

第

章

2

排ガス拡散予測手法の 開発

第2章 排ガス拡散予測手法の開発 目次

狛江研究所大気科学部 上席研究員 市川 陽一
狛江研究所大気科学部 上席研究員 佐田 幸一
狛江研究所大気科学部 主任研究員 柿島 伸次

2 - 1 火力発電所	19
2 - 2 原子力発電所	30
2 - 3 地熱発電所	33
2 - 4 まとめ	34

市川 陽一（8ページに掲載）



佐田 幸一（1983年入所）

これまで発電所および発電設備から放出される排ガスの大気拡散現象を対象に、数値計算手法の開発、および風洞実験手法の高度化に関する研究に従事してきた。現在は、濃度変動の瞬間予測等、今後の実用化が考えられる分野での研究にも取り組んでいる。



柿島 伸次（1958年入所）

大気環境影響評価手法のうち、特に、発電用原子炉施設からの放射性物質の拡散と線量評価手法の合理化に関する研究に従事してきた。

コラム1 水を用いて空気の流れを再現	35
--------------------------	----



西原 崇（1994年入所）

我孫子研究所水理部主任研究員。

主に流体関連振動に関する研究に従事している。これまで、高速増殖炉(FBR)を対象とした自然循環流の不安定性に関する実験や安定性解析を行うとともに、架空送電線からプラント機器一般にいたる様々な構造物に作用する流体力の解明のため、大型水路を利用した実験に取り組んでいる。

2 - 1 火力発電所

2-1-1 拡散予測の方法

1997年6月に環境影響評価法が制定され、1999年6月から新しい環境影響評価制度が適用された。環境影響評価法では、規模が大きく、環境影響の程度が著しくなるおそれがある事業の一つとして、発電用施設の設置または変更工事を定めている。各事業はその規模に応じて、第一種事業、第二種事業に分けられる。火

力発電所(地熱を除く)は出力15万kW以上が第一種事業、11万2500kW以上15万kW未満が第二種事業である。第二種事業に該当する場合は、簡易な方法により環境影響評価を行うことになっている。第一種事業については、主務省令で定めるところにより、対象事業に係る環境影響評価の項目ならびに調査、予測および評価の手法を選定しなければならない。

一般に、排ガス拡散の予測方法は表2-1のようにまとめることができる。各方法はそれぞれに特徴があり、

表2-1 排ガス拡散予測の方法

方 法		内 容	特 徴
野外での気象観測とトレーサ実験		現地で、トレーサガスを放出して周辺の濃度分布を測定する。あわせて、地上や上空の気象観測を行う。	<ul style="list-style-type: none"> ・実現象そのものを把握できる。 ・実験条件の設定が困難で、人手と費用がかかる。 ・環境影響評価そのものより、拡散パラメータの推定や予測モデルの検証用を実施される。
室内実験	風洞実験	大きなダクト内に地形や建物の模型を入れ、制御した風を送って、気流やトレーサガスの拡散状態を調べる。	<ul style="list-style-type: none"> ・地形や建物影響に関しては、大気との相似則を満足しやすく、環境影響評価で実績がある。 ・地形と熱が複合した条件では、高度な実験技術が必要である。 ・大型の実験設備が必要で、模型製作等に費用がかかる。
	水槽実験	水中で色素をトレーサとして拡散状態を調べる。	<ul style="list-style-type: none"> ・大気との相似則や測定技術に問題がある。 ・可視化により煙突形状や排出条件を検討するのに用いられるが、環境影響評価では補助的役割である。
計 算	拡 散 式	排煙上昇や拡散の公式に従って濃度分布を計算する。	<ul style="list-style-type: none"> ・正規分布型の拡散公式は年間など長期におよぶ濃度予測が容易で、環境影響評価に広く使用されている。 ・地形や建物影響などへの適用に限界がある。
	数値モデル	運動方程式や拡散方程式を数値的に解いて、気流や濃度分布を求める。	<ul style="list-style-type: none"> ・乱流モデルを用いれば、地形影響に関して、風洞実験と同等の予測ができるようになった。 ・計算機は普及しており、容易に実施できる。 ・複雑形状の構造物の組み込みは課題である。

合理的に環境影響評価を行うには適、不適がある。通商産業省の発電所アセス省令では、施設の稼働にともなう排ガス拡散予測の基本的な手法として、大気拡散式にもとづく理論計算をあげている。発電所アセス省令に示される調査、予測、評価の指針に関する具体的な内容は、「発電所に係る環境影響評価の手引」¹⁾(以下、「手引」と言う)に示されている。この「手引」では、年平均値、日平均値の予測に対して、原則、環境庁の「窒素氧化物総量規制マニュアル[増補改訂版]」²⁾に示される煙上昇高さ計算式および拡散式を選定することになっている。また、地形影響については、拡散式による計算が予測結果に大きな影響をおよぼすおそれがある場合には、検討する必要があるとしている。予測手法として、風洞実験と数値モデルを適宜選択して利用することを定めている。

2-1-2 風洞実験

種々の風洞実験手法

風洞実験には表2-2に示すように固定法、重合法、加振法がある。固定法は、地形模型を固定し、定常の風のもとでトレーサ実験を行うもので、歪みのない矩形模型を用いる方法と歪模型を用いる方法がある。矩形模型を用いる方法は、風洞実験の中で最も一般的で、広く使われている。歪模型を用いる実験は、電力中央研究所が1960年代なかばから80年代なかばにかけて実施した。ふつうの風洞では、実際の大気で見られる風の横方向の変動と、それともなう大きな煙の拡がりをつくることは難しい。歪模型を用いる方法では、横方向に模型を縮めることで、相対的に横方向の煙の拡がり方を大きくする。こうして、煙軸上地表濃度の1時間値の予測を行う。

表2-2 風洞実験手法の一覧

風洞実験手法		装置	手法の概要
固定法	矩形模型法	特別な装置は不用	風洞気流に乱れを与えるため、測定部風上に乱流発生装置を置く。縦横同一縮尺の地形模型を用いてトレーサ実験を行う。発電所の環境影響評価で用いられてきた方法。
	歪模型法	同上	風洞気流に乱れを与えるため、測定部風上に乱流発生装置を置く。横方向の縮尺が縦方向より小さな地形模型を用いてトレーサ実験を行う。
重合法	数値重合法	同上	風向を変化させて固定法のトレーサ実験を行い、各風向の出現頻度で重み付けて濃度分布を算定する。
	実験重合法	ターンテーブル	地形模型をターンテーブルに載せ、風向頻度を再現するように模型を回転させてトレーサ実験を行う。火力発電所に対して実績あり。
加振法		加振装置 (不規則振動板 や加振翼列)	測定部風上の加振装置により、強制的に横方向に大きな風の変動を与えてトレーサ実験を行う。火力発電所への適用例あり。

重合法、加振法は、風の横方向の変動を考慮し、短期平均濃度(例えば、1時間値)を模擬するために、開発が進められてきた風洞実験手法である。重合法には数値重合法とターンテーブル法がある。数値重合法は、微小角度ずつ風向を変化させた固定法の風洞実験結果を、風向頻度で重み付けして足し合わせ、濃度を予測する方法である。ターンテーブル法は、風向頻度を再現するように地形模型を回転させる方法である。三菱重工業の大型拡散風洞の模型回転部は直径12mある³⁾。重合法は、固定法と同じ気流状態のまま、拡散状態を大気と相似させようという手法である。これに対し、加振法は気流状態の相似を満足させた上で、大気拡散の状態を模擬しようという試みである。電力中央研究所⁴⁾や三菱重工業⁵⁾の加振法では、風洞試験区間入り口に設置した板列を振動させて、横方向の大きな乱れを作った。石川島播磨重工業は、高さ600mmの翼を18個加振させている。

大気との相似性

風洞実験を行う場合、大気との相似性を満たす必要がある。大気拡散の風洞実験を行う場合の相似則を以下に示す。

・模型の幾何学的相似

対象地域の地形は、一般に流れ、水平、鉛直方向に同じ割合で縮小した模型で再現する。模型縮尺は1/5000 ~ 1/1000程度である。なお、小さな構造物や樹

木の模型は作らないで、地表面の粗度として与える。幾何学的な相似を満足させることは困難なことではないが、火力発電所のような高所大規模煙源では、長くて幅の広い風洞試験部が必要になる。図2-1は電力中央研究所の大気拡散実験用風洞(試験部高さ1.5m、幅3m、長さ17m)である。

・排出条件に関する相似

煙突から排出された煙は、主に熱浮力により上昇するとともに、大気の乱れにより拡散する。煙突が高い火力発電所の場合、排煙上昇過程に煙が地表に到達することはない。そのため、風洞実験で上昇過程そのものの模擬は行わない。その代わりに、経験的な予測式を用いて排煙上昇高さを計算し、これを実際の煙突高さに加えた有効煙突高からトレーサガスを気流と等速で水平に放出する。

・気流に関する相似

風洞内の平板上に実規模換算で数100m程度の速度境界層をつくる。また、境界層内の速度分布が大気で観測されている分布と相似になるように気流調整を行う。風洞内の風速は、平地および地形上で乱れが十分発達した流れになるように、2 ~ 3 m/s以上にすることが一般的である。大気の乱れは、経験的に得られた平地上の排ガス拡散結果(拡散式)を再現するように与える。つまり、平地で拡散実験を行い、測定された地表濃度分布などが実大気での分布と一致するなら、大気と風洞で気流の乱れの相似が成立すると判断する。



