

最適変換法に基づく資源変動要因の解析*

大西修平**・松宮義晴***・小出水規行***

Analysis of Relationship between Fish Population Dynamics and Factors of Oceanographic Condition based on the Optimal Transformations Method*

Shyuhei OHNISHI**, Yoshiharu MATSUMIYA*** and Noriyuki KOIZUMI***

Abstract

In general, the parametric regression model is often used for analysing the fishing and oceanographic conditions because of its easiness on calculation. On the analysis, the linear regression model, which is often used and consists of catch (dependent variables) and environmental information (independent variables), is adapted to the multi-variate data in order to extract the response of dependent-independent variables. However, the data, which reflect the actual complexity of fishing and oceanographic conditions, are not so simple as to be treated with the linear model. On the contrary, the non-linear regression model is useful for explaining the complicated relationship among the variables. In spite of the suitability of this model, it sometimes happens that the case in which non-linear model is not able to analyse the data because of the increase of model parameters. Eventually the parametric model is not appropriate for analysing the fishing and oceanographic phenomena.

In this study, we tried to analyse the data by the non-parametric regression model in order to extract the relationship among the complicated factors of the data. As the material of multi-variate data we used the catch of saury population and the related environmental information, and extracted the relationships between dependent-independent variables. Based on the result, we could infer the biological events which were included in the data. It suggested that this method should be the comparatively surpassing way to deal with the fishing and oceanographic conditions.

1. はじめに

一般に回遊性浮魚類の漁況には多数の要因が複雑に関与しており、漁況と変動要因の応答関係は不明であることが多い。要因間の関係式や誤差の発生機構を実験的に推定することは不可能であるため、変動の応答特性は、データ解析を通して推定し抽出される。

回帰モデルに代表されるパラメトリックモデルは、漁況データに関与する要因(変数)間の応答を精査する目的には活用しにくい状況も多い。重回帰モデルでは応答関係を線形に限定しており、応答をより詳細に

記述できる非線形モデルは、データの特性によってはパラメタを大幅に増やす必要があり、実用に耐えない場合も出てくる。

本報告では漁況解析で、パラメトリックモデルの利用が必ずしも実用的ではないという視点に立ち、漁況データの新しい解析手法の導入を行う。これに伴い、要因間の応答特性を細かく記述でき、現実的な漁況の解析が可能となる方向性も考察する。東北海域におけるサンマ漁況を適用例として、本手法が漁況変動の要因をより詳細に定量化でき得ることを示す。

本報告をとりまとめるにあたり、手法の理論的枠組みと適用結果の解釈において適切なお助言とご指導を頂き、本文を査読頂いた、東京水産大学北原 武博士、櫻本 和美博士に謝意を表します。

2. 解析手法

本報告のモデルとして、BREIMAN and FRIEDMAN

1995年6月27日受理

*本報告の内容については、1995年日本水産学会春季大会にて口頭発表を行った。

**東京水産大学 Tokyo University of Fisheries, Konan, Minato, Tokyo 108, Japan.

***東京大学海洋研究所 Ocean Research Institute, University of Tokyo, Minamidai, Nakano, Tokyo 164, Japan.

(1985) による, 最適変換法 (Optimal Transformations) をとり挙げ, 一般的な重回帰モデルと比較し検討を加える。最適変換法ではデータの従属変数(目的変数) Y と独立変数(説明変数) $X_i (i=1, \dots, k)$ を,

$$\theta(Y) = \sum_{i=1}^k \phi_i(X_i) + e \quad (1)$$

と表す。ここで k は独立変数の個数である。 θ と ϕ_i は何れも未知で, 変数に対する任意の変換関数であり, データの数値に依存して異なる変換値を与える。 e は最適変換で説明のできない誤差であり, 特定の確率分布には従わない。最適変換法による最適モデルは, 変数ごとの個々のデータの変換値で決定され, パラメータで記述されない。本手法はノンパラメトリックモデルに属している。

