

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 20 日現在

機関番号：85401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K00048

研究課題名(和文) 変化係数モデルの多変量化と北東大西洋のミンククジラの身体状況データへの適用

研究課題名(英文) Multivariate varying coefficient model and its application to physical state data of minke whale in the northeast Atlantic Ocean

研究代表者

山村 麻理子 (Yamamura, Mariko)

公益財団法人放射線影響研究所・統計部・研究員

研究者番号：60525343

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：空間データの分析に利用されている変化係数モデルについて、複数の目的変数に対応できるように拡張した正準相関変化係数モデルを作成し、ノルウェー国立海洋学研究所が管理する北東大西洋におけるミンククジラの身体状態の時空間データに応用した。推定結果は海洋環境や海洋生態からみた現状が反映されており、国際捕鯨委員会で報告された。しかしながら、データが偏った位置で収集されていることから、推定方法にはさらなる改良が必要で今後の課題として研究を続けたい。

研究成果の学術的意義や社会的意義

時空間統計分析の新たな手法が提案され、複数の目的変数を用いた推定が可能となった。北大西洋におけるミンククジラの脂肪厚の時空間的な差異を明らかにしたことで、クジラの栄養状態や海洋生態系の状況を緯度と経度で示す位置、年、および季節の効果を交えて把握でき、海洋環境における重要な情報を提供することができた。本研究の推定結果が国際捕鯨委員会で報告会で取り上げられ、各国にミンククジラの生態の様子を伝える一助を担った。

研究成果の概要(英文)：We propose how we can analyze spatio-temporal data with multiple response variables by innovating the varying coefficient model in canonical correlation analysis, and to apply the approach where we use a body condition data set from common minke whales in the Northeast Atlantic Ocean provided by Institute of Marine Research in Norway. The estimation results reflect the current situation from the viewpoint of marine environment and ecology, and were reported by the International Whaling Commission. However, since the data are collected in a biased location, the estimation method needs further improvement, and research will continue as a future subject.

研究分野：統計科学

キーワード：時空間統計解析 変化係数モデル 多変量解析 情報量基準

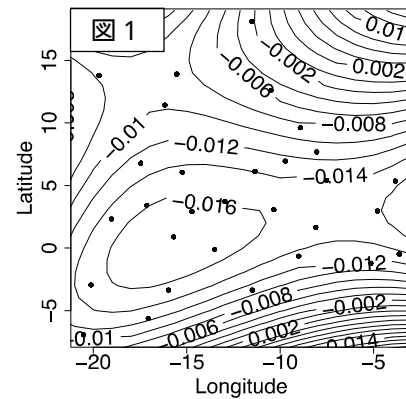
様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

変化係数モデルとは時間の関数としての回帰係数を推定するモデルで、1996年頃から空間データの分析に利用されており、一般的にカーネル平滑化などがあてはめられている。しかしカーネル平滑化法は信頼区間の構築が困難であることから、変化係数曲面の構造を線形で推定する手法と、合わせてその信頼区間の導出と有意性検定が提案されている。変化係数モデルを用いた時空間統計解析の例として、ある空間で同様に植林された杉の23年間の成長を記録したデータを推定した Yamamura et al (2016) を次のとおり挙げる。

$$y(u, v, t) = \beta_1(u, v) + \gamma_1(t) + \{\beta_2(u, v) + \gamma_2(t)\}x + \varepsilon(u, v, t)$$

杉の成長を表すものとして目的変数 y には体積を用い、 u と v をそれぞれ杉が立地する緯度と経度、 $t=1, 2, \dots, 23$ を樹齢とする。 $\beta(u, v)$ と $\gamma(t)$ はそれぞれ、緯度と経度、および樹齢を関数とする変化係数である。 $\beta(u, v)$ の推定結果は等高線のように図1で示される。図中の変化係数 $\beta(u, v)$ の値は緯度と経度によって異なり、ここから杉の体積の成長の位置効果が明らかとなる。ここでは目的変数とした杉の成長を表す観測値として体積のみを用いた。しかし他にも、高さや太さなども考えられ、総合的に成長の様子を捉えたい。そこで複数の目的変数に対応できるように拡張した多変量変化係数モデルを実用したい。また単変量の場合と同様に、多変量変化係数モデルは係数の有意性や信頼度も表すことが可能である。



