

模型による山越気流に関する研究⁽¹⁾

鈴木清太郎* 矢吹 萬寿**

§ 1. 緒 言

筆者の一人が、1948年5月3日福岡県浮羽郡吉井町で暴雨にあった際、狭い附近一帯の農作物が被害甚大で特に裸麦において著しかった。風力の最も強かったのはこの地帯の南を東西に走る耳納山系から吹き下した南風の時で、風向が北に転じて後初めて風力は衰えた。この日吉井町から30km離れた羽犬塚町(現名筑後市)の観測は最高風速9m/secで浮羽郡よりはずっと弱い、しかも農作物の被害からも当日の強風は耳納山の北斜面のみの極めて狭い局地的な風であることが判った。その後の調査からこの地方には耳納山から吹き下す強風が度々あって、強風対策がこの吹き下し風に向ってなされていることも明かとなった。

この興味ある事実からこの研究が始められたが、気流が山脈を横断する時風下に莫大な損害を与えていることはこの一例に止まらず、最近迄にかなり調査報告され、岡山県の広島風、愛媛県のヤマジ風、那須山系の季節風、神戸の北風、あるいは悲恋物語迄加わって平安朝時代から有名な琵琶湖の比良八荒(講)等があり、またこの様な風は世界各地に見られるもので、チェッコとポーランドの国境にある Riesenberg、英国の Crossfell 連山、スウェーデンの Ovik 山および米国加州の Owen 谷等の報告があり、なかんずく J. Küttner による Riesenberg の調査は最も古くしかも精細を極めている。

わが国でも最近これらの調査が行われ、各地の実態が幾分判って来たが、筆者らは1948年以来各地の調査や高層資料の解析を行うとともに、実験的にも研究を進めて来た。今その大様について述べたいと思う。

後にも述べるが、以上の山脈に吹く風は北風(Ovik, 広島)、北西風(比良)、南風(Riesenberg, ヤマジ, 耳納山)、西風(Bishop, 鈴鹿)、東風(清川グシ, 生駒山)と風向を異にし、天気も台風の時であったり、季節風であったりして異なるが、これら地方性の小異を捨てると同一現象であると結論したい。

なお、これらの研究調査が日本では農作物や家屋の被害から取上げられたのに対して、外国では飛行機事故、グライダーの研究、あるいはその時に出来る高層雲の成因調査が問題となって始まり、従って研究対象が日本で

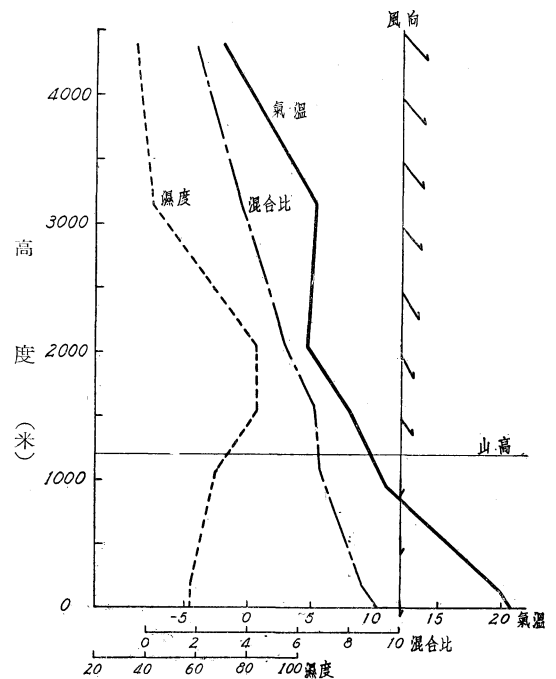
は地表風であるに対し、外国では高層大気が主体となっていることは興味深い点である。

