

Nepal Landslideをもたらしやすいmonsoon循環

Monsoon Circulation that could Induce Landslides in Nepal

谷田貝亜紀代⁽¹⁾・鈴木隆太郎⁽¹⁾・安藤千晶⁽¹⁾・Melanie FROUDE⁽²⁾
・David PETLEY⁽²⁾・増田南波⁽¹⁾・千木良雅弘

Akiyo YATAGAI⁽¹⁾, Ryutaro SUZUKI⁽¹⁾, Chiaki ANDO⁽¹⁾, Melanie FROUDE⁽²⁾
David PETLEY⁽²⁾, Minami MASUDA⁽¹⁾ and Masahiro CHIGIRA

(1) 弘前大学地球環境防災学科

(2) 英国シェフィールド大学

(1) Faculty of Science and Technology, Hirosaki University, Japan

(2) Sheffield University, UK

Synopsis

The APHRODITE precipitation data was used to investigate the relationship between patterns of monsoon rainfall and fatal landslide occurrence in Nepal. Rainfall from the South Asian Summer Monsoon (June to September) triggers on average 26 fatal landslide events each summer monsoon season. High peak annual rainfall corresponds with densely populated, mountainous districts in Nepal. Annual monsoon rainfall (1985-2014) was compared with the South Asian Summer Monsoon Index (SASMI). Results showed that when SASMI is negative (weak), monsoon rainfall is higher in central hill and mountain districts. The weak monsoon trough over Northern India, means moist air travels north and converges on central Nepal. Decomposing the July rainfall series using empirical orthogonal function (EOF) analysis identifies variability in the position of convergence over central Nepal when SASMI is negative. EOF 1 and 2 explain 52.8% and 15.5% of spatial variance in the data. High positive values in EOF 1 correspond with strong convergence and high rainfall in the west and south-west districts in Nepal. Negative values in EOF 2 correspond with high rainfall in the west, positive values correspond with high rainfall in the east. More fatal landslides occur when SASMI is negative, EOF 1 is positive and EOF 2 is negative. Research is ongoing to explore rainfall-thresholds for the initiation of landslides.

キーワード: Landslide, 精確な降水, ヒマラヤ山脈, モンスーン循環

Keywords: landslides, accurate precipitation, Himalayas, monsoon circulation

1. はじめに

地球温暖化によりアジア湿潤地域は、豪雨の発生頻度が増加傾向にあると指摘されている。そこでモンスーン期における降水と洪水やlandslide災害の気象要因を対応付けることは重要であり、温暖化が進行するに当たってのリスク評価、災害予測、被害緩

和のために意義がある。ここで言うlandslideとは落石や泥流、円弧滑りなど重力によって物質が斜面を下方向に移動する現象すべてに相当する。私たちの耳になじみある地滑りとは狭義のlandslideであり、斜面の一部あるいは全部が斜面下方に移動する現象のことをいう点で異なる。

先行研究Petleyほか(2007)においてインド総降水量

とネパールのlandslide災害発生数および死者数に負の相関を指摘しているが、古くからインド総降水量とヒマラヤ降水量には負の相関が知られている。こうした背景より現地の降水とlandslide災害の対応を関連付けることは非常に重要である。しかしこれまでネパール現地の降水の解析には、再解析データやTRMM(熱帯降雨観測衛星)が用いられてきた。これらはデータの空間あるいは時間解像度が荒く、地域の詳細な気象場を求めることは困難であった。しかしYatagai et al.(2012)より1951年～2007年の期間を対象に雨量計データに地形補正してグリッド化した日降水量データ(APHRODITE)が整備され、精度良く解析できるようになった。ネパールについては、内部的に2008年以降のデータも更新し、0.05度グリッドのAPHRODITEを加えて解析できるようになった。

本研究の目的はネパール現地の降水の時間空間構造とlandslide災害の対応を、APHRODITEを用い調査することである。基本統計に加えて、主成分分析によりネパールにおける降水パターンを明らかにし、先行研究Petleyほか(2007)で使用されている南アジアモンスーンインデックス(SASMI)を用いて、ネパールのモンスーン期で降水が卓越するパターンを明らかにし、最終的には降水性landslide災害との対応性を考察することである。本研究では降水パターンや降水分布に加えて、850 hPa面における風の場合と水蒸気フラックスの収束場から降水が卓越するパターンの気象場を解析し、降水が卓越するパターンの特徴を明らかにする。

