

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「海洋生物多様性および生態系の保全・
再生に資する基盤技術の創出」
研究課題「海洋生態学と機械学習法の融合による
データ不足下の生態系評価手法の開発」

研究終了報告書

研究期間 平成24年10月～平成29年3月

研究代表者：岡村 寛
(国立研究開発法人水産研究・教育機構
中央水産研究所、グループ長)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究課題は、中央水産研究所のチームと、統計数理研究所のチームとで構成された。中央水産研究所のチームは、生態系モデル開発に注力し、統計数理研究所は生態系評価指標の作成に注力する計画であった。

生態系モデル開発では、従来の物理モデル的な生態系モデルではなく、より統計的なモデルを使った。具体的には、状態空間モデルと呼ばれる個体群の変化に影響する確率的誤差（過程誤差）と観測に伴う誤差（観測誤差）を区別することが可能なモデルにより、複数種の動態のモデル化を行った。このとき、過程誤差の中に種間の相関関係を仮定し、それによって種間関係を取り込んだ。さらに、環境の変化を示す動態モデルも取り入れることにより、環境影響も同時に調べることができる。

太平洋のマサバ、マイワシ、カタクチイワシの資源は、魚種交替として知られる交互に資源量の増減を示す挙動が見られる。これらの種の資源量データと海洋環境の指標のひとつである Pacific Decadal Oscillation (PDO)の時系列データを合わせて、上記モデルを適用し、種間関係と環境影響の重要性を評価した。モデルは、種間関係が環境影響よりも大きな影響を持っていることを示した。

同様な結果が別のモデルでも観測されるかを調べるため、最近開発された Convergent Cross Mapping (Sugihara et al. 2013)と呼ばれる因果関係を検出する方法を同データに適用した。その結果、太平洋ではやはり種間関係が重要な役割を果たしている可能性が示唆された。

生態系評価指標開発では、RAM Legacy データ（以下、RAM データ）と呼ばれる世界の資源評価結果を集めたデータベースと FAO の漁獲統計データベース（以下、FAO データ）を使用し、RAM データをラベル付き（教師ありデータ）、FAO データをラベルなし（教師なしデータ）として、全世界の漁獲対象となっている海洋資源の崩壊確率（基準となる資源量より低い水準まで落ちる確率）を推定する方法の開発を行った。RAM データの中の情報を用いれば、様々な海洋資源が崩壊かそうでないかを判定できるが、崩壊と判定される種の数、崩壊していないと判定される種の数よりかなり少なかった。これにより、従来のロジスティック判別は、崩壊していない種の方に強く影響されることになり、特に重要である崩壊している種の予測精度が悪くなるという問題があった。そこで、非対称ロジスティックモデルという新しく開発した予測モデルを使って将来の崩壊確率を推定した。その結果、従来知られていた崩壊確率の予測とは違う結果が得られた。我々の予測はシミュレーションや実データに対する予測力の規準などから従来のモデルより優れていると考えられた。

さらに、RAM データと FAO データの比較の際、RAM データのサンプリングバイアスを補正するため、傾向スコアと回帰による予測を組み合わせた二重頑健法と非対称ロジスティックモデルを組み合わせた分析手法を開発した。これによりさらに予測力の高い生態系の状態推定が可能になった。

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1. Okamura, H., Ichinokawa, M., and Komori, O. in press. Ecosystem models in data-poor situations (Chapter 9). in Aoki, I., 他 2 名 (eds) Fish Population Dynamics, Monitoring, and Management: Sustainable Fisheries in the Eternal Ocean. Springer.

概要: 従来、様々な情報や仮定が必要だった生態系モデルに関して、入手しやすい情報と制限的な仮定を取り除いた生態系モデルの開発を試みた。シミュレーションにより、単一種のモデルよりも正確な予測が可能であることが示唆された。さらに、魚種交替現象が知られている北太平洋の 3 魚種に対してモデルを適用したところ、環境影響よりも種間関係の影響が強いことが分かった。

2. Komori, O., Eguchi, S., Ikeda, S., Okamura, H., Ichinokawa, M., and Nakayama, S. 2016. An asymmetric logistic regression model for ecological data. *Methods in Ecology and Evolution*

7(2):249-260.

概要:世界の海洋資源の状態については従来から議論のあるとことであつたが,従来のモデルを拡張して非崩壊資源に対して崩壊資源のサンプルサイズが極端に低い場合にも予測性能の高い非対称ロジスティックモデルを開発した.シミュレーションにより,非対称予測モデルは従来のモデルより良い性能を持つことが分かつた.実データへの適用結果は,従来の結果と異なるものだつた.

3. Ichinokawa, M., Okamura, H., Watanabe, C., Kawabata, A., and Oozeki, Y. 2015. Effective time closures: quantifying the conservation benefits of input control for the Pacific chub mackerel fishery. *Ecological Applications* 25(6): 1566-1584.

概要:一般化状態空間モデルと呼ばれる統計手法とシミュレーションを組み合わせ、過去のサバに対する休漁措置が資源の保護にどのような効果を持っていたかを調べた。その結果、もし休漁を行っていなければ、資源は減少し、漁獲量は今より少なくなっていた、ということが予想された。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. Okamura, H., Ikeda, S., Morita, T., and Eguchi, S. 2016. Risk assessment of radioisotope contamination for aquatic living resources in and around Japan. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 113(14):3838-3843.

