

海洋熱塩循環と温暖化

羽角 博康

はすみ ひろやす

東京大学気候システム研究センター

海洋熱塩循環が温暖化の過程で顕著に弱まるのではないかということが大きな問題として取り沙汰され、IPCC 第4次報告書でも重要なテーマとして扱われている。ところで、海洋熱塩循環とはそもそも何なのか。また、温暖化は実感を伴って事実として受け入れられつつあるが、海洋熱塩循環の変化は実際に起こっているのだろうか。そして、その影響はどう現れるのだろうか。

海水温は海面付近では緯度や季節に依存して $-2\sim 30^{\circ}\text{C}$ をとるが、深さ数千メートルの深層ではどこでも 0°C 前後の低温である。海洋中にはこの温度差をなくすような混合現象が存在する一方、海洋内部に冷却源は存在しない。したがって、深層における低温水の存在は、高緯度の海面付近に存在する低温水が深層に沈むような循環の存在を意味する。純粋な水とは異なり、海水は結氷温度に達するまで低温ほど密度が高く、また高塩分であるほど密度が高い。海面付近の冷却または高塩分化（蒸発・結氷）は海水の密度を高め、特に高密度が実現される場所において深層への下降が生じる。実際にそれが生じているのは北大西洋北縁と南極大陸周囲のごく狭い数箇所に限られている。この高密度水は深層を水平的に流れつつ、上層に存在する低密度水と混合して密度を下げながら上昇する。その結果、海洋には上層と深層をつないで全球を巡る循環が形成されている。海水の密度が温度と塩分に依存することから、この循環は熱塩循環と呼ばれる。

熱塩循環の深層部分は低温水を高緯度から運び出し、上層部分は高温水を高緯度に運び込むため、低緯度と高緯度の温度差を緩和する働きを持っている。風によって海洋上層に形成される水平的な循環や大気の循環も低緯度と高緯度の温度差を緩和する働きがあるが、熱塩循環は南北半球間を高緯度まで直接つなぐという、他の循環とは大きく異なる特徴を持っている。その結果、熱塩循環は両半球間で熱の再分配を行い、特に大西洋では多くの熱が南大西洋から北大西洋に運ばれている。北ヨーロッパの気候が緯度に比して温暖なのはこの熱輸送によるところが大きく、熱塩循環が存在しなければ北ヨーロッパの気温は現在よりも数 $^{\circ}\text{C}$ 程度は低いはずである⁽¹⁾。また、氷期には熱塩循環が現在よりも弱かったことが知られているが、それは氷期の気候状態と密接に関係すると考えられている。後述する炭素循環における役割も含め、熱塩循環は気候の特に長期・大規模変動をコントロールする主要因のひとつである。

温暖化は海面付近の水温上昇をもたらすとともに、降水増加や氷床・氷河の融解を通して高緯度の海面付近を低塩分化する可能性が高い。これらはいずれも深層水形成領域の海水密度を低くするため、温暖化によって深層水形成が弱まり、ひいては全球規模の熱塩循環が弱まるという予想が成り立つ。IPCC 第4次報告書における気候予測シミュレーション

のほとんどはその予想を支持している。その一方で、ここまでもっともらしく述べてきたが、熱塩循環の実態には不明な部分が多いのも事実である。

深層水形成領域では継続的に集中観測が行われており、その実態や変動は比較的良くわかっている。そして、20世紀後半から現在にかけて深層水形成領域が低密度化してきているという観測事実が、北大西洋と南極周囲の両方について、ここ数年の間にいくつも報告されている⁽²⁾⁽³⁾。これは深層水形成が弱まったことを示すが、十年～数十年規模の自然気候変動に伴ってもそうした変動が生じ得るため、観測された変化が温暖化の結果だとはまだ断定できない段階である。熱塩循環そのものの観測には様々な困難が伴い、その強さや変動については間接的な推定が少数存在するのみである。そうした間接的推定では、過去50年間で熱塩循環が顕著に弱まったという報告がある一方⁽⁴⁾、1980年から現在にかけて若干強化されているという報告もある⁽⁵⁾。先述の自然気候変動は熱塩循環の変動ももたらすものであり、深層水形成の場合と同様に、温暖化が熱塩循環を弱めたという確たる証拠も今のところ無いと言うべきであろう。数値シミュレーション結果は20世紀中には熱塩循環は顕著に弱まらないことを支持している。熱塩循環弱化の観測的実証は今後の大きな課題である。

先述の通り、熱塩循環が弱まると北大西洋の低温化と南大西洋の高温化が生じる。しかし、温暖化進行中の出来事として捉えると、そもそも高緯度地方の温暖化は大きいため、北大西洋高緯度域の温度上昇を少々緩やかにするのが精一杯である。その緩和のツケは南大西洋のさらなる温暖化に回る。こうした変化は温暖化とともに徐々に進むが、もし熱塩循環が一旦ほとんど停止してしまうと、温暖化の進行が止まっても熱塩循環は長期に渡って回復しないと考えられている。そうなると、海洋炭素循環を通じた気候への長期的影響が大きな問題となる。

人間活動によって大気中に放出されてきた二酸化炭素のうちかなりの部分は海洋に吸収されてきた⁽⁶⁾。大気と海洋は海面を通して二酸化炭素を交換するが、海水は低温ほど二酸化炭素を吸収しやすく、高緯度で深層に沈む熱塩循環は二酸化炭素を海洋深層に運ぶ役割を果たす。海面水温の上昇と熱塩循環の停滞は、この海洋の二酸化炭素吸収能力を低下させる。ただし、海洋による二酸化炭素吸収には、海洋生物による光合成等の過程も重要である。生物活動は栄養塩と呼ばれる溶存物質の海洋表層への供給量に依存し、その供給には熱塩循環が関わっている。したがって、生物活動も熱塩循環変化の影響を受けると考えられるが、その程度は明らかでない。また、温暖化による生物種の変化なども海洋の二酸化炭素吸収能力を考える上で重要であるが、そこには未知の部分が多い。熱塩循環と生物過程の結果として、海洋深層には大気中の数十倍の炭素が存在している。海洋炭素循環のわずかな変化も大気中二酸化炭素濃度の大きな変化につながり得る。温暖化に対する海洋炭素循環の応答に関しては今後さらなる研究が必要とされ、その解明と影響評価はIPCC次期報告書における重要課題である。

文献

- (1) M. Vellinga & R. A. Wood: *Climatic Change*, 54, 251(2002)
- (2) B. Dickson et al.: *Nature*, 416, 832(2002)
- (3) S. S. Jacobs et al.: *Science*, 297, 386(2002)
- (4) H. L. Bryden et al.: *Nature*, 438, 655(2005)
- (5) M. Latif et al.: *J. Climate*, 19, 4631(2006)
- (6) C. L. Sabine et al.: *Science*, 305, 367(2004)