



地球温暖化の地域的な違いを生じるメカニズム

海洋研究開発機構・地球環境フロンティア研究センター 野田 彰

1. はじめに

地球温暖化に関する最新の科学的知見は、IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change：気候変動に関する政府間パネル）において、1990年以來5,6年ごとに評価報告書としてまとめられ、2007年には第4次評価報告書（AR4）が刊行された。このAR4では、観測事実の文献を広く詳しく調べ、また、世界の研究機関の20余りの気候モデルによるシミュレーションの結果、「地球全体が温暖化していることに疑問の余地はない」、「20世紀半ば以降の温暖化は、人為的な温室効果ガスが原因である可能性が非常に高い」と結論づけている。温暖化の予測に関しては、共通の温室効果気体排出シナリオに基づいて計算され、その結果が世界の研究者に公開・解析された。AR4では、従来の地球規模の変化予測については、不確実性が統計的に示された。更に、最高、最低気温、中・高緯度の低気圧活動、熱帯低気圧(台風・ハリケーン)、梅雨前線などに伴う集中豪雨などの気象現象(極端現象: extreme events)の予測も、以前の報告書に比べて詳しく記述されている。本講演では、気候モデルで計算された予測結果について、なぜそのように予測されているのか、メカニズムに重点を置いて紹介したい。

2. 地球温暖化のメカニズム

2.1 地球の温室効果

宇宙空間から見たときの地球の平均温度は、図1に示したように、地球が吸収する太陽放射エネルギーと、地球から宇宙空間に放出される赤外線エネルギーの釣り合いによって決まる。

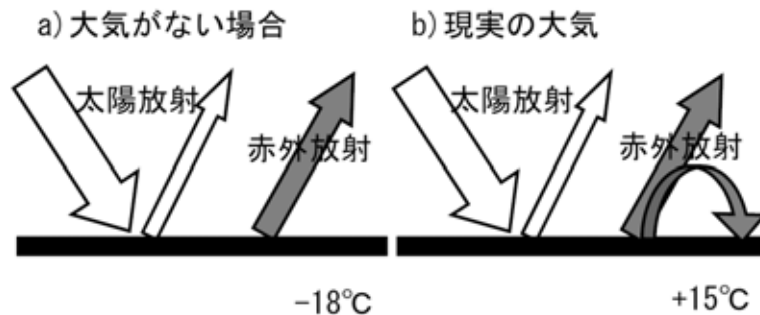


図1 温室効果の概念図。(a)大気がない場合、太陽放射と赤外放射のエネルギーバランスから求まる地球の平均表面温度は -18 となる。しかし、(b)大気に赤外放射吸収物質(温室効果気体)がある場合、地表から上向きに放出された赤外放射は大気で吸収され、大気から下向きに再放出された赤外線が地表面を暖める効果が加わり、実際の平均地上気温は 15 になっている。

2.2 地球温暖化の地理・高度分布

図1に示した温室効果のメカニズムによって、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素などの温室効果気体が大気中に増えると、地表面温度が増加するが、地球の海陸分布や気候システムの相互作用やフィードバック効果があるために、一様に温暖化するわけではない。図2にAR4に貢献した21の気候モデルによる21世紀末の気候変化予測実験のモデル平均の結果を示してある。特徴的

