

〈寄稿〉

水産資源研究に出現する陰関数モデル：漁獲動態に基づく例証

大西修平^{1†}

An implicit functional model appearing in a study on population dynamics: Illustrations using the stock-yield relationship

Shuhei OHNISHI^{1†}

資源研究で利用される数理モデルの多くは陽関数で記述され、陰関数によるものは少ない。資源変動の分析にあたり、モデルの未知パラメータは、最小二乗法等を用いて推定される。陰関数のモデルでは、パラメータ探索の演算アルゴリズムは、陽関数の場合に比べて複雑になるが、現在は計算機技術の高度化により、自由にモデルを試すことができる。そのため、モデル未開拓領域における、陰関数のモデル出現に対する理解が必要になる。本報告では、読者が共有できる着想をもとに、基礎的な資源動態モデルを展開し、陰関数の出現を例証する。漁獲量が陰関数で定義される場合、漁獲対象資源量が陰関数で定義される場合、この2つの事例に沿って、陰関数のモデルとの身近な遭遇について、理解を促す。陰関数は研究の進展上、ごく自然に出現するものと考え、束縛のないモデル開発に向け、議論の端緒になる話題を提供する。

Most models used for population dynamics analysis are given in an explicit functional form. In contrast, the implicit functional model has rarely been found in past studies. Upon objective evaluation, an implicit functional model is often not usable as a practical computational tool due to an inflexible mathematical form. A comprehensive discussion about utilizing an implicit functional model may not have been provided. The remarkable progress of current techniques in computer software, however, has enabled various types of theoretical models to be easily applied in calculation algorithms. This suggests that a wide range of possible mathematical forms, including an implicit function, can be modeled and exploited to obtain a more insightful form. That is, a flexible, unbiased view of the functional form that is required during model construction. This study aims to show how easy it is to create an implicit functional model from ordinary ideas in an unspecialized issue on fisheries research. For this purpose, the author presented two topics concerning a stock-yield dynamic and illustrated the detailed process of application of the model. In addition to the demonstration of model exploitation, the perspective on latent ideas for advanced models was presented.

Key words: population dynamics modelling, implicit function, Concentration Profiles

はじめに

資源研究では、漁獲量や生物個体サイズの観測値の変動に対して、これらを従属変数とする因果関係に理論的な説明を与えるために、数理モデルが使用される。モデルの多くでは、独立変数 x と従属変数 y は、スカラー関数 F により $y=F(x)$ と表される。ここで示した $y=F(x)$ のように、 x に y を対応させる具体的な方式 F が示せる場合、 F は陽関数 (explicit function) とよばれる (日本数学会, 1985)。たとえ

ば再生産曲線 (x : 産卵親数, y : 子数), 個体成長曲線 (x : 齢, y : 体サイズ), 生残曲線 (x : 齢, y : 個体数) は、資源変動の要素 y を陽関数で表した事例にあたる。一方、 x と y が $F(x, y)=0$ の形でしか表せないとき、 F は陰関数 (implicit function) とよばれる (日本数学会, 1985)。著者の経験に限って言えば、陰関数で記述されたモデルは少ない。たとえば、Euler-Lotka 方程式 (松田, 2004) $\sum_{t=1}^{\infty} l_t m_t / \lambda^t - 1 = 0$ は、 λ を変数に持つ陰関数と解釈できる。この陰関数の形式が、後に述べるような、取り扱いの煩わしさに関連する。

数理モデルは、資源変動のデータを分析する際の理論的基盤である。モデルが未知パラメータを含むとき、実測データに対するモデルのフィットのために、最小二乗法等による未知パラメータ推定が必要になる。興味の対象 y が

2013年10月9日受付, 2014年4月11日受理

¹ 東海大学・海洋学部

¹ School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3-20-1, Orido, Shimizu, Shizuoka 424-8610, Japan

[†] E-mail address: ohnishi@scc.u-tokai.ac.jp

陰関数 $F(x, y) = 0$ によって定義される場合、 $F(x, y) = 0$ はパラメータ探索において、数値的最適化問題の制約条件になる (赤嶺, 2007)。これは、陰関数のモデルを扱う演算アルゴリズムの複雑化と計算量の増加など、潜在的な技術コストの大きさを示唆している。計算機環境の整備がまだ不十分であった時代では、陰関数のモデルは不都合なツールであったのかも知れない。かりに深い洞察を備えた理論でも、便宜上、割愛せざるを得なかった事情も否定できない。

現在の資源研究の環境では、成熟した計算機技術のもと、自由にモデルを試すことができる。そのため、陰関数のモデルの使い勝手の悪さに対する認識は、研究の進展を図る上でマイナス要因ともなる。陰関数との遭遇を敬遠することなく、また理論展開の道筋に制約を付けず、モデルの未開拓領域に挑む姿勢は必要であろう。

本報告は、資源研究の身近な話題から出発する。読者が共有できる着想のもとにモデルを展開し、陰関数の出現を例証する。この過程を通して、身近に遭遇する陰関数のモデルへの理解を促す。陰関数は研究が進む上で自然に出現するものであるとの見地から、束縛のないモデル開発や、自由なアイデアの交流に向けて、議論の端緒になる話題を提供する。

材料と方法

本稿の話題は、微分方程式による漁獲の過程の単純な関係、

$$\frac{dC}{dt} = fN \left(1 - \frac{C}{N} \right) \quad (C < N, \quad 0 < f < 1) \quad (1)$$

から始める。なお C, f, N, t は、累積漁獲尾数、瞬間漁獲率、漁獲対象資源尾数、漁獲の経過時間をそれぞれ表している。 f と N は、ここでは漁業と資源を特徴づけるパラメータと考える。(1) 式をもとに、ここから派生する2つの事例について、以下のようにモデルを展開する。

事例1；累積漁獲尾数 C が陰関数で表される例

ここでは、浸漬中の固定漁具にみられる、捕獲能力の変化を題材として話題を展開する。定置網、刺網、籠網、また延縄など、問題設定は多くの漁法に共通している。

時間経過に伴う生物の捕獲について、誘引の過程を含めて物理的動態を分析した例として、吉原 (1957, 1960) が先駆的である。これらは水生動物の漁具に対する反応や行動に要する時間など、漁獲率を左右する要素について詳細に定式化している。また、マグロ延縄操業での、餌の脱落や劣化が有効努力量に与える影響を含めたモデルの報告もある (平山, 1969)。Sigler (2000) は、資源量推定モデルの中で、漁具と水生動物の遭遇率を、餌の匂い成分の拡散に関連付けてパラメータ化している。Sainte-Marie and Hargrave (1987) は、餌の匂いの具体的な物理拡散モデルに基

づいて、誘引速度の時間変化を統計分析している。以上のように、漁具の能力と漁獲率の変動に寄与する餌の特性は、資源評価において無視できない。

漁具に迷入した個体の、体分解成分や屍骸の匂いによる誘引・忌避効果が知られる (渡部・本多, 2005)。この場合には、誘引と忌避は、漁具の機能を変化させる要因とみなすことができる。事例1では、以上のような漁獲過程を支配する誘引・忌避の動態を題材にする。

事例2；漁獲対象資源尾数 N が陰関数で表される例

—Clark (1985)・Chapter 2.2の応用で遭遇する陰関数—

本稿では一貫して、Clark (1985) の Chapter 2.2 の理論展開をさして「先行研究」とよぶことにする。先行研究 (Clark, 1985) また Clark (1982) でも扱われた、Concentration Profiles of four types (集中特性曲線・濃度分布の4つのタイプ) の応用について示す。まず準備として、資源の空間構造を論じた先行研究の要点を以下に概説する。

Clark (1974) は魚群のサイズと個体群の生残率の関係を定量化しており、先行研究では Clark (1974) を応用している。先行研究は、野生生物の生息密度の不均一性を前提に、資源現存尾数の総量 x の拡大 (および縮小) と、 x の中での生息密度の最大値 ρ について、関数 $\rho = g(x)$ を用いて考察している。 x と ρ に関する解釈は、先行研究は次のように与えている。逆関数 $x = g^{-1}(\rho)$ より $dx = (g^{-1}(\rho))' d\rho$ である。 dx は最大生息密度海域 (密度範囲 ρ から $\rho + d\rho$) での資源尾数に相当する。 $x = \int_0^x dx = \int_0^{\rho} (g^{-1}(y))' dy$ であるので、最高値 ρ 以下の任意密度での資源尾数の総和が x である。陸上・海洋の環境の違いによらず、観測エリアを広げるにつれ、エリア内の生物数は一方的に増加すると同時に、観測される群れ密度の“最高記録値”は確実に上方へと更新される。先行研究はこの単純な事実に基づいており、したがって $g(x)$ は必ず単調増加関数になることは自明である。

先行研究は $g(x)$ の曲線形状をもとに、資源の空間分布特性つまり偏り方を、4タイプに類型化した (Type-I, II, III, IV)。特に Type-I: Diffusive Resource Stocks (拡散性資源)、Type-III: Aggregative Resource Stocks (集群性資源) と定義されているタイプは、多くの水産資源に当てはまる、現実的な分布特性である。Type-I (拡散性資源) は低密度の群れほど、逆に Type-III (集群性資源) は高密度の群れほど、 x の配分割合が多くなる様子 (生物の空間分布の偏り) を規定している。また Type-II は I と III の中間的な特性 (低密度群から高密度群まで x の配分割合が均等) を規定している。なお $g(x)$ の形状として、Type-I が凸 (convex) 型、Type-III が凹 (concave) 型を、さらに Type-II が直線 (linear) 型をとることが詳説されている。

先行研究に限らず、生物の集群性は資源評価のモデルでも検討されてきた。拡張 DeLury モデルでは、負の二項分布をはじめ確率密度関数の使い分けによって、生息密度の

特性が定式化できる (Yamakawa et al., 1994). しかしながら先行研究は、確率密度関数に依るのではなく、 $g(x)$ の凸凹の形状に基づいて、空間分布の偏りの変化を論じている点が特徴といえる. 事例2は、先行研究の成果を応用する過程で、あらたに派生したモデルという位置づけになる.

結果と考察

事例1

モデル組み立ての結果を示す. (1) 式に誘引と忌避を関連づけて、

$$\frac{dC}{dt} = f \left(\frac{1+aC}{1+bC} \right) N \left(1 - \frac{C}{N} \right) \quad (a>0, b>0) \quad (2)$$

と書く. 右辺 f 直後の括弧内は、誘引と忌避の作用を意味する. a, b はそれぞれ誘引と忌避の強度のパラメータである. すでに漁具に捕獲された量 C に依存して、誘引・忌避作用の規模は決まり、この影響は f に乗じられる. ここで変数の置換: $C/N=x, aN=A, bN=B$ により (2) 式を、

$$\frac{dx}{dt} = f \left(\frac{1+Ax}{1+Bx} \right) (1-x) \quad (3)$$

と書き直す. 以後、(3) 式を用いる. (3) 式は変数分離形で扱える.

$$\left\{ \frac{1}{(1-x)(1+Ax)} + \frac{Bx}{(1-x)(1+Ax)} \right\} dx = f dt$$

として、初歩的な解法が適用できる. 操業開始時点での漁獲量はゼロであるから、初期条件: $t=0, x=0$ で解けば、

$$F = \left\{ \frac{A-B}{A(1+A)} \right\} \log(1+Ax) - \left\{ \frac{1+B}{1+A} \right\} \log(1-x) - ft = 0 \quad (4)$$

を得る. (4) 式は A, B および f をパラメータに持ち、変数 x と t で漁獲動態を表現した陰関数 F になっていることがわかる. なお対数 (\log) は本稿では一貫して自然対数を意味する. 時間 t 依存の漁獲動態 x (または C) は、(4) 式のように陰関数になる. (4) 式では誘引・忌避効果を同時に扱っているが、両効果に制限を設けることもできる. パラメータに制約を加えて、(4) 式を次のように再定義してみる.

$A=0, B=0$: この場合は、誘引・忌避効果ともに作用しないので、捕獲個体による f への作用はなく、

$$F_{A=0, B=0} = -\log(1-x) - ft = 0$$

である. したがって x はこの場合は、

$$x = 1 - \exp(-ft)$$

と陽関数で表現することができる.

$B=0$: これは、誘引効果だけが作用するモデルに相当し、

$$F_{B=0} = \frac{1}{1+A} \{ \log(1+Ax) - \log(1-x) \} - ft = 0$$

となるので、この場合についても、

$$x = \frac{1 - \exp(-f(1+A)t)}{1 + A \exp(-f(1+A)t)}$$

と陽関数が得られる.

$A=0$: これは忌避効果だけを扱うモデルに相当する. まず (4) 式の第一項において、 A に関してマクローリン展開: $\log(1+Ax) = Ax - (Ax)^2/2 + (Ax)^3/3 \dots$ を適用する. また (4) 式の第二項の $(1+B)/(1+A)$ では $A=0$ とおいてよいので、これらの操作全体を通じて、

$$F_{A=0} = -Bx - (1+B)\log(1-x) - ft = 0 \quad (5)$$

が得られる. (5) 式は x について陽関数に変形できない. 忌避効果だけが作用するモデルは (5) 式の陰関数のままである.

ここで (5) 式の $\log(1-x)$ を $x=X^*$ の周りでテイラー展開する. 1次近似までを使用することで、(5) 式を、

$$F_{A=0} \cong \left(-B + \frac{1+B}{1-X^*} \right) x - (1+B)\log(1-X^*) - (1+B) \frac{X^*}{1-X^*} - ft \cong 0 \quad (6)$$

と変形する. (6) 式全体をゼロとおき、 x について解けば、

$$x = \frac{(1+B) \{ X^* + (1-X^*) \log(1-X^*) \} + (1-X^*) ft}{1 + BX^*} \quad (7)$$

のように x を陽関数で書くことができる. (7) 式は $x=X^*$ の近傍でのみ、近似的に成り立つ関係であるという点に注意が必要である.

導出したモデルが陰関数であっても、適用範囲を制限することで、(7) 式のように陽関数に置き換えが可能な場合がある. グラフ描画が簡単であるなど、陽関数のほうがたしかに扱い易さでは勝っている. 既存の形式を鵜呑みにせず、モデルを都合よく利用できる余地が残っていないか、慎重に検討することは有意義であろう.

事例2

まず最初に、生物分布の空間サイズ (面積または体積) を具体的に定量化する. 先行研究では、 $dx = (g^{-1}(\rho))' d\rho$ を最大生息密度海域での資源尾数としているので、 dx を密度 ρ で除した量が、最大生息密度海域の空間サイズになる.

具体的には, x を収容している空間サイズを新しい変数 s で表し, x を s の関数として, $1/\rho dx = 1/\rho (g^{-1}(\rho))' dp = ds$ と書く.

いま最大生息密度 R , 総尾数 U , 生息空間の大きさ S を持つ資源を考える. 点 (U, R) は, 密度の不均一性を規定するための関数 $g(x)$ 上に位置している. さてここで, 操業や資源探索が, 常に最大生息密度海域にて行われることを前提にする (この仮定は先行研究でも使われている). また実際の漁場は空間的広がりを持つので, 漁場内の生息密度にも必然的に値の範囲がある. 以上をふまえ, (1) 式の N を, 最大生息密度海域から低密度域に向かって広がる空間内に存在する, 生物量と考える必要がある. ここで, 一定時間内 (期間や漁期) で生産活動が及ぶ空間, つまり漁船の操業の実稼動空間サイズを A とする. A は船体や動力の規模に応じた物理的な制約でもある. A は定数とみなしても不自然ではない. すると A 内に収容されている資源尾数が N になり, 以上の考えに基づいて, 次の関係を導くことができる.

$$\int_{U-N}^U \frac{1}{\rho} dx = \int_{\hat{\rho}}^R \frac{1}{\rho} (g^{-1}(\rho))' dp \quad (8)$$

$$= \int_{\hat{S}}^S ds = A = \text{const.} \quad (\rho > 0)$$

ここで $\hat{\rho} = g(U-N)$, また \hat{S} は資源尾数 $U-N$ を収容する空間サイズである.

漁獲量の動態のモデル化に向けて, (8) 式と (1) 式を結び付けて C を書き表すには, まず (8) 式を解いて N を明示的に書く必要がある. この場合 (8) 式における N の挙動は, 被積分関数 $1/\rho$ の形に左右される. ρ すなわち $g(x)$ の曲線形状を包括的に扱うための具体例として, $x \leq U$ の範囲で,

$$\rho = g(x) = \frac{bx}{U+ax} \quad (a > -1, b > 0) \quad (9)$$

を使用する. a は $g(x)$ の凸 (convex) 型あるいは凹 (concave) 型の形状において, 曲率を変化させるパラメータである. $-1 < a < 0$ で $g(x)$ は凸型 (Type-I: 拡散性資源) になる. これに対して, $a > 0$ で $g(x)$ は凹型 (Type-III: 集群性資源) になる. また $a=0$ のとき $g(x)$ は直線型 (Type-II) になる. 先行研究は Type-II に名称を与えていないが, Type-II は, 拡散性と集群性の中間に位置し, 総尾数 U が全ての密度に均等に配分された状態を意味する. パラメータ b は密度 ρ の絶対量を変化させる. $U=1$ の場合について, (9) 式の形状の概略を図に示す (Fig. 1).

(9) 式を (8) 式に代入して解くと,

$$U \log \frac{U}{U-N} + aN - bA = 0 \quad (10)$$

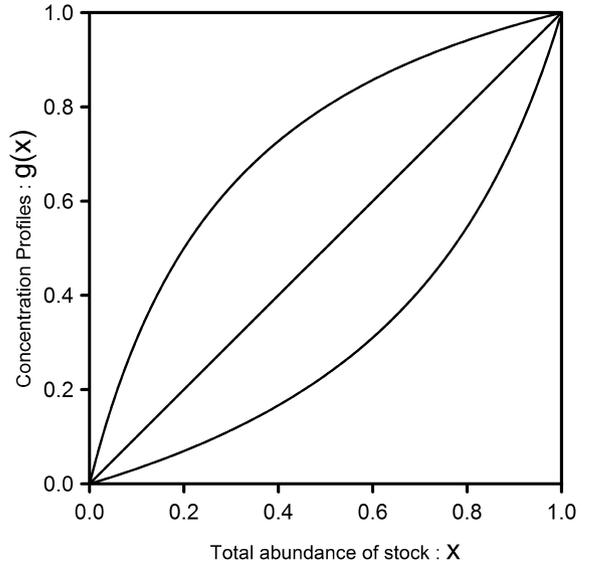


Figure 1. Typical curve shapes that describe the Concentration Profiles of spatial properties in fish stock. The three lines correspond to the following classifications of Concentration Profiles by Clark (1985): Type-I: convex (bottom), Type-II: linear (middle), Type-III: concave (top). The function $\rho = g(x) = bx/(1+ax)$ is used as a candidate for the Concentration Profiles in our study. The parameter values of a in $g(x)$ used for Type-I, -II, and -III are $-0.7, 0,$ and $3,$ respectively. The value of $g(x)$ at $x=1$ is normalized by adjusting the parameter b .

を得る. $a \neq 0$ の場合 N は陽関数で表すことはできない. つまり (9) 式を使用する限り, 凸型 (Type-I: 拡散性資源) と凹型 (Type-III: 集群性資源) の分布特性の下に, 形成される漁場の漁獲対象資源尾数 N は, 陰関数で表現される.

事例2についても, (1) 式をもとに漁獲量の動態を表してみる. そのために, (1) 式について初期条件: $t=0, C=0$ による解,

$$C = N(1 - e^{-ft}) \quad (11)$$

を利用する. (10) 式と (11) 式をひとつにまとめたい場合, (11) 式を $N=C(1-e^{-ft})^{-1}$ と変形し, これを (10) 式に代入する必要がある. この操作により,

$$-U \log \left\{ 1 - \frac{C}{U(1-e^{-ft})} \right\} + \frac{aC}{1-e^{-ft}} - bA = 0 \quad (12)$$

を得るが, (12) 式の C を陽関数で表すことはできない. C も N と同様, 陰関数によって扱われる. なお事例1の (6) 式と (7) 式の手順と同様, $C=C^*$ の周りでのテイラー展開を利用すれば, (12) 式の C は, $C=C^*$ の近傍で陽関数による近似が可能である.

まとめと課題

2つの事例が示すように、身近なモデルの展開においても、陰関数は出現する。事例1と同様の、微分方程式の解が陰関数で与えられる問題については、既に報告がある (Ohnishi and Akamine, 2006)。資源動態の理論が、陰関数によらざるを得ない解を潜在的に持つ事は、理解しておく必要がある。事例1と2からの展望や技術面の課題については以下の通りである。

事例1の着想は、ゴーストフィッシング (Smolowitz, 1978; Matsuoka et al., 2005) の動態分析にも応用できる。ゴーストフィッシング (以下GF) は、逸失漁具への個体の連鎖的な迷入、あるいは意図しない継続的な間引きとして知られる。誘引の連鎖と漁具の殺傷能力の増長が、GFの問題の本質である。GFは実際の収穫量に計量できない、いわゆる自然死亡 M に含められる変動であるため、その管理は困難な問題である。(4)式のような誘引・忌避の動態を M に関連付けることで、GFによるダメージが定量化しやすくなるかも知れない。自然死亡 M の分析に新しい視点加わる。

動物が群れる習性には集合フェロモン (八杉ほか, 1996) の関与が知られている。これは生体の分泌物のうち、同種他個体に作用し、集団の形成や個体間の誘引において特異的な作用をもつ化学物質をさす。匂い刺激に対する高い知覚により、顕著な群れを形成する種については、群内の個体相互の誘引作用が知られる (井上, 1978)。群を作りやすい魚種は、効率よく捕獲できると考えれば、事例1は魚群の複雑な習性と漁具の工学特性を同時に考える問題に展開できる。フジツボなどの無脊椎動物の幼生の付着機構にも、誘引を促す生化学物質の存在が知られる (野方ほか, 2006; 遠藤・野方, 2012)。「漁獲」を「基質への着生」と読み替えて、問題の視点を変えれば、事例1は生物駆除の話題にも発展する。実学への展望に関わる話題は尽きない。

事例2は、Clark (1985) の理論とDeLuryモデルを結び、パラメトリゼーション手順の一部である。(8)–(10)式に示したように、本稿では積分が解析的に扱える場合を取り挙げた。しかしながら $g(x)$ つまり ρ しだいでは、 N の根を得るための積分そのものを数値的に解く必要がある。凸型・凹型の曲線を表す関数には様々な候補があるので、数値積分でしか解けないモデルも考慮に入れておく必要がある。モデルの導出後において、(8)式が未処理のまま残されていることで、モデル適用時の計算処理の手間は増える。このように条件の悪いモデルを得る可能性もたしかにありうる。

事例1についても、GFの個別の問題を扱う場合、(2)式に代わる別の表現の導入が計算を複雑にする。たとえば、(2)式で屍骸の劣化や分解を考慮したい場合、また誘引と忌避のパラメータを時間 t に依存させたい場合など、問題

の性質により求積法で解けないケースも現れる。微分方程式の解がより複雑な形になることで、陰関数の扱いの難度が増すこともある。

上のような見通しを立てば、陰関数タイプのモデルの実用上の課題は、さらに増すものと思われる。本稿ではモデルの組み立てについて理論を話題にしたが、理論とともに、モデルフィットの技術や、具体的な計算方法についても検討が必要である。(累積)漁獲尾数 C やCPUEデータの変動を説明する変数が陰関数のモデルを構成している場合、未知パラメータの推定により、陰関数をデータにフィットさせる。現時点で知られている陰関数のフィット(未知パラメータの推定)のためのアルゴリズムは、さほど多くない (Britt and Luecke, 1973; Awaya, 1983; Varah, 1996; Marshall and Blencoe, 2005)。手法ごとに、扱われるモデルの曲線(関数)はまちまちで、様々な問題に対応可能なアルゴリズムが知られているわけではない。陰関数のモデルの使い勝手に対するマイナスイメージを払拭するために、資源動態モデルを広範囲にわたってカバーできる、汎用性の高いアルゴリズムの開発も必要である。モデル分析のための計算ツールの整備と、陰関数タイプのモデルに対する習熟がセットになることで、モデル未開拓領域の議論がより一層さかんになるものと期待できる。

謝辞

本稿の丁寧な査読において、有益な助言を数多く頂戴いたしました。二名の匿名の査読者の方々に、深く感謝致します。

引用文献

- 赤嶺達郎 (2007) 「水産資源解析の基礎」, 恒星社厚生閣, 東京, 115 pp.
- Awaya, T. (1983) Two-dimensional curve fitting in counting experiments. *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res.*, **212**, 311–317.
- Britt, H. I. and Luecke, R. H. (1973) The estimation of parameters in nonlinear, implicit models. *Technometrics*, **15**, 233–247.
- Clark, C. W. (1974) Possible effects of schooling on the dynamics of exploited fish populations. *J. Cons. Int. Explor. Mer.*, **36**, 7–14.
- Clark, C. W. (1982) Concentration profiles and the production and management of marine fisheries, in W. Eichhorn (ed.) *Economic theory of natural resources*. Physica-Verlag, Würzburg-Wien, 97–112.
- Clark, C. W. (1985) *Bioeconomic modelling and fisheries management*. John Wiley & Sons, New York, 291 pp. (田中昌一監訳: 「生物資源管理論」, 恒星社厚生閣, 東京, 1988, 300 pp.)
- 遠藤紀之・野方靖行 (2012) フジツボ類の着生フェロモンに関する研究—着生フェロモンの精製・構造解析と生産方法の確立—, *電中研報*, **V11008**, 1–20.
- 平山信夫 (1969) マグロ延縄の漁獲機構に関する研究—IV—. *日本誌*, **35**, 635–640.
- 井上 実 (1978) 「魚の行動と漁法」, 恒星社厚生閣, 東京, 211 pp.
- Marshall, S. L. and Blencoe, J. G. (2005) Generalized least-squares fit of multiequation models. *Am. J. Phys.*, **73**, 69–82.
- 松田裕之 (2004) 「ゼロからわかる生態学—環境・進化・持続可能性の科学」, 共立出版, 東京, 244 pp.

- Matsuoka, T., Nakashima, T. and Nagasawa, N. (2005) A review of ghost fishing: Scientific approaches to evaluation and solutions. *Fish. Sci.*, **71**, 691–702.
- 日本数学会 (編) (1985) 「数学辞典 (第3版)」. 岩波書店, 東京, 1609 pp.
- 野方靖行・松村清隆・坂口 勇 (2006) 海域試験によるアカフジツボ抽出物のフジツボ着生誘起効果の評価. *電中研報*, **V05033**, 1–14.
- Ohnishi, S. and Akamine, T. (2006) Extension of von Bertalanffy growth model incorporating growth patterns of soft and hard tissues in bivalve molluscs. *Fish. Sci.*, **72**, 787–795.
- Sainte-Marie, B. and Hargrave, B. T. (1987) Estimation of scavenger abundance and distance of attraction to bait. *Mar. Biol.*, **94**, 431–443.
- Sigler, M. F. (2000) Abundance estimation and capture of sablefish (*Anoplopoma fimbria*) by longline gear. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **57**, 1270–1283.
- Smolowitz, R. J. (1978) Trap design and ghost fishing: an overview. *Mar. Fish. Rev.*, **40**, 2–8.
- Varah, J. M. (1996) Least squares data fitting with implicit functions. *BIT*, **36**, 842–854.
- 渡部俊広・本多直人 (2005) ベニズワイガニ籠の餌料として同種を用いた時の漁獲について. *日水誌*, **71**, 549–554.
- Yamakawa, T., Matsumiya, Y. and Kitada, S. (1994) Comparison of statistical models for expanded DeLury's method. *Fish. Sci.*, **60**, 405–409.
- 八杉龍一・小関治男・古谷雅樹・日高敏隆 (編) (1996) 「生物学辞典 (第4版)」. 岩波書店, 東京, 2027 pp.
- 吉原友吉 (1957) 漁獲の機構I. *日本生態学会誌*, **7**, 10–13.
- 吉原友吉 (1960) 漁獲の機構II. *日本生態学会誌*, **10**, 109–112.