

鯨類目視調査に基づく個体数推定方法の開発と JARPA への適用

学位論文内容の要旨

【緒言】

鯨類は、かつて世界中で乱獲された歴史を持ち、現在その保全と健全な利用のために正確な個体数推定が望まれている。

鯨類の個体数推定法として 1980 年代からライントランセクト法 (LT 法) が用いられてきた。LT 法とは調査区域内に引かれた調査ライン上を移動しながら探索を行い、発見生物の位置を記録する調査法で、発見横距離（調査ラインと発見生物の距離） x に対する発見確率 $g(x)$ から個体密度を推定する。従来はライン上の生物を 100% 発見できる、すなわち $g(0)=1$ を仮定していたが、鯨類は浮上潜水をするため、これが成り立たない。 $g(0)$ と推定個体数には反比例関係があり、 $g(0)$ を正しく求めなければ推定個体数が大幅に偏る。しかし、 $g(0)$ は LT 法からは求められない。IWC の調査では独立観察者実験 (IO 実験) という別に設けられた実験から $g(0)$ が推定されている。

日本独自の捕獲調査である JARPA は IO 実験を行っておらず、 $g(0)$ は推定されていない。鯨の浮上間隔の情報を用いた $g(0)$ 推定法は提案されているが、その詳細な検討はされていない。また、 $g(0)$ は発見時環境や鯨が示す発見のきっかけでも変動するが、大型鯨類に対してそれらを考慮した密度推定は行われていない。そこで本研究では、LT 法によって得られる発見位置情報に鯨の浮上間隔情報および発見時環境要因を組み込み、IO 実験を用いずに $g(0)$ と密度を推定する方法を開発した。この推定法による推定値の偏りと頑健性をシミュレーション実験によって検討した。さらに JARPA の調査データに対して本方法による個体数推定を行い、従来の推定結果との比較を行った。

【個体数推定法】

Y 軸方向に等速移動する調査船を原点とする XY 座標について、Y 軸方向を線分区間で離散化し線分区間番号 $i=1, \dots, c$ を与えた。 i で浮上した鯨は浮上発見確率 $Q_i(x, \mathbf{H} | \mathbf{a})$ で発見されるとした。 $\mathbf{H}$ は発見時環境要因値のベクトルで、 $\mathbf{a}$ はパラメータベクトルである。 i 内で鯨が浮上する期待確率 Δs を定義すると、区間 i

でまだ発見されていない鯨が初めて発見される確率（一次発見確率） q_i は、区間 $i+1$ までの未発見個体が Δs の確率で浮上し、かつ Q_i の確率で発見される同時確率となる。よって、ある横距離 x にいる鯨を発見する確率 $g(x)$ は全線分区間の q_i の和となる。 q_i に含まれるパラメータベクトル $\mathbf{a}$ は、LT 法に基づく鯨の発見位置と発見時環境要因値から最尤法で推定した。最尤推定量 $\mathbf{a}^*$ を求め、そのパラメータ下の $g_j^*(x)$ 、 $g_j^*(0)$ を算出し、さらに LT 法の理論から群密度 D^* 、個体密度 D_{ind}^* を得た。

$\mathbf{H}$ を含む Q の関数型として、本研究では指数関数、ハザードレイト関数、線形関数および逆数関数を使用した。 Q 内の要因 $\mathbf{H}$ から影響のある要因 $\tilde{\mathbf{H}}$ のみを選択するため、発見距離を応答変数、その他の環境要因値を説明変数とする一般化線形モデル（GLM）を立て、全組合せの内 AIC が最小となるモデルに含まれる要因 $\tilde{\mathbf{H}}$ のみを Q に用いた。

【シミュレーション実験によるモデルの妥当性の検討】

本研究で提案した密度推定法(本法)の偏りと頑健性の検討のため、シミュレーション実験を行った。

実際の調査を模倣した擬似調査をコンピュータ上で行わせ、擬似調査データとして発見距離、発見角度、群れサイズ、発見時環境要因値ベクトル $\mathbf{H}$ 、調査ライン長 L を記録した。

