

海洋ベントスとレジームシフト

大垣俊一

限られた地理的範囲で生物現象を時間的に追跡していると、地域固有の環境要因だけでは説明のつかないことが出てくる場合がある。環境要因の変化は連続的なのに生物相が急激、断絶的に変わるとか、原因はわからないまま遠隔地点に同じパターンの変動がみられる、などである。このような現象に対する有力な説明要因として、近年「レジームシフト (regime shift)」という概念が注目されるようになった。regime はもともと、統治形態、体制といった意味だが、地球物理や生態学の分野では、「一定期間比較的安定に推移し、その間の変化が相対的に急激な生態系の存在状態」のことをいう^{21, 64)}。生態系まで行かなくても、物理環境ないし生物現象のみの段階的变化に対して使われることもある。

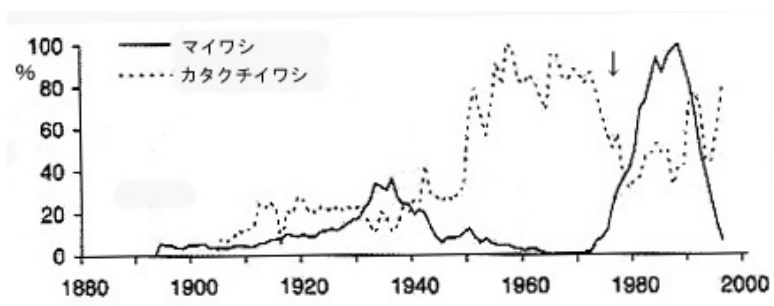


図 1. 日本におけるマイワシとカタクチワシの漁獲量年変動。両種とも、期間内最大値に対する相対値。矢印は 1976 年のレジームシフトの年。文献 33 より。

この概念は 1980 年代、マイワシ (*Sardinops* 属) とカタクチワシ (*Engraulis* 属) の資源変動の研究に端を発する。これらが交互に増減することは日本やペルーで知られていたが、そのパターンが太平洋全域で共通することが気づかれ、広範囲で働く環境要因の影響が推測された。そしてマイワシ優占期とカタクチワシ優占期の交代のような現象に対し、のちに regime shift の語が与えられた²⁶⁾。一方、地球物理の分野でも、1980 年代以降、太平洋域での数十年規模の気海象変動が注目され^{41, 44)}、多くの研究が行われる過程で、いくつかの転換点が気づかれるようになった。中でも 1976 年前後の変化は顕著で、1991 年には日本でも海洋気象学者による「1975 年に何が起こったか」という題のシンポジウムが開かれている¹⁸⁾。一方、大西洋ではすでに 1920 年代から数十年規模の気海象変動が知られていたが、1970 年代以降はこれが生物現象の説明にも適用されるようになった¹⁵⁾。

本稿では、北太平洋と北大西洋の、数十年規模の生物と気海象の広域変動とレジーム

ムシフトについて紹介する。生物データは海洋ベントスを主とするが、太平洋の場合は例が少ないため、研究の進んでいる浮魚資源の情報を中心とした。レジームシフトは、地域生物変動論において行詰まった局面を開閉する有力な考え方ではあるが、同時にある種の危さも伴っている。それは一部には、この概念が本質的に抱える論理的なあいまいさにもよると思われる。この点についても後段で議論したい。

北太平洋と PDO

1. 気海象

PDO (Pacific Decadal Oscillation; 太平洋十年規模変動) は、現在北太平洋の生態系変動を論ずる場合の基礎的概念で、特に東太平洋、北米西岸の生物変動を論ずるときにしばしば言及される。PDO は 1990 年代後半に定義され、その指数 (PDO index, PDOI) は、一義的には北太平洋の海面水温 (SST) を代表する³⁵⁾。具体的な計算方法は、北緯 20° 以北の海面水温を標準化 (平均値を引いて標準偏差で割る) した上、全地球の SST 平均値を差し引き、EOF 第 1 モードを計算してその時系列で表現する。北緯 20° 以北とするのは、エルニーニョを主とする熱帯域の短期的変動の影響を除き、北太平洋独自の指標とするため。全球平均を引くのは地球温暖化などの長期的傾向を除くためである。EOF は地球物理の論文で多用され、Empirical Orthogonal Function (経験的直交関数) の略だが、実質的には PCA (主成分分析) のことである。つまり、「行」を各地点、「列」を年度とした表をもとに主成分分析を行い、地点を軸とする多次元空間に回帰線を通す。そこに下ろした垂線の足の取る値 (第 1 主成分負荷量, PC1 または EOF1) を、時系列に対してグラフ化する (図 1)。PDOI については 1900 年からのデータが公表されているが、衛星画像などから広い海面の SST がわかるようになったのは 1950 年代以降である。1900 年代以降は海上での観測データがあるが、さらに古くは木の年輪などから推定することもある³⁹⁾。

