

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

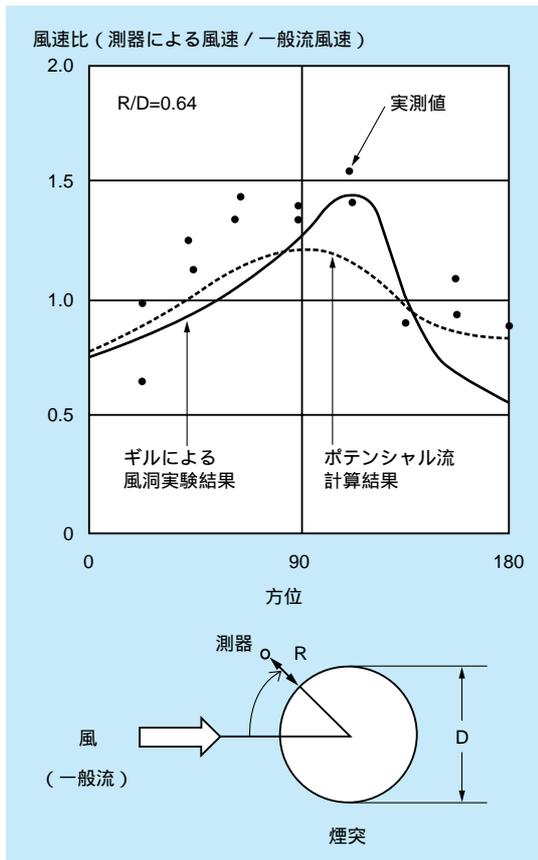


図4-1 煙突のまわりの風速比

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

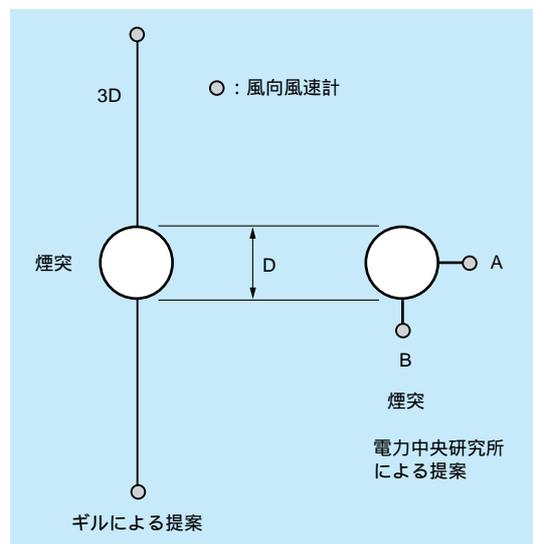


図4-2 ギルおよび電力中央研究所の提案



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

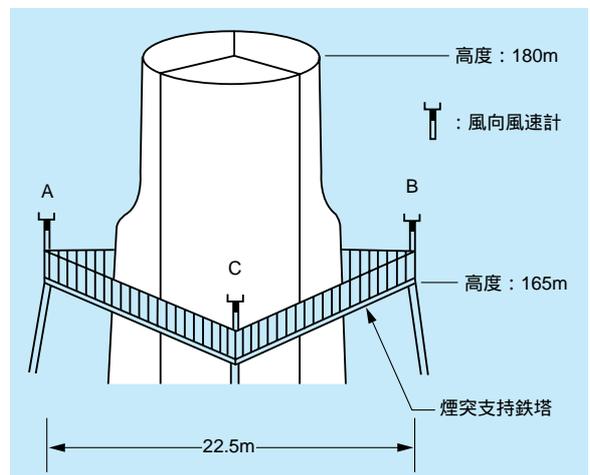


図4-4 3筒集合煙突への風速計取り付け場所

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

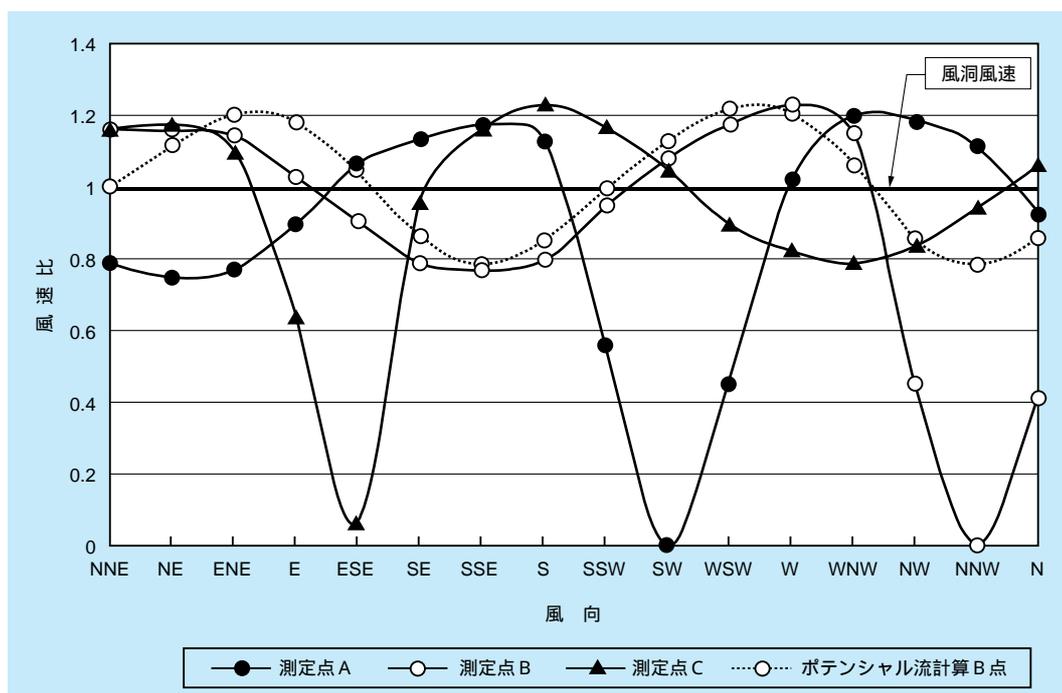


図4-5 3筒集合煙突のまわりに設置した風速計による風向別風速比

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。

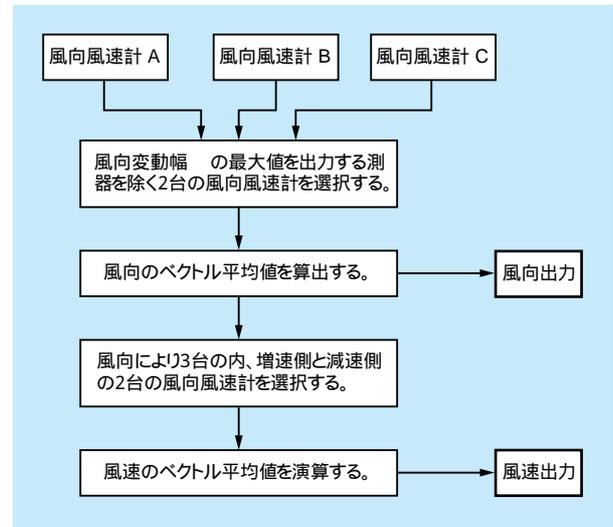


図4-6 煙突に取り付けた風向風速計による観測プロセスダイアグラム

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展し、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が特徴である。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

の連続観測結果と高さ200mの煙突を利用した気温差の観測結果を比較し、サーマルプルーム型のエコーはほとんどの場合、空気塊の動きが活発になる大気が不安定の時に出現し、層状型や接地型のエコーは空気塊の動きが抑えられる安定や逆転層の大気に対応して出現することを明らかにし、マック・アリスターの結果を追認した¹⁹⁾。興味深い結果として、火力発電所で観測した層状エコーが、排煙そのものによる音波の反射によって発生するエコーであることを明らかにした²⁰⁾。つまり、通常ほとんど目でみることができない煙の上昇高さを知りたい場合にソーダを活用できる。図4-7に

当研究所がソーダにより観測したエコーパタンと気温鉛直分布の関係を示す。ここで示されるように、逆転層(下図の囲い込み領域)と層状エコー(上図の白い帯状の領域)がよい対応で出現している。このようなエコーパタンによる逆転層の観測により、大気境界層の実態が容易に把握できるようになった。

