

# 延縄式海中造林施設における耐波性能向上とその設計法

川俣 茂・鈴木健吾 ((国研) 水産研究・教育機構 水産技術研究所)

## 1. はじめに

延縄式海中造林施設 (以下、「延縄式施設」という) は、浮子とアンカーを用いて中層に伸ばしたロープにコンブやワカメなどの大型海藻を育成する施設である。今日、大型海藻の藻場から置き換わったウニの優占する磯焼け域が全国的にみられているが、何らかの方法でウニの食害を受けない基質を海底直上に設けることができれば、大型海藻とウニ・アワビなどの底生藻食動物が立体的に共存する漁場に改変できる可能性がある。この可能性は延縄式施設<sup>1,2)</sup>と揺動式海藻着生装置<sup>3)</sup>で実証されているが、コンブ、ワカメの種苗を用いて広い面積にわたり磯焼け場を改変するのであれば、前者の方が、実現可能性が高い。しかし、延縄式施設は、耐波浪性能が低く、数多くの破損・流失事例 (例えば、道端<sup>4)</sup>) により、海藻の生育に適した波動流の比較的強い浅所での適用は困難と考えられている。

延縄式施設の耐波浪設計については、コンブとワカメを対象にした研究<sup>5,6)</sup>があるが、それらの施設は養殖を中層で行うもので、底層で行うものではなかった。またコンブやワカメの養殖を対象にした延縄式施設に作用する波力については、微小振幅波理論が適用可能な規則波実験<sup>6)</sup>での検討しかなく、不規則波実験による検討はなかった。また、延縄式施設の流失・破損原因については、ロープのたわみに伴う衝撃張力やキックの発生<sup>6)</sup>、ロープ端部の結合部分の摩耗、ロープの岩擦れやロープ同士の擦れ<sup>7)</sup>が挙げられているが、詳しい調査はなされていない。

従来の延縄式施設 (以下、「従来型」という) は、アンカー、元綱 (係留索)、元浮子、種糸から海藻を育成する幹綱 (メインロープ) 及び中浮子から成る (図1)。従来型では2つの係留点間の距離よりもロープの長さが元綱の分だけ長いため、強い波動流中ではロープの弛緩・緊張に伴う衝撃的張力の発生は避けられない。しかし、幹綱を2つの支柱に緊張係留すればその発生は回避または抑制できると考えられる。また幹綱は岸に平行に張ることが多いようであるが、幹綱を岸沖方向に張ることにより波力を減少できる可能性もある。そこで、耐波性の高い延縄式施設として図2に示すような施設 (以下「提案型」という) を考えた。本研究では、その可能性と設計に必要な最大係留張力の計算方法を水理模型実験と実物のコンブを用いた実験によ

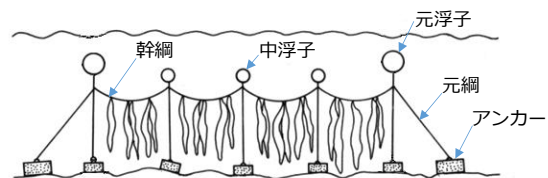


図1 従来型の代表例

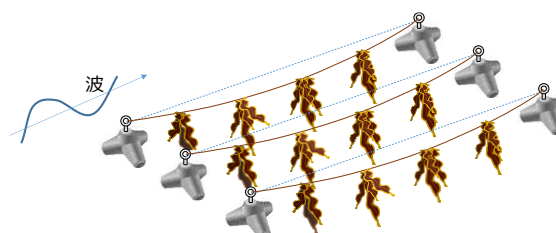


図2 提案型のイメージ図

り検討した。

## 2. 実験方法

### 1) 模型実験

従来型と提案型の縮尺模型 (想定縮尺 1/25) を製作し、振動流及び不規則波中での施設に作用する流体力を測定した。海藻には種糸から養成されるコンブを想定し、セロハン紙 14×0.7cm を手で揉んで皺をつけて作ったコンブ藻体模型 6 本または 12 本を束ねたもの (コンブ束という) を 2cm 間隔に取り付けた紐 (径 1.2mm、ポリエチレン製) を幹綱模型として作製した。

