

博士論文（要約）

沈み込み帯における

浅部プレート境界断層の変形過程と強度空間分布

(Deformation process and strength distribution of shallow
plate boundary fault in subduction zone)

高下 裕章

論文要旨

地震は地震動が直接与える災害に加え、津波を引き起こすことで広範囲の地域に対し甚大な被害をもたらす。特に大きな被害を及ぼすのがプレート沈み込み帯の巨大地震である。モーメントマグニチュード M_w 8.0 を超えるような巨大地震の 9 割は沈み込み帯で発生することが知られている。日本においても巨大地震が南海トラフや日本海溝で繰り返し発生し、津波を伴うことで海岸沿いの地域に対し大きな被害をもたらしてきた。

プレート沈み込み帯では、沈み込みに伴いプレート境界面が固着している領域で歪が蓄積され、それが一気にずれて歪を解放、境界面が滑ることで地震が発生する。そのため、固着が強い地震発生帯と呼ばれる深部領域が、沈み込み帯の中では主な研究対象であった。一方、固着が弱く非地震性の定常すべり領域と考えられてきた浅部領域は、歪を多く蓄積せず、巨大なすべりを一度に開放することがないとされてきたため、これまで注目される機会が少なかった。

しかし近年の観測・研究結果から、この浅部プレート境界断層領域は防災上重要な研究の新領域として注目されている。まず、浅部プレート境界断層でも巨大地震時には巨大なすべりを伴うことが明らかになってきた。2011 年の東北地方太平洋沖地震ではプレート境界断層の破壊が海底にまで到達したことが初めて観測され、津波を通常より巨大化させたと考えられている。また、2000 年代以降の測地・地震波観測の高精度化に伴い「スロー地震」と呼ばれる新たな地震現象が発見されており、この地震現象は浅部プレート境界断層領域でも発見・観測されている。スロー地震は、揺れを伴わず通常地震より継続時間が長い破壊が進行する地震と定義されるが、そのスロー地震は巨大地震震源の周辺で発生し、応力状態を変化させるため、研究は途上ではあるがプレート境界断層上で巨大地震の震源域における断層破壊と深く関連していることが示唆されている。

本研究では、上述のようにほとんど注目されてこなかった浅部プレート境界断層に関して、特にその時空間変化を捉えることを目的とし以下の 2 つの研究を行った。研究テーマ 1：日本海溝を対象に東北地方太平洋沖地震において浅部プレート境界断層領域がどのような動的変形を辿ったかを明らかにする。研究テーマ 2：浅部プレート境界断層の摩擦係数の詳細な分布を明らかにするために、これまで用いられてきた手法を改善し、新たな解析手法の開発に取り組む。

研究テーマ 1「浅部プレート境界断層の変形過程の解明」

2011 年の東北地方太平洋沖地震では地震前の観測データが存在しており、地震直後の観測結果と比べると、海溝軸付近で最大約 60 m の巨大な変位が地震時に発生したことが明らかになり、浅部プレート境界断層の破壊に関する初の観測事例となった。この地震に伴って発生した巨大な津波は、東北地方沿岸部の広い地域に甚大な被害をもたらすこととなった。

しかしながらこの最も巨大な地震時すべりを起こした領域が、地震時にどのような変形を辿って破壊されたのかということは十分に明らかになっていない。先行研究の問題点としては以下の 3 つが挙げられる。1) 一般的に日本海溝には地塁・地溝構造という凹凸構造が発達

した海洋プレートが沈み込んでいるが、この最大すべり領域においては凹構造である半地溝構造が沈み込んでいる。これまで凸地形の沈み込み（海山やリッジなど）により地震が巨大化するということが示唆されていたため、その動的変形モデルの研究が進展しているのに対し、凹地形の沈み込みはその逆の現象が発生すると推測され、ほぼ無視されてきた。そのため、第一に本領域における凹地形の沈み込みのメカニズム自体が未解明である。2) 地震前後の観測から海底面付近の浅部領域においてプレート境界断層の破壊が発生したことが確かめられているが、観測結果は観測時点でのスナップショットにすぎず、その間をつなぐシームレスな動的変形について議論することは困難である。そのため実際に地震時に動いた断層の特定を難しくしている。3) 地震直後の国際深海科学掘削計画 Expedition 343/343T において 5~15 m の主断層部、また主断層の直上に 100 m もの厚い変形帯が存在していることが確かめられている。掘削地点は海溝軸から 3.2 km 程度の水平距離であるが、このような厚い変形帯を作るメカニズムは分かっていない。

