



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	地球温暖化による海洋生態系の変化
Author(s)	岸, 道郎; Kishi, Michio J.
Citation	Memoirs of the Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University, 53(2), 27-37
Issue Date	2011-06
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/47552">https://hdl.handle.net/2115/47552</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	27-37.pdf



# 地球温暖化による海洋生態系の変化

岸 道郎

## Marine Ecosystem Change Caused by Global Warming

Michio J. KISHI

### Abstract

Marine ecosystem especially fish ecology in the sub-arctic ocean must be changed due to global warming. In this manuscript, the introduction of marine food web will be discussed and based on this discussions, we guess what will happen on marine food web due to global warming based on simulation results by physical ecological coupled model.

**Key words** : global warming, common squid, chum salmon, walleye pollack

### 1 はじめに

地球規模での気温の変化は南極の氷に閉じ込められた酸素の同位体比などを測定することによって、過去にも数万年から数十年にわたる様々な周期で起こってきたことがわかっている。Fig. 1は過去30万年にわたる大気中の二酸化炭素とメタンの濃度の変化を表している。これらの情報から、二酸化炭素やメタンの大気中の濃度は数万年周期で変化し、それに応じて、これらの濃度が高かった期間は地球の気温が高かったと考えられている。これらは、当然、人

間の活動によって引き起こされた訳ではない。しかしこの図の一番右の端、すなわち近年になって、100年という、これらに比べるとはるかに短い時間スケールで人間活動によって二酸化炭素が急激に増加してきたこともわかる。この二酸化炭素の増加によって地球が温暖化することが危惧されているのは承知の通りである。

こういった、周期的な温度変化に対しては、11年周期の太陽活動の影響も二酸化炭素の増加以外に考えないといけない。また、地球の公転軌道が楕円で、これに地球の自転の歳差運動が加わって北半球が冬のときに太陽が一番近づくか、夏のときに太陽が一番近づくかで温暖寒冷を繰り返すことも知られている。二酸化炭素の増加だけで温暖化は起こらないとそぶく人はこのような他の事象の影響をことさら強調するのだ。ここで注意しなければいけないのは、太陽活動がおとなしいからといって寒冷化するとは限らないまして自転の歳差運動は千年スケールの現象であり、ここ100年の温暖化は説明できないのだ。

人間活動は二酸化炭素を排出して温暖化を通じて海に

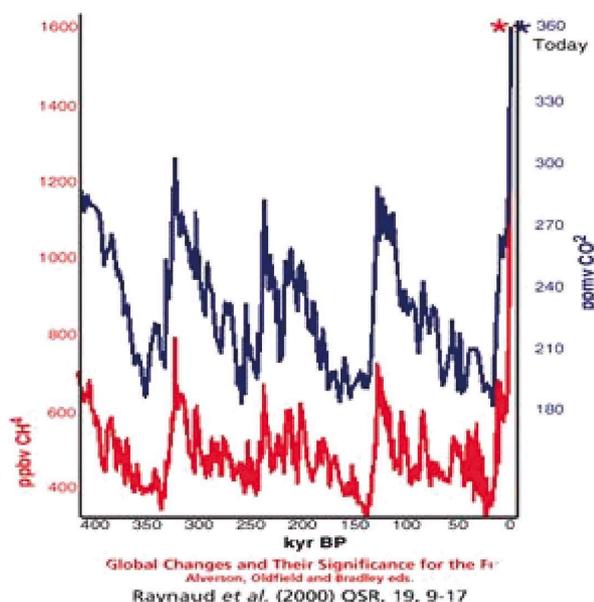


Fig. 1 Time dependent features of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> after Raynaud et al. (2000)

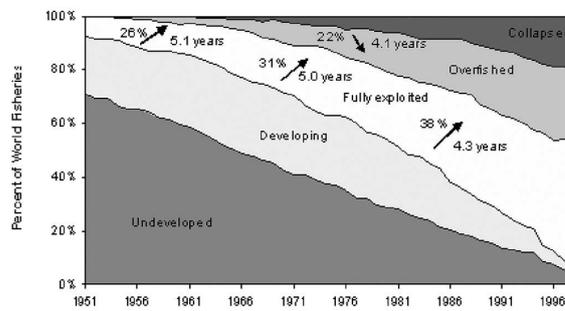
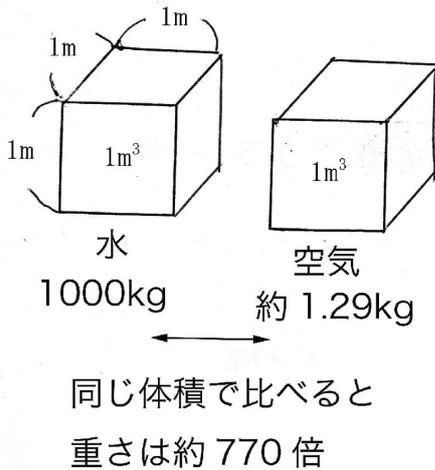


Fig. 2 Trend of world fisheries after Froese and Pauly (2003)



1kg あたりの比熱は 4 倍  
体積あたりだと約 3000 倍

Fig. 3 Latent heat of water and air

影響を与えるだけではなく、直接に海へ与えた影響も計り知れない。特に公害による海洋の汚染、人口の増加による漁業活動の活発化によって、生物多様性 (いろいろな生物が存在すること) が崩れて希少種が絶滅する、あるいはサンマやイワシのようにたくさんいる魚種でも漁業による資源量の減少などは無視できない。特に第二次世界大戦以降の海洋生態系の変化は劇的であり、鯨類、海獣類、大型魚類などの長命な高次生物の激減、マイワシ、ニシンなどの爆発的盛衰、短命な小型魚類・イカ類の増加など、生態系の多様性の減少と単純化、そして温暖化に伴う寒冷生態系の縮小などが懸念されている。Fig. 2 は、Froese and Pauly (2003) による最近 50 年間の世界の漁業のトレンドを描いた有名な図であるが (統計の取り方に問題がないとはいえない) ここ 30 年で多くの魚種が開発 (ここでいう「開発 = development」は、新たに食用として漁獲することにした魚のこと) され尽くしていることを示している。

1-1 海の温暖化を理解するために

比熱は 1g の物質を暖めるのに必要な熱量を水との比で表したものである。小さいほど暖まりやすくさめやすいし、含むことのできる熱の量が小さいことを表している。重量あたりだと水の比熱は大気の 4 倍程度であるが、体積あたりにすると地上の気圧では約 3,000 倍 (空気の分子量が約 29 なので 22.4 リットルを割り算すればこの値になる...)、全体ではどこまで大気とするかで異なるけれども平均で数百倍になるのだ。そして含むことのできる熱量は、全体の重さをかけ算してやると、海洋は大気の約 1,000 倍、地球上の水全体で約 5 倍、氷が全部溶けるとき熱 (融解熱) 換算では 800 倍と計算されている。したがって、地球の気候を支配するシステムの中で、特に気候の長期の変動になればなるほど、海の役割は大きくなる。いったん海が暖ま

