

高解像度 CCSR/NIES/FRCGC GCMにおける大気海洋結合効果

稲津 将[†]・木本 昌秀(東京大学気候システム研究センター)

1. はじめに

大気海洋結合モデル (CGCM) は、大気海洋間の結合過程を含む問題に対して有効である。しかしながら、計算機資源や技術的な制約の都合、しばしば海洋表面の情報を与えた大気のみの大循環モデル (AGCM) の結果で、そのような問題を議論する場合がある。大気海洋間の結合が解くべき問題において重要でなければ、この方法は適切であろう。

AGCMの利用の妥当性については、CGCMとの比較によって近年多く議論されている。Kitoh and Arakawa (1999) では、CGCMの積分結果から得られた海面水温 (SST) を与えた AGCM 実験を使ってこの問題を調べた。彼らは、AGCMがその場の SST の影響を抑える 2 つのフィードバック (SST-雲-放射フィードバックと対流-蒸発-風フィードバックの一部) を表現できないため、AGCMでは赤道上の降水を強めに見積もることを発見した。Wang et al. (2004) もまた、熱帯の降水が AGCMではその場の SST に非常に鋭敏であって、そのことが東南アジアの降水の予測に悪影響を与えることを指摘している。Fu and Wang (2004) は、アジアモンスーンの再現には CGCM を使うことが適当であると示唆している。さらに、AGCMは、中緯度においてさへ経年より長い時間スケールの変動の表現が不充分であることが指摘されている (Watanabe and Kimoto 2000)。上述のすべての問題の根源は、AGCMにおいて、時と場所によっては非常に大きな大気下端と海洋表面の間の温度差を生じ、その結果として多くの熱フラックス、特に蒸発、を生じてしまうことにある (Yu and Mechoso 1999)。

本研究の目的は、Kitoh and Arakawa (1999) にならって AGCM と CGCM を使って、大気海洋結合効果を調べることにある。ここでは紙面の制約から、北半球の夏 (6月から8月、JJA) に注目する。3節にて結合モデルが現実的な気候値を再現するかを確認してから、4節にて大気海洋結合効果の汎球的な影響と地域的な影響の1つを議論する。

2. モデルと実験

本研究で使用したモデルは、東京大学気候システム研究センター、国立環境研究所、独立行政法人海洋開発研究機構地球環境フロンティア研究センターで共同開発した MIROC 3.2 である。このモデルには、大気、海洋、陸面、河川、海氷に関する 5 つのサブモデルと、そのサブモデル間を繋ぐカップラーにより構成されている。このモデルの解像度は、大気が水平 T106 (約 100km の格子間隔相当) の鉛直 56 層、陸面は水平 $0.56^\circ \times 0.56^\circ$

の鉛直 5 層、海洋が水平 $1/4^\circ \times 1/6^\circ$ の鉛直 48 層である。これは、従来の気候研究で使用される CGCM に比して非常に高解像度である。このような莫大な計算は、世界最速級の地球シミュレータによって可能になった。大気海洋のサブモデルはプリミティブ方程式に基づいている。この両サブモデルでは、放射伝達、積雲や海洋の対流、大規模雲凝結過程、大気重力波抵抗、乱流混合の各過程が、パラメタライズされている。他のサブモデル雪、土壌、キャノピー、土壌からの水分の流出、河川による流出、氷に関する過程を解いている。また、大気と海洋の結合に際し、フラックス調節は使っていない。ここで、AGCMとは大気、陸面、河川のサブモデル群を指す。詳しくは、K-1 model developers (2004) または Kimoto (2005, 準備中) を参照せよ。