§ 2. 現象の主な特性

今これら内外の調査研究、すなわち欧米4カ所(Riesenberg Crossfell, Ovik, Bishop,) 日本における4カ所(広島, ヤマジ, 耳納, 比良)——耳納および比良は筆者らの調査せるものの一つで、この比良八荒の詳細については後にゆずる——の調査を総合して見ると共通せる点が極めて多く、その特性は大体次の如きものである。

(1) 地勢は、1000~1500m程度の山で、この風の起る処は平滑な斜面で平野に連なり、前面に障害物があるてはならない。これは例外のない点であるが、さらに大半が、背後は山続きである。斜面は各地共非常によく類似し、1:5~1:6程度である。

(2) 風向は勿論山脈に直角で平野部に向って吹く時に急激で、例えば比良八荒は南南西の時は余り強くない



第1図 米子における気温、湿度、混合比の分布
1952年9月29日(この時広島風起る)

* 気象研修所

** 大阪府立大学農学部—1956年2月20日受理—

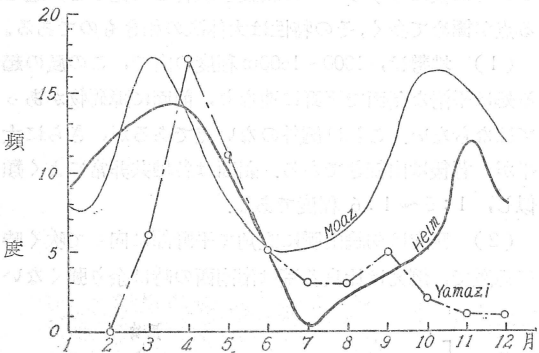
(1) 昭和30年5月、日本気象学会30年度総会並に、昭和30年10月風に関するシンポジウムにおいて発表せるもの。

が、北々西に移ると急に風速が大となり、広戸でも北に転ずると急に風速を増す。

(3) 高層資料で検討すると、山越気流があるとき必ず山高近くで気温逆転がある。寒暖の2前線が来るときは気温逆転は必ず随伴する。しかし気温逆転は低気圧に伴う狭義の前線を前提とするものではないが、多くの場合では山越気流と前線とは分離しがたい関係にある。(第1図)

(4) 時期別に見ると各地共3~5月、9~10月の春秋に多い。この季節は低気圧、不連続線の通過が頻繁で特に日本では台風によってもたらされることが多い。今その1~2例を第2図に示したが、上述の事柄が極めて顕著であることが判る。

さらに時刻別に見ると昼間よりも夜間に起ることが多い。これは気層の安定度、気温の逆転等に関連があるも△



第2図 山越気流の発生する季節別頻度
春秋に多い

△のと考えられる。

(5) 特殊な雲が発生する。前述せる如くこの山越気流の発達する時は極めて特徴的な雲が発生する。この強風が吹き始める前(数時間)に山嶺に風枕、桁雲、風雲 Helm cloud あるいは Föhnmauer 等その地方特有の名前で呼ばれる雲が現われる。例えば比良八荒はこの雲を唯一の予報とし、湖上に出ている漁船は急いで帰港退避している。この風が吹き出すと山頂から4~8kmの地点の大体山高程度の高さに rotor と呼ばれる定常雲が発生する。この位置は風速が大きい程山から遠ざかる。風の強いのはこの rotor 迄で rotor の下部は風は弱い。比良八荒の場合は山嶺から約8kmの湖上中央部に発生する。写真はさき大谷東平氏が本誌3巻3号に掲載されたので省略したが、1955年10月20日台風26号(5526)が名古屋付近を通過せる頃発生した状況を撮影したものの一枚で、この現象の典型的なものというべく、手前の黒い雲が rotor である*。写真1に鈴鹿下し時の写真を掲げた。これは1955年12月28日午前6時30分関西線車中より撮影したものである。

