統計数理 (1999)
第 47 巻 第 2 号 277-290

特集「情報量規準」
[総合報告]

水産資源学における赤池情報量規準の適用

東京大学* 松 宮 義 晴

(受付 1999 年 2 月 12 日；改訂 1999 年 4 月 8 日)

要 旨

水産資源学とは魚・イカ・エビ・カニなどの水産資源生物の数量変動や資源管理についての学問分野であり，生態学の基礎や統計学の原理を大幅に取り入れた，数式や数学モデルを駆使する精密な科学でもある．水産資源学に赤池情報量規準 (AIC) を適用した具体例として，再生産曲線の推定と DeLury 法による資源量推定の研究を詳しく紹介する．他の一般的な適用例としては，成長曲線の推定と体長組成の分解，標識放流法による資源特性値の推定，資源変動モデルの構築，網目選択曲線の推定などがある．日本の水産資源学の分野に AIC が導入された過程を述べ，AIC の活用について将来を展望する．

キーワード：赤池情報量規準 (AIC)，水産資源学，資源量推定，再生産曲線，資源特性値．

1. はじめに

陸上の野生生物で産業の対象になる資源といえるものは少なくなってしまった．狩猟産業は牧畜や畜産業に形を変え，多くの動物達は食糧資源からむしろ観光資源に変貌してしまった．天然生物採取産業として唯一，漁業が今日まで引き継がれている．どのような方法で水産資源を利用すれば永続的に最大の生産性を維持できるか，人間が魚を食糧として活用していく上での最もよいとり方を模索していくことが水産資源研究の中心課題である．21 世紀に向けての人類の食糧問題，人口問題，環境問題を克服する上でも，本当の更新資源である魚という水産資源の自然科学的側面を理解していただくことが重要である．水産資源学 (水産資源解析学) とは魚・イカ・エビ・カニなどの水産資源生物の数量変動についての学問分野であり，Fish Population Dynamics と訳す．この学問分野が‘魚の資源が漁業によってどのような影響を受けるか？’，‘漁獲努力を浪費しないで，海の幸を最大限に利用するにはどうすればよいか？’，‘漁業の強さと海の生物生産との間にはどんな関連があるのか？’という課題に対応できる．生態学の基礎や統計学の原理を大幅にとり入れた，数式や数学モデルを駆使する精密な現代科学でもある．

水産資源を評価し適切な管理をするための研究には，資源量や生残率 (死亡係数) のようなパラメータを推定したり，再生産関係や成長曲線あるいは漁具の選択性などを明らかにすることが必要である．多くの場合，漁業や調査船に基づく測定誤差やサンプリングによる確率変動を含むデータをもとに推定されている．水産資源学の分野では，様々な適切な統計学的手法が導

* 海洋研究所：〒164-8639 東京都中野区南台 1-15-1．

入されてきた．特に線形最小2乗法（線形回帰）は計算が容易であるため，パラメータ推定の方法として広く用いられてきた．水産学の分野では従来は，実際のデータに既存のモデルや理論式を盲目的一義的にあてはめてきたというのが実際的である．その理由も計算が容易である，教科書にみられた，そのモデルや式しか知らないなど希薄であり，詳細に吟味する姿勢はみられなかった．1990年頃から赤池情報量規準（Akaike Information Criterion，以下ではAICと略す）利用によるモデルの比較という立場で多くの研究が展開されてきた．3章ではAIC適用の具体例について，4章では研究発表の文献を整理して，22編の日本人によるAICを適用した論文を紹介する．

2. 赤池情報量規準と水産資源学の出会い

筆者が知る限り水産分野の科学論文にAICが登場するのは，Stocker and Noakesによるカナダの雑誌が初めてである．Stocker and Noakes (1988) はニシン幼魚量の将来予測をするための移送関数ノイズモデルで，どのような変数（親魚量，海の水温や流速など）を導入すればよいのかについてAICを活用している．近年では海外の水産資源解析分野でも，モデル選択にAICが利用されるようになった．例えばアメリカのコロラド州立大学のD. R. AndersonとK. P. Burnhamは放流再捕のモデル選択にAICを導入し，さらに‘Model selection in the biological sciences’という本を数人で執筆中である（Anderson et al. (1994)，Burnham et al. (1995)）．

水産学の分野では，外国人によるAIC関連の論文は少なく，日本人による論文が質量とも圧倒的に凌駕している．何より発案者が日本の赤池弘次博士であることに起因していると思われる．本分野では教祖的な存在である両博士による著書Hilborn and Mangel (1997) の第7章のModel selection using likelihoods, AIC for non-nested modelsの項に，‘Matsumiya (1990a), Hiramatsu and Kitada (1991), and Hiyama and Kitahara (1993) provide examples of the use of the **AIC in fisheries problems**’とあり，日本人による3論文だけが引用されている．

日本の水産資源学の分野にAICが導入される大きな契機となったのは，1988年12月に開かれたシンポジウム‘情報量規準とベイズ決定理論の水産資源解析への応用’（場所・東大海洋研，コンビナー・松宮義晴）である．この他，‘水産資源解析とその周辺分野——新しい考え方，機器および手法’（1987年，東大海洋研と統数研），‘資源解析学におけるパラメータの推定とモデル選択’（1992年，京大数解研），‘水産資源解析の課題と展望——統計モデルと資源特性値の推定’（1993年，日本水産学会・東水大）といういくつかのシンポジウムが開催され，これらの研究成果は松宮 編 (1993) として出版された．その後，シンポジウム‘生物科学における統計モデルの研究’（科研費総合研究A，コンビナー・山田作太郎，岸野洋久）が1995年に開催され，水産資源学に関する講演もみられた．

水産資源学の分野では平松 (1992) をはじめとして，数名がAICや最尤法を強力な手法として博士号（学位論文）を取得し，現在では日本における水産資源の数理解析研究において中心的な役割を担っている．AICは資源解析プログラム集や計算パッケージにもごく普通に盛りこまれ，現在では広く農学生命科学系大学院の修士論文の中でも何の引用もなく，相関係数rのように常識的に用いられるようになった．水産資源の動態学について総合的かつ系統的に整理された教科書として，田中 (1998) がある．この中の補遺4ではAICについてもふれられており，水産資源解析に関する学識を深めたい方には是非読んでいただきたい本である．

