

## 2010年のロシア熱波とパキスタン豪雨の発生メカニズムと因果関係の検討

(Study of Occurrence Mechanisms and Relativity of The 2010 Russian Heat Wave and Pakistan Flood)

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 竹内大輝 (Daiki Takeuchi)  
 北海道大学大学院工学研究院 Murad Ahmed Farukh  
 北海道大学大学院工学研究院 正員 山田朋人 (Tomohito J. Yamada)

## 1. はじめに

2010年7月中旬から8月中旬にかけて、ロシア西部を襲った記録的な熱波が干ばつと山火事を誘発した。世界気象機関(WMO)によると、山火事は5000km<sup>2</sup>以上の範囲で発生し、熱波による死者は15,000人以上、経済損失は150億米ドルに上った。さらに、7月の平均気温は1880年以降で最も高い観測値を記録した。一方、同時期にパキスタン北部を襲った豪雨により、インダス川流域では観測史上最大の洪水に見舞われた。流域全体では2000万人の人が被災し、死者1900人以上、損壊家屋は190万戸に上り、経済損失は約400億米ドルと言われている。

2010年に発生した2つの極端現象の特徴としては、i)同一期間(2010年7月から8月)に異なる場所で発生したこと、ii)長期間同じ気象状態が続いたことが挙げられる。2010年7月10日から7月24日における2m高さ気温の平年偏差を図-1(a)に示す。これより、ロシア熱波が広範囲で起きたことが確認される。2010年の西ロシア(図-1(a)の黒枠の内側)の気温の領域平均(図-1(b))を見ると、5月から9月にかけて平年よりも高く、特に7月、8月は平年よりも5°C以上高い日が続いた。

一方、2010年7月25日から8月8日の降水量の平年偏差を図-1(c)に示す。同図より、パキスタン北東部に平年より約12mm/day多い降水量が確認できる。これは15日間で平年よりも180mm多い降水量を記録したことになる。パキスタンの年降水量が346mmであることより、年降水量の約50%に当たる雨量が短期間にもたらされたことを意味する。

過去の研究によりKoster et al. (2004)<sup>2)</sup>、Yamada et al. (2005)<sup>3)</sup>はインダス川流域において土壌水分量が降水活動に顕著な影響を与えることを示唆している。アメリカ航空宇宙局(NASA)<sup>4)</sup>とLau and Kim (2012)<sup>1)</sup>は2010年のロシア熱波についてブロッキング高気圧の発生と、西ロシアにおいて平年以下の土壌水分量の地域が拡大したことによる地表面から大気への顕熱輸送量の増加が熱波の発生原因であると指摘し、パキスタン豪雨については季節風の北への蛇行に伴うベンガル湾からの平年よりも大量の水蒸気輸送と、ヒマラヤ山脈に沿って平年以上の強力な南東方向の気流が現象の拡大をもたらしたのではないかと指摘している。しかしながら、上記2つの極端現象の物理的関連性及び、地表面状態の影響について述べた研究は存在しない。

