

9. 複数の気候データに基づいた降雨極値推計と 土砂災害警戒区域のリスク予測の検討

鈴木皓達^{1*}・川越清樹²・齋藤洋介³

¹福島大学大学院共生システム理工学研究科（〒960-1296福島県福島市金谷川1）

²福島大学共生システム理工学類（〒960-1296福島県福島市金谷川1）

³日本工営株式会社 沖縄支店（〒900-0025沖縄県那覇市壺川3丁目5番地1号）

* E-mail: s1970025@ipc.fukushima-u.ac.jp

本研究は、山地、台地の占拠率が高い地形特性をもち、生活基盤が山体と密接に連動している長野県を対象に土砂災害警戒区域に対する既往最大、気候変動予測値の降雨量に応じたリスク情報を整備し、適応策として活用可能なデータベースの開発を試みた。過去から将来予測の降水量の地域特性を示すとともに、現在まで開発された気候モデルを利用して降雨量に応じた土砂災害警戒区域の発生確率によるリスク情報を整備した成果を示した。結果として、長野県の土砂災害警戒区域において、現在、近未来、将来における降水量に応じた降雨特性及び土砂災害に対するリスク情報が示された。今後は、長野県をモデルケースとして全国への適応を検討していく意向である。

Key Words : *climate change, slope failure, sediment disaster caution zone, Probable Maximum Precipitation*

1. はじめに

近年、豪雨による甚大な災害が後を絶たず、平成29年九州北部豪雨、平成30年西日本豪雨、そして令和元年6月に発生した梅雨前線による豪雨においては、鹿児島県鹿屋市で1時間降水量81.0mm、24時間降水量472.5mmと記録的な豪雨となり、豪雨により誘発された土砂災害は全国各地で起こった。土砂災害発生件数は154件に上り、2名の死者が出るなど、甚大な災害となった。こうした現状に加えて、地球温暖化の影響により、降水の極端化が進行し、現在から将来的に降雨量の増大、豪雨頻度の増加、無降雨期間の長期化が推計されている。よって将来的に降雨によって引き起こされる土砂災害の発生頻度の増加が見込まれ、一層の対策強化、および気候変動を意識したハード・ソフト対策が必要不可欠となる。

平成30年12月1日より施行された気候変動適応法より、温室効果ガス排出削減を重視とした緩和策のほか、気候変動の影響に伴う被害を回避、軽減する適応策の推進が法的に定められた。気象、地形、地質の背景より従来から自然災害の多い我が国では、過去の経験値、および経験に基づく統計値を基準に

防災の取り組みが講じられてきた。今後、適応策の推進目標に従って、先進の科学技術より取得される気候変動に伴う影響評価も考慮した実践的な防災計画が進められると推測される。本研究のテーマとして取り上げる土砂災害は、1999年の6月広島豪雨を契機に、土砂災害警戒区域等における土砂災害災害防止対策の推進に関する法律が施行され、従来より進められてきたハード対策のほかにソフト対策も重視された経緯をもつ。土砂災害防止法では、土砂災害のおそれのある区域（土砂災害警戒区域、土砂災害特別警戒区域）を明示し、危険の周知、警戒避難態勢の整備、住宅等の新規立地の抑制、既存住宅移転の促進が定められている。

本研究では、土砂災害警戒区域に対する既往最大、気候変動予測値の降雨量に応じたリスク情報を整備し、適応策として活用可能なデータベースの開発を試みた。土砂災害の誘因となる降雨量の過去から将来予測の情報と土砂災害のリスクのデータを土砂災害警戒区域の調書という防災上のストックに記載して、現在、今後に選択すべき防災対策を円滑に誘導させるアーカイブ情報を装備させることも視野に含めてデータベース化を図った。

2. 研究方法およびデータセット

土砂災害警戒区域の発生確率によるリスク情報開発のために取り組んだ解析を以下の①～③に示す。

- ①既往最大実績降雨量の空間分布の開発。
- ②気候モデルを用いた現在，近未来(2050年：2031-2050年)，将来(2100年：2081-2100年)に対する降水ポテンシャル予測値の空間分布情報の開発。
- ③既往最大，近未来と将来の予測値による降雨量に応じた土砂災害警戒区域の斜面崩壊発生確率によるリスク情報の開発。

