

(3) 人工リーフ周辺の流れと生息する海藻との関係

Relation between Wave-Induced Current and Algae on Artificial Reefs

井上 公人*, 田中 仁**, 西村 修**, 馬場 聡***
Kimihito INOUE*, Hitoshi TANAKA**, Osamu NISHIMURA**, Satoshi BABA***

ABSTRACT ; In recent years, a social demand toward an ecological aspect of a coastal area is increasing. However, very little things have been known about the relationship between an ecosystem and a coastal environment. The objective of the present study is to investigate the transition of algae community on artificial reefs after construction, and the relationship between the development of algae on artificial reefs and the intensity of wave-induced current around artificial reefs will be discussed.

KEYWORDS ; artificial reef, wave-induced current, ecosystem, algae

1. はじめに

従来、我が国における海岸保全施設の建設に際し、防災を主な目的として事業等が進められてきた。

しかし、近年の内湾や沿岸域を取り巻く社会的状況の変化は大きく、良好な海岸環境および生態系の保全に対する要望が増大しており、波浪の低減などの防災機能や海岸等への良好なアクセスなどの親水機能に加え、生態系と共生できる自然共生型の施設整備が望まれており、今後海岸等で設置する施設については、施設の設置が生物環境にどの程度影響するのか、正確な予測が望まれている。

筆者ら¹⁾は先の研究において生態系の基礎を支えている海藻に着目し、人工リーフと海藻の出現、遷移及び定着について検討を行った結果、人工リーフが海藻の生息の場として有効であることが確認された。また、海藻の分布が人工リーフ及びその周辺における流れなどの物理環境に影響されている可能性について提言を行った。

そこで、本研究では人工リーフに生息する海藻に着目し、現地調査を実施するとともに、人工リーフ設置に伴う海藻の出現、定着について整理した。また、人工リーフ周辺の流れについて数値モデルを用いた計算を実施し、流れと海藻の出現状況との関係について検討を行った。

*東北大学大学院工学研究科土木工学専攻(Graduate School of Engineering, Tohoku University)

国際航業株式会社(Kokusaikougyou Co., Ltd.)

**東北大学大学院工学研究科土木工学専攻(Graduate School of Engineering, Tohoku University)

***岩手県 (Iwate Prefectural Government)

3. 調査方法

調査は1号リーフ、2号リーフを対象に実施し、調査地点は人工リーフ上における海藻の分布状況について検討するために、人工リーフの縦断方向に4測線設定し、測線毎に横断方向に7測点配置した。
調査方法は全28測点（○印）での潜水観察を行った。

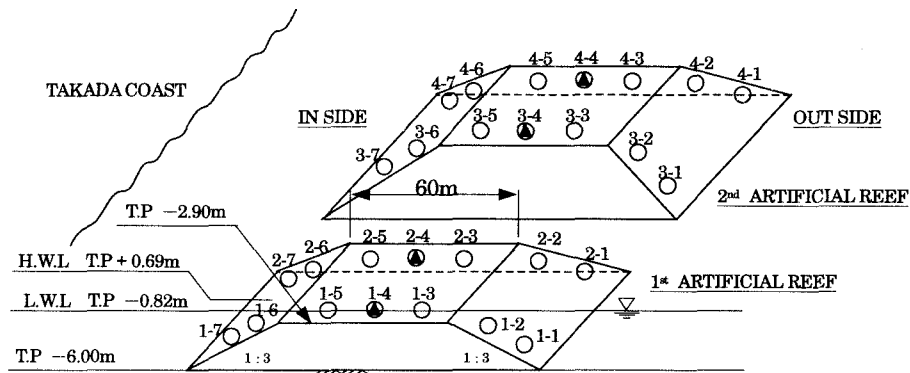


Fig. 4 調査測点位置図 unit : m

調査は1995年1月より2001年の2月までの6年間に1998年、2000年を除く年1回の調査を実施し、全体で計5回の調査を実施した。また、調査時期は海藻の多くが冬季に著しく成長することから、1～2月の間に調査を実施した。

