

稚内地方における地上風の周期的 変化について*

村 松 照 男**

要 旨

稚内地方に南西風が吹く場合、自記記録に約1時間周期を持つ顕著な周期現象が記録されることがある。この現象は風向風速に顕著に現われ、同時に同周期で気圧・気温・湿度にも見られ24時間以上続く場合もある。

顕著な周期性および持続性より、利尻島の風下に発生したカルマン渦の通過によると推論した。稚内で観測された種々の記録は、この推論を裏付けていることを示す。

1. ま え が き

稚内地方が南西風域になる場合、周期的突風が吹くことがしばしばあることが知られている。生本・佐藤(1968)によれば、1968年6月23日から24日にかけて、稚内地方気象台の地上風の自記記録に顕著な周期変化が18時間以上も続いた。

この現象は利尻島の風下域に限られた所で観測され、周期変動は顕著で、局地性および持続性から利尻島風下のカルマン渦列に原因を求めた。Roshko (1961)によれば、高い Reynolds 数でも(この場合には § 3.3 に見られるように、ほぼ140である)、カルマン渦列の存在が可能である。従来にも気象衛星写真による雲の解析から、Cheju 島の風下域での渦列状雲の報告(Tsuchiya, 1969)もある。

今回の報告では、稚内地方気象台・稚内空港分室・国鉄抜海駅の3観測点の資料を用い、1968年3月3～5日、1968年6月23～24日の顕著に現われた例の解析をした。

2. 地上風の周期的変化現象

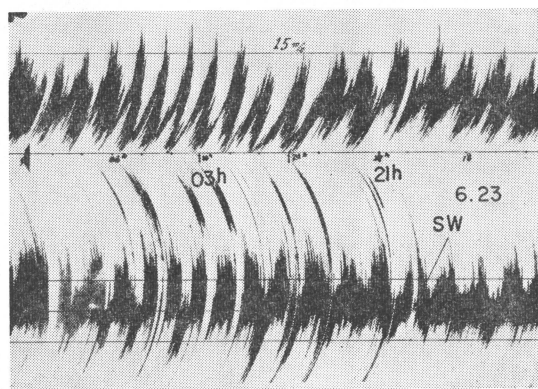
稚内地方に起る地上風の周期的変化現象は変動幅の大小と持続時間に差はあるが、稚内(地方気象台)においては年間約30例程記録される。特に顕著な例は春から初夏に多く、冬はほとんどない。1964年以後の周期性が特に顕著に現われた例として、1968年3月3～5日、6月23

～24日があり、前者は稚内など3観測点を比較し、後者は稚内中心に解析してみた。(地名および場所については第5図参照)

2.1 1968年6月23～24日に起った周期変化現象

過去に記録されたこの周期的変化現象の中で最も変動幅が大きく周期性が明瞭で気圧などの自記記録にも同時的にでた例として、1968年6月23～24日の現象を解析してみた。地上風の自記記録を第1図に示した。この記録では、23日16時から24日9時までであるが、風速の変動が見事に記録され、風向も南西を中心に変化していることがわかる。

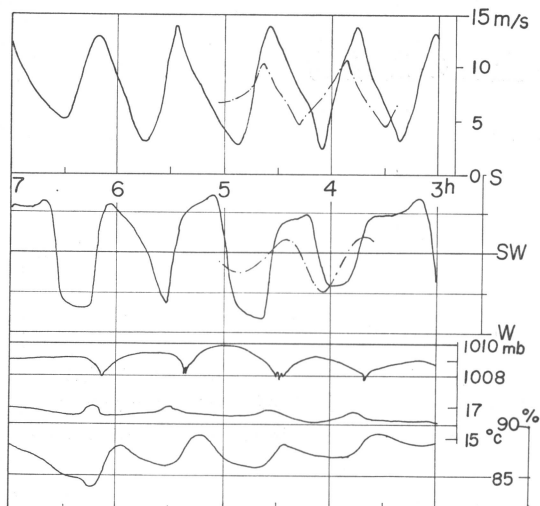
これより前の6月22日15時頃から次第に周期性が明瞭になり、風速は0～6 m/sec の変動を示し、風向は南西を軸に南と西の間を変化している。これは23日の2時ま



