



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北海道海洋生物科学シンポジウム要旨集
Relation	北海道海洋生物科学シンポジウム = Hokkaido Marine Bioscience Symposium. 平成22年11月5日(金). 北海道大学地球環境科学研究所D棟201号室, 札幌市.
Issue Date	2010-11-05
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/44157
Type	conference paper
File Information	23_yoshi.pdf



北海道海洋生物科学シンポジウム

主催 北海道海洋生物科学研究会
北海道大学グローバル COE プログラム
「統合フィールド環境科学の教育研究拠点形成」

□日時 2010年11月5日（金）13：00～

□会場 北海道大学大学院地球環境科学研究院 D201 室

プログラム

13:05-13:45 座長 北大地環 沖野龍文

大城 隆 （鳥取大学 工学研究科）

海藻由来ハロゲン化酵素の特性

13:45-14:25 座長 北大水 尾島孝男

河井 崇（阿南高専 地域連携・テクノセンター）カメノテとムラサキインコにおける
種間相互作用の地理的変異：ファシリテーションで温暖化をしのげるか！？

14:25-15:05 座長 北大水 尾島孝男

山北剛久（森林総合研究所）

列島スケールでの藻場成立要因の検出と植生の空間パターンとの関係

15:25-16:05 座長 北大地環 藤井賢彦

小埜恒夫（水産総合研究センター北海道区水産研究所）

海洋生物に対する地球温暖化の直接影響～貧酸素化と酸性化～

16:05-16:45 座長 北大地環 藤井賢彦

谷口 旭（東京農業大学 生物産業学部）

プランクトンが支配する海洋生態系—原始的狩猟にも比せられる漁業の確固たるサステナビリティの基盤—

海藻由来ハロゲン化酵素の特性

鳥取大学工学研究科 化学・生物応用工学専攻 大城 隆

海洋国のわが国では海藻は古来親しまれてきた食材のひとつであるが、近年、その成分は健康食品素材として大きな注目を集めている。また、海藻は貴重な海洋生物資源との認識も高まり、医薬、エネルギー分野での活用を目的とした研究が非常に盛んになってきている。

当研究室では、かねてから海藻が生産するハロゲン化酵素に着目し、本酵素に関する酵素化学的・遺伝子工学的研究を行っている。化学工業におけるハロゲン化反応は有毒な試薬を用いる反応であり、これを酵素反応で置き換えることができれば、環境調和プロセスになるというのが研究の端緒であった。有機化合物をハロゲン化する酵素反応の多くは過酸化水素に依存して起こり、この反応に関与する酵素はハロペルオキシダーゼと呼ばれ、次の反応を触媒する。



多くの海藻がこの酵素を有し、しかも高活性であることから、ハロペルオキシダーゼは海藻由来の酵素では最も研究が進んでいる酵素の一つになっている。ハロペルオキシダーゼは基質として利用できる最も電気陰性度の大きいハライドを基に、ブロモペルオキシダーゼ (BPO)、クロロペルオキシダーゼとも呼ばれている。当研究室では、紅藻サンゴモ科に属するピリヒバ (*Corallina pilulifera*) 由来の BPO が基礎的な側面とともに、応用的見地からも非常に特徴的な酵素であることを詳細に明らかにしてきた。

ピリヒバは体長が 3~4 cm で日本のどこの海岸にも見られる海藻であり、著量の BPO タンパク質を含有する。この海藻を鳥取県の海岸から大量に採集し、BPO を精製、単離した。明らかにした酵素化学的諸性質のなかで特徴的なことは、熱安定性、溶媒耐性が非常に高いこと、活性中心にバナジン酸を保持することであった。BPO 以外のバナジウム含有酵素についての報告例は、ニトロゲナーゼに見られるのみである。本酵素は非常にユニークなホモ十二量体構造をとっており、ネイティブの分子量は 790,000 Da にものぼる。X 線解析の結果、バナジン酸の結合部位およびそれを取囲む構造も明らかにされた。さらに、活性中心から離れた BPO ポリペプチド鎖のループの中にカルシウム原子が存在することが判明し、このカルシウムが本酵素の熱安定性、溶媒耐性に寄与していることを実証した。また、ピリヒバ由来の BPO を安定供給することを当初の目的として本海藻から BPO 遺伝子のクローニングを実施し、酵母 *Saccharomyces cerevisiae* における発現系を確立した。そして遺伝子工学的アプローチを用い、一つのアミノ酸置換により、ハライドに対する活性が変化した変異酵素を取得することができた。