調査した各測点の基質（自然石）は人工リーフの施工の関係から、水中での放置期間が異なるため、各調査測点と基質の施工年月日（放置期間）との関係についてTable 1に整理した。

潜水観察は塩化ビニールパイプで作成した正方形1m×1mのコドラートをを用いて行い、枠内に確認された各種ごとに1m²あたりの平均被度（%）を観察した^{2) 3) 4)}。また、被度の観察は海藻が重なって分布している箇所については、それぞれの海藻に重複部分も被度として考慮に入れた。

Table 1 各調査測点と施工年月日との関係

測線番号 /測点	1 1-1～1-7	2 2-1～2-7	3 3-1～3-7	4 4-1～4-7
施工完了年	1995	1993	1993	1991
投入期間				
第1回調査 (1995. 1. 18)	施工直後	2年	2年	4年
第2回調査 (1996. 1. 19)	1年	3年	3年	5年
第3回調査 (1997. 1. 21)	2年	4年	4年	6年
第4回調査 (1999. 1. 22)	4年	6年	6年	8年
第5回調査 (2001. 2. 1)	6年	8年	8年	10年

4. 調査結果および考察

4. 1 海藻の出現状況

本調査の中で出現した海藻は全体で63種であり、うち緑藻が7種、褐藻が16種、紅藻が40種となっていた。Fig. 5に各調査時における出現種類数の変化を示したが、30～40種程度の種類数で推移しており、大きな変化は見られなかった。また、出現海藻の特徴については、アラメなどの温海性種、昆布類等の亜寒性種などが混在し、当該地区が親潮や黒潮などの影響を受けていることが伺えた。

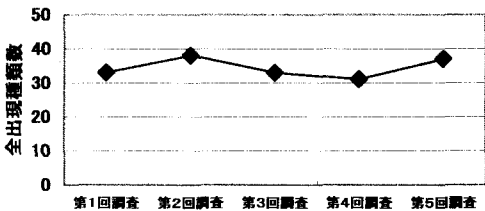


Fig. 5 各調査時の全出現種類数変化

また、各調査時における各測線の種類数変化について Fig. 6 に示したが、第1回調査から第3回調査までは各測線間に出現種類数に変化が見られた。しかし、第4回調査、第5回調査では第5回調査の測線2を除いてほぼ同程度の値を示しており、人工リーフ上に出現する海藻が安定してきていることが伺えた。これは、先の研究報告¹⁾にもあるとおり、人工リーフの工事の進捗に伴う被覆石の水中設置期間が異なることによるものと考えられ、基質（被覆石）の水中における設置期間が4年程度経過すると、海藻の変化が安定することによるものと判断された。

さらに、Fig. 7 に各測線における出現被度の变化を示したが、出現被度についても種類数と同様の傾向を示しており、第1回～第3回調査では測線間に変化が見られるものの、第4回調査以降ではほぼ同程度の値を示しており、被度のについても種類数と同様に第4回調査以降において人工リーフに生息する海藻の変化が安定してきているものと考えられた。

以上より、第5回調査においても海藻の出現種類数、被度等の測線間における変化は小さく、人工リーフ上に生息する海藻は4年を目処に安定することが確認された。

4. 2 人工リーフ周辺の流れと海藻との関係

(1) 人工リーフ周辺における海浜流の計算

次に、人工リーフに生息する海藻と大きく関係していると考えられる流れについて検討をする為、数値モデルを用いて人工リーフ及びその周辺区域における平均流速の再現計算を実施した。まず、当該地区の物理環境を検討するため、下式に示すエネルギー平衡方程式を基礎式とした波浪場の計算を実施した。

$$\frac{\partial}{\partial x}(SV_x) + \frac{\partial}{\partial y}(SV_y) + \frac{\partial}{\partial \theta}(SV_\theta) = 0 \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} V_x &= C_r \cos \theta \\ V_y &= C_r \sin \theta \\ V_\theta &= \frac{C_r}{C} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial C}{\partial y} \cos \theta \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 S ：方向スペクトル、 C ：波速、 C_g ：波の群速度、 x ：岸沖方向の座標、 y ：沿岸方向の座標、 θ ： x 軸となす波向角を示す。

