

# 有効応力変動圧密試験の数値解析

栗本悠平\*・王乾\*・張鋒\*\*1

## 1. 研究の目的

海溝型巨大地震、なかでも南海トラフ周辺における地震の発生機構を議論するには、海洋掘削や地球物理学的な情報の取得が重要である。地震発生機構の解明を目指すこれらの情報取得技術は、近年大きな進歩を遂げ、現在も研究成果の蓄積が精力的に行われている。一方、海溝型地震発生帯の形成やその規模に寄与するプレート境界断層（デコルマ）の起源や初期形成過程に関する研究は、まだ数少ない。我々は、「南海トラフのデコルマを構成する堆積物が粒子配列を維持したまま高密度な状態にある」という、深海掘削調査で得られた事実に基づき、「デコルマの初期形成で支配的な役割を果たすのは、プレート沈み込み運動に伴うせん断変形ではなく、地震などの動的外力である」と仮説を立てた。本稿では、南海トラフの海底岩盤をモデル化し、二次元有限変形 FEM 解析を用いた数値実験により、連続的な静的せん断変形と瞬間的な動的荷重が同時に作用した場合のプロトデコルマの挙動を再現した。

## 2. 研究のシナリオ

プレート境界である南海トラフでは近い将来、高確率で巨大地震が発生すると予測されており、その発生メカニズムの解明や対策が切望されている。しかしながら、これまでの巨大地震に関する研究は遠方観測データや遠い過去の地質記録からの類推によるものがほとんどであり、プレート境界断層材料を用いた力学試験やその形成メカニズムに関する研究は数少なく、室内要素試験や数値実験等の基礎的な研究が求められる。

近年ではプレート境界断層の掘削を目指した国際深海掘削計画（Ocean Drilling Program; ODP）や統合国際深海掘削計画（Integrated Ocean Drilling Program; IODP）の策定に始まり、日・米・欧が参加する国際海洋掘削計画第 190 次航海では室戸岬沖の南海トラフにおいて深海掘削調査が実施されている。深海掘削調査で採取された室戸岬沖の南海トラフ試料より、将来的にプレート境界断層になるとされるデコルマ相当層準（以下、プロトデコルマ）では自生鉱物粒子に起因する粒子間セメンテーションが存在し、低密度状態であることが確認されている。また、プレート境界断層に相当するデコルマではある深度で異常とも言える体積圧縮を生じ、高密度状態であることが確認されている（Morgan and Karig, 1995; Ujiie et al., 2003）。これはプロトデコルマで形成されていた粒子間セメンテーションが数十万年を経てデコルマへ変化する過程で崩壊し、高密度状態に移行したことを意味する。一方、採取されたデコルマのコア試料を観察すると、デコルマは数 mm～数 cm 程度の角礫で形成されており、その角礫内部における粒子配列はランダムな状態を維持していることが明らかにされている（Ujiie et al., 2003）。これはデコルマを形成する角礫内部において、せん断変形を受けた形跡が認められないことを意味する。

地盤工学において、粒子間を繋ぐ役割を果たすセメンテーションや土粒子の嵩張り（カードハウス構造）により形成される構造などの崩壊はせん断変形に起因するとされる。しかしながら、デコルマを形成する角礫内部ではランダム組織を維持したままセメンテーションが崩壊することで高密

---

\*名古屋工業大学大学院, \*\*同・教授

度化し、従来の地盤工学で認識されてきた「せん断変形による高密度化」と矛盾している。そこで、著者らは地震動に起因する低周波流圧変動がデコルマ層準において発生していること (Davis et al., 2006) に着目し、従来の認識とは大きく異なる仮説を立てた。すなわち、デコルマではせん断変形が支配的でなく、ランダム組織を維持したままセメンテーションを崩壊させるのは地震による疎密波やプレート境界断層内部の局所的な材料破壊、流圧変動等の「平均応力と偏差応力が共に変化する動的外力」に起因すると仮定した。

