

大気境界層の風の日変化と日平均風 (II)*

—海陸風に及ぼす一般風の影響—

白木正規**

要旨

地上風の資料の解析と簡単なモデルのシミュレーションから、一般風が海陸風に及ぼす影響を明らかにした。まず、第1報(白木, 1984)で述べた統計的な解析方法を用いて、日本全国の地上風の資料から、一般風と密接な関係のある日平均風と日変化との関係を解析した。この結果、海岸に近い地点の日変化の卓越方向、レンジ、回転の向きは日平均風の風向によって異なることが明らかにされた。解析結果の信頼性は、誤差の評価とサブグループに分けた解析から議論した。次に、解析結果を海陸風の観点から考察するため、Haurwitz (1947)のモデルに摩擦係数の日変化を入れてシミュレーションを行い、モデルの結果と資料解析の結果が定性的によく似たふるまいを示すことを明らかにした。

1. はじめに

この研究の目的は、大気境界層の風の日変化が一般風によってどのように変形されるか明らかにすることである。普通、比較的弱い一般風の場合、海岸に近い地点の風の日変化は大部分が海陸風であると考えられるので、この研究は一般風が海陸風に及ぼす影響を明らかにすることになる。

資料の解析において一般風を直接取り扱うのは困難である。そこで、ここでは一般風と関係の深い日平均風を用いて解析を行う。第1報(白木, 1984)では、風の日変化と日平均風の間関係を調べるための、統計的な解析方法について述べた。その概略は次のとおりである。観測された風のベクトル \tilde{V} は、日平均風の成分 V と日変化の成分 v に分けて、

$$\tilde{V} = V + v \quad (1)$$

と書ける。 V を風向 θ と風速 V で表せば、 v は θ と V に依存して、 $v(t, \theta, V)$ と表せる。ここで、 t は日変化を記述する時刻であり、 θ は x 軸(東向き)から反時

計回りに測った角度で表す。このとき、 $v(t, \theta, V)$ は θ についてフーリエ級数に類似した式で展開できて、

$$v(t, \theta, V) = \sum_k \tilde{R}(-k\theta) g_k(t, V) \quad (2)$$

と表せる。ここで、 $R(\tilde{\varphi})$ はベクトルを角度 φ だけ反時計回りに回転させる回転演算子であり、 k は 0 および正と負の整数である。係数 g_k は、 t と V の関数で、日変化を表していて、

$$g_k(t, V) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \tilde{R}(k\theta) v(t, \theta, V) d\theta \quad (3)$$

によって求められる。

第1報では、更に、この方法で釧路の地上風の資料を解析した結果について述べた。それによれば、(2)式の主要な項は g_0 と g_{-1} の項である。 g_0 は日平均風の風向に依存しない日変化成分を表し、 g_1 は日平均風の風向に同期した日変化成分を表す。また、それらのふるまいを調べて、 g_0 は海陸風によって生じた風の日変化を示し、 g_{-1} は大気鉛直安定度の日変化が原因で生じた風の日変化を示していることが明らかにされた。ところで、第1報で指摘されたように、解析では年平均の g_k を計算しているけれども、日平均風の風向の頻度分布が季節によって異なるため、得られた g_k には季節的な効

* Effects of the prevailing wind on sea and land breezes.

** Masanori Shiraki, 気象研究所.

—1983年7月21日受領—

—1984年2月15日受理—

果が含まれている。また、季節的要因と地形的要因のために、日平均風の頻度分布が風向によって一様でないので、 g_k の計算結果にはこれが原因の誤差が含まれている。これらの2つの問題点のため、釧路の解析結果とその解釈については、更に他の地点の解析を行って確かめる必要がある。

この点を確かめるため、この第2報では、日本全国の160地点の解析を行った。160地点の解析結果を地点ごとに述べるのは煩雑なので、ここではあとで述べる条件をもとに選んだ多地点の平均の日変化を求め、この日変化と日平均風の関係を調べた。この平均の日変化では、先に述べた2つの問題点から生じた誤差が平均によって除かれるという利点がある。平均した日変化の信頼性については、誤差の評価とサブグループ分けの方法とから議論した。また、解析結果を海陸風の立場から考察するため、簡単な海陸風のモデルのシミュレーションを行い、この結果との比較をした。

2. 解析

解析を行った160地点は全国の地上気象官署で、用いた資料は、第1報の釧路の場合と同じように、1961年から1980年までの1日8回の地上風の観測値である。資料は、気象庁統計課で作成した「普通気候観測・時日別累年値」と呼ばれる磁気テープから得た。160地点のうち23地点については、上記の20年間を通して観測値が得られなかったため、地点によって3年から18年間の資料を解析した。

