

全球大気モデルによる土砂災害関連指標降雨の将来変化

奥 勇一郎・中北 英一

要 旨

気象庁・気象研究所の全球大気モデルによる温暖化予測実験の降水量データを用いて、我が国における土砂災害の発生の指標降水量の将来変化を調べた。深層崩壊リスクの指標として一雨総降水量と半減期72時間の実効降水量、表層崩壊リスクの指標として一雨最大時間降水量と同1.5時間の実効降水量を求め、現在、現在から30年後を想定した近未来、21世紀末を想定した将来の各25年間における全降水事例の特性の変化および極端な降水事例の変化について調べた。その結果、全体としては、総降水量の少ない雨が減り、多い雨が増え、かつ、最大時間降水量の小さい雨が減り、大きい雨が増えることがわかった。極端な降水事例の将来変化を調べたところ、21世紀末には、深層崩壊リスクが最大で30%、表層崩壊リスクが最大で20%それぞれ増えることがわかり、後者は全国的に有意な変化であるに対して、前者は東北と中部から西の地域のみ有意な変化であることが示せた。

キーワード：気候変化、降水量、土砂災害、全球大気モデル

1. はじめに

近年、降水強度や連続降水量の大きな降水の極端現象の頻度が高まっている。例えば、2009年8月の台湾における台風MORAKOT（0908号）に伴う豪雨がもたらした大規模な災害「八八水災」が記憶に新しい。台湾のある観測地点では、3日間積算降水量が2,748mmに達し、この数値は3日間積算降水量の世界記録に匹敵する。別の地点では降水の継続時間が約90時間、この間の平均降水強度は約30mm/hであり、強い雨が極めて長い時間降り続けた結果、深層崩壊と呼ばれる大規模な斜面崩壊が発生したとされる（藤田，2010）。砂防用語集（2004）によると、深層崩壊とは、山崩れや崖崩れ等の斜面崩壊のうち、すべり面が表層崩壊よりも深部で発生し表土層だけでなく深層の地盤までもが崩壊土塊となる規模の大きな崩壊現象であり、一般に連続降水量が大きいと発生すると考えられている。これに対し、厚さ0.5～2.0m程度の表層土が、表層土と基盤層の境界に沿って滑落する比較的規模の小さな崩壊現象を表層崩壊という。表層崩壊は降水強度が強いと発生すると考えられている。台湾で発生した大規模な深層崩壊は、降水の極端化によりこれまで安全とされてきた地域でも斜面崩壊が引き起こされる可能性があることを如実に示している。

国内では、2010年7月に鹿児島県南大隅町で深層崩壊によるとみられる土石流が発生した。梅雨前線の影響により、南大隅町では降り始めからの降水量が1,200mmに達し、この数値は実に年間降水量の半分に相当する。この年の梅雨期には、全国の観測所で様々な時間スケールの降水量の観測記録更新が相次いだ。

気候変動により降水の極端化が予測されており、将来の降水特性の変質を調べることは土砂災害特性の変化を推定し、対策を講ずる上で重要である。本研究では、気象庁・気象研究所の全球大気モデルの温暖化予測実験(Kitoh et al., 2009)の出力を用いて、土砂災害に関連した降水量の将来変化について調べた。

2. 土砂災害関連指標降水量

1時間降水量0.5mm以上の降水が3時間以上継続し、かつ、前後24時間が無降水（1時間降水量0.5mm未満）である降水イベントを「一雨」として定義し、一雨総降水量を連続降水量の指標として、一雨最大時間降水量を降水強度の指標とする。前述の砂防用語集における深層崩壊、表層崩壊の定義と照らし合わせると、一雨総降水量は深層崩壊のリスクポテンシャルの指標として、一雨最大時間降水量は表層崩壊の

