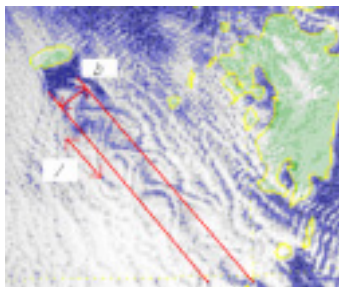

山の風下に見られる カルマン渦の研究

～ 成層および三次元効果の影響 ～

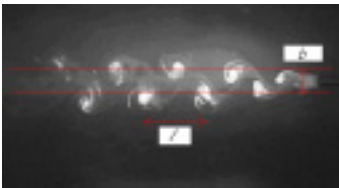
京都大学総合人間学部自然環境学科
生物・地球圏環境論講座地球科学分野
樋口阿里沙

はじめに



冬に衛星雲画像を見ていると、季節風が吹く時に、濟州島の風下に左上図のような二列のカルマン渦列がしばしば見られる。この渦列は、一見、実験室の中でできるカルマン渦列にそっくりであるが、よく見ると並んだ渦列の幅と、渦の間隔の比（図中の b/l ）が大きく異なる。

カルマン渦そのものに関しては、これまでに理論でも室内実験でもよく研究されており、この渦間隔比（ b/l ）も、理論的におよそ0.28がもっとも安定であることがわかっている。この値は室内実験でも確かめられている。



これに対して、濟州島の風下にできるカルマン渦の間隔比を衛星画像から求めてみると、0.4から0.6となり、理論や室内実験の結果より明らかに大きい。

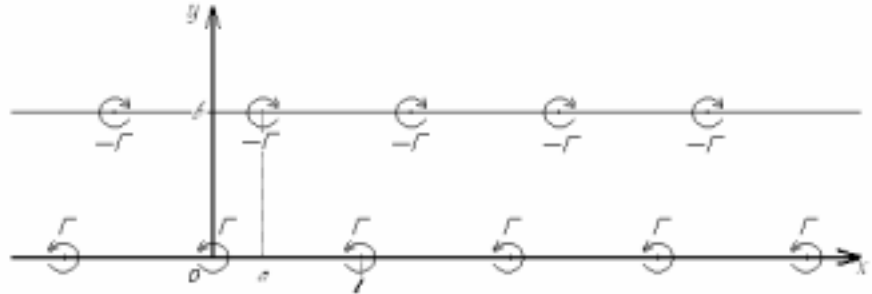
この渦間隔比が大きくなるメカニズムを解明するため以下の研究を行った。

1.0 理論から導かれるカルマン渦

1.1 カルマン渦とは

円柱のような柱状の物体を一様な流れの中に流れに垂直に置くと、レイノルズ数が 10^2 から 10^3 までの範囲では、物体の背後にできた渦が交互にはがれて、下流に規則正しい二列の渦列が見られる。理論計算では、このような渦列の理想化として、完全流体の渦列を考えている。

ここで、一直線上に一定の間隔 l をおいて並んでいる循環 Γ の渦糸からなる渦列に対して、これと平行に循環 $-\Gamma$ の渦糸からなるもう一つの渦列を置いたと考える。



二つの渦列の間隔を b 、第二の渦列の、第一の渦列に対する相対的なずれを a とすれば、渦糸の位置は一般的に、 $z = nl, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ (第一列)、 $z = h + nl, h = a + ib$ (第二列) のように表される。このとき、二つの渦列の作る流れは、

$$W = \frac{\Gamma}{2\pi i} \log \sin\left(\frac{\pi z}{l}\right) - \frac{\Gamma}{2\pi i} \log \sin\left(\frac{\pi(z-h)}{l}\right) \quad (1.1)$$

で与えられる。

第一の渦列の中の任意の渦糸の受ける誘導速度は、第一の渦列からの寄与は 0 であるので、第二の渦列からの寄与だけであり、

$$w_1 = \left[\frac{d}{dz} \left\{ -\frac{\Gamma}{2\pi i} \log \sin\left(\frac{\pi(z-h)}{l}\right) \right\} \right]_{z=0} = \frac{\Gamma}{2li} \cot\left(\frac{\pi h}{l}\right) \quad (1.2)$$

となる。これは、第一の渦列全体の移動速度を与える。同様に、第二の渦列の移動速度は、

$$w_2 = \left[\frac{d}{dz} \left\{ \frac{\Gamma}{2\pi i} \log \sin\left(\frac{\pi z}{l}\right) \right\} \right]_{z=h} = \frac{\Gamma}{2li} \cot\left(\frac{\pi h}{l}\right) = w_1 \quad (1.3)$$

で与えられる。したがって、二つの渦列はその形を保ったまま、速度

$$w_1 = w_2 = \frac{\Gamma}{2li} \cot\left(\frac{\pi h}{l}\right) = \frac{\Gamma \sinh(2\pi b/l) + i \sin(2\pi a/l)}{2l \cosh(2\pi b/l) - \cos(2\pi a/l)} \quad (1.4)$$

で移動する。

$w_1 (= w_2)$ は一般に複素数であるから、平行渦列は一般に斜め方向に移動する。しかし、 $\sin(2\pi a/l) = 0$ 、すなわち $a = 0, 1/2$ の場合には w_1 は実数となり、自分自身に平行に運動する。 $a = 0$ の場合には上下の渦列は対称であり、 $a = 1/2$ の場合には渦列は互い違いに並ぶ。

いずれの場合にも、渦列は全体として自分自身に平行に、速度

$$V = -w_1 = \frac{\Gamma}{2l} \coth\left(\frac{\pi b}{l}\right) \quad \text{対称な渦列} (a = 0) \quad (1.5)$$

$$V = -w_1 = \frac{\Gamma}{2l} \tanh\left(\frac{\pi b}{l}\right) \quad \text{互い違いの渦列} (a = l/2) \quad (1.6)$$

で負 x 方向 ($\Gamma > 0$ として) に向かって動く。

平行渦列の外側の流れは、(1.1) の $y \rightarrow \pm\infty$ での振舞いを見れば明らかのように、上下とも速度 0 の静止状態である。したがって、二列の渦列は静止流体の中を速度 V で移動する。

平行渦列は外部攪乱に対して一般に安定ではない。ただ例外的に、互い違いの平行渦列で、

$$\cosh\left(\frac{\pi b}{l}\right) = \sqrt{2} \quad \text{すなわち} \quad \frac{b}{l} = 0.2806 \quad (1.7)$$

の関係が成り立つ場合には、渦列は中立安定であることが Karman(1911) によって示された。

1.2 カルマン渦を取り巻く無次元数

1.2.1 レイノルズ数

レイノルズ数は流体に作用する慣性力と摩擦力の比で、無次元数である。たとえ、境界のスケールや無限遠での流速の大きさ、流体の粘性係数が異なっても、二つの流れのレイノルズ数が等しければ、流れの場は互いに相似になる。この値の大小だけが流れを支配する。ここで、速度 U の一様流を考え、流体の動粘性係数を ν とすると、 $Re = \frac{Ud}{\nu}$ で表される。