4-2-3 ドップラーソーダの開発

ドップラーソーダの誕生

ドップラーソーダは、ソーダによる受信信号を周波

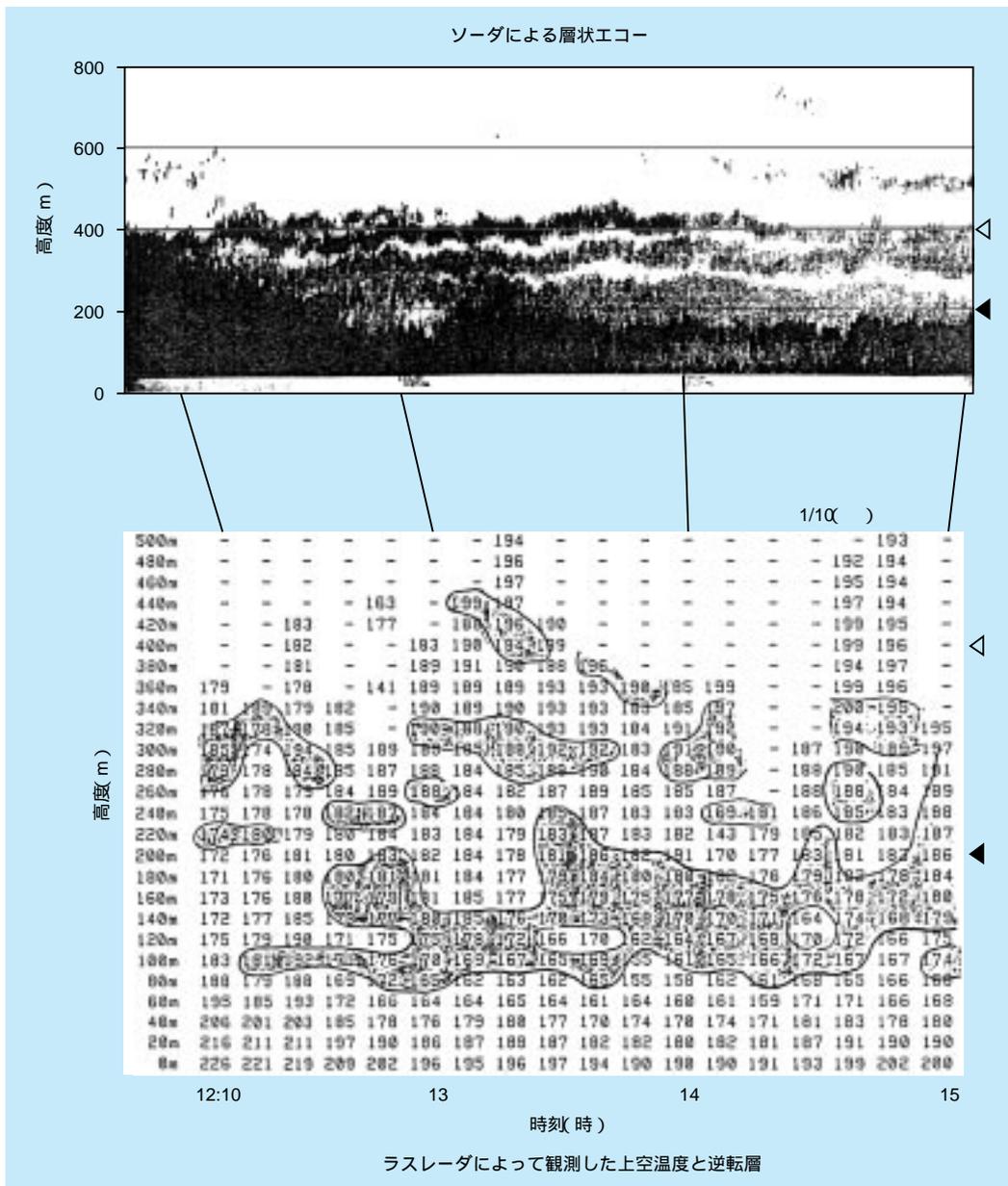


図4-7 ソーダによる層状エコーと気温逆転層の対応

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

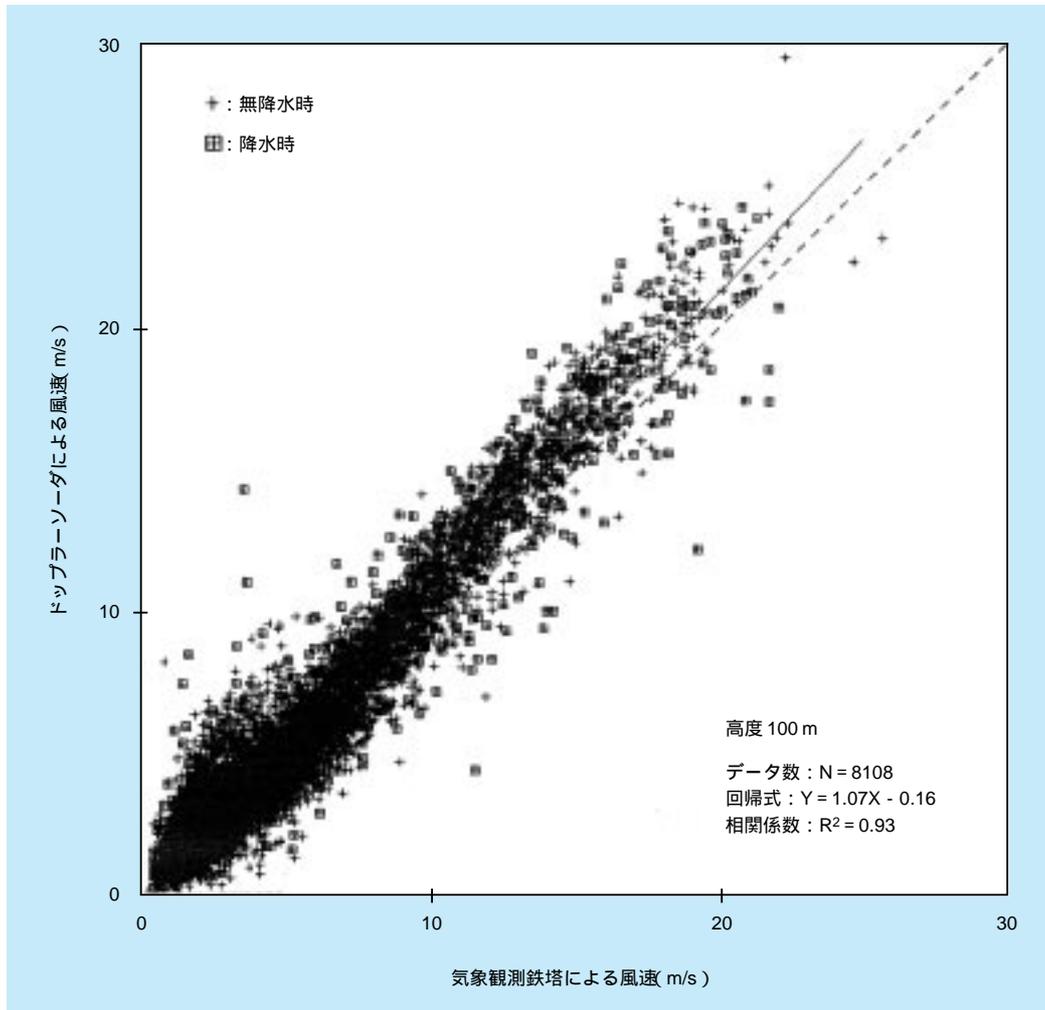


図4-9 ドップラーソーダと気象観測鉄塔による風速の比較(毎正時値、年間)

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 移動型ラズレーダの開発

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 ラズレーダの開発経緯

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、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

