

## 網地結節および脚へのナンバーリング手法の開発

久保 敏\*

### Development of a method for numbering the knots and bars of netting

Satoshi KUBO\*

**Abstract** In the field of fishing, there have been several traditional uses of netting (fishing nets) seen over the years. To achieve further development and improvement, experimentation using a field survey or tank test is required. Recently, some attempts at numerical simulation to determine netting movement have taken place. In numerical simulations of this type, each knot and twine(bar) of the netting must be numbered. Generally, when a net texture is laid flat, the knots and bars of the net are placed in orderly rows. Therefore, in the case of simple net-texture shapes, this work is not too difficult and can even be done manually.

However, if this work could be done with a computer, the task of numbering various net shapes would become easier and faster.

This document is a report on a method for numbering the knots and bars of variously shaped net textures with a computer by applying Cauchy's integral formula in a complex number field. After numbering is completed using this method, the data is processed in order to obtain a form that can be used for numerical simulation. Also, one example of sea-surface crawl-netting moored by ropes is shown in the first paragraph of the computer simulation.

**Key words:** Cauchy's formula, automatic numbering, netting movement, computer simulation

我が国では、沿岸から沖合にかけて各種の養殖業が営まれている。魚類養殖では、海面付近に設置された生簀（合成繊維等の網地、枠材、浮体およびロープなどで構成）が使用されている。一方、網漁具の改良・開発について、従来は現地実験あるいは水槽実験などをもとに試行錯誤的に行われる傾向があった。生簀や網漁具は一般に流体からの抗力、あるいは網糸（脚）に働く張力など複雑な力学的関係により形状が保たれているが、流体中でのそれらの形状や運動については未知の面が多い。しかし最近、こうした分野で数値シミュレーションによる解析の試み（Theret *et al.*, 1992; 久保, 1998; Rong *et al.*, 2002; 高木ら, 2002;

Katsuya *et al.*, 2003）が行われている。そのような数値シミュレーションがより発展し、流体中でのそれらの形状や運動に関するより細かい情報を得ることが可能になれば、例えば、生簀の水中での形状の解明や、係留ロープにかかる力を推定することができ、より合理的な設計の手懸かりを得ることができる。

さて、網地で構成された生簀や漁具の水中での挙動に関する数値シミュレーションを行う際、事前の準備として網地の各結節へ識別番号を付し、この番号をもとに計算処理を進める方法が合理的である。前述の網漁具の数値シミュレーションに関する文献でも多くは結節ごとに運動方程式を作成し、その軌跡を求めるこ

2003年12月15日受理 (Received on December 15, 2003)

水産総合研究センター業績 A 第46号 (Contribution No. A 46 from the Fisheries Research Agency)

\* 水産工学研究所 〒314-0421 茨城県鹿島郡波崎町海老台7620-1 (National Research Institute of Fisheries Engineering, Ebidai 7620-1, Hasaki, Kashima, Ibaraki, 314-0421, Japan)

とに重点を置いて記述されている。

3次元の形状を持つ生簀網のような複雑な網構造物を対象として各結節に識別番号（あるいは位置座標）を付すことは一般的には複雑な作業となる。そこで、まず2次元である平面状の網地を適当な形状に切り取り、必要な枚数を組み合わせ（縫い合わせ）て3次元の形状を有する生簀網を組み立てることを想定した。

平面上に置かれた自然の状態の網地の結節および脚は一定の間隔で規則正しく並んでおり、特に正方形や長方形のようなシンプルな形状の模型網程度の場合では各結節等に識別番号を付す作業は若干の工夫をすれば、手作業でも特に難しいことではない。また計算機による方法として、外形を構成する線分の上下、左右等を指定し、条件に合う結節を見いだす方法がまず第一に考えられる。しかし形状が複雑となり、特に凹凸を含むような場合は、その判定プログラムは複雑となり、また形状ごとに新たにプログラムを組み直す必要がある。

