

地形の後に生じる雲パターンの実験*

柳 沢 嘉 親** 孫 野 長 治***

要旨

ドライアイスの霧の流れを用いて密度流が物体後方に作る流れを可視化し、地形の後に生じる雲パターンの再現を試みた。第1の実験では、ドライアイス霧を含む流れの渦粘性係数 K を Kármán 渦列から求め、室内実験の範囲では $K=1\sim 5\text{ cm}^2/\text{sec}$ であることが解った。

第2の実験では、孤立峰(円錐)の後方に生じる霧の流れを種々の気流の安定度のもとに可視化し、特徴的な3つの雲パターンである Kármán 渦列, Ship wave, Band cloud に対応する流れを得た。それらの流れパターンと気流の安定度、さらに霧の層厚の間の関係を求めた。

さらに第3の実験では、北海道の地形模型を用いて、ドライアイス霧層の作る流れパターンと、実際の衛星写真の雲パターンを比較し、特に、冬の北西季節風の時、それらの間には十分な相似が成り立つことがわかった。相似を検討する無次元数としては、 F (フルード数) が有効であった。

1. はじめに

気象衛星の雲写真によると、孤立した山の後方に Kármán 渦列 (Thomson・Gower, 1977) や Ship wave (Gjevik・Marthinsen, 1978) に似た雲パターンが、しばしば現われる。また Magono (1971) は孤立した障害物の後方に帯状雲が発生することを室内実験で再現しているが、本研究はこの実験を発展させて、一連の室内実験により、各種の雲パターンの再現を試み、どのような実験条件の下にどのような雲パターンが現われるか調べた。さらに、実際の北海道地形模型を用いて、北海道の地形によって生じる雲パターンを再現し、気象衛星の雲写真との比較を試みた。

2. 室内実験気流の渦粘性係数

2.1. 実験手順

室内実験におけるドライアイス霧層の渦粘性係数 K を求めるために次のような実験を行なった。定常流の中に置かれた円柱後方に生じる Kármán 渦列とレイノルズ数 ($Re=U\cdot D/K$, U は流速, D は円柱の直径, K は動粘性係数) との間には決まった関係がある (Homann,

1936)。この関係から動粘性係数を求めることにした。実験手順は次のとおりである。

(イ): D および U の値をさまざまに変えて、霧層の流れの中で円柱を動かし、円柱後部の渦列を撮影する。

(ロ): Taneda (1956) の実験結果によれば、渦列のでき初めがレイノルズ数30前後であるので、渦列の徴候が現われた時の U , D より $Re=30$ として、 K の値を求める。

(ハ): (ロ) で決めた K を用いて、渦列のさまざまなパターンのレイノルズ数を求め、 K の妥当性を確かめる。

2.2. 実験装置

実験には、山崎 (1968) に準じて、第1図のような装置を用いた。ただし後の実験では、多少の改良を加えた。

図の Dry ice box と書いた箱の内部に温湯を入れた皿が入っており、この中にドライアイス塊 2~3 kg を投げ入れると、前部スリットより実験平面として使ったアルミ板上に、定常流に近いドライアイス霧層の流れが出てくる。このドライアイス霧層の厚さは、一様に 1 cm 内外である。これは周囲の空気に比べてドライアイス霧の比重が大きいためである。流れの写真撮影は、装置のガラス板の外側から、写真用電球 (500 W) 4個を取り付け、撮影の瞬間だけ、横方向から点灯し、上方よりカメラ撮影をした。

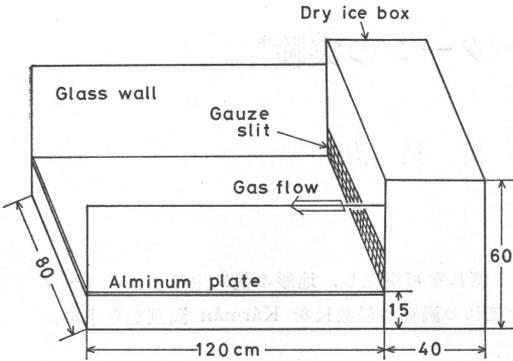
* Laboratory experiments on cloud patterns produced behind the topography.