縦型循環式回流水槽 (閉水路観測部: 長さ 3m×断面 0.4×0.4m) を用いて、0.2~1m/s の定常流中で幹綱の部分模型 (中央部 20cm 間にコンブ束 11 束を等間隔に取り付けた全長 30cm の紐) に作用する流体力を測定した。

造波水槽 (長さ 70m×幅 0.7m×深さ 2.2m) を用いて不規則波中の延縄式施設の係留索に掛かる力を測定した。測定は、1/50 斜面部に玉石を敷き詰めた試験区を設けて、水深 40cm で周期 (有義波周期: 1.5~3s) と波高を変えた 12 通りの不規則波 (修正ブレットシユナイダー・光易スペクトル) を 250 波以上与えて波向に対する幹綱の迎角 (0°、10°、20°、30°及び 90°) を変えて従来型と提案型の係留部位に作用する力を計測した。施設模型の幹綱部分は従来型と提案型ともに、コンブ束 11 束と球形の元浮子 (径 11mm) 2 個と中浮

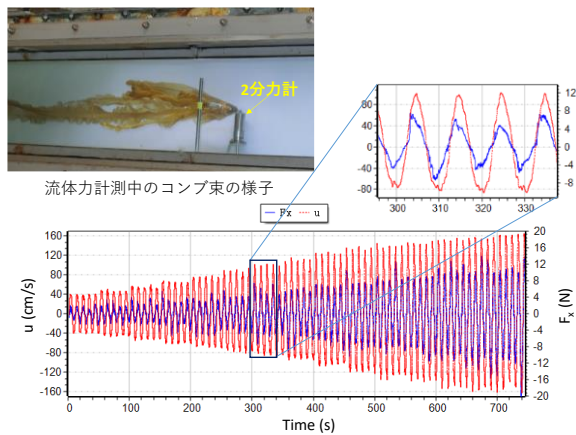


図3 回流水槽におけるコンブ束の流体力計測と発生させた振動流の流速時間波形

子（径9mm）3個を等間隔に取り付けた長さ50cmの紐とし、その両端に輪をつくり、三分力計（容量20N）2台に直接取り付けられるようにしたが、従来型（対照施設）ではその両端部分を5cmずつ延長して元綱とした。2台の分力計は、取付部位間の距離が50cmになるようステンレス板に固定した。すなわち、提案型の幹綱にはたわみがないが、従来型の係留綱（幹綱+元綱）には浮子の影響が無視できれば20%の遊びがある。上記ステンレス板は玉石で覆って設置し（玉石面からの係留点の高さ：2cm）、その設置方向により幹綱の迎角を変更した。

### 2) マコンブを用いた流体力測定

コンブ束に作用する流体力の推定手法の確立のため、マコンブを用いた流体力計測を前述の回流水槽を用いて行った。2022年2月4日、北海道小樽市沿岸でローブ養殖されていたマコンブを入手した。コンブは入手時点ではまだ小さかった（葉長<0.9m）ため、回流水槽においてLED照明下で、水温5℃、周期20sの振動流中で約1ヶ月間、成長させて実験に供した。実験個体の葉長は49~136cmであった。

マコンブはなるべく長さの近い個体を選び、両端を潰して孔を穿ったステンレスパイプ（径10mm、長さ32cm）の中央に、束になるように仮根部を紐で縛りつけて1~7本/束の模範的コンブ束を作製した。これらのパイプは、回流水槽試験区中央、底面から15cmの高さに水路幅方向に向けて、一端を2分力計（容量20N）、もう一端をダミーの支柱に固定し、図3に示す一定周期10sで流速振幅のみが次第に増加する振動流を与えて力と流速を計測した。また、同じ振動流中でコンブ束を取り付けない状態での力を計測し、両者の力の差を2倍してコンブのみに作用した力を求めた。

