得られることを明らかにした。

このように、本章で開発したアルゴリズムは、電力機器の最適絶縁設計にとって極めて有用であることを計算事例により明らかにした。

## 第7章の文献

- [1] H.Singer: "Computation of Optimized Electrode Geometries", 3rd International Symposium on High Voltage Engineering, No.11.06, 1979.
- [2] 新田: 「第2章 負性気体の放電」, 電気学会雑誌, Vol.93, No.5, pp.359-362, 1973
- [3] 毛受, 池田: 「変圧器油の絶縁破壊の統計的考察について」, 電気学会雑誌, Vol.92, No.12, pp.1207-1213, 1972
- [4] M.Okawa, T.Shioiri, H.Okubo, S.Yanabu: "Area Effect on Electric Breakdown of Copper and Stainless Steel Electrodes in Vacuum", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 23, No.1, pp.77-81, 1988.
- [5] 加藤, 大久保: 「最適電極形状の自動求解における絶縁媒質の絶縁特性依存性」, 日本シミュレーション学会第17回計算電気・電子工学シンポジウム, I-13, 1996
- [6] 宅間: 「気体の放電機構の考察と大気圧空気中球ギャップフラッシュオーバ電圧の計算への応用」, 電気学会雑誌, Vol.91, No.7, pp.148-156, 1971
- [7] N.H.Malik, A.H.Qureshi: "Breakdown Mechanisms in Sulphur-Hexafluoride", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.EI-13, No.3, pp.135-145, 1978.
- [8] M.S.Bhalla, J.D.Craggs: "Measurement of Ionization and Attachment Coefficient in Sulphur Hexafluoride in Uniform Fields", Proc. Phys. Soc. Vol.80, pp.151-160, 1962.
- [9] M.A.Harrison, R.Geballe: "Simultaneous Measurement of Ionization and Attachment Coefficients", Phys. Rev., Vol.91, pp.1-7, 1953.
- [10] H.Raether: "Electron Avalanche and Breakdown in Gases", London, Butterworths (1964).
- [11] H.Prinz (増田, 河野共訳): 「電界計算法」, pp.296-298 (1974), 朝倉書店

## 第8章 総括

### 8.1 まえがき

近年の電力需要の増加に対応するために, ガス絶縁開閉装置 (GIS) などの電力機器は, 一層の高電圧化・高信頼化・縮小化が要請されている. これに伴い, 機器内部空間中の高電界化がますます進んでいる. このような背景のもと, 電力機器の絶縁設計においては, 高精度・高効率な電界解析技術を手軽に使用できるシステムの実現が強く求められている. また, 電界解析技術を発展させ, 与えられた電界条件を有する機器形状を自動逆求解する「電界最適化」技術が強く要求されている. さらに, より高精度の絶縁設計のためには, 電界分布のみではなく, 絶縁媒質の種類・印加電圧波形などによって決定される絶縁特性を同時に考慮に入れて最適化を行う, 「絶縁最適化」計算技術の構築が必要である. これらの計算技術は, 機器設計に多用されるパソコンCADと結合された環境の下での使用により, CAD-電界解析間のデータの相互利用を可能とし, 設計作業の省力化および操作性向上を実現できる.

本研究においてはこのような観点から, 電力機器を対象とした最適絶縁設計支援CADシステム"CADEF" (CAD with Electric Field analysis) の構築を目標としている. まず, パソコンCADと電界解析の結合により, CADEFの基本システムを構築した後, 電界解析に必要な専門家知識・経験的要素を導入し, CADEFの知的化を行った. 次に, パソコンによる電界最適化技術を確立し, CADEF中で電界最適化自動計算を可能とした. 最後に, より精密な最適設計を可能とするために, 様々な周囲条件から決定される最適絶縁条件に基づいて計算を行う絶縁最適化自動計算技術を確立し, CADEFへ導入した. これらの統合により, 電力機器の最適絶縁設計支援CADシステムとしてのCADEFを構築することができた.



