

平成22年6月2日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20740274

研究課題名（和文） 地球温暖化による降水量変化予測の排出シナリオ依存性

研究課題名（英文） Emission scenario dependency of precipitation on global warming

研究代表者

塩竈 秀夫 (SHIOGAMA HIDEO)

独立行政法人国立環境研究所・大気圏環境研究領域・NIES 特別研究員

研究者番号：30391113

研究成果の概要（和文）：全球気温変化1℃に対する全球平均降水量の変化率（降水量感度）には、モデル間で大きな不確実性があり、活発に研究が行われてきた。本研究は、MIROC3.2 大気海洋結合モデルを用いて、数値実験を行うことで、降水量感度が温室効果ガスとエアロゾルの排出シナリオに明瞭に依存することを示した。その原因を調べるために、MIROC3.2 モデルを用いて、温室効果ガスとエアロゾルによる影響を切り分ける感度実験を行った。その結果、炭索性エアロゾルの排出量の違いが降水量感度の排出シナリオ依存性をもたらしていることが分かり、さらにそのメカニズムを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The precipitation sensitivity per 1K of global warming in 21st century climate projections is smaller in an emission scenario with larger greenhouse gas concentrations and aerosol emissions, according to the MIROC3.2 coupled atmosphere-ocean general circulation model. We examined the reasons for the precipitation sensitivity to emission scenarios by performing separated individual forcing runs under high and low emission scenarios. It was found that the dependency on emission scenario is mainly caused by differences in black and organic carbon aerosol forcing between the emission scenarios and that the precipitation is more sensitive to carbon aerosols than well-mixed greenhouse gases. We also investigated the reason for the larger precipitation sensitivity (larger magnitude of precipitation decrease per 1K cooling of temperature) in the carbon aerosol runs.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：気候変動、気象学

1. 研究開始当初の背景

(1) 地球温暖化による将来の気候変動を予測する時、「将来の社会経済がどのように発展し、温室効果ガス濃度や人為起源エアロゾル排出量がどのように変化するか」に関して何らかの想定を置いた上で、大気海洋結合モデルなどの気候モデルを用いて予測を行う。このような前提となる想定を「排出シナリオ」と呼ぶ。排出シナリオには様々なバリエーションがあり、100年後の気候変動を予測する上で大きな不確実性の要因となっている。このような気候変動予測の排出シナリオ不確実性を定量化することは、気候変動予測のみならず影響評価、適応策、緩和策などの研究にとっても重要である。

(2) 将来気候変化予測実験において、全球気温変化 1°C に対する全球平均降水量の変化率（降水量感度）には、モデル間で大きな不確実性があり、活発に研究が行われてきた。一方、降水量感度が排出シナリオに依存するかどうかは調べられてこなかった。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、MIROC3.2 大気海洋結合モデルを用いて、様々な数値実験を行うことで、降水量感度が排出シナリオに明瞭に依存することを示す。さらに、その原因を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) MIROC3.2 大気海洋結合モデルを用いて、2つの排出シナリオに沿って将来予測実験を行うことで、降水量感度が排出シナリオに依存することを示した。具体的には、IPCC SRES A2 シナリオ（温室効果ガス排出量大・エアロゾル排出量大）と B1 シナリオ（温室効果ガス排出量小・エアロゾル排出量小）に沿った 2001 年から 2100 年までの将来予測実験積分を行った。

(2) 加えて、外部要因（温室効果ガス、硫酸性エアロゾル、炭素性エアロゾル、対流圏・成層圏オゾン）を個別に与えて MIROC3.2 モデルを積分し、どの外部要因が降水量感度の排出シナリオ依存性をもたらすかを明らかにした。また 2000 年時点で放射強制力にインバランスがある影響を評価するために、外部要因を 2000 年時点で固定した実験も計算した。これらの実験を表 1 にまとめる。以上の実験は、複数の初期値アンサンブルメンバーを積分した。

(3) 外部要因を切り分けて要因推定を行う際の前提条件は、各外部要因に対する応答の線形足し合わせが可能なことである。本研究では、線形加法性がどの程度保たれているか

