

## 「海」の変化 I 水温・海流・鉛直混合

小笠恒夫（水産総合研究センター）

### 1. はじめに

地球温暖化が海に引き起こすであろう変化について、1990年代から現在に至るまで様々な機関による研究が積み重ねられてきました。更に、世界の各機関によって連綿と続けられている海洋環境モニタリングの結果を解析する事によって、そうした研究によって将来起こると予測されている変化の一部が、既に現在の海洋で発生し始めている兆候も検出されています。

こうした、現在と将来の海洋の温暖化に伴う変化に関する知見は、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)によって数年ごとにとりまとめられ公表されるようになってきました。ここでは、IPCCの最新の報告書である第5次評価報告書（自然環境に関するワーキンググループI報告書は2013年9月発行）に記載された情報を基に、水温、塩分、海流、鉛直混合といった海の物理環境に関する将来の予測と、現時点における変化傾向の観測結果について、主に北太平洋域を中心として紹介します。更に日本周辺の海域に関しては、我々が実施している気候変動対策プロジェクト研究でも、現在の海洋環境変化の解析や数値モデルによる将来予測を行っていますので、それらも合わせてご報告します。

### 2. 水温・塩分の変化

#### 1) 表層の水温、塩分変化の予測

温暖化によって最も直接的に引き起こされる海洋の変化は、表層水温の上昇です。多くの海洋生物が、水温によって生息範囲を決められていますので、水温の変化予測は海洋生態系の将来予測にとって極めて重要です。

IPCC第5次報告書では、将来にわたって何も温暖化対策を取らなかった場合(RCP8.5シナリオ)、世界の海洋全体の平均表面水温が2030年までに0.6℃、2050年までに1.2℃、2100年には3℃上昇すると予測しています(図1)。将来の大気中二酸化炭素濃度を550ppmで安定させた場合(RCP4.5シナリオ)でも、この半分から2/3程度の水温上昇が予想されています。海になじみの無い方には1℃の水温上昇というと大した事がないように思われるかも知れませんが、水温1℃の違いが魚の分布や行動に大きな影響を与えることは、例えば趣味で釣りをされる方なら日頃から体感されているのではないかと思います。漁業現場でも、例えば日本海のブリの漁獲量は約1℃の水温変化で10,000トン程度変動する事が当センターの解析により明らかになっています(田, 2014)。水温3℃の変化となると、現在の南関東近海と奄美・沖縄近海の水温差に相当します。単純に考えれば、今年生まれた赤ちゃんが85歳になったときに南関東のスーパーに並んでいる「地魚」は、現在の沖縄で見られる「地魚」に変化している可能性も有るわけです。こうした温度変化に伴う海洋生態系と水産資源の変動の詳細については、この後の講演により報告される予定です。

IPCC第5次報告書では、表層海水の塩分も温暖化により変動すると予測されています。水温と違い、塩分は増加する海域と減少する海域がありますが、日本周辺海域を含む北太

平洋では、2100年までに最大0.5程度の塩分低下が予測されています（RCP8.5シナリオの場合。図2）。水温ほどではありませんが、塩分も魚の生息範囲を決める要素の1つになっています。このため、表層塩分の変化も海洋生態系の将来予測にとって重要な要素になります。

