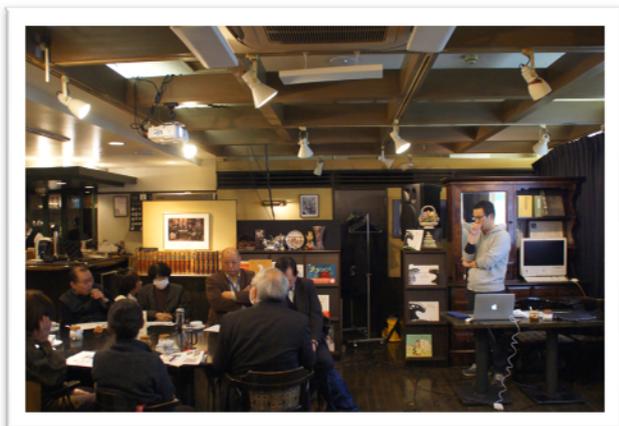


第31回 環境サイエンスカフェ

テーマ 【シリーズ：気候変動の影響(4)】
 海のデッドゾーン-貧酸素水塊 —温暖化の影響と予測の不確実性—
 講師 重光雅仁さん(海洋研究開発機構(JAMSTEC) 地球環境観測研究開発センター 技術研究員)
 日時 2016年1月27日(水) 18:30~20:00
 会場 サロン・ド・富山房 Folio 参加者 43名



2016年1月27日
 日立財団 環境サイエンス
 カフェ

**海のデッドゾーン-貧酸素水塊
 —温暖化の影響と予測の不確実性—**

重光雅仁
 国立研究開発法人 海洋研究開発機構
 地球環境観測研究開発センター
 全球海洋化学・物理研究グループ

1

今日の話の概要

地球温暖化による生物地球化学循環・生態系への影響

- 1) 水温上昇 (rising temperature)
- 2) 酸性化 (acidification)
- 3) 脱酸素化 (deoxygenation) e.g., Gruber (2011)

話の流れ

- (1) 今日の話に必要な知識
- (2) 1960年代からの溶存酸素濃度の変化
- (3) 溶存酸素濃度の将来予測とその不確実性
- (4) 今後の課題

* IPCC:気候変動に関する政府間パネル
 CMIP:結合モデル相互比較計画

2

はじめに

私は重光と申します。海洋研究開発機構というところで研究をしています。われわれのグループは、海に船で出ていき、ある測線に沿って、高精度の物理に関するものとか、化学に関するものを測って、昔測った高精度なものとか、海がどのように変わっているか、それとも変わってないのかというようなことを調べようとしているところです。それでは、今日は、そのような観測のこともお話できればと思います。よろしくお願ひいたします。

今日の話の概要をまずお話したいと思います。
 地球温暖化によって、海の中の生態系に幾つか

のストレスが掛かるといわれています。まず、1つ目が水温の上昇。そして2つ目は聞いたことあるかもしれませんが、酸性化。二酸化炭素が海水に溶け、pHが下がり、炭酸カルシウムの殻を作るような生物が、殻をうまく作れなくなったりするようなことが起ります。

この2つは結構調べられているのですけれども、もう1つありまして、酸素が無くなることがあります。これがなぜ起こるかという、皆さんは、高校のときの化学で習ったかもしれませんが、酸素の水への溶解度というのは、温度が低いほど大きくよく溶けるのです。したがって、温暖化で海水温が高くなっていくと、溶けにくくなり

記しておきました。

ます。そして、酸素の海への供給源というのは、海の表面にしかないので、表面で酸素が溶けなくなると、必然的に海の中の酸素の量というのは、減ってくるわけです。それについての研究があまりなされていません。今日はその話をするわけです。話の流れとしては、今日の話を理解するのに幾つか知識が要りますので、まず最初にそのお話をします。酸素といっても、海の中での化学反応も関係しますし、海洋の流れのような物理現象も関係します。他には、海の表層で植物プランクトンなどが光合成をして、酸素を出し入れしたりとか、海洋の中深層では表層でできた有機物が沈んで、それをバクテリア等が呼吸をして、酸素消費したりといった生物学的な現象も関与します。このように、化学、物理、生物学的な過程のすべてが海の中の酸素の挙動を決定するのに影響し、それらの概要が分からないと海の中の酸素を理解するのが難しいと思われるので、必要な知識をまず最初にお話しするわけです。

次に、われわれが行っているような海洋観測のこれまでの結果をお話して、近年観測でどのようなことが分かってきているかということを見たいと思います。そして、私もやっている研究なのですが、気候モデルという地球をコンピューターの中につくって、将来の温暖化予測をするような研究から見えてきている、つまり、将来、海の中の酸素濃度がどうなるかということについてのお話をし、最後にそれにまつわる課題を明らかにしたいと思っています。

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) というのと CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) というのが今回の話で出てきますが、IPCC というのは皆さん、ご存じだと思います。気候変動に関する政府間パネルで、気候変動に関する科学的な知識を集めて、数年に1回、評価報告書という形で出したりします。その中で、非常に大事な役割を担っているのが、この CMIP です。結合モデルの相互比較計画というもので、気候モデルが世界のいろいろな機関でつくられていて温暖化予測をしているのですけれども、かなり不確実性があるので、それらを集めて、どういうところが確実で、どういうところが不確実であるかを調べたりしているものです。この2つが何度か出てくると思いますので、最初に

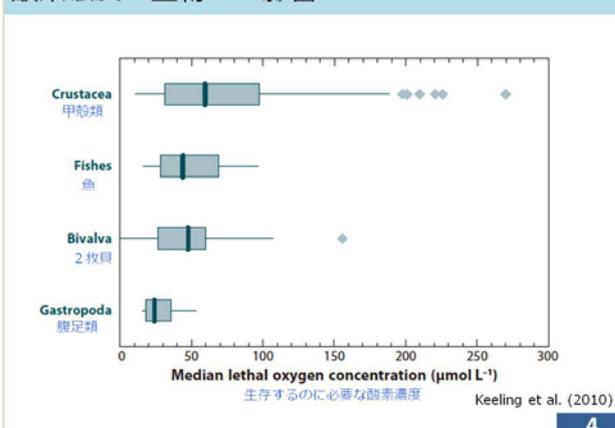
1. 今日の話に必要な知識

(1) 今日の話に必要な知識

3

それでは、まず最初に、今日の話に必要な知識について話していきたいと思います。なぜ酸素が重要なのかということなのですが、この図は生物が生存するのに必要な酸素濃度を記したものです。

酸素濃度の生物への影響

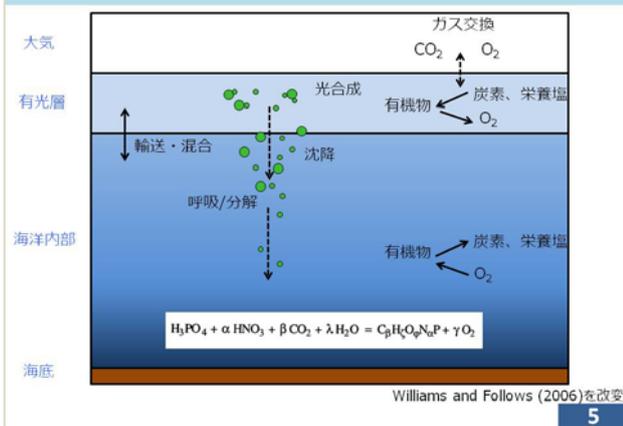


4

一番上が甲殻類、エビとかカニとかです。(図4) その下が魚、そしてその下の2つが貝になります。この図の見方としては、横軸に酸素濃度が書いてあって、この四角が今までの実験値としてある、25パーセントの値と75パーセントの値。それで、この線で引いているのが中央値です。横線の一番右が最大値で、一番左が最小値を表しています。この中で一番酸素に影響されそうなのが甲殻類で、その次に、われわれが食料にもしている魚です。30 μmol/l ぐらいで魚が生きられなくなるというような境界値があって、貝はもう少し低い濃度まで生きられます。このように、ある酸素濃度より

も低くなると、これらの生物が生きられなくなるという意味で、酸素がなくなってしまうとそこには生物がいれなくなってしまう、題名にも付けていますけれど、デッドゾーンという死の世界が広がってしまうので、酸素濃度をこれからきちっとモニタリングしていく必要があります。

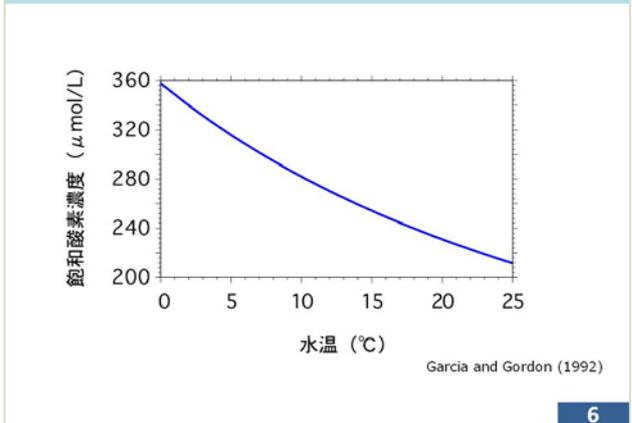
海洋の酸素濃度の変動要因



海洋の酸素濃度を変動させる要因を話します。

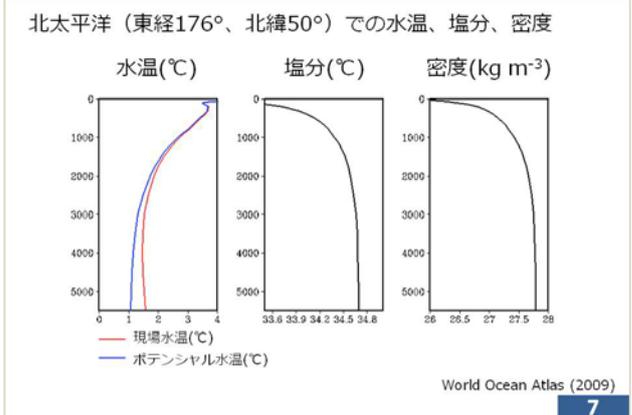
(図5) この図の一番上が大気を表します。上から2つ目のボックスが海洋の表面で光が当たって、植物プランクトンなどが光合成をできる有光層という層を表しています。そして、海洋の内部と海底のボックスを表しています。最初に言いましたように、酸素というのは海洋の表面で、ガス交換でしか海に入ってくるところがありません。あと、もう1つあるのは、海洋の表面で植物プランクトンが光合成をして、酸素を出すという経路があります。光合成というのは、リンとか窒素とかCO₂とか水を植物プランクトンが取り込んで、有機物を作って酸素を出します。そのようにして作った有機物ですが、植物プランクトンあるいはそれを食べた動物プランクトン等は死ぬと沈んでいきます。沈んでいくと、酸素を使って呼吸をするバクテリアなどがいて、海洋の内部ではこの逆の方向の反応が進んで酸素が消費されます。有機物を、酸素を使い消費し元の栄養塩に戻すというような作用を呼吸といい、海洋の内部では呼吸によって酸素が消費されていきます。海洋の上層と下層は物理的に混合されています。まとめると、海の中の酸素は、海洋表面にその供給源があって、上層と下層の混合で海洋の内部に酸素が送られ、その送られた酸素が海洋の内部で消費されていくということになります。