リスクポテンシャルの指標として考えることができる。

一方、土砂災害の発生は、現在降っている雨だけではなく、それまでに降った雨の影響も受けており、この影響の度合いは現在との時間差が大きくなるほど減少する。この特徴を反映した指標として半減期を定めて重み付けをした積算降水量、すなわち実効降水量がある。実効降水量 R_t は、半減期を T 、 t 時間前の降水量 r_t 、 t 時間前の減少係数 a_t とすると、

$$R_t = \sum_i a_i r_i, \quad a_i = 0.5^{\frac{t}{T}} \quad (1)$$

で与えられる。よく用いられるのは半減期を1.5時間とした $R_{1.5}$ と、72時間とした R_{72} である。 $R_{1.5}$ の変動は表層水の変動に対応していることが経験的に知られており、表層崩壊のリスクポテンシャルの指標と考えることができる。同様に、 R_{72} の変動は地下水の変動に対応しており、深層崩壊のリスクポテンシャルの指標と考えることができる。

3. データ

気象庁・気象研究所の全球大気モデルから出力される1時間間隔の降水量データを使用した。モデルは水平解像度が20kmのMRI-AGCM3.1S（20kmモデル）と60kmのMRI-AGCM3.1H（60kmモデル）の2種類ある。前者は、より実測に近い降水量データで将来変化を調べるために、後者はアンサンブルランの結果

から将来変化におけるモデルの不確実性を評価するためにそれぞれ使用した。アンサンブルランは、3つの大気の初期状態と4つの海面水温の将来変化を用いた現在気候3パターン、将来気候12パターンで構成されている。20kmモデル、60kmモデルとも解析対象期間は、現在気候1979～2003年、近未来気候2015～2039年、将来気候2075～2099年の各25年である。

実際の降水量とモデル出力の降水量との比較を行うために、現在気候計算と同じ期間である1979～2003年の全国のAMeDAS観測地点における1時間降水量のデータを使用した。AMeDASのデータは、20kmモデルの格子点位置において逆数距離による加重平均値として与えた。計算方法は奥ら（2009）と同じである。

4. 20kmモデルによる将来変化

4.1 降水特性の将来変化

Fig. 1は、観測（左下）、現在気候（右下）、近未来気候（右上）、将来気候（左上）それぞれ25年間におけるすべての降水事例を対象として、一雨総降水量（横軸）と一雨最大時間降水量（縦軸）との関係の頻度分布を示している。横軸の大きな値における頻度が高ければ、深層崩壊リスクポテンシャルの高い降水事例の頻度が高いことを示し、縦軸の場合は表層崩壊リスクのそれが高いことを示す。まず、観測とモデルによる現在気候計算の結果を比較すると、頻度分布がよく似ている様子が見て取れる。図ではわかりにくいですが、詳細に比べてみると、モデル計算は観測に比べて総降水量が100mm以下で最大時間降水量が5mm以下の雨が再現過多、総降水量が10mm以上100mm以下で最大時間降水量が5mm以上10mm以下の雨が再現過少となっているが、両者の頻度の差は最大でもその事例数の1%に満たない。このことから20kmモデルでは、一雨総降水量と一雨最大時間降水量との関係からみた現実の降水特性を適切に再現できていると考えることができる。次に、将

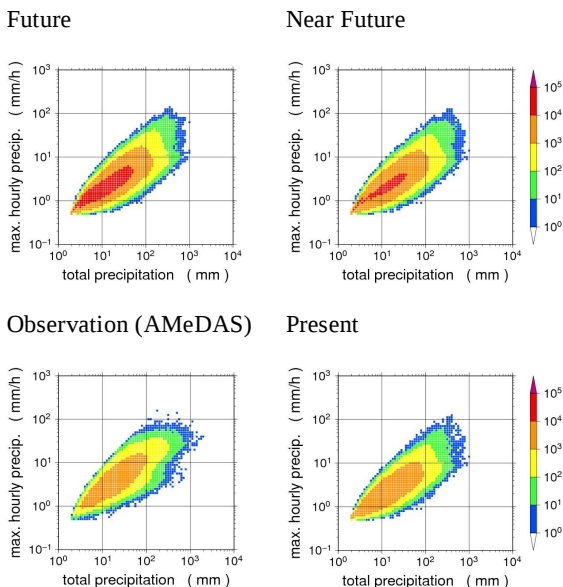


Fig. 1: 2 dimensional histograms for total amount during an individual precipitation event (horizontal axis) and the maximum hourly precipitation (vertical axis). The both axes are expressed in a base-10 logarithmic scale.

