

第 5 章

技術革新を支える



第5章 技術革新を支える 目次

我孫子研究所	材料構造部	上席研究員	山本 広祐
	情報研究所	上席研究員	篠原 靖志
	情報研究所	上席研究員	小野田 崇
	情報研究所	主任研究員	所 健一
	情報研究所	主任研究員	渡邊 勇
	情報研究所	主任研究員	椎名 孝之
	情報研究所	主任研究員	石野 隆一
我孫子研究所	材料構造部	主任研究員	酒井 理哉
我孫子研究所	流体科学部	主任研究員	服部 康男
横須賀研究所	エネルギー機械部	主任研究員	市川 和芳
横須賀研究所	エネルギー化学部	主任研究員	河瀬 誠
	横須賀研究所 電力部長	上席研究員	岡本 達希
	経済社会研究所	上席研究員	山本 公夫
我孫子研究所	研究コーディネーター	上席研究員	萩原 豊
我孫子研究所	材料構造部	主任研究員	塩竈 裕三
我孫子研究所	材料構造部	主任研究員	齋藤 潔
	情報研究所	主任研究員	堤 富士雄

5 - 1 機械学習技術 .....	62
5 - 2 最適化技術 .....	69
5 - 3 画像技術 .....	77
5 - 4 オープンネットワーク技術 .....	91
コラム6：ニューラルネットワークとサポートベクターマシン .....	68
コラム7：確率計画法 .....	76



山本 広祐（1987年入所）  
 水力発電所土木構造物の健全性診断を中心に、高速増殖炉主容器等の地震時座屈評価技術、人工知能を活用した非線形構造解析、インターネットによる電力会社向け情報発信・共有システムの開発等に従事してきた。最近では、維持管理研究の一環として土木施設のリスクマネジメントやライフサイクルコスト評価の研究にも携わっている。



小野田 崇（1988年入所）  
 入所以来、ニューラルネットワークによる最大電力需要予測など、機械学習技術の開発、適用研究に従事。現在、主にパターン認識技術の性能向上の研究および異常予兆発見、情報検索へのパターン認識技術の適用研究に従事。

篠原 靖志（42ページに掲載）

堤 富士雄（42ページに掲載）



所 健一（1989年入所）  
 これまでの電力用移動無線における周波数の最適配置手法など、主に電気事業における最適化に関する研究に携わる。現在はマルチエージェントを用いた取引シミュレーション、小型分散型電源機器の最適運転計画、発電機部品の最適運用計画などの研究に従事。



渡邊 勇（1996年入所）

入所以来、主にコンピュータネットワークの信頼度評価、電気事業に対する協調型最適化手法の適用研究に携わる。現在、マルチエージェントを用いた電力市場シミュレーション、電力システムの信頼度評価に対する最適化手法の適用などの研究に従事。



椎名 孝之（1991年入所）

オペレーションズ・リサーチ、特に数理計画法の手法の電気事業への応用を行っている。現在では、確率計画法などの不確実な状況下での意思決定の研究を中心に、応用数学的手法全般に興味を持つ。



石野 隆一（1991年入所）

入所以来、画像技術による電力設備の監視技術に従事。低品質画像の改善、赤外線カメラを利用した配電機材の異常検出、多眼カメラを利用した距離情報や形状情報の取得、ITV画像による電線の揺れ分析、などの研究開発に取り組む。現在、紫外線画像の利用について研究中。



酒井 理哉（1991年入所）

高速増殖炉の耐震設計の研究に従事し、原子炉容器や配管の座屈評価・疲労損傷評価を行ってきた。その後、新しい計算機を利用したFEM解析の並列処理・同時可視化システムの開発を行い、現在は数値解析と実験を連携して行うハイブリッド動的試験システムの研究に取り組んでいる。



服部 康男（1993年入所）

入所以来、複雑体系場の乱流現象に着目した研究を進めてきた。数値計算や風洞実験により、送電設備の耐風設計や原子力発電所からの使用済燃料貯蔵施設に関する研究に携わってきた。



市川 和芳（1991年入所）

入所入所後、石炭ガス化複合発電技術研究組合に出向し、200トン/日パイロットガス化炉およびプラント全体の性能評価を実施するなどIGCC技術開発に携わる。その後、ガス化炉内および熱交換器への灰・チャーの付着現象の解明および予測手法の開発に関して取り組む。現在は、ガス化スラグの有効利用技術の開発やバイオマスガス化技術に関する研究に取り組んでいる。



河瀬 誠（1993年入所）

これまで熔融炭酸塩形燃料電池に関する研究に携わり、燃料電池の高出力化のため、高性能な電極の開発に取り組んでいる。さらに、燃料として石炭ガス、バイオマス燃料を用いた場合の電池性能に対する不純物の影響を評価している。



岡本 達希（1976年入所）

これまでは主に、電子顕微鏡等を用いた高分子絶縁材料の絶縁破壊・劣化機構や高電圧機器等の絶縁診断方法の開発研究に携わり、最近では材料の改質による超高压CVケーブルのコンパクト化手法の開発とその実証を進めてきた。今後も、高電圧機器のさらなる高性能化研究や、診断技術の開発研究に取り組む。



山本 公夫（1981年入所）

発電所の景観アセスメント手法の開発や電力施設の景観デザイン案の提案などに関する環境研究に従事。現在は、豊かさが実感できる地域振興や電力施設立地における合意形成などに係る研究に取り組む。



萩原 豊（1983年入所）

高速増殖炉や海上に浮かぶ原子力発電所の地震応答に関する研究に関与の後、並列処理・可視化・分散処理等の計算科学基盤技術に活動分野を広げた。現在は、我孫子研究所の新たな研究企画立案・総合調整等に従事。



齋藤 潔（1994年入所）

これまで、高速増殖炉主容器等の地震応答評価に関する研究や分散処理等の計算科学基盤技術に関する研究に携わってきた。現在は、遠隔観測技術を活用した水力発電所土木施設の維持管理高度化に取り組んでいる。



塩竈 裕三（1999年入所）

水力土木施設のうち特に鋼構造物の維持管理研究に携わり、広域通信回線を利用した遠隔モニタリング、モニタリングデータによる構造物の状態推定を手がける。

## 5 - 1 機械学習技術

### 5-1-1 ニューラルネットワークを用いた非線形構造解析

#### (1) ニューラルネットワークの特徴

ニューラルネットワークは、脳神経細胞網の情報処理メカニズムを模倣したもので、神経細胞（ニューロン）の本質的な機能を比較的単純にモデル化した要素を多数組み合わせた情報処理システムである。ニューラルネットワークが注目を集めている最大の理由は事例を学習できることにあり、あらかじめ準備した事例（データ）をニューラルネットワークに与えてネットワークの出力誤差が小さくなるよう数学的にネットワークの結合関係を修正することで、特定の機能を有するモデルを自動的に作成することができる。

#### (2) 荷重 - 変位関係のモデル化における階層型ニューラルネットワークの活用

構造物に荷重（力）が加わった時の変形や強度特性を調べる際、従来は実験で荷重と変位の関係を詳細に分析し、これを数式化した解析モデルを作成して地震応答解析などに用いてきた。しかしながら、構造物に複雑な荷重の繰り返し加わるような時には、荷重と変位の関係を定式化することが容易でない場合が多い。このため、実験で取得した荷重 - 変位関係のモデル化に階層型ニューラルネットワークの関数近似能力を活用した。図5-1-1に階層型ニューラルネットワークの基本構成とニューロン間における結合の重みの修正方法を示す。実験結果から代表的な入力値および出力値（教師信号）の組み合わせを多数準備し、個々の入力データに対するニューラルネットワークの出力と教師信号（正解値）との差が許容範囲に収まるまで結合の重みを修正することで、ネットワークの学習が行われる。

#### (3) 荷重 - 変位関係のモデル化

構造物の荷重 - 変位関係のモデル化手法として、図5-1-2に示す2種類の方法を考案した。一つは先験的に荷重 - 変位曲線がたどる経路の始点  $(X_j, Y_j)$  と指向点

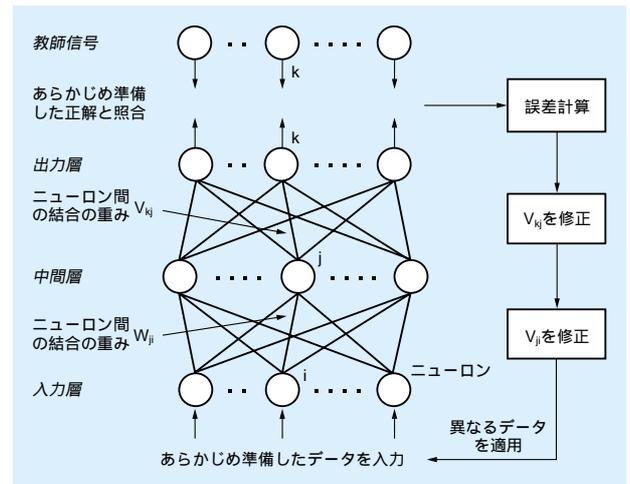


図5-1-1 階層型ニューラルネットワークの概要

$(X_i, Y_i)$  が特定できる場合で、これを経路内挿法と呼ぶ。経路内挿法では、 $(X_j, Y_j)$  と  $(X_i, Y_i)$  に加えて、この間の任意の変位  $X_n$  を入力とし、 $X_n$  に対する荷重  $Y_n$  を出力とするニューラルネットワークを構築すれば、荷重 - 変位関係のモデル化が行える。もう一つの方法は履歴曲線がたどった過去の傾向を外挿する方法で経路外挿法と呼ぶ。ここでは、 $(X_{n-2}, Y_{n-2})$ 、 $(X_{n-1}, Y_{n-1})$ 、 $X_n$  を入力とし、 $X_n$  に対する荷重  $Y_n$  を出力とする。

ニューラルネットワークによる荷重 - 変位関係のモデル化手法をプラント配管の問題に適用し、有効性を確認した。図5-1-3に示すステンレス製配管部材（直管）を用い、これに繰り返し荷重をかけた場合の実験結果が図5-1-4である。図5-1-4から経路内挿法に使うための入出力データ（前述の座標値）を300組ほど抽出してニューラルネットワークに与える事例とし、ネットワークの出力誤差が許容範囲に収まるまで学習を行わせた。図5-1-5は、図5-1-4の経路上にある座標点約700を学習済みのニューラルネットワークに連続的に与えて荷重 - 変位関係のグラフを作成したものである。実験結果（図5-1-4）とニューラルネットワークによる推定結果（図5-1-5）の対応は非常に良く、複雑な数式を作らなくてもニューラルネットワークで精度の高いモデルが作成できることが明らかとなった。

#### (4) 非線形構造解析における活用

構築したニューラルネットワークには、構造部材にお

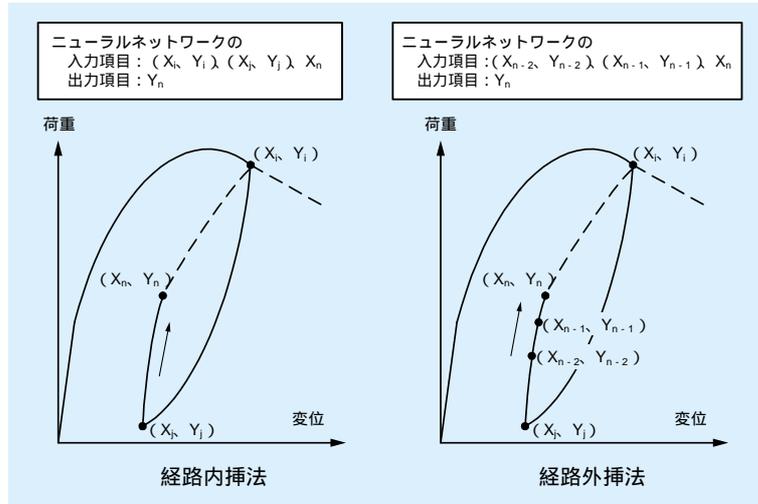


図5-1-2 ニューラルネットワークによる荷重 変位関係のモデル化

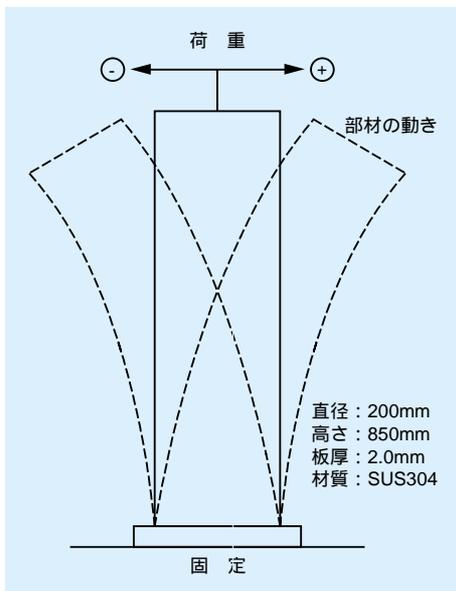


図5-1-3 プラント配管部材（直管）の実験模型

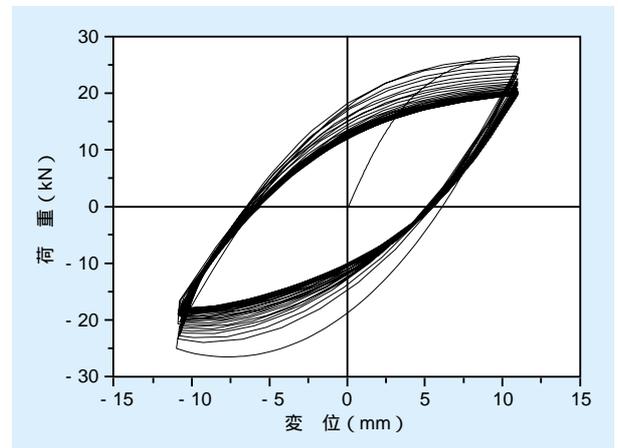


図5-1-5 ニューラルネットワークの推定結果

ける非線形の荷重 - 変位関係を表現できる能力が備わっている。このような部材が複数組み合わせられて構造物が作られるが、構造物全体の解析を行う場合には、ニューラルネットワークで近似される部材を必要に応じてユーザーサブルーチンの形で構造解析プログラムの中に組み込むだけで利用が可能である。この解析法を直管や曲り管を含む配管構造物の解析に活用し、適切な精度の解が得られることを確認した。

## 5-1-2 屋外からの家庭内電気機器の状態推定

### 背景・目的

従来、家庭で各家電機器をどのように使用しているかはあまり把握されていない。しかし、これらの情報は、家庭自身にも、電力会社などにとっても重要な情報とな

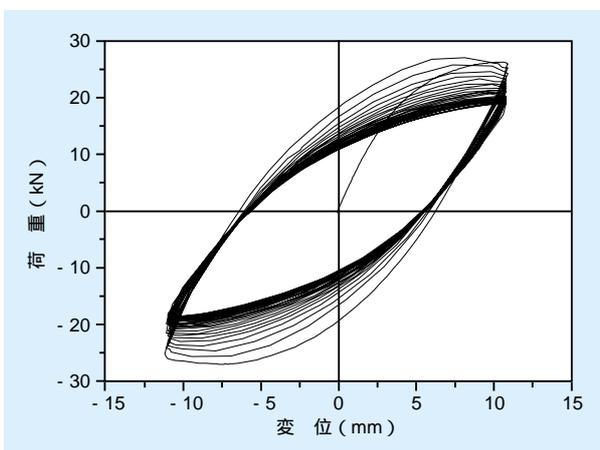


図5-1-4 プラント配管部材の実験結果

ってきた。

例えば、各家庭でエアコンをどのような気温や時間帯にどの程度使用するかという情報は、夏場などの電力消費をよりの確に予測して、効率的な発電計画を立ったり、きめ細かな季節時間帯別料金メニューを設計することに活かすことができる。また、近年、省エネ診断や改善提案などの各種省エネルギーサービスを提供する企業（ESCO：Energy Service Company）も現れているが、家庭での省エネルギーを進めていく上で、その家庭で各家電機器を実際にどのように使用しているのかというデータは不可欠である。

電力会社や研究機関は、現在でも、ご協力いただけるご家庭において消費電力の実態調査をしており、また、家庭内の家電機器の消費電力を計測するサービスを行う機関もある。このような調査では、一般に、計測したい家電機器ひとつひとつに測定器やセンサをとりつけ、その消費電力を記録する。しかし、測定機器などの取り付けや回収には、家庭内での設置・撤去工事が必要であるし、設置スペースが問題となる。また、多数の機器を測定する場合には、測定器やセンサも増えるので費用もかさむ。

このような問題を解決するため、当所では、建物の給電線入口付近から屋内の電気機器の使用状態や消費電力をリアルタイムで計測・記録できる電気機器使用実態のモニタリングシステムを開発した。

### (1) システムの特徴

設置場所は図5-1-6に示すように屋外の電力量計（ま



図5-1-6 本システムの導入イメージ

たは、屋内の分電盤）の付近で、測定対象である電気機器には測定器やセンサを取付ける必要がない。このため、設置工事のコストが少なくすむ上、設置工事やデータ回収についての家庭の負担が小さいという利点がある。

屋外の電力量計付近での設置でよい理由は、本システムが家庭内の個別機器の電流の合計である主幹回路電流から個別の稼働機器の電流を推測できるからである。

従来でも主幹回路電流の階段状の変化を見つけて、例えば、5Aの変化があれば、登録済みの500W機器が動作したと推定する稼働機器の推定手法があったが、現在では、インバータエアコンなどのインバータ機器の導入が進み、電流変化はステップ上ではない。

そこで、最新の機械学習技術を用いて、インバータ機器など消費電力が変動する機器にも適用できる家電機器の稼働状態と消費電力の新しい推定手法を開発した。

### (2) 個別機器の動作状態推定の基本的しくみ

開発手法は、主幹回路電流高調波（基本周波数の奇数倍の周波数）の各次数での電流と位相の組み合わせである「高調波パターン」を利用する。各家電機器は固有の高調波パターンを持ち、それは主幹回路の高調波パターンに反映される。開発手法は、主幹回路での高調波パターンから逆に各機器の動作状態や消費電力を推定しており、この推定には、サポートベクトルマシン（SVM：Support Vector Machine）やRBFネットワーク（Radial Basis Function Network）と呼ぶ最新機械学習手法が使用される。

