

煙突の煙の上昇と拡散についての国際シンポジウム*

大田 正 次**

昨年10月3日から7日まで The International Clean Air Congress がロンドンで開かれたが、この機会を利用してイギリスの中央電力研究所 (Central Electricity Research Laboratories, CERL) は首題のシンポジウムを開き、同研究所の最近の研究成果を紹介した。シンポジウムは10月7日にロンドン郊外にある CERL の本部で行なわれ、英気象局の Pasquill 博士、インペリアルカレッジの Scorer 教授、ケンブリジ大学の W.R. Hawthorne 教授がそれぞれ座長をつとめた。出席者の顔ぶれを見ると、ロンドン郊外にある Warren Spring 国立研究所の C.F. Barrett 氏、ハウエルの原子力研究所の P.M. Bryant 嬢、ロンドン郊外の国立物理学研究所の P.G. O'Neill 氏、米気象局の L. Machta 博士、同じく米気象局の D.H. Pack 氏、CERL の D.J. Moore 博士、R.A. Scriven 氏、D.H. Lucas 氏らである。国別に見ると、英80、米10、仏9、オランダ7、伊3、西独3、チェコ・豪・南ア・スウェデン・日本各1名であった。

まず最初にパスキル博士の座長で、次の2つの講演があり、それらが終って討論があった。

“煙の上昇と拡散の測定のための測器”

K.W. James

CERL の実験場となっているテームス下流の Tilbury 発電所に備えつけた測器について説明した。概要は Air & Wat. Pollut. Int. J. 1966, pp. 1~13にある。なお筆者は後日現場を見たので、その模様もつけ加えて述べる。

Tilbury での実験の目的は、火力発電所の高さ 100m の煙突から出る SO_2 の地上分布を測定し、その分布型と気象要素との関係を求めることである。

気象観測

高さ 187m の鉄塔を用い、風向風速計、微風計、水平および垂直のガスト・メーター (タービレンス・メーター)、乾球湿球温度計の7種目をそれぞれ 38m, 114m, 187m の3点に、また乾球温度計をそれらのほぼ中間に

3点配置する。

風向風速計は普通の気象観測用のもの、微風計は風速 2 m/s 以下の微風用でカセラ製のもの (風杯型) を用いた。これは数字の出るカウンターに接続され、そのカウンターを 16mm のフィルムで駒どりする。ガストメーターは英気象局で開発された風向変動巾を測る方式のもの (Jones, 1963) を用い、スペクトルに分けて記録する。すなわち平均時間 0.83秒、サンプリング時間 5秒のもの、平均時間 5秒、サンプリング時間 30秒のもの平均時間 30秒、サンプリング時間 3分のもの、平均時間 3分サンプリング時間 1時間のをそれぞれ記録する。これに用いる矢羽根は合成樹脂製の軽いもので、およそ1ヶ月毎に新しいものととりかえる。

乾湿計には白金抵抗を用い、各所毎に小さいモーターファンをつけて風を当てる。湿球用の水は約7日間保つ。高さ 38m の温度を標準とし、これとれ差を求める。導線にはバランス導線を用いる。

これらの要素は全て地上にある小屋の中の記録計にまとめられ、1週間に1度の見まわりが行なわれる。

その他地上では降水量日射量を測る。これは SO_2 の雨による洗浄、 $\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_3$ の光合成を知るのに役立つためである。

サーチライトによる煙の上昇の測定

航空気象観測用のシーロメーターを改造して用いた。ピーク出力 2MW のアルゴン封入のバルス光 (くり返し) の速さ毎秒 20回、発光時間 $2\mu\text{sec}$ で角度約 7° ごとに鉛直面のスキャンを行う。同一方向に約15秒とどまっていた、その間に 150m 離れた受信側が同一鉛直面のスキャンを行なう。このようにして3分間に高度 8° から 85° の鉛直面のスキャンを終る。

このような光学装置を源から 400m, 1200m の2点に置いたが、ふだんは煙が薄いためにほとんど成果は得られなかった。人工的に煙を濃くした場合にいくつかのデータが得られた。