一方、ピリヒバ以外の海藻が有する酵素の検索も行っている。その結果、BPO の報告例がほとんどない緑藻にも弱いながらも BPO 活性を検出することができ、アワビモ (*Ulvelia lens*)、ミル (*Codium fragile*) 由来の酵素の諸性質を明らかにしている。

生物機能を活用した生産プロセス技術開発に関する研究が数多く実施されているが、機能を発揮する本体である酵素は通常安定性が低く、この点は克服すべき大きな課題である。その点、耐熱性、溶媒耐性を有するピリヒバ由来 BPO は、有機合成プロセスに組み込みやすく、多種多様な有機化合物のハロゲン化反応への適用が可能である。今後、本酵素を用いた有用プロセスが確立されることが大いに期待される。

カメノテとムラサキインコにおける種間相互作用の地理的変異： ファシリテーションで温暖化をしのげるか！？

阿南工業高等専門学校 地域連携・テクノセンター 環境研究部門 河井 崇

種間相互作用の方向や強さが、物理環境の地理的スケールにおける変異に伴ってどのように変化するのかを理解することは、今後気候変動により群集構造や生態系機能がどのような影響を受けるのかを予測する上で有効であると考えられる。潮間帯は海と陸の境界に位置する特異的な場所であるため、そこに生息する生物は陸海両方の影響を交互に受けている。特に干潮時、水中から出現し大気中にさらされた状況において、太陽光による熱ストレスの影響は顕著であるとともに、その強さは空間的に変異すると予測される。

また、「ストレス勾配仮説 (stress gradient hypothesis)」とは、海洋生態学者 M. Bertness と植物生態学者 R. Callaway により 1994 年に提唱された「生物間相互作用と環境勾配との関係の規則性」に関する仮説であり、それによると「生物間の関係は生息環境の厳しさの度合い（ストレスの強さ）と密接な関係を持っており、ストレスが弱い環境においては競争関係 (competition) が卓越するが、ストレスが強くなるにつれて中立関係 (neutral)、そしてファシリテーション：扶助関係 (facilitation) へとその方向・強さ、もしくは出現頻度が規則的に変化する」と推測されている。

そこで本研究では、北海道から鹿児島にかけての異なる地域の岩礁潮間帯に幅広く分布する、固着性動物カメノテとムラサキインコの種間相互作用に注目し、熱ストレスの地理的変異に伴って、これら 2 種の関係がどのように変化するのかを明らかにする事を目的とした。

カメノテとムラサキインコの分布域をほぼ網羅し異なる気候帯にまたがる、鹿児島から北海道にかけての全国 7 ヶ所（鹿児島・熊本・福岡・徳島・茨城・岩手・北海道）の岩礁潮間帯において、2006 年 6 月から 9 月にかけて熱ストレス強度、及び 2 種間の相互作用の評価を行った。各地の岩礁潮間帯にムラサキインコ型温度ロガー（ムラサキインコの殻の中に小型防水温度ロガーをシリコンで埋め込んだもの）を設置し、ムラサキインコが各地で受けている干潮時の熱ストレスの強さを測定した。その結果、熱ストレスの強い順に、熊本>鹿児島=徳島>福岡>茨城>北海道>岩手となり、潮間帯における干潮時の熱ストレスの強度は、緯度勾配に沿った気温の変移と単純に同調しているわけではなく、緯度勾配と独立したそれぞれの場所に特有の潮汐リズムにより強く影響を受けていることがわかった。従って、北に位置する場所においても、夏季の真昼に干潮が重なれば熱ストレスは厳しくなり、南に位置するが真昼に潮が引かない場所では逆に穏やかとなり、熱ストレス強度分布の南北逆転現象が起こっていた。

また、熱ストレス強度は、種間相互作用の変動を介して 2 種の分布へ強く影響しており、熱ストレスが強い場所ではその緩和機能を持ったカメノテ中心のファシリテーション：扶助関係 (facilitation) を基礎とした系が形成されていたが、熱ストレスが穏やかな場所では、耐性は低いが競争能力の高いムラサキインコを中心として競争が卓越した系が形成されていた。これらの結果は、地理的スケールにおいてストレス勾配仮説を支持するものである。

