

寿司が消える日

伊藤進一（東京大学大気海洋研究所）

1. はじめに（言い訳）

「寿司が消える日」、いつその寿司ネタが獲れなくなってしまうのか？ そんな問いに正確に答えることなんかできるはずがない。無謀な企画と思えるが、しかしこの問題を考えることで、私たちが何を知っていて、何を知らないのか、いや、むしろどれくらい海洋生物のことをわかっていないのか、そしてそんなにわからないだらけの海洋生物を美味しく頂いているにもかかわらず、その生活環境まで脅かしている人間の傲慢さを反省し、地球温暖化問題に真摯に向き合うきっかけにするべきだと考え直し、この難題に取り組むことにした。

さて、地球温暖化による海洋生態系への影響については、水温上昇、酸性化、貧酸素化など、様々な懸念が提唱されており、実際に生息分布域の移動（基本的には低水温を目指した極方向への移動、例えば Poloczanska et al., 2013）や生活史の季節性の変化（産卵期が早まるなど、例えば Wassmann et al., 2011）などが報告されている。しかしながら、日本周辺海域においては、暖流である黒潮と寒流である親潮が流れ込み、南北の水温勾配が世界的にみても強い海域であるため、海洋生物の極方向への大規模な移動は確認されていない。それでも、地道な定点観測によって温暖種が北上している例は示されている（Masuda, 2007）。

これら海洋生物の地球温暖化に対する応答については、様々な室内実験および野外観測結果に基づき、現在の海洋生物が持つ適水温帯など環境依存性を用いて、将来の影響評価が行われている（例えば桑原ほか, 2006）。また、室内実験や野外観測の知見を数値モデル化し、より mechanistic に将来の影響評価を行った例もある（例えば Ito et al, 2013）。しかし、これらの影響評価では、現在の海洋生物が持つ特性が保持されるという大胆な仮定のもとに影響評価を行っている。実際には、長期間同じ環境に晒されると耐性を示す生物も多く、また世代交代の中で曝露されている環境に耐性のある遺伝子が選抜されていく可能性もある。実際にアラスカにおけるカラフトマス（*Oncorhynchus gorbuscha*）の産卵回帰の時期が 40 年前と比較して 2010 年代には 2 週間早くなった現象については、後期産卵群の割合が減少しており、環境の影響を受けた選抜過程を通して、遺伝子レベルの小進化が生じていることが指摘されている（Kovach et al., 2012）。これらの耐性の向上や選抜過程については、モデル化できるだけの情報が足りておらず、同様に生物種間の競合などについてもモデル化が著しく遅れている状況にある。

さらに、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の評価報告書でも報告されているように、将来の温暖化気体の排出シナリオや気候モデルにも不確実性があり、これらの情報に基づいて行う海洋生物や海洋生態系の応答予測にも不確実性が多く含まれることは否めない。従って、現段階で、地球温暖化に対する海洋生物や海洋生態系の応答を正確に示すことは不

可能であるが、最初に述べたように、思考実験として、どんな寿司ネタが影響を受けそうか、これから考えてみたいと思う。

2. 地球温暖化の影響要素

まもなく IPCC の Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC) が発刊されるため、多くの情報はこの報告書によって更新される可能性が高いが、2013 年から 2014 年に発刊された IPCC の第 5 次評価報告書 (IPCC-AR5) に基づいて、海洋生態系に影響を及ぼしそうな海洋環境の変化を整理してみよう。なお、詳しくは IPCC-AR5 や「海の温暖化」(日本海洋学会, 2017) を参考にされたい。

2. 1. 海水温の上昇

地球上の海洋全体 (これ以降「全球」と呼ぶ) で平均した海面水温は、1880 年から 2012 年の間で、 $0.51^{\circ}\text{C}/100$ 年の上昇率を示したと推測されている (Rayner et al., 2016)。一方、日本近海での海面水温の上昇を気象庁がまとめている (http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html) が、東シナ海、日本海、黒潮域で $1.0^{\circ}\text{C}/100$ 年を超える水温上昇率が観測されており、昇温が激しい海域が存在する。今後も昇温は続くことが予想されており、

