

ひまわりから見たカルマン渦

The Kármán Vortex Street Detected by the Geostationary Meteorological Satellite "Himawari"

森 脇 明*

Akira Moriwaki*

Abstract

Kármán vortex streets detected by the Geostationary Meteorological Satellite "Himawari" are observed in a down-side area of an island: Che-ju island, Yaku-shima island, Ururun island, Shantong peninsula, for instance. In these areas common conditions are found geographically and meteorologically.

Three numbers are defined: Reynolds number, Strouhal number, a ratio b/a (b : a distance between two vortex streets, a : a distance between neighbouring vortices living up along a street). In this paper these numbers are discussed, and the ratio b/a were measured using the data obtained near Japan.

It was revealed, according to a statistical investigation, that there was a frequent occurrence, in the down-side of Che-ju island from December to January, and in that of Yaku-shima island on February, respectively.

The case of December 23rd to 24th, 1981 has been analysed. Results showed that a shape of vortex streets represented trajectories of air particles in the vicinity of the island.

1. 緒 論

冬期日本付近の気象衛星画像に明瞭なカルマン渦がしばしば見られる。特に韓国・濟州島 (Cheju Island) の風下には、大きな個々の渦を持ち、時には 800 km ~ 1,000 km 位の長さの渦列が出現する。また屋久島の風下や千島列島の風下でも時々出現し、まれに韓国・ウルルン島 (ウツリョウ島) や山東半島の風下にも見られる。(Fig. 1-1 写真参照) カルマン渦は、日常身近の例としては、川の中に立っている杭の下流にできる渦が挙げられ、また実験室での流体実験でも容易に作ることができる。衛星画像でみる雲の場合は、実験室での障害物の代わりに 500 m ~ 2,000 m 位の高さの円錐形に近い山があり、インクまたは煙などの代わりに比較的強い逆転層に雲頂を押えられた層積雲が層雲が広い範囲で存在するわけである。カルマン渦が出現する為には、その他

色々な共通した条件がある。その一つに、その山の付近には方向の一定した比較的強い下層風が吹いているということ。そして、障害物となる山は広い海面に突き出た半島か広い海面上の小さな島であることなど。しかし、これらの条件は絶対条件ではないので、この条件外でもカルマン渦は山の風下に出現する可能性はある。実際ひまわりの画像では、北海道の風下や東北地方の風下にみられる。(Fig. 1-2 参照)。

2. カルマン渦に関する数式及び数

カルマン渦に関した重要な数として、レイノルズ数がある。このレイノルズ数 (R_e) は、慣性力が粘性力の何倍かを示す無時限の数で、

$$R_e = u \cdot d / \nu \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 u は自然流体の速度、 d は障害物の直径、 ν は流体の動粘性係数となっている。また ν