海水への酸素溶解度の温度依存性



(図6) これは、水温に対する酸素の溶解度を表します。先ほど言いましたように、温度が高くなると、溶ける酸素の濃度は低くて、温度が低くなればなるほど、溶ける酸素の濃度は高くなります。なので、温暖化が単純に進むと海洋の表面から入ってくる酸素自体が少なくなるので、海の中の酸素は少なくなっていくわけです。

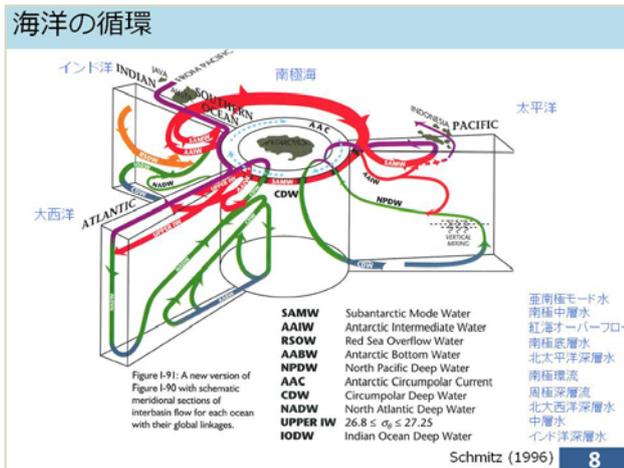
海水温、塩分と密度



次に海の中の物理についての必要な情報です。海の中は表面が暖かくて、下層に行くほど冷たくなっています。これはある北太平洋の東経176度北緯50度での水温と塩分によって決まる密度の分布を表しています。(図7) 海の中では表面の温度が高く、下に行くほど低くなります。温度が低いほど密度が大きくなるため、冷たい水がある深層に行くほど重たい水があるわけです。塩分については表面で低くて、下に行くほど高くなっており、塩分が高いほど密度が高くなります。なので、低温で高塩分な水ほど密度が高くなり、重たい水が下層にあるわけです。海の中の水温、塩分は基本的にこのような鉛直分布をしていて、密度

的には下から重たい水が連なり、表面に向けて軽い水が乗っかっていっているというような分布をしているわけです。

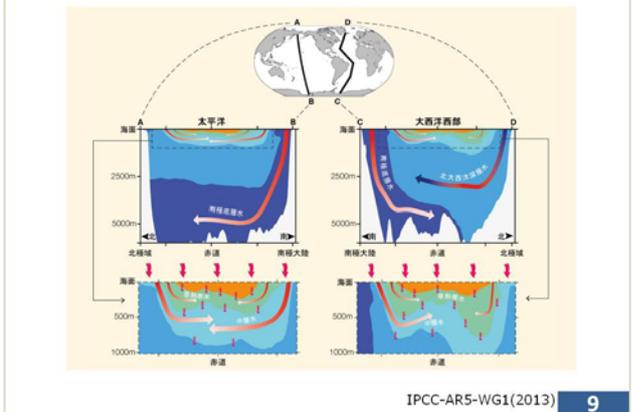
このように水温と塩分で決まる密度なのですから、この密度によって海洋の大きな流れというものも決まっていきます。これが彼らによって示されている、海洋の大循環といわれるものの模式図です。(図 8)



海洋の大循環というのは、大西洋の北側で始まります。聞いたことがあるかもしれませんが、北大西洋で重たい水が沈み込みます。それを NADW (North Atlantic Deep Water)、北大西洋深層水といいます。北大西洋で沈み込んだ水が南下して行って、南大洋にまで達します。そして、もう 1 つ深層水ができる場所が、南極海にあります。そこでできた水と混ざります。大西洋では、北大西洋でできた水よりも重い、南極海でできた水、南極低層水というものが北上しています。この 2 つが混ざって、太平洋とインド洋では深層水が沈んで北上していきます。そして北上していくときに、徐々に海洋の上層に湧昇してきます。

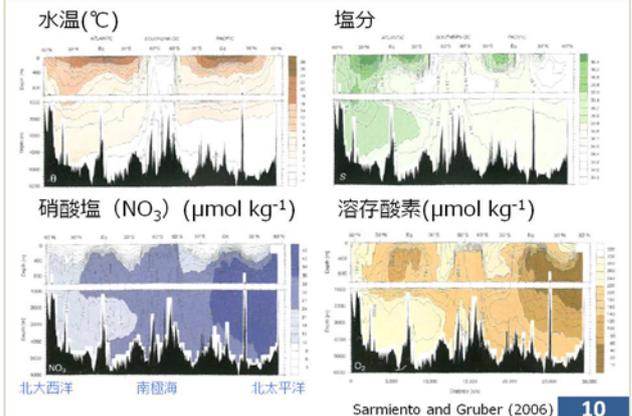
そしてその湧昇してきた水というのは、インドネシアを通過して、インド洋に入り、アフリカ大陸の南端を通過して北大西洋に戻って、もう一度沈み込むというような大きな循環をしています。このような循環は温度と塩分により決まるので、熱塩循環と呼ばれています。これが海洋の大循環で、一周するのに数千年かかるといわれています。もうちょっと分かりやすく見られないかと思ったところ、いい図がありました。(図 9) これは IPCC の第 5 次評価報告書の海の中の温度が温暖化によってどのように温まっていくかというのを示した

海洋の循環



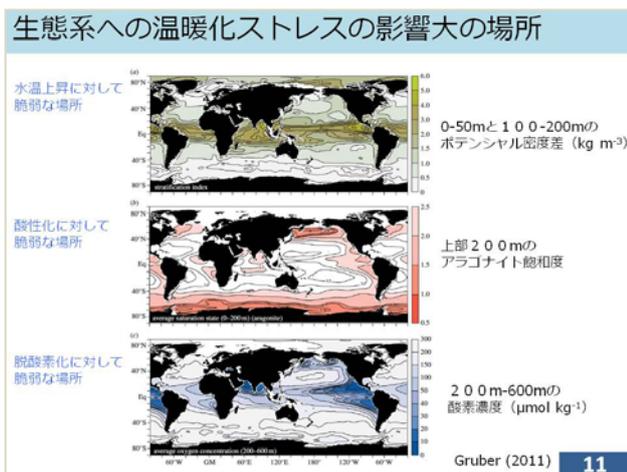
模式図です。こちらの 2 つが南。南極海を表していて、こちらにいくと北を表します。南極海で南極低層水が大西洋、太平洋ともに沈んでいきます。この浅いところも高緯度側では比較的重たい水ができ、底に達するほどの重たい水にはならないのですけれども、中層に沈み込むような中層水があります。これは温度がどういうふうに伝わっていくかを表している図なのですが、1 つは低層まで行って、北に進むものです。また、両極から赤道にむけて中層を進む水というのがあります。これらはほぼ酸素と同じ供給経路なので、重要です。

水温・塩分・硝酸塩・酸素の分布



これを頭に入れて、今日のターゲットであります全球の酸素の分布を見てみたいと思います。ここでは、酸素に加え、水温、塩分、硝酸塩も示しています。硝酸塩というのは、最初の方に話しました栄養物質です。(図 10) これは、左から北大西洋、真ん中が南極になっていて、一番右が北太平洋になっています。深層水は北大西洋できると言いましたが、北大西洋の水というのは、

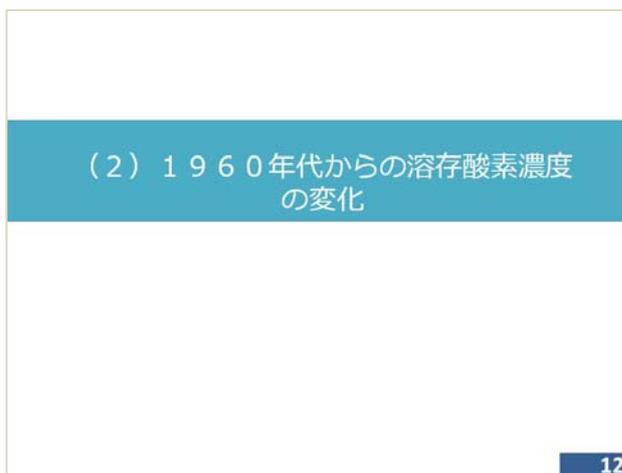
温度が低くて、高塩分で密度が高い水になっています。それが沈み込んで、南大洋にまで達します。また南大洋でできた水と混ざって太平洋を北上します。その間に、硝酸塩は、海洋の表層で植物プランクトンに使われて、有機物になって沈んでいき分解されるので、この大循環に沿って栄養物質が深層で高くなっていくというわけです。また有機物が分解されると酸素が消費されるので、酸素濃度は北大西洋から北太平洋に向かうにつれて、低くなっていく分布をしています。というのを頭に入れて今日の話を聞いてほしいです。



最後に、知っておいてほしいもう1つの基礎知識です。生態系への温暖化ストレスが水温上昇と酸性化と、酸素がなくなることと言いました。水温上昇に対して、生態系が脆弱な場所というのがあります。(図11)この一番上の図は50mと100~200mの密度の差で、上層と下層の水の混ざり具合の指標になっています。これが大きければ、大きいほど、下層の水と混ざりにくいので、先ほど言った栄養塩というものが、表層に上がってこないで、生物が成長できなくなります。なので、この熱帯から亜熱帯にかけては温暖化が進むと、より水が混ざりにくくなるので、水温上昇に対して脆弱な場所であると言えます。また、酸性化はこの真ん中の図、上部200mの炭酸カルシウムの結晶形、アラゴナイトというものなのですけれども、その飽和度を表しています。溶けやすさの指標です。これが低ければ低いほど溶けやすく、高ければ高いほど溶けにくいものを表します。高緯度の水はこの飽和度がもともと非常に低いので、大気中の二酸化炭素濃度が高くなればなるほど、酸性化によって海洋の生態系が影響を

