

はじめに

皆さんこんにちは。昨年の日本は大変な酷暑で、その後も暑い日が続きました。私は4～5月と10～11月の間、日本に戻っていましたが、11月初旬の東京の気温が25℃、荷物を持って歩いていると汗ばむほどで驚きました。自分は子供の頃、一年中外遊びに熱中していましたが、11月になると木枯らしが吹き始め、夕方になるとすっかり冷え込んだものです。昨年の夏から続いた暑さは単なる異常気象だったのでしょうか？もっと長い時間スケールの気候変動の一部なのでしょうか？それとも、これらの組み合わせによるのでしょうか（注1）？今や地球温暖化は世界的な大問題、自然科学だけでなく、工学、経済、政治などの分野でも活発な研究が行われています。「海とデンマークと日本と」第二話では、地球温暖化と、温暖化によって海が受ける影響をご紹介します。

気温上昇の記録

19世紀から21世紀にかけて、気温はどのくらい上昇したのでしょうか？図1に、1873年から2022年のデンマークの平均と、1876年から2023年の東京の年平均気温の推移をそれぞれ示します。このグラフには、年ごとに寒暖の差はあるものの、東京、デンマーク共に気温の上昇が明確に現れています。このような気温の上昇は世界中で記録され、温暖化が進んでいることが分かります。

国連の政府間機構である気候変動に関する政府間パネル（IPCC；Intergovern

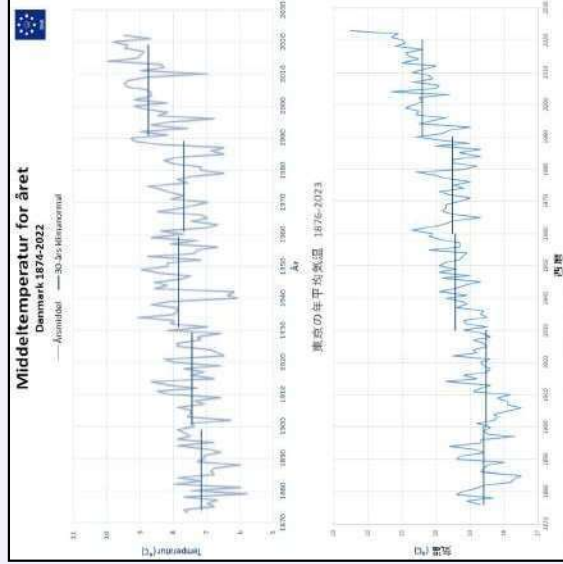


図1. デンマークと東京の年平均気温の推移。横軸は30年間の平均気温を示す。デンマークのグラフはClimate Change Adaptationが、デンマーク気象研究所のデータを基に作成した図を引用し（<https://en.klimadaptation.dk/>）、東京のグラフは気象庁の公開データ（<https://www.data.mago.jp/ob/stats/atm/index.php>）を基に著者が作成。

-mental Panel on Climate Change) は、昨年、第6次評価報告を発表しました。この報告書の「人間活動が温室効果気体の排出を通して地球温暖化を引き起こしてきたことに疑う余地はない」「大気、海洋、雪氷圏、及び生物圏に広範囲かつ急速な変化が起こっている」という総括には、温暖化に対する、かつてない強い警告が含まれているように読めます。温暖化の主な原因は、化石燃料の消費によって発生し、大気中に放出される二酸化炭素であることは常識ですが、それはなぜ？と言われると案外答えられないものです。そこでまず、二酸化炭素が地球を温める仕組みを解説しましょう。

