

地球温暖化は海の温暖化

青木 茂

1. はじめに

日本は周囲を海に囲まれた海洋国家です。日本人には命を育む「海の幸」が欠かせません。一方で、地震や台風によって津波や高波が起これり、人命を奪う恐ろしい側面も、海は持ち合わせています。海で起きていること、これから起こる可能性があることをきちんと理解しておくことは、私たちの生活にも大切な意味をもっています。

海は膨大で多様です。海は地球の表面積の約7割を覆っています。全海洋の深さを平均すると3.8キロメートル、富士山を沈めてもお釣りがくる深さになります。こうした広大な領域に、熱や物質を溜め込む能力の高い液体である水が満々とたたえられています。海の熱容量は大気そのものの約1000倍にもなります。海には珊瑚礁の広がる熱帯の暖かい海もあれば、氷山や海氷の浮く極域の冷たい海もあります(図1)。こうした海を海水がぐるぐると流れ循環することで、熱や物質を運んでいます。日本南岸の黒潮が洗う海でも、1キロメートルももぐれば4℃以下の冷たい水が占めています。海の循環は、地球の気候を形作るシステムの中で重要な役割を演じています。

海の姿は、一見すると「年々歳々相似たり」といったようにも思えますが、近年の研究により、少なくともここ半世紀程度、じわじわとしかも確実に変化しつつあることが分かっています。その変化は地球の気候の変動と密接に関係しています。そうした変動の中には、化石燃料の消費による二酸化炭素の排出をはじめとする人間活動が影響していると考えられるものがあります。第5次報告書でも多くの章を割いて、海の変化の来し方行く末を論じています。今回は、その中で海水温や塩分のパターン、海水位といった海の物理的な性質の変化に注目します。(大気中の二酸化炭素の増加は、海への吸収とそれによる酸性化といった、化学・生物学・気候学的に重要な変化も引き起こします。これらについては山中康裕教授の講義で扱います。)以下では、変わりゆく海の姿を見ていきましょう。



図1. 熱帯の海(オーストラリアケアンズ)と極域の海(南極海)

2. 海水温の上昇

人類は大航海時代から世界の海へと乗り出していきましたが、海の様子を科学的に調べるようになったのはそれほど昔のことではありません。大西洋の深海がとても冷たいことにヘンリー・エリスが気付いたのが 1751 年、チャレンジャー号による世界的な海洋調査が行われたのはようやく 1870 年代になってからのことでした。当然のことながら船を使って行う観測はたいへんな労力を伴いますし、まして陸地から遠く離れれば離れるほどその観測に要する労力は増して行きます。そうしたこともあって、曲がりなりにも地球規模で海の姿を捉えられるようになったのは、20 世紀半ばになってからのことです。

観測が充実してきた 20 世紀後半以降についてみると、全球の平均的な海洋の水温は上昇しています。1971 年からの 2010 年までの 40 年間では、表面から水深 75 メートルまでの平均で $0.11 \pm 0.02^\circ\text{C}/10$ 年、表層 700 メートルまでの平均で $0.015^\circ\text{C}/10$ 年の割合で上昇していることが分かりました。

海洋表層だけでなく深海でも、ここ 20 年ほどで水温が上昇したことが分かって来ました。深海では水温の変化も小さいため、水温を精度よく測るために、同じ場所を 10 年くらいの間隔をおいて測る努力が 1990 年代から始まりました。海底付近では、南極海に近いところがもっとも水温が上昇しています。

こうした水温上昇は、海洋にどんどん熱が貯め込まれていることを意味します。1970 年代以降、地球表層システムの中で蓄えられた貯熱量の実に 93 パーセントが海洋で蓄えられていることとなります(図 2)。64 パーセントは水深 700 メートルまでの表層に蓄えられています。温暖化による貯熱量増加のほとんどを海洋が引き受けているという意味で、「地球温暖化は海の温暖化」ということもできるでしょう。

