

ウニの侵入を制御する空気ポケットフェンスの開発

桑原久実*・金田友紀**・清川哲志***・中山哲厳****

1. はじめに

北海道南西部の日本海沿岸ではキタムラサキウニが高密度に分布し, その過剰な摂食圧によりホソメコンブなどの海藻群落が増少する“磯焼け”状態にある。その結果, 餌料不足によりウニ類やエゾアワビの成長不良や成熟不良となり, 沿岸漁業の深刻な問題となっている。

ウニやエゾアワビの餌料となる海藻は, 種々あるが成長や身入りに効果的なのは大型 1 年生海藻のホソメコンブである(名畑ら, 1999)。このため磯焼け海域では限られるが, 毎年ホソメコンブ群落の見られる場所に注目し, その形成条件を検討した。北海道忍路湾における研究によると, ホソメコンブの群落形成には, 冬期, 時化のためウニの食圧が低く, 配偶体や幼芽が保護され, 夏期, 風浪に伴いウニの食圧が高く, 着生した多年生海藻を食べ尽くす(多年生海藻に遷移しない)ような環境が必要であることがわかった。

また, この環境を人為的に造成する方法として, 次の 2 つを提案している(桑原ら, 2001)。

- 1) フェンス: 一定の海域をウニが侵入できないフェンスで囲み, フェンス内の食圧を人為的に管理する。
- 2) 嵩上げ: 海底面を投石などで嵩上げし, 底面波浪流速を増加させ, 冬にウニが居ない, 夏に居るようにする。

これらのうち 2) については, 既に, 既存の藻場造成施設を用いて, 嵩上げ手法の妥当性を明らかにし, 嵩上げ高さの算定法を示している(桑原ら, 2000)。また, 1) については, 刺し網を棒状にしたものを用い, ウニの侵入を制御してホソメコンブの幼芽を守ることで群落を造成し(写真-1), その後, フェンス内に深みから採取した痩せ老齢ウニを入れて身入り改善を行うことに成功している(写真-2)。しかし, 刺し網のフェンスは, 静穏な海域ではサンゴモが付着しウニの侵入が容易となり, 時化の多い海域では破壊してしまい耐久性に問題である。

本研究は, この様な問題を解決するため新たに空気ポケットフェンスを開発した(図-1)。これは, ウニが空気中に管足を出せない(移動できない)ことを利用したものである。まず, ウニの行動制御に必要な空気ポケットの形状を室内実験から明らかにし, 次に, 波浪により空気ポケット内の空気が流失しないように, その安定性