* 気象衛星センター解析課, Meteorological Satellite Center

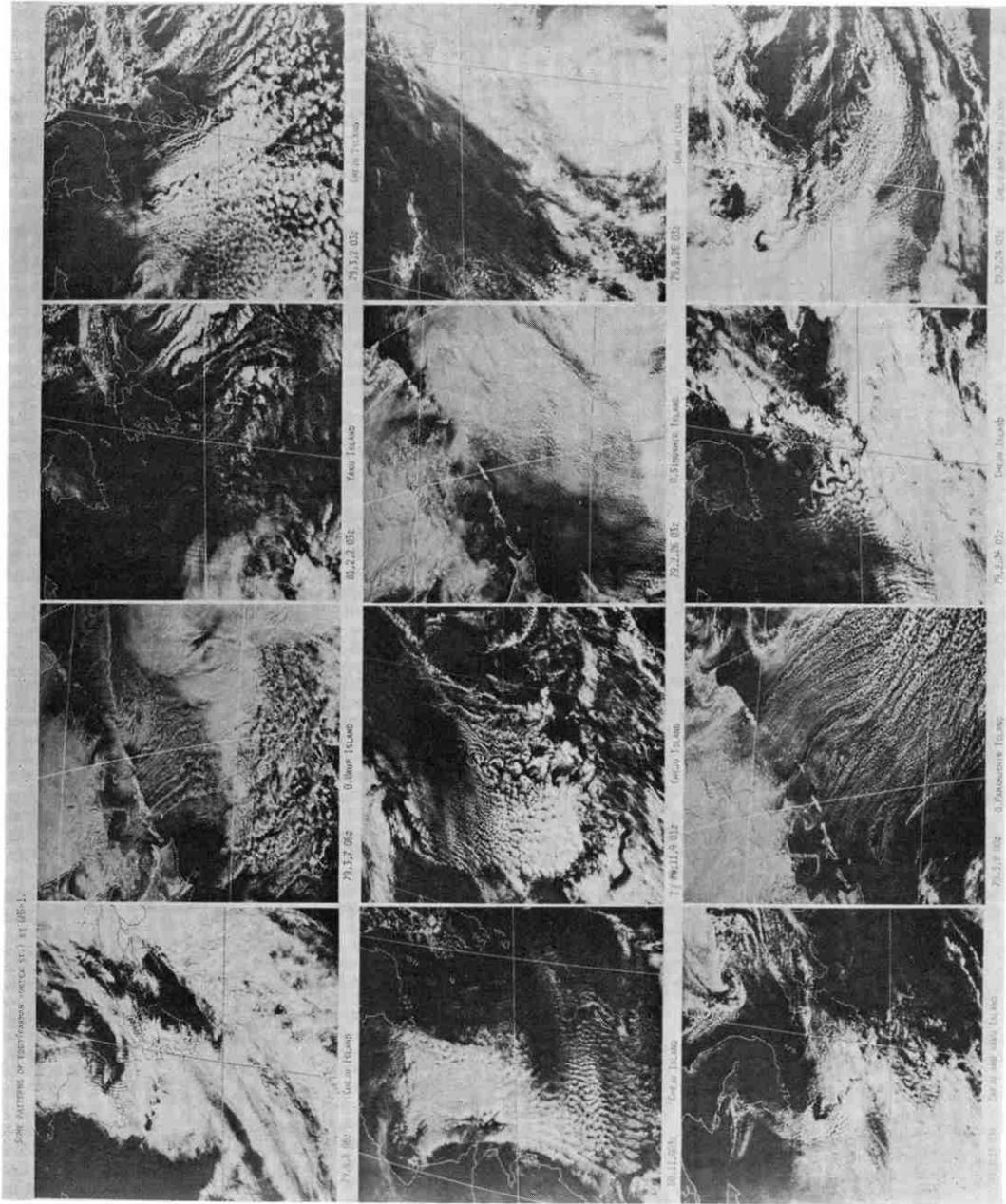


Fig. 1-1 「ひまわり」で観測された日本付近に出現した色々な形のカルマン渦。

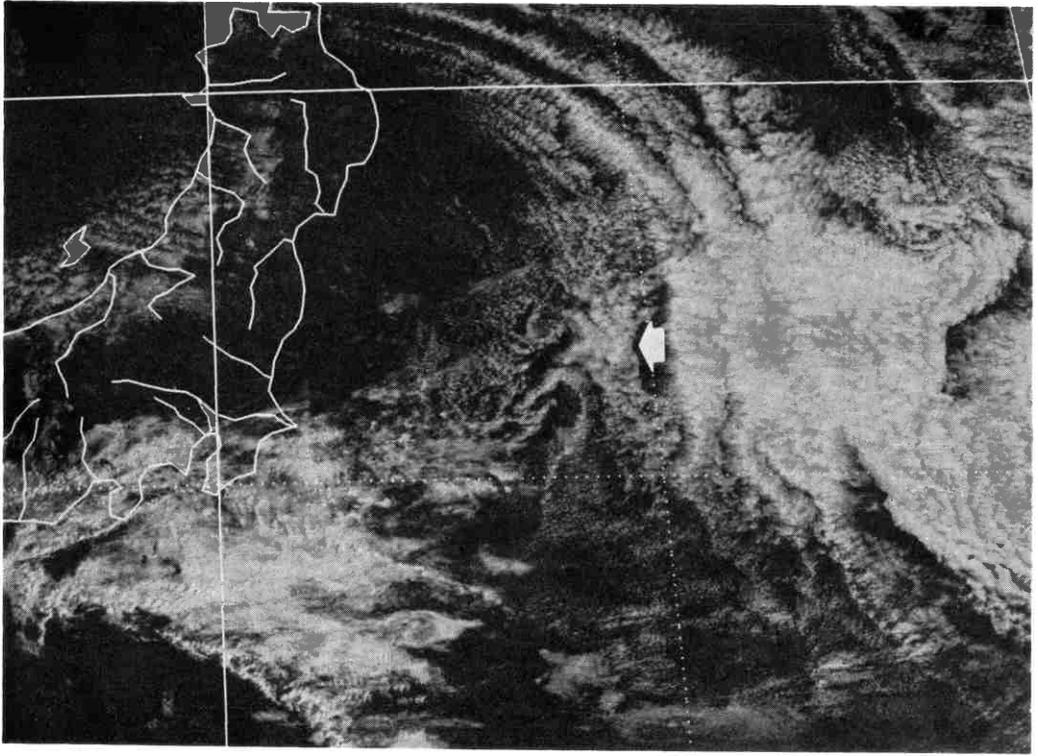


Fig. 1-2 東北地方の風下に出現したカルマン渦と考えられるもの。
1983年10月12日00Z 可視画像。

は

$$\nu = \mu / \rho$$

でも表わされる。ここで、 μ は流体の静粘性係数、 ρ は流体の密度となっている。このレイノルズ数は、その流体が乱流であるかどうかを決める値と云ってもよい。実験室の実験によると、このレイノルズ数がおよそ $50 \leq Re \leq 5,000$ でカルマン渦は出現している。(Niels Otto Jensen and Ernest M. Agee, 1978)。山の風下に出来るカルマン渦の場合には、およそ $50 \leq Re \leq 300$ でカルマン渦は出現している (Roshko, 1954)。

またレイノルズ数と関係のある数でストロウハル数 (S) という数がある (Niels Otto Jensen and Ernest M. Agee, 1978)。この S 数は

$$S = n \cdot d / u \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 n は渦の出現周期で、 d と u については式 (1) と同様になっている。

式 (1) と式 (2) よりレイノルズ数とストロウハル数の関係を導くと

$$S = n \cdot d^2 / Re \cdot \nu = n \cdot Re \cdot \nu / u^2$$

となる。Roshko が実験によって、レイノルズ数とストロウハル数の関係を求めたグラフを Fig. 2 に示す (Roshko, 1954)。およそ $Re = 500$ 以上で $S = 0.21$ 近くに安定していることがわかる。(Niels Otto Jensen and Ernest M. Agee, 1978)。Roshko によると、 $40 \leq Re \leq 200$ の範囲でカルマン渦は出現し、その範囲でのストロウハル数は $0.12 \leq S \leq 0.19$ となっている。またその範囲では

$$S = 0.212 - 4.5 / Re$$

の関係が成立し、 $Re > 300$ に対して $S = 0.21$ で安定な値を取る。(Fig. 2) Roshko (1954) による。

