

第4章 光CTの高精度化

4.1 まえがき

変電所の計測制御技術のデジタル化や光LANを用いた信号処理システムの適用に対し、電流出力の電磁型変流器は、信号回路に電磁ノイズが混入しやすいことや電流/電圧変換回路が必要である点などの問題がある。また、設備故障時に直流の重畳した大電流によって二次電流波形が変歪する現象^[1]に対し、保護装置では、誤動作防止策^[2]が必要であるという問題がある。そこでこれらの問題を解決しうる光CTの開発を目標とした。第2章で取り上げた(磁気鉄心+光磁界センサ)方式の光CTは、構成が簡単で製作が容易であると言うメリットがある。このため、設置が容易に行える方式として断路器へ内蔵した光CTに関する学術的な検討を進め、実規模装置による検証を行ってきた。しかし、この方式の光CTは、BSO素子を用いることから温度特性や光の波長依存性を有し、それが高精度化の障害となっていた。

本章は、電磁型CTの問題点を解決でき電力需給用に要求される0.3級の精度を有する光CTの実現を目標として、光CTの特性改善の技術検討および実規模装置による特性検証内容に関して取りまとめたものである。光CTヘッドは基本的には第2章と同一構成でBSO光磁界センサとギャップ付鉄心を組み合わせたものを対象とした。

4.2 特性改善の検討

光CTの目標特性を第4-1表に示す。光CTの電流計測性能としてJISC

第4-1表 光CTの目標特性

項目	特性
使用周囲温度	光CTヘッド: $-20 \sim 40^\circ\text{C}$ 光検出器: $-5 \sim 40^\circ\text{C}$
周波数	50 / 60 Hz
適用電圧階級	66 kV ~ 275 kV (光ファイバ内蔵碍子による)
定格電流	2000 Arms
比誤差	$\pm 0.3\%$
位相角	± 15.6 分

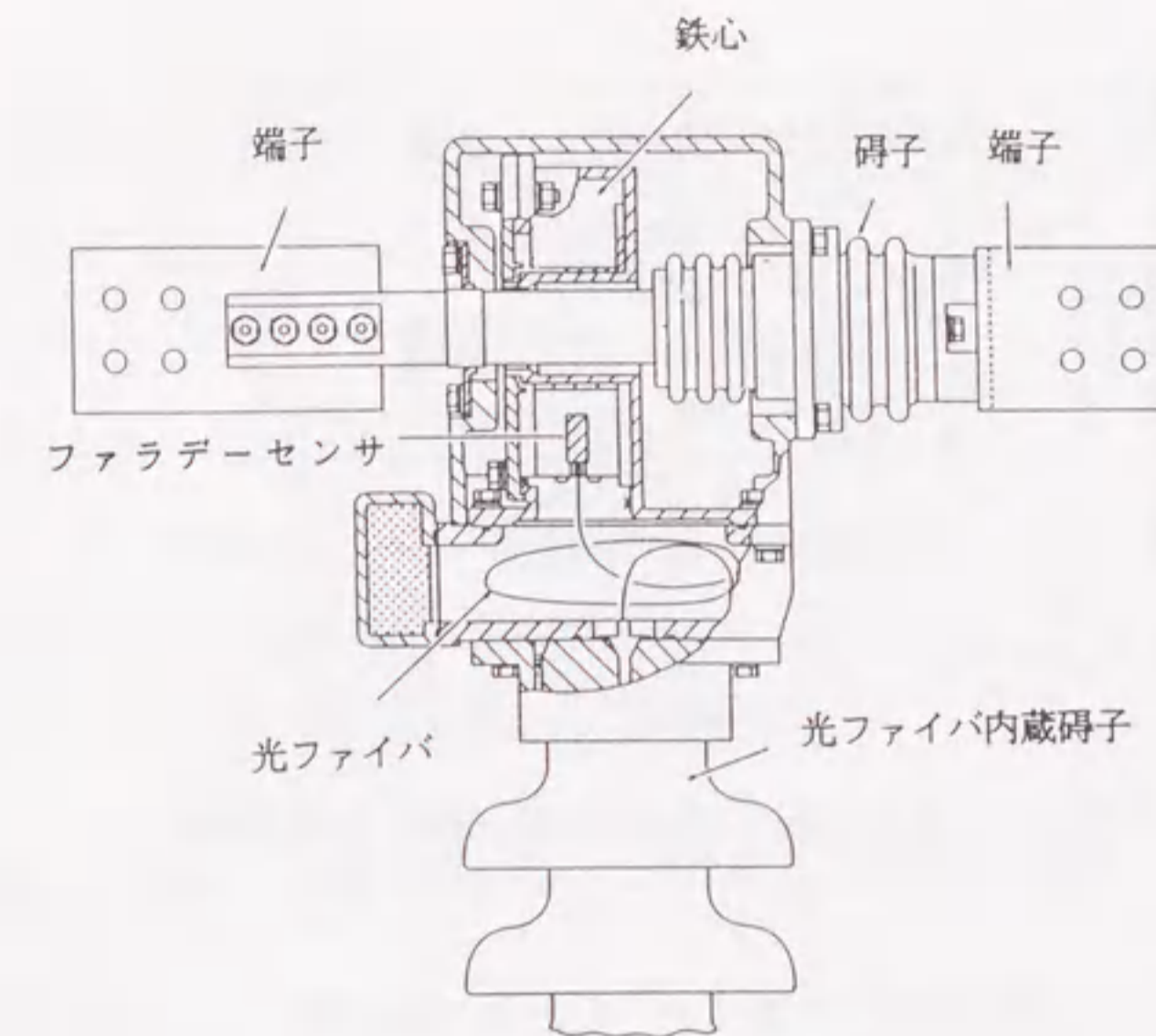
1736(1988)^[3]の0.3級を目標に、高精度化の阻害要因を解明し、その解決策を計算によるシミュレーションと実験によって明らかにした。

光CTの測定原理は、第2章の(磁気鉄心+光磁界センサ)方式と同一で、その構成要素は、光磁界センサ、ギャップ付鉄心、光ファイバ内蔵碍子および光検出器である。光検出器は、磁界が印加されているときの強度変調光の光強度と磁界が0のときの光強度の比を割算器を用いて取り出すことによって、環境変化などによる伝送路の損失変化をキャンセルできる方式としている。

光CTヘッドの構造を第4-1図に示す。このタイプの光CTの交流電流計測性能は主に次の3点の特性によって左右される。

- (1)ファラデー素子の特性: 磁界検出感度、温度依存性
- (2)磁気鉄心の特性: 一次電流に対する磁界の直線性
- (3)光検出器の特性: 温度依存性

以下に、これらの特性要素について高精度化を目的に学術的検討を加えた。



第4-1図 光CTヘッドの構造

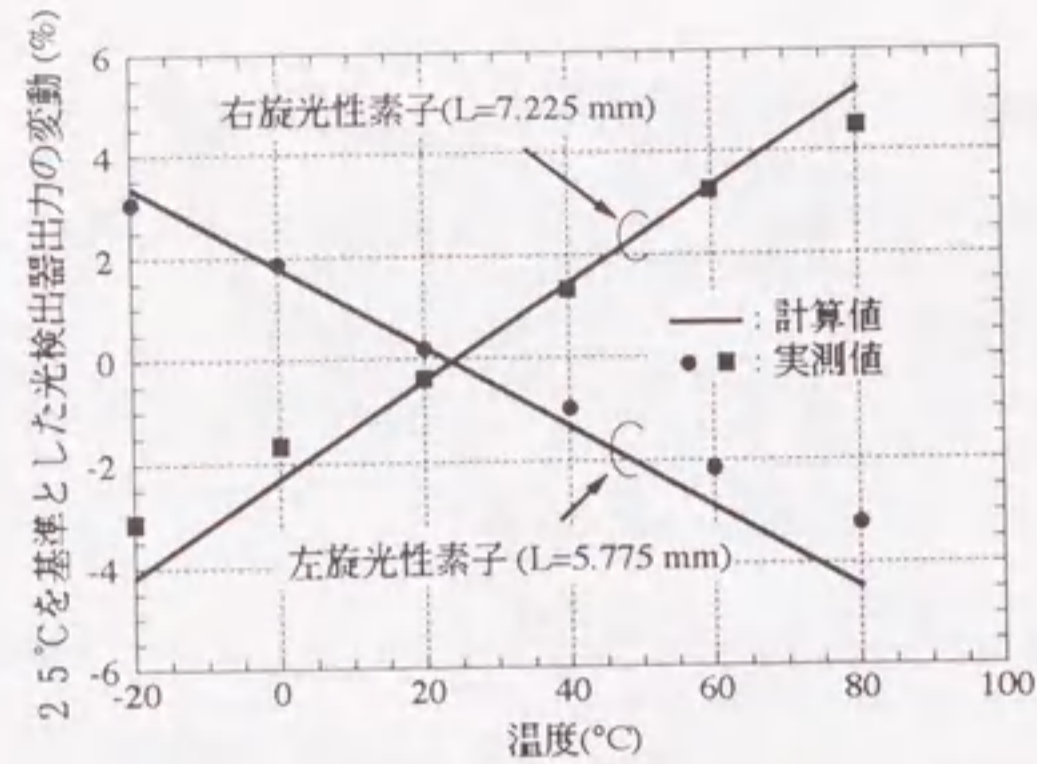
4.2.1 光磁界センサの温度特性改善方法の検討

光磁界センサに用いるBSO素子は、偏波面を回転させる性質の自然旋光性を有しており^[4]右まわりの旋光性を示す素子と左まわりの旋光性を示す素子がある。一例として、BSO素子長7.225mmの右旋光性素子と5.775mmの左旋光性素子を使用した光磁界センサの温度特性の実測結果と(2-13)式と第4-2表のBSO素子の特性値を用いた計算値を第4-2図に示す。図に示した光検出器出力の変動

第4-2表 BSO単結晶のヴェルデ定数と自然旋光能

素材名	ヴェルデ定数 [rad/A]		自然旋光能 [rad/m]		測定波長 [nm]
		温度依存性 [rad/A·℃]		温度依存性 [rad/m·℃]	
Bi ₁₂ SiO ₂₀ ^[4]	3.66×10^{-5}	5.56×10^{-9}	183	-0.052	870
YIG	3.07×10^{-2}	注	-	—	1150

(注) 温度に対し、直線的变化ではなく、U字形の特性を示す。

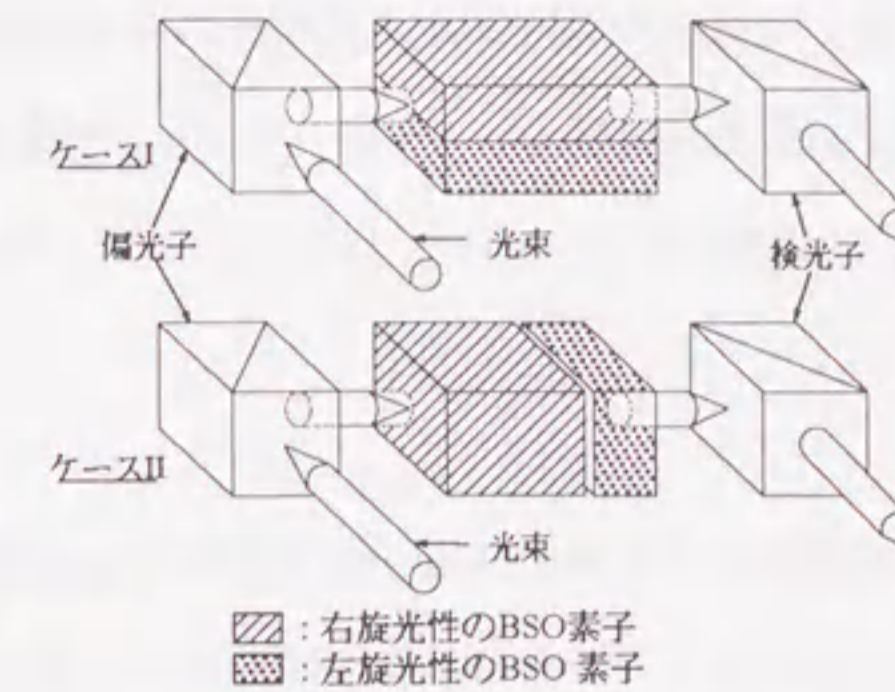


第4-2図 BSOセンサの自然旋光性と温度特性

は、25°Cのときの光検出器出力を基準としたときの各温度における出力変動を示したものである。この結果から、右旋光性素子と左旋光性素子は温度に対して全く逆の傾きの出力温度特性を有していることが確認できた。また、計算値と実測値は左旋光性素子では高温側で、右旋光性素子では低温側で、それぞれ1.5%程度のずれが見られた。このずれの原因は、BSO素子をセンサとして組立てる際にBSO素子をセラミックベースに接着したときの歪が温度ストレスによって光弾性効果を引き起こしているためであると推定できる。このように温度に対して全く逆特性を実現できることから、右旋光性と左旋光性を有する素子を第4-3図に示すように光路軸に対して、上、下、または、前、後に配置することにより温度特性を改善できる。なお、温度特性をキャンセルできるようBSO素子を適切に組合せることを検討する際には、第4-2図の結果から分るように実測値、計算値とのズレを考慮していく必要がある。

(1) ケースI (上下型)

上、下に右、左旋光性素子をはり合せたケースIの場合には、右、左の旋光性素子を透過する光量を適切に配分することによって、温度依存性をキャンセルできる。すなわち、偏・検光子の相対角 $\pi/4$ 、自然旋光能による偏波面の回転を $\phi L = \pi/2$ とし、光の進行方向に対して左回り自然旋光性を正、右回りを負と



第4-3図 温度特性改善のためのBSO単結晶の配置

して仮定し、左、右の旋光性素子の透過光量をそれぞれ αP_0 、 βP_0 とする ($\alpha + \beta = 1$)。これにより、変調光強度は(2-3)式より次式で表わすことができる。

$$P = \alpha P_0 \cos^2(\pi/4 - \theta_+) + \beta P_0 \cos^2(\pi/4 - \theta_-) \dots (4-1)$$

ここで、

$$\theta_+ = (V_e + k_v \cdot \Delta T) H \cdot L + (\pi/2 + k_\phi \cdot T \cdot L)$$

$$\theta_- = (V_e + k_v \cdot \Delta T) H \cdot L - (\pi/2 + k_\phi \cdot T \cdot L)$$

k_v : ヴェルデ定数の温度変化率

k_ϕ : 自然旋光能の温度変化率

ΔT : 温度25°C (T_0) からの温度変化 ($= T - T_0$)

従って、光検出器の出力: V_{out} は変調度として取り出されるため、次式となる。

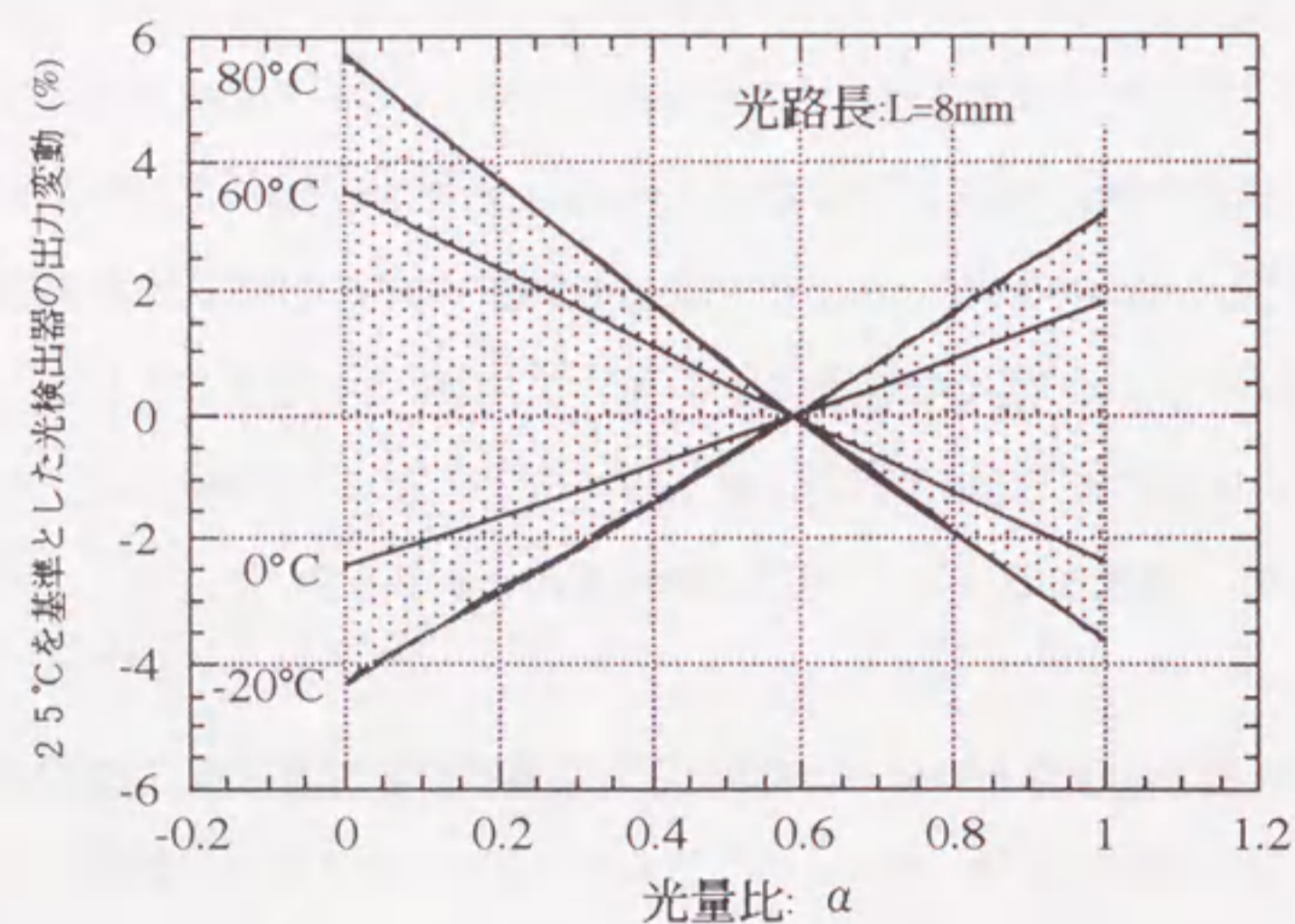
$$V_{out} \approx \frac{-2(V_e + k_v \cdot \Delta T) H \cdot L}{1 - 2(2\alpha - 1) \cdot k_\phi \cdot \Delta T \cdot L} \dots (4-2)$$

(4-2)式を用いて、 α と出力: V_{out} の温度による変動を25°Cを基準として計算した。結果を第4-4 図に示す。これによると、 $\alpha=0.585$ のとき出力の温度変動が0となることが明らかとなった。

(2)ケースII (前後型)

ケースIIの方法は、左旋光性素子と右旋光性素子を光路に対して直列に配置することで温度特性をキャンセルするものである。この場合には、偏光子と検光子との相対角 Ψ と左旋光性素子と右旋光性素子を直線偏光が通過するときの自然旋光性による偏波面の回転: $\phi (L_l-L_r)$ とを組合せて最適な光学バイアス $\pi/4$ となるよう設定する。このような条件下では、(2-3)式から得られる光検出器出力 V_{out} は次の通り表現できる。

$$V_{out} \approx - \frac{-2 (V_e + k_v \cdot \Delta T) H \cdot (L_l + L_r)}{1 + 2 k_\phi \cdot \Delta T \cdot (L_l - L_r)} \quad (4-3)$$

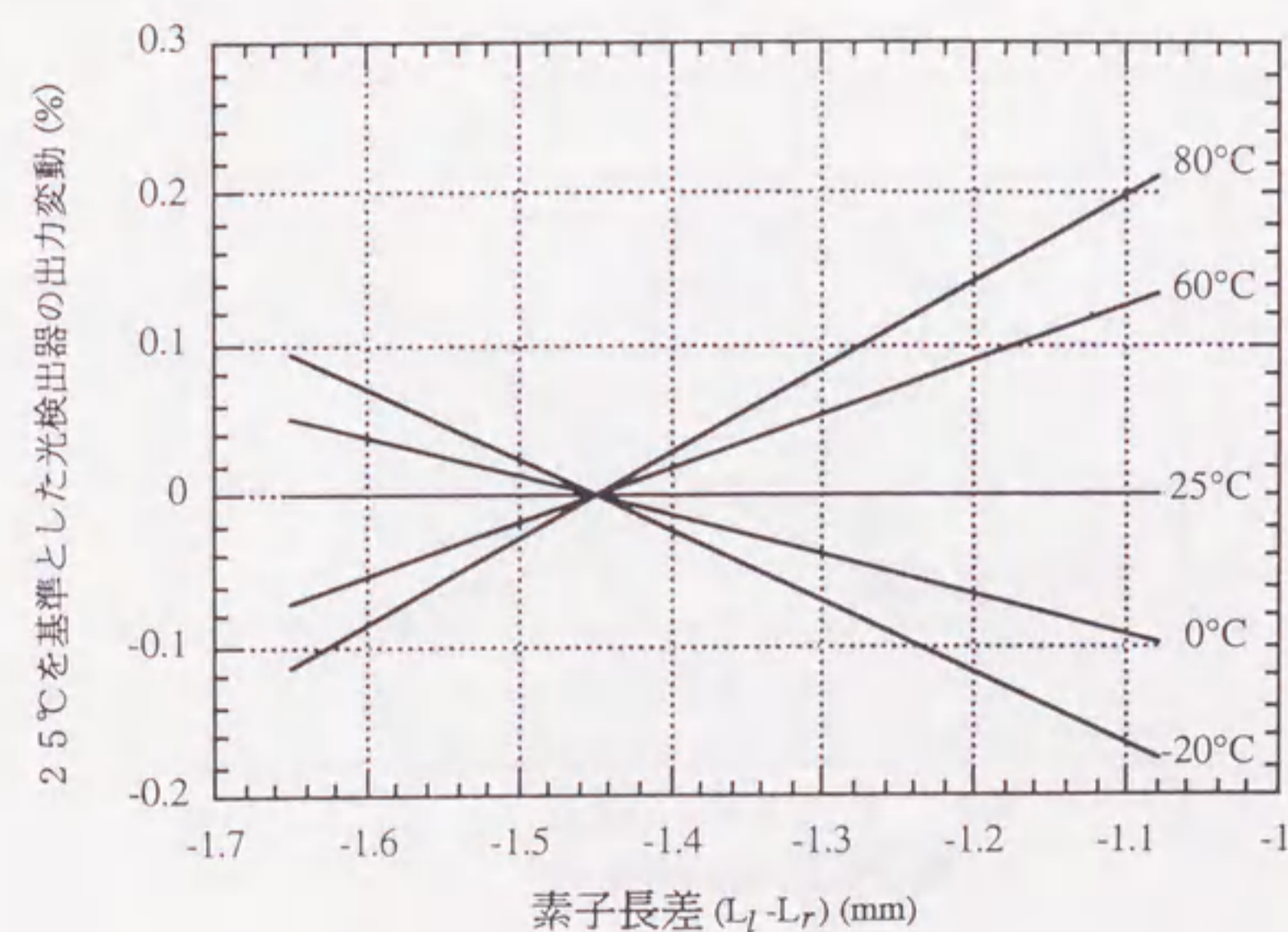


第4-4 図 透過光量比 α と光検出器出力 V_{out} の温度特性 (計算値)

(4-3)式を用いて、 (L_l-L_r) と出力 V_{out} の温度による変動を25°Cを基準として計算した。結果を第4-5 図に示す。この計算の結果、 $L_l-L_r=-1.45\text{mm}$ のときに出力の温度変動が0となることが明らかとなった。

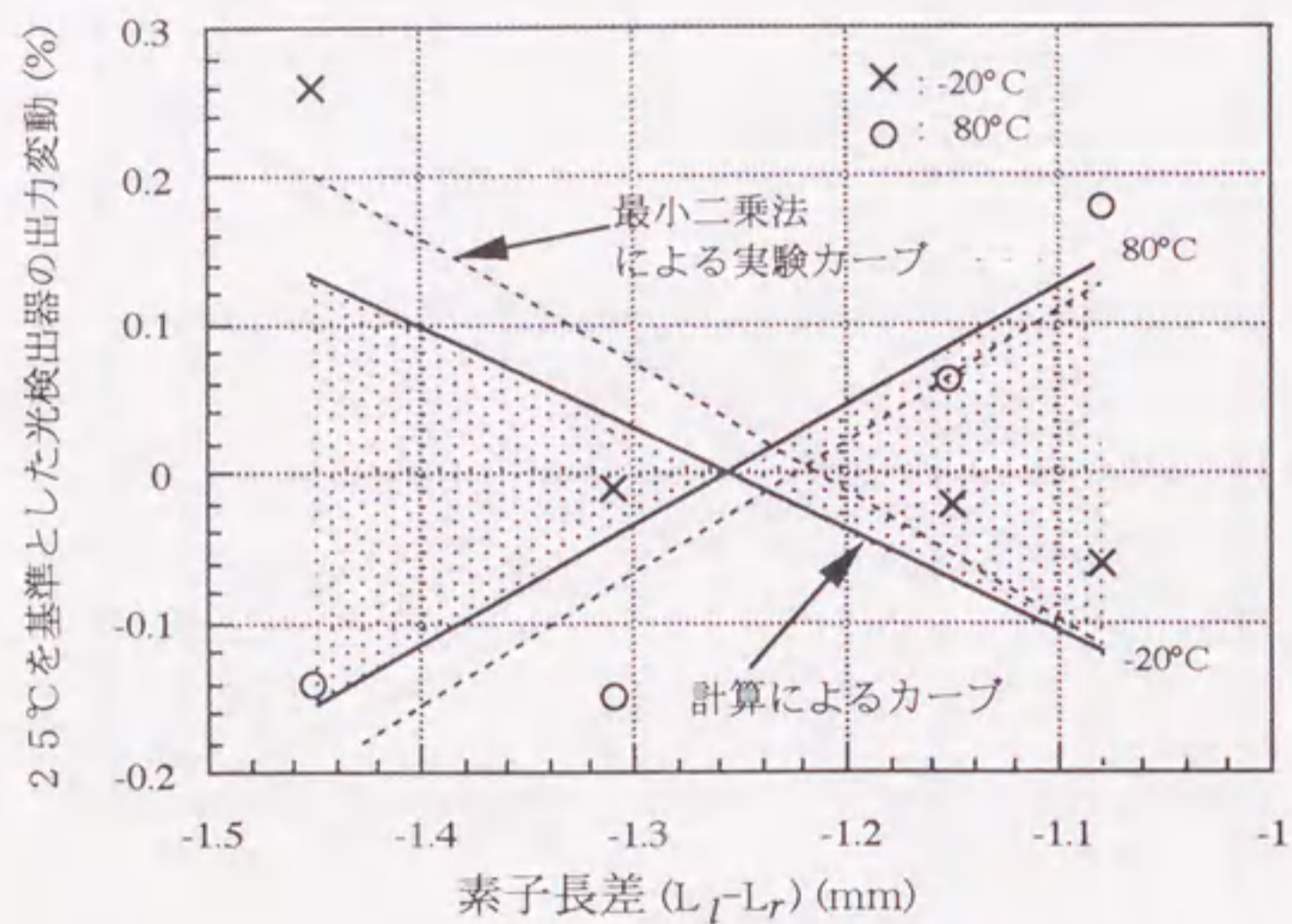
4.2.2 実験的確認

ケースI、IIの両者の方法に関し、計算によって、左、右旋光性素子の最適な寸法を求めることができた。ケースIは、セラミック製ベース基板と光軸の位置関係を基準に素子寸法を決定し、ベース上に左、右旋光性素子を積み重ねることによって製作できる。また、ケースIIは計算された素子長のBSO素子を光軸に対して直列に配置することで製作でき、ケースIに比べ製作が容易である。そこで、ここではケースIIの方法を実験的に確かめることとした。



第4-5 図 (L_l-L_r) と光検出器出力 V_{out} の温度特性 (計算値)

素子長差を $L_l - L_r = -1.45 \sim -1.08 \text{ mm}$ の範囲で変化させその温度特性の改善効果を確認した。結果を第4-6 図に示す。理想的には、BSO素子の自然旋光性による偏波面の回転と偏・検光子の相対角とで決まる光学バイアスは、 $\pi/4$ とすることが望ましく、(4-3)式からそのときの最適な素子長差 $L_l - L_r = -1.45$ と計算できた。しかし、この実験では実験用センサの製作を容易とするため、偏・検光子の相対角度をあらかじめ、 $\pi/4$ と固定して行った。従って、光学バイアスは偏・検光子の相対角度 $\Psi = \pi/4$ にBSO素子の自然旋光性による偏波面の回転が加わることとなる。このため、このときの最適な素子長差は(4-3)式から計算すると第4-6 図に示したように -1.26 mm となる。80°Cと-20°Cにおける実験結果から最小二乗法による実験カーブを求めると最適素子長差は -1.22 mm となり、計算結果とほぼ一致することが明らかとなった。この計算値と実験値の差は、実験時に素子をセラミックベース基板上に接着した際に発生した素子の歪による光弾性効果によるものと考えられる。

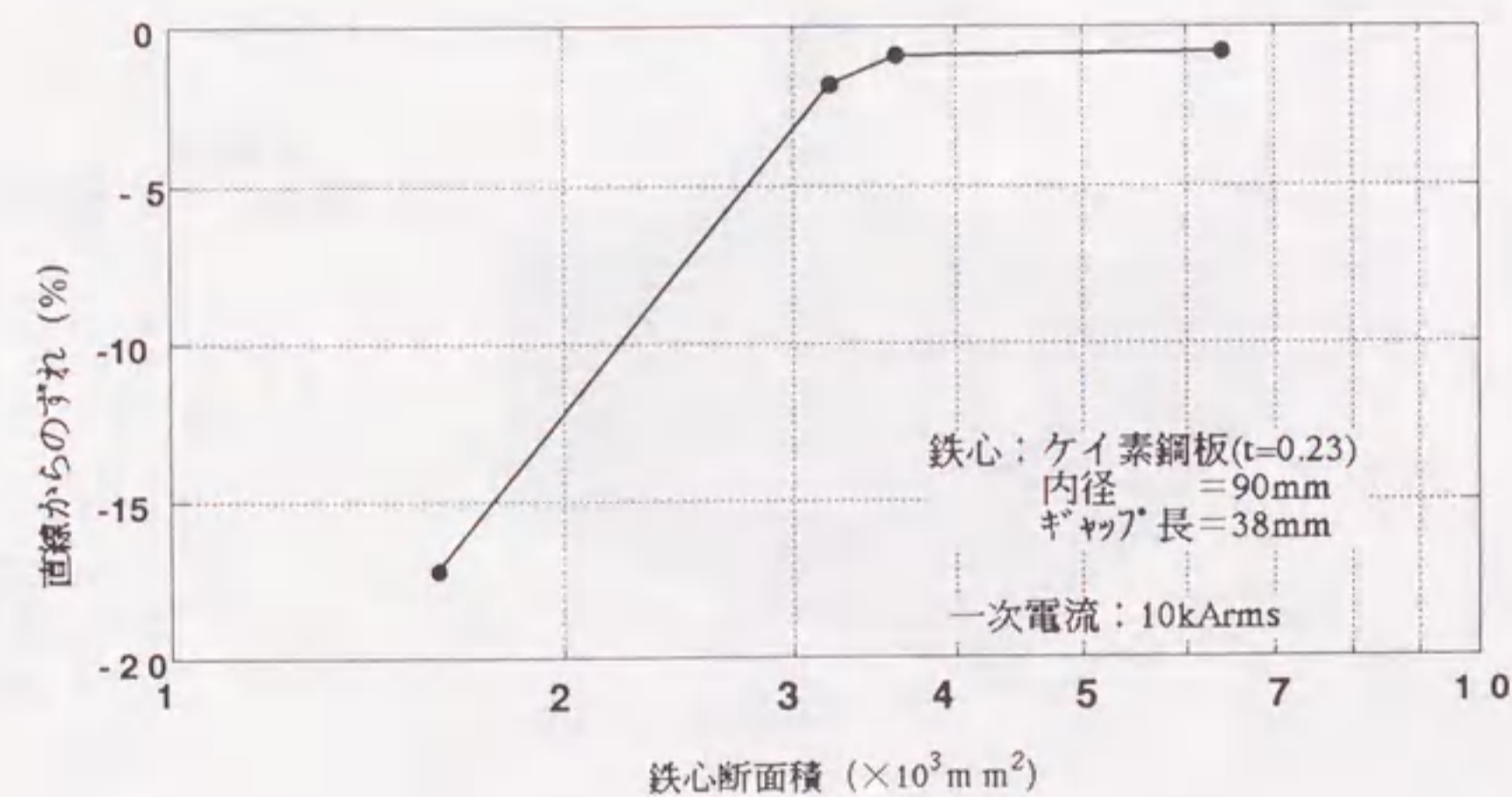


第4-6 図 素子長差 ($L_l - L_r$) と光検出器出力 V_{out} の温度特性 (実測値)

4.2.3 鉄心ギャップ中の磁界の直線性

鉄心ギャップ中の磁界は、一般に鉄心の磁気飽和によって一次電流に対する直線性がそこなわれる。その特性はギャップ寸法と鉄心断面積に依存するため、光CTの特性評価の上で必要なデータとなる。

そこで、ケイ素鋼板 (板厚0.23mm) の巻鉄心を用いギャップ長を一定として、鉄心断面積とギャップ中の発生磁界の直線からのずれを調査した。なお、ギャップ中の磁界はガウスメータで計測した。結果を第4-7 図に示す。これによると10 kAまで1%以下の直線性を確保するには、ギャップ長38mmの場合で断面積3600mm²以上必要であることが分かる。また、鉄心飽和の発生しない磁束密度の範囲でのギャップ中の磁界の大きさはギャップ長に反比例するが、光CTヘッドの実設計におけるギャップ長は下限値をギャップ内に挿入する光磁界センサの寸法で制限され、上限値を電流計測範囲の偏波面の回転角の設計 (変調度の設計) によって制限される。

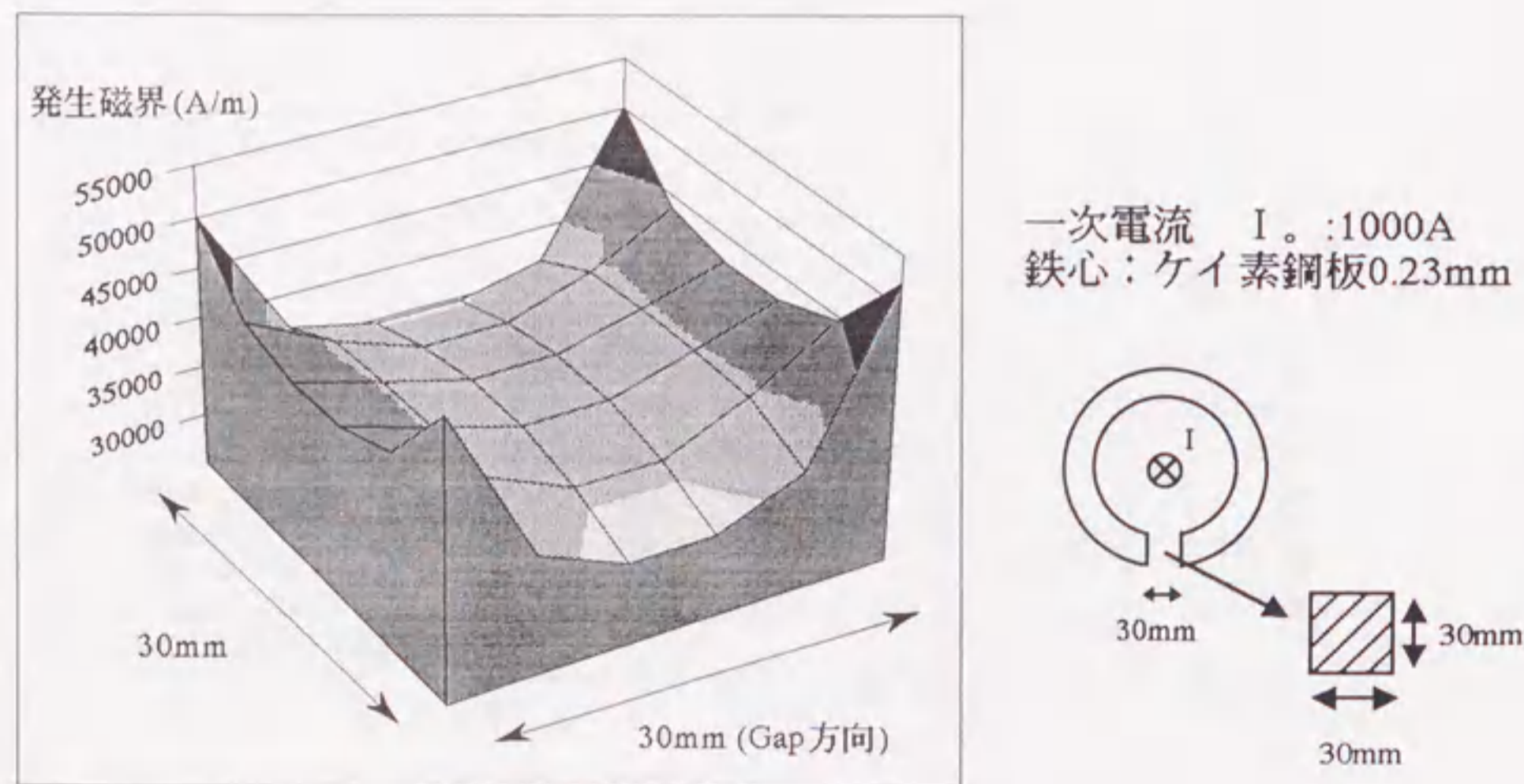


第4-7 図 鉄心断面積とギャップ中磁界の直線性

次に、光磁界センサのギャップ中における取付位置の違いによる印加磁界の変化を検討するため、ギャップ中の磁界分布を磁界解析プログラムMAGNA/FIMを用いて解析した^[5]。磁界分布図を第4-8図に示す。ギャップ中の発生磁界はギャップ中央でほぼ平坦な特性であり、取付位置の精度を上げなくても所定の磁界が得られることが明らかとなった。