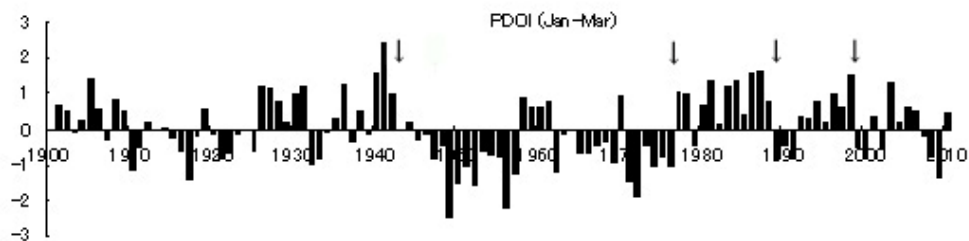


図 1. 冬季 (1-3 月) PDO の経年変動。出典 30 より作図。矢印は近年のレジームシフトの年代⁵²⁾を示す。

PDO は結局 SST の指標だから、こんな面倒なことをしなくても、各地点の SST の平均偏差を標準化すればよさそうなものである。それでも EOF (PCA) が好まれ

るのは、一つにはこのやり方の持つある種の「含蓄」によるのだろう。たとえば野球の投手とその能力項目をもとに行った主成分分析の結果から、PC1は「全体的な活躍の度合い」、PC2は「軟投派か本格派か」を示す、などの分析が行われる²⁹⁾。実際の指標が示す以上の背景要因が現れうるという期待であろう。もう一つは、標準化では一つの指標しか得られないが、EOFの場合、第1主成分、第2主成分…などいくつかある（直交関数展開）。そこでEOF1はA要因、EOF2はB要因との結びつきが強い、などの分析ができる。

このPDOが+（基準線の上）のとき、日本を含む北太平洋西部と中央は寒冷で東部は温暖、一ならば西部～中央は温暖で東部は寒冷となる。東西でパターンが逆になる理由は、北太平洋の気象条件と関係している（図2）。

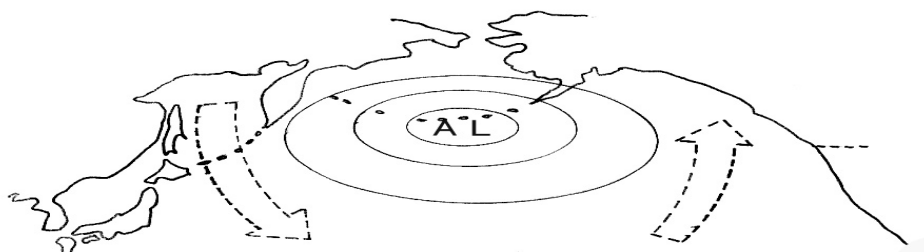


図2. 北太平洋のPNA (Pacific North-American) パターン。アリューシャン低気圧 (AL) が発達した状態を示す。破線矢印は風向。

「ベーリング海は低気圧の墓場」などともいうが、日本付近を西から東に通過した低気圧は、発達しながら北東に進んでアリューシャン低気圧 (Aleutian low, 以下AL) となる。これが強大に発達すると、西のシベリア高気圧とのコンビネーションで「西高東低、冬型気圧配置」になり、日本付近に冷たく強い北西風が吹いて日本を含む北太平洋西部～中部は寒冷化する。ALからの吹き出しが親潮の勢いを強め、より南までその影響が及ぶ。逆に東部北太平洋では南風が卓越し、北向きのアラスカ海流が強められる効果も加わって北米西岸部は温暖化する。アリューシャン低気圧が弱いときにはこれと逆のことが起こり、北太平洋西部は高温、東部は低温になる^{8,30)}。これをPNA (Pacific North-American) パターンといている。この現象はALがらみで冬の特徴だから、海面水温を代表するPDO指数の顕著な変化はもっぱら冬季に現れる²⁾。

このPDOの符号転換が、レジーム・シフトの時期とみなされる。図1からわかるように、最近では1976/77年、1988/89年に逆転が起こり、これに1998/99年を加えることもある^{7,52)}。最後のは単純な逆転ではなく、2000年代に入ってから、それまでの概ね正または負の期間が続く状態から、正負が頻繁に逆転する状態に入ったとみべきだろう³⁰⁾。

このPDOの変動要因、ないしPDOを構成する要素については、北太平洋内部の

メカニズムと外域の影響に分けて考えられている。前者の例として、「亜熱帯モード水」と呼ばれるものがある^{1,30)}。これは冬季に、強いALの影響で冷やされた海の表面水が深層にもぐりこみ、夏の間水温躍層の下に封じ込められたのち、秋以降の鉛直混合の発達に伴って表層に出てくる現象をいう。つまりある年の冬の状態が後年に持ち越されて影響を与える。その他、台風、低気圧等によるかく乱など、確率的要素もある⁴²⁾。一方外域の影響とは、主にエル・ニーニョなど熱帯域からの作用である。エル・ニーニョそのものは数年程度の寿命で、十年～数十年の継続期を持つPDOと一致するわけではないが、その発生は大気を通じた亜寒帯域への熱の供給によって、PNAパターンに影響すると考えられている('atmospheric bridge'²⁾)。ただしその詳細については議論があり、影響の程度が、北太平洋内部の位置や⁴⁰⁾エル・ニーニョの発生年度⁶⁵⁾によって異なるという。ここで、内部とや外部といっても結局太平洋の話だから、それらすべてを統御する究極要因は、地球そのものか、その外になければならないという素朴な疑問がわく。実際そういう視点もあるようで、PDOと太陽活動(黒点数)との関係³⁸⁾や、エルニーニョと月の潮汐力⁶⁾への言及もみられる。しかしこれらはまだspeculationの域を出ないようだ。

