



深海底プレート境界デコルマ帯におけるせん断破壊モデル

杉山, 友理
戎, 健次
飯塚, 敦
河井, 克之
佐々木, 陽亮

(Citation)

土木学会論文集A2 (応用力学) , 71(2):I_605-I_612

(Issue Date)

2015

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2015 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003368>



深海底プレート境界デコルマ帯における せん断破壊モデル

杉山 友理¹・戎 健次²・飯塚 敦³・河井 克之⁴・佐々木 陽亮⁵

¹工修, 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: 128t120t@stu.kobe-u.ac.jp

²株式会社ニュージェック (〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)

E-mail: kenji.ebisu@gmail.com

³工博, 神戸大学教授, 都市安全研究センター

⁴工博, 近畿大学准教授, 理工学部

⁵工修, 神戸大学大学院工学研究科

プレート境界すべり面(デコルマ帯)で起きる地震発生要因の一つがスメクタイトからイライトの変化であり, この変質による力学挙動を理解することが地震研究において必要とされている. しかしながら, 巨大地震の発生に重要な役割を果たすとされているデコルマ帯の実態と力学挙動に関する研究はほとんどなされていない. 本研究では, この未解決の問題であるデコルマ帯について, 力学的観点からアプローチすることを目的とする. ここでは, 変質により生じる変化として, スメクタイトがイライト化に伴って脱水することの影響及び, スメクタイトとイライトの力学特性の変化による影響について考慮した. その結果, スメクタイトの脱水によりデコルマ帯の強度が増加することが分かった.

Key Words : *decollement zone, alteration, constitutive model, simple shear test*

1. はじめに

“地震は「固着して滑る」という摩擦によって生じる不安定性が原因で生じる”という地震説が提唱された¹⁾. ここで, 地震とは「滑り」のことであり, 「固着」とは地震と地震の間の弾性ひずみの蓄積により生じるものを意味する. 今まで, プレート沈み込み境界では, 高温高圧のため, 大陸プレートは固体として存在せず(アセノスフェア), 固体の海洋プレートがアセノスフェア中を沈み込むため, プレートのすべりはゆっくりであり, スロースリップと呼ばれる非地震性すべりが発生している領域であると考えられていた. つまり, プレート間の固着はなく, ここでは地震時に地震性すべりが発生しないと考えられていた. しかし, 固着が弱いはずなのにプレート境界断層(デコルマ帯)で固着している場所があることが分かった²⁾. さらに, 地震性すべりが断層の端部まで伝播した証拠も見つかっている³⁾. プレート境界浅部の滑りは巨大津波の原因となる. そのため, 安定滑り領域で固着域ができるメカニズムの早急な解明が求めら

れている. そこで, なぜ固着し, このような滑りが生じたのか調べるため, 深海科学掘削が東日本大震災後に行われた. 深海科学掘削では, 主にプレート境界断層の構成鉱物と物性の解明や断層及び近傍の摩擦特性の分析が行われた. その結果, プレート境界断層はスメクタイトを豊富に含んだ遠洋性粘土層で構成されており, せん断帯の厚さは5m未満で, 局所的に変形が集中していることが分かった⁴⁾. ここで, スメクタイトとは, 鉱物内に層間水を有した構造をしており, 60℃~150℃で層間水の脱水が生じ, イオンの存在によっては異なる鉱物に変質する性質を有している(図-1). 日本海溝, 南海トラフやバルバドス付加体の掘削データから, デコルマ帯でスメクタイトが減少し, イライトが増加していることが分かり, さらにその深さが, スメクタイトが層間水の脱水を経験する温度に対応することが分かった⁵⁾⁶⁾(図-2). スメクタイトとイライトの主な違いは,

1. スメクタイトは水膨潤性を有する
2. 土粒子密度が異なる. (スメクタイトの土粒子密度: 2.35g/cm³, イライトの土粒子密度: 2.75g/cm³)

3. 摩擦特性が異なる．（スメクタイトの摩擦係数：0.2 以下，イライトの摩擦係数：0.3～0.6）

であり，これらのことから，デコルマ帯でのスメクタイトのイライト化による摩擦特性の変化が固着の原因ではないかと考えられるようになった．スメクタイトの脱水及びスメクタイト含有率が摩擦特性に及ぼす影響に関する研究は多いが，イライト化と脱水現象を同時に考慮したモデル化や実験は行われていない．しかし，デコルマ帯では脱水とイライト化は同時に生じている．さらに，デコルマ帯はプレート沈み込みによるせん断作用も受けていることから，これらの現象を同時に追う必要がある．土/水連成の力学体系で，スメクタイトからイライトへの変質を考慮することができれば，せん断力を受けながら変質した場合の力学挙動について調べることができ，このことは安定滑り領域での固着して滑るという現象の解明に繋がるのではないかと考えた．そこで本研究では，変質作用（脱水・イライト化）による強度増加や鉱物の密度変化といった現象を，土/水連成問題として理論的に解釈するために構成モデル及び連続式に組み込み，デコルマ帯におけるせん断破壊モデルを提案することを研究目的とする．また，イライト化に伴い様々なイオンが水に溶解込むことで水の密度も変化する可能性があるが，

何種類ものイオンが溶けた海水の密度でも1.03g/cm³程度であるため，本研究ではイオン溶出による水の密度変化については考慮せず，水密度は一定（1.0 g/cm³）であると仮定する．また温度変化については，常に変質可能な温度領域内であると仮定し，化学反応による熱移動についても考慮しない．さらに，変質速度については未解明なことが多いことから，変質進行具合を示す指標として用いる変質率は入力値とする．