## 3. 結果と考察

### 1) 延縄式施設の係留張力

同じ波浪条件下で迎角90°の提案型と従来型の延縄式施設の係留張力の比較例を図4に示す。係留張力は、従来型において弛緩状態から緊張状態への変化に伴い比較的ピークの鋭い衝撃力の発生がみられたのに対して、提案型ではピークは比較的鈍いが、大きな衝撃力を示した。これは、緊張状態の係留綱では係留系に作用する流体力 $F_p$ と $F_t = F_p / (2 \cos \gamma)$ （ここに、 $\gamma$ ：流向と係留綱の係留点での向きとのなす角度）の関係にある係留張力 $F_t$ が、提案型では幹綱のたわみ量が小さいため、 $\gamma$ が90°に近づいて大きくなることによる。図4では底面軌道流速 $u$ （岸向を正）が浅海波の特徴である強い非対称性を示し、ゼロアップクロス点の直後の極大値( $U_{p+}$ )の方が直前の極小値( $U_{p-}$ )の絶対値よりも顕著に大きくなっている。図中の波Aと波Bの比較からわかるように、係留張力 $F_t$ は単純に $U_{p+}$ の増加に伴い増加していない。このことは、水粒子の速度だけでなく加速度の影響も考慮したモリソン式によっても説明できるが、次式の最大波力式<sup>8)</sup>により簡便に説明できる。

$$F_p = \frac{1}{2} \rho C_F (K_C) A U_a^2 \quad (1)$$

ここに、 $F_p$ ：最大流体力、 $\rho$ ：水の密度、 $C_F$ ：最大力係数で、 $K_C = 2U_a T_{pp} / D$ で定義されるKC数の関数、 $A$ ：物体の基準面積、 $U_a = (U_{p+} - U_{p-}) / 2$ ：流速半振幅、 $T_{pp}$ ：流速が $U_{p-}$ から $U_{p+}$ に至るまでの時間、 $D$ ：物体

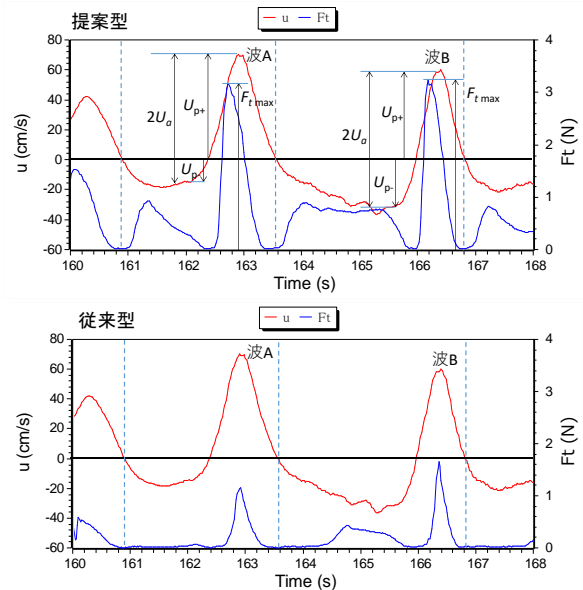


図4 提案型と従来型の施設模型（迎角90°の場合）に作用する係留張力 $F_t$ の比較例

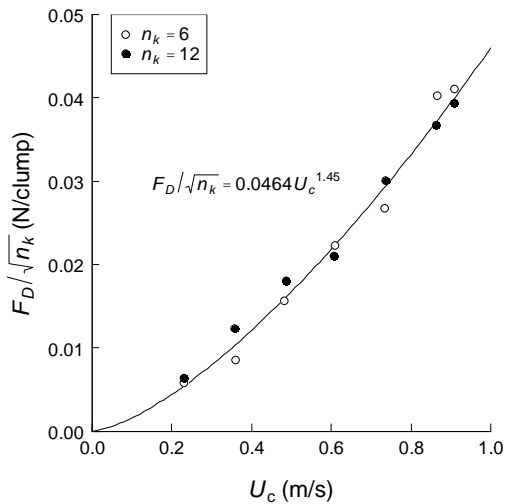


図5 定常流中のコンブ束モデルに作用する抗力に及ぼす束当たりのコンブ本数 $n_k$ の影響.  $U_c$ : 定常流の速度.

