

1 はじめに

土壌雨量指数（Soil Water Index: SWI）とは、降った雨が土壌中にどれだけ貯まっているのかを、3段の直列タンクモデルに時間降水量を与えて計算した指標（3つのタンクに貯まっている水量の和: 図1の $S_1+S_2+S_3$, 単位: mm）である（図1の点線で囲んだ部分）。そのため、土壌雨量指数は長期間の降水量に関する指標とみなせる（岡田ほか 2001）。土壌雨量指数では、現在注目している降水イベントの値と、過去10年間（カレンダー年）の最大値とを比較して、前者が後者を上回る時に土砂災害が発生しやすいことが指摘されている（岡田ほか 2001）。そのため、土壌雨量指数は土砂災害警戒情報が発表される際に用いられるなど、今日では日常業務で用いられている（Osanai et al. 2010）。筆者たちもそのような観点から土壌雨量指数に関する研究を進めてきており（Saito et al. 2010a, b, 齋藤ほか 2011, Saito and Matsuyama 2012, 2015）、その有効性はこれまで実証的に示されている。

しかしながら、土壌雨量指数には、「冬季であっても降水が降雨として地下に浸透してしま

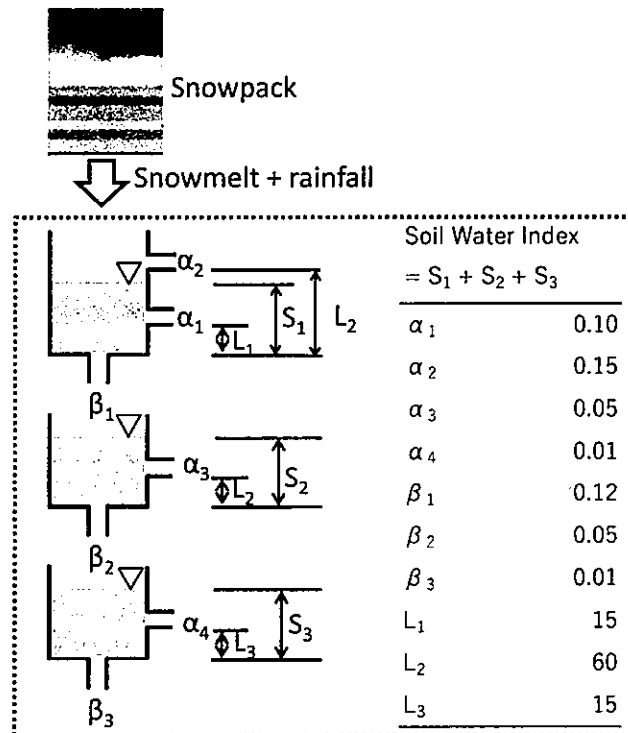


図 1: 土壌雨量指数を計算する 3 段のタンクモデルに積雪を追加した模式図（清水・上村, 2018 を元に作成）。点線内はオリジナルの土壌雨量指数（岡田ほか 2001）を示している。融雪に関するパラメータは後述する表 1 を参照のこと。

う」という問題点がある。大雨が降る時に土砂災害が発生しやすいことは容易に想像がつくが、積雪地域では冬季に積もった雪が春先に融ける。これは、地面側にとっては雨が降っているのと同じことであり、その時が晴天であっても土砂災害が発生する場合がある(例えば、白谷ほか 2013, 宮崎ほか 2017, 後述する図 2)。

白谷ほか (2013) では、札幌郊外の中山峠において 2012 年 5 月 4 日に発生した土砂災害を解析し、降水量に関係なく融雪によって土壌水分量が増加していた可能性を示した。しかしながら、白谷ほか (2013) では中山峠を含む流域の水循環をよく再現できるようにモデルのパラメータが最適化されており、ここで構築された水循環モデルを他の地域に適用することはできない。宮崎ほか (2017) は、土壌雨量指数を用いて白谷ほか (2013) と同じ土砂災害の事例を解析したが、融雪量を求めるために必要なデータが多く(毎時の気温、湿度、風速、積雪深、日射量、気圧、および各メッシュにおける地形・地被データ)、少なくとも、本研究で対象とするトムスク(ロシア)には適用できない。このような問題点はあるものの、宮崎ほか (2017) で述べられているように、土壌雨量指数を用いて融雪期の土砂災害発生を推定した研究は少なく、事例数を積み重ねる必要がある。そのためには、冬季の降雪-積雪-融雪過程を土壌雨量指数に導入する必要がある(図 1)。

これに関連して、本研究ではトムスクを対象地域として、土壌雨量指数の適用可能性について調べる。トムスクは、本研究助成で対象とする「広い意味でのアジアの一部」であり(永山・吉田 2018)、市の西部を流れるトム川の融雪洪水と、市街地のある河岸段丘における斜面災害が問題になっている。本研究では、トムスク国立大学の教員たちと協力することによってこの問題を解決することを目指す。彼らは、行政からの支援を得て斜面災害のモニタリング及び発生予測に関する研究を行っており、彼らの研究に土壌雨量指数を組み込むことで、実践的な自然災害予測・防災研究を行なうことができる。これは社会的な意義も大きい。

しかしながら、ロシアでは時間降水量のデータを入手することができず、気象データは日単位のもの、あるいは 3 時間ごとのものが利用できるだけである(RIHMI-WDC 2019)。土壌雨量指数の計算には時間降水量が必要なため、冬季の降雪-積雪-融雪過程を土壌雨量指数に導入したとしても、現状ではトムスクの気象データを用いて土壌雨量指数を計算することはできない。そのため、本研究では、以下の課題に取り組んだ。ここでは、①の研究成果を②で利用するため、実際にこの順番で研究を行なった。

- ① 顕著な土砂災害が発生した日本国内の事例を対象とし、日降水量から時間降水量を推定した場合に土壌雨量指数がどのように変化するかを明らかにする。
- ② 毎時の気象データ、および融雪期の土砂災害発生状況(場所および日時)が利用可能な日本の積雪地域を対象として、降雪-積雪-融雪過程を土壌雨量指数へ導入する。
- ③ ①、②を踏まえたうえで、トムスクの日単位の気象データを用いて土壌雨量指数を計算する。顕著な融雪災害が起こった年(2010年)を対象として、計算結果の妥当性について検討する。