2. 変質を考慮した構成モデル

本章では，スメクタイトからイライトへの変質を考慮した数理モデルの提案を行う．ここで，デコルマ帯は超高压下に存在しており地温勾配に伴い温度が上昇するため，ここでの水の存在状態が問題となる．しかし，水深2200m以深では，いくら温度を上げても沸騰せず，さらにこの圧力下で温度が374℃になると超臨界流体となる．本研究で着目する領域は，水深が2200m以深で，温度が150℃程度であるため，間隙水は液体として存在し続けることができると考えられるので，水の状態変化については考慮しない．また，拘束圧がかなり大きいので，深さごとに強度定数が変化する可能性が考えられるが，ある一定の深さにおける応力変化について検討するため，ここでは強度定数に及ぼす拘束圧は考えない．まず初めに，スメクタイトからイライトに変質する，すなわち粘土鉱物の特性の変化を表現できるモデルの構築を行う．

様々なモンモリロナイト含有率のベントナイト粘土の一次元圧密試験結果をまとめた結果を図-3a, 3bに示す⁹⁾．ここで，モンモリロナイトはスメクタイト族の中で最もメジャーな鉱物であり，スメクタイトとモンモリロナイトは同じ鉱物として扱われている．図-3a から，モンモリロナイト含有率が変化しても，圧縮指数は変化しないことが分かる．また，図-3b に示す等方圧密試験結果から，載荷時と除荷時にほぼ同じ経路を辿っていることが分かる．ここで，図-4 に示す体積圧縮特性から，スメクタイトは $\lambda = \kappa_{sme}$ とすることで，図-3b に示す関係を表現することができるといえる．ここで， λ は圧縮指数， κ_{sme} はスメクタイトの膨潤指数である．さらに，モンモリロナイトを主成分として含有する飽和ベントナイトの三軸非排水試験結果を図-8c に示す¹⁰⁾．図-3c の左図に示す有効応力経路より，軸差応力の増加に対し平均有効応力の増減がないため，せん断による体積変化（ダイレイタンス特性）が生じていないことが分かる．ダイレイタンス特性は粒状性材料で見られる非可逆的体積変化であり，CAM-CLAY 理論に基づくダイレイタンス発現の研究成果¹¹⁾より，せん断応力比と体積変化の割合を表すダイレイタンス係数 D は，

$$D = \frac{\lambda - \kappa}{(1 + e_0)M} \quad (A)$$

として求めることができる．ここで，式中の M は，CAM-CLAY モデルの限界状態理論¹²⁾で定義される強度

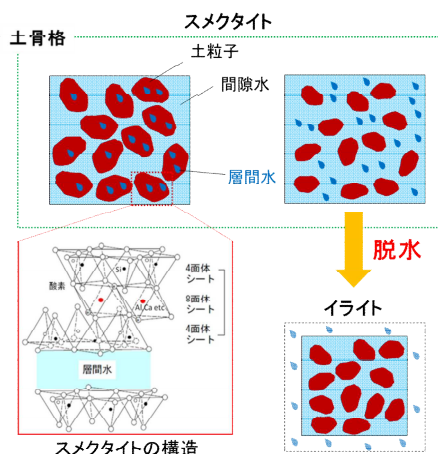


図-1 脱水による体積変化

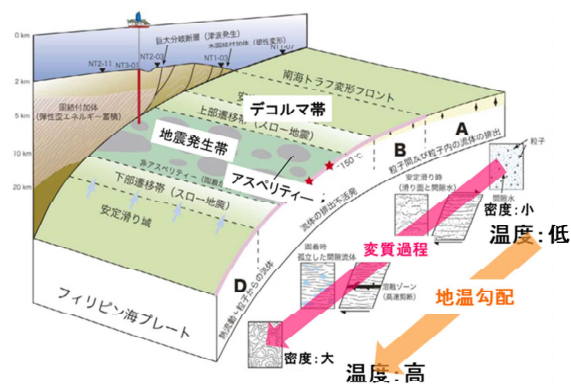


図-2 デコルマ帯⁷⁾

定数である．この関係式より， $\lambda = \kappa_{sme}$ とすれば $D=0$ となり，ダイレイタンスによる体積変化が生じない，すなわち図-3c の左図に示す関係を表現することができる．次に，図-3c の右図に示す応力-ひずみ関係より，せん断途中から軸差応力がほとんど変化せずに軸ひずみが進行していることが分かる．このことから，モンモリロナイトは通常の土質材料と同様に限界状態が存在すると考えられる．これらのことから，完全に飽和したモンモリロナイトは弾塑性体であるにも関わらず，弾性体のような性質を有する材料であると考えられ， $\lambda = \kappa_{sme}$ とすることで弾性体としての性質を表現できることが分かった．

また，イライトに関する力学試験結果から¹³⁾，イライトは載荷時と除荷/再載荷時にそれぞれ異なる体積圧縮挙動を示し，粒状性材料特有のダイレイタンス特性を発現することが分かっている．このことから，イライトは $\lambda \neq \kappa_{ill}$ であり，弾塑性体として取り扱える．ここで， κ_{ill} はイライトの膨潤指数である．

