

のり養殖網による波エネルギー逸散率の定式化と抵抗係数

Wave Energy Dissipation by Laver Culture Net and its Coefficient of Resistance

長尾昌朋¹・上岡充男²・八木 宏³・小谷正幸⁴

Masatomo NAGAO, Mitsuo KAMIOKA, Hiroshi YAGI and Masayuki KOTANI

We carried out experiments on the wave decay through the culture net with live laver. The equation of the wave energy dissipation by the net was made from the motion of the net in the wave field. The resistance coefficient of the net for the estimate of the wave energy dissipation was calculated from the wave decay. The coefficient is the same as the resistance coefficient of the net in a steady flow when the KC number is large, and the coefficient becomes large when the KC number becomes small. Moreover, the coefficient becomes large with the growth of the laver.

1. はじめに

海洋生物の育成には、栄養分の豊富な新鮮な海水が必要であり、常に適切な海水交換が行われている必要がある。そして、養殖施設を適切に配置するためには、海水交換シミュレーションが重要な役割を果たす。海水交換シミュレーションは、基本的に、波のエネルギー方程式を解き、得られた波運動からラディエーション応力を求め、ラディエーション応力の分布から海浜流を求めることで行われる。すなわち、波エネルギーの流入や損失を適切に予測することが重要となる。しかしながら、対象領域にのり養殖施設が存在する場合は、養殖網による波エネルギーの減衰効果が十分把握されていないため、精度の高い再現計算を行うことができなかった。これは、のり葉体の物理特性が未知のために縮尺模型実験が困難であり、柿野 (2000) のような養殖網の波浪減衰に関する研究が少ないからである。そこで本研究では、本物ののりの付いた養殖網を用いた波浪減衰に関する室内水理実験を行った。そして、養殖網による波のエネルギー逸散率を定式化するとともに、この計算に必要な養殖網の抵抗係数も求めた。

2. のり養殖網による波浪減衰

のり葉体の相似則が不明なため、実験には本物ののりの付いた養殖網を使用する必要がある。そのため、福岡県水産海洋技術センター有明海研究所の養殖試験区域でのりを生長させた養殖網を、足利工業大学水理実験棟へ持ち込み、波浪減衰実験を行った。実際に使用されている長さ 18 m、幅 1.8 m の養殖網を、図-1 のように長さ

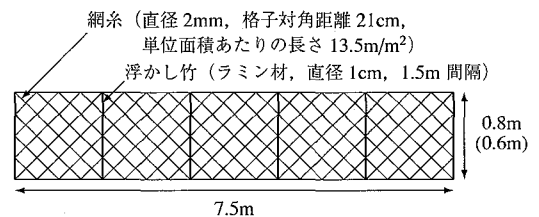


図-1 加工したのり養殖網の概要

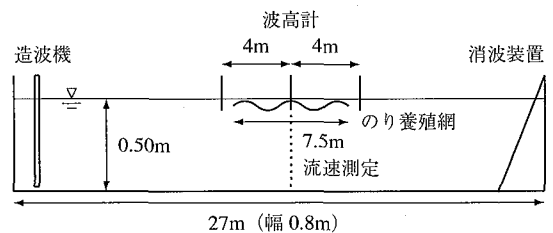


図-2 波浪減衰測定の実験装置概要

表-1 養殖網 1 枚あたり（長さ 18 m、幅 1.8 m）ののり量

実験ケース	のり葉長	のり着生湿重量
網のみ	—	—
短いのり付網	85 mm	11.4 kg
長いりの付網	280 mm	93.2 kg

$\ell=7.50$ m、幅を実験水槽の幅 0.8 m に合わせて切り出し、浮かし竹として直径 1 cm のラミン材を 1.5 m 間隔で取り付け付けた。図-2 に示す全長 27 m、幅 0.8 m の波動水槽に、この養殖網をゆるやかに設置した。養殖網を通過する直前の波高 (H_1) と直後の波高 (H_3) を容量式波高計で、養殖網中央部での流速分布をレーザー流速計で測定した。

数 m の現地水深に近づけるようにするため、実験での水深は造波限界水深である $h=0.50$ m とした。波は、周期 $T=0.7 \sim 3.0$ s、波高 $H_1=0.05 \sim 0.10$ m の中から、適当な組み合わせで 8 ケースとした。のりの生長の影響を調べるため、表-1 に示す網のみ、生長途中の短

1 正会員 博(工) 足利工業大学教授 工学部都市環境工学科
2 正会員 足利工業大学助手 工学部都市環境工学科
3 正会員 博(工) 東京工業大学准教授 大学院情報理工学研究科
4 農修 福岡県水産海洋技術センター有明海研究所