モニタリングシステムの構成を図5-1-7に示す。主幹

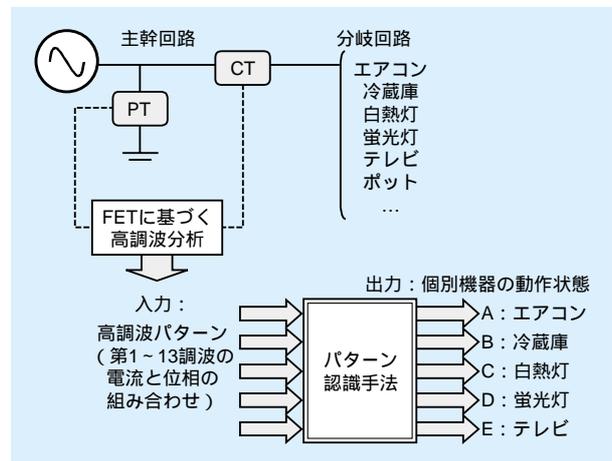


図5-1-7 モニタリングシステムの構成

回路の計測電流を高速フーリエ変換することで得られる高調波パターン（基本波および各奇数次の電流値とその位相）を入力として、個別機器の動作状態を推定する。

### (3) 最新機械学習手法による動作状態推定

本システムでは、機器の稼働状態（稼働中であるか否か）の判定には、「サポートベクトルマシン（SVM）」を、一方、機器の電流（消費電力）を推定するには、「RBFネットワーク」と呼ぶ最新機械学習手法を用いる。

このため、まず、主幹回路の電流がさまざまな高調波パターンを取っている時に、対象機器の実際の動作状態（オン/オフ、消費電力）のデータベースを事前に作成する。モニタリング中に得られた主幹回路の高調波パターンが、既にこのデータベースにあれば機器の動作状態は推定可能であるが、事前に全ての高調波パターンとその時の機器動作状態を収集することは不可能であるし、膨大なデータベースから検索しては推定速度も遅くなる。データベースにない新しい高調波パターンに対して、いかに精度良く、高速に動作状態の推定を行うかが問題となる。

機械学習手法は、得られたデータベース中のデータを事前に分析し、未知のデータ（高調波パターン）に対しても精度の高い推定が行える推定モデルを学習する。実際のモニタリングでは、データベースは用いずに、推定モデルを用いて、精度の良い高速な推定を行う。

従来もニューラルネットワークが同様の目的で使用されたが、本システムで使用している最新機械学習手法は、ニューラルネットワークに比べて、高い推定精度を持つ。

表5-1-1に、実験データに対する各機器のオン・オフ

表5-1-1 オン・オフ判定への適用結果（誤識別率%）

	ニューラル	RBF	SVM
エアコン	0.8	0.0	0.0
冷蔵庫	0.0	0.0	0.0
冷蔵庫	27.5	14.0	8.3
白熱灯	16.7	0.0	0.0
蛍光灯	0.0	0.0	0.0
テレビ	2.5	0.0	0.0
平均	7.9	2.3	1.4

判定精度の実験結果を示す。ニューラルネットワーク（92%）に比べ、SVMやRBFが98%以上の非常に高い認識率を示すことがわかる。消費電力推定においても同様に高い精度を持ち、500W エアコンに対する誤差は約10W程度であった。図5-1-8に、実家庭に据えつけた実験でのエアコンの消費電力推定結果を示す。家庭内のエアコンの動作状態を、主幹回路電流のみから精度良く推定できていることがわかる。

### 5-1-3 エネルギー有効利用支援システム

#### 背景・目的

需要家個々のエネルギーコストの削減やCO<sub>2</sub>排出量削減施策などとして、オフィスや家庭などの民生用に燃料電池をはじめとする小型のエネルギー機器の導入が進む可能性がある。電力と熱の需要を正確に予測することができれば、燃料電池や蓄電機器、給湯・空調用蓄熱装置などの各エネルギー機器がもつ蓄熱・蓄電や貯水などの機能を活かした効率的な運用が可能となる。しかし、オ

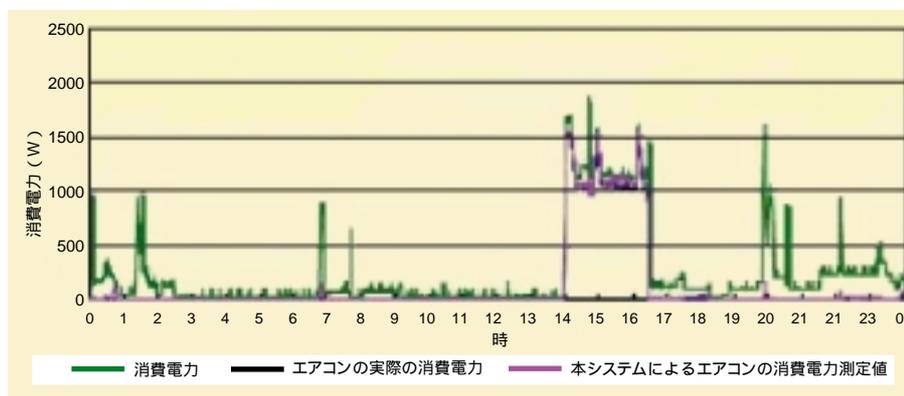


図5-1-8 エアコンの消費電力を本システムで推定した例

フィスや家庭では突発的な予定変更など予測不能な出来事が多く、需要を確定的に予測しても外れる可能性が高い。電力・熱の大量な過不足による非効率な運用を避けるには、需要の不確実性を前提としたエネルギー機器の運用が不可欠である。そこで、当所では、オフィスや家庭における需要の不確実な需要変動を前提とした、各種小型エネルギー機器の効率的な運用手法を開発した。

**(1) 基本的考え方**

需要予測が外れる原因にはさまざまなものがある。例えば、天気予報に基づく需要予測では、天気予報の外れが該当する。また、家庭等では、急な残業などで帰宅時間が遅くなれば、電気・熱の需要曲線が後ろにシフトするなどの変化が起きるが、このような急に起こる事態や気まぐれな行動も事前に予測不可能である。地域単位の総需要などでは個々人の行動の影響は、平均化されて直接反映されないため影響が小さいが、オフィスや家庭などの小規模需要家においては、この種の「需要の不確実性」(需要曲線の不確実な変動)は、一般的に生じる。従って、小規模需要家の翌日の需要曲線を精度高く推定することは、非常に困難である。

単一の需要曲線のみを想定する運用計画の立案は、機器の運用計画を行う場合の一般的な手法である。しかし、予測した需要が不適切なものになれば当然この最適運用

計画は、最適ではなくなる。このため、「需要の不確実な変動」が日常的な、小規模需要家の持つエネルギー機器の運用を、従来型の運用計画手法で行えば、省エネ・省コスト運転とはならず、大量の電力・熱の過不足が生じる非効率な運用となる危険性が高い。

一方、さまざまな要因による「需要の不確実な変動」を見込んだ運転計画は、天気予報が外れたり、帰宅時間がずれたりしても極端なエネルギー余剰やエネルギー不足などが生じない運転となる。当然、需要を正確に予測できる場合に比べれば運転コストはかかるが、小規模需要家では予測が外れる可能性が高いのであるから、月間や年間の平均などでは、この「需要の不確実な変動」を見込んだ運転計画がより省エネ・省コスト運転になると期待される。

そこで、オフィスや家庭などにおけるエネルギー有効利用支援システムの需要予測においては、従来の「単一の需要曲線の推定」ではなく、「複数の需要曲線の推定(確率分布推定)」を、また運転計画立案においては、従来の「単一需要曲線に対する最適運転計画立案」ではなく、「複数の需要曲線に対して平均的に最適な運転計画立案」を利用することにした。

**(2) 開発手法の概要**

図5-1-9に開発手法の概要を示す。開発手法では、工

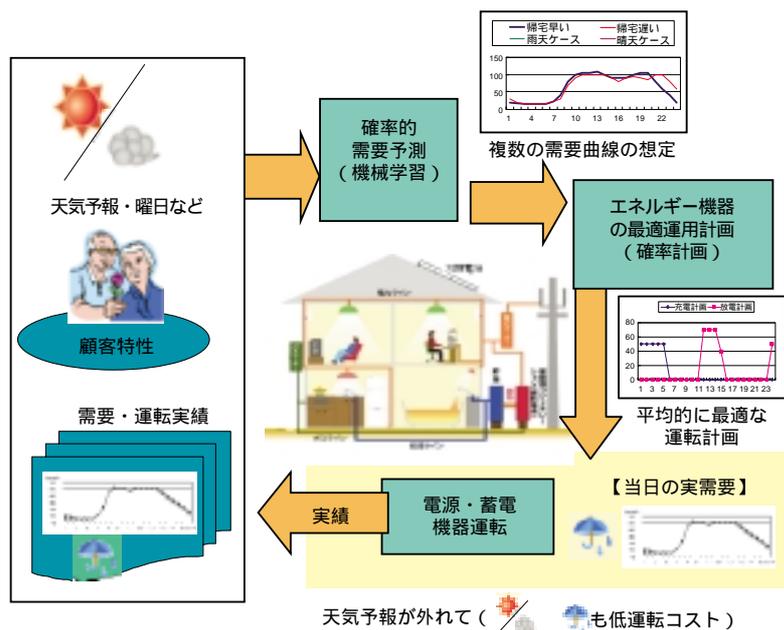


図5-1-9 エネルギー有効利用支援システムの概要

エネルギー需要予測にその需要家の過去の電力・熱需要実績のデータベースを使用する。

エネルギー機器運用計画は以下の3ステップによって作成する。

【ステップ1】エネルギー需要曲線確率モデル構築

開発手法では、エネルギー需要曲線（各時刻の電力と熱の両需要の列）の確率分布を、音声認識などで使用される隠れマルコフモデルを用いて表現する。そして、機械学習手法を用いて、上記実績データベース中の至近（約2週間）の実績データからこの確率モデルを高速に学習する。

対象需要家の至近の需要実績に基づいた学習を行うので、個別の需要家固有の電力や熱の利用を反映したエネルギー需要曲線の確率モデルを構成できる上、需要家の電気や熱の利用方法が季節などの時間経過によって変化しても追従することができる。

【ステップ2】エネルギー需要シナリオの予測

推定したエネルギー需要曲線の確率モデルと運転日当日情報（曜日、天気予報等）から、想定されるさまざまな需要曲線（シナリオ）を複数（数百～千個）作成する。

【ステップ3】エネルギー機器の最適運用計画立案

ステップ2で予測した複数のエネルギー需要曲線（シナリオ）と、対象需要家におけるエネルギー機器構成のデータおよび個別のエネルギー機器の特性データとに基づいて、期待コスト（個々のシナリオにおけるコストの平均）が最小となる最適な運用計画を求める。提案手法では、この問題を遺伝的アルゴリズムによって解いてい

る。遺伝的アルゴリズムは、高速であると同時に柔軟性が高い手法で、蓄電・蓄熱装置の有無など、エネルギー機器の構成が異なる場合、あるいは分散型電源の排熱を給湯以外に利用する場合などにおいても、最適なエネルギー機器の運用計画を効率的に求めることが可能である。

(3) 開発した最適運用手法の評価

家庭での電力・熱消費の実績データ1年分を用いて、翌日の時間帯毎のエネルギー機器の最適な運用計画を毎日求めるシミュレーションを行い、その結果を従来型の確定的手法と比較・評価した。この結果、予測した需要曲線が実績とほぼ合致した場合には従来型方式による運用が経済的であるが、需要を完全に予測できることは少ないため、年間約280日（約75%）に対して、開発手法の方がより経済的であった。月平均で見れば年間を通して開発手法が経済的となる（図5-1-10）。

(4) 開発手法の活用に向けて

今後は、開発手法のオフィスでのエネルギー機器運用への適用やエネルギー機器運転比較システムの活用を図る予定である。その一環として、既に、エネルギー機器構成、料金プラン、運用手法などを選択して、さまざまな状況での機器運用シミュレーションができるインターネット版エネルギー機器運用比較検討システムを開発している。本システムにより、エネルギー機器や新しい運用手法の導入効果など需要家に合ったエネルギー機器の効率的運用方法の比較検討を支援できる。

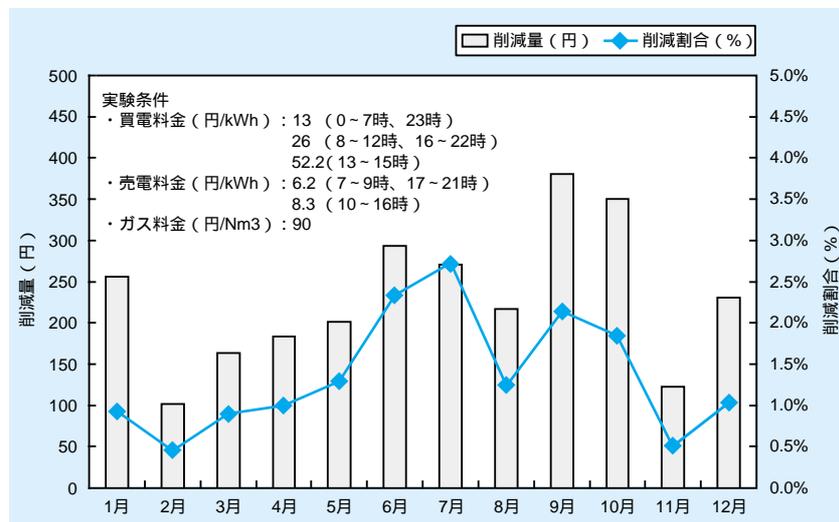


図5-1-10 従来方式（確定的方式）と比べた開発手法によるコスト削減例

## コラム6：ニューラルネットワークとサポートベクターマシン

パターン認識手法の主流となっているニューラルネットワークと、最近、その認識性能が目目されているサポートベクターマシン（以下、SVM）の関係について簡単に紹介する。

ニューラルネットワークの学習は、1980年代に多層パーセプトロンと学習アルゴリズムである誤差逆伝播法が世に出て、数多くの応用を産み出し、多くの研究が進んだ。しかし、応用と研究が進むにつれ、ニューラルネットワークには、学習の収束の遅さ、望ましくない局所最適解への収束、中間層ユニット数の選択など、いくつかの問題があることがわかってきた。

最近、優れたパターン識別能力のため注目を集めているSVMの基本的な構造は、驚くべきことに、ニューロンのモデルとして最も単純な線形しきい素子なのである。構造は単純なニューロンと同じであるが、Vapnikらによって、単純パーセプトロンのよい性質を保ちつつ、数理計画法や関数解析に関係する工夫が加えられて、優れた学習アルゴリズムが提案され、SVMが開発された。

### SVMの基本構造

SVMの基本構造である線形しきい素子は、ニューロンを非常に単純化したモデルで、ある入力に対し、2値の出力（+1または-1）を線形識別関数に従って出力する。このモデルを幾何学的に見てみると、観測空間を線形識別関数である超平面で2つに分け、片側に+1を、もう片側に-1を対応させることにあたる（図1左側）。線形しきい素子の学習は、観測空間を2つに分ける線形識別関数を見つけることにより行われる。全てのサンプルに対して正しい出力を出せるような線形識別関数が存在するとき、そのサンプル集合を「線形分離可能」と言う。一般に、線形分離を実現する線形識別関数である超平面は一意ではない。では、そのような超平面のうち、最適なものはどれかなのであろうか。直感的には、サンプルパターンすれすれを通る超平面よりも多少余裕をもって分ける超平面の方が良さそうである。

### SVMとニューラルネットワークとの相違

ニューラルネットワークの学習に一般に採用されている誤差逆伝播学習法では、サンプルに対して正しい出力をする線形識別関数が探索された時点で学習が終わってしまい、どこに線形識別関数

である超平面が生成されたのかわからない（図1左側）。一方、SVMでは、サンプルパターンと超平面との余裕をマージンという量で測り、このマージンをできるだけ大きくするように超平面を求める。マージンとは超平面と例題パターンとの距離の最小値である（図1右側）。こうすることにより、SVMでは、線形識別関数である超平面を一意に定めることができる。

では、観測空間で線形分離可能でない場合にはどうしたらよいのであろうか。SVMでは、入力を非線形変換によって、より高次元の空間に写像して、その空間で線形の識別を行う。SVMで利用できる非線形変換はいくつかあるが、SVMにシグモイド関数による非線形変換を行う場合、SVMの構造は、3層のニューラルネットワークモデルと同じになる。

### まとめ

観測空間で線形分離可能な場合、SVMの構造は1個の線形しきい素子となるニューロンモデルであり、非線形変換としてシグモイド関数を採用すれば、多層のニューラルネットワークモデルとなる。ただし、前述したように学習アルゴリズムは異なるので、SVMには局所最適解の問題や中間層ユニット数の選択の問題などはない。

現在、パターン認識精度を追求する研究領域において、SVMがニューラルネットワークに取って代わる勢いである。今後、様々な実用システムの中で、SVMを目にする機会が増えることだろう。

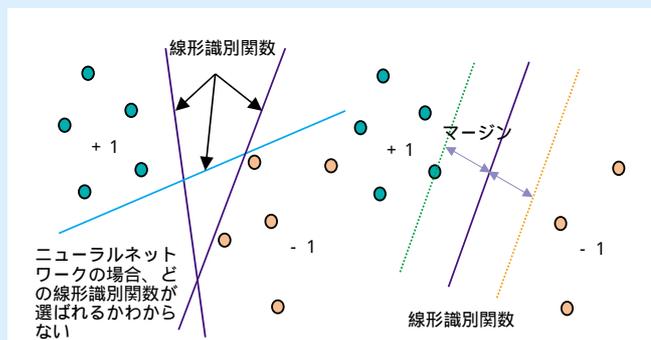


図1 ニューラルネットワークの線形識別関数（左側）とSVMの線形識別関数（右側）：●はクラス+1のサンプル、○はクラス-1のサンプルを表す。

## 5 - 2 最適化技術

### 5-2-1 移動無線周波数の最適割当て

#### 背景・目的

電気事業では、安定した電力を供給するために、独自の移動無線システムを構築・運用している。たとえば台風により送電線が被害を受け、停電が発生した場合など、感電などの事故を防ぎつつ、複数の作業チームが連携していち早く復旧作業を行う上で、この移動無線システムが大変重要な役割を果たしている。