** Yoshichika Yanagisawa, 埼玉県川口工業高校。

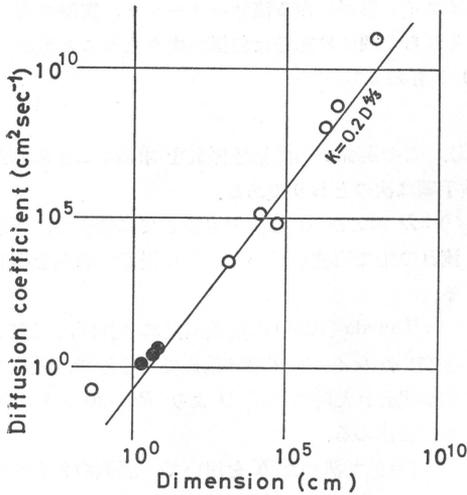
*** Chyoji Magono, 北海道大学。

—1980年10月9日受領—

—1980年11月15日受理—



第1図 実験装置. 右側箱型部分がドライアイス霧層発生箱.



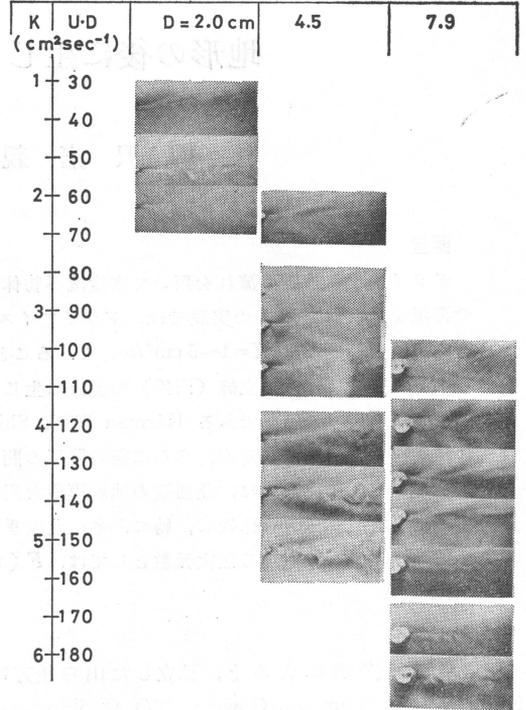
第3図 代表的長さ, 乱流拡散係数の関係. ○は Richardson, ●は当実験 (Richardson, 1926).

ここでは, 以上の装置の他に, Kármán 渦列を生じさせる障害物として直径 2.0, 4.5, 7.9 cm/sec の3種類の垂直円柱を使った. また霧層の流速を補うために, 変速モーターを使って 4.7 cm/sec~23.8 cm/sec 間の10段階の速度で, 円柱を流れの中で引っ張った.

なお霧の方を静止させて, 円柱を移動させる方法も考えられるが, 自然流の K を知りたかったため, 上記の方法をとった.

2.3. 実験結果

第2図に, 渦列のパターンと, $U \cdot D$ および K の関係を示した. K の値は, $Re=30$ とした時のものである.



第2図 円柱の後方流. D は円柱の直径, U は流速, K は $Re=30$ としたときの渦粘性係数.

この図から $U \cdot D$ の値は D により異なるが 30~150 から渦列のでき始めることがわかる. したがって,

$$K = \frac{U \cdot D}{Re} = \frac{U \cdot D}{30}$$

からわれわれの実験では $K=1 \sim 5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ であることがわかった.