## 8.2 本研究で得られた成果

本節においては、本研究で得られた成果についての総括を行う。

### <8.2.1> 電界解析機能付CAD "CADEF" の開発

第2章では、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) の基本的構築を行った。その後、高効率・高精度自動電界解析を可能とするために、システムの知的化を行った。ここでは、はじめにCADEFに用いるCADおよび電界解析手法を選定した。CADとして、汎用性・経済性などの観点から多用されているパソコンCADを用いた。一方、電界解析手法としては、CADとの整合性・解析精度などの観点から、電荷重畳法を用いることとした。次に、CADと電界解析の結合を行い、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。また、CADの境界データから領域を自動認識するアルゴリズムを開発した。さらに、電荷重畳法における仮想電荷配置に関する専門家の経験的要素をルールとしてまとめ、CADEFに組み入れることによって、CADEFの知的化を行った。最後に、これら開発事項の導入効果を検証するために、実用機器のCAD図面を用いて電界解析の自動計算を行った。その結果、機器形状データ入力の大幅な省力化および操作性の向上を実現するとともに、電界解析の専門家と同等の高精度で自動電界解析が可能であることを確認することができた。

### <8.2.2> パソコンによる電界最適化自動計算技術の開発

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、適用範囲も比較的限られたものとなっていた。また、CADEFにおいてはパソコンを用いており、CADEFでの電界最適化計算を実現するためには電界最適化の計算効率を一層向上させる必要があった。そこで第3章においては、電荷重畳法

をベースとしたパソコンによる電界最適化計算手法の開発を行った。はじめに、電界最適化を「電極面上の電界が最小、かつ一様となるような電極形状の求解」と定義した。次に、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、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。これらのアルゴリズムの有用性を検証するために、GISの母線端部を模擬した電極系を計算対象として用い、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、本アルゴリズムの導入により、形状修正に関する制約を大幅に低減し、汎用性の観点から極めて優れた電界最適化計算を可能にした。最後に、この手法を実機器レベルの計算事例に適用した結果、パソコンを用いて約20分という実用時間内で電界最適化が可能であることを明らかにした。

### <8.2.3> 電極形状の最適性決定手法の開発

上述のような数値電界最適化計算においては、最終的に得られた電極形状が真に最適なものかどうかを検証する必要がある。また、このような最適性の判断を定量的に行うことにより、目標とする最適形状がどこに位置するかを計算によって求めることができるので、極めて効率の高い電界最適化計算を行うことができる。しかしこれまで、このような電極形状の最適性についての研究報告例はほとんどみられない。このような背景のもと、第4章において、電極形状の最適性を定量的に求める手法の開発を行った。この中で、電極形状の修正前後の電界強度の比として定義したパラメータ $f$ を最適性判断の手法として提案した。このようなパラメータ $f$ の空間的分布を求めることにより、電極形状の真の最適性を判断・決定することができた。これを用いて、最適化計算の初期段階で、目標とする最適電極形状が初期形状の内側・外側のどちらに存在するかを判断・決定可能とした。また、同時にパラ

メータ f の特性より、目標とする最適電極形状がどの位置に存在するかを定量的に見いだすことを可能とした。最後に、計算事例を用いて本アルゴリズムの有用性を検証した。その結果、初回の形状修正で最終的に得られるべき最適電極形状に極めて近い形状を求解可能であることを確認した。すなわち、電界最適化計算の過程において、極めて収束性の高い形状修正を可能とした。このように、本手法が、パソコンを用いた電界最適化計算に極めて有用であることが明らかになった。