式 (2) の frequency (n) は

$$n = (u_e / u) \cdot u / a = u_e / a$$

で表わされ、渦の伝播スピードである u_e と同じ列中の渦の間隔 (a) によって求められる。またストロウハル数とレイノルズ数の比 (β) を用いる場合もあり、

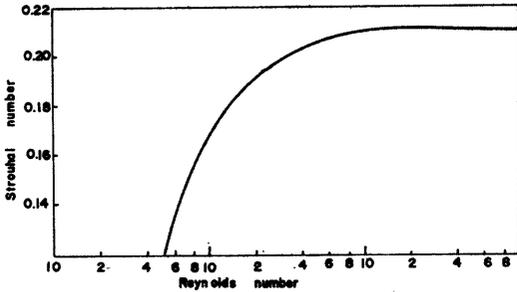


Fig. 2 Strouhal 数と Reynolds 数の関係 (流体が正円筒形の障害物を通過するとき)。Roshko (1954) による。

$$\beta = S/R_e = n \cdot \nu / u^2$$

を使用している。

以上述べた数はカルマン渦が出来るかどうかを決める数、またはカルマン渦が出現したときに障害物の直径と流体によって、どのような形の渦列になるのかを決める数といっても良い。

渦列が出現した後、その渦列の安定度を表す値に b/a という比がある。ここで b は渦列の間隔である (Fig. 3 参照)。流体力学の方程式からロシュッコによって求められた理論上の値は、 $\cos h(\pi b/a) = \sqrt{2}$ となっている。これはすなわち、 $b/a \approx 0.2806$ のときのみ渦列が安定することを意味している。しかし、実際に観測された b/a という比は、障害物の形や流体の種類によって、 $0.28 < b/a < 0.52$ の範囲になっていることを Chopra と Hubert が報告している (Chopra and Hubert, 1965)。

一シーズンに気象衛星ひまわりから観測された b/a の平均値は、次のようになっている。カルマン渦が濟州島の南寄りの方向に出現した場合には、その値は $b/a \approx 0.42$ 、南東寄り出現した場合には、 $b/a \approx 0.48$ 、屋久島の南東方向寄りに出現したもののその値は、 $b/a \approx 0.46$

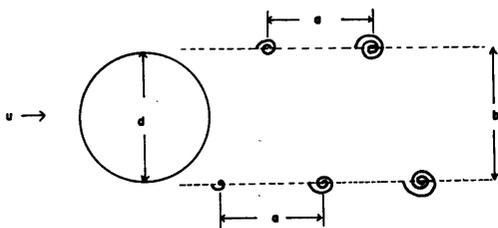


Fig. 3 free flow 中にある円柱障害物の下流に出来るカルマン渦。d は円柱の直径、a は同列の渦と渦の間隔、b は両列の間隔。

となっていた。千島列島のウルフ島の風下に出現したものでは、 $b/a \approx 0.29$ という理論上の値に近い値を取っていたものもあった。期間は、1981年10月から1982年3月までのポーラステレオ画像より測定したもので、濟州島の南寄りの場合には5例、南東寄りの場合には12例、屋久島では7例、ウルフ島では1例より求めた。