第2図によると K の値は, 円柱の直径によって変化するように見える. 因みに各直径ごとに K の値を求め Richardson (1926) の乱流拡散係数のグラフに記入してみると第3図●印のように, 彼の与えた $K=0.2D^{4/3}$ の回帰直線にのることがわかる.

なお実験と天然の雲の現象の相似として, Kármán 渦列の生じたことが, 1つの有力な手懸りと思われた.

3. 孤峰(孤島)後方の不安定気流パターン模型実験

3.1. 実験手順

孤峰の模型実験としてドライアイス霧層の中に円錐形の障害物を置いて, 後方の気流パターンを観察した. 手順は次のとおりである.

第1表 使用した円錐の寸法

直径 (cm)	高さ (cm)						
	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	
1	—	—	—	—	—	—	—
3	—	0.8	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0
5	—	0.8	—	1.5	2.0	3.0	4.0
10	—	—	—	—	2.0	3.0	4.0

name	pattern	symbol	remarks
Kármán vortex		●	
Ship wave		○	
Band cloud I		▲	unstable
Band cloud II		△	stable
Band & Ship I		■	unstable
Band & Ship II		□	stable
Kármán&Ship		◐	intermediate stage of Ship and Kármán
Ship&Kármán		◑	intermediate stage of Ship and Kármán



(a)



(b)



(c)

