

# 山岳地の気流の数値解析〔1〕\*

(第4回山の気象シンポジウム No. 2)

吉川 友章\*\*

## 1. 緒言

山岳地の気象変化をしらべてみると、大規模な一般流が地形におうじて上昇や回をするのと深い関係がある。たとえば、平地でははっきりしなかった局地的な気象構造が山岳地にかかって発達するのも、本来の熱力学的なメソ構造に地形による収束や上昇がくわわるためと考えられる<sup>1)</sup>。

そこで筆者は山岳地の気象を数値的に究明する一助として、一般流が山岳により影響される模様を近似式によってもとめ、その結果を実測でたしかめようところみた。

いままで山岳地の気流をしらべたものに目視観察<sup>2)</sup>、グライダーによる調査<sup>3)</sup>、模型実験<sup>4)</sup>などがあるが、数値的などりあつかいは、山脈を高さの様な土手と考え、山ごえ気流を垂直断面図で二次元的にあらわした場合にかぎられた<sup>5)</sup>。最近になってようやく回を考慮にいった三次的などりあつかいもきかれるようになった<sup>6)</sup>。

## 2. 近似式と流跡線

気流の上昇・下降にはつぎの三つの条件が関係すると考えられる。

- ① 気流本来の熱的安定度
- ② 地面からの熱的影響
- ③ 地面からの力学的影響

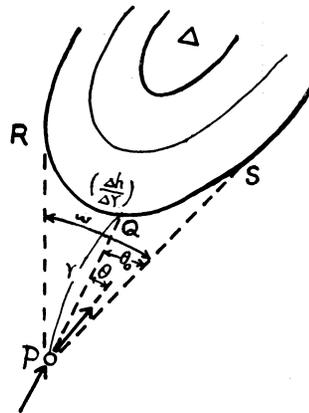
実際にはこれらが相互に関係していて分離することはむずかしいが、ここでは③のみを考えることにする。また接地気層には地表面の摩擦や乱流という重要な問題があるが、初期の段階では地表面付近まで層流とみなしうるモデルを仮定する。

数kmのスケールでは、一般流はほとんど直進する様な気流とみなしてよい。気流が山岳地に近づくとき、できるだけ上昇しないで谷間をう回する傾向がある。

いま気塊の進む方向に山があり、気塊の現在位置 $P$ での進行方向を延長すると、距離 $r$ の点 $Q$ で山につきあたる。 $P$ から $Q$ らの等高線にそって山を見こむ角度を $\omega$ 、 $P$ から $Q$ の等高線にひいた接線を $PR$ 、 $PS$ とするとき、 $P$ の気塊は $Q$ の最大傾斜方向から遠ざかる向きにまがる。点 $P$ の気塊が $\theta^\circ$ まげられるとき

$$\theta = \theta_0 \left[ 1 - \exp\left(-C \frac{\Delta h}{\Delta r}\right) \right] \sin \frac{\omega}{2} \exp(-Kr) \quad (1)$$

がなりたつとする。ここで $C$ 、 $K$ : const.,  $\Delta h/\Delta r$ :  $Q$ の $r$ 方向の平均勾配、 $\theta_0$ :  $\angle QPR$  または  $\angle QPS$ 。(第1図)



第1図 山にむかう気塊のまがり

定数 $C$ 、 $K$ は実際の山地の気流を測定して実験的に決定するのがよいが、十分な資料がないため仮定によった。

すなわち山が壁状に続くとき( $\omega=180^\circ$ ,  $\Delta h/\Delta r=\infty$ )、気塊は等高線の接線方向にまがる( $\theta=\theta_0$ )。山がないとき( $\omega=0$ ,  $\Delta h/\Delta r=0$ )、直進する( $\theta=0$ )、気塊が斜面に接したとき( $r=0$ )、 $\exp(-Kr)=1$ 、 $r=10000\text{m}$ のとき、 $\exp(-Kr)=1/10$ となるよう各因子をきめる。これより定数は

$$C=0.693 \quad K=2.30 \times 10^{-5}$$

\* Numerical Analysis of Air Current in the Mountain District [1]