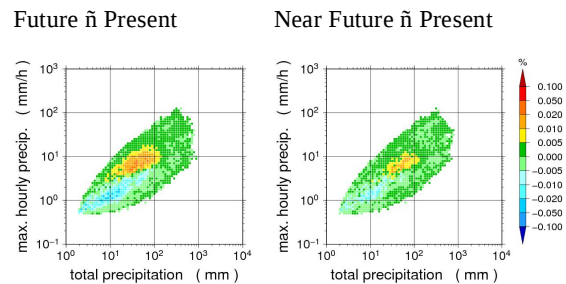


Fig. 2: Same as Fig. 1, but histogram differences between the 20km-model present and the future (left), the near-future (right) climates.

来気候と現在、および近未来と現在との頻度の差を求め、降水特性の将来変化について調べる。Fig. 2 は、Fig. 1の将来および近未来の頻度分布と現在の頻度分布との差を頻度の変化割合で図示している。図から将来、近未来ともに、一雨総降水量の少ない雨が減り、多い雨が増え、かつ、一雨最大時間降水量の小さい雨が減り、大きい雨が増えることがわかる。一雨総降水量の大きさの変化よりも一雨最大時間降水量の大きさの変化の方が大きい。また、近未来よりも将来の方が、変化の割合が大きいこともFig. 2からわかる。

4.2 事例数でみた極端降水の将来変化

一雨総降水量が極端に大きければ深層崩壊のリスクポテンシャルも大きくなることが想定され、一雨最大時間降水量が極端に大きければ表層崩壊のリスクポテンシャルも大きくなることが想定される。前節では各25年間のすべての降水事例を対象として、その傾向の将来変化を調べた。ここでは、これら極端降水の将来変化について調べる。

Fig. 3は極端降水の事例数の将来変化である。(a)は一雨総降水量が600mm以上、(b)は一雨最大時間降水量80mm以上、そして(c)は(a)かつ(b)の事例数をそれぞれ示している。観測（紺色の棒グラフ）と20kmモデルの現在気候（青色）とを比較すると、(a)ではモデルは観測の6分の1程度の事例数しか再現できていないが、(b)ではほぼ完璧に再現できていることがわかる。すなわち、極端降水の事例数の視点から

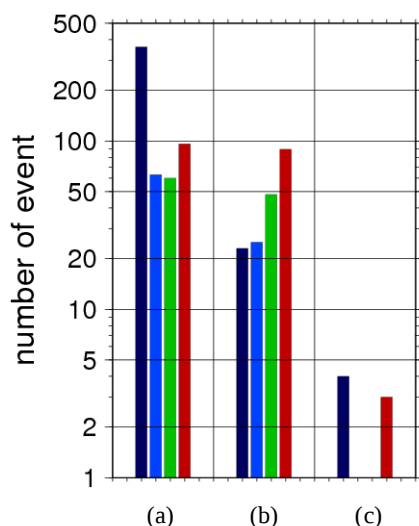


Fig. 3: Number of an individual precipitation in 25-year observation (deep blue), the 20km-AGCM present (blue), the near-future (green) and the future climates (red). (a) total precipitation higher than 600mm, (b) the maximum hourly precipitation higher than 80mm, (c) both (a) and (b).

20kmモデルの再現性を評価すると、極端に大きな一雨総降水量の事例数の再現はできていないものの、極端に大きな一雨最大時間降水量の事例数は再現できていることがわかる。これを受けて、(c)では観測が4事例に対して、現在気候は該当事例がなかった。

次に、極端降水の将来変化について調べる。(a)では将来（赤色）は現在の1.5倍に増えるのに対して、近未来（緑色）は逆に事例数が若干ではあるが減っていることがわかる。しかし(b)に着目すると、近未来は現在の3倍に、将来は近未来の2倍に増えていることがわかる。事例数でみると極端に大きな一雨総降水量の事例数の増分よりも、極端に大きな一雨最大時間降水量の増分の方が大きいことがわかる。また、(c)では現在、近未来では該当事例がないのに対し、将来では3事例あることがわかった。