1.2.2 ストローハル数

ストローハル数は物体の形状によって決まる値で、無次元数である。単位時間に f 対の渦が発生するとすれば、物体が円柱 (直径 d) の場合、

$$St = \frac{fd}{U} \sim 0.2 \quad \text{となることが実験的に知られている。}$$

2.0 山の風下に見られるカルマン渦の特徴

2.1 濟州島において漢ラ山の風下にカルマン渦が見られる条件

濟州島は朝鮮半島の南、対馬列島の西に位置する小さな島である。島の中央には標高約 1950m の漢ラ山がそびえている。その漢ラ山に冬の季節風が吹き、日本海から東シナ海にかけて筋上の雲がみられるとき、よくカルマン渦が観察される。カルマン渦が観察される条件は、冬型の気圧配置が見られること、漢ラ山に風が同じ方向から半日以上吹くこと、そして、カルマン渦が雲によって可視化されることである。

2.2 理論から導かれるカルマン渦との原理のうえでの違い

理論では完全流体を考えているうえに、円柱の後流を考えている。円柱は垂直方向に関して変化がないので、二次元内での流体の挙動を考えていることになる。一方、実際の大気は安定度を考える必要があり、山の後流を考えている。すなわち、理論では、大気が単純に成層していたり、寒気により逆転層が生じていたりする状態を全く考慮していない。そのうえ、山は垂直方向に変化があるので、三次元効果も考慮に入れる必要がある。

大気もともと乱流である事によって、その乱流から規則正しい流れが見られるという渦粘性の効果については本研究では触れていない。

2.3 カルマン渦の形についてどう評価するか

2.3.1 室内実験でできた渦の評価手順

1. 物体の後流において、剥離した渦が見られたかどうかを調べた。ここでいう渦とは、渦度をもつものと定義した。剥離した渦が見られるものについてはストローハル数を調べた。

2. 渦が見られたものを対称の渦列と、互い違いの渦列（本研究では、この渦列をカルマン渦と呼ぶ）とに分類した。

3. 互い違いの渦列について、(1.7) で得た b/l で評価した。

2.3.2 衛星画像で見られる渦の評価手順

1. 濟州島の風下に見られるカルマン渦を調べた。渦が見られるかどうかで分類し、渦が見られたものについては b/l を調べた。

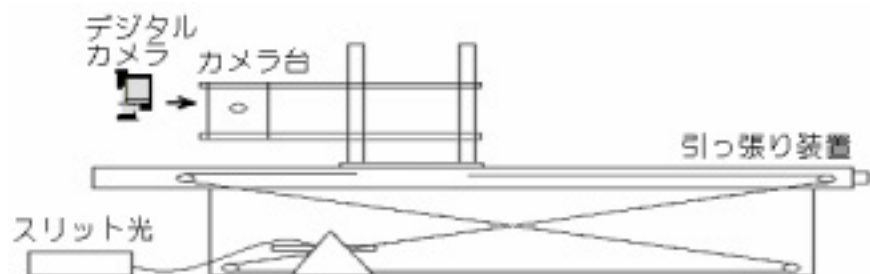
2. 各々のカルマン渦についての特徴を吟味した。

3.0 室内実験

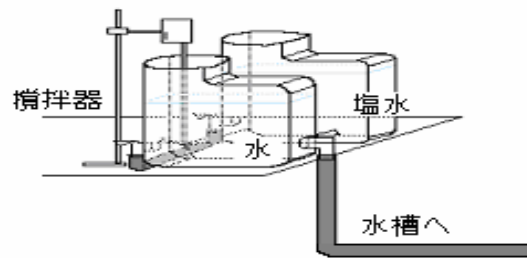
3.1 物体の後流にできる模様に関する実験

3.1.1 実験方法

実験は、水槽の中で円柱、円錐、円錐台を等速度で動かし、それらの後流にできた模様を上からデジタルビデオで撮影し、パソコン上で渦の位置を読み取り、渦の形を判断するという方法で行った。水槽は幅 30cm、長さ 100cm、円柱は直径 1.0cm、円錐は直径 5.0cm、高さ 6.0cm、円錐台は直径 3.0cm、6.0cm、高さ 3.0cm のものを用いた。可視化には、ペースト状のクリープを円柱、円錐に塗り、スリット光で照らした。



成層は下図のように食塩水と水を用いて作った。



実験 : 7.0cm まで水を入れ、頭を出した状態で円柱を動かした。

流れを観察した速度は、0.50cm/s、0.60cm/s、0.70cm/s、0.80cm/s、0.90cm/s、1.00cm/s、1.22cm/s、1.50cm/s、1.70cm/s、1.90cm/s、2.20cm/s、2.60cm/s、3.16cm/s、4.15cm/s、5.10cm/s、10.00cm/s。

実験 : 7.0cm まで成層させ、頭を出した状態で円柱を動かした。

密度成層の大きさを示す指標としてブラント = バイサラ振動数 N を用いた。空気塊が角振動数 N で振動するとすると以下の式で表される。

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz} - \frac{g^2}{c_s^2} \quad g; \text{重力加速度} \quad \rho; \text{密度} \quad c_s; \text{音速}$$

実験した密度成層のブラント = バイサラ振動数は、 $1.7s^{-1}$ 、 $2.4s^{-1}$ 、 $2.9s^{-1}$ 、 $3.3s^{-1}$ 、 $4.1s^{-1}$ 。

流れを観察した速度は、0.60cm/s、0.80cm/s、1.00cm/s、1.50cm/s、1.70cm/s、1.90cm/s、2.20cm/s、3.16cm/s、4.15cm/s、5.10cm/s、10.00cm/s。

実験 : 7.0cm まで水を入れ、水没した状態で円錐、円錐台を動かした。それぞれ底から 4.8cm (この高さにおける円錐の直径は 1.0cm)、2.0cm (この高さにおける円錐台の直径は 4.0cm) を可視化した。

流れを観察した速度は、円錐では 1.22cm/s、1.68cm/s、1.92cm/s、2.20cm/s、2.40cm/s、2.64cm/s、2.88cm/s、3.17cm/s、4.15cm/s、5.12cm/s。円錐台では 0.60cm/s、1.00cm/s、1.22cm/s、2.00cm/s、3.17cm/s。

実験 : 4.8cm まで水を入れ、頭を出した状態で円錐を動かした。底から 4.8cm (この高さにおける円錐の直径は 1.0cm) を可視化した。

流れを観察した速度は、0.50cm/s、0.60cm/s、0.70cm/s、0.80cm/s、0.90cm/s、1.00cm/s、1.22cm/s、1.50cm/s、1.70cm/s、1.90cm/s、2.20cm/s、2.60cm/s、3.16cm/s、4.15cm/s、5.10cm/s、10.00cm/s。

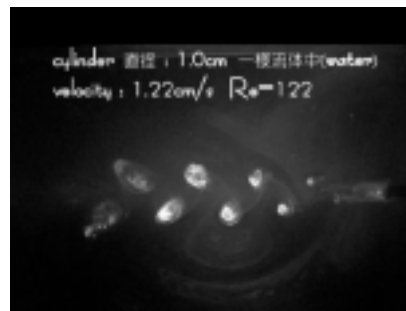
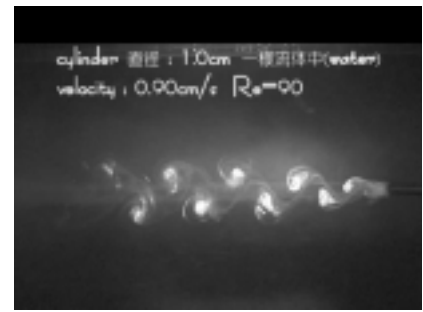
実験 : 7.0cm まで成層させ、水没した状態で円錐を動かした。底から 4.8cm (この高さにおける円錐の直径は 1.0cm) を可視化した。