解析①，②は土砂災害のリスク情報を取得するための降水量のデータセットに相当し，解析③は本論で論述するリスク情報の結果となる。リスク情報の開発は長野県を対象に実施された。長野県は，山地，台地の占拠率が高い地形特性をもち，生活基盤が山体と密接に連動している。また，糸魚川－静岡構造線付近に位置して断層発達した地質特性をもつ。これらの地形，地質を背景とした土砂災害リスクの高まりをふまえて当該地域を対象に設定した。以下より，取り組んだ解析①～③の解析方法，データセットの詳細を解説する。なお，解析①，②に相当する降水量のデータセットに関しては，予め表1に土砂災害警戒区域の斜面崩壊発生確率によるリスク情報に利用する降水データを一覧表として示した。

表1 リスク情報解析利用 24 時間降雨量条件一覧表

気候区 シナリオ	現 在	近未来		将 来		データセット
		RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5	
既往最大 実績降雨 量 MAR	●					現在： AMeDAS と メッシュ気候 値 2010
想定 最大降雨 量 MPR		●	●	●	●	近未来・将来： 経験的降雨発 生特性値と気 候モデル
可能最大 降水量 PMP	●	●	●	●	●	現在： メッシュ気候 値 2010 近未来・将来： 気候モデル

2.1 既往最大実績降雨量MARの空間分布情報の開発

既往最大実績降雨量(Maximum Actual Rainfall，以下 MAR)の情報を開発し，斜面崩壊発生確率モデルに入力することで，降雨に伴う既往最大の実績リスク情報を取得する。MAR は，極大イベント単体に着目したものではなく，現在の気候中で生じた極大降雨の空間分布情報として位置付けられる。リスク評価に当てはめれば，現在気候中で最大の危険な降水状態の経験値を示すものと解釈できる。MAR のデータセットは，長野県内の AMeDAS39 地

点，隣接県の AMeDAS8 地点の既往最大 24 時間降雨量，暖候期降水量である。これらのデータ間の関係性を利用して長野県の広域規則性と地域固有性の特徴を導出し MAR の空間分布情報を開発した。結果を図 1 に示す。本解析では AMeDAS の空間補間による手法を用いた。以下の①～④に MAR の空間分布情報の開発方法を示す。

- ① 長野県およびその周辺に対する計 37 地点の AMeDAS について，暖候期の月最大降水量と既往最大 24 時間降雨量の関係を検証し，広域規則性と地域固有性を分類した。結果を図 1 に示す。これらの各々の特徴を分けて，空間情報化する処理を進める。なお，この考え方のベースは，牛山らの求めた暖候期降水量と極大降雨の強い関係性のアルゴリズム²⁾を基にしたものであり，これに準じた降雨極値変換法²⁾による解析事例も存在している。
- ② 広域規則性については，メッシュ気候値 2010 に格納される暖候期の月最大降水量を降雨極値変換式に代入することで空間情報化する。
- ③ 地域固有性については，AMeDAS 地点毎の広域規則性との差分を，重み付け距離平均法による補間処置を行うことで空間情報化する。
- ④ 方法②，③で空間情報化された広域規則性と地域固有性の情報を加算して MAR の空間分布情報を開発する。

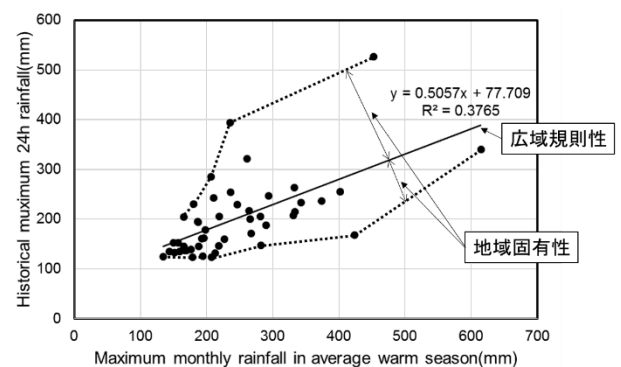


図 1 24 時間降雨量と暖候期最大月降水量の関係図

2.2 気候モデル等を用いた降水ポテンシャル予測値の空間分布情報の開発

現在，近未来，将来に対する降水ポテンシャル予測値としてリスク情報に用いる情報は，可能最大降水量(Probable Maximum Precipitation，以下 PMP)，想定最大降雨量(Maximum Predict Rainfall，以下 MPR)とする。以下に PMP と MPR の詳細を示す。