4.3 絶対値でみた極端降水の将来変化

極端に大きな一雨総降水量あるいは一雨最大時間

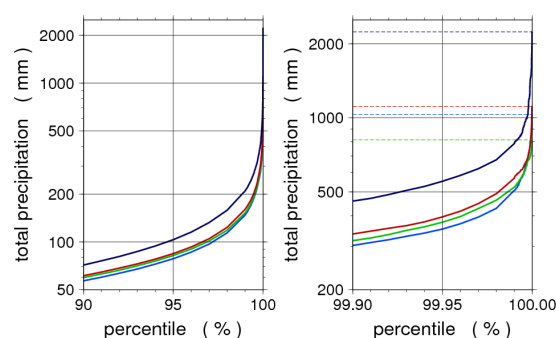


Fig. 4: The percentile profile of the total amount during an individual precipitation event corresponding with a probability of 25-year observation (deep blue), the 20km-AGCM present (blue), the near future (green), the future (red) climates. The left panel shows higher than 90%-ile values. The right one shows higher than 99.9%-iles. The horizontal broken lines indicate the maximums during each 25 years.

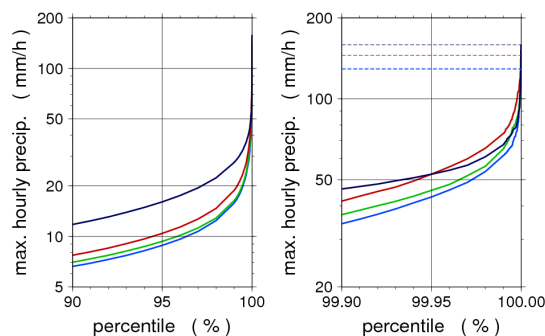


Fig. 5: Same as Fig.4, but the percentile profile of the maximum hourly precipitation during an individual precipitation.

降水量の絶対値はどの程度変化するのかについて調べる。Fig. 4は観測、現在、近未来、将来の各25年間における一雨総降水量のパーセンタイル値のプロファイルである。横軸がパーセンタイル値、縦軸がパーセンタイル値に対応する降水量を示している。まず、20kmモデルの再現性について調べる。一雨総降水量の最大値で比較すると観測（紺色）が2,238mmに対して、現在気候（青色）が1,032mmと、モデルは観測の半分であった。99.9%-ile値で比べるとモデルは観測の6割程度であった。前述の極端に大きな一雨総降水量の事例数と同様に、その絶対値についてもモデルは過小評価していることになる。将来変化では、最大値だけをみると将来（赤色）が1,112mm、近未来（緑色）が814mmと、一雨総降水量800mm以上の事例数と同様に、将来、現在、近未来の順に並ぶ。しかし、99.9%-ile値で比べると、将来、近未来、

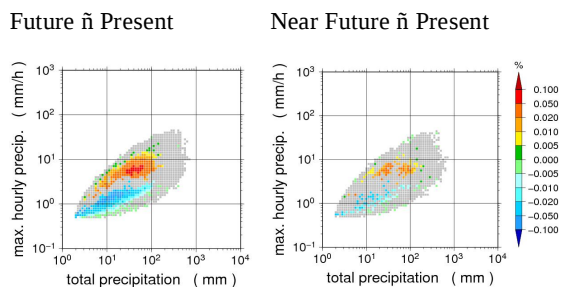


Fig. 6: Same as Fig. 2, but 60km-AGCM.

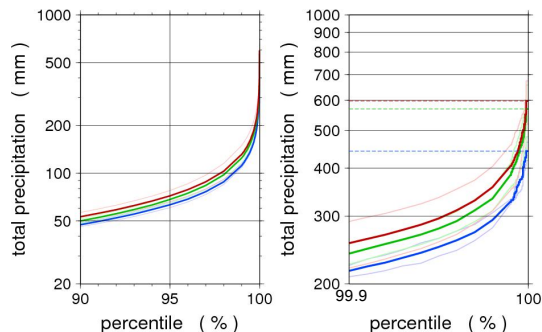


Fig. 7: Same as Fig. 4, but 60km-AGCM ensemble means. The light colored line indicates mean values $\pm \sigma$ (standard deviation) or $\pm \sigma$.

