

煙突から出た煙の運動と接地気層の乱れの構造*

石 崎 健 二**

要旨

煙突から出る煙の運動を一点写真撮影法で調べた。風その他の気象要素の同時観測はなされておらず、また、検討された煙の運動成分も鉛直方向に限られた。煙塊（パフ）の追跡と、風下における定点での煙軸高度の時系列の解析から、パフの運動の直線性に注目され、煙軸の蛇行と風の関係が推定された。なお、煙軸高度の時系列解析には、調和解析の手法が応用された。

1. はじめに

煙突から出た煙が大気中をどのように拡散していくかということは、大気安定度、逆転層など、直接的には煙の拡散へ結びつかない大気状態との関連で追求されることが多い。しかし、本来、拡散の様子は風との関係で全て説明されるはずである。もし風の吹きかたと拡散の関係がわかれば、風と大気状態の関係を知らることによって、大気状態から拡散の様子を推定することが可能になる。

このようなことから、風と拡散の関係を明らかにすることには大きな意味があり、その1つの試みとして、煙の運動のみに注目したときに風との間にいかなる関係がありそうに見えるか、調べてみた。

煙突から出た煙は、一筋の煙となっただけでなく、大小の煙塊（パフ）の連なりをなすのが普通である。どのような連なりをなすかというのは、煙突の形などの排煙条件と、大気の状態によってある程度きまるようである（Scriven, 1966）。煙突から出た煙が、そこにおける空気の運動と一体になっている、すなわち、空気の運動を示しているとみなすことができるときには、煙のそれぞれの部分（パフ）は、空気のラグランジュ的な運動を表わしている。但し、ラグランジュ的な運動といっても、それは煙の大きさに見合った、ある空間的に平均された

運動である。

煙は煙突を出てから次第にその拡がりを大きくしていくので、煙が示す運動の平均空間の大きさも煙の浮遊時間とともに大きくなっていく。また、煙突の出口は空間的に固定されているから、次々に出ていく煙の運動は先ず刻々と煙突出口を通過する大気の運動を反映する。

このような特徴をもった煙の運動に注目することによって、接地気層の乱れの構造を一定程度明らかにしようと試みたわけである。なお、観測方法の制約から、煙の鉛直方向と風下方向の運動だけが議論された。

2. 観測

2-1. 煙突

札幌市厚別清掃工場厚別発電所の煙突で、海拔 18 m のところにあり、高さは 100 m である。発電所は石狩平野からゆるやかな丘陵にかかるところにある（第1図）。排ガス量は約 $10^6 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、排ガス温度は約 260°C 、排熱量は約 $8 \times 10^6 \text{ kcal/h}$ である。清掃工場のボイラーでは排熱量の一定程度の変動は避けられず、工場では排ガス温度が一定になるように排ガスを調整しているとのことである。

2-2. 観測日

1975年4月2日午前10時40分から11時までの20分間、写真撮影した。天気は薄曇で、風は石狩平野から丘陵に向かって吹いていた。平均風速は煙の流れているところで、約 13 m/秒 と煙の移動速度から推定された。

2-3. 観測方法

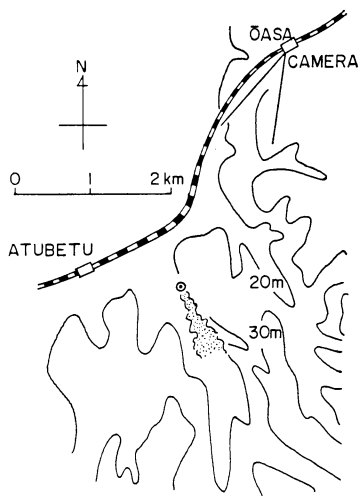
35 mm カメラによる一点観測で、気象要素の直接測定は何もなされていない。したがって、全ての議論は煙の写真観測の結果のみにもとづいてなされた。

* On the Behavior of the Chimney Plumes and the Structure of Turbulence of the Atmospheric Surface Layer.

** K. Ishizaki, 北海道大学工学部.

—1976年12月23日 受領—

—1977年3月15日 受理—



第1図 煙突 (●), 写真撮影点 (Camera), 煙流の配置.