本研究は2010年のロシア熱波とパキスタン豪雨の発生メカニズム及び2つの極端現象の関連性の解明を目的とする。2章では、使用するモデル及びデータの説明を

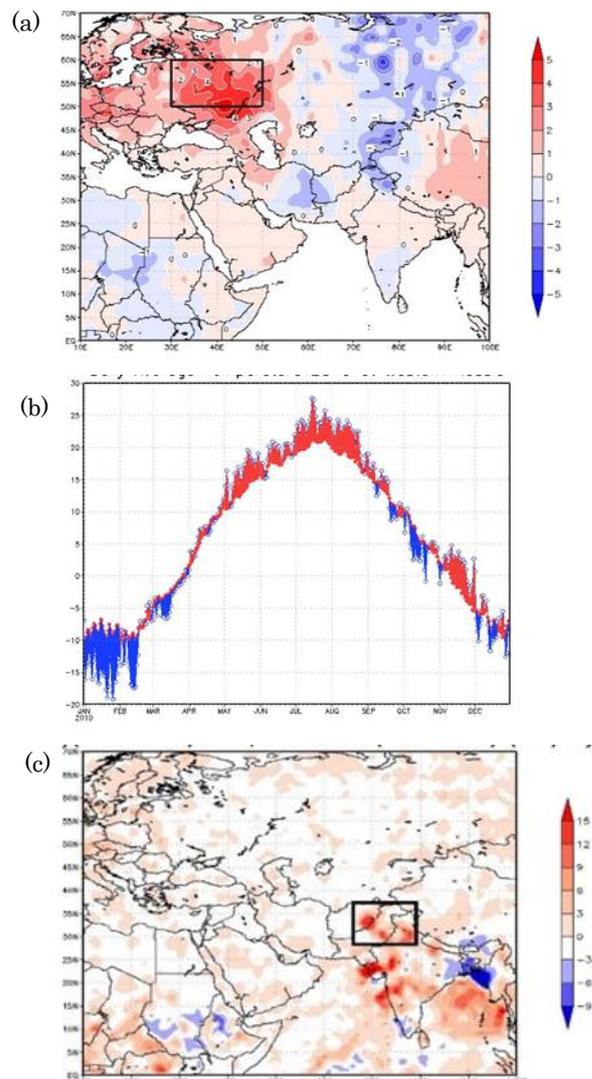


図-1 (a) 2010年7月10日から7月24日までの2m高さ気温の平年偏差(°C)。 (b) 2010年各日ごとの2m高さ気温(°C)と平年値の領域平均。青い領域は、2010年の2m高さ気温が平年以下であることを、赤い領域は2010年の2m高さ気温が平年以上であることを表す。平均をとった領域は(a)の黒い枠で囲まれた範囲(30°E-50°E、50°N-60°N)である。 (c) 2010年7月24日から8月8日までの降水量の平年偏差(mm/day)。いずれも大気再解析データをもとにしたSheffield et al.(2006)を使用。なお平年偏差及び平年値は1997年から2010年とする。

行い、3章で得られる結果について考察し、まとめを4章に記す。

## 2. 使用データ

### 2.1 大気データ

本研究において使用した大気データは National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research (NCEP-NCAR)再解析データ、Sheffield et al. (2006)による3時間ごとの1°メッシュ全球大気データである。ジオポテンシャル高度、風速、比湿のデータはNCEP-NCAR再解析データを、2m高さの気温、降水量データにはSheffield et al. (2006)による再解析データを用いた。このSheffield et al. (2006)のデータは再解析データと観測データを組み合わせたデータセットで、降水強度や地表面近くの気温や風速といった再解析値の偏りを修正している。降水データにはGlobal Precipitation Climatology Project(GPCP)による日降水量とTropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 3時間降水量を用いている。

### 2.2 海面水温データ

海面水温データにはアメリカ海洋大気庁(NOAA)の1982年から2013年の海面水温月間平均データを用いた。なお、このデータはインド洋における2010年7月の海面水温の平年偏差、アラビア海、ベンガル湾及びNINO3.4海域(南緯5°-北緯5°、西経120°-170°)の海面水温の平年偏差における領域平均の解析に用いた。

## 3. 結果と考察

### 3.1 海面水温の特徴

インド洋における2010年7月の海面水温の平年偏差を図-2(a)に示す。これよりインド付近のベンガル湾とアラビア海では約1°C海面水温が高い。ここで、インド洋の海面水温の上昇はラニーニャ現象に起因していることが多いことに着目する。一般的にラニーニャ年の抽出にはNINO3.4海域の海面水温の平年偏差が用いられる。そこで、NINO3.4海域の海面水温の平年偏差を図2(b)に示す。NINO3.4海域において2010年の海面水温は平年よりも約1.5°C低くなっている。Golden Gate Weather Serviceによると1.5°C以上海面水温が平年よりも低い年は顕著なラニーニャ年と定義されている。

アラビア海及びベンガル湾の海面水温の平年偏差の推移を図2(c)、図2(d)に示す。アラビア海及びベンガル湾において約1°C平年より海面水温が高い年は2010年以外には存在しない。従って、2010年のパキスタン近海の海面水温は極めて高く、それ故に大気中への水蒸気供給量も多かったのではないかと考えられる。つまり、海からの水蒸気供給量が平年よりも多くなったことがパキスタン豪雨を引き起こす1つの要因となったであろう。

