

ロケットの噴煙による風の観測 (1)

的 川 泰 宣・寺 田 守 男

Smoke-Trail Method for Obtaining Wind Profiles

By

Yasunori MATOGAWA and Morio TERADA

Abstract: With the advent of larger and more complex rockets the need for detail information on atmospheric motion gains greater importance. This preliminary study is concerned with developing smoke-trail method as a usable tool for the three dimensional analysis of wind. The field experiment and data reduction technique are explained. Some examples of wind measurement by this method are shown, and the results are compared with the data obtained by balloon-tracking wind radar.

概 要

ロケットの噴煙を三か所の観測点から写真撮影し、噴煙の動きによって風の変動を研究する。フィルムの読みから一連の同定操作を経て、煙の特異点の空間位置を算出する手順を述べ、ロケット2機についての観測結果を示し、将来一層精密な測定を行なうための予備的考察を行なう。

1. 序 論

大型化していく飛しょう体の、構造上および制御上の要件を設定するために、大気の運動を正確に把握することがますます重要な課題になってきている。

気球観測による風ベクトルの測定は、平均的な風速・風向の鉛直分布を求めるための便利な方法として、広く用いられており、わが国のロケット発射実験においても、発射角補正を行なう際の風ベクトルのデータは、主としてこの気球観測から得ている [1]。そして従来の観測ロケットに関する限り、気球は重要な手段としてその力を発揮してきたわけであるが、ロケット飛しょう体の大型化が進み、そのミッションも精度の高いことが要請されてくるにつれ、風の性質についても、平均的な量だけでなく、現実の細かい動きについて知ることが必要になってきている。この点より見るならば、気球観測による風の測定には、いくつかの問題点があるであろう。その主なものを二つ挙げると、

① 風の乱れに関する知識を提供しない。……これは、レーダー追跡のシステムの不完全さに由来する面もあるが、むしろ気球自身の動的応答特性の悪さから来るものであろう。実際、静止した空気中においても、気球が不規則な径路をたどることが報告されている [2]。

② 放球後の気球の径路とロケットの飛しょう径路とが一般に一致しないこと。……このため、気球によって得たデータは、ロケットが突き進んでいく道すじに沿った風向風速の分布を正確に反映したものとはいえない。

以上の二点のうち、①についていえば、超音波風速計その他を用いて風の変動を細かく追うなど [3]、幾種類もの工夫がされている。しかし、ロケットの受ける動圧が最大になる高度領域など、必要なところでのデータが充分蓄積されているとは言い難い状態である。

また、②の制約を補う方法としては、ロケット自身の迎角の時間変化を見るもの [4] のほか、ロケットによって作ったナトリウム、バリウム等の人工発光雲の写真解析 [5] や、本稿のテーマであるロケットの噴煙の写真撮影による方法がある [2] [6] [7]。

とりわけ、ロケットの噴煙を利用する方法は、

- 実際の飛しょう径路に沿った風の分布を知ることができること。
- 風の比較的小さい規模の動きを追うことができる。
- 連続した高度の風の様子や、高度相関・時間相関などを得る可能性がある。

などの特長を併せ持っているので、測定・解析を適確に行なえば、かなり実機の発射の際に役に立つデータを取得できるものと思われ、噴煙が時々刻々に変化していく様子が現実の大気の運動をかなり忠実に反映していることも確認されている [8] [9]。

本稿の目的は、ロケットの噴煙の写真から風の水平二成分と鉛直成分を求める手順を記述し、実際にその手順による計算を、実機の噴煙について実行することによって、噴煙の動きを数量的に取り扱うための若干の予備的考察を行なうことにある。

2. 写真撮影

ロケットモーター内の推進剤の燃焼生成物が空气中に吐き出されて出来る噴煙を、三つの地点にカメラを設置して、一定の時間間隔ごとに同時撮影していく。ただし惰性飛行中は噴煙を吐かないので、別の方法で煙を出してやらなければならない。実例をあげれば、三酸化イオウ (SO₃) のクロルスルホン酸 (HSO₃Cl) 溶液を、エーロゾルのかたちで大気中に放出することにより、ロケット燃焼終了から頂点付近まで、非常に反射能力のすぐれた線条を残し、これを写真撮影した例が報告されている [2]。

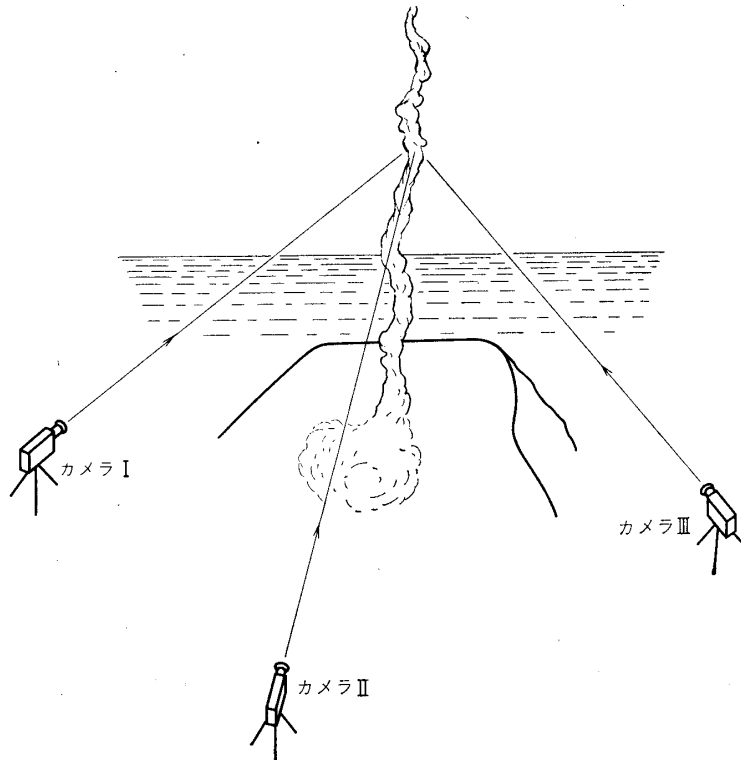
写真撮影の際のカメラ等の配置図を第 1 図に示してある。三つのカメラで同時撮影されたフィルムから、煙の位置を決定し、それと、一定時間をおいてやはり同時撮影されたフィルムによる煙の位置とを比較することによって、その時間内に煙がどれだけ動いたかを計算することができるわけである。

