

60kmAGCMアンサンブルを用いた 気候変動に伴う集中豪雨発生要因となる大気場特性の将来予測

Study on Future Change in Atmospheric Characteristics Causing Localized Heavy Rainfall under Climate Change Using AGCM60km Ensemble

中北英一・草野晴香⁽¹⁾・キムスンミン⁽²⁾

Eiichi NAKAKITA, Haruka KUSANO⁽¹⁾ and Sunmin KIM⁽²⁾

(1) 京都大学大学院工学研究科

(2) 京都大学工学研究科社会基盤工学専攻

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

(2) Department of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University

Synopsis

In 2013 summer, the southwestern part of Japan experienced an extraordinary heavy rainfall that showed a characterized atmospheric pattern. In this study, we are analyzing future changes in atmospheric character that cause localized heavy rainfall under the changed climate. Future climate conditions were analyzed, which were simulated by the AGCM 60km with various sea surface temperature and initial conditions. We also analyzed RCM to verify how rainfall events correspond to atmospheric situation.

キーワード: 気候変動, 集中豪雨, 大気場, 気候モデル

Keywords: climate change, localized heavy rainfall, atmospheric condition, climate model

1. はじめに

1. 1 背景と目的

2013年夏, 我が国では記録的な猛暑や全国各地での豪雨, 沖縄や奄美での小雨など異常気象が相次いだ. 特に豪雨の点では, 7月の山口・島根豪雨や8月の秋田・岩手豪雨など中国地方や東北地方の日本海側などで過去に経験したことないような非常に激しい雨が降り, 洪水氾濫や土砂災害などにより甚大な被害をもたらした. 近年, このような夏期の梅雨前線に伴う集中豪雨が毎年のように発生している. ここで集中豪雨とは, 100 km程度の長さで10~20 kmの幅をもち, 6時間~半日程度継続する降雨を指し, 流域面積が100 km² オーダーまでの流域面積をもつ中小河川に外水および内水氾濫といった影響を

及ぼす危険がある. 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す可能性がある. 気象庁の気候変動監視レポート(2012)では, アメダス観測地点での雨量値解析により時間雨量50 mm以上といった短時間強雨が近年増加傾向にあることが報告されており, 極端降水の増加が示唆されている. このような状況から地球温暖化に伴う気候変動と集中豪雨増加の関連性について注目が集まっており, 防災の点からも集中豪雨の将来変化予測が必要とされている.

現在, 気候変動の研究には全球気候モデル(GCM)が一般的である. 気象庁気象研究所では, 極端現象に対する影響評価を目的として, 高分解能大気気候

モデル (AGCM: Atmospheric Global Climate Model)が開発され、この高分解能の AGCM には 60km メッシュのものと 20km メッシュのものがある。20km メッシュの全球大気モデル (AGCM) では、台風や梅雨前線帯など大きな気象現象はよく再現できている。しかし、梅雨前線に伴う集中豪雨は上述のように小さいスケールの現象であるので、20kmAGCM でも影響評価をすることは困難である。そこで20kmAGCMをダウンスケーリングした5kmメッシュの領域気候モデル(RCM: Regional Climate Model)が開発され、これにより集中豪雨のようなメソβスケール(20km~200km)の現象まで表現できるようになり影響評価が可能となった。

5kmRCM を用いた気候変動の集中豪雨に対する影響評価に関して日本では様々な研究が進められており、夏季において日雨量の有意な増加傾向、特に日雨量 100mm 以上の大雨がもたらす降水の総雨量に対する割合が増加することが示されている (Kanada *et al.*2010)。また、梅雨期に関して、中北ら (2011) は 5kmRCM を用いて将来気候の 7 月と 8 月の月上旬に特に日本海側で集中豪雨が増加することを報告している。しかし、降水は非常に細密で複雑な課程を伴うため不確実性が高く、また 20kmAGCM と 5kmRCM は現在気候再現実験、将来推測実験共に 1 本の時系列 25 年間分しかないため、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危険性がある。

そこで本研究では、アンサンブル計算が実施されている 60kmAGCM の結果を用いて、気候変動予測における将来推定の有意性を高めることを大きな目的とする。そのために、60km 空間分解能の出力で表現できる大きなスケールを持ち、かつ夏季の天候に大きな影響を与える太平洋高気圧や水蒸気フラックスに着目し、集中豪雨を大気場から捉えることを試みる。2013 年の夏は西日本に強く張り出した太平洋高気圧と、その周縁に沿って日本海側から日本列島に吹き込んだ水蒸気フラックスが特徴的であり、日本海側での集中豪雨の要因となったと考えられる。したがって、同じような特徴の大気場が気候変動によって増加する場合、2013 年の夏に起きたような集中豪雨が将来増加する可能性があると考えられる。

1.2 使用データと研究の流れ

本研究で使用している気候モデルはすべて気象研究所で開発されたものである。将来変化推定には革新プログラムの後期実験で出力された 20kmAGCM(MRI_3.2S)の現在気候(1979~2003)と 21 世紀末気候(2075~2099)の 7~8 月の月平均出力値を用いて、2013 年夏の気候と同じ特徴をもつ大

気場の出現特性と発生頻度を目視により解析する。また、20kmAGCM による結果の有意性を向上させるために、海面水温と大気初期値を変化させた 60kmAGCM のアンサンブル情報を用いて同様の解析を行う。具体的には、革新プログラムの 60kmAGCM 後期実験 (MRI-3.2H) において出力された海面水温昇温 4 パターンと 3 つの積雲スキームの違いによる 12 アンサンブル実験結果のうち、積雲スキームが 20kmAGCM 後期実験でも用いられている吉村 (YS) スキームのもののみを用いる。この積雲スキームは、格子内の背の高さの異なる複数の積乱雲を緻密に計算しているスキームであり、このスキームを用いることによって降水量などがよく再現されることがわかっている。海面水温昇温パターンは、CMIP3 マルチモデル平均の昇温パターンを与えたコントロールランと、CMIP3 の各モデルを昇温パターンによって 3 つのクラスターに分けて、クラスターごとに平均した昇温パターンを与えた合計 4 パターンが与えられている。また、大気初期値の違いによるばらつきも考慮するため、創生プログラムで追加された MRI_3.2H とは異なる初期値による現在気候と将来予測コントロールラン予測結果も使用する。以上、現在気候 2 種類、将来気候 5 種類のアンサンブルメンバーによる出力結果を用いる。最後に、革新プログラムにおいて 20kmAGCM から力学的にダウンスケーリングした 5kmRCM 情報を用いて、大気場と集中豪雨の対応を検証する。中北ら (2011) の既往研究において、5kmRCM の降雨分布から目視により直接抽出した集中豪雨事例を用いて、集中豪雨が発生した年と 20kmAGCM において大気場の特徴により抽出した年を比較して、大気場による集中豪雨の再現性を評価する。以上の 20kmAGCM、60kmAGCM、5kmRCM の本研究における相互関係の概念図を Fig.1 に示す。



Fig.1 conceptual diagram

2. AGCMを用いた大気場による対象年の抽出

2.1 2013年夏の気候の特徴

2013年夏の日本では、記録的な猛暑や日本海側での大雨、太平洋側と沖縄、奄美の一部地域での少雨など様々な異常気象に見舞われた。本節では、これらの現象の原因となった大気場について、大気と海洋・陸面・雪氷が相互に関連する一つのシステムである気候システムと関連させながら、気象庁が発表した資料を基に解析を行う。

気候の変化には、海面水温の挙動が重要な役割を果たす。2013年7～8月で平均した海面水温は、インドネシアやフィリピン周辺で平年より高くなる一方で、中・東部太平洋赤道域では平年より低くなり、ラニーニャ現象と似たパターンを示した(Fig.2)。