Table 1 大気と海の比較 1

	大気	海洋	
比熱 (Cp/J・K <sup>-1</sup> ・g <sup>-1</sup> )	1	4	
比重 (g・cm <sup>-3</sup> )	0.0012	1	
1 cm <sup>3</sup> 当たりの比熱の比			2,000
大循環	60 日	200-2,000 年	
主な流れの速さ (ジェット気流 VS 黒潮)	30 m/s	1 m/s	
小さな渦の速さ (竜巻 VS 渦潮)	100 m/s	5 m/s	
大気の 1 日 = 海の 200 日 ~ 2,000 日			

Table 2 海洋と大気の比較 2

海水温は地球平均で 0.037°C 上昇している。	
<b>海洋と大気の比較</b>	
貯熱量 = (質量) × (比熱) × 温度	
質量:	海洋 1,400,000,000,000,000,000kg (1.4e21kg) 大気 5,300,000,000,000,000,000kg (5.3e18kg) 140京トン vs 5300兆トン: 264倍
比熱:	海水 (4000J/C/kg) vs 大気 (1000J/C/kg): 4倍
海洋が 1°C あがるときに増える貯熱量は、大気が 1°C あがる時に増える貯熱量の 1056 倍。 海洋 0.037°C 上昇は大気に換算すると 40°C の気温上昇	

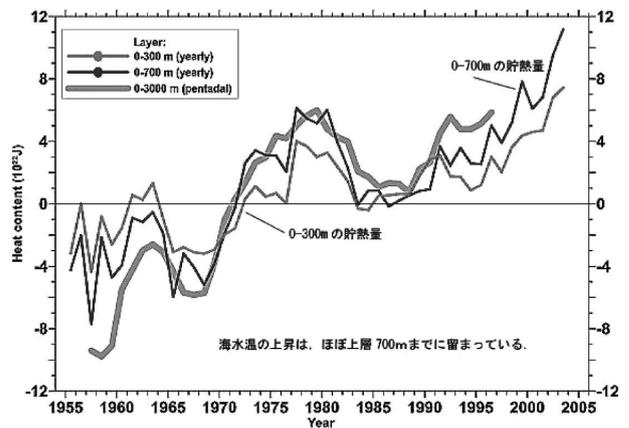


Fig. 4 Time dependent features of heat content of sea water (Levitus et al., 2005)

るとそこに蓄えられた熱量は膨大なものとなりもとにもどりにくいからである。ここ 40 年間に地球全体が加熱された熱量のうち、約 84% が海洋に貯蔵されている (Levitus et al., 2005) と考えられている。残りの 16% がすべて大気に貯蔵されたわけではないので、この数字は、大気に蓄積された熱量と比較すると約 20 倍になるのだが、次の思考実験をしてみるとより海洋の重要さがわかる。海洋自体は、全球平均するとここ 40 年間で 0.037°C 上昇している。ほんの

0.037°C だけである。しかし、この海洋が吸収した熱量が一気に大気に放出された場合を想定すると、先に述べたように、大気は海洋の約 1,000 倍、すなわち約 40°C も上昇してしまうのだ (表 1 と 2)。いかに、海洋が吸収している熱量が莫大なものかわかるであろう。海洋における貯熱は上層 700 m 程度でほとんどのものが行われているが (Fig. 4)、太平洋においては海域平均して考えると上層約 100 m に貯熱が限定されているといわれている。

そこでまずは、天気や気候に大きな影響を及ぼしている海と大気のかかわりを中心に、さまざまな角度から海の役割考えてみよう。

### 1-2 海水の鉛直構造

四季のある場所では、夏は上から太陽が海水を温めるが、暖まった水は軽いので、暖かい水が海面付近を覆ってしまって、深いところまで暖まることはない。つまり太陽の上からの放射によって暖まるのは海面から 100~200 m までである。そして冬季に上層が冷やされて重くなり、対流が起こって鉛直混合するのである。Fig. 5 はこの水温の年変化の様子を鉛直的に表したものである。夏季に暖かい水が海面付近を覆い、冬季に鉛直方向に一様な水温になる、すなわち対流でかきまぜられる様子を表している。Fig. 6 はこの鉛直構造の変化によって植物プランクトンが海水

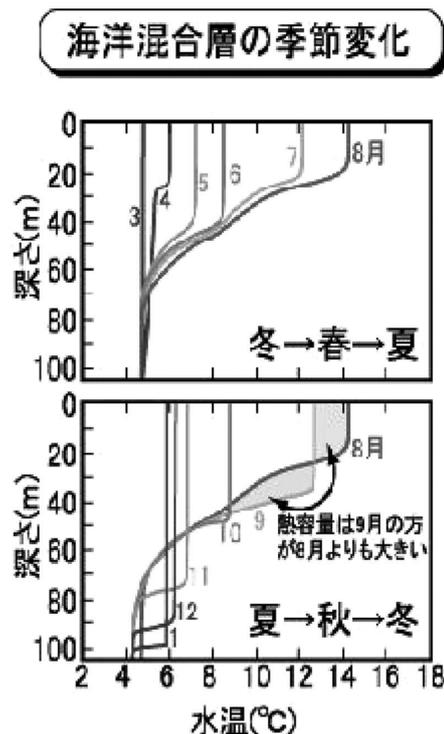


Fig. 5 Time dependent features of vertical profile of water temperature in Gulf of Alaska

