

13. 気候変動に伴う梅雨期集中豪雨の将来変化 に関する領域気候モデルを用いた基礎的研究

宮宅敏哉^{1*}・Kim Kyoungjun²・木島梨沙子³・中北英一⁴

¹京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

²Disaster Research Division, National Disaster Management Institute, Ministry of Public Administration and Security
(136, Mapo-daero, Mapo-gu, Seoul, 121-719, Korea)

³東京大学大学院 工学系研究科 総合研究機構 (〒113-8656 東京都文京区弥生2-11-16)

⁴京都大学 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

* E-mail: miyake@hmd.dpri.kyoto-u.ac.jp

近年、我が国では梅雨前線に伴う集中豪雨が頻繁に発生し多くの災害が起こっており、温暖化が進むことでさらにその数が増加するのが注目されている。これまでの温暖化研究により将来降水量が増加することは示されているが、それが集中豪雨によるものかは明確にされていない。そこで、気象庁気象研究所で開発され、集中豪雨等の小さなスケールの現象まで表現できるようになった5km領域気候モデル(RCM: regional climate model)の出力データを30分雨量画像データとして目視により定性的に降水現象を捉えることで梅雨前線に伴う集中豪雨のみを抽出し、将来変化を検討した。本論文では、日本全域だけではなく特に近年注目されてきている梅雨期の九州南北における集中豪雨の将来変化と、日本海側における集中豪雨の変化に着目して解析を行った。

Key Words : Climate Change, Localized Heavy Rainfall, Baiu Front, RCM, Frequency

1. 研究の背景と目的

近年、我が国では、2012年7月の九州北部豪雨など、梅雨前線に伴う集中豪雨が頻繁に発生している。このような集中豪雨は、100 km 程度の長さで10~20 kmの幅をもち、6時間~半日程度継続する特徴があり、流域面積が100 km² までの流域面積をもつ中小河川の外水および内水氾濫が問題となっている。一方、近年の経済成長に伴うCO₂の排出量の増加により地球温暖化が進行しているとされており、その影響は、気温の上昇だけではなく、大気循環にも影響を与え、降水特性にも変化を及ぼし、特に極端降水が増加する可能性がある。気象庁の気候変動監視レポートでは、アメダス観測地点での雨量値解析により50 mm/hr 以上の強雨が近年増加傾向にあることが報告されており¹⁾、地球温暖化と集中豪雨の関連性について注目されている。

また現在、21世紀気候変動予測革新プログラムの中で、気象庁気象研究所で開発された気候モデルを用いた温暖化予測実験が行われている。日本域で災害をもたらす豪雨には、1000 km × 1000 km 程度の広さをもち数日継続する台風による豪雨、上述のような集中豪雨、非常に狭い範囲に1時間程度継続するゲリラ豪雨がある。台風に

よる豪雨に関しては、20 km全球大気モデル(AGCM: atmospheric general circulation model)により影響評価が可能となってきた。しかし、集中豪雨やゲリラ豪雨のようにスケールの小さい現象は20kmAGCMで影響評価をすることは不可能である。そこで開発されたのが5 km 領域気候モデル(RCM: regional climate model)であり、これにより集中豪雨のようなメソβスケールの現象まで表現できるようになり(図-1)影響評価を可能とした。ただし、メソγスケールであるゲリラ豪雨の影響評価は未だ不可能である。

梅雨期の特に関心する梅雨前線に伴った降水に着目すると、60kmAGCMのアンサンブル計算では、将来、梅雨前線の北上が遅延すること(Kusunoki et al., 2011²⁾)や7月上旬に日雨量の有意な増加傾向が出ている(Kanada et al., 2011³⁾)。20kmAGCMでは、将来は7月上旬だけでなく8月上旬においても日雨量の有意な増加傾向が出ている。また5kmRCMでは、さらに細かい降水の将来変化を探っており、将来は7月上旬と8月上旬において日雨量の増加だけでなく、特に日雨量100 mm 以上の大雨がもたらす降水の総雨量に対する割合も増加することが示されている⁴⁾。すなわち、上記のすべてのモデルにおいて将来、梅雨前線の北上の遅延と7月上旬に日雨量の増加傾向が見られるため、かなり有意性が高い変化であると言える。