2. 生物

北太平洋東部：生物現象について、北太平洋東部ではサケ、底魚・ベントス、動物プランクトン、海中林、海鳥などのレジーム・シフトとの関係が検討されている^{7,37)}。また東部を中心に太平洋全域の生物、環境条件を総合して、1976/77年と1988/89年に生態系のレジームシフトが起こったことを主張する報告もある^{12,21)}。このうちサケ資源と底魚・ベントスの研究について少し詳しく見る。

1990年代以来、北米太平洋岸を含む北太平洋のサケ類資源は、広域の気海象、特にALの変動に一致して増減することが知られていた⁴⁾。これをPDO指数を考案したMantuaらが分析したところ、太平洋岸北部のアラスカでは、1947年のシフト(暖→冷)で漁獲が減少、1977年のシフト(冷→暖)で増加していることが示された³⁵⁾。一方南部(ワシントン、オレゴン、カリフォルニア)では、北部と逆のパターンを示す^{20,36)}。これらの要因については、気候変動が植物プランクトン、動物プランクトンの生産量を通じて降海期のサケ幼魚のエサ環境に影響したという、bottom-up効果があげられている。具体的には、南部を中心に次のように推測された¹⁶⁾。PDOの負相ではALの発達が弱く、南風が弱まるのでアメリカ西海岸は低温である。この時期ALとは逆に、カリフォルニア沖の亜熱帯高気圧が強まり、南流するカリフォルニア海流上を北風が吹くパターンとなる。これは沖向きの流れを引き起こし(エクマン流)、湧昇を生じて表層に栄養塩が供給される。増加した栄養塩により植物プランクトンが繁殖し、動物プランクトンの増加によりサケ類幼魚の成長がよくなる。PDOの正相では、この逆に湧昇が起こりにくく、サケ類資源は減少する。この説明は、南部については一応整合するが、北部が南部と逆の変動をすることや、北部の方がPDOと明瞭に相関する理由がはっきりしない。さらに、ALの強弱は北太平洋海流(親潮・黒潮の続流)の流路と勢力に関係し、より北を流れる時(AL弱化期)には、この海流自体が栄養塩を多く含むためにその影響も考えられる。またPDOは沿岸気象にも反

映するから、サケの降海期の降水量が河川流量に結びついて資源量を左右している可能性もある。つまり事情はかなり複雑である。

アラスカ湾で 1950 年代から 50 年近く行われた調査底引き網の漁獲物を分析した結果³⁾によると、1977 年のレジーム・シフトの時期を境に、ベントス・底魚群集の組成に変化が見られた。それ以前はエビ類、シシヤモなど低位栄養段階種が多かったが、以後はタラ、ヒラメなど高位栄養段階種が優占する種相になった。また、冷→暖の環境変化に対応して、種類相もより暖海的なものになっている。この変化は漁業が行われていないところでも見られることなどから、漁獲圧の変化ではなく、広域の環境変化に対応する現象と推測された。具体的には、湧昇など風系変化が原因とすると減少種について説明できないとし、プランクトンの発生時期とベントス・底魚産卵期の 'match-mismatch' の考え方に、より説得力があるとしている。

北太平洋西部： 日本周辺でも 1990 年代以降、漁業資源と広域、長期の気象変動の関係についての研究例が増えてきた。かつて瀬戸内海のイカナゴは、冬の季節風が強い年に漁獲量が高いというはっきりした関係があり、仔魚分布との関係で説明されていた。しかし 1976 年以降この関係は崩れ、漁獲と相関の高い気象要因がわからなくなった¹³⁾。ブリについても各地の定置網量の分析から、AL が弱い温暖レジームでは、寒冷期よりも漁獲が高まる傾向が認められている³²⁾。時期的一致の指摘にとどまらず、具体的メカニズムに踏み込んだ例としては、イワシ類の研究がある。マイワシ個体群には、沿岸域で低密度に分布する状態と、そこから増殖して回遊する 2 つのフェーズがあり、バツタなどの「相変異」に対比される²⁷⁾。沿岸定住相のマイワシは回遊相に比べて栄養状態がよく、仔稚魚の生残率も高い。1976 年以前、マイワシは低密度の沿岸分布相にあり、その末期の温暖環境のときに、良質の卵を生み出す栄養状態のよい親が増加しつつあった。ここにレジームシフトによる寒冷化が起これ、それに伴う 1 次生産の増加で、仔稚魚の生残率が上昇した。マイワシは回遊相に転じ、親潮・黒潮混合域に至ってそのエサ資源を利用、爆発的に増加したと考えられている⁴³⁾。一方、対象生物の初期発生に注目した研究もある。スルメイカは 1970~80 年代の寒冷レジーム期に資源が激減した。スルメイカの卵の発生海域は水深 100~500m の陸棚・斜面上の暖水塊内にあり、この部分が低温化したことが同時期の資源減少をもたらしたらしい。一方 1989 年以降は温暖条件のもとに、産卵可能海域が拡大し、これがこの時期の資源増加に結びついたと推測されている^{54, 55)}。