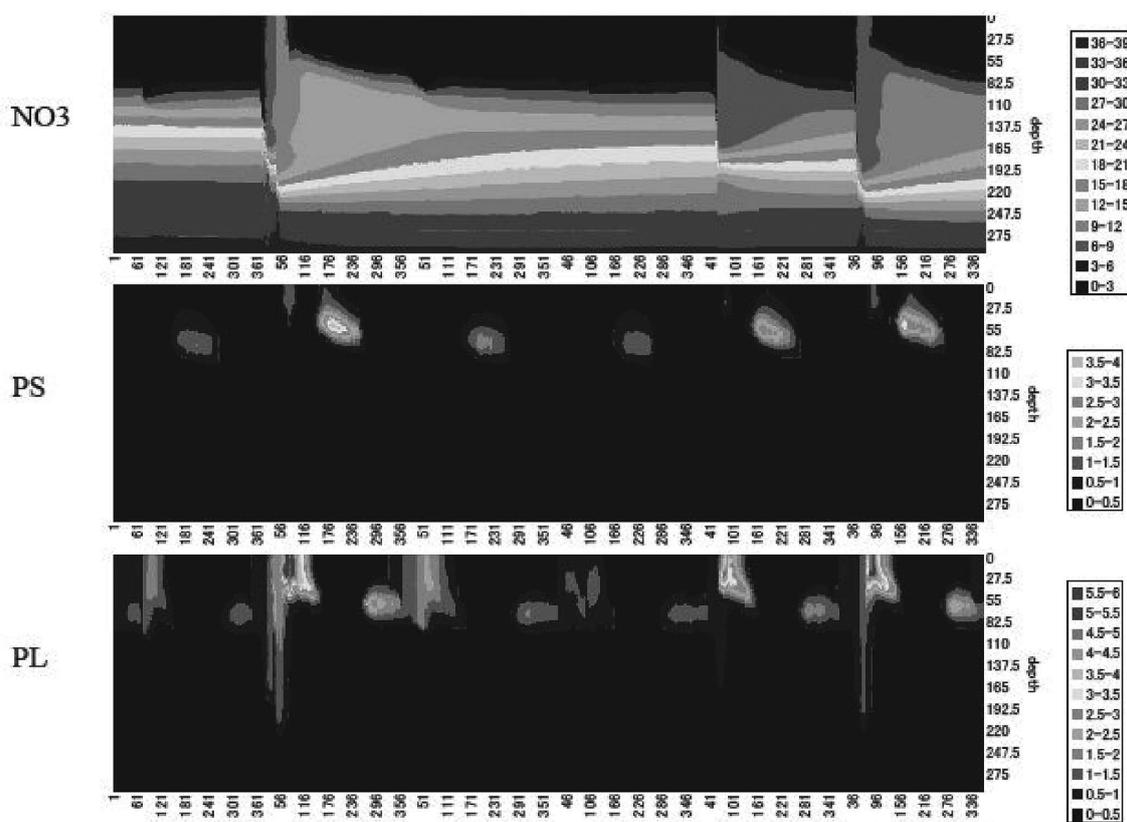


Fig. 6 Time dependent features of vertical distribution of nutrient and phytoplankton. PS is small phytoplankton and PL corresponds large phytoplankton, diatom. (Kishi et al., 2001)

に含まれている養分をどのように使って増えるか、を表している。陸の植物では、枯れた木の葉や動物の糞は、地面に落ちてそのまま森林に吸収されるが、海は光が届くのは表層 100~200 m 程度、プランクトンの死骸や魚の糞などはその場で利用されることはほとんどなく分解されながら沈んでいく。海の表層は、死んだ動植物が分解することによる養分が補給されないで、植物が育ちにくい。したがって対流が起こって深層から栄養分が補給されて初めて植物プランクトンは増えることができるのだ。温帯域では、春になると、水温があがり、太陽から受ける光の量が増えて、光合成に適する条件が整うので、冬季に鉛直混合によって下層から供給された養分を使って植物プランクトンが増殖する。熱帯域では冬季に鉛直混合しないので、光と水温が十分でも、ふつう植物プランクトンは表層には一年中きわめて少ない。

1-3 風で引きずられる海水

北緯 40 度付近を偏西風 (西風) が吹いている。そして北緯 20 度付近では東風 (貿易風) が吹いている。これらの風が海流を作る大事な役割も果たしている。世界の海の大規模な循環の様子を、模式的に Fig. 7 に示した。黒い矢印は海の表層の循環を表している。太平洋でも大西洋でも、海の西の端だけに強い流れがある。北太平洋の西の端の流れは黒潮、北大西洋は「湾流 (Gulf Stream)」と呼ばれている。このような海流はどうしてできるのか。表層の海水は、主にその上を吹く風によって動かされているのだ。貿易風と偏西風は、北太平洋、北大西洋の表層の海水を時計回りに吹き回しているのだが、地球が自転していることや地球が丸いことによって、強い流れはこれらの大洋の西側だけに限られて形成される。黒潮や湾流は海流の中でも特に強い流れであるが、秒速は 1~2 m, 人間が早歩きするくらいの速さである。低気圧が発達すると秒速 20 m 以上で風が吹くのは大違いである。これは水が空気より重いこと、海が深いことに大きく関係している。いくら空気が海面をこ

すっても、流れはそんなに速くならない。しかし 1 秒間に流れる水の量はナイアガラの滝の 5,000 倍ほどに上り、黒潮は熱帯から寒帯へ熱を運ぶ大きな役割を果たしている。そして北太平洋の水が、この表層循環に乗って北太平洋を一巡するのは、数年かかる。日本の南岸を流れる黒潮の水は、南の海から来るから温かい流れで、東北の東の海には、親潮と呼ばれる冷たい流れがある。海中はとても流れがゆっくりしているので、見ていても流れているのがなかなか分からない。それに黒潮や親潮が流れているところまで行ったことのある人も少ないだろう。しかし、黒潮や対馬海流が西から流れてくることは、遠く中国から日本の沿岸に中国語で書かれた空き缶や産業廃棄物が漂着することからも思いを馳せることができよう。

1-4 塩辛い大西洋と深層の海水

高緯度の寒いところの表層の水が、冷たい風によって冷やされて、その下方の水より密度が大きくなると、対流が起きて、表層の水が沈み込む。大規模にそのような沈み込みが起こっているところが、世界の海に 2 か所ある。1 つは、グリーンランドの東方、もう 1 つは南極大陸のウェデル海と呼ばれているところで、どちらも Fig. 7 の中に丸で囲んだ×で記してある。どうしてグリーンランドの沖で表層の水が沈み込むのに太平洋では深層まで沈み込まないか、というと太平洋は塩分が小さい (大西洋より太平洋の方が降水が多く、大きな河川も多いことが主な原因) から同じ温度まで冷やされても塩分の高い大西洋の海水の方が重くなるのだ。そして太平洋は北がベーリング海でほとんど閉ざされているが、大西洋は広く北極まで続いていることも大事だ。にわとりと卵の関係になるけれど、大西洋の海水がグリーンランド沖で沈み込むので、暖かい湾流は、沈み込みに引きずられて北の方まで流れることができる。よってヨーロッパは緯度が高いのに冬でも暖かい。湾流が北まで流れるから、熱帯地方の塩分の高い水がグリーンランド沖まで到達できるのだ。

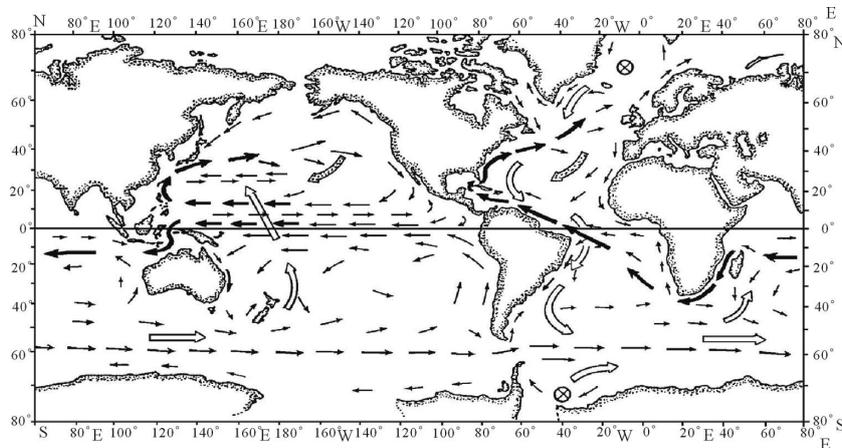


Fig. 7 Important sea surface currents of world ocean (Black arrows) and deep circulation (white arrows). ⊗ indicates the area where bottom water is formed.