講演では、気温上昇シナリオにおける 2 種の共存可能性についても議論したい。

列島スケールでの藻場成立要因の検出と植生の空間パターンとの関係

森林総合研究所 昆虫生態研究室 山北 剛久

藻場は沿岸生態系の主要な要素の1つであり、その機能の重要性が近年注目されている。コンブ藻場などのように構成種そのものが利用できる他にも、海藻やデトライタス（破碎された有機物）、付着藻をエサにする底生生物や葉上動物の生活の場、魚類の産卵場、稚仔魚の生育場など水産上様々な機能を持っている。また、底質を安定させる効果や栄養塩を吸収する効果など水質浄化機能があるとされる。このような沿岸生態系における藻場の生態系サービスの重要性の認識と、生態系のモニタリングや自然再生の機運の高まりとともに、藻場の機能と変動メカニズムの研究は近年進みつつある。

一方で、近年グローバルな生態系の変動について、陸上生態系の研究では「マクロ生態学」が発展しつつある。マクロ生態学とは広域の種や生物群集の分布パターンを扱うもので、古典的な生物地理学や進化生態学を多様性形成のメカニズム研究へと発展させる基礎的な意義がある。また、従来局所で行われてきた個別の研究を統合し、地球規模の環境変動による生態系の変化を予測するために不可欠な物である。例えば、海と森などの異なる生態系同士のつながりについては、重要性が世間で指摘されて久しいにも関わらず、その定量的な効果やメカニズムについては未解明な点が多い。従来は個別の流域ごとの研究において、陸域からの流出物とその影響を詳細に追跡する手法により、陸域が海域に影響するメカニズムを解明する試みが多く行われてきた。しかし、このように流域が1単位となる事象においては、多数の流域を繰り返して比較することで、広域スケールにおけるパターンの一般性を検証するアプローチが同時に行われるべきである。

そこで、演者らは全国スケールで流域環境と沿岸生物の分布との関係を明らかにするために、流域ごとの陸域の土地利用と海側の環境要因を合わせ、藻場の成立要因の解析を行った。また、流域からの影響のうち従来指摘され、モニタリングが進んでいる水質以外の要因として、特に河口域周辺で砂の動きが見られる。この砂の動きに焦点を絞り、東京湾のアマモ場を対象に植生変動と微地形変化との関係を空中写真画像解析と野外調査から明らかにした。

前者について、全国の上流域が1000km²以上の流域を対象に、流域のデータおよび河口から一定距離の海域のデータを抽出し、流域面積、森林率、風波の指標（weighted effective fetch）、水深の傾き、水質（表層植物プランクトン量）を説明変数とする一般化線形モデルを作成し、AICによるモデル選択を行った。その結果、河口から20kmの範囲では藻場の面積と流域の面積に負の相関が見られたが非線形な作用だった。藻場を種に従って分けて解析することで、関係は明瞭になり、ガラモ場の成立については、流域面積と水質が主要な負の要因であった一方で、アマモ場の成立については風波と水質が主要な負の要因であった。要因のうち、流域の森林率と畑地率は拮抗的に変化していた。

次に砂と波による物理的攪乱がアマモ場に与える効果について、1つのアマモ場に焦点をしばって変動プロセスの検証を行った。アマモの増減のトレンドに対して空間自己相関の指標である方向性のあるバリオグラムを用いることで、増減の起こる方向性と攪乱の方向性の対応関係を調べた。また、パッチの各4方位で砂の堆積量を比較することで、植生の景観パターンが攪乱と微地形に与える効果を調べた。その結果、アマモのパッチは減少する際に方向性を持った物理的攪乱の影響を受けていることが明瞭であり、底質の堆積作用はパッチの方位によって大きく異なることが明らかになった。

沿岸の生息環境の変化をマクロスケールで捉えるには従来モニターされている水質だけでなく、流域の規模に応じた陸域からの流出物の影響や、波による直接的な物理的攪乱、漂砂などによる地形変化を継続してモニターすることが重要である。