一方、亜表層 (表層より下層の海域) に目を向けると必ずしも昇温傾向を示す領域ばかりではなく、領域によっては降温傾向を示す領域も存在するが、全球平均すると少なくとも 700m までは昇温しているという結果が示されている (IPCC-AR5)。日本近海に目を向けると、降温傾向を示す領域も少なくない。

将来の予測としては、前述の通りシナリオに依存するが、21 世紀末までに海面水温で 1°C から 3°C の上昇、亜表層で 0.5°C から 1.5°C の水温上昇が 1000m の深さまで達すると報告されており (IPCC-AR5)、ある海洋生物に注目するとその分布域が高緯度方向へと移動することが予想される。

2. 2. 海面水位の上昇

1901~2010 年の間に 1 年あたり 1.7mm の割合で、地球全域で平均した海面水位が上昇したと推定されている (IPCC-AR5)。海面高度計衛星によって、全球の海面水位の観測が可能になった 1993 年以降については、1 年あたり 3.2mm の割合で、海面水位が上昇していることが示されており、近年上昇率が加速していることが指摘されている。20 世紀以降の海面水位上昇は、陸氷の融解と海水の熱膨張によって主に引き起こされていると推定されている。

将来の予測としては、前述の通りシナリオに依存するが、21 世紀末までに地球全域で平均した海面水位が 0.26 から 0.82m 上昇すると報告されている (IPCC-AR5)。日本近海においては、特に黒潮の南側および日本海における海面水位の上昇が顕著になると報告されて

おり、海藻、海草、造礁サンゴなどは水位上昇に伴う太陽光の減少を補うために分布域の陸側への移動を余儀なくされることが予想される。

2. 3. 成層の強化による栄養塩供給の減少

沿岸域では人間活動によって硝酸塩をはじめとする栄養塩の過剰供給が問題となっている地域が地球規模で拡大している。一方で、地球温暖化による海洋表層の高温化に伴い、海洋表層と下層との密度差が大きくなり、成層が強化されていることが指摘されている。その結果、光合成によって栄養塩の減少が生じていない下層の海水と、光合成によって常に栄養塩消費が進んでいる表層の海水が混合し難くなっており、表層への栄養塩供給が減少していることが、いくつかの海域で指摘されている（Watanabe et al., 2005 など）。衛星観測によっても、植物プランクトンによる基礎生産が低い貧栄養海域が拡大していることが報告されている（Polovina et al., 2008 など）。しかし、衛星観測の期間は短く、地球温暖化の影響と断定するには至っていない。

将来の予測としては、前述の通りシナリオに依存するが、成層化がより進み、表層への栄養塩供給が減少することが推測されており、亜熱帯域では植物プランクトンの生産が減少することが予想されているが、亜寒帯以北については植物プランクトンの生産の増減はモデル間格差が大きく不確実性が高い（Doney, 2010 など）。亜熱帯域のように植物プランクトンの生産が減少すると、動物プランクトン、小型魚類、大型魚類と上位の栄養段階の海洋生物にも影響が生じることが予想される。

2. 4. 海洋循環の変化

全球の海面水位の観測が可能になった 1993 年以降については、北太平洋や南太平洋で亜熱帯循環（黒潮や東オーストラリア海流）が強化されていることが観測されている（IPCC-AR5）。しかし、太平洋などでは 10 年規模の長周期変動が卓越しており、20 年程度のデータから地球温暖化による影響と長周期自然変動との区別をすることは困難である。

より長期の水温データをもとに推定した結果では、黒潮などの西岸境界流（大洋の西側にできる強い流れ）域で水温上昇が大きいことが報告されている（Wu et al., 2012 など）。黒潮の場合は、黒潮の流軸が北上することで水温上昇が顕著になっていることが指摘されている。

将来の予測としては、前述の通りシナリオに依存するだけでなく、モデル間での格差も大きく、系統だった予想を示すことができない。しかし、地球温暖化が進行しても黒潮などの強い海流は存在し、産卵された卵仔稚は海流によって下流に流されるため、温暖化によって種の移動する方向と海流が逆方向になる場合は、生物の移動が困難になることが予想される（Kumagai et al., 2018 など）。