3. GMS 写真における出現の統計

1981年9月から1982年4月の間のカルマン渦のシーズン中における月別出現回数(頻度)と月別出現時間の統計を Fig. 4 と Fig. 5 に示す。これらは、「ひまわり」の3時間ごとの画像より目視で測定し、きちんとした渦状になっていなくても、乱流状であれば出現していると見なした。これによると、濟州島の風下に発生するカルマン渦は10月に出現頻度と出現時間共に小さなピークがある。これは、日本付近が冬型の天気のとときに非常に強

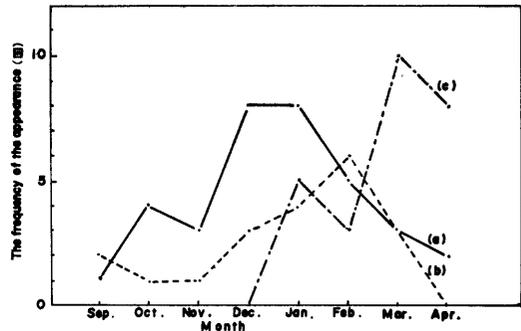


Fig. 4 1981年9月から1982年4月までのカルマン渦の月別出現回数。「ひまわり」の画像より目視によって数え、きれいにカルマン渦になっていない乱流状のものも含めた。(a) は濟州島 (Cheju Is.), (b) は屋久島, (c) は千島列島全島。

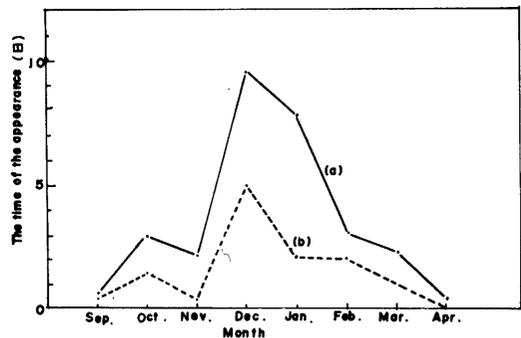


Fig. 5 1981年9月から1982年4月までの月毎の出現時間。以下 Fig. 4 と同様。

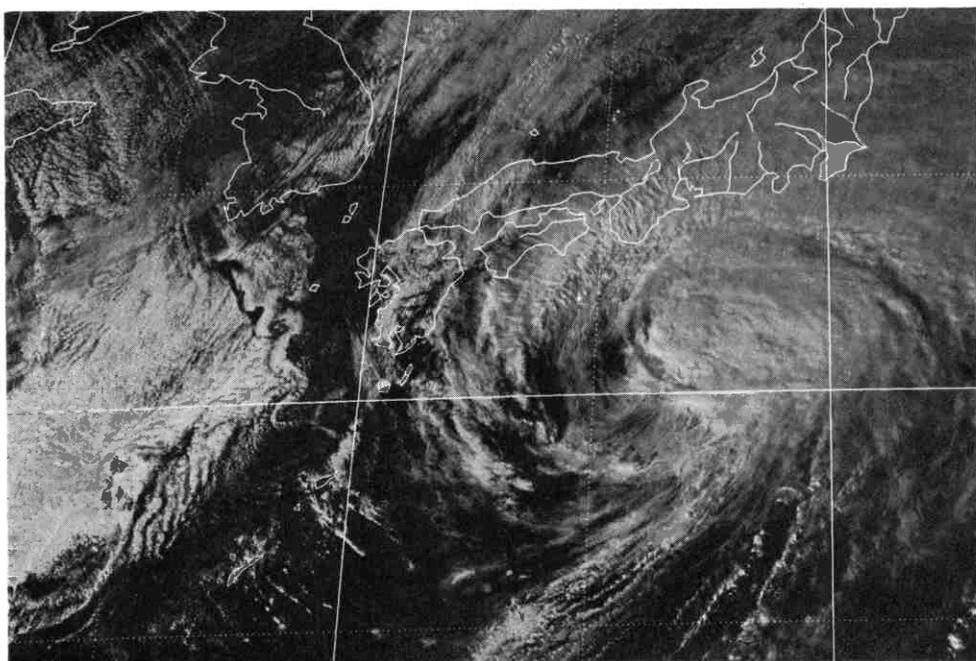


Fig. 6 台風西側の北風域に見られたカルマン渦の例。1981年10月22日06Z 可視画像。

い北寄りの季節風が吹き込む為が発生するものではなく、台風が日本付近に接近したとき、北寄りの強い風をもたらす為が発生するものと思われる (Fig. 6 の写真参照)。これが済州島の風下に出現するカルマン渦の一つのパターンとなっている。もちろんこの場合では、季