ライダー (Lidar) による煙の上昇の測定

ルビーレーザーを用いたライダーが商品として得られたので、これを用いた。これはピーク出力 200MW で、30秒毎に1回発射できる。A-スコープの前に置いたボラ

* Symposium on Chimney Plume Rise and Dispersion

** S. Ohta, 気象研究所
—1967年4月27日受理—

ロイドカメラで撮る。これを源から 1200m の所に置いて色々の天気状態の時に測定した。この方法は煙の断面の型を得るのに非常に有効であった。

SO₂ の地上濃度の測定

SO₂ 測定点は源から主風向の風下に扇状60度に展開されている。点数は約20、最遠点は 16km である。この測器は Cummings and Redfearn (1957) の電気伝導度測定型のものを多少改造したものである。たとえば液体試薬を重力の代りにポンプを使って注入したり、空気を振動板式のポンプで吸入したりした。電源には一般の電燈線 (230V) を引いた。現場でのチェックのために携帯用検定器を開発した。週に 2 回の見廻りを行なう。

この測器では 3 分毎の平均値が得られる。測定結果によれば、3 分間の平均値は時間の変動が大きく、1 時間の平均をとればスムーズされるという。

“地上 200m までの大気中の気象観測”

D.J. Moore

Tilbury 付近の 187m の鉄塔で測った気象要素について 1963 年 8 月から 1964 年 1 月までの結果を取りまとめた。煙突の高さが 100m であるから、測定点 114m を境とし、114m と 187m、114m と 9m の温度差をとって安定度を求める。ポテンシャル温度で等温または逆転の場合を安定とした。また風速については <5、5~10、および >10m/sec の 3 段階に分けて取扱った。ガストメーターで得られた矢羽根の振れ巾をラジアンで表わし、以上に述べた分類に分けてその平均をとる。次表は風速別安定度の出現回数である。

1963.8.10~1964.1.3日の毎時の安定度出現回数

安定度		114m の風速 (m/sec)		
114m より下層	114m より上層	<5	5~10	>10
中立	中立	171	325	232
中立	安定	91	117	27
安定	安定	40	32	8
安定	中立	13	7	—

垂直方向と水平方向の振れ巾を比べてみると、高さを増すほど乱れは等方性に近づく。また安定層の中では乱れは少ない。

乱れの測定値から Pasquill の方法 (1962) を用いて計算した煙の水平方向の広がり、実際の SO₂ の測定によって得た広がり (1 時間平均値) を比べると、比較的良好一致した。

次いで Scorer 教授が座長となり、以下の 2 つの講演

があった。

“2 発電所における煙の高さの測定”

P.M. Hamilton

Tilbury とその近くの煙突 (それぞれ 100m, 150m の高さ) から出る煙の上昇をそれぞれサーチライトおよびライダーで測った。

Tilbury の 100m 煙突については、400m 離れた所でサーチライトで断面を測る。たゞし煙の中にオイル霧を加えて人工的に煙を濃くした。別の煙突 (150m) については、1800m 離れた所で、ライダーで断面を測る。

両者ともスキャンに 3 分かゝる。煙の高さは、3 分間に測った煙の上限と下限の平均から求めた。源からの距離が 400m では、まだ煙は多少上昇しつゝあり、0.62 Z_{max} と見なされる。1800m まで離れると上昇は完全に終わったと見てよい。

煙の上昇は Lucas, Moore, and Spurr (1963) の与えた次の関係式でよく近似された。

$$Z_{max} = \frac{\alpha Q^{\frac{1}{4}}}{U}$$

Z_{max} = 煙の上昇 (m), U = 風速 (m/s),

Q = 熱放出率 (MW), α = パラメーター (安定度、場所などの関数)

今回の測定では Q = 40MW として、α = 400m² sec⁻¹ MW^{-1/4} となった。ただし点はかなりばらつく。

今までに行なわれた 8 例の異なる工場の煙突についてみると、α は 300~580 の間を変動した。α = 300 の場合と α = 580 の場合について当ててみると、煙突の直径がそれぞれ 3.5m, 7m であり、これが煙の上昇に影響を及ぼすと思われる (Scriven(1966), Moore(1966))。

今回の実験では α = 400 となったが、これは他の例に比べると小さ目である。この原因として考えられることは、今回の工場の風上に高さ 30m 程度の地物があり、この影響で煙突口付近に下降気流を起こすことが考えられる。この沈降を考えに入れて、

$$Z_{max} = \frac{500(40)^{\frac{1}{4}}}{U} - 30$$

として沈降分 30(m) を補正すると、α = 500 として実測値をよく説明できる。沈降の問題は今後の研究を待つ。

“SO₂ 濃度分布の測定”

D.J. Moore

SO₂ のデータは 3 分毎の値、1 時間平均、1 時間内の最大値 (3 分値) の等に分けて整理し、風速は 114m の高さのものを <4m/s, 4~10m/s, >10m/s に分け、安