こうした電力用移動無線システムの構築・運用にあたっての重要な課題の1つが、周波数の効率利用である。特に、近年の携帯電話をはじめとする移動体通信の爆発的な普及により、周波数資源への需要が高まっており、周波数を無駄無く使用することが重要となる。

しかし、使用する周波数が最小となるように、システムを構築することは容易ではない。電力用移動無線システムで使用する周波数を少なくするには、1つの周波数を干渉しないように、複数の基地局に効率的に割り当てる必要がある(図5-2-1)。しかし、基地局への周波数割当ての組合せの数は膨大であるため、この中から干渉が生じず、しかも使用する周波数の数が最小となる割当てを見つけ出すことは非常に困難な作業となる。

そこで、周波数割当作業に要する時間と労力を削減することを目的に、干渉する基地局数が非常に多くなる場合においても、効率的に最適な周波数割当てを求められることができる周波数割当て手法を開発した。

#### (1) 周波数割当て手法の開発

開発した割当て手法では、遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithm)と呼ばれる、生物の進化過程を模して作られた探索アルゴリズムを用いて、最適な基地局への周波数割当てを見つけ出す。GAでは解(基地局への周波数割当て)の情報を染色体に記録した個体の集団に対して、交叉や突然変異と呼ばれる操作を加えることで、より良い個体(解)に進化させていく。GAの一般的な操作手順を示すと以下ようになる(図5-2-2)。

- a. **初期化**: ランダムな染色体をもつ個体をあらかじめ決められた個数生成して、これを初期集団とする。
- b. **再生**: 集団の各個体の適合度(染色体に記録された解の良し悪し)を計算して、適合度の低いいくつかの個体を淘汰する。また淘汰した個体の数だけ、新しい個体を生成する(図5-2-2)。
- c. **交叉**: 集団の2つの個体を選び出し、それぞれの染色体をランダムに選んだ同じ位置で切断し、その一部を交換する(図5-2-2)。
- d. **突然変異**: あらかじめ決められた突然変異率にしたがって、染色体の遺伝子の値を別の値へと変更する(図5-2-2)。
- e. **終了判定**: 終了条件が満たされたなら、アルゴリズムを終了する。集団内でもっとも適合度が高い個体の染色体に記録された解を最適解とする。終了条件が満たされなければ、集団の世代数を1増やし、再生からの操作を繰り返す。なお、終了条件としては「世代数があらかじめ設定した数に達したか?」という条件を用いるのがもっとも一般的である。

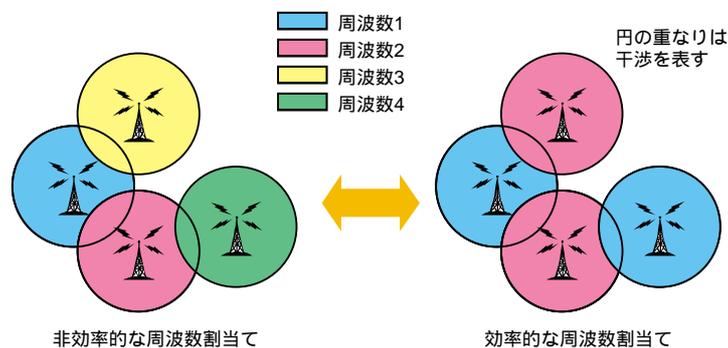


図5-2-1 効率的な周波数割当て

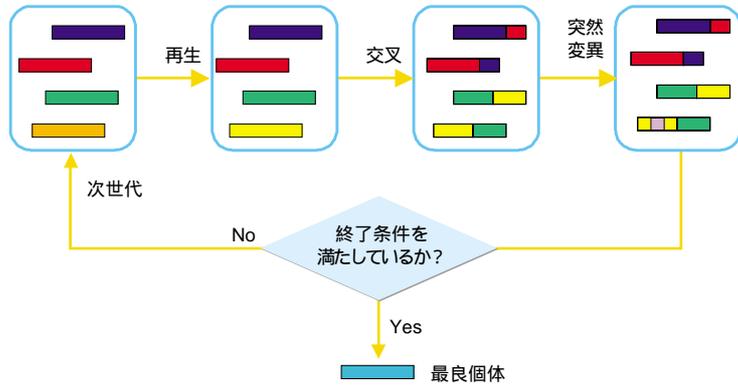


図5-2-2 GAの一般的な操作手順

ただし、一般的なGAをそのまま適用したのでは、現実の電力用移動無線システムの最適な周波数配置を求めることはできない。遮蔽物の少ない海を挟んで、4つの電力会社が隣接する瀬戸内地域などでは、非常に多くの基地局同士が複雑に干渉しあい、一般的なGAでこうした地域の最適な周波数割当てを求めることは不可能となる。そこで新たな割当手法を開発した。開発した割当手法では、GAに割当て可能な周波数が少ない基地局から、優先的に周波数を割り当てていくという割当てルールを組み合わせることで、効率的に最適な割当てを求めることを可能としている。

開発した手法では、個体の染色体に基地局へ周波数を割り当てる優先度を記録し、使用する周波数が最小となる基地局への周波数の割当順序を求める。染色体の情報と割当てルールを基に、基地局に順次周波数を割り当てていく手順を、図5-2-3の4つの基地局へ周波数を割り当てる単純な問題を例に示すと以下ようになる。

**ステップ1**：次の式で計算される、各基地局の「割当可能周波数による優先度」を計算する（図5-2-4）。

割当可能周波数による優先度 = 割り当て可能な周波

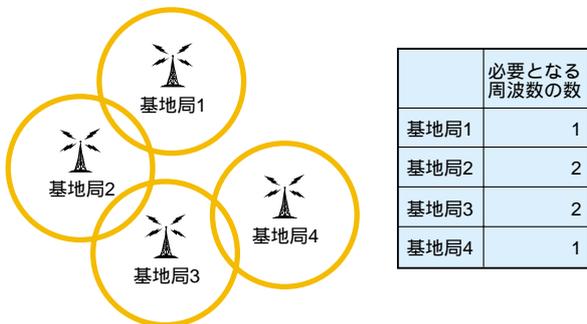


図5-2-3 4つの基地局からなる周波数割当ての例題

数の数 / (必要な周波数の数 - 既に割り当てた周波数の数)

**ステップ2**：ステップ1で計算した優先度と、染色体にコード化された優先度（図5-2-4）との積（図5-2-4）を計算する。この積がもっとも小さい基地局に、割当て可能なもっとも番号の小さい周波数を割り当てる。

**ステップ3**：すべての基地局へ必要となる周波数を割り



図5-2-4 染色体の情報を基にした周波数の割当て手順

当てたら終了する。そうでなければステップ1からの操作を繰り返す。

## (2) 性能評価と実問題への適用

周波数配置に関する研究で用いられている代表的なテスト問題に、フィラデルフィア近郊の携帯電話システムを基に作られた、フィラデルフィア問題と呼ばれる問題がある。この問題には各基地局で必要となる周波数の数や、干渉条件などにバリエーションを設けた複数の問題があるが、これまで、すべての問題の最適な周波数配置を求められる手法はなかった。しかし、開発した手法を適用したところ、すべての問題で使用する周波数の数が最小となる周波数配置を求めることができた。

また、開発した手法は実際に九州電力管内と4つの電力会社の基地局が干渉する、瀬戸内地域の電力用移動無線システムの最適な周波数割当てを求めるのに利用され、これまで基本的には担当者の手作業により、長い時間をかけて行われていた割当て作業を、わずか数十分で完了することができ、割当て時間の大幅な削減を実現した。

### 5-2-2 CO<sub>2</sub> 排出権取引ルールへのGAの適用

#### 背景・目的

電気事業と関係の深い2つの市場の開設が、国内で検討されている。その1つが電力を取引する市場であり、もう1つがCO<sub>2</sub>の削減目標に従って割り当てられた、CO<sub>2</sub>の排出可能量（CO<sub>2</sub>排出権）を取引する市場である。こうした市場の導入にあたっては、どのような取引ルールを設定するかが重要な課題の1つとなる。取引ルールが適切でなければ、価格の高騰や供給不足といった問題を生じさせる要因となる。

しかし、これら2つの市場での取引がどのように行われるかを、事前に予測することは困難である。電力市場には従来の電気事業に加え、独立系発電事業者（IPP：Independent Power Producer）などが参加すると予想されるが、こうした市場参加者の多くは火力発電の設備を保有している。火力発電で電力を生産すると、副産物としてCO<sub>2</sub>が排出されることから、たとえば電力市場で多くの電力を販売すれば、一般により多くのCO<sub>2</sub>排出権が必要となる。このため、ある企業が電力市場で取る行

動と、その企業がCO<sub>2</sub>排出権市場で取る行動は密接に関連する。また、新しく効率の高い発電設備を導入すれば、CO<sub>2</sub>の排出量や発電コストが削減されるので、企業が2つの市場で取る行動は、新しい発電設備の導入量によっても変化する。このようにある企業が2つの市場で取る行動は相互に影響しあい、また新しく導入する発電設備の導入量によっても変化するから、企業が市場でどのように行動し、その結果市場での取引がどのように行われるかを、理論的に予測することは非常に困難となる。

こうした複雑に関連する2つの市場での取引動向を分析する方法の1つとして、実験参加者に電力市場とCO<sub>2</sub>排出権市場での取引を模擬してもらう実験が行われている。しかし、こうした取引実験を行うには、非常に多くの時間とコストが必要となる。適正な市場の取引ルールを探索するには、さまざまに条件を変えながら繰り返し取引実験を行い、事前に問題点を抽出しておく必要がある。しかし、そのすべてを人間が取引する実験で行うには限界がある。

そこで、市場での取引ルールの検討などを支援するツールとして、さまざまな条件での取引動向を、短時間で模擬できるシミュレーションシステムを開発した。

#### (1) シミュレーションシステムの開発

開発したシミュレーションシステムでは、図5-2-5に示すように、コンピュータ上の仮想市場で、人間に代わってエージェントと呼ばれるコンピュータプログラムが取引を行うことで、取引動向を模擬する。これまでも仮想市場におけるエージェントの行動から、市場取引などを模擬する方法が提案されている。しかし、これらの方法を用いて電力市場とCO<sub>2</sub>排出権市場の取引シミュレーションを行うには、エージェントが最適な戦略を学習する方法が問題となる。前述のように、1つのエージェントが2つの市場で取る行動は相互に関連しあい、また新しい発電設備の導入によっても変化するから、電力市場での行動戦略、排出権市場での行動戦略、それに発電設備の投資戦略の組合せを1つの戦略として考えなければならない。このためエージェントが取り得る戦略の組合せの数は膨大となり、従来用いられている学習方法では、最適な戦略を学習することが困難となる。

開発したシミュレーションシステムでは、生物界の「宿主 - 寄生虫」の関係をモデル化した共進化型アルゴ

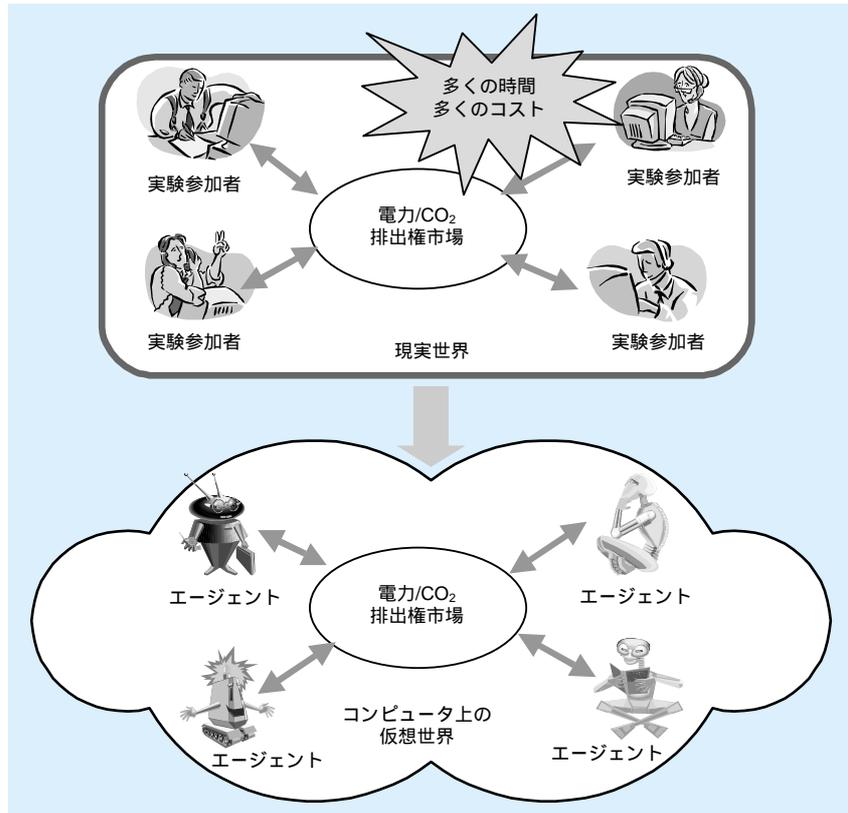


図5-2-5 エージェントシミュレーション

リズムを用いて、エージェントが膨大な戦略の中から最適な戦略を学習する。共進化型アルゴリズムとは図5-2-6のように、宿主である生物は寄生虫からの防御を進化させ、寄生虫はその防御を打ち破るために進化するという競争を続けることで、より強い宿主/寄生虫に進化させていく方法である。それぞれのエージェント毎に、戦略を個体の染色体に記録したうえで、それぞれの個体集合をお互いに競争させながら、前述のGAの遺伝的操作を加えて進化させたところ、取り得る戦略が膨大となる電力市場とCO<sub>2</sub>排出権市場の取引シミュレーションにおいても、効率的に最適な戦略を学習することができた。

## (2) シミュレーション結果

当所で人間を実験参加者として行った取引実験と同様の条件設定で、開発したシミュレーションシステムを用いて、電力市場とCO<sub>2</sub>排出権市場での取引を模擬する実験を行った。その結果、人間を参加者とした場合には2日間を要した実験を、シミュレーションでは、データの準備や、エージェントの学習に要する時間を含めても、約5時間で終了することができ、取引実験に要する時間を大幅に短縮することができた。また、開発したシミュ

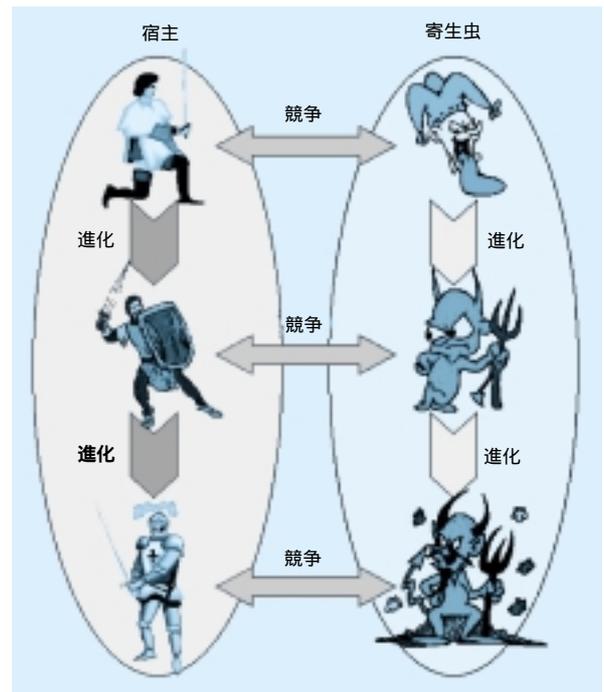


図5-2-6 共進化型アルゴリズム

レーションシステムを用いた取引実験の結果から、所有する排出権を超過したCO<sub>2</sub>を排出した場合の罰則金の設定に注意を払う必要のあることが判明した。具体的には、

市場で取引されたCO<sub>2</sub>排出権の価格に連動して罰則金を決める取引ルールの場合、排出権を大幅に越えるCO<sub>2</sub>を排出する戦略(図5-2-7)が、もっとも経済的となる場合のあることが分かった。これまでに何回も行われた人間を参加者とした実験では、こうした戦略は取られたことが無く、取引ルールの問題点を検証する目的からも、開発したシミュレーションシステムが有効であることが確認できた。

### 5-2-3 電力自由化市場制度設計へのマルチエージェントの適用

#### 背景・目的

わが国における電気事業の自由化については、2003年2月に電気事業分科会の報告書が出され、その一つとして全国規模の卸電力市場を整備することが打ち出された。しかしながら、すでに卸電力市場が導入されている欧米の一部の市場では、取引価格の極端な乱高下(価格スパイク)や高止まりなどの問題が顕在化している。電力は社会的必需財であることから、その価格が極端に不安定になることは望ましくない。今後わが国に導入する卸電力市場の制度設計の際には、様々な制度設計要因が市場に与える影響を十分に分析・評価した上で、取引価格の乱高下や高止まりを抑制するための手立てが十分に組み込まれる必要がある。

そこで、卸電力市場における価格変動などを定量的に分析・評価するために、マルチエージェント技術を用いた電力市場シミュレーションモデルを開発した。市場参加者(発電および供給事業者)を各自の入札戦略に基づいて独立に振る舞う「エージェント」としてモデル化する。

る。エージェントアプローチの利点は意思決定者の柔軟なモデル化が可能な点であり、電力の売買取引だけでなく、発送配電に関連する電力系統固有の技術的問題も考慮する必要のある電力市場のモデル化にとって、有効なアプローチの一つである。

#### (1) 電力市場シミュレーションの基本モデル

電力自由化が先行する諸外国・地域の卸電力市場を参考に、図5-2-8に示すような私的契約に基づく相対取引とプール型の卸電力市場(プール市場)とが混在する電力供給構造を想定する。発電事業者は相対契約に基づく電力供給を行う一方で、プール市場を介して供給事業者と電力の市場取引を行う。

