

クロマグロ大型養殖生簀の形状と作用荷重推定

高木 力,^{1*} Holger Korte,² 清水孝士³

(環境保全・資源動態グループ)

¹近畿大学大学院農学研究科, ²近畿大学水産研究所 COE 博士研究員, ³北海道大学水産科学研究科

*tutakagi@nara.kindai.ac.jp

クロマグロ養殖では高速で遊泳する能力を考慮して、できるだけ大型の施設で養成することが望ましい。しかし、大型養殖生簀の設置後の力学的問題は未知な部分も多く、試行錯誤的な設計に頼らざるを得ない部分も多い。大型生簀の最適設計法の確立はこれからの課題といえる。

蓄養殖生簀網は潮流や波浪環境の中でその形状は常に変化している。時として高流速時ではその形状は大変形し、内容積は大幅に減少する。結果、蓄養殖魚の棲息空間が狭小化し、魚体の擦れや生簀への衝突などの深刻な問題が発生する。さらに、このような環境下では施設に作用する流体力は大きなものになり、最悪の場合施設の損壊流失につながる。高流速時の蓄養殖空間の確保のため、生簀底面のシンカー重量を増やすことがしばしば行われるが、網地への荷重の増加を招くため使用部材や網地の破損の機会を増やし、安易な重量増加は根本的な解決にならない。しかもこの方法では潮流による施設変形に対する対応策がとられただけで、施設に作用する流体力削減の効果はない。

実海域で施設の形状を把握するには実機試作後現場観察するか、設計段階で水槽模型実験により評価するしかない。しかし、前者の方法では大型施設ほど全体形状を把握するには困難であり、しかも、潮流による作用荷重の計測は大型の水中ロードセルなどを使用しなければならない。一方、後者では実機を製作する必要はないが、大型実験水槽が必要となり実験用設備が使用できる環境であることが前提となる。そのためこれらの方法ではいずれもかなりの労力と経済的コストがかかるのが現実である。また、こうした理由から設計段階でこれらの実験結果を実機製作に反映させることは難しく、結局、経験則に基づいた試行錯誤的

な設計に頼らざるを得ないのが現状となっている。

当該施設設計段階での水中形状や各部材への作用荷重の詳細な予測は、設計者はもとよりユーザーにとっても最大の関心事でもある。そこで本研究では蓄養殖施設の中でもこのように規模の大きな大型な施設の水中形状や作用荷重を実機試作や水槽模型実験を行うことなく、コンピュータ上でこれらを推定するシステムを構築することを試みた。これは施設の諸元を入力するだけで、定常流中に設置された蓄養殖施設の形状がモニタ上に表され、併せて施設の全ての部分にどの程度の荷重が作用しているかを可視化するというもので、いわゆる数値シミュレーションによる解析技術である。本報では、まず施設を構成する網地状構造物の水中形状を算定するための力学的計算モデルの定式化法について紹介する。そして、この計算モデルに基づいて推定されたクロマグロ養殖用大型生簀網の水中形状と作用荷重をいくつかの流動条件ごとの算定例を紹介し、当施設の耐候性について評価する。

方法

定式化方法 著者は既に網地状の柔構造物の形状を算定するための計算モデルを定式化し、網地形状シミュレーションシステム NaLA(Net Shape and Loading Analysis System)を開発してきた。①②ここでは、その計算モデルについて紹介する。

図1に示すように網地は複数の質点とバネで構成されているものと仮定する。結節に質量が集中しているものと仮定し、その質点は質量の無視できるバネに接合されているものとする。図1のような模式図により計算モデルは示される。また、脚の質量を代表させる質点を結節間の中央に配した場合、この質点に作用する流体力は運動する方

向によって変化するものと仮定した方が合理的である。そこで、図2に示すように質点を中心とした局所座標系を設定する。図1, 2の系に基づいて運動方程式を設定することを考える。

質点に作用する張力は次式のように表すことができる。

$$T_j = k_S \left\{ \sqrt{(x_{Sj} - x_i)^2 + (y_{Sj} - y_i)^2 + (z_{Sj} - z_i)^2} - l_S \right\} \\ j = \{1, 2, 3, 4\} \quad (1)$$

