326

谷地形のある山岳モデルをすぎる安定成層流に関する実験

辰野 正和[○](九大応力研), 中塚 志保(全日本空輸(株)), 石井 幸治(九大応力研)

Experimental Study on the Stratified Flow over a Ridge with a Valley

Masakazu TATSUNO, Shiho NAKATSUKA and Koji ISHI-I

ABSTRACT

An experimental study has been made of the stably stratified flows over a ridge or a ridge with a valley. The experiments were performed by towing models through linearly stratified saline-water solutions. The Froude number $Fr (=U_0/NH)$ was changed from 0.1 to 1.67 (and ∞), where U_0 is the towing speed, N the Brunt-Väisälä frequency and H the height of models. Flow structures around models were visualized by means of the electrolytic precipitation method, and the velocity fields at several vertical cross sections were determined by PIV method.

In the case of a ridge with a valley, the flow has funneled to the valley and a strong flow has been generated downwards along the slope of the valley at low values of Fr . When $Fr > 0.8$, however, the flow funneled to the valley could not be observed.

Key Words : Stratified flows, Mountain models, Flow visualization

1. はじめに

山岳域を越える大気の流れの研究に関しては、観測、モデル実験、数値シミュレーション等がなされている。

孤立峰を過ぎる流れに関しては、密度成層場を作った水槽実験としては、Brighton¹⁾, Hunt & Snyder²⁾, Boyer et al.³⁾, 日野等⁴⁾の研究、また中立流における風洞実験としては、孟・日比等⁵⁾の報告がある。

一方、二次元的な山岳モデルに関する研究は少ない。Castro et al.⁶⁾は、三角形断面を持ったリッジモデルについて、密度成層流を作った水槽で実験を行っている。内田、大屋^{7,8)}は、有限流路内の二次元丘陵地形を過ぎる安定成層流に関する数値シミュレーションを行っている。また、石原、日比⁹⁾は、中立流場における2次元山を過ぎる流れの数値解析を行っている。

本研究では、大気の流れに対する複雑地形の影響の一つとして、二次元的な山岳モデル、およびその一部に谷地形がある場合について水槽を利用したモデル実験を行う。

2. 実験装置および方法

使用した水槽は、幅 40cm, 深さ 40cm, 長さ 6m であり、その上部にある曳航電車にモデルを固定して走行

させる。

実験を行った作業流体は、水だけの中立流および水と塩水による安定な成層流体であった。種々の直線状の密度勾配を持った成層流は、水と塩水による二槽式密度成層流作成装置で生成した。成層流体の密度分布は、電気伝導度計で計測した。直線状の密度勾配を持った成層流体中での山岳モデルまわりの流れの特性を表すパラメーターとしては、フルード数 $F=U_0/NH$, $K=ND/\pi U_0$, $\varepsilon=\pi H/D$, $Re=U_0 H/\nu$ がある。ここで、 U_0 はモデルの進行速度、 H はモデルの高さ、 D は水深、 ν は動粘性係数、 N はブルント・パイサラ振動数であり、 $N=(g/\rho_0 \cdot \partial \rho / \partial z)^{1/2}$ で表される。 g は重力加速度、 ρ_0 は平均密度、 $\partial \rho / \partial z$ は高さ方向の密度勾配である。

山岳モデルとして、Fig.1 に示すように、2個のモデルを作成した。第1のモデルは、二次元 ridge モデルであり、その断面は高さ 5cm, 底部 17.3cm の二等辺三角形をしている。つまり、両斜面の底面とのなす傾斜角は 30° である。横の長さは 39.4cm であった。第2のモデルは、基本形は第1のモデルと同様であるが、長さ 39.4cm の中央部に幅 5cm, 深さ 2.5cm, 両側面の傾斜角 45° の谷が工作されている。両モデルとも材料は発泡スチロールであるが、強度と防水効果をかねて、その表面には接着剤と石膏の混合した物を塗布したのち、黒色スプレーで着色している。