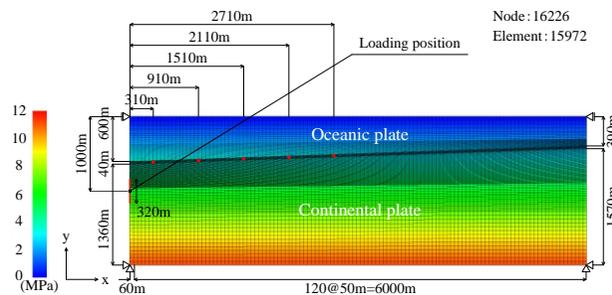
本研究ではこの仮説を検証するために、プレート境界断層の海洋堆積物を用いた室内要素試験を実施し、動的外力を受ける巨視的変形特性と微視的内部組織の変化を評価する。ただし、海洋プレートが大陸プレートに沈み込む過程で生成されたデコルマは完全に境界値問題であり、その形成メカニズムを室内要素試験のみで議論することは充分ではない。そこで、本稿では回転硬化型弾塑性構成式 Cyclic mobility model (Zhang et al., 2007) に基づく土・水連成有限変形静的・動的 FEM 解析プログラム「DBLEAVES」(Ye et al., 2007) を用いた数値実験により、地震等の動的外力とプレートの沈み込み運動に伴うせん断変形がデコルマの形成に与える影響を解析的に検証し、特に動的外力を受けるプロトデコルマの体積変化や粒子配列に着目した結果を報告する。

### 3. 動的外力とプレート沈み込み運動を同時に受けるプロトデコルマの力学挙動

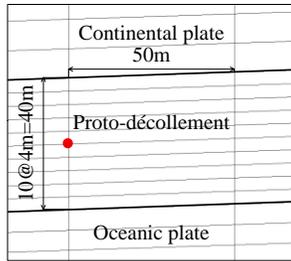
#### 3.1 解析条件

プレート境界断層深部では、固着が解放され (Lay and Kanamori, 1980; Lay et al., 1982)、材料破壊が繰返し発生している。これを踏まえると、デコルマの力学特性を理解するためには、海底岩盤のなかでもプレート境界断層を弾塑性材料としてモデル化する必要がある。

解析メッシュは、室戸岬沖の南海トラフの海底岩盤 (海底深下数 100 m) を想定した。南海トラフは、海洋プレートが西南日本弧の下に年間約 4 cm の速度で沈み込むプレート沈み込み帯である (Seno et al., 1993; Miyazaki and Heki, 2001)。本解析では、海洋プレートが大陸プレートに沈み込む過程を対象とし、海洋プレートの沈み込み角度を 2 度とした。また、大陸プレートと海洋プレートの境界であるプロトデコルマの深度は、南海トラフで観測されたデコルマの海底深下約 800 m をもとに 390 m から 640 m とした。一方、本解析で対象としたプロトデコルマ層厚は、深海掘削調査 (Y) で明らかにされた南海トラフのデコルマ層厚約 32.6 m をもとに 40 m とした。16226 節点および 15972 要素から構成される横幅 6000 m、深さ 2000 m の二次元海底岩盤の解析メッシュを図 1 に示す。初期応力は、飽和状態の自重応力場として与えた。



(a) 南海トラフの海底岩盤を想定した解析メッシュ



(b) プロトデコルマの周囲

図1 二次元 FEM 解析メッシュおよび初期平均有効応力分布

動的解析においては、初期剛性比例型の Rayleigh 減衰を使用し、減衰定数は堆積軟岩の場合、数%であることを参考に 0.05 と仮定した。境界条件は、海洋プレートの底面を鉛直・水平方向固定とし、解析メッシュの両側面は鉛直方向自由、水平方向固定とした。

南海トラフで観察されたデコルマは、プレート沈み込みによる常時のせん断および圧縮変形と、瞬間的な地震などによる動的荷重や低周波流動圧などの外力を長期間受けることで形成したものと考えられる。そこで本論文では、海底岩盤に対してこれらの外力を同時に作用させ、プロトデコルマの応答をよりリアルに検証した。本解析では、外力を複合的に作用させるため、連続的に発生する静的荷重と断続的に繰り返し発生する動的荷重を時系列的に沿って計算した。本解析では、まず海洋プレートに動的荷重を作用させ、その後海洋プレートが年間約 4 cm の速度で大陸プレートに沈み込む) せん断および圧縮変形を 200 年にわたって与えた。なお、海底岩盤の構成則に用いる材料パラメータは、解析過程において一切変更しない。

