

地球温暖化を巡る議論に関する物理学的な立場からの考察

= 判断しかねる立場から =

酪農学園大学 環境システム学部 矢吹哲夫

今年の3月に鹿児島で開かれた物理学会において、「温暖化現象を巡る諸説に関する物理学的な立場からの検討」というテーマでシンポジウムが開かれ、神戸大の蛸名邦禎氏、高千穂大の植田敦氏とともに、私もパネリストとして参加した。私は、『判断しかねる立場から』という副題を付けさせて頂き、地球温暖化問題の素人として一般市民の立場を代表して、地球温暖化問題の論点を整理する形で講演をさせて頂いた。今回、そのとき整理した論点とシンポジウムでの討議に基づき、あらためて本誌上で地球温暖化問題について私が知りえた範囲内においてのレビューをさせて頂く。

1. 温暖化説の定説と異説

人間の産業活動に伴って排出される二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスが深刻な地球温暖化をもたらしているという説(以下「CO₂温暖化説」と呼ぶ。)が気象学者から提起され、2001年にIPCC(気候変動に関する政府間パネル)の第3次報告書がこの説が真実である“可能性が高い”と発表するにおよんで、「CO₂温暖化説」はヨーロッパ諸国を中心とする各国政府、企業をはじめ国際世論の支持するところとなった。そこで以下では、この大気中のCO₂濃度の上昇が原因で地球の平均気温の上昇という結果を招いているとする「CO₂温暖化説」を“定説”と位置づける。(“通説”という表現も考えたが、科学者を含めたマジョリティの支持を得ているという意味で“定説”の表現を用いることにした。勿論、天動説が“定説”だった中世を省みれば、“定説”が必ずしも真理を説いているとは限らないことは言うまでもない。)日本でも1997年に京都で行な

われたCOP3(第3回締約国会議)及びその際日本がイニシアチブを発揮して取り交わされた京都議定書により、国内世論も「CO₂温暖化説」を定説とみなしたと言える。一方でこの「CO₂温暖化説」の定説を真っ向から否定する論(以下「異説」と呼ぶ。)が存在し、少なくない科学者が「CO₂温暖化説」に待ったをかける論を展開していることも事実である。

この覚書では、「定説」、「異説」のどちらが正しいか判断しかねる立場で論考を行なう。まず、温暖化論の専門化ではない私が、一般市民を代表する立場で現在把握している範囲内で温暖化とその原因論を検証し、その具体的なポイントを整理する。

2. 温暖化の検証

(地球は温暖化しているのか?)

(1) 地球気温の“過去”

過去の地球気温は、様々な代替指標(気温測定の代わりになる指標)を用いて推定する「多代替指標方式(Multi-proxy)」で行なわれている。以下、その代表的な指標を挙げる。

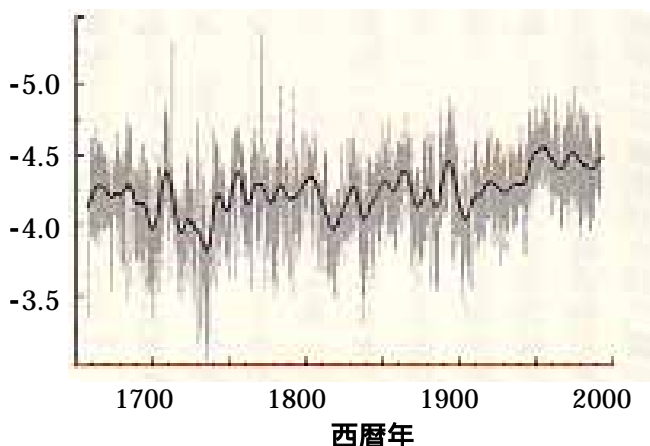
年輪

樹木は気温が高いほど成長が速いので、年輪の幅の広さから気温を推定できる。しかし、樹木の成長に影響を与えるのは気温だけではなく、降水量、二酸化炭素濃度も関係する。また一般に若いほど成長が速く年齢を経ると成長が遅くなるので、その補正が必要となる。年輪という代替指標による気温の推定は、樹木のある陸地であればどこでも可能であり最も一般的なものであるが、一筋縄ではいかない難しさを内包している。実際に年輪を用いたいくつかの気温データが発表され