4.2.4 光検出器の温度変動の改善

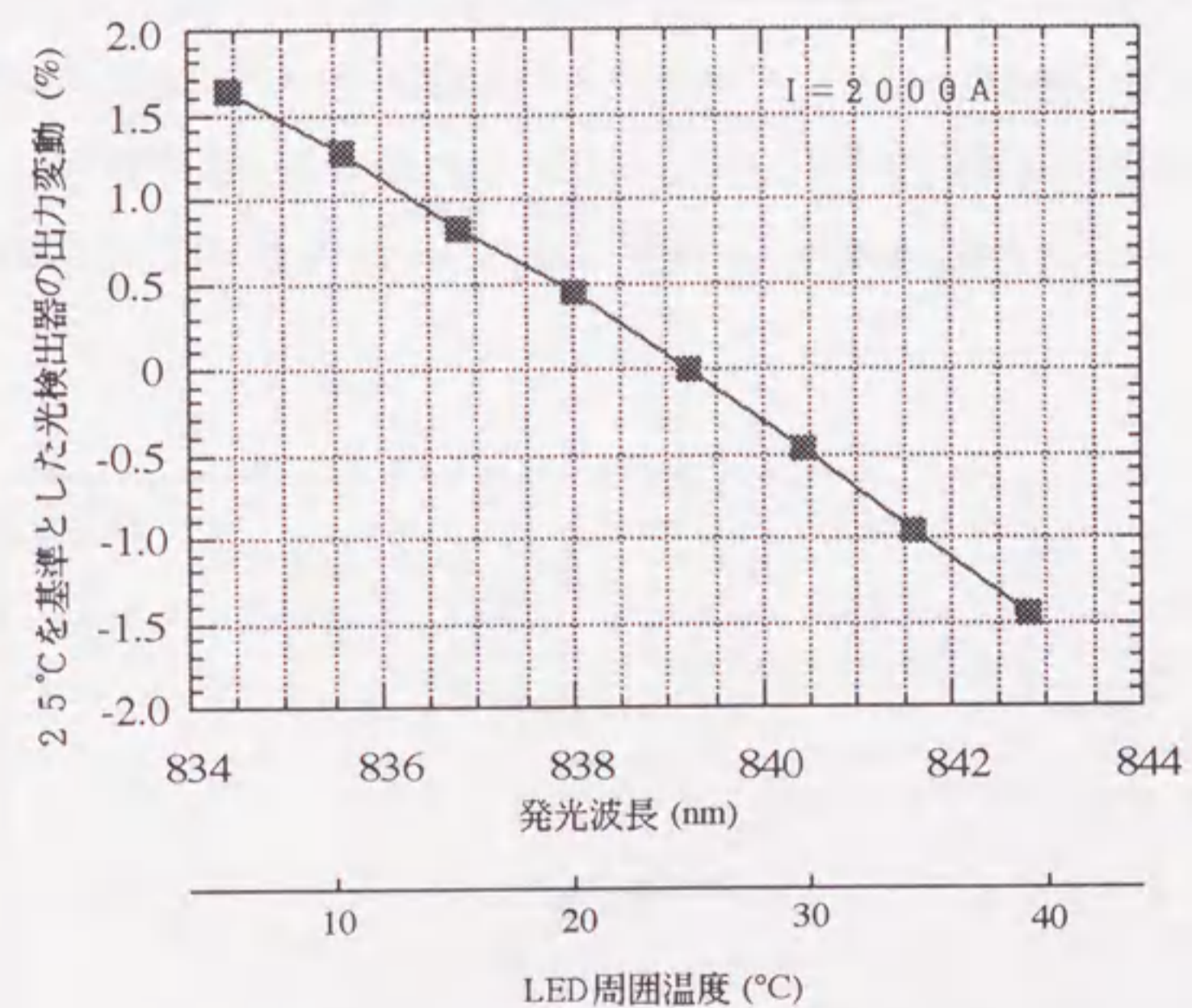
発光回路と受光回路で構成した光検出器において周囲温度を変化させたとき、割算器、アンプなどの電子回路部品は温度ドリフトによって増幅率が変化し、光CTの出力変動につながる。また、発光回路のLEDの波長は、温度ドリフトがあり光磁界センサのヴェルデ定数の変動につながる。前者の電子回路部品の温度ドリフトは部品選定によって改善しうることから、ここでは、LEDの発光波長



第4-8図 ギャップ中の発生磁界の分布

変動と光磁界センサの特性変化を調査した。

光磁界センサのヴェルデ定数には波長依存性があるため、光検出器の周囲温度変動によってLEDの発光波長が変動し、結果として、光CTの出力 V_{out} が変動する。BSO光磁界センサを対象として、発光波長と光検出器の出力の関係の実測結果を第4-9図に示す。これによると、波長変化1nm当りおよそ-0.34~-0.4%の出力変動を起こすことが分かる。これは、光検出器の出力変化を0.1%以下とするためには、波長変化を0.29nm以下とする必要があることを示している。また、使用したLEDの25°Cでの中心波長は854.3nmで、温度係数は0.24nm/°Cであることを実験によって確認した。

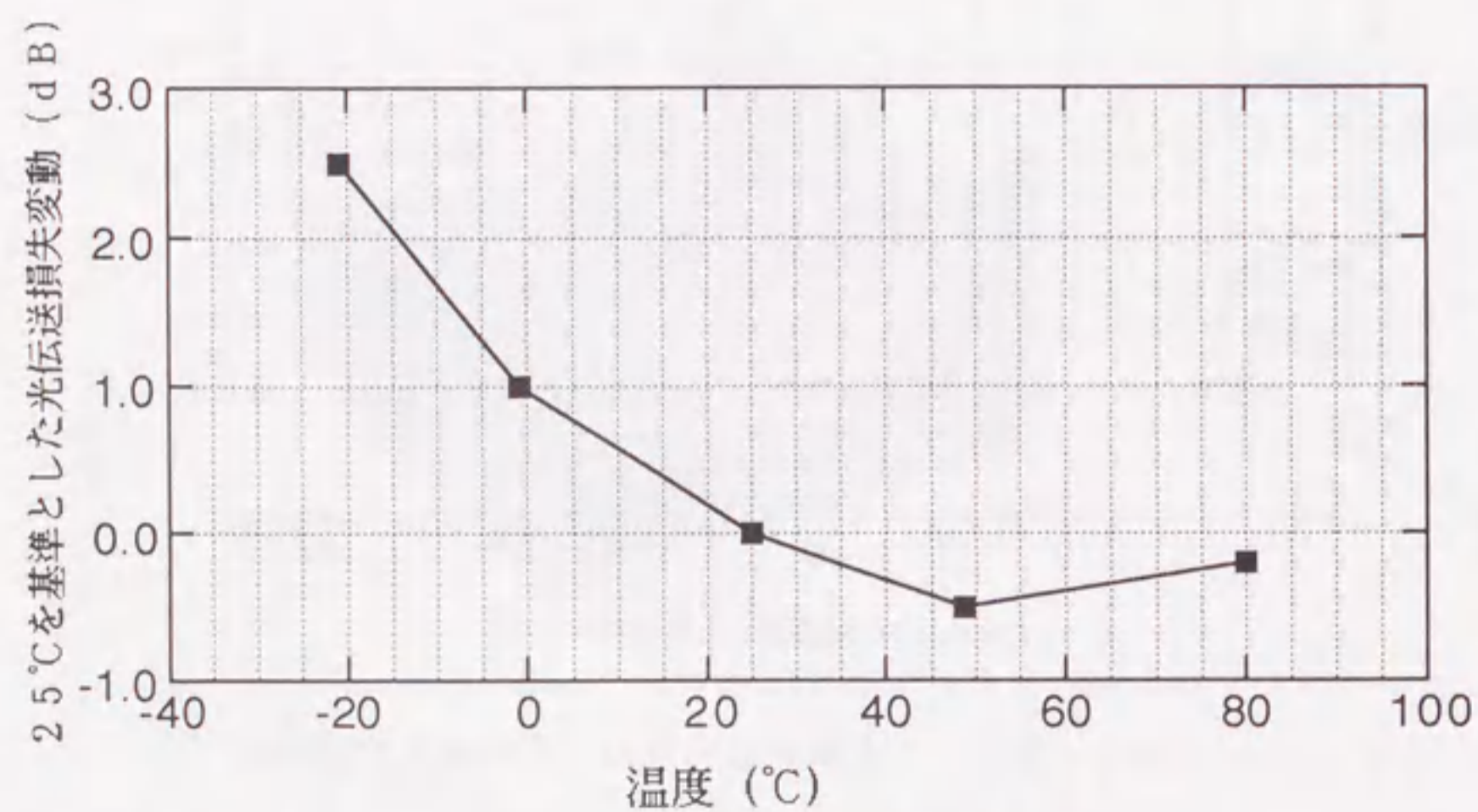


第4-9図 光検出器出力のLED波長特性

以上のことから、光検出器の使用温度範囲を $-10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ と想定した場合、LEDの発光波長の変化を 0.29nm 以下にするためにはLED周囲温度の変化を 25°C を基準として 1.2 度以下におさえることが必要である。このため、LEDはペルチェ素子で温度コントロールできる恒温槽内に収納することとした。実際に試作したペルチェ素子を組み込んだ恒温槽内の温度変動の実測結果では、周囲温度 $-5\sim +40^{\circ}\text{C}$ の範囲で 25°C 基準に対し $+0.2\sim -0.1^{\circ}\text{C}$ の変動であることを確認した。

4.2.5 光伝送損失特性

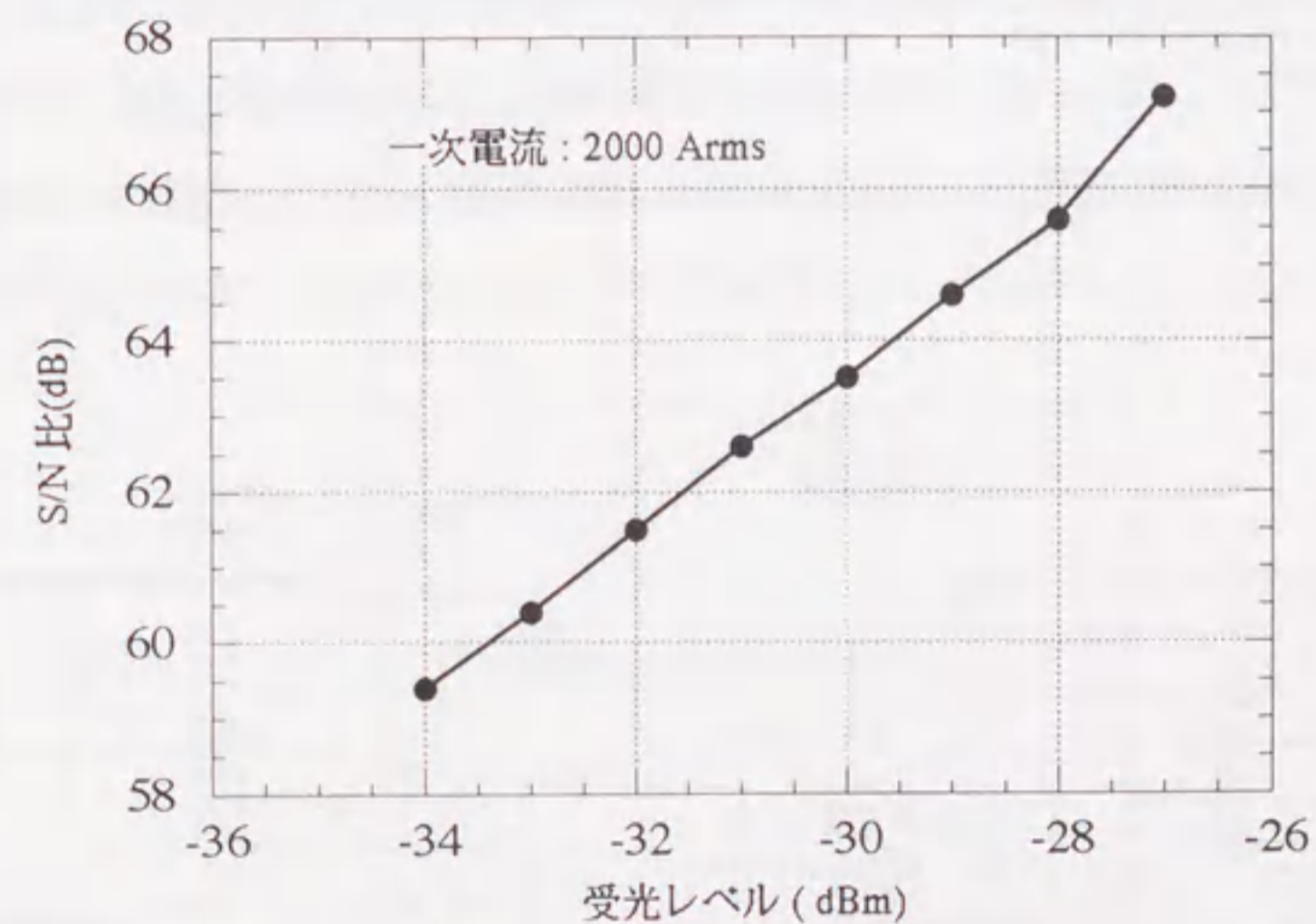
光検出器の出力ノイズは、計測性能を決定する一要素で受光レベルに左右される。このため、光CTの光経路全体の光伝送損失を検討した。 $-20\sim 80^{\circ}\text{C}$ の範囲での光CT（光CTヘッド+ 161kV 光ファイバ内蔵碍子）の光伝送損失の変動の実測結果を第4-10図に示す。これによると、 $-20\sim 80^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において光伝送損失の変動は 25°C を基準として最大 3dB であった。なお、 25°C での絶対損



第4-10図 光CTの光伝送損失温度特性

失値は 17.8dB であった。

光検出器の受光レベルを変化させたときの光検出器の出力のS/N特性の変化の実測値を第4-11図に示す。なお、S/N特性のSは 2000A 通電時の光検出器出力(V)で、Nは電流が零のときの光検出器の出力をオシロスコープにより計測し比較したものである。 161kV クラスの（光CTヘッド+光ファイバ内蔵碍子）の光伝送損失は実測で 17.8dB であった。光検出器のLEDの発光出力を -12.7dBm とすれば、受光レベルは常温で -30.5dBm である。温度範囲 $-20\sim 80^{\circ}\text{C}$ を考えたとき、光CTヘッド+光ファイバ内蔵碍子の伝送損失の変動が第4-10図で示すように最大でも 3dB 以下であるため、S/N比の低下は第4-11図に示すように 63dB から 60dB の 3dB 程度となる。



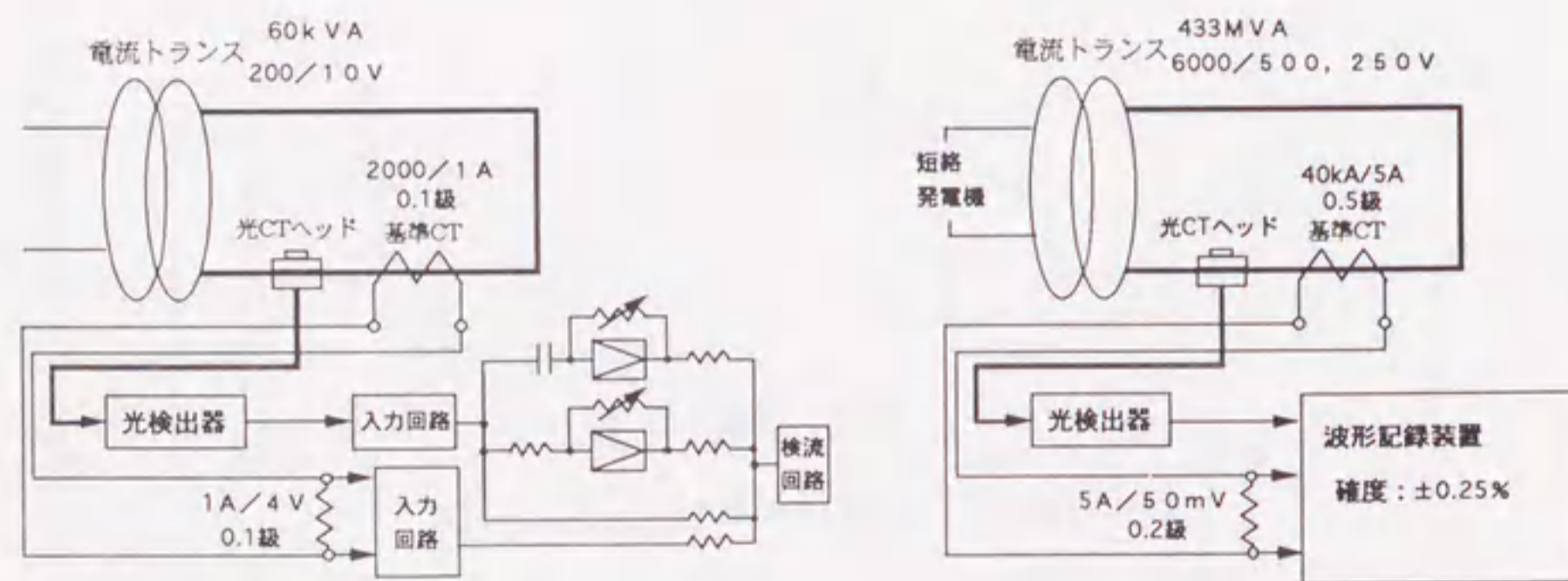
第4-11図 受光レベルとS/N比特性

4.3 実規模光CTを用いた実証的検討

以上に示した計算結果ならびに実験結果に基づいて、電圧階級161kV、定格電流2000Aで目標精度0.3級の実規模の光CTを製作し、その性能を実証評価した。

4.3.1 比誤差、位相角の測定回路

光CTの比誤差と位相角を精度よく計測する方法は現在のところ規格化されていないため、本章では、第4-12図に示す測定回路を構成し試験に用いた。通常、電磁型CTの比誤差/位相角は、商用周波数に対して基準となるCTの二次電流と被測定物の二次電流をブリッジ等で比較することによって測定することができる。しかしながら、光CTの出力は電圧出力(0~4Vrms)であるため、基準の電磁型CTの二次電流をシャント抵抗で電圧変換し電圧どうしで比較する方式を考案し適用した。第4-12図(a)に具体的回路構成を示した。回路の調整は、基準となる既知の精度の電磁型CTの出力を光検出器を接続する側にも接続し、検流回路が平衡状態となるように行った。定格電流以上の比誤差測定は第4-12図(b)の測



(a) 定格電流範囲の計測回路

(b) 大電流範囲の計測回路

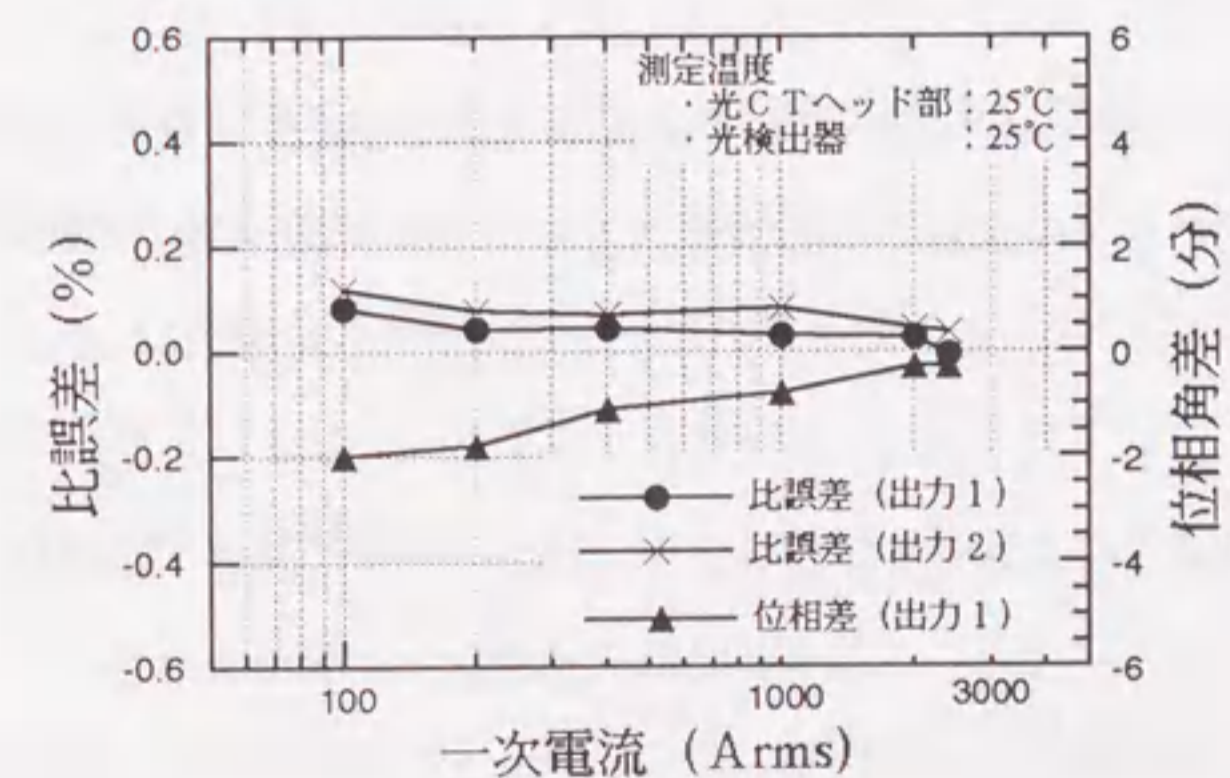
第4-12図 比誤差・位相角差試験回路

定回路を用いた。

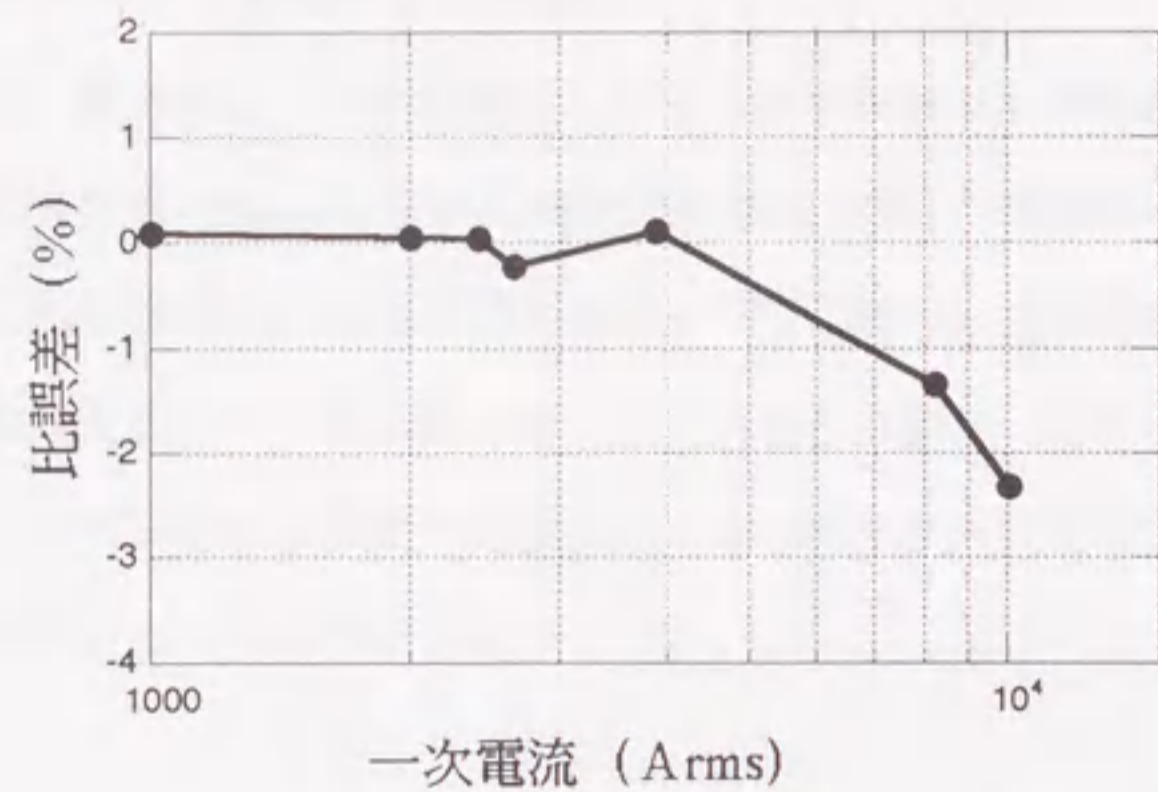
光CTヘッドの温度特性を評価するときは、光検出器を一定の温度(25°C)に保ち、光CTヘッドのみを-20°C~80°Cに変化させた。また、逆に光検出器の温度特性を評価するときには、光CTヘッドを一定の温度(25°C)に保ち、光検出器のみを-10°C~40°Cに変化させた。さらに、光CTヘッドと光検出器を同時に-10~40°Cの間で変化させたときの出力電圧の変動も併せて計測した。

4.3.2 特性評価結果

一定温度(25°C)における光CTの比誤差・位相角特性の実測値を第4-13、4-14図に示す。なお、光CTの電流特性は光検出器の出力増幅器のダイナミックレンジの設定の影響を受ける。このため、定格電流2000A以下を主体に評価するよう、増幅器の最大電圧に近い電圧4Vを2000Aに設定した出力1と大電流領域の光CTヘッドの特性を評価する目的で、定格の20倍の40kAを4Vに設定した出力2を設けて試験した。実規模評価試験の結果、光CTの出力1は電流範囲100Arms



第4-13図 比誤差・位相角差特性

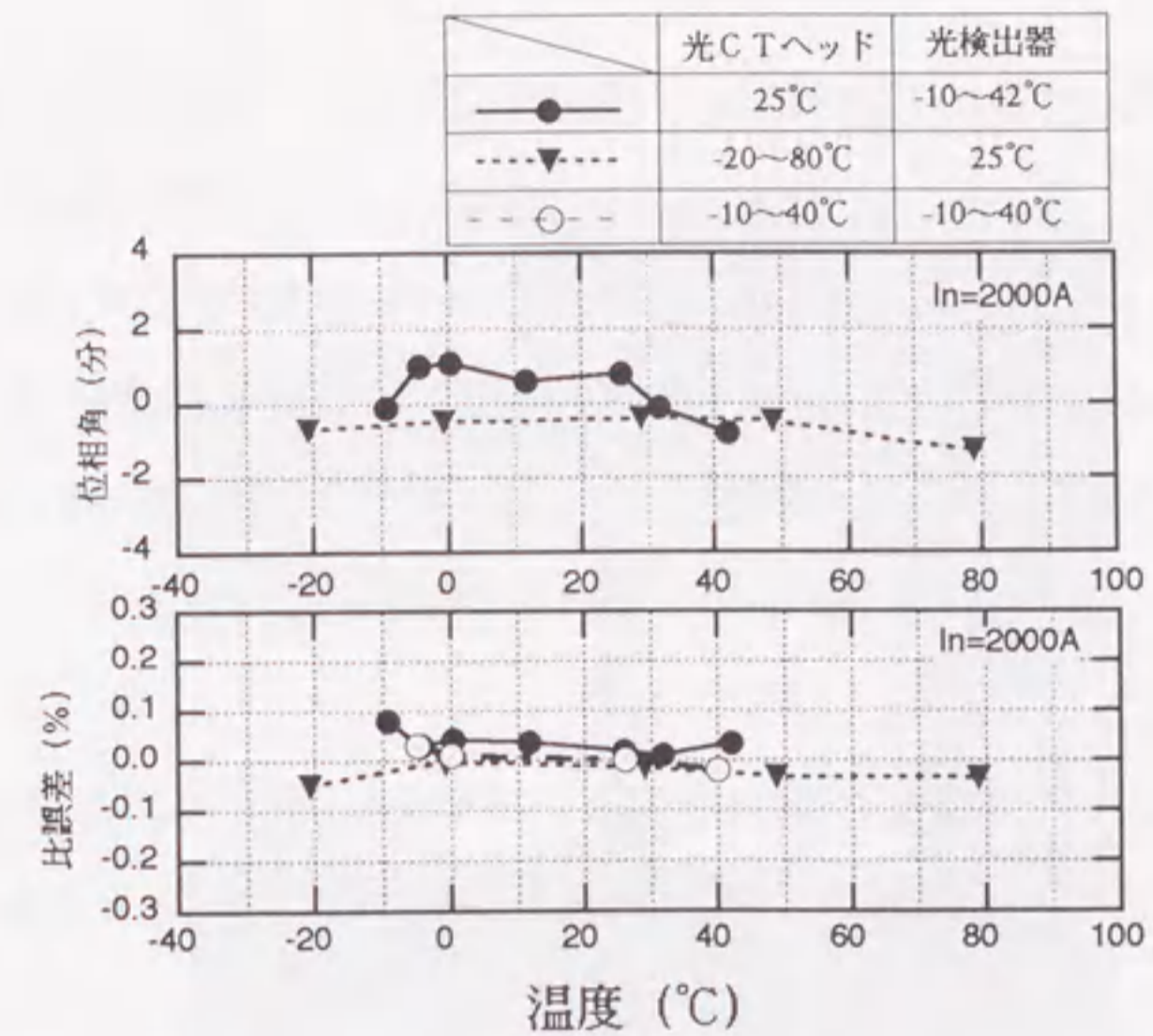


第4-14図 大電流領域の比誤差特性(出力2)

~2000Arms の間で、比誤差0.09%以下、位相角-2分以内で非常に優れた特性を有することを明らかにすることができた。出力2は、定格の5倍の10kAにおいて、-2.4%の比誤差を示した。なお、出力1と出力2の比誤差は定格電流以下の領域ではほとんど変わらないが、出力2のS/N比は出力1より劣っていた。

温度を変化させたときの光CTの比誤差と位相角の特性を第4-15図に示す。ここで示した比誤差は、(2-9)式によって計算した値である。光CTヘッドの周囲温度を-20~+80°Cの範囲で変化させたときの光CTの比誤差、位相角は、それぞれ-0.05%以下、-1.4分以下であった。また、光検出器の周囲温度を-10~+40°Cの範囲で変化させたときの光CTの比誤差、位相角は、それぞれ+0.09%以下、+1分以下であった。さらに、光CTヘッドおよび光検出器の周囲温度を同時に変化させたときの比誤差は-5~40°Cの範囲で-0.03%以下であった。

以上の特性評価結果から考えて、光CTヘッドの周囲温度が-20~+80°C、光検出器の周囲温度が-10~+40°Cのどの点にさらされた場合においても、比誤差、位相角は次に示す精度となり JIS C 1736^[3] (第1-5 図参照) の0.3



第4-15図 光CTの温度特性

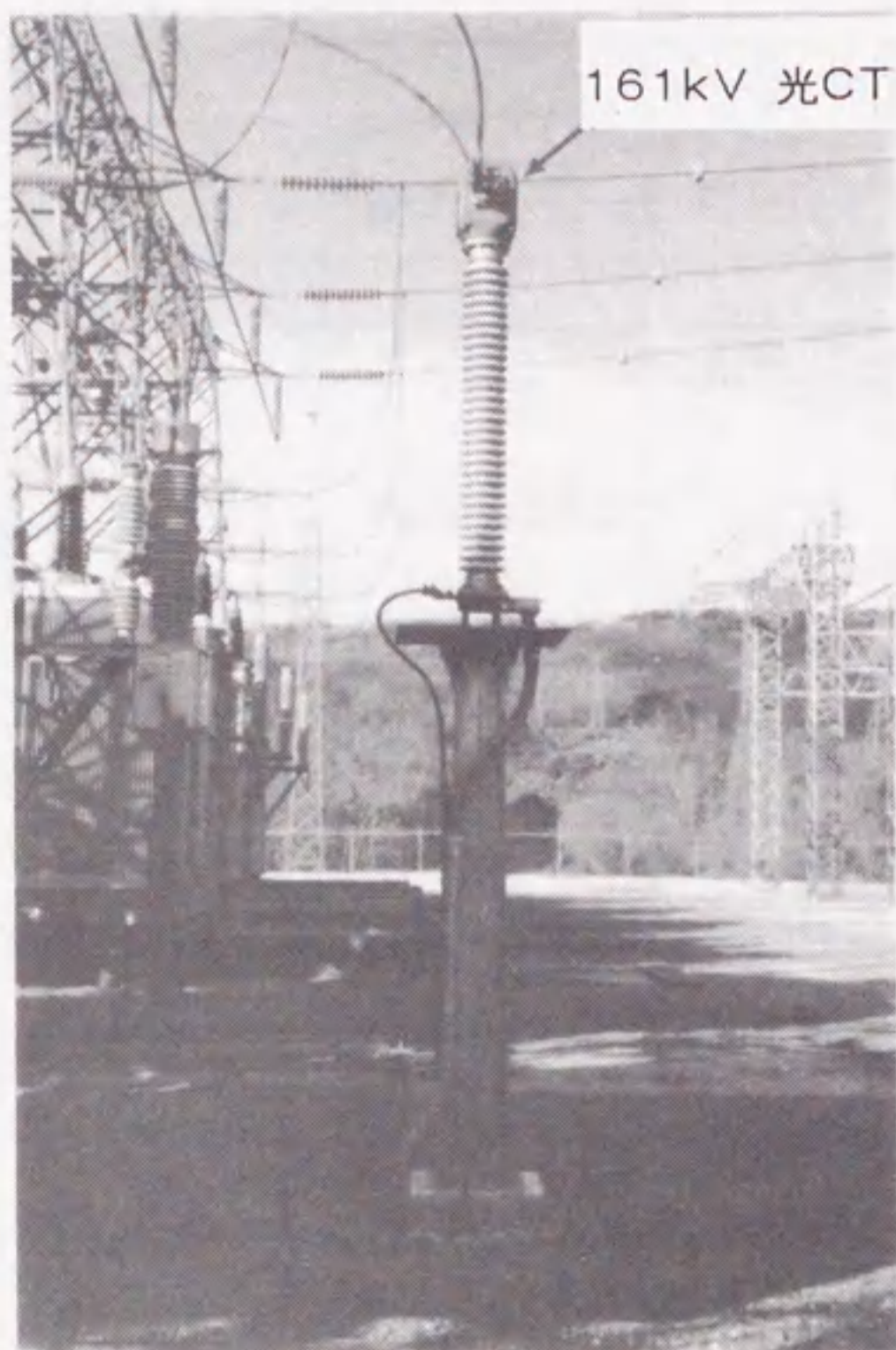
級の精度を有するものと判断できる。

比誤差: -0.05~+0.09%

位相角: -1.4 ~ +1分

製作した161kV 光CTは、米国、Tennessee Valley Authority (TVA) のMoccasin変電所で実用性能の検証を進めている。光CTの設置状況を第4-16図に示す。光CTと常時比較のため0.1級の高精度の電磁型CTを161kV母線より引き出された電力融通線路に設置した。

試験は1994年夏より運転を開始した。現在までのところ光CTの誤差は0.3%以下でフィールドにおいても十分性能を維持した。



第4-16図 光CTのフィールド試験状況

4.4 まとめ

本章では、構成が比較的簡単で、製作が容易な光CTとして鉄心のギャップ内にバルク型光磁界センサを挿入した形態のものを取り上げ、本方式の光CTとして初めて0.3級の精度を実現した研究成果をまとめた。

ファラデー素子としてBSO素子を用い、温度特性を改善するために右旋光性と左旋光性のものを組合せる方式を計算および実験的に確かめ、 $-20\sim+80^{\circ}\text{C}$ の範囲で0.1%以下の良好な特性が得られることを明らかにした。また、BSO素子の特性の波長依存性についても評価し高精度な光検出器を実現した。さらに、碍子型光CTの構成要素として光ファイバを内蔵した磁器碍子を製作し、光伝送性能の精度への影響を実験的に明らかにした。

これらの成果に基づき161kV光CTを製作し、実験的検証を行った結果、温度特性を考慮しても定格電流において比誤差 $\pm 0.1\%$ 以下、位相角 ± 2 分以下の性能が得られることを確認した。さらに、実変電所における性能検証でも、誤差が0.3%以下の性能を維持していることも確かめた。

4.5 参考文献

- [1] 電気学会技術報告(Ⅱ部)第227号, “計器用変成器(保護継電器用)における最近の技術諸問題”, 計器用変成器標準特別委員会, 1986.
- [2] 岡杖, 尾上, 川崎, 宮野, 甲斐, 水間, “母線保護継電装置”, 明電時報, No.6, 通巻209号, 1989.
- [3] JIS C-1736, “計器用変成器(電力需給用)”, 1988.
- [4] T.Mitsui, K.Hosoe, H.Usami, S.Miyamoto, “Development of Fiber-Optic Voltage Sensors and Magnetic-Field Sensors,” IEEE/PES 1986 Summer Meeting, 86SM 442-8, 1986.

- [5] 田中, 野島, 中村, 小椋, “積分方式を伴った有限要素法と磁位を用いた静磁界解析”, 電気学会 回転機・静止器合同研究会資料, RM-86-37・SA-86-30, 1986.