写真-1 刺し網フェンスを用いたホソメコンブ群落造成

* 正会員 農博 (独)水産総合研究センター水産工学研究所

** 水修 北海道立中央水産試験場水産工学室

*** 正会員 工博 (株)清水建設和泉研究室

**** 正会員 工修 (独)水産総合研究センター水産工学研究所



写真-2 フェンスの餌料海藻で身入りしたウニの出荷

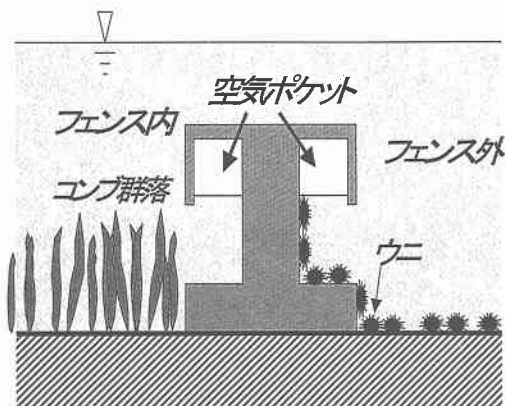


図-1 空気ポケットフェンスの概要

を理論解析から検討する。最後に、空気ポケットフェンスを用いた磯焼け漁場の生産性増大システムを提案する。

2. ウニ侵入制御に必要な空気ポケット形状

ウニの行動を制御する空気ポケットの形状は、図-2 の様な断面をもつアクリル性の装置(縦 50 cm, 横 50 cm, 高さ 30 cm)を作製し、ウニが空気ポケットを渡って外部に脱出できる限界を調べた。底面から空気ポケットの高さ ΔT は 5, 10, 15 cm, 空気ポケットの幅 ΔR は 5, 10, 15 cm, 空気ポケットの空気厚さ ΔS は 1, 5, 10 cm に変化させた。実験に用いたキタムラサキウニは約 84 個体で、殻径は 48 ± 18 mm である。実験中の水温は、 $17.5 \sim 24.2^\circ\text{C}$ である。1 ケースの試験期間は、1 週間である。

空気ポケットの ΔT , ΔR が大きくなるに従い、脱出するウニの殻径は大きくなるが、 ΔT , ΔR 共に 15 cm 以上になるとウニは移動(脱出)できなくなる。また、 ΔS は 1 cm でも、ウニの行動を制御するのに十分であることがわかった。伊藤ら(1999)は、既に、同様な実験を水温 $12.5 \sim 16.3^\circ\text{C}$, 殻径 $18.5 \sim 67.0$ mm で行い、

$$\Delta T \geq 2 \times Th_{\max} + L_{\max}$$

$$\Delta R \geq 2 \times Tr_{\max} + L_{\max}$$

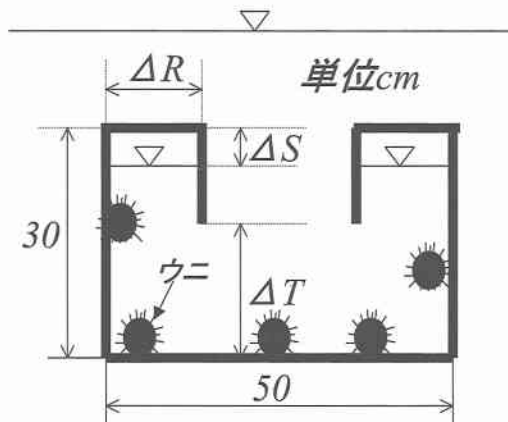


図-2 実験装置の概要

を得ている。

ここに、 $Th_{\max}$: 最大殻高, $L_{\max}$: 最長管足長, $Tr_{\max}$: 最大殻径である ($Th = 0.57 Tr - 1.92$, $L_{\max} = 0.73 Tr + 9.18$). 筆者らの実験で用いた最大殻径 66 mm で計算すると、 $\Delta T = 13$ cm, $\Delta R = 19$ cm となり、筆者らの試験結果とほぼ一致する。この様に非常に小さな空気ポケットで、ウニの侵入を防ぐことが可能となる。

3. 空気ポケット内の空気の安定性

1) 理論解析の方法

清川・大山(1986)にならい空気ポケットフェンス内の水面変動について検討する。一定水深 h の海域に、図-3 の様な空気ポケットフェンスが設置され、これに直角に x の正の方向から角振動数 ω , 振幅 η_0 の微小振幅波が入射する場合について、空気ポケット内の自由水面の挙動を 2 次元線形問題として取り扱う。流体を非圧縮・非粘性流体、流体運動を非回転運動と仮定し、速度ポテンシャルに関する境界値問題として定式化する。ここでは、領域分割によるポテンシャル接続法を用いる。領域を

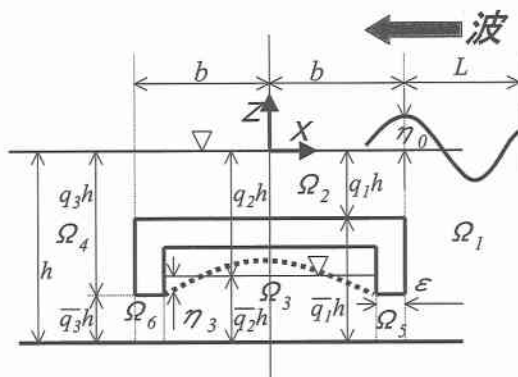


図-3 解析に用いた座標系と記号

$\Omega_1 \sim \Omega_6$ に分割し、各領域の速度ポテンシャルを次式とする。

$$\phi_m(x, z, t) = \frac{g\eta_0}{\omega} \phi_m(x, z) e^{i\omega t} \quad (m=1 \sim 6) \quad \cdots (1)$$

