

磯焼けの話⑱ 「琵琶湖の深呼吸」が教える温暖化の影響とは？

～地球温暖化の海洋へ及ぼす影響を示唆！～

技術士（衛生工学・建設・環境） 鍵谷 司

はじめに

「裏方思考の散歩のみち」と題して自身の関心ごとをテーマに寄稿してきた。とくに、日本海沿岸部育ちの私にとって1993（平成5）年7月の北海道南西沖地震（奥尻地震；マグニチュード7.8）後の津波対策として浅瀬に投入されたコンクリート製のテトラポットは、自然破壊そのものであった。海に影響はないのであろうか？ 毎年、住いの京都から北海道日本海沿岸部を訪れ、海中の様子を観察し、荒廃を肌で感じてきたので「磯焼け」を取り上げた。

磯焼けとは、主に沿岸部の藻場消失であり、その回復には、栄養塩も必要であるが、光合成の引き金になる微量の鉄分の存在が不可欠であることを紹介した。また、藻場は「海の森林」であり、陸の森林と同様に太陽光、水と海水中に溶けた二酸化炭素（以下、CO₂）による光合成により生育、繁茂する。これにより海水中のCO₂が消費されると、大気中から溶け込むので、大気中濃度が低下する。しかしながら、CO₂の排出量が、吸収量を上回ってきたことから大気中濃度が上昇し、地球温暖化をもたらし、これまで経験したことがないような異常気象が頻発する事態に陥っている。

ところで、最近、日本最大の湖である琵琶湖において地球温暖化により湖水の対流が中途半端になっており、水質や生態系に影響が及ぶのではないかと懸念されている。つまり、冬季においても表層水の水温が高いために表層から底層への対流が起りにくくなっている。このため、溶存酸素の豊富な表層水が底層部へ沈み込まないため底層部の溶存酸素濃度（以下、DO）が不足し、生態系

に大きな影響が懸念されている。当然、地球規模で起こっている温暖化により海洋の海水温が上昇するので、琵琶湖と同様に表層海水の沈み込みが不十分になり、地球規模で気候変動が起こる要因ではないかと心配になる。

まずは、身近な琵琶湖で起こっている地球温暖化による気温上昇の影響に注目した。今回は、この地球温暖化が広大な海洋にも影響し、地球規模で異常気象を引き起こすとの報道もあるので、取り上げる。

1. 琵琶湖の水温上昇に伴う異変とは？

近畿の水がめである琵琶湖は、下流約1,500万人の生活用水、農業用水、工業用水を供給し、人々の暮らしと経済を支えている。昭和50年代には周辺の都市化に伴って水質が悪化し、赤潮発生を引き起したが、これを克服し良質な水質を維持してきた。が、最近では、地球温暖化による気温上昇により湖水の対流が不十分な事態が観測されている。人間にたとえると、呼吸が不十分であるのと同じで、湖の「死」を予感させる。

以下に温暖化に伴う水温上昇が琵琶湖に及ぼす影響に焦点を当てて、概要及び湖水の表層と底層の対流、つまり循環の現状と問題点について紹介する。

1. 1 琵琶湖の概要¹⁾

琵琶湖の概要を表1に、等水深線を図1に示す。滋賀県の1/6を占める琵琶湖は、日本最大の湖であり、外海から隔離された閉鎖性水域である。その総貯水量は275億m³で、あの黒部ダムの貯水量

表1 琵琶湖の概要

主要項目	概要
面積	約674km ² (北湖:619km ² 、南湖:55km ²)
容積	約275億m ³ (北湖273億m ³ 、南湖:2億m ³)
大きさ	長さ:約63.5km、幅:約1.35~22.8km
沿岸線延長	約235km
最大水深	103.58m (北湖西岸安曇川沖)
平均水深	北湖:約43m、南湖:約4m

