

ウェブサイト掲載に当たって

東北大学は今年（2007年）、創立100周年を迎えます。理学研究科では、この機会に、高校生を主な対象とした「青葉山サイエンス・サマースクール」を開講することにしました。期間は8月20日（月）から24日（金）までの5日間です。青葉山の理学部キャンパス内にある「理学部大講義室」で、毎日13時から17時まで、4名から5名の講師による講演が行われ、その後17時から18時まで、理葉厚生会館（グリーンホール）で講演者を交えたサイエンス・カフェが開催されます。この催事の詳細は、本研究科のウェブサイト（下記のアドレス）をご覧ください。

このサマースクールは、本研究科で走らせている三つの21世紀COEプログラムの成果がもとになっています。このうち、地球科学COEの成果は、23日（木）と24日（金）に紹介されます。是非、多くの皆さんが参加されることを期待しております。

私も、23日（木）14時35分から15時20分まで、「地球温暖化と海」と題して講演を行います。今年2月、IPCC第1作業部会による第4次評価報告書が公表されましたが、私は第5章（海洋に関する章）の執筆者として参加しています。今回の講演では、その内容を紹介します。以下の文章は、講演要旨集のために作成いたしました。地球温暖化や気候変動における海洋の役割について解説しているものです。何らかの参考になればと思い、本ウェブサイトに掲載することとしました。

2007年7月26日

花輪 公雄

本催事を紹介しているウェブサイトのアドレス：

http://www.sci.tohoku.ac.jp/docs/world-wide/summerschool_program.pdf

地球温暖化と海

花輪公雄

(東北大学 大学院理学研究科 地球物理学専攻)

< 要旨 >

人類は産業革命以来、石炭や石油などの化石燃料を大量に消費してきました。このため、「温室効果気体」が大気中に残り、地球温暖化が顕在化しています。最近の研究により、海洋にも地球温暖化の影響が現れていることがわかってきました。1955年以降の約50年間で、海は 14.5×10^{22} ジュールもの大量の熱を貯えていたのです。また、高緯度海洋表層は低塩化、低緯度は高塩化していることもわかりました。海水の熱膨張と、大陸氷河などの融解による海水の増加により、海面水位の上昇も起こっています。本講演では、最近公表された IPCC 第1作業部会による第4次評価報告書を中心に、地球温暖化の実態と海洋の関わりについてお話しします。

1. はじめに

地球温暖化が心配されるようになり、国際連合では、科学者グループによる気候の診断と予測、影響評価、緩和策の検討を行うことに決めました。そして1988年に設置されたのが「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」です。IPCCは、5~6年おきに「評価報告書」を公表しています。今年(2007年)2月に公表されたその第1作業部会の第4次評価報告書 (IPCC, 2007) では、産業革命以来の地球の温暖化は明白であり、それは私たちが化石燃料を消費しているため温室効果気体が増加したことによるものであると断定しました。

この講演では、温室効果の仕組み、温室効果気体、IPCCの活動、第4次評価報告書の特徴、その概要、特に海洋の変動や、地球温暖化における海洋の役割などについて概説します。

2. 温室効果と地球温暖化

図1に、1850年以降の全球平均地表面気温の変化を示します。気温は、上がったりがったりと変動はしていますが、20世紀にはいと急激に上昇しています。図中の直線は、この変動を直線で近似したものです。最近の期間に限れば限るほど直線の傾きが急になっていることもわかります。このような気温の上昇が、地球温暖化です。