まず、1900年の大気組成を与えた産業革命前の気候条件下で、109年間のスピニングアップ後100年間のCGCM数値積分を実行した。この積分結果について、61年目から80年目の20年間のデータを格納した。次に、同じ産業革命前の条件で、このCGCM実験の格納された結果 (例えば SST) から月平均の境界条件をつくり、これをAGCMに与えて実験を行った。このAGCM実験に際し、2つの異なる初期条件を使ってアンサンブル実験を行った。以下の節では、このCGCM実験 (C20) とAGCM実験のアンサンブル平均 (A20) を比較する。同様に、CGCM実験 (C21) とAGCMアンサンブル実験 (A21) を、温暖化の条件の下で行った。CGCM実験ではC20の大気組成を初期値として1年当たり複利で1%ずつ二酸化炭素濃度を遡増させた。したがって、格納したデータの期間である61年目から80年目におけるC21の二酸化炭素濃度はC20のそれに比べておよそ2倍になっている。われわれはC21とA21も比較した。

3. 気候値

AGCM実験との比較の前に、まず、本稿における基準となるCGCMの結果をみる。図1aと1bは、C20におけるJJAの地表面気温、850hPaの水平風、降水、海面気圧の気候値を示している。観測のように、JJA平均の気候値はアジアモンスーンとそれに関係する現象によって特徴づけられる。太平洋上と大西洋上には2つの大きな亜熱帯高気圧、東南アジアから日本にかけての降水帯である梅雨前線、砂漠における高温、これがまさにその特徴である。モデルでは赤道収束帯における強い降水を表現しているが、他のCGCMがそうであるように南太平洋収束帯の再現には失敗している。また、南半球の西風ジェットと定常波動もよく表現されている。

図1cと1dはJJAの気候値の温暖化に伴う変化 (C21からC20を引いたもの) を表している。温室効果の影

[†]連絡先: 〒 277-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 総合研究棟 東京大学気候システム研究センター E-mail: inaz@ccsr.u-tokyo.ac.jp