\*\* Tomoaki Yoshikawa 気象庁山岳部

—1961年4月10日受理—

となる\*。

つぎに垂直成分については、気塊の下方の地面の傾斜と気塊の地面からの高さで定める。気塊の上昇速度  $w$  は

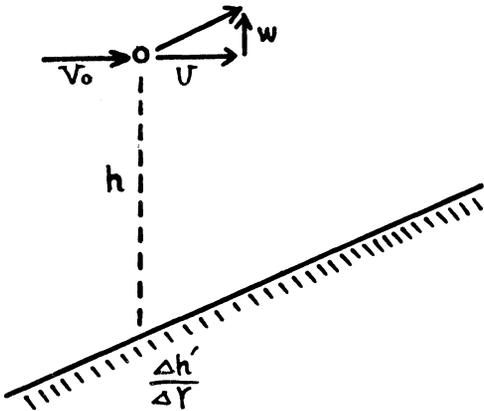
$$w = v_0 \left( \frac{\Delta h'}{\Delta r} \right) \exp(-ah) \quad (2)$$

とする。ここで  $v_0$ : 点  $P$  に達する風速の水平方向成分,  $\Delta h'/\Delta r$ : 下方地面の  $r$  方向の勾配,  $h$ : 気塊の地面からの高さ,  $a$ : const.

もとより気塊が地面に接しているなら  $\exp(-ah) = 1$  で  $w = v_0 (\Delta h'/\Delta r)$ ,  $h = 1000\text{m}$  で  $\exp(-ah) = 1/10$  とすると,

$$a = 2.30 \times 10^{-4}$$

となる (第2図)。



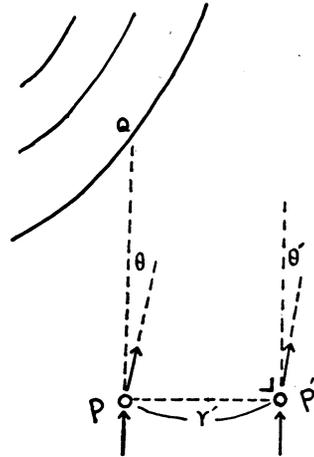
第2図 斜面上空の気塊の上昇

なお山が近くにありながら、気塊がその方向に進まない場合は、その点の進行方向に垂直な地点を山に向う気塊がまがる角度からつぎの式によって算出する。

$$\theta' = \theta \exp(-ar') \quad (3)$$

ここで  $\theta'$ : 山につきあたらない気塊のまがり,  $\theta$ : 山につきあたる気塊のまがり,  $a = 2.30 \times 10^{-4}$ ,  $r'$ : ふたつの気塊の間の距離 (第3図),

この方法により気塊の動きを連続的に追っていけば径路がもとめられる。実際問題としては連続的に追うのは困難であるから、適当な間隔を直進させてから気塊の速度変化をもとめれば近似的な径路がえられる。山の影響のない平野では間隔を大きくとり、気塊が山に接近してきたら間隔を小さくすれば十分である。追跡にあたっては水平方向のまがりと垂直上昇を同時にもとめて次々に



第3図 山につきあたらない気塊のまがり

延長していけばよいが、同一水平面の流れを考える場合は、考える平面より大きくはなれて上昇した気塊は順次上層の流れにくりいれることにする。従ってまず地表面についてもとめ、上層の上昇気塊を考慮しながら上層平面の流れを考えるべきである。