### 3.2 解析結果および考察

地震などによる動的外力を 200 年毎に与え、その後はプレート沈み込み運動を再現した動的・静的载荷サイクルを 5 回繰返した場合の、1000 年後における各要素の力学挙動を図 2 に示す。着目した要素は、第二章と同様である。過剰間隙水圧に着目すると、動的荷重が作用する度に急激に変化するが、プレート沈み込み運動の過程で消散していく傾向を示している。一方、平均有効応力は、過剰間隙水圧の消散に伴い回復し、上昇傾向にある。なお、平均有効応力と偏差応力は、動的荷重を受ける度にパルスのような応答を示しているが、例えば図 3 に示す平均有効応力変化 (60 秒間) の拡大図から分かるように単なる時間スケールの問題であり、解析結果はスムーズに変化していることが分かる。

ここで、プロトデコルマで発生した体積ひずみに着目すると、プレート沈み込み運動の過程においても若干の体積圧縮挙動を示すことが分かる。一方、解析開始から約 100 年間では、せん断変形の影響で構造と応力誘導異方性が変化しているが、その後はほとんど変化しない。これは、約 100 年間のプレート運動を受けて形成されたプロトデコルマ上部のせん断帯 (図 4) が、せん断および圧縮変形をほとんど受け持ったためである。すなわち、プレート沈み込み運動の過程で発生する体積ひずみの大部分は、動的荷重で発生した過剰間隙水圧の消散 (圧密) が寄与しているといえる。よって、動的外力とプレート沈み込み運動が同時に作用する場合でも、せん断帯が形成されるとその後のプレート沈み込み運動は、プロトデコルマの大圧縮に寄与しないといえる。また、1000 年間に発生した体積ひずみは、既に 6%にも達しているが、内部の構造や応力誘導異方性に顕著な喪失と発展は見られない。したがって、複数回の動的荷重が海底岩盤に作用する場合、第二章と同様にプロトデコルマは内部組織を維持したまま、大圧縮を示す可能性が極めて高いといえる。