なお、上式で計算される波高には碎波の影響を考慮していないため、合田の碎波指標⁵⁾を用いて水深に対

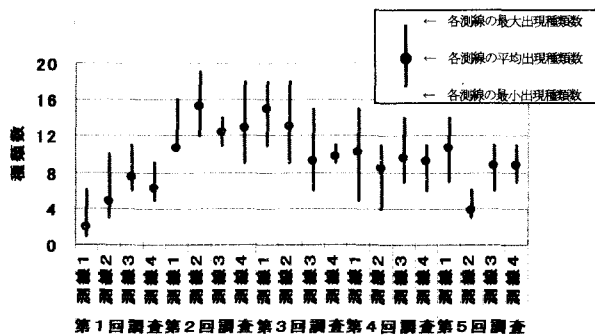


Fig. 6 各測線の種類数変化

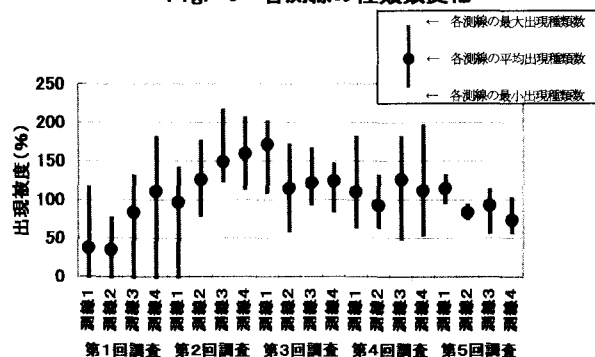


Fig. 7 各測線の被度の変化

応した碎波限界波高を求め、その位置での波高が碎波限界波高より大きくならないようにして碎波を考慮した。

次に、海浜流の計算を実施した。基礎式は平均流に関する連続式と外力としてラディエーションストレス項を加えた運動量の保存式からなっている。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial[(h+\eta)u]}{\partial x} + \frac{\partial[(h+\eta)v]}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + F_x - M_x + R_x + g \frac{\partial \eta}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + F_y - M_y + R_y + g \frac{\partial \eta}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 η : 静水面からの平均水位の高さ、 h : 静水時の水深、 u, v : 流れの x, y 成分、 F_x, F_y : 底面摩擦項、 M_x, M_y : 水平拡散項、 R_x, R_y : ラディエーションストレス項、 g : 重力加速度 であり、なお、底面摩擦項については、西村⁶⁾にならい波による水粒子の軌道運動に伴う底面の摩擦を次のように与えている。

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \frac{C_f}{h+\eta} \left\{ \left(W + \frac{w_b^2}{W} \cos^2 \theta \right) u + \frac{w_b^2}{W} (\sin \theta \cos \theta) v \right\} \\ F_y &= \frac{C_f}{h+\eta} \left\{ \frac{w_b^2}{W} (\sin \theta \cos \theta) u + \left(W + \frac{w_b^2}{W} \sin^2 \theta \right) v \right\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} W &= \{u^2 + v^2 + w_b^2 + 2(u \cos \theta + v \sin \theta) w_b\}^{1/2} \\ &= \{u^2 + v^2 + w_b^2 - 2(u \cos \theta + v \sin \theta) w_b\}^{1/2} / 2 \end{aligned}$$

ここで式 (4) の中で、 C_f : 底面の摩擦係数、 w_b : 底面における波の軌道流速の最大値を示している。また、式 (3) の M_x, M_y は式 (5) のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} M_x &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ M_y &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