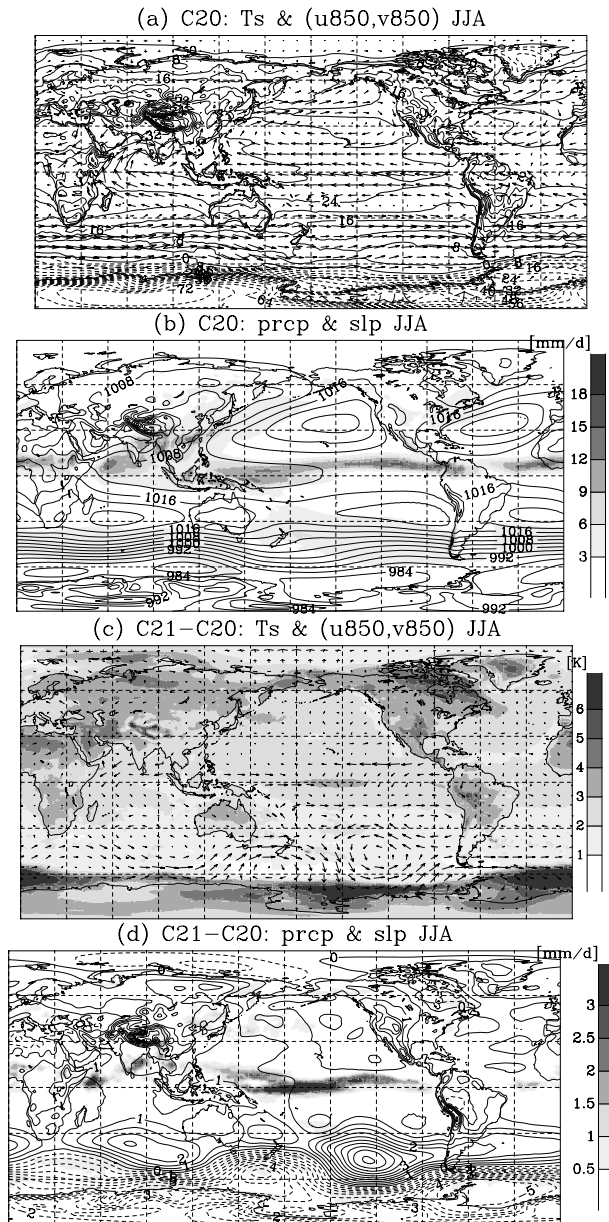


図 1. (a) C20 における JJA 平均の地表面気温の水平分布 (等値線間隔 2°C) と 850hPa の水平風 (m s^{-1} ; 矢羽)。 (b) C20 における海面気圧 (等値線間隔 4hPa) と降水 (mm day^{-1} ; 陰影)。 (c) (a) と同じ。但し、C21 から C20 を引いたもの。 (d) (b) と同じ。但し、C21 から C20 を引いたもの (等値線間隔 0.5hPa; 負値は破線)。

響でこのモデルでは海洋上で 2 から 3K、陸上で 4 から 5K、地表面気温が上昇している。温暖化すると気温の上昇に伴い大気中に多くの水蒸気を含むことができるので、降水は赤道とモンスーン領域の一部で増加している。このような温暖化の応答は、これまでの研究と概ね一致している (Manabe and Wetherald 1975; Houghton et al. 2001)。

このように MIROC CGCM は大気海洋の大循環の観測されている特徴をよく再現し、また温暖化の応答の見積もりは過去の研究と整合的である。そこで、次節ではこの CGCM の結果を基準として大気海洋結合効果を議論する。

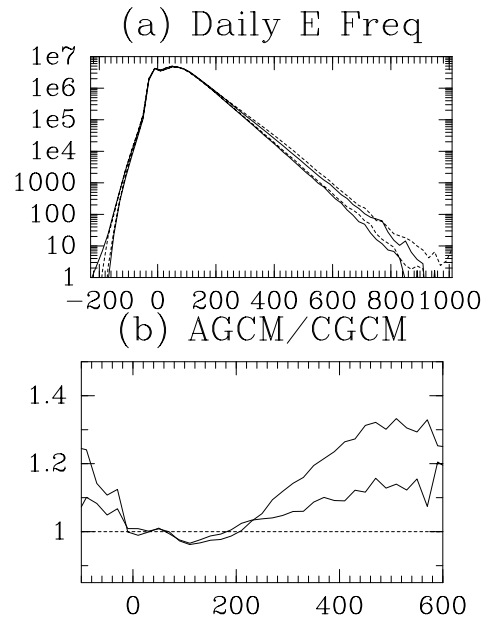


図 2. (a) C20(細実線)、A20(細点線)、C21(太実線)、A21(太点線) における海洋上の各格子点の日蒸発量の頻度分布。すべての海洋上の格子点に対し、 20 W m^{-2} 間隔で $\cos(\text{緯度})$ の過重をつけて計算した。 (b) (a) における A20 と C20(細線) および A21 と C21(太線) の比。