概要:東北大地震以降の我が国周辺の水産物のセシウム汚染度の時空間変化を調べた。セシウム測定値には欠測値の問題があつたが、最小置換法という方法とランダム効果モデルを組み合わせることにより、セシウム汚染度の全体的な傾向を知ることができた。今後のリスク評価への貢献が大きいものと考えられる。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

①「生態系モデル」グループ

研究参加者

| 氏名 | 所属 | 役職 | 参加時期 |
|--------|---------------------------|---------|--------------|
| 岡村 寛 | 国立研究開発法人水産研究・教育機構 中央水産研究所 | グループ長 | H24.10～ |
| 市野川 桃子 | 同上 | 主任研究員 | H24.10～ |
| 中山 新一朗 | 同上 | 研究等支援職員 | H25.4～ |
| 宮川 光代 | 同上 | 研究等支援職員 | H25.4～H25.12 |
| 西嶋 翔太 | 同上 | 研究等支援職員 | H27.2～H28.3 |
| 橋本 緑 | 同上 | 研究等支援職員 | H28.2～ |

研究項目

- ・研究総括
- ・データベース構築(主担当)
- ・アロメトリー関係と確率的種間関係を利用した生態系モデルの開発(主担当)
- ・機械学習手法を利用した生態系評価指標の開発(副担当)
- ・機械学習手法を利用した生態系評価指標の適用・有効性の検証(副担当)
- ・生態系モデルを利用した現状評価と将来予測(主担当)

②「生態系指標」グループ

研究参加者

| 氏名 | 所属 | 役職 | 参加時期 |
|--------|--------------------------------|---------|-------------|
| 江口 真透 | 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 統計数理研究所 | 教授 | H24.10～ |
| 池田 思朗 | 同上 | 准教授 | H24.10～ |
| 小森 理 | 福井大学 | 講師 | H25.4～ |
| 渡辺 法子 | 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 統計数理研究所 | 技術補佐員 | H25.4～ |
| 長谷部 裕紀 | 同上 | 短期研究参加者 | H25.6～H25.8 |
| 三枝 祐輔 | 東京理科大学 | D1 | H26.4～ |
| 野津 昭文 | 総合研究大学院大学 統計科学専攻 | D3 | H25.4～H26.3 |
| 長縄 真学 | 東京理科大学 | 学生 | H25.4～H26.3 |

研究項目

- ・機械学習手法を利用した生態系評価指標の開発(主担当)
- ・機械学習手法を利用した生態系評価指標の適用・有効性の検証(主担当)
- ・アロメトリー関係と確率的種間関係を利用した生態系モデルの開発(副担当)
- ・生態系モデルを利用した現状評価と将来予測(副担当)

§ 3 研究実施内容及び成果

3.1 生態系モデル開発(中央水産研究所 生態系モデルグループ)

(1)研究実施内容及び成果

上位捕食者も含む生態系モデルについては、これまでEcopath/Ecosim や Atlantis のようなモデルが知られてはいたものの、胃内容物の情報や平衡状態(定常状態)の仮定の必要性など、過度なデータ要求と不合理な仮定の問題があった。そこで、入手しやすい情報だけから評価ができて、なおかつ平衡状態のような不合理な仮定を必要としない生態系モデルを開発することを目指した。

生態系モデルとして、状態空間モデルを利用する。これにより、過程誤差と観測誤差という従来分離が難しかった 2 つの誤差を区別することが可能となり、過程誤差の中で種間の相関関係をモデル化することができる。非線形の状態空間モデルの推定は難しいが、Gompertz-Fox モデルと呼ばれるモデルを使うことにより、線形モデル化を行った。Gompertz-Fox モデルは、近年メタ分析により多くの資源の動態がこのモデルに近いものであることが知られている。さらに、パラメータのいくつかをランダム効果として、パラメータ数の増大を抑えつつも、モデルの柔軟性を増すようにした。構築された複数種の生態系モデルは、図 1 のように要約される。

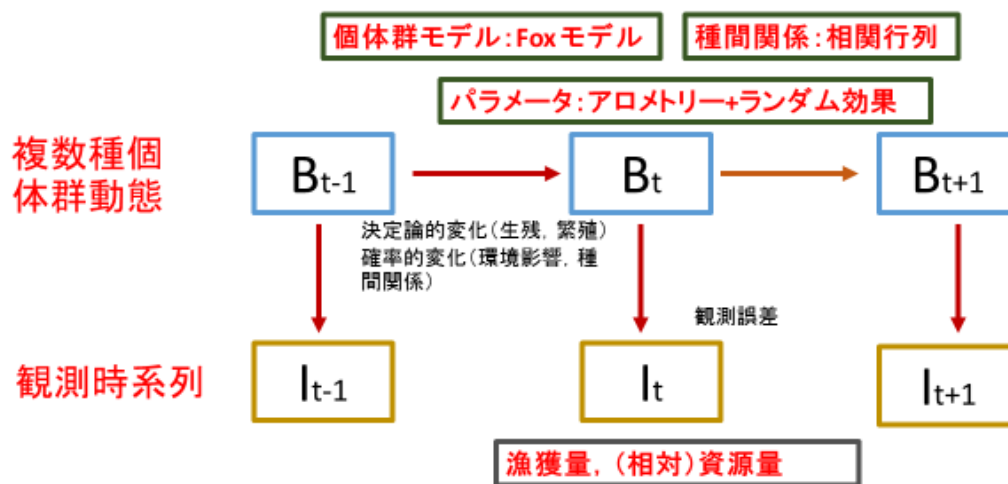


図 1. 生態系モデルの模式図

モデルの性能を評価するために、シミュレーションを行った。シミュレーションでは、3 種の資源を想定し、バイオマス変化に相関関係を仮定した上で、100 年間のデータを発生させた。100 年間のデータのうち、最初の 50 年間のデータはモデルのパラメータ推定に使用せず、後半の 50 年間のデータだけを使用した。これにより、非定常状態のデータだけを利用した場合の推定のパフォーマンスを見ることができる。最大持続生産量のような資源管理・保全に重要なパラメータの推定結果を調べたところ、複数種を考慮したモデルの方が、単一種だけを考えたモデルより良い性能を持つことが分かった。

さらに、北太平洋のマサバ・マイワシ・カタクチイワシの 3 種と環境の指標である太平洋十年規模振動(Pacific Decadal Oscillation, PDO)に対して、モデルを適用したところ、環境の影響よりも、3 種の種間関係のほうが、モデルによる予測に重要なことが分かった。このことは従来提唱されていた 3 魚種の「3 すくみ仮説」を定量的に裏付けるものであると考えられた。