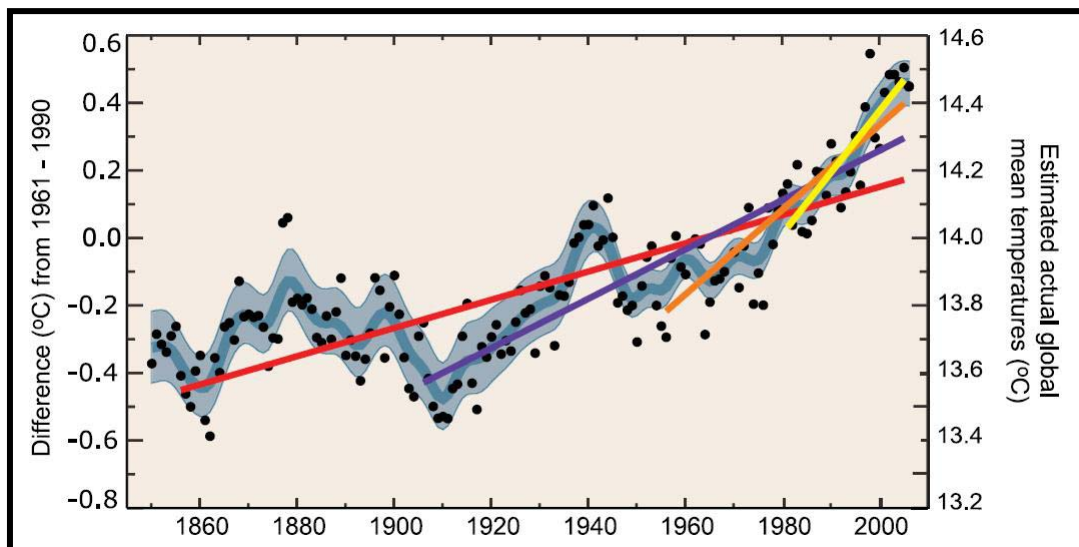


図1. 温度計計測資料に基づく全球平均地表面気温の変化。1850年から2006年まで。図の直線は、その長さの期間で求めた長期傾向(トレンド)。縦軸は、1961年から1990年までの平均値からの差(左側の目盛)と、温度(右側の目盛)。

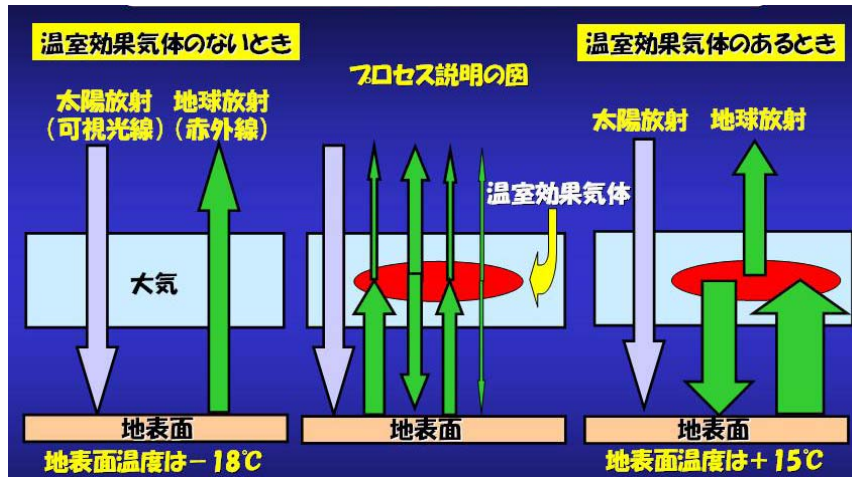


図2. 温室効果の仕組みを説明する模式図.

第4次評価報告書では、この地球温暖化は「温室効果気体」の増加による人為的なものであると断定しました。では、「温室効果」とは、あるいは、「温室効果気体」とは何でしょうか。図2は、温室効果気体による温暖化の仕組みを説明するための模式図です。

温室効果気体は、地表面が放射する赤外線（熱）を吸収し、再びその熱を四方八方に放射するため、熱の一部が地表面に戻り、大気の下層を暖めます。これが、温室効果です。すなわち、温室効果気体とは、赤外線を吸収できる気体のことです。もし、地球の大気に温室効果気体がなければ、地表面温度は零下18℃になるはずですが、ところが、温室効果気体があるため、実際の温度は15℃になっているのです。この意味で、温室効果が起こっているから、現在の地球は生物が生存に適した環境になっているとも、いえることになります。

