

地面附近の煙拡散の実験の一例について

岡 本 雅 典*

1 はしがき

近時放射能による大気汚染等の問題に関連し、煙の拡散現象が特に注目されてきている。筆者は研修所において生徒実習をかねて、地面附近での煙の拡散現象に関する諸量を野外実験にもとづいて求めた。水平及び垂直の各拡散巾に関しては Sutton 教授の理論式により、又空間内に固定した点源からの垂直拡散については井上博*

* 士等の乱流理論にもとづいた諸式によってそれぞれ実験値を整理した。最後にこの場合は熱点源と見做せるので、それについて二、三の考察をした。

2. 実験場所での諸条件

実験場所として研修所構内の野球場を選んだ。各実験の諸条件は第1表のようであり、それぞれ風上に著しい障害物はなかった。

実験番号	日 日	時 刻	風 向	平均風速 m/s	雲量雲形	備 考
第 1 回	2月17日	13時30分 ～15時00分	E	0.7	10 Sc	地上 2m の高さでの平均風速 地上点源
第 2 回	2月24日	10時30分 ～11時20分	S	2.8	/	地上 2m の高さで300秒間の平均風速 地上点源
第 3 回	3月3日	14時00分 ～14時20分	E →SE	1.6 ～2.3	9Cu, Cs	.
第 4 回	3月29日	14時55分 ～16時00分	E	2.3	10Sc, As	地上5.5m の高さで400秒間の平均風速 空間点源 地上5.5m の突出部に固定)
第 5 回	4月4日	14時30分 ～15時30分	W	3.2	1 Cu	地上3.3m の高さで200秒間の平均風速 " (地上3.3m の突出部に固定)

第 1 表 各実験の諸条件

第4図目の実験においては、発煙筒を風力塔の途中の突出部に固定した。その際煙の点源から 300m 以内には、風に対する主な障害物はなかった。このときの様子を示したのが第1図である。第5回目の実験では、主風の風上 500m 以内に障害物はなかったが、水平面内での主風向の変動が多少あった。



第 1 図 風力塔上の発火点と煙の状態(第4図)

各回とも風速は理工研式の小型ロビンソン風力計を用いた。第3回目には風力塔上、地上よりの高さがそれぞれ 7.7m, 5.3m, 3.0m, 1.1m の各場所に寒暖計を置いてその附近の気温を測定したが、日射の影響が大きく信用出来ない。

そこで第4回目では小型ロビンソン風力計の腕と直角に、かつ主風向と直角に枠を設置し、それに熱電堆を水平に張って測定した結果、高さ 6m と 2m の間の温度差は 400秒間の平均が 0.27°C であり、高さ 0.5m と 2m の

間の温度差は 0.48°C であった。第5回目は熱電堆を実験中に切断したので、測定値は得られなかった。

発煙剤は塩化亜鉛を主成分としたもので、高さ 20cm, 直径 10cm の円筒容器に入り、発火すると高温になり、周囲の空気との温度差は約 40°C 位になり、筆者が測定した所では熱源より 3.5m 離れた地点、地表面から高さ 15cm の所では煙の中心部と周りの空気との温度差は最大 6.6°C 高く、煙の周辺部では約 2.0°C ほど高温であった。なおその際には地表面は平たんで、煙はほとんど地表面に沿って流れて来た。佐々木氏の測定によれば、噴出力による相当風力は 1m 離れた地点では 0.8m/sec であり、煙の中心部と周囲の空気との温度差は 5m 離れた所ではほとんど零になる。したがって発煙剤による影響は風速が 1m/sec 以下の場合には、煙が発火点の近くでたい積する傾向があり、発火点より 5m 以内では発煙剤の熱のためまわりの空気及び煙も熱によって生じた浮力を受けていると考えねばならない。

3 拡散の方程式

よく知られているように地上点源からの拡散を表わす方程式は、分子拡散との類似により

$$\frac{d\chi}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial \chi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial \chi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial \chi}{\partial z})$$

ただし χ は濃度, K_x, K_y, K_z は x, y, z 方向の拡散係数。ここで $\vec{U} = \vec{U}(z), \vec{V} = \vec{W} = 0$, かつ定常とし

* 気象庁研修所

て、境界条件は

- (1) $x, y, z \rightarrow \infty$ のとき $\chi \rightarrow 0$
- (2) $z \rightarrow 0, z > 0$ のとき $K_z \frac{\partial \chi}{\partial z} \rightarrow 0$
- (3) $x = y = z = 0$ では $\chi \rightarrow 0$
- (4) 連続の条件としてすべての $x > 0$ に対して

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \bar{U} \chi(x, y, z) dz dy = Q$$