さらに、式 (5) の ε は渦拡散係数であり、Longuet-Higgins⁷⁾ による次式を用いた。

$$\varepsilon = Nl \sqrt{g(h+\eta)} \quad (6)$$

ここに、 N : 無次元パラメータ (= 0.01)、 l : 離岸距離を示す。

式 (3) に示すラディエーションストレス項は、以下の示すとおりである。

$$\left. \begin{aligned} R_x &= \frac{1}{\rho(h+\eta)} \left(\frac{\partial \mathcal{S}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{S}_{xy}}{\partial y} \right) \\ R_y &= \frac{1}{\rho(h+\eta)} \left(\frac{\partial \mathcal{S}_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{S}_{yy}}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここで、 S_{xx} , S_{xy} , S_{yx} , S_{yy} はラディエーションストレス、 ρ は海水の密度であり、上記の計算結果より、当該地区の平均流速を算出した。平均流速 $\bar{U}$ は海浜流の u, v 成分から次式で求めた。

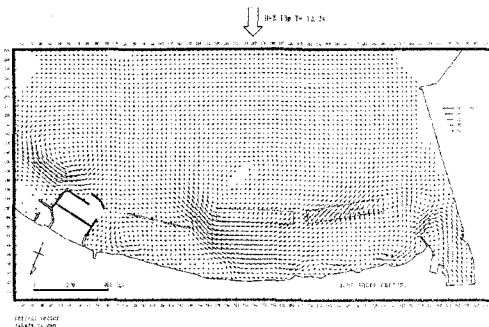
$$\bar{U} = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (8)$$

(2) 計算条件

計算条件としては計算範囲を 2,580m×1,350m とし、計算点間隔を 5.0m とした。また、計算に用いた波浪は当該地区近傍の江ノ島波浪観測所のデータをもとに、当該地区に年数回程度発生する可能性がある有義波浪 $H_0' = 2.13\text{m}$ 、 $T = 10.3\text{s}$ を算出しシミュレーション計算に用いた。

(3) 当該地区の波浪分布

計算結果を Fig. 8 に示す。この結果より、人工リーフ上において速い流速がみられ、特に、1号リーフ上で 20cm/s 程度の流速が分布していた。また、1号リーフ背後において河口部方向からの流入がみられ、逆に、2号リーフ堤内側から堤外側に向けて流出がみられた。



(4) 平均流速と海藻の諸量の関係

上記計算結果より算出された平均流速と海藻の種類数、被度等の調査結果を用いて、海藻と流れの関係について検討を行った。なお、人工リーフ上に生息する海藻の変化が4年程度で安定することが先の研究¹⁾で示されていることから、全調査データのうち基質(被覆石)の設置が4年以上経過した箇所のデータを用いて検討した。

また、観察された海藻の被度について、1年生小型海藻、殻状海藻、多年生大型海藻の3つに分類し、その分布状況についても検討を行った。

① 平均流速と海藻の諸量の平面分布

Fig. 9 に第5回調査時における測線3の平均流速と種類数、被度等の変化について示す。

この結果、平均流速については、沖側の測点 3-1～3-3 で高い傾向にあり、岸側に向かうに従って平均流速が減少する結果となった。これに対し、種類数については 3-2 の測点で、被度については測点 3-5 で高い傾向がみられた。また、各分類海藻については、1年生大型海藻、殻状海藻については測点 3-6 で、多年生大型海藻では測点 3-4 で高い傾向にあった。