そこで、本研究では半地溝構造の沈み込みを再現したアナログモデル実験を実施した。本実験によって動的変形を把握し、凹地形の沈み込みの影響の評価と変形メカニズムの理解を目指す。アナログモデル実験ではデジタル画像相関法（DIC）を併用し、断層運動を可視化、内部の変形の定量化を行った。本研究を通じた実験において、以下のように 4 つの結論が得られた。1) 半地溝構造の沈み込みはウェッジ（楔型地質体）を圧縮させる効果を持つ。2) 海溝充填堆積物が少なかったことが大きなすべりの要因の 1 つであった可能性が高い。これら 2 つの結論は、これまで先行研究を通じて得られていなかった凹地形沈み込みの効果に対し、新たな知見をもたらした。3) 凹部底面への断層の伸展は、円弧すべりを原因とするものではなく、斜面全体が押し出される変形を原因とするものであることが明らかになった。これによりプレート境界断層浅部領域の動的な破壊モデルが決定された。4) これまで報告例のない新たな断層運動である **Fault dancing** を発見した。この運動によって日本海溝の主断層部上部に存在する約 100 m の厚い変形帯が形成された可能性が高い。さらに従来の研究で、断層の厚さから断層が放出するエネルギーの推定が行われていたが、この断層運動を無視した場合ではエネルギーが過大評価される可能性を示した。

研究テーマ 2「地形解析によるアプローチ: Critical taper model の改善」

沈み込み帯や造山帯のように側方からの圧縮により衝上断層が卓越し、短縮変形を受けた地質体を総称して **Fold-and-thrust belt** と呼ぶ。**Critical taper model** は **fold-and-thrust belt** の断層強度を知るために広く用いられてきた。沈み込み帯に対してこの **Critical taper model** を適用した場合、単純な地形パラメータを用いて主にプレート境界断層における摩擦係数の推定が可能である。そのため、**Critical taper model** は地震に関連する研究分野で広く用いられてきた。ただし、**Critical taper model** では、計算に用いる地形データを取得する際、以下のような 2 つの問題点が指摘できる。1) 反射法地震探査断面のデータが必要であるため、観測記録のある断面以外に **Critical taper model** の適用ができない。2) 反射法地震探査データを用いた深度断面処理において、プレート境界断層の深度が速度モデルに大きく依存し、プレート境界断層の傾斜角 β の値に影響を与える。そのため正確な比較という点に関して信頼性が低い。

そこで本研究は上述の問題点を改善するため、**Critical taper model** に用いるパラメータを反射法地震探査断面ではなく、水深測量データからのみ得る新たな手法の開発を行った。反射法地震探査断面から得られるプレート境界断層の傾斜角 β の代わりに、プレートが沈み込む前の海溝海側斜面の傾斜角 $\beta_{\text{bathymetry}}$ を使用し、その計算結果から手法の妥当性の検証を行った。本研究では、南海トラフを対象領域として手法の妥当性の検証を行った。南海トラフでは海溝型巨大地震の基礎研究の重要性から反射法地震探査断面が多く取得されており、従来の **Critical taper model** と本研究で新たに行う手法との比較が行い易いこと。地震波や GPS など、様々な研究手法による観測が進んでいることから、その比較対象とするべき先行研究が豊富であることが理由である。

本手法の妥当性の検証結果から、海底下の沈み込み帯に **Critical taper model** を適用する場合、理論的に見過ごされてきた性質があることが明らかになった。その性質とは、高い間隙水圧比がウェッジ全体で仮定される場合、有効摩擦係数の算出に際し β が結果に与える影響が非常に小さくなることである。そのため、水深測量データにおける海溝陸側斜面 α のみを用いて浅部プレート境界断層の摩擦分布を議論することが十分可能であることが示唆された。ただしその際、有効摩擦係数の算出誤差が 20 パーセント程度生じる点は注意が必要である。