な空間パターンがあることに気がつく。以下に、これらのパターンがどうして生じたか、そのメカニズムを考える。

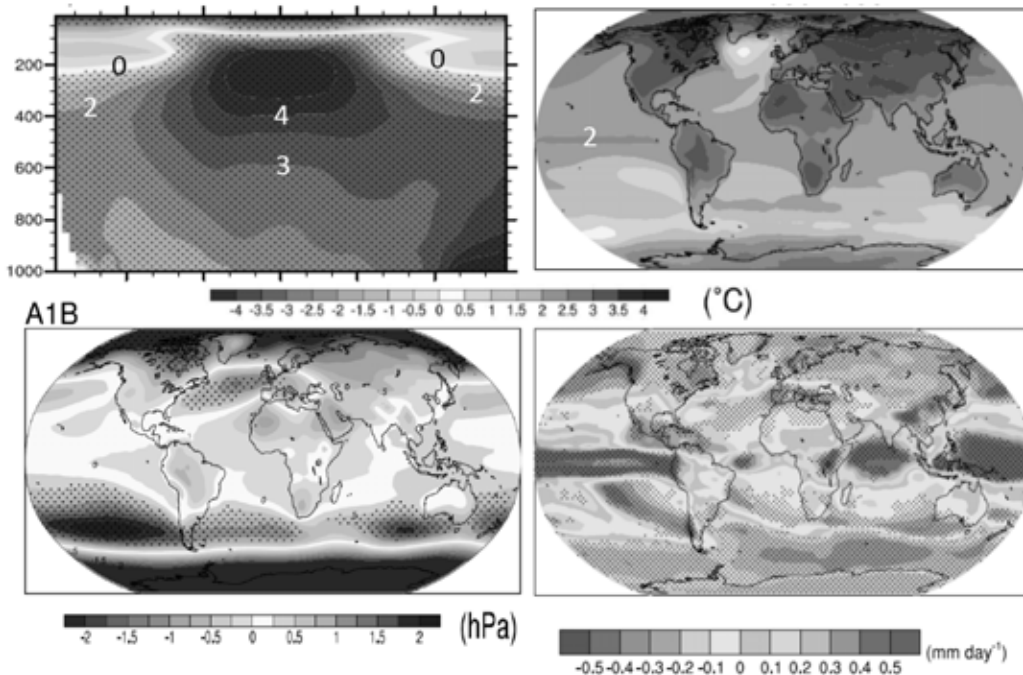


図2 1980～1999年を基準としたIPCCのA1B排出シナリオ(高度経済成長が続き、世界人口が21世紀半ばにピークに達した後に減少し、新技術や高効率化技術が急速に導入される未来社会を想定した場合の温室効果気体の排出予想)に基づく21世紀末(2080～2099年)の気候変化の気候モデル平均。左上)気温上昇の東西平均の高度(気圧)・緯度分布。右上)地上気温上昇の緯度・経度分布。左下)海面気圧変化の緯度・経度分布。右下)降水量変化の緯度・経度分布。IPCC(2007)

a) 高緯度地方での温暖化

まず、高緯度地方での地球温暖化のフィードバック効果を考える。図3に示したように、高緯度地方は、雪氷に覆われていて、太陽放射の反射率(アルベド)が高い。温暖化で雪や氷が溶けると、その下の土壌や海面が現れ、太陽放射を良く吸収するようになる。更に海水は大気と海洋の間の熱の交換を妨げる断熱材の役割を果たしているため、温暖化で海水が減少すると、特に大気の温度が低い冬期には、海洋から大気へ熱が伝わり温暖化を加速する。一方、高緯度の海洋では、低緯度から運ばれてきた海水が蒸発して塩分濃度が高まる効果と、温度が低い効果で、表層の海水の密度が大きくなり、深層まで潜り込む循環が存在する。海水は大気や土壌に比べて熱容量が大きいために、このような場所では、温暖化は非常に小さくなる。北半球高緯度の大きな昇温は前者の効果、南半球高緯度と北大西洋の高緯度では後者の効果によって大きな昇温の違いが生じたと理解される。

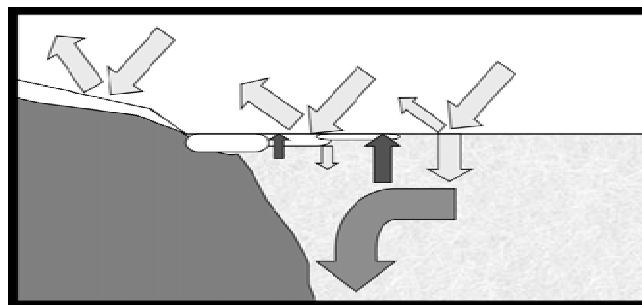


図3 高緯度地方の概念図。海洋は海水が存在し、大陸上は積雪で覆われている。

b) 低緯度地方での温暖化

次に、低緯度地方では温暖化に伴いどのような変化が起きるか考えてみよう。低緯度の対流圏（地上から高度 15km 付近の大気の間）では積雲対流活動が活発なために、上空ほど気温が下がる大気の温度成層は湿潤飽和断熱気温減率に近い状態になっている。温室効果で地上気温が上昇すると、積雲対流活動によって、対流圏の上下混合が起こり、地上の温度から決まる湿潤飽和断熱気温減率を持った成層構造が維持される。湿潤飽和断熱減率は、図 4 に示すように、気温が高いほど緩やかになるので、地表面温度が上昇すると対流圏の上層ほど気温上昇が大きくなる。図 2 左上に予測された低緯度対流圏上層の大きな気温上昇は、このメカニズムで生じている。