次に、擬似調査の初期設定が異なる 6 種類のシミュレーション実験を行った。

「シンプルテスト」では、鯨群がすべて 1 頭群で、鯨の浮上間隔情報と Q の関数型が正しい時に推定される $g(0)$ と密度の偏りを調べた。「複合要因テスト」では、鯨群が 1~5 頭群で、 $\mathbf{H}=\{\eta_1, \eta_2\}$ が Q に影響を与える複雑な状況下での推定の偏りを検討した。「浮上間隔テスト」では、鯨の浮上間隔の情報に誤りがあり、 Δs が真と異なる時の推定の偏りを調べた。「発見要因の変動に関するテスト」では、発見されるまで $\mathbf{H}$ が一定という本法の仮定が成立しない時の偏りを検討した。「GLM テスト」では、GLM による $\tilde{\mathbf{H}}$ の選択に誤りがあった場合の推定密度の偏りと頑健性を調べた。「 Q のモデル選択テスト」では、複数の Q の関数型を用いた擬似データから、正しい Q の関数型が AIC によって選択されるかを検討し、また異なる関数型間での密度推定値の違いを検証した。

「シンプルテスト」および「複合要因テスト」から、本法は、鯨の浮上間隔情報と Q が正しいければ、 $g(0)$ と密度を正しく推定できることがわかった。「浮上間隔テスト」の結果から、 Δs が真より大きくなると、密度は過小に推定された。

「発見要因の変動に関するテスト」の結果から、環境要因が短時間で変動する場合、密度はわずかながら過小推定される事がわかった。GLM による要因選択は、効果のある要因を解析に含めないと密度推定値を有意に偏らせた。AIC は擬似データ発生時に用いた Q の関数型を正しく選択し、選択された Q からの推定密度は真に近くなった。

よって、本方法は正しい Δs を用い、AIC によって Q および環境要因を選択していけば偏りの少ない密度を推定できる事が分かった。

【JARPA の調査データを用いた南極海クロミンククジラの個体数推定】

JARPA は、南極海のクロミンククジラ(*Balaenoptera bonaerensis*)を中心とする日本独自の鯨類捕獲調査であり、第IV区および第V区と呼ばれる海域を隔年調査している。第IV区について、JARPA と IWC が実施する SOWER がそれぞれ LT 法により $g(0)=1$ を仮定した個体数推定を行なった結果、そこには格差が生じた。また、JARPA1997/98 年の推定個体数に比べ 1999/00 年は約 2 倍に推定された。これらの推定格差には $g(0)$ の違いが関係している可能性がある。そこで本研究は、1995/96～2001/02 年における第IV区の JARPA 調査データを用いて、本法から $g(0)$ の推定を試みた。

JARPA の第IV区の調査データ 4 期分 (1995/96、1997/98、1999/00、2001/02 年) から、目視専門船でクロミンククジラと判別された一次発見データを抽出し、発見距離、発見角度、群れサイズ、発見のきっかけ、ビューフォート風力階級、風速、氷カバー率を解析に用いた。浮上間隔の情報は、1990～1996 年まで JARPA の調査中に行われた追尾影響観察実験記録の結果を用いた。

第IV区全体について、1995/96 年の $g(0)$ は 0.5 程度であったが、他年はおよそ 0.7 と推定された。推定個体数は 1997/98 年が 45,000 頭と低かったが、他年は 100,000 頭前後になった。従来の方法よりも本法の推定値は 4 期分すべてで多く、1995/96 年は従来の約 4 倍多く推定された。

1997/98 年は従来の推定値と同様に他年に比べ少なかった。 $g(0)$ の影響を取り除いているので、これは目視範囲にクロミンククジラが少なかったためと判断された。1995/96 年の $g(0)$ が他年より低く推定されたのは、この年のビューフォート風力階級に対する Q の影響力が強かったためと思われる。以上から、 $g(0)$ を含めた個体数の推定は十分可能であるが、推定値の揺れは $g(0)$ だけでなく、鯨の分布も関係している事が示唆された。

学位論文審査の要旨

主査	教授	桜井泰憲
副査	教授	高橋豊美
副査	教授	岸野洋久
副査	助教授	松石隆

学位論文題名

鯨類目視調査に基づく個体数推定方法の開発と JARPA への適用

鯨類の保全と健全な利用のため、正確な個体数推定が望まれている。鯨類の個体数推定に用いられるライントランセクト法 (LT 法) には正面発見確率 $g(0)$ を推定できない問題があり、このため IWC が LT 法から推定している現在の鯨類の個体数は過小であることが指摘されている。

日本独自の捕獲調査である JARPA でも $g(0)$ は推定されていない。また、 $g(0)$ は発見時環境や鯨が示す発見のきっかけでも変動するが、大型鯨類に対してそれらを考慮した密度推定は行われていない。そこで本研究では、LT 法によって得られる発見位置情報に鯨の浮上間隔情報および発見時環境要因を組み込み、 $g(0)$ と密度を推定する方法を開発した。推定値の偏りと頑健性はシミュレーション実験によって検討した。さらに JARPA の調査データに対して本方法による個体数推定を行い、従来の推定結果との比較を行った。