温室効果と温暖化

地球は太陽からエネルギーを受けています。これは温度5252℃（絶対温度で表すと5525ケルビン）の物体が発する電磁波、つまり紫外線と可視光線と赤外線からなる光です。このうち、赤外線には物体を温める効果があるため、地表は温められます。地表からは、地表温度（210～310ケルビン）の物体が発する、波長の長い赤外線が宇宙空間に放たれていきます。しかし、大気中に存在する水蒸気や二酸化炭素などは、この赤外線の一部を吸収するため、宇宙空間には15～30%しか出ていきません。この赤外線を吸収した水蒸気や二酸化炭素は、赤外線を全方向に再放出するため、大気全体が温められます。これが温室効果です（図2）。もし温室効果がなかったら、地表の温度はマイナス18℃という極寒の世界になります。温室効果のうち、水蒸気と二酸化炭素が寄与する割合は、それぞれ48%、21%です。雲（下層雲は太陽光を反射するため気温を下げるが、上層雲は赤外線を吸収するため大気を暖めます）は19%、残りは対流圏内のオゾン、メタンや一酸化二窒素などの気体によるもので

小栗 一将

す。これらの気体のなかでも、二酸化炭素は人間活動、つまり石油、石炭、天然ガスといった化石燃料の消費（燃焼）によって大気中の濃度が増え続けているため、温暖化の元凶とされます。ちなみに、大気中の二酸化炭素濃度が倍になると、地表の平均気温は温室効果によって3.5℃上がると見積もられています（注2）。

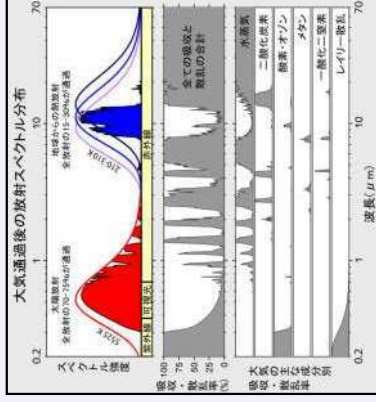


図2. 太陽放射のスペクトルと、地球の熱放射スペクトル（青い部分）、温暖化気体による吸収と散乱の合計（灰色の部分）、主な温暖化気体と散乱による吸収スペクトル。灰色の面積が多いほど吸収が大きいことを示す。この図は、https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric_Transmission.pngより引用。

二酸化炭素濃度の増加によって気温が上昇すれば、海水温も上がって蒸発量が増えるため、水蒸気による温暖化の寄与も上がります。さらに、気温の上昇によって極域に存在する永久凍土が溶けると、凍土に閉じ込められたメタンが大気中に放出されます。メタンは同じ質量の二酸化炭素に比べ、25倍も強い温室効果を起こすため、温暖化を加速させる恐れがあります。他にも、極域の雪氷が溶けて、太陽光の反射率が下がり、地表の温度が上がる効果も存在します。つまり地球には、「温暖化が温暖化を呼ぶ」仕組みが存在しているのです。

二酸化炭素濃度の増加の記録

1957年、米国・スクリpps海洋研究

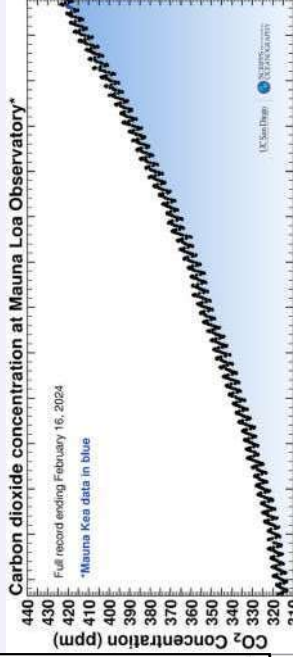


図3. 1958年から2024年2月16日までの大気中の二酸化炭素濃度の変動記録。このグラフは、スクリpps海洋研究所のサイト（<https://keelingcurve.ucsd.edu/>）より引用。

所のチャールズ・キーリング博士（1928-2005）は、現在も継続する大気中の二酸化炭素濃度の観測を開始しました。そして観測を開始して間もなく、夏になると濃度が下がり、冬に上がるという結果を得ます。これは、北半球の日照量が増加する季節には植物の光合成が活発になるためです。しかし観測を続けていくと、二酸化炭素濃度は、この現象を繰り返しながら増加していくことが判明しました（図3）。この上昇カーブには、化石燃料の消費や、耕作・放牧に伴い森林の面積を減少させた影響が現れています。大気中の二酸化炭素濃度は、1958年には315ppmでしたが、2023年末には415ppmとなり、増加傾向が衰える様子はありません。