(a) A ridge model

(b) A model with a valley

Fig.1 Experimental models

流れの構造の定性的な可視化のためには、電解沈殿法を利用した。さらに、流速分布の定量的な計測のためには、PIV 法を利用した。この際、流体には微粒子を混入した。使用した微粒子は、ポリエチレン粒子に適当な接着剤被膜を作り、密度の異なる流体中のどこにも微粒子が分散して存在するようにした。ビデオカメラで撮影した映像 (1/30 秒間隔) の適当な 2 枚を選び、それらの映像間での微粒子の変位から速度場を求める。使用したソフトは、ライブラリー社の流体画像解析ソフト Flow-vec32 であった。

本実験では、一様流方向に X 軸、モデル軸に沿って Y 軸、鉛直上向きに Z 軸をとる。また、各点の合成平均速度を U 、X 方向平均速度成分を U_x 、Z 方向平均速度成分を U_z とする。

3. 実験結果

3. 1. 二次元 ridge

二次元 ridge を越える流れには、安定成層の度合いによって、blocking, lee wave, ローター, 碎波, 剥離域などの様々な現象があらわれることがわかった。

blocking 現象は、Fr 数の小さい程広領域で現れ、Fr 数の増加とともに領域は小さくなる。さらに Fr 数の小さい強安定成層の状態では、山を越える流れは山の後方

斜面を速い速度ですべり下り、斜面の途中で lee wave を形成する。Fr 数が小さい程 lee wave の波長は短く、Fr 数が大きくなるにつれ、その波長も長くなってゆく。

Fr 数が 0.4 程度になると、山の後方麓まで流れはすべりおりようになる。これは、いわゆるおろしの状態であり、山の斜面に沿う流れの速度はかなり速く、山の麓では一様流 U_0 の約 2.2 倍の速さにもなっている。また lee wave 上方にできた碎波領域では、流れはほぼ停滞していることがわかった。しかし Fr 数が 0.8 程度以上になると、流れは山の頂上付近で剥離をおこし、山の下流側には剥離領域が形成されるようになる。

3. 2. 谷モデル

Fig2 に、Fr=0.11 の場合の山部、谷部それぞれの部分での縦断面写真を示す。山部には下流側に lee wave ができており、山斜面の 1/3 の位置まで降りてきている。上流側には blocking 領域がある。山部の流れの縦断面の観察は谷中央部より 9cm の位置で行ったが、二次元 ridge の Fr=0.1 の場合の流れとほぼ同じであった。

谷部では、山の高さの blocking 領域に溜まった流れが、収束して谷に沿って流れ出る。その上方には lee wave らしきもののものがかけていている。PIV 計測によると、谷を抜けた、下流側の地面付近で、流速は極端に速くなっており、 U_x は U_0 の約 6 倍もの速さになっている。こうした谷への収束流は、Fr 数が小さいほど顕著

(a) A vertical plane view of the flow over the ridge

(b) A vertical plane view of the flow over the valley

Fig.2 Flow over the model at Fr=0.11.

$U_0=0.44\text{cm/s}$, $K=14.85$, $\varepsilon=0.628$, $Re=193$

(a) A bird's-eye view of the flow over the model

(b) A top view of the flow over the model

(c) A vertical plane view of the flow over the ridge

(d) A vertical plane view of the flow over the valley

(e) Distributions of U_x/U_0 in a vertical cross section over the ridge

(f) Distributions of U_x/U_0 in a vertical cross section over the valley

Fig.3 Flow over the model at $Fr=0.43$.

$U_0=1.0\text{cm/s}$, $K=3.73$, $\varepsilon=0.628$, $Re=422$.