しかし、8月上旬の日雨量の将来変化のように、20kmAGCMや5kmRCMの高解像度のモデルでは有意な変化が見られるものの、60kmAGCMでのアンサンブル計算では有意な変化が見られないことがある。それゆえ、5kmRCMにおいて見られる将来変化は、必ずしもすべてが有意な変化ではない可能性もあるが、メソβスケールの現象まで影響評価が可能になったこと自体が非常に価値のあることである。

上記のアメダス観測や気候モデルによる定量的解析では、統計的には強い降水が増加していることが確認されたものの、これらの統計値からでは、実際にどのような降水現象により降水量が増加しているのか明確にされていない。そこで本研究では、集中豪雨のようなスケールの小さい現象を表現できるようになった5kmRCMを用いて、既往研究での統計的有意性を基に災害という視点から、レーダーを通して豪雨解析を行ってきた経験を活かして、定性的に降水現象を捉えていくことにより、梅雨前線に伴う集中豪雨のみの抽出を行った。具体的には、5kmRCMの雨量画像データを用いて、日本域における降水現象を目視により確認することで、梅雨前線に伴う集中豪雨のみの抽出し、その発生頻度と出現特性の将来変化を検討することを目的とする。

2. 使用データについて

本研究で使用した5kmRCMは20kmAGCMをダウンスケーリングしたモデルである。20kmAGCMは、水平解像度がTL959（格子間隔約20 km）であり、境界条件として、現在気候では全球観測値、将来気候では21世紀末にCO₂の濃度が2倍になると仮定したA1Bシナリオにより出力された全球海面水温分布を与えている。一般的に数値モデルでは、格子間隔の10倍程度の現象を再現することができるとされており⁵⁾、20kmAGCMでは、上述のように台風や梅雨前線などのメソαスケール（200 km ～ 2000 km）がよく再現されているため、台風による豪雨の影響評価が可能になった。しかし、集中豪雨のような空間スケールが数10 km の現象の表現は難しく、そのような現象の影響評価は20kmAGCM出力を用いては難しい。しかし、5kmRCMでは、水平格子間隔が5 km となり、20kmAGCMと比べ詳細な雲物理過程を用い、積雲を半経験的に表現する積雲対流スキームを用いているため、20kmAGCMでは表現できなかった集中豪雨のような局所的な対流現象がもたらす降水のより正確な表現が可能となっている。また、5kmRCMは、20kmGCMと比較しても日雨量において、非常に良い再現性を示している（Kanada et al.,2010⁶⁾）。

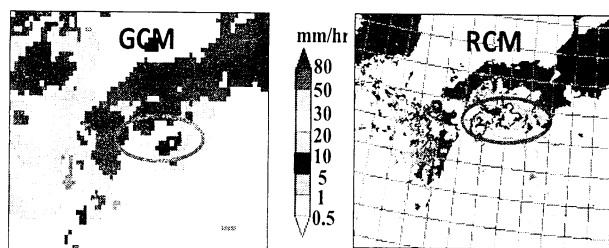


図-1 20kmGCMと5kmRCMの比較

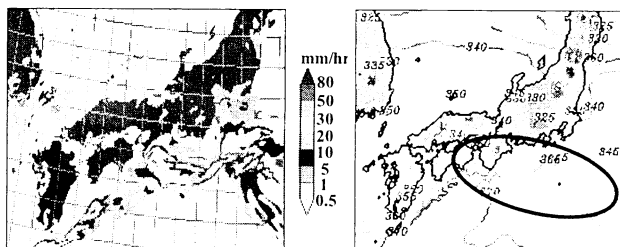


図-2 相当温位による梅雨前線の確認

3. 集中豪雨の定義とその抽出方法

(1) 集中豪雨の定義

集中豪雨という言葉は、1953年8月15日の朝日新聞の夕刊（大阪本社版）で「集中豪雨木津川上流に」という見出しとして、初めて使用された言葉であり、正式な気象用語ではない。しかし、現象を端的に表現しているため、現在では学術的にも一般的にも広く用いられている。気象庁によると「狭い範囲に数時間にわたり強く降り、100 mm から数100 mm の雨量をもたらす雨」と定義されている。