(6) 風下の気温が風速と共に上昇することがある。すなわちフェーンを伴うことがある。

§ 3. 実験への仮定

山越気流についての従来の理論を述べる余裕はないが、Lyra の数理論は大気は等温で風速は一様、地上風も無風でないとしている。Queney は成層とし、かつ地球廻転の考えを入れた点は Lyra より進んでいるが、実際



a

b

写真1 鈴鹿下し時の雲の状況 (昭和30年12月28日6時35分項関西線急行車中より撮影)

a: 鈴鹿山に出来た笠雲。手前はロートル雲

b: 線路より海岸側に出来たロートル雲 (少くとも5本は観察された。)

や実験とも合致しない。Scorer は風速は上に行く程強くなるとし、不連続面も考えており実際とも可なり一致はしているが、下層のところは実際とは一致しない。このような問題——渦あるいは rotor 等——は岡田博士も指

摘されている如く、現段階では実験的に解析を進めるのはかない。

この山越気流の問題点は言う迄もなく、山の風下側に渦が出来ないで、強烈に吹き下して来ることであって、

* 比良八荒の調査については別に精しく報告したいが、当日比良山麓の被害は極めて大きく、刈取り前の水稲は刈が吹き飛ばされ、収量皆無の水田もあり、大半が50%以上の減収となり、大木・家屋の倒壊もあった。対岸では水稲の被害は少なかったが、山麓では風速は23m/secであった。

普通の状態ならば当然風下側に渦が発生すべきである。

山麓で強風に襲われることの説明として物体が斜面に沿って落下すると同様に空気塊を考えてみる。すなわち今吹き下す空気の密度を ρ , 周囲の空気を ρ' , 山高を h とするとき, 重力の加速度によって山を下る間に得られる風速 V_g は, $V_g = \sqrt{2h(\rho - \rho')g/\rho}$ となり, 山頂における風速を V_0 とするならば, 山麓では $V = V_0 + V_g$ となって大風速を得ることが判る。しかも他の平地での風速は V_0 よりも可なり小さいから山越気流と他の平地との速度差は極めて大きい。もちろんこの計算は大略のものであり, 地表との摩擦を無視し, また雲の発生のためや断熱圧縮のための密度の変化を無視しているばかりでなく, 流体として論ぜず単に1個の落体として論じている。

上述のことから結局気流が山腹に沿って吹き下すことが判れば問題が解決されることになる。一般流体力学の論ずるところでは山の風下側に渦を生ずるから, 特殊な大気条件によって吹き下しの気流が生ずるものと考えられる。前節に挙げた特性の中, 大気条件と考えられるものは不連続線の存在であることから, この点が本質的なものと考え実験を行った。

§ 4. 実 験

a. 実験装置 装置は次に述べる2種類の水槽を用い

た。水槽の一つは長さ150cm, 巾6cm, 高さ20cmの両面ガラス張りのもので, 液体を動かすことは出来ないから山の模型をモーターによって任意の速度で動かし, その時の液体の状態を写真にとった。第2の水槽はちょうど Göttingen 型風洞の如く水を廻遊せしめるようにした。従って山は固定されているから観察も容易である。これは直線部長150cm, 巾10cm, 高さ30cmとし湾曲部は内半径25cmとした。勿論測定部は両面ガラス張りとしてある。水の流動は水車によって行うため乱れるので整流格子を取付けた。

山の高さは3cmとした。山の形も重要条件であるが $Z = h / (1 + \frac{x^2}{a^2})$ とした。 h は山高で Z は中心軸から x なる水平距離での高さである。 a は常数であるが本実験では $a = \frac{1}{2}h, h, 2h$ について行った。富士山の断面形は, $a = h$ に, 広戸, ヤマジ等の如く山越気流の発達する山形は $a = 2h$ にほぼ近い形をなしている。

b. 実験結果

1. 全層一様な密度を有する場合 液体は水とし, これにアルミ粉末を入れて流線を見る。これは isentropic な大気状態と対比することが出来よう。実際と模型実験との相似律はこの場合 Reynolds 数が適用出来るものとするならば, 山高1000m, 風速30m/sec, 渦動粘性係数を 10^5 程度とすると $Re = 3 \times 10^3$ 程度のものとなる。写

