



第3章 温暖化問題の科学的基礎

21世紀に地球の気候が温暖化するという見通しは、基本的には、温室効果の理論と、大気中の二酸化炭素濃度が増加しているという事実に基づいて得られた理論的なものである。1988年のIPCC発足以後、「20世紀にすでに温暖化が起きていることが事実として検出できるか」「その原因として二酸化炭素濃度増加の寄与が特定できるか」などの問題（検出と原因特定 detection and attribution）がたてられ、長い検討の末にIPCCはこれに肯定的に答えた。これは21世紀の温暖化の理論的見通しを支える議論のひとつとなっている（ただし、理論的見通しの不可欠な部分ではない）。温暖化懐疑論には、この20世紀における温暖化の事実とその解釈を疑うものが多い。本章では、温暖化問題の科学的基礎に関する様々な懐疑論に対して具体的にコメントする。

<本章の構成>

3.1. 過去および現在の観測データに関する議論

- ▶ 20世紀にすでに温暖化が起きていることに対する懐疑論
- ▶ 本当に温暖化しているのか？ という疑問

3.2. 過去および現在の気候変化の原因に関する議論

- ▶ その主要な原因が温室効果ガス増加であることに対する懐疑論
- ▶ そのほかの原因は考えられないのか？ という疑問

3.3. 炭素循環に関する議論

- ▶ 大気中の二酸化炭素濃度増加の原因が人間活動であることに対する懐疑論
- ▶ 二酸化炭素は人が増やしたのか？ という疑問

3.4. 温室効果強化に対する気候システムの応答に関する議論

- ▶ 温室効果による温暖化の強さに関する懐疑論
- ▶ 二酸化炭素が増えてもこれ以上温暖化しないのでは？ という疑問

3.5. 地球大気・構造・光学特性に関する議論

- ▶ 二酸化炭素の温室効果自体に関する懐疑論
- ▶ 二酸化炭素が増えるとどれくらい温暖化するのか？ という疑問

3.6. 海水準変化に関する議論

- ▶ 温暖化を原因とする海面上昇に対する懐疑論
- ▶ 影響の一つの氷の融解の実状は？ という疑問

3.1. 過去および現在の観測データに関する議論

観測データによる19世紀後半からの全球平均気温（Brohan *et al.* 2006）や、古気候指標から復元推定された過去1000年スケールの北半球平均気温（National Research Council 2006；Mann *et al.* 2008）の時系列グラフは、20世紀後半からの顕著な温暖化傾向を示している。たしかに、これらのグラフに関わる科学的不確実性は残っており、太陽活動などの自然起源の変動の寄与など、解釈についても議論の余地はある。しかし、こうした点をことさらに取りあげたり、ヒートアイランド現象の影響を過大評価したりすることによって、グラフに示唆される温暖化傾向を全く無視してよいかのような主張を繰り返す懐疑論がある。本節では、こうした懐疑論の事実誤認や行き過ぎた点を指摘し、観測データに対する批判と信頼の健全なバランスを保った態度が必要であることを説く。



議論 3



そもそも温暖化が起きているかどうかはわからない。なぜならば、温度の観測データがおかしいし、温暖化も止まっている。

証拠 1

地球表面の7割を占める海上の気候変化のデータはなく、都市化の影響も十分に考慮されていない（渡辺2005, p.76；武田2008b, p.37）。

反論

まず、海上のデータがないというのは渡辺（2005）の全くの誤解である。全球平均地上気温と呼ばれる数値を計算するには、ふつう、陸上で観測された気温のデータと、船などで観測された海面水温のデータが使われている。その方法は、野沢（2007）が解説しているので参照してほしい。例えばIPCC第4次報告書に掲載された過去27年間の温度変化の図（図1-1）は、このように陸上気温と海面水温のデータを組み合わせて得られたものである。

NASAのジェームス・ハンセンたちが発表しているグラフ（<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>）は、陸上だけの集計値もあるが、海上だけのもの、海と陸の両方を含めたものもある（いずれも上昇傾向はほぼ同じである。なお、NASAだけでなく、日本の気象庁や英East Anglia大学の気候研究ユニットでも同様に陸上のみの情報を公開している）。

陸上の観測点のうちには、都市のヒートアイランド効果など、観測場所のローカルな環境の変化の影響

が大きいところもあることは確かである。したがって、全球平均地上気温を計算している各研究グループでは、ローカルな影響を受けた観測値を除外あるいは補正する努力をそれぞれ行なっている。また、Parker（2004）は、ヒートアイランド効果は風の強い夜には弱いにもかかわらず、温度上昇量は風の強い夜と風の弱い夜との間に大きな違いがないことから、温度上昇へのヒートアイランドの影響は小さいと評価した。なお、仮に、ローカルな影響が完全に除去しきれなかったとしても、全球平均気温にあたえる影響は小さい（Hansen *et al.* 2001；Peterson and Owen 2005）。また、大都市にあるからと言って、必ずしもその地点のデータが都市化の影響を受けているというわけではない（Peterson 2003）。

図1-2は夜間の衛星画像の合成図（都市化の度合いを視覚的に伝える図）である。まず、図1-1の27年間の温度変化傾向と図1-2の比較によって、ユーラシア大陸上などの大きな上昇トレンドが都市化とは無相関であることがわかる。また、全体的にも、これらの年だけではなく他の年でも相関性は見いだせないことなどから、温度上昇と都市化は無相関であると言える。温暖化が激しいのはむしろ都市化が進んでいない場所であり、このことは「都市化による全球気温のバイアス」が幻想であることを示している。

ところで、全地球の温暖化の指標は全球平均地上気温だけではない。地上から高さ約数kmまでの対流圏下層の気温にも（「議論4」の項参照）、海の深さ3kmま

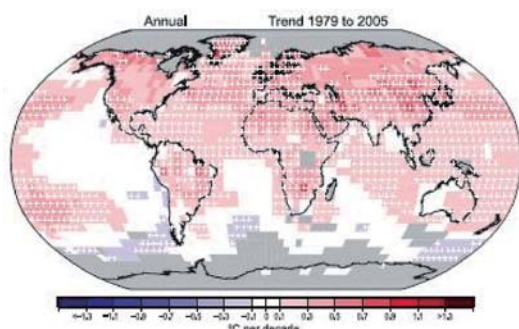


図1-1 全球的な温暖化傾向を示す観測結果
（出所：IPCC WGI AR4 Fig.3.9）



図1-2 夜間の衛星画像（2002年8月11日）
（出所：http://veimages.gsfc.nasa.gov/1438/earth_lights_lrg.jpg）

での蓄熱量にも (Levitus *et al.* 2009 ; Ishii and Kimoto 2009)、上昇傾向が見られる。これらが主にヒートアイランドなどのローカルな影響によるものでないことは明らかである。

なお、武田 (2008b) も、「事実、IPCCは、報告する地球温暖化のデータでは、「都市化による平均気温の上昇を除いていない」と言うことを公表している」と書いている (p.37)。しかし実際には、IPCC 報告書の中にこのような記述は存在しない。例えば、“A number of recent studies indicate that effects of urbanisation and land use change on the land-based temperature record are negligible (0.006°C per decade) as far as hemispheric- and continental-scale averages are concerned because the very real but local effects are avoided or accounted for in the data sets used.” (対応訳)「最近の多くの研究が示すように、半球規模や大陸規模でみる限り、(1950年以降の) 陸上気温の記録に、都市化や土地利用の変化が及ぼす効果は無視できる。なぜならば、実際にあるとはいえ局地的な効果は、用いられるデータセットの中で無効となるか補正の対象となってしまうからである」とある (IPCC WG1 AR4 Chapter 3, p.237)。したがって、前出のIPCCの記述に関する文章は創作だと思われる。

また、「温室効果ガスで気温が上がっているのは、日本でも世界でもせいぜい0.2℃程度ということになる」(武田2008c, p.73) と書いているが、これも誤った計算である。なぜなら、武田 (2008c) では、都市と田舎各1点のデータのみをもって、都市部の気温上昇が見られる一方で田舎では気温上昇が見られないと断言し、「あまり精度が高くないのに、細かい数値を提示するのは誠意がないので、ここでは「半分」と、何ら根拠なく、気温上昇量の半分以上を都市化の影響としているからである。実際には、(都市化の影響がほとんど含まれていない) IPCCで取り上げられている全球海水温の上昇量は0.67℃/100年 (1901~2005年) であり、「半分」と断言できる根拠はない。

さらに、武田 (2008c) では、赤祖父 (2008) の図 (その出典はKeigwin (1996)) を用いて、全体的に寒冷化の傾向がみられると言いながら、太陽活動の影響で0.3℃/100年の気温上昇が見られると根拠なしに断言している (かつ矛盾もしている)。

いずれにしろ、IPCCの全球の0.7℃上昇との値から、都市化の影響として半減させ、さらに太陽活動の影響として0.3℃を差し引き、「0.1~0.3℃ほど」の上昇量としているのは、武田が根拠なく勝手に行った計算に過ぎない。

証拠 2

ここ100年は、(日本の) 年平均気温は殆ど上がっていない (武田2008b, p.28)。田舎で観測すれば0.2℃の気温上昇しか起こらない (武田2008b, p.32)。

反論

2008年4月の段階で、武田 (2008b) が引用する近藤純正氏のホームページ上では、日本における平均気温の上昇率に関して0.2℃/100年としていた計算値を、再度検討し直した結果として0.67℃/100年に修正している。しかし、2008年10月に出版された武田 (2008b) では、恣意的に修正前の古い値を用い続けているようである。

また、武田は、日本における1990年代の急激な温度上昇を「バブル・ジャンプ」と呼び、この原因を日本の観測状況 (器差) などの特異性に帰している。しかし、海温データでも世界の気温データでも、この武田の言う「バブル・ジャンプ」が見られることから、日本の観測状況 (器差) に単純に起因するとは言いがたい。なお、これに関して気象庁の「異常気象レポート2005」では、1990年代のジャンプの要因を北極振動 (Arctic Oscillation: 北極と北半球中緯度地域の気圧が逆の傾向で変動する現象) の影響としている (http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/climate_change/2005/pdf/2005_2-2.pdf)。 (バブルジャンプという現象自体も、もともとは近藤氏が提唱したものである)

さらに、数点だけの気温上昇が見られない地点を殊更に取り上げる手法もミスリーディングである。

証拠 3

日本近海の水温も上がっていない (武田2008b, p.37-42; 武田2008c)。

反論

武田 (2008b, 2008c) では、日本の気象庁による「海面水温の長期変化傾向 (日本近海) http://www.data.kishou.go.jp/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html」のデータを用いて、日本近海の水温は上昇して

いないとしている。しかし、これには下記のような問題点がある。

第一に、気象庁の資料（図1-3）では、全13海域のうち、有意な上昇傾向が見られる9海域と、見られない4海域とがある。それにも関わらず、武田（2008b）では、「北海道から南下し、三陸沖、関東沖、愛知沖あたりまでは」と有意でない3海域のみを取り上げ、海水温に変化傾向が見られないとしている。

第二に、「四国・東海沖南部」に関して、「海の気温が上がっているのは、実は四国より南の海域である」（武田2008b）と同海域で海温が上昇していること自体は認めるものの、「日本全体の海の温度」とは言いがたい」（武田2008b）、と否定的に取り上げている。し

かし実際には、前述のように、日本近海の場合、安定してほぼ同様な上昇傾向が見られる海域の方が多い。

第三に、「日本海中部」に関して、戦前戦後のズレの原因を武田は単純に気温ジャンプに求めているが、これは前出の議論3証拠2で述べたように、北極振動の影響と考えられる。

第四に、武田（2008b）では、「気象庁が恣意的に、トレンドを示す回帰直線が引かれていないグラフを公開している」という主張が展開されている。しかし、気象庁ホームページには、「上昇率が『*』とあるものは、統計的に有意な長期変化傾向が見出せないことを示します。」ときちんと明記されている（図1-3参照）。したがって、批判はあたらない。

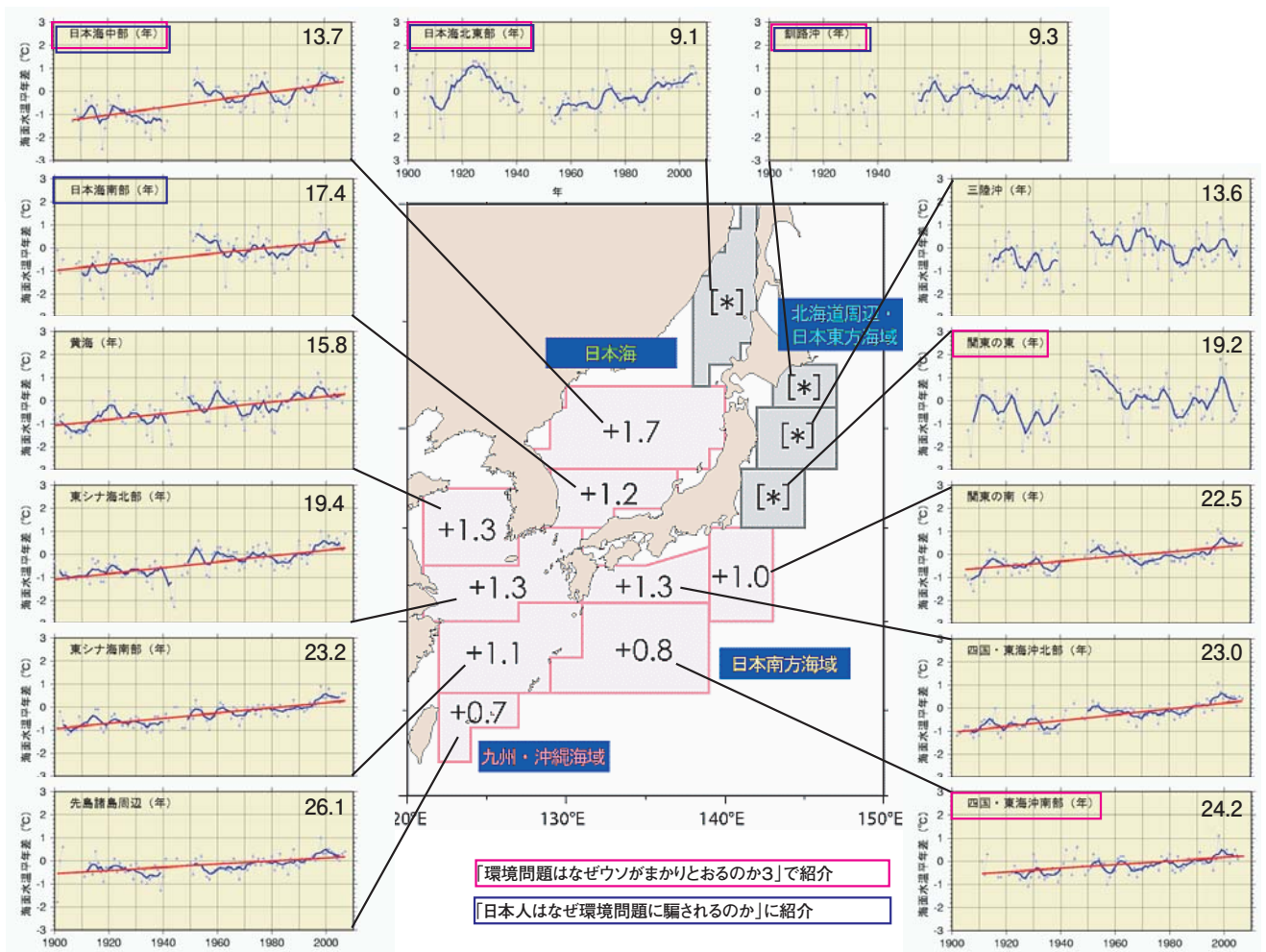


図1-3 海面水温の長期変化傾向（日本近海）

（出所：気象庁 http://www.data.kishou.go.jp/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.htmlを整理）

証拠 4

観測環境が劣化しており、系統的な温暖化傾向が出ていないと疑われる（伊藤2009；伊藤・渡辺 2008, p. 59-78）。

反論

観測環境の劣化は確かに問題である。しかし、世界平均気温の変化を計算する際には、周囲と大きく異なったり、大きな不連続があったりするなど明らかに不自然な時系列を示すデータは除去あるいは補正されている（たとえばPeterson *et al.* 1998）。また、地表面積の7割は海洋が占めるので、世界平均気温の変化には海上のデータの寄与の方がより大きい（ただし、海上データにも一部補正が必要）。以上から、観測環境の劣化が世界平均気温変化の推定に与える影響は限定的と考えられる。

証拠 5

気温が下がっている場所もある。南極圏の温度は50年間ずっと横ばいである（渡辺 2005；渡辺2006；武田 2007a）。

反論

世界を探せば気温が下がる傾向の場所もある。しかし、それらは局所的な自然変動によるものであり、それらを全て時間空間的に平均して得られる全体的な傾向として、20世紀の山岳氷河の大規模な後退や温暖化はほぼ確実な観測事実であって否定しようがない。

また、最近の研究結果では以下のようなことが明らかになっている（Knutson *et al.* 2006）

- 1) 過去100年間で寒冷化している地点は（十分なデータが存在する地点の）数%未満に過ぎない
- 2) 特に寒冷化傾向が顕著なのは米国南東部とグリーンランドの南東沖である
- 3) しかしモデルの長期変動における自然変動で検定すると、この両地域の寒冷化トレンドは有意でない
- 4) 長期変動における自然変動を用いた検定により、有意なトレンドと認められる地点はほぼすべて温暖化している

さらに、南極圏の気温は上昇していないのは、むしろ「南極圏の気温上昇は他の地域より遅れる」という専門家の予測と整合的であり、南極の周りの海域で深層との海水の混合が大きいことなどによると考えられる。いずれにしろ、一部の地域の現象（例：気温低下や降雪量の増大）をとりあげて地球全体で起きている傾向を否定する論法は、非常にミスリーディングなものである。



議論 4



衛星による観測データでは温度上昇が見られない（渡辺2005, p.92）。気象衛星NOAAの計測器のデータによる南半球の気温は、25年間変わっておらず、エルニーニョ現象がなかったら逆に微かに下がり気味である（渡辺2005, p.89；池田 2006）。

反論

ここでいう衛星による気温は、対流圏下層、つまり高さ約2kmを中心として数kmの厚さをもった層の平均気温である。地上気温（原則として地面・海面から高さ2mでの気温）と同じではない。対流圏下層気温は気球でも観測されている。