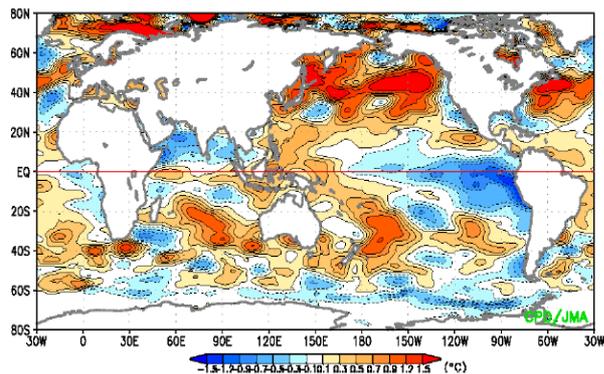


Fig.2 7/1-8/25 in 2013 average sea surface temperature deviation from normal(JMA.2013)

海面水温が高くなると、蒸発量の増加により一般に対流活動は活発化される。加えて、インド洋の海面水温が平年より低かったため、大陸と海洋間の熱的コントラストが強まったことによりアジアモンスーンが強化された。これらの要因によってアジアモンスーン域の広い範囲で対流活動が非常に活発になった。ここで、アジアモンスーン域とは、「地上風の卓越風向が1月と7月の間で120度以上変化し、両月での卓越風出現頻度の平均が40%を超える地域」(Khromov. 1957)のうち、南アジアから東アジアにかけての地域を指す。

アジアモンスーン域に含まれるフィリピン東方海上で対流活発となると、大気の熱源応答によって対流活発域の北西側に低気圧性の循環が生み出される。(Matsuno(1966)-Gill(1980)の熱源応答) この熱帯域での低気圧性の渦度を励起源として、定常ロスビー波という定常波のエネルギーの東への伝播によってPJパターン(Nitta.1987)という高低気圧が交互に現れるテレコネクションパターンが生まれ、日本では高気圧性の偏差が見られる(Fig.3)。

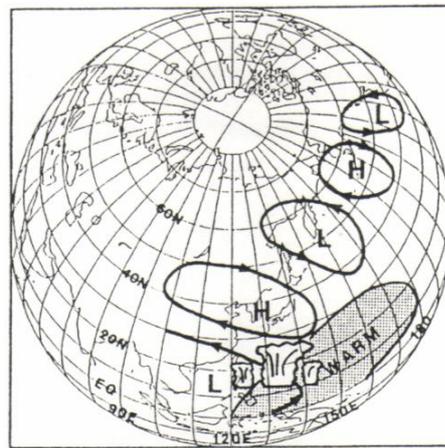


Fig.3 PJ pattern(Nitta.1987)

これは太平洋高気圧の西側への拡大あるいは局所的な強化に相当する。この状況は2013年夏にも当てはまり、7～8月平均した東シナ海～西日本の太平洋高気圧性の循環は1979年以降でもっとも強く、太平洋高気圧が強く西に張り出したため沖縄・奄美や西日本では勢力が非常に強くなった【Fig.4】。

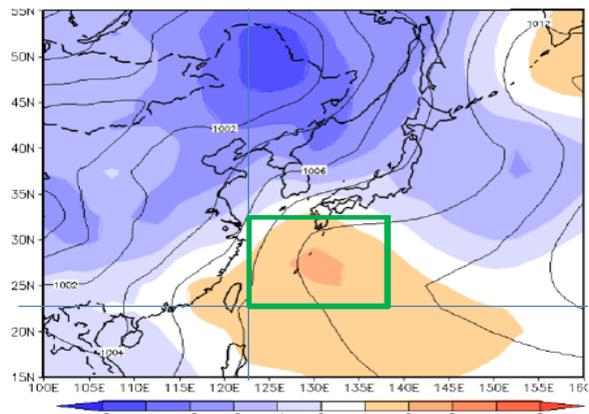


Fig.4 7/1-8/25 in 2013 average sea level pressure deviation from normal (JMA.2013)

一方、アジアモンスーン域での対流活発はチベット高気圧にも影響を与える。一般にチベット高原は周辺より標高が高いため多量の日射量によって暖まりやすく、加えて対流活発による降水に伴う潜熱加熱により上昇気流が強化され、対流圏上層が高圧となることでチベット高気圧が強まる。2013年夏は、同じ原理でチベット高気圧が平年より強く、特に西日本への張り出しが強かった。

上記の理由により太平洋高気圧とチベット高気圧が優勢となり、この2つの高気圧に覆われた日本では日射量が平年より多くなった。この影響で西日本を中心に全国的に高温となり、高知県の四万十市では日最高気温が41.0度を記録し、観測史上最高となった。日本海の海面水温もかなり高く、それに伴って7～8月の日本海南部の水蒸気量は平年に比べて

多かった。そのため、西に張り出した太平洋高気圧の周縁に沿って暖かく湿った空気が日本海側から日本列島に吹き込み、非常に強い雨をもたらした。水蒸気フラックスの平年差を見ると、日本海南部で強い東向き偏差のフラックスが現れている。また、東北地方では太平洋側で西向き偏差のフラックスになったことにより水蒸気の収束場となり、梅雨前線による豪雨が発生したと考えられる(Fig.5)。

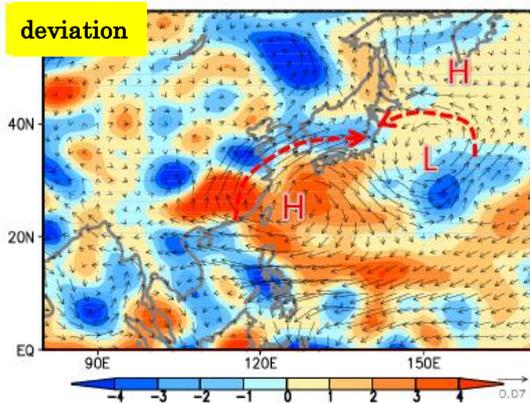


Fig.5 7/1-8/25 in 2013 average water vapor flux and specific humidity from normal (JMA.2013)

以上の解析により、2013年夏の大気場の特徴は、ラニーニャ傾向の海面水温パターンとアジアモンスーン域での対流活発化、優勢な太平洋高気圧とチベット高気圧の日本付近への張り出し、日本海での高い海面水温に伴う水蒸気の増加、の以上4点にまとめられる。本研究では、このうち日本での豪雨に直接関わったと考えられる太平洋高気圧の西への張り出しと、水蒸気、特に東向き水蒸気フラックスの2点に着目し、大気場から集中豪雨を捉えるを試みる。

2.2 抽出の基準とする大気場の特徴

本研究では2.1節での解析から、日本南海上に張り出した太平洋高気圧と、その周縁に沿って日本海側に吹き込んだ水蒸気フラックスを梅雨期集中豪雨の原因と見なし、2013年と同様の大気場の特徴を持つ年の抽出の材料とする。また、2013年夏に豪雨が特に多かった中国地方と東北地方の日本海側に注目するため、水蒸気フラックスは中国地方日本海側と東北地方日本海側、2つを区別せずに本州日本海側を対象にする3種類の基準を設けた。北陸地方は中国地方と東北地方の中間地点にあたり、水蒸気フラックスとして区別が難しいことから特別な基準は設けていない。九州地方北部は集中豪雨が毎年のように発生しており、2013年夏の特徴として見なし難いため対象から外している。具体的な基準を以下に示す。

[1] 海面更正気圧表面分布

- ・九州周辺の日本南海上で高気圧偏差が現れている場合
- ・高気圧偏差が上記の場所から東西南北にずれている場合でも、高気圧偏差が九州にかかっている場合
- ・東経100~170度、北緯10~60度付近の範囲が一様に高気圧偏差に覆われている場合は除く

[2] 水蒸気フラックス表面分布

- 1)本州日本海側
 - ・九州北部で東向き偏差を示し、かつ北陸周辺の日本海南部で東向き偏差を示す場合
- 2)中国地方日本海側
 - ・九州地方北部で東向き偏差を示す場合
- 3)東北地方日本海側
 - ・北陸地方周辺の日本海で東向き偏差を示し、東北地方の太平洋側で西向き偏差を示す場合