を与え、Roberts氏⁽²⁾は K_x, K_y, K_z を常数として次の解を得ている。

$$y_0 = \left(\frac{4(\ln 10) R_y x}{\bar{U}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$z_0 = \left(\frac{4(\ln 10) R_z x}{\bar{U}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

なお、或る地点での煙の境界というのは、その地点での最大濃度の $\frac{1}{10}$ になる煙の周辺上の点と定める。

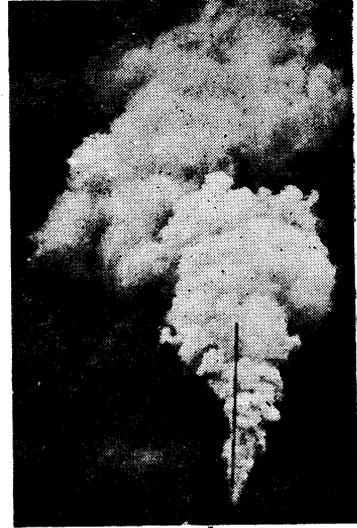
Sutton教授の実験結果⁽²⁾によると地上2mの高さでの平均風速が $\bar{u} = 5 \text{ m/sec}$ のとき、 $x = 10^4 \text{ cm}$ の地点で $y_0 = 1.75 \times 10^3 \text{ cm}$, $z_0 = 10^3 \text{ cm}$ の値を得ている。上式の計算によれば、 $K_y = 1.6 \times 10^4 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$, $K_z = 5 \times 10^3 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ となる。

この値は他の渦動拡散や伝導について求めた値とほぼ一致している。以上の数学的諸条件を完全に充すように実験を配置することは困難ではあるが、上式を一応現象を整理する基準とした。

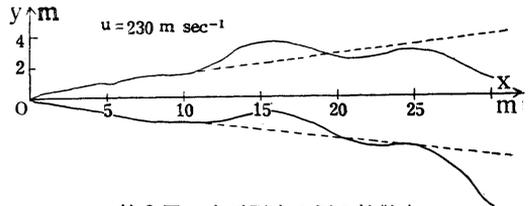
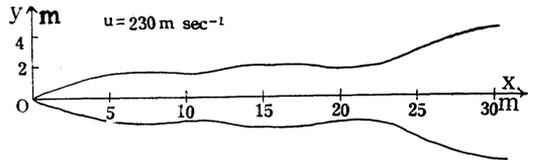
4. 実験の結果

第1回目から第3回目までの実験では水平面内の拡散巾を調べることを目的とし、発火後煙が連続的に一様に噴出しており、且つ水平方向の変動がないと見做し得るときに、信号を出し煙の周辺に測量用のポールをたて、煙が消散した後にその位置を測定した。そのときの模様第2図で、測定結果は代表的なもののみ第3図に示した。

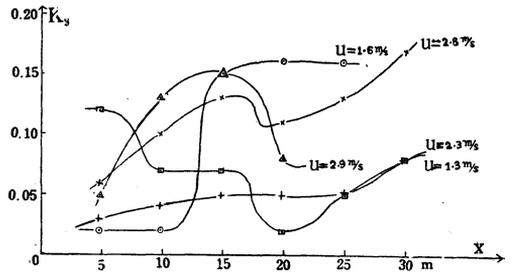
第3図中にあるように水平方向の変動が著しいものは修正を施してその拡散巾を定めた。それ等の値をもとにして水平面内の拡散係数を求め、点源からの距離の増加に伴う水平面内の拡散係数 K_y の変化を描いたのが第4図である。これを見ると $x = 10\text{m}$ から $x = 20\text{m}$ の間で極大値を生じているが、風向変動による x 軸の変化を修正し



第2図 水平面内の煙の拡散 (b)



第3図 水平面内の煙の拡散巾



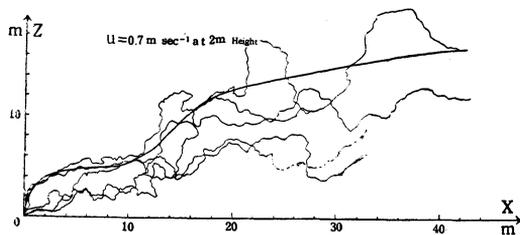
第4図 点源からの距離と水平面内の拡散係数 K_y

た場合にはかかる傾向が認められない。約 3.0 m/sec の平均風速では $x = 15\text{m}$ 前後で極大値がある。 1.3 m/sec の平均風速では $x = 5\text{m}$ 前後で極大値がある。これは前述した噴出力による煙のたい積効果と考えられる。

