

大気境界層の風の日変化と日平均風 (I)*

—釧路の解析例—

白木正規**

要旨

大気境界層における風の日変化が、日平均風の風向・風速とどのような関係にあるか、観測資料の解析から明らかにした。まず、風の日変化を日平均風の風向に関してフーリエ級数に類似した式で展開する、統計的な解析方法について述べた。次に、この方法で釧路の地上風の資料を解析し、結果の主要な項が日変化を起こす二つのメカニズムと関連していることを明らかにした。一つは大気安定度の日変化が原因であり、他の一つは海陸風である。海陸風に関連して、日平均風は海陸風の強さ、回転の向きと密接な関係のあることを見出した。更に、解析結果に含まれる二つの問題点について議論し、これらが主要な項に及ぼす影響は小さいことを述べた。最後に、日平均風と地上気圧から求めた地衡風との関係についても若干議論した。

1. はじめに

大気境界層における風の日変化は、主として、次の二つのメカニズムによって生じている(例えば、高橋, 1969)。一つは、大気鉛直安定度の日変化が原因である。鉛直安定度が不安定な日中は、鉛直の乱流混合が盛んであり、上空の運動量の大きな風が降下してくる。このため、日中は夜間より強い風が吹き、風の日変化が生じる。他の一つのメカニズムは、海陸風や山谷風と呼ばれる局地循環である。海や陸、あるいは山や谷における気温の日変化の違いで気圧傾度の日変化が起こり、それに伴って風の日変化が生じる。

これらの二つの日変化を、これに重なった一般風の強さという観点からみると、鉛直安定度が原因で起こる風の日変化は一般風が比較的強い時に顕著であり、局地循環で生じる日変化は一般風が弱い時に顕著である。二つのメカニズムから生じる日変化は、そのふるまいがそれぞれ違うため、一般風の強さが変わる時、それに伴って日変化の様子も変わるはずである。この報文では、この

ことを観測資料の解析から明らかにする。しかし、一般風を直接扱うのは困難なので、ここでは一般風と関係の深い日平均風が日変化とどのような関係にあるかを調べる。そして、最後に、一般風として用いられることの多い地衡風と日平均風との関係について若干議論する。

2. 解析方法

観測された風のベクトル \tilde{V} は、日変化より長い周期で時間変化する日平均風の成分 V と、日変化の成分 v とに分けて、

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

と書ける。ここで、 v として1日を周期とする周期関数を仮定する。このとき、 u 、 v をそれぞれ、 v の x 、 y 成分とすれば、フーリエ級数を用いて、

$$u = \sum_n a_n^x \cos n\omega t + \sum_n b_n^x \sin n\omega t \quad (2a)$$

$$v = \sum_n a_n^y \cos n\omega t + \sum_n b_n^y \sin n\omega t \quad (2b)$$

と表せる。ここで、 t は日変化を記述する時刻である。また、 ω は地球の回転角速度、 n は正の整数、 a_n^x 、 b_n^x 、 a_n^y 、 b_n^y は定数である。

一方、日平均風 V を風向 θ と風速 V で表せば、 v は一般に日平均風の θ と V に依存するので、 $v(t, \theta, V)$ と書き表せる。ここで、 θ は x 軸(東向き)から

* Diurnal variation of surface wind at Kushiro controlled by the prevailing wind.

** Masanori Shiraki, 気象研究所.

—1983年7月21日受領—

—1984年2月15日受理—

第1表 日平均風の風向 (θ) と風速 (V) によるグループごとの日数. V の単位は m/s で, かつこの中は平均値. r は V のグループの中の最大と最小の日数の比. 日数の下にアンダーラインをしたグループは, 第1図のホドグラフの回転の向きが時計回りであることを示す.

	$n\pi/4 - \pi/8 \leq \theta < n\pi/4 + \pi/8$								r
	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$	$n=8$	
$0.0 \leq V < 0.5$ (0.3)	45	57	56	66	<u>52</u>	41	41	<u>34</u>	1.9
$0.5 \leq V < 1.0$ (0.7)	81	153	171	165	151	<u>128</u>	<u>80</u>	<u>72</u>	2.4
$1.0 \leq V < 2.0$ (1.4)	<u>173</u>	455	442	213	321	326	<u>183</u>	<u>150</u>	3.0
$2.0 \leq V < 3.0$ (2.4)	<u>179</u>	<u>367</u>	195	73	<u>246</u>	<u>276</u>	<u>126</u>	<u>160</u>	5.0
$3.0 \leq V < 4.5$ (3.6)	<u>117</u>	<u>150</u>	<u>98</u>	40	<u>213</u>	<u>296</u>	<u>108</u>	<u>160</u>	7.4
$4.5 \leq V < 6.0$ (5.0)	<u>59</u>	<u>38</u>	<u>42</u>	15	<u>78</u>	<u>166</u>	<u>47</u>	<u>116</u>	11.1
$6.0 \leq V < 8.0$ (6.6)	<u>20</u>	14	13	4	<u>24</u>	70	<u>17</u>	<u>64</u>	(17.5)
$8.0 \leq V < 10.0$ (8.6)	1	0	4	1	7	<u>18</u>	3	8	—
$10.0 \leq V$ (10.4)	0	1	2	1	0	<u>5</u>	0	2	—