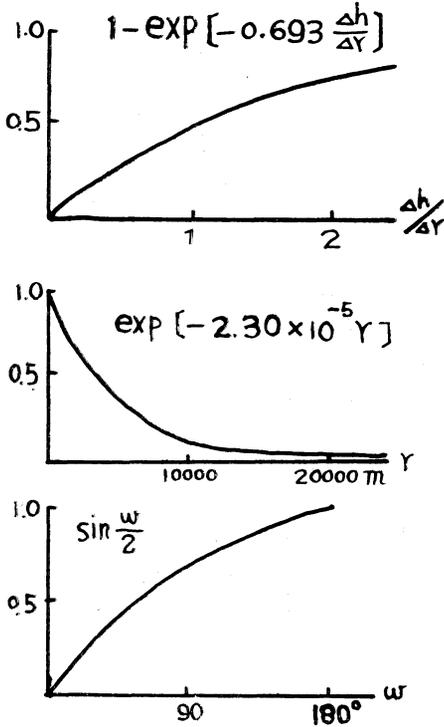
ところで、この方法は山の風上側での気流の変化を考えたもので、山をこえた気流の大勢は直進することになる。Förchtgött によると、数百mの山脈では山の高さ、風の強さなどの条件により、風下側におこる乱流・層流・たての乱れのウズ・波動・回転が分類できるとい<sup>6)</sup>。しかしさらに高い山では力学的条件だけでは解決できないように思われるので、今回は風上側のみを考え、風下側については今後熱的な条件も考えあわせてとりあつかうことにしたい。

### 3. モデル地形への適用

近似式の実用にあたっては、地形図から  $r$ ,  $\theta_0$ ,  $w$ ,  $\Delta h'/\Delta r$  などをよみとる労力、式の計算や作図の手数が問題となる。地形因子のよみとりは大型の分度器とコンパスによっておこなうが、複雑な地形からこれらの値をよみとる場合、測りかたによってかなりの差がでる。そこで気象現象に関係しない程度の地形変化はとりのぞき、平滑化した地形図をつくるとよい。また測定法を統一し、労力を少くして精度をたかめることも必要である。計算にあたっては各因子ごとに図式計算し、それらの積は計算尺でもとめた。(第4図)

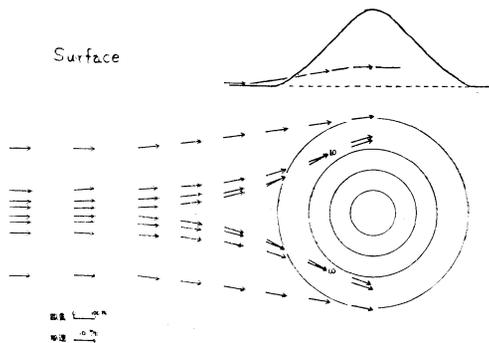
この方法によってどのような流跡線がえられるか、モデルの山をもちいてためしてみた。まず富士山のように均性のとれた独立峰(高さ 350m)についてもとめる

\* 高さ数百mの低い山では  $r = 1000\text{m}$  で  $\exp(-Kr) = 1/10$  として  $K = 2.30 \times 10^{-4}$  をつかう。

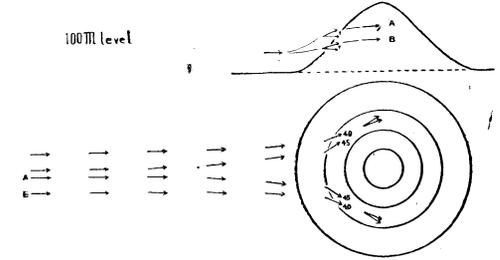


第4図 各因子をまとめる図

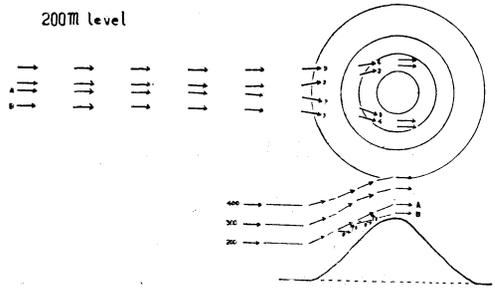
と、(第5図)のようになる。各高度に一樣に10m/sの風がふくとき、地表面付近(5・1図)、100m上空(5・2図)、200m上空(5・3図)について気塊の平面的な動きと垂直上昇をしらべた。矢印の長さは風速、矢の前にしるした数字は上昇速度をしめす。これによると、地表面付近の気塊は山の中心につきあたると、100mくらい上昇し、最大1.0m/sぐらいの上昇速度をしめす。100m上空では最大4.5m/sの上昇速度をもち、250m近く