確かに、2000年ごろに得られていたデータでは対流圏下層気温にははっきりした上昇傾向がなかった。それは地上気温に上昇傾向があることと論理的に矛盾するものではないが、気候モデルによる予測計算とはくいちがっていた。

しかし、最近の研究（Mears 2005；Sherwood *et al.*

2005）で、衛星観測、気球観測それぞれの観測機器の誤差およびその補正手順を吟味して計算しなおした結果によれば、対流圏下層気温にも上昇傾向が見られる。これでモデルによる予測との矛盾はなくなった（Santer 2005；Hogan 2005；Karl *et al.*, 2006）。

すなわち、モデルによる予測が観測データ処理を訂正するきっかけをもたらしたわけである。しばしば批判されるように、気候モデル開発の過程では、観測データを参照してチューニング（調整）を行なわざるをえない。しかし、もしそれが無分別に結果の数値を観測値に合わせるようなものであったら、上記のような検証は起こりえなかっただろうし、気候モデルがこのような説得力を持つこともなかっただろう。



議論 5



2001年以降、気温上昇が止まっている（赤祖父2009）。

反論

1998年のエルニーニョによる異常高温などの自然の変動に対する認識不足が、このような誤解を生じさせる原因となっていると思われる。図2は、1977年から2007年までの観測された世界平均気温の変化を示す。火山噴火やエルニーニョ（東太平洋の赤道付近で海水の温度が上昇する自然現象）、ラニーニャ（エルニーニョとは反対で、同じ海域の海水の温度が下降する自然現象）などの自然変動に対応した気温変化率の変動があるものの、15年の変化率で見ると、近年に至

るまでほとんど同じ率で気温上昇が続いている。2007～2008年もラニーニャによる寒冷化が生じた。しかし、現在（2009年9月）、ラニーニャは終息しており、2009年7月の世界平均海面温度は史上最高を記録した。すなわち、短期の気温上昇傾向も回復する可能性は高い（ただし、ラニーニャは、再発の可能性もある。詳細は、次のURLにある気象庁のエルニーニョ監視情報を参照せよ。http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/el_nino/kanshi_joho/kanshi_joho1.html）。

（これに関しては議論10も参照のこと）

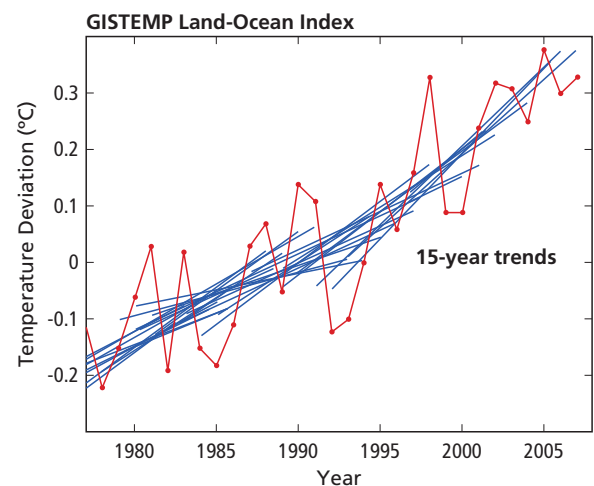
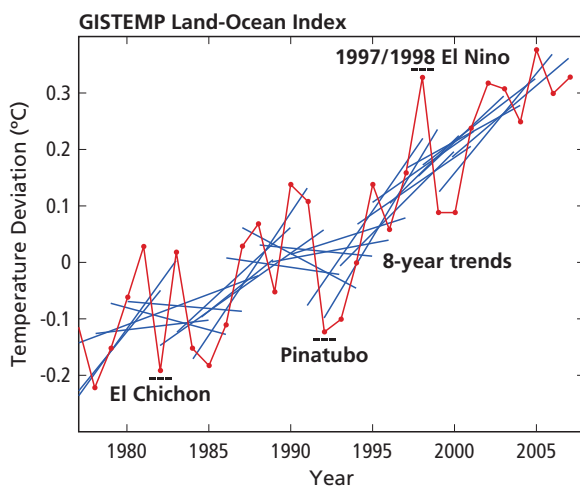


図2-1 1978年以降の温度変化状況
(出所：Schmidt and Rahmstorf (2008))

注) 赤が各年の年平均世界平均気温偏差の観測データ。左図の青線は8年トレンド、右図の青線は15年トレンドをそれぞれ示す。



議論 6



ホッケー・スティック論争で、Mannらは自分たちの復元推定計算結果の訂正記事を出した(渡辺2005, p.94)。IPCCは、第4次報告書でホッケー・スティック曲線を見放したことについて清算していない(伊藤 2009)。IPCCは古気候の変動を軽視している(赤祖父2008; 武田2008b)。

反論

ホッケー・スティック論争とは、過去1000年の範囲で20世紀に急激な温暖化が起きているか否かについての論争であり、Mann *et al.* (1998, 1999) により推定された北半球平均気温の復元曲線の形がホッケー・スティックのように見えることからこの名前がついた。彼らの復元推定曲線はその代表例としてIPCC第三次報告書(2001)にも掲載されており、20世紀が過去1000年間で際立って温暖であることを示す重要な論拠とされた。その後、Mannらは1998年の論文に対する訂正記事(Mann *et al.* 2004)をNature誌に提出したが、これは利用可能であったデータのうちどれを実際に採用したかの記述に間違いがあったというものであり、論文の結果には変更がないと明言している。すなわち、彼ら自身が過去の論文の結論の誤りを認めたものでは決してない。したがって、渡辺(2005)の「悔しきまぎれの捨てぜりふ」という形容は事実と反している。なお、Mannらの復元推定に関する論争はこの他にもいくつかあり、増田(2005)が整理を試みている。

IPCC第三次報告書以降、過去1000~2000年間の気温の復元推定は他の研究グループによっても数多く行なわれてきており、Mannらも2008年に新しい論文を出している。IPCC第4次報告書(2007)には、IPCC第三次報告書に掲載されたものも含め、11種の復元結果が掲載されている(WG1第6章の図6.10)。その中にはMannら(1999)の曲線も含まれている。さらに、ホッケー・スティック論争とその後の研究群の整理にも相当の紙面が割かれている(第6章、p.466-474)。

また、懐疑論では無視されているが、第三次報告書に掲載されたMannら(1999)の最良推定値には、 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ほどの大きな誤差範囲がつけられている。第4次報告書に掲載された復元結果には、中世から産業革命以前の気温変動が大きいものも多いが、それらもMannら(1999)の復元結果の誤差範囲に含まれている。つまり、Mannら(1999)の結果は誤差範囲を考慮すればそれ

以後の研究に照らして外れてはいない。

ただし、最近の古気温復元結果では誤差範囲が小さくなってきている。つまり、最近の古気温復元精度の向上により、これまでは誤差に埋もれていた変動が見えてきたということである。

学問の進展とともに最新の知見を代表する論文は移りかわってゆく。IPCCがMannら(1999)の論文を重視しなくなったのもその当然の反映である。新しい論文が直接的に古い論文を根拠としていない限り、科学論争は新しい論文を材料としてすればよいので、古い論文に関する論争の「清算」を求める必要はない。

なお、これまでの研究結果を総合してみると、1000年間の前半の気候復元のばらつきはまだ大きいものの、20世紀後半以降の気温が際立って高いことは共通している(National Research Council, 2006)。

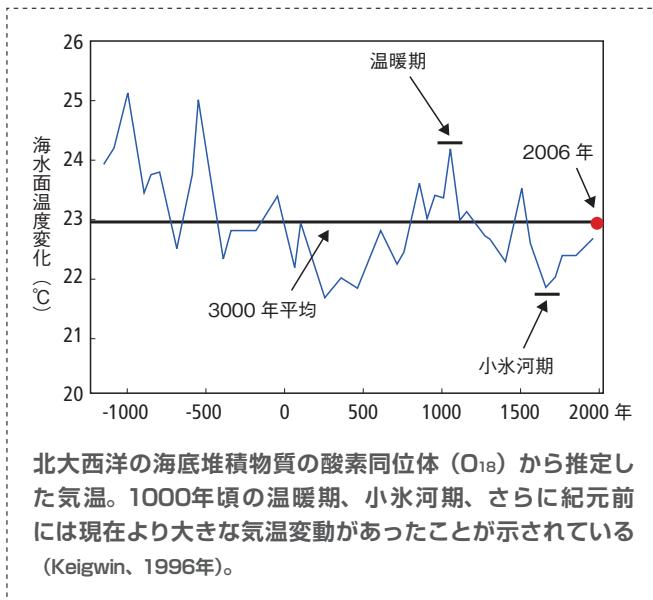
懐疑論の中には、IPCCで行われてきた論議の過程を踏まえていないか、あるいは、無視しているものが見受けられる。赤祖父(2008)では、IPCCはホッケー・スティック曲線を重視したいがために、古気候の変動を軽視したかのように述べられている。

赤祖父(2008)や武田(2008b; S. Akasofu, Feb.27,2008と引用表記)が示す図の中の 하나가、Keigwin(1996)のものとされる図である。実際のKeigwin(1996)では、北大西洋のサルガッソー海海面水温の変化を海底堆積物のデータから推定している。つまり、半球や全球を代表するものではなく、特定の海域の古環境復元である。そして、同じ著者らによるKeigwin and Pickart(1999)によれば、北大西洋のさらに高緯度の海域のデータはこの図とは逆の変動を示しており、これらの変動は北大西洋の海流の自然変動によるものと考えられている。IPCC第3次評価報告書(WG1,Chapter2, p.135-136)においても、これら2つの研究を引用して論議しており、その上で、地域的な気温変化推定の一例であるKeigwin(1996)やKeigwin and Pickart(1999)ではなく、北半球の平均気温を誤差幅付きで推定したMann *et al.* (1999)を代

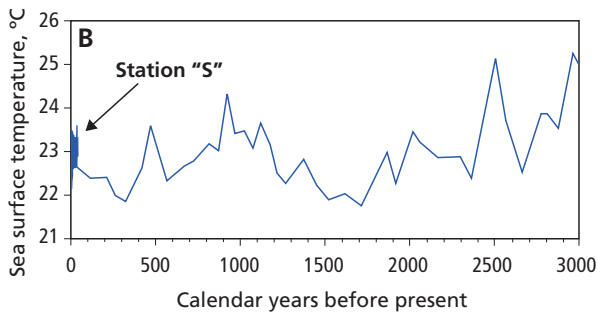
表的な図として扱っている。

なお、赤祖父 (2008) や武田 (2008b) が示す図では、Keigwin (1996) の原論文の図にある “Calendar years before present” が西暦1950年を基点としている

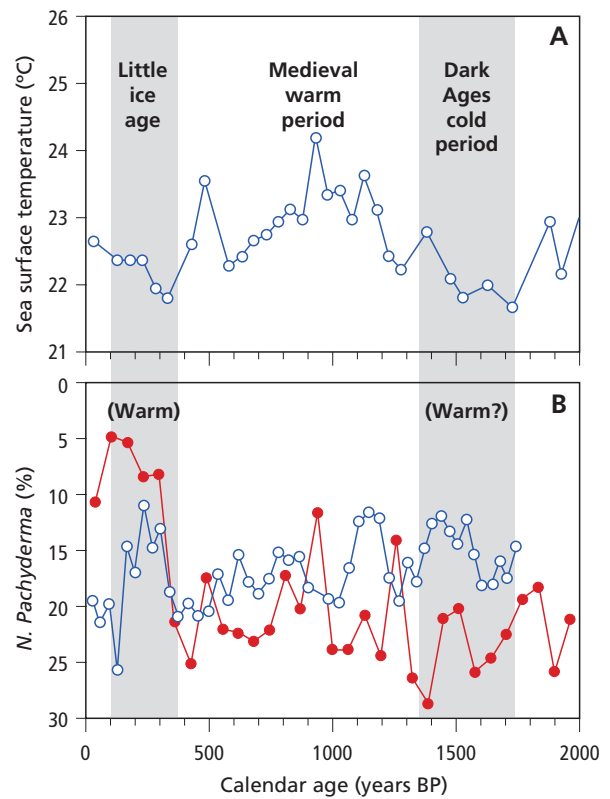
ことを考慮していないので、時間軸がずれている。また、2006年の温度を示す点も原図になく、時間軸について誤解したまま付け加えられた不適切な値である。



上：赤祖父 (2008) に示されているKeigwin (1996) とされる図。武田 (2008b) の図もほぼ同様。恐らく O_{18} は ^{18}O の間違い。また、海水温を気温としているのもおかしい。



実際のKeigwin (1996) のFig.4



Keigwin and Pickart (1999) のFig.4
(但しAはKeigwin (1996) と同じ。Bは北緯43度の2地点での寒冷指標となる有孔虫の比率)

図2-2 赤祖父 (2008) の図4.11とその原論文の図

3.2. 過去および現在の 気候変化の原因に関する議論

人為起源の温室効果気体濃度の増加は気候変化の唯一の要因ではない。しかし、20世紀の全球平均地上気温の上昇の大部分を説明する要因である。一方、対立仮説としては、太陽などの地球外部の原因、火山あるいは人為起源のエロゾル（気体中に浮遊する微小な液体または固体の粒子）、気候システム（大気・海洋・雪氷など）の内部変動、などがあるが、このいずれによっても、気温上昇を説明することは困難である。なお、地域別の気候変化にとっては、温室効果ガスの増加は、必ずしも変化の大部分を説明するわけではない。しかし、温室効果ガス増加という要因を入れた過去の気候変化シミュレーションの結果は、その不確かさの幅の内で観測事実と矛盾しない。



議論 7



人為的排出二酸化炭素温暖化説によれば、二酸化炭素の大気中濃度上昇によって、平均気温は単調に上昇傾向を示し、その上昇率は近年に近づくほど大きくなる。しかし実際に観測された平均気温の変動はこれとは異なった傾向を見せている。例えば、第二次世界大戦前後の大気中二酸化炭素濃度上昇率が大きくなった時期に、逆に低温化傾向を示している（近藤 2006；Durkin 2007；赤祖父2008；赤祖父2009）。

反論

地球の平均気温は二酸化炭素濃度に見合った平衡状態に達しているわけではなく、気温変化には様々な因子がある。すなわち、太陽活動や火山といった自然起源因子もあり、メタンやフロンなどの二酸化炭素以外の温室効果ガスも人為活動により増加している。これらと二酸化炭素とが合わさって20世紀の気温上昇の原因となっている（二酸化炭素だけが原因とは、人為的排出二酸化炭素温暖化説をとる研究者の誰も言っていない）。したがって、気温と二酸化炭素濃度がぴったり対応しないのは必ずしも不思議なことではない。第二次世界大戦前後の大気中の二酸化炭素濃度の上昇率が大きくなった時期は、火山噴火などの自然要因（Wigley *et al.* 1997）と人為起源エーロゾルの冷却効果（Tett *et al.* 2002；Nagashima *et al.* 2006）が温暖化を打ち消していたという説が有力であり、同時に気候の内部

変動という説もある（Andronova and Schlesinger 2000；Knight *et al.* 2005）。

このような過去の事象は、気候モデルによる20世紀の再現実験によってある程度示すことができる。例えば、仮に二酸化炭素やエーロゾルなどの人為起源物質の増加が無いという条件でシ

ミュレーションを行うと、（自然の変動要因と気候の内部変動だけでは）20世紀後半の気温上昇の大きさは再現できない（図3）。これらは、20世紀後半においては、二酸化炭素が「原因」で温度が「結果」であることを強く示唆している。

なお、気候変動を予測する気候モデルは、まず過去および現在の事象（例：様々な要因による温度変化）を事後的にうまく再現できるかどうかによって検証される。また、このような検証を経て淘汰されてきた最新の気候モデルは、例えば温度上昇の地域差などかなり正確に再現している。

実は、前述のように、長い間、モデルが予想する地球上空の温度上昇と気象衛星および気球によるデータによる温度観測のずれが問題となっていた。しかし、最新の知見では、衛星データなどの方に（補正の）誤りがあったことが明らかになっている（本稿の議論4を参照）。すなわち、前にも述べたように、結果的にモデルの予測が現実の観測の誤りを指摘したことになり、この事はモデルの結果を現実の数字に近づけるようなチューニング（調整）が無分別にはなされてはいないということの間接的証明にもなっている。さらに、気候学者は、気候モデルを用いて1991年に起きたフィリピンのピナツボ火山噴火後の気温低下を噴火直後に予測することにも成功した。すなわち、限られた数の事象のみではあるものの、過去だけでなく将来予測に関してもモデルは一定の検証を受けている。

ただし、現時点でモデルの検証が「十分」であるかは誰にも判断できない。今後もモデルと観測データの不一致に対して、モデルを改良するか、観測データの解釈を再検討するかという営みが不断に続くのであるが、それは真つ当な「科学」の営みに他ならない。重要な点は、世界中で独立に開発された多くのモデルがこのような不断の検証を受け続けており、現時点でその全てが将来の温暖化傾向を予測していることである。

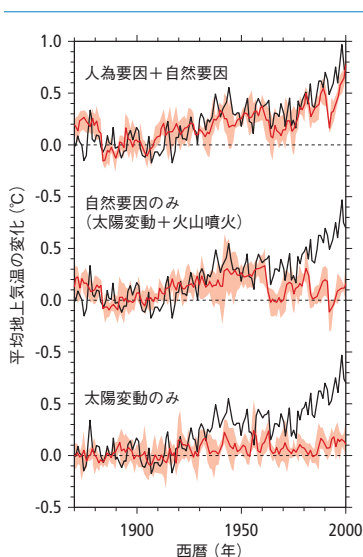


図3 気候モデルによるシミュレーション結果
（出所：Shiogama *et al.* (2006) を改変）



議論 8



最近の温暖化は主に太陽活動の影響である。

証拠 1

過去においては太陽活動のレベルを示す黒点数と温度との相関関係が観られる（池田 2006；近藤 2006；伊藤・渡辺2008, p.145-154）。

反論

確かに過去の気候変動においては太陽活動が大きな影響を与えていると考えられ、IPCC AR4も、過去における太陽活動の影響を否定してはいない。図4-1は過去の太陽放射量の経年変化を示すが、この図が示すように、重要なポイントは、20世紀後半においては太陽活動が活発化する傾向は見られず、20世紀後半の