和歌山県の田辺湾は、この規模の内湾としては、日本で最も古くから、生物相変動についての情報が蓄積されている海域の一つである。レジーム・シフトの分析はまだ未成熟だが、太平洋におけるベントスの情報を補う意味で若干の論述を加えたい。田辺湾の海岸生物が顕著に変化した記録として、次の 3 つの事例がある。第 1 は 1963 年冬季寒波における熱帯系・南方性生物の大量死、第 2 は 1975/76 年の固着性二枚貝類の急減、第 3 は 1990 年以降の固着性二枚貝類の全湾的増殖である。このうち第 1 は、温暖レジームに単独に生じた強い寒波によるもので⁵⁹⁾、その規模はヨーロッパを含む世界的なものだった^{9, 28, 66)}。しかし影響を受けた種はその後短期に回復しており⁵⁹⁾、ここで論じているレジームシフトとは直接関係がない。第 2 の変化は内湾部を中心に起こり、ケガキ、ヒバリガイモドキ、ヒバリガイなど、海岸の相観を左右

する固着性二枚貝の優占種が一斉に姿を消した⁶¹⁾。原因については赤潮の発生や水質汚濁が示唆されたものの、不明のままである。第3の事例は1990年前後のことで、内湾部から姿を消していたヒバリガイモドキと、湾奥に局限されていたマガキが全湾に増殖して海岸景観を一変させ、やや遅れてケガキも湾内に回復した^{45, 47)}。のちにマガキは湾奥に縮退したが、ヒバリガイモドキとケガキの優勢状態は2011年現在まで続いている。1990年の変化については種ごとに異なるメカニズムが示唆されたが、疑問点も残っており、決定的なことはわからない。1976年と1989年は、これまで見てきたように、北太平洋でレジームシフトが起こった年である。また同じくシフトの示唆される1998年にも、田辺湾湾口部の貝類種組成に、断絶的变化が起こったことが認められている⁴⁸⁾。

北大西洋とNAO

1. 気海象

NAO (North Atlantic Oscillation; 北大西洋振動) は、太平洋のPDOに相当する北大西洋の指標で、気圧偏差によって定義される。北半球の大西洋上には、北のアイスランド周辺にアイスランド低気圧(Icelandic low, IL)、南にアゾレス高気圧(Azores high, AH)があり、同時的に強まったり弱まったりしながら、それぞれの位置を東西に振動させている(図3)。このときILの中心付近のアイスランド、レイキャビクの気圧と、AHの中心付近にあるアゾレス諸島の気圧の差を取り、標準化したものがNAO index (NAOI) である。アゾレスの気圧測定が近年からのためか、これをポルトガル(リスボン)などの気圧で代替することもある。つまりPDOが水温に基くのに対し、NAOは気圧で定義された指標である。NAOが正、すなわち南高北低の気圧差が顕著なとき、北大西洋上の偏西風が北偏し、ヨーロッパ北部に吹きつける。海洋気団の影響で同地域は暖冬傾向となり、低気圧もこの風に乗って東進するため、降水量が増える。NAOの負相では、偏西風が南偏して南ヨーロッパに吹きつけ、今度はこちらが暖冬、湿潤な気象条件になる²⁴⁾。NAOの発生原因については、大西洋の海面水温、北極付近の海氷面積、ユーラシア大陸の積雪面積の変動などが考えられているが、まだよくわかっていないらしい³⁰⁾。ただ、太平洋との関係で興味深いのは、NAOとPDOが連動して変化し²²⁾、レジームシフトがほぼ同時に起こる⁶⁴⁾など、北半球規模の連関が想定されていることである。先にふれた1963年の厳冬・寒波も日本周辺とヨーロッパで同時に起こり、両地域の海洋生物に大きな影響を与えたが、これもヨーロッパと日本同時の気象変動の例といえる。

図 3. NAO 正相時の北大西洋の気圧配置と風系。アイスランド低気圧 (IL) とアゾレス高気圧 (AH) の間を偏西風 (破線矢印) が吹く。実線矢印は、NAO 負相からの各要素の移動方向。



