

「海」の変化 II プランクトン・基礎生産 -海洋生態系に対する地球温暖化の影響-

田所 和明（水産総合研究センター）

1. はじめに

海洋は自然現象としての気候変動や人間活動に伴う地球温暖化等の影響を受け変動しています。その中で自然現象と考えられるエルニーニョや気候のレジームシフトなどの影響については1980年代から研究が始まり、現在でも盛んに行われています(例えば Mantua et al., 1997)。一方、地球温暖化の影響に関する研究はこれよりも前の1960年代から始められていました (Revelle et al., 1965)。しかしその研究が飛躍的に進展したのはデータの蓄積が進み、コンピュータ等の機器が急速な発達した1980年代後期以降です。そして昨年には IPCC(気候変動に関する政府間パネル)が発行した第5次評価報告において、水温や塩分といった海洋環境に対する地球温暖化の影響についての研究も総括されました (IPCC, 2013)。

海洋生態系は漁業を通じて人類に食料を供給しているだけでなく、二酸化炭素を取り込み深層へ運ぶ生物ポンプとしても重要な役割を果たしています (図1)。

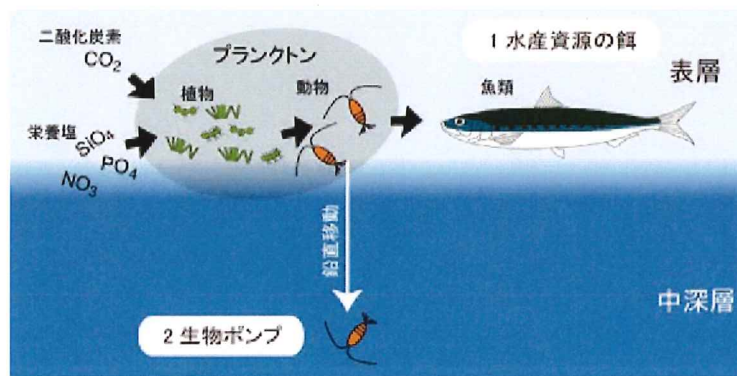


図1 海洋の低次生態系の役割。1 動物プランクトンはイワシなどの水産資源の餌なり、その資源を育てている。2 動物プランクトンは深層へ移動することによって表層の二酸化炭素を運ぶ生物ポンプとしての役割も果たしている。

そのため、海洋生態系に対する地球温暖化の影響を明らかにすることは、地球環境や社会に対する影響を評価する上で非常に重要です。そこで本講演では水域毎に、1) 北太平洋、2) 北大西洋、3) 沿岸湧昇域、4) 極域の生物生産、分布および季節変動への影響に関するこれまでの研究を概観します。さらに海洋酸性化の影響についても述べ、最後に今後の課題についても議論します。なお本講演の内容は田所他 (2008) に最新の知見を加えたものです。

2. 北太平洋への影響

北太平洋の外洋域ではこの半世紀の間、表層における水温の上昇と塩分の低下が観測されており、その原因として地球温暖化が推測されています（IPCC, 2013）。外洋域では植物プランクトンの成長に不可欠な栄養塩は鉛直混合によってその殆どが中層から表層へ供給されます。従って、このような水温上昇・塩分低下は表層の成層化を促進し、中層から表層へ栄養塩の供給量を減少させる可能性があります。

栄養塩濃度については、北太平洋の広い範囲で長期的に観測が行われており、この半世紀の間、表層での低下傾向が示されています（図2）。黒潮親潮混合域では、1960年から2008年の間にリン酸塩濃度が44%低下しています。一方で中層の栄養塩濃度は上昇しており、黒潮親潮混合域では1960年から2008年の間に9%上昇しています。これらのことから、地球温暖化によって中層から表層への栄養塩の供給量が低下していることが示唆されます。