カメラアングルの設定にあたっては、水平線が視野に入るようにし、光学軸の水平面への投影が発射点付近にくるようにする。背景の青空とロケットの白煙とのコントラストをきわだたせるためには、Wratten No. 25 赤色フィルターなどをつけるとよいであろう。

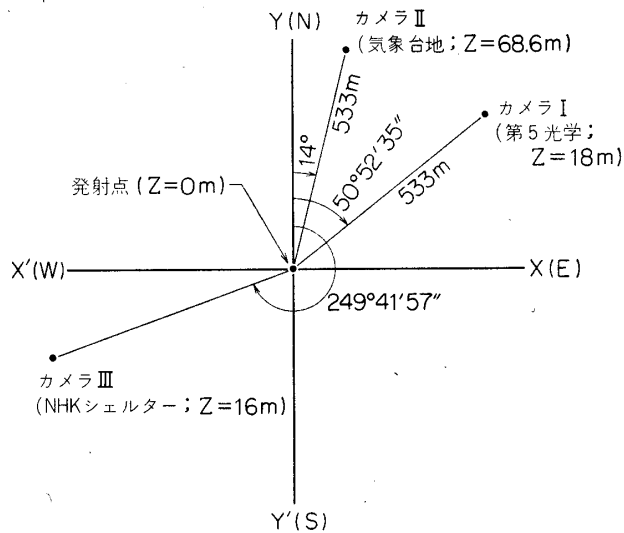
われわれが観測の対象にしたのは、第 1 表のロケット 2 機である。その際、観測点としては、

第 1 表 観測対象

	発 射 日	発 射 時 刻
S-210-7	昭 47.2.17	午後 5 時
S-160-4	昭 47.2.21	午前 11 時



第1図 カメラ設置図

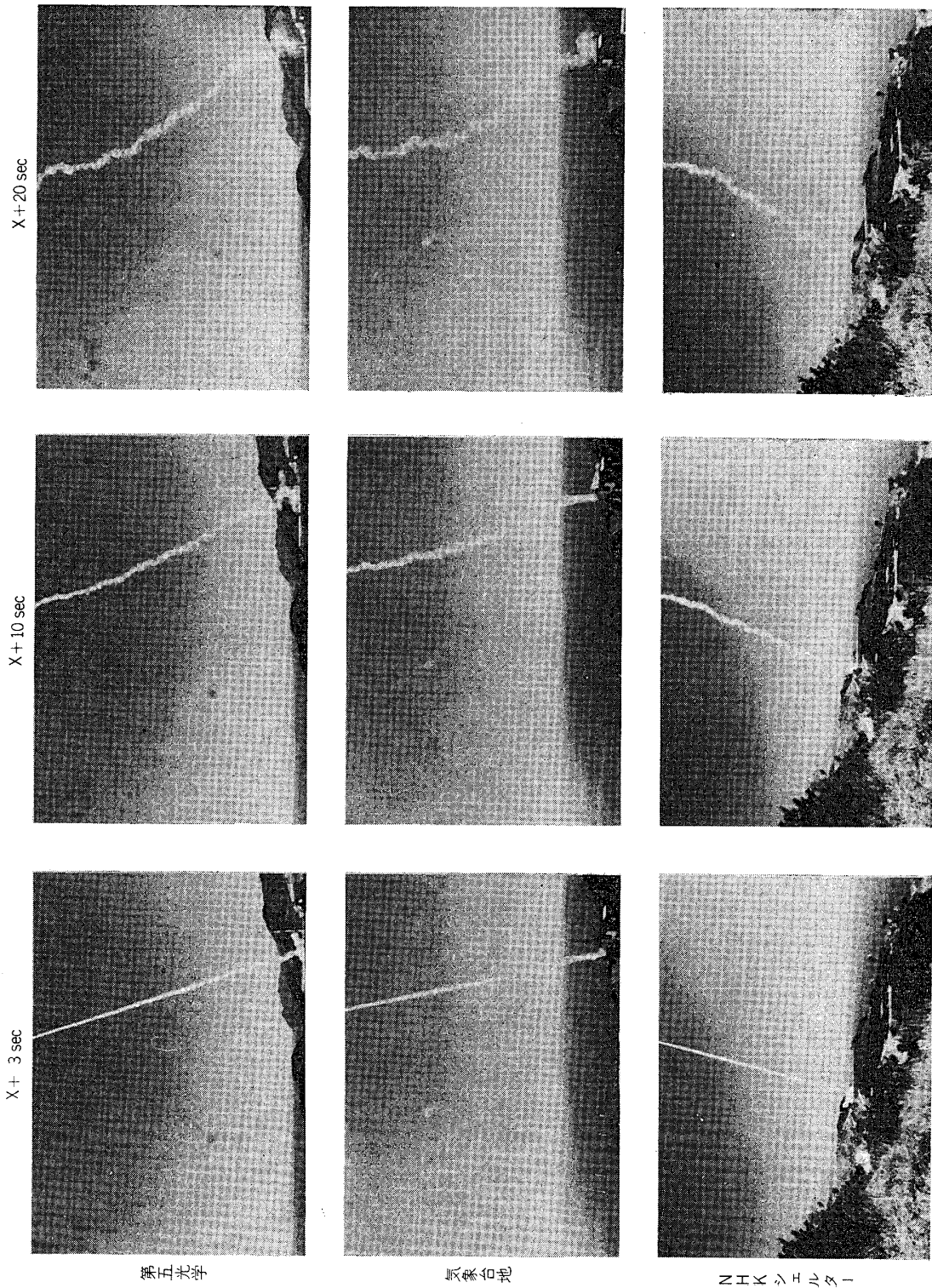


第2図 発射点と三観測点の位置関係 (昭 47.2.)

