気候モデルによる気候変化研究
〜温暖化と古気候の接点〜

鬼頭　昭雄　気象研究所

全球大気海洋結合大循環モデル（AOGCM）は温暖化予測から古気候研究まで幅広い目的で用いられている．最新のAOGCMでも，現在の大気･海洋状態の主な特徴を再現するものの，観測と比べると基本場にバイアスが存在する．本稿では，気候モデルの現在気候再現性能を概観した後，21世紀末の温暖化予測および完新世中期（6,000年前）の古気候予測実験の実例を紹介する．完新世中期では地球軌道要素の強制により，北半球では夏冬間の季節変化の増幅，夏季モンスーンの強化などの顕著な応答が見られる．モデル基本場の違いによる差についても議論した．

1．はじめに

地球上の気候は，地質学的時間スケールから数十年あるいは年々までの幅広い時間スケールで，変化を続けている．気候の自然変動は人類の歴史に大きな影響をもたらしてきたが，逆に人間活動が気候を変えていることも明らかになってきた[1,2]．日本はアジアモンスーン域に位置しているが，熱帯太平洋でのエルニーニョ・南方振動現象（ENSO）の影響も受けている．これからの気候はどうなるのか，モンスーンは強まるのか，ENSOは変調するのか，それらは過去の長い歴史を通じてどう変わってきたのか，そもそも変動のメカニズムは何か．これらの疑問に答えるツールが気候モデルである．気候モデルは，現在気候の再現と気候変動のメカニズム研究，温暖化予測さらには古気候研究など幅広い分野で用いられている．幅広い境界条件下で用いられ絶えず評価されることでモデルの精度はあがっていくともいえる．古気候研究により気候変動メカニズムについての理解が深まるだけでなく，古気候モデリングにより古気候プロキシデータやモデル相互比較を通して気候モデルの評価が行えるところに古気候研究と温暖化研究の接点がある．本稿では，気候モデルの現在気候再現の現状を紹介した後，温暖化予測および古気候再現実験の実例を紹介する．

2．気候モデルと現在気候再現

地球の気候は，大気，海洋，陸面，海氷などの各システム間のさまざまな相互作用下で成り立っているため，地球温暖化の進行に伴ってどのような気候変化が生じるかを評価するためには，気候モデルの利用が不可欠である．気候モデルは，それら各システムの変動およびそれらの相互作用の物理法則を記述した仮想的な気候システムを構築しており，その時間的な変化を予測することができる．大気大循環モデル（AGCM）には陸面モデルが組み込まれ，海洋大循環モデル（OGCM）には海氷モデルが組み込まれることが多い．大気と海洋間の熱・水・運動量交換を全球で可能にしたモデルが全球大気海洋結合大循環モデル（AOGCM）である．最近では，さらに大気化学モデル，植生モデルや炭素循環モデルを組み込んだ地球システムモデルへと発展を続けている．

過去数年にわたり，世界の約20の研究機関で，それぞれ最新の全球大気海洋結合大循環モデル（AOGCM）を用いての各種シナリオ下での21世紀気候予測実験（いわゆる地球温暖化予測実験）が実行された．この結果はIPCC（気候変動に関する政府間パネル）第4次評価報告書（IPCC AR4）の重要なデータとなったばかりでなく，様々な現象に関して将来どう変化するかの解析が行われた．気候モデルによる将来予測について検討する前に，まずはそのモデルの性能評価が行われなければならない．その意味で，各モデルセンターでは，同時に20世紀の気候再現実験も行われた．この20世紀気候再現実験では，19世紀半ば以降20世紀末までに観測された温室効果気体（二酸化炭素，メタン，亜酸化窒素，およびハロカーボン類），対流圏硫酸エーロゾル，太陽活動による太陽定数の変化，および火山活動による成層圏エーロゾルの放射強制力を境界条件とした．これらのデータを用いて，20世紀末のモデル気候値と観測データの比較評価や過去100年間の気候トレンドの再現評価が行われている．

AOGCMでは，現在気候再現実験における海面水温や海氷分布を現在の気候値から大きくはずれないようにするために大気海洋間の熱や水のフラックス交換量に補正を加えるフラックス補正法を用いる場合がある．熱帯の対流活動は海面水温の絶対値や空間分布に大きく依存するために，現実的な海面水温の表現は欠かせないものである．また現在気候再現実験で海氷面積が観測に比べて

大きすぎれば，モデルは低温バイアスになるとともに，実際起こりうるであろうものより大きい海氷・アルベドフィードバックをもたらす．フラックス補正を用いることで，モデルの気候ドリフトを抑えることができ，現実的な海面水温や海氷分布を表現できる．一方で，フラックス補正を用いると，大気と海洋の相互作用に自然でない，一方向の力をもたらしてしまう．もちろんフラックス補正なしで現実的な気候分布を再現するのがもちろん望ましいわけであるが，現時点でのモデリング技術では，フラックス補正を用いない場合にはある程度のバイアスが生じることは避けられない．フラックス補正ありでより小さい気候ドリフトを取るか，フラックス補正なしで自然な大気海洋相互作用を取るか，の選択を迫られる訳である．2001 年に発行された IPCC 第 3 次評価報告書（TAR）ではフラックス補正を用いたモデルと用いないモデルがほぼ同数であったが，AR4 ではフラックス補正を用いたモデルは全体の 1/4 になった．多くのモデルグループでフラックス補正を用いなくても安定したモデル積分が出来るようになったとも言えるが，後に示すようにフラックス補正なしによるモデル気候のドリフト（バイアス）は依然大きいものである．

