

力学効果により谷筋に沿って吹く風*

木 村 富 士 男**

要 約

数十 km 程度の幅の谷の底において、上層風あるいは地上地衡風と風向がほぼ反対で、かつ谷筋に平行な風がよく観測される。このような風の吹く機構はかなり複雑なものと考えられるが、地形の力学効果が重要なものと考えられる。伊那谷にある飯島と北上盆地にある盛岡の地上風と地衡風の関係を調べ、地衡風と地上風がほぼ逆向きになることが、しばしばあることを示した。また簡単な数値モデルにより、その機構を調べた。

1. はじめに

山間部では風が谷筋に平行に吹きやすいことは広く知られている。地上天気図で気圧傾度が弱く、雲の少ない日などは、山谷風などの熱的な局地風として説明されている。この場合には風向や風速が顕著な日変化をするのが普通である。

数十 km 程度の谷の底において、日変化が顕著ではないにもかかわらず、上層風あるいは地上地衡風と風向がほぼ反対で、かつ谷筋に平行な風がよく観測される。このような風の吹く機構はかなり複雑なものと考えられるが、地形の力学効果によるものと推測される。

2. 地衡風と逆の地上風

第1図は河村(1966)により解析された中部日本の冬の地上風系である。この論文の書かれた時代にはまだアメダス観測網はなかったので、区内観測所で行われている午前9時の観測をまとめたものである。河村は強い冬型では、海岸部をのぞき風系の日変化は弱いので、9時の風系でほぼ一日の地上風系を代表しているとしている。最近のアメダスのデータをみてもそれは正しうである。さて第1図は季節風のサイクルの最盛期における地上風系である。図に示されているように、このケースのときの地衡風は北を中心とする東西それぞれ20度の範囲内にある。また等圧線は低気圧性の曲率を持っているのが特徴である。図によると、地上風系は地形の影響を



第1図 河村(1966)により解析された中部日本の冬の地上風系。地衡風が北を中心とする東西それぞれ20度の範囲内にあり、等圧線が低気圧性の曲率を持つとき。

強く受け、風の通り道が作られているのがわかる。ここで注目することは、伊那谷では地衡風と正反対の南風が吹いていることである。伊那谷は南アルプスと中央アルプスにはさまれた南北に長い谷で、谷幅(峰一峰)約40 km、深さ2,000 m程度である。

季節風が弱まりはじめると、気圧傾度の向きは変わらないものの、等圧線の曲率は高気圧性になる。このときには地上風系は別の型になり、伊那谷では南風は消滅する。一方、季節風の吹きはじめでは地衡風の向きは西北西を中心として両側40度の範囲にあるが、この時は伊那谷では強い南風となる。また伊那谷だけではなく、本曾谷や

* Mechanically induced winds blowing along valleys

** Fujio Kimura, 東北大学理学部地球物理

—1991年4月18日受領—

—1991年6月12日受理—

松本盆地にも強い南風が吹く。

河村による上の指摘はアメダス・データによっても確認することができる。アメダスでは伊那谷の南風と松本の南風はつながっているようには見えない。さらにおもしろいことは相模湾上の不連続線の位置とかなり正確な対応関係があることである。この不連続線は先の河村の解析でも触れられているが、三国山脈を越え関東平野を南下してきた風と、東海地方から伊豆半島を越えてきた風の境界である。この不連続線が大島と房総半島先端の中間点より北東側にあるときには、伊那谷には南風が吹き、南西側にある時には北風になる。これは伊那谷の風向が季節風の風向により決まっていること、つまり季節風の力学的な効果によって南風が吹いていることを示唆している。

谷の中で総観規模の地衡風と反対の風が吹くことは、他の地域でも知られている。

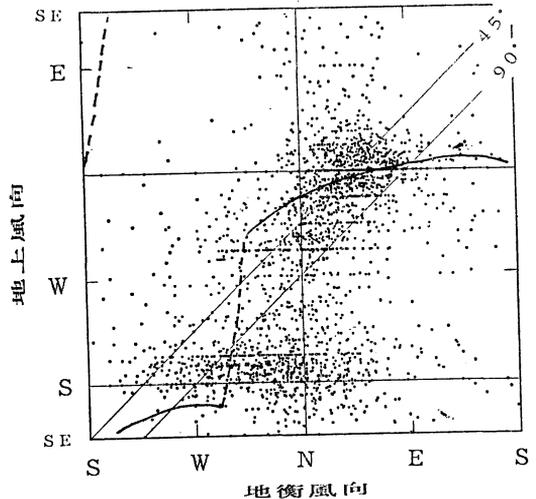
オーストラリアの南東部にある Latorobe Valley では上層風が西北西のとき、谷底ではしばしば東風が観測される。ドイツ、ライン川沿いの谷でも地衡風と逆向きに吹く風が観測され、またそのメカニズムが調査されている (Wipperman and Gross, 1981; Wipperman, 1984)。この谷は山脈に挟まれた谷ではなく、平地 (あるいは台地) に谷が刻まれている。