第1図 地上風の自記記録(稚内地方気象台1968年6月23日16時～24日9時)

* On Periodic Change of Surface Wind in Wakkanai Districts in Hokkaido

** T. Muramatsu 気象庁観測部南極観測事務室
1970年12月22日受理



第2図 稚内地方気象台における1968年6月24日の
風向・風速・気圧・気温・湿度の変化。鎖
線は稚内空港での変化。

で続いた。またこの間、稚内の500mの高度の高層風は220度付近で、顕著な温度逆転層が920~950mbに存在していた。500m高度の風向が200度と変わり、稚内では周期性がいったん不明瞭となった。23日の17時頃から再び明瞭となり、24日5時頃から最も顕著な周期変化をした。この後15時頃まで明瞭に存在し25日の2時頃に再び顕著な周期変化が見られ、規則的・不規則的な変化が断続的に見られる。

第2図は、この最も著しい24日3時から7時までの各気象要素の自記記録である。各要素を比較することにより、次の諸特徴点を挙げることができる。

(i) 周期変化現象が明瞭で、第2図の時間帯では45~50分周期であった。

(ii) 風向と風速の同時刻での比較から、風速の鋭い極大を境に風向は南西を軸に南~西へと時計廻りに急変する。この極大に対応して、気圧は漏斗状に減少し極小となった。気温は少し遅れているが、 0.5°C 程度上昇し、湿度は逆に減少した。

(iii) 風速の極小を境に、風向は南西を中心に西~南へと反時計廻りに急変し、気圧は緩かに極大を取る。(ii)、(iii)をもって一周期を形成し、風速の最大差12m/sec、風向は70度の変化であった。

(iv) 気圧変化の最大差は1.5mbで、変化はきわめて緩かだが極小付近で漏斗状に急減している。

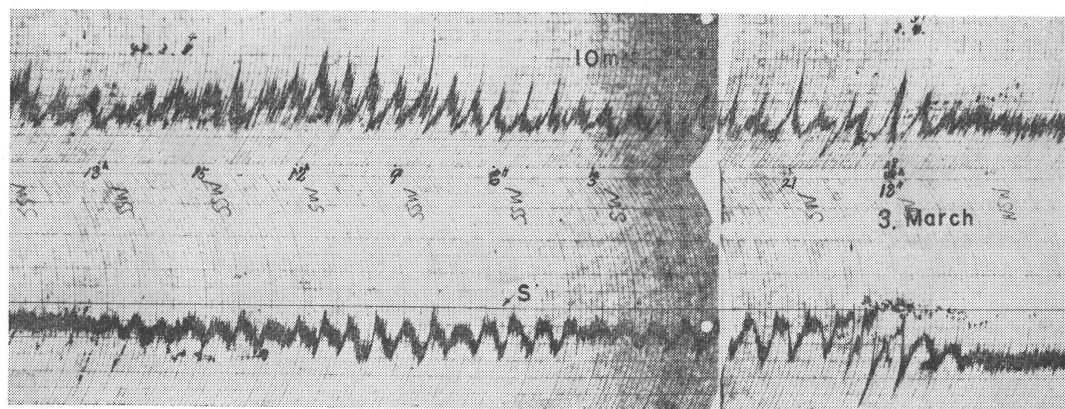
(v) 顕著な温度逆転層が930~900mbに存在している。

(vi) 空港分室にも第2図で鎖線で示したとおり、(ii)、(iii)の風向風速の同じ変化が見られる。風速変動差6m/sec、風向は ± 15 度で、稚内から位相で5~10分遅れて、第2図の時間帯を中心に10時間程現われている。抜海駅の資料はなかった。