写真-1 のり養殖網

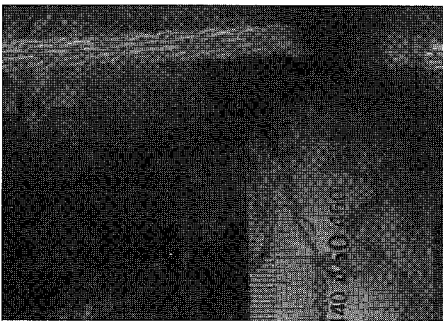


写真-2 のりの付着状況

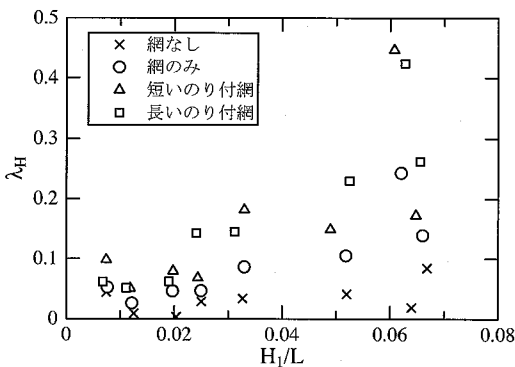


図-3 波形勾配と波高減衰率

いのり付網、十分に生長した長いりのり付網の3ケースで実験を行った。のり葉体は、短いりのり付網では長さ最大10 cm程度、幅3～5 mm程度、長いりのり付網では長さ最大30～40 cm程度、幅20 mm程度で、厚さはきわめて薄く、網糸に隙間なく密集している。写真-1にのりの付いていない養殖網、写真-2に短いりのり付網でのりの付着状況を示す。

波形勾配 H_1/L と波高減衰率 $\lambda_H = 1 - H_3/H_1$ との関係を図-3に示す。この図には網のない状態も示しており、波高減衰率にはこの程度の誤差が含まれているものの、網のある場合においては確かな波浪減衰効果が確認でき

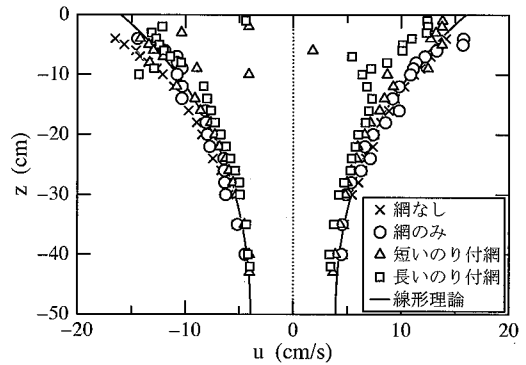


図-4 流速の水平方向成分の分布

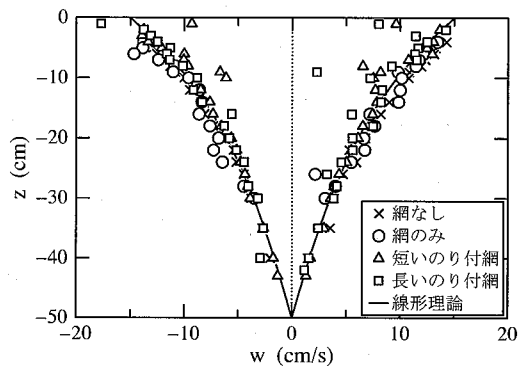


図-5 流速の鉛直方向成分の分布

る。特に周期が短い場合には減衰率が高く、周期が同じであっても、波高が大きくなると減衰率が高くなる。入射波の条件が同じでも、網のみ、短いりのり付網、長いりのり付網の3ケースを比較すると、のりの生長とともに減衰率が高くなっていることが確認できる。

流速測定は、適度に波浪減衰が起きていた波高 $H_1 = 0.05$ m、周期 $T = 1.0$ s のケースで実験した。流速分布を、微小振幅波理論とともに、図-4、図-5に示す。深さ10 cm以浅に大きなばらつきが見られる。これには養殖網の影響と流速測定の欠損が含まれる。養殖網付近ではデータの欠損が生じるものの、流速の低下は養殖網のごく近傍でしか確認できない。よって、波浪減衰は養殖網の抗力などによって生じると考えられる。

