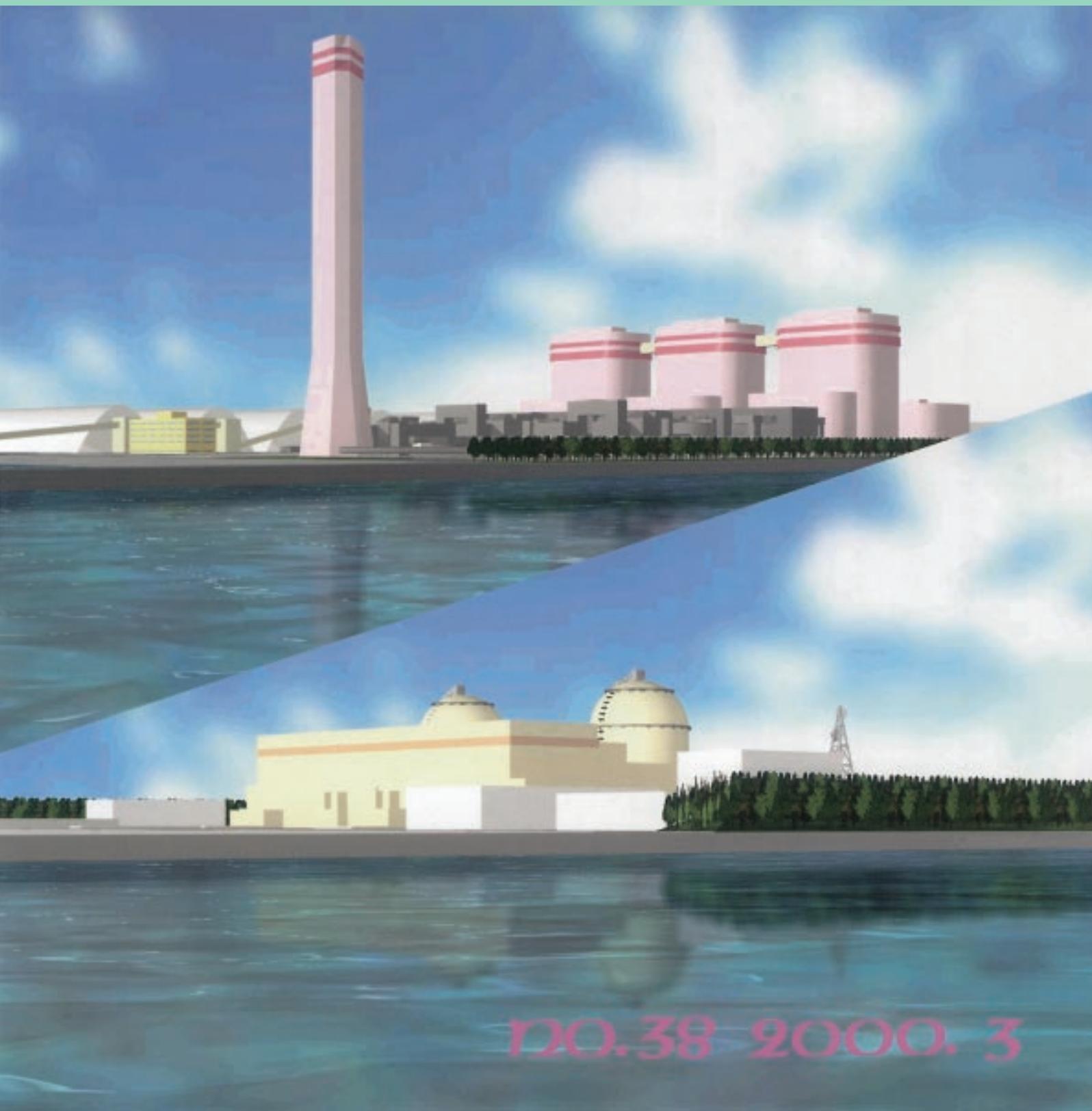


DENCHUKEN REVIEW

電中研レビュー

「大気拡散予測手法」



NO.38 2000. 3

巻頭言	工学院大学教授 北林 興二	2
電中研「大気拡散研究」のあゆみ		4
はじめに	常務理事 平松 紀夫	6
第1章 大気環境問題の変遷と当研究所の取り組み		7
1 - 1 地球環境問題の解決は個人と地域から		9
1 - 2 大気環境問題の歴史		9
1 - 3 大気拡散と気象の研究		14
第2章 排ガス拡散予測手法の開発		17
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
第3章 都市建物まわりの熱と大気汚染の予測		37
3 - 1 都市環境に作用する複合要因		39
3 - 2 都市域の大気拡散研究		39
3 - 3 風洞実験による熱と物質移動の把握		39
3 - 4 数値モデルによる熱移動と大気拡散の予測		42
3 - 5 ま と め		45
第4章 気象と大気汚染の観測手法の開発		51
4 - 1 煙突を利用した上層風の観測		53
4 - 2 ドップラーソーダの実用化		57
4 - 3 移動型ラスレーダの開発		64
4 - 4 ライダー観測		71
4 - 5 ま と め		73
第5章 排ガス拡散予測の新しい技術開発		77
5 - 1 実験的アプローチ		79
5 - 2 数値計算からのアプローチ		81

5 - 3	ま と め	84
第 6 章	大気環境影響評価の方向性	87
6 - 1	大気環境影響評価の現状	89
6 - 2	今後の課題と取り組み	90
おわりに	===== 理事 粕江研究所長 福島 充男	91
引用文献・資料等	92

コラム目次

1 .	水を用いて空気の流れを再現	35
2 .	冷却塔は都市気象，気候を変えるか？	46
3 .	暑い都市の環境改善技術を提案	47
4 .	可視化でよくわかる空気の流れ	48
5 .	大気中での混合反応を捉える	49
6 .	回想 - 30年前の気象観測	74
7 .	大気中に排出された窒素酸化物の行く末を追う	75
8 .	大気汚染物質の高精度・多種同時計測を狙うレーザーレーダ	76
9 .	濃度変動測定システムの原理	84
10 .	環境計算科学と数値乱流風洞	85

表 紙

「未来の景観煙突」

公害から環境へ、地域から地球へ



公害問題は、人間、或いは、動物が集団となって生活すれば程度の差はあれ、或いは、被害の差はあれ発生する。古墳時代においても、貝塚は悪臭やカラスの害などの原因として我々の祖先を悩ませていたことであろう。また、産業革命以前にも、すでに13世紀には、ロンドンなどの都市で石炭の使用によるばい煙公害が大きな社会問題、政治問題であったことが知られている。英国における石炭燃焼による大気汚染問題は1952年の有名なロンドンスモッグ事件により、ピークを迎えた。

第二次大戦後は油田の発見や開発が進み、石油という扱いやすく優れた燃料の普及により、我が国を含めて多くの国々で大気汚染、水質汚染が大きな社会問題となったが、そのメカニズムの解明、予測技術、対策技術の研究に多くの頭脳が取り組んだ結果、先進諸国においては、かなりの改善をみている。20世紀は激動の時代であったが、技術の進歩、普及により公害が発生し、それをまた技術により解決するという、ある意味で技術の正負の両面が顕著に現れた「公害・環境問題の世紀」と言えよう。公害問題の解決は、多くの国々において、国や自治体、企業や市民が熱心に取り組んだことと共に、産業革命以降の、“第二次技術革命”とも言うべき急激な技術革新の成果とも言えよう。勿論、まだまだ、公害問題が全て解決したとはとても言えない。発展途上国の公害はこれからも激化するであろうし、質的に変化して、地球温暖化や化学物質の環境リスクなどに代表される複雑で広域的な環境問題が、21世紀の人類にとって大きな社会、政治問題となってきている。

しかしながら、数年前には、地球環境問題がサミットの主要課題として取り上げられるなど、20世紀の最後に、これまでの後処理から、未然防止へと世界全体の姿勢が進歩してきている。環境問題、特に地球環境問題は人類が地球的規模で問題の解決を考え、行動できる、また、しなければならない共通の大テーマでもある。人類は必ずやこの問題を解決できるものと思う。

今回発刊された大気拡散予測手法は、二酸化硫黄、窒素酸化物汚染に代表される我が国の大気汚染問題の解決の歴史的、技術的な研究の経緯を、電力供給の側から、また、大気汚染予測技術の面から集大成したものであり、1960年代から世界に先駆けて環境問題に取り組んできた先導的な研究機関である電力中央研究所のみが著せる書籍と言えよう。この本は単に技術解説書としてのみならず、技術史としての面からも極めて貴重な書物である。

大気汚染の予測技術、つまり、拡散予測技術は、大気の流れや汚染物質の測定監視技術など、数々の周辺技術の進歩と共に発展してきたものであるが、これからの技術の進展と共にまだまだ、改良、改善できる、或いはすべき点も多々残っている。電力中央研究所が持てる世界に誇るべき技術のポテンシャルをさらに向上させ、酸性雨問題や大気環境予測技術の解決、改善に向けてさらに研究を発展させ、環境問題の解決に向けて努力し、研鑽されることを信じ、また、心から期待したい。

工学院大学機械システム工学科

北 林 興 二

電中研「大気拡散研究」のあゆみ

西 暦	当 研 究 所 の 状 況	内 外 の 状 況
前3000頃		・青銅器時代（大気汚染のはじまり？）
1273		・ロンドンで石炭燃焼の禁止
1661		・大気汚染に関する初めての本、イブリンの「防煙」
1823		・イギリスのリバプールで高煙突（約90m）
1867		・アメリカのセントルイスで煙突の高さを周囲の建物より約6m高くする規定
1914		・日立鉱山で世界一の高煙突（156m）
1921		・テイラーの拡散理論
1951	・研究所設立	
1952		・ロンドンスモッグ
1953		・サットン「微気象学」
1955		・アメリカ原子力委員会「気象と原子力」 ・この頃（～60年代）日本で産業公害
1957		・東海村で日本初の原子力気象、拡散調査
1959		・大気汚染研究全国協議会（現在の大気環境学会）発足
1962		・パスキル「大気拡散」
1964	・排ガス対策研究委員会発足	
1965	・長10m拡散風洞設置 ・排煙上昇式の提唱	
1966		・ロンドンで第1回世界清空会議
1967		・公害対策基本法公布
1968		・大気汚染防止法公布
1970	・拡散実験用3次元水槽の設置	・公害国会
1972		・アメリカのローレンス・リバモア研究所で原子力の緊急時監視システムのサービスを開始
1973	・長20m温調拡散風洞設置	
1976	・環境アセスメント研究会発足	
1977		・通商産業省省議決定「発電所の立地に関する環境影響調査及び環境審査の強化について」 ・原子力委員会「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」 ・この頃（～80年代半ば）アメリカで複雑地形の拡散モデル開発プロジェクト盛ん

西 暦	当 研 究 所 の 状 況	内 外 の 状 況
1979	<ul style="list-style-type: none"> ・ 温度境界層模擬水槽の設置 	
1980	<ul style="list-style-type: none"> ・ 下層風速遠隔測定装置（ドップラーソーダ）の導入 	
1982	<ul style="list-style-type: none"> ・ 火力発電所排煙の大気拡散予測手法の開発 ・ 石炭粉じんの飛散量予測手法の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 環境庁「窒素酸化物総量規制マニュアル」
1983	<ul style="list-style-type: none"> ・ 長10m拡散風洞改造（長17m拡散風洞となる） 	
1985	<ul style="list-style-type: none"> ・ 原子炉施設の安全解析の風洞実験手法に関する成果 [「風洞実験の内規」に反映] 	
1986	<ul style="list-style-type: none"> ・ 気温分布遠隔探査装置（ラスレーダ）の導入 	
1990	<ul style="list-style-type: none"> ・ 石炭粉じんの飛散量予測手法の改良 [資源エネルギー庁「手引」(1999)に採用] 	
1991		<ul style="list-style-type: none"> ・ ヨーロッパで環境影響評価の拡散モデルを標準化する動き
1992	<ul style="list-style-type: none"> ・ ドップラーソーダの実用性評価 [原子力安全委員会「気象指針」(1994)、資源エネルギー庁「手引」(1999)に採用] 	
1993		<ul style="list-style-type: none"> ・ 環境基本法の公布，施行
1995	<ul style="list-style-type: none"> ・ 小型風洞（温度成層，剪断流）設置 	
1996	<ul style="list-style-type: none"> ・ モノスタティック型ドップラーソーダの導入 	
1997		<ul style="list-style-type: none"> ・ 環境影響評価法公布
1999	<ul style="list-style-type: none"> ・ 数値モデルによる排ガス拡散の地形影響評価手法の開発 [資源エネルギー庁「手引」(1999)に反映] 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 環境影響評価法施行
1999		<ul style="list-style-type: none"> ・ 環境影響評価法施行 ・ 資源エネルギー庁「発電所に係る環境影響評価の手引」

は じ め に

常務理事 平松 紀夫



当研究所では、1960年代から、高度経済成長によるエネルギー源としての石油の消費増大によりもたらされた大気汚染問題に対処する為に、世界に先駆け、大気拡散とそれと密接に関連する気象の研究を進めて参りました。

現地観測、風洞実験そしてコンピュータを用いた数値計算による、総合的な取り組みを行い、火力、原子力発電所の排ガス拡散予測手法やリモートセンシングを用いた気象観測手法を開発してきました。それらの成果の幾つかは、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、数多くの火力、原子力発電所の環境影響評価に適用されております。

昨年6月に、環境影響評価に必要な技術の向上をはかるため、当該技術の研究開発の推進を謳った環境影響評価法が施行され、新しい環境影響評価制度が適用されました。今回これを機に、これまでの研究成果を電中研レビューとしてまとめることに致しました。本レビューでは、大気拡散予測や気象観測について、既に確立された手法や、研究段階ながら、ある程度の目処のついたもの、さらに将来期待される技術を幅広く紹介しております。

21世紀には、電気の供給形態や利用形態も大きく変化するものと思われませんが、人間がいる限り大気に関する環境問題はついて回ると考えられます。これからも、本レビューを物質輸送の基本である大気拡散予測技術と身近な大気環境を理解するのにお役に立てていただくことを願っております。

第 1 章

1

**大気環境問題の変遷と
当研究所の取り組み**

第1章 大気環境問題の変遷と当研究所の取り組み 目次

粕江研究所大気科学部 上席研究員 市川 陽一

1 - 1 地球環境問題の解決は個人と地域から	9
1 - 2 大気環境問題の歴史	9
1 - 3 大気拡散と気象の研究	14



市川 陽一（1977年入所）

大気拡散に関する研究に従事している。これまで、火力発電所の環境影響評価のために、石炭粉じんの飛散量予測手法や排ガス拡散予測数値モデルの開発を行った。また、大気汚染物質の長距離輸送を解析した。

1 - 1 地球環境問題の解決は個人と地域から

次世代を危惧し、新しく迎える千年紀の最初に取り組むべき問題として、地球環境に対する関心が高い。本書では発生源周辺での大気拡散や気象に関する地域環境問題について述べる。地域環境問題は、地球環境問題の影に隠れてしまった感じがする。事実、日本の二酸化硫黄の環境濃度は、1967年以降激減し、環境基準の達成率が100%近い状態が長年続いている。このように身近な大気環境が改善されたのは、固定煙源と言われる発電所、工場等の環境対策が推進された結果である。しかし、都市部の窒素酸化物や熱のように解決されていない問題、廃棄物焼却施設周辺の大気汚染のように新たな問題がないわけではない。これらは自動車、ごみといった私たちの生活が密接に関わる問題である。また、開発途上国には、工場排煙による環境問題が深刻な都市が幾つもある。私たちの生活様式を見直し、地域環境問題に対策を講ずること、そして、その技術を国際的な環境問題の解決に役立てることが、地球環境問題解決につながる。

電気事業は1970年代に燃料対策、環境設備の導入をはかり、今では、火力発電所からの硫黄酸化物や窒素酸化物の発電電力量あたりの排出量は、それぞれ、

0.24g/kWh、0.31g/kWhと欧米の先進諸国と比べて一桁低い値になっている¹⁾。また、発電所の立地にあたって、1977年からは通商産業省省議決定、1999年6月からは環境影響評価法および電気事業法に従い環境影響評価が実施され、適切な環境保全のための措置がとられている。

電力中央研究所は、1964年に火力発電所排ガス等の対策に関する研究の強化推進をはかるため、大気拡散と気象に関する研究、調査を開始した。それ以降、大気拡散と気象に関する研究を継続している。当初の研究目的は、火力発電所排煙の監視、管理手法を確立することであった²⁾。その後、環境影響評価手法の高度化に重点を移し、大気拡散予測手法や気象観測手法の開発を進め、火力発電所の環境影響評価、原子力発電所の安全解析等に貢献してきた。環境対策が進み、環境影響評価法が施行された現在、新たに以下のことを目的に大気拡散に関する研究を展開している。

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

分散化、多様化する電源立地への対応

国際的な環境問題の解決

1 - 2 大気環境問題の歴史

1-2-1 紀元前からあった大気汚染

人類が火を使い始めたのが50万年前と言われている。この頃から、Public Nuisance(公害)という言葉を用いると大げさだが、近隣の煙で迷惑をしたということがあったかも知れない。紀元前5000~4000年になると、メソポタミアで銅鉱石の製錬が始まり、紀元前3000年頃には青銅器時代を迎える。世界最初の都市国家シュメールやエジプトでは、銅精錬によって二酸化硫黄を含む煙が大量に排出されたと考えられている³⁾。このあ

たりが大気汚染問題の濫觴と推測される。紀元前4世紀には、戦争で大気汚染を利用した記録が残されている。ペロポネソス戦争で、スパルタ軍は硫黄を燃やしてアテネ人の城を攻めた⁴⁾。また、ネロ皇帝の師セネカが、医師から健康にくらすため煙や悪臭の漂うローマを離れるように忠告を受けたのは、紀元1世紀なかばのことである⁵⁾。

発生源近くの大気環境問題が、今話題の地球環境や環境ホルモンの問題とは比べものにならないくらい歴史が古いことがわかる。宮沢賢治(1896~1933年)の時代には、寒冷による凶作を防ぐため、今とは逆に二酸

化炭素による気温上昇を期待していた。日本の越冬隊がオゾンホールが発見に先鞭をつけたのが1982年のことである。レイチェル・カーソンが化学物質に対する警告の書を著したのは1962年である。越境大気汚染の記録は少し古い、それでも16世紀頃に過ぎない。

大気汚染の歴史の始まりとして、よく紹介されるのが13世紀のイギリスである。イギリス最初の大気汚染エピソードは、中部の都市ノッティンガムで起こった。1257年、ヘンリー 1世の王妃は石炭燃焼の悪臭のため城を逃げだした⁵⁾。ばい煙問題が深刻なロンドンでは、エドワード1世が1273年に石炭を燃やすことを禁止した。また、1306年には、職人が石炭を使用することを禁止する王室布告が出された。ロンドンの大気汚染のひどさは、イベリン⁶⁾が1661年に著した書「Fumifugium (防煙)」に克明に記録されている。彼は英国清空協会から、大気汚染について初めて本を著し、19世紀の後半まで煙害のことを真剣に考えた唯一の人と賞賛されている。図1-1をよく見ると、FumifugiumはJ.E.(John Evelyn)から陛下(国王チャールズII世)への煙害対策の提案書であることがわかる。大場³⁾はこの本の内容を「環境問題と世界史」において2章を割いて紹介している。イベリンはまず、石炭の無秩序な使用で大量の硫黄とすすが発生した結果、「セントポール辺りは異常に悪臭を放つ暗くて厚い霧によって通過できない。」「長年健康に暮らしていた老人がロンドンに着いたとたん、汚染された空気のせいで病気になった。」と大気汚染の現状を訴え、次いで汚染源の移転と植林による煙害対策を建言した。1772年に再版された同著の序文で、編

集者は汚染源の移転より現実的で有効な方法として、煙突を高くして煙が建物に巻き込まれないようにすることを提案している。高煙突による拡散希釈は1823年にイギリス・リバプールのソーダ工場で試みられた。リバプールの工場は高さ約90mの煙突を建てたが、塩化水素排ガスがうまく拡散せず、あまり効果がなかった³⁾。

ロンドンでは、19世紀の後半から度々スモッグによって通常以上に死者が増える過剰死亡が確認されている。中でも1952年12月4日から始まったロンドンスモッグでは、過剰死亡者数が1ヶ月で約4000人、全期間を通じると8000人に達した⁷⁾。高濃度出現には石炭燃焼による大量のばい煙排出に加え、地形と気象条件が深く関わっている。ロンドンはテムズ川沿いの盆地にあり、ここに冷氣団が移流して停滞したため逆転層が生じた。逆転層は地表に近づくにつれて気温が低くなっている層で、汚染物質の拡散希釈が起こりにくい。谷間の底に汚染物質がたまって高濃度汚染が生じた。その後、イギリスでは1956年に大気清浄法が制定され、有名なロンドンスモッグのエピソードは1962年が最後となった。

20世紀なかばにはロサンゼルスの光化学スモッグなど幾つかの大気汚染エピソードが発生しているが、ロンドンと同様、盆地あるいは谷間と逆転層が共通した要因としてあげられる。

1-2-2 鉱山の煙害防止にみる環境対策の原点

日本の公害の原点として足尾銅山が名指しを受ける。



図1-1 大気汚染に関する初めての本、イブリンの防煙(Fumifugium)

わが国の銅鉱山は、明治から大正にかけて国を支える基幹産業として、生産量を飛躍的に伸ばした。それとともに煙害による被害地も拡大した。足尾銅山、別子銅山、小坂鉱山、日立鉱山の煙害は四大鉱害事件として知られている。図1-2は足尾の煙害地域⁸⁾を示している。東西17.5km、南北14kmの足尾地区境界が太い線で描かれており、そのほぼ中心の丸印が製錬所の位置と思われる。足尾の荒廃地は自然の風化侵食に亜硫酸ガスを主体とする煙害、乱伐、山火事が加わったことが原因で3000haにもおよんだ。治山事業により、

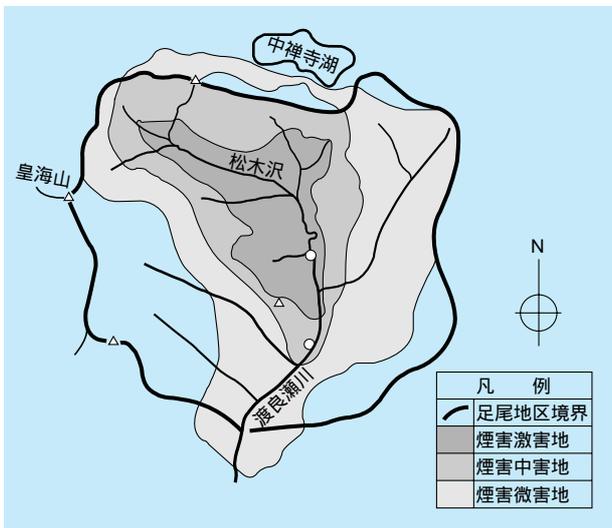


図1-2 足尾の煙害地域(足尾郷土誌1993年版より)

全くのハゲ山がかなりの箇所で見られるようになったのは最近のことである。

このように煙害が深刻な時代であったが、その中に今日の環境対策の原点を見つけることができる。日立鉱山は実によく煙害問題に取り組んだ。気象観測所や農事試験場の設置、除じん、硫酸回収設備の導入など多くをあげることができるが、特記すべきは高煙突の建設である。イギリスでうまくいかなかった高煙突を、大気拡散と気象の知識を駆使して成功させた。高煙突建設に関する話題を「大煙突の記録 - 日立鉱山煙害対策史」⁹⁾から拾い出す。世界一の高さ156mの大煙突(煙突頂上は海拔481m)は1914年(大正3年)に完成した。図1-3は煙突の使用が始まった1915年の精錬所の写真である。前年の写真では、左側の谷間が煙でぼやけて見えなかった。

図1-3は煙突の歴史を見る上でもおもしろい。図の左手の峰を高さ2m、長さ1630mの煙道(白く見える縦の線、1911年竣工)が走っている。この煙道には10数個の排気口が横腹にあいている。大煙突の下のずんぐりした煙突(1913年竣工)は高さが36mであるが、実は胴体の内部に高さ11mの煙突が6基収まっている。当時は、低い位置から煙を薄めて出すことによって、煙害を狭い範囲に限定する方法が常識であった。しかし、これらの煙道、煙突の効果は少しもなかった。

低煙突は失敗したが、だからといって高煙突にすれ



大煙突完成後の製錬所。谷間から煙は消えている(大正4年10月頃)

図1-3 日立鉱山の煙突(大煙突の記録 - 日立鉱山煙害対策史より)

ば被害拡大の心配がある。そこで日立では、既設煙突(図1-3で大煙突の左下)を使った煙の拡散幅の観測、繫留気球による高層気象観測、風洞実験、川の中での気流模擬実験やトレーサ実験を行い、事前の拡散評価を実施した。繫留気球観測をとりあげても、陸軍気球隊で気球の製作、揚げ方から学んだ時代である。拡散予測に相当の力を注ぎ、高煙突を成功させたことがわかる。

日立鉱山の成功には小坂鉱山での経験が生かされていると言えるだろう。小坂では1902年(明治35年)に東洋一の高さ60mの大煙突が建設されていたし、煙を観測する煙見山をもうけていたようだ。

別子銅山でも精錬所移転、煙突の改良などさまざまな方策がとられた¹⁰⁾。新居浜地区の煙害を解消するために、沖合約20kmの四阪島に精錬所が建設され、1905年(明治38年)に操業が開始された。しかし、結果は逆に煙害を拡大させてしまった。この対策として、1914年に64mの煙突をやめ30mの煙突を6本作った。低煙突からの薄煙放出は、すでに述べたように日立やまた足尾でも行われたが、いずれも失敗している。別子では結局、1939年に亜硫酸ガスをアンモニア水によって中和する排煙処理により、煙害を解決した。

1-2-3 近年の環境対策と環境濃度推移の二つの型

日本の産業公害の発生と克服は、開発途上国への教訓として活用が望まれている。産業公害の発生について、「日本の大気汚染経験」¹¹⁾を要約引用する。「第二次世界大戦後における石炭を主要エネルギーとした日本の工業復興は早く、各地で降下ばいじんや硫酸化物を主とする大気汚染問題を引き起こした。1955～1964年の日本経済の飛躍的な成長により、エネルギー消費量は10年間で約3倍に、エネルギー源の主役も、石炭から石油に入れ替わった。このため、大気汚染も硫酸化物を中心とした汚染に形態を変化させつつ広域化、深刻化していった。」

産業公害克服の過程を示すよい例として、二酸化硫黄濃度をとりあげる。図1-4は二酸化硫黄の環境濃度の経年変化¹²⁾に、関連する法規、電気事業における環境対策をあわせて記載したものである。ばい煙の排出

に関する国レベルの初めての規制法は、1962年に制定されたばい煙の排出の規制等に関する法律である。この法律は降下ばいじん量の減少には効果があったが、排ガス中の濃度規制を行ったこと、高度成長期のまっただ中であったことから、硫酸化物の総排出量削減や環境濃度低減には至らなかった。大気拡散の話はさめば、この頃が風洞実験による事前予測・評価の始まりである。

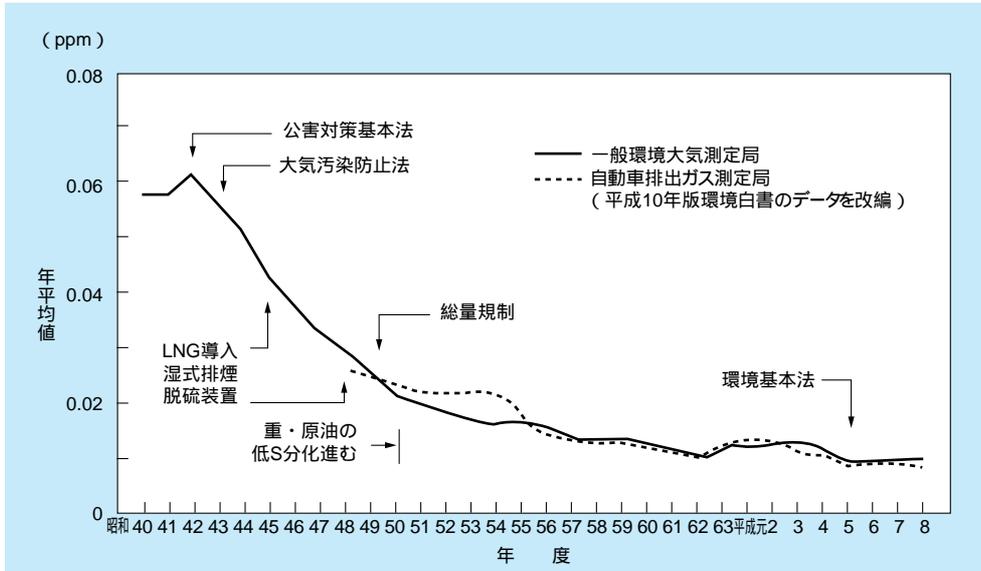
1967年に公害対策基本法が制定され、国民の健康の保護、生活環境の保全を維持するための環境基準が定められた。また、翌年の1968年には大気汚染防止法が制定され、硫酸化物のK値規制が行われるようになった。K値規制では次式により排出基準(許容量)が定められている。

$$\text{排出許容量} = K \times 1/1000 \times \text{有効煙突高の2乗}$$

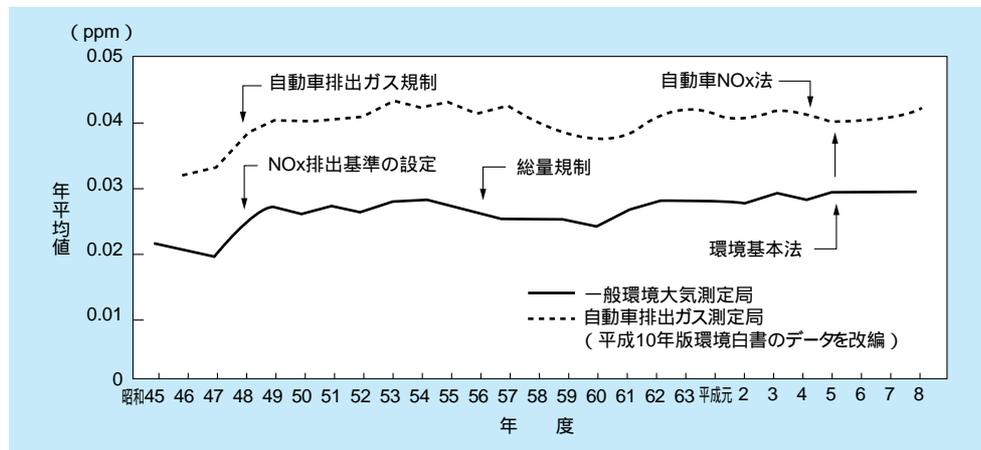
なお、Kは地域ごとに定める値(K値規制の名前の由来)、有効煙突高は煙突実高に煙の上昇高さを加えた高さである。この式は、有名な大気拡散式の一つ、サットンの式に風速6m/sなどの条件を代入し、地表最大濃度を誘導することにより求めることができる。

K値規制では高煙突による拡散希釈の効果が期待できる。ところが、高煙突化に見合う分だけ排出量を増加すると大気汚染が広域化し、さらに施設が増加した場合には大気汚染が進む。そこで、K値を見直すことで規制強化して、硫酸化物の排出量を削減した。1974年になると、硫酸化物に対して総量規制が導入された。総量規制は、工場等の集合地域で環境基準の確保が困難であると認められる地域が対象になる。これまで24地域が指定された。総量規制では、大気拡散の予測シミュレーションを実施して、環境基準を確保できる排出条件かどうか評価、検討することになっている。

上記の法規制に対応するため、燃料の低硫黄化と排煙脱硫設備の導入が進められた。低硫黄化について見ると、日本の重油中の硫黄含有量は1965年から1973年の間に2.6%から1.4%に急速に低下した。排煙脱硫装置設置数の合計は、1970年に102基だったのが、1976年には1134基まで急増した。日本産業機械工業会の資料をもとにまとめた大気汚染防止装置生産額の推移¹¹⁾を



二酸化硫黄



二酸化窒素

図1-4 二酸化硫黄と二酸化窒素の環境濃度の経年変化

見ると、1972年に生産額で排煙脱硫装置が高層煙突を抜いた。電気事業では、硫黄分を含まない燃料LNG(液化天然ガス)を、1970年に東京電力南横浜火力発電所が世界で初めて導入した。排煙脱硫装置は1972年に導入、発電用重原油の硫黄分削減は1975年頃までに実施された¹⁾。K値規制、総量規制の導入と、それに伴う環境対策の実施により、二酸化硫黄の環境基準(1時間の1日平均値が0.04ppm以下であり、かつ1時間値が0.1ppm以下であること)の達成率はほぼ100%を保っている。

図1-4は二酸化窒素の環境濃度の経年変化¹²⁾である。窒素酸化物(NO_x)の固定煙源対策については、

1973年に大気汚染防止法にもとづく排出基準の設定、1981年に東京特別区等地域、横浜市・川崎市等地域、大阪市・堺市等地域の3地域に総量規制の導入がなされた。これに応えるため、燃料対策、燃焼対策、排煙脱硝が行われた。全産業における排煙脱硝装置の設置数合計は1972年にわずか5基だったが、1996年には1165基まで年々着実に増加した。電気事業では、1972年に低NO_x燃焼技術(二段燃焼法、排ガス再循環法)、1973年に低NO_xバーナー、1977年に排煙脱硝装置の導入を行っている¹⁾。

一方、自動車の保有台数は1965年の800万台から1997年には7300万台まで増加した。自動車から排出さ

れる窒素酸化物に対しては、1973年以降の度重なる排ガス規制、1992年の自動車NO_x法(首都圏および大阪・兵庫圏特定地域における総量規制)の制定により削減がはかられた。しかし、図1-4に見るように、環境中の二酸化窒素の濃度は改善されない状態が長く続いている。二酸化窒素の環境基準(1時間値の1日平均値が0.04ppmから0.06ppmまでのゾーン内またはそれ以下であること)の達成率(1997年調査)は、自動車NO_x法の特定地域の一般環境大気測定局で78.9%、自動車

排出ガス測定局で34.3%に過ぎない¹³⁾。自動車排ガスの寄与が高い浮遊粒子状物質も、二酸化窒素と同じ環境濃度の経年変化を示す。固定煙源や自動車排ガスに対する様々な対策の効果が、自動車台数の伸びにうち消されている。1993年に制定された環境基本法では、「国、地方公共団体、事業者及び国民の責務」をうたっている。自動車に代表されるように、規制や事業者の対策だけでなく、私たち一人一人の環境問題に対する取り組み、心構えや誇りが必要な時代に来ている。

1 - 3 大気拡散と気象の研究

1-3-1 内外の取り組み

大気拡散が科学として研究され始めたのは第一次世界大戦中(1914～1918年)と考えられている¹⁴⁾。1918年の論文¹⁵⁾には、対流が発達するときや逆転層が崩壊するときの煙の挙動が報告されている。煙の拡がり方について、初めて理論的な答えを与えたのはテイラー¹⁶⁾(1921年)である。大気拡散と地表近くの気象に関する研究の体系化は、サットンの「微気象学」¹⁷⁾(1953年)、パスキルの「大気拡散」¹⁸⁾(1962年)に見られる。原子力の分野ではアメリカの原子力委員会の「気象と原子力」¹⁹⁾(1955年)があげられる。また、日本では伊東疆自、森口実の「大気汚染と制御」²⁰⁾(1961年)や本間端雄の煙の拡散についての総説(1972年)²¹⁾がある。