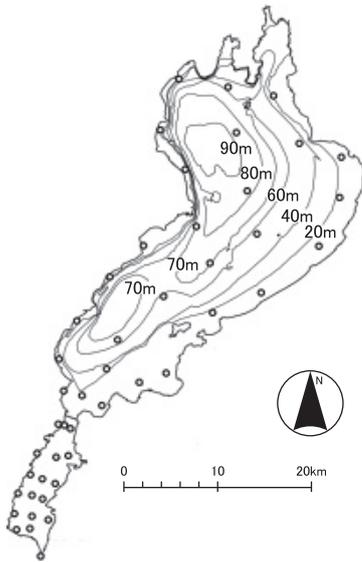


図1 琵琶湖の等水深線の事例

2億トンの130倍以上である。琵琶湖は、120カ所以上から河川水が流入するが、流出は瀬田川と琵琶湖疏水の2カ所である。平成15年度の年間水収支は、河川より39.3億m³、地下水より7.4億m³、湖面への直接降水より12.2億m³の計58.9億m³が流入し、湖面からの蒸発により4.0億m³、瀬田川より48.4億m³、琵琶湖疏水より4.9億m³が流出し、その滞留時間は4.7年と報告されている。

琵琶湖は、北湖と南湖に区分され、北湖は南湖の11倍の面積で、最大水深が100mを超えるが、南湖は狭くて浅い。南湖の最大水深は7m程度、平均水深は4m程度なので、強風だけでもかき混ぜられるが、北湖は風では浅層部のみの混合で深層部には至らない。しかし、日本は寒暖差の大きな四季があるので、温度差に伴う水の比重差によ

り、北湖においては表層水と底層水の対流により年に一度、全層循環が起これ、湖底まで溶存酸素が供給され、豊かな生態系を維持してきた。

ところが、地球温暖化に伴う暖冬の頻発、降雪量の減少に伴って琵琶湖の水温が上昇し、「湖水の循環」が不十分な年度があるとの観測結果が明らかになっている。その影響は定かでないが、水質悪化や水生生物の生育、繁殖等に影響が懸念されている。

1.2 琵琶湖における対流による循環！

最近、琵琶湖湖水が表層部から底層部の全層にわたって対流する全層循環が大きな注目を浴びており、これを「琵琶湖の深呼吸」と呼んで、毎年、ニュースになっている²⁾。

(1) 琵琶湖における対流のメカニズムは！

琵琶湖の全層循環のイメージを図2に、循環不全のイメージを図3に示す。琵琶湖では年に一度、表層と底層が入れ替わる、全層循環が起これることが知られ、これを「琵琶湖の深呼吸」と呼んでいる。そのメカニズムは、以下の通りである。

