

開放度測定の地形法

大垣俊一

海岸における波当りの強さ (wave exposure) が、生物の分布、形態、成長など、さまざまな生態的側面に影響を及ぼすことについては、多くの研究がある。そのため、波浪強度を測定するためにいろいろな試みが行われてきたが、それらは大きく4つの方法に分けることができる (清田 2004, 大垣 2004)。第一は、これは測定といえるかどうかかわからないが、外海に面した開放性の海岸だったとか、内湾、遮蔽海岸だったというように、カテゴリ分けして記述する。しかしこれは主観的で地域間の比較を定量的に行うことができず、他の方法に比べて生物現象との対応も劣るとされる (Lindegarth & Gamfeldt 2005, Burrows et al. 2008)。二番目は生物の分布を利用するもので、biological exposure scale と呼ばれる。かつてイギリスや北欧で行われ、海岸生物の種類相や垂直分布をもとに、波浪露出度を求めるものである。これについては、地理的位置が異なると生物相も変わって別の基準が必要になる上、生物の分布によって生物現象を説明するのは循環論だという批判がある (Raffaeri & Hawkins 1999, Burrows et al. 2008, 大垣 2008)。3つ目が今回取り上げる地形法で、地形の情報を定量化して、開放度に換算する。これは海洋波の理論をベースとし、中心点からオープンな水面の水平角を求めるという単純なものから、方位ごとの対岸距離 (fetch) を測る、風のデータを加えるなど、さまざまなバリエーションがある。のちに述べるように欠点もいろいろ指摘されているが、いつでも室内で、地図と気象データをもとに計算できる簡便さから、近年使用例が増えてきた。最後に機械的方法がある。海岸に設置した測定器によって、実際に波力や流速を測るやり方である。これには、釘とプレートといった簡単なものから、石膏ボールの摩滅度によるもの、精巧な電氣的圧力計など、いろいろなタイプがある。これは最も正確だが、設置と維持に手間がかかり、また局所的な環境に左右されるという弱点があり、多数地点での長期の値を簡便に求めることができない (Thomas 1986, Davis & Johnson 2006, Burrows et al. 2008)。あとの二つについては、どちらが優れているというより、地形法が、広範囲の生物相と波当りの関係を調べるというようなマクロな分析に向いているのに対し、機械的方法は測定点付近の、短期的な生物個体への波のインパクトを調べるというようにミクロな分析に向き、用途が異なるというべきだろう。

直接に波当りの効果を調べる研究でなくても、一般的な海岸生物の調査に当り、habitat の記述の中に、他地点と比較可能な開放度の情報を含めることは有意義だろう。その場合、比較的簡単な操作で、事後的に値が得られる地形法は有力な手法である。特に、多数地点で海岸生物を調べ、種類相と環境条件を対照するような研究で、連続変数として開放度の数値を検討に加えられることの意味は大きい。本稿では地形による開放度測定の方法について、基礎となる理論と使用例、および計算の実例を示し、この方法の有効性について検討する。

1. 波力推定の理論

海岸生態学でいう地点の開放度とは、具体的にはその場の生物が受ける波当りの強さ、つまり波のエネルギーを意味している。そのエネルギーは高い波ほど大きく、次の関係がある（宇野木 1993）。

$$E = 1/8 \rho g H^2 \quad \dots i)$$

(E, 波のエネルギー; ρ , 海水密度; g, 重力加速度; H, 波高)

ρ と g は定数なので、波のエネルギーは波高の 2 乗に比例するという関係になる。そこで波高を推定する必要があるが、これには有義波法、スペクトル法、またさらに複雑な数値計算による方法（気象庁の現在の波浪予測に使われている）など、いくつかやり方がある。海岸生態の開放度推定は有義波法に基づく。これは 60 年以上前の第 2 次世界大戦中、アメリカ、スクリプス海洋研究所の Sverdrup と Munk が開発し、ノルマンジー上陸作戦成功の一因になったともいわれる有名な方法で、のちにこれを改良した Bretschneider のイニシャルを加えて、SMB 法と呼ばれている。SMB 法は、純粋に流体力学や水面波理論に基づく理論式ではなく、指標を操作しながら実際の波高との相関を探ることによって生まれた経験式の色合いが強い。しかし精度は良く、成功した方法といわれている（永田 1971, 光易 1995, 関根 1996, 磯崎 2006）。この方法では、まず「有義波」というものを考える。これは、その場で発生しているさまざまな高さの波のうち、上位 1/3 を取り出して高さを平均したもので、人間が目視で観測する波の高さにほぼ一致するという。有義波は海底の干渉を考えなくてよい沖合などでは、風速、風の吹いた時間幅（連吹時間）、吹送距離（海岸の場合は対岸距離、以下 fetch と表記）の 3 つに依存する。風は海面にエネルギーを与えるから、その強さ（風速）と、吹いている時間（連吹時間）が長いほど与えられるエネルギーが大きくなり、波は高くなる。また、波は移動しながら高くなって行くので、吹送距離（fetch）の関数でもある。連吹時間と fetch には、これ以上大きくなっても波が高くない上限ないし飽和点がある。一定の風速のもとで、ある程度風が吹き続けると、波は十分に発達し、風によって波に与えられるエネルギーと波が砕けることによって失われるエネルギーが均衡し、それ以上波は高くない。そこで連吹時間ないし fetch を横軸、波高を縦軸にとってグラフを描くと、はじめは比例的に波高が上昇するが、ある点で頭打ちになる。このように、波高の決定には 3 変数が関与して、それぞれ飽和点があるというように複雑なので、1 つの式に収めたり、1 つの平面グラフで表現するのは無理がある。そこでテキスト類では、いくつかの式や図に分けたり、複数の変数を合成した指標を縦、横軸にとるなどの形になっている。ここでは後で問題になる fetch に注目し、有義波法による波高推定法を図 1（次頁）に単純化して示す。なお、グラフは一種の回帰線で、波高の実測値は、この線の上下に誤差を含んだ点としてばらついている。