プール市場では性質の異なる2種類の市場(前日市場とリアルタイム市場)を想定する。前日市場では、卸電力が実際に取り引きされる前日までに市場参加者が希望価格と取引量を電力取引所に入札する。電力取引所は各市場参加者からの入札を総合した需給曲線を作成し、その交点でもって市場価格を決定する。リアルタイム市場では、発電事業者は前日市場と同様に希望価格と取引量を入札するが、供給事業者は取引量のみを系統運用者に申告する。

#### (2) 市場参加者のエージェントモデル

市場参加者の多様性や行動戦略を考慮するために、図5-2-9に示すように発電事業者と供給事業者をそれぞれ発電エージェント、需要家エージェントとしてモデル化する。各エージェントは過去の入札行動とその結果として得られる報酬をもとに、獲得報酬を最大化するような最適な入札行動の獲得を試みる。具体的には、発電エー

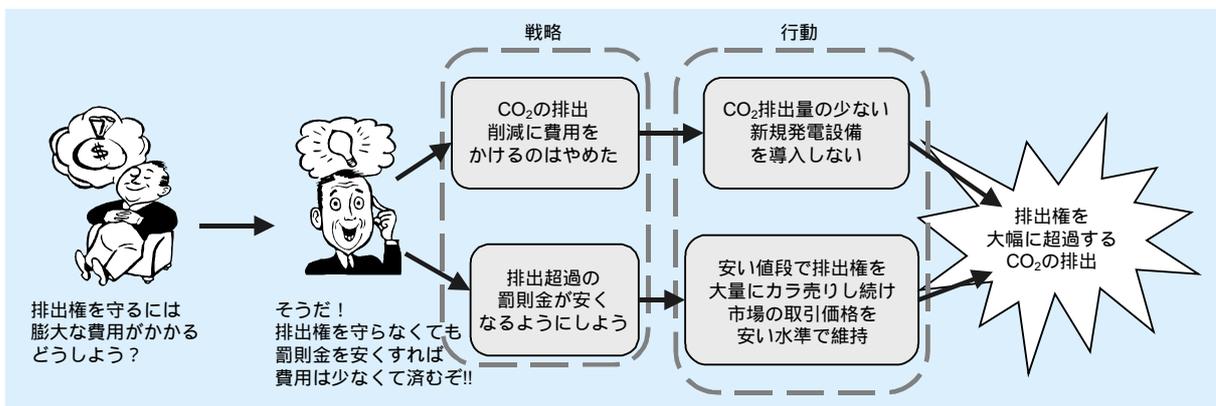


図5-2-7 大幅な排出超過を前提とする戦略(取引ルールの問題点)

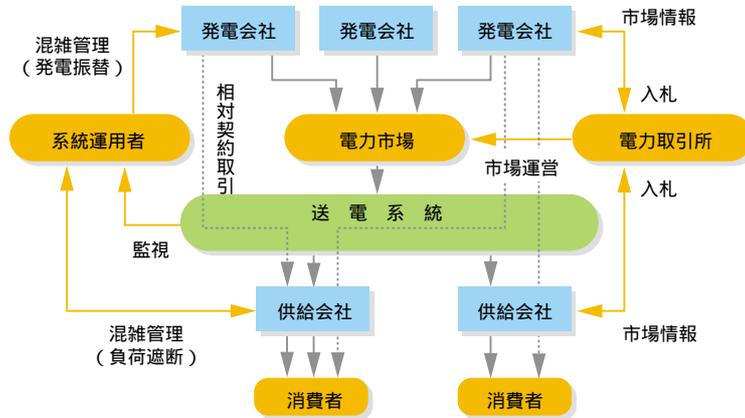


図5-2-8 電力供給構造の想定

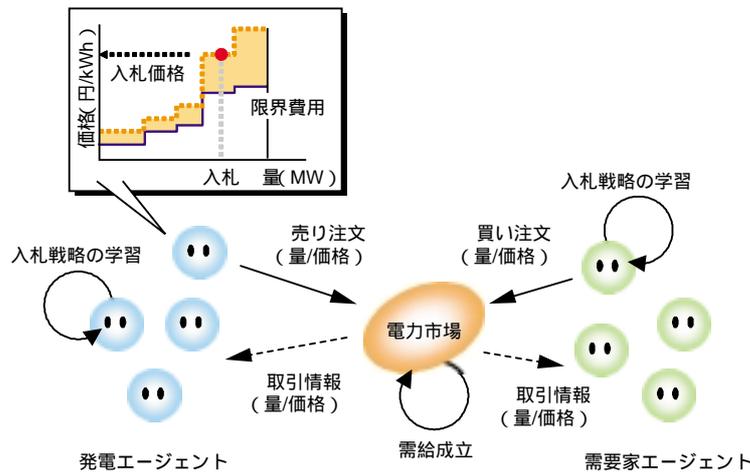


図5-2-9 市場参加者のエージェントモデル

ジェントは売上から発電費用を引いた利潤の最大化を目指し、需要家エージェントは平均購入費用の最小化を目指して行動する。これはエージェントに強化学習に基づく学習モデルを実装することで実現する。

発電エージェントは限界費用の異なる複数の発電機を保有しており、各発電機の限界費用に期待利潤を上乗せした価格を各市場に入札する。また、保有する発電機の総設備容量の一部を限界費用の安い設備順に、前日市場に入札し、残りをリアルタイム市場に入札する。一方、需要家エージェントは、期待販売価格に割引率を乗じた価格を前日市場に入札する。期待需要の一部は前日市場に入札し、残りをリアルタイム市場に入札する。

### (3) 開発モデルを用いた検討例

本シミュレーションモデルを用いることで、電力取引形態の違いや市場支配力などが、取引価格に与える影響

について分析することが可能になり、様々な課題に対する基本的な対応のあり方を探ることができる。表5-2-1に具体的な検討課題とその検討内容を示す。以下では、市場参加者の入札行動が取引価格に与える影響について検討・分析した結果について報告する。

本検討ではモデル系統（母線数47、送電線数78、発電所数10）を介した電力取引を想定する。想定した電力系統を南北2地域に分割し、地域間の連系線で発生す

表5-2-1 主な検討課題

適用検討課題	具体的な検討内容
電力取引形態の影響	相対取引とプール取引の比率
市場支配力の影響	市場参加者の数や規模、設備保有率の比較
系統制約の影響	送電線混雑の発生、混雑管理方式のあり方
価格決定方式の影響	入札方式や市場価格の決定方法
価格弾力性の影響	需要家の価格弾力性
不確実性の影響	需要予測誤差、需要変動シナリオ
市場における情報の影響	市場における各種情報の公開度合い

る混雑のみを考慮した。表5-2-2に示すように、シミュレーションに用いる需給量の設定は発電側および需要家側シナリオを組み合わせた9種類のシナリオを想定した。需要家側シナリオとして、全需要家エージェントの需要を一律に増加させた一律増加型と、南地域の需要のみ増加させた一部増加型を想定した。発電側シナリオとして通常寡占型に加え、総設備容量の半分以上を一社が独占的に保有するガリバー型も想定シナリオに含めた。発電エージェント数を5、需要家エージェント数を30とし、発電エージェントが保有する総発電機数を44とした。

各シナリオについて独立した50回のシミュレーションを行い、エージェントの入札行動が収束状態に至った際の平均市場価格（円/kWh）を図5-2-10に示す。需給逼迫時（S4、S5、S6）にはリアルタイム市場の取引価格が高騰する様子が確認できる。また、発電側シナリオにおいて基準ケースと比較してガリバー型（S2、S5、S8）の方が一般に取引価格が高いことなどが分かる。これらの結果を含め、取引制度や市場参加者の入札行動が価格変動に与える影響について分析した結果、価格高騰の基本的なメカニズムなど以下の点が明らかになった。

- a．需給逼迫時には取引価格が高騰し、特にリアルタイム市場における価格水準は発電エージェントの入札上限価格にまで達する。
- b．市場支配力を持つ発電エージェントの入札において、前日市場への出し渋りやリアルタイム市場での価格吊り上げなどの戦略的行動を確認した。
- c．前日市場にプライスカップが存在する場合、発電

表5-2-2 市場シミュレーションのシナリオ設定

需要側シナリオ	発電側シナリオ		
	基準ケース	ガリバー型	通常寡占型
基準ケース	S1	S2	S3
一律増加型	S4	S5	S6
一部増加型	S7	S8	S9

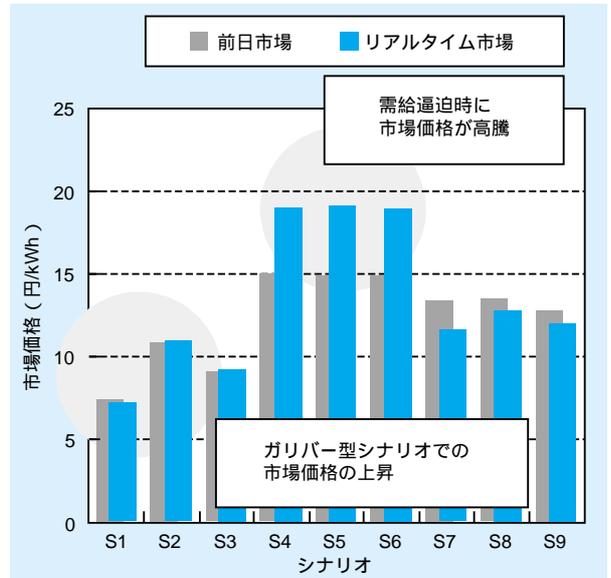


図5-2-10 シナリオ間の平均市場価格の比較

エージェントが取引価格の上限が設定されている前日市場を避け入札量を絞るため、前日市場での取引量が減少する。

- d．地域間を連系する送電線容量は取引価格に大きな影響を与える。

以上、卸電力市場における価格変動などを定量的に分析・評価するために、マルチエージェント技術を用いて開発した電力市場シミュレーションモデルの概要、ならびにモデルシステムに対する基本的な適用結果について述べた。本モデルの特長は、卸電力市場での価格変動に大きく影響する市場参加者の入札戦略に関するモデル化の能力が高い点にある。本モデルを用いることにより、事業者の戦略まで含めた詳細な検討が可能となる。

今後は、計画期間内の需要変動を考慮したモデルへの拡張を図り、市場価格や需要量など将来の不確実性を考慮した最適化手法の適用について検討を進める。

## コラム7：確立計画法

数理計画法とは、与えられた制約条件の下で、目的関数を最適化する手法である。数理計画法の適用分野は工業生産、エネルギーなどの工学的諸問題、企業の経営や計画、公共政策、さらには金融など、実社会のあらゆる面に及んでいる。電力システムの計画と運用の問題は、数理計画法が適用される代表的なシステムといえる。電力システムに対しては、設備のサービスレベルを確保した上で、システム全体を安定的かつ効率的に運用することが求められる。このようなシステム構成を求める問題やシステムの運用を求める問題は、数理計画法を用いて解くことができる。

### 不確実な状況下での数理計画法

電力システムに限らず現実の数理計画問題には、目的関数および制約条件に不確実要素を伴う場合が多い。不確実な状況下での計画はリスクを伴う。電力供給計画を例にあげて考えてみよう。電力需要および供給に必要な燃料費などは確定的な値ではなく、確率的な変動を含む。電力需要が想定値より大きくなると、供給が満たされない可能性が生じ、また電力需要の想定を大きくとりすぎると、供給設備に余剰が生じることになる。また、電力供給に必要な燃料費が変動する場合は、供給コストの最適性が失われる可能性がある。このようなリスクは、現実の計画においては回避しなければならない。

そのため、現実のシステムに含まれる不確実な状況をモデル化し、確率的変動要素を考慮することが必要となる。不確実要素を考慮した数理計画法は、確率計画法と呼ばれている。電気事業においては、今後予定される電力自由化や規制緩和の進展により、不確実な状況下での意思決定やリスク管理手法が重要となるため、確率計画法の理論・手法の進展が求められている。当所では電気事業における設計・運用・計画などの問題に確率計画法を応用した。以下これらの応用例を紹介しよう。

### 確率計画法の電気事業への応用

発電機の起動停止問題とは、時間帯ごと与えられた電力需要を満たすように、各発電機の起動停止スケジュールおよび発電量を求める問題であ

り、大規模かつ複雑なスケジューリング問題である。起動停止問題の目的関数は、燃料費と発電機の起動費用の総和である。図は、電力需要の変動シナリオ例であり、確率計画法を用いると、電力需要の変動や、電力の市場への売買を考慮したスケジュールを求めることができる。

火力・原子力の発電機の補修の時間的制約を考慮して補修費用を最小化する問題は、整数計画問題として取り扱うことができる。この問題を拡張して需要の変動を考慮すると、確率計画法を用いて効率的に解を求めることができる。

電力供給においては、景気などによる長期的な需要変動や、気象条件などの変化による短期的な需要変動を想定している。電力需要値を確率変数と考えると、電力需要を満たすという制約条件に対する信頼度は、多次元の数値積分によって求められ、非線形最適化手法と組み合わせることによって、与えられた信頼度に対して最適な供給費用を求めることが可能となり、リスクを管理することができる。

電力システムの問題以外にも、確率計画法は通信網設計などに応用できる。予想される将来の通信需要の増大に対応するために、不確実な通信量のシナリオを仮定する。将来のネットワークの拡張を考慮すると、初期投資費用と設備増設費用の期待値の総和を最小化する問題となり、確率計画法により解を求めることができる。この手法はより複雑な多期間の問題へと拡張できる。

確率計画法により、不確実な状況下での設計・運用・計画などの問題において生じるリスクを管理または回避することが可能であり、今後も電気事業での応用が期待できる。

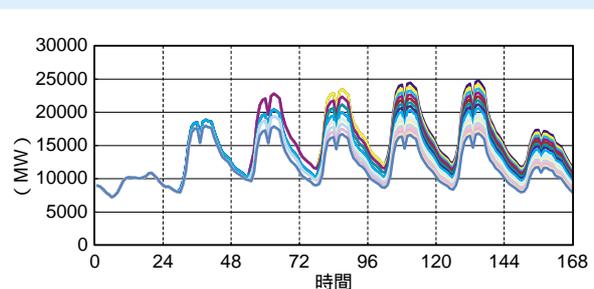


図1 電力需要の変動シナリオ

## 5 - 3 画像技術

### 5-3-1 画像計測の適用

#### (1) 電線の揺れ計測

##### 背景・目的

台風や季節風などの強い風の影響で電線が大きく揺れ、電線同士が接触して短絡したり、さらにひどい場合には鉄塔が倒壊することがある。この風の影響を解明するために、電線の揺れ方と風の関係に対する種々の研究がなされている。電線の揺れ方を観測する方法として、電線に張力計や加速度計などを取り付け実際の揺れを測定する方法がとられてきたが、初期値の特定が難しいなど、揺れ方を十分に観測できない問題があった。そこで、監視用に設置されたビデオの画像情報を用いて、電線の揺れを算定する遠隔計測手法を開発した。

##### a . 画像情報による変位量の算出法

電線の揺れ方を解明するためには、電線上の複数個所での揺れの変位の測定が必要となる。

そこで図5-3-1の観測系により、送電線上の3個所にターゲット（反射板）を取り付けて、電線の変位を観測し、画像情報を用いた解析による変位量の算出精度を調べた。

観測では、ビデオに映るターゲットを強調するなどの

画像処理を行い、画像上でターゲットの初期値を設定した後、揺れの解析を行う。移動したターゲットの画像と直前の画像を比較することにより、画像上でのターゲットの変位が計算できるため、画像上での移動量と実際の移動量の関係をあらかじめ求めて電線の揺れの変位量を算定する。

電線の揺れの変位量の算出精度を調べるために、観測系の電線をワイヤーで引っ張り、移動するターゲットを画像上で追跡して、画像上の変位量を算出し、その算出結果と実際にレーザ測距儀で計測した結果とを比較した。

その結果、ターゲットを取り付けたいずれの個所でも、画像上で設定した約1画素の精度で、変位を推定することがわかった。これは、実際には、観測系の距離85メートルの地点で変位量3センチ、255mの地点で5センチの誤差に相当する。

##### b . 電線揺れの周波数応答特性解析

電線の揺れ方を解明するには、揺れ方が支配的になる周波数を知ることが必要となる。国内で通常用いられているNISC方式のビデオ映像の場合、毎秒30枚の画像を取り込んでいるため、33ミリ秒ごとに画像データが得られる。したがって、画像データから各地点のターゲットの位置を求めれば、時系列の位置データが得られる。この時系列データをFFT（高速フーリエ変換）処理す

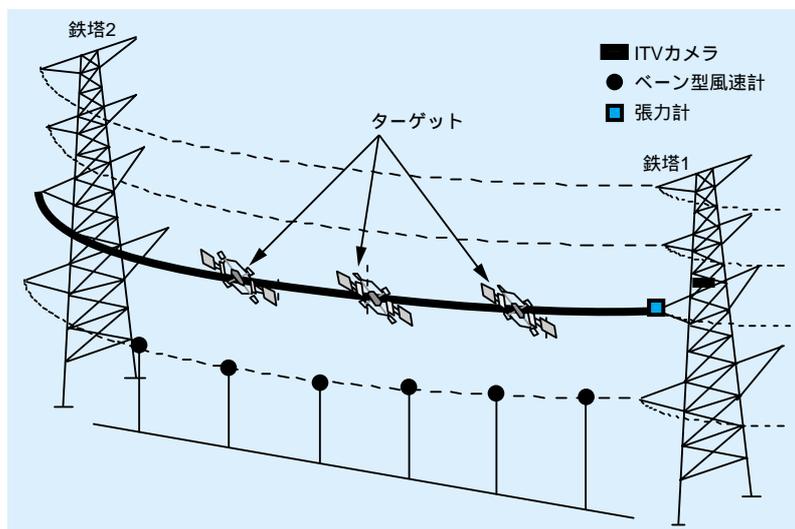


図5-3-1 観測系

ると図5-3-2に示すように、各地点での揺れの周波数応答特性が得られ、各地点でのパワーの大きい支配的な振動の周波数がわかる。さらに、支配的な周波数と3点の位相を勘案することで、図5-3-3に示すように電線の揺れ方に大きな影響を与える電線の振動モードが解明できる。