図2-1 電力中央研究所の大気拡散実験用風洞

地形影響評価

環境影響評価法施行までは、資源エネルギー庁の「発電所の立地に関する環境影響調査要綱別表1」⁶⁾に従って、大気汚染に関連して地形影響がないと認められる場合を除いて、しかし実態は必ずと言ってよいほど、風洞実験による予測、評価を行ってきた。一方、1999年の環境影響評価法の施行にあわせて作成された資源エネルギー庁の「手引」では、以下のように記載されている。「地形の影響については、数値計算による予測結果に大きな影響を及ぼすおそれがある場合には検討する必要がある。」ここで、数値計算とは次節で述べるブルームやパフの拡散式の意味である。

地形影響有無の判定は、「手引」の参考資料「新法アクセス対応解説書における補足説明(地形影響)について」をもとに行われる。大まかに言えば、煙源から5 km以内の最大標高が有効煙突高の0.6倍以上、あるいは、煙源から20km以内の最大標高が有効煙突高の1.0倍以上の場合は、地形影響ありと判定される。この判定基準は、過去の重合法の風洞実験データを整理して得られたものである。地形条件で最大濃度が平地の何倍になるかを表す比(最大着地濃度比 α 、本節末参照)が2.5を超える条件が、地形影響ありの判定基準に対応している。

電気事業は、従来、固定法で風洞実験を実施してきた。風洞実験ではまず、平地の気流状態を調整し、経験的な拡散式の濃度分布を再現する。固定法では、短期拡散予測と整合をとるため、ボサンケ・サットン式が平地の拡散式として使用されてきた。ところが、新しい「手引」では、拡散計算は年平均値も短期的な変動も、原則、窒素酸化物総量規制マニュアル[増補改訂版] (NO_xマニュアル)²⁾にもとづいて実施することになった。風洞実験の実施方法について「手引」に具体的な記述はないが、排煙上昇式や拡散式は、NO_xマニュアルにあわせるのが妥当だろう。

風洞実験による地形影響評価項目は以下の通りである。

最大着地濃度比 α = 地形を入れた場合の最大着地濃度 / 平板での最大着地濃度

最大着地濃度距離比 = 地形を入れた場合の最大着地濃度距離 / 平板での最大着地濃度距離

煙軸上着地濃度比 (α) = 地形を入れた場合の煙軸上着地濃度 / 平板での最大着地濃度

図2-2は風洞実験による地形影響評価例である。まず、平地の風洞実験結果と拡散公式がよく一致しているのがわかる。地形を対象にした風洞実験の濃度の最大値から α が2.3、地形と平地の最大濃度が出現する距離の比6.7/13.4から α が0.5と評価される。 α の値は平坦な地形では1.0前後であるが、地形が複雑になると3を超える場合もある。 α の値は通常1.0より小さくなり、煙源の近くに高い山があったり、ダウンドラフト現象(山や建物による気流と大気汚染物質の下降、図1-5参照)が生じていたりすると0.2程度になる。

2-1-3 拡散式

平地条件

ここでは、代数計算で比較的簡単に大気汚染物質の濃度を求める手法を拡散式と呼ぶ。拡散式はコンピュータを用いて拡散方程式を数値的に解く数値モデルとは区別される。拡散式の多くは、大気汚染物質の濃度が正規分布すると仮定している。定常状態で煙が連続的に流れていく状態をブルーム(羽毛の形状)と呼び、このときの濃度を求める拡散式がブルームモデルである。一方、瞬間的に排出された煙の塊をパフ(一吹き煙)と言い、この状態の濃度を求める拡散式がパフモデルである。ブルームモデルでは、横方向と鉛直方向、パフモデルではさらに流れ方向に濃度が正規分布する。通常、濃度分布の標準偏差を煙の拡がり幅という。図2-3にブルームモデルとパフモデルの概念を示す。煙突

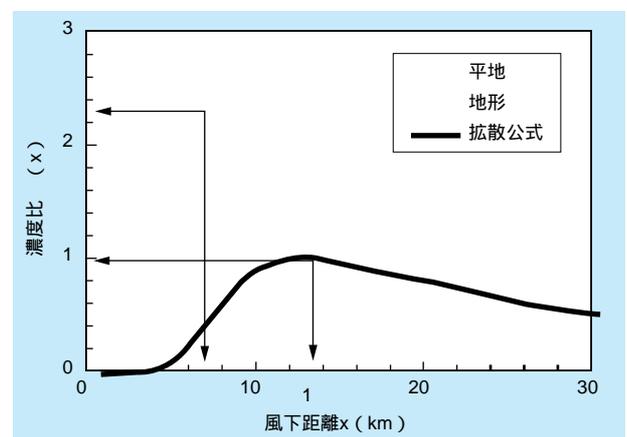


図2-2 風洞実験()による地形影響評価例

から排出された煙は、図2-3の実線で示すように、煙のもつ熱量と強制的な送風のために上昇する。拡散式で濃度予測を行う場合、通常、煙の上昇過程は別に扱い、煙突真上の有効煙突高の位置に相当する仮想煙源から地面に平行に煙軸を設ける。

煙の拡がり幅は煙源からの風下距離とともに大きくなる。テイラー(1921年)は、乱流拡散の統計理論により、煙の拡がり幅を風下距離の関数として与えた。テイラーが導いた式には、評価が難しい速度変動の相関係数が含まれている。実用的な煙の拡がり幅は、サットン(1947年)、パスキル(1961年)、ブリグス(1973年)らによって提案された。各人の煙の拡がり幅を用いたブルームモデルが、それぞれサットンの式、パスキルの式、ブリグスの式である。サットンの式に含まれる拡散パラメータは、風速や気温などの気象要素によって決めることができず、経験的に与えざるを得ない。パスキルの煙の拡がり幅は、日常的に観測される風速、日射量あるいは放射収支量をもとに評価できる。そのため、年間を通した毎時の気象変化に対応して拡散予測ができる。パスキルの煙の拡がり幅は、丈の短い草原での実験データを整理したものである。都市部のように地表面の凸凹が大きく、特に夜間のヒートアイランド下では拡散が促進されることを考慮して、ブリグスは田園地域と都市域に分けて拡がり幅の公式を提案している⁷⁾。

上記の実用的な煙の拡がり幅は、もともと高煙突の大規模拡散用に提案されたものではない。高煙突の煙の拡がり幅としてアメリカのテネシー川流域開発公社(Tennessee Valley Authority: TVA)の線図⁸⁾がある。

しかし、テネシー州のような内陸の実験結果を、気象特性の異なるわが国の火力発電所が立地する臨海地域へ適用するには問題がある。電力中央研究所は、わが国の火力発電所の排煙に適した煙の拡がり幅を提案した^{9、10)}。その結果を図2-4に示す。これらは、公害資源研究所(現在の資源環境技術総合研究所)が1969年から1973年に11地点、電力中央研究所が1963年から1974年に8火力発電所で行った野外トレーサ実験のデータを整理して得られた。両方とも日中のデータである。日中、夜間の風向変動の標準偏差が類似していることから、横方向の煙の拡がり幅は日中、夜間で同じとした。夜間における鉛直方向の煙の拡がり幅は、ドイツ・カールスルーエ原子力研究センターで実施された野外トレーサ実験の結果を参考に決めた。図2-4にはパスキルとサットンの煙の拡がり幅も記載されている。横方向の煙の拡がり幅は、観測時間が長くなるほど大きくなる。図でパスキル、サットンの拡がり幅は3分間値、電力中央研究所の拡がり幅は1時間値である。

排煙上昇の予測は、窒素酸化物総量規制マニュアル²⁾ではコンケイウ式を選択している。この式で排煙上昇高さは、排出熱量の1/2乗、風速の $-3/4$ 乗に比例する。電力中央研究所は火力発電所排煙には、日中はコンケイウ式の比例定数を1.3倍することを提案した。