日本の大気拡散と気象研究の草創期については、大田正次²²⁾が「原子力と気象 - 原子力気象調査とともに - 」で詳しく振り返っている。1957年の日本原子力研究所、1958～59年の日本原子力発電東海発電所の立地調査で、現地トレーサ実験や気象観測を行ったこと、イギリス気象局の技術資料の段階からパスキルの方法の導入がはかられた経緯などを知ることができる。日本原子力発電の調査では、「1年間の毎時刻の気象観測値から、正規分布型の拡散式を用いて、任意地点の毎時刻のガス濃度を計算する」方法を模索し、今日の環境影響評価の原型を造りあげることに成功した。

煙突排ガスの拡散予測を風洞で行うことは、1930年

代の後半にイギリスやアメリカで開始された²³⁾。日本では1960年代から風洞実験が行われている。現在は、電力中央研究所、三菱重工業、石川島播磨重工業、資源環境技術総合研究所、国立環境研究所、気象研究所、清水建設他の風洞で大気拡散の実験ができる。調査研究対象は、排ガス拡散、排煙上昇過程、気流におよぼす地形、建物、構造物、温度成層、地表面加熱・冷却等の影響評価である。また、空気の代わりに水を使う水槽実験は、1970年代に電力中央研究所や京都大学他で行われた。三菱重工業は排煙上昇過程を調べる実験を水槽で実施している。

計算機を用いた本格的な数値モデルは、日野幹雄²⁴⁾が1968年に発表したのが世界初である。アメリカでは、1970年代末から1980年代中頃にかけて、環境保護庁、電力研究所、エネルギー省で別々に、複雑地形を対象とした拡散モデルの開発プロジェクトが進められた。これらのプロジェクトは、開発事業に対する環境影響評価手法の開発が目的である。一方、原子力施設の緊急時対策用のモデル開発は、1979年に起こったアメリカのスリーマイルアイランド原子力発電所の事故を契機に高まった。1980年代までの数値モデルは、ポテンシャル流理論を用いた正規分布型ブルームモデル、客観解析法とセル内粒子モデルあるいはパフモデルの組み合わせ、1次のクロージャーモデルが主である。高次の乱流モデルは、ロスアラモス国立研究所の山田哲二²⁵⁾が1985年に2次のクロージャーモデル+マルコフ連鎖モデルを報告したが、一般的になってきたのは

1980年代末からである。現在は、風や濃度の平均値だけでなく、瞬間的な変動まで予測する数値モデルが開発されつつある。

1991年にヨーロッパの国々が中心となって、環境影響評価のための大気拡散モデルについて、標準化をはかる動きがおこり、国際会議を重ねている²⁶⁾。この会合では、モデル開発者に加えて、使用者、環境行政担当者が強く意識されている。最近、大気拡散モデルの商品化が進んでいるし、インターネットを通じてモデルの実行を許す例も見られる。これらは、パソコン、ワークステーションの発達の結果でもあるが、開発する時代から使う時代が変わりつつある証でもある。これまで蓄積された大気拡散の成果を整理、選択し、総合化をはかり、必要な人にツールとして提供する時代にきている。

1-3-2 電力中央研究所の取り組み

電力中央研究所は1964年に排ガス対策研究委員会を発足させて、大気拡散と気象に関する研究を本格的に開始した。本委員会は1972年に所期の目的を達して幕を閉じたが、その間、排煙上昇高さの計算式や接地層の大気安定度推定方法の提案など数多くの成果をあげた²⁾。

1972年に開催された国連人間環境会議の日本政府代表演説の中で、わが国において環境影響評価制度を環境行政の根幹とする旨の決意が表明された²⁷⁾。この頃から当研究所は、環境影響評価手法の開発、高度化に関する研究に力を入れてきた。当研究所が1982年に開発した火力発電所排煙の大気拡散予測手法^{28、29)}は、資源エネルギー庁の大気環境影響調査暫定指針(案)³⁰⁾に採用された。石炭火力発電所の環境影響評価のためには、粉じんの飛散量予測手法を1982年に開発し³¹⁾、1990年に改良した^{32、33)}。この改良された手法は、資源エネルギー庁の「発電所に係る環境影響評価の手引」³⁴⁾(以下、「手引」とよぶ)に採用された。また、1999年には排ガス拡散数値モデルによる地形影響評価手法³⁵⁾を開発した。この手法は資源エネルギー庁の「手引」で、地形影響評価に風洞だけでなく数値モデルを用いてもよいことの根拠になっている。

原子力の分野では、1985年にまとめた発電用原子炉

施設の安全解析の風洞実験手法に関する研究成果³⁶⁾が、風洞実験についての内規に反映されている。また、1992年のドップラーソーダによる高所あるいは上層風観測の成果^{37、38)}は、「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」³⁹⁾や資源エネルギー庁の「手引」に採用された。

環境影響評価に直接結びつく風洞実験の実施は、風洞が設置された1965年以降、火力が約50地点、原子力が約20地点におよぶ。石炭粉じんの飛散予測は16地点に対して行われた。増設、計画変更の実験、予測を加えれば、件数は倍増する。また、ドップラーソーダは10箇所の原子力発電所に導入されたし、排ガス拡散数値モデルによる地形影響評価も実施されるようになってきた。

表1-1は当研究所の排ガス拡散研究への取り組み計画である。環境影響評価の効率化では、風洞実験を数値計算に置き換えることにより、予測に係る費用削減に貢献する。また、数値モデル自身の簡略化をはかり、比較的身近な計算機環境で実行できるツールとして提供する。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のために、防災時を想定した排ガス拡散予測手法を開発する。これにより、環境社会学の分野を科学的、工学的に支援する役割を担う。分散、多様化する電源立地への対応として、これまで海岸域に重点が置かれていた気象、拡散現象の解明を、都市域、内陸域へ広げる。この中で、都市環境あるいは広域環境問題として重要な反応性物質、粒子状物質を扱う。地球環境問題の解決に、経済発展とともにエネルギー利用が増大せざるを得ない開発途上国、特にアジアの国々の参加は不可欠である。そして、途上国の地域環境問題の解消を地球環境問題に連動させることの必要性がよく説かれる。当研究所の30数年におよぶ実績が国際的な環境問題の解決に活かせると思う。図1-5は排ガス拡散におよぼす様々な要因を示している。これら気象や地形、建物の影響を受けて、大気中の物質は非常に複雑な挙動をする。当研究所は大気拡散研究の最終的な目標として、計算科学を駆使して、複雑な大気中の物質移動現象を予測することを掲げている。

なお、本書2-1-4節の一部は、通商産業省資源エネルギー庁からの受託研究として実施した内容である。

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

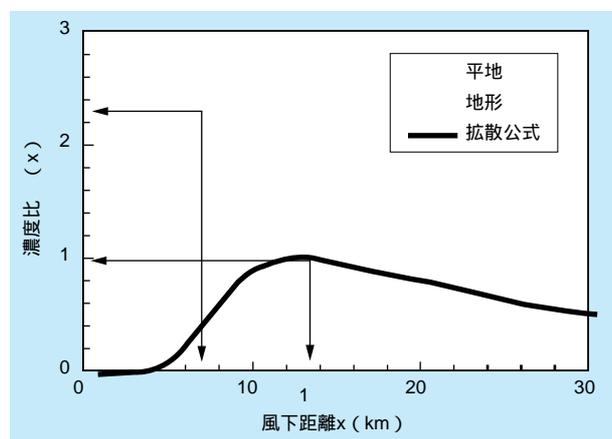


図2-2 風洞実験()による地形影響評価例

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

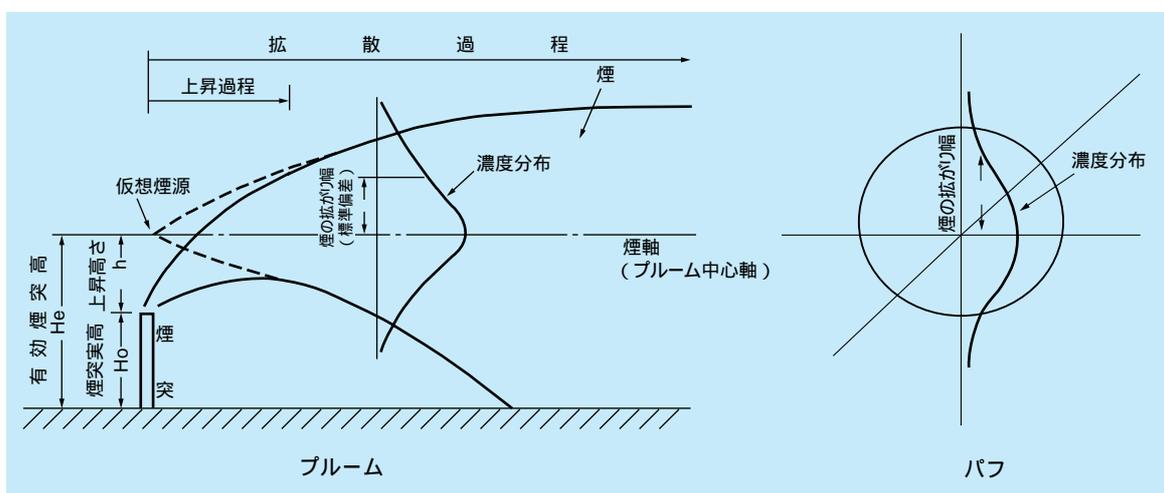


図2-3 ブルームモデルとパフモデル

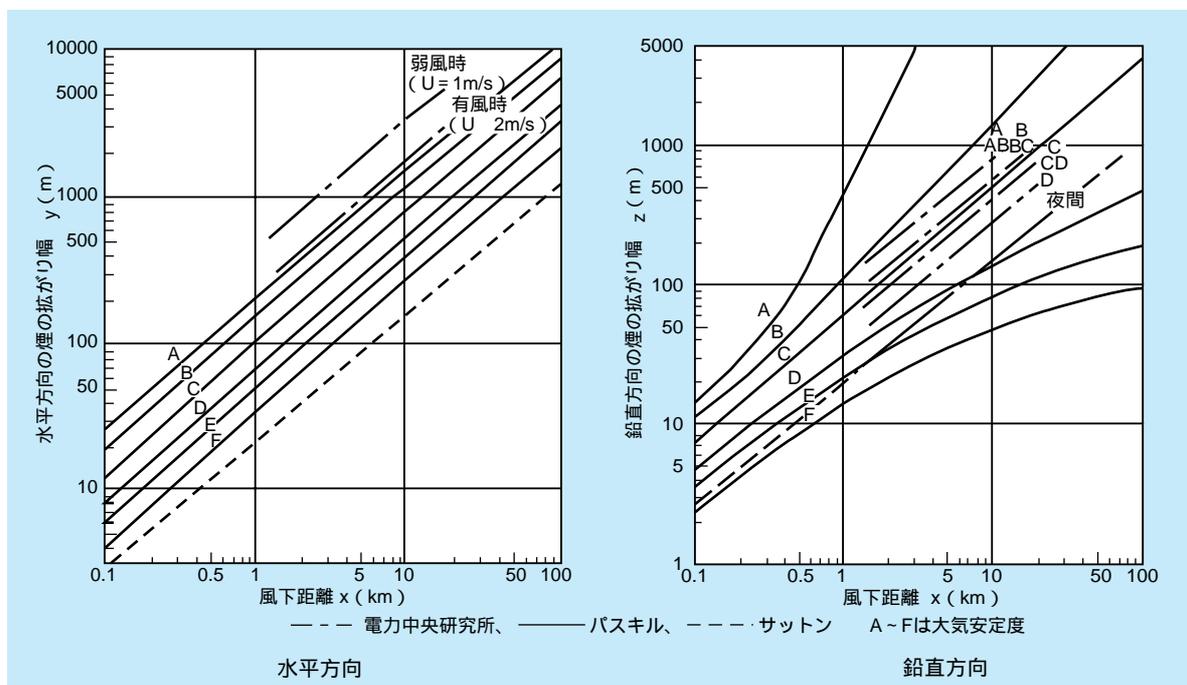


図2-4 煙の拡がり幅

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

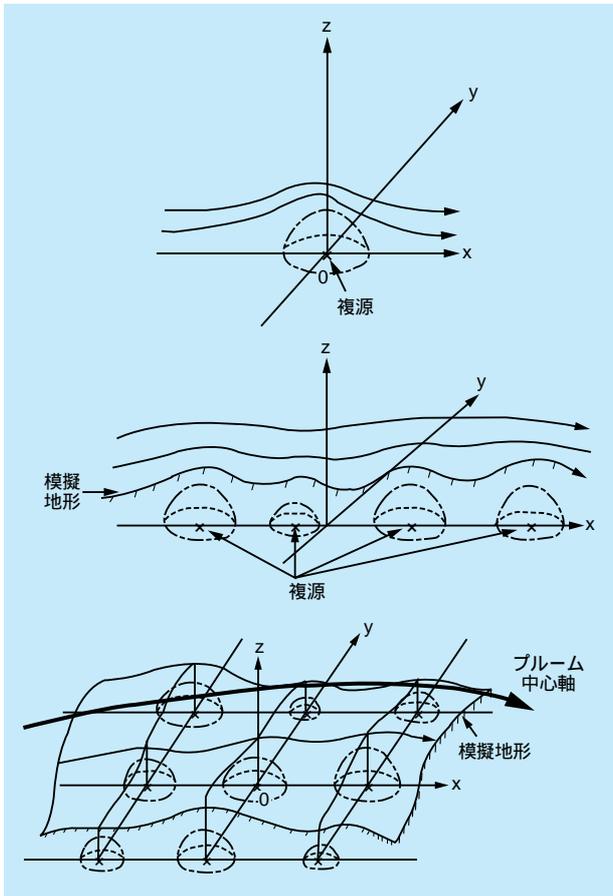


図2-5 ポテンシャル流理論にもとづくブルームモデル

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

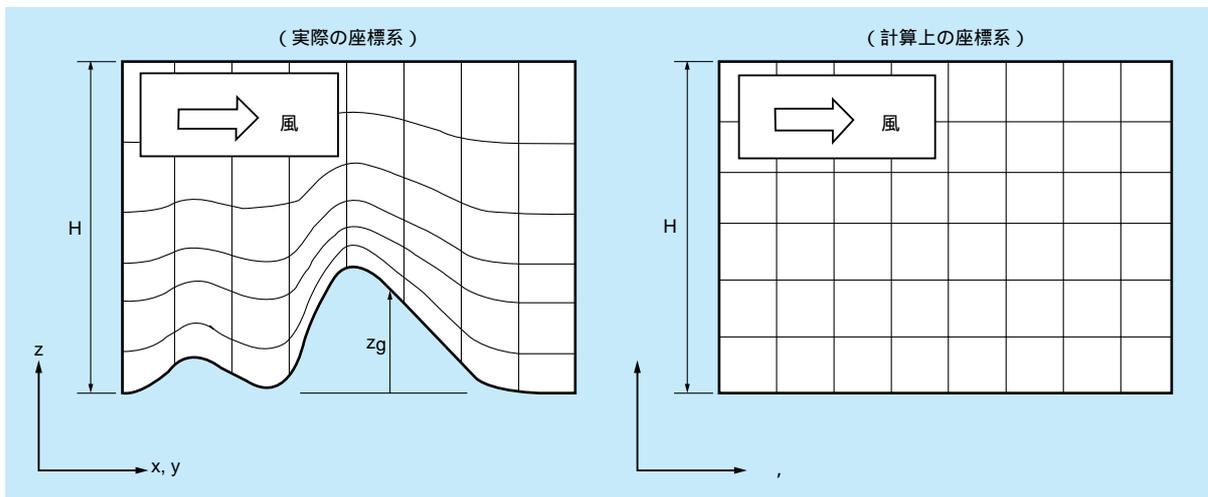


図2-6 地形に沿った座標系

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

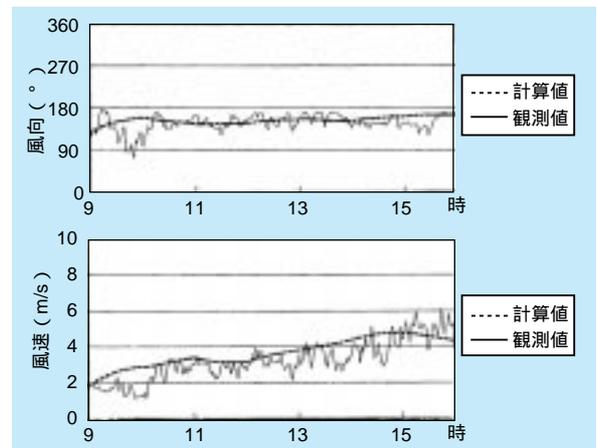


図2-8 風向、風速の計算と観測の比較

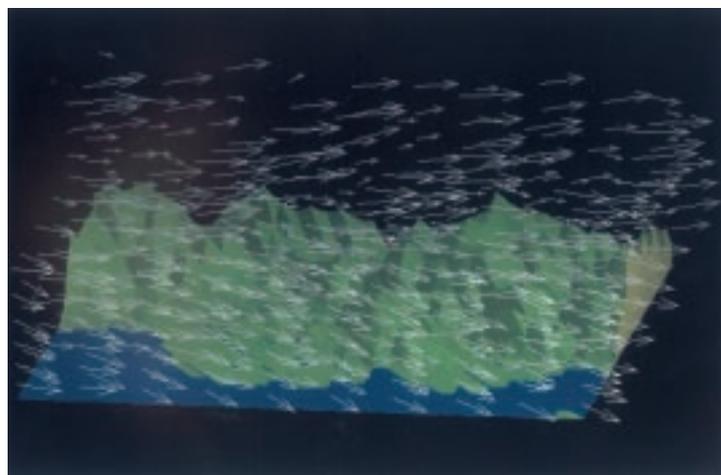


図2-7 複雑地形上の気流計算結果

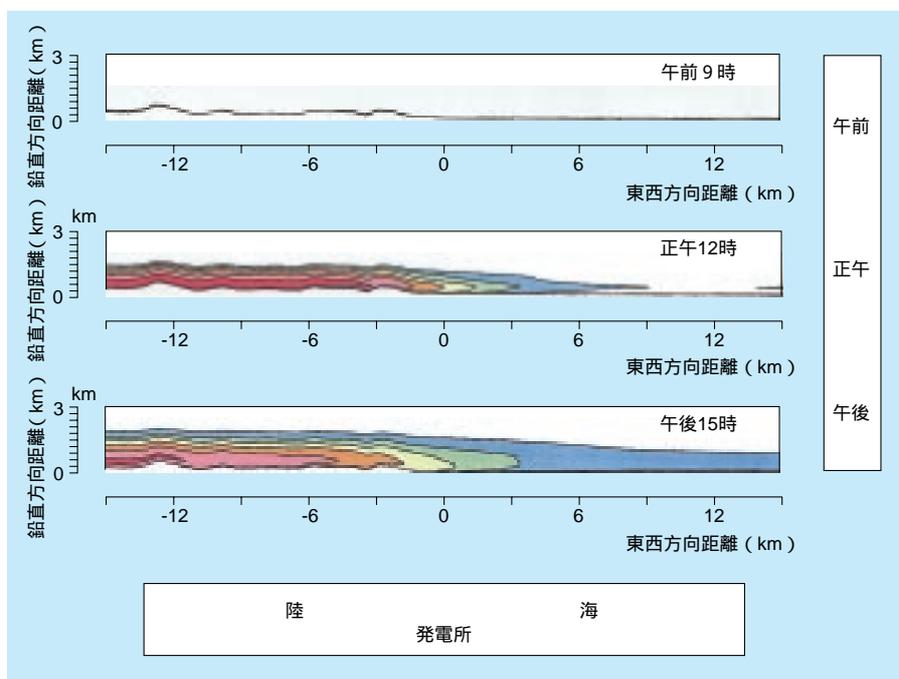


図2-9 大気乱れの時間変化 (赤：乱れ大 ↔ 青：乱れ小)

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

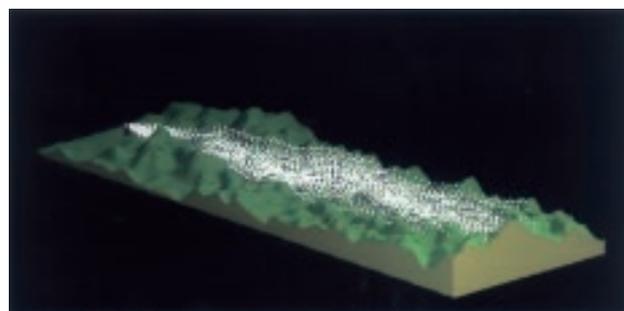


図2-10 ラグランジュ型粒子モデルの計算結果

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

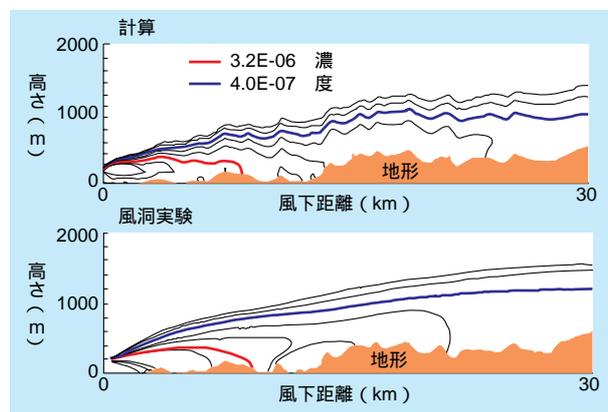


図2-11 拡散モデルと風洞実験の比較(鉛直断面)

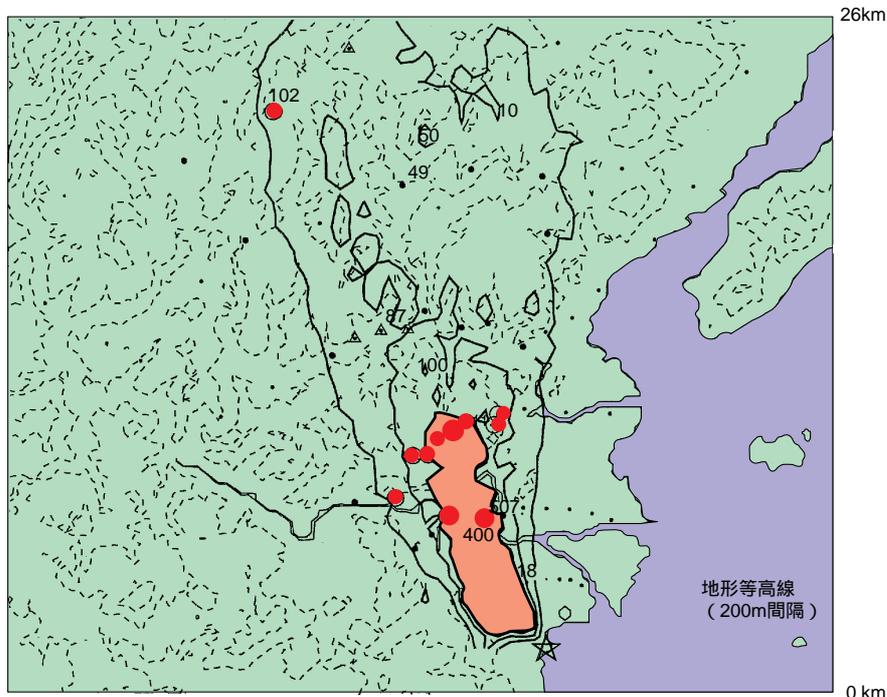


図2-12 拡散モデルと野外トレーサ実験の比較 (■: 計算結果と
●: 実験結果の地表濃度が同じレベル)

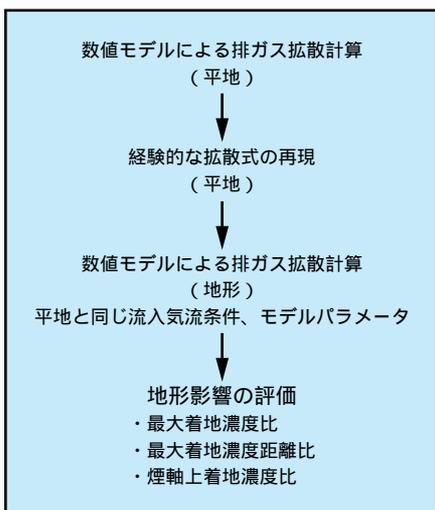


図2-13 数値モデルによる地形影響評価の手順

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。

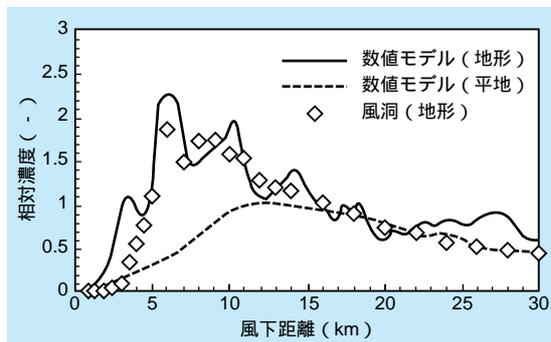


図2-14 数値モデルによる煙軸上着地濃度比(x)の評価と風洞実験の比較

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

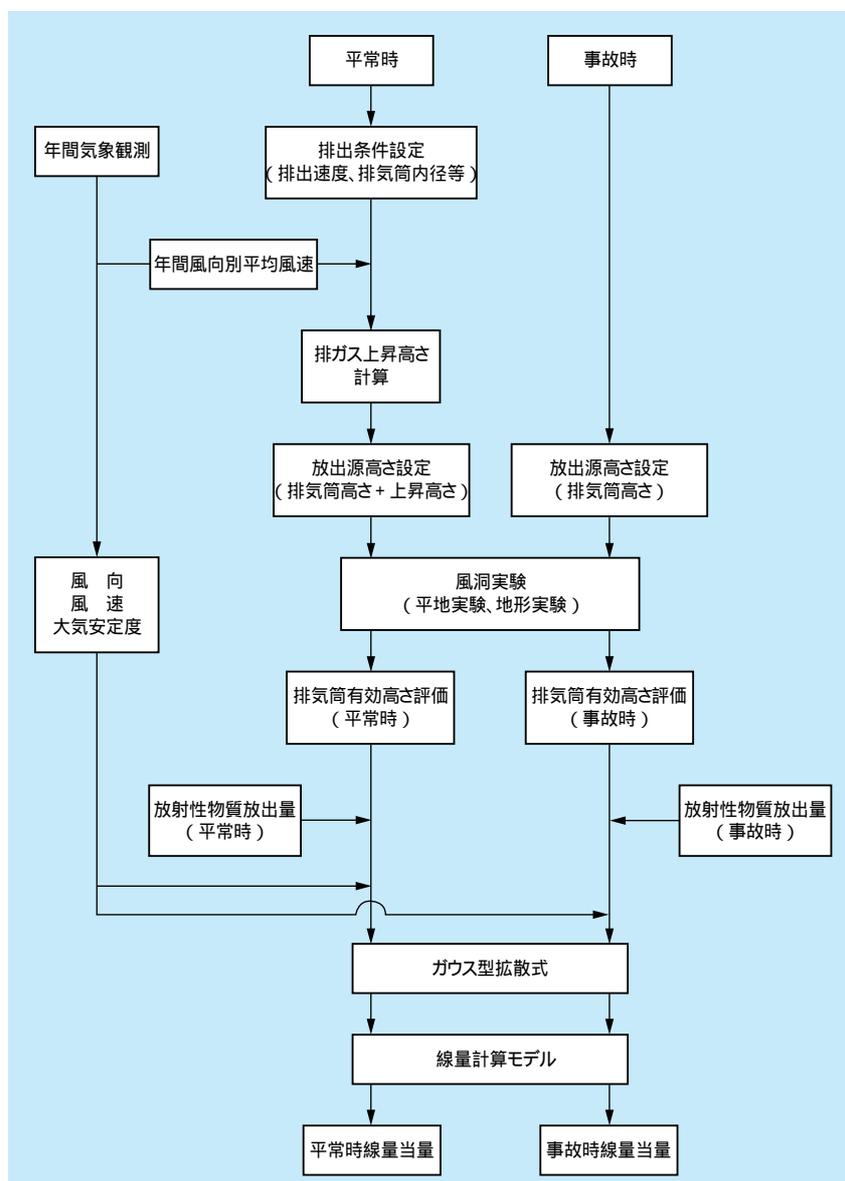


図2-15 原子力発電所の安全解析で用いられている線量評価手法

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、平常時に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、事故時に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減し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に設定し、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

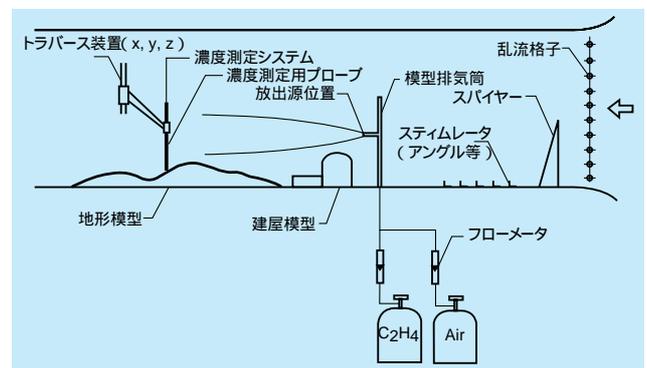


図2-16 風洞実験の概略

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⁾。

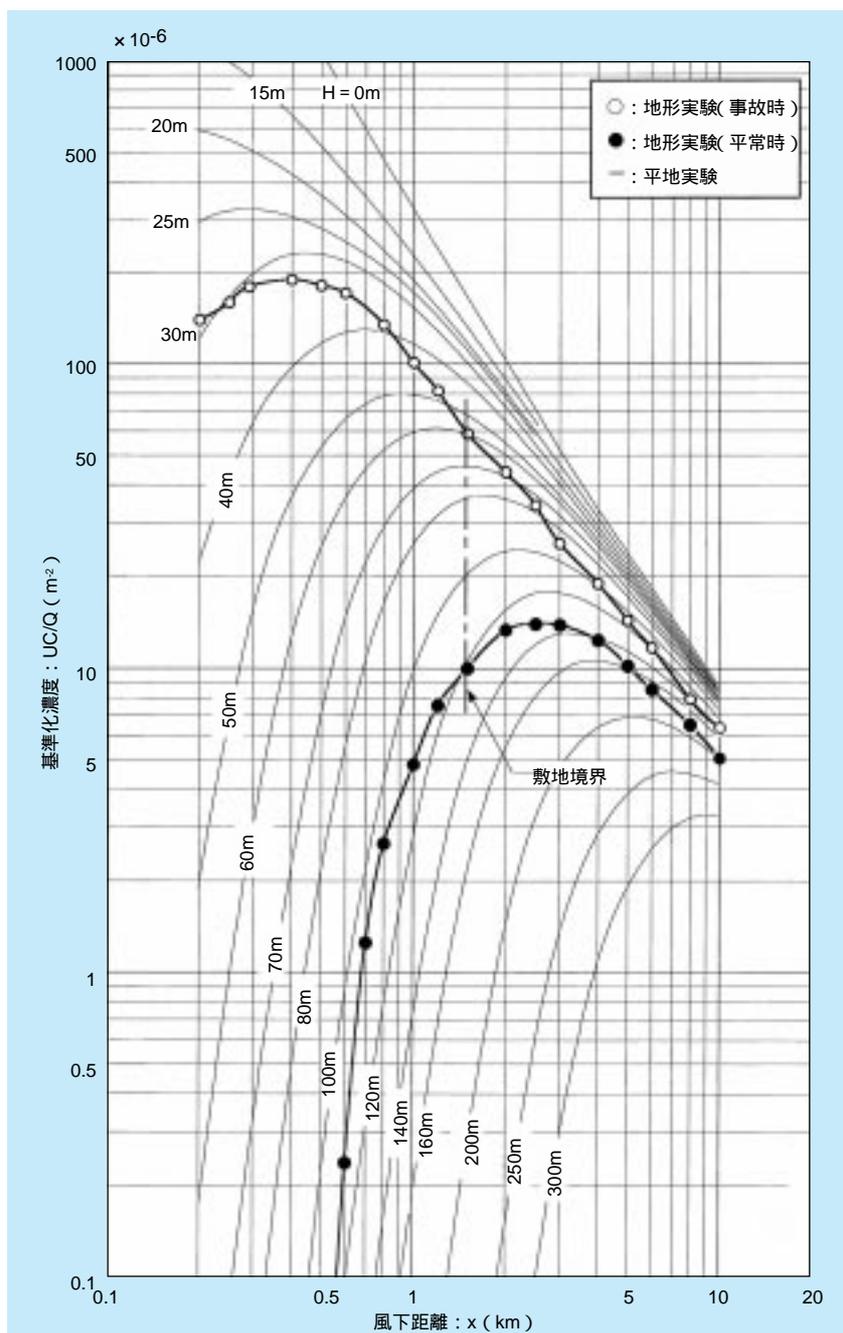


図2-17 排気筒有効高さ H_e の評価方法

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 $Fr = U(\rho L / \rho_0)^{1/2}$ が用いられる。ここで、 ρ は大気の密度[kg/m³]、 ρ_0 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_0 を風洞と大気で合わせると $U_m = U(\rho L / \rho_0)^{1/2}$ 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 Δz 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