3. AIC 適用の具体例

3.1 再生産曲線の推定

生物資源は更新可能な資源であり，生物が子供を産んで数を増やしていく働きを‘再生産’という．魚をはじめ水産資源の大きな特徴として再生産という機能が挙げられ，魚資源には漁業による減少分を回復しようとする力が働く．魚資源も，種もみ，つまり親を残しておかないと次世代の子供がいなくなり，末永く資源を活用できない．どのくらい種もみの量を確保しておくべきか検討する‘資源管理’のためには，親子関係の量的な解析が必要である．親の量と子の量の長期間のデータから親子関係を定量的に示したのが再生産曲線で，一般に横軸に親世代の量としてある年の産卵総量（産卵親魚尾数，遡河量，親魚資源量指数），縦軸に子世代の量としてそれに由来する加入量（加入尾数，回帰量，加入資源量指数）をとる．

図1に典型的な親子関係を示す．親の量と無関係に子の量が平均的に一定の場合，図 1a のようになる．仮に産卵量に関係なく，常に一定割合が生残して子世代の資源となると，子の量は親の量に比例することになり，再生産曲線は b のような原点を通る直線となる．もし産卵量が多いほど密度の影響によって死ぬ確率が高くなるならば，再生産曲線は直線から離れ，その程度は産卵量が多いほど大きくなる．再生産曲線の型は，密度と死亡率の関係（密度効果）によって定まる．1尾の親の産卵量が一定で，卵から加入までの生残率も一定ならば，親子の関係は比例的となる（密度独立）．実際にはこのような関係は存在せず，生物資源は大きくなりすぎた時に増殖をおさえ，逆に小さくなりすぎた時に増殖を促進するような自己調節機構をそなえている．親の量と1尾の親の産卵量の関係，卵の量の加入までの生残率の関係，いいかえると，卵の生産や卵・仔稚魚の生残の密度従属の程度を知ることが大切である．密度従属的死亡は主として卵期以降の初期生活史の段階に集中していると考えられ，この関係をいろいろ仮定することによって各種の再生産曲線を示すことができる．重要な再生産式として，ベバートン・ホルト（Beverton-Holt）型とリッカー（Ricker）型の曲線がある（図1）．Beverton-Holt 型は，死亡率がその時その時の密度によって決定され，密度と瞬間的な死亡率が直線的な関係にある，という仮定から得られる．Ricker 型は死亡率が産卵量によって決定され，産卵量と直線的な関係にあるという仮定から得られる．この曲線はある親の水準で子が最大となり，産卵量がある

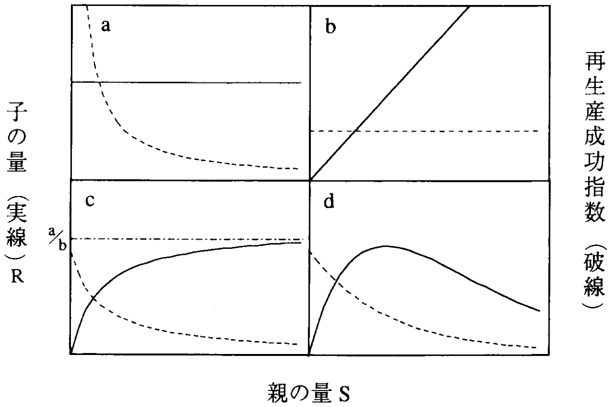

図1．典型的な親子関係．実線：再生産曲線（直線），子の量Rを由来する親の量Sの関数として表現したもの，破線：子の量/親の量（RPS，再生産成功指数），a：親の量と無関係に子の量一定，b：親の量に比例（密度独立），c：Beverton-Holt 型（密度従属），d：Ricker 型（密度従属）．

値を超えると加入量が減少するドーム型になる．Beverton-Holt 型とのこの相違点は漁獲が加入量へ与える影響を検討するとき重要となる．加入量への漁業の影響は，漁獲によって産卵親魚が減少し，そのことが子の世代の加入量に影響するという形で現れる．漁業の影響はこのような産卵親魚量と子の量の再生産の関係によって把握できる．

以下では平松・松宮・北田による研究を紹介する．Hiramatsu et al. (1994) は様々な統計モデルの比較に基づき，親子関係の精度の高い量的データから妥当な再生産式を導く考え方を示し，実際のデータに適用し，活用の方向や限界などについて考察を加えた．下記の 14 種類の統計モデルを定義し，従来の線形回帰に相当するモデルとともに，非線形のまま取り扱うモデルも考えた．親と子が直線で表示されるモデルや，無関係であるようなモデルも示し，あわせて検討を加えた．

1. $R=\alpha+\varepsilon$
2. $\ln R=\ln\alpha+\varepsilon$
3. $R=\alpha E+\varepsilon$
4. $\ln R=\ln\alpha E+\varepsilon$
5. $R=\alpha+\beta E+\varepsilon$
6. $\ln R=\ln(\alpha+\beta E)+\varepsilon$
7. $R=\alpha Ee^{-\beta E}+\varepsilon$
8. $\ln R=\ln\alpha Ee^{-\beta E}+\varepsilon$
9. $R=\dfrac{\alpha E}{1+\beta E}+\varepsilon$
10. $\ln R=\ln\dfrac{\alpha E}{1+\beta E}+\varepsilon$
11. $\dfrac{E}{R}=\dfrac{1}{\alpha}(1+\beta E)+\varepsilon$
12. $\dfrac{1}{R}=\dfrac{1}{\alpha}\left(\beta+\dfrac{1}{E}\right)+\varepsilon$
13. $R=\dfrac{\alpha E}{1+(\beta E)^{\gamma}}+\varepsilon$
14. $\ln R=\ln\left\{\dfrac{\alpha E}{1+(\beta E)^{\gamma}}\right\}+\varepsilon$

ここではEは親の量，Rは子の量，αとβとγは再生産式のパラメータ，εは誤差[$\varepsilon\sim N(0,\delta^2)$]である．モデル 1 と 2 は親子が無関係，モデル 3 ～ 6 は直線式，モデル 7 と 8 は Ricker 型，モデル 9 ～12 は Beverton-Holt 型，モデル 13 と 14 は Shepherd 型である．誤差εを含めて，それぞれ 2 ～ 4 個のパラメータをもつ．モデル 1，3，5，7，9，13 は再生産式のまわりに子Rが正規分布し，モデル 2，4，6，8，10，14 では対数正規分布するものである．モデル 11 と 12 は，それぞれEとE/R，$1/E$と$1/R$が線形回帰する，従来から頻用されてきた Beverton-Holt 型に相当する．

