

人新世海洋の三重危機 第二部：酸素欠乏

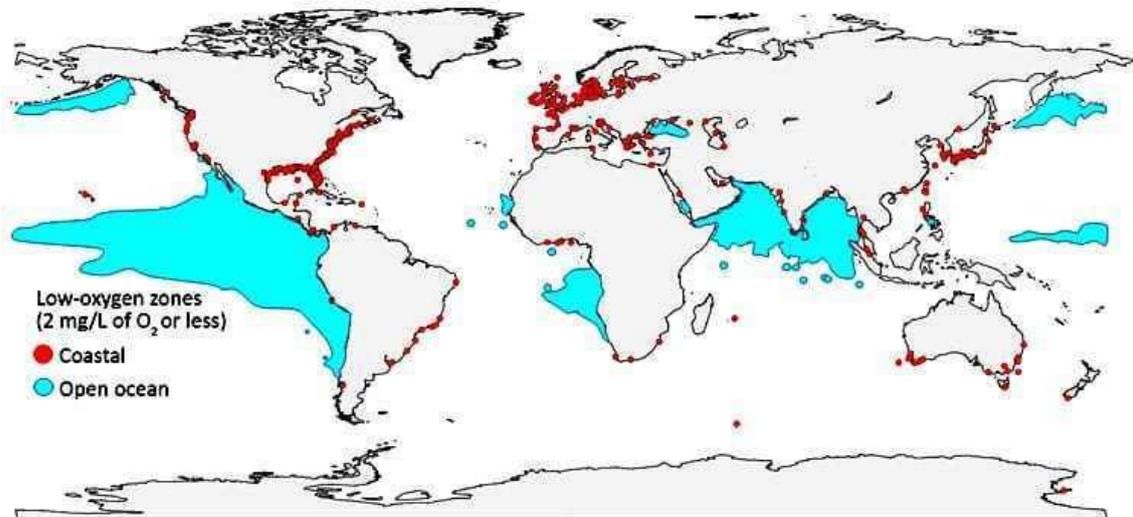
イアン・アンガス著、脇浜義明訳

原典：Climate and Capitalism, 2020年9月22日



「海洋脱酸素化はあまりメディア報道されないが、地球温暖化と海水酸性化と並んで、気候変動をもたらす三害悪の一つである。靴の一方が脱いだ音がしたのもう一方を脱ぐ音が聞こえるだろうというような軽い影響でなく、大きなブーツで海洋のエコシステムを蹴飛ばして、海洋で暮らしを立てている何億人の人々に破壊的影響を与え、気象をひっくり返すものである。」

— 『懐疑の科学』



Red dots mark coastal 'dead zones' where oxygen has plummeted to 2 milligrams per liter or less. Blue areas in the open ocean have the same low-oxygen levels. Source: GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel.

海洋生物が瀕死の危機に直面し、生物圏を形成する生物地球化学循環が崩れかけ、今や海が息切れしている。

1960年以降、海洋の低酸素領域は450万平方キロメートルも拡大した。これはEU全体の面積に相当する広さである。海域によっては酸素の40%が喪失したところもあり、無酸素状態の海水域が4倍以上に増えた。海洋から喪失する酸素は毎年10億メートル・トンになる。このまま続くと、2100年までには生命の元になる酸素の低下は3倍になるだろう。それに加え、沿岸の酸欠海域の数が急増しているのも、まさに生命にとって非常事態である。

全体として見ると、海洋の酸素含有量減少は2%であるが、酸素減少が起きている場所が海洋生物がたくさんいる海域なので、その影響は2%という数字が示すよりはるかに大きい。

代謝亀裂に関するこのシリーズの前論文では、資本主義の盲目的拡張運動が作り出した二つのエコロジカル過剰状態 — 工業的農業の人工化学肥料利用が作り出した窒素過剰と資本主義経済の化石燃料依存が作り出した二酸化炭素過剰 — を検討した。この二つが、過去何億年間にわたって生物圏を支えてきた生物地球化学循環を乱し、地球システムの代謝に大きな亀裂をもたらした。