撮影地点は煙突から約 3.3 km 離れている国鉄大麻駅の横断歩道橋の上である。カメラはアサヒペンタックス S2 型, 135 mm レンズを使用した。観測の 1 シリーズは 5 秒ごとに撮影された 36 枚の写真から成り, 全部で 5 シリーズが得られた。

観測点と煙突と煙の流れとの平面的な関係は第 1 図に示されている通りであるが, 煙軸はカメラの光軸に垂直な面に 37 度傾いているとして, 煙の位置を写真から計算した。煙軸が数度平面的にゆらぐと, 煙突からの距離の計算に約 1 割の誤差が生じる。

なお, 一点写真観測法の上手なやりかたについては, Halitsky (1961) が論じている。

3. 写真の整理

3-1. 煙軸

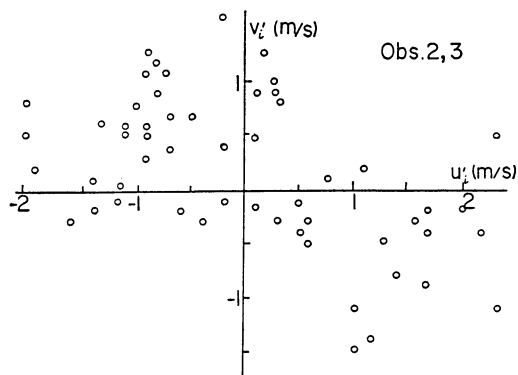
適当な大きさに引伸ばされた写真に目分量で煙の中心をきめて線をひき, 煙軸とした。

写真の上の 1 mm は現地 (煙突のあるところ) の 5.2 m に相当する。煙は煙突から遠ざかるに伴い, その大きさが大きくなり, 輪郭のはっきりしなくなるから, 煙軸の測定精度は煙突付近で 5 m ぐらい, 離れたところで 10~15 m ぐらいであろう。

3-2. パフ

煙の写真の中から追跡可能なパフを選出し, やはりその輪郭を目分量でなぞってパフとした。そしてパフの中心を目分量できめ, そこをパフの位置とした。

測定精度は煙軸のそれと同じぐらいと考えてよいであ



第2図 u_i' と v_i' の関係.

ろう。

4. 結果と考察

4-1. 風の様子

およその風向は撮影地点へ行くときの汽車の窓から煙を見てその流れの方向から推定された。帰り (約 1 時間後) にも見たが, 煙の流れの方向には行くときとくらべて目立つような相違は認められなかった。

風速はパフの速度から推定した。パフの速度は, パフが煙突を出てから 5~10 秒後の位置と, さらに 20 秒経ったときの位置から計算した。

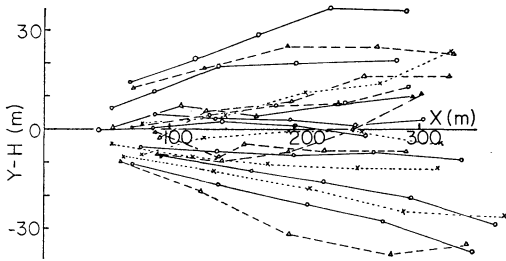
個々のパフの浮遊中の平均速度を風下方向については u_i , 鉛直方向については v_i とし, 1 シリーズ (3 分間) でのパフ全体の平均速度を \bar{u} , \bar{v} , とすれば,

$$u_i = \bar{u} + u_i' \quad (1)$$

$$v_i = \bar{v} + v_i' \quad (2)$$

と表わすことができる。 i はパフを区別するための添字である。 \bar{v} には, 3 分間 (観測時間) 平均鉛直風速のほかに, パフの浮力による平均上昇速度の効果が含まれている。

このようにして計算されたパフの速度のパフによる違い, u_i' , v_i' は, 煙軸が水平的にゆらぐことによって計算上は出てくる。また, 時々によるパフの煙突からの突出速度や浮力の違いにも影響されているはずであり, 変動の全てが必ずしも風の変動のみを示しているわけではない。しかし, 第 2 図に示されている u_i' と v_i' の間の著しい負の相関は, パフの運動がかなり大気の運動を反映したものであることを示唆している。観測時には, 煙の流れている高さ (100~150 m) では常時 13 m/秒前後の風が吹いていながら, 地上では特に風が強かったという印象はなく, 相当な風速の鉛直シアがあったと



第3図 パフの流跡線. 縦軸の Y はパフの高度, H は平均的な煙軸の形で, いずれも煙突出口の高度を基準にして表わし, 横軸 X は煙突からの距離を表わす.