これらのことから，スメクタイトのイライト化は，弾性体から弾塑性体への変化として捉えることができる．スメクタイトとイライトの圧縮指数を比較すると，ほとんど同じ値であり，またスメクタイトの膨潤指数を圧縮指数と等しいと考えることで弾性体としての性質を示すことができることから，変質率の増加に伴い膨潤指数がスメクタイトの膨潤指数からイライトの膨潤指数に徐々に変化するとした．すなわち，

$$\kappa' = (1 - \chi_a) \kappa_{sme} + \chi_a \kappa_{ill} \quad (5)$$

$\dot{\kappa}' = -(\kappa_{sme} - \kappa_{ill}) \dot{\chi}_a$
 κ' は変質により変化する膨潤指数， χ_a は変質率， $\dot{\chi}_a$ は変質率増分である．ここで，変質速度については未解明なことが多いことから，変質進行具合を示す指標として用いる変質率増分は入力値とする．

さらに，スメクタイトから層間水が脱水することでイライトへと変質し，このとき密度変化が生じるため，脱水作用を密度変化として表現できると考えている．本論文では密度変化については今後の課題とするが，変質による密度増加により硬化する可能性を考え，変質に伴い降伏応力が増加するようにモデル化した．

$$p'_c = \xi p'_{ini} \\ \xi = \exp[\chi_a \ln a] \quad (6)$$

$$\xi = 1 \quad \text{when} \quad \chi_a = 0$$

$$\xi = a \quad \text{when} \quad \chi_a = 1$$

p'_c は降伏応力， p'_{ini} は初期降伏応力， a は剛性を左右するパラメータである．

よって，変質を考慮した等方弾性応答の体積変化式を導出すると，

$$\dot{\varepsilon}_v^e = \frac{\kappa'}{p'(1+e_c)} \dot{p}' \\ - \frac{1}{1+e_c} \left\{ (\kappa_{sme} - \kappa_{ill}) \ln \frac{p'}{\xi p'_{sat}} + \kappa' \ln a \right\} \dot{\chi}_a \quad (7)$$

となり，体積変化が，有効応力変化と変質により生じる

式として表される．これは，変質を考慮しない場合，既存の非線形弾性体に帰着する．また，(7)式を平均有効主応力で整理すると，

$$\dot{p}' = \frac{p'(1+e_c)}{\kappa'} \dot{\varepsilon}_v^e + \frac{p'}{\kappa'} \left\{ (\kappa_{sme} - \kappa_{ill}) \ln \frac{p'}{\xi p'_{sat}} + \kappa' \ln a \right\} \dot{\chi}_a \quad (8)$$

と表すことができる．

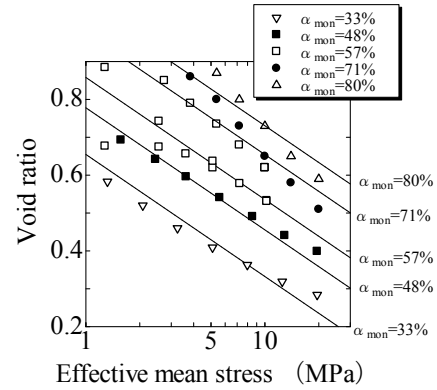


図-3a モンモリロナイト含有率ごとの一次元圧密試験

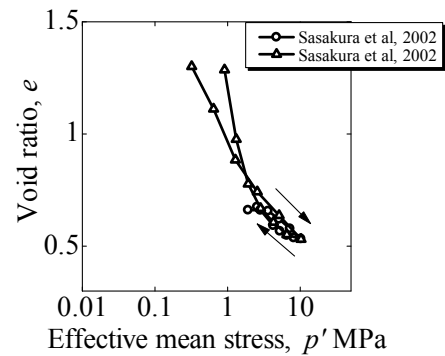


図-3b 飽和ベントナイトの載荷/除荷時の体積圧縮特性

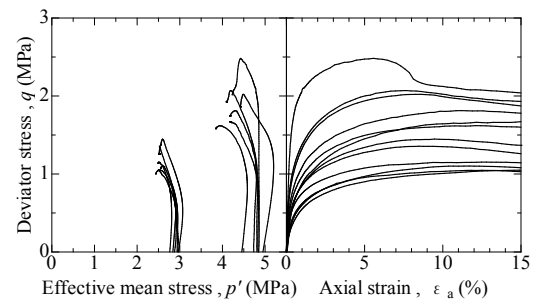


図-3c 飽和ベントナイトの非排水せん断中の軸差応力と有効応力関係及び軸差応力と軸ひずみ関係

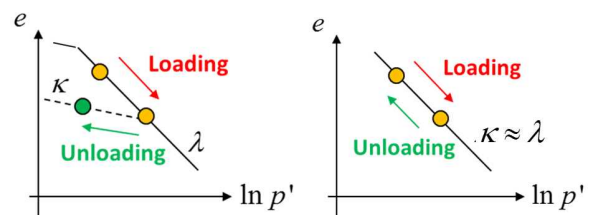


図-4 体積圧縮特性のモデル化

さらに、式(5)をCAM-CLAYモデルに適用すると、降伏関数は

$$f = \frac{\lambda - \kappa'}{1 + e_c} \ln \frac{p'}{\xi p'_{sat}} + \frac{\lambda - \kappa'}{1 + e_c} \frac{q}{p' M} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (9)$$