Ensemble name	Descriptions	Ensemble size
A2	A2 scenario runs	3
A2GHG	well-mixed GHG only runs under A2 scenario	3
A2SUL	Sulfate aerosol only runs under A2 scenario	3
A2CRB	Black and organic carbon aerosol only runs under A2 scenario	10
A2OZN	Stratosphere and troposphere ozone only runs under A2 scenario	3
B1	B1 scenario runs	3
B1GHG	well-mixed GHG only runs under B1 scenario	3
B1SUL	Sulfate aerosol only runs under B1 scenario	3
B1CRB	Black and organic carbon aerosol only runs under B1 scenario	10
B1OZN	Stratosphere and troposphere ozone only runs under B1 scenario	3
Y2K	All external forcing factors are fixed at the year 2000 (year 2000 commitment runs)	10

表 1：実験名とその説明，アンサンブル数.

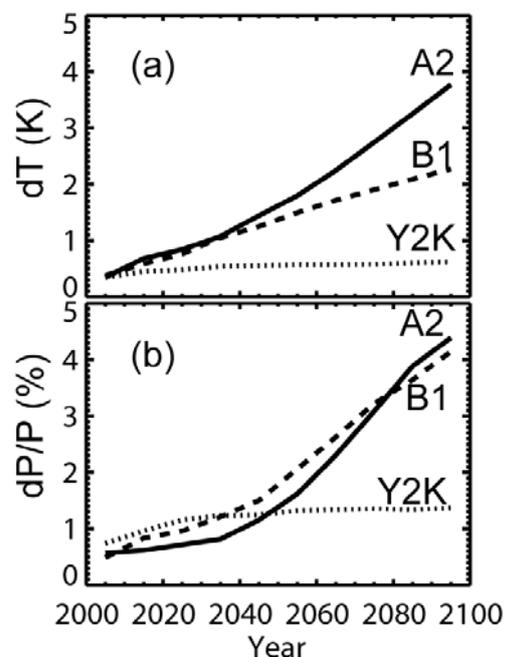


図 1： (a) 地上気温変化 (K) と (b) 降水量のパーセント変化 (%). それぞれ 1981-2000 年平均からの偏差を 10 年平均したもの. 実線は A2, 破線は B1, 点線は Y2K 実験を表す.

を確認する。

(4) さらに外部強制要因の種類によって降水量感が異なる場合、その物理的原因を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 図1にA2、B1実験での全球平均地上気温と全球平均降水量の時間変化を示す。A2実験はB1実験の約2倍の気温上昇を予測しているにもかかわらず、降水量の増加量はほぼ同じである。これは単位気温変化あたりの降水量変化率が約2倍も異なることを示している。

(2) 図2は、外部要因切り分け実験における気温・降水量の変化である。2000年時点で放射強制力にインバランスがあることの影響を除くために、Y2K実験の変化を引いている。気温・降水量とも、切り分け実験を足し合わせたものはA2、B1実験とよく一致して加法性が保たれており、線形に解釈することができる。温室効果ガス濃度とオゾンの濃度増加は気温上昇をもたらす、炭素性エアロゾルの増加は気温を低下させる。硫酸性エアロゾルは、カラム量が増加している間は冷却に働くがカラム量が減少してくると過熱に働く。A2GHG実験では、B1GHG実験よりも降水量の変化が大きく、両者の単位気温変化あたりの降水量変化率はほぼ等しい。つまり、

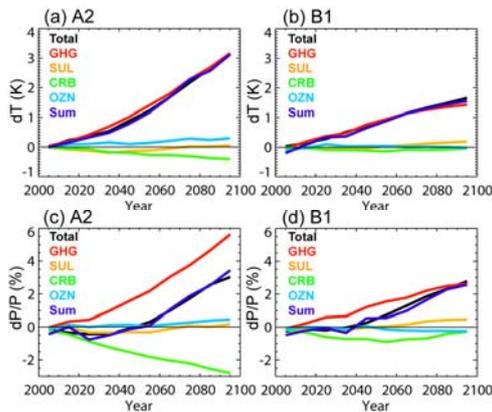


図2：黒線は全球平均地上気温の(a)A2と(b)B1での変化(K)と、全球平均降水量の(c)A2と(d)B1でのパーセント変化(%)。GHG(赤線)、SUL(黄色線)、CRB(緑線)、OZN(水色線)と切り分け実験の総和(青線)を共に示す。それぞれ1981-2000年平均からの偏差を10年平均したもので、Y2K実験を引いている。