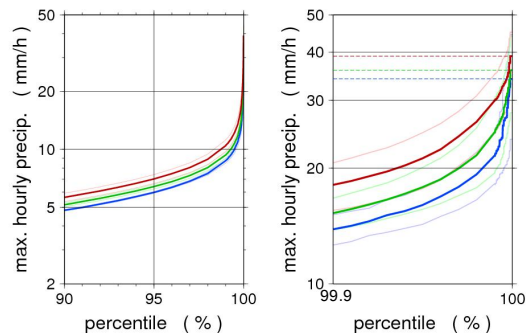


Fig. 8: Same as Fig. 5, but 60km-AGCM ensemble means.

現在の順となり、一雨総降水量の将来変化の傾向としては、近未来が現在より減るとは言い切れないことがわかる。

一方、Fig. 5は各25年間における一雨最大時間降水量のパーセンタイル値のプロファイルである。最大値だけを比較すると、観測が158mmに対して、現在は129mm、近未来は128mm、将来は145mmである。一雨最大時間降水量の将来変化についても、一雨総降水量と同様に、最大値では将来、現在、近未来の順に並ぶが、99.9%-ile値では将来、近未来、現在の順になることが見て取れる。

4.4 モデルにおける不確実性

これまで述べてきた将来あるいは近未来と現在との差は、有意な変化とみることができようか。たとえば、25年間における一雨最大時間降水量の最大値では近未来と現在との差はわずか1mmであり、99.9%-ile値でみると近未来と現在との大小関係は最大値でみたときと逆転する。降水量、特にその統計的な極値については、モデルに初期値として入力する大気場、あるいは境界値として入力する海面水温の変化に依存することが考えられる。次節では、これらモデルによる不確実性を評価するために、60kmモデルのアンサンブルランの結果を使用して、将来変化の統計的な有意性について調べる。

5. 60kmモデル

5.1 降水特性の将来変化

4.1節と同様に、Fig. 1のような一雨総降水量と一雨最大時間降水量の頻度を60kmモデルのアンサンブルランの結果を用いて調べる。60kmモデルでは、現在気候は3個、将来および近未来はそれぞれ12個の降水量データがあるので、将来変化は各25年間の平均値の差として評価し、有意水準95%以上の差を有意な将来変化とする。Fig. 6は、Fig. 2と同様に60kmモデルで頻度の変化割合を調べたものである。ただし、有意水準95%以上を満たす変化のところだけ、その変化分をカラーで図示しており、満たさない変化は灰色でマスクしている。20kmモデルから求めたFig. 2と、60kmによるFig. 6を比べると、降水量の絶対値はモデルの解像度が粗い60kmモデルの方が20kmモデルに比べて小さくなっているが、将来変化の傾向はよく似ていることが見て取れる。

20kmモデルと同様に、60kmモデルでも将来、近未来ともに、一雨総降水量の少ない雨が減り、多い雨が增え、かつ、一雨最大時間降水量の小さい雨が減り、大きい雨が增える。そして、これらが統計的に有意な変化であることが、Fig. 6からわかる。さらに、

総降水量の大きさの変化よりも最大時間降水量の大きさの変化の方が大きいことや、近未来よりも将来の方が、変化の割合が大きいことも有意な変化であることがわかる。

5.2 極端降水の将来変化

Fig. 7は一雨総降水量のパーセンタイル値のプロファイルを示している。濃い実線のパーセンタイル値はアンサンブルランの平均値であり、薄い実線は平均値とその標準偏差 σ の和($+\sigma$)あるいは差($-\sigma$)を示している。ここでは、極端に大きな一雨総降水量の将来変化を調べるために、25年間の99.9%-ile値以上のプロファイルに着目する。平均値だけで比べると、将来、近未来、現在の順に大きいことがわかる。つまり、数あるアンサンブルランの中には、現在気候のあるランのパーセンタイル値が将来気候のあるランのパーセンタイル値よりも小さいものが存在することを示唆している。