3. のり養殖網による波のエネルギー逸散率

一方向に伝播する波が何らかの影響でエネルギーを損失した場合、波のエネルギー保存式は

$$\frac{\partial}{\partial x}(Ec_g) = -D \dots \dots \dots (1)$$

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \dots \dots \dots (2)$$

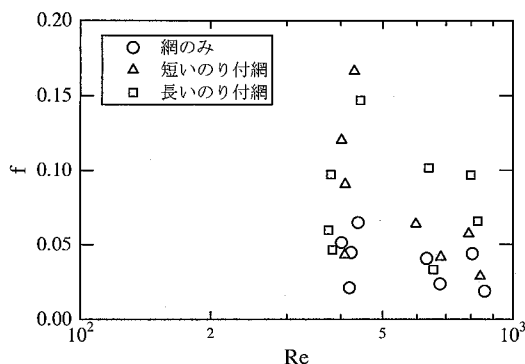


図-6 Re数と抵抗係数

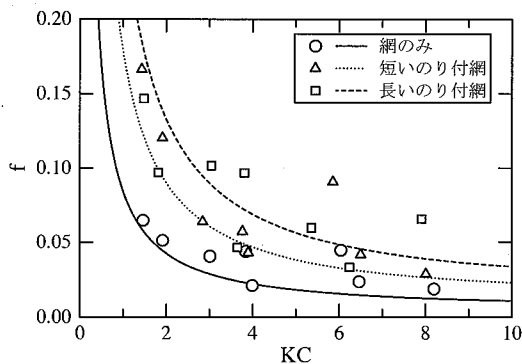


図-7 KC数と抵抗係数

となる．ここで、 x ：波の進行方向、 E ：波のエネルギー、 c_g ：波の群速度、 D ：エネルギー逸散率、 g ：重力加速度、 ρ ：流体の密度、 H ：波高である．実験での観察により、養殖網は鉛直方向の流体運動に追従するものの、水平方向の移動は少ないことがわかった．よって、水面近くにある養殖網によるせん断力 τ は、水面での流速の水平方向成分 u で表現できるので、エネルギー逸散率 D は

$$D = \int_0^T \tau u dt \dots\dots\dots (3)$$

$$\tau = \frac{\rho}{2} f |u| u \dots\dots\dots (4)$$

$$u = \frac{H}{2\sigma} \frac{\cosh kh}{\sinh kh} \cos(kx - \sigma t) \dots\dots\dots (5)$$

となる．ここで、 t ：時間、 T ：波の周期、 f ：養殖網の抵抗係数、 h ：水深、 k ：波の波数、 σ ：波の角周波数である．式(3)から式(5)をまとめると、養殖網による波のエネルギー逸散率 D の推定式は

$$D = \frac{2}{3} \pi^2 \frac{\rho f H^3}{T^3 \tanh^3 kh} \dots\dots\dots (6)$$

となる．よって、養殖網の抵抗係数 f の推定が重要と考えられる．

式(6)のように得られたエネルギー逸散率 D を波のエネルギー保存式(1)に代入し、波が養殖網の長さ ℓ だけ伝播したときの波高の変化と抵抗係数 f との関係を求めると

$$f = \frac{3gc_g T^3 \tanh^3 kh}{8\pi^2 \ell} \left(\frac{1}{H_3} - \frac{1}{H_1} \right) \dots\dots\dots (7)$$

となる．実験結果から得られた養殖網の抵抗係数 f を図-6、図-7に示す．図-6は微小振幅波理論から求めた水面付近での流速振幅と網糸の直径(2mm)を用いた Re 数でまとめた．抵抗係数は全体的にばらついており、特徴的な傾向は感じられない．図-7は波の周期と流速振幅、網糸の平均間隔(10.5cm)を用いた KC 数でまとめた．養

殖網の近くを通過する流体は、網糸の有無に応じて流体運動の変化が繰り返されると思われる．そこで、 KC 数に使用する長さスケールとして網糸の格子対角距離の1/2を使用した．図-7より、 KC 数が小さくなると抵抗係数は大きくなり、 KC 数が大きくなると抵抗係数は一定の値に漸近している．この傾向は、波動場に置かれた円柱の抗力係数と KC 数の関係に似ている(岩垣, 1987)．

4. のり養殖網の抵抗係数

本実験での Re 数の範囲は図-6に示すように400～900である．この Re 数の範囲では、円柱の抗力係数は一般的に $C_D=1.2$ 程度と言われている．養殖網の網糸および浮かし竹を円柱と仮定すると、網のみの場合の養殖網の抵抗係数を、この抗力係数から見積もることが可能である．網糸は直径 $d_1=0.002$ m、単位表面積あたりの長さ $\ell_1=13.5$ m/m²、流れとの角度 $\theta_1=45^\circ$ 、浮かし竹は直径 $d_2=0.01$ m、単位表面積あたりの長さ $\ell_2=0.667$ m/m²、流れとの角度 $\theta_2=90^\circ$ である．のり養殖網に働くせん断力が、網糸と浮かし竹の抗力によるものとする