第5章 光CTの気中絶縁 変電所母線故障点標定への適用検証

5.1 まえがき

近年の電力需要の急増、都市機能の高度化・多様化の進展、ライフスタイルの変化から、電力の高品質かつ安定な供給に対する社会的要請はますます高いものとなっている。このような情勢の中で、電力流通設備の要である変電所においては、万一の事故発生に対し迅速かつ確かな状況判断と復旧対応が要求されている。従来、無人変電所で発生した事故の場合には、現行の遠方監視情報が十分でないため現地出向し故障点を確認し事故状況を把握した後、再送電を行っている^[1]。この場合、変電所母線事故では広範囲の停電となり、動作リレーや故障表示が数多く集中している制御箇所において事故状況を迅速・的確に判断することは難しく、復旧操作に手間どることも考えられる。

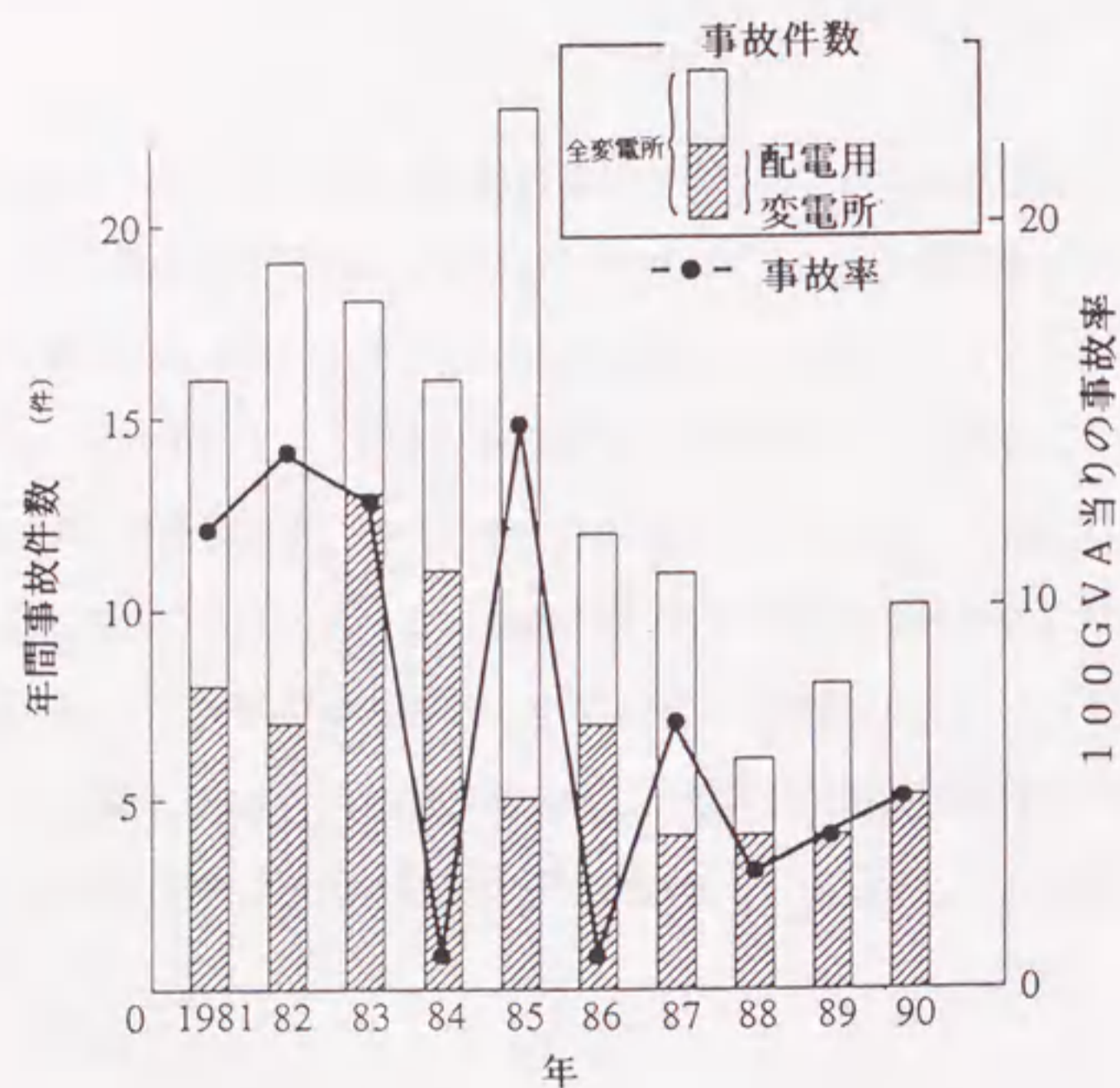
このような問題を解決するため、気中母線の故障点標定に光磁界センサを用いた光CTを適用する検討を行った。本研究で開発してきた気中絶縁光CTは、変電所の既存設備として設置されている電磁型CTとは電流計測特性の一部において異なっている。このため、電磁型CTを電流計測手段として使用している保護継電装置と協調できるようにする必要がある。また、光CTと電磁型CTとで計測された電流情報を組合せて故障標定を行う場合には、この2方式の電流計測手段の計測データをどのように処理して利用するかが技術検討のポイントとなる。

以下に、単母線形態の配電用変電所と二重母線で多数の引き出し回線やバンクをもつ超高压変電所を対象に光CTの母線故障点標定への適用技術に関する研究成果を示す。

5.2 配電用変電所の母線の故障点標定への光CTの適用

5.2.1 事故実績と故障点標定の必要性

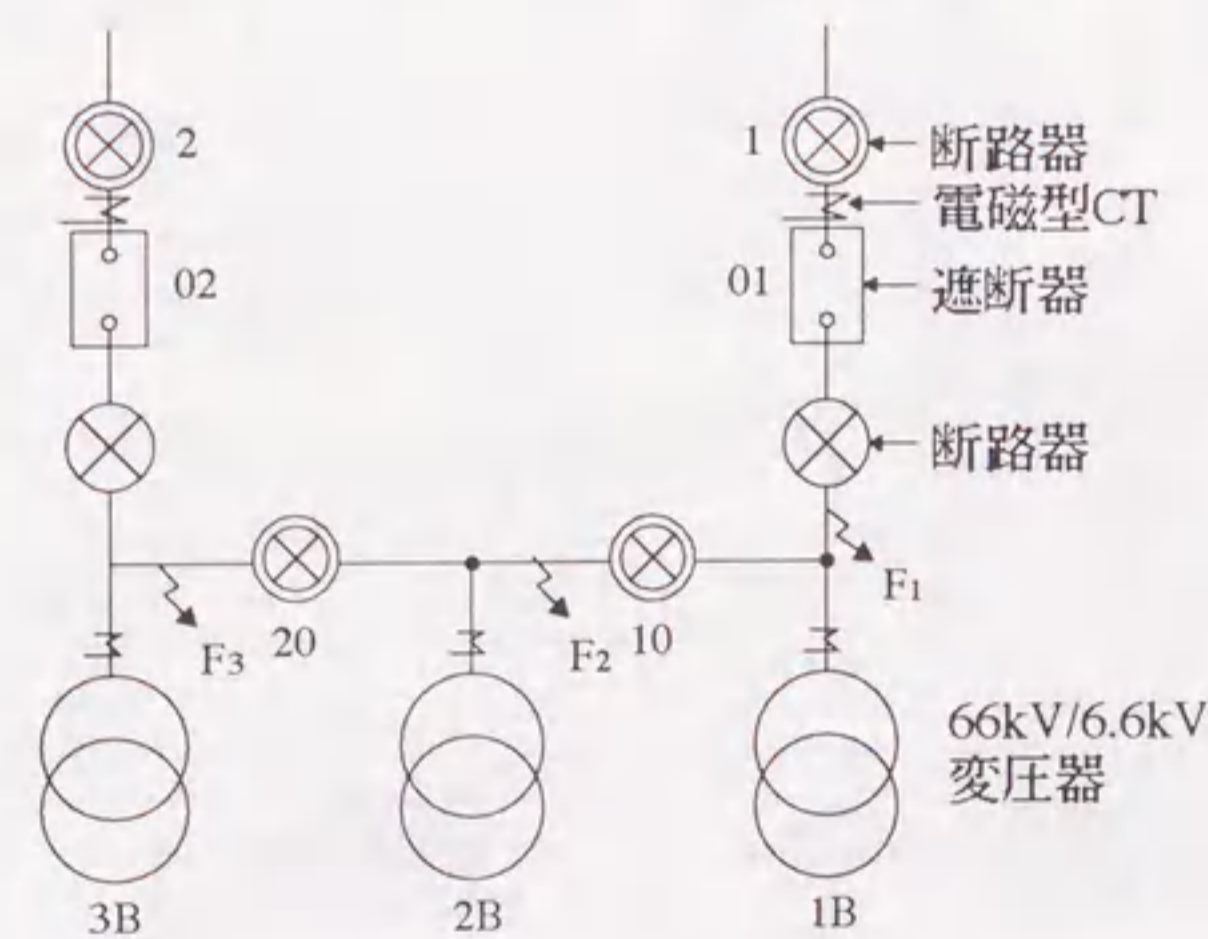
過去10年間の国内配電用変電所における事故および全変電所の事故実績の例を第5-1図に示す。全変電所事故実績において一変電所当たり、認可出力100GVA当りの事故率(件/100GVA)は減少しており、年間の全事故件数も減少傾向にある。過去10年間の配電用変電所における事故の中で受電設備事故は6件で、総数63件の約10%あるが、事故原因を見てみると、風雨・鳥獣接触など自然要因によるものが5件ある。配電用変電所は数1000箇所あり、全て無人変電所である。また、用地取得の困難化、環境調和要請、運転保守の省力化の観点などから、一次側受電設備をGISなどの隠蔽型設備を採用する傾向にあるが、いまだ適用率は低い。



第5-1図 変電所の事故統計

従って、飛来物接触等による外的要因による事故確率の高い気中絶縁変電所に対し、受電設備事故時の事故点判断の迅速化は供給復旧時間の短縮のために急務の課題である。

現行では、第5-2図の例に示す設備形態から遮断器(機器No.01, 02)、断路器(機器No.10, 20)および母線(手動操作断路器含む)で発生した故障については、電磁型CTが遮断器より線路側にしか設置されていないため、保護装置によってその部位を特定できない。特に、短絡故障の場合は現地での故障点調査が必要となり、健全線路も含んで長期間の供給停止を引き起こす。こうしたことから、断路器で切離することができる区間(機器No.1-No.10, No.10-No.20, No.20-No.2)ごとに故障区間の標定が細分化できれば、故障発生後即時に故障区間のみを遠隔から切離し健全区間を復旧でき、供給支障範囲・時間を最小限とすることができる。このようなニーズに対応し、配電用変電所の事故発生時の迅速・的確な処置を図り、供給信頼度を向上させることを目的とし、光CTを適用した故障点標定装置の技術的検討を進め、実規模検証を行った。



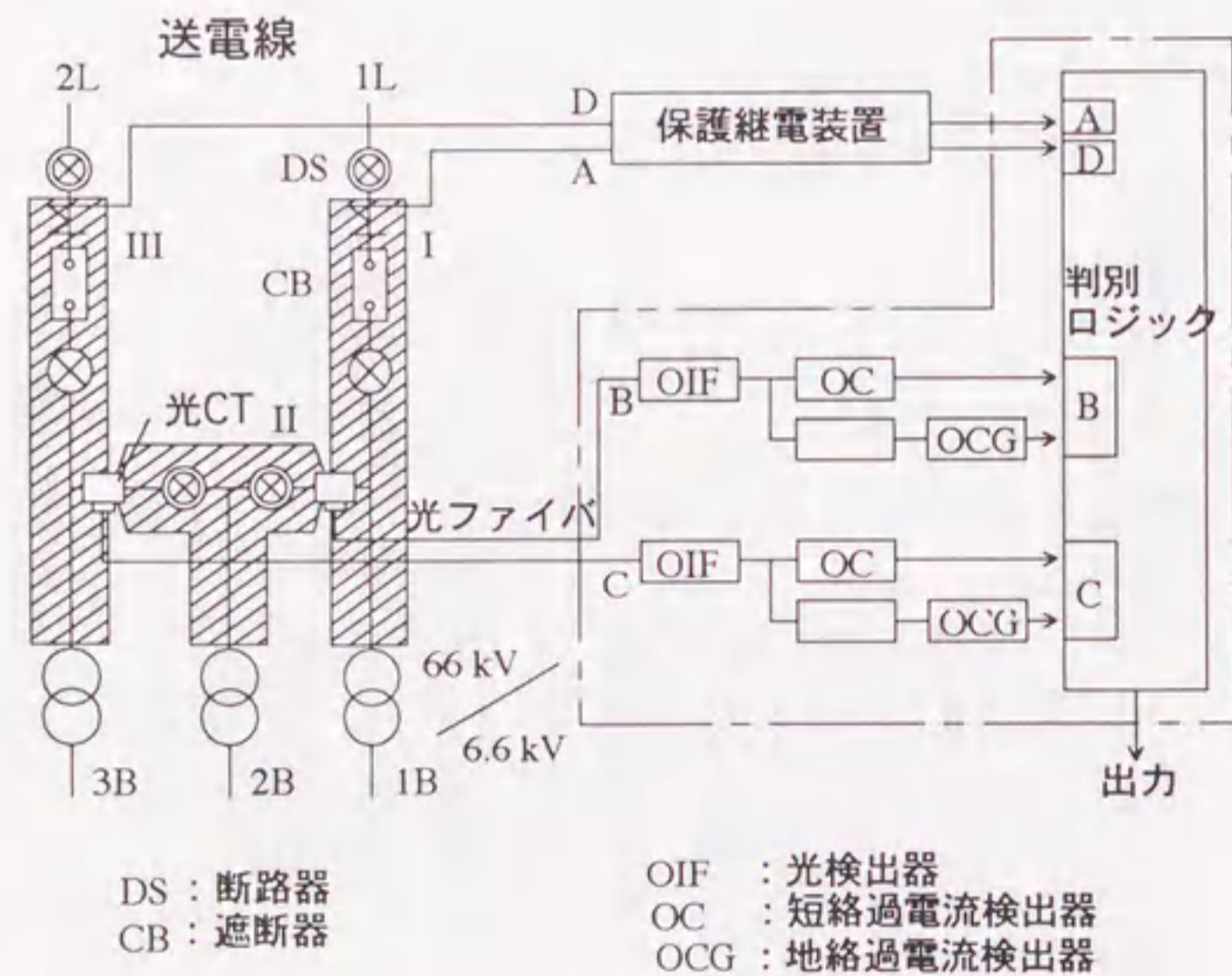
第5-2図 配電用変電所の単線結線図

5.2.2 システムの基本構成と故障点標定の原理

システムの基本構成を第5-3 図に示す。本システムは、母線に流れる故障電流をリアルタイムで検出する光CTヘッドと検出された情報をアース側に光伝送する光ファイバ内蔵碍子および光伝送ケーブル、光の情報を光-電気変換する光検出器そして故障区間を判別する判別器から構成した。

故障電流の検出用として、切離し区間ごとに通常の油入電磁型CTを設置することは、設置スペースの制約や設置工事が大きいため、保守点検箇所が増加につながり好ましくない。このため、切離し区間に設置されている母線断路器の支持碍子部分に光CTを設置することとした。

非有効接地系が採用されている変電所においては、地絡故障が発生した場合の故障電流（地絡電流）は数100A以下と小さく、短絡故障が発生した場合の故障電



第5-3 図 故障点の標定原理構成 (単母線用)

流（短絡電流）は数10kA以上にもなる。このように、短絡電流と地絡電流の絶対値の差が大きく地絡電流は負荷電流に近い値となっているため、本システムでは地絡故障は零相電流の発生により、短絡故障は各相の過電流により検出することとした。配電用変電所は通常2回線送電線の内どちらか片方の回線で受電しているため、単一故障のみを対象とすれば、第5-1 表に示すように地絡または短絡時の故障電流の通過の有無で容易に事故区間を判定することができる（以下、動作判別方式）。例えば、第5-1 表のように「F₂」の地点で地絡または短絡故障が発生した場合には、「B」の光CTと「A」の既設の電磁型CTが故障電流を計測し、CTに接続された過電流リレーによって故障を検出し、システムは故障点「II」と判定する。また、配電用変電所でも両回線送電線から同時に受電している場合には、故障電流の方向によって判別する方式（以下、方向比較方式）を用いることで故障点を標定することができる。

故障判別を動作判別方式としたため、地絡電流は負荷電流領域の3相電流をベクトル合成した零相電流として検出し、短絡電流は負荷電流以上の電流が流れたことを検出すればよいこととなる。従って、光CTは最大でも配電用変電所の最

第5-1 表 故障区間判別原理 (動作判別方式)

故障点	OC/OCGの動作				判別した故障区間
	A	B	C	D	
F ₁	○	-	-	-	I
F ₂	○	○	-	-	II
F ₃	○	○	○	-	III

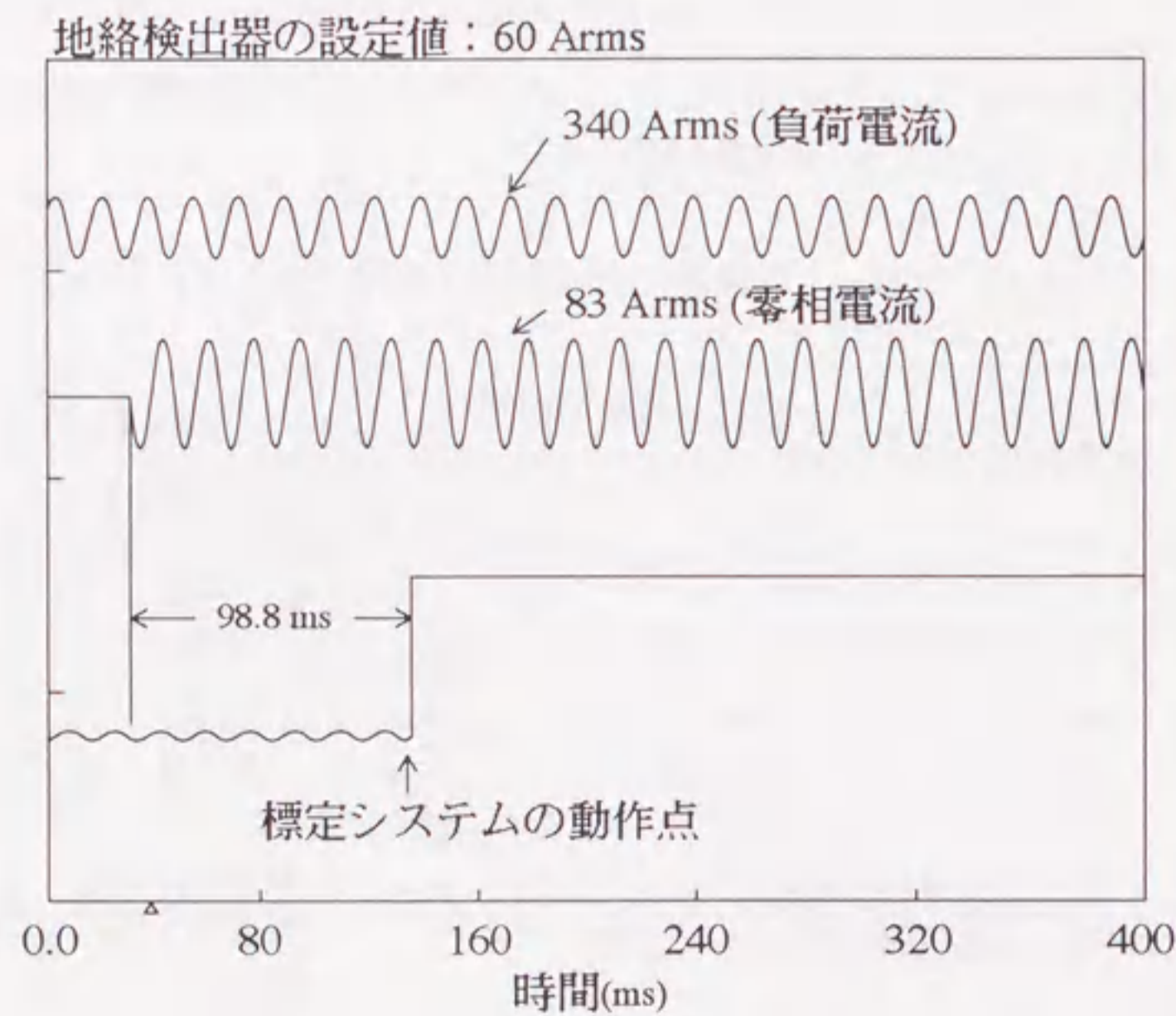
(注1) 故障点「F₁、F₂、F₃」、OC/OCG「A、B、C、D」は、第5-2 図、第5-3 図参照。

(注2) ○ : 動作
- : 不動作

大負荷電流1200A程まで検出できればよいこととなり、むしろ通常の負荷電流の数100A領域で3相の精度のバラツキが小さいことが要求特性である。従って、このような特性が必要とされる電流計測のためには、大きなダイナミックレンジが不要であること、構成が簡単で既存の変電所に容易に設置できるなどのメリットのある（磁気鉄心+光磁界センサ）方式の光CTが適しているものとする。

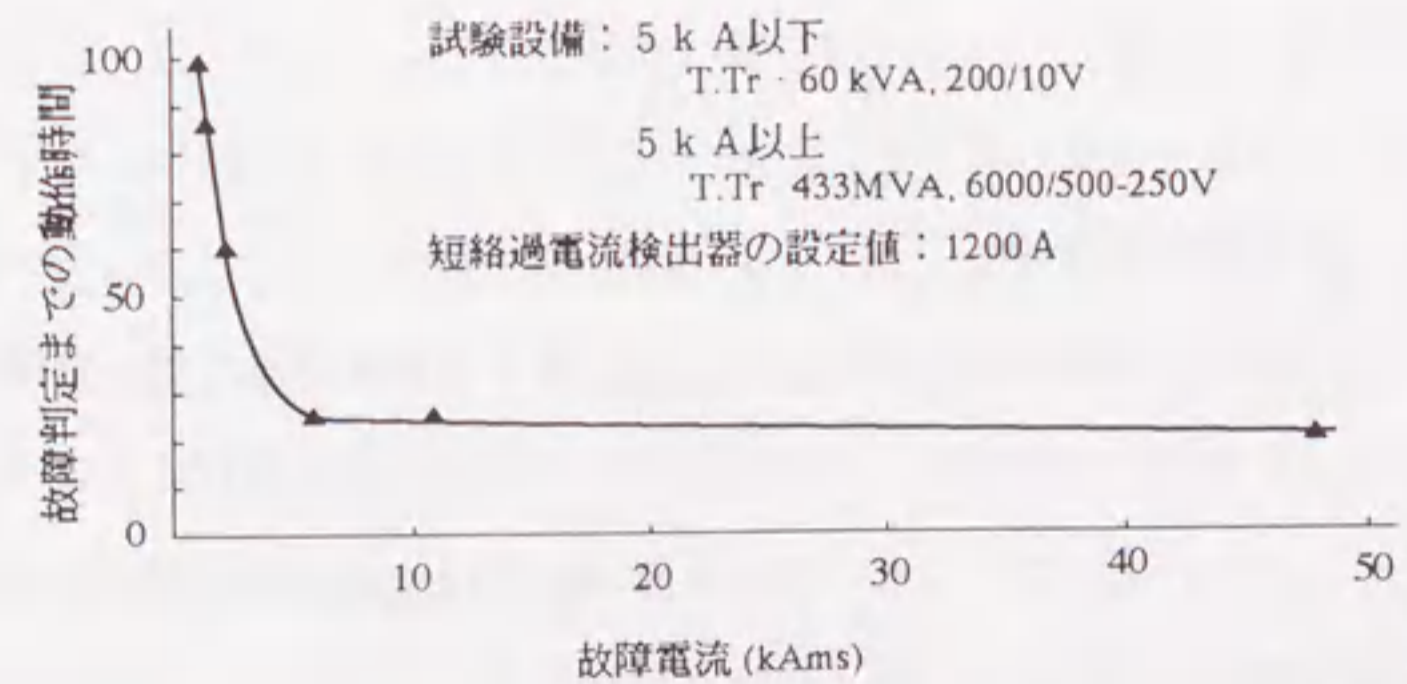
5.2.3 システムの性能検証

（磁気鉄心+光磁界センサ）方式の光CTを用いた故障点標定システムの総合性能を明らかにするため、実規模装置を用いた人工地絡・短絡模擬試験を行った。地絡試験では、地絡電流30~300Armsまでの試験を実施した。その結果、第5-4図の例に示すように、光CTの出力を三相合成して得られた零相電流が精度良

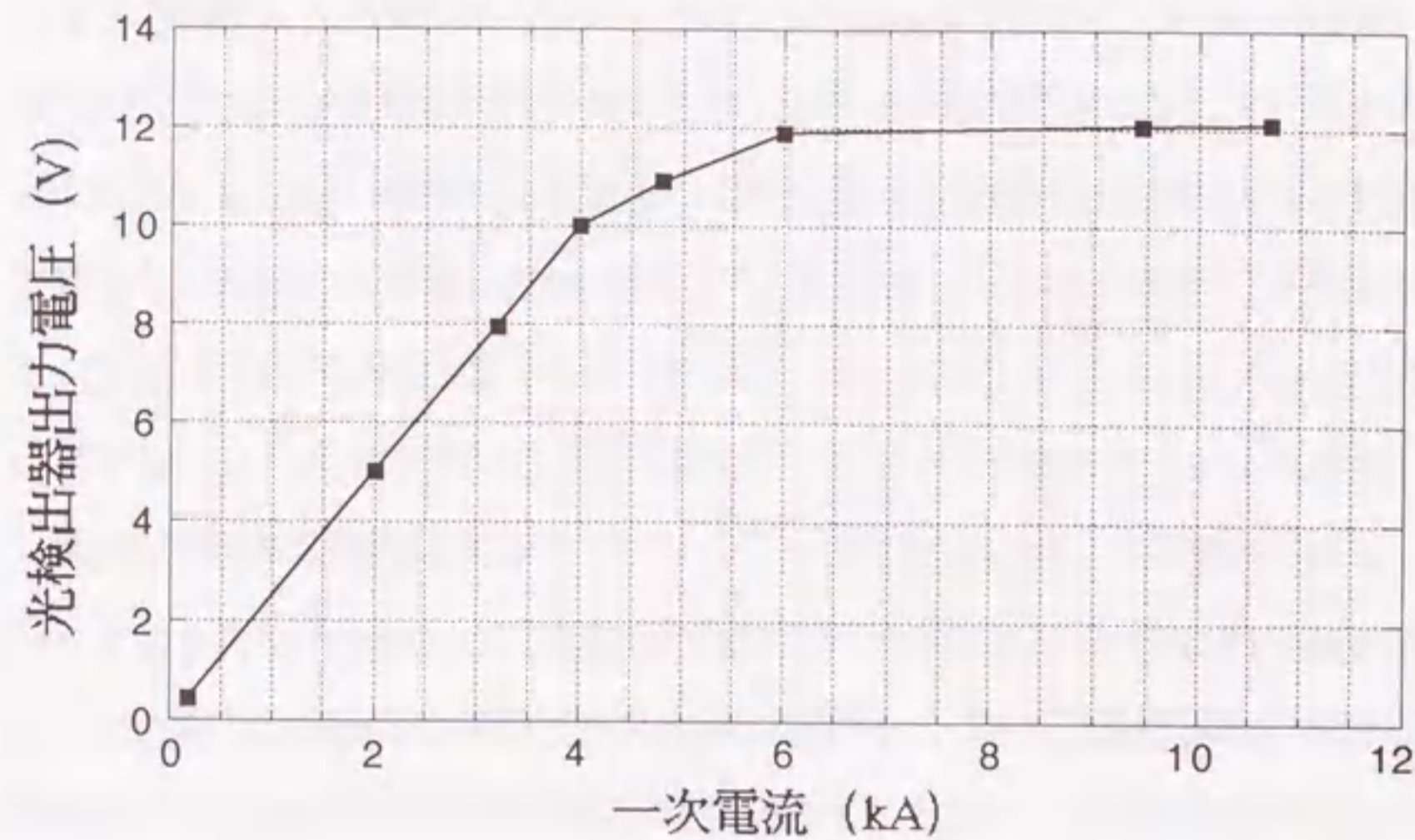


第5-4図 人工地絡試験時の波形例

く検出され、地絡故障電流の検出設定値の130%入力が100ms以上継続すれば、正常に動作できることを実験的に検証できた。なお、本実験において区間も正常に判定できていることを確認している。また、短絡試験時の故障電流と故障の判定までの動作時間の関係を第5-5図に示す。整定値1200Aの130%で100msの動作時間でそれ以後短絡電流の増加に伴い動作時間は短くなり、5kA以上では動作時間は25msでほぼ一定の値となった。これは、第5-6図の光CTの出力特性に示すように光CTの出力電圧がオペアンプの出力レンジの制約からクリップしたこと、および過電流リレーの減時特性によるものである。この試験では短絡電流1560Arms~46.5kArmsまでの事故区間判別の確認を行い、いずれの場合にも光CTが正常に故障電流を計測し、その電流計測データに基づき正常に故障点標定できることが実験的に明らかにすることができた。故障点標定システムは、母線保護装置の故障検出信号により遮断器が動作し事故が消滅する以前に、故障点を標定する必要があるが、総合試験の結果、故障電流が消滅する時間50msに対して、十分な動作特性を有していることが検証できた。



第5-5図 故障点標定システムの短絡故障検出特性



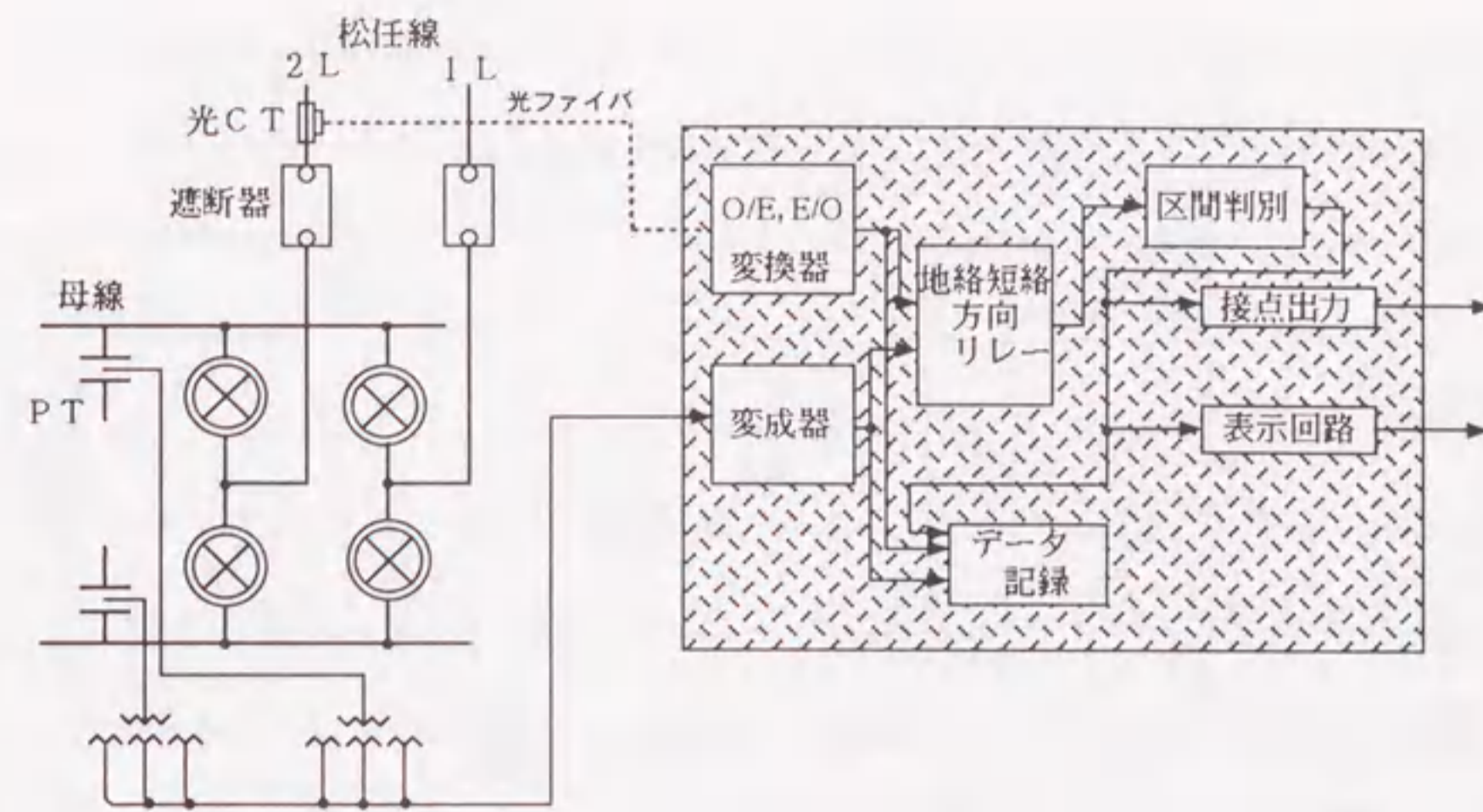
第5-6図 光CTの出力特性

5.2.4 変電所における故障検出性能の実証

光CTの故障電流計測性能とその電流信号に基づく故障点標定性能を実規模レベルで検証した。

(1) フィールド試験装置の構成

フィールド試験装置の構成を第5-7図に示す。フィールド試験では、実際に雷害による故障の多い線路を対象として母線故障か線路故障かを判定するように装置を設定した。このため、フィールド試験装置は、電流の流れる方向を母線電圧を基準によって検出し、その方向から故障点が光CTの位置に対してどの方向にあるかを判別する方式（方向比較方式）で構成した。なお、この方向比較方式は動作判別方式と同等の回路で構成し、ほぼ同等の動作特性（動作時間と動作電流の関係）を有していることを別の実験によって確認している。



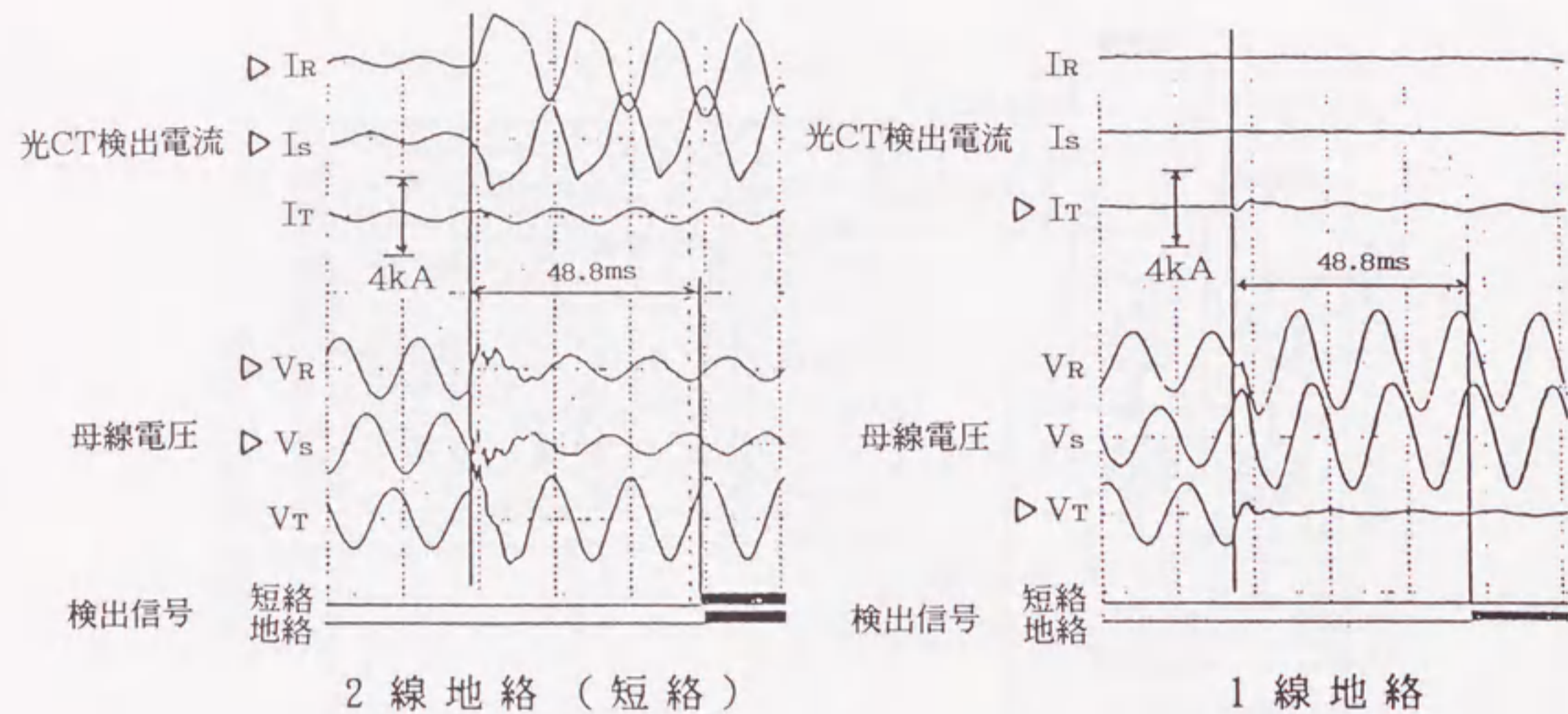
第5-7図 フィールド試験装置の構成

(2) 実故障電流による光CTの電流特性と故障判定特性

フィールド試験期間中、雷による短絡および地絡故障が8回発生した。試験結果の例として、光CTでの計測電流波形、故障検出信号の動作状況を第5-8図に示す。装置は、最短故障除去時間（故障発生後から故障遮断されるまでの最短時間）の50ms以内の48.8msで故障検出信号を出力した。2線地絡（短絡）故障時の光CT検出電流波形は大きく歪んでいるが、判別器は第5-5図の人工試験結果から得られた動作時間とほぼ一致した。光CTの出力波形の歪は、人工試験同様に光検出器の出力電圧がクリップするためである。

(3) 光CTの屋外環境下での性能

（磁気鉄心+光磁界センサ）方式の光CTは、人工試験によって各種の性能を第2章において明らかにした。ここでは、屋外環境下において光CTが人工試験と同等の性能を維持しうるかどうかについて実証した。実証試験の項目は、光CTの性能の内、光伝送損失と光電流計測性能の2点として、約1年間に亘って実



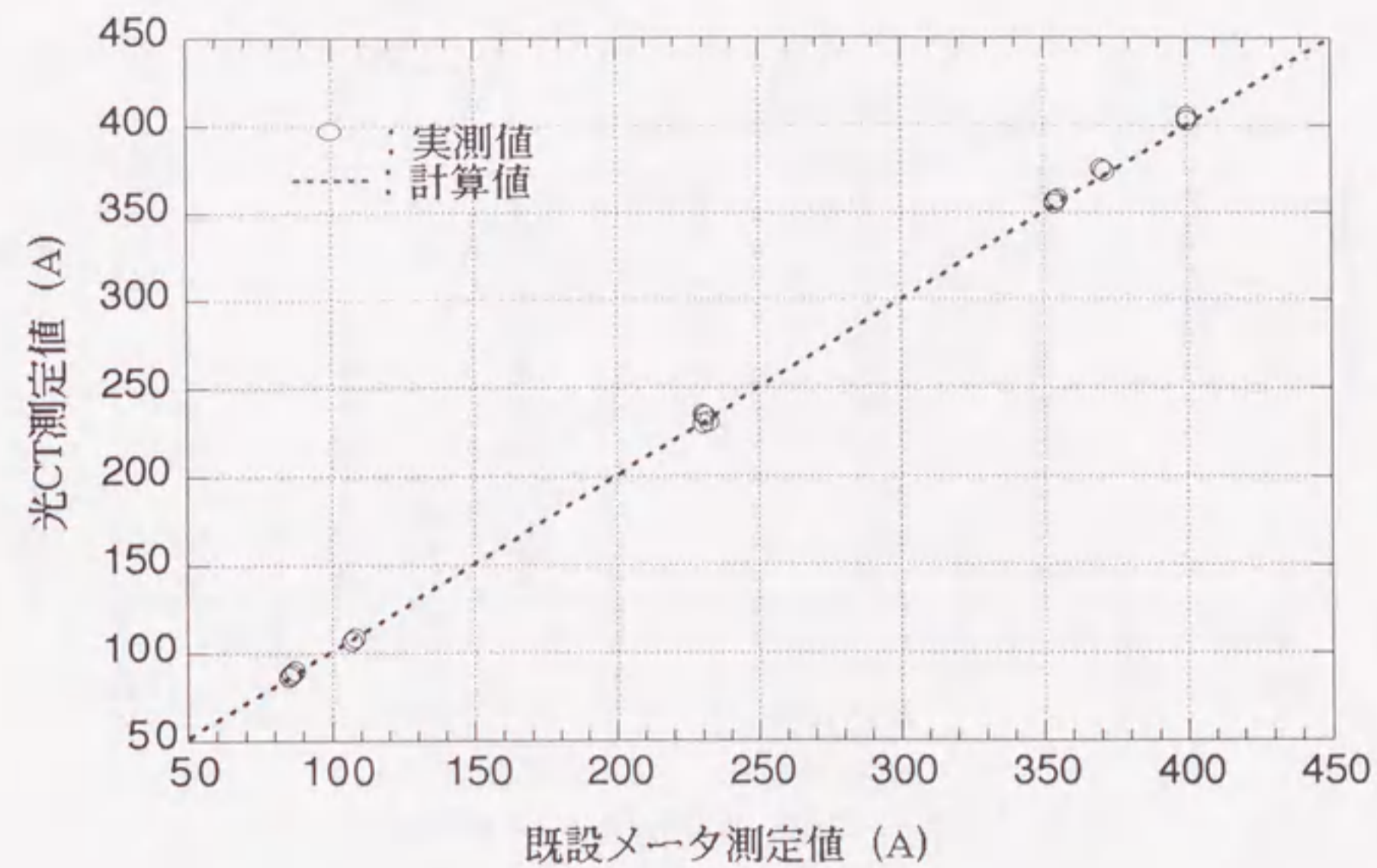
第5-8図 光CTでの故障電流検出波形

際の変電所で試験した。電流計測性能は変電所に設置されている1級クラスのメータの読み値とそのときの光CTの測定値を比較した。結果を第5-9図に示す。これによるとメータ測定値と光CTの測定値は、よく一致していることを確認できた。光伝送損失の季節変動を第5-10図に示す。外気温度の変化によって冬期の低温時に損失が増大し夏期には減少することが分かり、実験室の結果と同等の傾向がみられた。