海洋生物に対する地球温暖化の直接影響～貧酸素化と酸性化～

(独) 水産総合研究センター北海道区水産研究所 小埜 恒夫

地球温暖化の海洋生物に対する影響については、これまでは主に、水温の変動が海洋生物に直接与える生理的な影響と、海洋循環の変動やそれに伴う栄養塩供給量の変動が餌料環境を変化させる事により与えられる間接的な影響の二つの側面から議論がなされてきた。しかしここ数年の間に、これまで議論されていなかった、新たな二つの直接的な温暖化影響の存在が指摘されるようになってきた。一つは、温暖化が海洋の成層構造を強化させることによる亜表層域の酸素濃度減少の影響、もう一つは、海水中に二酸化炭素が溶け込むことによる海洋酸性化の問題である。

温暖化が海洋の成層構造を強化させることは、既に 20 年以上前から議論されていた。温暖化により海洋は表層から暖められるので、ちょうど風呂を上から暖めた時と同じように、表層海水の密度は現在より軽くなり、海洋表層の密度成層が発達して鉛直混合が鈍化する。このことによって海洋表層から海洋内部に運ばれる酸素の量が減少するので、海洋内部の酸素濃度は徐々に減少していく事になる。この減少が実際に起きている事は 2001 年には確認されており、逆に海洋内部の酸素濃度の変動状況から、海盆スケールの海洋循環や各海域の鉛直成層強度の変化を推定する研究がこれまで盛んに行われてきている。一方で、この溶存酸素の減少が亜表層域の海洋生物に顕著な影響を与える可能性については、ほんの 2-3 年前まで真剣に議論される事がなかったのは不思議な位である。一般的な海棲魚類が逃避行動を開始する酸素濃度閾値は $60 \mu\text{mol/l}$ とされているが、海水中の溶存酸素濃度がこの閾値を割り込む水深（限界酸素水深）は、北太平洋東岸（北米西岸）では現在 350m 付近にあるが、この深度はここ 20 年以上の間、毎年 3m 程度の速度で浅くなってきており、この結果地形的な影響で特に限界水深が浅くなっているオレゴン州沿岸域では、年によって限界酸素水深が 200m 以浅になる、つまり大陸棚底面の広い範囲が溶存酸素濃度 $60 \mu\text{mol/l}$ 以下の水に覆われるような事態が生じるようになった。この「温暖化による青潮」により、オレゴン沿岸の底魚類に酸欠による大量斃死が発生したり、低酸素耐性のある深海性のアメリカオオアカイカが大陸棚上に侵入して生態系に大きな影響を与える等のドラスティックな変化が生じている。北太平洋西岸（日本沿岸）では、限界酸素水深は現在水深 550m 付近にあり、太平洋マダラの生息下限深度とほぼ等しくなっている。しかし我々の研究により、1950 年代には限界酸素水深は 700m 程度であったこと、つまり太平洋東岸でも限界酸素水深はほぼ 3m/年のスピードで、かなり以前から上昇を続けており、その結果日本太平洋岸のマダラの生息深度は 1950 年代の 700m 程度から、現在の 550m にまで狭められている事が判ってきた。大陸棚では未だ影響が表れていないが、大陸斜面の生態系には既に大西洋西岸でも酸素濃度低下の影響が現れてきていることをこの結果は示している。

日本では酸素低下の問題より、海洋酸性化の方がマスコミによく知られた問題である。この問題は当初、このままの速度で温暖化が進めば 2100 年頃に外洋域のプランクトン（特に炭酸カルシウム殻を持つ円石藻や、翼足類、浮遊性巻貝等）に影響が表れ、海洋生態系に大きなダメージを与えるという予測から研究が始まったが、最近ではむしろ、極域（特に北極海）や珊瑚礁、さらには内湾等の浅海域で、サンゴ虫や炭酸カルシウム殻を持つ底生生物（巻貝）に「既に影響が現れている可能性が有る」という事が明らかになりつつある。我々が直接研究を行っている日本沿岸域の場合、そこに生息している巻貝類の幼生は、 CO_2 分圧 1000ppm 程度の海水への数時間の曝露で、奇形や生存率の低下を生じる事が判った。現在の大气中の CO_2 分圧は 390ppm、外洋域表層の pCO_2 は高くても 450ppm 程度だが、浅海域では活発な生物生産と有機物分解の影響により、現在でも短期的には海水の CO_2 分圧が 1000ppm に達するところがある。また都市排水や港湾からの排水の影響を受ける水域では、人為的に排出された有機物の分解によって海水の CO_2 分圧が 2000ppm に達することもある事が近年の研究で判ってきた。このような「自然の酸性化」と「汚染による酸性化」の相互作用によって、日本沿岸域でも酸性化による沿岸底生生物への影響が局地的には既に引き起こされている可能性が有り、そうした観点からのフィールド研究が今後は必要とされている。

