

# 光温度分布レーダを用いた閉鎖配電盤温度監視システムの開発

高橋正彦 楮本 豊 三好 哲

東京都水道局経営計画部技術開発室  
東京都新宿区西新宿2丁目8番1号

## 要旨

上水道施設は、日常的な巡視点検作業等により施設の安定維持を図っているが、人間の感覚に多くを依存した点検方法のみでは施設保全に限界がある。そのため、従来の巡視点検作業を補完し、設備異常の早期発見が可能な設備診断システムの開発が求められている。東京都水道局（以下 当局という）では異常の兆候として盤内の発熱に着目し、閉鎖配電盤内の温度変化を継続的に監視する閉鎖配電盤温度監視システム（以下 本システム）の技術開発を進めてきた。

本システムは、温度センサとして光ファイバセンサを採用し、光温度分布レーダとして動作させることにより一本のセンサによる多点の温度計測を可能とした。また、温度分布パターンの変化から異常判定を行うアルゴリズムにウォルシュ変換を適用した解析手法を開発し判定精度の向上を図った。

本稿は、本システムの概要について適用範囲および実装方法の検討をするとともに、当局ポンプ所におけるフィールド試験の評価について報告する。

## キーワード

光温度分布レーダ、ウォルシュ変換、設備診断システム

### 1. はじめに

上水道施設は、社会的な基盤としてその重要性は大きい。設備に一旦問題が生じると、施設の一部または全部の機能が停止し、多大な影響が出るのが予想される。施設の安定維持のためには日常の巡視点検が不可欠であり、これにより設備異常の兆候を早期に発見し、交換・精密点検・オーバーホール等適切な処置を行い、良好な施設維持に努める必要がある。しかしながら、一般に施設は広大な敷地に点在し、機種が多様さ、点検等における設備停止時間の制約、専門的知識を持つ技術者の不足等により多大な労力と時間を要しているのが現状であり、保全業務全般の改善が望まれている。

このような状況を踏まえ、当局では設備状態情報を収集し、異常兆候を早期に発見する総合的な保全システムの実現可能性について検討を行ってきた。その一例として、閉鎖配電盤内の温度を監視し温度異常を検出する**通電異常監視機能**、および放電破壊音を監視し絶縁劣化を検出する**絶縁異常監視機能**を有する「閉鎖配電盤内状態監視システム」の開発が挙げられる。本稿では、このうち通電異常監視機能に関する開発内容について「閉鎖配電盤温度監視システム」として報告する。

### 2. 監視システムの概要

#### 2. 1 監視対象設備

本システムは、温度計測に高精度の電子機器を使用していることから、対象を原則として屋内の閉鎖配電盤とした。想定される監視対象設備としては、受電盤、変圧器盤、ポンプ盤等が挙げられる。当局ポンプ場で行ったフィールドテストでは、受電盤、変圧器盤、ポンプ盤を監視対象とした。

#### 2. 2 検出対象機器の劣化要因

設備機器の劣化は、電気的要因、化学的要因、機械的要因、熱的要因等に分類されるが、本システムでは、このうち熱的要因による異常過熱を常時監視の対象とした。

図1は典型的な異常過熱の進展フローで各部位の不良が最終的に発熱に至る過程を表わしている。

配電盤内に収納されるスイッチギヤや共通母線等の通電部分は、材質不良による接触面への分解生成物の付着、破損・折損、取付不良等による接触不良が原因で部分的な電気抵抗が増大し、通電機能が低下することがある。これらの部位に電流が流れると異常発熱が起これ機器故障の原因となる。本システムは、異常兆候としての発熱に注目し、盤内の温度を常時監視することにより、その温度変化から通電異常の判定が可能であるとの観点から開発を行ってきた。

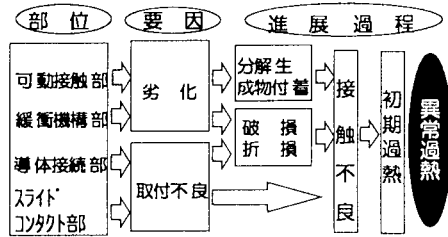


図1 異常過熱の進展フロー

2. 3 最適センサーの検討

異常発熱を検出するためには、配電盤内部の監視対象部位の近傍に温度センサを配置すれば容易に温度監視を行うことができる。しかし、配電盤内部は充電部が多く個々の部位ごとに温度センサを配置することは、経済性、安全性、メンテナンス性の観点から現実的でない。本システムでは、配電盤の内部で発生した熱が配電盤内の空気の流れや発熱点の支持物を通して配電盤表面から周囲雰囲気中に放熱されていることに着目し、配電盤の上部外面と配電盤前面扉内側に複数の温度測定点を設け、配電盤内部の発熱を盤外面の温度パターンを監視することにより通電異常を判定することとした。本システムに最適なセンサとして、使用条件、実績等を総合的に検討し、光ファイバセンサを採用した。以下に光ファイバセンサの特長を示す。