水深測量データは空間的に密に取得されたデータであるため、これにより海溝軸に沿った高密度な浅部プレート境界断層の摩擦分布を初めて算出することが可能となった。南海トラフにおいて高密度な海溝軸沿いの摩擦分布データから、摩擦が著しく低く算出された領域がこれまでの地震観測によって議論されてきたセグメント境界やスロー地震と関連していることが示唆された。また、日本海溝においても海溝軸に沿った高密度な摩擦分布を議論した。結果として α はヒストグラムから 2 つのピークを持つことを示し、低い α の領域が東北地方太平洋沖地震における滑り分布と、また高い α の領域が明治三陸地震の震源域と対応している様子が見られた。

以上から、本手法は反射法地震探査断面が十分に取得されていない海域や、地震活動によるセグメントが十分に検討されていない領域において、地震・津波防災に関して資する新たな手法だと考えられる。

目次

第 1 章 はじめに	1
1.1 研究背景 -----	1
1.2 研究目的 -----	2
第 2 章 浅部プレート境界断層の変形過程の解明	3
2.1 はじめに -----	3
2.2 日本海溝の地質概要-----	3
2.3 日本海溝の地形概要-----	3
2.4 2011 年東北地方太平洋沖地震 -----	3
2.4.1 地震前後における水深測量データの比較 -----	3
2.4.2 海底観察-----	3
2.4.3 地震前後の探査断面の比較 -----	3
2.4.4 国際深海科学掘削計画 Expedition 343/343T の調査結果-----	3
2.5 凹地形沈み込みに対するこれまでの理解 -----	3
2.6 先行研究における問題点・本研究の目的 -----	3
2.7 研究手法：砂を用いたアナログモデル実験およびデジタル画像相関法-----	3
2.7.1 アナログモデル実験-----	3
2.7.2 デジタル画像相関法（Digital Image Correlation; DIC） -----	3
2.7.3 実験装置とその特徴-----	3
2.7.4 実験材料とスケール-----	3
2.7.5 実験条件-----	3
2.7.6 解析結果の出力形式-----	3
2.8 結果-----	3
2.8.1 EXP1: Flat basement -----	3
2.8.2 EXP2: Half-graben basement without trench-fill-----	3
2.8.3 EXP3: Half-graben basement with trench-fill -----	3
2.9 議論 -----	3
2.9.1 半地溝構造の沈み込みと先端部の圧縮変形 -----	3
2.9.2 すべりの規模と海溝充填堆積物の関係 -----	3
2.9.3 凹部底面への断層の伸展＝斜面全体が押し出される断層形成 -----	3
2.9.4 Fault dancing -----	3
2.9.4.1 動的過程に関して	3
2.9.4.2 短時間・小変位で厚い剪断帯を形成	3
2.9.4.3 Fault dancing の発生要因	3
2.9.4.4 日本海溝におけるプレート境界断層部の構造の解釈	3

2.10	各実験条件と地質の関連付け-----	3
2.11	まとめ -----	3
第 3 章	地形解析によるアプローチ:Critical taper model の改善	4
3.1	はじめに -----	4
3.2	Critical taper model -----	4
3.2.1	Critical taper model とは -----	4
3.2.2	Critical taper model の導入 -----	4
3.2.3	同モデルの研究事例 1：沈み込み帯の比較 -----	4
3.2.4	同モデルの研究事例 2：単一の沈み込み帯内におけるプレート境界断層の強度空間分布に関する研究-----	4
3.2.5	同モデルの研究事例 3：動的解釈、間隙水圧の考察-----	4
3.2.6	従来の Critical taper model の持つ問題点・改善案 -----	4
3.2.7	本研究で使用する計算手法 -----	4
3.3	地質概要：南海トラフ -----	4
3.4	使用したデータ -----	4
3.4.1	反射法地震探査断面-----	4
3.4.2	水深測量データ-----	4
3.4.3	データ取得における留意点 -----	4
3.5	結果-----	4
3.5.1	Taper angle の分布 -----	4
3.5.2	プレート境界断層の摩擦係数の分布 -----	4
3.5.3	計算結果の一覧-----	4
3.6	議論-----	4
3.6.1	Critical taper model の理論的盲点 -----	4
3.6.2	データの解釈：南海トラフ -----	4
3.6.2.1	β_{PSDM} と $\beta_{\text{bathymetry}}$ の差の評価	4
3.6.2.1	有効摩擦係数の分布と地震セグメントとの対応	4
3.6.3	日本海溝への適応例-----	4
3.7	結論-----	4
第 4 章	総合考察	5
	参考文献	6
	謝辞	14