今、ある風速の風が吹き始め、2 時間以上たつと、波の発生点から a km の距離の地点の波高は p m と予想される。この位置では、さらに風が吹き続けても、fetch が足りないで波はそれ以上高くない。一方発生点から b km の地点では、連吹 2 時間の波の高さは p m だが、10 時間吹けば r m まで波は高まる。もちろん風速が異なると、また別のグラフが必要になる。

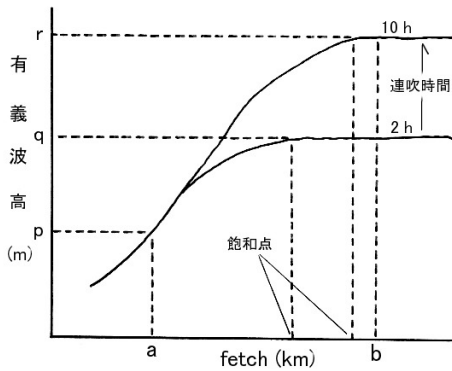


図 1. 有義波法による波高推定

ところで、図の飽和点に達するまでは、fetch と波高の間には一定の関係が見られ、次の式が与えられている（関根 1996）。

$$H \propto v f^{1/2} \quad \dots \text{ii)}$$

（ H 有義波高, v 風速, f 吹送距離 fetch, \propto は比例関係）

つまり、波高は風速に比例し、また fetch の 1/2 乗に比例する。これと先の i) 式を合わせると、

$$E \propto v^2 f$$

つまり波のエネルギーは、風速の 2 乗と fetch に比例することになる。のちに紹介する開放度推定の論文では、しばしば fetch に風速の 2 乗をかけているが、その根拠はこうしたところにあると考えられる。

以上は波高が飽和に達する以前、いわゆる「発達途中の波」についての式だが、飽和点の位置は Sverdrup-Munk の有義波グラフから、次のように読み取ることができる（永田 1971, Harborne et al. 2006）。

$$g f / v^2 = 22 \times 10^3$$

つまり左辺がこの値以上になると、飽和点の波高を一定値として適用することができる。風速 10 m とすると、fetch は 238 km と計算され、このことが、のちに紹介する論文で、fetch を 200 km 程度まで考慮することの根拠になっている（Burrows et al. 2008）。

なお以上は、沖合の十分な水深のあるところの話である。水面波による海水のかく乱は周期の半分の水深に及び、そのためこれより浅いところでは、海面との干渉を生じて波高の決定式は別の形を取ることになる。また、あくまで風波（風波、風波）についての理論なので、風の影響を受けずに伝播される「うねり」のような長周期波も考慮外になっている。

ところで、fetch には direct fetch と effective fetch の二つの考え方があり（Keddy 1982；図 2）、海岸生態の開放度測定においても、両方ともに使用例がある。

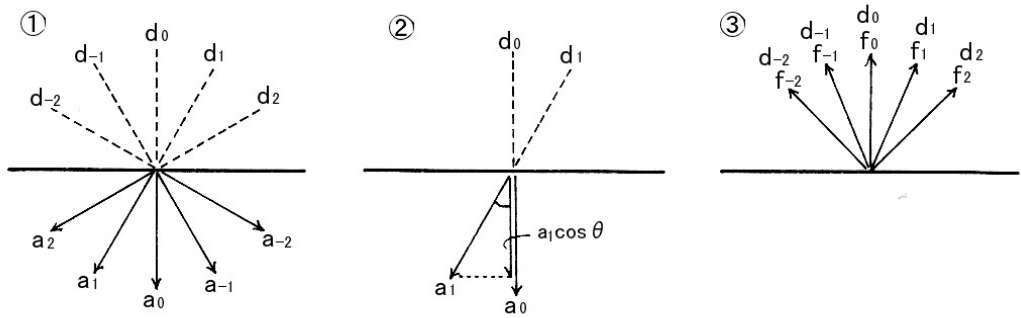


図2. effective fetch の考え方

direct fetch は、中心点から各方位に放射線を伸ばし、各線上で対岸にぶつかるまでの距離を測り、これを全方位について合計する。図2の③でいえば、

$Fd = (f_0 + f_1 + f_{-1} + f_2 + f_{-2})$ これは図2①で、 $d_{-2} \sim d_2$ の方向から与えられる波力 $a_{-2} \sim a_2$ を合計していることに相当する。しかし、たとえば d_0 方向からの力は、 d_0 のみから与えられるのではない。 d_1 から進入する波も d_0 方向のベクトルを持ち、その大きさは $a_1 \cos \theta$ である (図2②)。これがすでに想定している d_0 方向の力 a_0 に加わり、合せて $a_0 + a_1 \cos \theta$ となる。これをすべての方位について足し合わせるのが、effective fetch の考え方である。 $\cos \theta$ は、 θ が大きくなるほど小さく、真横方向 ($\theta = 90^\circ$) で0だから、あまり傾斜した線を考えても意味は薄い。慣例的に、垂直から $\pm 45^\circ$ まで計算することになっている。 θ の値として、一般的な風向の細分基準である、方位角幅 22.5° を用いると、海岸から垂直方向を 0° とし、 $\pm 45^\circ$ 内5本の fetch を考えて (③)、

$$f_0 + f_1 \cos 22.5^\circ + f_2 \cos 45^\circ + f_{-1} \cos 22.5^\circ + f_{-2} \cos 45^\circ$$