2. 5. 海洋酸性化

海水はもともと弱アルカリ性であるが、人為起源の二酸化炭素が海水に吸収されることにより、アルカリ性が弱くなる。この現象が海洋酸性化と呼ばれている。よく知られている海洋酸性化の悪影響として、炭酸カルシウムの結晶を作り難くなり、より多くのエネルギーを殻の形成に要するため、炭酸カルシウムの殻を持つ生物の成長が鈍化することがあげられる。

海洋酸性化が顕著に進んでいるのは、極域、亜寒帯域や大洋の東岸にあたる大規模な湧昇（下層から表層へ海水が運ばれる現象）が生じている海域である。将来の予測においても、極域、亜寒帯海域などで、海洋酸性化が顕著になると予想されており、21世紀末には、海洋の表層の pH は現在約 8.1 から 0.13~0.42 ほど低下すると予想されている（IPCC-AR5）。

海洋酸性化は、直接的に炭酸カルシウムの結晶を殻とする生物に影響するだけでなく、温暖化による高温と複合的にサンゴ礁の白化現象に働き、様々な生物の生息域の消失にも影響を及ぼす可能性がある。

2. 6. 貧酸素化

2. 3 で述べた成層の強化によって、表層と下層の海水の混合が減少すると、酸素が下層に供給され難くなり、下層の貧酸素化が進む。さらに海水温上昇によって、酸素が海水に溶解する濃度も低下する。実際に、1960年から2010年の50年間に、水深300mの亜表層で、溶存酸素濃度（海水に溶解している酸素の濃度）が、1年あたり $0.063 \mu \text{mol kg}^{-1}$ の割合で減少していることが示されている（IPCC-AR5）。しかし、海域によっては溶存酸素濃度が増加している海域もあり、増減は空間的に一様ではない。

また、沿岸域も含め $60 \mu \text{mol kg}^{-1}$ 以下の貧酸素水塊の出現海域が広がっていることが報告されている（Rabalais et al., 2010 など）。さらに沿岸域では、季節的に発生する貧酸素水塊の存在が問題となっている。

将来の予測としては、今後のも海水の溶存酸素量が減少傾向にあることが予想されているが、前述の通りシナリオに依存するだけでなく、モデル間での格差も大きく、貧酸素水塊の総量や、海水の溶存酸素濃度の値そのものについては、不確実性が大きいのが現状である（IPCC-AR5）。将来、溶存酸素濃度が低下し、特に貧酸素水塊が出現する海域が増えると、酸素を必要とする生物が生息できる海域が狭められる危険性がある。

2. 7. 極端現象

1950年以降、大気中に存在する水蒸気量が増加し、集中豪雨などの極端現象が多発していることが報告されているが、地球温暖化との関連性は中程度とされている（IPCC-AR5）。極端現象の中には海洋熱波と呼ばれる異常高水温の発生も含まれており、1925年から2016年の間に海洋熱波の頻度が34%、期間が17%増加したことが報告されている（Oliver et al., 2018 など）。

将来の予測としては、極端な豪雨の発生が増えることが予想されている（IPCC-AR5）が、

海洋熱波についての評価は正式には行われていない。極端な豪雨が増えると、大量の土砂が沿岸域に流入し、多くの海洋生物の生息環境に影響を及ぼすことが予想される。また、海洋熱波による海洋生物への影響は、多くの海域で報告されており、影響を受けた海洋生態系の回復には長い時間がかかることが懸念される。

2. 8. 潮汐

前述した通り、海面水位が上昇し、成層が強化されると、潮汐の振幅（満潮と干潮の水位差）にも影響が現れる可能性がある。実際に、過去の潮汐の振幅を調べた研究では、潮汐振幅の増加傾向を報告しているものがある（Jay, 2009 など）。

