

第3章 観測:海洋

概要

水温と貯熱量の変化

海洋表層(水深700 m以浅)が1971年から2010年にかけて温暖化したことは**ほぼ確実¹**であり、1870年代から1971年にかけて温暖化した**可能性は高い**。1971年以降データ被覆範囲が増えたことと、海洋表層の水温[3.2]、海面水温[2.4.2]及び海面水位の上昇(水位上昇の大部分が熱膨張に起因することが知られている[3.7、第13章])についての独立した観測データ間の一致度の高さに基づくと、この期間に対する評価の**確信度は高い²**。1971年以前の変化については、初期の期間のデータの取得が相対的にまばらであったため、確からしさはより低くなる。最も顕著な昇温は海面付近に見られ(水深75 m以浅において1971年から2010年の間に10年当たり0.11 [0.09~0.13] °C)、水深700 mでは10年当たり約0.015°Cまで小さくなる。この温暖化シグナルの海面での強化が、水深0~200 mにおける海洋表層の温度成層化を約4%増大させた**可能性は非常に高い**。第4次評価報告書以降、過去の海洋表層水温の測定値に測器バイアスが確認され、それが軽減されたことにより、1970年代及び1980年代に最も顕著だった水温及び海洋表層貯熱量におけるみかけの十年規模変動が減少した。{3.2.1~3.2.3、図3.1、図3.2、図3.9}

5年平均に基づくと、1957年から2009年にかけて水深700~2000 mの層で海洋は温暖化した可能性が高い。1992年から2005年にかけて、水深3000 mから海底までの水温は上昇した**可能性が高い**一方で、水深2000~3000 mにおける世界平均水温には同期間に有意な変化傾向は観測されなかった。水深3000 m以深の昇温は、南大洋^[訳注 1]で最も大きくなっている。{3.2.4、3.5.1、図3.2b、図3.3、FAQ 3.1}

海洋表層(0~700 m)貯熱量が、比較的十分なデータが取得されている1971から2010年にかけての40年間に増加したことは**ほぼ確実**である。この期間について公表されている増加率は74 TW~137 TW^[訳注 2]の範囲にあり、データが乏しい海域で偏差0を仮定して推定するとより小さい変化傾向を示す。統計的手法を用いてサンプルの乏しい海域の変化と、不確実性を推定すると、世界全体の海洋表層貯熱量の増加率は137 [120~154] TWとの結果が得られる(**中程度の確信度**)。いくつかあるデータセットの全ての変化傾向がその統計的不確実性の範囲内で一致するわけではないが、全て正で

あり、統計的に変化傾向がゼロというデータセットはない。{3.2.3、図3.2}

水深700~2000 mの海洋の温暖化は、1957年から2009年までの間における世界全体の海洋貯熱量(0~2000 m)の全増加分の約30%に寄与している**可能性が高い**。水深0~700 mを地球規模で積算した海洋貯熱量の推定値のうちいくつかでは、2003年から2010年にかけての増加率がその前の10年間よりも緩やかだが、水深700~2000 mの海洋の熱吸収は、この期間も衰えることなく続いていた**可能性が高い**。{3.2.4、図3.2、Box 9.2}

海洋の温暖化は、地球のエネルギー貯蔵量の変化において卓越している。海洋の温暖化は1971年から2010年の期間における地球のエネルギー貯蔵量増加分の約93%を占め(**高い確信度**)、このうち海洋表層(0~700 m)の昇温が全体の約64%を占めている。エネルギー変化の残りの部分は、氷(北極域の海氷、氷床、氷河を含む)の融解と大陸及び大気の上昇が占めている。1971年から2010年までの間の地球のエネルギー貯蔵量の正味増加量は274 [196~351] ZJ(1 ZJ = 10²¹ ジュール)と推定され、この期間の年々の値に線形回帰するとエネルギー増加率は213 TWとなり、これを地球の全表面にわたる加熱とすれば0.42 Wm⁻²に相当し、海洋の昇温分を海洋の表面積にわたる加熱とすれば0.55 Wm⁻²に相当することになる。{3.2.3、図3.2、Box 3.1}

