

## 現状と今後の展望

### 日本における温暖化影響評価と適応策 -地球規模の変化からみて-

伊藤進一（東京大学 大気海洋研究所）

#### 1. はじめに

産業革命以来、二酸化炭素に代表される温室効果気体の濃度が大気中で著しく増大し、人間活動と地球温暖化の関係が久しく危惧される事態となりました。そこで、地球気候システムに起きている科学的事実を明らかにし、適応策と緩和策に関する国家の意思決定に役立てるために Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) が 1988 年に組織された（山形, 2013）のは周知の事実です。IPCC は、1990 年の "Climate Change: The IPCC Scientific Assessment" の発行から、定期的に評価報告書を発行しています。2007 年に発行された第 4 次評価報告書においては、「20 世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスの観測された増加によってもたらされた可能性が非常に高い」と言及し、世間の脚光を浴び、ノーベル平和賞の受賞にまで至りました。一方、第 5 次評価報告書では、「人間による影響が 20 世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的な原因であった可能性が極めて高い」と断定に近い形で報告され、人類そして地球が引き返すことのできない局面に至っていることが確実となりました。それにもかかわらず、世間の反応は第 4 次報告書のとおりよりも醒めていた感があります。

第 5 次報告書では、海洋上層の水温、塩分、溶存無機炭素、溶存酸素、酸性度などの過去 60 年間のトレンドは、自然変動の影響を超えて、人為的影響を受けていると結論づけています。そして、21 世紀中に、世界全体で海洋は昇温し続け、熱は海面から海洋深層に広がり、海洋循環に影響することが予想されています。また、世界平均海面水位は上昇を続け、海面水位の上昇率は 1971 年から 2010 年の期間に観測された上昇率を超える可能性が非常に高いとも予想されています。さらに、海洋の更なる炭素吸収により、海洋酸性化が進行することも

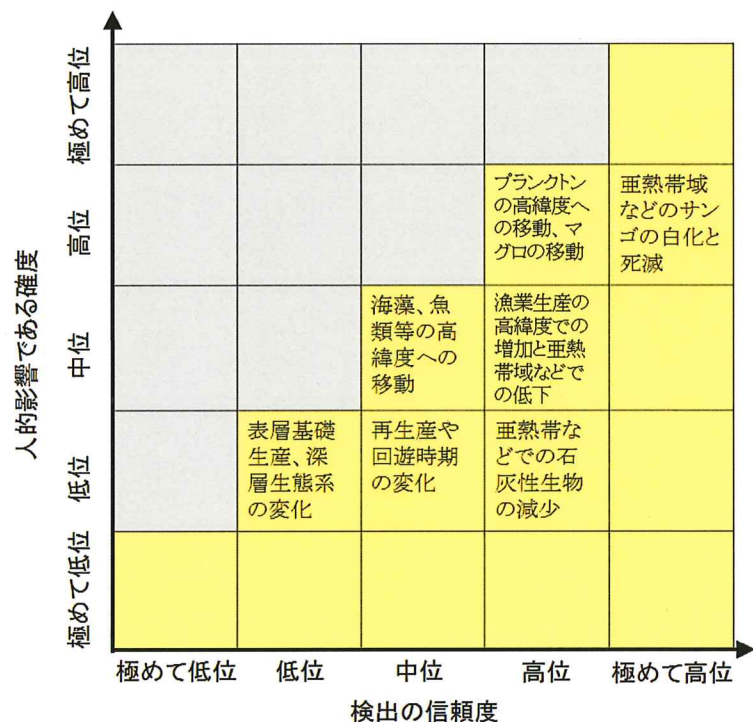


図 1. 世界各地の観測結果から検出された海洋生物の応答の信頼性と人間活動によって引き起こされたとと思われる確度 (IPCC, 2014 より改変)。

予想されており、地球温暖化の影響を受けて、海洋環境が大きく変化することは否めない状況となっています (IPCC, 2013)。気候変化によって、海洋生態系は昇温、酸性化、貧酸素水域の拡大などに晒され、サンゴの白化や死滅、高緯度へのプランクトンの種移動、マグロの分布海域の変化、海藻や魚類の高緯度への移動などが検出され (図 1)、今後も影響の拡大が危惧されています (伊藤・田所, 2014)。