となる。

ここで、

$$\text{ひずみ速度の分解 } \dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p \quad (10)$$

$$\text{流れ則 } \dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\gamma} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (11)$$

$$\text{コンシステンシー条件 } \dot{f} = 0 \quad (12)$$

$$p' = \frac{1}{3} \sigma_{ii} \quad (13)$$

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}} \quad (14)$$

$$s_{ij} = \sigma'_{ij} - p' \delta_{ij} \quad (15)$$

ここで、式(7)を考慮した非線形弾塑性構成モデルは

$$\dot{\sigma}'_{ij} = C_{ijkl}^e \dot{\varepsilon}_{kl}^e + K^{\chi_a} \delta_{ij} \dot{\chi}_a \quad (16)$$

と記述できる。 s_{ij} は偏差応力テンソルである。ここで提案する弾塑性構成モデルの導出過程をまとめると図-5となる。

3. 変質シミュレーション

2章で構築した数理モデルを用いて、(1)変質に伴う物性変化について確認する（排水条件）。また、初期変質率を様々に変えた非排水せん断シミュレーションを行い、イライト含有量の違いによる強度変化についても検討した。さらに、(2)初期変質率0%の状態から変質させながら同時に非排水条件でせん断するシミュレーションを行った。(1)(2)のせん断シミュレーションは非排水条件でそれぞれ0.01%/dayで変質させた。用いた材料パラメータを表-1に示す。

(1) 変質シミュレーションの検証

変質のみが生じる状態を想定したシミュレーションを行うことで、変質のみによる間隙比変化、すなわち脱水作用が表現できているか確認した。図-6、7にそれぞれ変質率に対する膨潤指数変化及び降伏応力変化を示す。これらの結果から、変質の進行と共にスメクタイトからイライトの力学的特性が連続的に変化することを確認できた。また、図-8から、変質率の増加に伴い間隙比が徐々に減少することが確認できた。図中に示した赤点で変質が終了し、このとき変質のみにより生じた間隙比変化量は約0.08であり、この値の妥当性については今後スメクタイトの層間水を脱水させた実験等と比較することで検討する。図-9は、変質終了後、変質率100%の状態等で方載荷した後等方除荷したときの体積圧縮特性である。この結果より、初期は正規圧密状態であったが、変

Non-linear elastic constitutive model

$$\dot{\sigma}'_{ij} = C_{ijkl}^e \dot{\varepsilon}_{kl}^e + K^{\chi_a} \delta_{ij} \dot{\chi}_a$$

$$C_{ijkl}^e = K \delta_{ij} \delta_{kl} + 2G A_{ijkl}, \quad K^{\chi_a} = \frac{p'}{K'} \left[(\kappa_{sm} - \kappa_{sl}) \ln \frac{p'}{\xi p'_{sat}} + \kappa' \ln a \right]$$

Yield function

$$f(\sigma'_{ij}, \chi_a, \varepsilon_v^p) = 0$$

Consistency condition

$$\dot{f} = \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} \dot{\sigma}'_{ij} + \frac{\partial f}{\partial \chi_a} \dot{\chi}_a + \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \dot{\varepsilon}_v^p = 0$$

Strain decomposition

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p$$

Flow rule

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\gamma} \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}}$$

$$\dot{\sigma}'_{ij} = C_{ijkl}^e \left(\dot{\varepsilon}_{kl} - \dot{\gamma} \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{kl}} \right) + K^{\chi_a} \delta_{ij} \dot{\chi}_a$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} C_{ijkl}^e}{\frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} C_{ijkl}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{kl}} - \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \frac{\partial f}{\partial p'}} \dot{\varepsilon}_{kl} + \frac{\frac{\partial f}{\partial p'} K^{\chi_a} + \frac{\partial f}{\partial \chi_a}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} C_{ijkl}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{kl}} - \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \frac{\partial f}{\partial p'}} \dot{\chi}_a$$

Constitutive equation

$$\dot{\sigma}'_{ij} = \left(C_{ijkl}^e - \frac{C_{ijmn}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{mn}} \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{kl}} C_{stkl}^e}{\frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} C_{ijmn}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{mn}} - \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \frac{\partial f}{\partial p'}} \right) \dot{\varepsilon}_{kl} - \left[\frac{C_{ijkl}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{kl}} \left(\frac{\partial f}{\partial p'} K^{\chi_a} + \frac{\partial f}{\partial \chi_a} \right)}{\frac{\partial f}{\partial \sigma'_{mn}} C_{mnkl}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{kl}} - \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \frac{\partial f}{\partial p'}} - K^{\chi_a} \delta_{ij} \right] \dot{\chi}_a$$

$$\dot{\sigma}'_{ij} = C_{ijkl}^{ep} \dot{\varepsilon}_{kl} - C_{ij}^{\chi_a} \dot{\chi}_a$$

図-5 応力-ひずみ関係導出フローチャート

質により降伏応力が大きくなるため（図-7）過圧密状態になり，変質後に载荷すると，図-9中の黒矢印で示すように，変質後の膨潤線を通り，変質率100%のときの降伏応力（図中赤点）で降伏することが確認できた。

次に，様々な変質率におけるせん断強度を調べた．変質率が20，40，60，80，100%のときを初期とし，図-

表-1 材料パラメータ

λ	κ_{sme}	κ_{ill}	M_{ill}	ν'
0.14	0.14	0.05	1.4	0.312
a	e_0	k_w (m / day)	χ_{ai}	$d\chi_a$
10	1.0	0.6	0.0	0.01