ここで、 T_j は質点に作用する張力、 k_S はバネ定数、 l_S はバネの自然長、 (x_i, y_i, z_i) は質点*i*の位置、 (x_{Sj}, y_{Sj}, z_{Sj}) はバネの他端の位置を表している。ただし、*i-j*間の距離が l_S より小さい場合はバネにおける圧縮力は作用しないものとし、 $T_j = 0$ とする。したがって、質点*i*から他の質点*j*を結ぶ方向の各単位ベクトルを \mathbf{e}_j として、その成分を $\mathbf{e}_j = (e_{jx}, e_{jy}, e_{jz})$ とすれば、質点*i*に作用する張力ベクトル \mathbf{T} の*x,y,z*方向成分はそれぞれ次式で表せる。

$$T_x = T_1 e_{1x} + T_2 e_{2x} + T_3 e_{3x} + T_4 e_{4x} \\ T_y = T_1 e_{1y} + T_2 e_{2y} + T_3 e_{3y} + T_4 e_{4y} \quad (2) \\ T_z = T_1 e_{1z} + T_2 e_{2z} + T_3 e_{3z} + T_4 e_{4z}$$

質点*i*に作用する流体による抗力ベクトル \mathbf{F} の*x,y,z*成分は流体の定常流速を $\mathbf{V}_f = (u, v, w)$ として次式で表すものとする。

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_D S |\mathbf{e}_x - u| (\mathbf{e}_x - u) \\ F_y = \frac{1}{2} \rho C_D S |\mathbf{e}_y - v| (\mathbf{e}_y - v) \quad (3) \\ F_z = \frac{1}{2} \rho C_D S |\mathbf{e}_z - w| (\mathbf{e}_z - w)$$

ここで、 C_D 、 S はそれぞれ抗力係数、質点の投影面積を表している。抗力は流向に依存しないものここでは仮定すると各成分の C_D 、 S はそれぞれ等しい値となる。

重力 \mathbf{W} と浮力 \mathbf{B} はそれぞれの大きさを w_0 、 b とすると次式のように表すことができる。

$$\mathbf{W} = (0, 0, w_0) \quad (4) \\ \mathbf{B} = (0, 0, b)$$

以上のように、図1における質点*i*に作用する外力から、運動方程式は次式で表すことができる。

$$(M_i + \Delta M_i) \mathbf{a} = \mathbf{T} + \mathbf{F} + \mathbf{W} + \mathbf{B} \quad (5)$$

ただし、 \mathbf{a} は質点*i*の加速度ベクトル、 \mathbf{T} は質点に作用する張力、 \mathbf{F} は抗力、 \mathbf{W} 、 \mathbf{B} はそれぞれ重力と浮力を表す。また、 M_i 、 ΔM_i はそれぞれ質点の質量および付加質量を表している。付加質量は流向により変化しないと仮定しているので、方向性に依存しない定数として次式で定義する。

$$\Delta M_i = \rho C_M V_0 \quad (6)$$

ここに、 ρ 、 C_M 、 V_0 はそれぞれ流体密度、付加質量係数、質点の体積である。

(2)~(6)式を(1)式に代入すると質点*i*の加速度 $\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)$ に関して次式が得られる。

$$(M_i + \Delta M_i) a_x = T_x - F_x \\ (M_i + \Delta M_i) a_y = T_y - F_y \quad (7) \\ (M_i + \Delta M_i) a_z = T_z - F_z + w_0 + b$$

図2における質点*i*の運動を考える。質点*i*を原点として線分1-2を通る座標軸を τ とする。定常流の流速ベクトル $\mathbf{V} = (u, v, w)$ と座標軸 τ を含む平面上に原点を通り、軸 τ に垂直な座標軸を η とする。さらに τ 、 η に垂直な軸を ξ として質点*i*に関する3次元の局所座標系を設定する。こうすることによって、流体の流速ベクトルと質点*i*の運動方向ベクトルを常に線分1-2の接線および法線方向の成分に分けて考える。質点*i*から伸びる質点1および2を結ぶ方向の単位ベクトルをそれぞれ \mathbf{e}_{i1} 、 \mathbf{e}_{i2} とおき、 τ 、 η 、 ξ 軸上の単位ベクトルを \mathbf{e}_τ 、 \mathbf{e}_η 、 \mathbf{e}_ξ とする。質点*i*に作用する張力の τ 軸方向成分 T_τ は、質点*i*と1の間に働く張力を T_1 、質点*i*と2の間に働く張力を T_2 として次式で表すことができる。

$$T_\tau = T_1 \mathbf{e}_{i1} \cdot \mathbf{e}_\tau + T_2 \mathbf{e}_{i2} \cdot \mathbf{e}_\tau \quad (8)$$