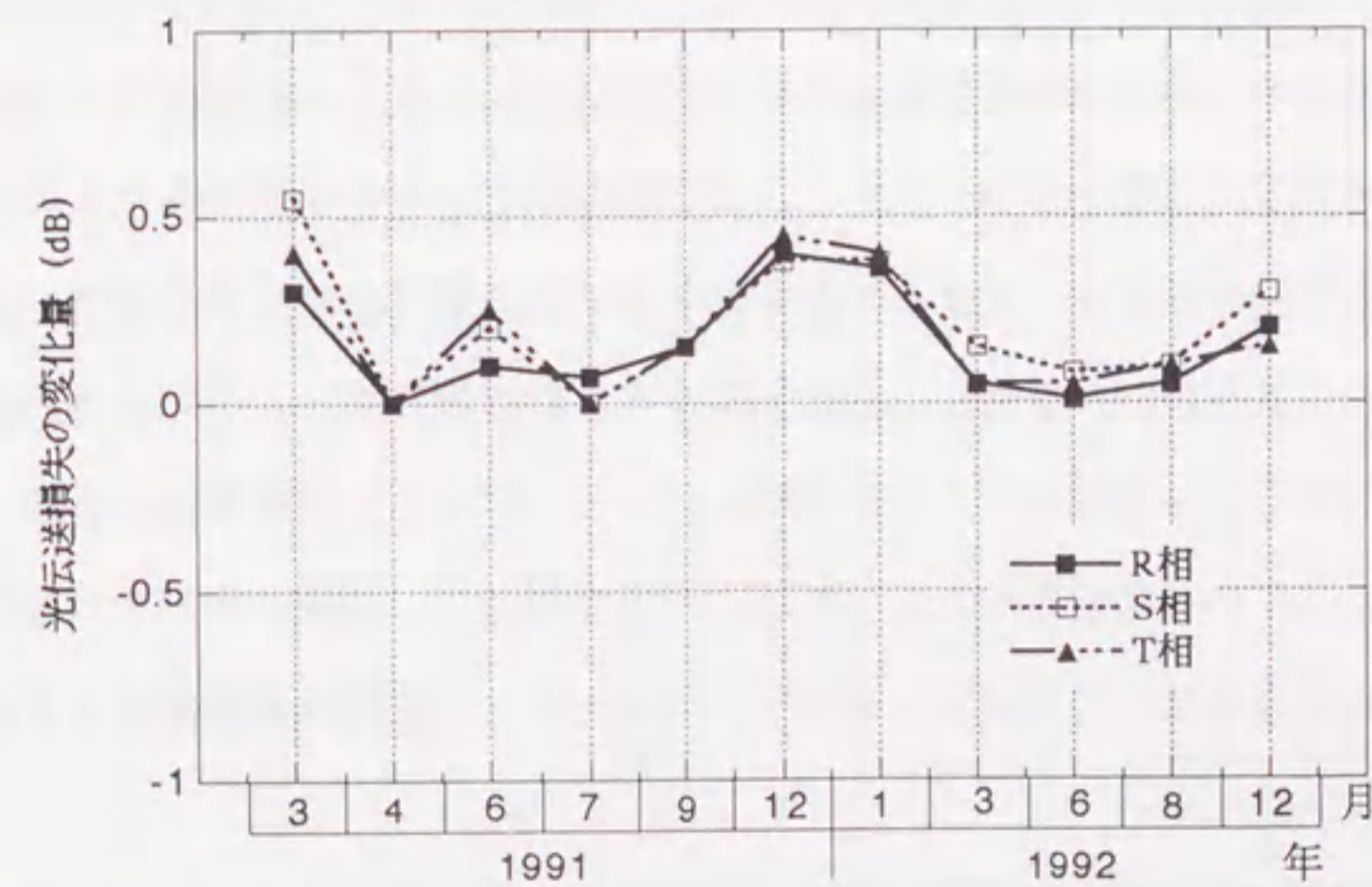
5.3 超高圧変電所内二重母線の故障点標定への光CTの適用検証

5.3.1 故障点検出原理

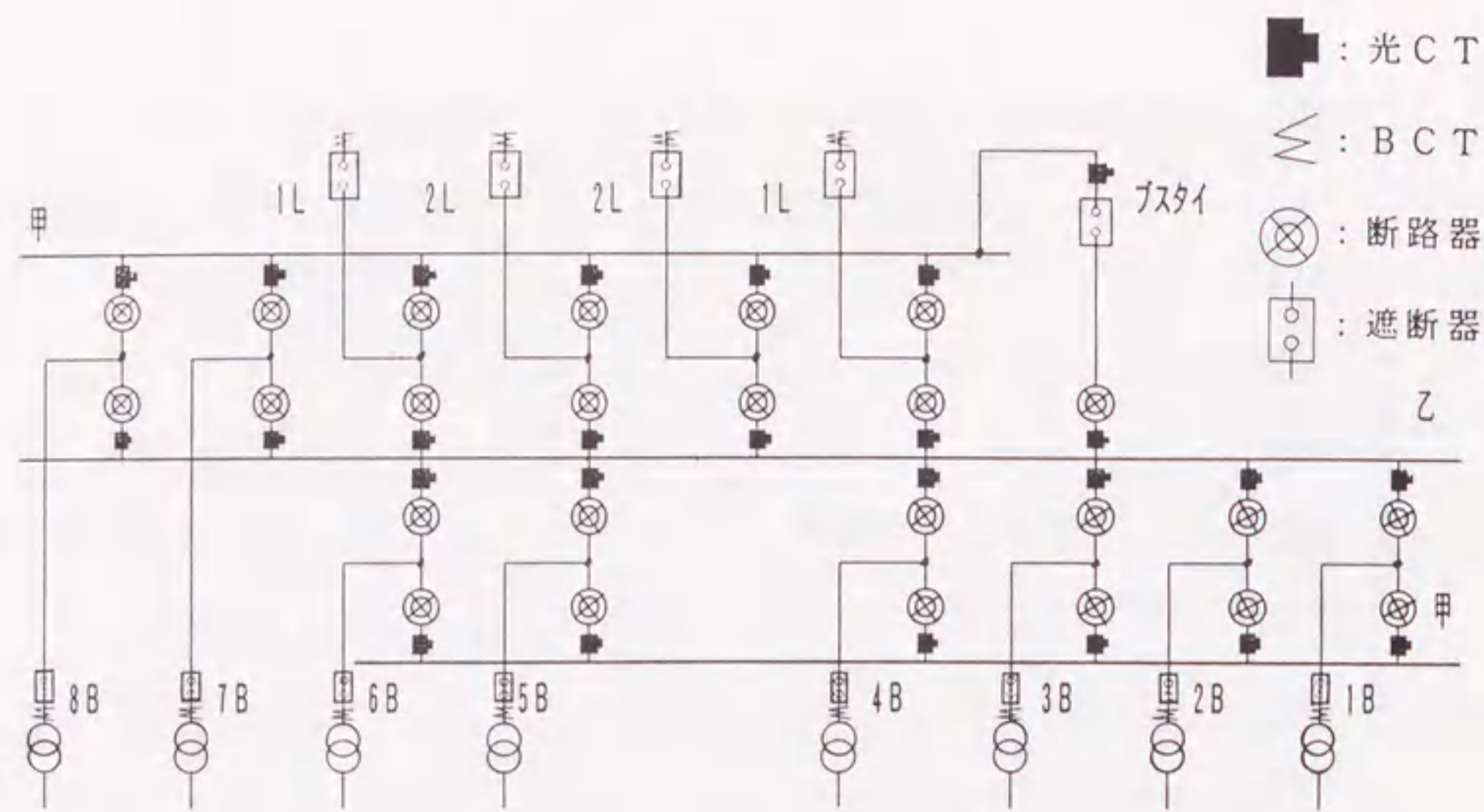
第5-11図に示すような多数回線が接続された母線の故障点標定では、標定しようとする1つの区間に3端子以上の導体が接続されている。多端子の回路が接続された母線の保護装置などでは、電流差動判別方式^[2]が広く適用されており、



第5-9図 負荷電流測定結果



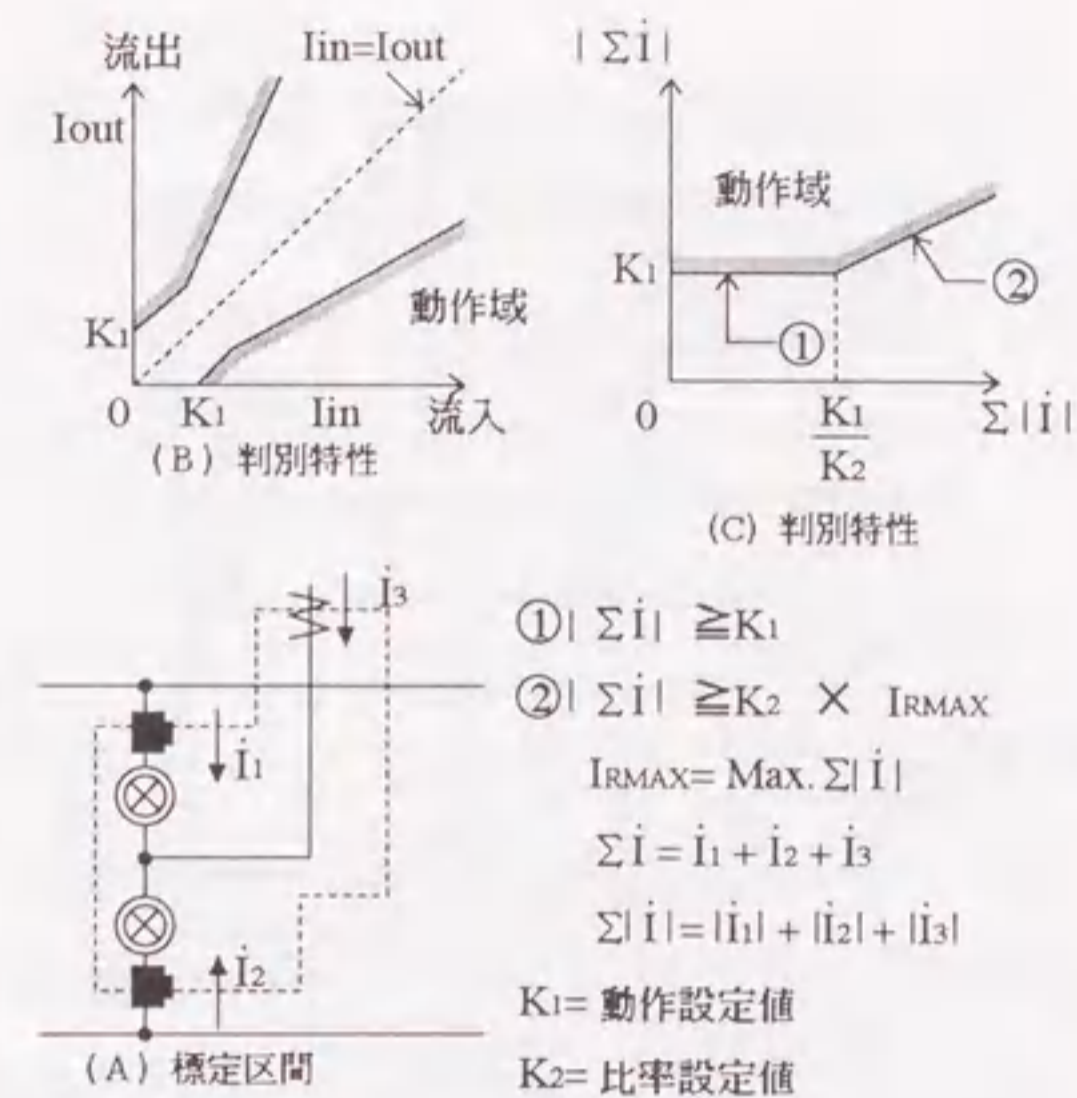
第5-10図 光伝送損失の経時変化



第5-11図 275kV 変電所母線の単線結線図

今回の故障点標定に対してもこの方式を用いることを検討した。第5-12図に故障区間判定の原理を示す。図中(A)は、標定区間の1つを示している。図中(B)は、標定区間に流入または流出する電流と故障判定動作の関係を示したものである。通常、母線の場合には、区間内への流入、流出電流は同一で図中の点線上にあるが、区間内で故障が発生すると両者の電流に差が発生し、故障発生と判定して動作するものである。図中(C)は、判定動作式①、②式を図化したもので、 K_1 、 K_2 を可変させることによって判定のしきい値を変えることができる。①式は、電流のベクトル和が故障によって大きくなり動作設定値 K_1 を越えた時、故障が発生したものと判定することを意味している。②式は、故障電流が大きくなった時に、CTの計測誤差が大きくなることを考慮して、故障の判定の誤動作を防止できるよう各端子の電流値の総和(スカラー和)に比例させて動作しにくくしている。

故障電流計測用の光CTは故障の標定を行う範囲を区分するよう母線上に新たに設置した。母線の引出し部の遮断器内のブッシング部には、保護・計測用に電磁型ブッシングCT(以下BCCT)が設置されている。そこで、光CTとBCCT

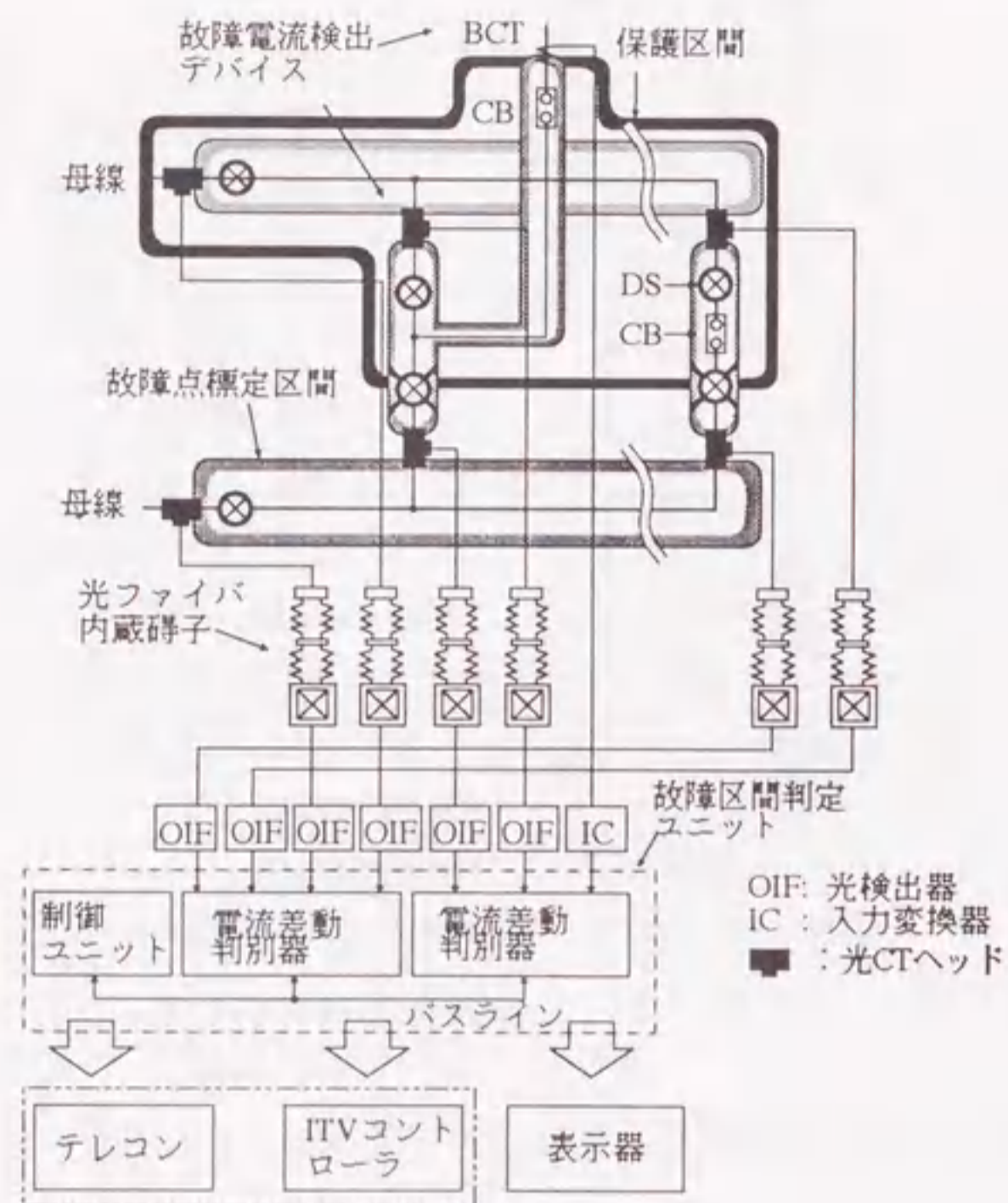


第5-12図 故障区間判定の原理

のように方式の異なる計測手段を組合せて電流差動方式によって故障判定することを学術的に検討した。なお、電流差動判別方式では故障電流を正確に計測して演算処理を行うことから、大電流まで計測可能な(コイル+光磁界センサ)方式の光CTを適用することで検討を進めた。システムの概念構成図を第5-13図に示す。この図には、光CTとBCCTによって区画された故障点標定区間と母線保護装置によって遮断される保護区間との関係を示した。このように、故障点標定区間は保護区間を細分化するように設定できていることが分る。

5.3.2 過渡特性の検討

同一規格の電磁型CTを組合せた場合でも、大電流領域ではそれぞれの特性バラツキによって誤差電流が発生する。このことを想定し電流差動判別器では、第5-12図に示すように動作領域を制限して誤動作を防止している。本研究では、光



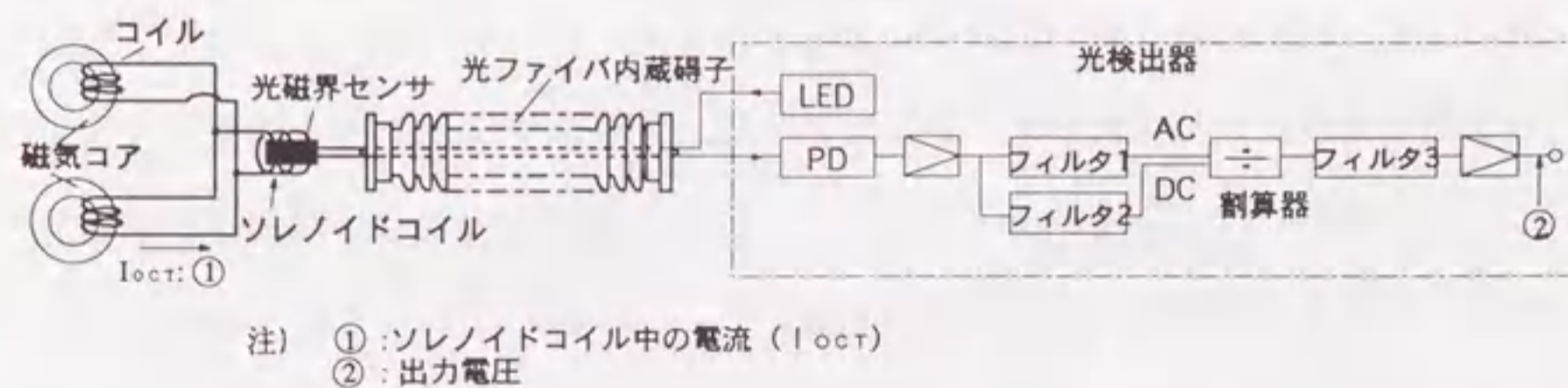
第5-13図 故障点標定システムの概念構成図(2重母線用)

CTとBCTを組合せて使用することを基本構成としていることから、方式の異なる2種類の故障電流計測デバイスの特性をいかに適合させるかが技術的ポイントとなる。実際の故障電流は、商用周波数の基本波成分電流以外に直流成分を含んだ過渡電流や高調波電流を多く含んでいる。このため、これらの周波数成分に対する光CT、BCTの出力特性を適合させる必要がある。この内、基本波成分の定常電流特性は、光CTの比誤差特性によって規定されている。光CTの定常電流(基本波)領域の比誤差特性(25°C)は、定格電流で±1%以下、最大電流50kAで-10%以内であることを実証している。これはBCTの特性を規定しているJEC-1201 1PS級の特性仕様と同等であるため、基本波成分電流においては光CTとBCTを組合せた場合にも故障判定に十分な電流差動判別性能が得られる。

また、高調波成分については、従来の保護装置と同様にフィルタによってカットしているため、電流差動判別器の動作に対する影響はないように設計している。これらのことから、光CTとBCTを組合せて故障判定を行うための技術検討に当たって、直流成分を含んだ過渡電流に対する光CTとBCTの応答について明らかにした。

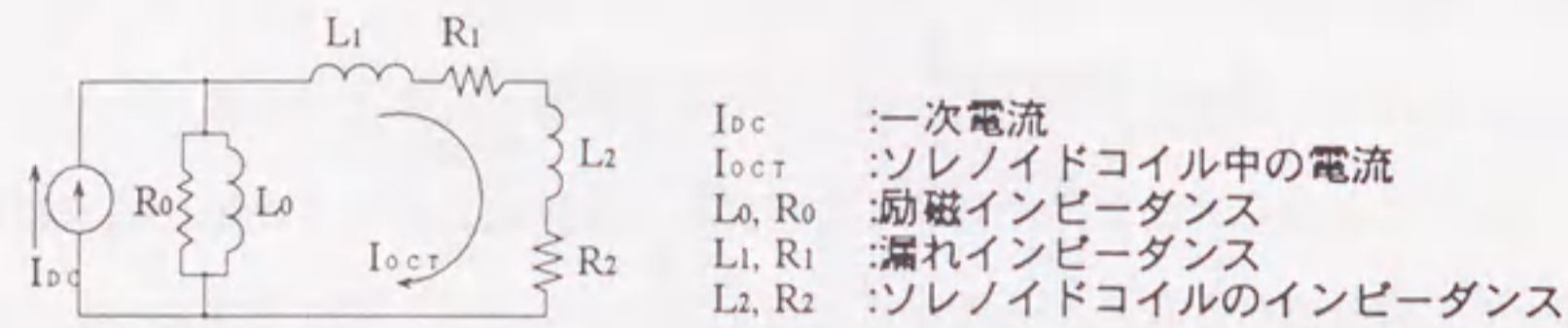
検討の対象とした(コイル+光磁界センサ)方式の光CTの回路構成を第5-14図に示す。ファラデー効果は、原理的には、印加磁界に追従すると考えられるが、多数の磁区で構成されるフェリ磁性の希土類ガーネット結晶では、磁壁の移動速度が印加磁界に対する追従性に影響する。Bi置換YIGでは、1MHzまでセンサの感度に変化のないことが確かめられている^[3]。このため、(コイル+光磁界センサ)方式の光CTヘッドの周波数特性は、ソレノイドコイルによって発生し光磁界センサに印加される磁界Hの特性で決まるといえる。すなわち、磁界発生部の過渡特性を検討すればよいこととなる。

直流減衰波形の重畳した交流波形が一次電流として通電されたときの光CTの過渡特性を考えるに当り、簡略化のため、直流減衰波形成分のみについて応答性を検討した(第1-8図参照)。磁界発生部の等価回路を第5-15図に示す。この回路に直流減衰電流を与えたときのコイル電流波形は、(5-1)式によって得られる。



注) ①:ソレノイドコイル中の電流(I_{ocr})
②:出力電圧

第5-14図 光CTの構成図



第5-15図 鉄心付コイル+ソレノイドコイルの等価回路

$$I_{oct} = I_o \cdot \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \left\{ \frac{1}{\tau_2} \exp(-t/\tau_2) - \frac{1}{\tau_1} \exp(-t/\tau_1) \right\} \dots\dots\dots (5-1)$$

ここで、 I_{DC} : 印加する直流減衰一次電流

$$I_{DC} = I_o \exp(-t/\tau_1)$$

I_o : $t=0$ のときの直流電流

τ_1 : 一次電流の直流分減衰の時定数

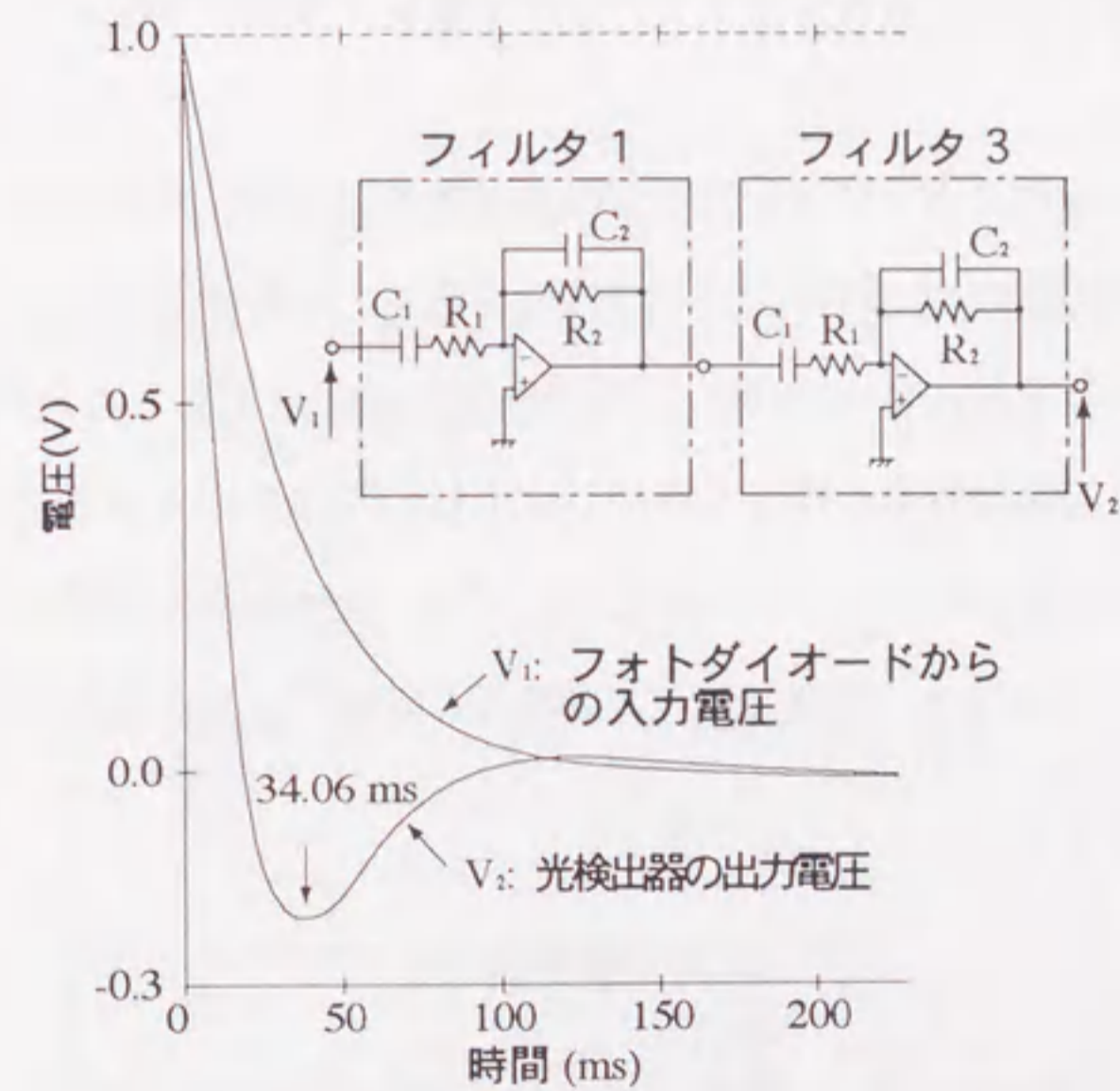
I_{oct} : ソレノイドコイルに流れる電流

τ_2 : 光CTの磁界発生部の直流分減衰の時定数

(5-1)式から分かるように、光CTの直流減衰波形に対する追従性は磁界発生部の時定数によって決まることが分る。磁界発生部の時定数は、鉄心付コイルおよびソレノイドコイルの巻数、素線径で決まる。これらは、定常電流のとき光磁界センサへ印加される磁界の特性によって決めた。そこで、このようにして設計した磁界発生部の時定数を求めるため、ステップ電流を印加してその応答を求めた。その結果、時定数は83msとなった。これは、磁界発生部の回路定数から計算によって求めた時定数79.9msとほぼ一致した。この光CTの時定数:83msは、BCCTの時定数1sに対して短く、83msより長い時定数をもつ一次電流に対しては両者に差が発生することを意味する。

もう一つの過渡応答特性の要因として光検出器の回路特性が考えられる。光検出器の回路中にはバンドパスフィルタ2台とローパスフィルタ1台を挿入しており、直流重畳時の過渡応答に対しては、低周波分をカットするバンドパスフィルタの特性が影響する。簡単な回路解析をした結果を第5-16図に示す。直流減衰波形を印加した場合には、フィルタのCRの時定数の影響によって34msの時点で波形のオーバーシュートが発生することが分った。

以上の検討結果を総合すると、直流が重畳した故障電流に対して光CTの出力は、BCCTの出力より速く減衰し1.5サイクル付近にオーバーシュートが発生するものと解析できた。



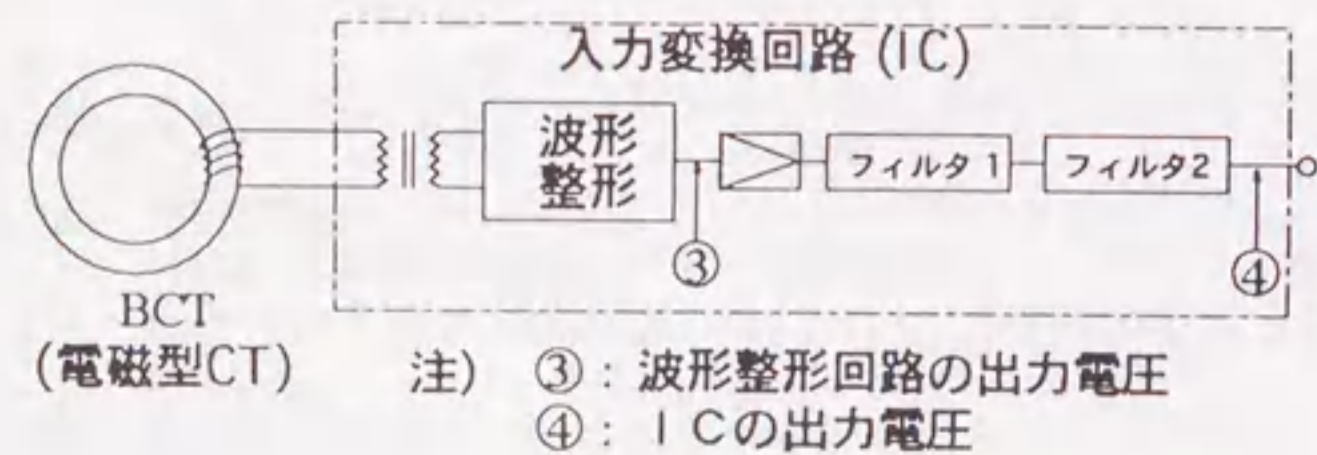
第5-16図 光検出器のフィルタ回路の過渡応答特性

5.3.3 光CTと電磁型CTの組合せ

(1) 組合せ方法の検討

第3章の検討結果によると基本波成分の定常電流における比誤差特性は、光CTに内蔵している光磁界センサのファラデー素子長の設定によって制御でき、BCTの特性の規定範囲におさめることができる。一方、直流成分を含んだ過渡電流に対する応答特性は、光CTとBCTとでは異なることが解析された。光CTの特性をBCTの特性に近づけるためには、光CTヘッドの直流分減衰時定数を大きくする必要があるが、等価回路から分かるように抵抗分を小さくしインダクタンスを大きくすることが必要で装置の大型化と重量増加をまねくこととなる。このため、BCTの電流信号を電圧信号に変換して、電流差動判別器に入力するための変換回路（第1章第1-3図(a)中の電流/電圧変換器）を工夫し、電流差動判別器に入力される光CT信号とマッチングさせることを検討した。

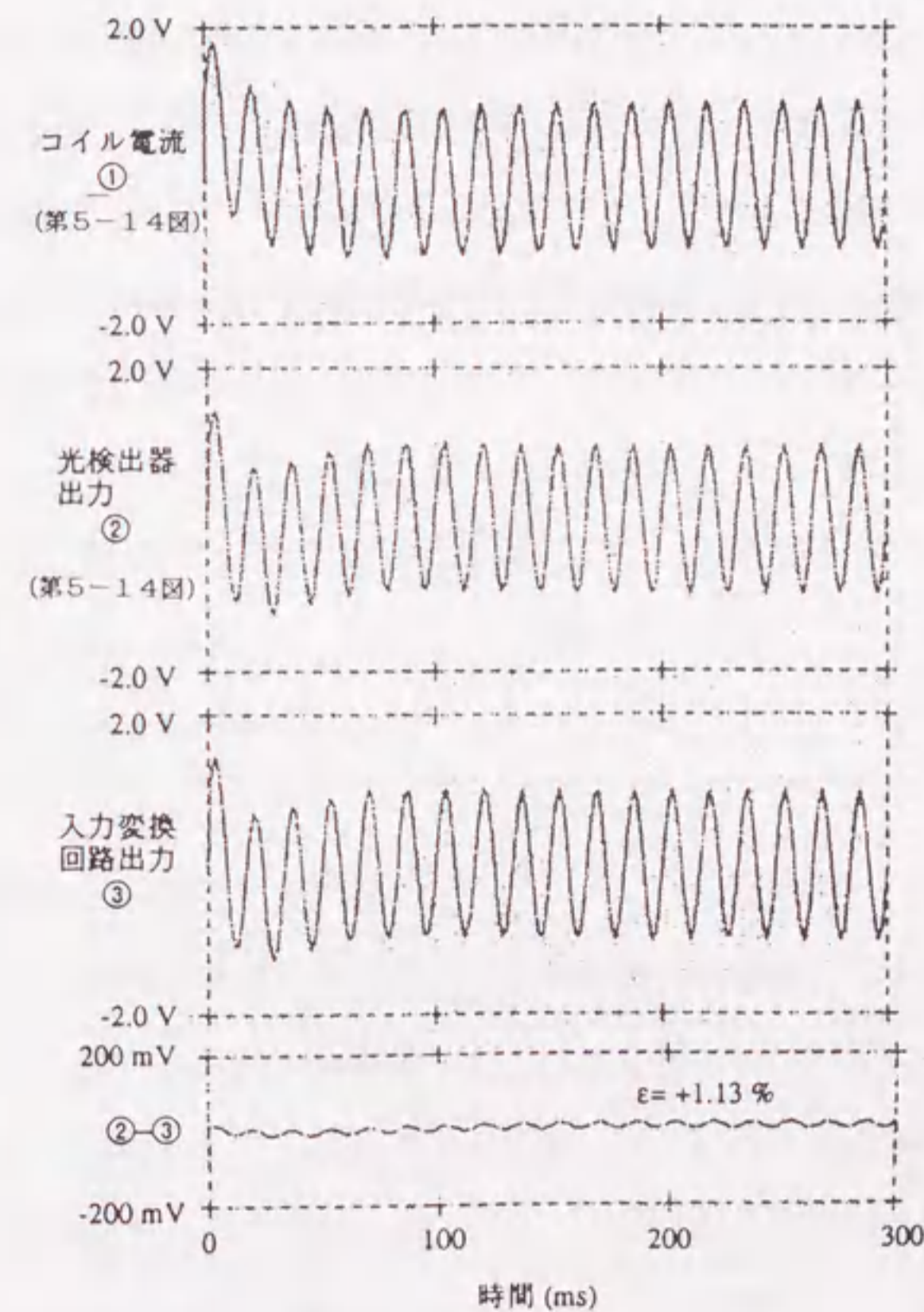
入力変換回路の検討に当たっては、BCTの過渡特性を含め、光CTヘッドの直流減衰特性と光検出器のオーバーシュートの特性を考慮する必要がある。光CTヘッドの直流減衰特性は、(5-1)式に従い、その時定数は83msであることから、入力変換回路の初段回路に同等の特性を有する波形整形回路を挿入することを考案した。また、第2波目のオーバーシュートについては、光検出器と同等のフィルタ回路を挿入することとした。設計した入力変換器の回路ブロック図を第5-17図に示す。



第5-17図 BCT用の電流/電圧変換器のブロック図

(2) 過渡特性誤差のシミュレーション

考案した入力変換回路の特性を検証するため、回路シミュレーションを行った。シミュレーションにおいて、光CTは、第5-14図の光検出器の回路に第5-15図の光CTヘッドの等価回路を接続した回路として計算した。ここでは、光磁界センサは、十分な過渡応答性があるとして省略した。シミュレーション結果を第5-18図に示す。これによるとコイル電流①に対し、光検出器出力はフィルタ回路の時定数により、波形がオーバーシュートすることがシミュレーションできている。また、BCTの入力変換回路の出力と光検出器の出力の過渡誤差： $\{ (\text{②}-\text{③}) / (\text{一次電流}) \} \times 100$ は、1.13%と計算できた。これは、一次電流の直流分減衰



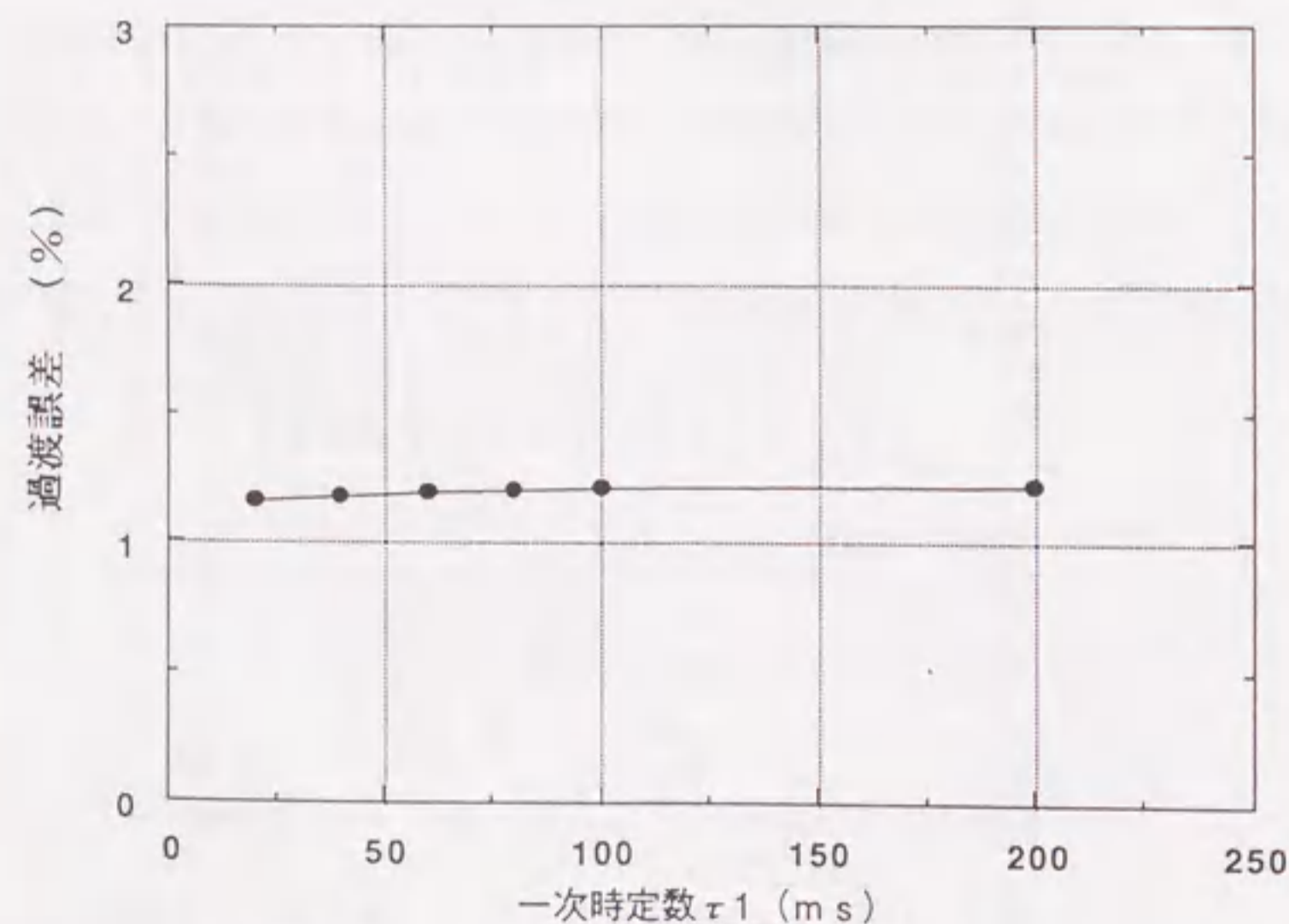
第5-18図 過渡特性誤差のシミュレーション結果

時定数20msで短絡電流10kA領域における計算値である。さらに、一次電流の時定数は線路によって異なることから、20msから200msまで延ばしてシミュレーションを行った。結果を第5-19図に示す。シミュレーションの結果、20~200msの間で過渡誤差は1.13%~1.25%の間でほとんど変化はなかった。