## 2. 日本における温暖化影響評価

IPCC の第 5 次報告書には、多くの日本人著者も貢献し、第二作業部会 (適応と脆弱性) においては、15 篇の成果が「気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト」の水産課題から引用されています。これは素晴らしい成果ですが、一方で、Poloczanska et al. (2013) に代表されるような全世界の温暖化影響研究を調べた論文では、日本近海で海洋生物への温暖化影響を解析した事例は、欧米と比較すれば限定されています。要因として、日本周辺域は北太平洋十年規模変動をはじめとする様々な気候変動の影響を受けており、表面水温は確かに上昇している海域が多いものの、下層では十年規模で見ると逆に水温が低下している海域もあるためです。また、日本近海は、暖流である黒潮と寒流である親潮が流れ込むため、世界的にみても水温の南北勾配が強く、生物が少しだけ移動するだけで水温上昇を補償できる環境であり、水温の南北勾配が弱い海域よりも影響が顕在化し難いためと考えられます。さらには、海洋モニタリング (ポスター発表 P-(1)-①) の結果にもある通り、親潮や黒潮も十年規模の変動を示すため、地球温暖化の影響を検出するのが困難な海域となっています。

このように日本近海は、地球温暖化以外の気候変動の影響も受けるため、ある時期は温暖化の影響が顕在し難い状況が発生します。この現象は全球平均でも生じており、気候ハイエータス (climate hiatus) と呼ばれています (Easterling and Wehner, 2009)。例えば、気象庁の世界の年平均気温偏差 ([http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/list/an\\_wld.html](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/list/an_wld.html)) をもとに 1900~2010 年の気温上昇を調べると、10 年あたり 0.072°C 高くなっていますが、2001~2010 年では気温上昇が停滞しています (図 2)。このような温暖化の停滞

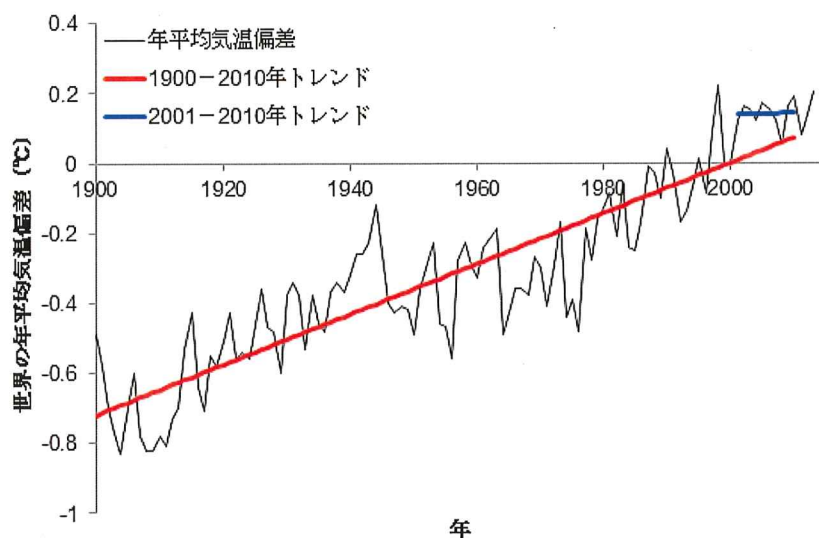


図 2. 世界の年平均気温偏差 (黒線) とその 1900~2010 年 (赤線) および 2001~2010 年 (青線) の間のトレンド。データは気象庁ホームページより。

は、前述した通り部分的には太平洋十年規模変動のような自然変動が影響していることが示されています (Watanbe et al., 2013)。逆に、気候変動と地球温暖化による気候変化が同じ方向に変化した場合は、より激しく海洋生物への影響が現れる可能性があり、モニタリングを基盤とした息の長い研究を推進していく必要があります。

本プロジェクトで展開したモニタリング結果からも、地球温暖化の影響と考えられる現象が検出されています。黒潮流軸上では、生物への影響は明らかではありませんが、流速の増加や水温上昇、塩分低下が検出されています (ポスター発表 P-(1)・②)。また、北西太平洋の広い範囲で、栄養塩の低下に伴う基礎生産の低下が検出されています。これは、地球温暖化に伴う鉛直混合の低下が起因していると考えられています。

