

沿岸環境関連学会連絡協議会 第36回ジョイントシンポジウム

沿岸分野の各学会における気候変動対応：学会間の トレードオフとシナジー効果を明らかにする



日 時：2020年1月11日（土）10:00 - 17:30

場 所：東京海洋大学 品川キャンパス 白鷹館1階講義室

主 催：土木学会海岸工学委員会

共 催：沿岸環境関連学会連絡協議会

後 援：京都大学防災研究所，日本水産学会

沿岸環境関連学会連絡協議会 第36回ジョイントシンポジウム

沿岸分野の各学会における気候変動対応： 学会間のトレードオフとシナジー効果を明らかにする

コンビナー：桑江朝比呂（港空研）・川崎浩司（ハイドロ総研）・藤井賢彦（北大
院地球環境）・大越和加（東北大院農）・今井一郎（北大院水）

日時：2020年1月11日（土）10:00 – 17:30

場所：東京海洋大学 品川キャンパス 白鷹館1階講義室

主催：土木学会海岸工学委員会

共催：沿岸環境関連学会連絡協議会（あいうえお順：応用生態工学会・水産海洋学
会・土木学会海岸工学委員会・土木学会工学委員会・日本沿岸域学会・日本
海洋学会沿岸海洋研究部会・日本海洋学会海洋環境問題委員会・日本水産学
会・日本水産工学会物質循環研究会・日本船舶海洋工学会海洋環境研究会・
日本プランクトン学会・日本ベントス学会）

後援：京都大学防災研究所，日本水産学会

問合せ先：国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
桑江朝比呂 E-mail: kuwae@p.mpat.go.jp

開催趣旨：

沿岸域における気候変動に関する研究は、気象、海洋物理・化学・生物、生態学、政策学、経済学など、非常に多岐にわたる学術分野あるいは学会において進められている。しかしながら、気候変動学があまりに広範で総合的であるために、各学会における取り組みが共有されているとは言い難い。この状況をふまえ、本ジョイントシンポジウムでは、はじめに、土木学会海岸工学委員会が沿岸域における気候変動に関連する様々な学会に対して実施した「今後の我が国の沿岸分野における気候変動対応で取り組むべき課題」に関するアンケート結果を紹介し、各学会の特徴や差違を明らかにする。続いて、各学会の専門家から、過去～現在までの気候変動に対する関心事、そして今後の取り組みについてご講演いただく。最後に、各学会からの内容を横断的にみて、今後の取り組みに関するシナジー効果やトレードオフについて、パネルディスカッション形式で議論する。そして、抽出されたシナジー効果をより高めるため、そしてトレードオフをより軽減するために、各学会がどのように連携できるのか、その可能性について議論する。

プログラム：

10:00 – 10:10

1. 開会挨拶

土木学会海岸工学委員会：川崎浩司（ハイドロ総研）

沿岸環境関連学会連絡協議会：今井一郎（北大院水）

10:10 – 10:40

2. 趣旨説明

桑江朝比呂（港空研）

沿岸分野の各学会における気候変動対応：学会間のトレードオフとシナジー効果を明らかにする

10:40 – 16:40

3. 各分野における注目すべき課題と取り組みの現状（各 発表 20 分+質疑 5 分）

10:40 – 11:55（座長：桑江朝比呂）

(1) 海洋学会：藤井賢彦（北大院地球環境）

地球温暖化・海洋酸性化が日本沿岸の海洋生態系や社会に及ぼす影響

(2) JpGU：石川洋一（JAMSTEC：海洋研究開発機構）

今後の気候変動研究における課題 - JpGU の視点から -

(3) 水産海洋学会：伊藤進一（東大大気海洋研）

水産海洋学から期待する沿岸域における気候変動に関する研究

11:55 – 13:00 昼休み

13:00 – 14:15（座長：藤井賢彦）

(4) 水産工学会：瀬戸雅文（福井県大海洋生物資源）

水産環境整備における気候変動への適応策と課題

(5) 土木学会：森 信人（京大防災研）

気候変動の沿岸部への物理的影響評価と適応

(6) 土木学会：有働恵子（東北大災害国際研）

全国の砂浜消失将来予測と適応策

14:15 – 15:30（座長：川崎浩司）

(7) 船舶海洋工学会：多部田茂（東大新領域）

船舶海洋工学分野における課題と取り組みの現状

(8) 沿岸域学会：川辺みどり（海洋大学術研究院）

気候変動影響対応を含めた沿岸域管理

- (9) 生態学会：山北剛久 (JAMSTEC)
生態学に関連した気候変動研究の数と事例

15:30 – 15:40 休 憩

15:40 – 16:55 (座長：大越和加)

- (10) 水産学会・プランクトン学会：西川哲也 (兵庫水技セ)
海域環境と植物プランクトン群集，特に有害藻の長期変動
- (11) ベントス学会：澤山周平 (中央水研)
気候変動対応において沿岸域のベントス研究が果たすべき役割について
- (12) サンゴ礁学会：山野博哉 (国環研)
サンゴ礁域における気候変動対応で解決すべき課題

16:55 – 17:25

4. ディスカッション

- (1) 課題対応におけるトレードオフとシナジーを検出する
- (2) どのようにトレードオフとシナジーに対応するか

17:25 – 17:30

5. 閉会挨拶 (水産学会：樽谷賢治)

目次：

桑江朝比呂（港空研） 沿岸分野の各学会における気候変動対応：学会間のトレードオフとシナジー効果を 明らかにする	・・・ 1
藤井賢彦（北大院地球環境） 地球温暖化・海洋酸性化が日本沿岸の海洋生態系や社会に及ぼす影響	・・・ 2
石川洋一（JAMSTEC：海洋研究開発機構） 今後の気候変動研究における課題 - JpGU の視点から-	・・・ 4
伊藤進一（東大大気海洋研） 水産海洋学から期待する沿岸域における気候変動に関する研究	・・・ 5
瀬戸雅文（福井県大海洋生物資源） 水産環境整備における気候変動への適応策と課題	・・・ 7
森 信人（京大防災研） 気候変動の沿岸部への物理的影響評価と適応	・・・ 9
有働恵子（東北大災害国際研） 全国の砂浜消失将来予測と適応策	・・・ 11
多部田茂（東大新領域） 船舶海洋工学分野における課題と取組みの現状	・・・ 13
川辺みどり（海洋大学術研究院） 気候変動影響対応を含めた沿岸域管理	・・・ 15
山北剛久（JAMSTEC） 生態学に関連した気候変動研究の数と事例	・・・ 17
西川哲也（兵庫水技セ） 海域環境と植物プランクトン群集，特に有害藻の長期変動	・・・ 19
澤山周平（中央水研） 気候変動対応において沿岸域のベントス研究が果たすべき役割について	・・・ 20
山野博哉（国環研） サンゴ礁域における気候変動対応で解決すべき課題	・・・ 22

沿岸分野の各学会における気候変動対応： 学会間のトレードオフとシナジー効果を明らかにする

桑江朝比呂（港湾空港技術研究所）

キーワード：アンケート・発表件数分析・学際型研究

沿岸域における気候変動に関する研究は、気象、海洋物理・化学・生物、生態学、政策学、経済学など、非常に多岐にわたる学術分野あるいは学会において進められている。しかしながら、気候変動学があまりに広範で総合的であるために、各学会における取り組みが共有されているとは言い難い。

この状況をふまえ、本ジョイントシンポジウムでは、はじめに、土木学会海岸工学委員会が沿岸域における気候変動に関連する様々な学会に対して実施した「今後の我が国の沿岸分野における気候変動対応で取り組むべき課題」に関するアンケート（下記の表からキーワードを選択）の結果を紹介し、各学会の特徴や差違を明らかにする。

続いて、各学会の専門家から、過去～現在までの気候変動に対する関心事、そして今後の取り組みについてご講演いただく。

最後に、各学会からの内容を横断的にみて、今後の取り組みに関するシナジー効果やトレードオフについて、パネルディスカッション形式で議論する。そして、抽出されたシナジー効果

をより高めるため、そしてトレードオフをより軽減するために、各学会がどのように連携できるのか、その可能性について議論する。

アンケートを配布した学会

- 土木学会※
- 日本沿岸域学会
- 日本海洋学会
- 日本地球惑星科学連合（JpGU）
- 日本水産学会※※
- 日本水産工学会
- 水産海洋学会
- 日本海洋政策学会
- 応用生態工学会日本ベントス学会
- 日本プランクトン学会
- 日本サンゴ礁学会
- 日本マングローブ学会
- 日本生態学会
- 日本自然災害学会
- 水文水資源学会
- 日本船舶海洋工学会
- 日本水環境学会

	自然現象	人間活動への影響	緩和・適応策
物理	101 海面上昇 102 海流・海洋構造 103 台風・低気圧 104 気温・海水温 105 降水・積雪・乾燥 106 淡水（河川、地下水）流入	201 浸水被害 202 塩水被害 203 国土減少・海岸侵食 204 極端気象・気候 205 施設機能低下	301 ハード（構造物、施設など）による浸水対策 302 沿岸土地利用の変更（居住地、産業立地） 303 洋上風力 304 海水冷却 305 リスク管理 306 ガバナンス・制度の改善
化学	111 温室効果ガス 112 栄養塩・濁度 113 海洋酸性化 114 貧酸素		311 海洋アルカリ化 312 海域でのCCS（二酸化炭素の回収と貯留）
生物	121 海洋動物 122 海洋植物 123 海洋微生物	221 生物多様性の減少 222 水産物の減少 223 生物の生息域の移動 224 藻場の磯焼け 225 サンゴ白化・消滅	321 品種改良（有用生物の高水温耐性化） 322 漁業管理
生態系		231 生態系サービスの劣化	331 生態系管理（外来種対策、自然再生） 332 グリーンインフラ 333 ブルーカーボン
その他 （自由記述）	191 上記以外の自然現象	291 上記以外の影響	391 上記以外の緩和策（CO2排出抑制、吸収源対策など） 392 上記以外の適応策（被害の軽減策など）
	991 その他（分類に該当しない課題） 999 課題はない		

地球温暖化・海洋酸性化が日本沿岸の海洋生態系や社会に及ぼす影響

藤井賢彦（北海道大学 大学院地球環境科学研究所）

キーワード：地球温暖化・海洋酸性化・沿岸生態系・沿岸社会・緩和策・適応策

1. はじめに

海洋における地球温暖化影響として目下、最も顕著な現象は海水温上昇であるが、ここ 100 年間の上昇速度は世界平均で 0.5°C 程度である¹⁾。この上昇速度は海域によって異なり、一般に極域や高緯度域でより速いことが報告されている。現に、日本近海でも世界平均を上回る速度で水温上昇が起こっており、この傾向は将来的にも続くと考えられる。加えて、人為起源 CO_2 が海水に溶け込むと、弱アルカリ性の海水が中和され、徐々に中性あるいは酸性の方向に向かう。海洋酸性化と呼ばれるこの現象も近年知られるようになった。

人為起源 CO_2 の過剰排出が続く限り、地球温暖化・海洋酸性化は今後も進行することが懸念される。ここではこれらの現象が海洋生態系や人間社会にどのような影響を及ぼし、またその悪影響を軽減・回避するためにはどのような対策が求められるかを、日本沿岸を例に紹介する。

2. 地球温暖化による影響

2.1. 海水温上昇が海洋生物の存在量・生息域・多様性に及ぼす影響

海水温上昇に伴って日本近海のサンゴ生息可能域は高緯度側に移行している。一方、沖縄県など亜熱帯域や世界中の熱帯域では、高水温によるサンゴの白化現象が近年、頻繁に見られるようになった。このままのペースで地球温暖化が進行すると、その分、高水温の頻度・強度がさらに高まり、今世紀後半には沖縄近海のサンゴが絶滅してしまう可能性が示唆されている²⁾。