Fig. 8 Trade and westerly of atmosphere and general circulation of sea water.

グリーンランド東方で沈み込んだ重い水は、深層まで沈み、Fig. 7に白い矢印で示したように、やはり大西洋の西の端あたりを通過して、赤道を越え、ウェデル海から沈んだ水とともに、南極の周りを東に流れる。その一部はインド洋にも入りこむが、多くはニュージーランドの東を通過して北上し、赤道を越えて北太平洋に流れ込む。北太平洋に達した水は、最初グリーンランド沖で沈みこんでから、2,000年の程度の時間を費やしていることが分かっている。表層の水の動きは速いけれど、この深層循環の水の動きは大変緩やかなのだ。Fig. 8は大気の流れと海洋大循環の様子を表した図である。

### 1-5 海水の温度上昇の予測

2007年の気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第4次報告書 (AR4) にも含まれている日本での温暖化予測は、気象研究所 (気象庁の研究所)、環境研究所 (環境省の研究所)、東京大学気候システム研究センター (現「大気海洋研究所」)、海洋研究開発機構 (文科省の研究所)、が行っている。詳細は省略するが、大気と海洋との相互作用、海洋と陸の植物の二酸化炭素の吸収などを全て含んだモデルで100年後までの気候、海洋の予測をしている。これによれば、2050年に日本付近の海面水温は現在よりも1~2°C、2100年には2~4°C上昇する。これによって海水が膨張して水位が上昇するので洪水を心配する人もいるけれど、これは数センチ~十数センチ程度なので、人間生活への影響は軽微であろう。日本で水位上昇の影響を深刻に受けそう

なのは、沿岸の汽水湖 (潮の満ち引きによって海水が入ったり出たりする湖: サロマ湖, 厚岸湖, 宍道湖など) である。湖に入ってくる海水の量が変化して塩分が変化するので生態系への影響が心配される。

これから、水温上昇に伴って魚がどう生活空間を変えるか、という話をするのであるが、あくまで、現在の延長で魚類が回遊したり、餌を食べたりすることを前提に話をする。魚が水温変化に適応したり (最近の研究では、たった4世代で水温変化に適応する魚が選択される、という魚種もあるらしい)、生息水深を変える (すでに述べたように海面付近は水温上昇が激しいが、少し潜れば水温はあまり変化しない) というようなことが起こるかもしれない。そのようなことは、実験室でも確かめることはできないし、過去の知見 (氷河期にどうだったか、など) もアテにならない。今までに経験していないことが起こるのであるから。

### 1-6 気候変動と魚の資源変動

漁業資源の枯渇が心配される中、最近では餌環境や漁業者の経済状態までを顧慮した「生態系に基づく資源管理 (Ecosystem-based Management)」ということが資源研究の中心となりつつある。このような生態系に基づく資源管理は、温暖化などの気候変化と漁業を含む人間活動に応答する海洋生態系保全を目指して、ノルウェー (バレンツ海)、アメリカ (ベーリング海・アラスカ湾) で研究プロジェクトが開始され (2006年現在)、太平洋を囲む国々ではカナダ、中国、ロシア、韓国も研究を立案中である。さらに、

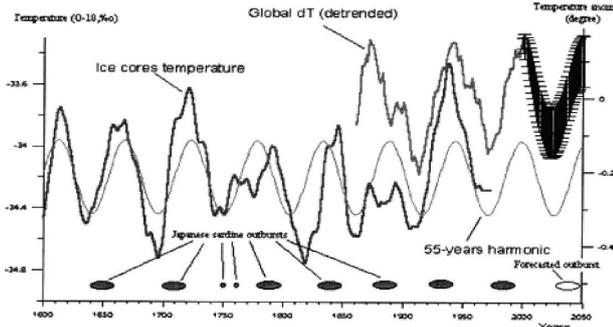


Fig. 9 Temperature anomaly based on ice core. Black circles indicate when pacific sardine dominated based on old literature in Japan. (Klyashtorin, L.B., 2001)

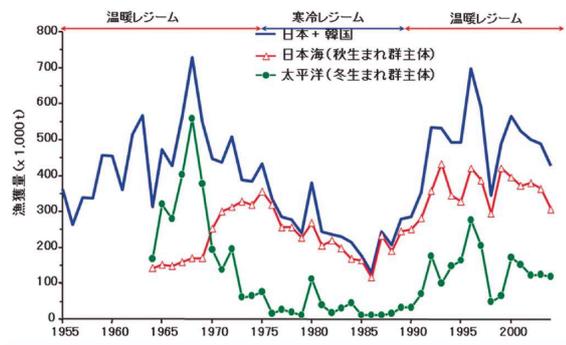


Fig. 10 Fisheries of common squid and water temperature of Japan Sea. (Sakurai et al. 2007)

GLOBEC (Global Ocean Ecosystem Dynamics という国際研究プロジェクト), 北大西洋海洋科学会議 (ICES) や北太平洋海洋科学機構 (PICES) (これらはどちらも政府間で決められた国際海洋研究機関である) でもこれらのプロジェクトの支援が進められている。日本においても 200 海里内の水産資源管理への適用が検討されている。海洋生態系の変遷と現状を的確に捉え、その将来予測のためには生態系に基づく水産資源管理のための多様なモデル解析が必要である (ここでいう「モデル」は必ずしも数学的なモデルとは限らない)。

Fig. 9 は Klyashtorin (2001) による過去 400 年の気温の変化と日本周辺のマイワシが多く獲れた時期を表している。30 年から 50 年の周期の海洋表層の水温変動がマイワシの増減、に密接に関係しているということである。Sakurai et al. (2000) によると、日本海の水温が温暖な年代はスルメイカの漁獲量が多いことがわかり、これは産卵場の水温構造の違いによっておこることが知られている (Fig. 10)。以上のように数十年スケールで起こっている気候変動と生物活動は密接に関係しているらしいことが最近の研究で急速にはっきり分かってきた。このことは地球温暖化によって海水温や気温が変化した場合、海の生物はそれに反応して変化するであろうことを示唆している。ただし、温暖化はじわじわと 50 年、100 年かけて一方的に起こり、こ

れに数十年周期の変動が乗っているのである (Fig. 17 参照)。そうすると、現在の寒冷年が将来の温暖年と同じ水温となる可能性がある。この場合、現在寒冷年で起こっている現象が将来に外挿されるという保証はなく、また、温暖年で起こる現象は、現在や過去の経験からは全く予想されないものである。