集中豪雨はその成因によって、梅雨前線による集中豪雨、台風による集中豪雨、熱雷による集中豪雨などに分類される。本研究で対象とする集中豪雨は先に述べたように梅雨前線による集中豪雨である。ただし、台風の影響で梅雨前線が活発化された場合は、梅雨前線による集中豪雨とする。

本研究では、具体的に以下のような判断基準を用いて、梅雨前線による集中豪雨を定義する。

1) 30分雨量

- 時間雨量換算で 50 mm 以上の雨域が同じ地域に 2 時間以上停滞する場合
- 時間雨量換算で 50 mm 以上の雨域が同じ地域に 2 時間以内に 2 個以上出現する場合

2) 3時間雨量

- 150 mm 以上の雨域が出現した場合
- 100 mm ～150 mm の雨域が出現し、その雨域が同じ地域に 3 時間以上停滞する場合

3) 梅雨前線の確認

- 地表面における相当温位の水平勾配が大きいこと

この1)~3)の全てを満たすものを本研究における集中豪雨と定義する。ただし、相当温位を用いた梅雨前線の確認は、30分雨量、3時間雨量で梅雨前線と確認できなかった場合についてのみ行うものとする。

ここで、30分雨量を用いる理由として、RCMデータの出力時間解像度が30分であり、また、積乱雲が通常、成長期・成熟期・減衰期の3段階を経てその一生を終えるのは30分~60分であるため、集中豪雨という現象を把握する上で有効であると判断したためである。また、3時間雨量を用いる理由として、同じ場所に一定時間以上停滞しているかどうかを判断できるからである。最後に、梅雨前線による豪雨かどうかを地表面における相当温位の水平勾配によって確定させる(図-2)。

また、集中豪雨の数え方として、梅雨前線による集中豪雨の1事例の中で、集中豪雨が複数の地域で発生している場合は、2種類の数え方をする。1つ目は、同一の気象擾乱により、複数の地域に集中豪雨をもたらされた場合、別々の災害であり、別々の集中豪雨として数える。2つ目は、複数の地域に集中豪雨をもたらされたとしても、同じ気象擾乱によってもたらされているなら、同一の原因によるものとして1つと数える。本サンプリング手法では、積雲の発達や併合等のプロセスを重視しているのではなく、災害という観点からある狭い地域について集中豪雨が起こっているかについて議論しているため、ある積乱雲が1つの地域に集中豪雨をもたらした後、さらに発達、併合し別の地域に再び集中豪雨をもたらした場合は、別の災害であるとし、2つの集中豪雨が起こっているとする。つまり、1つの積乱雲が複数の地域に集中豪雨をもたらしている場合が存在する。

