

山の風下側に発生する雲パターンの空間的分類

The classification of the cloud pattern leeward of the mountain

北海道大学大学院工学院環境フィールド工学専攻修士課程 1 年 ○学生員 北野慈和 (Yoshikazu Kitano)
北海道大学大学院工学研究院 正会員 山田朋人 (Tomohito Yamada)

1. はじめに

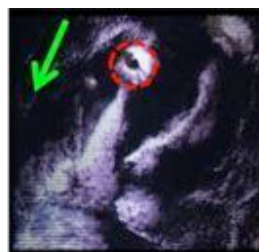
本研究は山の風下側に発生する雲のパターン进行分类することを目的としている。地形が大気場に与える影響を詳細に理解することで、未だに不明な点が多い下層雲の物理的な解釈に貢献し、気象予測の精度を向上させられると考えられる。本研究は、まず第2章で、地形に起因する雲のパターンを紹介し、第3章で大気場を想定した線形解析手法を紹介する。第4章ではその手法で得られた結果について考察する。

2. 山の風下側に発生する雲のパターン

本研究は、人工衛星で撮影した可視画像によって確認できる、山の風下に発生する雲のパターンが非常に多様である事への興味から始まった。図-1は、アメリカ地質調査所 (USGS) が提供する人工衛星LandSatの可視画像¹⁾によって撮られた、地形の影響により発現した雲の一例を示している。本研究では、上記可視画像の1984年から2011年までを対象とし、364事例を収集した。これらの事例は、大気下層に与える山の影響のみを抽出するために、周囲には地形ない、大西洋、太平洋、インド洋上の島々48地点を観察した。以下に本研究で対象とした雲の形状进行分类した結果を述べる。多数観測された事例毎に分け、110事例あった「すじ状の雲を形成するパターン」进行分类1、119事例あった「山岳波」进行分类2、25事例あった「航跡波の発散型波頭に類似した雲形を示すパターン」进行分类3としている。その他の事例に関しては、分類1~3に当てはまらない物を分類4とし、分類1~3が複合して観察される物を分類5としている。以下に詳しく述べる。

第1の分類として考えられるのは、図-1(a)に示すような風下側にすじ状の雲を形成するパターンである。すじ状の雲は、一本の直線状の雲を形成するものや、カルマン渦列の様に交互に渦を形成するものなど、そのバリエーションは実に多様である。この形状は、カルマン渦列の形成過程と類似する点も多いが、木村(1990)によると渦列が風上から順に発生するのではなく同時に発生する事例があるなど、一概にカルマン渦列と同様の現象と断言はできない²⁾。また、直線状のすじ雲を形成するものは既存研究における指摘が少なく、低レイノルズ数における円柱流れとして扱って良いものかは疑問が残る。また、本論文による観察結果から、直線状の雲が低緯度地域に観察される事例が多いことがわかったが、このことも興味深い点である。

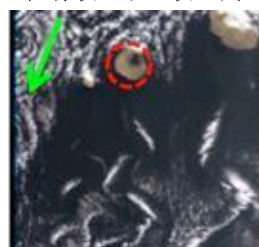
第2の分類として考えられるのは、山岳波によって生じる波状の雲である。山岳波は大気の鉛直安定度が小さ



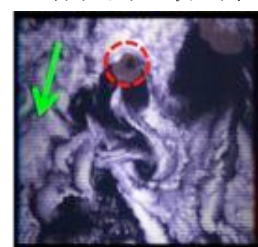
直線状のすじ状の雲



蛇行するすじ状の雲

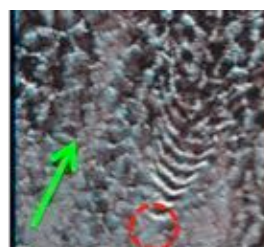


左右交互に発生する
すじ状の雲

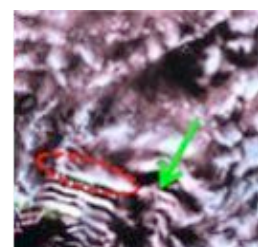


カルマン渦のような
交互に渦を形成する
すじ状の雲

(a)分類1 風下にすじ状の雲を形成する

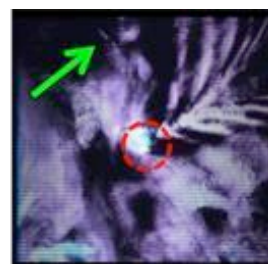


直交型波頭をもつ
山岳波



山が風向に直交する方向に長い場合の山岳波

(b)分類2 山岳波



発散型波頭に形状が
類似している波状の雲

(c)分類3

航跡波の発散型波頭に形状が類似した波状の雲
図-1-1 山の風下に発生する雲の形状分類
(赤い丸は山の位置、矢印は風向を示す。)