第4図 実験に現われた代表的パターン。
(a) Ship wave (b) Kármán 渦列
(c) Band cloud

(イ)：実験平面のアルミ板の温度を変えて種々の安定度の霧層の流れを作り，その中に円錐物体を置いて，ドライアイス霧層の流れのパターンを撮影する。

(ロ)：(イ)と同時に，熱電対を使い，下面温度と約10mm上層の温度を測定し，安定度を求める。

さらに，霧の速度は，適当な擾乱をトレーサーとして測定する。

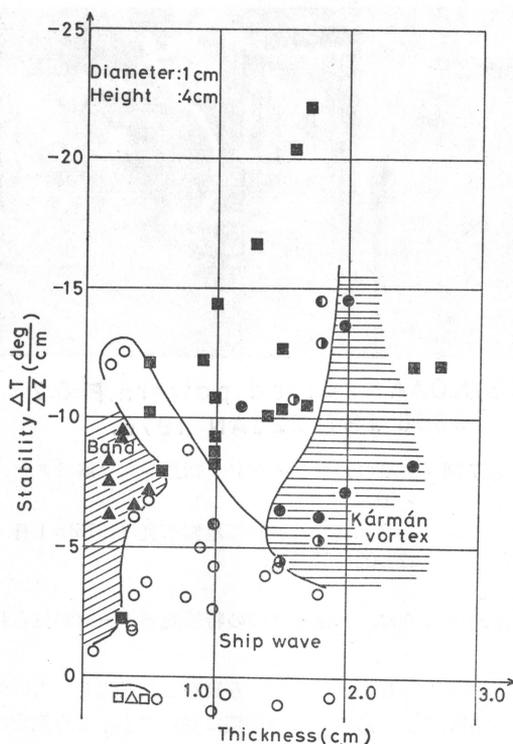
3.2. 実験装置

2.2節で述べた実験装置に，障害物として第1表に示す円錐を使用した。

またアルミ板の下を湯槽とし，温度を変えられるようにした。実験では，アルミ板の温度は7.5°C, 10°C,

1981年1月

第5図 パターンの模式図と記号

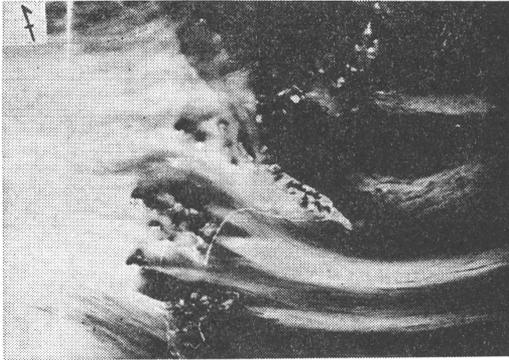
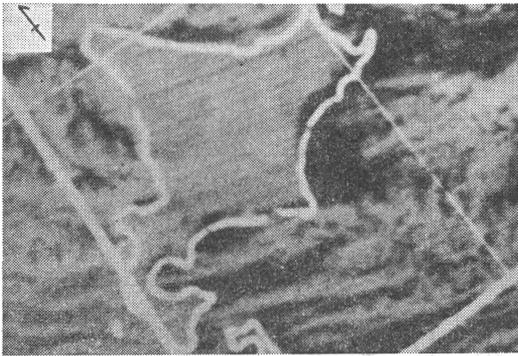


第6図 ドライアイス霧層の厚さと，安定度による流れパターンの変化。記号は第4図による。

15°C, 25°C, 30°C, 40°C, 45°C, 50°Cの8種類とし，この温度に応じてアルミ板上を流れるドライアイス霧層は，安定(〜8°C)，中立(8°C〜16°C)，および不安定(17°C〜)に分けられた。室温は概ね25°Cであり，()内がアルミ板の温度である。

3.3. 実験結果

円錐障害物後方に生ずるパターンには，下の第4図に

(a) NW fog layer stream. $F^2=0.5$ (b) NOAA 5 Cloud pattern. $F^2=0.2$
0858 JST 22 JAN 1976.

第7図 実験の霧層パターンと衛星写真の雲パターン①

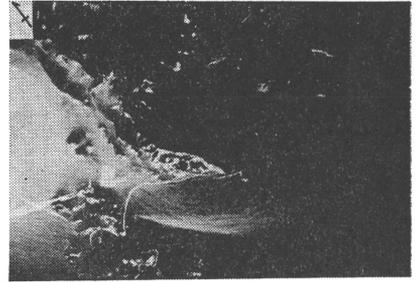
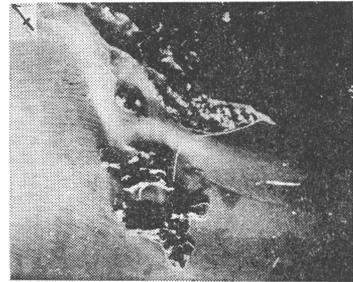
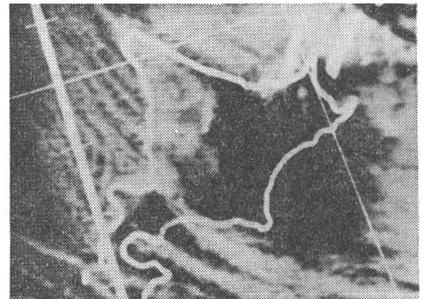
(a) 実験 (b) 衛星雲写真 (1976年1月22日08時58分)

例示するように、およそ3つの特徴的パターンが見られた。

もう少し分類を細かくして写真から模式化して書いたものが第5図である。この分類に従って上下2点測定により決められた安定度 ($\Delta T/\Delta Z$) と密度流の厚さによる実験条件と、これからできた流れのパターンの関係を第6図に例示する。

図に従えば、Band cloud (▲印) は霧層 (密度流) の浅い時に、Kármán 渦列 (●印) は深い時に発生し、また Ship wave (○印) はその中間で層が比較的安定な時、Band と Ship の混合は不安定度が大きい時に発生することがわかる。

実際には20種類の円錐に対して、同様の20枚の図ができ上がった。これら20枚の図の一般的性質は次のとおり

(a) NW fog layer stream. $F^2=1.5$ (b) Same as (a). $F^2=0.7$ (c) NOAA 5 Cloud pattern. $F^2=1.0$
0913JST 1 DEC 1975.