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{\rho}{2} f |u| u \\ &= \frac{1}{2} C_D \rho \ell_1 d_1 |u| u \sin^3 \theta_1 + \frac{1}{2} C_D \rho \ell_2 d_2 |u| u \sin^3 \theta_2 \end{aligned} \dots\dots\dots (8)$$

となるので、養殖網の抵抗係数は

$$\begin{aligned} f &= C_D \ell_1 d_1 \sin^3 \theta_1 + C_D \ell_2 d_2 \sin^3 \theta_2 \\ &= 0.0115 + 0.0080 \\ &= 0.0195 \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

となる．この抵抗係数 $f=0.0195$ は一方向流に置かれた養殖網の抵抗係数ともみなせるので、網のみのケースの KC 数が十分大きい範囲での抵抗係数の目安である．ただし、抗力を発生させる物体が流れ方向へ群をなしている効果は考慮していないので、大きめの値となっている

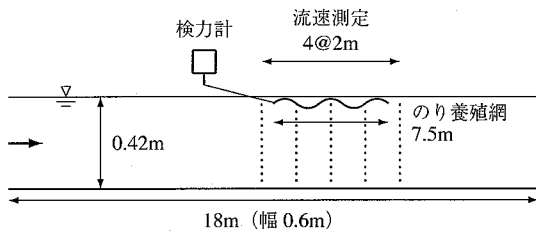


図-8 流体力測定の実験装置概要

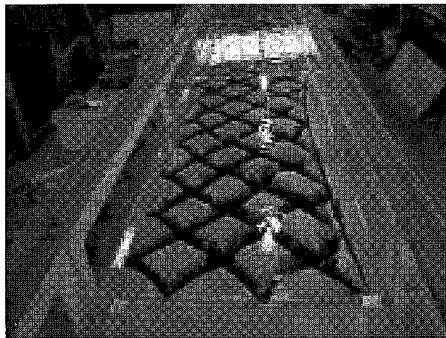


写真-3 一方向流中ののり養殖網

可能性がある。

著者らの一部(八木ら, 2004)は, 福岡県水産海洋技術センター有明海研究所の試験区域で現地計測を行い, 養殖網の抵抗係数を求めている。養殖網1列(長さ36m, 幅1.8m)をのり養殖施設の区画外に取り出し, 潮流によって作用する流体力を計測した。その結果, 生長途中ののりの付いた養殖網(短いり付網に相当)の抵抗係数は $f=0.010$, 十分に生長したのり(長いり付網に相当)の場合は $f=0.021$ の結果を得ている。この現地計測では, 養殖網1列だけを取り出してその抵抗係数を計測しているため, 複数の養殖網が隣接して設置される実際の状況の抵抗係数とは差があることも考えられる。

そこで本研究では, 養殖網の抵抗係数に関するデータを蓄積するため, 図-1に示す養殖網(幅0.6m)を用いた室内水理実験を行った。図-8に示す全長18m, 幅0.6m, 水深0.42mの開水路の水面に養殖網を設置し, 養殖網に作用する流体力を三分力計で, 養殖網の直下の流速分布をレーザー流速計で測定した。流量は, 網のみの場合では $0.050 \sim 0.085 \text{ m}^3/\text{s}$ の3ケース, のり付網の場合では $0.085 \text{ m}^3/\text{s}$ の1ケースとした。開水路に設置した短いり付網の状況を写真-3に示す。測定された流速分布の一例を図-9に示すが, 水路底面と養殖網の抵抗を受けて, 底面付近と水面付近は対数分布, 中央部は一樣流速となる。この実験では現地と同じ養殖網を使用しているので, 水面付近の流速分布には実験と現地