これによって、電線の変位量や支配的な揺れ方がわかるため、揺れの最大変位量や最大変位が発生する電線部分の推定が可能となり、電線の防振対策への活用が可能となる。

また、開発した手法は、市販のビデオカメラで撮影した映像に対しても適用可能であり、巡視者が偶然撮影したギャロッピング映像に対して、同様の解析を行い、周

波数応答特性が得られている。このように、従来、現象の記録としての価値しかなかったビデオ映像から容易に周波数応答特性を求めることが可能となった。この手法は、発生箇所の予測が難しいため定点観測が困難なギャロッピング現象に対し、映像が撮影できれば揺れの周波数応答特性を解析できるため、ギャロッピング現象の解明に役立つと考えられる。

## (2) 格子法によるひずみ計測

### 背景・目的

格子法によるひずみ計測は、被写体に円形ターゲットなどのマークを取り付け、高精度なデジタルカメラなどで変形を記録し、画像処理により座標を求め、ひずみを算出する方法である。ひずみゲージ等では計測不能な大ひずみまで測定でき、計測範囲が広いいため変形の局所化を捉えることができる。本節では格子法による画像計測の概要と、鉄筋コンクリート構造物、杭基礎周辺地盤の変形計測に適用し、得られた局所変形挙動について紹介する。

#### a. 格子法によるひずみ計測

当所で開発した画像計測ソフトでは、図5-3-4に示した流れに沿って画像処理を行っている。

計測画像(i)にはカメラのレンズの収差が生じているため、カメラの内部パラメータから収差を復元する標定処理を施し、放射状のひずみを除去する(ii)。カラー画像(RGB)から色相、色彩、明度の色空間(HSI)に変換し、色彩の画像を取り出す(iii)。100×100ピクセルで平均化した画像との動的しきい値を用いて2値化する(iv)。ターゲットのみを抽出するため、認識した領域の特徴(サイズ、丸み)を用いてフィルター処理を行う(v)。ターゲットは円形のものを使用しているため、量子化された領域を円にフィッティングし、円の中心位置をターゲットの座標として求める(vi)。

種々の実験に適用した経験からこの方法が、試験体の汚れや、変形後にひび割れなどが生じた計測画像に対しても、ターゲットの認識率が高く、良好な計測精度が得られている。

#### b. 鉄筋コンクリート構造物の変形計測

鉄筋コンクリート(RC)構造物の力学試験では、ひ

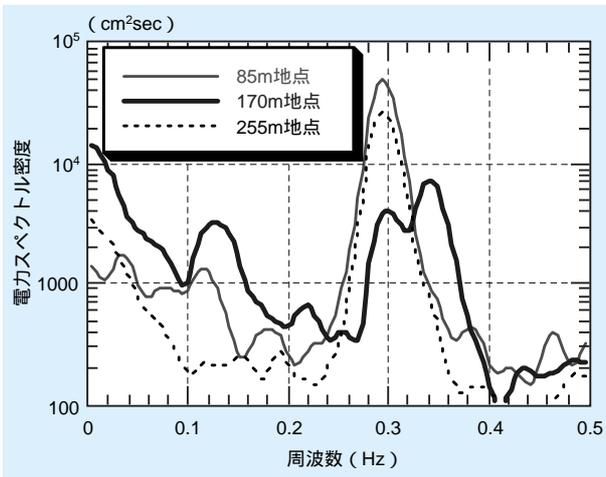


図5-3-2 周波数応答解析

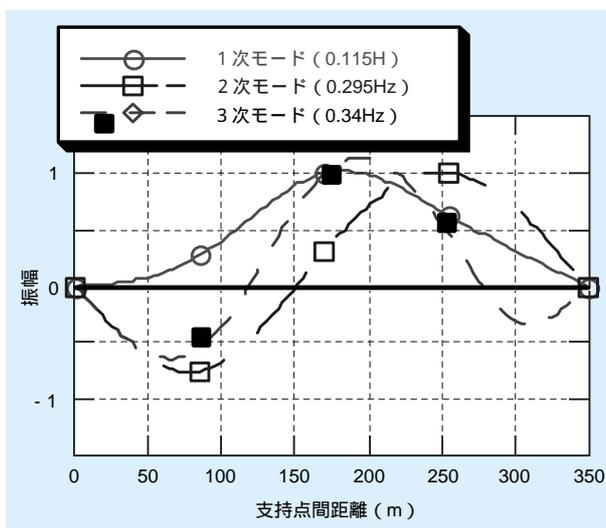


図5-3-3 揺れのモード解析

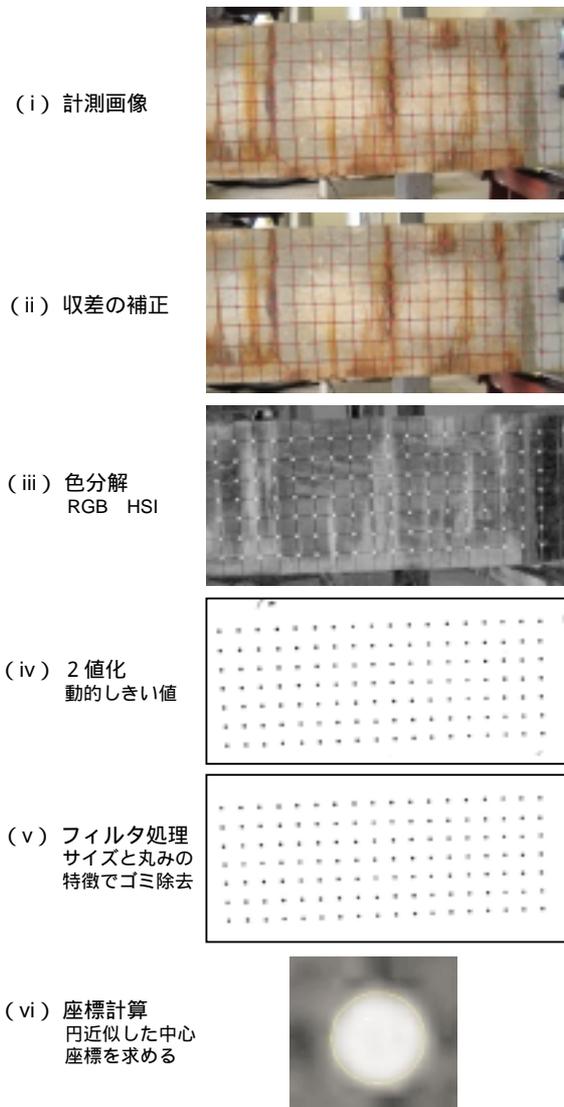


図5-3-4 画像処理手順

び割れを伴う変形が生じ、破壊に至るが、局所化する変形挙動などの破壊モード・メカニズムの解明が耐震安全性の向上に重要である。

図5-3-5は耐震壁を有するRCボックス構造物のせん断試験に画像計測を適用した例であり、ひび割れ状況を示す計測画像と変形による引張ひずみ分布図を示している。この構造物の終局耐力時点での耐震壁の変形状況は、せん断による斜め引張領域と左壁に沿った圧縮領域に局所化して破壊が生じている様子がみられる。従来のRC構造物の力学実験では、ひび割れ状況のスケッチなどによる定性的な破壊挙動を把握するのにとどまっていたが、ひずみを計算することで損傷を定量化する事ができ、ひずみコンターや主ひずみのベクトル図を用いた可視化により、破壊モードを理解するのも有効な手段である。

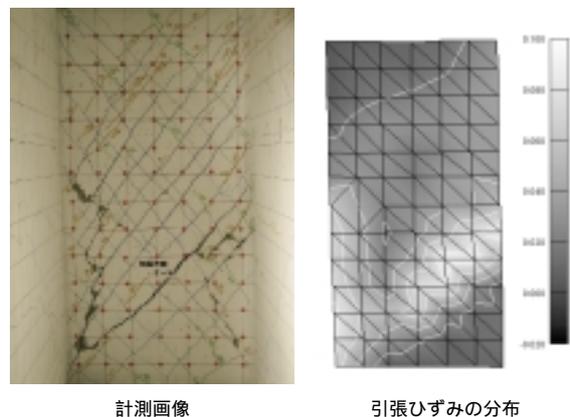


図5-3-5 RC構造物の画像計測

### c. 杭基礎周辺地盤の変形計測

地中の基礎の支持力を評価するために、基礎周辺地盤の変形挙動を測定する模型実験が行われる。この検討では、2次元土槽内に模型地盤を作成し、その鉛直断面に格子パターンを印刷したメンブレン（ゴム膜）を貼り付け、変形状況を撮影して、画像処理により数千点に及ぶ格子点の座標を求めることが要求される。前述の画像計測プログラムを改造して、東京電力(株)が実施した杭の引抜き実験に適用した。

図5-3-6に杭基礎周辺地盤の画像計測結果を示す。左図は変形前後の格子メッシュの移動状況を示したもので、上方に引き上げられる杭に沿って地盤の変形が生じている状況が観察できる。右図は計測された格子座標を用いて算出した最大せん断ひずみ分布を重ねて表示している。地盤内の破壊面は杭に沿ってくさび状に複数に分布している状況が計測できており、精細なメッシュと高解像度の画像処理を用いることにより、従来得られなかった地

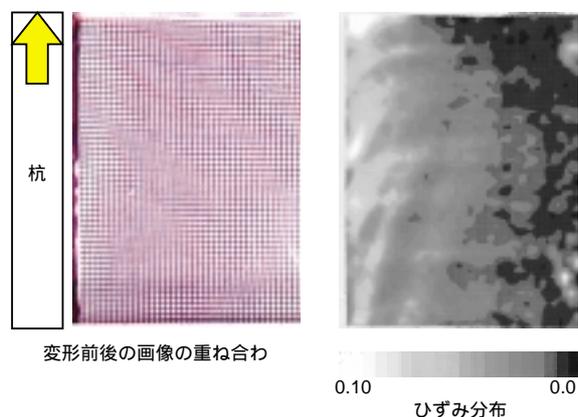


図5-3-6 杭基礎周辺地盤の画像計測

盤の局所破壊に関する新たなデータを得ることができた。

### (3) 流速分布計測

#### 背景・目的

基本的な流れの理解や実機設計のためのデータ取得を目的として、これまでに多くの水路・風洞実験が行われてきた。その応用は、自動車、飛行機などの輸送機の空力設計、建築物の耐風設計、各種プラントの熱設計など多岐にわたる。ここで、実験の成否を決める事項の一つとして、流速計測法の測定精度が挙げられる。そして、様々な流れ場に対して熱線流速計やレーザードップラー流速計などに代表される種々の流速計測法が開発されてきた。

これらの計測手法の中で、近年、計算機の能力向上とともに、可視化画像のデジタル処理による粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry、PIV) が盛んに研究されるようになった。基本的な PIV システムは、トレーサ粒子発生装置、照明装置、撮影装置および画像記録・解析装置から構成される。実験では、流れ場に微細な粒子を混入することで流れ場を可視化する。そして、可視化画像をコンピュータのメモリに取り込んだ後、画像内の粒子位置情報を利用して、複数の測定点における粒子の移動量を算出し速度分布を求める。他の計測手法と比較して、PIV は多次元測定への展開が容易であり、流動場の空間構造の同定に関する有力なツールとして威力を発揮している。

#### a . PIV アルゴリズムの開発

当所では、水理模型実験、発電プラントの熱流動実験、構造物の耐風設計、海面での CO<sub>2</sub> 挙動の把握など、様々な課題に対して PIV による流速計測を活用している。同時に、アルゴリズムの改良を中心に PIV の高度化も進めている。水理模型試験や発電プラントの熱流動実験では、発電プラント内の 3 次元流動場を容易に観察するために、スキャニング PIV 法を開発した。スキャニング PIV は、光シートを面外方向にスキャンさせることによって、3 次元流速場を計測する方法であり、その特長として、高い空間分解能が挙げられる。また、海面での CO<sub>2</sub> 挙動把握に関する研究では、2 色レーザー誘起蛍光法 (Laser Induced Fluorescence : LIF) と PIV を組み合わせた速度場と濃度場の高精度同時計測を検討している。

以下では、使用済燃料貯蔵施設の除熱試験での計測事例を取り上げ、気流を対象とした PIV による流速計測の事例を紹介する。

#### b . 熱流動実験への PIV 適用例

使用済燃料貯蔵施設では、原子力発電所から生じる使用済燃料の管理・貯蔵にあたり、崩壊熱の除熱特性を適切に評価する必要がある。崩壊熱の大部分は、発熱体周りに形成される熱駆動境界層での対流伝熱により除去されることから、このような流れ場の流動・伝熱特性を把握することが重要となる。図 5-3-7 に、実験に用いた縦型風洞装置の概要を示す。風洞内に鉛直に設置された金属平板を電気加熱 (表面温度は 300 程度) することで、その周りに熱駆動境界層 (上昇流) を発達させた。そして、発熱体近傍の流況を PIV により調べた。トレーサ粒子として、境界層内に直径 1 μm 程度のオイルミストを混入し、出力 90 mJ/pulse のダブルパルス YAG レーザにより、2 次元断面の流れ場を可視化した。撮影には、観察距離 0.7m に設置された CCD カメラを用いた。CCD カメラからの画像出力を、リアルタイムでパーソナルコンピュータ (PC) のハードディスクに直接取り込み、ビットマップ (bmp) ファイルとして、10fps (frames per second) でハードディスクに記録した。そして、相



図5-3-7 縦型風洞実験設備

互相関法を適用し、速度ベクトルを算出した。本実験の測定体積は $1.2 \times 1.2 \times 1\text{mm}^3$ 程度である。さらに、ダイナミックレンジの増加を目指し、階層型およびサブピクセルアルゴリズムを適用した。図5-3-8に、実験で得られた速度ベクトルの一例を示す。本結果は、発熱体に平行な断面での変動成分（瞬時値から時間平均値を引いたもの）により構成される速度ベクトルであり、可視化領域は、境界層厚さ（上昇流が形成される領域）に一致する。図から明らかなように、熱駆動境界層の瞬時変動速度は、空間的に大きな変動を有している。流れ場は強い非一様性に支配されており、境界層の厚さに匹敵する大規模な流体運動を観察することができる。別途実施した温度計測との対比から、このような大規模運動が、熱駆動境界層の対流伝熱と強く関連することが明らかになっており、除熱特性を評価する上で、このような流体構造を十分に把握する必要があるといえる。

このように、PIVでは流体運動の特徴を示す多彩な情報を手に入れることができ、その結果は、現象の直感的な理解に資するものである。しかし、PIVには、ダイナミックレンジが不足しやすい、長時間分解能を確保しにくいなどの欠点もあり、熱、濃度、密度など複数の物理量の同時計測なども含め、今後も測定手法の更なる高度化を重要な課題として研究を進める予定である。

#### （４）石炭ガス化炉模擬環境下における高温微粒子挙動計測 背景・目的

現在、250MW級石炭ガス化複合発電実証機計画が

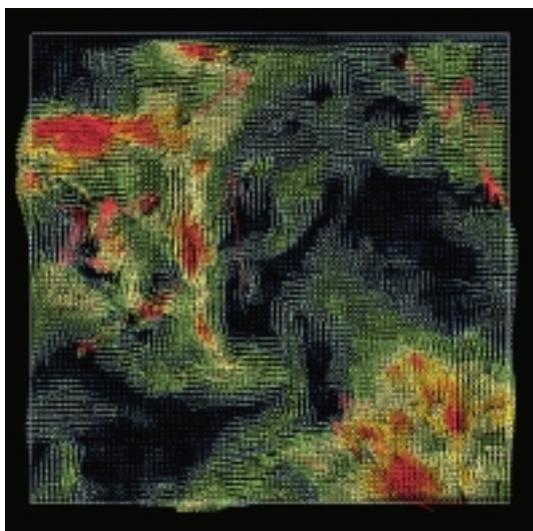


図5-3-8 PIVで得られた変動速度ベクトルの一例

2007年の運開を目指し、電気事業大で精力的に進められている。その中核設備である石炭ガス化炉内においては、石炭中の灰分が炉内壁に付着・成長し、炉の安定運転に支障を与えることが懸念されている。このことから当所では、ガス化炉内灰付着性予測技術の確立を目指し、研究に取り組んでいる。

灰付着現象には、灰の組成や温度、粒径および衝突時の速度など多くの因子が複雑に関与しており、現象解明を困難にさせている。そこで、当所は、波長分光機能を組み込んだ高速度ビデオカメラを用いた高温微粒子計測システム（図5-3-9）を開発し、従来例のない単一灰粒子毎の温度、粒径、速度の同時計測を行い、付着/反発挙動との相関性を検討している。

##### a．装置概要および測定原理

本装置の概略図を図5-3-9に示す。本装置は、長距離顕微鏡を接続した3波長式高速度ビデオカメラと撮影画像の収録・解析用計算機からなる。従来のPTV（Particle Tracking Velocimetry）技術による速度計測や画素換算による粒径計測に加え、撮影画像を3波長に分光することで、二色法により温度計測を行うことが本装置の特徴である。収録された画像は、粒子の付着/反発判定アルゴリズムを組み込んだ解析ソフトウェアにより演算処理され、付着/反発時毎の粒子状態量が算出される。

##### b．測定結果と成果の反映

結果の一例として、石炭ガス化炉内の温度分布（1000～1600）を模擬した落下型管状加熱炉中に灰粒子を落下させ、金属面へ衝突させた時の付着粒子の粒径と温度の関係を図5-3-10に示す。この石炭の場合、1400