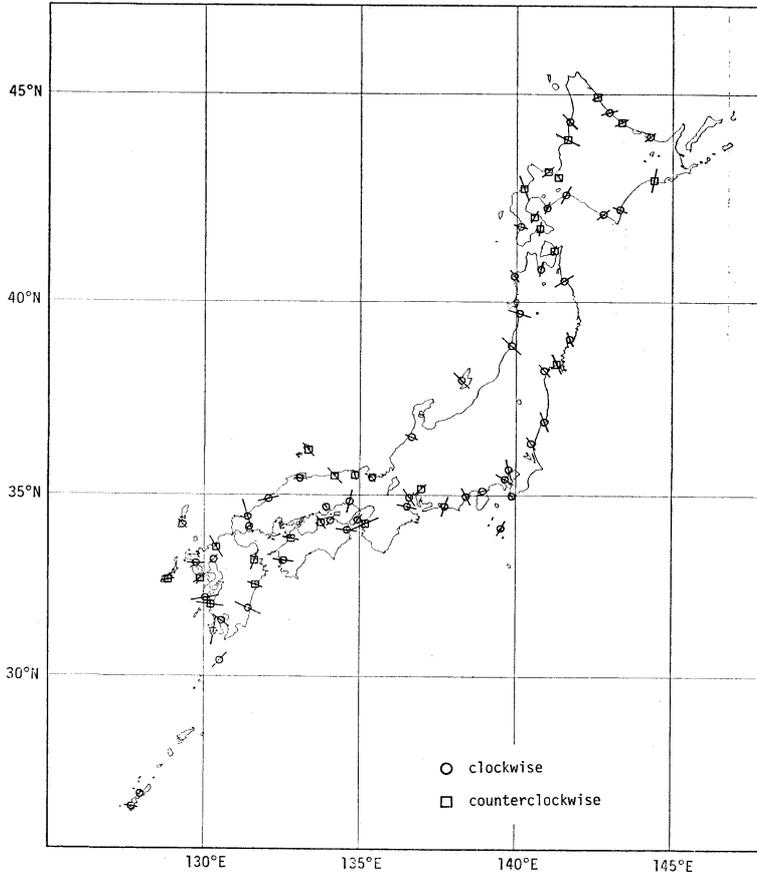
解析の第1の段階では、第1報で述べられた手順に従って、各地点の g_k を計算した。地点によって日平均風の風向 θ 、風速 V の頻度分布が異なるので、地点ごとに g_k の計算できる V の範囲が違っている。第1報で示した釧路の場合は、比較的大きな V のところまで計算できた地点である。各地点の g_k を地点ごとに示すのは煩雑なのでここでは行わない。しかし、各地点の g_k のふるまいは次のように要約できる。

海岸に近い地点の g_0 は、ほとんどの場合に釧路と同じようなふるまいを示し、日平均風の風向に依存しない海陸風の日変化成分として説明できる。海岸からかなり内陸に入った地点の g_0 が釧路と同じようなふるまいを示す場合があるが、これはむしろ山谷風による日変化であると考えられる。 g_0 のふるまいが海陸風や山谷風で説明できない地点については、 θ と日平均風の日数の関係を調べてみると、最大と最小の日数の比が非常に大き

い地点である。このような地点では、前章で問題点の一つとして述べたが、日平均風の日数が θ について不釣り合いなため、計算した g_k の誤差が非常に大きくなり、正しい g_0 が求まらなかったものと考えられる。一方、 g_{-1} については、ほとんどの地点で釧路と同じようなふるまいを示し、鉛直安定度の日変化が原因で生じた風の日変化成分として説明できる。しかし、いくつかの地点では、 g_{-1} の位相が釧路の場合とは逆になっている。すなわち、これらの地点では夜間に平均風を強め、昼間に弱めるような日変化となっている。これらの地点は必ずしも日平均風の日数のふつりあい大きい地点ではないので、計算誤差では説明できない。この原因については今のところ不明である。他方、 g_0 、 g_{-1} 以外の係数については、それらの大きさはどの地点でも g_0 や g_{-1} と比べると小さく、日変化の主要な成分ではない。また、それらのふるまいが地点ごとに非常に異なるので、なんらの共通点も見出されていない。複雑なふるまいの原因は、前章で述べた2つの問題点による誤差のために、本来の日変化成分がかくされているためと考えられる。

解析の第2の段階では、次に述べる2つの条件をもとに、160地点の中から地点を選んで平均の \bar{g}_k を計算した。今後、多地点の平均から得られたものはバーをつけて表す。まず第1に、 \bar{g}_0 の解釈を容易にするため、 g_0 が海陸風によって説明できると考えられる地点を選んだ。このため、地点から海岸までの距離が25 km以下という条件をつけた。また、解析の第1段階の V に関するグループ分けにおいて、 V が1.0 m/sより小さいグループから計算された g_0 の日変化のレンジが0.5 m/sより大きいこと、という条件もつけた。ただし、離島の場合には、島の大きさが10 kmより小さいものは除いた。次に日平均風の風向による日数の不釣り合いから生じる誤差の影響を小さくするため、この日数の不釣り合いの程度が比較的小さい地点だけを選んだ。このため、不釣り合いの程度を日数の最大値と最小値の比(r)で表し、この比がある閾値より小さいこと、という条件をつけた。

上の条件を満たす地点は、 $0.5 \text{ m/s} \leq V < 1.0 \text{ m/s}$ で、 $r \leq 7.5$ の場合に、73地点であり、それらの地理的な位置が第1図に示されている。図では、各地点の位置のところに、その地点の g_0 のホドグラフの卓越方向、レンジの大きさ、回転の向きが示してある。卓越方向は局所的な海岸線にはほぼ直交していて、向きはすべて海から陸



第1図 \bar{g}_k の計算に用いた地点の分布. ただし, $\bar{V}=0.73 \text{ m/s}$ で, $r \leq 7.5$ の場合. \bigcirc は g_0 の回転の向きが時計回りの地点を示し, \square は反時計回りの地点を示す. また, 各地点の g_0 の卓越方向とレンジの相対的な大きさが直線で示されている.