ただし、式中の \cdot はベクトルのスカラー積を表しており、 T_1 、 T_2 は(1)式同様に自然長からの伸びに比例する力として定義される。

同様に、張力の η 、 ξ 軸方向成分 T_η 、 T_ξ についても(8)式と同様の手順で表すことができ、

$$\mathbf{T} = (T_\tau, T_\eta, T_\xi) \quad (9)$$

質点の流体に対する相対速度の τ 、 η 、 ξ の成分 $\mathbf{v}_{ib} = (v_\tau, v_\eta, v_\xi)$ は絶対座標系における流体速度ベクトル \mathbf{v}_f と質点速度ベクトル \mathbf{v}_i を用いて次式で表すことができる。

$$\mathbf{v}_{ib} = \bar{C}_i^T \cdot (\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_i) \quad (10)$$

ただし、 \bar{C}_i^T は座標変換行列である。

したがって、局所座標系で表した質点に作用する抗力 $\mathbf{F} = (F_\tau, F_\eta, F_\xi)$ は次式となる。

$$F_k = \frac{\rho_w}{2} C_{Dk} A_k v_k |v_k| \quad (11)$$

$$k = \{\tau, \eta, \xi\}$$

局所座標系における運動方程式を次式で表す。

$$(M_i + \Delta M_i) \mathbf{a} = \mathbf{T} + \mathbf{F} + \mathbf{W} + \mathbf{B} \quad (12)$$

ただし、 $\mathbf{W} = (w_\tau, w_\eta, w_\xi)$ 、 $\mathbf{B} = (b_\tau, b_\eta, b_\xi)$ である。

上式右辺は座標変換行列 \bar{C}_i を用いて絶対座標系と局所座標系の間以下に以下の関係が成立する。例えば、 $\mathbf{F} = (F_\tau, F_\eta, F_\xi)$ では次式の通りである。

$$(F_{xi}, F_{yi}, F_{zi})^T = \bar{C}_i (F_{\tau i}, F_{\eta i}, F_{\xi i})^T \quad (13)$$

ただし、 $\bar{C}_i = [\mathbf{e}_\tau, \mathbf{e}_\eta, \mathbf{e}_\xi]$ で、

$$\mathbf{e}_\tau = \frac{\mathbf{P}_{i+1} - \mathbf{P}_i}{|\mathbf{P}_{i+1} - \mathbf{P}_i|}$$

$$\mathbf{e}_\eta = \frac{\mathbf{L}_i \times \mathbf{e}_\tau}{|\mathbf{L}_i \times \mathbf{e}_\tau|} \quad (14)$$

$$\mathbf{e}_\xi = \mathbf{e}_\tau \times \mathbf{e}_\eta$$

ここで、 \mathbf{P}_i は質点の位置ベクトル、 \mathbf{L}_i は流体による荷重の作用ベクトルである。

このように (13) 式のような座標変換行列を用いれば右辺は全て局所座標系から絶対座標系に変換することができる。同様に左辺の加速度 $\mathbf{a} = (a_{xi}, a_{yi}, a_{zi})$ についても

$$(a_{xi}, a_{yi}, a_{zi})^T = \bar{C}_i (a_{\tau i}, a_{\eta i}, a_{\xi i})^T \quad (15)$$

となるから、(13) 式を (12) 式に代入後、(15) 式に代入すれば全ての未知変数は絶対座標系へと変換される。その結果、図1から得られた運動方程式と併せて (12) 式は各質点における2階常微分方程式となり、ルンゲ・クッタ法などの数値計算を施すことにより適切な初期条件のもと各質点位置が得られることになる。