3波長式高速度ビデオカメラ  
 分光波長：550、650、850nm  
 撮像素子：MOS型固体撮像素子  
 感光帯域：350～850nm

長距離顕微鏡  
 光学系：マクストフ・カセグレン系  
 検査距離：55cm～170cm  
 実視倍率：約125倍

解析用コンピュータ

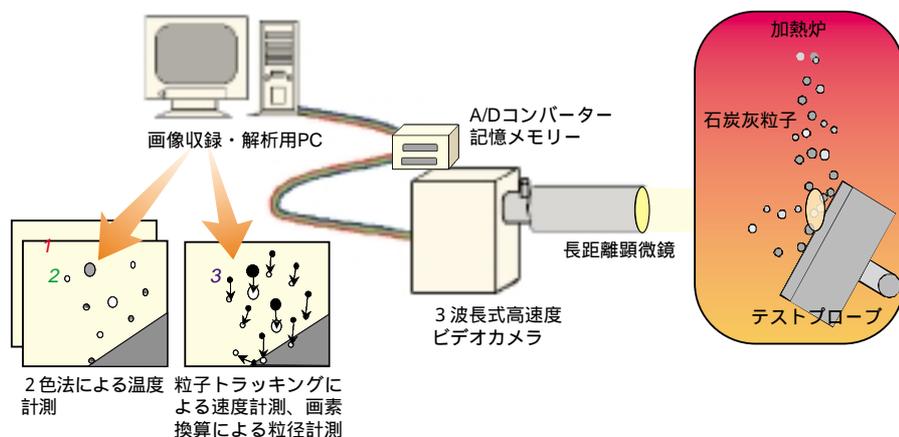


図5-3-9 高温微粒子計測システム概略

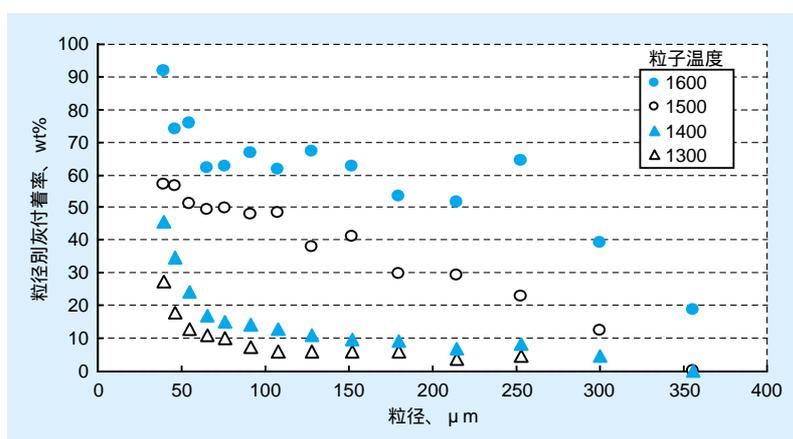


図5-3-10 高温微粒子計測システム概略

に加熱された粒子の付着確率は 150 μm で 10 % 程度と低いが、50 μm 以下では、50 % 程度まで上昇した。また、粒子温度の上昇に伴い、全粒径範囲で灰粒子付着率が向上し、分子間力に加えて、液相生成に伴う液架橋力の発生が付着性を増大させていることが明瞭となった。

本研究などで得られた基礎データは、灰付着モデルへ反映され、さらにそのモデルは石炭ガス化炉内灰付着性解析ソフトに導入されている。

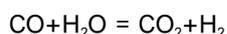
### (5) 燃料電池電極反応の直接観察

#### 背景・目的

燃料電池発電は、燃料と酸化剤の連続的な供給により、燃料の持つ化学エネルギーを直接・連続的に電気エネルギーに変換する発電方式である。燃料電池には、いくつかの種類があり、低温形と高温形に大別できる。低温形の燃料電池(りん酸形(PAFC)、固体高分子形(PEFC))は電極反応の進行を促進するために、電極内部に白金

(Pt) 触媒を分散担持させているが、PtはCOとの結合力が強く、燃料ガス中のCO濃度を極力低いレベルに抑制することが求められる。また、動作温度も200 以下となり、排熱の利用にも制約がある。

これに対して高温形の燃料電池(熔融炭酸塩形(MCFC)、固体酸化物形(SOFC))は、動作温度がそれぞれ600~700、800~1000 と高く、Ptが不要であるばかりでなく、次のシフト反応



によって、COがH<sub>2</sub>に変換され、高濃度のCOを含む石炭ガス化ガス燃料などを直接利用することができる。さらに、燃料電池から排出される高温・高圧のガスによって、ガスタービンや蒸気タービンによる動力回収、付加発電が可能となり、プラント全体の効率(発電端効率50~55% HHV基準)を高めることが可能となる。この

ような背景から、当所では発電効率がよく、大容量化、多様な燃料の使用が可能である MCFC の開発に取り組んでいる。

現在、MCFC の開発においては、天然ガスが燃料の主流であるが、石炭ガス化ガス、バイオマスガス、廃棄物ガス化ガスの利用が大いに期待されている。しかし、これらのガスは天然ガスに比べエネルギー密度が低いため、さらなる電池性能の向上が望まれており、当所では高性能電極の開発に取り組んでいる。まず高性能電極の条件および電極設計指針を与えるために、環境制御型電子顕微鏡を用い、直接高温状態（480 ~ 700 °C）で電極上での反応（特にカソード反応）を観察し、ミクロレベルで反応が活発に生じている場所を画像解析によって把握した。

### 電極反応活性ポイントの把握

MCFC のカソード反応  $\text{CO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- = \text{CO}_3^{2-}$  が生じている状態では、図 5-3-11 に示すように電解質の液滴が出現・消失を繰り返す電解質の生成過程が観察される。

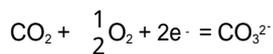
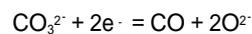


図 5-3-11 ①では大きな液滴が一つと小さな液滴が数個見られ、3秒後の図 5-3-11 ②では大きな液滴が消えている。そして4秒後の図 5-3-11 ③では、小さな液滴が生成している。これらの小さな液滴は成長と結合により、再び図 5-3-11 ①の状態になり、①のサイクルが繰り返される。この電解質の生成のサイクルは、過電圧が大きいほど活発になる。また、液滴の高さは約 0.1 ~ 0.5 μm

であり、液滴の周りでは極めて薄い電解質膜の移動が、動画における輝度の変化より観察された。

このように MCFC のカソード反応によって電解質の液滴の消滅・生成が生じることはわかったが、液滴の形成されていない場所においては全く動きが観察できず、MCFC のカソード反応が活性となる場所（反応活性ポイント）は特定できていない。しかし、水蒸気雰囲気において電位を - 0.7V（開回路電位基準）以下に設定した場合、式①の反応に伴うガス発生を伴う反応が観察され、その現象を画像解析することによって反応活性ポイントを特定することに成功した。



反応活性ポイントの特定においては、まず、そのガスの発生状況をビデオに取込み、ガス発生によって画像上で見られる輝度の変化に注目し、微小領域での単位時間当たりの変化度合を積分し、マップ化した。図 5-3-12 にその多孔質 NiO 電極表面の SEM（Scanning Electron Microscope、走査型電子顕微鏡）像の 1 カットと画像解析像を示す。

の画像解析像中の色の濃淡は、ガス発生の活発度の変化を示しており、色の薄い部分ほど活発であったことを示している。SEM 像と画像解析像を比較すると、ガス発生の活発な色の薄い部分は、SEM 像において明るい部分に対応し、電解質膜厚の比較的薄い場所であることがわかる。

以上の結果、画像解析によって反応の活発度は電解質膜厚に依存することがわかり、このガス発生反応の活性

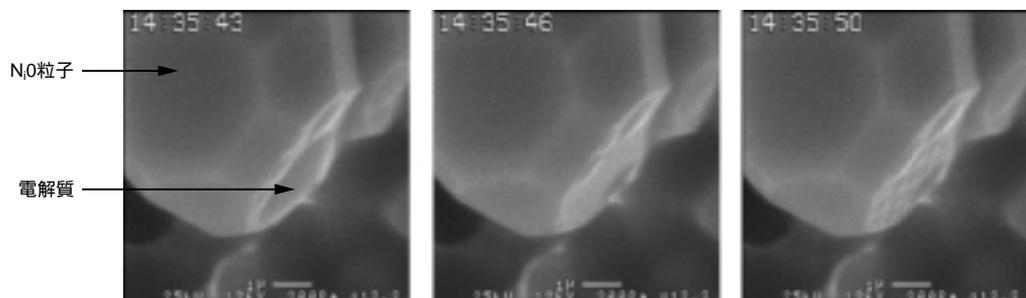


図5-3-11  $\text{CO}_2 + 1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^- = \text{CO}_3^{2-}$  反応によるNiO電極上での電解質の生成過程  
電位、- 0.2V(開回路電位基準)；温度、650 °C；圧力、200Pa；雰囲気ガス組成、 $\text{CO}_2/\text{O}_2 = 66/33$

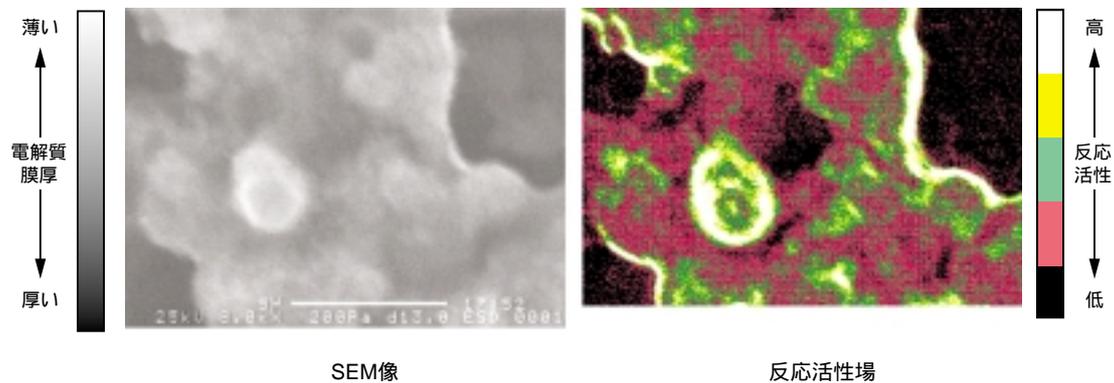


図5-3-12 水蒸気雰囲気での多孔質NiO電極上でのガス発生ポイントの電解質が薄い場所と、の反応活性が高い部分が一致している。  
(温度、650 ; 圧力、200Pa ; 雰囲気ガス組成、H<sub>2</sub>O = 100%)

ポイントがMCFCの本来のカソード反応である 式の反応活性ポイントと同じ場所になると仮定すると、そのポイントを増やすための方策を電極設計に加えることで高性能電極が作製できると考えている。

### 5-3-2 高圧 CV ケーブルの半導電層界面の状態評価への適用

#### 背景・目的

当研究所では、図5-3-13のような断面構造をしているCVケーブルのコンパクト化のために、絶縁厚の大幅な低減(半減)を目指しており、そのためには絶縁破壊メカニズムの詳細解明が必要である。

CVケーブルの絶縁破壊は、半導電層から絶縁層に突き出した極めて小さな突起などを起点として発生し、電気トリーと呼ばれる樹脂状(トリー状)の細い絶縁破壊痕を残す。この電気トリーは、突起電極先端における数10mm程度の微細な凸部からポリエチレンの薄い(厚さ

20nm程度)板状の結晶であるラメラに沿って伸び出していることが明らかになっている。

そこで界面近傍の絶縁体の高次構造を定量的に評価する方法として、半導電層界面近傍の絶縁体中の平均ラメラ角 や半導電層界面粗さなどの影響を検討してきた。ラメラは、透過型電子顕微鏡では白い線として観測され、この線と反導電層界面の垂線とのなす角度がラメラ角で、ラメラ角を多数測定して、平均したものが平均ラメラ角である。

ラメラ角の検出のためのデータ処理作業には多大な時間を必要とするため、迅速な画像データ処理システムの開発が望まれていた。そこで、効率の良い半導電層界面ラメラ角の自動解析システムを開発することを目的として、電子顕微鏡写真からラメラ線を抽出する手法を開発した。さらに、抽出されたラメラ線の特徴データから、ラメラ角を計算し、従来手法で求めたラメラ角と比較し、開発手法の有効性を確認した。

#### (1) ラメラ線の抽出例

図5-3-14は、ラメラ線が明瞭で且つ半導電層界面に垂直になっているTEM(透過型電子顕微鏡)写真例で、データ処理の結果、図5-3-15に示す様に多数のラメラ線が検出されている。肉眼で明瞭に認識できる線は、比較的長く明るい線と認識されている。また、詳細に見てラメラ線と認識できる線も良く検出されている。改良点としては、明るい孤立点を十字形の短い線として誤認識する点があげられる。このため、肉眼では存在しない短い線が多数現れる。実用上は線の長さによる足切りで、この問題に対処している。

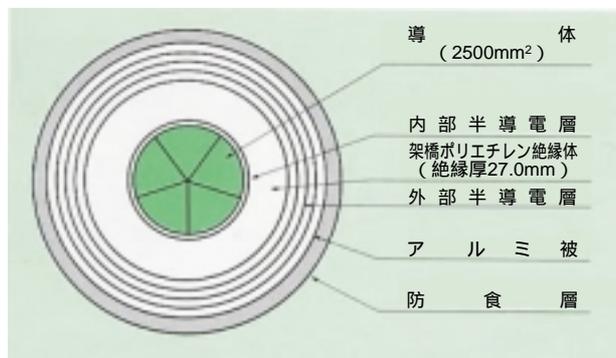


図5-3-13 275kV CVケーブルの構造例

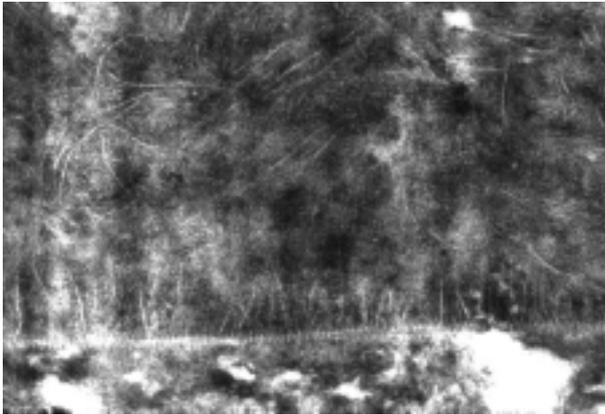


図5-3-14 ラメラ線のTEM写真例

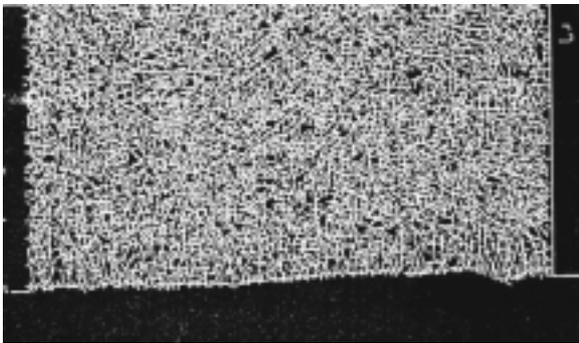


図5-3-15 図5-3-14画像のデータ処理結果

## (2) 従来手法と画像処理とのラメラ角の比較

画像処理によるラメラ角は、半導電層界面からの平均距離が $0.2\ \mu\text{m}$ と小さい時には、従来のデジタル化による平均ラメラ角とほぼ一致する場合と、平均ラメラ角より約 $10^\circ$ 大きい場合に2分された。しかし、平均距離が $1.0\ \mu\text{m}$ になると、全ての場合で画像処理による平均ラメラ角の方が $7^\circ$ 程度大きくなった。

絶縁層を低減した高性能CVケーブルの長期信頼性を的確に評価するためには、以前にも増して精度の高い性能評価方法が必要となっている。ここで検討した画像処理による平均ラメラ角検出法は、従来の手法より高精度、高速度に検出できる可能性が高いため、今後、効率の良い半導電層界面ラメラ角の自動解析システムの開発につながる。

## 5-3-3 可視化技術の適用

### (1) 景観シミュレーション

#### 背景・目的

火力・原子力発電所の新規建設や増設の際には、施設の景観や緑化、公園・グラウンド等の環境施設を立地地域の自然環境や社会環境と調和させることが強く求められる。最近では、既設の発電所においてもメンテナンスのための施設の塗り替えに対して、自治体や地域住民のニーズを考慮した色彩デザインを検討するケースが増えている。

そのため、当所ではこれまでの知見をもとに地域と共生する発電所の景観や緑化、環境施設に係わる環境デザインを、インターネット上で地域住民との対話のなかで検討するための支援システムを開発した。

#### a. 発電所の環境デザイン支援システム

この環境デザイン支援システムは、さまざまなデザインメニューを選択することにより発電所景観を予測する「景観シミュレーションシステム」、全国の発電所における環境共生事例をデータベース化した「環境共生事例データベース」、当所の発電所環境デザインに係わる研究成果をデータベース化した「研究成果データベース」という3つのシステムで構成されている。

ここでは、景観シミュレーションを中心にシステムの概要を紹介する。

地域環境と調和する火力・原子力発電所の景観デザインを検討したうえで、様々なデザインメニューを選択することにより発電所景観を予測し、好ましいデザイン案をアンケート（登録）することのできる景観シミュレーションシステムを開発した。

まず、これまでの景観デザインに係わる研究成果にもとづいて、技術的に実行可能なデザインメニューを考案し、地域環境との調和・創造の観点から絞り込んだ結果、建屋の形状デザイン、排気塔の形状デザイン、貯炭場のデザイン、緑化・マウンドのデザイン、基調色（ベースカラー）のデザイン、アクセントのデザインという6つのメニューを設定した。

次に、これらのデザインメニューを組み合わせた場合の発電所景観を、コンピュータグラフィックスソフト

(3D Studio Max) を用いて 3 次元シミュレーションを行い、景観デザイン案のシミュレーション結果を視覚表示できるようにした。

さらに、複数の景観シミュレーション結果を同一画面上で比較評価を行い、絞り込まれた最適な景観デザイン案を登録する機能を持たせた(図5-3-16)。この機能を用いると、インターネット上で一般の人々や地域住民の方々の景観デザインに対する好みの把握が可能となり、地域ニーズを考慮した(地域との共生を目指した)発電所デザインの検討材料を得ることができる。

### b. 分散型景観シミュレーションシステム

「発電所の環境デザイン支援システム」では、実務適用を前提に、普及度・互換性の高い一般的 Web 技術・グラフィックス技術を適用したが、当所ではまた、分散型景観シミュレーションシステム NewLand (Network Landscape Designer) を(株)電力計算センターと共同開発し、より高度な情報技術を適用した実験的システムの構築も試みている。