九州や四国では、サンゴ同様、南方系（暖水性）ホンダワラ類などの亜熱帯性海藻がその分布北限を高緯度側に拡大し、優占種が元々の在来種であるカジメなどの温帯性海藻から置き換わりつつある^{3),4)}。また、近年の海水温上昇に伴い、アイゴ、ノトイヌズミ、ブダイといった植食魚の活動期間が長くなり、結果として海藻への食害も深刻になってきた。このような、海水温上昇による生息域の縮小と食害の拡大というダブルパンチとも言うべき影響により、日本近海の温帯性藻場は衰退の一途をたどっている。北日本では和食に不可欠なコンブが著しく減少することが予測されている⁵⁾。これらの傾向は、今後の人為起源 CO_2 排出量の多寡にもよるが、

将来も続くと懸念される。藻場はアワビやウニといった重要水産種を育むゆりかごでもあり、藻場の衰退はこれらの水産資源の枯渇をも意味する。

2.2. 海水温上昇が水産食資源供給に及ぼす影響

北日本において極めて重要な水産対象種であるシロザケは、その好適水温が $8\sim 12^{\circ}\text{C}$ であることが知られている。一方、将来的にこのような水温環境が日本近海では少なくなってしまう、日本近海からシロザケが消滅してしまう可能性も示唆されている⁶⁾。同じく重要な水産対象種であるサンマは、餌となる動物プランクトンが海水温の上昇と共に減少することで、一個体の体長や体重が低下することが懸念される⁷⁾。一方、海水温上昇により成長が速くなり、仔稚魚時代により捕食者に捕食されたり死亡したりする機会が減って個体数が増える可能性もある。さらに、漁場が日本近海よりも北に、漁期が秋から冬にシフトする可能性も示唆されており、将来的には旬を求める日本人特有の花鳥風月にも影響する可能性がある。

3. 海洋酸性化による影響

3.1. 海洋酸性化が海洋生物に及ぼす影響

これまでに、 CO_2 濃度を増加させた水槽中で海洋生物を飼育した実験結果や、実際の沿岸域での群集構造の解析結果などから、海洋酸性化が様々な海洋生物に悪影響を及ぼす可能性が示唆されている。特に、海水中の CO_2 濃度の増加は炭酸イオン (CO_3^{2-}) 濃度の減少をもたらすので、炭酸イオンを利用して炭酸カルシウムや炭酸マグネシウムの殻や骨格を形成するプランクトン、サンゴ、貝類、甲殻類、棘皮動物など石灰化生物の生存が脅かされることが強く懸念される。また、これらの殻や骨格を持たない生物でも、酸性度の高い（アルカリ性の弱い）海水中では受精や初期発育段階での支障、あるいは嗅覚に対する支障といった形で生物に悪影響が及ぶ可能性がある^{8),9),10)}。

石灰化生物は、地球温暖化と海洋酸性化という、人為起源 CO_2 がもたらす“双子の現象”の影響をダブルで受けることになる。例えば、日本近海のサンゴの生息域は、地球温暖化と海洋酸性化の影響を同時に考慮すると今後縮小してい

くと懸念され、今世紀末までに日本近海にサンゴが生息できなくなる可能性が示唆される¹¹⁾。

3.2. 海洋酸性化が人間社会に及ぼす影響

地球温暖化同様、海洋酸性化も海洋生物に対する直接的な影響を介して、人間社会、とりわけ水産業や観光業をはじめとする地場産業に対しても深刻な打撃を与える可能性が懸念される。

サンゴ礁が有する高い生態系サービスの相当部分が精神的・文化的利益であるが、海洋酸性化によってサンゴやそれを取りまく生態系が劣化してしまうと、ダイビングに代表されるレクリエーションや観光業なども衰退する可能性がある。将来的には、世界的な経済成長に伴い、サンゴ礁を舞台とするレクリエーション活動も伸びてサンゴ礁に関する経済波及効果が大きくなる分、海洋酸性化によるサンゴの劣化による経済的損失はさらに拡大する恐れがある。

海洋酸性化を含む様々な要因によって将来的に天然物が減少するようならば、養殖で補うことも必要となるだろう。一方、世界の海面養殖業の大半が、無給餌養殖が可能な貝類を含む軟体動物類と甲殻類である。これらの養殖対象種の多くは石灰化生物であり、従って海洋酸性化は地球温暖化と同様、将来の養殖業に対して深刻な影響を及ぼす可能性が懸念される。

4. まとめ

地球温暖化・海洋酸性化が海洋生態系や社会に及ぼす影響を極力回避するためには、人為起源 CO₂ の排出削減による緩和策はもとより、観光業や水産業などを中心に、海洋生態系の変化に応じた適応策を順応的に講じていく必要があるだろう¹²⁾。

世界の漁業生産量に占める養殖生産量の割合が増加の一途を辿っている現状に鑑みると、今後は陸上養殖を含めた養殖技術のさらなる改良や養殖対象種や養殖場所の選定、海洋酸性化に対して特に脆弱な初期発生段階は低 CO₂ 環境で飼育するといった適応策も視野に入れていく必要があるだろう。

社会に求められる適応策は技術的なものに留まらない。例えばトラフグは現在、大半が大阪以西の西日本で消費されているが、有毒ゆえ調理の際にはふぐ調理師の免許が必要であり、将来的に養殖適域が西日本から東日本ひいては北日本に遷移した場合、それに応じてふぐ食文化も移行させるのか各地域での判断が求められる。

緩和策と適応策は独立したものではなく、人為起源 CO₂ の抑制が遅れば遅れるほど、影響

回避に求められる適応策の敷居も高くなることを肝に銘じておく必要がある¹³⁾。地球温暖化に対しては CO₂ 以外の温室効果ガスの排出抑制や日射量の人為的な抑制が緩和策として有効に働く可能性も残されているが、海洋酸性化に対しては人為起源 CO₂ の排出を削減する以外に有効な緩和策は今のところ存在しない。

一方、地球温暖化・海洋酸性化が海洋生態系に及ぼす影響の解明は、相手が生物である以上、一筋縄でいかない場合も多く、得られた研究結果にも少なからず不確実性が内在する。さらに人間社会に対する影響となると、これらの現象の主因である人為起源 CO₂ の排出量自体がダイナミックに変化している状況においては、十分な精度での評価・予測は至難の業である。しかし、数多くの制約があるにせよ、研究に対する社会の要請がどこにあるのかを常に念頭に置きつつ、地球温暖化・海洋酸性化の複合影響とその不確実性を努めて定量的に評価・予測した上で、優先的に対策を講じるべき海域、及びその適切な範囲や時期に関する科学的指針を精確かつ迅速に社会に対して提示していくことが求められている。

参考文献

- ¹⁾ IPCC, Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 1132pp, 2014.
- ²⁾ 屋良 由美子ら, 日本サンゴ礁学会誌, 11, 131-140, 2009.
- ³⁾ Takao, S. et al., Ecology and Evolution, 5, 213-223, 2014.
- ⁴⁾ Kumagai, N. H. et al., PNAS, 115(36), 8990-8995, 2018.
- ⁵⁾ Sudo, K. et al., Ecological Research, DOI: 10.1111/1440-1703.12053, 2020.
- ⁶⁾ Kaeriyama, M. et al., Environmental Biology of Fishes, 94(1), 165-177, 2012.
- ⁷⁾ 伊藤 進一, 月刊海洋, 39, 303-308, 2007.
- ⁸⁾ Morita, M. et al., Zygote, 18, 103-107, 2009.
- ⁹⁾ Munday, P. L. et al., PNAS, 106(6), 1848-1852, 2009.
- ¹⁰⁾ Onitsuka, T. et al., Marine Environmental Research, 134, 28-36, 2018.
- ¹¹⁾ Yara, Y. et al., Biogeosciences, 9, 4955-4968, 2012.
- ¹²⁾ 藤井 賢彦, 月刊海洋, 50(8), 208-216, 2018.
- ¹³⁾ Gattuso, J.-P. et al., Science, 349, 6243, aac4722-9, 2015.

今後の気候変動研究における課題 - JpGU の視点から -

石川洋一（海洋研究開発機構）

キーワード：JpGU・発表件数分析・学際型研究

日本地球惑星科学連合（Japan Geoscience Union; 以下 JpGU）は、その名称の通り地球惑星科学に関わる学協会や関連分野の研究者・技術者などから構成される学術団体で、2005年に地球惑星科学の関連学協会を束ねる組織として発足した。2017年3月末時点で個人会員9000名以上、団体会員49学協会から構成されており、沿岸環境関連学会連携協議会（以下沿環連）からは日本海洋学会が団体会員となっている。

JpGUの活動の主体となるのは、地球惑星科学全体をサイエンスの視点で大まかに区分した「宇宙惑星科学」「大気水圏科学」「地球人間圏科学」「固体地球科学」及び「地球生命科学」の5つのサイエンスセッションであり、気候変動に関わる研究活動は主に「大気水圏科学」「地球人間圏科学」の2つのセッションがカバーしている。主な活動は春に開催される学術大会（日本地球惑星科学連合大会）、学術雑誌「Progress in Earth and Planetary Science」の出版であり、ここでは連合大会での発表件数とアンケート結果をみながら JpGU における気候変動研究の傾向を考察してみたい。

図1は連合大会の発表にウェブ上でキーワード検索を行うことができるようになった2014年以降の「気候変動」および「地球温暖化」のキーワードによってヒットした発表件数の推移を示したものである。

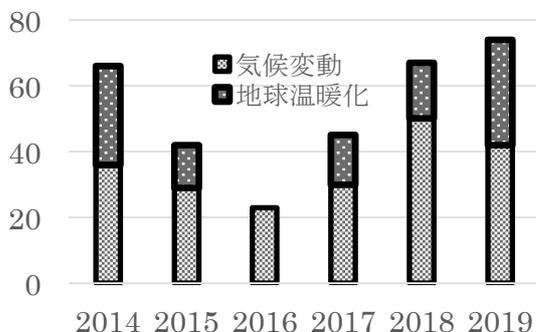


図1: 地球惑星科学連合大会において「地球温暖化」および「気候変動」のキーワードに該当する発表件数の推移

連合大会の発表はセッション提案制をとっており、2014年にはIPCC第5次報告書と関連した気候変動研究に関するセッションが、2017年からは気候変動適応に関するセッションが設けられたことがこのような発表件数の推移に現れていると考えられるが、それ以外のセッションでの発表なども2017年以降だんだん増加してきており、気候変動への興味の高まりが感じられる。

このような状況を踏まえ、今回行われたアンケートについて JpGU 所属として回答された結果をみると、予想通り沿環連と JpGU 両方に関わっている海洋学会との類似性が見て取れる。主な傾向としては「自然現象」のカテゴリーに分類される、「気温・海水温」、「海面上昇」、「温室効果ガス」、「台風・低気圧」で相対的に高いスコアを示しており、地球惑星科学をベースにして自然現象の理解に関心が高い研究者が回答の中心であることが見て取れる。特に「海面上昇」「台風・低気圧」に関しては海洋学会と比べても高い関心を集めており、気象・気候関係など他の分野の研究者からの回答があったのかもしれない。一方で、「人間活動への影響」にカテゴライズされる項目については、相対的に低いスコアとなっており、特に「水産物の現象」や「漁業管理」に関心のあるとした回答は際立って少ない。実際、連合大会における過去の研究発表題目をみても、自然生態系に関する発表はそれなりに散見されるものの、水産に関連した発表はほとんど見られず、分野間の関心の違いを示すものとなっている。

ここでは JpGU 連合大会における過去の発表とアンケートの簡単な分析を行った結果を示したが、発表時にはこれらをもとに JpGU が今後の気候変動研究にどのような役割を果たしているについても。

