

多様度指数を用いた波高・港湾構造形式別の付着生物群集の評価

小 笹 博 昭* ・ 村 上 和 男** ・ 浅 井 正***
中 瀬 浩 太**** ・ 綿 貫 啓***** ・ 山 本 秀 一*****

1. はじめに

港湾建設や埋め立てなど、沿岸部分で行われる開発行為には、環境保全および生物との共生が必須の条件となりつつある。このことは、運輸省港湾局が1994年3月にあらわした、新たな港湾環境政策—環境と共生する港湾「エコポート」をめざして—に代表されるように、行政面でもオーソライズされている。

生物と共生する港湾構造物等の設計や港湾内におけるゾーニングには、生物の生息条件の定量的表現や、生物の分布状況を客観的に表現することが必要である。しかしこれらに関して、実際の計画や設計に役立つ情報は非常に乏しいのが現状である。

小笹ら(1994)は、港湾における生物との共生の第一歩として、全国5港湾の既存環境調査結果より、生物の出現種類数と出現量を、年間最大有義波高に相当する波浪時の構造物前面波高および構造形式をパラメータとして表現することを試みた。その結果、生物群集の出現ピークは、海藻の場合波高2~3m、付着動物の場合は1~1.5mであること、および直立構造物には動物を主とする生物群集が、傾斜構造物には海藻を主とする生物群集が形成されることを示した。

しかしながら、上記の結果は検討対象とした港湾等の数が少なく、特に波高1m以下および3m付近のデータが乏しかった。そこで、本研究では調査対象港湾を追加するとともに、波高平面分布が明らかである御前崎港の現地調査を行って、これらのデータの補充を行った。なお、現地調査は小笹ら(1994)が指摘した生物分布の特性を、実海域において検証することも目的としている。

さらに、本研究においては、生物群集の質的評価を行うために優占種の把握や多様度指数によって表される出

現生物のバラエティ等を、波高と構造物形式をパラメータとして評価することを試みた。

2. 多様度指数

生物にとって質の高い環境とは、単に生息している生物の量が多いのみではなく、独占的に出現する種が存在せず、かつ多くの種類の生物が存在し、その結果全体として生物の出現量が多いことで表される。この状態を生物学的に「多様性が大きい」と表現する。この多様性の定量的尺度として表-1に示すような各種の多様度指数が提案されている(木元, 1976, 1989)。

これらの各種多様度指数について、計算の簡便さ、および表現方法等を検討した結果、本研究では種間遭遇確率による指数で、計算結果が0~1の範囲に表される、Simpsonの類似度指数 λ を用いることにした。

$$\lambda = \frac{\sum n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 n_i は i 番目の出現種の個体数、 N は総個体数である。

総種類数と総個体数のみ記載のサンプルの場合は、構造的規則性による多様度指数でサンプルサイズの影響が少ないFisherの対数級数則による α を用いた。 α は、

$$S = \alpha \log \left\{ 1 + \left(\frac{N}{\alpha} \right) \right\} \dots \dots \dots (2)$$

を繰り返し計算によって解くことで求められる。ここに、 S は総出現種類数である。なお、 α と λ の間には、

$$\lambda = \frac{1}{1 + \alpha} \dots \dots \dots (3)$$

の関係があり(木元, 1976)これより α を λ に換算した。なお、 λ は多様度が大きいほど0に近い値になるので、多様度が大きいほどその値が大きくなるように、

$$\lambda' = 1 - \lambda \dots \dots \dots (4)$$

を計算し λ' を多様度指数として検討に用いた。

なお、多様度指数は出現種類別個体数あるいは総個体数と総種類数を用いて算出するため、検討対象はこれらが明記されているサンプルに限定した。

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 海洋環境部長
** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 海洋環境部 環境評価研究室長
*** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 海洋環境部 環境評価研究室
**** 正会員 五洋建設(株) 第一技術部
***** 正会員 工修 日本テトラポッド(株) 応用水理研究所 第四研究室
***** 学修 (株)エコー 第二技術部 環境計画課

表一 各種の多様性指数 (木元 (1986), 木元・武田 (1989) より作成)