I. 第5光学 II. 気象台地 III. NHK シェルターの3箇所を選定した。これらの位置関係は第2図の通りである。

なお、撮影の際に使用したカメラ、撮影速度その他の諸元は第2表に掲げた。

撮影の結果得られたフィルムのうちから、S-160-4号機の、X+3秒、10秒、20秒のも



第 3 図 三観測点から見た噴煙の変化

第2表 撮影装置・データ

撮 影 位 置	第 5 光 学	気象台地・NHK シェルター
カ メ ラ	Bolex Type 16 mm	Filmo DR
レ ン ズ	Cine Nikkor 10 mm F/1.8	Cine Nikkor 10 mm F/1.8
絞 り	f: 16	f: 16
フ ィ ル タ ー	Wratten No. 29 (赤)	Wratten No. 29 (赤)
駆 動 方 式	ゼンマイ	ゼンマイ
撮 影 速 度	12 f/s	12 f/s
一 駒 の 露 出 時 間	1/36 sec	1/36 sec
使 用 フ ィ ル ム	16 mm 白黒 Fuji RP	16 mm 白黒 Fuji RP
フ ィ ル ム 感 度	ASA 32	ASA 32

のを、第3図に示した。実際の計算にあたっては、初速をもって吐き出された煙が大気と平衡状態に達するまでに数秒の時間を要する点に鑑みて、 $X+3$ 秒以前に出来た噴煙について、 $X+10$ 秒以後の動きを追った。第3図を見ると、 $X+3$ 秒ではほぼ直線状に伸びている煙が、時間が経つにつれて形のくずれていく様子がよく分る。

3. 計算の手順と方法

第3図を見れば分る通り、カメラIでとらえた噴煙の中の1点が、カメラIIによる噴煙の中のどの点に相当するかは容易には決定できない問題である。そしてこれこそがまさに、噴煙による風観測の中で最も厄介な問題となっている。この同定は様々な方法で行なわれており、たとえば、高高度にナトリウム蒸気を放出し、アナログ的に同定した例などがある[10]が、ここではデジタルな処理方法を扱ってみたい。

以下、説明の便宜上、第1図または第2図のように、噴煙から三台のカメラを見た場合、向って右端のカメラをカメラI、真中のカメラをカメラII、左端のカメラをカメラIIIと呼ぶことにする。

i) 同定の方法の概要

まずカメラIとカメラIIによって撮影したフィルムから、同一時刻に相当するコマを選び出し、カメラIによる画面の中の噴煙上の点 $P_i (i=1, 2, \dots, n)$ をカメラIIの噴煙上の点に対応させる同定を行なう。次にカメラIとカメラIIIによるフィルムについて、やはり $P_i (i=1, 2, \dots, n)$ に対応するカメラIIIのフィルム上の点を決定する。さらに、今度はカメラIIとIIIを組み合わせて、先にカメラIとIIの同定で選び出されたIIの画面上の点に対して、カメラIIIの画面内の噴煙上の点に対応づける同定を行なう。

さて、以上の三回の同定によって、カメラIによる噴煙の任意の点 P_i に対して、一応候補としてあげられる三つの点の空間座標が求まった。これらのある基準点に対するベクトルのかたちで表わす。すなわち、

I と II で決定された点…… $A_{1i} (i=1, 2, \dots, n)$

I と III で決定された点…… $A_{2i} (i=1, 2, \dots, n)$

II と III で決定された点…… A_{3i} ($i=1, 2, \dots, n$)

これらの三点は本来一致するはずのものであるが、レンズの収差・読みとり誤差その他によってかならず若干のズレを生じる。そこで、

$$\sum_{j=1}^3 |C_i - A_{ji}|^2$$

を最小にする点 C_i を最終的に P_i に対応するものと決定する。然る後に、一定時間後のフィルムから同じ点の位置を同様の方法で決定し、その変位からその点の風ベクトルを算出するわけである。

ii) 座標軸の設定

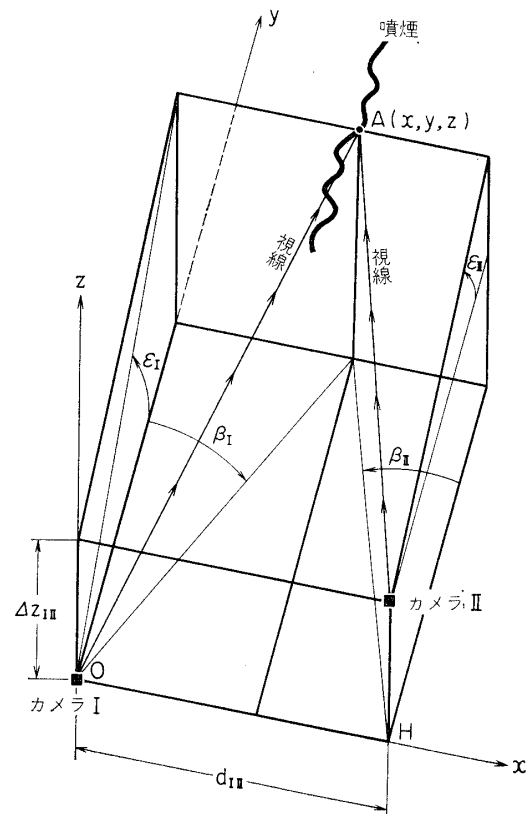
まず、カメラ I と II によって同定を行なう場合について記述する。カメラの設定位置と噴煙との間に、第 4 図のような座標系を設定する。すなわち、カメラ II の位置を水平面に投影した点を H とするとき、カメラ I を原点とし、原点から H の向きに x 軸、原点から鉛直上方の向きに z 軸、 $O-xyz$ 系が右手直交系をなすように y 軸を選定する。