第4回目の実験では地上点源の垂直面内の拡散巾を調べた。そのため側面から発火後30秒たってから30秒毎に写真撮影し、そのネガを重ね合わせて平均的な拡散巾を



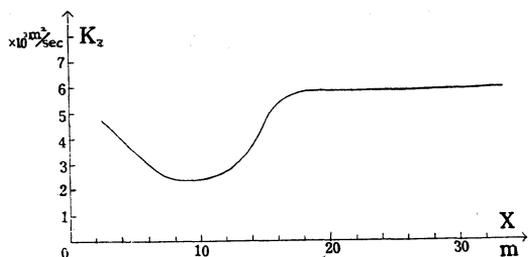
第2図 水平面内の煙の拡散 (a)



第5図 垂直面内の煙の拡散巾(太線)

推定した。それが第5図である。

これにもとづいて垂直方向の拡散係数を計算し、 K_z と点源からの距離 x との関係を表わしたのが第6図である。これを見ると x が10m附近で、垂直面内の拡散係数 K_z の最小値が表われている。*



第6図 点源からの距離と垂直面内の拡散係数 K_z

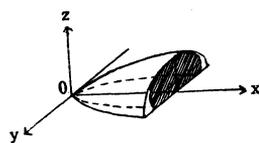
* これは熱による浮力の効果と思われる。

ここで実際に得られた K_y, K_z の値を Sutton 氏の得た値

$$K_y = 1.6 \times 10^4 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$$

$$K_z = 5 \times 10^3 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$$

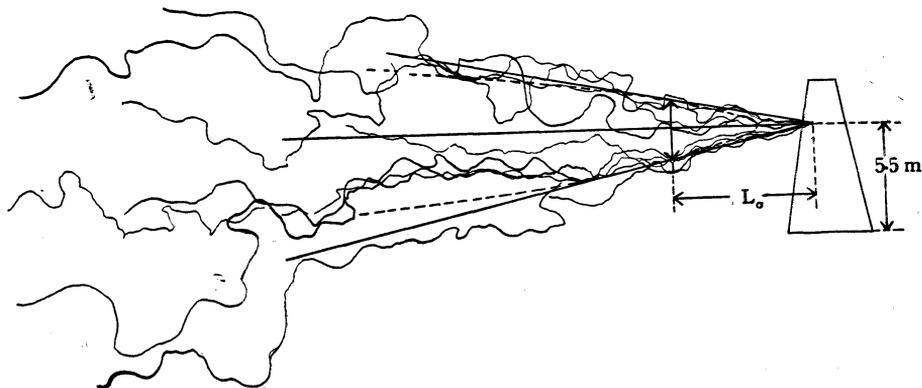
と比較すると、 K_y は 10^{-1} の order だけ小さく、 K_z はよく一致している。これは点源の附近では、全体として浮力のために煙の中心軸が地上より上方にあるためと考えられ、したがって、この模様をモデル化して考えると第7図のようになる。実線は計算の基準になったモデルである。此の場合に浮力により上に傾いた実際上の中心軸を x 軸と一致せしめたならば、 K_z が小さくなることが予想される。これは噴出力の効果によって説明されるのではないかと思うが、未だ確定的なことは言えない。



第7図 中心軸が浮力のため上昇

5 空間に固定した点源からの垂直面内での拡散

第4回目の実験では、点源を地上からの高さ 5.5mの点に置き、第5回目の実験では点源を地上からの高さ



第8図 空間点源の場合の垂直面内の煙の拡散巾(太線)

3.3mの地点に置いた。

拡散巾の測定方法としては発火後10秒置きに写真撮影し、出来上ったネガを投影機に写し、煙の濃度が中心部では同程度と認められる9個の場合を連続的にグラフ用紙上に重ね合わせた。この結果を第8図に示した。

浮力の効果があるので、煙の中心軸は上昇しているが、それは重ね合わせのときに水平にした。この図をもとにして点源からの距離 X と垂直面内の変位の分散 $\langle Z^2 \rangle^{\frac{1}{2}}$ との関係を示したのが第9図である。

井上氏の理論⁽¹⁾によると最大乱子の寿命時間を τ 、平均風速を U としたとき、或る特定の操作的長さ $L_0 = U \tau$ によって、

拡散域は二つの異なる部分に分けられ、 $0 \leq X \leq L_0$ の領域、即ち所謂第一種拡散領域では、 $\langle Z^2 \rangle^{\frac{1}{2}} \propto X$ と K_y は操作長さ X に比例し、 $Z \leq L_0$ なる所謂第二種拡散領域では、 $\langle Z^2 \rangle^{\frac{1}{2}} \propto Z^2$ は放物線的に増加し、拡散係数は一定値になる。