(1) PMPの解析方法とデータセット

気候変動によって起こる降水の極端化での豪雨頻度の増加を考える場合、空気中の気温と水蒸気量の関係性を表したClausius-Clapeyron式(以下C-C式)がある。気温の上昇に伴って大気中の飽和水蒸気圧は、指数関数的に増加し、気液平衡である場合、その増加率は約 $7\%^{\circ}\text{C}^{-1}$ であることに基づいたプロセスに基づき式化、および定量化されている。渡辺ら³⁾は、日本国内でも多くの観測データの極端降水頻度の変化率が $7\%^{\circ}\text{C}^{-1}$ に類似することを明らかにした。また、内海ら⁴⁾は、日本を含むアジア圏において、降雨量の99パーセンタイル値の極端降水がC-C式から推定された水蒸気量変化率と類似することが明らかにしている。本研究においては、長野県内AMeDAS観測における1986年から2015年の30年分の気温と降雨量データを用いて、日降雨量の気温ビン毎に降雨量99パーセンタイル値を抽出した。これを基にC-C式を作成することで降雨量の変化率を求め、C-C式の理論値である $7\%^{\circ}\text{C}^{-1}$ と比較をした。また、求められたC-C式を用いて、可能最大降水量(PMP: Probable Maximam Precipitation)の推定を行った。C-C曲線からPMP計算にあたり、用いた式を(1)式に示す。

$$PMP = a \cdot \exp(b \cdot Td) \quad (1)$$

ここで、 a 、 b : 係数、 Td : 気温である。この式に将来気候モデルアウトプットデータを入力することで、現在気候と将来気候における最大可能降水量を推定した。

(2) MPRの解析方法とデータセット

MPRに関しては、気温変化だけに依存しない経験的な地域特性も加味した将来のポテンシャル量として位置付けられるものである。リスク評価に当てはめれば、地域特性も含めて想定される将来の危険な降水状態と解釈される。MPRの解析方法は、はじめに、メッシュ気候値2010に格納された現在気候の最暖月の日平均気温アウトプットを基にPMPを求めるとともに、PMPに対するMARとの空間比率分布を算定し、現在気候に基づく地域の経験的降雨発生特性値としての空間情報化を図った。この経験的降雨発生特性値を複数の気候モデルのアウトプットより求められた近未来、将来のPMPに乗じることで、気温情報のみに依存しない経験上の地域特性もふまえた空間情報を開発している。

2.3 土砂災害警戒区域の斜面崩壊発生確率によるリスク情報

リスク評価に用いる斜面崩壊発生確率モデルは、Ohlmacherにより開発された斜面崩壊発生確率モデル⁹⁾を水文量の要素を加えて動的なリスクを導出できるように改良したものである。モデルは二項分布による多重ロジスティック回帰分析より構成されており、斜面崩壊モデルに利用した二項分布とは、ある事象に対する災害発生の有無であり、有を「1」、無を「0」に設定している。式(2)に斜面崩壊発生確率モデル式を示す。

$$P = \frac{1}{1 + \exp[-(\alpha + \beta_h x_h + \beta_r x_r)]} \quad (2)$$

ここに、 P : 斜面崩壊発生確率、 α : 動水勾配係数、 β_h : 動水勾配係数、 x_h : 動水勾配、 β_r : 起伏量係数、 x_r : 起伏量である。動水勾配が水文量、起伏量が地形条件となる。このモデル式により現在気候、近未来と将来の予測値による降雨量に応じた土砂災害警戒区域の斜面崩壊発生確率によるリスク情報を示す。

3. 解析結果

3.1 既往最大実績降雨量MARの空間分布情報解析結果

これらの方法より開発された空間情報を図2に示す。図2(1)の広域規則性分布では盆地を中心に多降水の領域となる傾向と、図2(2)の地域規則性では比較的標高の低い関東山地側の南東部に多降水領域が分布する結果を得た。長野県南東部は、地形要因より強力な勢力の気象現象や関東地方で生じた極端現象が南東側から波及しやすい降水特徴を有していることが示されている。広域規則性と地域固有性の空間分布情報の合算より図2(3)のMAR空間分布情報が構築されたが、地域固有性の地形要因の影響より長野県南東部に多降水領域が分布する結果を得ている。MARの全県平均値は171mmと求められた。