反時計回りに測った角度である. このとき, $v(t, \theta, V)$ は θ について周期関数なので, θ に関するフーリエ級数に展開して,

$$v(t, \theta, V) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_l a_l \cos l\theta + \sum_l b_l \sin l\theta \quad (3)$$

と書ける. l は正の整数である. ここでは, (2) 式の場合と違って, $l=0$ の項 ($\frac{1}{2}a_0$) が含まれている. また, 係数 $\frac{1}{2}a_0, a_l, b_l (l \geq 1)$ は t と V の関数であることから, (2) 式のように t についてのフーリエ級数に展開できる.

ところで, 前章で述べた風の日変化のメカニズムと結びつけて考える場合には, (3) 式のフーリエ級数の係数よりも, これらの組み合わせから導出される次のような係数 $g_{\pm l}$ の方が結果の解釈に便利である.

$$g_0 = \frac{1}{2}a_0 \quad (4a)$$

$$g_{\pm l} = \frac{1}{2} [a_l \pm \tilde{R}(\frac{\pi}{2}) b_l] \quad (l \geq 1) \quad (4b)$$

ただし, $\tilde{R}(\varphi)$ 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, テンソル表現を用いると,

$$\tilde{R}(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (5)$$

と書ける. 一方, (3) 式と (4) 式から, g_k を用いて $v(t, \theta, V)$ を表すと,

$$v(t, \theta, V) = \sum_k \tilde{R}(-k\theta) g_k \quad (6)$$

と書ける. ここで, k は 0 と正および負の整数をとる. 更に, g_k を $v(t, \theta, V)$ から直接計算する式は,

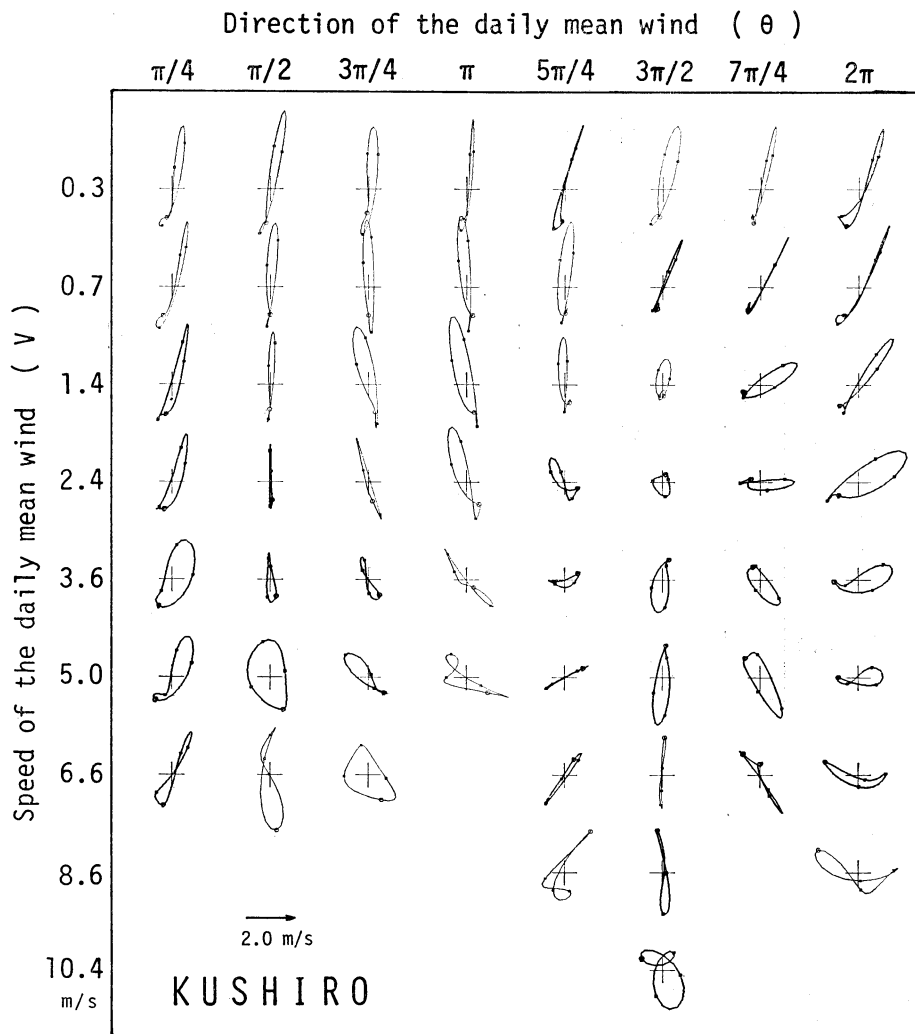
$$g_k(t, V) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \tilde{R}(k\theta) v(t, \theta, V) d\theta \quad (7)$$