く、風速が速いような場合に、山を乗り越えるように大気が動くことにより生じる内部重力波である。船等が水面を移動することによって生じる航跡波の直交型波頭に形状が類似しているのが特徴である。

第3の分類は、航跡波の発散型波頭に形状が類似している図-1(c)の様な波状の雲である。これは浅井(1996)によると、第2の分類とは成因が異なり、大気の安定度が大きく、山を乗り越えられず側面を通過するような場合に形成されると述べられている³⁾。従って、発生条件は第1の分類に類似しているが、なぜ発散型波頭ができる場合と筋状の雲ができる場合があるかは、明確に指摘されていない。

また、図-1(d)のように、そのどれにも類しないものや、図-1(e)のように、3つの分類のいずれかが同時に発生しているものなど、分類の枠を超えた事象も多数観測されている。これらには研究の余地が十分にあり、特に図-1(e)に示される複合的な事象は、別々の事象として研究されてきた3つの分類についての関係性を示す重要な資料と考えられる。

以上のように、山の風下側に形成される雲のパターンは実に多様である。本研究はこれらを複合的に考え、関係性を示すことを目的とする。

3. 線形解析手法

前章で紹介した事例は、主に、大気場の鉛直方向の安定度、流速分布、山の形状の3点で説明されるものと考えられる。このうち、山の形状については忠実に表現すると複雑であるため、本論文では扱わない。山の形状について考えるならば数値計算を行う方が適しており、別手法の研究を行う必要がある。ここでは、大気場の鉛直方向の安定度、流速分布にのみ着目してそれらの影響について議論を進める。

本論文では、大気境界層を線形に近似した流速、簡略化した二層の密度場を有する図-2のような大気場について議論する。二層の密度場の境界面を以後密度界面と呼ぶことにする。この密度界面に山に見立てた鉛直方向の擾乱を一点だけに与え、それがどのように発達するかを調べる。

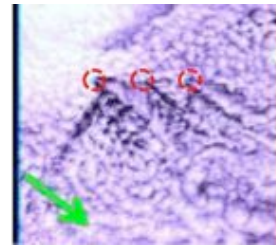
以下に、その解析手法を簡潔に述べる。基本的には著者等の論文⁴⁾及びSchmid and Henningson(2000)⁵⁾の方法に準拠しているため、参考にされたい。

(1) 流速、圧力、密度の定義

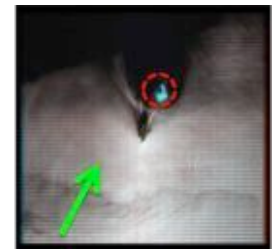
流速3成分、圧力、密度をそれぞれ以下のように表現する。

$$\begin{array}{lll} \text{流下}(x)\text{方向の流速} & U(z) & + \quad u \\ \text{横断}(y)\text{方向の流速} & & v \\ \text{鉛直}(z)\text{方向の流速} & & w \\ \text{圧力} & P(z) & + \quad p \\ \text{密度} & \bar{\rho}(z) & + \quad \rho \end{array} \quad (1)$$

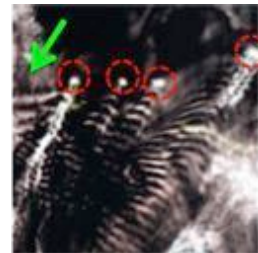
本研究では、基本場として、流れ(x)方向のみに流速があり、鉛直(z)方向に流速、圧力、密度が変化する場を考えている(図-2 参照)。これら基本場の変数を $U(z)$ 、