将来予測に関しては、IPCC-AR5 では評価が行われていないが、潮汐が変化することで、湾内と湾外の海水交換や湾内の流れ、潮汐エネルギーをもとにした上下の海水の混合過程、などが変化し、海洋生物にも影響が及ぶ可能性がある。

3. 影響を受けそうな寿司ネタ

前節のような環境変化を受けて影響を受けそうな寿司ネタを想像してみることにする。ここで想像という表現を用いているのは、これまで発表されてきた科学論文や報告書をもとに考察しているとは言え、正確な評価がまだ不可能なためである。そのことを留意して、以下の文章を読みたい。

3. 1. さけといくら

シロザケの成長適水温として夏季の 8~12°C、冬季の越冬水温 4~6°C という情報に基づき、将来のサケの分布域を評価した結果では、サケの分布が北上し、21 世紀末には日本周辺への回遊が困難になることが予想されている（Kaeriyama et al., 2014）。この予想が本当であれば、日本産のシロザケの入手は困難になることが予想され、国産のさけ、いくらといった寿司ネタが 21 世紀末頃に危機に瀕する危険性がある。

しかしその一方で、現在よりも 5°C 程度水温が高かったと推測されている縄文時代にもシロザケの歯が東北地方の遺跡から発掘されており、水温が高い時代にもシロザケが日本の河川を遡上できていた可能性がある（Ishida et al., 2009）。近年の小型ロガーの開発によって魚類の行動を追跡することが可能となってきたが、シロザケが水深 200m 程度まで潜って暖水を避けながら沿岸域に回遊してくる様子も観測されており（Kitagawa et al., 2016）、縄文時代には分布深度を変化させていた可能性もある。したがって、不確実性が多く残されるころではあるが、水温の影響を強く受ける可能性がある魚種としてシロザケをあげるができる。

3. 2. ひらめ

低水温期（2 月）には 5 °C 以上、高水温期（8 月）には 27.5 °C 以下（ただしヒラメは約

30m に分布するため海面水温では 29℃と仮定) に分布するという情報をもとに評価した結果では、低水温期の分布北限にあたる 5℃等温線の位置は将来も大きくは変動しないのに対し、高水温期の分布南限にあたる 29℃等温線は大きく変化し、現在は分布南限が、鹿児島県付近にあるのに対し、21 世紀中ごろには近畿地方に、21 世紀末には関東北部に移動することが示されている (桑原ほか, 2006)。この情報に基づくと、21 世紀中ごろには瀬戸内海でヒラメの成育が困難になり、21 世紀末には東京湾でもヒラメの成育が厳しい状況になる。

ヒラメの場合は沿岸域に生息しており、底生性のため、生息水深を深くすることで適水温帯へ移動することも可能である。北海では、底生性魚類が生息水深を変化させている観測例もある (Perry et al., 2005)。ここで問題になるのが、貧酸素水塊の分布である。特に内湾域では、冬季に冷却された水塊が湾内の底層に溜まり貧酸素水塊を形成する。すなわち、水温調整をするために底層へと移動しようとしても貧酸素水塊であるために移動できない状況が発生する危険性がある。

ヒラメについては、もう一つ大きな不安要素がある。吸血性単生類ネオヘテロボツリウム・ヒラメの寄生における貧血の発生である。この寄生虫は高水温で増殖することが知られており (良永, 2017)、環境ストレスに加えて寄生虫によるストレスが増えることも危惧される。

3. 3. まだい

マダイの生息水温についても、桑原ほか (2006) によればヒラメとほぼ同様のため、マダイについても同様の影響が考えられ、21 世紀中ごろには瀬戸内海でヒラメの成育が困難になり、21 世紀末には東京湾でもマダイの成育が厳しい状況になると評価される。

3. 4. あわび

桑原ほか (2006) によればエゾアワビやクロアワビも成貝の高水温期 (8 月) の限界水温が 28℃、稚貝においてはさらに低く 25℃、24℃のため、ヒラメ、マダイよりも早く影響がでることが推定される。さらには、アワビが生息地とする藻場を構成する海藻類においても同様な水温帯を適水温とするため、アワビの場合には、水温の不適と生息地の消滅が同時に起こることが予想される。このため、深刻な影響が危惧される。