ここでは任意形状の網地であっても、外形の形状を指定し定式化された計算を行うのみで、これらの作業が可能となる方法として複素関数の分野で用いられるコーシーの積分公式を応用した手法を試みた。さらに、この結果を海面に係留された生簀に応用した例について報告する。

方法

本報告では、最終的に5枚の長方形の網地で構成される生簀網を想定する。2次元の網地から必要な部分を裁断する場合、計算処理上、結節が裁断された網地の内部にあるか外部にあるかを判定する必要がある。また、この様にして必要な網地を構成する結節と判定された場合はそれに識別番号を与え、かつ位置座標を対応させる。以下のその取り扱いについて述べる。

結節に識別番号を付与する方法

ある点（本論の場合、結節の位置）が閉曲線で囲まれた内部にあるか外部にあるかを数値的に表す場合、閉曲線に沿って一周する線積分の値が“1”か“0”になるコーシーの積分公式の性質が応用できると考えられる。コーシーの積分公式として、ここでは次式を用いる。

$$f = \frac{1}{2\pi i} \oint \frac{dz}{z - \zeta} \quad (1)$$

ここで、

z: 閉曲線上の点座標（複素数）

ζ: 閉曲線の内部、あるいは外部にある点の座標（複素数）

を示す。

Fig. 1 に示すように閉曲線 c に沿って反時計回りにこの積分を行うと、ζ が閉曲線 c の内部にある場合と外部にある場合とでは積分値 f の値が異なり、次の様になる。

$$\zeta \text{ が閉曲線 } c \text{ の内部にある場合: } f=1 \quad (2)$$

$$\zeta \text{ が閉曲線 } c \text{ の外部にある場合: } f=0$$

この性質を応用して、Fig. 2 に示すように平面状に広げられた網地上に閉曲線に相当する一定形状の外形枠を当てはめ、結節座標を ζ として、この点の f の値を求める。結節がこの枠の内部にあると判断された場合には必要とする網地を形成する結節であるとして扱い、外部に有ると判断された場合は排除する。複素数表示を用いて、

$$z = x + iy \quad (3)$$

$$\zeta = \xi + i\eta$$

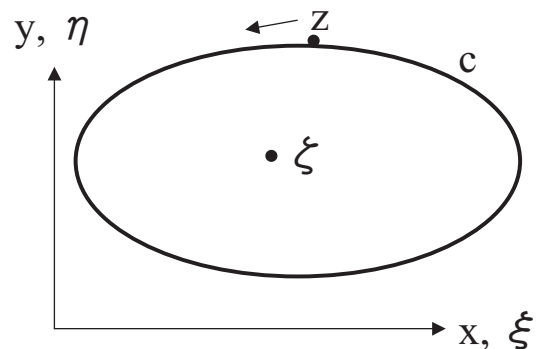


Fig. 1. Complex plane for Cauchy's integral formula

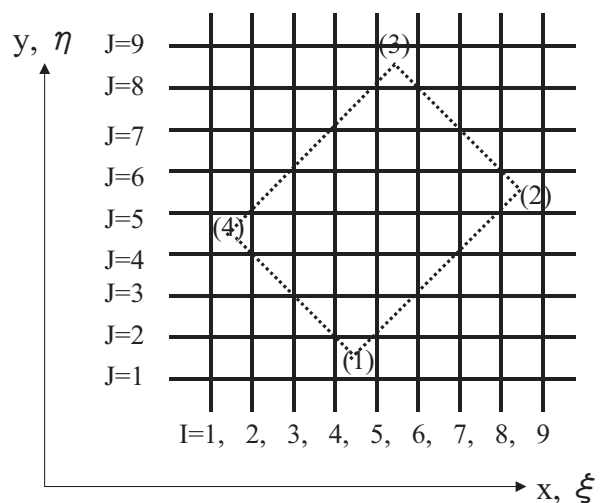


Fig. 2. Net texture arrangement and coordinates

とおくと (1) 式は次式となる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \oint \frac{\{i(x-\xi)dy - (y-\eta)dx\} - i\{(x-\xi)dx + (y-\eta)dy\}}{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2} \quad (4)$$