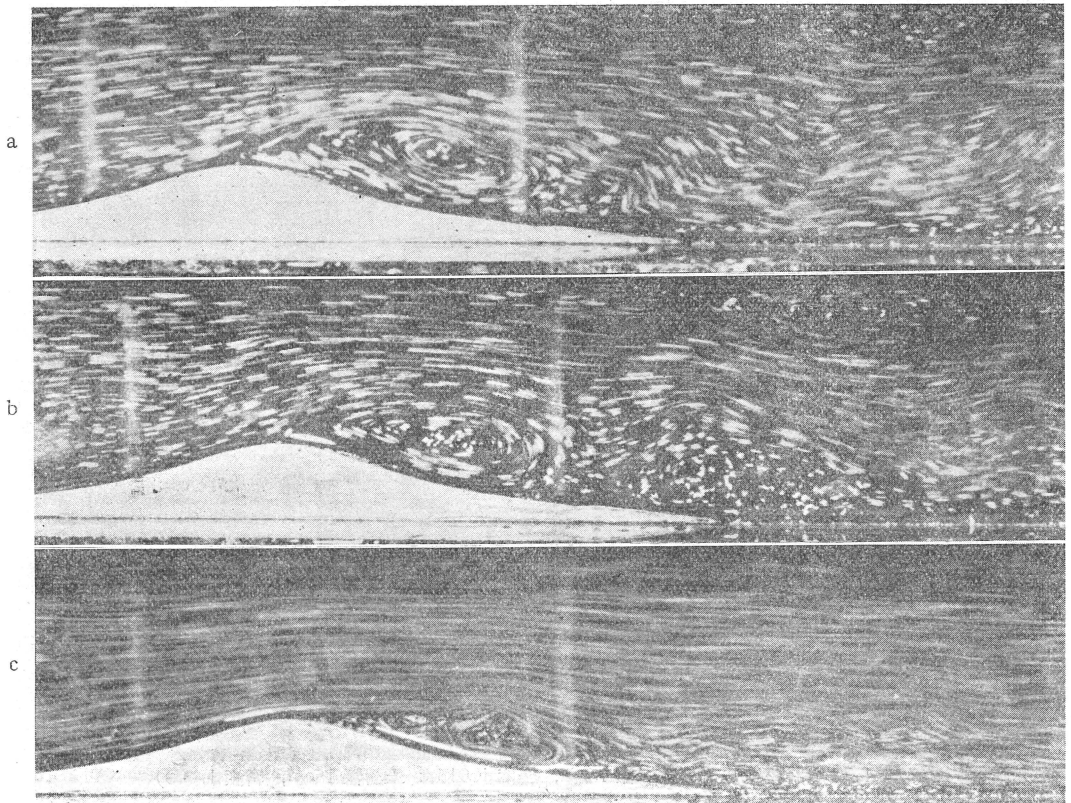


写真2 齊一流体における流線

a: $Re = 1300$ b: $Re = 2500$ c: $Re = 6000$

真2-a は流速約 5 cm/sec で $Re \approx 1300$ 程度の場合である。ただし山の形は $a=2h$ である。この程度では大きい一つの渦が山に固定して生ずる。しかも山の頂上から渦が始まり特徴的な形をしている。従って山腹では吹き

下しとならず逆流となり、流速は主流速の 1/3 以下となっている。しかし山頂部での逆流はかなり強い。写真2-b は Re 数が 2500 程度の場合である。風下側の渦は数を増すと共に小さくなって来る。山頂附近に出来た渦の回

