

34. 気候変動による都道府県別の斜面崩壊リスク 曝露人口に関する検討

若林 初美¹・伊藤 圭祐²・川越 清樹^{1*}

¹福島大学共生システム理工学類環境システムマネジメント専攻（〒960-1296福島県福島市金谷川1）

²福島大学大学院環境システム理工学研究科（〒960-1296福島県福島市金谷川1）

* E-mail: kawagoe@sss.fukushima-u.ac.jp

本研究では、CMIP3による気候モデル比較より最大24時間降雨量を示すケースを抽出し、発生確率より示される斜面崩壊リスクの曝露人口を都道府県別に整理した解析結果に人口予測データを重ねあわせ比較した。この比較解析により最も斜面崩壊リスクに対して脆弱になる都道府県を統合的に評価することに取り組んだ。結果として、2050年期になることで兵庫県、岐阜県、群馬県、広島県、京都府に示される都市圏、および大都市圏に隣接する都道府県で斜面リスクに曝露される人口が高まることが明らかにされる一方で、兵庫県等は人口減少が進む予測がなされているため、リスクの不確実性が存在することが明らかにされた。都道府県内の領域差異も存在するため、今後はCMIP5による気候モデルアウトプットと、将来人口予測データを利用し、空間解像度1km×1kmの精度による斜面崩壊の曝露人口を見積もる予定である。

Key Words : Global warming, slope failure probability, CMIP3, disaster population

1. はじめに

人為起源の温室効果ガス排出量増加に伴う気候システムの温暖化が、世界各地の研究機関で開発された全球気候モデルの出力データより見積もられ、現在から変化する気象事象が予見されている。IPCC Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptationでは、21世紀中に強い降雨の発生頻度あるいは総降水量に占める強い降雨の割合が世界の多くの地域で増加する可能性を説明するとともに「人の生活やその他の社会経済活動等が極端現象により悪影響を受ける可能性がある場所に存在する」ことを報告している¹⁾。社会経済活動が悪影響になる予測に対し、事前に温暖化の影響を推計することで、適応した社会形成を計画できる取り組みも進められており、更に緻密かつ確度の高い検討の実施が期待されている。こうした、災害の適応策を検討する上で、特に重視されるものが生命、損傷、社会活動に直接関与する「人」のリスクであり、近年、気候変動に応じた人的リスクを求めるための研究も進められ²⁾、IPCCに示されたシナリオに応じたリスク³⁾や、適応策の計画まで言及する人的リスク評価が取り組まれている⁴⁾。本研究グループも同様の取り組

みを実施し、斜面崩壊発生確率モデルによる降雨量に応じた3次メッシュ(解像度1km×1km)のリスク量³⁾、人口分布データを照合し、日本列島を対象に気候の温暖化による斜面崩壊と影響人口の関係性を求めることで人的リスクの空間的、定量的な導出に取り組んだ⁵⁾。ただし、この解析では、人口分布の条件を平成17年国勢調査統計値で固定しリスク推計を検討している。人口リスクを求めるにあたり、人口推移を踏まえた場合、予測値の不確実性を増幅させる可能性もある。しかしながら、世界各国の研究機関では、災害による影響人口の推計も進められ現実的な対策設計と最大限のリスクポテンシャル量との比較検討の中で、被災に直接関与する人口の影響を捉えており、将来の防災体制および、街づくり、情報提供等のハード対策を補完するソフト対策をより具現化して議論できるものと考えている。そのため、安心安全・持続可能な社会の構築の誘導に効用をもつ可能性を持つ。

本研究では、IPCC AR4に利用されたCMIP3の数値気候モデルに基づく降雨データを用いた都道府県別の斜面崩壊における人口影響リスク結果⁶⁾に、国立社会保障・人口問題研究所のまとめた「日本の将来推計人口（平成24年1月推計）」の報告書⁶⁾の人口推移データを重ね合わせ比較することで、温暖化に応じた人口影響リスクの推計

を試みたものである。

2. 解析方法

既往研究の解析手順は以下に示すとおりである。

- ① 気候モデル出力データのダウンスケーリング(3次メッシュ化)、および再現年に対する降雨極値データへの変換
- ② ダウンスケーリング済み再現年に対する降雨極値を用いた将来に対する斜面崩壊発生確率の解析
- ③ 都道府県毎の3次メッシュに対する斜面崩壊発生確率と人口分布データ(平成17年国勢調査統計値)の関係性評価