第8図 実験の霧層パターンと衛星写真の雲パターン②

(a) 実験 (b) 実験 (c) 衛星雲写真 (1975年12月1日09時13分)

である。

①実験上の制限として、ドライアイス霧の層の厚さが厚い時は、速さが大きいということがある。層厚、速度のどちらがパターンに多く影響を与えるかを調べるために、高さの違う円錐の結果を表わす第6図に当たるものを重ね合わせて検討した。その結果、Kármán 渦列には速度が、Ship wave には速度と厚さの両方が重要であることがわかった。

②Ship wave は流れが安定な時は、実験の範囲におい

て、ほとんど例外なく出現する。ただし、円錐の高さがドライアイス霧層の厚さより低い時ほど、形は明瞭になった。

③Band cloud は、流れが不安定なときに出現する度合が多く、安定な時に生ずるものと比べて対流性があり、Band の高さが高い。

④Kármán 渦列は流れの速度が大きい時にできるが、円錐の直径が小さい時ほど、その形が明瞭である。直径が大きい時は障害物後方が乱流状態になり、速度が小さくなるにつれて Band cloud に移行する。

4. 霧層実験の実際の地形への応用

気象衛星の雲写真を見ると、冬期日本付近には、地形効果を著しく受けたと思われる特徴的な雲パターンが現われる。これは日本海を渡って不安定化した気塊が、日本の地形効果を受けたもので、不安定状態における気流の挙動として興味深い。そこでドライアイス霧層を北海道の地形模型上に流してみた。海に該当する部分は、アルミ板を暖めて不安定とした。

4.1. 実験装置

北海道の地形模型を粘土で作り、水平縮尺を100万分の1、垂直縮尺を10万分の1とした。すなわち水平縮尺は、冬期日本海上に現われる筋状雲の間隔が30kmぐらゐであり(岡林, 1972)、また実験では霧層の雲列の幅が3cmぐらゐになることが判っているの、水平縮尺を決めた。また垂直縮尺が誇張されているのは、天然の筋状雲の間隔と雲頂までの高さの比が10:1であるのに対して、実験では2:1になることから、高さ方向に、少なくとも5倍の誇張が必要と思われたからである。

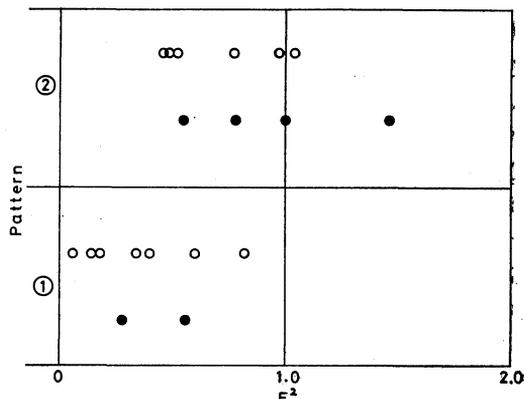
この模型を実験平面であるアルミ板の上に置き、ドライアイス霧層(密度流)を流すとともに、霧の流速、温度の上下2点測定を行なった。

4.2. 実験結果

実験の結果、2つの特徴的な霧層の流れパターンが現われた。これを第7, 8図に示す。

まず第7図に見られるように、日高山脈後方の沖合など、山脈後方の沖合に、明確な幅広いBand cloudができるものと、もう一つ第8図のように石狩平野を抜ける雲が沖合にまで達するものである。これをパターン①、パターン②と呼び、パターンとフルード数 F の関係を実際(白丸)と実験(黒丸)で比較してみたところ第9図のようになった。

ただしフルード数 F は、



第9図 雲パターンとフルード数の関係。
○：衛星雲写真 ●：実験

$$F = \frac{U}{(g^*H)^{1/2}}$$

で定義する。ただし、

$$g^* = \frac{g(\rho' - \rho)}{\rho} \quad (\text{実験})$$

$$g^* = \frac{g(\theta' - \theta)}{\theta'} \quad (\text{実際の大气})$$

ここで、 U は一般流速、 g は重力加速度である。また実験での密度流をドライアイス霧層と空気の2層流と考え、 ρ' は上層の空気、 ρ は下層のドライアイス霧層の密度である。また実際の大气では、札幌の高層データを用い、 θ' は雲頂の、 θ は地上の温位である。