AOGCM による 20 世紀気候再現実験から，1971-2000 年のモデル気候値を求め，観測データと比較した．ここでは海洋の気候再現に焦点を当てて示す．図 1 は年平均海面水温偏差分布（モデル平均と観測値の差）である．モデル海面水温は全体に観測より低温で（全球平均で約−0.2℃）あるが，南大洋ではモデルの方が高温である．北太平洋中央部では約 2 ℃，北米ニューファウンドランド沖では約 3 ℃の低温バイアスが見られる．また熱帯及び亜熱帯の東部海洋上で顕著な高温バイアスが見られ，ペルー沖やアンゴラ沖では 3 ℃を越える高温バイアスとなっている．また赤道太平洋上では 1 ℃以上の低温バイアスである．日本付近では，35°N 付近を境にして南側で低温バイアス，北側で高温バイアスとなっており，特に北海道東方海上では 1 ℃以上の高温バイアスが見られる．これらは海洋モデルの解像度不足のために黒潮離岸がうまく表現出来ておらず日本列島東岸沿いに北偏していることを示唆している．同様のことは北米東岸ニューファウンドランド沖にもあてはまる．東部赤道太平洋での高温バイアスと中部・西部赤道太平洋における低温バイアスは，東部・中部赤道太平洋に存在する冷水域が西偏し西部太平洋まで貫入していることを示している．これらはほとんどのモデルに共通してみられる特徴であり，モデルによる ENSO 再現性能にも影響を及ぼしている．

図 2 は帯状平均した年平均水温偏差の緯度深度断面図である．モデルは，海面を含む 100 m 以浅では低温，以深では高温バイアスである．これらの偏差は，モデルのサーモクラインが実際に比べて拡散していることを意味している．水温勾配が観測に比べて弱いことは，大気状態が同じであれば，水温の年々変動の大きさが小さくなる，すなわち ENSO 振幅が弱くなる傾向にあることを示唆する．実際にはモデル中の貿易風の再現程度も関わってくるので，エルニーニョが弱くなるとは一概にはいえない．

高緯度における海面水温偏差はその場における海氷の再現性能とも関係している．Arzel ら[3] は 14 モデルの海氷分布の評価をしている．北半球の 3 月と 9 月の海氷縁の分布を比較すると，14 モデルの中間値（メディアン）は観測の海氷縁とよく合っていた．しかしながらそれぞ

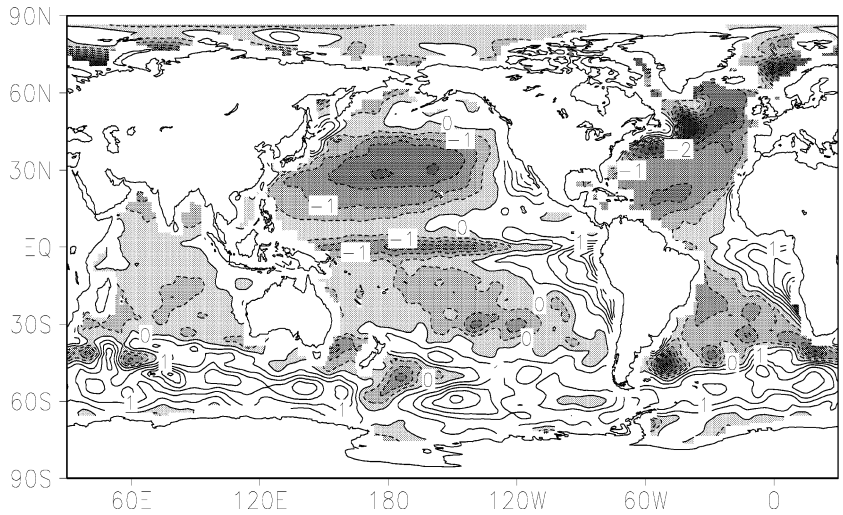

図 1　気候モデルの年平均海面水温バイアス．等値線は 0.5℃間隔．

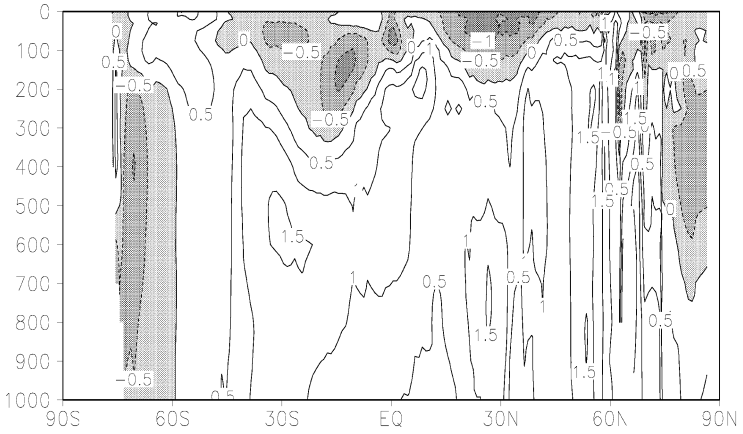

図2　気候モデルの年平均東西平均水温バイアスの緯度・深度分布．

れのモデルの海氷縁はモデル毎に異なり，特に北太平洋と北大西洋でモデル間の広がりが大きい．14 モデルのメディアンが観測と合っているのは，海氷分布を過大評価しているモデルと過小評価しているモデルを平均した結果として得られた統計的描像にすぎないといえる．