本研究の結果は、Springer から発行される書籍の 1 章として掲載予定である(Okamura et al. in press)。

上記、生態系モデルの結果を、異なるアプローチで検証するため、Convergent Cross Mapping (CCM)と呼ばれる最近開発された因果関係の有無を時系列データから調べる方法を、同じ太平洋の海洋資源に適用した。元の CCM の研究がカリフォルニアのマイワシとカタクチイワシの研究となっていたため、それに合わせて、こちらの分析でもマサバを除き、マイワシとカタクチイワシのみを調べることにした。漁獲量による CCM は、魚種間の因果関係を示唆しなかったが、資源量の間には因果関係が見られ、やはり北太平洋では魚種間の関係が重要な要因であることが示唆された。

この成果に関しては、現在論文にまとめているところであり、今年度中には投稿予定である。

生態系モデル開発に利用した状態空間モデルを利用して、北太平洋のマサバに対する努力量のコントロールによる資源回復への効果を定量化した。努力量管理による資源回復への効果の定量化は困難で、これまでに多くの研究はなされてこなかった。複数の状態空間モデルを利用して、努力量調整がある場合の効果を定量化した。そのモデルを利用してシミュレーションを行うことにより、努力量調整がなかった場合の資源量の予測が可能となり、結果として、そのことは努力量調整による資源回復効果の定量化を可能とした。

この研究の中の、状態空間モデルを使った評価は高く評価され、結果は Ecological Applications という生態学の国際誌で公表された (Ichinokawa et al. 2015)。

また、日本の海洋資源の状態が世界と比べてどのようであるかを見極めるため、RAM Legacy データと呼ばれている世界の海洋資源評価結果のデータベースと日本の資源評価結果の比較を行った。日本の資源は、成熟が早く、自然死亡が大きい種が多いことが分かった。また、総漁獲量規制のような資源管理を行っている種については漁獲率が減少する傾向が見られ、資源管理効果が見られることが分かった一方で、栽培漁業種については放流効果による資源回復は見られなかった (図 2)。

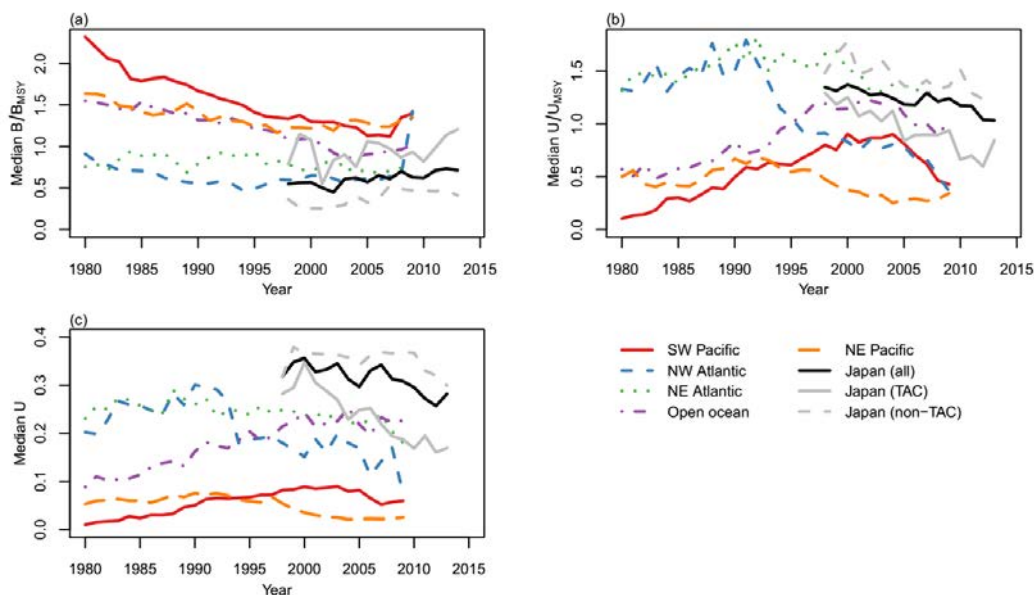


図 2. 世界と日本の海洋資源の特徴比較. B/B_{MSY} は、資源量の相対割合. U/U_{MSY} は漁獲率の相対割合. U は漁獲率.

この研究結果は、論文化して国際学術雑誌に投稿中である。

さらに、生態系モデルの中で使用したランダム効果を使って、複数種の動態を扱うというアプローチを水産食品の放射性物質の時空間変化を分析するために使用した。放射性物質の中でセシウム 134 と 137 は毒性が強く、長い半減期を持つことが知られ、2011 年 3 月 11 日に発生した東北沖大地震とそれに伴う福島第一原発の爆発によって大気中に多くのセシウムが散布されたと考えられている。水産食品の放射性物質による汚染は、海洋生態系の保全の上で非常に重要な問題であり、科学的・社会的貢献は大きいものと思われる。

我々は、ワイブル分布と呼ばれる寿命等を扱う生存時間分析で使用されるモデルを基礎として、欠測データに対しては、ランダム効果モデルにより類似生息地を持つ類似種の情報を利用するこ

とにより推測を行った。さらに、データが 1 点のみで、ランダム効果すら適用が困難なデータに対しては、最小置換法という新規に開発した手法を適用した。これにより、出来得る限りバイアスを最小化した上で日本周辺全体のセシウム汚染リスクを定量的に評価することが可能になった。

日本全土のセシウム 134 と 137 の合計値の時間変化を調べたところ、海水魚のリスクは急速に減少し、リスクはかなり低くなっているものの、淡水魚のリスクは依然として高いものがあることが明らかになった(図 3)。ただし、この研究で調べられた魚種は天然のものだけであり、一般の食卓に上がる淡水魚は通常養殖ものであるため、食生活に対するリスク的には低いものと考えられた。天然の淡水魚は、遊漁などの産業でより重要なため、そのような産業におけるリスク管理に有用な情報となることが期待される。