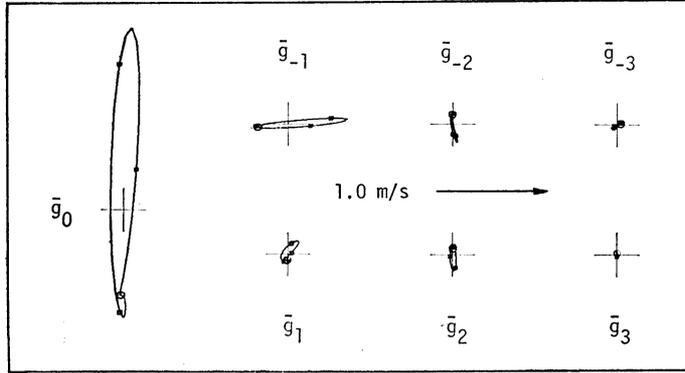
に向かっている.

次に, このようにして選ばれた地点の g_k を平均するとき, 各地点の g_0 の卓越方向が地点ごとに異なっていることを考慮した. すなわち, g_0 の卓越方向を θ_0 としたとき, $\frac{\pi}{2} - \theta_0$ だけ時計回りに回転した新しい座標系を考え, この座標系に変換された g_k の値を用いて \bar{g}_k を計算した. これは, 各地点の g_0 の卓越方向を y 方向に一致させて平均を求めることになる. 実際の計算では, 各地点の g_k を求めるのに用いた日数に比例した重みをつけて平均した. また, 各地点の θ_0 は V のグループによって若干値が異なるので, $0.0 \leq V < 1.0 \text{ m/s}$ の2つのグループの平均の値を用いた.

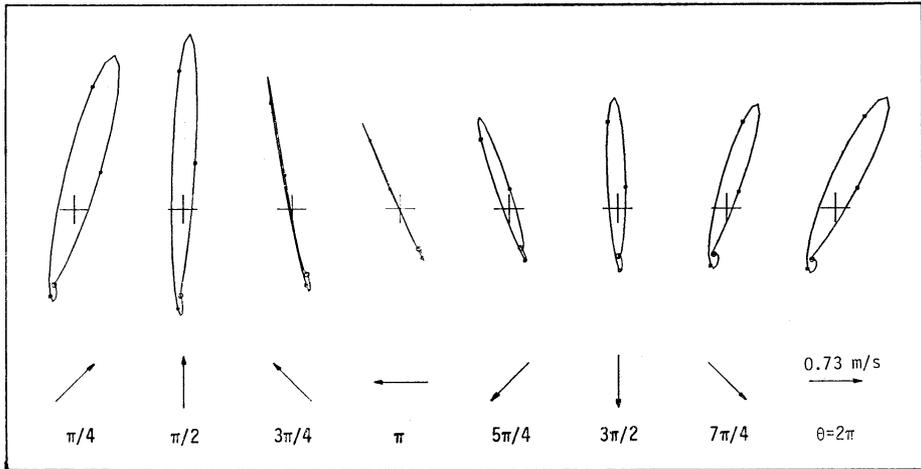
第1図で選ばれた地点について計算した $\bar{g}_k (\bar{V}=0.73$

$\text{m/s})$ が第2図に示されている. 先に述べた計算の手順からも期待されるように, \bar{g}_0 の卓越方向は y 方向になっている. $\bar{g}_k (k \neq 0)$ は風向に依存した成分であるので, 図では $\theta=0$ の風向の日平均風に対する日変化として表してある. 一方, 第3図は, \bar{g}_k から(2)式を用いて合成した \bar{v} である. $\pi/4$ ごとの8つの θ について計算してあり, それぞれの日平均風が図にベクトル(矢印)で示されている.

第3図から, 平均の日変化 \bar{v} は, 日平均風の風向によって日変化のレンジと卓越方向が変わるのが明らかである. レンジは $\theta = \frac{\pi}{2}$ のとき最大で $\theta = \frac{3}{2}\pi$ のとき最小であり, その比は1.9である. また, 卓越方向は, $\theta = \frac{\pi}{2}$ と $\theta = \frac{3}{2}\pi$ の日平均風のとき $+y$ の方向にほぼ



第2図 \bar{g}_k の計算結果. ただし, $\bar{V}=0.73 \text{ m/s}$ で, $r \leq 7.5$ の場合. 太線 (細線) のホドグラフは時計 (反時計) 回りの回転の向きを示す. ホドグラフ上の印は, 6時間ごとの時刻を示し, 一番大きい印が真夜中を示す.