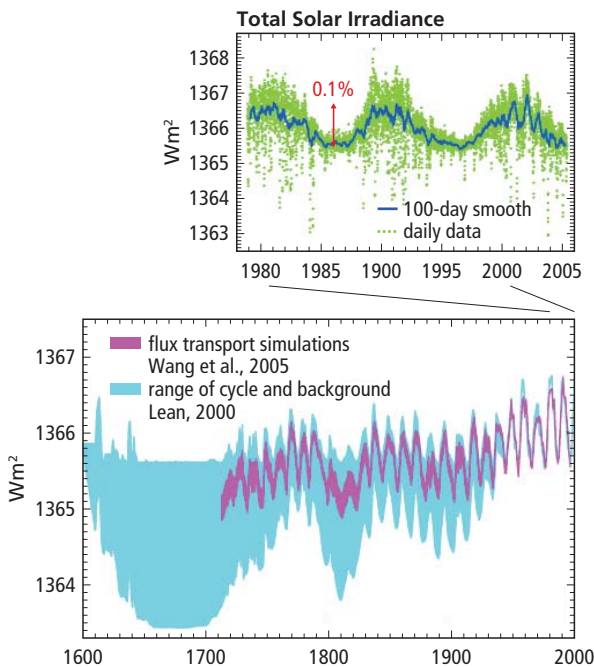


図4-1 太陽活動の大きさの推移
(出所：Lean (2006))

注) 上の方の図は、Fröhlich and Lean (2004) による太陽放射量の観測結果を示す。下の方の図では、水色の陰影部がLean (2000) によって再構築された過去の太陽放射量の変化であり、11年の移動平均を示している。もう一つのピンク色の折れ線グラフは、Wang *et al.* (2005) によるシミュレーション結果である。これらから、20世紀後半においては太陽活動が活発化する傾向が見られないことが分かる。

急激な温暖化は太陽活動では説明できないことである (Solanki and Krivova 2003；Foukal *et al.* 2006)。

このことは気候モデルを用いたシミュレーションでも示唆されている（前出の図3）。なお、最近では衛星観測以前の太陽放射量経年変化の推定に関して、11年周期よりも長期の変化は過大評価であるという考えが強まっており (Lean *et al.* 2002；Wang *et al.* 2005)、実際には太陽活動が気候に及ぼす影響はさらに小さい可能性がある。

なお、Solanki *et al.* (2004) は最近太陽活動が異常に強くなっていると述べているが、Muscheler *et al.* (2005) はとくに異常なレベルではないと反論している。ただし、太陽活動が地球温暖化の主要な要因ではないという点については、これらは同じ見解が述べられている。太陽活動の影響に関しては、詳細な総説としてはGray *et al.* (2005) を参照せよ。

証拠 2

宇宙線の量と温度との相関関係が観られる（伊藤 2003；伊藤・渡辺2008, p.154-155；丸山 2008a；丸山2008b；丸山2009）。

反論

宇宙線が雲の形成に影響をおよぼし、それが20世紀後半の気温の上昇につながっているという理論は、しばしば人為的排出二酸化炭素温暖化説を批判する材料として用いられる。しかし、宇宙線と雲の形成との因果関係に関しては、1) 理論的な証明が不十分である、2) 宇宙線の量に関して、(雲の形成による温度上昇を説明するのに必要な) 長期的傾向が見られない、3) この説の提唱者である論文の計算自体に問題がある、なども指摘されている (Damon and Laut 2004)。

また、1) 宇宙線と相関が高いとされる下層雲量は衛星の赤外バンドのみから求めたものであり、そもそも赤外のみから求めた下層雲量は現実の雲量のよい指標でない、2) 可視＋赤外から求めた下層雲量（現実との対応がよい）と宇宙線との相関は悪い、3) 赤外のみから求めた下層雲量と宇宙線の相関もデータを1994年以

降に延長すると相関が悪くなる、などが明らかになっている（図4-2）。

さらに、1994年以降の衛星データ処理に問題があるという指摘もなされたが、その可能性が低いことを示す研究結果も発表されている（Sun and Bradley 2004）。

したがって、研究者の間では、宇宙線の量と温度との相関関係は信頼性がそれほど高くない一つの仮説にとどまっている。

なお、最新の総説としてVerheggen（2009）がある。そこで論じられているPierce and Adams（2009）の雲微物理の数値モデルによる研究によれば、宇宙線の量を20世紀にあった程度に変化させた結果生じる雲凝結核の数の違いは、0.1%程度にすぎなかった。

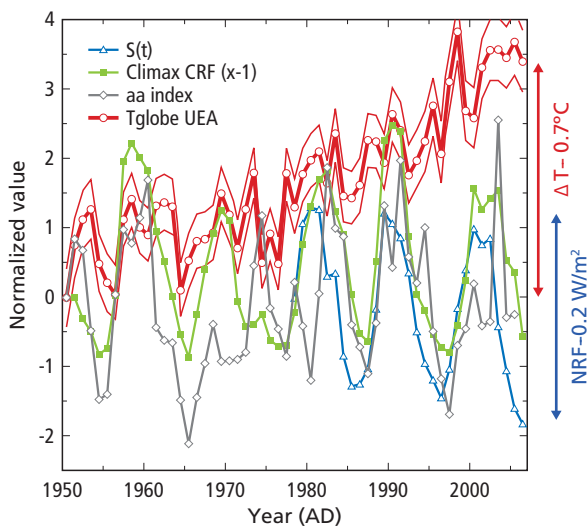


図4-2 太陽活動に関する3種類の指標と
全球平均地上気温との比較
(出所：Bard and Delaygu（2008）)

注）青色は太陽放射量、緑色は宇宙線照射量（他の指標との比較を容易にするため符号が反転されている）、灰色は太陽磁気活動の指標（aaインデックス）、赤色は全球平均地上気温（細い赤線は95%の信頼区間）。1950年以降、全球平均地上気温には顕著な上昇傾向が見られるが、太陽活動に関する指標にはそのような傾向は見られない（ただし、太陽放射量のデータは1978年以降）。縦軸は規格化された数値であるが、図の右側には全球平均地上気温の変化（ ΔT ）と太陽放射量に関する正味放射強制力（NRF）の変動幅が示されている。



議論 9



過去約2000年間の気温変動に比べれば、過去約100年間の温暖化は異常なものではない。(丸山 2008b)。

反論

丸山 (2008b, p.183-186) は、1 個体の屋久杉の年輪から得られた安定炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) のデータを全球平均気温の指標として独自に解釈することにより、地球の気候が太陽活動や宇宙線照射量に連動していると主張し、過去100年程度の地球温暖化の傾向が「異常」ではないと結論づけている。丸山が用いた $\delta^{13}\text{C}$ データは Kitagawa and Matsumoto (1995) によるものの、この解釈自体はまったく丸山氏独自のものである。

しかし、まずこの屋久杉は1970年に伐採されたものである (Kitagawa and Matsumoto 1995) ため、そもそも近年の急激な温暖化傾向について論じる目的には使えない。また、1970年以前のデータに関しても、1) 1 個体の屋久杉が大気中 CO_2 の $\delta^{13}\text{C}$ の変動を記録しているか、2) 大気中 CO_2 の $\delta^{13}\text{C}$ は全球平均気温を反映して上下するか、という 2 つの問題に答えないかぎり、

上記のような丸山氏独自の解釈にもとづいた議論は成立しない。以下では、この 2 つの問題について詳しく検証する。

問題1：屋久杉は、大気中 CO_2 の $\delta^{13}\text{C}$ の変動を記録しているか？

実測される以前の大気中 CO_2 を最も正確に保存しているものは、過去の空気を閉じこめた氷床である。図5に示すように、南極氷床コアの分析結果によれば、西暦1200～1800年における大気中 CO_2 の $\delta^{13}\text{C}$ 変動の振幅は 0.3パーミル程度である (Francey *et al.* 1999)。これに比べて、Kitagawa and Matsumoto (1995) が分析した屋久杉 1 個体の年輪における $\delta^{13}\text{C}$ の変動幅は 1.5パーミル程度と、大気 CO_2 の変動よりはるかに大きい (なお、日本地球惑星科学連合大会2008年5月28日の丸山氏の講演要旨では、 ± 3 パーミルの変動である [変動幅は 6 パーミル] という誤った数値が述べられて

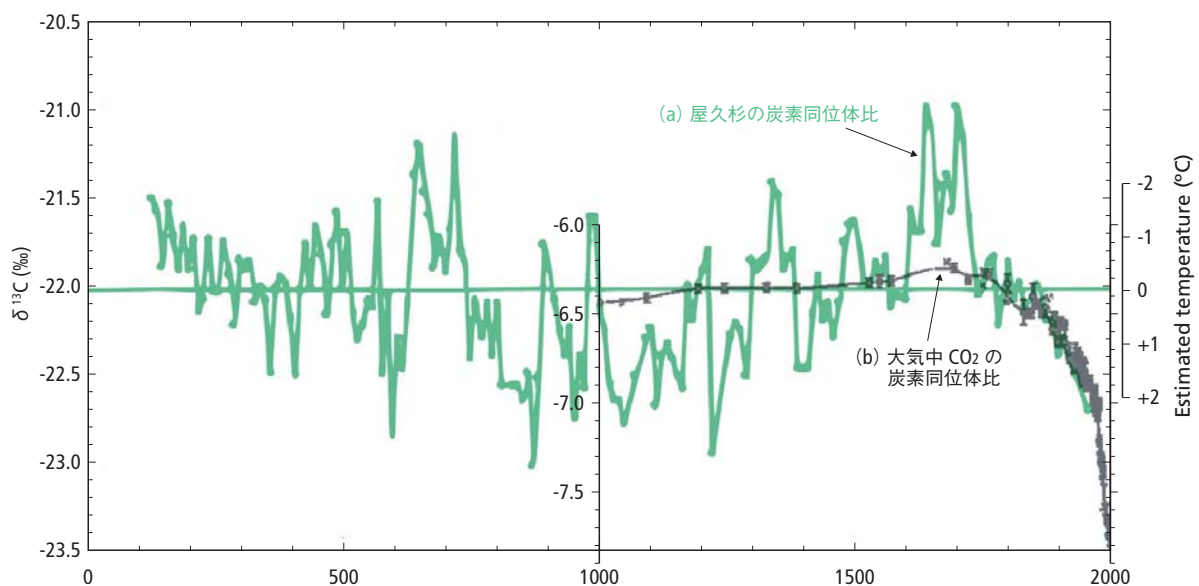


図5 屋久杉（緑線）と大気中 CO_2 （黒線）の安定炭素同位体比の比較

注) 横軸は西暦年。(a)の緑線は、Kitagawa and Matsumoto (1995) によって分析された屋久杉1個体の年輪における $\delta^{13}\text{C}$ の推移を示している。図の右側には、気温の指標と見なすことによる温度偏差の目盛りが付加されているが、これは屋久島における産業革命以前の気温変動を推定したものであり、全球平均気温の変動を示すものではない。(b)の黒線は、南極氷床コアの分析による過去1000年間の大気中 CO_2 の $\delta^{13}\text{C}$ (Francey *et al.* 1999)。産業革命以降は、人為起源の ($\delta^{13}\text{C}$ が低い) CO_2 放出により、大気中 CO_2 の $\delta^{13}\text{C}$ が急速に低下してきていることが明らかであり、屋久杉の $\delta^{13}\text{C}$ にもこれと同様の変化が見られる。

いる)。すなわち、少なくともこの個体に関しては、大気CO₂の変動とは異なる、その木が育った環境からの影響が圧倒的に大きいことが明らかである。また、古気候学の常識的に考えても、1本の樹木年輪のデータから全球的な変動を再現することは不可能である。

問題2：大気中CO₂の $\delta^{13}\text{C}$ は、全球平均気温を反映して上下するか？

丸山(2008b)は、気温が上昇すれば植物の光合成が活発になり、それにともなって $\delta^{13}\text{C}$ は上昇する(気温が低下すれば $\delta^{13}\text{C}$ も低下する)と主張している。その根拠として、植物に含まれる炭素は $\delta^{13}\text{C}$ が低いため、植物バイオマスが増えると大気中に残されるCO₂については $\delta^{13}\text{C}$ が上昇すると考えられる、と主張している。しかし、大気中CO₂の $\delta^{13}\text{C}$ が全球平均気温と連動する(正の相関を持つ)というのは仮説にすぎず、その真偽については検証する必要がある。これまでの研究によれば、考慮する時間スケール(あるいは主要な役割を果たす過程)の違いにより、大気CO₂の $\delta^{13}\text{C}$ と全球的な気温との相関は異なることが明らかになっている。したがって、時間スケールによっては符号が逆にもなり得る。両者の間に単純な相関を仮定するのは不適切である。

数年～数百年スケールでは、全球的な寒冷化が起これると、陸上植物のバイオマス量が減少する効果よりも、土壌中の微生物の呼吸や有機物の分解が抑えられる効果が勝ると考えられ、陸上生物圏全体では正味でCO₂を吸収することになる(Trudinger *et al.* 1999; Jones and Cox 2001; Lucht *et al.* 2002)。その結果、大気中CO₂の $\delta^{13}\text{C}$ は上昇するため、丸山の仮説とは変化の方向が逆になる。

一方、約18000年前から約11000年前にかけて(氷期から間氷期への移行期にほぼ相当)、全球規模で急激な温暖化が起これ、大気中CO₂濃度は上昇したが、同時に大気中CO₂の $\delta^{13}\text{C}$ も上昇した(Smith *et al.* 1999)。この期間では、全球平均気温と連動して $\delta^{13}\text{C}$ が上昇したことになるが、陸上生物圏だけではなく海洋も重要な役割を果たしていたと考えられる。

さらに重要なことに、産業革命以降においては、($\delta^{13}\text{C}$ が低い)化石燃料等の人為起源のCO₂が大気に加わったことにより、大気中の $\delta^{13}\text{C}$ が大きく低下してきている(図5)。このような変化は屋久杉の $\delta^{13}\text{C}$ にも反映されており(Kitagawa and Matsumoto 1995)、これを気温変動の指標であるとする解釈は完全な誤りである。

以上より、丸山(2008b)の独自の解釈(「1個体の

屋久杉の年輪から得られた $\delta^{13}\text{C}$ データは全球気温平均の指標である」)自体に何重もの誤りが含まれており、この誤った解釈に基づいた様々な主張は当然成り立たない。



議論 10

最近の温暖化は自然変動にすぎない（赤祖父 2008；赤祖父2009）。

ここでは、主に江守（2009）に基づいて、まず自然変動に関する全体的な反論を述べ、次に個別の論点について反論する。

【全体的な反論コメント】

自然変動といっても、「自然起源の強制力への応答」（太陽活動変動や火山噴火への応答）と「気候システムの自励的な内部変動」（エルニーニョ南方振動、北極振動など）を区別する必要がある。赤祖父（2009）で述べられている自然変動は、1)上のどちらにあたるか、2)前者であれば強制力は何か、3)後者であればどのような構造の内部変動か、などが明確にされていないので、次に紹介するIPCCの解釈の対立仮説として科学的に評価することがむずかしい。

IPCCが20世紀後半以降の温暖化の大部分が人為起源である可能性が非常に高いと結論した主な根拠は、自然起源強制力のみを与えた気候モデル計算では観測された気温上昇が再現できず、人為起源強制力も与えると再現できるということである。この際、内部変動の不確実性、強制力（特にエアロゾルの効果）の不確実性、気候モデル（気候感度）の不確実性が当然ありうるものの、人為起源強制力を与えた場合は不確実性の範囲内で観測と整合的であり、自然起源のみの場合は不確実性を考慮しても観測と整合的でない、という点が重要である。現時点においては、他の仮説にこのような定量的な整合性を客観的に議論できるものは存在しない。

【個別の論点に対する反論コメント】

証拠 1

過去の温暖化の大部分は小氷河期（14世紀半ばから19世紀半ばにかけて続いた寒冷な期間）からの回復であり、IPCCはこれを無視している。小氷河期の原因はまだ誰にもわからない（赤祖父 2008;赤祖父 2009）。

反論

IPCC報告書（WG1 AR4, 9.3.3節）には、小氷期（赤祖父氏のいう小氷河期）を含む過去700年の北半球の気

温変化を太陽・火山等の外部強制力によって整合的に説明できることが示されている。もちろん、これは過去の気温および強制力の復元には大きな不確実性があり、その幅の中で整合的であるという意味である。しかし、20世紀後半の気温上昇は、不確実性を考慮しても、温室効果ガスの増加がないと説明できないのである。

もし小氷期からの回復の原因がわからないとするならば、その要因が20世紀後半も続いていると考える根拠は薄弱である。またその原因を太陽あるいは火山と推測するとすれば、20世紀後半にはその変化傾向は観測されていない（太陽については議論8の反論参照）。

証拠 2

IPCCでは20世紀前半の温暖化とその後の寒冷化が考察されていない（赤祖父 2009）。

反論

前述のように、IPCC報告書（WG1 AR4, FAQ9.2）には、自然および人為の強制力を与えた気候モデル計算により、1940年代の海上のピークを除いて、観測された気温変化を再現できることが示されている。

また、1940年代の海上のピークについては、海面水温の観測方法の変化による人為的なものであることが最近指摘されている（Thompson *et al.* 2008）。

したがって、この問題が補正されると、1940年代のピークは今まで考えられていたより小さくなり、気候モデルの結果に近づくことになる。（ただし、以上の説明は以下に述べるPDOなどの自然変動の存在を否定するものではない）。

なお、20世紀前半の温暖化についてまだ不明な点があるのは確かだが、過去にさかのぼるほど気温変化も強制力もデータの不確実性が大きくなるので、20世紀前半の温暖化が解明されなければ後半の説明もできないとはいえない。

証拠 3

IPCCはPDOなどの準周期変動を無視している。準周期変動の原因はまだ誰にもわからないので気候モデルに教えることができない（赤祖父 2008；赤祖父 2009）。

反論

IPCC報告書で将来予測に用いられている気候モデルは、PDOなどのいくつかの自然変動を再現することができている（IPCC WG1 AR4, 8.4.2節）。PDOは内部変動モードなので、これを再現するためにモデルに「原因」、すなわち外部強制力を教える必要はない。大気と海洋の方程式を素直に解けば、PDOは勝手に現れる。ただし強制されたものではないため、その位相（いつ正になっていつ負になるか）は予測できない。PDOは「カオス的である」と言われるが、それは、初期条件が少し違うだけでPDOの位相が大きく違うことがあることをさしている。

