

山越え気流による雲の生成

大谷ちとせ（指導教員：河村哲也）

1 はじめに

山は天気が変わりやすく、山頂は雨が多い。また、冬の日本海側は雪(雨)が多い。

そもそも雲ができるしくみは、空気の温度によって決まる飽和水蒸気量が関係しており、仮想的に考えた粒子について、粒子1粒あたりに含まれる水蒸気量が周囲の空気の飽和水蒸気量に達したときに粒子内の水蒸気が液体の水となり目に見えるようになることである。

本研究では自然界の各条件や粒子の様子を数値化し、シミュレーションすることで雲の生成を再現する。

2 モデル化・格子生成

2.1 格子

本研究では奥行き方向に同じ形を持つ2次元形状の山を想定し、計算を行った。

計算領域は Fig. 2.1. に示すように山の形状は正弦関数の正の部分を用いてモデル化した。領域は格子数 160×80 の等間隔格子を用いて分割した。(Fig. 2.1)

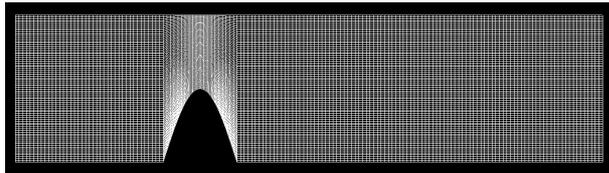


Fig. 2.1: 計算領域と格子

2.2 計算モデル

以下に示す2つの観点から数値実験を行う。なお、境界条件は図の左側からの一様流が流入し右側で自然流出しているとした。上面はすべり壁としている。

(1) 粒子の条件

100 ステップごとに、入口の境界上で上向きに等間隔の地点で40個の粒子を発生させる。なお、この粒子は発生時には湿度50%の水蒸気量を持っているものとする。

(2) 雲の可視化

計算領域内で、周囲の格子点の速度から補間した速度 (u, v) によって粒子を時間間隔 Δt ごとに

$$x^{n+1} = x^n + u\Delta t$$

$$y^{n+1} = y^n + v\Delta t$$

で移動させる。ここで上添字 n は移動前、 $n+1$ は移動後を示す。

移動しても粒子の水蒸気量は不変とし、それが周囲の空気の飽和水蒸気量に達した際にその粒子の状態を雲として表示させる。なおこの方法だと雲は離散的に表示されるため、雲を表す連続関数 f を雲の存在を表す離散関数 $S(x,y)$ を用いて

$$f(X, Y) = \sum_{k=1}^M S(x_k, y_k) e^{-\sqrt{(X-x_k)^2 + (Y-y_k)^2}}$$

で定義し、 f をシェーディング表示する。

ここで X, Y は格子点の座標、 x_k, y_k は k 個目の粒子の座標、 M はある時間ステップでの粒子の総数とする。

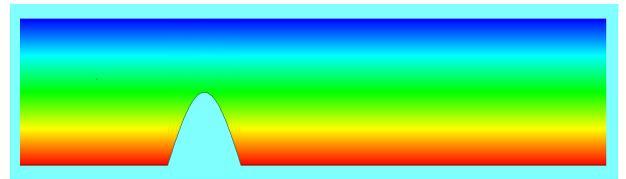


Fig. 2.2: 飽和水蒸気量

3 計算方法

3.1 基礎方程式

二次元の場合の基礎方程式は以下の通りである。連続の式、Navier-Stokes 方程式を使用する。

連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

u : 水平方向速度, v : 鉛直方向速度,

P : 圧力, Re : レイノルズ数

3.2 解法

上記方程式を差分近似し、フラクショナルステップ法を用いて解いた。

4 結果と考察

4.1 空気の流れ

レイノルズ数1000, ステップ数48000で計算したところ、左方から流れ込んだ空気が山を越え、麓付近で渦を巻いていることが確認できた。

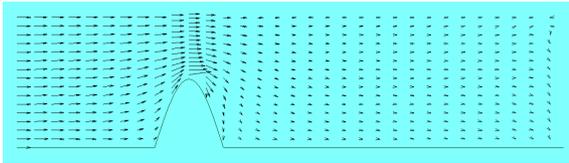


Fig. 4.1: 400 ステップでの空気の流れ

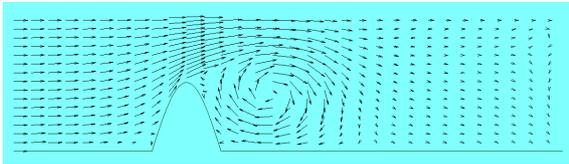


Fig. 4.2: 10000 ステップでの空気の流れ

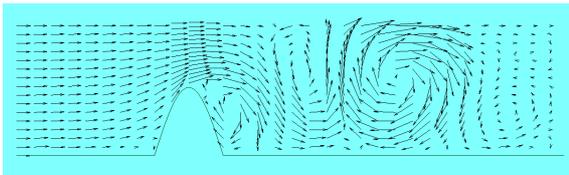


Fig. 4.3: 30400 ステップでの空気の流れ

4.2 雲の生成と流れ

Fig.4.4, Fig.4.5, Fig.4.6 および Fig.4.7 は、時間ステップごとの雲の様子をそれぞれ示したものである。

4800 ステップ目の雲の様子を見ると、山頂よりやや左側に雲ができています (Fig. 4.4)。この雲が徐々に右方伸び、41600 ステップ目には新たな雲が山頂付近に発生している (Fig. 4.7)。その後山頂付近では雲が生まれたり消えたりしながら全体的に右方向へと進み、山の右側では断続的に雲が存在していることがわかる。



Fig. 4.4: 4800 ステップでの雲の様子



Fig. 4.5: 20800 ステップでの雲の様子



Fig. 4.6: 34000 ステップでの雲の様子



Fig. 4.7: 41600 ステップでの雲の様子

また、Fig.4.8, Fig.4.9, Fig.4.10 および Fig.4.11 は、山の高さを半分にし、湿度と気温減率を自由に設定できるようにしたものである。(画像は湿度 60%, 気温減率 0.375)



Fig. 4.8: 5600 ステップでの雲の様子



Fig. 4.9: 28000 ステップでの雲の様子



Fig. 4.10: 40400 ステップでの雲の様子



Fig. 4.10: 47600 ステップでの雲の様子

5 まとめと今後の課題

山を越えた気流の流れと、その流れによって生じる雲の動きを再現した。その結果、山頂付近と山を越えた後の領域で雲が発達する様子が確認できた。実際の雲が発達すると雨や雪が降るため空気内の水蒸気量が減少するが、今回は粒子内の水蒸気量を一定にした状態での実験だったため、冬に日本海側で雪が降り太平洋側で乾燥する現象の再現には至らなかった。しかし山よりも手前の領域で雨が降らなかった場合、山より風下の広い領域で曇るということがわかった。

今後は計算を二次元から三次元にし、各水蒸気量などを実際の数値に近づけることでより現実味のある再現を行う。また、水蒸気が凝縮したときに放出する潜熱の影響を考慮したり、雲の生成だけではなく雨を降らせたと仮定したうえでの各粒子の水蒸気量の変化や温度変化についても考える。

参考文献

- [1] 丸山健人・水野量・村松照男. 大気とその運動. 東海大学出版会, 1995.