NAO は、ヨーロッパ沿岸の海流や河川流入量を通じて沿岸生態系に影響する。動物プランクトン、北海の漁業から陸上動物まで多くの例が指摘されているが^{14, 49, 51, 56)}、ここでは北海のベントスを取り上げる。1980年代まで、この海域のベントス変動の要因については、主に人間活動に伴う栄養塩の流入・富栄養化が考えられていた^{5, 25)}。しかし北太平洋広域の気象変動も要因の一つであるとされ¹⁵⁾、1990年代後半からはこちらの視点の研究が増えてくる。北海のドイツ沿岸で潮下帯マクロベントスを17年間調べた結果によると³¹⁾、群集組成に影響を与えた要因として、富栄養化に加えてNAOが認められた。具体的メカニズムとしては、NAOの正相時に暖冬となって沿岸水温が上昇し、これに栄養条件が加わってベントス量が増加するという。スカゲラック海峡東部、フィヨルド周辺の研究^{17, 62)}では、ベントス量に7~8年の周期が認められた。これは同時期のNAOの周期7.9年とほぼ一致する。NAOがベントスに影響する具体的な道筋については、浅所と深所別にいくつかの環境指標との相関により分析している。その結果、気象変化が北海での湧昇をもたらし、豊富な栄養塩を含む海水がスカゲラック海峡に流入する一方、降水量の増加が河川からの栄養塩流入を促して表層の1次生産が上昇し、それがベントス増加に結びついたと結論した。しかし相関をくわしく見ると、NAOとベントス反応までのタイムラグが短かすぎたり、河川流入量との関係が、沿岸より沖合いのほうでむしろ強いなど、理解しにくい現象が散見される。北海の西側、イギリス北東沖の沿岸ベントス調査を1973~1996年まで調べた結果によると、群集組成に1987年を境とする断絶が認められた⁶³⁾。これは北海全域に生態系のレジーム・シフトが起こった年で、この後NAOIが継続的にプラスになったことが知られている。気象変化の具体的作用については、一般論としてレジーム・シフトが富栄養化をもたらすことがあるとのみ述べられている。

このほか南半球の大西洋、南部アフリカでもレジーム・シフトに関わるいくつかの研究がある。イワシ類は太平洋と同じく、ベンゲラ海流(喜望峰周辺からアフリカ西岸を北上する寒流)域でも、マイワシ属とカタクチイワシ属の交互増減を示す³⁴⁾。しかしそのパターンは太平洋域とは一致しない。また南アフリカの岩礁海岸群集を、延長約200kmに散在するいくつかの地点で13-4年間調べた結果によると、群集組成に2つ以上の安定相が認められた。とくに1990年前後に大きな変化が起こり、こ

れを境に多様度の変動が小さくなった。この現象は調査域全体に生じていることから、広域の気象変化が背景にあると推測されている^{10,11)}。

レジームシフト論の諸問題

1. 検出の客観性

何か新しい見方が登場した時、それに合致する現象が次々に報告される一方、合わない事例は無視されて、概念の自己強化、自己増殖が始まる。レジームシフト関連の文献を読んでいると、科学のいろいろな場面でくり返されてきたこのパターンが、ここでも起こっているように感じられる。理論の発展過程というのはそういうものなのだろうが、ある程度の歯止めは必要である。特に「シフト」をどのように定義するか、その客観化を図る必要がある。

たとえば顕著な生物現象（マイワシとカタクチイワシの交代など）が起こった時期として、漠然とシフトが主張されることがあるが、中には別の年でもよいのではないかと思えるケースもある。ある時点を境に変化した多くの生物現象（ある場合には前後2時点の差）をもとにシフトの影響を論ずる場合³⁷⁾、差の出た現象だけ集めれば、どの年代をとっても「レジームシフト」が検出されるだろう。そこでPDOやNAOのような気海象の指標をもとに、シフトを客観的に定義することが試みられている。この場合、あらかじめある年代を想定し、前後一定期間の気候指標の有意差を検出するというようなやり方だと、シフト（段階的）ではなく直線的に変化していても有意差が検出されることがあるから適当でない。そこで次のようなかなり込み入った方法が行われている^{12,21)}。まず北太平洋全域から、物理、生物現象の時系列を多数集め、それぞれ標準化する。そして検討する年（シフト候補年）を境に、増加している指標はそのままとし、減少している場合には、増減が打ち消しあう現象を避けるため符号を逆転させて増加パターンに変換する。これらの平均値を取ることにより、1976年と1988年を境とする明瞭で有意なステップ状の変化が見出された。しかしこれには異論もある。一定値の周りにノイズを含んで正規分布するような時系列を集めて同様の処理を行っても明瞭な段階的変化が現れることが示され、このような解析法に疑問が呈された。そうなる原因は、特定年を境に符号を逆転させる操作にある⁵³⁾。つまり、ある時系列が前半から後半にかけて増加している時はそのままとし、逆に減少しているときに符号を逆転させて、見かけ上増加している形にして各系列を足し合わせると、前半から後半にかけて必ず増加することになり、しかもステップ状の変化が表れやすいというのである。一方、初めに特定の年を仮定せず、t検定などを用いて、年度をずらしながらシフトの候補年を抽出する試みもあり^{52,65)}、その結果はこれまで経験的に知られていたレジーム・シフトの発生年とよく一致していた。

これらの手法は、ほぼ一定な状態から別の一定に近い状態に段階的に変化する場合に適合するが、レジームシフトはこのようなパターンだけではないかもしれない¹⁹⁾。特に生物現象は物理現象と違って非線形的な性質を持つから²³⁾、安定状態のあと変動が始まる、増加フェーズから現象フェーズないし安定状態に移行する、などいろい