さて、大気には窒素、酸素、アルゴンなどが含まれています。この3つの気体で99.9%以上を占めますが、これらは温室効果気体ではありません。量的にはほんの少しですが、二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、各種フロンガスなども大気に含まれます。これらが温室効果気体です。

私たち人類は、産業革命以来、多くの石油、石炭、天然ガスなど、大量の化石燃料を消費してきました。そのため、大気中の温室効果気体が増加したのです。例えば、産業革命以前の二酸化炭素濃度は280ppm（ppmは百万分の一）でしたが、現在は380ppmにもなっています。そのため、地表面気温も次第に上昇しているのです。

3. IPCC(気候変動に関する政府間パネル)について

科学者は、19世紀半ばからの気温の急激な上昇に気づきました。そして、これが温室効果気体によるものではないかと考え、その懸念を表明しました。結果的に1988年、国連はIPCCを設置したのです。その役割は、「二酸化炭素等の温室効果気体の増加に伴う地球温暖化の科学的・技術的、社会・経済的評価を行い、得られた知見を、政策決定者を始めとし、広く一般に利用してもらうこと」にあります。IPCCは、気候変動や地球温暖化の科学的評価を行う第1作業部会、温暖化の影響や適応、環境の脆弱性（どのような悪影響があるのか）を評価する第2作業部会、地球温暖化の緩和策を評価する第3作業部会からできています。また、各国でどの程度温室効果気体を輩出し、また、吸収しているのかを調査する作業チームも設置されています。これらのグループは、研究をするグループではなく、公表された文献（論文など）から調査・分析し、5-6年ごとに評価報告書を作成します。

これまで、1990年、1995年、2001年と3回、報告書を公表しました。そして今年、第4次評価報告書が公表されたのです。ここで、これまでの評価報告書に記載された地球温暖化に関する見解を見ていきましょう。

第1次評価報告書（1990）：観測された気温上昇は、主に自然的要因に起因している**可能性もある**。

第2次評価報告書（1995）：事実を比較検討した結果、識別可能な人為的影響が地球全体の気

候に現れていることが示唆される。

第3次評価報告書（2001）：過去50年間に観測された温暖化の大部分は、温室効果気体濃度の増加によるものであった**可能性が高い**。

第4次評価報告書（2007）：人為起源の温室効果気体の増加により、20世紀半ば以降の世界平均気温の上昇のほとんどがもたらされた**可能性がかなり高い**。

今回の評価報告書では、「可能性がかなり高い」と、強い表現がとられました。これは、90%の確からしさで、そうある、と判断したのです。これを、新聞などのメディアでは、「人為起源と断定した」と報じています。

次の節からは、第4次評価報告書の特徴や、そこに述べられていることについて解説します。

4. 第4次評価報告書の特徴

今回の報告書の第1の特徴は、多くの観測結果が記載されたこと、すなわち、評価対象項目が増加したことが挙げられます。例えば、過去80年間の北半球の雪氷面積の変化が、初めて記述されました。実際、第3次評価報告書では観測の章は、第2章「観測された気候の変動と変化」の1章だけでしたが、第4次評価報告書では、第3章「観測：地表面と大気的气候変化」、第4章「観測：雪氷と凍土変化」、第5章「海洋の気候変化と水位」と、3章に分割されました。

第2の特徴として、過去の気候変動を再現したり、将来を予測したりする際に使用する数値モデルが、コンピュータの高性能化にともない、精密化されたことです。例えば、格子（計算する点）間隔が小さくなり、陸面や海岸の地形などがより精密に表現できるようになりました。また、モデルで扱われるさまざまな変化過程も、取り入れられるようになりました。例えば、大気中の物質の化学変化過程などもはいつています。また、計算能力の向上により、多くの事例を計算できるようになったことも挙げられます。

このようなモデルを用いて、過去100年程度の気候変動を再現する試みを行っています。図4は、世界各国のモデルで再現した気温の変動を示しています。大陸ごと、陸域、海域、全世界の結果が示されています。帯状の上昇している線が温室効果気体を入れた結果ですが、観測結果をよく表現していることがわかります。このようなことから、気温の上昇は、温室効果気体の増加による人為的なものと判断されているのです。