①成層期：春から秋にかけて水温が高いため表層、中層、底層が生成する。表層水には、大気から

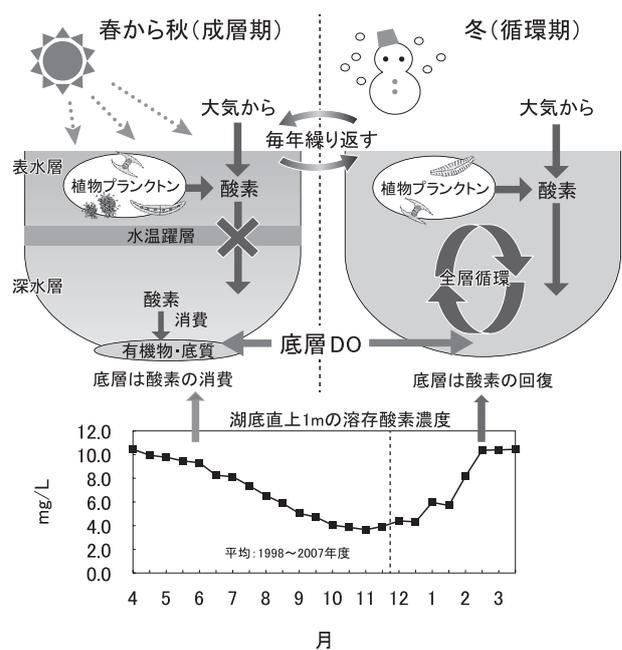


図2 琵琶湖の全層循環のイメージ³⁾

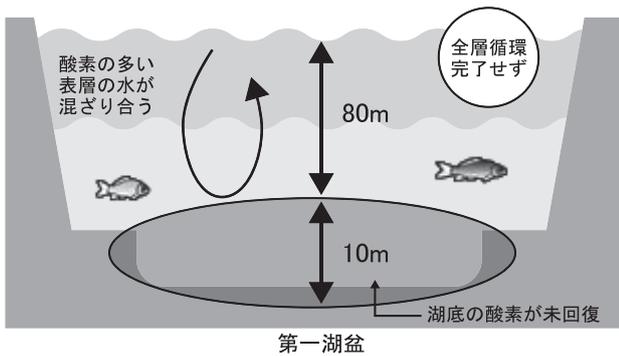


図3 琵琶湖の循環不全のイメージ⁴⁾

酸素が飽和状態で溶存しており、栄養分があると、太陽光、水とCO₂との光合成により植物プランクトンが繁殖する。一方、底層部では、沈降した有機物が好気性分解により酸素を消費するが、酸素が供給されないため、DOが不足し、嫌気性状態になる。

- ②循環期；冬になると水温が低下し、大気から多くの酸素が溶存し、重くなった水は沈み込み、循環が起こる。表層水が底層へと移動するので深層部のDOが回復する。一方、栄養分が沈んでいる底層水は表層へ運ばれ植物プランクトン発生源となる。これが一年の循環サイクルであるが、最近の水温上昇により図3に示したように循環が不十分な状態が現れている。

つまり、季節の水温の差が対流を生み、表層の豊富なDOを底層部へ、そして栄養豊富な底層水を表層へ運ぶ役割を担う。

温暖化の影響の基本要素は、水温と水の比重、および水温と酸素溶解量との関係である。

- ①水の温度と比重；図4に示すように水温が高くなると比重は小さくなるので、表層に溜まり、低くなると重くなるので沈み込む。お風呂あるいは遊泳時に表層は温かいが、下層は冷たいことはよく経験することである。温暖化により水温が高いままであれば、表層水が沈み込まないので、対流が起き難いことを意味する。
- ②水の温度と酸素の溶解量；図5に示すように酸素などの気体は、水温が低くなるとたくさん溶ける性質がある。水中の好気性微生物は、この溶存した酸素を活用して有機物等の栄養分を酸