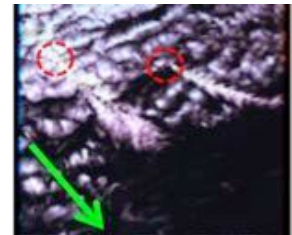
V字状の、雲がない領域が形成されるパターン



島により雲が風下の左右に分かれ後流に乱れがないパターン

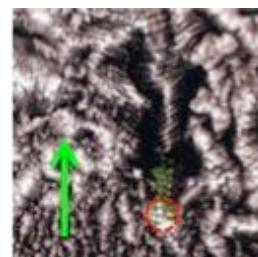


風下中心部に雲が全く形成されないパターン

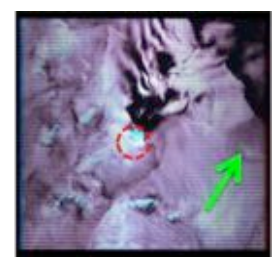


筋状の雲の縁が波形を持つパターン

(d)分類 1~3 ののどれにも類さない事例



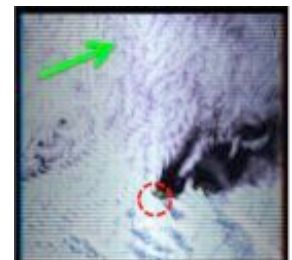
直交型波頭状の雲の両側に渦が形成されるパターン



直交型波頭状の雲の真ん中に重なるように渦が形成されるパターン



直交型波頭状の雲に重なるように直線上のすじ雲が形成されるパターン



発散型波頭に類似した雲と交互に発生するすじ雲が重なっている事例

(e)分類 1~3 の複合したパターン

図-1-2 山の風下に発生する雲の形状分類
(赤い丸は山の位置、矢印は風向を示す。)

$P(z)$ 、 $\bar{\rho}(z)$ で表現する。これに対し、密度界面に与えられる擾乱によって生じる変数をそれぞれ u 、 v 、 w 、 p 、 ρ とおき擾乱項と呼ぶ。擾乱項は x 、 y 、 z 、 t の関数である。Schmid & Henningson(2000)⁵⁾の方法に準拠し、

以下の式系で表現する。

$$\begin{aligned} u &= \tilde{u}(z)e^{i(\alpha x + \beta y - \alpha c t)}, & v &= \tilde{v}(z)e^{i(\alpha x + \beta y - \alpha c t)}, \\ w &= \tilde{w}(z)e^{i(\alpha x + \beta y - \alpha c t)}, & p &= \tilde{p}(z)e^{i(\alpha x + \beta y - \alpha c t)}, \\ \rho &= \tilde{\rho}(z)e^{i(\alpha x + \beta y - \alpha c t)} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 t は時間を示す。 c は x 方向の波速であり、 α 、 β は波数の x 成分、 y 成分である。

以上が全ての変数である。基本場の項は全て図-2 で与えられている。従って、擾乱項の $\tilde{u}(z)$ 、 $\tilde{v}(z)$ 、 $\tilde{w}(z)$ 、 $\tilde{p}(z)$ 、 $\tilde{\rho}(z)$ が未知変数となる。

また、擾乱項は基本場項よりも非常に小さいことを仮定している。この仮定により、擾乱項の2乗以上の項は全て無視できることに留意されたい。

(2) 基礎方程式

(1)で定義した変数を、非粘性の Navier-Stokes 式に代入すると、

$$\begin{aligned} \bar{\rho} \left(\frac{\partial u}{\partial t} + U \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial U}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x}, & \bar{\rho} \left(\frac{\partial v}{\partial t} + U \frac{\partial v}{\partial x} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} \\ \bar{\rho} \left(\frac{\partial w}{\partial t} + U \frac{\partial w}{\partial x} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} - g\rho \end{aligned} \quad (3)$$

が得られる。また、連続式は

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

となる。最後に流体塊は移動に伴い密度が不変であるという条件式を、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + U \frac{\partial \rho}{\partial x} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

で与える。以上5式が基礎方程式である。

(3) 分散関係式

以上の基礎方程式に、図-2 の基本場を与えると、分散関係式が得られる。詳しい式の導出は、著者等の参考文献⁴⁾に記述されている。

$$\begin{aligned} c^* &= 1 - \frac{1}{2k^* (\rho_{rate} + \coth(k^*))} \\ &\pm \sqrt{\frac{1}{4k^{*2} (\rho_{rate} + \coth(k^*))^2} - \frac{\rho_{rate} - 1}{Fr^2 k^* \cos^2(\theta) (\rho_{rate} + \coth(k^*))}} \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 $*$ は代表長さを h 、代表流速を U_{II} として無次元化したことを示している。 k 及び θ は波数及び波数の向きであり、 (α, β) の組で定義されていた波数は (k, θ) の組

で定義することになる。また、フルード数及び密度に関する無次元パラメータをそれぞれ

$$Fr = \frac{U_{II}}{\sqrt{gh}}, \quad \rho_{rate} = \frac{\rho_{II}}{\rho_I} \quad (7)$$