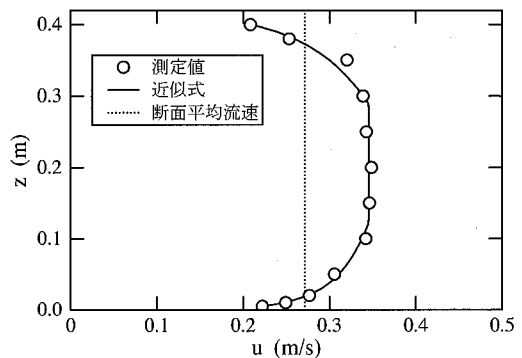


図-9 一方向流での流速分布の一例

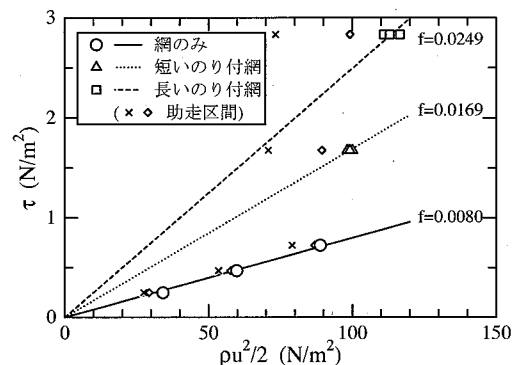


図-10 一樣流速とせん断力

とでほぼ同じ影響が現れると思われる。しかし, 水深が数mになる現地では断面平均流速と中央部での一樣流速がほぼ一致するのに対して, 水深が小さい室内実験では断面平均流速と中央部の一樣流速が異なっている。そこで, 現地での流れを考慮して, 中央部での一樣流速と養殖網に作用するせん断力とを式(4)に当てはめ, 図-10のように整理して抵抗係数を求めた。流速測定地点の中で養殖網直前と次の地点は助走区間として除外すると, 網のみの場合の抵抗係数は $f=0.008$, のり付網の場合では $f=0.017 \sim 0.025$ となった。八木ら(2004)の現地計測結果 $f=0.010 \sim 0.021$ と概ね一致している。

波のエネルギー逸散率の計算に使用する養殖網の抵抗係数は図-7に示した通りである。KC数が小さくなると抵抗係数は大きくなり, KC数が大きいと抵抗係数はある一定の値に漸近している。一方向流れはKC数が大きな場合に相当するので, この漸近値は一方向流に置かれた養殖網の抵抗係数とほぼ同じ値と考えられる。本研究の結果でも, 図-7のKC数が大きい場合の漸近値と図-10の抵抗係数はほぼ一致している。よって, 養殖網による波のエネルギー逸散率を計算するための抵抗係数は, KC数が大きい範囲では一方向流に置かれた養殖網の抵抗係数になり, KC数が小さくなると抵抗係数は

徐々に大きくなる傾向を持つ。また、のりの生長に伴い、抵抗係数は KC 数の全範囲で大きくなる。すなわち、図-7 の曲線のようにになると考えられる。今回はこの曲線を

$$f = \frac{f_0}{\tanh aKC} \dots \dots \dots (10)$$

で表現した。\$f_0\$ には一方向流に置かれた養殖網の抵抗係数 (0.008, 0.017, 0.025) を使用し、係数 \$a\$ を最適化した (\$a=0.095\$) ものである。この式が適当かどうかは、今後のデータの蓄積に期待したい。

5. ま と め

本研究では、のり養殖施設の影響を海水交換シミュレーションに組み込むことを目的として、本物ののりの付いた養殖網を用いた室内水理実験を行い、波浪減衰を測定した。得られた結果を以下に示す。

水理実験で養殖網の挙動を観察した結果、養殖網は、上下方向には波運動に追随するものの、波進行方向にはほとんど動かないことがわかった。また、流速低下は養殖網のごく近傍に限られていた。これらのことを考慮して、養殖網による波のエネルギー逸散率を式 (6) のよ

うに定式化した。

エネルギー逸散率の計算に必要な養殖網の抵抗係数を波高減衰量から求めた。抵抗係数は図-7 の曲線のように KC 数によって変化する。KC 数が大きい範囲では一方向流に置かれた養殖網の抵抗係数とほぼ同じ値であり、KC 数が小さくなると抵抗係数が大きくなる。また、のりの生長とともに抵抗係数が大きくなる。

謝辞 本研究を行うにあたり、関山直樹 (当時、足利工業大学大学院修士課程)、篠宮悟、渡辺裕、今野優司、下谷征二、飯岡大輔、本間隆広 (当時、足利工業大学 4 年) の諸氏には水理実験などに協力して頂いた。ここに記して謝意を表わします。

参 考 文 献

- 岩垣雄一(1987): 最新海岸工学, 森北出版, pp. 61-66.
- 柿野 純(2000): 東京湾盤洲干潟におけるアサリの減耗に及ぼす波浪の影響に関する研究, 東京水産大学学位論文, pp. 103-120.
- 八木 宏・石田大暁・高橋亜依・灘岡和夫・田村 仁・小谷正幸(2004): ノリ養殖施設の流体抵抗と潮流・浮泥輸送への影響, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 1026-1030.