

不等間隔格子を用いた有限差分法による現実地形のモデル化 -海底地形の効果が津波伝播に与える影響評価- Modeling Real Structure with FDM using In-equally Spaced Grids - Effects of Seafloor Topography on Tsunami Propagation-

大畑 朋也¹, 三ヶ田 均^{2*}, 後藤 忠徳², 武川 順一²

OHATA, Tomoya¹, MIKADA, Hitoshi^{2*}, GOTO, Tada-nori², TAKEKAWA, Junichi²

¹ 石油資源開発 (株), ² 京大院工

¹Japan Petroleum exploration Co., Ltd, ²Kyoto Univ.

様々な地球物理学的諸現象を解明するために数値シミュレーションを行う際、地球の表面形状がその現象に影響を与える場合が多く、より現実に即したモデルを設計することは現象の理解のために必要である。そこで現実の地形をモデル化する手法として本研究では不等間隔格子を用いた有限差分法を考えた。さらに本手法を津波防災分野に適用し、海底地形の効果による津波伝播への影響に関して考察した。

地震に伴って発生する津波挙動を予測する際に津波発生・伝播シミュレーションが広く行われているが、特に津波後続波の挙動予測が観測値と一致しない場合が多いという問題が知られている。本研究ではこの問題に対して、海底地形を考慮した津波の伝播シミュレーションを導入することで解決できるのではないかと、という仮説を立てこの課題に取り組んだ。計算手法としてはナビエ・ストークスの方程式を3次元方向で解き、上記の不等間隔格子を利用した有限差分法により現実の海底地形をモデル化し、津波伝播シミュレーションを行った。さらに本手法における津波伝播と長波近似による津波伝播とを比較することで、海底地形の効果が津波伝播に与える影響を評価した。その結果、現実の水深変化の効果と浅海域における非線形項の効果の2つが津波伝播に大きな影響を与えることが明らかとなり、より現実に即した海底地形を表現することでそれらの要素を津波伝播シミュレーションに取り入れた本手法が、後続波の高精度予測につながるということが分かった。

キーワード: 津波伝播シミュレーション, 海底地形, モデリング, 不等間隔格子, 津波後続波, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: simulation of tsunami propagation, seafloor topography, modeling, in-equally spaced grids, later phases of tsunami, The Tohoku earthquake

海洋音響トモグラフィへのフルウェーブインバージョンの適用 The application of the fullwave inversion techniques to Ocean Acoustic Tomography

樹田 行弘^{1*}
KIDA, Yukihiro^{1*}

¹ 京都大学工学研究科

¹Graduate school of engineering, Kyoto University

The problem of Ocean Acoustic Tomography (OAT) is to estimate the state of ocean in temperature, salinity, etc. that are related to sound velocity structure from the travel-time or other properties in acoustic wave propagation. The ocean is nearly transparent for low frequency acoustic waves so that the acoustic wave could propagate for thousands of kms. OAT was first introduced by Munk et al. (1995) and based on a ray theoretical approach. A travel-time inversion method has been developed using a ray-tracing scheme in the Munk's method. There is some similarity with seismic exploration both in theory and in data processing methods. However the waveform analysis is not common in OAT although its importance is widely recognized in seismic explorations. Actually there is hardly any precedent studies on waveform inversion in the application of OAT. In this study, a full-wave inversion technique is applied to OAT in the 2-D acoustic FDTD model in order to investigate the effectiveness of the method through the comparison of the results with that of the ray-tracing inversion approach. Then, as an application for a field data, the full-wave inversion technique is applied to the VCS experiment data in Lake Biwa. The result shows applicability of the full-wave inversion technique to OAT and also shows that full-wave inversion provides higher image construction than in travel-times inversions.

キーワード: 水中音響, VCS, フルウェーブインバージョン, 海洋音響トモグラフィ

Keywords: Underwater acoustic, VCS, Full-wave inversion, Ocean Acoustic Tomography

平行断層群の形成と応力場の関係

Relationship between formation of parallel faults and stress fields in rock mass

今井 優希^{1*}, 三ヶ田 均¹, 後藤 忠徳¹, 武川 順一¹

IMAI, Yuki^{1*}, MIKADA, Hitoshi¹, GOTO, Tada-nori¹, TAKEKAWA, Junichi¹

¹ 京都大学

¹ Kyoto University

地震や地殻変動により平行あるいはそれと共役な方向に平行な断層群が形成されることがあり、このような平行亀裂群は、地殻スケールだけでなく岩石破壊試験などの供試体スケールでも確認できるが、その発生メカニズムや応力場との関係などは力学的に明らかになっていない。このような亀裂の挙動の解釈には、破壊力学の理論を用いた研究が数多くなされており、これらの多くは亀裂の進展を表現することに成功している。しかし、この理論によって亀裂の発生や結合を表現することは難しいため、近年では数値計算を用いた研究が盛んになされている。本研究においても数値計算によって断層の発生から進展までを表現しようと試みた。

