

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 26 日現在

機関番号：62603

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330051

研究課題名(和文)生態リスク評価の緻密化と環境識別問題に対するベイズ的接近

研究課題名(英文)Development of ecology risk evaluation and Bayesian approach to environmental problems

研究代表者

柏木 宣久(Kashiwagi, Nobuhisa)

統計数理研究所・モデリング研究系・教授

研究者番号：50150032

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：我々は環境問題に現れる数理的な問題を解決するための統計的方法について研究した。具体的なテーマは、生態リスク評価、汚染発生源解析、太陽放射エネルギー、土砂災害、化学物質に対する細胞応答であった。生態リスク評価については、急性毒性から慢性毒性を推定する方法を提案した。汚染発生源解析については、室蘭港底質のPCB汚染の発生源について検討した。太陽放射エネルギー、土砂災害、化学物質に対する細胞応答については、現象に対応する統計モデルを開発した。

研究成果の概要(英文)：We have studied about the statistical methods to settle the mathematical problems of appearing in environmental issues. Themes in detail were ecology risk evaluation, a pollution source analysis, the solar radiation energy, landslide disaster and a cell reply to chemicals. About ecology risk evaluation, we proposed a method to estimate chronic toxicity from acute toxicity. About a pollution source analysis, we estimated PCB sources in Muroran port sediments. About the solar radiation energy, landslide disaster and a cell reply to chemicals, we developed statistical models which can describe the phenomena.

研究分野：統計科学

キーワード：ベイズ統計 環境統計 方向統計 生態リスク評価 汚染発生源解析 土砂災害 化学物質に対する細胞応答

1. 研究開始当初の背景

近年のベイズ的方法の進展は著しく、進展以前の観念論に過ぎないとの批判を覆し、実用的方法として定着するに至った。解決困難とされてきた非線形問題、識別問題、大規模問題等にも威力を発揮している。例えば、申請者の提案に限っても、線形トレンドにおける構造的変化の検知 (Kashiwagi, 1996)、井戸水位の時空間変化に基づく地下帯水構造の逆推定 (Honjo and Kashiwagi, 1999)、時空間季節変動調整 (Kashiwagi, et al., 2003) 等がある。計算機の発達に伴い、状態空間やマルコフ連鎖モンテカルロの適用範囲が拡がり、現象に則したモデリングを可能にするベイズモデルの実用性が確保され、様々な成果が得られるようになった。同時に、問題解決におけるモデリングの重要性が一層明白になった。

モデリングを行うには、現象に対する理解が不可欠である。申請者の場合、方法の開発に際し、該当分野の研究者と共同研究を実施している。その一環として、環境分野の研究者と交流があり、統計の立場から環境問題全般を観察する機会を得た。その際に気付いたのが、統計的問題の解決に便宜的な方法が用いられる場合や識別不能な推論を強いられる場合が多いという点である。そこで、本研究では、生態リスク評価に関して、従来の便宜的な慢性毒性の推定法に代わるベイズ的方法を開発すると共に、発生源解析に関して、本来的には識別不能な未知発生源に関する推論を実現するベイズ的方法を開発する。

(1) 生態リスク評価

環境中の化学物質を管理するために生態リスク評価は不可欠である。生態リスク評価では環境濃度や種の感受性の確率変動を明示的に扱える Expected Potentially Affected Fraction (EPAF) を用いるのが合理的である。ただし、環境濃度について、検出下限未滿の測定値が多数を占め、データの大きさが時点や地点に依存する、といった問題があり、また、種の感受性について、毒性値が測定されている種数が藻類、甲殻類、魚類といった分類毎に異なり、毒性データの大きさも極端に小さい、といった問題があり、環境濃度分布や種の感受性分布を合理的に推定できず、EPAF を利用し難い状況が続いていた。そこで、データが問題を内在している場合でも、EPAF を利用可能にするベイズ的方法を開発した (Hayashi and Kashiwagi, 2011, 2012)。この方法により状況は改善したが、データが整備されている方が精度は良くなる。種の感受性として通常は慢性毒性が利用される。しかし、慢性毒性試験は多くの時間と費用を要するため、データは非常に少ないのが実情である。そのため、比較的豊富に存在する急性毒性データから慢性毒性値を推定する仕方がしばしば採用される。ただし、従来の急性慢性毒性比に基づく推定法は現象に対応していないため、推定精度に問題が