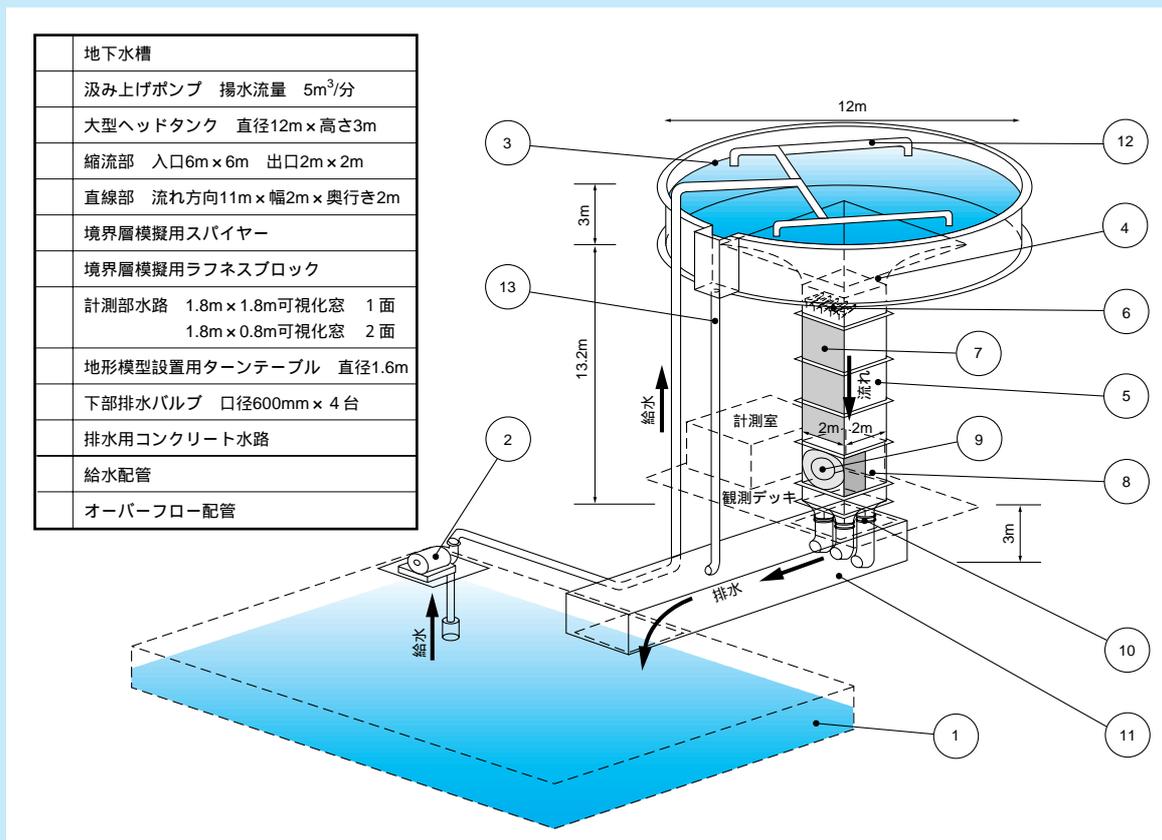


図1 大型水風洞設備の概要

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。

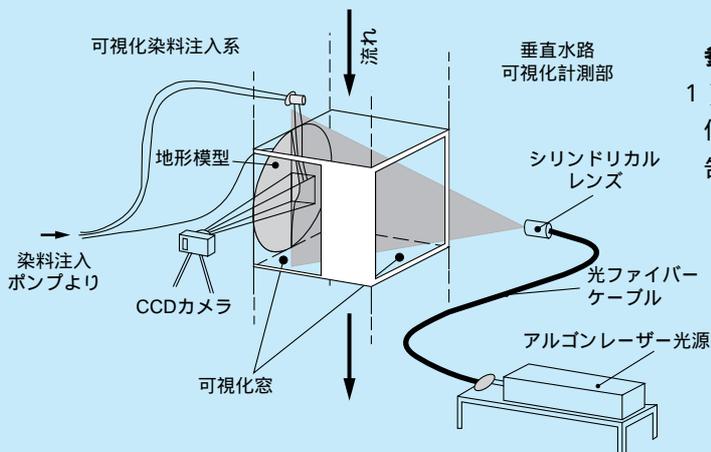


図2 レーザーライトシートと蛍光染料を用いた可視化

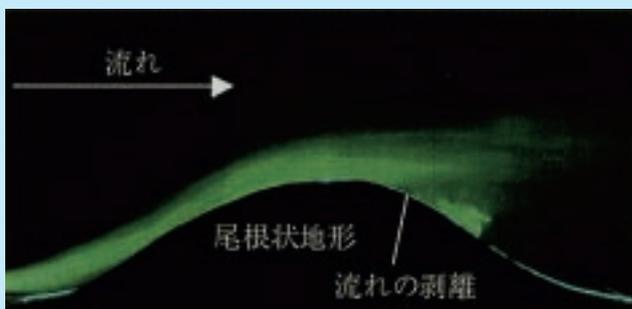


図3 尾根状地形まわりの流れの可視化写真

参考文献

- 1) 江口譲、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

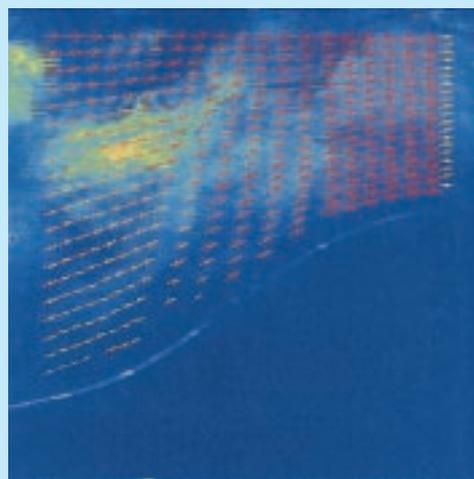


図4 PIVによる尾根状地形まわりの流速分布測定結果例

第

章

3

都市建物まわりの熱と
大気汚染の予測

粕江研究所大気科学部 主任研究員 神崎 隆男

3 - 1	都市環境に作用する複合要因	39
3 - 2	都市域の大気拡散研究	39
3 - 3	風洞実験による熱と物質移動の把握	39
3 - 4	数値モデルによる熱移動と大気拡散の予測	42
3 - 5	まとめ	45



神崎 隆男（1992年入所）
都市環境を対象として、大気乱流中の熱や汚染物質の輸送現象に関する研究を行ってきた。現在は、大気拡散におよぼす化学反応の影響に関する研究に取り組んでいる。

コラム2	冷却塔は都市気象、気候を変えるか？	46
コラム3	暑い都市の環境改善技術を提案	47
コラム4	可視化でよくわかる空気の流れ	48
コラム5	大気中での混合反応を捉える	49



水鳥 雅文（1980年入所）
我孫子研究所環境科学部 上席研究員
これまでは、主に火力、原子力発電所の冷却水取放水に係る海域環境問題について研究してきた。最近は、省エネ、負荷平準化といったエネルギー消費との関連から見た都市熱環境問題の予測と対策について研究を行っている。



田村 英寿（1993年入所）
我孫子研究所環境科学部 主任研究員
東京23区等の大都市域を対象に、数値シミュレーションによる熱環境の実態把握や熱環境改善策の効果予測に携わってきた。現在は、都市中心部の街区スケールを対象に、建物・緑地の配置やエネルギーシステムの導入にともなう屋外熱環境や建物空調負荷の改善効果予測に取り組んでいる。

神崎 隆男（上記掲載）

3 - 1 都市環境に作用する複合要因

都市化の影響により、都市域が次第に周囲に広がってきた。最近では、都市中心近くに高層マンションなどの住宅が建設され、住空間とオフィス空間が交錯するようになった。このため、工場、ゴミ焼却場、エネルギー施設などが都市建物のすぐそばに設置されるというケースがよく見られる。平成11年版の環境白書¹⁾によれば、大都市地域を中心として窒素酸化物、浮遊粒子状物質の環境基準の達成状況は依然として低い水準にある。これは自動車排ガスによるところが大きい。都市域に立地される各施設に対しても厳しい環境対策が要求されている。

大気中では、地形や植生の影響によって気流の乱れが生じる。また、昼夜の日射の変化に応じて、地面と大気の間で熱の移動がおこる。さらに、都市建物周囲

の大気拡散には、これらの影響に加えて、汚染物質の排出方法や排出位置、建物の形状や配置、日射による建物の部分的な加熱、エネルギー施設や空調器用室外機のような局所的な熱源など、数多くの条件が複合的に作用する。

以上述べたように、都市では、大気汚染が改善されていないこと、熱や大気汚染物質の移動現象に様々な要因が絡みあっていることを考えると、郊外の清浄地域と比べて、より精密な手法、より高精度の予測が必要となる。電力中央研究所では、都市環境問題の一つとして、都市建物まわりの熱と大気汚染に着目し、それらの移動現象の予測手法に関する研究を実施している。

3 - 2 都市域の大気拡散研究

都市建物周囲の大気拡散に関する研究は、最近、数多く報告されている。単体建物を対象とした研究では、アメリカ環境保護庁のグループによる安定成層の影響を調べる水槽実験、その実験結果の乱流モデルによる予測がある^{2, 3)}。また、東京大学^{4, 5)}や電力中央研究所⁶⁾では、乱流モデルを用いて気流と大気拡散の予測を行っている。複数の建物群に対しては、単体建物に比べて対象とする領域が大幅に増えるため、数値計算よりも野外観測や風洞実験に関する研究が先行している。イギリス、

アメリカ、カナダの研究者は、野外観測を行い、煙源サイズや建物配置が拡散におよぼす影響を調べた⁷⁻⁹⁾。風洞実験は清水建設¹⁰⁾や国立環境研究所¹¹⁾、電力中央研究所¹²⁾で実施された。大気拡散に関する数値モデル研究は、都市ストリートキャニオン(ビルの谷間)を対象としたものが多い¹³⁻¹⁵⁾。このように、都市域の大気拡散に関する研究は多岐にわたって行われているが、個々の要因の影響を明らかにすることに重点がおかれ、複合した要因を系統立てて研究しているものは少ない。

3 - 3 風洞実験による熱と物質移動の把握

都市の建物壁面は、夏季の晴天日には日射により加熱され、温度が60℃にも達する。このとき、気温との温度差は30℃以上になる。このように、日射や散在す

る熱源の影響により、都市大気中に局所的な高温部が形成される。建物周囲の大気拡散はこれらの影響を直接受ける。では、建物周囲の大気拡散は建物壁面の加

熱によってどのように変化するのだろうか。それらの影響を調べるために風洞実験を行った。

風洞実験の概要

電力中央研究所が所有する風洞実験装置内に、都市ストリートキャニオンを300分の1の縮尺スケールで再現した。つまり、図3-1のように一辺が16cmの立方体を9個設置した。建物の壁面加熱の影響を調べるために、()建物に加熱しない場合(非加熱時)、()図中A位置の建物の壁面を加熱した場合(ケース1)、()図中B位置の建物の壁面を加熱した場合(ケース2)の3種類の実験を行った。壁面は90°の一定温度に加熱した。この加熱条件は大気との相似則を用いて換算すると、実際の建物壁面と気温の間に約12°の温度差があることに相当する。本実験では、建物周囲の気流の動き、気温上昇、汚染物質の濃度を調べる必要がある。そこで、レーザー Doppler - 流速計で風速、抵抗線温度計で気温を測定した。また、大気汚染物質の代わりにエチレンと空気を混合したトレーサガスを放出し、高精度の炭化水素計で濃度測定を行った。ワークステーションを使用して、測定したデータを処理し、平均値や変動値を計算した。図3-2に風洞内の濃度測定の様子を示す。



図3-2 濃度測定の様子(風洞実験)

風洞実験の結果

図3-3は建物壁面の高温化が気温におよぼす影響を示している。図中の等値線は、風洞中心位置の風下方向断面における上昇温度値の分布である。斜線部の立方体が壁面加熱された建物模型である。風上側の建物加熱時(ケース1)にも、中央の建物加熱時(ケース2)にも、加熱された壁面直後のキャニオン内に高温領域が形成され、約5°の温度上昇が観測された。また、加熱の影響は風下領域にもおよんでいる。このように、建物壁面の高温化は、人々の居住空間に相当する都市キャニオン領域の温度上昇に大きく影響をおよぼしている。

次に、建物壁面の高温化が気流におよぼす影響について調べた。非加熱時には、建築物の存在により、都市大気中に気流の乱れが大量に生成されるため、風上側の建物の屋根面近くやキャニオン内で乱流エネルギーが大きい。加熱時には、加熱壁面直後のキャニオン内において、乱流エネルギーは非加熱時に比べて増加した。これは、壁面加熱による部分的な気温の上昇により、気流に対して浮力の効果が作用する結果、気流中の乱流運動が活発化されたことを意味する。このように、建物壁面加熱の効果は気流場にも影響をおよぼし、気流中の乱れを増やす方向に作用する。

建物壁面の高温化が大気拡散におよぼす影響を図3-4

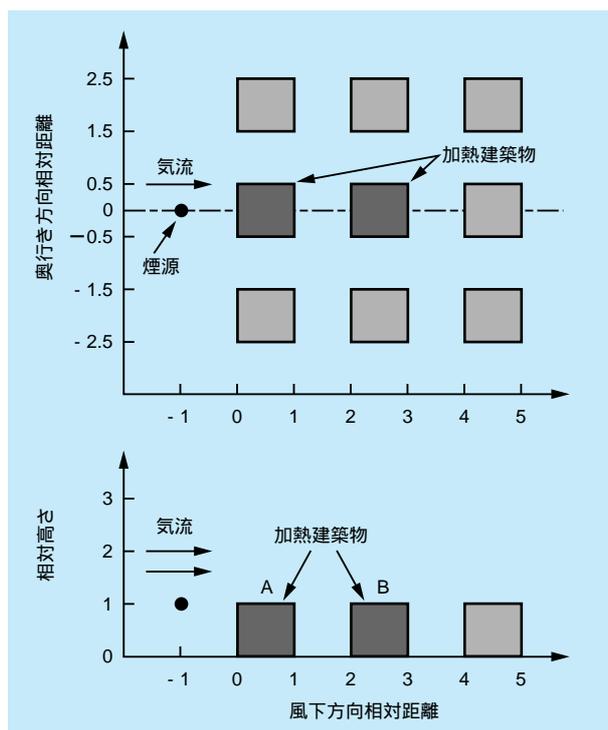


図3-1 建物模型の配置

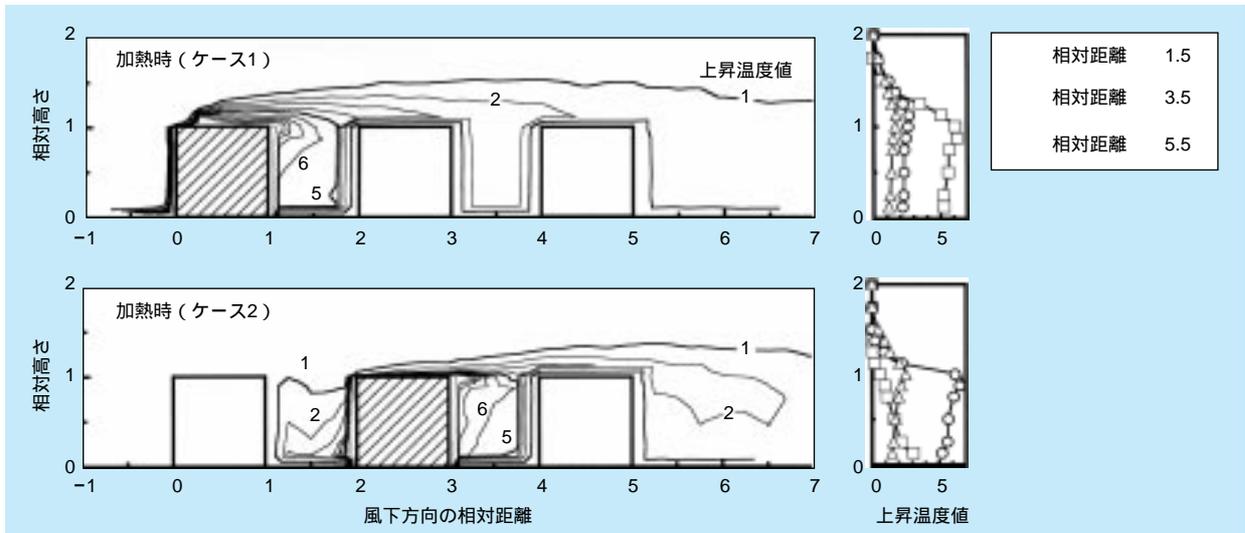


図3-3 建物壁面の高温化が周囲の気温におよぼす影響

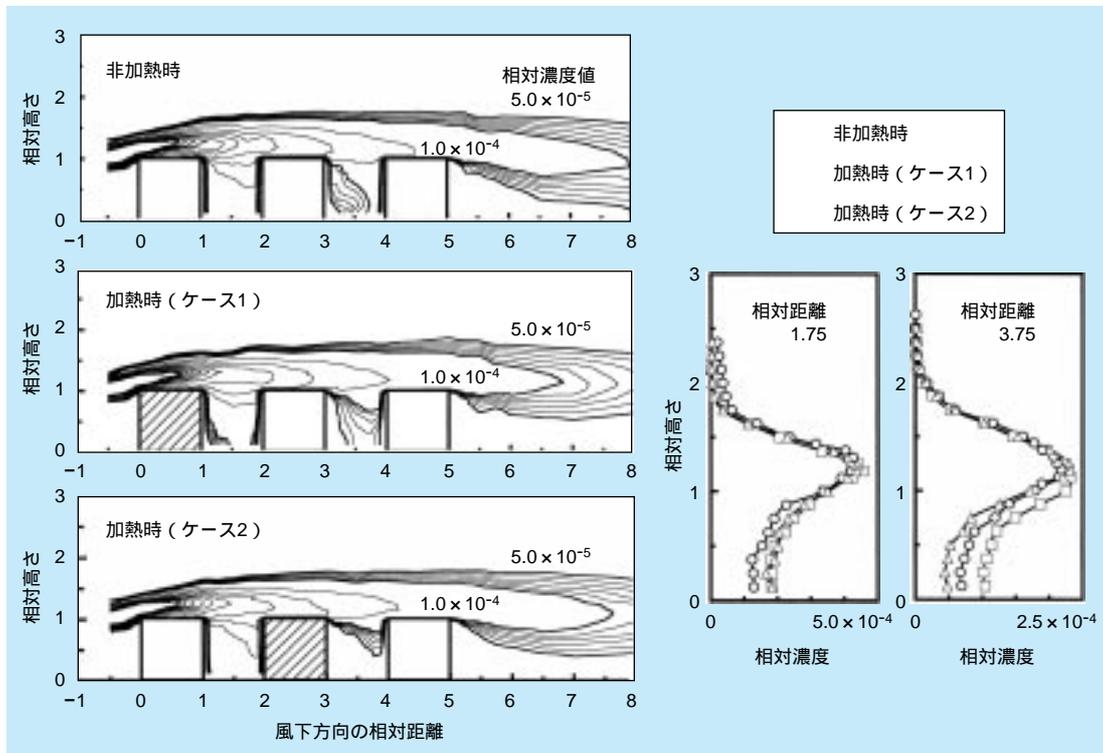


図3-4 建物壁面の高温化が大気拡散におよぼす影響

に示す。図中の等値線は、トレーサガスの相対濃度の分布である。非加熱時の分布から、相対距離 - 1、相対高さ1の位置から放出されたトレーサガスが、建物群を越える気流によって風下方向に運ばれ、その途中で一部がキャニオン内に拡散している様子が見られる。これ

に対して、加熱時には、ケース1の場合にも、ケース2の場合にも、相対濃度値は加熱面直後のキャニオン内で減少している。つまり、建物の壁面加熱は、直後のキャニオン内では、地表付近の大気汚染物質濃度を減少させる方向に作用する。

3 - 4 数値モデルによる熱移動と大気拡散の予測

前節で述べた3種類の風洞実験のうち、中央の建物壁面を加熱した場合(ケース2)を対象に、都市建物まわりの熱移動と大気拡散を予測した。ここでは、応力方程式モデルと呼ばれる乱流モデルを使用して、3次元数値計算を行った。

都市建物周囲の気流分布、気温分布、トレーサガス濃度分布を数値計算で予測するには、一言で言えば、連続の式、運動方程式、温度の輸送方程式(エネルギー方程式)、物質の輸送方程式を連立させて解けばよい。しかし、これらの式中には平均量のみならず変動値が含まれ、方程式の数に比べて未知変数の数が多い。したがって、未知変数の数を何らかの方法で方程式の数に合わせなければならない。この方法としては、()未知変数を勾配拡散などの物理現象にもとづいた仮定により与える方法と、()乱流モデルを使用して未知変数の輸送方程式を解く方法(ただし、より高次の未知量に対しては仮定が必要)がある。応力方程式モデルは、後者の方法の一つであり、比較的高レベルのモデルに相当する。具体的には、速度変動の二重相関量(レイノルズ応力)、速度変動・温度変動の二重相関量(乱流熱フラックス)、速度変動・濃度変動の二重相関量(乱流物質フラックス)に対して、輸送方程式を解くのである。一概に応力方程式モデルといっても、方程式中の各項に対して各種の乱流モデルが提唱されている。それらのモデルの大部分は平地上の気流や円管内の気流のように、解析が比較的簡単な気流に対して開発されたものである。したがって、都市建物周囲のような複雑な気流に対して、適用可能性を検討することは重要である。

ここで紹介する応力方程式モデルの計算には、標準的と言われているロンダーらのモデル¹⁶⁾を使用した。境界条件には、風速分布、乱流エネルギー分布、壁面加熱温度、トレーサガスの濃度フラックスなどを風洞実験と同じ条件で与えた。計算には、主流(x)方向18Hb(Hbは建物高さ)、鉛直(z)方向6Hb、奥行き(y)方向11Hbの領域を使用した。また、予測精度上、建物壁面近くの格子間隔を細かくするために、不等間隔計算格

子を使用し、図3-5に示すように計算領域をx、y、z方向に85×70×38の226,100点に分割して計算を行った。

図3-6は建物周囲の気流を予測した結果である。風洞中心の風下方向断面位置で、実験結果との比較を行っている。図中の矢印が平均風のベクトルを表している。数値モデルの結果は、建物に接近して一旦上昇後、建物群を通過して地表に近づく流れや、上空からキャニオン内に流れ込み、循環する流れの特徴をよく予測している。しかし、詳細に実験結果と比較すると、キャニオン内への下降流や循環流が弱く、建物群風下側に形成される循環流動領域がかなり大きく予測されている。これは応力方程式モデルが未だ開発段階にあるため、単体建物の場合でさえ、循環流領域が大きく計算される傾向にある⁴⁾。この点は今後モデルの改良が必要である。また、建物壁面近くの計算格子間隔をより小さくすれば、モデルの予測精度は改善することが予想される。

図3-7は建物周囲の気温の予測である。図中の数値は、上空気温に対する相対値を示している。予測結果は、壁面加熱の影響により、加熱壁直後のキャニオン内に高温の領域が作られ、周囲で温度上昇が生じている様子をよく表している。しかし、風上側のキャニオン内では地表近くの温度上昇が実験結果よりも若干高く、風下側のキャニオン内では若干低く予測されている。この点は、前述のように、キャニオン内の循環流の予測結果が実験結果よりも弱いことが原因である。

図3-8は建物周囲の大気拡散を予測した結果である。図中の数値は、放出時のトレーサガス濃度に対する相対値を示している。予測結果は、煙源から放出されたトレーサガスが建物群を通過する気流によって輸送され、その途中でキャニオン内に拡散される様子をよく表している。

図3-9は大気拡散予測モデルの性能を調べる上で重要な因子である、最大濃度値、拡散幅、煙軸高さの予測結果を実験結果と比較したものである。ここで、煙軸高さは平均濃度の鉛直分布が最大値を示す高さ、拡散幅は平均濃度が最大濃度の50%以上を示す鉛直方向領

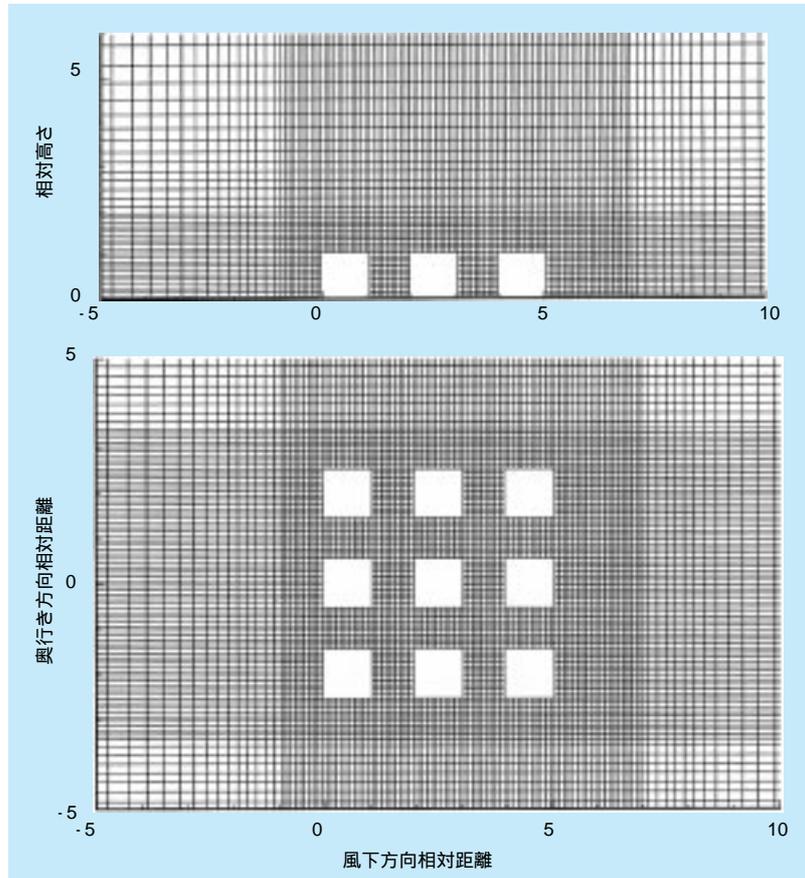


図3-5 計算格子の概要

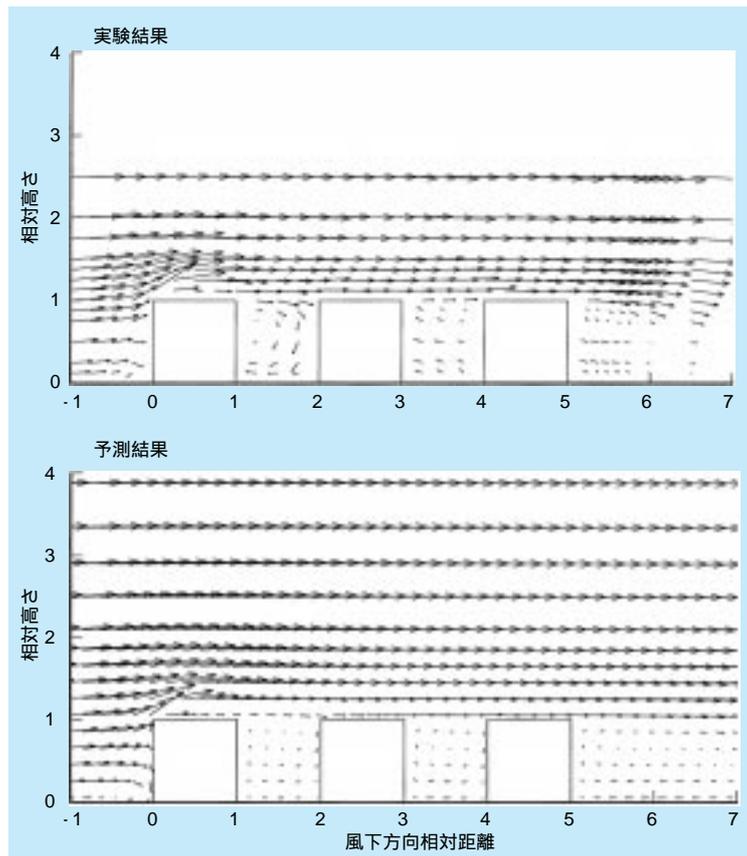


図3-6 建物群周囲の気流の予測結果と風洞実験結果の比較

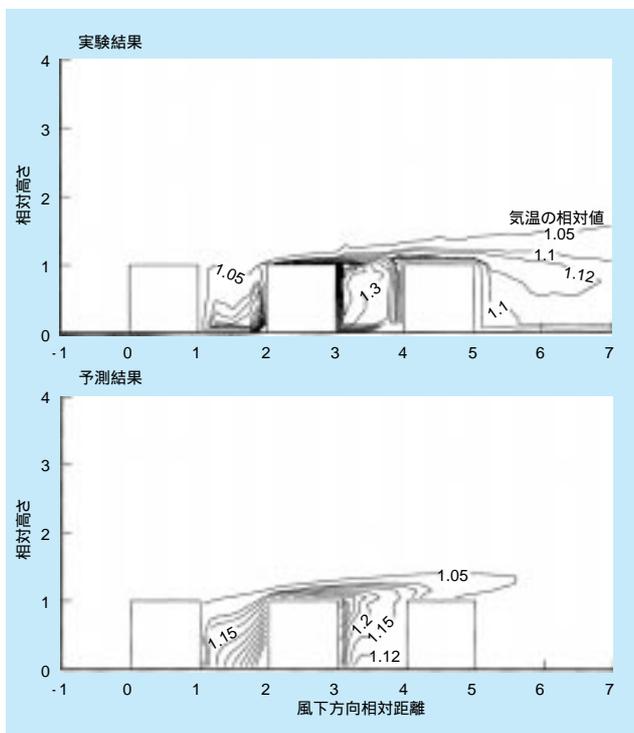


図3-7 建物群周囲の気温の予測結果と風洞実験結果の比較

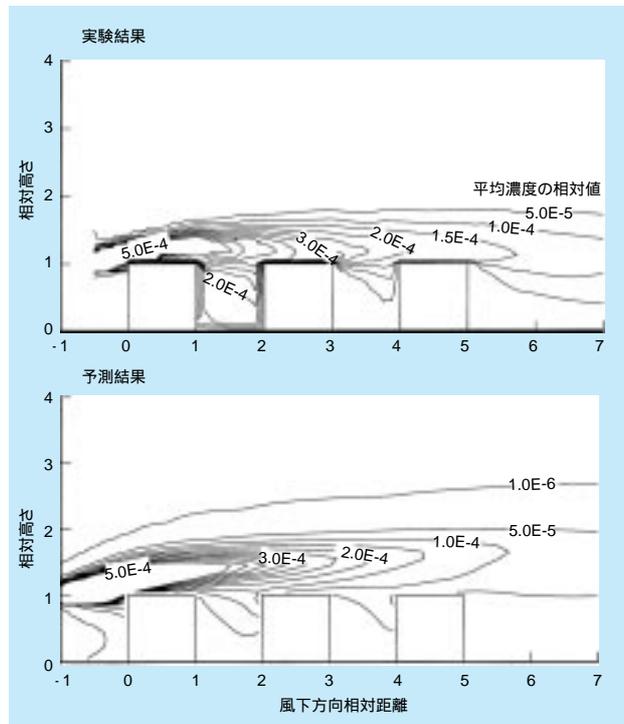


図3-8 建物群周囲の大気拡散予測結果と風洞実験結果の比較

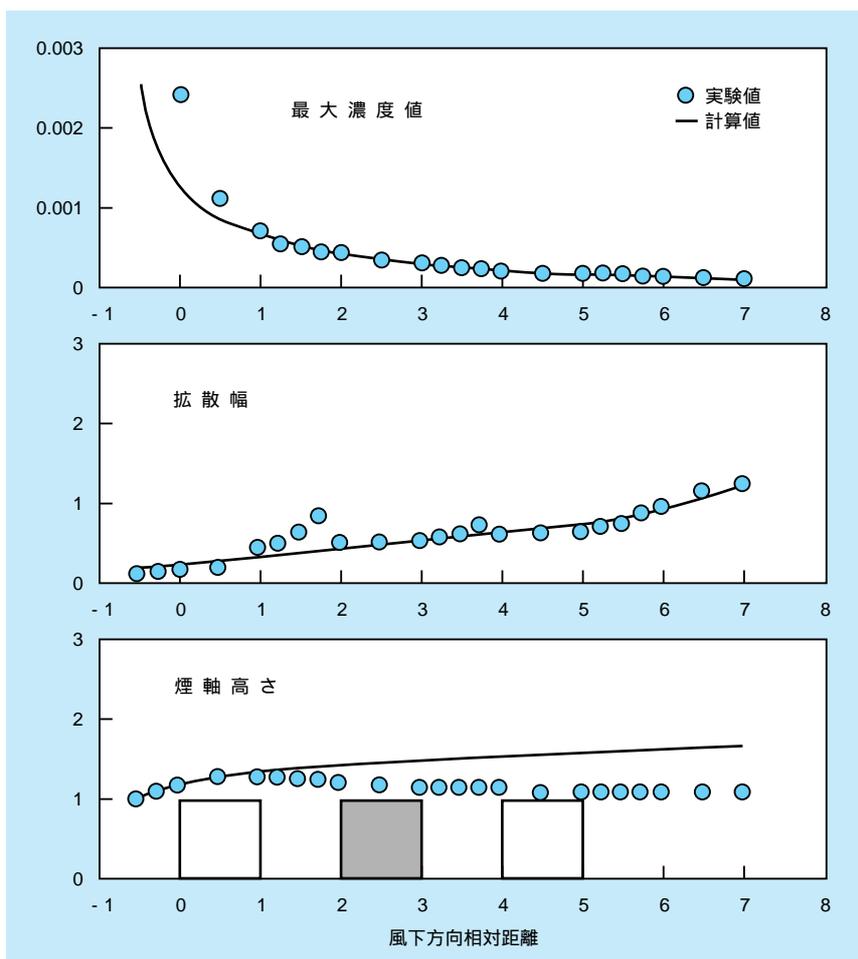


図3-9 建物群周囲の大気拡散の予測結果と風洞実験結果の比較

域の幅である。最大濃度の予測結果は、風下領域で概ね実験結果とよく一致している。しかし、煙源に近い領域では、計算格子間隔に依存する煙源サイズの違いにより、予測結果は実験結果に比べて低い。また、拡散幅の予測結果は、キャニオン内においては実験結果よりやや小さいが、他の領域では実験結果とよく一致している。一方、煙軸高さの予測結果は、煙源近くでは実験結果とよく一致しているが、風下領域においては、実験結果よりも大きな値になっている。これは、建物風下側の下降流の予測結果が実験に比べて弱いためである。

これらの結果から、数値計算により、最大濃度値、拡散幅などは概ねよく予測できることがわかった。今

後、予測精度を向上させるためには、より高レベルの乱流モデルを使用すること、複雑な気流場に適用できる高性能の乱流モデルを開発すること、建物壁面近くの計算格子をより細かく設定することが有効と考える。

都市域の大気拡散過程には、まだまだ未解明の現象が多く残されている。例えば、都市建物周囲の強い気流の乱れによって進行する反応混合が、大気拡散過程に大きな影響をおよぼすことが予想される。今後、反応混合過程を考慮したモデル開発が求められる。さらに、微小粒子状物質の浮遊拡散過程、汚染物質の気体から液体、液体から固体への相変化など、複雑なメカニズムをともなう現象のモデル化も必要となる。

3 - 5 ま と め

電力中央研究所では、都市域の大気環境影響予測手法を開発するために、都市の特徴である建物と排熱に着目した。これまで、風洞実験により、都市建物周辺の熱と大気汚染物質の輸送過程を明らかにした。また、固定煙源を対象に、建物影響を受けた都市域の気温と大気汚染物質の濃度を予測する数値モデルを開発した。

今後は、都市部で深刻な状態になっている窒素酸化物の混合反応機構の解明とモデル化に関する研究を進める。そして、分散、多様化する電源立地への対応をはかるために、都市内部だけでなくその周辺部を含めた地域や内陸地域を対象に、排ガス拡散予測手法を開発する予定である。

コラム2 冷却塔は都市気象、気候を変えるか？

火力、原子力発電所循環水の冷却方式として、わが国では、ほとんどの場合、海水を利用する冷却水方式が採用されている。しかし、欧米では発電所が内陸に立地されることが多いため、冷却塔から大気中へ排熱する方式も多く採用されている。わが国では、これまで主に地熱発電所でこの方式が用いられてきたが、最近では独立系発電事業者（Independent Power Producers：IPP）の中で採用するケースが見られるようになってきた。こうしたIPPによる火力発電所は、電力需要の多い都市部に近接して立地される場合が比較的多い。そのため、冷却塔に関して以下のような環境問題が考えられる（図1）。

都市気候、気象への影響

白煙化による日射の遮蔽、交通障害などの影響

水滴の飛散にともなう水分、塩分（海水使用の場合）

菌類、薬品類などの影響

騒音、景観問題

欧米における研究事例をみると、アメリカでは塩分飛散に関するもの、ヨーロッパでは日射の遮蔽や景観に関するものが多いが、実際に重大な環境問題になった事例は数少ない。

前述のようにわが国では、地熱発電所用以外の冷却塔の実例がほとんどなかったため、その環境影響評価については、予測手法ならびに評価基準とも十分整備されていない状況にある。さらに今後は、需要地に近い都市部近郊での事例も増えることが予想されており、予測評価手法の整備が急務となっている。

電力中央研究所では、都市ヒートアイランド研究で培った基礎基盤力をもとに、これまでにあまり解析的な影響評価が行われてこなかったの問題を主な対象として、その影響の大きさについて評価、検討するための研究に着手した。

現在わが国で計画されている冷却塔方式による発電所は、比較的小規模なものが多いが、それでも隣接する都市部全体から排出される総人工排熱量に対して無視できるほど小さいものではない。そこで、冷却塔からの排熱が周辺地域の気温や湿度の上昇にどの程度寄与するのか？、局所的な雷雨や降雨の発生をもたらす可能性があるのか？などの問題について、コンピュータシミュレーション手法によって明らかにしていく予定である。