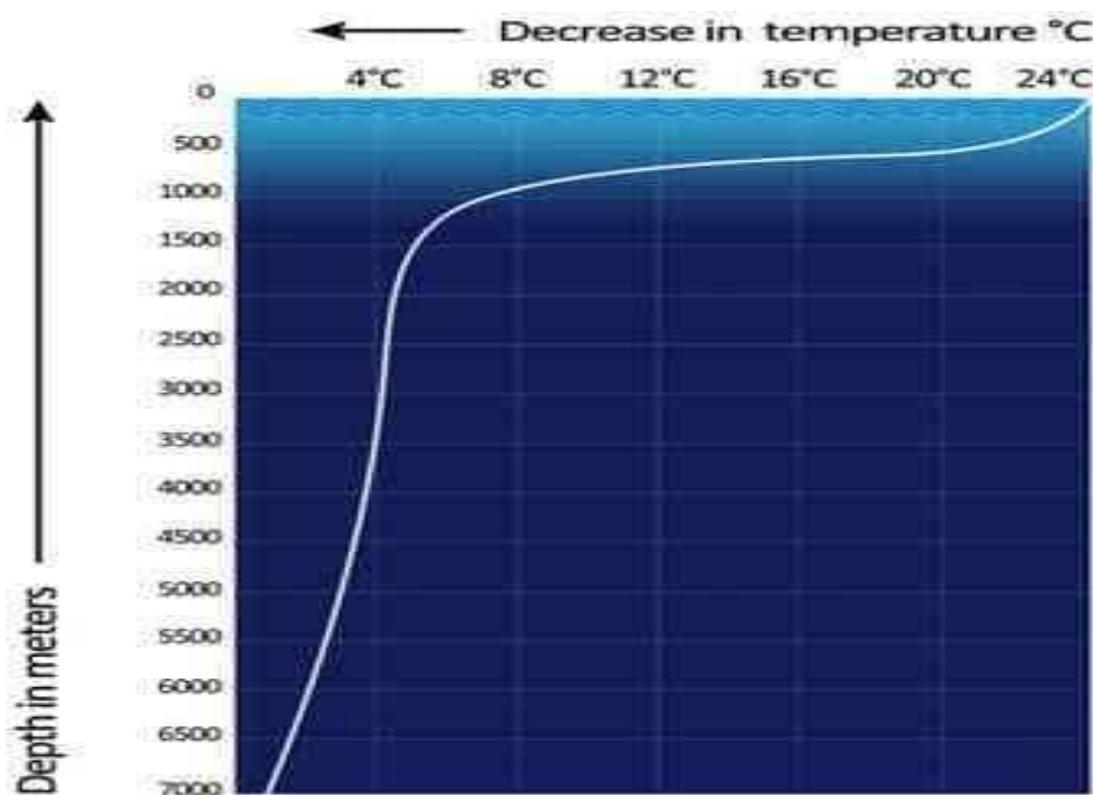
海洋の酸素危機は、各所で窒素と二酸化炭素過剰から生じている。沿岸や河口付近では、川が運んできた数百万トンの人工窒素肥料のために、季節的に酸欠海域が発生している。これまで900件の酸欠海域が報告されているが、実際にはもっと多くあるのは間違いない。1980年代以後に科学者による沿岸の酸欠海域の調査が行われ、その原因と結果につい

て広範な一致が見られた。私はそれについて先月 *Climate & Capitalism*(気候と資本主義) という論文に書いた。本論文では、まだ本格的研究の歴史が15年程度しかない現象 — 海洋における低酸素及び無酸素海域について考察する。この現象は沿岸の酸欠海域とは別物 — 例えばバルト海やアラビア海では重複している — ではないが、それと並行して別途発生しているもので、拡大している。

酸素の海水への溶解は、いくら深部の海水であっても、すべて表面か表面近くで始まる。そのプロセスは次の二つ。

- 1) 大気と海の間には絶えず酸素分子の交流がある。大気中酸素が海水へ溶け込み、海水中酸素は泡となって空気中に入り込む。
- 2) かなりの量の酸素は植物 — 特に海中の植物性プランクトンから生成される。光合成には日光が必要で、透き通った水でも、光が届く深さは200メートルである。この受光層から世界の酸素のほぼ半分、海洋酸素のほとんどが生成されている。

深さ200メートルまでの層は表層または混合層と呼ばれる。波、風に押される潮、潮流、対流などが混合層の中をかき混ぜて、水温と塩分濃度と溶解ガス含有量がほぼ均一に保たれる。海水に溶け込んだ酸素は混合層の中で早く拡散して、均等な状態になる。

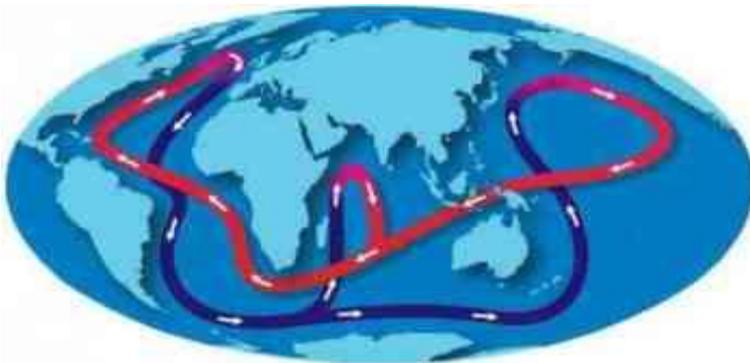


Typical ocean layers. Temperature falls rapidly in the thermocline, between the mixed layer (above 200 meters) and the deep layer (below 1000 meters)

where temperature is nearly constant. Depths vary by latitude and season. Source: Wikimedia Commons