第1章 はじめに

1.1 研究背景

地震は地震動が直接与える災害に加え、津波を引き起こすことで広範囲の地域に対し甚大な被害をもたらす。特に大きな被害を及ぼすのがプレート沈み込み帯の巨大地震である。モーメントマグニチュード M_w 8.0 を超えるような巨大地震の 9 割は沈み込み帯で発生することが知られている (Thatcher, 1990)。日本においても巨大地震が繰り返し南海トラフ (Ando, 1975) や日本海溝 (Tanioka et al., 1997) で発生し、津波を伴うことで海岸沿いの地域に対し大きな被害をもたらしてきた。プレート沈み込み帯では、沈み込みに伴いプレート境界面が固着している領域で歪が蓄積され、それが一気にずれて歪を解放、境界面が滑ることで地震が発生する。そのため、沈み込み帯においてはプレート境界断層でも固着が強い地震発生帯 (Hyndman et al., 2007) と呼ばれる深部領域が主な研究対象であった (図 1)。一方、固着が弱く非地震性の定常すべり領域と考えられてきた浅部領域は、歪を多く蓄積せず、巨大なすべりを一度に開放することがないとされてきたため、これまで注目される機会が少なかった (Scholz, 1998; Bilek and Lay, 2002; Currie et al., 2002)。しかし近年の観測・研究結果から、この浅部プレート境界断層領域は防災上重要な研究の新領域として注目されている。

まず、浅部プレート境界断層でも巨大地震時には巨大なすべりを伴うことが明らかになってきた。例えば、2004 年のスマトラ島沖地震では浅部領域にまで断層破壊が到達し、津波を巨大化させたと推測されていた (Subarya et al., 2006)。ただしこの地震では、地震前のデータが乏しく、地震前後の比較ができなかったために浅部領域の破壊の確証が得られていなかった。しかし、2011 年の東北地方太平洋沖地震ではプレート境界断層の破壊が海底にまで到達したことが初めて実際に観測され (Fujiwara et al., 2011; Kodaira et al., 2012; Sun et al., 2017)、この変位が津波を通常より巨大化させたと考えられている (図 2)。

また、2000 年代以降の測地・地震波観測の高精度化に伴い「スロー地震」と呼ばれる新たな地震現象が発見されており、この地震現象は浅部プレート境界断層領域でも発見・観測されている (Obara, 2002; Okada et al., 2004; Ito et al., 2007)。スロー地震は、揺れを伴わず通常の地震より継続時間が長い破壊が進行する地震と定義される (Schwartz and Rokosky, 2007)。スロー地震は巨大地震震源の周辺で発生し、応力状態を変化させるため、研究は途上ではあるがプレート境界断層上で巨大地震の震源域における断層破壊と深く関連していることが示唆されている (Obara et al., 2016)。

このように新しい研究領域である浅部プレート境界断層に関連した研究の進展は地震災害軽減につながる。

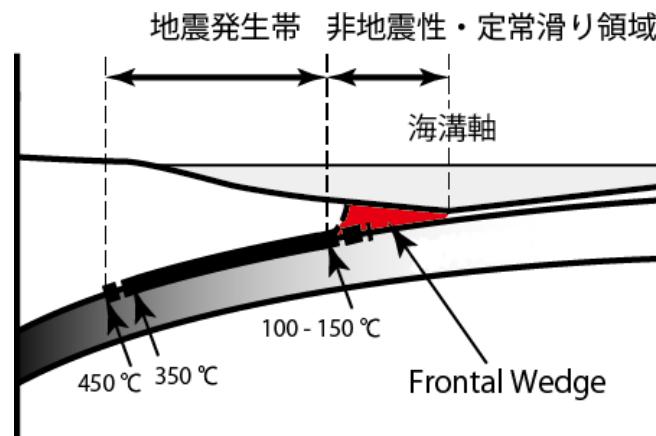


図1 日本海溝を例とした沈み込み帯の概略図。赤が本研究における対象領域。Bilek and Lay (2002)、Currie et al. (2002)、Miura et al. (2005) を改変。