シナリオによる気温上昇の速度差は、降水変化率の違いを説明しない。A2実験の小さな降水量変化率は、炭素性エアロゾルによる大きな降水量減少によってもたらされている。A2シナリオでは、炭素性エアロゾルが大きく増加する。さらに炭素性エアロゾルによる単位気温変化あたりの降水量変化率が、温室効果ガスによるものより大きいため、A2実験での降水量変化が小さく押さえられたことがわかる。

(3) CRB実験で降水量変化率が大きい理由を調べるために、GHG実験とCRB実験の降水量と水蒸気量のパーセント変化を比較する(図3)。GHG実験では気温上昇に伴い水蒸気量が増加し、CRB実験では気温低下に伴い水蒸気量が減少する。興味深いことに、GHG実験では降水量の変化は水蒸気量の変化より小さいのに対して、CRB実験では降水量変化が水蒸気量変化に近い。この性質の違いが、降水量変化率の差と関係している。

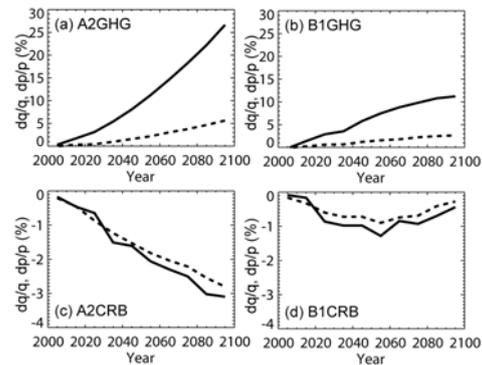


図3：鉛直積算水蒸気量(%)；実線)と降水量(%)；破線)の1981-2000年平均からのパーセント変化。10年平均。Y2K実験を引いている。上図は(a)A2GHGと(b)B1GHGで、下図は(c)A2CRBと(d)B1CRB。

(4) 先行研究は、温室効果ガス強制力に対する降水量と水蒸気量の変化量が異なる理由として、上昇流の強さの変化が重要であることを示した。彼らは、ほとんどの水蒸気は大気下層に存在するため、降水に変換されるには上昇流が必要であり、500-hPa面での上昇流の積算量を ω' とすると、

$$\Delta P / P = \Delta q / q + \phi \Delta \omega' / \omega', \quad (1)$$

という関係が成り立つことを示した。ここで ϕ は正の比例係数である。この関係が正しければ、降水量と水蒸気量のパーセント変化量の差は、上昇流が減少することによって説明できる。しかし、本研究のように第2種間接効果を含むモデルでシナリオ間の不確実性

を考える場合、上昇流によって自由大気に運ばれた水蒸気が雲水に変わる過程だけでなく、雲水が降水に変わる効率を考慮する必要がある。MIROC3.2 モデルでは、降水効率は雲粒数密度 U_c に反比例するため、
$$\frac{\Delta P}{P} = \Delta q/q + \phi \frac{\Delta \omega^\uparrow}{\omega^\uparrow} + \phi \frac{\Delta U_c}{U_c}, \quad (2)$$
 という比例関係が想定される。ここで ϕ は負の比例係数である。

(5) 図4に ω^\uparrow と U_c のパーセント変化を示す。気温が上昇するA2GHG、B1GHG実験では上昇流が弱まり、逆に気温の低下するA2CRB、B1CRB実験では上昇流が強まる。どちらの実験でも、上昇流は水蒸気量の変化と逆向きに変動し、水蒸気量変化による降水への影響を打ち消すように働いている。一方、A2CRB、B1CRB実験では、雲粒数密度は増加し、その変化は特にA2CRB実験で大きい。これは、炭素性エアロゾルの増加に伴い雲粒数密度が増加し ($\phi \Delta U_c / U_c$ が負に大きくなり)、降水量の減少に寄与したことを示唆している。

(6) 水蒸気量、上昇流、雲粒数密度の変化が降水量変化に及ぼした影響を定量的に評価するために、式2を重回帰式とみなして回帰係数 ϕ 、 ϕ を求めた。これらの回帰係数でスケールした各項の降水量変化への寄与を図5に示す。A2GHG、B1GHG 実験では、水蒸気量増加による効果を上昇流減少の効果が大きく打ち消すことで、降水量の変化が