水産海洋学から期待する沿岸域における気候変動に関する研究

伊藤進一（東京大学大気海洋研究所）

1. はじめに

人為起源の温暖化気体による地球温暖化は、地球環境を変え、地球上の生物そして人類に様々な形で影響を与えつつある。その影響は、大気、陸域、海洋、雪氷圏と地球表層圏全域に渡り、水循環、食料生産、居住環境、健康、生活環境、経済活動、社会構造、貧困、など様々な要素に深く関係する (IPCC-AR5)。このため、本シンポジウムの焦点となる沿岸域について考えた場合にも、単純に陸地に近い海域だけでなく、海域に流れ込む河川やその流域、陸上、そしてその沿岸域で暮らす人々の社会を考慮しなければならない。また、科学的な知見を応用すべき項目としても、地球温暖化による環境変化そのものの検知、将来予測、生態系や関係する要素への影響評価、それらに関する過程、影響を緩和するための適応策、温暖化気体そのものの排出を削減するための対策、と広範囲に及ぶ。これらの課題に向け、国内でも文部科学省や環境省が中心となって、研究の推進を行っているが、残念ながら日本全体の研究者の規模を考えた場合、それほど多くの研究者が地球温暖化に関する研究に携わっているとは言えない（関係論文数で世界13位、3.1%）。海洋（関係論文数で世界8位、5.6%）についてやや改善するものの、沿岸域（関係論文数で世界9位、4.9%）についてもこの状況は基本変わらない。

地球温暖化問題の根が深い理由の一つに規模がある。地球規模で起こっている現象のため、原因と結果の間に大きな時間差が生じる。例えば今すぐ温室効果ガスの排出を停止しても、21世紀半ばまでは地球全体で平均した地上気温は上がり続ける。つまり、地球が熱的に平衡状態になるまでに数十年も要してしまう（実際には深層海洋大循環のスケールを考えると1500年以上になるが）ため、その原因を作っている人類が結果の深刻さを認識するのが遅れてしまうという問題を含んでいる。これからますます深刻化していくことが予想される地球温暖化に直面し、日本の科学コミュニティとしてもより強固な連携体制のもと研究を進めることが望まれる。そ

のような背景のもと、報告者から水産海洋学の知見から必要と考えられる「沿岸域における気候変動に関する研究」について個人的な意見を述べる。

2. 検知

まず重要となるが、今、沿岸域でどのような変化が起きているのかという検知である。陸上と違い、海洋には人間が住んでいないため、海洋内部の現象、そしてそこに生息する海洋生物については、未知な部分が多く残されている。そのため、地球温暖化に伴いどのような変化が起きているのか検知することは容易ではない。しかし、幸いにも日本は海洋モニタリングという点では、世界でも最も古くから継続してきた国の一つである。このため、水温、塩分、動物プランクトン、魚類の卵稚仔、魚類、海藻、海草、サンゴなどの継続的なモニタリングが行われている。これらの基礎的モニタリングを継続し、それらのデータから変化を検知することが重要である。これに加え、地球温暖化の影響を大きく受けると考えられる栄養塩、微量金属、溶存酸素量、pH、二酸化炭素分圧などの海洋環境モニタリングを強化するとともに、微生物叢、植物プランクトンなどの観測を強化し、生物相の変化を検知することが重要である。また、近年の発達してきた環境DNAを用いたモニタリングも展開していくべきであろう。

地球温暖化がもたらす海洋生態系へのリスク要因としては、水温上昇、貧栄養塩化、貧酸素化、海洋酸性化が主と考えられているが、上記のモニタリングを継続することで、それらのすべてを包括的に監視することができる。

一つ、残念なこととしては、海面漁獲に関する統計が近年簡略化されつつある問題がある。例えば、シイラ、トビウオ、ボラなどは暖水域を好む魚類であり、地球温暖化の進行とともに、その分布域が日本沿岸域で北上することが予想される。ところが、農林水産省が行っている海面漁業生産統計調査の海面漁業魚種別漁獲量累年統計では2007年以降、これらの魚種の個別の漁獲量は記載されておらず、その他の魚種とし

てまとめられてしまっており、個々の魚種の漁獲分布の推移を追うことができなくなっている。今後、地球温暖化の影響が深刻になる中、このような統計の劣化は是非とも改善すべきである。

3. 将来予測

地球温暖化の進行とともに、沿岸域の海洋環境がどう変化するのか、将来予測を行うことは、今後の適応策を考える上で、必要不可欠な一歩であるが、現在のIPCCの評価報告書で使用されている気候モデルの解像度は数十km以上であり、沿岸域の現象はほとんど解像できていないと言わざるを得ない。このため、沿岸域のより高解像度なモデルを組み込んだネスティングが必要とされる。すでにネスティングによる沿岸域の高解像度モデルを用いた将来予測実験が実施されているが、それらのモデルに低次栄養段階生態系モデルを結合させ、栄養塩循環、基礎生産、二次生産の将来評価を実施する必要がある。

また、上記の低次栄養段階生態系モデルから出力される餌料動物プランクトンの情報、そして海洋大循環モデルから出力される水温、海流などの情報をもとに、海洋生物の成長－生残－移動－再生産モデルなどを走らせ、将来の海洋生物の応答を評価することも必要となる。

しかし、ここで大きな障壁となるのが、海洋生物に関する大きな知識ギャップである。多くの海洋生物において、生活史そのものが未だ不明なものが多く、生物間の関係も不明な点が多い。これら、基礎的な知見を積み上げていくことが必要不可欠である。特に最近では飛躍的な技術の進歩によって、魚類の回遊経路を推定する方法が発展してきた（アーカイバルタグ、耳石酸素安定同位体など）。これらの技術を組み合わせ、沿岸域の海洋生物に関する基礎的な知見を積み上げ、生活史を解明するとともに、海洋環境変動が沿岸域の海洋生物に影響を与えるメカニズムを解明していくことが重要である。その知見を用いて将来予測を行うことで、地球温暖化が沿岸域の海洋生物に与えるリスクを評価することが可能となる。

4. 他研究領域との連携

上記の海洋環境変動が沿岸域の海洋生物に影響を与えるメカニズムの解明において、重要となるのが、他研究領域との連携である。当然の

ことながら、陸域からの物質負荷の変化は沿岸の海洋環境に影響を与える。陸域からの物質負荷は河川からだけではなく、地下水や大気を通じて行われる。したがって、多岐にわたって沿岸域の陸上の人間活動の影響を受ける。また、沿岸域の海洋生物は食料資源としても利用されているため、漁獲負荷を通して直接影響するとともに、養殖活動を通じて海洋環境が変化することにより間接的に影響する。これに加え、船舶航行に伴う物質負荷や、バラスト水などによる外来生物の移入、海上風発電などの構造物による環境変化など、様々な要素を通じた海洋生物への影響が考えられる。これらの影響が、自然環境変動や地球温暖化による影響と重なり、実際の海洋生物の応答が決定されているため、メカニズム解明には、様々な研究領域による連携が必要不可欠となる。

5. 適応策と対策

気候変動適応法が2018年6月13日に公布、2018年12月1日に施行され、国、地方公共団体、事業者、国民が連携・協力して適応策を推進するための法的仕組みが整備された。これに先立ち1998年に成立した地球温暖化対策推進法と併せて、温暖化気体排出の削減とその影響の緩和を実施することになる。

気候変動適応法においては、都道府県及び市町村に、地域気候変動適応計画の策定に向け努力することが義務づけられているが、沿岸域における適応策の策定には、沿岸域の生態系構造の理解、そしてその変動メカニズムの理解が必要不可欠となる。また、海洋生態系の頑強性を向上させるため、海洋生態系の健全性を維持する必要がある、そのための海洋生態系の適切な管理手法の開発が必要でとなる。

さらに、地球温暖化の進行とともに、熱波やこれまでに経験のない強度の台風の発生など、極端現象の頻発化が予想される。これらの極端現象に対するリスク管理も重要となってくる。

このように水産海洋学的な立場からだけでも、他分野に渡る研究が必要とされている。その多くは、「国連持続可能な開発のための海洋科学の10年」が目指す内容と合致しており、国内外の研究者、関係者とともに取り組むべき絶好の機会を得ていることを特筆したい。

水産環境整備における気候変動への適応策と課題

瀬戸雅文（福井県立大学海洋生物資源学部）

キーワード：水産環境整備・粗放的造成・鉛直混合促進・順応的管理

1. はじめに

日本水産工学会は水産生物の生息場としての藻場、干潟の保全や再生、漁場・増養殖場の造成、環境にやさしい漁具・漁法の開発、漁船工学と安全操業に関わる技術開発など、水産工学全般を研究対象とするが、近年、海水温の上昇、回遊性魚介類の分布・産卵域の変化、高波浪や海流流路の変化など、気候変動に関わる諸現象が水産環境整備（水産生物を涵養する生態系を底上し、生活史の空間的なつながりを考慮に入れた生息環境空間の創出）に及ぼす影響に関心が高まりつつある。

気候変動に伴う海水温の上昇は、魚介類の分布・回遊域や造成漁場の構成種に変化をもたらしている。南方系の藻食性生物による摂食行動の活発化は、藻場の衰退や磯根資源の減少に拍車をかけ、海面上昇による干潟の減少や海洋酸性化に伴うサンゴ礁の消滅が懸念されている。

水産庁漁港漁場整備部は、2017年6月、「気候変動に対応した漁場整備方策に関するガイドライン」を公表し、藻場・岩礁域、干潟・砂浜域、サンゴ礁、沿岸・沖合域のそれぞれの海域について、漁場整備に関わり短期的、中長期的に想定される対策を整理した（図1に、同ガイドラインの対策一覧表を一部改変して示す）。

本シンポジウムでは、粗放的造成技術、鉛直混合促進構造物、順応的漁場管理システムを中心に、気候変動の適応策における水産工学の役割や技術革新の可能性を模索する。

2. 粗放的造成技術

藻場や干潟は気候変動に伴う長期トレンドの影響を受けながら、比較的短期的に環境が変化するため、環境条件に応じて対象海域や造成規模を柔軟に再調整しながら繰り返し再生できる工法が効果的である。これらの環境再生活動を定着させるために、多様な主体が、安全・安価・容易で、安心して継続可能な市民実践型の再生

プロセスの確立が急がれる。

鉄粉でコーティングしたアマモ種子や、直径1 mm程度の顆粒状の高比重基質に着生させた海藻種苗を、海上より散布する藻場造成手法や、着底に有利な粒径の底質を浮遊幼生の着底期にタイミングを絞って覆砂する二枚貝の着底促進手法などの粗放的な生息場造成技術は、気候変動に応じて再生規模や密度を調整しながら持続可能な新たな再生プロセスと位置づけられる。生物が備える生態系エンジニアとしての環境修復能力や環境適応能力を、漁場の造成や管理に積極的に生かす今後の取り組みに注目したい。

3. 鉛直混合促進技術

気候変動に伴い成層強度が増加した海域において、密度躍層に適度な外的攪乱を与えて鉛直混合を促進させる技術を開発できれば、有光層への栄養塩類の供給を助長したり、貧酸素水塊の成長を抑制するための新たなプロセスを提供できる。着底式の人工湧昇流発生構造物を用いた鉛直混合効果の発現が困難な大水深海域においては、浮体式構造物を躍層付近に配置して上下混合を促進させたり、上下混合機能を備えた垂下式養殖施設の開発などが期待される。