の基準幅。以下では、式(1)に基づきコンブ束に作用する流体力を解析する。

## 2) コンブ束の流体力算定式の構築

コンブ生育密度 (本数/束) の異なるコンブ束モデルに作用する定常流中での抗力を図5に示す。コンブ束当たりの抗力 $F_D$ はコンブ同士の遮蔽効果により束当たりの本数 $n_k$ に単調には比例することではなく、 $\sqrt{n_k}$ に比例して増加することが示唆された。そこで、振動流中のコンブ束に作用する最大流体力 $F_p$ を次式で表す。

$$F_p = \frac{1}{2} \rho C_{F,clump} \sqrt{n_k} A_b U_a^2 \quad (2)$$

ここに、 $A_b$ : コンブの平均葉面積。  $C_{F,clump}$  は次元解析により以下の無次元数の関数で表す。

$$C_{F,clump} \equiv \frac{2F_p}{\rho \sqrt{n_k} A_b U_a^2} = f \left( K_{C,b}, Re, \frac{L_b}{B_b} \right) \quad (3)$$

ここに、 $K_{C,b} = 2U_a T_{pp} / L_b$ 、 $L_b$ : コンブの平均葉長、 $Re = U_a L_b / \nu$ 、 $\nu$ : 水の動粘性係数、 $B_b = A_b / L_b$ : コンブの平均葉幅。時間の経過に伴い流速振幅が増加する試験流速 (図3) では、コンブ束の作用流体力も次第に増加するはずであるが、実際にはコンブ藻体が取付パイプに絡みついて最大流体力が減少することもあった。このため、最大流体力算定式の構築に当たっては、個々波の $F_p$ が時間的に前のデータよりも大きいデータのみを選択して解析を行った。その結果、次の予測式 ( $n = 135$ ,  $R_{adj}^2 = 0.899$ ) を得た (図6)。

$$C_{F,clump} = 1.69 \times 10^5 \frac{K_{C,b}^{0.557} (L_b/B_b)^{1.104}}{Re^{1.289}} \quad (4)$$

## 3) 波向に対する幹綱の迎角が係留張力に及ぼす影響

不規則波中の提案型施設の2つの係留張力の最大値の比が迎角によってどのように変化するかを図7に示す。沖側係留点での張力が岸側よりも大きく、また迎角が $0^\circ$  (幹綱が波の進行方向に平行) のとき最大で、約3倍大きくなる場合もみられた。しかしその比は、 $U_a$ の最大値 $U_a^*$  (ここに、アスタリスク(\*)を付けた記号は $U_a$ が最大の流速波形 (最大流速波形という) の値を示す) の増加に伴い減少している。

提案型の性能を評価するため、同一条件の不規則波中での提案型と迎角 $90^\circ$ の従来型で計測された最大張力の比を図8に示す。先述したように、提案型ではたわみ量の少ない係留のため、係留張力が増加し、迎角 $\geq 30^\circ$ では従来型よりも2倍以上になった。このことから、従来型の流失がたわみに起因する衝撃張力ではなく、ロープの岩擦れやロープ端部の結合部での摩擦、キックなどの他の原因によるもので、それらの原因を回避または減少できる提案型の方が張力に耐え得る設