以上のとおり、平均流速と海藻の諸量の平面分布をみると、種類数、被度等で流速に対し異なる変化傾向がみられ、以下に平均流速と海藻の諸量の関係について検討を行った。

Fig. 8 当該地区の平均流速の流況分布

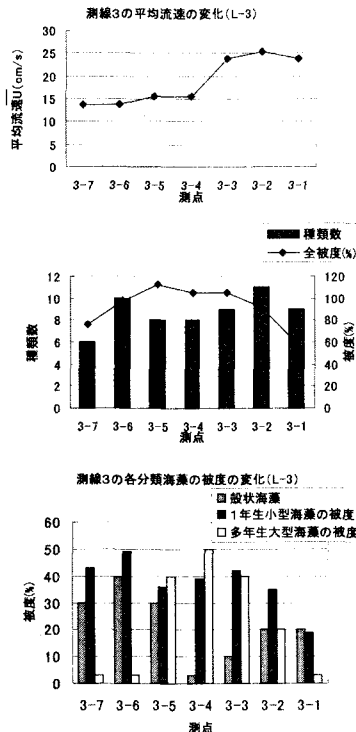


Fig. 9 平均流速と海藻の諸量の分布

②平均流速と種類数、被度との関係

Fig. 10 に平均流速と種類数の関係について示したが、平均流速で約 13cm/s まで種類数の増加が見られ、流速の増加に伴って、人工リーフ上に生息する海藻の種類が増加する傾向が見られた。しかし、13cm/s 以降の速い流速では種類数の増加はほとんど見られなかった。これは、主に人工リーフ上の沖側で流速が速い傾向にあり、沖側では周囲から到達した海藻の遊走子などとの接触確率が高いことや、流速が速い方が遊走子等を含む海水と基質（被覆石）との接触確率が高いことなどが考えられた。しかし、約 13cm/s を境に、生息可能な海藻の種類が限られてきているのではないかと推察された。

次に、平均流速と海藻の被度の関係について Fig. 11 に示した。この結果、被度については平均流速 20cm/s 程度で最も多い被度を示し、その後流速の増大に伴って減少する傾向が見られた。これは特に流速の速い区域で多年生大型海藻のアラメが多く繁茂しており、これにより被度が大きく増加したものと考えられるが、その後、流速の増加とともに海藻への影響が大きくなり、海藻の生息が難しくなったことにより被度が減少したものと考えられた。

③平均流速と種多様度指数との関係

人工リーフ上に生息する海藻について、海藻の出現状況を定量的に把握するために、出現種と被度を用いて種多様度指数を用いた検討を行った。なお、種多様度指数の計算には Shannon-Weaver の多様性指数を用いた。算定式を式(9)に示す。

$$H = -\sum (n_i/N) \log(n_i/N) \quad (9)$$

ここで、H：種多様度、 n_i ：i 番目の種の平均被度（%）、N は総被度を示す。

次に、上記計算結果をもとに種多様度指数と平均流速との関係について検討した。検討結果を Fig. 12 に示す。この結果より、平均流速 5～10cm/s 付近で種多様度指数が大きい傾向にあり、その後、17cm/s 付近で若干高い値を示している点を除いて、全体として減少する傾向を示していた。これは、平均流速が小さい測点では出現する種に対する出現被度が比較的均等に出現していることにより、種多様度指数が高い値を示しているが、流速が増加するに従って、②に示したとおり出現種類数は増加するものの、優占して生息できる種が減少し、被度の大半が流速の速い区域で生息可能な種で占められてくることから、種多様度が減少したものと判断された。

④平均流速と各分類海藻との関係

既往の研究⁸⁾によれば、沿岸域などに生息する海藻について、海藻の葉の射影面積と海藻の抵抗について検討されている。そこで、調査結果に出現している海藻について、形状（大きさ）および生息年数などを考慮して、1年生小型海藻、多年生小型海藻、多年生大型海藻、殻状海藻の4つに分類し、各分類海藻の被度と平均流速との関係について検討を行った。なお、ワカメなどの1年生大型海藻については出現が少ないこ