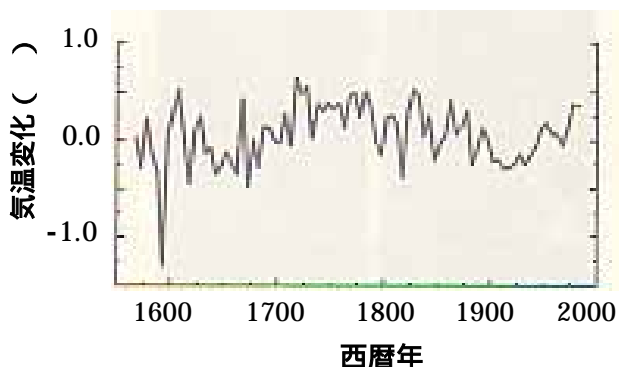
ているが、それらの間にはかなりの相違がある。

サンゴ骨格の酸素同位体分析

海水中には普通の酸素¹⁶Oを含む水H₂¹⁶Oと同時に僅かながら同位体酸素¹⁸Oを含む水H₂¹⁸Oが含まれている。H₂¹⁸OはH₂¹⁶Oより重く蒸発しにくい、気温(海水温)が上がると蒸発しやすくなるため、海水中の酸素同位体比は気温(海水温)と負の相関がある。サンゴはその骨格形成の際、海水中の酸素を取り込むので、サンゴの年輪ごとの酸素同位体比を調べることで、よりその年の海水温(気温)が推定できる。例えば石垣島のハマサンゴ群で酸素同位体分析を行った結果、この200年間特に夏100年ごとに確実に気温が上昇していることが分かっている(文献[2]参照)。また、この酸素同位体比分析とは別にストロンチウムとカルシウムの比 Sr/Ca を用いたサンゴ骨格の分析による気温推定法もある。図1はどちらもオーストラリアの海域で、



ニューカレドニアサンゴ礁の¹⁸O濃度
(単位 1/1000)



グレートバリアリーフサンゴ礁による気温の推定

図1 サンゴによる気温の推定[1]

ニューカレドニアのサンゴ礁の分析により得た気温推定結果のグラフ、はグレートバリアリーフのサンゴ礁での分析により得た気温推定結果のグラフである。このグラフから、少なくともこの海域で18世紀に現在より温暖な時期があったことが読み取れる。

ポアホール測定

地表の気温の変化は、非常にゆっくりした熱伝導で地中深く伝えられるので、地中深く掘られた穴の壁には昔の気温が残っている。穴の壁のその深度による温度分布を測定することで、過去の気温を推定することができる。この方法をポアホール測定という。図2はグリーンランドでの氷床ポアホールの測定データに基づく過去2000年間の気温推定のグラフである。これを見ると、グリーンランドでは中世9世紀には現在より1以上温暖な時期があったことが分かる。

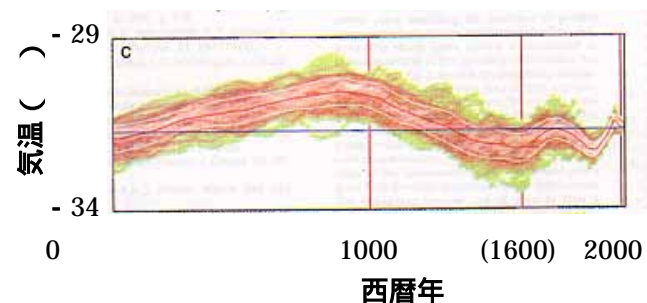


図2 グリーンランド氷床ボーリングによる推定[3]

氷床コア、湖底・海底堆積物の酸素同位体分析
サンゴ骨格に対する酸素同位体分析のところで説明したように、気温が高いと重い¹⁸Oが相対的に多く海水から蒸発する。その結果大気中の酸素同位体比が上昇するので、氷床コアや湖底・海底堆積物に閉じ込められた過去の大気中の酸素分子の同位体分析を行なうことで過去の気温を推定できる。日本の研究チームによる南極“ドームふじ”による南極氷床コア、福井県水月湖の湖底堆積物、海洋堆積物等の酸素同位体分析も行なわれている。

以上の様々な代替指標による過去の地球気温推定から、10世紀前後の中世に現在に匹敵する温暖な期間があったこと(データによっては、現

在より高い気温を示している。)が伺える。当時の気温変化は人為変動ではなく純粋な自然変動と考えられるので、近年の温暖化傾向が、この1000年単位の中での自然変動である可能性を100%否定することはできないであろう。