節風によって発生する場合と、少し天気図の様子が異なっている。

屋久島の風下に発生するカルマン渦は、出現時間で済州島の風下のものと同傾向になっているが、出現頻度において済州島のそれとは異なっている (Fig. 4 参照)。

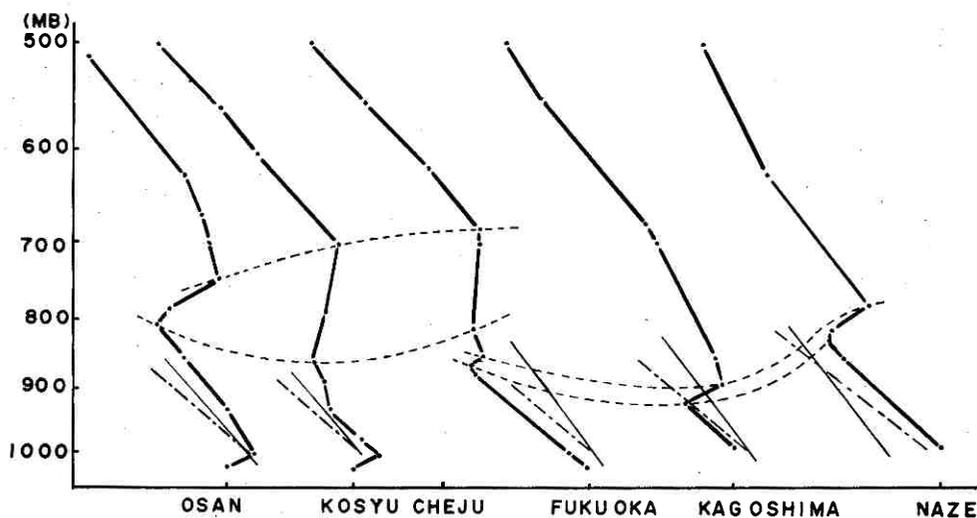


Fig. 7 季節風の風向に沿う径路上の気温鉛直分布。烏山, 光州, 済州島, 福岡, 鹿児島, 名瀬の位置を直線 (季節風と平行) に投写した距離間隔で記入してある。鎖線は乾燥断熱線を示し、細線は湿潤断熱線、破線は逆転層を示す。縦軸は高度 (気圧) を表わしている。