平均値を求めて、

$$fe_0 = (f_0 + f_1 \cos 22.5^\circ + f_2 \cos 45^\circ + f_{-1} \cos 22.5^\circ + f_{-2} \cos 45^\circ) / (1 + \cos 22.5^\circ + \cos 45^\circ + \cos 22.5^\circ + \cos 45^\circ)$$

これは d_0 方向の effective fetch にすぎないから、これをすべての方位についてたし合せ、つぎの合計 effective fetch を得る。

$$Fe = fe_0 + fe_1 + fe_{-1} + fe_2 + fe_{-2}$$

direct fetch と effective fetch を比較すると、Keddy (1982) の図を見ても、また筆者自身の実例計算からも、前者は fetch の分散が大きく、中心点から鋭いぎざぎざのような分布になるが、後者の分布はよりなだらかである。これは effective fetch が、各方位の direct fetch の平均の性格を持つことから当然だろう。direct fetch は、ある方向の沖合近距離に小島や岩礁があると小さくなるが、実際にその方向から与えられる波のエネルギーは、横方向からの力も考慮しなければならない。したがって特定方向からの力を評価する場合は、effective fetch を用いるのが妥当である。たとえば海岸に堤防を作るとき、その表面にどれくらいの力がかかるか、といったケースが考えられる。一方、全方向からの波力を合計しないし平均すると、両者は全く同じ値になる ($Fd = Fe$)。effective fetch は、いくつかの

direct fetch を±45°角内で平均化したものだから当然で、このことは fetch を 45°角、8 本程度に絞って実際に計算してみれば、簡単に確かめられる。effective fetch 概念の出典として挙げられているのは、私は直接見ていないが、アメリカ合衆国政府発行の 'Shore protection manual' という文献で、これはそのタイトルから防災関係の技術書であると考えられる。そういう分野ならば、上記の堤防建設の場合のように effective fetch の考え方が意味を持つだろうが、海岸生態では、その地点に与えられる波力の総合値を問題にすることが多い。effective fetch を採用している例もあるが (Murphy & Fonseca 1995, Fonseca & Bell 1998, Ruuskanen et al. 1999)、結局合計するのであれば、めんどろな effective fetch の計算をする意味はないといえる。

波浪に関する海洋物理のテキスト類の記述は、流体力学や水面波理論の文字式、微分方程式が多用され、難解である。開放度についての海岸生態の論文でも、ある程度細部に踏み込んでいるものもあるが、しかし一般的に言えばそれほど複雑なことをしているわけではない。上記の紹介は大ざっぱなものだが、それら論文の開放度測定の説明を理解するためには足りていると考えるので、以下実例に従って解説してゆくことにする。

2. 地形法の採用例

開放度ないし波力を地形的に推定する方法の中で、最も単純なものは、その地点から遮るものがないオープンな水面の水平角度の合計を求めるもので、1930 年代から例がある。これに対し、1940 年代以降発達した波高理論をベースとし、中心点から放射状に引いた直線上の対岸距離 (fetch) を求める方法が、1980 年代から行われるようになった。これに各 fetch 方向から吹いた風の頻度と風速を掛け合わせて、全体的な開放度の指標にすることもあり、今のところこのパターンが最もよく使われている。しかし開放角や fetch のみで評価するやり方も、並立して使われている。

Moore (1935) は地形法の草分けともいえる論文で、開放度の指標として、調査点から 0.5 mile (≒0.8km) 半径までの開放水面を決定し、その方向から風が吹いた頻度 (100 日当りの日数) をその地点の 'exposure factor' とした。

Baardseth (1970; Ruuskanen et al. 1999 引用) は、5 万分の 1 海図で、調査点から半径 7.5km の円内を中心角 9°の扇形 40 に分割し、その中に地形的障害物 (対岸、小島など) のない扇形の数を開放度の指標とした。これはのちに **Baardseth Index** と呼ばれ、2000 年代に至るまで、主として北欧の海藻研究で使われている。

Keddy (1982) は fetch と風に基づくさまざまな指標を比較している。これは湖での仕事だが、海の論文でもよく引用される。著者は湖岸の 25 地点で、fetch として direct と effective、風速として平均風速と超過風速 (一定値を超えた速度の平均)、検討期間として結氷期や水草の生育期を考慮した 4 期を区別し、 $2 \times 2 \times 4 = 16$ パターンの指数を水草の垂直分布や底質粒度と対照した。指数は $\sum p f v$ の形になっている (p 風向頻度=ある方向から風が吹いた日数の割合, f 対岸距離 fetch, v 風速, その積を全方位について合計)。fetch の計測に当っては、中心点から 22.5°間隔で放射線を引いた透明シートを用意し、これを地図上に置いて対岸距離を測るというやり方をしている。こうすることで地図上に線を引く手間