混合層は太陽光で直接温められる。河川、降雨、氷山の溶解によって絶えず新しい水が補充されるので、深部の海水に比べて軽い（濃度が低い）。その下には突然水温が低下する水温躍層が形成される。この表面水より冷たくて濃度が高い水の塊である水温躍層が、混合層と海洋水の90%を構成している冷たくてゆっくり流れる深層との境界線となって、両者を分離している。その大きさは季節と緯度によって変化する — 南北極海には水温躍層と混合層はほとんど見られない — が、たいていのところでは海面下200メートルから1000メートルの幅である。

集散的にベンティレーション（水の循環、交流）と呼ばれる様々なプロセスによって、混合層の一部とそこに含まれる酸素は水温躍層に変化する。酸素配分は潮流、地形、予測し難い変動、その他の要因に左右され、一様ではない。注目されるのは、水温躍層のある部分では、ベンティレーションが弱く、酸素を消費する微生物が多いため、酸素極小層と呼ばれるポケットが生じることもある。普通水温躍層では魚が群れているのだが、酸素極小層では魚は不在で、低酸素または無酸素でも生存できる微生物だけとなる。



Simplified map of the Great Conveyor Belt. Blue: Cold deep flow. Red: Warm surface flow. Source: NOAA.

深海部ではそれと異なる、もっと緩慢なプロセスが酸素供給任務を行っている。北大西洋で海水が凍ると、残された塩分のために濃い高塩水層が形成され、底へ沈む。その重い海水層がゆっくりと南へ移動し、その移動で表層で吸収した酸素を連れていく。これがグローバル・コンベヤー・ベルトである。毎秒2000万立方メートルの海水 — アマゾン川の1000倍の量 — を動かすゆっくりした深海潮流で、酸素と栄養物を深海に配分する。一回の旅路は約1000年かかる。海流がグリーンランドから北太平洋に達する頃には、海水中の酸素の多くがなくなってしまう。このため西ベーリング海とアラスカ湾に酸素極小層が形成される。

気候変動対酸素

第一部で論じたように、海洋酸性化は過剰な二酸化炭素放出の直接的結果である。海洋脱酸素化も同じである。温室効果ガスが世界を熱し、その余熱の90%以上を海の表層が吸収し、海水中の酸素を減少させ、酸素極小層を拡大させる。

脱酸性化の詳細については現在研究中であるが、気候変動が海の酸素欠乏現象の原因であることは明らかである。気温に依存する三つのプロセス — 溶解度、層形成と循環、好気性代謝 — が海から呼吸を奪っている。

溶解度 基礎物理学によれば、海水温度が上がれば溶解酸素が少なくなる。だから北極の海水は赤道直下の海水より溶解酸素が多い。海水温度が4℃から6℃に上がれば、酸素量が5%減少する。

大気と海の間的气体相互交換が数千年間安定していたので、海水中の溶解酸素の量もほぼ一定だった。ところが、過去半世紀間のある時点でバランスが崩れた。暖められた海は吸収した酸素よりも多くの酸素を吐き出し始めたのだ。最近のある研究は、1975年～2005年間の海から大気中へ放出された酸素の量は年平均1億トンになると計算した。このまま温暖化が続くと、海洋からのガス放出は2100年までに3倍増となるだろう。

層形成と循環 前に述べたように、水温と塩分濃度によって海は三つの層に分かれる。濃度が低い層が上にある。気候変動の影響で海水温度が上昇、降雨や氷河溶解のため、最上層部の濃度がいっそう薄くなった。このため、酸素を多く含んだ海水が水温躍層へ循環するのが困難になった。

溶解度減少は全体として酸素が少なくなることを意味し、層形成によって混合層の下を循環する部分の酸素が減少する。1960年以降水温躍層内の酸素極小層が20%も増えている — 2500万立方キロメートルから3040万立方キロメートルになった。これは海洋面積の8%、海水量の7%にあたる。

地球温暖化によってグレート・コンベヤー・ベルト潮流も弱まる。北大西洋のグレート・コンベヤー・ベルトは今や1960年のときよりも15%も少ない海流を運んでいる。今のところ、それによる深海部酸素水準への影響は観察されていないが、一つにはこの中流が非常にゆっくりしているためか、あるいは深海水サンプルが限られているために、まだ分からないだけかもしれない。いずれにせよ、現在の温暖化がこのまま続けば、2100年までに深海部の循環が45%も落ちるだろうと推測されている。