以下では、上記①～③を実現するための具体的な手順について述べる。

2 データ

(1) 日降水量から時間降水量を推定した場合に土壌雨量指数がどのように変化するかに関する日本国内のデータ

大雨に伴う日本国内の土砂災害発生事例を対象として、日降水量から時間降水量を推定した場合に土壌雨量指数がどのように変化するか、感度分析を行なった。事例として、「平成 24 年 7 月九州北部豪雨」(福岡管区気象台 2012) を取り上げた。これは、「平成 24 年 7 月九州北部豪雨」によって阿蘇地方で斜面崩壊が多発したこと(宮縁 2012, 齋藤ほか 2016), そして筆者たちも「平成 24 年九州北部豪雨」の解析をやりかけたことがあり、いつ、どこで斜面崩壊が発生したか時間単位で把握できていること(田中ほか 2014, 松山ほか 2014)による。解析に用いたのは、AMeDAS 阿蘇乙姫の時間降水量(気象庁 2019) および、2017 年 7 月 12 日付の熊本日日新聞夕刊(土砂災害発生時刻に関する記事)である。後者によると、AMeDAS 阿蘇乙姫周辺では 2012 年 7 月 12 日 6 時頃に土砂災害が発生したことが明らかになっている。

(2) 土壌雨量指数に降雪－積雪－融雪過程を取り込むための日本国内のデータ

2006～2009 年の日本国内における、融雪に伴う土砂災害の発生状況(場所および年月日)について、国土交通省および関連する Web サイトから収集した(図 2)。対象としたのは、データを収集できた新潟県の AMeDAS 関山周辺である。

AMeDAS 関山のデータは気象庁(2019) から入手した。解析に用いたのは 2005 年 10 月 1 日～2006 年 9 月 30 日における時間降水量, 日最高気温, 日最低気温, 毎時の積雪深である。これは、2.(2) 節で述べるトムスクの気象データが、日降水量, 日最高気温, 日最低気温, 5 日ごとの積雪深しか利用できないためである。AMeDAS 関山のデータにはこの他、風向・風速と日照時間があり、日本国内については風速を用いた降水量捕捉率の低下を補正することも可能である(例えば Motoyama 1990, 大野ほか 1998)。しかしながら、最終的にはトムスクにおいて、降雪－積雪－融雪過程を導入した土壌雨量指数を適用することが本研究の目的なので、降水量捕捉率の低下について今回は考えなかった。そのため、本研究では時間降水量, 日最高気温, 日最低気温を土壌雨量指数への入力とし、毎時の積雪深を用いて計算結果の妥当性を検討した(3.(2) 節参照)。

(3) トムスクの水文・気象データ

トムスクの水文・気象データは、RIHMI-WDC(2019) から入手した。トムスクでは、1881 年 1 月 1 日以降の日降水量と日平均気温が利用できる。また、日最低気温と日最高気温については、それぞれ、1890 年 1 月 1 日以降と 1925 年 6 月 1 日以降のデータが利用できる。土壌雨量指数の検証に用いる積雪深のデータは、1966 年 1 月以降、5 日または 10 日ごとのデ

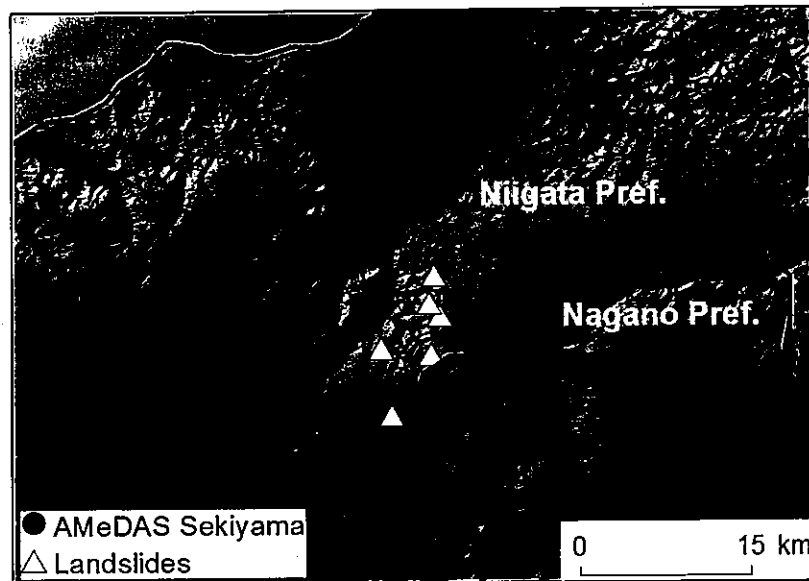


図 2: AMeDAS 関山付近における、2006～2009 年の融雪に伴う土砂災害の発生箇所の分布
(関東学院大学 齋藤 仁准教授作成)

ータが利用できる。しかしながら、このデータには消雪時期を確定できない年があるという問題点がある(5.(2) 節参照)。なお、トムスクについては1966年1月1日以降については、3時間ごとの気象データも利用できる(RIHMI-WDC 2019)。しかしながら、日単位のデータを用いる場合であっても、十分な時間分解能が得られていることが分かっているので(4.(2) 節)、ここでは3時間ごとのデータ解析は行なわなかった。

3 解析方法

(1) 日降水量から時間降水量を推定した場合の土壌雨量指数の感度分析

日降水量しか利用できない状況下で時間降水量を推定する方法として、以下の2つが考えられる。(a) 時間降水量=日降水量/24として与える。(b) 乱数を発生して時間降水量を求める。ただし、日降水量は保存するようにする。

2012年7月9日1時～7月14日24時(日本時間)におけるAMeDAS阿蘇乙姫の時間降水量および日降水量を用いて、上述した(a)、(b)の方法を用いて仮想的な時間降水量を作成し、これを入力として土壌雨量指数を計算した。得られた土壌雨量指数と、「観測された時間降水量を入力として計算された土壌雨量指数」とを比較した。

(2) 土壌雨量指数への降雪-積雪-融雪過程の導入

2005年10月1日～2006年9月30日におけるAMeDAS関山のデータを用いて、融雪に伴う土砂災害発生のタイミングを再現できるように、オリジナルの土壌雨量指数を改良して降雪-積雪-融雪過程を追加した(図1)。まず、2時に日最低気温、14時に日最高気温が生