地形条件

建物や山がある場合には、煙が建物背後に巻き込まれたり、地形、建物の影響で気流が上昇、下降したり

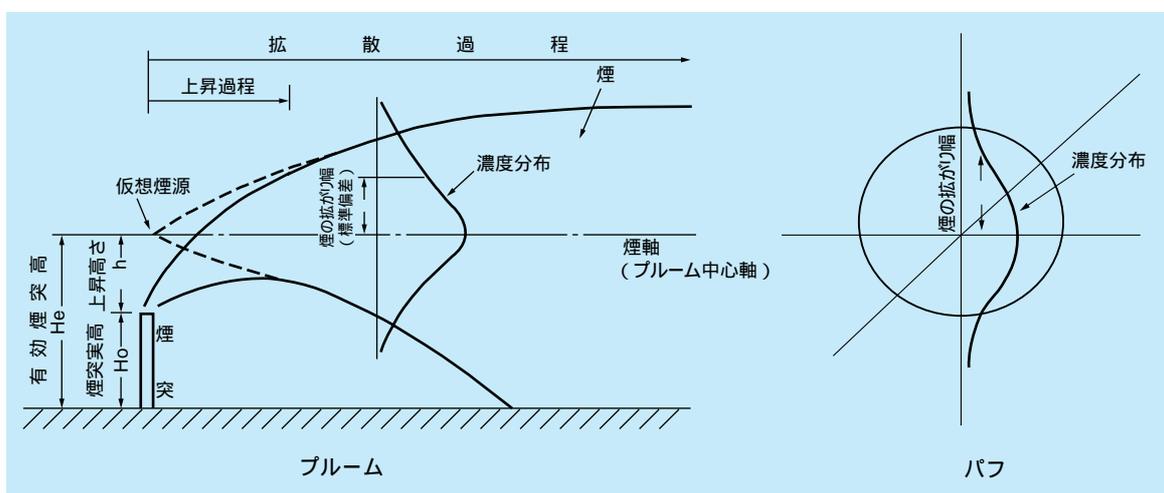


図2-3 プルームモデルとパフモデル

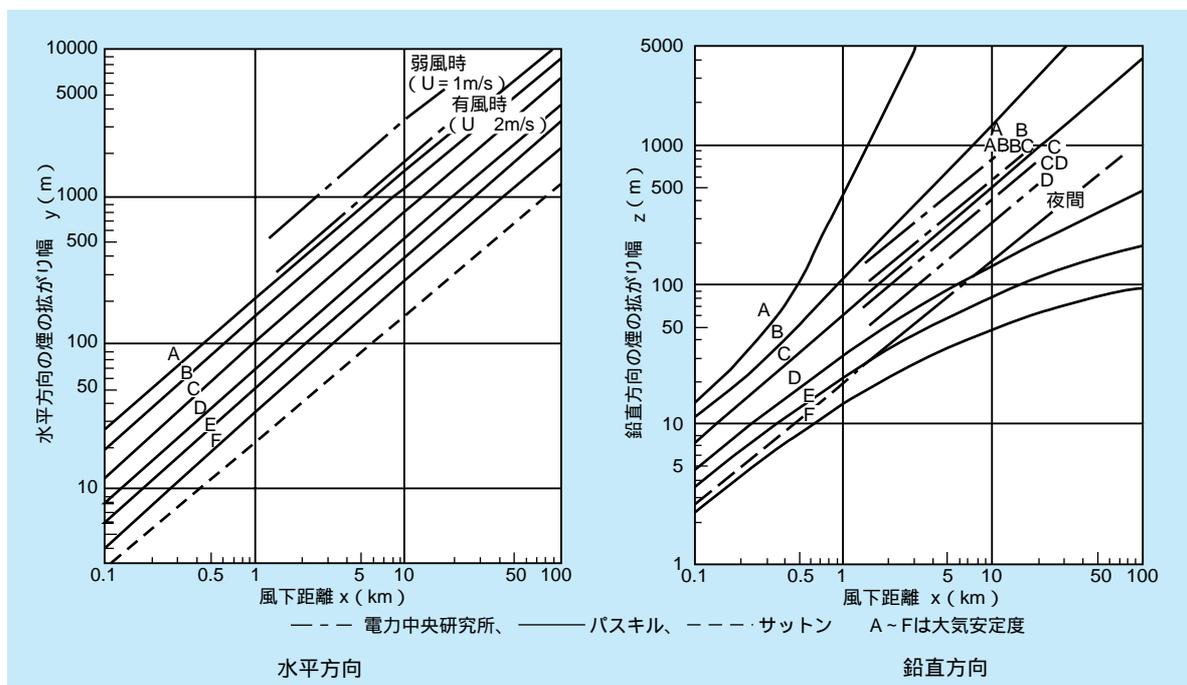


図2-4 煙の拡がり幅

する。このような場合には、煙軸や煙の拡がり幅を修正した拡散モデルが提案されている。アメリカのコンサルタントERT(現在のENSR)のイーガン(1975年)は、煙軸を以下のように決めることを提案した¹¹⁾。「評価点の標高が有効煙突高さより低い場合は、有効煙突高さから地形標高の1/2を減じた値を煙軸と地形表面の距離とする。評価点の標高が有効煙突高さより高い場合は、有効煙突高さの1/2を煙軸と地形表面の距離とする。」アメリカの環境保護庁が1980年代に開発した複雑地形上の拡散モデルCTDM(Complex Terrain Dispersion Model)¹²⁾では、ある高さを境に流れのパターンを2つに分けている。下側の流れは鉛直方向にほとんど運動しないとしてポテンシャル流理論で、上側の流れは地形を上昇、下降するとして線形の運動方程式で求めて、煙軸を評価している。また、煙の拡がり幅は地形による流線の歪みを考慮して補正されている。

煙塊の移動に、風の地形による空間変動や時間変化を考慮したモデルは、流跡線パフモデルと呼ばれる。煙塊の流跡は場所や時間によって変化する風(風系)をトレースすることによって求める。地形の影響を受けた風(場)を予測するのに、客観解析法がよく使われる。客観解析法は、対象とする領域で何点かの観測風のデータがある場合、それらのデータを内挿、外挿し

て全体の風(場)を求めるものである。

電力中央研究所はポテンシャル流で煙軸を予測する拡散式(正規分布型流跡モデル)を開発した¹³⁻¹⁵⁾。このモデルの特長は、一様流と水平面に配置した3次元複源の合成により得られる流線を煙軸とすることである。複源とは、図2-5に示すように、一様流と合成すると球(図では半球)まわりの流れが得られる場である。複源の数を増し、一つ一つの複源の強さを変えると、図のように流線が起伏を帯びる。ある流線を地形、地形上空の流線をブルーム中心軸(煙軸)とみなすことができる。同様に図のように強さの異なる複源を平面上に配置すると、複雑な地形とその上空にブルーム中心軸が得られる。地形影響を受けた煙の拡がり幅は、既存の風洞実験データから、平地と比べて横方向は約2倍、鉛直方向は2~3倍の値にした。本正規分布型流跡モデルを、野外での模型および実規模のトレーサ実験結果で検討したところ、大気が不安定、中立状態では比較的よい予測精度が得られた。

2-1-4 数値モデル

気流モデル

わが国の場合、火力発電所は複雑な地形に立地され

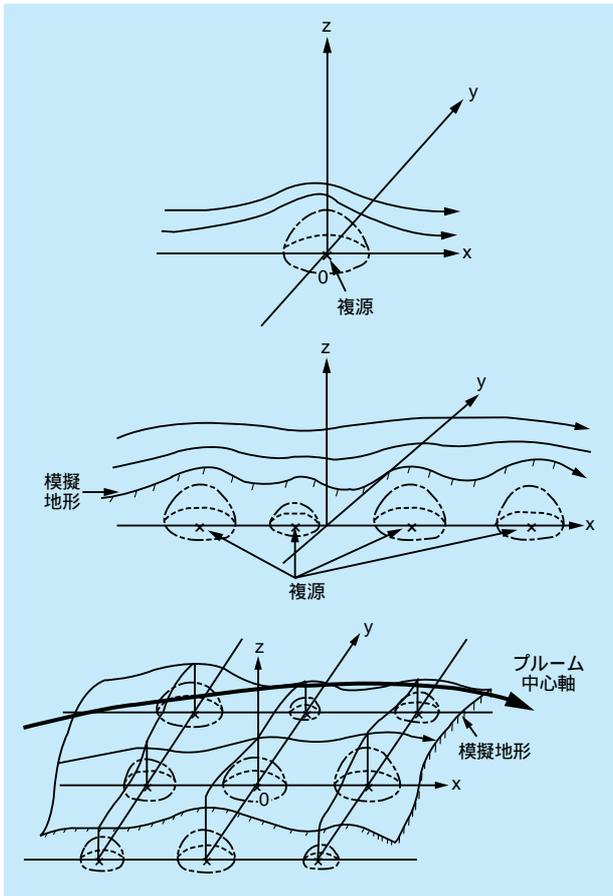


図2-5 ポテンシャル流理論にもとづくブルームモデル

ることが多いため、気流および大気拡散におよぼす地形影響の検討は重要である。1970年代後半から1980年代前半にかけて、複雑地形上の気流計算に客観解析法やポテンシャル流理論が適用された。最近では、計算機

や数値解析手法の発達により、乱流モデルが広く用いられている。電力中央研究所では、火力発電所の排ガス拡散予測を効率的かつ精度よく実施するために、乱流モデルにもとづく気流モデルを開発してきた¹⁶⁻¹⁸⁾。

当研究所の気流モデルは、図2-6に示す地形に沿った座標系で計算される。実際の座標系 (x, y, z) で、地表面と計算領域高さ間の格子数を一定にし、地表面上の領域高さに按分比例させて格子幅を変化させる。水平方向には数100 m程度の間隔で地形標高を与える。実際の座標系で計算格子を与えた後、計算上の座標系 (ξ, η, ζ) で数値計算を行う。この方法では、格子生成に関して、特に専門的な知識や経験を必要としない。

気流モデルでは、熱的に中立な状態においては水平方向の風速成分と乱れを計算する。乱れの計算には、乱流のモデル化(乱流モデル)が必要で、当研究所では高度な代数応力方程式モデルを採用した。また、日射等の影響により地表面温度が上昇するような非中立時に気流計算を行う場合、気温や温度乱れの計算を加える。

方程式系の複雑さを和らげるため、幾つかの簡略が施された。例えば、諸物理量の水平方向の変化に比べて鉛直方向の変化が大きい大気境界層では、水平方向の変化を省略する(境界層近似)。大気密度と圧力の釣り合いを仮定して、鉛直方向の輸送方程式を簡略化する(静力学近似)。これらの近似は、急峻な地形に適用しなければ妥当と考えられている。