このような風系を説明する機構の考察も行われている。宇田川 (1966) は松本に吹く南風の説明に、山越え気流に伴う局所的低気圧 (松本低気圧) の役割を挙げている。この低気圧は北アルプスの風下低気圧であり、南風はここに向かって吹くと説明されている。杉原・浅井 (1977) は松本の気圧変化と風速の統計的關係から宇田川説を支持している。しかしこの説明では、河村が指摘しているような、日本海側から谷沿いに吹く北風が弱いことをうまく説明できない。

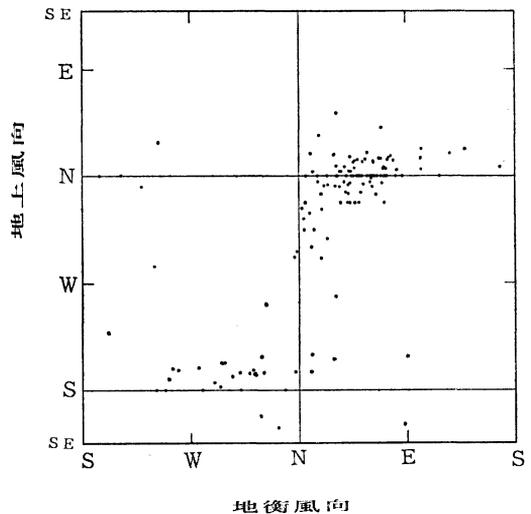
Wipperman (1984) は地衡風と逆向き of 風系に関しての数値モデルを提案している。従来のエクマンスパイラルの式に地形効果の項を経験的に加えたモデルであるが、力学的な解釈は明確ではない Gross and Wipperman (1987) は力学方程式に基づく数値シミュレーションを実施している。使われているモデルでは地面摩擦・乱流を丁寧に扱っているが、メカニズムの解釈はあまりされていない。

3. 伊那谷における地上風と地衡風の関係

伊那谷にあるアメダスの飯島局での地上風向と地衡風

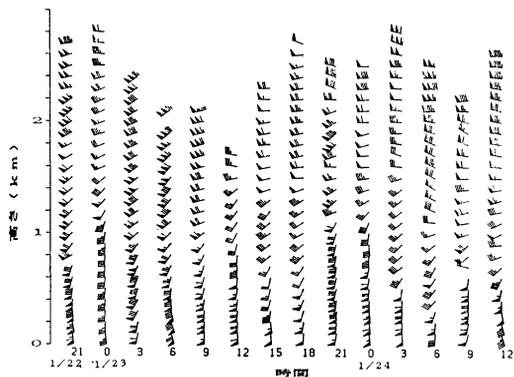


第2図 伊那谷にあるアメダス飯島局の地上風と地衡風の風向の關係。地上風速が 1 m/s 以上、地衡風速が 5 m/s 以上のとき、点線と実線は Wipperman and Gross, 1981 によるライン川沿いの谷に吹く風の最多風向と地上地衡風の關係。

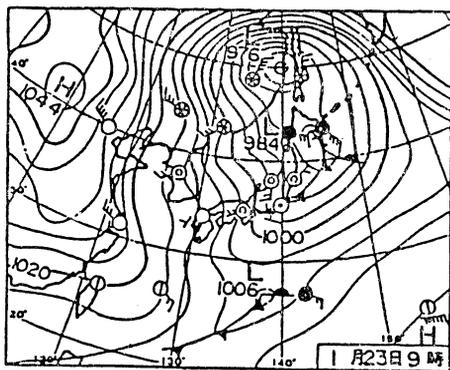


第3図 2図と同じ、ただし地衡風速が 15 m/s 以上のとき。

向の關係を調べた。地上風は3時間のベクトル平均、地上気圧傾度は輪島、八丈、潮岬の3地点の3時間毎の観測値から求めた。これらの地点はいずれも海岸付近にあり、それぞれの地域を代表する気圧を与えると考えられ