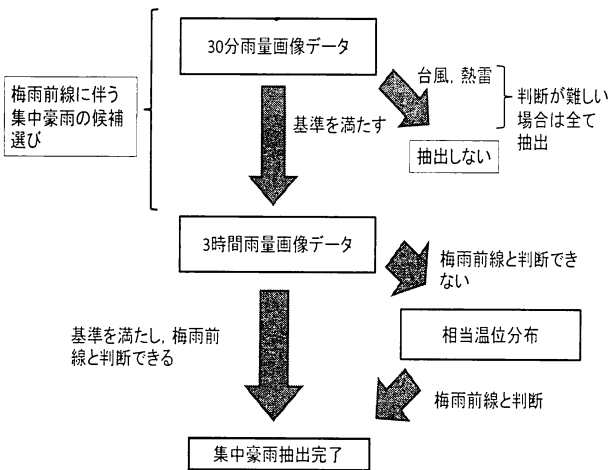


図-3 梅雨前線に伴う集中豪雨の抽出手順

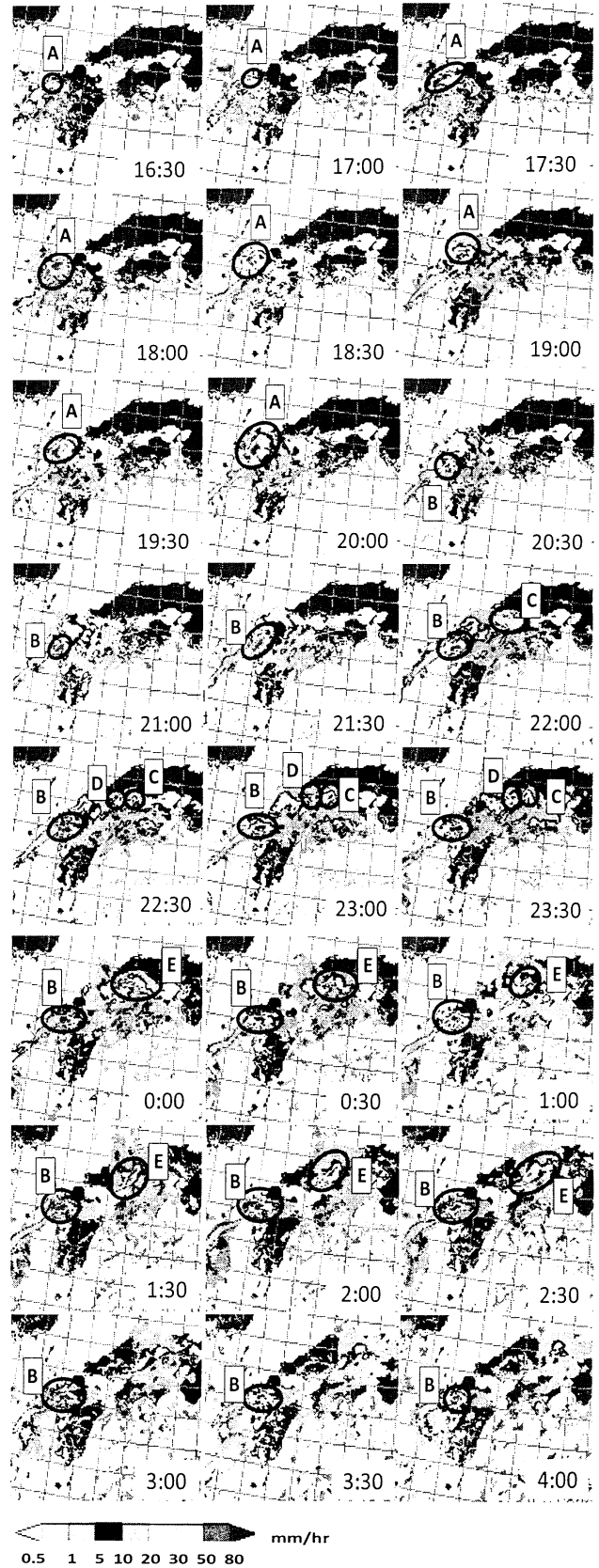


図-4 5kmRCM 30分雨量分布 (2021年7月6日16:30~7日4:00)

(2) 梅雨前線に伴う集中豪雨の抽出

解析期間は、現在気候（1979～2003）、21世紀末気候（2075～2099）の梅雨期とする。梅雨期は通常、6月～7月である。しかし、九州南部は5月の終わりに梅雨入りする可能性があり、また8月初旬に梅雨の戻りや、梅雨明けがなく8月まで梅雨前線により雨が降り続く可能性があるため解析期間は各25年の5月17日～8月31日とする。

