

京都大学	博士（工学）	氏名	CHAKRABORTY ANIRBAN
論文題目	Map Resolutions considering Data Uncertainty with Application to Seismic Microzonation (データの不確定性を考慮した解像度で描く地震ハザードマップ)		
(論文内容の要旨)			
<p>局所的な地震ハザードの理解は地震防災において重要である。しかし、現在広く利用されている地震ハザードマップや揺れやすさマップは、画一的な解像度で示されていることが多い。本論文は、データの不確定性の程度に応じて解像度を空間的に変化させる表示法 (Uncertainty Projected Mapping: UPM) を提案し、従来法では表現されなかった値の統計的に有意な違いをマップに表示しようとするものである。本論文は6章で構成されている。1章は序論である。2章はUPM法の基となるベイズ法と空間統計モデルについて整理している。3章はUPM法についての理論的背景と数値実験例を示している。4章はデータのもつ情報量に応じてUPM法による表示の変化を検討している。5章は既存の揺れやすさマップに詳細なデータを加えることでマップを更新する方法を検討している。6章は結論である。</p> <p>第1章では、序論として本研究に至る学術的背景、および研究の目的が整理されている。近年、地震ハザード評価が広く行われつつある現状について、歴史的な経緯がまず取りまとめられている。地震ハザードマップや揺れやすさマップに関する幾つかの事例を紹介した上で、表層地盤の増幅度が平均S波速度 (<math>V_{s30}</math>) によって簡便に評価されているために、マップで表示される値に不確定性が含まれている可能性を指摘している。不確定性があるならば、表示されている値の差異が統計的に有意であるかどうかは本来は重要である。この点に着目し、隣接点間で統計的に値の差が有意であることを表現できるような図法を提案することが本論文の目的であると述べている。</p> <p>第2章では、本研究に関連する統計的手法が整理されている。3章で説明されるUPM法は、ベイズ論に立脚した空間統計モデルの一種であるため、ベイズ論および階層型ベイズ推定についてまとめられている。UPM法では空間統計モデルのうち条件付き自己回帰モデル (conditional auto-regression: CAR) を用いるため、これについても紹介されている。また、モデル選択を行う場合の規範として、交差検証法と拡張赤池情報量基準 (WAIC) がそれぞれ説明されている。</p> <p>第3章では、本研究で提案するUncertainty Projected Mapping法 (UPM法) の定式化とその数値実験例が紹介されている。まず、空間構造としてCARを導入した階層型ベイズモデルを構成する。評価値が正規分布に従うと仮定すると、そのばらつきを表す<math>\sigma</math>が推定パラメータとなる。また、隣接点での値の差はCARの枠組みでは空間的なばらつきを表すパラメータ<math>s</math>により表される。従来のCARモデルではパラメータ<math>s</math>を何らかの方法により先験的に与えていたが、本研究では<math>s</math>と<math>\sigma</math>の間に関係があると考え、<math>s</math>と<math>\sigma</math>の積を一定値とする拘束条件を与える。すなわち、値の持つばらつきが大きいほど隣接点での値の差が小さく求められ、ばらつきが小さいほど隣接点での値の差が大きく求められる。このことは、不確定性が小さく統計的に有意であると考えられる場合に表示される値は大きく変化し、一方で不確定性が大きい箇所では値があまり変化しないような表示を実現することになる。本論文では、このように<math>s</math>と<math>\sigma</math>に拘束条件を与えたモデルをUPM法と命名している。<math>s</math>と<math>\sigma</math>の積をどのような値で拘束するかはベイズ推定の枠組みだけで一意に定まらないため、2章で説明されたモデル選択法が用いられている。</p> <p>UPM法がどのような結果を示すのかについて、1次元の人工的なデータセットを用いて検証されている。データのばらつきが大きい箇所ではUPMは滑らかな表示を与えていることから、目的とした結果が得られていると主張している。また、UPM法ではデータが与えられていない箇所でも周囲のデータから推定することができるため、空間補間法の一種とみなすこともできる。空間補間法として広く用いられているKriging法による結果と比較すると、ばらつきが大きい箇所ではより滑らかな表示を与えることが示される。実際のデータを利用した事例として、古川高密度地震観測網によるデータを用いた地盤増幅の空間特性が推定されている。隣接する2地点のデータをヒストグラムで重ねて比べた</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	CHAKRABORTY ANIRBAN
------	--------	----	---------------------

時、ヒストグラムがほぼ重なる箇所と重ならない箇所とがある。UPM による表示では、前者はほぼ同じ値を示しているのに対し、後者は異なる値が示されている。このことはすなわち、値の差が統計的に有意な箇所でのみ異なる値が表示されていることを意味しており、本研究の目的が UPM 法によって実現できたと主張している。

第 4 章では、UPM 法の特徴的な性質が論じられている。数値実験によると、UPM 法による表示はデータ数に応じて変化する傾向が見られる。データ数が少ない場合、不確実性が高いと解釈されるために滑らかな表示となるが、データ数が増えるにつれて徐々に滑らかでなくなる。そして、データ数を増やすことによって表示が収束する傾向が見られる。この収束傾向は KL-divergence によって定量的に評価されている。データの平均値を採用する従来法と比較したところ、データ数が多くなるほど両者の表示は漸近する。すなわち、データが十分に与えられると、UPM 法と従来法により表示される分布に大きな違いは見られない。このことは、データが十分に与えられる場合には UPM 法が従来法と同等の表示になることを担保しつつ、データが十分に与えられていない場合には不確実性に応じた適切な滑らかさで表示される特徴を有している、と本論文は主張している。