るなパターンがありうる。先の瀬戸内のイカナゴ漁獲が、「予測可能」から「予測不能」に転じたのは、その一つの例といえるだろう。

2. 生物増幅

ここでいう生物増幅とは、無機環境のわずかな変化に対して生物現象が顕著に応答することで、 $\pm 2.5 \sim 3.0^{\circ}\text{C}$ の温度変化で $\pm 2\text{SD}$ 以上の生物現象の変化が生じたとか³⁷⁾、気圧変化は数ヘクトパスカルだが浮魚の資源変動は数十～数百倍²⁶⁾、などと表現される。このため生物現象を環境変化のセンサーとして利用することができるという主張もある^{21, 58)}。しかし単位系の違う指標を比較するときには注意が必要である。たとえば気圧変化は数ヘクトパスカルでも、これに関与する気団の総量は膨大なものになりうる。変動幅を各指標内で標準化し、それでも物理要因のわずかな変化が生物現象の大きな変化に結びついているとすると、もっと大きな変化が生物に影響していないことになり、奇妙である。相関による評価もある。イギリス周辺の動物プランクトン量は、直接の環境要因である水温との相関は弱い、水温変動の背景であるメキシコ湾流の位置とよく相関する⁵⁸⁾。つまり動物プランクトンは、海流系、生態系の変化によってさまざまな要因の間に分散して生じた変化を感知するために、その中の1要因にすぎない水温との相関が弱くなるという。これは増幅というより収集というべきだが、個々の環境要因に注目すると、その少しの変化で大きな生物変化を引き起こしているように見えるだろう。このような生物増幅は、栄養段階を上に行くほど顕著になるとされている²⁶⁾。たとえば浮魚資源については著しい変動の例が多く知られているが、動・植物プランクトンではあまり知られない。これについては次のような説明がある。海洋生態系では、有名な「現存量の逆ピラミッド」として、下位より上位栄養段階のバイオマスが大きい。そのためプランクトンは常に上位捕食者の激しい摂食圧の下にあり、増加してもすぐに食べられて密度は低位一定に留められる。だから環境条件の変動により植物プランクトンの「生産量」は変動しているが、常に速やかに上位捕食者のバイオマスに変換されるので、「現存量」の変動は浮魚資源の方に顕著に現れる⁵⁷⁾。ただしこれについては、漁獲量の情報が多いために変動の事例が多く得られる、という要素もあるかもしれない。

生物増幅は、定義や変動幅の評価などまだ未成熟な印象があるが、含蓄のある興味深いテーマであり、今後の発展が期待される。

3. 目的要因か説明要因か

地域の生物変動に対し、レジームシフトに言及する場合には、2つのパターンが考えられる。一つは、より広域で知られているシフト現象の一例と位置づけるもので、この場合レジームシフトは、検証すべき仮説ないし目的要因である。従来の見解に一致するシフトが起こっていれば仮説は強化され、一致しなければ例外となる。この場合は明快で、論理的な紛れはない。問題はレジームシフトが、地域生物変動に対する説明要因として使われるときである。たとえば、「この現象の背景にはレジームシフト（ないしPDOやNAO）があるかもしれない」というように言ったとき、それは何を意味するのだろうか。

地域の生物現象は、本来地域の生物・環境条件によって説明されるべきものである。それができない時、レジームシフトないし広域気海象変動が説明要因として言及される。その間をつなぐ相関分析なども行われているが、結果は錯綜として必ずしもうまくいっているとはいえない¹⁷⁾。その理由としては、先に述べたような、生物増幅や軽度分散要因の効果によって因果関係がとらえにくかったり、当の個体群が遠隔地からの加入を受けているために、地域の事情だけで説明できない、などが考えられる。また、個々の生物と環境の関係についての情報が不足しているために、どのような要因を分析すればよいかわからない、ということもあるだろう。

そこで具体的連関は不明のまま、レジームシフトが説明要因として持ち出されることになる。しかしこれは生態系の変化だから、生物現象を含んでいる。つまり自らその一例となる現象によって自らを説明しようとしているわけで、循環論の懸念を免れない。レジームシフトを地域生物変動の説明要因とするのは、不完全で暫定的な処置と言わざるをえない。そのあいまいさは、いずれは地域生物現象と広域環境変動をつなぐ具体的研究によって乗越えられねばならないだろう。

レジームシフトに関わる論文を和英取り混ぜて読んでみると、ここでもまた、欧米と日本のアプローチの違いに気づく。広域気海象変動と地域生物現象のかかわりを分析するとき、欧米の論文では、そのほとんどが気海象→湧昇→栄養塩という‘bottom-up’の連鎖関係を想定し、それで説明できないときには‘match-mismatch’が持ち出されるというように、既成の理論の枠内で説明が行われている。対して日本の研究では、これらの概念は言及されることはあっても、それを中心に展開するという形ではない。個々の種、個体群、現象に注目し、それぞれの場面で要因を探る中から、全体像に迫ろうとしているように見える。こうした欧米と日本の方向性の差は、前報で検討した磯焼け研究にも共通する⁴⁶⁾。そのどちらがより充実した成果を生み出すか、今後の展開に注目したい。