抽出の手順として、まず30分雨量を用いて梅雨前線による集中豪雨の候補を抽出する。ここでは、台風や熱雷による集中豪雨と梅雨前線に伴う集中豪雨を区別しながら、梅雨前線に伴う集中豪雨の候補を抽出する。抽出過程において注意することは、30分雨量は抽出の第一段階であるため、梅雨前線に伴う集中豪雨であるかどうか疑わしい事例はすべて抽出することである。また、集中豪雨の出現個数を数えるとともに、集中豪雨をもたらした気象擾乱の個数も数える。次に、30分雨量で候補に挙げた事例が3時間雨量の基準を満たしているか確認する。基準を満たしていれば集中豪雨と判断し、梅雨前線に伴うものかわからないものは最後に、相当温位分布を用いて確認する（図-3）。相当温位の等値線は梅雨前線に沿って分布し、梅雨前線を境に急激に差ができるため、等値線分布をみると線と線の間隔が狭くなる。台風の場合は、豪雨域を含んだ広い領域が高相当温位域になっており、梅雨前線と明確な違いがある。この特性を利用して梅雨前線の確認を行う。なお、本研究では、地表面の相当温位分布であるため、陸域では等値線がかなり複雑である。そのため、陸域だけにとどまらず、海上域も含めた広域において前線の確認を行う。

(3) 集中豪雨の抽出事例

以後、30分雨量で時間雨量換算50 mm 以上、3時間雨量で100 mm 以上の雨域を豪雨域と呼ぶこととする。図-4 は30分雨量画像データで、図-5 は3時間雨用画像データである。時間ステップは、30分雨量が30分で、3時間雨量は1時間である。

2081年7月6日～7日にかけて長崎県、佐賀県付近と広島県付近でシュミレーションされている雨域が集中豪雨かどうかを判断する。まず、30分雨量を用いた抽出の手法の説明を行う。図-4は、6日16時30分～7日4時までの九州、中国、四国地方の降雨状況である。6日16時30分に長崎県、佐賀県付近に小さな豪雨域（A）が出現している。6日17時30分には大きな雨域となり、6日20時まで約3時間余り佐賀県付近に停滞している。また、6日20時30分には長崎県付近に新たな豪雨域（B）が出現している。豪雨域（B）は7日4時頃まで約8時間余り長崎県と有明海付近に停滞している。続いて、6日22時には、広島県付近に豪雨域（C）が出現している。さらに次の時間には、（C）の西にもう1つ新しい豪雨域（D）が出現している。（C）はあまり移動することなく、7日0時に少し北に移動した付近で（D）と結合し豪雨域（E）と

なっている。（E）は、その後7日1時30分にさらに南から来た新たな豪雨域と結合し、7日2時までほぼ同じ地域に停滞している。3地域とも豪雨域が同じ場所に停滞しているため、集中豪雨の候補として抽出する。

同様に、3時間雨量を用いた抽出の手法の説明を行う。ここでの3時間雨量とは、表示時刻の前3時間の合計雨量である。図-5は6日18時から7日8時までの九州、中国、四国地方の様子である。6日18時に長崎県、佐賀県付近に豪雨域（F）が出現している。その後、6日20時まで同じ場所に（F）が停滞している。さらに、（F）の中でも150 mm 以上を示す雨域が確認できる。また、6日21時には長崎県付近に豪雨域（G）が出現している。（G）では150 mm 以上を示す雨域も出現し、その後7日8時までほぼ同じ地域に停滞している。7日0時に広島県付近に出現した豪雨域（H）は、7日3時まで約3時間同じ地域に停滞し、さらに150 mm の雨域も出現している。以上、3地点とも定義した基準を満たしているため集中豪雨として断定する。