環境要因値ベクトル $\mathbf{H}$ の下で横距離 x 、縦位置 i で浮上した鯨を発見する確率関数 $Q_i(x, \mathbf{H} | \mathbf{a})$ と、鯨の浮上確率 Δs を与えると、任意の (x, i) で鯨を発見する確率 q_i を算出できる。 q_i がわかれば $g(x)$ および $g(0)$ を求められる。 q_i を決めるパラメータベクトル $\mathbf{a}$ は、LT 法に基づく鯨の発見位置と発見時環境要因値から最尤法で推定した。最尤推定量 $\mathbf{a}^*$ を求め、そのパラメータ下の $g_j^*(x)$ 、 $g_j^*(0)$ を算出し、さらに LT 法の理論から群密度 D^* 、個体密度 D_{ind}^* を得た。

$\mathbf{H}$ を含む Q の関数型として、本研究では指数関数、ハザードレイト関数、線形関数および逆数関数を使用した。 Q 内の要因 $\mathbf{H}$ から影響のある要因 $\tilde{\mathbf{H}}$ のみを選択するため、発見距離を応答変数、その他の環境要因値を説明変数とする一般化線形モデル (GLM) を立て、全組合せの内 AIC が最小となるモデルに含まれる要因 $\tilde{\mathbf{H}}$ のみを Q に用いた。

シミュレーションによる精度と頑健性の検討結果、浮上間隔の情報が正しければ、 $g(0)$ は正しく推定され、個体密度推定値は真に十分近くなった。推定時に、鯨の平均浮上時間間隔を真より 20%程度小さく与えると、 $g(0)$ は約 8%過大、密度はおよそ 5%過小に推定された。一般化線形モデルから AIC によって選択された環境要因を推定時に加えた場合、 $g(0)$ および密度は偏りなく推定された。また、推定法に含まれる浮上発見確率関数 Q を AIC でモデル選択すると、推定密度は真に近づくことがわかった。以上から本研究での推定方法によって、 $g(0)$ の影響を取り除いた密度推定が十分可能であることが明らかとなった。

よって、本方法は正しい Δs を用い、AIC によって Q および環境要因を選択していけば偏りの少ない密度を推定できる事が分かった。

南極海第IV区 (60S°以南 70°~130°E) について、日本独自の鯨類捕獲調査である JARPA と、IWC が実施する SOWER が LT 法からクロミンククジラの個体数推定を行なった結果、推定格差が生じた。また、JARPA1997/98 年の推定個体数に比べ 1999/00 年は約 2 倍に推定された。これらの推定格差には $g(0)$ の違いが関係している可能性がある。そこで本研究は、1995/96~2001/02 年における第IV区の JARPA 調査データを用いて、本法から $g(0)$ の推定を試みた。

JARPA の第IV区の調査データ 4 期分 (1995/96、1997/98、1999/00、2001/02 年) のクロミンククジラと判別された発見データを抽出し、発見距離、発見角度、群れサイズ、発見のきっかけ、ビューフォート風力階級、風速、氷カバー率を解析に用いた。浮上間隔の情報は、1990~1996 年まで JARPA の調査中に行われた追尾影響観察実験記録の結果を用いた。

第IV区全体について、1995/96 年の $g(0)$ は 0.5 程度であったが、他年はおよそ 0.7 と推定された。推定個体数は 1997/98 年が 45,000 頭と低かったが、他年は 100,000 頭前後になった。従来の方法よりも本法の推定値は 4 期分すべてで多く、1995/96 年は従来の約 4 倍多く推定された。

1997/98 年は従来の推定値と同様に他年に比べ少なかった。 $g(0)$ の影響を取り除いているので、これは目視範囲にクロミンククジラが少なかったためと判断された。1995/96 年の $g(0)$ が他年より低く推定されたのは、この年のビューフォート風力階級に対する Q の影響力が強かったためと思われる。以上から、 $g(0)$ を含めた個体数の推定は十分可能であるが、推定値の揺れは $g(0)$ だけでなく、鯨の分布も関係している事が示唆された。

上記の内容は、鯨類目視調査による個体数推定法に関して画期的な内容を含み、鯨類資源解析学への貢献が大きいと評価できる。よって、審査員一同は本論文が博士(水産科学)の学位を授与される資格のあるものと判定した。