以下、本論文では海面更正気圧表面分布と水蒸気フラックス表面分布を、単に海面更正気圧と水蒸気フラックスと記す。海面更正気圧、水蒸気フラックス両方の条件を満たすものを抽出の対象とした。ただし、水蒸気フラックスの基準より海面更正気圧の基準を緩くした。すなわち海面更正気圧のパターンが多少異なっても水蒸気フラックスによって抽出されるようにした。その理由は、水蒸気フラックスの方が降雨への影響がより大きいと考えたためである。海面更正気圧、水蒸気フラックスは共に2013年夏の状況をもとに基準を設定し、そのうち中国地方と東北地方での豪雨に寄与したと考えられる部分をそれぞれの基準とした。

2.3 抽出の流れと大気場抽出の解析方針

本研究では、20kmAGCMと60kmAGCMから出力される月平均値を用いて日本周辺の海面更正気圧と水蒸気フラックスの偏差を画像データにし、それらを目視によって2.2節で定めた基準に当てはまる大気場が現れる年を抽出する。偏差の基準値とする平均値には現在気候、将来気候共に現在気候の25年平均を用い、この平均値からの差を各年で求めている。これは、現在気候の平均からの変動が将来気候において増加するかしないかを明らかにすることが本研究の目的であるためである。すなわち、現在気候と将来気候では25年の平均値が異なり、別々の平均値を用いると現在気候と将来気候で厳密な比較ができなくなるためである。手順としては、まず海面更正気圧と水蒸気フラックスのそれぞれで基準に当てはまる大気場が現れる年を抽出し、その後両方当てはまる場合の年のみを採用する。基準によって抽出された代表的な年の大気場をFig.6に示す。なお、

水蒸気フラックスの図では地上 2m での比湿の偏差を陰影（カラー）で、水蒸気フラックスの向きと大きさの偏差（ベクトルとしての偏差）を矢印によって表現している。

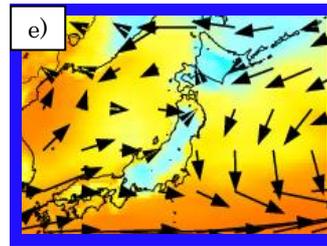
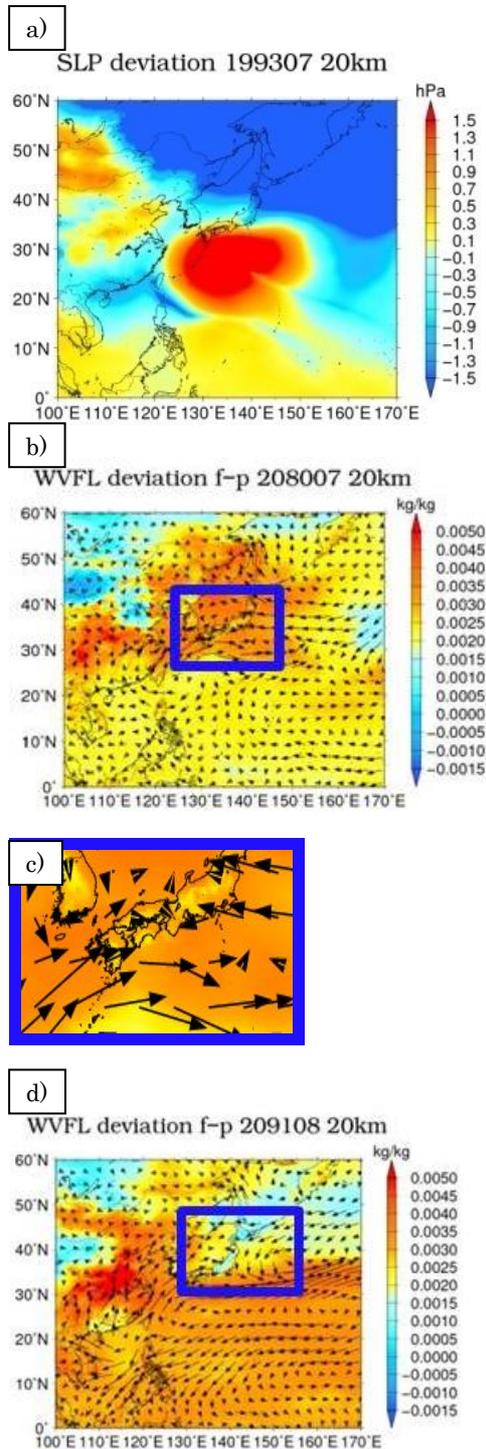


Fig.6 Typical examples of atmospheric pattern picked out, a)sea surface pressure, b)~e)water vapor flux(vector) and specific humidity(color). b) is example about Chugoku region, d) is about Tohoku region. c) and e) is enlarged illustration of blue square in b) and d).

上記の方法によって抽出された基準に当てはまる大気場が現れる年の出現頻度を現在気候と将来気候とで比較し、その差が有意であるかどうかを χ 二乗検定およびT検定による仮説検定を用いて検定する。以上により 2013 年夏の豪雨をもたらしたような大気場が将来気候において増加するかを解析する。

3. 大気場による対象年抽出の結果

3.1. 20kmAGCMによる抽出結果

Table1 は現在気候, 将来気候において 20kmGCM を用いて大気場の基準によって抽出された年の数, Table2 は Table1 の結果に対し χ 二乗検定による仮説検定を行った結果を、本州日本海側、中国地方日本海側、東北地方日本海側それぞれにおいて月別に表示した結果である。

Table1 The number of years picked out by atmospheric pattern in 20kmAGCM.

The main island		
	July	August
Present	6	5
Future	11	11

Chugoku region		
	July	August
Present	7	4
Future	12	11

Tohoku region		
	July	August
Present	1	2
Future	6	4

Table2 The statistical significance of increase between present and future. The yellow shaded cells show 5% significance level and the green shadows show 10%.

The main island

	July	August
test statistic χ^2	2.23	3.31
5%significance level rejection region	3.84	3.84
10%significance level rejection region	2.71	2.71

Chugoku region

	July	August
test statistic χ^2	2.12	4.67
5%significance level rejection region	3.84	3.84
10%significance level rejection region	2.71	2.71

Tohoku region

	July	August
test statistic χ^2	4.15	0.76
5%significance level rejection region	3.84	3.84
10%significance level rejection region	2.71	2.71

χ^2 二乗検定は現在気候と将来気候で抽出された年の数の差に対して行い、差がないとの帰無仮説のもと、検定統計量が棄却域を超えれば有意な差がある（増加する）とし、超えなければ有意な差ではない（帰無仮説は却下できない）と判断する。今回は、現在気候と比較して、将来気候で大気場の基準によって抽出される年が増加していることの検定であるので、片側検定を行った。

Table1の結果では、現在気候に比べて将来気候では大気場によって抽出される年は一様に増加している。とくに、本州日本海側と中国地方日本海側では7月に比べ8月の増加が大きい。この結果は、将来気候において日本海側で集中豪雨の発生頻度が8月上旬に増加するという、5kmRCMを用いた集中豪雨の解析結果(中北ら.2011)と対応していると考えられる。

しかし、Table2の結果では有意水準5%で有意な差として現れているのは中国地方の8月、東北地方の7月だけである。すなわち、20kmAGCMの結果だけでは、大気場の基準による対象年の差は有意な差であるとはいえない。

3.2 60kmAGCMアンサンブルによる抽出結果

次に、Table3に60kmAGCMアンサンブル実験の大気場によって抽出された対象年の数を示す。

Table3 The number of years picked out by atmospheric pattern in 60kmAGCM ensembles.