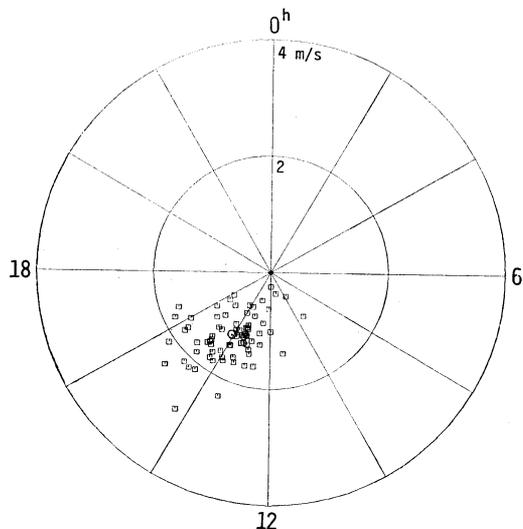


第3図 \bar{g}_k (第2図) から計算した $v(t, \theta, V)$. 下から順に, θ の値, V のベクトル, v のホドグラフを示す. ホドグラフの説明は第2図と同じ.

一致していて, その他の風のときは θ に従って $\pm x$ の方向に偏る. $+y$ の方向からの偏りは $\theta=0$ あるいは $\theta=\pi$ の風のときに最大となり, それぞれ 20° である. 更に, 回転の向きについては, 大部分が時計回りであるが, $\theta=\frac{3}{4}\pi$ と $\theta=\pi$ の風の場合は卓越方向にほぼ直線の日変化を示している. これらの日変化のふるまいは, 第2図の \bar{g}_k の主要項である \bar{g}_0 と \bar{g}_{-1} と重ね合わせでほぼ説明がつく. 第2図で, 日変化のレンジの大きさを \bar{g}_0 と比べたとき, \bar{g}_{-1} は約 $1/3$, $\bar{g}_1, \bar{g}_2, \bar{g}_{-2}$ は約 $1/10$, \bar{g}_3, \bar{g}_{-3} は $1/40$ 以下である.

係数 g_k は日変化を表しているので, g_k の x 成

分, y 成分はそれぞれを t に関するフーリエ級数で展開できる (第1報, (2) 式). 第4図は, 第1図に示されている73地点の g_0 の y 成分をフーリエ級数に展開して, その1日周期項の係数をハーモニックダイヤルで表示したものである. ただし, 係数は個々の地点の卓越方向を y 方向にあわせた後の値である. 図には, これらの重み付きの平均値と平均値に対する標準誤差円も示されている. 誤差円の半径 ρ は, 位相が0時と6時の方向の標準誤差を ρ_a, ρ_b としたとき, 誤差の等方性を仮定して $\rho = \sqrt{\rho_a^2 + \rho_b^2}$ で計算した. 個々の地点の係数はその振幅と位相の両方共にかかりのばらつきがみられ

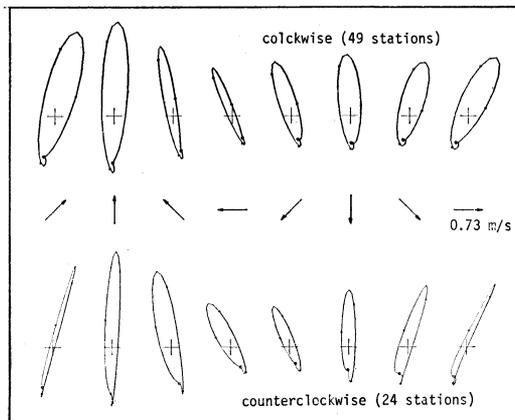


第4図 g_0 の y 成分をハーモニックダイヤルで示したものである。ただし、 $\bar{V}=0.73 \text{ m/s}$ 、 $r \leq 7.5$ の場合で、地点ごとに g_0 の卓越方向を y 軸にあわせたあとの値。同時に、平均値とその標準誤差円が示されている。

るが、73地点の平均値は誤差円の大きさからわかるように非常に信頼性の高い値を示している。同じように、他の g_k について調べてみると、 $|k|$ が大きくなるほど \bar{g}_k の信頼性は落ちる傾向にある。しかし、 \bar{g}_2 と \bar{g}_{-3} を除いて、少なくとも x か y のどちらかの成分のうち、大きい振幅を示す係数は、危険率5%以下で信頼できる値を示している。

結局、 \bar{g}_k の誤差の評価と \bar{g}_k のお互いの相対的な大きさを考慮すると、第3図に得られた結果は十分信頼できることがわかった。ここでは、更に、第1図に示された地点を次に述べるようなサブグループに分けて解析して、主に第3図のような図を比較することによって、結果の信頼性を調べた。まず第1に、地点の緯度によって、 35°N より北の地点 (N グループ) と南の地点 (S グループ) に分けた。この場合、N、S グループ共に第3図とほとんど同じ結果が得られた。

第2に、 g_0 の回転の向きによって、時計回りの地点 (C グループ) と反時計回りの地点 (A グループ) に分けた。結果が第5図に示されている。両方のグループ共に、レンジ、卓越方向については第3図とほぼ同じ結果を示している。回転の向きについては、C (A) グループではすべての θ について時計 (反時計) 回りである、しかし、どちらのグループでも、 $\theta = \pi (\theta = 0)$ のときは