これらの①から③の解析の解析を通じて、日本列島を対象とする気候システムの温暖化に起因した斜面崩壊による人口リスクを検討している。これに対し、本研究では既往研究で求めた都道府県別の斜面崩壊の人口リスクに人口推移予測データを重ねあわせ比較して、都道府県別の将来の斜面崩壊曝露人口を見積もった。

以下に斜面崩壊を求めるための気候モデルの降雨量データ、および再現年の降雨極値と斜面崩壊発生確率の解析手法の説明を行う。

(1) 気候モデルのデータセット

気候モデルとして解析に用いた出力データは、IPCC AR4に記載されるCMIP3の気候予測データのうちの①から④である。

- ① MIROC3.2Medres(空間解像度:110km, 開発国:日本)
- ② MRI-CGCM2.3.2(空間解像度:280km, 開発国:日本)
- ③ GFDL CM2.1(空間解像度:250km, 開発国:USA)
- ④ CSIRO MK3.0(空間解像度:250km, 開発国:オーストラリア)

これらの出力データを選定した理由として、Glacker et alによるメトリクス⁷⁾とCMIP3気候予測情報における気温、降水量のばらつきを勘案した。なお、これらモデルのSRES-A1B,A2,B1のIPCC排出シナリオデータを解析に利用している。SRES-A1Bは化石燃料・非化石燃料バランス重視経済発展型社会、SRES-A2は多元化型社会、SRES-B1は環境重視型社会を想定している。これら複数の気候モデル、SRESで気候システムの温暖化を捉えることで、降雨量の影響の幅を求めた。温暖化の検討年代は2011年から2030年(2020年期と称する)、2046年から2065年(2050年期と称する)、2080年から2099年(2090年期と称する)の3つの気候スパンとした。なお、基準の年代を2000年期と設定する。解析に用いられる月平均降水量データはIntergovernmental Panel on Climate Change Data Distribution Centreより取得した。このデータについて、3

次メッシュ(解像度1km×1km)へのダウンスケーリング、再現期間に応じた降雨極値変換を行うことで斜面崩壊リスクを求めた⁵⁾。

(2) 斜面崩壊発生確率モデルによる解析方法

斜面崩壊リスクは発生確率より求められた。斜面崩壊の発生確率は川越らにより開発されたモデルを利用した。斜面崩壊発生確率モデルは、二項分布による多重ロジスティック回帰分析より開発されたものである⁸⁾。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、「1」と「0」で設定される。この二項分布をロジスティック曲線で連結させることにより0から1の連続的な線形を成立させる。ロジスティック曲線を重回帰式で解くことにより、モデルが構築される。ここで得られる結果は0から1で推移するまでの発生確率であり、ある条件下を基に現象が生起する条件付確率として定義される。筆者らの開発した斜面崩壊発生確率モデルは、浅層の斜面崩壊を対象にした評価モデルであり、斜面崩壊の素因である地形、地質条件、そして、誘因である降雨量を含む水文量を用いた多重ロジスティック回帰分析より構成されたものである。降雨量を含む水文量を利用することで、気候変動に応じた動的な発生確率を導くことができる。また、斜面崩壊発生確率モデルに利用する地形、地質条件と水文量のデータは3次メッシュの数値地理情報であり、解像度1km×1kmの地域単位の空間分布を解析結果として求めることができる。そのため、時空間的な斜面崩壊情報を求めることが可能である。式(4)は斜面崩壊発生確率モデル式である。

$$P = \frac{1}{1 + \exp[-(\alpha + \beta_h x_h + \beta_r x_r)]} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 P :斜面崩壊発生確率、 α :切片、 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。また、この式は地質毎に作成されている。地質の対象は未固結状態である崩積土、続成期間の短い半固結状態である新第三系堆積岩、および古第三系堆積岩、造山鉱物にカオリナイトを含み粘土化しやすい花崗岩の4種類である。

地形条件である起伏量は、国土数値情報KS-META-G05-56Mに格納された最高標高と最低標高の差である。起伏量は、地形の複雑さを示す値として解釈されており、従来から地形解析のパラメータ⁹⁾として利用されている。