(1)式と重回帰モデルを比較すると, (1)式の $\phi_i(X_i)$ は重回帰式では独立変数と回帰係数の積にあたる。重回帰式では, 独立変数の従属変数に対する応答は1次関数に限定されるが, 最適変換法では ϕ_i が任意の変換関数であるため, 応答をより複雑な形で記述できる。次に, 最適変換法では従属変数に対する変換 θ が考慮されていることが特徴である。これにより, 最適変換法はモデルの制約を緩和し, より一般化したものとなる。最適変換法の最適モデルの推定は, 個々のデータの最適な変数変換 $\theta^*(Y)$ と $\phi_i^*(X_i)$ の推定を行うことに相当する。 $\theta^*(Y)$ と $\phi_i^*(X_i)$ の推定は, BREIMAN and FRIEDMAN (1985) が開発した, ACE (Alternating Conditional Expectations) と呼ばれる数値計算アルゴリズムを用いて行うことができる。

ACE は, (1)式の両辺のうち, 一方を既知とし他方の変換を求める計算を交互に行うアルゴリズムである。最適変換は,

$$e^2 = E\{\theta(Y) - \sum_{i=1}^k \phi_i(X_i)\}^2 \quad (2)$$

を最小化するものとして定義する。ただし $E\{\theta^2(Y)\} = 1$ という条件 (BREIMAN and FRIEDMAN, 1985) が付加されている。ここで, (1)式の右辺第1項を既知としたとき, (2)式を $\theta(Y)$ について最小化する条件, つまり(2)式を最小化するような Y の変換関数の値は, 次式の形に導出される。

$$\theta(Y) = E\left\{\sum_{i=1}^k \phi_i(X_i) \mid Y\right\} \quad (3)$$

また(1)式の左辺が既知のとき, (2)式を $\phi_l(X_l)$ ($l=1, \dots, k$) について最小化する条件は,

$$\phi_l(X_l) = E\{\theta(Y) - \sum_{i=1, i \neq l}^k \phi_i(X_i) \mid X_l\} \quad (4)$$

($l = 1, \dots, k$)

となる。この時 $\phi_i(X_i) (i=1, \dots, k) (i \neq l)$ も既知であることが前提になる。

(3)と(4)式は, ACE の中で変数変換と数値の置換をするように働く。実際の計算では, (3)と(4)式の期待値演算は平面上での平滑化で代用される。ACE は, (3)と(4)式を交互に用いて, (2)式を最小値に収束させるアルゴリズムである。ACE の理論的構成は BREIMAN and FRIEDMAN (1985) により, 解がユニークに存在することが証明されている。田崎ら (1989, 1991) は, ACE を「交替条件付き期待値」として取り扱っている。

最適変換法および ACE は, 回帰モデルに並列的に位置づけられるもので, データの特徴を捉える手法である。付加条件が大幅に少なく, 理論値が柔軟にデータに適合するため, 本モデルの利用によって変数の応答関係が詳細に記述できる。

3. 適用

最適変換法は, 浮魚の資源変動の解析を目的とした, いくつかの研究事例に用いられている。MENDELSSOHN and CURY (1987) は, 浮魚の CPUE を表面水温と時間遅れの CPUE を用いて説明するために最適変換法を適用した。CURY and ROY (1989) は, 浮魚の加入量に関する要因を分析するために本手法を用いた。さらに MENDELSSOHN and CURY (1989) は, 浮魚資源の変動解析に自己回帰モデル等の線形モデルと最適変換法を併用し, 比較検討を加えている。ここでは要因間の非線形性が強く, データ解析において最適変換法が有効であることが強調されている。

本報告では最適変換法を用いて, 本州東北海域のサンマ漁況の変動要因を解析する。データの対象期間は 1966 年から 1989 年までの 24 年間である。東北海域でのサンマの漁獲量 (渡部, 1992) を従属変数 Y とし, 独立変数として以下の 3 個の変数を用いた。なお, サンマの漁獲量はおおむね資源量指数に対応している (MATSUMIYA and TANAKA, 1976)。サンマの再生産関係を表すため, X_1 は Y に対応する 1 年前の漁獲量を用いた。 X_2 には有機的な環境の指標として, 常磐から北海道東 (35-43°N, 145°E 以西) における動物プランクトンの現存量 (小達, 1994) を用いた。ODATE (1985) は, 動物プランクトンを捕食する浮魚類にとっ