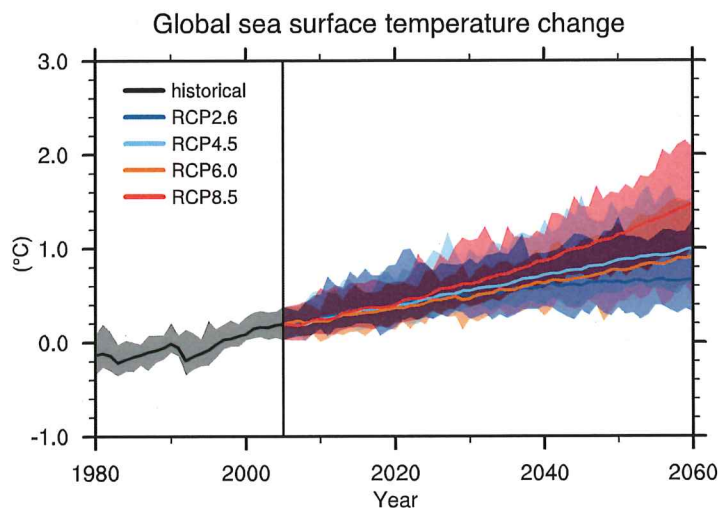
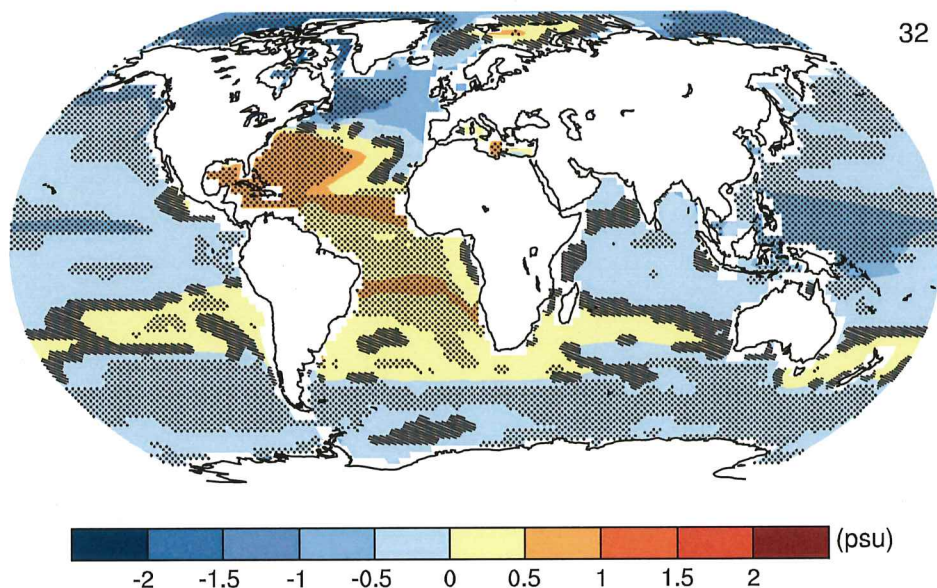


図1 IPCC第5次報告書で予測されている、水深0m-700m間の世界平均水温の将来予測値（1980年から2060年まで）。図中の各色の線は将来の温暖化シナリオ毎の予測中央値、色塗り範囲は各シナリオ毎の予測の90%信頼限界を示す。

Annual mean surface salinity change (RCP8.5: 2081-2100)



32

図2 IPCC第5次報告書で予測されている、温暖化による表層塩分の変化量の将来予測値（2081年-2100年の平均値と現在との差を示す）。図中の網掛け部は、2100年までの予測変化幅が、現在の海洋で見られる年々変動の範囲内に収まっている海域。親潮から混合水域にかけては網がかかっておらず、温暖化によって現在では見られないような値にまで塩分が低下する事を示している。

## 2) 現在の海に見られる変化傾向

こうした水温や塩分の変化は、どうやら既に現在の海でも始まっているらしいことが、世界の海のモニタリングデータから明らかになってきています。IPCC 第5次報告書では、1960年から2010年までの50年間に、世界の表面海水の平均水温は約0.6°C上昇していると報告しています。地理的に見ると、特に水温上昇の大きな海域は日本南方の亜熱帯海域で、そこでは海の表層700mの平均水温が10年間に0.3°Cもの速度で上昇している事が判っています。我々の観測でも、黒潮の流軸上の表面水温が10年間で0.25°Cの速度で上昇していることが判明しています。

塩分については、1950年から2008年までの間に、日本南方の亜熱帯海域では約0.1、日本東方の亜寒帯海域では0.2から0.4程度の塩分低下が起きている事が判っています。

## 3. 海流の変化

### 1) 海洋生物にとっての海流の意味

温暖化により、表層海水の温度や塩分だけでなく、海の中の流れ、つまり海流の形や強さも大きく変化します。水温や塩分の変化が海洋生物に影響を与えることは直感的にわかりやすいのですが、海流の変化がどうして海洋生物に影響を及ぼすのでしょうか？

