特　集

ティッピング・ポイントを考える

第4回　海（海洋）

島田 和幸（CASAスタッフ）

第４回の特集では、ティッピング・ポイントのエレメントの中から主に、海洋の深層循環、貧酸素化、酸性化、サンゴの白化についてとりあげていきたいと思います。

私たち人間が出した温室効果ガスによる温室効果で地球に蓄えられた熱エネルギーの90％以上が海洋に蓄えられていると言われています。地上の気温上昇が問題となっていますが、しかしこれは増加した熱量のわずか10％以下での影響です。一方海洋おける海水は陸地に比べて比熱が大きいため温まりにくく昇温のスピードは遅いですが、 その影響は非常に大きいものになると危惧されています。IPCC海洋・雪氷圏特別報告書で、近年の台風の大型化もこの海洋に蓄えられた熱エネルギーが影響しているとしています。また、気象研究所は、2019年の令和元年東日本台風（台風19号）に伴って関東甲信地方に降った雨の総量は、1980年以降の気温及び海面水温の上昇によって10.9％、工業化（1850年）以降の気温及び海面水温の上昇によって13.6％増加したと報告しています。今回は地球全体の海洋がどのようになっているのか、地球規模で起きていることに目を向けて考えていきたいと思います。

1．海洋の深層循環

海洋の大循環をつかさどる深層海流は世界各地の気候を決定する大きな要因になっています。そして今、温暖化がこの深層海流に深刻な影響を及ぼし始めているのではないかと言われています。

海洋には暖かい表層流の循環と、深さ数千ｍの深海を循環する深層流の循環（鉛直循環）の２つの大きな流れがあります。

一般にメキシコ湾付近の赤道域の暖かい海流①は、北上するにつれて熱を放出し冷えていきます。また海水の氷結時に排除される塩分によって海水の塩分濃度が増加します。海水は冷えて塩分濃度が大きくなる

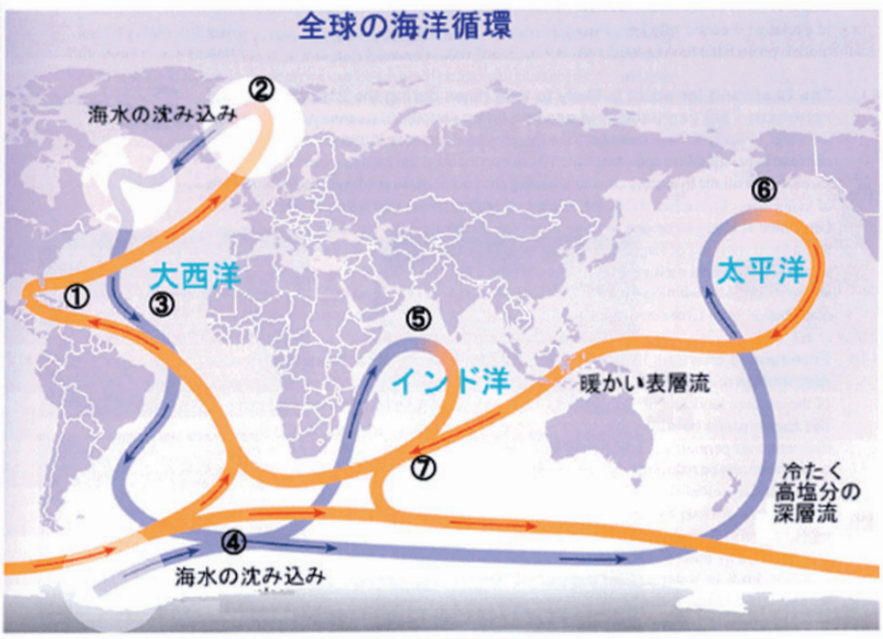

図１　出典：気象庁「異常気象レポート2005」（2005）

と、重くなっていきます。この重くなった海水はグリーンランド周辺で海底へ深く沈み込み② 、図にあるように大西洋の深さ3,000 ～ 4,000 mを南へ移動する深層海流③となります。これは南極大陸周辺の深層海流と合流し、インド洋と南太平洋に分かれ北上します④ 。そしてインド洋⑤、北太平洋上⑥で深層から表層に湧き上がり、暖かい表層循環と合流して南下し⑦、アフリカ大陸の南端を回って再び大西洋①に戻っていきます。この深層流の動きは非常にゆっくりとしたもので、１時間にやっと１～2m程度、大西洋を北から南まで縦断するだけでも100年程度かかると言われており、一巡するには約1000年のスケールの循環となります。