海面水温が実際の観測に比べて高すぎる時には長波放射・顕熱・潜熱の形で海から大気へのエネルギーが増加するなどの負のフィードバックが働くためモデルバイアスにも一定の歯止めがかかるが，塩分についてはそのような負のフィードバック機構は働かないので，気候モデルによる塩分の定量的な再現はより困難である．図 3 に年平均海面塩分偏差分布（モデル平均と観測値の差）を示す．まず北極海でのモデルの顕著な高塩バイアスが目立つ．北太平洋（特に東部海域）でも高塩傾向である．逆に大西洋(南北両大西洋とも)，南太平洋亜熱帯海域やインド洋ではモデルの海面塩分は観測値と比べて低い．各海盆での降水量のバイアスがこれら塩分バイアスに主に影響している．これらの空間的な塩分バイアスは現実の海面塩分の空間分布と逆であり，モデルでシミュレートされた海面塩分の空間分布は，各海域間の塩分コントラストが観測より小さいものとなっている．

5 年前の IPCC TAR と比べると，フラックス補正を用いないモデルの割合が IPCC AR4 では格段に増大しているが，フラックス補正を用いないことによる基本場のバイアス（北太平洋域における海氷域の拡がりすぎや熱帯太平洋の東西水温傾度の誤差など)の存在は，大気・海洋の応答を評価する上で考慮されるべき問題であるといえる．

3．21 世紀の気候変化予測

IPCC AR4 に合わせて，世界の約 20 の気候モデルグループでは，1850 年以降 2000 年までの 20 世紀気候再現実験，SRES A2・A1B・B1 の各シナリオでの 2100 年ま

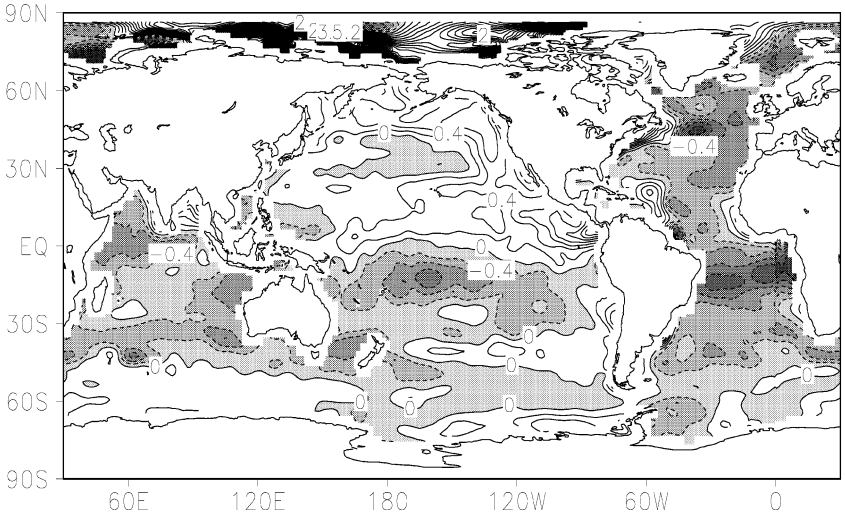

図3　気候モデルの年平均海面塩分バイアス．等値線は 0.2 psu 間隔．

での予測実験などを行った．その結果を用いてのモンスーンやENSOなど様々な現象の将来変化に関する論文が多数報告されている．複数のモデルの予測結果を統合するアンサンブル平均は，個々のモデルが持つ不完全性を打ち消しあうため，よりよい予測結果を得ることが期待できる．本節では，気候変動シナリオとして，3つの内の中間シナリオであるSRES A1B（2100年にCO_2が720 ppmに上昇）による気温と降水量の変化について紹介する．SRES A1Bシナリオによるモデルアンサンブルは，全球年平均地上気温で21世紀末には2.7℃の上昇を，全球年平均降水量は現在値に比べて4.1%の増加を予測している[4]．

図4は19の気候モデルで得られた21世紀末と現在(1981-2000年平均)との年平均地上気温の差である[4]．等値線は19のモデルの平均を示している．年平均地上気温偏差はどこでも正であり，かつ北半球高緯度ほど大きい．また海上よりも陸上での気温上昇が大きい．また，結果のモデル間のばらつきの度合いをみるために，平均の気温変化量とモデル間の標準偏差の比を影で示した．気温に関しては，低緯度ほどこのシグナル・ノイズ比（信頼性）は大きい．これらの結果は文献1-2で既に得られているものと本質的に同じ結果である．季節的に分けてみると，冬季には北極海及びユーラシア大陸と北米大陸の東側での昇温が大きい．夏季には中東，中国西部，米国西部のいわゆる乾燥域での昇温が大きい特徴がある．日本付近の気温変化量は，全球平均値に比べて，年・冬季・夏季とも約20%大きい．

図5に年平均降水量変化を示す[4]．降水量は熱帯及び中・高緯度で増加，亜熱帯域の一部で減少を予測している．地中海域やメキシコから米国南西部での減少が顕著であり，特に前者はモデル間の予測一致度が高い．これらの特徴も文献1-2と矛盾しないが，定量的には，平均変化量とモデル間の標準偏差の比が気温の場合と比べて小さいことからわかるようにモデル間のばらつきが大きい．夏季には日本を含む東アジアでの降水量増加をモデルは予測している．また，雨期入りの期日の変化は比較的小さいものの，台湾・琉球諸島から日本南方にかけての地域では梅雨明けが遅れる傾向があり，梅雨等の初夏の雨期の総降水量，降水強度，雨期の期間の長期化が示唆されている[5]．