- ①一本のセンサで多点の温度計測が可能（布設の方法により2次元・3次元の温度分布の計測も可能）
- ②光ファイバ自体が絶縁体で無誘導性であるため、電気的外来ノイズの影響を受けない
- ③可とう性があり、既存の盤等へ取付ける場合施工の自由度が大きい
- ④温度計測機能に加えて、断線等の障害点の検出機能（自己診断機能）を持たせることが容易である
- ⑤パンプデバイス(受動素子)であるため寿命が長い

2. 4 光温度分布レーダの測定原理

(1) 光温度分布レーダ

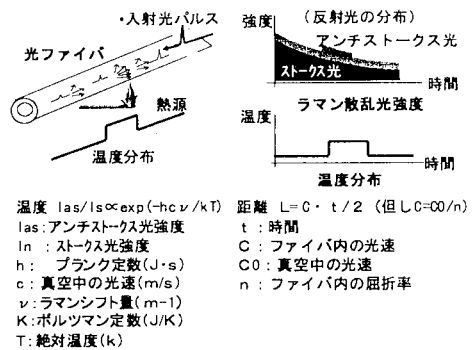
光温度分布レーダは、光ファイバセンサの軸方向に沿った温度分布を一度に計測できる測定技術で、距離と温度双方の信号を処理する系を有している。距離計測についてはOTDR法(Optical Time Domain Reflectometry)として、通信用光ファイバケーブルの障害点の検出等に広く用いられている。また、温度計測は散乱光のもつ物理的性質を巧みに利用した計測技術である。図2に測定原理図を示す。

(2) 温度の測定原理

半導体パルスレーザ光を光ファイバセンサに入射すると、光の粒子がガラス分子と衝突し入射光とは異なる2種類の波長の散乱光を生ずる。この物理現象をラマン散乱と呼び入射光に対して波長が短波長側にシフトするアンチストークス光と逆に長波長側にシフトするストークス光の2種類がある。

このうちアンチストークス光の強度は温度依存性が高く、逆にストークス光の強度は殆ど温度に無関係である。

この2つの散乱光の強度の比を測定して信号処理を行うことにより、光ファイバセンサに沿った温度分布を計測することが可能である。



(3) 距離の測定原理

光ファイバセンサに短いパルス光を入射すると、パルス光は媒質中を伝搬中にその一部は光ファイバのガラス分子によって散乱されて戻って来る(後方散乱)。このとき近くで散乱された光はすぐに戻って来るが、遠くの方で散乱された光は進む経路が長くなり到達時間に遅れを生じる。そこで散乱光の経路差に応じた到達時間を測定することにより、散乱が起こった位置を測定することができる。これはレーダの測距技術と原理的には同一のものである。このように光温度分布レーダは、一本の光ファイバセンサにより励起光パルス幅内の平均温度を連続して多点計測可能である。また、計測精度の決定要因である光ファイバ内の光速の変

図2 測定原理図

温度  $I_{as}/I_{s} \propto \exp(-hc\nu/kT)$   
 $I_{as}$ : アンチストークス光強度  
 $I_{s}$ : ストークス光強度  
 $h$ : プランク定数(J·s)  
 $c$ : 真空中の光速(m/s)  
 $\nu$ : ラマンシフト量( $m^{-1}$ )  
 $k$ : ボルツマン定数(J/K)  
 $T$ : 絶対温度(K)

距離  $L = C \cdot t / 2$  (但し  $C=C_0/n$ )  
 $t$ : 時間  
 $C$ : ファイバ内の光速  
 $C_0$ : 真空中の光速  
 $n$ : ファイバ内の屈折率