じると仮定して、気温の日変化を三角関数で表現した。3.(1) 節で述べた感度分析によって、土砂災害の発生時刻をピンポイントで推定するためには時間降水量が必要なことが判明しており（4. (1) 節参照）、AMeDAS 関山付近で発生した融雪に伴う土砂災害の発生時刻についてはここまでの時間分解能はなかったため、ここでは時間降水量=日降水量/24 として土壤雨量指数を計算した。三角関数で表現された気温の日変化を用いて雨雪判別を行ない、小川・野上（1994）にならって判別の閾値は気温 2°Cとした。

融雪は、気温が 0°C以上の時に生じるとして degree-hour 法で計算した（例えば、山崎 1994）。これに用いる融雪係数は試行錯誤で決定した。上面融雪（雪面と大気との間で生じる融雪）と下面融雪（積雪と地面との間で生じる融雪）は区別せず、両者を合わせて融雪係数を求めた。具体的には、計算で得られた積雪水量（積雪を融かした時の水の深さ）の季節変化が、観測された積雪の発生・消滅時期と合致するように、融雪係数のみを調整した。融雪係数の妥当性は、作成されたグラフを見て目視で判断した。ここで、最適化したパラメータを表 1 に示す。

(3) トムスクの気象データへの、改良した土壤雨量指数の適用

降雪－積雪－融雪過程を導入した土壤雨量指数をトムスクの気象データに適用し、トムスクで融雪災害が起こった年（2010 年）の融雪期の状況を再現できるかどうか検討した。2009 年 10 月 1 日～2010 年 9 月 30 日のトムスクのデータに対して、3.(2) 節と同じ方法を用いて融雪係数を決定した。この場合の融雪係数は 0.7 mm・°C/day となった。

4 結果

(1) 日降水量から時間降水量を推定した場合の土壤雨量指数の感度分析

図 3 は、AMeDAS 阿蘇乙姫にて、2012 年 7 月 9 日 1 時～7 月 14 日 24 時において、時間降水量=日降水量/24 としたものを入力として計算した土壤雨量指数と、観測された時間降水量を入力として計算した土壤雨量指数とを比較したものである。なお、図 3 には、2002～2011 年の同地点における土壤雨量指数の最大値（245 mm）が点線で示されている。

表 1: 2005 年 10 月 1 日～2006 年 9 月 30 日の AMeDAS 関山のデータを用いて最適化した降雪－積雪－融雪過程に関するパラメータ

日最低気温が生じる時刻	2 時
日最高気温が生じる時刻	14 時
時間降水量の与え方	日降水量 / 24
雨雪判別の閾値	2 °C
融雪が発生する気温	0 °C
融雪係数	1.1 mm・°C/day

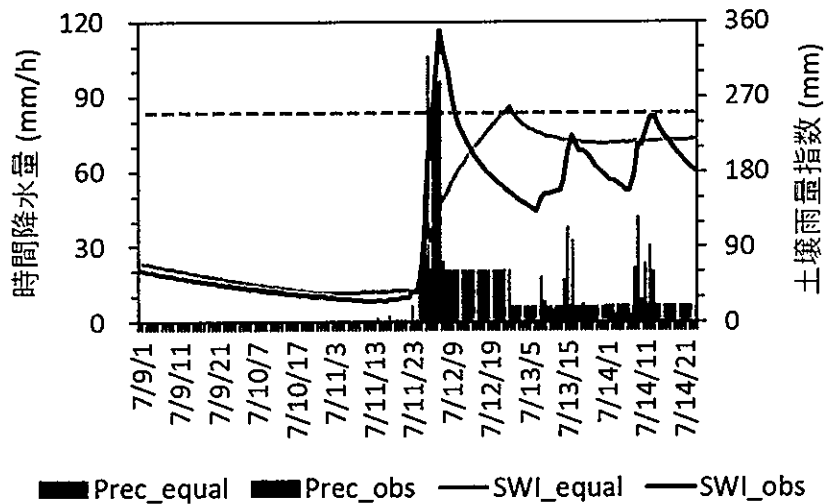


図 3: AMeDAS 阿蘇乙姫にて 2012 年 7 月 9 日 1 時～7 月 14 日 24 時において、時間降水量 = 日降水量/24 としたもの (青色棒) を入力として計算した土壌雨量指数 (橙線) と、観測された時間降水量 (灰色棒) を入力として計算した土壌雨量指数 (黒線) との比較。緑色の点線は、2002～2011 年の同地点における土壌雨量指数の最大値 (245 mm) である。

観測された時間降水量を入力として土壌雨量指数を計算した場合には、7 月 12 日 0 時頃に過去 10 年間の土壌雨量指数の最大値を超え、7 月 12 日 6 時に鋭いピークがみられる (図 3)。実際、この頃に AMeDAS 阿蘇乙姫付近で土砂災害が発生している (熊本日日新聞 2012 年 7 月 12 日付夕刊による)。

一方、時間降水量 = 日降水量/24 としたものを入力として土壌雨量指数を計算した場合には、7 月 12 日の夜半に過去 10 年間の土壌雨量指数の最大値を超える。すなわち、今回の大雨によって土砂災害が発生する条件を満たしたものの、土壌雨量指数の値がピークを迎えるのは 7 月 12 日 24 時であった (図 3)。つまり、土砂災害発生時刻をピンポイントで予測する場合には、時間降水量の観測値が必要不可欠であることが、この解析によって分かる。

図 4 は、乱数を発生させて求めた時間降水量を用いて、図 3 と同様の解析を行なった結果である。図 3 で時間降水量 = 日降水量/24 としたものを入力として計算した土壌雨量指数と比べて、図 4 では 1 日の中で短周期の変動が生じていることが分かる。しかしながら、図 3 と図 4 のいずれも日降水量は等しくなっているため、7 月 9 日から 14 日にかけての土壌雨量指数の大まかな変化の様子は、図 3、図 4 とともに類似している。すなわち、ピンポイントで土砂災害発生時刻を予測するのでなければ、時間降水量 = 日降水量/24 として与えるのでよいと言える。