方法	考え方の根拠	評価項目	主な多様性指数	備考
生物出現の構造的規則性によるもの	出現順位と個体数間に成立する関数関係	関数の勾配など	等比級数則 (元村: a) 調和級数則 (Corbet: c) 対数級数則 (Fisher: a)	種間遭遇と換算可能
	考え方は上記に同じ計算を簡略化	総個体数と総湿重量より計算される係数	Gleason (d) Wilmin (d) Malgalef (d)	サンプルサイズの影響を受ける
確率的なもの	種間遭遇確率	サンプルのくり返し抽出で、同一種を得る確率	Simpson (λ), 森下 (β) Hurbert (D_1) McIntosh (D_1)	分布形に関数関係を当てはめる必要がない
	情報量(エントロピー)	無作為抽出時の種・個体数の順列組み合わせ総数	Brillouin (i) Murgalef (D_1 等) Shanon-Wiever (H')	

3. 調査方法

全国の港湾等における付着生物調査結果を用いて、統一表記方法で集計し、多様性指数を計算した。これらの結果とその場所の波高や構造形式を比較検討することにより、生物の出現に関して、港湾の計画や設計に用いることのできるデータを抽出することを試みた。

(1) 調査対象地点

本研究では、港湾内のサンプリング地点が明記されており、かつサンプリング地点別に生物調査結果が記載されている全国9港湾等を検討対象とした。これらの波浪条件、構造形式および、データの特性等を表-2に示す。

海藻や付着動物の存在を規定するものに、構造物の形式、その場所の波高、水質、地理的分布、種類間の場所をめぐる競争等があげられるが、本研究ではこれらの中から構造物の設計やゾーニングに用いることのできるパラメータとして、構造物堤前波高と構造物の形式(直立・傾斜)を選定した。

検討に用いた沖波波高は、原則として実測値より求めた1年確率の有義波高とした。これは、付着生物は多くの場合1年を単位としたライフサイクルを持っているため、1年に1度程度生じる波浪にも耐えうると考えたことによる。また、各調査地点ごとにこの波を用い、浅水

変形等を考慮してサンプリング地点の構造物堤前波高を算出した。

構造物形式は傾斜(消波ブロックを含む)構造物と直立構造物(矢板、ケーソン等)の2通りに分類した。

(2) 生物出現状況の検証およびデータ補充

小笹ら(1994)が指摘した港湾構造物形式、堤前波高と生物出現状況の関係を検証すること、およびデータが不足している波高1m付近と3m付近のデータ補充を目的として、港内外の波浪条件と構造物形式が明らかで、かつ付着生物の多い港湾である静岡県御前崎港を調査対象に選び、生物出現状況の観察および生物の採集を行った。

当該港湾の現地波浪(1年確率波)を用いて静穏度解析を行い、港内外の波高分布を求め、さらに構造物の形式、対面方位を参考にしてサンプリング地点を選定した。

平成7年2月14, 15日に各サンプリング地点の朔望平均干潮位直下、マウンド直上堤体部分、およびその中間の3水深において、50×50cm枠内の付着生物を採取し、動物と植物別に種類ごとの個体数、湿重量を測定した。

