

山形県内における降雪域形成の数値シミュレーション

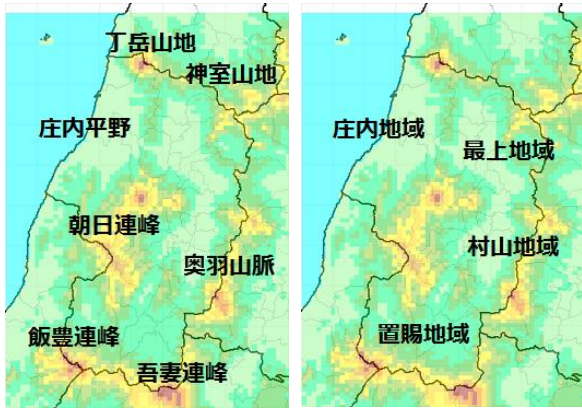
高野 哲夫

1. 諸言

東北地方南部の日本海側に位置する山形県は、北に丁岳山地と神室山地、東に奥羽山脈、南に飯豊山地と吾妻連峰、県央には朝日山地が連なり、その地形は起伏に富んでいる。山形県は庄内・最上・村山・置賜の4地域に分けられる(第1図)。

筆者は長年に渡り、山形県南部の置賜地方における局地風の数値モデルの独自開発を試み(高野 2007)、局地風の特性とフルード数の関係について解析を行ってきた(高野 2009)。高野(2014b)では新たに比湿の輸送方程式および凝結・降水過程の計算スキームを導入し、季節風の強い場合と弱い場合の降水域形成の再現実験を試みた。

今回は、最新の研究成果について報告する。



第1図 山形県内の主な地形

2. 理論解析と数値実験の概要

本研究では、非圧縮性ナビエ・ストークス方程式(1)と熱エネルギー方程式(2)および比湿の輸送方程式(3)からなる連立非線形偏微分方程式を用いた。但し、相変化に伴う物理過程は考慮しないものとした。

[非圧縮性ナビエ・ストークス方程式]

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - f \bar{u}_j (\delta_{i2} \delta_{j1} - \delta_{i1} \delta_{j2}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) + \frac{\bar{\theta}}{Fr^2} \delta_{i3} \quad (1)$$

[熱エネルギー方程式]

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{1}{Pr Re} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_j \theta}) \quad (2)$$

[比湿の輸送方程式]

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{q}}{\partial x_j} = Q \quad (3)$$

[無次元数の定義]

$$Re = \frac{U_0 H_0}{\nu} \quad (4)$$

$$Fr = \frac{U_0}{\sqrt{H_0 g \Delta \theta / \theta_0}} \quad (5)$$

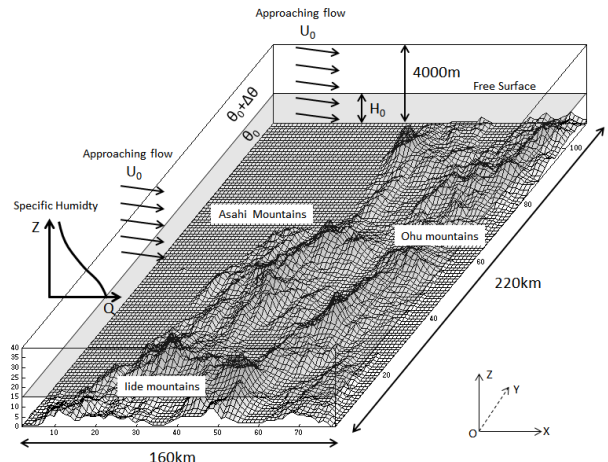
ここで、 t は時間、 x_i, x_j は東西、南北および鉛直方向の変位、 u_i, u_j は東西、南北および鉛直方向の各速度成分、 p は圧力、 θ は温位、 q は比湿、 Q は降水過程に伴う生成項、 g は重力加速度、 f はコリオリパラメーター、 Re はレイノルズ数、 Fr はフルード数、 Pr はプラントル数、 δ_{i3} はクロネッカーのデルタ、 ν は粘性係数、 U_0 は代表速さ、 H_0 は代表長さ、 θ_0 は基準温位、 $\Delta \theta$ は温位差であり、変数の上にある“—”は空間フィルタリング処理を表す。