The main island

July	MRI-3.2H control run	MRI-3.2H SSTcluster1	MRI-3.2H SSTcluster2	MRI-3.2H SSTcluster3	Initial condition ensemble
Present	5				8
Future	9	12	7	6	6
August	MRI-3.2H control run	MRI-3.2H SSTcluster1	MRI-3.2H SSTcluster2	MRI-3.2H SSTcluster3	Initial condition ensemble
Present	8				6
Future	9	9	11	7	8

Chugoku region

July	MRI-3.2H control run	MRI-3.2H SSTcluster1	MRI-3.2H SSTcluster2	MRI-3.2H SSTcluster3	Initial condition ensemble
Present	5				8
Future	9	12	7	6	6
August	MRI-3.2H control run	MRI-3.2H SSTcluster1	MRI-3.2H SSTcluster2	MRI-3.2H SSTcluster3	Initial condition ensemble
Present	3				7
Future	13	8	11	7	9

Tohoku region

July	MRI-3.2H control run	MRI-3.2H SSTcluster1	MRI-3.2H SSTcluster2	MRI-3.2H SSTcluster3	Initial condition ensemble
Present	1				2
Future	1	6	2	4	3
August	MRI-3.2H control run	MRI-3.2H SSTcluster1	MRI-3.2H SSTcluster2	MRI-3.2H SSTcluster3	Initial condition ensemble
Present	4				2
Future	5	4	5	5	5

本州日本海側、中国地方日本海側、東北地方日本海側のすべてにおいて、ほとんどのアンサンブルメンバーで現在気候に比べて将来気候で対象年の数が増加している。しかし、本州日本海側7月における初期値アンサンブルや、8月のMRI-3.2H クラスタ3のように減少するメンバーもあり、また増加していても20kmAGCMでの結果に比べて増加量が小さいメンバーも多い。本州日本海側では、8月に比べて7月の増加が大きい。一方中国地方では8月の方が7月より増加が大きい。東北地方では現在気候の7月で抽出された年の数が特に小さいため、8月に比べて増加が大きい。一方初期値による違いでは、地域や月ごとに異なり、初期値の違いによる明確な特徴は見られなかった。すなわち、初期値の違いが気候の要素に対し系統的な差を生まず、アンサンブルとして有効な独立な初期値アンサンブルメンバーが創生プログラムによって追加されたと言える。

60kmAGCM 現在気候と将来気候コントロールランはそれぞれ20kmAGCMと同じ海面水温分布を与

えているが、大気場による対象年の抽出結果は、将来気候で増加年数が多い月や地域、増加量年数そのものなどが、20kmAGCMで行った結果とあまり対応していない。実際に同じ年と月の海面更正気圧偏差を20kmAGCMと60kmAGCMで比較すると、日本付近の分布にかなり違いがあった。Fig.7に例を示す。

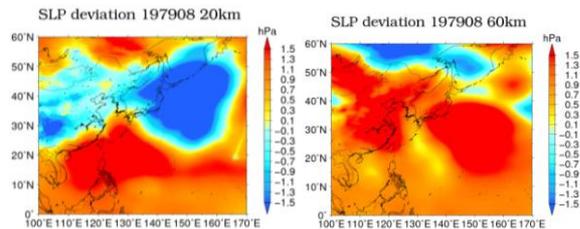


Fig.7 sea level pressure deviation in August,1979, from 20kmAGCM(right side) and 60km AGCM(left side).

この例では、20kmAGCMでは海面更正気圧による抽出基準に当てはまるが、60kmAGCMでは基準に当てはまらないため除外される。すなわち、この海面更正気圧の分布の違いによって、この年が抽出の対象になるかが分かれるため、抽出結果に違いが生じたと考えられる。よって、有意性評価の際には20kmAGCMによる抽出結果と60kmAGCMによる抽出結果を、異なる独立のメンバーからの抽出結果として採用することを考える。

以下では、なぜこのような独立な扱いをすることができるのかを少し考察しておく。すなわち、20kmAGCMと60kmAGCMコントロールランでは同じ年と月でも大気場の分布が異なる理由として、以下2つの理由が考えられる。1つ目に、両者の積雲スキームに用いられているYSスキームでは、1.2節で述べたように格子内の高さが異なる複数の積雲による対流の平均的な効果を格子スケールに与えている。そのため、格子の大きさが違うと、含まれる積雲の数が異なるため、60km格子では20km格子に比べて対流の効果が平滑化されてしまう。この違いが大気場に影響を与えた要因の1つと考えられる。2つ目に、20kmAGCMと60kmAGCMでは大気初期値が異なるため、そこから算出される結果が異なると考えられる。同じ格子スケールで同じ海面水温分布を与えたMRI-3.2Hの現在気候出力値と初期値アンサンプルの現在気候では、相違点は大気初期値だけであるが、Fig.8に示したように海面更正気圧の分布に違いがある。

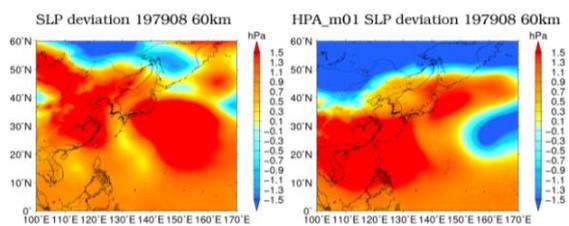


Fig.8 sea level pressure deviation in August 1979 from MRI-3.2H 60kmAGCM (right side) and 60kmAGCM initial condition ensemble (left side).

以上2つの理由から、20kmAGCMと60kmAGCMコントロールランでは各年の大気場は対応しないと考えられる。

一方、将来気候の3つのクラスターの海面水温昇温パターンごとに抽出された数を比較すると、7月ほどの地域でもクラスター1の増加が一番多い。各クラスターの特徴を明らかにするため、海面更正気圧と水蒸気フラックス、海面水温について、各クラスター25年平均とコントロールランの将来気候25年平均との差をFig.9、Fig.10、Fig.11に示す。

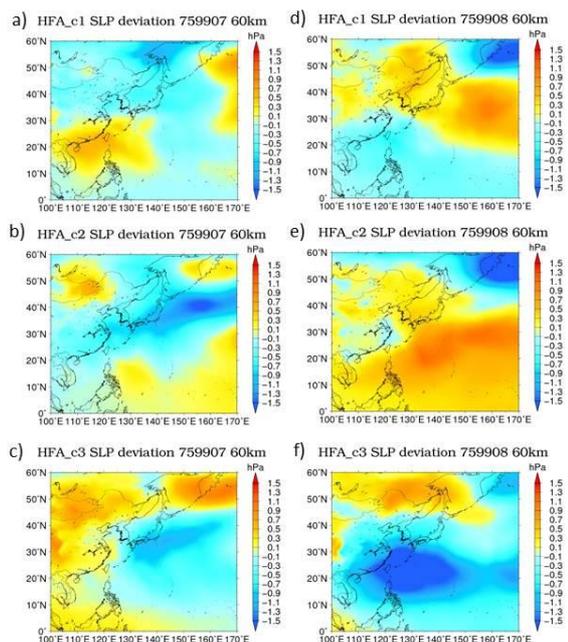


Fig.9 2075~2099 average in July(a)~c) and August(d)~f) sea surface pressure difference between 60kmAGCM control run and three ensembles with three SST patterns.

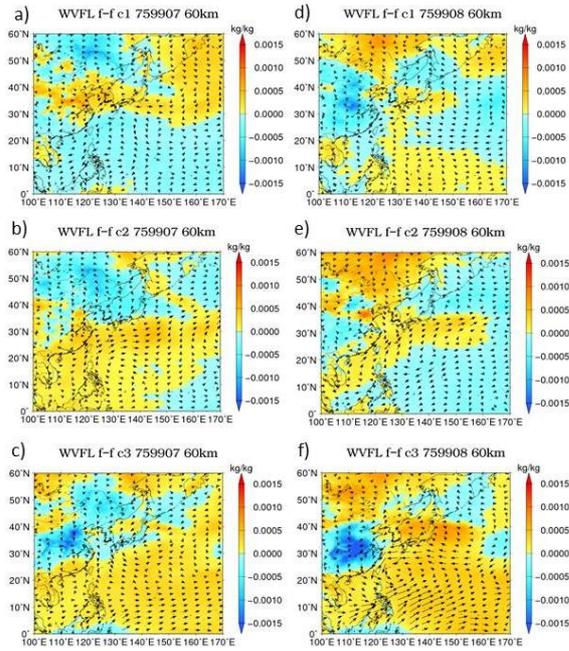


Fig.10 2075~2099 average in July and August sea water vapor flux difference between 60kmAGCM control run and three ensembles with three SST patterns.