この現在の温暖化が自然変動なのか人為変動なのかについての議論はこの後の(3)であらためて考察する。

(2) 地球気温の“現在”

現在の地球気温は、陸地については百葉箱、海洋については船やブイによる地道な直接測定に加えて、1980年頃から衛星を用いた地球全体の気温のモニターも行なわれている。

百葉箱

現在、日本の気象庁では機械による自動記録を行なっていて百葉箱は使っていないが、世界の多くの地域では陸上の気温測定を百葉箱に頼っている。その場合、百葉箱の管理が正確な気温測定の鍵を握っている。しかし、例えば太陽光の直射を避けるための百葉箱の白い塗料が剥げ落ちてくると太陽光の反射が減り、実際の気温より高い計測値を記録してしまう。また、開発が進み百葉箱の近くに建物が林立すると風通しが悪くなって、この場合もまた実際の気温より高い計測値を記録してしまう。百葉箱による気温測定はそのままでは信頼性は決して高くないと判断される。

船やブイ

陸上の気温測定に比べると、船やブイによる海上の測定点は極めて限られている。また測定誤差も小さくない。

衛星観測

大気中の酸素分子が出す電磁波の強さを衛星軌道で測定して、気温を測定する方法である。地上(陸地、海洋)での直接測定の値より低めの値が出ているが、衛星軌道の降下によると考えられていて、その補正の努力もなされている。

(3) 温暖化は自然変動か人為変動か？

前節(2)で紹介したように、過去の気温は多代替

指標方式(multi-proxy)で、現在の気温は直接測定と衛星観測で各々行なわれている。図3は両者のデータを合わせた過去2000年間の地球気温のグラフである。上と下は各々別のグループによるものであるが、いずれにしても近年の地球温暖化の傾向は否定できないと判断される。

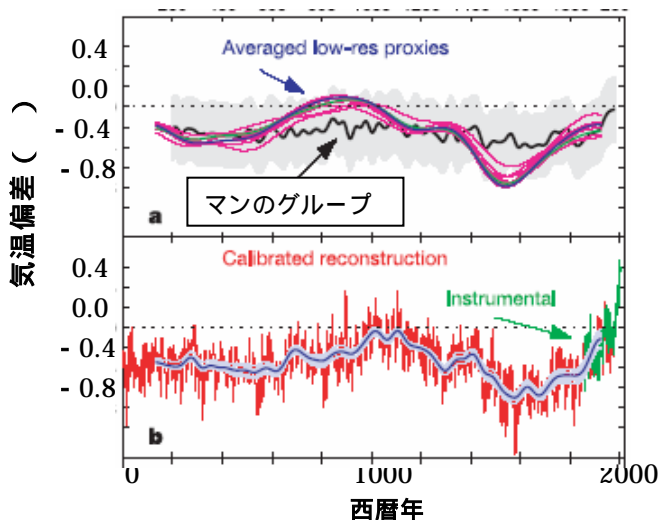


図3 推定気温変化[5]

それでは、近年の温暖化即ち地球気温の上昇は、自然変動と捉えるべきなのか、それとも人為変動と捉えるべきなのであろうか？

図3の上のグラフ(一重線)は、マンのグループによる年輪を主な代替指標とした過去2000年間の気温推定のグラフである。このマンのグループによる解析グラフは19世紀からの気温上昇が特に著しく、その形がホッケースティックに似ている。このホッケースティック型グラフはIPCCの報告で産業活動に伴う短期的に急激な気温上昇の証拠として引用されている。一方図3の下のグラフは2005年に科学雑誌「Nature」(文献[5])で発表されたMoberg達の多代替指標方式(multi-proxy)による解析報告であり、マンたちが主に陸上の年輪指標に依拠していたのに対して、海洋堆積物の酸素同位体解析も加えて全地球規模での過去の気温推定を行なった結果である。その際Moberg達は、100年の時間分解能しかない海洋堆積物によるデータ(図3の上のグラフの束になったグラフ)をウェブレット解析の手法で10年の時間分解能に内挿することによりマ

ン達のデータとの直接比較を可能にした。図3の下の図から分かるように、Moberg 達の解析では、低温期である17世紀頃から現在まで長期的な気温上昇が続いていて決してホッケースティック型の19世紀の産業革命以来の短期間の気温上昇ではないことが見て取れる。