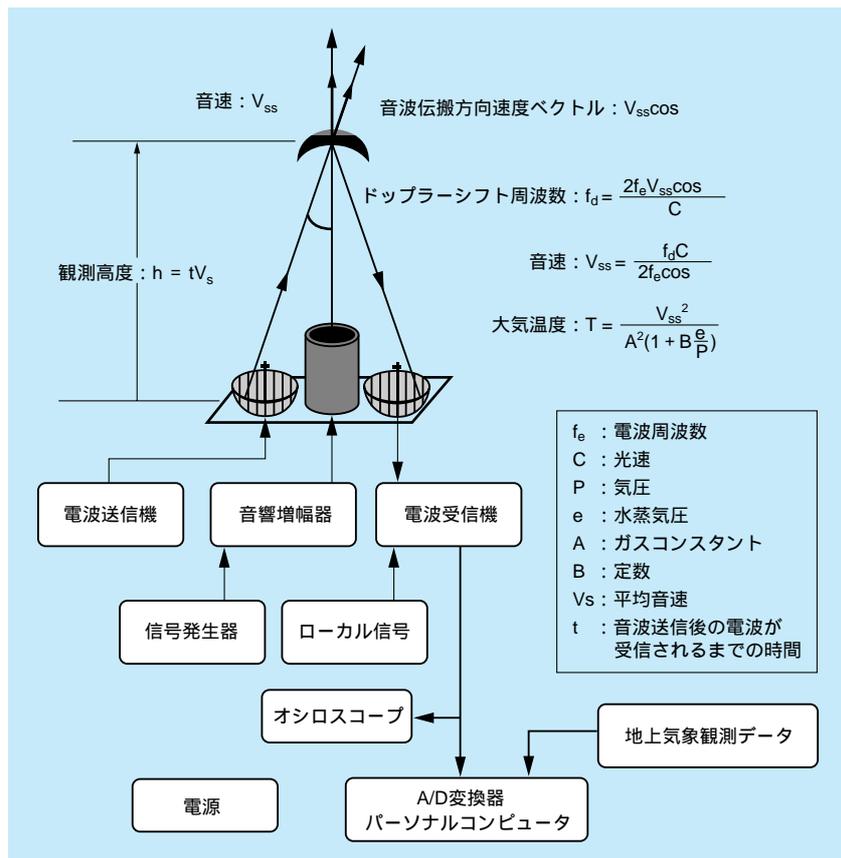


図4-12 移動型ラズレーダのブロックダイアグラム

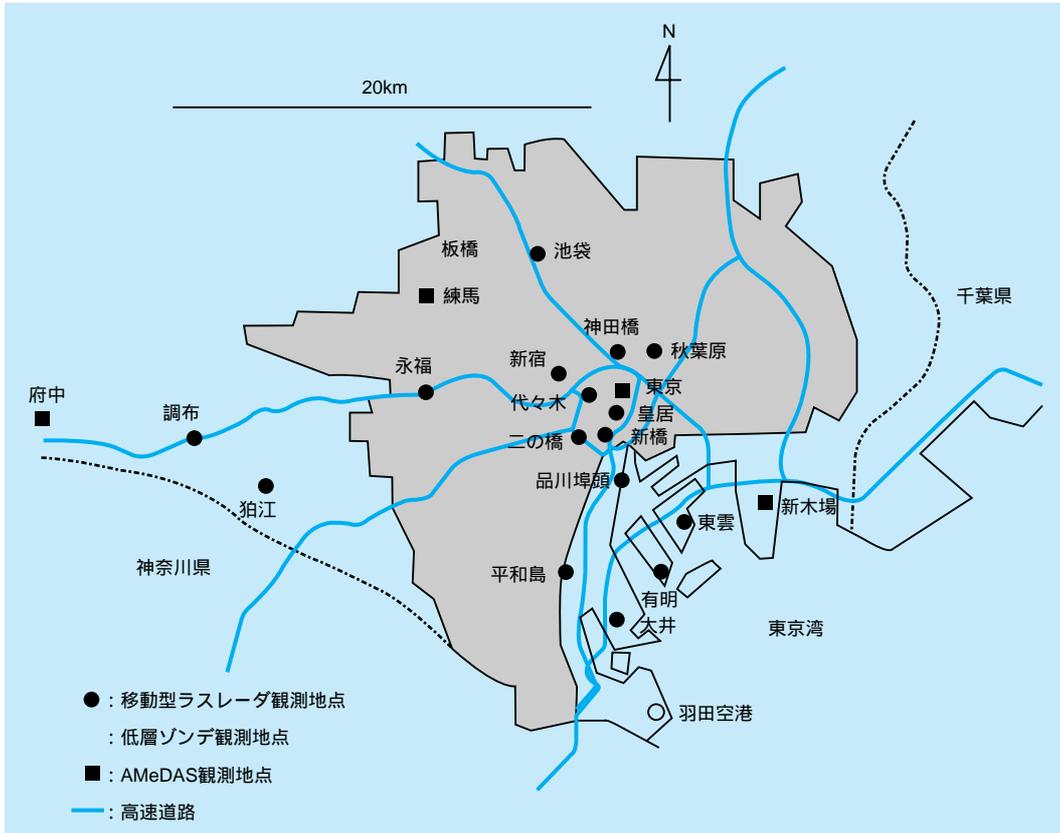


図4-13 移動型ラズレーダ、低層ゾンデなどの観測場所

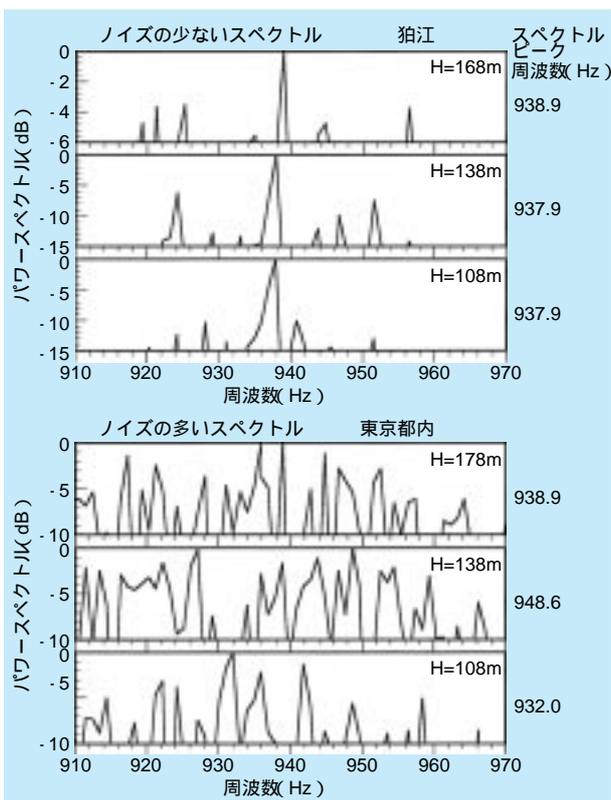


図4-14 ノイズによるスペクトル形状の違い