塩分と淡水量の変化

1950年代以降、海洋表面の塩分の地域による差が強化されている**可能性が非常に高い**。すなわち、蒸発が卓越している中緯度域の海面の高塩分は塩分がより上昇し、降雨が卓越している熱帯域及び極域の相対的に塩分の低い表面水の塩分がさらに低下している。高塩分域と低塩分域の平均的な差は、1950年から2008年にかけて0.13 [0.08~0.17]増加した。大洋間における淡水量の差が増大している**可能性は非常に高い**。すなわち、大西洋はより塩分が高くなり、太平洋と南大洋は塩分が低下している。第4次評価報告書においても同様の結論に達したが、より拡充されたデータセットと新しい解析法に基づく最近の研究は、海洋塩分における変化傾向の評価に**高い確信度**を与えている。{3.3.2、3.3.3、3.3.5、図3.4、図3.5、図3.21d、FAQ 3.2}

¹ 本報告書では、成果あるいは結果の可能性の評価を示すために、次の用語が用いられる。「ほぼ確実」:発生確率が99~100%、「可能性が非常に高い」:発生確率が90~100%、「可能性が高い」:発生確率が66~100%、「どちらも同程度」:発生確率が33~66%、「可能性が低い」:発生確率が0~33%、「可能性が非常に低い」:発生確率が0~10%、「ほぼあり得ない」:発生確率が0~1%。適切な場合には追加で以下の用語を用いることがある。「可能性が極めて高い」:発生確率が95~100%、「どちらかと言えば」:発生確率が>50~100%、「可能性が極めて低い」:発生確率が0~5%。可能性の評価結果は、「可能性が非常に高い」のように斜体字で記述する(詳細は1.4節及びBox TS.1を参照)。

² 本報告書では、利用できる証拠を記述するために、「限られた」、「中程度の」、「確実な」を、見解の一致度を記述するために、「低い」、「中程度の」、「高い」といった用語を用いる。確信度は、「非常に低い」、「低い」、「中程度の」、「高い」、「非常に高い」の5段階の表現を用い、「確信度が中程度」のように斜体字で記述する。ある一つの証拠と見解の一致度に対して、異なる確信度が割り当てられることがあるが、証拠と見解の一致度の増加は確信度の増加と相関している(詳細は1.4節及びBox TS.1を参照)。

塩分の大規模な変化傾向は海洋内部にも起こっている**可能性が非常に高い**。蒸発量と降水量の差の変化によって形成される海面における塩分変動の沈み込みと、昇温による密度面の移動の両方が、観測されている海洋表層の塩分変化に寄与した**可能性が高い**。{3.3.2～3.3.4、図 3.5、図 3.9}

塩分の変化傾向、平均塩分、そして蒸発量から降水量を差し引いた値の平均分布の空間分布は、全て似ている。この類似性は、**中程度の確信度**により、海洋における蒸発量と降水量の差の分布が 1950 年代以降強化されたことの間接的な証拠を提供している。{3.3.2～3.3.4、図 3.4、図 3.5、図 3.20d、FAQ 3.2}。

大気－海洋間フラックスと波高の変化

観測されている海洋貯熱量の増加と整合するために必要な世界平均での正味の**大気－海洋間熱フラックスの変化(1971 年以降についておよそ 0.5 Wm^{-2} 程度)**を検出するには、**大気－海洋間の熱フラックスのデータセットの不確実性はあまりにも大きすぎる**。1950 年以降観測されている塩分の変化の時間スケールにおいて、海洋での蒸発量又は降水量の地域あるいは世界的分布の変化傾向を直接特定するためには、このデータセットはまだ信頼して利用することはできない。{3.4.2、3.4.3、図 3.6、図 3.7}

北大西洋、熱帯太平洋、南大洋において、十年～百年の時間スケールで**海域規模の風応力の変化傾向が低～中程度の確信度**により観測されている。こうした結果は、主に大気の再解析にもとづいており、場合によっては単一の解析に限られる。それで、確信度のレベルは対象とする地域と時間スケールに依存する。証拠が最も強固なのは南大洋についてであり、南大洋では**帯状平均風応力が 1980 年代初頭から強くなっていること**の**確信度は中程度**である。{3.4.4、図 3.8}