上式の値は複素数であるが閉曲線を一周する積分結果は 0 か 1 の実数となり、虚数部は常に 0 となる。このため上式の実数部分のみを取り出し  $g$  とおけば、次式となる。

$$g = \frac{1}{2\pi} \oint \frac{(x-\xi)dy - (y-\eta)dx}{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2} \quad (5)$$

この積分を計算機で行うため閉曲線を離散化して近似的に次のような和で表す。

$$g \doteq \frac{1}{2\pi} \sum_n \frac{(x_{(n)} - \xi)\Delta y_{(n)} - (y_{(n)} - \eta)\Delta x_{(n)}}{(x_{(n)} - \xi)^2 + (y_{(n)} - \eta)^2} \quad (6)$$

閉曲線に沿う微小な線分の長さを  $\Delta s$  とし、 $\Delta s$  が横軸となす角を  $\theta_{(n)}$  とすれば、以下のように表される。

$$\begin{aligned} \Delta x_{(n)} &= \Delta s \cdot \cos \theta_{(n)} \\ \Delta y_{(n)} &= \Delta s \cdot \sin \theta_{(n)} \end{aligned} \quad (7)$$

よって (6) 式は次式となる。

$$g \doteq \frac{1}{2\pi} \sum_n \frac{\Delta s \{ (x_{(n)} - \xi) \sin \theta_{(n)} - (y_{(n)} - \eta) \cos \theta_{(n)} \}}{(x_{(n)} - \xi)^2 + (y_{(n)} - \eta)^2} \quad (8)$$

結節の位置を  $(I, J)$  の組で表し、座標は  $(I=1, J=1)$  の位置を基準と仮定し次式で計算した。

$$\begin{aligned} \xi &= l_0 (I-1) \\ \eta &= l_0 (J-1) \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 $l_0$  は脚長を表す。一方、閉曲線上の座標  $(x_{(n)}, y_{(n)})$  および微小線分の

角度は次のように求めた。例えば Fig. 2 で示す長方形の頂点 1  $(x_1, y_1)$  から頂点 2  $(x_2, y_2)$  に向かう辺の場合は、

$$\begin{aligned} \text{辺の長さ: } L_{12} &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \\ \text{余弦: } \cos \theta_{(n)} &= (x_2 - x_1) / L_{12} \\ \text{正弦: } \sin \theta_{(n)} &= (y_2 - y_1) / L_{12} \\ \text{座標: } x_{(n)} &= x_1 + n \Delta s \cdot \cos \theta_{(n)} \\ & y_{(n)} = y_1 + n \Delta s \cdot \sin \theta_{(n)} \\ 1 \leq n \leq \text{nint} (L_{12} / \Delta s) \end{aligned} \quad (10)$$

ただし  $n$  は整数で、 $\text{nint}$  はかっこ内の小数点以下を四捨五入することを意味する。

### 各結節での計算結果

ここでは、まず本方法の数値計算上の判定精度について模型網規模について検討した結果について述べる。一つの例として Fig. 2 に示すように、閉曲線として破線で示す頂点 1, 2, 3, 4 で囲まれる長方形 (20cm × 15cm,  $l_0 = 3.54$ cm) を外形枠とした網地の場合について今回の方法で計算した結果を以下に示す。ここでは、 $\Delta s$  は 0.01cm, 0.1cm, 1.0cm の 3 種類で計算し、その大きさによる影響を確認した。(8)式で  $g$  の値を計算する時、結節位置が閉曲線上にある場合は分母が 0 になるため計算できない。この時は閉曲線内部に含まれるとして処理した。計算された結果をすべての結節について示すのは煩雑であるので 5 列目 ( $I=5$ ) の場合について示す (Table 1)。