第4図 1988年1月22日から24日にかけて駒ヶ根市(飯島の北5~6km)にて観測された上層風。細く短い矢羽は1m/s, 細く長い矢羽が2m/s, ペナントは10m/sを表す。



第5図 24日の天気図。

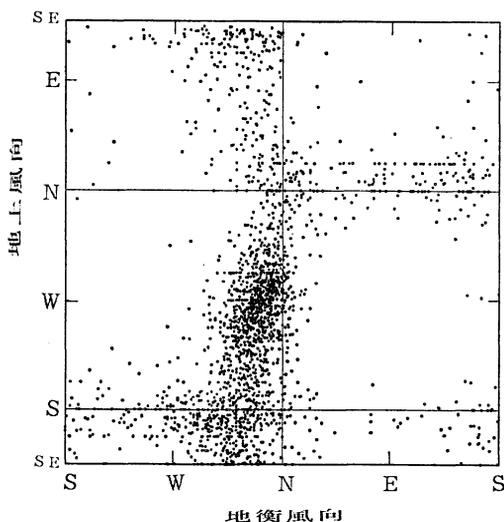
る。解析は1982年から86年までの5年間のうち各年1, 2, 12月の合計15カ月間について行った。

第2図は地上風速が1m/s以上, 地衡風速が5m/s以上のときの地上風と地衡風の風向の関係をプロットしたものである。地上風向の出現頻度は, 地衡風が南一西一北では南風が圧倒的に高く, 北一東一南では北風が出現しやすい。地衡風と地上風の角度はエクマンスパイラルの理論値(拡散係数を一定としたときの理論値は45度一図に細線で示す一, 現実には拡散係数は下層ほど小さいので, 平地の実測値はこれよりはかなり小さい)と大きく食い違う。特に地衡風がNW—NNWのときの最多出現風向は気圧傾度力の方向(90度一図に細い線で示す一)をはるかに越えて180度に迫るほどである。この傾向は地衡風の風速が15m/s以上のときに限ったデータではより明確になる(第3図)。

第2図の点線と実線は Wipperman and Gross (1981) によるライン川沿いの谷に吹く風の最多風向と地上地衡風の関係である(この谷もほぼ南北に向いている)。伊那谷の地上風はドイツの谷に吹く風とよく似た性質をもっている。しかし伊那谷のほうがエクマンスパイラルとの差異がより顕著であることがわかる。

4. 上層風観測

第4図は1988年1月22日から24日にかけて駒ヶ根市(飯島の北5~6km)にて観測された上層風を示す。第5図には24日の天気図を示す。23日に気圧の谷が通過し, 24日には冬型になっている。第4図によると高度2,000m以上の上層風は23日の夜に南西風から西あるいは西北西に変わり, 季節風が吹きはじめたことがわか