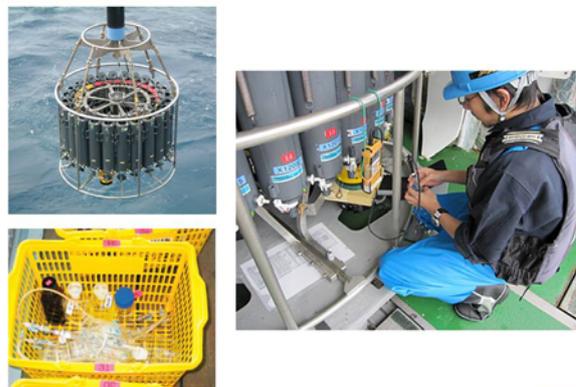
受けやすい場所になります。一番下の図は200~600mの酸素濃度を表しているのですけれども、アブストラクトにも書きましたが、東部の赤道太平洋と、インド洋の北部に非常に酸素濃度の低い海域があります。これらの海域で酸素が減ってくると、生物に対して非常に影響があるというわけです。このように、これらの3つのストレスが生態系に対して大きな影響を与える場所が、空間的に異なって分布していることを頭に入れておいてほしいと思います。

2. 1960年代からの溶存酸素濃度の変化



それでは観測の結果について、話していきたいと思います。全体として少し入り組んだ話があると思いますので、分からないことは気軽に質問してください。ここから海洋の内部で観測した酸素濃度の結果について、お話していきたいです。

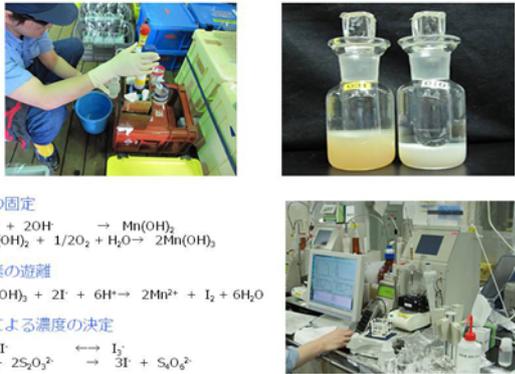
酸素濃度の測定方法



海の中の酸素濃度は、まず海水を採取して測ります。(図13)海の水をどういうふうにして採って

くるかと言いますと、このような採水ボトルを付けた測器を海洋の中に船から沈めます。沈める前は、この採水ボトルのふたは開いているのですけれども、ある水を採りたい深度まで来たとき、電気信号を送ってふたを閉め、ある深度の水を採ります。上がってきた採水ボトル一本一本に違う深度の水が入っていますので、各ボトルの採水口にチューブを付けて、いろいろ測定したい成分に対して水を採っていきます。そのような作業を船上ではしています。

酸素濃度の測定方法



酸素の固定
 $Mn^{2+} + 2OH^- \rightarrow Mn(OH)_2$
 $2Mn(OH)_2 + 1/2O_2 + H_2O \rightarrow 2Mn(OH)_3$

ヨウ素の遊離
 $2Mn(OH)_3 + 2I^- + 6H^+ \rightarrow 2Mn^{2+} + I_2 + 6H_2O$

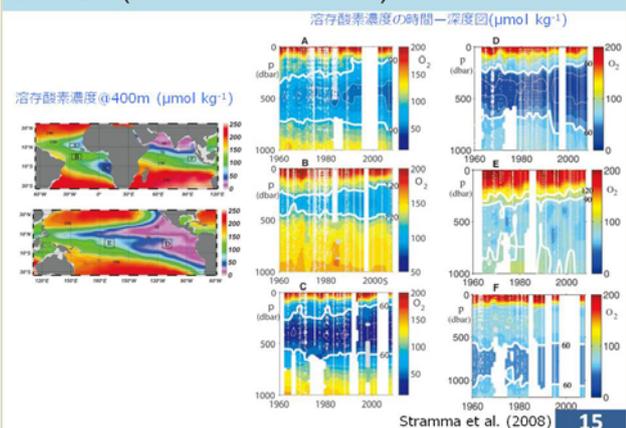
滴定による濃度の決定
 $I_2 + 2S_2O_3^{2-} \rightarrow 2I^- + S_4O_6^{2-}$

写真：海洋研究開発機構ホームページ&広報誌 14

(図 1 4) 酸素の測定なのですけれども、こういう酸素瓶というものに、先ほど言ったある地点のある深度で採った水を採取します。それに化学薬品を入れて、海の中の酸素をマンガンの水酸化物にして、このようにして沈殿させます。このようにして沈殿させたものを、チオ硫酸ナトリウムというもので滴定して、海の中の酸素量というものを測定するわけです。

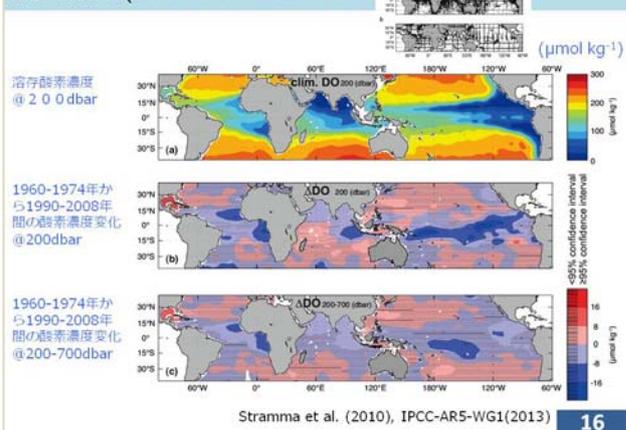
こうして測った観測結果が 1960 年代から現在までかなりあります。これは大西洋の地点、インド洋の地点、または太平洋の幾つかの地点で、酸

観測結果(1960→2008)



素濃度の観測データを集めて、どのように 1960 年代から 2000 年代にかけて酸素濃度が変わってきたかを示した図です。(図 15) A、B、C は大西洋、D と E は太平洋、そして F がインド洋の結果になります。この白い線がおのおの 60 μmol/l、90 μmol/l、120 μmol/l の等値線になっているのですけれども、1960 年代から 2000 年代にかけて、この等値線の幅が広がっていているのが分かります。これは中層で酸素濃度が減少しているということを示してはいて、もともと酸素濃度が低い場所において、このような酸素濃度の減少が起きているということが明らかになってきました。

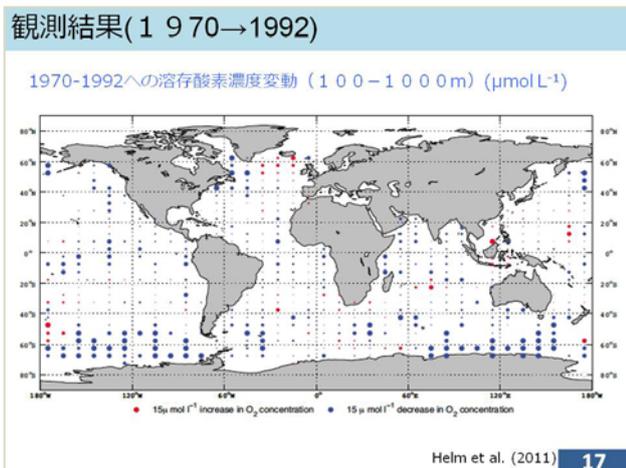
観測結果(1960→2008)



彼らはもう少しデータを出して、同じような解析をして IPCC の評価報告書にも載せています。この図は水深約 200 m における 1960 年代から 1990 年代の酸素濃度変化です。(図 16)減ったり、増えたりしているところがあるのですけれども、この線の入っているところが統計的に有意に減少したり上昇しているところで、減少している場所が多いということを示しています。また、海洋 200 ~ 700 m の中層で、もともと酸素濃度が低い場所においても酸素濃度が減少しているところがあるということが分かりました。

(図 17) もう 1 つ同じようなデータ群を全球で、ある緯度経度のグリッドに内挿してやることで、1970 年代から 1992 年代への酸素濃度の変動を示した研究があります。これは中層ですが、100 から 1,000 m において、どのように変動してきたかというのを示した研究結果です。これによりますと、青色の点がこの中層において、この期間、酸素濃度が減少したところ。赤の点のある場所が酸素濃度が上昇したところなのですけれども、

現在の観測では、こういうことが分かってきています。ここまでが観測の結果です。



ほとんどの海域で酸素濃度が減少したということを示しています。これら3つぐらいの代表的な研究をもとに、IPCCの評価報告書によると、幾つかの解析結果間の一致度が高いことから、1960年代以降、多くの海域において、外洋の水溫躍層というのは中層のことで、中層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ということで、報告しました。

この一般的な濃度低下は以下の予想と整合しているということも、この報告書では言っています。1つは水溫上昇によって、表面と中層の密度差が大きくなるので、混ざりにくくなって、海面近くの酸素が豊富な水から、中層への酸素供給が減少することによって酸素濃度が減少するであろうということです。もう1つは、水溫が上がるほど海が保持できる酸素が少なくなるので、酸素が減っているのだろうということと、もう1つは、最初、海洋の循環のところでちょっとお話ししなかったのですけれども、海洋の表層は黒潮とか親潮とか、いろいろな海流があるのですが、風によって駆動されている循環がありまして、そういう循環というのが、気候変動の影響で変わってきている可能性があると言われていました。そのような循環を風成循環というのですけれども、それによっても酸素濃度が影響していることがあるだろうと考えられるのです。そのような予想と整合しているので、中程度の確信度を持って、海の酸素濃度は減少しているとIPCCの評価報告書では言っています。さらに、この数十年間に先ほど熱帯域で、ある低い酸素濃度の層厚が増えていたという結果を示しましたがけれども、その酸素が低い層が拡大した可能性は高いということも言っています。今

ここまでのまとめ

IPCC-AR5-WG1(2013)によると、

★異なる解析結果間の一致度が高いことから、1960年代以降多くの海域において外洋水溫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。
 ⇒昇温による成層化によって海面近くの水から水溫躍層への酸素供給が減少すること
 ⇒水溫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

★ この数十年間に熱帯域の酸素極小層が拡大した可能性は高い。

18

3. 溶存酸素濃度の将来予測

(3) 溶存酸素濃度の将来予測とその不確実性

19

ここからは少し複雑な話になっていくのですが、気候モデルを使った将来予測の話です。ここまでで何かご質問ありますか。いろいろな現象が絡んでいるので、なかなか理解するのが難しいかもしれません。

会場：今、海域について酸素の濃度というのがあったのですが、例えば、船で採取に行ったり、場合によっては近くに島とかあると思うのですが、陸上での何か比較をされているのかなというのを、お伺いしたいのです。

重光さん：陸上の比較ですか。

会場：はい。陸上とその海域によって何か傾向があるかどうかという意味です。

重光さん：大気中の酸素濃度と。

会場：そうです。その同じ場所も船の上とか、島とかありますよね。その濃度という意味で、比較はされているのか、データ取りをされているのでしょうか。

重光さん：比較というのは、多分、海の酸素濃度に興味を持っている人はしてないと思います。なぜなら、酸素は大気の主成分なので、二酸化炭素と反応して減っているといっても微々たるもので、それほど変わることはありません。なので、あまり比較している人はいないと思います。一方で、その大気中の微量な酸素濃度変化に興味を持っている人は、比較している研究もあると思います。