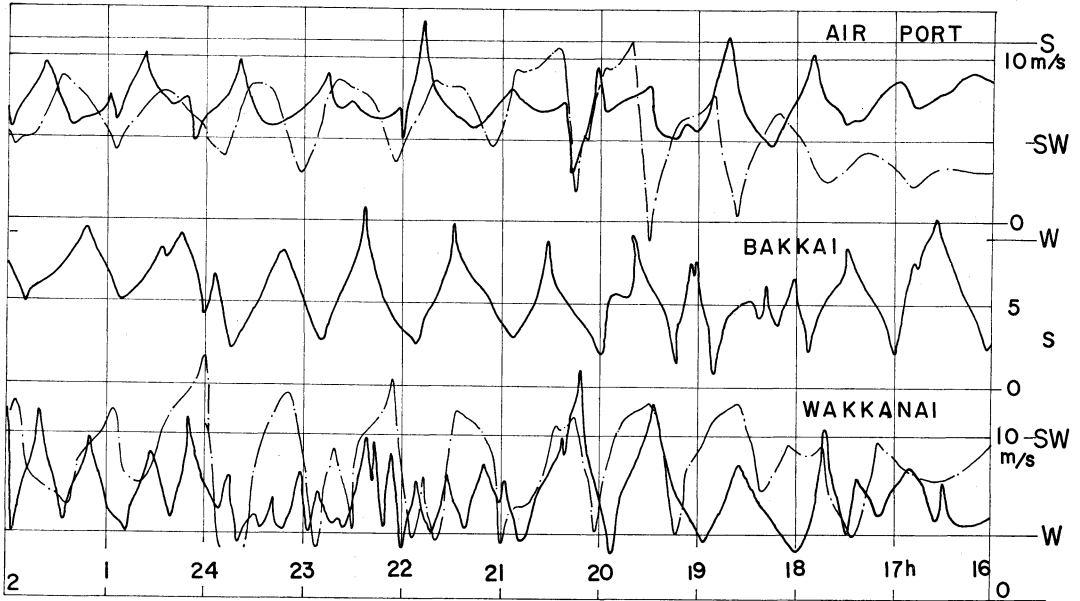
2.2 1968年3月3~5日の周期変化現象

2.1では主に稚内を中心に観測された例で各気象要素を比較したが、この例では稚内・空港・抜海の3観測点に2.1例と同様な周期現象が現れ24時間以上も広範囲に記録されたので比較検討してみた。

第3図は1968年3月3~4日の稚内空港の地上風の自記記録である。周囲が平坦で地物の影響が少ないので明瞭に顕著な周期変化を記録した。3日17時から4日20時まで27時間も続いた稀に見る記録である。同時に稚内・



第3図 稚内空港の地上風の自記記録(1968年3月3~4日)



第4図 1968年3月3～4日の稚内空港・抜海駅・稚内地方気象台の地上風の記録。実線は風速、鎖線は風向。

抜海駅においても顕著な周期変化が記録された。

この3点の風向風速の変化の一部を第4図に示した。上から稚内空港・抜海駅・稚内で、風速(実線)、風向(鎖線)をそれぞれ重ねて示した。抜海駅の風向の記録はなかった。

第4図から見られる特徴は次のとおりである。

(i) 稚内空港・抜海駅・稚内の3観測点全てに、周期変化が顕著に現れ24時間以上も続いた。

(ii) 稚内空港での周期変化には時間の経過に伴って3種類の異った変化を見せた。まず第1に、3月3日18時に代表される風速と風向の周期が一致し、風速の極大(たとえば18時40分)に対応して風向は南西を軸に西から南へ反時計廻りに急変する。これに反し22時以降(たとえば23時40分の風速の極大)では風向が南西を軸に南から西へと時計廻りに急変するように、全く逆の変化を見せる。またこの間、20時前後に代表される、風速の周期が風向の周期の1/2になる変化を見せる。