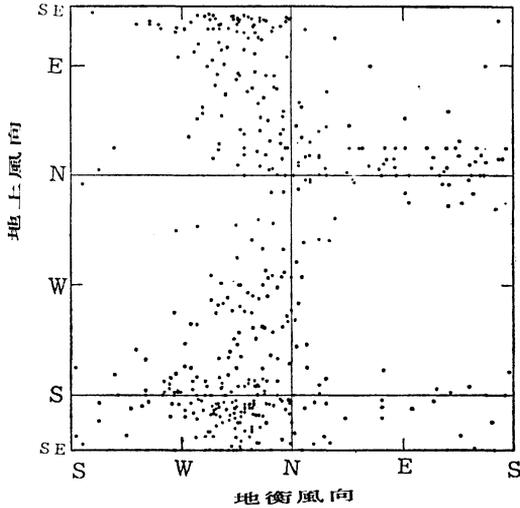


第6図 盛岡での冬の地上風と地上地衡風向の関係。地衡風速が5m/s以上のとき。

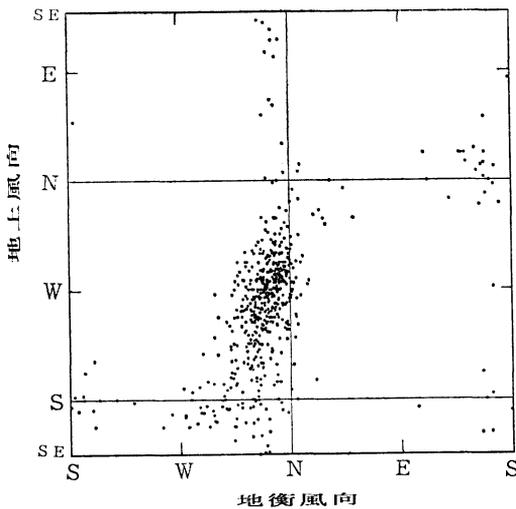
る。観測期間を通して, 下層は強い南風になっている。冬型が安定したと見られる24日の0300 JST以降の下層風を見ると, 南風の風速は高度200—400mで最大14m/s程度, その高度までは風向はほぼ真南で, その上層1,000—1,500m位まで南風成分を持った風になっている。それより上空では, 一般風と考えられる西ないし西北西の強風が吹いている。

5. 盛岡での風の解析

アメダスの盛岡局は奥羽山脈と北上山地にはさまれた幅約60km, 深さ1,000m弱の南北に長い谷の中にある。谷の深さは異なるものの, 伊那谷と類似の地形とな

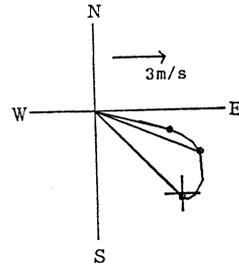


第7図 6図と同じ、ただし地衡風速が5 m/s以上、10 m/s以下のとき。



第8図 6図と同じ、ただし地衡風速が20 m/s以上のとき。

っている。第6図は盛岡での冬の地上風と、青森、秋田、宮古の地上気圧から求めた地衡風向の関係を示す。谷の方向が伊那谷とはほぼ同じであることに留意していただきたい。地衡風がNNWのときに着目し第2図の飯島と比較すると、飯島では南風の頻度が圧倒的に多いのに対し、盛岡では南風になるとき、西風になるときの2つに分かれる。第7図、第8図は同じデータを地衡風の強さで分けてプロットしたものである。地衡風向がNNW



第9図 数値モデルによる平地での風ベクトルと高度との関係。+は地衡風ベクトル(北西7 m/sを仮定)。○印は原点に近いほうから、それぞれ高さ40m、206m、506m、980mの風ベクトル。この図では506mと980mベクトルは地衡風ベクトルとほぼ重なっている。

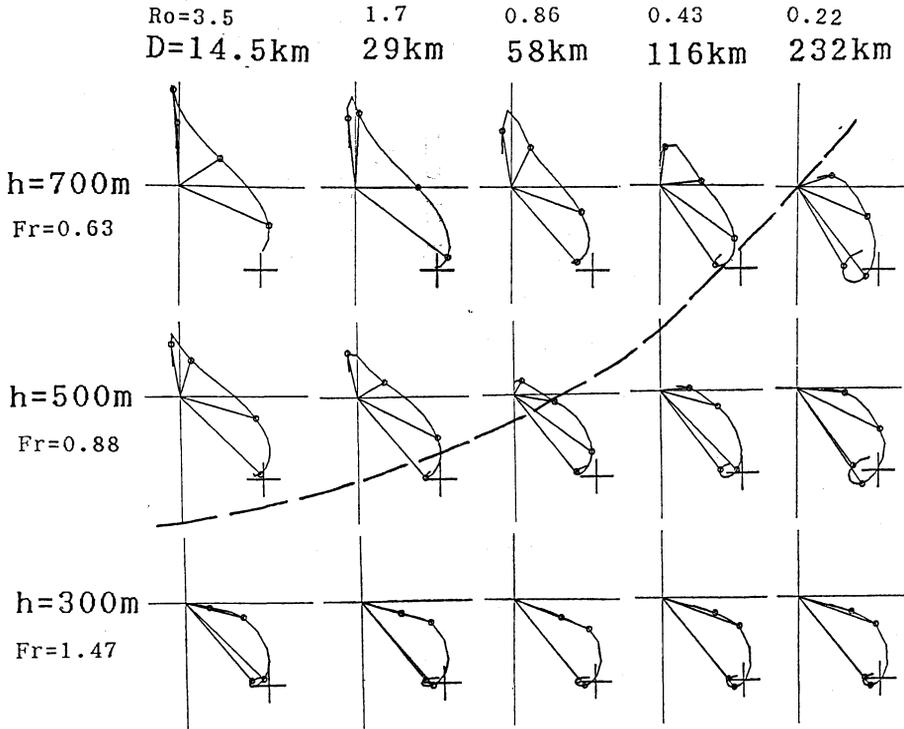
のときでは、地衡風速が弱いとき(5~10 m/s、第7図)では地上風は南風の頻度が高く、飯島と同じ傾向になるのに対し、地衡風が強いとき(20 m/s以上、第8図)では地上はほとんどの場合西風になる。これは奥羽山脈は伊那谷に比べて低く、山の障壁効果に限界があるためと思われる。