で定義している。

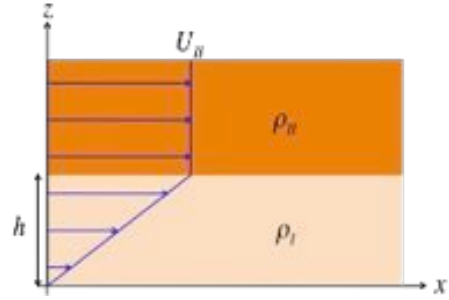


図-2 線形解析で用いる基本場の模式図

(4) 停留位相法と波形

分散関係式(6)より、本理論で扱う波は分散性を有し波数に対して異なる波速を有することが確認できる。自然界に存在する様々な波数を含んだ擾乱の挙動を知るためには、全ての波数の擾乱を重ね合わせなければならない。密度界面の鉛直方向の乱れ ξ を以下のように定義する。

$$\xi^* = \tilde{\xi}^* e^{i(\alpha^* x^* + \beta^* y^* - \alpha^* c^* t^*)} \quad (8)$$

ただし、適合条件及び基礎方程式の解より、

$$\tilde{\xi}^* = D(e^{-k^*} - e^{k^*}) / (\omega^* - \alpha^*) i \quad (9)$$

が得られる。ここで、 D は任意の定数である。この ξ^* を全ての波数について重ね合わせると

$$\xi^* = \frac{1}{4\pi^2} \iint \tilde{\xi}^* e^{i(\alpha^* \frac{x^*}{l^*} + \beta^* \frac{y^*}{l^*} - \omega^* t^*)} d\alpha^* d\beta^* \quad (10)$$

となる。

ここで、 ω^* は周波数であり、 $\omega^* = c\alpha$ で定義される。この積分式(10)を評価するために停留位相法を用いる。式(10)の被積分関数は振動関数であり、わずかな α 及び β の変化によって激しく振動する。この振動より積分は打ち消しあうが、以下の条件を満たす場合のみ積分は値を有すると考えられる。

$$\frac{\partial \omega^*}{\partial \alpha^*} = c_{gx}^* = \frac{x^*}{t^*}, \quad \frac{\partial \omega^*}{\partial \beta^*} = c_{gy}^* = \frac{y^*}{t^*} \quad (11)$$

ここで、式(11)の2式の左辺はそれぞれ x 方向、 y 方向の群速度 c_{gx}^* 、 c_{gy}^* を示している。この条件式は変形すると以下ようになり、ある時間 t^* での密度界面上の擾乱の存在範囲を示す。

$$x^* = \frac{\partial \alpha^* c^*}{\partial \alpha} t^*, \quad y^* = \frac{\partial \alpha^* c^*}{\partial \beta} t^* \quad (12)$$

c は波数の関数である。従って、波数 (α^*, β^*) もしくは

波数 (k^*, θ) を式(12)に代入することによって、その波数

に対応する擾乱の水平分布 (x^*, y^*) が得られることになる。

さらに、(10)の被積分関数の指数部を2次の項までテイラー展開し、ガウス積分を用いて解くと、

$$\xi^* = \frac{\tilde{\xi}^* e^{i(\alpha^* x^* + \beta^* y^* - \omega^*)t^*}}{2\pi i t^* \sqrt{\left| \frac{\partial^2 \omega}{\partial \alpha^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \beta^2} - \frac{\partial^2 \omega}{\partial \alpha \partial \beta} \right|}} \quad (13)$$

が得られる。これにより、密度界面に生じる波形を表現できた。

4. 解析結果の一例

上記に示した、線形解析手法の結果の一例を紹介する。図-3に示す。これは、前述の通り、図-2に示した基本場における $z = h(z^* = 1)$ の密度界面に発生した波形を表現している。ここで注意されたいことは、擾乱を一度限り与えた場合の波形を図-3は表している点である。通常、山の風下に形成される擾乱は山により連続的に大気場が乱される結果生じる。従って、図-3は山の風下に発生する擾乱の一部のみを表していることになる。ある周期で擾乱を与え続け、波形を重ね合わせることによって実際の波形自身を表現できるが、ここでは山により乱された一つの空気塊の動きを見たいために単一の擾乱のみを考える。