実験した密度成層は $4.1s^{-1}$ 。

流れを観察した速度は、0.73cm/s、1.22cm/s、1.68cm/s、1.92cm/s、2.20cm/s、2.30cm/s、2.40cm/s、2.64cm/s、2.88cm/s、3.17cm/s。

3.1.2 実験結果（画像・動画については付属の CD-R に収録した）

実験：実験したレイノルズ数は 50 から 1000 までである。このあいだにおいて、互い違いの渦列（カルマン渦）が見られ、それらを以下のような 4 種類のグループに分ける事ができた。



まずは非常に安定したカルマン渦のうち、渦自体に注目し渦の中が白くないもの（レイノルズ数 50）。次に渦の中が白いものの、渦が綺麗な円となっているもの（レイノルズ数 60-100、170-190）。また、渦が伸びてきつつあることから、不安定化しつつあると判断したカルマン渦（レイノルズ数 122-150）。渦が乱れているカルマン渦（レイノルズ数 220-1000）。

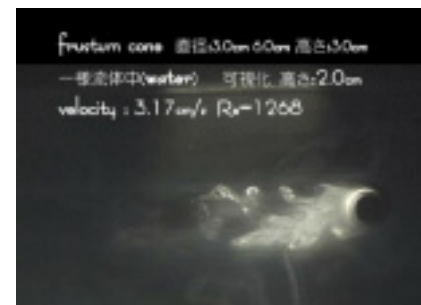
実験：実験したレイノルズ数は 24 から 1120 までである。レイノルズ数が 24 あたりのものは渦が剥離することはなかったが、その他のものは互い違いの渦（カルマン渦）が見られ、それらを 4 種類のグループに分ける事ができた。



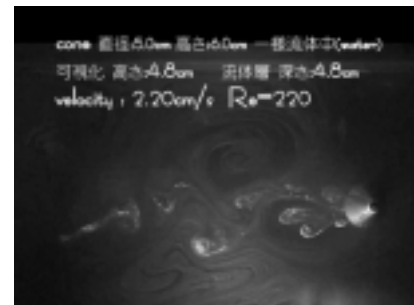
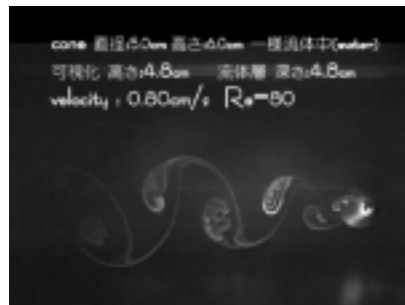


まずは非常に安定したカルマン渦のうち、円柱の近くにできている渦に着目し、その渦が渦度をもっているか調べた。渦度をもっていないもの（レイノルズ数 60-75）と渦度をもっているもの（レイノルズ数 80-202）に分けることができた。また、渦度をもっているものの中では上の写真のように二列の渦列が平行に並んでいるものと、並んでいないものが見られた。レイノルズ数が 220 を超え始めると、次第に渦自体が大きくなり、カルマン渦は乱れ始めた。レイノルズ数が大きくなり、カルマン渦が不安定になると円柱から離れるにしたがって、渦が中央線を越えて巻き込んでいくようになった。

実験：実験したレイノルズ数は、円錐については 122 から 512 まで、円錐台については 240 から 1268 までである。すべてにおいて、互い違いの渦（カルマン渦）が見られることはなかった。円錐においては実験した範囲のレイノルズ数では下の写真のように双子渦がそのまま剥離したようなものが見られた。円錐台においては下の写真のように、レイノルズ数 240 のものは渦が剥離するには至らなかったが、レイノルズ数 400-488 のものは渦が引きちぎられるように剥離し双子渦が距離を置いて並ぶものが見られた。レイノルズ数 800 を超えると乱れ始めた。

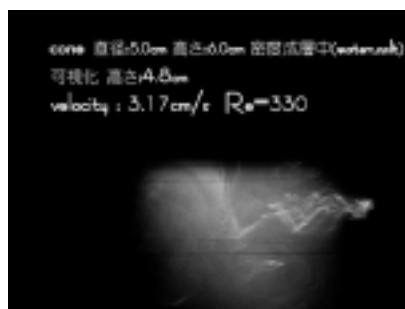


実験 : 実験したレイノルズ数は 50 から 1000 までである。すべてにおいて、互い違いの渦列が見られた。



レイノルズ数が 100 までは非常に安定したカルマン渦が見られたが、レイノルズ数が 100 を超えると、次第に円錐から渦が写真のように上下同時に剥離するものが見られた。ただし、全体では互い違いの渦が見られた。

実験 : 実験したレイノルズ数は 76 から 330 までである。この実験で見られる流れの模様の特徴は、「渦」の部分より、渦につながる「線」のほうが際立っていることである。レイノルズ数 76 から 250 までは互い違いの渦列が見られたが、レイノルズ数が 275 あたりから渦は乱れはじめ、上下同時に剥離していくのが見られた。



実験結果のまとめ

互い違いの渦ができないのは、水没した状態で円錐、円錐台を動かしたときのみであった。そこで、水を使った実験にのみ注目して考えてみた。円柱や、水面から頭を出した状態の円錐、円錐台では互い違いの渦が見られたことから、水面から頭が出ているかどうか重要な目安になることがいえる。

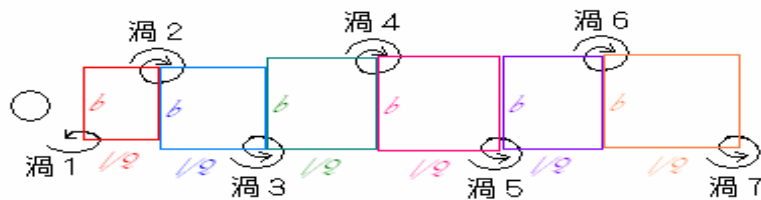
互い違いの渦ができたものでも、観察した高さの直径が 1.0cm と同じにもかかわらず、渦自体の大きさが明らかに異なっていた。また、円錐に関しては、水面から頭を出した状態および、成層中では互い違いの渦が見られたのであるが、レイノルズ数が大きくなり不安定になってくると、水没した状態での実験で見られた上下同時に剥離する渦が見られたのが特徴である。

3.1.3 考察

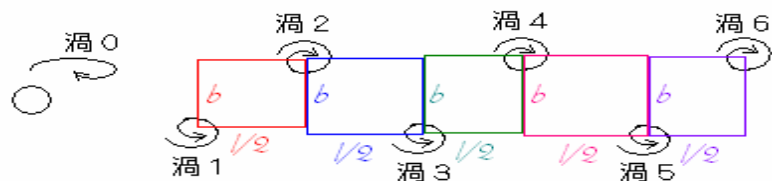
以上の実験に関して、数値的に特徴を議論するために以下の二種類の方法で考察を試みた。