と表される. 第 (6), (7) 式の導出については付録Aを参照されたい.

第 (7) 式から明らかなように, 係数 g_k は t と V の関数で, それぞれの k について日変化を表している. 第 (6) 式において, g_0 の項は日平均風の風速だけに依存し, 風向には依存しない日変化成分を表す. 一方, $g_k (k \neq 0)$ のかかった項は, 日平均風の風速のみならず風向が日変化と関係することを表す成分である. このうち, 特に, g_{-1} の項は日平均風の風向を座標の x' 軸とする新しい $x'y'$ 座標系で考えるとその意味が明らかである. すなわち, xy 座標系の g_{-1} の項は $x'y'$ 座標系で計算される g'_0 項 (ダッシュは $x'y'$ 座標系での値を意味する) に等しい. このことから, g_{-1} の項は日平均風の風向に同期した日変化成分を表している.

3. 解析例

前章で述べた解析方法で, 釧路地方気象台 (北緯 $42^\circ 59'$, 東経 $144^\circ 24'$, 海拔 31.8 m) の地上風を解析した. 資料は1961年から1980年までの1日8回の観測値で, 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. 解析した20年間に, 観測方法, 測器, 測風塔の変更があり, 資料の均質性については必ずしも連続ではない. しかし, 以下に述べるような解析を, 資料の均質性を考慮して期間を分割して行ってみたが, 結果に本質的な違いは見られなかった. そこで, 以下には20年間の平均の結果についてだけ述べる.



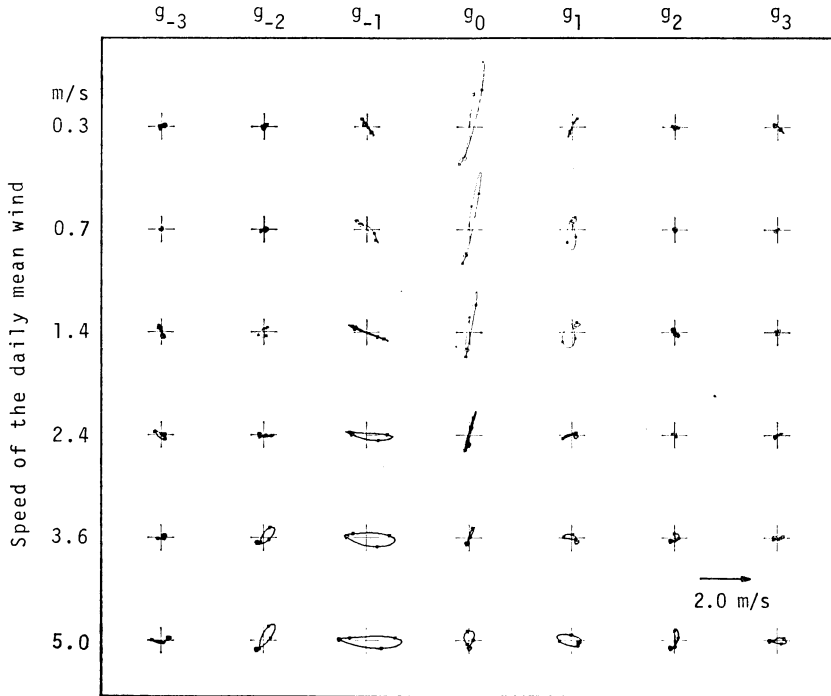
第1図 日平均風の風向 (θ) と風速 (V) でグループ分けされた風の日変化。ホドグラフの見方については、付録Bを参照のこと。