(iii) 3観測点の変化の経過は、3月3日15時40分に抜海駅に最初の風速の極大が現われ、空港が17時に、稚内が17時40分に各々最初の極大が現われている。次に風速の周期が半分になる時間は、抜海駅で18～19時、稚内空港19時30分～20時30分、稚内は24時～4日2時に見られる。再び前と同じ周期になるのもこの順である。このように抜海駅→稚内空港→稚内の順に現象の移行が見ら

れる。

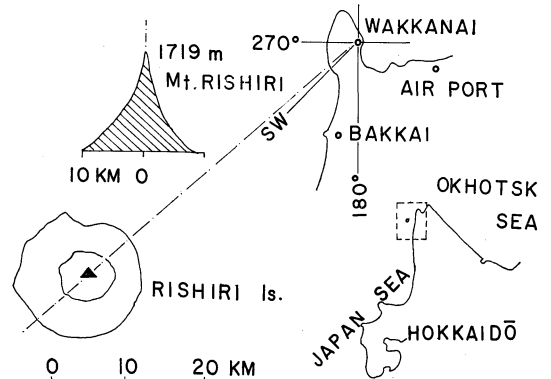
(iv) 稚内においては、他と比べ3日21時頃から24時まで風速が不規則になっている。さらに、第4図には示されていない4日2～6時に断続的に周期に乱れが出ている。稚内特有のものと思われる。

3. 周期変化現象についての考察

3.1 1968年6月23～24日の考察

2.1で挙げられた特徴点から次のことが考察される。現象の局地性および周期性、持続性と主風向が南西であることから、利尻島風下域のカルマン渦列と推論した。

第5図に示したように、稚内南西約40kmに利尻島が



第5図 稚内地方の地形

1,790m の円錐状孤峰を有して、日本海上に位置している。日本海を吹き抜ける乱れの少ない風が吹く良い条件下に位置している。従来の渦列状雲の解析は気象衛星写真で解析され、Madeira 島 (Chopra and Hubert, 1965), Kiska 島 (Lyons and Fujita, 1968), Cheju 島 (Tsuchiya, 1969) 等の報告に共通して見られる点は海上に孤峰が位置していることである。この点も推論の一つの裏付けとなる。

このカルマン渦列との推論で 2.1 (i) ~ (vi) を考察した。カルマン渦の安定周期は

$$\tau = d/S \cdot U$$

d: 代表的スケール (山の直径)

U: 一般風速

S: Strouhal 数 ≈ 0.2

で求められる。d を 700m 高度の山の直径 8 km にとり、一般風 U を 14m/sec (観測された代表値) と取ると周期は 47 分を得る。(i) の 45~50 分に一致する。

(ii), (iii) については固定観測点上をカルマン渦列が周期的に通ったとすれば説明できる。渦を渦糸と見なすと、渦糸の移動ベクトルと渦糸による接線ベクトルの合成が地上風と記録される。この結果、渦の中心が最も接近する時刻に渦糸の中心付近の気圧降下により、気圧は急減し、漏斗状の極小となる。風速は中心が最も近づく時、接線ベクトルが最大となるので極大となる。風向

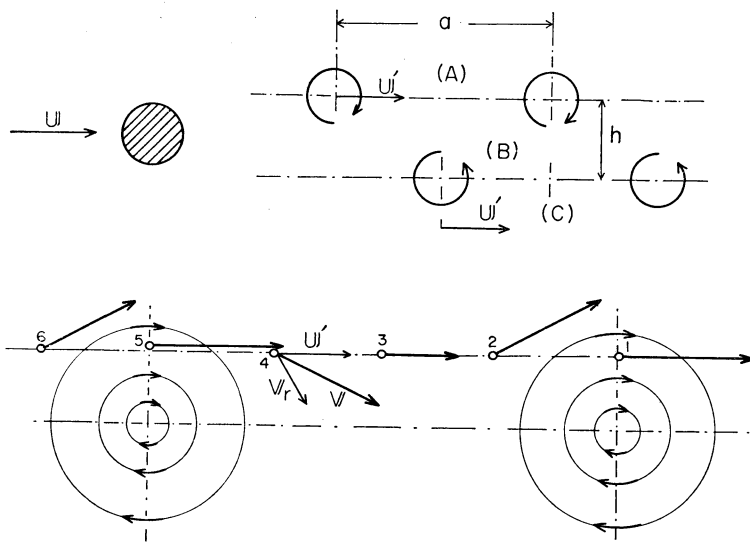
は渦の移動方向である南西を軸に急変する。風速の極小の場合はこの逆の変化をたどり、風速・風向の変化の周期は一致して変化する。