3. 計算スキームの概要

第2図に数値モデルのイメージを記す。高度 H_0 より下層の温位は θ_0 、上層の温位は $\theta_0 + \Delta \theta$ で各々様となる二層構造を仮定し、この境界面を逆転層に相当する自由表面として扱った。この構造は浅水流理論による山越え気流の解析モデル(例えば山岸 2002)に基づいた。計算スキームは平野(2001)などを参考に以下のように設定した。

格子系は等間隔のスタaggered格子(Arakawa C)系を使用し、圧力解法はMAC(Marker And Cell)法を使用した。方程式の離散化は、移流項に3次精度風上差分法(UTOPIAスキーム)、粘性項に2次精度中央差分法を各々使用し、時間発展には4次精度のルンゲ・クッタ法を使用した。また、乱流モデルには標準型スマゴリンスキーモデルおよび温度場0方程式モデル(数値流体力学編集委員会 1995)を使用した。

数値計算に際しては、山岳地形はボックスとして表現した。初期条件・境界条件でボックス上の各速度成分をゼロとして扱い、内部の温位も θ_0 で一定と扱うことで地形の影響を計算に反映している。比湿はボックスの内外を区別していない。



第2図 山形県内の3次元熱流体数値モデル(イメージ)

4. 凝結・降水過程の取り扱い

凝結・降水過程は河村（2005）を参考に、タイムステップ毎に次のような計算を行った。

ある空間に含み得る比湿 q には限界値（飽和比湿 q_s ）が存在し、 $q \geq q_s$ であれば自動的に凝結量 $q' \equiv q - q_s$ を生じるものとする。さらに落下率 α （凝結量 q' の内、地上に落下する割合）、タイムステップ間隔 Δt において $q'\alpha\Delta t$ が凝結後、瞬時に直下の地上に落下するものとした。

この落下に伴う大気中の比湿の減少が輸送方程式（3）の生成項 Q に相当する。この時間 Δt に当たりの落下分 $q'\alpha\Delta t$ を地上降水量として順次積算していく。その一方で、 $q'(1-\alpha\Delta t)$ は大気中に残り、引き続き式（3）に従って輸送される。この時、式（3）は生成項 $Q=0$ として扱うため実質的には移流方程式として計算している。本研究では降水量を無次元量として扱った。

尚、上記以外の物理過程は考慮していない。

5. 数値実験

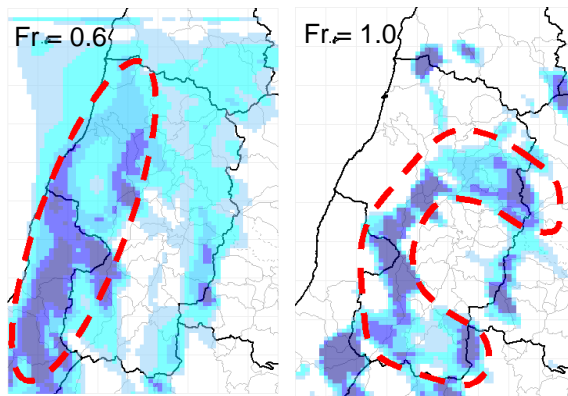
本研究では、高野（2014）に従って季節風の風向が西北西の場合を想定し、フルード数 $Fr = 0.6 \sim 1.0$ の条件で数値計算を行った。

5.1 数値実験による特徴の再現

本モデルによる計算結果を第4図に示す。

フルード数が低い場合（左： $Fr = 0.6$ ）は西北西寄りの季節風が弱い場合に相当する。降水域は朝日連峰の風上側を中心に広がり、内陸側への顕著な進入は見られない。季節風の内陸側への進入は、朝日連峰や飯豊連峰によって妨げられている。