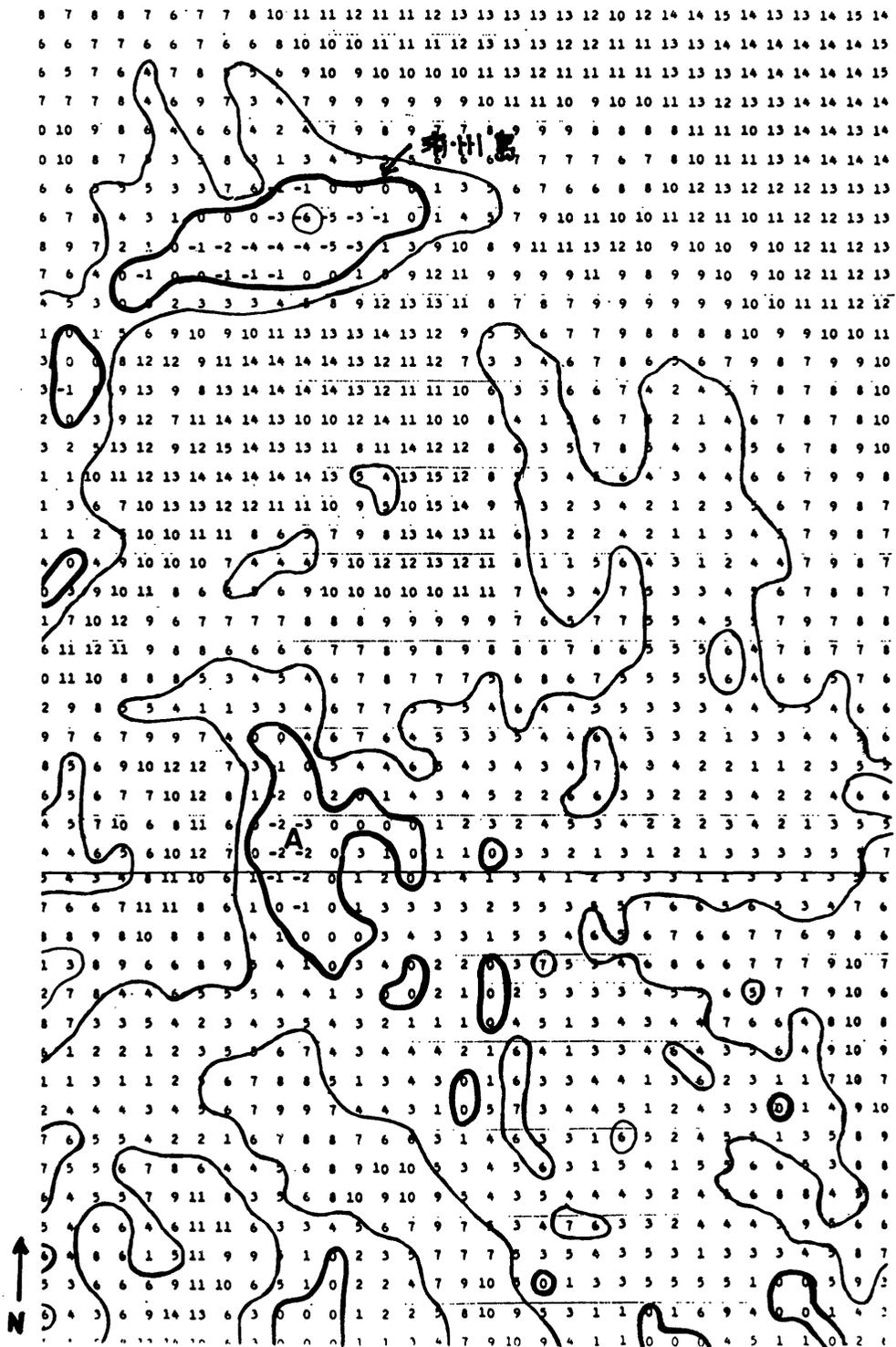


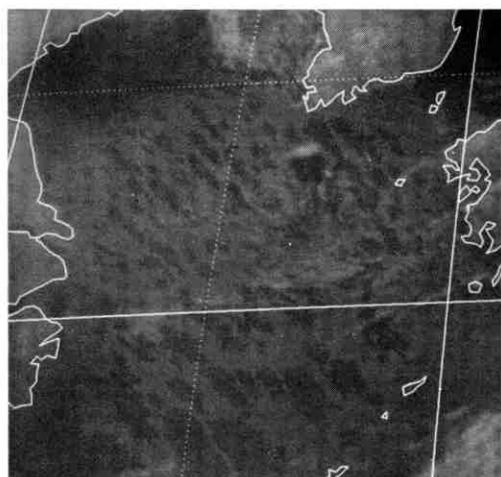
Fig. 8 1981年12月24日00Z における 濟州島風下海域の赤外輝度温度分布。数値は摂氏温度。
太線は 0°C の等温線で 5°C 毎に等温線を引いた。

濟州島の風下では、12月～1月に出現頻度のピークがあるが、屋久島の風下では、2月になっている。その理由は1月から2月になると、日本の南岸を低気圧が頻繁に通過するために、屋久島の風下にのみ渦列が発生し易くなるためであろう。さらにその低気圧の移動スピードは非常に速いので、渦列の出現（持続）時間はそれほど長くはならない（Fig. 5 参照）。

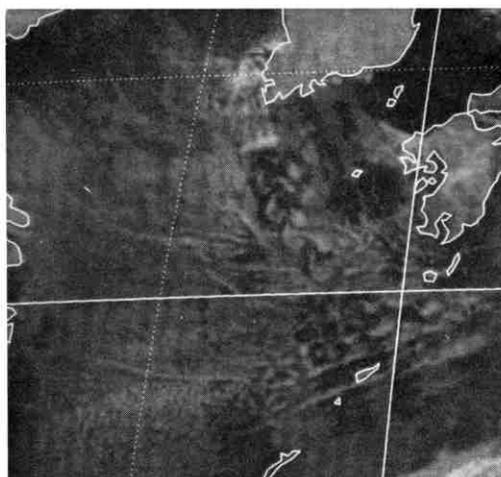
濟州島の風下に出来るカルマン渦は、屋久島の風下に出来るカルマン渦に比べて、ほぼ出現頻度と出現時間も多くなっている。これは屋久島の風下に出現するカ

ルマン渦が、一定方向（ほぼ南東方向）にしか出現しないためようだ。一定方向にしか渦列が出現しない理由は、山の形が円錐形でないことと、広い海がその方向にのみ存在するということであろう。