北半球冬季には北極振動と呼ばれる現象が卓越している（かならずしも振動現象ではないため北半球環状モードとの言い換えが進んでいる）．北極振動は北半球の中高緯度で冬季に卓越する極域と環状的な中緯度間の半球規模の地表面気圧シーソー的変動であり，北半球の大規模変動場の基本的変動で各地の異常気象との関連が高い．気候変化の将来予測では，北半球高緯度域で多くのモデルが，極域で海面気圧が負偏差，中緯度で正偏差となる正位相の北極振動的な温暖化パターンを示している[6,7]．北極振動が正位相の時，北太平洋域の海面気圧偏差は正偏差となり，アリューシャン低気圧は弱まる傾向にある．同時に熱帯太平洋域では，多くのモデルで，貿易風（偏東風）が弱まり降水域が東偏する，平均場がいわゆる「エルニーニョ的」な特徴を持つ温暖化パターン

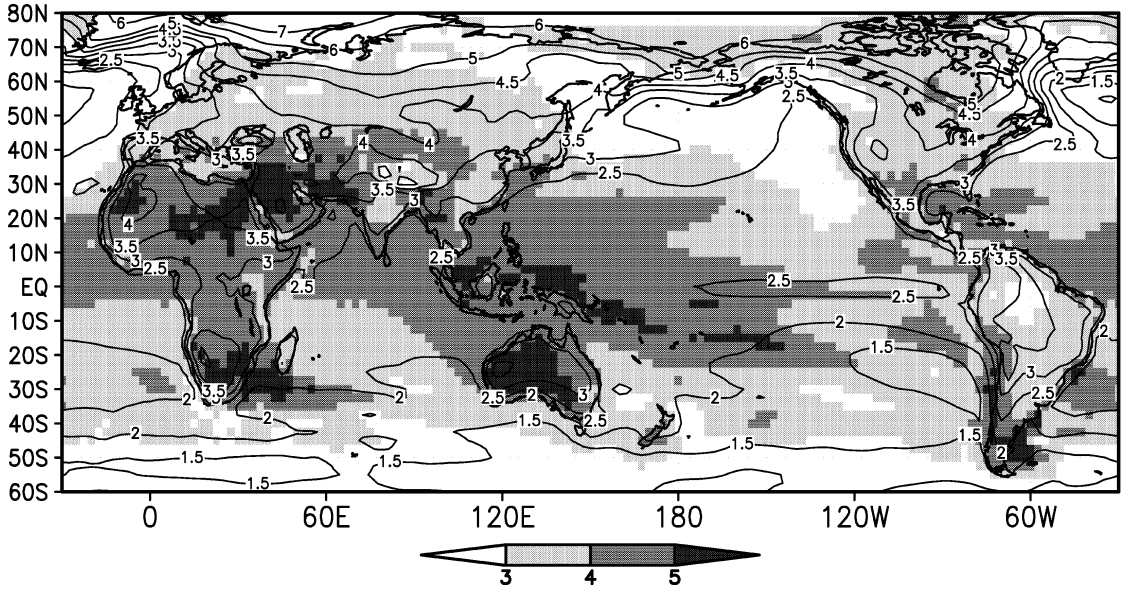

図4　SRES A1Bシナリオ下での21世紀末の年平均気温変化（20世紀末との差）．等値線は19の気候モデルの平均（単位℃）．影は平均の気温変化量とモデル間の標準偏差の比で，大きいほど結果がモデル間で一致していることを示す．

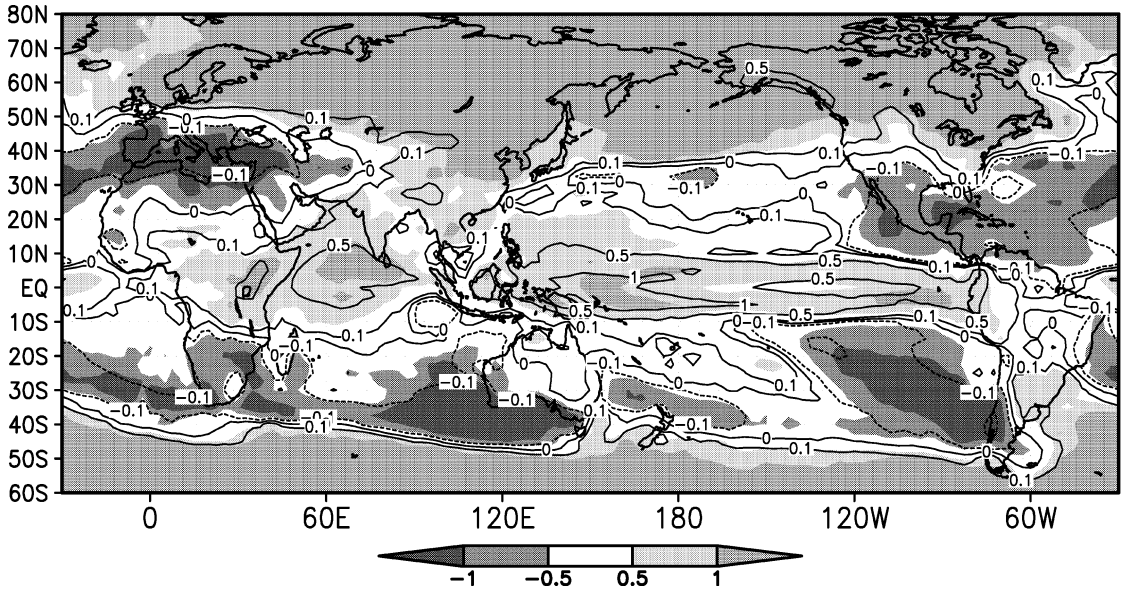

図5　図4と同じ，ただし年平均降水量（単位 mm/day）．

を示す（年々変動としてのエルニーニョ現象の振幅が変化することを意味している訳ではなく，時間平均場の偏差パターンがエルニーニョが起こっているときのパターンに似ている，という意味である）．また，温暖化が起こると低緯度の上部対流圏の気温上昇が大きくなるため，上部対流圏及び下部成層圏での南北温度勾配が増加する．これは，亜熱帯ジェット気流を強め，高緯度において北極振動的に変化し易い状態をもたらし，一方，静的安定度の増加は，大規模循環を弱め，低緯度においてエルニーニョ的に変化し易い状態をもたらすであろうことが考えられている．しかし，熱帯でエルニーニョ的な変化をする時は，北太平洋海面気圧は負偏差となりやすいことも知られている．北極振動の正位相的応答とエルニーニョ的な平均場の変化のバランスが，モデル間の温暖化パターンに不一致が生じる原因の一つとなっているようだ[6]．