考察 1 : b/l を用い、式 (1.7) より得られた理論値と比較した。

まず、以下のように今まさに発生しようとしている渦を「渦 1」と名付け、そこから互い違いに「渦 2」「渦 3」...と名付けた。次に、「渦 1」が発生とともに物体から剥離してゆき、新たな渦、「渦 0」が発生するまでの間を考えた。そこで、「渦 1」と「渦 2」との b/l 値を図のように b と $l/2$ とをとり求め、「 b/l_1 」と名付けた。同様に、「渦 2」と「渦 3」との b/l 値は「 b/l_2 」...と名付けた。



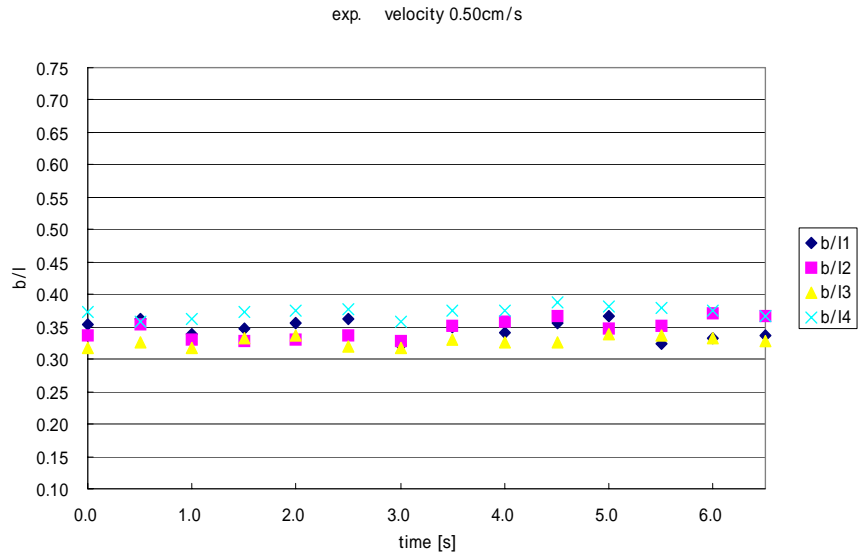
次の渦が発生しはじめると、



物体から今まさに剥離せんとしている渦に注目し、次の渦が発生するまで (これを「1 周期」と呼ぶ) 同じ渦に着目し、 b/l を測った。ある渦が発生してから、次の渦が発生するまでの間の映像を、1/2 秒間隔で切り出し、それぞれについて b/l を測った。すべての実験を通して議論をするときは 1 周期で平均をとった値を用いた。

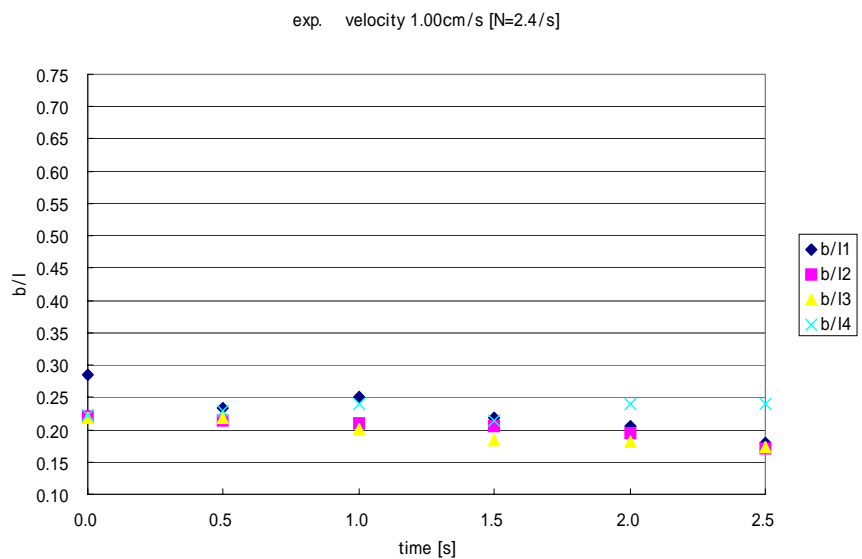
次に互い違いの渦が見られた実験について、 b/l が 1 周期のあいだに、どのように変化していくかをグラフにした。

次のグラフは実験 (円柱・水) の特徴的な結果である。(他のデータは付属の CD-R に収録した。)



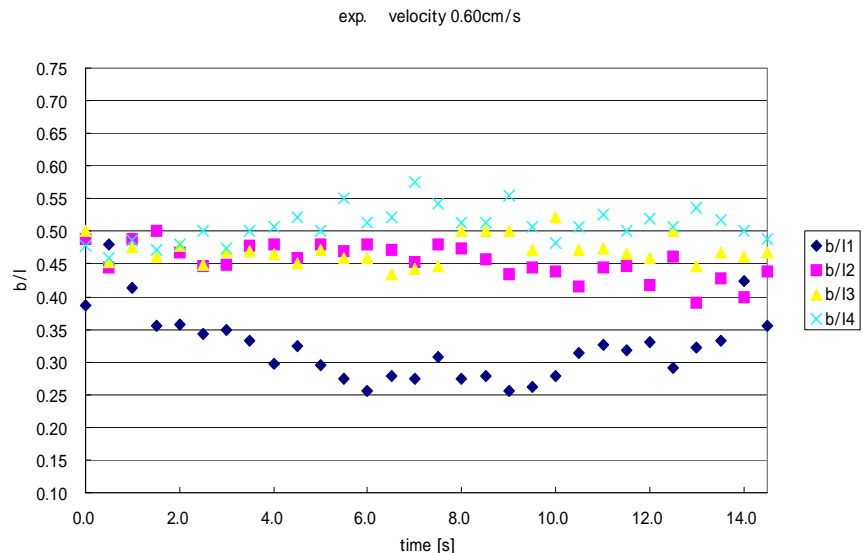
渦の発生から時間が経つに従って、 b/l にはばらつきが見られるが、ばらつきの程度は一周期で0.10未満と小さいので、特に変化は見られないと言える。場所によって b/l がどのように変化しているか考えると、「 b/l 1」は渦が発生途中なので除くと、「 b/l 2」「 b/l 3」「 b/l 4」と円柱から遠ざかるにつれて、 b/l の値は大きくなっていった。渦が完全に発生したものを b/l で議論するために「 b/l 2」に着目して考えた。すると、安定なカルマン渦が発生している範囲の速度では b/l の値は0.25から0.35までと得られた。また、理論値が0.28であることから、理論値にほぼ一致したといえる。