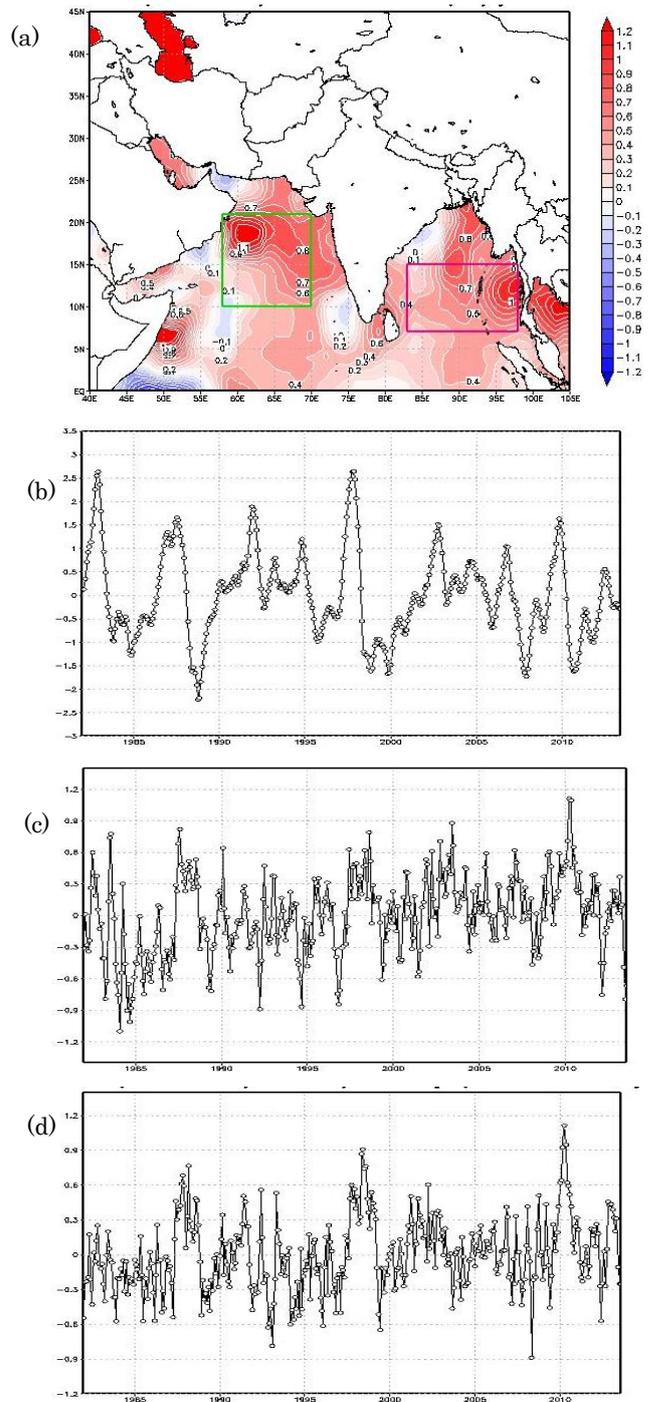


図-2 (a) 2010年7月における海面水温の平年偏差。(b) Nino3.4領域における3か月平均海面水温の平年偏差。(c) アラビア海(a図の緑枠内)における月平均海面水温の平年偏差。(d) ベンガル湾(a図の赤紫枠内)における月平均海面水温の平年偏差。それぞれの海面水温の平年偏差の単位は°C、平年値は1982年から2013年の平均値。いずれの解析にもアメリカ海洋大気庁(NOAA)海面水温データ使用。