注）PDOは、Pacific Decadal Oscillation（太平洋十年規模振動）の略で、大気と海洋が結びついて起こる気候の内部変動である。十年規模・数十年規模振動（decadal/multidecadal oscillation）と呼ばれるものの1つであり、十年から数十年の周期を持つ。他の十年規模・数十年規模振動には、大西洋数十年振動（Atlantic Multidecadal Oscillation：AMO）がある。

証拠 4

近年、世界平均気温は低下しているので、気温上昇というIPCCの予測はすでに外れている（赤祖父 2009）。

反論

近年10年程度だけに注目すると世界平均気温が上昇していないように見えるのは確かである（本稿議論5を参照のこと）。そして、その原因としてPDOが関係している可能性があるという指摘ももっともである。しかし、上（証拠3の反論）に述べたように、IPCCに採用された予測計算ではPDOの位相を再現できないのは当然であり、その部分に注目してIPCCの予測が外れたという批判は的外れである。

PDOはカオス的な内部変動であるため、気候モデル計算の結果のPDOの位相はまちまちである。多数の計

算の平均をとると、内部変動は互いに打ち消されて、温暖化によるほぼまっすぐなトレンドが残る。この平均化されたものを評価するには、現実のデータも内部変動を消した形で見るべきである（現実には1つしかないので時間軸上で移動平均するくらいしか手段がないが）。

証拠 5

IPCCは100年間で6℃上昇するとしている。それならば、10年間で0.6℃上昇していないとおかしい（赤祖父 2009）。

反論

IPCC AR4の100年間の予測計算の結果は、排出量シナリオによる幅と気候モデルによる幅をもっている（江守 2008の4章1節を参照せよ）。また、6℃というのは排出量が大きいシナリオと感度の大きめの気候モデルの組み合わせで出てくる値である。ちなみに、近未来の気温上昇について、IPCCでは10年間で平均0.2℃のペースと予測している（AR4 WG1, TS.5.1）。

証拠 6

IPCCでは、大気中水蒸気量はモニターされていない（赤祖父 2009）。

反論

IPCC WG1 AR4では3.4.2節で大気中水蒸気量の変化のレビューがされている。その後、1987年以後の全球海上の水蒸気量の変化傾向が人為的な温暖化のモデル計算と整合的であることを示した研究もある（Santer et al. 2007）。

証拠 7

IPCCが水の影響を無視している（武田2008b, p.72）

反論

武田（2008b）では、IPCCは水蒸気の効果、水の循環、雲の効果などが考慮されていないという意味の説明があるが、実際には、それらをすべて考慮している。気象庁（2007）「IPCC 第4次評価報告書 第1作業部会報告書概要及びよくある質問と回答」を参照のこと。 



議論 11



20世紀の間に、グローバル・ディミング（地球暗化）と呼ばれる現象が起きている。これは地上に達する太陽放射の減少であり、原因は硫酸エアロゾルと考えられている。この硫酸エアロゾルは、人為起源の温室効果ガスによる温暖化よりも大きな寒冷化をもたらしているはずである。もし、それにもかかわらず気温が上昇しているのならば、温室効果ガス以外にそれよりも大きな温暖化をもたらす要因が働いているはずである（伊藤2005；伊藤・渡辺2008, p.127-130）。

反論

20世紀後半で日射が減少傾向にあるという観測事実から気温低下をもたらすと考えられているグローバル・ディミングに関しては、1) 観測された日射の減少は、全球的な現象ではなく、局地的または地域的な現象である（Alpert *et al.* 2005）、2) 日射の観測値は1985年頃を境に減少傾向から増加傾向に転じており、先進国で大気汚染物質の排出規制が始まった時期と合致す

る（Wild *et al.* 2005）、などの研究結果が出ている。したがって、グローバル・ディミングの効果は、今まで議論されてきているエアロゾルの効果でほとんど説明できると考えられる。なお、近年の温暖化の議論や実際のモデル計算では、エアロゾルや対流圏オゾンの影響は、二酸化炭素と並んでその効果がすでに定量的に考慮されており、その大きさも、二酸化炭素による温暖化を打ち消すようなものではない。





議論 12



大気汚染が温暖化の原因となっている可能性がある（槌田2005b；槌田2006）。

反論

大気汚染物質であるエアロゾルの気候影響は種類によって異なる。エアロゾルは、それ自身が太陽光を散乱・反射するだけでなく、雲凝結核となって雲のアルベドや寿命を変化させ、地上気温を下げる効果を持つ。一方、煤のように太陽光をよく吸収するエアロゾルは、空気を暖め、場合によっては地上気温を高める。また、雪氷面などに付着して地表面アルベドを変化させることにより、地上付近の大気を暖める。しかし、地上気温を高めるこれらの効果は、硫酸液滴などのエアロゾルによる

冷却効果と比べて数分の一程度であると考えられている（Hansen *et al.* 2005b）。また、エアロゾルが重要だからといって、二酸化炭素などの気体成分が重要でないわけではなく、両方の効果は共存している。気候モデルのシミュレーションによれば、20世紀後半の地上気温経年変化は、第1に二酸化炭素などの気体成分、第2に（大気汚染による）硫酸液滴のようなエアロゾルを考慮するとよく説明できる（Tett *et al.* 2002）。煤や土壌粒子などのエアロゾルの効果はそれらに比べれば副次的と思われる。





議論 13



「世界気象機関が異常気象と温暖化は無関係と言っている」（武田2008b, p. 80）

証拠 1

「国連機関は、最近の異常気象と温暖化は関係ないと言っている（武田 2008b, p.80）。

反論

武田（2008b）では、AFP通信（2007）による、世界気象機関（WMO）が近年の異常気象は「気候変動によ

るものではなく、単に頻度が増しているだけ」であるとした記事を取り上げ、IPCCと異なる国連機関がIPCCと異なる見解を発表したとして紹介している。

しかし、実際のWMOのプレスリリース（World Meteorological Organization, 2007）では、AFP通信（2007）の記述と異なり、過去50年の異常気象の増加に関する記述はIPCCの報告書そのものであり、全体的にもIPCCの報告に沿った内容である。なお、WMOはIPCCの組織母体の一つである。



3.3. 炭素循環に関する議論

化石燃料の燃焼によって排出された二酸化炭素の半分以上が大気中にとどまっており、それが20世紀に起きた大気中の二酸化炭素濃度の増加の主要な原因である。今後も、化石燃料を使い続ける限りは、大気中にとどまる比率は変わるかもしれないものの、ほぼ同じことが続くはずである。したがって、約100年の時間スケールの大気中の二酸化炭素の変化を、ここでとりあげる懐疑論のように、気温・水温の上昇の結果として、あるいはその他の自然要因によって説明することは困難である。



議論 14



二酸化炭素の温室効果による地球温暖化はなく、気温上昇が二酸化炭素濃度上昇の原因である（槌田2005b；槌田2006；近藤 2006；槌田 2007）。

証拠 1

例えば、Keeling *et al.* (1989) のグラフ（図6）によると、気温の変化は二酸化炭素濃度の変化よりも半年早く現れる（槌田2005；槌田2006；槌田 2007；伊藤2007；武田 2008b；伊藤 2009）。

反論

図6は、Keeling *et al.* (1989) による一つのグラフを根本（1994）が日本に紹介したもののだが、この図をもって二酸化炭素の変動が常に気温に追従すると考えるのは拡大解釈である。なぜならば、このグラフは、キーリングが、二酸化炭素濃度の長期的な上昇傾向（人間活動の影響）を除いた場合の気温上昇と二酸化炭素濃度上昇との関係を明らかにする目的で作成したグラフであり、ある特定の時間スケールにおける気温上昇と大気中の二酸化炭素濃度上昇との相関関係を示したものである。グラフでは温度上昇が二酸化炭素の濃度上昇に先行しているように見える理由としてキーリング自身が「エルニーニョによる二酸化炭素濃度上昇を示していると考えられる」と明言している（キーリングがどのような意図で図6を作成したかについては、彼自身の日本での講演録であるKeeling

(1993)、さらに温暖化問題におけるキーリングの業績に関しては、キーリング追悼講演録でもあるHansen (2005a) をそれぞれ参照してほしい）。

なお、関連分野の専門家の多くにとって常識ではあるが、キーリング自身は生涯温暖化論を支持していたことを付け加えておく。槌田（2006）はキーリングが温暖化論支持から不支持の立場に転向したかのような印象を与える記述をしているが、Keeling（1993）は講演録で大気中二酸化炭素濃度の長期的上昇が人間活動の影響であると述べており、槌田（2006）の主張とは相容れない。

また、河宮（2005）にあるように、エルニーニョなどの自然起源による二酸化炭素濃度変動振幅は0.5 ppm程度、変動の特徴的なタイムスケールは数年程度である。例えば、大気大循環モデルを用いた地球温暖化実験において、100年程度のタイムスケールで二酸化炭素濃度が350ppmから700ppmに倍増したときの典型的な昇温幅が2～6度である（IPCC第三次報告書）ことを考えると、図6の振幅・タイムスケールは非常に小さなものであり、現在起きている温度上昇にはほとんど影響を与えないレベルである。このような場合、二酸化炭素は受動的な大気成分として振る舞い、気温や降水といった環境条件の変動の影響を受けそれらより位相の遅れた変動を示す。一方、20世紀後半に起きている地球温暖化問題の場合は、大きな濃度変化が長期間にわたって続くため放射バランスの変化を通じ気

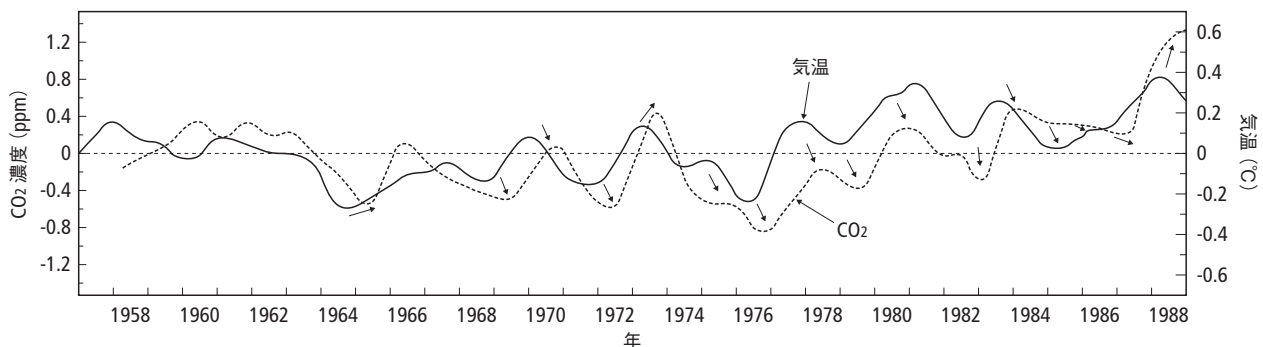


図6 観測値から長期的上昇傾向と季節変化を取り除いた大気中二酸化炭素濃度変動と気温変動の関係
(出所：根本（1994）, p.151)

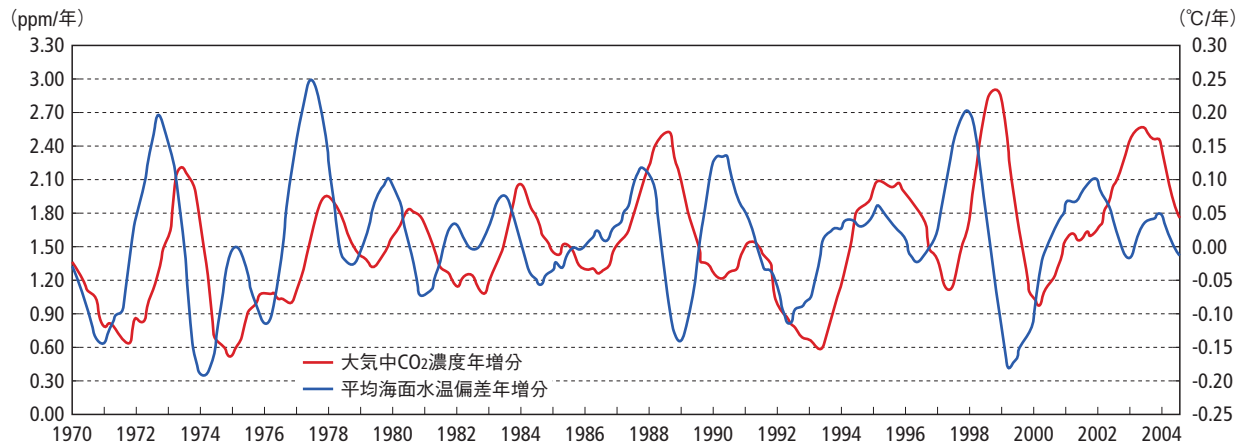


図7 CO₂濃度変化と海面水温変化 (出所: 近藤 (2006) の図2.14)

温を能動的に変える要因として働く。

さらに、図6の関係を敷衍して二酸化炭素濃度の長期的上昇を説明しようとする、25度といった大幅な気温上昇を仮定せざるを得なくなるが、もちろんそのような気温上昇は観測されていない。本稿冒頭で紹介した討論会で筆者らはこの矛盾について榎田氏に聞いたのだが、明確な回答を得ることはできなかった(河宮・江守 2006)。

以上のようなやりとりがあった後に、近藤 (2006) は、彼の図2.14 (本稿では図7) を用いてCO₂濃度の変化は海面水温変化によって支配されていると述べ、榎田 (2006) の主張を支持した。

この図7ではCO₂濃度変化の長期傾向は情報として含まれているものの、時間微分と同等の操作を施すことにより見かけ上長期傾向の印象を弱くしている。以下に示すとおり、この図を丁寧に見れば、CO₂濃度変化の長期傾向を海面水温の変化によっては説明できないことが明らかである。

まず、榎田 (2006) や近藤 (2006) の主張によれば、水温が低下した1～2年後にCO₂濃度が下がるはずであることを確認しておく。ここで近藤 (2006) の図7で水温のグラフを見ると、水温が上昇している期間と下降している期間を両方含むことが分かる。一方CO₂の年増加率のグラフを見ると、負の値には決してならない。これはグラフに示された全期間を通じ、CO₂が増加していることを意味する。つまり、水温の上昇・下降に関係なくCO₂が増加しているということを示している。この事実は榎田 (2006) や近藤 (2006) の主張と矛盾する。なお、図6や図7に見られるような、CO₂濃度が気温・水温に遅れて変化する関係は、長期成分を取り除いたり、時間微分に同等な操作をしたりなど、何らかの処理を施して2者の関係を

強調しない限り明瞭には見えてこない。

なお、1990年代の平均的な人為起源CO₂排出量は6.3GtC/yrである。この排出量のうち半分程度が海洋や森林などに吸収された場合に対応する大気中CO₂濃度増加率を計算すると、1.5ppm/yrほどになる。これは図7における1990年代の平均的なCO₂濃度上昇率とほぼ一致している。このことは、図7に見られる「水温の上昇・下降に関係ないCO₂濃度上昇」が人為起源CO₂排出によるものである、という考え方を支持するものである。

一方、図8は、季節変動の除去以外には特別なデータ処理を行わず、年平均のCO₂濃度・海面水温 (SST) の時間変化をもっとも単純な形で比較してみたものである。

この図8から、榎田 (2006) や近藤 (2006) の主張

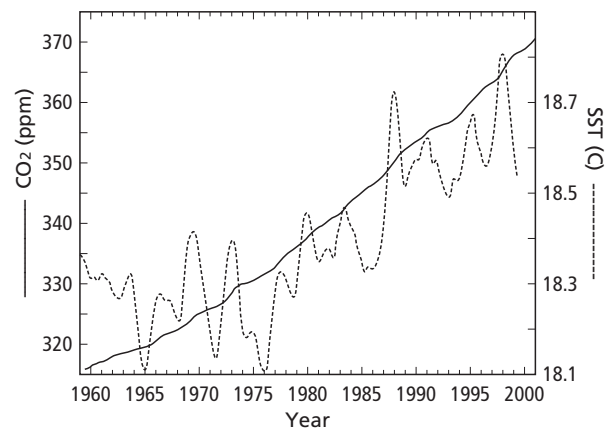


図8 マウナロアにおいて観測されたCO₂濃度 (実線、Keeling and Whorf 2005) と全球平均海面水温 (破線、Rayner et al. 2003) の時間変化

注) 両者とも12ヶ月移動平均を用いて季節変動を取り除いてある

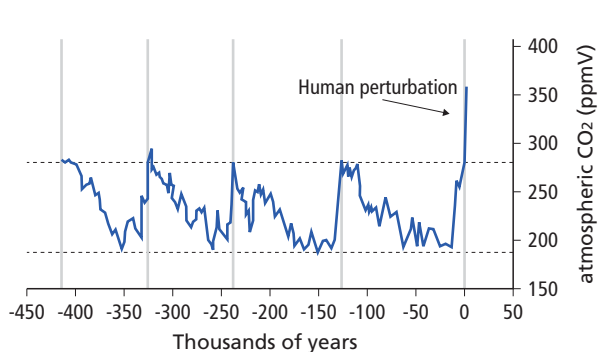


図9 ポストークのアイスコアから得られたCO₂濃度 (Petit et al. 1999) と、最近のCO₂濃度直接観測データ (Keeling and Whorf 2005) をつなげて示した時系列グラフ
(出所: Steffen et al. (2003) による図を改変)

と異なり、海面水温の上昇・下降に関わらずCO₂濃度は一貫して増加していることが分かる。すなわち、この海面水温の変化に無関係なCO₂増加が、人為起源CO₂の排出によるものなのである。

なお、このような説明をすると、「図8は人為起源CO₂による温暖化説とも矛盾するのではないかな？なぜなら、この図ではCO₂濃度が上がっているが、海面水温が下がっている時期がたくさんあるから」という質問を受けることがある。こうした疑問に対しては、次のように答えることができる。すなわち、気候を決める要因の中には、エルニーニョのように周期的に気温・海面水温を上げ下げするものや、大規模な火山噴火のように一時的に気温・海面水温を下げるものが含まれる。つまり、観測される気温・海面水温の時間変化は、CO₂濃度の上昇に対応してゆっくり上昇する成分と、上記のような自然変動によって上下動を繰り返す成分とが含まれる。前者による上昇の速さは後者による上下動の速さより遅いため、一時的に気温が下がる時期が多数見られる。したがって、図8の海面水温の時間変化においても、短い周期で変動する成分をのぞいて長期的傾向を見れば、1970年代以降は上昇傾向にあることがわかり、この上昇傾向は、人為起源の温室効果気体排出によるものである可能性が非常に高いと考えられている（議論7に対する反論も参照のこと）。