あり、これを改善する必要が生じていた。

(2) 発生源解析

環境管理にとって汚染発生源の同定は本質的な問題である。発生源を同定できなければ如何なる発生源対策も立てようがないからである。発生源を同定するためリセプターモデルと呼ばれる様々な数理的方法が提案されている。発生源組成が未知の場合の米国環境保護局の標準的方法は Positive Matrix Factorization (Paatero and Tapper, 1993) であるが、この方法の解に一意性は無く (Park et al., 2002)、標準的方法が実質的に存在しない状況になっていた。そこで、本来は識別不能な未知発生源の組成と寄与率を推定できるベイズ的方法を開発した (Kashiwagi, 2004)。ただし、この方法はある程度の観測の繰り返しを必要としているため、適用場面が限定されてきた。そこで、観測の繰り返しを減らせる補助情報を探索したが (例えば、今井 他, 2011)、結局、推定の偏りを補正する事前分布および時空間情報の利用が最も汎用的と判断され、今回の方法の開発を着想するに至った。

2. 研究の目的

環境問題において、統計的問題の解決に便宜的な方法が用いられる場合、あるいは識別不能な推論を強いられる場合が、頻繁に見られる。そこで、申請者が開発に携わってきたベイズ的方法を用いて、そうした場合に使用すべき合理的な方法を開発する。具体的には、生態リスク評価に関して、急性毒性から慢性毒性を推定するための方法として、従来の急性慢性毒性比に代わるベイズ的方法を開発すると共に、発生源解析に関して、本来的には識別不能な未知発生源に関する推論を実現するベイズ的方法を開発する。そして、開発した方法を実際のデータに適用し、方法の実用性を検証すると共に、環境問題解決に貢献する。

3. 研究の方法

研究協力者と共に、生態リスク評価と発生源解析について検討する。生態リスク評価については、開発した EPAF 推定法の利用を促進させるため、不足している慢性毒性データを急性毒性から推定して補うためのベイズ的方法を開発すると共に、生態毒性試験に関わる生物統計手法の標準化を進める。発生源解析については、コストの掛かる観測の繰り返しを減らす方法として、母数に時間情報、空間情報、あるいは時空間情報を組み入れたベイズ的方法を開発する。そうした一般的な情報だけでなく、研究協力者から持ち込まれる環境汚染問題毎に、推定に有用と思われる情報を探索し、利用可能な情報が存在する場合には、対応するベイズ的方法を開発する。また、推定精度を向上させるため、環境化学物質の発生源および環境動態に関する情報の拡充にも努める。

なお、大気汚染物質の時空間濃度分布をモデリングする際に、大気汚染物質の時空間遷移について検討する必要が生じた。大気汚染物質の時空間遷移に影響する要因のひとつに風向があるが、風向は角度で表現されるため、これを統計的に処理するためには、方向統計という特殊な方法を使用しなければならない。そのため、1年目後半から、方向統計の専門家を分担者に加えた。

また、慢性毒性データの取得にコストが掛かるため、急性毒性から慢性毒性を推定する方法の開発を目的にしたが、藻類やミジンコはともかく、脊椎動物になると急性毒性の評価も容易でなくなる。そこで、化学物質に触れると細胞の電気特性が変化する現象に注目した毒性を推定するための細胞応答モデルの構築の可否について検討するため、2年目後半から、生体信号処理の専門家を分担者に加えた。