引用文献

- 1) Alexander MA & Deser C (1995) A mechanism for the recurrence of wintertime midlatitude SST anomalies. *Journal of physical oceanography*, 25, 122-137/
- 2) Alexander MA et al.(2002) The atmospheric bridge: the influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. *Journal of Climate*, 15, 2205-2231.
- 3) Anderson PJ & Piatt JF (1999) Community recolonization in the Gulf of Alaska following ocean regime shift. *Marine Ecology Progress Series*, 189, 117-123.
- 4) Beamish RJ & Bouillon DR (1993) Pacific salmon production trends in relation to climate. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 50, 1002-1016.
- 5) Beukema JJ (1991) Changes in composition of bottom fauna of a tidal-flat area during a period of eutrophication. *Marine Biology*, 111, 293-301.

- 6) Ceveny RS & Shaffer JA (2001) The moon and El Niño. *Geophysical research letters*, 28, 25-28.
- 7) Chavez et al. (2003) From anchovies to sardines and back: multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science*, 299, 217-221.
- 8) 千葉早苗 (2009) 気候のレジームシフトと海洋低次生態系の応答過程. *月刊海洋* 459, 24-32.
- 9) Crisp DJ (1964) The effects of the severe winter of 1962-63 on marine life in Britain. *Journal of Animal Ecology*, 33, 165-210.
- 10) Dye AH (1998) Community-level analyses of long-term changes in rocky littoral fauna from South Africa. *Marine Ecology Progress Series*, 164, 47-57.
- 11) Dye AH (1998) Dynamics of rocky intertidal communities: analyses of long time series from South African shores. *Estuaries, Coastal and Shelf Science*, 46, 287-305.
- 12) Ebbesmeyer CC et al. (1991) 1976 step in the Pacific climate: forty environmental changes between 1968-1975 and 1977-1984. In, Betancourt VL & Tharp VL eds. *Proceedings of the Seventh Annual Pacific Climate Workshop*, April 1990.
- 13) 藤原建紀 (1991) イカナゴの漁獲と気象・海象・エルニーニョ. *海と空*, 66 特別号, 283-290.
- 14) Flomentin JM & Planque B (1996) *Calanus* and environment in the eastern North Atlantic II. Influence of the North Atlantic Oscillation on *C. finmarichicus* and *C. helgolandicus*. *Marine Ecology Progress Series*, 134, 111-118.
- 15) Gray JS & Christie H (1983) Predicting long-term changes in marine benthic communities. *Marine Ecology Progress Series*, 13, 87-94.
- 16) Greenland D (2003) Decadal climate variation and Coho Salmon catch. In, *Climate Variability and Ecosystem Response at Long-term Ecological Research Sites*. Oxford University Press.
- 17) Hagberg J & Tunberg BG (2000) Studies on the covariation between physical factors and the long-term variation of the marine soft bottom macrofauna in Western Sweden. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 50, 373-385.
- 18) 花輪公雄 (1993) 海洋の長周期変動と大気大循環. *海と空*, 68, 167-180.
- 19) 花輪公雄 (1998) 気候のレジームシフトと海洋生態系の応答. *月刊海洋* 30, 389-394.
- 20) Hare SR, Mantua NJ, Francis RC (1999) Inverse production regimes: Alaska and West Coast Pacific salmon. *Fisheries*, 24, 6-14.
- 21) Hare RH & Mantua NJ (2000) Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. *Progress in Oceanography*, 47, 103-145.
- 22) 本田明治・中村尚 (2001) 北太平洋の変動が北大西洋に与える影響. *月刊海洋号外* 24, 123-129.

- 23) Hsieh et al. (2005) Distinguishing random environmental fluctuations from ecological catastrophes for the North Pacific Ocean. *Nature*, 435, 336-340.
- 24) Hurrell JW & Van Loon H (1997) Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Climate Change*, 36, 301-326.
- 25) Josefson A (1990) Increase of benthic biomass in the Skagerrak-Kattegat during the 1970s and 1980s – effects of organic enrichment. *Marine Biology Progress Series*, 66, 117-130.
- 26) 川崎健 (2009) イワシと気候変動. 岩波新書
- 27) Kawasaki T & Omori M (1995) Possible mechanisms underlying fluctuations in the Far Eastern sardine population inferred from time series of two biological traits. *Fisheries Oceanography*, 4, 238-242.
- 28) 菊池泰二 (1980) 厳しすぎた冬. *自然*, 30, 18-19.
- 29) 木下栄蔵 (1987) 多変量解析入門. 啓学出版
- 30) 気象庁 HP. 気象統計情報 > 海洋の健康診断表.
<http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/shindan/index.html>
- 31) Kröcke et al. (1998) Long-term changes in macrofaunal communities off Norderney (East Frisia, Germany) in relation to climate variability. *Marine Ecology Progress Series*, 167, 25-36.
- 32) 久野正博 (2004) ブリ資源の長期変動特性と気候のレジームシフト. *黒潮の資源海洋研究*, 5, 29-37.
- 33) Lehordey JA et al. (2006) Climate variability, fish and fisheries. *Journal of Climate – Special section*, 15 October 2006.
- 34) Lluch-Belda et al. (1989) World-wide fluctuations of sardine and anchovy stocks: the regime problem. *South African Journal of Marine Science*, 8, 195-205.
- 35) Mantua NJ et al. (1997) A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 1069-1079.
- 36) Mantua NJ & Hare SR (2002) Pacific decadal oscillation. *Journal of Oceanography*, 58, 35-44.
- 37) McGowan JA, Cayan DR, Dorman LM (1998) Climate-ocean variability and ecosystem response in the Northeast Pacific. *Science*, 281, 210-217.
- 38) Minobe S (1997) A 50-70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophysical research letters*, 24, 683-686.
- 39) 三上岳彦 (2001) 歴史時代の気候変動–過去 1000 年間の気候変動とその要因. 月刊海洋号外 No. 24, 194-199.
- 40) Nakamura H, Lin G, Yamagata T (1997) Decadal climate variability in the North Pacific during the recent decades. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 2215-2225.
- 41) Namias J, Yuan X, Cayan DR (1988) Persistence of North Pacific sea surface