4. 順応的漁場管理システム

水産資源を取り巻く種々の環境要因は、変動性と不確実性に満ち溢れている。このため、対象生物の世代時間や造成効果の発現時間を基準として、漁場施設の耐用年数なども加味しながら、資源トレンドや整備シナリオの妥当性を再確認し、整備の効果に応じて事業の規模や進め方を改善する取り組み（PDCAサイクル）が必要となる。PDCAサイクルを持続するためには、多様な主体との協働を視野に入れた実施体制の整備が重要となるが、そのためには客観的で科学的な背景に基づいた合意形成ツールの開発や、安全・安価・容易に実施できるスマートモニタリング手法（ICT技術）の開発が急がれる。

施設	対象	気候変動	影響	水産環境整備に関わる気候変動対策	
				短期的	中長期的
増殖場	藻場 岩礁域	水温上昇・塩分低下	構成種変化、藻場衰退	耐性種の粗放的造成技術開発 局地性湧昇域の藻場保全強化 海洋深層水利用による藻場修復	藻場情報プラットフォームの運用 粗放的広域藻場造成技術の普及
			分布域の北上	新出種に配慮した複合藻場造成 群落移動分散促進技術の開発	藻場ITC技術(分布、構造、保全・ 造成適地選定)の進展
			食害生物の増加・活性化	生物間相互作用による藻場造成 立体構造に応じた藻場造成 食害生物の除去・利活用(漁獲) 食害防御(流動、混植、フェンス等)	多様な主体による順応的管理促進
			磯根資源の減少	水温変動を加味した造成適地選定 餌料・着底用小型海藻群落造成	
		産卵・保育場機能の低下	藻場縁辺域の産卵・保育場創出	生息場ネットワークの頑強性向上	
		気象災害の激甚化	磯根資源の成長阻害 海藻草類の流失	港湾・海岸保全施設の水産協調化 流れ藻・寄り藻捕捉施設の整備	ブルーカーボンの深層輸送過程・貯留効果の解明
	海面水位の上昇	分布水深帯の変化	嵩上げ・基質確保		
	海洋の酸性化	海藻の成長促進・石灰化海藻の減少		ブルーカーボン生態系による緩和	
		磯根資源の成長阻害		人工種苗中間育成施設の整備	
	干潟 砂浜域	水温上昇・塩分低下	浮遊幼生分散過程の変化	中核個体群を取り巻く増殖場配置 作濡・覆砂・基質等による着底促進	生息場ネットワークの頑強性向上
			食害生物・病害虫の顕在化と分布域北上	食害生物の除去、食害の防護 食害生物の漁獲促進・販路拡大	食害抑制に配慮した適正密度広域移植
			貧酸素水塊・青潮の形成・遡上	曝気、防除幕、地盤高調整 浚渫・耕耘・覆砂による形成緩和	潜砂性二枚貝の垂下増殖 耐性種の移植放流
		気象災害の激甚化	出水流路変化、浮泥堆積、ゴミ漂流・漂着	浚渫、作濡、耕耘、覆砂、回収	多様な主体による順応的管理促進
			高波浪による分散・打上げ	覆砂材による流出抑制、深所化 港湾・海岸保全施設の水産協調化	
		海面水位の上昇	構成種・分布域の変化 水質浄化機能の停滞	地盤高調整、人工干潟の造成 生物多様性に配慮した造成計画	干潟再生・移植技術の進展 多様な主体による順応的管理促進
	海洋の酸性化	貝殻の溶解・脆弱化 成長阻害		人工種苗中間育成施設の整備	
	サンゴ 礁	水温上昇・塩分低下	白化・適水温帯の北上	高温耐性種の種苗育成	面的保全・回復技術の開発
			食害生物の増加・活性化	食害生物の除去、食害の防護	
		気象災害の激甚化	高波浪による破壊	瓦礫からの防御(蛇籠等)	
			出水による赤土流入	水質保全対策事業等の活用	
海洋の酸性化	石灰化機能の低下		耐性種の移植		
内湾・ 沿岸域	水温上昇・塩分低下	貧酸素水塊・青潮の顕在化	順応的漁場管理システムの導入	大規模環境変化(導水・開削・掘削・埋戻し等) ブルーカーボン生態系と融合した気候変動緩和型漁場整備の進展	
		成層強化・混合層深度低下による基礎生産変	鉛直混合促進構造物(テーノ型中層浮魚礁・養殖施設等)の整備		
	海洋の酸性化	石灰化生物(甲殻類、円石藻等)の成長阻害	ブルーカーボン生態系による緩和		
魚礁	内湾・ 沿岸域	水温上昇・塩分低下	対象種の変化	適応水深帯の拡張(魚礁群の深淺配置、高層魚礁の整備、大水深域の漁場整備推進)	魚礁情報プラットフォームの運用 漁場ICT技術(海況・蛸集データリアルタイム提供)の進展 新たな魚種の高付加価値化・販路拡大
			回遊時期・経路の変化	漁況変化に適応した漁場(規模、機能)の分散配置と相互連携強化	
		貧酸素水塊の発達・波及	低酸素抑制施設、鉛直混合促進構造物の整備		
		気象災害激甚化	海底擾乱	沿岸外力変化の施設安定性反映	

図1 水産環境整備に関わる気候変動対策の一覧

気候変動の沿岸部への物理的影響評価と適応

森 信人 (京都大学・防災研究所)

キーワード：気候変動・海面上昇・波浪・高潮・沿岸災害

1. はじめに

温室効果ガスによる気候の長期変化（気候変化・気候変動）の影響は、気温上昇や海面上昇だけでなく様々な影響を与えることが予測されている。予想されている将来の温かい気候条件は、台風・熱帯低気圧（以下台風）発達に重要な海洋の海面温度の上昇や大気の安定度の変化が予想され、台風の強度や発生頻度にも影響を与えることが疑われている。

気候変動の影響の中で、我が国の沿岸部における自然災害への影響として重要なのは、海面上昇、高潮および高波というハザードの変化予測であり、これと関連して沿岸部の脆弱性の将来変化や適応策が重要となる。台風特性の将来変化は、日本周辺海域の高潮や高波の特性に顕著な影響を与えることが予見されている（例えば、Mori・Takemi, 2016）。また、気象庁他（2018）「統合レポート」では、これら我が国の気候変動の予測・影響がまとめられ、知見が集積しつつある。これらについて紹介したい。

2. 海面上昇の将来変化予測

我が国における海面上昇の長期評価は、世界平均の海面水位にみられるような明瞭なトレンド上昇の傾向がこれまでみられないこと、1990年代以降は上昇傾向と共に約10年周期の変動が確認できると報告されている（気象庁, 2013）。

一方、温暖化に伴う将来の海面上昇についてはシナリオ毎の定量的な予測と影響評価が行われ、IPCC AR5 で予想された全球の平均海面の変化は、RCP2.6で0.26~0.55m, RCP4.5シナリオで0.32~0.63m, RCP8.5シナリオで0.45~0.82mであり、IPCC 特別報告書 The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC)では、世紀末の将来変化は+0.2m程度増加することが予想される。

また、熱輸送による海面上昇は全球で一様ではなく、黒潮など熱輸送が大きな海域では全球平均より大きな水位上昇が起こるため、領域・国レベル以下のスケールで海面上昇に対する定量

的な適応策を考える場合は注意が必要である。

3. 台風特性の将来変化予測

観測データの不足から、過去から現在に至るまでの台風の長期変化の傾向は、全球規模で熱帯低気圧の活動度が長期的に強まる傾向にあるかどうかは未だに確信度は低いと評価されている。将来変化についてはGCM(全球気候モデル)による検討が盛んに行われている。IPCC AR5では、台風（熱帯低気圧）については、温暖化に伴い全球でその頻度は減少もしくは変化しないとの将来予測がまとめられている。日本を含む北西太平洋では、弱いカテゴリ-Iの台風は減るものの、強いカテゴリ-IIの台風は増えるという予測が示されている。IPCC AR5の段階では全球気候モデルのパフォーマンスが低く、地域レベルの予測に対する確信度は低いとされている。

日本では、気象研究所の大気全球気候モデル(MRI-AGCM)による将来予測結果にもとづく台風の将来変化が精力的に行われており、2016年に公開されたMRI-AGCMを用いて5000年以上の長期の気候計算が実施された（略称：d4PDF; Mizutaら, 2017）。d4PDFでは、通常の100倍以上の長さの気候計算を行ったため、発生頻度が低い台風の領域スケールでの評価を可能とした。北西太平洋をはじめとする各海域で、台風の中心気圧は将来気候条件において顕著に低下する。特に、日本周辺の将来変化は全球平均より大きく、940hPa以下の強い台風は増加する（図-1）。発生数は減少するものの、920hPa以下の台風の超過確率は1桁増加することがわかった。

気候変動に伴う台風特性の将来変化は徐々に定量的になりつつある。領域スケールでの台風関連災害の影響評価には発生個数や強度に加えて台風経路の将来変化も重要である。

4. 高波特性の将来変化予測

波浪の将来変化については、Sea Level

Extreme として IPCC-AR5 の WGI 第 13 章と WGII 第 5 章に別れてまとめられている。波浪については、AR5 において初めて将来変化について具体的な予測結果が掲載されており、北半球中緯度における平均波高の減少、南半球中高緯度における増加が中程度の確信度で予測されている。

筆者らの研究グループでは、高波浪の将来変化について、4 つの研究機関で行われた結果をアンサンブルデータとして、将来変化を解析した。図-2 に示すのは、再現期間 10 年の確率波高（極端波高）の将来変化のアンサンブル平均値と標準偏差である。図のように、極端波高の将来変化は、平均で 2m の将来変化を示し、北半球高緯度での増加傾向が顕著である。南氷洋での波高増加は、海氷の将来変化によるフェッチの変化の寄与が大きく現れている。北西太平洋については、極端波高の減少が顕著であるが、10 年確率波高では日本南岸での局所的な増加傾向が見られる。

冬季の低気圧による高潮の将来変化については、研究の緒についたばかりである。観測された爆弾低気圧の年間発生数はわずかに減少傾向、強い爆弾低気圧の発生数がやや増加傾向にある。温暖化に伴い、日本海側の高潮の将来変化にどのように変化するかについては、今後の研究の進展が必要である。

5. おわりに

海面上昇、台風および高波に関連する将来変化について、概説した。日本スケールまで踏み込んだ海面水位や波浪等の沿岸外力の長期変化についての研究は、数年前から本格的に始まっており、数年以内に実用的に利用可能になると思われる。また、これらの長期的評価に対する検証データとして、波浪および海面水位の長期的な現地データの蓄積は不可欠である。

我が国では、文部科学省や環境省におけるプロジェクトにおいて、研究が勢力的に進められており、また 2018 年に施行された「気候変動適応法案」に対応するため、国土交通省等の実務省庁と温暖化予測・影響評価研究が密に連携する必要がある。

参考文献

1. Mori, N. and T. Takemi (2016) Impact assessment of coastal hazards due to future changes of tropical cyclones in the North Pacific Ocean, *Weather and Climate Extremes*, Vol.11, pp.53-69.
2. 気象庁他 (2018) 「気候変動の観測・予測・影響評価に関する統合レポート 2018～日本の気候変動とその影響～」
3. 気象庁 (2013) 第 1 章 地球温暖化に関わる海洋の長期変化,
4. Mizuta, R. et al. (2017) Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models, *The Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS)*, July, pp.1383-1398. doi: 10.1175/BAMS-D-16-0099.1
5. 森 信人・志村智也・Mark HEMER・Xiaolan WANG (2017) CMIP5 にもとづく地球温暖化による高波の将来変化のアンサンブル予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 73(2), I_115