## 2 魚類と温暖化

### 2-1 イカ (スルメイカ)

イカ類が日本近海の卓越種となる時代が来るかもしれない。現に、夏から秋にかけて日本海では表層を泳ぐ魚介類の 80% をスルメイカが占めていると言われている。ダイオウイカのような巨大なイカを除いて、その多くの寿命は 1 年以内と短命である。例えば、アメリカ太平洋側に生息するアメリカオオアカイカ (1 年で体重 20 kg 以上に成長) では、その急激な資源増加と分布拡大がマグロ類資源の減少の一因と疑われている (CLITOP/GLOBEC ワークショップ, 2006 年 11 月, ホノルル)。1 年で食物連鎖の低次から高次捕食者に変身するイカ類は、海洋生態系にとって鍵となる種であるといわれている。これまで北海道大学の桜井泰憲教授は、寒冷-温暖レジームシフト (温暖化とは別に数十年周期で海水温度が 1°C から数度高くなったり低くなったりする現象) に応答するスルメイカ資源の変動のシナリオを提案し、寒冷期には、特に冬生まれ群が減少し、温暖期には秋・冬生まれ群ともに増加することを推定してきた (Sakurai et al., 2000; 2003; 桜井ら, 2007) (Fig. 10)。

桜井教授によるスルメイカの仮説によると、「スルメイカの産卵場を含む再生産 (魚が産卵し、漁獲対象の大きさにまで育つこと) が可能海域は、陸棚-陸棚斜面 (100-500 m) 域の表層水温 18-23°C (特に 19.5-23°C) で、水温が一定な混合層 (Fig. 5 参照) が海底にまで達しない海域」(桜井他, 2007; Miyanaga and Sakurai, 2006) である。ここでは、その実験・実証の背景は省略するが、この新仮説は、水槽内での産卵実験、人工授精による卵発生実験、ふ化幼生の各水温における遊泳行動実験、実際の産卵海域に出現するふ化幼生の分布水温と産卵個体が採集される陸棚-陸棚斜面の水深などの知見に基づいており、かなり限定された再生産に適した海洋条件を設定することができている。スルメイカにとっての好適な「再生産可能海域」が、季節的にどのように移動し、その範囲の拡大・縮小をモニタリングできれば、少なくとも翌年の資源水準が極端に変化することを予測できることになる。この仮説から、陸棚斜面域 (水深 100-500 m) 上で、衛星画像などによって 18-23°C (特に、19.5-23°C) の海表面水温 (SST) の海域を抽出すれば、それがふ化したスルメイカ幼生が最も生残できる海域、つまり「再生産海域」とすることができる。以上に示したような本種の再生産から回遊までの環境条件を加味して、温暖化したときにスルメイカがどのような行動を取るかを予測した。IPCC-A1B の温暖化シナリオによる地球フ

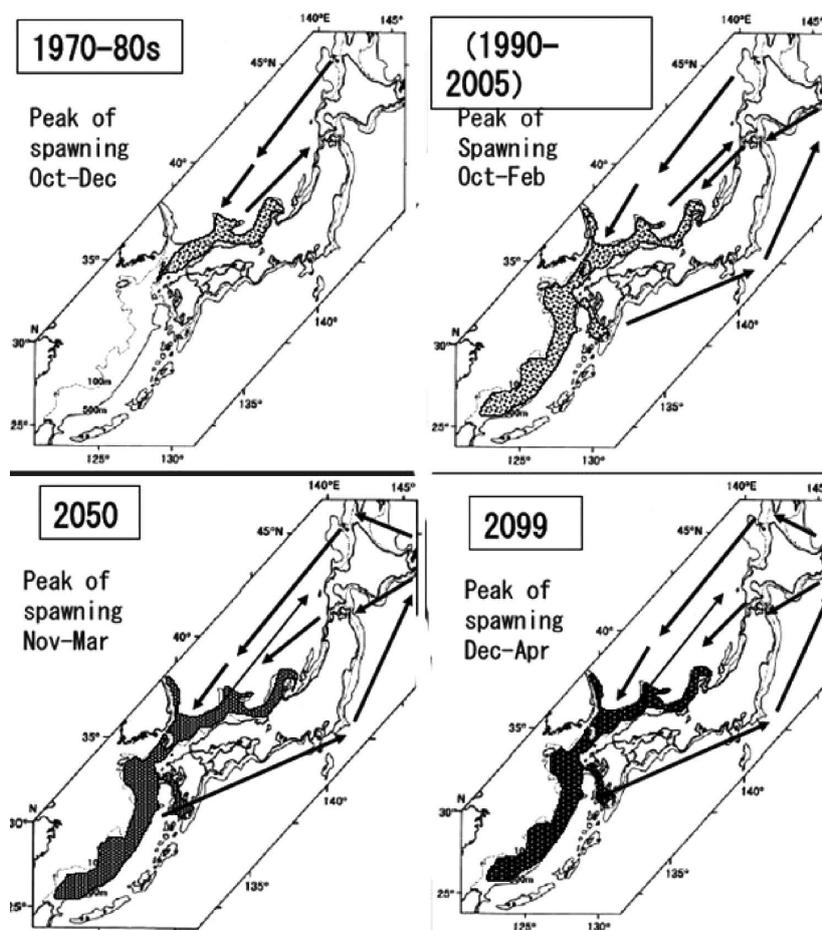


Fig. 11 Transition of common squid spawning area corresponding to global warming. (Sakurai et al. 2007)

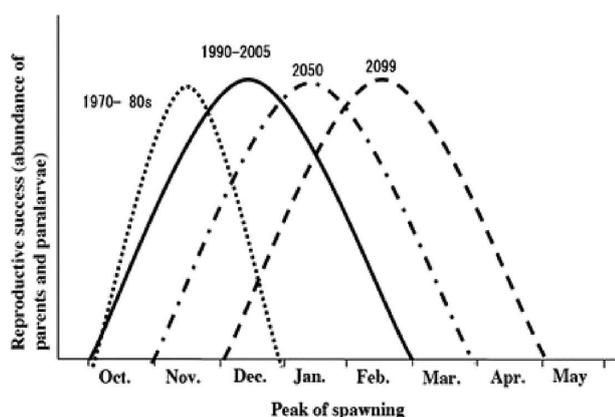


Fig. 12 Predicted spawning period of common squid.

ロンティア研究センター (河宮ら, 2007) の予測データを用いて (50年後に海面水温が日本周辺ではおよそ2°C上昇, 100年後にはおよそ4°C上昇すると考えられる), 索餌回遊 (さくじかいゆう=餌を求めて成長期にする回遊のこと) 時の低温限界水温 (海面水温が12°C) 域は, 2050年で緯度にして日本海では2度ずつ北上する。主な再生産海域は100年間を通して, 日本海から対馬海峡-東シナ海に形成

され, 温暖レジーム期と変わらないように見える (Fig. 11)。しかし, 産卵盛期は, 現状は10月-2月 (秋-冬に産卵する群が主体) であるが, 50年後は11月-3月, 100年後には12月-4月 (冬-春に産卵する群が主体) へと変化して行く (Fig. 12) と予想される。産卵期がずれて, 現在10月から2月の産卵期が, 2050年には11月から4月まで, 2100年には12月から5月までが産卵期となることが予想され, いずれは秋生まれから春生まれの区別がなくなり産卵場が東シナ海に限られるようになると予想される (桜井ら, 2007)。