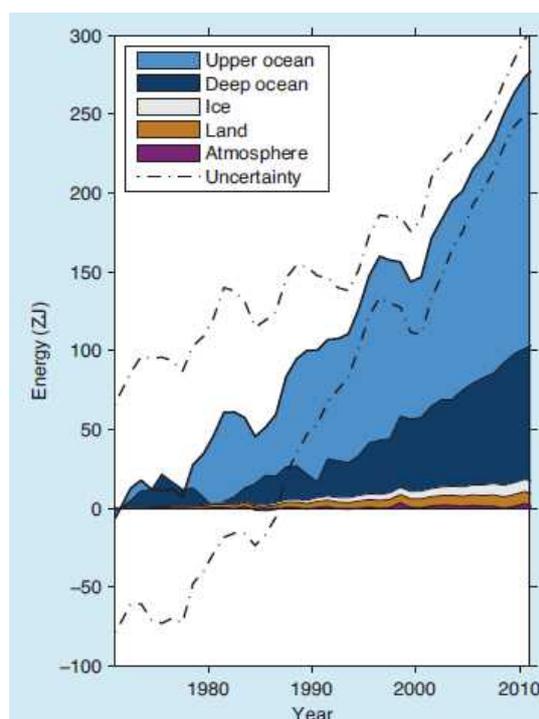


図 2. 地球表層システムにおける貯熱量の時間的変化(IPCC WG1 AR5 Chapter 3—Box 3.1—より引用)

3. 海面塩分コントラストの強まり

海洋の重要な特性として、塩辛さが挙げられます。この塩辛さは「塩分」(海水 1 キログラムのなかに何グラム塩がとけているか) で表します。海洋の塩分の分布には高いところ

もあれば低いところもあります。海面での塩分の分布は、おおまかには、大気への蒸発や大気からの降水のパターンが決めています。降水が蒸発よりも多い赤道付近（熱帯雨林を思い浮かべてください）や高緯度域では概ね海面塩分が低く、蒸発が降水に勝っている中緯度（砂漠がみられるあたりを思い浮かべてください）では海面塩分が高いというコントラストができています（図3）。

20世紀後半以降、この海面塩分のコントラストが強まっている可能性が非常に高いと考えられています。つまり、もともと塩分が高い場所ではより高く、低い場所ではより低くなる傾向になっているのです。こうしたパターンの変化は、大気の水循環パターンの変化（雨の多いところではより多く降り、乾燥したところはより乾燥する）の間接的な証拠であると多くの研究者が考えています。つまり海洋が、地球規模の「雨量計」になっている、というわけです。

こうした塩分の変化や前節で見た水温の変化を詳細に記述することを可能にしたのは、Argo という全世界的な観測網です。Argo とは、浮力を自動で調節して海洋中を上がり下がりすることで、水温や塩分の鉛直的な分布を測るブイを使って、世界の海をカバーしてしまおうという国際的な観測計画の名前で、だいたい3600個を超えるブイが世界の海をパトロールしています（2014年7月現在）。これによって2キロ

メートルより浅い海の様子がかつてない観測密度であきらかになり、それと比べることで過去からの変化の理解も飛躍的に進みました。ただし、2キロメートルより深い海や氷の浮かぶ極域の海は、この観測網からも取り残されています。