多変量変化係数モデルを応用するデータとして、ノルウェー国立海洋学研究所が提供する北東大西洋におけるミンククジラの身体状態を記録したものがある。ノルウェーは春から夏にかけてノルウェー海域を北上してくるミンククジラの商業用捕鯨を行っており、捕獲したクジラについて、捕獲場所の緯度と経度、体長、胴回りの長さ、脂肪厚などを記録し、国際捕鯨委員会(IWC)で報告している。今までの研究からクジラは北上するほど栄養を蓄えて脂肪厚が増していくことが分かっている。この海洋環境や海洋生態を守る必要があることから、ミンククジラの移動に伴う脂肪厚の変化に関する研究を進め、国際的に理解を深める必要がある。そのため当データによる時空間統計解析が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、時空間統計解析において、単変量で用いられている変化係数モデルを多変量に拡張し応用範囲を広げる。そしてノルウェー国立海洋学研究所が提供する北東大西洋におけるミンククジラの身体状態の時空間データに応用し、クジラの生態環境を把握することである。ノルウェー海域における位置として緯度と経度ごとにミンククジラの脂肪厚がどのように異なるか分析し、クジラが北上することによって身体に十分に栄養を蓄えられているかどうか明らかにする。さらに近年、北大西洋において、ミンククジラの主要な餌となるシシャモ等の生息の時空間的変異が明らかとなっており、また地球温暖化に伴う北極圏海域の生態系の変化も知られていることから、クジラが十分に栄養を蓄えられていないことが懸念されている。よって年別の脂肪厚の経時変化にも注目する。また、春から夏にかけてのクジラの移動時期を考えると、移動時期の序盤と終盤では季節が異なることから、海洋の環境や生態が異なり、その結果、栄養の摂取状況に違いが生じ脂肪厚が異なることが考えられる。よって、季節効果としての脂肪厚の経時変化も明らかにする。目的変数となる脂肪厚については、様々な部位で測定が行われている。1箇所部位に絞ることなく、全体としてクジラが身体に脂肪を蓄えられているかどうか知りたいことから、多変量変化係数モデルに沿って、図2のBT1, BT2, BT3のとおり、複数箇所の脂肪厚を目的変数として用いる。



3. 研究の方法

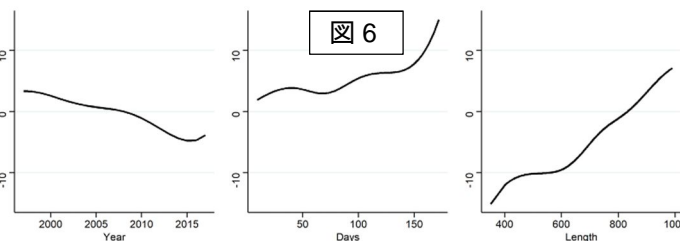
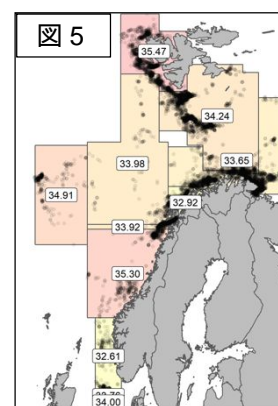
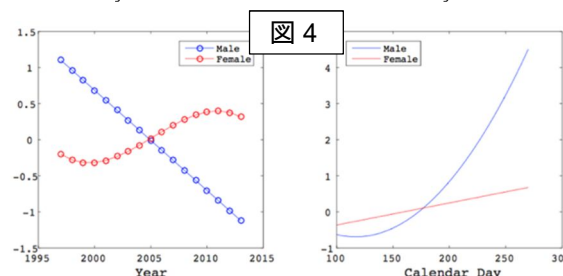
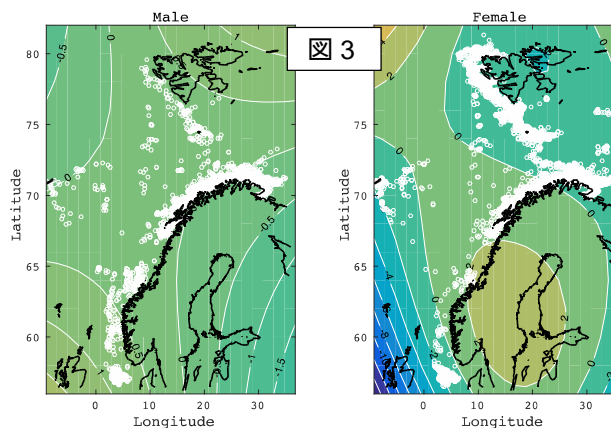
ノルウェー国立海洋学研究所との共同研究を行う。ノルウェー側はデータの準備と分析結果の解釈を行い、日本側は分析手法の提案と、統計モデルの作成、実解析のためのプログラムの作成、および推定を行う。分析用のデータをノルウェー側が作成し、記述統計や図表などを作成しながら、データクリーニングを行い、日本側に分析データを渡す。捕鯨は毎年行われることから、ミンククジラのデータは更新されていく。よって、分析データも都度、更新を行う。受け取った分析データから、日本側は統計モデルを作成し推定を行う。推定結果について、両国で統計理論と海洋環境学や海洋生態学の視点から確認や意見のすり合わせを行い、報告書や論文としてまとめる。