気流モデルは実際の大気で見られるような非定常現象を組み込むことができる。例えば、地表面温度の日変化

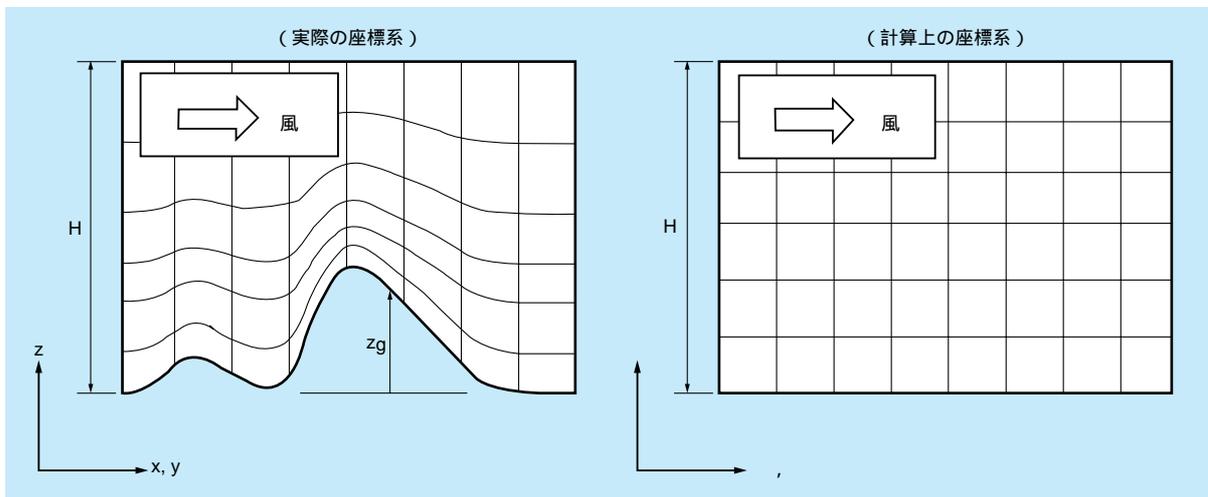


図2-6 地形に沿った座標系

を考慮できる。地表面温度は、長波および短波の放射、潜熱や顕熱、地中への熱伝導等の熱収支計算から与えられる。また、時間変化する風などの観測データをモデルに取り込み、予測値と観測値の乖離を防ぎながら、非定常な現象を追跡できる(4次元同化)。

図2-7は複雑地形上の気流を計算した結果である。地形範囲は横方向に約17km、縦方向に約13kmである。地形の最大標高は500m強で、起伏は実際より誇張して描かれている。地形の影響を受けた風ベクトルの変化が示されている。また、地形上で気流の乱れが増加する結果が計算された。これらは風洞実験結果とよく対応している。図2-8は気流モデルと野外気象観測の比較である。気流モデルと気象測器の時間応答性が異なるため、計算結果は観測結果に見られる細かな振動に追従できないが、風向、風速の時間変化をよく表現している。図2-9は気流モデルで計算した乱れの時間変化である。日射の影響により時間とともに地表面温度が上昇し、乱れの大きな混合層が発達している。

気流モデルは、風洞や野外で観測される現象を比較的よく予測した。本モデルで計算された平均風や乱れは、次項で述べる排ガス拡散を計算するラグランジュ型粒子モデルの入力になる。

拡散モデル

拡散モデルの分類

拡散モデルは大まかに以下のように分類できる^{19, 20)}。

- パフモデル、ブルームモデル
- K理論の拡散モデル

セル内粒子モデル

ラグランジュ型粒子モデル

濃度変動の予測モデル

パフモデル、ブルームモデルは、2-1-3節に示した拡散式に属する。ここでは、拡散方程式を数値的に解く数値モデルとして以下を扱う。大気中での物質の物理、化学過程は拡散方程式により記述できる。

$$[\text{時間変化}] + [\text{移流}] =$$

$$[\text{拡散}] + [\text{化学反応}] + [\text{発生}] + [\text{除去}]$$

ここで、[移流][拡散]=関数f(地形、建物、気象など)

移流項、拡散項は図1-5に示した地形、建物、気象条件等の影響を受ける。また、化学反応は気温や乱れ等、除去過程は地表面状態、風速、降水強度等によって変化する。

厳密な拡散方程式をそのまま解くことはできないので、何らかの簡略化(モデル化)が必要となる。本節で

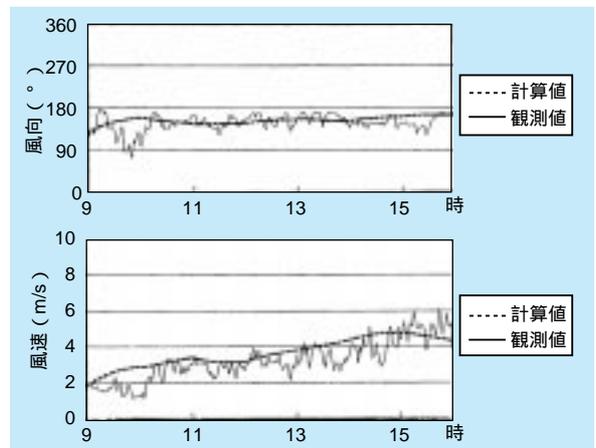


図2-8 風向、風速の計算と観測の比較

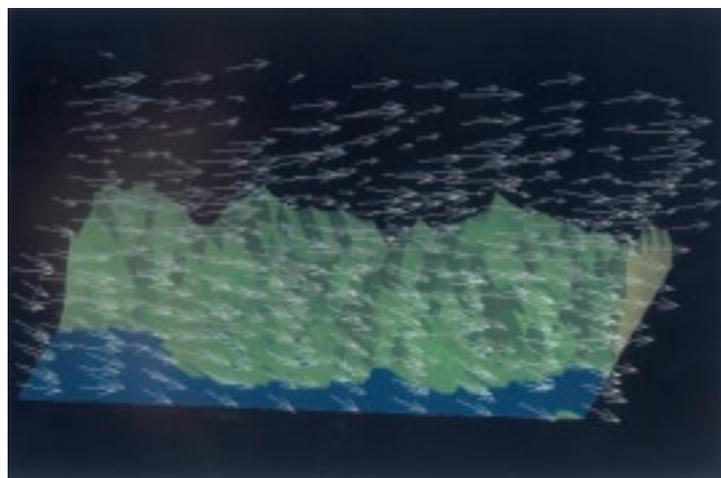


図2-7 複雑地形上の気流計算結果

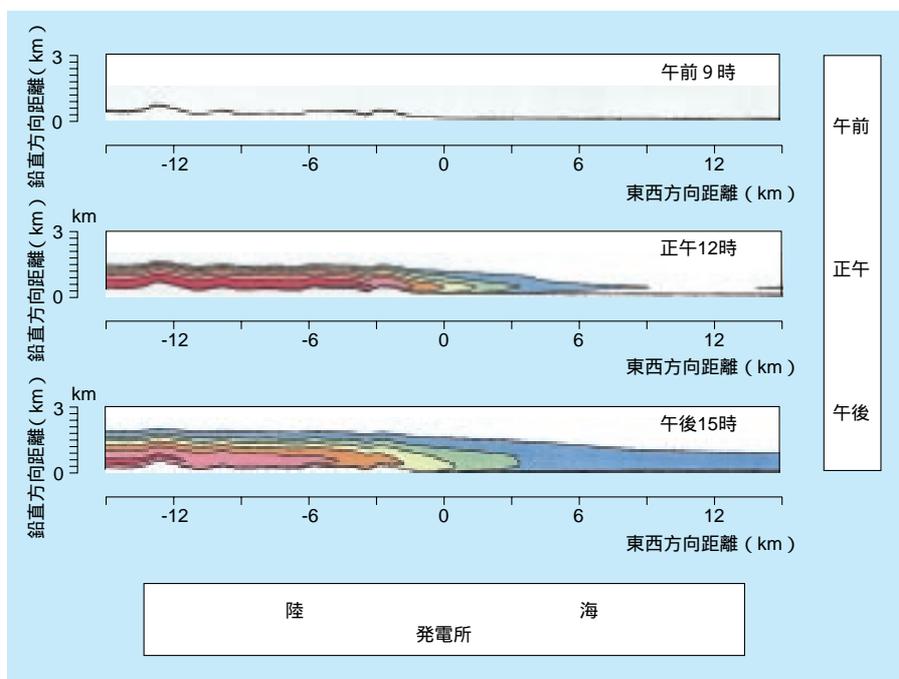


図2-9 大気乱れの時間変化 (赤：乱れ大 ↔ 青：乱れ小)

は、まず、化学反応や除去過程を考えないことにする。拡散項には物質の輸送量を表す濃度フラックス(速度変動と濃度変動の積の時間平均)が含まれる。この濃度フラックスを渦拡散係数 K と濃度勾配を用いて簡略化したものが、 K 理論の拡散モデルあるいは K 理論の式である。 K 理論の式において、渦拡散係数や風速がどこでも同じなどの条件で簡略化すると、解析的に解けてブルームモデルやパフモデルの式が導かれる。地面に近いところでは、鉛直方向の渦拡散係数は高さに比例する。このことを考慮して拡散方程式から解析的に導かれた拡散式が坂上の式²¹⁾である。しかし、拡散式の解析的な誘導には限度があって、地形や建物の影響で風の場合や渦拡散係数が場所によって大きく変化する場合には、拡散方程式を数値的に解かざるを得ない。拡散方程式を、差分法や有限要素法を用いて、ある時間間隔、距離間隔(格子点)の式に変えることによって、コンピュータで数値計算できるようになる。

のセル内粒子モデルは、ガス状、粒子状を問わず、大気汚染物質を模擬した多数の粒子を平均風と K 理論の拡散で移動させる方法である。大気拡散の分野では、原子力施設の緊急時予測システムとして実用化されたADPIC(Atmospheric Diffusion Particle-In-Cell)というモデルが有名である。このモデルで濃度分布は、対象

領域を区切ったセルに入っている粒子の個数から求める。粒子はセル間の濃度勾配力で動くため、拡散による移動距離は同一セル内の粒子すべてについて同じである。この点が、一つ一つの粒子が独立に動くラグランジュ型粒子モデルとは異なる。