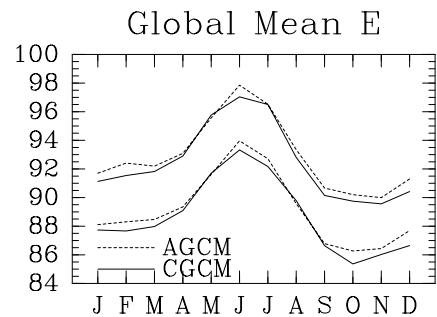


図 3. C20(細実線)、A20(細点線)、C21(太実線)、A21(太点線) における全球平均蒸発の季節変化 (1 月から 12 月)。

4. 大気海洋結合効果

4.1 蒸発の過大評価

蒸発は、冒頭で指摘したように、CGCM と AGCM の結果の相異を議論する上での鍵である。大気変動と独立に SST を与える AGCM では、大気下端と海洋表面との間に大きな温度の差を生じる確率が高くなる。このため、AGCM では時と場合によっては非常に多くの蒸発を生成する。図 2a は、JJA における海洋上の全ての格子点における日蒸発量の頻度分布である。大気と海洋の結合を切り離すと、確かに産業革命前条件で 10%、温暖化時条件で 20% 程、 300 W m^{-2} 以上の日蒸発量の頻度を増している (図 2b)。日蒸発量は対数正規分布に従うことから (図 2a)、蒸発量の多い日または場所が増えれば、蒸発の変動のみならず平均値も増加する。このような海洋上の蒸発に見られる結合効果は、海洋上で平均した蒸発量のみならず全球平均の蒸発量にも影響する。全球平均の蒸発量の季節変化¹ (図 3) を見ると、AGCM は産業革命前、温暖化時の二条

¹このモデルでは海岸線上に偽の大気海洋結合効果が生じ

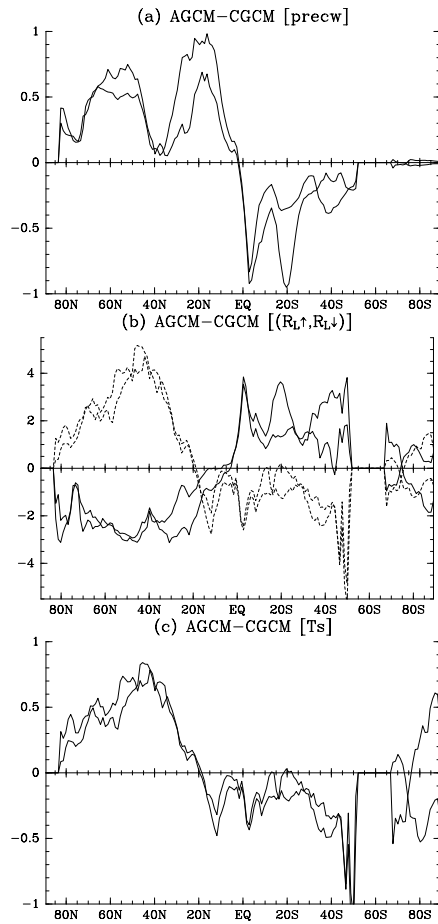


図 4. (a) 各緯度毎に陸域のみで東西平均した JJA 平均の可降水量 (kg m^{-2})。A20 から C20 を引いたものを細線、A21 から C21 を引いたものを太線で表した。(b) (a) と同じ。但し、地表面における下向き (実線) と上向き (点線) の赤外放射フラックス (W m^{-2})。(c) (a) と同じ。但し、地表面気温 (K)。

件で一年を通じて蒸発量が多い。それ故、大気海洋結合過程を除くと、大気中に多くの水蒸気を供給することになり、以下に示すような汎球的なまたは地域的な気候に影響を及ぼす。

4.2 汎球的な影響

図 4a は、各緯度円で陸域平均した可降水量である (海洋を含めても結果は変わらない。)。CGCM に比べ AGCM では北半球 (NH) の陸域で多くの可降水量が存在する。このことは温室効果を強める。確かに、AGCM の方が、NH では、地表面における下向きおよび上向き赤外放射フラックス (図 4b) を強めに、陸域の地表面気温 (図 4c) は高めに見積もっている。AGCM は NH の海洋でも多くの水蒸気を含む (図略) のだが、SST が与えられているため、CGCM と AGCM の間に地表面気温の差は生じ得ない。さらに水蒸気の増加をもたらすもう 1 つの側面について指摘する。水蒸気が増加すると雲量が増加する可能性がある。雲量の増加は日射を遮る効果によって、地表面気温を降下させる。このモデルでは、北半球の陸域の高緯度における雲量と太陽入射フラックスは、CGCM と AGCM でほとんど