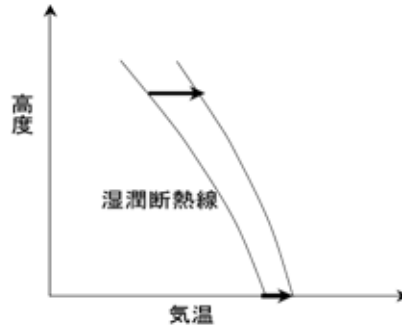


図4 湿潤飽和断熱線の温度依存性

低緯度地方の積雲対流は、地球全体の気候大循環を駆動する最重要な熱源であるから、この熱源が形成した低緯度対流圏上層の大きな昇温は、気候大循環を通して、地球温暖化の変化の主要な空間パターンを形成すると予想される。低緯度対流圏上層に局在した温度上昇は、鉛直方向には対流圏の成層状態を安定化させる効果、水平方向には赤道と極の間の温度差を大きくする効果が考えられる (Yamaguchi and Noda, 2006)。まず、成層の安定化は、低緯度地方低緯度帯で対流圏全層に及ぶ主要な循環である、南北方向のハドレー循環(図 5 左)、東西方向のウォーカー循環(図 5 右)、海洋と大陸の間の大規模な海陸風循環であるモンスーン循環を弱めていることが、AR4 モデルの解析から明らかにされた (Tanaka et al., 2005; Vecchi and Soden, 2007)。

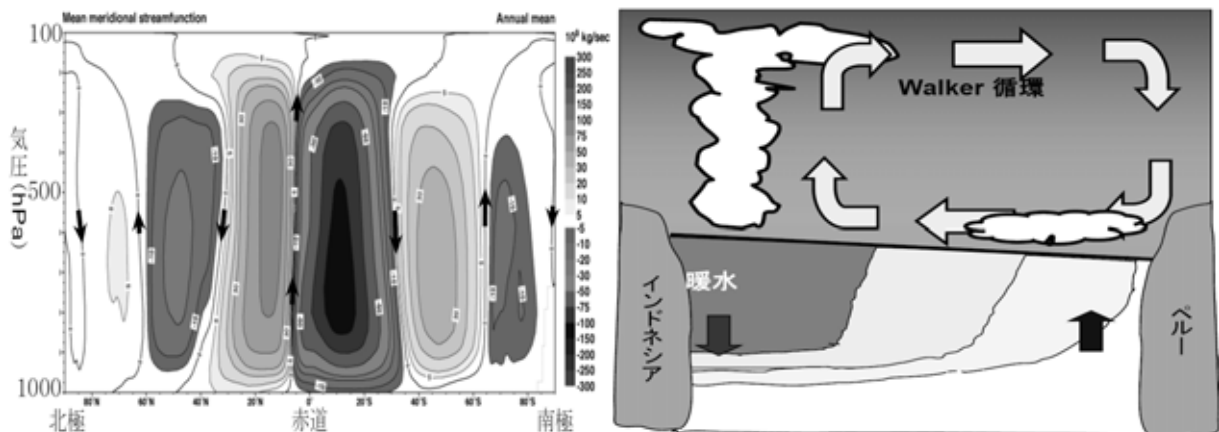


図5 左)ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) の再解析 ERA-40 に基づく東西平均質量流線関数(ECMWF, 2007)。南北半球各々で赤道で上昇し 30 度付近で下降する循環はハドレー循環、中緯度の逆向きの循環はフェレル循環と呼ばれている。右) 赤道太平洋の主要な東西循環であるウォーカー (Walker) 循環の模式図。エルニーニョの時は、下層の東風が弱まり、西に吹き寄せられた暖水が東太平洋に広がる。

これらの循環の中で、ウォーカー循環は、赤道上の海面水温の異常としてエルニーニョ・ラニーニャと呼ばれている数年周期の自然変動と密接な関係がある。エルニーニョの時下層の東風は弱まり赤道東太平洋で海面水温が上昇し、ラニーニャの時は逆に東風が強まり、東太平洋の海面水温は下降する。温暖化でウォーカー循環が弱まれば、自然変動自体のメカニズムとは異なるが、エルニーニョの時と同様な海面水温の異常が生じ、それに伴い地球規模の循環の異常が予想される。実際、図2の赤道付近では、赤道に沿って東太平洋に大きな昇温と、海面気圧が東太平洋で負、西太平洋で正の偏差が見られるが、同様の偏差はエルニーニョの時に観測されている偏差と類似している。