また、近年のCO₂増加が人為起源排出によるもので

あることをより端的に示すデータとして図9を掲げる。

これは氷床コアからとられた過去40万年のCO₂濃度の変化と、マウナロアなどで測定された20世紀後半以降のCO₂濃度の変化とをつなげて示したものである。この図9から、近年は過去40万年にない勢いでCO₂濃度が上昇していることが分かる。このCO₂濃度上昇を環境変動の結果として説明しようとする、氷期-間氷期サイクルに匹敵する環境変化が産業革命以後に起こっていないからではない。近年温暖化の兆候が検出されているとは言え、それほどまでに大きな変化は観測されていない。産業革命以後のCO₂濃度上昇は、人間活動の結果と考えるのが妥当である。

長期変動成分を取り除くと図6のようなCO₂濃度と気温のラグ付き相関が見られる理由についても概略を説明しておく。

まず、この場合の気温変動の支配的要因となっているのはエルニーニョである。現在の知見では、エルニーニョ発生で気温が上がったときにCO₂濃度が増加する仕組みとして、1) 高温化がもたらす干魃による陸域生態系の生産力低下、2) 昇温による土壌有機物の分解促進、3) 乾燥による森林火災の増加、などが考えられている。なお海洋については、後述するように、エルニーニョ発生年にはCO₂放出が低減することが実際の観測によって明らかになっている（本議論の証拠5を参照せよ）。すなわち、エルニーニョによる海面温度上昇はあるものの、「(人為的排出二酸化炭素温暖化説を否定する論者の多くが証拠を示さずに主張しているような) 海面温度上昇によって海面からのCO₂が放出され、それが大気中のCO₂濃度上昇の主な要因となっている」という考えは誤りである（河宮 2005）。

最後に補足するが、世界の「人為的排出二酸化炭素温暖化説」否定論者のうちでも、このグラフ（図6）を使って「温度が原因で濃度が結果」という論を立てるのは、私たちの知る限り、日本の論者のみである。これには根本（1994）の影響力が大きかったと思われる。なお、根本順吉氏の気候変化の見通しおよびその原因に関する見解は、池田（2006）も指摘しているように、各著作の時点ごとに異なる。

証拠 2

南極氷床コアのデータによれば、氷期・間氷期サイクルに伴う大気中二酸化炭素濃度の増減は、気候変動に対して遅れていた。したがって、気候変動が二酸化炭素濃度を変えるのであり、二酸化炭素が気温を変えるのではない（Durkin 2007；武田 2008b）。アル・ゴアの映画『不都合な真実』ではその逆のことが示唆されており誤りである（伊藤2007；伊藤 2009）。二酸化炭素大気中濃度の上昇が原因で、結果として気温上昇が起こっているものと仮定すると、二酸化炭素やメタンの大気中濃度を周期的に変動させる地球システムのイベントを示すことが必要（近藤 2006）。

反論

前述のように、人間活動の影響以前に二酸化炭素やメタンの大気中濃度を増加させていた要因は、もちろん気候変動であってもよく、これも含めて、気候学者は過去20年以上にわたり以下の3つを同時に認めている。

- 1) 気候が原因で二酸化炭素濃度が変わる
- 2) 二酸化炭素濃度が原因で気候が変わる
- 3) 近年の地球温暖化は、2)が大きな原因である

まず、強調したいのは、1)は2)、3)と両立するので、1)を認めたら最後、2)も3)も棄却されるという論理は成り立たないことである。あくまでも20世紀後半の温度上昇に関しては人為起源の温室効果気体が主な原因であるということであり、それ以前の過去において、温室効果気体以外の原因により地球規模の気候変動が起こったことは明らかである。また、気候変動が原因で二酸化炭素濃度が変化した場合が数多く存在することも明らかである。

氷期から間氷期に移る「退氷期」においては、二酸化炭素濃度の上昇は南極の気温上昇に対して数百年ほど遅れていたことが、氷床コア研究から分かってきた。退氷期とは、約10万年に一度、地球の平均気温が5℃ほど温暖化したとともに、カナダや北欧などを覆っていた分厚い大陸氷床が融け、海面が約130mも上昇した期間のことである。この退氷期においては、公転軌道の形や自転軸の傾きなど、地球軌道要素の変化によって、北半球の夏における太陽からの距離が近くなったことにより、大陸氷床が縮小を始め、その影響が全

球に及んだと考えられている（ミランコビッチ理論）（Kawamura *et al.* 2007）。退氷期の大气中二酸化炭素濃度の増加については、大陸氷床の縮小による気候変動や海洋への淡水流入が、海洋の温度や循環、生物活動の変化を引き起こし、海洋からの二酸化炭素放出につながったとする考え方が主流である（野崎 1994；Sigman and Boyle 2000；Ahn *et al.* 2008）。しかし、これらの研究成果から、二酸化炭素が地球温暖化を引き起こさなかったとする論理は誤りである。

なぜなら、まず退氷期の持続期間が5000年以上であり、二酸化炭素の気温に対する数百年の遅れに比べてはるかに長いからである。つまり、懐疑論では無視されているが、二酸化炭素濃度と気温は何千年間も同時に上昇していた。もう一つ、見落としとしてはならないことは、氷床コア解析から復元された温室効果ガス濃度と、地形・地質学的調査から復元された過去の大陸氷床の拡大範囲から、氷期の最寒期における温室効果気体濃度と大陸氷床による負の放射強制力が、同程度であったことが分かっていることである。複数の気候モデルで軌道要素と温室効果ガス濃度、氷床の分布を変化させた古気候シミュレーションにおいても、氷期の気温が3～5℃低下したと推定されたが（IPCC第4次報告書）、温室効果ガス濃度の減少がなければ、その半分程度にしかならない。

また、氷期の寒冷化には大気中のエアロゾルや植生分布の変化も寄与したと考えられ、それらは、氷床と温室効果気体による気候変動に対する、さらなるフィードバックとして捉えるべきものである。まだ不確実性は大きいですが、これらの寄与を考慮に入れると、気候モデルによる氷期－間氷期の気温変動の推定値は4～7℃である。これらのことは、大気中二酸化炭素が気候変動への正のフィードバックとして働き、気温上昇をさらに強めたことを示しているとともに、気候モデルによる見積もりと古気候データとの間には、定量的にも矛盾がないことを示している。

なお、アル・ゴア氏の映画『不都合な真実』において、過去65万年間の氷床コアデータを用いた文脈で、将来の気温上昇について定性的には正しいものの定量的には誤った示唆をしているのは確かである。なぜなら、気温の予想値に言及しているわけではないものの、過去に見られた二酸化炭素濃度と気温との相関を、そのまま将来に外挿することを読者に促すような表現になっているからである（実際には、氷期－間氷期の気温変動における温室効果気体の寄与は半分程度である）。

しかし、ゴア氏が、過去の気温と二酸化炭素濃度と

の間には複雑なメカニズムを介した相関があるとしたことや、温室効果気体が気温に影響したと言及したことなどは正しい。一方、「氷期－間氷期の気温変動が温室効果気体変動に一方的に影響しただけであり、温室効果気体による気温変動の増幅がなかった」と主張する懐疑論は、定量的にはおろか定性的にも誤りである。

懐疑論の背景には、「過去においても現在においても二酸化炭素のみが温暖化の原因だとIPCCや気候学者は主張している」というような誤った認識があるように思われる。まさにこのような批判こそが、地球温暖化の理論と古気候復元結果との整合性を「懐疑論者」が十分に理解あるいは研究していないことの証左と言える。

証拠 3

(人為的二酸化炭素排出が継続していたにも拘らず) 92年と93年では二酸化炭素濃度は増加しなかった(槌田2005; 近藤2006)。

反論

第一に、大気中二酸化炭素濃度変化は、人為起源の排出と自然の(海洋および陸上生態系の)排出および吸収の和で決まる。したがって、自然の排出・吸収は火山噴火やエルニーニョのような自然変動により変動し、正味で大きな吸収になることもある。人為的二酸化炭素排出があれば必ず大気中二酸化炭素濃度が上がることを人為的排出二酸化炭素温暖化説の研究者は主張しておらず、二酸化炭素濃度の変動は、人為的排出二酸化炭素温暖化説を否定するようなものではない。

第二に、スクリプス海洋研究所による観測データ(<http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/sio-keel.html>)のうちで、もともと季節変動がより小さい(自然の排出・吸収の影響が現われにくい)南半球の地点での年平均値を見ると、二酸化炭素濃度はこの時期も上昇しつづけている。

第三に、元データ、すなわち槌田(2006)の図表2-4あるいは近藤(2006)の図2.11を見ると、月別では最高月の濃度は92年も93年も上昇傾向にはあり、全体の上昇傾向にそれほど逸脱していないようにも見える。

第四に、そもそも、2年間の異常があるから、産業革命以降の約150年間でずっと成立していると想定できるものを完全否定する、という論法自体がおかしい。

証拠 4

2003年では大気中二酸化炭素濃度が3ppmも増加した(それまでは毎年1.5~1.8ppm)。3ppmというのは、人間が排出した量と同じである(槌田2004)。

反論

まず、3ppmという数字の由来が不明である。また、前出の議論14証拠3に対する反論の中でも述べたように、二酸化炭素大気中濃度は、人為的排出以外の要素も影響するため大きな幅があり地域によっても異なる。したがって、3ppmという数字もあり得ない数字ではない。実際に、IPCC第三次報告書でも、「1990年代の年々の増加量は、0.9ppm (0.2%) から2.8ppm (0.8%) まで」となっており、変動幅は大きい。

証拠 5

エルニーニョの1年後に二酸化炭素濃度が上昇する。エルニーニョによる海面水温上昇によって大気中に二酸化炭素が海洋から放出される(槌田2005b)。

反論

これも人為的排出二酸化炭素温暖化説と矛盾しない。前出の議論14証拠1に対する反論でも述べたように、確かに、エルニーニョによって二酸化炭素濃度が増えるという形の因果関係は考えられる。しかし、それは温暖化や干ばつによる森林火災時の二酸化炭素排出が大きく影響していると考えられている。実際に、最近では97~98年のエルニーニョによって、多くの国で数百万haもの森林火災があった。83年のインドネシアでの森林火災もまた、その半年以上前のモンスーン期の干ばつ(実際にあったエルニーニョ)の影響を受けて二酸化炭素を排出していた。なお、次の図10と図11で示したように、エルニーニョによる海面水温上昇によって海洋から二酸化炭素が放出されるというのは、実際の観測によって否定されており、実際は、逆にエルニーニョによって海面からの二酸化炭素放出量は減少するという変化が起きている(Feely et al. 1999)。これは、エルニーニョに伴って太平洋赤道域に

広がる高温の海水には、生物活動の影響によりもともとCO₂があまり含まれていないためである。

なお、図10および図11で示したデータに対し、「92年はピナツボ火山噴火の直後にあたるので、このような特殊な時期のデータはあてにならないのではないか？」という疑問もあるであろう。しかし、こうした時期だからといってエルニーニョそのものが特異な振舞いを見せているわけではなく、太平洋赤道域における水温の上昇は他のエルニーニョと同様に起こっている。火山噴火が大気海洋間のCO₂交換に影響を与える

ような具体的なプロセスが提案されているわけではなく、また、水温上昇に伴うCO₂放出減少の理由も上記のように合理的に説明できる。すなわち、ここで示された92年のデータは十分に代表性があると思ってよい。実際、図11をみると、92年以外のデータである93-96年についても、水温とCO₂分圧の逆相関ははっきりと見て取れる。もちろん、エルニーニョのような出来事によるフィードバックはいつも同じように（同じ大きさで）成立するとはかぎらない。

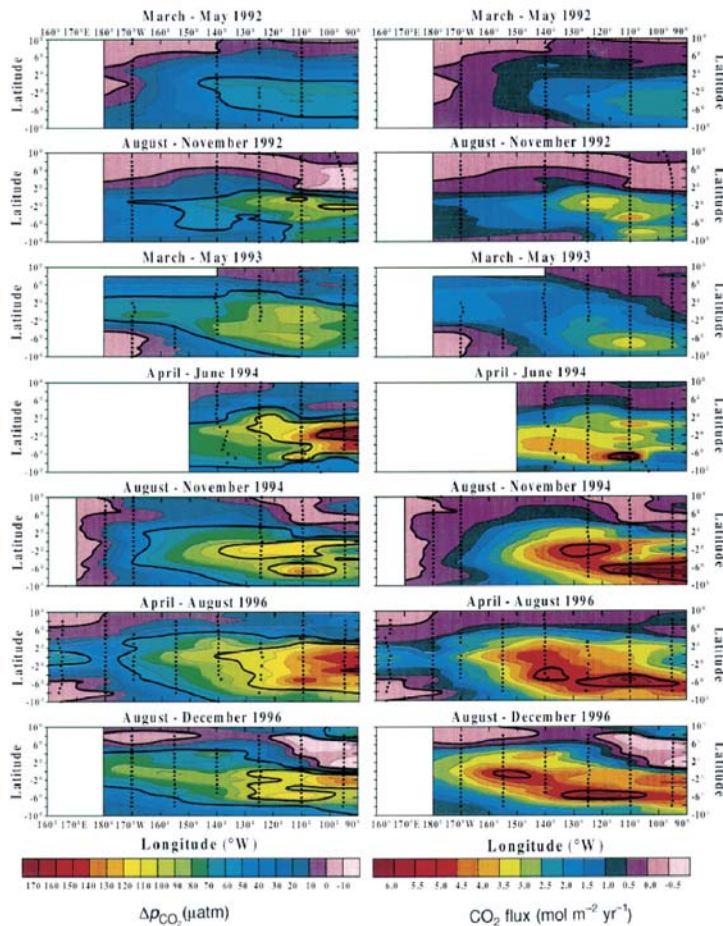


図10 エルニーニョと海面からの二酸化炭素放出との関係
(出所: Feely et al. (1999))

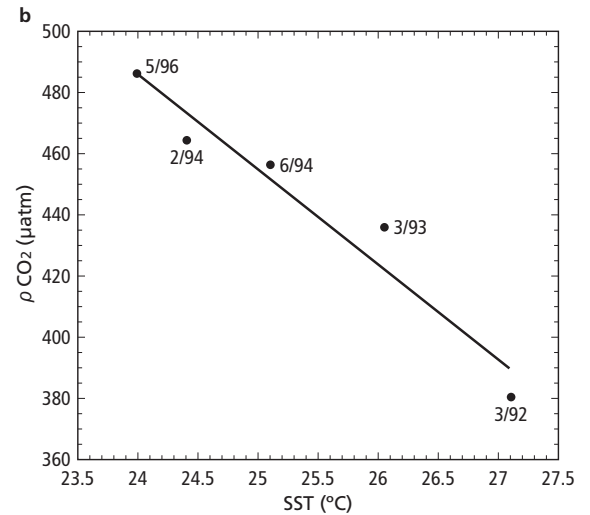


図11 海面水温と二酸化炭素分圧との相関関係
(出所: Feely et al. (1999))

注) 図10の右列が海洋からのCO₂放出を示す。上の方92, 93年がエルニーニョ発生年、下の方の96年は非エルニーニョ発生年にあたり、エルニーニョ発生年の方が、CO₂放出が小さくなっていることがわかる。図11では、海面水温 (SST) が上がるとCO₂分圧 (pCO₂) が下がる (海はCO₂を吸収しやすくなる=海面からのCO₂放出量が小さくなる) というきれいな相関が示されている。



議論 15



海面水温上昇で、海洋からCO₂が大量に放出される。例えば1度の海水温上昇でCO₂の溶解度は4%減少する。海洋表層に含まれる無機炭素は1,020Gtほどであるので、1度の海水温上昇で40Gt（炭素量換算）のCO₂が大気中に放出されることになる（近藤 2006）。

反論

炭酸系における「緩衝効果」と呼ばれる現象のため、1度の温度上昇による炭素放出は40Gtより小さく、4Gtほどであると考えられる。これは大気中濃度に換算して2ppmほどであり、マウナロアにおけるCO₂濃度直接観測が始まった1958年から現在までのCO₂濃度増加量50ppmに比べわずかな量でしかない。すなわち、全球平均で1度程度の海水温上昇では、大気中の二酸化炭素濃度上昇を定量的に説明できない。

この炭酸系の緩衝効果について概略を簡単に説明する（野崎(1994)72-73ページに、より詳細な解説がある）。

海洋中で無機炭素は、二酸化炭素（CO₂）、炭酸イオン（CO₃²⁻）、重炭酸イオン（HCO₃⁻）の3つの形態を主にとりながら溶解し平衡に達している。「CO₂の溶解度が4%減る」ということはあくまでCO₂形態の溶解度が4%減少することを意味し、3形態をあわせた「全炭酸」濃度の減少量とは異なる。CO₂の溶解度が4%減少したとき、全炭酸濃度の減少量はその1/10程度の約0.4%であり、このことを緩衝効果と呼ぶ。そして、上の1,020Gtという数字は、CO₂形態の無機炭素量ではなく全炭酸量であることに注意して欲しい。

緩衝効果について、さらに例を挙げて説明する。

Sabine *et al.* (2004) は、海洋が吸収した人為起源CO₂の分布を推定している。それによると、海洋表層における人為起源CO₂の典型的濃度は、全炭酸で50mmol/m³ほどである。これに対し、自然界にもとから存在する全炭酸は海洋表層で2000mmol/m³ほどであり、人間活動による増加は2.5%ほどに過ぎない。しかし海洋表層のCO₂分圧は大気中のものと同様、産業革命以前から30%近くも増えている（Takahashi *et al.* 2002）。海洋中のCO₂分圧はCO₂形態の無機炭素濃度に（一定温度では）比例するので、緩衝効果により、全炭酸濃度よりも増加の割合が1桁高いのである。

なお、炭酸系の緩衝効果に関しては、ハーバード大学教授でもあったRoger Revelle氏がその認識に重要な役割を果たしていることを付け加えておきたい（炭酸系の緩衝効果を定量的に議論する際に重要な係数にRevelle係数という量がある）。彼は、本稿の議論13でも取り上げたチャールズ・キーリング氏を雇用してハワイのマウナロア山での大気中CO₂濃度観測を推進した米スクリプス海洋研究所長（当時）であり、映画『不都合な真実』にあるように、ハーバード大学の学生であった若い頃のアル・ゴア氏に大きな感銘を与えた人物でもある。