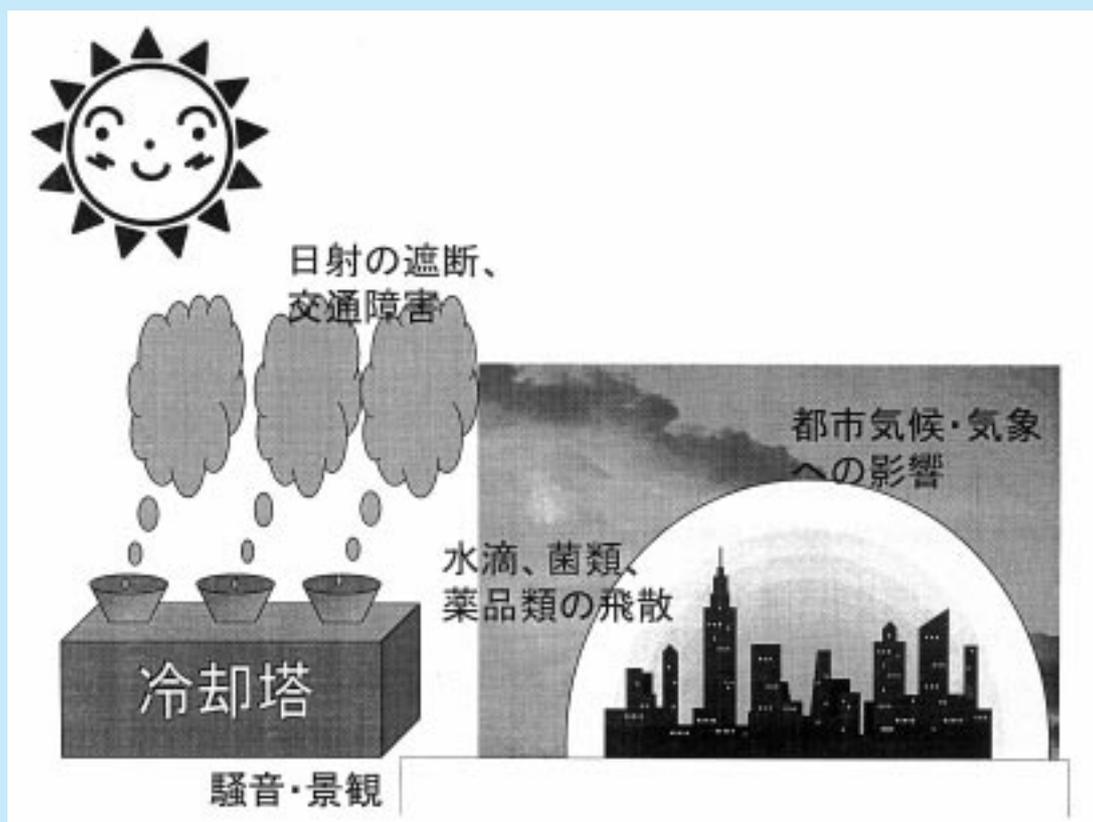


図1 冷却塔に関する環境問題

コラム3 暑い都市の環境改善技術を提案

ヒートアイランド(図1)とは、大都市の中心部が周辺地域に比べ気温が高くなり、等温線を描くと海に浮かぶ島のように見える現象である。この現象は、一般に都市のアメニティを損なうばかりでなく、冷房需要を助長するなど、都市部のエネルギー消費と密接に関連している。

電力中央研究所では、ヒートアイランド現象のメカニズムを詳細に検討し、種々の改善方策の効果を定量的に評価することを目的として、新たに3次元数値シミュレーションモデルを開発した。このモデルは、都市部周辺の地形、土地利用状況、人工排熱分布などを入力条件として、都市部での局地風や海陸風などを計算するとともに、それによる大気中の熱と水蒸気の移流、拡散を計算するものである。したがって、本モデルにより、都市域における温暖化ばかりでなく、乾燥化や風系の変化なども予測、評価することができる(図2)。

これまでに本モデルを東京、大阪、名古屋といった代表的な大都市圏に適用し、ヒートアイランド現象を緩和するための幾つかの具体的な対策(緑化の推進や省エネ、負荷平準化策の導入など)の効果について、定量的な評価を行ってきた。

これまでの研究によれば、緑化による気温緩和効果は1日を通じて平均的に現れること、省エネなどによる排熱削減の気温緩和効果は夜間や早朝の方が顕著に現れること、気温の緩和効果は必ずしも対策を施した場所に現れるのではなく、風系にも変化を生じさせるために、その出現分布が複雑であること等の知見が得られている。

今後は、こうした大都市部における気温緩和効果と電力需要の関係を定量的に明らかにするとともに、対策導入時のビル街区レベルの熱環境改善効果や電力負荷変化

を予測する手法の開発を目指していく。そして、電気事業側の立場からばかりでなく、広く需要家サイドの立場に立って本問題の重要性とその解決策について提言していくことにより、環境共生・省エネ社会の実現に研究成果を役立てる予定である。

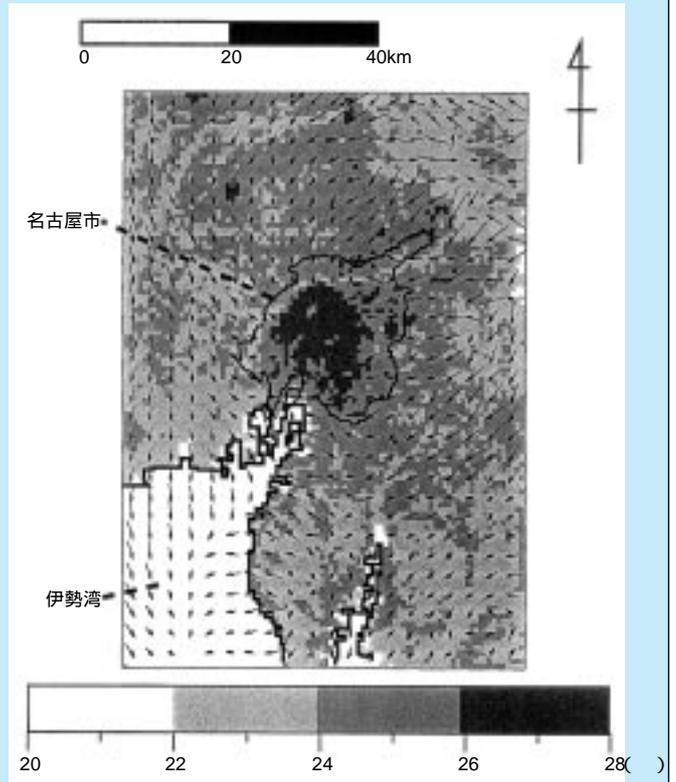


図2 早朝5時における名古屋市域の気温分布と風速分布の計算結果



図1 都市ヒートアイランド化の主な要因

コラム4 可視化でよくわかる空気の流れ

創造的発想システムによる可視化

気象分野における数値シミュレーションでは、時間とともに変化する3次元的な流れ、温度等が解析対象となる場合が多い。こうした複雑な計算結果を正しく理解するため、電力中央研究所では、立体視等によって現象を可視化するための環境（創造的発想システム）の構築や可視化手法の開発に取り組んでいる。これらは研究の効率的な推進に役立っている。図1は海岸付近の平野部に70km²の都市を配置した場合を想定し、都市の配置法による日中の海風の現れ方の違いを3次元的に可視化した例である。間に緑地を挟んで都市を分散配置することにより、都市部での上昇気流が弱まり、海風が内陸に届きやすくなる様子がわかる。

レーザー光による可視化

都市域や発電所周囲の大気汚染物質の拡散には、建物や地形により生じる複雑な気流が影響をおよぼす。また、日射や局所的な温度分布により生じる浮力の効果も影響をおよぼす。したがって、これらの影響を風洞実験や数値シミュレーションで明らかにするためには、予め、対象とする気流場の可視化を行い、その概要を把握しておくことが有効である。図2は、風洞実験装置内に都市と類似の気流場を再現し、建物周囲の大気拡散の様子をレーザースリット光によって可視化したものである。都市建物群は透明アクリル製の立方体で模擬した。建物上流側から放出された大気汚染物質（煙）が、建物の屋根面付近を通過する気流や側面を通過する気流によって、建物直後のキャニオン内に巻き込まれる様子が、青色に光る煙粒子の動きにより明瞭に示されている。可視化に

より得られた情報は、風洞実験を行うときの測定点の決定や数値シミュレーションを行うときの最適な計算格子の設定に役立っている。

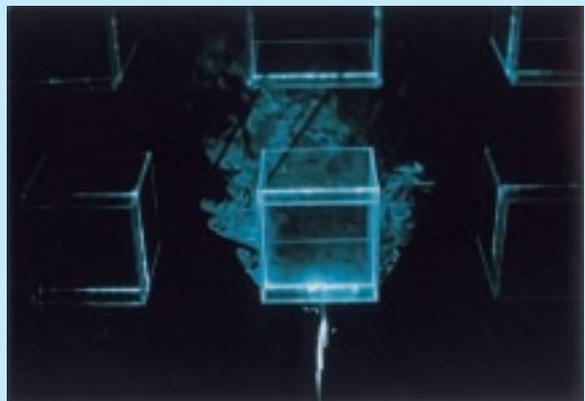


図2 建物周囲の大気拡散の可視化（風洞実験）

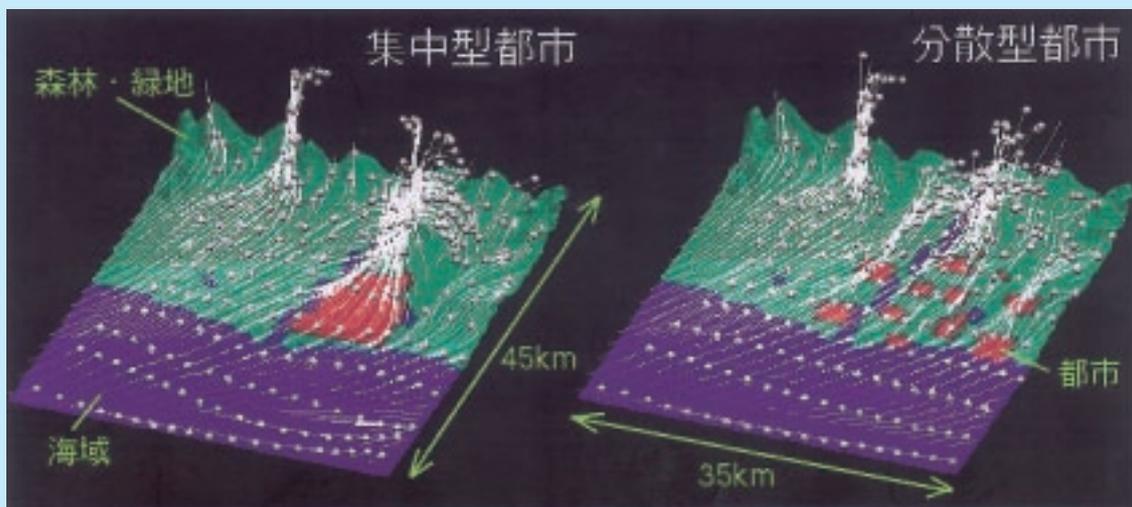


図1 集中型都市と分散型都市の海風の可視化（計算）

コラム5 大気中の混合反応を捉える

大気汚染物質が反応性物質である場合、拡散過程で化学反応が起こる。このとき、化学反応の進行速度は、気流の乱れの強さによって変化する。

図1は反応性物質AとBの混合状態を説明したものである。大気中で化学反応 $A+B \rightarrow P$ が起こる場合を考えてみる。排ガス中に含まれる成分Aと大気中に含まれている成分Bは、気流中の乱れにより不均一に混合され、図1に示すように、混合領域に濃度むらが生じる。化学反応はAとBが均一に混合された反応界面(斜線部)のみ進行する。反応界面の面積は気流の乱れ成分の強さに左右される。したがって、A、B成分の均一な混合状態(図1)を仮定して汚染物質濃度を予測すれば、化学反応による濃度減少を過大に評価することになる。その結果、汚染物質濃度を実際よりも低く予測してしまう恐れがある。特に、都市大気中のように、建物形状や配置の影響によって、不規則な気流乱れが生じ、濃度むらが生じやすい気流中では、この影響を受けやすい。また、化学反応の種類によっても影響の程度は異なる。

化学反応におよぼす気流乱れの影響を詳細に調べるためには、気流実験により、A、B成分の瞬間的な濃度変

動を同時に測定しなければならない。しかし、気流中の多成分濃度の同時測定は技術的に非常に難しく、これまで開発されている測定法はいずれもサンプル方式のものである。今後、レーザー蛍光法などの非接触法を利用した高精度の濃度測定法の開発が期待される。図2は、電力中央研究所で開発中の濃度測定装置を用いて撮影した、一酸化窒素(NO)噴流の蛍光測定画像である。

一方、これらの影響を考慮して大気拡散予測に適用できる数値シミュレーション手法には、輸送方程式を何の仮定も用いずに直接解く直接法(ダイレクト・シミュレーション)、計算格子以上の濃度変動に対しては直接輸送方程式を解き、計算格子以下の濃度変動に対してはモデルを使用するLES(Large Eddy Simulation)、濃度変動に関する高次の項を平均濃度勾配など低次の項で仮定して解くクロ・ジャ・モデル、多数個の微小な気流塊の動きから、統計的に濃度を計算する確率密度関数モデルなどがある。これらのなかで、大気拡散モデルに必要な計算領域や実用上使用できる計算機容量の制約、あるいは、大気中の渦構造が複雑であること、反応項に対してモデルを必要としないなどの理由から、現時点では、確率密度関数モデルを使用する方法が有望視されている。今後、このモデルを使用して、実大気中の化学反応のメカニズムをできるだけ正確に取り入れた大気拡散予測手法の開発を行う予定である。

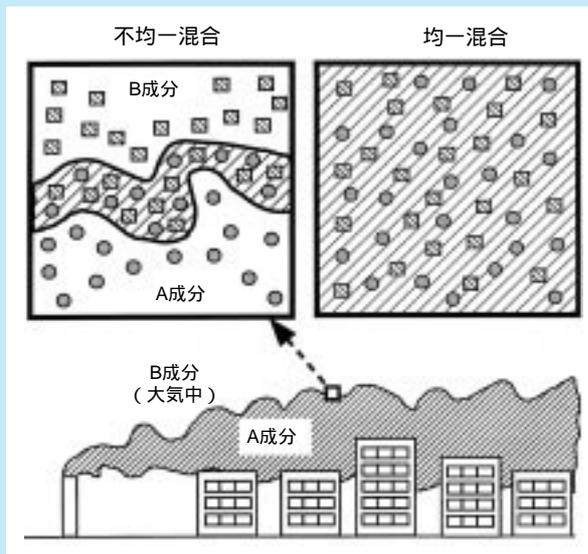


図1 大気中の混合反応のメカニズム

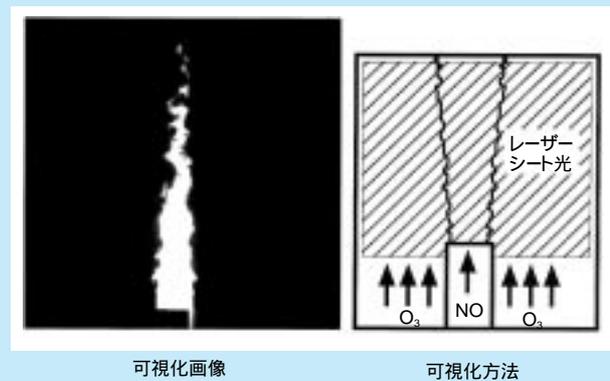


図2 レーザー蛍光法によるNO噴流の可視化画像

第 4 章

4

気象と大気汚染の
観測手法の開発

第4章 気象と大気汚染の観測手法の開発 目次

狛江研究所大気科学部 主任研究員 赤井 幸夫
 狛江研究所大気科学部 主任研究員 下田 昭郎

4 - 1	煙突を利用した上層風の観測	53
4 - 2	ドップラーソーダの実用化	57
4 - 3	移動型ラスレーダの開発	64
4 - 4	ライダー観測	71
4 - 5	まとめ	73



赤井 幸夫（1965年入所）
 火力、原子力発電所の大気環境保全に係わる気象観測手法に関する研究に従事してきた。現在は主として、ドップラーソーダやラスレーダなど地上設置型のリモートセンシング気象観測技術に関する研究を行っている。



下田 昭郎（1990年入所）
 人工衛星データを用いた温室効果気体濃度の測定手法に関する研究に従事してきた。現在は、赤外分光法を用いたリモートセンシング手法の開発あるいはライダー観測によるヒートアイランド内エアロゾルの挙動解明等に取り組んでいる。

コラム6	回想 - 30年前の気象観測	74
コラム7	大気中に排出された窒素酸化物の行く末を追う	75
コラム8	大気汚染物質の高精度・多種同時計測を狙うレーザーレーダ	76

赤井 幸夫（上記掲載）



速水 洋（1990年入所）
 狛江研究所大気科学部主任研究員
 気象学と環境化学の学際分野に携わってきた。現在は、窒素化合物を対象に、現象を目撃しながら（観測）、解析（数値モデル開発）を進めることのできるスケールで調査を進めている。



藤井 隆（1987年入所）
 狛江研究所電気物理部主任研究員
 銅蒸気レーザー用固体電源、半導体レーザーの波長制御技術および波長可変固体レーザーの開発に従事。最近では、多波長差分吸収レーザーレーダを用いた大気中汚染物質計測を行っている。

4-1 煙突を利用した上層風の観測

4-1-1 手引に規定された選択肢

煙突や排気筒から放出される煙やガスの年間平均濃度を求める長期拡散予測計算では、放出口と同等の高さの風速値を用いる必要がある。このため、原子力発電所の建設地点の多くは、排気筒と同じ高さの気象観測鉄塔を建設して風の観測を行っている。火力発電所の建設の場合には、季節ごとに実施した低層ゾンデによる上層気象の観測結果から、風速鉛直分布の形状を表す「べき法則」の指数などを求めておき、地上高10mで通年観測した風速から実煙突高の一年間の風速を推定することが多かった。一方、1999年6月に発行された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、発電所の設置場所近傍の鉄塔や煙突を利用して測定した風向、風速を使用してもよいと明記された。そのため、今後は、煙突や排気筒に風向風速計を取り付けて風の観測を行う場合が多くなると考えられる。電力中央研究所では従来から、煙突に風向風速計を取り付けて風を観測する場合の煙突や構造物の影響に関する研究や、測定誤差を少なくするための研究に取り組んできた。

4-1-2 内外の研究例

煙突が1本の場合

塔体を利用した風の観測手法に関する研究発表は1960年頃から見ることができる。アメリカのアルゴンヌ国立研究所のモーゼスら²⁾は、火の見櫓の鉄塔を利用し、鉄塔の下部にプロペラベーン型風向風速計を取り付けて風の観測を行った。この鉄塔から約50m離れた場所に高さ5.5mの観測ポールを建て、頂部に突き出すように風向風速計を設置した。観測ポールでの風は塔の影響を受けないため、これと鉄塔の観測値を比較した。この結果、風速が弱いほど鉄塔の影響が大きく、観測ポールでの風速が0～1.8m/sで、風速計が鉄塔の陰になるような風向の場合、鉄塔の観測値は観測ポールの風速に対して0.55倍まで減衰することがあった。

一方、風速計が鉄塔の側面に位置するような風向の場合には、1.3倍程度まで増速することが示され、鉄塔の影響による風速の増減が野外実測により確認された。

モーゼスの野外実測は、部材で組み立てられた空隙のある鉄塔による実験であった。ミシガン大学のギルら³⁾は、種々の形状の塔体模型を風洞内に設置し、塔体まわりの気流を測定し、塔体に風向風速計を取り付けて観測した場合の測定誤差について検討した。対象とした塔は、鉄塔で空隙のある場合と無い場合や筒状の1本の煙突である。実験結果からは、1本の煙突に風速計を取り付ける場合、支柱の長さを煙突の直径と同じにしても、風速計の位置が塔体の風下となる風向では、風速の減衰が極めて大きいことが示された。逆に風速計の位置が煙突の側面に来るような風向では、風速は増速することが示され、モーゼスの野外観測と同じ傾向が得られた。

電力中央研究所では、ポテンシャル流理論の計算と火力発電所での実測により、煙突まわりの風速分布を調べた⁴⁾。煙突筒身直径は4.7mで、筒から最大9.5mの位置まで種々の方向に9点風速計を設置して、約3ヶ月間の観測を実施した。図4-1に実測結果とポテンシャル流計算結果の例を示す。図には、前述したギルの風洞実験結果から条件の類似した結果を読みとりプロットした。この結果、風速計が煙突の後方に位置する風向(θが180度近く)では、実測値は煙突の影響を受けない流れ(一般流)の風速に対して0.5倍近くまで減衰し、塔体の影響が極めて大きいことが示された。また、このように影響の大きな風向では、実測と計算結果の乖離が大きく、渦無しと仮定したポテンシャル流計算の限界が示された。一方、増速は一般流に対して風速計が90度横に位置するよりやや後流域(θが90度を超えたあたり)に生じている。このことは、ギルが実施した風洞実験結果と同じであった。筒身側面での増速率は最大で約1.5倍である。

以上の実測結果や計算結果から、1本の煙突に風向風速計を取り付けて、風の観測を行う場合の方式が提案された。

ギルによる提案

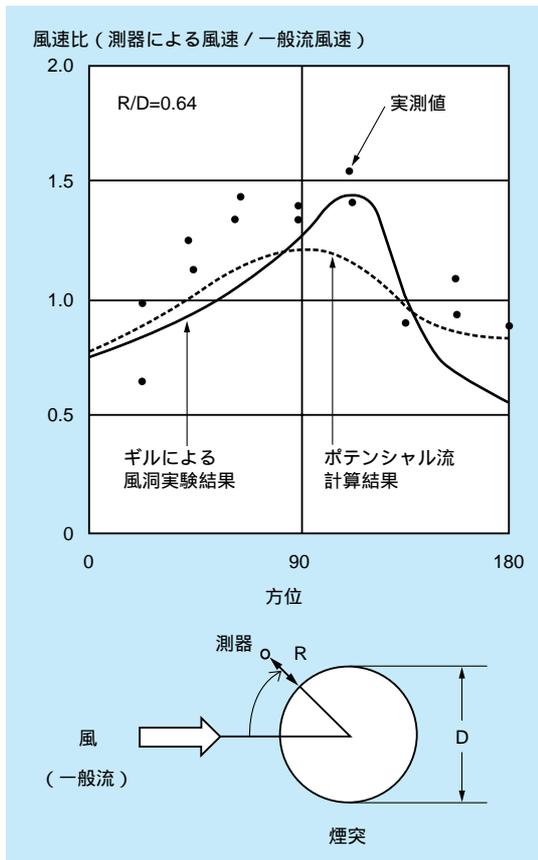


図4-1 煙突のまわりの風速比

ギルは、煙突は風向風速計の取り付け場所としては不適當であるとしながらも、もし観測を行うなら、煙突直径の3倍の長さの支柱を2本、180度方向に出し、その先端に風向風速計を取り付け、風向により測定値を選択して観測することを推奨している。この場合、一般流の風速に対する誤差は最大で10%程度であると述べている。

電力中央研究所の提案

2台の風速計を同一高度に、互いに煙突中心から直角方向の同心円上に設置し、両者の出力の平均値を風速とする。また、風向は風速の高い方の測器による値とする。

ギルの場合、煙突直径の3倍の支柱を設置することは現実には困難である。また、風向風速計が煙突近くに設置された場合、測器が煙突の風上、風下のどちらにあっても風速は減衰する。つまり、互いに180度方向に支柱を出し、測器を取り付けると、支柱方向の風向では、観測された二つの風速は共に減衰している。逆に、支柱の方向と90度の風向、つまり2台の風速計が

煙突の側面に来る場合には、両者とも風速が増す。これに対して、当研究所の支柱を互いに90度方向に出す提案では、図4-2において、風が図の上から下にした場合、Bの測器は煙突の陰になり風速は減衰し、測器Aは煙突の側面で増速する。実験結果から増速、減速の割合が同程度の大きさであることから、これらの平均値が一般流に近くなって合理的である。しかも、当研究所の提案では、支柱に取り付けた測器が煙突直径の0.2倍程度まで煙突に近接した場合においても、一般流の風速に対して20%以下の誤差で観測できる。

多筒身集合煙突の場合

大容量火力発電所の煙突は筒身の直径が6 mを超え、しかも複数の煙突を集合させて檜で支持する構造のものが多い。図4-3は実際の煙突の近傍に取り付けた風向風速計で、この写真から煙突と測器の大きさが比較できる。このような大きな煙突に風向風速計を取り付けて観測を行う場合の方法について、電力中央研究所は煙突模型を用いた風洞実験、実際の煙突を利用した観測、ポテンシャル流計算により検討を行った^{5、6}。風洞実験での検討は近年多くの実施例をみるが、1970年代後半当時は、風洞内部に置かれた模型周辺の風向を定量的に測定することが難しかった。そこで、風洞実験結果を参考に、現場実測結果およびポテンシャル流計算結果により、2本の集合煙突まわりに風向風速計を3点取り付けて風を観測する方法として以下を提案

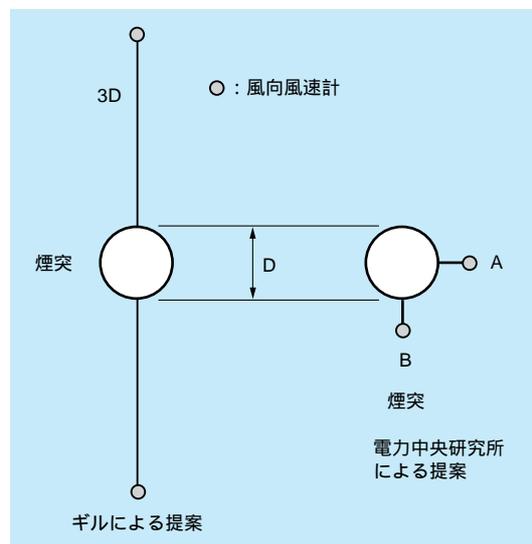


図4-2 ギルおよび電力中央研究所の提案



図4-3 集合煙突の支持部材に取り付けられた風向風速計

した。

「煙突支持鉄塔の4角のうち、最も出現頻度の少ない風向の角を除く3つの角に風向風速計を設置する。風速は3点の瞬時値の合成値(算術平均)、風向は風向変動の標準偏差の最も小さい点の観測値を採用する。この観測では、風速は一般風に対して約 $\pm 10 \sim 15\%$ の誤差をもつ。」

この方法は、火力発電所における上層風の観測に使われたことがある。

4-1-3 風洞実験による近年の研究例

前述したように、塔体影響に関する風洞実験は古くから行われてきた。しかしながら、従来のサーミスタ風速計や熱線風速計では、風洞内に置かれた模型まわりの気流の曲がり、すなわち風向やその変動量を定量的に測ることが難しかった。したがって、風向の測定は、模型に極細の糸を用いて毛糸やタンポポの冠毛を結び、これが気流になびく様子を風洞上部から写真撮影して行っていた。また、風向変動幅については、カメラのシャッターを開放にして、気流変化で振動する毛糸あるいはタンポポにストロボスコープから間欠的に光をあて、多重露光することにより画像化して解析してきた。しかし、これらの方法では、測定や解析に多くの時間を要し、その割には正確な風向やその変動量が測定できたとは言い難かった。これに対して、近年レーザー光線を用いたレーザードップラー流速計

(Laser Doppler Velocimeter : LDV)が開発され、正確な風向風速が測定できるようになった。ここでは、3筒集合煙突を対象に、風洞内でLDVを用いて模型まわりの気流を計測し、その結果をもとに風の観測を行う方法を提案した当研究所の研究例⁷⁾を示す。

LDVの原理

LDVは2対のレーザー光線を交差させるように発信し、その交差部に発生する干涉縞部分にトレーサ粒子を流し、干涉縞の明滅速度が粒子の移動速度、つまり風速に比例していることから、この速度を検出し風速を測定する装置である。トレーサとして水をグリセリンでコーティングした粒径 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 程度の霧をシーディングジェネレータにより発生させ、風洞の上流から模型に向けて流す。LDVによる1対のレーザー光線で求められる風速がレーザーの発信方向のベクトル成分である。実際には2対のレーザー光線を直交して発信させて風のベクトル成分を求める。平均風速はもとより、これまで数値として計測が難しかった風洞内の風向およびその乱れの標準偏差(風向変動幅)も計測可能である。

実験条件

集合煙突の模型は、風向風速計を取り付ける部分を中心に製作し、レイノルズ数や風洞の閉塞率を考慮して縮尺を $1/40$ とした^{8, 9)}。集合煙突と風向風速計の取り付け部分の概要を図4-4に示す。最大3本の筒身とこれを支える部材から構成され、模型の筒身の直径は

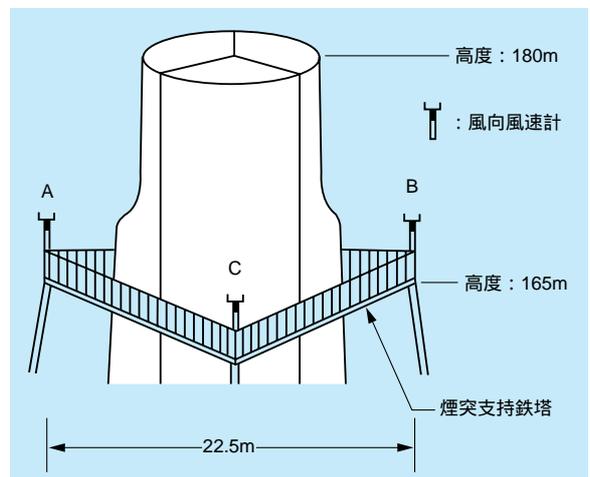


図4-4 3筒集合煙突への風速計取り付け場所

0.15m程度となる。風洞開口面積にしめる模型の断面積の割合(閉塞率)は5%程度で、実験条件として妥当である。風洞実験において最も大切なことは、実際の気流との相似性をいかに保つかということである。本実験では、模型表面の粗さやレイノルズ数の相似をはかった。また、風洞風速は測定におよぼす空力的な模型の振動を考慮して8 m/sとした。

測定結果

LDVによって煙突模型まわりの気流が風のベクトル成分として効率よく計測される。また、風洞内で模型を回転させることにより、あらゆる風向に対して実験ができる。風向別に測定した煙突まわりのA、B、C 3箇所(図4-4)の平均風速を図4-5に示す。どの測定点においても風速が弱くほとんど0 m/s近くになるのは、その測定点が煙突の風下に位置する場合である。一方、測定位置が煙突の側面の場合、風速が最大2割程度増加する。また、煙突の風下では、風向変動幅が極めて大きくなった。これらの結果が示すように、個々の風向風速計による観測値では、ほとんどの方位に対して一般流を正しく計測することは難しい。このため、煙突に取り付けた3台の風向風速計の出力値を用いて演算処理し、風速の一般流速を推定することとした。

ポテンシャル流による計算結果

図4-5には、ポテンシャル流により計算した結果が重ねて示されている。測定点Bについて示したが、風向NNW付近の煙突後流部の乱れが大きくなるような位置、つまりポテンシャル流では計算できない渦領域を除き、計算と測定結果はよく一致した。

観測方法の提案

煙突まわりの風速分布を見ると、風向がNNEからEまでは、A点の風速の減速とB点の風速の増速がほぼ同じである。したがって、この方位ではC点を除き、A点とB点の測定値を平均すればほぼ一般流に近い風速値が得られる。また、他の風向においても、どれか1台の測器による測定値を除き、残る2台の測定値を平均することにより一般流に近い風速値が求められる。3台の測器による測定値から一般流を演算するには、風向によって使用する2台の風速計を選択すればよく、使用する測器を風向別に決める必要がある。そのためには、まず風向を把握する必要がある。風洞実験の結果、風向の乱れが大きくなる測定点を除く、2つの風向の測定値を平均するとほぼ一般流の風向と一致した。以上から、3筒集合煙突を利用した風向、風速の観測値の誤差を少なくするための補正方法として、以下を

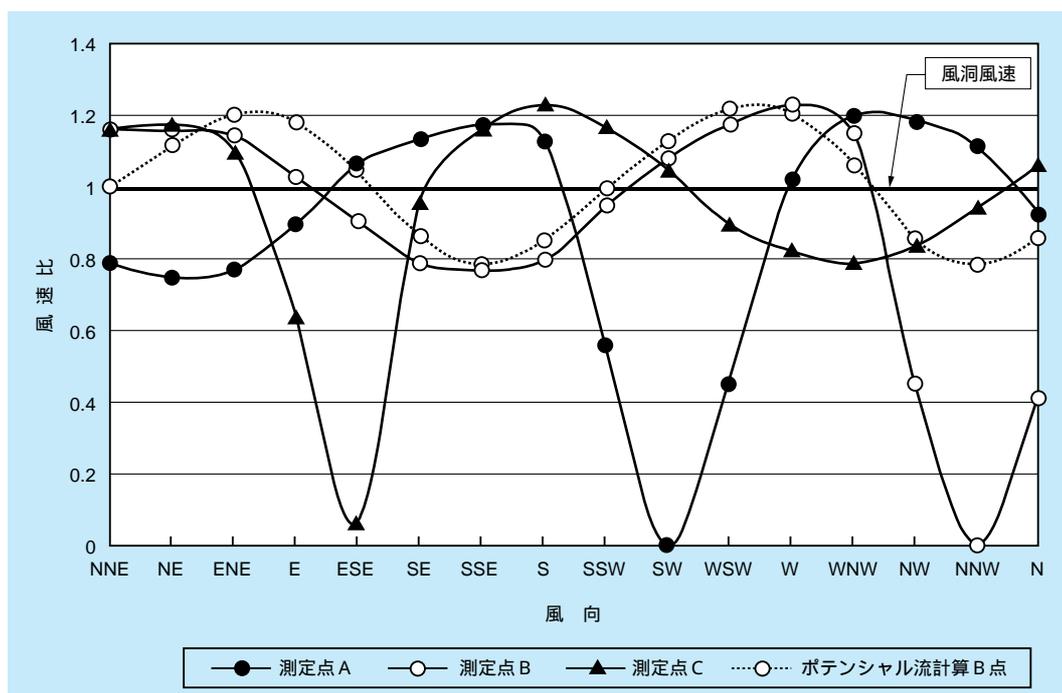


図4-5 3筒集合煙突のまわりに設置した風速計による風向別風速比

提案した。

風向変動幅が最大となる測器を除く、2台の風向風速計のデータからベクトル平均風向を16方位単位で求め、これを風向出力とする。

風洞実験により決めた測器選択表から、当該風向に対する2台の風向風速計を選択し、ベクトル平均風速を演算し、これを風速出力とする。

この手法のフローを図4-6に示す。本手法による風向、風速の測定誤差は煙突の数に拘わらず $\pm 10\%$ 以内である。本手法により取得された上層風データが、火力発電所の環境影響調査に活用されたことがある。

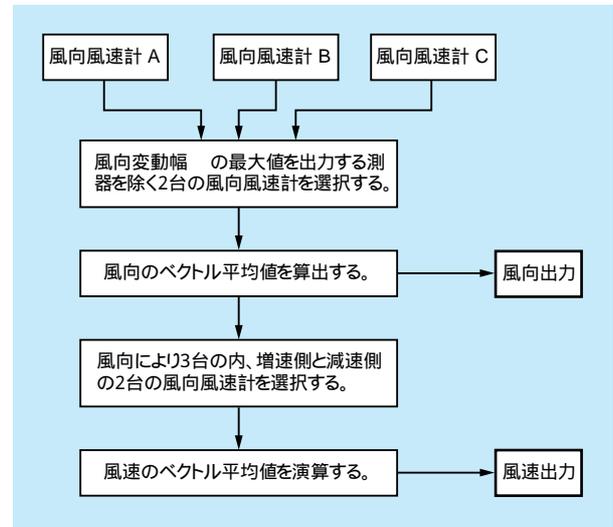


図4-6 煙突に取り付けた風向風速計による観測プロセスダイアグラム

4 - 2 ドップラーソーダの実用化

4-2-1 鉄塔による気象観測の問題点

排煙、排ガスの拡散状態は、拡散場の風向、風速、大気安定度等の気象条件によって変わる。大気環境影響評価では、原子力施設の場合、「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」¹⁰⁾(気象指針)により気象観測の項目、方法が定められており、火力発電所においても気象指針を参考にしてほぼ同様の観測が実施されている。これらの観測項目のうち、上層風の観測は、気象観測鉄塔や低層ゾンデにより実施されてきたが、以下に示すように改善の余地があった。