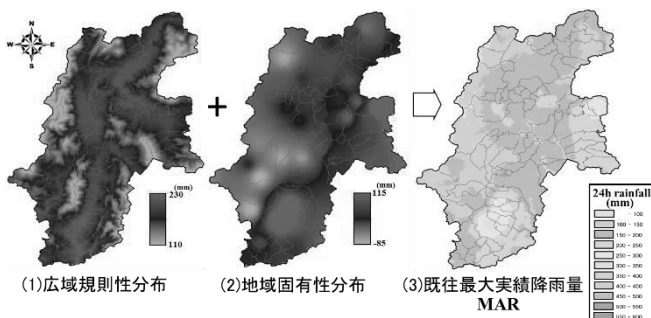


図2 既往最大実績降雨量空間分布情報

3.2 気候モデル等を用いた降水ポテンシャル予測値の空間分布情報の解析結果

図3は長野県および周辺の24時間降雨量99パーセンタイル値と日平均気温の関係である。24時間降雨量99パーセンタイル値の上限値の日平均温度に対する推移より7.85℃⁻¹の結果が得られた。CC式の示す7%℃⁻¹の変化率に類似することが示され、長野県の近未来、将来の検討でも7.85℃⁻¹を基にPMPを求めることとした。各気候モデルの近未来、将来の最暖月の日平均気温アウトプットを基にPMPを算定した。また、RCPシナリオについては、下限を示す低位安定化シナリオのRCP2.6、上限を示す高位参

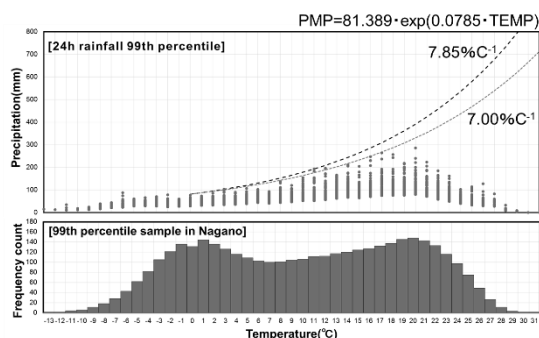


図3 24時間降雨量99パーセンタイル値と日平均気温の関係

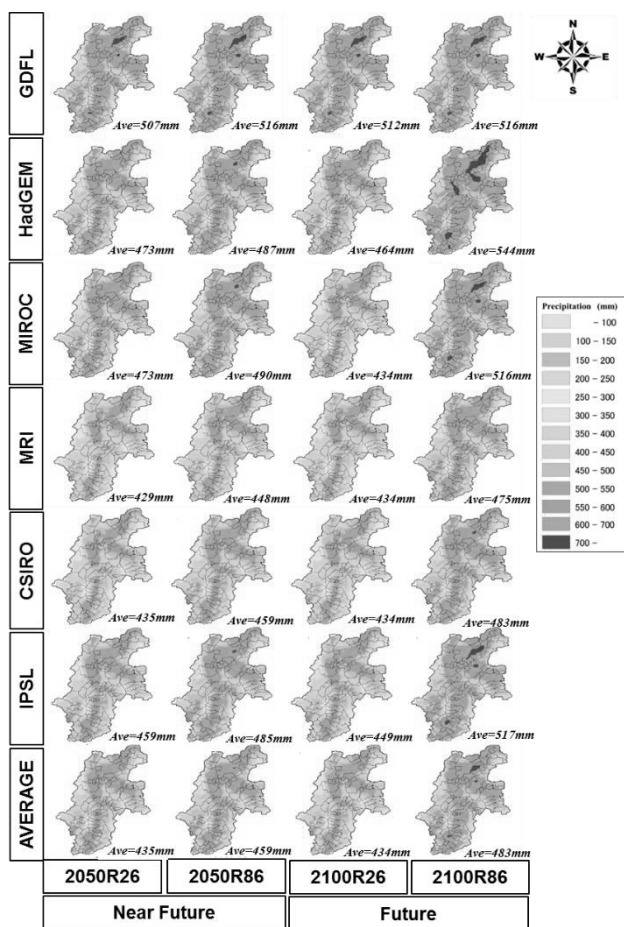


図4 PMP空間情報分布

照シナリオのRCP8.5を採用し、時間変化に応じた幅を明瞭化できる条件にした。図4に各気候モデル、およびアンサンブル平均値のPMP空間分布情報を示す。この空間分布の結果から、概ね長野県内の盆地で550mm超の多降水領域となり、やや長野県北部で多降水量となる傾向が示された。また、近未来から将来への推移が、RCP2.6の場合は変化なしに対して、RCP8.5の場合は24mm増となる結果を得た。