化が周囲温度に殆ど依存しない等、外乱による誤差も極めて小さく安定した計測が可能である。

## 2. 5 システム構成

以下に本システムの主な構成要素の概要説明と機器仕様を、図3にシステム構成図示す。

(1)本システムでは温度センサとして、特徴の異なる2種類の光ファイバセンサを使用した。

ケーブルセンサは、ステンレス製の可とう管に光ファイバを挿通したもので、測定対象物の表面に展開させて用いることにより広範囲の温度測定が可能である。

本システムでは、配電盤上部外面を奥行方向に蛇行しながら敷設し盤上部の外面温度分布を測定した。(写真1)

スポットセンサは、光ファイバセンサを金属容器の中に一定の長さ(約20m)巻き込んだ構造で、部分的な温度を測定するのに適しており、配電盤前面扉内側の収納機器周辺に上下方向4点(VCB等近傍)と雰囲気温度(室温)測定用として盤外に1点設置した。(写真2)

(2)光温度分布レーダは、本システムの計測精度を決定づける重要な機器でレーダ本体と基準温度ユニットから構成されている。基準温度ユニットは恒温槽内に収納され高い精度を維持している。

(3)システムモニタは、光ファイバセンサによって得られた温度測定データを収集し演算処理を行う装置で、通電異常の判定を行う他、温度分布表示、トレンド表示、日報・月報の表示・保存などの機能を有する。

(4)機器仕様

- ①温度測定精度:  $\pm 1\%$  FS
- ②温度測定範囲:  $0 \sim 100^{\circ}\text{C}$
- ③測定距離: 500m
- ④ケーブル間隔: 1m
- ⑤距離測定精度: 1m以内
- ⑥測定時間: 100秒(光ファイバセンサ1本あたり)
- ⑦最大測定点数: 500点(光ファイバセンサ1本あたり)

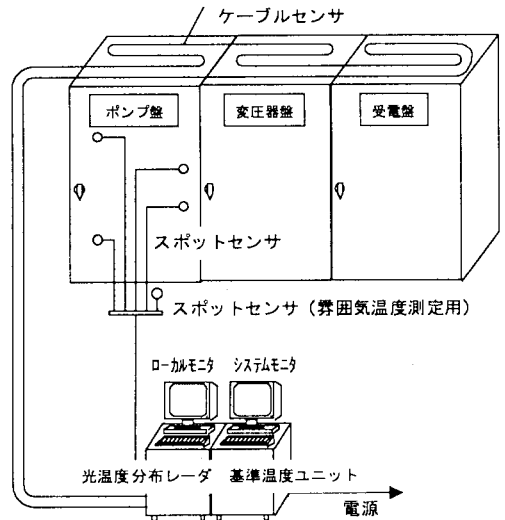


図3 システム構成図

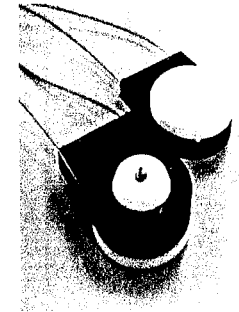
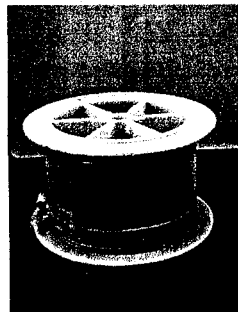


写真1 ケーブルセンサ

写真2 スポットセンサ

## 3. 光ファイバセンサの実装方法の検討

光ファイバセンサを既設の設備に設置可能とするため、以下の条件を満足することを目標とした。

- (1)短時間で施工可能なこと(取付作業に伴う停電時を、可能な限り短くする)
- (2)施工性が良好なこと(既設盤の加工を最小限にし、いわゆる現場合わせの部分を少なくすること)
- (3)盤筐体との結合が強固であること(盤の振動等で浮きや剥離が起きないこと)

### 3. 1 ケーブルセンサの実装

(1)センサ布設上の問題点

ケーブルセンサを配電盤上部に敷設して温度監視を行う場合、盤上部を蛇行させて敷設するのが最も効果的であるが、その固定方法が問題となる。固定用に何らかの治具を使用する場合、治具による熱伝導の遅れや熱の吸収等による誤差が少なくなるよう考慮しなければならない。また、温度分布レーダのサンプリング間隔は1mであることから、測定点1点あたりケーブルセンサの長さは最低でも1m以上が必要である。