カメラ I から噴煙上の一点 A を見たときの迎角を ε_I 、方位角を β_I とし、カメラ II から A を見た時の仰角を ε_{II} 、方位角を β_{II} とすると、これらと点 A の座標 (x, y, z) との間には、以下の関係式が成立する。

$$\tan \beta_I = \frac{x}{y} \quad (1)$$

$$\tan(-\beta_{II}) = \frac{d_{I II} - x}{y} \quad (2)$$

$$\tan \varepsilon_I = \frac{z}{y} \quad (3)$$



第 4 図 同定の際の座標系

$$\tan \varepsilon_{II} = \frac{z - \Delta z_{I II}}{y} \quad (4)$$

(1), (2), (3) を x, y, z に関して解けば、

$$x = \frac{d_{I II} \tan \beta_I}{\tan \beta_I - \tan \beta_{II}} \quad (5)$$

$$y = \frac{d_{I II}}{\tan \beta_I - \tan \beta_{II}} \quad (6)$$

$$z = \frac{d_{I II} \tan \varepsilon_I}{\tan \beta_I - \tan \beta_{II}} \quad (7)$$

また、(1), (2), (4) を使えば z について別の表現をすることができる。

$$z = \frac{d_{I\text{II}} \tan \varepsilon_{\text{II}}}{\tan \beta_{\text{I}} - \tan \beta_{\text{II}}} + \Delta z_{\text{I II}} \quad (8)$$

したがって、 β_{I} 、 β_{II} 、 ε_{I} を与えれば (5)、(6)、(7) を用いて、また、 β_{I} 、 β_{II} 、 ε_{II} を与えると (5)、(6)、(8) を用いて、それぞれ点Aの座標 (x, y, z) を求めることができる。

そこで今度は、カメラによって撮影したフィルムから仰角 ε と方位角 β をどのように計算するか、という問題になる。簡単のため、カメラは、光軸を水平にし、第4図の OH に垂直な方位に向けられているとする（もちろん、実際には、カメラの光軸は、これとは別の向きを向いているので、その仰角・方位角の大きさだけ座標変換してやる必要がある）。噴煙が非常に遠くにあることを考えると、カメラのレンズの焦点距離を f とし、第5図を参照することによって、次の式を得る。

$$\tan \beta = \frac{x'}{f} \quad (9)$$

$$\tan \varepsilon = \frac{y'}{f} \quad (10)$$

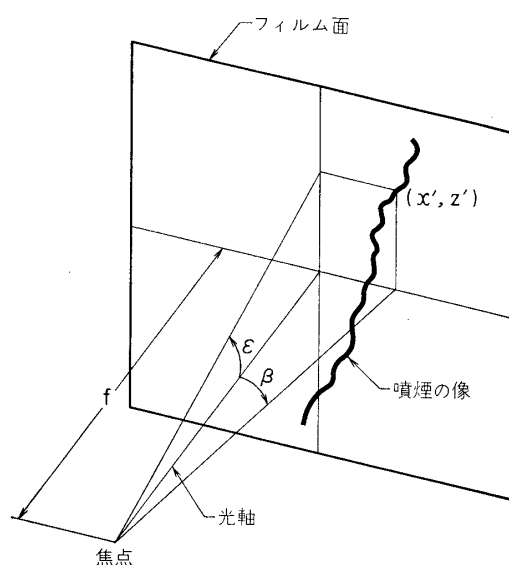
これで、フィルム面の座標から現実の噴煙の空間座標への変換式は一応出揃ったことになる。次に、これらの式を使って実際に、二枚のフィルムからの同定をどのように遂行するか、を述べる。

iii) 同定の方法

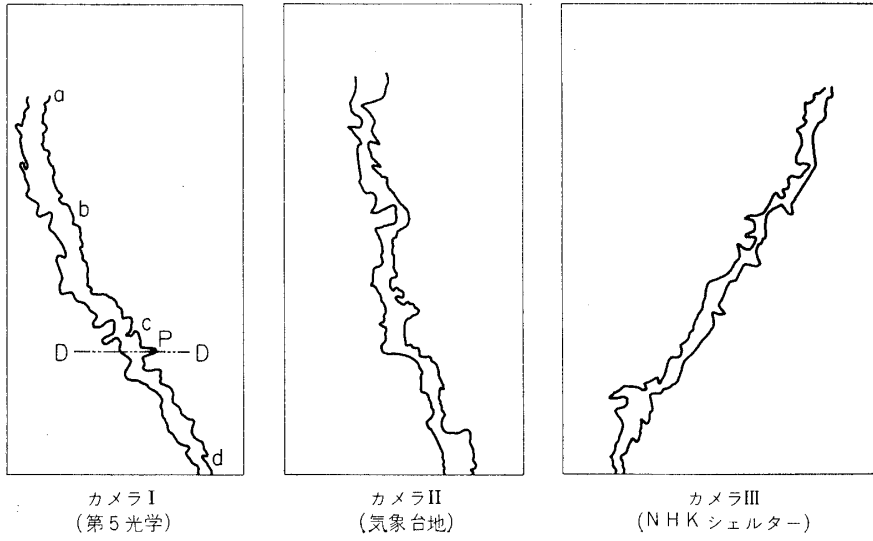
同定の難しさは、噴煙が立体的な構造をもっており、カメラIではとらえても、カメラIIあるいはIIIからはとらえられない（つまり裏側にある）点が必要に存在していること、また、煙の粒子一つ一つを判別することが不可能であることに由来している。したがって、前述したような方法で噴煙の空間位置を決定するためには、最初にカメラIによって写した噴煙の中から前述の点 $P_i (i=1, 2, \dots, n; \text{もちろんこれは、画面上の点})$ を選択するとき、カメラIIとカメラIIIの双方によって画面にとらえられている点を選ぶべきである。