内部に含まれると判定された結節に順に識別番号を付し、同時にこの結節の位置を表す  $(I, J)$  の組、および位置座標のデータを作成した例を Table 2 に示す。

### 結節の位置関係

前述の作業によって網地を形成している結節、およびその位置情報が得られた。次にこれらの結節の互い

**Table 1.** Calculation result at each  $\Delta s$  value (in case of  $I=5$ ).

Position		Calculated $g$			Judgment
I	J	$\Delta s=0.01$ cm	$\Delta s=0.1$ cm	$\Delta s=1.0$ cm	(0: Ext., 1: Int.)
5	1	3.228E-04	3.225E-03	3.223E-02	0
5	2	*1.000000	*1.000000	*1.000000	1
5	3	1.000059	1.000579	1.004994	1
5	4	1.000013	1.000114	1.000539	1
5	5	0.9999993	0.9999933	0.9993478	1
5	6	1.000010	1.000114	1.000539	1
5	7	1.000059	1.000579	1.004993	1
5	8	*1.000000	*1.000000	*1.000000	1
5	9	3.226E-04	3.225E-03	3.223E-02	0

\* means that the knot is on a border and its value is set

の位置関係をより詳しく把握するためTable 2 を用いて、網地を形成しているある結節に隣接する結節の個数と、それらの識別番号を調べる。位置  $(I, J)$  で示される結節を中心として、その周囲には一般に以下に示す4カ所の結節が存在する (Fig. 3)。

$$(I, J+1), (I-1, J), (I, J-1), (I+1, J) \quad (11)$$

これら4カ所それぞれについてTable 2 のデータに含まれる場合は必要とする網地を形成している結節と判断する。そして最終的に中心の結節  $(I, J)$  に隣接する結節の個数およびそれらの識別番号を示すデータを作成する (Table 3)。

**脚へ識別番号を付与する方法**

網地形状の運動シミュレーションにおいては、各結節に質量が集中していると仮定し、脚に働く張力、流体抵抗等はこの質量に作用するとして各結節ごとに運動方程式を作成するのが一般的である。この時、例えば脚に働く張力を計算した場合、その値を両端の結節に互いに逆になるように与える、また脚に働く流体抵

抗を計算した場合についても、その値を両端の結節に働くように割り振る。こうした作業を全脚について行った後、最終的に各結節ごとに作用する力の合力を求め運動方程式を解くことになると考えられる。このため、次のようにして脚に識別番号を与える。

Table 3 に示される中心の結節と隣接する結節の関係を用いて、中心の結節と隣接する結節の識別番号の大きさを比較し、隣接する結節の識別番号が大きい場合には、この結節同士の組み合わせに番号を与え、それを脚の識別番号とする。逆に隣接する結節の識別番号のほうが小さい場合は、すでにこの組み合わせの脚には識別番号が付されているとして新たな番号を付与しない。これにより同一の脚に再度識別番号を与えることが避けられる。この作業を行うことによって各脚に順に識別番号が付されると同時に、脚両端の結節の識別番号を知ることができる。その結果をTable 4 に示す。

**結果と考察**

**結節および脚に対する識別番号の付与結果**

以上の手順に従ってFig. 2 で示される平面状の網地から長方形の菱目網を取り出した結果をFig. 4 に示す。○印で囲まれた1から31までの数字で示す結節が指定された長方形の枠の内部に有り網地を形成していると判定され、また各結節を結ぶ脚にも1から48まで識別番号が付され、かつ脚両端の結節番号についてのデータを作成することが可能となった。

**判定条件**

今回、閉曲線に沿う微少な線分の長さを $\Delta s$ を3種類変化させその大きさによる影響を調べた。その結果、いずれの場合もほぼ理論通りの値を示し $\Delta s$ の違いによっても特別な大きな変化は見られず判定は比較的容易であった。(8)式は無次元であり単位の影響は無いが、問題となるのは必要な網地形状を決めた後、その外形枠