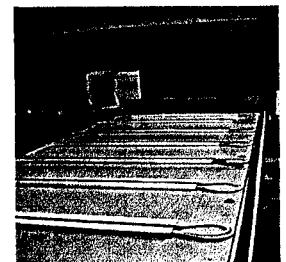


写真3 ケーブルセンサ実装例

## (2) ケーブルガイドの考案

敷設方法の問題を解決する方法として、センサ固定用治具に熱伝導率の良いアルミ製のケーブルガイドを考案した。これにより敷設する際の労力を軽減するとともに、ケーブルガイドに収納した光ファイバセンサをゴム製スペーサで押さえることにより、確実な固定を可能とした。一般に温度測定点に敷設されるケーブルセンサは長いほど精度が向上することから今回は温度測定点1カ所あたり最低2mのケーブルセンサが敷設されるように、ケーブルガイド内を2往復するよう固定方法を工夫した。写真3にケーブルガイドを使用したケーブルセンサ実装例を、図4にケーブルガイドの外形図を示す。

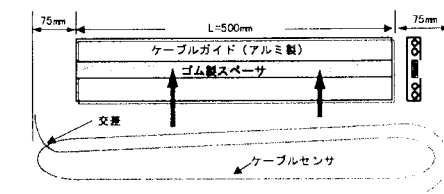


図4 ケーブルガイド外形図

(単位: °C)

表面温度 (熱電対)	センサ 測定値	誤差	室温
26.7	26.5	-0.2	24.1
29.2	29.2	0.0	23.9
30.7	30.4	-0.3	23.3

表1 温度測定誤差

## (3) 温度の誤差の測定

ケーブルガイドを使用したことによる温度測定誤差は、熱電対温度計を用いた比較試験を行い誤差が0.5°C以下であることが確認できた。表1に温度測定誤差を示す。

## 3. 2スポットセンサの実装

### (1) 実装位置の検討

一般的な配電盤では、遮断器等の収納機器は、前面からの保守点検を考慮した設計となっているため配電盤の前面側に収納され後方は配電スペースに充てられている。前面扉内側には充電部は露出されておらず、スポットセンサの実装は比較的容易であるが、効果的に機器の温度を測定するには測定対象となっている機器の近傍に実装することが望ましい。スポットセンサの実装は磁石による固定も可能であるがスポットセンサの落下等により配電盤の機能に支障を及ぼすことのないよう強固な固定方法を検討した。

### (2) 実装方法

日常の点検作業等や、遮断器等のスライド着脱によりスポットセンサの取付け位置が制限される場合は、配電盤正面にこだわらず各種機器近傍の配電盤側面に取付けた。実装は固定用磁石の磁力の低下や地震・機器自身の振動を考慮しスポットセンサ中央のネジにより配電盤に直接固定するとともに、スポットセンサから出ているケーブル部分は配線ダクトに収納し、周囲構造体に固定した。

図5にスポットセンサ取付イメージを、写真4にスポットセンサの実装例を示す。

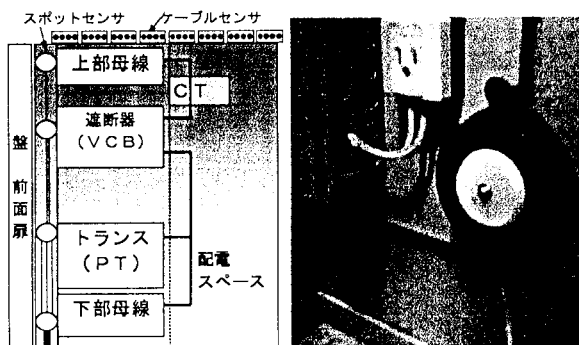


図5 センサ取付イメージ 写真4 スポットセンサ実装例

## 4. 異常判定アルゴリズムの検討

異常判定のプロセスにおいては、観測パターンそのものが識別信号となる場合を除いて何らかの操作により特徴パターンを生成(抽出)するのが一般的である。本システムでは図6、図7に示す手順に従って異常判定を定量的に処理している。

以下に異常模擬実験を例にデータ処理手順を示す。異常模擬実験は、盤内部に50~300Wの発熱体を設置し疑似故障を発生させた。盤天井部分に敷設したケーブルセンサで温度分布を計測したデータ、およびこのデータを規格化し

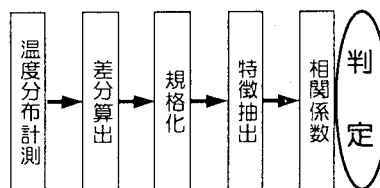


図6 特徴抽出手順

温度分布を計測したデータ、およびこのデータを規格化し

たグラフを図8に示す。(発熱体の設置位置は盤前面より50cm、盤の奥行きは約180cm、センサ配置は図5参照)