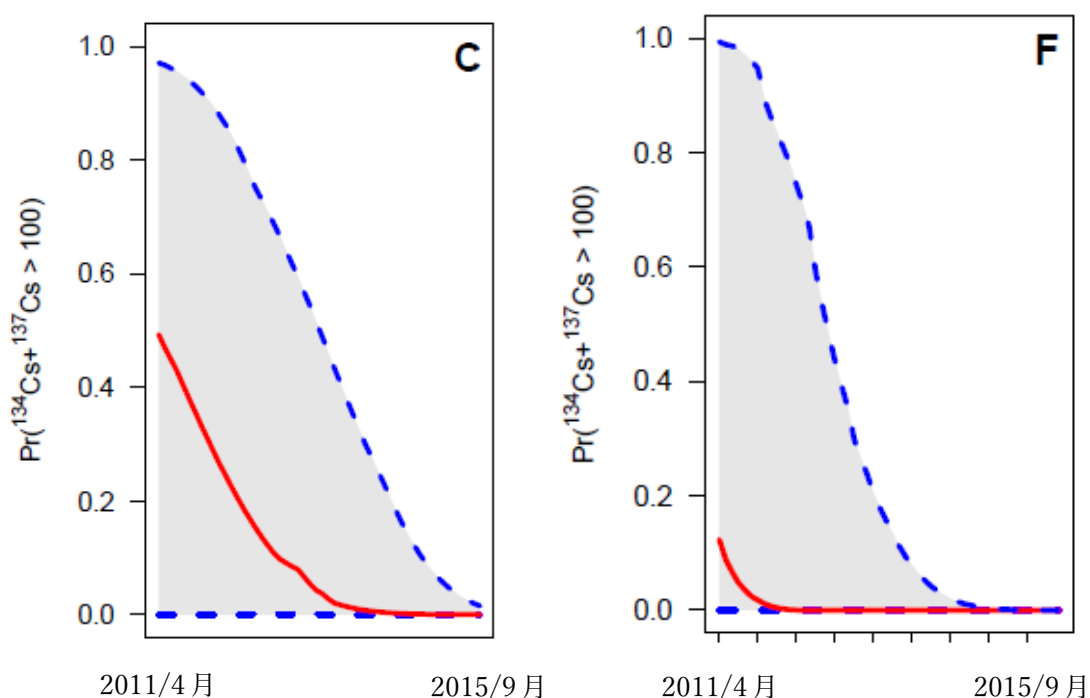


図 3. 2011 年 4 月から 2015 年 9 月までに 134Cs と 137Cs の測定値が 100 ベクレル/kg を越える確率(汚染度)の時間変化. 海水魚の汚染度はかなり速く 0 に近づいているものの、淡水魚の汚染度の低下はより遅いことが分かる

本研究は、当初計画にはないものであったが、生態系モデル開発で使用していた手法が効果的に使われたものである。この成果は、国際総合学術雑誌のひとつである Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS) に掲載され、ワシントンポストや毎日新聞などのマスメディアにて報告されるなど、国内外で大きな関心を集めた。

さらに、機械学習的手法を駆使して海洋生物の評価精度を向上させる手法の開発を行い、国際学術誌 (Ecological Applications, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, ICES Journal of Marine Science など) で発表を行った。

3. 2 生態系評価指標開発(統計数理研究所 生態系評価指標グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

全地球規模の海洋資源の状態については議論のあるところで、これまで Nature や Science をはじめとする国際学術雑誌で論争が繰り返されてきた。全地球規模の評価をしようと思うと、漁獲量のような広く入手可能なデータに頼らざるを得ないが、そのような情報は資源状態の指標としてはバイアスが大きいものと考えられた。一方、RAM Legacy データのような世界の海洋資源評価結果

のデータベースは、海洋資源状態をより正確に反映すると考えられるが、一部の地域や魚種に限られ、標本の代表性という観点で問題がある。

RAM Legacy データのような海洋資源評価データと FAO の漁獲統計データのような全地球規模の情報を組み合わせた評価はこれまで行われたこともあったが、従来の統計手法を適用するもので、データに内在する問題を完全に解決したものではなかった。

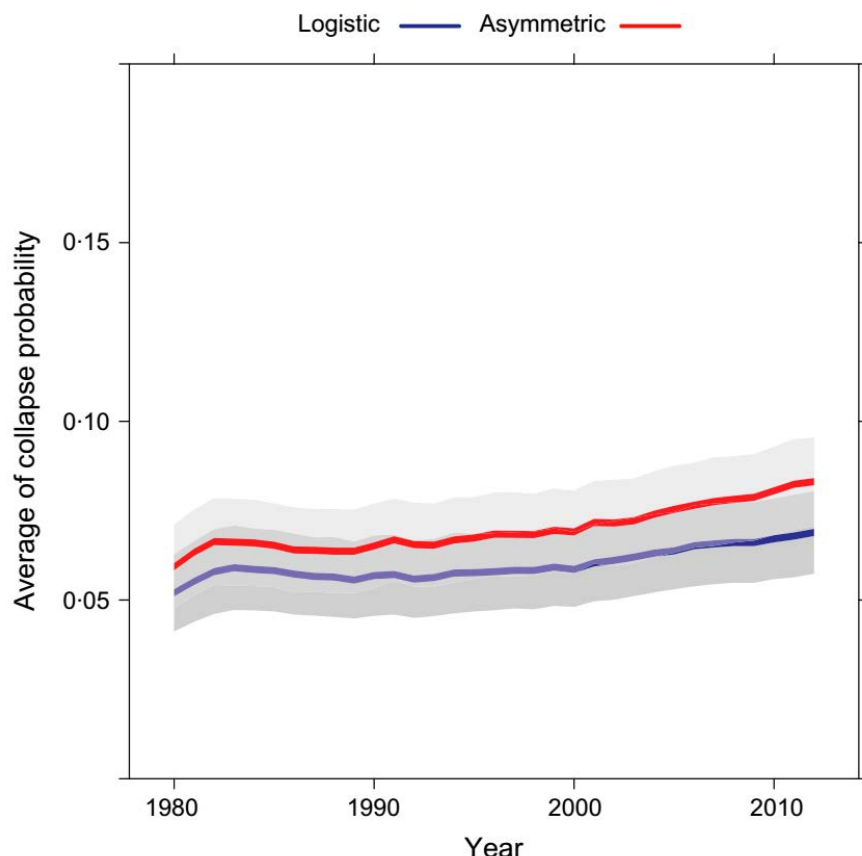


図 4. RAM Legacy データと FAO データにロジスティックモデル(青線)と非対称ロジスティックモデル(赤線)を適用して崩壊確率を予測した結果。

RAM Legacy データによれば、各魚種の資源状態を崩壊 (collapsed) か非崩壊 (noncollapsed) に分類することができる(資源評価により、 B_{MSY} という最適資源状態が与えられているので、資源量を B_{MSY} で割ることにより、その比率が小さいとき“崩壊”と判定できる)。データを調べた結果、崩壊と判定された資源の割合は非崩壊と判定された割合よりもかなり低いものであることが分かった。これより、ロジスティック回帰のような従来の統計手法では、崩壊の予測精度が悪くなってしまうことが懸念される。