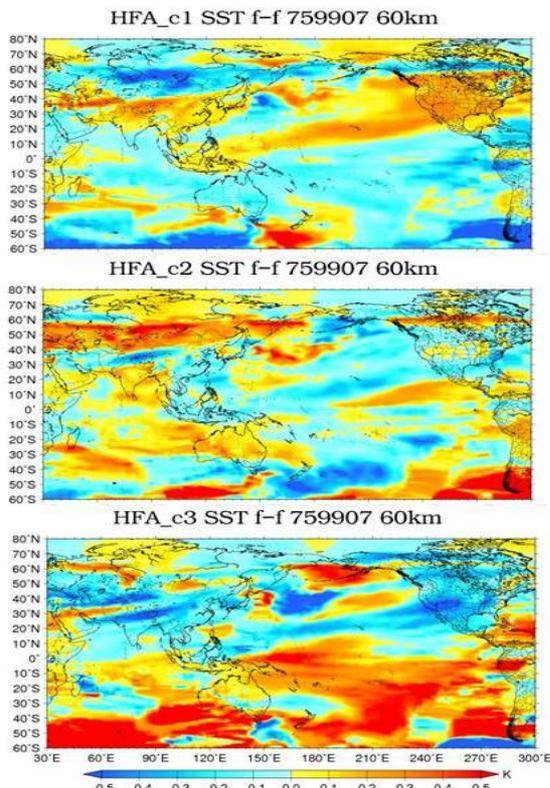


Fig.11(i) 2075~2099 average in July sea surface temperature difference between 60kmAGCM control run and three ensembles with three SST patterns.

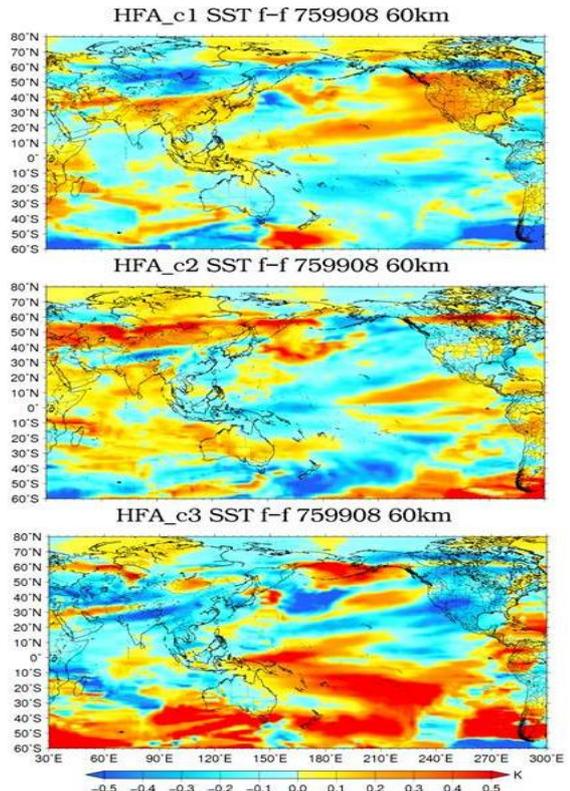


Fig.11(ii) 2075~2099 average in August sea surface temperature difference between 60kmAGCM control run and three ensembles with three SST patterns.

7月のクラスター1の図では日本南海上で海面更正気圧の高気圧偏差が現れており、九州地方北部から北陸地方にかけての日本海で東向き偏差の水蒸気フラックスが現れている。これは2.2節で設定した大気場の基準に当てはまり、他クラスターではそのような特徴は見られない。したがって、海面水温の昇温パターンによる大気場への影響が現れていると考えられる。しかし、8月は海面水温のパターンは7月とほとんど変化しないが、大気場による抽出の対象年はクラスター2が一番多くなっており、25年平均した大気場の特徴もクラスター2でのみ当てはまる。そのため、海面水温の昇温パターン以外の何らかの要因がより大きな影響を大気場に与えたか、あるいは海面水温の微妙な変化でも大気場に影響を与えたと考えられる。しかし一方で、クラスター間の大気場の違いは、各年の偏差に対して10分の1程度の差しかなく、この微妙な差を考慮するべきか、という点にも疑問が残る。

次に、60kmAGCM アンサンブル情報で大気場による対象年の抽出した結果をベースに、モデルによるばらつきを超えて将来気候と現在気候で抽出年数の差が有意であるかどうかを T 検定によって評価する。3.1 節で行った χ^2 乗検定と同様に、将来気候と現在気候の抽出数の平均に差はないという帰無仮説のも

と、片側検定で検定統計量が棄却域を超えれば将来で抽出年が有意に増加し、超えなければ帰無仮説は却下できないと判断する。

Table4 に本研究で用いたすべてのメンバーから得られた、大気場による対象年の抽出結果に対する T 検定を行った結果を示す。すべてのメンバーとは、3章で用いた 20kmAGCM 出力と 5つの 60kmAGCM アンサンブルメンバー出力とを併せた 6つのメンバーを指す。各モデルでの抽出結果を Table5 に示す。

Table4 The statistical significance of increase between present and future from 20kmAGCM and 60km AGCM. The yellow shaded cells show 5% significance level and the green shadows show 10%.

The main island		
	7月	8月
test statistic T	2.177	2.070
5%significance level rejection region	2.571	2.571
10%significance level rejection region	2.015	2.015

Chugoku region		
	7月	8月
test statistic T	2.366	5.000
5%significance level rejection region	2.571	2.571
10%significance level rejection region	2.015	2.015

Tohoku region		
	7月	8月
test statistic T	2.825	3.162
5%significance level rejection region	2.571	2.571
10%significance level rejection region	2.015	2.015

Table5 The number of years picked out by atmospheric pattern in 20 km AGCM and 60kmAGCM ensembles.

The main island						
July	20km	60km control run	60km cluster1	60km cluster2	60km cluster3	60km initial condition
Present	6	5				8
Future	11	9	12	7	6	6
August	20km	60km control run	60km cluster1	60km cluster2	60km cluster3	60km initial condition
Present	5	8				6
Future	11	9	9	11	7	8

Chugoku region						
July	20km	60km control run	60km cluster1	60km cluster2	60km cluster3	60km initial condition
Present	7	5				8
Future	8	9	12	7	6	8
August	20km	60k _control run	60km cluster1	60km cluster2	60km cluster3	60km initial condition
Present	5	3				7
Future	11	13	8	11	7	9

Tohoku region						
July	20km	60km control run	60km cluster1	60km cluster2	60km cluster3	60km initial condition
Present	1	1				2
Future	6	1	6	2	4	3
August	20km	60k _control run	60km cluster1	60km cluster2	60km cluster3	60km initial condition
Present	2	4				2
Future	4	5	4	5	5	5

Table4 中の黄色く塗りつぶされたマスは有意水準 5%，緑色に塗りつぶされたマスは有意水準 10% に対し有意と判断されたことを意味する。Table4 の結果ではどの地域においても有意水準 10%以上で有意増加している。特に中国地方日本海側の 8 月と東北地方日本海側の 7 月、8 月では、有意水準 5%で有意増加しており、信頼性の高い結果と言える。しかし、本州日本海側の抽出年数の増加に対する有意性は、中国地方日本海側と東北地方日本海側における有意性と同等、もしくはより高いはずであるにも関わらず、7 月 8 月共に最も低い。本来、本州日本海側は中国地方日本海側と東北地方日本海側を含んでいるはずであるのに、矛盾が生じている。この結果は、本州日本海側での大気場による対象年の抽出基準が、中国地方日本海側と東北地方日本海側を対象とした場合の抽出結果を包括しているものではない危険性があることを示す。そこで、中国地方日本海側と東北地方日本海側において抽出された対象年の数を、現在気候と将来気候の月別にそれぞれ合計して、新たな本州日本海側の抽出年数として設定する。もちろん、中国地方日本海側、東北地方日本海側共に、対象年として抽出された場合は、2年ではなく、1年としてカウントする。この新たな本州日本海側での現在気候と将来気候の対象年数の差に対して、再度 T 検定を行った結果を Table6 に示す。

Table6 The statistical significance of increase between present and future from 20kmAGCM and 60km AGCM. The yellow shaded cells show 5% significance level and the green shadows show 10%.