観測鉄塔の建設には多大な費用を要する。

鉄塔を利用した風の測定値には、塔体の影響による誤差が含まれる場合がある。

低層ゾンデによる観測は、降雨、降雪、霧によって妨げられる。また、自動化されていないために連続観測が困難である。

低層ゾンデは上空の風に流され、本来測定したい地点真上の気象を観測できない。

低層ゾンデによる観測は航空法による規制を受け、航空機の飛行経路にあたる地点での観測は許可され

なかったり、様々な制約を受ける。

一方、近年、上層気象のリモートセンシング技術の開発が急速に進歩し、その適用により上記問題点の改善が期待された。電力中央研究所は、音波探査による大気観測技術の開発に率先して取り組み、電気事業におけるドップラーソーダによる上層風観測技術の実用化を推進した。

4-2-2 ソーダの開発

ソーダの誕生

ソーダ(Sound Detection and Ranging: Sodar)は、音波を上空に送信し、上空大気からの散乱波を受信、処理して、大気現象を把握する装置である。音波レーダ(Acoustic Radar)とも呼ばれる。ソーダは、オーストラリアWRE(Weapons Research Establishment)のマック・アリスター¹¹⁾によって1968年に発表された論文により、世界の注目を集めることになった。当時の装置はコーン型スピーカ(開口径8インチ)を196個使用し、音波の送信機と上空からの散乱音波の受信機を兼用していた点の特徴である。送信周波数900Hz、送信出力500Wで動作した。マック・アリスターは、ソーダに

よるエコーパタン画像に示された高さ約900mの横帯状のエコーが逆転層によって生じたものであると発表した。

ソーダの測定原理

ソーダの理論的な検討に関する論文を、前述のマック・アリスター¹²⁾とアメリカ海洋大気局(National Oceanic and Atmospheric Administration: NOAA)のリトル¹³⁾が、アメリカ電気電子学会の1969年4月号に同時に発表していることは興味深い。両者とも共通して、ロシアのカリストラトバ¹⁴⁾による研究成果を引用し、大気からの音波散乱強度を表す式を示した。それによると、大気中を伝搬する音波は、大気温度および風の変動により四方八方に散らばり、地上から上空に送信した音波の一部が地上に戻ってくる。その際、音波を送信した方向と180度逆方向への散乱音波、すなわち音波の後方散乱波は、大気温度変動のみによって生じることが示された。音波散乱を生じさせる大気の変動量は構造関数と呼ばれるが、温度構造関数は、ある距離離れた2点間の温度変動の分散で距離の2/3乗に反比例して大きくなる。ソーダによる観測では、上空からの散乱音波の強さを時系列的に画像化し、描かれた画像の変化傾向から大気の状態を把握する。明確に区別される画像のパタンは、横帯状のパタンと鋸状のパタンであり、前者は安定な大気の場合に出現し、逆転層高度とよく対応する。一方、鋸状のエコーパタンは不安定な大気の場合に出現する。

ソーダの実用化

マック・アリスターやリトルの論文発表を受けて、いち早く情報を入手した郵政省電波研究所(現在の通信総合研究所)は、対流圏下部の電波伝搬におよぼす気象構造探査を目的として、1969年にソーダの開発調査に着手した。福島が小金井市の電波研究所構内に製作した音波送受信用のパラボラアンテナは、開口部の直径が16mのコンクリート製で、音波用としてはおそらく世界最大級のものである。福島¹⁵⁾はこのアンテナを使ったソーダにより、典型的なエコーパタンを観測し、マック・アリスターが発表したエコーパタンを用いた大気構造探査に関する可能性を確認した。

インドのシンガルは、一貫してソーダエコーパタン

による大気境界層の研究を行っている。シンガル¹⁶⁾はソーダを大気拡散評価へ適用するため、エコーパタンとパスキルの大気安定度との比較検討を行った。彼らはエコーパタンを細かく区分し、地表付近で観測された風向変動幅およびパスキル安定度によって分類した。シンガルは、大気汚染を悪化させる要因の一つである強い安定層がソーダによって簡便に観測できることから、ソーダは大気汚染研究に有用な装置であると評価している。さらに、ゲラ¹⁷⁾は地表付近の気温とラジオゾンデを用いた上空気温の観測データによって、安定度指標としてよく用いられているバルクリチャードゾン数とエコーパタンとの比較を行い、両者の間により相関があることを示した。

電力中央研究所の取り組み

ソーダ開発に関する情報が広がりつつあった1970年代のわが国は、産業の発展が著しく、工場排煙による大気汚染の対策が真剣に検討された時期であった。電気事業においては、大気汚染対策の一環として、電力中央研究所を中心に火力発電所周辺で拡散実験が盛んに実施された。この中で、多くの人手を必要とするラジオゾンデや係留気球により、汚染物質の地上濃度を高めるといわれる気温逆転層の観測が数多く行われた。当研究所は、地上に設置した装置によって簡便に上空の逆転層が把握できるソーダについて、内外の開発動向を注目し、1976年に試作機を作った¹⁸⁾。

試作機はマック・アリスターが発表したものと同様にコーン型のスピーカを用い、これを直線状に配置したいわゆるトルボーイ型と呼ばれる音響送信機を持ち、散乱音波はアルミニウムのパラボラ反射鏡で集音するものであった。受信エコーの記録は、ブラウン管の蛍光面の残光特性を利用したストレージオシロスコープを用いて行った。

その後、当研究所は、メーカーと共同でソーダの開発を行い、電力中央研究所狛江研究所(東京都狛江市)の構内や火力発電所においてエコーパタン観測を実施し、ソーダによる逆転層観測手法の開発を進めた。さらに、ソーダ観測によるエコーパタンの分類を行い、ほとんどのエコーを接地型、上層型、サーマルブルーム型、ブレイキングウェーブ型に区分することができた。また、火力発電所構内における約2ヶ月間のエコーパタン

数解析し、上空大気の移動(風)によるドップラー効果によって変化した周波数を検出して、上空の風を観測する装置である。音波の送信方向を短時間に変化させ、それぞれの方向の風ベクトル成分を合成し、通常の間風速計で測るように風向、風速を出力させることができる。しかも、音波パルス送信後、連続した音波が受信されるため、1回の音波の送信で複数高度の風速、すなわち風速鉛直分布を観測することができる。

マック・アリスターが1968年に歴史的なソーダに関する論文を発表した3年後に、アメリカ海洋大気局NOAAのピーランら²¹⁾が、ドップラーソーダの開発に関する論文を発表した。開発当初のシステムはソーダを発展させたもので、鉛直風速を観測する装置であった。その後、ピーランはバイスタティック型と呼ばれるドップラーソーダを開発した。バイスタティック型は、音波を鉛直上方に送信し、上空からの散乱波を送信アンテナから離して設置した2台の受信アンテナで受け、受信波のドップラー解析により風ベクトルを観測するものである。ピーランら²²⁾は空港などで観測を行い、係留気球に搭載した風速計との比較から、ドップラーソーダによって従来の間風速計による観測値と同等の値が得られることを示した。一方、モノスタティック型ドップラーソーダは、3台の音波送受信アンテナを1箇所に設置し、1台からは鉛直上方、他の2台からは斜め上方に音波を送信し、それぞれのアンテナにおいて受信を行う。現在実用化されているドップラーソーダはほとんどがモノスタティック型であるが、これはアンテナの設置が一箇所ですむことが一因である。

近年、フェーズドアレイ型のドップラーソーダ(図4-11でトラック運転席の屋根に写っている)が開発されている。これは、小型のスピーカを多数並べ、入力する信号を操作し、音波の送信方向をコントロールする方式である。フェーズドアレイ型のドップラーソーダの風を測る原理はモノスタティック型と同じである。

アメリカ海洋大気局(NOAA)の貢献

NOAAがドップラーソーダの開発および実用化に果たした役割は大きい。ソーダを開発したピーランを始め多くの研究者によって、ドップラーソーダの理論的考察や実験的検討が行われた。特に、NOAAの重要な

研究としてあげられるのが、各社のドップラーソーダを一堂に集め、気象観測鉄塔に設置された間風速計との比較観測を10年間に6回実施し、その結果を公表した点である。1979年の第1回目の観測では、間風速計や温度計など多数の気象観測装置を取り付けたコロラド州ボルダールの高さ300mの気象観測(Boulder Atmospheric Observatory : BAO)鉄塔を利用して、各種気象観測装置の比較が行われた²³⁾。比較された測器は、超音波間風速計やペーン型間風速計など20機種以上に達し、その中にアメリカ・エアロパイロメント社、スウェーデン・センシトロン社などのドップラーソーダが5機種含まれていた。この最初の比較観測では、ドップラーソーダが開発途上で観測に不慣れだったこともあって、鉄塔との比較でかなりばらつきがみられた²⁴⁾。これに対してメーカーから、他社の装置の発信音による妨害のためというコメントがあった。

NOAAは、1980年に追加観測を実施した。この時に試験されたフランス・ベルティン社のモノスタティック型ドップラーソーダに対して高い評価が寄せられた²⁵⁾。ベルティン社はその後レムテック社と改名し、モノスタティック型ドップラーソーダの販売で世界的にシェアを拡大していくこととなった。1988年の観測では、アメリカ・ゾンダーと日本のカイジョーによってフェーズドアレイ型のアンテナを持つ新型の装置が試験された²⁶⁾。

以上述べたBAO鉄塔とドップラーソーダによる比較観測において、NOAAは平均風向、風速の測定能力に関して常にドップラーソーダを前向きに評価した。これらの結果が評価され、ドップラーソーダは世界に普及していった。なお、気象観測鉄塔とドップラーソーダの比較観測は、ドイツ・カールスルーエ原子力研究センター²⁷⁾やアメリカのNorth East Utilities²⁸⁾でも行われた。いずれもドップラーソーダの実用性が評価された。これらの比較観測について、1997年にNOAAのクレセンティ²⁹⁾は、「ドップラーソーダの比較研究の20年を振り返って」という論文を発表している。そのまとめで、ドップラーソーダは平均風向、風速を測る装置としては十分に満足できると述べている。なお、約20年前の1978年には、NOAAのブラウンとホール³⁰⁾が、それまでのソーダに関する研究のレビューを行い、300を超える論文を紹介して話題となった。このようにNOAAがソーダの研究開発に果たした役割は極めて大

きい。

ドップラーソーダの実用化

アメリカでは原子力発電所の緊急時における大気拡散の実時間予測に、ドップラーソーダで観測された風が利用されている。スーリアー³¹⁾はサンフランシスコとロスアンジェルスほぼ中間に位置するPG&E社(Pacific Gas & Electric Co.)のダイアブロキャニオン原子力発電所(PWR100万kW×2基、排気筒高さ76m)を対象に、緊急時の風の実時間予測を行った。風の実時間予測は、アメリカ原子力規制委員会(Nuclear Regulatory Commission : NRC)および連邦緊急事態管理庁(Federal Emergency Management Agency : FEMA)からの要請に応えたものである。PG&E社では当初、気象観測鉄塔の風を用いて拡散予測を行っていたが、地形が複雑なため、大気拡散がうまく説明できなかった。そこで、発電所構内に1台、発電所から約10km地点に2台設置した合計3台のドップラーソーダにより風を観測し、大きな空間の気象変化の把握に努めた。

フランス電力公社(Electricite de France: EDF)では1979年以来、ドップラーソーダで観測した風向、風速、鉛直風速の乱れ、エコー強度の鉛直分布を利用した大気拡散の予測手法を実用化している³²⁾。EDFのグランドがドップラーソーダの長所として、まずあげたのはコスト面である。彼は500m上空までの風向、風速の鉛直分布、鉛直方向の熱的構造や乱れの情報がルーチン観測できる最も安い気象観測法であると述べた。また、90%以上の稼働率やデータ取得率は十分に満足できるものと考えている。グランドは、エコー強度と気温鉛直分布の関係を調べ、ソーダのエコーパタン画像解析により、逆転層が確実に観測できることを報告した。さらに、鉛直風速の乱れ(w)の日変化に注目し、大気安定度を次のように分類した。

$w < 45 \text{ cm/s}$: 安定

$w > 45 \text{ cm/s}$: 中立または不安定

この分類の妥当性は、気温勾配から得られる大気安定度との比較により確認された。なお、後年、グランドより当研究所にこの境界の w 値を修正する旨の連絡があった。NRCの指針では、パスキル安定度を気温鉛直分布の傾き(気温減率)から分類しているが、グラ

ンドはこの気温減率とドップラーソーダの w を関係づけ、原子力発電所における大気拡散評価に適用した。

4-2-4 わが国の電気事業における研究開発

実用化研究に至るまで

1978年にアメリカ製パイスタティック型ドップラーソーダのゾンダーが商社によってわが国に輸入され、筑波の気象研究所構内において公開実験が行われ、多くの気象研究者らがその存在を知ることとなった。電力中央研究所では既にソーダを所有し、逆転層など大気成層の観測手法の開発に取り組んでいたが、1979年にはわが国で初めてパイスタティック型ドップラーソーダを導入した。そして、地上からリモートセンシングによって上空の風が測れる特長を活かし、火力や原子力発電所など多くの地点で、煙突に取り付けた風向風速計のデータの妥当性確認、拡散実験時の気象観測³³⁾、上層大気の流れ計測³⁴⁾などに積極的に活用した。また、発電所構内での連続観測結果にもとづく装置の性能評価結果もまとめた³⁵⁾。以上から、当研究所はドップラーソーダは気象観測に実用的な装置であると結論を下した³⁶⁾。

1979年に当研究所がドップラーソーダを導入し、その観測結果などが研究報告書、学会などで公開され、電気事業者内で徐々に注目を集めるようになった。また、当研究所以外でも気象研究所³⁷⁾や京都大学³⁸⁾で研究が進められた。さらに、NOAAの成果などが電気事業関係者の目に触れるようになった。これらを背景に、1989年に電力中央研究所を中心に電力共通研究として、ドップラーソーダの実用化研究が始まった。以下にその概要を示す。

わが国の原子力発電所では、大気環境保全や緊急時の対策として、上空の気象観測が発電所構内に建てられた気象観測鉄塔などを利用して常時行われている。ドップラーソーダによる観測は、気象観測鉄塔などを用いた従来の観測方法に比べ、人手の削減と鉄塔建設が不要になることから大幅なコスト削減が期待された。

実用化研究では、国産のドップラーソーダ(カイジョーAR-410型)が評価対象として選択された。AR-410型ドップラーソーダについては、伊藤ら³⁹⁾により開発経過などが気象学会誌に発表され、とかくブラックボッ

クスのといわれる海外の製品に比べ、動作条件等がすべて公開された装置であった。以下にその測定方式を示す。

ドップラー周波数算出

上空からの音波散乱信号は、時間的に連続して受信され、コンピュータによりデジタル化される。したがって、音波送信後から散乱波が受信されるまでの時間と音速を与えれば、一定の幅を持つが任意の高度の信号を切り出すことができる。この切り出された信号に対してファーストフーリエ変換(FFT)を用いて周波数解析すると、その高度の周波数スペクトルが得られる。もしドップラー効果が起こっていなければ、スペクトルピークは送信周波数と同一周波数の位置に生じる。静穏時を除けば、通常大気は移動しており、そこからの散乱音波はドップラー効果により周波数が変化するため、スペクトルピークは送信周波数とは異なる位置に生じる。スペクトルが最大となる周波数をはさむ前後合計5点のスペクトルの重心位置を示す周波数をドップラー周波数とする。このドップラー周波数から計算される速度がドップラー速度となる。

スペクトル信頼度の判定

ドップラーソーダから発信される音の周波数は1000～3000Hz程度の可聴音波である。したがって、周辺からこの音域の音がドップラーソーダアンテナから取り込まれるとノイズとなり、FFTスペクトルの一つのピーク周波数が得られず、フラットな形状のスペクトルあるいは複数のピークスペクトルが出現する場合がある。このように一つのスペクトルピークが出現しない場合には、風速のスペクトルの推定が困難となるため、スペクトル密度の最大値と前後2点ずつの周波数のスペクトル密度との比率を把握し、この値がある基準を超えない場合には、ドップラー速度の計算に使わないで棄却する。さらに、この棄却された数が10分間に一定数以上あった場合には、その10分間測定値を欠測としている。このように、ドップラーソーダの観測では、周辺からのノイズの混入により欠測となる場合があることを念頭に置く必要がある。ノイズ発生の原因として、降雨、強風、周辺の車両による騒音、工事騒音などが考えられる。

風速の演算

1台のアンテナによる音波送受信で得られたドップラーシフト周波数、送信周波数および音速から一次速度が求められる。この一次速度は音波送信方向の風速成分であるため、音波送信方向の角度から水平風速に換算される。さらに他の2方向に送信された音波による風速成分をベクトル合成し、いわゆる風向、風速が求められる。また、1回ごとの音波送受信により観測された風速から、風速変動と風向変動の標準偏差が計算される。

実証試験と指針、手引での採用

AR-410型ドップラーソーダを原子力発電所構内に設置し、気象指針に沿った風の観測が可能かどうかを実証するために、1年間にわたる連続観測を実施した。発電所構内に設置されたドップラーソーダを図4-8に示す。発電所構内の気象観測鉄塔に取り付けた超音波風向風速計との比較結果から、図4-9に示すように、上層の風速値により相関が得られた。また、年間の欠測率は1.3%で気象指針に定められた値10%を下回った。実証試験では、ドップラーソーダの欠測や異常値の出現要因等についても検討を加え、ドップラーソーダの上層風観測装置としての実用性を評価した^{40, 41)}。その後、本研究成果にもとづくドップラーソーダ導入の検討が電気事業大で進められ、1994年に改訂された気象指針¹⁰⁾で、原子力発電所における風向風速観測装置として採用された。現在、わが国の多くの原子力発電所におい



図4-8 原子力発電所構内で実用化試験中のドップラーソーダ

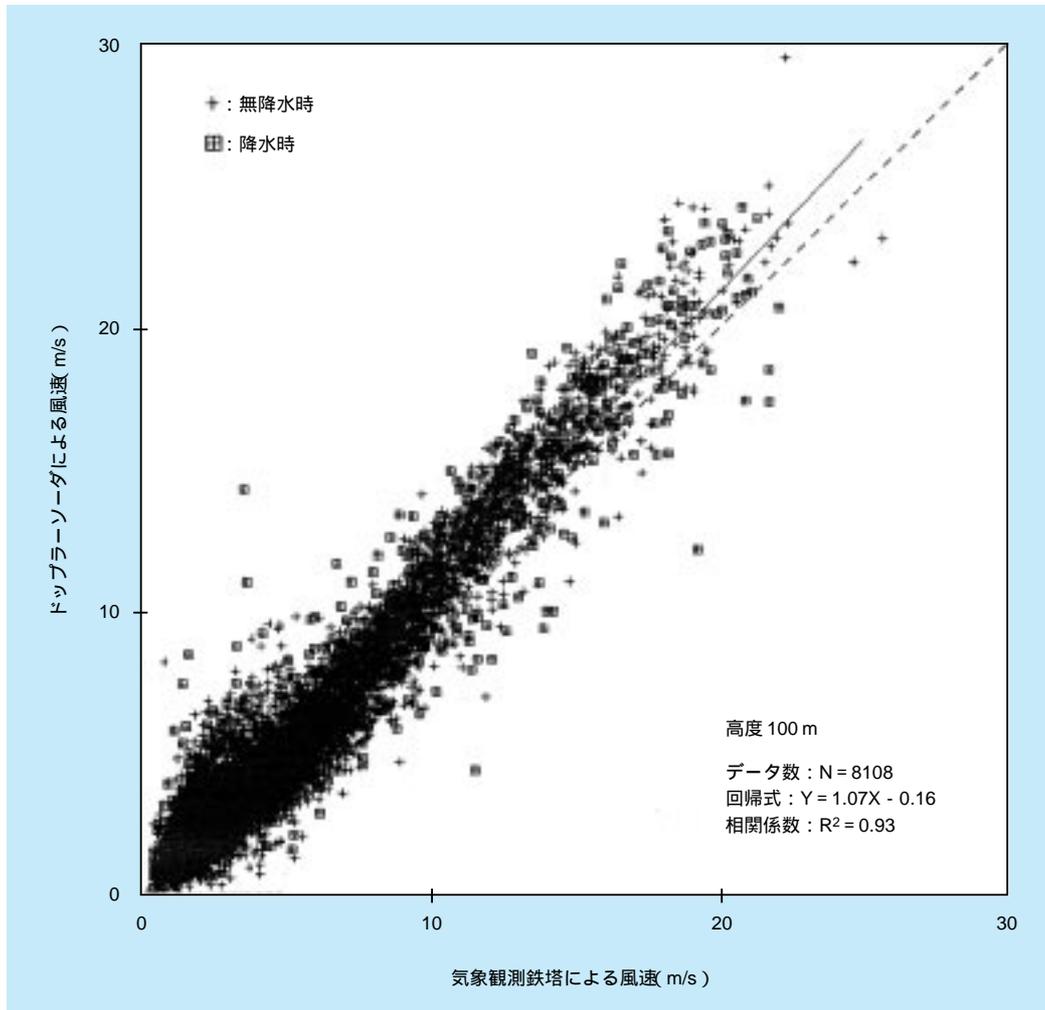


図4-9 ドップラーソーダと気象観測鉄塔による風速の比較(毎正時値、年間)

て、ドップラーソーダによる上層風の観測が行われている。

一方、火力発電所の環境影響評価の場合には、1999年6月に発行された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⁾で、「発電所の設置の場所近傍の鉄塔、煙突等において、またはドップラーソーダ等による通年の上層気象観測が行われている場合は、上層拡散場の風向、風速としてこれを使用することができる」と明記され、ドップラーソーダの使用が認められた。

将来の研究開発

以上、ドップラーソーダの実用化に関する技術開発動向について述べた。NOAA やわが国の電気事業にお

ける研究成果などから、ドップラーソーダによる風向、風速の平均値の観測手法については実用化された。さらに、測器開発の面では、フェーズドアレイ型の小型アンテナを持つミニソーダが開発されるなどの進歩が見られる⁴²⁾。

ドップラーソーダをさらに活用するために、今後の研究課題として、平均風速だけでなく、変動成分まで観測する手法を開発することがあげられる。風速や風向の変動は、煙の拡散幅と直接的に結びつく量であり、これがドップラーソーダによって観測可能であれば、大気拡散評価にもたらす効果は大きい。フランスのEDFは、既に鉛直風速の乱れを大気拡散評価に用いているが、水平風速の乱れや風向変動幅については、超音波風向風速計の観測値との乖離が問題となっている⁴³⁾。

4 - 3 移動型ラスレーダの開発

4-3-1 音波と電波を利用するラス

熱的に中立な大気では、高度が100m上昇するごとに約1℃気温が下がる。逆転層と呼ばれる大気は、上空ほど気温が高くなり強い安定状態を示す。また、高度とともに気温が低減する割合が1℃より大きい場合は、不安定な大気と呼ばれる。気温勾配と煙の拡散状態は密接に関連している。例えば、上層に逆転層があり、下層が不安定な状態では、煙は上方への拡散が抑えられ、地上に降りてきて高濃度をもたらすことがある。従来、気温鉛直分布は、鉄塔に温度計を取り付けて観測するか、風船に低層ゾンデを取り付けて上空に飛ばして観測している。しかし、これらの方法は経費や人手がかかるため、リモートセンシングによって観測するための研究が進められてきた。現在、上空の温度を地上から遠隔探査する唯一の方法は、ラス(Radio Acoustic Sounding System : RASS)レーダによるものである。ラスレーダは音波と電波を組み合わせた観測装置である。電力中央研究所では、近年、都市上空の温度を移動しながら観測することができる移動型ラスレーダを内外に先駆けて実用化し、都市域における環境影響評価手法の開発に活用している。

4-3-2 ラスレーダの開発経緯

1972年にアメリカ・スタンフォード大学のマーシャルら⁴⁴⁾は、周波数85Hzのパルス音波を36.8MHzのパルスドップラーレーダの電波によって追跡し、音波面から反射した電波を受信して音速を計測し、それから上空の温度を観測できるという論文を発表した。マーシャルらはその論文の中で、送信した音波の2倍の波長の電波を送信した場合に反射強度が最大となる、いわゆるブラッグ条件を満たすことが重要であると指摘した。同じスタンフォード大学のノースら⁴⁵⁾は、装置のブロックダイアグラムを示し、ラスレーダが比較的簡単な装置により構成されていることを伝えた。ノースのラスレーダはマーシャルのものと異なり、電波を

パルスではなく連続して送信して、そこに音波パルスを発信させる方式である。以上の論文発表を契機に、ラスレーダの開発が各国の研究者により行われるようになった。

イタリアでは、イタリア電力公社(ENEL、現在は株式会社のENEL S.p.A.)とトリノ大学が共同してラスレーダの開発を進め、ミラノ近郊のTurbigio火力発電所やPO Valleyにおいて観測を行った⁴⁶⁾。ENELのラスレーダはMetric型ラスレーダと呼ばれ、音波の波長が約1m(周波数約340Hz)の比較的低周波信号を用いるものである。対応する電波の波長は2m(周波数:150MHz)となる。ENELのラスレーダによる上空の気温観測結果とラジオゾンデによる結果はよい相関がある⁴⁷⁾。また、電波の受信強度は送信音波の周波数によって変化することが理論的に明らかにされているが、このことの確認や混合層高さの日変化の観測が行われた。ENELでは、Turbigio火力発電所周辺の大気環境保全のために、発電プラントの運転コントロールをラスレーダやドップラーソーダの観測データを用いて行っている⁴⁸⁾。

わが国では、郵政省電波研究所(現在の通信総合研究所)の福島⁴⁹⁾によって、1977年にラスレーダの開発が開始された。福島は1979年に日本気象学会春期大会において、ラスレーダ開発の第一報を講演した。上空の気温がプローブ等を一切使用せずに、地上から非接触で観測できるということに注目が集まった。その後、ラスレーダと低層ゾンデによる観測結果はよく一致することを報告した⁵⁰⁾。福島は、電波を連続して送受信するCW(Continuous Wave)型のドップラーレーダを用いて、音波を追跡する方式を採用した。ラスレーダを開発する上での問題点は、送信音波が上空の風下に流され、反射電波が受信機の設置場所に到達しないことであった。これを解決するために、電波研究所の松浦ら⁵¹⁾は、音波および電波の送信アンテナを複数台使用したラスレーダを開発した。これは、風向変化に応じて音波の送信位置を常に風上になるように変化させ、電波が多数配置した受信アンテナに到達するようにしたものである。このような方式のラスレーダは、電波

の受信位置が上空の風向、風速に依存していることから、風向、風速も測定できる。

電力中央研究所では、1986年に郵政省方式のラスレーダを導入し、観測データの評価を行った。当研究所の装置は音波周波数が約1kHz、電波周波数が400MHzで、**図4-10**に示すように送信音波アンテナが4台、直径1.8mの電波アンテナが40台からなる大型のものであった。これは、上空の風で音波が風下方向に流され、電波受信位置が変化しても複数の受信アンテナで受信できること、また、風向が変化した場合には、電波受信アンテナが音波アンテナの風下に位置するように音波アンテナを切り替えられるように設計したためである。一般にラスレーダの問題点は、強風時に音波の波面が風下に流され、電波受信位置が変化することから生ずる観測高度の低下である。大型の当研究所の装置では、風速5 m/s程度における高度300mまでの気温鉛直分布データ取得率は約80%であった。当研究所は、鉄塔に取り付けた温度計との比較を行い、良好な相関関係を確認した。これにより、従来、鉄塔や低層ゾンデにより行ってきた上空温度の観測が、音波と電波を利用したリモートセンシング機器によって可能であることを示した⁵²⁾。

4-3-3 ラスレーダの動作原理

大気中を進行する音波の伝播速度は、気温の平方根に比例する。ラスレーダは、鉛直上方に送信した音波

の伝播速度を電波のドップラーレーダにより計測し、これから音波の伝播速度を決めている気温を算出する装置である。大気中を進行する音波の伝播部分は、空気の圧縮、膨張が繰り返され、空気密度の粗密が生じている。空気密度の変化は、電波伝播に対する大気屈折率を変化させ、音波波面に入射した電波はわずかながら反射する。また、音波面からの反射電波は、音波の移動速度によるドップラー効果によって周波数がずれ、地上の受信機で受信した上空からの反射電波を解析すればドップラー速度、つまり音速が求まる。音速は、大気温度の関数であるため気温に換算することができる。

上空に送信した音波に電波を入射した際、電波が反射する強さを表す重要な関係がある。マーシャルが示したブラッグの定理は、音波の波長に対して、これに作用する電波の波長が2倍のときに個々の波からの反射電波が同位相で積算されるため、反射される電波が最大になるというものである。このブラッグ条件は比較的敏感で、実際の装置の動作では重要なポイントとなる。特にラスレーダを自動運転する場合、送信する音波周波数をどのように決めるかが課題となる。当研究所の従来の装置では、地上付近の気温を温度計により測定し、これに対応した音速と電波の波長の1/2となる音波の波長をなす音波周波数でまず送信する。次に上空の気温を想定し、これに対応した周波数の音波を約100ms後に送信する。このように、地上付近から上空700m程度までの観測を行うのに、2つの周波数の音



図4-10 大型ラスレーダのアンテナ(当研究所 赤城試験センター)

波を用いている⁵²⁾。ENELのTurbigo発電所に設置されたMETRIC型ラスレーダの場合にも、同様に地上の気温を測定し、送信音波周波数を決定している。しかし、この方法の場合、地上付近で測られた温度により計算される音波周波数が必ずしも上空のブラッグ条件を満足していないことから、解析に十分な大きさの電波を受信できないことがある。したがって、最初に送信した周波数を基準に、周波数を少しずつ変化させて音波を発信し、受信信号が最も大きくなる周波数を探すという操作が必要となり、温度データが観測されるまで数分から10分程度の時間がかかった。

4-3-4 移動型ラスレーダの開発

電力中央研究所では都市域における環境影響評価手法開発の一環として、建物まわりやヒートアイランド発生時の大気拡散現象について研究を進めている。既に述べたように、大気拡散と気温勾配には密接な関連があるため、都市域においても気温鉛直分布を観測することが重要である。しかも、様々な形状の都市建造物のことを考えると、都市域のいろいろな場所で気温鉛直分布の観測を行えることが望ましい。そこで、当研究所は移動型ラスレーダを開発することにした。

ラスレーダは風が強いと観測高度が低下するが、ヒートアイランドは風が弱い静穏時に発生するケースが多い⁵³⁾。このため、ラスレーダを風速約2 m/s以下の静穏時あるいは弱風時に用いることとし、アンテナの数を削減して4トントラックに積載して観測できるように改造した。改造にあたっては、事前に大型ラスレーダをアンテナの接続数を削減して動作させ、観測精度や観測高度について小型化するためのデータを取得した⁵⁴⁾。

移動の容易性

移動型ラスレーダは、直径1.1m、高さ2mの音波アンテナ1台、直径1.8mの電波パラボラアンテナ2台からなり、420.001MHzで動作するCWドップラーレーダ、データ処理システム、電源装置などで構成される。これらのすべての機器を4トントラックに積載し、移動した場所で観測できるようにした。東京都内で観測中の移動型ラスレーダを図4-11に示す。ラスレーダ装置



図4-11 移動型ラスレーダによる都市域での観測状況

の全長は約7mで、移動の容易性を考慮するとこの大きさが最大と考えられる。移動型ラスレーダに関しては、近年ENELが大学と共同開発したDecimetric型ラスレーダがある。この装置の全長は12mあるが、彼らはこれをトレーラーに積載して移動観測できると報告している⁵⁵⁾。

有害電波対策

移動型ラスレーダ構築に際しては、送受信電波アンテナの周囲に電波吸収体を設置することにより、有害電波を低減させた。ラスレーダを広い敷地に設置して観測する場合、装置の周囲に電波を反射するものがほとんどないため、有害電波対策は必要ない。ところが、ラスレーダを車に積載して動作させる場合には、車を構成する鉄板などから電波の直接反射があり、計測に悪影響をおよぼすことが予想された。また、都市域では観測場所周囲に多数の建物が存在し、そこからの反射電波の影響がある。そこで、電波アンテナの側面周囲に電波吸収体を設置し、送信電波が横方向に発射されることを防ぐとともに、横方向からの電波の受信を防いだ。

電波吸収体には、フェライトを焼き固めた磁性材料⁵⁶⁾を用いた。これは、電波アンテナの特性を計測する場合に使用される電波無響室の内壁に貼られているものである。使用した電波吸収体1枚は6cm四方、厚さ4.5mmと小さい。実際は、パラボラアンテナを囲むように6枚のアルミ板を設置し、これに約1300枚の電波吸収体を貼り付けた。電波吸収体の周波数特性は、移動型ラズレーダの使用周波数帯域である400MHzで減衰量が最大の約36dBになる。これは電波吸収体に垂直に当たった電波の入射波の強さに対して、反射波が1/63に減衰することを示している。

観測の迅速性

ラズレーダによる観測では、上空に音波を送信することが必須となる。この音波は出力が大きいため騒音となりうる。従来のラズレーダでは、先に述べたブラッグ条件を満たすために、周波数を少しずつ変化させた大音量の音波パルスを繰り返し発信させて、最適な周波数を把握した。このような方式によるラズレーダを都市域内で動作させることは、周辺環境に騒音をまき散らすこととなり、観測そのものを困難とする。そこで、当研究所では音波を一回送信しただけで気温鉛直分布が観測できる方法を考案した⁵⁷⁾。まず、ラズレーダの受信電力をオシロスコープなどで監視し、連続した音波を小音量で送信し周波数を変化させる。ブラッグ条件を満足する音波周波数になると電波受信電力は最大となる。このときの音波周波数で大音量のパルス音波を発信させると、観測に十分な電波受信電力が得られ、1回の送信音波により気温鉛直分布を観測することが可能となる。この方式によるラズレーダは内外において例がなく、電力中央研究所では本方式をOSAP RASS(One Shot Acoustic Pulse ラズレーダ)と名付けた。ここで考案したOSAP方式では、送信音波一発で観測が完了し、高度200mの気温鉛直分布の観測そのものに要する時間は約0.5秒である。

一般に温度計測では、10分間平均値で論じられる風向、風速とは異なり、平均化時間に関する議論は少ない。低層ゾンデに搭載された直径10 μ mのタングステン線温度センサーのように0.2秒程度の短い時定数を持つものから、棒状温度計のように1分程度の長い時定数を持つ測器まで、多くの種類のセンサーによる測定値

が瞬時値として用いられている。したがって、本移動型ラズレーダのOSAPモードによる温度観測値についても、基本的には音波送信1回ごとの測定値を観測値として扱い、必要に応じて平均をとることとした。

データ処理

音波から反射した電波を受信し、これを周波数解析するとドップラー周波数が求められ、これから音速さらに温度が計算される。大型のラズレーダのデータ処理装置では、前述の最適音波周波数の検出操作に加え、観測値の平均化操作などのため、一つの気温鉛直分布を求めるのに多くの時間がかかった。また、コンピュータ機器も大型であり、車に積載するにはやや無理があった。これに対して、移動型ラズレーダでは、1回音波を送信するたびに地上付近から上空までの気温鉛直分布を求められるようにデータ解析ソフトを改良した。ノートブック型のパソコンを用い、データ処理部を大幅に小型軽量化して、トラックの車室内でデータ処理を行えるようにした。