て、夏期の動物プランクトン現存量が資源量と大きく関連することを指摘しており、動物プランクトンの6月の現存量(親潮域、混合域、黒潮域の合計値)を用いた(小達, 1994)。 X_3 は無機的な環境の指標として、川合(1989)による黒潮統流の北限緯度を用いた。本報告では川合(1989)のデータの各年の平均値を求めて解析に用いた。

データ解析にあたって、最適変換法の有効性をみるため、パラメトリックな加法型の一般的な回帰モデルを構築し比較を行った。ここで X_1 が再生産モデルの変数となるため、 X_i から Y への応答は全体としては非線形で定義される。 X_1 の再生産関係にはRickerモデルを用い、 X_2 と X_3 から Y への応答特性に変化を与え、

$$Y = c_1 X_1 e^{-c_2 X_1} + c_3 X_2 + c_4 X_3 + c_5 \quad (5)$$

$$Y = c_1 X_1 e^{-c_2 X_1} + c_3 X_2^2 + c_4 X_2 + c_5 X_3^2 + c_6 X_3 + c_7 \quad (6)$$

という2種類のモデルを作成した。(5)と(6)式をそれぞれ、model 1およびmodel 2とする。model 2では、 X_2 と X_3 の応答に極値を考慮している。なおモデルのパラメタ推定には準ニュートン法を用いた。

4. 結果

最適変換法およびパラメトリックモデルによる解析結果について示す。Fig. 1は、(1)式(最適変換法)の関数形と、(5)と(6)式(パラメトリックモデル: model 1, model 2)のパラメタを推定し、その結果に基づいて Y の理論値を内挿した結果である。残差平方和はパラメトリックモデルmodel 1とmodel 2でそれぞれ1123.9と933.5になった。最適変換法を適用した場合、数値はさらに下がり、869.9となった(Fig. 1)。

独立変数の最適変換の結果 $\phi_i^*(X_i)$ ($i=1, 2, 3$)をFig. 2に示した。Fig. 2は全ての変数に非線形な応答が推定され、さらに変数によっては応答に明瞭な極値が出現している。BREIMAN and FRIEDMAN (1985)は、独立変数間に何らかの関連性がある場合には、最適変換法の結果が不安定になる可能性を指摘し、それに対する決定的な対処方法がないことを述べている。そこで関連性についてみるため、独立変数間の相関係数を統計的に検定したところ、独立変数いずれの組み合わせについても無相関であった。このため本報告の解析結果

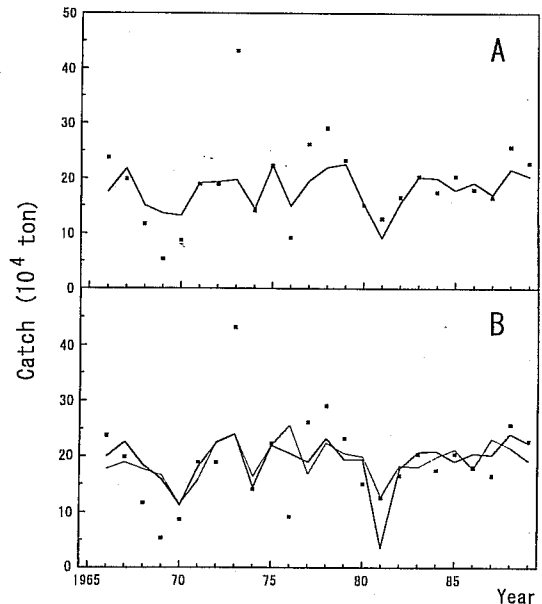


Fig. 1. Comparison of the results analysing the catch of saury 1966-1989. The upper (A) indicates the result by Optimal Transformations (formula (1)). Dots are the real catch(Y), and the line is the theoretical value. The lower (B) is the result by parametric model (model 1 and model 2 : formula(5) and (6)). Dots are the same as the upper. The thin and thick lines are the theoretical values of model 1 and model 2, respectively.