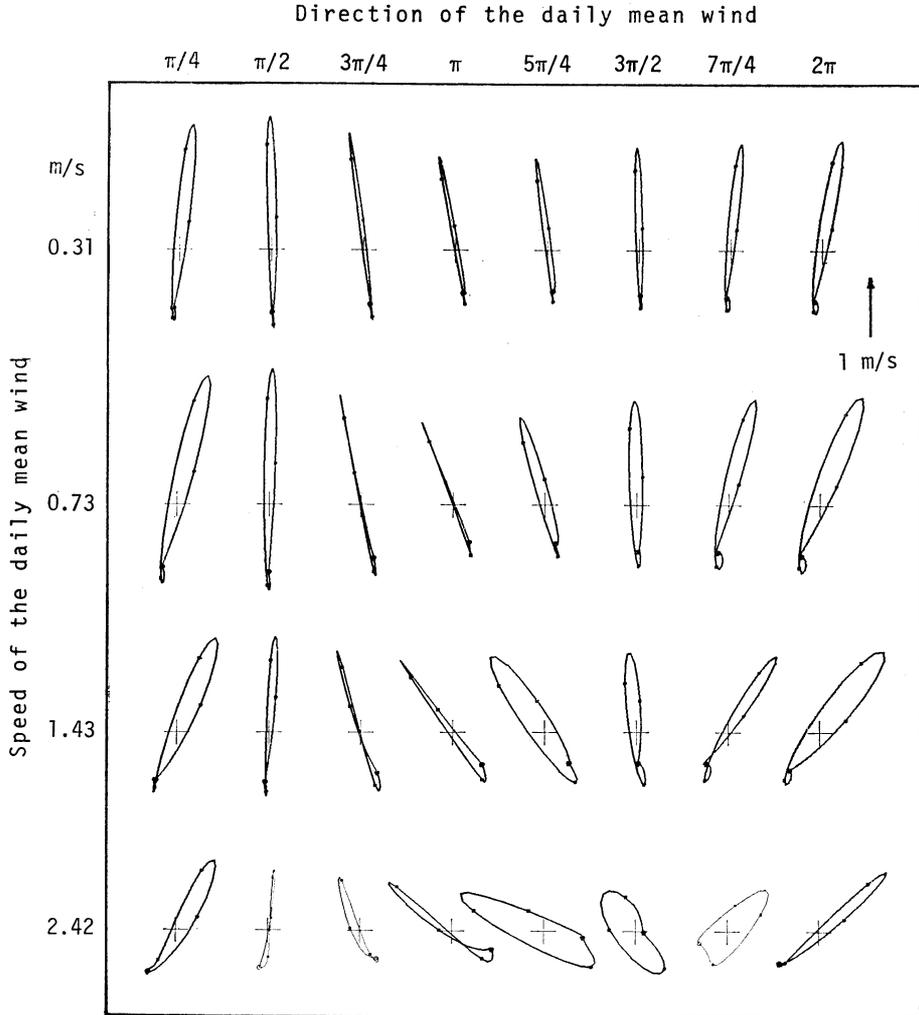


第5図 g_0 の回転の向きで地点を分けて計算した $\bar{v}(t, \theta, V)$ 。ただし、 $\bar{V}=0.73 \text{ m/s}$ で $r \leq 7.5$ の場合。ホドグラフとベクトルの説明は第3図と同じ。

そのグループの中で相対的に反時計 (時計) 回りの傾向が強い、という特徴が見られる。このことは、日平均風の風向が日変化の回転の向きに影響を与えていることを示す。

第3に、 g_0 の卓越方向 θ_0 によって、 $0^\circ \leq \theta_0 < 180^\circ$ (N' グループ) と $180^\circ \leq \theta_0 < 360^\circ$ (S' グループ) に分けた。この二つのグループでは、レンジ、卓越方向、回転の向きすべてにやや顕著な違いがみられる。先に、各地点の解析結果の問題点の一つとして、結果に季節的效果が誤差として含まれることを述べた。この原因は、日平均風の風向の日数分布が季節によって違うためであるが、この違いはどの地点でも南北方向に著しい。このため、この効果は地理的な座標で計算した g_k では同じ位相で含まれるが、 g_0 の卓越方向を y 方向にあわせて変換したあとの g_k では、 $k\theta_0$ だけ位相が違っている。それ故、 θ_0 が適当に分布している場合には、得られた \bar{g}_k の季節的效果は平均で消されて小さくなることが期待される。第3図を計算するのに用いた73地点の θ_0 は、ほぼどの方向にも分布している。このため、第3図の結果では、季節的效果による誤差はかなりの部分が除かれたものと考えられる。一方、ここで行った N' と S' のグループ分けのように、 θ_0 が一方に偏っている場合にはその効果が強調される。二つのグループの違いは、この季節的效果を示すものであり、これは主として g_1 の違いで生じている。

第4に、各地点の g_0 のレンジが 1.5 m/s 以上の地点 (GR グループ) とそれより小さい地点 (SM グループ)



第6図 4つの \bar{V} のグループについて計算された $\bar{v}(t, \theta, V)$. 地点の選び方は本文参照. また, ホドグラフの説明は第2図と同じ.

