

種々の山岳地形におけるフェーン現象の数値シミュレーション

理学専攻・情報科学コース 井元 薫

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、これはフェーンがひとつの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 湿ったフェーンのメカニズム

例えば1000mの山があるとし、地表の温度を20℃とする。空気は風上側の山麓ですでに水蒸気で飽和しているとす。風は山にぶつかり上昇気流となり、余分な水蒸気が凝結し、凝結熱を放出するので、上昇に伴う温度の割合が乾燥断熱減率(100mにつき1℃)より小さくなる。これを湿潤断熱減率と言い、100mにつき0.5℃低下するので、山頂では15℃となる。その後、山の風下側では乾燥断熱的に下降する。この場合、100mにつき1℃上昇するので、風下側のふもとでは25℃となり暖かく乾いた風が吹く。

3 モデル化・格子生成

本研究では埼玉県熊谷市から南西10km付近と、山形県山形市から東10km付近の地形を扱う。 xz 平面を地表面、 y 方向を高さとし、前者は x 方向に10km、 z 方向に10km、 y 方向に1.6km、後者は x 方向に10km、 z 方向に10km、 y 方向に6km(標高が高いため)の直方体の計算領域とする。ただし y 方向1番目の格子点に国土院発行の数値地図50mメッシュ(標高)のCD-ROMから標高データを入れる。

いずれの場合も、格子数は x 方向に200、 z 方向に200、 y 方向に25とし、地表に近いほど格子が細くなる3次元不等間隔格子とする(図1, 図2)。

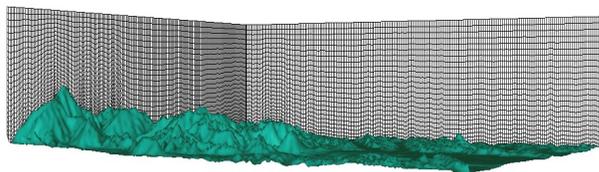


図1 埼玉県熊谷市から南西10km付近

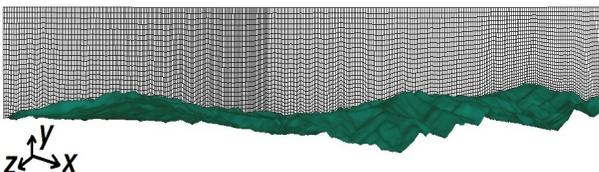


図2 山形県山形市から東10km付近

4 計算方法

4.1 基礎方程式

山越え気流は風速が大きくないため、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式を基礎方程式とし、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 は温度減率を考慮に入れるための項、 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 は地表面からの高さとする。 $To - \beta y$ はまわりの大気(基準温度場)の温度を表し、地表面の温度から乾燥断熱減率的に温度が下がるとする。 T が負ならば大気の成層は安定であり、正ならば不安定である。

さらに本研究では、飽和水蒸気量を

$$Hs = 217.0 \times \frac{e}{T + 273.15} \quad (6)$$

と仮定した。ただし e は飽和水蒸気圧であり、Tetensのパラメータ値による August 他 の式より $e = 6.11 \times 10.0 \frac{7.5T}{T+237.3}$ とする。(4)によって水蒸気量 H を計算し、ある点において、飽和水蒸気量 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、過飽和分を減らし、 $Q = -$ 湿潤断熱減率 \times 高さ方向の流体の移動距離として計算する。 H が Hs 以下の場合には $Q = -$ 乾燥断熱減率 \times 高さ方向の流体の移動距離とする。

4.2 初期条件と境界条件

初期条件は、速度ベクトル $v = (1.0, 0.0, 0.0)$ とする。また、 $\Delta t = 0.001$, $\alpha = 0.0001$, $Re = 100$, $\frac{Gr}{Re^2} = 0.001$, $Pr = 0.8$ とする。海拔0mの初期状態での温度を20℃とする。湿った空気を与え、地面からも水蒸気を供給させることとする。

境界条件は速度については地表面は滑りなし条件、西側の側面は地表面の境界条件を考慮した速度分布、東側の側面は自由流出、上空は一樣流、北側と南側の側面は滑り壁条件とする。圧力、温度、水蒸気の境界条件については、東側と西側の側面は x 方向の変化量がなく、南側と北側の側面は z 方向の変化量がなく、上空間と地表面は y 方向の変化量がないものとする。

5 計算結果

図3, 図4はそれぞれ埼玉県熊谷市から南西10km付近(以下, 熊谷と表記する)と山形県山形市から東10km付近(以下, 山形と表記する)を上空からみた様子である。それぞれについて地点1~3, 4~6を定める。ただし図3, 4はどちらも上が北である。

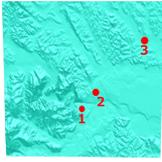


図3 熊谷

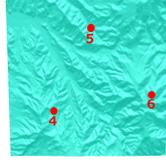


図4 山形

5.1 雲の発生

雲の発生を各地点を通る山の断面で示す。水蒸気量と飽和水蒸気量の差を表し, 赤色に近づくほど水蒸気が凝結し雲が発生している。代表して図3の地点2, 図4の地点6を通る断面での結果を載せる。