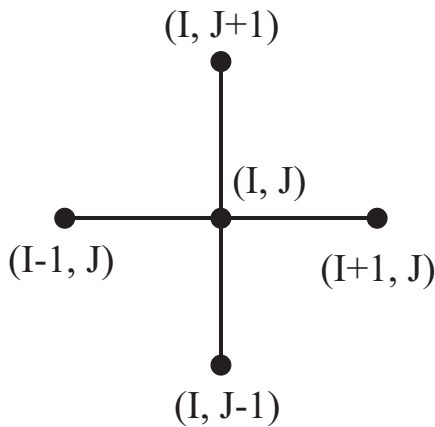


Fig. 3. Knot arrangement around a center knot

Table 2. Each knot position and coordinate value

Knot number	I	J	x-axis (cm)	y-axis (cm)
①	2	4	7.1	14.1
②	2	5	7.1	17.7
③	3	3	10.6	10.6
④	3	4	10.6	14.1
⑤	3	5	10.6	17.7
⑥	3	6	10.6	21.2

(The rest is omitted.)

Table 3. Center knot and the neighboring knots (See Fig. 4)

Center knot number	Quantity of neighboring knots	Neighboring knot numbers
①	2	②, ④
②	2	①, ⑤
③	2	④, ⑧
④	4	⑤, ①, ③, ⑨
⑤	4	⑥, ②, ④, ⑩
⑥	2	⑤, ⑪

(The rest is omitted.)

に相当する線が結節のごく近くを通る場合の取り扱いである。判定基準の設定の仕方によって内部、外部の判定が異なる場合もあり得る。今回用いた判定基準は、計算機による数値計算上の制約から外形枠の線上から結節までの距離が微小な値  $\delta$  (cm) 未満の場合には線上にあると判定した。また、閉曲線に沿う微小な線分の長さを便宜上  $\Delta s = \delta$  と設定し、且つ  $\delta < l_0/2$  とした。この時、(8)式による計算結果が  $g > 0.5$  の値を示した場合、外形枠の内部にあり網地を構成するために必要な結節であると判定した。

**他形状の網地の場合**

以上、平面状の網地から長方形の菱目網を取り出す例を示したが、その他に参考までに正三角形、円形の2種類の網地を裁断し、各結節、および脚に識別番号を付した例を示す (Fig. 5)。Fig. 2 の座標系に正三角形の外形枠を設定し、前述の方法により各結節および脚に識別番号を付した。網地は結節と脚により成り立っているため、当然ながら正確な正三角形の形状は得ら

れない。特に周辺部分で凹凸を生じる。また、図中の正三角形の頂点 1, 2, 3 の近くに黒色の三角形で示した点を示している。これは初期の計算では網地を構成する結節と判定されたものであるが、これらは全て隣の結節と1本の脚でしか結ばれておらず、実質的に網地としての意味をなさない。前述の「方法」の中の「結節の位置関係」の項で得られた結果から、隣接する結節の個数が1個の場合は、この結節は排除している。外形が円形状の場合も同様である (結節数が多いため一部の識別番号のみを記載した)。

このことは、複数の網地を網構造物として組み立てる場合、互いの網地の辺と辺を対応させる場合に問題となる。例えば2枚の網地のある辺と辺を対応させる場合、互いの結節の数が同じであればそれぞれを対応