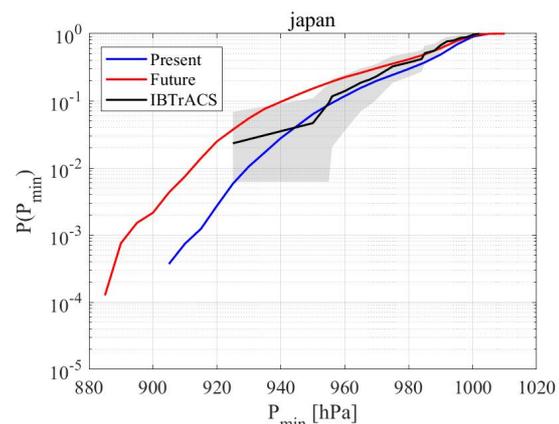


図-1 d4PDF にもとづく北西太平洋の台風中心気圧超過確率の将来変化。実線：アンサンブル平均，シェードは 95% の信頼区間，青：現在気候，赤：+4 度気候，黒：観測値 (IBTrACS)

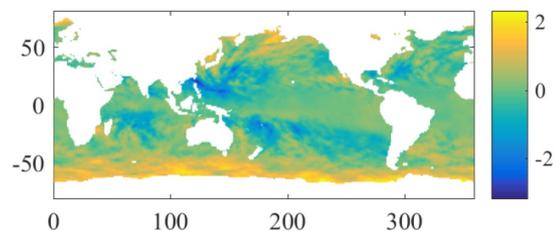


図-2 極端波高（再現確率 10 年）の将来変化の空間分布(RCP8.5 シナリオ, 単位:m), (出典：森ら, 2017)

全国の砂浜消失将来予測と適応策

有働恵子（東北大学災害科学国際研究所）

キーワード：砂浜地形変化・海面上昇・土砂生産量・Bruun 則・RUSLE

1. 緒言

気候変動に伴う海面上昇や降雨・波浪特性の変化が懸念されている。長期的に海面が上昇し、最大波高が増大すれば、砂浜消失リスクが増大し汀線が後退する。沿岸域に人口が集中する我が国では、汀線後退による多大なる影響が懸念される。

我が国の将来の砂浜消失に関しては、三村ら (1994) や Udo・Takeda (2017) などが Bruun 則 (1962) をもとに RCP シナリオに対する将来予測を行っている。Udo・Takeda (2017) は、全国の約 280 km² の砂浜の約 40~90% が 21 世紀末頃までに消失すると予測している。この予測の幅は、予測の際の算定条件の不確実性によるものである。なお、同様の評価はタイ王国においても行われており、全国のおよそ 55 km² の砂浜の約 20~90% が消失するという予測結果になっている (Ritphring et al., 2018)。予測における我が国とタイとの大きな違いは、我が国では砂浜の背後に堤防が整備されている場所が多く、内陸部の侵食が抑制されるのに対し、タイでは整備されていない場所も多く、予測された海面上昇量以上のシナリオに対してはより深刻な状況となりうることである。このような Bruun 則を用いた予測は、全球の砂浜消失についても行われている (Hinkel et al., 2013)。

本報では、我が国の全国スケールの過去の長期的な砂浜消失とその原因について振り返り、将来の砂浜消失予測の現状と課題について概説する。

2. 過去の長期的な砂浜消失とその原因

1900 年頃、1950 年頃、ならびに 1990 年頃の全国の砂浜幅の平均値は 70 m, 66 m, ならびに 43 m であり、1950 年頃から 1990 年頃にかけて急速に砂浜消失が進行した (有働ら, 2016)。この砂浜消失の原因を議論するには、降雨による土砂生産から河道における土砂移動、河川から海岸への土砂供給、ならびに深海への土砂損

失を考慮し、流砂系の土砂収支を考慮する必要がある。さらには海水位変化や地殻変動による相対的な海水位変化についても考慮しなければならない。流砂系の土砂収支を念頭に、河川から海岸への土砂供給や、河川における土砂量変化の海岸への影響について検討を行った例はいくつかあるものの (例えば Yuhi, 2008), 利用可能なデータの制約もあり、研究の蓄積は少ない。

有働ら (2016) は、流砂系の土砂収支 (河川から海岸への土砂供給) に関わる土砂生産量強度、ダム堆砂量、河川砂利採取量、河床高変化、相対的な海面水位変化など、利用可能な長期データを解析することにより、全国の流砂系土砂収支の空間解析を 77 沿岸区分別に試みている。1950~1990 年の 40 年間の土砂諸量の全国積算値について、土砂生産量強度は 56 億 m³ 程度、ダム堆砂量 (国土交通省提供) は 8 億 m³ 程度、川砂利および海砂利採取量 (経済産業省提供) は 16 億 m³ 程度および 7 億 m³ 程度と算定されている。なお、砂利採取量については許可量であり、実際の採取量は数倍 (村本, 1974) との指摘もある。土砂諸量の中で、特に川砂利採取量が顕著であるが、これは主に 1964 年の河川法改正で規制される以前に、戦後の急速な国土開発において建設材料として採取されたものである。河床高変化および相対的な海面水位変化については、全国の検討を行うのに十分なデータが存在せず有用な知見は得られていない。ここで、河川から海岸への土砂供給の指標として、土砂生産量強度からダム堆砂量および砂利採取量を差し引いて得られる、土砂供給ポテンシャルを定義する。1960 年代の実際の川砂利採取量が、例えば許可量の 3 倍であったとすると、1950~1990 年の土砂供給ポテンシャルは、56 億 m³ - 48 億 m³ - 8 億 m³ = 0 億 m³ となり、潜在供給量はなかったと算定される。ここでは河床高変化の影響を考慮していないが、考慮した場合には潜在供給量が大きくなる。

また、ここでは1950～1990年の積算値を示したが、時間変化についても把握する必要がある。これらについて、時空間的に詳細な土砂諸量データが得られる吉野川流域で長期解析を行ったものの寺(中ら, 2019), 地域レベルにおいても川砂利採取量の不確実性等により土砂収支の算定は困難であった。現在は流域全体の土砂輸送計算により、実態の把握を試みているところである。

我が国においては、1964年の河川法改正以降川砂利採取が規制されているため、今後も川砂利採取が海岸侵食の主要な原因として問題になる可能性は低い、過去の影響がどの程度のタイムラグで下流に影響を与えているのか今後把握する必要がある。また、ダム堆砂など他の要因の影響が相対的に大きくなる可能性がある。他国においても、発展途上国などを中心に、砂利採取が主要な侵食原因となるケースが報告されている(Anthony et al, 2015)。

3. 将来の長期的な砂浜消失

将来の砂浜変化の主要な原因としても、前節であげた河川から海岸への土砂供給の変化、深海への土砂損失、ならびに相対的な海面水位変化があげられる。将来は気候変動に伴い、降雨特性や波浪特性、海面水位の変化が予測されており、これらの影響を考慮する必要がある。

全国スケールのように比較的広域で海面水位変化の影響を考慮して砂浜消失を予測する際には、Bruun 則を用いて予測が行われる場合が多い。著者らは現在、この Bruun 則により算定された Udo・Takeda (2017) の予測結果に、土壌侵食モデル RUSLE をもとに d2PDF/d4PDF の降雨データを用いて算定した土砂生産量の予測結果を考慮して砂浜消失予測を行っている。さらに、砂浜幅を維持するコストとこれによる被害額軽減効果(ベネフィット)を算定し費用便益分析を行っている。

ここで報告した著者らの研究成果は、現在進行中の研究プロジェクトの一環として得られたもので、現在進行中の解析結果は今年度の最終報告書にとりまとめる予定である。

4. 結言

本稿では、気候変動の砂浜地形への影響につ

いて、過去の砂浜地形変化を総括するとともに、将来の海面上昇による砂浜消失、および、砂浜消失に影響を及ぼしうる気候変動要因等について概説した。数十年以上の長期の砂浜予測に関しては、世界でも有数のデータ蓄積国である我が国においてさえも、利用可能なモデル・データの両面で、求められる精度を実現するのは容易ではないのが現状である。今後さらに現実的な影響評価および適応策を検討していくことが求められる。

参考文献

- Mimura, N., Inoue, K., Kiyohashi, M., Izumiya, T. and Nobuoka, H., Assessment of sea-level rise impact on sandy beaches (2) — Verification of predictive model and national assessment, Proc. Coastal Eng., JSCE, 41, 1161–1165, (1994).
- Udo, K. and Takeda, Y., Projections of Future Beach Loss in Japan Due to Sea-Level Rise and Uncertainties in Projected Beach Loss, Coastal Engineering Journal, Vol. 59, No. 2 (2017).
- Ritphring, S., Somphong, C., Udo, K. and Kazama, S., Projections of future beach loss due to sea level rise for sandy beaches along Thailand's coastlines, Journal of Coastal Research, Sp. Iss. 85, 541-545 (2018).
- Hinkel, J., Nicholls, R. J., Tol, R. S. J., Wang, Z. B., Hamilton, J. M., Boot, G., Vafeidis, A. T., McFadden, L., Ganopolski, A. and Klein, R. J. T., A global analysis of coastal erosion of beaches due to sea-level rise: An application of DIVA, Global Planet. Change 111, 150–158 (2013).
- Udo, K., Takeda, Y., and Yokoo, Y., Relationship between potential sediment supply from river to sea and beach erosion in Japan, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering), 72, I_799-I_804 (2016).
- Yuhi, Impact of Anthropogenic Modifications of a River Basin on Neighboring Coasts: Case Study, J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng., 134, 336-344 (2008).
- Muramoto, Y., River disasters due to river channel process – on recent trends of river bed variation in Japan, Disaster Prevention Research Institute Annuals, 17A, 7-17 (1974).
- Anthony, E.J., Brunier, G., Besset, M., Goichot, M., Dussouillez, P. and Nguyen, V.L., Linking rapid erosion of the Mekong River delta to human activities, Scientific Reports, 5, article no. 14745 (2015).

船舶海洋工学分野における課題と取組みの現状

多部田茂（東京大学・新領域創成科学研究科）

キーワード：海運・海洋再生可能エネルギー・包括的評価

船舶海洋工学分野からの Web アンケートへの回答数は非常に少なかった（6 件）ため、アンケート結果から課題を抽出するのは困難であった。そこで一部の学会員に別途追加でアンケートを実施することを検討しているが、本稿では学会での取組みの現状を委員会活動から概観しておく。

日本船舶海洋工学会では、明確な目標を定めて時限（3 年以内）で設置する研究組織として、学会として発信すべき戦略的課題について研究を実施するストラテジー研究委員会と、具体的な課題について研究を実施するプロジェクト研究委員会を設けている。表 1 に気候変動に関連すると考えられる研究委員会を示す。これらは、概ね以下のように分類できる。

まず、海上輸送による CO₂ 排出の削減に関連するものが挙げられる。2012 年時点での国際海運による CO₂ 排出量は約 8 億トン（世界全体の排出量の約 2.2%、ドイツ 1 国分の排出量に相当）であり、対応の重要性が高まっていた。2013 年に国際海事機関(IMO)で合意された規制が開始され、一定サイズ以上の新造船に対しては「エネルギー効率設計指標」（EEDI:1 トンの貨物を 1 マイル輸送する際の CO₂ 排出量を評価する指標）が基準値に適合することが求められている（2025 年には 2013-14 年比で 30%削減）。また 2018 年 4 月には今世紀中可能な限り早期に GHG 排出をゼロにする長期目標等を含む「IMO GHG 削減戦略」が採択された。これらの動向にも関連して、様々な船舶の省エネ技術が検討されている。学会においても、摩擦抵抗の低減技術(S-7)、省エネ技術の CFD（数値流体力学）による評価(P-31)、省エネ船型開発(P-51)、燃料の転換(P-57)が取り上げられてきた。さらに将来を見据えて自然エネルギーや電池を動力とした船の実用化も検討されている。

次に、海洋における再生可能エネルギーの利用技術の開発に関するものが挙げられる。四方を海に囲まれた我が国は豊富な海洋再生可能エネルギーに恵まれている。学会でも、これを有