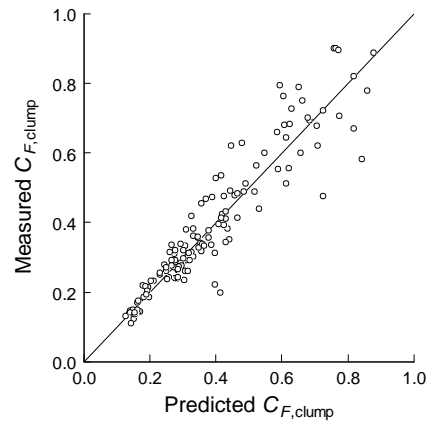


図6 振動流中でのコンブ束の最大力係数の実測値と予測値との比較

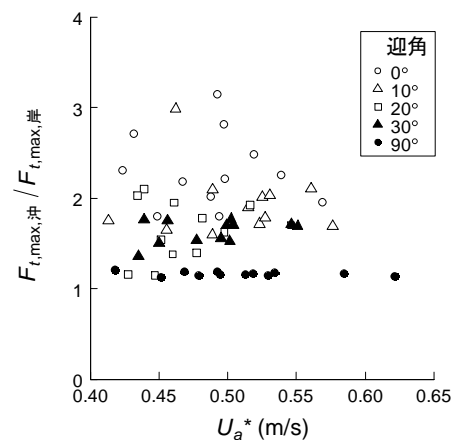


図7 不規則波中での提案型モデルの沖側と岸側の最大係留張力の比と迎角の関係

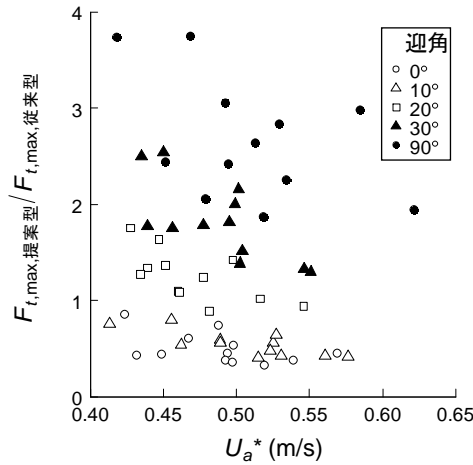


図 8 不規則波中での提案型模型の最大係留張力  $F_{t,max,提案型}$  に及ぼす迎角の影響.  $F_{t,max,従来型}$ : 迎角  $90^\circ$  の従来型模型の最大係留張力.

計が可能であれば実用化しやすいと考えられる。そこで最後にその検討に必要な最大張力予測手法の構築を試みる。

式(3)より提案型に作用する最大係留張力  $F_{t,max}$  が次式で表されると仮定する。

$$F_{t,max} = \frac{1}{2} \rho C_t C_{F,clump} \sqrt{n_k} A_b U_a^{*2} n_c \quad (5)$$

ここに、 $C_t$ : 迎角  $\alpha$  とコンブ束取付間隔  $s$  に依存する係数、 $n_c$ : 幹綱のコンブ束の数。コンブ束模型の  $C_{F,clump}$  は、 $\alpha = 90^\circ$  の提案型模型の両係留点での岸沖方向の力の合力  $F_x$  ( $\approx$  全コンブ束の作用流体力) の時系列から底面軌道流速のゼロ・ダウン・クロス波毎に得られる  $F_x$  のピーク値  $F_{x,p}$  より  $C_{F,clump} = 2F_{x,p} / (\rho \sqrt{n_k} A_b U_a^{*2} n_c)$  として求められる。その回帰分析により次の予測式 ( $n=344$ ,  $R_{adj}^2 = 0.253$ ) を得た。

$$C_{F,clump} = 0.176 + 1.92 K_{C,b}^{-1.10} \quad (6)$$

したがって、 $C_t$  は式(5)及び式(6)より次式で与えられる。

$$C_t = \frac{2F_{t,max}}{\sqrt{n_k} A_b U_a^{*2} n_c (0.176 + 1.92 K_{C,b}^{-1.10})} \quad (7)$$

式(7)で求められる提案型模型の  $C_t$  値をすべての迎角の実験結果について計算し、その変動を説明するための回帰モデルとして次式 ( $n=48$ ,  $R_{adj}^2 = 0.907$ ; 図9) を得た。

$$C_t = 2.17 + 0.765 \ln\left(\frac{s \sin \alpha}{L_b}\right) + 0.56 \ln K_{C,b}^* \quad (8)$$