炭素のゆえ

図4に、IPCCが2013年に発表した第5次評価報告書から引用した、地球上の炭素の収支をまとめた図を示します。図中の黒い矢印と横の数字は産業革命以前の一年間における炭素の放出・吸収量、赤い矢印と数字は、2000-2009年の間に人類活動が放出した炭素の放出・吸収量の年平均値をそれぞれ示します。炭素（二酸化炭素）は、森林（植物の光合成）、岩石（風化作用）、そして海洋に吸収されますが、大気中に存在する炭素589Pg（ペタグラム；つまり589,000,000,000,000,000グラム！）に対し、海洋全体の水中には、その65倍にあたる38000Pgもの無機炭酸（二酸化炭素が溶解したもので、大部分を重炭酸イオンの形をとって、そのほかは主に炭酸イオンの形をとっています）が存在します。産業革命以降、人類が大気中に放出した炭素は240Pgになりますが、海水中にも155Pg蓄積しています。海洋は二酸化炭素の吸収源であり、炭素の量にして一年間に2.3Pgが海洋に取り込まれています。

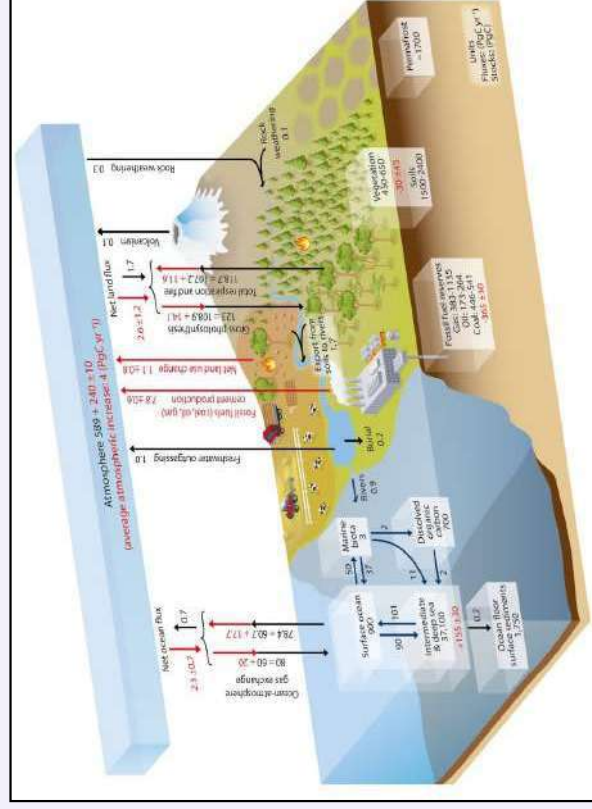


図4. 全球の炭素収支。赤い数字と矢印は、人間活動によって放出された炭素を示す。この図はIPCC第5次評価報告書（https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf）第6章より引用。

二酸化炭素は海洋全体で均質に吸収されるわけではありません（図5）。赤道

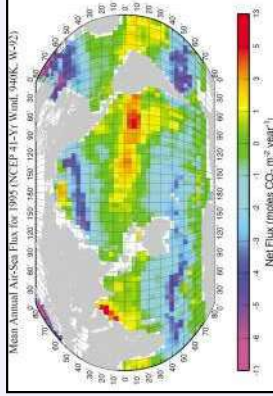


図5. 海洋表面における二酸化炭素収支。黄色から赤色は二酸化炭素を放出している海域を、紫から水色は二酸化炭素を吸収している海域をそれぞれ示す。数字の単位は、一平方メートルの海面を通して、一年間に何モルの二酸化炭素が入りしりしたか、を表す。この図は、Takahashi et al. (2002), [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00003-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00003-6)より引用。