なお、釧路の地上風の平均の観測高度は地上 17 m である。

まず、磁気テープの風向・風速の資料を東西成分 (\tilde{U}) と南北成分 (\tilde{V}) とに変換し、(1) 式の \mathbf{V} として、 \tilde{U} , \tilde{V} の日平均値を計算した。次に、 \tilde{V} と \mathbf{V} の差から \mathbf{v} を計算し、 \mathbf{V} の風向 (θ)、風速 (V) によって \mathbf{v} のグループ分けを行った。第1表には、 θ について8グループ、 V について9グループに分けた、それぞれのグループの日数がのせられている。一方、第1図は、それぞれのグループの平均の日変化がホドグラフを用いて示されている。ただし、平均の日数が5日より少ない場合は除

いてある。ホドグラフを作る手順と、ホドグラフの卓越方向・レンジ・回転の向きの決め方については付録Bにのせられている。第1図で見られる日変化は、 θ と V によって複雑なふるまいを示している。日変化の卓越方向、レンジ、回転の向きはグループごとに違いが見られる。しかし、これらの違いの中には規則的な点も見出される。これは次に述べる、 θ についてフーリエ級数に類似した式に展開した結果から明らかになる。

第1図の V に関する9つのグループのうち、すべての θ について平均の日変化が求められている6つのグループについて、(3) 式の係数 a_i , b_i を計算した。風向 θ



第2図 g_k の計算結果.

について8つのグループに分けたので、 $l=3$ までの係数が計算できる。第1表から明らかなように、 θ によって日数が異なるので、日数に比例した重みをつけて係数の計算をした。次に、これらの係数から(4)式により g_k を計算し、結果が第2図に示されている。

第2図の g_0 は日平均風の風向に依存しない日変化成分である。風速 V が大きくなるに従って、 g_0 の日変化のレンジは小さくなっていくが、卓越方向はほとんど変わらない。風速 V が 2 m/s より小さいグループから求めた平均の卓越方向 θ_0 は 78° である。これは釧路付近の海岸線にはほぼ直交した方向である。一方、 $g_k (k \neq 0)$ は日平均風の風向と風速の両方に依存する日変化成分を表し、図では日平均風の風向が $\theta=0$ (西風) のときの日変化として示されている。一般に、 $g_k (k \neq 0)$ は V が大きくなるに従ってその日変化のレンジが大きくなる傾向が見られる。これは g_0 と逆の傾向である。この結果、 V が大きいときは g_{-1} などが卓越し、 V が小さいときは g_0 が主たる日変化成分になっている。これらの点を総合すると、 g_0 は海陸風によって生じた日変化と考えられる。

第2図の g_0 の結果は、日平均風の風速が大きくなる

に従って海陸風の発達がおさえられる様子を示している。一般風によって海陸風がどのように変形されるか、を明らかにすることは、海陸風のメカニズムを解明するための重要な研究課題の一つである(浅井・吉門, 1972)。しかし、解析の困難さのため、観測資料からこの点を明らかにした研究は少なく、事実はまだよくわかっていない。ここでは、長期間にわたる平均の海陸風についての結果であるが、日平均風と海陸風の関係が明らかにされた。日平均風は一般風と同じではないが、一般風の風速が大きいとき日平均風の風速も大きくなると考えられるので、上の結果は一般風と海陸風の関係を示唆するものと考えられる。一般風が強くなると海陸風の発達がおさえられる原因の一つは、一般風が強くなるに従って海陸の温度差の生じやすい条件の日が少なくなることが考えられる。また、別の原因として、海陸の温度差を生じる条件に違いがなくても、一般風による温度移流のため温度差が弱められることが考えられる。しかし、ここで得られた結果からは、その詳細について知ることはできない。

第2図で、 V が小さいとき、 g_0 のホドグラフは反時計回り(左回り)の回転の向きを示している。海陸風の

線型理論によれば、北半球ではコリオリ力のため時計回り (右回り) の回転の向きが期待される (Haurwitz, 1947). しかし、数値モデルを用いたシミュレーションによれば、観測点の付近の海陸分布によっては反時計回りの回転の向きが生じる場合のあることが報告されている (斎藤, 1976). 釧路の場合が海陸分布で説明できるかどうかは、釧路付近の海陸分布を入れた数値モデルによって明らかにする必要がある。

先にもふれたが、一般に、 V が大きくなると $g_k (k \neq 0)$ の日変化のレンジが大きくなる。レンジの大きさからみて、このうち最も主要な成分は g_{-1} である。 g_{-1} の卓越方向は、 V の大きさによって少し変わるが、西風の日平均風のときはほぼ東向きである。これは西風が昼に強くなり夜に弱くなることを示す。更に、前章で述べたように、 g_{-1} は平均風の風向に同期した日変化成分であることから、上のことはどの風向の平均風についてもいえる。よって、 g_{-1} は第1章で述べた大気安定度の日変化が原因で生じた風の日変化成分と考えられる。第2図で、 g_{-1} は $V=0.7 \text{ m/s}$ の場合を除いて時計回りの回転の向きを示している。