日本側は、複数の目的変数に対応できる多変量変化係数モデルとして、正準相関変化係数モデルを提案する。目的変数は3種類の脂肪厚(BT1, BT2, BT3)、胴回りの長さ(Girth)、および体長を用いる。説明変数は位置効果として緯度と経度、年効果として年、季節効果として1月1日からの数え日数を変化係数で推定し、その他に性別を加える。当然ながら、なるべく目的

変数の状況を正確に表す変化係数の推定結果が望まれる。位置の影響は緯度と経度で張られた平面にどの様に現れるかは不明である。よって、1次の線形で固く推定するのではなく、2次以上の曲線を含めて滑らかに推定したい。つまり、変化係数の関数となる緯度や経度については、最適な関数の形を調べる必要がある。これを可能とするモデル選択について、推定モデルとともに研究を行う。年や数え日数に関しても緯度と経度と同様に最適なモデル選択を行う。モデル選択については、赤池情報量規準や交差検証について研究を行う。統計理論を作成した後、実分析を行うためのプログラムを作成する。

4. 研究成果

ミンククジラのデータの標本数は約12,000である。年は1997年から2018年、数え日数としては、4月から9月にあたる日数が入っている。正準相関変化係数モデルによる変化係数の推定結果を示した図として、図3は位置効果、図4左は年効果、図4右は数え日数による季節効果を表している。雄と雌は別々の推定結果を持つ。それぞれの変化係数の形状が異なるのは、モデル選択により選ばれた最適な変数や次数が異なるからである。図3は寒色から暖色に移るほど、クジラの脂肪厚が増していることを表しており、図3左の雄と図3右の雌の結果は同じと言えないものの、雌の結果は北上するほどクジラが栄養を蓄えている様子が伺える。図4左の年については、近年クジラの栄養となる餌の減少の影響が特に青色で示した雄で見られる。図4右の季節効果については、秋に近いほど脂肪厚が増加する特徴を的確に捉えることができている。ノルウェー側の研究者によると、推定結果は海洋環境や生態からみた現状が反映されているという。本研究成果は線形モデルで扱いやすく、統計学が専門でなくても解釈を行いやすいことが長所であると思われる。データの更新を行いつつ、IWCで本モデルの推定結果が報告されている。また論文の出版も終了している。しかしながら、正準相関変化係数モデルは扱いやすい反面、正直、データの分析結果には少々疑問が残った。なぜ雄と雌とで推定結果が異なるのか、なぜ南から北に移るに従い脂肪厚が増える現状が位置効果としてもっと明確に現れないのか。正準相関変化係数モデルがこのデータに対して当てはまりが悪い可能性が拭いきれず、ひいては、空間分析手法として問題といえる。原因は図3で見られると考えている。白い点が実際にクジラを捕獲した位置で、その位置に随分と偏りがあるのが分かる。これは漁師が、IWCにより予め決められた区域内において、自分達の慣れた位置で捕鯨を繰り返すため



と考えられる。位置効果を示す変化係数は緯度と経度の関数である。すると、緯度と経度のデータに偏りがあれば、線形モデルによる適切な推定が望めないのである。これより、位置に偏りがあるデータの空間分析について研究を行うこととなった。現在、推定モデルが完成し、図5や図6の通り結果を得ることができた。脂肪厚については、クジラの体長にも影響があることから、新たに体長を説明変数として使用しており、雄と雌とに分けて推定することは止めた。図6に左、中央、右の順に年、数え日数、体長の推定結果を示す。図6は図4よりも格段に推定結果が現状と一致している。一方で、図5の位置効果については、現状が反映されていると言い難く、現在もノルウェー国立海洋学研究所との共同研究が続いており、近く結果をまとめて報告したい。