各統計モデルの尤度関数を導出し，与えられたデータのもとで，パラメータの最尤推定値を求めた．計算はシンプレックス法最適化プログラムに従い，妥当な再生産式の選択は赤池情報量規準 (AIC) に拠った．過去の論文から選び出された 35 組の親子関係のデータを解析した結果，様々なモデルが選択された．選択されたモデルは，もとの論文で採用された再生産式とは一致しないものが目立った．誤差が対数正規分布型のモデル (モデル 12 を除き，偶数番号のモデル) の方が妥当なモデルとして選択される傾向がみられた．親の量Eが大きいほど，バラツキ

が大きいという常識的な知見とも一致した．自在型の新しい再生産式として提案された Shepherd 型はパラメータ数が最も多いモデルであるが，採択されたデータは 2 組のみであった．再生産式の推定には，このような詳細な検討が必要である．

たくさんのデータセットから，一般的な性質の推定を試行したり，多くの研究者による分析結果を比較分析して総合的な結論を導くことを meta-dataset-analysis（メタアナリシス）という．メタアナリシスは統計学的な取り扱いが難しい再生産関係に関する知見を検討する有力な方法といえよう．外国の諸論文は魚類資源の加入量は親魚量に関係するか，密度依存的調節のメカニズムがあるかないか，について検討し様々な論争を呼んでいる．上記の再生産モデル 13 と 14 の Shepherd 型のパラメータ γ が 1 より大きい時，再生産式は S 字状曲線となり depensation（非補償）の程度が大きいことを意味する．Myers et al. (1995) と Liermann and Hilborn (1997) は 120 種類程度の魚資源の 15 年以上に及ぶ親子間のデータセットを用い，魚類資源の depensatory model の妥当性を尤度比検定と階層的ベイジアンメタアナリシスで検討した．

3.2 DeLury 法による資源量推定

DeLury 法は移出入のない資源の漁獲量と努力量データから，努力あたり漁獲量の減少傾向を利用して資源量と漁具能率を推定する方法であり，除去法または Leslie 法とも呼ばれる．閉鎖系とみなされる水域で，比較的短時間に連続して強度の漁獲が行われた場合に有効であり，アワビ・ナマコ・サザエなどの高価で移動の少ない根付資源の解析によく利用されている．自然死亡や加入を無視できる仮定が満たされない場合や，漁具能率が環境要因により変化する場合にも適用できる拡張モデルが考案されている．ここでは複数のモデル比較をするために赤池情報量規準（AIC）を用い，データの解析結果を通じて，モデルの発展とより現実的なパラメータの推定を導く過程について検討する．

応用例を以下に示す．DeLury 法は漁獲量 C_i と努力量 X_i の期別データ（$i = 1,\ldots, k$）より，初期資源量 N_0 と漁具能率 q を計算し，$C_i/X_i = q_i(N_0 - \sum_{j=1}^{i-1} C_j)$ が基本式である．① DeLury の第 2 モデル $\ln(C_i/X_i) = \ln qN_0 - q(\sum_{j=1}^{i-1} X_j) - M(i-1)$ を用いると，自然死亡係数 M の有無の選択は AIC による重回帰分析の変数選択（$F_{\mathrm{in}} = F_{\mathrm{out}} = 2$）に帰結できる．②漁具能率の変化する場合について，Schnute (1983) による除去法を拡張し発展させた．Schnute (1983) は $X_i = 1$ に限るデータについて，二項分布に基づき

$$\mathrm{pr}\{\hat{C}_i \mid N_0,\ \hat{T}_{i-1},\ q_i\} = \binom{N_0 - \hat{T}_{i-1}}{\hat{C}_i}(1-q_i)^{N_0 - \hat{T}_i} q_i^{\hat{C}_i}$$

（但し $T_i = \sum_{j=1}^{i} C_j$）と表現し，漁具能率 q の経時変化の 3 パターン［$q_i = q_1$；$q_i = q_1 (i = 1)$, $q_i = q (i = 2,\ldots, k)$；$q_i = q_1 + (q - q_1)(1 - a^{i-1}), 0 \le a \le 1$］をモデル化し，最尤法でパラメータを推定し，最適なモデルの選択には χ^2 分布の $\alpha = 0.05$ (df $= 1$) の 3.84 を規準とした．実例はカワマスの電気漁で，数値計算はシンプレックス法による．モデル 1 はパラメータ数 2 個（N と q_1），モデル 2 は 3 個（N, q_1, q），モデル 3 は 4 個（N, q_1, q, a）である．Matsumiya (1990a) は AIC を導入するには 3.84 を 2×1（パラメータの増加分）に置換すればよく，拡張 DeLury 法に AIC を活用すれば，データごとの最良のモデルを選択するという実際的な目標まで発展することが可能であることを示唆した．

漁具能率 q は漁獲の効率や漁具の性能に関係し，単位努力あたり漁獲率を意味する．資源量指数 $\Sigma C/X$ を q で除すと資源の絶対量が得られる．Yamakawa et al. (1994a) は水温，潮の大きさ，波浪，透明度などの環境要因によってイセエビ用刺網の漁具能率が変化する以下のような 14 通りのモデルを提案した．漁獲努力量 X は $X = 1$ に限定されず，期によって変化する条

件付き二項分布の積として表現した（以下は本論文の紹介である）．

$$L=\prod_{i=1}^{n}\binom{N_i}{C_i}p_i^{C_i}(1-p_i)^{N_i-C_i},\qquad N_i=N_0-T_{i-1},\qquad T_i=\sum_{j=1}^{i}C_j$$