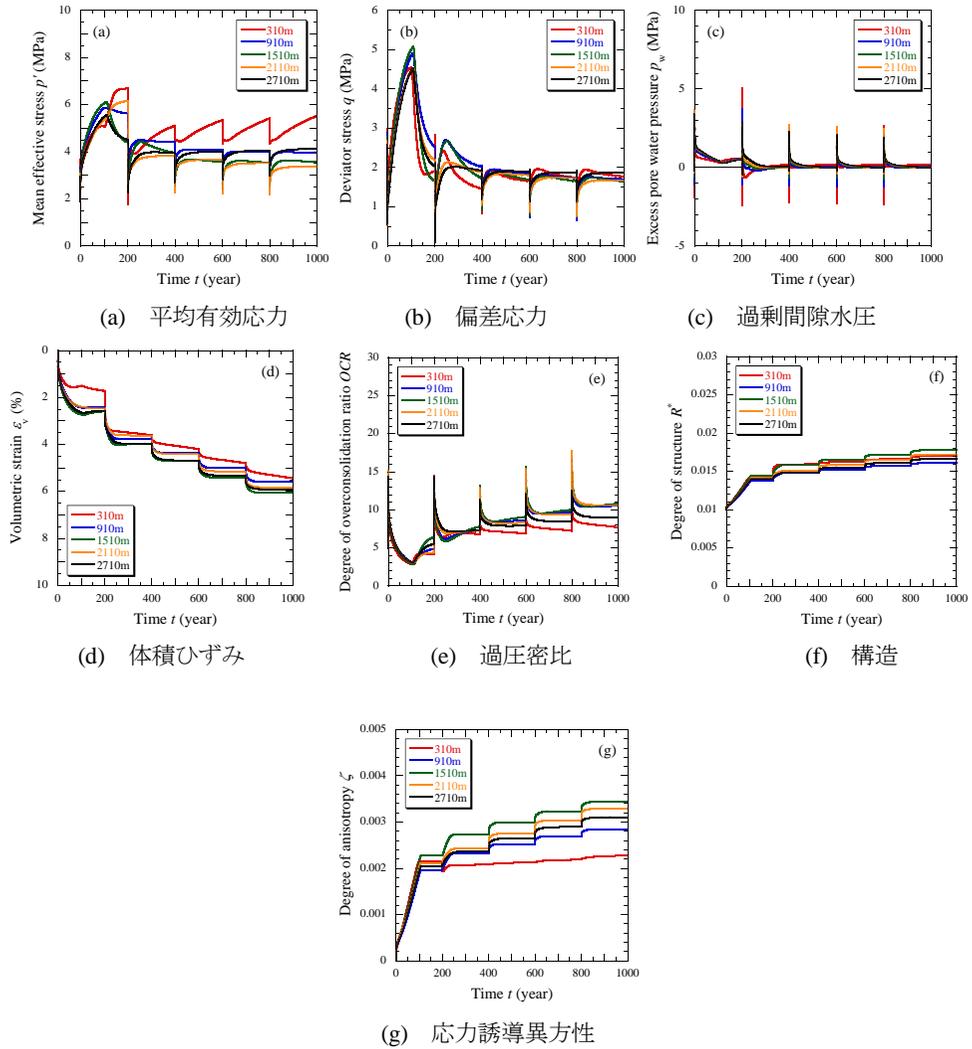


図2 動的外力とプレート沈み込み運動を受けるプロトデコルマの力学挙動 (1000年後)

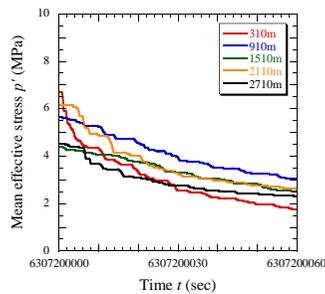


図3 平均有効応力の拡大図 (200年付近, 60秒間)

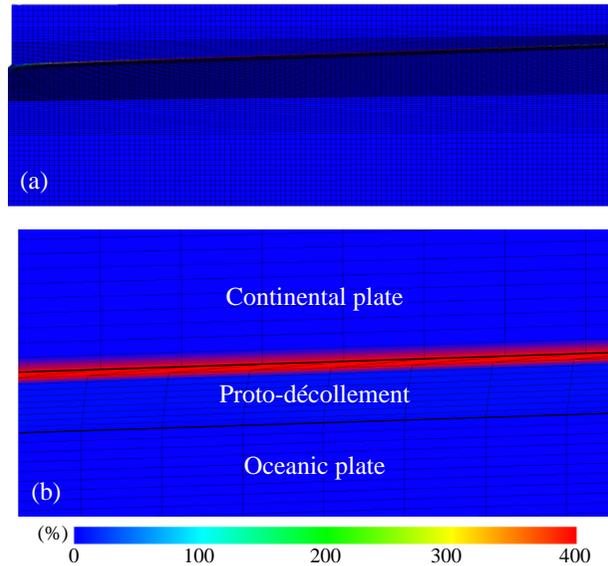


図4 せん断ひずみ分布(1000年後); (a) 海底岩盤, (b) プロトデコルマの周囲

#### 4. 結論

我々の提案するデコルマの初期形成メカニズムの仮説を検証するために、回転硬化型弾塑性構成則 Cyclic mobility model に基づく土・水連成有限変形静的・動的 FEM 解析プログラムを用いて、連続的な静的せん断変形と瞬間的な動的荷重をプレート境界断層に与えた。本研究の結論と今後の展望を以下に述べる。