予想されるからである.

4-2. パフの運動

1 シリーズにつき, 30~40個のパフが選び出され, 煙突から数10メートルのところから約 300 m までの間(約 25秒間) 追跡された. そして位置と大きさが 5秒おきに測定された. その中から Obs. 3 の場合が第3図に示されている.

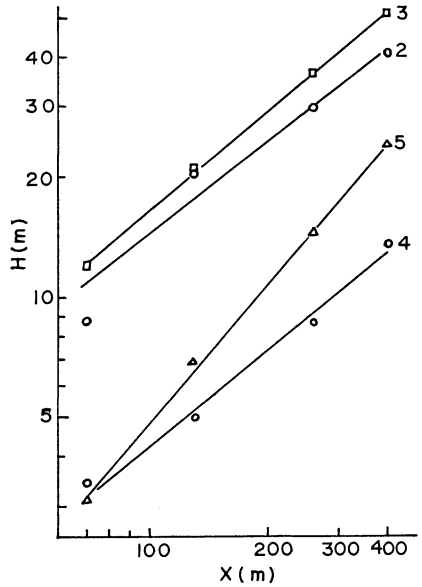
測定精度の関係から 1つ1つのパフの運動の詳細について論じることはできないが, 全体としてみたとき, いくつかの特徴に気がつく. ここでは, 横軸(平均的な煙軸に相当)を横切っているパフは全体の 1/4 ぐらいで, 大部分は上昇したまま, あるいは下降したまま, であることに注目する. パフの流跡線の示す蛇行は平均高度からの上昇量, 下降量にくらべて小さいということである. したがって, パフが煙突からの水平距離に対して一定の上昇率または下降率(平均的な煙軸を基準にし, パフによって異なる)をもっているとみなしても, パフ全体としての運動の傾向は, かなりよく示すことができると考えられる.

パフの流跡線が示すこのような直線の傾向と, 4-1で示唆されている上昇率または下降率と鉛直風速との対応のよさは, すでに Davidson ら (1958) によっても注目され, 煙の地上濃度の推定に応用されている.

4-3. 煙軸の平均的な形

第4図によれば, 3分間で平均された煙軸の形はかなり時間的に変化しているが, 煙軸の蛇行は小さい. パフの運動の直線の傾向も合わせ考えてみれば, 煙突から風下 300 m ぐらいまでの間では, 特定の所で煙軸の特定の変動が定常的に起こってはいないと考えられる.

なお, このような煙軸の形の時間的変動は, 煙の排出



第4図 3分間で平均された煙軸の形の時間変化. 数字は Obs. No. を示す.

条件や大気安定度の変動によるというよりは, 大規模な乱れによると考えられる (Moore, 1966).

4-4. 煙軸高度の時系列

第5図は, 煙突から風下方向に70, 130, 260, 400 m 離れた所における煙軸の高さの時間変化(煙軸高度の時系列)を表わしている. 観測は3分間を一区切りとして行なわれており, 区切りから次の区切りまでの間で写真フィルムの交換をしている. その所要時間は約1分である.

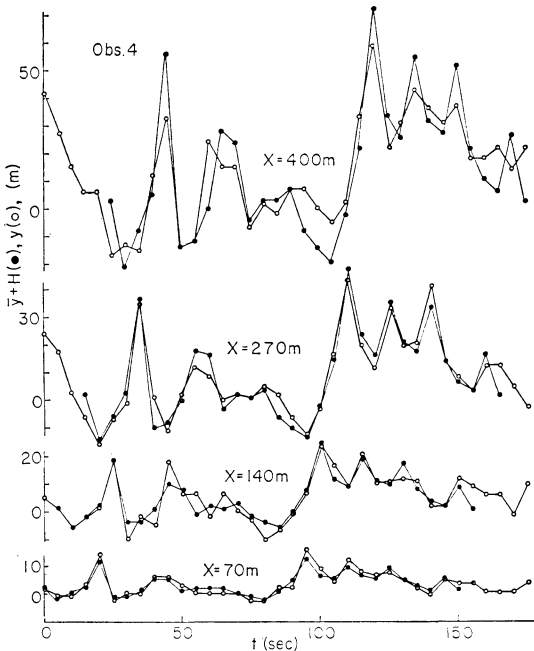
時系列を風下距離との関係で眺めてみると, 時間軸を適当にずらせば変化の傾向に非常によい相関のあることがわかる. 時間軸のずらしの適当な大きさと, 比較する地点の距離をパフが平均風速で通過するのに要する時間である.