式(5)において、 $C_{F,clump}$  の予測式に式(4)を用いれば、現地での最大係留張力を求めることができる。

#### 4) 試算

構築された式を用い、実際に外海域で想定される提案型の最大係留張力を以下の条件で試算する。

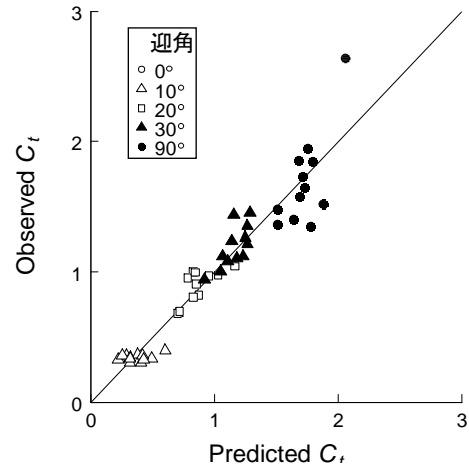


図 9 係数  $C_t$  の予測値と実験値の比較

設計条件: 沖波(有義波)波高 9m, 周期 11s, 海底勾配 1/50, 設置水深 5m,  $\nu = 1.5 \text{mm}^2/\text{s}$  ( $5^\circ\text{C}$ ),  $\rho = 1025 \text{kg/m}^3$   
 施設諸元:  $L_b = 2.5 \text{m}$ ,  $A_b = 0.20 \text{m}^2$  ( $B_b = 0.08 \text{m}$ ),  $n_k = 30$ ,  
 幹綱の長さ  $L_r = 30 \text{m}$ ,  $s = 0.3 \text{m}$ ,  $n_c = L_r/s = 100$ ,  $\alpha = 30^\circ$   
 設計条件より実験式<sup>9)</sup>を用いて  $U_a^* = 1.683 \text{m/s}$ ,  $T_{pp}^* = 3.36 \text{s}$  が得られる。したがって、 $K_{C,b}^* = 4.52$ ,  $Re^* = 2.805 \times 10^6$ ,  $C_{F,clump} = 0.0855$ ,  $C_t = 0.863$  となり、式(5)より耐波設計可能な値  $F_{t,max} = 11.7 \text{kN}$  が得られる。

#### 参考文献

- 1) 菊地省吾, 浮 永久: アワビ・ウニ類とコンブ類藻場との関係, 藻場・海中林, 日本水産学会編, 1981, 恒星社厚生閣, 東京. p. 9-23.
- 2) 菊地省吾: 海中造林とその理論, 増殖技術の基礎と理論—その発展の糸口として, 日本水産学会編, 1978, 恒星社厚生閣, 東京. p.68-78.
- 3) 川俣 茂: キタムラサキウニの優占する磯焼け地帯に適用可能な揺動式海藻着生装置の開発. 水産工学, **44**, 127-138, 2007.
- 4) 道端純二: 豊かな漁場作りへ—尻屋漁協. 水産の研究, **2**(5), 92-96, 1983.
- 5) 前田 清康, 桜井 喜十郎, 鈴木 博: ロープ式ワカメ養殖施設に関する水理実験報告. 農業土木試験場技報, **B11**, 1-7, 1967.
- 6) 桜井 喜十郎: コンブ養殖ロープ施設に働く波力について. 農業土木学会論文集, **116**, 25-31, 1985.
- 7) 佐藤 修: 海藻増養殖施設に関する若干の問題. 水産土木, **15**(1), 63-64, 1978.
- 8) S. Kawamata, M. Kobayashi: Modified formula for predicting the maximum wave force on near-bed objects. Ocean Eng., **266**, 112751, 2022.
- 9) S. Kawamata, M. Kobayashi: Empirical formulas for near-bed wave orbital velocity parameters involved in maximum wave load in random wave trains. Ocean Eng., **276**, 114133, 2023.