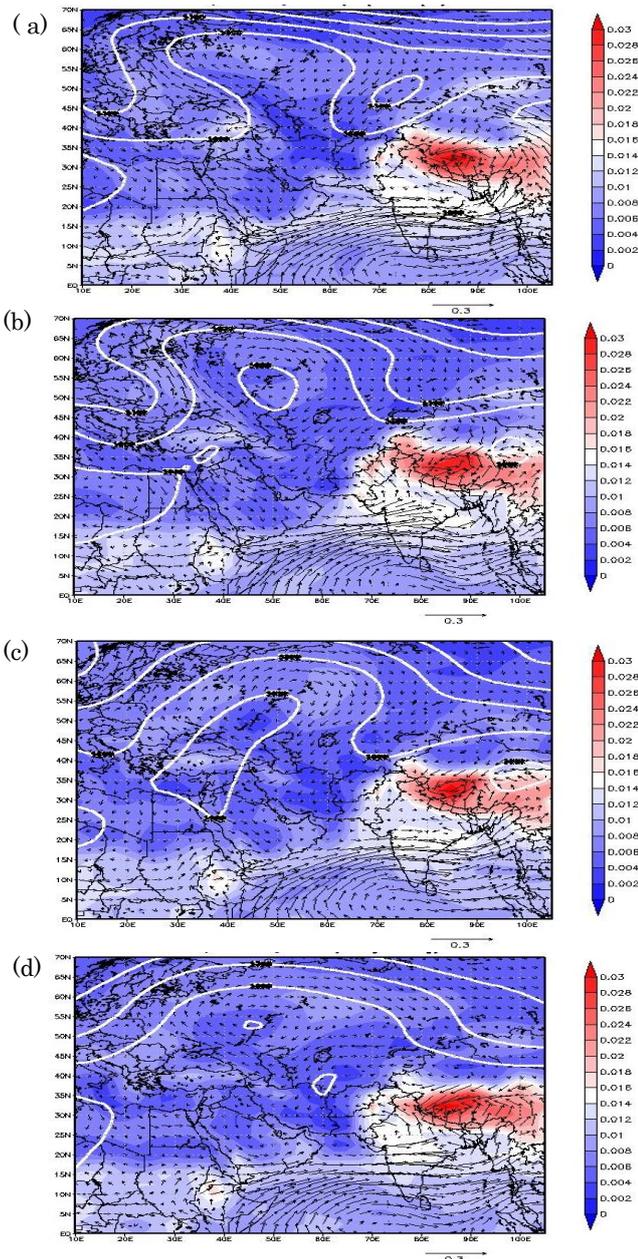


図-3 色は 850hPa 面の比湿(kg/kg)。等値線は 500hPa 面ジオポテンシャル高度(m)。ベクトルは水蒸気フラックス。期間は(a) が第一期間(2010年7月24日~7月26日)、(b) が第二期間(2010年7月27日~7月29日)、(c) が第三期間(2010年7月30日~8月1日)、(d) が第四期間(2010年8月2日~8月4日)。使用データは NCEP-NCAR 再解析データ。

### 3.2 ブロッキング高気圧

2010年7、8月における比湿(850hPa面)、ジオポテンシャル高度(500hPa面)、並びに水蒸気フラックス(850hPa面)を図3に、それらの年平均偏差を図4に示す。ここでは期間を4つに分けており、第一期間を2010年7月21日から7月23日、第二期間を2010年7月24日から7月26日、第三期間を2010年7月27日から7月29日、第四期間を2010年7月30日から8月1日と定義する。