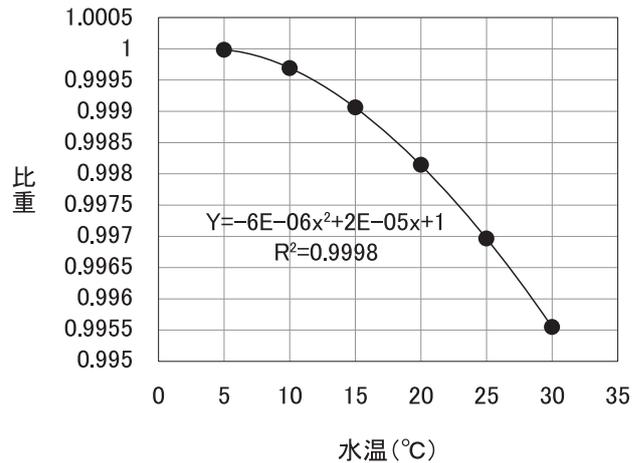


図4 水の温度と比重の関係

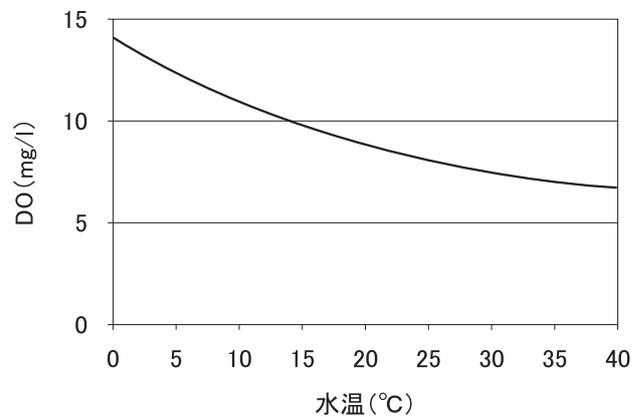


図5 水温と飽和溶存酸素量 (DO) の関係

化分解してエネルギーに変換し、活動、生育、繁殖している。DOが5 mg/l以下になると活動は阻害され、嫌気性微生物により腐敗が起るとされている。

以上の水の性質より、琵琶湖の深度別の水温とDOを測定すれば、どの程度の深さまで対流・循環が起っているかを把握できる。四季のおかげで循環が起こるので、湖底の酸素は夏にかけて減少しても冬の全層循環で回復するというサイクルが繰り返されるのである。しかしながら、最近気候温暖化により、2019年と2020年には全層循環が起らない事態が起り、衝撃的な出来事と報じられた。幸いにも、今年2021年には3年ぶりの全層循環が確認されたものの、地球規模で起る温暖化による気温上昇が原因であり、対応に苦慮することが予想される²⁾。

※「溶存酸素量」(DO = Dissolved Oxygen) とは、大気中から水に溶け込んでいる酸素 (O₂) の量を示す。DOが減少すると、水中の好気性微生物の活動が鈍くなり、河川や海域の自然浄化作用が働かなくなる。魚介類などの水棲生物の繁殖を阻害し、窒息死するなどの影響を及ぼす。一般に河川などで悪臭が発生しないためには、DOが2mg/l以上、また、魚介類が生存するためには3mg/l以上が必要といわれている。つまり、DOは、数値が大きいほど良好な水質であることを意味する。

(2) 琵琶湖の水質測定の事例⁴⁾

琵琶湖の循環は、図2に示すイメージで示される。しかし、水温にしてもDOにしても自然現象であり、風、降雨や有機物濃度などによっても変動する。以下に具体的に季節別、深度別における水質測定結果の事例を紹介する。

琵琶湖においては図6に示した安曇川沖と今津沖で深度別の水質観測が2機関により行われている。測定地点の概要は下記の通りである。

〈測定地点〉

○安曇川沖総合自動観測所 (水資源機構所有) ;