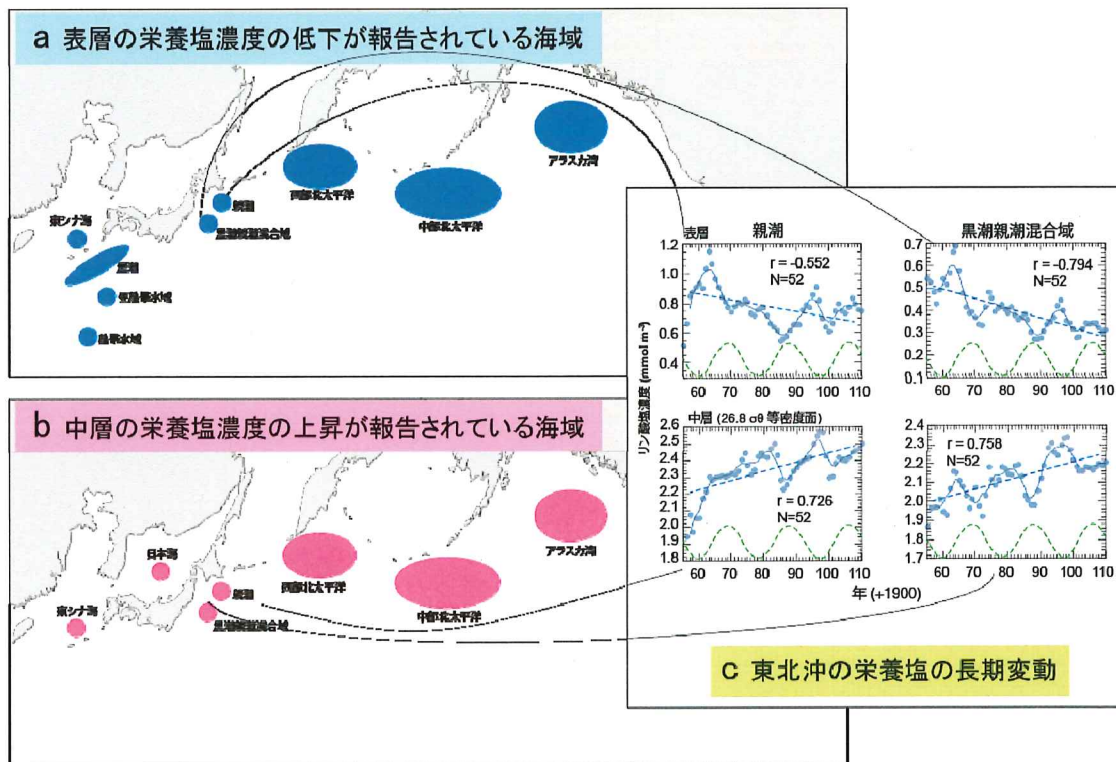


図2 北太平洋における栄養塩濃度の変動のまとめ。a: 表層の栄養塩濃度の低下が報告されている水域、b: 中層の栄養塩濃度の上昇が報告されている水域、c: 東北沖の表層と中層の長期変動。

表層の栄養塩濃度の低下に対応して、西部北太平洋では広い範囲で植物プランクトン現存量の指標となるクロロフィル a 濃度の低下や一次生産量の低下が示されています。さらに黒潮親潮混合域ではメソ動物プランクトン現存量にも有意な減少トレンドが検出されており、栄養塩の供給量の低下は一次生産量の減少を通じて高次の栄養段階にも影響している可能性があります（図3）。