がなく、簡便であるため、以後の研究でもこのやり方が踏襲されている。結果として、16 指数は互いによく相関し、**direct fetch** を用いた方が **effective fetch** によるよりも自然条件との適合においてよい結果を与えた。前項で述べたように、両者はこの論文におけるように、全方位総合して評価すれば同じ値になるはずである。この点理解に苦しむが、計算上の端数の処理により、両者は若干異なる値になるので、その差が関係したのかもしれない。もう一つの可能性は、各方位についてあらかじめ求めた **effective fetch** に、各方位の平均風速をかけたというものである。これだと **direct fetch** を使う場合と違う値になるが、理論上は、各方位内において、**effective fetch** を構成する全 **fetch** に対してその方向の風速をかけ、その積を合計すべきであり、この場合は同じ値にならない。また、**Keddy** の結果で注目されるのは、風データの採用期間を水草の生育期間に限定した場合より、波の立たない結氷期を含めた年間データに基づくほうが、水草分布との適合がよいという結果が出たことである。これは解釈困難であり、著者も明快な説明をしていない。

Thomas (1986) は海岸生物の帯状分布を基準としながら、開放度指標の修正を試みている。基本的には中心角 22.5° の各扇形から風が吹いた頻度と平均風速を使い、 $\sum p f v^2$ の形を '**exposure index**' とした。ただし対数スケールにより、また海岸の傾斜を組み込むなど、複雑な式になっている。検討の結果、**exposure index** と生物の垂直分布幅との対応はよく、適合性が悪い場合は海岸の傾斜度を組み込むことで改善が見られた。これらの指数によって、垂直分布の分散の大部分を説明できるとしている。

その後の研究では、**Ruuskanen et al. (1999)**、**Westerbom & Jatu (2006)** が **Baardseth Index** を、**Murphy & Fonseca (1995)**、**Fonseca & Bell (1998)**、**Davies & Johnson (2006)** らが $\sum p f v$ の形、**Burrows et al. (2008)** が $\sum p f v^2$ の形を採用している。このほか **Ekebom et al. (2003)**、**Lindegarh & Gamfeldt (2005)**、**Harborne et al. (2006)** らの場合は、水面波の理論にふみ込んで多段階の推定式になっているので、 f と v の累乗関係について単純なパターンで示すのは無理がある。

このうち **Ekebom et al. (2003)** は、**fetch** 計測に初めて GIS を利用した。GIS (地理情報システム) は、衛星写真にさまざまな地理情報を加えて地球規模でデータベース化したもので、これに基づき、さまざまな解像度で海岸線の形状を決定することができる。データは NOAA のサイトからダウンロードして、GIS ソフトで分析する。著者らはこれにより、迅速、正確な **fetch** 計測が可能であると、こうして求めた各方位の **fetch** に、地点前面の平均水深、風速、風向の情報を加え、次の 5 段階のプロセスで、海岸に与えられる波力を推定した ($k_1 \sim k_5$ は定数)。

1) 有義波高 = $k_1 \times$ 地上 10m の風速 \times **fetch**^{1/2}

2) ピーク波高周期 = $k_2 \times$ 地上 10m 風速^{1/2} \times **fetch**^{1/4}

(以上について、**fetch** と連吹時間が飽和点以上の場合は別の推定式が示されている)

3) 波のエネルギー = $k_3 \times$ 有義波高²

4) **fetch** 方向波力 = $k_4 \times$ 波のエネルギー \times 波速

ただし、波速 = $k_5 \times$ ピーク波高周期 (浅海では別の波速推定式を使う)

5) 総合波力 ('**wave exposure**') = \sum 方向頻度 \times **fetch** 方向波力

方向頻度：その方向から風が吹く確率

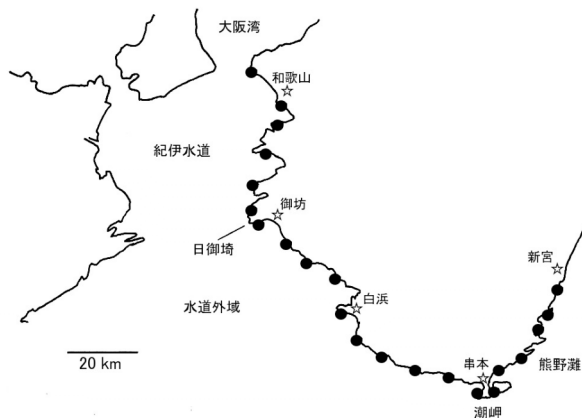
これは開放度を測定した例の中で最も詳細なものの一つで、周期の試算を加えて、水面波理論にできるだけ従おうとしている。著者らは、この方法によって求めた'wave exposure'と、単なる direct fetch の合計を比較したところ、両者は大まかに一致し、有意な正相関が見出された。しかし細かく見ると、地点ごとに風の影響が認められる。著者らはこの方法による'wave exposure' 推定の不十分な点として、長い fetch に対して、地点近傍の風データを一律に適用していること、海岸至近の浅瀬、うねりや波の反射や回折の影響を組み込んでいないことなどを挙げている。

Burrows et al. (2008) も、GIS を利用して開放度を測定しているが、同時に半定量的方法で海岸生物相を多数地点で調べ、互いの対応を論じている。波力 (exposure) の推定式は、 $\Sigma p f v^2$ の形で、これと平均 fetch を用いている。fetch は有義波グラフに基づき、200km を飽和点として、それ以上は 200km とみなした。一方主成分分析によって 57 種の海岸生物を、185 地点での出現度によって類別し、exposure と fetch の寄与率を見たところ、exposure には風のデータが加わっているにもかかわらず、fetch のみの方が生物相に対する予測力が大きかった。fetch は PC1 軸方向分散の 50% 以上を説明し、ついで海岸幅の寄与が認められる。幅の広い海岸では、波が先端で砕けるので、波の影響が弱められ、そうした場所を好む種が増えることによると、著者らは考えている。なお、GIS による地形表現では、解像度 200m (200m メッシュ内の海岸を直線として扱う) の方が、最小解像度である 100m よりも fetch を計算したときに、生物データとの対応がよいという、一見奇妙な結果が得られた。これは調査範囲が延長 100m を越えているためらしく、生物調査の範囲を無視して地形情報の精度を上げて、あまり意味がないことを示している。