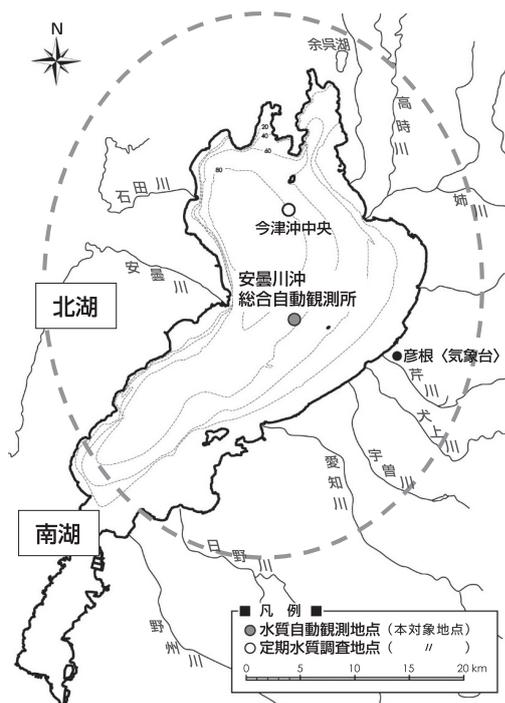


図6 琵琶湖水質観測地点

最大水深約60m地点、毎正時に表層(水温・DOなど)の計測・6時間ごとに各層(水深5~60m)で計測

○今津沖中央(滋賀県調査船により調査);今津沖第一湖盆とも呼ばれる最大水深約90m地点ではほぼ月2回の頻度で深度別調査

〈測定結果〉

安曇川沖中央における自動観測所のリアルタイムデータのうち、図7に典型的な全層循環の発生年の2016~2017年のグラフを、図8に全層循環不全年の2018~2019年のグラフを示す。また、今津沖中央における調査船による月2回の観測結果の水温、深度別DOを比較することにより、琵琶湖水の対流の状況、すなわち循環の程度を定量的に把握できる。表2に全層循環年(2016~2017年)と循環不全年(2018~2019年)における北湖今津沖の深度別の水温とDOの測定結果を抜粋して示

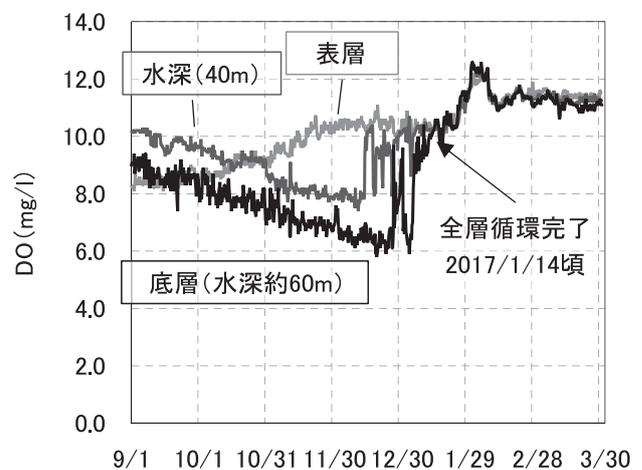
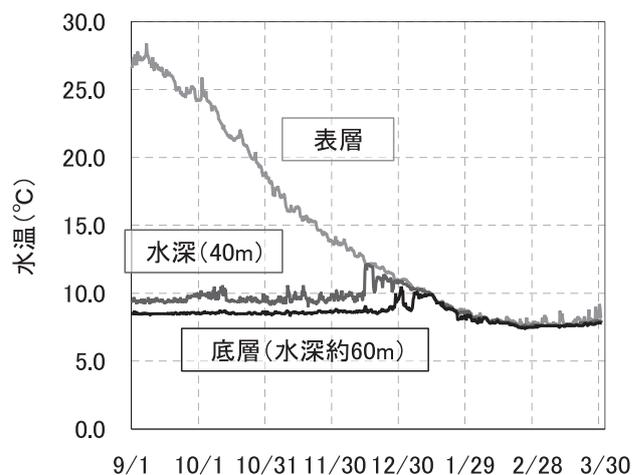