同図よりジオポテンシャル高度から、ブロッキング高

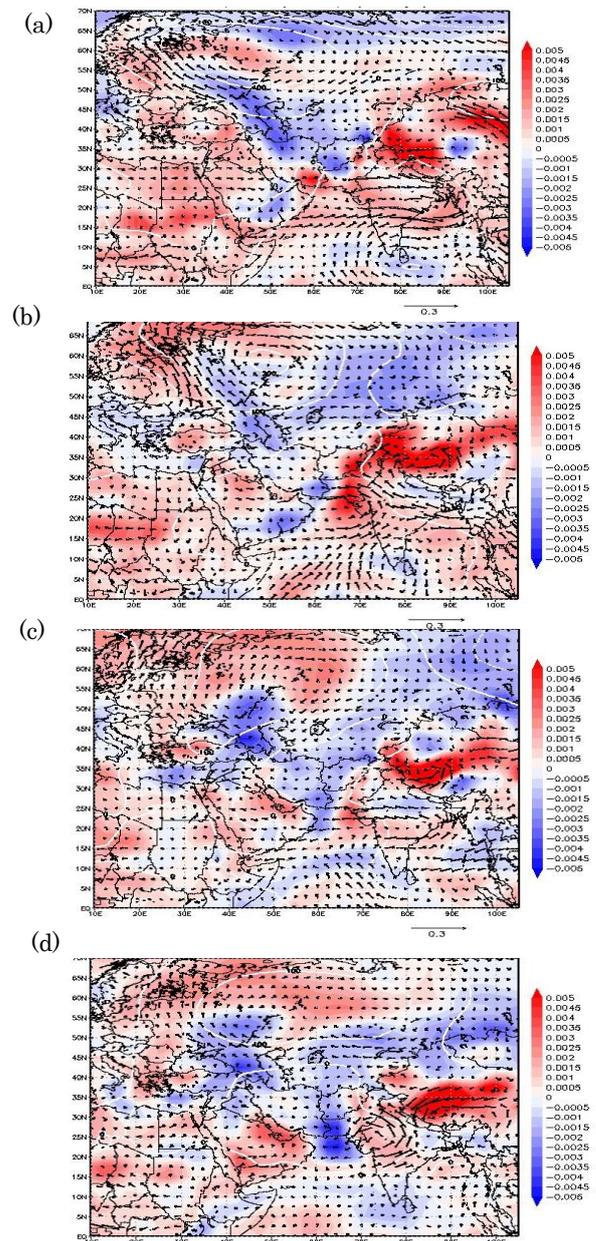


図-4 色は 850hPa 面の比湿(kg/kg)の年平均偏差。等値線は 500hPa 面ジオポテンシャル高度(m)の年平均偏差。ベクトルは水蒸気フラックスの年平均偏差。期間は(a) が第一期間(2010年7月24日~7月26日)、(b) が第二期間(2010年7月27日~7月29日)、(c) が第三期間(2010年7月30日~8月1日)、(d) が第四期間(2010年8月2日~8月4日)。なお年平均偏差は 1979年から 2012年の平均とする。使用データは NCEP-NCAR 再解析データ。

気圧がジェット気流の蛇行を生み、その高気圧が長期間同じ場所に居座り続けたことがロシア熱波の原因であると考えられる。図1(a)と比較するとちょうど熱波の起きた地域と2m高さの気温の高い地域が一致している。なお、このブロッキング高気圧がパキスタン上空の500hPa面にて下降し、ヒマラヤ山脈にさしかかるところで上昇したことがわかったが紙面の都合上図は割愛する。

2010年のロシアの気温(図-1b)は5月頃から平年より高かったため、ブロッキング高気圧発生以前から乾燥傾向が示されていたと考えられる。そこに、ブロッキング高気圧が発生し、下降気流を生むことにより上空から乾いた空気を地表面へと運ぶ。下降気流は地表面付近にて大気を圧縮し、気温の上昇を促し、さらに土壤水分を奪う。潜熱フラックスを上回る顕熱フラックスにより、大気がさらに暖まり、地上と上空の温度差がブロッキング高気圧はさらに勢力を強める。そのブロッキング高気圧がより上空の乾いた空気を地上付近へと運び、土壤を乾燥させ、さらなる気温上昇を招く。このようなサイクルが発生し、2010年、ロシアにて記録的な熱波が発生したのではないかと考察する。

### 3.3 水蒸気フラックス

図3、図4のベクトルは水蒸気フラックスの第一期間~第四期間における平均と平年偏差を示す。これより、第一期間から第四期間ではアラビア海からベンガル湾にかけての水蒸気輸送量が大きいことがわかる。これは上述した2010年がラニーニャ年であったことによる高い海面水温が両海域から蒸発した水蒸気量の増加を招き、季節風がアラビア海からベンガル湾へと向かって吹く際、それぞれの海域上空の大量の水蒸気を運んでいるためであろう。第一期間における水蒸気輸送の平年偏差はベンガル湾からヒマラヤ山脈沿いにパキスタンへ向かう流れ、すなわち季節風の北西への蛇行が同期間において強かったことを示している。第一期間から第二期間、第三期間へと進むにつれてその傾向はさらに強くなっている。