(1) 配電盤の天井部分には模擬発熱によって、ある温度分布パターンが観測される。(図8上: 発熱量と温度上昇は正の相関があり、発熱体直近の温度が最も高い)

(2) 異常発熱による温度分布の形状変化を、発熱量に依存しない形で比較するため、特定測定部分の全温度上昇値に対する相対値で測定値を規格化する。(図7)

(3) 通常パターンとの比を求め規格化差分温度パターンを算出する。

(図8下: 発熱量による差がキャンセルされ、温度上昇率はほぼ一定になる)

(4) 規格化した差分温度上昇値を用いて異常判定を行う場合、上昇値の絶対値それ自身より、温度変化パターンが+なのか-なのかという離散的な情報により特徴抽出するほうが、計算機処理するうえでは有利である。実際には、しきい値としてある数値を設定し、+1, -1, 0の数値に3値化し、特徴ベクトル(特徴パターン)を生成する。なお、しきい値は実験等により求める。今回は100Wの異常発熱で異常検出となるよう、しきい値を設定、外乱除去のため不感帯として±1%のマージンをとった。

(5) 相関係数の算出

特徴パターンの波形を分析する手法として、スペクトル解析があるが、分析する値が±1の2値の場合(この場合0は考慮しない)は、三角関数に類似した性質を持つウォルシュ関数(任意の矩形信号)を用いてフーリエ変換に類似した演算であるウォルシュ変換を適用し、関数展開すると高速な変換が可能である。計算結果は異常パターンとの相関係数として結果が得られる。(図9: 発熱量によらず、強い相関が得られることがわかる。) 図9にシスムモニタでのウォルシュ変換結果の表示例を示す。

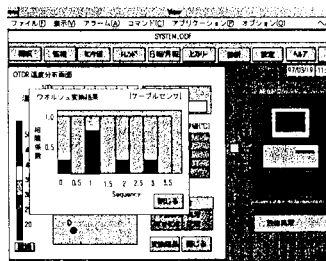


図10 システムモニタ画面例

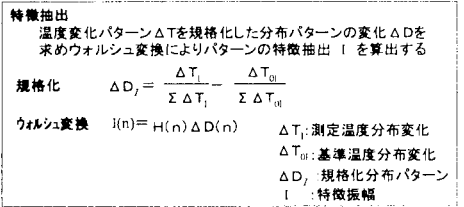


図7 特徴抽出式

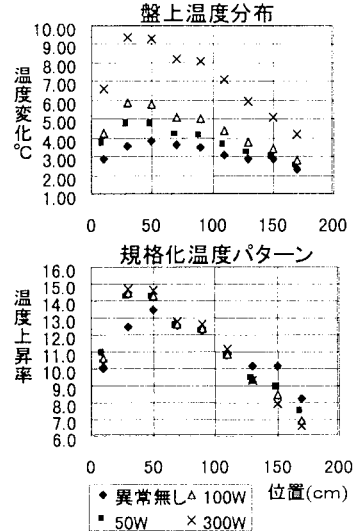


図8 模擬異常による変換過程  
ウォルシュ変換結果

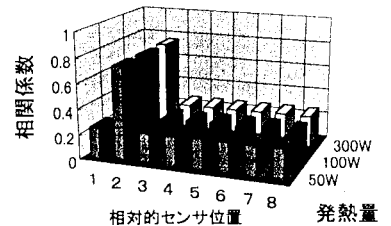


図9 異常模擬判定結果

## 5. フィールド試験

### 5.1 試験の概要

平成10年2月9日から3月15日まで、当局ポンプ所電気室においてフィールド試験を行った。実験対象設備は通常の使用状態でデータを収集し以下の事項について検証した。

- (1) 周囲温度の変動が本システムに及ぼす影響
- (2) 負荷の変動(機器の稼動状態)が本システムに及ぼす影響
- (3) 電気的外乱(設備の運転・停止に伴うパルス性ノイズ等)が本システムに及ぼす影響
- (4) 制約された条件下(停電時間内作業等)での光ファイバセンサの効率的な敷設・施工

### 5.2 フィールド試験の考察

(1) 周囲温度の影響

図11、図12はそれぞれ2月21日から3月2日までの、ポンプ盤におけるケーブルセンサの温度上昇値とウォルシュ変換結果を2時間おきにプロットしたグラフである。データの表示方法は次のとおり。