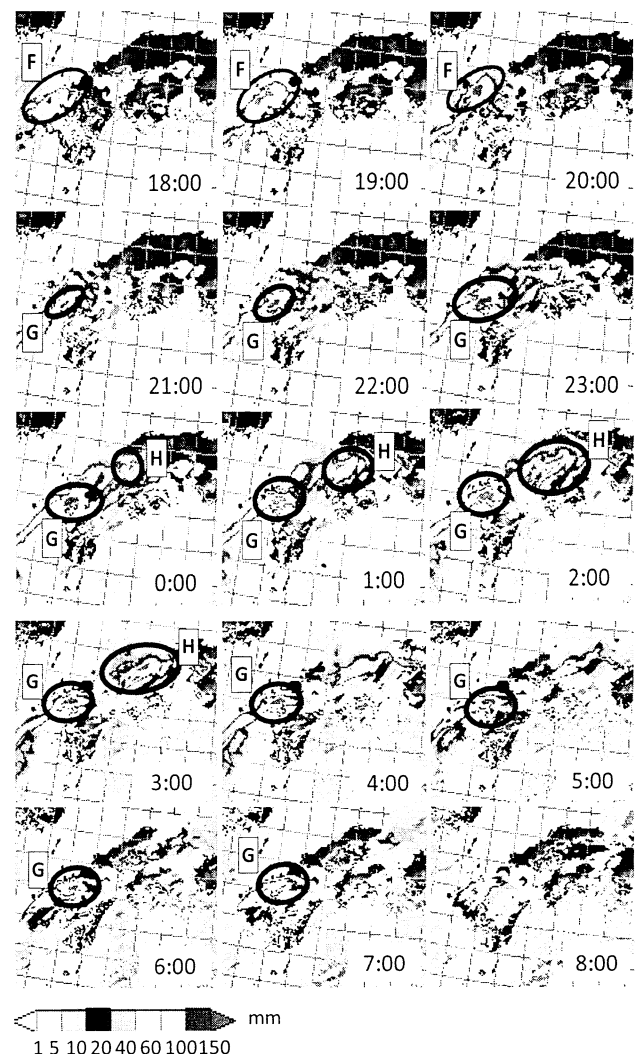


図-5 5kmRCM 3時間雨量分布（2081年7月6日18：00～7日8：00）

以上の事例では、集中豪雨を伴う梅雨前線の回数は1回で、集中豪雨の出現回数は、3地域で出現しているため、3回と数える。

4. 抽出結果と傾向分析

本章では、日本全域における将来変化だけでなく、九州地方を南北に分けた場合の集中豪雨の将来変化と日本海側における集中豪雨の将来変化の解析を行った結果を示す。なお有意性の検定は各25年の平均発生頻度と各年のばらつきである標準偏差を用いて片側T検定を行った⁶⁾。

本来、観測データとの比較は行いたい解析であるが、集中豪雨のようなスケールの小さい現象は、20 km 程度の間隔で設置されているアメダス観測点でとらえることは不可能であり、一方で、レーダーアメダスの観測データは1988年から現在までのデータしかなく、1979年からのデータがないことにより現在気候との比較においては十分なサンプル数が得られないため、本研究と同様の手法による検証は行えなかった。しかし5kmRCMを用いた既往研究では、レーダー雨量計やAPHRODITEと比較した定量的な解析において、梅雨期の日雨量でのピーク時期や降水量の再現性が非常に良く、さらに 200 mm/day を超えるような強雨の再現性が非常によいことがすでに検証されている^{3), 5)}。それゆえ、本研究と同様の手法での検証は行えないものの、5kmRCMは梅雨期豪雨の再現性が非常によいことを踏まえており、本研究の5kmRCMを用いた定性的な梅雨期の集中豪雨解析は信頼できる解析である。

(1) 日本全域における解析

現在気候と比較して、21世紀末気候シナリオの各25年平均発生頻度が増加しているのか、有意性の検定を行った。なお、ここでは、個別に災害をもたらすという観点からみた集中豪雨の頻度分析を行う。すなわち、同一の気象原因によってもたらされた集中豪雨であっても、それが複数の地域に集中豪雨災害をもたらすならば別々の集中豪雨災害として捉えられるため、別々の集中豪雨として数えた場合である。