会場：その辺りはある程度、データをくっつけていろいろとやっているという方はいらっしゃるということですが、もう学会等、そういう枠が違うので、相手にされてないように思ったほうがいいですか。

重光さん：そうですね。海洋内部を見ている人は、比較してないような気がします。

会場：単純な質問なのですが、酸素濃度が低下している中層というのは具体的にはどのぐらいの深さなのでしょう。

重光さん：だいたい 200 m から 1,000 m ぐらいです。

会場：200 m だと、漁業で言う大陸棚の辺りだと思うのですが。そうすると、おいしい魚とか、生態系にも、いろいろな影響が、酸素が無くなればあるのではないかと思うのですが。

重光さん：はい。あると思います。

会場：先生の周りではそういう研究も行われているのでしょうか。

重光さん：私のいるグループは化学と物理のグル

ープなので、生物についてはあまりやっていないのですけれども。実際、もともと酸素が少ないところで、酸素が少なくなってきた、その沿岸の生態系がどうなるというのを研究している人たちはいます。

会場：酸素濃度の測定についてお伺いしたいのですけれども。これは IPCC が出した観測結果ですよ。これは 1900 年代からのデータみたいですが、でも、当時もこんな酸素濃度の測定方法というのはあったのですか？

重光さん：そうですね。酸素濃度の測定法自体は、もうその当時から確立されていて、ありました。

会場：では、データの的に現在のデータと比べて、そんな色ないデータが、きちんと積み上げられていたのですか。

重光さん：今よりは、悪いのかもしれないですけども、その中でも使えるデータを使って、比較していると思います。

会場：海水溶存酸素濃度の測定結果の白い線は、何を意味しているのですか。

よく分からないですけど、ここが少しクリティカルポイントみたいな感じがします。この部分が扇状に広がっているから、まずいのですか。

重光さん：そうですね。多分低い酸素濃度であろうという、例えば 60 とか 90 とかです。

会場：そういうエリアが広がっているということですか。

重光さん：そうです。

会場：面積が広がっているという解釈なのですか。

重光さん：体積が、です。

会場：横軸が年代ですよ。縦軸は、これは何ですか。

した式をコンピューターで近似的に解いてゆくモデルです。

重光さん：深度です。水圧になっているので。

会場：深度ですか。分かりました。どうもありがとうございました。

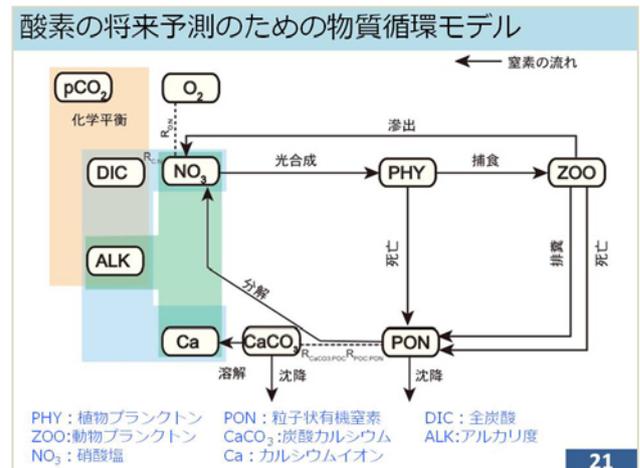
会場：深いところで酸素濃度が、また上がっていますよね。というふうに見えるのですが、それは錯覚ですか。

重光さん：そうです。上がっているところもあります。

会場：これは、からくりは何ですか。

重光さん：からくりは、この後の話で出てくるので、そこで答えられればと思います。

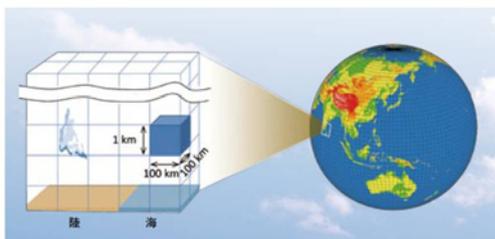
会場：はい。分かりました。では、楽しみにしています。



海の中はこれだけではなく、最初の方に説明しました生物活動があります。その生物を表しているのがこの一番簡単なモデルです。(図 21) このようなモデルで硝酸というような栄養塩を植物プランクトンが光合成で使って、その光合成で育った植物プランクトンを動物プランクトンが食べて、その動物プランクトンが死んだり、植物プランクトンが死んだら有機物の塊になって下層に落ちていきます。また、その落ちていく過程で分解して元の栄養塩に戻るのと、そのときに酸素が消費されるというようなプロセスを、このモデルで表現しています。

最初の方で、栄養塩、炭素、水を使う光合成の式を書いたのですが、だいたい海の中では、その量比が一定になっています。それを「レッドフィールド比」というのですが、そのような比を使って、この酸素の時間変化、また炭素の時間変化が重要なので、それらの時間変化を栄養塩の時間変化から計算しているわけです。このようなモデルを使って温暖化予測をしていきます。将来の気候を予測するには、大気中の温室効果ガスの濃度であるとかエアロゾルの濃度についても、量等がこれからどういふふうに変化していくのかというような前提状況が必要になるのですが、IPCC の第 5 次評価報告書に RCP (Representative Concentration Pathway) シナリオというのがあります。(図 22) この温暖化の影響シリーズの 1 回目、塩竈さんの発表で同じものを使われていたのですが、右側が 2100 年に向けての大気中の二酸化炭素濃度を表してい

酸素の将来予測のためのモデル (気候モデル)



海洋: 海流、海面高度、海水温、塩分
大気: 風、気圧、気温、湿度

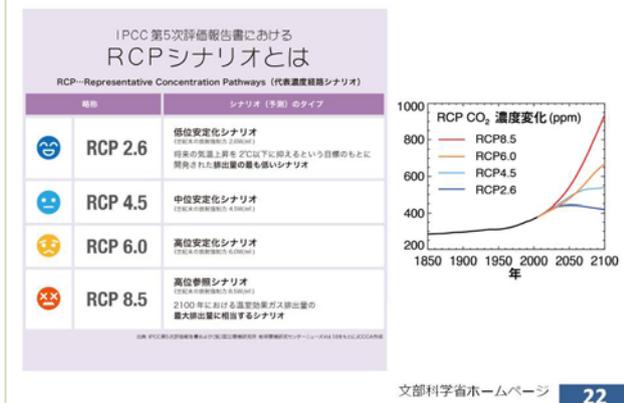
東京大学大気海洋研究所
「誓いだけしやない地球温暖化」

それぞれのグリッドで、運動量保存の法則(運動方程式)、質量保存の法則(連続の式)、エネルギー保存の法則等をコンピューターを使用して近似的に解く。

20

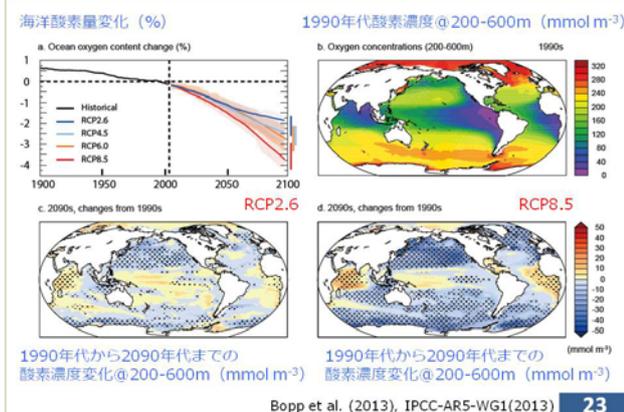
というので、先に進みます。次は気候モデルを使った、将来予測についてのお話をしたいと思います。酸素の将来予測のために気候モデルというものが使われています。(図 20) 気候モデルとは何ぞやということなのですが、地球の中の陸面、大気、海洋をこのようなサイコロ型のグリッドに区切って、この中の物理量、大気ならば風、気圧、気温、湿度、海洋だと海流、海面高度、海水温、塩分などをそれぞれのグリッドで、運動量の保存の法則とか、質量保存の法則、エネルギーの保存の法則等いろいろな物理法則を表

酸素の将来予測のための温暖化シナリオ



ます。RCP8.5 というのが一番温暖化が進むケースで、2100年において、今の約3倍の大気中CO₂濃度になるシナリオです。また、6.0、4.5、2.6となるにつれて、二酸化炭素濃度が低くなる、つまり温暖化がRCP8.5ほど進まないようなシナリオがあり、このようなシナリオを設定して、大気中の温室効果ガスの濃度等を決めて、先ほどのモデルに与えてやることで、将来の地球、大気であるとか、海洋がどういうふうになるかというのを予測しているわけです。

酸素の将来予測



そのようにして出した結果がこれで、これもIPCCの報告書に載ったもので、左上が海洋中の全酸素量の2000年代を基準にしたときの将来変化量です。パーセンテージで表しています。(図23)右上は200mから600mの1990年代の観測結果です。左下が温暖化があまり進まないRCP2.6というシナリオにおける2090年代と1990年代の酸素濃度の差です。これは中層、200から600mの平均値で表しています。そして、右下が、より温暖化が進むRCP8.5というシナリオの1990年代

から2090年代までの酸素濃度変化を表しています。まず、海洋全体の酸素量の変化を見ると、RCP8.5、温暖化がより進むシナリオの21世紀末において、酸素が約3%減少します。この幅がモデル間の予測の幅を記しているのですけれども、約3%が平均的に減っています。で、RCP6.0、4.5、2.6と温暖化が進まないシナリオになるにつれて、減る量は少なくなっています。これは単純に海の表面水温がどれぐらい温まるかに依存していると思われる。

次に、この中層の酸素濃度の変化を見ると、やはり温暖化がより進むRCP8.5のほうが200から600mで減っています。特にこのドットが付いているところが、信頼性の高いところです。亜熱帯域の中層であるとか、高緯度域の中層で酸素が下がっています。これはRCP2.6でも見られます。一番重要なのは酸素濃度がもともと低いところで酸素がどう変わるかということです。どうも東部の赤道太平洋であるとか、インド洋の北部は、ドットが付いてなくて、モデルによって増えたり減ったりしていて、信頼性があまりないということが分かります。この中で信頼性があるのが、海洋全体としての酸素の量が減るのは、多分間違いなさそうです。IPCCの1つ前の報告書のときに使われていた温暖化のシナリオにおいても酸素濃度を予測していました。(図24)それにおいても、これが2090年代の酸素の減少量なのですけれども、海洋全体として減るというのは間違いなさそうです。AR5 (IPCC第5次評価報告書)によりますと、21世紀中に海洋の溶存酸素量が数パーセント減少するという可能性は非常に高いということが同様に言われています。