においては、応答の推定結果が不安定であるという可能性は低いと考えられ、以下のような解釈が可能である。なお本報告の主な目的は、本手法の有効性を理論的に唱えることであるため、結果の解釈の内容は最重要視されるものでない、という前提に立って推論をすすめた。

前年の漁獲量 X_1 の応答である、再生産関数は飽和曲線あるいは極値を持った関数とみることができる。 $X_1 \cong 45 \times 10^4$ に外れ値が1個あり、その最適変換値によって全体に緩やかなドーム型の応答が特定されているが、特に $15 \times 10^4 \leq X_1 \leq 25 \times 10^4$ に値が集中している様子から、元来 X_1 には強い極値が存在していると推測できる(データ数が不十分であり、本報告では推測の域を出ない)。

動物プランクトン量 X_2 の応答については、データは均等に分布しており、非常に明瞭な極値が出現している。このことは、動物プランクトン現存量の増産によるサンマ資源の増加が、 $X_2 \cong 420 \times 10^4$ を境界に全

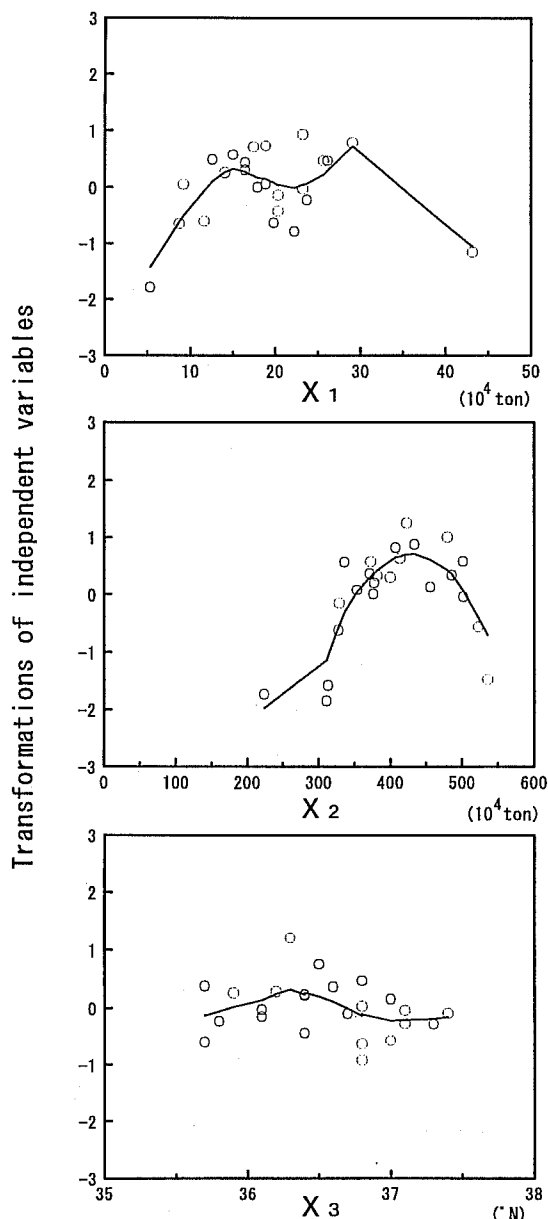


Fig. 2. Optimal Transformations of independent variables for explaining the catch of saury. X_1 , X_2 and X_3 imply the value of catch at one year before, biomass of zoo plankton at the Tohoku area, and the latitude at the north limit of the Kuroshio Extension axis, respectively. The line in the figure is the trace of the Optimal Transformations value $\phi_i^*(X_i)$. Open circles indicate the values before calculating the expectations at formula(4).

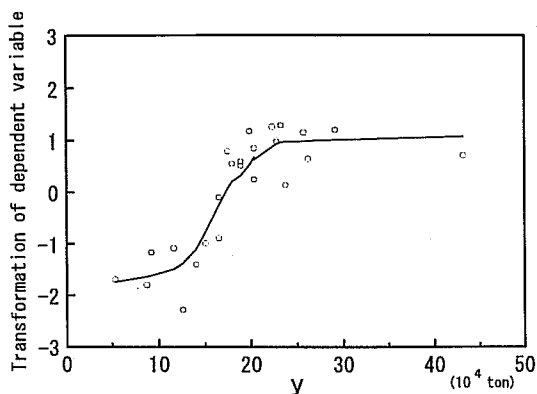


Fig. 3. Optimal Transformations of dependent variable. The line in the figure is the trace of the Optimal Transformations value $\theta^*(Y)$. Open circles indicate the values before calculating the expectations at formula(3).