(2) 土壌雨量指数への降雪－積雪－融雪過程の導入

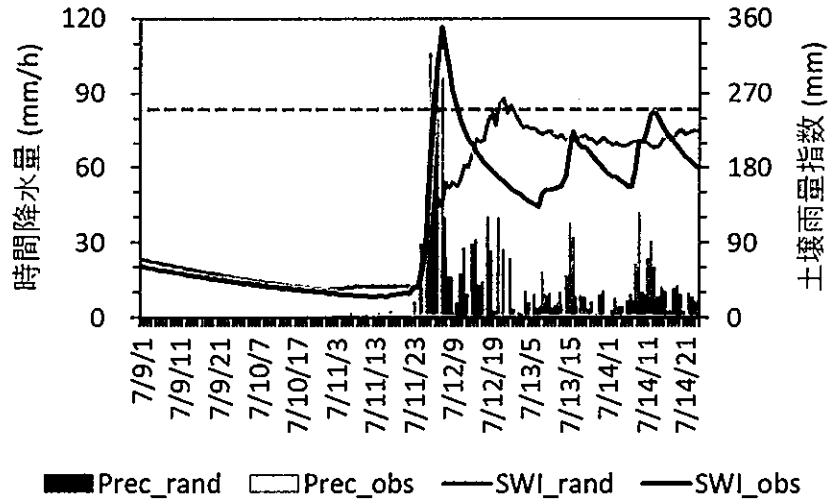


図 4: 図 3 と同じ。ただし、青色棒は乱数を発生させて求めた時間降水量であり、日降水量が保存するように調整してある。

4.(1) 節の感度解析において、「ピンポイントで土砂災害発生時刻を予測するのではなく、時間降水量=日降水量/24 として与えるのでよい」ことが分かった。本節で用いる「融雪に伴う土砂災害発生時刻」には、図 5,6 の時間スケールで見るとそのまでの時間分解能はないため、土壌雨量指数への降雪-積雪-融雪過程の導入に際しては、時間降水量=日降水量/24 として求めて、土壌雨量指数の計算に用いることにする。

図 5 は、AMeDAS 関山にて、2005 年 10 月 1 日～2006 年 9 月 30 日において、観測された時間降水量を入力として計算した土壌雨量指数を示している。この図では、降雪-積雪-融雪過程は考慮されていないため、降水量が増加する 2005 年 12 月と暖候期に大雨が観測された 2006 年 7 月に土壌雨量指数の値が高まっていることが分かる。2005 年 12 月の降水は

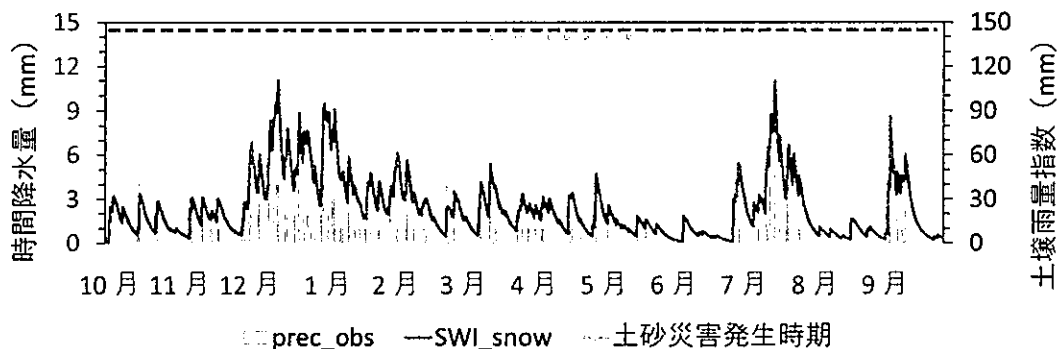


図 5: 2005 年 10 月 1 日～2006 年 9 月 30 日の AMeDAS 関山の毎時の降水量観測値 (棒グラフ) を入力として計算された土壌雨量指数 (実線)。ただし、降雪-積雪-融雪過程は導入されていない。1995～2004 年の土壌雨量指数の最大値 (143 mm) を点線で示す。

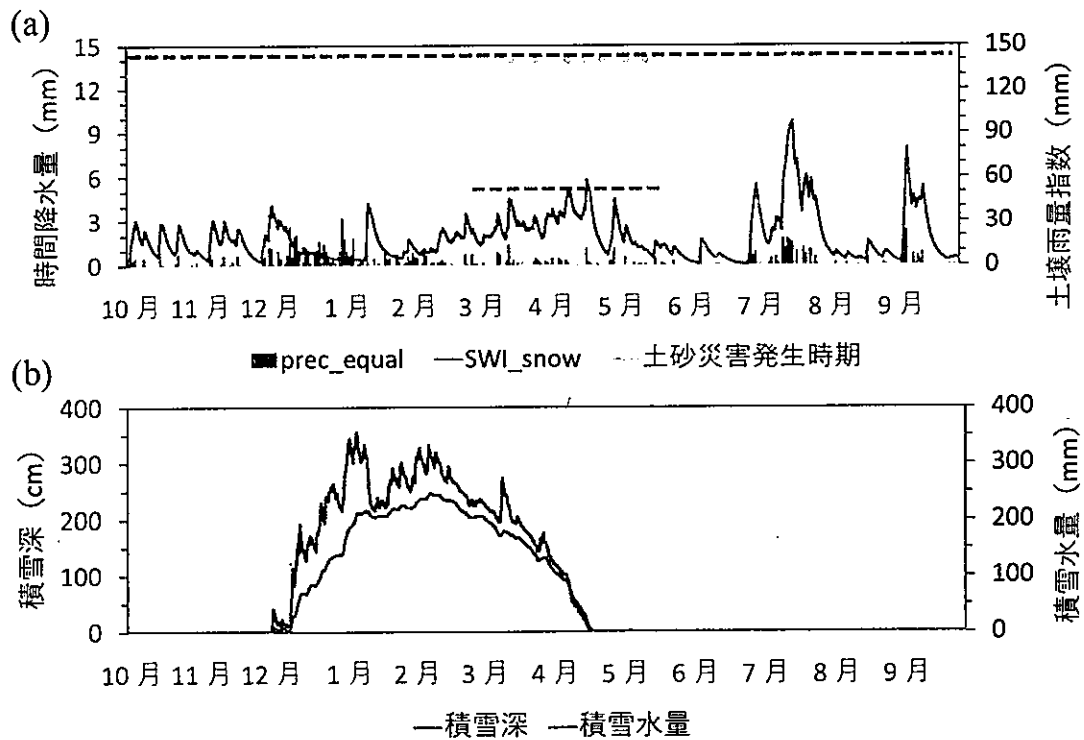


図6: (a) 図5と同じ。ただし、時間降水量は日降水量/24として与え、降雪-積雪-融雪過程を導入した後のもの。融雪期(3~5月)における土壌雨量指数の最大値(53mm)も点線で示した。(b) (a)と同じ期間について、AMeDAS 関山において観測された積雪深(青線)と計算で得られた積雪水量(橙線)。