次のグラフは実験（円柱・成層）の特徴的な結果である。（他のデータは付属のCD-Rに収録した。）



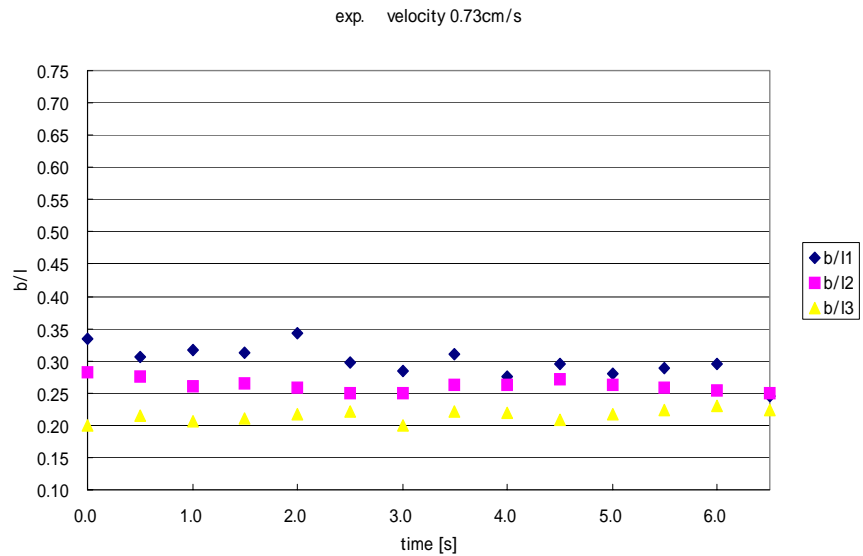
実験と同様に、渦の発生から時間が経つに従って、 b/l にはばらつきが見られるが、ばらつきの程度は1周期で0.15程度と小さいので、特に変化は見られないと言える。このことから、安定なカルマン渦に関しては成層か否かに関係せず、時間経過によるばらつきは変わらないといえる。場所によって b/l がどのように変化しているか考えると、「 b/l 1」は渦が発生途中なので除くと、「 b/l 2」「 b/l 3」「 b/l 4」と円柱から遠ざかるにつれて、 b/l の値は大きくなっていった。渦が完全に発生したものを b/l で議論するために「 b/l 2」に着目して考えた。すると、安定なカルマン渦が発生している範囲の速度では b/l の値は0.15から0.25までと得られた。また、理論値が0.28であることから、理論値より小さいことが分かった。これらのことは成層強度によらず同じであった。

次のグラフは実験（円錐・水・頭出）の特徴的な結果である。（他のデータは付属のCD-Rに収録した。）



渦の発生から時間が経つに従って、「 b/l 1」に関しては1周期で0.25ものばらつきが見られたが、その他の「 b/l 2」「 b/l 3」「 b/l 4」に関しては0.15程度と小さかった。このことから、渦の発生時に渦が安定しない可能性が示唆される。場所によって b/l がどのように変化しているか考えると、渦発生から時間が経過するに従って、「 b/l 2」「 b/l 3」「 b/l 4」と円錐から遠ざかるほど大きくなる傾向が見られた。渦が完全に発生したものを b/l で議論するために「 b/l 2」に着目して考えた。すると、安定なカルマン渦が発生している範囲の速度では b/l の値は0.35から0.55までと得られた。また、理論値が0.28であることから、理論値より大きいことが分かった。

次のグラフは実験（円錐・成層・沈没）の特徴的な結果である。（他のデータは付属のCD-Rに収録した。）



渦の発生から時間が経つに従って、 b/l にはばらつきが見られるが、ばらつきの程度は一周期で0.10未満と小さいので、特に変化は見られないと言える。場所によって b/l がどのように変化しているか考えると、「 b/l 1」は渦が発生途中なので除くと、「 b/l 2」「 b/l 3」「 b/l 4」と円錐から遠ざかるにつれて、 b/l の値は小さくなっていった。渦が完全に発生したものを b/l で議論するために「 b/l 2」に着目して考えた。すると、安定なカルマン渦が発生している範囲の速度では b/l の値は0.10から0.30までと得られた。また、理論値が0.28であることから、理論値より小さいときもあれば、ほぼ一致するときもある。

考察1のまとめ

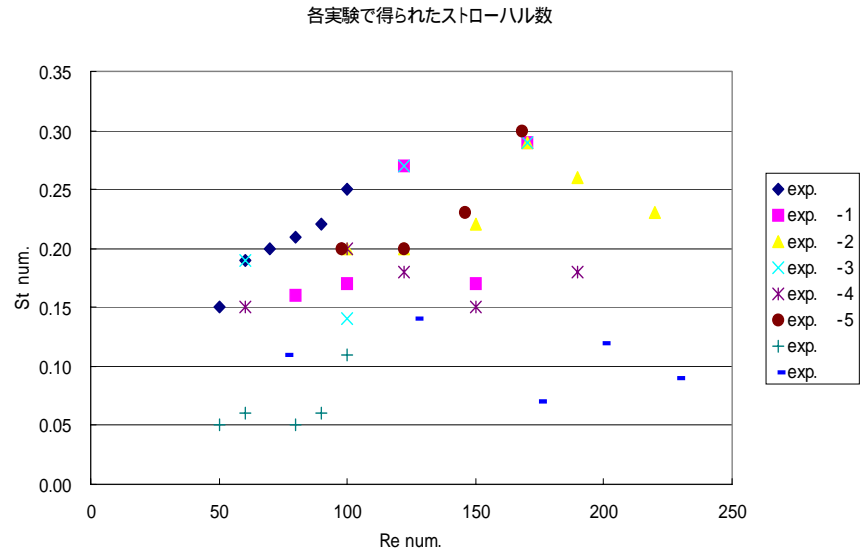
水中で円柱を動かすと b/l の値はほぼ理論値どおりの0.25から0.35までとなり、成層中で円柱を動かすと、理論値より小さい0.15から0.25までとなった。また、水中で円錐を沈没した状態で動かすとカルマン渦は見られず、水中で円錐を頭を出した状態で動かすとカルマン渦はでき、 b/l の値は理論値より大きい0.35から0.55までとなった。成層中で円錐を沈没した状態で動かすとカルマン渦はでき、 b/l の値は0.10から0.30までとなった。

考察2：ストローハル数が動かした物体によってどのくらい変化するか調べた。

ストローハル数は式 $St = \frac{fd}{U}$ と表されることが知られている。 d は物

体の直径であり、本実験では円錐台を除き1.0cmに統一している。また、 U は速度であるので、単位時間に f 対の渦が発生するか調べ、ストローハル数を求めた。ストローハル数はレイノルズ数の関数であるので、レイノルズ数も考慮して比較した。

f を調べていると、円錐の方が円柱に比べて、渦の剥離が遅いことが分かった。



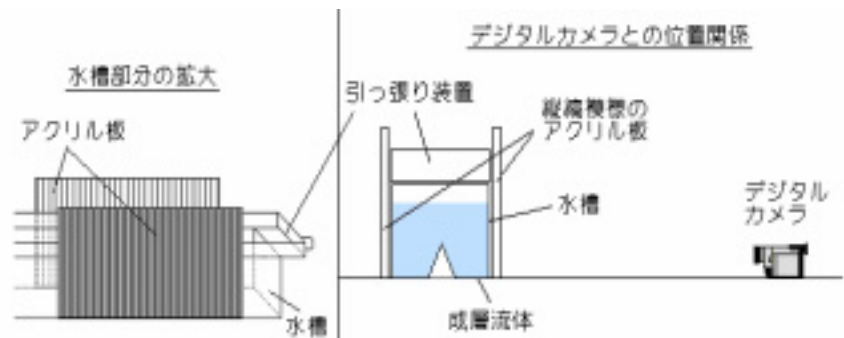
安定したカルマン渦が見られるレイノルズ数の範囲でストローハル数を調べると、円柱を動かした実験 (exp. , exp.) ではストローハル数はほぼ 0.15 から 0.30 までの間に納まり、円錐を動かした実験 (exp. , exp.) では、ほぼ 0.05 から 0.15 の間に納まった。