のラグランジュ型粒子モデルは、セル内粒子モデルと同様に、大気汚染物質を多数の粒子で模擬する方法である。粒子は大気の乱流特性により移動する。本モデルには、ランダムウォークモデル、モンテカルロモデル、確率微分方程式モデル、マルコフ連鎖モデルと呼ばれているものが含まれる。ただし、セル内粒子モデルは、濃度勾配力が粒子の移動を決める手順を含むため、オイラーとラグランジュのハイブリッド型で、完全なラグランジュ型モデルではない。なお、格子点やセルのように固定座標系で扱うものをオイラー型、粒子の軌跡のように移動座標系で扱うものをラグランジュ型と言う。粒子の追跡間隔が渦の寿命より大きいとき、ラグランジュ型モデルはオイラー型の K 理論の拡散方程式と等価になる。ラグランジュ型粒子モデルの支配方程式は、粒子の速度と位置に対する確率微分方程式である。確率微分方程式は、時間と共に変化する不確定な現象を表す。

K 理論の拡散モデルでは、濃度フラックスをモデル化するのに対し、の濃度変動の予測モデルでは、濃

度フラックスや濃度変動の分散についても方程式をたてて予測する。濃度フラックスは濃度変動と速度変動の2次の相関、濃度変動の分散は濃度変動同士の2次の相関である。2次の相関の方程式には3次の相関が含まれる。3次の相関については方程式をたてず、モデル化を行ったものを2次のクロージャーモデルという。平均濃度だけでなく濃度変動まで予測できるモデルとして、他にLES(Large Eddy Simulation)型の拡散モデル、ラグランジュ型粒子対(ついで)モデルがある。これらは、毒性や可燃性ガス、悪臭物質など、平均濃度よりも瞬間的な高濃度が防災対策上重要な場合に必要になる。

電力中央研究所の数値モデル

電力中央研究所では、火力発電所の排ガスを対象に、拡散モデルを用いた地形影響評価手法を開発した。防災対策でなく通常的环境影響評価に用いること、適用範囲が広く、モデルの考え方が自然で理解しやすいことを考慮して、拡散モデルとしてのラグランジュ型粒子モデルを選択した。幾つかあるラグランジュ型粒子モデルの中で、イギリス気象局のトムソン²²⁾が1987年に提案したモデルは、地形や熱によって生じる複雑な気流条件、乱れの発生頻度が正規分布しない気流場(非正規な乱流場)、乱れが場所によって異なる気流場(非均質な乱流場)に適用できる潜在的な可能性をもっていた。また、排煙上昇過程を、鉛直成分の運動方程式に浮力による粒子上昇の加速度項を付け加えるだけで組み込むことができる。1990年代初めまでに、2次元の熱的影響が強い、対流の盛んな領域(対流境界層)の拡散予測へ適用された例は幾つか見られたが、地形条件下での大気拡散予測に使われたことはなかった。当研究所は資源エネルギー庁からの委託研究の中で、1992年から5年かけて、トムソンのモデルを複雑地形条件、熱的影響の強い条件、排煙上昇過程を考慮した条件に適用できるように、拡散モデルの開発を行った^{23~26)}。さらに、開発した拡散モデルを用いて、風洞実験の代替となりうる地形影響評価手法を提案した²⁷⁾。なお、拡散モデルに必要な乱流データは項で述べた当研究所が開発した気流モデルにより与える。

図2-10にラグランジュ型粒子モデルの計算結果を示す。図の左側から放出された大気汚染物質を模擬した

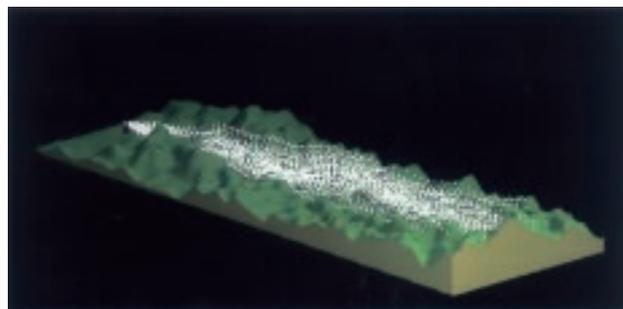


図2-10 ラグランジュ型粒子モデルの計算結果

粒子が、複雑な地形上を拡散しながら移動している。拡散モデルの妥当性は、風洞実験や野外トレーサ実験を行って確認した。図2-11は拡散モデルと風洞実験の比較で、排ガス濃度の鉛直断面を示している。風洞実験は熱的に中立な状態で実施された。図2-12は拡散モデルと野外トレーサ実験の比較で、排ガス濃度の地表濃度を示している。野外トレーサ実験は、1994年、95年の夏の日中に実施された。複雑な地形や地形と日射の両方の影響を受けた排ガス濃度分布が、拡散モデルで精度よく予測できた。

図2-13は数値モデルによる地形影響評価の手順である。まず、平地を対象に数値モデルによる気流、拡散計算を行い、既に提案されている経験的な拡散式の濃度分布を再現することを確認する。このとき、拡散式の濃度分布を再現するまで、気流計算の条件を変化させる。次に、気流計算の流入境界条件を平地と同じにして、地形を対象に気流、拡散計算を行い、最大着地濃度比 α 、最大着地濃度距離比、煙軸上着地濃度比(x)を評価する。 α 、 x については2.1.2節(c)項に式を示

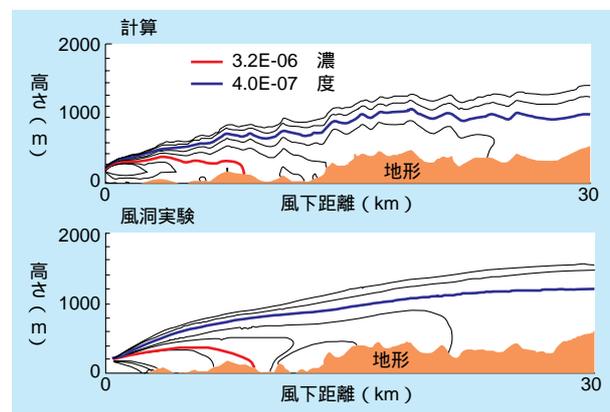


図2-11 拡散モデルと風洞実験の比較(鉛直断面)

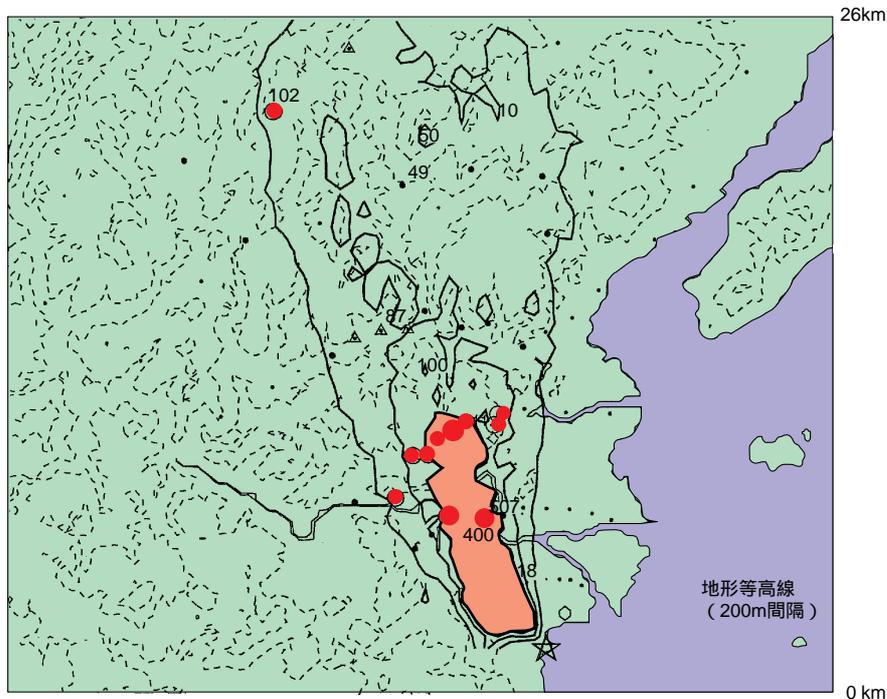


図2-12 拡散モデルと野外トレーサ実験の比較 (〇 : 計算結果と
● : 実験結果の地表濃度が同じレベル)

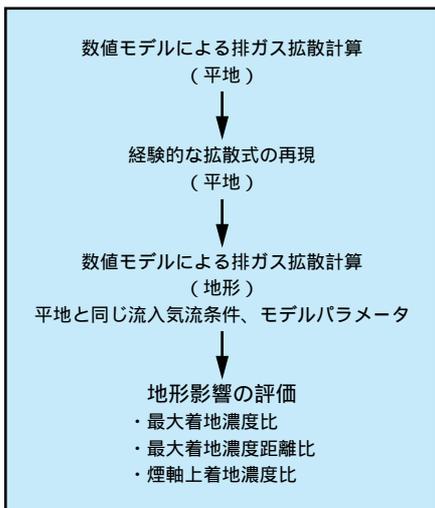


図2-13 数値モデルによる地形影響評価の手順

した。なお、図2-13の基本的な考え方は、風洞実験による地形影響評価手法と同じである。ここで、基準として使われる経験的な拡散式による平地の濃度分布の再現であるが、以下のように考えるとよいだろう。資源エネルギー庁の「手引」¹⁾では、長期予測に「NOxマニュアル」²⁾の使用を原則としていること、地形影響評価を実施するかどうかの判断基準が重合合法(1時間値対応)の風洞実験にもとづいていることから、コン

ケイウ式を用いて排煙上昇高さを求め、パスキル式の1時間濃度を再現する。

図2-14は最高標高が1000 mを超える複雑地形を対象に(x)を評価した結果である。図には風洞実験の結果も示されている。対象地点に対して、数値モデルで評価した α は2強、 β は0.5程度であった。 α については風洞実験より若干高く、 β についてはほぼ同じであった。数値モデルが風洞実験の代替として、排ガス拡散におよぼす地形影響評価に使用できることが確認できた。今後は、プリ・ポスト処理を含めて、誰でも簡単に排ガス拡散予測ができる解析ツールの開発を進める予定である。