χ_{ai} : 初期変質率, $d\chi_a$ (%/day) : 変質増分

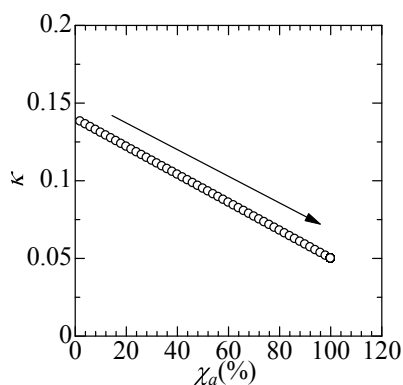


図-6 変質率—膨潤指数関係

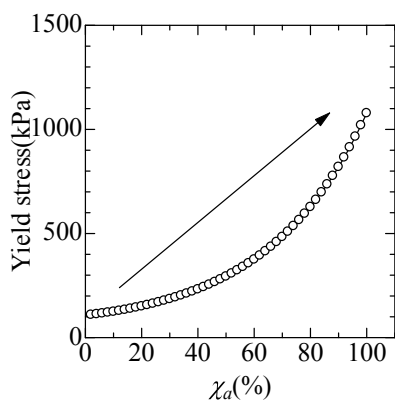


図-7 変質率—降伏応力関係

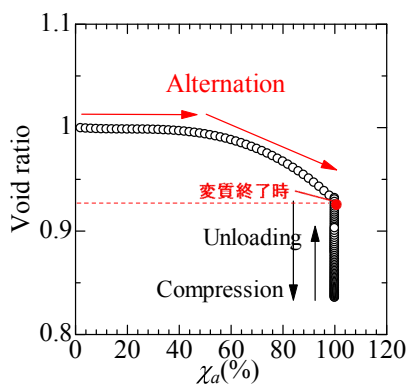


図-8 変質率—間隙比関係

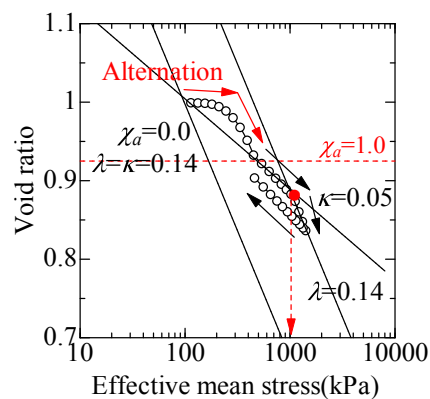


図-9 体積圧縮特性

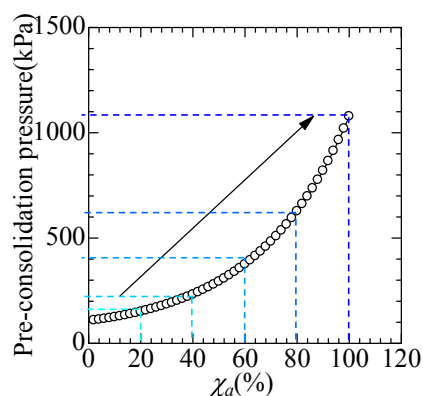


図-10 変質率—先行圧密圧力関係

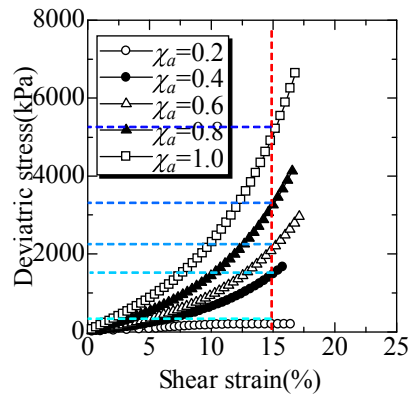


図-11 応力—ひずみ関係

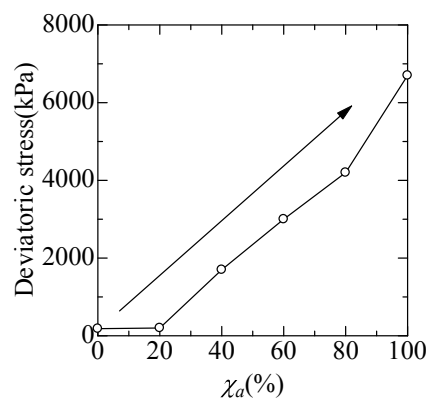


図-12 変質率—偏差応力関係

10に示す変質率と先行圧密圧力関係より、それぞれ正規圧密状態で変質率一定のまま非排水せん断試験を行った。せん断スピードは0.01%/minである。ここではイライト混合度の違いによる強度の差を調べるため、せん断中変質はさせない。

図-11にそれぞれの応力-ひずみ関係を示す。この結果から、せん断ひずみ15%時のせん断強度を用いて、変質率に対する非排水せん断強度をまとめた結果を図-12に示す。図-12から、変質率が増加する、すなわちイライト含有量が増えるほど、非排水せん断強度が増加することが分かる。スメクタイト含有率を様々に変えてせん断した既往の実験結果から、スメクタイト含有率が少ないほど摩擦係数が大きくなることが分かっている¹⁴。摩擦係数が大きくなることから、摩擦力、すなわちせん断強度が大きくなるといえる。このことから、図-12に示す結果は、実験事実と傾向が一致しているといえる。

(2) 変質を考慮した非排水せん断シミュレーション

本研究ではスメクタイトがダイレイタンシー特性をもたず、イライト化に伴い徐々にダイレイタンシーが発現するようなモデルを提案している。ダイレイタンシーの発現が表現できているか確認するために、変質させながら同時にせん断スピード0.01%/minでせん断する非排水せん断シミュレーションを行った。また、変質スピードが強度変化に及ぼす影響についても同時に検討を行うため、図-13に示す3ケースの変質スピードを用いて非排水せん断シミュレーションを行った。せん断初期からスメクタイト0%（イライト）である場合（図中の黒印）についても同様のシミュレーションを行った。