図-6はひと月を10日ごとに区切った旬別の集中豪雨の発生頻度分布である。図の色を付けた範囲では、現在気候と比較して、21世紀末気候シナリオが90 % 以上有意に増加傾向にあることを意味している。これより、7月上旬と7月下旬から8月上旬にかけて、21世紀末気候シナリオでは有意な増加傾向が見られる。つまり金田らの研究において7月上旬と8月上旬に強い降水の割合が増加していた原因は、梅雨前線に伴う集中豪雨によるものである可能性が高い。

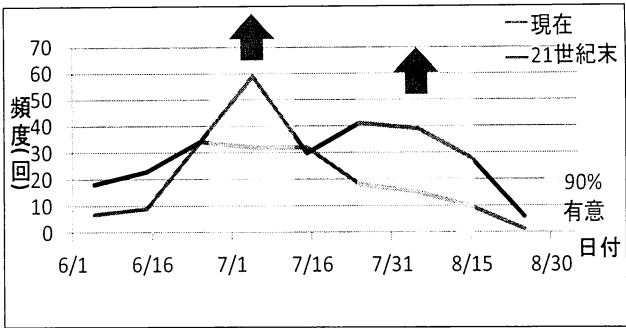


図-6 現在気候と21世紀末気候シナリオの旬別発生頻度

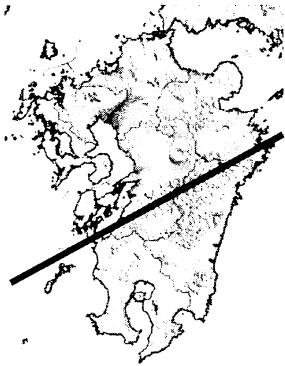


図-7 九州地方分断図

表-1 九州南北の合計頻度と標準偏差

	合計頻度	標準偏差
	北部	
現在	45	1.94
21世紀末	61	2.08
	南部	
現在	34	1.38
21世紀末	42	1.77

(2) 九州地方における解析

ここでは九州地方を南北に分断して、南北での集中豪雨の将来変化を解析した。南北の境目は図-7に示している。気候的にみて九州山地の北側では梅雨前線に伴う集中豪雨が多い傾向にあり、九州山地の南側では特に宮崎で台風による豪雨が多い傾向にあることからこのように分断した。つまり大きく分けて、北部は福岡、佐賀、長崎、大分、熊本であり、南部は宮崎と鹿児島である。

表-1には、南北それぞれの現在気候と21世紀末気候シナリオの合計頻度と標準偏差を示している。表-1より、南北ともに現在気候と比較して21世紀末気候シナリオでは頻度が増加している。ただし、南北ともに90%以上の有意な変化傾向は見られなかった。次に、南北で比較してみると、現在気候と21世紀末気候シナリオともに北部で頻度が多いことが読み取れる。また増加量を比較すると、北部は南部の2倍である。

図-8は、九州南北それぞれの集中豪雨の旬別発生頻度分布である。図-8より、南北ともに21世紀末気候シナリオにおいて7月上旬に頻度のピークを迎えている。特に北部では現在気候と比較して90%以上有意な増加傾向が見られた。しかし、日本全域で見られた8月上旬の有意な増加傾向は見られなかった。南北の比較では、6月は南部の頻度が多く、7月以降は北部の頻度が多い傾向があることから、梅雨前線の北上と梅雨の戻りなど気候的な違いが見られた。

（3）日本海側における解析

2004年や2011年の新潟・福島豪雨のように梅雨前線に伴って、日本海から次々に積乱雲がやってきた場合に発生する集中豪雨の将来変化の解析を行った。本論文では本州の日本海側（青森から山口まで）を対象とする。

図-9は、日本海側における現在気候と21世紀末気候シナリオの旬別発生頻度分布である。図-9より、21世紀末気候シナリオでは現在気候と比較して頻度の増加が見られ、特に頻度のピークが8月上旬に見られる。これは、梅雨の戻りであり、特に北陸・東北地方で集中豪雨が見られた。