3. 実例による検討：紀州沿岸データ

以下では筆者が 2007-8 年にかけて行った、紀州沿岸の貝類調査のまとめにあたり、環境データの一つとして求めた開放度の計算過程を紹介する。この調査は、北は加太から日御崎、潮岬を経て東の新宮まで、和歌山県下 650km の海岸線に、平均 30km 間隔で 22 の調査点を設け、海岸貝類相を記録したものである (大垣未発表, 図 3)。場所はなるべく湾奥部を避けて開放性の岩礁を選んだが、周囲の地形から、開放度にはかなりのばらつきがあることが予想された。これらの地点における fetch および exposure 値の計測について、以下順を追って示す。

図 3. 和歌山沿岸貝類相調査点



① fetch の計測

fetch はクリアシート法 (Keddy 1982) で求めた。まず透明シート (OHP シートを利用) 上に、中心点から分度器で 11.25° 刻みに 32 本の線を引いたものを用意する。これを 5 万分の 1 地図 (遠距離になる場合は 20 万分の 1 地図) の上に、中心点が調査点になるように置き、対岸までの距離を物差しで測る。のちに縮尺を考慮して km に換算した。距離は Burrows et al. (2008) にならい、波高飽和の考え方から 200km までとし、これを越える場合は 200km として扱った。また、1 本の fetch について両側それぞれ $\pm 45^\circ$ まで、計 9 本の fetch をもとに、1 節に述べた方法で effective fetch を求めた。direct fetch と effective fetch は、合計すれば一致するはずだが、一応確認のために両方計算した。

図 4 に fetch の実測例を示す。この地点 (有田高田 St) からは、海面方向に 11.25° 間隔で 15 本の放射線が引けるが、うち 9 本は湾内で対岸に当り、6 本が湾外に出た (左図)。その 6 本のうち、4 本は紀伊水道内で対岸に当り、2 本は四国東南岸までの fetch となった (右図)。

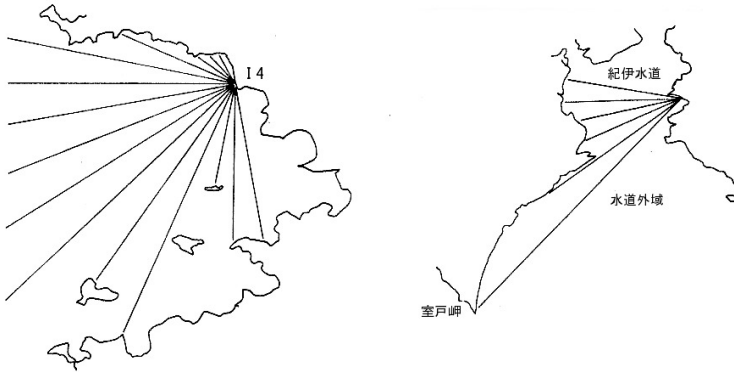


図 4. fetch 計測例

② 風データの組み込み

fetch だけでも大まかな開放度の指標を与えるが、風向風力データを加えた指数 (ここでは 'exposure' とする) も求めた。和歌山沿岸の風のデータは、気象庁が和歌山市、御坊 (または川辺)、白浜、潮岬、新宮の 5 ヶ所で測定しており、気象庁のインターネット HP で見ることができる。このうちどれかが調査地点から 15km 以内にあり、最も近い観測点のデータを使った。期間は 1985-2005 年の 21 年間。もとのデータでは時間単位までわかるが、今回は日最大風速の月平均値と、月最大風速の風向を用いた。従ってデータ数は、風向、風力とも 1 地点につき $12 \times 25 = 252$ となる。一般に紀州では、冬の北西風と夏の台風時の南風が卓越する。5 ヶ所の月平均最大風速と風向の頻度にもこの傾向は現れるが、地点ごとにかかなりの違いが認められる。たとえば南に海面が開けた和歌山市、潮岬、新宮では南寄りの、西岸の御坊、白浜では西寄りの強風が目立つ。このほかにも各地点に特有のパターンがあり、全体に一樣とか、西岸と東岸、北部と南部で共通するといった、単純なものではないようである。

ある地点、各方向について、fetch (f)、その方向からの月最大風速の風が吹いた頻度 (p) と平均最大風速 (v) を求め、 $p f v^2$ を計算する。 v を 2 乗するのは、1 節で述べたように、

波力のエネルギーとしての性格を持たせるためである。これを 16 方位について足し合わせた $\Sigma p f v^2$ が、今回の exposure の指数となる。なお、fetch は 11.25° 刻みで求めているが、風のデータが 22.5° 単位のため、fetch もこれに合わせて 1 本おきのものを使用した。また fetch は direct と effective 両方を使ってそれぞれに対応する exposure 値を算出した。

③ fetch と exposure の評価

図 5 に、和歌山沿岸 22 地点の direct fetch と exposure (direct fetch ベース、 $\Sigma p f v^2$) のパターンを示した。I は紀伊水道、O は水道外域、K は熊野灘のポイントで、北→南→東と並んでいる。I と O の境に日御埼、O と K の境に潮岬がある。