ブ)に分けた. 二つのグループの結果を比べると, どの θ についても GR グループのレンジはこれに対応する SM グループのレンジより大きい. これは, グループの分け方から当然である. しかし, 二つのグループは最大と最小のレンジの比, 卓越方向の偏りの角度, 回転の向きの変り方についても違いが大きい. 第3図と比べた場合には, 特に SM グループの違いが顕著で, 最大と最小のレンジの比は3.7, 卓越方向の偏りは $\pm 40^\circ$, 回転の向きは $\theta = \frac{3}{4}\pi \sim \frac{5}{4}\pi$ の三つの θ で明らかに反時計回りを示している. 二つのグループを \bar{g}_k で比べると, \bar{g}_{-1} は GR グループより SM グループの方が大きい,

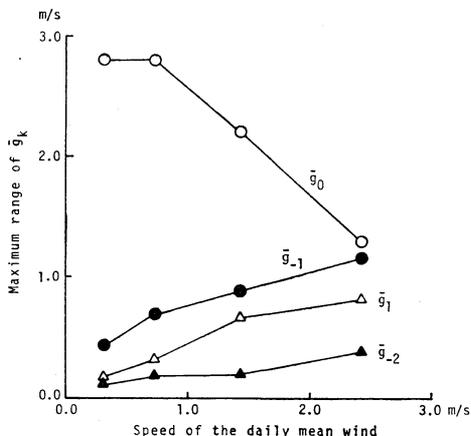
という \bar{g}_0 とは逆の性質を示しているのが最も顕著な違いである. この原因を個々の地点でみると, g_0 の大きい地点の g_{-1} の位相が平均とは逆位相を示していることが多いためである. g_{-1} の位相が平均とは逆になる原因については, 地点ごとの海岸からの距離, 観測高度, 地形的効果が考えられるが, 未だ明らかでない.

第5に, 日平均風の風向による日数の不つりあいの程度を示す r の閾値によってグループ分けをした. この場合は, 閾値をいろいろ変えて結果を調べた. 閾値を小さくしていくとき, 閾値が5.0 (地点数32)まではほとんど第3図との違いがみられないが, これよりも小さく

すると地点数が少なくなることが原因で第3図との違いが大きくなってゆく。逆に、第3図の場合より大きな閾値にしたときは、第1図に追加される地点の g_k の誤差は第1図の地点のものより大きいと考えられるが、平均では第3図と比べて大きな違いは見られない。しかし、 r の大きな地点だけで平均をとると第3図の結果とかなり違いがみられる。 \bar{g}_k でみると、特に \bar{g}_2 と \bar{g}_{-2} のレンジが大きくなる傾向にある。これらのことを考慮すると、 r に閾値をつけたのはよい結果をもたらしていると考えられる。

最後に、第3図と同じような図を他の \bar{V} のグループについて計算し、それらを比較した結果について述べる。異なる \bar{V} に対して同一の r の閾値をとって \bar{g}_k を計算すると、それぞれの \bar{V} について選ばれる地点数が異なり、 \bar{V} が大きくなるほど地点数が少なくなる。しかし、 \bar{V} が変わるときの \bar{g}_k あるいは \bar{v} の違いをみるには、むしろ次のような地点の選び方の方が都合がよい。すなわち、まず最初に、 $1.0 \text{ m/s} \leq V < 2.0 \text{ m/s}$ の場合に、 $r \leq 10.0$ の条件で地点を選び (44 地点)、これらの地点から $\bar{v}(t, \theta, \bar{V}=1.43 \text{ m/s})$ を計算する。この結果は第6図の下から二つ目に示されている。次に、この \bar{V} に対して選ばれた地点を用いて、 $\bar{V}=0.31 \text{ m/s}$ と $\bar{V}=0.73 \text{ m/s}$ のグループの \bar{v} を計算する。これらの結果は第1図の上の二つである。結局、3つの \bar{V} のグループについて同じ44地点を用いて \bar{v} を計算して、 r の閾値が \bar{V} によって異なった値となっている。しかし、第3図の結果と第6図の $\bar{V}=0.73 \text{ m/s}$ のグループの結果を比べてみるとわかるように、いずれの地点の選び方でも結果に著しい違いはない。 $2.0 \text{ m/s} \leq V < 3.0 \text{ m/s}$ ($\bar{V}=2.42 \text{ m/s}$) のグループで地点を選ぶと、 $r \leq 10.0$ のときは12地点、 $r \leq 15.0$ のときは22地点である。これでは地点数がやや少ないので、これを他の \bar{V} の地点を選ぶ基準には用いなかった。第6図の $\bar{V}=2.42 \text{ m/s}$ の結果は、 $r \leq 15.0$ の地点から得られたものが示されている。