さらに考慮すべき内容は、海洋酸性化の影響によって、アワビの幼生が貝殻の形成を行うために現在よりもより多くのエネルギーを必要とする可能性が高いことである。21 世紀末の状況で海洋酸性化の影響がどれほど深刻に影響を及ぼすのか不明な点が多いが、留意すべき内容である。

3. 5. うに

キタムラサキウニについても、桑原ほか (2006) によれば高水温期 (8 月) の限界水温が 25℃と、アワビとほぼ同じため、同様の危険性があることが推測される。ウニにおいては、

ウニが餌料とする海藻類も同様な水温帯を適水温とするため、ウニの場合には、水温の不適と餌料の欠乏が同時に起こることが予想される。このため、深刻な影響が危惧される。

アワビ同様、ウニについても、海洋酸性化の影響が幼生の殻形成に影響を及ぼす可能性が高い。海洋酸性化の影響は、深層からの湧昇が存在する亜寒帯域で深刻となることが予想されているため、ウニについては、より海洋酸性化の影響が大きいことが予想される。

3. 6. ほたて

ホタテガイについては、山本（1964）によれば 23℃を越えると生理的に障害がおこることが知られている。また、このような高温環境下で波浪などによって貝同士がぶつかり、傷をおうと、治癒しないことが確認されている。養殖環境下において、これらの影響を軽減するためには、ホタテガイを垂下する層を深い層へ変える必要があるが、前述の通り、貧酸素水塊の存在のために、使用できる層に限界がある。

アワビ、ウニと同様、ホタテガイについても、海洋酸性化の影響が幼生の殻形成に影響を及ぼす可能性が高い。

3. 7. かに

桑原ほか（2006）によればズワイガニの高水温期（8月）の限界水温が 17℃とされている。ただしズワイガニの場合は深い水深に生息するため、水温の影響は海面付近に生息する生物に比較すると大きくはないと考えられる。

しかしながら、表層が暖かくなることによって成層が強くなり、亜表層の溶存酸素濃度が低下する影響によって生息水深が限定される恐れがある。また、海洋酸性化の影響により殻を作るエネルギーが現在よりも多く必要となる危険性もある。これらのことを加味すると、桑原ほか（2006）で予想した影響よりも深刻な事態も考えられる。

3. 8. シャコ

児玉ほか（2003）によれば、東京湾の横浜市漁業協同組合柴支所のシャコの資源指数は、北風が強いほど、水温が高いほど、河川流量が多いほど低くなる傾向を示す。メカニズムは未だ不明な点が多いが、風と河川流量についてはシャコの幼生を沖向きに輸送してしまうためと推測される。また、シャコ幼生は 15psu よりも低塩分な環境に対し耐性が低いことが示されている。地球温暖化によって、極端降雨の頻度が高くなることが予想されており、短期的かつ大規模な出水により、シャコの湾内への残留確率が低くなることが危惧される。

3. 9. いかなご

ご存知の通り、イカナゴは、餌料が不足する夏季に、砂の中で夏眠を行い、エネルギーを制御することで越夏をする。伊勢湾の研究例では、低層水温が 21℃前後に達する 6～7 月から 14℃を下回る 12 月頃までの約半年間に渡り夏眠をする。夏眠前に栄養蓄積を十分に行わ

ないと、冬季に産卵ができないことが示されている（山田,2011）。地球温暖化によって、海水温が上昇すると夏眠の期間が増え、夏眠の開始も早くなることから十分な餌料を確保できずに再生産に悪影響が発生することが考えられる。

また、イカナゴの場合、底質が比較的粗い砂泥でないと生息できないことから、水温変化に対する分布域の移動が底質によって制限されてしまう。この意味で、環境変動に対して脆弱性を示すことが危惧される。