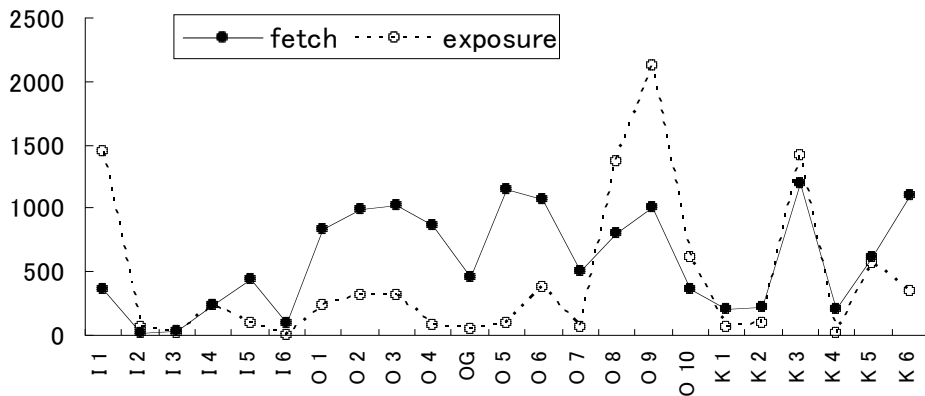


図 5. fetch と exposure の地点パターン

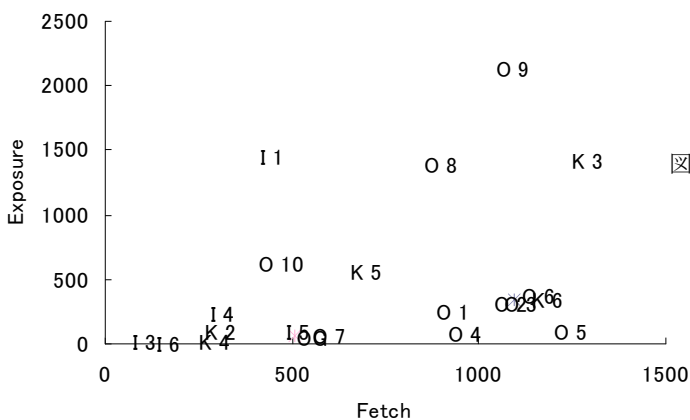


図 6. fetch と exposure の相関

fetch、exposure とともに effective fetch ベースでも計算したが、予想通り両者のグラフは全く重なり、両方示す意味がないので、direct の方だけ示してある。これを見ると、2 指数とも平均すると紀伊水道が最も低く、熊野灘がこれに次ぎ、水道外域は最も大きな値をとる。これは紀伊水道では西 40-50km に四国があり、fetch がそれ以上伸びないことが大きいと

思われる。水道外域と熊野灘の差については、前者、特に南部は海岸線が直線的で、fetch がストレートに外洋に伸びやすいのに対し、熊野灘では地形が複雑で、近隣の地形に遮られやすいことによるのだろう。このように、両者は大まかに一致するが、図に見られるように、細部まで並行的とは言えず、相関は有意にならない（図6； $r=0.394$, $P=0.063$ ）。特にO1~O6の水道外域北部で、fetch が大きい割に exposure が小さく、これが両者の相関の乱れの主要因になっている。これらのポイントは、日御埼とそれに続く半島地形の陰になり、北寄りの風が遮られる位置にある。そのため北西季節風の影響が少なく、他の地点に比べて exposure 値が小さめになったと考えられる。

指数どうしの関係は以上として、生物データとの対応はどうだろうか。こういう検討には、本来、波あたりとの関係が、経験的にもメカニズム的にもよくわかっている生物帯の幅（特に上限の位置）などを基準にすべきだが、今回はそういうデータは取っていない。そこで、生物相からさまざまな指標を抽出して相関を取ってみた（表1）。

	Fetch	Exposure		Fetch	Exposure
地理分布 %			体形・生活形 %		
北方性	—	+	巻貝形	+	+
南方性	+	+	笠形	+*	+*
食性 %			付・固着	-**	-*
藻食	+**	+**	種数	+	—
肉食	-*	—	密度	—	—
懸濁物食	-**	-*	多様度H'	+	—
			多様度Δ*	-**	-*

表1. 和歌山沿岸22地点の海岸貝類属性(密度%)、群集指標と開放度との相関(Spearman順位相関)。+は正相関、-は負相関。*, $P<0.05$. **, $P<0.01$. H', Shannon-Wienerの多様性指数。Δ*, 分類学的多様度指数。

これを見ると、fetch と exposure 指数の結果はほぼ同じで、有意な結果が出たケースでは、その方向性は一致している。たとえば開放度が大きくなると、藻食、笠形種が増える一方、懸濁物食、付固着性種が減り、分類学的多様度は減少する。意味づけについてはここでくわしく議論しないが、たとえば懸濁物食種が開放度の低い地点で多くなるのは、内湾的なところほどエサとなる懸濁物がたまりやすいということが考えられる。同様のパターンは、調査範囲内にある田辺湾で、もっと細かいスケールで示されている（Ohgaki 2007）。

4. 開放度計測の諸問題

fetch 計測：

有義波ベースの開放度推定では、fetch と風のデータが基礎となる。このうち fetch については direct と effective の2種があるが、全方位について合計すれば、理論的に両者が一