プランクトンが支配する海洋生態系
—原始的狩猟にも比せられる漁業の確固たるサステナビリティの基盤—

**Plankton dominating oceanic ecosystems:
Basis of firm sustainability of the pelagic fisheries often criticized as primitive and
exploitative activity**

谷口 旭（東京農業大学オホーツク）

しばしば「人類の生存は地球システムとの共生にかかっている」といわれ、地球システムの要素である自然の環境や生態系が受容する営みでなければ持続的たりえないという考えが優勢である。損なわれた環境を復元するにも、自然系の受容範囲を超えれば成功は期し難い。人間は生態系の一員だから、自然系の受容範囲を見極めるには生態学の視点が必要である。20 世紀の科学技術の陰を見て、社会もこのことに気が付いている。

経済不況の今日、農業の自然調和性に加えて、産業としての強さに気が付いた人も多い。一万年前に農耕牧畜を始めた人類は「文明時代」へと進歩し、農業は人間社会の基盤になった。農業が自然系と調和しやすいのは、生物の更新力（再生産力）を利用するからである。近代農学はさらに生産力を高め、世界人口は急増した。しかるに漁業は今なお天然資源を捕獲しており、農耕以前の「狩猟時代」に留まっている。ある人は水産学の未熟さを非難し、またある人は栽培漁業に将来があると強調する。完全なる間違いではないが、その背景には海洋生態系に関する誤解があるように感じられる。

海洋では植物生産速度および物質循環速度がともに速い、換言すれば海洋生物の生産力は高いということが理解されていないのではないか。陸上の植物は、一般に動物よりも大型長寿命で生長が遅く、長寿命である。対して、海洋環境に適応進化した藻類の生長はきわめて速い。そのほとんどは植物プランクトンであり、短時日のうちに細胞分裂する。すなわち藻類の生産量：生体量（P/B）比は高い。その現存量は少ないが、年間生産量は全陸上植物の生産に匹敵する。

植物プランクトンの P/B 比が高いのは、海的环境媒体が水だからであり、海は深いからである。水の密度と粘度が大きいため、海水は混合しにくく、それゆえ有光層は貧栄養である。一方、海水の吸光度は大きいので、海中は深さとともに急激に暗くなる。海洋植物は、希薄栄養塩を効率的に利用することと有光層から沈まないことを同時に果たさなければならない。それを可能にする唯一の適応が「小型化」だった。小型なほど細胞の面積(S)と体積(V)の比 (S/V 比) が大きくなるので、浮遊にも栄養塩摂取にも有利である。

植物プランクトンが微細なのでその摂食者である動物プランクトンも小さく、したがって海洋の食物連鎖は長くなる。長い食物連鎖では大部分の有機物が無機化される。無機化とは栄養塩の再生に外ならず、これが貧栄養な表層生態系の持続性を保障している。長い食物連鎖は、栄養塩律速系において、有限な栄養塩物質の再生循環を加速する必須の仕組みなのである。それゆえ、海洋生態系の主役達は代謝活性が高い小型種であり、その寿命は短い。短寿命は高い更新力を意味するから、海洋の小型浮魚類は多獲性資源だといわれる。サケなどの孵化放流を除く栽培漁業はこうした小型浮魚類を餌として営まれており、可食魚肉重量を基準にすれば負の生産をしていることになる。人工的に投入される餌料は海域の富栄養化を招き、魚病予防薬剤は環境を汚損する恐れもある。文明たる農耕に倣おうとするものではあるが、私にはそのような栽培漁業が持続的だとも文明的だとも思わないのである。

小型浮魚類の高い更新力は海洋生態系が必要とする、いわば自然が発揮させている生産力なのであり、それを漁獲することは自然系の許容しやすいところであろう。漁業は本質的に持続的たりうる産業なのであり、それゆえ漁業を「狩猟時代」に留めておくほうが合理的なのだといえよう。