参考：

Yamamura, M, Fukui, K. & Yanagihara, H. (2016). Illustration of the varying coefficient model for a tree growth analysis from the age and space perspectives. FORMATH(15), 1-9.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Oda Ryoya, Suzuki Yuya, Yanagihara Hirokazu, Fujikoshi Yasunori	4. 巻 175
2. 論文標題 A consistent variable selection method in high-dimensional canonical discriminant analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Multivariate Analysis	6. 最初と最後の頁 104561 ~ 104561
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.jmva.2019.104561	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ohishi Mineaki, Yanagihara Hirokazu, Fujikoshi Yasunori	4. 巻 204
2. 論文標題 A fast algorithm for optimizing ridge parameters in a generalized ridge regression by minimizing a model selection criterion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Planning and Inference	6. 最初と最後の頁 187 ~ 205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.jspi.2019.04.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Fujikoshi Yasunori	4. 巻 19-06
2. 論文標題 Computable Error Bounds for Asymptotic Approximations of the Quadratic Discriminant Function	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Hiroshima Mathematical Journal	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Keisuke Fukui, Mineaki Ohishi, Mariko Yamamura, Hirokazu Yanagihara	4. 巻 -
2. 論文標題 A Fast Optimization Method for Additive Model via Partial Generalized Ridge Regression	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Knowledge-Based and Intelligent Engineering Systems	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroko Solvang, Tore Haug, Nils Oien	4. 巻 SC/68A/EM/02
2. 論文標題 Recent development in temporal and geographical variation in body condition of common minke whales (<i>Balaenoptera acutorostrata acutorostrata</i>) in the Northeast Atlantic	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 国際捕鯨委員会科学委員会報告書	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Zhidong Bai, Kwok Pui Choi, and Yasunori Fujikoshi	4. 巻 46(3)
2. 論文標題 Consistency of AIC and BIC in estimating the number of significant components in high-dimensional principal component analysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Annals of Statistics	6. 最初と最後の頁 1050-1076
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Oda Ryoya, Yanagihara Hirokazu, Fujikoshi Yasunori	4. 巻 8
2. 論文標題 Asymptotic null and non-null distributions of test statistics for redundancy in high-dimensional canonical correlation analysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Random Matrices: Theory and Applications	6. 最初と最後の頁 1950001 ~ 1950001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1142/S2010326319500011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mariko Yamamura, Hirokazu Yanagihara, Hiroko Kato Solvang, Nils Oien, Tore Haug	4. 巻 96
2. 論文標題 Canonical correlation analysis for geographical and chronological responses	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Procedia Computer Science	6. 最初と最後の頁 1351-1360
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.08.180	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 櫻井哲朗 藤越康祝
2. 発表標題 グラフィカルモデルの選択におけるK00法の適用
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤越康祝 櫻井哲朗
2. 発表標題 高次元多変量回帰モデルにおける変数と次元の同時選択法
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroko Solvang, Tore Haug, Nils Oien
2. 発表標題 Recent development in temporal and geographical variation in body condition common minke whales (<i>Balaenoptera acutorostrata acutorostrata</i>) in the Northeast Atlantic
3. 学会等名 Report of International Whaling Commission Scientific Committee
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福井敬祐, 山村麻理子, 柳原宏和, Solvang Hiroko, Nils Oien, Tore Haug
2. 発表標題 ミンククジラの身体データを例とした粗密がある空間データでの Fused Lasso による空間効果の推定
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mariko Yamamura
2. 発表標題 Estimation of spatiotemporal effects by the fused lasso for densely sampled spatial data using body condition data set from common minke whales
3. 学会等名 International Symposium on Statistical Theory and Methodology for Large Complex Data (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山村麻理子
2. 発表標題 費用効率性評価と粗密な時空間データの分析について
3. 学会等名 サステナビリティ研究センター 第14回研究会・公開講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 櫻井哲朗, 藤越康祝
2. 発表標題 多変量回帰分析や判別分析などにおける新たな変数選択法の提案
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 八木文香, 瀬尾隆, 藤越康祝
2. 発表標題 単調欠測データをもつ成長曲線モデルに関するAIC型選択規準
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroko K. Solvang
2. 発表標題 Temporal and geographical variation in body condition of common minke whales <i>Balaenoptera acutorostrata</i> in the Barents Sea
3. 学会等名 Kouchi International Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tore Haug
2. 発表標題 The current tendency for temporal and geographical variation in body condition of common minke whales (<i>Balaenoptera acutorostrata acutorostrata</i>) in the Northeast Atlantic
3. 学会等名 International Whaling Commission Scientific Committee (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mariko Yamamura
2. 発表標題 Canonical correlation analysis for geographical and chronological responses
3. 学会等名 KES-2016 20th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Mariko Yamamura
2. 発表標題 Canonical correlation analysis for geographical and chronological responses
3. 学会等名 International Symposium on Statistical Analysis for Large Complex Data
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	藤越 康祝 (Fujikoshi Yasunori) (40033849)	広島大学・理学研究科・名誉教授 (15401)	
研究 協力者	ソルヴァン ヒロコ (Solvang Hiroko)		