（N_i：i 期における資源尾数，p_i：i 期における（N_i に対する）除去率）

除去率は　$p_i=1-\exp(-q_iX_i)$ によって表す：（q_i：i 期における漁具能率，X_i：i 期における漁獲努力量）

Ⅰ．$q_i=a$

Ⅱ．$q_i=a+bi$

Ⅲ．$q_i=a+bi+di^2$

Ⅳ．$q_i=(a+bi+di^2)[1+u\cos\{2\pi(i-v-v_0)/M\}]$

Ⅴ．$q_i=(a+bi+di^2)[1+u\cos\{2\pi(i-v-v_0)/M\}](w_i+z)$

Ⅵ．$q_i=a(t_i+f)$

Ⅶ．$q_i=a(t_i+f)[1+u\cos\{2\pi(i-v-v_0)/M\}]$

Ⅷ．$q_i=a(t_i+f)[1+u\cos\{2\pi(i-v-v_0)/M\}](w_i+z)$

Ⅸ．$q_i=\begin{cases}a(t_i+f) & (i\le i_0)\\ a(gt_i+h) & (i>i_0)\end{cases}$

Ⅹ．$q_i=\begin{cases}a(t_i+f)[1+u\cos\{2\pi(i-v-v_0)/M\}] & (i\le i_0)\\ a(gt_i+h)[1+u\cos\{2\pi(i-v-v_0)/M\}] & (i>i_0)\end{cases}$

Ⅺ．$q_i=\begin{cases}a(t_i+f)[1+u\cos\{2\pi(i-v-v_0)/M\}](w_i+z) & (i\le i_0)\\ a(gt_i+h)[1+u\cos\{2\pi(i-v-v_0)/M\}](w_i+z) & (i>i_0)\end{cases}$

Ⅻ．$q_i=\begin{cases}a\{\bar{t}_i+f+l(t_i-\bar{t}_i)\} & (i\le i_0)\\ a\{g\bar{t}_i+h+l(t_i-\bar{t}_i)\} & (i>i_0)\end{cases}$

XIII．$q_i=\begin{cases}a\{\bar{t}_i+f+l(t_i-\bar{t}_i)\}[1+u\cos\{2\pi(i-v-v_0)/M\}] & (i\le i_0)\\ a\{g\bar{t}_i+h+l(t_i-\bar{t}_i)\}[1+u\cos\{2\pi(i-v-v_0)/M\}] & (i>i_0)\end{cases}$

XIV．$q_i=\begin{cases}a\{\bar{t}_i+f+l(t_i-\bar{t}_i)\}[1+u\cos\{2\pi(i-v-v_0)/M\}](w_i+z) & (i\le i_0)\\ a\{g\bar{t}_i+h+l(t_i-\bar{t}_i)\}[1+u\cos\{2\pi(i-v-v_0)/M\}](w_i+z) & (i>i_0)\end{cases}$

ここで

t_i：i 期における水温，

$\bar{t}$：水温の5点移動平均値　$\left(\bar{t}_i=\sum_{j=i-4}^{i}t_j/5\right)$，

i_0：水温の変化点（期），

v_0：10月における最初の新月の日，

M：太陰月（=29.53日），

w_i：i 期における波浪強度の指数，

$a, b, d, f, g, h, l, u, v, z$：（推定すべき）パラメータ

である．

q_i は，モデルⅠでは一定，モデルⅡとモデルⅢではそれぞれ，期間 i に関する線形関数と二次関数である．モデルⅣとⅤはモデルⅢを拡張したケースで，モデルⅣでは太陰月 M を周期とする q_i の周期的変化が導入されている．u は周期の変動幅を決めるパラメータ，v は位相を決めるパラメータである．モデルⅤはモデルⅣに加えて波浪の強さを考慮したもので，w_i の線形関数が導入されている．モデルⅥでは，q_i は水温 t_i の線形関数である．モデルⅦとⅧはモデル

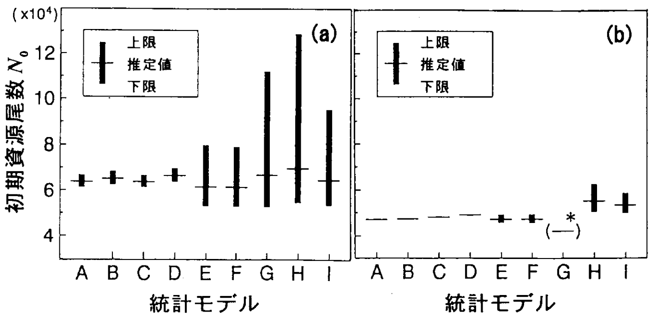

図 2.　拡張 DeLury 法の各統計モデルによって推定された，1990 年 10 月における初期資源尾数 N_0 の値と 95%信頼区間．信頼区間は尤度比検定によって計算した．(a) 単年データによる解析結果，(b) 3 ヶ年データの同時解析による推定結果．＊：モデル G では N_0 の推定値が現実の総漁獲尾数 T_n (=42,050) と等しい値に収束したため，信頼区間を求めることができない (Yamakawa et al. (1994b) から引用)．

VIを，太陰月周期と波浪を用いて拡張したケースである．モデルIX，X，XIでは水温に関する異なる 2 つの線形関数が i_0 の前後で別々に定められており，g はこれら 2 つの関数の傾きの比を表す．モデルXII，XIII，XIVは水温の移動平均 $\bar{t}_i$ を導入することによって水温の長期変動と短期的変化を別々に扱うことができるようにしたものである．ここで l は t_i と $\bar{t}_i$ の差の影響割合を決めるパラメータである．

イセエビ刺網の漁獲データに適用して資源パラメータの推定や AIC に拠るモデル間の比較検討を行った結果，水温と太陰月周期，波浪による q の変化を導入したモデルXIVが適当なモデルとして選択された．水温による q の変化を水温上昇期と下降期に分けて表現し，さらに水温の 5 日間移動平均値を導入したモデルは妥当性が一層高まった (Yamakawa et al. (1994a))．

Yamakawa et al. (1994b) は前述の拡張 DeLury 法において，9 通りの統計モデル，A. 条件付き Poisson 分布，B. 条件付き二項分布，C. B の正規近似，D. 多項分布の正規近似，E. C の over-dispersion モデル，F. D の over-dispersion モデル，G. 条件付き正規分布モデル，H. 条件付き対数正規分布モデル，I. 条件付き負の二項分布，による尤度を導出した．前と同様にイセエビ刺網の漁獲データに適用し，AIC に拠り統計モデルを比較した結果，負の二項分布が最も妥当なモデルと判断された．この結果は，集中分布とみなせるイセエビの実際の分布生態をよく反映していると考えた．

