

現実地球の複雑性が地震の弾性・粘弾性変形に与える影響の評価

測地学及び地殻変動論分科 西上直志 (NISHIUE, Tadashi)

1. はじめに

特に規模の大きな地震の後には、数年以上継続する長期的な地殻変動が発生し、変位や重力変化として観測される (e.g. Heki *et al.*, 1997; Tamura *et al.*, 2023). この変動は余効変動と呼ばれ、いくつかのメカニズムによって起こると考えられている。粘弾性変形は余効変動の主要なメカニズムであると考えられており、その時間発展は指数関数などの単純な時間関数に従うとされることが多い。実際、万有引力のない半無限一様 Maxwell 粘弾性媒質の表面における地震後の変位と重力変化は、単一の時定数を持った指数関数に従う。一方、Fukahata and Matsu'ura (2018) はより現実的な状況として万有引力と弾性層が存在する場合を扱い、変位の方向や震央距離によって変動の時定数が数倍以上変化することや、変位が時間変化する方向が逆向きになる場合があることを示した。ただし、この複雑な時間発展の物理的な解釈は明らかではない。



そこで、本研究は上述のような複雑な時間発展が起こる原因として、万有引力と弾性層の効果を調べた。具体的には、ごく単純な状況で粘弾性変形の数値計算を行い、万有引力や弾性層の効果によって時間発展がどのように変化するのかを整理した。さらに、この結果をもとに得られた時間発展に対して物理的な解釈を与えた。本講演では主に万有引力の効果について取り扱う。

2. 計算手法

結果の解釈を行いやすくするために、本研究は一様な Maxwell 粘弾性媒質という単純な状況を仮定した。粘弾性媒質の Maxwell 緩和時間は約 5 年に設定した。粘弾性変形の計算には万有引力下の球状媒質を扱う手法 (Zhou, 2022; Zhou and Wang, 2023) を用いた。海溝型地震を想定して、震源は傾斜角 10 度の逆断層とし、変動を計算する点は上盤側に配置した (Figure 1)。震源深さ d と震央距離 θ は変動の空間スケール依存性を把握するために適宜変更する。また、万有引力の強さを変更した場合の計算も行うために、比例係数 C_G を導入し、万有引力定数や重力加速度の大きさを制御した。万有引力なし (NoG) の場合には、十分小さな値として $C_G = 10^{-10}$ と設定した。本研究で扱った物理量は水平変位 u_x ・鉛直変位 u_z ・重力変化 δg の 3 つである。水平変位は万有引力とカップリングするスフェロイダル成分のみの値であり、重力変化は空間固定点における値である。

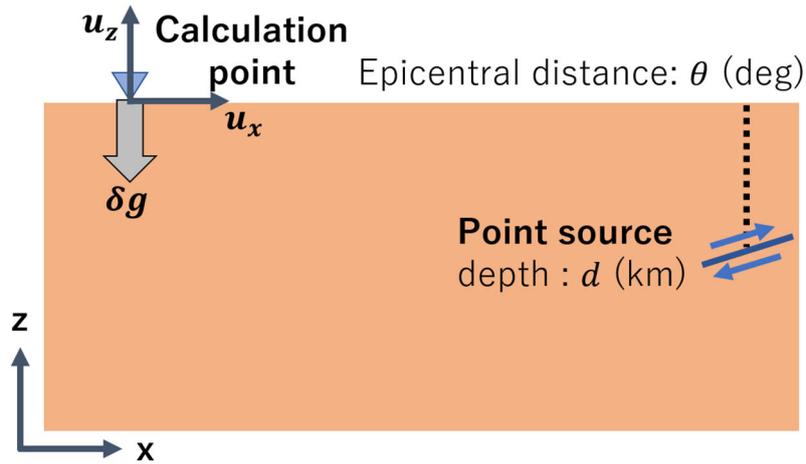


Figure 1. 点震源と計算点の配置図.

3. 計算結果・議論

計算結果の例を Figure 2 に示す. 図中の時系列は地震時の変動量で割った値であり, 地震直後に 1 程度の値をとっている. まず万有引力が存在しない場合 (NoG, Figure 2 の白抜きシンボル+実線), 解析的な結果から予想される通り, 各変動の時間発展は単一の時定数による単純な緩和的変動となった. 以後, この変動のことを「初期緩和」と呼ぶ. 初期緩和の時定数は媒質の Maxwell 緩和時間程度のオーダーであった.

これに対し, 万有引力が存在する場合 (Figure 2 の点線と破線), 上述の初期緩和に加えてより遅い時刻に時間変化が起こることで, 時間発展はより複雑になった. 以後, この新たな変動のことを「引力緩和」と呼ぶ. 引力緩和の時定数は震央距離 θ や震源の深さ d といった空間スケールや万有引力の強さ C_G に依存し, 特に空間スケールが大きいときや万有引力が強いときほど時定数が短くなった. この時定数の特徴は, 粘弾性的な力に対する万有引力効果の大きさ (Segall, 2010) そのものを反映していると考えられる.

引力緩和の詳しい成因を明らかにするため, 等価定理 (Fukahata and Matsu'ura, 2006) を用いて引力緩和が卓越する直前の万有引力効果の空間分布を見積もったところ, 初期応力の移流の効果が特に大きな値を持つことが分かった. 初期応力移流の効果は地表面に対する荷重で近似することができるため, 見積もりの結果は地表面の鉛直変位を打ち消すように進行する計算結果 (Figure 2d-f) をよく説明する. 以上のことから, 引力緩和の主な成因は初期応力移流の効果であると結論付ける.