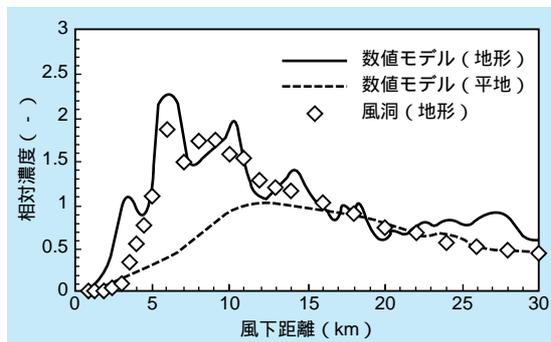


図2-14 数値モデルによる煙軸上着地濃度比(x)の評価と風洞実験の比較

2 - 2 原子力発電所

2-2-1 地形と建屋影響の評価

原子力発電所を新設あるいは増設する場合には、安全解析の一環として、排気筒から放出される放射性物質による被曝線量を評価する必要がある。わが国で現在用いられている線量評価手法の概略を図2-15に示す。この評価手法を欧米各国の評価手法と比較すると、最

も特徴的なことは、放射性物質の拡散におよぼす地形や建屋等の影響を風洞実験で検討していることである。これは、原子力発電所が地形の複雑な地点に設置されることが多い、わが国固有の評価手法である。

わが国で原子力発電所の排ガス拡散におよぼす地形影響を評価したのは、東海発電所建設時の安全解析が最初である。地形影響は、丘状地形の断面を円弧と弦からなる割円に置き換え、ポテンシャル流れによりプ

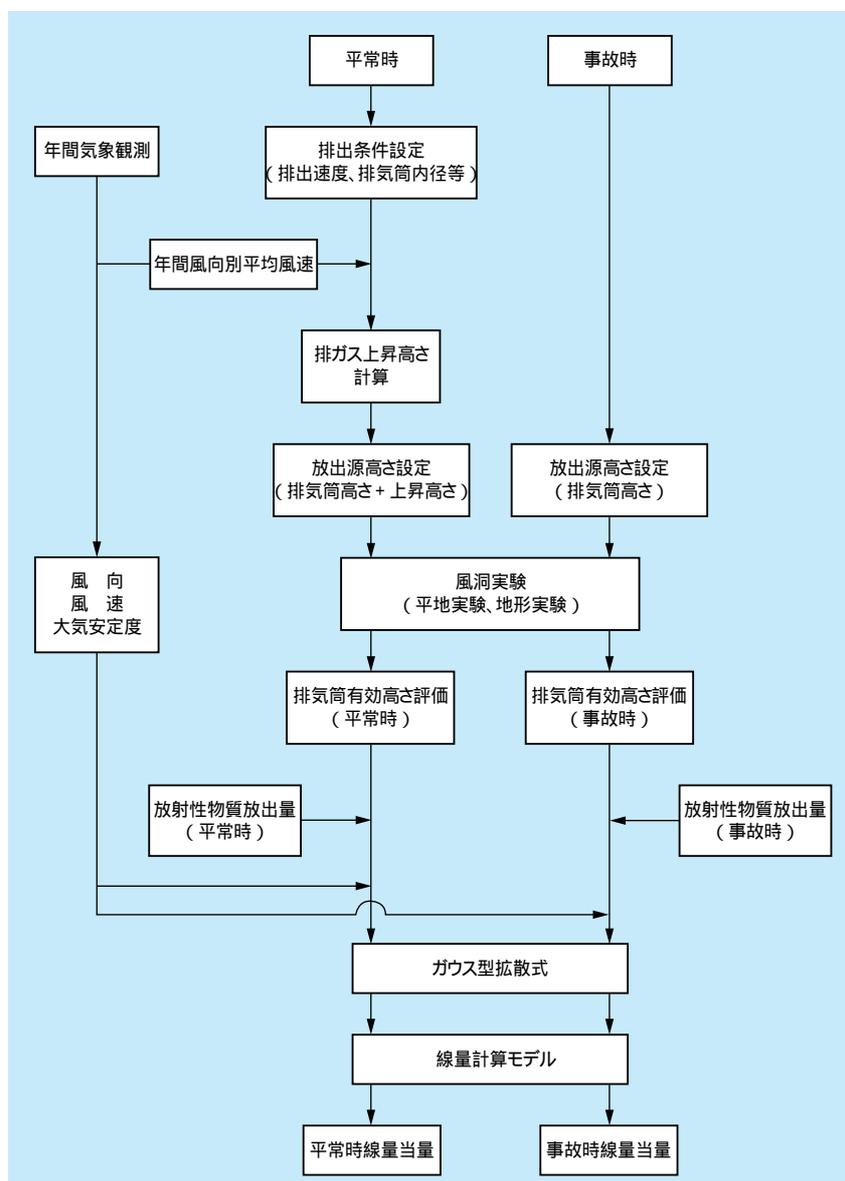


図2-15 原子力発電所の安全解析で用いられている線量評価手法

ブルーム軸の変化を計算して評価した。その後、風洞実験により検討する方法が採用されたが、地形影響を定量化して線量評価に組み込む方法が定められなかったため、実験結果は参考資料の域を出なかった。

1982年になると「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針（以下、気象指針という）²⁸⁾」によって、風洞実験による地形影響評価法と排ガス拡散におよぼす地形や発電所建屋の影響を放出源高さの変化(2-2-3節の排気筒有効高さを参照)として評価する方法が定められ、現在に至っている。なお、アメリカでは風下に地形がある場合には、放出源の高さからその地形の高さを差し引いた高さを放出源高さとして、拡散計算を行う方法が用いられている²⁹⁾。

2-2-2 線量評価手法

平常時および事故時の線量当量評価手法の概略が図2-15に示されている。気象観測は発電所敷地内またはその周辺の適切な場所で実施する。排ガス拡散に直接関係する排気筒出口の風向、風速は、鉄塔やドップラーソーダを用いて観測する。排ガスの拡散状態を決める大気安定度は、観測柱の地上10m高の風速と地上約1.5mの高さで測定した日射量、放射収支量から求める。平常時は気象観測で得られた年間風向別平均風速を用いて排ガスの上昇高さを計算し、これを排気筒高さに加えたものを放出源高さとする。また、事故時は排気筒高さを放出源高さとする。

平常時と事故時では適用する気象条件が異なる。すなわち、平常時では年間の平均的な線量を評価することを目的としているため、気象データは年間平均値を用いている。一方、事故時では年間の気象データのうち、出現頻度から見てめったに出現しないと思われる厳しい条件を適用している。線量当量評価にあたっては、排気筒有効高さ、気象条件、放射性物質の放出量を与えて、正規分布(ガウス)型拡散式により放射性物質の空間濃度を計算する。さらに、外部被曝線量を計算する場合には、ガンマ線線量計算モデルにより空気吸収線量率を計算した後、線量当量を評価する。

以上は気象指針にもとづく線量評価手法であるが、電力中央研究所では、ガンマ線照射線量率の短時間変動特性の評価^{30、31)}や静穏時の線量評価³²⁾を行う手法を

開発した。その結果、線量モデルで計算した原子力発電所排ガスによるガンマ線照射線量率は、バックグラウンドを差し引いた測定値とファクター2以内で一致すること、静穏時には気象指針等をもとにした安全解析モデルによる線量計算結果は、原子力発電所の一般的な敷地境界である500～1000m程度以遠で過大になることが明らかになった。

2-2-3 風洞実験手法

原子力発電所を対象とした排ガス拡散に関する風洞実験の目的は、排ガス拡散におよぼす地形や発電所建屋の影響を放出源高さが増えたものとしてとらえ、線量当量の計算に用いる排気筒有効高さを求めることである。これは、地形がある場合の地表最大濃度とその出現距離を平地の結果と相対比較する火力発電所の風洞実験とは、目的や手法が幾分異なることを意味する。

実験に必要な相似条件は、火力発電所を対象とした実験とほぼ同じである。ただし、気流の乱れは、気象指針に示されている排ガスの水平方向、鉛直方向の拡がり幅を相似させるように与える。

実験方法の概略を図2-16に示す。一般にガンマ()型と呼ばれる模型排気筒の出口を放出源高さを設定し、水平にトレーサガスを放出して、風下における地表濃度分布を測定する。得られた地表濃度分布から、地表ブルーム中心軸濃度分布を求める。地表ブルーム中心軸濃度分布を用いた排気筒有効高さ H_e の評価例を図2-17に示す。平地実験と地形実験における地表濃度分布を比較し、敷地境界に代表される線量評価地点以遠を

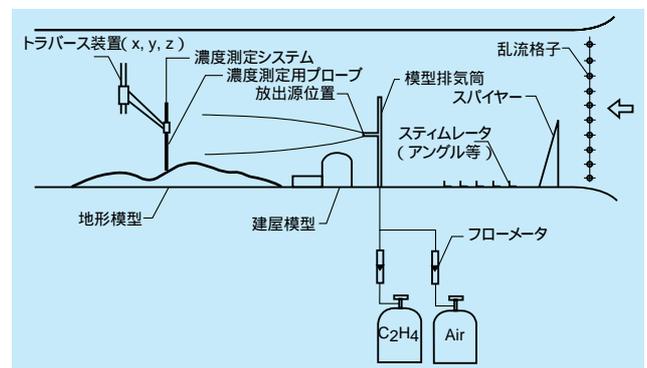


図2-16 風洞実験の概略

対象として、平地実験で得た地表濃度が地形実験における地表濃度を下回らないような分布を示す平地実験の放出源高さを H_e とする。言葉ではわかりにくいので、図2-17を例に説明する。事故時を対象とした地形実験の地表プルーム中心軸濃度を見ると、敷地境界以遠では平地実験における放出源高さ60mの地表プルーム中心軸濃度を下回っている。この場合、 $H_e = 60m$ と評