効に利用するための技術開発や実用化へのロードマップの検討がなされている(P-22)。最も早期に普及が期待されているのは洋上風力発電であるが、本学会では特に浮体式洋上風車に関する検討が精力的に行われてきた(SP-1)。また、海流、潮流、波力、海洋温度差等の海洋再生可能エネルギー利用技術に関する研究も行われており、国際標準化等を見据えた水槽実験法の検討も行われている(S-13, P-53)。さらに、実用化に向けて重要な検討事項の一つである環境影響評価についても議論がなされている(P-44)。

エネルギー以外の海洋における生産活動としては、次世代海洋食料生産システム (S-6)が取り上げられている。気候変動によって地球上の生物生産は変化し、その結果として食料生産も大きな影響を受ける可能性があることから、この検討は適応策の議論につながると捉えることができる。

より広い視点から海洋利用の技術開発や実用化の戦略を検討する取組みも見られる。具体的には、海洋利用の啓発(S-3)、開発と保全の二元論に陥らないための海洋環境管理戦略(S-8)、我が国が取り組むべき海事・海洋関連課題に対する技術および産業化の観点からの検討(S-9)などである。これらの検討の中では、エネルギー・資源や食料、水の生産に加えて、海洋における CCS(二酸化炭素の回収貯留)も議論されている。特に IMPACT 研究委員会(P-6, P-25)では、海洋の大規模利用技術が現行技術の代替策として有効であるか、技術の導入による地球環境への負荷が持続的可能領域の範囲に収まるか等を、客観的かつ定量的に評価することを念頭においた議論が行われ、環境面の持続可能性と経済面の実現可能性を統合的に評価することのできる指標として Triple I(Inclusive Impact Index)が提案された。さらに、Triple I と生態系サービスとの関連を整理し、IMPACT 研究委員会で培った知見を海洋における生態系サービスの評価手法に生かすための検討も行われている(P-48)。

表 1. 日本船舶海洋工学会における気候変動対応に関わるプロジェクト研究会(P-)およびストラテジー研究委員会(S-)

	委員会名	活動期間
P-6	海洋の大規模利用に対する包括的環境影響評価研究委員会 (IMPACT研究委員会)	H17. 6～H20. 3
S-3	海洋教育研究委員会	H17. 7～ H19. 9
S-7	摩擦抵抗低減研究委員会	H20. 12～H24. 3
P-22	海洋再生可能エネルギーの実用・利用に向けた企画立案検討委員会	H21. 4～H23. 3
P-25	海洋の大規模利用に対する包括的環境影響評価普及推進研究委員会	H21. 4～H24. 3
S-8	海洋環境戦略的管理研究委員会	H21. 12～H24. 12
S-9	海洋立国基本戦略検討委員会	H22. 3～H24. 3
P-31	CFDによる船舶の省エネ性能評価研究委員会	H22. 10～H25. 3
SP-1	洋上風力特別検討委員会	H25. 4～H27. 3
P-44	海洋エネルギー施設の環境影響評価に関する研究委員会	H26. 4～H29. 3
P-48	海洋における生態系サービスの評価に関する研究委員会	H27. 4～H30. 3
S-13	海洋再生可能エネルギー水槽実験方法検討会	H27. 8～H29. 3
P-51	内航海運のための省エネ母船型の研究開発委員会	H28. 4～H29. 3
P-53	波力発電における水槽試験での模型縮尺影響研究委員会	H29. 7～H31. 3
S-16	次世代海洋食料生産システム研究会	H30. 7～R2. 3
P-57	LNG燃料船の艤装設計に関する課題と調査	R1. 4～R3. 3

気候変動影響対応を含めた沿岸域管理

川辺 みどり（東京海洋大学 学術研究院 海洋政策文化学部門）

キーワード：沿岸域管理・気候変動リスク

1. 日本沿岸域学会の特色

日本沿岸域学会は、その名のとおり、「沿岸域にかかわるあらゆる問題を総合的に議論できる自然科学、社会科学、人文科学の各分野が融合した学際的な学会」であり、「環境、土木、建築、水産、法律、経済、地理、歴史、観光などの各学界、さらには、官界、産業界等のあらゆる分野や立場の個人、団体の方々により構成されている。研究内容は、基礎科学というより、沿岸域の共同体の存在を前提とした事業や活動にかかわるものが多く、その分析には、量的手法に限らず、質的手法を用いたりもする。

こうした研究の最終的な目標は、持続可能な沿岸域利用の実現であり、そのために必要かつ有効な方策のひとつが、沿岸域を利用するさまざまな立場の人びとや組織が、その持続的利用のためにおこなう努力、「沿岸域管理」である。

2. 沿岸域の場の特徴

沿岸域は、陸域と海域を包含した、水でつながる空間である。国連ミレニアム生態系評価 (MA, 2005) は、沿岸海域を水際の状況に応じて8つの「場」に分類した。このなかで、エスチュアリ(河口湾)、マングローブ、サンゴ礁はとくにゆたかな生態系サービスを提供してくれる。それゆえ古来、人類は沿岸に居住し、集落をつくり都市を発展させてきた。MA(2005)によれば、世界の人口の約40%は沿岸から100km以内に住み、人口50万人以上の都市の半分は沿岸50キロメートル内にある。

その結果、沿岸域の自然環境や生態系は人間活動からさまざまな圧力—物質排出による汚染、海岸改変、資源乱獲など—を受け、生態系サービスの劣化が懸念されている。水によってつながる場である沿岸域は、その高い利便性の裏返しとして、脆弱性もまた高い。

沿岸域の多様なステークホルダー間の調整を含め、沿岸域のさまざまな問題の解決に期待されているのが、「総合的な沿岸域管理: Integrated Coastal Zone Management: ICM」である。ICMは、沿岸域を利用するさまざまな立場の人びとや組織の利益を調整するために《計画をつくり、実施し、評価し、改善する》というマネジメント・サイクルを回していく過程として表現される。だが、現実には実施されたICMについては批判も多い。

3. 沿岸域における気候変動のリスク

気候変動は「気温・海水温の上昇」、「海面水位の上昇」をもたらすとされており、沿岸部（海岸）においては、「強い台風の増加」（「高潮偏差の増加」、「波浪の増大」）および「海面水位の上昇」などを引き起こす（沿岸部（海岸）における気候変動の影響及び適応の方向性検討委員会、2015）。

だが、沿岸域をより広範に、内陸から海にいたる水のネットワークで網羅された場として見れば、上記項目を含めてIPCC第5次評価報告書（IPCC AR5）（環境省、2014）が指摘した、複数の分野や地域にわたる主要な8つのリスクのほぼ全てが沿岸域に当てはまる。

- ①高潮、沿岸域の氾濫及び海面水位上昇による、沿岸の低地並びに小島嶼開発途上国及びその他の小島嶼における死亡、負傷、健康障害、生計崩壊のリスク。
- ②いくつかの地域における内陸洪水による大都市住民の深刻な健康障害や生計崩壊のリスク。
- ③極端な気象現象が、電気、水供給並びに保健及び緊急サービスのようなインフラ網や重要なサービスの機能停止をもたらすことによるシステムのリスク。
- ④特に脆弱な都市住民及び都市域又は農村域の

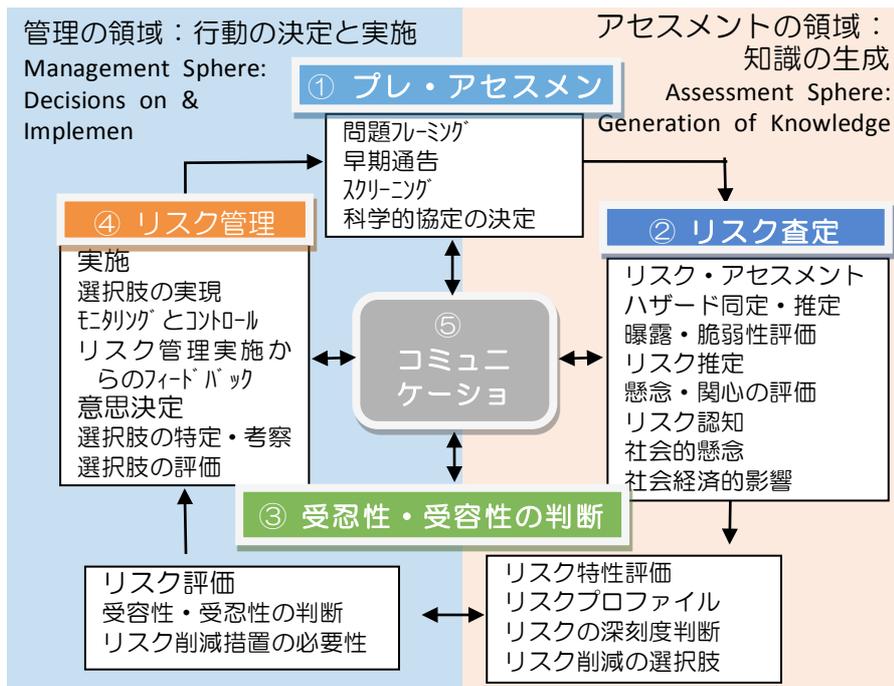


図1 IRGCのリスク・ガバナンスの枠組み

(International Risk Governance Council (IRGC) , 2005)

応においてもっとも貢献できる分野は、この、気候変動リスク・ガバナンス (図1) の諸段階への対応や、これを内包した、沿岸域ガバナンスの構築ではないだろうか。

その第一歩として、今までの沿岸域管理の課題、たとえば、科学者と行政者を含む多様なステークホルダーが、どのように知識や情報を共有し、合意形成を図るのか、といった問題について研究をおこない、知見を集積してゆく必要があると考える。

屋外労働者についての、極端な暑熱期間における死亡及び罹病のリスク。

- ⑤特に都市及び農村におけるより貧しい住民にとっての、温暖化、干ばつ、洪水、降水の変動及び極端現象に伴う食料不足や食料システム崩壊のリスク。
- ⑦特に熱帯と北極圏の漁業コミュニティにおいて、沿岸部の人々の生計を支える、海洋・沿岸生態系と生物多様性、生態系の財・機能・サービスが失われるリスク。
- ⑧人々の生計を支える陸域及び内水の生態系と生物多様性、生態系の財・機能・サービスが失われるリスク。

4. 気候変動リスクを含めた沿岸域ガバナンス

気候変動がもたらすリスクは、気候関連のハザード (災害外力)、曝露、脆弱性の3つの要素で構成される。したがって、気候変動リスクは、地域によって異なり、不確実性もまた高い。しかし、いずれの沿岸地域においても、その特性に応じた「リスク・マネジメント」は、気候変動への適応策として必要である。

そして、日本沿岸域学会が気候変動影響への対

引用文献

- 沿岸部 (海岸) における気候変動の影響及び適応の方向性検討委員会 (2015) 「沿岸部 (海岸) における気候変動の影響及び適応の方向性概要」.
- 環境省 (2014) 「気候変動 2014 : 影響、適応及び脆弱性 気候変動に関する政府間パネル第5次評価報告書 第2作業部会報告書 政策決定者向け要約 技術要約」 (翻訳) .
- International Risk Governance Council (2005) Risk Governance-Towards an Integrative Approach, White Paper No.1, O. Renn with an Annex by P. Graham, IRGC, Geneva.
- The Millennium Ecosystem Assessment (国連ミレニアム生態系評価 (MA)) (200) 19.3.1 Human in the Coastal System: Demographics and Use of Services. Chapter 19 Coastal Systems. In *Ecosystems and human well-being: current state and trends, Volume 1.* eds. R.Hassan, R. Scholes, N. Ash, pages 529-531, Island Press, DC, USA, 2005.