6. 数値モデルによる谷底での風向の高度変化

山脈の障壁効果と地衡風に逆らう風の力学的性質を数値モデル用いて調べた。用いた数値モデルはKimura and Manins (1988)をコリオリ力のある場合へ拡張したもので、2次元のブジネスク・(A・Bの・)静力学平衡近似方程式系からなる。地面摩擦、乱流境界層を考慮するが、簡単化のため地表は断熱とする。鉛直格子間隔は最下層が4 mで、上空に行くにしたがって厚くなり、最大で200mである。地上から高度4,000mまでを25層に分割している。水平方向の格子点の数は30であり、格子間隔は計算条件により0.5 kmより8 kmまで変える。

風速、鉛直温位傾度とも一様な初期条件から出発し、定常解を求めるが、計算過程において慣性振動が発生する。慣性振動は、地面摩擦の影響の及ぶにくい上空では、なかなか減衰しない。そこで慣性振動を効率よく減衰させ、早く定常解を得るために、運動方程式に加速度に比例する項を加えた。付加した項は定常解に近づくと、ゼロに収束するので、得られる定常解を変形することはない。

地形は無限に伸びた、左右対称の山脈に挟まれた谷を仮定している。谷の断面の標高はSin関数で与えられるものとする。



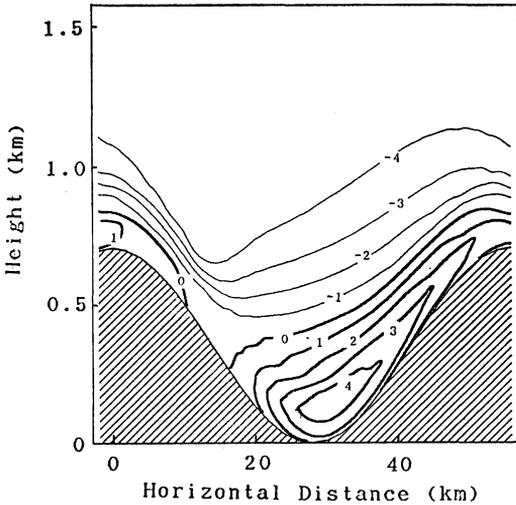
第10図 数値モデルによるホドグラフの山の高さ h と谷の幅 D に関する依存性。

第9図は数値モデルによって計算した、山の高さが0のとき、即ち平地での風ベクトルと高度との関係を示すホドグラフである。図中の+は地衡風ベクトルを表す。地衡風は北西 7m/s を仮定している。高度0(原点)から $1,310\text{m}$ までのホドグラフが実線で示されているが、途中の4つの○印はそれぞれ高さ 40m 、 206m 、 506m 、 980m の風ベクトルを表す。高度 980m では地衡風とほとんど一致している。また高度 40m 以下では風向の変化はほとんどなく、地衡風とは約 30 度の角度を持っている。この角度は平地での代表的な観測値と一致している。

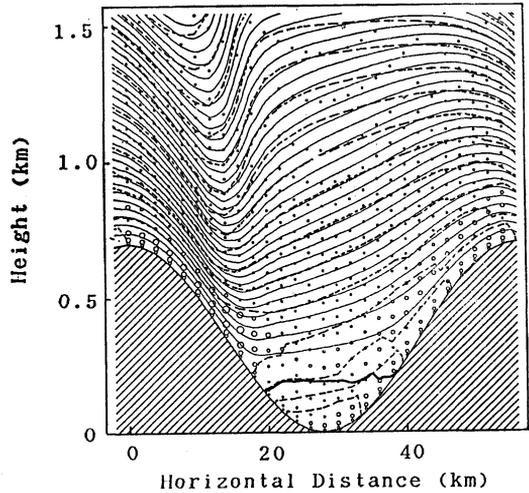
第10図は山の高さ h (山頂と谷底の標高差) と谷幅 D (山頂間の距離) がいろいろな場合のホドグラフを示す。山の高さは $300, 500, 700\text{m}$ の3ケース、谷幅は $14.5, 29, 58, 116, 232\text{km}$ の5ケース、合計15ケースのホドグラフが示されている。例えば山の高さ h が 300m で、 D が 58km (最下段中央) では第9図の平地のホドグラフとよく似ている。この高さの山は谷底のホドグラフには大きな影響は与えない。しかし h が 700m (最上段中