(iv) の気圧変化は旋衡風で説明できる。渦の中心と周囲の気圧差は旋衡風の式から $\Delta p \sim \rho \times V^2_{max}$ で与えられる。 $\rho = 10^{-3} \text{ gr/cm}^3$ で $V_{max} = 16 \text{ m/sec}$ (24日 3時 400m 高度の風速) では 2.6mb 降下し、地上風速 10m/sec で 1.0mb 降下する。実際に観測された 1.5mb に十分近い。また、第 2 図で見られる気圧の漏斗状の降下は旋衡風によって当然もたらされる。Cheju 島によるカルマン渦を気象衛星の写真 (Tsuchiya, 1969) で見ると渦の中心に陥没が見える。これは旋衡風による気圧降下が逆転面を漏斗状に引き下げた結果と考えられ、上記の説明の裏付けとなる。

また循環 Γ は中心から 2 km 地点で 16m/sec として計算すると、 $\Gamma = 2.0 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{sec}$ を得る。この値は利尻島の 3 倍の径をもつ Cheju 島の風下にてできるカルマン渦の循環 $\Gamma = 5.0 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{sec}$ に比較して妥当である。

(v) は従来の渦列状雲の報告に共通したものであり、利尻島の他の場合も存在している。

(vi) の空港での変化の位相が稚内より遅れるのは、空港が稚内より利尻島から離れた距離にあることを考慮すれば、渦列の移動によるものであると説明できる。



第 6 図 カルマン渦列 (上段) と (イ) 領域における風の変化 (下段)。

U: 一般流, U': 渦の移動ベクトル

V: 渦に伴う循環の速度, V は U' と Vr のベクトル和

a: 渦の間の距離, h: 渦列の幅

また500mの高さの風向が220度になると周期変化が明瞭となり、200度になると不明瞭となるのは、200度では渦列の影響外に稚内が位置するからである。

以上カルマン渦列の通過により (i) ~ (vi) の特徴を矛盾なく説明できた。同様に1969年6月20~21日にこれに匹敵する程度で起り、気圧・気温の変化も伴った。一般に気圧変化まで記録されるのは稀である。

3.2 1968年3月3~5日の現象の考察

稚内空港での2.2の(ii)で述べた3種類の変化はカルマン渦の推論を暗示させる。すなわちカルマン渦列は第6図の上段に示すごとく、時計廻り・反時計廻りの二つの相反する渦列が存在する。観測点が

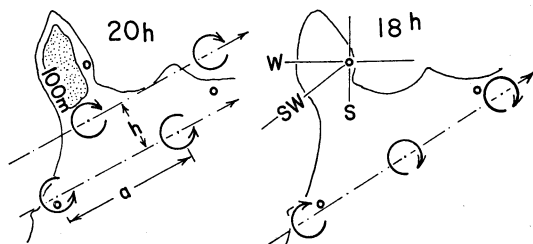
(A) 時計廻りの渦列の軸の外側

(B) 2列の軸の間

(C) 反時計廻りの渦列の軸の外側

の三つの場合のどの位置に当るかで観測される変化が異なる。たとえば、第6図(A)の側にある場合には同図の下段に太い矢羽1, 2, 3, 4, 5, 6で示すような風の変化を示す。一つの渦から次の渦の通過で一周期変化をし、風向と風速の周期は一致し、風速の極大は渦の最も接近する時で、風向は渦の移動方向を軸に反時計廻りに急変する。また(C)領域ではこの逆の変化をし、(B)の位置では2列の渦列両方が減速の役目をするので、風速の周期は(A), (C)の半分となる。稚内空港の記録では、(A)を18時、(B)を20時、(C)を23時頃に対応させることができる。これで2.2の(ii)は矛盾なく説明できる。稚内にも同様のことがいえる。