2. 使用したデータ

本研究では、日降水量グリッドデータ、ネパールにおけるlandslideデータ、風データ、水蒸気フラックスデータを用いた。

2.1 日降水量グリッドデータ

日降水量グリッドデータとしてAsian Precipitation-Highly Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation (APHRODITE) of Water Resourcesのアルゴリズム(Yatagai et al.(2012))による雨量計データに地形を考慮した内挿手法を適用した0.05° 格子の降水量データを用いた。本研究では、ネパール水文気象局(DHM)から入手した2008年から2014年のデータも同様の手法でグリッド化を行い、1985年から2014年の6月から9月を対象期間として使用した。

2.2 ネパールにおけるlandslideデータ

ネパールにおけるlandslideデータは英国シェフィールド大学のDavid Petley教授がインターネットニュ

ースなどにに基づき編集したもので日時、要因、行政界ごとに死者を伴うlandslide災害の回数や災害規模、災害の起こった行政界の緯度経度情報が整理されている。Landslideデータに記されている期間は2004年から2015年までだが、本研究は2004年から2014年の期間を対象期間とした。

2.3 風速および水蒸気フラックスデータ

ヨーロッパ中期予報センターECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)から配布されているERA Interim再解析データより850 hPaにおける南北風及び東西風の0.75° × 0.75°の格子点データを使用した。また、同ERA Interim再解析データより北向き及び東向きの鉛直積算水蒸気フラックスの0.75° × 0.75° 格子点データを使用した。両者とも、1日4回(00, 06, 12, 18UTC)の解析値を平均して日風速値とした。対象期間は1985年から2014年の6月から9月である。

3. 経年変動

3.1 南アジアモンスーンインデックス

Petley et al. (2007)では、ネパールのlandslideとインドモンスーン総降水量あるいは、南アジアモンスーンインデックス (South Asia Summer Monsoon Index, SASMI, Zeng et al., 1994)を比較し両者に負の関係を指摘した。そこで、本研究もまず、SASMIとAPHRODITEによるネパール月降水量との関係を調べた。SASMIはdynamical normalized seasonality (DNS)から導かれるインデックスで、DNSは以下で定義される。

$$\delta = \frac{\|\bar{V}_w - V_{nm}\|}{\|\bar{V}\|} - 2$$

$\bar{V}_w$ は冬期の基準となる風速ベクトル、 V_{nm} はn年m月の風速ベクトルのことである。多くのモンスーンインデックスでは $\bar{V}_w$ は1月、 V_{nm} は7月の風速ベクトルを用いられ、SASMIでも同様である。また $\bar{V}$ は1月と7月の平均風速ベクトルである。SASMIに適用される領域は(5°N - 22.5°N, 35°E - 97.5°E)であり、850 hPaの風の場合を適用している。(Li and Zeng, 2002). 本研究では、このLi and Zeng (2002)によるSASMIを用いた。

Fig. 1aに、7月についてのSASMIとAPHRODITE 0.05度グリッド降水量の7月降水量との相関係数(1985年から2014年の30年)を示す。青は負相関を表しており、一部の山岳部をのぞき、SASMIが正、すなわち年間における南北風成分の変化の点で、南アジアモン

スーン（インド洋～インド）が強い（弱い）年（7月）には、青で示された地域で降水が少ない（多い）ことを示している。これはPetley et al. (2007)と整合する。

モンスーン気流が降水をもたらすので、循環場との対応のため、SASMIの標準偏差が±1以上の年の合成図を作成した。その差をFig. 2に示す。すなわち7月のSASMI $\sigma > 1$ の年の平均から $\sigma < -1$ の年の平均をプロットしている。この図もFig. 1aと整合的で、ネパールを標高別に見た場合の中部（Hill）および低地（Terai）でSASMIが負のときに降水が多い分布となっている。