果たして、IPCC が結論付けているように近年の気温上昇が産業活動による人為変動と断定して良いのかどうか、過去の気温データからは判断しかねるところである。

3. CO₂ 変動と気温変動はどちらが先か？

現在大気中の濃度と気温がともに増加傾向にあり、両者の間に正の相関があることに異論をばさむ研究者はいない。しかし、両者の間の因果関係の議論になると話は単純ではない。

大気中の CO₂ 濃度の変化と気温の変化との間には、互いに逆方向の因果関係が存在する。一つは、CO₂ 濃度の変化が温室効果の変化を生み、その結果気温の変化が生じるという因果関係であり、もう一つは気温の変化が海洋中の CO₂ 溶解度の変化を生み、その結果 CO₂ 濃度の変化が生じるという因果関係である。この双方向の因果関係のうちどちらを優位と考えるかで「定説」と「異説」に分かれる。

地球温暖化の定説は、前者が後者より優位であり、CO₂ に代表される温室効果ガスの大気中の濃度の上昇が温室効果を強め気温の上昇が起こるという因果関係を基本とする。即ち CO₂ 濃度の上昇が原因で気温の上昇は結果であるという因果論である。これに対して異説の多くは、気温の上昇が原因で CO₂ 濃度の上昇は結果であるという因果関係を基本とする。この因果論の中で、気温の上昇が CO₂ 濃度の上昇をもたらすメカニズムとしては、気温の上昇が海洋中の CO₂ 飽和溶解度を下げ余剰になった CO₂ が大気中に放出され大気中の CO₂ 濃度が上昇するということを基本としつつ、その他気温の上昇が微生物の個体数を増やしてその呼吸により CO₂ 濃度が上昇するという可能性も含めて考えられている。

果たして、この互いに逆方向の因果関係のどちらが優位なのかを判断するためには以下の2つの側面からの考察が鍵となろう。

(1) 気温変化と濃度の変化のグラフから、

どちらが先行しているかを直接的に考察する。

図4はキーリングによる大気中の濃度の変化と気温の変化のグラフである。実線が気温で、破線が大気中の濃度である。この図を一見すると、気温の変化が濃度の変化に先行しているように見える。しかし、大気中の濃度と気温の互いに逆方向のどちらの因果関係についても、数年間の時間を要する影響と考えられるので、例えば10年平均をとるなどして長期的な変化を見て比較しなければならないだろう。実際に図4について、日本気象学会は「CO₂の濃度変化の長期的傾向が除かれている。」と指摘している。

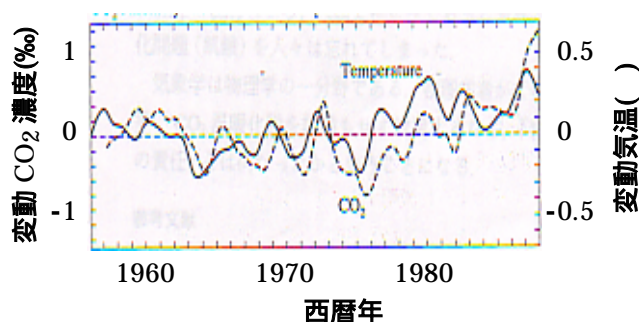


図4 気温と CO₂ 濃度の経年変化[7]

また同じキーリングが1995年には科学雑誌「Nature」(文献[6])にエルニーニョ発生直後には、陸上生物の呼吸の活発化によって濃度が増加することを報告している。この中でキーリングが用いた手法は安定同位体¹³C(炭素13)の減少度を調べる方法である。生物の体を構成する炭素は元を辿れば植物が光合成したときに大気から吸収された炭素であるが、このとき¹³Cは分子量が大きいために¹²Cに比べて吸収率が低い。これは、植物の炭素同位体分別効果と呼ばれている。そのため、生物の呼吸から放出されたCO₂に含まれる¹³Cは生物起源でないCO₂が含む¹³Cより少なくなるので、大気中の¹³Cの減少度(δ(¹³C))を測定することにより、生物の呼吸に