第三期間では季節風の北方への蛇行によりパキスタンへと運ばれた水蒸気がカラコルム山脈へと向かう様子が見られる。また、パキスタンからカラコルム山脈へと向かうにつれて、標高は急激に上昇する。つまり、パキスタンへ運ばれた水蒸気が標高の急激な変化により雲へと成長したのではないかと推測できる。第四期間に移るとその傾向は弱まっている。2010年7月下旬から8月上旬にかけて、温暖で湿った空気が季節風の蛇行によりパキスタン上空に運ばれたことはパキスタンの洪水を引き起こした一つの要因であろう。

### 3.4 ロシア熱波及びパキスタン豪雨の発生メカニズムの考察

3.1~3.3節の結果より、ロシア熱波及びパキスタン豪雨の発生要因について以下のことが考察される。

- ・ロシア熱波：2010年のロシア西部における気温が高く、土壤水分が乾燥していたという条件、さらにブロッキング高気圧が居座り続けたという条件が重なり発生した。

- ・パキスタン豪雨：インド洋上にて発生した温暖で湿潤な空気が季節風により運ばれる。一方、ロシア上空で発生したブロッキング高気圧により、寒冷で乾燥した空気が亜熱帯へと運ばれる。以上、2つの空気塊がパキスタン上空で衝突することで豪雨が発生した。

### 4. まとめ

本研究は2010年のロシア熱波とパキスタン豪雨の発生メカニズム検証と両極端現象の因果関係の有無について議論を行った。解析結果から得られた結果を以下に挙げる。

- ・2010年は強力なラニーニャ年であり、インド洋の海面水温と水蒸気量が上昇した。

- ・2010年のロシアは早期から気温が高く、土壤水分の低下を招いた。

- ・2010年にロシア上空にて発生したブロッキング高気圧がロシアにおける気温上昇の要因となった。

- ・季節風の北方への蛇行が暖かい湿潤空気をパキスタンへと運んだ。

以上の結果より、2010年のロシア熱波とパキスタン豪雨の発生プロセスを考察すると、2010年のロシアでは土壤水分の低下が潜熱フラックスを上回る顕熱フラックスを生み、大気の上昇を招く。続いて、ロシア上空にブロッキング高気圧が発生し、さらなる気温上昇を促す。ブロッキング高気圧はロシアの寒冷かつ乾燥した空気をパキスタン上空へと運ぶ。一方、インド洋ではラニーニャ現象により海面水温が上昇し、大気中の水蒸気量が増加する。並びに、インド洋上の水蒸気を輸送する役割を果たす季節風が北方に蛇行する。蛇行した季節風はヒマラヤ山脈に沿ってパキスタン上空へと温暖かつ湿潤な空気を輸送する。ロシア上空より運ばれた寒冷かつ乾燥した大気とインド洋より運ばれた温暖かつ湿潤な大気がパキスタン上空にて衝突することにより、雲の生成を促し、豪雨が発生した。

今後はさらなる解析を行うとともに、土壤水分量の低下と海面水温の上昇が2010年のロシア熱波とパキスタン豪雨にどの程度影響を及ぼしたのかを検討する必要がある。そこで、陸面モデルを用いて現実的な土壤水分データを作成し、全球気候モデル(GCM)にその土壤水分データ及び海面水温データを境界条件として与え実験したものと、それらのデータを境界条件として与えずに実験したものを比較し、土壤水分量及び海面水温と上記の両極端現象との関係を明らかにする。

### 参考文献

- 1) William K. M. Lau and Kyu-Myong Kim, 2012: The 2010 Pakistan flood and Russian heat wave: teleconnection of hydrometeorologic extremes. *J. Hydrometeorology*, 13, 392-403.
- 2) Koster, R.D. and GLACE team.: Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, Vol. 305, pp.1138-1140, 2004.
- 3) Yamada, T., S. Kanae, T. Oki, Contribution of Land Surface States to Precipitation Variability in Boreal Summer with an Atmospheric General Circulation Model. 85th AMS Annual Meeting, San Diego, January 2005
- 4) NASA web page: <http://earthobservatory.nasa.gov/>: Heavy rains and dry lands don't mix: reflections on the 2010 Pakistan flood
- 5) Sheffield, J., G. Goteti, and E. F. Wood, 2006: Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *J. Climate*, 19, 3088-3111.