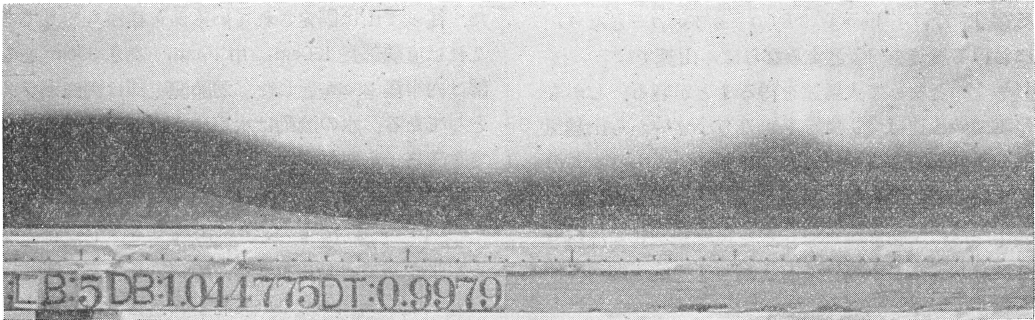


写真 3 二成層流の状況

流速 9 cm/sec

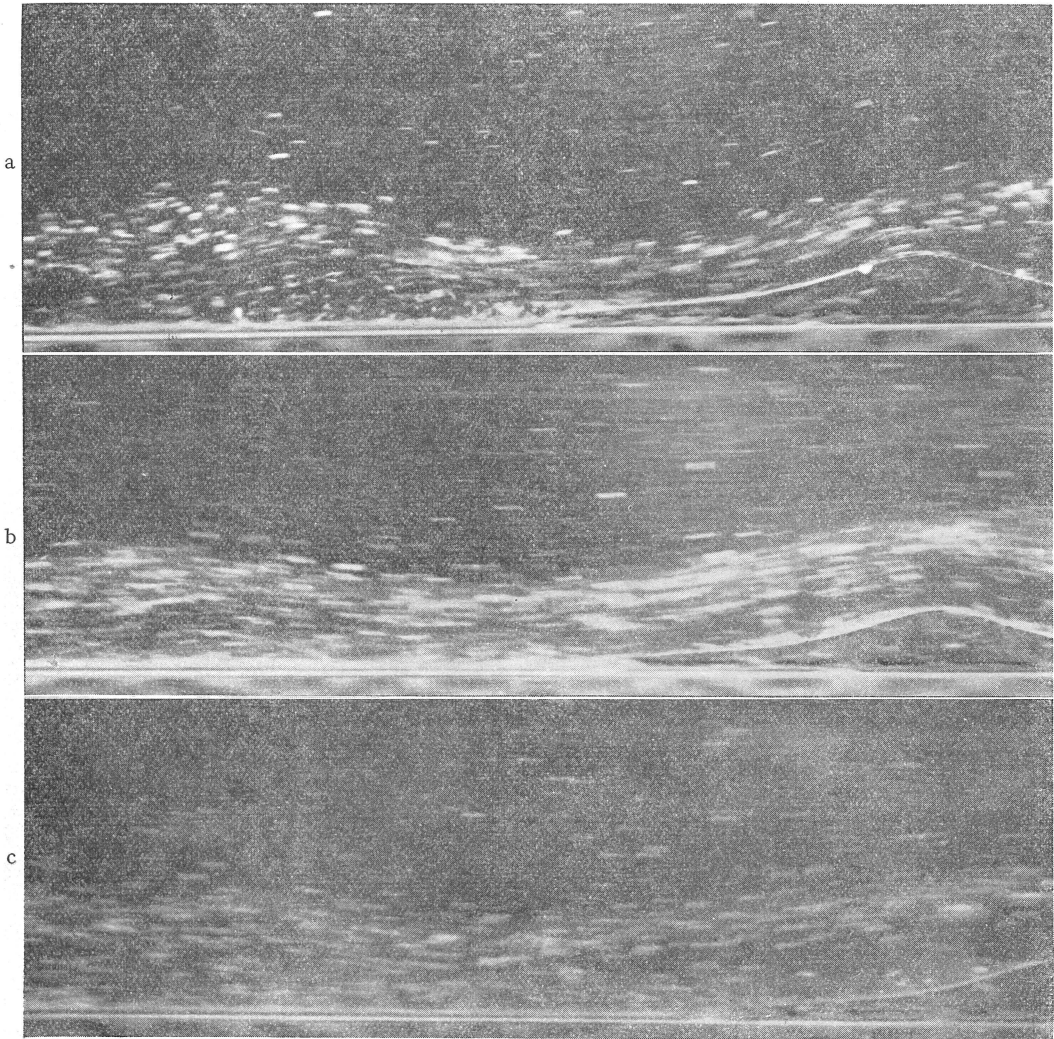


写真 4 2成層流の状況 (下層深 15cm, 密度 1.015 : 上層深 15cm, 密度 1.000)

a: 流速は 4.2cm/s で、緩速度のとき

b: 流速は 6.0cm/s で、まさに山腹に渦生れんとす

c: 流速は 13.0cm/s で、この速度では山腹に渦が生れている

転速度は非常に速いが、それ以後の渦は主風速の 1/5 以下になっている。地表では勿論逆流で山頂に向かって吹き上げている。写真2-cは前2者と同様な条件で $Re=6000$ の場合で渦がより小さくなり、その数を増して来る。前2者の場合渦が山に固定しているに対してこの場合は規則的な週期で発生して流れて行き、Kármán渦列と全く同様なものである。この場合のように速度が大となって Re 数が大きくなっても山頂から渦の効果が出ていることは興味深い。

以上3実験は齊一流体の場合で、これらは障害物が板、円筒等の場合これに近い現象があることは多く知られている。さてこれによって isentropic な大気条件ではわれわれの言う山越気流は発生しないことがわかる。まして気層の不安定な場合には山越気流は生じないことが考えられる。

2. 密度を異にする2層 密度を異にした2成層流の場合には重力が働くから Re 数を用うることは出来ないから、ここでは1種の Froude 数 (Fi) を用うることとした。すなわち