The main island		
	July	August
test statistic T	3.630	3.780
5%significance level rejection region	2.571	2.571
10%significance level rejection region	2.015	2.015

Chugoku region		
	July	August
test statistic T	2.366	5.000
5%significance level rejection region	2.571	2.571
10%significance level rejection region	2.015	2.015

Tohoku region		
	July	August
test statistic T	2.825	3.162
5%significance level rejection region	2.571	2.571
10%significance level rejection region	2.015	2.015

参考のため中国地方日本海側と東北地方日本海側は Table4 と同じものを再掲している。Table4 と比較して、本州日本海側で7月, 8月共に5%有意水準に対しても有意な増加をしており, 検定統計量を比較しても有意性が格段に向上したことがわかる。また, Table6 の全てにおいて, 7月に比べて8月の検定統計量が大きいことは, 8月で日本海側の集中豪雨が将来増加するという, 5kmRCM や 20kmAGCM を用いた既往研究で述べられている研究成果とも整合している。したがって, この新たに設定された本州日本海側の抽出年数, すなわち中国地方日本海側と東北地方日本海側の抽出年の和集合の要素数が, より正確な値であると考えられる。以下ではこの新たな本州日本海側の抽出年数を用いることとする。

本研究で用いたすべてのモデルに対するT検定では, すべての地域と月で大気場による抽出年数の有意な増加が見られたが, アンサンブル実験においてモデルによる系統的な差が最も小さいと考えられるのは, モデルの解像度や境界条件が等しく初期値のみが異なる初期値アンサンブル実験による出力値である。そこで, より厳密な検定を行うため, 60kmAGCMの2つの初期値アンサンブルで抽出した結果のみに対してT検定を行った結果をTable7に示す。

す。

Table7 The statistical significance of increase between present and future from 60kmAGCM ensembles with initial conditions.

The main island		
	July	August
test statistic T	3.000	3.000
5%significance level rejection region	12.71	12.71
10%significance level rejection region	6.31	6.31

Chugoku region		
	July	August
test statistic T	1.000	1.500
5%significance level rejection region	12.71	12.71
10%significance level rejection region	6.31	6.31

Tohoku region		
	July	August
test statistic T	1.000	2.000
5%significance level rejection region	12.71	12.71
10%significance level rejection region	6.31	6.31

有意水準に対する棄却域と比較して, どの地域でも検定統計量が非常に小さく, 有意な増加が全くないことがわかる。これは各地域の増加量が抽出年数そのものに対し微量であることに加え, アンサンブルメンバーが2つしかないため自由度が1となり, 有意水準に対する棄却域がかなり大きくなり棄却することが難しくなることが原因と考えられる。そこで次に, アンサンブルメンバーを増やすため, 大気場の特徴の差異が微小であることから本研究では系統的な差がないとした, 海面水温昇温パターンの違いによるアンサンブル実験出力結果と, 初期値アンサンブル出力結果で抽出された結果に対しT検定を行った。検定結果をTable8に示す。

Table8 The statistical significance of increase between present and future from 60kmAGCM ensembles with two initial conditions and three sea surface temperature pattern.

The main island		
	July	August
test statistic T	2.997	3.000
5%significance level rejection region	2.776	2.776
10%significance level rejection region	2.132	2.132
Chugoku region		
	July	August
test statistic T	2.256	4.061
5%significance level rejection region	2.776	2.776
10%significance level rejection region	2.132	2.132
Tohoku region		
	July	August
test statistic T	1.486	2.064
5%significance level rejection region	2.776	2.776
10%significance level rejection region	2.132	2.132

20kmAGCMによる抽出結果を検定に含めたTable6の検定結果と比較すると、本州日本海側の7月8月両月と中国地方日本海側の8月で、有意水準5%に対する有意な増加が現れている点が共通しているため、この増加はかなり有意性の高い結果と言える。一方で、Table6の検定結果と異なり、東北地方日本海側では有意な増加が現れていない。すなわち、Table6で見られた東北地方日本海側の有意な増加は、20kmAGCMによる抽出結果の寄与が大きいと言える。

以上の20kmAGCMと60kmAGCMを用いた大気場の抽出結果より、7月は本州日本海側全体で、また8月は日本海側の特に中国地方において、将来気候で2013年と似た特徴を持つ大気場が現れる頻度が現在気候と比較して高い有意性を持って増加すると言える。また、アンサンブル情報を用いて複数の抽出結果を用いることによって有意性が評価でき、その数が多いほど有意性を正しく評価できると言える。

4. 5kmRCMと20kmAGCMの対応

上述してきた大気場の特徴によって集中豪雨の生起と生起場所の特徴を捉えられるのかどうかを評価するために、本節では5kmRCMによる降雨分布出力を直接用いて、対象とする梅雨前線に伴う集中豪

雨が生起した年と、本研究で20kmAGCMを用いて大気場の特徴によって抽出された年との対応について検討する。5kmRCM降雨分布出力を用いた集中豪雨事例の抽出結果は、先述した中北ら(2012)の研究結果を用いる。大気場から対象年を抽出した場合と同様に2013年の夏に発生した集中豪雨を基本とするため、5kmRCMの現在気候と将来気候の7月と8月において、中国地方、東北地方、北陸地方のいずれかの日本海側で梅雨前線による集中豪雨が発生した年を抽出し、大気場の基準による日本海側の集中豪雨生起年の抽出結果と対応しているかを検討する。詳細な評価を行うため、中国地方日本海側、東北地方日本海側で豪雨が発生した場合に、それぞれの地域で設定した水蒸気フラックスの基準に従って大気場を抽出した結果と対応しているかについても検討する。なお、5kmRCMでの集中豪雨の定義は中北ら(2011)による以下の基準に従う。

- 1) 30分雨量
 - ・時間雨量換算で50mm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50mm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
 - ・150mm以上の雨域が出現した場合
 - ・100mm~150mm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
- 以上すべてを満たすものを集中豪雨と定義する。

Table9に5kmRCM降雨分布出力の直接解析によって集中豪雨が抽出された年(以下、本研究ではこの抽出された年をRCM集中豪雨年と記す)と20kmAGCMにおいて大気場の基準によって抽出された年が対応している割合を示す。

Table9 The ratio that rainfalls observed from 5kmRCM relate atmospheric characteristics observed from 20kmAGCM

a)

The main island		
	July	August
Present	42.9% (3/7)	50% (2/4)
Future	37.5% (3/8)	66.7% (8/1)

Chugoku region		
	July	August
Present	57.1% (4/7)	50% (1/2)
Future	80% (4/5)	57.1% (4/7)

Tohoku region		
	7月	8月
Present	*% (0/0)	*% (0/0)
Future	*% (0/0)	33.3% (2/6)

*Yellow mesh shows that the numbers decreased when the criteria of SLP changed strictly

b)

The main island		
	July	August
Present	50% (3/6)	40% (2/5)
Future	27.3% (3/1)	72.7% (8/1)

Chugoku region		
	July	August
Present	57.1% (4/7)	25% (1/4)
Future	33.3% (4/1)	36.4% (4/1)