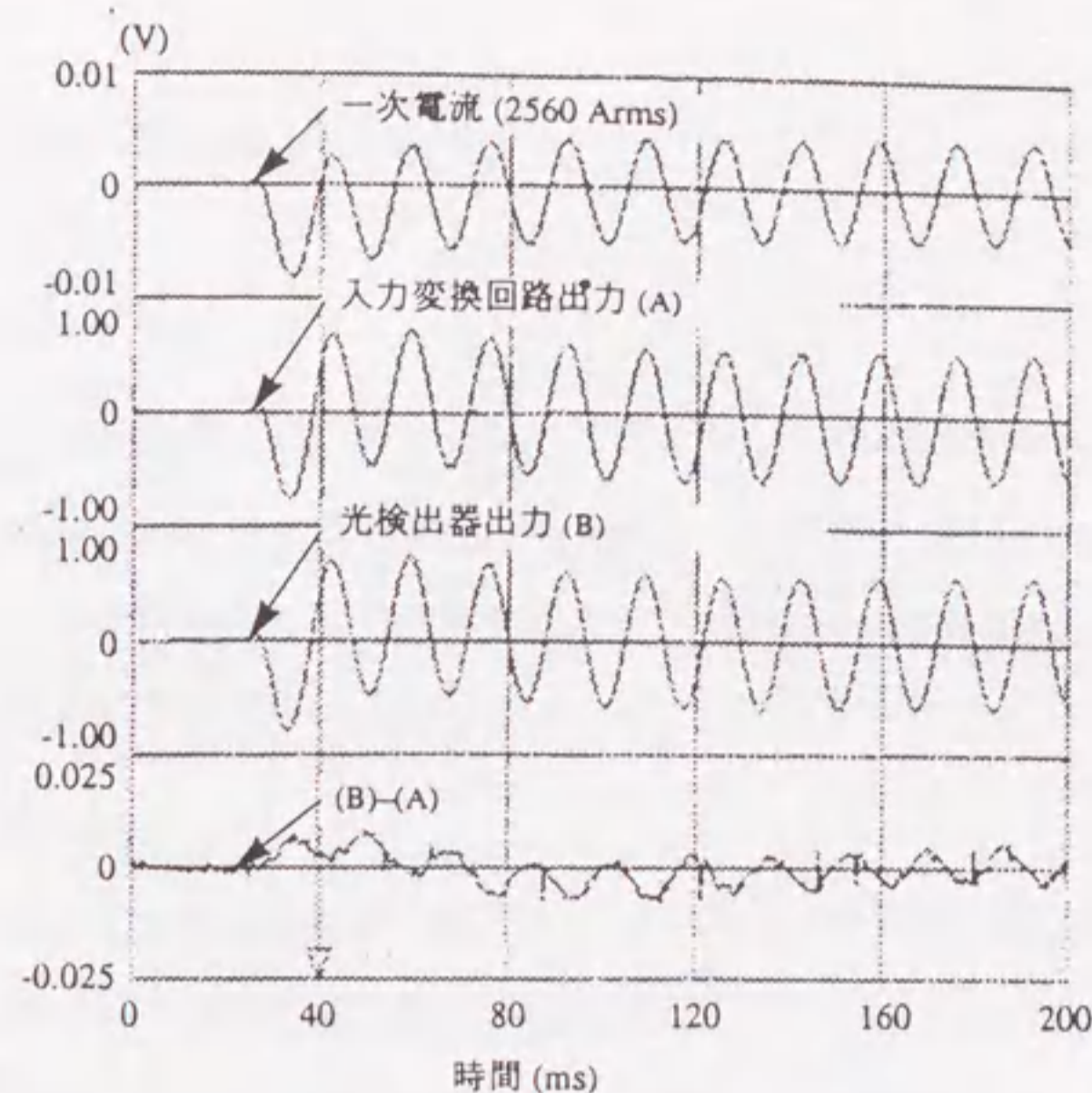
5.3.4 実規模装置を用いた検証

(1) 光CTの過渡応答特性

過渡電流に対する応答特性の検証試験では、光CTを通過する一次導体に1P S級(JEC-1201)のBC T(定格2000A/5A, 過電流定数: 20倍)を通し、このBC Tの2次側に先に検討した入力変換回路を接続して、光CTの出力と入力変換回路の出力を比較した。結果の一例を第5-20図に示す。なお、一次電流の直流分の減衰時定数は試験設備の制約から30.8msで試験した。この結果によると、光C



第5-19図 一次電流の時定数に対する過渡誤差のシミュレーション結果

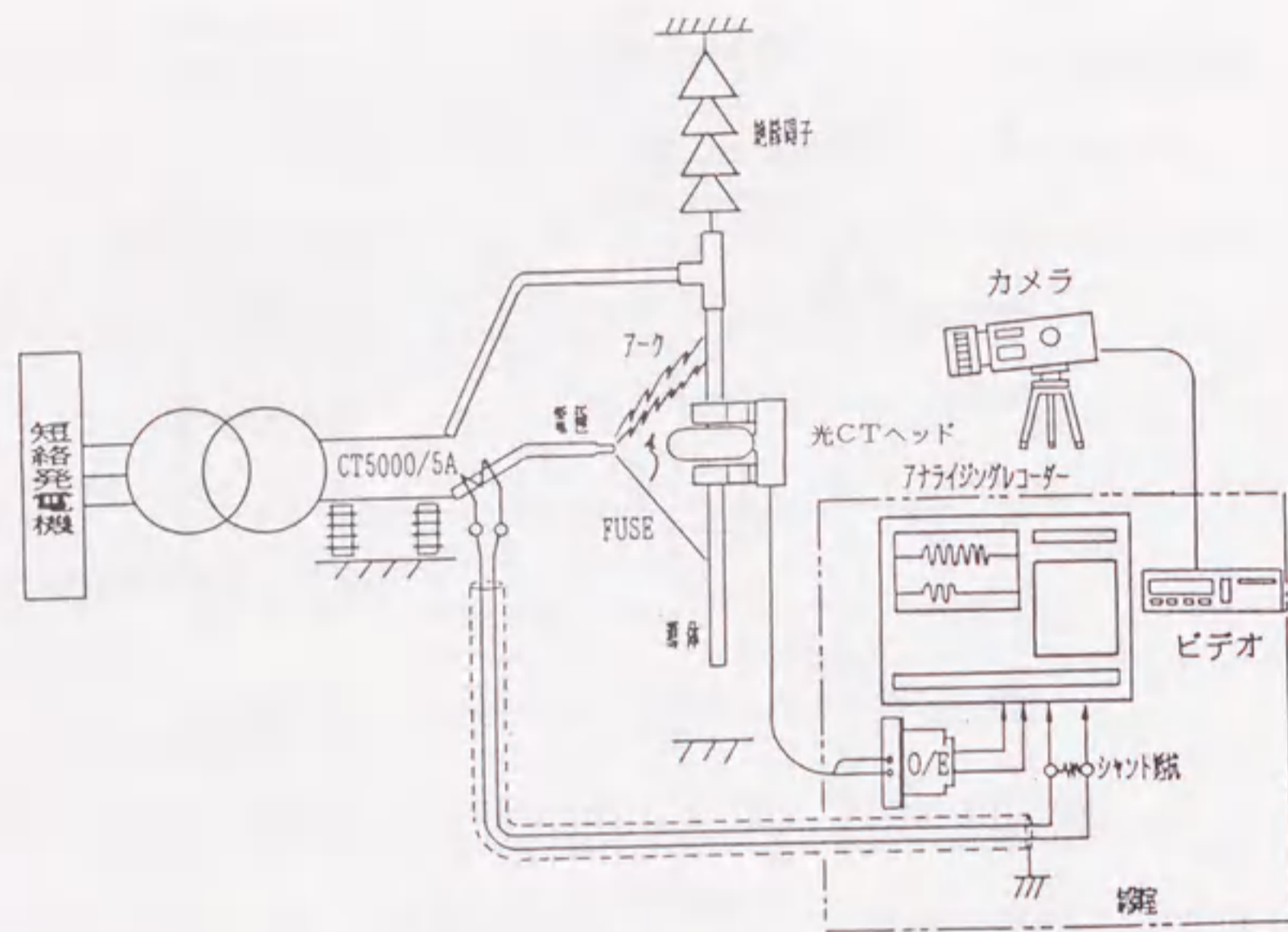


第5-20図 光CTの過渡応答特性

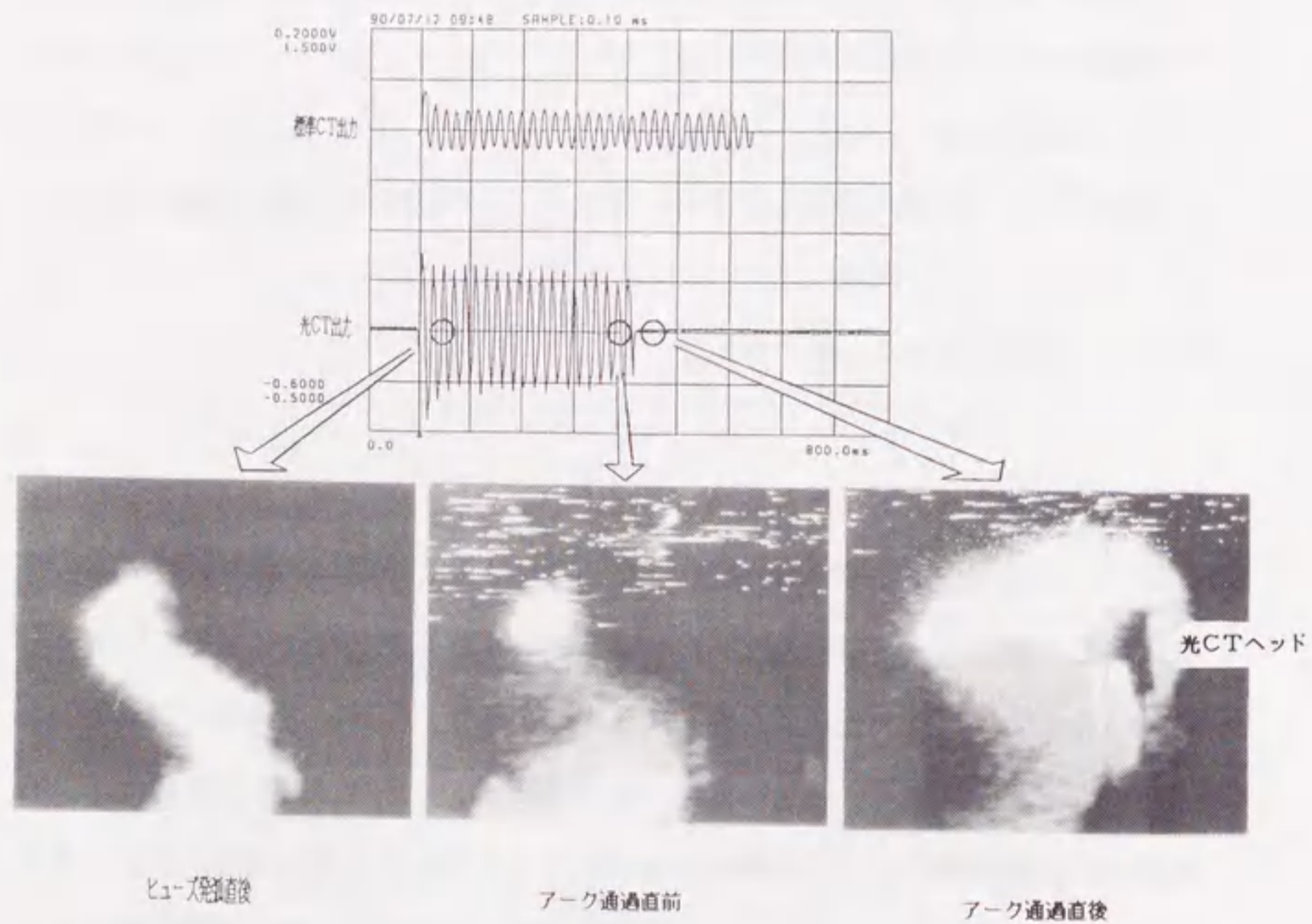
Tの出力 図中(B)の波形およびBC Tに接続された入力変換回路出力(A)共に、一次電流波形と比較すると直流分に1.5サイクルのところにおバシユートがあることが確認できた。また、過渡誤差: $\{(B-A) / (\text{一次電流})\} \times 100$ は1.44%となり、両波形は非常によく一致した。この結果は、第5-18図の例に示したシミュレーション結果(おバシユート発生までの時間: 1.5サイクル, 過渡誤差: 1.13%)とよく一致した。

(2) 光CT近傍アーク電流検出性能

アーク発生時の光CTの動作性能とアークが表面を通過したときの耐久性能を検証するため、アーク電流試験を行った。試験回路を第5-21図に示す。試験ではアーク発生時は電流が光CTを貫通する導体を通り、アークが移動した後は、光CTを電流が通過しないよう電極、光CTヘッドおよび導体を配置した。試験結果の計測電流波形および各時刻におけるアークの位置を第5-22図に示す。これにより、アークが光CT下部から上部に移行するにつれて正常に電流計測するこ



第5-21図 アーク電流試験回路



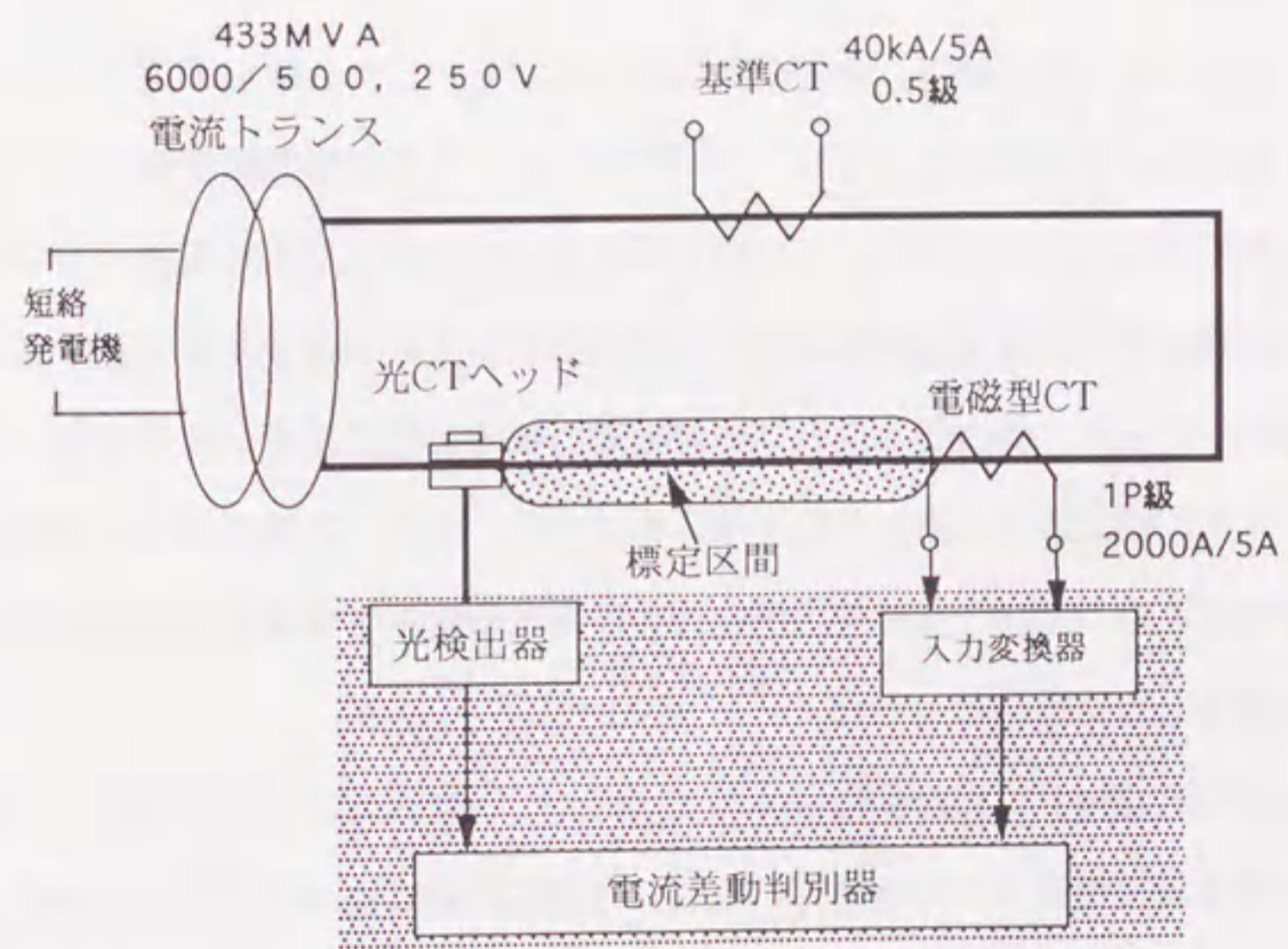
第5-22図 アーク挙動試験状況

とを実験的に確かめることができた。

(3) 標定性能の検証

光CTとBCTとを組合せ、第5-12図に示した判定演算式を組込んだデジタル型電流差動判別器による標定性能を実証した。試験回路を第5-23図に示す。BCTと光CTで区分される標定区間の内部と外部の故障の模擬は、光CTとBCTの極性を反転させることによって行った。

試験結果の一例を第5-2表に示す。試験時の一次電流の直流分減衰時定数は28.1msから30.8msで、直流重畳率は80~96.4%であった。これによると故障電流40kA領域において、内部故障時には逆極性の電流が検出され、第5-12図(B)の流入電流が80kA程度に対し、流出電流が零の状態となり動作領域に入り故障と判定した。外部故障時の通過電流に対しては、40kA通電時において過渡誤差は12.5%および28.33%であったが、故障点判別を行う電流差動判別器が動作領域に至るような差電流が発生せず動作しなかった。



第5-23図 標定試験回路

第5-2表 標定性能試験結果

故障箇所	試験 No.	一 次 電 流			過渡誤差 (%)	判別器の 動 作	試験結果の 良 否
		電 流(Arms)	時定数(ms)	直流重畳率(%)			
外部故障	1	39060	30.8	96.4	12.51	×	良
	2	40890	28.1	80.0	28.33	×	良
内部故障	3	41300	29.5	95.3	—	○	良
	4	41290	28.7	93.4	—	○	良

(注1) 判別器の動作状況：(○, 動作) (×, 不動作)

(注2) 判別器の整定条件

試験No.	1, 3	2, 4
動作値, K_1	2500 Arms	2500 Arms
比 率, K_2	33%	15%

5.4 まとめ

光CTの応用として、気中絶縁変電所の母線を対象とした故障点標定システムを実現するための技術検討を行った。66~275kVまでの電圧階級の変電所の気中母線を対象に光磁界センサを組込んだ光CTによって計測した故障電流データと既存の電磁型CTで計測した故障電流データに基づき、故障点を標定できる装置の技術検討を行った。特に66kVクラスの単母線の故障点標定技術の検討に当たっては、光CTと判別装置の組合せ特性を明らかにした。また、二重母線の故障点標定技術の検討に当たっては、光CTと電磁型CTとの特性差を考慮して故障判別する技術を確立した。

構成の簡単な単母線の故障点標定として、母線断路器部に(磁気鉄心+光磁界センサ)方式光CTを適用し、動作判別方式によって故障区間を判別する技術を

確立した。地絡電流 30~300Arms、短絡電流 1560Arms~46.5kArmsでの故障判別性能を実証し、光CTの特性が故障判別性能に与える影響を明らかにした。また、実際の電力設備における8回の実故障に対して光CTの動作を明らかにすると共に、故障判別性能を実証することができた。

二重母線変電所を対象とした故障点標定方式として、(コイル+光磁界センサ)方式光CTによって計測された電流データに基づき処理する電流差動判別方式を検討した。光CTと電磁型CTを組合せて電流差動判別を行うため、これらの電流計測手段の故障時の過渡特性をシミュレーションおよび実験的に明らかにした。これらの結果に基づきBCCTの二次電流を電圧に変換する回路に光CTの特性と整合させるための変換回路を付加することを考案した。実験的検証の結果、2500Armsで光CT出力とBCCT+変換回路出力の過渡誤差を1.44%とすることができると確かめた。また、これらの電流計測手段に電流差動判別器を組合せ、40kAクラスの実規模短絡模擬試験を行った結果、良好な判別性能を有することを確かめた。

5.5 参考文献

- [1] 電気協同研究会, 変電設備信頼度向上対策専門委員会, “変電設備信頼度向上対策”, 電気協同研究第41巻, 第5号, 1986.
- [2] 保護継電器ハンドブック, pp.283-292, オーム社, 1980.
- [3] N. Inoue, T. Tsunekage, S. Sakai, “On-Line Fault Location System for 66kV Underground Cables with Fast O/E and Fast A/D Technique”, IEEE/PES 1993 Summer Meeting 93 SM 336-5 PWRD, 1993.

第6章 光CTを用いた 故障様相判別技術の確立

6.1 まえがき

送電線路は、風、塩、降雨、降雪、雷撃、鳥獣、飛来物の接触などさまざまな原因によって、故障に至る場合がある。これに対し、絶縁の強化、供給ルートの上二重化、自動再閉路などの運転システムの強化、避雷装置の設置などの設備上の強化を図って、供給信頼度の確保に努めてきた^[1]。このため、現在では、供給支障に至ることは少なくなって来ている。しかし、再閉路のできないような永久故障の場合の復旧作業はもちろんのこと、再閉路によって復旧した場合でも、その後の巡視による故障原因の調査および設備損傷点検時の作業には、現場が山岳地であったり広範囲であることから多大な時間と労力を要している。

一方、本研究においては、電磁誘導やノイズに影響されにくい、絶縁性が高いなどの長を有する光CT技術を確立してきた。また、コンピュータ応用技術分野において開発された人間の思考形態に近づけたファジー理論、ニューロ理論などを利用した判断処理技術は、電力設備においても導入され、その成果を上げている。

こうした基礎技術に基づき、本章では、光計測技術の一つとして技術確立を進めた光CTとコンピュータ応用技術を組合せ、送電線路の故障原因を推定する技術を確立することを目的に、中性点抵抗接地系および非接地系を対象に人工故障時の電流、電圧波形を解析し、コンピュータによる判別を試み、自動化システムの可能性を見極めた。

6.2 故障原因と電圧電流波形の特徴

送電線の故障は、原因別に以下の4種類に大別できる。

- (a) 雷／開閉サージによる気中閃絡
- (b) 汚損、冠雪、着氷雪などによる沿面閃絡
- (c) 他物接触による閃絡
- (d) 有機絶縁物の劣化による閃絡

これら4種類の内、他物接触による閃絡以外は研究例^{[2] [3]}が多いため、ここでは、他物接触による閃絡について検討を進めることとした。他物接触による閃絡は、接触物の性状のみならず、その物の接触のしかたによって、閃絡時の電圧、電流波形が異なるものとする。接触物としては鳥獣、樹木、導電性の飛来物やクレーンのアームなどが想定でき、それぞれ接触時の表面および内部の抵抗が異なる。接触物の種類と抵抗値の分類を第6-1表に整理した。

樹木の絶縁破壊は、初期の抵抗値に対応したもれ電流が表面を流れることによって順次炭化導電路が形成され、最後に電極が閃絡できる距離に達したときに最終的な閃絡に至り、大きな続流電流が流れるものと考えられる。従って、閃絡までの時間と電流・電圧の関係と炭化導電路の形成は、次の関係式に従うものと仮定して検討を進めた。

$$V \cdot I \cdot t = k \cdot C \cdot \rho \cdot L \cdot S \cdot \Delta T \dots \dots \dots (6-1)$$

ここで、V：対地電圧 [V]

I：前駆電流 [A]

t：最終的フラッシュオーバーまでの時間 [sec]

k：係数

C：比熱容量 [J/kg・K]

第6-1表 接触物の種別と抵抗値範囲

抵抗値	接 触 物
数100 Ω以下	鳥獣の内部，クレーン等の金属物
数kΩ～数100kΩ	鳥獣の表面，樹木
数100kΩ以上	樹木

ρ ：比重 [kg/m³]

L：炭化した部分の長さ [m]

S：炭化した部分の平均断面積 [m²]

ΔT ：発火温度と気温の差 [K]

鳥獣の場合には、構成要素が主に筋肉、表皮および体液、血液などであることから、絶縁破壊時の電流は、抵抗値の低いところを通り最終的フラッシュオーバーに至ると考えられる。

金属抵抗による地絡は、金属物の抵抗値が地絡電流によって変化しないことから、接触抵抗、金属接触物のもつ抵抗値および回路定数で定まる地絡電流が継続するものとする。

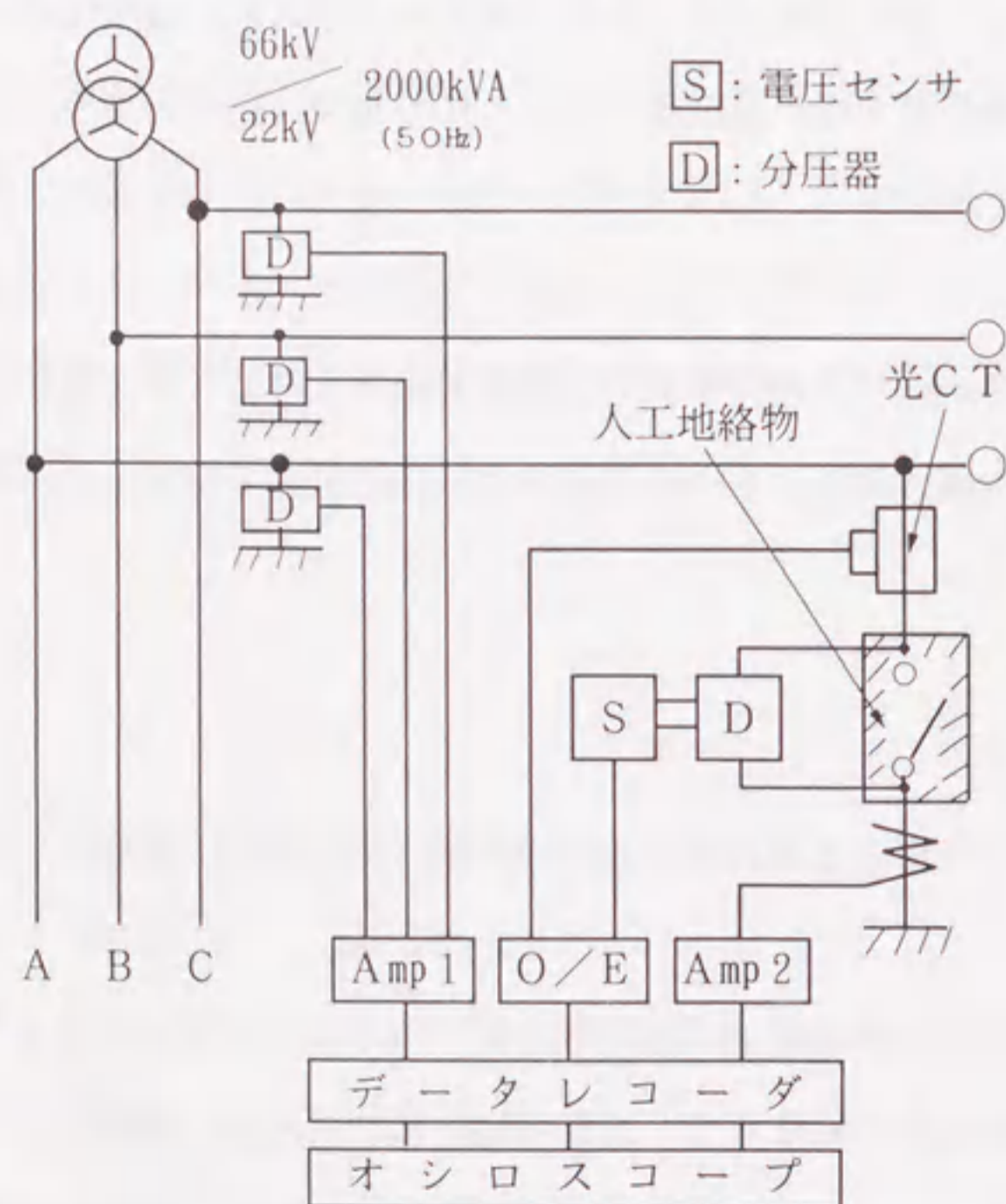
6.3 人工地絡試験による電流電圧波形の調査（中性点抵抗接地系）

送電線の故障発生時の電流電圧波形は、前項の検討結果で分るように、故障原因となる接地導電物のみならず、変電所側の接地抵抗値、線路インピーダンスおよび線路電圧に左右される。このため、実線路で発生する故障時の電流電圧波

形を人工試験によって模擬し、観測するために(財)電力中央研究所赤城試験センターにおいて22kV抵抗接地系統の巨長 1.2kmの模擬線路を用いて人工地絡試験を実施した。

6.3.1 試験回路および供試試料

試験回路を第6-1 図に示す。故障時の電流電圧は、雪平氏の論文^[4]で示されているようにmsオーダーの波形となることから、数10kHz 以上の波形まで計測できる測定器とした。電流計測用CTは、電磁型の計測用CT(~20MHz)と(磁気鉄心+光磁界センサ)方式の光CT(~50kHz)を用いた。また、電圧計測用としては、各相電圧計測用に分圧器(~1MHz)を用い、さらに、分圧器を人工地絡を行う極間に設置し、その2次側にポッケルス素子とO/E変換器(~50kHz)を取付けた。



第6-1 図 人工試験回路 (電力中央研究所赤城試験センター)

供試試料の一覧を第6-2 表に示す。試験に用いた地絡物については、小動物はできるだけ生きた状態で、樹木等は伐採直後のものとし、自然状態を再現することに注力した。

6.3.2 試験結果

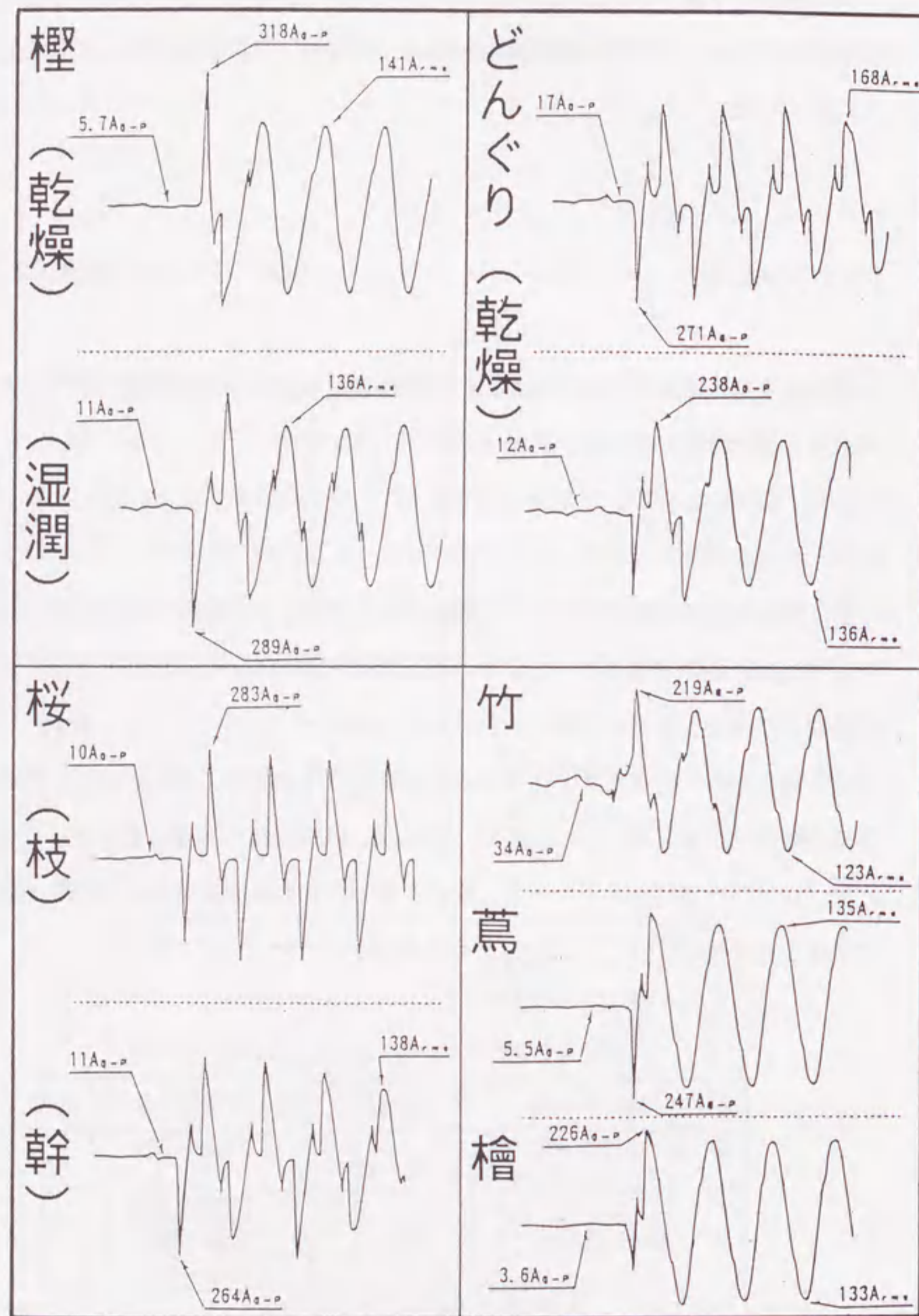
地絡現象を特徴づける電流波形は、地絡の初期段階から最終的なフラッシュオーバに至るまでの間に種々変化を示す。

(1) 樹木

樹木接触時の電流波形の代表例を第6-2 図に示す。この図から分かるように、地絡電流は、地絡初期は小さく、その後最終的フラッシュオーバに至っており、前駆期間とフラッシュオーバ期間に大別できる。試験は、樫、どんぐり、桜、竹、蔦、檜の6種について行ったが、竹以外の前駆期間は10A以下の電流が流れ、その後、急に最終的フラッシュオーバに至った。波形は、供試試料の種類によって、ほとんど差がないことが明らかとなった。また、樹木の表面状態が乾燥と湿潤で比較したがほとんど差がないことも明らかにできた。

第6-2表 人工試験供試試料

想定故障	供試試料	初期抵抗値[Ω]	試験回数
樹木接触	樫, 竹, 桜, どんぐり, 檜, 蔦	約20~3M	30
	にわとり	数10~600k	3
鳥獣害	へしまへび	約10~600k	2
	びうなぎ	約5~8k	6
碍子沿面閃絡	汚損(0.1mg/cm ²) [等価霧中法]	—	3
	氷(着氷雪)	~1.3M	9
人工的飛来物	金属棒	0~1k	25
人工的接地物	カーボンロッド	~4M	6



第6-2図 樹木接触時の地絡電流波形

前駆期間の継続時間と注入エネルギーの計算結果を第6-3表に示す。尚、注入エネルギーの計算は、(6-1)式の左辺に従い、前駆期間の電流値、電圧値の瞬時値の積を時間積分したものである。樹木の地絡初期には、前駆期間の小さなもれ電流によって地絡物の炭化が生じる。炭化導電路の先で更に放電が生じ、最終的に全経路が低抵抗の炭化導電路になるまで継続し、フラッシュオーバー期間に至る。これは、注入エネルギーと炭化に必要なエネルギー量とがオーダー的によく一致したことから裏付けられる。ここで、炭化導電路体積は、実験後のサンプルの炭化断面積から想定したものである。

(2)鳥 獣

鳥獣類の接触したときの電流と極間電圧波形例としてへびと鳥のものを第6-3図に示す。前駆期間は、比較的短時間で終了しており、上記のような注入エネルギー的な観点からすれば、炭化層が鳥獣の表面の皮肉層から低抵抗の血管まで至るところまでは、注入エネルギー量に関連するが、その後は、鳥獣の低抵抗層を電流が流れ、フラッシュオーバーに至るものとする。鳥の場合は、皮肉層がうすく血管が太く抵抗が小さいため、2~3サイクルで最終的フラッシュオーバーに至る。これに比べへびは、血管が皮肉層の内部にあり細いため、皮肉層を10数Aの電流が流れ炭化導電路が形成されフラッシュオーバーに至るものとする。

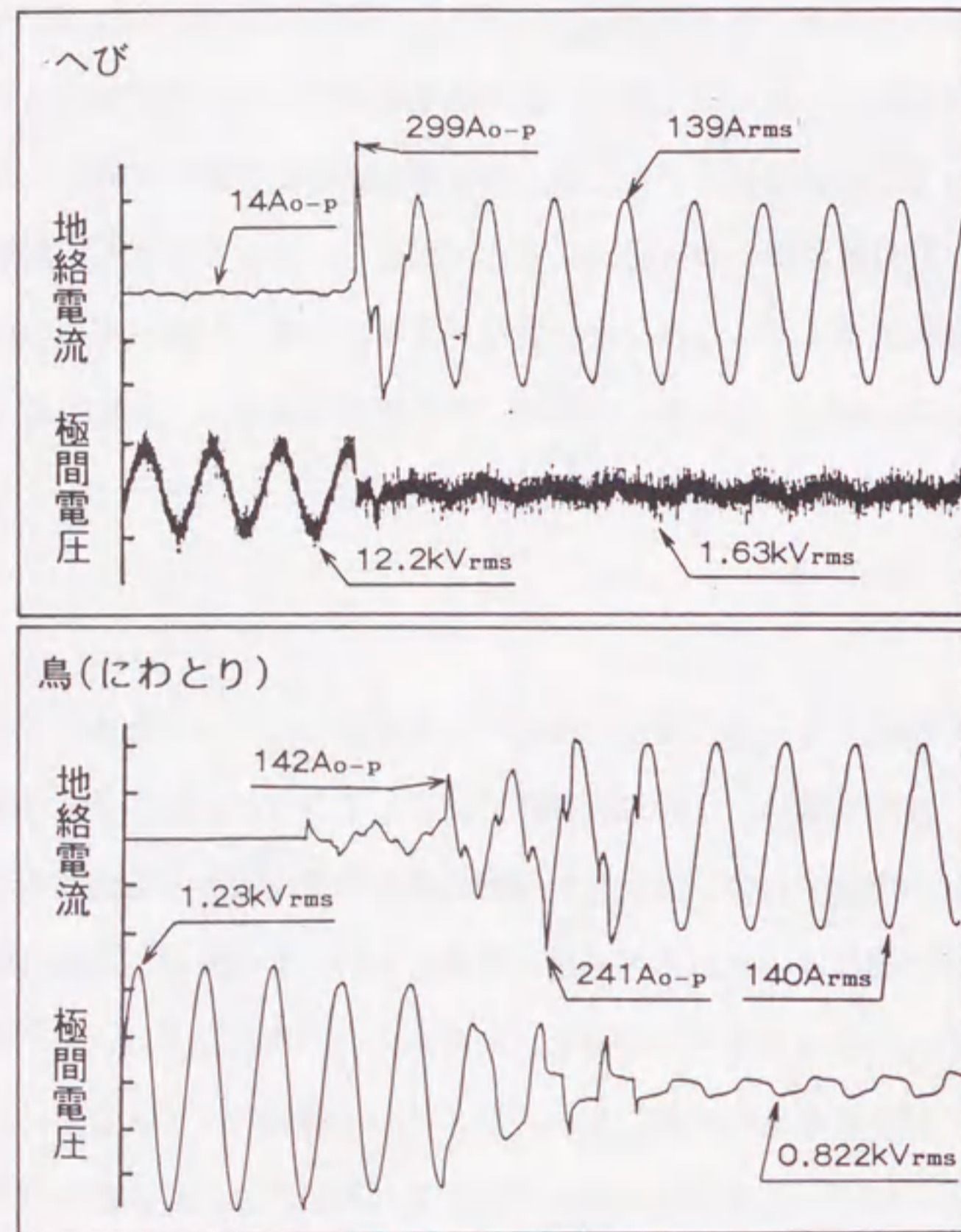
第6-3表 フラッシュオーバー前の注入エネルギー

供試試料	前駆期間継続時間	注入エネルギー	炭化エネルギー
樹木	約11秒	107000 J	96000 J
(檜)	約22秒	95000 J	
へび	約7秒	61000 J	—

* 炭化に必要なエネルギーの計算式

$$[\text{炭化エネルギー}] = [\text{炭化係数}] \times [\text{比熱容量}] \times [\text{比重}] \times [\text{炭化した部分の長さ}] \times [\text{炭化断面積}] \times [(\text{発火温度}) - (\text{気温})]$$