代謝率 温度が上昇すると、すべての有機体の生命を支えている複雑な生化学的作用などの化学過程のスピードも上昇する。温度に比例して代謝率が増加するのだ — 有機体は同一レベルの活動を維持するためにもより多くの酸素を使わなければならなくなるからだ。これは人間のような温血動物ではあまり目立たない。人間の肉体は常に大量のエネルギーを使って一定の状態を保っているから。しかし、ほとんどの海洋生物を含む冷血動物の呼吸数は、水温が上がると、増加する。

つまり、酸素溶解度減少と強い層形成によって海水中の溶解酸素供給が減り、一方好気性代謝によって酸素需要が高まるのである。

この三つのプロセスそれぞれの相対的インパクトを数値化するのは困難だが、これまでのところ溶解度と層形成による酸素減少の方が、呼吸増加が必要とする酸素を上回っている。これは多分地球温暖化が進むにつれ大きく変化するであろう。温度が代謝率に与えるインパクトは指数関数的だからである。最近の研究によると、「2℃の温暖化で海洋の酸素消費速度は29%速くなり、3℃上昇すると50%速くなって、海洋は大規模な低酸素症となる。」

結語

「酸素は海洋生物の基礎である。海洋酸素の低下は、人間の活動が地球環境に及ぼした最も深刻な影響のひとつである」 — スミソニアン環境研究センター上級研究員デニス・ブライトバーグ

海洋無酸素事変（OAE）というのは、海洋の広い領域で溶解酸素の水準がゼロまたはゼロに近くなる期間である。OAEは長い地球史の中で何回か起き、一番新しいOAEは約9400万年前で、酸素欠乏のため海洋生物の大部分が死滅した。ウッズ・ホール海洋研究所の科学者たちが指摘したように、現在の海洋の状態は9400万年前のOAEが起きる前の状態と似て、今後ますます悪化する。「現在進行中の炭素排出のもとでは、もっと大きく深刻な混乱が起きるように思える。人間が積極的に止める手立てを講じないと、有史前のOAE研究が現在に当て嵌まるという悲しいことになるであろう。」

まだOAE期に入っていないけれど、酸素喪失が続くと、海洋生物の大量消滅はほぼ確実である。もうすでにそれは始まっている。「温帯の海洋生態系に関する多くの証拠や、数少ないが熱帯の海洋生物に関する調査から明らかなのは、低酸素症ストレスが生物多様性、複雑な栄養源ネットワーク、漁場等の喪失を招き、それによって生態系が破壊的に単純化していることだ。」実際、低酸素症に限らず、普段呼吸している酸素の僅かな減少でも、海洋生物にとっては生死の問題である。クラゲのような酸素減少にあまり影響されない生物もいるが、多くの生物は僅かな酸素減少で衰弱する。その結果、酸素水準が低い海域の生物個体数のバランスが崩れ、低酸素状態に耐性がある種ばかりになる。

酸素欠乏は海洋生物の生息地と生命を脅かしているだけでなく、窒素循環を混乱させる。何億年もの間、自然発生する酸素極小層が窒素循環で基本的役割を担ってきた。細菌が反応性窒素分子（Nr）を不活性窒素ガス（N₂）に変えるのだが、その作用は酸素がないときにのみ起きる。温暖化によって酸素極小層が大きくなることは、海洋からNrを除去する微生物が増えることを意味し、循環のバランスを崩し、海洋生物の栄養源を破壊することを意味する。

そのうえ、細菌が僅かな酸素存在の中で Nr を N_2 に変えるとき、同時に亜酸化窒素 (N_2O) を発生させる。 N_2O は二酸化炭素の 300 倍も強力な温室効果ガスで、オゾン層を破壊する。酸素極小層の上の海面から多量の N_2O が発生していることが、多くの調査で明らかになっている。地球温暖化が亜酸化窒素の発生を促進し、発生した亜酸化窒素が地球温暖化を促進するという悪循環になっているのだ。

最後に、酸素欠乏は孤立して起きる現象ではないことに留意することが大切だ。例えば酸素多く消費する有機体は同時に二酸化炭素を吐き出して海洋酸性化を促進する。魚は酸欠水域を逃れて新しい場所に移動し、その場所をすぐに酸性化させる。次の第三部では、気候変動がもたらす三悪の第三のもの、海洋温暖化を扱う。すでに見てきたように、海水温上昇から海水酸性化と脱酸素化が生まれるが、それら三つが重なり合って海洋生態系破壊を進行させているのだ。