本システムは、Web3D (World Wide Web 上における 3 次元コンピュータ・グラフィックス) 技術により、Web 上に設備の景観情報を公開するとともに、これを見た利用者が自分の好み景観を対話的に作り上げ、さらにその結果を情報提供者が収集し、収集結果の統計を開

示する、という一連のプロセスを Web 上で実現した(図5-3-17)。実装には、VRML (Web3D のデータ形式) Java (オブジェクト指向プログラミング言語)、HORB (分散オブジェクト環境) を用いた。

情報提供者は、本システムを用いて計画中の設備の景観について、関係者との間で情報共有し、計画に対する評価や代替案を短時間で収集することができる。この結果、より良い景観デザインの実現へ向けた合意形成の促進が期待される。また、本システムは、特殊なハードウェアやソフトウェアを必要としないこと、Web により広域的なサービスが可能であること、三次元表示により一般公衆にも判り易く景観を提示できること等の特長を有している。

このため、本システムは、設備の景観計画において、

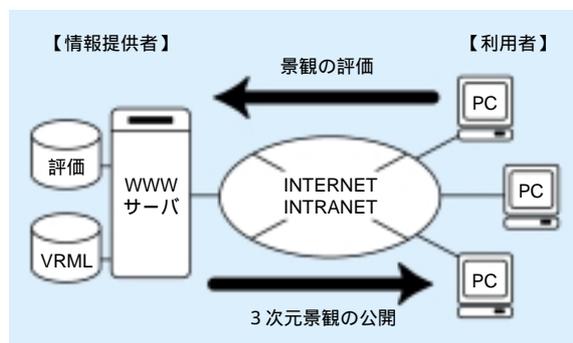


図5-3-17 分散型景観シミュレーションシステムの概念



図5-3-16 景観シミュレーション結果の比較と登録

事業者から地域へ向けた情報公開や住民参加の手段に適用することが可能と考えられる。例えば、計画中の発電所の周辺住民は、近隣の様々な地点から三次元表示された発電所を眺めて、景観デザイン案の比較評価を行うことが可能となる（図5-3-18）。

前述の「発電所の環境デザイン支援システム」では事前に景観の静止画を作成してサーバー上に保管しておき、クライアント側ではこれを表示するだけである。このため、視点の移動等を行うことはできないが、描画に十分な時間をかけリアリティの高い景観を提示することができる。一方、本システムではクライアント側に三次元データをすべて送ってグラフィックスを生成するため、視点の移動等の自由な表示が可能であるが、景観のリアリティは「発電所の環境デザイン支援システム」より落とさざるを得ない。このように、インターネット上で三次元可視化を行う際には、目的と運用環境に応じて、サーバーとクライアントの間で処理の最適な配分が必要である。

今日、高速なインターネット接続環境が急速に普及しつつあることに加え、低価格なPCでも高度な三次元描画機能を備えているため、比較的大きな三次元データを広域に流通させることが容易となってきた。この結果、

Web3Dの普及も進みつつあり、本システムが提案したような実装方法を、情報公開や住民参加の用途へ適用することも、実務で可能な状況になりつつあるものと考えられる。

## （2） 数値解析結果や観測データの可視化

### 背景・目的

大規模な数値解析や現地観測では、コンピュータグラフィックスを用いてデータを映像化する、科学的データ可視化の適用が不可欠となっている。以下では、当所におけるデータ可視化事例のうち、対話的可視化とボリュームレンダリングの適用例を紹介する。

#### a . 対話的な可視化

数値解析では、長時間の計算を終えて可視化してみると、入力データの不備等による計算の誤りが初めて判ることがある。また、非線形な計算では条件を途中で変えてやらないとうまく進まない場合がある。さらに、研究者は常々、模型実験のように計算を観察できないか、と考えてきた。

このため、当所と㈱日立製作所は、トラッキングス

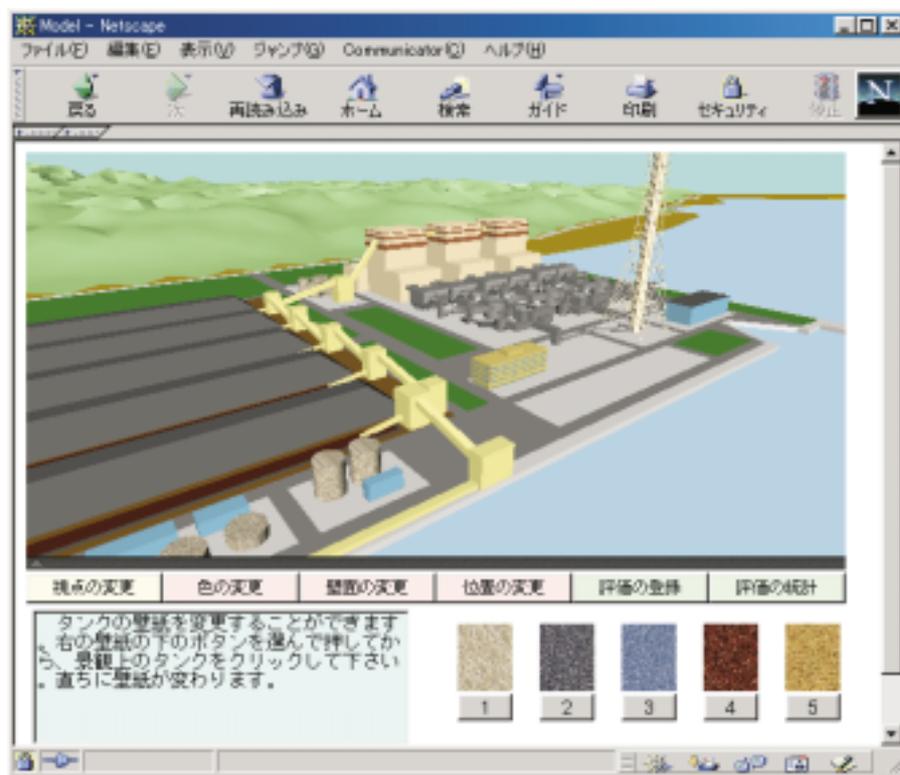


図5-3-18 分散型景観シミュレーションシステムの画面例

テアリングシステム (Tracking/Steering System。以下、T&Sシステム) に関する研究を行った。T&Sシステムとは、数値解析の実行中にその結果を逐次・同時並行的に可視化し、対話的に観察・制御するシステムである。

図5-3-19に都市熱環境解析へのT&Sシステムの適用例を示す。人工排熱やコンクリートによる地表面の被覆等によって、都市部で局地的に気温が高くなるヒートアイランド現象を再現し、様々な対策手法の効果を検証することが目的である。画面では、ある土地利用状況(画面右下)での風速分布(画面中央下)、気温に関するパラメータ(画面右上)などを計算の進行にしたがってトラッキング(=リアルタイム可視化)している。画面左下隅にある時計は、数値解析のモデル上における時刻を表している。その上には、コントロールパネルが表示されており、ここで、例えば大気の日射透過率などをステアリング(=対話的制御)し、問題解決へ向けた仮想実験を行うことができる。このT&Sシステムはこの他に、液面をもつ流体の解析や円筒殻の弾塑性座屈解析にも適用された。

### b. ボリュームレンダリング

可視化には、物体表面の光の反射・散乱を再現するサーフェスレンダリングが適用されることが多いが、三次元物体の内部の可視化が必要な場合もある。このような場合には、データを微小ボリュームの光の吸収・散乱特性に対応させ、空間を透過する光の解析によりデータ

全体を可視化するボリュームレンダリングの適用が有効である。

当所では、(株)日立製作所と共同で、ボリュームレンダリング技術を様々な対象に適用して活用技術を検討した。以下に適用事例を紹介する。

高温岩体発電では、高圧の水で地下深部を破碎して熱水の貯留層を作り蒸気を生成する。当所では水圧破碎で発生した破碎音の発生位置と大きさを地上で計測し、地下深部の破碎進展状況をボリュームレンダリングで可視化した。破碎発生からの時間とともに音源の輝度を暗くし、破碎進展と貯留層構造の理解を容易にした(図5-3-20)。

ドップラーレーダーは降雨分布を高い時空間分解能で観測する装置である。当所ではドップラーレーダー

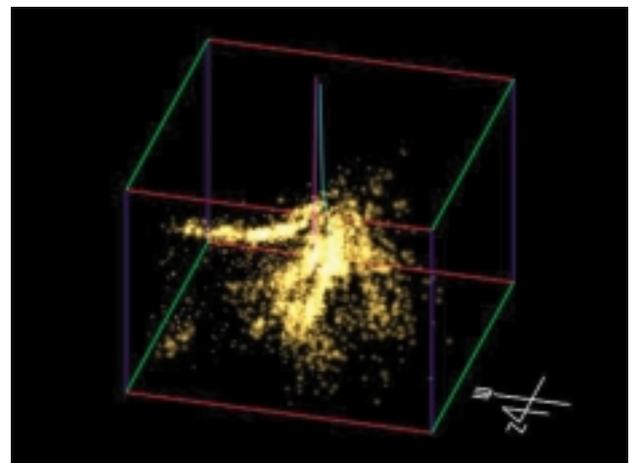


図5-3-20 深部地下の破碎音分布の可視化

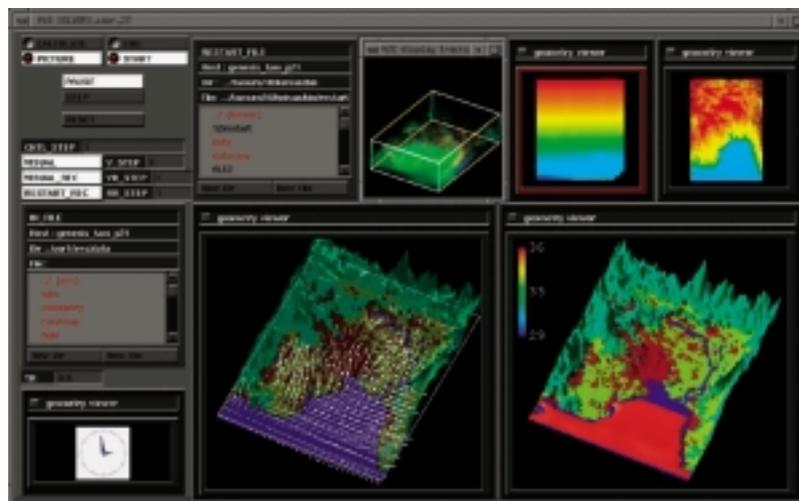


図5-3-19 トラッキングステアリングシステム

によって観測された台風時の降水量をボリューム・レンダリングで可視化した。色の赤みが増すほど降雨が強いことを表す。台風特有の螺旋状の降雨帯がレーダー観測域内に現れていることが判る（図5-3-21）。

気象モデルを用いて、現実が発生した台風を再現する解析を実施し、三次元風速ベクトル場をボリュームレンダリングで可視化した。風速を微小ベクトルで表わし、上昇流を赤色、下降流を青色で表わした。中間の緑色は横風の卓越を表わし、偏西風を際立たせている。台風付近では上昇流を伴う渦巻状の強風が顕著である（図5-3-22）。

1995年兵庫県南部地震で神戸市街地等に帯状に現れた被害地域「震災の帯」の成因を解明するため、地震波伝播解析を行い、地震波による応力場をボリュームレンダリングで可視化した。地中の圧力を不透明度に、せん断を光の散乱と輝度に対応させ、符号に応じて色を変えることで、複雑な応力場の分析を可能とした（図5-3-23）。

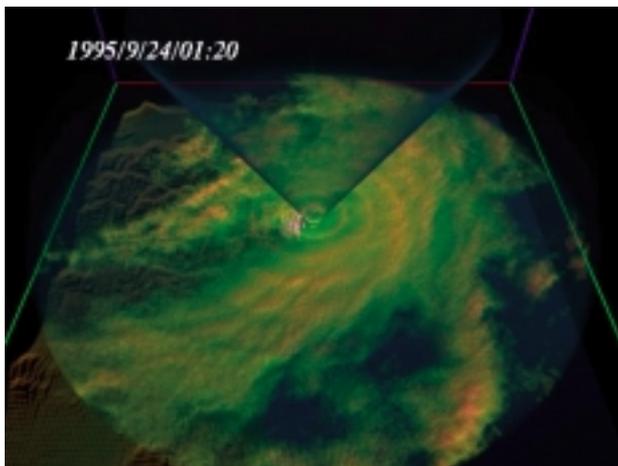


図5-3-21 ドップラーレーダーによる降雨分布の可視化

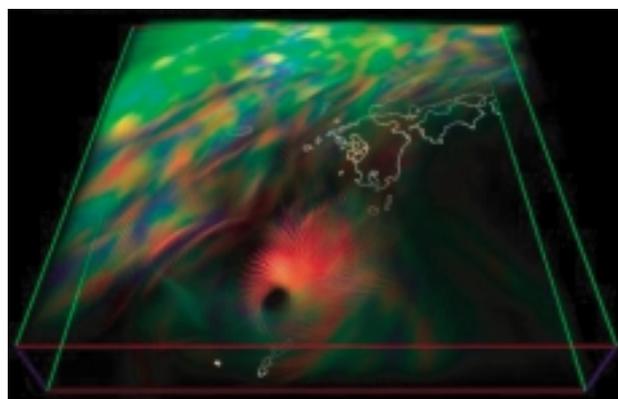


図5-3-22 台風モデルによる風速分布の可視化

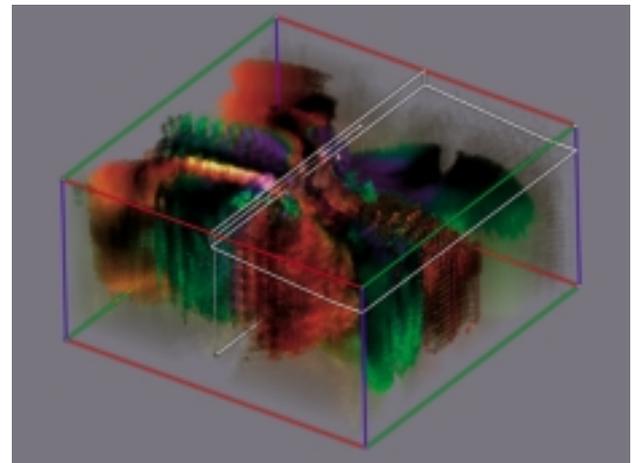


図5-3-23 地震波動解析による応力分布の可視化

### (3) 音の可視化と検索

#### 背景・目的

電力会社では、発電所や変電所の安全運転のために機器の連続監視を行っている。この監視には各種センサによる自動監視だけでなく、巡視員の点検による故障の早期発見態勢も整えられており、これら巡視点検業務の高度化・効率化や、診断および点検ノウハウの巡視員間で共有化が課題となっている。特に人間が機器異常の予兆検知に活用している音情報をわかりやすくかつ客観的な形で共有することは設備保全上重要である。

#### a. 機器音の可視化・検索手法

点検箇所毎に音データを収集することで、機器音変化の可視化や類似音検索ができる手法を開発した（図5-3-24）。開発手法は以下の三手法から構成される。

##### (i) 映像変化検出による音データのデータベース化

巡視点検時に撮影しているビデオ映像から巡視員の注視時点を自動的に検出し、ビデオ映像と関連づけて、その点検箇所の音データを簡易に収集・分類する。

##### (ii) 特徴抽出および可視化

点検箇所毎にまとめられた音データから、その箇所での定常的な音特徴を抽出し、現在の音との差異をその場で即座に算出し可視化表示することで、異音の検知を支援する。

##### (iii) 音検索

抽出した定常的な音特徴と点検時の音特徴との差異情報をもとに周波数成分の時間的変化での類似性に基づいて過去の類似音（機器状態）を検索し、表示する。

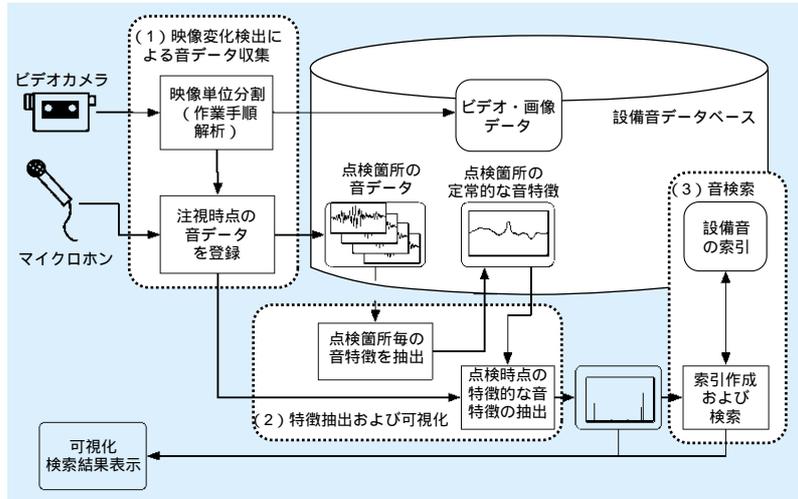


図5-3-24 機器音の可視化・検索手法の処理フロー

**b. 放電音を対象とした有効性確認実験**

提案手法の効果を確認するために、直流がいし連の暴露試験映像データを用いた。このデータは、直流がいし連に高電圧を長期間印加した状態を撮影したビデオ映像であり、音は垂直に設置された直流がいし連から1.5m離れた無指向性マイクにより録音されている。試験の目的は、直流がいし特有の放電現象である部分閃絡の抑制技術の効果を観測することにある。映像は音圧が一定値を越えた場合に、それをトリガーとして自動的に記録される。そのため部分閃絡発生時以外の映像・音データも多数記録されており、部分閃絡が記録された箇所の自動的な切り出しが必要である。

この音データに対して開発した可視化手法を用いると、**図5-3-25** に示すように従来の単純なスペクトル表示では分かりづらい部分閃絡音の特徴が、**図5-3-25**

のように強調されて可視化できる。図中の凡例に示すように、上の棒グラフは、リアルタイムの入力音信号で、横軸が周波数、縦軸が対数振幅であり、下の表示は、スペクトル時系列の可視化であり、色の違いが周波数を、明さが振幅を表している。