である。

Fig3 に、 $Fr=0.43$ の場合についてモデルまわりの流れの鳥瞰図、水平な断面を上から見た様子 (Top view)、山部・谷部の縦断面写真および PIV 法により求めた山部、谷部の代表的な地点の U_x の鉛直分布を示す。(b)の Top view の写真で、中央部に見える縦の2本の白線は、モデルの裾を表している。まず、これらの図から、モデルの上流側には、blocking 領域があることがわかる。しかし、その領域は、 $Fr=0.11$ の場合より小さい。

また、山部では、 $Fr=0.4$ の場合の二次元 ridge と同

様に、山の斜面に沿って流れが滑り降りる、いわゆるおろしの状態になっているのがわかる。山を下り降りた麓では U_x は U_0 の約 2.2 倍になっている。

一方、谷部には、風上側の左右から収束し、集まってくる流れがあり、流速は増し、斜面に沿って流れ下る。谷を流れ下った地面付近では U_x は U_0 の約 2.4 倍となっている。

Fr 数が 0.5 以上になると、風上側での谷への収束流はほとんどなくなるようである。

Fig.4 に、 $Fr=0.80$ の場合の、山部、谷部の縦断面写

(a) A vertical plane view of the flow over the ridge

(b) A vertical plane view of the flow over the valley

Fig.4 Flow over the model at $Fr=0.80$.

$U_0=1.88\text{cm/s}$, $K=1.98$, $\varepsilon=0.628$, $Re=822$.

真を示す。ここでは、モデル上流側での blocking 領域がほとんどなくなる。流れの大きな特徴は、山部、谷部ともに、それぞれの頂上で流れが剥離していることである。山部の下流側斜面には、大きな剥離渦が形成されているのがわかる。

4. 結論

山脈型の二次元 ridge モデルと、その中央に谷間を工作した谷モデルをすぎる安定成層流の特性を、 Fr 数を変化させて調べた。その結果以下のことがわかった。

二次元 ridge の低 Fr 数領域では、上流側に blocking 現象が起こる。山の下流側には、風下波(lee wave)が発生し、lee wave の上方には碎波、下方にはローターが現れる。 $Fr=0.4$ では、lee wave が山の麓まで降りてきており、いわゆるおろしの状態になっている。二次元 ridge の高 Fr 数領域では、流れは山頂上で剥離し、山の斜面に沿って渦が発生する。

谷モデルでは、 Fr 数の小さな強安定状態の時に、谷への収束流が発生することがわかった。こうした収束流は、 $Fr<0.5$ で起こっている。弱安定成層の高 Fr 数領域では、谷間に横方向から収束する流れが入らなくなる。また山部、谷部ともにその頂上で流れの剥離が起こるようになる。

参考文献

- 1) P. W. M. Brighton : Strongly stratified flow past three-dimensional obstacles, Quart. J. R. Met. Soc. 104 (1978) pp.289-307.
- 2) J. C. R. Hunt & W. H. Snyder : Experiments on stable and neutrally stratified flow over a model three-dimensional hill, J. Fluid Mech. vol.96, part4 (1980) pp.671-704.
- 3) D. L. Boyer, P. A. Davies, W. R. Holland, F. Biolley & H. Honj : Stratified rotating flow over and around isolated three-dimensional topography, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A322 (1983) pp.213-241.
- 4) 日野 幹雄, 日向 博文, 奥村 卓也 : 安定成層中における孤立峰周りの流れの可視化(指示薬法), 可視化情報, vol.11, Suppl. No1 (1991) pp.131-134..
- 5) 孟 岩, 日比 一喜 : 急な斜面をもつ 3 次元孤立峰周りの流れ場の乱流特性, 日本風工学会誌, 第 73 号(1997) pp.3-14..
- 6) I. P. Castro, W. H. Snyder & G. L. Marsh : Stratified flow over three-dimensional ridges, J. Fluid Mech. vol.1135 (1983) pp.261-282.
- 7) 内田 孝紀, 大屋 祐二 : 有限流路内の二次元丘陵地形を過ぎる安定成層流の非定常性, ながれ 17 (1998) pp.45-46.
- 8) 内田 孝紀, 大屋 祐二 : 有限流路内の二次元丘陵地形を過ぎる安定成層流の非定常性-第 2 報 非定常な剥離・再付着流れに対する安定成層の効果-, ながれ 18 (1999) pp.308-320.
- 9) 石原 孟, 日比 一喜 : 2 次元山における風の増速に関する数値解析, 第 16 回風工学シンポジウム(2000) pp.37-40.