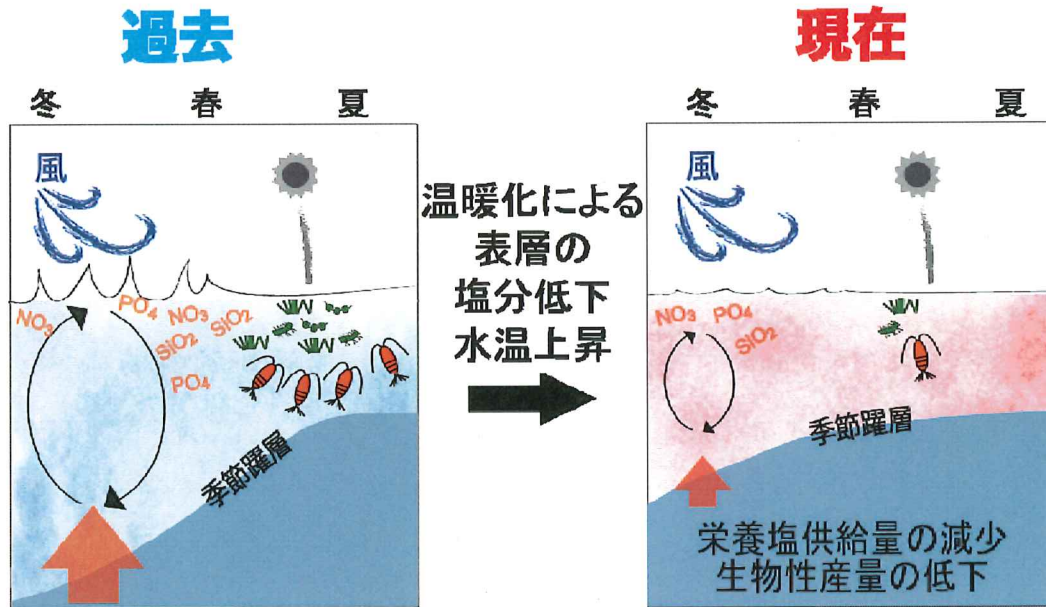


図3 北太平洋の海洋生態系に対する地球温暖化の影響の模式図。表層の水温上昇と塩分低下によって生態系への栄養塩供給量が低下し、生物生産も低下している可能性がある。

3. 北大西洋への影響

北大西洋でも地球温暖化に関連すると考えられる表層水温の上昇が観測されています（IPCC, 2013）。このような水温上昇は北大西洋の生態系の季節変動パターンに影響を与えていることが報告されています。北海では植物プランクトンの一種である渦鞭毛藻や動物プランクトンの一種である端脚類では春に増え始めるタイミングがこの半世紀の間、十日から数十日程度早まっていることが明らかになっています。一方で、珪藻では増え始める時期はほとんど変化していません。これは前者の増殖や成長は水温や成層化が関係しているのに対し、後者には日長が関係しているためと推測されています。このような種による応答の違いは、被食者と捕食者の間のミスマッチを招くことで、食物連鎖の転換効率を低下させると考えられています（図4）。例えば北海の重要な水産資源である二枚貝の産卵時

期は水温上昇によって早まりますが、餌である珪藻が増え始めるタイミングは変わらないため、上述の通りであるため両者の間にミスマッチが生じ、その結果資源量が減少したと推測されています。

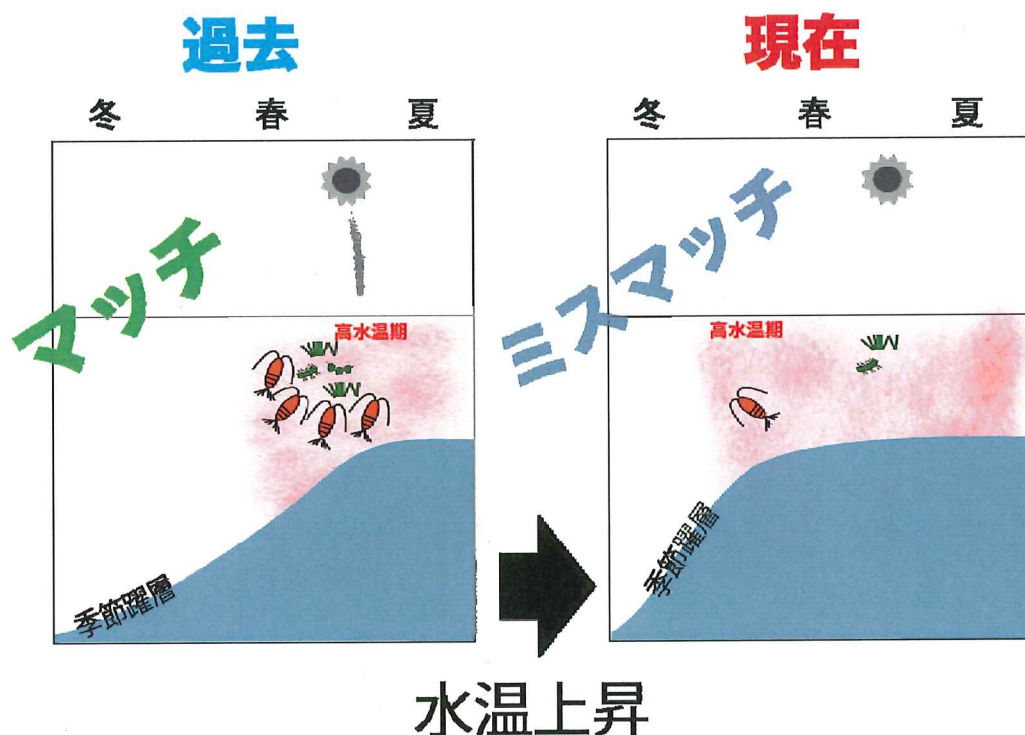


図4 北太平洋の海洋生態系に対する地球温暖化の影響の模式図。種によって温度上昇に対する応答様式がことなるため、栄養段階間でミスマッチが生じ、結果として上位の生態系の生産量が減少している可能性がある。