水文量である動水勾配は、国土数値情報KS-META-G05-54Mの表層土壌と国土数値情報KS-META-G05-56Mの斜面傾斜度を用いて擬似二次元化した斜面に日降雨量を入力し、Richards式による飽和不飽和浸透解析を行うことで求められた。降雨発生後の最大傾斜を示す浸潤線から発生確率に用いる動水勾配を得ている。動水勾配は、

単位距離当りの地下水水頭の変化率であり、降雨量が多くなるほど急勾配を呈する。急な動水勾配は、土塊の有効応力を減少させるため、斜面は不安定化する要因となる。地質条件に国土数値情報KS-META-G05-54Mのデータを用いた。

3. 既往研究の都道府県別解析結果

既往研究の平成17年国勢調査より集計された人口分布(日本総人口127,767,994人)と2000年期、および2020年期、2050年期、2090年期の再現年50年、100年に対する斜面崩壊発生確率を都道府県毎に比較検討した。以下に斜面崩壊発生確率と人口分布を関係性検討の結果を示す。

図-1は2000年期の再現年50年に対する斜面崩壊発生確率の影響人口である。発生確率の基準として、0%(斜面崩壊の影響外地域分布人口)、0%超過20%以下、20%超過40%以下、40%超過60%以下、60%超過80%以下、80%超過100%以下のカテゴリに分類し影響人口を求めた。この解析結果は、斜面崩壊の影響外地域分布人口に91,387,771人、斜面崩壊発生確率の認められる地域に存在する人口は36,380,223人を示している。地形、地質、再現年50年の降雨状況から斜面崩壊の影響をうける可能性を持つ人口は日本総人口の約28%に達していることが理解できる。気候区分(関口により区分された気候¹⁰)を利用)、および都道府県による影響地域分布人口、影響人口の傾向として、北海道、東海関東型の関東地方の都道府県、瀬戸内型に含まれる大阪府に九州型の福岡等の大都市圏では、影響外地域の人口が多い結果を得た。これは、斜面の少ない沖積平地に市街化が発達していることに起因しており、0%超過20%以下の発生確率に含まれる影響人口も影響外地域の人口も同様の傾向を示している。日本列島内の相対的な比較より、大都市圏は、人的影響を及ぼす危険斜面分布が少ないことを示唆している。20%超過40%以下、40%超過60%以下、60%超過80%以下、80%超過100%以下のカテゴリになると気候区分、および都道府県の傾向が変化する結果を示している。斜面崩壊発生確率により影響人口の多い気候区分と都道府県は①から⑥に示すとおりである。

- ① 東海関東型に含まれる群馬県、静岡県
 - ② 中央高原型の山梨県、長野県、岐阜県
 - ③ 瀬戸内型に含まれる兵庫県、広島県
 - ④ 山陰型に含まれる島根県
 - ⑤ 南海型に含まれる和歌山県、高知県、鹿児島県
 - ⑥ 九州型に含まれる長崎県
- ①から⑥に示されるとおり、多岐にわたる気候区分で影響人口の多い地域が認められている。傾向として日本列島の南部に影響人口の高まる地域が偏在するものの、細

分化した気候よりも地形地質、人口分布の関係性が斜面崩壊の影響人口に寄与していることを示唆する。全体のカテゴリを統括して特徴的な傾向を示す都道府県としてあげられるのが、山梨県、長野県、岐阜県、兵庫県、広島県、高知県、島根県、長崎県である。これらの地域は再現年50年の降雨量で過半数を超える人口が斜面崩壊の影響をうける推計結果を得ている。特に広島県には約75%の影響人口が見込まれる。

最も危険側を示す80%超過100%以下の発生確率のカテゴリでは、日本列島全体人口の約1%である1,325,398人の影響人口が推計された。図-7は80%超過100%以下の発生確率のカテゴリの都道府県影響人口を示したマップである。80%超過100%以下の発生確率のカテゴリで影響人口の多い都道府県を列举すると、兵庫県(194,391人、県総人口3.4%)、広島県(158,408人、県総人口5.7%)、岐阜県(78,344人、県総人口3.8%)、長崎県(76,918人、県総人口5.3%)、静岡県(63,512人、県総人口1.7%)となる。広島県、長崎県は県総人口約5%の人口が発生確率の最も高いカテゴリに分布している。また、県総人口率に着目すると和歌山県、山梨県も約5%が発生確率の高いカテゴリに分布していることが見積もられている。