煙軸高度の時間変化に見られる観測地点間のこのような共通性が, すでに指摘したパフの運動の直線性を反映したものであることは言うまでもない.

4-5. 煙軸高度の時系列とパフの鉛直速度の時系列

時刻 t_0 に煙突を出たパフに注目する.

浮遊時間 θ におけるそのパフの鉛直速度を $V(t_0, \theta)$ とすれば, 煙突から風下距離 X に到着したときのパフの高度 $Y(t_0, X)$ は,



第5図 煙軸高度の時間変化。○は観測値，●はパフの平均運動（直線的傾向）に注目したときの計算値。

$$Y(t_0, X) = \int_0^{X/U} V(t_0, \theta) d\theta \quad (3)$$

となる。Uはパフの風下方向への速度であるが、簡単のために以下ではパフによらず一定とする。また、Yは煙突出口からの高さである。

次に、 $V(t_0, \theta)$ を次のように分解して考える。

$$V(t_0, \theta) = \bar{V}(t_0) + W(\theta) + V'(t_0, \theta) \quad (4)$$

ここで、 $\bar{V}(t_0)$ は4-2で述べたところのパフの流跡線の直線的な傾向に対応するパフの鉛直速度成分で、 θ によらない。また、 $W(\theta)$ は4-3で述べた煙軸の平均的な形 $H(X)$ を基準にしてパフの運動を考えるためのもので、 $H(X)$ とは、

$$H(X) = \int_0^{X/U} W(\theta) d\theta \quad (5)$$

の関係にある。(4)式を(3)式に代入し、(5)式を考慮すれば、

$$Y(t_0, X) = \bar{V}(t_0) \cdot \frac{X}{U} + H(X) + \int_0^{X/U} V'(t_0, \theta) d\theta \quad (6)$$

となる。

一筋の瞬間的な煙軸がとぎれのないパフの連なりの中

心線であり、かつ、Xに到着するパフの順序が煙突を出たときと変わらない場合には、Xにおける煙軸高度の時系列 $y(t, X)$ は、

$$\begin{aligned} y(t, X) &= \int_0^{X/U} V\left(t - \frac{X}{U}, \theta\right) d\theta \\ &= \bar{V}\left(t - \frac{X}{U}\right) \cdot \frac{X}{U} + H(X) \\ &\quad + \int_0^{X/U} V'\left(t - \frac{X}{U}, \theta\right) d\theta \\ &= \bar{y}(t, X) + H(X) + y'(t, X) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{但し、} \bar{y}(t, X) = \bar{V}\left(t - \frac{X}{U}\right) \cdot \frac{X}{U} \quad (8)$$

となる。

Xが70~400mの間では、Xが大きくなっても時系列 y が全体として一定の時間的おくれと振幅の増加があるだけで、同じような形の変化をしているということは、 y がおもに(7)式の右辺第1項と第2項を反映しているということである。このことを具体的にみるために、観測された時系列を(7)式の右辺に対応するように次のように分解してみた。