定度については 114m~187m, 0~114m についてポテンシャル温度を 100mにつき, -0.8~-0.4, -0.4~0, 0~+0.4, +0.4~+0.8°C……等に分けて整理する。

まず安定度と SO₂ の 1 時間内最大値 (SO₂ 排出量で割ってノーマライズする) との関係を見ると, (i) 煙突口より下が安定 ($\partial\theta/\partial Z > 0.4^\circ\text{C}/100\text{m}$) の場合には SO₂ はほとんど地上に現われない。(ii) 煙突より上が非常に安定 ($\partial\theta/\partial Z > 2.0^\circ\text{C}/100\text{m}$) の場合は前と同じ。(iii) 煙突より上が安定 ($\partial\theta/\partial Z > 0.4^\circ\text{C}/100\text{m}$) のときに概して大きい濃度が現われる。(iv) 煙突より下が安定度が小さくなる濃度が大きくなる傾向があるが, これははっきりしない。

これらの結果から気象型を分類すると次表になる。

気象型別出現頻度

風速	安定度	出現頻度	記号
全風速	煙突より下安定又は非常に安定,又は煙突より上非常に安定	20%	Z
強	煙突より上安定	12%	A
強	煙突より上中立	12%	B
並	煙突より上安定	25%	C
並	煙突より上中立	12%	D
弱	煙突より上安定	12%	E
弱	煙突より上中立	8%	F

ただし安定: $2.0 > \partial\theta/\partial Z > 0.4^\circ\text{C}/100\text{m}$, 非常に安定: $\partial\theta/\partial Z > 2.0^\circ\text{C}$, 中立: $\partial\theta/\partial Z < 0.4^\circ\text{C}$, 煙突の高さ 100m とする。

次に色々の気象型および SO₂ 排出量について, SO₂ の 1 時間平均値を用いて, 平均分布および地上濃度分布を求めた。それによると, 強風と並風のときは最大濃度は約 2 km の所に現われ, 弱風のときは 10~12km の風下に現われる。

1 時間平均値の最高値が 30p.p.h.m. をこえた場合が 5 例あったが, このときの気象型は何れも A (前表) であった, また 20~29p.p.h.m. であった例が 11 回あり, そのうち 4 回は A, 1 回はそれぞれ B と E で他は低負荷の場合であった。低負荷の場合には down-wash が起こるとみなされる。

午後にはケンブリジの W.R. Hawthorne 教授が座長となり, 次の 2 講演があった。

“高い源のときの最大地上濃度の特徴”

R.A. Scriven

高い源の場合問題となるのは最大地上濃度の値とその位置である。前述の Moore らの研究によると, 実測値

は理論値のまわりに大きく分散する。この分散は気象現象の変動に起因すると思われるが, しかし 50% 以上も食違いとその原因をつきとめる必要がある。

煙突の上方で安定, 下方で十分な混合が行なわれるような大気状態のときが計算と実測の食違いの大きい場合の例である。このような場合には理論計算では従来の簡単な 1 層モデルは不適當で, 2 層モデル (第 1 図) とすることが望ましい。

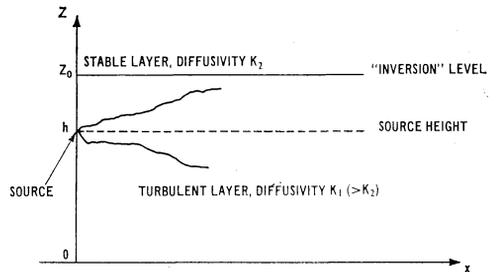


FIG. 1 DIAGRAM ILLUSTRATING SIMPLE TWO-LAYER MODEL OF THE ATMOSPHERE

第 1 図 2 層モデル

2 層モデルの場合の濃度分布は,

$$\bar{c}(x,y) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \mu^{|n|} \exp \left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(2nz_0 - h)^2}{2\sigma_z^2} \right]$$

で与えられる。ただし,

$$\mu = \left[1 - \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \right] / \left[1 + \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \right]$$

K_2 は上層の, K_1 は下層の鉛直方向拡散係数, σ_y, σ_z は下層における煙の拡がりの標準偏差値 (地面および上層の影響のないとき), z_0 は上層の底面の高さ, h は源の高さである。