Tohoku region		
	July	August
Present	0% (0/1)	0% (0/2)
Future	0% (0/6)	50% (2/4)

a), b)の数字はそれぞれ以下の定義式に従い、式中のA, B, CはFig.12の概念図の定義に従う。

- a) RCM集中豪雨のうち大気場が基準に当てはまる年の割合 = $B/(A+B)$
- b) 大気場が基準に当てはまる年のうちRCM集中豪雨年の割合 = $B/(B+C)$

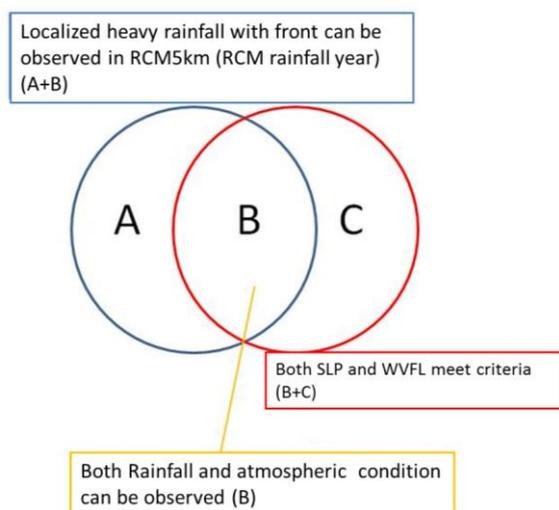


Fig.12 conceptual diagram using 5kmRCM and 20kmAGCM

Table9のa)において定義された割合は、RCM集中豪雨のうち、大気場の特徴によっても抽出され

た年の割合を表している。5kmRCMで現在気候と将来気候の7月8月それぞれの割合をすべて平均したものを平均的な割合とすると、本州日本海側では約49.3%であった。月別に見ると、7月に比べて8月の割合が現在気候と将来気候共に高くなっている。次に、中国地方日本海側では平均的な割合は61.6%であり、このことは地域に分けたことによって大気場による抽出年とRCM集中豪雨年、すなわち大気場特性と集中豪雨との対応がより良くなったことを示している。一方、月別では、日本海側全体で見た場合とは異なり、8月より7月の割合が高くなっている。東北地方に関しては、将来気候の8月以外にはRCM集中豪雨年がなかったため、20kmAGCMにおいて大気場から抽出される年と、RCM集中豪雨年との対応を評価できなかった。降雨分布による解析では集中豪雨が生起していた将来気候の8月でも、割合は33.3%とあまり高くならなかった。

さて、表中の黄色く塗りつぶした部分は、海面更正気圧の基準を2.2節で定めたものより厳しくした場合、大気場による抽出年とRCM集中豪雨年との対応、つまりa)で定義された割合が低くなった部分を示している。5kmRCMで集中豪雨の事例数がある程度存在する本州日本海側、中国地方日本海側のほとんどのマスが黄色表示されていることから、海面更正気圧の基準を緩くした方が20kmAGCMの大気場と5kmRCM集中豪雨年との対応が良いことがわかる。すなわち、2.2節の抽出方法で言及したように、集中豪雨には海面更正気圧より水蒸気フラックスがより大きな影響を与えていると考えられる。

次に、RCM集中豪雨のうち、大気場の特徴が基準に当てはまらない場合(大気場による抽出のRCM集中豪雨年の見逃し)の水蒸気フラックスを見ると、それぞれ以下の特徴が多く見られた。代表的な例をFig.13に示す。

- ・中国地方日本海側での見逃し
九州北部で南西向き偏差のフラックスが見られ、日本海側ではなく太平洋側からの強い北西向き偏差のフラックスが現れている場合
- ・東北地方日本海側での見逃し
太平洋側で西向き偏差のフラックスは見られないが、日本海側から非常に強い北東向き偏差のフラックスが現れている場合

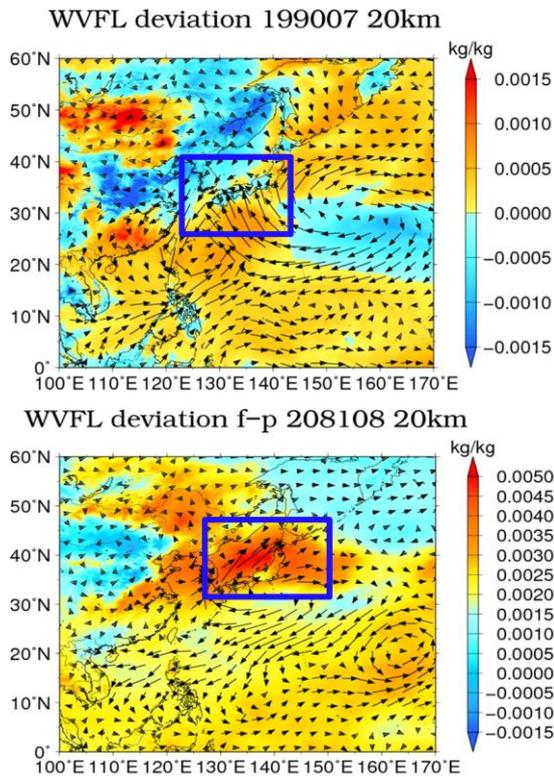


Fig.13 The typical example of WVFL when rainfalls were observed but atmospheric characteristics were not. Above Figure is about Chugoku region, another one is about Tohoku region. The blue square area is different from criteria.

中国地方の場合は、中国地方周辺で北西向きの水蒸気フラックスと日本海側の南西向きの水蒸気フラックスが収束し、前線による集中豪雨が発生したと考えられる。東北地方の場合は、日本海での比湿の偏差が非常に大きくなっているため、日本海から多量の水蒸気を伴った空気が東北地方に吹き込んだ為に集中豪雨が発生したと考えられる。

最後に、大気場によって抽出された年に降雨分布解析では抽出されない年（空振り）についてもふれておく。Table9 の b)において定義された割合は、20kmAGCM において大気場の特徴が基準に当てはまる年のうち、RCM 集中豪雨年の割合である。ほとんどのマスで a)で定義された割合に比べて値が小さい。これは、先述の大気場特徴による抽出での RCM 集中豪雨年の見逃しと比べて大気場による抽出の空振りが多いことを表している。表中の黄色表示されたマスは、a)と同じ定義による。黄色表示されたマスが日本海側の将来気候 8 月のみであることから、海面更正気圧の基準を緩く設定したことによって空振りが増えてしまったことがわかる。

以上の解析により、本研究で対象とする

20kmAGCM での大気場の特徴は、必ずしもすべての集中豪雨を捉えられるわけではないが、中国地方日本海側と本州日本海側で生起する集中豪雨に関しては 60%に近い確率で大気場による解析によって捉えることができるとわかる。また、本研究で基準とする 2013 年夏の大気場の特徴とは異なる特徴をもつため本研究では抽出の対象としなかった大気場でも、水蒸気フラックスのパターンによって日本海側の集中豪雨の発生が推定でき、すなわち見逃しをさらに少なくできる可能性があると考えられる。もちろん大気場の基準による集中豪雨の見逃しと空振りに関しては、どちらも無視できない数の数が現れているため、大気場と集中豪雨をより対応させるにはこれらの数を減少させることが必要である。しかし、Fig.14 に示すように、本州日本海側で 7 月と 8 月で合計した見逃しの数(miss), 空振りの数(overlook), 集中豪雨と大気場が対応する数は、どの値も現在気候から将来気候にかけて同等の割合で増加しており、見逃しや空振りが増加するだけでなく、対応している部分も増加している。加えて、対応している部分のみが 5%有意水準に対して有意増加している。したがって、今回基準にした大気場の特徴が現れる頻度と日本海側での集中豪雨がそれぞれ増加する可能性があること、また今回基準にした大気場の特徴を原因とする集中豪雨が、現在気候に比べて将来気候で有意に増加することが考えられる。