央) では地上風向は南風、つまり谷に平行な風となっていて、地衡風(北西風)とは 140 度以上の角度をもつ。高度 300 ないし 400m 、つまり山の高さの半分位まで、南よりの成分を持った風向になっている。

この時 ($h=700\text{m}$, $D=58\text{km}$) の風の南北成分の断面図を第11図aに示す。等値線は南北成分が0または正のとき、つまり南よりの成分を持っているとき太い線、負の時には細い線で書かれている。流れの東西成分は図の左から右に向かっている。南風成分は谷中央よりも、やや風下に寄ったところに中心があり、風下の斜面ではほぼ全域で南成分が卓越する。第11図bはそのときの東西成分の流線(細い実線, $100\text{m}^2/\text{s}$ ごと)と温位 (0.5 度ごと) である。流線のうち流線関数の値が地表と同じ値の流線は太い実線で示されている。従って太い実線と地面に囲まれた領域では、閉じた循環が形成されていることがわかる。この図から谷底の中央部では地上風はほとんど淀んでいることがわかる。つまり東西風に着目する限り、一般風である西風は下層ではブロックされ、ほとんど無風か、弱い循環流を形成している。このこと



第11図(a)



第11図(b)

第11図 a 数値モデルによる風の南北成分の断面図 ($h=700\text{ m}$, $D=59\text{ km}$ のとき). 太線は0または正のときの等値線, 細線は負.

b 東西成分の流線 (細い実線 $100\text{ m}^2/\text{s}$ ごと) と等温位線 (0.5 度 ごと). 太い実線は流線関数の値が地表と同じ値の流線. 流れは左から右へ. 小さなマル印は拡散係数の大きさを定性的に示す. 最も小さいマル印は拡散係数が約 $0.5\text{ m}^2/\text{s}$, 最も大きなマル印は約 $30\text{ m}^2/\text{s}$.

は, Kimura and Manins (1988) で詳しく議論されている.

第11図 b に示されている温位分布をみると, 下層の冷気は谷の風下側斜面に移動している. この冷気により, 谷の内部では風下側の気圧を上昇させ, 谷底に働く一般場の気圧傾度の東西成分をキャンセルしている. 図に示されている, 小さなマル印は拡散係数の大きさを定性的に示す. 最も小さいマル印は拡散係数が約 $0.5\text{ m}^2/\text{s}$ であり, 最も大きなマル印は約 $30\text{ m}^2/\text{s}$ を示す. 地面近くで拡散係数が大きく, とくに風上側斜面で拡散係数が大きいのが目だつ. これは風が強いための強制対流混合によるものと考えられる.

さて, 第10図に戻り, 地上風が南風となっているか否かでホドグラフを分類すると, 図に示す太い破線を境に, 左上で地上風が南風, 右下で西風となっている. つまり谷が深ければ深いほど, また谷幅が狭ければ狭いほど, 南風になりやすいことがわかる. 非粘性流体の場合, 流れは以下に示す Fr 数と Ro 数だけできまる.

$$Fr = U/NH$$

ここで U は地衝風速, H は山の高さ, N は Brunt-Väisälä 振動数 (浮力振動数) で以下で与えられる.

$$N = (g\Gamma/\theta)^{1/2}$$

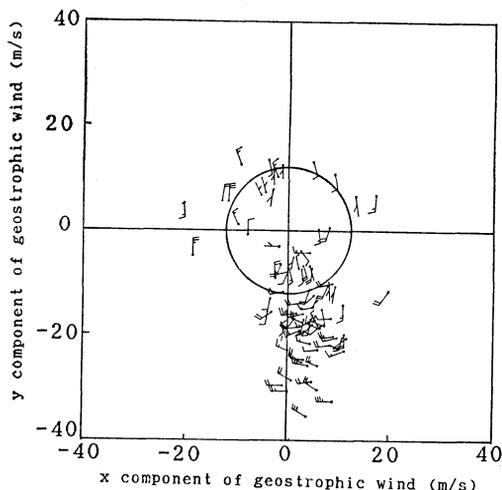
g は重力加速度, Γ は大気鉛直温位傾度, θ は平均温位であり, 上記の計算例では N は 0.014 sec^{-1} である. また Ro 数は次のように与えられる.