実は、海洋生物の多くは卵や幼魚期、稚魚期など、遊泳力の小さな時期の移動能力を海流に依存しています。海藻や貝類等の沿岸固着性の生物も、卵や幼生の拡散は海流に依存しています。大まかに言えば、生息範囲の拡大のために卵や幼生をできるだけ広範囲に拡散させたい生物にとっては、海流が強い方が自分たちに有利に働くこととなります。逆に、餌等の条件の良い限られた海域に卵を産んで、卵や幼魚期をその海域内で過ごさせる事で生き残り率を高めているような生物にとっては、海流が強くなる事はその卵や幼魚がその海域に留まっていられる時間を短くする事に繋がるので、不利に働く事になります。

また、海流は温かい水と冷たい水の境目に沿って流れることが多いので、逆に言えば海流の位置が変わる事により、暖かい海と冷たい海の境界の位置が大きく変化する事になります。境界が変化した場所の沿岸の生物にとっては、海流の変化によって自分の住んでいる海域が「冷たい海」から「暖かい海」へ、またはその逆へと急激に変化することになるので、先に述べた全体的な水温の上昇よりも遙かに大きくて急激な変化にさらされる事になります。

### 2) 日本近海の海流の変化の予測

IPCC の第5次報告書では、北太平洋の海流の変化について詳しい事は述べられていませんが、この報告書の作製過程とほぼ並行して行われた「第5次気候モデル国際相互比較プロジェクト(CMIP5)」と呼ばれる国際的な数値モデルによる気候予測実験では、日本の太平洋側を流れる代表的な海流である黒潮と親潮が、ともに温暖化によって流速を早めること、ただし黒潮、親潮それぞれが流れている位置は温暖化後も現在とは大きく変わらない事が予測されています(例えば Sakamoto and Hasumi, 2008.)。一方日本海を流れる対馬暖流については、我々の研究により、2100年までに対馬暖流の流れが強まり、それとともに対馬暖流の北端位置が沿岸、沖合い共に大きく北上することが予測されています(木所等, 2011. 図3)。これは日本海の中で、低水温域に生息する魚の漁場が日本から北に大きく離れる可能性がある事を示唆しています。

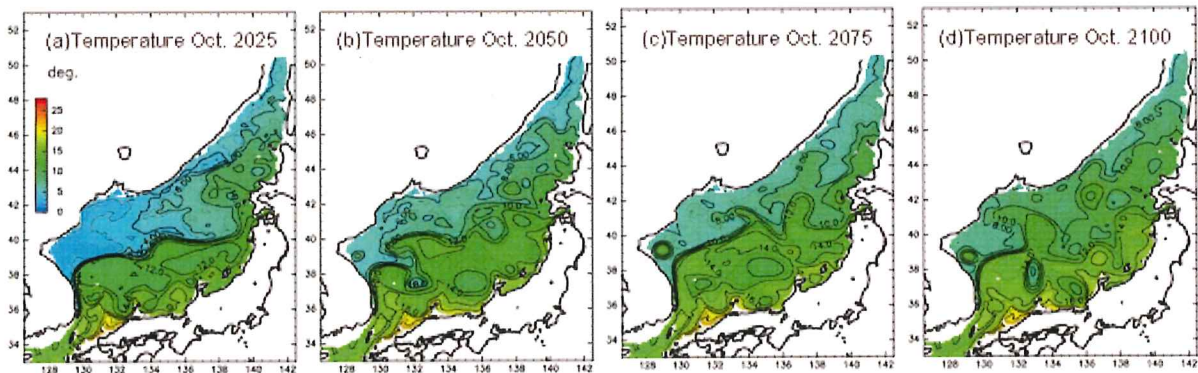


図3 水産総合研究センターが農林水産技術会議委託プロジェクト研究「地球温暖化が農林水産業に及ぼす影響評価と緩和及び適応技術の開発」で開発したモデルによる、10月の日本海の100m水温分布の将来変化予測。a)2025年、(b)2050年、(c)2075年、(d)2100年。[木所等, 2011から引用]

#### 4. 鉛直混合の変化

##### 1) 鉛直混合と「混合層深度」

海の中には太陽の光が届きにくいので、植物プランクトンは海の表層にだけ棲んでいます。これらの植物プランクトンも陸の植物と同様、成長するためには窒素、リンなどの「肥料」(海では栄養塩と呼びます)を必要としますが、この栄養塩は海の表層にはとても少なく、海の深層に沢山溜まっています。このため、海の表層にいる植物プランクトンが成長するためには、表層の水と深層の水が適度に上下方向に混ぜられること、すなわち鉛直混合が起きる必要があります。