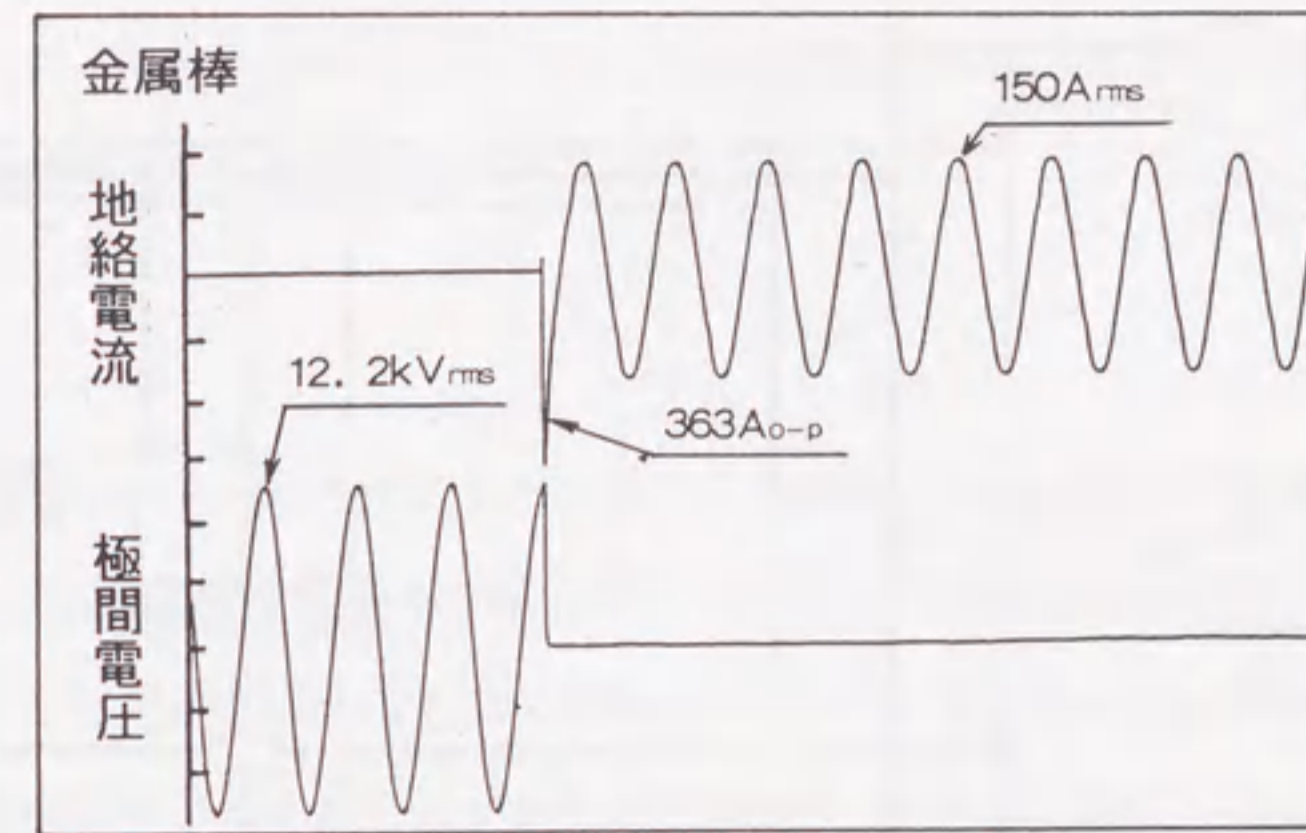
** 炭化係数：実験によって求めた係数



第6-3図 へびと鳥が接触したときの電流電圧波形

(3)導電性接触物

金属棒の接触時の電流電圧波形を第6-4 図に示す。これによれば、フラッシュオーバー期間の最初にパルス状の電流波形が観測され、その後アーク継続期間中、交流の地絡電流が継続する。



第6-4図 金属棒の接触時の電流電圧波形

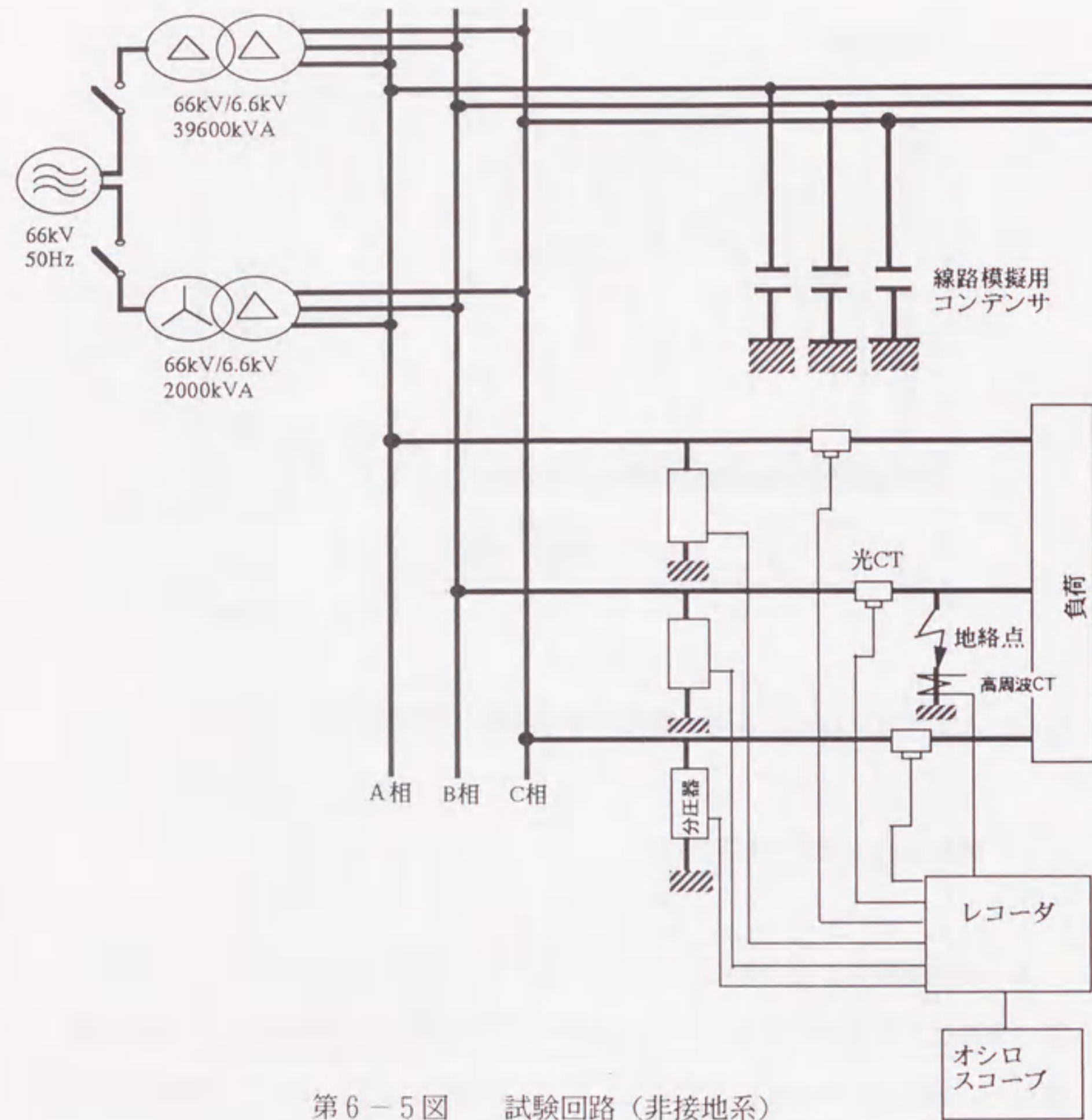
6.4 人工地絡試験による電流電圧波形の調査 (非接地系)

6.4.1 試験回路および供試試料

人工地絡試験は、抵抗接地系と同様に電力中央研究所赤城試験センターの 6.6 kVの非接地系配電線を利用して、8種類の人工地絡物を供試試料として試験を実施した。試験回路を第6-5 図に示し、供試試料を第6-4 表に示す。試験線路の全長は約3.2km であるが、実線路を想定し対地静電容量 (2.92 μ F) を設置した。電流電圧の計測に関しては、各相に配置した光CT、地絡点の高周波CT (周波数帯域 \sim 20MHz) および各相電圧計測用の分圧器 (周波数帯域 \sim 1 MHz) を使用した。CTは、(磁気鉄心+光磁界センサ) 方式のもので周波数特性を \sim 50kHz とした。

6.4.2 試験結果

試験中の電流電圧の代表波形を第6-6 図 \sim 第6-11図に示す。電流の観測波形と



第6-5図 試験回路(非接地系)

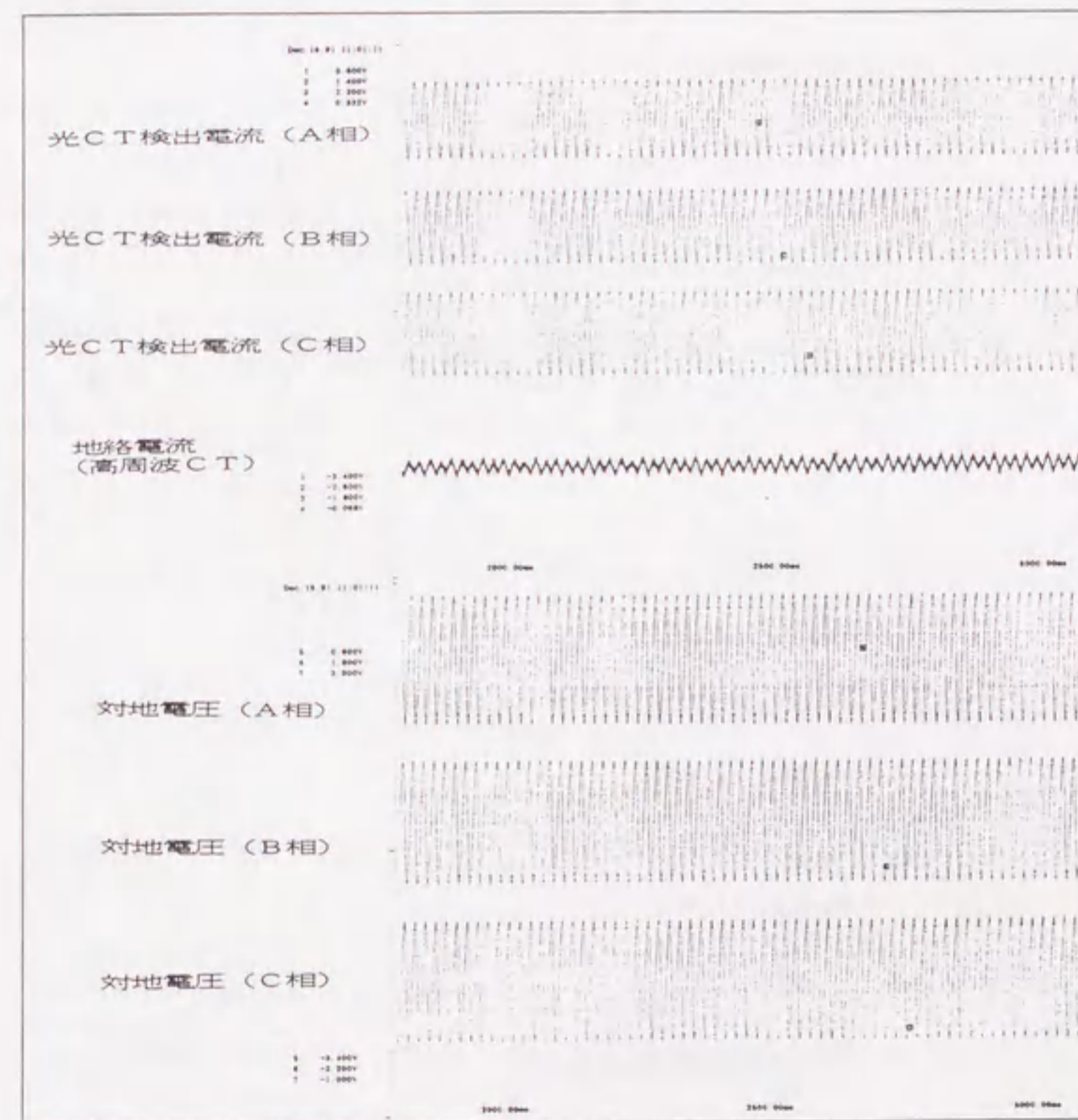
第6-4表 供試試料

想定故障	供試試料	初期抵抗値 [Ω]	試験回数
樹木接触	乾燥 さんご樹, くりの木	表皮あり約350k	7
	湿潤	表皮なし約100k	
	湿潤 柳	幹200k、枝1M	2
鳥獣害	へび [しまへび]	約200k~約600k	2
	うなぎ	約50k	5
	鳥 [鶏]	約400k~約600k	2
ケーブル事故	地絡不良	—	4
碍子沿面閃絡	汚損(0.1mg/cm ²)[等価霧中法]	—	3
人工的接地物	金属棒	—	13
	抵抗器 (250Ω、500Ω、1kΩ)	250、500、1k	6

地絡物のアーク発生状況から、それぞれの地絡物について以下の特徴があることを明らかにすることができた。

(1) 樹木

樹木接触による試験では、さんご樹、くりの木、および柳の3種類について試験を実施した。第6-6図では明確ではないが、さんご樹は木が全体として抵抗体となり、もれ電流が徐々に増加する傾向がある。一方、柳の接触試験では、皮の部分の表面抵抗が低く大きなアークが皮の部分で繰り返し発生するため、大きなアーク電流が観測され、それと同時に地絡相電圧の低下が見られた。



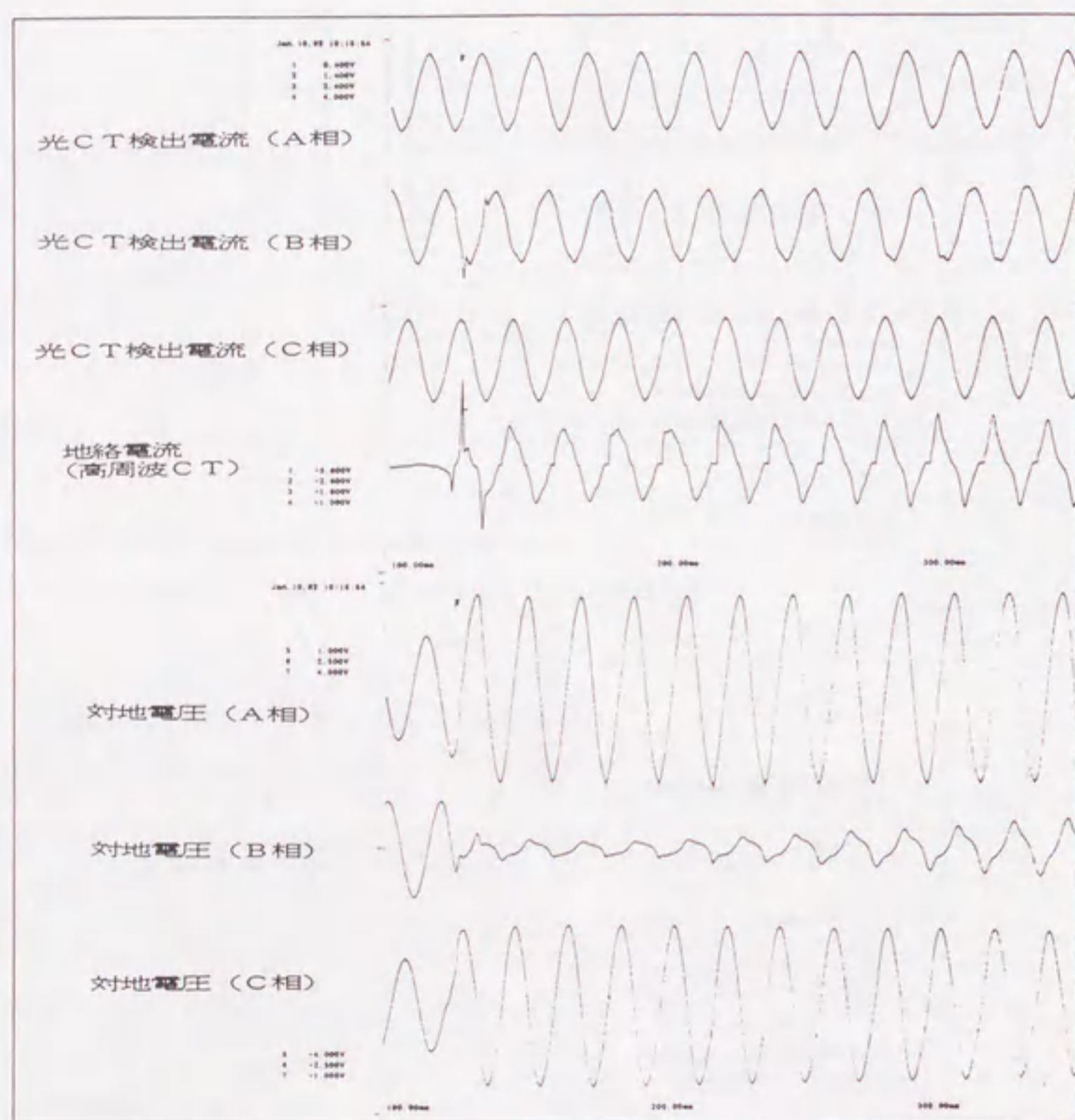
第6-6図 地絡時の電流電圧波形(さんご樹)

(2)鳥 獣

鳥獣の代表として実施した鶏と蛇（うなぎ含む）の地絡現象については、ほぼ同様の傾向を示し、各サイクルごとに放電電圧に達した時点で放電が発生し、地絡電流が流れていることが分った。

(3)碍子沿面/ケーブル

碍子汚損の地絡試験は等価霧中法によって強制的に汚損閃絡させており、各半波のピーク付近でケーブル地絡と同様のパルス電流波形を観測した。

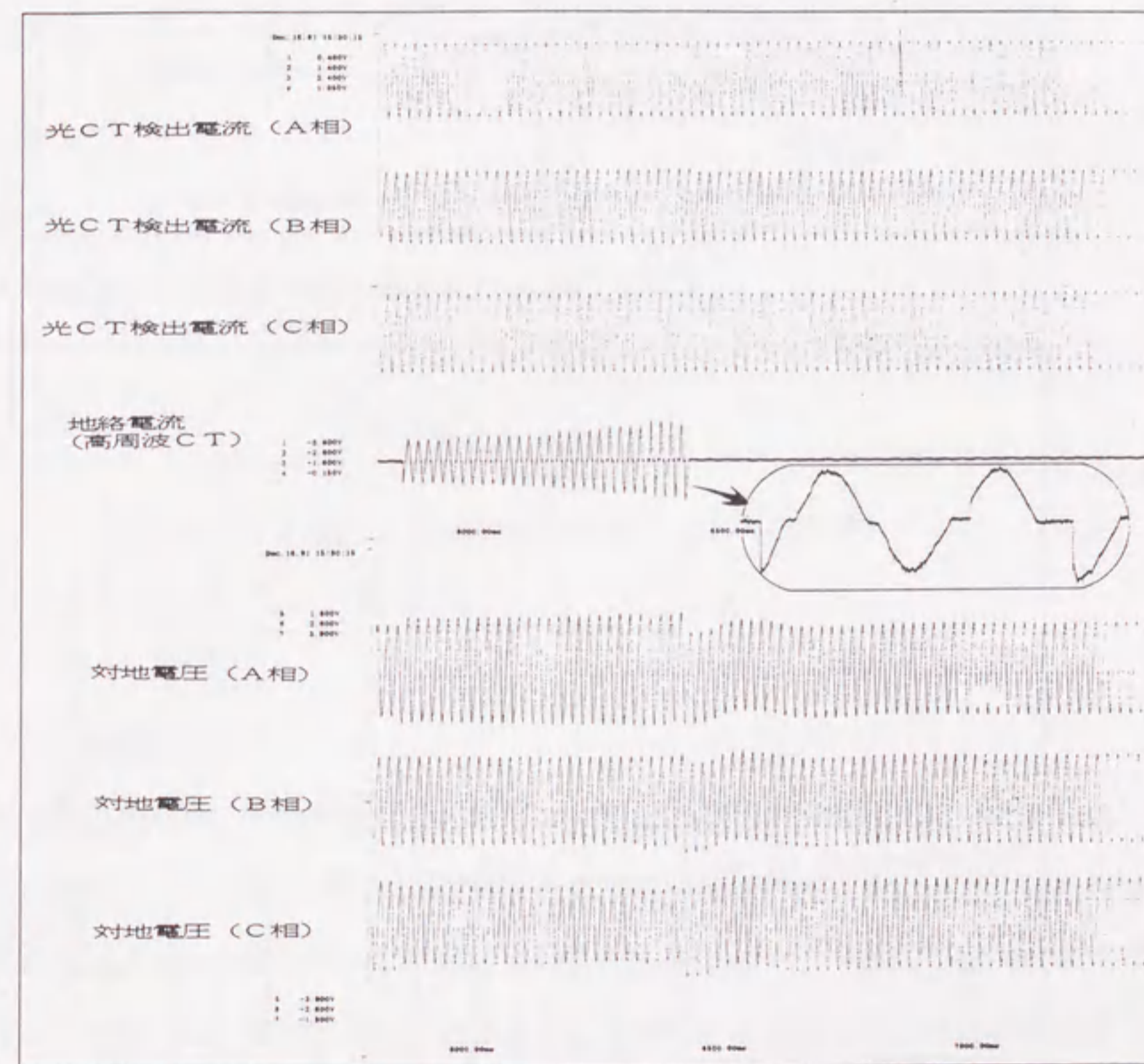


第6-7図 地絡時の電流電圧波形（柳）

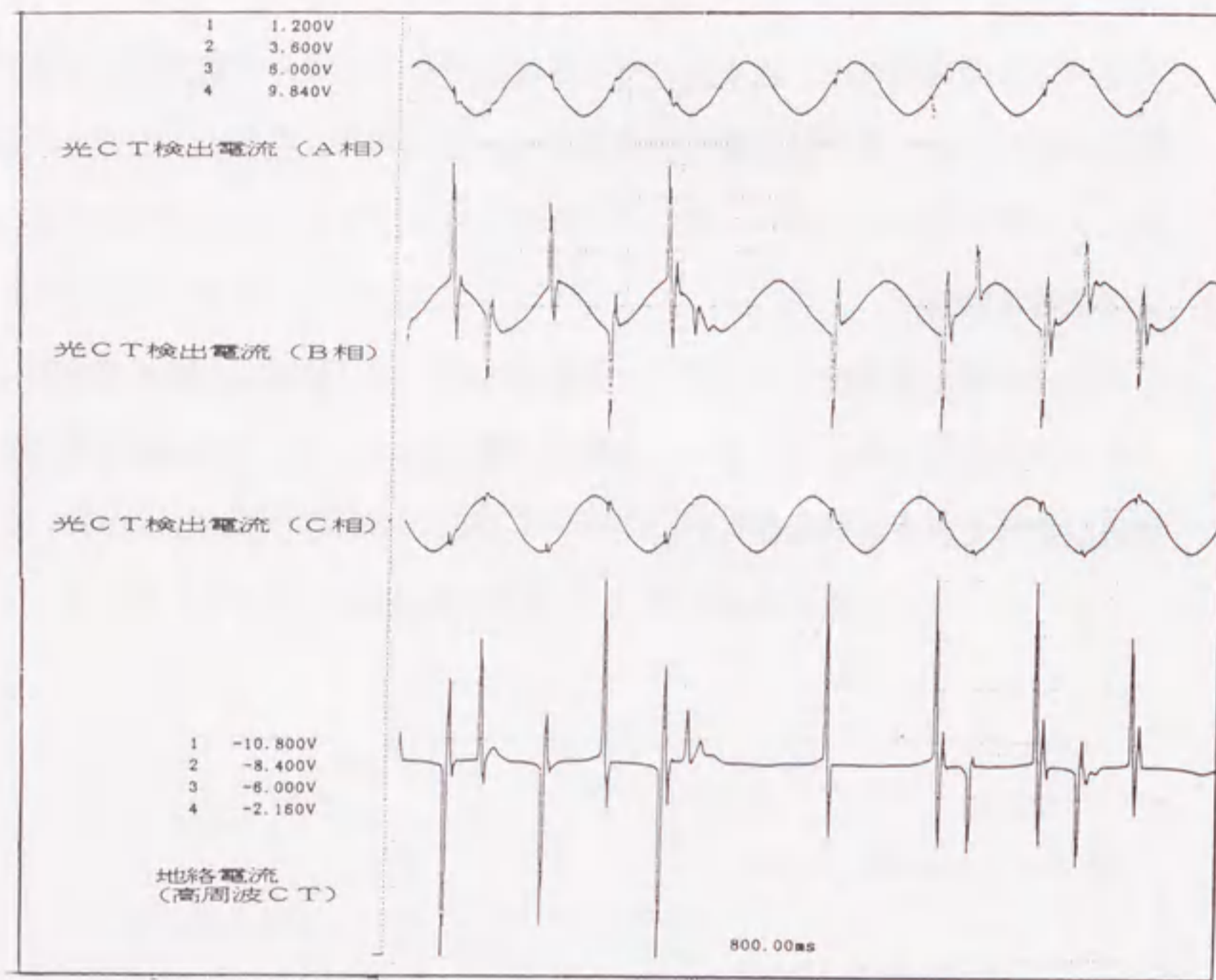
ケーブルの地絡では、各半波のピーク付近で針状のパルス電流が発生しており、線路キャパシタンスの放電電流が観測できた。

(4)導電性接触物

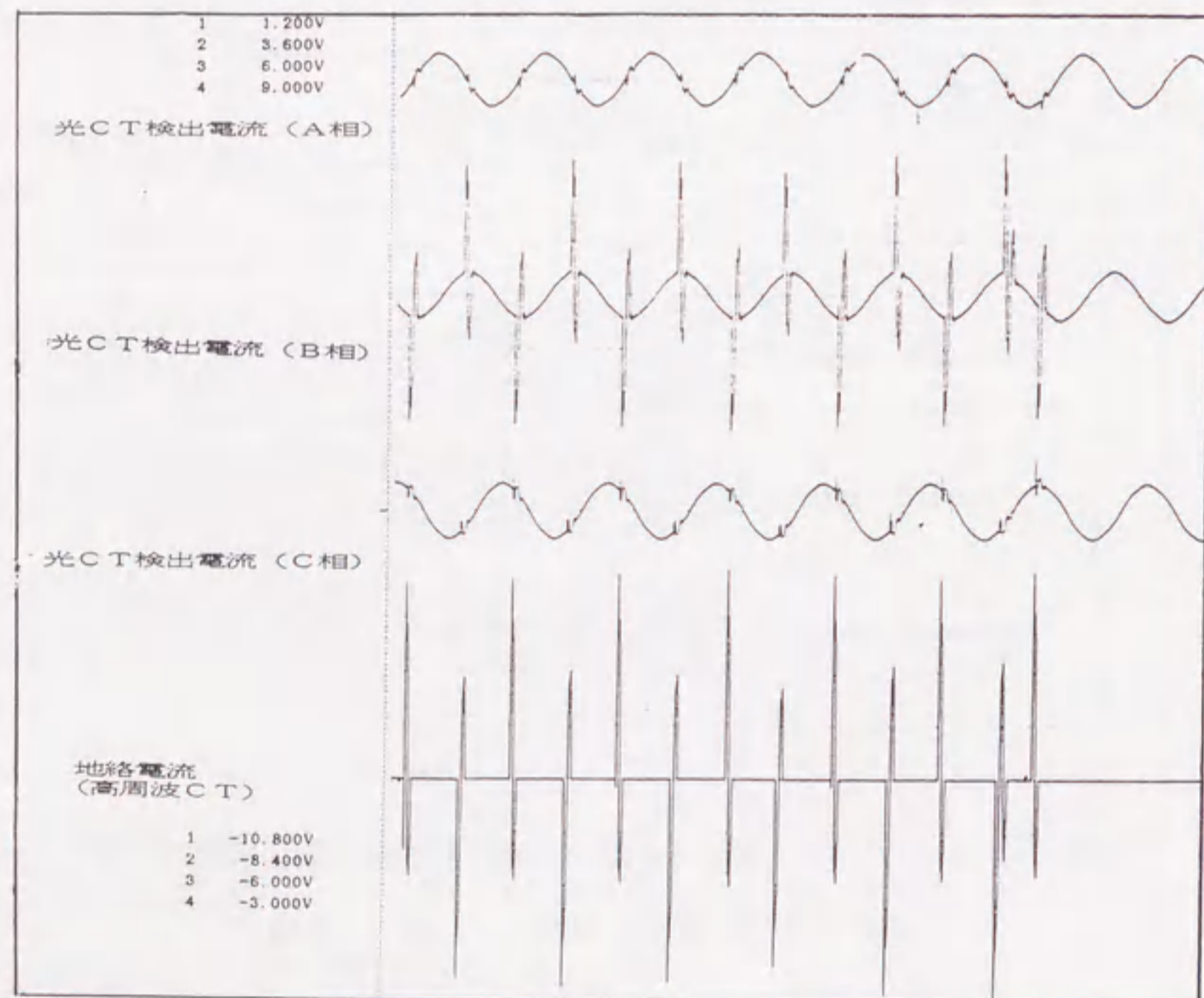
クレーン等の重機接触を想定した金属棒地絡では、接触した時点で線路キャパシタンスの放電と考えられるパルス電流が観測され、完全地絡時点での地絡電流は線路定数で決まる値となった。



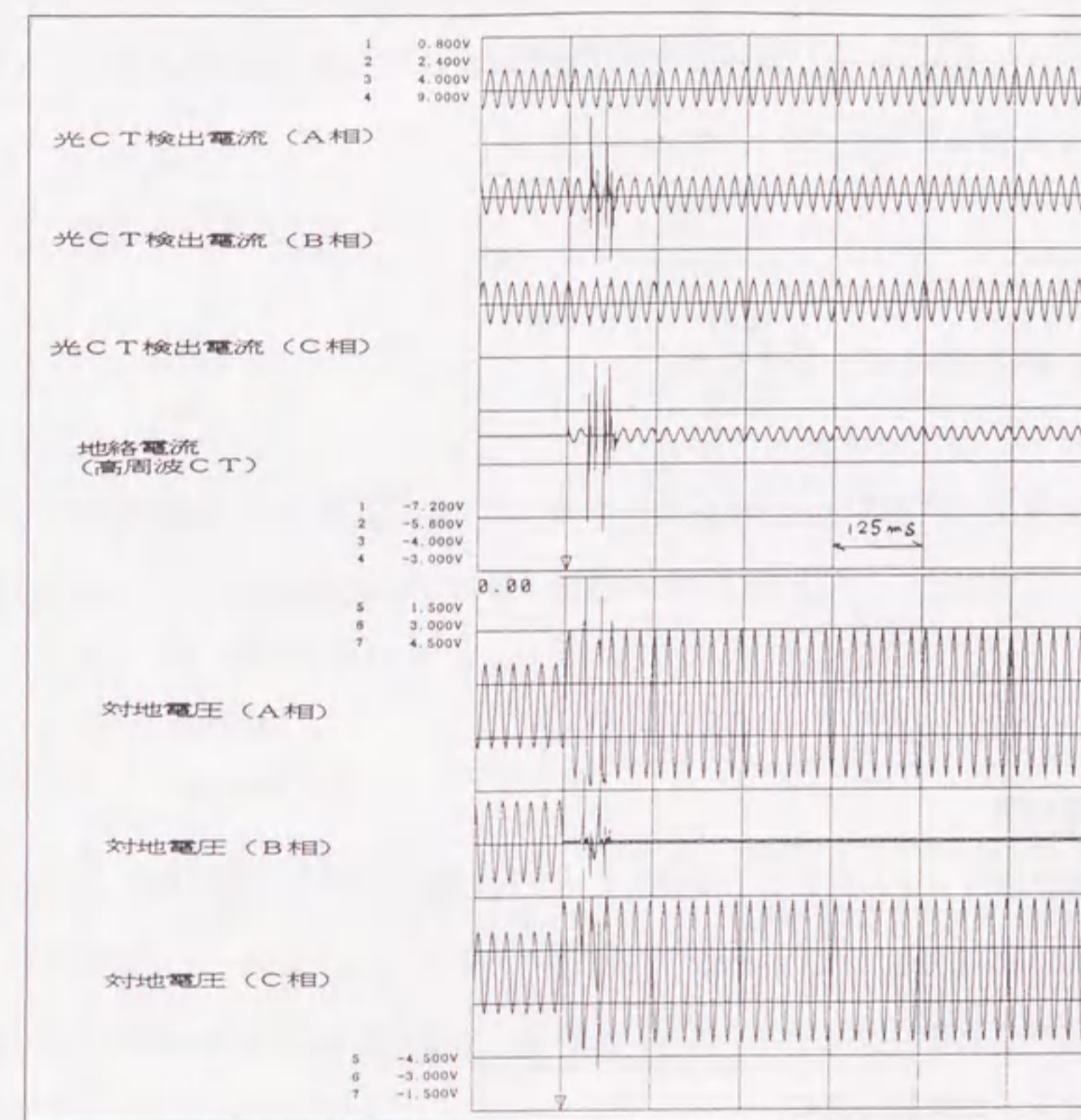
第6-8図 地絡時の電流電圧波形（へび）



第6-9図 地絡時の電流電圧波形 (汚損碍子)



第6-10図 地絡時の電流電圧波形 (ケーブル)



第6-11図 地絡時の電流電圧波形 (金属棒)

(5)人工地絡試験結果のまとめ

以上まとめると、非接地系統の地絡においては、初期の地絡抵抗値が大きい地絡物は地絡と共に地絡抵抗と回路定数で決まる地絡電流が流れる。一方、初期の地絡抵抗値が小さい地絡物は、地絡と同時に線路キャパシタンスの電荷が放電するため、パルス状の高周波電流が発生することが明らかとなった。また、基本波や高周波電流の時間的な間欠性は、地絡物が離れたり接触したりすることによる地絡の不完全によるものであり、基本波成分の地絡電流が持続した場合の電流変化は、地絡電流による地絡物の抵抗値の変化であると考えられる。さらに、中性点抵

抗接地系の電流波形と比較してみると、非接地系統の地絡電流波形は、地絡の前駆期間とフラッシュオーバー期間のような電流値の激的な変化はみられないことが明らかとなった。

6.4.3 等価回路シミュレーション

地絡現象と電流電圧の関係を解析する目的で等価回路を用い地絡現象のシミュレーションを行い、人工地絡試験の結果得られた電流電圧波形との比較検討を行った。

(1) 等価回路

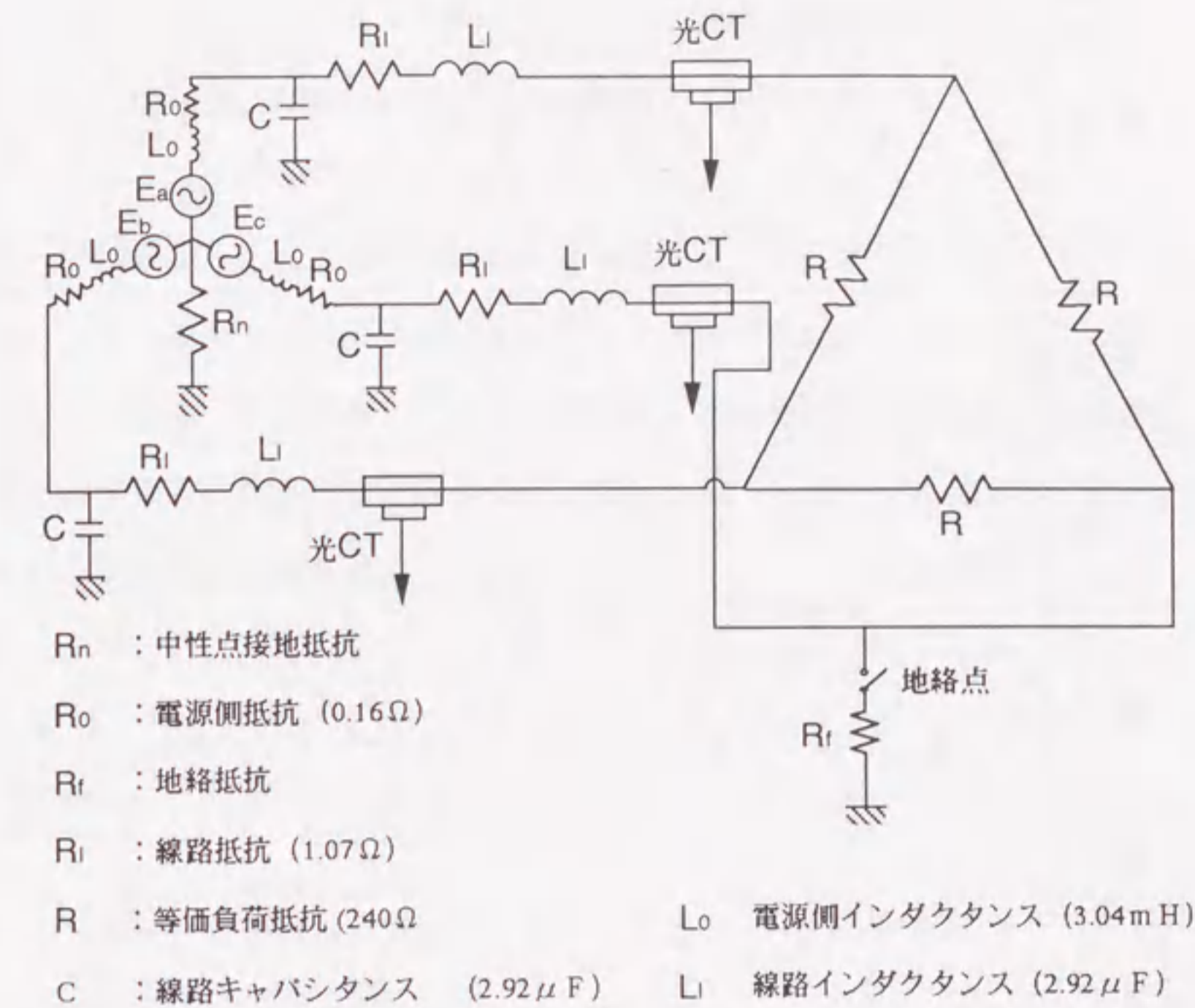
赤城試験センターにおいて実施した人工地絡試験の等価回路を第6-12図に示す。人工地絡試験回路は非接地系統で△結線であるが、シミュレーション計算^[5]に用いた等価回路では電源をY結線に変換し、中性点を高抵抗($R_n=1M\Omega$)で接地した。なお、地絡相はB相とした。

(2) シミュレーション結果

第6-12図の等価回路を用い地絡抵抗 R_f を変化させたときの電流電圧波形のシミュレーション結果の代表例を第6-13、6-14図に示す。また、比較のため抵抗器を用いた人工地絡試験結果を第6-15、6-16図に示す。