同様に、一雨最大時間降水量について調べたものがFig. 8である。99.9%-ile値以上のプロファイルに着目すると、現在の平均値 $+\sigma$ は将来の平均値 $-\sigma$ とほぼ同じ分布を示していることがみてとれる。一雨最大時間降水量の場合、その将来変化が一雨総降水量よりもより確実に増えることを意味している。

5.3 極端降水の将来変化の空間分布

これまでの、極端降水の将来変化を日本全体で議論してきた。ここでは、その空間分布について調べる。極端さを示す代表値として25年間における99.5%-ile値を用い、60kmモデルで解像されている日本陸上の格子点において一雨総降水量の99.5%-ile値を求めアンサンブルランで平均し、将来変化を調べ

る。結果をFig. 9に示す。有意な変化については菱形(◆)で、そうでない変化については小さい丸(●)で示している。Fig. 9から将来、近未来ともに北海道の一部の地域を除き日本全体で一雨総降水量が増えることがわかる。また、東北地方から北の地域と、関東から西の太平洋岸の地域を中心に、増え方がほかの地域と比べて大きいことがわかる。さらに、これらの増え方が有意である地域は、西日本と東北地方の一部に限られていることが見て取れる。

一方、一雨最大時間降水量について調べた結果をFig. 10に示す。こちらは近未来と将来が対照的であり、近未来では増え方そのものが将来よりも小さい。近未来では一部の地域で一雨最大時間降水量が減っているところもあるが、将来ではすべての地域で増えている。増え方が大きいところは、東北地方から北の地域、関東、四国、九州の一部の地域であり、将来はその増え方が全国的に有意であるのに対して、近未来では変化分のほとんどが有意でないことがわかる。

日本全体では、一雨総降水量あるいは一雨最大時間降水量が増える傾向があることを示せた一方で、それらの空間分布を調べてみると増え方が地域によって必ずしも均等でないことがわかる。有意な変化を示すところとなると、さらに地域が限定されることがわかる。

5.4 実効降水量でみた将来変化の空間分布

一雨総降水量と一雨最大時間降水量を用いて将来変化について調べてきたが、より土砂災害の発生と関連した指標降水量として実効降水量を導入し、その将来変化の空間分布について調べる。深層崩壊や表層崩壊が発生する実効降水量の具体的な閾値を定めることはできないが、ここでは5.3節と同様に25年

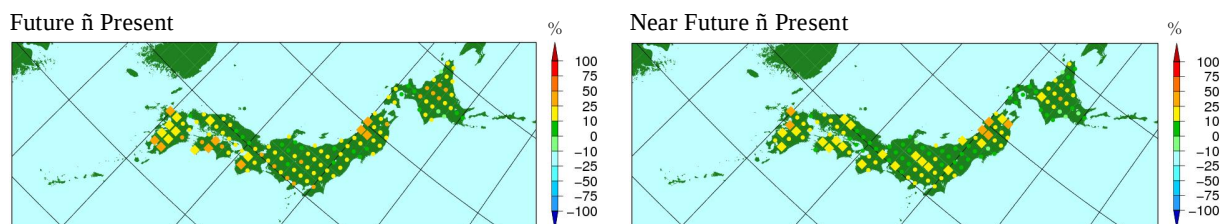


Fig. 9: The future change of 99.5%-ile value in 25 years of the total amount during an individual precipitation. Diamond (◆) indicates statistically significant changes at the 95% confidence level.

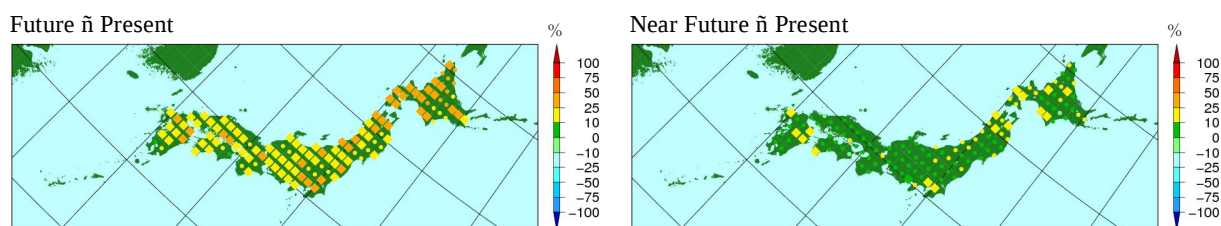


Fig. 10: Same as Fig. 9, but the maximum hourly precipitation during an individual precipitation.