第6図から明らかなように、日平均風の風向によって日変化が変形される様子は、 \bar{V} のグループによって違っている。 θ による日変化のレンジの変わり方は、 $\bar{V}=0.73 \text{ m/s}$ のグループで最も顕著である。また、卓越方向は、 \bar{V} が大きくなるほどその変動幅が大きくなる。更に、 \bar{V} が大きくなるほど θ によって回転の向きが異なる場合が多くなり、ホドグラフの形も θ によって著しく変わるようになる。これらのふるまいは、 \bar{V} による \bar{g}_k の変わり方で見ると理解しやすい。 \bar{g}_k のホドグラフの形



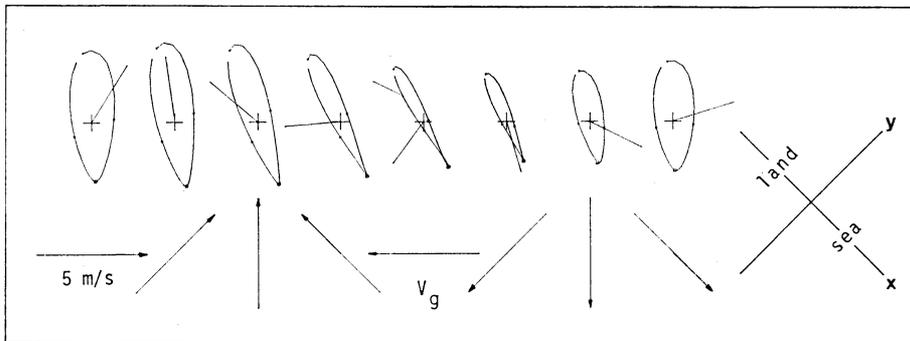
第7図 \bar{g}_k の日変化のレンジと \bar{V} の関係。

は \bar{V} によってほとんど変わらない。また、 \bar{g}_{-1} を除いて、卓越方向も \bar{V} によってほとんど変わらない。 \bar{g}_{-1} の卓越方向は、 $\bar{V}=0.3 \text{ m/s}$ のときは y 軸方向であるが、 \bar{V} が大きくなるにつれて x 軸方向に変わってゆく。そこで、第7図には \bar{V} による \bar{g}_k の日変化のレンジの変わり方だけを示した。 \bar{V} が増加するとき、 \bar{g}_0 は減少の傾向にあり、 \bar{g}_{-1} 、 \bar{g}_{-1} 、 \bar{g}_{-2} は増加の傾向が見られる。その他の \bar{g}_k はレンジが小さい (大きくても \bar{g}_{-2} を越えない) うえに、変化が複雑なので図には示さなかった。どの \bar{V} についても、 \bar{g}_0 と \bar{g}_{-1} が主要項なので、第6図のふるまいの大部分は、 \bar{g}_0 と \bar{g}_{-1} の相対的な大きさと説明できる。

3. 考察

前章では、日平均風の風速が小さい場合について、海岸に近い地点の平均の日変化を求め、これが日平均風の風向とどのような関係にあるか明らかにした。第1報では、一般風として普通用いられる地衡風と日平均風の関係を示した。日平均風は、一般風と同じではないが、一般風と密接な関係があると考えられる。このことから、前章の結果は一般風と日変化の関係を示すものと考えられる。一方、一般風が弱いとき、海岸に近い地点の風の日変化は大部分が海陸風であると考えられる。それ故、前章の結果を海陸風の立場からみると、海陸風の強さ、卓越方向あるいは回転の向きが一般風の風向によって異なることを示している。

これまでに、理論の方から、一般風が海陸風に影響を及ぼすことが指摘され、数値モデルを用いたシミュレーションで調べられている (例えば、Estoque, 1962;



第8図 モデルから計算された風の日変化成分と日平均風。図の下側はモデルで与えた地衡風を示し、上側は計算結果を示す。ホドグラフ上の印は6時間ごとの時刻を示し、一番大きな印は海陸の温度差が最小になる時刻(夜間)を示す。ホドグラフとベクトルは、図の右側に示された座標で表されている。

Pielke, 1974; など)。また、観測資料の解析からもこの点が調べられている(例えば、Wexler, 1946; 佐橋, 1978; など)。これらの結果と前章の結果とを比べてみると、定性的な傾向に矛盾はない。しかし、それぞれの結果の表現のし方に違いがあって、特に、数値シミュレーションとの比較が簡単に行えない。そこで、ここでは Haurwitz (1947) によって提案された初期の海陸風のモデルを用いて前章の結果を考察する。

モデルの運動方程式は次のとおりである。

$$\frac{du}{dt} - fv + ku = F_x - F(t) \quad (4a)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + kv = F_y \quad (4b)$$

ここで、 x, y, u, v は水平座標とそれぞれの風速成分であり、 x 座標は陸から海に向かう方向を正とする。 f はコリオリの係数、 k は摩擦係数である。 F_x, F_y は大規模な気圧傾度力で、気圧 p 、密度 ρ 、地衡風 $V_g(x, y)$ 成分は u_g, v_g とすると、

$$F_x = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -fv_g \quad (5a)$$

$$F_y = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = fu_g \quad (5b)$$

と書ける。 $F(t)$ は海と陸の温度差で生じる気圧傾度力で、時間 t の周期関数で表される。Haurwitz は、

$$F(t) = A_0 + A_1 \cos \omega t \quad (6)$$

と表したとき、運動方程式を解析的に解いた。ただし、 ω は地球の回転角速度である。また、定数として、 $f = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 $k = 0.58 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 $A_0 = 1.53 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-2}$ 、