船舶観測と大気の再解析データで駆動した波浪モデルによる再予報^[取注 3]の結果によれば、北緯 45 度以北の北大西洋の大部分において**1950 年代以降、有義波高の平均値が中程度の確信度で増大しており、典型的な冬季の変化傾向は 10 年当たり最大 20 cm であった**。{3.4.5}

水塊と循環の変化

水塊特性について観測されている変化は、**海洋表面外力における長期変化傾向(海洋表面の昇温や蒸発と降水量の差の変化など)と気候モードに関連した年々～数十年規模の変動の複合効果を反映している可能性が高い**。海洋内部において観測される水温や塩分の変化のほとんどは、海面で特性が変えられた水塊が沈み込んで拡がった結果として説明可能である。1950 年から 2000 年にかけて**亜熱帯の塩分極大がさらに高塩分になる一方、高緯度で形成される低塩分の中層水は全般に低塩分化した可能性が高い**。上部北大西洋深層水の特性と形成率の変化は十年規模変動に支配されている**可**

能性が非常に高い。下部北大西洋深層水は 1955 年から 2005 年にかけて**低温化した可能性が高く**、第 4 次評価報告書で強調された**低塩分化傾向は 1990 年代中頃に逆転した**。南極底層水が 1980 年代以降地球規模で昇温して縮小し、南大洋のインド洋及び太平洋側では 1970 年から 2008 年までの間に塩分が低下した**可能性が高い**。{3.5、FAQ 3.1}

最近の観測により、**主要な海洋循環系が年々から数十年規模で変動している証拠が強化されている**。北太平洋と南太平洋の**亜熱帯循環が 1993 年以降拡大して強化された可能性は非常に高い**。これが風強制による十年規模変動に関連していることと、より長期的な変化傾向の一部であることの可能性は**どちらも同程度**である。大西洋子午面循環(AMOC)全体と様々な緯度や期間における個々の構成要素の測定値に基づく、長期変化傾向の証拠はない。また、インドネシア通過流、南極周極流、及び大西洋とノルディック海間の輸送量のいずれにも変化傾向の証拠がない。ただし、1950 年から 2010 年の間に、南極周極流が 40 年間でおよそ緯度 1 度分に相当する速度で南に移動したことについては**中程度の確信度**がある。{3.6、図 3.10、図 3.11}

海面水位の変化

潮位計データ及び**1993 年以降、追加で用いている衛星データに基づき、1901～2010 年の期間の 110 年にわたる平均上昇率を用いて計算した結果によると、世界平均海面水位(GMSL)は、この期間中 0.19 [0.17～0.21] m 上昇した**。平均上昇率は、**1901～2010 年の間では、1 年当たり 1.7 [1.5～1.9] mm で、1993～2010 年の間では 1 年当たり 3.2 [2.8～3.6] mm に増加した可能性が非常に高い**。この評価は、異なる手法を用いた複数の研究、鉛直方向の地殻変動を補正した長期の潮位計記録、1993 年以降の独立した観測システム(潮位計と高度測定)の間の高い**一致度**に基づいたものである(TFE.2 図 1 も参照)。1920 年から 1950 年までの世界平均海面水位の上昇率は、世界中の個々の潮位計の数値と世界平均海面水位の復元結果が、この期間の海面水位の上昇率の増加を示しているため、1993 年から 2010 年の期間に観測された上昇率と同程度で上昇した**可能性は高い**。広範な海域における海面水位の上昇率が、海洋循環の変動により、数十年規模の期間については世界平均海面水位の上昇率より数倍高いこともあれば、低いこともあり得る。鉛直方向の地殻変動の補正の有無に関わらず研究間での**一致度が高い**ことは、海面水位変化の世界平均上昇率の推定値が、これまで考慮されてなかった鉛直方向の地殻変動の影響を受けて大きく偏っている**可能性は非常に低い**ことを示唆している。{3.7.2、3.7.3、表 3.1、図 3.12、図 3.13、図 3.14}

水深 700 m 以浅における**温暖化が 1971 年以降の 1 年当たり平均 0.6 [0.4～0.8] mm の海面水位上昇に寄与している可能性は非常に高い**。水深 700 m～2000 m における温暖化は、1971 年以降の海面水位上昇にさらに 1 年当たり 0.1 [0～0.2] mm 寄与し、水深 2000 m