第5・1図 孤立峰にむかう地表面の風



第5・2図 孤立峰にむかう100m上空の風



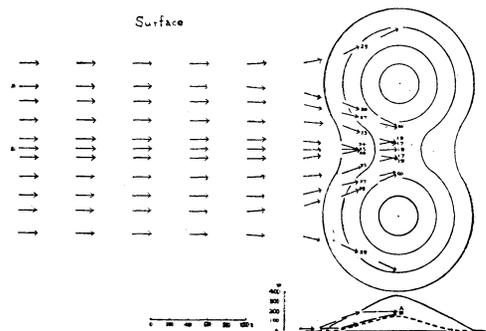
第5・3図 孤立峰にむかう200m上空の風

まであがる。200m上空の気塊には山頂より高くあがるものもある。山頂の高さを通る気塊は最大200mもちあげられるが、それ以上の高度では次第に影響が少なくなる。

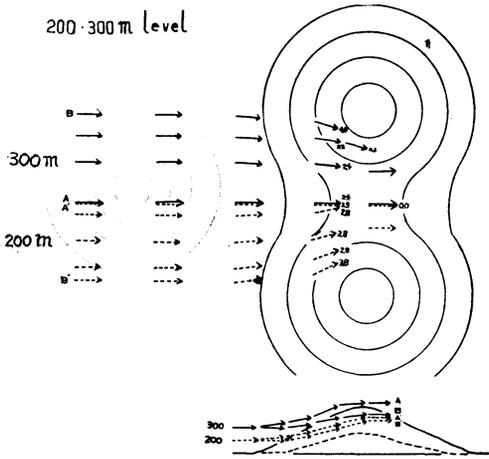
つぎに気流の収束がどのようにあらわれるかをみるため、二つの峰にはさまれた鞍部をモデルにとってみた。

(第6図)鞍部にあつまる気流ははじめ両端で垂直上昇が大きく、鞍部にさしかかると両端の上昇が減少して中心部が最大となる。収束は上空より地表面の気流にはげしい。

結果はだいたい常識的に想像されるようなもので、実際の地形にあてはめても傾向は一致すると思われる。今後流跡線の状態から発散量をもとめることができれば、



第6・1図 鞍部にむかう地表の風



第6・2図 鞍部にむかう上空の風

定量的なとりあつかいも期待できる。

4. 地形図への適用

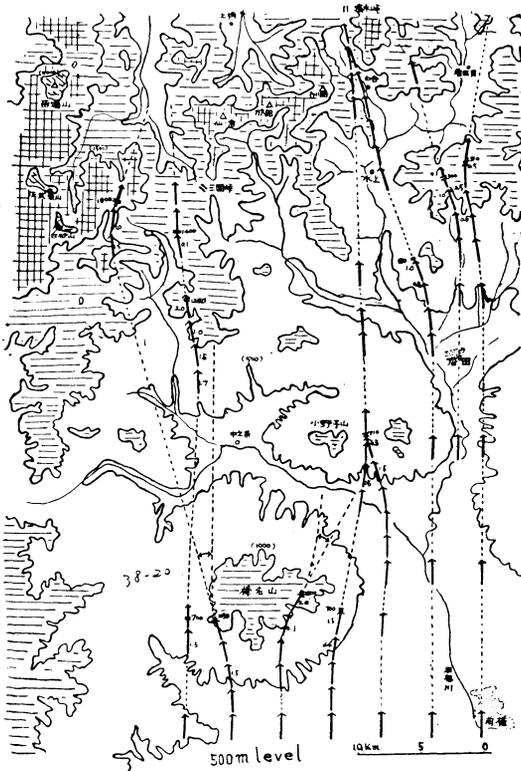
これまでののべた方法を実際の地形図にもちいれば、局地的な気象をしらべるのによいめやすとなる。当面の