図7 全層循環発生年における水温・DO

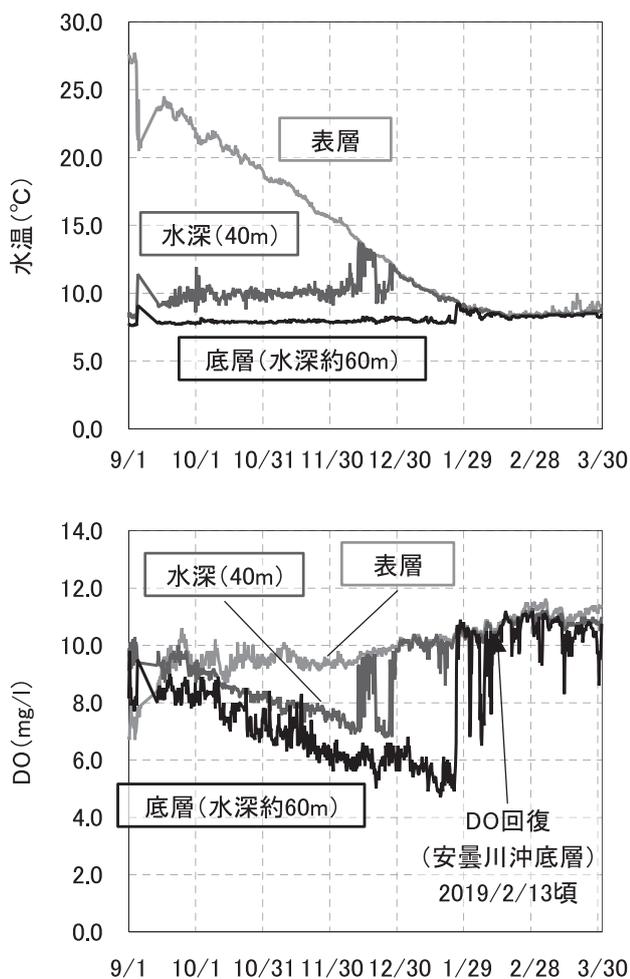


図8 全層循環不全年における水温・DO

した。深度別の水温及びDO測定により対流、つまり循環の深度が分かる。

これらの図より、全層循環が起こると、表層と底層の水温及びDOが同じになること、循環不全の場合には、中層部まではDOが同じ数値であるが、湖底まで混合していないことが分かる。この場合は、湖底付近のDOが3 mg/l以下と極端に低い状態であった。DO不足の嫌気性状態であり、沈降した有機物は嫌気性分解され、腐敗して水質の悪化を招くとともに、水生生物の生存が難しい環境になると考えられる。なお、湖底の深度は約90mで、その1m上で測定している。

以下に全層循環と全層循環不全発生時の特徴を示す。

①全層循環 (2016～2017年)；図7・表2

水温が低下すると表層水は沈降する。水温が15℃程度で-15m付近まで、10℃程度で-40m

表2 全層循環と循環不全時の深度別水温・DO

	水深 (m)	水温 (DO) > 25℃	水温 (DO) ~ 15℃	水温 (DO) 10℃ >
全層循環	測定月	9月前半	11月後半	1月前半
	表層	27.4 (8.3)	15.2 (10.3)	8.7 (10.2)
	-20m	14.0 (6.3)	14.9 (9.7)	8.6 (10.2)
	-40m	9.4 (8.7)	9.9 (6.9)	8.6 (10.1)
	-60m	8.4 (7.8)	8.9 (7.1)	8.6 (10.1)
	-80m	8.2 (4.6)	8.4 (5.5)	8.6 (10.1)
	湖底	8.2 (3.9)	8.3 (3.7)	8.6 (10.1)
循環不全	測定月	9月前半	12月前半	3月後半
	表層	23.9 (8.1)	15.2 (9.3)	8.8 (10.9)
	-20m	17.2 (7.7)	15.2 (9.1)	8.4 (10.8)
	-40m	12.0 (8.1)	10.3 (6.7)	8.4 (10.8)
	-60m	8.1 (7.9)	7.9 (5.9)	8.3 (10.1)
	-80m	7.5 (8.3)	7.6 (6.2)	7.9 (4.3)
	湖底	7.5 (7.3)	7.5 (2.5)	7.9 (3.3)

※表層；-0.5m地点、湖底；+1m地点

付近まで表層水が沈降・混合して同じ水温になる。さらに表層水温が8.6℃まで低下すると-80m以深の底層部まで混合する。つまり、1月後半調査時には全層で水温がほぼ一定になり、全層循環が確認された。また、DO濃度分布も同じ様相を示す。なお、底層部ではDOが5 mg/l以下であり、全層循環が起こってようやく表層と同じ10mg/lを回復した。

また、表2より当年では1月前半に表層水と底層部が8.7℃と同じ水温になり、DO濃度は、表層と同じ10.1mg/lまで回復した。

②全層循環不全 (2018～2019年)；図8・表2

表層水の水温が10℃以下に達する時期は、全層循環よりも1ヵ月以上遅れの3月前半から後半であり、しかも水温及びDOとも深度-40mまでしか均一にならず、一時的に-60mまで回復したが全層循環に到らなかった。当然、湖底付近のDOは低く、4 mg/l以下であり、水質悪化や生物への影響が懸念された。これを「琵琶湖の半呼吸」と呼び、危機感が募ったが、次年