#### <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

近年、人間の経験的知識などを必要とする問題に対応できる計算手法として、ニューラルネットワーク (NN) への関心が高まっている。特に、NN が一度学習を行うと、要求仕様を満足する最適解が繰り返しなしで高速に計算可能であることは、電界最適化の計算効率という観点から極めて優れた特徴である。しかし、NN の電界最適化問題への応用例はほとんど見られない。そこで、第5章では、パソコン上で電界最適化をより効率的に行うために、NN を適用した電界解析技術の開発を行い、その有用性について検証した。ここでは、NN を用いた電界最適化を行うにあたり、2つのNN を連結させて用いる電界最適化アルゴリズムを考案した。また、学習パターンの電極形状における電界分布より電界最適値を決定するアルゴリズムを考案した。最後に、計算事例を用いて、今回開発したNN による電界最適化手法の有用性を検証した。その結果、一度学習を行えば、最適電極形状はパソコンを用いて12秒程度と、極めて高速で求められることを確認した。このことから、NN を用いた電界最適化は、特に計算効率という点からその有用性が検証できた。

#### <8.2.5> 電界最適電極の絶縁特性に関する実験的検証

第3章～第5章までの電界最適化技術の開発の結果、より優れた絶縁性能を有する高電圧電力機器形状を机上で容易に求めることが可能となった。一方、

より精密な最適設計のためには、このように机上の計算で得られた電界最適化電極形状について、その絶縁性能を実験的に検証することが必要である。このような観点から、第6章においては、電界最適化計算により得られた形状を有する電極 (電界最適電極) を実際に製作し、その絶縁破壊特性について実験的検証を行った。ここでは、空気中およびSF<sub>6</sub>ガス中において電界最適電極の絶縁破壊特性の測定を行った。その結果、同一の電界最適電極を用いた場合でも、空気中とSF<sub>6</sub>ガス中とでは、絶縁破壊特性に違いがみられることを実験的に検証できた。特に、SF<sub>6</sub>ガスにおいては、絶縁破壊が電極表面電界によってほぼ決定されるのに対し、空気中においてはギャップ空間の電界分布が寄与するなど、絶縁媒質によって最適電極の有する絶縁特性が異なることを確認した。これらの結果から、電界最適化から絶縁最適化へ進む上での考慮すべき点を明確にした。

#### <8.2.6> 絶縁最適化自動計算技術の構築

電力用高電圧機器の絶縁設計における究極の目的は、与えられた条件のもとで、可能な限り高い絶縁性能を有する機器形状を求めることである。このためには、第6章での実験結果から明らかのように、最大電界の低減のみでなく、絶縁媒質の種類などの様々な周囲条件を考慮に入れる必要がある。しかし、このような最適化計算はこれまで行われた実績は無い。このような観点から、第7章においては、電界最適化自動計算技術をさらに発展させ、絶縁媒質が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行った。はじめに、電極面積効果を考慮に入れた最適化自動計算技術の開発を行った。また、実例を用いて最適化計算を行い、絶縁媒質の違いによって異なる絶縁最適形状を得ることができた。次に、空気およびSF<sub>6</sub>ガスを絶縁媒質として使用した場合の絶縁最適化計算技術を開発した。また計算事例を用いて、空気およびSF<sub>6</sub>ガスそれぞれの絶縁最適電極形状を自動計算により求めることができた。このように、第7章で開発した絶縁最適化自動計算アルゴリズムは、

電力機器の最適絶縁設計にとって極めて有用であることを計算事例により明らかにした。

以上の研究開発事項の統合により、操作性・汎用性・計算効率・計算精度の観点から優れた知的絶縁設計支援システムの構築を実現することができた。

### 8.3 今後の課題

本研究においては、電力機器を対象とした絶縁設計支援システムの構築を目的とし、CADと電界解析の結合技術、電界最適化、絶縁最適化などの計算技術の絶縁設計への適用に関して、多くの提案を行うことができた。今後これらの適用技術のより一層の高度化が要求されていくと思われる。本研究における今後の課題としては、以下に示す項目が挙げられる。