生態学に関連した気候変動研究の数と事例

山北剛久 (JAMSTEC)

キーワード：陸域・森林・シナリオ・生物多様性・生態系サービス・IPBES・CBD

1. はじめに

生態学は、生物と環境の間の相互作用を扱う学問であり、近年は生物多様性科学の一翼として生物多様性の成り立ちから生態系保全までの幅広い分野を遺伝子から地球規模までの様々なスケールと手法でカバーする。

日本生態学会は 1953 年に設立され現在、約 4000 人の会員がおり、全会員の 3 割以上を学生が、全会員の 2 割以上を女性が占める。また、近年の大会は英語講演も推奨しており、留学生や国外の参加者も少なくない。

気候変動に限らない広いスケールの研究例も多いことが特徴であり、各学会の大会発表から空間関連のキーワードを有した発表件数を示した表 1 から特にスケール、空間や分布に対する高い関心がうかがえる。

2. 主な気候変動研究と出現キーワード

生態学会における研究数は圧倒的に陸域が多い。なかでも森林の研究はその一角を占めている。2007 年以降の学会大会の要旨集から「沿岸域において気候変動対応で解決すべき課題」に関する、キーワードを検索した結果(表 2)、全体で生物多様性、淡水 OR 河川 OR 地下水、降水 OR 降雪 OR 乾燥、生態系管理 OR 外来種 OR 自然再生などが 1000 件を超えており、陸水に関する河川以外では森林に関する研究・研究者が全体のおおむね 1/3 程度以上を占めている。

特に近年では REDD+などの炭素貯留に関連した研究や、調査プロットの変動要因に気候変動の効果を組み込んだ検討、広域の分布の推定などがみられる。長期データという点では、モニタリングサイト 1000 や森林プロット、演習林、試験場での継続的な記録が見られる点に特色がある。

一方、気候変動に対応した「対策」の検討は

広域の政策については増加したもののまだ多くはない。現象の理解と生物間・生物-環境間の相互作用が主な対象で、積極的な自然の改変は十分な配慮が必要という立場が多く、一部には抵抗感もあるかもしれない。

3. 海域・PANCES における気候変動研究

海域の研究は相対的に少ないものの、決してマイノリティーではない。特に干潟や海浜をはじめとする徒歩でアクセスできる沿岸域研究は盛んにおこなわれている。

近年は、日本全国規模の解析も行われるようになってきた。例えば、気候変動後の藻場やサンゴ礁の分布の推定、砂浜の消失の影響、遺伝的要素から避難場所になりうる場所などを検討した。これらに基づき保護区の再設定、対策優先順、避難場所などを最適化する検討も行われている。

さらに、生態系サービス評価を行っている環境省推進費 S15/PANCES プロジェクトでは、土地利用や人口の変化を含む、4つの社会経済シナリオを作成。それと対応した社会の変化または政策オプションを選び取るために、複数のサービスとそのトレードオフ等について評価を提示することを目標としており、講演ではその例を含めて紹介したい。

4. まとめ

生態学の生物多様性に関する分野は生物多様性条約 (CBD) や UNFCCC の動向に関連した研究の関係者も多い。そうした観点からも、生態系サービスの評価や生物多様性の評価に基づき、多様な生き物が存在する価値への理解と、自然の恵みを受けられる環境を維持するための対策が十分な自然への配慮の上で検討されることを期待している。

表 1. 各学会の GIS や空間データに関する発表数。全発表数とタイトルにキーワードを有した発表件数の年合計値(Yamakita 2018 CCBY)

	海洋学会	水産学会	生態学会	土木学会
全発表数	2012	1381	1385	
	2013	1278	1107	
	2014	1384	1164	3101
	2015	312	1244	1115
	2016	459	1158	1054
3585				
「GIS」	2012	2	3	
	2013	0	4	
	2014	0	3	3
	2015	0	1	0
	2016	1	0	0
1				
「スケール」	2012	1	4	
	2013	0	11	
	2014	0	11	6
	2015	5	0	8
	2016	16	0	4
8				
「空間」	2012	8	14	
	2013	9	28	
	2014	3	43	36
	2015	7	2	31
	2016	12	6	26
36				
「地理」	2012	3	13	
	2013	4	15	
	2014	5	21	0
	2015	1	3	13
	2016	1	3	13
2				
「分布」	2012	57	46	
	2013	66	74	
	2014	59	84	28
	2015	31	41	58
	2016	49	50	55
44				

表 2. 2007 年以降の生態学会大会要旨でのキーワードヒット件数*

*Google による自動的な書き分ち、著者所属等を含む結果。

	全件	十 森	十 沿 岸	十 海 域
物理				
101 海面上昇 OR 海水位 OR 海水準	29	6	10	5
102 海流 OR 海洋構造	74	15	31	23
103 台風 OR 低気圧	217	110	26	20
104 気温 OR 海水温	768	246	118	66
105 降水 OR 積雪 OR 乾燥淡水 OR 河川 OR 地下水	1480	613	95	59
106 水	1920	451	234	118
201301 浸水	66	55	41	25
202 塩水	44	10	118	59
203 国土減少 OR 海岸侵食	11	3	8	7

204 極端気象 OR 極端気候	7	4	0	0
205 施設機能低下	16	21	11	27
302 土地利用 OR 土地被覆	609	309	57	39
303 洋上風力	19	3	6	5
304 海水冷却	1	1	1	1
305 リスク	796	200	80	80
306 ガバナンス OR 制度	156	47	41	20
化学				
111 温室効果	164	95	25	40
112 栄養塩 OR 濁度	444	269	82	101
113 酸性化	81	59	12	14
114 貧酸素	70	26	30	23
311 アルカリ化	2	1	1	1
312 CCS	8	5	2	2
生物				
121 海洋動物	394	157	109	119
122 海洋植物 OR 海浜植物 OR 海岸植物	68	26	20	8
123 海洋微生物 OR プラクトン OR メイオベントス	393	113	158	54
221 生物多様性	2840	913	233	143
222 水産物 OR 水産資源 生息地の移動 OR 生息地のシフト OR 生息地シフト	97	25	37	18
223	4	2	1	1
224 磯焼け	6	2	4	3
225 白化	38	9	21	16
321 品種改良 OR 温度耐性 漁業管理 OR 資源管理	28	3	3	5
322	93	53	22	19
生態系				
231 生態系サービス 生態系管理 OR 外来種 OR 自然再生	445	212	54	33
331	1340	511	119	50
332 グリーンインフラ	41	9	4	3
333 ブルーカーボン	8	2	6	6
その他				
気候変動	966	359	106	34
温暖化	602	288	120	75
気候変動 適応	140	78	40	15
気候変動 緩和	49	40	39	15
IPCC	62	40	10	7
REDD	22	13	1	1
炭素固定 OR 炭素吸収	153	109	24	19

引用資料

山北剛久 2018 東日本大震災後の海の変化を知る e-種生物学研究 2



海域環境と植物プランクトン群集，特に有害藻の長期変動

西川哲也（兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター）

キーワード: 植物プランクトン・赤潮・海苔の色落ち・水温上昇・貧栄養化

近年，気候変動による海洋環境や水産資源への影響は様々な形で顕在化しており，それへの対応は地域の水産業振興を主たる業務とする地方自治体の研究機関においても，重要度，緊急度が増している。兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センターでは，播磨灘に設けた19定点において，1973年4月から毎月1回，月の月上旬に海洋観測調査を実施している。本調査では，水温，塩分，栄養塩濃度といった水質に関する観測項目に加え，表層における植物プランクトンの種同定と計数を行ってきた。ここでは，1973年4月～2008年12月まで36か年間のデータセットを用いて，海域環境の変動に対する植物プランクトン群集の応答を概観し，夏季と冬季を代表する有害赤潮藻 *Chattonella* spp. (*C. antiqua*+*C. marina*+*C. ovata*，以下 *Chattonella* と呼称する) と海苔色落ち原因藻 *Eucampia zodiacus* の長期的な個体群動態を解析した結果を示すことによって，今後解決すべき課題を検討する。

植物プランクトンの年平均細胞密度は，1970年代に高く，1980年代前半に大きく減少し，1980年代後半以降は，ほぼ横ばいで推移した。海域環境では，水温に有意な上昇と溶存態無機窒素（DIN）濃度に有意な低下が見られ，植物プランクトンの年平均細胞密度とDIN濃度の年平均値は同調的な変動を示した。植物プランクトンの構成種は，調査期間を通して珪藻が大部分を占めていたが，1970年代～1980年代前半は，ラフィド藻が全体の20%近くを占める年も見られた。また，珪藻の種組成も1980年代前半に劇的な変化が見られ，1970年代～1980年代前半に大部分を占めていた *Skeletonema* の割合が低下し，1980年代半ば以降は *Chaetoceros* をはじめ他の珪藻の占める割合が高まった。

1970～1980年代，*Chattonella* はしばしば夏季に播磨灘全域を着色域とする大規模な赤潮を形成した。しかし1990年代以降，播磨灘ではそのような大規模な赤潮の発生は見られなくなった。DIN濃度が低下した近年の環境下では，

Chattonella は以前のように大規模な赤潮を形成できなくなったと考えられた。一方で，1990年代後半以降，*Chattonella* はそれ以前に比べて出現密度や発生規模は小さいものの，7月に北部沿岸域を中心に出現頻度が高くなった。*Chattonella* は，一年の大部分をシストとして海底土中で生残し，底層水温が20℃近くに上昇するとシストが活発に発芽し，栄養細胞となる。近年，播磨灘では水温の上昇によりシストの発芽時期が数週間～1か月近く早まり，*Chattonella* の栄養細胞の出現時期が梅雨の時期と重なるようになった。その結果，北部沿岸において，優占種である珪藻のブルームが一時的に衰退した河口域などで，小規模ながら *Chattonella* の増殖できるチャンスが増大したと考えられた。

1990年代半ば以降，播磨灘では冬季に *E. zodiacus* が大量発生するようになり，養殖海苔に深刻な色落ち被害を頻発させ，大きな問題となっている。本種は，1970年代から播磨灘において出現が確認されていたが，他の珪藻とは異なり，1990年代半ば以降，出現細胞密度が増大するようになった。室内での培養実験から，本種は温度の上昇とともに増殖速度が急激に増大することや冬季水温下での窒素の取り込み能に優れていることが明らかとなっている。水温の上昇，DIN濃度の低下は，*E. zodiacus* の増殖にとって有利に作用していると思われ，近年の大量発生は，本種の生理生態学的特性をよく反映した結果であると考えられた。

以上のように，富栄養化の進行した沿岸域では水温の上昇に加え，海域の栄養塩レベルを考慮した解析が重要である。特に近年の瀬戸内海では，富栄養化の状態から「きれいな海」を取り戻しつつある過程で，これまでになかった新たな問題が生じている。今後は，有害種の水産業への直接的な影響に加え，海域環境の変動に伴う低次生物生産過程の変化が，海洋生態系にどのような影響を及ぼすのか，有用水産資源の持続的利用の観点から，生態系を包括的に捉えるためのアプローチが重要であると考えられる。

気候変動対応において 沿岸域のベントス研究が果たすべき役割について

澤山周平（水産機構中央水研）

キーワード：岩礁・群集・生物多様性・ベントス・モニタリング

1. はじめに

地球規模の気候変動は沿岸域の底生生物に対しても大きなインパクトを与えると考えられる。気候変動により生じる諸々の問題に対して日本ベントス学会が果たすべき役割を考える上で、従来行われてきたベントス研究の傾向とその問題点を把握することが重要である。そこで本稿では、まず本学会の研究領域・分野の持つ特色と問題点の整理を行う。続いて、これまでのベントス研究の一例として相模湾沿岸の岩礁域潮下帯の生物相モニタリングで得られた知見を紹介する。これらをもとに、気候変動対応において沿岸域のベントス研究という分野が現状抱える課題と今後の改善策について、一研究者の立場から提案を行いたい。