(3) 生物データの整理

現地調査を含む各調査対象港湾等のそれぞれのサンプリング地点の生物データは、以下の手順で整理を行った。

a) 出現する生物を、動物と植物(海藻)に分類した。

表-2 調査対象港湾等の波浪条件

No.	都府県	港名	1年確率 $H_{1/3}$ (m)	周期 (sec)	堤前波高範囲 (m)	港湾構造物の形式	生物データの特性	備考
1 ^{a)}	北海道	瀬棚港	5.6	10.0	0.4~5.3	直立ケーソン防波堤 消波ブロック被覆混成堤	有用生物・上位出現種のみ	
2 ^{a)}	新潟	新潟西海岸	5.0	10.1	1.4~4.7	離岸堤、突堤、潜堤 (消波ブロック)		
3	新潟	柏崎港	6.3	11.2	1.4~3.4	直立ケーソン防波堤	湿重量の記載なし	
4	石川	七尾港	3.2	8.6	0.3~0.8	透過壁ブロック堤	多毛類は分類せず	
5 ^{a)}	静岡	御前崎港	3.7	13.9	0.8~4.0	直立ケーソン防波堤 消波ブロック被覆混成堤		港内波高分布計算、生物現地調査実施
6	愛知	三河港	5.4	10.8	0.4~0.8	直立ケーソン防波堤		
7 ^{a)}	大阪	関西国際空港	2.5	11.4	0.3~2.4	緩傾斜護岸、直立消波堤 鋼製セル護岸	種類別出現量の記載無し	波高は2年間の実測値、生物データは森ら(1991)によった
8	山口	安下庄港	0.6	2.8	0.3~0.6	消波ブロック離岸堤		使用波浪は、近傍の人工海浜の設計波(1年確率波)を利用
9	山口	日良居港	0.2	2.0	0.1~0.2	消波ブロック離岸堤		

*: 小笹ら(1994)で使用したデータ

- b) 各サンプルの優占種を以下の方法で決定した。
 - ア) 重量比較により動物群集か海藻群集かを判断
 - イ) 最も多く出現する種類より優占種グループを判断
- c) 付着動物のデータより多様度指数を算出した。
- d) 生物の出現量（個体数および湿重量）はすべて1 m²あたりに換算した。
- e) 水深別, 季節別に調査結果がある場合には, これらのデータと算出した多様度指数を全て単純平均した。

4. 調査結果

(1) 波高と出現量との関係

各サンプリングポイントの堤前波高と付着動物, 海藻の種類数と出現量（湿重量）との関係を図-1に示す。

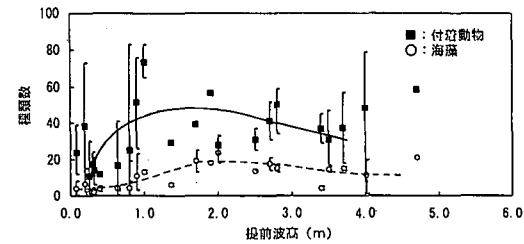
付着動物の出現は種類数は1.0~3.0 m, 出現量では0.5~1.0 mの波高の範囲がピークであり, 堤前波高の増大とともに漸減傾向を示した。また, この範囲より堤前波高の小さい部分では付着動物の出現種類数, 出現量とも急減していることが明らかになった。

海藻類の種類数および出現量のピークは, どちらも堤前波高2.0~3.0 mの範囲であった。

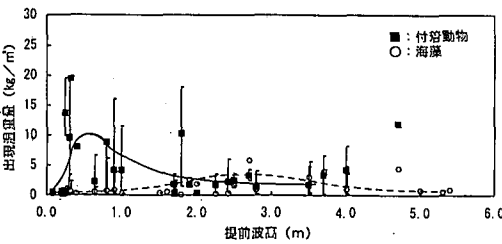
(2) 波高と付着動物の多様度指数との関係

各サンプリングポイントの堤前波高と多様度指数との関係を図-2に示す。

多様度指数は堤前波高1.5~2.0 mの範囲をピークとしている傾向が見られた。この堤前波高の範囲は付着動物の出現量のピークである0.5~1.0 mより大きく, 種



① 波高別出現種類数



② 波高別出現湿重量

図-1 堤前波高別生物出現状況

類数の出現のピークである1.0~3.0 mよりもやや小さい部分である。

(3) 構造形式と付着動物の多様度指数との関係

港湾構造物の形式（傾斜および直立構造）と対面方向別の付着動物群集の多様度指数分布状況を図-3に示す。

構造形式の相違, および対面方向によって, 多様度指数の平均値が変化することは認められなかった。

(4) 生物出現量・優占生物と多様性の関係

各サンプルの優占種をパラメタとした, 全付着生物出現量（動物+海藻の湿重量）と付着動物の多様度指数との関係を図-4に示す。

全付着生物の出現量の増大にともない多様度指数は増加傾向を示している。しかし, 全付着生物が5 kg/m²以上出現すると, 多様度指数は0.9前後で横這いとなっている場合が多い。