議論 16



炭化水素燃料の燃焼によって大気に付加される二酸化炭素による炭素の供給量は6Gt程度であって、年間に大気と生態系・海洋表層水と交換される二酸化炭素による炭素量200Gtのわずか3%に過ぎない（近藤 2006）。

反論

これも非常にミスリーディングな議論である。大気、陸、海の間での二酸化炭素のやりとり（自然の炭素循環）は、例えて言えば、年度末の残高（大気中二酸化炭素濃度）の変化は大きくないものの、年度途中での出し入れが激しい貯金口座の預入・引出のようなものである（だから循環という名前がついている）。一方、人為

的二酸化炭素排出は、わずかずつであるものの、年度末残高を増加させる積立貯金になぞらえることが出来る（人類による二酸化炭素排出量は産業革命以降現在までの累計で約350Gt）。この累計で約350Gtというのは、産業革命以前の大気中二酸化炭素存在量の約7割であり、自然界の炭素循環過程での変動では吸収不能な量である。なお、これに関しては向井（2007）を参照されたい。





議論 17



「人為的に排出された二酸化炭素のうち、大気中にとどまるのが46%、海洋吸収が28%、森林吸収25%」という推定はいい加減。「森林などによる吸収の増加」は、森林伐採や焼き畑などの現状に反している（槌田2005b；槌田2006）。

反論

前出の議論14に対する反論でも述べたように、しばしば「温度上昇によって二酸化炭素濃度が上昇した。人為的排出は大気中二酸化炭素濃度上昇に関係ない」という主張のもと、ヘンリーの法則やエルニーニョなどが持ち出され「大気中にとどまるのが46%」などの数字が否定される。

しかし、このような議論は、直感的に考えておかしく、観測事実によっても否定されている。

まず、仮に、現在観測されている二酸化炭素濃度上昇が人為的な排出由来でないとすると、数十万年間も変化がなかった状況から、何らかの原因で海洋から人為的な排出と同じ量の二酸化炭素がいきなり放出され、それと同時に全く同量の人為的排出による二酸化炭素が海と陸に吸収されなくてはならない。これは直感的に非常に考えにくい。仮に森林伐採によっても陸域生態系から排出、さらに海水温上昇で海洋からも排出、人為的な化石燃料からも排出というのであれば、一体それらの二酸化炭素は最終的にどこへ行ったというのだろうか。

ヘンリーの法則によって人為起源二酸化炭素が海洋にすべて吸収されると説明するのも困難である。なぜならば、もし人為起源二酸化炭素が全て海洋に吸収されたとすれば、その分海洋中の二酸化炭素の質量は大きくなり、平衡する大気中の二酸化炭素分圧もそれに比例して大きくなる。しかし、人為起源二酸化炭素は大気中には残っていないので分圧の上がりようがない。したがって、実際には、人為起源の二酸化炭素の一部が大気中に残り、「海洋中の二酸化炭素量増加に対応する二酸化炭素分圧上昇」と「大気に残った二酸化炭素によりもたらされる実際の二酸化炭素分圧上昇」が等しくなるところで平衡が保たれるはずである。

また、前述のように、エルニーニョによる海面水温上昇→二酸化炭素放出の可能性も実測によって明確に否定されている。

さらに、下記に挙げるのは、独立的な研究手法に基づいた複数の定量的な研究であり、すべてある程度の範囲で、「人為的に排出された二酸化炭素のうちで海洋に吸収される量」などに関する数値でほぼ一致した結果を出している。もし、このような数字を否定するのであれば、一つ一つの研究結果に対して具体的な反証を挙げるべきである。

研究1： ^{14}C 濃度の変化

化石燃料由来人為的排出による二酸化炭素は、炭素同位体である ^{14}C の含有量が小さい。したがって、図12に示したような大気中の二酸化炭素に含まれる ^{14}C の濃度変化を見れば、大気中二酸化炭素濃度上昇が化石燃料由来によるか否かがわかる⁵⁾ (Damon *et al.* 1973; Baxter and Walton 1970)。

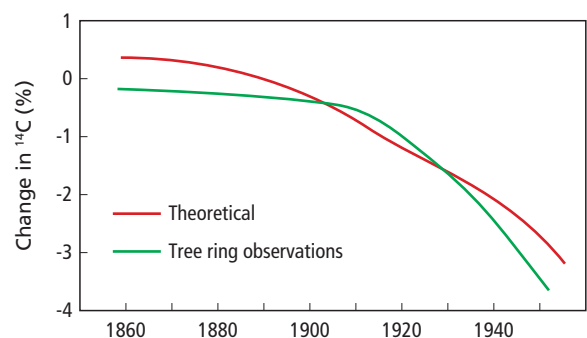


図12 大気中における ^{14}C 濃度の変化

(出所: Hadley Center (2005))

5) より詳細は、Freyer (1979) を参照せよ。

研究2：O₂濃度の変化

大気中の酸素の濃度は、化石燃料由来の人為的二酸化炭素排出および陸域植生による吸収によって変化するが、海洋による二酸化炭素吸収によっては変化しない。したがって、Keeling *et al.* (1996) で明らかにされているように、大気中の酸素と二酸化炭素濃度の変化をあわせて見れば、人為的排出を含めた二酸化炭素の排出・吸収源の寄与度がわかる（図13）。これに関してはIPCC第三次報告書で詳しく議論されている（http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/fig3-4.htmを参照せよ）。

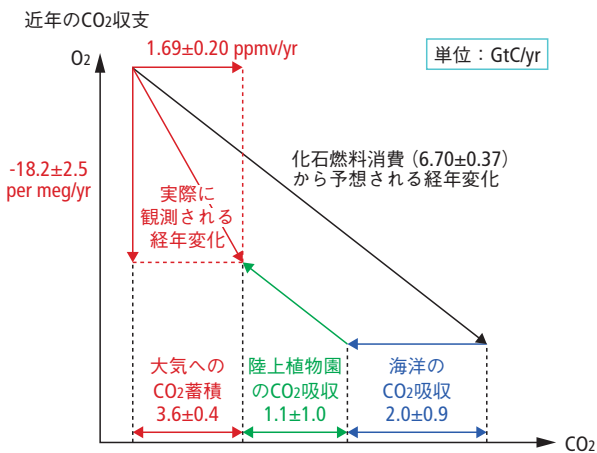


図13 O₂とCO₂の観測結果から得られた近年のCO₂収支に関する模式図

（出所：東北大学大気海洋変動観測研究センター（2006））

陸上生態系による吸収は、大気中の二酸化炭素収支を地域別・季節的に分けて解析することなどにより、主に北半球中・高緯度の植生が吸収していることがわかっている。しかし、木、草、土壌などへの配分や、どの程度安定した形で貯蔵されているかについては未解明なことも多い。陸上生態系の吸収がふえた理由の一部は、地域や生物種によって一様でないものの、1) 特に北米やヨーロッパにおける多くの農地が使われなくなって森林になる単なる土地利用が変化（Caspersen *et al.* 2000）、2) 二酸化炭素濃度の増加および気候変化が光合成による有機物生産に有利に作用、3) 大気汚染や肥料に由来する窒素による施肥効果、などで説明される。

研究3：海洋中炭素濃度の変化（6つの独立した手法）

大気と二酸化炭素をやり取りするのは海洋と陸域生物圏の2つだけである。したがって、大気中の二酸化炭素の一部でもが海洋なり陸域から排出されたものな

のであれば、これらの二つが貯蔵する炭素量の減少が実際に計測されるはずである。これに関しては、すでに以下の6つの独立した手法を用いた定量的な分析がなされており、大気と海とのやりとりに関して、すべてほぼ一致した結果（海洋炭素量減少の否定）を明確に示している。

- 1) 海洋表面の二酸化炭素分圧の直接観測（Takahashi *et al.* 2002）
- 2) 異なる海域への炭素循環量を示す二酸化炭素の大気中の空間分布観測（Bousquet *et al.* 2000）
- 3) 生体プロセス影響を排除したCFCと炭素、酸素、養分の総合観測（Sabine *et al.* 2004）
- 4) CFCsによる水の年齢推定と組み合わせた炭素とアルカリ性の二回の観測（McNeil *et al.* 2003）
- 5) 大気中二酸化炭素増加と酸素減少の同時観測（Keeling *et al.* 1996）
- 6) 大気中二酸化炭素増加と¹³C減少の同時観測（Ciais *et al.* 1995）

すなわち、現時点（2007年2月）においては、海洋中炭素に関して減少を示す観測の報告数はゼロである。一方、上述のように、増加を示す観測の報告数は、6つの独立した手法を用いて20以上の研究文献がある。繰り返して言うが、もし、このような数字を否定するのであれば、一つ一つの研究結果に対して具体的な反証を挙げるべきである。





議論 18



人為的に排出された二酸化炭素の大気中滞留時間は短い。

証拠 1

人間活動によって放出されたCO₂のうち、大気中に長期的に残存する量は等比数列の和として計算され、3.33年分の放出量にあたる量しか残存しない（槌田 2007；槌田2008）。

反論

「人間活動によって放出されたCO₂のうち、約3割が海洋や森林に吸収される」（5割と言った方が実態には近いが、槌田氏の議論に合わせて3割という値を使う）という表現がよくなされる。これは丁寧に言い換えれば、「森林や海洋はCO₂を放出したり吸収したりしているが、地球全体では現在正味で吸収となっている。その1年間の吸収量は、同じ年に人間活動によって放出されるCO₂量の約3割にあたる」という意味である（人間活動によって放出されたCO₂分子が選択的に吸収されるという主張は含まれていないことに注意）。すなわち、槌田氏が主張しているような「ある年に人間活動によって放出されたCO₂は、その年のうちに3割が吸収され、次の年には残りの7割のうちの3割がさらに吸収されるという過程が無限に繰り返される」という意味ではない。

したがって、人間活動によって放出されるCO₂量をQ、森林や海洋による吸収量のQに対する割合をrとし、Qとrは時間変化しないと仮定すれば、大気中に残存するCO₂量の正しい計算法は、

$$Q \times (1-r) + Q \times (1-r) + Q \times (1-r) + \dots$$

ということになる。この数列の和は収束せず、人間活動によるCO₂放出が続く限り大気中のCO₂量は増えていくことになる。

なお、ここで問題になっているのは大気中CO₂の収支に関わる問題であるので、本質を損なわずに次のような金銭の収支に置き換えてみる。例えば、

ある家庭では年間の収入と支出が釣り合ってお

り、貯金額の増減はなかった。ある年から50万円の副収入が入ってくるようになった。その副収入のうち3割を消費に向け、残り7割を貯金にすることにした。このとき、貯金額の年々の変化はどのように計算されるだろうか。

という問題を考えてみよう。この問題と大気中CO₂収支の問題との対応は、

元の年間の収入・支出→人間活動によるCO₂放出
がない時の森林や海洋によるCO₂の放出・吸収
貯金額→大気中のCO₂量
副収入→人間活動によるCO₂放出量
消費に向けられる副収入→森林や海洋による吸収量
貯金に向けられる副収入→大気中に残るCO₂量

となる。

貯金額の変化は当然、

$$50万円 \times 0.7 + 50万円 \times 0.7 + 50万円 \times 0.7 + \dots$$

と計算すべきであるが、これを、

1年目は50万円のうちの7割、つまり35万円を貯金することになる。2年目は、その年の副収入50万円の7割（＝35万円）と、1年目に貯めた35万円の7割（＝24.5万円）との和、59.5万円が増加分になる。3年目には、同じ要領で 50万円×0.7＋35万円×0.7＋24.5万円×0.7となり、増加分は76万6,500円になる。したがって、このようにして貯金を無限に続けていっても、
50万円×（0.7＋0.7²＋0.7³＋…）＝
50万円×0.7/（1－0.7）＝～117万円
と計算されるように、当該年の副収入50万円を足した約167万円しか貯金は増えない、

などと計算しているのが槌田氏の議論にあたる（図14）。



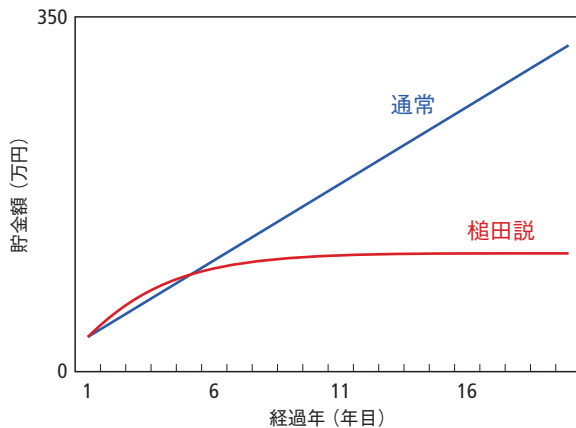


図14 槌田氏の議論による計算と通常の計算との相違

証拠 2

大気中二酸化炭素と海洋中二酸化炭素は平均海面温度で準熱平衡状態にあり、人為的二酸化炭素が長期間大気中に留まるとは考えられない(槌田2005b)。

反論

まず、二酸化炭素は水と反応して炭酸イオン等の形で海水に溶け、また、海洋プランクトンの活動により、海洋表層の炭素は有機物に変換されて中層・深層へ沈降するため、二酸化炭素の海水への溶解量はヘンリーの法則（溶解度の小さい気体では、温度が一定ならば、一定量の溶媒にとける気体の質量は、その気体の分圧に比例）だけからは決まらない。また、表層水は1000年のオーダーで循環して深層水と入れ替わるため、深層を含む海洋全体の炭素量が大气中の二酸化炭素濃度と平衡するには1000年オーダーの時間がかかる。以上から、大気と海洋との短時間スケールの平衡状態を基点とした議論は誤りである。すなわち、人為的二酸化炭素排出を主因として急速に増加した大気中二酸化炭素濃度に対して、海洋全体としては全く平衡に達しておらず、大気中二酸化炭素をしばらくは吸収し続ける過渡状態にあると考えるのが合理的である。なお、大気中二酸化炭素濃度の決定には、海洋のみでなく、陸域生態系と大気との炭素交換の役割も重要であるが、こちらも温度のみによる短時間スケールの平衡状態では議論できない。



議論 19

森林はCO₂を吸収しない（武田2007a；武田2008, p.182）。

証拠 1

IPCCが第2次報告（1995年）で示した世界全体の収支（炭素換算）は、南方の森林：17億トンの放出、北方の森林：7億トンの吸収、差し引き：10億トンの放出となり放出が多い（武田2008c, p.184）。

反論

武田（2008c）の引用する、南方の森林による「17億トンの放出」の根拠となっているIPCC第2次報告書（SAR）では、“IPCC（1994）indicates that the net emission from changes in tropical land-use was 1.6 ± 1.0 GtC/yr for the period 1980 through 1989（Schimel *et al.*, 1995）. Houghton（1995）estimated that in 1990

the net flux to the atmosphere, essentially all from the tropics, was 1.7 GtC/yr with an uncertainty of $\pm 30\%$.”（IPCC SAR WG1, p.451）と記述されており、武田の言う17億トンのうち、16億トンは人為的改変による放出である。すなわち、大半が人為改変による排出量と、SARによると0.7～0.8GtC/yrとされる北半球中緯度の吸収量の差し引きは、本来の意味での自然の森林の収支を表さない。なお、SAR時点において、武田の言う「南方の森林17億トン」と対応する、全球での陸域への吸収量は -2.6 GtC/yrである（Ciais *et al.* 1995）。

ちなみに、IPCCの第4次報告書（AR4）で、火災や農地化など、土地利用の変化も含めた、陸域の吸収量見積もりは、 0.9 ± 0.6 GtC/yr（2000-2005年）、熱帯林での人為改変による放出量は 1.6 ± 0.6 GtC/yr（1990年代）となっている。



議論 20

森林火災のため、地球全体ではCO₂は吸収しきれない。

証拠 1

福田（2004；正しくは2005か）では、微生物の活動が不活発な北方の森林では、森林が育つときのCO₂の吸収が259g/m²、分解などで排出するCO₂が173g/m²、差し引き86g/m²（の吸収）であり、約3分の1のCO₂しか固定されない（武田2008c, p.185）。

証拠 2

シベリアで、火災で焼失する森林は0.1億ha/yearであり、それを補うために必要な森林10億haであるのに、現実のシベリアの森林は、2.5億haであるから、火災によって増えるCO₂を吸収することはできない（武田2008c, p.186）。

反論

武田（2008c）で引用されている吸収・排出量の数値は、福田（2005）には掲載されていない。これらに近い値として、観測サイトの収支として、2000年の非伐採箇所では-184gC/m²（吸収）、は2001年の伐採後に+184gC/m²（排出）とあり、また、2001年のコントロールサイト（非伐採）では、非伐採箇所では-263gC/m²の吸収量であることがわかる。もしこれらの値であるなら、これは同じ単位面積あたりの収支にすぎず、北方林全体の収支を代表

するものではない。

ところで、武田（2008c）で挙げられている森林火災面積や森林面積をそのまま適用すると、25年で森林が全て消失するペースになる。一方、福田（2005）の記載事実を見ると、シベリアタイガの総面積は約8.0億haであり、異常火災のあった2003年は2000万haの森林火災があったと記載されている。すなわち、武田（2008c）のあげる「1000万ha」の記述は見あたらない。ちなみに、早坂ら（2007）によるサハ自治州の事例の場合、森林面積は1,430,000km²であり、火災面積は、その約0.13%にあたる1797km²（1955～2005年）である（注：統計が示す値より実際には焼失面積が多い旨は記されている）。いずれにしろ、森林の収支を考える際、特異年の値のみでの議論は不適切である。

なお、森林火災が持つ気候への影響には、下記のような様々な側面がある。

- 1) 火災で炭素が放出される
- 2) しかし、炭素の一部は炭になる（炭は極端に分解されにくく、炭素を貯留する効果がある）
- 3) 火災でブラックカーボンが出る（火災のあった年のアルベドが下がる）
- 4) ところが、裸地のアルベドは低い（火災後2年目からのアルベドは上がる）

すなわち森林火災の影響は、武田（2008c）の議論のような単純なものではない（これらについては、最新の研究としてはRanderson *et al.*（2006）が詳しい）。





議論 21



「CO₂を吸収する」という発想は見当はずれ（武田2008c, p.187）。

反論

京都議定書の中での森林吸収のアカウンティングに関して疑問を呈しているようだが、京都議定書での考え方は、ごく単純化して言えば、人為の努力によって

従来よりもCO₂をより多く吸収した場合に、その分だけを吸収量としてカウントする、との考えである。武田（2008c）は、前述（議論19）の自然の森林吸収と混同しているように思われる。