図5に現在気候に基づく地域の経験的降雨発生特性値としての空間情報化、図6に各気候モデル、およびアンサンブル平均値のMPR空間分布情報を示す。PMPの空間分布では長野県の盆地部、特に北側で多降水領域だったものが、MARに類似した南東

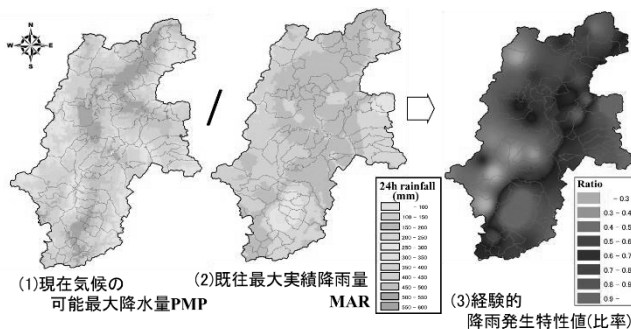


図5 経験的降雨発生特性値の空間分布情報

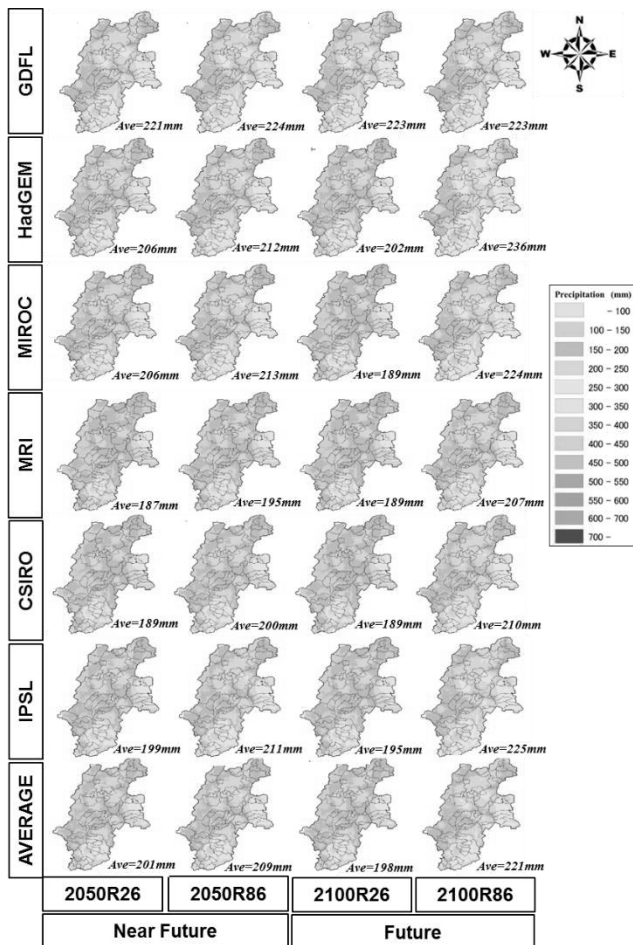


図6 MPR空間情報分布

側に多降水領域が出現する形状に変化した。なお、MARは長野県平均で171mmの値を得たが、アンサンブル平均のMPRについて近未来のRCP2.6で+17%(+30mm)、RCP8.5で+22%(+38mm)、将来のRCP2.6で+15%(+27mm)、RCP8.5で+29%(+50mm)となる結果を得た。

3.3 土砂災害警戒区域の斜面崩壊発生確率によるリスク情報結果

図7は気候データに基づいた各年期の土砂災害警戒区域の発生確率結果である。また、図8は現在および近未来、将来における土砂災害警戒区域の斜面崩壊発生確率のリスク分布頻度図である。