●カメラIの画面から点 P_i を選び出す方法

第6図は、S-160-4号機の発射後20秒のときのフィルムから写しとったものであるが、カメラI（第5光学）によって撮影した噴煙を構成している無数の点のうち右端の線 $abcd$ は、カメラII、IIIの両方からも確実に見える位置にある。というのは、第6図に撮影された状態を、カメラの位置なども含めて鉛直上方から全体的に眺めると第7図のようになっており、第6図のD-D断面は第7図には閉じた曲線になっているはずである。すると、カメラIから見てD-D断面の右端に当たるP点は、カメラII、IIIの位置から見ると、必ず噴煙の表側に当たっている部分にある（つまり、カメラでとらえられる）ことになるからである。



第5図 画像と焦点距離の関係

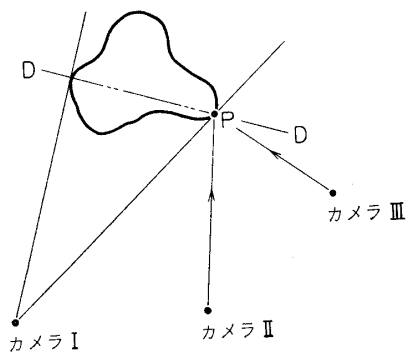


第 6 図 S-160-4 号機の噴煙写真 (X+20 秒)

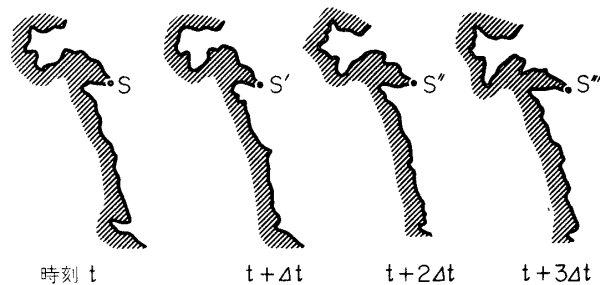
したがって、 $P_i (i=1, 2, \dots, n)$ は、カメラ I でとらえた噴煙の写真の右端の部分から選択することになる。

●特異点の移動についての仮定

ここで一つの仮定をおく。カメラ I で写した噴煙の右端の部分だけを、時間を追って見ていったとき、たとえば第 8 図のようになっていたとする。このとき、点 S のような特異点がある写真にも現われ、しかもその付近の煙が形が余りくずれないで程度保存されていくような場合 (実際のフィルムでは、このような尖点がいくつも見出される)、時刻 t における S は、時間が経つにつれて、 $S \rightarrow S' \rightarrow S'' \rightarrow S'''$ という風に実際に移動していった、という仮定をおくのである。



第 7 図



第 8 図

この仮定は大体において妥当に見えるのであるが、ある特殊な場合には成立しない。たとえば、ある時刻において鉛直上方から見たとき、第 9 図上の (A) のような位置にあった煙が、矢印の向きに風を受けて時間間隔 Δt 後 (時刻 $t + \Delta t$) には、(B) のような位置に来

たとすれば、それを E の位置から固定カメラで撮影すると、第 9 図下の (a), (b) のようになるであろう。つまり、時刻 t では、実際の煙の中の点 R がフィルム面上の煙の右端の点 R' となって現われるのに対し、時刻 $t + \Delta t$ では、煙の中の点 L がフィルム面上の煙の右端の点 L' となってしまい、この場合は、点 R' が Δt 時間後に L' に移ったと考えるのは、実は妥当でない、という結論になる。

それともう一つ、第 10 図のように、時刻 t で鉛直上方から見た断面が (A) の状態だった煙が、 $t + \Delta t$ に (B) の状態に移ったとすれば、カメラ I から見た煙の形は、 t から $t + \Delta t$ へ移っても保存されている可能性が強い。しかもフィルムにとらえた煙の右端の点は一見同じ点に見えながら実は R から R' への切り換えが行なわれているわけであって、この場合も上述の仮定は成立しない。このように主に二つの懸念があるわけであるが、後者の方は、煙とカメラの間の距離が非常に遠方であるということ、前者の懸念は、フィルム面上に現われた煙の形を時間を追って見ていくことにより、ある程度は回避できる、と考えられる。

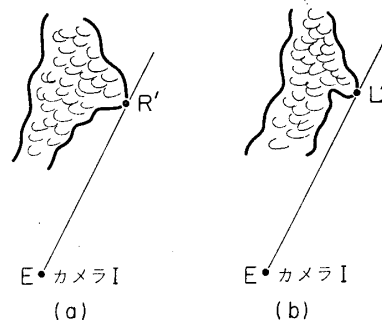
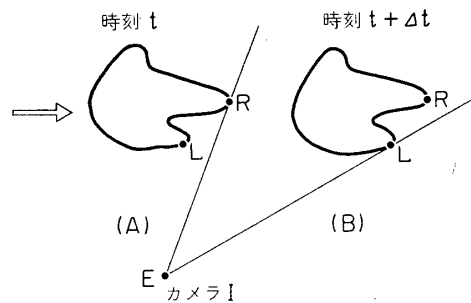
そこで、以上の考察を施した上で、カメラ I で写した噴煙の右端を成している線の中から、煙の形をかなり保存しながら移動している特異点を n 個選択して、それを上から順に P_1, P_2, \dots, P_n としよう。