電波受信アンテナで受信された約420MHzの高周波信号は、ヘテロダイン型の周波数変換部で低周波信号に変換され、パソコンに内蔵されたA-D変換機によりデジタル信号として取り込まれる。その後、移動型ラズレーダ用に開発したデータ処理ソフトによりドップラー周波数が求められ、温度が算出される。ドップラー周波数の解析にはソフトウェアFFTを用いた。実際のA-D変換機のサンプリング周波数は10kHzであるが、解析周波数分解能等を考慮して、FFTの解析では5kHzのサンプリング周波数(sf)を用いた。また、解析データ数(N)は1024点とした。このため、周波数分解能(sf/N)は4.88Hz、温度分解能は約0.3となる。解析高度幅は約70mとなるが、データウィンドウにハミングウィンドウを採用し、計算上の観測高度幅に対して中心付近の高度に重みを持たせた温度が観測できるようにした^{58, 59)}。なお、音速の計算式で鉛直風速の寄与分を省略した。これは、ヒートアイランドが発生するような大気では風が弱く、風速の鉛直成分を小さいと仮定したためである。音速の計算に必要な気圧、湿度はトラックの荷台に設置した測器で観測した。

観測高度は音波送信後、電波が受信されるまでの時間と音速から求められ、地上近傍を除き40~80mから

上空の任意の高度を複数設定できる。最低観測高度は音波パルス幅に依存しており、パルス幅が200msで約80m、100msで約40mとなる。最高観測高度は、電波の受信状態によって変わる。外来電波ノイズの増加や上空風速の増大などによって観測高度が低下する。開発した移動型ラズレーダでは、ヒートアイランドが発生する比較的風が弱い条件を対象としているため、最高観測高度の目標を200m以上とした。図4-12に移動型ラズレーダのブロックダイアグラムを示す。

4-3-5 移動型ラズレーダによる観測

東京都内で移動型ラズレーダによる観測を実施した。同時に郊外にある電力中央研究所狛江研究所(東京都狛江市)構内あるいは都内で、低層ゾンデによって気温鉛直分布を観測した。狛江研究所では、移動型ラズレーダと低層ゾンデによる比較観測結果を得ることができた。図4-13に移動型ラズレーダ、低層ゾンデ、気象庁の地域気象観測システム・アメダス(AMeDAS)の観測

地点を示す。4トントラックに積載した移動型ラズレーダは、主に首都高速道路を移動し、観測は道路上のパーキングエリアあるいは一般の駐車場等に短時間停車して行った。各観測場所ではOSAP方式により、到着後速やかに気温鉛直分布の観測結果を得ることができた。また、OSAP方式により、夜間、静寂な住宅地域でさえ、騒音が問題となることはなかった。なお、レーダ機器やコンピュータに必要な電力は、観測用として積み込んだ2個の24VバッテリーをインバーターでAC100Vに変換して供給された。観測用バッテリーは、荷台に設置したエンジン発電機により観測を行わない時間帯に充電された。

移動型ラズレーダによる気温鉛直分布の観測は1996年の夏に開始した。しかし、当初の観測高度は120m程度と目標の200mに達しなかった。このような事例は都内の観測では多く見られた。これは、有害電波対策が十分でなく、信号雑音比が低下し、良好なスペクトルピーク解析ができなかったためである。図4-14に高度100m以上の場合について、ノイズが少ない場所とノイ

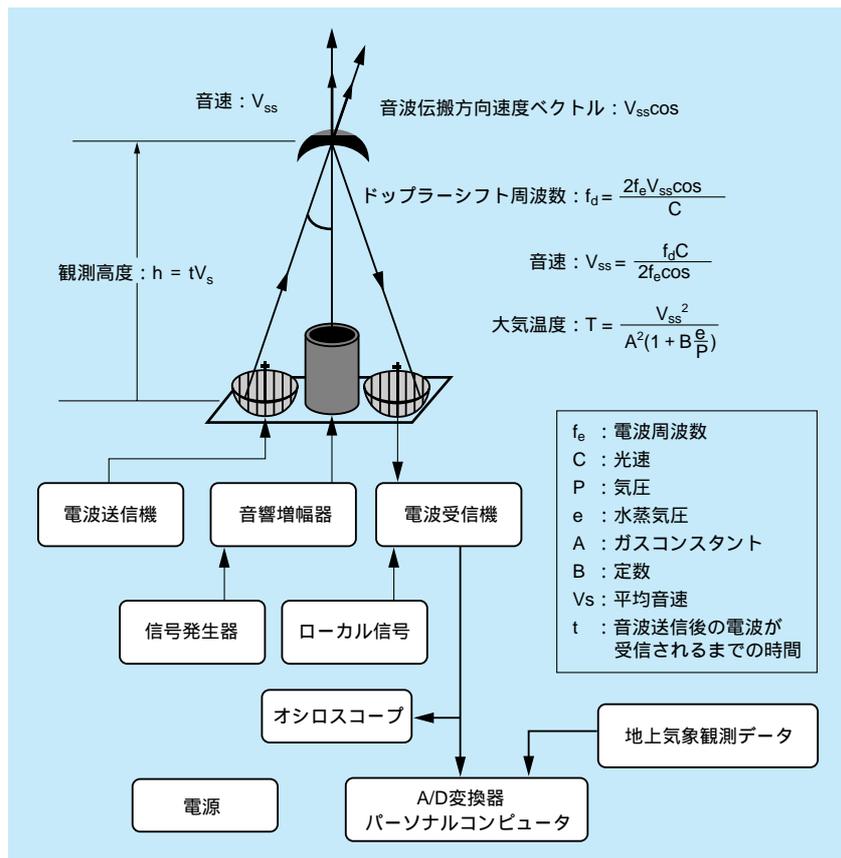


図4-12 移動型ラズレーダのブロックダイアグラム

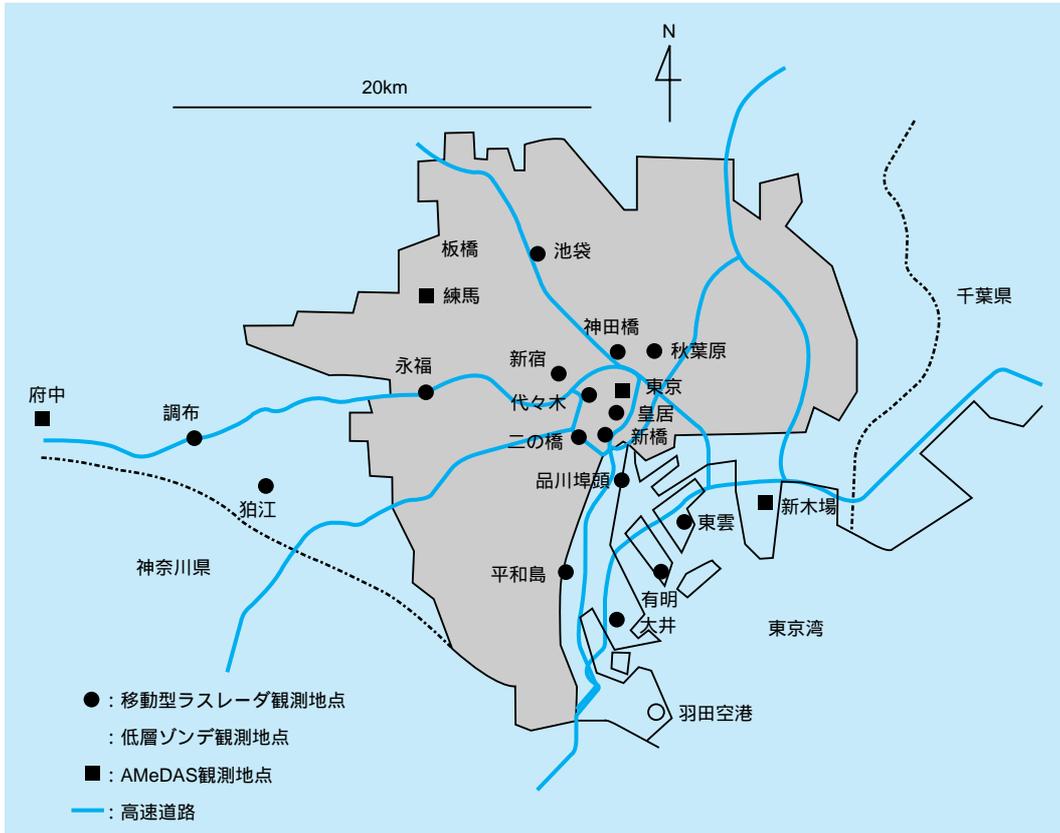


図4-13 移動型ラズレーダ、低層ゾンデなどの観測場所

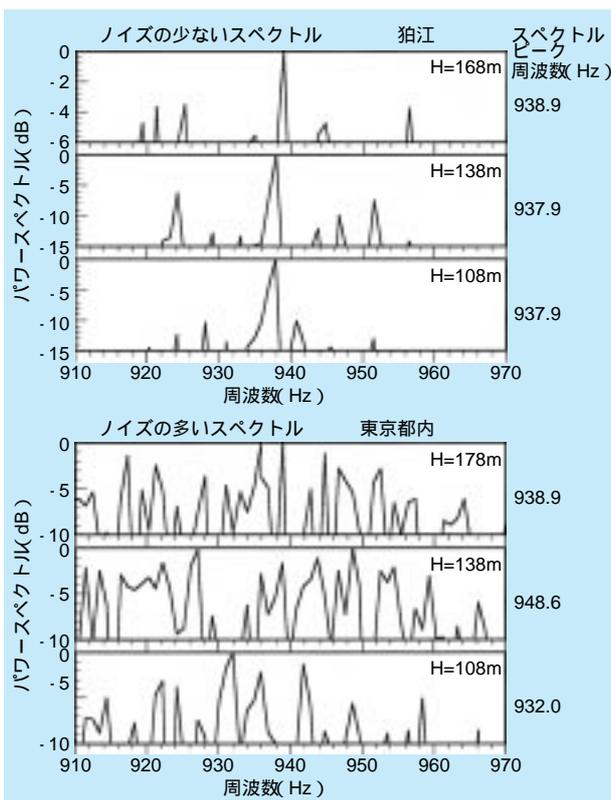


図4-14 ノイズによるスペクトル形状の違い

ズが大きい場所でのスペクトルの比較を示した⁶⁰⁾。ノイズの大きい場所では、パソコンが自動検出したスペクトルピークの位置がばらついている。

上記の移動型ラズレーダによる初期観測結果から、装置性能の向上のためには、一層の有害電波対策が必要であることが示された。そこで、電波送受信アンテナの周囲に設置した電波吸収体を大型化した。1998年3月の観測から改良した移動型ラズレーダを用いて、東京都内において気温鉛直分布の観測を実施した。3月3日～4日の夜間の観測結果を図4-15に示す⁶⁰⁾。天気は晴れで風が弱く、ラズレーダの観測には好条件であった。移動型ラズレーダの観測場所は、図中に示すように狛江、代々木、秋葉原、神田橋、皇居前広場、二の橋、新宿(図4-13参照)である。観測結果から明らかに、有害電波対策の効果が得られ、各地点においてほぼ目標とする高度200mまでの気温鉛直分布が観測できた。一晩に様々な地点で気温鉛直分布を観測した例として、内外において貴重な結果と言える。各地点の気温鉛直分布の図には、狛江研究所構内の低層ゾン

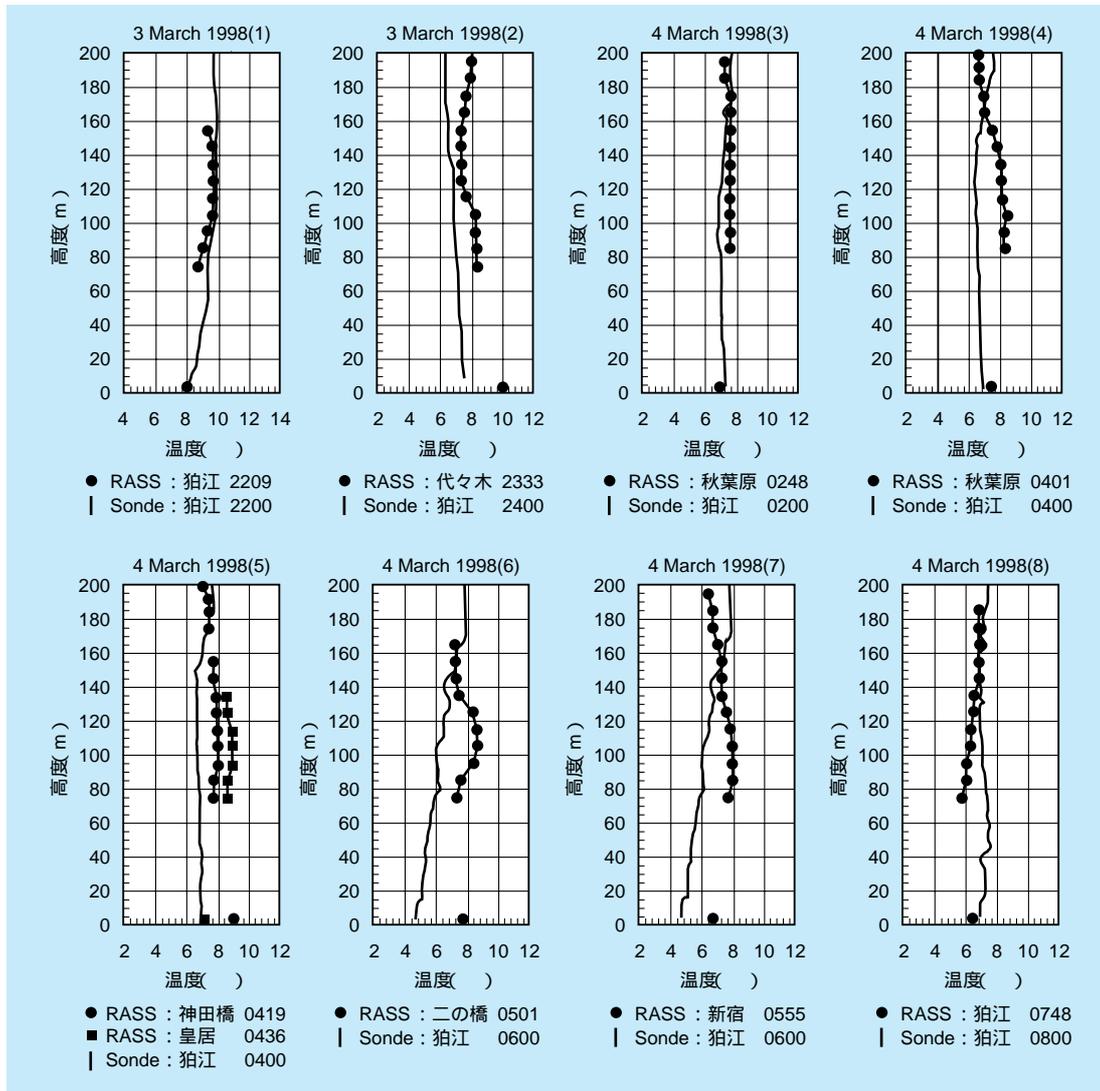


図4-15 移動型ラスレーダによる都市域内の気温鉛直分布観測結果

での観測結果を示したが、郊外と都市域内部での比較から以下のことが言える。

深夜から朝方にかけて高度160mの気温を比較すると、狛江市と都市域内部の各地とも6.5程度とほとんど同じ温度が観測されている。このことから、観測地点の広い範囲の上空に等温度層が存在することが推定される。

午前4時から早朝6時にかけて、高度100mの都市域内部の気温は狛江市の気温に比べて約2高かった。

同様に早朝の都市域内部では、地上付近の気温は狛江市の地上気温に比べて約2高かった。

この観測結果から、夜間のヒートアイランドを観測したことは明らかである。また、移動型ラスレーダは弱風時の都市気象を観測するのに有効な手法であることが示された。

本装置には、鉛直風速の補正機能の導入や装置の小型化等でさらに性能を向上できる余地が残されており、今後の研究成果が期待される。

4 - 4 ライダー観測

4-4-1 ライダーとは

ライダー(Light Detection and Ranging; Lidar)は、レーザーレーダ(Laser rader)とも呼ばれる気象、大気物理の分野における呼称で、レーザー光の周波数が単一の線スペクトルに近いという単色性と、平行光線に極めて近いという指向性を利用して、遠方にある物体までの距離やその形状などの諸情報を遠隔測定する装置である。ライダーは、1960年にレーザー発信が成功してまもなく、それを応用した計測技術の一つとして研究が開始された⁶¹⁾。電力中央研究所では、ライダーを大気汚染の観測に利用している。

4-4-2 ライダーの原理

ライダーの基本原理は、観測対象物にレーザーパルスを照射し、そこからの後方散乱によって戻ってきたパルス光を検出することで、観測対象物までの距離およびその他の情報を得るというものである。検出される散乱光は、大気中の観測対象物とレーザー光との相互作用の差異によって幾つかに分類されるが、そのうちのどの種の散乱光を検出するかによって測定対象も異なる。現在、ライダーに利用されている光散乱現象は、

レーザー光の波長と同程度またはそれ以上の粒径を有する球状粒子によって生ずるミー散乱、波長に比べて十分に小さい粒径を有する粒子(一般には原子や分子に対応する)によって生ずるレーリー散乱、照射されたレーザー光によって、分子の振動・回転準位が遷移して生ずるラマン散乱、レーザー光の波長と分子、原子特有の共鳴波長が同調することで生ずる共鳴散乱がある。これらを利用したライダーは、それぞれ、ミーライダー、レーリーライダー、ラマンライダー、共鳴散乱ライダーと呼ばれる。他に、測定対象分子の吸収特性が異なる複数波長のレーザーを用いることによって、分子濃度を導出する差分吸収ライダー(コラム8参照)などもある。

4-4-3 ミーライダー

発電所からの排煙に含まれる粒子や、大気中のエアロゾルの粒径は、おおむねサブミクロンオーダーと考えられる。したがって、これらの大気中の分布や挙動の解明を目的とした観測には、ミーライダーが用いられることが多い。ミーライダーは、先に示した数種のライダーの中で、最も簡単な原理にもとづいており、1963年に初めて超高層エアロゾルの観測に用いられた⁶²⁾。図4-16にミーライダーの構成概念を示す。天頂方向に発射されたレーザーパルスは、大気中に漂う排煙中の粒子、雲粒子あるいはエアロゾルなどによって散乱される。そのうち後方への散乱光が望遠鏡により集光される。集光された光は、背景光の除去を目的とした干渉フィルターを通して光電子増倍管により検出される。検出器からの出力は、デジタイザーによりデジタル変換され、コンピュータにより各種処理が行われる。

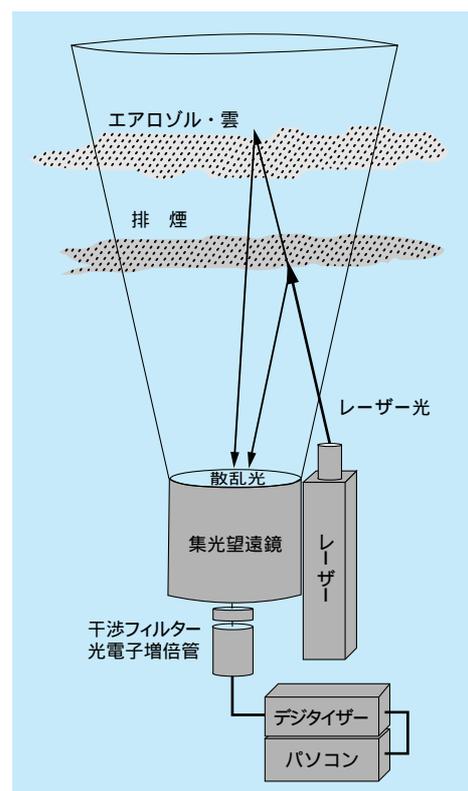


図4-16 ミーライダーの構成概念

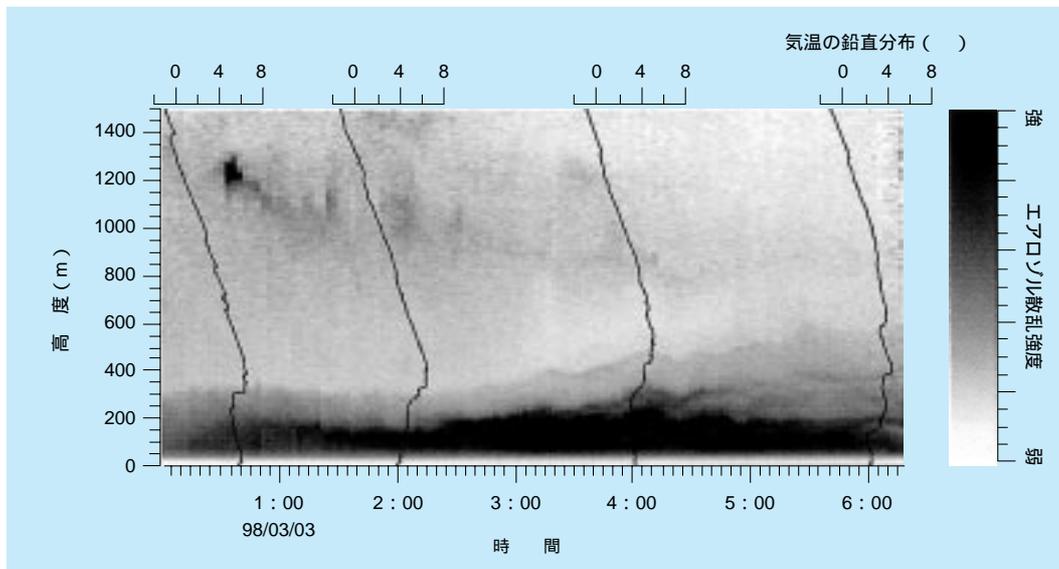


図4-17 ミーライダーによるエアロゾル観測の解析結果

今、散乱に寄与する粒子までの距離を r とすると、検出される後方散乱光の受信強度 $P(r)$ は、次式に示すライダー方程式によって表される。

$$P(r) = \frac{P_0 L K T^2(r) \{\beta_1(r) + \beta_2(r)\} A_r Y(r)}{r^2} + P_b$$

ここで、 P_0 はレーザーの発信出力、 L は距離分解能、 K はシステム定数、 $T(r)$ は大気透過率、 $\beta_1(r)$ は粒子による後方散乱係数、 $\beta_2(r)$ は空気分子による後方散乱係数、 A_r は受光望遠鏡の有効面積、 $Y(r)$ は送信レーザービームと受光望遠鏡の視野との重なりを示すパラメータ、 P_b は太陽光などに起因する背景光の強度である。距離 r は、レーザーパルスの射出時間と後方散乱光のサンプリング時間との差から求められる。観測によって得られた後方散乱光の受信強度 $P(r)$ からライダー方程式をもとに定量的な解析を行い、 $\beta_1(r)$ を求めることで、大気中の粒子の空間分布を導出することができる。しかし、大気透過率 $T(r)$ 自体が後方散乱係数 $\beta_1(r)$ に依存していることや、システム定数 K の正確な決定が困難なことなどから、定量的な解析を行うためには、各種の近似を用いる必要があり、十分な精度を得ることは容易ではない。有効煙突高や雲の高度の測定、あるいはエアロゾルの空間的な分布構造の定量的な解明を利用目的とする場合は、単に距離の 2 乗 (r^2) で補正を行うだけで十分である。

4-4-4 ライダーを用いた大気中浮遊粒子の観測

電力中央研究所では、気象観測や大気汚染観測を目的とした可搬型ミーライダーの開発を行っている。その基本仕様を表4-1に示す。これまでに、このライダーを用いて、発電所の有効煙突高度の測定や都市域ヒートアイランド内のエアロゾル観測を行ってきた。観測例として、1998年3月3日の深夜から早朝にかけて、当研究所狛江研究所構内において行った連続測定の結果を図4-17に示す。なお、観測当時の天候は、ほぼ快晴であった。結果には、距離 2 乗補正のみが施されている。また、連続観測中に行われたゾンデ観測から得られた気温の鉛直分布も同時に示す。図より、観測開始

表4-1 ミーライダーの基本仕様(電力中央研究所)

レーザー	Nd: YAGレーザー
レーザー波長	532 nm
レーザー出力	160 mJ
発信繰り返し	20 Hz (Max.)
受信部光学系	カセグレン型反射望遠鏡
検出器	光電子増倍管
サンプリングレート	20 M-samples/s
距離分解能	7.5 m

時点で高度約300mから観測終了時点の高度約600mにかけて、連続的に散乱強度の不連続線を見ることができ。また、ゾンデ観測によって得られた気温の鉛直分布から、放射冷却により形成された逆転層が時間とともに発達していき、この高度が散乱強度の不連続線と極めてよく一致していることもわかる。このように、ミーライダーを観測に用いることは、大気中の粒子状物質の立体構造のみならず、逆転層の立体的な検出も可能となるなど、気象や大気汚染の現象解明に極めて

有効であることがわかる。

一般に、散乱強度を測定対象にしたミーライダーは、定常的な観測に利用可能な段階に達していると言える。現在は、その発展型として、偏光フィルターを利用して偏光解消度の測定を行い、粒子の性状や形状に関する情報を導出するなどの高度化に関する研究を行っている。また、高精度で定量的な解析を行う手法についても今後の研究課題である。

4 - 5 ま と め

電力中央研究所では、発電所の環境影響評価や大気環境の実態把握のために、気象観測手法を開発してきた。ドップラーソーダによる高所あるいは上層風観測の実用化研究の成果は、原子力安全委員会の安全解析に関する気象指針や資源エネルギー庁の環境影響評価の手引で採用された。こうして、原子力発電所では、気象鉄塔の代わりに、建設や観測の費用、データ取得の面で有利なドップラーソーダの導入が行われた。ま

た、煙突を利用した上層風の観測手法は、発電所の気象調査で役立った。当研究所が開発した移動型のラステレーダやライダーにより、都市の気象と大気汚染の実態把握が可能となった。今後は、大気拡散との関連で重要となる風の変動成分をドップラーソーダで観測する手法の開発や、移動型観測装置の様々な地域への適用を行う予定である。

コラム6 回想 - 30年前の気象観測

電力中央研究所が大気環境影響調査の一環として、気象や大気汚染の観測を開始したのは1960年代なかばである。当時、産業の発達にともない公害問題が深刻化し、電気事業も率先して大気環境影響調査研究を行った。その中で、当研究所が中心となり、多くの発電所において大気拡散実験を行った。当時の目玉は、何といても係留気球（飛行船型あるいは卵型の大型風船、図1）を使用した温度と風速の観測であった。温度計のサーミスタセンサーは気球を上げ下げするための強靱なピアノ線を兼用し、地上に置かれたブリッジ回路に電氣的に接続され、出力は電気信号に変換された。気球は最高500m程度まで上げられ、逆転層を中心に気温鉛直分布が観測された。大阪府堺市近郊では、観測地点から約2kmの場所に放送局の電波送信塔があり、この送信電波が係留気球を支えるピアノ線に誘導したため、異常な温度が出力された。そのみならず、ピアノ線に白熱電球を接続したところ、煌々と輝いたことがあり、放送電波からの誘導電圧の大きさに驚かされた。測定に際しては、そのノイズをどのように除去するかが課題となり対策に追われた。今考えると、最新のラスレダにしても同じであるが、計測の歴史はノイズ対策の歴史でもある。

係留気球に取り付ける風速計は、ピアノ線を経由し定電流電源により加熱したサーミスタに風をあて、奪われる熱量を測る方式を採用した。当時はまだトランジスタが開発途上ということもあり、定電流電源の開発に四苦八苦した。また、サーミスタ風速計の検定装置も製作した。1.5m位の長さの棒をモータで回転させ、その先にサーミスタのセンサーを取り付け、室内で回転速度を変化させ風速の検定を行った。こんな手作り測器が現場実験を支えていたのである。

当時、係留気球は上空の気象を測る必須の道具であったが、ピアノ線が強風のために切断し、気球が飛ばされてしまったという危うい経験が3度ほどあった。その後のリモートセンシング技術の出現が嬉しかった。係留気球にはボンベ約5本分のガスが充填されたが、ガスはヘリウムではなく水素であった。

模型飛行機による高所の温度や風の遠隔測定も試みられた。その飛行機は某電子機器メーカーの社長が伊豆大島から湘南海岸まで無着水飛行をした当時話題の機種であった。しかし、製作者による試験飛行中に真逆様に地面に墜落し、全長2mほどの機体の半分くらいが地面に埋まり、その後実用化されることはなかった。

1970年代に極めてユニークなデータ解析装置の開発が行われた。大気乱流解析などでは相関係数がしばしば計

算される。現在ならば、少し古いパソコンでさえ数千点のデータ数であろうがたちどころに計算してしまう。これをアナログ式で計算しようとした。磁気テープに収録された風速などの1対のデータに対して、1個のデータは常に固定されたヘッドで、もう一個のデータは可動式のヘッドで時間差を与え読み取る。時間差を大きくするごとに、巻き戻した磁気テープを再生させて相関係数を計算した。数十点の計算ですら大変な時間がかかった。データが欲しいという熱意と挑戦すればできるという努力が作り出した、古き時代の傑作であろう。

もうひとつ、20年近く前になるが、いわゆるヤジロペイを測定器に利用した。長さ約15cmのプラスチック板により飛行機の胴体型を作り、その重心部分を地面に立てた針金の先端に置くだけのものであった。つまり、わずかな風の変化にも追従する風向計である。これを10m四方の板の上に、30cm程度の間隔でメッシュ状に配置し、上空から写真やビデオで撮影した。現在では、数値シミュレーションによりコンピュータ画面上に気流計算結果がベクトル表示されるが、飛行機型模型の写真撮影結果はちょうどそのような感じになる。

近年、気象測定器の歴史に大きな変化をもたらしたのは、リモートセンシング技術の導入である。特にドップラーソーダの電気事業での実用化は大きな出来事で、鉄塔を撤去する施設もでてきた。気になるのは、このような新技術の多くが外国に依存して開発されている点である。相対湿度を電氣的に変換するセンサーとして約20年前にスイスの製品を導入したが、現在でも欧州の製品の評価が高い。ラジオゾンデにGPS (Global Positioning System) を搭載した製品がいまだにわが国では開発されていない。先端技術を用いた測器の開発に関して、私たちの奮起が必要だ。



図1 30年前の気象観測の様子

コラム7 大気中に排出された窒素酸化物の行く末を追う

大気汚染物質・窒素酸化物

窒素酸化物(NO_x)はそれ自身も、また、それから生成した二次汚染物質も含めて、都市大気汚染に深く関わっている。窒素酸化物の多くは化石燃料の燃焼に由来し、排出時の約9割が一酸化窒素(NO)、残りが二酸化窒素(NO_2)とされている。大気中では、一酸化窒素は酸化されて二酸化窒素に変質する。生成した二酸化窒素は日射により光分解されて再び一酸化窒素に戻るが、一連の反応においてオゾンが生成される。この間、窒素酸化物(=一酸化窒素+二酸化窒素)量は変わらない。石油精製、溶剤等から大気に放出された炭化水素類は、オゾンと競合して一酸化窒素を酸化するため、豊富に存在すると、オゾンの消費を抑える方向に働く。一方で、二酸化窒素の光分解によるオゾン生成は続くから、結果的に高濃度のオゾンが発生する。このように窒素酸化物は、高濃度オゾンの発現において重要な役割を果たしている。

窒素酸化物の一部は、さらに酸化されて硝酸(HNO_3)に変質する。硝酸は、硫酸とともに大気中の主要な酸性物質であり、降水酸性化の原因物質である。また、大気の状態によって粒子化し、視程低下や呼吸器障害を招く。都市部では、なかなか減少しない二酸化窒素と粒子状物質がにわかに注目を集めるようになってきている。これからの都市大気汚染を考える上では、高濃度オゾンに関わる窒素酸化物だけでなく、硝酸までも含めた「窒素化合物」の“動態”(排出から、大気を輸送されながら変質し、地表面に除去されるまで)を把握することが必要とされる。

硝酸塩の濃度測定

“動態”の把握には、まず大気中濃度の実測値を知らなくてはならない。窒素酸化物の濃度測定は、連続的に自動運転可能な測定機器がすでに実用化されているが、硝酸の場合、濃度測定はかなりの部分を手作業に頼らざるを得ない。また、上述したように、硝酸は大気の状態によりガスとしても粒子としても存在する。粒子状の硝酸(硝酸塩)は、大気中のアンモニアと反応して微小粒子(粒径0.1-1ミクロン)を形成したものと、土壌粒子や海塩粒子の粗大粒子(同1-10ミクロン)に取り込まれたものに大きく分けられる。すなわち、大気中の硝酸は大きく分けてガス、微小粒子、粗大粒子の3相に存在できる。相により大気から除去される特性が大きく異なるため、硝酸の濃度は相別に把握しなければならない。

硝酸の濃度測定には簡便なフィルターパック法がよく使われるが、測定上の誤差がともなうことが知られている。この誤差は、デニューダの使用により低減可能である。デニューダはガラス製の円筒で、そこを通過する空気

中のガス状物質を、内壁に塗布した溶液に吸着して捕集する。粒子はデニューダを通過する性質があるため、デニューダの後段にフィルターパックを装着すれば、ガス状硝酸と粒子状硝酸を分けて捕集することが可能となる。ただし、粗大粒子はデニューダの内壁に衝突して捕捉されてしまう可能性があるため、デニューダの前段に分別装置を付けて、そこで粗大粒子を捕集する。このようなサンプラー(図1)を用いれば、1本のラインで粗大粒子状硝酸塩、ガス状硝酸、微小粒子状硝酸塩を分別捕集することができる。

このデニューダ付きフィルターパックを用いた方法で濃度を測定したところ、冬季には微小粒子状硝酸塩が全体の80%ほどを占めるが、夏季には50%程度にまで下がることなどが示された。このような結果はフィルターパック法による測定結果からも予想されていたが、大気中での現象なのか、測定上の誤差なのか、見極められなかった。デニューダ付きフィルターパック法は、重要な窒素化合物のひとつであるアンモニアにも適用可能であり、現在、硝酸との同時測定を通年で実施している。

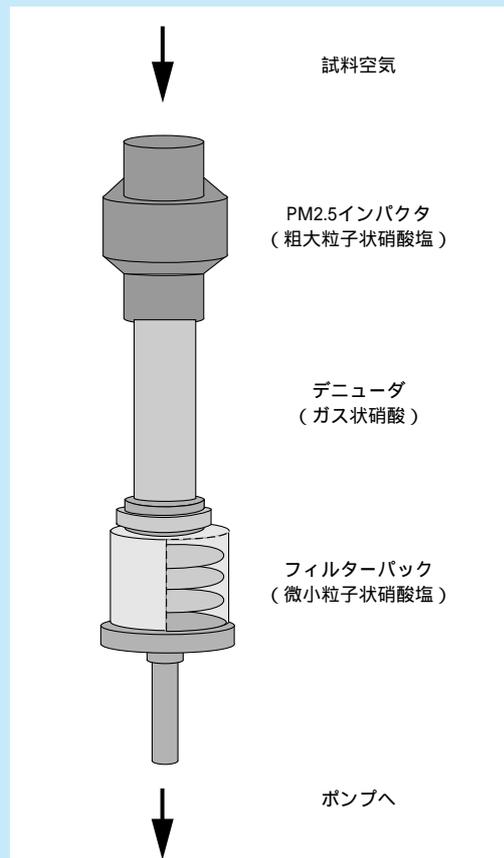


図1 デニューダ付きフィルターパックサンプラー

コラム 8 大気汚染物質の高精度・多種同時計測を狙うレーザーレーダ

酸性雨原因物質の広域的な輸送モデルの開発や都市大気汚染の発生メカニズム解明のために、大気における二酸化硫黄 (SO_2)、窒素酸化物 (NO_x)、オゾン濃度の高精度空間分布計測や多種同時計測が望まれる。この計測手法として、ゾンデ、気球、航空機を用いた方法があるが、これらに比べて連続的な観測を簡便にかつリアルタイムに行える方法としてレーザーレーダ(ライダー)がある。ライダーの種類と原理は4-4-2節に記載されているが、ここでは、測定対象物質の濃度分布を求めるために、差分吸収ライダー(Differential Absorption Lidar: DIAL)を用いる。この原理を図1に示す。物質特有の光吸収スペクトルを利用し、測定対象物質による吸収の小さな波長(波長A)とそれに隣接した吸収の大きな波長(波長B)のレーザー光をほぼ同時に大気中に照射する。この場合、波長Bの光は波長Aの光に比べて測定対象物質による減衰が大きい。また隣接した2波長を選ぶことにより、他の分子、粒子による光減衰の2波長間の差は、測定対象物質によるものに比べて十分小さいとみなすことができる。レーザー光出射点から光が散乱される位置までの距離は、レーザー光が受光系に戻ってくるまでの時間により求めることができる。したがって、大気における光の減衰を2波長間で比較することにより、測定対象物質濃度の空間分布を求めることができる。しかしながら、例えば大気中を長距離輸送されてくる SO_2 の濃度は数ppbと非常に微量であり、この場合他の分子、粒子の寄与が無視できなくなる。この問題点を解消する方法として、3波長以上を用いたDIAL(以下多波長DIALと呼ぶ)が提案されている。