問題として、

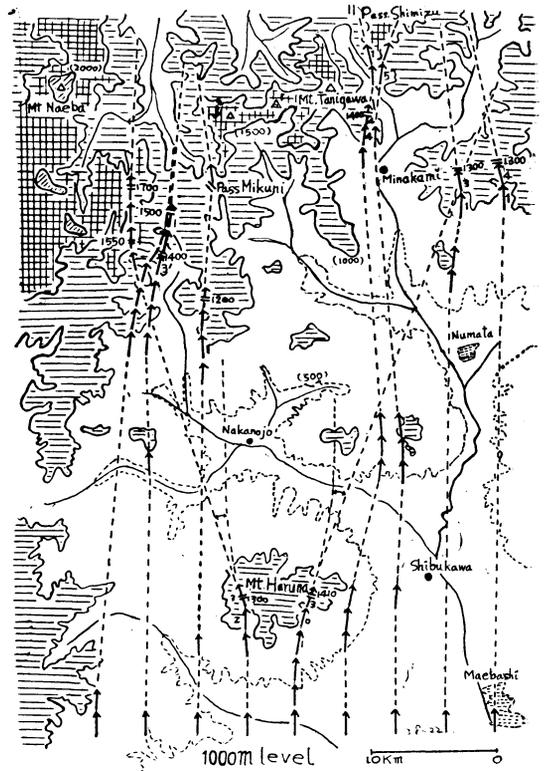
- (1) 特にはげしい収束のおこる場合の地形と風のふきかたの関係をしらべる。
  - (2) 地形と卓越風の関係をしらべる。
- (1) は雷雨の発生や局地的強雨の予知にやくだち、  
 (2) は気候の分野にやくだつ。

実際に適用する場合、スケールのとりかたと一般流のもめかたが特に問題となる。降水現象の最小規模は数百mであるから、距離の単位としてはkmをとれば十分であり、複雑な山地でのみ必要におうじて1/10kmまであつかえばよい。地形図は20万分の1のが手頃である。一方、一般流は特定の時間については上層天気図や断面図を内挿すればもとめられるが、測風気球観測による資料があればなおよい。

一例として前橋から谷川岳にいたる利根川流域の気流を〔第7図〕にしめす。関東平野の上空500mを一様に10m/sの南風がふくとき、気塊はまず赤城山と榛名山の影響をうける。赤城と榛名の間にあつまった気流はほとんど谷川連峰から清水峠にむかい、榛名の西を通る気流



第7・1図 利根川100m上空の風



第7・2図 利根川200m上空の風

は三国峠にむかう。図中、矢印の横にしるされている数字は上昇成分をしめし、径路の途中の二印についた数字は気塊が山をこえるときの最高到達高度をしめす。また点線は気塊が地面をはなれて上空を通過することを意味する。榛名山ではやくから上昇をおこし、基準面より多くのぼった気塊は、う回後直進する場合とすぐ一般流におしながされる場合の両極端の流跡線をしめた。実際には上層の気塊とのかねあいではこれらの間を進むはずである。

1000m上空でも傾向は同様で気塊は榛名山を境にして利根川上流へむかうのと三国峠方面にあつまるとにわかれる。(7・2図)

5. 山の気流調査

1959年5月、東京理大気象部は読売新聞社による谷川岳総合調査の気象部門を相当し、気象観測とともに気流の調査をおこなった。山をこえる気流を立体的にしらべるため、つぎのような方法をとった。

(1) 山脈の稜線上の峰や鞍部に適当な間隔で要員を配置し、指定された時刻に発煙筒をたく。地点ごとに煙の色をかえ、上から飛行機で写真(カラーおよび白黒)をとる。また地上からも撮影する。