酸素の将来予測

2100年までの酸素減少量

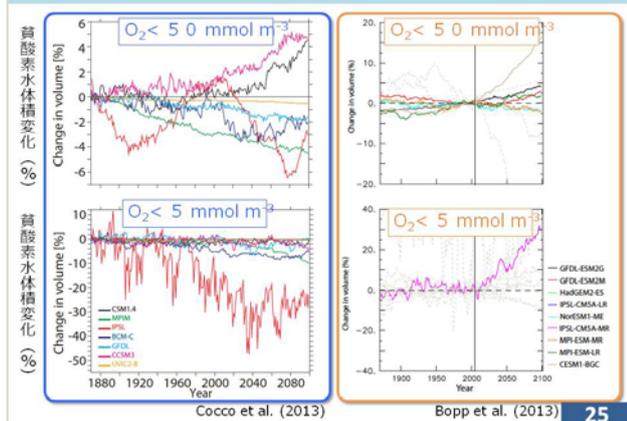
文献	海洋炭素循環モデル	強制力	酸素減少量 (μmol kg ⁻¹)	溶解度の寄与 (%)
Study	Ocean Carbon Cycle Model	Forcing	Mean [O ₂] Decrease (μmol kg ⁻¹) ^a	Solubility Contribution (%)
Sarmiento et al. (1998)	GFDL	IS92a	7 ^b	18
Mattar et al. (2000)	CSIRO	IS92a	12	35
Plattner et al. (2002)	Bern ZD	SRES A1	4	25
Bopp et al. (2002)	IPSU	SRES A2 ^c	9	26
Mattar and Hirst (2003)	CSIRO	IS92a	9	26
Schmittner et al. (2008)	UVic	SRES A2	9	26
Ouchles et al. (2008)	UVic	SRES A2	9	26
Fridlicher et al. (2009)	UVic-variable CN	SRES A2	12	26
	NCAR CSM1.4-CCSM	SRES A2	4	50
		SRES B1	3	
Daffer et al. (2009)	ICESM	SRES A2	10 ^d	

Keeling et al. (2010), IPCC-AR5-WG1(2013)

IPCC-AR5-WG1(2013)によると、

21世紀中に海洋の溶存酸素量が数パーセント減少する可能性は非常に高い。

酸素の将来予測の不確実性

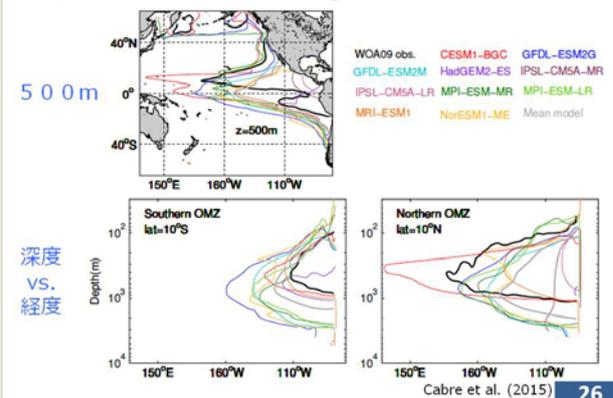


次にいきますが、我々が最も知りたいのは、もともと酸素の低い領域がどう変わっていくかということです。(図 25) 左側と右側がいろいろな気候モデルで、酸素の濃度が 50 mmol/m^3 、 5 mmol/m^3 以下の酸素を持っている海の体積がそれぞれ、温暖化が進むにつれて、どう変わるかというのを調べた結果を表しています。上側が 50 mmol/m^3 で、下側が 5 mmol/m^3 です。この左側の研究結果によると、ボリュームが減っていくモデルもあれば、増えるモデルもあって、やはり怪しく、どうなっているのか分からないということが分かります。右側の研究結果では、そもそもモデルの現在場の結果が観測されているものをうまく表現してないものは、灰色の点線にしてしまっているのですけれども、 5 mmol/m^3 以下のボリュームをうまく表現しているのは、1 モデルしかなくて、それは増えています。 50 mmol/m^3 だと、やはり減るものもあれば、増えるものもあるというので、酸素濃度がもともと低い領域で酸素濃度が将来どう変わっていくのかというのが、非常に怪しいということがこれらの結果から分かります。このような将来予測の不確実性を、今後減らしていくためにどのような現象がモデルの中で起こっているのかを見ていきたいわけです。

少しここら辺から話が入り組んでいくのですが、つい最近の研究結果を紹介します。(図 26) これも同じように、いろいろな気候モデルの結果を見たものです。何度かお話しましたように、酸素濃度がもともと低い水塊(貧酸素水塊)は、インド洋の北部と東部の赤道太平洋にあるのですが、そのほとんどは東部の赤道太平洋にあるので、この場所における貧酸素水塊の現在の状

マルチモデルによる貧酸素水塊の再現性の検証

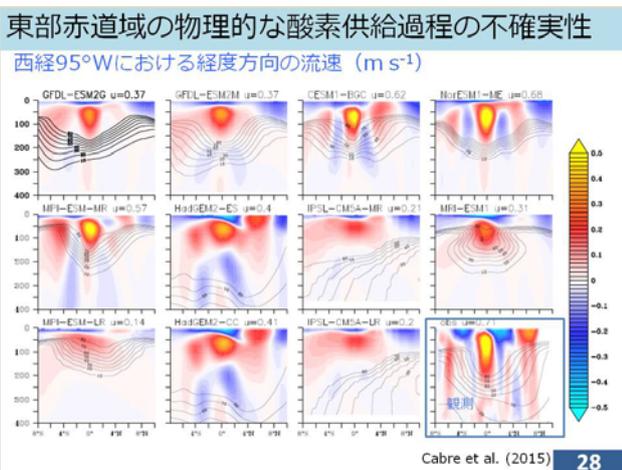
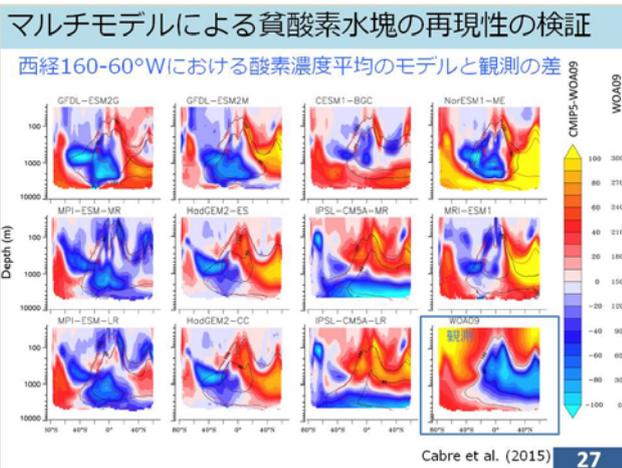
1960-1999年の酸素極小層 ($O_2 < 30 \text{ mmol m}^{-3}$) の分布



況をうまく各々のモデルが再現できているのか、また将来変化は各々のモデルでどのようなメカニズムで起こっているのかを明らかにするのが、貧酸素水塊の将来予測の不確実性を減らす上で重要なだろうということで、彼らは東部の赤道太平洋について調べています。上の図は、水深 500 m における 30 mmol/m^3 の酸素濃度(1960~1999年の平均値)の領域を示したもので、黒色が観測値、カラーで表しているのがモデルの結果になります。これを見ると、観測値は北太平洋で酸素濃度が低い領域が多く、南の太平洋(赤道を越えた南側)で、その領域が狭いことを示しています。しかし、モデルを見ると、この南と北の酸素が低い領域がほぼ一緒になってしまい、観測に見られるような南北非対称が見られませんが、どのモデルもほとんどそうになっています。

次にこれ、深度方向に見てみます。これが南側の南緯 10 度において、横軸が経度で、縦軸が深度。それで、右下の図が北側、北緯 10 度線に沿っての深度対経度の図を表していて、同じく酸素が 30 mmol/m^3 以下のところを書いています。この黒線が同じように観測値です。南も北もモデルの結果がだいたい過大評価をしているということが分かります。

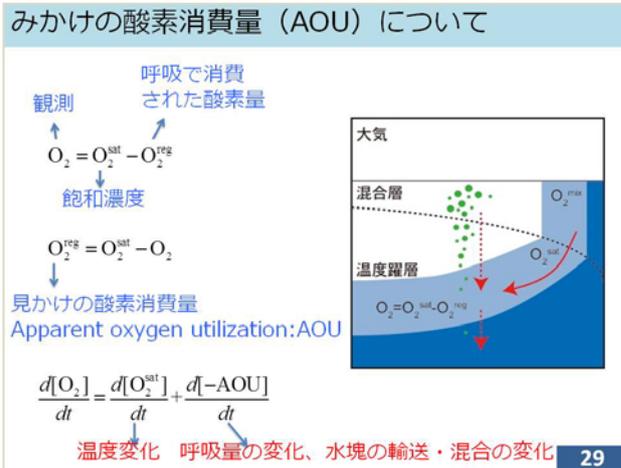
(図 27) 次に同じように、東部の赤道太平洋において、1960 から 1999 年の期間にわたって、西経 160 度から 60 度にかけて各深度、各緯度で各モデルの酸素濃度を平均し、観測値(右下の図)との差を取ったのを見てみます。どのモデルも、過大評価していたり過少評価していたりと、酸素濃度がもともと低いところでモデルがうまく観測値を再現できていないということが分かります。



この東部の赤道太平洋の酸素濃度を決めるのに一番重要な要因が、この図に示してあります。

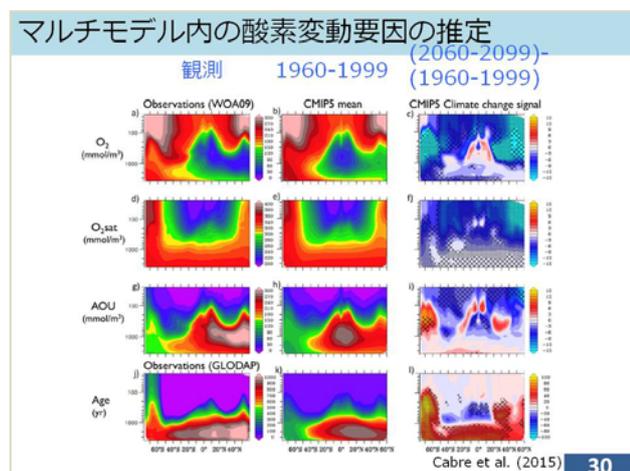
(図 28) これがどういう図かと言うと、西経 95 度において、東側から西側を見た図で、色は海の中の流れを表します。この赤色でプラスになっているのは、西から東に水が流れているということを表していて、青色のマイナスになっているのが、東から西に水が流れているということを表しています。右下が観測の結果で、この赤道の約 100~300 m ぐらいのところ、非常に強い流れが東部の赤道太平洋にあるということが分かります。これが赤道潜流 (EUC: Equatorial Undercurrent) と呼ばれるものなのですが、これが非常に多くの酸素を西側から東部の赤道太平洋に送り込んでいて、貧酸素水塊の大きさを決定するのに重要です。うまくこれを表してそんなモデルもあるのでありますが、観測と比べて非常に弱いモデルもあり、この再現がうまくいってないがために、酸素が低いところの領域をモデルがうまく表現できていないのではないかとされて