第2図から、(6) 式の主要な項は g_0 と g_{-1} の項であることがわかった。このことから、日平均風の風速がある大きさのとき、 g_0 と g_{-1} とを比べてどちらが大きいかによって、第1図の日変化のふるまいがほぼ説明できる。 V が小さいときは g_0 が卓越していて、 θ によるホドグラフの卓越方向やレンジの違いはあまり見られない。しかし、 V が大きいときは g_{-1} が大きく、 θ によってホドグラフの卓越方向が全く逆になっている。一方、 V が 2 m/s 程度のときは g_0 と g_{-1} の日変化のレンジがほぼ等しい。このため、 2 m/s 程度の日平均風のときは、二つのメカニズムで生じた日変化がほぼ同じ程度含まれていることになる。第1図で、 V が 2 m/s 程度のとき、 $\theta = \frac{3}{2}\pi$ の風向の日変化のレンジが他の風向の場合に比べて非常に小さくなっているのは、二つのメカニズムで生じた日変化がお互いに打ち消しあうためである。

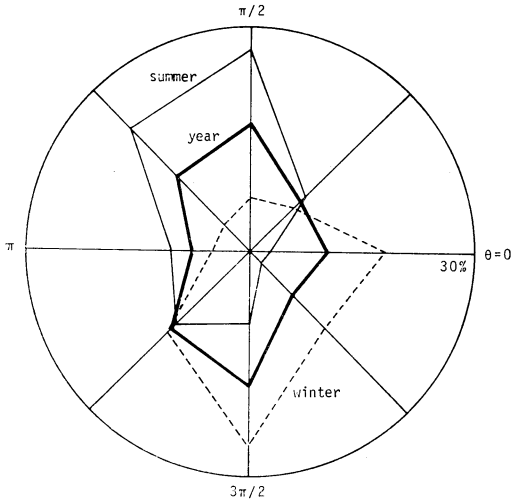
日変化の卓越方向やレンジの場合と同じように、ホドグラフの回転の向きについても、 g_0 と g_{-1} のどちらが大きいかによってほぼ説明がつく。しかし、 $\theta=0$ あるいは $\theta=\pi$ の場合には、必ずしも大きい方の g_k の回転の向きと一致していない。例えば、 V が小さい $\theta=0$ の日平均風に対して、ホドグラフの回転の向きは g_0 とは逆の時計回りを示している。この風向の日平均風の場合

には、 g_0 と比べて日変化のレンジの小さい g_{-1} が回転の向きを支配していることになる。普通、海陸風としては一般風が弱いときの日変化を考えるので、上に述べたことを海陸風の立場からみると次のようにいえる。すなわち、海陸風のホドグラフの回転の向きは、先に述べた海陸分布だけでなく、一般風の風向にも関係している。これは、海陸風に及ぼす一般風の効果として、この解析から明らかにされた第2の点である。

第2図で、 g_{-1} と比べると日変化のレンジは小さいが、 g_{-2} や g_1 も無視できる大きさではない。これらは、日平均風の風向が変わるときに見られる日変化の違いのうち、 g_{-1} では説明できない部分を表す。これについては、日変化を海陸風で考えると、次のようなものが考えられる。すなわち、日平均風の風向によって温度移流のし方が異なり、海陸風の発達に違いが生じる。そして、この効果は (6) 式の $g_k (k \neq 0)$ に含まれる。先に、 g_{-1} は安定度の日変化が原因で生じた風の日変化であると述べたが、日平均風の風速が弱くて海陸風の大きな場合に、 V と共に g_{-1} の卓越方向が少し変わるのとは、この温度移流の効果ではないかと考えられる。逆に、安定度が原因で生じる風の日変化も g_{-1} だけでは表せない。日平均風の風向によって安定度が異なり、日変化の違いを生じることが考えられる。そして、その違いの部分が $g_k (k \neq -1)$ に含まれる。このため、 g_0 も厳密には海陸風だけによるものでなく、安定度が原因の日変化も含まれている。 g_0 の回転の向きが、 V が小さいときは反時計回りであるが、 V が大きくなると時計回りに変わるのとはこれが原因であると考えられる。しかし、 g_1 や g_{-2} のレンジの大きさから推定すると、 g_0 に含まれる海陸風以外の成分の割合は海陸風の成分に比べて小さいと考えられる。