他の興味深い計算結果として, 震源深さに比べて震央距離が大きい場合 (Figure 2d,g), 引力緩和の進行する向きが途中で逆転した. この現象は, 上述の空間スケール依存性から理解することができ, 特に短波長成分が存在することによって引き起こされると解釈できる. また, 水平変位・鉛直変位・重力変化のそれぞれで時間発展の特徴が異なっていた. 具体的には, 鉛直変位に比べて重力変化は初期緩和の振幅が非常に小さく, これによって引力緩和がより早く卓越する場合があった (Figure 2g). また, 水平変位は鉛直変位や重力変化と同じタイミングでの変動の振幅が小さく, より遅い時刻に大きな変動が観察された. これらの物理量間の特徴の違いについては, さらなる考察が必要である.

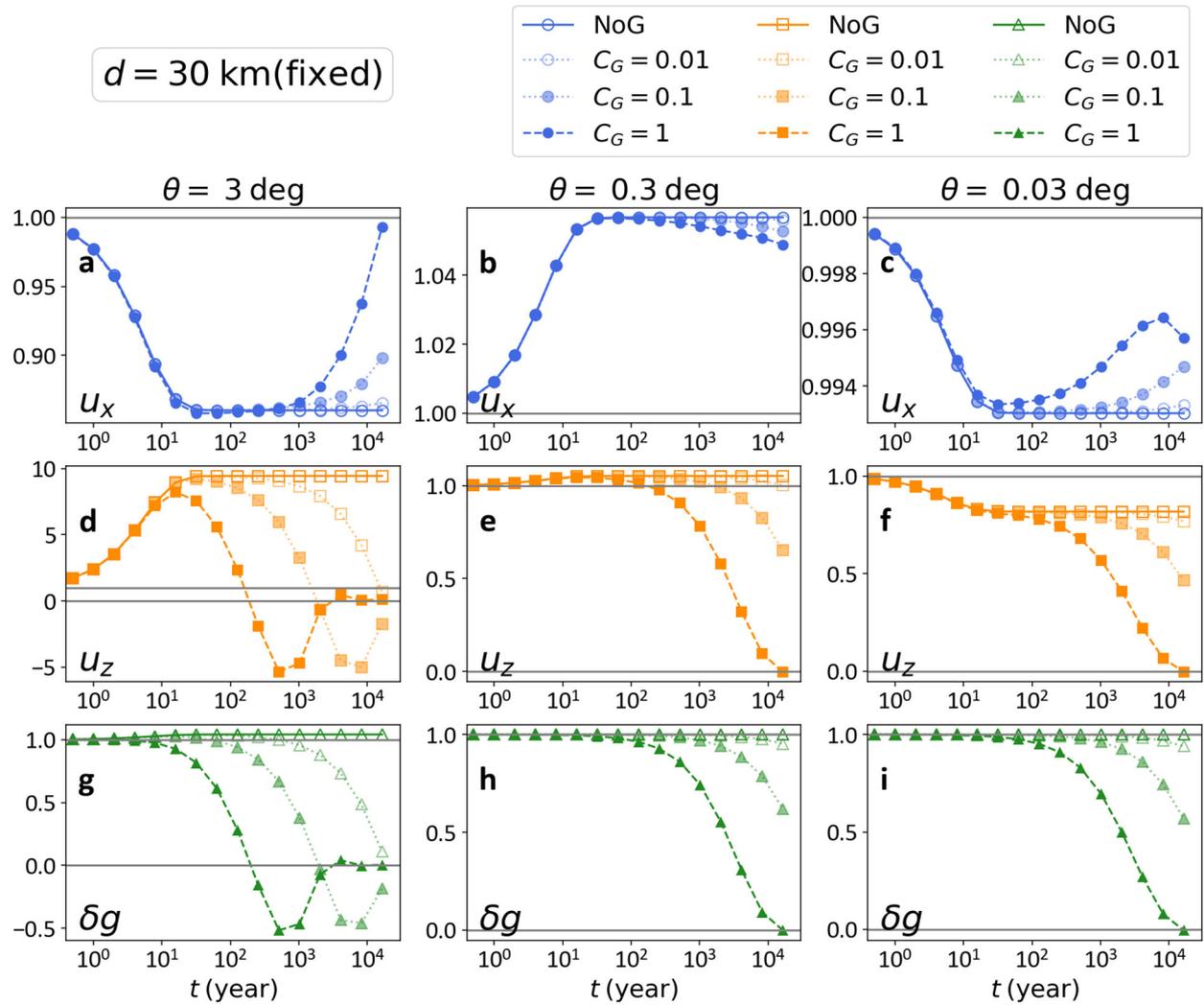


Figure 2. 震源の深さ d が 30km の場合の時系列の例. 震央距離は列ごとに異なり, その値は各列の上部に示している. (a)(b)(c)は水平変位, (d)(e)(f)は鉛直変位, (g)(h)(i)は重力変化の時系列である. 色の濃さや線の種類は万有引力の強さを表す. 各時刻の値は地震時の変動量で割ったものである. 灰色の線は縦軸において 0 と 1 を表す.

4. まとめ

本研究では地震後の粘弾性変形の時間発展に対する万有引力の効果を議論した. 万有引力が存在する場合, 媒質の Maxwell 緩和時間より数桁以上遅い時刻においても変動が発生し, これによって時間発展は複雑になった. この変動は主に初期応力の移流によって引き起こされたと考えられる. 万有引力がある場合の時間発展は, 空間スケールや変動の種類 (水平変位か, 鉛直変位か, 重力変化か) によって異なる特徴を示すことも分かった. 今後は上記の特徴についてさらに考察を進めるとともに, より現実的な場合の変動に物理的な解釈を与えることが求められる.