や太平洋の南米沖やアラビア海などでは、むしろ二酸化炭素を放出しています。これは、この地域で一定方向に吹く風が表層の海水を動かすため、これを補うように、無機炭酸を多く含む海水が海面に上昇するためです（これを湧昇と呼びます）。北大西洋で二酸化炭素の吸収が多いのは、低緯度で蒸発を受け、塩分が高くなったメキシコ湾流の海水が、ここで冷却されて密度が上がり、海洋深層に沈み込んでいるためです。北太平洋では、冬場の低気圧が起す波風が、海面付近の海水と、より深い、無機炭酸を多く含む海水を混ぜるため、大気中に二酸化炭素を放出します。しかし、この混合は植物プランクトンの生育に必要な栄養ももたらします。このため春から秋にかけて、珪藻という植物プランクトンが増殖します。すると、海水中の無機炭酸は光合成によって減少するため、大気中の二酸化炭素が海水に溶け込みます。一年という時間スケールで見れば、この海域は二酸化炭素を吸収していることにな

ります（https://www.data.jma.go.jp/kaigyou/db/mar_env/knowledge/global_co2_flux/global_co2_flux_map.html）。

地球温暖化が海洋に与える影響

大気中の二酸化炭素濃度が上昇して、気温や海の表層水温が上昇すると、様々な問題が発生します。温暖化による自然世界の影響のように科学的な内容は、IPCCの第5次成果報告書に詳しく解説されていますので、ここでは主に、環境省が2014年12月に発表した「IPCC第5次評価報告書の概要 -第一作業部会（自然科学的根拠）-」（https://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_wg2_overview_presentation.pdf）に基づいた、温暖化によって海洋が受ける影響を抜粋してみます。また、補足として参考になるサイトのURLも記しました。もっと知りたい方はこちらも併せてご覧ください。なお、海の温暖化を長年にわたりモニタする海洋観測やIPCCの報告書作成には、海洋研究開発機構、気象庁、国立環境研究所をはじめとする日本の機関が大きく貢献していることも、ここで紹介しておきます。

- ・海洋の表層付近で水温が上昇し、海水にエネルギーが蓄積されている。

精細な海洋観測の結果、1970年から2010年の40年の間に、海洋の平均水温は、海面から100mまでで0.3℃、水深500-700m付近で0.05℃上昇しました。これは、温暖化によって蓄積されたエネルギーの90%が海洋に蓄えられ、そのうちの60%が、表層から水深700mまでの海水に蓄えられたこととなります。南水洋では水深3000mから海底の深層でも、1992-2005年の間に、0.02-0.03℃もの水温上昇が確認されています。たったこれだけ、と思われるかもしれませんが、1グラムの水の温度を1℃上げるには、4.185ジュールの熱を必要とすること（平たく言えば、水には温まりにくく、冷めにくい）、海水の膨大な体積を考えるとみれば、海洋に途方もないエネルギーが蓄積されていることを想像できます。ちなみに、過去40年間に海洋に蓄積されたエネルギーは、10の23乗ジュールという天文学的な値です。

- ・海水温の上昇によって、激しい気象現象が起きるようになる。

海水温が上昇すれば、蒸発量が増えるため大気中の水蒸気量も増加します。こうなると、大雨が降りやすくなります。近年日本で観測されている豪雨は、温暖化と関係があると考えられています。台風は熱帯の熱エネルギーを高緯度に運びますが、熱帯の大気の水蒸気量が増加すれば、日本を襲う台風の発生頻度も増えるようになります（https://www.mri-jma.go.jp/Topics/H29/291026_d4pdf/press_release.pdf）。さらに、ペルー沖の海水温が上昇するエルニーニョ現象が発生すると、大気と海洋の相互作用によって、世界中で異

常気象が発生します。エルニーニョ現象自体は昔から発生していましたが、温暖化によってこの現象がどう変わるのかについて、はまだ結論が出ていません（<http://www.cger.nies.go.jp/ja/news/2013/130911.html>、<http://s://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/data/dhmo/learning/faq/faq8.html#2>）。