4. 議論

前章で述べた資料の取り扱いからわかるように、第2図の結果は年平均の日変化について計算したものである。しかし、この結果には季節的な効果が含まれていることが次の考察からわかる。第3図は、第1表の日平均風の風向別の日数頻度を、すべての風速についてまとめて図示したものである。図には、これを暖候期 (4~9月) と寒候期 (10~3月) に分けて求めたものも示してある。日平均風の頻度の卓越する方向が暖候期と寒候期ではほぼ逆になっていることが明らかである。このことは、日平均風の風速のグループごとにみた場合にもいえ



第3図 日平均風の風向による日数の頻度分布。

る。このため、第1図で求めた日変化は、 θ のグループによって平均に用いた暖候期と寒候期の日数の割合が違っている。このことは、 θ による日変化の違いの中に季節的な日変化の違いも含まれていることを意味する。この結果、これをもとに計算した第2図の g_k には季節的な効果が含まれる。

この点を更に調べるため、資料を暖候期と寒候期の二つの季節に分けて解析してみた。この結果、二つの季節の g_0 と g_{-1} の V による変化は、第2図と比べるとやや複雑である。また、 $g_k (k \neq 0, -1)$ については、 g_0 や g_{-1} 以上に複雑な違いが見られる。このように、二つの季節の g_k に違いが見られることから、年平均の結果には季節的な効果が含まれていることになる。しかし、違いが複雑なので、今のところ、季節的な効果についてこれ以上のことはわからない。

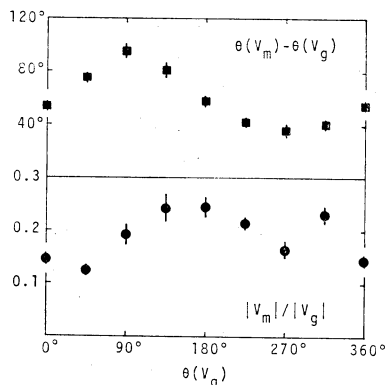
季節に分けて解析した結果が複雑なふるまいを示す原因には次の問題点が考えられる。第3章でもふれたが、第1図の日変化を求めるのに用いた日数は、 θ によって異なっている。この原因には、日平均風と関係する大規模な風系が一様に分布しないことと、観測点の付近の地形的な効果とが考えられる。このため、第2図の g_k は、 θ による日数の不つりあいを考慮して、日数に比例した重みをつけて計算した。しかし、 θ による重みの違いが余り大きくなると、それが原因の計算誤差が生じる。第1表には、ある V のグループの中の θ による重みの違いを、そのグループの中の最大の重みと最小の重みの比

(r) で示した。この比は、 V が大きくなるほど大きくなっていく。また、第1表からわかるように、 V が大きくなるほどグループの V の幅、すなわち、そのグループに含めた日平均風の風速の上限と下限の差、が大きくとられている。 V の幅が大きいくほど g_k の計算誤差は大きくなるが、 θ による重みの比をなるべく小さくするために、 V が大きくなるほど V の幅をある程度大きくする必要があるので、第2図の g_k は日平均風の風速が大きくなるほど計算誤差が大きくなっている。資料を季節に分けて解析した場合、風向による重みの比はどの風速についても第1表の値より大きいので、第2図の結果より更に誤差が大きいと考えられる。この誤差のため、二つの季節の g_k は第2図の場合より複雑な結果を示しているものと考えられる。

こうして、前章の解析結果には二つの問題点が含まれていることがわかった。しかし、これらの問題点がどの程度結果に影響を及ぼしているかについて、今のところ明らかでない。このため、解析結果とその解釈の妥当性について、釧路とは違った条件の他の地点を解析して確かめることが必要である。そこで、北海道の他の22地点について解析を試みた。資料は、釧路の場合と同じように、統計課作成の磁気テープより得た。

この結果によると、海岸に近い地点（例えば、網走、札幌、苫小牧）では、釧路の場合と同じように、 g_0 は日平均風の風向に依存しない海陸風の成分として説明できる。また、海岸からかなり内陸に入った地点（例えば、岩見沢）でも、 g_0 は海陸風と同じふるまいの日変化を示すが、これはむしろ山谷風であると考えられる。一方、 g_{-1} は、地点ごとに V による日変化のレンジの増加のし方は違うが、鉛直安定度の日変化が原因で生じた風の日変化として説明できる。内陸地点の一つである帯広では、 V の大きさに関係なく g_0 は非常に小さく、この地点の日変化は g_{-1} だけでほぼ表される。これは、帯広が海岸から約 50 km 内陸にありここまでは海陸風が到達しないことと、帯広のまわりはかなり平坦なのでここでは山谷風も生じないことを示すものと考えられる。これらのことから、 g_0 と g_{-1} については、先に述べた二つの問題点の影響が含まれているとしても小さいと考えられる。