まず、 $y(t, X)$ を余弦関数の和で表わす。

$$y(t, X) = \sum_{n=0}^{14} A_n(X) \cos 2\pi f_n [t - B_n(X)] \quad (9)$$

但し、 $f_n = n/T$ 、 T :時系列の長さ

n が0から14までなのは、解析に使用したデータの数が31個であることによる。

次に振幅 $A_n(X)$ 、位相角 $B_n(X)$ を次のように表わす。

$$A_n(X) = \bar{a}_n \cdot \frac{X}{U} + a_n'(X) \quad (n \neq 0) \quad (10)$$

$$B_n(X) = \frac{X}{U} + b_n(X) = \frac{X}{U} + \bar{b}_n + b_n'(X) \quad (11)$$

\bar{a}_n は $A_n(X)$ の X/U についての平均増加率、 \bar{b}_n は $b_n(X)$ の X についての平均値である。

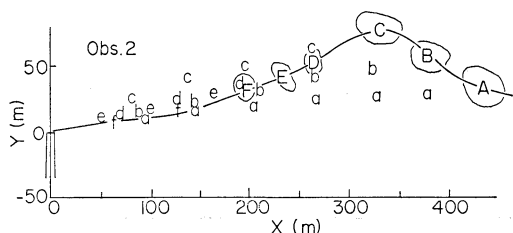
(10)、(11)式を(9)式に代入すれば、

$$\begin{aligned} y(t, X) &= \frac{X}{U} \sum_{n=1}^{14} \bar{a}_n \cos 2\pi f_n \left(t - \frac{X}{U} - \bar{b}_n\right) \\ &\quad + A_0(X) + y'(t, X) \end{aligned} \quad (12)$$

となる。 $A_0(X)$ は $H(X)$ と同じものであるから、(12)式を(7)、(8)式と比べてみると、

$$\bar{V}\left(t - \frac{X}{U}\right) = \sum_{n=1}^{14} \bar{a}_n \cos 2\pi f_n \left(t - \frac{X}{U} - \bar{b}_n\right) \quad (13)$$

であることがわかる。



第6図 ある瞬間に観測された煙軸の形(実線)とパフ(A~F)の位置,及びパフの流跡線.大文字で示された6個のパフについて,煙突からそこに至るまでの道筋を同じ文字の小文字で示す.文字と文字の間は5秒間の変位.

観測された $y(t, X)$ を(9)式のように余弦関数の和で表わすには調解析の手法を用いればよい.そして(13)式のように $\bar{V}(t - \frac{X}{U})$ を求め,それを(8)式に代入して $\bar{y}(t, X)$ を計算することができる.

こうして得た $\bar{y}(t, X) + H(X)$ は第5図に黒丸で示されている.但し, $A_n(X)$ は第4観測点 ($X=400\text{ m}$) において n の大きい部分での減衰が著しいので, \bar{a}_n は第3観測点 ($X=270\text{ m}$) までの平均値を用いた.煙軸高度の時系列におけるパフの運動の直線性の寄与度をうかがうことができる.

4-6. 煙軸の蛇行と乱れの空間構造

ある瞬間における1本の煙軸の空間的な形を考える.煙軸の始まり(煙突出口)にあるパフが煙突を出たときの時刻を t_1 とし,その時の煙軸の形を $F(t_1, X)$ とすれば,(7)式により,

$$F(t_1, X) = \bar{V} \left(t_1 - \frac{X}{U} \right) \cdot \frac{X}{U} + H(X) + F'(t_1, X) \tag{14}$$

と表わすことができる.

すでに述べたように時系列 y の形が \bar{V} の時系列の形と W をよく反映しているとすれば,煙軸の形 F もまた,おもに(14)式の右辺第1項と第2項を反映していなければならない.煙軸の蛇行は,パフの流跡線の蛇行によるというよりは,次々と煙突から出ていくパフの平均速度 \bar{V} がパフによって異なることによる,ということである.このことは,1本の煙軸上の5個のパフを追跡した第6図にもよく示されている.

以上のことから,ある瞬間の煙軸の形から鉛直方向の乱れの空間構造の概略を推定することが可能になった.煙軸が第6図のように上下に蛇行している場合には,平

均的な煙軸よりも瞬間的な煙軸が上または下にある部分は,それぞれ鉛直方向の乱れが正(上向き)または負になっていることがわかり,その乱れの大きさの概略値 $G(t_1, X)$ は(14)式により,

$$G(t_1, X) = \left\{ F(t_1, X) - H(X) \right\} \frac{U}{X} \tag{15}$$

と推定される.

ここで,注目されている乱れのスケールについて簡単にふれておかねばならない.

平均的な煙軸の形を求めるときの平均時間を零にとれば瞬間的な煙軸の形と平均的な煙軸の形が一致して,乱れが零になることからわかるように,1つの煙軸の形から上で述べたようにして推定される乱れの空間構造は,平均時間の長さによって変わってくる.言いかえれば,平均時間の大きさに見合ったある大きさより小さい渦の運動とその空間的広がりが推定される.さらに,パフの大きさに見合ったある大きさより小さい渦は煙軸の形に寄与しないことを考えれば,推定される乱れは,結局,平均時間とパフの大きさによって制限されたある範囲の大きさにある渦の,合成された運動である.