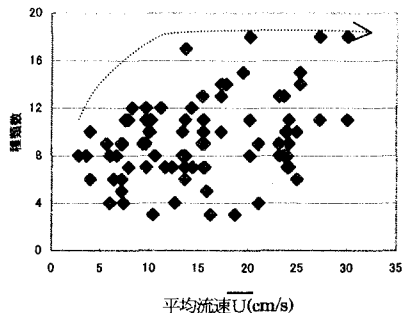


Fig. 10 平均流速と種類数の関係

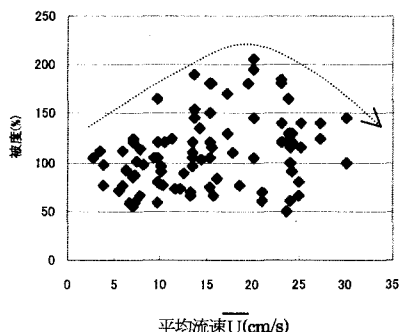


Fig. 11 平均流速と被度の関係

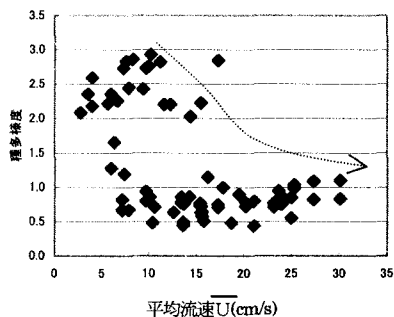


Fig. 12 平均流速と種多様度指数との関係

とから、ここでは検討しないものとする。検討結果 Fig. 13~16 に示す。この結果、1 年生小型海藻については、平均流速 15~25cm/s 付近で高い値を示す点が数点見られたが、それ以外の測点では全体的に低い傾向を示しており、一定の傾向は見られなかった。一方、多年生小型海藻、多年生大型海藻、殻状海藻については、それぞれ 10cm/s、20cm/s、13cm/s で被度が高い傾向を示しており、流れによる影響が大きいと考えられる大型の多年生海藻の方が、小型の多年生海藻、殻状海藻に比べ速い流速で多く生息できるという結果となった。この要因は現在のところ明確にはできないが、海藻の形状など速い流速でも生息可能な要因があるものと推察される。

次に、海藻の着生量と流速の関係から海藻の出現について検討してみると、須藤⁹⁾、柳瀬ら¹⁰⁾によれば、アラメでは 6~10cm/s、カジメでは 1.5cm/s、ワカメで 2cm/s の流速の時に着生量が多くなる結果が得られている。しかし、今回の検討結果を見ると特にアラメを含む多年生大型海藻について、既往の研究結果である最適着生流速 6~10cm/s に比べ、現地の調査結果では倍の平均流速の約 20cm/s の付近で多く出現している結果となった。この要因としては、着生については 6~10cm/s の比較的遅い流速で多く着生できるものの、Fig. 14 や Fig. 16 に見られるとおり、小型の海藻の着生も多くあり、海藻の種間競争が厳しく、アラメが広く分布できる環境条件になかったのではないかと考えられる。逆に、流速の速い 20cm/s 付近の箇所では、小型海藻の着生が 6~10cm/s 付近と比較して少なく、海藻の種間競争が比較的厳しくないこともあり、アラメの着生は少ないものの生育環境が良いことから被度が多くなったのではないかと推察された。

5. まとめ

人工リーフ周辺における流れと出現する海藻の関係について検討した結果、以下のような知見が得られた。

- ①種類数については流速の増加に伴って種類数が増加し、平均流速 13cm/s 付近を境に横這いで推移する傾向を示した。一方、被度については平均流速 20cm/s 付近で多く見られ、この要因として多年生大型海藻のアラメが被度に大きく影響していることがわかった。
- ②流速の小さい測点で種多様度指数が大きくなる傾向が見られ、これは大型多年生海藻に加え、小型の 1 年生海藻、多年生海藻、殻状海藻などが多く繁茂することによるものと考えられた。
- ③今後、人工リーフを整備していく上で、種の多様性を確保していくには人工リーフ及び周辺区域における流速