図-14にせん断時の間隙水圧変化を示す。図-14中のイライトの結果を見ると、せん断初期から間隙水圧が上昇し、その後破壊に達したところで一定値に落ち着くことが分かる。しかし、初期がスメクタイトの状態からイライト化させた場合の結果を見ると、せん断初期の間隙水圧上昇が小さく、徐々に間隙水圧が上昇している。これは、変質率の増加に伴い $\lambda \neq \kappa'$ となるため、式(A)の分子 $\lambda - \kappa'$ が0でなくなり、ダイレイタンシー係数が徐々に大きくなるためである。このことから、変質に伴いダイレイタンシー特性が発現していることを表現できていることが確認できた。また、変質が進みイライトの割合が増え、変質を経験しないイライトの結果に比べ、発生間隙水圧が大きくなる結果を得た。その差は、変質速度が遅いほど大きくなる結果を得た。図-7に示すように、変質により降伏応力が増加するため過圧密状態になり、さらに式(7)より変質に伴い体積変化が生じるため、図-15に示す有効応力経路を見ると、過圧密状態であるにもかかわらず有効応力が増加していることが分かる。初期からイライトの場合は、典型的な正規圧密状態の有効応力経路を示している。しかし、変質速度が遅くなると、せん断中に有効応力経路の挙動がイライトをせん断したときの挙動と同様になり、有効応力が減少していることが分かる。そのため、変質速度が遅いほど間隙水圧が上昇するのは、正規圧密状態になることで有効応力が減少することが原因であると考えられる。さらにこのとき、破壊時の強度が小さくなるため、図-16に

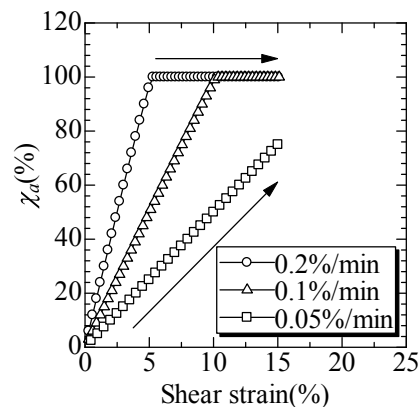


図-13 変質スピード

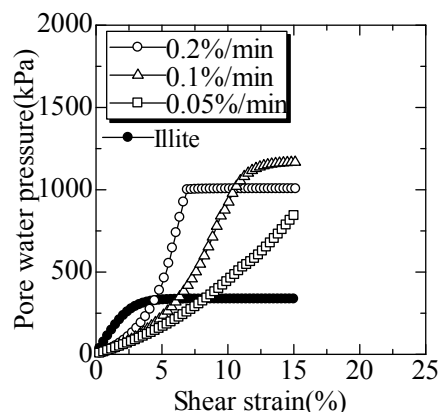


図-14 間隙水圧変化

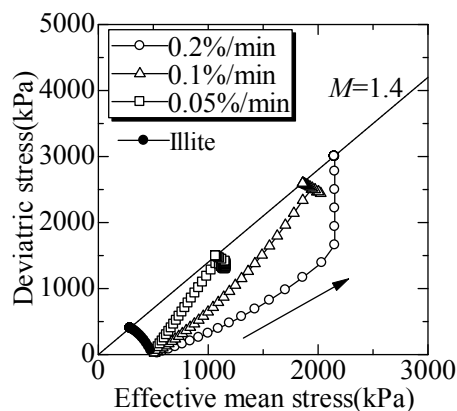


図-15 応力経路

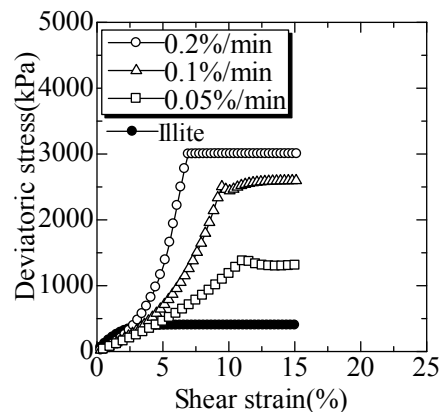


図-16 強度変化

示すように、変質速度が遅いほど、強度が小さくなる結果を得た。また、スメクタイトからイライトに変質させながらせん断した結果と、初期からイライトの状態でせん断した結果を比較すると、変質させた場合の強度が最大で約6倍大きくなっていることが分かる。

このように、変質を考慮した場合としていない場合で、最終的に同じ粘土鉱物であるにも関わらず異なる強度を得ることが分かった。また、変質スピードが強度にかなり影響を与えることから、変質率を支配する引数について調べ、変質スピードを支配する式の提案を行うことが必要であるといえる。

4. 地震説の妥当性の検討

南海トラフのデコルマ帯は、東西500km以上に発達しており、その厚さは20m程度であると言われている¹⁵⁾。変質が生じる温度領域は60～150℃の温度領域であり、