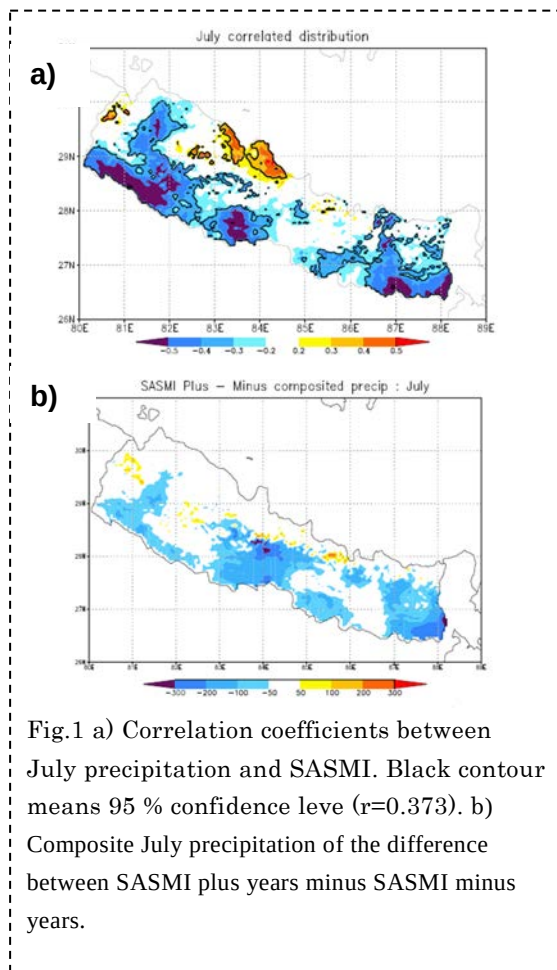


Fig.1 a) Correlation coefficients between July precipitation and SASMI. Black contour means 95 % confidence leve ($r=0.373$). b) Composite July precipitation of the difference between SASMI plus years minus SASMI minus years.

3.2 7月のSASMIに対する循環場

次にFig.1bと同じ条件、すなわちSASMIの $\sigma > 1$ の年と、SASMIの $\sigma < -1$ の年の7月の水蒸気フラックスの合成図をFig.2に示す。SASMIがプラス、すなわちネパールの多くの領域で降水が少ないとき、インド北東部でモンスーントラフが収束している。ネパールは北西部に収束がみられる。一方、SASMIがマイナスでネパールで降水が多くみられる時には、ネパ

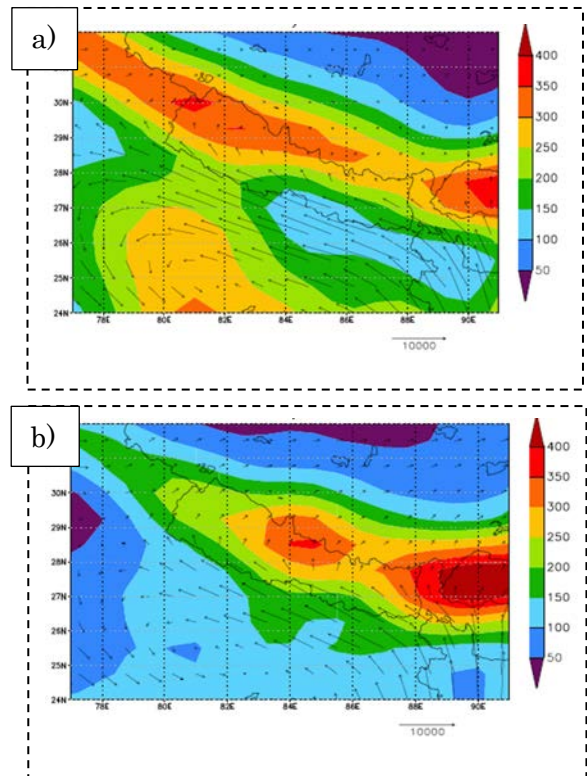


Fig. 2 Composite moisture flux and convergence (mm/month) of a) SASMI plus condition in July. b) SASMI minus condition.