$A_1 = 2.4 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-2}$ を与えて、 V_g の風速が 5 m s^{-1} のときの4つの風向 ($\theta_g = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$) について u, v を計算して、結果をホドグラフで示した (Haurwitz の論文の Fig. 7)。この結果を見ると、 V_g は平均風に参与しているだけで、海陸風の日変化成分は V_g の風向で変わらない。

Haurwitz は摩擦係数 k が一定値の場合について運動方程式を解いたが、実際には k は日変化する量であり、彼も論文の中で k の日変化を考慮する必要のあることを述べている。 k に日変化を考えると方程式は解析的に解けないが、数値的には容易に u, v を計算できる。そこで、ここでは、

$$k = B_0 + B_1 \cos(\omega t + \alpha) \quad (7)$$

と表したときの u, v を数値的に計算してみた。計算結果の1例を第8図に示す。図の計算に用いた定数は、 $f = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 $A_0 = 0.0 \text{ m s}^{-2}$ 、 $A_1 = 5.0 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-2}$ 、 $B_0 = 1.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 $B_1 = 0.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 $\alpha = 150^\circ$ であり、 $|V_g| = 5 \text{ m s}^{-1}$ のときの8方向の $V_g(\theta_g = \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \dots, 2\pi)$ について計算した。Haurwitz の場合と違って、 $A_0 = 0.0$ としているが、 A_0 は V_g の中に含まれるので、海陸風を日変化成分と日平均風の成分に分けて考えるときには、 A_0 の項を除いても本質的な違いはない。 α は、 $F(t)$ が最大になる時刻と k が最大になる時刻の違いを表す。第(6)、(7)式の t は $F(t)$ が最大になる時刻(昼間)から測るので、 $\alpha = 150^\circ$ は k が夜間に最大で昼間に最小になり、最小になる時刻が $F(t)$ が最大になる時刻より2時間遅れている場合を計算している。

第8図は、数値的に得られた1日分の u と v を日平均

風の成分と日変化の成分とに分けて表してある。後者はホドグラフで示し、前者はホドグラフの中心からひいた直線で示してある。また、図の下段にはそれぞれのホドグラフの計算に用いた V_g が示してあり、右側にはモデルで設定した x, y 座標系の方向が示してある。図では、 V_g の方向によって海陸風の日変化成分のレンジ、卓越方向に変化が見られる。また、回転の向きはすべての場合に時計回りであるが、時計回りの程度が違っている。結局、モデルのシミュレーションの結果でも、海陸風の日変化成分は地衡風の風向（日平均風はこれより約 60° 反時計回りの方向になっている）によって変形を受けていることが明らかである。そして、この結果を前章の第3, 4, 6図と比べると、定性的なふるまいが非常によく似ていることがわかる。

モデルの場合、海陸風の日変化成分の変形は k の日変化から生じている。第(4)式の k のかかった項は運動量の鉛直拡散をパラメタライズしたものであり、 k の日変化は拡散係数の日変化に関係している。ところが、拡散係数は大気鉛直安定度に依存しているため、安定度の日変化が k の日変化の原因である。一方、前章の結果では、日平均風の風向による日変化の変形を表すのは $g_k (k \neq 0)$ の項であったが、そのうち g_{-1} が最も主要な項であった。更に、第1報で、平均風の風速による g_{-1} のふるまいを調べて、 g_{-1} は安定度の日変化で生じた風の日変化成分であることが推定された。これらのことから、海陸風の日変化成分を変形する原因となるものは、モデルのシミュレーションの結果も観測資料の解析の結果も同じものであることが明らかである。

モデルと解析の結果は、これらの定性的なふるまいの細部や定量的な点を比較すると、両者には違った点が多い。これは、ここで用いたモデルの単純さを考えると当然であると思われる。現在の海陸風のモデルの水準を考えると、モデルの結果は改良の余地がある。今後、もっと現実に近いモデルを用いて、解析結果の考察を行う予定である。

謝 辞

この研究を行うにあたって、荒川正一博士から終始適切な御助言をいただいた。また、藤田敏夫博士およびレフリーからは原稿に対して有益な御意見をいただいた。ここに記して謝意を表します。

文 献

- Estoque, M.A., 1962: The sea breeze as a function of the prevailing synoptic situation, *J. Atmos. Sci.*, **19**, 244-250.
- Haurwitz, B., 1947: Comments on the sea-breeze circulation, *J. Met.*, **4**, 1-8.
- Pielke, R.A., 1974: A three-dimensional numerical model of sea breeze over south Florida, *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 115-139.
- 佐橋 謙, 1978: 岡山周辺の海陸風について, *天気*, **25**, 357-363.
- 白木正規, 1983: 大気境界層の風の日変化と日平均風(Ⅰ)—釧路の解析例一, *天気*, **31**, 243-250.
- Wexler, R., 1946: Theory and observations of land and sea breezes, *Bull. Amer. Met. Soc.*, **27**, 272-287.