このようなサンプリング率の違いに対処するため、我々は非対称ロジスティックモデルという新しい統計モデルの開発を進めた。非対称ロジスティックモデルは従来のロジスティックモデルのような対称性を仮定しないため、より柔軟な分析が可能となり、崩壊資源の予測力を改善することが期待される。

サンプリング割合を変えたシミュレーションデータを作成し、ロジスティックモデルと非対称ロジスティックモデルをシミュレーションデータに適用してパラメータを推定する試験を行ったところ、非対称ロジスティックモデルは従来のロジスティックモデルよりも良い予測能力を持つことが分かった。実際の RAM Legacy データと FAO の漁獲量データにロジスティックモデルと非対称ロジスティックモデルを適用した結果、非対称ロジスティックモデルにより従来の崩壊確率よりも高い崩壊確率が予測された(図 4)。

この成果は、Methods in Ecology and Evolution という生態学のトップジャーナルのひとつに掲載され、高い評価を得た。また、この課題において、使用した RAM Legacy データや FAO データを整理編集し、図表を作成したり、分析したりするための統計ソフトのパッケージを開発し、公開の準備を進めている。

RAM Legacy データは、資源状態の評価としては正確なものの、サンプリングに偏りがある。資源評価が行われている種は、価値が高く、漁業の歴史が長い重要魚種である傾向がある。また、欧米諸国の資源評価データが中心となっており、アジアなどのデータは不足している。すなわち、RAM Legacy データは、全地球規模の代表的サンプルとは言えず、そのようなサンプリングバイアスを調整しない分析は誤った結論を導く可能性がある。

このようなサンプリングバイアスの調整法として傾向スコアによる調整が知られている。傾向スコアは、ある条件のもとでの選択確率に対応し、ある条件で得られたデータをその条件のもとでの傾向スコアで割って重み付けをしてやれば、選択率の補正となる。我々が開発した非対称ロジスティックモデルとの融合をはかるため、二重頑健法と呼ばれる傾向スコアと回帰モデルを融合した手法を、非対称ロジスティックモデルを利用したものに拡張した。二重頑健とは、傾向スコアのモデルが間違っている場合でも、回帰モデルが正しければ正しい推定となり、逆もまた真である、ということである。

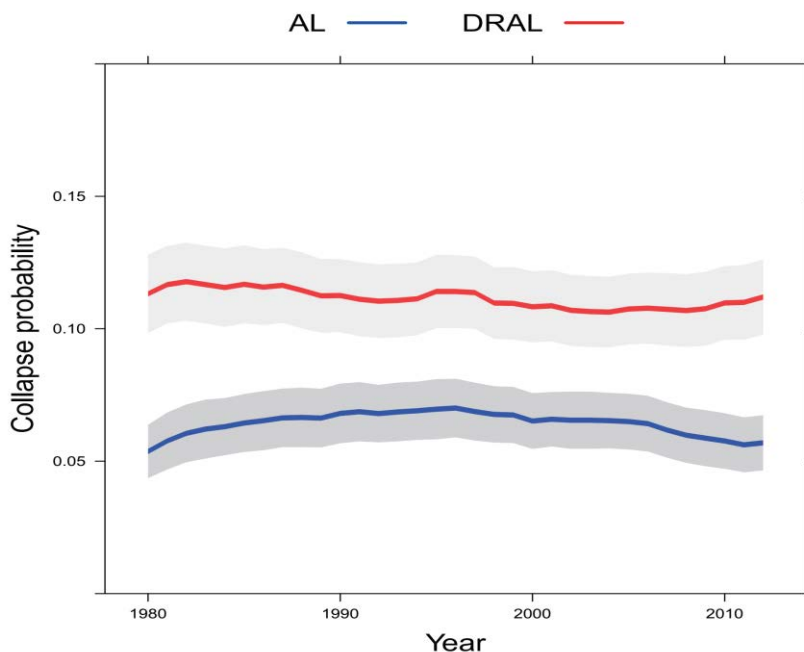


図 5. 二重頑健法と非対称ロジスティックモデルを組み合わせた手法を RAM Legacy データと FAO データに適用したときの崩壊確率の推定結果。AL は非対称ロジスティックモデルのみ、DRAL は二重頑健法と非対称ロジスティックモデルの組み合わせ。交互作用を考慮しているので、非対称ロジスティックモデルの結果も図 4 と異なる。灰色部分は 95%信頼区間。

二重頑健法と非対称ロジスティックモデルを組み合わせたモデルをシミュレーションデータに適用したところ従来の方法より優れていることが分かった。さらに、RAM Legacy データと FAO データにモデルを適用したところ、従来の非対称ロジスティックモデルとは違った結果が得られ、その信頼区間も重なりがなくなった(図 5)。これより、傾向スコアを考慮することによる影響が大きく、RAM Legacy データと FAO データは分布が異なっていて、それらの違いを考慮しないと推定結果を誤る可能性が示唆された。この結果は、論文化を行い、現在国際的な生態学の雑誌に投稿中である。

§ 4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 0 件、国際(欧文)誌 17 件)