ところが、海水は常に太陽の熱で表面から暖められている状態なので、おおむね海の表面で一番水温が高く、下に行けば行くほど冷たくなっていきます。暖かい水は冷たい水より密度が軽く浮きやすいので、海の水は外から力が働かない限り、簡単には鉛直混合が起きないようになっています。風力で海の表層のわずか数十mから100m程度がかき混ぜられ、上下方向に一樣な水が形成されます。この層の事を「混合層」といいます。混合層が海の表面から深さ何mまで形成されているかを表す言葉が「混合層深度」です。一般には混合層深度が大きければ大きいほど、深い層の栄養塩が海の表面に運ばれやすくなるので、植物プランクトンの生育がよくなります。ただし、あまりにも混合層深度が深くなりすぎると、今度は混合層の下の方では植物プランクトンが十分な光を受けられなくなってしまい、かえって植物プランクトンの成育が悪くなる場合もあります。

##### 2) 混合層深度の変化予測と、現在の海に見られる変化

温暖化による水温の上昇はまず海面から起きますので、温暖化が進むと海の表層と深層との間の水温差がますます大きくなり、その結果海の鉛直混合が弱まる事が予測されています。先述のCMIP5の研究結果や我々のプロジェクトによる数値モデル予測では、日本南方の亜熱帯海域と本州東方の混合水域で、2100年までに冬期の混合層深度が20m以上



浅くなると計算されています (図 4)。このような鉛直混合の弱まりが海洋生態系に与えるであろう影響の詳細については、この後の講演で報告される予定です。

こうした混合層深度の変化は、現在の海でも既に見られているのでしょうか？我々のプロジェクトによって、親潮域や親潮・黒潮混合水域における混合層深度のデータを過去 50 年以上にわたってさかのぼり、その変化を解析してみました。この限られた海域では混合層深度の明確な減少傾向は検出されませんでした。しかし、北太平洋全体では既に混合層深度の減少が始まっている可能性があります。その傍証の 1 つとして、北太平洋亜寒帯域の混合層における栄養塩濃度が、少なくとも 1975 年以降、一貫して減少し続けている事が幾つかの独立した調査によって発見されています (Ono et al., 2008, Whitney et al., 2011 等。図 5)。混合層深度が減少し、鉛直混合が弱まったことによって、深層から表層に運ばれる栄養塩の量が少なくなった事がこの原因と考えられています。この問題については、次の講演でより詳しく紹介される予定です。

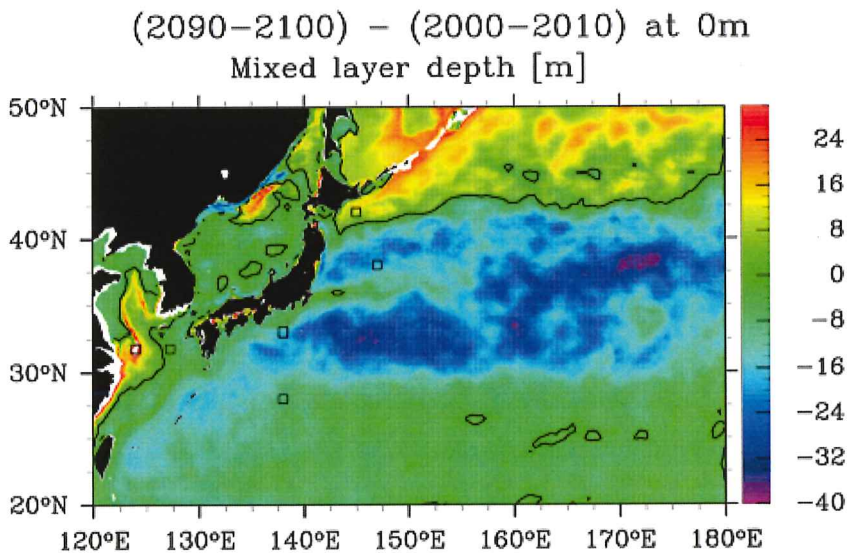


図 4 現在進行中のプロジェクト「漁業・養殖業に係る気候変動の影響評価」で水産総合研究センターとその共同研究グループが予測した、温暖化による混合層深度の変化予測 (2090-2100 年と 2000-2100 年の差を表示)。