4. 人口分布の予測

国立社会保障・人口問題研究所のまとめた「日本の将来推計人口(平成24年1月推計)」の報告書⁹⁾によれば、人口推計は、コーホート要因法を基礎としている。コーホート要因法とは、年齢別人口の加齢にともなう生ずる年々の変化をその要因(死亡、出生、および人口移動)ごとに計算して将来の人口を求める方法である。すでに生存する人口については、加齢とともに生ずる死亡と国際人口移動を差し引いて将来の人口を求められる。新たに生まれる人口については、再生産年齢人口に生ずる出生数とその生存数、ならびに人口移動数を順次算出して求め、翌年の人口に組み入れられる。ここに示される方法より集計された都道府県別の人口推移結果を基に斜面崩壊リスクとの重ねあわせ検討を行う。なお、集計結果として、2010年まで5ヵ年ごとで2035年まで、および2050年時の結果が示されている。

図-2には、2010年、2030年、2050年時の都道府県別人口を示す。総じて人口減少が示される。特に人口減少の多い都道府県は大都市圏を含む東京都、大阪府等が列举される。ただし、こうした大都市圏を含む都道府県は2030年代に大きく減少する傾向を示す。その他の都道府県に關すれば、2030年から2050年にかけての方が人口減少の割合の大きい傾向を示している。また、人口減少率の少ない都道府県としては滋賀県、沖縄県が挙げられる。

各都道府県の2050年代までの人口減少をわかりやすくするために示したものが、図-3の人口減少率と年当たり平均人口減少数の関係図である。この結果を参考にすれば、おおよそ人口減少率0.15から0.35、年当たり平均人口減少数1,500以内に概ねの都道府県が含まれる。この領域と比較的に特徴を示すものは、①人口減少率が低い、②人口減少数の割合が大きい都道府県として分類することができる。①に関しては、沖縄県、滋賀県、神奈川県、愛知県、東京都が含まれる。また、②に関しては、愛知県、千葉県、静岡県、東京都、埼玉県、兵庫県、大阪府、北海道が含まれる。図-2の見かけ上で一概に大都市圏は人口減少数が少ないと説明できる一方で、東京都、愛知県は人口減少率も低いことが示される。こうした結果は、人口減少に関わらずある特定の社会領域が消失する、つまり過疎化することとは異なる可能性を示唆する。そのため、災害の起きうる地域が消失するわけでないことに留意しなければならない。

5. 2050年までの斜面崩壊リスクの推移解析

曝露人口を推計するため、人口予測のなされている2000年代(人口2010年時を代替)、2030年代、2050年代の解析結果データを利用し、2050年代の再現年50年の斜面崩壊リスク曝露人口と人口増加を重ね合わせた検討を行った。図-4は、発生確率0%に含まれる2000年比の2030年、2050年の人口増加数、発生確率80%に含まれる2030年、2050年の人口減少数を示したものである。各都道府県で傾向が異なり、2030年代に発生確率0%に含まれる人口10000超で減少する都道府県は、沖縄県、広島県、兵庫県、京都府、岐阜県である。その一方で、発生確率80%から100%に含まれる人口10000超で増加する都道府県は広島県、兵庫県、京都府である。広島県、兵庫県、京都府では、市街化領域で斜面崩壊リスクの著しく高まりが認められること、沖縄県、広島県、兵庫県、京都府、岐阜県も市街地内において斜面崩壊リスクの高まりが生じることを示唆している。また、2030年から2050年になり、発生確率0%に含まれる人口1000人超で減少する都道府県は兵庫県、岐阜県、宮城県、北海道であり、発生確率80%から100%に含まれる人口1000超で増加する都道府県は兵庫県、岐阜県であることが明らかにされた。2050年も兵庫県、岐阜県は、市街化領域で斜面崩壊リスクの著しく増加する傾向を示した。その一方で、特徴的な傾向を示した都道府県は広島県、京都府であり、2050年時の曝露人口増加幅が著しく小さい傾向が明らかにされた。これらの都道府県は市街地よりも、むしろ市街地外での斜面危険度の高まりが拡大することを示唆している。