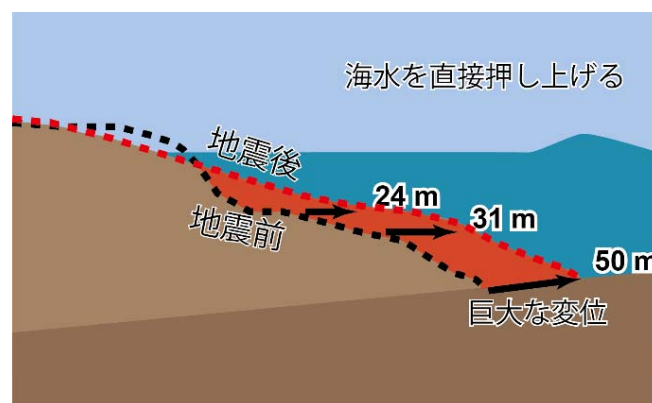


図2 2011年東北地方太平洋沖地震の地震時における変形模式図。JAMSTEC ホームページ (http://www.jamstec.go.jp/j/kids/press_release/20131206/) を改変。

1.2 研究目的

本研究ではほとんど注目されてこなかった浅部プレート境界断層に関して、特にその時空間変化を捉えることを目的とし、以下の2つの研究を行った。研究テーマ1：日本海溝を対象に東北地方太平洋沖地震で浅部プレート境界断層領域がどのような動的変形を辿ったかを明らかにする。研究テーマ2：なぜ特定の領域で巨大な地震時すべりが発生したのかを明らかにする。

第2章 浅部プレート境界断層の変形過程の解明

本博士論文中、2 章および 3 章は、掲載等の形で刊行される予定であるため、学位授与日から 5 年間（最長 5 年）インターネットでの公表をすることができません。

第3章

地形解析によるアプローチ:Critical taper model の改善

本博士論文中、2 章および 3 章は、掲載等の形で刊行される予定であるため、学位授与日から 5 年間（最長 5 年）インターネットでの公表をすることができません。

第4章 総合考察と今後の課題

2 章および 3 章で用いたアナログモデル実験と Critical taper model は沈み込み帯を含む Fold-and-thrust belt の古典的モデルとされる（斎藤ら, 2010）。Fold-and-thrust belt は大地形を用いてその断層強度や形態を Critical taper model で理解し、さらにアナログモデル実験を用いてその形成モデルを考察する。そのため両者は併用して解釈されることが多い。例として、本研究で引用した DIC 解析を併用した Adam et al. (2005) と、アルプス造山運動の解釈に Critical taper model を用いた Adam and Reuther (2000) の筆頭著者は同一人物である。

本研究ではこのような古典的モデルに対し、砂箱実験では変形したプレートの沈み込みと DIC 解析を組み合わせることで、また Critical taper model は理論的改善を実施するところで、新たな知見を示し、古典と呼ばれる手法に関してもまだ十分発展余地があることを示した。

さらに本研究の 2 章、3 章はそれぞれ博士前期課程時の研究内容（Koge et al., 2014）で生まれた新たな疑問に対する回答になっている。沈み込み地形の凹凸がプレート境界断層の摩擦分布に関連していることが最終的に同論文では結論づけられていたが、この論文では（1）地形の凹凸がどのようにプレート境界断層に影響を与えているか、また（2）空間的に日本海溝で 12 本の測線のみで摩擦係数のバリエーションを議論してよいのか、という新たな問題を内在していた。本博士論文では（1）に対し、アナログモデル実験を行うことで沈み込む凹凸地形がプレート境界断層の形成でどのような役割を果たすか、また（2）に対し、より海溝軸に沿った高密度な摩擦係数の分布を得る手法を新たに検討したことでその解答を得たと考えている。

本論文で残された課題として、Critical taper model における凹凸の扱いが挙げられる。2 章において沈み込む地形表面の凹凸がプレート境界断層に影響を与え、ウェッジ全体を圧縮させることが示された。一方で、Critical taper model は直線的なプレート境界断層で考えるために、このような凹凸を考慮することができない。そのため、実際に観測された沈み込み帯におけるウェッジの形状に対し、与える回答がプレート境界断層の摩擦係数が高い・低いという考察しか加えることができない。将来的には Critical taper model に凹凸項を組み込む必要があり、その凹凸による影響も加味したモデルの考案が必要と考えられる。

参考文献

Adam, J., Urai, J. L., Wieneke, B., Oncken, O., Pfeiffer, K., Kukowski, N., Lohrmann, J., Hoth S., Zee, WVD., Schmatz, J. (2005). Shear localisation and strain distribution during tectonic faulting—New insights from granular-flow experiments and high-resolution optical image correlation techniques. *Journal of Structural Geology*, 27(2), 283-301.