(3) 考察

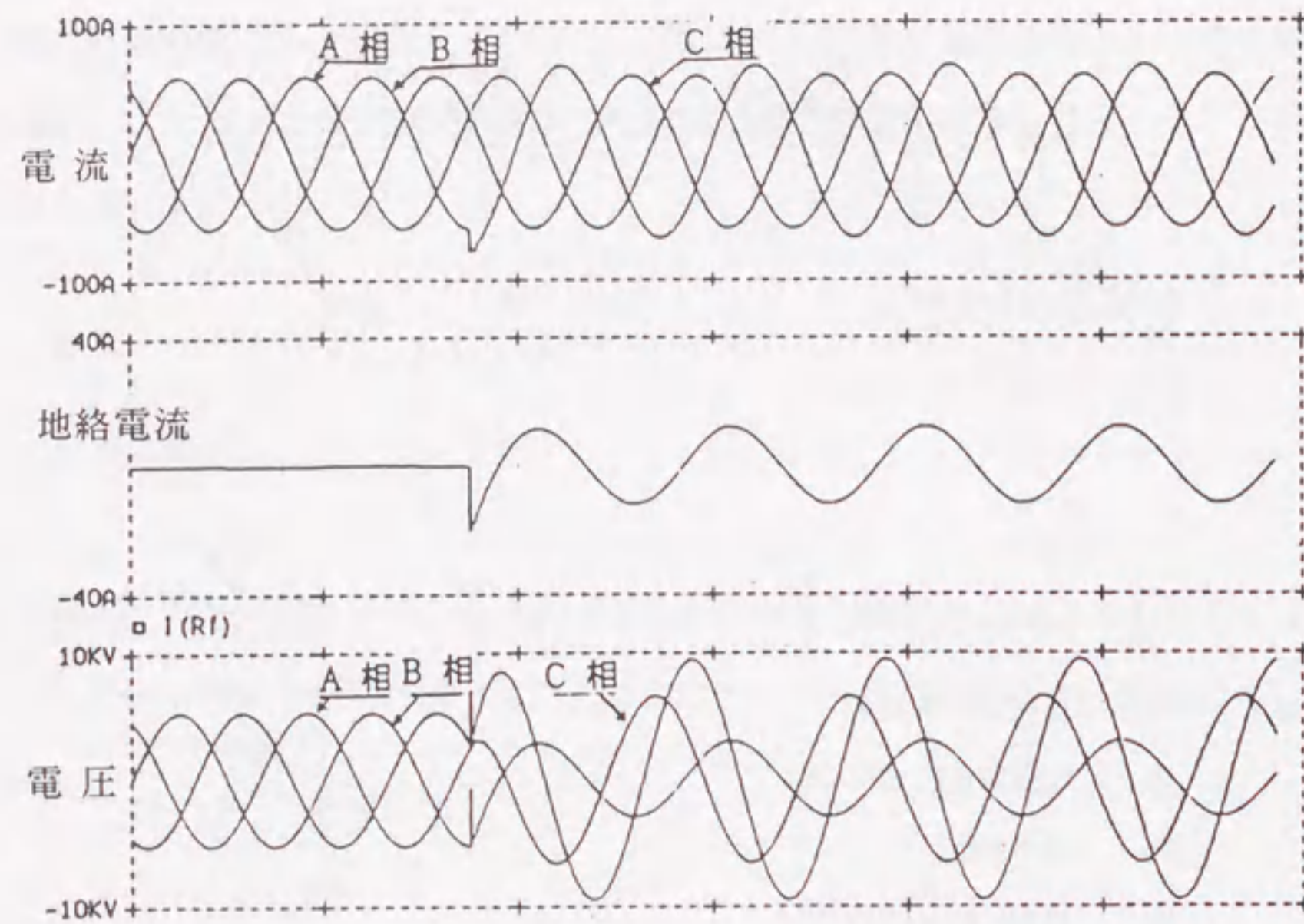
抵抗地絡時の実験とシミュレーション結果の各波形を比較すると、地絡初期段階において地絡電流および地絡電圧波形に差異が見られる。これは、実験で地絡を発生させるときに抵抗を接地電極に落下させる方法を用いたため、抵抗が一度接地した後一端跳ね絶縁が回復し、その後に永久地絡に至ったため波形の歪が発



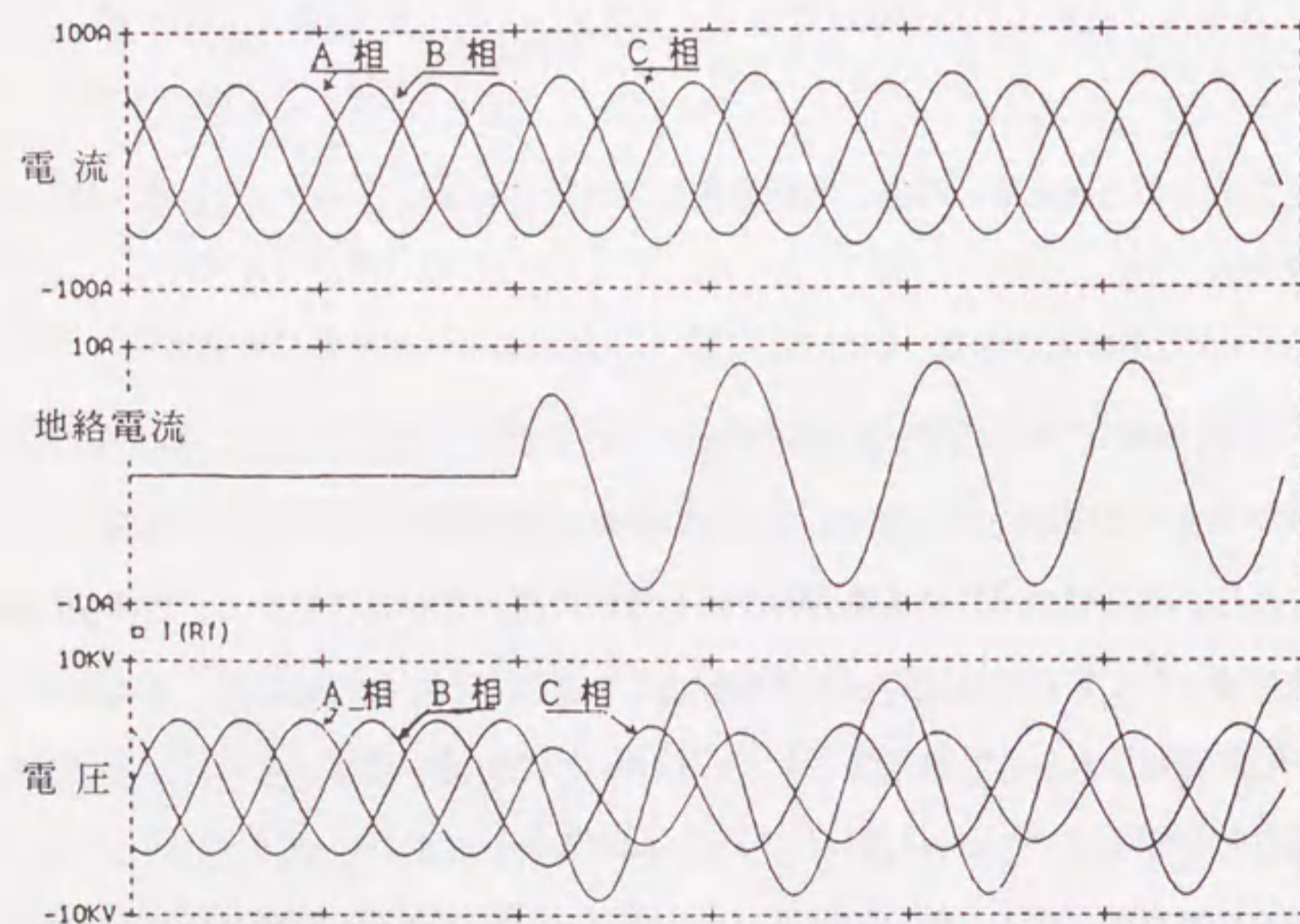
第6-12図 等価回路

生したものとする。なお、地絡電流値は実験とシミュレーション結果とは、ほぼ一致した。

また、第6-17図の人工地絡試験の波形例に示すように相の電流にパルス状の波形が発生する場合には、地絡していない相にも同位相のパルス波形が観測された。これは、地絡相のパルス電流方向と同じ方向に流れていることから、電源側に線路容量として等価的に取付けた静電容量 C に蓄積されていた電荷が、負荷を介して地絡点に流れ込む放電電流と考えられる。この実験を模擬するため、地絡抵抗 10Ω でシミュレーション解析を行った。結果を第6-18図に示す。これによると地絡相以外の相にパルス電流が発生し、地絡パルスの周期も $1ms$ 程度で実験結果とほぼ一致した。また、今回の人工地絡試験結果およびシミュレーション結果の波



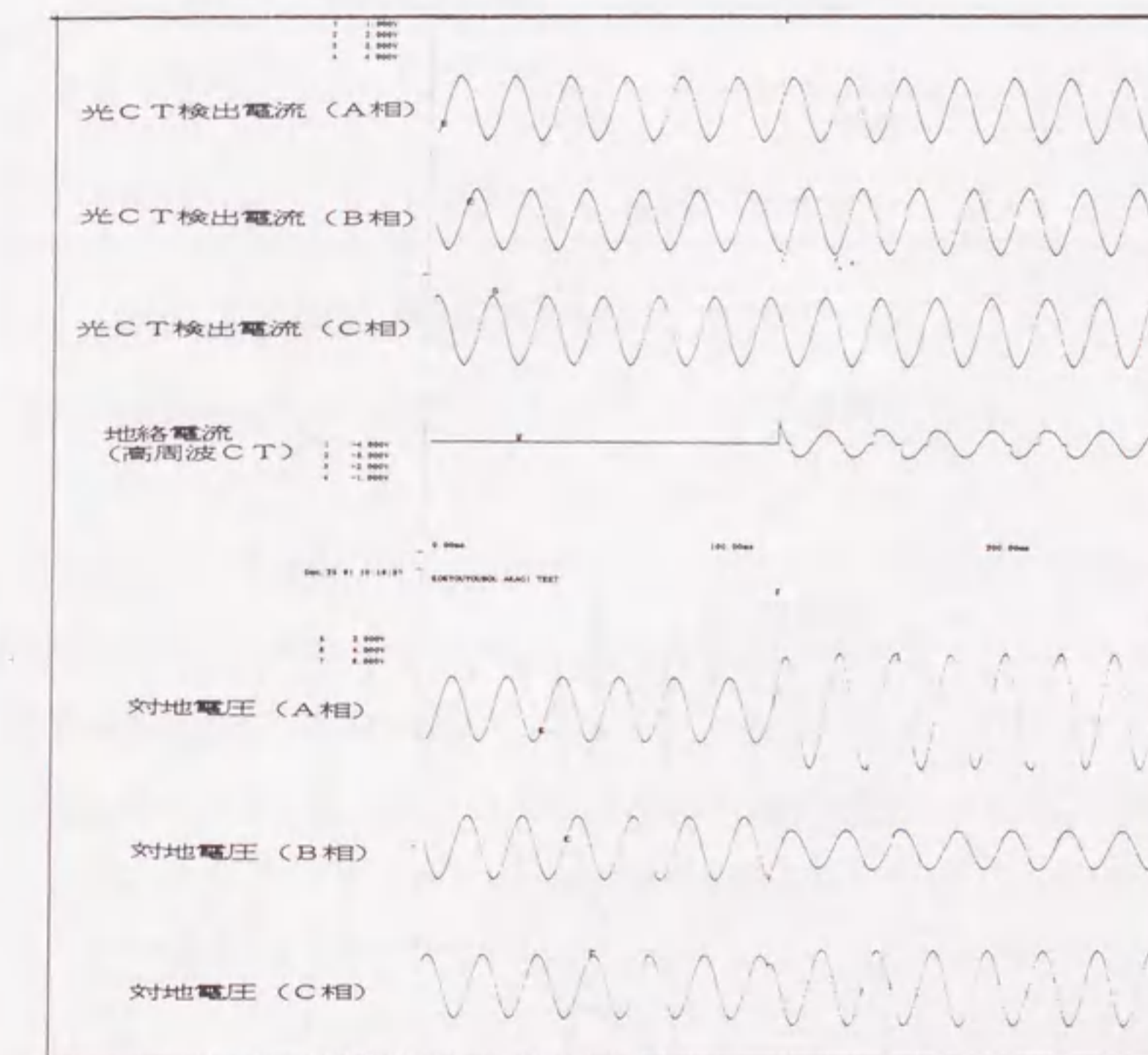
第6-13図 シミュレーション結果 (地絡抵抗 250Ω)



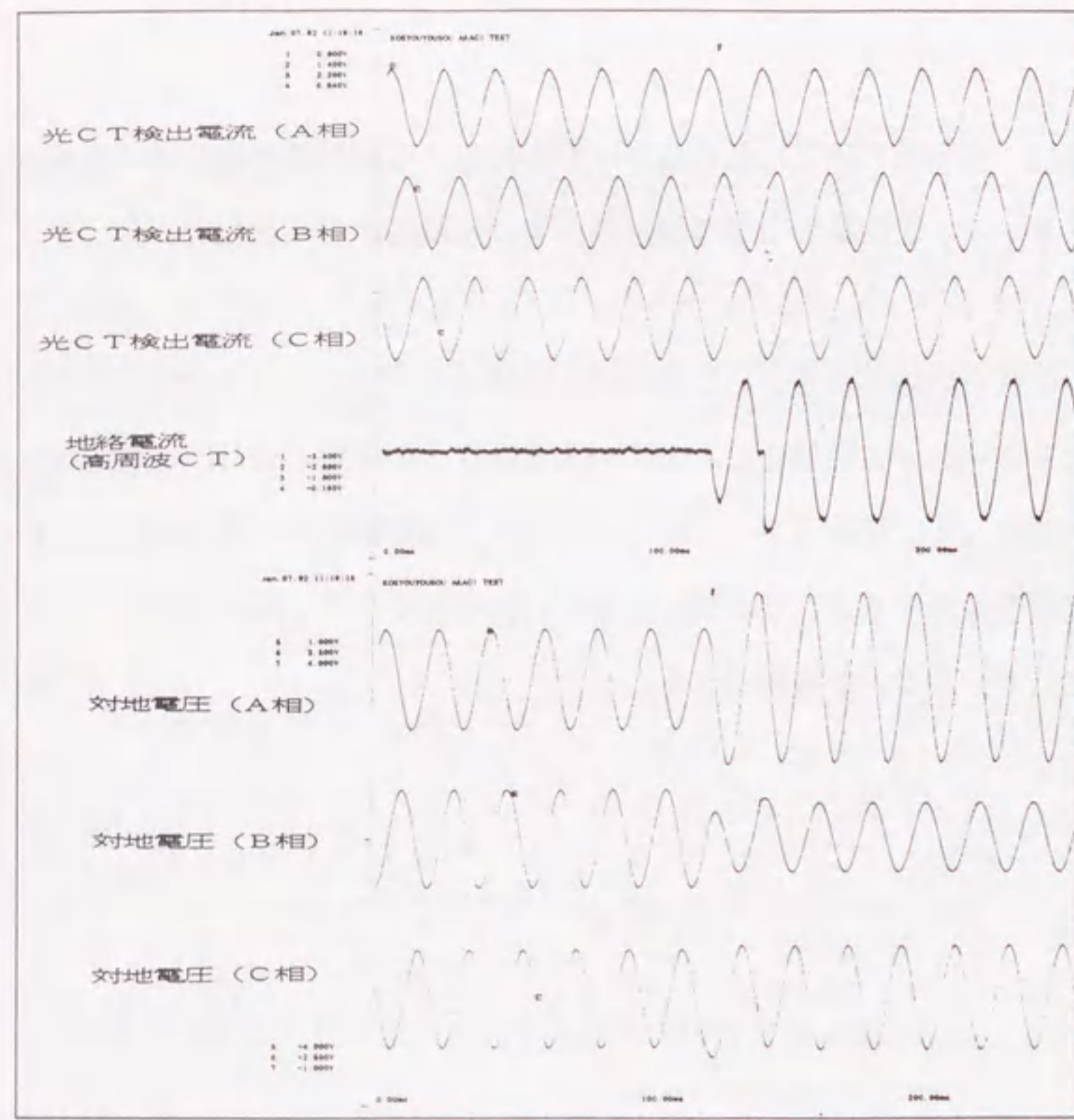
第6-14図 シミュレーション結果 (地絡抵抗 500Ω)

形は、雪平氏の論文におけるケーブルにおける間欠弧光地絡時の電流波形のシミュレーション結果および実験結果とも、比較的良好一致している。

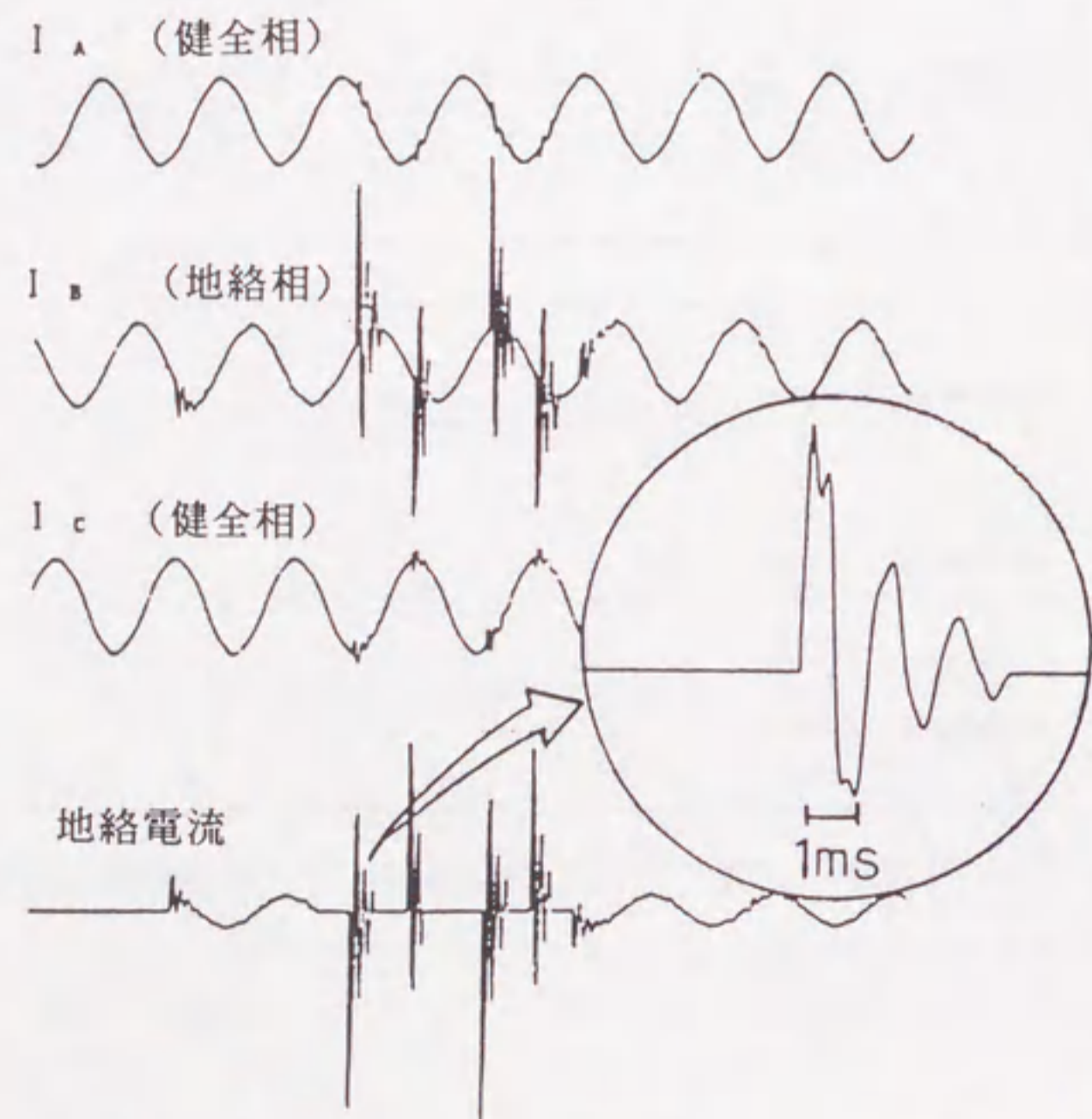
これらの結果から、人工地絡試験結果と等価回路による地絡抵抗値を用いたシミュレーション結果とは、よく一致することが確認できた。この結果に基づき、一例として、樹木(さんご樹)による人工地絡試験時の電流電圧波形から地絡抵抗値を推測すると、地絡開始初期の13kΩ程度から、約12秒後に3.3kΩまで変化していることが推測できる。



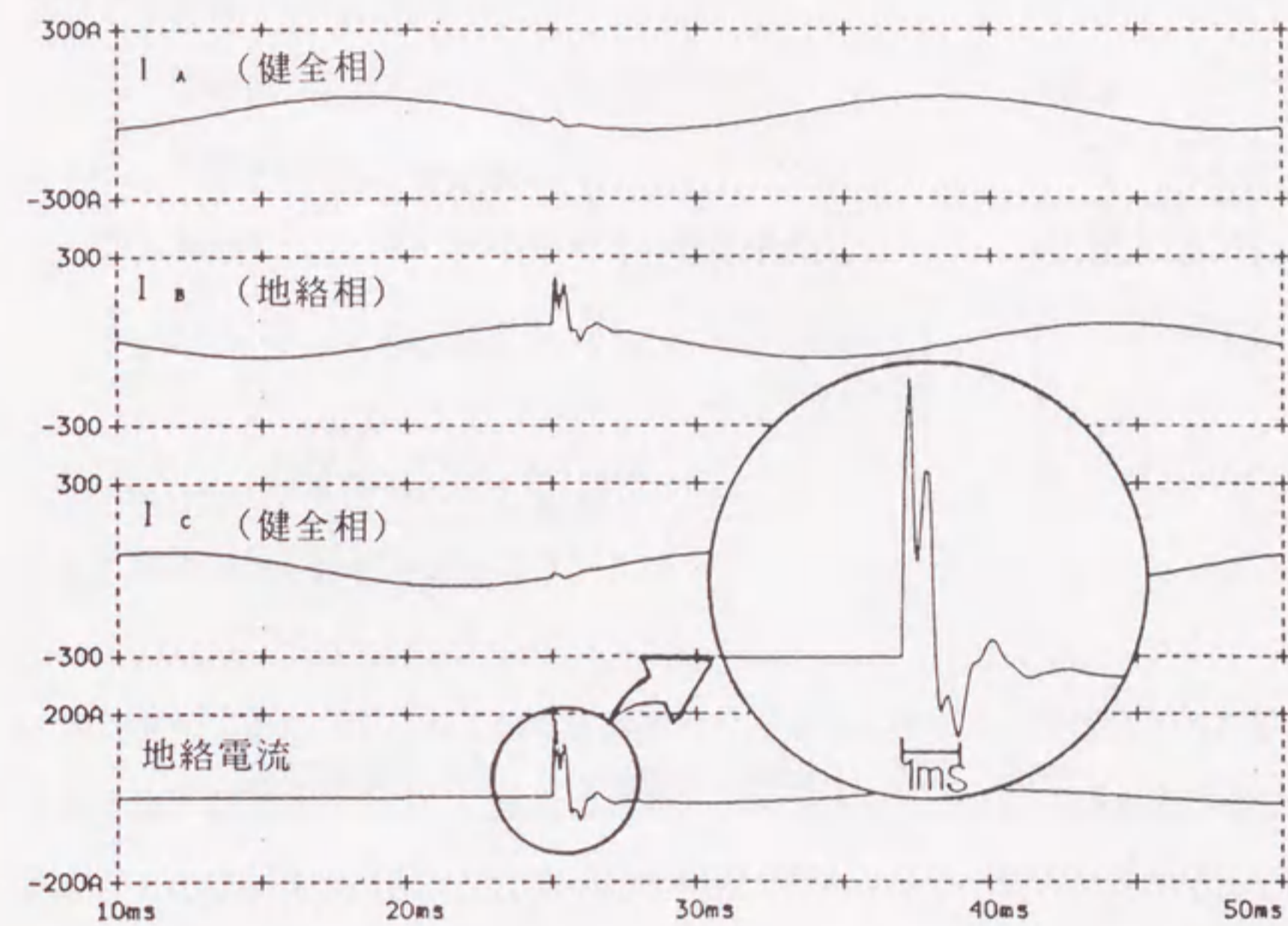
第6-15図 人工地絡試験結果 (地絡抵抗 250Ω)



第6-16図 人工地絡試験結果（地絡抵抗 500Ω）



第6-17図 人工地絡試験結果（金属棒による地絡）



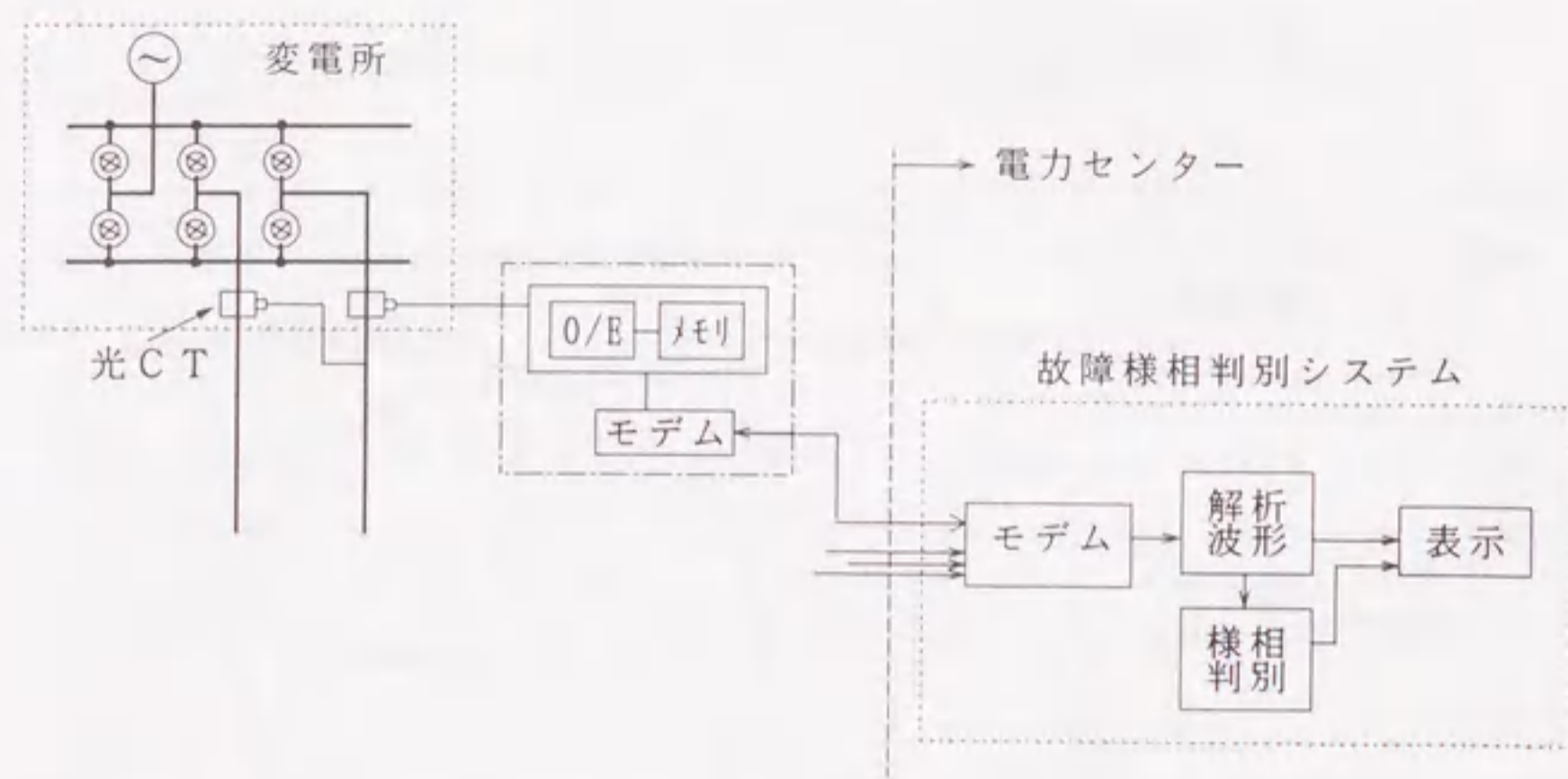
第6-18図 シミュレーション結果（地絡抵抗 10Ω）

6.5 原因判別の自動化の可能性

故障時の電流波形と故障原因の基礎検討結果、並びに人工模擬試験の結果から、故障電流波形の特徴と故障原因の間にはある程度の関連が見いだされた。従って、電流波形の特徴を何らかの形で数値化、パターン化できれば、故障原因判別の自動化が可能であると考えられる。そこで、抵抗接地系統の故障電流波形を用いて故障原因判別を行うコンピュータシステムの基礎検討を行った。

6.5.1 故障様相判別システムの基本構成の検討

故障様相判別システムの基本構成の検討結果を第6-19図に示す。前項までの検



第6-19図 故障様相判別システムの基本構想図

討および人工試験結果から分かるように、故障電流波形は多くの高周波成分が含まれており、故障原因との相関関係がみられる。このため、故障電流波形は高周波成分まで計測する必要があり、変電所の送電端に設置されている電磁型CTによる計測では高周波特性が不十分であると考えた。そこで、この計測手段として本研究で確立した光CT技術を用いることが望ましいと考えた。光CTを送電線の電源側に当る変電所の送電線引出し部にそれぞれ設置し、故障電流を検出するものとした。故障電流波形は、3相の光CTで検出したものを零相電流として合成し一旦記録した後、親局側に電話を用いて伝送して集約解析するものである。

6.5.2 故障原因判別方法

故障電流波形の特徴を周波数スペクトルに置き換え重判別分析法^[6]とニューラルネットワーク手法^[7]を用いて故障原因判別の可能性を検討した。判別手順

は以下の通りとした。

- ① 電流波形の最大振幅での波形の正規化
- ② 周波数解析
- ③ 周波数パワースペクトル密度の特徴抽出
- ④ 判別分析

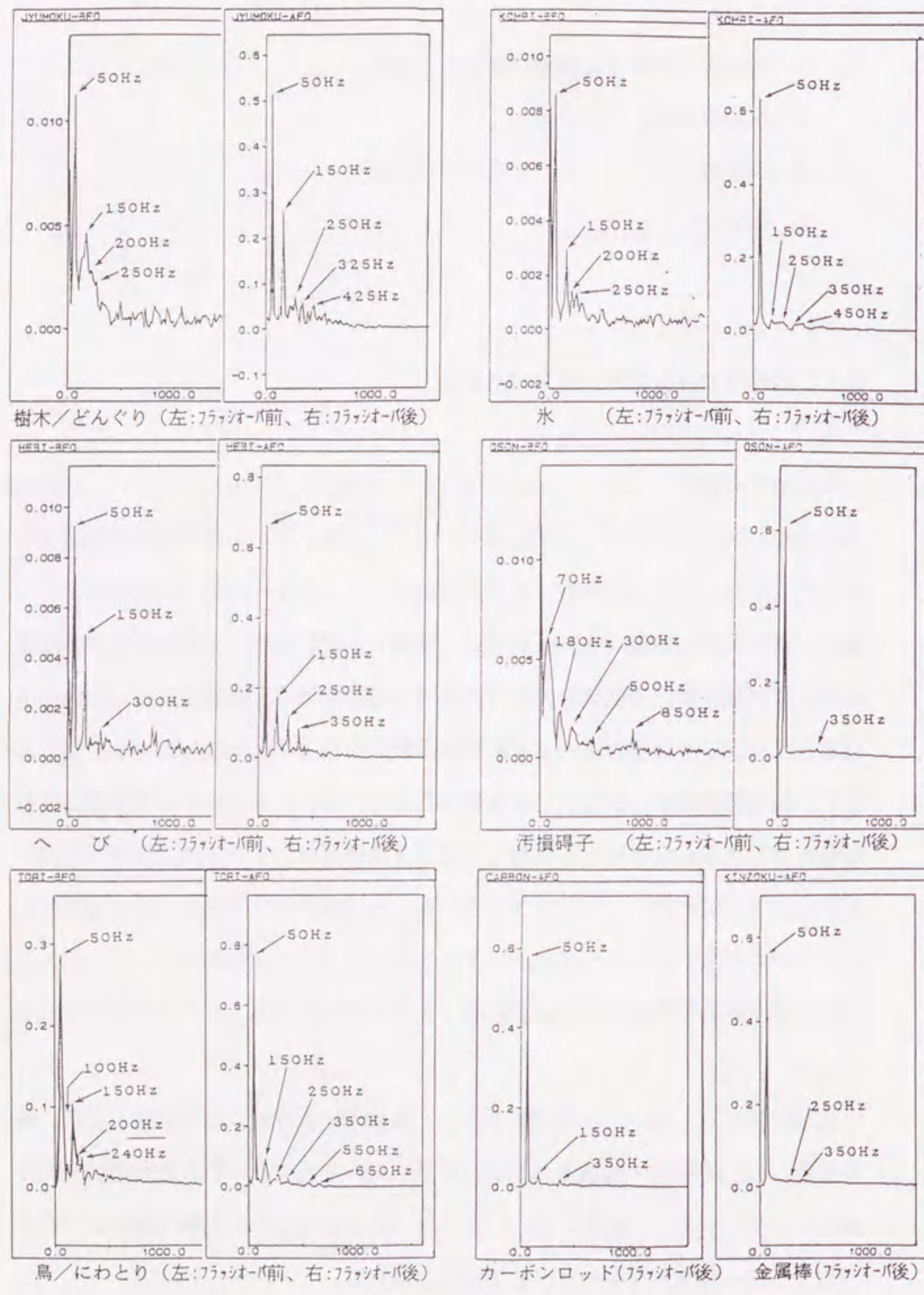
6.5.3 故障電流波形の周波数スペクトル

判別分析に先立って、人工地絡試験波形の周波数スペクトル分析を行った結果の例を第6-20図に示す。この図は最終的フラッシュオーバの前後の波形を周波数解析したもので、各供試料別に並べた左側がフラッシュオーバ前（前駆期間）、右側がフラッシュオーバ後（フラッシュオーバ期間）の解析結果を示している。これによると、初期抵抗値の低い金属棒は接触後即時にフラッシュオーバに至り続流が流れるため、基本波成分がほとんどであり、他の試料と相違が明確に区分できる。また、沿面閃絡現象を模擬した氷や汚損などは、フラッシュオーバ後は高周波成分がほとんど見られないことも特徴として上げられる。

6.5.4 重判別分析手法による判別結果

送電線保守の立場から故障原因を第6-2表に示すように、樹木接触、鳥獣、碍子沿面、人工的飛来・接地物の4群に分類した。それぞれの群の故障電流波形の最終的フラッシュオーバ前後3波のパワースペクトルを求め、50~700Hzの間の高調波（1次~14次）をデータとして抽出し28変数とした。

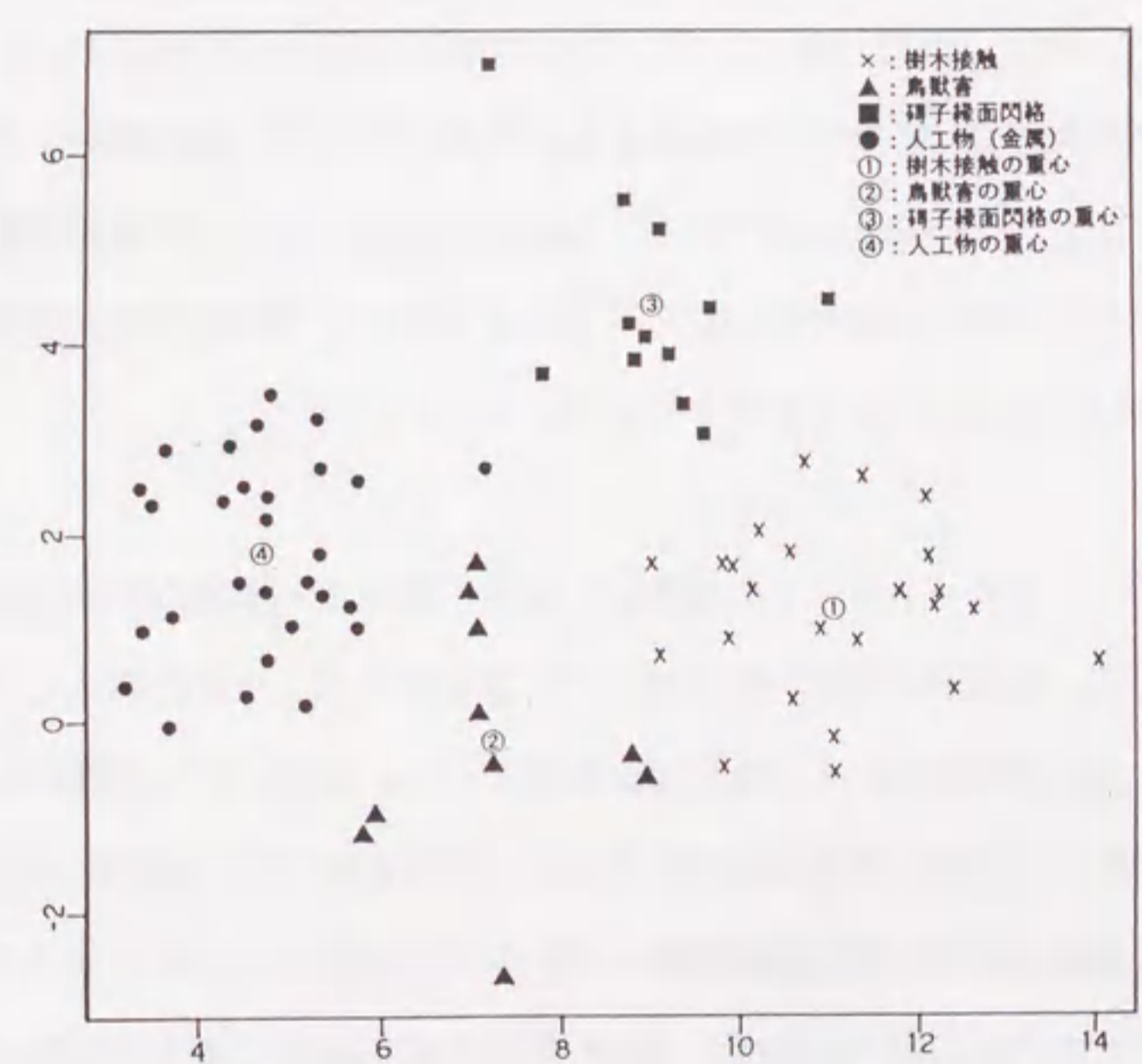
全28変数による判別分析によって得た固有値の大きい2つの軸平面における各



第6-20図 スペクトル解析結果

サンプルと各群の重心の位置関係を第6-21図に示す。これによると、金属と樹木がよく分離しているが、鳥獣の群や碍子浴面の群は他の群との分離が悪い、すなわち判別が難しいことが明らかとなった。

28変数の内、特徴的な周波数として9変数を選び出し、それらの全データを用いて判別式を第6-5表に示すように作成した。この判別式の判別性能を評価するためには、理想的には、判別式の作成に使用したデータ以外のデータを母集団から得てテスト評価すべきであるが、今回の場合には追加データが容易に得られない状況にある。そこで、再度、使用した全データを用いて判別分析すると共に、Leave One Out 法によってデータを抽出し判別分析を行った。その結果、全データを使用した場合で、90.8%、Leave One Out 法の場合で82.9%であり、いずれも80%以上の判別正解率が得られた。



第6-21図 28変数による重判別分析結果

第6-5表 重判別分析の判別式

判別群	定数	変数				
		B 1	B 2	B 3	B 4	B 5
鳥獣	21.5293635	-0.2528043	-0.9416579	1.7643179	-0.9667305	-0.2608494
金属	6.8530396	-0.2301135	-0.4101591	0.9691309	-0.3707034	-0.1746721
軒樋	29.6399664	-0.4783749	-0.7894151	1.4312657	-0.3922019	0.2378340
樹木	61.6884499	-0.6070808	-1.3822254	2.7966013	-1.2033326	-0.2775922