第9図のようにパターン①は実験・実際の大气とも F^2 の小さな値の方に、またパターン②は F^2 が①より大きな値の方に分類された。

以上の結果は、高さ方向に10倍の縮尺率の誇張をした模型実験で得られたものであるが、高さ方向に5倍だけ誇張した模型についても実験したところ、 F^2 の値が第9図の右側に少しずれることがわかった。

しかし、いずれの模型の場合にも、パターンは明確に2つに分かれ、天然の雲パターンである衛星写真においても、 F^2 値において実験と同様の傾向を示すことがわかった。

衛星雲写真から得られたパターンとフルード数との関係で、フルード数のばらつきが問題となるが、これは大気中の風向が一樣でないことなど諸要素の組み合わせであるためと考えられる。したがって、フルード数以外の無次元数でも、実験との相似を考える必要があると思われた。

5. まとめ

ドライアイス霧層の流れの特性（流れの可視化，上層の空気と2層流を作る）を使って，種々の実験を試みたが，その結果，ドライアイス霧層の流れが，実際に起こっている天然の雲現象（衛星写真で見られる中規模現象の雲）を，よく再現していることがわかった．特に，地形効果を受けた雲パターンとして，孤島や孤立峰後方に生ずる Kármán 渦列，Ship wave，Band cloud には，一連の関係があり，それらは2層流体下層の層厚，速度ならびに安定度をパラメータとして関連づけられた．さらに，もう少し大きな現象に関しては，フルード数が，雲パターンの決定を大きく支配していることがわかった．なお今後の問題として，これらの2層流体の理論化，定量化が残された．

謝辞

この実験は「自然災害科学特別研究」の一環として行なわれたものである．実験を援助された北大地球物理学気象学講座の諸兄に，感謝の意を捧げます．

文 献

- Gjevik, B. and T. Marthinsen, 1978: Three Dimensional Lee-wave pattern, *Quart. J. R.Met. Soc.*, 104, 947-957.
- Homann, F., 1936: Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens.
- Magono, C., 1971: On the Localization Phenomena of Snowfall, *J. Met. Soc. Japan*, 49, 824-835.
- 岡林俊雄, 1972: 気象研究ノート, 113, 気象衛星特集号II, 第II部.
- Richardson, L. F., 1926: Atmospheric Diffusion Shown on a Distance-Neighbour Graph, *Pro. Roy. Soc., London*, A105, 709-737.
- Taneda, S., 1956: Experimental Investigation of the Wakes Behind Cylinders and Plates at low Reynolds Numbers, *J. Phys. Soc. Japan*, 11, 302-307.
- Thomson, R.E. and J.F.R. Gower, 1977: Vortex Streets in the Wake of the Aleutian Islands, *Mon. Wea. Rev.*, 105, 873-884.
- 山崎武, 1968: 列状雲のモデル実験, その(3), 1968年秋季大会講演予稿集, 131.

気象学会および関連学会行事予定

行 事 名	開 催 年 月 日	主 催 団 体 等	場 所
気候変動研究計画に関するシンポジウム	昭和56年2月9日		日本学術会議大会議室
月例会「レーダ気象」	昭和56年3月5日	日本気象学会	気象庁
月例会「長期予報・大気大循環」	昭和56年3月11日	日本気象学会	気象庁
日本気象学会昭和56年春季大会	昭和56年5月27日～29日	日本気象学会	日本教育会館
第18回理工学における同位元素研究発表会	昭和56年6月29日～7月1日		国立教育会館
IAMAP Third Scientific Assembly	1981年8月17日～28日		西独ハンブルグ市
グローバル水収支の変動に関するシンポジウム	1981年8月9日～15日		英国オックスフォード