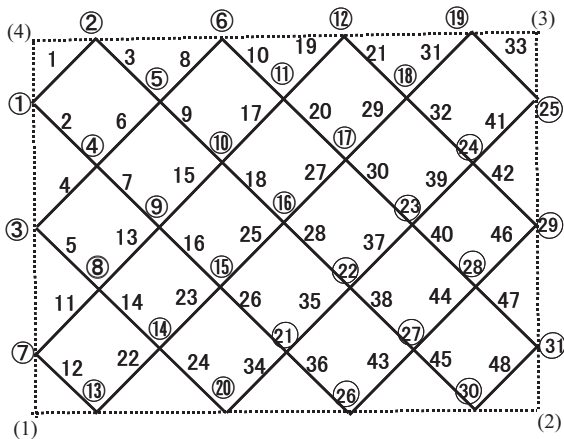
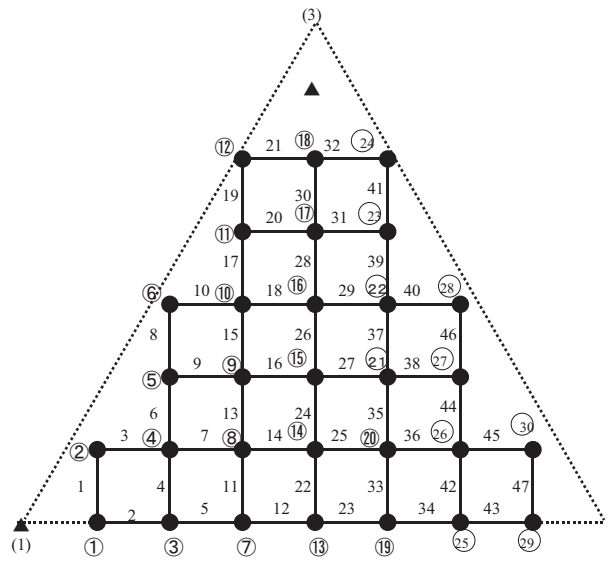


Fig. 4. Final numbering of each knot and bar



**Table 4.** Bar number and knots at both ends

Combination of knots		Bar number
Center knot number	Neighboring knot number	
①	②	1
①	④	2
②	①	ignored
②	⑤	3
③	④	4
③	⑧	5
④	⑤	6
④	①	ignored
④	③	ignored
④	⑨	7

(The rest is omitted.)

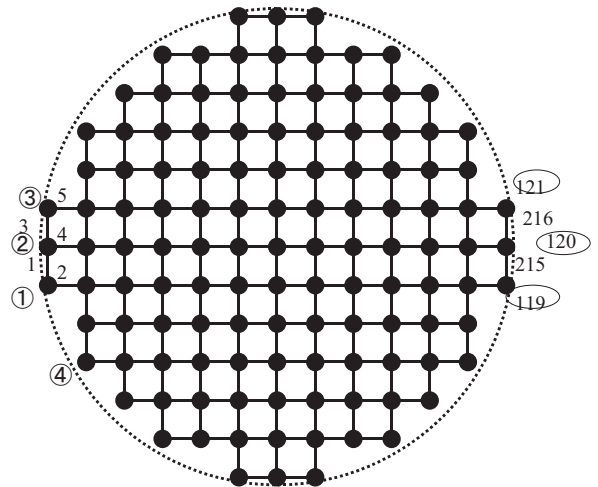


Fig. 5. Examples of other net texture shapes (upper: regular triangle, lower: circle).



させればよい。これは、長方形や、正方形のように辺を形成する結節が規則正しく並んでいる場合には比較的容易であるが、例えば、三角形の辺と長方形の辺を対応させる場合には互いに辺を構成する結節の数が異なる場合があり得るため、計算機上での取り扱いが複雑となる。こうした取り扱いについては今後の問題とする。

#### 実物規模の網地の場合

前述までの結果は模型網程度の規模を想定した結果であるが、さらに実物規模の網地に対して本方法の有効性を検証した。ここでは10m×10m(脚長 $l_0=3.54\text{cm}$ )の比較的大きな網地を想定し、これをFig. 2の座標系に外形枠として設定した。なお、 $\Delta s$ の影響も同時に調べ、計算条件として $\Delta s$ を、0.01, 0.1, 1 cmの3通りとした。その計算結果の一例として、この正方形の網地のほぼ中央部分(対角線)を通る線上( $I=222$ )にある結節での計算値 $g$ の値をFig. 6に示す。