上記の各モデルについて，単年データ (図左) と 3 ヶ年データ (図右) を用いて，初期資源尾数 N_0 の推定と信頼区間を図 2 に示した．I の負の二項分布モデルでは推定値の信頼区間が相当広かったが，3 年間のデータをまとめた解析では単年の解析より信頼区間は狭くなった．以上の研究については，いくつかの視点からさらに詳しい解析が進められている．

4.　水産資源学における適用例

4.1　成長曲線の推定と体長組成の分解

水産生物の体長 L と体重 W の関係では，従来はアロメトリー式 $W=aL^b$ の対数をとって $\ln W=\ln a+b\ln L$ とし，直線回帰により係数 a と b を求めていた．この時 $b=3$ と固定してよいかを比較検討する必要がある．データごとにパラメータ 1 つ (a のみ) か，2 つ (a と b) の式を選択するか，AIC によって判断できる．Hiyama and Kitahara (1993) は魚類の surplus energy (成長と繁殖に使えるエネルギー) と体重の理論的な関係式について研究した．従来の式とパラメータが3つ多い提案式との比較検討にAICを導入した．

水産資源の一般的な成長の傾向を表現する理論式には，直線式，1分子反応式，ロジスチック曲線，Gompertzの式などがあり，特にBertalanffyの式が頻用されている．Richardsの式$L = L_\infty/[1+n\exp\{-K(t-t_0)\}]^{1/n}$は$n=-1/3, 0, 1$の時それぞれ，Bertalanffy式，Gompertz式，ロジスチック曲線となる (体長L，年齢t，最大体長L_∞，成長係数K)．さらに季節による成長の違いを導入した周期関数 (sin) による拡張モデルでは振幅と起点の2つのパラメータが加わる．Akamine (1988) はnをパラメータに加えることの妥当性の判定や最適な成長式の決定にAICを活用した．Kiso et al. (1992) はサクラマス雌の降海型と河川残留型の成長様式を比較し，AICに拠り2型とも成長速度が周期的に変化するGompertz式が妥当であることを示した．

水産生物は鱗，耳石，脊椎骨などの硬組織で年齢を査定するが，体長組成を手がかりに年齢組成を推定する場合もある．この方法は，多峰型の度数分布 (ヒストグラム) を単位の正規分布 (1つの年級群の分布) に分解しようとする考え方に集約できる，たくさんのコンピュータプログラムが作成され公開されている (赤嶺 (1985))．多重正規分布$f=\sum P_i N(\mu_i, \sigma_i)$, $\sum P_i = 1$において，正規分布の個数 (年級群の数) nの決定にAICが適用できる．このときパラメータ数は$3n-1$であるが，$P_k=0$ならμ_iとσ_iは意味がない．但し，度数分布をみただけで正規分布の数を決定できないようなデータでは，誤差が大きくなりAICの値だけで判断するのは危険が伴う．一般的な生物学的知見も考慮して解析することが望ましい．混合分布の分解における構成分布数の問題は完全には解かれておらず，統計的取扱いには注意を要する．

Yamakawa and Matsumiya (1997) は成長に年変動がある場合の経時的な複数体長組成データを一括的に解析し，齢別組成と成長曲線を推定する方法を提案した．各パラメータはデータセットごとに独立あるいは共通として設定でき，未知として推定または既知として固定の様々な選択が自由に行える．この方法によると，成長が年ごとに変動する場合でもデータに内在する情報量を有効に活用でき，柔軟で精度の高い推定を行うことができる．38,486尾の雄のイセエビ頭胸甲長組成データに適用しAICによる比較の結果，成長の年変動および季節変動，標準偏差の変化，高齢群の減少を導入するとモデルの妥当性が高まった．

4.2 標識放流法による資源特性値の推定

標識放流法とは迷子札などの標識票を魚体に装着したり，魚自体に目印を付けて元の資源に戻してやり，標識個体が再び捕らえられる状況 (全漁獲尾数に対する標識再捕個体の割合) から資源量 (魚の数) を推定する方法である．標識魚の再捕までの期間の長さ，あるいは単位期間毎の再捕尾数の時系列データが得られれば，漁獲されることによる死亡と自然死亡の度合 (一般に時間あたりの漁獲係数Fと自然死亡係数Mで表示) などの資源特性値を推定できる様々なモデルが考案されている．

Crosbie and Manly (1985) は多回放流多回再捕の有力手法であるJolly-Seber法の生残・加入・捕獲の仮定にある分布型や等捕獲確率を設定し，よりパラメータ数の少ない節約型のモデルを構築した．Matsumiya (1990b) はこの研究にAICを導入すると，データごとにより節約型のモデルを端的に選択でき，尤度比検定と異なる結果が得られることを示した．1回放流の標識再捕試験による死亡係数の推定では，ふつうFとMが推定される．Hiramatsu and Kitada (1991) は自然死亡が小さいと考えられる場合，モデルへのM導入の是非をAICによるモデル比較の立場から検討し，ガザミのデータに適用した．

1回放流の標識再捕の時系列データから一定のFとMを推定する方法は古くから扱われてきたが，1987年頃からFとMが時間に伴って変化する場合の解析方法が開発されてきた．北田 他

(1993) は多項分布ではなく，正規近似によって再捕系列に対する統計モデルを構成し，変化点をもつFとMの推定について考察した．マダイによる標識放流魚の解析事例では変化点は放流後14日と推定され，FもMも変化するモデルが選択された．同じ変化点の下で，Mは一定でFだけが変わるモデルでさらに解析を加えるとAICの値が最小となった．Kitada et al. (1994) は変化点をもつ時のほか，魚の集中分布のために漁獲が単純ランダムサンプリングで行われずover-dispersionが起きた場合の解析方法および2つの群を同時に同じ海域に放流した時の死亡率の差の検出に，様々な統計モデルを導入しAICを活用している．Matsuda and Akamine (1994) は栽培漁業のアワビの標識再捕データから再捕個体の空間分布を巧みに活用して死亡率と拡散率を同時推定した．拡散の時間独立と従属モデルやいくつかの空間分布のモデル間の比較にAICを用いている．

4.3 資源変動モデルの構築

水産資源の変動解析は，資源量の年変動値を目的変数とし環境要因（海況，水温，塩分，水質，濁度，海流，風向，河川からの流入量など）を説明変数として，線形重回帰モデルを用いて実施されることが多い．重回帰モデルは一般的に加法型モデルであり，最適モデルの探索作業は，AICに拠り変数選択法 ($F_{\mathrm{in}} = F_{\mathrm{out}} = 2$) を通じて機械的かつ単純に実行される．横田 他 (1998) はホタルイカ漁獲量変動と環境要因との関連を解析するため，重回帰分析を行いAICによる変数選択を行った．資源変動において漁獲の有無や漁場形成の有無というような2値表現が不可欠な場合があり，これに対応できるポアソン計数過程による時系列変動のための統計モデルも検討されている．

Ohnishi et al. (1995) は変動要因データ内の自己相関や要因間の相関関係を考慮した多次元自己回帰モデルを構築し，漁海況データの解析と予測に利用した．日本本州南岸から計測した黒潮流軸の離岸距離をガウスモデル（全誤差間に正規分布を仮定）および非ガウスモデル（部分的に非ガウスモデルを導入）で解析し，AICによるモデル評価の結果，後者の適用が妥当であった．乱数を用いた非ガウスモデルによる予測値が，より現実的な離岸距離の変動を生成することも確認した．

現実的には，資源変動は大きな幅で不規則に起こることが一般的であるため，非線形な応答を採用した加法型の非線形重回帰モデルまで拡張する必要がある．いくつかの仮設的なモデルがある場合には考え得る全ての関数形を全て組み合わせ，AICをもとにモデル探索する方法が効率的である．一般にモデルの非線形項に用いる関数は未知であり無数に存在している．モデルごとのパラメータ推定には数値的最適化を伴うため，逆に効率の悪い非現実的な方法となってしまう．仮に非線形項の関数が大雑把にでもわかれば候補になるモデルが限定でき，探索は非常に能率的になる．統計学的なモニタリングの手段として最適変換法 (Optimal Transformations; Breiman and Friedman (1985)) があり，所与のデータから非線形項の関数形を大雑把に推定できる．また重回帰モデルのもつ応答の線形性をやや緩和したモデルとして，応答曲面法 (Response Surface Analysis) がある．

大西・松宮 (1996) は最適変換法の適用により推定した関数形を参考にして，モデルの非線形項を設定し，非線形重回帰モデルを構築することで，AICに基づく妥当なモデルを効率よく探索でき，同時に一般的な重回帰モデルにおいては改善の余地があることを指摘した．さらにいくつかの適用例において，最適変換法に基づくモデルが，応答曲面法のもつ効用を超えることができ，非加法型まで含めて構成できる可能性も模索した．

4.4 網目選択曲線の推定

ある漁具が漁獲しやすい魚の大きさ，すなわち漁具による体長サイズの選択性を知ることは，

資源評価や資源管理の上で重要である．底曳網では，魚の体長が大きくなるにしたがって網内にとどまる割合 (漁獲される比率) が高くなり，対象魚の体長を変数としたLogistic式で表現されることが多い．網目選択性を推定する方法に，対象とする袋網の外側を目合の小さい網でおおう‘カバーネット法’(おおい網試験) がある．対象としている網に漁獲された魚の数と，網から脱落してカバーネットで漁獲された数から，各体長ごとの網にとどまる割合すなわち選択率を計算することができる．網口に入る魚の数は体長によって大きな差があるため，体長ごとにデータのバラツキ方が異なり，正しい選択曲線を推定することは困難であった．平松 (1992) は網目選択の過程を確率論的に扱い，網を抜ける魚と網の比の確率変動を二項分布で表した最尤法によるパラメータ推定の方法を示した．パラメータ数の異なる複数の選択曲線 (シグモイド単純型と拡張型) 間の比較はAICで判断した．なおパラメータ推定には一般化線形モデル (Generalized Linear Model, GLM) の最尤推定がよく用いられている．

大本 他 (1998) は角目と菱目の袋網を用いた底曳網の選択曲線について，また内田 他 (1998) はマアナゴに対するかご網の網目選択曲線について，AICによる比較検討を行なった．東海・三橋 (1998) は比較操業実験から求めるSELECTモデルも含めて，選択性曲線のパラメータ推定法やモデルの適合性などについて総説を加えた．谷津 他 (1994) はアカイカ漁業の流し網に混獲されるオットセイやイルカの尾数について，流し網の目合 (網目のサイズ) と混獲の確率分布 (ポアソン分布と負の二項分布) を組合せたモデルを考え，AICを用いて比較検討した．

5. 展望とまとめ

水産資源学分野においては，生物の成長や再生産の動態，漁獲の過程などの定量的な把握を目的に，様々な統計モデルが考案されてきた．モデルの構成には，物理学的生物学的に現実的な定式化が求められるが，数式が複雑になると推定や計算には困難が伴う．複雑なモデルは現実的であっても，実際のデータに基づく解析では実用に耐えない．近年，固定的なモデルに固執せず新たなモデルを模索する傾向が著しく，これには統計学的分野における‘最尤法と情報量規準AICを用いた統計モデルの研究’の進展が大きく寄与している．小型計算機や非線形最適化法の発達により，モデルが複雑になっても推定できるため，自由自在な発想でモデル構築を進めることが可能となった．モデルの数学的な研究も発展し，水産資源の定量的研究はより一層現実的なモデルを通じて解析されるようになった．

広く世界の水産資源学分野では，ベイズ統計学やベイズ的アプローチの適用も盛んで，近年では Hilborn et al. (1994) と Punt and Hilborn (1997) の2つの総説が出されている．日本でも水産資源を対象とした若干の論文がみられる．水産学の分野では，漁獲努力量の情報がなくても資源量を把握できるコホート解析という手法が研究されている．大西 他 (1993) はパラメータの漸進的変化の仮定を取り込んだベイズ型コホートモデル (Nakamura (1986)) の水産資源解析への応用を模索し，仮設的なデータとマサバ漁業のデータを分析することによって，ベイズ型情報量規準 (ABIC) の実際的な効用を論証した．