間の実効降水量の99.5%-ile値を代表値として扱うことにする。Fig. 11は半減期を72時間とした実効降水量 R_{72} の将来変化である。2節で説明したように、 R_{72} は深層崩壊のリスクポテンシャルの指標として扱うことができる。 R_{72} は、近未来、将来ともに現在よりも増えるが、増え方は近未来より将来の方が大きい。変化が有意であるのは、東北地方と中部から西の地域に限られる。有意な変化が認められる地域に限ると、将来変化の増分は近未来が最大で20%であるのに対して将来は30%前後にまで及ぶ。

一方、Fig. 12は半減期を1.5時間とした実効降水量 $R_{1.5}$ の将来変化であり、表層崩壊のリスクポテンシャルの指標として扱うことができる。 $R_{1.5}$ も R_{72} と同様に、近未来、将来ともに現在よりも増え、増え方は近未来より将来の方が大きい。しかし、 R_{72} では有意な変化が認められる地域は限定的であったのに対し、 $R_{1.5}$ では全国的にその変化が有意であるという結果になった。変化量をみてみると、近未来では全国的に10%ほど増えているのに対して、将来では10%から20%ほど増えていることがわかった。

6. まとめ

気象庁・気象研究所の全球大気モデルによる温暖化予測実験の降水量データを用いて、土砂災害発生の指標降水量の将来変化を調べた。深層崩壊のリスクポテンシャルの指標として一雨総降水量と半減期72時間の実効降水量、表層崩壊のリスクポテンシャルの指標として一雨最大時間降水量と半減期1.5時間の実効降水量をそれぞれ求め、現在、30年後を想定した近未来、21世紀末を想定した将来の各25年における全降水事例の特性の変化および極端な降水事例の将来変化について調べた。

全降水事例の変化の傾向としては、一雨総降水量の少ない雨が減り、多い雨が増え、かつ、一雨最大時間降水量の小さい雨が減り、大きい雨が増えることがわかった。極端な降水事例の将来変化を調べたところ、21世紀末には、深層崩壊のリスクポテンシャルを示す R_{72} が最大で30%、表層崩壊のリスクポテンシャルを示す $R_{1.5}$ が最大で20%、それぞれ増えることがわかり、後者は全国的に有意な変化であるに対して、前者は東北と中部から西の地域のみ有意な変化であることが示せた。20kmモデルではより実測に近い降水量データで将来変化を評価できる一方、高解像度であるがゆえに計算機資源の制約上シングルランでしか実験を行えず、将来変化の統計的有意性については議論できない。しかし、60kmモデルのアンサンブルランの結果を用いることで、統計的に有意な変化を示すことができた。

気候変化に伴う降水特性の変化により、極端に大きな連続降水量や極端に強い降水強度の雨がもたらされ、土砂災害が発生するリスクが高まることが示せた。そのリスクの高まり方は、30年後よりも21世紀末の方が大きいことも示せた。しかし、実際に深層崩壊や表層崩壊が発生するかどうかは、その場所の地盤や土壌の特性に依存する。そのため、ここでの深層崩壊のリスク、表層崩壊のリスクは、あくまで降水量の変化に着目したポテンシャルであることを強調しておく。

今回の結果を、土砂災害のハザードマップと照らし合わせることで、土砂災害に脆弱な地域での斜面崩壊発生リスクの増加、あるいはこれまで土砂災害が発生することのなかった地域での斜面崩壊の発生の可能性についての議論が可能になると期待される。