- temperature and atmospheric flow patterns. *Journal of Climate*, 1, 682-702.
- 42) Newman M, Compo GP, Alexander ME (2003) ENSO-based variability of the Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Climate*, 16, 3835-3857.
- 43) 二平章 (2008) 気候レジームシフトと日本マイワシの資源変動. *月刊海洋* 40, 149-158
- 44) Nitta T & Yamada S (1989) Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 67, 375-383.
- 45) 大垣俊一 (2002) 田辺湾周辺の地質、地形と海岸生物. *Argonauta*, 7, 3-19.
- 46) 大垣俊一 (2010) ウニ密度変動論. *Argonauta*, 18, 3-16
- 47) 大垣俊一 (2010) 浅海生物相の長期変動－紀州田辺湾の自然史. 南紀沿岸生態研究室.
- 48) 大垣俊一 未発表
- 49) Pearson A (2009) Perfect storm. *New Scientist*, 3 January 2009, 33-35.
- 51) Reid PC & Edwards M (2001) Long-term changes in the pelagos, benthos, and fisheries of the North Sea. *Marine Biodiversity*, 31, 107-115.
- 52) Rodionov S & Overland JE (2005) Application of a sequential regime shift detection method to the Bering Sea ecosystem. *ICES Journal of Marine Science*, 62, 328-332.
- 53) Rudnick DL & Davis RE (2003) Red noise and regime shifts. *Deep-sea Research I*, 50, 691-699.
- 54) 桜井泰憲 (2001) 気候変化とイカ類資源の変動. *月刊海洋号外*, No. 24, 228-236.
- 55) 桜井泰憲・山本潤 (2009) レジームシフトに応答する魚類とイカ類資源の変動. *月刊海洋* 41, 33-42.
- 56) Stenseth et al. (2002) Ecological effects of climate fluctuations. *Science*, 297, 1292-1296.
- 57) 谷口旭 (2009) 海洋低次生産層におけるレジーム・シフト検知の難しさ. *月刊海洋* 41, 21-23.
- 58) Taylor AH, Allen JI, Clark PA (2002) Extraction of a weak climatic signal by an ecosystem. *Nature*, 416, 629-632.
- 59) Tokioka T (1963) Supposed effects of the cold weather of the winter 1962-63 upon the intertidal fauna in the vicinity of Seto. *Publications of the Seto Marine Biological Laboratory*, 11, 245-254.
- 60) Tokioka T (1966) Recovery of the *Echinometra* population in the intertidal zone in the vicinity of Seto, with a preliminary note on the mass mortality of some sea urchins in the summer season. *Publications of the Seto Marine Biological Laboratory*, 14, 7-16.
- 61) Tokioka T & Imafuku M (1977) Composition of the fixed sea urchin colony of Hatakejima Island, 1976. *Publications of the Seto Marine Biological Laboratory*, 23, 425-426.

- 62) Tunberg BG & Nelson WG (1998) Do climatic oscillations influence cyclical patterns of soft bottom macrobenthic communities on the Swedish west coast? *Marine Ecology Progress Series*, 170, 85-94.
- 63) Warwick et al. (2002) Inter-annual changes in the biodiversity and community structure of the macrobenthos in Tees Bay and Tees Estuary, UK, associated with local and regional environmental events. *Marine Ecology Progress Series*, 234, 1-13.
- 64) Yasunaka S & Hanawa K (2002) Regime shifts found in the Northern Hemisphere SST field. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 80, 115-135/
- 65) Yasunaka S & Hanawa K (2003) Regime shifts in the Northern Hemisphere SST field: revisited in relation to tropical variations. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 81, 415-424.
- 66) Ziegelmeier E (1964) Einwirkungen des kalten Winters 1962/63 auf das Makrobenthos in Ostteil der Deutschen Bucht. *Helgoländer Wissenschaft Meeresuntersuchungen*, 10, 276-282.