

種々の山岳地形におけるフェーン現象のシミュレーション

井元 薫 (指導教員: 河村 哲也)

1 はじめに

風が山肌にあたり山を越え、暖かくて乾いた風となって降りてきて、付近の気温が上昇する現象をフェーン現象という。フェーンとはもともとはアルプスの北側で吹く高温で乾燥した南よりの風のことであった。

日本では、日本海に台風や前線を伴う温帯低気圧があり、強い南風が太平洋側から中央山脈を越えるとき、日本海側で暖かく乾いた風が吹く。山形県山形市では1933年7月25日に40.8 という気温を記録したが、これはフェーンが原因であるとされており、2007年8月16日に岐阜県多治見市、埼玉県熊谷市で40.9 が観測されるまでは日本の観測史上最高気温であった。フェーン現象は非常に乾燥した突風になることもあるのでしばしば火災が発生することもある。

本研究では、フェーン現象をシミュレーションすることにより、山岳地形の違いから検証を行う。なお、フェーン現象には、熱力学的な断熱変化によって起こる湿ったフェーンと、力学的に起こる乾いたフェーンの2つがあるが、本研究では前者のみを取り扱う。

2 湿ったフェーンのマカニズム

たとえば、1000 mの山があり地表の温度が20 °Cであったとする。気流は山の風上側で湿潤断熱的に上昇する。このとき水蒸気が凝結して潜熱を放出しながら雲を発生させる。また、100 mにつき0.5 °C低下するので、山頂では15 °Cとなる。山の風下側では乾燥断熱的に下降する。この場合、100 mにつき1.0 °C上昇するので、風下側でのふもとでは25 °Cとなり暖かく乾いた風が吹く。

3 モデル化・格子生成

xz平面を地表面、y方向を高さとする32km×8km×8kmを計算領域とした。ただし、地表面の一部分に標高2000 mの山があるとす。本研究では、山がz方向の中央に1つ (Case1)、両端に1つずつ (Case2)、3つ連なる (Case3) 場合を考えた (図1~3)。

いずれの場合も、格子数はx方向に61、y方向に101、z方向に61とし、山に近ければ近いほど格子が細くなる3次元不等間隔格子とする (図4)。

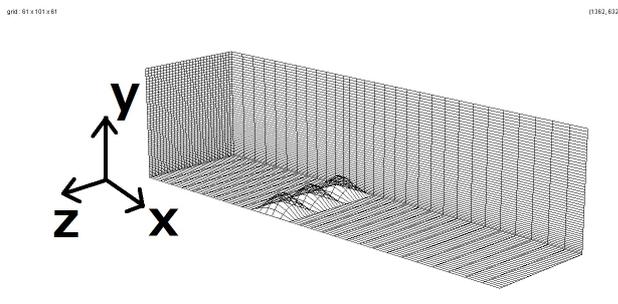
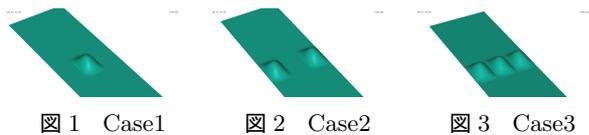


図4 計算格子 (Case3)

4 計算方法

4.1 基礎方程式

山越え気流は風速が大きいいため、圧力をかけても縮まない非圧縮性の流れとみなすことができる。そこで、連続の式 (1)、非圧縮性 Navier-Stokes 方程式 (2)、温度偏差に関する方程式 (3)、水蒸気量に関する方程式 (4) の4式を支配方程式とし、フラクショナル・ステップ法を用いて解いた。

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 v + \frac{Gr}{Re^2} Tj \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (v \cdot \nabla) T = \frac{1}{RePr} \nabla^2 T + Q \quad (3)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + (v \cdot \nabla) H = \alpha \nabla^2 H \quad (4)$$

ただし、各方程式は無次元化されており、 j は y 方向の単位ベクトル、 v は速度ベクトル、 t は時間、 p は圧力、 Q は潜熱項、 H は水蒸気量、 α は拡散係数に関する定数、 Re はレイノルズ数、 Gr はグラスホフ数、 Pr はプラントル数とする。

また、温度偏差は、乾燥断熱変化からの温度の偏差であり、

$$T = Ta - (To - \beta y) \quad (5)$$

によって定義した。ただし、 Ta は実際の温度、 To は地表の温度、 β は乾燥断熱減率、 y は高さとする。

さらに本研究では、飽和水蒸気量を

$$Hs = Ho - \gamma y \quad (6)$$

と仮定した。ただし、 Ho は地表の飽和水蒸気量、 γ は飽和水蒸気量の減率とする。(4) によって水蒸気量を計算し、ある点において、 Hs より大きくなったとき、その点で過飽和になったと判断して、潜熱を発生させるとともに、水蒸気量は飽和を超えた分だけ減らす。

4.2 初期条件と境界条件

初期条件としては風はすでに流れていると考え、速度ベクトル $U=1.0, V=W=0$ とする。また、 $\Delta t=0.0002$ 、 $\alpha=0.0001, Re=600, Gr/Re^2=0.9, Pr=0.8, To=20$ とする。