図-4に示される発生確率0%に含まれる2000年比の2050

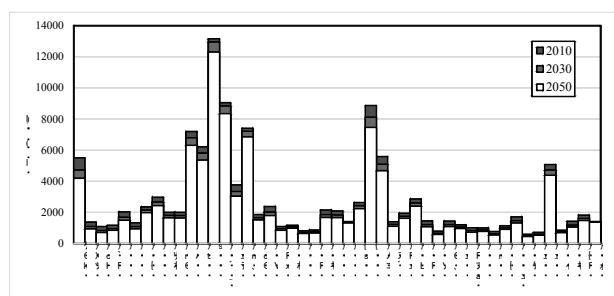


図-2 2010年、2030年、2050年時の都道府県別人口

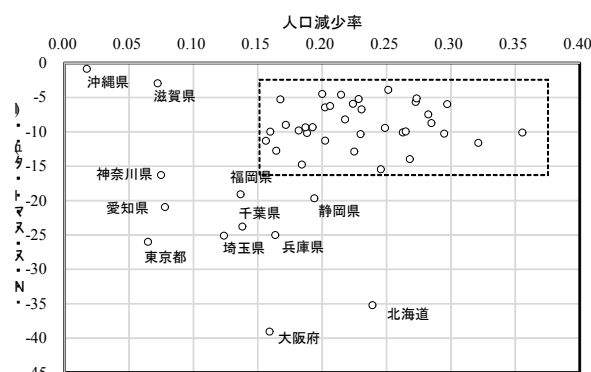
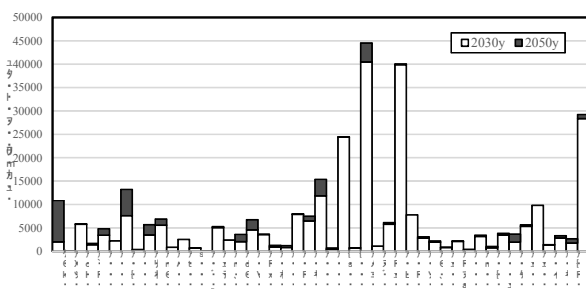
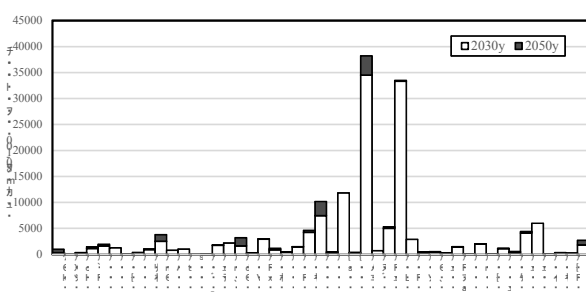


図-3 人口減少率と年当たり平均人口減少数の関係



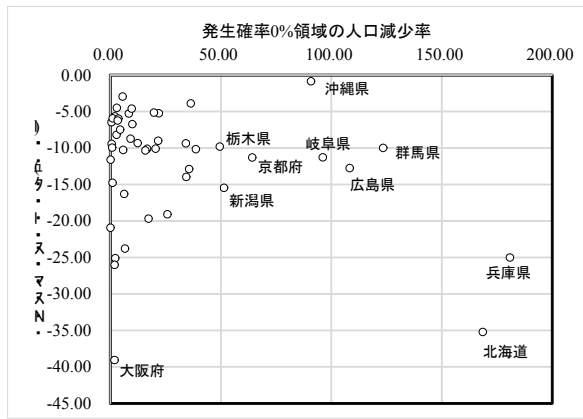
(1) 発生確率 0%に含まれる 2000 年比の 2030 年、2050 年の人口増加数