降雪として生じていた可能性が示唆されるが、ここでの計算では全て降雨として地面に浸透してしまうため、図5のようになってしまう。また、図5上部には融雪に伴う土砂災害発生時期も点で示されているが、土砂災害が発生した3~5月には土壌雨量指数の値が高まっていないことも分かる。なお、2005年10月~2006年9月30日における土壌雨量指数の最大値は、2005年12月15日5時における111mmである。一方、過去10年間(1995~2004年)における土壌雨量指数の最大値は1995年7月11日22時の143mmであるため、2005年12月15日の土壌雨量指数の高まりは、土砂災害を発生させるほどのものではない。

これに対して図6(a)は、降雪-積雪-融雪過程を導入して計算した土壌雨量指数を示している。ここでは、時間降水量=日降水量/24として計算がなされている。図5において2005年12月にみられる土壌雨量指数の高まりは図6ではみられなくなっている。これは、この時期の降水が降雪として生じ、図1の積雪となったためである。図6(a)では土壌雨量指数は融雪末期に向けて増加し、2006年4月20日22時に融雪期の最大値63mmを記録している。融雪末期に向けて土壌雨量指数の値が増加していくのは、この時期に融雪に伴う土砂災害発生が頻発すること(図5,6上部の点)と調和的である。なお、図6における土壌雨量指

数の年間の最大値は、2006年7月20日0時における98mmであり、過去10年間の最大値(143mm)を超えるものではない。

図6(b)は観測された積雪深(単位:cm)と計算で得られた積雪水量(単位:mm)の季節変化を示している。ここで、両者は異なる物理量であることに注意されたい(5.(1)節参照)。しかしながら、積雪が存在しなければ両者ともに0(cmもしくはmm)になり、この計算において試行錯誤で決めなければならないのは融雪係数だけであるため、ここでは積雪深および積雪水量の発生/消失時期が合致するように融雪係数を決定した。そのため、図6(b)において、積雪深および積雪水量の発生/消失時期が合致するのは当然のことである。

ここで注目すべきは、「このように決定した融雪係数を用いて計算した土壌雨量指数が、2006年の融雪末期に、融雪期(ここでは3~5月とする)の最大値を取る」ということである。ちなみに、図6の融雪期における土壌雨量指数の最大値は2006年4月20日の63mm、過去10年間(1995~2004年)の融雪期における土壌雨量指数の最大値は1997年4月6日23時の53mmであり、融雪期に限れば2006年4月20日の値は、過去10年間の最大値を上回っていた。図6上部の点からは、この頃、融雪に伴う土砂災害が発生していることから、融雪期に限定した土壌雨量指数に着目することによって、融雪に伴う土砂災害の発生を予測できる可能性がある。これは、履歴順位に注目する土壌雨量指数の長所であるといえるが、今回の場合、その時間分解能は図5,6上部の点で示したように極めて粗い。

(3) トムスクの気象データへの、改良した土壌雨量指数の適用

4.(1)節と4.(2)節の解析に基づき、2009年10月1日~2010年9月30日のトムスクにおいて、降雪-積雪-融雪過程を導入した土壌雨量指数を計算し、2010年の融雪期に発生した災害(図7)を予測できるかどうかについて検討した。この場合、土砂災害というよりは融雪洪水であるが、融雪期に積雪が一気に融けて、河川が氾濫したことは間違いない。

図8は、2009年10月1日~2010年9月30日のトムスクにおける時間降水量(日降水量/24)、土壌雨量指数、および融雪期(3~5月)における1999~2008年の土壌雨量指数の最大値(29mm)を示している。この図から、2009年10月~2010年9月においては、融雪期の土壌雨量指数が年間の最大値(31mm)となっていることが分かる。この最大値は2010年4月28日12時に生じており、31mmという値は、融雪期に限れば過去10年間の最大値であった(図8)。図7に示したように、4月28~29日はトムスクにおける融雪洪水の最盛期であり、降雪-積雪-融雪過程を導入した土壌雨量指数は、この発生時期をよく再現できていると言える(図8a)。ただし、気をつけなければならないのは、図8(a)はトムスクの地点データを用いた計算結果であり、融雪洪水は上流域の状態を反映したものであるという空間スケールの違いである。つまり、両者の発生時期は必ずしも一致しなくてもよいわけであるが、4.(2)節の解析結果と合わせて考えると、融雪期に限定した土壌雨量指数に注目することで、融雪災害の発生を予測できる可能性があると言える。

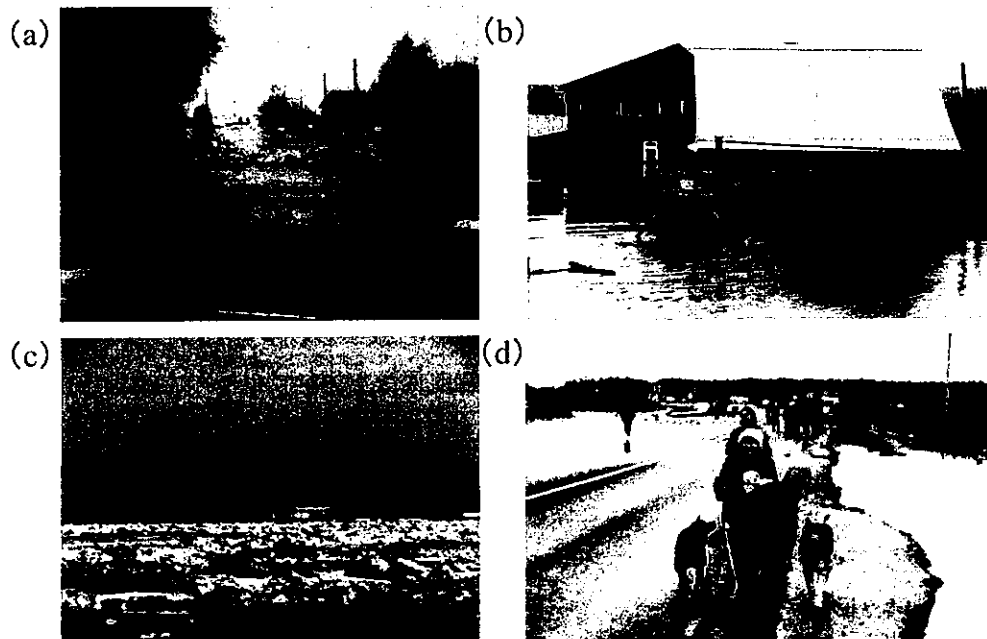


図 7: 2010 年 4 月末にトムスクで発生した融雪災害の状況. (a), (b) 2010 年 4 月 28 日, (c), (d) 2010 年 4 月 29 日撮影. いずれも, トムスク国立大学水文学科 A. Tarasov 助教による.