境界条件は地表面は動かないものとし、x方向に無限に計算領域があると考えるという周期条件であるとする。

5 計算結果

5.1 発熱量

どれも極めて似ていたため、Case1の結果のみ載せる。

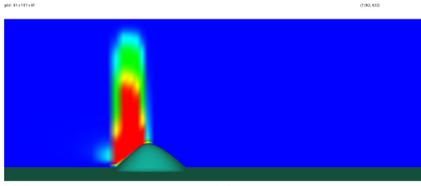


図 5 Case1

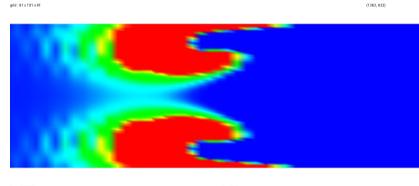


図 11 Case2

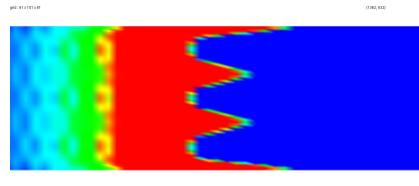


図 12 Case3

5.2 水蒸気量

どれも極めて似ていたのので,Case1 の結果のみ載せる.

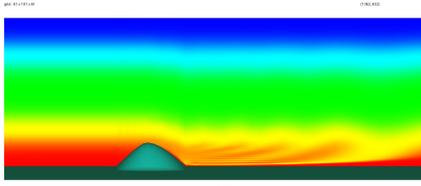


図 6 Case1

5.3 乾燥断熱変化からの温度の偏差

xy 平面でみたとき

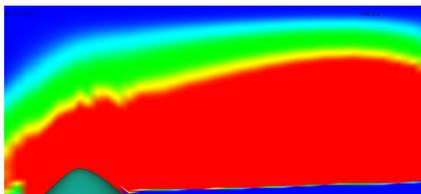


図 7 Case1

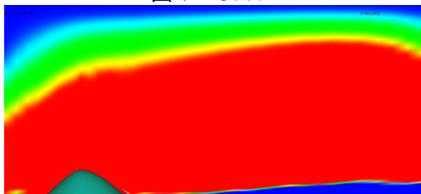


図 8 Case2

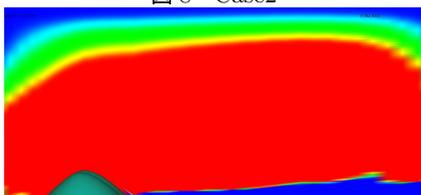


図 9 Case3

xz 平面でみたとき

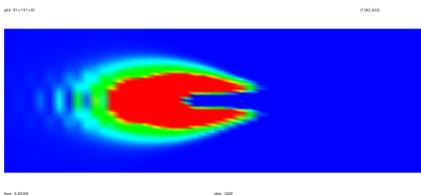


図 10 Case1

6 考察

6.1 発熱量

図 5 から, 山の風上側の斜面で発熱しているのがわかる. これは空気に含まれている水蒸気が凝結して雲が発生するときに出た潜熱であり, 図の赤い部分が雲に対応している.

6.2 水蒸気量

図 6 から, 風下側でははじめは赤かった部分が, 次第に黄色くなっていくのがわかる. これは, 風が山を越えるときに水蒸気が凝結して水蒸気量が少なくなり, それが風下側に降りてくるためだと考えられ, 乾いた風が吹いたということがわかる.

6.3 乾燥断熱変化からの温度の偏差

図 7~9 から,Case1~3 のすべてにおいて, まず山の風上側の斜面の温度が高くなる. これは雲が発生するときの潜熱の影響であると考えられる. その後, 赤い部分は風下側のふもとに向かって下っていきながら遠くへ広がっていく. これより, 山を越えた風は暖かいことがわかる.

同じ時刻で Case1~3 を比較すると, 図 7~9 から, 赤い部分は多い順に Case3,Case2,Case1 となる. これは, 地形によりまわり込む風の影響が少ない順と一致することから, 山が連なっているほうがフェーン現象は激しくなるということがわかる.

図 10~12 から,xz 平面でみると Case1 と Case2 はまわり込む風の影響が大きいため, 温度もまわり込むように高くなっていき, 山がないところは変化があまりみられない. それに対して,Case3 は山が連なっているため, 温度がはじめと比べると高くなっているところが多くなる.

7 まとめと今後の課題

本研究では, 種々の山岳地形から, 発熱量と雲の発生との関係, 水蒸気量, 乾燥断熱変化からの温度の偏差を調べることにより, フェーン現象を検証した. 今後は, 計算領域を大気条件により近づけ, 実際にある地形を再現することや, より複雑な地形を考え, フェーン現象がどのような地形で起こりやすいのかを考えていきたい.

参考文献

- [1] 河村哲也:数値シミュレーション入門, サイエンス社, 2006,ISBN4-7819-1134-X
- [2] 安藤常世:流体の力学, 培風館,2006,ISBN4-563-03411-8
- [3] 山田歩:山越え気流のシミュレーション, お茶の水女子大学卒業研究発表会要旨集,pp.75-76,2010