$$Fi = u / \sqrt{gh \Delta\theta / \theta}$$

ただし、 u は風速、 h は成層圏迄の高さ、 θ は温位である。模型では $\Delta\theta / \theta$ の代りに $\Delta\rho / \rho$ とする。 ρ は液体の密度である。

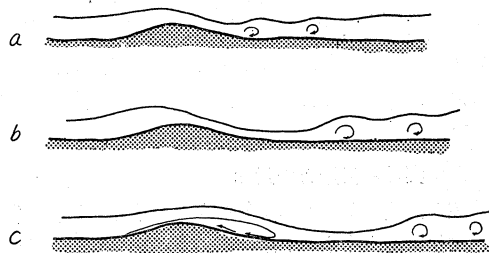
$\Delta\theta = 10^\circ\text{C}$ $u = 30\text{m/sec}$ とすると $Fi = 0.45$ となる。従って模型では $\Delta\rho$ を 0.04 とし液層深を 15 cm 程度とすると、 $u = 11\text{cm/sec}$ 程度のものに対比することが出来る。この問題解決にあたりこの Fi 数が適当とは言えないであろうが、一応の目安として用いた。

下層を密度 1.04 の塩水とし、上層を 1.0 の水を用い下層深 5 cm、全層深 15 cm、山の速度 9 cm/sec として上の条件に大体合致した場合の実験写真が写真3である。この場合は山の風下側には渦を生ずることなく綺麗に流れ落ちて行き、かなり離れた点で廻転部 (rotor の出るところ) の渦が出来、以後波形を描いて行く。この実験写真は比良あるいは鈴鹿の実際の写真とかなり似た状況を示していて、われわれの問題の山越気流を解決するものと考えていろいろ条件を変えて実験を行った。別に実験条件を変えた場合の写真を示す。この条件も仲々複雑であるが、大体次の3つの大きい条件によって決定される。