5 考察

(1) 積雪深と積雪水量について

本研究では, 土壌雨量指数に降雪-積雪-融雪過程を導入するために, 観測された積雪深 (cm) と計算された積雪水量 (mm) を比較して, 積雪の出現・消滅時期が一致するように融雪係数 ($\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}/\text{day}$) の値を決定した (図 6, 8). ここで, 積雪深と積雪水量はともに長さの次元を持つが, 両者の持つ意味は全く異なる. いま, 積雪深が cm, 積雪密度が g/cm^3 で与えられている時に積雪水量 mm は, 以下の式 (1) で求めることができる.

$$\text{積雪水量 (mm)} = \text{積雪深 (cm)} \times \text{積雪密度 (g/cm}^3\text{)} \times 10 \text{ (cm} \rightarrow \text{mm の単位換算)} \quad (1)$$

積雪深が 0 cm であれば積雪水量も 0 mm である. そのため, 本研究では積雪の出現・消滅時期に注目したが, これは検証データとして積雪深のデータしか利用できないからである. 図 6 と図 8 は積雪の出現・消滅時期はよく再現できている. しかしながら, 冬季を通じた両者の途中経過には定量的な問題がある.

場所による違いはあるが, 降雪 (新雪) の密度は $0.10 \sim 0.15 \text{ g}/\text{cm}^3$, 融雪期の積雪密度は $0.5 \sim 0.6 \text{ g}/\text{cm}^3$ である (例えば, 山崎 1994). トムスクにおいて観測された積雪深と計算された積雪水量を示した図 8 を見ると, 融雪直前の 3 月末には 100 cm の積雪があることが分かる. ここで, 積雪密度 $0.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ を仮定すると, 式 (1) によって計算される積雪水量は 500

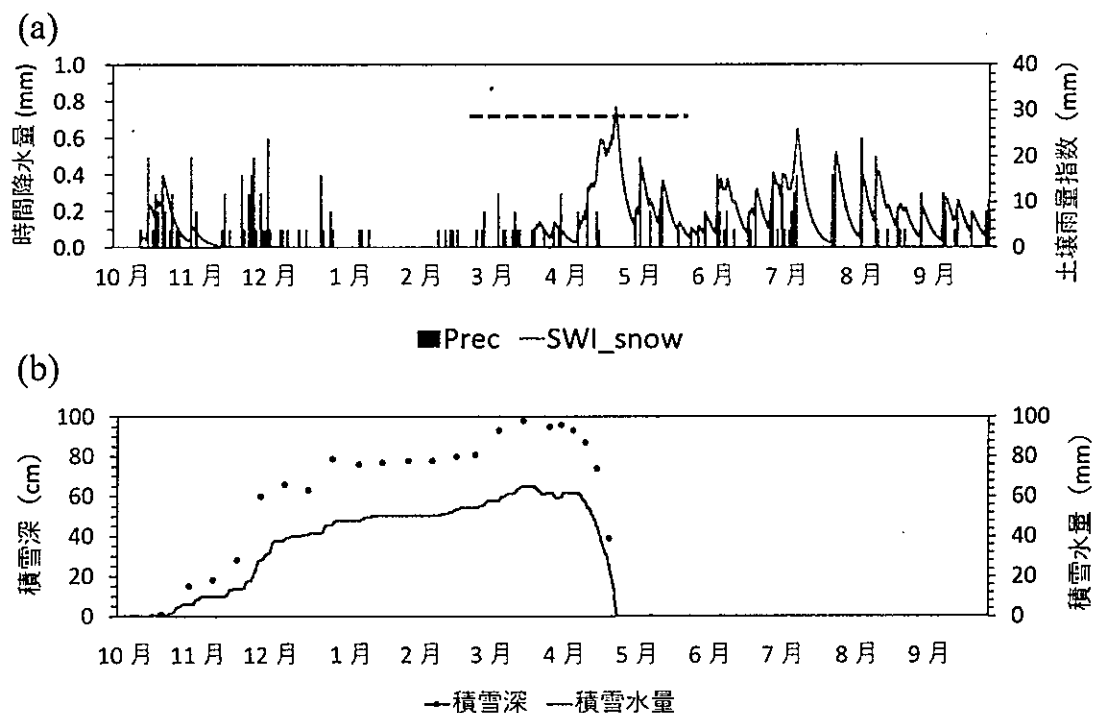


図 8: (a) 2009 年 10 月 1 日～2010 年 9 月 30 日のトムスクにおける時間降水量（日降水量／24，棒グラフ）を与え，降雪－積雪－融雪過程を考慮して計算された土壤雨量指数（実線），1999～2008 年の融雪期（3～5 月）における土壤雨量指数の最大値（29 mm）を点線で示す．(b) (a) と同じ期間について，トムスクにおいて観測された積雪深（青線）と計算で得られた積雪水量（橙線）．

mm になる．しかしながら，図 8 に示された同時期の積雪水量は 60 mm しかない．つまり，図 8 に示された積雪水量の季節変化の様子はよいとしても，定量的には一桁異なっており，本研究にはこの程度の不確実性がある．

この点について，1 章で挙げた白谷ほか（2013）や宮崎ほか（2017）では，解析対象流域の流量データを検証に用いて積雪水量の定量化を行なっている．白谷ほか（2013）や宮崎ほか（2017）は本研究と同様に，タンクモデルを用いて積雪が土砂災害発生に及ぼす影響を調べたものであるが，白谷ほか（2013）では，タンクモデルのパラメータも解析対象流域特有のものに最適化している．これは，解析対象流域を調べるのにはよいが，パラメータの可搬性という意味では問題がある．

そもそも土壤雨量指数は，Ishihara and Kobatake (1979) の 3 段直列タンクモデルに花崗岩を多く含む地質のパラメータを与えて日本全国一律に計算するものである．Ishihara and Kobatake (1979) の 3 段直列タンクモデルのパラメータは地質の違いにより 5 種類あり，土壤雨量指数の値はそれぞれ異なる．しかしながら，値は異なるものの雨によって履歴順位が