致することはすでに述べた。前節の実例検討でも、*fetch* とそれにもとづく *exposure* の計算で、どちらを使っても同じ値になることが確かめられている。*fetch* の求め方としては、クリアシートを使うのと、GIS によるのと 2 通りある。GIS 法はクリアシートより速いとも言われるが、クリアシートもそれほど煩雑ではなく、この点から GIS を採用する意味は薄い。むしろ GIS の利点は、*fetch* の引き方を、誰がやっても同じになるように客観化できることである。クリアシート法では、中心点からどの方位が開放されているかの判断が、個人内でも個人間でも微妙にずれる可能性がある。対岸ぎりぎりにかすめるようなケースでは、わずかなシートの置きかたの差で、*fetch* がそこで止まるか外洋まで伸びるかが左右される。これらの影響により、*sum fetch* にも無視できない差が出るかもしれない。一方 GIS にはコストの問題がある。地理情報そのものは NOAA のサイトから無料でダウンロードできるが、それを使うためには GIS 用のソフトが必要で、これがかなり高価である（数十万～百万円）。私は使ったことがないが、習熟に時間がかかるとも言われている。クリアシートか GIS かは、上述の客観性を得るのにそれだけの負担をするかどうかという、コストベネフィットの問題だろう。

風向風力データ：

有義波法による推定に必要な風のデータは、風速と、ある方向からの風がどれだけ長く吹いたか（連吹時間）である。時間単位のデータがあれば、連吹時間とその間の平均風速をかなり正確に把握できる。しかしこれは相当な手間を要するためか、最も理論に忠実に推定式を立てているケースですら、これを避けて各方位ごとの風向頻度で代用している。これは粗い近似であるが、Keddy (1982) は、連吹時間が長いほどその方向の風向頻度が高くなるので、代用可能と述べている。風についてもう一つ問題になるのは、地点近傍の観測点の値を使うことである。だいたい 10km 以内のデータなので、その地点付近はよいとしても、*fetch* は数百キロ先まで考慮される。紀州の実例では、数十キロ程度離れた観測所の風向風力パターンにすら、かなりの差が見られ、数百キロにわたる地域の風の吹き方が一定とは考えにくい。Westerbom & Jattu (2006) は、こうしたことがあるので、風利用の *exposure* 推定は狭い海域でのみ有効と述べている。

単位の問題：

fetch と風ベースの開放度測定では、波高ないし波力を想定しているから、求める値の単位は波高なら m、波力なら N（ニュートン）となる。実際 Lindegarth & Gamfeldt (2005) は、有義波高を m 単位で推定し、Ekebom et al. (2003) と Harborne et al. (2006) は、重力加速度や海水密度も組み込んで、波力を N 単位で求める推定式を提案している。しかし多くの著者は f 、 $f v$ 、 $f v^2$ などの形を使い、これらの単位は m、 m^2/s 、 m^3/s^2 であるから、N (=kg · m/s²) には一致しない。従ってこれらは波力に対する相対値である。しかし、各地点の開放度を順位に変換して生物相と対応させるといった分析では、単位を N に合わせる必要はなく、相対値で足りるだろう。

推定の不確定要素：

理論に忠実に推定式を精密化した例においても、波力推定にはなお多くの不確定要素がある (Ekebom et al. 2003)。一つはうねりである。これは風によって引き起こされた波が、風域の外に出てからもエネルギーを保って伝播される現象で、長周期の波が、極めて遠く

まで到達する。日本の場合は台風のうちねりの影響が大きい。うねりは現地の気象とは無関係だから、別途考慮しなければならない。ただし Thomas (1982) は、うねりも地形に左右され、これを考慮しないモデルでも生物分布との適合がよいので、修正は不要と述べている。紀州における筆者の経験でも、うねりの発生時、その高さは水道外域より紀伊水道で低く、西岸を列車で北上するにつれ弱まってゆく様子が見られた。しかし結果的に適合するとしても方法の精度内でできるだけ厳密化を図るべきであり、特にうねりの発生季節や波力が風波と全く異なる場合、計算に含めることが望ましいことは言うまでもない。ほかに波の回折や反射の影響がある。開放度推定の理論では、風波は fetch の方向から直進すると仮定しているが、岬のように突出した地形では、海底の等深線分布により、波が屈折して集中的に当たる。逆に入り江の地形では波は分散して弱くなる (磯崎 2006)。海岸近くの浅瀬や潮間帯の platform 地形が波を弱める効果も大きい。サンゴ礁では、リーフによって有義波高が 8 割以上減衰し (Lugo-Fernandez et al. 1994)、海岸の傾斜がゆるいと生物分布の上限が下がる (Thomas 1982)、潮間帯の面積が広いと遮蔽海岸の生物相が優占する (Burrows et al. 2008) などとも指摘されている。Thomas (1982) は海岸の傾斜を組み込んだ推定式を提案し、生物分布との適合性に改善を見ているが、多くの開放度推定例では、浅瀬の影響は考慮されていない。Helmuth & Denny (2003) は、海岸で機械的に測定した波高と波力を対照し、海岸の複雑な地形によって、両者は必ずしも相関関係にならないことを示した。地形法が前提とする、波高→波力の読み替えに疑問を呈する結果である。方法間の比較：

開放度推定のさまざまな指標については、相互に比較され、また生物データとの対応が調べられている。検討した例では大体どの方法間にもよい一致が見られ、Baardseth Index と fetch (Ruuskanen 1999)、Baardseth Index と風向+fetch (Westerbom & Jattu 2006)、fetch とニュートン (N) ベースの exposure (Ekeboom et al. 2003) などで高い相関が認められている。生物データとの対応では、Keddy (1982) と Thomas (1986) が垂直分布との対応を示し、Burrows et al. (2008) は、群集組成の説明率の点から、 $f v^2$ 型より fetch のみの方が予測性が高いと述べている。逆に筆者の実例検討では、fetch と $f v^2$ 型の exposure に有意な相関はないという結果だった。