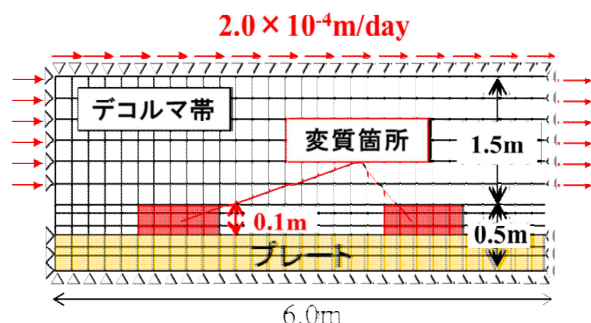


図-17 解析領域
表-2 材料パラメータ

λ	κ_{sme}	κ_{ill}	M	ν'
0.14	0.14	0.05	1.4	0.312
a	e_0	k_v (Smectite)	k_v (Plate)	$d\chi_a$
10	1.0	3.6×10^{-5}	0.6	0.01

k_w (m/day) : 透水係数

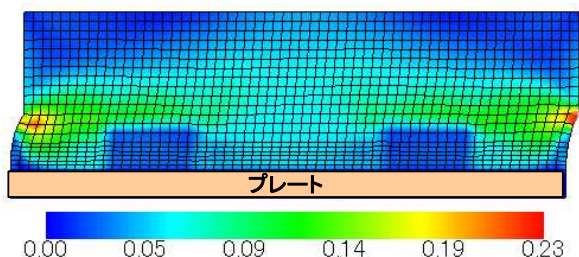


図-18 せん断ひずみ分布

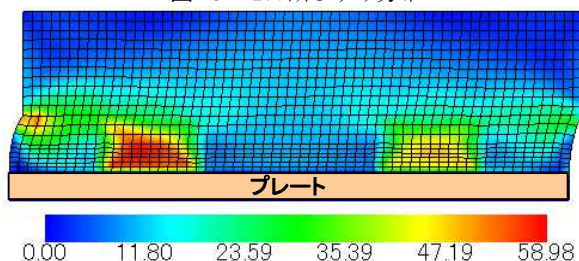


図-19 強度分布

デコルマ帯全体が全て変質するとは考え難い。そこで、平面ひずみ条件のもと、図-17に示すように横6.0m×高さ2.0mの解析領域を想定した。メッシュは0.20m×0.20mの正方形とし、下端面から高さ0.50mまでは、横0.20m×高さ0.10mとした。変質箇所は高さ0.40m～0.50mの間にある図中の赤色で示す2か所（幅1.0m）に設け、初期変質率0%から、1%/yearで変質率が100%になるまで徐々に変質させる。変位境界については、下端面から高さ0.30mまでの要素（プレート部分）を水平・鉛直方向とも固定、高さ0.30mより上方の要素（デコルマ帯）を鉛直方向固定としている。また、解析領域全面を非排水境界としている。変質しない箇所は全てスメクタイトとしている。解析で使用した材料パラメータを表-2に示す。スメクタイトは透水性が非常に低いため、透水係数を低く設定した。また、デコルマ帯の層準や間隙水圧の推定値から^{16) 17) 18)}、初期有効応力610.0kPaとし、初期正規圧密状態とした。実際はプレートが運動しているが、ここではプレート部分を固定し、デコルマ帯は沈み込みに伴い反力を受けることを想定して、デコルマ帯に図-17中の赤矢印で示す箇所に強制変位を与えせん断した。南海トラフに位置するプレート沈み込み平均速度が4cm/yearであり、速いところでは8cm/yearで沈み込むところがあることが分かっている。本論文では7cm/yearで変位を与えた。また、本解析では簡単のため陽解法を用いており、計算刻みを十分に小さくするように留意した。

図-18、図-19に、x軸方向にひずみ約25%となるまでせん断した時のせん断ひずみ分布と強度分布をそれぞれ示す。図-18より、変質箇所が周辺と比較してせん断ひずみが小さいことが分かる。この結果から、変質により剛性が増加し、せん断変形が生じにくくなると考えられる。すなわち、デコルマ帯で変質が生じることで、変質箇所が硬化し、固着域となる可能性があるといえる。さらに、図-19より、変質箇所の強度が増加していることが分かる。強度が増加し、さらにそこが固着域となっていることから、この変質箇所ではひずみエネルギーが蓄積されるといえる。これらのことから、地震発生時に蓄積されたひずみエネルギーが解放されることでデコルマ帯の固着域（変質した箇所）が一気に滑る、すなわち地震性すべりを生じるのではないかと考えられる。

5. 結論

デコルマ帯で生じている現象を土/水連成の力学体系に組み込むことで、デコルマ帯が変質を生じながらプレート沈み込みによるせん断力を受けるときの力学挙動について検討した。その結果、スメクタイトに比べ、イライト化を経験する場合の方がせん断強度が大きくなる結果を得た。また、構築したモデルを用いて近年の地震説の妥当性について検討したところ、変質箇所が固着域となり、さらにその部分の強度が増加することが分かった。このことから、変質により固着域が生じ、そこでひずみエネルギーが蓄積されることが分かった。このことから、本来非地震性すべり領域であるプレート境界浅部が、鉦

物の変質により固着域となり、地震発生時に固着域で蓄積されたエネルギーが解放されることで地震性すべりを生じる可能性があるといえる。このようなプレート境界浅部の滑りは巨大津波の発生に繋がる。そのため、デコルマ帯での固着して滑るメカニズムの解明が必要である。本論文で、デコルマ帯で固着域が生じる可能性までは検討できたが、変質による脱水や密度変化についてはまだ考慮できていない。また、デコルマ帯でのプレート沈み込みによるせん断シミュレーションの解析条件も正確な条件であるとは言えない。そのため、今度は変質による脱水や密度変化をモデルに組み込み、デコルマ帯の応力条件や変質速度について文献調査を行い、より実現象に近い挙動を予測し、デコルマ帯で生じている固着して滑るメカニズムの解明に寄与したいと考えている。