1. Notsu, A., Kawasaki, Y. and Eguchi, S. "Detection of heterogeneous structures on the Gaussian copula model using projective power entropy", *ISRN Probability and Statistics*, 2013, 787141, 2013. (DOI:10.1155/2013/787141)
2. Ohara, A. and Eguchi, S. "Group invariance of information geometry on q-Gaussian distributions induced by beta-divergence", *Entropy* 15, 4732-4747, 2013. (DOI:10.3390/e15114732)
3. Okamura, H., McAllister, M. K., Ichinokawa, M., Yamanaka, L. and Holt, K. "Evaluation of the sensitivity of biological reference points to the spatio-temporal distribution of fishing effort when seasonal migrations are sex-specific", *Fisheries Research*, 158, 116-123, 2014. (DOI:10.1016/j.fishres.2013.10.022)
4. Notsu, A., Komori, O. and Eguchi, S. "Spontaneous Clustering via Minimum Gamma-Divergence", *Neural computation*, 26(2), 421-448, 2014. (DOI:10.1162/NECO_a_00547)
5. Eguchi, S., Komori, O. and Ohara, A. "Duality of maximum entropy and minimum divergence", *Entropy* 16(7), 3552-3572, 2014. (DOI:10.3390/e16073552)
6. Ichinokawa, M., Okamura, H., Watanabe, C., Kawabata, A. and Oozeki, Y. "Effective time closures: quantifying the conservation benefits of input control for the Pacific chub mackerel fishery", *Ecological Applications* 25(6), 1566-1584, 2015. (DOI:10.1890/14-1216.1)
7. Yonezaki, S., Kiyota, M. and Okamura, H. "Long-term ecosystem change in the western North Pacific inferred from commercial fisheries and top predator diet", *Deep Sea Research Part II*, 113, 91-101, 2015. (DOI:10.1016/j.dsr2.2014.10.027)
8. Komori, O., Eguchi, S. and Copas, J. "Generalized t-statistics for two-group classification", *Biometrics*, 71(2), 404-416, 2015. (DOI:10.1111/biom.12265)
9. Kato, S., and Eguchi, S. "Robust estimation of location and concentration parameters for the von Mises-Fisher distribution", *Statistical Papers*. 57(1), 205-234, 2016. (DOI:10.1007/s00362-014-0648-9)
10. Komori, O., Eguchi, S., Ikeda, S., Okamura, H., Ichinokawa, M. and Nakayama, S. "An asymmetric logistic regression model for ecological data", *Methods in Ecology and Evolution*, 7(2), 249-260, 2016. (DOI:10.1111/2041-210X.12473)
11. Takenouchi, T., Komori, O. and Eguchi, S. "Binary classification with pseudo exponential model and its application for multi task learning", *Entropy* 17(8), 5673-5694, 2015. (DOI:10.3390/e17085673)
12. Notsu, A. and Eguchi, S. "Robust Clustering Method in the Presence of Scattered Observations", *Neural Computation*, 28(6), 1141-1162, 2016. (DOI:10.1162/NECO_a_00833)
13. Okamura, H., Ikeda, S., Morita, T. and Eguchi, S. "Risk assessment of radioisotope contamination for aquatic living resources in and around Japan", *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 113(14), 3838-3834, 2016. (DOI:10.1073/pnas.1519792113)
14. Ichinokawa, M., Okamura, H., and Kurota, H., "The status of Japanese fisheries relative to fisheries around the world", *ICES Journal of Marine Science*. (DOI:10.1093/icesjms/fsx002)
15. Nakayama, S., Akimoto, S., Ichinokawa, M., and Okamura, H. "Incorporating accessibility limitation into the surplus production model", *Fish. Sci.* (in press) (DOI: 10.1007/s12562-017-1078-0)
16. Okamura, H., Yamashita, Y., and Ichinokawa, M. Ridge virtual population analysis to reduce the instability of fishing mortalities in the terminal year. *ICES Journal of Marine Science* (in press) (DOI: 10.1093/icesjms/fsx089)
17. Okamura, H., Morita, S. H., Funamoto, T., Ichinokawa, M., and Eguchi, S. Target-based catch-per-unit-effort standardization in multispecies fisheries. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (in press) (DOI:10.1139/cjfas-2016-0460)

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. 中山新一朗, 阿部真人, 岡村 寛. Convergent cross mapping の紹介:生態学における時系列間の因果関係推定法. 日本生態学会誌, 65:241-253, 2015.
2. Eguchi, S. and Komori, O. Path Connectedness on a Space of Probability Density Functions., *Geometric Science of Information* , 615-624. Springer International Publishing, 2015.
3. Eguchi, S., Notsu, A. and Komori, O. "Spontaneous learning for data distributions via minimum divergence", *Computational Information Geometry in Signal and Image Processing*, Springer, 2016.
4. 市野川桃子, 岡村 寛. "乱獲 - 漁業資源の今とこれから -", 東海大学出版部(翻訳), 2015
5. 岡村 寛・市野川桃子 2016. 水産資源学における統計モデリング. 統計数理 64(1):39-57.
6. 市野川桃子・岡村 寛 2016. 一般化状態空間モデルで漁業動態を記述する —マサバ努力量管理効果の定量評価. 統計数理 64(1):59-75.

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 1 件、国際会議 5 件)

1. 江口真透, "情報幾何の展開—アダブーストからポアンカレ予想まで", シンポジウム「一般化線形モデルの最新の展開とその周辺」特別講演会, 千葉, 2013.11.8-10.
2. Eguchi, S., "Pattern Recognition for Marine Ecological Assessments", The 9th ICSA International Conference: Challenges of Statistical Methods for Interdisciplinary Research and Big Data, Hong Kong, 2013.12.20-23.
3. Eguchi, S. and Komori, O. "Generalized entropy and divergence in statistical learning", The 3rd Institute of Mathematical Statistics Area Pacific Rim Meeting Taipei, 2014.6.29-7.3.
4. Eguchi, S. "Spontaneous learning for data distributions via minimum divergence", ICMS Workshop on Computational information geometry for image and signal processing, University of Edinburgh, 2015.9.21.
5. Eguchi, S. "Information geometry and spontaneous data learning", Workshop on High-Dimensional Statistical Analysis, Taiwan, 2015.12.1.
6. Eguchi, S. "Spontaneous learning for clustered data via gamma power divergence", The 9th Conference of the Asian Regional Section of the IASC, Singapore. 2015.12.19.

