

氏 名 塚越 芳樹

学位（専攻分野） 博士（統計科学）

学位記番号 総研大乙第 190 号

学位授与の日付 平成 21 年 3 月 24 日

学位授与の要件 学位規則第 6 条第 2 項該当

学位論文題目 Statistical Analysis of Fractures from Senbei to Earth's Crust

論文審査委員 主 査 教授 田村 義保
教授 尾形 良彦
教授 種村 正美
領域長 安井 明美
(農業・食品産業技術研究機構)
教授 島崎 邦彦 (東京大学)

論文内容の要旨

破壊現象は、様々なところに見られる。スナック菓子を口に入れて咀嚼したときに起きる破壊は、「サクサク感」と表現されうる食感をもたらす。近年、市場には食品が飽和しており、商品に訴求性を持たせることが重要となっている。食感はその訴求性に影響しており、大切な性質になっている。一方、地球の地殻が破壊し、弾性波が放出される現象は地震と呼ばれる。その規模によっては、建造物に多大な被害をもたらすなど、生活に影響を及ぼす。このような破壊は、物理学的には、物体にかかる応力が一定値を超え、分子間結合が崩壊して応力を保持できなくなることによって生じる。破壊が始まると、破壊フロントに応力集中がおきその近傍も破壊されるような連鎖現象が起きる。このような破壊の進展は、破壊が進む媒体の不均一さ等によって食い止められうるが、その停止には不確定な要素が多い。そこで、物理的なモデリングは困難であり、確率的なアプローチが不可避になる。そのような、破壊の解析に対する確率的なモデリングの適用には、未解明な点が多数存在する。そこで本論文の目的は、様々な破壊の確率的な性質を調べ、統計科学の貢献の可能性を示すことにある。

まず、最初に、地震のデータの解析を行った。地震の発生は、定常的に起きるバックグラウンドの活動と、地震が他の地震を誘発することによって生じる余震活動の混合モデルであらわされると考えられている。余震は、それまでの地震活動の履歴に影響されるが、バックグラウンドの方は、地殻の状況の変化に影響されることが考えられている。現在、非地震性の地殻の動きが注目されているが、地震活動からこのような地殻の状況を調べるには、これらの二つの活動を別々に扱う必要がある。

これまでの研究では、余震を含むカタログからバックグラウンドの地震だけを取り出すために、除群作業が行なわれていた。そこでは、いくつものパラメーターを *a priori* で与えることによって除群作業が行われるため、結果がそのパラメーターに依存するという問題があった。また、除群の方法は、必ずしも全て物理的に誤差のない原則ではなく、経験式を利用して行われるが、この経験式には誤差が多い。これらの理由により、除群が正確に行われていない可能性があるという問題があった。そこで、本研究では、尾形によって提案されている ETAS モデルを応用して、バックグラウンドの活動を解析する方法を提案し、実際に、日本周辺の地震活動へ適応した。その変動を表示した。また、ETAS モデルは、混合分布モデルの側面を持つことを見だし、EM アルゴリズムを用いて、未知パラメーターの推定ができることを示した。また、このバックグラウンドの地震と、余震の分類は、ETAS 中のパラメーターにはそれほど依らず、本手法が、それらのパラメーターに対して頑健であることを示した。

次の章においては、バックグラウンドの地震発生数のみを調べる前章の手法を拡張し、バックグラウンドの地震活動、大きさ頻度分布を含むモデルによって日本の地震活動を解析した。この頻度分布として、地震学において広く支持されているグーテンベルグ・リヒターの法則を仮定した。当研究では、この法則のパラメーターであり、大きな地震と小さな地震の数の比と関係する *b*-値について、その時間、空間変動を調べた。その結果、いくつか *b* 値が変動している地点を見つけることが出来た。また、*b* 値の時間変動を個別に調

べるために、期待累積マグニチュード図を用いることによって、窓関数を利用せずに b 値の変動を調べることが出来た。これらの解析結果は、余震活動による b 値の変動を取り除いたものになっており、新たな情報として解釈できる。また、本研究のように、欠測の多い余震活動を取り除いたバックグラウンドのみの解析を行うことは、人為的な影響を取り除く上で好ましいと考えられる。さらに、次の章では、二つのグーテンベルグ・リヒターのグループの混合分布によって、日本列島近傍の地震活動の解析を行った。そのけっか、 b 値の空間変動が急峻な地域が、この混合分布モデルによる解析によって、検出できることを示した。また同時に、この分布は、GR 図において凹型のカーブを描くが、この分布が当てはまる場所は、それほど多くないことが示された。このことは、単純なグーテンベルグ・リヒターの法則が、 b -値を変えながら存在していると地震活動に対するモデルではない側面を地震活動が示している可能性を表している。

次の章では、地震活動に用いられてきた解析法が、煎餅などの、食品の微細な破壊によって生じる感覚である「パリパリ」「サクサク」などの評価に用いることが出来るかを明らかにすることを目的としている。まず、スナック菓子の破壊試験を行い、その際の加重-時間曲線を得た。ここから、加重の急速な低下を破壊の発生と見なし、その発生時を抽出した。また、破壊の大きさを、加重の変化量並びに、加重の絶対値の二つを用いて定量化した、データを取得した。このデータは、点過程論ではマーク付き点過程と呼ばれる分類になる。スナック菓子の破壊の大きさ-頻度分布に対し、理論分布へのあてはまりを AIC によって評価したところ、ワイブル分布、指数関数、べき場関数の順に好ましいと言う結果がえられた。すなわち、地殻の破壊である地震と異なる分布をしていることであり、グーテンベルグ・リヒターの法則はフラクタル性など、地殻特有の何らかの特性が影響した結果生じたものであることが示唆された。また、本研究の直接の応用としては、スナック菓子を高湿度な環境の中に放置することによって、破壊の数が大きく影響を受けることも示されたため、本手法が「湿気った」状態の指標になりうることを示された。