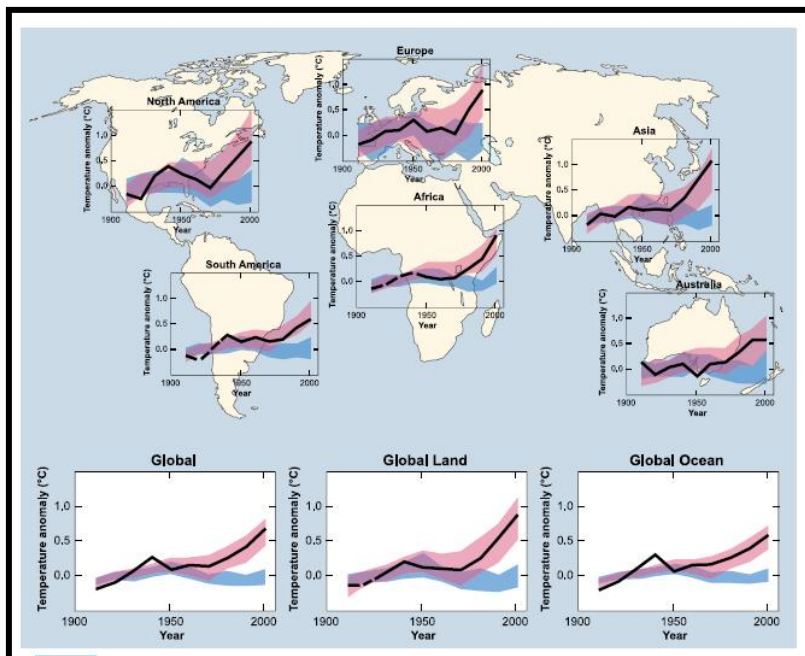


図3. 世界各国の数値モデルで再現した、大陸ごと、陸域全体、海洋全体、全世界で平均した気温変化の結果。実線は観測値、帯状の上昇している線は温室効果気体を考慮したときの結果、水平に近い帯状の線は温室効果気体濃度を20世紀初頭の値に固定し、火山噴火や太陽活動などの自然的変動要因のみを考慮した結果を示す。

5. 将来予測に用いられる温室効果気体排出シナリオ

評価報告書には、数値モデルを用いた将来予測結果も記載されています。将来予測で問題となるのは、今後の温室効果気体の排出量の動向です。私たちの今後の努力により、温室効果気体の排出をある程度制御することができるからです。計算では何らかの仮定をしなければなりません。この排出量の変化を「シナリオ」と呼んでいます。

IPCCは政治的に中立との立場ですので、排出量もさまざまな要因を推測して、何種類も作っています。計算に用いられたのは、このうち、6種類です。あるシナリオでは、現在の経済成長が続くことを仮定し、温室効果気体排出の抑制は最小限と想定しています。あるシナリオでは、経済発展をある程度制限し、数十年後、排出量を現在よりも少なくするというものです。これら六つのシナリオで将来を予測しているので、将来予測にはある程度の幅が出てしまうことに注意してください。

6. 気象に関する現状分析と将来予測

最新の研究成果を含めてまとめられた1850年以降の地表面気温の変動が、既に示した図1です。最近12年間のうちの11年間は、1850年以降もっとも高温であった12年の中にはいりました。また、最近の50年間の昇温傾向は、過去100年の昇温傾向の2倍であることもわかりました。すなわち、地球温暖化が加速していると考えられます。

また、木の年輪やサンゴの化石（これらを間接資料、または代替資料などと呼んでいます）などの分析から、過去1300年程度の気温の変動も復元されています。この結果、最近の50年間の気温は、少なくとも過去1300年の間で、最高であったことがわかりました。