以下では平松 (1992) に従い，AICの活用について展望する．最尤法では線形に式変形する必要がないため，従来は別々に扱われてきた手法を統一的に取り扱うことが可能となった．例えば DeLury 法 (3.2節)，標識放流法による資源特性値の推定 (4.2節)，コホート解析はいずれも閉じた資源を対象とし，漁獲尾数データ C を基本に初期資源尾数 N，漁獲係数 F，自然死亡係数 M などを推定する方法である．基本とする式は共通で，

$$C_j = N\frac{F_i}{F_i+M}[1-\exp\{-(F_i+M)\}]\times\exp\left\{-\sum_{j=1}^{i-1}(F_j+M)\right\}.$$

利用可能な情報の違いがそれぞれの手法の違いに対応している．3手法間には漁獲尾数以外の情報として何が得られるかという差があるだけで，一般的な立場から従来の慣習にとらわれることなく，柔軟なモデル作りが可能である．

線形回帰を中心とした解析では，モデルを未知のパラメータについて線形になるよう変形したり近似したりすることに力が注がれてきた．このため，必ずしも現象に即していないモデルが用いられることがあり，本質的には同じでも未知パラメータのわずかな違いにより，全く異なった方法として扱われることがあった．最尤法によれば，未知パラメータはデータ発生確率モデルから直接推定され，AICにより異なった種類のモデルも統一的に比較することが可能である．従来は比較できなかったようなモデル間の統計学的な比較を可能としたことがAIC適用の大きな利点といえよう．一方，AICで選ばれたモデルが絶対的なものであるというわけではない．そのモデルでは考慮していないような，生物学的あるいは経済的要因も含めて総合的に判断した結果，AICで最適となったモデルを実際には使わないということも当然ありうる．こういった点をふまえた上でAICの利点は十分活用すべきであるし，活用していきたいと考えている．

水産学の分野では適切な入門書がなかったこともあって，最尤法とAIC活用の多くの利点は浸透しにくかった．かつては，水産学分野の研究者にはとっつきにくい手法であり，統計学に堪能な一部の研究者が活用していたにすぎなかった．その後本稿が示すように，最尤法とAICを用いた研究は増大し，最近では線形回帰で十分な解析にわざわざ最尤法を用いるなど，その濫用や誤用を憂える意見もみられる．日本の水産資源学の分野では，AICは一般的常識的に適用されるようになった．

統計学の水産資源学への応用という観点からみれば，本稿で紹介したようなデータから情報を取り出すこと（統計的推測）だけでなく，統計的データを作り出すこと（標本調査）や，データに基づいて具体的な問題について決定を下すこと（統計的決定・予測）も重要である．いくら最尤法やAICが便利な道具であろうと，偏ったデータからは適切な推定やモデルは導出できない．水産庁遠洋水産研究所（静岡県清水市）の若い研究者は，ベイジアン・シンセシス（Bayesian Synthesis）およびcorrected AIC（Sugiura (1978)，Hurvich and Tsai (1991)）やTIC（竹内(1976, 1983)）の水産資源学への適用を推進している．ベイジアン・シンセシスは決定論的資源動態モデルに情報の不確実性をとりこんだ資源評価解析手法で，クジラ類の資源管理に応用されつつある（岡村 (1997)）．水産学分野の標本数（データ数）は一般的に多くないので，AICとcorrection of AICのどちらを採用するかによってモデル選択の結果が違ってくる場合が頻出する．水産資源学の分野では，水産資源の管理と保全がより大きな宿命的な課題となりつつある．本分野の数理解析的研究も，具体的な資源管理への応用が重視されるようになった．永続的な資源利用や資源管理研究への寄与や貢献という視点で，日本の水産資源学における統計学的研究も真価を問われる時代が来たといえよう．

謝　　辞

本稿をまとめるにあたり，貴重なご指摘ならびにご助言いただいた査読者の諸先生方には心からお礼申し上げる．編集委員の方々には種々のご指導やご高配をいただいた．本稿のような研究を実施する過程で，統計学分野の石黒真木夫，中村隆，平野勝臣，坂元慶行，種村正美，松原望，繁桝算男，丹後俊郎，岸野洋久の諸先生方をはじめ，多くの皆様方にシンポジウムの講演者や座長を担っていただき，また個々の研究に対しても有益なご指導を賜わった．この場

を借りて厚く御礼申し上げる.

参 考 文 献

赤嶺達郎 (1985). Polymodal な度数分布を正規分布へ分解する BASIC プログラムの検討, 日本海区水産研究所報告, **35**, 129-160.

Akamine, T. (1988). Estimation of parameters for Richards model, *Bulletin of the Japan Sea Regional Fisheries Research Laboratory*, **38**, 187-200.

Anderson, D. R., Burnham, K. P. and White, G. C. (1994). AIC model selection in overdispersed capture-recapture data, *Ecology*, **75**, 1780-1793.

Breiman, L. and Friedman, J. H. (1985). Estimating optimal transformations for multiple regression and correlation, *J. Amer. Statist. Assoc.*, **80**, 580-619.

Burnham, K. P., White, G. C. and Anderson, D. R. (1995). Model selection strategy in the analysis of capture-recapture data, *Biometrics*, **51**, 888-898.

Crosbie, S. F. and Manly, B. F. J. (1985). Parsimonious modelling of capture-mark-recapture studies, *Biometrics*, **41**, 385-398.

Hilborn, R. and Mangel, M. (1997). *The Ecological Detective — Confronting Models with Data*, Princeton University Press, New Jersey.

Hilborn, R., Pikitch, E. K. and McAllister, M. K. (1994). A Bayesian estimation and decision analysis for an age-structured model using biomass survey data, *Fisheries Research*, **19**, 17-30.

平松一彦 (1992). 最尤法による水産資源の統計学的研究 — パラメータ推定とモデル選択 —, 遠洋水産研究所研究報告, **29**, 57-114.

Hiramatsu, K. and Kitada, S. (1991). Model selection of single release tagging studies: The effect of natural mortality, *Nippon Suisan Gakkaishi*, **57**, p. 977.

Hiramatsu, K., Matsumiya, Y. and Kitada, S. (1994). Introduction of suitable stock-recruitment relationship by a comparison of statistic models, *Fisheries Science*, **60**, 411-414.

Hiyama, Y. and Kitahara, T. (1993). Relationship between surplus enegy and body weight in fish populations, *Researches on Population Ecology*, **35**, 139-150.

Hurvich, C. M. and Tsai, C. (1991). Bias of the corrected AIC criterion for underfitted regression and time series models, *Biometrika*, **78**, 499-509.