また、東部北大西洋の植物プランクトンの現存量は近年の温度上昇に伴って北部水域では増加しているのに対し、南部水域では減少していることが報告されています。水温の上昇によって優占する動物プランクトン（カイアシ類）も冷水種から暖水種へ変化していることが示されています。大西洋マダラ (*Gadus morhua*) にとって春を中心に表層に分布する冷水種のカイアシ類は加入を左右する重要な餌生物となっています。しかし水温の上昇によって秋を中心に表層に分布する暖水種へ優占種が変化したために餌が減少し、その結果大西洋マダラの資源量が大きく減少していることが報告されています。さらに、北大西洋では水温上昇に伴って北冷水性の魚種が、分布を北へ移動させていることも報告されています。しかしながら、種によって分布の変化の程度も異なるため、群集構造が変化し、結果として栄養段階間でのミスマッチが発生することで、水産資源に悪影響を与える可能性も指摘されています（図5）。

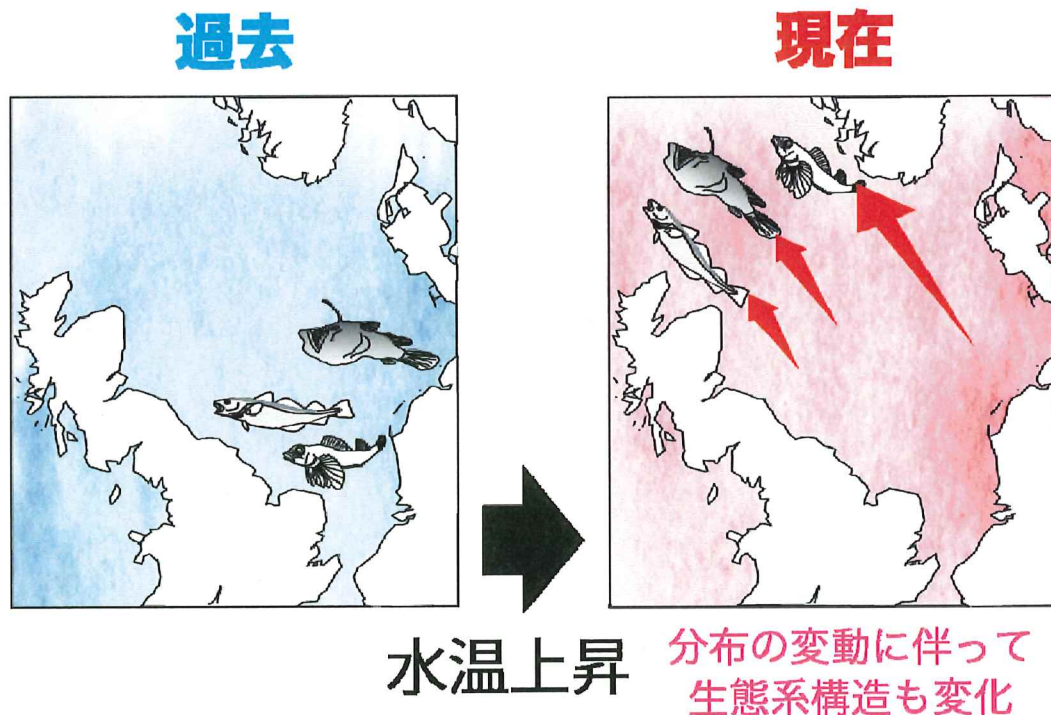


図5 北大西洋の魚類の分布に対する温暖化の影響の模式図。種によって温度に対する感受性が異なるため、種に分布に対する温暖化の影響は異なり、結果として生態系構造に変化が生じる可能性がある。

4. 沿岸湧昇域への影響

沿岸湧昇域の面積は全海洋の1%に満たないものの、世界の水産資源の約20%が水揚げされる水産上重要な水域です。主な水域としては、カリフォルニア海流系（カリフォルニア～オレゴン沿岸）、フンボルト海流系（ペルー沿岸域）、ベンゲラ海流系（アフリカ南部西岸）、カナリア海流系（アフリカ北部西岸・イベリア半島西岸）、モンスーン海流系（西部アラビア海）が挙げられます（図6）。