3.2 成層中での鉛直方向への乱れに関する実験

3.2.1 実験方法

成層中で円柱や円錐を動かしたとき、鉛直方向にどのような擾乱が見られるか実験した。塩水の屈折率はその濃度に依存し、濃度が高くなると屈折率も大きくなる。したがって、成層流体中に水平に入射した光は濃度勾配の方向に屈折する。これらの事を利用して、成層流体を通して見た縞模様の干渉縞から密度場擾乱を可視化した。

図のように、ピッチの異なる縦縞模様を印刷した透明アクリル板を、水槽を挟んで両側に置く。この透明アクリル板を通して縦縞模様を見ると、一般にはモアレ縞が見えるが、適当な距離から見ると、二つの縞模様が完全に重なり、モアレ縞が消える。その位置にデジタルカメラを設置し、密度場擾乱を撮影した。



実験 : 7.0cm まで成層させ、頭を出した状態で円柱を動かし、モアレ縞を観察した。実験した密度成層は $3.3s^{-1}$ 。

流れを観察した速度は、0.60cm/s、1.00cm/s、1.22cm/s、1.50cm/s、1.70cm/s、2.20cm/s、3.16cm/s、4.15cm/s、5.10cm/s。

実験 : 7.0cm まで成層させ、水没した状態で円錐を動かし、モアレ縞を観察した。実験した密度成層は $1.7s^{-1}$ 。

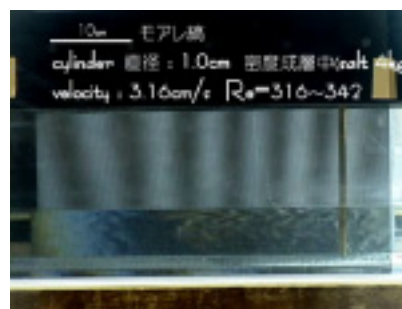
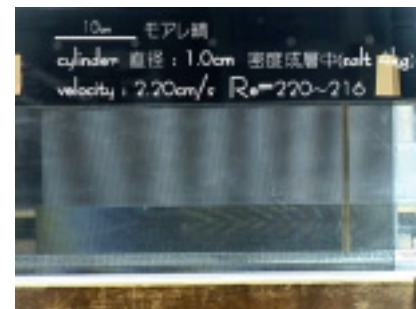
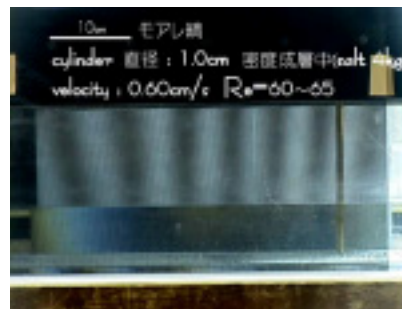
流れを観察した速度は、0.60cm/s、1.22cm/s、1.50cm/s、1.70cm/s、1.90cm/s、2.20cm/s、3.16cm/s、4.15cm/s。

実験 : モアレ縞による鉛直方向の擾乱の可視化は、成層した流体にしか用いることができない。そこで、4.8cm まで水を入れ、頭を出した状態で円錐を動かし、横から鉛直方向の流れをデジタルカメラで撮影した。ペースト状のクリープを底に流し込んで可視化した。

流れを観察した速度は、1.00cm/s、1.22cm/s、2.20cm/s。

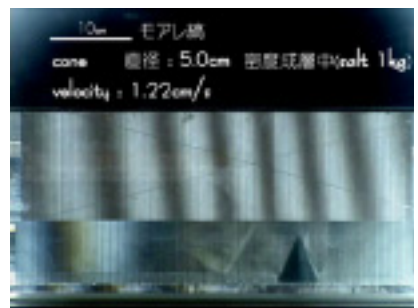
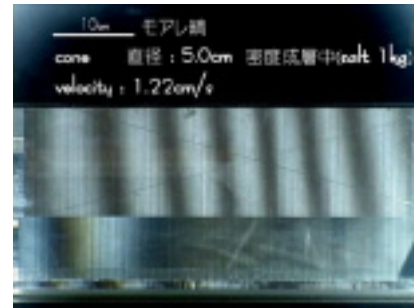
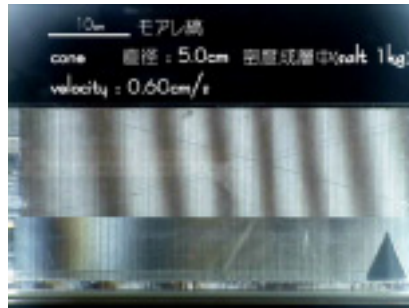
3.2.2 実験結果 (画像・動画については付属の CD-R に収録した)

実験 : 実験した速度で動かしたとき、上から観察するとカルマン渦ができる速度である。また、速度 2.20cm/s までは安定なカルマン渦のできる速度である。速度 2.20cm/s を超えると次第にカルマン渦は乱れはじめる。



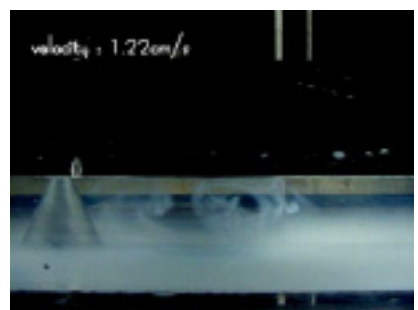
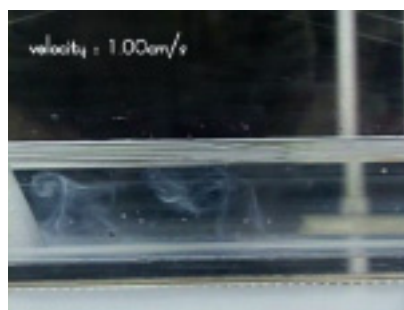
速度 0.60cm/s、1.00cm/s ではほとんど鉛直方向への擾乱は見られなかった。速度 1.22cm/s では円柱に引きずられるような乱れを確認できた。速度 1.50cm/s を超えると図のような「<」「>」のような線模様ができた。速度 2.20cm/s では綺麗な「>」模様ができた。速度が 3.16cm/s から 5.10cm/s は鉛直方向への擾乱が大きいことが確認でき、その擾乱の中に「<」「>」模様を見出すことができた。擾乱を観察していると、水槽手前側の流れと後ろの流れが異なっているように見える部分もあった。したがって、渦の影響が考えられる。

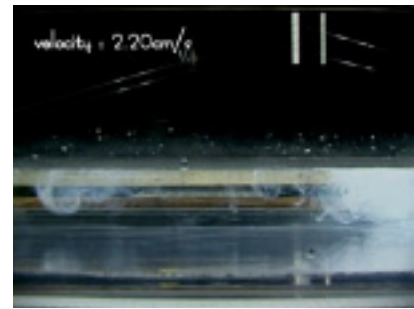
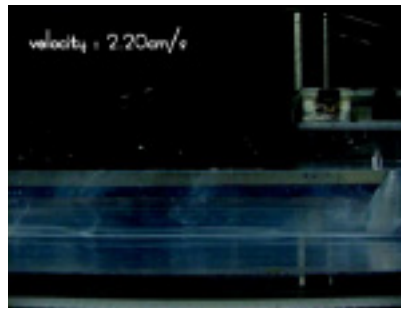
実験 : 実験した速度で動かしたとき、上から観察すると速度 0.60cm/s、1.22cm/s、1.50cm/s、1.70cm/s、1.90cm/s、2.20cm/s ではカルマン渦ができて、速度 3.16cm/s、4.15cm/s ではカルマン渦は乱れ、上下同時に剥離しはじめていた。