4. 研究成果

(1) 生態リスク評価に関しては、急性毒性(半数影響濃度)から慢性毒性(無影響濃度)を推定する方法について検討した。これは、前述したように、最も合理的なリスク評価法である期待影響割合を構成する種の感受性分布を同定する際に不足する慢性毒性データを補うためであるが、推定を実現するには先ず急性毒性と慢性毒性の関数関係を明らかにする必要があった。そこで、慢性毒性データが比較的整備されている藻類、ミジンコ、魚類を対象に両者の関数関係について検討した。その結果、両者の関係を対数線型モデルで記述できるのが分かり、推定法を構築し提案した。ただし、魚類でさえモデルの同定に必要な最小限のデータしかなく、他の脊椎動物では同定に必要なデータを確保するのは困難と予想された。そこで、生体信号を利用してより安価に毒性を推定する方法について検討するに至った。

(2) 発生源解析に関しては、数学的に識別不能とされる環境汚染に対する未知認発生源の寄与率や組成を推定可能にするベイズ的方法の精度向上について検討した。従来は事前分布として一様分布を仮定していたため、真値が小さいと推定値は過大になり、逆に真値が大きいと推定値は過小になるという系統的な偏りが生じていた。この系統的な偏りを減少させるため、経験ベイズ的方法の利用について考察した。また、適用範囲を拡大するため、時空間情報等の補助情報の利用拡大についても検討した。更に、方法をPM2.5やPCBによる実際の環境汚染問題に適用し、発生源に関する推論を実施した。

(3) 方向統計に関しては、環境データの中で特に角度データのモデル化に焦点を当てて研究を行った。説明変数に角度データを含む場合の多変量回帰モデルにおいて、外れ値も

しくはモデルに強い影響を与えるデータ検出のための統計的診断法を開発した。理論を太陽放射エネルギー測定データに応用してデータ解析するとともにシミュレーションにより理論の検討を行った。また、土砂災害の軽減を目指して、斜面崩壊時刻を予測するための時系列モデルおよびロジスティック回帰モデルについて研究した。

(4) 生体信号処理に関しては、毒性の基礎研究として、毒性をもたらす化学物質に対する細胞応答をモデル化することを試みた。具体的には、リガンド依存イオンチャネル等に代表される化学物質レセプターを入力として引き起こされる細胞興奮の能動性を、細胞内イオンによる電気的特性に着目し、等価回路による解析を行った。この成果は、化学物質に対する細胞応答の電気物理的モデルの提案であり、電氣的解析手法の導入による数値的アプローチの基盤となると期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計14件)

Anezaki, K., Nakano, T., Kashiwagi, N., Estimation of polychlorinated biphenyl sources in industrial port sediments using a Bayesian semifactor model considering unidentified sources, *Environmental Science & Technology*, 査読有, 50, 2016, 765-771.

Liu, S., Ma, T., SenGupta, A., Shimizu, K., Wang, M.-Z., Influence diagnostics in possibly asymmetric circular-linear multivariate regression models, *Sankhya B*, 査読有, 78, 2016, 1-18, DOI 10.1007/s13571-016-0116-8.

Takizawa Y., Fukasawa A., Excitation of a Neuron for Characteristic Potential Generation, *WSEAS Transactions on Biology and Biomedicine*, 査読有, 12, 2015, 69-78.

Takizawa Y., Fukasawa, A. Takeuchi H.-A., Excitation of Paramecium with Membrane Potential Generation for Swimming Direction by Cilia, *WSEAS Transactions on Biology and Biomedicine*, 査読有, 12, 2015, 62-68.

林岳彦, 柏木宣久, 生態毒性データにおける急性慢性比(ACR)の算出・使用の前提となる仮定は実際に成り立っているのか? : 回帰分析による検証, *日本リスク研究学会誌*, 査読有, 24, 2015, 213-220.