以下、これらカメラ I のフィルム面上の点 P_i を、どのようにしてカメラ II あるいは III のフィルム面上の点に対応させるか、について述べてみよう。

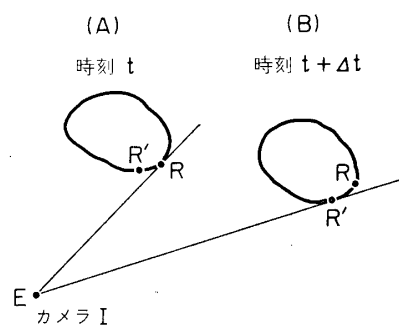
● P_i とカメラ II の写真との同定

まずある時刻 t における写真から P_i がフィルム面上でもっている座標 (x', y') を読み取ることによって、(9), (10) 式から、 β_I, ε_I が求められカメラ I が P_i をのぞむ視線が決定される。

カメラ II による写真にとらえられたフィルム面上の煙を構成している無数の点は、そのフィルム面上における座標に応じて、やはり (9), (10) 式から決められる $\beta_{II}, \varepsilon_{II}$ の値をそれぞれが有している。特定の (β_I, ε_I) の組み合わせに対して、適当な $(\beta_{II}, \varepsilon_{II})$ の組み合わせを選べば、(5)~(8) 式の全部を満足させることができ、現実の煙の空間座標 (x, y, z) が



第 9 図



第 10 図

決定される。

実際には、 $\beta_I, \varepsilon_I, \beta_{II}$ を与えると (5), (6), (7) 式によって (x, y, z) は唯一的に決定されてしまい、 ε_{II} が受動的な立場になってしまう。そこで次に $\beta_I, \varepsilon_I, \varepsilon_{II}$ を与えて (x, y, z) を唯一的に決めることもやっておこう。そうすれば β_{II} と ε_{II} の両方に公平な立場を貫けよう。これは比較的容易に遂行できる。すなわち、(1), (3), (4) を x, y, z に関して解くことにより、次の解を得る。

$$x = \frac{\Delta z_{I II} \tan \beta_I}{\tan \varepsilon_I - \tan \varepsilon_{II}} \quad (11)$$

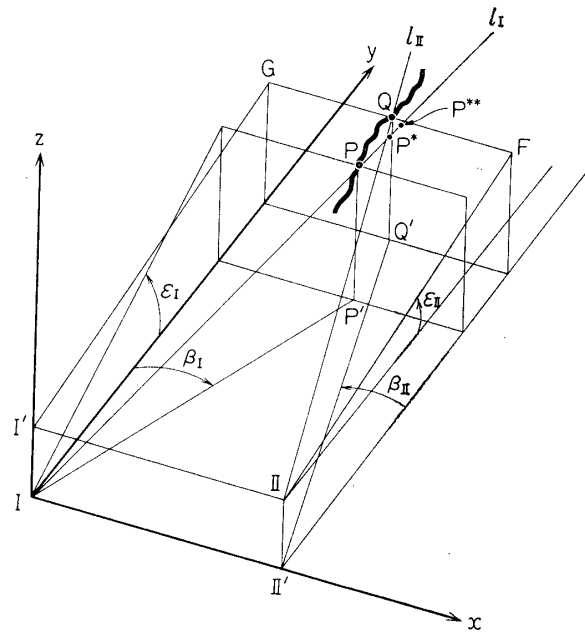
$$y = \frac{\Delta z_{I II}}{\tan \varepsilon_I - \tan \varepsilon_{II}} \quad (12)$$

$$z = \frac{\Delta z_{I II} \tan \varepsilon_I}{\tan \varepsilon_I - \tan \varepsilon_{II}} \quad (13)$$

ここまで準備しておいて、いよいよ実際に無数にあるカメラ II のフィルム面（もちろん時刻 t におけるもの）上の煙の中の点から、どのようにして適当な $(\beta_{II}, \varepsilon_{II})$ を探すか、という問題に入る。

<方法 1>

カメラ II による噴煙の写真上から任意の点を選び、そのフィルム面上の座標から (9), (10) 式を介して決定された方位角と仰角をそれぞれ $\beta_{II}, \varepsilon_{II}$ としよう。既にカメラ I の写真から特異点 P_i の β_I, ε_I は決定されている。まず β_I, ε_I により (5), (6), (7) 式を介して算出した空間座標を $X_1(x_1, y_1, z_1)$ とし、次に $\beta_I, \varepsilon_I, \varepsilon_{II}$ により (11), (12), (13) 式で計算した空間点を $X_2(x_2, y_2, z_2)$ とする。この操作は、現実のカメラ・煙系に翻訳すると、第 11 図のようになる。 P_i の現実の煙における位置を P とし、それと同時刻のカメラ II のフィルム面に写っている煙から任意に選んだ点 Q_i の現実の煙における位置を Q とする。また II から z 軸および x 軸に下した垂線の足をそれぞれ I', II' とし、 P, Q から $O-xy$ 平面に下した垂線の足をそれぞれ P', Q' とする。



第 11 図

まず P_i のフィルム面上の位置からは、 β_I, ε_I 、言い換えると I から P への視線 l_I が決められる（これだけではまだ点 P の位置は決定されない）。次に Q_i から、 $\beta_{II}, \varepsilon_{II}$ つまり II から Q への視線 l_{II} が決められる。ここで、 β_{II} と ε_{II} とを分離して、まず $\beta_I, \varepsilon_I, \beta_{II}$