第 5 章では、UPM 法の応用事例として、既存の空間表示をデータに基づいて更新する方法が紹介されている。J-SHIS に代表されるように、面的な地震ハザード評価の結果が公開されている一方、地域の詳細な地盤情報等は適切に反映されていない可能性がある。本章では、地域の地盤情報を反映して地盤増幅度のマップを更新する手法を提案している。ここではベイズ更新を採用し、事前情報として既存のマップを、尤度の評価に地域の地盤情報を反映したデータを採用することで事後分布を求め、これによりマップを更新する。UPM 法はベイズ法に基づいているため、4 章までのようにデータに基づいて確率を評価し、これに事前情報を確率分布として掛けるだけで良い。

本章では、大阪府茨木市周辺を対象地域とし、事前情報として J-SHIS の地盤増幅度を、データとして稠密なボーリングデータから評価した地盤増幅度を採用し、J-SHIS の地盤増幅度のマップの更新を試みている。まず、ボーリングデータを整理して地震動を入力する工学的基盤を地域ごとに設定し、ボーリング地点ごとに 1 次元の速度モデルを構築した。その上で、全国で得られた観測記録 21 波をそれぞれの地点に入射させて地盤応答解析を行い、最大速度の増幅比を求めている。この増幅比を地点毎に与えられたデータとして使い、J-SHIS の地盤増幅度マップを更新した。大まかな傾向は J-SHIS のマップを引き継いでいるが、データの与えられている箇所に表示値の差が小さくなるエリア、表示値の差が大きくなるエリアの両者が認められている。これらのエリアでデータのヒストグラムを比較すると、データの有意な違いを反映した表示であることが確認される。このため、UPM 法の特徴を引き継ぎつつ、マップを更新する手法が実現できると主張している。

第 6 章は結論であり、以上の章で述べられた知見が取りまとめられている。

## (論文審査の結果の要旨)

局所的な地震ハザードの理解は地震防災において重要である。しかし、現在広く利用されている地震ハザードマップや揺れやすさマップは、画一的な解像度で示されていることが多い。本論文は、データの不確定性の程度に応じて解像度を空間的に変化させる表示法 (Uncertainty Projected Mapping: UPM) を提案し、従来法では陽に表されなかった統計的に有意な値の違いをマップに表示しようとするものである。

1章は序論である。序論として本研究に至る学術的背景、および研究の目的が整理されている。近年、地震ハザード評価が広く行われつつある現状について、歴史的な経緯がまず取りまとめられている。従来の表示法の問題点を明らかにした上で、隣接点間で統計的に値の差が有意であることを表現できるような図法を提案することが本論文の目的であると述べている。2章は UPM 法の基となる空間統計モデルについて整理している。階層型ベイズ法、条件付き自己回帰モデルの説明に加え、モデル評価法である交差検証法や WAIC について紹介している。3章は本研究で提案する UPM 法の定式化とその数値実験例が紹介されている。従来の空間統計モデルである条件付き自己回帰モデルに、データの不確定性と空間的なばらつきを表すパラメータの間に新たに拘束条件を導入することで、ばらつきが大きい箇所で滑らかな表示を与える方法として UPM 法を提案している。1次元の人工的なデータセットを用いた数値実験により妥当性を検証したのち、高密度地震観測網による地震記録を用いた揺れやすさマップへ適用している。UPM 法では、データ間に統計的に有意な差がある場合に、異なる値で表示されることが示されている。4章はデータのもつ情報量に応じて UPM 法による表示の変化を検討している。データ数を増やすことによって表示が収束する傾向が見られ、これを KL-divergence によって定量的に評価している。データの平均値を採用する従来法と比較したところ、データ数が多くなるほど両者の表示は漸近することが示されている。このことは、データが十分に与えられる場合には UPM 法が従来法と同等の表示になることを担保しつつ、データが十分に与えられていない場合には不確定性に応じた適切な滑らかさで表示される特徴を有する、と本論文は主張している。5章は UPM 法の応用事例として、既存の揺れやすさマップに詳細なデータを加えることでマップを更新する方法を検討している。ベイズ更新を採用し、事前情報として既存のマップを、尤度の評価に地域の地盤情報を反映したデータを採用することで事後分布を求め、これによりマップを更新する。UPM 法はベイズ法に基づいているため、4章までのようにデータに基づいて確率を評価し、これに事前情報を確率分布として掛けるだけで良い。大阪府茨木市域を対象として J-SHIS の揺れやすさマップを更新した事例について紹介している。

本論文で提案される UPM 法は理論的背景が明確であり、かつ複数の応用例によって妥当性が示されていることから、手法の信頼性は高いと考えられる。また、データの不確定性が陽に示されたマップにより意思決定の信頼性も向上する可能性が考えられる。地震以外のハザードへの応用も期待され、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和3年1月25日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。