前節に述べた6つのシナリオを用いて、今世紀末までの気温の変化の予測がなされました。図6はその結果です。世界各国の16から21の数値モデルの結果をまとめたものです。各シナリオに対し、平均的な昇温量（最良の見積もり）と、90%の確からしさの範囲（予測幅）が示されています。もっとも排出量を抑えたB1と呼ばれるシナリオの最良の見積もりは1.8°Cの上昇、予測幅は1.1°Cから2.9°Cとなりました。排出量をあまり抑制しないA1F1と呼ばれるシナリオの最良の見積もりは4.0°Cの上昇、予測幅は2.4°Cから6.4°Cとなりました。新聞などの見出しでは、六つのシナリオの上限と下限をとって、1.1°Cから6.4°Cの上昇、などと表現しています。

温室効果気体を2000年の濃度で一定にしたときの予測結果も図6に示されています。最良の見積もりは0.6°C、予測幅は0.3°Cから0.9°Cです。すなわち、温室効果気体を、例え一定にしたとしても、地球温暖化はすぐとまるわけではないことを示しています。

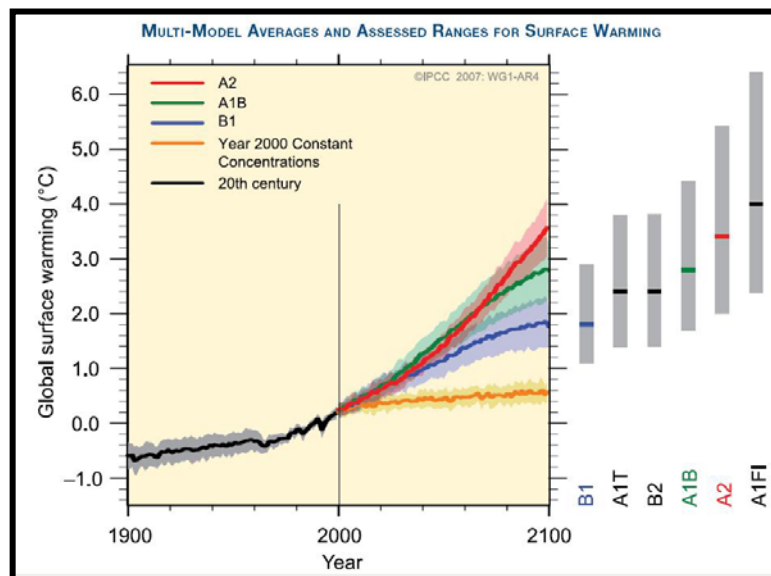


図4. 数値モデルを用いた地表面気温の将来予測結果。縦軸の原点は、1980年から1999年の20年間の平均値。6つのシナリオに対し、モデルの平均値と90%の確からしさの範囲が示されている。一番昇温の小さな線は、温室効果気体の濃度が2000年と同じと仮定したときの变化。

次に、熱帯低気圧（台風）についての現状分析と、将来予測です。熱帯低気圧の年間発生数には明確な傾向はないが、1970年頃以降、北大西洋では強い熱帯低気圧の強度が増加していると分析されました。データの品質に問題があるため、他の地域の変化傾向は不明瞭とされています。また、将来予測として、熱帯低気圧の強度は強まり、最大風速や降水量は増加する可能性が高いと分析されています。モデルでは世界的に発生数が減少するとの予測がでていますが、これについては、まだ信頼性が低いと評価されました。

一方、集中豪雨、熱波などの極端な現象（いわゆる異常気象のことです）についても分析されました。大雨の頻度はほとんどの陸域で増加したこと、暑い日、暑い夜、熱波の発生頻度も増加したと分析されました。また、将来予測として、極端な高温や熱波、大雨の頻度は、引き続き増加する可能性がかなり高いとされています。