く意味の異なるものであることを示唆している。例えば餌環境が良すぎる場合は、サンマ稚魚を捕食する魚種に対しても好環境であるため、稚魚の捕食による年級群の資源量の減少が生じることなどが、 X_2 の応答が負に切り替わる原因の1つの仮説として考えられる。 $X_2 \geq 420 \times 10^4$ となる時期は1973年から1978年に連続して集中しており(小達, 1994)、この時期は渡部(1992)による、マイワシの漁獲量が急激に増加した時期に対応している。渡部(1992)は、マイワシ資源の高水準期にはサンマ稚魚・未成魚の索餌北上期の分布様式は、マイワシ稚魚・未成魚の大量分布に影響されることを指摘している。このことから、1973年から1978年の $\phi_2^*(X_2)$ の応答の形の逆転は、動物プランクトン現存量が高水準になったことが、サンマよりマイワシに有利な間接的なメカニズムが働くことで生じたものである、との仮説をたてることができる。

無機的環境の指標としての黒潮統流の北限緯度 X_3 の応答はほぼフラットであり、サンマの生産に寄与しない要因であるという仮説が導かれる。 X_3 は黒潮の勢力とみなすことができ、サンマの北上期の環境条件に関連する。一般的にサンマの漁況は、南下期の親潮の条件による漁場形成によって規定されると考えられている。SHINOMIYA and TAMEISHI (1988) はリモートセンシングによる海況情報をもとに、親潮の計測値で適切な漁場形成予測が可能であることを示した。松宮・田中(1976)は、親潮系冷水域の面積の増加速度と漁場の南下速度に相関関係を見いだした。 $\phi_3^*(X_3)$ の応答から、黒潮の関与が弱いことがより具体的に示され、

無機的な環境要因としては、親潮の変動に関するものを取り挙げる必要がある。

Fig. 3の従属変数 Y の変換 $\theta^*(Y)$ に注目する。 $\theta^*(Y)$ は Logistic 関数に似た形である。ここで $\theta^*(Y)$ は部分的に直線で置換し、近似することができる。その場合の直線は、 Y の値に応じて異なる、無数の線形変換（1次関数）である。そこで $\theta^*(Y)$ が、 Y の値によって変化する1次関数の切り替わりで表されている、と考えて検討を進める。Fig. 3は線形変換が概ね資源水準の「低い時期」・「中程度の時期（ $10 \times 10^4 \leq Y \leq 25 \times 10^4$ ）」・「高い時期」に対応して切り替わっていると読み取れる。

(1)式の誤差項を無視して、要因の個数を $k=3$ とし、

$$Y = \theta^{*-1}(\phi_1^*(X_1) + \phi_2^*(X_2) + \phi_3^*(X_3)) \quad (7)$$

とする。 θ^{*-1} は逆関数である。Fig. 3の「低い時期」と「高い時期」については、 $\theta^*(Y)$ に傾きがなく定数とみることができる。 Y が 10×10^4 以下、または 25×10^4 以上では $\theta^*(Y)$ に傾きがないとみることができるため、この範囲ではモデルのあてはめに Y の値の大きさの違いが意味を持たなくなっている。一方 $10 \times 10^4 \leq Y \leq 25 \times 10^4$ の範囲内では $\theta^*(Y)$ と Y が1対1に対応しており、内挿結果(Fig. 1)からみても、 Y の変動が本報告で採用した3個の独立変数で説明されていることを意味する。(7)式より、 Y が 10×10^4 以下、または 25×10^4 以上では、独立変数の値が同じであっても、異なった Y の値が出現する。

まとめると、1) 独立変数の応答 $\phi_i^*(X_i)$ ($i=1,2,3$) は資源水準が「中程度の時期」のみ成り立つものであり、2) 「低い時期」と「高い時期」には、3個の要因で変動を説明できていない、という結果になる。特に2)の仮説的な解釈は、資源量の水準に応じて資源変動に関与する要因が変化しうる可能性があることを意味している。

5. 考察

本報告では主として、最適変換法のサンマ資源の解析への応用を、理論的な側面から述べた。最適変換法の適用によって、多変量データの変動の特徴を詳細に記述できることを示した。本報告の適用例では、独立変数の応答に明瞭な非線形性が特定された。漁漁況の変動は独立変数の単純な線形応答で説明できない場合が多いと考えられる。したがって、漁況予測モデルの作成にあたっては事前に最適変換を適用し、要因間の

応答特性の概形を把握することが、予測精度を向上させるために有効である。

応答特性を把握するためには、パラメタで応答関数が規定される、パラメトリックモデルの使用も可能である。SCHNUTE and MCKINNEL (1984) による、Response Surface Analysis (RSA) は独立変数の power (べき乗) 変換で従属変数への応答を表すもので、時系列データの複雑な変動の識別にも活用されている (TURCHIN and TAYLOR, 1992)。独立変数の応答が複雑なデータを複雑なモデルで解析しようとする、モデルのパラメタが増加して、本質的でないモデルで変動要因を抽出する危険性が高い。より複雑な変動要因を持つ漁況データを詳細に解析する目的で、パラメトリックモデルを使用することは一般的には妥当ではない。モデルの複雑さとモデルの適合性との関連については、松宮 (1993) に詳説されている。

最適変換法は、モデルにいわゆる物理的および生物学的の仮定がない。このため使用したデータとは別の情報を用いて、応答の妥当性を検証する必要がある。最も一般的には、予測値を外挿して実測値と比較する方法があげられる。最適変換の結果に基づき、本報告で示したような仮説を導出するための情報が得られることは、生物学的な研究を推進する場合に有効であろう。変数の個数が少ない場合や、変動要因が単純な場合は除いて、複雑な現象の解明には、最適変換法は特に有効であると考えられる。

参考文献

- BREIMAN, L. and J. H. FRIEDMAN (1985) Estimating optimal transformations for multiple regression and correlation. *J. Am. Stat. Assoc.*, **80**, 580-619.
- Cury, P. and C. Roy (1989) Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **46**, 670-680.
- 川合英夫 (1989) 東北海区近海の黒潮統流軸北限と親潮水南限の長期変動。水産海洋研究, **53**, 353-363.
- MATSUMIYA, Y. and S. TANAKA (1976) Dynamics of the saury population in the Pacific Ocean off northern Japan-II Estimation of the catchability coefficient q with the shift of fishing ground. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, **42**, 943-952.
- 松宮義晴・田中昌一 (1976) 東北・北海道海区の表面水温分布の数量化とサンマ漁場との結びつき。水産海洋研究会報, **29**, 30-40.
- 松宮義晴編 (1993) 水産資源解析と統計モデル。恒星社厚生閣東京, 116pp.
- MENDELSSOHN, R. and P. CURY (1987) Fluctuations of a fortnightly abundance index of the Ivoirian coastal

最適変換法に基づく資源変動要因の解析

- pelagic species and associated environmental conditions. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **44**, 408-421.
- MENDELSSOHN, R. and P. CURY(1989) Temporal and spatial dynamics of a coastal pelagic species, *Sardinella maderensis* off the Ivory Coast. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **46**, 1686-1697.
- ODATE, K. (1985) Distribution and inter-annual variation of zooplanktons in the open sea. *Bull. Mar. Sci.*, **37**, 772.
- 小達和子 (1994) 東北海域における動物プランクトンの動態と長期変動に関する研究. 東北水研研報, **56**, 115-174.
- SCHNUTE, J. and S. MCKINNELL(1984) A biologically meaningful approach to response surface analysis. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **41**, 936-953.
- SHINOMIYA, H. and H. TAMEISHI(1988) Discriminant prediction of formation of saury fishing grounds by satellite infrared imageries. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **54**, 1093-1099.
- 田崎武信・財前政美・後藤昌司 (1989) 最近の平滑化法とその応用. 計算機統計学, **2**, 57-69.
- 田崎武信・財前政美・後藤昌司 (1991) 交替条件付き期待値 (ACE) によるカテゴリカル・データの解析. 計算機統計学, **4**, 15-23.
- TURCHIN, P. and A. D. TAYLOR(1992) Complex dynamics in ecological time series. *Ecology*, **73**, 289-305.
- 渡部泰輔 (1992) 魚種交替のメカニズムと予測-多獲性浮魚類の再生産からみた魚種交替について. 水産海洋研究, **56**, 505-514.