3.4. 温室効果強化に対する気候システムの 応答に関する議論

地球温暖化は、温室効果ガス濃度変化という強制作用への気候システムの応答と考えられる。この応答の強さの指標として、二酸化炭素濃度が2倍の値と1倍の値でそれぞれ固定されて十分に時間が経たときの長期平均気温の差をとった「二酸化炭素倍増に対する平衡応答」がある。地球温暖化の文脈での慣例として、「気候感度」はこの平衡応答をさす。その大きさに関しては、多くの研究を検討した結果、 2°C ～ 5°C の範囲におさまる可能性が高いと考えられている。



議論 22



観測から推定される気候感度は小さい（伊藤・渡辺2008, p. 95-99；伊藤2009）。

反論

一般に、IPCCに対する反論の中には、IPCCの結論に反する研究を一つ二つ例示して詳しく解説するという手法をとるものがある。しかし、例示された研究が、IPCCの結論を導いた多数の研究を凌駕する説得力を持つかどうかを吟味しなければ科学的な議論とはいえない。なぜなら、IPCCの結論は、相反するものも含めた多数の論文を総合的に評価することにより導かれているからである。

伊藤（2009）は、Illis（2008）を例示して「観測から推定される気候感度は小さい」と結論している。しか

し、IPCCが引用している2℃以上の気候感度を観測から推定した多数の論文（図15）のどれよりも、この一つの研究が信頼できるということを示さないかぎり、そんなことはいえない。

また、このIllisの研究は、以下のような問題が指摘できる。

- 1) エーロゾルの冷却効果および海洋熱吸収を無視しているため、必然的に現実よりも低い気候感度を導く。
- 2) 気温データとして地上観測よりも衛星観測によるものを重視したことが低い気候感度という結果をもたらしている。しかし、衛星データにも不確かさがある。とくに複数の衛星による観測をつなぐ際の不確かさが含まれている。
- 3) この研究はまだ査読を経た論文として出版されていない。

さらに、二酸化炭素濃度を倍増に固定して十分に時間が経ったときの気温上昇量である「平衡応答」と、年1%複利で二酸化炭素濃度を増加させていって倍増した時点（70年後）での気温上昇量である「過渡応答」の二つをよく区別して理解する必要もある。伊藤（2009）は、「実用上は後者が重要で、その値は前者より小さいのに、それがよく知られていない」と主張している。しかし正しくは、どちらも実用上重要である。なぜなら、長期的に気温上昇を止める目標（気候安定化目標）を議論するためには、過渡気候応答ではなく、平衡気候感度で議論する必要があるからである。

なお、伊藤（2008）および伊藤（2009）が引用している、気候感度を1.1℃前後と推定したSchwartz（2007）については、手法の問題点などを指摘したFoster *et al.*（2008）、Knutti *et al.*（2008）、Scafetta（2008）の3編のコメント論文が出されている。これらに対してSchwartzは、コメントへの応答論文の中で自らの推定値を1.9℃前後に修正した（Schwartz 2008）。（ただし、これはSchwartz（2008）で改定された手法にコメント論文の著者たちが満足したことを必ずしも意味しない）

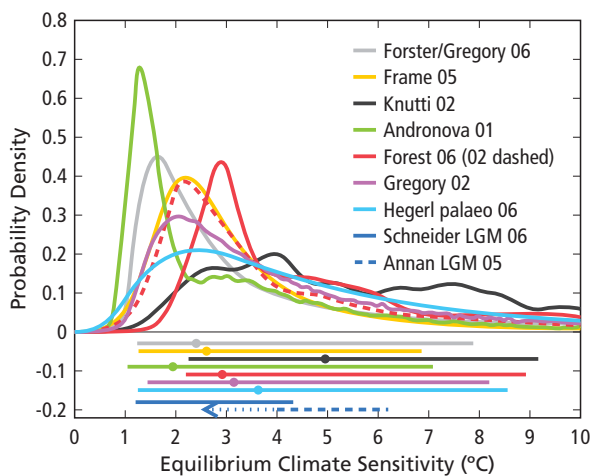


図15 観測データに基づいて推定された気候感度（二酸化炭素倍増平衡気候感度）の確率分布
（出所：IPCC WG1 AR4, Figure 9.20）

注）この図は、種々の研究による、観測データに基づく気候感度の推定値の確率分布を示している。図の下側の線は5-95%信頼区間、ドットは中央値を表す。どの研究も簡単なモデルを用いているが、モデルのパラメータを観測データにより制約するため、実質的に観測データに基づく推定といえる（ただしAnnan LGM 05はGCMを用いているのでモデル依存性が入っているだろう）。いずれにしろ、どの推定も高い気候感度の方向に長い尾を引くことが共通の特徴である。このため、たとえば伊藤（2009）で引用しているForster/Gregory 06（灰色線）では、確かに最尤推定（分布のピーク）は1.6℃であるものの、中央値（図の下側のドット）は2.4℃と高くなることに注意してほしい。中央値を3℃前後とする研究がもっとも多く、最尤推定で見ても2～3℃を超える研究が少なくない（IPCC WG1 AR4, Figure 9.20）。

3.5. 地球大気の構造・光学特性に関する議論

地球上の全球平均地上気温を理論的に説明するのに大気の温室効果は必須である。大気の温室効果に最大の寄与をする物質是水蒸気だが、海のある地球上では大気中の水蒸気量は大局的には温度に伴って決まる。したがって水蒸気は温度変化に対して正のフィードバックの要因として働き、外的強制作用としては重要でない。第2の寄与をするのが二酸化炭素であり、この濃度が人間活動によって増加していることは気候に対する外的強制作用として重要である。懐疑論者の間で典型的な議論として、「赤外線吸収の主役是水蒸気であり、二酸化炭素の増加などとは足りない」「二酸化炭素による赤外線吸収は飽和しており、濃度が増加しても昇温につながらない」といったものがある。また槌田（2006）は独自の理論により「地球表面の気温が二酸化炭素濃度によらない全く別の過程によって決まっている」と主張する。本節では、これらの主張の背後にある誤解について指摘を行っていく。



議論 23



対流圏上部の大気温度は、その大気中の水蒸気の分子振動による宇宙への放熱で決まる。この温度はマイナス18℃である。残りの対流圏大気の基準温度は気圧で決まる。高度の下降に伴い気圧が上がると温度が上がる。地上の温度は（気温）は、1気圧での基準温度の付近にある。基準温度よりも対流圏大気の温度が高くなると不安定になり、対流とそれに伴う蒸気降雨が発生して冷却されるので、基準温度は維持される（槌田2004）。

反論

地球のエネルギー収支はつりあっていると近似できるので、地球が吸収する太陽エネルギー量が変化しなければ、宇宙から見たときに地球が出す放射の代表温度（有効放射温度）は一定（マイナス18℃）とみなしてもよい。また、対流圏の鉛直温度勾配は近似的には一定とみなしてもよい。

しかし、槌田（2004）では、放射の代表温度をもつ高さが変化することが見落とされている。温室効果物質が多いということは、赤外線に対して大気がより不透明だということだから、赤外線が宇宙から見えるのはより外側、つまりより高いところになる。つまり、放射の代表温度をもつ高さは温室効果物質が多いほど高くなる。したがって、温度勾配が一定ならば、地面付近の気温は、より高くなる。

これは真鍋による次の有名な温室効果の説明に他ならない（例えば真鍋 1985）。図16において、地球の出す放射の代表温度が T_e で、太陽から受け取る放射とつりあっているとすると、実線の温度分布ならば、図16のAが放射を出す代表位置である。ここで大気が赤外線に対してより不透明になったとすると、放射を出す代表位置がA'に変わる。ところがこれでは地球が出すエネルギーが受け取る太陽エネルギーより少ないので、

地球（大気・海洋）が暖まっていく。A'の高さの温度が T_e となる破線の温度分布まで大気全体が暖まって、地球のエネルギー収支がつりあうことになる。

なお、実際には地表付近気温はこれだけからは決まらず、地表面エネルギー収支の影響を受ける点に注意が必要である。

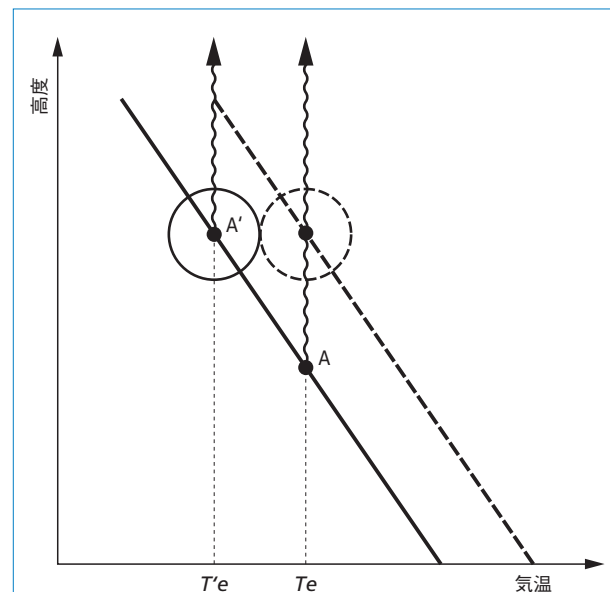


図16 気温と高度との関係を示す模式図
(出所：真鍋（1985）)



議論 24



成層圏でも大気は循環しており、その結果秒速60メートルもの風が吹いているので平衡状態とはとても言えない。まして、対流圏では、積乱雲が見られるように地表から対流圏上部まで直結して激しい活動があり、これを平衡で近似することはそもそも無理である。そのような平衡モデルを出発点とする地球温暖化論では正しい答えが得られるはずがない（槌田2005b；槌田2006）。

反論

放射対流平衡モデルの「平衡」という概念に反応しているようであるが、ここではまず用語の意味の違いに起因する誤解があることに注意したい。気候モデルの文脈で「平衡」という用語が意味するのは、熱力学的な用語では「平衡状態」（エントロピー極大のいわゆる「熱的死」の状態）ではなく、「非平衡定常状態」（エネルギーの出入りによりエントロピーを低く保ったまま時間的に定常な状態）のことである。地球は熱力学的にはエネルギーについて開いた非平衡系であるため、地球物理学では（少なくとも大循環のスケールでは）孤立系の熱力学的平衡状態を問題にする機会が無いことから、「平衡」という用語が熱力学的平衡ではなく単に外部条件にバランスした時間的な定常状態を表す意味で用いられることが慣例化しているものと思われる。これを熱力学的平衡と受け取られると、大きな誤解を招く可能性がある。この点は地球物理学者（気象学者）

の側からも注意すべき点と言えるかもしれない。

さて、この点に注意すれば、槌田（2006）の誤解を指摘するのは容易である。鉛直1次元放射対流平衡モデルでは、水平方向に平均化された鉛直温度構造を問題にしている。成層圏の循環は風速が大きくても水平平均した鉛直温度構造の変化に大きく寄与しないので、その効果は省略されているが、これはモデルが「成層圏の大気が循環していない」と仮定していることを意味しない。積乱雲についてはその平均的な効果を対流調節と呼ばれる近似（パラメタリゼーション）により考慮しているので、モデルは「対流圏の鉛直運動が存在しない」とも仮定していない。

なお、近年温暖化の研究によく用いられる3次元の大気大循環モデルでは、成層圏の循環も対流圏の鉛直運動も（積乱雲の効果はパラメタリゼーションであるものの）明示的に表現されており、時間的な定常状態も仮定されていないので、槌田（2006）の批判はさらに当たらない。





議論 25



気温は、1)対流圏上空の温度、2)断熱圧縮、3)水蒸気を原因とする対流、で決まる。CO₂温暖化説は、これを十分に考慮していない（槌田2005b）。

反論

この3項目には放射過程が欠落している。対流圏の鉛直温度勾配が基本的に対流で決まっていることは確かだが、温度そのものを決める上では放射過程は無視できない。

まず、仮に水蒸気の凝結・蒸発過程がない場合を考える。乾燥断熱勾配よりきつい勾配は、対流が起こるので長続きしない。逆にゆるい場合（上下逆転した場合を含む）は対流が抑制されるので持続可能である。したがって、時空間平均した鉛直温度勾配は、乾燥断熱勾配かそれよりゆるい。地球大気の対流圏の状況では下端の地表面に太陽放射吸収による熱源があるので、必ず対流が起き、平均の鉛直温度勾配は乾燥断熱勾配に近くなるはずである。

水蒸気の効果は、基本的に凝結によって水蒸気の持っていたエネルギーがまわりの空気に移りその温度を上

げることによってきく（水蒸気の凝結によって大気を加熱して軽くする）。凝結しながら上昇する空気塊の温度変化は湿潤断熱勾配と呼ばれるものになる。しかし、水を降水として落としたあと下降する空気塊の温度変化や、上昇中でも凝結が進行しない場合の温度変化は乾燥断熱勾配に近いものになる。したがって、現実の大気の鉛直温度勾配は、湿潤断熱と乾燥断熱の間となる。

仮に放射にきく意味での水蒸気、他の気体成分、エアロゾルの量などが同じとすれば、地球が出す放射の代表温度とその温度をもつ高さが固定されているとみてよい。その条件で乾燥対流の場合と湿潤対流の場合を比較すれば、地上気温は湿潤対流の場合のほうが低くなる。しかし、放射にきく物質の量が変化すれば、代表温度を持つ高さは変化しうる。温度勾配が固定されていても、地上気温が対流だけで決まるわけではない。



 議論 26

水蒸気の濃度変動は大きい。30℃で飽和水蒸気は42,000ppm、10℃では、12,000ppm、0℃では、6,000ppmである。したがって、気温が下がると地表から放射される遠赤外線は大気を通過して宇宙に放出され易くなる（放射冷却）。寒冷化するとますます寒くなる（逆も正しい）。このように温室効果ガスの主役は水蒸気である。CO₂が100ppm増えたところで、この水蒸気温度の変動幅の範囲内であって、温暖化ガスとしての水蒸気による保温効果を大きく修正することにはならない（槌田2005b）。

 反論

この章の冒頭でも述べたように、地球大気の温室効果をもたらす最大の要因が水蒸気であることは正しい。また、海のあるもとでは、大気中の水蒸気量はほぼ飽和水蒸気量に比例して増加すると思われるので、温度に対して水蒸気の温室効果が正のフィードバックになることも恐らく正しい。実際に、温暖化予測に用いられる3次元気候モデルにおいては、水蒸気による赤外線の吸収・射出は二酸化炭素等と同様に当然考慮されている。

しかし、水蒸気はすべての波長の赤外線を強く吸収・射出するわけではない。二酸化炭素、メタン、N₂O、フロンなどは、水蒸気の吸収の弱い波長帯の一部を強く吸収・射出する。その吸収波長帯の赤外線によるエネルギーのやりとりに関する限りは、水蒸気よりも重要である。さらに、成層圏においては、水蒸気量が非常に小さいため、赤外線の放射において、水蒸気よりも二酸化炭素の方が重要な役割を果たしている。本稿の「はじめに」で紹介したブログ“Real Climate”での議論（Schmidt 2005）によれば、大気の温室効果全体に占

める水蒸気の寄与は、雲による吸収の効果も含め80～90%程度で、二酸化炭素の寄与は20～30%である（吸収帯の重なりがあるので各種温室効果気体の寄与度の和は100%にならない）。これは、GISS GCMの中の放射プログラムによって得られた数値である。Schmidt (2005)はこの数値はRamanathan and Coakley (1978)の鉛直1次元モデルの計算結果ともよく対応すると述べている。ここで、地球大気全体の温室効果が地表気温で33℃の上昇に相当することから、比例計算すれば二酸化炭素の寄与は温度に直して7～10℃と評価できる。こうした見積りから、たとえ水蒸気が最も重要な温室効果ガスであっても、二酸化炭素濃度が産業革命以前と比べ2倍、3倍となれば気候に影響を与えうることは十分に納得できるであろう。

なお、水蒸気は通常、放射強制力をもたらす「人為起源」温室効果ガスに含められないが、これは、大気中の水蒸気量を決める要因がおもに大気と海洋および陸面との間の交換（蒸発・降水）であり、また、大気中の水蒸気の平均滞在時間（大気中の存在量を交換速度で割ったもの）が約10日と短いからであり、決して水蒸気的重要性が見落とされているためではない。





議論 27



二酸化炭素は地球放射の赤外線をこれ以上吸収しない。したがってさらなる温室効果を持たない（池田 2006, p.28-29）。

反論

図17は、鉛直方向の大気全層に相当する二酸化炭素による1回の吸収による放射透過率を波長別に計算したもので、横軸は波数（下；波長の逆数）または波長（上）、縦軸は透過率である。これを見ると、確かに波数630から700/cm付近では吸収が飽和している。

しかし、この図17は二酸化炭素による赤外線の射出をゼロとして、吸収の効果のみを表したものである。実際の大気では、地表面から射出された赤外線は大気中の温室効果ガスによる吸収・射出を繰り返して大気上端に到達する。大気中の二酸化炭素濃度が増加すると、この吸収・射出の平均回数が増加することにより、温室効果は増加する。したがって、大気全層による1回の吸収が飽和しているからといって、二酸化炭素がこれ以上増加しても温室効果は増加しないと考えるのは誤りである。

また、図17で波数570から620/cm付近と710から760/cm付近の黒く見えるところは、透過率が大きい値と小さい値の間を行ったり来たりしており、吸収線の間を示している。気体分子の吸収線は、圧力効果とドップラー効果と呼ばれる2つの効果によって波数方向に幅を持っており、特に、吸収線の中心で吸収が飽和しても、さらに気体濃度が増え、吸収線の幅が広が

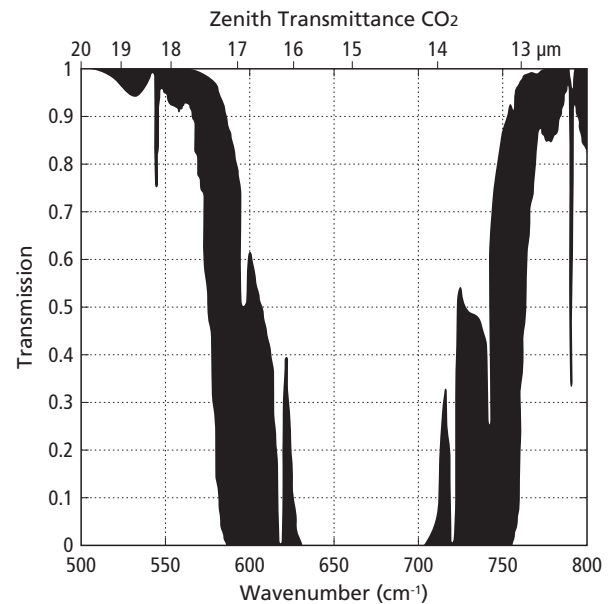


図17 二酸化炭素による放射透過率
(出所: Petty (2004))