Adam, J., Reuther, CD. (2000). Crustal dynamics and active fault mechanics during subduction erosion. Application of frictional wedge analysis on to the North Chilean Forearc. *Tectonophysics*, 321(3), 297-325.

Ando, M. (1975). Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai Trough, Japan. *Tectonophysics*, 27(2), 119-140.

Argus, D. F., Gordon, RG., DeMets, C. (2011). Geologically current motion of 56 plates relative to the no - net - rotation reference frame. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(11).

Ashi, J., Taira, A. (1992). Structure of the Nankai accretionary prism as revealed from IZANAGI sidescan imagery and multichannel seismic reflection profiling. *Island Arc*, 1(1), 104-115.

栗田泰夫, 杉山雄一 (1989) 南海トラフ沿いの巨大地震に伴う右横ずれ逆断層構造. *地震 第 2 編*, 42(2), 231-233.

Bilek, SL., Lay, T. (2002). Tsunami earthquakes possibly widespread manifestations of frictional conditional stability. *Geophysical Research Letters*, 29(14).

Bose, S., Saha, P., Mori, JJ., Rowe, C., Ujiie, K., Chester, FM., Coninc, M., Regalla, C., Kameda, J., Toy, V., Kirkpatrick, J., Remitti, F., Moore, JC., Wolfson-Schwehr, M., Nakamura, Y., Gupta, A. (2015). Deformation structures in the frontal prism near the Japan Trench: Insights from sandbox models. *Journal of Geodynamics*, 89, 29-38.

Chester, FM., Rowe, C., Ujiie, K., Kirkpatrick, J., Regalla, C., Remitti, F., Moore, JC., Toy, V., Wolfson-Schwehr, M., Bose, S., Kameda, J., Mori, JJ., Brodsky, EE., Eguchi, N., Sean, T., Expedition 343 and 343T Scientists (2013). Structure and composition of the plate-boundary slip zone for the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Science*, 342(6163), 1208-1211.

Cobbold, PR., Durand, S., Mourgues, R. (2001). Sandbox modelling of thrust wedges with fluid-assisted detachments. *Tectonophysics*, 334(3-4), 245-258.

Currie, C. A., Hyndman, R. D., Wang, K., Kostoglodov, V. (2002). Thermal models of the Mexico subduction zone: Implications for the megathrust seismogenic zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B12).

Dahlen, FA. (1990). Critical taper model of fold-and-thrust belts and accretionary wedges.

Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 18(1), 55-99.

Dahlen, FA., Suppe, J., Davis, D. (1984). Mechanics of fold - and - thrust belts and accretionary wedges: Cohesive Coulomb theory. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B12), 10087-10101.

Dambara, T. (1971). Synthetic vertical movements in Japan during the recent 70 years. *J Geodetic Soc Japan*, 17(3):100-108.

Davis, D., Suppe, J., Dahlen, FA (1983). Mechanics of fold - and - thrust belts and accretionary wedges. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(B2), 1153-1172.

Davis, E., Kinoshita, M., Becker, K., Wang, K., Asano, Y., Ito, Y. (2013). Episodic deformation and inferred slow slip at the Nankai subduction zone during the first decade of CORK borehole pressure and VLFE monitoring. *Earth and Planetary Science Letters*, 368, 110-118.

DeMets, C., Gordon, RG., Argus, DF. (2010). Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181(1), 1-80.

Dietz, RS. (1954). Marine geology of northwestern Pacific: Description of Japanese bathymetric chart 6901. *Geological Society of America Bulletin*, 65(12), 1199-1224.