(i) 速度を増すにつれて波形が大きくなり回転部分が後方に遠ざかって行き、さらに速度を増すと山腹に渦が出来始める。これの模図を第3図に示す。渦の出来た場合の流線は写真4-bからもうかがわれる。

(ii) 不連続な2成層の密度差が大きい程山腹での渦は出来難く、従って山越気流が発達する。

(iii) 不連続面と山との高さの差によって現象が異なる。不連続な2成層をなしていても不連続面の高さが、

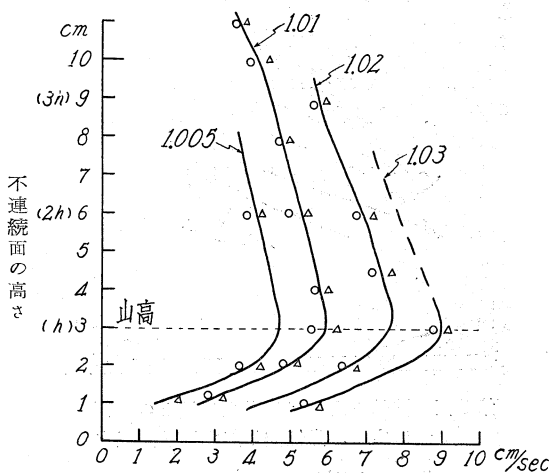


第3図 2成層流模図

- a: 速度の遅い場合
- b: 速度の速くなった場合
- c: さらに速くなり山腹に渦を生ずるようになる

山の高さより高くなって行く渦の出来る限界速度が小さくなって行き、2層ではあるが下層部は Re 数の適用範囲に入って行くことを示す。

以上の条件を変えて山腹に渦の出来る限界速度を求めたものが第4図で、上述の事柄を明瞭に示している。ただしこれは山形が $a=2h$ のものについての実験であり a の値によって限界速度の異なることはもちろんである。不連続面を高くして山高に接近させると急速に限界速度は大きくなるが、山高を過ぎると限界速度が小さく



限-界-温-度

第4図 渦発生限界速度 (山形 $a=2h$)

限界の判別困難で、明瞭に渦の発生した速度を Δ 印、明瞭に渦の発生しなかつた速度を \circ 印で示す。図中の数字は下層の密度、上層の密度は 1.0

なって行くことは興味深い。

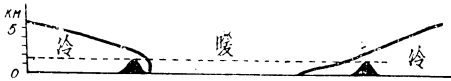
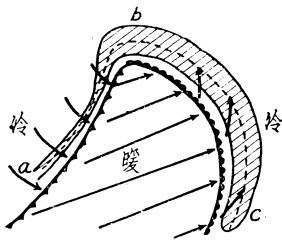
3. 密度が連続的に変化する場合 これは大気が安定な場合である。実験的には密度を連続的に変化せしめることは出来ないから、全層を 15 cm 深とし、1 cm 毎に密度を異にする多層流とした。最下層は 1.030、最上層を 1.00とし各層間の密度差は 0.002 であったが、実際は流入時の混合で略連続的に変化していると見做して大差なからう。山形は $a=2h$ について行った。山の速度

6 cm/sec を過ぎると山腹に渦を生じて来た。すなわち、密度が連続的に変化している場合速度が小なる時は山越気流が発生はするが、速度が少し大きくなると渦が発生して来る。もちろん安定度が大きである程山越気流は発達し易い。

§ 5. 実験と実際との対比

前述の実験によると山越気流が発生するには山高附近に不連続面が存在する2層流が、あるいは極端に安定な成層をなしている場合とが考えられた。しかし、後者には強力な発達を考えられない。結局前者の場合の条件がこの問題解決の鍵と考えられる。前掲の山越気流の発生した場合の高層資料をこの点について見ると必ず山高附近に不連続面のあることが判る。