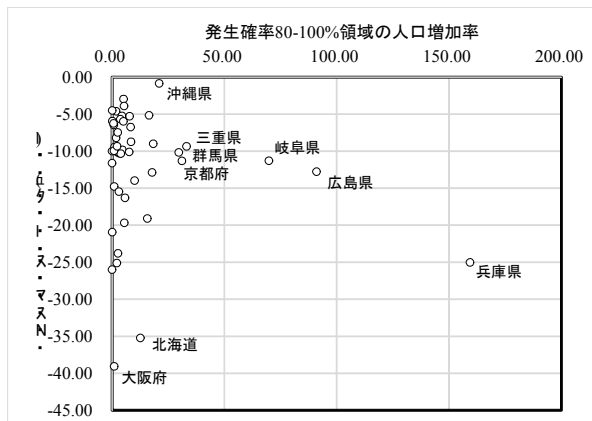
(2) 発生確率 80%に含まれる 2030 年、2050 年の人口減少数

図-4 斜面崩壊発生確率に応じた都道府県別曝露人口

年の人口増加数、発生確率80%に含まれる2050年の人口減少数の時間的変化と人口増加の比率を重ね合わせ比較した結果が、図-5である。この結果より、兵庫県、北海道、大阪府に関しては人口増加減少数が大きく、この斜面崩壊リスクに大きな不確実性を含む可能性が含まれていること、特に時間変化に応じて斜面崩壊リスクの変化量も大きい兵庫県、北海道はその傾向が大きくなる可能



(1)発生確率0%曝露人口と人口減少の関係



(2)発生確率0%曝露人口と人口減少の関係

図5 斜面崩壊リスク曝露人口と人口減少(2050年)

性が明らかにされた。こうした不確実性に対して、空間解像度の細やか解析を実施して斜面崩壊リスク領域の特定を試みる等を実施し、再度精度の高い検証を行う必要性があるといえる。また、斜面リスクの高まる、沖縄県、栃木県、岐阜県、群馬県、京都府、広島県、新潟県なども10,000人規模程度の誤差を含むため留意が必要といえる。

6. 現在段階でのまとめ

IPCC AR4に利用されたCMIP3の数値気候モデルに基づく降雨データを用いた都道府県別の斜面崩壊における人口影響リスク結果³⁾に、国立社会保障・人口問題研究所のまとめた「日本の将来推計人口（平成24年1月推計）」の報告書⁹⁾の人口推移データを重ね合わせ比較することで、温暖化に応じた人口影響リスクの推計した。おおよその都道府県別のリスク傾向は明らかにされ、広島県、兵庫県、京都府、沖縄県、広島県、兵庫県、京都

府、岐阜県の曝露人口の顕著な傾向は明らかにされたものの、人口予測によるリスク不確実性の大きさをも明らかにされた。そのため、今後はCMIP5による気候モデルアウトプットと、将来人口予測データを利用し、空間解像度1km×1kmの精度による斜面崩壊の曝露人口を見積もり、不確実性に対する解析を進める予定である。

謝辞：本研究は環境省地球環境研究総合推進費（S-8）の研究助成によって行われた。ここに記して謝意を示す次第である。

参考文献

- 1) IPCC : Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, <http://ipcc-wg2.gov/SREX/>, 2011
- 2) 例えば Andreas Benedikter, Peter Läderach, Anton Eitzinger, Simon Cook and Michele Bruni : Addressing Adaptation to Support Disaster Risk Reduction: A Framework for Supply Chain Inclusive Adaptation to Climate Change, Climate Change Management, pp.513-533,2013.
- 3) 例えば Aavudai Anandhi : Assessing impact of climate change on season length in Karnataka for IPCC SRES scenarios, Journal of Earth System Science, Vol.119, Issue 4, pp.447-460, 2010.
- 4) 例えば William Solecki, Robin Leichenko, Karen and O' Brien : Climate change adaptation strategies and disaster risk reduction in cities: connections, Environmental Sustainability, Vol.3, pp.135-141, 2011.
- 5) 川越清樹・江坂悠里 : 気候システムの温暖化による斜面崩壊と影響人口の関係に関する推計, 土木学会論文集 G(環境), Vol.68, No.5, I_287-I_296, 2012.9.
- 6) 国立社会保障・人口問題研究所 : 日本の将来推計人口（平成24年1月推計）報告書, http://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/suikai07/P_HP_H1812_A/index2.html, Site viewed 2014/06/03.
- 7) 例えば William Solecki, Robin Leichenko, Karen and O' Brien : Climate change adaptation strategies and disaster risk reduction in cities: connections, Environmental Sustainability, Vol.3, pp.135-141, 2011.
- 8) S. Kawagoe, S. Kazama, and P. R. Sarukkalgige : Probabilistic modeling of rainfall induced landslide hazard assessment, Hydrology and Earth System Sciences, Vol.14, pp.1047-1061, 2010.
- 9) 例えば吉松弘行 : 山腹崩壊の予測式について, 新砂防, No.102, 1977.
- 10) 関口武 : 日本におけるケツペンの気候区, 社会地理, Vol.15, pp.12-16, 1949.