この海洋大循環の一つで、大西洋と北極にまたがる大きな流れを大西洋子午面循環（Atlantic Meridional Overturning Circulation: AMOC）と言い、IPCC海洋・雪氷圏特別報告書では、AMOCが弱くなったことが観測で示されています。弱まりの速度はそれほど顕著ではありませんが、警戒が必要だと言われています。この海洋大循環による熱の移動は、地球全体の気候をコントロールするという非常に重要な役割をもっています。過去には深層海流が止まったことで、ヨーロッパ全体が凍りつく期間が千年近くも続いたことがありました。また大循環の変化は、地域ごとの海流の流れを変えてしまう可能性もあります。このように温暖化による深層海流の変化は、大きな気候変動を招く可能性をはらんでいます。

グリーンランド氷床では気温上昇により、大量の氷が海洋に融け出してきています。この淡水が大量に入り込むことで、海水の塩分濃度の低下が起こり海底への沈み込みが弱まり、その結果海洋の循環も鈍くなります。このように海水温の上昇だけでなく、大気中の気温上昇による陸域の氷の融解も、海洋の循環に大きな影響を及ぼしていることがわかります。つまり海洋の循環は陸域での温暖化とも密接につながっています。

2. 海洋の密度成層の強化と貧酸素化

一般的に真水では約４℃で密度が最大になりますが、海水は低温になるほど、また塩分濃度が高まるほど密度が高くなります。そしてこの海水の密度の差によって鉛直方向に層が形成されており、密度成層と呼ばれています。この層は海水を上下に混ざりにくくする働きがあります。温暖化によって海面付近の水温が上昇すると上層部の海水密度が下がり、深いところの密度の高い海水とより交わりにくくなります。2020