ール中央部およびブータン付近で水蒸気が収束している。南からのモンスーン気流は、モンスーントラフ（インド）での収束はみられず、ネパールに水蒸気が流れ込んでいることがわかる。

これらの気流系は高度ごとに異なるため、850hPaの風の場合について、同様のコンポジットを行ったものを、Fig. 3に示す。太い矢印で示したように、SASMIがプラスのとき、対流圏下層のモンスーン気流は、モンスーントラフで収束し、SASMIがマイナスのとき、モンスーン気流は、北向き成分を持ち、ネパール中央部からブータンにかけて収束していることがわかる。

4. モンスーン季節変化

4.1 半月降水場の主成分分析

よく知られているように、アジアモンスーン降水には季節内変動が卓越し、インドとヒマラヤ付近の降水も、インドモンスーンのactive/break期との関係で解析されることが多い。しかし、ネパールを中心として解析されたものは少ない。そこで、Fig.4に示

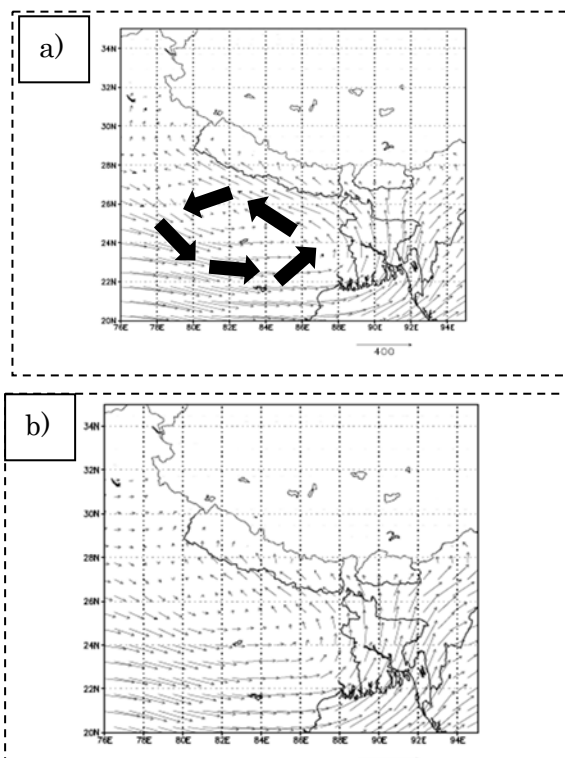


Fig. 3 Composite wind field at 850 hPa height for a) SASMI plus years (July) and b) SASMI minus years (July). thick arrows indicate atmospheric circulation.

すように、APHRODITE降水データがカバーするネパール領域を30地域に分割し、この半月（5日）降水量に主成分分析（EOF解析）を適用した。

Fig.5に、第1～第3主成分の固有ベクトル分布を示す。寄与率はそれぞれ、52.8、15.5、5.2%であった。第1主成分（以後、EOF 1）は、ネパール全体の降水の多

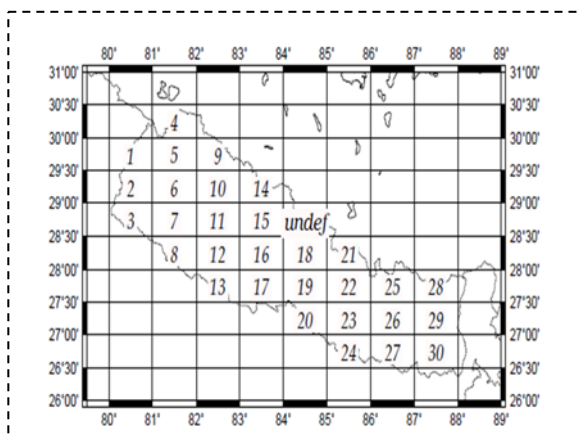


Fig.4 Regional sub-sections to apply Empirical Orthogonal Function analysis. Pentad areal precipitation for June to September are subjected to EOF analysis.