ここに、 g は重力加速度である。

$\phi_m (m=1 \sim 6)$ に関する基礎方程式と各領域の接続面での条件を除く境界条件は、次式の様である。

$$\nabla^2 \phi_m = 0 \quad (\text{in } \Omega_m, m=1 \sim 6) \quad \cdots (2)$$

$$\partial \phi_m / \partial z = 0 \quad (\text{at } z = -h, m=1 \sim 6) \quad \cdots (3)$$

$$\partial \phi_m / \partial z - \nu \phi_m = 0, \nu = \omega^2 / g \quad (\text{at } z = 0, m=1 \sim 6) \quad \cdots (4)$$

$$\partial \phi_5 / \partial z = 0 \quad (\text{at } z = -q_3 h) \quad \cdots (5)$$

$$\partial \phi_6 / \partial z = 0 \quad (\text{at } z = -q_3 h) \quad \cdots (6)$$

$$\begin{cases} \partial \phi_3 / \partial z - \nu \phi_3 + c = 0 \\ c = \frac{\gamma P_0}{\rho g V_0} \int_{-b}^{+b} \frac{\partial \phi_3}{\partial z} dz \end{cases} \quad (\text{at } z = -q_2 h) \quad \cdots (7)$$

ここで、式 (2) はラプラス方程式、式 (3) は海底面での不透過条件、式 (4) は Ω_1 , Ω_2 及び Ω_4 での自由表面条件、式 (5) と (6) は空気ポケットフェンス端部の不透過条件、式 (7) は空気ポケットフェンス内部の自由表面条件で、 P_0 , V_0 は静水時の空気圧力と空気の体積 (単位奥行き当たり) である。 γ は空気の状態変化を示す定数で断熱変化の場合 1.4 (通常)、等温変化の場合 1.0 とする。 ρ は海水密度である。 c は空気の状態変化に対応した付加圧力項である。空気ポケット内の空気と自由水面を連成させ誘導したものである (清川・大山, 1984)。 ϕ_1 は $x \rightarrow +\infty$ で入射波と反射波のみ、 ϕ_5 は $x \rightarrow -\infty$ で透過波のみである。

一方、各領域の接続面では、次の接続条件を用いる。

領域 Ω_1 , Ω_2 と Ω_3 の接続面 ($x = +b + \varepsilon$) :

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \begin{cases} \partial \phi_2 / \partial x (-q_1 h \leq z \leq 0) \\ 0 (-q_3 h \leq z \leq -q_1 h) \\ \partial \phi_5 / \partial x (-h \leq z \leq -q_3 h) \end{cases} \quad \cdots (8)$$

$$\phi_1 = \begin{cases} \phi_2 (-q_1 h \leq z \leq 0) \\ \phi_5 (-h \leq z \leq -q_3 h) \end{cases} \quad \cdots (9)$$

領域 Ω_3 と Ω_6 の接続面 ($x = +b$) :

$$\frac{\partial \phi_3}{\partial x} = \begin{cases} 0 (-q_3 h \leq z \leq -q_2 h) \\ \partial \phi_6 / \partial x (-h \leq z \leq -q_3 h) \end{cases} \quad \cdots (10)$$

$$\phi_3 = \phi_6 (-h \leq z \leq -q_3 h) \quad \cdots (11)$$

領域 Ω_3 と Ω_6 の接続面 ($x = -b$) :