沿岸湧昇は南向き（南半球では北向き）の風によって駆動されます。地球温暖化は陸上の低気圧を強化することでそのような風を強めると考えられており、その結果湧昇が促進され表層への栄養塩類の供給量が増えることで、生物生産が上昇すると推測されています（図6）。実際、カナリア海流系では過去約2500年間の堆積物を調査した結果、地球温暖化が原因と推測される表層水温の低下が20世紀以降確認されています。さらに、カナリア海流系やモンスーン海流系では堆積物や人工衛星データを調べた結果から沿岸湧昇の強化に伴う一次生産量の増加が示されています。

一方、カリフォルニア海流域ではこの一世紀の間、表層水温の上昇によって成層が強化されたために湧昇が弱まっていることが堆積物の分析から明らかとなっており(図6)、動物プランクトン量の減少も報告されています。これらのことから、この水域では、地球温暖化は生物生産をむしろ減少させている可能性があります。

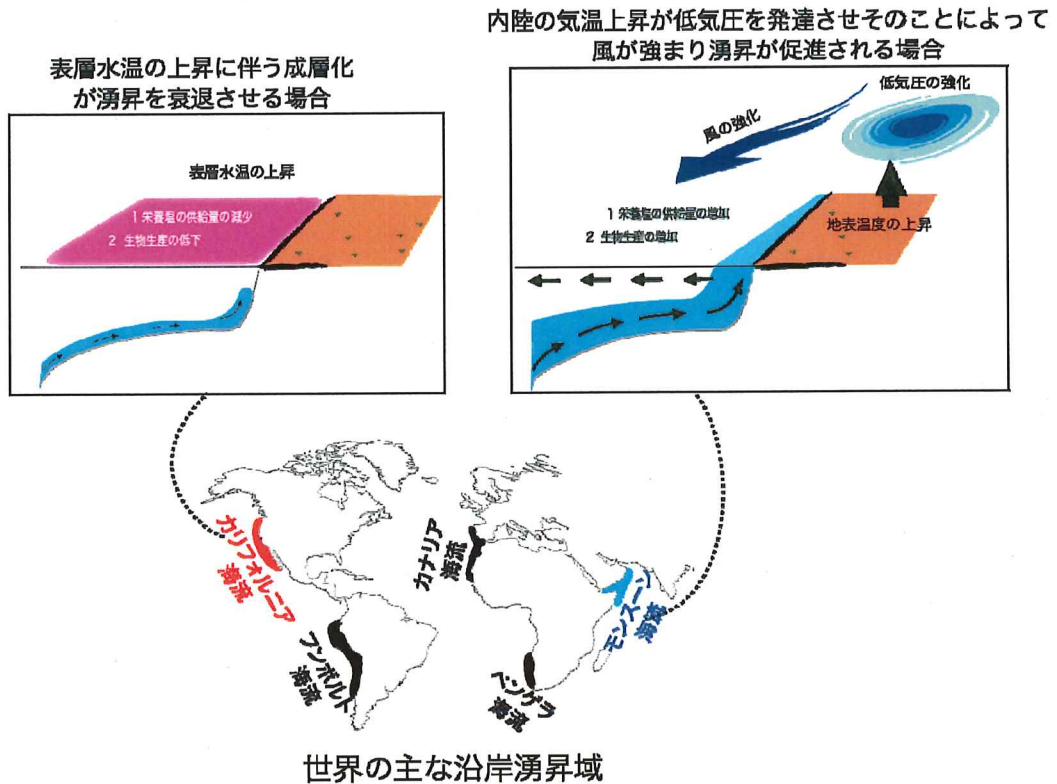


図6 沿岸湧昇域に対する温暖化の影響の模式図。下の図は世界の主要な沿岸湧昇域。左上はカリフォルニア海流域で推測されている、温暖化による湧昇の衰退と生物生産低下のシナリオ。右上はモンスーン海流域で推測されている、暖化による湧昇の促進と生物生産増加のシナリオ。

5. 極域

地球温暖化に関連すると推測される気温の上昇に対応して、南極および北極域ではこの数十年間に海氷が大きく減少しています。さらに、数値実験の結果では、今世紀末には北極海の夏季の海氷はほぼ消滅してしまうことが予測されています。極域において海氷は様々な生物生産過程と関連しているため(図7)、その減少は海洋生態系に大きな影響を与えると考えられています。