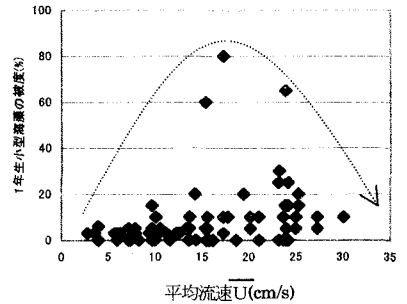


Fig. 13 平均流速と 1 年生小型海藻の被度の関係

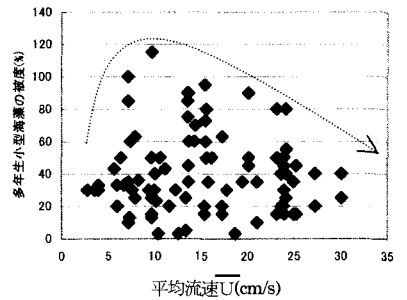


Fig. 14 平均流速と多年生小型海藻の被度の関係

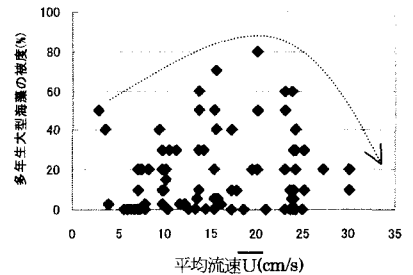


Fig. 15 平均流速と多年生大型海藻の関係

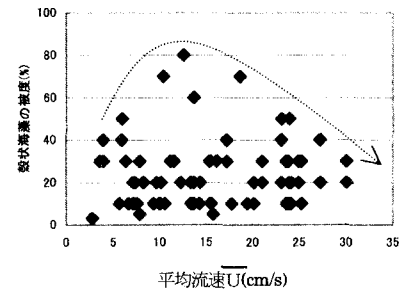


Fig. 16 平均流速と殻状海藻の関係

を小さくすることが望ましいことがわかった。一方、水産有用種であるアラメについて、人工リーフ上の平均流速を約 20cm/s を基準に速くすることにより、その生息する範囲を増加させられる可能性があるものと考えられた。

今後の研究としては、今回の検討で大型海藻が平均流速の速い測点で多数確認されたが、大型海藻は葉の射影面積等を考慮した場合、流速による影響が大きいものと考えられ、速い流速での大型海藻の繁茂は海藻の形状などが深く関係しているものと考えられる。よって、今後海藻の形状と流速との関係について検討し、流速と海藻の生息分布の関係について解明を行っていく必要があるものと考えられる。また、大型海藻の繁茂は光量の関係から小型海藻に影響を及ぼすことが考えられ、今回の流速との関係に加え光量などの物理的要因も併せて検討していく必要がある。

さらに、今回海藻の分類について大きく 4 分類に分割して検討したが、海藻種類毎で基質（被覆石、ブロック等）との着生に機能的違いがあるものと考えられることから、海藻の生息と流速との関係についてより詳細に検討していく必要があるものと考えられる。

参考文献

- 1) 井上公人・田中 仁・西村 修・馬場 聡：環境工学研究論文集，第 37 巻，pp. 379-387，2000.
- 2) 新崎盛敏：原色海藻検索図鑑，北隆館，217pp.，1964.
- 3) 千葉光雄：標準原色図鑑全集海藻・海浜植物，保育社，173pp.，1970.
- 4) 千葉光雄：藻類の多様性の生物学，内田老鶴圃，386pp.，1997.
- 5) 合田良實：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，pp. 57，1997.
- 6) 西村仁嗣：海浜循環流の数値シミュレーション，第 29 回海岸工学講演論文集，pp. 333-337，1982.
- 7) Longuet-Higgins, M. S. : Longshore currents generated by obliquely incident wave, J. Geophys. Res., Vol. 75, No. 33, pp. 6778-6789, 1970.
- 8) 川合英夫：流れと生物と，京都大学学術出版会，pp. 216-240，1989.
- 9) 須藤俊造：昆布科植物の遊走子の放出，運動並びに着生，日本水産学会誌，Vol. 13(4)，pp. 123-28，1948.
- 10) 柳瀬良介・佐々木正・青山雅俊：カジメ群落拡大に関する研究，静岡水試伊豆分場資料，No. 143，pp. 1-14，1983.