次に、3観測点の渦列との相対位置から(iii)を説明しよう。第5図で明らかとなり利尻島に抜海駅が最も近く、従って現象は抜海駅から始まる。また3点が(A)~(C)のどの位置にあるか、強弱の関係から渦列の位置を第4図・第5図から推定したのが第7図で、18時と20時を示した。たとえば20時では、稚内が(A)の変化をし、空港が(B)、抜海駅が(C)を表わしているの、大よその渦列の位置が決まる。時間の推移では、渦



第7図 1968年6月3日18時20時のカルマン渦列の位置 a, h は第6図に同じ。

列の軸(主風向)が18時から20時、さらにそれ以降も次第に北偏していくのがわかる。この結果一つの観測点で(A)~(C)の3種類の変化が時間とともに見られ、抜海駅→空港→稚内へと現象が移る。

(iv)の現象は、稚内西方の約200mの海岸段丘によるものと思われる。3日の22時頃、4日の4時頃に2列の軸がこの地形に当たる。この結果、山陰にあたる稚内だけに周期性の乱れが記録されることになる。

以上、3観測点の比較から2列の渦列の存在を裏付けた。

3.3 渦動粘性係数 ν ; h/a ; Re 数について

カルマン渦の実験室内での存在する条件として Lin のパラメータ β が $10^{-3} < \beta < 2.5 \times 10^{-3}$ の範囲を必要とする。 β は $\beta = \text{Strouhal 数} / Re$ 数で表わされる。これより渦動粘性係数 ν を求めると、カルマン渦列の存在した Cheju 島では $U = 8 \text{ m/sec}$, $\tau = 4.4$ 時間で

$$1.09 \times 10^7 < \nu < 2.73 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$$

を得ており、Kiska 島・Madeira 島も同程度の値を得ている。利尻島の場合は、 $U = 14 \text{ m/sec}$, $\tau = 47$ 分で

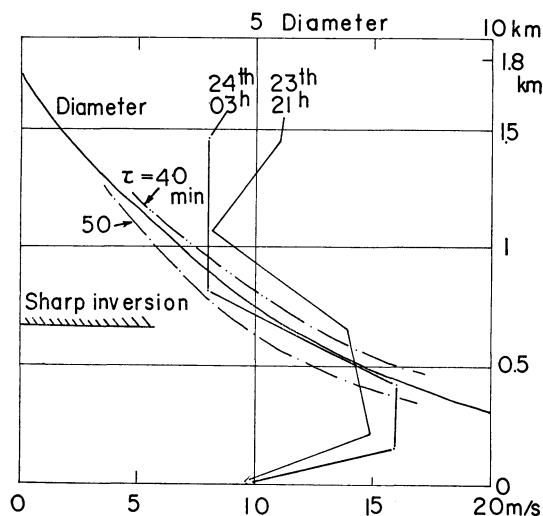
$$0.05 \times 10^7 < \nu < 1.38 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$$

となり、スケールを考慮すれば妥当である。

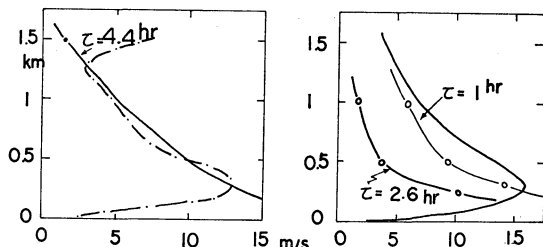
Re 数については、 $Re = U \cdot d / \nu$ で $\nu = 0.8 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ を与えれば、 $Re = 140$ となる。また第7図から、 h/a の値は約0.33を得る。第1表は過去に観測された例との比