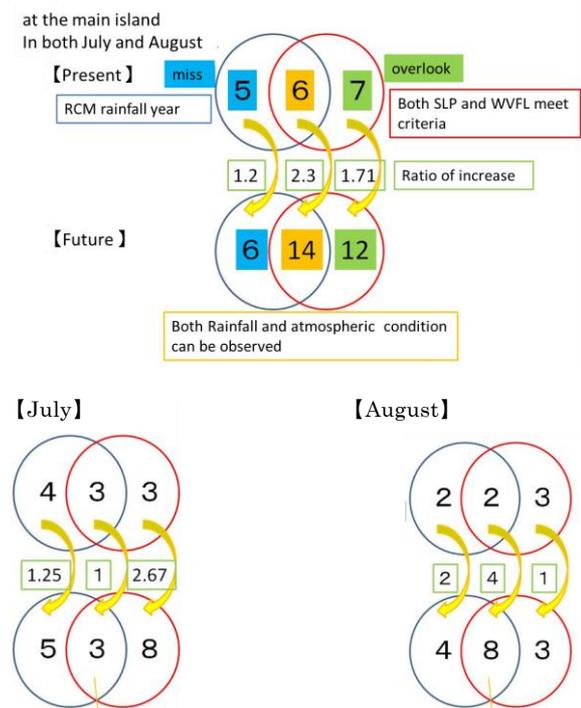


Fig. 14 The future change in number of rainfall missed or atmospheric characteristics overlooked.

月別に見た場合では、7月は空振りの数だけが多く増加しているのに対し、8月は集中豪雨と大気場が対応する数が増加している。これは3.2節で述べた8月上旬の日本海側での集中豪雨の増加に対応している結果と考えられる。また、防災という観点からは、空振りより見逃しが少ないことが重要であるため、今回の結果は将来の集中豪雨への対応策に役立つと考えられる。

なお、3.2節の検討から、20kmAGCMから力学的にダウンスケーリングした5kmRCMは60kmAGCMと対応しないと考えられるため、60kmAGCMで大気場によって抽出した対象年は4節で定義したRCM集中豪雨年に対応する可能性は低い。実際に現在気候どうしてRCM集中豪雨年との対応を比較すると、60kmAGCMの方が対応する割合が低く、また対応する年も異なった(Fig.15)。したがって、本研究では60kmAGCMアンサンブルによる対象年の抽出結果はRCM集中豪雨年との対応は考慮せず、大気場によって抽出される対象年が増加するかどうかのみを検討している。

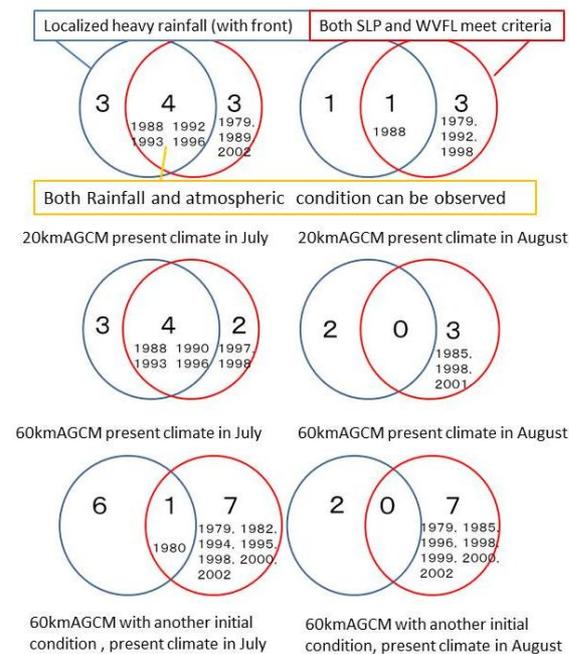


Fig.15 The year when rainfalls were observed from 5kmRCM and when the atmospheric characteristics were observed from 20kmAGCM and 60kmAGCM with two initial condition.

5. おわりに

本研究では、夏期集中豪雨の将来変化をより高い有意性をもって予測するために、将来予測のアンサ

ンプル情報が創出されている60kmAGCM(全球大気気候モデル)を利用すべく、我が国における梅雨期の集中豪雨年を大規模なスケールの大気場の特徴から捉え、AGCMを用いて対象となる大気場が現れる年の抽出とその将来変化の解析を行った。

大気場の指標として2013年の夏に着目し、日本海側で多発した集中豪雨の要因となった海面更正気圧や水蒸気フラックスといった大規模な大気場を、海面水温と大気の相互作用などの気候システムと関連させながら解析した。解析した大気場の特徴をもとに地域ごとの基準を設定して、20kmAGCMによる現在気候と将来気候出力値から基準に当てはまる大気場が現れる年を抽出していき、現在気候と比べて、将来気候において大気場の特徴によって抽出される年の数が有意に増加するかどうかを統計的検定によって評価した。その結果、中国地方の8月と東北地方の7月に関しては、5%の有意水準に対して有意な増加がみられた。さらに、60kmAGCMアンサンブル実験による出力から、20kmAGCMを用いて行った解析と同様の手順で基準に当てはまる大気場が発現する年を抽出した。20kmAGCMと60kmAGCMの全アンサンブル情報に対して有意性検定を行った結果、2013年夏のような大気場の特徴による集中豪雨が、将来気候の7月と8月において本州日本海側で高い有意性で増加すること、また8月に関しては日本海側の特に中国地方において増加する危険性が高いという結果が得られた。この結果は、8月上旬に集中豪雨が増加するという中北ら(2011)の5kmRCMを用いた梅雨期の降水現象の解析による結果とも整合的であると考えられる。すなわち、20kmAGCM出力、60kmAGCMアンサンブル出力を利用することにより、RCMを用いた解析結果により高い有意性を付与することができたと言える。最後に、既往研究で5kmRCMを用いて定量的に集中豪雨が抽出された年と、本研究で大規模の大気場によって抽出された年が対応するかについても検討した。その結果、RCMの定量的な解析によって抽出された年のうち、約50%に近い割合で大気場の基準からも抽出できることを示した。大規模な大気場と集中豪雨を完全に対応させることはできないが、大気場の基準による集中豪雨の見逃しや空振りを考慮しても、大気場の基準によって捉えられる集中豪雨が増加すると考えられる。

今後の課題と研究方針は以下の通りである。今回はAGCMによる月平均出力値を直接使用したため、1ヶ月のうち具体的にどの期間での大気場が月平均の偏差に影響を与えたのかはわからない。そこで、より詳細な分析を行うために、1ヶ月を旬別にかけて旬ごとの大気場による解析を行うという方向が考

えられる。また、大気場からの抽出基準を定める際に偏西風の蛇行など新たな指標を考慮に入れることで、60kmAGCM出力とRCM降雨の対応性を向上し、集中豪雨将来予測の有意性をさらに高められると考えている。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、データを提供していただくとともに適切なお指摘、ご助言を頂きました。京都大学防災研究所の向川均教授、竹見哲也准教授、岡田靖子研究員に深く感謝申し上げます。

参考文献

植田宏昭 (2012) : 気候システム論-グローバルモンスーンから読み解く気候変動-,筑波大学出版会。
気象庁 (2013) : 気象庁気候変動監視レポート 2012, 31pp.
気象庁 (2013) : 夏の日本の極端な天候について～異常気象分析検討会の分析結果の概要～,9pp.
中北英一, 宮宅敏哉, Kim Kyoungjun, 木島梨沙子 (2012) : 気候変動に伴う梅雨期の集中豪雨の将来

変化に関する領域気候モデルを用いた基礎的研究, 土木学会論文集, B1(水工学), Vol. 68 巻, pp. 427-432,.

中北英一, 宮宅敏哉 (2013) : 領域モデルを用いた気候変動に伴う梅雨期集中豪雨の将来変化予測に関する研究, 京都大学防災年報, 第 56 号 B,CD-ROM, pp.407-440.

文部科学省研究開発局 (2012) : 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 23 年度研究成果報告書.

Kanada, S., M. Nakano, and T. Kato (2010) : 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*, 6, 117-120.

(論文受理日 : 2014年6月11日)