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

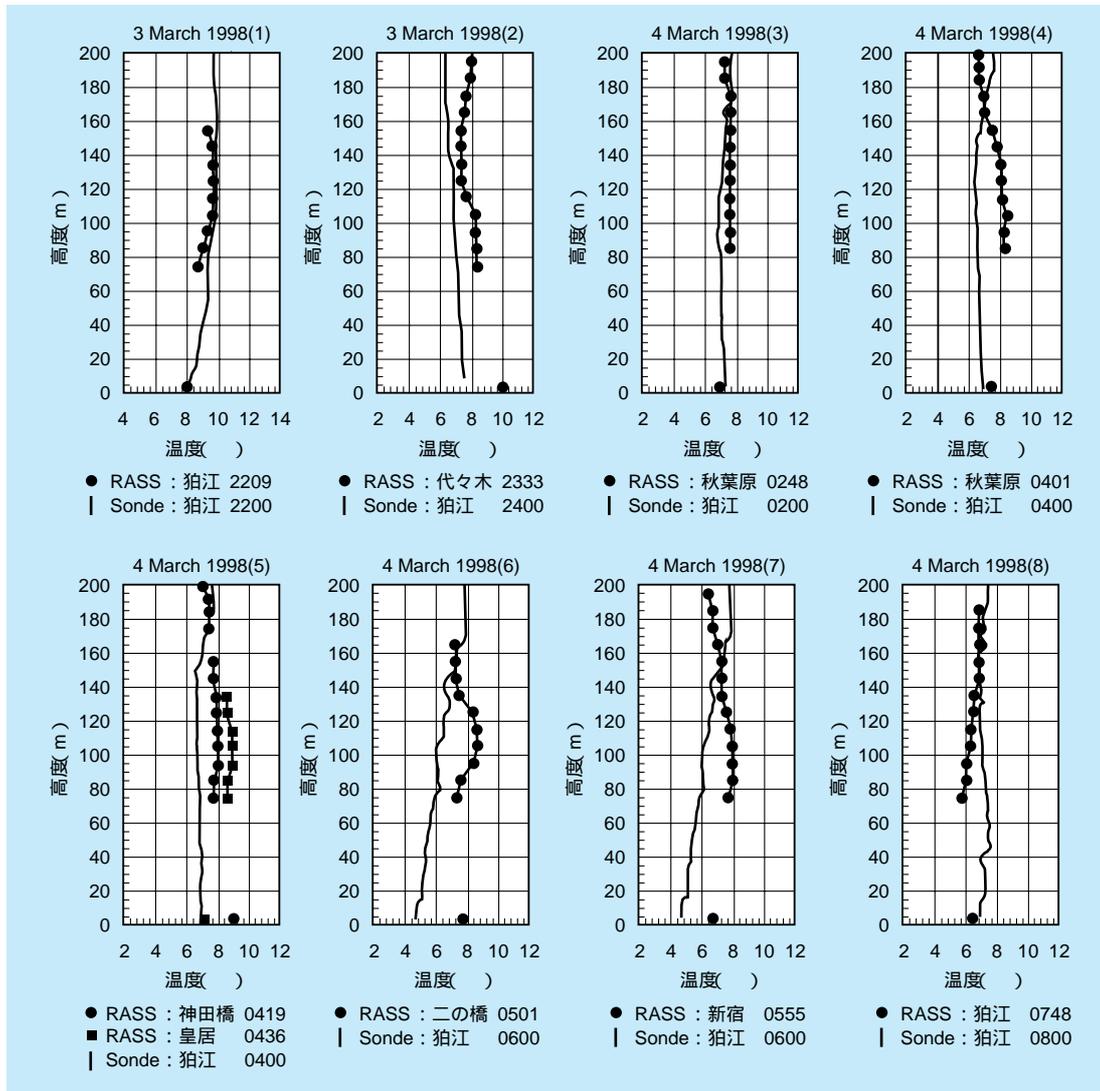


図4-15 移動型ラスレーダによる都市域内の気温鉛直分布観測結果

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。

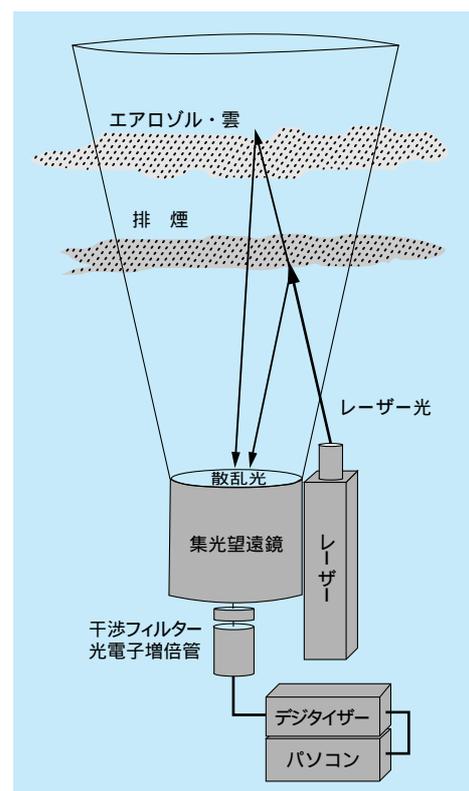