ていたため、海岸線のデータは取扱わなかった。

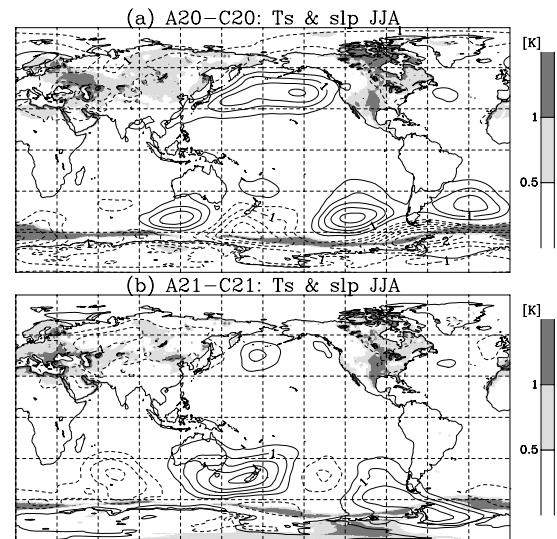


図 5. (a) A20 から C20 を差し引いたものと、(b) A21 から C21 を差し引いたものの、JJA 平均海面気圧 (等値線間隔 0.5hPa ; 0 線は省略; 負値は破線) と地表面気温 (陰影)。

同じであった (図略)。高緯度においては水蒸気量の増大が雲量の増大に繋がりにくいと推測するが、両者の関連はモデル依存の問題である。

図 5 の陰影は、AGCM と CGCM の間の地表面気温の差の水平分布を示している。地表面気温は確かに AGCM の方が陸域全般で高い (図 4c を参照) が、その程度は地域によって多少の違いが見られる。ここでは結合効果にこのような地域的な分布が生じる理由として 3 つの可能性を提示する。AGCM が地表面気温を過大評価する程度は、米国中部とモンゴルからウクライナというような半乾燥地域で大きい。地表面気温が高くなると乾燥している土壌からより水分を奪い、より乾燥した土壌はさらに地表面気温を上げることが理由であろう。A20 の 2 つのアンサンブルメンバーとも、確かに初期条件からの 10 年間で土壌から水分が奪われている。それに対してアラスカでは気温の差違が小さい。これは北太平洋に広がっている亜熱帯高気圧の東縁 (図 5) でより寒気が流入することが理由である。なお、カナダ北部で AGCM の方が異常に気温が高いのは、モデル依存の問題であろう。極域の気温は、海氷の与え方に鋭敏である。

4.3 地域的な影響

ここでは、結合効果が温暖化の条件でもっとも大きかった東アジアの夏季の降水に焦点を絞る。図 6 は東アジアの降水と水蒸気フラックスの結合効果 (A20 から C20 を引いたもの) を表している。産業革命前の条件では (図 6a)、大気海洋間の結合を切り離すと、赤道周辺とガンジス河流域で雨が増え、海洋大陸上とモンスーン領域の大部分で雨が減る。これは、Fu et al. (2002) と整合的である。また、梅雨前線の南縁に沿って、熱帯からの北向き水蒸気フラックスが弱いと関係して雨が少ない。日本付近の降水は、A20 と C20 とで同程度である。温暖化の条件では (図 6b)、産業革命前の条件と同様に、AGCM の方がガンジス河流域と海洋大陸を除く赤道上で雨が多い。しかし、梅雨前線付近では産業革命前の条件とは明らかに異なっている。台湾が