の3つから $X_1(x_1, y_1, z_1)$ を求める作業は、物理的には、平面 $II'Q'Q$ と視線 l_I との交点 P^* を求めることであり、また次に $\beta_I, \varepsilon_I, \varepsilon_{II}$ の3つから $X_2(x_2, y_2, z_2)$ を求めることは平面 $II'GF$ と視線 l_I との交点 P^{**} を求めることに相当する。 P^* と P^{**} とは従って一般には一致しない。よって、最適な $\beta_{II}, \varepsilon_{II}$ を求めるためには、カメラIIの噴煙内の点をくまなく当っていき、 $P^* P^{**}$ との空間座標が一致するまで続けられよう。

<方法2>

あるいは、次のような方法が華麗であるかもしれぬ。原点 $O(I)$ を通り方位角・仰角がそれぞれ β_I, ε_I であるような三次元空間の直線を l_1 とする。また、IIを通り方位角・仰角をそれぞれ $\beta_{II}, \varepsilon_{II}$ とする直線を l_2 とする。 l_1 を固定しておいて、カメラIIでとらえた噴煙から、次々に $(\beta_{II}, \varepsilon_{II})$ の組をとり出して l_2 を構成し、 l_1 と l_2 が一致するまでその操作を続けるわけである。

<方法1>と<方法2>のいずれを使うにしても、カメラIIの写真上の点をくまなく当るという作業は大変なことで、当然電子計算機に頼ることになるが、この仕事を系統的に進める技術は、ダイナミック・プログラミング、最大傾斜法その他いくらかでも簡便な方法はあるだろう。

カメラIとIIの同定は以上の手順で行なうが、この後風速を求めるまでの方法はi)に記したので詳しい説明は省くことにして、座標変換についてだけ簡単に触れておこう。

●座標変換

カメラIとIIの同定には、第4図の座標を使ったが、カメラIとIIIの同定に当っては、第4図のカメラIIのところにかメラIIIをおき、 $d_{I II} \rightarrow d_{I III}$, $\Delta z_{I II} \rightarrow \Delta z_{I III}$ という置き換えを行えばよい。するとIとIIとの場合の x, y 軸と、IとIIIの場合の x', y' 軸との間に以下の変換を施すことが必要である。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \quad (14)$$

ただし、カメラIIIから x' 軸に下した垂線の足を III' とするとき、 θ_1 は、IからII'とIIIをのぞむ角であり、鉛直上方から見たとき左回りを正にとってある。

また、IIとIIIとを同定する際には、第4図に、 $I \rightarrow II$, $II \rightarrow III$, $d_{I II} \rightarrow d_{I III}$, $\Delta z_{I II} \rightarrow \Delta z_{I III}$ のような置き換えを行なうので、その際に用いられる x'', y'', z'' 軸と x, y, z 軸との間に次の変換を行なう。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_{I II} \\ 0 \\ \Delta z_{I II} \end{pmatrix} \quad (15)$$

ただし、IIIから x'' 軸に下した垂線の足を III'' とすると、 θ_2 は、IIからIII''とI'とをのぞむ角であり、鉛直上方から見たとき左回りを正にとってある。

(14), (15)式によって、同定の各段階で使った座標系が全て第4図の $O-xyz$ 系に変換されたわけだが、風のWE成分、NS成分および発射点からの噴煙の高度を求めるために、最後に次の座標変換を行なう。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_0 & \sin \theta_0 & 0 \\ -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad (16)$$

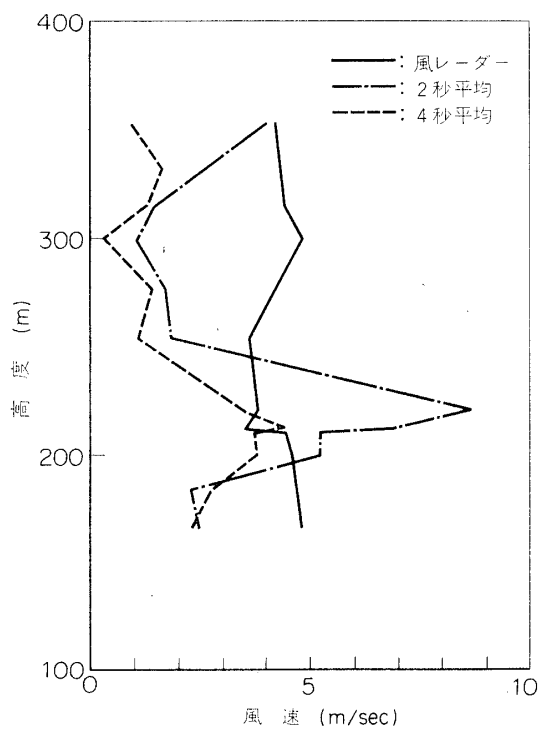
ただし, XYZ はロケットは発射点を原点とする第 2 図に示した座標系であり, θ_0 は, I II を結ぶ直線が X 軸の正の向きと成す角であり, 鉛直上方から見て左回りを正としてある. また, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ は, XYZ 座標系において I が占める位置ベクトルの各成分である.

4. 観測および計算結果

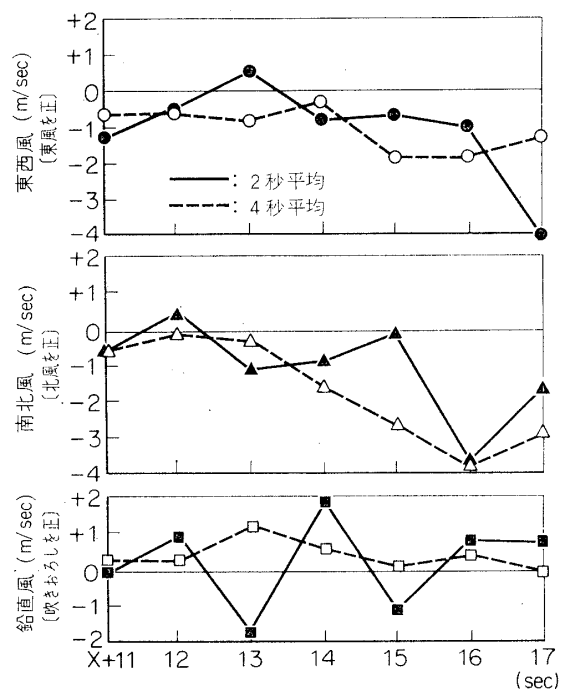
噴煙による風観測の対象としてわれわれがとりあげたのは, 第 2 表に示したロケット 2 機である. この 2 機のロケットが出した噴煙を, 発射後 10 秒から 60 秒までの間, 第 1 表に掲げた撮影方法で観測したが, そのうち, S-160-4 号機の噴煙を, 例として第 3 図に示してある. データ処理は東大宇宙研の HITAC-5020 によって行なった.