速度 0.60cm/s ではほとんど鉛直方向への擾乱は見られなかった。速度 1.22cm/s、1.50cm/s、1.70cm/s では図のような傾き 20 度ぐらいの綺麗な直線が見られた。また、うっすらではあるが、右下図のような傾き 65 度ぐらいの同じ幅の白黒の縞が見られた。速度 1.90cm/s でその直線は乱れはじめ、速度 2.20cm/s を超えると、擾乱は激しくなり擾乱の中に見える模様は「<」が重なったようであった。速度 4.15cm/s の図では円錐が左から右に動いたものである。また、擾乱を眺めていると、渦運動らしきものを確認できた。

実験 : 実験した速度で動かしたとき、上から観察すると、上下同時に剥離するが、全体としては互い違いの渦列が観察できる速度である。また、速度 1.00cm/s、1.22cm/s では比較的上下同時に剥離するのが少なかった。





速度 1.00cm/s、1.22cm/s では、円錐が左に動くとき、円錐の直後に反時計回りの回転をする渦が見られた。速度 2.20cm/s では、円錐の直後にははっきりした渦は見られなかったが、ところどころに強い回転の渦が見られ、全体的に乱れていた。

3.2.3 考察

実験、実験 に関しては、観察された擾乱が、カルマン渦が鉛直方向へ乱れることによってできたものなのか、円柱や円錐が動き、周りの流体を押し上げたり押し下げたりすることで、内部重力波が発生しているのかを調べた。

そこで、次の式を満たす擾乱（波）は内部重力波であるといえる。

$$\cos\theta = \frac{\omega}{N} \quad \theta: \text{角度} \quad \omega: \text{振動数} \quad N: \text{ブラント} = \text{バイサラ振動数}$$

θ は水平軸からの角度とし、波が発生しているとき、ある一点に着目し 1 秒間に黒色と白色とが何回入れ替わるかを ω とし、式 $\cos\theta = \frac{\omega}{N}$ に代入した。

実験 では速度 2.20cm/s のとき、綺麗な縞模様が見られたもので、この式が成り立つか調べた。ブラント = バイサラ振動数 N は 3.3s^{-1} 、角度 θ は 20° 、また、振動数 ω は 1.9 回。これらの数字を上のに代入すると、(左辺) = 0.94、(右辺) = 0.58 となった。このことから、この波は内部重力波の可能性は低い。

実験 では速度 1.22cm/s、1.50cm/s、1.70cm/s のとき、綺麗な縞模様が見られたもので、この式が成り立つか調べた。この実験では 2 種類の縞が見られたので別々に考えた。はっきりした縞を縞 1、見辛いが白黒の幅が同じ縞を縞 2 とする。

縞 1：この縞は移動がなく、はじめにできた位置で縞がはっきりとしてくるだけであった。従って、この縞は内部重力波によってできた縞ではないことが分かる。

縞 2：ブラント = バイサラ振動数 N は 1.7s^{-1} 、角度 θ は 65° 、また、振動数 ω は 0.74 回。これらの数字を上のに代入すると、(左辺) = 0.42、(右辺) = 0.44 なので、(左辺) (右辺) となり、この縞（波）は内部重力波であるといえる。

まとめ

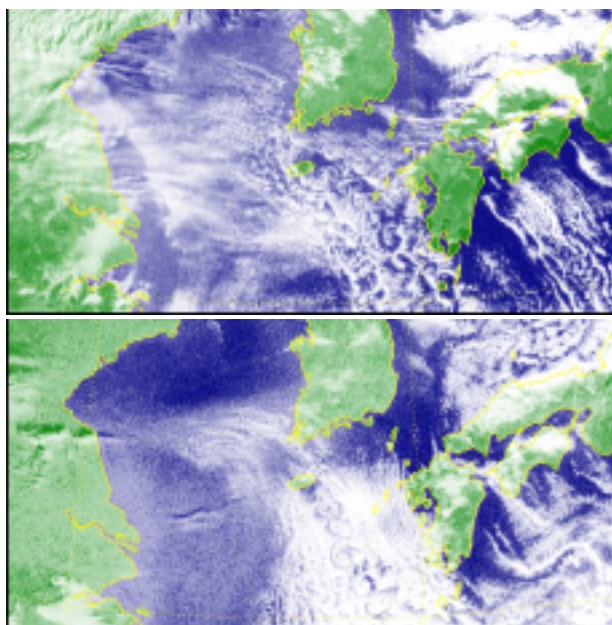
鉛直方向への主な擾乱は渦によるものであり、円錐においては内部重力波も検出できた。

4.0 それぞれの室内実験と山の風下にできるカルマン渦との比較

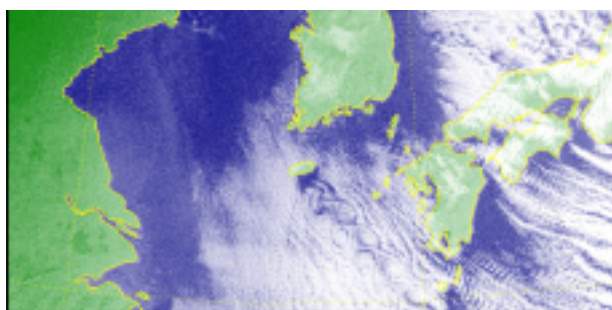
4.1 衛星画像で見た濟州島の風下の渦

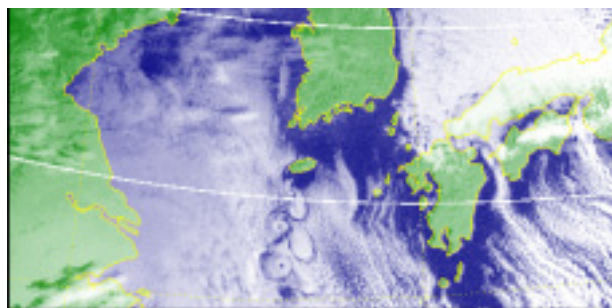
衛星画像で濟州島の風下を調べると、カルマン渦に関連する大きく3種類の流れが確認できた。

1. 互い違いの渦ではなく、双子渦が並んでいるもの

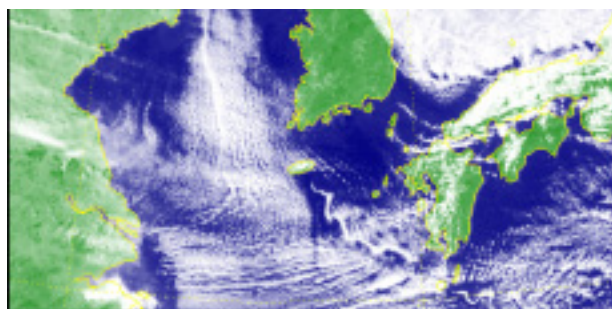
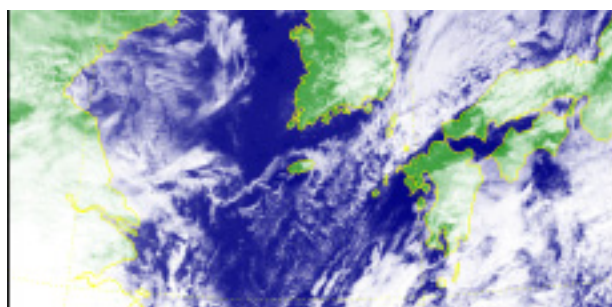