4．古気候モデリング

過去数十万年の間には氷期と間氷期が交互に起こったことは広く知られている．氷期・間氷期サイクルは，自転軸の傾きや地球の公転軌道の周期的な変動によって起こる日射量の変動に対して，海洋大循環や氷床や地殻など地球表層システムが応答してもたらされていると考えられている．特に自転軸傾斜と歳差の変動から，春分点・近日点等の位置は約23,000年の周期で公転軌道上を移動しており，近日点が北半球の夏季に起こる時期には，逆に近日点が北半球の冬季に起こる時期に比べて，北半球の夏季に日射量がより多く，冬季により少なくなる．そのため北半球の夏がより暖かく，冬がより寒くなり，季節変化の振幅が大きくなることが容易に想像できる．アジアの気候も氷期・間氷期サイクルで変動してきた．氷期にはインドモンスーンが弱く寒冷で乾燥していたが，その後の10,000〜5,000年前には現在より湿潤な気候状態になったことが，インド北西部からチベット高原南西部にかけての地域の花粉分析・湖水位データから示されている．9,000年前には北半球夏季の太陽入射量は現在より8％大きかったが，その後減少に転じた．南アジアモンスーンも，今から6,000年前をピークとして，その強度は徐々に弱まった．

古気候モデリング相互比較実験（Paleoclimate Modeling Intercomparison Project: PMIP2[8]）では，他の時期と比べて古気候プロキシデータが豊富に収集されている，6,000年前の完新世中期と21,000年前の最終氷期最盛期を主なターゲットとして，温暖化実験に使用しているものと同じAOGCMでの計算が行われている．PMIPは，世界の主な気候モデルグループが同一条件下で感度実験を行い，モデル間の相互比較及び地質データ解析との比較を行うことで，気候変動メカニズムの理解・古気候再現の精度向上を目指す国際的なモデル相互比較実験であり，日本からは気象庁気象研究所と東京大学気候システム研究センター／地球環境フロンティア研究センターの2グループが参加している．

ここでは，気象研究所での6,000年前（6 ka）の気候再現結果を紹介する[9]．これら古気候実験では，制御実験（0 ka）は産業革命以前とするため，制御実験についても温

室効果ガス（CO_2，CH_4，N_2O）として産業革命以前の値を使用している．二酸化炭素の大気中濃度は 280 ppm である．この制御実験をここでは「現在」と呼ぶ．6 ka の 0 ka との境界条件の違いは，地球軌道要素のみである．気象研究所では，フラックス補正ありの場合と，フラックス補正なしの場合の両方で実験を行い，それらの結果を比較した．

図 6 は年平均気温，年平均降水量，年平均海面塩分の 6,000 年前と現在との差について，フラックス補正あり実験とフラックス補正なし実験の結果を比較したものである[9]．6,000 年前の年平均気温はほとんどの場所で現在より低くシミュレートされている．北極域のみは逆符号で，6,000 年前の気温の方が高くなっている．このモデルでシミュレートされた 6,000 年前の全球年平均気温は，現在に比べて，フラックス補正ありの場合で 0.14℃，フラックス補正なしの場合で 0.47℃低い．この気温変化は，境界条件として与えた 6,000 年前と現在との日射量の差を反映している．全球年平均の日射量の差はほぼゼロだが，年平均した低緯度における日射量は，6,000 年前には現在に比べて約 1 Wm^{-2} 少なく，逆に南北両極域では約 4 Wm^{-2} 多かった．全球年平均気温の低下は，この低緯度における日射量の差を反映して海面水温が低下したためである．北極域では，年平均日射量が増えることも効いているが，それよりも夏季の日射量増加による海氷減少の効果が大きい．後でみるように，気温変化は季節ごとに大きく異なることに注意する必要がある．

年平均降水量はアフリカのサヘル地域からインドにかけて正偏差である．アフリカでは，熱帯に降水偏差域が南北の対になって見られ，アフリカモンスーン降水帯の北上・強化を示している．インドにおける降水量の増加は東南アジアにおける降水減少と対照的である．これらの降水増加域では，土壌が湿潤になること及び雲量増加