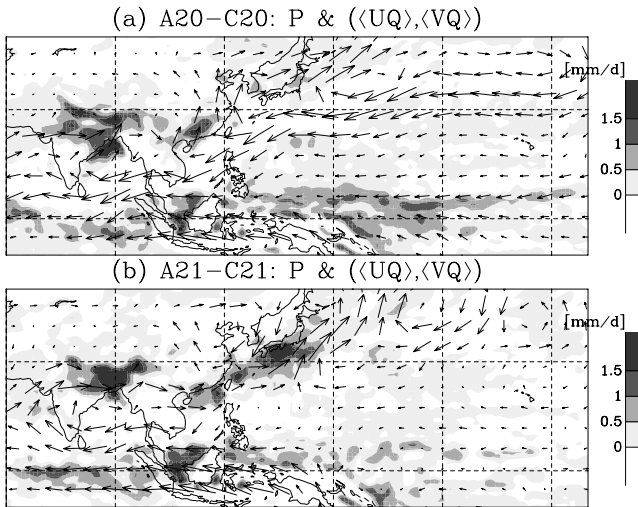


図 6. (a)A20 から C20 を差し引いたものと、(b)A21 から C21 を差し引いたものの、JJA 平均した東アジアの降水 (mm day^{-1} ; 陰影) と鉛直積算した水蒸気フラックス ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$; 矢印)。

ら日本にかけて、AGCMの方が水蒸気フラックス収束も降水も多い。

このような結合効果の違いは、おそらく水蒸気フラックスが循環と水蒸気分布によって制御されていることに関係するだろう。もし水蒸気が増えて循環が変わらなければ、日本の降水は増えるであろう。これはまさに温暖化の条件における結合効果である(図 6b)。これとは対照的に、産業革命前の条件では日本の南にある小笠原高気圧が北にずれる(図 5aを参照)というように循環に変化があった。これにより、小笠原高気圧の西縁に沿う北東向きの流れが弱くなった(図略)。それゆえ、この条件下では、結合効果による循環の変化は日本の降水を減らす方に働くが、一方で結合効果による水蒸気の変化は日本の降水を増やす方に働く。結果的に、日本の降水には結合効果に伴う変化が生じなかった。これは、気候条件が変わると結合効果に変化する一例である。産業革命前の条件でなぜ循環が変化したかは、さらなる研究が必要であるが、これは明らかに本研究の対象とする範疇を越えている。

最後に日本の降水の結合効果の程度を議論する。図 7は、夏季の日本における日降水量の頻度分布を示している。その分布は A20 と C20 とで非常に似ている。しかし、温暖化の条件下で大気海洋間の結合を切り離すと、 20mm day^{-1} 以上の多雨日が一夏平均で約 20% 増加する。これは気象学的にはそれほど大きなものではない。しかし、AGCMによって見積もられた温暖化に伴う降水変化の情報を、農学、工学、あるいは社会経済学といった問題に適用するとき、注意する必要があるかもしれない。

5. 結論と議論

本稿では、大気海洋結合効果を調べるために、産業革命前と温暖化の 2 つの条件下で CGCM と AGCM の実験結果を比較した。同一の気候条件で積分した CGCM 実験の SST の結果を月平均して、これを境界条件とし

て AGCM に与え実験した。その結果、AGCM では確かに系統的に多くの蒸発を生じ、大気に多くの水蒸気を供給することがわかった。熱フラックス、特に蒸発を介してのみ調整される大気海洋間の温度差が、AGCM において大きくなる傾向にあるからである。この結果、AGCM は、温室効果を通じて陸面の温度を幾分過大に評価した。水蒸気の過大供給は雲量の過大評価を招く可能性もあるが、このモデルではその効果は大きくなかった。

さらに、気候条件が変化によって結合効果が変わる例として、日本付近の降水に着目した。産業革命前の条件では、AGCM は水蒸気量を過大評価したものの、日本の南の南西風が過小評価したため、結果として日本の降水は CGCM と同じ程度に評価した。一方、温暖化の条件では、AGCM は CGCM に比べ日本付近の降水および水蒸気フラックス収束を幾分過大に評価した。

温暖化のシグナルと結合効果の間に注意が必要である。前者は地表面気温を全球的に上昇させる(図 1c)が、後者は AGCM と CGCM の間で SST に差はないので陸域の気温だけが穏やかに上昇する(図 5)。しかしながら、前者と後者の間で降水の応答は同程度である(図 1d と図 6)。これは降水が大抵局所的な事象であるからである。したがって、気温の上昇の大小にかかわらず、降水の偏差は正にも負にもなり得る。このような降水の偏差の程度は、大循環の偏差の特性よりも地域の気候の特性に依存している。