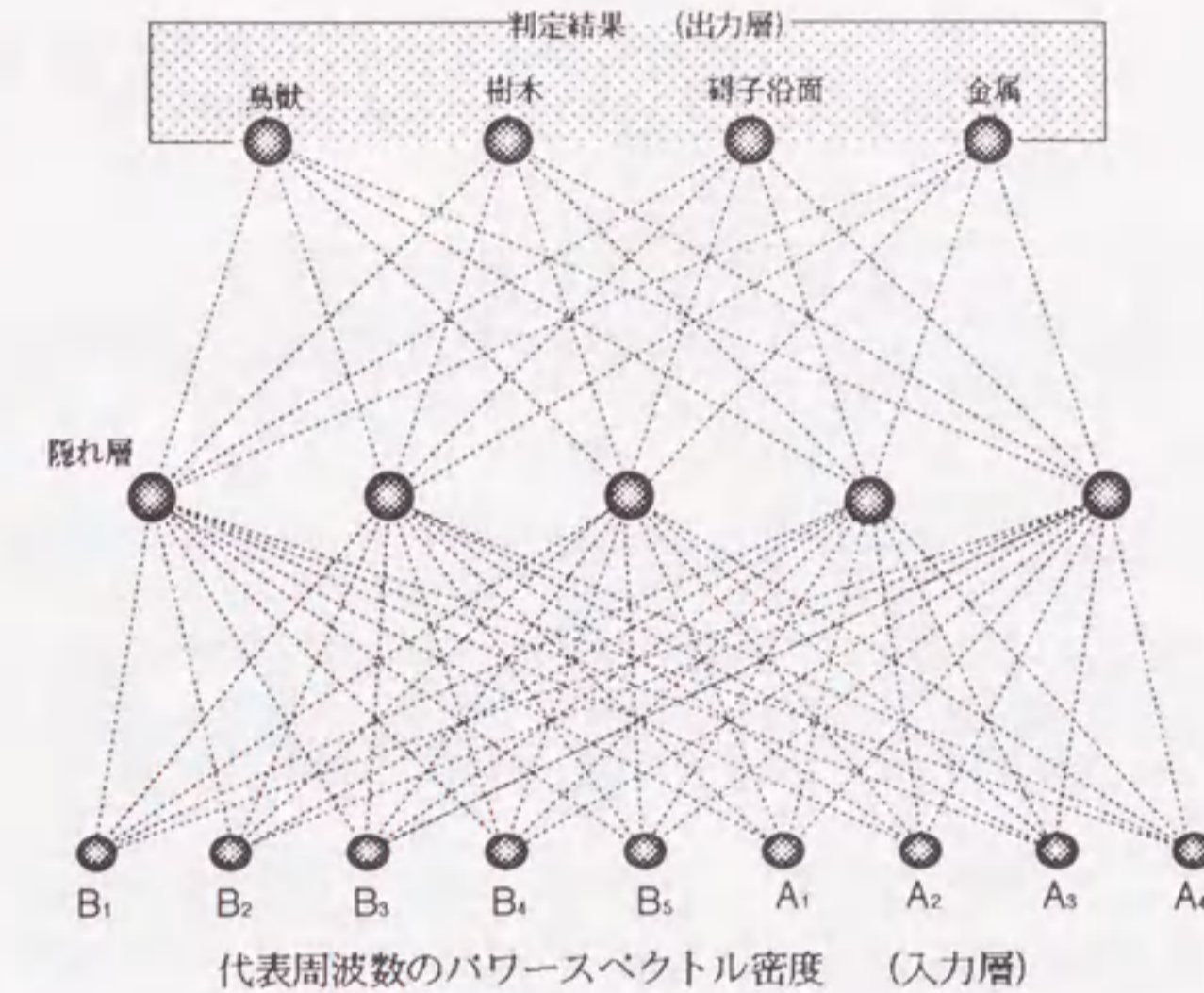
変数			
A 1	A 2	A 3	A 4
-0.7273116	-0.2923499	-1.6509595	-1.8269616
-0.3179379	-0.0892916	-1.0810161	-1.8253108
-1.1200635	-0.0516327	-1.7743726	-5.0013189
-1.2631350	-0.3128229	-2.9778350	-5.1570920

注1) B1~B5:フラッシュオーバー前3波分のパワースペクトル
A1~A4:フラッシュオーバー後3波分のパワースペクトル

6.5.5 ニューラルネットワーク手法による判別結果

今回の判別では、第6-22図のように入力層、隠れ層、出力層の3層構造によるバックプロパゲーションモデル^[7]を採用した。入力層は最終的フラッシュオーバー前後の1次~14次の高調波パワースペクトルの内、特徴的な周波数を変数とし、出力層は判別結果として分類した4群とした。

ニューラルネットワークの学習は、通常、訓練データ集合、テストデータ集合に分けて、両データを使い分けて行うべきであるが、今回の場合はデータ数が76件と少ないことから、テストデータを全データ:76件とし、訓練データを全データ(76件)、全データの2/3(51件)、全データの1/2(38件)として、ネットワークの確立と判別率の検証を行った。なお、ネットワークの入力データは、ネットワーク内部の伝達関数(Sigmoid関数)に対応し、各入力変数ごとに値の範囲が平均0、絶対値の最大1となるよう線形変換した。



第6-22図 ニューラルネットワークモデル

重判別分析手法の場合と同様の9変数を入力層として使用し、隠れ層のユニット数を5、6、7変数とした場合の判別結果を第6-6表に示す。これによると判別率は、77.63%~98.68%の範囲にあり、比較的高い判別率を示すことが分かった。また、隠れ層のユニット数をここでは、5、6、7と変化させたが、判別率に影響しないことを確かめた。

6.5.6 自動化の可能性評価

重判別分析手法とニューラルネットワーク手法を用いた判別結果では、フラッシュオーバー前後で電流波形に特徴が見い出され、良好な判別結果が得られることが明らかになった。これらの22kV線路の結果を送電線設備の巨長が長く地絡故障の実績の多い77kV抵抗接地系に置き換えてみると、電圧が3.5倍になっているため、第(6-1)式の考え方から鳥獣のような比較的低い抵抗体は、1サイクル以下でフ

第6-6表 ニューラルネットワークによる判別結果例

隠れ層 ユニット数	訓練データ数別判別結果					
	全データ	A(2/3)	B(2/3)	C(2/3)	D(1/2)	E(1/2)
5	90.79	94.79	89.47	86.84	84.21	78.95
	7	4	8	10	12	16
	21600	14600	14000	14600	12960	12960
6	93.42	88.16	85.53	84.21	77.63	84.21
	5	9	11	12	17	12
	21600	14600	14000	14600	12960	12960
7	98.68	90.79	94.74	85.53	84.21	81.58
	1	7	4	11	12	14
	21600	14600	14000	14000	10800	12960

注1)入力層：9変数，出力層：4群
 隠れ層：ユニット数を5,6,7としてネットワークを設定した。
 注2)訓練データ：全データ，全データの中の2/3および全データの
 中の2/1を訓練データとして選択した。
 テストデータ：全ケース共に全データを使用した。
 注3)表中の枠内の見方

90.79	←判別正解率(%)
7	←誤判別データ数
21600	←訓練回数

ラッシュオーバーに至ることが予測できる。また、樹木では数10A程度の電流の継続時間が22kVに比べ1/3になるものと予測できる。従って、77kV抵抗接地系においては地絡物の抵抗値の差が大きく表われ、4種類（樹木、鳥獣、汚損、金属棒）の分類は、可能であると考えられる。

次に、重判別分析手法とニューラルネットワーク手法による判別結果を比較してみる。今回の判別結果からすると、データを統計的に取り扱って処理した重判別分析手法の方が良好な判別結果が得られた。ニューラルネットワークによる判別は、学習させることができるので、新しいデータを取り入れて判別学習を行い改善できる点で、重判別分析のように固定した判別式を用いる方式に比べ、最終的に正解率の高いシステムができる可能性がある。今回は、データ量が不足しており、十分な判別正解率を得ることができなかったが、今後、データ量が増せれば、

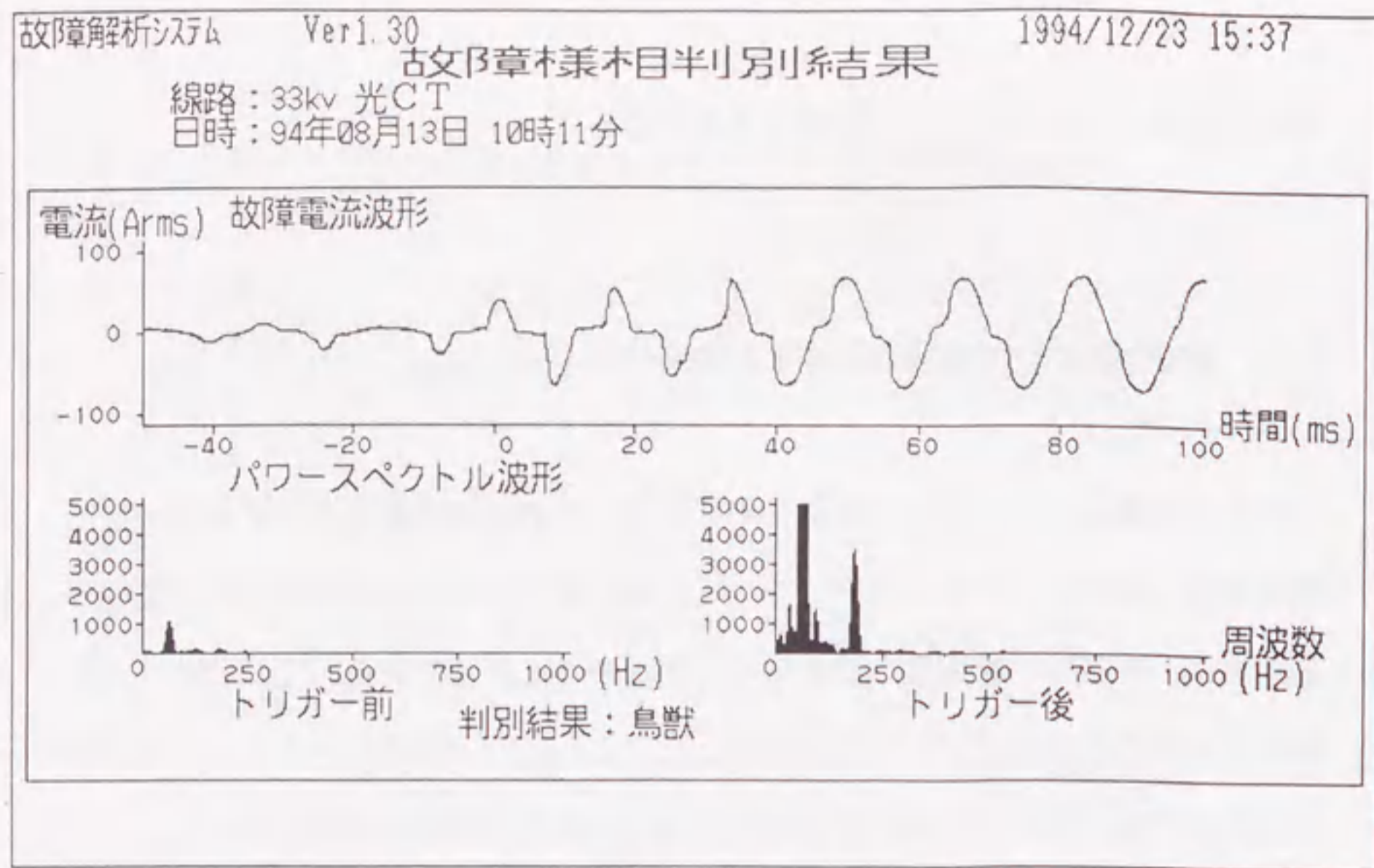
ば、正解率を向上させることができると考える。

6.6 実線路における故障電流波形と判別性能

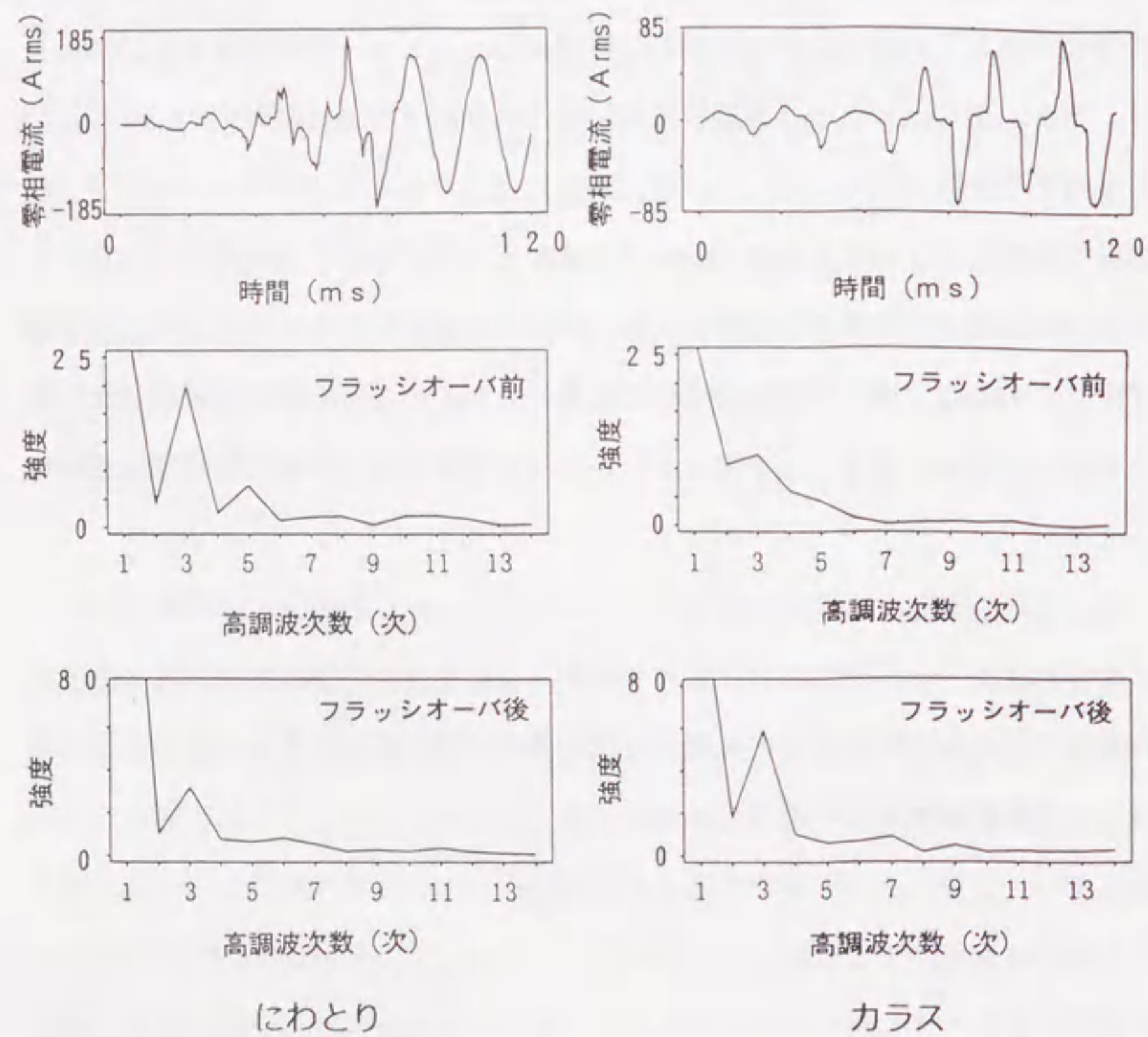
いままで進めてきた判別の自動化の検討は、自然の地絡物を用いて人工地絡試験を実施した波形データに基づいている。自然状態の実線路の地絡と人工地絡の相違点は、地絡物の課電部への接触の形態であると想定できる。このため、人工試験では極力自然な接触の仕方を模擬した。これら人工試験データに基づく判別の自動化手法の性能を評価する目的で33kVの実線路における検証を行った。

検証期間中、カラスによる地絡故障が3回あった。その際の光CTで捕えた故障電流波形とその波形に基づく判別分析結果のコンピュータ画面を第6-23図に示す。第6-24図には、カラスの地絡電流波形と先述の人工地絡試験時のにわたりの地絡波形を比較のために示した。更に同図には、それぞれのパワースペクトルを示した。これによると、両者の波形は非常によく似ており、接触直後から数サイクルに亘って数10Aの故障電流が次第に増加し、最終的フラッシュオーバーに至る様子がよく分かる。また、周波数分析の結果によればフラッシュオーバー前の第3、第5高調波で相違があるが、フラッシュオーバー後は非常に似ていることが明らかとなった。

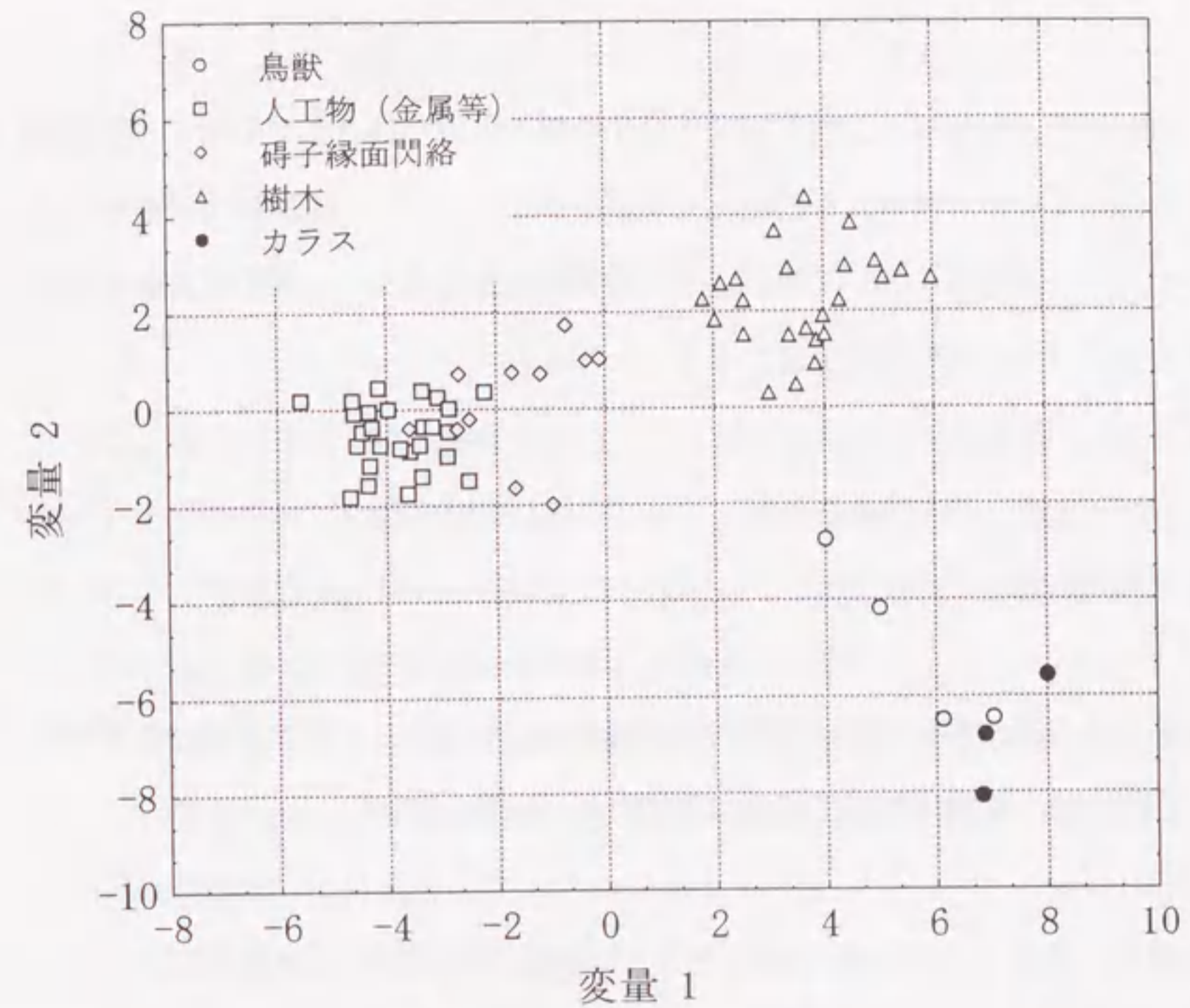
今回のフィールドで得られたカラスのデータといままで得られている人工試験の結果を加え判別分析をした結果の一例を第6-25図に示す。これによると、カラスは、鳥獣群に属していることが分る。



第6-23図 カラスによる地絡故障の判定結果



第6-24図 人工地絡電流波形(にわとり)と実故障電流波形(カラス)



第6-25図 重判別分析結果

6.7 まとめ

送電線路の保守業務の合理化、効率化を目的に、光CTとコンピュータ応用技術を組合せ、送電線路の故障原因を推定するシステムに関する基礎検討を行った。

送電線路を模擬した実際の地絡物による人工試験で電流、電圧の波形データを収集し、その生波形データを用いた判別分析を行った例はなく、今回、始めて地絡原因の種類とその電流波形の特徴を明らかにすることができた。最終的なフラッシュオーバー直前の電流波形は、地絡物の種類に大きく依存することが明確となり、周波数スペクトルに特徴を見いだすことができた。この波形データに基づき、重判別分析とニューラルネットワーク分析による判別分析を行った結果、80%以上の高い正解率で故障原因の判別できる技術を確立した。

(磁気鉄心+光磁界センサ)方式光CTを電流計測手段として応用し、故障様相を判別するアルゴリズムを組み込んだ装置を構成し、33kVの実線路での性能を明らかにした。実線路においてカラスによる地絡故障を検出し、光CTの性能およびアルゴリズムの有効性を実証することができた。

6.8 参考文献

- [1] 電気学会電力系統の事故時復旧操作調査専門委員会, “電力系統の事故時復旧操作”, 電気学会技術報告(Ⅱ部)第354号, 1990.
- [2] 植田, 森田, 山極, 菅, 緒川, “77kV変電所侵入雷サージの測定”, 電学論B, 114巻1号, 1994.
- [3] T. Fujimura, K. Naito, Y. Hasegawa, T. Kawaguchi, “Performance of Insulators Covered with Snow or Ice”, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No. 5, 1979.
- [4] 雪平, “配電線の間欠弧光地絡時における電流波形形状の解明と故障点探査への適用”, 電力中央研究所報告 185016, 1985.
- [5] 岡村, “SPICEによるシミュレータ新活用法”, CQ出版社.
- [6] 脇本, 後藤, 松原, “多変量グラフ解析法”, 朝倉書庫.
- [7] 麻生英樹, “ニューラルネットワーク情報処理”, 産業図書(株)

第7章 総括

7.1 まえがき

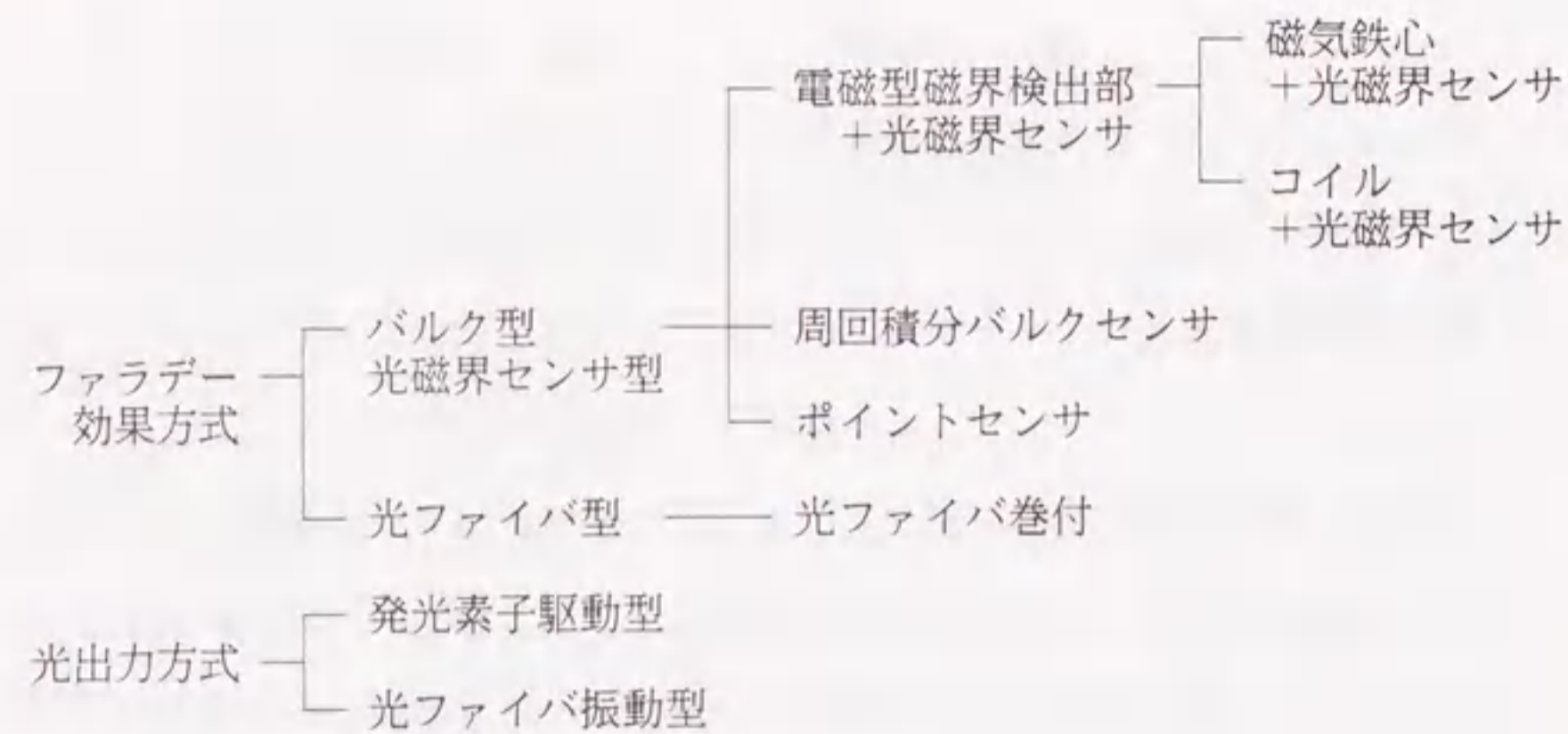
現在、電力設備の電流計測用として、広く適用されている変流器(CT)は、鉄心に巻線を巻付けた電磁型変成機器である。電力設備の計測・制御技術のデジタル化などの高度化に伴い、電磁型CTにおいて以下の幾つかの問題点が顕在化しつつあり、新しい電流計測技術の導入が期待されている。

- 電流計測データを用いる保護継電装置、電力需給メーターなどへのデジタル信号処理回路の適用による信号の小信号化(電圧信号)と電磁型CTの電流信号との不整合
- 系統容量増大に伴う短絡電流増大による鉄心の飽和
- 計測制御信号系の光情報ネットワーク化の要請
- 内部絶縁破壊の発生しにくい高絶縁性を有するCTの開発要請

こうしたニーズに対応し、光による電流計測技術に関する研究が進められている。光による電流計測技術は、次の2つの研究要素がある。

- 導体電流を光変調信号に変換する光CTヘッド技術の確立
- 課電側の光信号を接地側へ電気絶縁を維持しつつ伝送する技術の確立

光CTヘッドの電流検出方法は第7-1図に示すように、導体電流の周囲に発生する磁界をファラデー効果を用いて光信号に変える方式(ファラデー効果方式)と導体電流を電磁変換し、発光素子を駆動させたり、光ファイバに振動を与えるなどの方式(光出力方式)とに分類できる。これらの方式の幾つかは試験適用した例はあるが、電力設備として広く適用される段階には至っていなかった。



第7-1図 光CTの分類

光信号絶縁伝送方式には、気中絶縁を対象としたものとガス絶縁内部機器を対象としたものの2種類の適用形態がある。また、信号伝送の媒体で分類すると、気中空間を伝送する方式と光ファイバを用いる方式がある。いずれの方式でも、性能の安定性、信頼性、装置構成の複雑性などの要因のため実用レベルで簡便に適用できる技術は確立できているとは言い難い状況にあった。

本研究では、電力設備への適用を前提に、安定した性能が得られ低コスト化が図れる可能性の高い（電磁型磁界検出部+光磁界センサ）方式の光CT技術を確立するために、具体化のための基礎研究並びに実規模装置による検証を行った。また、電力設備として長期間に亘って使用できるよう光CTを設計し、長期的な性能の安定性を加速試験によって評価した。これらの研究の結果、66kV~275kVまでの電圧階級に適用でき、50Aから50kAまで計測できる光CTの実用化技術を確立した。これらの光CTの応用として、気中絶縁変電所の母線の故障点を標定するシステム、および送電線の故障原因を判定するシステムに関する技術を確立した。また、光CTを0.3級まで高精度化を図り、電力需給用メーターへの適用の可能性を明らかにした。以下に、研究成果の要旨を各章別にまとめた。

7.2 66kV級気中絶縁光CT技術の確立

第2章においては、磁気鉄心と光磁界センサを組合せた方式の光CTをとり上げ、気中絶縁変電所に簡便に設置ができ簡単な構成の電流計測装置とすべく、次の点に重点を置いて研究を行った。

- 光ファイバを内蔵し、従来の磁器碍子と同等の性能とハンドリングが可能な光ファイバ内蔵碍子を考案し、実現のための技術検討ならびに実規模装置による実証を行った。
- （磁気鉄心+光磁界センサ）方式光CTヘッド、光ファイバ内蔵碍子および光検出器を組合せて光CTを構成し、実用性能を実験的に明らかにした。
- 断路器の支持碍子部分に光CTヘッド+光ファイバ内蔵碍子を組み込む構造を考案し、諸特性を評価した。
- 電力設備としての実績のほとんどない光磁界センサなどの光学部品の長期的な性能維持の可能性を見極めた。

(1) 直径数mmの内孔を有する磁器製支持碍子に光ファイバ（SI80 μ m/125 μ m）を挿入し、シリコーンゴムによって封着した光ファイバ内蔵碍子を考案し、従来の磁器碍子と同等の機械特性、電気特性を有することを実験的に確かめた。新たに付加した光伝送性能については、-20~80 $^{\circ}$ Cの温度変化を与えても急激な光伝送損失変化はないことを明らかにした。

(2) ギャップ付の磁気鉄心にBSO素子を用いた光磁界センサを組付けた光CTを製作し、諸特性を実験的に確かめた。その結果、電流250-4000Aの範囲で比誤差 $\pm 1\%$ で、-20~80 $^{\circ}$ Cの範囲の温度変動は、25 $^{\circ}$ Cを基準として+0.5~-1.3%であった。この温度特性の原因は、BSO素子のヴェルデ定数と自然旋光性の温度依存性によることを計算によって解明した。

(3) 水平1点切および水平2点切の気中断路器の支持碍子に光CTを内蔵した断路器を構成し、断路器としての開閉性能と、光CTとしての計測性能を実規模レベルで評価した。断路器の開閉時の振動が加わった状態であっても、光CTの計測性能にはほとんど影響がないことを確かめた。

(4) 光磁界センサ、光ファイバ内蔵碍子について、長期間に亘る性能維持の可能性を見極めるため、温度、電圧、振動などのストレスを模擬した各種加速試験を実施し、全く異常のないことを明らかにした。

7.3 気中絶縁光CTの高電圧化と大電流化

第3章においては、気中絶縁光CTの高電圧化と大電流化のための基礎研究結果とその結果に基づいて製作した光CTの実規模検証結果について取りまとめた。275kVクラスの直接接地系統の変電所に光CTを適用することを考えた場合には、66kVクラス抵抗接地系統の変電所に比べ、次の点が異なる。

- 故障電流が最大50kAと大きい。
- 対地絶縁電圧が $275\text{kV} / \sqrt{3}$ と高い。
- 気中母線が複導体である場合が多い。

これらの点を考慮し、バルク型光磁界センサを用いた光CTの具体化のための基礎研究および実規模装置による実験的検証を行った。

(1) 導体の周囲に配置した鉄心付コイルとそのコイルに円筒型ソレノイドコイルを接続することで、ソレノイドコイル内部に一次導体電流に比例した磁界を発生させ、それを光磁界センサで検出する方式の光CTを新たに考案し、具体的な基礎研究を行った。50Aから大電流の50kAまで飽和のないようなダイナミックレンジの検討に当り、磁界発生コイル、センサの特性要因を明確にした。基礎研究成

果に基づき、光CTを製作し、性能を実験的に検証した。その比誤差は、400A～8kAの範囲で±1%以内で45.4kAで-6.6%となり、基礎検討の際のシミュレーション結果とよく一致した。

(2) 275kVクラスの光ファイバ内蔵碍子は、短尺の内孔付磁器碍子をあらかじめ連結した上で、光ファイバを挿入しシリコンゴムで封着することで構成した。66kVから275kVへの高電圧化に際して、シリコンゴム材料およびそれにボイドが内在する場合の絶縁特性を明らかにした。ボイド内在する最悪状態のシリコンゴムの部分放電電圧から求められる電界値は、電界解析によって求めた0.205kV/mmの実使用時の印加電界に対して10倍以上であることを確認した。さらに、実体レベルの碍子を用いて電気絶縁特性に関し実証した結果、従来の磁器碍子と同等の性能を有することを確かめた。また、光伝送損失の温度特性は、66kVクラスの1m程度の長さの碍子から275kVクラスの2.8mのものまでほとんど変化のないことを明らかにした。

7.4 光CTの高精度化

第4章においては、0.3級の高精度な光CTを実用化するための基礎技術検討の結果とその実証試験結果を取りまとめた。(磁気鉄心+光磁界センサ)方式の光CTは、BSO素子のヴェルデ定数と自然旋光能の温度特性によって光磁界センサとして±3%程度の温度特性をもつため、このままでは0.3%クラスの高精度な光CTとして応用できない。しかしながら、構造が簡単で、性能の安定化が見込めることから、この方式の光CTの高精度化に関し基礎研究を行った。この結果、右旋光性素子と左旋光性素子の温度特性の温度に対する勾配が逆であることを利用した光磁界センサを構成し、高精度化が図れることを実験的に明らかにした。

(1) BSO素子の右旋光性素子と左旋光性素子を光軸に対して、上下または、左右に配置することで、光磁界センサの温度特性をキャンセルできることを計算によって解析し、最適な素子配列を明らかにした。また、計算結果の妥当性を実験的に検証した。また、BSO素子のヴェルデ定数の波長依存性についても実験的に確かめ、波長1nm当り-0.34~-0.4%出力変動することを明らかにした。LEDの発光波長の温度依存性から、LEDの温度コントロール範囲を1.2°C以下とすべきことを明らかにした。

(2) 高精度化のための基礎研究結果に基づき、161kVの光CTを製作し、実験的検証を行った結果、以下の特性が実現でき、JEC 1736 (1988)の0.3級の要求特性を満足していることを実証した。なお、光CTの比誤差、位相角を高精度に計測する方法も実験的に確めた。

比誤差：-0.05~+0.09%

位相角：-1.4~+1分

7.5 光CTの気中絶縁変電所母線故障点標定への適用検証

第5章においては、光磁界センサを用いた光CTの応用として母線の故障点標定を取り上げ、光CTと保護継電装置ならびに電磁型CTとの適合技術の検討とその検証結果を取りまとめた。気中絶縁変電所では、万一の故障時には保護装置が故障電流を検出することで遮断器を動作させ母線全体または、二重母線の内の片母線が停止する。このため、故障点を含んだ広範囲の母線およびそれに接続された送電回路やバンクが停止してしまい、大規模な供給支障をきたす可能性がある。そこで、供給支障を極限化するため、光CTによって故障区間を特定する技術を確立した。

(1) 66kVクラスの単母線の配電用変電所を対象とし、6台の(磁気鉄心+光磁界センサ)方式の光CTと過電流を検出する装置を組み合わせる技術に関し実験的検証を行った。このシステムは、地絡電流30~300A、短絡電流3000A以上で設定した電流値を検出することで、区間内の故障の有無を判定するものとした。実際の変電所においても、実規模装置は光CTによって電流を検出し、正常に動作することを実証した。

(2) 275kVクラスの二重母線の超高圧変電所を対象とし、電磁型CTと(コイル+光磁界センサ)方式の光CTとで計測した電流信号を用い電流差動方式によって故障の有無を判定する技術を確立した。方式の異なる2種類の電流計測手段を組合せて使用することから、故障電流の過渡波形に対する計測特性の整合化が重要な研究要素であった。光CTの過渡特性の発生原因を解析した結果、コイルの時定数と光検出器のフィルタ特性によって電磁型CTと異なる過渡特性となることを明らかにした。そこで、電流差動による判別を行う時点で、光CTと電磁型CTの特性を適合させるよう、電磁型CTの出力電流を電圧に変換する入力変換回路を考案した。このような基礎的検討結果に基づき実規模レベルのシステムを構成し、40kAまでの人工故障試験を実施し、その性能を検証した。

7.6 光CTを用いた故障様相判別技術の確立

第6章においては、送電線路の保守業務の合理化、効率化を目的に、(磁気鉄心+光磁界センサ)方式の光CTとコンピューター応用技術を組合せ、架空送電線路で発生した故障の原因を推定する技術に関する基礎研究を行った。

(1) 樹木、鳥、金属棒、碍子浴面などを用いた人工地絡試験の結果、線路定数で

決まる地絡電流が流れる最終的フラッシュオーバの前の数サイクルの前駆電流は、各地絡原因によって異なり、この特徴を周波数分析によって分類し原因判別ができる可能性があることを見出した。

(2) 抵抗接地系統の人工試験の電流波形の周波数分析結果から重判別分析法およびニューラルネット法によって判別アルゴリズムを構築した。判別アルゴリズムを用い模擬データによる判別分析を行った結果、80%以上の判別性能であることが明らかとなった。

(3) 実線路においてカラスによる地絡故障電流を光CTによって計測し、そのデータに基づき判別アルゴリズムの妥当性を明らかにすると共に光CTの有効性も明確にした。

7.7 まとめ

本研究は、電力設備への適用を前提に（電磁型磁界検出部+光磁界センサ）方式の光CTの実用化のための基礎研究ならびに実規模装置による実験的な検証を行った。その結果、次の3種類の光CTに関する実用化技術を確立した。

- ① 水平1点切、2点切断器へ組込み可能な66kV用光CT
- ② 故障電流として50kAまで計測可能な275kV用光CT
- ③ 0.3級の高精度光CT

これらの光CTの内、①、②については気中絶縁変電所を対象として母線の故障点標定システムの故障電流計測装置として応用し、多くの実設備で実用に供している。また、送電線を対象とした故障様相判別システムは実線路で試験的にそのシステムの性能を評価している。③の高精度光CTは、電力の売買が盛んな米

国等においてそのニーズが高く、試験適用段階にある。このように、本研究で確立した光CT技術は、電力システムの発展・高度化に大きく寄与するものと確信している。

以上

謝 辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成に当って終始懇切な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 大久保仁先生に厚く感謝致します。本論文の作成に当って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 松村年郎先生および同助教授 清水教之先生に厚く感謝致します。また、研究の過程で有益な御教示と御激励を賜った前国立豊田工業高等専門学校長 堀井憲爾先生、防衛大学校教授 室岡義広先生、豊橋技術科学大学教授 小崎正光先生および同助教授 長尾雅行先生に厚く感謝致します。さらに、本研究の遂行に当り、共同研究の過程で有意義な御意見、御指導を賜った東京電力株式会社、中部電力株式会社および北陸電力株式会社の関係諸氏に厚く感謝致します。

本研究は、主として日本碍子株式会社電力事業本部の設備を使用して行われた。論文の作成を許可され、懇切な御指導と励ましを頂いた前電力事業本部技術部長取締役 森田健児氏、電力事業本部副本部長取締役 磯崎孝氏、前機器装置技術部長 古田正氏および前機器計装技術課長 篠田克郎氏に厚く感謝致します。また、その他関係する多くの上司、先輩各位に心より御礼申し上げます。

最後に、本研究の遂行に御協力頂いた電力事業本部機器装置技術部の職場の多くの関係の方々に感謝致します。

本研究に関して発表した論文

章	論文題目	記載雑誌	共著者
2	Development of Optical Current Transformers and Application to Fault Location Systems for Substations	IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No.3, PP. 866-873 1993.	Y. Yamagata T. Oshi S. Kato Y. Sakurai
3	Development of a New Type of Optical Transducer for Measuring Fault Current	IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No.3, PP. 1245-1251 1994.	Y. Hasegawa Y. Ichikawa N. Tanaka Y. Sakurai
4	Development of an Optical Current Transducer with a Bulk Type Faraday Sensor for Metering	IEEE/PES 1995 Summer Meeting, 95 SM 442-4 PWRD	H. Ishikawa H. Okajima T. W. Cease
	バルクファラディセンサを用いた高精度碍子型光CTの特性検証	電気学会論文誌 (H8/1月号掲載決定)	石川 等 岡島 久和
5	光磁界センサの気中絶縁母線故障点標定への適用検証	平成7年電気学会・エネルギー部門大会 (電気学会論文誌に) 投稿中	水野 和宏 桜井 靖久 田中 直樹
	Development of a Substations Fault Location Systems Using Optical Current Transducers	1993 CIGRE Symposium Berlin, No.110-01	E. Takahashi K. Nakahito S. Kato
	Application of Magneto-optical Sensor for Fault Location of Air Insulated Bus in Substations	1995 Optical Sensors for Utility, T&D Applications Workshop	S. Yokoi K. Mizuno
6	光CTを用いた送電線故障様相判別に関する基礎検討	電気学会論文誌B 114巻, 9号, pp. 915-921(平成6年)	荒金 昌克 横谷 宗久 鹿野 保 徳山 幸司