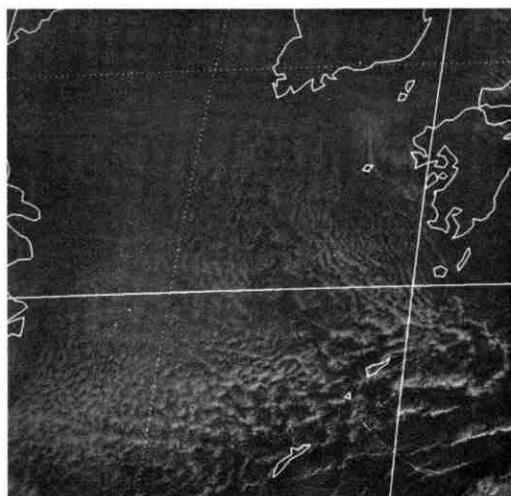
千島列島では、1月からカルマン渦が見られ始める。2月に少ないのは、海氷がオホーツク海をうめ尽くす為に、海面からの水蒸気の蒸発が少なくて、雲が出来ないためと解釈できる。すなわち、大気の流れにはカルマン渦は発生するだろうが、雲がそこないので気象衛星から観測することが出来ないであろう。実際、3月にな



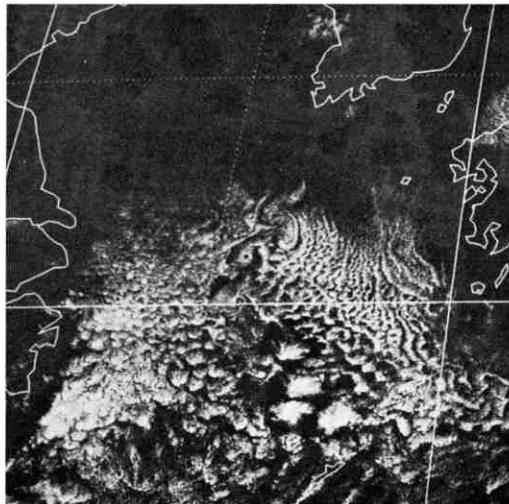
(a) 23 12Z



(b) 23 18Z



(c) 24 00Z



(d) 24 06Z

Fig. 9 (a) : 1981年12月23日12Z に赤外画像。(b) : 12月23日18Z 赤外画像。(c) : 12月24日00Z 可視画像。(d) : 12月24日06Z 可視画像。

ると、海氷はオホーツク海を北上し、一方カルマン渦の出現頻度は急に増加する (Fig. 4 参照)。千島列島の風下では、カルマン渦を5月頃まで観測することができる。

4. 事例解析

1981年12月23日06z から24日09z にかけて、非常にはっきりしたカルマン渦が済州島の風下に見られたので、時間を追ってその渦列を解析した。この期間中の12月24

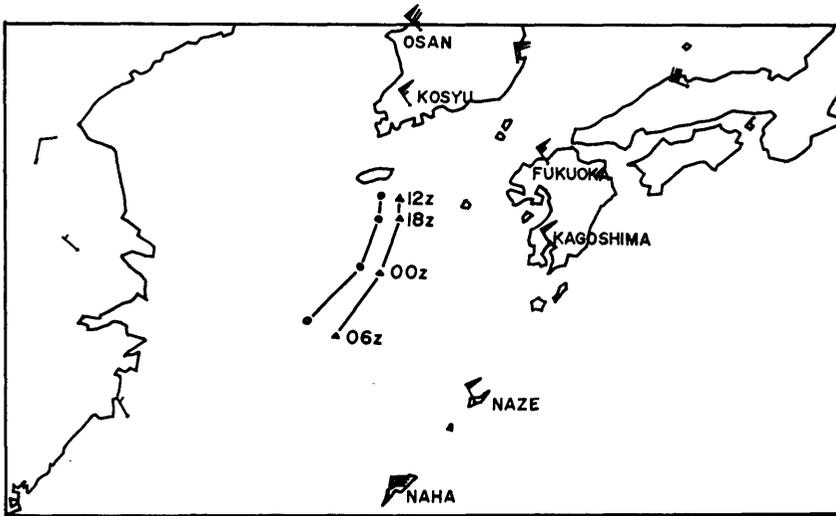


Fig. 10 渦列の中の一对の渦の移動経路。1981年12月23日12Z~12月24日06Z の間のもの。12月24日00Z の 850 mb の風を矢羽根で記入してある。