生態系への影響としては、通年海藻が覆い、沿岸域の海洋生物の成育場として重要な四季藻場が高水温によって後退し、春藻場に変化している海域もあります (「海」の変化Ⅲ 藻場・沿岸生態系で紹介)。これには、水温による直接的な影響だけでなく、高水温化による藻食性魚類の出現が影響しています。また、藻食性魚類の行動様式も群れの密度で変化することから、生態系の応答は、単純ではなく、他生物の影響が大きく関与する場合があります。

また、地球温暖化の影響は断定できませんが、スルメイカの日本海の本州沿岸域での漁獲量の低下 (「さかな」の変化Ⅲ スルメイカで紹介) や、ノリ養殖の開始時期の遅れに伴う生産量の低下 (ポスター発表 P-(8)-①) などが報告されています。日本が面している北西太平洋は、FAO の区分では全海洋の 6% の面積でしかありませんが、全世界の海面漁獲量の 25% の漁獲を生産しています (FAO, 2014)。また、無給餌養殖も盛んです。このように、日本近海は、世界屈指の豊穡な海ですが、地球温暖化の影響によってこれまでの漁業が成り立たない環境に移行すると、日本国民の蛋白源の供給さらには世界規模の食糧安全保障に影響を及ぼすため、今後の影響予測が必要とされています。

### 3. 日本における温暖化影響推定と適応策

IPCC 第 5 次評価報告書にあるように、地球温暖化の影響を受けて海洋環境がどのように変化するか気候モデル (大気-海洋-雪氷圏結合モデル) を用いた将来推定が全世界の研究機関で行われ、比較検討が行われてきました。しかし、日本近海での特有の問題として、黒潮や親潮の再現性があります。黒潮は本州南岸を蛇行しながら流れ、房総半島付近で離岸し、黒潮続流として東に流れますが、この離岸位置を正しく再現するためには、最低でも 50 km のモデル水平解像度が必要となります。しかし、第 4 次報告書に掲載された気候モデルの多くは、海洋モデルの解像度が 100 km 以上でした。このような解像度では、黒潮の離岸位置が北海道近海に位置し、非現実的な状況となります。第 5 次報告書に掲載された気候モデルでは、高解像度化されましたが、それでも黒潮続流の離岸緯度を現実に近い形で再現しているモデルは 1 割程度に過ぎません。したがって、これらの気候モデルの結果を境界条件 (モデル駆動力) として使用し、高解像度な領域モデルを駆動することで将来の海洋環境を推定する必要があります (ポスター発表 P-(2))。

このようにして推定された将来の海洋環境を用いて、有用水産生物の応答を推定します。水温指標を用いた方法では、今世紀中に日本海沿岸でコンブ目藻類の成育が困難になる可能性が示され (ポスター発表 P-(6))、スルメイカの漁獲最盛期の早期化と漁獲量の低下も

推定されています（「さかな」の変化Ⅲ スルメイカで紹介）。サケでは、将来の分布範囲の変化によって北海道のサケ孵化放流事業における最適放流数が現在よりも少なくなることが示されています（「さかな」の変化Ⅲ サケで紹介）。サンマでは、漁期が遅れる（「さかな」の変化Ⅱ サンマで紹介）とともに、餌料環境の変化も考慮したモデルを用いた解析によって、回遊経路の沖合化と魚体の小型化が推定されています（ポスター発表 P-(2)）。

しかし、藻場の応答で示されたように、海洋生態系としての応答は複雑であり、単生物種の応答としては予想できない変化が起きる可能性があります。特に、多くの水産資源は、海洋生態系の比較的高次の栄養段階に属しており、植物プランクトン、動物プランクトンの応答を介した間接的な影響と、物理環境を通じた直接的な影響を受けます。そのため、その応答予測は非常に難しいのが現状です。特に、動物プランクトンは多くの有用水産魚種の餌料である（ポスター発表 P-(4)）にもかかわらず、生態系モデルにおける再現精度はまだ限定的（ポスター発表 P-(3)）で、その高精度化が喫緊の課題となっています。また、他魚種との餌の競合、捕食者の影響、寄生虫や病害虫の影響など、生態系としての応答を推定するには、他にも考慮すべき影響が多数あります（Ito et al., 2010）。