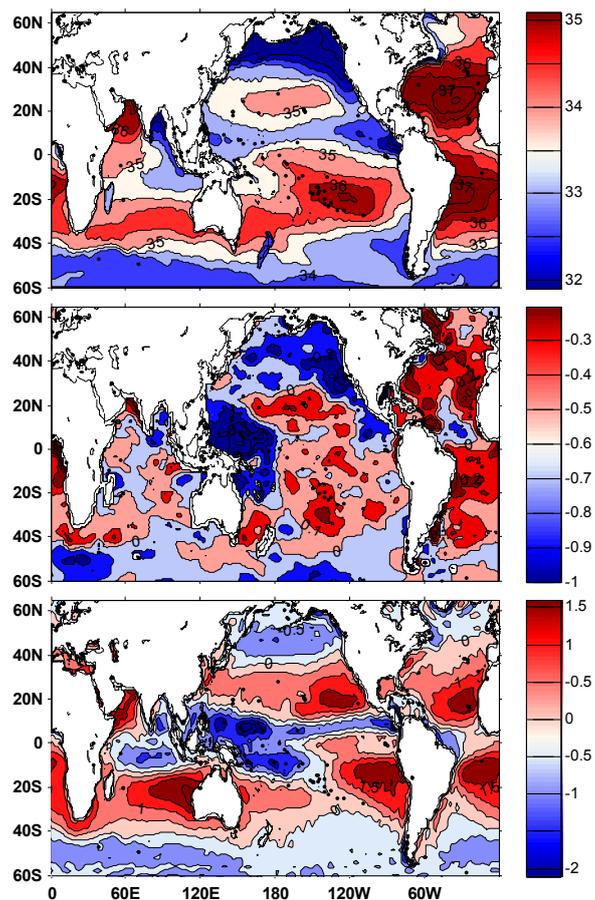


図3. 上から平均海面塩分（World Ocean Atlas 2009）、塩分偏差（2003–2007年と1960–89年の差; Hosoda et al., 2009）、年平均蒸発量 - 降水量（m/yr; NCEP）

4. 海水位の上昇

私たちの生活に関連の深い海水位は、地面に対する海面の相対的な高さです。この変

化について、場所によっては地盤沈下や逆に上昇が重要になってくることもあります、
全球的に見ると海水の体積と質量の変化が主要な要素になってきます。

1901年から2010年まで、平均水位は19(±2)センチメートル上がったと考えられています。この上昇率は、過去2千年間の平均的な上昇率よりも高いと考えられます。海水位の上昇は、海水が暖まって膨張して体積が増加した分と陸上にあった氷が融けて流れ込んだために質量が増加した分とでその多くが説明できます。人工衛星による観測が充実した1993年以降については、水位の直接的な観測と、それとは独立に行った変化要因の見積もりの合計とが、かなり良く一致するようになってきました。

観測された年間3.2(±0.4)ミリメートルの上昇が観測されているのに対し、熱膨張による影響が1.1(±0.3)ミリメートル、山岳氷河やグリーンランド、南極氷床などの氷河の影響の中央値が1.36ミリメートルで、大雑把にはどちらも同じくらい寄与していることとなります。南極氷床は、昔は温暖化によって降雪が増えるため、世界の海水位を低くする方向に寄与すると考えられていた時期もありますが、第4次報告書からはむしろ氷床の流出により海水位を上げる方向に働いているとされています。特に西南極氷床の融解については、それを融かすのに海洋の熱がかかわっていきそうということが問題になっています。

将来の海水位変動を考える上では、この海洋が西南極氷床にどのように影響を与えるのかという点がかつとも予測が難しい点となっています。また、社会的な影響という点から見ると、場所によって異なる上昇の実態や高潮など極端現象との複合的な変化を詳細に検討していくことが重要と考えられます。

5. おわりに

第5次報告書は、前回の第4次報告書からさらに一步踏み込んで、海に変化が起きていることを明らかにしました。報告書は政策立案者向け要約から本文まで全てウェブで公開されていて、また第一部会の政策立案者向け要約は日本語版が気象庁からでていますので、是非ページをめくってみてください。とはいえ、そのすべてに目を通すと、専門家ですらなかなか難しいでしょう。第5次報告書3章(海洋観測)の執筆者のひとりであるNOAA太平洋海洋環境研究所のグレゴリー・ジョンソン博士が、政策立案者向け要約のエッセンスを19の「Haiku」に凝縮して、美しい水彩画とともに公開してくれています(<http://daily.sightline.org/2013/12/16/the-entire-ipcc-report-in-19-illustrated-haiku>)。第5次報告書を体で理解するのにとても役立つ資料ですので、是非一度ご覧になって下さい。

海は確実に変わりつつあります。海洋の変化を理解することは、我々が地球温暖化をどの程度正確に把握できるかの試金石ともなります。海洋国家日本に住み、海の恵みに多くを依存する私たちはとりわけ、その変化に敏感であるべきではないでしょうか。