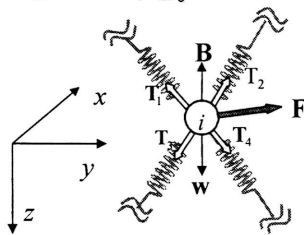


図1, 結節における質点の配置と作用する力

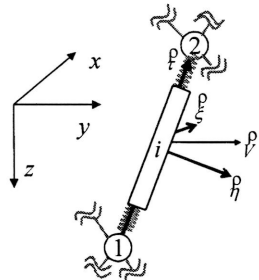


図2, 脚における質点の配置と座標系

蕃養殖施設 上述した計算モデルを適用し、本学

水産研究所奄美実験場に設置されているクロマグロ養成用大型生簀の水中形状と作用荷重を推定した。図3に本施設的设计用平面図を示す。施設は一边が16m、深さが10mの正八角柱の形状をしており、浮子綱から側網が垂下されている。底網、側網の目合はそれぞれ75mm、60mmである。この设计図面を基にNaLAを用いて流速0-50cm/sの定常流下における施設の形状と作用荷重を5cm/sごとに推定した。計算では浮子綱は水面に固定されているものとした。

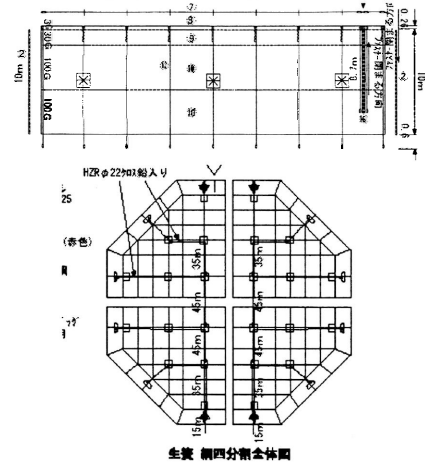


図3, クロマグロ大型生簀網平面図

実機の形状を計測するために実海域に設置されている大型生簀の底網の中央に深度ロガーを取り付け、網地の深度を計測した。また、周辺の流動環境を計測するため三次元電磁流速計を係留索に設置した。両者とも測定インターバルを5分として、2004年10月8日-11月15日の間計測した。得られた計測データを計算値と比較した。

結果および考察

異なる流速下における施設形状と作用荷重を計算し図に示した。流速が無い状態で重力と浮力だけが作用している状態を図4Aに、流速25cm/sと50cm/sの流速が水平方向に施設に垂直に差し込んでいる状態を図4B、図4Cにそれぞれ示した。流れは左から右に流れている。図では生簀の網地に作用する荷重がカラースケールで表示されるようになっており、荷重が大きくなるにつれ青から赤に変化するようになっている。

無流速下では浮力と重力だけが施設に作用するので生簀網は軸対象形状を示している。生簀の底網はシンカーラインの重さにより下向きにカタナリ形状を呈してかなり垂れ下がっており、最深部では18.1mとなっている。荷重は側面網のパネ

ルを仕切る立筋縄に集中していることが観察され、近傍の網地もほぼ同程度の張力が作用していることが見受けられる。このときに立筋縄に作用する荷重は最大で 54.2kgf である。直径 16mm のハイゼックスロープの立筋縄では破断強度が 2940kgf で作用荷重に対し十分な耐性を有しているが周辺の網地は 114kgf とロープに比べ 1/10 以下の強度となっている。