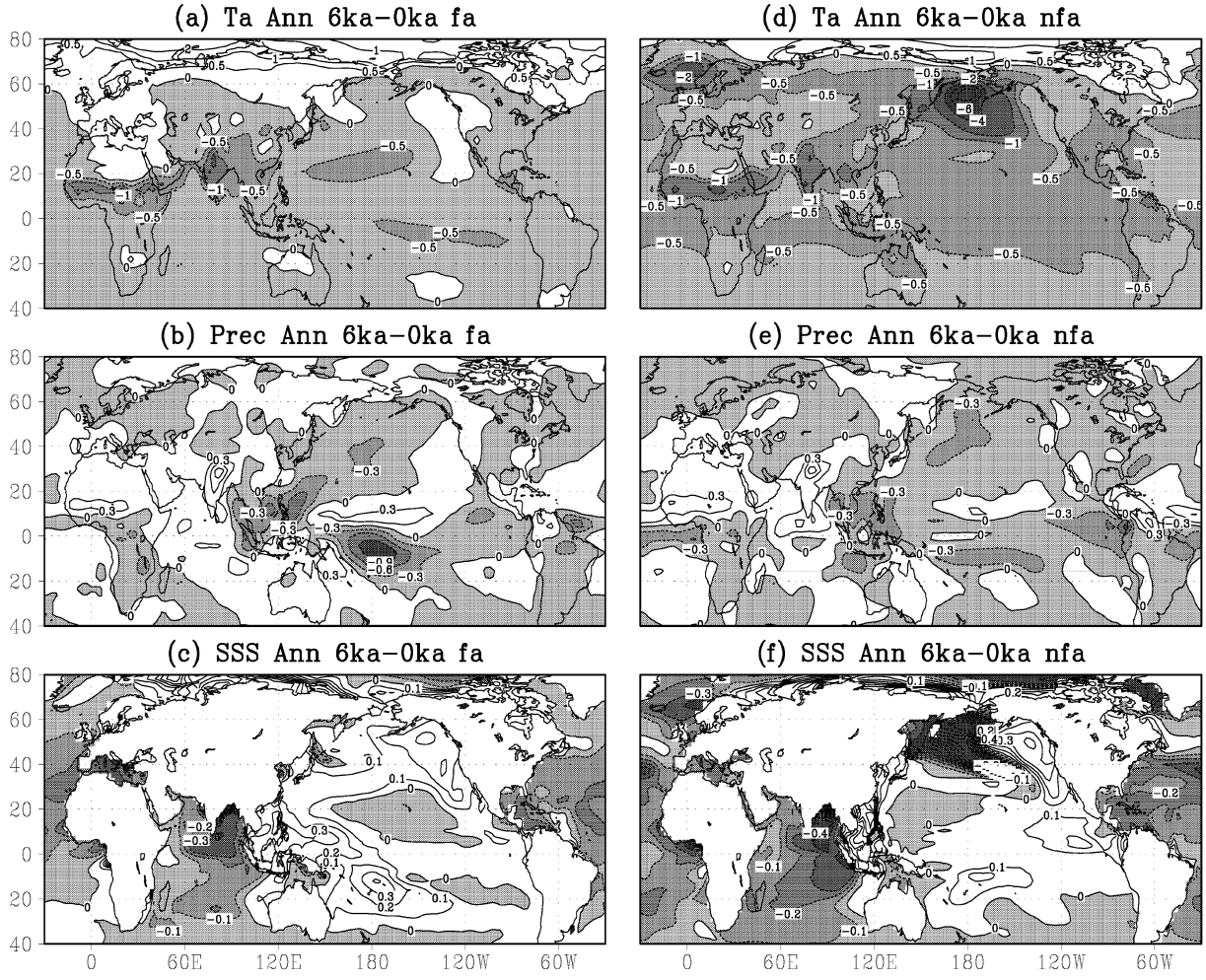

図 6　気象研究所気候モデルによる完新世中期（6,000 年前）の気候再現．フラックス補正あり実験による(a)年平均気温（℃），(b)年平均降水量（mm d^{-1}），(c)年平均海面塩分（psu）の 6,000 年前と現在との差．(d–f)（a–c）に同じ，ただしフラックス補正なし実験の結果．

により日射量が減少することで，地上気温は周囲と比べて負偏差となっている．

年平均海面塩分偏差では，インド洋での塩分減少，西部熱帯太平洋での塩分増加が対照的である．6,000 年前におけるベンガル湾やアラビア海での海面塩分低下はその場での降水量増加や陸上からの流出増加のためである．西部熱帯太平洋での海面塩分増加は，降水量が減少したためである．太平洋と大西洋を比較すると，現在気候では大西洋の方が高塩であり，水収支的には大西洋で蒸発した水が太平洋に輸送されていることを意味する．6,000 年前に太平洋で正，大西洋で負の塩分偏差がみられることは，両海洋間の水蒸気輸送ひいては塩分コントラストが現在より小さかったことを示唆している．

次にフラックス補正あり実験とフラックス補正なし実験の結果を比較してみよう．6,000 年前と現在の気温・降水量・海面塩分の差の空間分布の特徴は両者ともおおむね似ている．大きな差は北太平洋域にみられる．北太平洋では，フラックス補正なし実験での気温低下量が格段に大きい．これはフラックス補正なし実験の現在気候再現において，北太平洋域における海面水温が低温バイアスであり海氷分布が過大評価されていることと関係している．低温バイアスは陸上においても同様であり，積雪が多いために，6,000 年前実験において雪氷・アルベドフィードバックが過剰に効いている．フラックス補正なし実験においてもアフリカモンスーン・インドモンスーン降水量は強化されている．インドモンスーンにおける