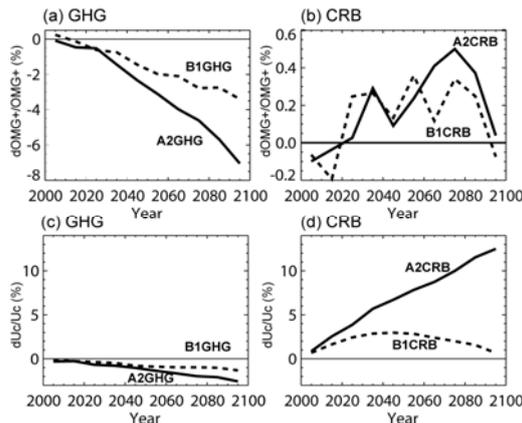


図4： 上図は (a) A2GHG, B1GHG と (b) A2CRB, B1CRB での $\Delta \omega^\uparrow / \omega^\uparrow$ (%)。下図は (c) A2GHG, B1GHG と (d) A2CRB, B1CRB での $\Delta U_c / U_c$ (%)。1981-2000 年平均からのパーセント変化の10年平均で、Y2K 実験を引いている。実線はA2GHG, A2CRBで破線はB1GHG, B1CRB。

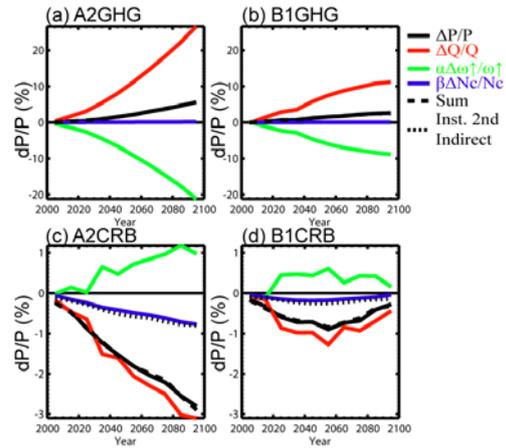


図5： (a) A1GHG, (b) B1GHG, (c) A2CRB, (d) B1CRB 実験における降水量変化(黒実線)への水蒸気量変化(赤線), 上昇流変化(緑線), 雲粒数密度変化(青線)の寄与と総和(黒破線)。1981-2000 年平均降水量からのパーセント変化(%)の10年平均値で示す。下図の黒点線は、大規模凝結過程を2度積分して診断したエアロゾル第2種間接効果の降水量への直接影響。

Clausius-Clapeyron 測から想定されるよりも小さくなっている。一方、A2CRB、B1CRB 実験では、水蒸気量減少の効果を一部上昇流強化が打ち消しているが、第2種間接効果が雲水から降水への変化効率を低下させるために、降水量の減少量は水蒸気量の減少量と近くなっている。

(7) 本研究ではさらに、モデルコード内で”第2種間接効果の降水への直接影響”を診断する方法を開発し、重回帰式から推定した第2種間接効果の影響の精度を高いことも示した。

(8) 本研究によって、降水量感度が排出シナリオに明瞭に依存すること、その原因が世界で初めて明らかになった。さらに、以上の結果は、地球温暖化の影響評価や緩和策の研究にとっても大きな意味を持つ。これらの研究では、様々な排出シナリオや安定化シナリオを調べるために、パターンスケールングの手法が広く用いられている。本研究の結果は、全外部要因を含んだ大気海洋結合モデル実験の結果からスケールングパターンを作成した場合、全球平均で見ても大きな誤差を生じることを示している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕（計1件）

Hideo Shiogama, Seita Emori, Kiyoshi Takahashi, Tatsuya Nagashima, Tomoo Ogura, Toru Nozawa and Toshihiko Takemura, Emission scenario dependency of precipitation on global warming in the MIROC3.2 model. Journal of Climate, 査読有, Vol. 23, No. 9, 2010, pp. 2404-2417

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塩竈 秀夫 (SHIOGAMA HIDEO)

独立行政法人国立環境研究所・

大気圏環境研究領域・NIES 特別研究員

研究者番号：30391113

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし