触刺激に対する ζ ポイントと網目に遭遇した魚の 前進行動への影響

Martasuganda Sulaeman, 小倉 芳子, 松岡 達郎, 川村 軍蔵

(1997 年 7 月 14 日受付)

ζ -point against Tactile Stimulation and Its Effect to Forward Motion of Fish upon Contact with a Mesh

Martasuganda Sulaeman,^{*1,*2} Yoshiko Ogura,^{*3}
Tatsuro Matsuoka,^{*3} and Gunzo Kawamura^{*3}

Two series of glass-tank experiments with blinded fish were conducted to investigate the existence of a ζ -point (a body section over which external stimulation alters forward and back ward motions of fish) against tactile stimulation and its effect in determining the direction of swimming upon contact with a net webbing. *Cyprinus carpio*, *Salmo mykiss*, *Tilapia mossambica* and *Lepomis macrochirus* were tested. Longitudinally random positions over the bodies of these fish were stimulated using thin sticks and they moved either forward or backward according to the location of the stimulated positions. *Cyprinus carpio* which encountered net webbing expanded in a tank proceeded into a mesh at different ratios under the conditions of three mesh sizes and three hang-in ratios. Geometrical analysis of contact of a netting twine and a fish body section indicated that the probability of proceeding into an encountered mesh increases with mesh size and is modally maximised at a certain hang-in ratio. It was concluded that, (1) a tactile ζ -point, ζ_t exists at a body section which is unique to each species, and (2) the probability for fish to proceed into a mesh of gillnet is affected by the position of ζ_t , body form and size, mesh size and hang-in ratio.

キーワード: ζ ポイント, 触刺激, 行動, 刺し網, 漁獲過程

刺し網の選択性に関してはこれまで数多くの研究がなされてきたが,¹⁾ その発現過程, 特に網地に遭遇した魚が網目に進入する過程には未解明な点も数多く残されている。

岡²⁾や神田³⁻⁴⁾が, 魚の網地への接近と網目の通過が網糸の太さ, 目合い, 縮結の違いに影響され, その要因が網の視認され方の差異にあるとして以来,⁵⁾ 刺し網に接近した魚の行動には視覚刺激が関与していると考えられてきた。藤森ら^{6,7)}の最近の研究でも, 網の視認度を刺し網の漁獲効率に対する大きな要因としている。梨本⁵⁾は刺し網の漁獲機構を物理的, 幾何学的に解析したが, 魚が網目の4脚と接触するまでの過程は無視しており, 十分に網目に進入した魚のみを取り扱ったと言える。藤森ら⁷⁾の刺し網の漁獲機構に関する研究や,

Kawamura,⁸⁾ 松岡ら⁹⁾の刺し網の選択性計算法に関する研究でも, 魚が網目に遭遇した後網目に進入する機構に関しては考慮されなかった。

本研究では, 網地に遭遇した魚の行動は, その網糸に接触することによる刺激によっても支配されるのではないかと考え, 触刺激に対する ζ ポイントを想定した。 ζ -point は黒木¹⁰⁻¹¹⁾が電載漁法の研究の中で発見したものである。魚体の両側から電気刺激を与えたとき, 魚体の長さ方向のどの位置に刺激をあたえるかによって魚が前進するか後退するかが分かれることを確認し, 前進後退行動が反転する境界となる魚体上の刺激断面の部位を ζ -point と名づけた。本研究では, 触刺激に対しても ζ -point に相等する断面が存在し, 刺し網に接触した魚の行動に関与するのではないかと考えた。ここでは, この

^{*1} 鹿児島大学大学院連合農学研究科 (The United Graduate School of Agricultural Sciences, Kagoshima University, Shimoarata, Kagoshima 890-0056, Japan).

^{*2} Permanent address: Faculty of Fisheries, Bogor Agricultural University (IPB), Kampus IPB Darmaga, Bogor 16610, Indonesia.

^{*3} 鹿児島大学水産学部 (Faculty of Fisheries, Kagoshima University, Shimoarata, Kagoshima 890-0056, Japan).

断面を ζ_i ポイントと称し、黒木による ζ -pointと区別し、両者を合わせて ζ ポイントと呼ぶことにする。

上の仮説に基づき、魚体上に触刺激に対する ζ ポイントすなわち ζ_i が存在し、網地に遭遇した魚の前進と後退への分岐が ζ_i ポイントによって影響を受けることを確認することを本研究の目的とした。

材料および方法

ζ_i ポイント確認実験 ζ_i ポイントの有無を確認する実験を、コイ *Cyprinus Carpio*、ニジマス *Oncorhynchus mykiss*、ティラピア *Tilapia mossambica*、ブルーギル *Lepomis macrochirus* の4種の淡水魚を対象に、長さ59 cm、幅29 cm、水深25 cmのガラス製小型水槽で行った。供試魚には、それぞれの魚種で体長、鰓蓋部胴周長の差が比較的小さい個体5尾ずつを用いた (Table 1)。供試魚への視覚刺激の影響を除くために、眼球に3%の塩化ベンゼトニウム ($C_{27}H_{42}ClNO_2$) を、ブルーギルには0.03 ml、その他の魚種には0.05 ml注射して失明させ、1週間から1ヶ月蓄養し、眼球およびその周辺が治癒して平静な行動を見せる状態になった後に実験に供した。供試魚を1尾ずつ水槽に入れ行動が落ち着きかつ遊泳が止まったときに、直径1.9 mmの竹製刺激棒を魚体長さ方向のランダムな位置に体側両側から同時に挟むように接触させ、この時の魚の行動を正横からビデオカメラで録画した。これを1試行とする。一回の試行ののち、鰓蓋と鰭の動きから魚の行動が落ち着いたと判断されてから次の試行に移り、これを1尾当たり約150試行繰り返した。1尾当たりの実験所要時間は約4~6時間であった。

ビデオ画像をもとに、試行ごとに鰭の動きと体幹の運動方向から供試魚の前進後退を判定した。静止画像から魚の画面上の体長と吻端から刺激断面までの距離 L_s を計測した。

ある相対刺激位置 L'_s を刺激したときの前進率 $R_f(L'_s)$ は、その位置での試行回数 N_c とそのうちの前進した回数 N_f の比とした。ここで、 L'_s は L_s を尾叉長または全長 L で相対化したものである。

$$R_f(L'_s) = \frac{N_f}{N_c} \quad (1)$$

$$L'_s = \frac{L_s}{L} \quad (2)$$

網目進入実験 上の実験と同様に失明させたコイ5尾を用い、遊泳中に網地に遭遇したときに前進行動を継続する率を求める実験を行った。ここで魚の網地との遭遇とは、網地に接近してきた魚の吻端が網地面を通過することとする。幅75 cm、奥行き42 cm、水深30 cmのガラス張り小型水槽の中央を仕切るように網地を展張し、供試魚1尾ずつを入れて自由に遊泳させた。魚が前進しつつ頭部から網地にまっすぐに遭遇したときの行動を、ビデオカメラで1尾当たり平均165回録画し、これより前進および後退した回数を得た。上の実験を、目合いを87 mmで一定とし縮結（内割）を0.39, 0.58, 0.70に変化させた場合と、縮結を0.39で一定とし目合いを60 mm, 87 mm, 140 mmに変化させた場合で行った。供試魚の尾叉長と最大胴周長はTable 1に示すとおりで、上の目合いのすべての場合に、最大胴周長は網目内周長より小さく、魚の網目の通過が可能なものであった。

与えられた目合い M 、縮結 s の条件のもとで、魚が前進し網目への進入行動を継続する率（前進継続率） $R_i(M, s)$ は、網地への頭部からの遭遇回数 N_e とそのうちの前進した回数 N_i の比とした。

$$R_i(M, s) = \frac{N_i}{N_e} \quad (3)$$

Table 1. Lengths and body girths of fish of four species tested in two experiments (mm)

Experiment-A								Experiment-B	
Trout		Carp		Tilapia		Bluegill		Carp	
L_b	G_o	L_f	G_o	L_t	G_o	L_f	G_o	L_f	G_m
211	38	216	57	250	48	164	46	119.8	86.4
214	38	206	56	196	38	143	36	112.3	84.1
210	41	219	58	218	38	156	38	118.0	91.0
210	41	215	54	190	35	130	34	124.1	88.1
208	42	218	55	200	37	116	29	116.9	84.0

Experiment-A and -B stand for; A for confirmation of existence of ζ_i -point and B for examination of effects of mesh size and hanging ratio to proceeding into encountered mesh. L_b , L_f and L_t stand for body length, fork length and total length. G_o and G_m are operculum girth and the maximum body girth.

結 果

ζポイント確認実験 実験より求めた魚種別の前進率を Fig. 1 に示す。ここで、ティラピア、ブルーギル各1尾は、行動を観察した結果から完全には失明していなかったと考え、資料から除いてある。記入した曲線は、供試魚ごとに前進率の変化を相対刺激位置をパラメータとした正規確率分布関数で近似したものである。4種のすべての個体で、接触刺激が魚体前方に加わると後退し後方に加わると前進したため、すべての供試魚種でζポイントが存在すると判断した。ただし前進と後退の入れ替わりはある刺激断面を境にして突然起こるのではなく、ある範囲にわたってばらついていた。

実験値を近似した曲線より前進率が0.5となるときの刺激位置に注目すると、すべての魚種でおおむね主鰓蓋後端付近の断面にあった。その位置はニジマスで平均0.203でもっとも前より、ブルーギルで平均0.338ともっとも後よりで、種によって異なっていたが、同一魚種の個体ではほとんど同じ位置にあった。このことから、ζポイントの位置は種ごとに固有のものであると考えた。黒木の実験でもζ-pointの位置に関して同様の結果が得られている。¹⁰⁻¹¹⁾ 後退・前進がほぼ安定して示される前進率を0.025と0.975とし、これらに対応する相対刺激位置の範囲に注目したところ、コイ、ニジマスでは0.064と0.127、ティラピア、ブルーギルでは0.216と0.209であった。これは、前2者では刺激位置の狭い範

Fig. 1. Observed ratios of forward motion when body sections were tactilely-stimulated at random and normal probability distribution curves which fit observed ratios for four tested species; (a) trout, (b) carp, (c) tilapia and (d) bluegill.

The bracketed value under the horizontal axis shows an average of relative positions which give a 0.5 value of probability distribution for the tested fishes.

$$d = (1-r) \frac{M}{2} \sqrt{2s-s^2} \quad (6)$$

である。ここで r は、網目の中心 O から、魚体断面の中心 o を通り網糸に平行な直線までの距離を、 O から網糸までの距離で相対化 ($r = \overline{OS}/\overline{OR}$) したものである。

仮定より、魚体断面は任意の断面における体幅、体高の半分 a, b を用いて楕円で近似する。

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (7)$$

ζポイント近傍における a と b は体長方向に連続で、それぞれを尾叉長で相対化した a/L_f と b/L_f は、体長方向の相対位置 L'_s をパラメータとする2次関数 $f_a(L'_s), f_b(L'_s)$ で近似できるものとする。

上に基つけば、魚体断面の中心 o を通り PQ に平行な直線が、網目の中心 O から相対距離 r にある線上に位置したとき、魚体断面と網糸が接するのは以下の判別式 D を満たす場合である。

$$D = b^2 + a^2 \cdot c^2 - d^2 = 0 \quad (8)$$

a と b の体長方向での変化の様子が異なるため、 a と b の比は一定ではなく、(8)式から一義的に a, b を決定することはできないので、ここではある r に対して、 L'_s を変えつつ、 $f_a(L'_s), f_b(L'_s)$ から得られる a, b を用い、 D^2 を最小とする a, b の組みを与える L'_s を繰り返し法による漸近解として求めた。この L'_s を、魚体中心 o が網目中心から相対距離 r で網目に接近してきた魚に網糸が触れる魚体上の位置とし、ζポイント確認実験から得た前進率を近似した正規確率分布関数の式に適用して、この魚が網目内で前進する確率 $P_1(r, M, s)$ を求めた。

一方、網目のランダムな位置に進入した魚の魚体中心が網目中心から相対距離 r 、幅 Δr の微小帯状範囲に入る確率 $P_2(r)$ は幾何学的に以下で表わせる。

$$P_2(r) = \left(r + \frac{1}{2} \Delta r \right)^2 - \left(r - \frac{1}{2} \Delta r \right)^2 = 2\Delta r \cdot r \quad (9)$$

これらから、前進継続確率 $P_i(M, s)$ は以下で求めるこ

とができる。

$$P_i(M, s) = \sum_{j=1}^J P_1(r_j, M, s) \cdot P_2(r_j) \quad (10)$$

$$r_j = (j-0.5)\Delta r \quad (j=1, 2, 3, \dots, J) \quad (11)$$

J は以下のように網目中心 O から網糸までの距離の等分割数である。

$$J = \frac{1}{\Delta r} \quad (12)$$

上のモデルにしたがった計算には、後者の実験に供した魚体と網目の条件と、前者の実験でのコイの前進率を近似した正規確率分布関数（平均値 0.236、標準偏差 0.0163）を適用した。供試魚と同起源の 30 尾のコイの体幅と体高を鰓蓋部周辺の 3 つの断面（相対位置 0.10, 0.30 と前進率が 0.5 に近くなる位置である 0.235）で計測し、最小二乗法により以下の式を得た。

$$a/L_f = -0.435 L'_s{}^2 + 0.288 L'_s + 0.0418 \quad (13)$$

$$b/L_f = -0.724 L'_s{}^2 + 0.604 L'_s + 0.0217 \quad (14)$$

ただし、網目通過実験供試魚の体長をもとに(13), (14)式から体幅と体高を得たところ、供試魚の太りぐあいが回帰式を求めた魚群のそれとわずかに異なっていたため (Table 3)、鰓蓋後端部で両者が一致するように、(13), (14)式から得た体幅、体高にそれぞれ定数 1.042, 1.062 を乗じて、太り具合を調整した上で計算に用いた。網目中心 O から網糸までの距離の分割数 J は 100 とした。

Fig. 3 に、縮結を 0.39 で一定とし、目合いを変化させたときの(10)式による前進継続確率と、縮結を一定とした実験で得た前進継続率を比較した。前進継続確率は目合いの拡大とともに大きくなり、計算された確率と実験による前進継続率はよく一致した傾向を示した。実験した 3 つの目合いそれぞれで実験結果と計算結果を比較したところ、目合い 87 mm では有意差があったが、目合い 60 mm と 140 mm では有意差はなかった ($P=0.95$)。この結果は、網目に接触した魚の前進後退行動の分岐が、ζポイントの影響を受けて決定されるとの仮説を強く支持するものであると考える。

Table 3. Body heights and breadths of carp tested in Experiment-B at 0.235 relative position from snout and those calculated with regression equations (13) and (14) (mm)

No.	Folk length	Measured		Calculated	
		Body height	Body breadth	Body height	Body breadth
1	119.8	34.0	21.2	29.7	20.5
2	112.3	29.8	20.2	27.8	19.2
3	118.0	31.4	21.2	29.2	20.2
4	124.1	30.0	21.1	30.7	21.2
5	116.9	30.2	21.6	28.9	20.0

Fig. 3. Theoretical curve of probability of proceeding into encountered mesh which was calculated on ζ_t -point against mesh size and observed ratios of proceeding into encountered mesh for carp against mesh sizes, 60 mm, 87 mm and 140 mm at constant hang-in ratio, 0.39.

Fig. 4. Theoretical curve of probability of proceeding into encountered mesh which was calculated on ζ_t -point against hang-in ratio and observed ratios of proceeding into encountered mesh for carp against hanging-in ratios, 0.39, 0.58 and 0.70 at constant mesh size, 87 mm.

Fig. 4 に、目合いを 87.0 mm で一定とし縮結を変化させたときの(10)式による前進継続確率と、実験で同じく目合いを一定とした場合の前進継続率を比較した。計算では、前進継続確率は、目合いを変えたときと異なり、縮結 0.36 のときにピークを持ち、それを離れるにしたがって低下することが示された。計算結果は縮結 0.58 と 0.70 での実験による前進継続率とよく一致したが、前進継続率が最大となると予測される縮結に近い 0.39 のとき、3 つの実験条件の中ではもっとも高い前進継続率を示しはしたが、計算による前進継続確率はこれとあまりよく一致しなかった。

目合いを変化させたときに比べて、縮結を変化させたときの実験値と計算値の一致度が悪かった理由は以下のように考えた。縮結が一定であれば、目合いが変化しても網糸と魚体断面の接触時の位置関係は相似であるが、縮結が変化すれば、目合いが一定でも網糸に触れる魚体断面上の位置は変化する。すなわち触刺激が加わる魚体上の位置が変化する。特に、縮結が小さくなると、魚体の側面より背面、覆面寄りの位置で網糸と接触することとなる。コイでは魚体前半部での触刺激受容器が腹側に局所的に分布している¹²⁾こととも関係し、上の影響を受けたであろう実験結果と、魚体側面への刺激による前進率をもとに計算した結果の差異が大きくなったのではないかと考えた。

以上の結果と考察から以下のように結論した。4 種の供試魚は触刺激に対する ζ_t ポイントを有する。網目に

遭遇した魚が、網目への前進行動を継続するか否かには ζ_t ポイントが関与しており、そのときの前進継続確率は種固有の ζ_t ポイントの特性とともに、目合いと縮結、魚体の形状と大きさに影響される。

これまで刺し網における漁獲過程は網を認識できなかった魚が網目に進入し羅網するとする単純なモデルで考えられてきた。しかし、本実験で明らかにされた ζ_t ポイントの存在は、網目に進入する過程にも、魚の触覚により羅網へ至るか否かが選択される分岐段階が存在することを示唆している。ただし、接触刺激から前進後退運動の開始までには時間遅れがあり高速遊泳時にはこの間に ζ_t ポイントまわりの刺激位置が変化すると考えられるので、 ζ_t ポイントの存在のみが網地遭遇時の前進後退を決定するとは言い切れない面もある。

本研究での供試魚では ζ_t ポイントはすべて主鰓蓋後端付近にあったが、このような魚の場合、刺し網の網目に十分に頭部を挿入した魚の前進行動は ζ_t ポイントにより強化される。梨本¹³⁾は、魚が網糸に接触したのちに網目への進入を続け、網糸の張力により魚体が締め付けられ網目に保持されるという刺し網の漁獲機構のモデルを考えたが、本実験の結果は ζ_t ポイントの存在が刺し網への魚の刺し現象を確実にすることに貢献していると解釈することもできる。

本研究を実施するにあたり御協力を頂いた、鹿児島大学水産学部助手安楽和彦氏ならびに同学部漁業基礎工学研究室の学生諸氏に深く感謝します。

文 献

- 1) J. M. Hamley: Review of gillnet selectivity. *J. Fish. Res. Board Can.*, **32**, 1943-1969 (1975).
- 2) 岡 正雄: 魚群の網目の通過に関する一実験. 日本誌, **13**, 203-206 (1948).
- 3) 神田猷二: 網地の縮結と魚群の目合いの通過に就いて—I. 日本誌, **18**, 365-372 (1953).
- 4) 神田猷二: 網地の縮結と魚群の目合いの通過に就いて—II. 日本誌, **19**, 643-647 (1953).
- 5) 梨本勝昭: 網刺し現象の基礎的研究 (第Ⅲ報) 適正縮結の理論的考察. 北大水産彙報, **18**, 73-80 (1967).
- 6) 藤森康澄, 松田 皎, L. P. Losanes, 小池 篤: 水槽実験による刺し網の漁獲効率と網目選択性. 日本誌, **56**, 2019-2027 (1990).
- 7) 藤森康澄, 東海 正, 梁 振林, 松田 皎: 刺し網の漁獲機構のシミュレーションモデル. 日本誌, **61**, 868-873 (1995).
- 8) G. Kawamura: Gill-net mesh selectivity curve developed from length-girth relationship. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **38**, 1119-1127 (1972).
- 9) 松岡達郎, 杜 勝久, 斉藤良仁: 刺し網のサイズ選択性の計算とその水槽実験による検証. 日本誌, **61**, 880-888 (1995).
- 10) 黒木敏郎: 電気漁網の研究 (第Ⅰ報) 有効周波数の選定に就て. 日本誌, **16**(4), 165-170 (1950).
- 11) 黒木敏郎: 電戟漁法, 技報堂, 東京, 1955, pp. 57-69.
- 12) S. Kiyohara, T. Shiratani, and S. Yamashita: Peripheral and central distribution of major branches of the facial taste nerve in the carp. *Brain Research*, **325**, 57-69 (1985).
- 13) 梨本勝昭: 網刺し現象の基礎的研究 (Ⅰ). 北大水産彙報, **15**, 221-233 (1965).