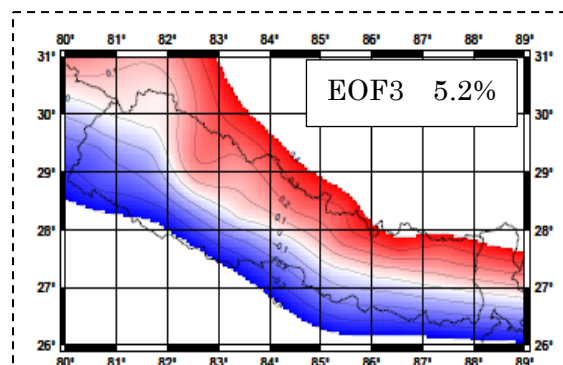
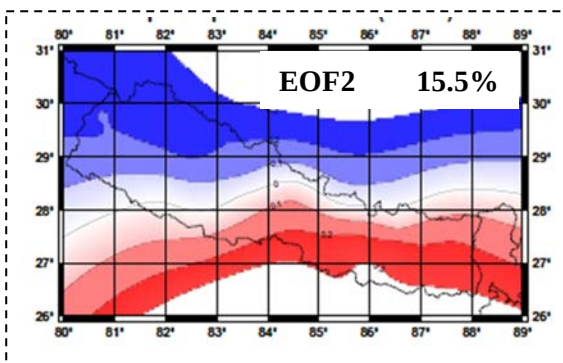
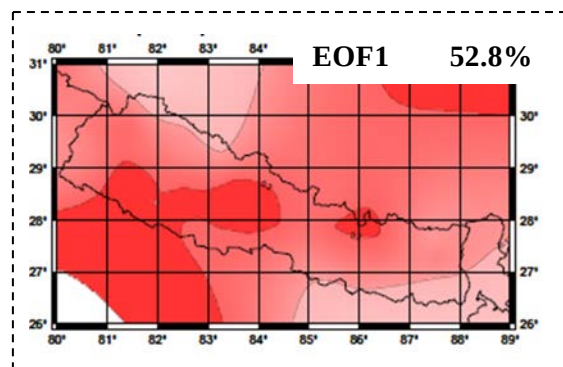


Fig. 5 The first three eigenvector patterns of pentad precipitation for summer monsoon season (June to September).

寡を表すモードで、その振動の中心は、Hillの中西部にある。EOF2は、東西（南東—北西）の振動を表している。EOF2がプラスのとき、南東部で降水量が多く、EOF2がマイナスのとき、北西部で降水量が多いことを示している。EOF3は、南北、あるいは山岳—低地の振動を表している。EOF3がマイナスのとき、低地で降水が多いことになる。

各EOFのスコア時系列は、6～9月について、計算しているが、ここでは省略する。詳しくは鈴木（2017）を参照されたい。

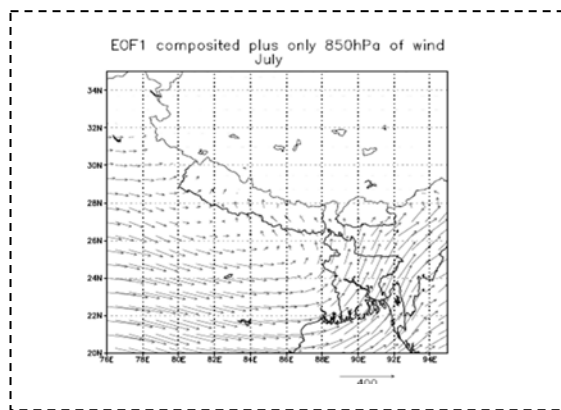
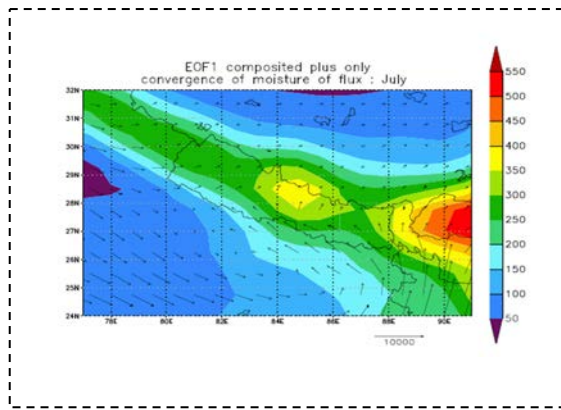


Fig. 6 a) Composite of vertically integrated moisture flux and convergence (colour) of the pentads which EOF1 score exceeds standard deviation. (July, EOF1 + cases). b) Composite of 850 hPa wind field of the pentads which EOF1 score exceeds standard deviation.