3通りの $\Delta s$ の値に対して、いずれの場合も結節の位置が外形枠の外部( $1 \leq J \leq 21$ と $422 \leq J \leq 442$ )と内部( $22 \leq J \leq 421$ )では明確に計算値 $g$ の値が異なり、実物規模の網地の場合についても、本方法は有効である。また、この程度の $\Delta s$ の値の違いは判定結果に殆ど影響しないことがわかった。

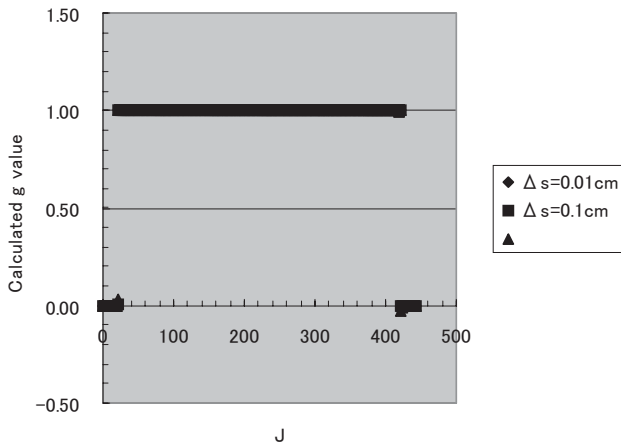


Fig. 6. Calculated result  $g$  for a big net plate (10m×10m,  $l_0=3.54\text{cm}$ ). (Ext.:1-21, Int.: 22-421, Ext.: 422-442)

#### 発展的応用の可能性

以上の結果の応用として、5枚の菱目網の網地を組み立て直方体状の箱網を作成することを試みた。各網地の寸法はTable 5の通りである。

5枚の網地は前述の処理を経た後、Fig. 7に概要を示す様に網地番号3を底面とし、その周辺に他の4枚の網地が側面となるように配置すると同時に、座標軸に対し直角になるように回転し箱形の網地形状を作成した例をFig. 8に示す。また、これを海面に設置した生簀に応用した例をFig. 9に示す。ここでは前述の手続きを経て得られた網地を生簀網として2個並べ海面に配置し、係留ロープで海底に固定した例を示した。

#### 結 言

生簀等の網漁具の運動について数値シミュレーションを行うに先立って、複素関数の分野のコーシーの積分公式の性質を応用して、定式化された計算を行うことにより網地を形成する結節および脚に自動的に識別番号を付し、且つそれらの位置関係を表す方法を検討し、その有効性を確認した。

今回は長方形の菱目網のみでなく正三角形、円形、及び比較的大きな正方形の網地にも対応できることを示したが、さらに、複雑な形として例えば中央部分に穴があいたようなドーナツ形状をした網地に対しても基本的には同じ考え方で対応が可能であると考えられる。ただ特殊な網地形状として脚長の幅の細長い切れ込みが有るような場合には、この部分に含まれる脚には識別番号の付与は不要であるケースが有るため、この場合は特別な対応が別途必要となる。

また今回の成果の応用として5枚の長方形の網地の結節、脚に連続した識別番号を付した後、各結節の位置座標を座標変換等を用いて3次元的形状の箱形に組み立て、これを生簀網として海面に浮かべ、その水中での挙動について数値シミュレーションを行える前段階までの道筋を示すことができた。

Table 5. Specifications of each net texture

Net texture number	Width		Height		Total number	
	Length(cm)	Meshes	Length(cm)	Meshes	Knots	Bars
1	60	12	80	16	412	768
2	100	20	60	12	512	960
3	100	20	80	16	676	1280
4	100	20	60	12	512	960
5	60	12	80	16	412	768