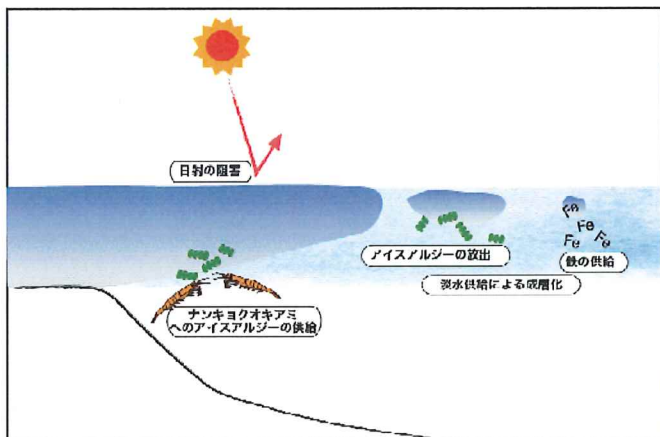


図7 極域生態系における海水の役割。海水はアイズアルジー（海水藻類）の海中への放出、ナンキョクオキアミへの供給、鉄の供給、淡水供給による成層化、日射の阻害など様々な役割を果たしている。

南極海は他の大陸から遠く離れているため、河川や大気を介した鉄の供給がほとんどありません。さらに、氷の重みによって大陸棚が深く沈み込んでいることから海底からの供給も非常に少ないです。そのため、広い範囲で植物プランクトンの成長を鉄が制限しています。一方、大規模な海水を擁するロス海とウェッデル海では、海水が鉄を供給することでこれらの水域の高い生物生産を支えています。したがって、海水の減少は鉄の供給量を減少させ、南極海の生物生産量を減らす可能性があります。

また、海水は海中に鉄を供給するだけでなく、淡水を供給することで表層の成層化を促し、ごく浅い層で植物プランクトンのブルームを発生させます。しかし、海水の減少によって成層が弱まることでブルーミングの水深が深くなると考えられています。このような深度の変化は、種組成の変化を引き起こすため、植物プランクトンの死骸の分解・再循環過程にも変化が生じると考えられています。

海水は、南極海の重要な一次生産者であるアイズアルジー（海水藻類）の棲息場所にもなっています。そのため、海水の減少に伴って餌であるアイズアルジーの生産が減少したことが、この数十年間に観測されたナンキョクオキアミ (*Euphausia superba*) 資源量の減少の原因として考えられています。

北極海でも、融氷時に鉄が海中に放出されることで植物プランクトンの大規模なブルーミングが発生します。そのため、海水の減少は、海水を基盤とした従来の生態系（カイアシ類→北極タラ→アザラシ→北極クマ）を萎縮させてしまう可能性があります。さらに海水の融解や河川流量の増大によって表層塩分が低下することで成層化が進み、その結果表層への栄養塩供給量が減少し、生物生産量が低下するとの推測もあります。

一方で海水は結氷時に日射を遮ることで一次生産を制限しているため、北極海では海水の減少は、利用可能な光量が増加させることで、一次生産量をむしろ押し上げるとの予測もあります。しかし、この水域は元々栄養塩濃度が低いために、日射量の増加の効果は限定的であるとの意見もあります。

6. 海洋酸性化の影響

IPCCのシナリオに基づいた数値実験の結果は、二酸化炭素濃度の上昇に伴って外洋の海表面のpHは今世紀末までに0.3-0.5低下することを予想しています。これは過去数千万～数億年の間で最も大きな変化と考えられ、海洋生態系に対して大きな影響を与えることが懸念されています。

酸性化は炭酸カルシウムの飽和度を低下させることで特に石灰質の殻や骨格を持つ生物に大きな影響を与えます。海洋生物の石灰質は結晶構造等によってカルサイト、高マグネシウムカルサイトおよびアラゴナイトに区分されます。カルサイトを持つ生物としては円石藻・有孔虫・甲殻類、高マグネシウムカルサイトは棘皮動物・サンゴ藻、アラゴナイトはサンゴ・軟体動物（翼足類・貝類）が挙げられます。アラゴナイトおよび高マグネシウムカルサイトの飽和度はカルサイトに比べ低いため、酸性化の影響をより受けます。