4. あまり根拠のない、影響が現れそうな時期の予想

上記の議論をもとに、影響が顕在化する寿司ネタの順序を予想すると以下のようなのではないと思われる。しかしながら、この予想については、確信は持てない。

21世紀中頃から： いかなご、しゃこ

21世紀中頃から21世紀末にかけて： いくら、さけ、ほたて、うに、あわび

21世紀末以降： ひらめ、まだい、ずわいがに

5. 最後に

今回、影響が顕在化しそうな寿司ネタを考えてみたが、そこで見えてきたのは、やはり知識の不足である。人類が食料として利用している馴染みの深い海洋生物においてさえ、その基礎的な生物的情報を十分に理解できていない。今後、進行する地球温暖化の影響下においては、これまで以上に海洋生物資源の適切な管理が求められる。適切な管理を行うためには、その海洋生物の特性を十分に把握しておく必要があり、今後も継続した基礎研究の推進が必要と考えられる。

また、地球温暖化が進行する中で、どのような変化が海洋生物に起きているのか、海洋生物を取り巻く環境要素とともに継続的にモニタリングし、その変化シグナルを早期に検出していくことが重要である。そして、基礎研究とモニタリングから得られる情報をもとに、適応策を実施していくことが肝要であろう。例えば、湾内への地下湧水の存在によって昇温傾向が抑制されている海域において産卵が行われている海洋生物があれば（実際にニシンなどは湧水付近での産卵が確認されている）、その環境を保全することが重要となる。今回、最も影響が現れやすいと考えたイカナゴ、シャコに関しても、適応策によって、影響の顕在化を遅らせることは十分に可能だと思われる。

これら、適応策を駆使し、適切な海洋生物資源管理を行なうとともに、根本にある温暖化気体の排出量の削減を一人一人の人間が考え、努力していくべきであろう。地球温暖化の問題は、寿司ネタだけの問題ではなく、地球全体に及ぶ問題であることを、寿司という身近な存在から考えて、未来の行動を選択して頂ければ幸いである。

参考文献

Poloczanska E. S., C. J. Brown, W. J. Sydeman, W. Kiessling, D. S. Schoeman, P. J. Moore, K.

- Brander, J. F. Bruno, L. B. Buckley, M. T. Burrows, C. M. Duarte, B. S. Halpern, J. Holding, C. V. Kappel, M. I. O'Connor, J. M. Pandolfi, C. Parmesan, F. Schwing, S. A. Thompson, A. J. Richardson, 2013, Global imprint of climate change on marine life. *Nature Climate Change*, 3, 919-925. doi: 10.1038/NCLIMATE1958
- Wassmann P., C. M. Duarte, S. Agusti, M. K. Sejr, 2011, Footprints of climate change in the Arctic marine ecosystem. *Global Change Biology*, 17, 1235-1249, doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02311.x
- Masuda R., 2007, Seasonal and interannual variation of subtidal fish assemblages in Wakasa Bay with reference to the warming trend in the Sea of Japan. *Environmental Biology of Fishes*, 82, 387-399. doi: 10.1007/s10641-007-9300-z
- Ito S., T. Okunishi, M. J. Kishi, M. Wang, 2013, Modelling ecological responses of Pacific saury (*Cololabis saira*) to future climate change and its uncertainty, *ICES Journal of Marine Science*, 70, 980-990, doi: 10.1093/icesjms/fst089.
- Kovach, R. P., A. J. Gharrett, D. A. Tallmon, 2013, Genetic change for earlier migration timing in a pink salmon population. *Proceedings The Royal Society Publishing B-Biological Science*, 279, 3870-3878. doi: 10.1098/rspb.2012.1158
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Field, C., Barros, V., Dokken, D., et al., 2014, *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, New York., NY, USA, doi: 10.1017/CBO9781107415379
- 日本海洋学会, 2017, 海の温暖化－変わりゆく海と人間活動の影響. 朝倉書店. 東京. 154pp.
- Rayner, N. A., P. Brohan, D. E. Parker, C. K. Folland, J. J. Kennedy, M. Vanicek, T. J. Ansell, S. F. B. Tett, 2006, Improved analyses of changes and uncertainties in sea surface temperature measured in situ since the mid-nineteenth century: The HadSST2 dataset. *Journal of Climate*, 19, 446-469. doi.org/10.1175/JCLI3637.1
- Watanabe Y. W., H. Ishida, T. Nakano, N. Nagai, 2005, Spatiotemporal decreases of nutrients and chlorophyll-a in the surface mixed layer of the western North Pacific from 1971 to 2000. *Journal of Oceanography*, 61, 1011-1016.
- Polovina J. J., E. A. Howell, M. Abecassis, 2008, Ocean's least productive waters are expanding, *Geophysical Research Letter*, 35, L03618, doi: 10.1029/2007/GL031745.
- Doney, S.C., 2010, The growing human footprint on coastal and open-ocean biogeochemistry. *Science*,