他方、 g_0 と g_{-1} 以外の係数についてみると、これらはどの地点でも g_0 や g_{-1} と比べて日変化のレンジが小さく、日変化の主要な項ではない。また、地点によってこれらの係数のふるまいが非常に異なり、今のところ何



第4図 地衡風 V_g と日平均風 V_m の関係. 直線は平均値に対する標準誤差を示す.

らの共通点も見出されていない. この複雑なふるまいの原因として, 季節的な効果が本来の日変化成分に比べて大きいことや地点ごとに違っていることが考えられる. また, 風向による重みの比が, V のグループごとに地点ごとに違っていることも複雑さの原因であると考えられる.

第3章では, 海陸風と日平均風の関係が明らかにされた. しかし, 理論的な立場からは, 地衡風と海陸風の関係が調べられている (Haurwitz, 1947). そこで, 最後に, 先に計算した日平均風と地上気圧傾度から求めた地衡風の関係について若干述べる. 地上気圧傾度を計算する地点として, 釧路が中心になるように, 根室, 網走, および浦河の3地点を用いた. これらの地点の3時間ごとの海面気圧値 (資料は, 地上風の場合と同じ磁気テープから得た) の日平均値から地衡風 V_g を計算し, 日平均風 V_m との関係調べた. 個々の日では, 二つの風の関係は非常に複雑であるが, 20年間の平均としては第4図のような関係が見られる. この図は, V_m と V_g の風向の差と風速の比を V_g の風向に対して示したものである. V_g の風速で分けて調べてみると, 5 m/s より小さいときに図と少し違いがみられるが, 5 m/s より大きいときには図と同じ関係が得られている. 第4図で, V_g のすべての風向について平均した V_m と V_g の風向の差は 57° であり, 風速の比は0.18である.

第4図の結果を考慮して第2図を見れば, 地衡風と日変化の関係がわかる. g_0 については, V_m と V_g の風速の比を考慮すればよい. 一方, $g_k (k \neq 0)$ については, 更に, V_m と V_g の風向の差を考慮しなければならない. ちなみに, (1) 式の V として V_g を用いて前章で

述べたような解析を試みた結果は, 第2図と第4図から得られる結果とほぼ同じであった. V_m を用いた方法は, 風だけの資料で解析が行えるのでこの方が便利である.

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

浅井富雄・吉門 洋, 1973: 海陸風に関する理論モデルとその問題点, 天気, 20, 119-129.
 Haurwitz, B., 1947: Comments on the sea breeze circulation, J. Met., 4, 1-8.
 斎藤直輔, 1976: 局地風—特に海陸風—の数値実験 I, 大気, 15, 1-26.
 高橋浩一郎, 1969: 総観気象学, 岸波書店, 385pp.

付録A 第(6)式および(7)式の導出について

第(4)式から a_l と b_l について解くと,

$$a_l = g_l + g_{-l} \tag{A1a}$$

$$b_l = \tilde{R} \left(-\frac{\pi}{2} \right) (g_l - g_{-l}) \tag{A1b}$$

となる. このとき, $\tilde{R} \left(-\frac{\pi}{2} \right) \tilde{R} \left(\frac{\pi}{2} \right) = 1$ の関係を用いた. (A1) 式を (3) 式に代入して整理すれば,

$$v(t, \theta, V) = g_0 + \sum_l \left\{ \cos l\theta + \sin l\theta \tilde{R} \left(-\frac{\pi}{2} \right) \right\} g_l + \sum_l \left\{ \cos l\theta - \sin l\theta \tilde{R} \left(-\frac{\pi}{2} \right) \right\} g_{-l} \tag{A2}$$

となる. ここで,

$$\cos l\theta \pm \sin l\theta \tilde{R} \left(-\frac{\pi}{2} \right) = \tilde{R} (\mp l\theta)$$

と変形できるので, (A2) 式は,

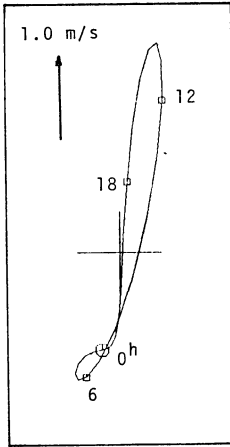
$$v(t, \theta, V) = g_0 + \sum_l \tilde{R} (-l\theta) g_l + \sum_l \tilde{R} (l\theta) g_{-l} \tag{A3}$$

となる. この式で, l は正の整数をとることから, 0 と $\pm l$ をまとめて k で書きなおすと (6) 式になる.