## 2-2 スケソウ

同様に温暖化予測データをもとにスケソウの予測を行った。現在, すでに減少傾向にある三陸沖, ならびに日本海北部では2050年には資源が激減する。そして2100年には北海道太平洋ならびにオホーツク海側の資源以外は絶滅する可能性が高いことが予想される (Fig. 12)。

## 2-3 サケ

日本産サケ (*Oncorhynchus* spp.) は長期的にその成長に差があることが知られている (Fig. 13の上側の図)。海洋年

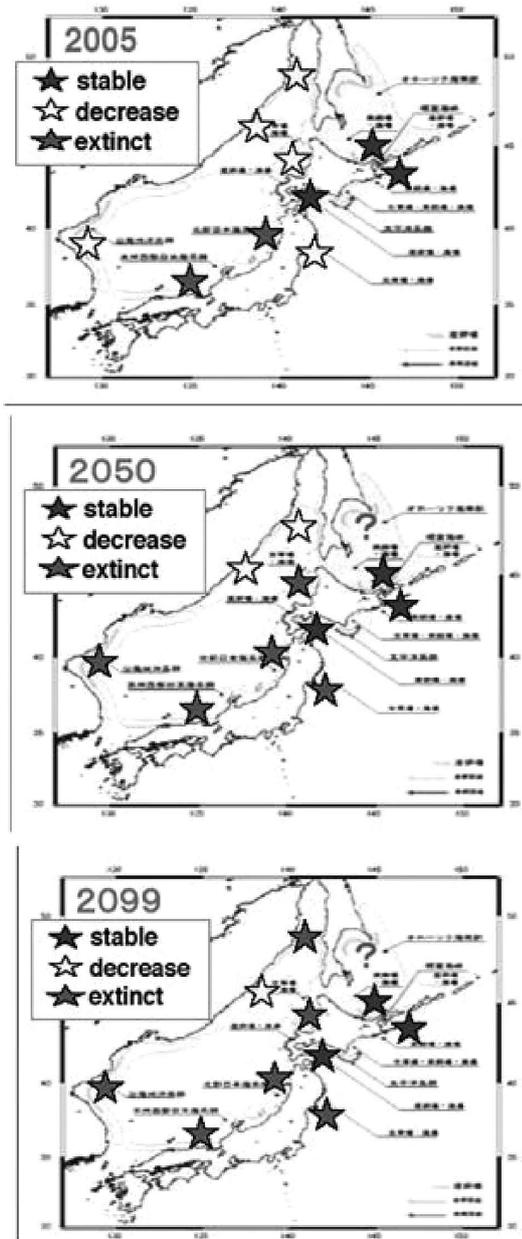


Fig. 13 Prediction of walleye pollack stock (Sakurai et al. 2007)

齢4才(放流して海で4回冬を越した鮭)のサケは1990年代まで体重が減少しているが90年後半になってからは一転して増加している。コンピュータを用いたモデル実験による解析 (Fig. 13の下側の図)でもその傾向を表すことができ(亀澤他, 2007) この成長の差は冬季に過ごすアラスカ湾の環境の差によることが指摘されている。イカのところでも述べた, IPCC-A1Bの温暖化シナリオによる予測データを用いて, 北海道系シロザケのオホーツク海における成長・生残動態とベーリング海における密度依存効果について検討を加えた。シロザケの最適水温は, 飼育実験結果(帰山, 1986)およびオホーツク海におけるシロザケ幼魚のCPUEとSSTとの関係(Ueno and Ishida, 1996)から

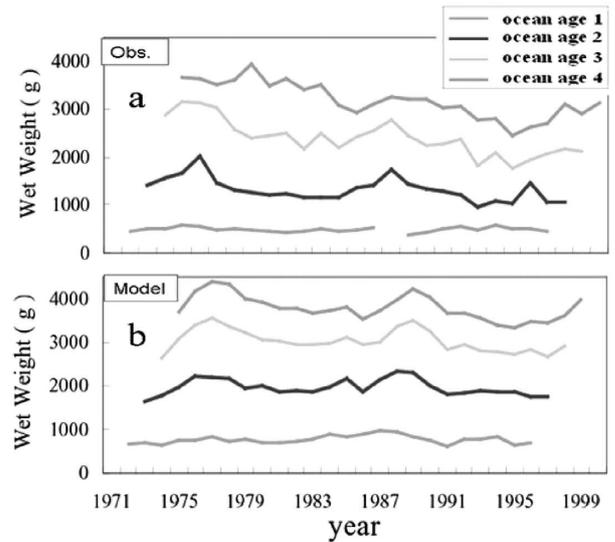


Fig. 14 Wet weight of chum salmon in the Bering Sea. (Kishi et al. 2010)

摂餌回遊期には8-12°Cとし, Fukuwaka (2007)に基づき越冬期には4-6°Cとする。その結果, 生残率に關与するオホーツク海では, 2050年8月には適水温エリアを消失し, 2099年にはほぼ壊滅状態になることが予測される。またベーリング海では2050年までは現在の分布域の約80%を確保できるものの, 2099年には壊滅状態となることが予測される (Fig. 14)。海洋生活2年目以降の越冬域であるアラスカ湾では, 2050年までは現状を維持できるものの, 2099年にはアメリカ系のシロザケとの間で競争(餌や居住区間をめぐって)が顕著になることが予想される。

### 3 モデルによる管理

以上は, 現在の知見に基づいて, 水温変化だけから予想される魚種の居住空間の変化を温暖化後について予想したものであるが, 海洋生態系の予想を現在の知識を用いて行うのはきわめて危険であると言わざるを得ない。物理現象の予測は「状態方程式」や「運動方程式」が正しい式なのである程度正しく予想される(もっとも, その境界条件である地球の地面の変化の様子を正しく予測することは難しいであろう)が, 生態系モデルは現在の経験に基づいて定式化されているので, 現在とは全く違う状態における変化を予測することは困難なのだ。しかし, 手をこまねいているわけにもいかないので, 過去の変化が何故起こったのかを考察し将来予測に役立てる試みは数多く行われており, そのことから演繹的に将来を予想しているのである。その研究をいくつか紹介しよう。生態系モデルという研究分野がある。これは, 海では, 例えば環境が変化したときにプランクトンが増えるか減るかを予測する際に, 生物の間の「喰う喰われる」の関係を数式で表すことである。ここで大切なのは, 「式」で表した生態系(ここでいう「生態

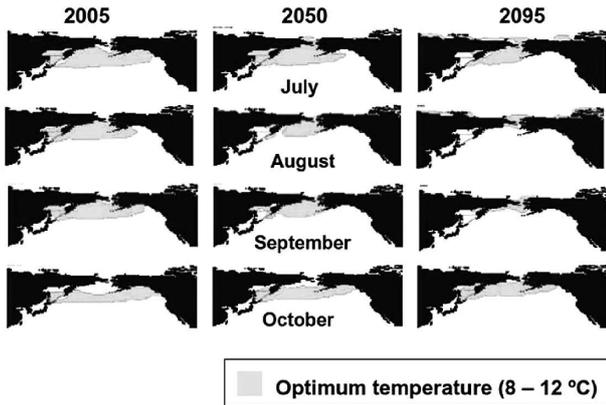


Fig. 15 Predicted living area of Japanese chum salmon (Kishi et al. 2010)