7. 海洋に関する現状分析と将来予測

この間、蓄積されていた海洋資料に対する解析が格段に進展しました。水温の解析からは、少なくとも水深 3000m 深までの全海洋の平均水温は上昇していることがわかりました。図 5 は、ここ 50 年間の海洋の貯熱量の変化を示したものです。変動をとまなっているものの、右肩上がりで、貯熱量が増加していることがわかります。海洋の温暖化です。この間、海洋は 14.5×10^{22} ジュールもの熱を貯えています。この量は、地球がこの間貯えた熱の 80%にあたります。一方、塩分は、中・高緯度で減少し、低緯度で上昇していることがわかりました。これは、温暖化にともない、低緯度で蒸発がより盛んになり、中・高緯度で降水がより活発になったことを意味します。これを、地球の水循環の活発化、と呼んでいます。

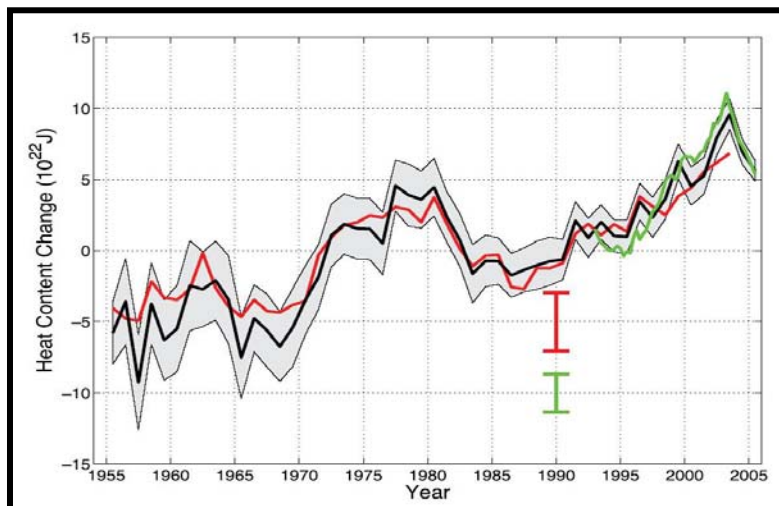


図 5. 過去 50 年間の海洋表層 700m 深までの貯熱量の変化。三つの解析結果が示されている。陰はその中央の線で描かれた解析結果に対する 90%の確からしきの範囲。縦軸の原点は 1961 年から 1990 年までの 30 年間の平均値。

海は莫大な熱をこの間貯えましたが、この貯えた熱で仮に大気を暖めてやりますと、 21°C の昇温を起こします。海がいかに大量の熱を貯えたがわかると思います。

次に、海面の高さ、すなわち、水位についてです。図 6 の左側に、過去 150 年にわたる全海洋で平均した水位の変化を示します。20 世紀期間中に水位は、全海洋平均で 17cm 上昇しています。また、過去 50 年間の平均上昇率は $1.8\text{mm}/\text{年}$ でしたが、ここ 10 年間では、 $3.1\text{mm}/\text{年}$ に増加しています。水位の上昇も、最近加速しているようです。

数値モデルによる将来予測ですが、図 6 の右側に A1B と呼ばれるシナリオに対する予測結果を示します。6 つのシナリオの結果を総合し、今後 100 年間で 18 cm から 64cm, 上昇すると予測されました。水位の上昇は、水温が上昇することによる熱膨張と、大陸氷河が融けて海へ流れることによる水の増加の二つが大きな要因です。分析の結果、水位の上昇をもたらしているのは、海水の熱膨張が主要因で、海水の増加による上昇は、あまり大きくないことがわかりました。