本研究では、数値解析手法としてHPM (Hamiltonian Particle Method) という粒子法の一つを用いている。粒子法は連続体の運動を離散粒子群の運動で近似するため、計算格子の構築の必要がなく、境界面の複雑な変化や構造物の大変形、破壊現象などを比較的容易に扱えるという利点がある。計算モデルとして玄武岩質の直方体を仮定した3次元弾性体モデルを用いた。引張・せん断強度に不均質性を与えた下で、破壊条件には3次元 Mohr-Coulomb 条件を適用した。与える応力場として、圧縮場やせん断場、曲げの作用などを考え、その方向や大きさを変化させることで断層形状を比較した。計算の結果、圧縮場では主圧縮方向と直交する方向の拘束圧の影響が平行断層群の生成に対し支配的であり、拘束圧が高いほど平行断層群が密に発達すること、せん断場においてもせん断方向に合うように平行断層群が生成されることが分かった。

キーワード: 断層, 粒子法

Keywords: fault, particle method

ACROSSによる淡路島野島断層近傍における11年間の地震波速度モニタリング 11 years long term monitoring of Seismic velocity near Nojima fault using ACROSS

生田 領野^{1*}, 山岡 耕春², 渡辺 俊樹², 國友 孝洋¹, 西上 欽也³

IKUTA, Ryoya^{1*}, YAMAOKA, Koshun², WATANABE, Toshiki², KUNITOMO, Takahiro¹, NISHIGAMI, Kin'ya³

¹ 静岡大学理学部, ² 名古屋大学大学院環境学研究科, ³ 京都大学防災研究所

¹Faculty of Sciences, Shizuoka University, ²Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, ³Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

淡路島野島断層近傍に設置された人工震源システム (ACROSS=精密制御定常信号システム) を用い、地表と地下 800m のボアホール間で 11 年間にわたる地震波速度の変動をモニタリングした結果、実体波速度に約 4 %の速まりが見られたので報告する。

ACROSS 震源装置は偏心錘型のパイプレータ震源装置であり、地中で錘を精密に制御して回転させ、遠心力で発生させた地震波を定期的に送信することができる。我々はこの ACROSS 震源装置を 1995 年兵庫県南部地震で動いた野島断層の南端付近に建設し、地震で大変位をひきおこした断層周辺の岩石の弾性的性質の地震後の変化を地震波速度を通して明らかにすることを試みている。震源装置は同じ建屋内に設置された 2 台が同時に運転されており、それぞれ最大回転速度 25Hz と 35Hz で 2×10^5 N の力を発生するように設計されている。これらの震源装置をそれぞれ約 9 から 16Hz, 16 から 22Hz の範囲で周波数変調させて運転した。運転は 2000 年から 2012 年まで断続的に行われ、震源から放射された地震波は直下のボアホール型地震計で観測されている。

本研究では以下の 3 点について検討した。直達の P および S 波の走時と振幅変化、後続波部分にあらわれる速度変化、S 波の偏向異方性の変化である。

P, S 波については、それぞれの到達時刻付近を 0.3 秒幅のウィンドウで抜き出し、相互相関法で到達時刻の変化を算出したところ、11 年間で 4 %程度の到達時刻の速まりを検出した。振幅は 20%程度ばらついてはいるが、単調な増加減少のトレンドは見いだせない。

後続波部分は S 波のコーダ部分 1 秒間の波形を 0.2 秒幅のウィンドウを 0.1 秒ずつずらしながら抜き出した。コーダ波が散乱されてくる震源-観測点を含んだ周辺の特定のボリューム内で一様な速度変化を仮定し、各ウィンドウの波形の走時変化を走時の絶対値で割って速度変化を推定した。11 年間で 1 %程度の地震波速度の速まりに相当する変動が見られた。

S 波の偏向異方性については過去の研究 (Ikua et al., 2004) で、断層平行成分が速く直交成分が遅い約 10%の非常に大きな異方性が見られているが、その変化については 2%の分解能の範囲内では 11 年間で有意な変化は見られなかった。