・海水温の上昇で、生物の分布が変わる。

温暖化に伴う海水温の上昇によって、これまで見られなかった生物が現れるようになります。本来は熱帯の温かい海にしか生息しない、毒を持つヒョウモンダコが九州の沿岸などから見つかるようになりました。また、沖縄などに生息するサンゴは、水温が上昇すると体内に共生している藻類が体内から出ていたため、栄養を得られなくなり、美しいサンゴ礁が死滅してしまいます。

水温の上昇は魚の生息域も変えてしまいうたため、漁業にも影響が出ます。東北の海では鮭がバヤ海になったり、本来は温かい海域に生息する魚が捕れるようになると、すぐに変化が現れています。温暖化によって、これまで成り立っていた海洋生態系が変わってしまうことは確かなようです（https://www.jfamaaff.go.jp/kikaku/wpaper/h29_jytrend/1/t1_1_2_3.html）。

・海洋の酸性化が進む。

といっても、海水が酸性になるわけではありません。海水に二酸化炭素が溶け込むと、海水のpH（水素イオン濃度を対数で表したものの）は減少します。海水のpHは弱アルカリ性で、1990年頃の平均値は約8.12でした。しかし、2010年には8.07-8.09まで減少しました。このまま二酸化炭素を放出し続けた場合、21世紀末までに海水のpHは7.8まで下がると予測されています（https://www.data.jma.go.jp/kaivou/db/mar_env/knowledge/oa/acidification.html）。大した値ではないと思われるかも知れませんが、pHは対数スケールなので、pHが8.09から7.8に減った場合、水素イオン濃度は二倍に増えることとなります。海水の酸性化が進むと、炭酸カルシウムの殻を作る生物達が殻を作りにくくなるため、彼らの生存が脅かされることとなります。とくに、炭酸カルシウムのなかでも溶解しやすい、アラゴナイトという鉱物で殻を作る生物（サンゴや、翼足類と呼ばれる貝の仲間のブラントクトン；図6）は殻を作りにくくなるため、生態系にも悪影響をもたらす恐れがあります（<https://www.data.j>



図6. 翼足類。サイズは1cm未満。この写真は、<http://en.wikipedia.org/wiki/Pteropoda>より引用。

ma.go.jp/kaivou/db/mar_env/knowledge/oa/acidification.html

・氷床の融解が進んでいる。

主な氷床は南極とグリーンランドにありますが、温暖化によって、これらの氷床が溶けて水になり、海洋に流出します。南極には、棚氷と呼ばれる広大な面積が氷に覆われた場所があります。ここでは氷床から押し出された氷が浅い海の上に氷が乗っていますが、温暖化によって海水温が上がると、これらの氷が溶け始めて大量に外洋に流出する恐れがあります。棚氷は元々陸上でつくられた氷のなかで、融解は海水面上昇を招きます。また、氷床の融解は陸上から海への物質（植物プランクトンの栄養となる、塩類や鉄など）の供給も変化させます。これにより、植物プランクトンを底辺とする海洋の生態系が短期的・長期的に変化する恐れがあります。グリーンランドでは、デンマークをはじめとする世界中の研究者達が、温暖化と生態系変動の研究を進めています。

・海面が上昇する。

温暖化によって氷床が融解し、海面の水温が上がると、陸に存在していた水が海に加わることと、温度による膨張のふたつの効果によって海面が上昇します。具体的には、世界平均で21世紀末までに59cm上昇すると見積もられています。標高の低い太平洋の島や沿岸などは海岸侵食や水没の影響を受けやすくなります。なお、水の密度は水の密度より低いため、北極海に浮かぶ海氷（陸水ではなく海水が凍ったもの）は、融解しても海面上昇に寄与しません（https://www.cger.nies.go.jp/ja/llbar/v/q/7/7-1/qa_7-1-j.html）。