電力中央研究所では、環境大気中の SO_2 、 NO_2 、オゾン濃度の空間分布計測が可能な多波長DIAL装置を開発し、当研究所狛江研究所構内に設置している。本装置では、2波長交互発振が可能な色素レーザーを2台(レーザー1、レーザー2)用いており、これにより紫外から可視域において4波長を1ショットごと交互に発振することができる。このため多波長DIALによる大気中微量物質濃度の高精度計測が可能であり、また多種同時計測により実大気中における光化学反応の解明に寄与することができる。測定例として、1998年12月10日、午前3時50分~3時55分に行った、東京都狛江市上空2000~3500mにおけるオゾン濃度分布の観測結果を図2に示す。通常の2波長DIALを2組同時に用いることにより、4組の濃度分布計測と2組のNull分布計測(波長が等しいペアによる計測)を同時に行った。これにより、濃度分布計測と同時に測定誤差をモニターすることが可能となり、今回のオゾン計測による測定誤差は5%程度と見積もられた。またこ

他、3波長DIALを用いてppbオーダの大気中 SO_2 濃度の空間分布計測にも成功している。

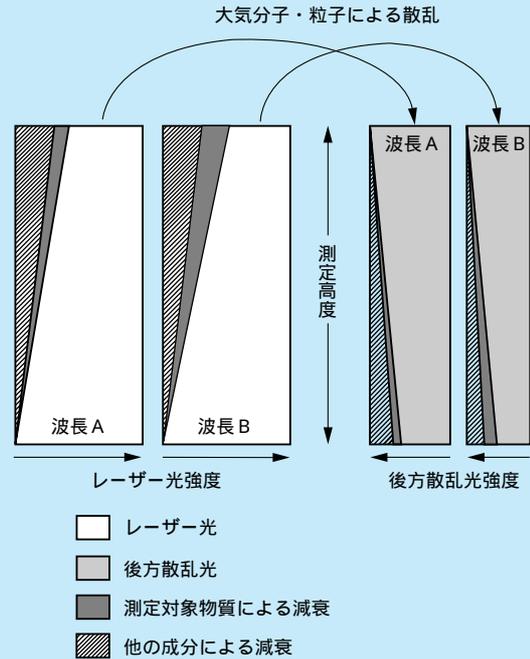


図1 差分吸収ライダー(DIAL)の測定原理

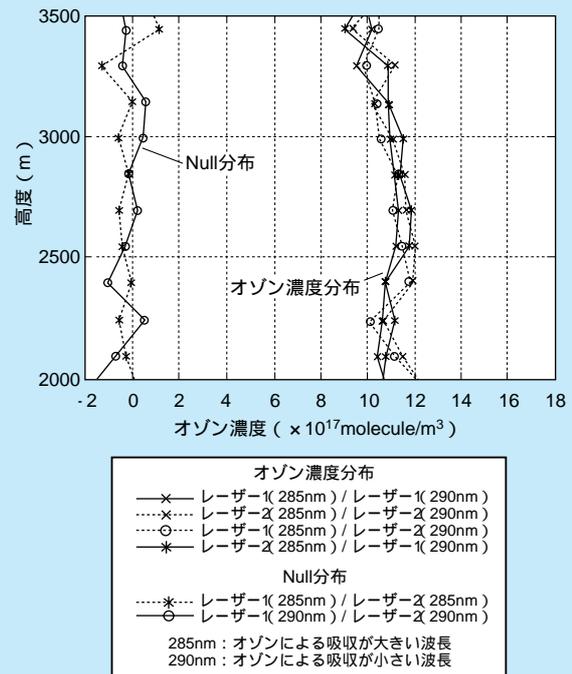


図2 大気中オゾン濃度の高度分布計測結果

第

章

5

排ガス拡散予測の
新しい技術開発

第5章 排ガス拡散予測の新しい技術開発 目次

粕江研究所大気科学部 上席研究員 佐田 幸一
粕江研究所大気科学部 研究員 佐藤 歩

5 - 1 実験的アプローチ79
5 - 2 数値計算からのアプローチ81
5 - 3 まとめ84

佐田 幸一（18ページに掲載）



佐藤 歩（1996年入所）
濃度変動を考慮した大気拡散予測に関する研究を行ってきた。現在は、災害時を対象とした大気拡散予測手法の開発に取り組んでいる。

コラム9 濃度変動測定システムの原理84
コラム10 環境計算科学と数値乱流風洞85

佐藤 歩（上記掲載）

佐田 幸一（上記掲載）

5 - 1 実験的アプローチ

5-1-1 濃度変動の重要性

環境影響評価に係わる現行の風洞実験においては、対象となるガス濃度の時間平均値のみを評価している。しかし、大気中における汚染物質の移動現象や気象のメカニズムを正確に解析するためには、濃度変動値に関する高次の統計量を評価する必要がある。また、事故等により毒性ガスや可燃性ガスが漏洩した場合、時間平均濃度のみの評価だけでは不十分であり、漏洩後短時間に生じる平均濃度の数倍あるいは十数倍といった高濃度値の予測を行うことが重要である。

5-1-2 濃度変動測定手法

風洞実験において、これまで濃度変動の測定を困難にしていた最大の理由は装置の応答性能である。従来、風洞実験で濃度測定を行う際にはFID(Flame Ionization Detector)型の全炭化水素濃度計が広く用いられてきた。FIDは、水素を燃料とした燃焼室にトレーサガスを吸引し、トレーサガス中に含まれる炭化水素を燃焼させることによって生じるイオンを電極により測定し、濃度を算出する。これまで用いられてきたFID型のガス分析計では、測定点で吸引したサンプリングガスをテフロンチューブ等により燃焼室まで導いていた。一般的に、燃焼室は風洞測定部外に設置されるため、測定点と燃焼室の間には一定の距離が生じる。よって、測定点でガスをサンプリングしてから燃焼室で濃度値を検出するまでに時間の遅れが生じる。そのため、従来型の濃度計は周波数応答性が低く、瞬間濃度を測定することが困難であった。しかし、近年、濃度計の改良が進み、燃焼室を測定点の近傍に設置することができるようになり、高周波数までの濃度変動の測定が可能となってきた。

5-1-3 濃度変動を測定する風洞実験

災害時を想定した風洞実験においては、従来の風洞

実験で対象としてきた濃度の平均値の他に、濃度変動の標準偏差やパワースペクトル、確率密度関数、最大瞬間濃度などを評価することが求められる。風洞実験では、先にも述べたような高周波数応答性を有する濃度計を用い、100Hz程度の高周波で瞬間濃度の測定を行う。測定した瞬間濃度の平均値からの偏差を算出することにより濃度変動を求める。以下では、濃度変動の自乗平均値を分散、その平方根(root-mean-square: RMS)値を濃度乱れと称す。

平地の風洞実験では、平均濃度と濃度乱れの分布形の相違が検討されている。図5-1に平均濃度と濃度変動の分散の測定例として、上空放出について示す。ブルームが地表付近から放出された場合、濃度乱れは煙源からの距離にかかわらず鉛直方向に自己相似な分布を示す。また、地表煙源時の濃度乱れの値は小さく、煙源の大きさなどの煙源条件にはほとんど影響されない。一方、ブルームが上空から放出された場合、煙源近傍の濃度乱れの分布は平均濃度と類似の分布形を示す。煙源からの距離が増加するにしたがい、平均濃度と濃度乱れの分布の間には違いが見られるようになり、平均濃度が最大となる高さは上空から地表方向へと下降するのに対し、濃度乱れが最大となる高さはさらに上空へと上昇する。瞬間濃度の出現頻度を表す確率密度関数は、濃度乱れの強さに依存して、対数正規型の分布から指数型の分布を示すことが報告されている¹⁻³⁾。

建物まわりの風洞実験では、建物屋根面からのガス放出⁴⁾や建物近傍の地表からのガス放出⁵⁾が模擬されている。いずれの場合も平均濃度の分布と濃度乱れの分布はよく対応しており、平均濃度が高く濃度勾配の大きいところでは、濃度乱れが大きくなることが示されている。また、建物屋根面からガスが放出された場合には、ガスは建物風下側に生じる渦領域に取り込まれ大きく拡散し、建物後流域における濃度乱れ強度(濃度乱れを平均濃度で除したもの)は鉛直方向に一樣な分布を示す。建物後方におけるその値は1より小さく、これは平地上のブルーム中心軸上の値より小さい。

電力中央研究所では、これまで建物模型として広く用いられてきた立方体あるいは直方体だけでなく、図

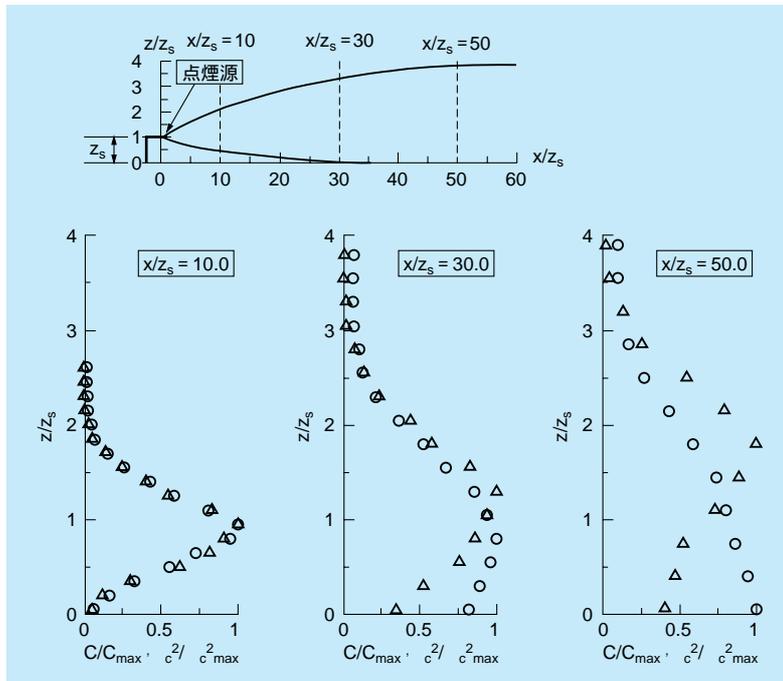


図5-1 平地上での濃度変動測定：平均濃度と濃度変動の分散の測定例（ \circ ；平均濃度 C 、 \triangle ；分散 c^2 ）

5-2に示す実際のプラントにより近い形状の模型を用いた実験を行った⁶⁾。配管系を模擬した建物模型後方では、立方体模型後方とは異なり、気流の巻き込みが少ないため、屋根面から放出されたガスの地表付近への拡散

は抑制される。また、濃度乱れ強度は立方体模型に比べ大きな値となり、平地上と立方体模型の中間の分布を示す。図5-3に建物周辺での濃度変動測定結果を示す。

プラント等における事故時のガス漏洩を想定した場合、特に高濃度値の出現割合が問題となる。そこで、風洞実験において平均濃度や濃度乱れと最大濃度の関係を予め求めておき、その関係と拡散モデルで計算した平均濃度、濃度乱れから最大濃度を推定する試みが行われている。これまでの実験では、濃度乱れに対する最大濃度の比は、建物形状にかかわらず一定値を示す結果を得た。

地形⁷⁾や熱⁸⁾の影響を対象とした濃度変動の風洞実験も行われている。様々な条件下における濃度変動特性が次第に明らかになってきたが、まだまだ十分ではない。また、これまで行われてきた風洞実験では、放出ガスの温度や密度、ガスの放出速度などの条件はほとんど考慮されていない。今後は実現象にあったガス放出条件を考慮した風洞実験手法の開発を行う。

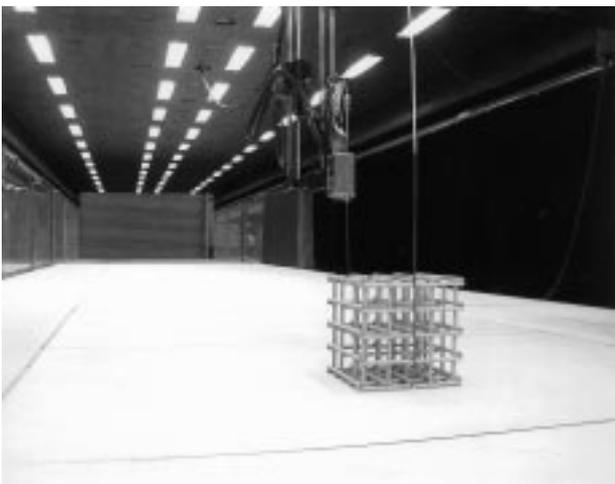


図5-2 配管系模型の風洞実験

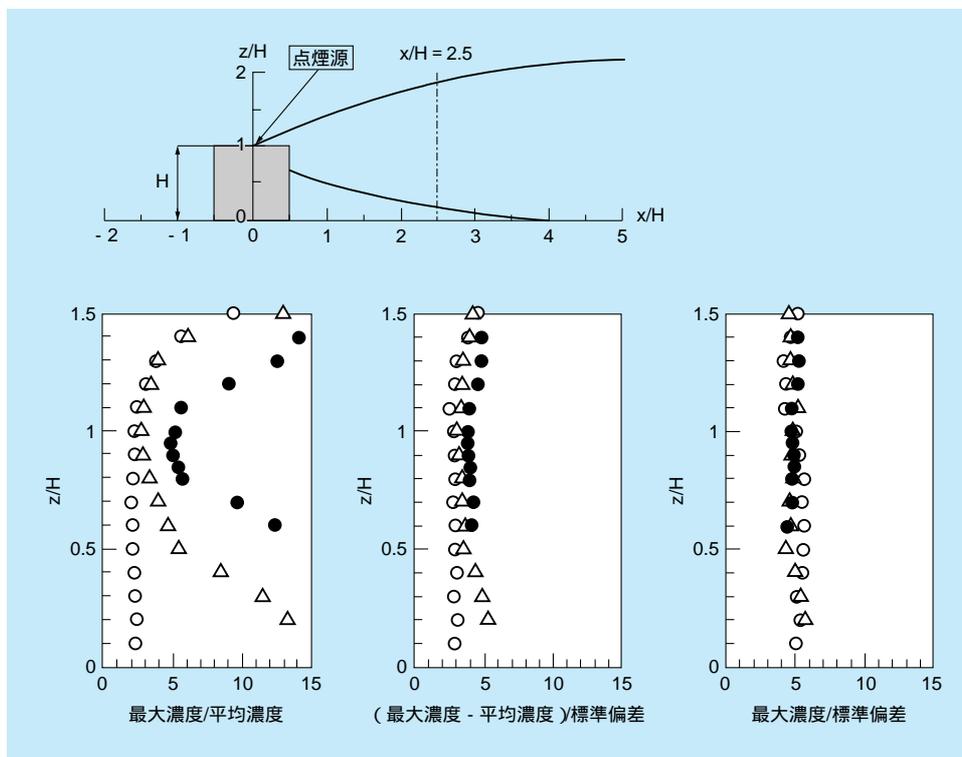


図5-3 建物周辺での濃度変動測定結果（ \circ ；立方体建屋、 \triangle ；配管系建屋、 \square ；平地）

5 - 2 数値計算からのアプローチ

5-2-1 実現象に近づけるために

近年、排ガス拡散予測に、数値モデルが適用されるようになり、2-14節や3-4節で示したように実用化研究が進んでいる。しかし、これらの数値モデルは、地形あるいは建屋のいずれか一方のみを対象とし、時間平均濃度の予測を行っている。一方、最近の乱流計算手法の発展とともに、今まで考慮されなかった現象も予測できる可能性がある⁹⁾。例えば、時間平均量に加えて、瞬間的な変動を予測する数値計算により、瞬間濃度の評価が可能となれば、毒性ガスや可燃性ガス等の安全対策に貢献するだろう。また、地形や建物が共存する条件で数値計算ができれば、より一層現実的な環境影響評価が可能となる。

5-2-2 瞬間値を予測する気流モデル

乱れが存在する場を対象に気流計算を行う際には、

乱れをモデル化して与える必要がある。乱れのモデル化、すなわち乱流モデルの分類を図5-4に示す。瞬間的な変動を予測するためには、時間平均化操作を行わずに気流場を取り扱う必要がある。すなわち、乱流モデルの内、細かい計算格子によって空間平均化を行う手法（Large Eddy Simulation：LES）を用いる。この空間平均化操作により、細かい変動成分は多少平準化されるものの、気流場の大きな渦スケールは直接計算される。そのため、LESは瞬間値の予測が可能で、予測精度の向上が期待できる。ところが、LESは普遍的な構造を有する渦スケールに至るまで計算格子を十分に細かく与え、かつ瞬間的な変動に追従した非定常計算を行う必要がある。そのため、多大な計算機記憶容量と計算時間を必要とする。LESの大気への適用は、その研究の初期の段階では平地に制限されていた。最近では単純な幾何学形状の建屋へも適用されている。

さらに予測精度が高い気流モデルとして、直接（計算）法が提案されている。直接法では、乱流のモデル化を何

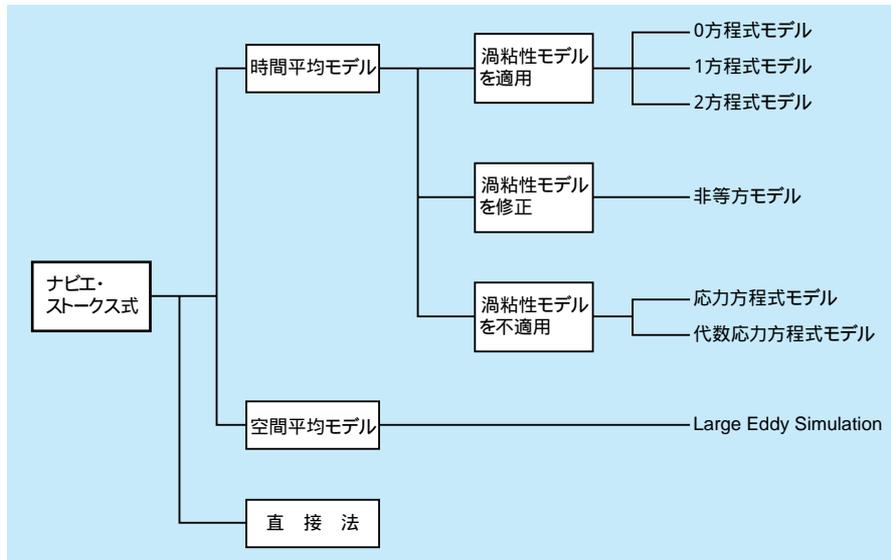


図5-4 乱流モデルの分類

ら行わず、気流場に存在する大小の渦を細かい計算格子で解像する。また、乱流の非定常性、すなわち瞬間値も計算することが可能である。しかし、計算機負荷はLES以上に大きい。そのため、直接法は流速の遅い気流場、単純形状まわりの気流場への適用に限られている。

5-2-3 瞬間値を予測する拡散モデル

前項で示した瞬間値を予測する気流モデルの考え方を大気拡散に適用し、排ガス濃度の瞬間値を予測する試みも見られる。例えば、建屋周辺の排ガス拡散に対して、前項で示したLESの考え方を拡張している。

また、LESの考え方にもとづかず、濃度の瞬間値を計算する手法も提案されている¹⁰⁾。この方法では、排ガスを小さな煙の断片(パフ)に分割し、計算格子ごとにパフの分割、結合を繰り返す。この繰り返しを非常に短い時間間隔で行うことにより、濃度の瞬間値を得る。パフによる拡散計算に必要な気流場の瞬間値は、前項で示したLES等により与える。一般に、発電所煙突などの排ガスの発生源は、計算領域の大きさと比べて小さく、大きな計算格子では精度よく解像することが困難である。パフを用いて排ガス拡散を予測する場合、任意の寸法で煙源を与えることができる。そのため、パフを用いた拡散計算では、煙源付近における予測精度が向上する。しかし、煙源から遠い位置では、排ガスの出現頻度を過小に評価することが指摘されている。

排ガス拡散にLESの考え方を適用した場合、煙源位置における予測精度の低下が懸念される。極端な場合、煙源付近で負の濃度変動値が予測される可能性があり、非現実的である。

以上の観点から、電力中央研究所では、煙源近傍ではパフ、煙源から遠い位置ではLESにもとづく手法を採用し¹¹⁾、両手法の優れた点を取り入れた。このように、両手法を切り替えることにより、濃度の瞬間的な変動を精度よく再現することができた。排ガス濃度の変動波形の例を図5-5に示す。排ガスの中心軸付近では、濃度が0になることはなく、瞬間的な高濃度が見られる。中心軸から遠くなると、濃度ゼロの出現頻度が多くなり、瞬間的に生じる高濃度の値は低下する。以上の特徴は数値計算、風洞実験とともに見られる。また、図5-5に示される濃度変動を解析処理した結果、大きい方から1~10%に相当する高濃度の計算値は、ほぼ風洞実験と一致することが確認された。

5-2-4 複雑な形状を有する場への数値モデルの適用

大気中で排ガス拡散の計算を行う場合、予測対象は地形や建屋が複合した条件である。そのため、境界の幾何学的形状が任意に変化する条件へも、数値モデルを適用しなければならない。境界の形状が複雑な条件を対象とする数値計算では、乱流モデルの選択よりも、

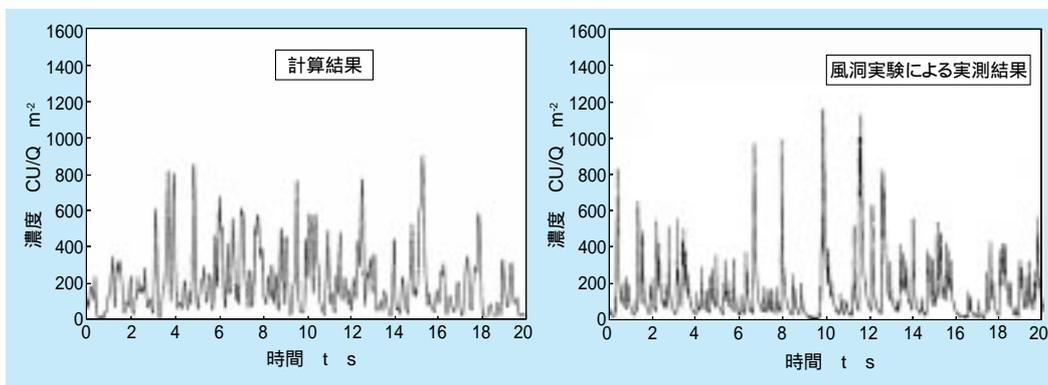


図5-5 排ガス中心軸上位置における濃度変動波形の計算結果と風洞実験結果の比較

どのような計算格子で対象物を表現するのが問題となる。例えば、実際の複雑な建屋が複合した条件に、十分に細かい計算格子を与えさえすれば、わざわざ高度な数値モデルを用いなくても、計算結果は風洞実験結果に一致する傾向があると指摘されている。

数値計算科学が実際の問題への適用になかなか応えられない原因の一つとして、複雑な形状を解像するための計算格子の生成に時間がかかり過ぎることがある。例えば、図5-6に示すように、計算格子は構造物の境界に適合するように曲率をもち、乱流量の大きな変化に

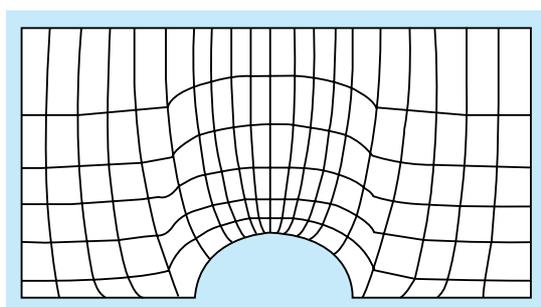


図5-6 半円状構造物まわりの計算格子の例

対応させるため細かくなっている¹²⁾。実際の発電所構内はさらに複雑で、複数の建屋が任意の方向を向いている。こういうケースでは、規則的な手順に従い、計算格子を生成することは難しい。

さらに、発電所周辺には地形がある。そのため、建屋に加えて地形高さの変化を計算格子で再現する必要がある。図5-7は地形と建屋の両方を考慮した座標系の例である。このような計算格子の生成は非常に手間がかかる。複雑な形状を効率よく計算格子で分解するため、複数の計算格子を重ねる手法、規則的でない計算格子を使用する手法などが研究されている。

より実態に即した予測を行うには、今後、数値計算手法を熱と地形・建屋が複合した場に適用する必要がある。そのために必要な数値モデルや計算手法の開発は、継続的に実施されるだろう。一方、計算機資源が限られている現状を踏まえて、合理的かつ効率的な数値計算手法も望まれている。現時点では、全ての大気現象を一つの数値モデルで再現するのではなく、環境影響評価や安全対策に必要な解析項目を明らかにして、現象を絞り込んで予測計算を行うのが現実的である。

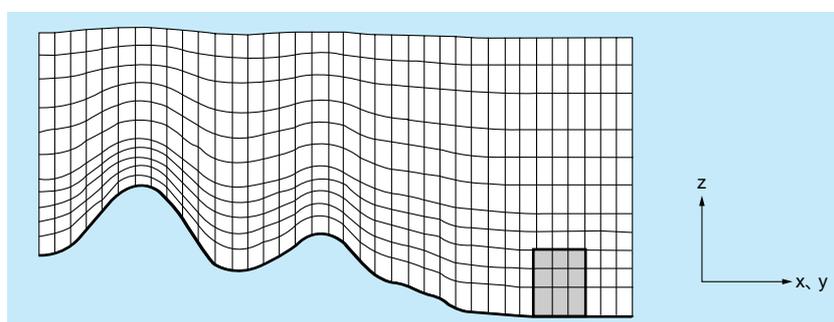


図5-7 地形および建屋の複合条件下における計算格子の例 (■は建屋に相当する)

5 - 3 ま と め

電力中央研究所では、大気拡散予測技術を防災対策等に役立てることを念頭に、これまでのように大気汚染物質濃度の平均値だけでなく、瞬間的な高濃度にも着目する研究を開始した。現在、様々なプラントの形状や排出条件に対して、大気汚染物質の濃度変動を風

洞内で測定する手法や瞬間濃度を予測する数値モデルの開発を行っている。また、環境流体計算科学の知識を十二分に活用して、複雑な現象が絡み合う大気中の物質移動現象を解明することを目指している。

コラム9 濃度変動測定システムの原理

風洞実験で濃度変動を測定するための装置（図1）は、小型の濃度測定部（サンプリングヘッド）および燃料の供給量や燃焼温度を調整するコントロール部から構成される。サンプリングヘッド内を減圧することにより、サンプリングヘッド先端に取り付けられたチューブを通じてトレーサガスを高速で吸引する仕組みとなっている。サンプリングヘッド内では、燃焼した炭化水素より生じる負イオンを捕捉し、発生した電流を電気信号として検出している。検出された電気信号は、風洞測定部外に設置されたコントロール部に送信され、コントロール部にて予め求められた係数を用いて濃度値に変換される。この係数を求めるための装置の検定は、所定のガス濃度に調整された検定ガスを用いて行う。また、サンプリングヘッド内で検出される電気信号は、燃焼室の燃焼温度や燃料の供給状態に影響されるため、装置の検定は各測定開始前に行う必要がある。一般に、サンプリングチューブには、内径 $2.5 \times 10^{-3} \text{m}$ 、全長0.2m程度の微細な金属製の管を用いる。そのため、燃焼室（すなわちサンプリングヘッド）を測定点の近傍に設定することができ、応答速度を高めることが可能となる。加えて、測定点から燃

焼室までの間において、サンプリングガスが他の気体と混合される影響が最小となる利点もある。

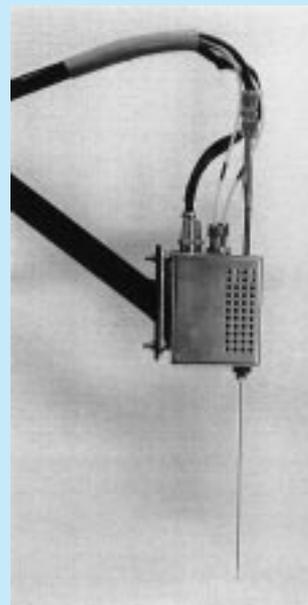


図1 濃度変動測定装置

コラム10 環境計算科学と数値乱流風洞

発電所周辺の排ガス拡散予測をはじめ、種々の大気現象の予測に、今後も数値モデルが適用されていくだろう。その際には、数値計算技術や計算機の進歩にともない、今まで予測できなかった現象も新たに予測可能になると考えられる。この数値モデルを用いた複雑な乱れ現象を解明する究極の姿の一つに、数値乱流風洞と言われるものがある¹⁾。

数値乱流風洞という言葉は、今から10年以上も前から使われ、乱流現象を把握するための実験設備としての「風洞」に対して、計算機を使って乱流現象を再現しようとする試みである。10年前の乱流モデルの研究レベルでは、LES (Large Eddy Simulation) 手法を中心に数値乱流風洞の構築が考えられていた。すなわち、乱れの細かい渦をモデル化するLES手法は、従来の時間平均モデルに比べて、より普遍的で局所的な情報を得られると期待され、開発、改良が続けられている。しかし、大気環境のように広い領域にLESを適用する際、十分に細かい計算格子が取れるのかという問題がある。大きな計算格子を使う方法は、LESと区別されてVLES (Very Large Eddy Simulation) と呼ばれることがある。一方、何らのモデル化を行わない直接法も使用されてきている。しかし、格子解像度等の点から、色々な気流条件を対象とする数値乱流風洞で使用する手法となるには、まだまだ時間が必要と思われる。

数値乱流風洞の構築には、計算機、特にスーパーコンピュータ (スパコン) の発達が大きく関わる。1990年代になると1GFLOPS (1秒当たり10億回の演算回数) に至るまで計算速度が上昇してきた。この計算速度の上昇は、主にベクトル化と呼ばれる計算手法の寄与が大きかった。しかし、このベクトル化による計算速度の上昇は最近になって限界に近づいている。例えば、次期スパコンの計算速度は、一つの演算装置で10GFLOPS程度以下に留まっている。将来的にはベクトル化に加えて、複数の演算装置を用いるパラレル化によって対応していくことになるだろう。また、計算に用いられる格子数は、現在では

1億に至るまで増加した²⁾。さらなる記憶容量の増大が、より複雑な計算を可能にする。

数値乱流風洞を具体化した一つの例として、航空宇宙研究所の「数値乱流風洞」がある³⁾。この数値乱流風洞は、1.7GFLOPSの演算装置を166台パラレルに接続している。合計で280GFLOPSの性能を有する数値乱流風洞は1993年に稼働開始し、当時、世界最高速度を有していた。数値乱流風洞により、平行平板間の直接法による数値計算が行われ、世界で最も早い気流速度条件下で解を得ている。今後は、さらに早い気流速度条件やより複雑な幾何学的条件への適用が期待されている。

数値乱流風洞の実現性を、乱流のモデル化と計算機の観点より考えてきた。大気の計算などに数値モデルを適用するには、上記に加えて、差分法等の数値計算技術、複雑な形状を有する場での格子の作成技術、得られた計算結果の可視化技術等、多くの観点から実現性を考える必要がある。特に、大気流れは実験室内の流れよりも多くのパラメータが関係する。そのため、大気現象を対象とした数値モデルの適用には、多くの困難さがつきまとう。自然界で起こる複雑な現象に対する万能の数値乱流風洞の実現はいつになるのか。夢のまま来世紀を過ごすことのないように、乱流モデルの研究者の頑張りが期待されている。

参考文献

- 1) 小林敏雄、1985、乱流の数値シミュレーション - 数値乱流風洞への夢 - 、日本機械学会誌、88、799、644-647
- 2) Murakami, S., Kato, S., Kobayashi, H. and Hanyu, F., 1995, Current status of CFD application to air-conditioning engineering, アジア地域の建築・都市環境調和技術に関する環太平洋シンポジウム
- 3) 航空宇宙技術研究所、1998、広報月刊誌「なる」、471

第 章

6

大気環境影響評価の
方向性

第6章 大気環境影響評価の方向性 目次

企画部環境推進担当 部長 朝倉 一雄

6 - 1 大気環境影響評価の現状89

6 - 2 今後の課題と取り組み90



朝倉 一雄（1971年入所）

火力発電所の排ガス拡散実態調査および排ガス拡散予測手法、石炭火力発電所微量物質の環境影響評価など、発電所の大気環境影響評価に係る研究を行ってきた。現在、企画部で、地球温暖化問題や化学物質対策など、環境研究全般にわたる総合推進の業務を担当している。

6 - 1 大気環境影響評価の現状

現在、大気に係わる環境問題は歴史的に見て、質的な転換期を迎えている。大気環境問題の中心である大気汚染は、1960年代に深刻な社会問題となった。当時、産業集中による工場地帯の大気汚染は環境や健康に大きな影響を与え、典型的な産業公害の一つであった。しかし、国は、1968年に「大気汚染防止法」を制定するとともに、主要な大気汚染物質である硫黄酸化物、窒素酸化物、ばいじんについて順次、環境基準の設定や排出規制の強化を進めた結果、工場など固定発生源からの大気汚染は次第に改善されてきた。その後、石油危機を契機にエネルギー源の多様化策がはかられ、石炭利用の拡大が進められたが、電気事業は世界的にトップレベルの環境対策技術を石炭火力発電所に導入し、大気汚染を未然に防止してきた。

1990年代に入ると、環境問題は広域化、複雑化の様相を呈し、酸性雨や地球温暖化に代表される広域環境問題がクローズアップされた。また、都市域においては、エネルギーの大量消費や人口集中により、窒素酸化物による大気汚染が顕在化している。1996年には、「大気汚染防止法」の改正が行われ、低濃度でも長時間の曝露により人への健康影響の恐れがある有害大気汚染物質に関する対策の推進が盛り込まれた。1997年に、ベンゼン、ダイオキシン等の化学物質が大気中濃度の低減を急ぐべき指定物質として認定され、現在、排出抑制対策が検討されている。加えて、これまでのガス状物質とは異なり、浮遊粒子状物質の健康影響に大きな関心が向けられている。アメリカで環境基準化された $2.5\ \mu\text{m}$ 以下の微細粒子の大気汚染は、わが国の都市域でも大気環境問題の一つとして認識されつつあり、健康影響が懸念されている。また最近、内分泌かく乱物質（環境ホルモン）による人や動物への影響が社会的に大きな脅威となっている。

すなわち、大気環境問題の視点は、従来の産業公害型の硫黄酸化物、窒素酸化物、ばいじん等の高濃度排ガスによる大気物理汚染から、複数の排出源からの有害大気汚染物質や大気中での複雑な化学反応を経た微粒子などが、低濃度でも重大な健康影響を引き起こす