Uesu, K., Shimizu, K., SenGupta, A., A possibly asymmetric multivariate

eneralization of the Mobius distribution for directional data, Journal of Multivariate Analysis, 査読有, 134, 2015, 146-162.
Fukasawa A., Takizawa Y., Activities of Excitatory Cells of Neuron and Unicellular Organism, International Journal of Biology and Biomedical Engineering, 査読有, 9, 2015, 98-103.
Fukasawa A., Takizawa Y., Modelling of a Neuron and Point Contact Transistor, International Journal of Biology and Biomedical Engineering, 査読有, 9, 2015, 14-21.
浅川大地, 古市裕子, 柏木宣久, 山本敦史, 橋本俊次, 船坂邦弘, 有機指標成分の測定と CMBK モデルの適用による大阪市の PM2.5 発生源寄与率推定, 大阪市立環科研報告, 査読無, 76, 2014, 47-52.
安藤晴夫, 柏木宣久, 和波一夫, 石井裕一, 東京湾における底層 DO データの解析, 東京都環境科学研究所年報, 査読無, 2014, 94-95.
清水邦夫, 王敏真, 環境科学における方向統計学の利用, 統計数理, 査読有, 61, 2013, 289-305.
Hokimoto, T., Shimizu, K., A non-homogeneous hidden Markov model for predicting the distribution of sea surface elevation, Journal of Applied Statistics, 査読有, 41, 2013, 294-319.
Abe, T., Pewsey, A., Shimizu, K., Extending circular distributions through transformation of argument, Annals of the Institute of Statistical Mathematics, 査読有, 65, 2013, 833-858.
王敏真, 清水邦夫, 上江洲香実, 方向統計学の利用による地震緯度・経度・マグニチュードデータの解析, 応用統計学, 査読有, 42, 2013, pp.29-44.

[学会発表](計31件)

柏木宣久, 時空間季節変動モデルについて, 科研費研究集会「東京湾水質データの統計解析」, 2016.2.17, 東京.
Shimizu, K., Imoto, T., Pareto-type distributions on the cylinder, 9th Conference of the Asian Regional Section of the IASC, 2015.12.17, Singapore.
柏木宣久, 環境中濃度データを読み解くための統計手法について, 平成27年度漁場環境保全関係研究開発推進会議有害物質部会, 2015.11.18, 広島.
井本智明, 酒井直樹, 清水邦夫, 山下智志, 金藤浩司, 斜面崩壊予測に対する時系列解析, 統数研共同研究集会「環

境・生態データと統計解析」, 2015.11.6, 立川.
Imoto, T., Sakai, N., Shimizu, K., Kanefuji, K., Yamashita, S., An application of statistical time series analysis to prediction of slope failure, International Conference on Slopes, 2015.9.15, Malaysia.
Koay, S. P., Tay, L. T., Fam, P. S., Imoto, T., Shimizu, K., Jamaludin, S., Koyama, T., Murakami, S., Fukuoka, H., Sakai, N., Lateh, H., A case study of rain induced landslides prediction in Malaysia, International Conference on Slopes, 2015.9.15, Malaysia.
Fam, P. S., Lim, Y. Z., Chai, Y. K., Shimizu, K., Tomoaki, I., Koay, S. P., Lateh, H., Tay, L. T., Landslide prediction by using logistic regression models, International Conference on Slopes, 2015.9.15, Malaysia.
Takizawa Y., Fukasawa A., Takeuchi H.-A., Activity of Bipolar Potential Generation in Paramecium, International Conference on Cellular and Molecular Biology, Biophysics and Bioengineering, 2015.9.6, Korea.
Takizawa Y., Fukasawa A., Natori K., Activity of a Neuron for Characteristic Potential Waveforms of Pulse and Plateau with Positive and Negative Polarities, International Conference on Cellular and Molecular Biology, Biophysics and Bioengineering, 2015.9.6, Korea.
Anezaki, K., Nakano, T., Kashiwagi, N., Estimation of polychlorinated biphenyl sources in sediment using Bayesian semi-factor model in consideration of an unidentified source, 35th International Symposium on Halogenated persistent Organic Pollutants, 2015.8.25, San Paulo, Brazil.
Takizawa Y., Fukasawa A., Takeuchi H.-A., Positive and Negative Action Potentials in Paramecium Relating to Neurons, International Conference on Health Science and Biomedical Systems, 2015.8.18, Malta.
Fukasawa, A., Takizawa, Y., Activity of a Neuron for Generation of Pulse and Plateau with Positive and Negative Potentials, International Conference on Health Science and Biomedical Systems, 2015.8.18, Malta.
姉崎克典, 柏木宣久, ベイズ型組成半因子モデルを用いた環境中の PCBs 汚染由来の推定, 環境化学討論会,