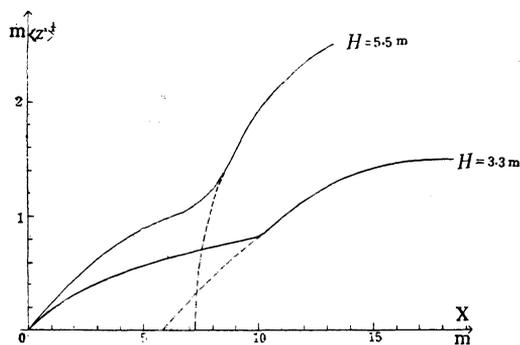
今地面附近では

(i) $\sqrt{w^2} \sim \text{constant}$

(ii) 最大乱子の大きさ $\Lambda \propto \text{高さ } Z$

(iii) 平均風速 $U \propto \log Z$

という仮定を設けると上述の理論が垂直面内の拡散現象に適用出来て第1種領域と第2種領域の接合点 L_0 に対



第9図 点源からの距離 x と z 方向の標準偏差 $\langle z^2 \rangle^{1/2}$ としては

$$\Lambda_0 \approx \frac{\sqrt{\langle w^2 \rangle}}{U} L_0$$

なる関係が成立する。そこで第8図 (i), (ii) より L_0 を求め、垂直方向の最大乱子の大きさ Λ_0 に関する見積りをしたのが第2表である。ここに γ° は拡散角である。

Z_m	γ°	$\langle w^2 \rangle^{1/2} / U$	L_0, m	Λ_0, m	U_0 (風速)
3.3	23.0	0.060	5.7	0.35	2.5 at $Z=3.3\text{mHeight}$
5.5	24.0	0.080	7.2	0.57	2.2 $Z=5.5\text{m}$

第2表

撮影機によって同種の実験を井上氏が仙台市郊外、野釜海岸で行い、 L_0 を測定して Λ_0 を計算されている。

その結果は第3表である。

Z_m	γ°	$\langle w^2 \rangle / U$	L_0, m	Λ_0, m	U_0 (風速) at 2mHeight
6	25	0.082	7.9	0.65	2.7
5	24.5	0.080	7.1	0.57	2.9
3	25	0.082	4.7	0.39	3.1

第3表

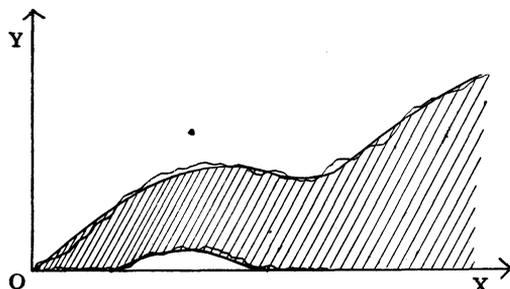
この第3表と我々の実験例を比較して見るとよく一致していることがわかる。又最大乱子の大きさ Λ_0 が高さ z の $1/10$ 程度であることも立証している。

なお、このときの地面附近の風速分布を対数法則で表わすと、点源が $Z=3.3\text{ m}$ の高さに置かれたときには $v = 3.56 \log_{10} Z - 0.43$ であり、点源が $Z=5.5\text{ m}$ の高さに置かれたときは $v = 6.04 \log_{10} Z - 0.18$ であった。

6 む す び

以上の実験を通してわかるように熱点源の場合には、垂直方向の拡散係数が浮力のため点源付近では大きくかつ距離 x に比例して減少し、或る距離まで行くと乱れによる拡散が優勢となり所謂第一種拡散領域では x に比例して増加し第二種拡散領域で一定値に達する。従って所謂第一種拡散領域内で K_x の最小値を得る。(第6図では 9 m の点で K_x が最小)。実際第2図(a)をよく見ると点源よりある距離遠ざかった地点では煙は地面に接せず空

隙を生じている。この様子をモデル化して描けば第10図のようになる。



第10図 浮力のため空隙を生ずる。

空間に点源を固定した場合には、煙の x 方向の軸が上昇して、水平に補正して拡散角を決めたので、上述のような傾向が顕著に見られない。いづれにしても熱点源の垂直面内の拡散係数と拡散巾については上記のような特徴があり、単純に放物線型を適用出来ないこと及び

第一種拡散領域に K_x の最小値が存在することを強調したい。

普通部第4回の学生諸氏、防衛庁委託生第1回の学生諸氏及び研修所斎藤技官、力武技官の協力がなければ、この実験が出来なかつたであろうことを記し、これ等の諸氏に謝意を表わし、又発煙筒を提供された防衛庁陸幕の諸氏、実験実施に際し種々御指導を頂いた三浦教官、整理に際し貴重なる御助言を頂いた相馬清二氏並びに佐々木芳治氏に特に感謝の意を表わす。

References

- (1) 井上 栄一 1952 : 農業技術研究所報告, A (物理統計) 第2号, September
- (2) O.G. Sutton, 1953 : Micrometeorology
- (3) O.F.T. Roberts, 1923 : Proc. Roy. Soc. (London), A 104, 640

☆

☆