$$\frac{\partial \phi_3}{\partial x} = \begin{cases} 0 (-q_3 h \leq z \leq -q_2 h) \\ \partial \phi_6 / \partial x (-h \leq z \leq -q_3 h) \end{cases} \quad \cdots (12)$$

$$\phi_3 = \phi_6 (-h \leq z \leq -q_3 h) \quad \cdots (13)$$

領域 Ω_4 , Ω_2 と Ω_6 の接続面 ($x = -b - \varepsilon$) :

$$\frac{\partial \phi_4}{\partial x} = \begin{cases} \partial \phi_2 / \partial x (-q_1 h \leq z \leq 0) \\ 0 (-q_3 h \leq z \leq -q_1 h) \\ \partial \phi_6 / \partial x (-h \leq z \leq -q_3 h) \end{cases} \quad \cdots (14)$$

$$\phi_4 = \begin{cases} \phi_2 (-q_1 h \leq z \leq 0) \\ \phi_6 (-h \leq z \leq -q_3 h) \end{cases} \quad \cdots (15)$$

式 (2) ~ (7) 及び放射条件を満足する速度ポテンシャル $\phi_1 \sim \phi_6$ の一般解は次の様に求まる。

$$\begin{aligned} \phi_1 = & A_0 \frac{\cosh k_0(h+z)}{\cosh k_0 h} e^{ik_0(x-b-\varepsilon)} \\ & + B_0 \frac{\cosh k_0(h+z)}{\cosh k_0 h} e^{-ik_0(x-b-\varepsilon)} \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \frac{\cos k_n(h+z)}{\cos k_n h} e^{-k_n(x-b-\varepsilon)} \quad \cdots (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_2 = & C_0 \frac{\cosh \lambda_0(q_1 h+z)}{\cosh \lambda_0 q_1 h} e^{i\lambda_0 x} + D_0 \frac{\cosh \lambda_0(q_1 h+z)}{\cosh \lambda_0 q_1 h} e^{-i\lambda_0 x} \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \frac{\cos \lambda_n(q_1 h+z)}{\cos \lambda_n q_1 h} e^{\lambda_n x} \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} D_n \frac{\cos \lambda_n(q_1 h+z)}{\cos \lambda_n q_1 h} e^{-\lambda_n x} \quad \cdots (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_3 = & (E_0 e^{i\lambda_0 x} + F_0 e^{-i\lambda_0 x}) \frac{\cosh \lambda'_0(h+z)}{\cosh \lambda'_0 h} \\ & + \frac{2\gamma P_0}{\rho g V_0} \left\{ \frac{(E_0 + F_0) \sin \lambda'_0 b}{\lambda'_0} \frac{\cosh \lambda'_0 \bar{q}_2 h}{\cosh \lambda'_0 h} \right\} \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \{ E_n \sinh \lambda'_n x + F_n \cosh \lambda'_n x \} \frac{\cos \lambda'_n(h+z)}{\cos \lambda'_n h} \\ & + \frac{2\gamma P_0}{\rho g V_0} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F_n}{\lambda'_n} \sinh \lambda'_n b \frac{\cos \lambda'_n \bar{q}_2 h}{\cos \lambda'_n h} \right\} \quad \cdots (18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_4 = & G_0 \frac{\cosh k_0(h+z)}{\cosh k_0 h} e^{ik_0(x+b+\varepsilon)} \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} G_n \frac{\cos k_n(h+z)}{\cos k_n h} e^{+k_n(x+b+\varepsilon)} \quad \cdots (19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_5 = & H_0 + I_0(x-b) + \sum_{r=1}^{\infty} \cos \frac{r\pi}{\bar{q}_3 h} (z+q_3 h) \\ & \cdot \left\{ H_r \cosh \frac{r\pi}{\bar{q}_3 h} (x-b) + I_r \sinh \frac{r\pi}{\bar{q}_3 h} (x-b) \right\} \quad \cdots (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_6 = & J_0 + K_0(x+b) + \sum_{r=1}^{\infty} \cos \frac{r\pi}{\bar{q}_3 h} (z+q_3 h) \\ & \cdot \left\{ J_r \cosh \frac{r\pi}{\bar{q}_3 h} (x+b) + K_r \sinh \frac{r\pi}{\bar{q}_3 h} (x+b) \right\} \quad \cdots (21) \end{aligned}$$