度に回復した。

(3) まとめ

図7及び図8に測定データを示したように、水温は、表層から-40m、-60m地点では変動は小さいが、DOは大きく変動する。DOは溶存酸素濃度であり、全層循環発生年は変動が小さいが、循環不全発生年は変動が大きい傾向が読み取れる。とくに、水温に比べて深度別DOの変動が大きいことは、好気性微生物の活動による消費が想定されるが、文献では考察されていない。

いずれにしても琵琶湖の最大深度の半分以上までは循環は起こっているが、最も大きな問題は有機物等の栄養塩が沈降して堆積する湖底部（ここでは湖底から+1m地点で測定）のDOであろう。これらは好気性微生物により分解され水質浄化されるが、DOが低下する。嫌気状態になると嫌気性菌による腐敗が起こり、水質悪化や水生生物の生存が難しくなる。このように温暖化の影響を観測データに基づいて予測することは非常に重要であり、DOの「回復対策」を考えるうえで貴重なデータである。自然循環に依存しては、いずれ「湖の死」を招くことになりかねないので、人工的な循環に取り組みなければならない。

温暖化は地球規模で起こっているため、当然、海水温の上昇は、海洋における循環を阻害する。今回は、琵琶湖の還流（湖流）、特に底層部における還流についてはデータ不足で触れなかったが、海洋では、複雑な地形による湧昇や渦発生などにより表層水と深層水の大規模な混合や循環が起こっていると考えられる。とくに、琵琶湖の循環不全時の底層部における挙動は、有機物などの栄養塩

の貯留場所でありながら、DO不足になりがちであり、計り知れない影響がありそうである。

おわりに

今、地球温暖化に起因する様々な異常気象が世界各地で報告されている。このまま地球温暖化が進むと、ますます暖冬になり、氷山や永久凍土の融解、降雪量の減少、気温の上昇に伴う海水温の上昇などにより地球規模で異常気象を引き起こし、人類生存の危機の入り口に差しかかっていると指摘されている。

温暖化に伴って起きている琵琶湖の「異変」は、まず湖水の対流が小さくなり、いわば琵琶湖の深呼吸から半呼吸がしばしば観測されている。対流の規模が小さく、あるいは停止すれば、とくに底層部の溶存酸素が低下し、腐敗に伴う水質の悪化や生態系に極めて大きな悪影響を及ぼすと推測されている。現状では、湖水の循環が不連続に起こっているため、湖底の水質は回復しているようだが、これが毎年底層部まで起こると、漁業をはじめ想定ができないような影響が懸念されている。

地球温暖化による気温上昇は地球規模で起きているため、当然、海洋においても琵琶湖と同じように表層水と底層水の対流、循環が抑制されるものと予想される。海洋における循環はどのような影響を及ぼすのであろうか？ 地球規模で起きている気象異変の要因になるのであろうか？ 海洋では、地球の自転によるコリオリの力を受けて表層、中層及び深層で地球規模で海流が生じている。現在の知見で温暖化はどのように影響を及ぼすことになるかについて2000年で地球を一周するといわれる「深層海流」に焦点をあてて紹介したい。

〈引用・参考文献〉

- 1) 琵琶湖・気候変動対策特別委員会資料；滋賀県琵琶湖環境部琵琶湖保全再生課；令和3年（2021年）2月8日
- 2) 「琵琶湖の深呼吸」3年ぶりに確認 生態系維持に不可欠な全層循環、知事「ほっとした」；京都新聞；2021年2月2日
- 3) 資料3 琵琶湖北湖における全層循環の状況について；滋賀県琵琶湖環境科学センター環境監視部門
- 4) 大平、柳生、村井；琵琶湖北湖における全層循環の考察について；独立行政法人水資源機構琵琶湖開発総合管理所