・海洋から酸素が減っていく。

デンマークは浅海に囲まれています。これまでも、陸上の畑や牧草地で使われる肥料が海に流れ出すことで海底プランクトンが増殖し、これらの死骸が海底で好氧分解したことで海底が酸欠状態になり、沿岸の魚介類が死滅するという問題が起きました。バリエ海では栄養分の流入によって現在も貧酸素化が進んでいますが、温暖化も貧酸素化を進めると考えられます。これは、水温が上がると体は水に溶けにくくなり、海洋表層の水温の上昇は、上層と下層の海水の密度差を広げるため、海水の上下混合が妨げられるためです（お風呂のお湯の表面が熱くても、底のお湯は熱くないのと同じ現象です）。こうなると大気からの酸素は海底まで十分に届かなくなります。海底の貧酸素化は海洋の生態系を大きく乱し、沿岸漁業も大打撃を受けます。外洋においても、温暖化に伴う溶存酸素濃度の減少が懸念されています（https://www.data.jma.go.jp/kaivou/db/mar_env/knowledge/deoxy/deoxygeneration.html）。

日本海の海底では、近年の溶存酸素の減少が顕著です（図7）。この原因は日本海特有の海水の循環にあります。日本海では、冬季になると北方で海水が冷やされます。海水は冷やされると密度が高くなるため、沈み込み

ます。この海水は底層水となり、海底に沿って南に流れていきます。気体は水温が低いほどよく溶けるため、底層水には酸素がたくさん含まれています。しかし、気温の上昇によって冷却が妨げられると、沈み込みによる海水の循環 が停滞するため、海底での酸素の消費と供給のバランスが崩れて酸素濃度が減ってしまいます。このままだと、数百年先の遠い将来には、日本海の海底は酸欠になつて、海底に住んでいる、おいしい魚介類が姿を消してしまうかも知れません（https://www.data.jma.go.jp/kaivou/db/mar_env/knowledge/koyusu.html）。

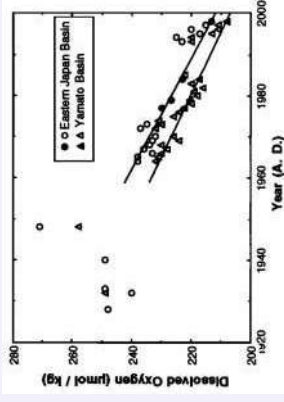


図7.日本海の海底の溶存酸素濃度の年変化。1960年代から2000年にかけて、2地点の酸素濃度が、それぞれ同じ傾向で減少しているのが分かる。この図は、Gamo (1999) <https://doi.org/10.1029/1999GL002341>より引用。

おわりに

温暖化や海洋の溶存炭酸のことを完全に理解するには、酸と塩基、溶解度、反応速度といった化学の知識が不可欠なのですが、今回はできるだけ分かりやすい解説になるよう、こういった説明は省略しました。温暖化問題を探っては、様々な説（なかにはアヤシイものも?）を見かけますが、インターネット上の情報が正しいのか判断に困る場合は、まず政府機関や大学のサイトから調べてみるといいでしょう。かく言う自分も、今回の連載を執筆するにあたり、気象庁や国立環境研究所のサイトを参考にしました。これらの解説はどれも丁寧で、引用もしっかりしています。今回のお話が、温暖化の情報を客観的に理解するきっかけ（頭の体操）になれば、と思います。

注1：日本の都市圏はアスファルトとコンクリートに覆われているため、水の蒸発による熱の吸収はきません。また、冷房の放熱機で都市圏全体が温められます。この「ヒートアイランド現象」による気温の上昇もバカになりません。また、昨年度の気温の原因には、ペルー沖の海水温が上下するエルニーニョ現象やラニーニャ現象が起きたタイミングの影響もありますが、この説明には連載一回分を要しますので、今回は省略します。

注2：この研究を行ったのが、2021年ノーベル物理学賞を受賞した道端昭博博士です。

著者紹介: 小栗 一将（おぐり かずまさ）

南デンマーク大学自然科学部生物学科・准教授、同学科で超深海の研究を専門とするDanish Center for Hadal Research (HADAL)とNordceelに勤務。日本の国立研究開発法人海洋研究開発機構の招聘主任研究員も務めており、調査航海にも度々参加している。