図-3には Fr と ρ_{rate} とを変化させた4つの事例を掲載している。これらの Fr と ρ_{rate} の値は実際の大気場に発生しうる値に忠実に従っているわけではない。本論文の手法の特性を吟味するために Fr 及び ρ_{rate} を大きく変化させている。

まずは、 Fr の影響について考える。式(7)より、 Fr の増大は密度界面下部の風速の勾配が急になることを示している。図-3より、 Fr の増大は波の振幅を大きくし、かつ $y^* = 0$ 付近に z^* 方向に突出して伸びる波が形成される事が分かる。これは重力項よりも慣性項が強くなった結果初めに与えた擾乱が分散せずに残ったためと考えられる。この $y^* = 0$ 付近の振幅が大きい点は、図-1(a)で示したような直線状のすじ雲に関係すると考えられる。

また、 ρ_{rate} の減少は大気安定度の増大を意味するが、大気が安定しているほど、発散型波頭のような波形よりも直交型波頭のような波形が卓越する傾向にある。これは、2章で説明した傾向と正反対の結果である。これは、本研究の手法では山を下層の大気が乗り越えられるか否かを考慮していない点によるものである。しかし、本研究の結果から、一度鉛直方向の擾乱が生まれさえすれば、大気の安定性は直交型波頭を生みやすいことが分かる。従って、現実の大気場に発生する分類2及び分類3の波形は、一概に空気塊が山を乗り越えた場合が分類2に属し、山の両側面を通過した物が分類3になるといえないと推察される。

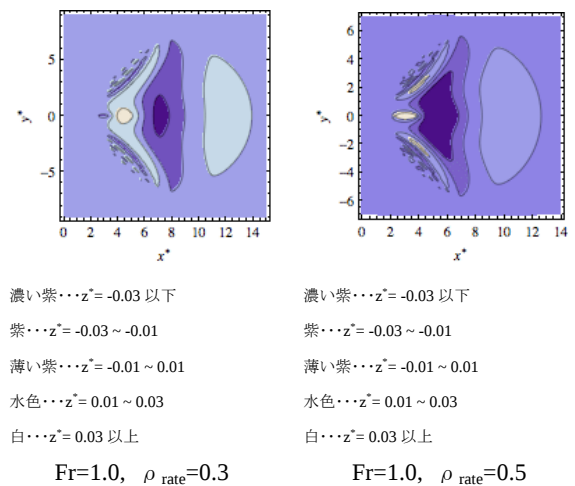
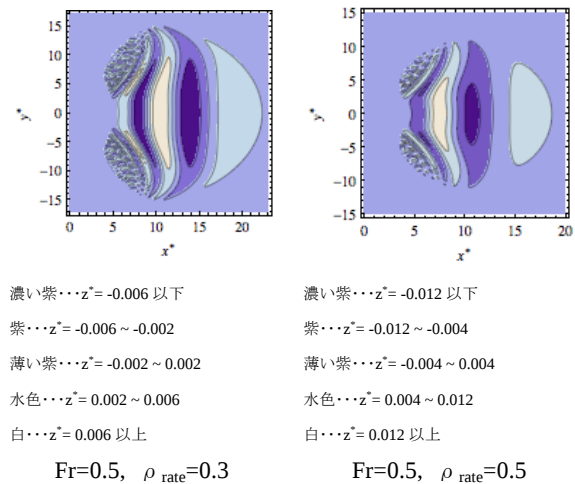


図-3 密度界面に発生する波形の等高線図
(x^*, y^*)=(0,0)の点に山があると考えられる事ができる。

5. おわりに

本論文では、山により乱された大気の波動について線形解析を用いて考察した。線形解析による限界はあるものの、第2章で分類した波形の特性について、大気の安定性および流速分布を用いて考察した。今後は山の形状も加味した研究を行っていき、今回の結果と比較・検討したい。

6. 参考文献・参考資料

- 1) HSGS science for a changing world Earth Resources Observation and Science Center (EROS)
<http://glovis.usgs.gov/>
- 2) 木村竜治, 1990: (下記参考文献(3)に記載)
- 3) 浅井富雄, 1996: 気象の教室2 ローカル気象学 Local Meteorology 東京大学出版会
- 4) 北野, 山田, 泉, 2012: 大機密度成層における擾乱の発達過程 土木学会論文集G (環境), vol.68, No.5, I_205-I_210, 2012
- 5) Peter J. Schmid and Dan S. Henningson, 2000: Stability and Transition in Shear Flows, Applied Mathematical Sciences 142