第1表

島	大きさ (km)	高さ (m)	形状	周期	逆転層の 下限の高さ (km)	\bar{a} (km)	\bar{h} (km)	\bar{h}/\bar{a}	Re	ν ($10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$)	U(m/sec)
利尻島	8×10	1,719	円錐状孤峰	50分	0.7	9	3	0.33	140	0.55~1.38	14
Cheju 島	28×70	1,950	円錐状孤峰	4.4時間	0.9	110.8	36.8	0.332	250	1.09~2.73	10
Kiska 島	10×40	1,216	一部円錐状	2.6時間	0.2~0.5	83	25	0.3	100	1.9	10
Madeira 島	40×10	約2,000	—	7.09時間	0.5	190	83	0.43	98	4.2	10



第8図 稚内における風速の垂直プロファイル (1968年6月23日21時, 24日3時) —実線, 周期一定の計算された風速—鎖線, 利尻岳の径—太線。



第9図 MOSULPO (Cheju 島) (左側), SHEMYA (右側) の高層風プロファイルと, 周期から計算された高層風。

較である。

4. 垂直構造についての考察

稚内における高層観測記録により垂直構造を検討してみた。著しい渦現象が現われた時の高層の状態の共通する点は次の諸点である。

(i) 利尻島の中腹0.5～1.0kmに顕著な逆転層が存在している。

(ii) 高層風の風向は利尻島と稚内を結ぶ線と一致する。

(iii) 逆転層下の高層風は地表付近を除いて上空ほど弱く、その強さは山の直径と比例している。

第8図は2.1で解析した例の1968年6月23日21時, 24日3時の、最も渦現象が顕著に現われた時の高層風の記録である。0.7km付近に顕著な逆転層(約4℃)の下

限が存在し、風速は0.1～1kmの高度で山の直径に比例している。これから特徴点は次のように説明できる。

カルマン渦の安定周期は $\tau = d/U \cdot S$ である。Strouhal数 S はほぼ一定で0.2をとるので、周期は d/U に比例する。垂直的に渦の発生周期が一定なら、 U と d すなわち、風速の垂直プロファイルは山の直径に比例する。0.5km以下の高度では地上摩擦の影響で風速が漸減し、第8図のようなプロファイルとなる。数値的に検討してみると、観測された周期は45～50分であったので、 $\tau = 40$ 分、50分で計算した U の分布を第8図に鎖線で示した。24日3時の実測値はこの間に入り、十分一致している。

この(i)～(iii)の特徴、なかんずく(iii)の風速の垂直プロファイルはCheju島およびKiska島の場合にも見られ、これを第9図に示した。たとえば、Cheju島の場合では、 $\tau = 4.4$ 時間、 $S = 0.194$ であるので、山の直径から期待される周期一定のための風速の強さを実線で示した。実際に観測された値(鎖線)と一致する。Kiska島も同様に傾向が一致している。

利尻島の場合、2.2の解析例の他、顕著な例にこれらの特徴点が共通して見られ、渦の発生に必要な条件と思われる。利尻島については、冬期はほとんどなく春から初夏など上層が弱風となる傾向の頃に渦の発生が集中している点から見て、逆転層の存在を含め、重要な要因となっている。

5. むすび

以上の解析と考察により次のことが要約される。

1. 稚内地方に局地的に起る地上風の周期変化現象は、南西風によって利尻島の風下域にできるカルマン渦列の通過によるものである。

2. 発生の条件としては、山の中腹に顕著な逆転層の存在することと、風速の垂直プロファイルによるカルマン渦の発生周期が垂直的に一致することが必要である。円錐状の孤峰の場合に良く発生しやすい。