(2) 気球をつりあいの状態か、あるいはごくゆっくり上昇するくらいに水素をつめて風上側の下方ではなし、2地点から測風経緯儀によって追跡測定する。また2地点から目じるしとなる地形をいれて気球を撮影し、後に写真をもちいて追跡する。目じるしの地形は別に測風経緯儀により方位角と仰角を測定しておく。

(3) 山の風下側の乱れをしらべるため、小型の気球数十個を風下側の下方から同時にはなし、横から8ミリシネカメラで撮影する。

準備期間が短かく、十分な手配はできなかったが、理大山岳部の協力で測風経緯儀2台、小型水素ボンベ2個、発煙筒10本各種の器材が荷上げされた。ところが観測期間中雨がふりつづき、山はいつも雲につつまれて気流調査により機会がえられなかった。

(1)については気象条件がわるいため危険で飛行機がかえらず、各気象観測点で発煙筒の性能実験をする程度にとどまった。その結果、山のスケールにくらべて煙の量が少なく、とりわけ赤や黄の色つきの発煙筒が不十分であることがわかった。この方法は火薬を多くもちいれば可能で、技術的な困難は少ないが、定量的な測定はむずかしい。

(2)は稜線がいつも雲の中にあつて山ごえ気流の測定は

できなかったが、谷間を上昇する気球を2地点から写真にとり、立体的な経路をもとめることができた。(後述)

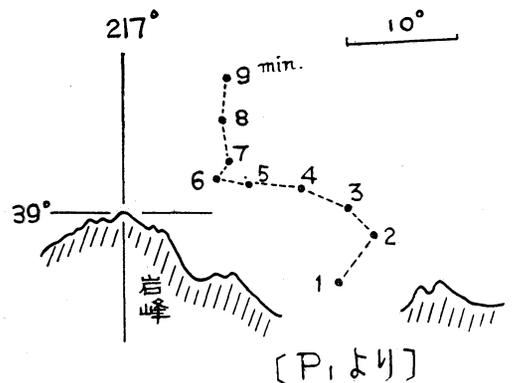
(3)も谷間でおこなったため、撮影した場所が適当でなく、雲底が低いので気球が十分な高度に達しないうちに雲にかくれてしまったが、一応記録はとれている。これについてはくわしくしらべて改めて報告したい。

6. 実測による検討

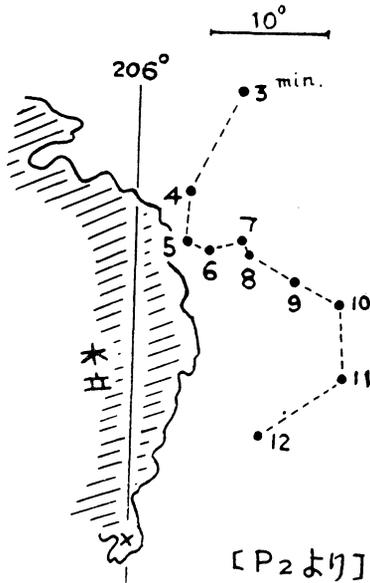
谷川岳でおこなった写真による測風気球観測の資料をもちいて、前にのべた近似式をたしかめた。

写真による測風気球観測 今回のはじめておこなった方法であるが、経費がやすく、手軽にできるのがとりえである。高度差が少なく見通しのきく2地点から、気球を同時に撮影する。その際写真の上で角度をきめてとなりの地形もうつす必要がある。山頂、岩峰、鞍部など、遠くの動かないものを目印にするとよいが、仰角が大きい場合は立木をつかうのもよい。カメラのレンズにはいろいろな収差があるので、できるだけしぼりをきかせた上、気球を視野の中央部にいれるようにしないと誤差が大きくなる。2地点を風向と直角な向きにならべると精度がよくなる。今回の結果では、直径30cmの気球でも、脊後が空であれば1000mはなれて十分うつる。写真をキャピネにのぼすと、角度1°が3mmくらいになる。