価される。また、平常時を対象とした実験結果では同様に $H_e = 120m$ と評価される。

電力中央研究所では、上に示した安全解析のための風洞実験手法について、より合理的、効率的なものにするため、排ガスの上昇軌跡、上昇高さを考慮する方法、排ガスの横方向の拡がり幅を考慮する方法、現地拡散実験の風洞内再現方法の検討を行った³³⁾。

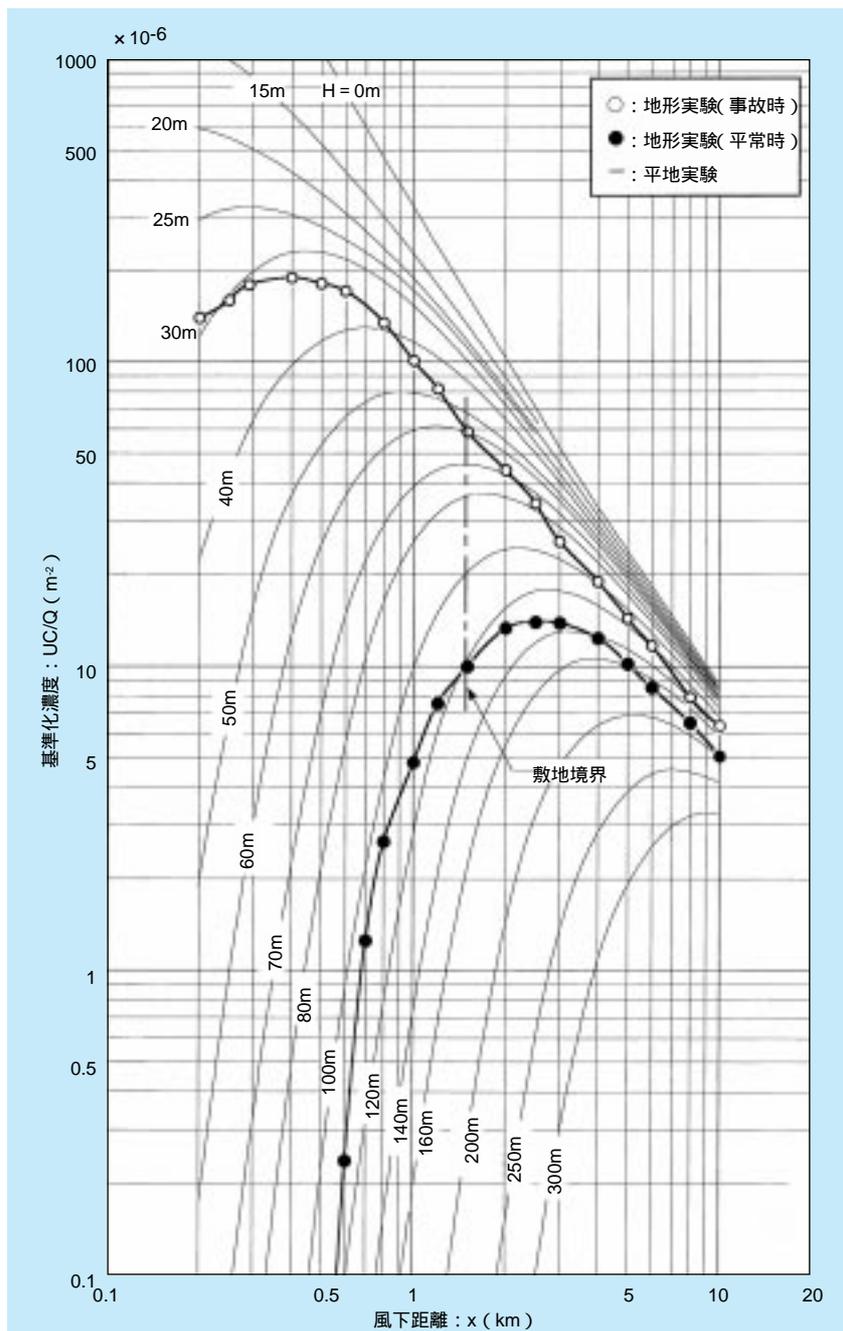


図2-17 排気筒有効高さ H_e の評価方法

2 - 3 地熱発電所

2-3-1 冷却塔排気の予測

欧米およびわが国の地熱発電所のほとんどは、冷却塔により排熱を大気中に放出している。欧米では、冷却塔ブルームの拡散について評価が可能なモデルが10以上発表されている³⁴⁾。しかし、これらのモデルは、大容量の火力発電所や原子力発電所の冷却塔ブルームに適用することを目的として開発されたもので、50MW程度の地熱発電所の冷却塔ブルームへの適用可能性については確認されていない。また、地熱発電所の冷却塔ブルームは塔自身や発電所建屋あるいは周辺地形の影響を受けるが、既存のモデルのうち唯一、これらの影響を評価できるポリカストロラ³⁵⁾のモデルも、簡易モデルを用いているため予測精度が十分とは言えない。現在、比較的予測精度が高く、かつ実用的な方法は風洞実験である。資源エネルギー庁の「発電所に係る環境影響評価の手引」¹⁾には、冷却塔排気に含まれる硫化水素の拡散予測について、次のように記載されている。「着地濃度の予測は地形、建物の影響及び排気の上昇過程の相似性を考慮した風洞実験により行う。」しかし、風洞実験の方法については何も記載されていない。

2-3-2 風洞実験手法

電力中央研究所は、地熱発電所の冷却塔ブルームを対象とした風洞実験手法を開発した³⁶⁾。この方法を以下に示す。

地熱発電所は複雑地形内に立地され、冷却塔高さあるいは排気速度が低いことから、ブルーム上昇中に最大の地表濃度に達する可能性がある。そのため、風洞

実験では、冷却塔排気の上昇過程中の拡散を模擬する。また、予測対象範囲は風下2 km程度と狭い。排気の上昇過程の模擬は、ヘリウムと空気の混合ガスにより行う。相似則としてはフルード数の一致を考えるが、当然のことながら、排気に含まれる水分の相変化による熱の放出、吸収は風洞実験では考慮できない。

温度あるいは密度の影響を大気と風洞実験で相似させる場合、相似則としてフルード数 $Fr = U(\rho L / \rho_a)^{1/2}$ が用いられる。ここで、 ρ は大気の密度[kg/m³]、 ρ_a は排気と大気の密度差[kg/m³]である。代表長さLとして冷却塔出口の内径をとる。 ρ / ρ_a を風洞と大気で合わせると $U_m = U(\rho L / \rho_a)^{1/2}$ の関係を得る。ここで、添字mは風洞、 ρ は実大気に関する量を表す。Lm/Lpは模型縮率で1/500がよく用いられる。このとき、 $U_m = 4.5 \times 10^{-2} U_p$ となる。冷却塔の排気速度が10m/sの場合、風洞実験における排気速度は0.45m/sである。実際の大気で風速6 m/sを対象とすれば、風洞実験は約0.3m/sで行う必要がある。

冷却塔本体や発電所の影響を再現するためには、レイノルズ数 $Re = UL/\nu$ を一致させる必要がある。 ν は空気の動粘性係数(m²/s)である。代表速度を風速、代表長さを冷却塔高さあるいは幅とするのが一般的である。レイノルズ数の一致は、その値がある程度大きく、気流が乱流であれば無視してよい。

実験は、まず、平板を対象に気流調整を行い、排気の上昇軌跡を経験式に合わせる。拡散については、排気の鉛直方向の拡がり幅 σ_z をTVA線図⁸⁾と比較して妥当性を確認する。次に、地形模型を入れてトレーサ実験を行い、地表濃度分布を測定する。この結果から硫化水素の地表濃度を評価する。

2 - 4 ま と め

電力中央研究所では、排ガス拡散予測に関する研究を風洞実験、計算の両手法により取り組んできた。風洞実験は、火力発電所、原子力発電所、地熱発電所の環境影響評価に多くの実績を残した。また、原子力施設を対象に、風洞実験手法をより合理的、効率的なものにするための研究を進め、その成果は風洞実験の内規に反映された。計算に関しては、火力発電所排煙の大気拡散予測手法を開発し、暫定指針案³⁷⁾という形ではあるが、長年にわたって環境影響評価に一役かった。

最近では、排ガス拡散におよぼす地形影響を予測する数値モデルを開発し、風洞実験の代替手法として提案した。本成果は資源エネルギー庁の発電所に係る環境影響評価の手引に反映された。今後は、環境影響評価の効率化、電源立地、核燃料サイクルに対する社会の理解と信頼の確保、国際的な環境問題の解決に貢献できるように、排ガス拡散の研究、予測手法の実用化に取り組んでいく。

コラム1 水を用いて空気の流れを再現

土木構造物や建築物の強度設計を行う際に考慮すべき主要な荷重の一つとして、台風時などの強風による風荷重がある。風から受ける荷重をいかに正しく算定して強度設計を行うかは、コストを抑えつつも安全性の高いものを建設していく上で非常に重要なことである。電気事業においても、例えば、山間の水力発電所や海辺の火力、原子力発電所から人々の生活圏まで、電気を運ぶ大切な設備の一つである架空送電線の耐風設計を合理化していくことが重要な課題となっている。耐風設計に関する研究を進めるにあたり、送電線路が設置される地点に吹く風や送電線と鉄塔まわりの気流の詳細を明らかにしていくことが必要であり、風洞と呼ばれる設備と縮尺模型を用いて、このような空気の流れを再現し、各種計測が行われる。しかしながら、相似則といわれる流体力学の原理にもとづいて、風洞のかわりに水路を用いて実験すれば、実際の空気の流れと同じ特性をもった流れを水流によって再現することができる。相似則にもとづいて気流を水流で模擬した場合、風洞実験と比較して以下のようなメリットを活かした実験が可能となる¹⁾。