よる CO₂ の増加量を推定することができる。

この事実は、気温の上昇が原因で濃度の上昇が起こることの一つの例である。

しかし、気温変化と濃度の変化のグラフからどちらの因果関係が優位なのかを確定的に断じることが、難しいと判断される。

(2) 大気中の CO₂ 濃度上昇と化石燃料の消費に伴う CO₂ 濃度上昇のグラフの比較

近年の大気中の CO₂ 濃度の上昇が産業活動による化石燃料の燃焼によるものかどうかを確かめる手立てとして、全世界の化石燃料の消費量のデータからその CO₂ 放出量を推定し、その時間変化が大気中 CO₂ 濃度の時間変化と一致するかどうかを調べることも一つの方法である。図 5 は IPCC 第 3 次報告の「第 3 章：炭素循環と大気中の二酸化炭素」の中で紹介されているグラフである。

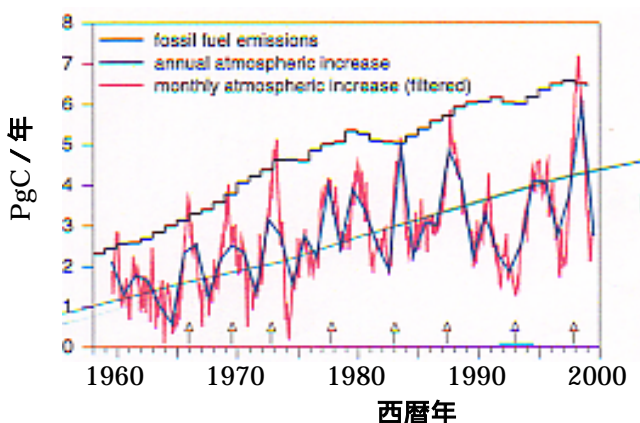


図 5 大気中の CO₂ 濃度上昇と化石燃料の消費[9]

一番上の階段状のグラフが化石燃料の消費量から推定されたその CO₂ 放出量の増加率 (PgC/年: 年当たり炭素換算量 10 億トン) であり、下の 2 つのグラフは各々大気中の CO₂ 濃度の増加率 (PgC/年) の 1 ヶ月ごとの変化と 1 年ごとの変化である。大気中の CO₂ 濃度の変化に入れた直線は本著者 (矢吹) によるものである。槌田敦氏はこれらのグラフの比較から、特に 1990 年代に産業活動が世界的に停滞し化石燃料の消費に伴う CO₂ 増加率は鈍化している (図 5 から読み取れる) にもかかわらず、大気中の CO₂ 濃度の増加率は右肩上がりのまま勢いを失っていない

(図 5 中の本著者による直線を参照のこと)。このことから槌田氏は、近年の大気中 CO₂ 濃度の上昇は化石燃料の燃焼によるものではないと断じている。本著者 (矢吹) にとって、この指摘は考えさせられる指摘であるが、いわば増加率の増加率という微妙な量の比較であり、このグラフから直ちにそう断言してよいかどうか、判断しかねるところである。

また図 6 から、槌田氏は 1991 年のピナツボ火山の噴火後数年間の大気中の増加の横ばいを指摘し、その間化石燃料の燃焼による人為的 CO₂ は増加していることを考え合わせ、近年の大気中の CO₂ 増加は化石燃料の燃焼によるものではないと断じている。(文献[8])

しかし、キーリングは前述したネーチャー誌上の論文報告 (文献[6]) で、ピナツボ火山噴火後は気温低下によって降雨量が増加し、その結果以下

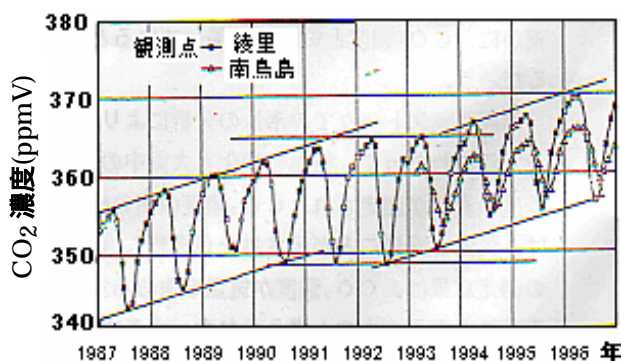


図 6 CO₂ 濃度とピナツボ火山の噴火

の現象が生じて大気中の CO₂ 吸収率が上昇したと指摘している。

- 光合成の活発化
- 土中の微生物の呼吸の減少
- 森林火災の減少

この指摘が正しいとすると、化石燃料の燃焼による人為的 CO₂ の増加と、上記の原因による大気中の CO₂ の吸収率の上昇が相殺して、図 6 のような大気中の CO₂ 増加の横ばいが出現したと考えることもできる。ただ、本著者 (矢吹) は、キーリングが根拠にした「大気中の ¹³C の減少度を測定することにより、生物の呼吸による CO₂ の増加量を推定することができる。」という基本手