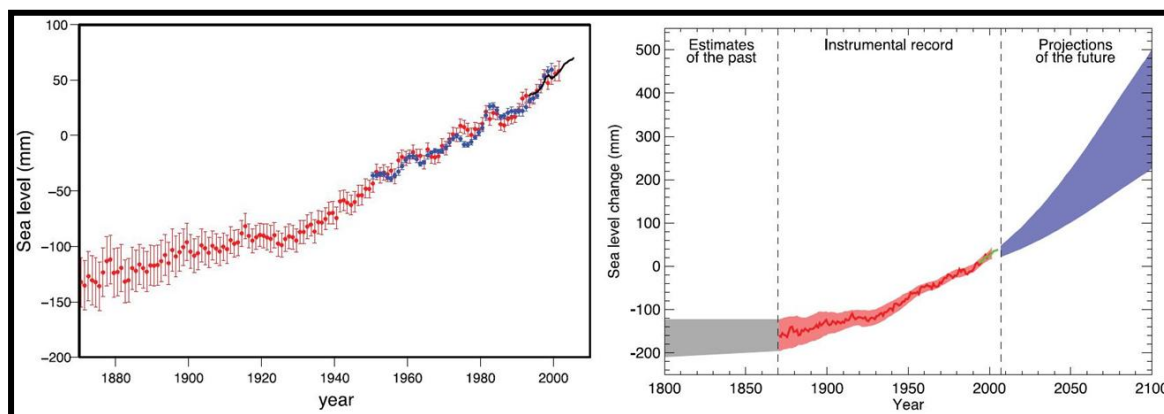


図6. (左図) 全海洋で平均した水位の過去150年間の変化. 二つの解析結果が示されている. 点に付けられた縦の棒は, 90%の確からしさの範囲. 縦軸の原点は, 1961年から1990年までの30年間の平均値. (右図) 数値モデルによるA1Bと呼ばれるシナリオに対する水位変化の予測. 過去の水位変化の様子も描かれている. 縦軸の平均値は, 左図と同じ.

8. 海洋と気候変動

この節では, 気候変動や地球温暖化における海の役割をまとめておきます. 海野役割としては, 次の三つの観点が重要です.

(1) 海は, 大きな熱容量 (熱を貯える能力) を持っています. 海水 (または水) は, 温まりにくく, 冷めにくいのです. このため, 大気のように, すぐ暖まってしまうことはないで, 熱を吸収して, 地球温暖化を遅らせる役目を担っています. 実際, 海が大半の南半球の温暖化は, 北半球に比べ, 遅れていることが知られています. しかし, 一方では, 熱を吸収すると膨張するため, 水位が上昇するという別の問題がでてきます.

(2) 海は, 何でも溶かし込んでしまう性質も持っています. 実際, 天然元素のほぼ全てが海水に溶けています. 温室効果気体も取り込まれます. 現在, 大気中に放出される二酸化炭素の約30%を海が吸収しているの見積もられています. 海は, 二酸化炭素を吸収して, 地球温暖化を遅らせていることとなります. しかし, 吸収にも限度があります. 当面は, 吸い続けると予測されていますが, 水温の上昇, 対流 (海水のかきまぜ) の弱まりなどで, 次第に吸収能力は落ちてくると予測されています.

(3) 海は, 多様な生物の宝庫です. 海は二酸化炭素を吸収しますが, その後, 植物プランクトンなどが光合成活動でこの炭素を利用しています. そして, この植物プランクトンが死ぬと, 海底へと沈んでいきます. すなわち, 海の表層から, 深海へと炭素を急速に輸送していることとなります. この働きを「生物ポンプ」といいます. 海の表層の二酸化炭素を急速に除去し, 大気中の二酸化炭素の吸収を促進しているのです. しかし, 温暖化による生態系の破壊が懸念されています. 将来もこの生物ポンプが働くかどうかは不明です.

9. おわりに

本稿では, 今年公表された IPCC 第1作業部会の第4次評価報告書を中心に, 地球温暖化と海洋について解説してきました. これまでの観測と監視の結果への分析, 復元された古気候の状態, データ解析技術の向上などにより, 地球の温暖化が加速的に進行しつつあることが明白になっています. また, 精密化された数値モデルによる将来予測によれば, どのようなシナリオでも, 今後数十年間は, 温暖化が進行することも明らかになりました.

私たちの地球は現在温暖化に直面していますが, 人類にとって, 一体どのような地球環境が望ましいのでしょうか. もし, 進行中の地球温暖化が好ましくないとするならば, 私たちはどのように行動すべきなのでしょう. 私たち一人一人が真剣に考えるべき課題であるといえます.

(注) 図2 (著者作成) を除き, 他はすべて IPCC 第1作業部会第4次評価報告書から引用.