- 2015.6.25, 札幌.
Shimizu, K., A method for generating circular distributions, Recent Developments in Statistical Distribution Theory, 2015.3.27, Tokyo.
- 柏木宣久, ベイズ型クリギングによる東京湾水質予測, 科研費研究集会「東京湾とその流域における水質の長期変動に関する研究」, 2015.1.27, 東京.
- 柏木宣久, 環境データの統計解析, 科研費研究集会「東京湾とその流域における水質の長期変動に関する研究」, 2015.1.27, 東京.
- Shimizu, K., A modified von Mises distribution, IASSL-International Conference, 2014.12.28, Sri Lanka.
- 清水邦夫, 井本智明, 山下智志, 金藤浩司, マレーシアにおける地すべりのリスク評価手法開発プロジェクト, 統数研共同研究集会「環境・生態データと統計解析」, 2014.12.5, 立川.
- Shimizu, K., Use of Mobius transformation in directional statistics, The 22nd National Symposium on Mathematical Sciences, 2014.11.25, Malaysia.
- Shimizu, K., A discrete cardioid distribution with application to wind direction data, International Conference on Mathematics, Statistics, and Financial Mathematics, 2014.11.19, Malaysia.
- 21 浅川大地, 船坂邦弘, 柏木宣久, 橋本俊次, 都市部のPM2.5に対するバイオマス燃焼寄与率のCMBKモデルによる推定, 大気環境学会, 2014.9.18, 松山.
- 22 浅川大地, 船坂邦弘, 柏木宣久, 橋本俊次, CMBモデルとCMBKモデルによるPM2.5の発生源解析, エアロゾル科学・技術研究討論会, 2014.8.8, つくば.
- 23 安藤晴夫, 柏木宣久, 和波一夫, 石井裕一, 東京湾における底層DOの長期変動傾向について, 日本水環境学会年会, 2014.3.17, 仙台.
- 24 Shimizu, K., A new probability model for cylindrical data, ISM Symposium on Environmental Statistics, 2014.2.5, 立川.
- 25 安藤晴夫, 柏木宣久, 和波一夫, 石井裕一, 東京湾における水質の長期変動傾向について - 2012年度まで解析結果 -, 科研費研究集会「東京湾水質の長期変動傾向の推定」, 2014.1.24, 東京.
- 26 柏木宣久, 種の期待影響割合による生態リスク評価, 科研費研究集会「東京湾水質の長期変動傾向の推定」, 2014.1.24, 東京.
- 27 柏木宣久, 環境測定分析における要因効果のベイズ推定, 科研費研究集会「東京湾水質の長期変動傾向の推定」, 2014.1.24, 東京.
- 28 Shimizu, K., Transforming the von Mises-Fisher distribution via a conformal transformation, 統数研共同研究集会「Advances and Applications in Distribution Theory」, 2014.1.14, 立川.
- 29 菅澤翔之助, 清水邦夫, シリンダー上のピアソンVII型分布, 統数研共同研究集会「環境・生態データと統計解析」, 2013.11.2, 立川.
- 30 Shimizu, K., Transforming the von Mises-Fisher distribution via generalized Mobius transformation, International Conference on Statistical Distributions and Applications, 2013.10.11, Michigan.
- 31 柏木宣久, CMBのソフトウェアについて, 統数研共同研究集会「統計学的手法を用いた環境及び生体化学調査の高度化に関する研究」, 2013.9.30, 立川.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柏木 宣久 (KASHIWAGI, Nobuhisa)
 統計数理研究所・モデリング研究系・教授
 研究者番号: 50150032

(2) 研究分担者

清水 邦夫 (SHIMIZU, Kunio)
 慶應義塾大学・理工学部・名誉教授
 研究者番号: 60110946

瀧澤 由美 (TAKIZAWA, Yumi)
 統計数理研究所・モデリング研究系・准教授
 研究者番号: 90280528

(4) 研究協力者

姉崎 克典 (ANEZAKI, Katsunori)

深澤 敦司 (FUKASAWA, Atsushi)

林 岳彦 (HAYASHI, Takehiko)