また、検索手法により部分閃絡音をそれ以外の放電音と区別できるなど、従来定量的に扱うのが難しかった放電音の類似性を扱えることがわかった。

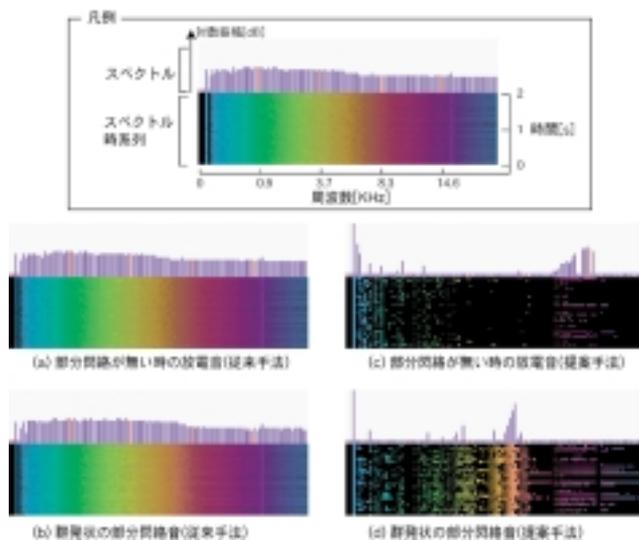


図5-3-25 音変化の可視化効果

(左列の従来手法による可視化では放電音の差が a、b で明確でない。これに対し右列の提案手法では放電の種類別による特徴が c、d で鮮明に示されている。)

## 5-4 オープンネットワーク技術

### 5-4-1 電中研テクノウェブシステム

#### 背景・目的

当所では、1997年度より電気事業に関わる研究開発の効率化を目的としたポータルサイト「電中研テクノウェブシステム」(以下、テクノウェブ)の開発に着手し、1998年6月以降、試験運用を継続してきた。テクノウェブは、電気事業に属する複数の組織が技術情報と研究資源を共有するためのエクストラネット(限定的な複数の組織が情報を共有するためのネットワーク)である(図5-4-1)。

#### (1) システム概要

本システムの実体は、エクストラネットを通じて提供される、以下のツール群(アプリケーション・ソフトウェア)である。

データベース：電力技術関連の調査・実験・観測の

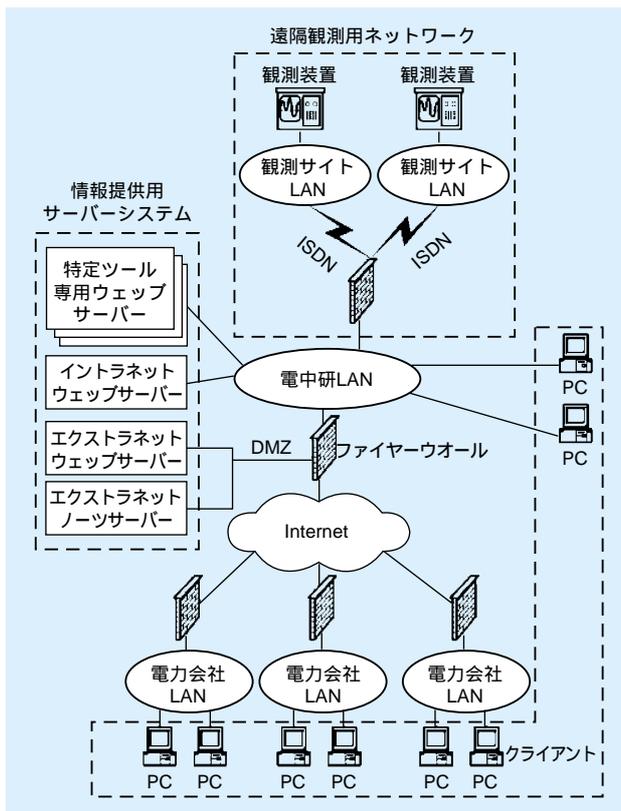


図5-4-1 電中研テクノウェブシステムの構成

結果等とそれを検索・閲覧するツール。

遠隔シミュレーション：電力技術に関する数値解析等のソフトウェアを遠隔利用するツール。

遠隔観測：遠隔地にある電力設備等の観測データをモニタリングするツール。

仮想会議室：特定の話題について利用者が書き込みと閲覧を行う電子的会議室。

その他：研究発表会のプログラム・要旨・予稿集等の情報やテクノウェブの最新情報等。

利用者はウェブブラウザを用いて、本システムにアクセスし、これらのツールを利用する。本システムにアクセス可能な利用者は、エクストラネットを構成する各組織の所属員のみである。

本システムは、以下の要素によって構成されている。

#### a. インターネットVPN

本システムは、インターネットVPN(Virtual Private Network)を媒体として構築された。このVPNは、専用DMZ(Demilitarized Zone; 非防護ゾーン)特定ドメインからの発信に限定した専用DMZへのアクセス許諾、SSL(Secure Socket Layer; インターネット上の暗号化・認証技術)を組み合わせ実装された。

#### b. 情報提供用サーバシステム

情報提供用サーバシステムの中核は「エクストラネットウェブサーバー」と呼ばれるUNIXサーバーであり、ここでHTTPサーバー、RDB(Relational Database)管理システム、Proxyサーバー及び大部分のツールを運用した。なお、これと同等の「イントラネットウェブサーバー」を所内に設置し開発用に用いた。一部のツールは上記のProxyサーバーが中継し、電中研LAN内の数台の専用サーバーから提供した。仮想会議室には「エクストラネットノーツサーバー」(WindowsNTサーバー)上のLotus Notes/Dominoを適用した。

#### c. 遠隔観測用ネットワーク

遠隔観測用ネットワークはISDN回線とダイヤルアッ

ブルータを用いたLAN間接続システムであり、遠隔地の観測現場のLANと電中研LANとの間をオンデマンドで結び、観測データのモニタリングや観測機器の遠隔操作に用いられている。

#### d. クライアント

クライアントには、各社の業務用PCのウェブブラウザを適用することとした。

### (2) コンテンツ

テクノウェブでは、2003年5月現在、表5-4-1に示すコンテンツが提供されている。本システムは、当初電力土木への適用を主眼として始まったため土木関係のツールが多いが、現在は様々な分野に適用範囲を広げている。

以下では、このうち、データベース、遠隔シミュレーションの各々について、代表的ツールを紹介する。なお、遠隔観測を代表するツールについては、5-4-2項「ネットワーク型遠隔観測システム」で詳述する。

#### a. 臨床水理データベース

当所では発電所水路工作物の水理設計について多くの検討を行っており、その際には過去の事例で蓄積されたデータやノウハウの活用が有効である。このため、水路工作物の設計・実験・現地計測等に関する写真、ビデオ、文献のリスト、既存の報告書等を収集し、臨床水理デー

タベースを構築・運用した。臨床医が治療に際して参照する症例集のように、技術者が水理設計上の問題解決に臨むにあたって役立つ事例集としたいとの意図から、本データベースには「臨床水理」の名が与えられている。本データベースは一種のマルチメディア文書管理システムであり、HTMLやPDFなどの任意形式の文書に対応できる。また、全文検索、項目検索、ツリー状キーワードによるカテゴリ検索が可能である。

#### b. 水力鋼構造物健全性診断システム

水力鋼構造物健全性診断システムは、ダムに付帯する鋼構造物のうち、経年劣化が懸念されるダムゲートと水圧鉄管の構造健全性の診断に用いるものであり、データベース、三次元構造解析プログラム、設備診断エキスパートシステムを連携させた総合的問題解決システムとなっている。このうち、データベースには、評価対象設備の設備概要、構造形態、外観状態、代表寸法、実測値、設計時の構造解析値、過去の調査時の構造解析値などが納められる。構造解析システムは、ダムゲートと水圧鉄管の構造解析モデル数十種類を内蔵した三次元有限要素解析プログラムであり、上記のデータベースの入力を受けて解析モデルを生成し、応力・振動解析・座屈等の解析を自動的に行う。設備診断エキスパートシステムは、データベースへの入力内容、構造解析システムの計算結果、破壊力学的評価、経験的評価を総合して、保守熟練者の経験的判断基準を取り込んだエキスパートシステムにより、設備の健全性・余寿命を診断する。本システムは、水力鋼構造物の維持管理に活用されている。

表5-4-1 提供コンテンツの一覧

ツール種別	名 称
データ ベース	臨床水理データベース
	応用地質写真データベース
	活断層トレンチデータベース
	電中研地震観測データベース
	堆砂対策支援データベース
	HFCオンラインデータベース
	大電流アークデータベース
	物理探査検層データベース
	風観測・風応答観測記録データベース
	海域観測データベース自動構築システム
	海浜変形実験データベース
遠隔シミュ レーション	温排水拡散簡易予測システム
	水力鋼構造物健全性診断システム
	発電所景観デザイン支援システム
	送電線雷事故率予測計算プログラム
	気流解析コード用標高データ作成支援ツール
遠隔観測	遠隔観測データサーバシステム
仮想会議室	試験運用参加者の会議室等
その他	テクノウェブニュース、お知らせ等

### (3) 運用状況

本システムは、1998年6月より、電力会社の土木部門を対象としてシステムを評価するための試験運用を開始し、電力会社から250名以上の参加者を得て、各種ツールの試用を行ってきた。本システムは、2003年5月現在に至るまで大きな障害を経験することなく、約5年間にわたり順調な運用を続けている。

開発と試験運用を通じて、以下のように、本システムの有用性は実証されたものと評価できる。

試験運用を通じて、電気事業に関わる限定された複数の組織が、インターネットを通じて研究情報・研究資源を共有できることが実証された。

当所の研究成果を、データベース、遠隔シミュレーション、遠隔観測ツール等の形で、電気事業の実務に直接役立てることが可能となった。

当所に埋もれがちな観測・調査・実験等のデータや、設計や調査に関わる知見を発掘・整理し、維持継承することが可能となった。

当所ではこれらの成果を受け、本システムを当所の全研究分野から電気事業へ向けた情報発信システムと位置付け、2003年5月より実用システムとしての運用を開始した。

## 5-4-2 ネットワーク型遠隔観測システム

### 背景・目的

電力土木施設では、既存施設の効率的な運用と長寿命化が進められており、維持管理の重要性が高まってきた。同時に、コスト低減を意識した維持管理の高度化と効率化が求められている。この解決策の一つとして、遠隔観測技術が有効であり、電力土木施設の状態を、リアルタイムかつ長期にわたって把握することにより、維持管理における点検間隔の延伸、補修・取替時期の延伸などのコストダウンに関わる意志決定が、迅速に行えるようになると考えられる。

そこで、当所では、ネットワーク技術の活用による電力土木施設での遠隔観測の効率化を目指して、ネットワーク型遠隔観測システムを開発した。

### (1) ネットワーク型遠隔監視システムの概要

開発システムは、従来の遠隔観測機能に加えてリアルタイムモニタリング機能を実現した「遠隔モニタリングシステム」と、データベースとWWW (World Wide Web) 技術を連携させて長期的な遠隔観測データの収集・保存・共有を実現した「遠隔観測データサーバシステム」から構成される。

ネットワーク型遠隔観測システムは、遠隔観測サイト、当所および電力会社を、電中研テクノウェブシステムが提供する遠隔観測用ISDN回線とエクストラネットにより接続し、運用される(図5-4-2)。このネットワークにより、本遠隔観測システムは、遠隔地からのリアルタイムモニタリングデータと、長期的に蓄積されたデータを、インターネットに接続された電力会社のPC上のWWWブラウザから利用可能としている。

### (2) 遠隔モニタリングシステム

本モニタリングシステムは、広域に分散する電力土木施設のモニタリングを、効率的かつ長期間にわたって行うために開発され、広域ネットワークの適用、信頼性の高い機器の採用、およびネットワーク機能を生かした計測アプリケーションを特徴とする。

広域に分散した施設のモニタリングでは、複数の遠隔観測サイトが想定されるだけでなく、ひとつのサイト内にも複数のモニタリング対象構造物が存在する。そのため、本モニタリングシステムでは、遠隔観測サイト内でデータ通信のためのネットワークを構成するとともに、

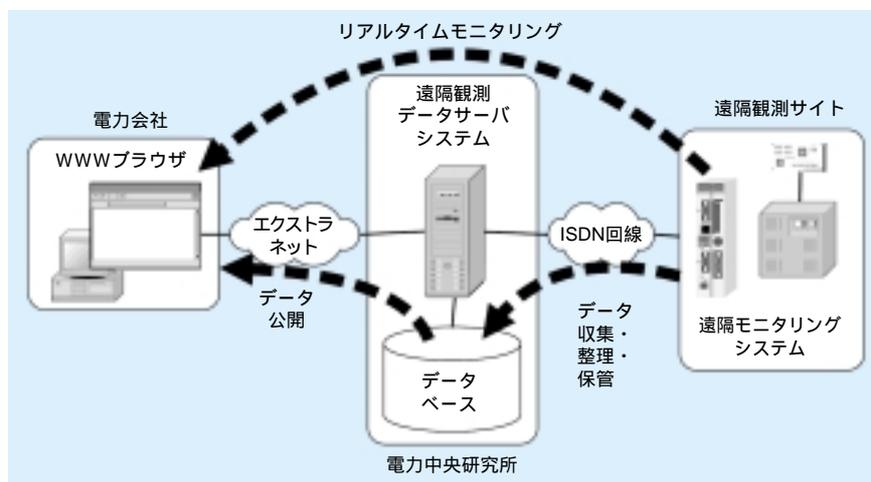


図5-4-2 ネットワーク型遠隔観測システムの運用

ネットワーク同士の接続を行う機器であるルータを使用して遠隔観測サイトと電力中央研究所LANを結び、広域ネットワーク内でデータ計測およびモニタリングを可能とした(図5-4-3)。また、遠隔観測サイトネットワークの一部を、無線LANにより無線化し、データ通信ケーブルの敷設が困難な現場へも対応するとともに、モニタリング地点を追加・削減する場合にも、通信ケーブルの敷設・撤去の手間を省き、迅速に対応できるようにした。

また、本モニタリングシステムでは、長期間にわたる遠隔観測の信頼性を向上させるために、データ収録装置の制御とデータ通信として、工業用ネットワークコンピュータ(Network Computer、NC)を採用した。工業用NCは、製造現場でのデータ収集を目的に開発されたコンピュータであり、故障の原因となりやすいハードディスクドライブ、ファンなどの回転機器を持たないために耐久性が高いとともに、リアルタイムタイムOS(Operating System)と呼ばれる信頼性の高いOSを使用しているため、ハード、ソフトの両面から長期の連続運転に適合している。この工業用NCにより、従来の遠隔観測で使用されるPCと比較して、屋外での長期の観測における耐久性・信頼性を向上させることができた。

本モニタリングシステムの観測アプリケーションは、WWWや電子メールといったネットワーク機能を活用して開発され、WWWブラウザによるネットワーク経由のリアルタイムモニタリング機能や、常時監視しているデータが設定した閾値を越えた場合に、詳細な計測と電子メールによる計測状況の通知を行う機能を実現した。これらにより、従来の遠隔観測システムでも実現されていた定期的な計測機能とともに、使い勝手のよいアプリケーションとなっている。

本モニタリングシステムの機能および現場環境での信頼性・耐久性は、ダム洪水吐ラジアルゲートおよび水圧鉄管における約1年間の連続モニタリングにより確認されている。

### (3) 遠隔観測データサーバシステム

本データサーバシステムは、遠隔観測データの収集・整理・保管・公開の自動化を目的として開発され、データベースとWWWアプリケーション(WWWサーバ上に構築するサーバアプリケーション)を統合したシステムである(図5-4-4)。本データサーバシステムでは、遠隔観測において定型的な作業となる遠隔観測データの収集・整理が自動化され、大量データの保管・処理

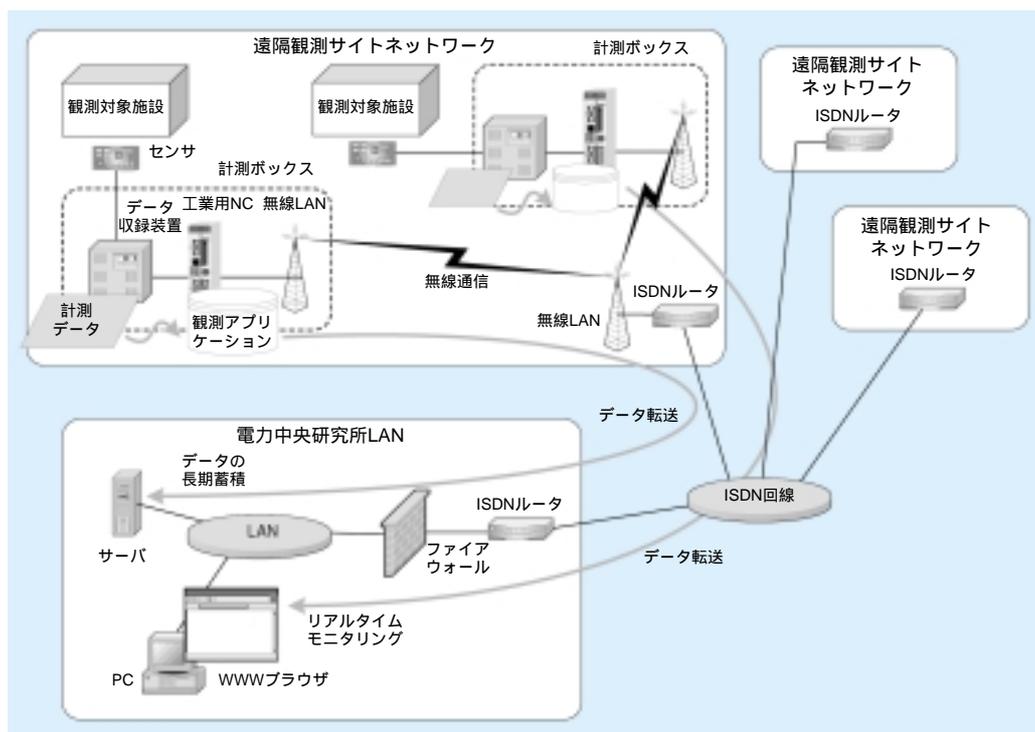


図5-4-3 遠隔モニタリングシステムの構成