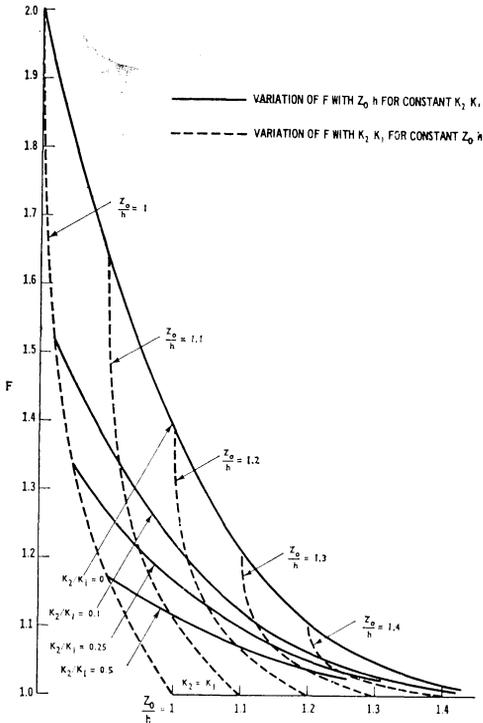
この式で $n=0$ とすれば 1 層モデルとなる。2 層モデルでは $n=1$ とすれば充分である。

1 層の場合と 2 層の場合の地上最大濃度比を F とおくと,

$$F \equiv \frac{\bar{c}_{max}(z_0)}{\bar{c}_{max}} \approx 1 + \mu \exp \left[-\frac{4z_0(z_0 - h)}{h^2} \right]$$

となる。

F の性質を上下両層の拡散係数の比 (K_2/K_1) および上層の高さと源の高さの比 (z_0/h) の関数として調べてみると, $K_2/K_1=0, z_0/h=1$ のときが F は最大で $F=2$ となる。これは源のすぐ上にふたがある場合である。また $z_0/h=1.4$ では K_2/K_1 の値の如何に拘らず F はほぼ 1.1 以下となる。これは上層が源の 1.4 倍以上の高さであれば, 地上濃度には 10% 以下しか利かないことを示す (第 2 図)。



第2図 F と z_0/h , $K_2/K_1 (K_1 > K_2)$ との関係
 “上昇率に関する研究結果の適用”

D.H. Lucas

完全なものではないが今までの Tilbury 実験場での研究結果から暫定的に結論を導いた。

気象観測における気温の垂直分布の測定とヴェーンによる乱れの測定はほぼ満足な結果を得た。SO₂ の記録装置は検定の際に10%の誤差を示したものも一部にあつたが、概してそれ以下の誤差で一致した。シーロメーター方式による煙の空間分布の測定の精度は必ずしも充分ではなかつたが、ライダーによる測定は成功であつた。

今までの成果を実用的な立場から次のようにまとめた。

(1) 煙の上昇は水平距離 1000m またはそれ以上に

つづくことがある。

(2) 並風または強風では煙の上昇は気温減率にはほとんど影響されない。

(3) 弱い風では煙の上昇は逆転のとき減少する。

(4) 中立状態では煙の上昇は、

$$Z_{max} = \frac{\alpha Q^{1/3}}{u} \tag{1}$$

で与えられる。 Z_{max} は煙の上昇、 Q は煙突からの熱の放出量、 u は風速、 α は煙突および場所によって決まる定数。この関係式は我々の4つの発電所に当はまる。他の研究者の結果も上式に当はまると思われる。

(5) 乱れは高さとともに弱くなる。したがってより高い所へ出された煙はより大きい上昇率をもつことはほぼ間違いない。

(6) 前掲の Hamilton の論文中的数据からは(5)項に述べた傾向ははつきりしない。しかし他の例をも考え合わせると、

$$\alpha = 400 + \frac{2}{3} H_c$$

が得られた。 H_c は煙突の高さ (m)。

これは $50m < H_c < 150m$ に当はまると思われる。

(7) そのほか α は煙突の直径、排出速度の関数であると思われるが、実験式はない。

(8) 最大濃度の式

$$C_{max} = \frac{2Q}{e\pi H^2 u} \tag{2}$$

はよく当はまる。 H は煙突の有効の高さである。なお逆転層があるときはそれが源の上にあるか下にあるかなどを考えに入れねばならない。

(9) 前記の(1)および(2)式は3分間平均の値について当はまる。ただし最大濃度の位置はかなり変動する。1時間平均の最大濃度は3分間平均の最大濃度の1/2~1/3で、その位置は割合に一定する。24時間平均の最大濃度は3分間のその約1/12である。1年間平均の最大濃度は3分間のその約1/100である。