参考文献

- 1) Christopher H. Scholz, Earthquakes and friction laws, *Nature*, Vol.391, pp.37-42, doi:10.1038/34097, 1998.
- 2) Bilek, S.L. and T. Lay, Tsunami earthquakes possibly widespread manifestations of frictional conditional stability, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.29, No.14, 1673, doi:10.1029/2002GL015215, 2002.
- 3) Sakaguchi, Seismic slip propagation to the updip end of plate boundary subduction interface faults: Vitrinite reflectance geothermometry on Integrated Ocean Drilling Program NanTio SEIZE cores, *Geology*, Vol.39, pp.395-398, doi: 10.1130/G31642.1, 2011
- 4) Frederick M. Chester, Christie Rowe, Kohtaro Ujiie, James Kirkpatrick, Christine Regalla, Francesca Remitti, J. Casey Moore, Virginia Toy, Monica Wolfson-Schwehr, Santanu Bose, Jun Kameda, James J. Mori, Emily E. Brodsky, Nobuhisa Eguchi, Sean Toczko, Structure and Composition of the Plate-Boundary Slip Zone for the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, Vol.342, No.6163, pp.1208-1211, 2013.
- 5) Kopf, A., Brown, K.M., Friction experiments on saturated sediments and their implications for the stress state of the Nankai and Barbados subduction thrusts, *Marine Geology*, Vol.202, pp.193-210, doi:10.1016/S0025-3227(03)00286-X, 2013.
- 6) Mulder, K.T., Rogers, G.C., and Hyndman, R.D.: Case for very low coupling stress on the Cascadia subduction thrust fault, *JGeophys.Res.*, Vol.100, No. 12, pp.907-918, 1995.
- 7) 伊藤久男: 超深度ボーリング JUDGE 計画, 放射性廃棄物研究, Vol.3, No.1, 1996.
- 8) 高山裕介: ベントナイトの力学モデルと放射性廃棄物地層処分における緩衝材としての品質管理, 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻博士論文, p.23-46, 2014
- 9) Kobayashi, I., Owada, H. & Ishii, T. Hydraulic / Mechanical modeling of smectitic materials for HMC analytical evaluation of the long term performance of TRU geological repository. Proceedings of the 14th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM2011-59090, France, 2011.
- 10) Sasakura, T., Kuroyanagi, M., Kobayashi, I., Okamoto, M., Studies on mechanical behavior of bentonite for development of the constitutive model II, Document Prepared by Other Institute, Based on the Contract, JNC TJ8400 2003-048, 2003.
- 11) Shibata, T., On the volume changes of normally consolidated clays, Disaster Prevention Research Institute Annuals, Kyoto University, Vol.6, pp.128-134, 1963.
- 12) Schofield, A.N. and Wroth, C.P., Critical state soil mechanics, Mc Graw-Hill, New York, 1968.
- 13) Olson, R. E. and Mitronovas, F., Shear strength and consolidation characteristics of calcium and magnesium illite, *Proc. 9th Nat. Conf. on Clays and Clay Minerals*, 185-209, 1962.
- 14) Oohashi, Dynamic weakening of smectite-bearing faults at intermediate velocities: Implications for subduction zone earthquakes, *Geophys. Res. Solid Earth*, 120, doi: 10.1002/2015JB011881, 2015.
- 15) 久保達郎, 片山郁夫: スメクタイト及びビライトの摩擦挙動の温度効果: 沈み込み帯での地震発生帯の上限としての可能性, Japan Geoscience Union, 2014.
- 16) Moore, J. C. and Tobin, H. J. (1997), Estimated fluid pressures of the Barbados accretionary prism and adjacent sediments. Proc. ODP, Sci. Results, 156, 229-238.
- 17) Kimura, G., Kitamura, Y., Hashimoto, Y., Yamaguchi, A., Shibata, T., Ujiie, K. and Okamoto, S. (1997), Proc. ODP, Init. Repts., 170, Cplge station TX (Ocean Drilling Program), doi: 10.2973/odp.proc.ir.170.1997.
- 18) Morris, J. D., Villinger, H. W., Klaus, A., et al. (2003), Proc. ODP, Init. Repts., 205, Cplge station TX (Ocean Drilling Program), doi: 10.2973/odp.proc.ir.205.2003.

(2015.6.23 受付)

MODELING OF SHEAR FAILURE OF THE PLATE BOUNDARY DECOLLEMENT ZONE

Yuri SUGIYAMA, Kenji EBISU, Atsushi IIZUKA,
Katsuyuki KAWAI, Yosuke SASAKI

Smectite to illite transformation is assumed to be one of the factors that causes earthquakes. Interpretation of the mechanical behavior considering smectite to illite transformation is needed in the study of earthquake. It has been reported that asperity which is a slight projection from surface of the plates existed in decollement zone, and the area existing asperity is known as an earthquake occurrence area. However, the mechanism of decollement formation and mechanical behavior has not been studied rigorously.

Therefore, the purpose of this study is to challenge to this unsolved problem from the point of view of geotechnology. As the first step, the influence of dehydrating action due to smectite to illite transformation and mechanical characteristic change is modeled. Consequently, it is found that smectite to illite transformation causes increasing in share strength and hence, it is thought that this mechanism would be a major factor to cause gigantic earthquake because the energy release of deformation is estimated to be a quite large volume.