- 1) プレート沈み込み運動で発生するせん断および圧縮変形を静的荷重として海底岩盤に与えると、大陸プレートと接触するプロトデコルマの最上部で局所的にせん断帯が形成された。一方、せん断帯以外の領域の材料は弾性除荷挙動を示し、せん断変形による影響をほとんど受けないため、構造と異方性の喪失・発展も小さく、体積ひずみは 1%程度しか生じないことが分かった。
- 2) 地震などによる動的外力とプレート沈み込み運動で生じる静的せん断力を同時に与えると、プロトデコルマで体積ひずみが 5%も発生するにも関わらず、その内部の構造と異方性に顕著な変化は見られなかった。プロトデコルマは上述した力学挙動と同様な傾向を示した。
- 3) 本数値実験で得られた結果は、主に巨視的力学特性を反映するものではあるが、微視的構造特性に結びつくものも多く含まれている。例えば、体積変化や構造、応力誘導異方性は、定量的な結果として時系列的に出力されている。この解析結果は、要素レベルの載荷試験と微視的構造解析、例えば AMS (Graham, 1966; Hrouda, 1978) や SEM などを通じて間接的にその一部の検証も可能である。

以上の結果より、地震などの動的外力がデコルマの初期形成要因である可能性は充分にあるといえる。ただし、本数値実験は、プロトデコルマについて仮想的な材料パラメータを用いていることに加え、海底岩盤の材料特性である不飽和の影響や温度・化学特性を考慮していない。今後は、海洋堆積物の試料を用いた室内要素試験より決定した材料パラメータと、不飽和材料の影響や地盤材料の温度・化学特性を考慮できる構成則に基づいた数値実験を実施し、室内要素試験と数値実験の両面から、より定量的にデコルマ形成メカニズムを検証していく。

#### 参考文献

- 1) Davis, E. E., Becker, K., Wang, K., Obara, K., Ito, Y. and Kinoshita, M.: A discrete episode of seismic

- and aseismic deformation of the Nankai trough subduction zone accretionary prism and incoming Philippine Sea plate, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 242, No. 1-2, 73-84, 2006.
- 2) Kurimoto, Y., Yamamoto, Y., Sakaguchi, H., Zhang, F. and Saeda, Y.: Mechanical properties of soft sedimentary rock under K0 and isotropic cyclic loading conditions, *Proceedings of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015.
  - 3) Morgan, J. K. and Karig, D. E.: Décollement processes at the Nankai accretionary margin, southeast Japan: Propagation, deformation, and dewatering, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, No. B8, 15221-15231, 1995.
  - 4) Ujiie, K., Hisamitsu, T. and Taira, A.: Deformation and fluid pressure variation during initiation and evolution of the plate boundary décollement zone in the Nankai accretionary prism, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. B8, 2398-8-14, 2003.
  - 5) Xiong, Y., Zhang, S., Ye, G. and Zhang, F.: Modification of thermo-elasto-viscoplastic model for soft rock and its application to THM analysis of heating tests, *Soils and Foundations*, Vol. 54, No. 2, 176-196, 2014.
  - 6) Graham, J. W.: Significance of magnetic anisotropy in Appalachian sedimentary rocks, *The Earth Beneath the Continents*, pp. 627-648, 1966.
  - 7) Hrouda, F.: The magnetic fabric in some folds, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 17, No. 2, pp. 89-97, 1978.
  - 8) Zhang, F., Ye, B., Noda, T., Nakano, M. and Nakai, K.: Explanation of cyclic mobility of soils: Approach by stress-induced anisotropy, *Soils and Foundations*, Vol. 47, No. 4, 635-648, 2007.
  - 9) Lay, T. and Kanamori, H.: Earthquake doublets in the Solomon Islands, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 21, No. 4, pp. 283-304, 1980.
  - 10) Lay, T., Kanamori, H. and Ruff, L.: The asperity model and the nature of large subduction zone earthquakes, *Earthquake Prediction Research*, Vol. 1, pp. 3-71, 1982.
  - 11) Seno, T., Stein, S. and Gripp, A. E.: A model for the motion of the Philippine Sea plate consistent with NUVEL-1 and geological data, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 98, No. B10, pp. 17941-17948, 1993.
  - 12) Miyazaki, S. and Heki, K.: Crustal velocity field of southwest Japan: Subduction and arc-arc collision, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, No. B3, pp. 4305-4326, 2001.