

フルード数が内陸豪雨に到る地形に沿う水蒸気流入へ与える影響と地球温暖化による変化 The Impact of the Froude number on Water Vapor Inflow along Terrain into Inland Heavy rainfall and the Changes due to Global Warming

○神谷太雅・仲ゆかり・中北英一

○Taiga KAMIYA, Yukari NAKA, Eiichi NAKAKITA

In Baiu season in Japan, a lot of heavy rainfall events have occurred including in the inland area. For the occurrence and maintenance of the rainfall, the water vapor inflow is much important. The large-scale water vapor inflow could be branched out by the terrain, and it could penetrate into the inland rainfall area. In addition, for terrain-forced flows, the size of the Froude number affects the flow around the terrain. By the critical Froude number which flow can accelerate along the terrain, the inflow path can be visualized. It can be considered that the airflow having the critical Froude number has the potential to penetrate the terrain and supply vapor to inland areas. Moreover, the frequency of the critical Froude number will increase due to global warming, which suggests the occasion that water vapor is supplied inland will increase and lead to an increase of rainfall in the future.

1. はじめに

梅雨期には線状対流系とよばれる局所的な豪雨が内陸を含め発生し、甚大な被害を引き起こしている。梅雨期には、梅雨前線に向かって、太平洋高気圧の縁辺を大量の水蒸気が流れ込むことで、豪雨を誘発する環境が生じる。この大規模な流入は大気の川とも呼ばれ、この流入なしでは豪雨は発生、維持が難しくなる。この大気の川は、地形によって分岐して水蒸気が内陸部へと侵入していくことで、内陸の豪雨を引き起こしていると考えられるが、この点について着目する研究は少ない。そこで本研究では地形まわりの水蒸気流れについて着目し、どのような状況下で地形により分岐され地形の狭間へと侵入していくのかについての理解を深めることを目的とする。更に、地球温暖化により梅雨豪雨が変化すると明らかになっていることを踏まえ、地形に沿う水蒸気の流入過程についても変化が起こるのではないかと考え、将来変化についても検討した。

本研究は地形が障害物となる流れを規定する重要な無次元数であるフルード数に着目する。 $Fr = U/Nh$ で定義され、風速 U と山の標高 h 、また大気の安定度を表すブランチパイサラ振動数 N のバランスによって変化する。フルード数の大きさの違いにより流体の挙動は変化するため、この特性が地形と地形の間を通り抜けることに意味を持つと考え研究を進めてきた。

2. フルード数により可視化される水蒸気流入

Gabersek and Durran (2004)では、理想的な地形を用いた数値実験により、地形に挟まれた gap を通り抜ける gap wind の挙動がフルード数の大小により異なることが示されている。その中でも、地形に沿い奥に進むにつれ加速が生じるレジームが、フルード数が 0.35 から約 0.7 のときに発生するといわれている。流体力学的に、フルード数が 1 以下の時は常流となり、gap の中心部において速度が最大となるが、その中でも地形の奥まで加速が起きるレジームこそが、地形によって分岐して内陸へと侵入する過程に対して重要なのではないかと仮説を立てた。このフルード数の幅を以後、クリティカルなフルード数と呼ぶ。

そこで、気象庁メソ数値モデル MSM の解析値を用いて内陸で局所的な豪雨が発生している事例に対して、クリティカルなフルード数を少し幅を持たせて空間的に描画した。フルード数の計算において、紀伊水道を挟む紀伊山地、四国山地の山々の平均標高と概ね一致する 1000m を全域に用いており、風速や安定度などは 1000m 以下の平均値を代入する。フルード数を算出するにあたり、gap に垂直に流入する風速が重要なため、南風成分のみを用いている。図 1 では 2012 年の 7 月に内陸の京都で発生した亀岡豪雨の発生 3 時間前でのフルード数の空間分布を示している。水蒸気フラックスが豪雨域に流れ込む様子が確認できた紀伊水道

において、クリティカルなフルード数が豪雨域に達する筋のように伸びていることがわかる。この様子は 2012 年の宇治豪雨で紀伊水道において同様の筋道が確認でき、2014 年の広島豪雨においても豊後水道で見える。