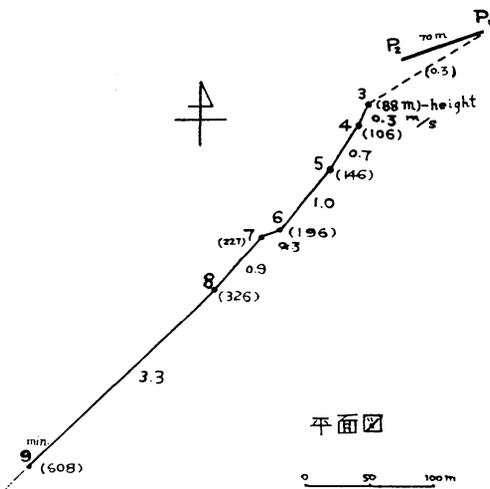
谷川岳一の倉沢で2地点から撮影した写真から、気球のみかけの位置をおうと〔第8図〕のようになる。気球の立体的な位置は、追跡点に高度差があつても、一方から方位角と仰角がわかれば、他方からは方位角だけできまる。〔第8図〕のよみとりから平面図〔第9図〕と垂直断面図〔第10図〕をつくった。これらにはカメラの収差をみこんでないが、視野の中央部をつかっているので、1°のオーダーまでのよみとりでは収差は無視して



第8・1図 写真による気球の追跡 (P1)



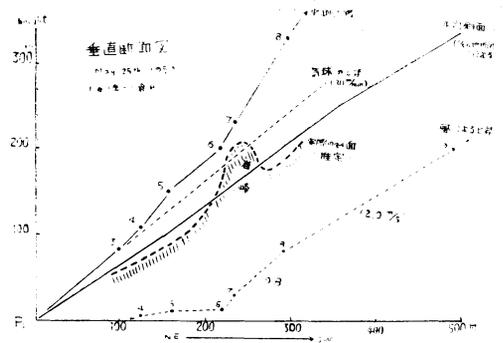
第8・2図 写真による気球の追跡 (P<sub>2</sub>)



第9図 写真追跡から求めた平面図

よいと思う。

近似式をたしかめる方法としては、実測から求めた風速の高度分布、気球自体の上昇速度、および地図から求めた風速の高度分布、気球自体の上昇速度、および地図から求めた地形因子により気球の径路を計算し、実測の径路とくらべてみるのがよい。ところが谷川連峰の地図は最もこまかいもので5万分の1のしかなく、1 km 以下のスケールにはあらずぎる。そこで上昇成分の



第10図 写真追跡から求めた垂直断面図

みを考え、実測による気球高度  $h$ 、地図による地面の平均傾斜 ( $\Delta h/\Delta r$ ) から逆に定数をもとめて、定数決定法の仮定をたしかめてみた。

表 各高度の定数

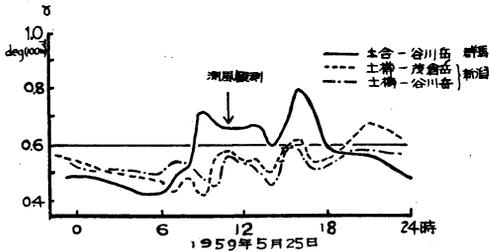
放球後の時間	$P_1$ より、 の平均 高度	$h$	$\Delta h/\Delta r$	$v$	$w$	$a$
分	m	m		m/s	m/s	
3~4	97	21	0.69	0.3	0.1	$3.5 \times 10^{-2}$
4~5	126	30	0.72	0.7	0.1	$5.4 \times 10^{-2}$
5~6	171	35	0.74	1.0	0.1	$5.6 \times 10^{-2}$
6~7	212	53	0.61	0.3	0.2	$-9.4 \times 10^{-3}$
7~8	277	91	0.76	0.9	0.3	$-1.8 \times 10^{-3}$
8~9	467	196	0.64	3.2	2.0	$3.7 \times 10^{-4}$
*6~7	171	15	2.0	0.3	0.3	$4.6 \times 10^{-2}$