ることにより吸収量が増加することが分かっている（柴田 1999；会田 1982；Petty 2004）。従って、これらの波長帯では大気全層の1回の吸収さえも未飽和であり、二酸化炭素の増加によって吸収量が増加することはさらに自明である。

3.6. 海水準変化に関する議論

各地の陸と海の関係は、ローカルな地殻変動や地盤沈下の影響も受けるため複雑である。しかし、多様なデータを総合すると、全球平均での海水準は20世紀の間に上昇したことは明らかである。たとえ、地域ごとのふるまいがそれと違っていても、それだけで全球平均の変動が否定されることはない。これまでの海面上昇は、温暖化に伴う海水の膨張と山岳氷河の融解を主要因として説明できる。21世紀には、温暖化が進めば大陸氷床の融解が進み、海水準上昇はさらに強まる可能性が高い。北極圏には、海水が凍った海水のほかにも巨大な氷河であるグリーンランド氷床があり、それが融解すれば、さらなる海水準上昇をもたらす。ただし、「氷床の流動がどのくらい加速するか」に関しては、現在、研究が継続中であり、まだ結論がまとまっていない。したがって、21世紀の海水準上昇が起こることは間違いないものの、その大きさの定量的な見通しには不確かさが大きい。



議論 28



ツバルの海面上昇は、ここ25年の変化はゼロである（渡辺2005, p.96）。

反論

まず一般論として、海面水位は付近の海流の自然変動や地盤の変動によっても影響を受ける。したがって、一部の地域で海面上昇が見られないことは特別におかしいことではなく、それが直ちに、実際に起きていることが明らかな全球的な海面上昇トレンドを否定する証拠にはならない。また、一部の地域の現象をとりあげて全体の傾向を否定する論法は、非常にミスリーディングなものである。その点を指摘したうえで、ツバルの海面上昇データについて反論する。

渡辺（2005）が主張の根拠として引用するウェブサイト（<http://john-daly.com/>）では、ツバルの首都フナフチに設置されたハワイ大学の潮位計による1977年～1999年末までの約22年間の月別潮位計測データをグラフとして示している。渡辺（2005）はそのグラフに基づき「ここ25年の変化はゼロ」と述べているが、実際には、NTC（National Tidal Centre in Australian Bureau of Meteorology）が2005年6月に公表した国別レポート（NTC2005）によると、同ハワイ大学の潮位計データによる22年間の海面変化トレンドは+0.9mm/年である。これは最新のIPCC報告書（IPCC 2007）による1961年～2003年の全球平均の海面変化トレンド（1.8mm/年）と同オーダーの数値であり、無視できるほど小さいものではない。

そのグラフの縦軸（潮位計の計測値）のレンジが-0.5m～2.75mと広いため、その図から0.9mm/年の上昇トレンド（22年間で約2cmの海面上昇）を見出すことは渡辺（2005）にとって困難であったかもしれない。しかし、同グラフを引いて「ここ25年の変化はゼロ」と判断するのは不適切である。ただし、このハワイ大学潮位計データには別の問題があることをNTCの国別レポートは指摘していることには注意が必要であ

る。長期の海面上昇傾向を観測するためには、地盤沈下等によって潮位計そのものの設置高さが変わる影響を補正（基準面補正）する必要がある。しかし、エルニーニョや短期的な海洋振動を観測するために設計されたこの潮位計では補正が不可能である。したがって、+0.9mm/年という数値の不確実性は大きく、その数値のみをもってフナフチにおける海面上昇の長期トレンドを断定出来ないことが指摘されている。

フナフチに関していえば、豪州国際開発局の資金援助により設置された（基準面補正された）精度良い潮位計による別の観測データも存在している。この観測データに基づき、観測開始（1993年）から最近（2005年）までの海面変化トレンドを見ると、1997年～1998年のエルニーニョに関連した一時的な海面下降があったにもかかわらず、+4.3mm/年の海面変化トレンドがあったことが分かっている。依然観測期間が短いことから、長期的なトレンドを断定することは出来ないものの、1993年～2005年の期間については、ツバルでは海面上昇があったといえる。

なお、最近ツバルでは洪水の被害が甚大になりつつある（たとえば、Patel 2006）。その要因としては、ローカルな人間活動でサンゴの健康がそこなわれたことや、人口増加に伴って土地利用が浸水常襲地帯まで広がったこともある。しかし、グローバルな海水準上昇も上に述べた程度には寄与しており、温暖化が進めば、それはますます重大になると思われる。

<追記：2009年4月23日>

2009年になって豪州国際開発局の出資による精度の良い潮位測定に関して、2005年6月以降のデータも用いた新たな研究論文の公表があった（Aung *et al.* 2009）。これによると、観測開始（1993年）から2008年9月までの平均潮位上昇傾向は5.9mm/年である。🔗

議論 29

現代の科学で判ることは、地球が温暖化すると海面が上昇する可能性が高い。ただし、その理由は、北極や南極の氷が溶けるからではなく、海の水が膨張するからである（武田 2007a, p.125；武田2007b）。

反論

海水面の変化などに関して、遠藤ら（2006）、武田（2007a、2007b、2008a、2008b）において、さまざまな事実誤認にもとづく主張が行われている。ここでは、それらに関して以下のように順に詳しい検証を行っていく。

議論29-1. 氷の融解によって海面上昇はおこらない

議論29-2. 極地は、北極海と南極大陸のみ

議論29-3. 極地の氷によって海面水位は下降すると
IPCCは主張している

議論29-4. 環境白書は間違っている

議論29-5. 新聞の報道は間違っている

議論29-6. 南極の氷床収支は、よほど特殊な事態がないかぎりマイナスである

議論 29-1

氷の融解によって海面上昇はおこらない。

証拠 1

現代の科学で判ることは、地球が温暖化すると海面が上昇する可能性が高い。ただし、その理由は、北極や南極の氷が溶けるからではなく、海の水が膨張するからである（武田2007a, p.125；武田2007b）。

証拠 2

「北極と南極の氷が解けて海水面が上がる」は間違い（武田2008a, p.75）。

証拠 3

温暖化で海水面は膨張するので10センチは上がる（武田2008a, p.75）。

証拠 4

「極地の氷が融けて海水面が上がる」がウソ（武田 2007c, p.105）。

反論

確かに、遠藤ら（2006）や武田の一連の書籍が指摘するように、氷山（氷河などから氷が崩れ落ちて海に浮かんだもの）や海水氷（海水が凍ったもの）の溶解による海面上昇に対する影響は「アルキメデスの原理」が適用され、非常に小さい。

しかし、陸上の氷床や山岳氷河、氷帽にある氷が、融けたり、そのまま海に流れ込んだ時点で海面上昇が生じる。すなわち、海面上昇に関しては、「アルキメデスの原理が適用される氷」だけではなく、すべての「氷」が議論の対象となるべきであり、実際になっている。

なお、IPCC報告書、たとえば最新の第4次評価報告書では、様々な要因の海面上昇への寄与度を明らかにしており、それによると、1993～2003年に起きた海面上昇（ $3.1 \pm 0.7 \text{ mm/year}$ ）への寄与度は、熱膨張が $1.6 \pm 0.5 \text{ mm/year}$ 、氷河と氷帽の融解が $0.77 \pm 0.22 \text{ mm/year}$ 、グリーンランドの氷床融解が $0.21 \pm 0.07 \text{ mm/year}$ 、南極の氷床融解が $0.21 \pm 0.35 \text{ mm/year}$ となっている（第3次評価報告書でも、氷全体の融解の寄与度はプラスになっている）。



議論 29-2

極地は、北極海と南極大陸のみ。

証拠 1

IPCCは「北極の氷」にグリーンランドを含めていない、ということだ。つまりIPCCが言う北極の氷は原則、海水の事になる(武田2008b, p.18)。

反論

遠藤ら(2006)、武田(2007a, 2007b, 2008a)には、「極地」の定義を「北極海と南極大陸のみ」とする誤認識がみられ、それに起因するさまざまな誤解が生じている(図18)。

IPCCでは、「極地(polar region)」の定義を、北極は“the Arctic is defined as the area within the Arctic Circle. It covers the Arctic Ocean and the islands and northern continental land areas. Thus, it extends far enough south to include parts of the boreal forest and discontinuous permafrost zone.”、同じく南極は、「ほぼ58°S以南」としている(IPCC第3次評価報告書第2作業部会報告第16章807ページ)。また、IPCC第3次評価報告書以外においても、学術上では、一般的に、北極は、北極圏(Arctic Circle)、もしくは60°N以北などと定義されている一方で、北極海のみを指す場合は北極海(Arctic Ocean)として表される。すなわち、IPCCや気象・気候学などの分野で用いられている定義では、極地は、北極海だけではなく、グリーンランド、北米大陸の一部(アラスカなど)、ユーラシア大陸の一部(シベリアなど)を含む。つまり、北極には、グ

リーンランドや永久凍土地域だけでなく、極地と定義される地域に包含される氷河も含まれる。また、IPCCにおいて「北極の海水」と「グリーンランド」の寄与は別項目として扱われているものの、両者とも「北極(Arctic)」に内包される。すなわち、武田(2008b, p.18)の「IPCCが言う北極の氷は原則、海水の事」という理解は根本的に間違っている。

なお、遠藤ら(2006)が参照している、IPCC第3次評価報告書では、「北極の海水(arctic sea ice)」を論じるセクション(2.2.5.2やBox7.1)においては、確かに「北極の氷(arctic ice)」との表現が用いられているが、これは予め対象を「北極の海水」に限定した文脈での表記である。



議論 29-3

極地の氷によって海面水位は下降するとIPCCは主張している。

証拠 1

IPCCは地球温暖化で気温が上昇すると極地の氷によって平均的には海面水位は下降すると報告している(遠藤ら2006)。

証拠 2

最新のIPCC第4次報告書では、1961年から2003年までのグリーンランドと南極の氷床の融解による海面上昇は合計して0.19mm/yearで、海面水位を上昇させるという点では、影響は小さかったことが報告されている(武田2007b, p.44)。

反論

遠藤ら(2006)は、Abstractで“the IPCC concluded in their past three reports that the sea level was estimated to be lower because of ice in the polar regions”、またその結果3.2で「IPCC報告書で海面水位が低下する記述されていた極地の氷」(原文ママ)と記述している。

一方、実際に遠藤ら(2006)が参照し得た第3次評価報告書においては、2100年までの海面上昇量に対する氷の寄与度として、氷河:0.01~0.23m、グリーンランド:-0.02~0.09m、南極大陸:-0.17~0.02mとの値を記している

IPCC	極地(北極)			*1	極地(南極)	
地域	北極海	グリーンランド	永久凍土地域	高山地	南極大陸	南極の海洋
氷の名前	北極海の海水	グリーンランド氷床	永久凍土	氷河および氷帽	南極大陸氷床	南極海の海水
環境白書		極地や高山地				
遠藤ら(2006)、武田	北極の氷 ^{*2}				南極大陸氷床	

*1 極地以外の高山地

*2 武田(2007b)が「アルキメデスの原理が適用される氷床」と呼んでいるもの

図18 極地の定義の違い

(IPCC第3次評価報告書第一作業部会報告第11章641ページ)。氷河が図18に示したように極地とそれ以外とにまたがることを考えると、IPCC報告書では「極地の氷」で海面水位の低下とはしていない。

ところで、IPCCには、“the static sensitivity values suggest a larger role for Antarctica than for Greenland for an identical local temperature increase, meaning that the polar ice sheets combined would produce a sea level lowering, but the spread of the individual estimates includes the possibility that both ice sheets may also balance one another for doubled atmospheric CO₂ conditions” (IPCC第3次評価報告書, WGI, Chap.11, p.654) と、極の氷床 (polar ice sheet; グリーンランドと南極大陸) についての記述は確かに存在する。しかし、「極の氷床 (polar ice sheet)」と「極地の氷 (ice in the polar regions)」とは、先述のように示す範囲が異なる。

武田が「北極の氷床は原則としてアルキメデスの原理がある」(武田, 2007b) と述べていることも考慮すると、遠藤ら (2006) では、(本来は大部分が陸上に存在する)「極の氷床」と「極地の氷」が同じものの誤解があった可能性がある。

また、第4次評価報告書が出た後の論議にも、問題がある。「グリーンランドと南極の氷床による影響は、海面水位を上昇させるという点では小さかった」(武田 2007b, p.44) との記述は、IPCC第4次評価報告書のどこにもなく、武田の主観にもとづく文章である。



議論 29-4

環境白書は間違っている。



証拠 1

日本政府は環境白書で、IPCC報告書と異なる表現を使っている (遠藤ら2006; 武田2007a)。



証拠 2

日本の環境省の「環境白書」は、20年にわたってIPCCの発表データを反対の方向に「誤訳」し、日本国民をミスリードしてきたのである (武田 2007c, p.105)。



反論

「極地の氷と海面水位の関係についてIPCCと反対の記述になっている」(原文ママ) という遠藤ら (2006) の3.2にある日本の『環境白書』批判も、極地の定義に対する誤った解釈に起因する。実際に、IPCC報告書以降に発行された環境白書は、例えば1998～2003年のそれにおいて「海水の膨張 (や)、極地や高山地の氷の融解」とあるように、熱膨張と、氷による寄与を総称した記述となっており、「IPCCと反対の記述」ではない。

すなわち、遠藤ら (2006) は、環境白書の「極地」の表現のみを取り上げ、さらに、前述の「極地=北極海と南極大陸のみ」との誤解釈により「環境白書が、極地の氷と海面水位の関係についてはIPCCと反対の認識になっている」との誤解が生じたといえる。



議論 29-5

新聞の報道は間違っている。



証拠 1

新聞は極地の氷が融解して海面水位が上昇するという記事を出しているが、その根拠は明らかではない (遠藤ら2006)。



証拠 2

一般市民は地球温暖化によって極地の氷が融解し、海面水位が上昇すると認識している (遠藤ら2006)。



反論

遠藤ら (2006) では、一定期間の朝日新聞の記事を集計し、海面上昇の原因記述があった96件のうち、主要なもので、北極の海水34件、南極55件、グリーンランド34件、氷河31件、熱膨張34件と集計している。

つまり、集計結果は、原因記述は重複しながらも、むしろ海面上昇の原因に関する報道において、新聞は非常にバランスがとれていることを示している。ところが遠藤ら (2006) の考察では、「新聞記事は一貫して海面水位は極地の氷によって上昇すると記載しており」(ここでは遠藤らの「極地」の定義にしたがう) と

しているが、そもそも、この結論は自らの集計結果と矛盾している。

また、明日香ら（2009）も、遠藤ら（2006）の手法に従い、集計の再現を試みた。遠藤ら（2006）の「地球温暖化による海面水位の変化に関する記述のあるものを該当記事とした」手法は、文意解釈で集計に恣意を挟む余地があり、また、オンラインで非公開となっている記事をどれだけ閲覧したかで結果に若干の幅が生じるため、完全な再現は行い難い。

結果として、たとえば、Arctic Sea Iceと分類される記事は、実際には3～5件に過ぎなかった（うち1つはフィクション記事、もう1つは読者の声）。しかし、ここで、遠藤ら（2006）の極地の定義を適用し、少なくとも19件ある「極地」、10件ある「北極」との記載を「北極の海水」として区分した場合には、計32～34件となり、遠藤ら（2006）の34件とほぼ合致した。

一方で、本来はグリーンランド・氷河・永久凍土などを含むはずの「北極」あるいは「極地」と記述されている記事を、遠藤らは「北極の海水」にカウントしているものの、「グリーンランド」などにはカウントしていない。1997年には、「北極」「極地」を要因とする記事が、それぞれ少なくとも3件、1件あり、本来であればグリーンランドは4件以上と集計されるはずが、遠藤らの集計では1件となっている。また、1995年の記事でも、「氷河・永久凍土」が1件、「極地方や高山の水」が1件、「極地方」が2件あり、本来であれば「氷河」は4件となるはずだが、遠藤らの集計では、1件とされている。このことから、遠藤ら（2006）が「極地」の定義を「北極海と南極大陸」と誤って解釈していると言える。

また、他にも問題がある。例えば、ラルセン棚氷の崩壊に起因する南極大陸氷床の海面上昇への寄与増大を報じている科学記事なども「南極の海面上昇という誤った報道の一つ」としてカウントしていると考えられ、遠藤ら（2006）の手法は、文脈を無視して集計している点でも不適切と言える。

ところで、この再検証によって、北極海の海水の融解により海面水位の上昇が生じるとする3件程度の記事が実際に見られたことは確かである。それら記事が、どの程度の影響を与えたのかの評価は難しい。

しかし、それと同時に、武田（2007a、2007b、2008a、2008b）において「極地＝北極海と南極大陸」と誤った認識で、おそらく多大な誤解を一般市民に与え続けてきたことも大きな問題だといえる。



議論 29-6

南極の氷床収支は、よほど特殊な事態がない限りマイナスである。



証拠 1

（IPCC報告書の記述として）よほど特殊な事態がない限り、南極の氷は増える（武田2008b, p.18）。

反論

確かに、南極の氷床の収支に関しては、いまだ不確実性が高く、例えば、IPCC第4次評価報告書の政策決定者向け要約（SPM）12ページにおいては以下のような記述となっている。

Current global model studies project that the Antarctic Ice Sheet will remain too cold for widespread surface melting and is expected to gain in mass due to increased snowfall. However, net loss of ice mass could occur if dynamical ice discharge dominates the ice sheet mass balance.

この文章では、降雪量の増加は見込まれているものの、現在のモデル計算では、現実に観測されている氷床の流出速度の増加が加味されていないことははっきりと記されている。すなわち、少なくとも、武田（2008b, p.18）の「よほど特殊な事態」という、非常に生じる確率が低いと思わせるような表現をIPCCは使っていない。

以上、海面上昇に関して、武田（2007a、2007b、2008a、2008b、2008c）では、最新の研究成果やIPCCの報告書の内容について正確に触れずに、一部の都合の良い記述のみを、一見客観的に見えるものの、実は主観的な表現を交えて社会に紹介しているといえる。