います。もう 1 つ、この赤道潜流の北側にも同じく西から東に流れる水があったり、東から西に流れていく水もありますが、どうもこの赤道域の物理 (流れの状況) がどのモデルもうまく表現できてないので、貧酸素水塊がモデルでうまく再現できてないということが言われています。



今のは、現在場の話だったのですけれども、温暖化したときにどういうふうになるかというのを、彼らはもう少し解析しています。1 つだけ、さらに面倒くさいのですが、見掛けの酸素消費量 (AOU: Apparent Oxygen Utilization) という概念を導入させてください。(図 29) これは何かと言いますと、大気があって、表面で混ざっている層があって、その下に中層があります。ちょっと前にお話したように、酸素というのは、大気から入ってきて表面でガチャガチャと混ぜられて、下層に沈んでいきます。その下層に沈んでいくときの酸素というのは、ほぼ大気と平衡になった酸素が沈んでいきます。その大気と平衡になっている酸素を持った水が流れていく中で、上から落ちてきた有機物を分解して、分解によって酸素が消費されていくわけです。なので、観測された酸素というのは、大気と海洋で飽和した酸素の濃度から、呼吸で消費された酸素を引いたものが観測されているわけです。この飽和濃度というのは、その場の温度と塩分で決まります。ある観測された地点における酸素の飽和濃度が決まると、呼吸で消費されたであろう見掛けの酸素消費量というのは、飽和濃度から観測された酸素を引くことによって、これぐらい消費されたのでしょうということが分かるわけです。CMIP5 における温暖化実験の結果というのは、この酸素濃度と温度塩分は、

誰でも使えるようになっているので、酸素濃度の将来変化というのは、その飽和濃度の変化と AOU の時間変化で話ができるでしょうということで、先ほどのこの人たちはそれらを用いて解析を進めています。

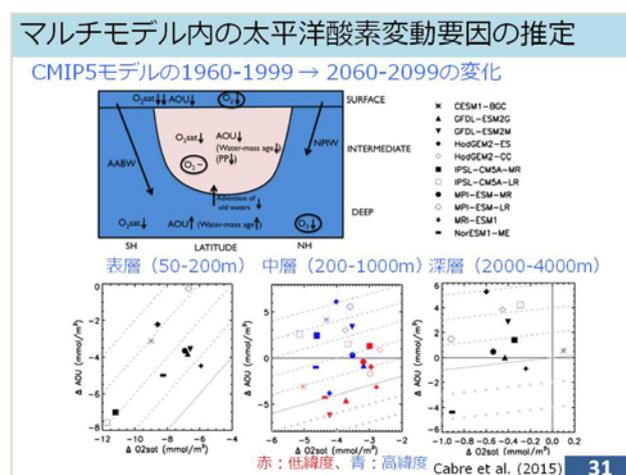


(図 30) この図なのですが、一番左が観測結果で、一番上が東部の赤道太平洋で経度方向(西経 180~100 度)に平均した酸素の濃度です。そして、次が温度と塩分で決まる酸素の飽和濃度 (O_2^{sat})、その下が呼吸で消費されたであろう酸素の濃度(AOU)、一番下は海水の年代を表しています。この年代は、放射性炭素というもので決めています。これが観測値です。真ん中が、1960 年から 1999 年の気候モデルの結果の平均値を表していて、酸素濃度はそこそこうまくいって、また温度と塩分で決まる飽和濃度というのも、温度と塩分が海の物理場に一番効いてくるので、これはほぼうまくいきます。

うまくいってないのは、この呼吸で消費されたであろう酸素濃度で、特にこの高緯度側でうまくいってないような感じがします。また、この年代も深層の方でうまくいってないような傾向があります。一番右が 2060 年代から 2099 年のモデル結果の平均値から現在の値(1960 年から 1990 年の平均値)を引いたもので、一番上が酸素濃度のこの差、真ん中が飽和濃度の差、その下が呼吸で消費されたであろう酸素の差、一番下が年代差を表します。これを見ると、表層はどの緯度帯でも、酸素濃度が減っています。これは、温度が上がることによって飽和濃度が下がることで、ほぼ説明されるということが分かります。一番見たいのは、この中層です。もともと酸素濃度が低いと言われ

ている場所でどうなるかです。ここでは若干増える傾向があるのですが、温度自体は上がっているため、飽和濃度の酸素は減少しています。しかし、同じように呼吸で消費される酸素も減少することによって、若干酸素が増えているということが分かります。この年代を見ると、年齢も下がっています。年齢が下がるということは、この場所に到達する水が温暖化するとより早く到達し、有機物の分解に使われた酸素が少なくなっているということになります。なので、温暖化によって酸素濃度が減少するのだけれども、ここに到達する水がより新しいので、呼吸に使われた酸素量が少なくなり、トータルで若干増えていることを彼らは言っています。

それをまとめたのがこの図です。(図 31) そのようなことを言っているのですが、実際問題、AOU というのは、有機物の分解によっても影響されますし、先ほど言った表面から沈み込んでどれぐらい年代がたったかによっても影響されるので、これだけでは、どういうプロセスで酸素濃度が温暖化により変化したのかというのは、よく分からないわけです。



そこで、われわれは、もう一度詳しくこのメカニズムを調べました。国立環境研究所とわれわれの JAMSTEC と、あと東京大学の気象海洋研究所というところで共同開発されている MIROC という気候モデルを用いて、酸素濃度を予測しました。東部赤道太平洋の 170 m から 1200 m における酸素濃度を 1850 年から 2100 年まで計算しています。結果は、1950 年代から 2050 年ぐらいまで貧酸素水塊の体積が増えていって、その後は横ばいになるような傾向を示します。ここで、それほど貧酸

素水塊の体積が変わらない期間 1 と、あと極大を迎える期間 2 と、それほど変わらない期間 3 において、東部の赤道太平洋での中層（170 m から 1200 m）の酸素濃度の将来変化を見てやりました。各期間の酸素濃度、期間 2 の値から期間 1 の値を引いたもの、期間 3 から期間 1 を引いたものを計算しています。その結果、赤道域で期間の 2、3 にわたって酸素濃度が減少していくことが分かりました。またその南北で酸素濃度が増えていきます。これがなぜかということ調べました。

海洋内部の酸素濃度の時間変化というのは、水平方向に水とともに流れてきて供給されるもの、鉛直方向に水とともに流れてきて供給されるもの、また、流れながら周りの水と混合しながら水平方向から供給されるもの、また、流れながら混合されて鉛直的に供給されるものと、有機物の分解による消費というものに分けられます。ここでは、その流れによるものと、混合によるものと、有機物の分解の項が貧酸素水塊が変わらない 1850～1950 の期間でどのようなバランスになっているかというのをまず見てやりました。ここでは、 $30 \mu\text{mol/l}$ 以下の領域を貧酸素水塊と定義して調べると、赤道域の貧酸素水塊の領域に先ほど言った赤道潜流によってほとんどの酸素が供給されているということが分かりました。また、この南北では水平方向の混合によって酸素が供給されていました。結果、赤道潜流による流れによって供給される酸素と、この南北で混合によって供給される酸素が、貧酸素水塊の領域では、上から降ってくる有機物を消費するのに使われてバランスしているということがこのモデルでは起こっていることが分かりました。

では、温暖化したときに、このバランスがどういうふうになるのかを最後に見ました。最初の酸素濃度があまり変わらないのが期間 1 で、期間 3 が貧酸素水塊の増え切ったところを表します。期間 1 の流れによる酸素の供給項、混合による供給項、あと有機物の分解に使った消費項を期間 3 の供給項、消費項と比較すると、最も顕著な変化が見られたのは、赤道潜流が弱くなること（流れによる酸素の供給項が減少）で、それにより酸素の供給量が減って赤道域の貧酸素水塊で酸素が減っているということが分かりました。その減少は、有機物の消費項の減少によってある程度は緩和さ

れていることも分かりました。

これをまとめると、東部の赤道太平洋においては、貧酸素水塊の増減への地球温暖化の影響によって、赤道潜流による酸素供給の変化が非常に重要であること、あともう 1 つは、有機物の分解の変化が重要であるということが分かりました。そこで、いろいろな気候モデルの結果を集めてきて、それらを見てやるとどうなっているかを調べました。

いくつかのモデルがあるのですが、赤道潜流の流量が 2090 年代と 1990 年代でどのように変化したかを横軸に取って、縦軸に貧酸素水塊が 21 世紀末と 20 世紀末でどう変化したのかを見ました。より温暖化が進む RCP の 6.0 と 8.5 の結果では、赤道潜流が増えるモデルもあれば減るモデルもありました。

増えるモデルでは、貧酸素水塊の体積が減る。酸素がより供給されるので減る。赤道潜流が減るモデルでは貧酸素水塊が増えるということで、より温暖化が進むそれらのシナリオでは、この赤道潜流がどう変わるかによって、東部の赤道太平洋の貧酸素水塊の体積がどうなるのかということが、最も影響されているであろうということを示しました。また、温暖化があんまり進まない RCP の 4.5 と 2.6 のシナリオでは、赤道潜流がそれほど変わらないにも関わらず、より温暖化が進むシナリオと同程度に貧酸素水塊が変わるのですけれども、これは多分、海洋表面で植物プランクトン等が作る有機物が、中層にどれぐらい沈降してきているかが変わっていることによって引き起こされるだろうということが分かりました。

将来予測のまとめ

IPCC-AR5-WG1(2013)によると、

★ 21世紀中に海洋の溶存酸素量が数パーセント減少する可能性は非常に高い。CMIP5 モデルによると、この溶存酸素の減少は主に中緯度の海洋表層で起こり、その原因は以下のことが示唆。

- ⇒成層の強化
- ⇒ヘンチレーションの弱化
- ⇒温度上昇

もともと、外洋における貧酸素水域の量が将来どう増大するかについては、潜在的な生物地球化学的影響と熱帯海洋力学の変化における不確実性が大きいため、合意は得られていない。

Cabre et al. (2015)とShigemitsu et al.(in prep)の結果から、赤道域の物理場(中層循環)の改良が酸素再現&予測に最重要。