また, カンザシゴカイ類, イガイ類, 紅藻類が優占種となっている場合には, 出現量に比して多様度指数が小

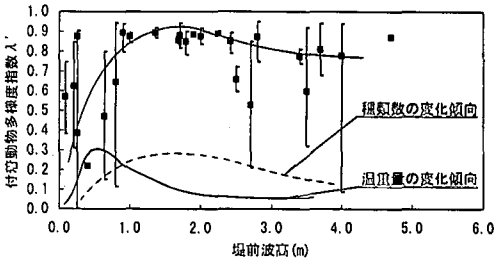


図-2 堤前波高別多様度指数分布

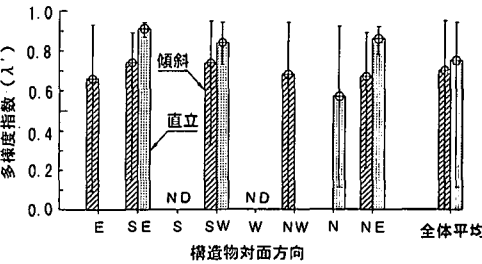


図-3 構造物形式・対面方向別付着動物の多様度指数

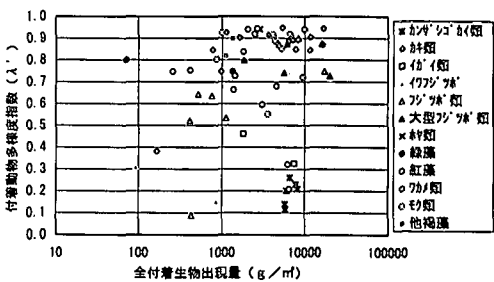


図-4 全付着生物と優占生物別多様度指数

さく現れる傾向が見られた。

(5) 生物出現傾向の現地調査による検証

御前崎港における1年確率波を用いた港内外の波高分布および波高1m付近および3m付近の生物分布状況を図-5に、また各地点の生物出現内容を表-3に示す。

堤前波高1m未満の直立護岸 St. A ではカキやフジツボ類の付着動物が優占し、海藻は少数のワカメ類が見られるだけであった。同じ波高の消波ブロックによる傾斜構造物の St. C, D ではホンダワラ類を主とする海藻が優占していた。なお、St. C は SW 方向、St. D は NE 方向に対面しているが、両者の海藻出現量はほぼ同一で、傾斜構造物では対面方向に関わりなく海藻が付着することが確認された。

5. 考 察

(1) 波高別生物出現状況

付着動物の堤前波高による分布において、小笹ら(1994)では堤前波高1.0m以下の静穏な範囲で付着動物の種類数、出現量が最も多くなると推定したが、本研

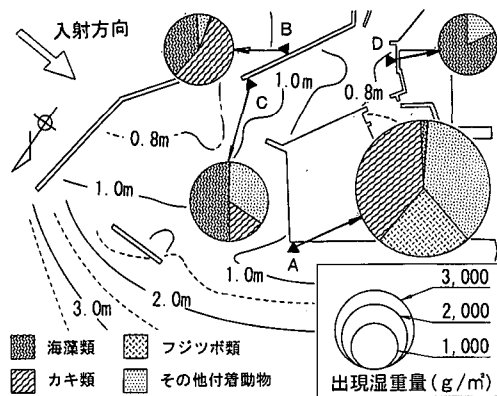


図-5 御前崎港の波高分布と生物出現状況

表-3 御前崎港の波高1mおよび3m付近の生物出現状況

調査地点	A	B	C	D
構造形式	直立	傾斜	傾斜	傾斜
堤前波高 (m)	1.0	2.8	0.9	0.8
対面方位	NW	ESE	SW	NE
生物出現量 (g/m ²)				
海藻	フクロノリ	42.4	317.2	265.6
	ワカメ	16.8	1.2	80.0
	ホンダワラ類	383.6	995.2	903.6
	その他	137.6	63.6	204.0
	合 計	154.4	1377.2	1453.2
付着動物	カキ類	3258.8	421.6	
	フジツボ類	1948.8	1.6	
	その他	3203.2	923.6	328.4
	合 計	8410.8	1346.8	328.4
付着生物総計		8565.2	2724.0	1781.6
多様性指数 (λ')		0.88	0.93	0.73