4.2 卓越モードに対応する循環場

安藤 (2017) では、ネパールの行政区および標高差から、15の地域にわけ、2日降水とPetleyによる日 landslideデータを比較した。その結果、降水がある閾値を超えると、非常に高い確率で死者を伴う landslideが発生する地域は、西部およびHill (南北に、Mountain, Hill, Teraiに分類)に見られた (Fig.8)。そこで、ここでは、EOF1と2のうち、これら地域に降水をもたらしやすいEOFとして、EOF1+と、EOF2-に着目して、循環場を議論する。

Fig.6にEOF1がプラス (スコアが $\sigma > 1$) の7月における半月時の、a) 水蒸気輸送とb) 850hPa風の場合を示す。また、同様にFig.7にEOF2がマイナス (スコアが $\sigma < -1$) のときの水蒸気輸送、風の場合を示す。また、これらの該当半月の降水量合成図を、Fig. 9に示す。降水場は、EOF1+時に、Hillを中心に中央部と東部で強くなっており、EOF2-時は西部で降水量が多くなっ

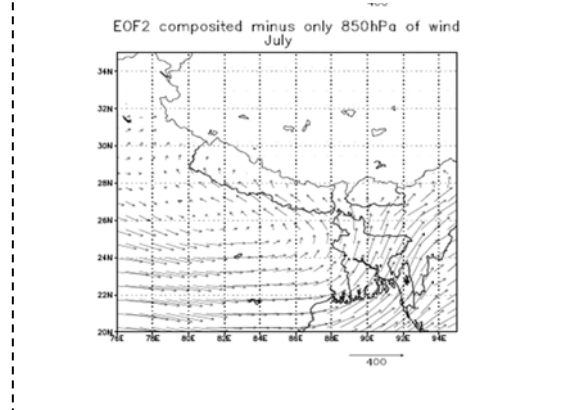
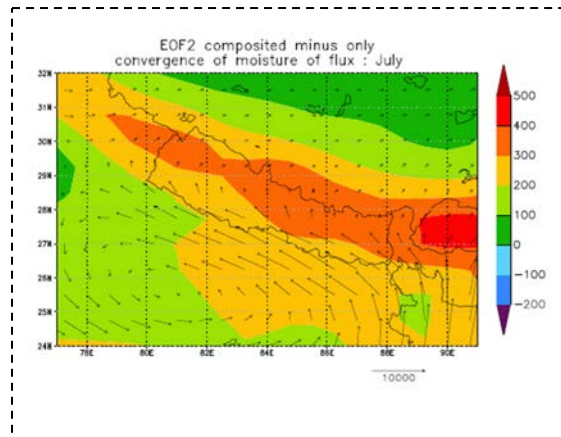


Fig. 7 a) Composite of vertically integrated moisture flux and convergence of the pentads which EOF2 score below minus standard deviation (July, EOF2 - cases). b) same with a) but for 850 hPa wind field.

ている (降水はEOF+とEOF-のため、EOF2は水色の部分がEOF2-時に降水が多いことになる)。

Fig.6 (EOF1+) では、降水合成分布と対応し、ネパール中部および東部 (からブータンにかけて) 水蒸気収束がみられ、インド亜大陸からの西風とベンガル湾からの南風がネパールに水蒸気を運び山岳域で収束、降水をもたらしていることがわかる。EOF1- では (図略)、経年変動場 (Fig.2aおよびFig.3a) に似て、水蒸気はインドのモンスーントラフで収束している。ベンガル湾からの多量の水蒸気は、西向きに運ばれ、ネパールに収束をもたらさない。