方法間で有意な相関が出やすいのは、風を組み込んだ exposure 指数も、中に fetch が入っているのが当然であろう。また、生物データを基準に指数の有効性を評価するのも少々疑問である。ある指数が生物相の中に有意な傾向を見出しやすい、ないし説明率がよいということからその指数が正確であるとみなし、それによって生物相を説明すれば、循環論になるからである。帯状分布の上限というような、これまで波浪との関係が広範囲でよく確かめられ、メカニズム的にも立証されているような現象なら問題は少ないが、本来なら数ヶ所の海岸で波力を 1 年くらい機械的に実測し、それとさまざまな地形的指数を対照すべきだろう。

fetch と風に基づく開放度測定法は、単純なものから複雑なものまでいろいろあるが、情報を増やして推定式を複雑化すると、不確定要素もまた増幅し、一方的に精度が上がっているという感じがしない。Keddy (1982) の湖の研究で、生物に影響しないはずの、結氷

期の風データを加えることによって、かえって生物データとの適合がよくなったというナンセンスな結果は、現象の複雑さを示す典型例だろう。地形指標と実波高、実波力との対応も未検討であり、地形による開放度推定は、いわば発展途中の方法といえる。また海岸生態の分野では、古典的な有義波法をベースにした推定のみが行われているが、気象予報などでは、格段に複雑で大がかりなスペクトル法や数値計算が主流であり、そうした方法も今後取り入れられるようになるかもしれない。いずれにしろこのような現状では、あまり複雑で手間のかかる方法を使うより、中間的な指数をいくつか算出し、比較しながら用いるという、妥協的な方法をとるしかないように思われる。

引用文献

- Burrows MT, Harvey R, Robb L (2008) Wave exposure indices from digital coastlines and the prediction of rocky shore community structure. *Mar Ecol Prog Ser* 353, 1-12.
- Davies AJ, Johnson MP (2006) Coastline configuration disrupts the effects of large-scale climatic forcing, leading to divergent temporal trends in wave exposure. *Estuar Coast Shelf Sci* 69, 643-648.
- Ekebom J, Laihonon P, Suominen T (2003) A GIS-based step-wise procedure for assessing physical exposure in fragmented archipelagos. *Estuar Coast Shelf Sci* 57, 887-898.
- Fonseca MS, Bell SS (1998) Influence of physical setting on seagrass landscapes near Beaufort, North Carolina, USA. *Mar Ecol Prog Ser* 171, 109-121.
- Harborne AR, Mumby PJ, Zychaluk K, Hedley JD, Blackwell PG (2006) Modelling the beta diversity of coral reefs. *Ecology* 87, 2871-2881.
- Helmuth B, Denny MW (2003) Predicting wave exposure in the rocky intertidal zone: Do bigger waves always lead to larger forces? *Limn Oceanogr* 48, 1338-1345.
- 磯崎一郎 (2006) 波浪学のABC. 成山堂書店.
- 清田雅史 (2004) Exposure to wave action—海岸における生態学要因としての波浪の作用とその測定法について. *Argonauta* 10, 3-8.
- Keddy PA (1982) Quantifying within-lake gradients of wave energy: interrelationships of wave energy, substrate particle size and shoreline plants in Axe Lake, Ontario. *Aquatic Botany* 14, 41-58.
- Lindgarth M, Gamfeldt L (2005) Comparing categorical and continuous ecological analysis: effects of "wave exposure" on rocky shores. *Ecology* 86, 1346-1357.
- Lugo-Fernández A, Hernández-Ávila ML, Roberts HH (1994) Wave-energy distribution and hurricane effects on Margarita Reef, southwestern Puerto Rico. *Coral Reefs* 13, 21-32.
- 光易恒 (1995) 海洋波の物理. 岩波書店.

- Moore MB (1935) The biology of *Balanus balanoides*. IV. Relation to environmental factors. Jour Mar Biol Ass UK 20, 279-307.
- Murphy PL, Fonseca MS (1995) Role of high and low energy seagrass beds as nursery areas for *Penaeus duorarum* in North Carolina. Mar Ecol Prog Ser 121, 91-98.
- 永田豊 (1971) 波の発生と予報の理論. 海洋物理学Ⅲ. 東海大学出版会.
- 大垣俊一 (2004) 環境の内湾度と海岸生物. Argonauta 10, 19-41.
- Ohgaki S (2007) Molluscan assemblages along a bay coastline: gradients related to geographical distribution and feeding habits of species. Plank Benthos Res 2, 28-37.
- 大垣俊一 (2008) 指標生物の論理. 日本ベントス学会誌 63, 56-63.
- Raffaeri D, Hawkins SH (1999) Intertidal Ecology (2nd ed.). Kluwer Academic Publishers.
- Ruuskanen A, Bäck S, Reitalu T (1999) A comparison of two cartographic exposure methods using *Fucus vesiculosus* as and indicator. Mar Biol 134, 139-145.
- 関根義彦 (1996) 海洋物理学概論. 成山堂書店.
- Thomas MLH (1986) A physically derived exposure index for marine shorelines. Ophelia 25, 1-13.
- 宇野木早苗 (1993) 沿岸の海洋物理学. 東海大学出版会.
- Westerbom M, Jatu S (2006) Effects of wave exposure on the sublittoral distribution of blue mussels *Mytilus edulis* in a heterogeneous archipelago. Mar Ecol Prog Ser 306, 191-200.