ただし、 A_n , B_n , C_n , D_n , E_n , F_n , G_n , H_n , I_n , J_n , K_n ($n=0, 1, 2, \dots$) は複素未定係数、 $\bar{q}_m = 1 - q_m$ ($m=1, 2, 3$)、 k_0, k_n ($n=1, 2, 3, \dots$) は Ω_1 と Ω_4 、 λ_0, λ_n は Ω_2 、 λ'_0, λ'_n は Ω_3 における波数と固有値でこれらは次式の実正根として求められる。

$$\left. \begin{aligned} k_0 \tanh k_0 h &= -k_n \tan k_n h = \nu \\ \lambda_0 \tanh \lambda_0 q_1 h &= -\lambda_n \tan \lambda_n q_1 h = \nu \\ \lambda'_0 \tanh \lambda'_0 \bar{q}_2 h &= -\lambda'_n \tan \lambda'_n \bar{q}_2 h = \nu \end{aligned} \right\} \quad \cdots (22)$$

未定係数の決定は、井島のポテンシャル接続法を用い、固有関数の直交性を利用して定式化する。式 (16) ~ (21)

の一般解を、各接続面の条件式 (8)~(15) に代入し、複素連立方程式を求め、これを解くことによって未定係数を決定する。ここでは、紙面の都合から省略する。

規則波による空気ポケット内の水面振幅は、次式の運動学的条件より、

$$\partial \eta_3 / \partial t = \partial \phi_3 / \partial z \quad (\text{at } z = -q_2 h) \quad \dots\dots\dots (23)$$

次のように求まる。

$$\begin{aligned} \eta_3 = & \frac{-i\omega}{g} \left\{ (E_0 e^{i\phi_0 x} + F_0 e^{-i\phi_0 x}) \frac{\cosh \lambda'_0(h+z)}{\cosh \lambda'_0 h} \right. \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} (E_n \sinh \lambda'_n x + F_n \cosh \lambda'_n x) \\ & \left. \cdot \frac{\cos \lambda'_n(h+z)}{\cos \lambda'_n h} \right\} e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

不規則波による空気ポケットフェンス内の水面振幅を算定する。まず、不規則波のスペクトルは、Bretschneider・光易を用い、周波数 f_m に対する振幅 η_{0m} を求めると次式となる。

$$\eta_{0m} = \sqrt{2S(f_m)Af_m} \quad \dots\dots\dots (25)$$

ここに、 $S(f_m) = af_m^{-5} \exp(-bf_m^{-4})$ で、 $a = 0.257H_{1/3}^2/T_{1/3}^2$ 、 $b = 1.03/T_{1/3}^4$ である。

式 (24) を用いて、式 (25) から得られた成分波に対するフェンス内の水面振幅を求め、これらの重ね合わせによって、不規則波に対するフェンス内の水面振幅を算出する。成分波の数 K は 100 とする。

$$\eta_{3*} = \sum_{i=1}^K \eta_3 \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad \dots\dots\dots (26)$$

ここに、 θ_i は位相差、 $\cos(2\pi f_i t + \theta_i)$ は $-1 \sim +1$ の乱数を取る。

2) 計算条件

空気ポケットフェンスの形状は、 $\bar{q}_1 h$ が 1.5 m、 $\bar{q}_2 h$ が 1.0 m、 $\bar{q}_3 h$ が 0.5 m、壁厚 ε が 0.1 m と一定にし、半スパン長 b は 1, 2, 3, 4, 5 m と変化させた。水深 h は 3, 5, 7 m、波浪の周期 T は 2 から 11 sec まで変化させた。