この報告に際し、資料を提供して頂いた稚内地方気象台の生本・佐藤両氏に謝意を表わすとともに、有益なる助言と援助を頂きました札幌管区気象台、松嶋高層課長をはじめ、本稿を閲読して下さいました気象大学校の荒川博士の御厚意に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Chopra, K.P. and L.F. Hubert, 1965: Meso-scale eddies in the wake of islands, J. of Atm. Sci., **22**, 652-657.
- 2) Gossard, E. and W. Munk, 1954: On gravity waves in the Atmosphere, J. of Met., **11**,

- 259-269.
- 3) Hubert, L.F. and A.F. Krueger, 1962: Satellite pictures of mesoscale eddies, Monthly Weather Rev., **90**, 457-463.
 - 4) Lyons, W.A. and T. Fujita, 1968: Mesoscale motions in oceanic stratus as revealed by satellite data, Monthly Weather Rev., **96**, 304-314.
 - 5) 佐藤克治・生本光二, 1968: 風速の変化について, 北部管区気象研究会誌(昭和43年度), 118-119.
 - 6) Tsuchiya, K., 1969: The clouds with the shape of Karman vortex street in the wake of Cheju Island, Korea, J. Met. Soc. of Japan, **47**, 457-465.

第16期 第3回理事会議事録

日 時 昭和46年5月25日 17.30~19.40

場 所 気象庁観測部会議室

出席者 山本, 大田, 関口, 大井, 川村, 小平, 関原
藤原, 岸保, 北川, 伊藤, 駒林各常任理事
磯野, 孫野, 木村, 須田, 竹内, 中島, 沢田
武田各理事, 根本監事

列席者 中村, 鈴木各庶務委員

議 題

昭和46年度総会準備について

- (1) 理事長あいさつ要綱(案) } 原案承認
- (2) 昭和45年度事業経過報告(案) }
- (3) 昭和46年度事業計画(案)

大会関係に秋季大会のシンポジウム, 9月東京で開催のシンポジウム, 夏期大学(第5回)開催のことを入れることにし原案承認

- (4) 昭和45年度決算報告 原案承認

- (5) 同 監査報告

根本監事より, 予稿集の収支は別項目にするようにしたい。一部地方大学で集金組織がないため会費の納入が遅れているものがある。機関誌で一部発行が遅れたものがある。これらの点に関しては, 今後改めるとして, 今回の決算は, 正確適法であったと報告があった。

原案を承認

- (6) 昭和46年度予算書(案)

予稿集の収支は決算で別項目とすることとし原案承認

- (7) 国際学術交流についての将来計画の方針

原案承認

- (8) 来年度大会当番支部

東北支部当番であるが春に国際放射シンポジウムが開催され1年に2回主催することは負担が重いので, 東京管区气象台と協議した結果, 関東地区担当, 東京管区气象台管内新潟で秋季大会を開催することの了承を得た。

昭和48年度は東北支部とする。なお, 今後大会を地方都市(たとえば広島, 鹿児島など)で開くことの可能性について検討することになった。

2. 正野記念論文集について

気象集誌の記念号とすることを承認する

3. 青木滋一理事の理事解職について

辞職を承認する。関西地区に次点者がいないので欠員とする。

4. 関口理事の講演企画委員会担当を辞退することを承認する。

5. 各種委員会委員の新任および変更について

原案承認, なお正野記念論文集編集委員に小平信彦気象集誌編集委員長を入れる。

6. その他

(1) 事務局職員を厚生年金保険, 失業保険に加入させるため適用事業所に指定申請書提出することを承認する。

(2) 事務局に総務, 経理, 国際の部を設け, 現在職員をそれぞれの部長とすることを承認する。

(3) 夏期講演会シンポジウムを「日本の AMTEX (GARP)計画」とすることを了承する。

(4) 夏期大学「新しい気象学教室」(第5回)の開催を承認する。