(注：生物データは上・中・下層の平均値を示す)

究では、この範囲のデータを追加したことにより、波高約0.5m以下の静穏な範囲で付着動物の出現種類数と出現量が、波高の減少とともに急減していることが明らかになった。なお、海藻類については、種類数、湿重量のピークは動物の場合より堤前波高の大きい部分(2.0~3.0m)であり、小笹ら(1994)の推定と相違はなかった。

付着動物のうち、生物群集構造の骨格を形成する固着動物は、海中の懸濁物を吸い込み、餌とする生物である。波浪等による海水流動が適度にある場合には、餌を含んだ海水が常に供給されるが、静穏状態では海水の流動が少ないために餌を得るには不利であり、かつ排泄物等の波浪による除去も起こりにくいため、生物の生息環境が悪化することが考えられる。

よって、付着動物主体の群集が形成される直立護岸でも、約0.5m以上の堤前波高が必要である。

(2) 波高別多様性指数

波高と多様性指数および出現種類数、出現量の関係について、それぞれのピークにずれがあることが明らかとなった。多様性指数のピークである堤前波高1.5~2.0mの範囲は、出現量のピークより大きく、種類数の出現のピークよりやや小さい部分である。

堤前波高0.5m付近以下の場所では環境悪化に耐性の大きい一部の付着動物のみ卓越することが考えられ、この結果群集の多様性は低下する。一方、波高の大きい場所では、出現種は波に耐え得る動物に限定され、このために多様性が低下すると推察される。

多様性指数が高い場所が良好な生息環境を反映していると考えられるので、付着動物の生息にとって良好な部分は、前波高1.5m~2.0m程度までの範囲であると言える。

(3) 構造形式別多様性指数

付着動物は日照との関係が少ないので、構造物対面方位による多様性の変化は見られなかった。また、小笹ら(1994)の結果では、直立構造物では傾斜構造物の5~10倍の付着生物出現量が見られるとしているものの、今回の調査では多様性指数については、両者に相違は見られなかった。

直立構造物の付着動物群集は、このように生物出現量が多いにもかかわらず、付着量に比して多様性がそれほど増大しない群集が多いと言える。したがって、より少ない出現量で同程度の多様性を示す傾斜構造物の方が、生態系のバリエーション形成に有利なことがうかがえる。

(4) 総出現量、優占種と多様性指数

港湾構造物の総出現量と多様性指数との関係において、優占種がホンダワラ類、ワカメ類、大型フジツボ類

表-4 主な優占種の形態、機能および出現波高

有占種名	形態	分布 波高*	機能その他
多 様 性 が 高 い	ホンダワ ラ類	丈が高く形状複 雑	1~3m 群落内の環境安定 (Komatu ら, 1982) 葉上に移動動物が多い (布施, 1962)
	ワカメ類	根部の形状複雑	3m 付近 仮根部に多くの生物が生息する
	大型フジ ツボ	大型で複雑な石 灰質の殻を持つ	全範囲 群落の立体構造の中核をなし、他の生物の付着 基質となる (山本, 1975)
	カキ類		2~4m 殻の隙間に移動動物が生息する
多 様 性 が 低 い	ムラサキ イガイ	繊維状器官で基 質上に厚く密生 付着する	全範囲 基質付近が嫌気化する、定期的に群落が脱落す る (細見, 1988) 大量脱落により環境悪化 (矢持ら, 1995)
	カンザシ ゴカイ類	小型管状の殻が 密生する	被覆により他の生物を圧迫 (沖山・鈴木, 1995) 大型海藻の付着阻害 (寺脇, 1995)
	紅藻類	一般に小型	光の不足する場所も分布 (横濱, 1985)

* : 小笹ら (1994) による出現頻度の高い堤前波高範囲

(アカフジツボ等)、カキ類の場合には総出現量と多様性の両者がともに大きい場合が多い。これらの生物は、個体の大きさが大きく、複雑な形状を持ち、生物自体が多種の生息基盤を形成することが多い。