入れ替わることは少ない。この履歴順位に注目するところが土壌雨量指数の長所であり、そのため、図 6,8 の積雪水量に定量的な問題点があったとしても、融雪に伴う土砂災害や洪水の発生時期をうまく推定できていると言える。

(2) トムスクの気象データについて

土壌雨量指数の計算に用いたトムスクの気象データ (RIHMI-WDC 2019) にも問題がある。特に、積雪深については消雪時期が分からない年があり、2010 年 4 月がこれに相当する (図 8)。図 8 では、2010 年 4 月 25 日に 39 cm の積雪が観測されているが、融雪期の観測はこれが最後であり、5 月以降の積雪の有無は分からない。3. (2) 節で、「計算で得られた積雪水量の季節変化が、観測された積雪の発生・消滅時期と合致するように、融雪係数のみを調整した。融雪係数の妥当性は、作成されたグラフを見て目視で判断した。」と述べたが、観測された積雪深にもここで述べたような問題点がある。そのため、試行錯誤で得られたトムスクにおける融雪係数 $0.7 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}/\text{day}$ には、この程度の不確実性がある。

トムスクでは、1966 年 1 月以降 3 時間ごとの気象データを利用できるが、検証に用いる積雪深データに、ここで挙げたような問題点があるので、3 時間ごとの気象データを用いて土壌雨量指数を計算しても精度は向上しないであろう。むしろ、融雪期の土砂災害を推定するためには、この時期の降水量そのものではなく、冬期を通じた積雪深を把握することが重要である。融雪期の積雪密度は $0.5 \sim 0.6 \text{ g}/\text{cm}^3$ とすればよく (例えば、山崎 1994)、積雪深が分かれば、融雪が土壌雨量指数に与える影響を把握できる。なお、精度 $0.1 \text{ g}/\text{cm}^3$ で積雪密度の観測を行なうことは難しいことが松山 (1998) によって示されているので、積雪密度 $0.1 \text{ g}/\text{cm}^3$ の違いは誤差の範疇である。

(3) 今回、トムスクで決定した融雪係数の可搬性 (他の年への適用可能性) について

今回、トムスクにおける融雪係数は、2009~2010 年に観測された積雪深と計算された積雪水量を比較することによって $0.7 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}/\text{day}$ と算定された。すると、次には、この値が他の年にも適用可能なのかという疑問が生じる。

図 9 は、1999~2000 年 (土壌雨量指数が履歴を参照する過去 10 年間のうちの最初の年) と 2006~2007 年 (過去 10 年間でデータがある最後の年) における観測された積雪深と計算された積雪水量を示している。どちらの年も両者の季節変化はよく対応しているように見えるが、5. (2) 節で述べたようにトムスクでは、4 月中~下旬になると積雪が残っていても積雪観測を止めてしまうため正確な消雪時期は分からない。しかしながら、図 9 を見る限り、 $0.7 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}/\text{day}$ という融雪係数の値は、2009~2010 年以外にも適用できそうである。

ここでは示さないが、本研究では 1999~2007 年の全ての年について図 9 と同様の図を作成して検討しており、主観的な判断ではあるが、いずれの年も良好な結果が得られている。そのため、トムスクに関していえば、年が違っても融雪係数は $0.7 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}/\text{day}$ としてよい。そして、5. (2) 節の議論からも、融雪初期の積雪深および気温を精度よく推定することが、ト

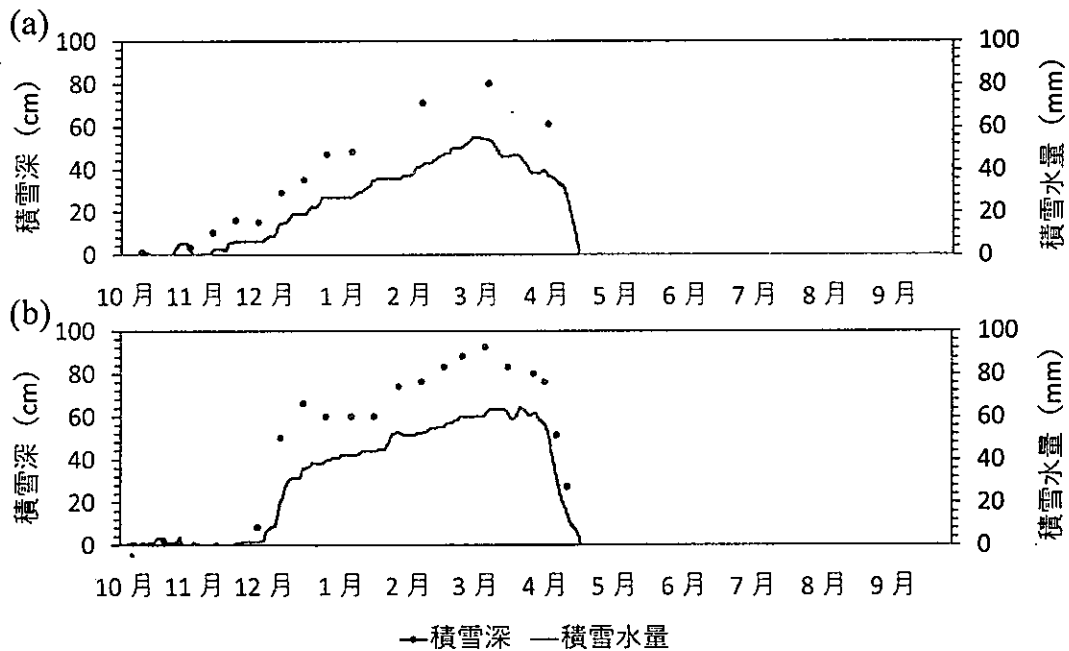


図9: 2009～2010年の気象データで決定した融雪係数 ($0.7 \text{ mm} \cdot \text{°C}/\text{day}$) を他の年に適用した結果. (a) 1999～2000年, (b) 2006～2007年.