Kiso, K., Akamine, T., Ohnishi, S. and Matsumiya, Y. (1992). Mathematical examinations of the growth of sea-run and fluviatile forms of female masu salmon *Oncorhynchus masou* in rivers of the southern Sanriku district, Honshu, Japan, *Nippon Suisan Gakkaishi*, **58**, 1779-1784.

北田修一, 平松一彦, 岸野洋久 (1993). 変化点を持つ放流魚の死亡係数の推定, 日本水産学会誌, **59**, 263-267.

Kitada, S., Hiramatsu, K. and Kishino, H. (1994). Estimating mortality rates from tag recoveries: Incorporating over-dispersion, correlation, and change points, *ICES Journal of Marine Science*, **51**, 241-251.

Liermann, M. and Hilborn, R. (1997). Depensation in fish stocks: A hierarchic Bayesian meta-analysis, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, **54**, 1976-1984.

Matsuda, H. and Akamine, T. (1994). Simultaneous estimation of mortality and dispersal rates of an artificially released population, *Researches on Population Ecology*, **36**, 73-78.

Matsumiya, Y. (1990a). AIC introduced to Schnute's models by the removal method, *Nippon Suisan Gakkaishi*, **56**, p. 543.

Matsumiya, Y. (1990b). AIC introduced to parsimonious modelling of capture-mark-recapture studies, *Nippon Suisan Gakkaishi*, **56**, p. 839.

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.

Myers, R. A., Barrowman, N. J., Hutchings, J. A. and Rosenberg, A. A. (1995). Population dynamics of exploited fish stock at low population levels, *Science*, **269**, 1106-1108.

Nakamura, T. (1986). Bayesian cohort models for general cohort table analysis, *Ann. Inst. Statist. Math.*, **38**, 353-370.

大本茂之, 東海 正, 反田 實, 西川哲也, 松田 皎 (1998). 角目袋網と菱目袋網の選択曲線の AIC による比較, 日本水産学会誌, **64**, 447-452.

大西修平，松宮義晴 (1996)．資源変動モデルの構築と最適変換法の応用，月刊海洋，**28**，111-117.

大西修平，松宮義晴，原田泰志 (1993)．ベイズ型コホートモデルの水産資源解析への応用，三重大学生物資源学部紀要，**9**，49-53.

Ohnishi, S., Matsumiya, Y., Ishiguro, M. and Sakuramoto, K. (1995). Construction of time series analysis model effective for forecast of fishing and oceanographic conditions, *Fisheries Science*, **61**, 550-554.

岡村　寛 (1997)．ベイジアン・シンセシスの紹介，水産資源管理談話会報，**18**，46-63.

Punt, A. E. and Hilborn, R. (1997). Fisheries stock assessment and decision analysis: The Bayesian approach, *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, **7**, 35-63.

Schnute, J. (1983). A new approach to estimating populations by the removal method, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, **40**, 2153-2169.

Stocker, M. and Noakes, D. J. (1988). Evaluating forecasting procedures for predicting Pacific herring (*Clupea harengus pallasi*) recruitment in British Columbia, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, **45**, 928-935.

Sugiura, N. (1978). Further analysis of the data by Akaike's information criterion and the finite corrections, *Comm. Statist. Theory Methods*, **7**, 13-26.

竹内　啓 (1976)．情報統計量の分布とモデルの適切さの基準，数理科学，**153**，12-18.

竹内　啓 (1983)．AIC 基準による統計的モデルの選択をめぐって，計測と制御，**22**，445-453.

田中昌一 (1998)．『水産資源学総論』，改訂版，恒星社厚生閣，東京.

東海　正，三橋延央 (1998)．比較操業実験から選択性を求める SELECT モデルについて，水産海洋研究，**62**，235-247.

内田圭一，東海　正，胡　夫祥，松田　皎 (1998)．カバーネット法によるマアナゴに対するかご網の網目選択性，日本水産学会誌，**64**，815-821.

Yamakawa, T. and Matsumiya, Y. (1997). Simultaneous analysis of multiple length frequency data sets when the growth rates fluctuate between years, *Fisheries Science*, **63**, 708-714.

Yamakawa, T., Matsumiya, Y., Nishimura M. and Ohnishi, S. (1994a). Expanded DeLury's method with variable catchability and its application to catch-effort data from spiny lobster gillnet fishery, *Fisheries Science*, **60**, 59-63.

Yamakawa, T., Matsumiya, Y. and Kitada, S. (1994b). Comparison of statistical models for expanded DeLury's method, *Fisheries Science*, **60**, 405-409.

谷津明彦，平松一彦，島田裕之，村田　守 (1994)．北太平洋における流し網の目合と海産哺乳類の混獲 CPUE の関係，日本水産学会誌，**60**，35-38.

横田賢史，北田修一，鵜殿謙二郎，渡邊精一 (1998)．富山湾におけるホタルイカの環境要因による漁獲量予測，日本水産学会誌，**64**，975-978.

採択後下記の論文が発表された.

Phiri, H., Shirakihara, K. and Yamakawa, T. (1999). A generalized DeLury's method based on Taylor's Power Law and its application to a pelagic species in southern Lake Tanganyika, *Fisheries Science*, **65**, 717-720.

Shono, H. (2000). Efficiency of finite correction of AIC, *Fisheries Science* (in press).

Application of Akaike Information Criterion to Fish Population Dynamics

Yoshiharu Matsumiya

(Ocean Research Institute, University of Tokyo)

The data used in the fish population dynamics are often subject to considerable stochastic variations and measurement errors. It is necessary to use sound statistical techniques in the analysis of data. The Akaike information criterion (AIC) was introduced by Akaike for the purpose of selecting an optimal model from within a set of proposed models. Recently, there is increasing interest in the application of AIC to the fish population dynamics. The estimation of stock-recruitment relationship, the DeLury method of estimating population abundance, the estimation of mortality rates from tag recoveries, and the determination of the mesh selectivity curve are studied using AIC and the maximum likelihood method. The advantages of parameter estimation and model selection by practical application of AIC are shown through above examples. A long term approaches are also discussed.

Key words: Akaike information criterion (AIC), fish population dynamics, estimation of population abundance, stock-recruitment relationship, population parameters.