可能性のある大気化学汚染に移りつつあると考えられる。

このような大気環境問題の変遷の中で、わが国の電気事業は自主的に発電所の環境アセスメントを導入し、周辺地域への影響を極力小さくする観点から環境影響評価を進めてきた。発電所の環境アセスメントの制度化は1977年の通商産業省の省議決定によってはかられ、1979年のいわゆる「エネ庁要綱」によって、現在の環境アセスメントの骨格が構築された。以後、発電所の環境アセスメントは、約20年の実績を有している。近年、益々広域化、複雑化する環境問題を総合的にとらえ対策を講ずるため、1993年に「環境基本法」が制定され、これを受けて1997年に「環境影響評価法」が成立した。発電所の環境影響評価についても、1999年6月に発行された「発電所に係る環境影響評価の手引」にもとづいて行われることになった。同手引では、環境影響評価の標準項目および標準手法について解説が行われており、大気環境影響評価手法の中心となる排ガス拡散予測手法についても、現時点で最も合理的と考えられる手法が解説されている。しかし、現在実用化されている予測手法は、前述の大気物理汚染を対象としたもので、今後問題になりつつある大気化学汚染に対する予測手法は未だ開発されていない。

電力中央研究所は、発電所を対象とした大気環境影響評価に関する研究に1965年頃から本格的に着手し、これまで、気象や大気汚染の調査手法、風洞実験による発電所の大気環境影響評価、排ガス拡散予測・評価手法、都市建物まわりの熱と大気汚染の予測手法などに係わる研究を推進してきた。本レビューに述べたように、これまで、リモートセンシングなどによる気象調査法の合理化、排ガス拡散に関する風洞実験手法の開発、発電所の大気環境影響評価、気象・大気拡散状況の現地調査による実態把握、簡易予測モデルおよび数値モデルによる排ガス拡散予測手法の開発などの研究成果をあげ、火力発電所の大気環境アセスメントや原子力発電所の安全解析、地熱発電所の環境調査などに反映をはかっている。

6 - 2 今後の課題と取り組み

大気環境影響評価に係わる第一の課題として、当面、現行の予測手法の改良、高度化があげられる。大気環境影響評価手法の中核となる「大気拡散予測手法」については、資源エネルギー庁の手引(1999年6月)の中で、技術的に知り得る自然界等の情報を有効に活用できるとともに、情報のレベルに適合した予測手法を選択することが重要であると述べられ、具体的には、環境庁のマニュアルや地方自治体等で使われている予測モデルの利用があげられている。また、評価の妥当性や予測精度の観点から、年平均値を主体に、日平均値の高濃度についても予測することとしている。地形影響の評価については、風洞実験のみならず、数値モデルの使用も選択肢に加えている。

しかし、手引で使用されている排ガス拡散予測手法は、幾つかの改良、高度化されるべき点を有している。例えば、環境基準値との比較、評価で重要な短時間高濃度を評価するため、特殊な気象条件(逆転層等)における1時間値の予測手法の開発が急務である。さらに、環境問題として緊急性が増している浮遊粒子状物質の予測手法、特に二次粒子の予測手法の開発が重要である。数値モデルについては、今後の計算科学の進展を踏まえると、大気環境影響評価手法の中核になるものと予想されるため、発電施設からの熱、物質輸送の数値シミュレーション手法の開発を一層強力に進める必要がある。ローカルな排ガス拡散予測手法に加えて、酸性物質の長距離輸送モデルの高度化やグローバルな温室効果ガスの移流拡散予測モデルの高度化も広義の大気環境影響評価の課題である。

第二の課題として、新しい大気環境問題への対応があげられる。これまでの大気汚染は工場など固定発生源からの硫黄酸化物、窒素酸化物、ばいじん等の排ガスによる高濃度汚染が主なものであった。しかし、排出源対策の効果が現れ、ローカルな産業公害型の大気汚染は相当程度の改善がなされた。新たな大気環境問題として、都市域で顕在化している大気汚染がある。

都市部では、移動発生源を主な原因とする窒素酸化物汚染やヒートアイランドによる熱汚染が大きな社会問題となっている。さらに、大気中の微粒子である浮遊粒子状物質の健康影響に大きな関心が向けられている。また、低濃度でも長期曝露により発ガンなどの健康影響を与える可能性がある有害物質の対策が焦眉の課題となっている。これらの有害大気汚染物質による人への影響評価を行うためには、何時、誰に、どのような被害が起こりうるかを予測するリスク評価という新しい概念が必要である。現在、都市域における有害物質による大気汚染の現象解明と影響評価手法の開発は緊急に取り組むべき重点課題の一つである。特に、窒素酸化物や浮遊粒子状物質については早期に実態解明を行い、都市大気環境影響評価手法を開発する必要がある。浮遊粒子状物質については、二次粒子の予測手法の早期開発が求められている。また、有害大気汚染物質の大気中での動態解明や挙動予測モデルの開発が重要な研究課題である。

第三の課題として、大気環境影響のみならず土壌、水域への環境影響などを総合的にとらえた影響評価手法の開発が今後益々重要になるものと考えられる。現代の環境問題は、大気圏、地圏、水圏といった領域の区別が定かでなくなり、相互に関連した複数の領域にまたがっている。例えば、発生源から大気へ排出された汚染物質は、大気中を移流、拡散して土壌に沈着する。そのうちの一部は大気へ再飛散する。また、陸水や海域に降下した排ガスは、水を媒体として魚貝類等へ濃縮される。これらの汚染物質による環境、人への影響評価を行うため、有害物質の健康リスクモデルでは、大気圏のみならず、地圏、水圏の関連を総合的に考慮した影響評価手法の開発が進められている。

当研究所においても、環境科学分野の基盤技術をベースに、多分野の研究者が共同して、総合的環境影響評価手法の開発を目指す取り組みが、今後一層重要となろう。

お わ り に

理事 狛江研究所長 福島 充男



環境問題は、資源、エネルギー、人口、食糧、経済、自然災害、安全保障、教育等々の社会的、経済的問題が複雑に絡み合い、予測が非常に難しい。このため、前もって対策をたてるには、最新の知識、技術を結集して、将来の姿を描く必要がある。

一方、大気拡散については、自然現象が複雑系であることが予測を本来的に難しいものにしている。当研究所では大型風洞設備、気象観測装置、高性能計算機を駆使して、この難問に挑戦してきた。また、幸い電力各社のご協力により、現地の貴重なデータを得ることもできた。

これらをもとに、大気拡散の予測手法や気象観測手法を開発し、発電所の環境影響評価と社会の理解を得た円滑な立地に、これまで幾分なりとも貢献できたのではないかと考えている。ご指導、ご協力を賜った大学、研究機関の先生方、電力会社関係各位に、心よりお礼申し上げます。

大気拡散予測技術は、酸性雨や地球温暖化など広域～地球規模の輸送にも適用できる。また、今後、ますます重要となる土壌、水系を含めた物質循環を、総合的にとらえた環境影響評価手法への発展も必須である。今後とも、電気事業および社会に還元できる大気環境の研究を進めて参る所存ですので、関係各位のご指導とご鞭撻をお願いする次第であります。

引用文献・資料等

第1章

- (1) 電気事業連合会、1999、環境とエネルギー 世界における日本の電気事業
- (2) 電力中央研究所、1978、電力中央研究所25年史
- (3) 大場英樹、1979、環境問題と世界史、公害対策技術同友会
- (4) 宮田親平、1991、毒ガスと科学者、光人社
- (5) Brimblecombe, P., 1987, The Big Smoke : A history of air pollution in London since medieval times, Methuen Company Ltd.
- (6) Evelyn, J., 1772 (原著は1661) Fumifugium: or, The inconvenience of the aer, and smoake of London dissipated. Together with some remedies humbly proposed by J. E. Esq; To His sacred Majestie, and to the parliament now assembled., Published by His Majesties command., Printed by W. Godbid, London.
- (7) 吉田克己、1971、大気汚染とその人体影響、われわれの生活と公害、V章、ナカニシヤ
- (8) 足尾町郷土誌編集委員会、1993、足尾郷土誌
- (9) ㈱ジャパンエナジー、日鉱金属㈱、1994、大煙突の記録 - 日立鉱山煙害対策史 -
- (10) 新居浜市、1996、歡喜の鉱山 - 別子銅山と新居浜 -
- (11) 日本の大気汚染経験検討委員会編、1997、日本の大気汚染経験 持続可能な開発への挑戦、ジャパンタイムズ
- (12) 環境庁編集、1998、平成10年版環境白書総説、大蔵省印刷局
- (13) 環境庁編集、1999、平成11年版環境白書総説、大蔵省印刷局
- (14) 横山長之、1989、大気拡散研究の30年、大気汚染学会誌、24、454-455
- (15) Etkes, P.W. and Brooks, C.F., 1918, Smoke as an indicator of gustiness and convection, Monthly Weather Review, 46, 459-460.
- (16) Taylor, G.I., 1921, Diffusion by continuous movements, Proceedings of London Mathematical Society, Ser. 2, 20, 196-211.
- (17) Sutton, O.G., 1953, Micrometeorology A study of physical processes in the lowest layers of the earth's atmosphere, McGraw-Hill Book Company, Inc.
- (18) Pasquill, F. and Smith, F. B., 1983 (初版はPasquill, F., 1962) Atmospheric Diffusion (3rd. edition) Ellis Horwood Limited (横山長之訳、1995、大気拡散、近代科学社)
- (19) Technical Information Center Office of Scientific and Technical Information, U. S. Department of Energy, 1984 (初版はU.S. Atomic Energy Commission, 1955, Meteorology and Atomic Energy), Atmospheric Science and Power Production, DOE/TIC-27601(DE84005177)
- (20) 伊東彊自、1961、大気汚染と制御、地人書館
- (21) 本間端雄、1972、煙の拡散、火力発電、23、247-260
- (22) 大田正次、1991、原子力と気象 - 原子力気象調査とともに -
- (23) 北林興二、1994、環境・気象・農業分野における風洞実験、可視化情報、14 Suppl., 24-29
- (24) Hino, M., 1968, Computer experiment on smoke diffusion over a complicated topography, Atmospheric Environment, 2, 541-558.
- (25) 山田哲二、1985、複雑な地形上の夜間下降流と拡散に関する研究、天気、32、151-156
- (26) National Environmental Research Institute, Denmark, 1999, Initiative on " Harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes ", <http://www.dmu.dk/atmosphericEnvironment/harmoni.htm>
- (27) 川名英之、1996、環境アセス法制法の挫折と復活への道程、エネルギーフォーラム、501、77-80
- (28) 朝倉一雄、四方浩、1982、火力発電所排煙の大気拡散予測手法の検討、電力中央研究所報告総合報告211
- (29) 朝倉一雄、四方浩、1983、火力発電所排煙の大気拡散予測手法、大気汚染学会誌、18、353-369
- (30) 資源エネルギー庁、大気環境影響調査暫定指針 (案)
- (31) 岡部義信、中井真行、市川陽一、織本正明、1981、揚貯炭施設からの炭じん飛散に関する検討 - 炭じん発生量推定と抑制対策効果 - 、電力中央研究所報告研究報告281060
- (32) 市川陽一、朝倉一雄、1990、揚貯運炭施設からの炭じん飛散量予測手法の開発、電力中央研究所報告研究報告T89025
- (33) 市川陽一、朝倉一雄、1991、揚貯運炭施設からの炭じん飛散量予測手法の開発、大気汚染学会誌、25、260-272
- (34) 資源エネルギー庁編、1999、発電所に係る環境影響評価の手引、電力新報社
- (35) 市川陽一、佐田幸一、1999、排ガス拡散数値モデルによる地形影響評価手法の開発、電力中央研究所報告研究報告T98010
- (36) 柿島伸次、通地克三、中井真行、千秋鋭夫、大場良二、西島茂行、1985、発電用原子炉施設の安全解析のための風洞実験手法の研究、電力中央研究所報告総合報告219
- (37) 赤井幸夫、朝倉一雄、1992、ドップラー音波レーダの上層風観測装置としての実用性評価、電力中央研究所報告研究報告T91048
- (38) 赤井幸夫、朝倉一雄、片寄直人、1993、ドップラーソーダの上層風観測装置としての実用性評価、天気、40、457-469
- (39) 科学技術庁原子力安全局原子力安全調査室、1998、発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針、原子力安全

第2章

- (1) 資源エネルギー庁、1999、発電所に係る環境影響評価の手引、電力新報社
- (2) 環境庁大気保全局大気規制課編、1995、窒素酸化物総量規制マニュアル〔増補改訂版〕 公害対策センター
- (3) 三菱重工業、1991、大気環境予測技術
- (4) 中井真行、佐田幸一、1987、大気拡散に関する風洞実験手法の改良 - 可動翼列による水平方向の乱れの制御 -、電力中央研究所報告研究報告T86011
- (5) 三菱重工業、産業公害防止協会、1981、風洞内における水平方向煙拡散幅再現法の研究、産業公害、17、235-245
- (6) 資源エネルギー庁、1979、発電所の立地に関する環境影響調査要綱別表1
- (7) Hanna, S. R., Briggs, G. A. and Hosker, Jr. R. P., 1982, Handbook on Atmospheric Diffusion, 29-30, Technical Information Center, U. S. Department of Energy.
- (8) Carpenter, S. B. Montgomery, T. L., Leavitt, J. M., Colbaugh, W. C. and Thomas, F. W., 1971, Principal plume dispersion models: TVA power plants, Journal of Air Pollution Control Association, 21, 491-495.
- (9) 朝倉一雄、四方浩、1982、火力発電所排煙の大気拡散予測手法の検討、電力中央研究所報告総合報告211
- (10) 朝倉一雄、四方浩、1983、火力発電所排煙の大気拡散予測手法、大気汚染学会誌、18、353-369
- (11) Hanna, S. R., Briggs, G. A. and Hosker, Jr. R. P., 1982, Handbook on Atmospheric Diffusion, 84-86, Technical Information Center, U. S. Department of Energy.
- (12) U. S. Environmental Protection Agency, 1987, Project report, EPA complex terrain model development: final report.
- (13) Ichikawa, Y. and Shikata, H., 1984, A three-dimensional potential flow model for the prediction of the behavior of radioactive plumes, Nuclear Technology, 64, 26-34.
- (14) 市川陽一、四方浩、1985、風の場計算のための擬似ポテンシャル流モデルの開発、土木学会論文集、363/ -4、61-69
- (15) 市川陽一、四方浩、西宮昌、1986、複雑地形を対象としたガウス型流跡モデル、大気汚染学会誌、21、104-114
- (16) Sada, K., Ichikawa, Y. and Asakura, K., 1996, Numerical simulation using the turbulent closure model for atmospheric flow under complex terrain conditions, Flow Modeling and Turbulence Measurements , Chen, Shih, Lienau and Kung (eds), Balkema, 607-614.
- (17) Sada, K., Ichikawa, Y., and Asakura, K., 1997, Numerical simulation of diurnal atmospheric flow variations in a coastal complex terrain area and comparison of results with field observations, Proceedings of 11th Symposium on Turbulent Shear Flows, Grenoble, France, p2-7-p2-12.
- (18) 佐田幸一、市川陽一、朝倉一雄、1998、火力発電所からの排ガス拡散の数値計算、日本風工学会誌、75、13-18.
- (19) 市川陽一、佐田幸一、朝倉一雄、1994、高次の乱流統計量をもとにした大気拡散モデル - ラグランジュ型粒子モデルを軸として -、大気汚染学会誌、29、297-312
- (20) 市川陽一、1995、大気流中での拡散 - 短距離輸送 -、数値流体力学、4、31-42
- (21) 坂上治郎、1982、坂上式の拡散パラメーターと二、三の計算式について、高圧ガス、19、166-172
- (22) Thomson, D. J., 1987, Criteria for the selection of stochastic models of particle trajectories in turbulent flows, Journal of Fluid Mechanics, 180, 529-556.
- (23) 電力中央研究所、1998、コンピュータで発電所排ガスの拡散を予測、電中研ニュース301
- (24) Ichikawa, Y., Sada, K. and Asakura, K., 1996, Simulation of turbulent dispersion phenomena in a complex terrain using a Lagrangian particle dispersion model, Flow Modeling and Turbulence Measurements , Chen, Shih, Lienau and Kung (eds) Balkema, 739-746.
- (25) Ichikawa, Y., Sada, K. and Asakura, K., 1997, Verification of a turbulent dispersion model through comparison with the results of a field tracer experiment in a complex terrain, Proceedings of 11th Symposium on Turbulent Shear Flows, Grenoble, France, p1-61-p1-66.
- (26) 市川陽一、赤井幸夫、佐田幸一、2000、ラグランジュ型粒子モデルによる排煙上昇過程を含む大気拡散の予測、土木学会論文集、643、 -14、61-70
- (27) 市川陽一、佐田幸一、1999、排ガス拡散数値モデルによる地形影響評価手法の開発、電力中央研究所報告研究報告T98010
- (28) 科学技術庁原子力安全局原子力安全調査室、1998、発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針、原子力安全委員会安全審査指針集（改訂9版）、343-373、大成出版社
- (29) U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1977, Regulatory Guide 1.111.
- (30) Ichikawa, Y., Kobayashi, A. and Kitada, Y., 1981, Real-time simulation of gamma exposure rate by puff model, Nuclear Technology, 53, 69-77.
- (31) 市川陽一、四方浩、石田健二、大場健護、1981、原子力発電所からの放射性雲による 線照射線量率の短時間変動特性の評価方法、日本原子力学会誌、23、60-67
- (32) 柿島伸次、大場良二、1997、静穏時の排ガス拡散・線量評価モデル、日本原子力学会誌、39、657-668
- (33) 柿島伸次、通地克三、中井真行、千秋鋭夫、大場良二、西島茂行、1985、発電用原子炉施設の安全解析のための風洞実験手法の研究、電力中央研究所報告総合報告219
- (34) Policastro, A. J., et al., 1984, User's manual: Cooling-tower-plume prediction code, Electric Power Research Institute,

CS-3403-CCM.

- (35) Policastro, A. J. and Wastag, M., 1981, Studies on mathematical models for characterizing plume and drift behavior from cooling towers, Volume 1 : Review of European research, Electric Power Research Institute 1683, Vol. 1.
- (36) 柿島伸次、1979、地熱発電所冷却塔のブルームの拡散に関する風洞実験、地熱エネルギー、12、120-127
- (37) 資源エネルギー庁、大気環境影響調査暫定指針（案）

第3章

- (1) 環境庁編集、1999、平成11年版環境白書各論、大蔵省印刷局
- (2) Snyder, W. H., 1994, Some observations of the influence of stratification on diffusion in building wakes. Stably stratified flows: Flow and dispersion over topography (eds. by Castro, I. P. and Rockliff, N. J.), Clarendon Press, Oxford, England, 301-324.
- (3) Zhang, Y. Q., Arya, S. P. and Snyder, W. H., 1996, A comparison of numerical and physical modeling of stable atmospheric flow and dispersion around a cubical building, Atmospheric Environment, 30, 1327-1345.
- (4) 大岡龍三、村上周三、持田灯、1998、 $u_i' u_j'$ 輸送方程式中の圧力歪相関項、wall-reflection項、乱流拡散項に関する各種モデルの評価、日本建築学会計画系論文集、504、55-61
- (5) 富永禎秀、村上周三、持田灯、1997、複合グリッドを用いたDynamic Mixed SGSモデルによる建物周辺のガス拡散のLES、日本建築学会計画系論文集、496、53-58
- (6) 神崎隆男、市川陽一、1997、都市域における建築物周囲の大気拡散予測、電力中央研究所報告研究報告T96045
- (7) Davidson, M. J., Mylne, K. R., Jones, C. D., Phillips, J. C., Perkins, R. J., Fung, J. C. H. and Hunt, J. C. R., 1995, Plume dispersion through large groups of obstacles - A field investigation, Atmospheric Environment, 29, 3245-3256.
- (8) Wilson, D. J. and Lamb, B. K., 1994, Dispersion of exhaust gases from roof-level stacks and vents on a laboratory building, Atmospheric Environment, 28, 3099-3111.
- (9) MacDonald, R. W., Griffiths, R. F. and Hall, D. J., 1998, A comparison of results from scaled field and wind tunnel modeling of dispersion in arrays of obstacles, Atmospheric Environment, 32, 3845-3862.
- (10) 老川進、孟岩、1997、建物群内における流れと拡散に関する実験的研究 その2、拡散場の測定、大気環境学会誌、32、148-156
- (11) 上原清、村上周三、老川進、若松伸司、1997、温度成層流中のストリ - トキヤニオン内の濃度分布に関する風洞実験 市街地における汚染物質の拡散に関する実験的研究その3、日本建築学会計画系論文集、499、9-16

- (12) 神崎隆男、市川陽一、1998、都市ストリ - トキヤニオンの大気拡散に及ぼす建築物壁面加熱の影響、電力中央研究所報告研究報告T98003
- (13) Hunter, L. J., Johnson, G. T. and Watson, I. D., 1992, An investigation of three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon, Atmospheric Environment, 26B, 425-432.
- (14) Sini, J. F., Anquetin, G. and Mestayer, P. G., 1996, Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons, Atmospheric Environment, 30, 2659-2677.
- (15) Lee, I. Y. and Park, H. M., 1994, Parameterization of the pollutant transport and dispersion in urban street canyons, Atmospheric Environment, 28, 2343-2349.
- (16) Launder, B. E., Reece, G. J. and Rodi, W., 1975, Progress in the development of Reynolds-stress closure, Journal of Fluid Mechanics, 68, 537-566.

第4章

- (1) 資源エネルギー庁、1999、発電所に係る環境影響評価の手引、電力新報社
- (2) Moses, H. and Daubek, H.G., 1961, Errors in wind measurements associated with tower-mounted anemometers, Bulletin of the American Meteorological Society, 42, 190-194.
- (3) Gill, C. G. and Olsson, L. E., 1967, Accuracy wind measurements on tower or stacks, Bulletin of the American Meteorological Society, 48, 665-674.
- (4) 千秋鋭夫、西宮昌、赤井幸夫、1971、煙突を利用して設置した風速計による風速測定誤差の解析、電力中央研究所報告研究報告71055
- (5) 西宮昌、赤井幸夫、小林博和、1976、煙突利用による風向風速の測定誤差（その1） - 風洞実験による検討 -、電力中央研究所報告研究報告275049
- (6) 西宮昌、赤井幸夫、小林博和、1978、煙突利用による風向風速の測定誤差（その2） - 実測とポテンシャル流による検討 -、電力中央研究所報告研究報告277037
- (7) 赤井幸夫、柿島伸次、市川陽一、1996、集合煙突を利用した風向風速の測定に関する風洞実験、電力中央研究所報告研究報告T95016
- (8) 日本機械学会編、1987、機械工学便覧、基礎編、応用編
- (9) 財団法人日本建築総合試験所、1988、建築物風洞実験の手続き - 風洞実験委員会報告書 -
- (10) 科学技術庁原子力安全局原子力安全調査室、1998、発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針、原子力安全委員会安全審査指針集（改訂9版）、343-373、大成出版社
- (11) McAllister, L. G., 1968, Acoustic sounding of the lower troposphere, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 30, 1439-1440.
- (12) McAllister, L. G., Pollard, J. R., Mahoney, A. R. and Shaw,

- P. J. R., 1969, Acoustic sounding - A new approach to the study of atmospheric structure, Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers, 57, 579-587.
- (13) Little, C. G., 1969, Acoustic methods for the remote probing of the lower atmosphere, Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers, 57, 571-578.
- (14) Kallistratova, M. A., 1961, Experimental investigation of sound wave scattering in the atmosphere, Trudy Institution of Fizika Atmosfernaya Turbulentnost, 4, 203-256.
- (15) 福島圓、1973、ソーダによる対流圏観測、気象研究ノート、116、135-146
- (16) Singal, S. P., Aggarwal, S. K., Pahwa, D. R. and Gera, B. S., 1985, Stability studies with help of acoustic, Atmospheric Environment, 19, 221-228.
- (17) Gera B. S. and Singal, S. P., 1990, Sodar in air pollution meteorology, Atmospheric Environment, 24A, 2003-2009.
- (18) 赤井幸夫、1976、音波レーダによる下層大気の観測、電力中央研究所報告研究報告276011
- (19) 赤井幸夫、1980、音波レーダによる下層大気の観測、電力中央研究所報告研究報告279072
- (20) 赤井幸夫、鈴木正勝、1982、音波レーダによる火力発電所排煙の遠隔観測、電力中央研究所報告研究報告281029
- (21) Beran, D. W., Little, C. G. and Willmarth, B. C., 1971, Acoustic Doppler measurements of vertical velocities in the atmosphere, Nature, 230, 160-162.
- (22) Beran, D. W., Willmarth, B. C., Carsey, F. C. and Hall, Jr. F. F., 1974, An acoustic Doppler wind measuring system, Journal of the Acoustical Society of America, 55, 334-338.
- (23) Kaimal, J.C. and Gaynor, J. E., 1983, The Boulder atmospheric observatory, Journal of Applied Meteorology, 22, 863-880.
- (24) Kaimal, J. C., Baynton, H. W. and Gaynor, J. E., 1980, The Boulder low-level intercomparison experiment, BAO Report 3, 102.
- (25) Kaimal, J. C., Gaynor, J. E., Finkelstein, P. L., Graves, M. E. and Lockhart, T. J., 1984, An evaluation of wind measurements by four Doppler Sodar, NOAA Report PB85-115301.
- (26) Gaynor, J. E., 1989. (私信)
- (27) Thomas, P. and Vogt, S., 1990, Measurement of wind data by Doppler sodar and tower instruments: An intercomparison. Meteorologische Rundschau, 42, 161-165.
- (28) Santovasi, J. A., 1986, Meteorological monitoring using Sodar for electric utility air quality applications, Journal of the Air Pollution Control Association, 36, 1130-1137.
- (29) Crescenti, G. H., 1997, A look back on two decades of Doppler Sodar comparison studies, Bulletin of the American Meteorological Society, 78, 651-673.
- (30) Brown, E. H. and Hall, Jr. F. F., 1978, Advances in atmospheric acoustics, Review of Geophysics and Space Physics, 16, 47-110.
- (31) Thuillier, R. H., 1987, Real-time analysis of local wind patterns for application to nuclear-emergency response, Bulletin of the American Meteorological Society, 68, 1111-1115.
- (32) Gland, H., 1982, Acoustic sounder data as meteorological input in dispersion estimates, 13th International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and Its Application, France.
- (33) 朝倉一雄、赤井幸夫、小林博和、1985、逆転層存在時の排煙拡散手法の検討、電力中央研究所報告研究報告284074
- (34) 小林博和、赤井幸夫、西宮昌、1985、ドップラー音波レーダによる下層大気の観測、電力中央研究所報告研究報告284070
- (35) 赤井幸夫、小林博和、加藤央之、西宮昌、1984、ドップラー音波レーダによる下層大気の観測、電力中央研究所報告研究報告283049
- (36) 赤井幸夫、朝倉一雄、小林博和、西宮昌、1986、音波による下層大気の観測手法、電力中央研究所報告総合報告225
- (37) 吉川友章、1984、ドップラーソーダによる気流と乱流パラメータの3次元測定、気象研究所技術報告11、159-171
- (38) Ito, Y., Murabayashi, S. and Mituta, Y., 1985, Development of a Sodar for the study of planetary boundary layer, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute Kyoto University, 35, 1-20.
- (39) 伊藤芳樹、渡辺好弘、水越利之、花房龍男、吉川友章、内藤恵吉、小平信彦、1986、ドップラーソーダの開発と大気境界層観測への応用、天気、33、19-29
- (40) 赤井幸夫、朝倉一雄、1992、ドップラー音波レーダの上層風観測装置としての実用性評価、電力中央研究所報告研究報告T91048
- (41) 赤井幸夫、朝倉一雄、片寄直人、1993、ドップラーソーダの上層風観測装置としての実用性評価、天気、40、21-34
- (42) 赤井幸夫、1997、ミニソーダの上層風観測装置としての実用性評価、日本気象学会1997年秋期大会講演予稿集、C212
- (43) Gaynor, J. E. and Kristensen, L., 1986, Errors in second moments estimated from monostatic Doppler Sodar winds, Part 2: Application to field measurements, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 3, 529-534.
- (44) Marshall, J. M., Peterson, A. M. and Barnes, Jr. A. A., 1972, Combined radar acoustic sounding system, Applied Optics, 11, 108-112.

- (45) North, E. M. and Peterson, A. M., 1973, Rass, A remote sensing system for measuring low-level temperature profiles, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 54, 912-919.
- (46) Elisei, G., Maini, M., Marzorati, A., Morsell, M. G., Fiocco, G., Cantarano, S. and Mastrantonio, G., 1986, Implementation of a multiaxial Doppler Sodar system with advanced data processing, *Atmospheric Research*, 20, 109-118.
- (47) Bonino, G., Elisei, G., Marzorati, A. and Trivero, P., 1986, Results on planetary boundary layer sounding by automatic RASS, *Atmospheric Research*, 20, 309-316.
- (48) Elisei, G. and Marzorati, A., 1989, Measurement of wind and temperature vertical profiles in the lower atmosphere (ENELの資料)
- (49) 福島圓、秋田錦一郎、増田悦久、1979、ラス・レーダ (電波音波共用探査装置) の開発、電波研究所季報、26、555-567
- (50) 福島圓、1984、ラスレーダ開発の現状、日本リモートセンシング学会誌、4、341-366
- (51) 松浦延夫、増田悦久、1985、ラスレーダによる大気の遠隔測定、電子通信学会誌、68、529-534
- (52) 赤井幸夫、西宮昌、1987、リモートセンシングによる気温鉛直分布の観測手法、電力中央研究所報告研究報告 T86092
- (53) Johnson, G. T., Oke, T. R., Lyons, T. J., Steyn, D. G., Watson, I. D. and Voogt, J. A., 1991, Simulation of surface urban heat islands under " ideal " conditions at night Part 1: Theory and tests against field data, *Boundary Layer Meteorology*, 56, 275-294.
- (54) 赤井幸夫、朝倉一雄、1994、移動型ラスレーダの開発、電力中央研究所報告研究報告 T93097
- (55) Trivero, P., Marzorati, A., Marcacci, P., Bonino, G. and Rossello, R., 1998, Improvements of a decimetric RASS, *Proceedings of 9th International Symposium of Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and the Oceans*, Institute for Meteorology and Physics, BOKU, Vienna, Austria, 196-199.
- (56) 内藤喜之、1987、電波吸収体、オーム社
- (57) Akai, Y. and Kanzaki, T., 1998, The application of a mobile RASS to observation of an urban heat island, *Proceedings of 9th International Symposium of Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and the Oceans*, Institute for Meteorology and Physics, BOKU, Vienna, Austria, 200-203.
- (58) 日野幹雄、1977、スペクトル解析、朝倉書店
- (59) 大崎順彦、1994、新・地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版会
- (60) Akai, Y. and Kanzaki, T., 1999, Development and initial results of a mobile RASS, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 71, 81-89.
- (61) 稲葉文男、1973、レーザーとそのレーダーへの応用、気象研究ノート、116、1-19
- (62) 笹野泰弘、1999、ミーライダー、気象研究ノート、194、123-130

第5章

- (1) Fackrell, J. E. and Robins, A. G., 1982, Concentration fluctuations and fluxes in plumes from point sources in a turbulent boundary layer, *Journal of Fluid Mechanics*, 117, 1-26.
- (2) 佐田幸一、佐藤歩、1999、大気境界層中のトレーサ濃度変動を対象とした風洞実験 (上空放出時ブルーム濃度変動の相似性) 日本機械学会論文集 (B編) 65、2734-2742
- (3) 佐田幸一、佐藤歩、1999、乱流境界層中のトレーサガス濃度変動の風洞実験 - 低濃度領域にしきい値を設定した場合の濃度変動量の特性 - 、大気環境学会誌、34、337-351
- (4) Li, W. W. and Merony, R. N., 1983, Gas dispersion near a cubical model building. Part . Concentration fluctuation measurements, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 12, 35-47.
- (5) 持田灯他、1990、高応答性濃度計による建物周辺の濃度変動に関する風洞実験 (その 1) 日本建築学会関東支部研究報告書
- (6) 佐藤歩、佐田幸一、1999、排ガスの濃度変動を対象とした大気拡散予測手法の開発 (その 3) - 配管系で構成される建物を対象とした風洞実験 - 、電力中央研究所報告研究報告 T98025.
- (7) Crooks, G. and Ramsay, S., 1993, A wind tunnel study of mean and fluctuating concentrations in a plume dispersing over a two-dimensional hill, *Boundary-Layer Meteorology*, 66, 155-172.
- (8) 佐藤歩、佐田幸一、神崎隆男、1998、濃度変動を考慮した風洞実験手法の開発 - 不安定時の濃度変動特性 - 、電力中央研究所報告研究報告 T97041
- (9) 大宮司久明、三宅裕、吉沢微編、1998、乱流の数値流体力学 - モデルと計算法 - 、東京大学出版会
- (10) Henn, D. S. and Sykes, R. I., 1992, Large-eddy simulation of dispersion in the convective boundary layer, *Atmospheric Environment*, 26A, 3145-3159.
- (11) 佐田幸一、佐藤歩、1999、排ガスの濃度変動を対象とした大気拡散予測手法の開発 (その 2) - 平地上の排ガス拡散を対象とした濃度変動予測数値モデルの開発 - 、電力中央研究所報告研究報告 T98024
- (12) Thompson, J. F., Warsi, Z. U. A. and Mastin, C. W., 1985, *Numerical Grid Generation Foundations and Applications*, Elsevier Science Publishing Co., Inc. (小国力、河村哲也訳、1994、数値格子生成の基礎と応用、丸善)



表紙絵

当所では、火力・原子力発電所と地域との共生を目指して、発電所の景観や緑化などのデザインをシミュレーションするシステムを開発してきました。表紙のコンピュータグラフィックス(CG)は、この景観シミュレーションシステムを用いて、将来の地域共生型発電所のデザイン案を作成したものです。

なお、このシステムは電力中央研究所のホームページでも簡単に操作できるように公開しています。興味のある方は、次のアドレスへ是非アクセスしてみてください。

<http://criepi.denken.or.jp/CRIEPI/serc/socio.htm>

(電力中央研究所 経済社会研究所
上席研究員 山本公夫)

編集後記

電中研レビュー第38号「大気拡散予測手法」をお届けいたします。

電力中央研究所が本格的に大気拡散や気象の研究に取り組み始めて、すでに35年の年月が経ちました。この間、大気環境問題は、煙突からのばいじん、SO_x、NO_xといった地域の環境問題から、地球温暖化などの地球規模での環境問題へと移ってきました。

当所が進めてきた火力発電所や原子力発電所を対象としたリモートセンシングによる気象解析法の研究成果、ならびに風洞実験や数値解析による排ガス拡散評価法の研究成果は、発電所の立地における環境影響評価の元となるとともに、個々の立地地点に対しては、現地観測や

拡散実験などで協力してまいりました。

昨年、環境影響評価法が施行され、資源エネルギー庁からは「発電所に係る環境影響評価の手引」が発刊され、この取りまとめの中で、当所の成果も反映させていただいております。これを契機に、当所の長年の成果を取りまとめました。

本レビューが、大気拡散予測についての、過去から現在までの理解の一助になりますことを、願ってやみません。

最後になりましたが、巻頭言をご執筆いただきました工学院大学 北林興二教授に、心より感謝させていただきます。



電中研レビュー NO.38

平成12年3月10日

編集兼発行・財団法人 電力中央研究所 広報部
100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 [大手町ビル7階]
(03) 3201-6601 (代表)
E-mail : www-pc-ml@criepi.denken.or.jp
<http://criepi.denken.or.jp/index-j.html>
印刷・株式会社 電友社

本部 / 経済社会研究所	100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1	(03) 3201-6601	我孫子研究所	270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646	(0471) 32-1181
狛江研究所 / 情報研究所 / 原子力情報センター			横須賀研究所	240-0196 神奈川県横須賀市長坂2-6-1	(0468) 36-2121
ヒューマンファクター研究センター / 事務センター			赤城試験センター	371-0241 群馬県勢多郡宮城村苗ヶ島2567	(027) 283-2721
	201-8511 東京都狛江市岩戸北2-11-1	(03) 3480-2111	塩原実験場	329-2801 栃木県那須郡塩原町関谷1033	(0287) 35-2048