32

ここまでをまとめます。(図 32) IPCC の AR5

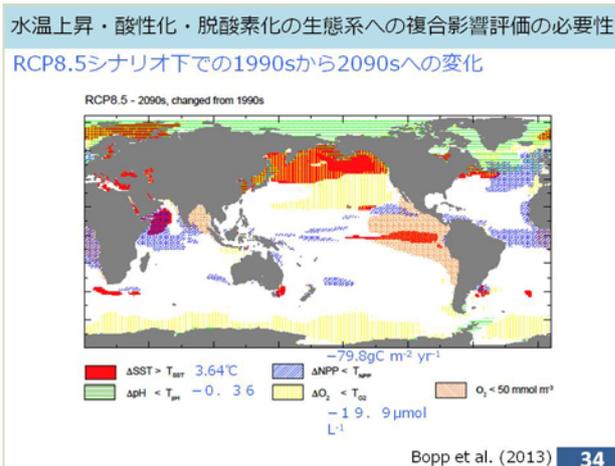
合影響を評価していく必要性があります。

によると、21世紀中に海洋の溶存酸素量が数パーセント減少するという可能性は、非常に高いということが分かりました。で、CMIP5のモデルによると、この溶存酸素の減少は海洋の表層で起こって、その原因としては、温度が上昇すること、あとは海洋の表層と中層の密度差が大きくなって、混合が弱くなるということによって説明できるのではないかということが言われています。外洋における貧酸素水域の量が将来どう変わるかについては、潜在的な生物地球化学的というのは、少々難しい言葉ですけど、有機物がどれぐらいできて、どれぐらい分解されるかというような影響と熱帯の海洋力学、先ほど言ったような赤道潜流のような変化における不確実性が大きいために合意は得られてないと報告しています。この後に今日紹介したCabreさんの研究とわれわれの結果から、赤道域の特に中層の循環を、今の気候モデルの中で改良していくことが、この東部の赤道太平洋の貧酸素水塊における酸素濃度の現況再現、さらに将来の温暖化予測に非常に重要であろうということが分かりました。これが将来予測のまとめです。

4. 今後の課題



最後にあと2枚だけです。今後どんな課題があるかということなのですが、先ほど示したように、モデルがまだ不十分なところが多々あるので、モデルを改良していくということはまず1つ重要です。もう1つ、その酸素の予測がうまくいったとして、どういうことを考えていかなければいけないかということなのですが、水温の上昇と酸性化、脱酸素化というのが生態系へ複合的に影響し得るはずですので、そのような複

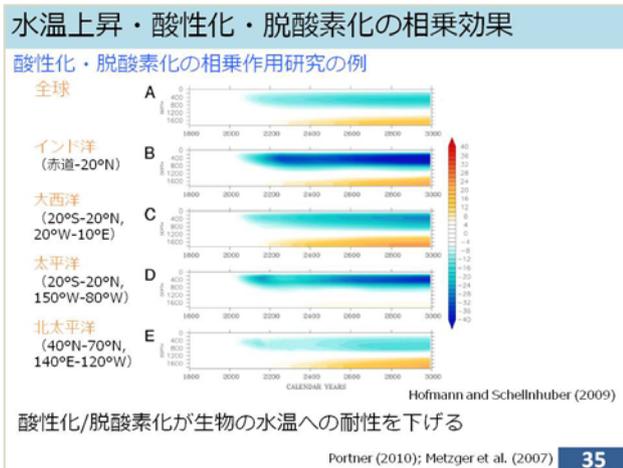


(図34)これはBoppさんたちの研究結果で、2090年代と1990年代のいろいろなモデルの差の結果を表しているのですが、赤い色のところが表面の水温がある閾値よりも高くなっている場所、この緑の横線を引いているところがpHの結果で、より酸性化がより進んでいるところです。また、この黄色の縦線は酸素濃度が、ある閾値よりも減っているところです。水温を見て分かるように、水温は熱帯域から高緯度にかけて広範囲に温暖化の影響を受けます。また、最初の方に示したように高緯度側から、酸性化の影響というのは進んでいきます。酸素というのはこの南大洋と亜熱帯域の辺で、非常に減りそうなどころがあるわけです。このように酸性化の影響と水温上昇の影響と、脱酸素化の影響が全て起こりうるような海域が出てきます。だから、そのような海域で生物がどういったふうに影響され得るのかというのを今後調べていく必要があります。

最後にもう1つ、この水温上昇と酸性化ということと、脱酸素化が相乗効果を起こす可能性が指摘されています。1つは、酸性化が進むと炭酸カルシウムが溶けて減ってくるわけですが、炭酸カルシウムというのは、有機物よりも重たいので、表層でできた有機物をより深層に送り込むのに重要であるといわれています。なので、もし炭酸カルシウムが溶けて少なくなったりすると、表層でできた有機物が深層まで行かずに、より浅いところで溶けるようになってくるというようなことが考えられています。

そのようなことをコンピューターのシミュレーションで示したのが彼らです。(図35)これは炭酸

素が結構あったのは、なぜだったのでしょうかというのが質問だったのです。



カルシウムが溶けない場合と、溶けた場合のモデルの差を取っているのですけれども、横軸は 1800 年から 3000 年(モデルの年)までを表しています。インド洋、太平洋を見てほしいのですけれども、この中層で酸素の濃度が少なくなっているということが、分かります。つまり、炭酸カルシウムが溶けることによって、有機物がより浅いところで溶けるようになったので、この中層で酸素が減るという可能性を彼らは指摘したわけです。

なので、この水温上昇、酸性化、脱酸素化が相乗的に悪いことをして、生態系に影響を与える可能性があるのです、そういうことも今後調べていく必要があります。実際、酸性化と酸素が少なくなることが、生物の水温への耐性を下げるといったようなことを実験的に報告している人もいますので、多分これも調べていく必要があります。以上、まとめると観測も続けていって、どうなっているかを見なきゃいけないし、培養実験等室内実験でこういう効果というのがどういうもので、どの程度の影響があるのかということも調べる必要があります。さらに、モデルの研究もうまく進めていく必要があって、温暖化の生態系への影響を調べるのに、それらの研究が三位一体となって進んでいく必要があるであろうと思っています。

〈質疑応答〉

会場：さっきの質問で結局、結論としてよく分からなかったのですけれども。古い時代は消費量が少なかったから沈んだのか、あるいは、深層に流れる流れが別のところにあって、酸素が補充されたのか。配布資料の 15 ページぐらいのところ、下の方の酸素が、より深海のところに行くともた酸

重光さん：これは 1 つの可能性は、モデルの結果でも示しましたが、中層の水の年齢が若くなるということが 1 つは、あり得るのかなと思います。

会場：古いときはまだそんなに消費されてなかったということですか。

重光さん：古くなればなるほど、有機物を分解して酸素消費して栄養塩を出してくるので、古い水ほど酸素の濃度が少ないのですけれども、ある場所に到達する水の年齢が若くなれば、酸素を消費してない水が来るので、定点で観測している酸素濃度が増えるというのは、あり得ます。多分それが影響し得るのではないかなと思います。

あと、もう 1 つは、表面から温暖化していくと、上の方の水の密度が低くなって、下層との密度差が大きくなるので、上下混合がしづらくなります。より深いところに酸素濃度の低い水があるので、その水とこの中層辺りの水が混ざりにくくなると、見かけ上酸素が減ってないというようなのがあり得るのかなと思います。ちょっとこれがなぜかというのは、多分まだ研究されていないと思うので、分からないですけど、可能性としてはそういうことがあるのかなという気がします。

会場：温暖化の影響というお話のときに、私常に疑問に思っていることがあるのですけれども。過去の歴史で炭酸ガス濃度が、例えば今の 10 倍程度あった時代があるはずですよね。

そのときに、植物が生態系が非常に繁栄したとかそういうようなことを聞いたことがあるのです。では今のこの程度増えたからと言って、何が影響あるのだろうという、その辺が疑問です。そのときは 300 ppm ぐらい炭酸ガスが濃度があつたはずなのですけれども、生命が絶滅したという話も聞いたことないものですから。先生のお考えを少し、その辺について伺いたいと思うのです。

重光さん：地質時代の話はよく分からないのですけれども。耳学問として聞いたことがあるのは、

その例えば白亜紀なんかは、海洋の深層で無酸素になったというようなのもあったとか聞いたことがあるので。その昔の地質時代の CO₂ 濃度が高かったのと、今ので、どう違うかという話ですよ。それについての明確な答えはないですけど、少なくとも、観測で見ている限り、酸素濃度が減少していっていますし。それで温暖化が進むと、酸素濃度というのは減少していくというのは、間違いないので、影響があるのかどうかと言ったらあるのだと思います。その昔の時代はどんなのだということは、少し大陸配置とかも違うであろうし、海洋循環なんかも違うと思うので、一概に比較はできないと思うのです。どうなのでしょう。例えば、無酸素になったときには、その無酸素のところでは生きていけるような生物が多分、出てくるであろうし。だから、生物層も多分全く違うのではないのでしょうか？昔のことは分からないので、何とも言えないのですけれども。

会場：分かりました。過去の歴史を見たら、地球というのは、そんなに弱いものじゃなくて、結構パワーがあるんじゃないかというような気がするのです。

重光さん：それはそうですね。

会場：だから個人的には、あまり心配し過ぎているのではないのかなという気は、そういう感覚は持つのです。でも悠久の歴史を変える話を、今、しても仕方ないですね。

重光さん：そうですね。昔と比べると、全然、変化も少ないのかもしれないのですけれど、実際、変化していること自体は見えてきているわけですし、酸性化が進んで、生物が影響を受けたりもしているわけなので、やはりちゃんと見ていく必要があるであろうなとは思っています。今後 100 年ぐらいの間で、例えば最後に示した研究のように、酸素濃度が中層でかなり減少してくるような可能性があるわけですね。そういうことがあるので、昔と比べるとどうだという話はありますけれど、調べていく必要があるのだらうなとは思っています。

会場：今の質問に関連してなのですけども。酸

素を使わないまま嫌気性細菌とかそういうのは別にして、普通酸素を使う生き物について、酸素の将来予測というところで、海洋の部分部分で見れば、モデルの精度に差があるけれども。全体としては、酸素の濃度が減っていくという予測ですよ。海洋酸素量変化というグラフのところでは 2000 年を基準にして下がっていくグラフはありましたけれども。この下がる濃度が最初の説明にあった酸素濃度の生物の影響ということで、甲殻類から魚、翼足類までで一番酸素を使うもののどこにかかってくるかという関連を見ることが、先ほどの質問の答えになるかと思うのです。

重光さん：そうですね。おっしゃるとおりです。

会場：あと、それで見ると、この全海洋の酸素濃度が下がっていくグラフと、冒頭の酸素濃度の生物の影響というグラフを重ね合わせたときに、どのシナリオだとどの生物のところに影響するかというのが質問です。

それで、先ほどの質問で、過去はむしろ 3,000 ppm とかあったかもしれないということで、実はあまり変わらないのではないかとありましたが、答えにはならないのですけれど、やはり地質年代的な変化というのは、もう何千万年とか何億年だったとかという変化に対して、こちらはもうたかだか 100 年とか、あまりにも短期な変化です。例えば酸素を取り込むヘモグロビンだとか銅だとか、そういう酵素の生物が進化するの、100 年とか 1000 年では無理だと思いますので。