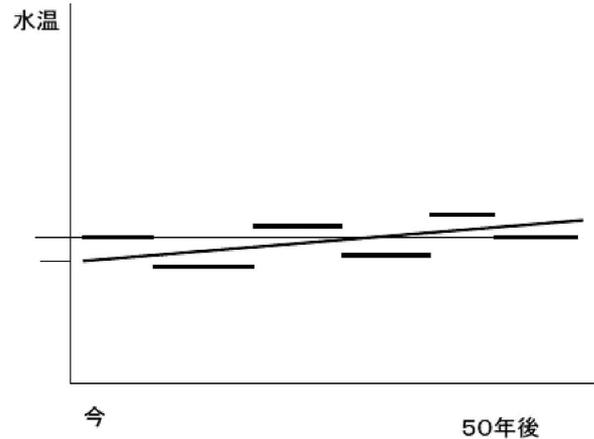


Fig. 17 Image of global warming and regime shift

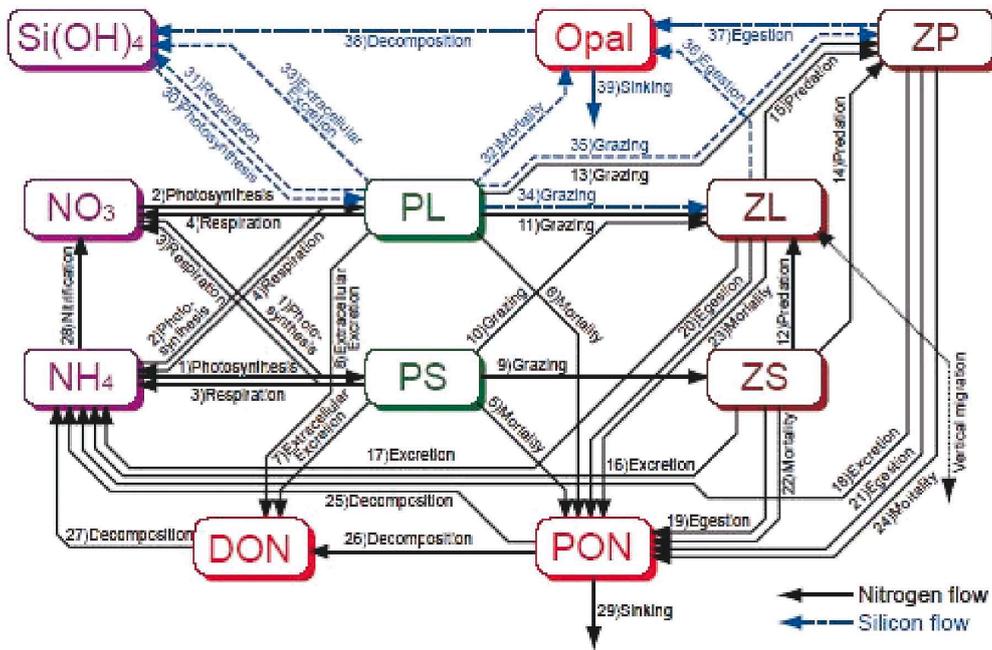


Fig. 16 Flow chart of NEMURO

系」とは生物どうしのつながりにとどまらず、それをとりまく気温などの環境をすべて含んで「生態系」とよぶことにする) が地球全体の生物のふるまいを隈無く網羅するかどうかではなく、我々が知りたい生物の変化が、その「式」で見当をつけられるかどうか、にある。Fig. 15はPICES (North Pacific Marine Science Organization=北太平洋海洋科学機構)で作られた「北太平洋の低次生産モデル NEMURO (North Pacific Ecosystem Model Used for Regional Oceanography) と呼ばれている「生態系モデル」である。実際の海で硝酸や珪酸のような栄養分は存在するけれども、「植物プランクトン」なんていう生物は存在しない (つまり陸上の生物を「木」「草」などと種類分けしているのと同じな訳で)。だからこれは実際の海洋の生態系を「正確に」記述したものではない。では、この「モデル」は

何のために作られたのか? このモデルを使って「ある特定の種類のプランクトンが増えるか減るか」などという予測をするつもりで作ったのではなく、太平洋全体の低次生産の動態を研究したい、物理環境の変化によって低次生物の生産がどう変わるかを考察したいという目的なので、こういったモデルができあがったのである。「気候変動が起きた場合に北太平洋の生物生産が増えるか減るか、そして、それに伴って魚が増えるか減るか」を予測するために使うモデルとして作成された (Kishi et al., 2007)。このモデルは名前を見て分かる通り、根室市で開かれた研究会で作成された。日本で行われた研究会で世界的に知られたモデルが作成されたのである。もっとも、その後、鉄による光合成制限が考慮されていない NEMURO では気候変動と生物生産を議論するのは片手落ちである、と考えられ

ている(ビタミンのように、多量には必要としないが存在しない)と成長が阻害される物質には、鉄の他にもマンガンやアルミニウムなど、金属の化合物が存在することが知られている)。Aita-N. et al. (2003, 2006) は NEMURO を物理の3次元 Global Model に取り込んで最近50年分にわたって計算をした。まず、NEMURO では植物プランクトンが珪藻 (Fig. 15 の PL) と小さい鞭毛藻など (PS) に分けられていること、copepod (ZL) が季節的に鉛直移動すること、が特徴で、珪藻が卓越する場所では動物プランクトンの鉛直移動が効果的に働いていて、鉛直移動していないときに比べて一次生産を大きくする効果があることが分かった。そして1975年のレジームシフト(このころ、地球規模で大きな気候変化があったこと、その影響は海にも及んでいることが知られている。これをレジームシフトと呼んでいる。)の前後で北太平洋の一次生産が大きく異なること、それは主に物理的要因で決まること、などを示している。

こういったモデルはある地域閉鎖系でかんがえられているが、生物のは海流によって輸送されるし、自発的な回避をする種類もおおい。海の流れが1週間後、2週間後にどうなるか、そして水温がどのように変化するか、が仮に分かったとして、海の中に住む生物がどこに何匹いるか、を予想するモデルを作るのはそう簡単ではない。イカを考えてみよう。イカは海水が流れれば一緒に流されると同時に自分で泳ぐ。イカがどこに向かって泳いでいくか? 自分で意志を持って泳ぐわけだから、「イカの意志」がどのように決定されるのかを、知らないとは多分予測ができない。そしてその意志が機械的に決定されるものならば(例えば「必ず水温が高い方に向かって泳ぐ」「必ずプランクトンが沢山いる方に向かって泳ぐ」のように)予測は可能なのであろうが、そうではないらしい。では、全く予想はできないか、というと、多分、そうではない。電車に乗ったとき、ドアに入ってどちらに行くか考えてみよう? これは利き足の関係で左に行く人の割合が多いことが統計的に分かっているらしい。正確な数字は知らないから、仮に右へ行く人の割合が40%左が60%としよう。100人いれば60人くらいは左へ行くということである。したがって私たちが作っているコンピュータの中の生態系のモデルというのは、このようなイカの個々の個体の事情は無視し、水温が高いほうへはこれこれの比率で移動するといった関係を仮定して?式を作って、あなるこなる、と予想しようとしている。例えばプランクトンが日光に当たって光合成をする、ということのを式に表すとすると、光が強くなればたくさん光合成をして酸素を出し、そして養分を作って増えていく、という過程を定量化する。プランクトン1個1個はもしかしたら魚に食われるとか、船の縁についてしまうとか、そんな事件に巻き込まれるかもしれないのであるが、そんなことは確率の問題として、例えば「全体の10%が1日に死んでしまう」というような関係を式に記述するわけである。