図4-16 ミーライダーの構成概念

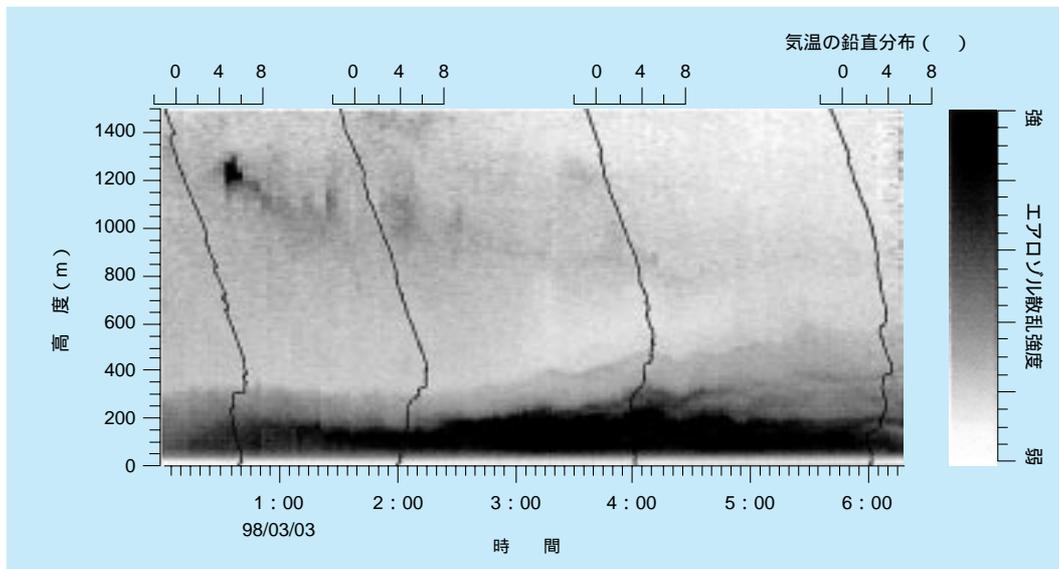


図4-17 ミーライダーによるエアロゾル観測の解析結果

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ズ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。