- (1) CADEFシステムの一層の計算効率の向上、計算精度の向上を目的とした、仮想電荷の配置ルールの導入、追加による知的化。
- (2) 印加電圧波形依存性や V-t 特性をはじめとする絶縁設計に考慮すべき項目の絶縁最適化への導入。
- (3) 絶縁のみではなく、磁界・熱・機械的構造など他の物理現象を考慮に入れた総合的な最適化技術の構築。

## 謝 辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、終始懇切なる御指導と御鞭撻を賜った名古屋大学大学院工学研究科教授 大久保仁先生に深く感謝するとともに厚く御礼申し上げます。

本論文の作成にあたり、有益なる御助言と御鞭撻を賜った名古屋大学大学院工学研究科教授 水谷照吉先生に厚く感謝いたします。

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、有益なる御教示と御指導を賜った九州工業大学工学部教授 匹田政幸先生に厚く感謝いたします。

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、有益なる御助言と御指導を賜った名古屋大学理工科学総合研究センター助教授 早川直樹先生に厚く感謝いたします。

本研究の遂行にあたり、有益なる御教示と御指導を賜った国立豊田工業高等専門学校長 鬼頭幸生先生に厚く感謝いたします。

本研究の遂行にあたり、直接御指導下さるとともに常に励ましの言葉を頂いた 前原宏之氏に深く感謝いたします。

また、本研究を進めるにあたり、御協力頂いた 大塚卓弥氏、田中達也氏、小林隆亘氏、伴好典氏、牧平崇氏に感謝いたします。

最後に、種々の御協力を頂きました名古屋大学大学院工学研究科エネルギー環境システム講座（大久保研究室）の先輩諸兄および同輩、後輩諸君に感謝いたします。

本研究に関して発表した論文

章	論文題目	掲載雑誌	共著者
2	Electric Field Calculation Combined with a CAD System for the Personal Computer	European Transactions on Electrical Power Engineering, Vol.3, No.3, pp.227-233 (1993)	H.Okubo H.Maehara M.Hikita Y.Kito
3	The Development of Personal Computer Based High Efficient Technique for Electric Field Optimization	European Transactions on Electrical Power Engineering, Vol.5, No.6, pp.401-407 (1995)	M.Hikita N.Hayakawa Y.Kito H.Okubo
	The Development of Electric Field Optimization Technique Using Personal Computer	8th International Symposium on High Voltage Engineering, Yokohama, No.11.04, pp.63-66 (1993)	H.Okubo M.Hikita Y.Kito
4	A Highly Efficient Method for Optimum Electrode Contour Determination	European Transactions on Electrical Power Engineering, Vol.7, No.1, pp.13-18 (1997)	M.Hikita N.Hayakawa Y.Kito H.Okubo
	A Highly Efficient Method for Determination of Electric Field Optimum Contour of High Voltage Electrode	9th International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, AUSTRIA, No.8358 (1995)	M.Hikita N.Hayakawa H.Okubo

章	論文題目	掲載雑誌	共著者
5	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	電気学会論文誌B, Vol.115-B, No.11, pp.1387-1392 (1995)	大塚卓弥 早川直樹 匹田政幸 大久保仁
	Electric Field Optimization of High Voltage Electrode Based on Neural Network	IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York, USA, No. PE-042-PWRS-0-12-1997 (1997)	H.Okubo T.Otsuka N.Hayakawa M.Hikita
6	Breakdown Characteristics in SF <sub>6</sub> Gas Using Electric Field Optimized Electrodes	11th International Conference on Gas Discharge and Their Applications, Tokyo, pp.264-267(Vol-I) (1995)	N.Hayakawa M.Hikita H.Okubo
7	Optimization of High Voltage Electrode Contour under the Consideration on Insulation Performance of Gaseous Dielectrics	IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation (submitted)	H.Okubo
	Optimization Technique for High Voltage Electrode Contour Based on the Discharge Onset Criterion in Gas Dielectrics	10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montréal, CANADA (1997) (submitted)	H.Okubo