そのようにして、地球が温暖化すればどうなるか? を予測する試みは今まさに進んでいる。いくつかの説を紹介したい。(1) 温暖化すると季節風が強くなると、気象学者が予測している。そうすると、冬季に北太平洋の海洋表層で水がよくまざるようになる。また、冬季の北太平洋の低気圧が強いと北太平洋では深層の養分に富んだ水が深層から上層に上昇してくる割合が多くなる。そこで、季節風が強くなることは北太平洋の表層の養分を豊富にするセンスに働くことになる。また水温が上昇すれば植物プランクトンは光合成を盛んにするようになる。これは春になって日光が十分に当たり、水温が暖かくなってきたときに植物プランクトンが増える(春季増殖といいます)割合が大きくなることを意味している (Hashioka and Yamanaka, 2006)。(2) カリフォルニア沖の「沿岸湧昇」も強くなることが予想されている。これもプランクトンを増やし浮き魚を増やすかもしれない。(3) 暖冬になれば冬季に海面が冷えにくくなる。この「冬季混合」が暖冬になると小さくなる。小さくなると養分が海面に補給されにくくなるので植物プランクトンの春季増殖が小さくなる (Hashioka and Yamanaka, 2006)。すると餌が少なくなって浮き魚も生残率が悪くなるかもしれない。(4) 北西の季節風が強い年は太平洋マイワシの卵稚仔の生残が悪いことも知られている (Kasai et al., 1992) で、季節風が強くなればマイワシ資源は減るかもしれない。でも、マイワシが減ればカタクチが増えることもしられている?! (5) 水温が高くなればサケの生息域が狭まってサケの資源量が減るのではないかと2章で述べた。水温の温暖化の速度はサケの適応のスピードを超えているかどうか分からない。サケに限らず、海洋の生物が、鍋の中のカエルと同じように適応する可能性があれば (Fig. 12 のように温暖化の上に数十年周期の変動が乗っている) 予測は不可能に近い。ただ、場合によってはうそかもしれないけれども、やってみる、言ってみることも必要である。ただし、自分で自分のクビを締めることにならないように自省しなくては。

## 引用文献

- Aita-Noguchi, M., Yamanaka, Y. and Kishi, M.J. (2003) Effect of ontogenetic vertical migration of zooplankton on the results of NEMURO embedded in a general circulation model. *Fish. Oceanogr.*, **12**, 284-290.
- Aita-Noguchi, M., Yamanaka, Y. and Kishi, M.J. (2007) Inter-decadal variation of the lower trophic ecosystem in the Northern Pacific between 1948 and 2002, in a 3-D implementation of the NEMURO model. *Ecol. Model.*, **202**, 81-91.
- Froese, R. and Pauly, D. (eds.) (2003) Fish Base 2000. World Wide Web electronic publication. <http://www.fishbase.org/>.
- Fukuwaka, M., Sato, S., Takahashi, S., Onuma, T.,

- Sakai, O., Tanimata, N., Makino, K., Davis, N.D., Volkov, A.F., Seong, K.B. and Moss, J.H. (2007) Winter distribution of chum salmon related to environmental variables in the North Pacific. *North Pacific Anadromous Fish Comm. Tech. Rep.*, **7**, 29–30.
- Kasai, A., Kishi, M.J. and Sugimoto, T. (1992) Modeling the transport and survival of Japanese sardine larvae in and around the Kuroshio current. *Fish. Oceanogr.*, **1**, 1–10.
- 河宮未知生・羽角博康・坂本 天・吉川知里 (2007) 気候モデルによる地球温暖化時の海洋環境予測. 月刊海洋, **39**, 285–290.
- Kishi, M.J., Eslinger, D.L., Kashiwai, M., Megrey, B.A., Ware, D.M., Werner, F.E., Aita, M.N., Azumaya, T., Fujii, M., Hashimoto, S., Huang, D., Iizumi, H., Ishida, Y., Kang, S., Kantakov, G.A., Kiml, H., Komatsu, K., Navrotsky, V.V., Smith, S.L., Tadokoro, K., Tsuda, A., Yamamura, O., Yamanaka, Y., Yokouchi, K., Yoshie, N., Zhang, J., Zuenko, Y.I. and Zvansky, V.I. (2007) NEMURO—a lower trophic level model for the North Pacific marine ecosystem. *Ecol. Model.*, **202**, 12–25.
- Kishi, M.J., Kaeriyama, M., Ueno, H., Kamezawa, Y. (2010) The effect of climate change on the growth of chum salmon (*Oncorhynchus Keta*) using a bioenergetics model coupled with a three-dimensional lower trophic ecosystem model (NEMURO). *Deep-Sea Res.*, II, **57**, 1257–1265.
- Klyashtorin, L.B. (2001) Cyclic change of climate and main commercial species production in the Pacific. Report of a GLOBEC–SPACC/APN Workshop on the Causes and Consequences of Climate-induced Changes in Pelagic Fish Productivity in East Asia. *GLOBEC Report*, **15**, 24–26.
- Levitus, S., Antonov, J. and Boyer, T. (2005) Warming of the world ocean, 1955–2003. *Geophysical Res. Letters*, **32**, L02604, doi:10.1029/2004GL021592.
- Miyanaga, S. and Sakurai, Y. (2006) Effect of temperature on the activity and metabolism of Japanese common squid paralarvae. Program and abstract book of “Cephalopod life cycles”. CIAC2006, 87pp, Hobart, Australia.
- Sakurai, Y., Kiyofuji, H., Saitoh, S., Goto, T. and Hiyama, Y. (2000) Changes in inferred spawning areas of *Todarodes pacificus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) due to changing environmental conditions. *ICES J. Mar. Sci.*, **57**, 24–30.
- Sakurai, Y., Bower, J.R. and Ikeda, Y. (2003) Reproductive characteristics of the ommastrephid squid *Todarodes pacificus*. *Fisken og Havet.*, **12**, 105–115.
- 桜井泰憲・岸 道郎・中島一歩 (2007) スケトウダラ, スルメイカ. 月刊海洋, **39**, 323–330.
- Ueno, Y. and Ishida, Y. (1996) Summer distribution and migration routes of juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*) originating from rivers in Japan. *Bull. Nat. Res. Far Fish.*, **33**, 139–147.