\* 岩峰を考慮した場合

これよりも求めた各高度の  $a$  は表のようになる。200~300m 付近で負となるのが問題であるが、写真や目測によると〔第10図〕にしめたように、その付近に岩峰がある。地図による平均傾斜をもちいて実際の起伏を無視したためとみられる。ころみに岩峰を考慮した  $a$  をもとめると、〔第1表〕の\*印のように  $a$  が正となり、下層の  $h$  の値が近い場合と同じオーダーをしめす。

$a$  のオーダーは地面からの実質高度  $h$  と深い関係がある。  $h$  がますます小さくなり、200m 付近ではほぼ仮定と一致する。さらに上層までの資料がないためくわしいことはわからないが、 $a$  の高度による減少が地表面の乱流や摩擦の大きい部分だけか、あるいは上層までみられるかによって仮定式を改良できる。

なおこれらには大気安定度も関係するので、当時の気温減率をしめすと〔第11図〕のようになる。測風観測をおこなった群馬側の方が新潟側より減率が大きい。一般流が新潟側で上昇し、群馬側で下降していたことが影響している。測定時の安定度は中立の範囲にはいる。



第11図

さらに今回についても決定的な結論をうるには今回の調査だけではとうてい不十分で、5万分の1の地図でもまにあうくらいのスケール（少くとも水平距離が2 km以上、到達高度が1 km以上）で何回も測定してみなくてはならない。

7. 結 語

気流解析の究極の目的は地形的な発散と降水現象の関係をしらべることにある。今回はごく簡単な場合を仮定したが、ひきつづき各種の条件をくわえてしらべてみたい。また今回は実測が容易なため流跡線について考えたが、発散やウズ度などの分布をしらべるには流線の方がつごうがよいので、地形因子と初期条件から直接流線の分布をもとめる近似式も考えてみたい。

また実測の方法として、カメラによる測風観測をさらに発展させ、精度をたかめている。例えば気球の径路にそって要員を配置し、条件のよい距離や角度をたもって

撮影するリレー方式や、高密度フィルムを利用した夜間用の方法がある。夜間用の方法はすでに実験でたしかめられている。豆電球に測定以上の電圧をかけると、寿命は短くなるが非常に明るく輝やく。これを気球につけてとばし、カメラにSSSフィルムをつめてシャッターを解放のまま固定しておくと気球の動きが輝線としてうつる。一定時間ごとにシャッターをおろすと、輝線にきれめができるので、その点をおって各時刻の位置をきめる。カメラを固定した角度、山の形、めじるしにもした灯火などの像を角度のきめてとする。

学校の気象サークルは研究資金がとほしいかわりに、考えたことをすぐ実行に移せる利点がある。今後も自分たちで工夫するような研究をやらせたいと思う。

参 考 文 献

- 1) 吉川(1959): 冬季中央アルプスの気象, 天気 6, 5.
- 吉川(1960): 谷川岳の局地気象, 天気 7, 8.
- 2) M. Abe,(1932): The Formation of Cloud by Obstruction of Mt. Fuji, Geophys. May. 6, M.Abe, (1942): An Attempt to make Visible the Mountain Air Current. J. Met. Soc.
- 3) J. Förchtgött,(1949): Wave Streaming in the Lee of Mountain Ridges, Bull. Met. Tchecosl. Prague, 3. その他.
- 4) 鈴木清太郎(1960): モデルによる山越気流の機構解析(講演), その他論文多数.
- 5) P. Queney,(1947): Theory of Perturbations in Stratified Currents with Application to Airflow over Mountain Barries, Chicago Univ. D. Misc. Rep. No. 23. 他, Scorer, RS. (1949~54): Theory of Airflow over Mountains, I~III, Quart. J.R. Met. Soc. 75, 79, 80.
- 6) 大西外史(1959~61): 山越え気流について, 気象学会に発表.