法に関して素人であり、大気中の ^{13}C の減少度($\delta(^{13}\text{C})$)は同時に化石燃料の燃焼から生じる CO_2 の増加量も示している(化石燃料に含まれる炭素は元を正せば植物の光合成によって取り込まれた CO_2 であり、やはり ^{13}C をはじく同位体分別効果が効いていると考えられるから)と考えられるので、この微妙な考察については判断しかねる状態であるというのが正直なところである。

4. 判断しかねる立場から(まとめとして)

物理学会のシンポジウムでのパネルディスカッションから得た印象として、槌田氏が指摘するように、異説に頷かせる論拠は、判断しかねるとは言いいくつも提出されているのに、定説を支持する測定データが提出されていない(少なくとも本著者が調べた限り、理論モデルを別にして測定データに立脚した論拠は見出していない)。現状では、物理学的な立場として定説を支持する確信をもつに至ることはできない。

大気中の濃度の上昇と地球気温の上昇の間の2方向の因果関係のどちらが優位かという問題に対して、現時点で私の知りえた範囲内では、陸上・海洋の生命圏及び海洋が大気中の二酸化炭素濃度、地上気温に対して複雑な応答をしていて、それらがあるときは増幅しあい、あるときはマスクしあっていて、一筋縄に結論を出すことを難しくさせている。

気温と濃度の間には複雑な因果関係が絡み合っていて、定説と異説の見極めには、より精確な炭素循環モデルと気候変動モデル(少なくともより精確な気温変化モデル)が必要と痛感する。今後様々な分野の研究者が胸襟を開いて率直に議論を戦わせることで、地球温暖化の『科学的真理』に到達することができると信じる。そのためには、定説、異説とも頭ごなしの批判の応酬ではなく、科学者として“真理”に門戸を開いた姿勢を堅持することが何にもまして求められるであろう。この点について、ワートがその著書「地球温暖化の発見」(文献[10])で述べている以下の言葉を引用しておく。

『科学者が確かな知識を追求する際に必要な原則は、意見の相違に耐えて公の議論の場であらゆる合理的な主張の発言を認めること。たとえ他の点について意見が一致しないことに同意していても、重要な点については意見の一致を求めて徹底的に話し合うこと。』

最後に、この地球温暖化問題に対して物理学的に(科学的に)『科学的真理』に到達できず定説を支持できるかどうか保留するとしても、このまま手をこまねいていても良いとは短絡しないことを強調しておきたい。いわゆる予防原則の観点から、定説の立場での予防の努力を支持することも必要と考える。その際、費用対効果の吟味は欠かせない前提条件ではあるが、この点について、前述のワートが同じその著書で述べている以下の言葉を引用してこの小文を終えることとする。

『気候の場合、確実な答を待つことは永遠に待つことを意味する。新たな病気や武装侵略に直面したときは、さらに多くの研究が終わるまで決断が延ばされることはない。利用できる最善の指針を用いて行動を起こすものだ。』

参考文献

- [1] 伊藤公紀著『地球温暖化 埋まってきたジグソーパズル』日本評論社、2004年。
- [2] 松本英二: パリティ 1999年2月号 4-8頁。
- [3] D. Dahl-Jensen, *et al.*: *Science* **282** (1998) 268-271.
- [4] 渡辺興亜: *科学* **69**[7] (1999) 608-618.
- [5] A. Moberg *et al.*: *Nature* **433** (2005) 613-617.
- [6] C. D. Keeling *et al.*: *Nature* **375** (1995) 666-670.
- [7] 槌田敦: *日本物理学会誌* **62**[2] (2007) 115-117.
- [8] 槌田敦: 『 CO_2 温暖化説は間違っている』(ほたる出版) 2006年。
- [9] IPCC 第3次報告(2001年)、第3章。
- [10] S. R. ワート著(増田耕一・藤井ひろ美共訳)『温暖化の 発見 とは何か』みすず書房、2006年。