(例)12210013.CVS →1 (ケーブル番号) 221 (日付2/21) 0013 (時刻00:13). CVS (データ形式)

周囲温度の影響を的確に評価するには、負荷変動と区別するため負荷が比較的平均している昼間で、かつ日較差の大きい日を選ぶ必要がある。例えば3月2日は昼から夜にかけて約6℃の室温の変動が認められたが、ケーブルセンサの温度上昇値は0.5℃程度に留まっており、ウォルシュ変換結果でも相関係数の変化は非常に小さく、判定しきい値に達するデータは見られなかった。従って周囲温度による影響は殆どなく、検出アルゴリズムが適切であったと考えられる。

## (2) 負荷変動の影響

(1)の結果から、周囲温度の影響が殆ど問題にならないことを考慮すると、実際の温度上昇値の変化は、負荷変動による要因が大きいと考えられる。例えば変圧器盤では、数回判定しきい値を超えたときがあり、これについて誤判定が発生した2月21・22日のデータについて分析を行った。(図11、図12)

誤判定は両日ともに夜中から明け方に発生している。図13は配電設備の電力量のグラフであり、2月21日の零時から翌日の23時までの運転データである。前述した時間帯では長時間に亘り電力量が極端に落込んでおり、温度パターンが急激に変化したために誤判定が起きた可能性が高い。配電設備が停止または軽負荷での故障は考えにくいため、このような負荷の急激な変化による誤判定を回避するためには以下に示すような対応策が必要と考えられる。

- ①センサ情報と盤固有の運転パターンとを総合的に判断する。
  - ②実際の異常時は、ある程度継続して異常判定が行われると考えられるので異常継続時間を加味した判定をする。
- これらの事項については、今後の検討課題としたい。

## (3) 電気的外乱の影響

設備の状態変化に伴う電気的外乱の影響は、全く検出されなかった。これは光ファイバ固有の無誘導性、およびステンレス管によるシールド効果によるものと考えられる。

## (4) センサ類の実装方法

ケーブルセンサについては、ケーブルガイドを使用した施工方法により列盤3面分の施工に要した時間は約2時間と停電予定時間の3時間以内に完了し、効率的な施工方法であったことが検証できた。

## 6. まとめ

フィールド試験の結果から、既設の閉鎖配電盤に通電異常を検出する光ファイバセンサを比較的容易に実装可能で、耐環境性・ノイズ性においても問題なく安定した監視が行えることが検証でき、実用化に向けた指標を得ることができた。また、本開発は総合的な設備監視システム構築の一部という位置づけであり、将来的にはより完成度の高い設備監視システムへの発展を目指している。

今後は、これまでの開発で得た成果をもとに、収集したデータの分析による故障因果関係の検討、センサ情報による高機能的な設備監視システムの検討、設備の故障診断アルゴリズムの判定精度の向上等、実用化に向けての研究開発を行っていく考えである。

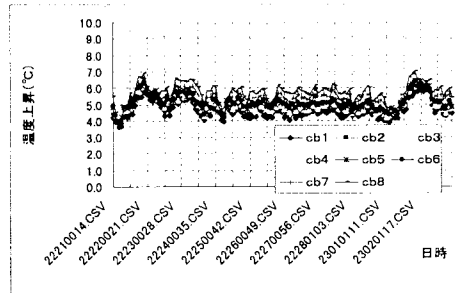


図11 変圧器盤温度上昇データ

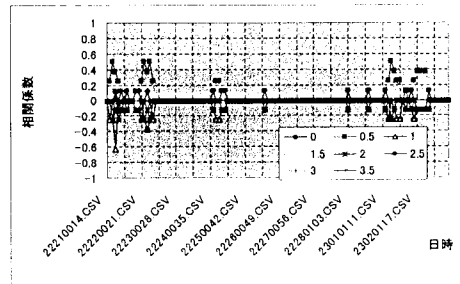


図12 変圧器盤ウォルシュ変換データ

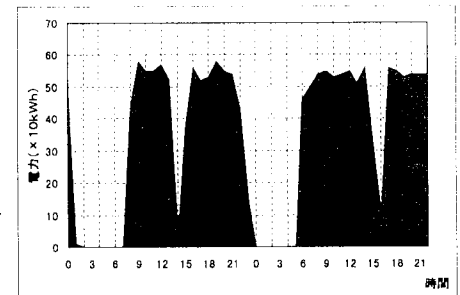


図13 電力量データ