重光さん：適応し切れないということですよ。

会場：地質的な変化に比べると、この人間活動の変化がグラフにしてみれば、あまりにもとんでもない急カーブになっているのが、変化の速度というのがすごく効いてくるのではないかなと思います。

重光さん：そうですね。生物が適応するのに、時間のスケールとしては短過ぎるということですね。

会場：はい。最初の質問がこのグラフを重ね合わせたときに、例えば甲殻類の一番酸素量を必要と

する $250 \mu\text{mol/l}$ のところにもうかかるシナリオがあるのかどうかという点が、質問です。

重光さん：多分これが答えである気がします。このオレンジのところは、今 200 m から 600 m で、酸素の平均濃度が 50 mmol/m^3 の領域です。酸素の量が $20 \mu\text{mol/l}$ よりも減っているところがこの辺にあるので、ぎりぎりこの辺というのは、今の不十分なモデルの中では影響があり得そうだなというところだと思います。あとのところは $20 \mu\text{mol/l}$ ぐらい減ったところで、そもそもの濃度が高いので、そんなに効いてこないであろうと思います。

会場：それからあともう1つ。赤道潜流の原動力というのは、暖かい海水が沈み込むからには、下の海水が横に移動してくれるから、それで引き込まれてということなのか、暖かい海水が下に潜り込む原動力というのは、何なのかという質問です。あとモデルによって逆に暖かい水が染み込む速度が速くなったり、若い年代の海水が増えるというように、普通の論理と逆の現象が起こるのもなぜなのかと疑問に思ったのです。

重光さん：物理が専門ではないので正確なことは言えませんが、熱帯の中層循環に重要となっているのは風だと思います。今回の我々の研究では、気候モデルの大気の様子を見てないのでちょっと分からないのですが、多分、貿易風の再現というか、温暖化したときの風の場の変化の仕方が全然違うので、赤道潜流の温暖化に対する応答がばらばらなのではないかというのが1つ考えられます。中層の水の年齢については、赤道潜流がより東の方まで到達する場合、下の水が上がってこられないのですが、温暖化の影響でそれよりも西で表層まで上がってくる場合には、深層の水が上がってきやすくなっているというのがあるのではないかなと思います。東部赤道太平洋の中層の年代のところでの話がそれと関係していると思います。もちろんモデルによりますけれども。

会場：酸素の増えたり減ったりのことは、ほとんど生物で説明されていましたけれども、例えば、人間活動。海洋汚染、油だとかゴミだとか、ある

いは河川から流れ込む化学物質だとか洗剤とか、そういうものの影響は無視できるぐらいなのか。

重光さん：いえ、沿岸域だとあると思います。例えば、人間が出す肥料だとかが河川から入ってきて、沿岸域で富栄養化したりすると、その沿岸域で普通それがなくなるときよりもかなりの生物生産が起こって、有機物の死骸がたまって、貧酸素化するというのはあると思います。あると思いますけれど、今の段階ではそれは考えてないです。

会場：全体量から見たら、少ないですか。

重光さん：その沿岸で閉じるような気がします。沿岸から外洋に出ていって、外洋にまで影響を与えるというまでのことはないような気がします。確信を持っては言えないですけど、多分、それも考えていかなきゃいけないのだと思います。

会場：最後のパネルの酸性化、脱酸素化が生物の水温への耐性を下げるところをもう少しかみ砕いてお教えいただけませんか。

重光さん：これは、私は全く専門じゃないので適当なことは言えないのですが、紹介した論文で1つ言っているのは、その食べるカニだと思えますが、カニの温度の適水温の範囲というのが、酸素濃度が下がると狭まるというようなことを言っていたと思います。それがどういうメカニズムなのかはちょっと分かりません。なので、その適水温の幅が狭まるので、その水温上昇と酸素低下というのが、相乗的に影響を及ぼすのではないかなということだと思います。

会場：炭酸カルシウムの沈降が酸素を下に運ぶのに役に立つということだったのですけれど。海洋中の炭酸カルシウムは生物が作るというふうにご覧になってよろしいですか。

重光さん：そうです。

会場：そうすると、またその生物量がどれぐらいあるか、地域によっても差があると思いますけれど

ど、またそれは予測が難しいということになってしまうのですか。

重光さん：そうです。難しいところです。炭酸カルシウムの殻を作る生物がいるのですけれども、そいつがいることで、より分解せずに、より深いところまで海洋表層でできた有機物を送り込めるように今の海洋ではなっていると思われるのです。しかし、酸性化が進んで、その炭酸カルシウムを作る生物量が減ると、海洋表層でできた有機物が深くまでいかなくて、浅いところで分解し始める。そうすると、酸素濃度がもともと低い層は中層にあるので、その中層で有機物が分解する量が増えて、酸素がより消費される可能性があります。ですから、酸素が少なくなることに影響するのではないかという主張です。酸素を送り込むというよりは、その有機物を送り込むポテンシャルが変わり得ることによって、中層にある酸素の低い層が影響を受けるということです。

会場：では、その炭酸カルシウムにそのものに入っている酸素ということではなくてということですか。

重光さん：はい、そうではないです。

会場：Keeling の酸素の将来予測の図の中で、それぞれのモデルに対しての強制力って、修正みたいになってたのですけれども。あれはどういう意味でどういうことが行われますか。

重光さん：ここですよ。これはRCPのシナリオのように、温暖化がどういふふうに進むかのシナリオの違いです。だから、より温暖化する場合、温暖化しない場合というシナリオのことを強制力といっていると思います。

会場：強制力が高いということは、例えばこのRCP2.6から6とか8.5みたいに。

重光さん：そうです。そういうことに対応している。

会場：対応していくというときの問題だというこ

とですか。

重光さん：そうです。だから、シナリオで、より温暖化が進むシナリオ、それほど進まないシナリオという意味です。

会場：これはそれぞれのモデルが、強制力をどのくらいで見ているかということなのですか。

重光さん：そうです。そういうシナリオになります。これは、RCPの1つ前のシナリオで、将来、社会経済とかがどういふふうに進んだりだとか、環境配慮して進んだりとかがいろいろなことを考えて決めていたときのシナリオです。ちょっと忘れてしまいましたけれど、この中ではA2というのが多分、一番CO₂濃度が高くなるシナリオだと思います。

会場：もう1つ、マルチモデルによる比較というのがありますが、マルチモデルというのは、それぞれのモデルを合成するのではなくて、それぞれのモデルでやった結果を重ね合わせて比較するという意味ですか。

重光さん：そうです。

会場：本日はありがとうございます。2つあるのです。15枚目ぐらいのところの観測結果で、溶存濃度がワニの口のように広がっているという図があるのですけれども。一番最初のところで、大きな海流の循環には数千年単位ということでゆっくり進んでいくということと、あと、表層と海底の空いたところでは、ある意味流れが遮断されていると反転しているというのもあったので。1960年と2000年、40年程度というところ、この海底に沈んでいるのはもう何百年も前に上だったのがだんだん沈んできているというふうにと考えると、そのころは温暖化の影響が無い時代だったと思います。それなのに、変動が起きているというのは、これはどういう可能性が考えられるのかなというのが1つです。

あと、もう1つは、タイトルの貧酸素水塊というところなのです。例えば、3枚目で先ほどの甲殻類が生きているのが30 μmol/lから100 μmol/l

とかありすけれども、この貧酸素水塊というのは、何 $\mu\text{mol/l}$ ぐらいのところ以下というのを、考えているのかというこの2点お願いします。

重光さん：まず、貧酸素水塊から。先ほども、その前にも質問ありましたけれど、生物が生きられなくなるというところが、多分、貧酸素水塊の定義になるのだろうなとは思っています。

あともう1つ今日は、少々話が複雑になり過ぎるので話ししなかったのですが、例えば、酸素濃度が $5\mu\text{mol/l}$ 以下とかになると、今、有機物の分解には、酸素を使ってやる分解をしているのですが、脱窒という、硝酸塩を酸化剤に使う有機物を分解するようなプロセスがあります。そういう意味で、今日、生物のモデルの説明でもしましたけれど、その硝酸塩は植物プランクトンが光合成するときにする栄養塩なので、貧酸素化、つまり $5\mu\text{mol/l}$ とか本当に低いところの領域が増えてくると、その栄養塩自体が使われていくので、海洋の上層における植物プランクトンの光合成なんかにも影響を与えます。だから、それも貧酸素水塊なのだと思います。

なので、生物が生きられなくなるような水というのと、最初のほうに生物地球化学的プロセスと書いていたのは、そういう有機物を酸化するプロセスが変わってしまって、他のところに影響があるので書いていたのですが、生物地球化学的プロセスの観点からいうと本当に低い $5\mu\text{mol/l}$ とか、そういうところも貧酸素水塊というのだと思います。

もう1つは、これは、15枚目のところですが、酸素の低いところが広がっていているのは、中層で 500m とかのところなのです。これは例えば、表面で起こる光合成によって植物プランクトンが作る有機物量が変わって、沈んでくる量が変わると、それだけでも変動し得る可能性があります。あと、最初の方にしゃべったのは海洋の大循環の話で 1000 年ぐらいの単位で起こる話でした。これは時間スケールの話はしていなかったのですが、最初お話しましたように、中層水というのは、底に沈むまで重たい水ではなくて、中層ぐらいで止まってしまうような水も高緯度の方でできたりするのです。そういう水の循環というのは、数年、数十年の時間スケールで動いているものなので、

それができるところの状況が変わっても変わり得るので、普通に起こり得る現象であると思います。

会場：酸素濃度の単位について少し教えていただきたいのですが、このマイクロモル・パー・リッターですか、それとミリモル・パー・キュービックメートルと同じですか。違うのですか。

重光さん：ミリモルのキュービックメートルなので、マイクロモル・パー・リットルと一緒にです。

会場：それで、これ ppm のほうに換算するとこれどうなるのですか。よく普通の海水じゃなくてあの場合、飽和で ppm で何 ppm で表しますよね。一体この海水の飽和度というのは、飽和濃度というのは、 $\mu\text{mol/l}$ でもいいのですけれども、どの程度なのかなと思って。一体生物というのは、その飽和度と言いますか、ムササビなんか半分ぐらいになっても大丈夫だとか、そういう感覚的なものが少しよく分からなかったのです。

重光さん：これが海水に塩分が 35 という水に、最大に溶けうる酸素の濃度を表しています。なので、例えばゼロ度の水だと、 $360\mu\text{mol/l}$ というのが、一番溶けうる酸素です。

例えば 25 度、亜熱帯とかの水だと 200 少しぐらいですか。

会場：最大それぐらいの範囲まで溶けますよということですか。

重光さん：そうです。ここから有機物を分解して消費されていくので、海洋の内部では、ここよりは少なくなるということです。

以上