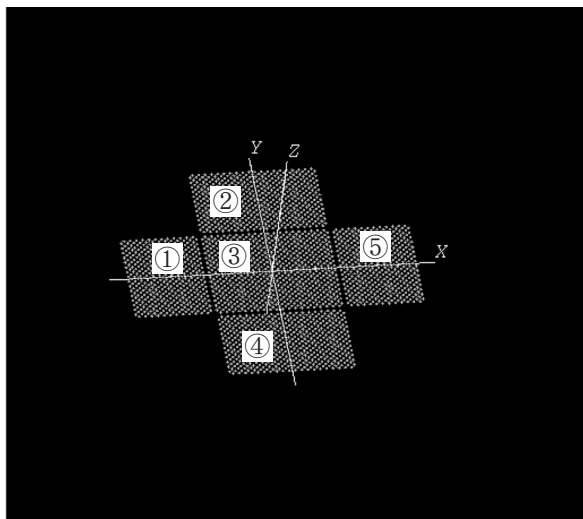


Fig. 7. 5 Net textures at the coordinates

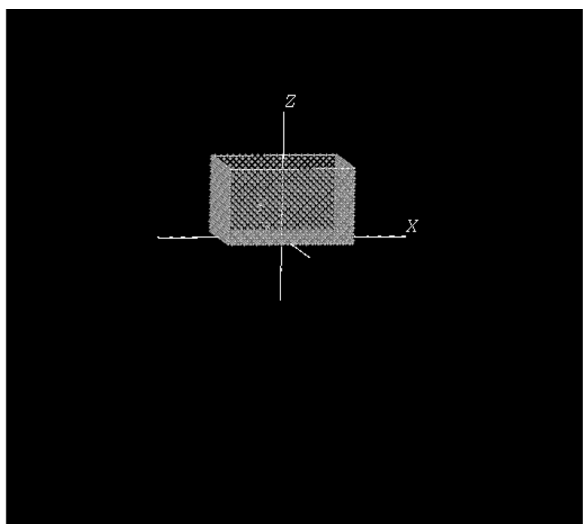


Fig. 8. Constructed netting box

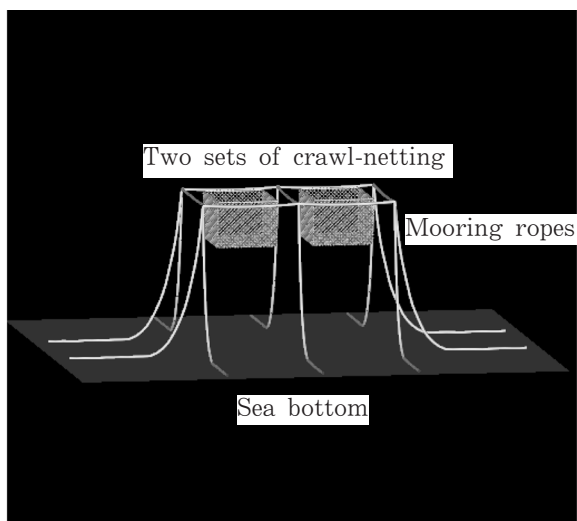


Fig. 9. Model case of sea-surface crawl-netting moored by ropes at the sea bottom

## 文 献

Katsuya S., Tsutomu T., Takashi S., Tomonori H., Katsutaro Y., and Katsuaki N., 2003: Validity and visualization of a numerical model used to determine dynamic configurations of fishing nets. *Fish Sci*, **69**, 695-705.

久保 敏, 1998: 流体中での網地の運動に関する考察. 日水学会中部支部大会講演要旨集, pp.9-10.

高木 力, 2002: 数値計算による柔構造物形状と運動の推定, 「漁具物理学」(松田皎編), 成山堂書店, 東京, pp.161-185.

高木 力, 鈴木勝也, 平石智徳, 2002: 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. 日水誌, **68**, 320-326.

Rong W., Fuxiang H., and Tadashi T., 2002: A static analysis of the tension and configuration of submerged plane nets. *Fish. Sci*, **68**, 815-823.

Theret F. and Marichal D., 1992: Determination of reticulate. structure shapes and tensions placed in a uniform current, in "Design of Marine and Offshore Structures" (ed. by Murthy T.K.S. and Alaez J.A.), Computational Mechanics Publications, Boston, pp.799-813.