5. まとめ

煙突から 400 m ぐらいの風下距離までの間では,煙軸の上下のゆらぎについて次のことがわかった.

(1) 任意の地点における煙軸高度の時間変化の形は,煙突から次々に出てくる煙(パフ)それぞれの平均鉛直速度の時系列の形をよく反映している.

(2) ある瞬間の一筋の煙軸の空間的形を煙軸の平均的な形とくらべることにより,鉛直方向の乱れの空間構造を推定することができる.

本報告では,煙軸のゆらぎとパフの鉛直速度との対応のよさに注目したが,一方では,風下遠くなるにしたがって煙の運動と煙突を出たときのパフの鉛直速度との対応が次第にあいまいになっていくことも明らかである.この点について論じるためには煙のゆらぎのメカニズムについてより立入った考察が必要であり,観測方法も含めて検討をすすめているところである.

なお,計算は北海道大学大型計算機センターで行なった.

文 献

Davidson, B. and J. Halitsky, 1958: A method of estimating the field of instantaneous ground concentration from tower bivane data, J. Air Poll. Cont. Assoc., 7, 316-319.

- Halitsky, J., 1961: Single-camera measurement of smoke plumes, *Int. J. Air and Water Poll.*, 4, 185-198.
- Moore, D.J., 1966: Physical aspects of plume models, *Int. J. Air and Water Poll.*, 10, 411-

418.

- Scriven, R.A., 1966: On the breakdown of chimney plume into discrete puffs, *Int. J. Air and Water Poll.*, 10, 419-426.



都筑卓司, 宮本正太郎, 飯田睦治郎著

物理質問箱

講談社, 1976, コミック版, 283頁, 500円

「一般の人が抱く素朴な疑問の中に、科学にとって本質的な問題が含まれているのではないか」と考えて、ブルーバック編集部が「科学に関する質問」を募集した。それに応じた4,000問にのぼる質問の中から物理に関する97問を選び、それぞれの質問（1行）に専門家の解答（数ページ）を付したのが本書の構成である。

質問の内容は、I. 星と宇宙についてはしない疑問、II. この地球についての、なぜ？、III. 水と空気のふしぎ、IV. 身近な物質のなぞ、V. 目に見えない極微の世界をのぞく、VI. 熱・温度とはなにか、VII. 力はどこから、VIII. 光と色のふしぎ、IX. 姿、形のない電気・磁気への疑問、X. 音についての疑問、XI. そして…？に分類され、それぞれ数問から20問程度の質問を含んでいる。どのページからでも読める肩のこらない一語解説が本書のねらいであろう。それに調子を合わせて、この書評もやわらかく行こう。レコード大賞にならって、各質問、各解答の中から特筆に値するものに下記の賞を与

えたいと思う。

①質問賞

「砂上のピラミッドは4000年の歴史に耐えてなぜ傾かないのか。」

このような文学性豊かな質問に答えなければいけない自然科学の何と色あせて見える事か、質問者はきつとすぐれた詩人になるに違いない。次点：「固体を切るとつながらぬのはなぜか。」

②名答賞

「虹はなぜ半円形になるのか。」の質問に対する答。特に、1つの虹を多くの人が見る場合、実は、一人一人、異なった位置にある虹を見ている事を指摘した点。このような事は、感覚的には全くわからない。原理を説明されて、はじめて納得できるのである。次点：月の反対側でも満潮になる事に対するエレガントな説明。

③愚答賞

「電磁波はどうして真空中を伝わるのか。」に対して、「(この) 間にずばり答えると、真空とは電磁波を伝える性質を持つものである。」と答えた解答者。この解答は「それが神の意志であるから」というのと本質的に同じである。この解答で満足できる読者は良き科学教信者になれても良き科学者にはなれない。

④誤答賞

砂を入れた水をかきまわすと砂が中心による理由を苦心して説明しているが、「水をかきまわすと容器の底近くで必然的に中心に向かう流れが生じる」事を指摘すれば素直に理解できる現象である。

(木村竜治)