② 口頭発表 (国内会議 23 件、国際会議 20 件)

1. 岡村寛, 市野川桃子. "限られた情報下における資源管理の成功・失敗の評価", 水産学会春季大会, 東京, 2013.3.26-30.
2. 岡村寛, 市野川桃子. "小標本におけるブートストラップ信頼区間の構成", 水産学会春季大会, 東京, 2013.3.26.-30.
3. Okamura, H., McAllister, M.K., Ichinokawa, M., Yamanaka L. and Holt, K. "Evaluating the sensitivity of biological reference points to variation in spatial and temporal selectivity", Workshop of selectivity: theory, estimation, and application in fishery stock assessment models, San Diego USA, 2013.3.12-14.
4. Ichinokawa, M., Okamura, H., Watanabe, C., Kawabata, A. and Oozeki, Y. "Does fishing effort control really work? - consequences of spillover effects observed in the Pacific chub mackerel fishery -", INTECOL2013. London. 2013.8.19-23.
5. 中山新一朗, 秋元清治, 市野川桃子, 岡村寛. "ナマコの資源動態モデル", 国際水研 H25 所内プロ研の秋季ワークショップ"これからの水産資源研究:限られたデータを有効活用し多面的ニーズに応えるには?", 三重, 2013.9.18-19
6. 江口真透. "海洋生態系を測るための関数データ解析", 統計関連学会連合大会, 大阪, 2013.9.8-11.
7. 岡村寛, 市野川桃子. "小標本の場合のブートストラップ信頼区間", 漁業データと生態系の解析に関するミニワークショップ in 2013, 長崎, 2013.9.26-27
8. 市野川桃子, 岡村寛, 渡邊千夏子, 川端 淳, 大関芳沖. "一般状態空間モデルを用いたマサバ休漁政策の定量評価", 漁業データと生態系の解析に関するミニワークショップ in 2013.

- 長崎. 2013.9.26-27.
9. 中山新一朗, 市野川桃子, 岡村寛. "複雑な"時系列の短期的予測について". 漁業データと生態系の解析に関するミニワークショップ in 2013. 長崎. 2013.9.26-27.
 10. 江口真透. "2 値判別分析におけるモデルと推定の関係について", 科学研究費シンポジウム「一般化線形モデルの最新の展開とその周辺」, 千葉, 2013.11.9
 11. Komori, O. "Assessment of Fishery Status Based on a Boosting Method", The 9th ICSA International Conference: Challenges of Statistical Methods for Interdisciplinary Research and Big Data. Hong Kong, 2013.12. 20-23.
 12. 市野川桃子, 岡村 寛, 渡邊千夏子, 川端 淳, 大関芳沖. "状態空間モデルを用いたサバ資源の休漁管理効果の検証". 日本生態学会. 広島. 2014.3.16
 13. Ichinokawa, M., Okamura, H., Watanabe, C., Kawabata, A. and Oozeki, Y. "Does effort management really work in "time"? - consequences of the management using fishing days-off in chub mackerel fishery in Japan", International symposium on innovation and challenges for fisheries assessment and management, Kanagawa, 2014.3.5
 14. Okamura, H., Ichinokawa, M., Mori, M. "Global fisheries and ecosystem assessment for data-limited situations", International symposium on Status and trends in global fisheries, Kanagawa, 2014.3.4
 15. Okamura, H. and Ichinokawa, M. "Constructing confidence intervals for small sample sizes", International symposium on innovation and challenges for fisheries assessment and management, Kanagawa, 2014.3.5
 16. Nakayama, S., Ichinokawa, M. and Okamura, H. "Causality in a complicated ecosystem: application of convergent cross mapping", International symposium on Status and trends in global fisheries, Kanagawa, 2014.3.4
 17. Nakayama, S., Akimoto, S., Ichinokawa, M. and Okamura, H. "Stock assessment of Japanese sea cucumber by a combination of DeLury's model and production model". International symposium on innovation and challenges for fisheries assessment and management. Kanagawa. 2014.3.5
 18. Eguchi, S. "Possible generalization of MAXENT". International symposium on innovation and challenges for fisheries assessment and management, Kanagawa, 2014.3.5
 19. Eguchi, S. and Komori, O. "Robustly predicting stock status via asymmetric binary regression model", International symposium on Status and trends in global fisheries, Kanagawa, 2014.3.4
 20. Komori, O. "Boost learning for evaluation of fishery stock status", International symposium on innovation and challenges for fisheries assessment and management, Kanagawa, 2014.3.5
 21. Nakayama, S., Akimoto, S., Ichinokawa, M. and Okamura, H. A method for stock assessment of Japanese sea cucumber. ICES Marine risk analysis symposium, フィンランド, 2014.6.2-4.
 22. Okamura, H. and Ichinokawa, M. "Bootstrap Confidence Intervals for Small Sample Sizes", 国際計量生物学会, フィレンツェ, 2014.7.5-13.
 23. Eguchi, S. and Komori, O. "Generalized entropy and divergence in statistical learning", IMS Asia Pacific Rim Meetings, Taipei, 2014.7.3
 24. Komori, O. and Eguchi, S. "Assessment of fishery status based on mis-label model", IMS Asia Pacific Rim Meetings, Taipei, 2014.7.3
 25. Ichinokawa, M., Okamura, H., Watanabe, C., Kawabata, A. and Oozeki, Y. "Evaluation of the effort management setting fishing days-off in the Japanese purse seine fishery targeting Pacific chub mackerel", アメリカ水産学会, ケベック, 2014.8.17-21.
 26. 小森理, 江口真透. 非対称ロジスティック回帰モデルによる 水産資源評価. 2014 年度統計関連学会連合大会, 東京大学, 2014.9.13-16.
 27. 江口真透, 小森理. 生態学のためのエントロピー最大法の拡張. 2014 年度統計関連学会連合大会, 東京大学, 2014.9.13-6.
 28. Komori, O. and Eguchi, S. "Maximum power entropy method for ecological data analysis", MaxEnt2014, Chateau du Clos Luce, Amboise, 2014.9.21-26.
 29. Takenouchi, T., Komori, S. and Eguchi, S. "A novel boosting algorithm for multi-task learning based on the Itakuda-Saito divergence", MaxEnt2014, Chateau du Clos Luce, Amboise, 2014.9.21-26.