さらに、食品破壊の点過程としての性質を調べるため、サラダ煎餅とスナック菓子という二つの食品の針入試験の結果を比較解析した。その結果は、発生率が深さによって変動しないポアソン過程では説明が付かなく、発生はクラスター状であると言う結果が得られた。さらに、サラダ煎餅とスナック菓子を比較したところ、内部の気泡が大きいスナック菓子の方が、小さめな煎餅よりも破壊と破壊の間隔が長い場合があり、針入試験の統計的な解析によって気泡構造に関する情報が得られることが示された。また、記録された破壊の数は、気泡の数よりも大きく、一つの気泡の壁を破壊する際に、複数の破壊が起きることが示された。

論文の審査結果の要旨

論文は7章105頁からなり英文で執筆されている。2章から6章までは国際学術誌に掲載された申請者を筆頭著者とする4編の論文の内容をとりまとめたものである。

第1章において、本論文のテーマである「煎餅から地殻の破壊」について概観し、解析目的を述べ、共通する統計的解析法について説明している。

第2章において、「常時地震活動」の客観的な解析のためには、既存の時空間地震活動解析ソフトウェアZMAP（地震発生率の差の検定統計量Z値などをマッピングした可視化図を作成）の代わりに、地震活動度の時空間変化の強度を表すETAS（Epidemic-Type Aftershock Sequence）点過程モデルに基づいた手法を用いることを提案している。提案された手法では、ETASモデルの空間応答関数の混合分布性に着目して、準Newton法による最適化とEMアルゴリズムを用いてパラメタの推定をし、シミュレーション実験でその収束特性について示されている。この手法を適用して日本における大地震前の各地域の活発化・静穏化現象を検知し、その地震学的裏づけの議論をしている。

第3章及び4章においては、地震の破壊の大きさを示すマグニチュードに関する発生頻度分布の時空間の変動を考察している。まず第3章では典型的な分布であるグーテンベルグ・リヒター法則（GR則＝指数分布）の尺度パラメタ（b値）の変動を調べている。時空間ETASモデル解析を用いて各地震が常時地震である確率を求めた後、それを重み付けしたマグニチュードのデータによって常時地震活動のb値の時空間変動を調べている。第4章では、地震規模のGR則（指数分布）からの外れ具合を調べるために混合指数分布およびマグニチュードの2次モーメント推定値（ η 値）による日本全土の地震活動のマッピングを行い、地震活動を調べるための新たな情報として利用できることを提案している。

第5章では、スナック菓子の食感を評価するための研究結果を説明している。応力試験器による針入試験の結果から、多孔質の塑性破壊食品の場合は、「破壊」の大きさを抽出することができる。測定値が、地震発生のように点過程のデータとして扱えることを示している。破壊の大きさの頻度分布を調べ、小さい破壊の部分は機械的なノイズであること、大きさの分布が、ワイブル分布または指数関数に近いことを示している。

第6章では、煎餅とスナック菓子の2つの針入試験のために新たな計測機器を開発し、その結果に対する点過程的な解析から、これまでの評価方法では気づかれていなかった食感の差を見つける方法を提案している。

第7章は結論にあてられている。

博士申請のための研究は、破壊現象の統計的な解析法を、地殻と煎餅で、時空間的に異なるスケールで得られるデータへ適用し、新たな方法で新知見を得ることを目指して行なわれたが、その目的はそれぞれの分野で十分達成していると考えられる。以下、各章ごとに具体的に評価する。

第2章の目的は、余震・群発などの地震の「群れ」というノイズを取り去り「常時地震活動」を捕まえる（除群アルゴリズム）ことである。時空間点過程モデルとAIC（赤池情報量規準）による客観的な解析手法で除群の問題点を解決するための方法を新たに提案している。地震活動への応用の仕方やEMアルゴリズムを用いた最適化などの統計手法とし

て新規性を認めることができる。また、日本における大地震前の当該地域の活発化・静穏化現象を導き出している点で地震学的意義もあると評価される。

第3章及び4章の目的は、地震の破壊の大きさを示すマグニチュードに関する発生頻度分布の時空間変動を解析することである。第3章において、前述のモデリングによる確率的除群法をマグニチュード分布の解析に応用し、常時地震活動のb値の時空間変動を調べていることに新規性を認めることができる。同じ場所の常時地震活動と余震活動ではb値が異なりうるという知見は地震学的に興味深く、物理学的な考察からも肯定される。第4章において、地震のマグニチュード頻度分布のGR則からのずれ(異常)を調べるために、混合指数分布モデリング及び2次モーメント統計量 η 値による空間マッピングという新たなツールを提供している。これらによって、宮城県北部地震や紀伊半島沖地震の近傍に、有意な前駆異常を見つけることが出来たことなどは高く評価できる。今後の地震予測研究のためには、より多くのデータでの追試が望まれるが、そのための有用なツールであると考えられる。

第5章と6章において、煎餅やスナック菓子の破壊過程を計測しデータ化した点は食品の物性評価において新規性を認めることができる。これらのデータを点過程と見なして解析した点でも、統計科学の新たな応用を見いだしたと言える。