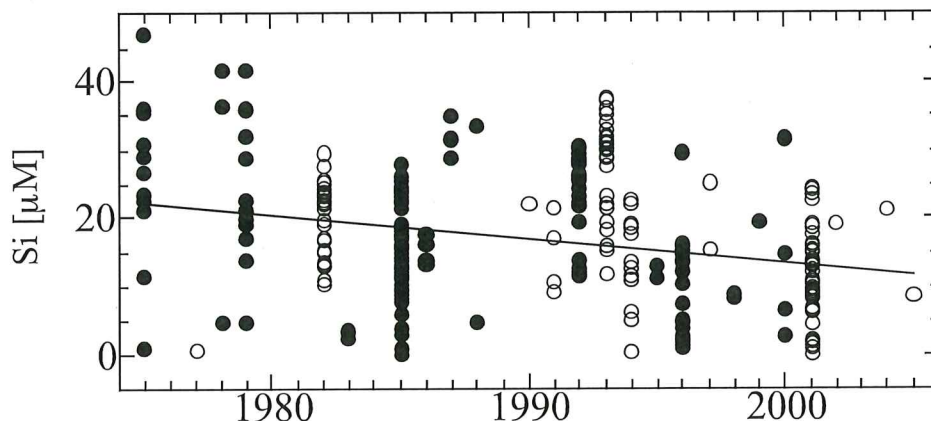


図 5 北太平洋の北緯 40 度以北、東経 155 度から西経 135 度までの海域の夏季混合層における栄養塩 (ケイ酸塩) の濃度経年変化。1975 年以降減少傾向が続いている。Ono et al. (2008) より引用。

## 5. まとめ

水温・塩分の変化、海流の変化、鉛直混合の変化と、温暖化によって引き起こされる海洋の物理的な変化のうち、海洋生態系や水産業に特に影響を与えると考えられる幾つかの項目について紹介してきました。本日の講演では、個々の変化が海洋生態系に与える影響について紹介してきましたが、実際の海洋ではこれらの複数の変化が同時並行で進行します。そうした場合に、個々の変化が相乗効果を起こしてより大きな影響を海洋生態系に及ぼすのか、それともある程度は互いの影響を相殺して、総合的な海洋生態系への影響が小さくなる方向に働くのかは、複雑な問題です。我々はこれまで述べてきたような、既に起きている海洋環境の変化に対応して、海洋生態系にどのような変化が起きているかの実例を研究する事により、このような複合影響の評価を正確に行う為の知見を蓄積しています。また数値モデルによって、将来の様々な海洋物理環境の変化が海洋生態系に与える複合影響について、予測を行なおうとしています。

## 参考文献

IPCC (2013): *Climate Change 2013: The physical science basis*,

<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

Ono, T., Shiomoto, A., and Saino, T. (2008) Recent decrease of summer nutrients concentrations and future possible shrinkage of the subarctic North Pacific High-Nutrient Low-Chlorophyll region: *Global Biogeochem. Cycles*, 22, GB3027.

木所英昭、渡邊達郎、田永軍、井桁庸介、森本晴之、藤野忠敬 (2011) 温暖化が与える日本海の主要回遊性魚類の既存産地への影響予測. 農林水産技術会議研究成果報告書 483 「地球温暖化が農林水産業に及ぼす影響評価と緩和及び適応技術の開発」 p. 266-271.

Sakamoto, T. T., and H. Hasumi (2008): Pacific upper ocean response to global warming -climate modeling in an eddying ocean regime-, in *Eddy-Resolving Ocean Modeling*, Eds. M. Hecht and H. Hasumi, American Geophysical Union, 265-279.

田永軍 (2014) 水産総合研究センター編 「水産資源ならびに生息環境における 地球温暖化の影響とその予測」 3-3 ブリ. <https://www.fra.affrc.go.jp/kseika/ondanka/siry01.pdf>

Whitney, F. A. (2011) Nutrient variability in the mixed layer of the subarctic Pacific Ocean, 1987-2010. *J. Oceanogr.*, 67, 481-492.