ムスクにおける融雪災害発生を予測するために重要であると言える。

6 結論

本研究によって明らかになったことをまとめると、以下のようになる。

1. 「平成24年7月九州北部豪雨」を対象として、日降水量から時間降水量を推定した場合に土壌雨量指数がどのように変化するかを明らかにした。(a) 時間降水量=日降水量/24とした場合、(b) 乱数を与えて時間降水量を求めた場合のいずれも、観測された時間降水量を与えた場合の土壌雨量指数とは位相がずれ、土砂災害発生時刻をピンポイントで推定することはできなかった。すなわち、日降水量のみを用いて土砂災害発生時刻をピンポイントで推定するのは難しいことが示された。
2. 降雪-積雪-融雪過程を土壌雨量指数へ導入した。導入に際し、融雪に伴う土砂災害発生状況(場所と発生年月日)が分かっている2005年10月～2006年9月のAMeDAS関山(新潟県)周辺を対象とした。降雪-積雪-融雪過程を土壌雨量指数に導入し、融雪期(3～5月)のみに限った土壌雨量指数に注目することによって、融雪に伴う土砂災害発生を予測できる可能性が示された。
3. トムスクの日単位の気象データを用いて、降雪-積雪-融雪過程を導入した土壌雨量指数を計算した。顕著な融雪災害が起こった年(2010年)を対象として、計算結果の妥当

性について検討した。トムスクの街が融雪洪水に覆われた 2010 年 4 月 28 日に、土壤雨量指数の値は過去 10 年間の融雪期における最大値を超えていた。すなわち、改良した土壤雨量指数を用いて、トムスクにおける融雪災害の時期を予測できる可能性が示された。

このほか本研究では、積雪深と積雪水量の定量的関係、トムスクの気象データの問題点、および、ある年のデータ解析で決定したトムスクの融雪係数の他の年への適用性についても議論した。

謝辞

トムスク国立大学の V. Zemtsov 教授、S. Kirpotin 教授、V. Khromykh 准教授には、研究全般についてお世話になりました。トムスク国立大学の A. Tarasov 助教には、2010 年 4 月末にトムスクで発生した融雪洪水の写真 (図 7) を提供していただきました。関東学院大学の齋藤 仁准教授には、図 2 を作成していただくとともに、本稿全般に関する御意見を頂きました。ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 白谷友秀・中津川 誠・松岡直基 2013. 融雪期の土砂災害に関連する土壤水分の定量評価. 土木学会論文集 B1 (水工学) 69: I_403-I_408.
- 大野宏之・横山宏太郎・小南靖弘・井上 聡・高見晋一・Wiesinger, T. 1998. 北陸地方における降水量計の固体降水捕捉率. 雪氷 60: 225-231.
- 岡田憲治・牧原康隆・新保明彦・永田和彦・国次雅司・斉藤 清 2001. 土壤雨量指数. 天気 48: 349-356.
- 小川真由美・野上道男 1994. 冬季の降水形態の判別と降水量の分離. 水文・水資源学会誌 7: 421-427.
- 気象庁 2019. 過去の気象データ・ダウンロード. <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php> (最終閲覧日: 2019 年 7 月 8 日)
- 齋藤 仁・中山大地・泉 岳樹・松山 洋 2011. 土砂災害を引き起こす降雨のリアルタイムモニタリング—2 種類の降雨イベントに着目した SWING system の構築と検証—. GIS—理論と応用 19: 81-90.
- 齋藤 仁・内山庄一郎・小花和宏之・早川裕弐 2016. 平成 24 年 (2012 年) 7 月九州北部豪雨に伴う阿蘇火山地域での土砂生産量の推定—UAV と SfM 多視点ステレオ写真測量を用いた高精細地形データの活用—. 地理学評論 89: 347-359.
- 清水彬光・上村剛史 2018. 解析雨量を用いた自然湧水の涵養域に関わる考察—新宿区立おとめ山公園を例にして—. 日本水文科学会誌 48: 3-16.

- 田中大輔・齋藤 仁・松山 洋 2014. スネーク曲線を用いた平成 24 年九州北部豪雨の解析－50 年確率値を用いて－. 日本気象学会 2014 年度春季大会講演予稿集 105: 374.
- 永山ゆかり・吉田 睦編 2018. アジアとしてのシベリア ロシアの中のシベリア先住民世界. 勉誠出版.
- 福岡管区气象台 2012. 災害時気象速報 平成 24 年 7 月九州北部豪雨. 災害時自然現象報告書 2012 年第 1 号.
- 松山 洋 1998. 巻機山における積雪密度・積雪水当量の季節変化と高度分布. 水文・水資源学会誌 11: 117-127.
- 松山 洋・田中大輔・齋藤 仁 2014. 50 年確率値を用いた土砂災害発生危険度の評価－土壌雨量指数と 1 時間雨量を用いて－. 水文・水資源学会 2014 年度研究発表会要旨集 136-137.
- 宮崎嵩之・中津川 誠・白谷友秀 2017. 融雪を考慮した土壌水分量の定量化とそれを用いた土砂災害発生危険度の判定. 水文・水資源学会誌 30: 89-101.
- 宮縁育夫 2012. 阿蘇カルデラにおいて 2012 年 7 月の九州北部豪雨によって発生した斜面崩壊. 地学雑誌 121: 1073-1080.
- 山崎 剛 1994. 10. 積雪と大気. 近藤純正編著『水環境の気象学』240-260, 朝倉書店.
- Ishihara, Y. and Kobatake, S. 1979. Runoff model for flood forecasting. *Bulletin of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University* 29: 27-43.
- Motoyama, H. 1990. Simulation of seasonal snowcover based on air temperature and precipitation. *Journal of Applied Meteorology* 29: 1104-1110.
- Osanaï, N., Shimizu, T., Kuramoto, K., Kojima, S. and Noro, T. 2010. Japanese early-warning for debris flows and slope failures using rainfall indices with Radial Basis Function Network. *Landslides* 7: 325-338.
- RIHMI-WDC 2019. Weather over the territory of the Russian Federation in 2010. <http://meteo.ru> (最終閲覧日: 2019 年 7 月 8 日)
- Saito, H. and Matsuyama, H. 2012. Catastrophic landslide disasters triggered by record-breaking rainfall in Japan: Their accurate detection with Normalized Soil Water Index in the Kii Peninsula for the year 2011. *SOLA* 8: 81-84.
- Saito, H. and Matsuyama, H. 2015. Probable hourly precipitation and Soil Water Index for 50-yr recurrence interval over the Japanese archipelago. *SOLA* 11: 118-123.
- Saito, H., Nakayama, D. and Matsuyama, H. 2010a. Relationship between the initiation of a shallow landslide and rainfall intensity-duration threshold in Japan. *Geomorphology* 118: 167-175.
- Saito, H., Nakayama, D. and Matsuyama, H. 2010b. Two types of rainfall conditions associated with shallow landslide initiation in Japan as revealed by Normalized Soil Water Index. *SOLA* 6: 57-60.