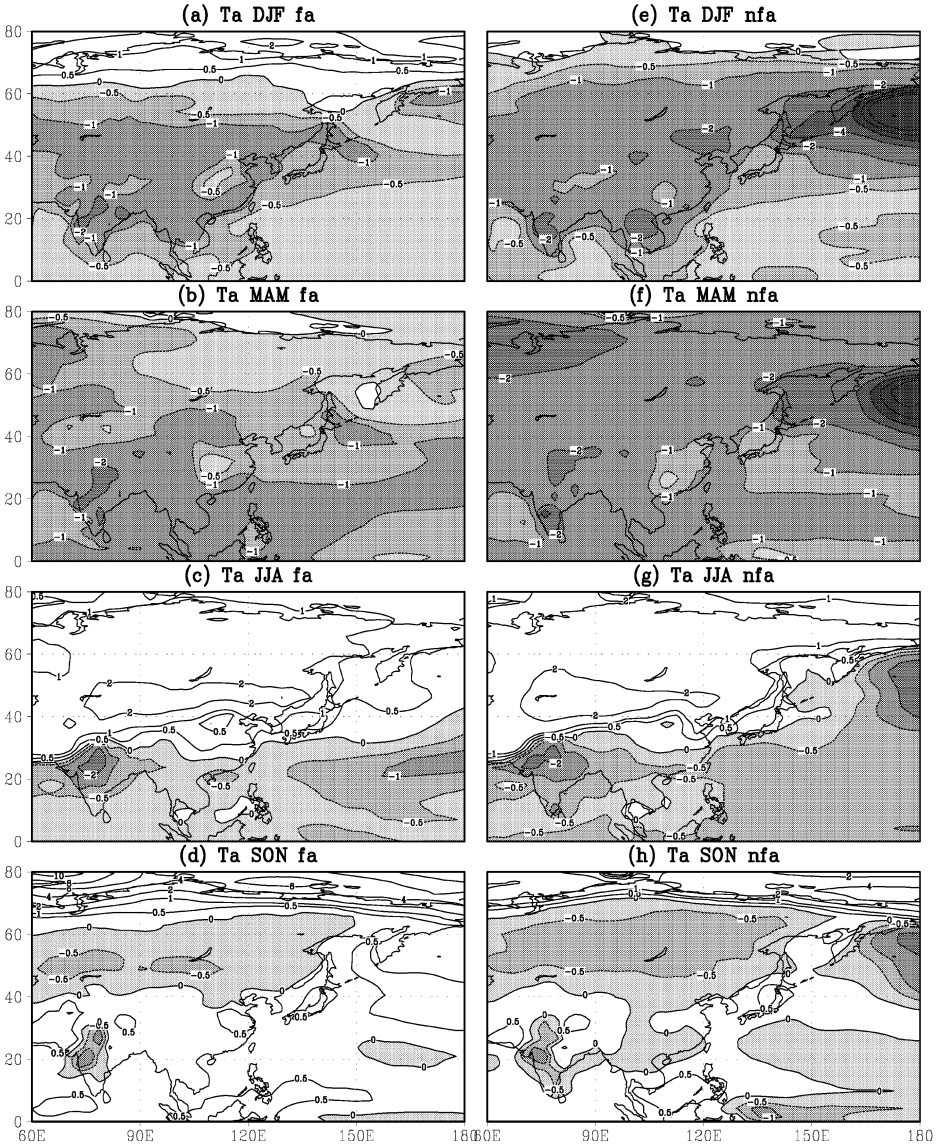

図 7　気象研究所気候モデルによる完新世中期（6,000 年前）の気候再現．フラックス補正あり実験による(a) 12-2 月，(b) 3-5 月，(c) 6-8 月，(d) 9-11 月平均気温（℃）の 6,000 年前と現在との差．(e-h)（a-d）に同じ，ただしフラックス補正なし実験の結果．

6-9 月平均降水量の 6,000 年前と現在の差（増加量）は，フラックス補正あり実験で 1.01 mm d^{-1}，フラックス補正なし実験で 0.84 mm d^{-1} と大きな差はない．一方，アフリカモンスーン降水量は，フラックス補正なし実験の方がより北まで増加域がみられる．フラックス補正あり実験でみられたインド洋と南シナ海間の海面塩分偏差コントラストはフラックス補正なし実験でもみられ，インドモンスーン域の降水と流出の増加と西部熱帯太平洋での降水量減少に対応している．フラックス補正なし実験にのみみられる北太平洋での大きな海面塩分偏差は，現在気候で過大評価した海氷が融解したためである．

図 7 に各季節別の地上気温変化分布を示す．上述のように，6,000 年前の大気頂での太陽放射量は，北半球の夏から秋に現在より最大で 5 %大きく，冬から春に少ない．そのため，6,000 年前の地上気温変化としては，北半球夏季の大陸上では現在より温暖だが，冬から春には寒冷であり，気温の年較差が大きくなる．気温変化は，各季節ともフラックス補正の有無如何に関わらず似た空間分布であるが，北太平洋域では現在気候値の海氷分布の差に起因する応答の差がみられる．日本付近では年平均気温の偏差はゼロに近いものの，春には 1 ℃低く，秋には 0.5℃高い．冬から春の低温と夏から秋の高温という非対称な気温変化が，降水量の変化と重なって，現在とは異なる植生分布を形成していたことが想像される．

年降水量の図からアフリカモンスーンの北上とアジアモンスーンの強化が示唆された．6,000 年前の北半球の太陽入射量は夏から秋に現在より大きく冬から春に少ないため，モンスーン域の降水量変化も季節によって大きく異なる．ここでは図 8 に春季と夏季の降水量変化分布を示す．両実験とも，6,000 年前の春季には東南アジアで降水量の大きな減少がみられる．夏季にはアジア陸域の降水量増加と熱帯西部太平洋での降水量減少のコントラストが顕著になる．東南アジアでは春季から夏季にかけて降水量偏差の符号が反転しており，夏季モンスーンの急激な開始を示唆している．フラックス補正の有無により，定量的には違いがあるものの，陸上の降水量変化などの変化パターンはおおむね整合的である．フラックス補正が海面水温の絶対値に影響を与える海洋上は別として，陸上の変化については太陽入射量の季節偏差が一義的であり，フラックス補正の存在は二次的な効果であるといえる．

