

異方性を考慮した大規模地震波シミュレーションによる 海域地震波解析への影響評価

岡元太郎¹・竹中博士²・小松正直³・渡邊禎貢²・小割啓史²

¹東京科学大学、²岡山大学、³岡山学院大学

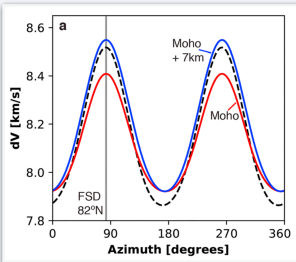
研究目的・意義

地震波異方性は、地球内部の物質の流動や変形過程といったダイナミクスを反映する重要な物理特性である。異方性は地震波速度だけでなく、位相や振幅の変化を通して波形にも影響を及ぼす。一方で、海域では周期数秒～10数秒程度の観測地震波波形を用いた地震パラメータ解析において、異方性の効果が解析結果にどの程度影響するかについては、必ずしも十分に検証されているとは言えない。特に海域では、異方性が空間的に系統だった様式で分布している可能性があり、その影響が地震波伝播経路に沿って累積的に現れることが考えられるため、震源パラメータ推定や破壊過程解析、構造モデル推定において誤差要因となる可能性がある。本課題では、これまでに開発してきた大規模地震波伝播シミュレーションプログラムに異方性の効果を導入し、震源パラメータ推定および構造モデル検討に適用することで、異方性が地震波解析結果に及ぼす影響を評価し、海域における地震波解析の信頼性向上と地球内部ダイナミクス研究への貢献を目指す。

地震波異方性の例

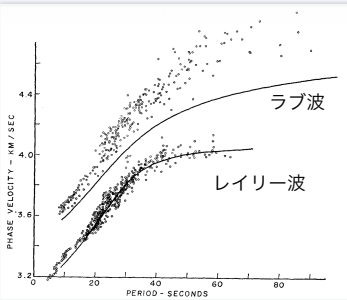
地震波の異方性は、地震波の進行方向や振動方向に伝播特性が変化する現象であり、地殻内の亀裂群や異方性鉱物の配列など、地球内部の応力場や変形・流動過程と密接に関係している。下記の他に、S波偏光異方性が広く研究されている。また異方性の震源パラメータへの影響を逆に用いて異方性の強さを推定する研究もある (Kawakatsu 2024)。

P波の方位異方性



太平洋中央部での上部マントル最上部を通る、卓越周波数10HzのP波の、伝播方位による速度の違い。赤線と青線：観測データから得られたモデル。赤線：海洋地殻直下、青線：7km深い場所。FSD：プレートの拡大方向。(Mark et al. 2019)

表面波の位相速度



アメリカ合衆国中央部でのレイリー波とラブ波の位相速度。レイリー波位相速度の観測値に合わせた構造モデルから計算されるラブ波位相速度の理論値は実測値と合わない。これは異方性の影響であるとみなされる。(McEvilly 1964)

標準地球モデルに Vertical Transverse Isotropy を導入する観測的根拠

HOT-FDM：陸海統合時間領域差分法

(Nakamura et al. 2011,2012)

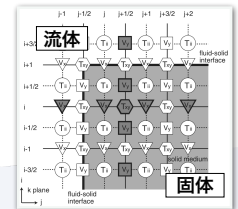
- 陸上地形・海底地形・海水層と統一的に扱う
 - Heterogeneity, Ocean layer, Topography : HOT-FDM
 - 地球内部不均質・非弾性減衰
 - 食い違い格子・空間4次精度・時間2次精度
 - 海域地震の震源パラメータ研究 (FAMT解析) への応用実績
 - 九州西方海域の地震活動 (Okamoto et al. 2017)
 - 東北地方太平洋沖地震震源域の地震解析 (Okamoto et al. 2018)
 - 沖繩本島沖の地震活動の解析 (小松・他 2023)
- 異方性を新たに組み込み、震源解析への影響を評価

GPU最適化

- 大規模配列へのアクセスのブロック化
- 共有メモリとレジスタを利用
- ブロックサイズの最適化
- 物性パラメータへの Look-up table
- 袖領域用の専用配列
- 非同期通信による通信時間の隠蔽

不規則形状の固体・流体境界

- 速度・応力成分の適切な配置



Vertical Transverse Isotropy (VTI)

- Hexagonal symmetry と同等
- 上部マントルの平均的な異方性モデルとして標準地球モデルに採用
- 水平方向に伝播するS波速度： V_{SH} (横振動) > V_{SV} (縦振動)
- PREM (Dziewonski & Anderson 1981) では V_{SV} と V_{SH} の差は最大で 5 %
- 5つの弾性定数：A, C, N, L, F (τ_{ij} 応力テンソル, ϵ_{ij} 歪みテンソル)

$$\tau_{xx} = A\epsilon_{xx} + (A - 2N)\epsilon_{yy} + F\epsilon_{zz}$$

$$\tau_{yz} = 2L\epsilon_{yz}$$

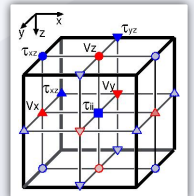
$$\tau_{yy} = (A - 2N)\epsilon_{xx} + A\epsilon_{yy} + F\epsilon_{zz}$$

$$\tau_{xz} = 2L\epsilon_{xz}$$

$$\tau_{zz} = F(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + C\epsilon_{zz}$$

$$\tau_{xy} = 2L\epsilon_{xy}$$

- 等方弾性体の場合と、項の構成は同じ (係数が異なるのみ)
- HOT-FDM に弾性定数を追加して構成方程式を修正するだけで対応可能 (食い違い格子の変更などは不要)



HOT-FDMの食い違い格子

今年度の主な計画

対象領域	計算機	演算デバイス
東北沖	TSUBAME (Science Tokyo)	GPU (H100)
南西諸島域	Wisteria-O (東京大学)	CPU (A64FX)

- 最も基本的なVTIを大規模地震波伝播シミュレーションに導入する [1Q~2Q]。VTIは比較的単純な構成関係で表現できるため、GPU計算 (東北沖班) やCPU計算 (南西諸島班) における弾性定数配列の設計やメモリアクセス最適化など、異方性導入に伴う計算科学的課題の検討を行う。
- 両対象地域においてVTIモデルと等方モデルによる多数回の大規模シミュレーションを実施し、震源パラメータ解析用グリーン関数を計算する [3Q~4Q]。計算波形どうし、および観測波形との比較を通じて、異方性導入による波形再現性および震源パラメータ推定結果への影響を評価する。
- より一般的な異方性導入の検討を行う [3Q~4Q]。