328, 1512-1516.

- Wu L., C Wenju, L. Zhang, H. Nakamura, A. Timmermann, T. Joyce, M. J. McPhaden, M. Alexander, B. Qiu, M. Visbeck, P. Chang, B. Giese, 2012, Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents. *Nature Climate Change*, 2, 161-166. doi: 10.1038/nclimate1353
- Kumagai N. H., J. G. Molinos, H. Yamano, S. Takao, M. Fujii, Y. Yamanaka, 2018, Ocean currents and herbivory drive macroalgae-to-coral community shift under climate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115, 8990-8995. doi: 10.1073/pnas.1716826115
- Rabalais N. N., R. J. Diaz, L. A. Levin, R. E. Turner, D. Gilbert, J. Zhang, 2010, Dynamics and distribution of natural and human-caused hypoxia, *Biogeosciences*, 7, 585-619. doi: 10.5194/bg-7-585-2010
- Oliver E. C.J., M. G. Donat, M. T. Burrows, P. J. Moore, D. A. Smale, L. V. Alexander, J. A. Benthuyzen, M. Feng, A. Sen Gupta, A. J. Hobday, N. J. Holbrook, S. E. Perkins-Kirkpatrick, H. A. Scannell, S. C. Straub, T. Wernberg., 2018, Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. *Nature Communications*, doi: 10.1038/s41467-018-03732-9
- Jay D., 2009, Evolution of tidal amplitudes in the eastern Pacific Ocean, *Geophysical Research Letter*, 36, L04603, doi:10.1029/2008GL036185
- Kaeriyama M., H. Seo, Y. Qin, 2014, Effect of global warming on the life history and population dynamics of Japanese chum salmon. *Fisheries Science*, 80, 251-260. doi: 10.1007/s12562-013-0693-7
- Ishida Y., A. Yamada, H. Adachi, I. Yagisawa, K. Tadokoro, H. J. Geiger, 2009, Salmon Distribution in Northern Japan during the Jomon Period, 2,000–8,000 Years Ago, and Its Implications for Future Global Warming. *North Pacific Anadromous Fish Commission Bulletin*, 5, 287-292.
- Kitagawa T., S. Hyodo, K. Sato, 2016, Atmospheric depression-mediated water temperature changes affect the vertical movement of chum salmon *Oncorhynchus keta*. *Marine Environmental Research*, 119, 72-78.
- 桑原久実・明田定満・小林聡・竹下彰・山下洋・城戸勝利, 2006, 温暖化による我が国水産生物の分布域の変化予測. *地球環境*, 11, 49-57.
- Perry A. L., P. L. Low, J. R. Ellis, J. D. Reynolds, 2005, Climate change and distribution shifts in marine fish, *Science*, 308, 1912-1915.
- 良永知義, 2017, ヒラメのネオヘテロボツリウム症. *魚病研究*, 52, 6-10.
- 山本護太郎, 1964, 水産増殖叢書 陸奥湾におけるホタテガイ増殖. 日本水産資源保護協会, 東京, 77pp.
- 児玉圭太・清水詢道・青木一郎, 2003, 東京湾におけるシャコ加入量の変動要因. 神奈川水試 神奈川県水産総合研究所研究所報告, 8, 71-76.
- 山田浩且, 2011, 伊勢湾におけるイカナゴの新規加入量決定機構に関する研究. 三重県水産

研究所研究報告, 19, 1-77.