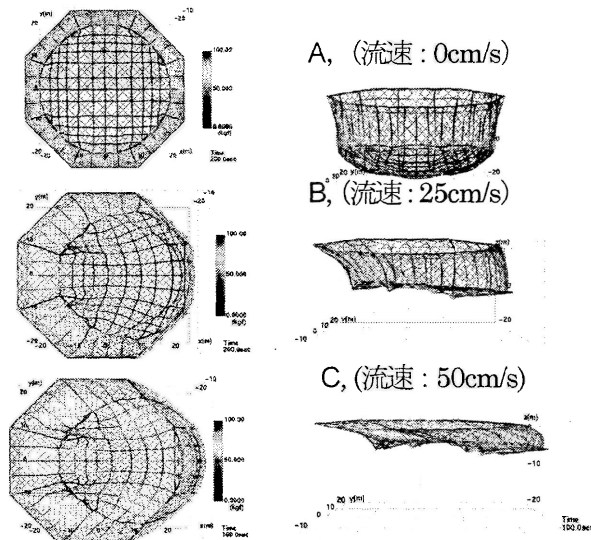


図4、大型生簀の形状と張力

流速 25cm/s では、網地形状は軸対象性を失い、底網がかなり上昇していることがわかる。底網の最深部は 9.0m となっており、無流速下に比べるとかなり浅く、底網の水深は 50%程度となっている。作用荷重は上流側で大きな部分が存在し、立筋縄で最大 116kgf の張力が作用していた。周囲の網地にも大荷重な部分が見受けられ、側面網地の破断強度が作用最大荷重とほぼ同程度あることを考えると、網地の破断に十分な注意を要することが推察できる。

流速 50cm/s では生簀はかなり変形しており、底網中央の水深は 3.4m しかない。空間容積は著しく減少しているのがわかる。立筋縄や近傍の側面網地に作用する荷重は 321kgf となり、もはや網地の破断強度限界を超えた値となっている。

実海域の計測結果を図5に示した。計測期間中の流速は 4cm/s をモードに持つ穏やかな流れであったが、10月19日は奄美大島に台風23号が接近した。このとき生簀網底部中央が最も吹かれ

上がった前後 30 分の平均流速は 21.4cm/s、深度ロガーの計測した最も浅い深度は 12m であった。計算では流速 20cm/s 時の底網中央の深度は 11.5m となっていることから実測値とほぼ同様の値が推定されていると考えられる。台風通過時には最大 31.8cm/s の瞬間最大流速が観測されているが、このときの立筋縄の最大荷重は計算値で 146kgf となることからこの付近の網地破断も懸念される。

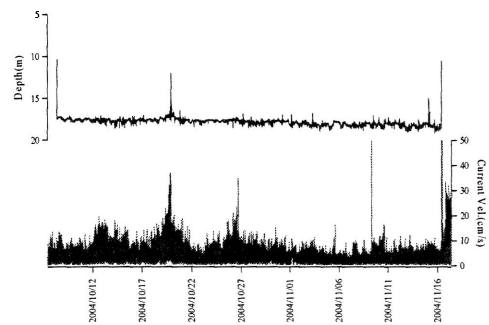


図5、実海域の生簀底網中央の水深と流速

今回は生簀本体の形状と作用荷重を NaLA により評価したが、今後は生簀係留系全体でどのような移動・変形や力が作用するのか算定したい。

謝辞

本学水産研究所奄美実験場の宮下盛教授、向井良夫氏および八木洋樹氏には現場実験遂行にあたりご協力頂いた。ここにお礼申し上げます。

文献

- 1)高木 力・鈴木勝也・平石智徳、網地の形状と運動に関する数値シミュレーション手法の開発、日本水産学会誌、2002; 68:320-326.
- 2)Tsutomu Takagi, Takashi Shimizu, Katsuya Suzuki, Tomonori Hiraishi, Yoshiki Matsushita and Toshihiro Watanabe, Performance of "NaLA": a fishing net shape simulator, Fisheries Engineering, 2003; 40: 125-134.
- 3)Katsuya SUZUKI, Tsutomu TAKAGI, Takashi SHIMIZU, Tomonori HIRAISHI, Katsutaro YAMAMOTO and Katsuaki NASHIMOTO, Validity and visualization of a numerical model used to determine dynamic configurations of fishing nets, Fisheries Science, 2003; 69: 695-705.
- 4)Tsutomu Takagi, Takashi Shimizu, Katsuya Suzuki, Tomonori Hiraishi, and Katsutaro Yamamoto, Validity and Layout of "NaLA": a Net Configuration and Loading Analysis System, Fisheries Research, 2004; 66: 235-243.
- 5)Takashi Shimizu, Tsutomu Takagi, Katsuya Suzuki, Tomonori Hiraishi and Katsutaro Yamamoto, Refined calculation model for NaLA, a fishing net shape simulator, applicable to gill nets Fisheries Science, 2004; 70: 401-411.
- 6)高木 力、漁具工学の数値シミュレーション技術とその可能性について日本水産工学会誌、2004; 41: 53-59.