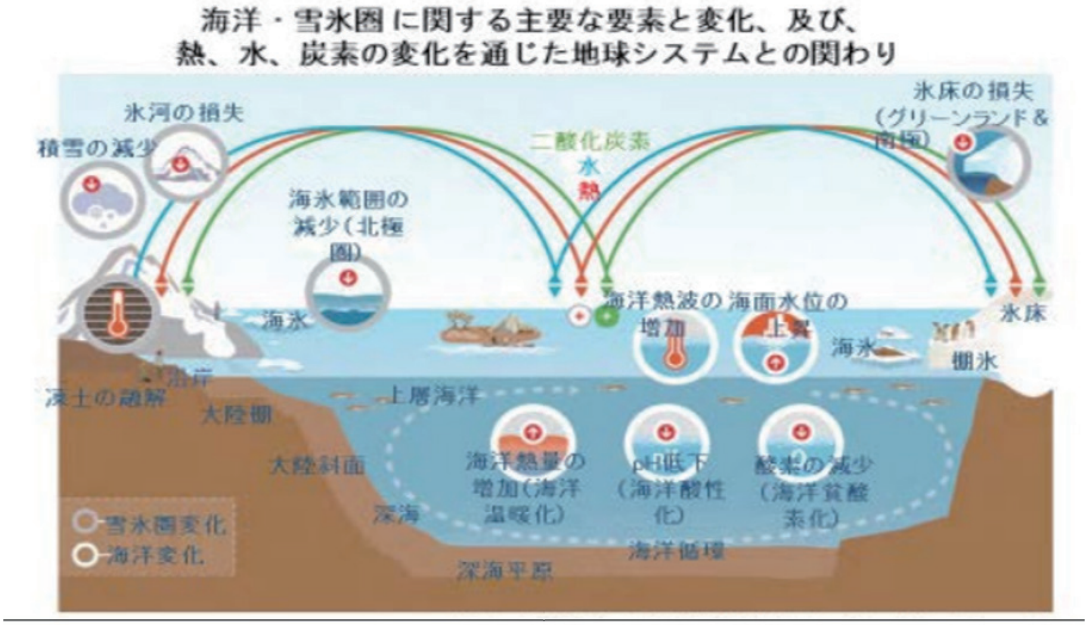

図２　出典：IPCC海洋・雪氷圏特別報告書、Box1.1　Figure1

年東北大学では世界の海水温塩分観測データから、海面から200m深までの密度成層が、地球温暖化の進行に伴って1960年以降有意に強まっているとの報告を出しました。

さらに海洋の広い範囲で貧酸素化と呼ばれる、海水中の酸素の量の減少も明らかになってきています。海洋は大気中の酸素や二酸化炭素（CO_2）も吸収しており、海水に溶け込んだ気体の約36％は酸素だと言われていますが、この貧酸素の原因の一つとしてとして、大気から海水中に溶けることができる酸素量の低下があります。一般に気体の液体への溶解度は、液体の温度が高いほど気体の溶解度は低くなります。このことから温暖化によって海水の温度が上昇すると、気体である酸素の吸収量は低下してしまいます。もう一つの原因が、先に述べた成層化の強化です。海洋表層の海水の密度の低下は、密度の高い深部との密度差をさらに大きくするため、より混ざりにくい状態を作ってしまいます。さらに成層化の強化は、下層からの栄養塩の供給も鈍らせることになり、生態系が受ける影響はさらに大きくなります。

３.海洋の酸性化

地球温暖化は、海水温の上昇や海面水位の上昇を引き起こし、海洋環境にも影響を及ぼします。一方、海は大気からCO_2を吸収することで地球温暖化が進むのを和らげる重要な働きをしています。しかし、このことは「もうひとつの二酸化炭素問題」とも呼ばれる「海洋酸性化」を引き起こしています。CO_2が水に溶けると炭酸になり、弱アルカリ性の海水を少しずつ酸性化の方向に進めます。

表面海水中の水素イオン濃度指数（pH）は、全球で1990年から2019年までの期間で、10年あたり0.018の割合で低下しています。この0.018という数値は小さく感じられるかもしれませんが、これはpHが水素イオン濃度（[H ＋]）の対数で示されていることによるものです。pHの低下速度0.018を、水素イオンの濃度増加率に換算すると、大気中の二酸化炭素濃度の増加率とほぼ等しくなります。さらに産業革命前の海と比べると、表面海水のpHは、すでにおよそ0.1下がったと考えられています。これは、水素イオン濃度に換算するとおよそ25％も増えたことになります。

現在、大気中に放出されるCO_2のうち、約４分の１は海水に溶け込んでいます。大気中のCO_2濃度の増加によって、海水に溶け込むCO_2量も増加しており、その影響で海水が酸性化します。また気体は溶け込む液体の温度が低いほど溶解度が大きくなるため、この酸性化の影響は、より温度の低い海域、つまり緯度の高い南極海や北太平洋の海域でより深刻になると予測されています。

2017年３月、アメリカ海洋大気庁（NOAA）などの科学者チームは、海洋の酸性化が北極海西部で面積・水深ともに急速に広がっていると報告しました。海洋科学者らの研究によると、酸性化した海水塊は、1990年代から2010年までの間に、アラスカ北西沖のチャクチ海から北極点付近まで北方へ約300海里（約550㎞）拡大し、水深は海面下約325フィート（約100m）から800フィート（約240m）超まで広がりました。分析によると、酸性化拡大の主因は海水循環パターンと夏季の海氷融解により、冬季に太平洋から北極海へ流入する海水が増加したことだとしています。すでにCO_2を大量に含んでいる太平洋の海水塊は、有機物の分解によるCO_2も吸収しながら北極海に流入して海域の酸性度を増しています。さらに冬季に氷が張ると海水の塩分濃度が増し、この重くなって酸性化した海水が下層へと沈んで深海にも広がっていくという悪循環になっています。海水の酸性化は、植物プランクトン、動物プランクトン、サンゴ、貝類や甲殻類など、さまざまな海洋生物の成長や繁殖に悪影響を及ぼし、これらの減少は、魚介類などに大きな影響を与え、それらに依存する地域社会にも大きな影響を及ぼすことが懸念されています。