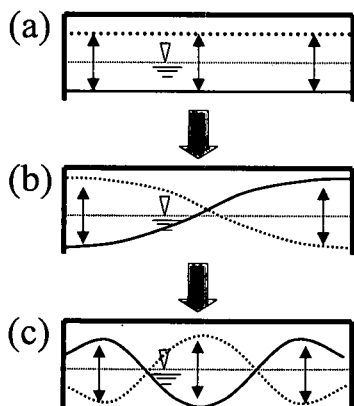


図-4 空気ポケット内の水面変動特性

3) 計算結果と考察

図-4 は、規則波による空気ポケット内の水面変動について一般的な特性を示している。フェンスの半スパン長 $2b$ が小さいと (a) の様な上下変動が主で振幅も小さいが、半スパン長が大きく入射波長 L が小さくなるに従い、矢印の方向へ水面の変動特性が変化し (b) や (c) の様な高次の振動モードとなり振幅も大きくなる。波浪の周期が空気ポケット内の水面応答の共振周期に一致すると、共振し振幅は著しく大きくなる。

図-5 は、規則波による空気ポケット内の水面振幅を示している。設置水深 h を 3, 5, 7 m としたときの、空気ポケット内の水面振幅の最大値 $\eta_{3\max}$ を波浪周期 T の関数として示したもので、半スパン長 b をパラメータにしている。これによると、波浪周期 T 、設置水深 h が大きく、半スパン長 b が小さいと、空気ポケット内の水面振幅は小さく、空気は安定に保たれることがわかる。また、