動水勾配が水文量となっているため、MPR解析結果より将来における土砂災害警戒区域の斜面崩壊発生確率を求めた。また、発生確率との数量差も示した。結果として、長野県全体では、基本的に地質状況に依存するため発生確率の分布には漸進な変動は認められないが、MPR下において、約300-400ヶ所、PMP下で5,000ヶ所の変動が認められた。

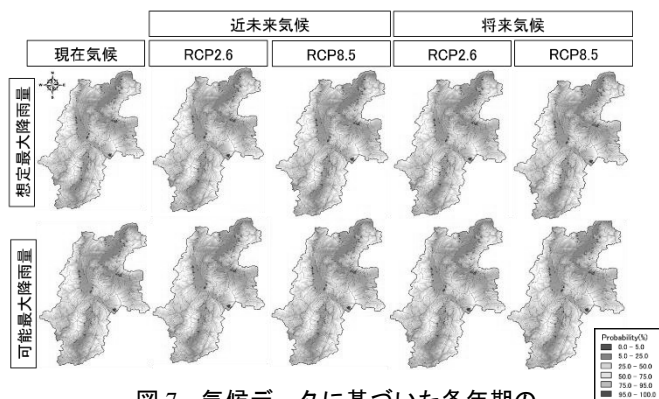


図7 気候データに基づいた各年期の土砂災害警戒区域の発生確率結果

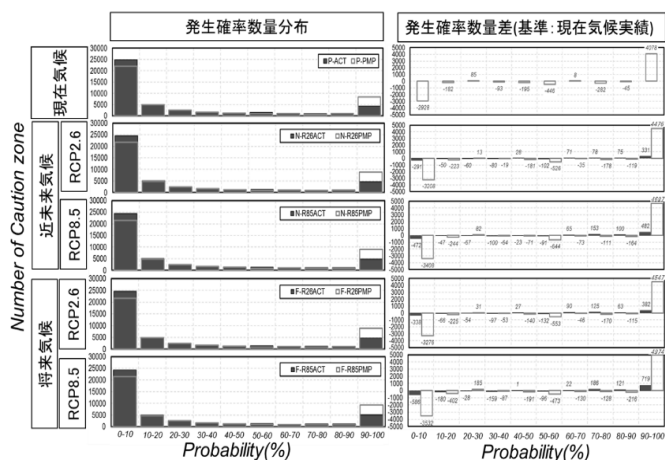


図8 現在気候、近未来と将来の予測値による降雨量に応じた土砂災害警戒区域の斜面崩壊発生確率によるリスク頻度

4. 結論

長野県単位で見ても将来的に降水量の増加は明らかであり、それに伴い斜面崩壊に起因する土砂災害リスクも増大していくため、将来も考慮した気候変動対策を講じていく必要がある。本研究では土砂災害のなかでも斜面崩壊のみに着目して研究を行ったが、近年の災害は斜面崩壊に起因する土石流や台風や洪水も同時に発生する複合災害も多く見られることから、総合的な災害対応な体制システムを整備していくことも必要になっていくと考える。今後は長野県をモデルケースとして全国への適用を検討していく意向である。

謝辞：本研究は、気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)、環境省環境推進費 環境問題対応型研究 地方自治体向けクラウド型気候変動影響評価ツールの開発気候変動適応を推進するための情報デザインに関する研究の支援により実施された。また、本研究を進めるにあたり、長野県および長野県環境保全研究所の支援も受けた。ここに謝辞を示す。

参考文献

- 1) 牛山素行・寶馨：AMeDASデータによる暖候期降水量と最大1時間・日降水量の関係、水文・水資源学会誌、Vol.16, pp.368-374, 2003.
- 2) 川越清樹・風間聡・沢本正樹：数値地理情報と降雨極値データを利用した土砂災害発生確率モデルの構築、自然災害学会誌、Vol.27, pp.69-83, 2008.
- 3) 渡辺春樹、吉川沙耶花、瀬戸里枝、鼎信次郎：日本における極端降水頻度の変化率とClausius-Clapeyron式との関係、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.74, No.4, I_145-I_150, 2018.
- 4) 内海信幸、瀬戸心太、鼎信次郎、沖大幹：気候変動に伴う豪雨変化の要因分析における大気湿潤度の考慮、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.68, No.4, I_421-I_426, 2012.
- 5) Ohlmacher, G.C and Davis, J.T. : Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA, Engineering Geology, Vol.69, Issues 3-4, pp.331-343, 2003.