一方, (6) 式を (7) 式の右辺に代入して整理すれば,

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \tilde{R}(k\theta) v(t, \theta, V) d\theta = \sum_j \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \tilde{R}(k-j\theta) g_j d\theta \tag{A4}$$

となる. ここで, m を 0 および整数としたとき,



第 B1 図 ホドグラフの例. 第 1 図の $\theta = \pi/4$, $V = 0.3 \text{ m/s}$ のものと同一.

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \tilde{R}(m\theta) d\theta = \begin{cases} 0 & (m \neq 0) \\ 1 & (m = 0) \end{cases} \quad (\text{A5})$$

であることを用いれば (A4) 式は g_k に等しくなり, (7) 式が導かれる.

付録 B 風の日変化のホドグラフについて

この論文のホドグラフを作る手順とホドグラフの卓越方向, レンジおよび回転の向きを決め方について述べる.

第 B1 図は, 第 1 図の $0.0 \text{ m/s} \leq V < 0.5 \text{ m/s}$, $\frac{\pi}{8} \leq \theta < \frac{3}{8}\pi$ の日平均風のグループの日変化を再録したもので, これを例として用いる. まず, このグループの平均の日変化を u, v のそれぞれについて計算する. 次に, これらを (2) 式のフーリエ級数に展開して, 係数 $a_n^x, b_n^x, a_n^y, b_n^y$ を計算する. u, v が 3 時間ごとの資料なので $n=1, 2, 3$ について係数が求まる. ここで, n の違う係数を比べてみると, $n=3$ の係数は $n=1, 2$ の係数と比べて非常に小さい. これはすべてのグループの日変化についていえる. そこで, $n=1, 2$ の係数だけを用いて, 再び (2) 式により 1 時間ごとの u, v を計算する. この u, v をホドグラフで表したものが第 B1 図である. このようにして得られたホドグラフは, 生の $u,$

v から作ったホドグラフと比べてなめらかな変化を示し, ホドグラフ間の比較が容易である. 図の中で大きな丸は真夜中を示し, 小さな四角は 6 時, 12 時, 18 時を示す. 第 B1 図では時刻が示してあるが, 第 1 図や第 2 図では煩雑さを避けるために省いてある. しかし, 後で述べるホドグラフの回転の向きを考慮すると, ホドグラフ上の印がどの時刻に相当するか容易にわかる.

一般に, ホドグラフにはその変化の卓越している方向が見られる. 第 B1 図では $\theta = 80^\circ$ の方向である. 第 2 図の場合には, この卓越方向を数値的に求めた. すなわち, ホドグラフ上の各時刻の点から最小自乗法によってホドグラフに最も近い直線を決め, この直線の方角をホドグラフの卓越方向とした. この場合, ホドグラフの中心からみて, 昼間の時刻の点のある方向を正の向きとした. 一方, こうして決めたホドグラフの卓越方向の最大の風速と最小の風速の差をレンジと呼び, これによって日変化の大きさを代表させた. 第 B1 図の場合のレンジは, 約 4.2 m/s である.

第 B1 図の場合, ホドグラフは大部分の時刻で反時計回りの変化をしているが, 真夜中前に時計回りの変化の見られる時刻がある. 一般に, ホドグラフは時刻によって回転の向きが異なるので, ホドグラフ全体としての回転の向きを決めることは容易ではない. しかし, (2) 式の $n=1$ と $n=2$ の係数を比べると, 普通 $n=1$ の係数の方が大きいので, $n=1$ の項の回転の向きで近似的にホドグラフ全体を代表させることができる. $n=1$ の項に限ると, その回転の向きは次のように計算で求められる. すなわち, (2) 式の $n=1$ の項を

$$u_1 = c \cos(\omega t + \alpha) \quad (\text{B1})$$

$$v_1 = d \cos(\omega t + \beta) \quad (\text{B2})$$

と書きなおしたとき, $\sin(\alpha - \beta)$ の符号が正のときに反時計回り, 負のときに時計回りである. 第 B1 図の場合には, 反時計回りになっている. 第 1 図と第 2 図のホドグラフでは, 線の太さで回転の向きを表し, 太線の場合に時計回り, 細線の場合に反時計回りを示している. 同時に, 第 1 図の時計回りのグループについては, 第 1 表で対応する日数にアンダーラインをつけて回転の向きを示してある.