さらには、複合的な効果も考慮し、海洋酸性化、貧酸素化、漁獲圧などの影響を総合的に評価する必要もあります。しかし、現段階でこれらをすべてモデルに統合的に包含することが得策とは言えません。例えば、人類は窒素化合物を排出していますが、窒素化合物は温暖化気体であるとともに、海の砂漠と言われる亜熱帯域では窒素固定生物によって重要な餌料へと変換されます。このような大気化学過程を取り込んだモデルを結合させた気候モデルは、第5次報告書で初めて報告されており、まだ開発途上の段階です。このような発展途上のモデル要素を複数組み合わせることは、不確定性を増大させる危険性が大きいのが現状です。

では、我々はどうすべきでしょうか。まずは、ある限定した要素のみを考慮したモデルを用いて思考実験を行ないながら影響評価を実施することが重要と思われます。例えば、水温と餌料の効果を考慮したモデルを用いて、水温と餌料の影響を分離して理解することができます（Ito et al., 2013）。また、様々な将来の影響推定をすることにより、前倒して適応策の検討ができます。例えば、ワカサギで考案されたように生残率の高い時期に集中的に放流する「適期放流技術」の開発を進めたり、イサザで考案されたように産卵基質の開発により人工産卵床造成を進めたり（ポスター発表 P-(7)）、高水温下における養殖技術の開発を進めたり（ポスター発表 P-(5)）、水温耐性を持つノリ育種素材の開発を進めたり（ポスター発表 P-(8)・②）することは、これから起こる変化に対して水産資源が少しでも頑強な構造を持つように支援するものです。これらの開発には時間がかかりますが、深刻な変化が起こる前からこのような努力を通じて、将来に備えることが重要と考えられます。そして、地球温暖化の影響を早期に検出するため、地道なモニタリングの継続が重要な任務となります。これらの一つ一つの任務を遂行することが、次世代に持続可能な海洋生態系サービスを残す唯一の道と考えます。

## 参考文献

Easterling D.R. and M.F. Wehner (2009) Is the climate warming or cooling? *Geophysical Research Letter*, 36, L08706, doi:10.1029/2009GL037810.

- FAO (2014) The State of World Fisheries and Aquaculture 2014. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 223 pp. Roma.
- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Edited by T.F. Stocker, D. Qin, G. Plattner, M.M.B. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley, 1522pp. Cambridge Univ. Press.
- 伊藤進一・田所和明 (2014) 温暖化による海洋生物への影響. 遺伝, 68, 368-372.
- Ito S., K.A. Rose, A.J. Miller, K. Drinkwater, K.M. Brander, J.E. Overland, S. Sundby, E. Curchitser, J.W. Hurrell and Y. Yamanaka (2010) Ocean ecosystem responses to future global change scenarios: A way forward. In: M. Barange, J.G. Field, R.H. Harris, E. Hofmann, R. I. Perry, F. Werner (Eds) Global Change and Marine Ecosystems. Oxford University Press., 287-322, pp440.
- Ito S., T. Okunishi, M.J. Kishi and M. Wang (2013) ICES Journal of Marine Science, 70, 980-990.
- 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. Duarte1, B.S. Halpern, J. Holding, C.V. Kappel, M.I. O'Connor, J.M. Pandolfi, C. Parmesan, F. Schwing, S.A. Thompson and A.J. Richardson (2013) Global imprint of climate change on marine life. Nature Climate Change, 3, 919-925.
- Watanabe M., Y. Kamae, M. Yoshimori, A. Oka, M. Sato, M. Ishii, T. Mochizuki and M. Kimoto (2013) Strengthening of ocean heat uptake efficiency associated with the recent climate hiatus. Geophysical Research Letters, 40, 3175–3179, doi:10.1002/grl.50541.
- 山形俊男 (2013) 気候変化と気候変動－国際的な動向. 遺伝, 67, 83–88.