c) 偏西風ジェットの変化

次に、低緯度対流圏上層の昇温が赤道と極の間の温度傾度を増大する効果を考える。南北の温度傾度は偏西風ジェット気流（亜熱帯ジェット）と密接に関連していて、ジェット気流の中心軸は、図5の対流圏上部の成層圏との境界（圏界面）付近の高度、ハドレー循環とフェレル循環の境界付近にあることが観測されている。この偏西風ジェットは自然変動することが観測されていて、近年冬の異常気象との原因として引用される北極振動と密接に関連している。南北の温度傾度が増加するのは、北極振動の正偏差に対応しており、その時期には、ジェットの蛇行は小さくなり（そのため高緯度からの寒気の吹き出しが弱まり、日本は暖冬になる）、軸が北極側に移動することが観測されている。北極振動の正偏差の際と同様な偏差が、図2の地上気圧が南北半球で緯度40度付近を境に、極側負、低緯度側で正の偏差、又、日本の東方海上での大きな温暖化として予測されている。IPCCのAR4モデルによる北極振動に伴う気温偏差と温暖化予測の相互比較の結果（Yamaguchi and Noda, 2006）を図6に示す。このように、現象論的には、北極振動との類似は明確に見られるが、類似をもたらす詳細なメカニズムの解明は今後の研究課題となっている。

d) 海陸の温暖化変化の違い

低中緯度の同じ緯度帯では大陸の方が海洋より昇温が大きい。その理由として、海水は、土壌と比べて熱容量が大きいので温まりにくいことが考えられる。実際このメカニズムが働いていることは間違いないが、熱容量の差だけでは、二酸化炭素濃度を例えば2倍増の一定状態で平衡に達すれば、海陸の温暖化には差が生じないはずである。しかし、実際にこの条件で、気候モデルを用いて実験を行うと、海洋の温暖化は大陸より小さくなる。これは、夏、熱い地面に水をまくと、蒸発熱で地面温度が下がるのと同様のメカニズムが働くからである。すなわち、海洋では温度変化がわずかでも、大きな蒸発熱（潜熱）の増加で温暖化による地表面における下向きの赤外放射の増加分とバランスするために温暖化が小さくなるのである。

e) 降水分布の変化

最後に、温暖化に伴う降水量の変化については、図5の子午面循環から予想される。地球が温暖化することにより蒸発が増え、その分降水量が増えると予想される。地球全体としては正しい予想だが、図2右下の降水量の変化予測では、中緯度帯の降水量は顕著に減少している。これは、中緯度帯では下降流が卓越しており、地表から蒸発した水蒸気が、下層ではハドレー循環で赤道側、フェレル循環で極向きに運ばれ、蒸発した緯度帯で増加した水蒸気はその緯度帯の降水に寄与出来ないために、温暖化で降水が減少したと理解出来る。