一方、Fig.7 (EOF2-) では、インド北部 (80E/26N 付近) に弱い収束はあるものの、南からの水蒸気は、ネパールで収束、EOF2+ (図略) では、ネパール上空の水蒸気は発散が卓越している。またインド北部で収束している。両者の差分をとると (図略) 降水の差分に対応してEOF2+からEOF2-の差分では、発散が卓越し、水蒸気Fluxは、北西から南東への成分が強い。

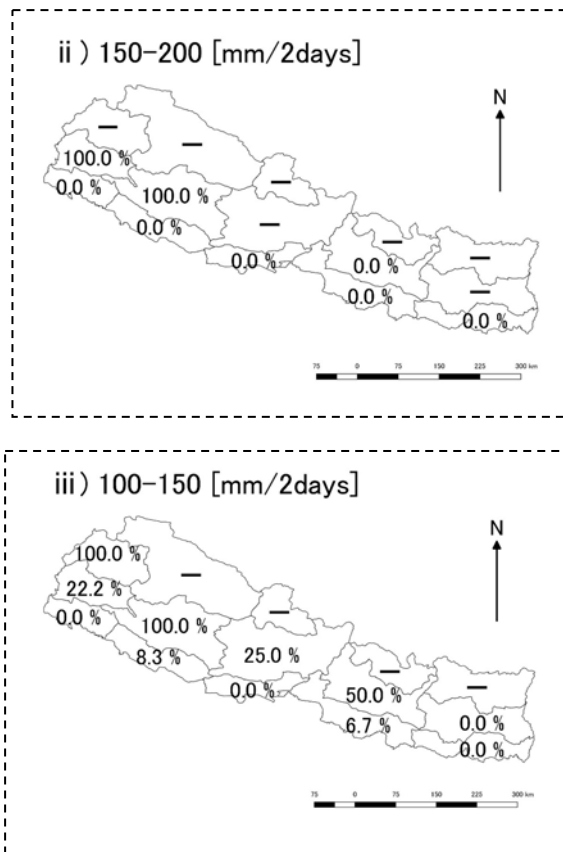


Fig. 8 Occurrence of fatal landslides (in percentage) according to the two days precipitation of a) 150 – 200 mm/2days and b) 100 – 150 mm/2days. (Ando, 2017)

これは、EOF2-のとき、多量の水蒸気がベンガル湾付近から、ネパール西部・中央部に輸送され、収束していることを表している。

5. まとめと考察

Yatagai et al. (2017)に示したように、空間的な多雨地域（ヒマラヤおよびマハーバラート南面）とlandslide多発地域は一致が見られたが、同等の降水量に比して、ヒマラヤ山脈前面では死者を伴うlandslideが多発した。この両者を詳細にしらべた研究（安藤, 2017）から、Fig.8にAPHRODITE降水（2日間）と死者を伴うLandslideの確率を調べた研究から、大きい閾値のもの2つを提示した。山岳地域は人口が少ないため、死者を伴うlandslideが少ないことを踏まえてみると、低地よりHill（南北の地形的3分類の中央）地域で対応が強く、特に、西部、中西部で極端降水が見られるときに、landslideが多発していることがわかる。この降水とlandslideとの対応が強い地域について、