これに対して、カンザシゴカイ類、イガイ類、紅藻類が優占種となっている場合には、出現量に比して多様度指数が小さい。これらの生物は、一般に内湾性の強い生物、すなわち海水汚濁に対する耐性の強い生物であるとされている (山本, 1975)。

これらの代表的優占種の、生物としての特性を表-4に示す。

(5) 実際の港湾における適用

御前崎港の現地調査の結果より、小笹ら (1994) が文献調査結果より示した、直立構造物には動物が、傾斜構造物には海藻が卓越すること、ホンダワラ類は波高 1 m 付近の静穏な場所に分布すること、および傾斜構造物では北向き方向側においても海藻類が減少しないことが、実海域における観察とサンプリングより検証された。

このことより、1 年確率波を用いた港湾内外の堤前波高計算結果より、これまでに得られた波高、構造と生物分布に関するデータを比較検討することによって、そこに分布する付着生物の量や質をある程度予測可能であることが明らかとなった。

6. おわりに

港湾の波浪分布を数値計算等により把握することで、港湾内の付着動物および海藻の概略的分布が把握可能となることが、既存の調査結果の解析および現地調査より明らかになった。また、動物群集の質は、多様度指数を用いて評価することが可能なことを示した。

今後、港湾内で生物共生を考える場合に本研究より明

らかになった、以下の項目が参考になると考えられる。

- 1) 多様性の高い生物群集は大型褐藻類 (ホンダワラ類、ワカメ類) およびカキ類、大型フジツボ類を優占種とするグループである。また、多様性を確保するためには、傾斜構造物が有利である。
 - 2) 付着動物を主とする群集は、直立護岸に多く見られるが、多様性の高い付着動物群集を維持するためには 1 年確率波において堤前波高 1.5 m~2.0 m 程度が必要である。
- しかしながら、多様度指数は現在のところ個体数の明らかな動物群集に対

してしか検討を行っていない。生物群集の多様性をさらに検討するためには、海藻群落の多様性も検討する必要がある、このことが今後の課題である。

最後に本研究を進めるにあたり、運輸省各港湾建設局、北海道開発局の関係者の皆様より貴重な現地調査記録をご提供頂いた。また、現地調査に当たって第五港湾建設局清水港工事事務所御前崎工場の皆様に多大なるご協力を賜った。また、データのとりまとめにあたっては、五洋建設(株)岩本裕之氏の協力を得た。これらの方々に、ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 沖山宋雄・鈴木克美編 (1985): 日本の海洋生物, 東海大学出版会, pp. 69-78.
- 小笹博昭・室 善一朗・中瀬浩太・綿貫 啓・山本秀一 (1994): 生物にやさしい港湾構造物の研究, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 1006-1020.
- 木元新作 (1976): 動物群集研究法 I, 共立出版, 192 p.
- 木元新作・武田博澄 (1989): 群集生態学入門, 共立出版, 198 p.
- 寺脇利信 (1995): 藻場の分布の制限要因を考慮した造成方法, 平成 7 年度日本水産工学会, 春季シンポジウム講演要旨集, pp. 160-161.
- 日本生態学会環境問題専門委員会編 (1975): 環境と指標生物 2, 共立出版, pp. 274-283.
- 布施慎一郎 (1962): ガラモ場における動物群集, 生理生態, Vol. 11, pp. 23-45.
- 細見彬文 (1988): ムラサキイガイの生態学, 山海堂, 137 p.
- 矢持 進・有山啓之・日下部敬之・佐野雅基・鍋島昭信・睦谷一馬・唐沢恒夫 (1995): 海の研究, Vol. 4. No. 1, pp. 9-18.
- 山本諒太郎編 (1975): 海洋生態学, 東京大学出版会, pp. 185-203.
- 横濱康継 (1985): 海の中の森の生態, 講談社, 247 p.
- Komatu, T., H. Ariyama and W. Sakamoto (1982): Spatial and Temporal Distributions of Water Temperature in Sargassum Forest, Journal of the Oceanographical Society of Japan, Vol. 38, pp. 63-72.