フラックス補正の有無は，6,000 年前と現在との海洋での変動度にも大きいインパクトをもたらす．筆者ら[9]は本実験結果を用いて ENSO の変調を調べている．6,000 年前の熱帯太平洋は，海面水温が下がることとサーモクラインの温度傾度が弱くなることで，エルニーニョの振幅が弱くなる傾向にある．一方，6,000 年前の貿易風は強いため，大気からみるとエルニーニョの振幅を強くする傾向にあり，両者の兼ね合いが実際のエルニーニョの振幅を決めている．フラックス補正ありの場合には 6,000 年前と現在のエルニーニョの振幅はほとんど変化しなかったが，フラックス補正なし実験では 6,000 年前のエルニーニョが弱くなった．観測プロキシデータは弱いエルニーニョを支持しており，大気海洋結合過程に

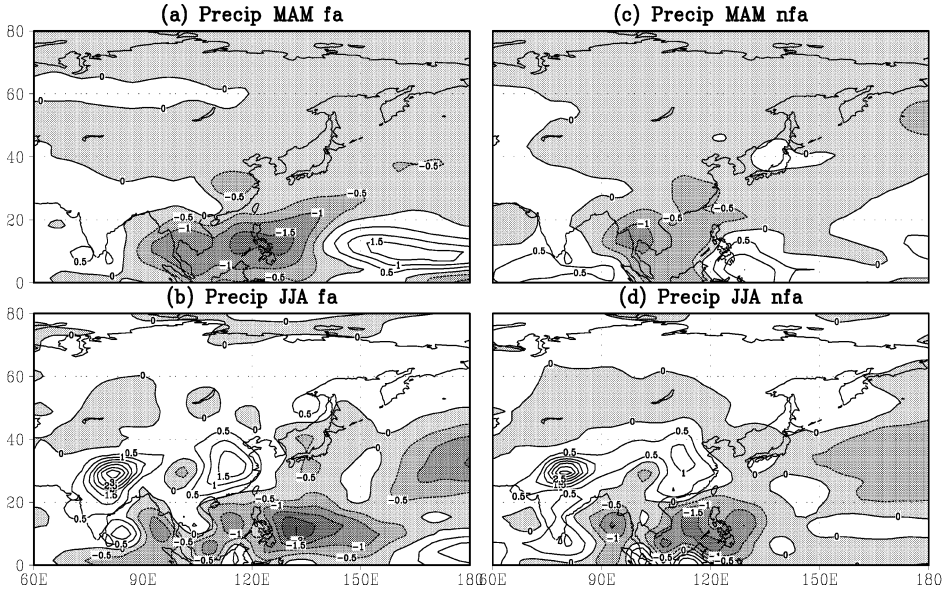

図 8　気象研究所気候モデルによる完新世中期（6,000 年前）の気候再現．フラックス補正あり実験による(a) 3-5 月，(b) 6-8 月平均降水量（mm d^{-1}）の 6,000 年前と現在との差．(c-d)（a-b）に同じ，ただしフラックス補正なし実験の結果．

ゆがみを生じさせないフラックス補正なし実験の方が，基本場のバイアスは大きいものの，より確からしい応答を示したといえる．

5．おわりに

気象研究所では，気候モデルを気象庁と共同で開発しており，そのモデルは，短期予報，現在気候の再現，年々変動メカニズムの研究からエルニーニョ予測や季節予測そして温暖化予測（30年程度の予測から300年程度の予測へ），古気候研究など幅広い目的で用いられている．気候モデルを用いた現在気候の再現実験はモデル評価の第一段階だが，それだけでは気候モデルの評価には不十分である．たとえば温暖化予測では，同一の放射強制に対してモデルが示す全球年平均気温変化にはモデル間に数倍の開きがある．また温暖化による降水量変化は地域によっては符号さえモデル間で異なる場合があるほか，エルニーニョがどう変調するかについてはモデルが示す変化傾向は様々である．気候モデルは，現在とは異なる条件下で用いられ性能評価されることで，高度化されていくといえる．

参考文献

1）IPCC, *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK (2001) 881 pp.

2）気象庁，異常気象レポート2005（2005）．

3）O. Arzel, T. Fichefet and H. Goosse, *Ocean Modelling* **12** (2006) p.401.

4）D. Nohara, A. Kitoh, M. Hosaka and T. Oki, *J. Hydrometeor* **7** (2006) p.1076.

5）A. Kitoh and T. Uchiyama, *J. Meteor. Soc. Japan* **84** (2006) p.247.

6）K. Yamaguchi and A. Noda, *J. Meteor. Soc. Japan* **84** (2006) p.221.

7）R. L. Miller, G. A. Schmidt and D. T. Shindell, J. Geophys. Res. **111** (2006) D18101.

8）M. Crucifix, P. Braconnot, S.P. Harrison and B. Otto-Bliesner, Eos **86** (2005) p.264.

9）A. Kitoh, T. Motoi and S. Murakami, J. Climate (2006) accepted.

（2006年10月31日　改訂受付）

Climate-change simulations: Future climate projections and paleo-climate modeling

Akio Kitoh
Meteorological Research Institute

abstract:
Coupled atmosphere-ocean general circulation models (AOGCMs) can be used for future climate projections and paleoclimate simulations. AOGCMs that are currently used for climate simulations reproduce the major characteristic features of the present atmosphere and ocean climate; however, they tend to show a diffuse thermocline and a weaker salinity contrast between the ocean basins. We present selected AOGCM results of future climate projections for the end of the 21st century. We also show an example of paleoclimate simulations for the Mid-Holocene (6,000 years before the present). The results reveal robust features such as an enhanced winter-to-summer seasonal change and enhanced monsoons, responding to the prescribed orbital forcing.

鬼頭昭雄
〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1
気象研究所気候研究部
e-mail: kitoh@mri-jma.go.jp