5. 結論

本論文では、日本全域だけではなく、近年豪雨災害に見舞われている九州地方や新潟・福島豪雨のような日本海側での旬別の集中豪雨の発生頻度の解析を行った。

日本全域では、21世紀末気候シナリオにおいて、7月上旬と8月上旬に梅雨前線に伴う集中豪雨の発生頻度が増加していることから、その時期に、降水量が増加し、特に日雨量100 mm以上の降水の割合が増加していたのは梅雨前線に伴う集中豪雨によるものである可能性が高いことが示された。

次に九州地方を九州山地で気候的に南北に分断し集中豪雨の発生頻度を解析したところ、南北ともに21世紀末気候シナリオにおいて頻度が増加傾向にあり、特に北部において7月上旬に90%以上の有意な増加傾向が見られた。しかし、南北ともに日本全域では見られた8月上旬の増加傾向は見られなかった。また、南北で比較すると現在気候、21世紀末気候シナリオともに北部で頻度が多いことが示された。

日本海側では、21世紀末気候シナリオにおいて集中豪雨の発生頻度が増加し、特に8月上旬にかけて北陸・東北地方で増加傾向にあることが示された。

今後は、梅雨の戻りがどの地域で増加傾向にあるのか、また、豪雨の継続時間等のより細かなところを解析していく予定である。

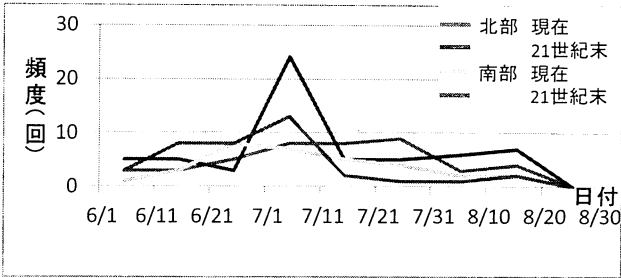


図-8 九州南北の現在気候と21世紀末気候シナリオの旬別発生頻度

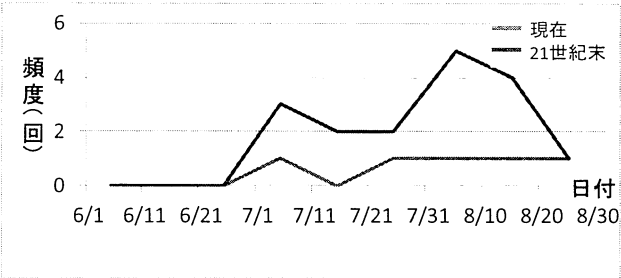


図-9 日本海側における現在気候と21世紀末気候シナリオの旬別発生頻度

謝辞：本研究は文部科学省 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。

参考文献

1) 気象庁: 気象庁気候変動監視レポート2007, 90pp., 2008.
2) Kusunoki, S, R, Mizuta and M, Matsueda.: Future changes in the East Asian rain band projected by global atmospheric models with 20-km and 60-km grid size, Climate Dynamics, 2011.
3) Kanada, S, M, Nakano and T, Kato.: Projection of Future Changes in precipitation and Vertical Structures of the Frontal Zone during the Baiu Season in the vicinity of Japan Using a 5-km-mesh Regional Climate Model, JMSJ, 2011.
4) 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22年度研究成果報告書, pp.50-56, 2011.
5) 山崎剛・岩崎俊樹: ダイナミックダウンスケールの課題と展望, 2008年度秋季大会シンポジウム「地域の詳細な気象と気候の再現を目指してーダイナミックダウンスケール技術の高度利用ー」の報告, pp.6-11, 2010.
6) Kanada, S, M, Nakano and T, Kato.: Climatological Characteristics of Daily Precipitation over Japan in the Kakushin Regional Climate Experiments Using a Non-Hydrostatic 5-km-Mesh Model: Comparison with an Outer Global 20-km-Mesh Atmospheric Climate Model, SOLA, Vol.6, pp.117-120, 2010.
7) 上田拓治: 44の例題で学ぶ統計的検定と推定の解き方, オーム社会, 210pp., 2000.