$$Ro = U/fD$$

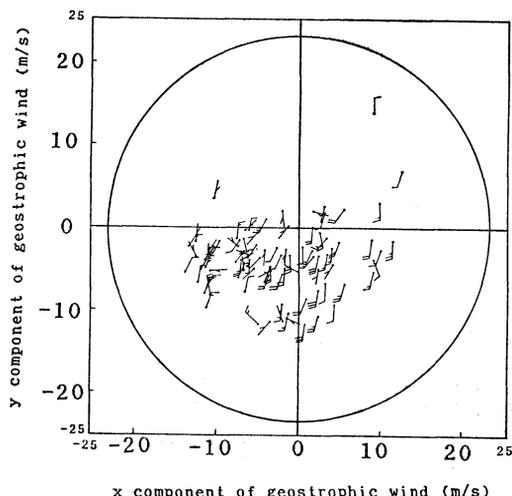
ここで D は谷幅, f はコリオリパラメータである.

粘性や地面摩擦があっても, 流れは, ほぼ Fr 数と Ro 数で決まる. 第10図によると, Ro 数が概ね 1 以上では, Ro 数にもあまり依存せず, ほとんど Fr 数だけで決まる. 地衝風速が 10 m/s 以上のときに限ると, 谷幅が 100 km 以下では, ほぼ Fr 数だけで決まるので, わが国にあるような谷では, Fr 数だけを考えればよいことになる. 第10図は Ro 数が 1 より大きいときには, 地上風が西風から南風になる Fr 数は約 0.9 と 1.5 の間にあることを示している.

Fr の 2 乗は気塊の運動エネルギーを山の高さのポテンシャル・エネルギーで割ったものに等しい. 従って Fr が 1 より小さくなると, 谷底の大気が谷を登りきれなくなり, 底に淀むことになる. 淀んだ大気は一般場の気圧傾度ベクトルの谷に平行な成分だけを感じて, 谷筋に沿った風が吹くものと解釈される. 一般場の気圧傾度ベクトルの谷に直交する成分は, 谷の中にできる局地的な気圧傾度により打ち消される.



第12図(a)



第12図(b)

第12図 a(盛岡), 及び b(飯島)における地上風ベクトルと地衡風ベクトルの関係. 地上風は矢羽で示す. 短い羽: 1 m/s, 長い羽: 2 m/s.

気温の鉛直分布に気候学的平均値を与えると, N は 0.01 sec^{-1} くらいである. 伊那谷の標高差は約 2,000 m, 盛岡周辺では 1,000 m なので, Fr が例えば 1.2 となる地衡風速はそれぞれ 24 m/sec と 12 m/sec となる.

第12図 a は盛岡における, 地上風ベクトルと地衡風ベクトルの関係を示す. 地上風は矢羽で示されていて, 短い羽が 1 m/s, 長い羽が 2 m/s である. 地衡風は矢羽の位置で示されている. 第 6 図のデータ全部は書ききれないので, 16時から18時の3時間間平均値のみをプロットしてある. 上に述べた Fr 数が 1.2 となる地衡風速が, 図中の円で示されている. 個々のデータのばらつきは大きい, 概ね円の内側では谷に沿った風, 特に地衡風に西成分のある時は南風, 東成分のある時は北風になっている. これに対し外側では, 地上風と地衡風は60ないし90度の角度を持っていることが多い. モデル計算に比べて, やや角度が大きいが, 第10図の右下の領域 (Fr 数の大きい領域) に相当することは明確である.

飯島の場合には, 第12図 b に示すように, 山が高いため円は約 2 倍の大きさになること, また盛岡ほどには地衡風速が強くないことから, 全部のデータが円内に入る. このため, 伊那谷ではほとんどの場合第10図の左上の領域にあり, そのため, 盛岡に比べ冬季に南風の吹く頻度は大きいものと考えられる.