30. Eguchi, S., Komori, O. and Ohara, A. "Duality in a maximum generalized entropy model." MaxEnt2014, Chateau du Clos Luce, Amboise, 2014.9.21-26.
31. 岡村寛, 池田思朗, 森田貴己, 江口真透. "水産物の放射能汚染リスクの定量的評価", 平成 27 年度日本水産学会春季大会. 2015.3.
32. 中山新一朗, "Convergent cross mapping の紹介と実践: 決定論的力学系における因果関係推定", 生態学会関東地区会シンポジウム・公開シンポジウム, 東京大学駒場キャンパス, 2015.8.6
33. 中山新一朗, "北西太平洋における魚種交替現象の因果関係推定: CCM を用いた解析", 第 63 回 日本生態学会大会, 仙台市国際センター, 2016.3.22
34. 中山新一朗, "Convergent cross mapping: 原理、実装、研究例について", 第 63 回日本生態学会大会, 仙台市国際センター, 2016.3.24
35. 市野川桃子, なぜこの魚は乱獲されるのか? 乱獲資源の特徴抽出, 第 63 回 日本生態学会大会, 仙台市国際センター, 2016.3.24
36. 岡村寛, 漁業が生態系に与える影響—単一種管理と生態系管理の違い—, 平成 28 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 2016.3.30
37. 市野川桃子, 乱獲の現状—世界から見た日本の姿—, 平成 28 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 2016.3.30
38. Ichinokawa, M. and Okamura, H. "A variety of effort management and its quantitative evaluation in the Pacific purse seine fishery targeting small pelagic fish" International Symposium Drivers of dynamics of small pelagic fish resources, Victoria, Canada, 2017.3.7.
39. 中山新一朗・岡村寛・市野川桃子・高須賀明典 "北西太平洋における魚種交替現象の因果関係推定", 生態学のリストラ 3, 京都, 2017.3.10
40. 岡村寛・山下夕帆・市野川桃子 "リッジ回帰とコホート解析を統合した資源評価モデル", 平成 29 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 2016.3.27
41. 橋本緑・岡村寛・市野川桃子・平松一彦・山川卓 "チューニング VPA における資源量指数の非線形性推定", 平成 29 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 2016.3.27
42. 岡村寛 "教師なし学習による狙い操業の予測", 平成 29 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 2016.3.30
43. 橋本緑 "教師あり学習による資源状態の予測モデル", 平成 29 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 2016.3.30

③ ポスター発表 (国内会議 5 件、国際会議 0 件)

1. 中山新一朗, 秋元清治, 市野川桃子, 岡村寛. "ナマコの資源動態モデル ~東京湾のナマコ漁を題材として~", 日本生態学会, 広島, 2014.3.14-18
2. 中山新一朗, 市野川桃子, 岡村寛. "シミュレーションデータを用いた Convergent Cross Mapping の性能評価", 第 62 回日本生態学会, 鹿児島, 2015.3.21-24
3. 橋本緑・岡村寛・市野川桃子・平松一彦・山川卓 "The impact of nonlinear relationship between population size and its index in a population dynamics model", 第 32 回個体群生態学会大会, 札幌定山溪温泉, 2016.11.15
4. 中山新一朗・高須賀明典・市野川桃子・岡村寛 "相関は因果を反映するか? ~水温とイワシ類 2 種の間を例として~", 第 64 回日本生態学会, 早稲田大学. 2017.3.14-18
5. 市野川桃子・岡村寛 "TAC 非対象種における小型魚保護と種苗放流の影響評価", 平成 29 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 2016.3.27

(4)受賞・報道等

①受賞

1. 岡村 寛:平成 28 年度水産学進歩賞(日本水産学会)(CREST 研究を含む業績が評価された)

②マスコミ(新聞・TV等)報道

1. Washington Post, With Fukushima's fifth anniversary approaching, we can probably start to

relax about radioactive seafood (2016/2/29)

2. 毎日新聞, セシウム 福島県沖の魚、基準値超えほぼゼロ (2016/2/29).

(5)成果展開事例

① 実用化に向けての展開

- ・ 開発したプログラムを「Ecological Applications」及び「Methods in Ecology and Evolution」の HP にて公開中 (<http://www.esapubs.org/archive/appl/A025/096/>, <http://onlinelibrary.wiley.com/store/10.1111/2041-210X.12473/asset/supinfo/mee312473-sup-0001-SupInfo.pdf?v=1&s=bcc87ee6be40a99993893a307ff0a0e0d52fb2a0>)
- ・ また, 世界の資源評価データベースを分析する R パッケージを開発し, 公開するために準備を進めている.

② 社会還元的な展開活動

- ・ Ecological Applications に掲載された成果を元に, 資源管理の重要性を主張し, 今後も資源管理政策を継続することを国に提言した.

§ 5 研究期間中の活動

5. 1 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

| 年月日 | 名称 | 場所 | 参加人数 | 概要 |
|---------------------|--|----------------------|------|--|
| 2012年10月 15日-19日 | ベイズワークショップ | 中央水産研 究所会議室 | 15人 | ベイズ法の専門家を招聘し ワークショップを開催した |
| 2012年11月 20日 | “Sea around the youth” シンポジウム | 中央水産研 究所講堂 | 40人 | 海外の生態系研究者ととも にシンポジウムを行った. |
| 2014年3月 3-4日 | 国際シンポジウム 「Status and Assessment of Marine Ecosystem」 | 中央水研講 堂・国際会 議室 | 40人 | ワシントン大学の Ray Hilborn 教授を招聘し, 招 待講演を行った. |
| 2014年3月5 日 | 国際シンポジウム 「Innovation and Challenges for Fisheries Assessment and Management」 | 慶應大学 | 40人 | ワシントン大学の Ray Hilborn 教授を招聘し, 国 際シンポジウムを開催し た. |
| 2014年10月 17日 | データ不足下における 海洋生態系の統計的評 価手法 | 東大大気海 洋研会議室 | 27人 | |

§6 最後に

今回, 中央水産研究所と統計数理研究所との共同研究を行い, 機械学習的手法の生態学への活用という点で大きな進展が見られたと考えている. 今後, 生態系モデルと生態系評価指標の更なる統合を目指し, 引き続きプロジェクト研究を進めていきたいと考えている.