本研究では、温暖化プロジェクトにおける所謂タイムスライス実験を模倣して月平均の SST を AGCM 実験に与えた。結合効果を調べる意味では、日平均やあるいは月平均より短い平均値の SST を使う方が適当であろう。そうすれば蒸発はより過大に評価されるので、本研究に比して結合効果はより明確に示されるはずである。

謝辞

本研究遂行に当たり、住明正教授(東京大学)と江守正多博士(国立環境研究所)から有益な助言を頂きました。この研究では、独立行政法人科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業と文部科学省、人・自然・地球共生プロジェクトからの研究費を用いた。モデル実験には地球シミュレーターを用いた。図は地球脳ライブラリーを用いた。

参考文献

- Fu, X., and B. Wang, 2004: Difference of boreal summer intraseasonal oscillations simulated in an atmosphere-ocean coupled model and an atmosphere-only model. *J. Climate*, **17**, 1263–1271.
- Fu, X., B. Wang, and T. Li, 2002: Impacts of air-sea coupling on the simulation of the mean Asia summer monsoon in the ECHAM4 model. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2889–2903.
- Houghton, J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, R. J. van der Linden, and D. Xiaosu Eds., 2001: Climate Change 2001: The scientific basis: Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change (IPCC). *Cambridge University Press*, 944pp.
- K-1 model developers, , 2004: K-1 coupled GCM

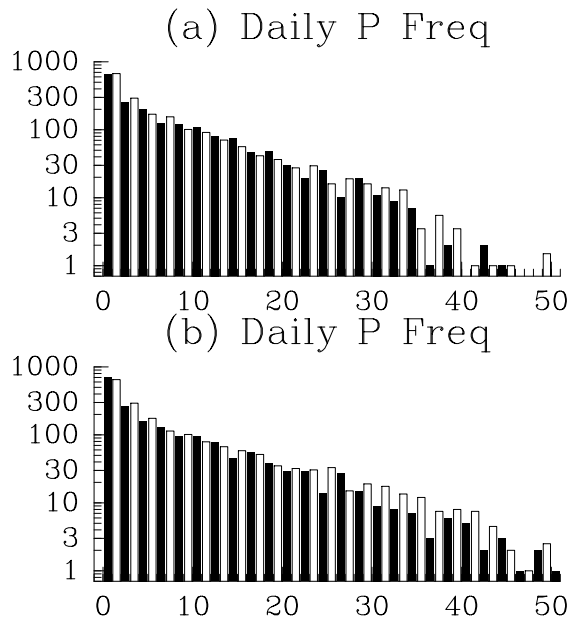


図 7. (a)A20(白抜)とC20(黒塗)の日本付近(東経 130-138 度と北緯 32-38 度に囲まれた領域の平均)の日平均降水量の頻度分布。2 mm day⁻¹毎にデータを勘定した。(b) (a)と同じ。但し、A21(白抜)とC21(黒塗)。

(MIROC) description. *H. Hasumi and S. Emori, Eds., K-1 Technical Report, 1*, 34pp.

Kitoh, A., and O. Arakawa, 1999: On overestimation of tropical precipitation by an atmospheric GCM with prescribed SST. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2965–2968.

Manabe, S., and R. T. Wetherald, 1975: The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, **32**, 3–15.

Wang, B., I.-S. Kang, and J.-Y. Lee, 2004: Ensemble simulations of Asian–Australian monsoon variability by 11 AGCMs. *J. Climate*, **17**, 803–818.

Watanabe, M., and M. Kimoto, 2000: Atmosphere–ocean thermal coupling in the North Atlantic: A positive feedback. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 3343–3369.

Yu, J.-Y., and C. R. Mechoso, 1999: A discussion on the errors in the surface heat fluxes simulated by a coupled GCM. *J. Climate*, **12**, 416–426.