コーダ波部分の速度変化が P,S 波の速度変化より小さかったことは、直達の P,S 波の変化がコーダ波のカバーする領域 (~1km 程度) に比べて局所的であることを示唆している。

また 11 年間の速度変化を、大きな異方性を作り出している断層近傍の破碎構造の変化であるとする、クラック密度の減少 ($N=0.004-0.01$ 程度) が示唆される。本実験サイトで 1996 年から繰り返し行われている 1700m ボアホールを通しての断層破碎帯への注水試験の解析では、透水係数が 2000 年から 2007 年にかけて、50%程度低下したことが報告されており (Kitagawa et al., 2007 など)、クラック密度の減少と定性的には整合的である。

10%もの異方性を作り出す破碎構造がありながら、速度変化は 4%であることから、地震後 5 年から 16 年の 11 年間の断層の回復は、クラック密度という観点で言えばごく小さいと言える。透水係数の大きな減少は、クラック間のコネクションの切断や目詰まりのような過程によりクラック密度の減少が拡大されて見えていると言えるかもしれない。

キーワード: アクロス, 野島断層, 断層解剖計画, 地震波速度, モニタリング

Keywords: ACROSS, Nojima Fault, Fault-zone Probe, Seismic velocity, Monitoring

宇宙線電磁成分を用いた横穴上部の土中水分量測定

The measurement of soil water content of upper part of the cave using electromagnetic component of air shower

武多 昭道^{1*}, 大久保修平¹, 田中宏幸¹

TAKETA, Akimichi^{1*}, OKUBO Shuhei¹, TANAKA K.M. Hiroyuki¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo

宇宙線軟成分を用いて土中水分量を測定する新手法について報告する。

地表に入射する宇宙線は硬成分と軟成分から成り、硬成分は主にミュオン、軟成分は主に電磁成分から成る。軟成分の貫通能力は硬成分と比較して低いため、建物や丘等、 2kg/cm^2 よりも薄い、つまり水換算で 20m よりも薄い構造物のラジオグラフィーに適している。しかし、これを行うには、軟成分と硬成分を分離する必要がある。軟成分と硬成分の分離は、強力な磁石と稠密な検出器によって可能であるが、その重量とコストのため、ラジオグラフィーには適さない。

我々は安価かつ効率的な統計的分離法を開発し、桜島有村観測坑にて試験観測を行った。試験観測の結果、軟成分の強度と降雨との間に有意な逆相関があることが分かった。降雨によって土中水分量が増加すると、減衰量が増加することが分かっているので、この結果から、宇宙線軟成分を用いて、土中水分量の増加を検出できたと言える。

本検出手法によって横坑周辺の土壌水分の時空間変動が押さえられれば、土質力学に基づいて、降雨に伴う地盤擾乱（ダイラタンシー等）や重力測定、傾斜測定等、降雨によって擾乱を受けやすい測定データの定量的な補正が可能となる。これまで行われてきた地殻変動測定の高精度化や、火山内部のマグマ運動の推定精度向上につながるかと期待される。また、将来的には、地滑り面周辺の土壌水分の時空間変動の測定等、土砂災害防止のための基礎データの提供が可能となると期待される。

キーワード: 土中水分率, 宇宙線, ラジオグラフィー

Keywords: soil water content, cosmic ray, radiography

MT周波数応答関数を用いた電磁場時系列解析 - 物理探査への応用 - Analysis of electromagnetic data by using MT frequency response function, application of geophysical exploration

長谷 英彰^{1*}, 上嶋 誠¹

HASE, Hideaki^{1*}, UYESHIMA, Makoto¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, Tokyo University

地表で観測される電磁場時系列データには電離層や磁気圏起源の電磁場変動によるインダクションレスポンスが含まれており、MT法ではそれらをソースとして観測データから電場と磁場との周波数応答関数を求めることにより比抵抗構造の推定を行っている。地表で行われる電磁場観測は、このように比抵抗構造を推定するために行われることが多いが、例えば地下への注水・CO₂貯留実験や地震に伴うシグナル検出など、インダクションレスポンスをターゲットとしない探査が行われることもある。このような場合、電磁場時系列データに含まれるインダクションレスポンスは解析の妨げとなるため、例えば地磁気擾乱が発生した場合には、ターゲットとするレスポンスを得ることが極めて困難な状況に陥ることがある。このような場合の解決策は、インダクションレスポンスが時系列データにどの程度含まれているか推定し、ターゲットレスポンスのシグナルを明確に抽出することであるが、このような解析が行われることは少ない。本講演では、MT観測で得られる周波数応答関数を用いて電磁場時系列データのインダクションレスポンスを推定する方法について解説を行い、実際の観測データを用いた解析結果について議論を行う。