2. 互い違いの渦が見られるもの





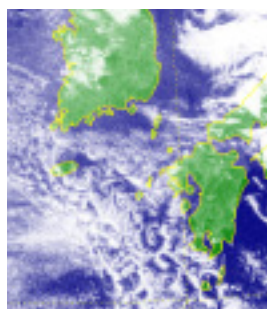
3. 渦が見られないものの、互い違いの渦と関連のありそうな流れ



4.2 衛星画像と室内実験で得た画像との比較

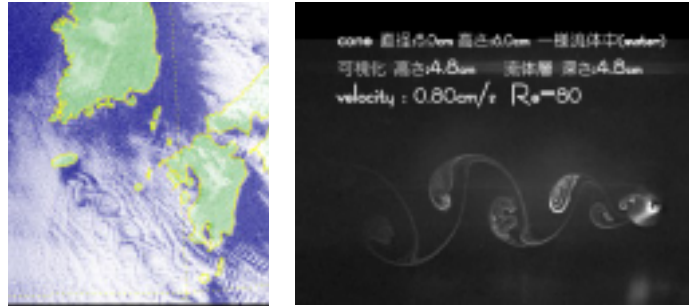
ここでは、先ほど分類した衛星画像が、本室内実験で得られたどの実験での画像に近いが、画像のみで判断を下した。

1. 互い違いの渦ではなく、双子渦が並んでいるもの



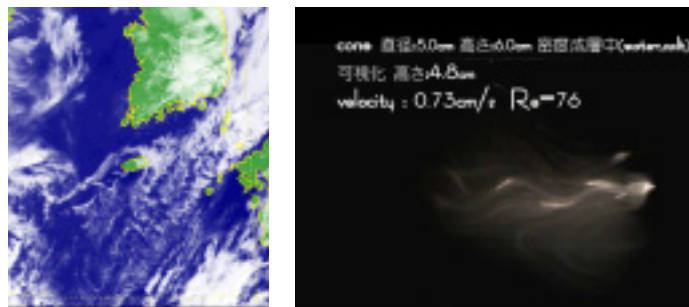
剥離した双子渦ができたものは、水没した状態で円錐、円錐台を動かした実験だけであった。このことから、このときの大気の状態は済州島(1950m)がすっぽりと浸かる高さまで中立、または、不安定な大気であると推測できる。

2. 互い違いの渦が見られるもの



互い違いの渦ができたものは、水中で円柱を動かした実験、成層中で円柱を動かした実験、水中から頭を出した状態で円錐を動かした実験、成層中で沈没した状態で動かした実験であった。次に、 b/l の値に注目して考えた。すると、衛星画像の b/l の値は0.4から0.6までと得られたので、 b/l の値が0.35から0.55までであった、水中から頭を出した状態で円錐を動かした実験が一番近いと判断した。そこで、このような渦が見られているとき、実際の大気の状態は済州島(1950m)の高さを超えない高度で逆転層が生じていると推測できる。

3. 渦が見られないものの、互い違いの渦と関連のありそうな流れ



互い違いに白い筋ができているのは、低速度で水中および成層中、円柱を動かした実験、あるいは、成層中において沈没した状態で円錐を動かした実験である。ここで、この雲模様ができているとき、他の雲画像と比べて風速が小さいとは認められなかったので、成層中において沈没した状態で円錐を動かした実験が一番近いと判断した。そこで、このような「八」の字模様の雲が見られるとき、実際の大気の状態は済州島(1950m)がすっぽりと浸かる高さまで安定な大気であると推測できる。

5.0 まとめ

5.1 考察

3.0章で示したように、一様流体中（水中）では頭を出すかどうかはカルマン渦ができるかどうかの鍵となり、水中で円錐を動かすと b/l の値はほぼ理論値どおりとなったが、水中で円錐を頭を出した状態で動かすと理論値より大きくなった。また、衛星画像で綺麗なカルマン渦が見られる時、その b/l の値を測ると理論値より大きくなり、水中で円錐を頭を出した状態で動かした実験と同じ値をとった。そのことから、その時の大気は逆転層を生じている事が分かった。

5.2 結論

カルマン渦に関連した流れについて、衛星画像を大きく3種類に分類し、そのときの大気の状態をその流れ模様から判断を下す事ができる可能性を示唆した。

双子渦が並んでいるものは、水没した状態で円錐、円錐台を動かした実験と渦の配置がそっくりであったので、そのときの大気の状態は濟州島がすっぽりと浸かる高さまで中立、または、不安定な大気である可能性がいえる。

次に、互い違いの渦ができているものは、その b/l の値が大きくなるという特徴から、水中から頭を出した状態で円錐を動かした実験が当てはまり、そのときの大気の状態は濟州島の高さを超えない高度で逆転層が生じている可能性がいえる。

最後に、「ハ」の字模様の流れが見られるものは、成層中において沈没した状態で円錐を動かした実験で得られた流れの模様とそっくりであったので、そのときの大気の状態は濟州島がすっぽりと浸かる高さまで安定な大気である可能性がいえる。

5.3 今後の課題

本研究では、 b/l の値が変化することについて、理論的にはふれていない。どういうメカニズムで b/l の値が変化するか考察する必要がある。また、衛星画像でカルマン渦が見られるときの実際の大気の状態を他の方法で調べ裏付ける必要がある。

6.0 謝辞

本研究にあたって、京都大学総合人間学部地球科学分野の酒井敏助教授には、研究全般にわたって御指導・御助言を頂いた。また、鎌田浩毅教授、石川尚人助教授、金子克哉助手、加藤護助手をはじめ、京都大学総合人間学部地球科学分野の関係者の皆様には、ゼミや研究活動において、有益な御議論・御批判を頂き、研究の助けとなった。京都大学総合人間学部井上和久氏には実験をお手伝いして頂いた。ここに深く感謝の意を述べたい。

7.0 参考文献

- [1] 木村竜治,1985: 改訂版・流れの科学, 東海大学出版, pp.2-25
- [2] 木村竜治,1983: 地球流体力学入門, 東京堂出版, pp.24-26
- [3] 種子田定俊,1988: 画像から学ぶ流体力学, 朝倉書店, pp.90-185
- [4] G.H.Koopmann,1967:The vortex wakes of vibrating cylinders at low Reynolds numbers,*J.Fluid Mech.*,**vol.28**,**part 3**,pp.501-512
- [5] 巽友正,1982: 流体力学, 培風館, pp.184-203
- [6] Satoshi Sakai,1997:Atmosphere and Ocean in a Laboratory,<http://www.gfd-dennou.org/library/gfd-exp/>
- [7] 酒井敏,1990: モアレ法による内部重力波の可視化, *可視化情報*,**vol.10**,**No.38**,pp65-68
- [8]Korea Meteorological Administration,2004:Satellite Images,<http://www.kma.go.kr/>