次に比良八荒, 広戸風等の場合は寒冷前線, ヤマジ風, 耳納山の風は温暖前線であることに對する疑問については次の如く統一して考えることが出来る。すなわち第5図の如く, 寒冷前線の場合は前線の通過後に, 温暖前線



第5図 前線と山越気流発生区域との関係
影は山越下降気流を起す区域, 黒山は山脈を示す

の場合には前線の通過前に山越気流は発生するもので、何れの場合にも下層は冷気塊であることが必要である。この間の詳細な調査資料はないが、降雨現象や風向等からこの考え方が裏付けられる。例えば、ヤマジ風の場合発生前は上層風は南風であるが、下層は北風であることが多い。その後下層も南風に転じヤマジ風が発達し、雨になって風力は衰え止む。これは最初不連続面が高く齊一層の実験の場合に相当し、風下側に渦を生じているから、上層は南風に対して、地上風は北風となっている。次第に不連続面が山高に近づくにつれて山越気流が発生し、吹き下しの南風となり、前線通過による降雨が発生し、通過と共に風は衰えることとなる。比良八荒では最初は南々西の風が吹いているが、それが急に北西に変化

して吹き出すと危険だと云っていることから、明らかに寒冷前線通過後に発生することを示している。

次に特殊な雲の発生は附随現象と云うべきであろう。不連続面が山高附近で、凝結高度をこの附近とし、波状雲と同様に考えれば、風枕、ヘルム雲等の笠雲の発生も、風上の気流の廻転による rotor 雲の発生も当然と言うべく、前述の実験写真と対比して考えれば明らかとなる。

春秋に多いのは、不連続線、低気圧、あるいは台風の通過する季節であり、また夜間に多いと言われるのは気温の逆転による気層安定のため発達を容易にするものと考えられる。

以上を結論的に言えば、強力な風系が存在し、山の高さ附近に不連続面があれば、山越気流が発生する。逆に強力な風系があっても不連続面が山高附近になければ山越気流は発生しないと言えよう。もちろん山の前面が、海、湖、平野であって開けた裾野が発達していなければならないが、この様な観点から地図上で当然山越気流が発生すると考えられる地点を選んで調査するとやはり発生していることが判る。例えば、生駒山、脊振山、鈴鹿等の山系がその例である。

§ 6. Föhn について

一般の山越気流については一応終るが、山越気流の一種である現象について論及したい。Föhn に対する理論は Hann と Ficker との2つの説がよく知れている。Hann は気流が山を越すことにより、高温乾燥する理由を熱力学的に説明しているが、何故に暖められた風が急速に山を吹き下りるのかについては説明がなく、単に Hann だけの理論では Föhn 現象の完全な説明とはならない。われわれの実験から言えば、安定した2層、すなわち、山高附近に不連続面がなければならぬと結論したい。これは Ficker の理論中の北フェーンとかなり似ているようであるが、停滞した冷気流とするより、寒冷前線と考えた方がよく、南フェーンについては Ficker は気流の下降を遠方にある低気圧の吸出し作用としているが、単にこれだけでは山腹には渦が生ずると考えなければならない。従って Ficker の言う南フェーンと云うものは温暖前線によるフェーンと考えたい。従ってわれわれのフェーン説は安定な2気層があり、その不連続面が山高と同程度の高さであるとする点で Ficker 説とも異なる。

本稿を終るにあたり、本研究の一部は関西気象協会の研究助成金によってなされたことを記して同協会に感謝の意を表したい。実験にあたり大阪府立大農業気象研究室宮川逸平氏ほか室員の協力を得また種々御援助を得た大阪管区気象台長大谷東平氏並びに大阪府立大学西内光教授に対しそれぞれ深甚なる謝意を表する次第である。最後に論文作製にあたり種々忠言を与えられた中央気象台研修所教官関谷博氏に対し厚く御礼を申し上げたい。