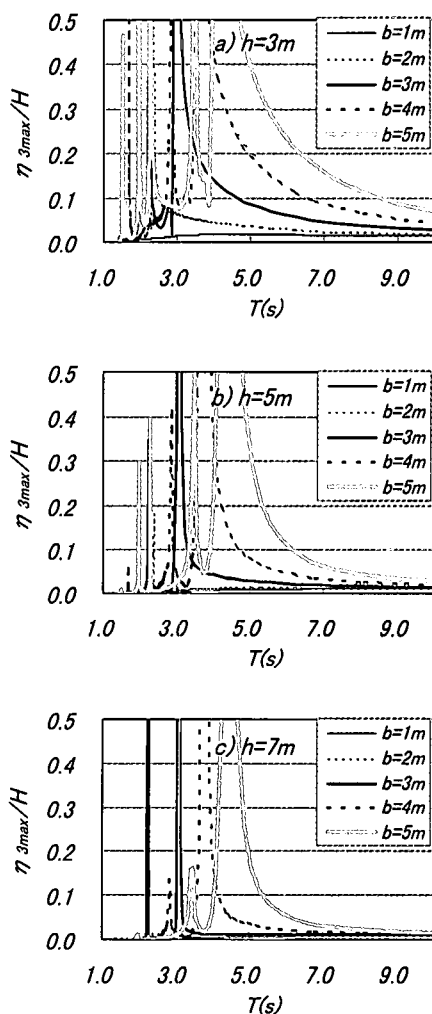


図-5 規則波による空気ポケット内の最大水面振幅

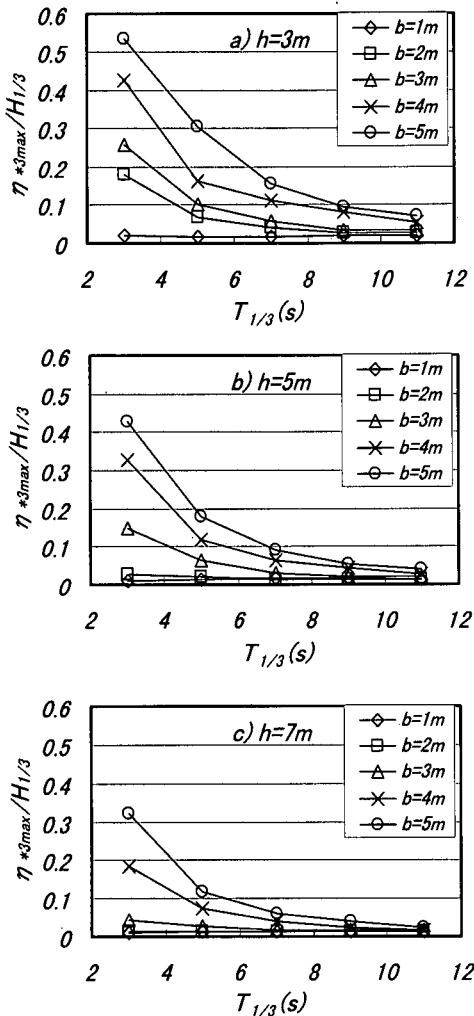


図-6 不規則波による空気ポケット内の最大水面振幅

著しく大きな水面振幅が現れるが、これは上述したように共振によるものである。

図-6は、不規則波による空気ポケット内の水面振幅を示している。設置水深 h を3, 5, 7mとしたときの、空気ポケット内の水面振幅の最大値 η_{*3max} を有義波周期 $T_{1/3}$ の関数として示したもので、半スパン長 b をパラメータにしている。規則波の場合と同様な傾向にあり、有義波周期 $T_{1/3}$ 、設置水深 h が大きく、スパン長が小さいと、空気ポケット内の水面振幅は小さく、空気は安定に

保たれる。ただし、規則波の解析で見られた共振による水面変動の著しい増大は、不規則波の場合、見られないことがわかる。図-6を満足するように空気ポケットの設計をすれば空気は安定に保たれ、ウニの侵入を持続的に制御することが可能と考えられる。

4. 空気ポケットフェンスの特徴

空気ポケットフェンスは、ある海域をフェンスで囲い、内部は自然の岩盤や転石を利用して藻場造成を行うため、従来の海底に敷き詰める投石礁やブロック礁に比べ費用が安い、また、フェンス内に形成された餌料海藻で成長したウニやアワビはフェンス外に脱出できないことから、しっかり管理をすれば、その効果が明確に現れる、などの特徴を有する。

この空気ポケットフェンスを用いて、磯焼け海域において、一定の海域を区切り、ウニの食害からコンブの幼芽を保護し、十分な餌料海藻群落を生育させた後、ウニやアワビなどの水産有用種を移植し、身入りや成長を促進させ漁獲するといった、一連の生産増大システムが可能となる。

謝辞：本研究を進めるに当たり、北海道立中央水産試験場の小林敏規室長、川井唯史研究員をはじめ多くの方々のお世話になった。ここに、記してお礼申し上げる。

参考文献

- 伊藤敏晃・高木 力・平石智徳・山本勝太郎・梨本勝昭 (1999): ウニの逃避防止用エアポケットフェンスの効果について、水産工学, Vol. 36, No. 1, pp. 71-74.
- 桑原久実・金田友紀・川井唯史 (2000): 北海道南西部磯焼け地帯の囲い礁におけるホソメコンブ群落の形成条件, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1181-1185.
- 桑原久実・川井唯史・金田友紀 (2001): 北海道南西部磯焼け海域におけるホソメコンブ群落の形成機構, 水産工学, Vol. 38, No. 2, pp. 159-165.
- 清川哲志・大山 巧 (1984): 中空円筒による波の散乱に及ぼす空気圧縮性の影響, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 481-485.
- 清川哲志・大山 巧 (1986): 空気密閉式カーテンウォール堤による波の反射・透過特性と内部空気圧の調節による波浪制御, 土木学会論文集, 第375号/II-6, pp. 271-280.
- 名畑進一・干川 裕・酒井勇一・船岡輝幸・大堀忠志・今村琢磨 (1999): キタムラサキウニに対する数種海藻餌料価値, 北海道立中央水産試験場報告, 54, pp. 33-40.