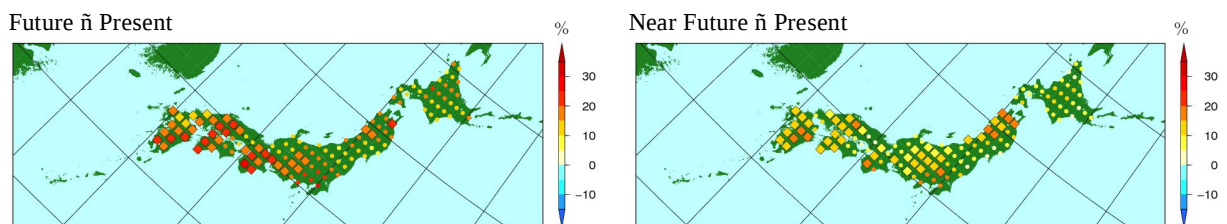


Fig. 11: The future change of 99.5%-ile value in 25 years of the effective precipitation amount with half value period of 72 hours. Diamond (◆) indicates statistically significant changes at the 95% confidence level.

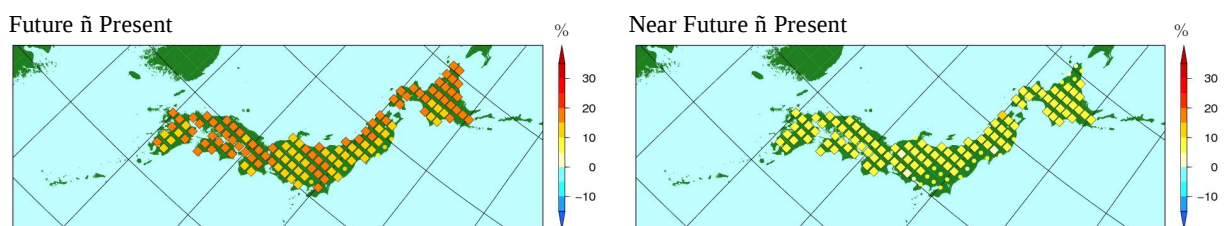


Fig. 12: Same as Fig. 11, but with half value period of 1.5 hours.

謝 辞

本研究における全球モデル温暖化実験は文部科学省21世紀気候変動予測革新プログラム「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究」のもと、地球シミュレータを用いて行われたものです。

参考文献

Kitoh, A., T. Ose, K. Kurihara, S. Kusunoki, M. Sugi and KAKUSHIN Team-3 Modeling Group (2009): Projection of changes in future weather extremes using super-high-resolution global and regional atmospheric models in the KAKUSHIN Program: Results of preliminary experiments. Hydrological Research

Letters, vol. 3, pp. 49-53.

奥 勇一郎・Sunmin Kim・中北 英一 (2009) : 超高解像度全球大気モデルの温暖化予測実験データを用いた日本陸域の極端気象現象の抽出方法, 京都大学防災研究所年報, 第52号B, pp. 439-444.

藤田 正治 (2010) : 2009年台風MORAKOTによる台風水・土砂災害, 京都大学防災研究所年報, 第53号A, pp. 73-83.

砂防学会 編 (2004) : 砂防用語集 改訂, 山海堂, 432pp.

藤田 正治・堤 大三・竹林 洋史 (2009) : 気候変動に伴う斜面崩壊特性および土砂生産特性の変化, 21世紀気候変動予測革新プログラム 超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究 平成20年度研究成果報告書, 文部科学省研究開発局, 192pp.

Future Change of Precipitation Related Sediment Disaster Risk Potential Using MRI-AGCM3.1

Yuichiro OKU and Eiichi NAKAKITA

Synopsis

The objective of this study is to evaluate the future change of precipitation which induces a slope failure potentially. The effective rainfall, which is used to consider the antecedent rainfall for slope stability, is calculated from MRI-AGCM3.1 outputs in Japan area. Comparing a spatial distribution of duration time when the effective rainfall is greater than 400mm in between the present climate simulation and the future prediction, the occurrence area appears in Hokkaido and Tohoku in the future where it does not in the present climate.

Keywords: climate change, precipitation, sediment disaster, MRI-AGCM3.1