予備的考察の資料にするために行なったいわば予備実験であったにも拘らず, 比較的妥当な結果を得ることができた.

第 12 図は, S-210-7 の噴煙の特異点の位置変化から風速を求めたものである. 2 秒間ずつの平均風速と 4 秒間ずつの平均風速とを高度に対してプロットし, 比較のため発射の 60 分前に気球—風レーダー系によって求めた風速のプロフィールをもあわせ示した. 気球観測によるデータにも細部にわたっては信頼しきれぬ点もあるが, この第 11 図の 3 本のプロフィールは定性的かつ定量的に比較的類似しているように見える.



第 12 図 S-210-7 の噴煙による風観測



第 13 図 S-160-4 の噴煙による風観測

第13図はS-160-4号機の噴煙からとったデータにより、風の東西成分 (zonal component) 南北成分 (meridional component)・鉛直成分 (vertical component) を時間に対してプロットしたものである。S-160-4号機打ち上げの際は、折悪しく風が弱く煙の観測には余り適当な条件とは言い難かった。風の鉛直成分は、求めたにも拘わらずその正しさを検証する術とてなく、ただ求まったという状態で満足するほかはなかった。ただし、噴煙の写真の時間を追って見ていくと、確かに煙の特異点には上下方向の運動が見られたことを付記しておく。

5. 結 論

- 立体構造をもつ噴煙を数量的に扱う方法を確立したことは何よりの成果であった。
- 以前から気球の上昇速度を測定することによって、内之浦上空に上昇気流あるいは下降気流が存在することは確かめられていたが、今回の実験で、それが裏づけられたこと、そしてそれを数量的に求める道がともかく敷かれたこと。
- 序論に述べた通り、ロケットの飛しょう径路や構造に与える風の影響を、現実の風の姿を電子計算機で再現することによって、より精確に知りたいわけであるが、そのためには、大気の乱れの特性を統計的に処理できるに充分な程の詳細なデータが一刻も早く要請されている。噴煙による風観測は、その方法に様々な改良を加えることによって、有力な手段の一つになるであろう。
- 今回の観測によって、気のついた点および今後の課題を列挙すれば、
 - ①噴煙の撮影は、フィルム面上の煙の幅を細くするために適当に遠い距離から撮影することが望ましい。太い煙であるときは、拡散の影響を考慮に入れなければならない。
 - ②前述した2機のロケットと並んで、発煙筒を気球につけてあげ、それを写真撮影する方法も試みてみた。その結果、若干の工夫をこらせば、これも風観測に利用しうることがわかった。一定時間毎に puff を出すような発煙筒を工夫するのも一計であろう。
 - ③レンズの収差やフィルムからの読みとり誤差など各段階において介入してくる誤差の評価を適切に行なうべきである。

なお、今回の観測の残したデータは膨大であり、ひき続き、風の乱れの統計的処理という観点から解析の手法を検討中であることを追記しておきたい。

おわりに、本稿をまとめるに当たって、有益な議論と示唆を与えて下さった東大宇宙研の平尾邦雄教授をはじめ、光学班の喜久里氏、記録班の青島氏、ならびに、膨大な量のデータを読みとるためにその労を惜しまずお貸し下さった玉木研究室の皆様に深く感謝いたします。

1972年3月21日 新設部(工学)

参 考 文 献

- [1] Tamaki, F., Nomura, T., and Matsuo, H., "Wind compensation system in the Kagoshima Space Center University of Tokyo" Proc. 7th, ISTS, Tokyo ('67)
- [2] Henry, R. M., Brandon, G. W., Tolefson, H. B. and Lanford, W. E., "The smoke-trail method for obtaining detailed measurements of the vertical wind profile for application to missile-

- dynamic-response problems" NASA TN D-976, Nov. ('61)
- [3] Yokoyama, O., "An experimental study on the structure of turbulence in the lowest 500 meters of the atmosphere and diffusion in it" Rep. Resources Research Institute, March ('71)
 - [4] Reisig, G. H. R., "Instantaneous and Continuous Wind Measurements up to the higher stratosphere" J. Meteor., Vol. 13, No. 5, Oct. ('56)
 - [5] 中村, 木村 "発光雲による風の解析方法" 宇宙観測シンポジウム ('68)
 - [6] Scoggins, J. R., "High resolution wind measurement: a launch design problem" Astron. and Aeros. Eng., April ('68)
 - [7] Marshall, J. C., "Behavior of Smoke Trails, 30 to 70 km" J. Appl. Meteor., Aug. ('69)
 - [8] Beaudoin, P. E., D. Golomb, T. M. Noel, N. W. Rosenberg and W. K. Vickery, "Observation of mesosphere winds and turbulence with smoke trails" J. Geophys. Res. ('68)
 - [9] Lester, H. C., and H. B. Tolefson, "A study of launch-vehicle responses to detailed characteristics of wind profile" J. Meteor. ('64)
 - [10] Manring, E., Bedinger, J. F., Pettit, H. B., and Moore, C. B., "Some wind determinations in the upper atmosphere using artificially generated sodium clouds" J. Geophys. Res., June ('59)