() 低流速でレイノルズ数相似の実験が可能である。

一般に、物体まわりの流れにもっとも影響を与えるパ

ラメータとしてレイノルズ数 Re (= 流速 × 物体の大きさ / 動粘性係数) があげられる。形状が幾何学的に相似な模型を用いて同じレイノルズ数を確保して実験を行うと、空気でも水でも同じ特性の流れを再現することができる。水の動粘性係数は常温で空気の約1/15であることを利用すると、水路を用いた実験では風洞で実験するよりも遅い流速で同じレイノルズ数を確保することができる。一方、現象の時間スケールは流速に反比例するため、低流速で実験すると時間スケールが引き延ばされることとなり、同じ特性を持ちながらも時間スケールの大きいゆっくりとした流れとして現象を再現することができる。この結果、微細な部分での流れの計測や可視化に有利となる。

() 流れを可視化する手段が豊富である。

水路実験は、風洞実験と比較して、可視化手段が豊富で、比較的容易である。また、上記(i)の理由から、より低流速で時間スケールを引き延ばして実験を行うことができるために、現象のメカニズム解明等の基礎的な実験においては、より詳細な観察、可視化が可能になる。

電力中央研究所では、架空送電線路の耐風設計合理化に関する研究へ役立てるため、水路実験のメリットを活かし、風洞実験にかえて大型の水路施設を用いた様々な

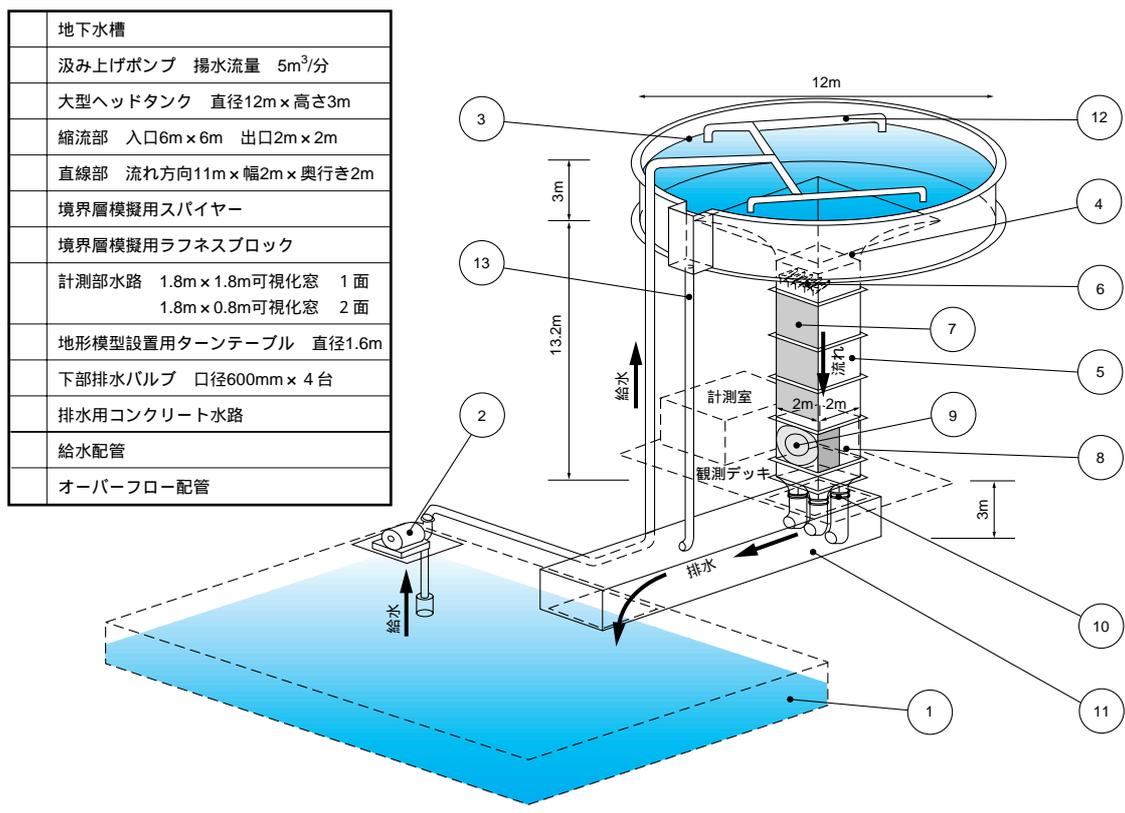


図1 大型水風洞設備の概要

実験を行っている。

図1は当所が所有している「大型水風洞設備」の概要を示したものである。水路内に様々な模型を設置し、模型まわりの流れの可視化や各種の測定を行う。本設備は、大型ヘッドタンクへ揚水後、重力を利用して水を駆動する方式（重力落下式）を採用している。このため、大型のポンプによって強制的に水を循環させる一般的な回流水槽と比較して、偏流が少ないという特長をもち、水路制作費、運転経費を大幅に削減しつつ大流量の実験が可能となる。また、この設備は水路としては珍しい境界層模擬用水路であり、境界層模擬用スパイヤーや境界層模擬用ラフネスブロックを使い分けることにより、実際の大気の流れと同様の特性をもつ流れを模擬することができる。

図2～図4に、上記設備を用いた実験例を示す。急峻な山間地に架空送電線を建設する場合、地形の影響により局地的に強められた風を受け、送電鉄塔に被害が生じることがある。これらの実験は、このような特殊地形による風の増速効果を解明するための研究の一環として実施されたものである。図3は、大型水風洞設備の計測

部水路内に、尾根状の地形を模擬した模型を設置し、図2に示す方法によって流れを可視化した例である。また、図4は、同様の方法で得た流れの可視化画像に対してPIV（Particle Image Velocimetry）と呼ばれる手法を適用して、模型まわりの流速分布を求めた例である。水路実験による流れの可視化と画像処理を組み合わせることにより、通常の風洞実験では得にくい空間的な流速分布も比較的容易に得ることができる。

以上のように、相似則にもとづいて風洞実験にかえて水路実験を行うことにより、風洞実験と比較して有利な実験を行うことが可能となる。ただし、ここで注意しなければならないのは、水路実験のデメリットとして、計測装置や模型の取付時の漏水防止、耐水圧処理や水路内の水質管理が必要といった面もあり、実験の目的に応じて風洞実験と水路実験を使い分けることが重要であろう。

今後は、相似則にもとづき気流を水流により模擬して流れの可視化や計測を行うという手法を空力騒音分野へ適用することや、あるいは水と空気の密度の違いを利用して詳細な動的な流体力を計測すること等について検討していく予定である。

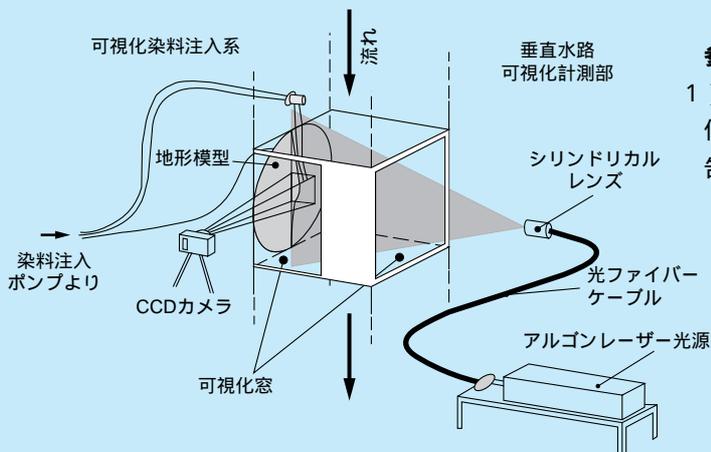


図2 レーザーライトシートと蛍光染料を用いた可視化

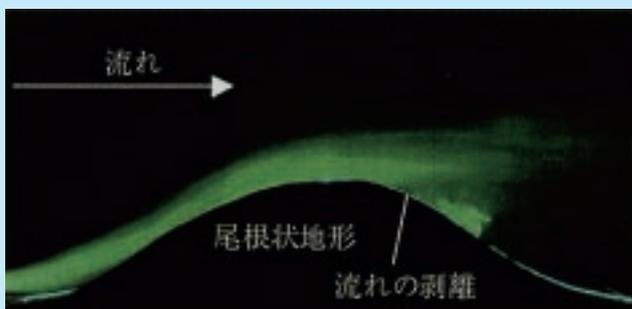


図3 尾根状地形まわりの流れの可視化写真

参考文献

- 1) 江口謙、西原崇、1999、水試験による電線の風荷重低減化のメカニズム解明、電力中央研究所報告研究報告U96050

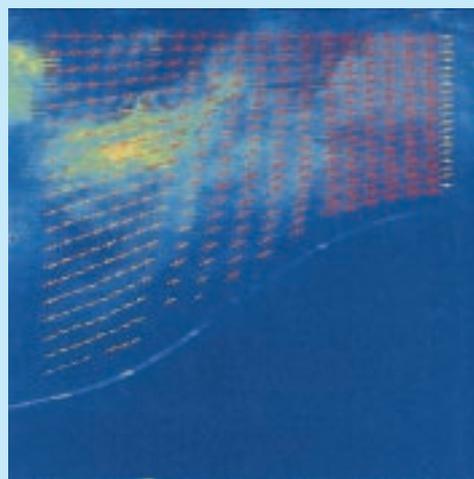


図4 PIVによる尾根状地形まわりの流速分布測定結果例