以深の温暖化は、1990年代初頭以降の海面水位上昇にさらに1年当たり0.1 [0.0~0.2] mm 寄与した**可能性が高い**。{3.7.2、図 3.13}

海面水位上昇率は19世紀初頭から20世紀初頭までの間に増加し、20世紀にわたってさらに増加した可能性が高い。19世紀の変化についての推論は、北ヨーロッパと北アメリカのきわめて長期にわたる少数の潮位計記録に基づいたものである。複数の長期の潮位計記録と世界平均海面水位の復元によると、上昇率が19世紀後半から高まっていることが確認される。少なくとも1900年まで遡る3つの復元のうち2つの復元は20世紀中に加速していることを示しており、20世紀の平均加速率は、[-0.002~0.019] mm/年²である**可能性が高い**。{3.7.4}

極端な高潮位現象の大きさは1970年以降増大している可能性が高い。極端な潮位現象の増加の大部分は、平均海面水位の上昇によって説明できる。つまり、極端な高潮位の変化は、平均海面水位の上昇を考慮に入れば、潮位計の94%において1年当たり5 mm未満に縮小される。{3.7.5、図 3.15}

海洋の生物地球化学の変化

異なる手法とデータセット(海洋中の炭素、酸素、過渡的トレーサなどのデータ)を用いた独立した推定値間の**一致度が高い**ことに基づくと、全世界の海洋に貯蔵された人為起源の炭素(C_{ant})の量は**1994年から2010年にかけて増加した可能性が非常に高い**。2010年における海洋のC_{ant}貯蔵量は、±20%の不確実性で155 PgC^[訳注4]と推定される。異なる期間について独立したデータセット(海洋C_{ant}貯蔵量の変化、大気中O₂/N₂測定、あるいは二酸化炭素分圧(pCO₂)データ)から計算した年間世界海洋吸収量は、互いの不確実性の範囲内で相互に一致しており、1年当たり1.0~3.2 PgCの範囲に収まる**可能性が非常に高い**。{3.8.1、図 3.16}

海洋が人為起源の二酸化炭素を吸収すると、海洋は次第に酸性化していく。海洋表面のpHは工業化時代の始まり以降0.1低下し、これは水素イオン濃度が26%増加したことに相当する(**高い確信度**)。観測されたpHの変化傾向は、表面水において1年当たり-0.0014~-0.0024の範囲にある。海洋内部では、人為起源の二酸化炭素の吸収に加え、自然の物理的及び生物的過程が、10年以上の時間スケールでpHの変化を引き起こし得る。{3.8.2、表 3.2、Box 3.2、図 3.18、図 3.19、FAQ 3.3}

異なる解析結果間の一貫性が高いことから、1960年代以降多くの海域において外洋水温躍層中の酸素濃度が低下したことについては、**中程度の確信度がある**。この

一般的な濃度低下は、以下の予想と整合している。すなわち、昇温による成層化によって海面近くの水から水温躍層への酸素供給が減少すること、水温が上がるほど保持できる酸素が少なくなること、風成循環における変化が酸素濃度に影響すること、である。この数十年間に、熱帯域の酸素極小層が拡大した**可能性が高い**。{3.8.3、図 3.20}

統合(まとめ)

本章で要約した観測結果は、水温、塩分、海面水位、炭素、pH、酸素をはじめ、気候に関連する海洋特性がこの**40年間に**変化したことの**確実な証拠**を提供している。海洋表層において観測された変化のパターンは、気候変動と自然変動にตอบสนองした海洋表面の変化と整合し、また海洋における既知の物理的及び生物地球化学過程とも整合しており、この評価において**高い確信度**を与えている。{3.9、図 3.21、図 3.22}

[訳注1] 原文では“the Southern Ocean”。南極海(“the Antarctic Ocean”)とも呼ばれる。

[訳注2] 1 TW(テラワット)= 1×10^{12} W = 1 兆ワット。

[訳注3] ハインドキャストとも呼ばれる。過去の事例をモデルによって再び予報すること。
(参考: http://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2012/2012_06_0493.pdf)

[訳注4] 1 PgC = 1 GtC(炭素換算で1ギガトン=10億トン=1000兆グラム)。二酸化炭素換算では36億6700万トンに相当する。