図5 熊谷(地点2を通る断面)

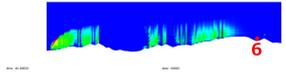


図6 山形(地点6を通る断面)

5.2 乾燥断熱変化からの温度偏差

温度偏差を各地点を通る山の断面で示す。青色に近づくほど大気成層が安定, 赤色に近づくほど不安定である。代表して図3の地点1, 図4の地点4を通る断面での結果を載せる。

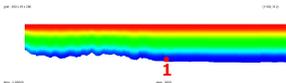


図7 熊谷(地点1を通る断面, 2000ステップ)

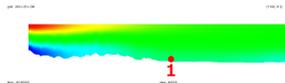


図8 熊谷(地点1を通る断面, 40000ステップ)

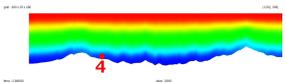


図9 山形(地点4を通る断面, 2000ステップ)

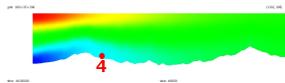


図10 山形(地点4を通る断面, 40000ステップ)

5.3 大気の温度

各地点の変化は図11, 図12の通りである。縦軸は温度(°C), 横軸は時間ステップ(×1000ステップ)で, 2000ステップから40000ステップまで1000ステップごとの変化である。40000ステップは実時間の約16.7分に相当する。

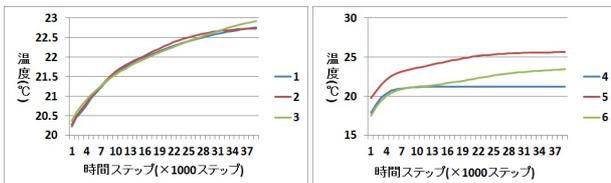


図11 熊谷

図12 山形

6 考察

6.1 雲の発生

どの地点を通る断面でも雲が風上側の斜面で発生していることがわかる。例えば図5のように熊谷の地点1~3では徐々に雲が消えていくが, 図6のように山形の地点4~6では雲が多く発生し続ける。山形の方が熊谷よりも標高が高く斜面も広いので過飽和分の水蒸気量が多くなるためと考えられる。

6.2 乾燥断熱変化からの温度偏差

どの地点を通る断面でも例えば図7, 図9のように地表に近いところでは大気成層が安定し, 標高が高くなるほど不安定であるが, その後, 図8, 図10のように風下側で定常状態へと広がっていくことがわかる。

6.3 大気の色

熊谷の地点1~3について, 図11のようにどれも温度が約3°C上昇したあとに定常状態になる。どのグラフもほぼ同じ形をしているのは地点1~3の標高が海拔89m, 64m, 44mであり, 山々も200m級と差があまりないためだと考えられる。また, 2章の湿ったフェーンのメカニズムから200mの山のときはフェーンによって約1°C上昇するという計算になるが, 熊谷ではこれよりも高く上昇している。これは実際の地形では山が多く連なっているため影響を大きく受けているためだと考えられる。

山形の地点4~6について, 図12のように地点5と地点6は温度がそれぞれ約5.9°C, 約4.8°C上昇したあとに定常状態へと向かっていく。地点4は温度は約3.3°C上昇してすぐに定常状態となる。地点4と地点6を比べると, 標高はそれぞれ891m, 957mとそれほど差はないのではじめの温度がほぼ等しいが, 地点6はちょうど山と山の間であるのに対して, 地点4は斜面を下る途中であるので地点6ほど温度が上がらなかったと考えられる。また, 温度上昇の度合い(傾き)は山形の方が大きい。

5.2の乾燥断熱変化からの温度偏差と合わせて見ると, 図8や図10のように地点1~6で大気成層が定常状態となっているとき, 図11と図12で温度変化も定常状態であることが確認できる。

以上より, 標高が高く, ひとつひとつの山が大きく斜面が広い山のふもとで効果的にフェーン現象が起きると推測される。

7 まとめと今後の課題

本研究では, 日本の山岳地形から, 雲の発生, 乾燥断熱変化からの温度偏差, 大気の色変化を調べることにより, フェーン現象を詳しく検証した。また, 効果的にフェーン現象が起きる条件を考えた。しかし, これについてはさらに別の条件もあると考える。

今後は, 計算をさらに長い時間でできるようにすること, 計算領域を大気の色により近づけること, 他の地域の地形についてもフェーン現象を解析することで, フェーン現象がどのような地形で効果的に起きやすいのかさらに考えていきたい。

参考文献

- [1] 河村哲也:流体解析I, 朝倉書店, 2000, ISBN4-254-11402-8
- [2] 渡来靖, 中川清隆, 福岡義隆: 2009年2月20日における関東平野北西域での急激な昇温に関する数値シミュレーション, 地学雑誌, Vol120, No.2, pp.296-308, 2011