一方で、フルード数が高い場合（右： $Fr = 1.0$ ）は西北西寄りの季節風が強い場合に相当する。降水域は朝日連峰を南北に迂回するように内陸側に向かって広がる。このパターンでは、吾妻連峰付近の北側に位置する米沢盆地周辺でも降雪しやすくなる。



第3図. 数値実験の結果(降水量) (左:Fr=0.6, 右:Fr=1.0)

5.2 観測事例に見る特徴

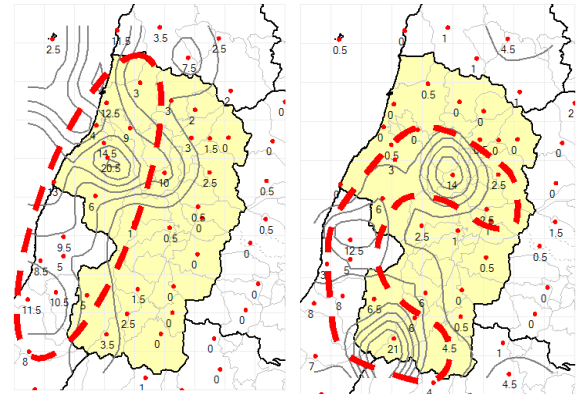
山形県内の冬季の夜間の12時間降水量の事例を第4図に示す。左側は2013年01月16日21時～翌17日09時、右側は2013年01月17日21時～翌18日09時を対象としている。

両ケースの秋田の850hPa等圧面における風速を見ると、左側は7～10m/s、右側は9m/s～14m/sであった。上空850hPa等圧面の風は、冬の季節風の目安として見た

め、左側はフルード数が低い場合、右側はフルード数が高い場合の特徴に各々相当する。

左側の降水域は、朝日連峰よりも海側を中心に広がり、内陸側への広がりがあまり見られない。その一方で、右側の降水域は、朝日連峰の北東側と南東側の内陸部へと深く広がろうとしている様子が見られる。

以上の特徴は第3図と一致している。



第4図・山形県内の冬季の夜間の12時間降水量 (mm)

(左) 2013年01月16日21時～翌17日09時

(右) 2013年01月17日21時～翌18日09時

6. 謝辞

本研究の参考文献・高野（2007）に対し、日本気象予報士会（現・一般社団法人日本気象予報士会）より木村賞を賜った。記して謝意を表す。

7. 参考文献

- 平野博之, 2001: 流れの数値計算と可視化—Tecplotで視る流体力学—. 丸善, 208pp.
- 河村哲也, 2005: 流れのシミュレーションの応用! (コンピュータ環境科学ライブラリー④). 山海堂, 123-124.
- 数値流体力学編集委員会, 1995: 乱流解析 数値流体力学シリーズ3. 東京大学出版会, 67-96, 223-288.
- 高野哲夫, 2007: 熱輸送を伴う3次元乱流数値シミュレーションを用いた山形県置賜地方における冬季局地風の解析. てんきすと, (48), 8-11.
- 高野哲夫, 2008: 山形県置賜地方における冬季局地風の力学的機構とフルード数の関係. 日本気象学会2008年度秋季大会講演予稿集, P161.
- 高野哲夫, 2009: 3次元熱流体数値モデルの独自開発—山形県置賜地方の冬季局地風への適用—. 天気, (56), 471-476.
- 高野哲夫, 2013a: 山形県内の冬の季節風と降雪傾向の関係. 日本気象学会2013年度春季大会講演予稿集, P407.
- 高野哲夫, 2013b: 山形県置賜地方における降雪量と時間帯の関係. 日本気象学会2013年度秋季大会講演予稿集, P101.
- 高野哲夫, 2014a: 山形県内における冬季の季節風と夜間の気温分布の関係. 日本気象学会2014年度春季大会講演予稿集, P439.
- 高野哲夫, 2014b: 山形県における冬季の降水域形成の数値実験. 天気, (61), 499-503.
- 山岸米二郎, 2002: 気象予報のための風の基礎知識. オーム社, 50-56, 178-182.

(ほか多数)