キーワード: MT法, 周波数応答関数, 物理探査, 時系列解析

Keywords: MT method, frequency response function, geophysical exploration, analysis of time-domain data

偏波と透過波を利用した地中レーダによる地下構造探査精度の向上 Improvement of prospecting accuracy of subsurface structure by GPR using polarization and transmitted waves

槇原 慧^{1*}, 吉永 徹², 小池 克明³, 橋野 芳治⁴, 吉田 雄司⁵, 板井 秀典⁶

MAKIHARA, Kei^{1*}, YOSHINAGA Tohru², KOIKE Katsuki³, HASHINO Yoshiharu⁴, YOSHIDA Yuji⁵, ITAI Hidenori⁶

¹ 熊大・院・自然科学, ² 熊大・工, ³ 京大・院・工学, ⁴ (株) 環境開発, ⁵ 九州計測器 (株), ⁶ ジオクロノロジージャパン

¹ Graduate School Sci. & Tec., Kumamoto Univ., ² Faculty of Eng., Kumamoto Univ., ³ Graduate School of Engineering, Kyoto Univ., ⁴ Environment & Technology Co., ⁵ KyushuKeisokki Co., ⁶ Geochronology Japan Inc.

レーダを利用した地下探査技術(地中レーダ)によれば,地表から非破壊的に地表下数メートルまでの地下構造を可視化できるという利点がある。そのため地中レーダは各種埋設管(水道・ガス管,通信・電力ケーブルなど)の探索,地盤沈下の原因となり得る地下空洞や地下亀裂の存在の調査,考古学的な遺跡の発掘,地質構造の推定,および地下資源(地下水,石炭など)の探査など,多くの分野で利用されている。従来,レーダの反射を利用して,地層の境界面の位置や形状を把握するのが地中レーダ探査の主な目的である。さらに地下探査精度を向上させるためには,このような幾何情報のみでなく,地下物質の物性に関する媒質定数(誘電率,導電率,透磁率など)を推定し,物質が何であるかを同定することが望まれる。しかしながら,地下の物性分布や地層境界の形状に関する不均質は特に大きく,従来の反射型の地中レーダでは物性まで正確に把握するのは困難なのが現状である。

そこで本研究では,地中レーダによる地下構造の探査精度の向上を目的とし,送信アンテナと受信アンテナを分離させ,透過波と複数の偏波を計測できる機器の開発を行った。これをPOGRA(POLarimetry Ground penetration RAdar system)と称した。従来の地中レーダでは1つの偏波成分しか利用していないが,複数の偏波成分を計測することで地下構造の可視化精度を向上させることが期待できる。また,地中の対象物を測定する場合,透過型地中レーダによれば,反射型に比べてレーダの伝播距離が約半分になることに利点がある。これによりレーダの受信強度が増加し,探査可能な深度範囲が増大する。

POGRAの有用性を検証するために,まず円柱,三角柱,四角柱という簡単な形状の埋設物に対して,偏波計測を適用した。その結果,反射波の半値値と振幅の2つを組み合わせれば形状の識別が可能となることがわかった。

次に,多くの小型の箱に物性が異なる試料を詰めることで地層モデルを作製した。試料として豊浦標準砂を用い,その含水比を変えることで誘電率(比誘電率)が大(約20),中(約10),小(約5)の3種類の状態を設定した。これらの深度方向への並びを変えた6パターンの3層構造に反射型を適用した。フレネルの反射率の公式に基づき,測定結果から各層の誘電率を算定した。その結果,深度が深くなるにつれて誘電率が大きくなるパターンに対しては,誘電率を妥当に得られることがわかった。さらに,このモデルの下部に空間を設けることで,透過型の計測をした。その対象は地下水面下に存在する空洞の検出であり,箱に水を満たした領域を設定し,この下に空の箱を置いてこれを空洞とみなした。その結果,減衰が大きい帯水層を介しても透過波を検出でき,空洞の存在が把握できることを明らかにできた。

キーワード: 誘電率, フレネルの法則, 反射率, 透過率, 地質モデル

Keywords: Dielectricity, Fresnel equations, Reflection coefficient, Transmittance, Geological model