現時点では表層の炭酸カルシウムは飽和しているため、観測から酸性化の影響は報告されていません。そのため、飼育実験や数値モデル実験から研究が進められています。プランクトンへの影響については、円石藻や翼足類の一種であるウキビシガイ (*Clio pyramidata*) を酸性化させた環境で飼育した結果、前者では奇形率が上昇し、後者で殻に顕著な溶解が認められています。底生生物に関しては、カキの初期発生段階における石灰化の阻害や、マガキガイ (*Strombus luhuanus*)、バフンウニ (*Hemicentrotus pulcherrimus*) およびサンゴの成長に悪影響を与えることが報告されています。

特にサンゴに対しては、数値実験から今世紀末には、酸性化の影響で14～30%程度その形成量が減少することが予測されています。また、水温上昇は共生する褐虫藻をサンゴから放出させることで白化現象を引き起こします。白化はサンゴの成長速度・再石灰化・再生産能力等を低下させるだけでなく、感染症の罹患率を上昇させる等の悪影響を与えます。この約半世紀の間に水温は地球温暖化によって造礁サンゴの適水温の上限に近づきつつあり、さらに今後数十年以内には世界中で上限を上回ってしまうことが数値モデルなどから推測されています。仮に今世紀の半ばに二酸化炭素濃度が現在の2～3倍になった場合、酸性化と水温上昇の影響が合わさることで、造礁サンゴがほぼ絶滅してしまうとの指摘もあります。サンゴ礁はその水域の他の生物の生育場所ともなっていることから、その減少は熱帯域の沿岸生態系の基盤を崩壊させることが懸念されます。

二酸化炭素濃度の上昇はイオンの交換やタンパク質の合成速度を減少させることで、石灰質を持たない生物に対しても悪影響を与えます。実験的に二酸化炭素濃度を上昇させた環境で稚魚および成魚を飼育した結果、死亡率の上昇や成長の顕著な鈍化が観察されています。さらに、動物プランクトンであるカイアシ類の孵化率やノープリウスの生残に対しても悪影響を与えることが明らかになっています。

7. 今後の課題

以上のように、海洋生態系に対する地球温暖化の影響について北半球や極域では多くの知見が得られている一方で、インド洋や南太平洋等では研究がほとんど進んでいません。また、研究が進んでいる水域でも、多くの未解決の問題が存在します。今後、地球温暖化の影響を理解していくためには、地域的な研究格差を縮めつつ、さらに比較的研究が進んでいる水域でも未解決の問題の解明のためにさらに調査を進めていく必要があります。

また、社会に最も身近にあるにも関わらず、沿岸生態系に対する影響についてはあまり研究が進んでいません。これは、この水域の変動機構が外洋に比べ複雑であることに加え、人間活動に伴う環境改変の影響を受け易いことが原因として考えられます。しかし、この水域は漁業や国土の保全等の点から非常に重要であることから研究を発展させていく必要があります。さらに、海洋酸性化についての研究は数値実験によるものが中心で、モニタリングデータに基づいた報告はありません。そのため、今後はモニタリングを通じてその実態を明らかにしていく必要があります。

地球温暖化のような数十年スケールの海洋生態系への影響を評価していくためには、多項目にわたる長期の観測データが必要です。しかし、現時点では多くの水域で不足しています。それを補うために、まず利用されずに埋もれたままの資料や標本の掘り起こしを進め、有効利用していくことが必要です。さらに、今後も影響を評価し、その対策を講じていくためには、充実したモニタリング態勢を構築し、それを将来にわたり維持していくことが重要です。しかし、厳しい社会情勢の中、新たな調査を実施することはおろか、現状のモニタリングを維持することさえも困難になってきています。今後もモニタリング調査を展開していくためには、研究成果を積極的に施策へ生かして行くことが重要です。さらに、研究機関の間で観測を連携して行うことによって調査の効率化をはかり、さらに新技術を活用することで、低コストで質の高いモニタリングを行うことも重要です。

8. 引用文献

IPCC (2013): *Climate Change 2013: The physical science basis*, <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

Mantua, N. J., S. R. Hare, Y. Zhang, J. M. Wallace, and R. C. Francis (1997): A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. *Bul. Am. Met. Soc.*, 78, 1069-1079.

Revelle, R., W. Broecker, H. Craig, C. D. Keeling, and J. Smagorinsky (1965): Atmospheric Carbon Dioxide. p. 112-133. In Report of the environmental pollution panel, President's Advisory Committee, Washington DC.

田所和明, 杉本隆成, 岸道朗 (2008) 海洋生態系に対する地球温暖化の影響, 海の研究, 17, 1-17.