7. 今後の問題点

2 次元のな解釈を行ってきたが, 3 次元のな要素を考えると, 現実には, ここで述べたようには簡単でない可能性がある. とくに高度により地衡風の向きが変る傾圧性 (baroclinicity) についてはその原因が一般場にあるときも, また地形性のときにもそれぞれ重要な役割を演じていると考えられる. またとくに盛岡周辺では熱的な局地風の効果も, 風の比較的弱いときには無視できなくなる. また冬の伊那谷の南風については日本海の顕熱輸送や, 降雪とも関係があるかも知れない.

謝 辞

観測及び解析にあたり, 気象研究所応用気象研究部および日本気象協会の方々の御協力と御指導を得ました. 深く感謝します. また本報告の一部は「東北支部だより」に掲載されています.

引用文献

河村 武, 1966: 中部日本に於ける冬の地上風系—特に冬の季節風に関連して—地理学評論, 538-555.
 宇田川和夫, 1966: 松本の南風の発生機構について, 研究時報, 338-352.
 杉原保幸・浅井富雄, 1977: 局地風「松本の南風」について, 天気, 475-483.

Wipperman, F. and Gross, 1981: On the construction of orographically influenced wind roses for given distributions of the large-scale wind. Beitr. Phys. Atmosph., 492-501.

——, 1984: Air flow over and in broad valley: Channeling and counter-current. Beitr. Phys.

Atmosph., 92-105.

Gross, G. and F. Wipperman, 1987: Channeling and countercurrent in the Upper Rhine Valley: Numerical simulation. J.C.A.M., 1293-1304.

Kimura, F. and P. Manins, 1988: Blocking in periodic valleys. B-L. Meteor., 44, 137-169.



股野宏志著
「気象エッセイ
ひまわり」

書苑新社 1991年3月刊
226ページ 2,000円(本体 1,942円)

本書の紹介の依頼を受けたとき、一瞬とまどった。というのも、ご存知の方も多と思われるが、著者は古今東西の文献に通暁した博学多才で、ときに芸術にかけても和洋を問わず嗜みの深い方である。したがって、本書の紹介で著者の意を十分伝え得ないところがあるのは、あらかじめご了解願いたい。

著者の紹介は、あとがきの一部をとって、“大阪管区気象台長を最後に定年退職し、その後は防衛大学校非常勤講師として研究科学生に天気予報論を講義し、平成3年3月末で5年間の勤めを終えた”，というくだりを記しておくことにする。

内容は、すでに印刷物になっていたものが多い。著者の勤務官署の定期刊行物に掲載されたいわゆるエッセイが1/3を占めている。ほとんどは、気象のことに結びついた話題からなっている。

始めの1/3は、著者の講演の原稿などを整理したものである。ここでは、話題は比較的气象学全般にわたっており、古典の教養のなかに気象現象をとり込んで、やや哲学的な思考を加えて気象講演をしたものが整理されている。そのなかのタイトルをいくつか書き出してみると、

3. 天網恢恢疎にして漏らさず——天に衛星，地にア
メダス
9. 色即是空——雲は形あれど実体なし
11. アイオロスの琴——大気の流れが奏でる音楽
12. 風は気ままには吹かない——大気の力学

これらは、それぞれ標題もしくは文中の引用が、老子、般若心経、ギリシャ神話、聖書である。

中ほどの1/3は、かつて本誌の解説欄で、グノーのG線上のアリアにたとえてロスビー波の振舞が説明された「天気予報——その学問的背景と実際の側面」(1977年10月号)と、荒城の月の楽譜付きでもって大気大循環メロディーを説明した「総観気象学への招待」(1986年11月号)である。別に、後半「雄略天皇」という一文があり、なかで、“数値予報の解説書などを書いたりしたが、考えてみると、個人の趣味を取り入れることが多く、読者には申しわけないことであった”というくだりがみられる。この本については、すくなくともエッセイと断ってあるので、読者は著者の趣味に寛大でなければならない。

まだまだ著者の多才な面は枚挙に遑がないが、書評を頼まれて一瞬しり込みをしたことについて、ご理解はいただけたと思う。ともあれ、気象学の追求に疲れを覚えられたときは、このエッセイを読んでみられては如何なものかとお勧めしたい。気象学の分野に身を置いていてよかった、と心にゆとりを感じさせてくれ、また研究の新たな糸口もつかめるのではないかと思われる。

(札幌管区気象台・原田 朗)