2. 日本ベントス学会の研究領域と気候変動

本学会の研究分野の多くは底生生物全般に関する基礎研究の領域に含まれる。これらは特定の生物種の分類、生態や生理を扱ったものから対象を群集・生態系に広げたものまで、内容は多岐に渡る。気候変動と関連したトピックに限っても、特定の生物の増減、分布域や群集構造の変化、外来種の定着、磯焼け等の生態系に生じる変化など、研究対象は極めて幅広い。

ベントスは移動性が比較的小さいという特徴を持つことから、それらを取り巻く環境の変化を検出するための指標として利用されることも多い。しかし、環境変化と言っても、従来のベントス研究は局所的かつ短期的に生じた自然現象や人為的改変に対するベントスの応答に焦点を当てることが多く、数回の単発的な定点調査や短期間のモニタリング調査がその都度設計されてきた。時空間的に巨大なスケールで進行する気候変動の影響を捉えるにはより広域的・長期的なデータの蓄積が必要となるが、そのような調査を企画・実施することは容易ではない。こうした課題への対策として「モニタリングサイト 1000」（環境省）の沿岸域調査が 2008 年に

開始されたが、対象とする生態系や生物種が限られるうえ、未だ時系列的なトレンドを検出可能なデータの蓄積には至っていない例も多い。また、気候変動対策の立案の上では、生物多様性の減少や群集構造の変化との因果関係の証明だけでなく、生態系サービスの劣化に至るプロセスの解明とその解消方法の提示が求められる。しかし、これまでのベントス研究は個別的な仮説検証に留まる例が多く、気候変動のように大規模な社会的課題の解決を目的に据えた生態系機能研究は不足してきたように感じられる。

今回実施されたアンケート結果のうち本学会の回答傾向を見ると、「生態系サービスの劣化」と「生物多様性の減少」というキーワードが全体平均に比べて多く選択されている。これらは、いずれも社会的認知度が極めて低いと評価されたキーワードでもあった。こうした傾向は、直接生物を取り扱う研究者として気候変動によって生態系が直面している危機を強く実感していること、またそれらに対する社会的な問題意識の不足を自覚していることの現れと言えよう。すなわち、ベントス研究者は気候変動による重大な危機について強い危惧を抱いている反面、その現状把握や対策提案に貢献するという役割を十分に果たせていない恐れがある。

3. 相模湾潮下帯岩礁域のモニタリング結果から示唆された気候変動の影響

ここでは、相模湾に面する神奈川県横須賀市西部の潮下帯岩礁域において、2011 年から約 8 年間にわたり現・水産機構中央水研によって実施されたベントス相調査の結果について紹介する。この連続調査の一部期間は水産庁委託「漁場環境生物多様性評価手法実証調査事業（H25-29 年度）」のもとで実施され、本項の内容は同事業内で解析・取りまとめた成果を使用している。水深約 10 m の海底に造成された人工礁と周囲の天然礁における海藻及びベントス相の調査・比較を通じて岩礁域の生物多様性評価

手法を開発することを目的とし、各礁で3ヶ月ごとに潜水による枠取り調査(1m²×3枠)を行った。採取した海藻及びベントスは種ごとに個体数と湿重量を測定後、同位体分析や遺伝子解析のサンプルとして冷凍保存した。このように統一された手法で潮下帯岩礁域の生物相の長期モニタリングを行った例は世界的にも珍しい。

調査開始から3年が経過した2014年前後から、両礁においてそれまで存在した海中林(カジメ等の大型褐藻類で構成される藻場)の消失が相次いで確認された。海中林消失後、両礁の基質表面は有節サンゴモに覆われ、その他の海藻類がほとんど入植しない状態が継続した。こうした海藻群落の大きな変化に伴ってベントス相も変化し、大型褐藻類を主な餌料とする有用水産生物(アワビ等)は減少した一方、それらを利用しない小型植食性巻貝の一種ウラウズガイ *Astraliium haematragum* が劇的に増加した(図1)。また、植生と同様にベントス相も季節や年を問わず常に一部の種が優占する単調な状態が持続するようになった。

この海藻群落とベントス相に生じた変化にはいくつかの要因が想定されるが、気候変動による影響も強く疑われる。特に近年の調査地における秋季の平均表層水温が1980年代と比べて1℃近く上昇していることは、海中林の維持機構に強い負の影響を及ぼしていると考えられる。2014年前後の水温は平年と比べて特段高くなかったことから、長期的な影響を受けて海中林の維持が不可能となる閾値を超えたことで短期間のうちに急激な変化が生じた可能性がある。

本調査は気候変動の影響把握を目的として開始されたものではなかったが、期間中偶然に大きな生態系の変化を捉えた貴重な事例となった。この個別事例から気候変動が岩礁域の生態系を変化させる一般的なプロセスの理解に繋げるためには、今後の変化に注視するためのモニタリング継続、他の海域で生じた事象との比較、そしてそれらをもとにした詳細なトレンド解析が必要と考えられる。その上で、他分野との連携を取りながら、海中林の保全や回復のための技術開発等、具体的な課題解決を睨んだ研究に発展させることが重要である。

4. まとめ

以上より、気候変動対応の上で日本ベントス学会の研究が果たすべき役割を念頭に置き、沿岸域のベントス研究において今後望まれる改善の方向性を以下のようにまとめたい。

- ①モニタリング体制の充実：岩礁域調査の例(上述)のような統一的・継続的なモニタリングの分析結果を気候変動対策にフィードバックできるよう、安定的な実施体制を確立するとともに、地域間の連携を強化するためのモニタリングネットワークを構築することが望まれる。
- ②課題解決に向けた応用研究の推進：社会発信や他分野との交流により気候変動が沿岸生態系に及ぼす影響に対する認知・理解の向上に努めつつ、モニタリング等の基礎研究の成果を応用した研究を通じて課題解決に向け適切な科学的助言を提供していくことが望まれる。

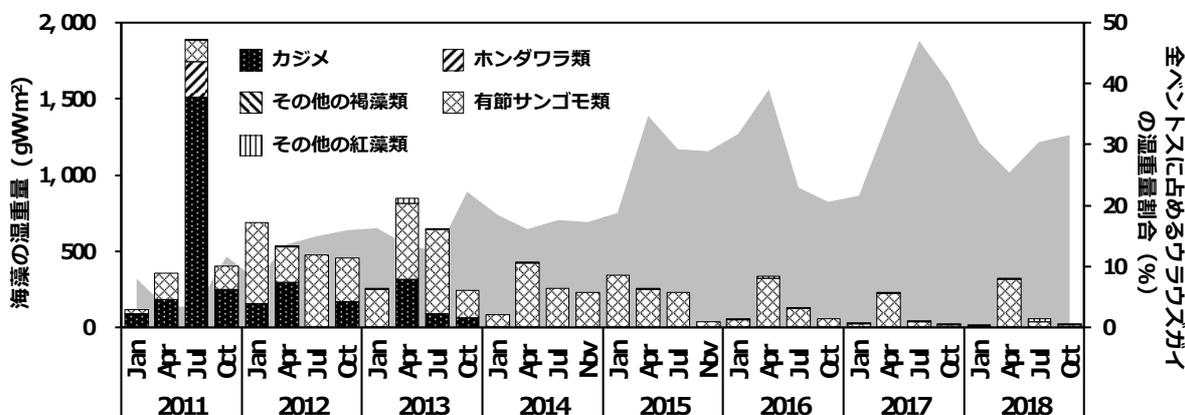


図1. 岩礁域の生物相モニタリングで得られた分類群ごとの海藻湿重量(縦棒)及び全ベントス中に占めるウラウズガイの重量割合(グレーの面)の変動

サンゴ礁域における気候変動対応で解決すべき課題

山野博哉（国立環境研究所）

キーワード：サンゴ礁・白化現象・水温上昇・海洋酸性化・緩和策・適応策

現在、過剰な人間活動によりサンゴ礁は急速に変化しつつある。地球規模での要因としては、温室効果ガスの排出による気候変動があり、水温上昇はサンゴと褐虫藻の共生関係を損ない、サンゴから褐虫藻が放出されたり褐虫藻自体が劣化したりしてサンゴの白化現象を招く。白化したサンゴは褐虫藻からの光合成生産物を得ることができずいずれ死んでしまう。1998年夏の高水温で世界中のサンゴが白化し、地球温暖化との関連が盛んに議論されるようになった。水温上昇はこうした白化という負の影響を与えるだけでなく、サンゴの生息が困難な温帯域では、水温上昇がサンゴの分布域の北への拡大を招く可能性もある。また、二酸化炭素が海水に溶け込んで起こる「海洋酸性化」は、サンゴの石灰化を阻害してサンゴの衰退を招く可能性が高い。実際に、海底から二酸化炭素が吹き出している海域では、サンゴの分布が観察されない。

一方、地域規模の要因もサンゴに大きな影響を与えている。沖縄では、日本復帰以降、土地開発により陸域から赤土が海域に流れ出し、赤土が積もってサンゴが大量に死んでしまった。この状況を受け、沖縄県は1995年10月に「沖縄県赤土等流出防止条例」を施行し、工事現場からの赤土流出が規制されるようになったが、農地からの赤土流出はまだ観察されており、依然問題は続いている。

サンゴ礁の保全には、上記のようにグローバルな視点とローカルな視点の両方が必要とされる。特に、グローバルな影響の代表的なものである気候変動に関しては、温室効果ガスの排出を減らす「緩和策」が必須であるが、同時に影響に対応する「適応策」を進めていく必要がある。気候変動の影響への適応策に関しては、国内では、気候変動の影響による被害を最小化あるいは回避し、迅速に回復できる、安全・安心で持続可能な社会の構築を目指すために「気候変動の影響への適応計画」が2015年11月27日に閣議決定された。その中の自然生態系分野では、「生物多様性分野における気候変動への

適応についての基本的考え方」が2015年7月に環境省自然環境局により示された。

サンゴ礁において特に重要なものは、気候変動の影響を受けにくい場所の検出とその優先的な保全、気候変動以外のローカルな影響の検出とその低減であろう。グローバルなスケールでの気候変動影響の評価においては気候学・海洋物理学と生物学・地学を統合し、場の特徴をとらえるアプローチが必要となり、ローカルな対策立案においては、サンゴ礁を陸域とつながった場としてとらえる必要がある。例えば陸域からの赤土削減には、サンゴなど生物分布調査に基づく赤土流出削減目標の設定、赤土流出源となっている農地の抽出、そして流出防止対策の費用対効果の算出という一連の仕組みを構築することが重要で、生態学、土木工学、環境経済学などさまざまな学問分野を統合するアプローチが必要である。また、流出防止対策など保全策を実行する際には、現地との協働が不可欠である。

今回、沿岸環境関連学会連絡協議会によって「今後の我が国の沿岸分野における気候変動対応で解決すべき課題」をテーマになされたアンケートにおいて、サンゴ礁学会員が平均より大きな値を示した上位五項目は、「サンゴ白化・消滅」を除くと、「海洋酸性化」、「上記以外の緩和策（CO₂排出抑制、吸収源対策）」、「生物多様性の減少」、「気温・海水温」、「温室効果ガス」であった。全体として、影響と緩和策についての回答が多く、淡水流入や流域管理などの適応策に関する回答は比較的少なかった。本稿で示したように、サンゴ礁の保全には、気候変動の緩和策と適応策は両輪で進める必要がある。例えば、沖縄県における赤土流出問題は古くから認識され、対策も行われており、これは気候変動適応策ともとらえられる。既存の施策の再評価を含め、適応策にもさらに意識を向け、サンゴ礁保全を推進していく必要がある。