海洋酸性化が進むと 、海水中の化学的な反応も変化し、そのために海洋がCO_2を吸収する能力も低下すると指摘されています。海洋の大気からのCO_2吸収能力の低下は、大気中に残るCO_2の増加につながり、陸域での温暖化がさらに加速することが懸念されていま

す。

4．サンゴ礁の白化

サンゴ礁は熱帯と亜熱帯の水温27℃付近の海域に広く分布し、サンゴ虫およびこれと共生する特有の微小な藻類によってつくられています。この藻類は水温に対してきわめて敏感で、海水温が1℃上昇すると、数日のうちに藻類がサンゴ虫の組織から離脱して共生関係が崩れます。その結果、サンゴ虫も生存できなくなり、サンゴ礁自身も白く色あせ（白化）、やがて死滅してしまいます。

このようなサンゴ礁の白化が1979年以降、世界中の海域で広く見られるようになりました。そして今では世界の主なサンゴ礁のほとんどで白化の事例が報告されています。サンゴの白化や死滅と、海水温のデータを解析した結果、白化が発生している海域の水温はすべて平均値よりも1℃以上高くなっていたことが確かめられました。中でも2016年には、世界最大のサンゴ礁のグレートバリアリーフで90％以上のサンゴが白化しました。さらにサンゴ礁は炭酸カルシウムの骨格を生成する生物であることから、海洋の酸性化によっても生存も阻害されます。つまり海水温の高温化だけでなく酸性化も大きな脅威となっています。

IPCC1.5℃特別報告書では、1.5℃の上昇で現在からさらに70～90％の、2℃上昇時には99％以上のサンゴが消滅するとの予測を出しています。

サンゴ礁は海洋の中で、もっとも生態系が豊かなところで、魚類をはじめ様々な生物が生息しており、これらは多くの島しょ国の人々の貴重なタンパク質の供給源になっています。

また、サンゴ礁は、津波などに対する自然の要塞でもあり、2004年12月のスマトラ沖地震の大津波のときも、サンゴ礁で囲まれた島では被害が小さく死者も出ませんでした。つまり温暖化等による海水温の上昇によってサンゴ礁が失われることは、生態系のみならず、私たち人間の生活にも大きな影響を及ぼすことになります。

今回とりあげた海洋における海水温上昇、貧酸素化、海洋の酸性化は、気候変動が引き起こす海洋生態系への三大ストレスと言われており、その原因の全てが地球温暖化によるものです。私たち人間が出した温室効果ガスにより、海洋は熱エネルギーの90％以上を蓄え、排出されるCO_2の約４分の１を吸収しています。そしてこの海洋のCO_2吸収能力も海水温の上昇によって低下するという、悪循環を引き起こします。その場合は、海洋でのCO_2吸収量の減少分だけ、大気中のCO_2量が増加することになり、地表での気温上昇がさらに加速する恐れがあります。

現在海洋で起こっているこれらの現状は、残念ながらもとに戻すことは難しいと言われています。なぜなら海洋に吸収された熱やCO_2の除去は極めて困難だからです。今の状態を維持することも不可能となりつつある状況で、私たちにできることはその進行を少しでも緩やかにすることしかありません。そしてその手段としては、人為的なCO_2の排出をゼロにするしかありません。静かにゆっくりと、しかし確実に、後戻りできない方向に進行している海洋。私たちに、声なき声で一刻も早くCO_2の排出を止めてと訴えているのではないでしょうか。

沖縄県阿嘉島周辺海域のサンゴ礁

図３　出典：全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイトより（http://www.jccca.org/）