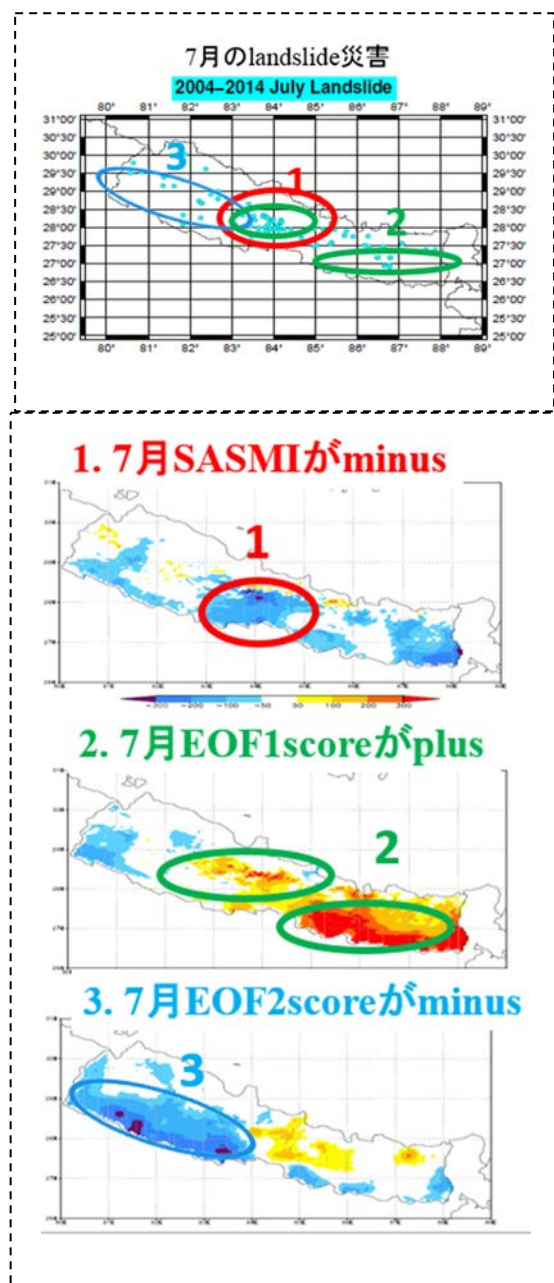


Fig. 9 Plot of landslide occurrence in July (top) and three dominant cases shown in this paper. 1. SASMI plus, 2. EOF 1 plus, 3. EOF 2 minus.

先行研究との関係から、経年変動指標としてSASMIを用いて、landslideをもたらしやすい降水分布、循環場を調べた。また、半月降水の点からも、当該地域にlandslideを引き起こしやすいモンスーン循環を調べた。7月について、それらを模式的にFig.9に示す。上のパネルは、7月のlandslide発生位置である。中央部（Hill）でLandslideをもたらしやすい経年変動は、SASMIが負の年（Fig.9の1）で、半月場では、EOF1+の時、中央部および南東部で、EOF2-のとき、西部

(Hill,Tarai)で多雨になり、これらはいずれも、インド側のモンスーントラフでの収束がなく（インドにとってはbreakで）、インド亜大陸およびベンガル湾からの水蒸気がネパールの対象地域で収束しやすい状況にあることが明らかになった。

謝 辞

本稿は、平成28,29年度に防災研究所一般共同研究「ヒマラヤ山岳域のlandslide災害への局地的降水影響の評価」に基づくものである。カトマンズ調査に際し、弘前大学檜垣教授、Tsou助教にお世話になった。降水データ提供された、ネパール気象局関係者ならびにデータ変換作業補助やカトマンズでのワークショップに指導役として参加した弘前大学黒崎氏、柳沢氏、また京都大学防災研究所安富特任研究員および、防災研究所千木良研究室北村さんに記してお礼申し上げる。

参考文献

安藤千晶 (2017): ネパールのlandslideと降水の関係, 弘前大学理工学部地球環境学科, 平成28年度卒業論文, 108pp.

鈴木隆太郎 (2017): ネパールにおけるモンスーン期部地球環境学科, 平成28年度卒業論文, 67pp.

Li, J. and Zeng, Q. (2002): A unified monsoon index." *Geophysical Research Letters* 29.8.

Petley, D. N., Hearn, G. J., Hart, A., Rosser, N. J., Dunning, S. A., Owen, K., & Mitchell, W. A. (2007). Trends in landslide occurrence in Nepal. *Natural hazards*, 43(1), pp. 23-44.

Yatagai, A., Kamiguchi, K., Arakawa, O., Hamada, A., Yasutomi, N., & Kitoh, A. (2012). APHRODITE: Constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(9), pp. 1401-1415.

Yatagai, A., Masuda, M., Chigira, M., Petley, D. and Froude, M. (2017): On the relationship between Horizontal Structure of Nepali Landslides and APHRODITE's Orographic Precipitation Pattern, proceedings of the DPRI Annual Meeting 2017, D04, (available) at http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/hapyo/17/gh28_d.html).

(論文受理日: 2018年6月13日)