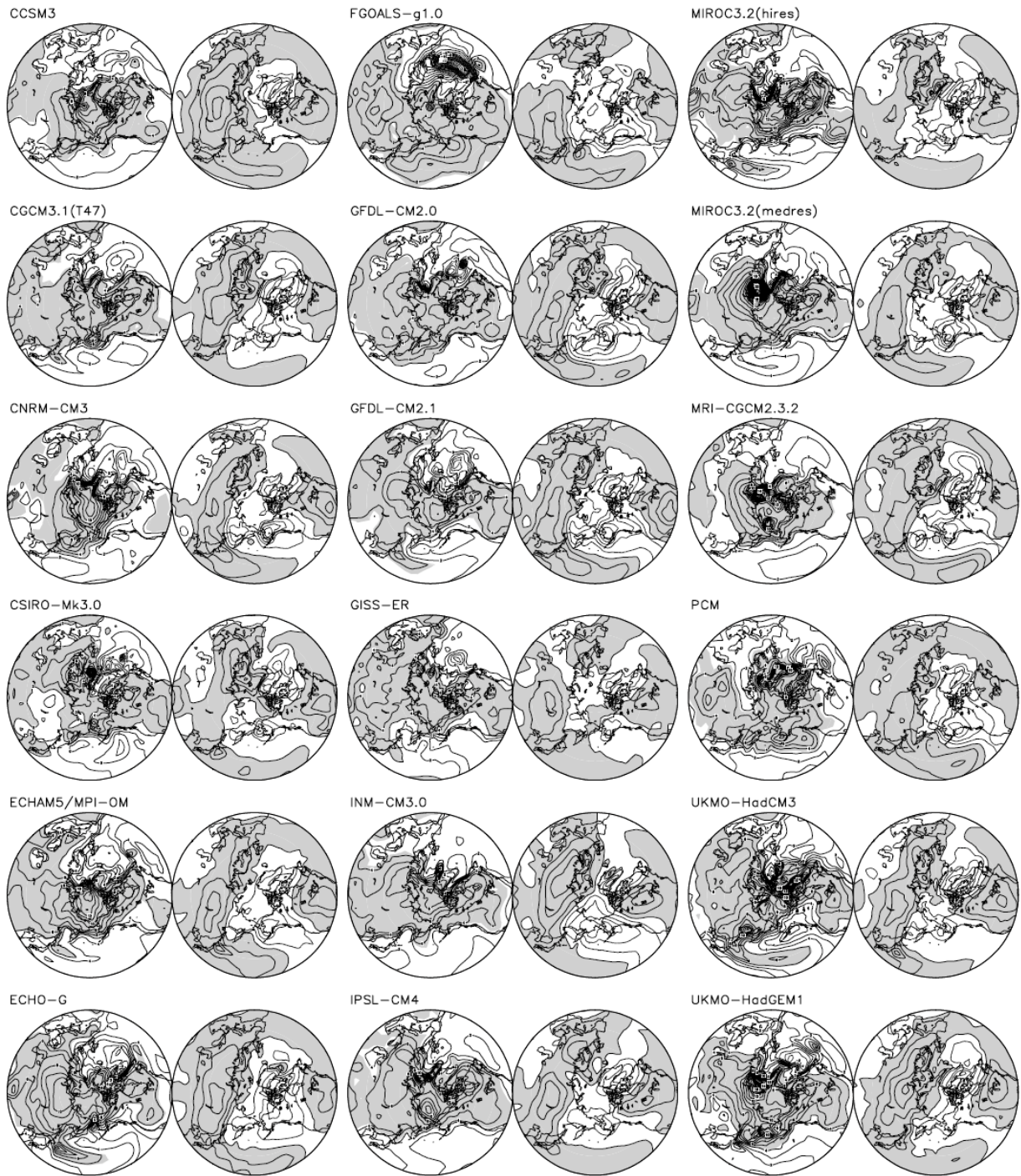


図6 IPCC AR4 の 18 の気候モデルによる二酸化炭素年率 1%複利漸増実験における温暖化率(/100 年)と北極振動に伴う地上気温変化(海面気圧の EOF 第一モードに回帰)。各気候モデルの名前の略称は図の左上に記されている。((Yamaguchi and Noda, 2006)

3. おわりに

以上、大規模な場について、気候変化の地理的分布を生じるメカニズムを紹介した。日本付近の温暖化では、低緯度のエルニーニョ類似的温暖化メカニズムと、偏西風ジェットの正偏差 A0 類似的温暖化メカニズムが働く。両者が引き起こす地上気温や海面気圧の偏差の符号が異なるために、どちらのメカニズムが優勢に効くか、AR4 の気候モデルは決定するに至っていない

(Yamaguchi and Noda, 2006)。

IPCC AR4 の気候モデルのなかで、すべての点で他に秀でているモデルはないことが報告書のモデル検証の章で指摘されており、また、その後のモデル相互比較研究も報告書の指摘を支持している。季節予報などにおいて、モデル平均の予報が一番予報精度高いという経験事実を考えると、図2 に示したモデル平均の予測が現時点では最も信頼性があるといえよう。次期の IPCC 第5次報告書では、気候システムに変化をもたらす基本的なメカニズムの理解が深まり、モデル予測のバラツキが減少することを期待したい。

参考文献

ECMWF, 2007: http://www.ecmwf.int/research/era/ERA-40_Atlas/index.html

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. (<http://www.ipcc.ch/> から電子版をダウンロードできる。)

Tanaka, H.L., N. Ishizaki and D. Nohara, 2005: Intercomparison of the intensities and trends of Hadley, Walker and monsoon circulations in the global warming projections. SOLA, 1, 77-80, doi: 10.2151/sola.2005.021.

Vecchi, G. A. and B. J. Soden, 2007: Vecchi, G.A. and B.J. Soden (2007), Global Warming and the Weakening of the Tropical Circulation. J. Climate, 20, 4316-4340.

Yamaguchi, K., and A. Noda, 2006: Global warming patterns over the North Pacific: ENSO versus AO. J. Meteor. Soc. Japan, 84, 221-241.

独立行政法人 海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター

URL : <http://www.jamstec.go.jp/frcgc/jp/index.html>

海と地球のふしぎをさぐるう ~ ジャムステックキッズ

<http://www.jamstec.go.jp/j/kids/index.html>