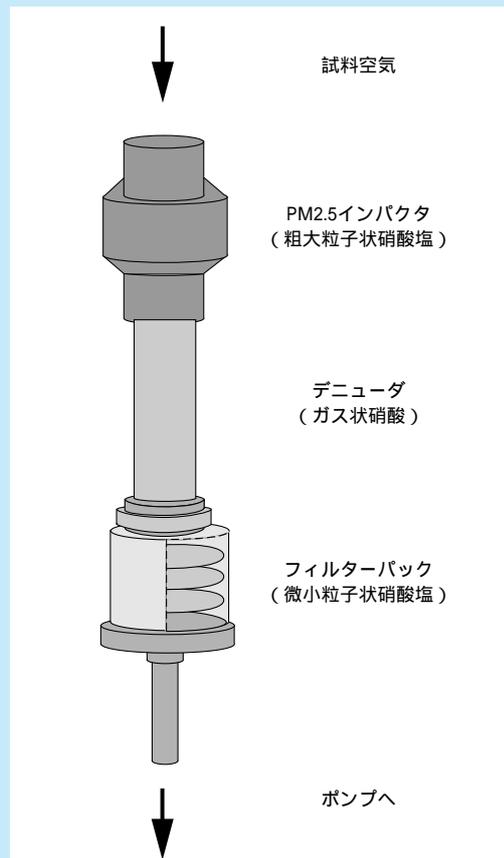


図1 デニューダ付きフィルターパックサンプラー

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。

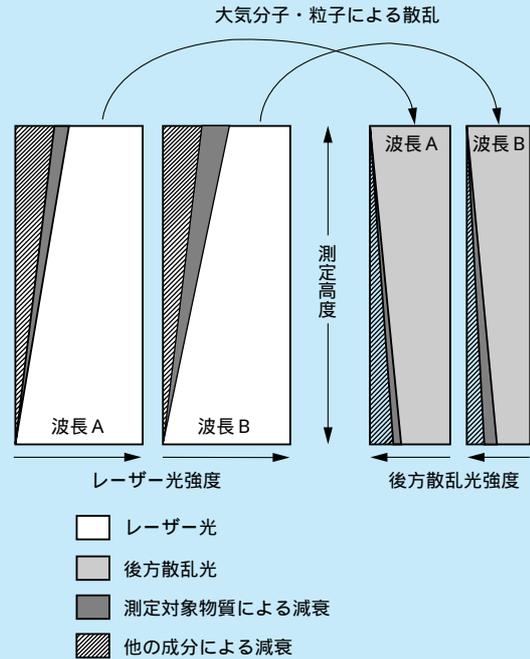


図1 差分吸収ライダー(DIAL)の測定原理

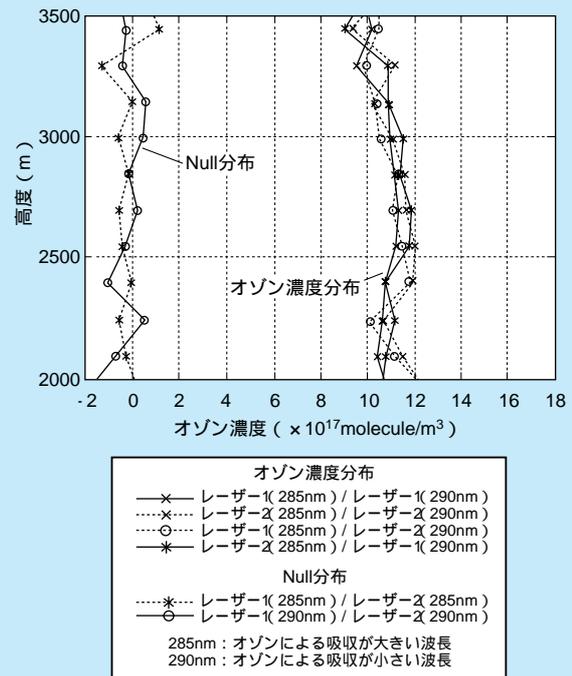


図2 大気中オゾン濃度の高度分布計測結果