さらに、MSM の解析値を SOM クラスター分類することによって、この傾向が多くを観測において当てはまるものであるのかを検討した。2010 年から 2021 年の 6 月～8 月における、地表面水蒸気フラックスの水平分布と、フルード数の水平分布をクラスター分析した結果、水蒸気フラックスが紀伊水道に入り込む大気場パターンでは、クリティカルなフルード数が紀伊水道において道筋を表していることが期待通り確認できた。そのようなクラスターに内陸の豪雨事例は分類されており、大まかな傾向を捉えることができた。また、南風ではあるにも関わらず、水蒸気フラックスが紀伊水道に入り込んでいないクラスターでは、フルード数がクリティカルな下限を満たしていないことが確認できた。

更に、メソ大気モデル CReSS を用いて、紀伊水道に一樣な流入を与えたところ、クリティカルなフルード数の範囲内である $Fr = 0.51$ の状況において、紀伊水道に沿った加速が確認できた。

このような結果から、地形と地形の間で加速する挙動を示すクリティカルなフルード数を持つ流入が、内陸へと地形に沿って侵入していくことに大きな意味をもつことがわかる。クリティカルなフルード数をもつ大気が、地形に沿って強く流れ、大気の川が分岐して地形の間を侵入して内陸まで水蒸気を供給していると考えられる。この侵入が豪雨にとっての必要条件であると示唆され、フルード数が水蒸気流入に対する一つの指標であると提案する。

3. 地球温暖化による将来変化

次に、地形に入り込む流入をクリティカルなフルード数が捉えた結果を踏まえて、地球温暖化によって流入過程がどのように変わるのかについて解析を進めた。5km 領域気候モデルでの、現在 20 年×2 アンサンブル、将来 20 年の 2 度上昇シナリオによる 1 アンサンブル、4 度上昇シナリオの 4 アンサンブルデータを用いて比較を行う。紀伊水道の入り口でフルード数の領域の平均値を取り、6～8 月でどのような頻度分布を示すかを解析した。結果は、将来のほうがクリティカルなフルー

ド数を示す頻度が増加し、紀伊水道を奥に侵入していく頻度が増加することを示唆していた。更に、南風そのものの頻度も増加していたが、**図 2** で示すように南風の条件付きの頻度においてもクリティカルなフルード数を示す頻度が増加していた。これは、豪雨が地球温暖化により増加するという既往研究と一貫性を持っており、水蒸気が流入する頻度が増えることで豪雨もより起きやすくなっていると考えられる。

4. 結論

地形の間を抜けて侵入する流れは、クリティカルなフルード数によるものが大きいことが分かり、内陸で豪雨が発生することに重要であることが明らかとなった。そしてその発生頻度は地球温暖化により増加すると考えられ、内陸での豪雨の増加を示唆している。

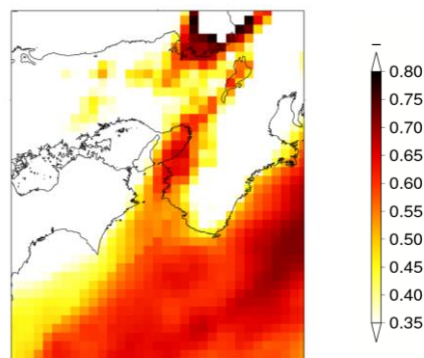


図 1 クリティカルなフルード数付近のみを描画空間分布。

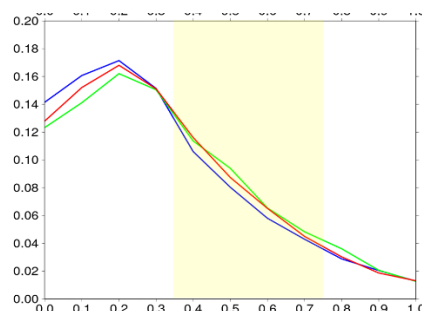


図 2 紀伊水道の入り口におけるフルード数の発生頻度の変化。横軸：フルード数の大きさ。青：現在気候、緑：2°C 上昇シナリオ、赤：4°C 上昇シナリオ。

参考文献

- 1) S. Gabersek and D. R. Durran: Gap Flows through Idealized Topography. Part I: Forcing by Large-Scale Winds in the Nonrotating Limit, Journal of the Atmospheric Sciences, 2846-2862, 2004.