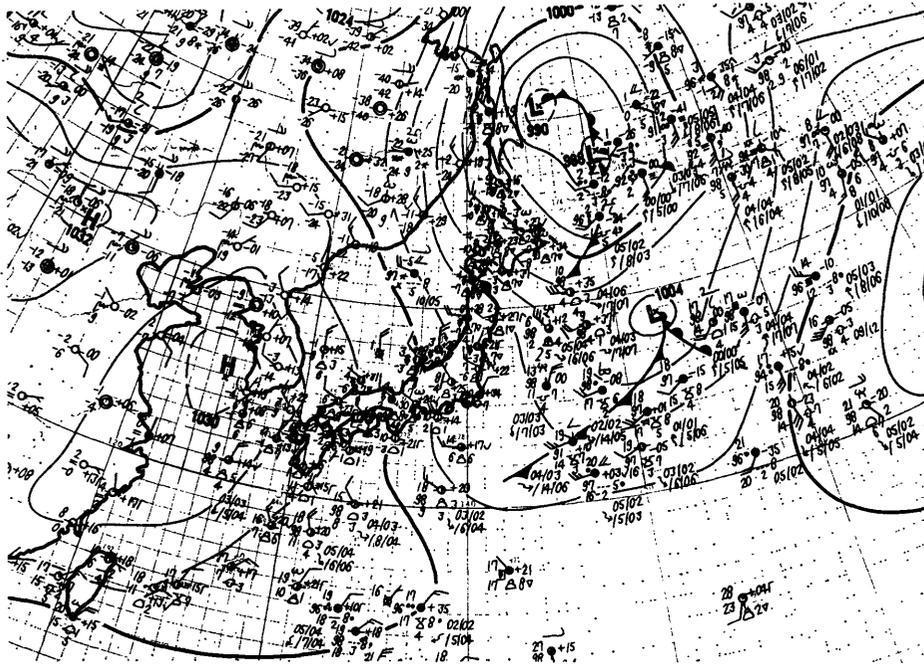


Fig. 11 1981年12月24日00Z の地上天気図。

日00zの烏山(韓国), 光州(韓国), 福岡, 鹿児島, 名瀬のそれぞれの地点でのエマグラムを Fig. 7 に示した。この中で, 非常に強い逆転層がおのおのの地点において, 表われているのがわかる。赤外データによると, カルマン渦を形成していると思われる雲の雲頂温度のいちばん低いところ (Fig. 8 の A 付近) で, $0^{\circ}\text{C}\sim-3^{\circ}\text{C}$ 位になっている。Fig. 7 から推定した済州島付近での逆転層は, 850~700 mb 位になっている。このときの850~700 mbの高度は, 同時刻の高層データよりおよそ1,500~3,100 m 位になる。この逆転層の高さは, 済州島(1,950 m)に対して, 十分 capping inversion と成り得るものである。

また Fig. 9 に23日12zと23日18z, 24日00z, 24日06z時の「ひまわり」からの写真を示した。この中で注目される点は, 渦列の走向が (a) では南東方向, (b) では南南東方向, (c) では南南西方向, (d) では南西方向と云うように連続的に変化したと云うことである。その結果, 24日06zでは Fig. 9 (d) のように, 渦列は西へ凸に湾曲している。この Fig. 9(d) の一枚の画像を見る限りにおいて, 渦は渦列に沿って流れて来たように見える。しかし, Fig. 10 では, その一対の渦は渦列と逆方向に湾曲して流れていることを示している。しかも, スピードを増しながら, 一対の渦は間隔を広げていることがわかる。この動きは, 正に流跡線であり, 流跡線によ

ってこの渦の動きを説明することができる。Fig. 11 に示した12月24日00zの地上天気図にあるように, 朝鮮半島の西にあった移動性の高気圧が東方へ移動して来た為に, 大きな風場が北西風から北北西風と変わり, そして北風から北東風と変化した為にこの美しい渦列が出現した。

参考文献

- 1) Niels Otto Jensen and Ernest M. Aee, 1978: Vortex cloud street during AMTEX 75, *Tellus*, **30**, 517-523.
- 2) Kiyoshi Tsuchiya, 1969: The clouds with the Shape of Kármán Vortex Street in the Wake of Cheju Island, Korea, *J. of Met. Soc. of Japan*, vol. XXXVII, No. 6, Dec. 28.
- 3) I. Hirota and K. Miyakoda, 1964: Numerical Solution of Kármán Vortex Street behind a Circular Cylinder, *J. of Met. Soc. of Japan*, vol. 43 No. 1.
- 4) R.E. Thomson, J.F.R. Gower and N.W. Bowker, 1977: Vortex Streets in the Wake of the Aleutian Islands, *Monthly Weather Review*, vol. 105, July.
- 5) T. Muramatsu, 1971: 稚内地方における地上風の周期的化変について, *天気* **18**, 6.