Dominguez, S., Lallemand, S., Malavieille, J., Schnürle, P. (1998). Oblique subduction of the Gagua Ridge beneath the Ryukyu accretionary wedge system: Insights from marine observations and sandbox experiments. *Marine Geophysical Researches*, 20(5), 383-402.

Dotare, T., Yamada, Y., Adam, J., Hori, T., Sakaguchi, H. (2016). Initiation of a thrust fault revealed by analog experiments. *Tectonophysics*, 684, 148-156.

Faccenna, C., Holt, AF, Becker, TW., Lallemand, S., Royden, L. H. (2017). Dynamics of the Ryukyu/Izu-Bonin-Marianas double subduction system. *Tectonophysics*.

Fagereng, Å. (2011). Wedge geometry, mechanical strength, and interseismic coupling of the Hikurangi subduction thrust, New Zealand. *Tectonophysics*, 507(1-4), 26-30.

Festa, A., Pini, G. A., Dilek, Y., Codegone, G. (2010). Mélanges and mélange-forming processes: a historical overview and new concepts. *International Geology Review*, 52(10-12), 1040-1105.

Fujii, Y., Satake, K., Sakai, S. I., Shinohara, M., Kanazawa, T. (2011). Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth, planets and space*, 63(7), 55.

Fujiwara, T., Kodaira, S., No, T., Kaiho, Y., Takahashi, N., Kaneda, Y. (2011). The 2011 Tohoku-Oki earthquake: Displacement reaching the trench axis. *Science*, 334(6060), 1240-1240.

Fulton, PM., Brodsky, EE., Kano, Y., Mori, J., Chester, F., Ishikawa, T., Toczko, S., Expedition 343, 343T and KR13-08 Scientists (2013). Low coseismic friction on the Tohoku-Oki fault determined from temperature measurements. *Science*, 342(6163), 1214-1217.

古村孝志 (2011) 東北地方太平洋沖地震の強震動と巨大津波の発生メカニズム, 安

全工学, 50.6: 354-359.

Garrett, E., Fujiwara, O., Garrett, P., Heyvaert, V. M., Shishikura, M., Yokoyama, Y., Hubert-Ferrari, A., Bruckner, H., Nakamura, A., De Batist, M., the QuakeRecNankai team (2016). A systematic review of geological evidence for Holocene earthquakes and tsunamis along the Nankai-Suruga Trough, Japan. *Earth-science reviews*, 159, 337-357.

Graveleau, F., Malavieille, J., Dominguez, S. (2012). Experimental modelling of orogenic wedges: A review. *Tectonophysics*, 538, 1-66.

Gray, GG., Morgan, JK., Sanz, PF. (2014). Overview of continuum and particle dynamics methods for mechanical modeling of contractional geologic structures. *Journal of Structural Geology*, 59, 19-36.

Gutscher, MA., Kukowski, N., Malavieille, J., Lallemand, S. (1996). Cyclical behavior of thrust wedges: Insights from high basal friction sandbox experiments. *Geology*, 24(2), 135-138.

Hirose, H., Asano, Y., Obara, K., Kimura, T., Matsuzawa, T., Tanaka, S., Maeda, T. (2010). Slow earthquakes linked along dip in the Nankai subduction zone. *Science*, 330(6010), 1502-1502.

Hubbert, M., Rubey, WW. (1959). Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting: I. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting. *Geological Society of America Bulletin*, 70(2), 115-166.

Hyndman, RD. (2007). The seismogenic zone of subduction thrust faults. *The seismogenic zone of subduction thrust faults*, 15-40.

Ide, S., Baltay, A., Beroza, GC. (2011). Shallow dynamic overshoot and energetic deep rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake. *Science*, 332(6036), 1426-1429.

Ikeda, Y. (2003) Contradiction of geodetic strain rate and geological strain rate. *Chikyū Mon*, 25(2):125-129.

Ito, Y., Obara, K., Shiomi, K., Sekine, S., Hirose, H. (2007). Slow earthquakes coincident with episodic tremors and slow slip events. *Science*, 315(5811), 503-506.

狩野謙一, 村田明広 (1998) 構造地質学, 朝倉書店

Kido, Y., Fujiwara, T. (2004). Regional variation of magnetization of oceanic crust subducting beneath the Nankai Trough. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(3).

Kim, YS., Sanderson, DJ. (2005). The relationship between displacement and length of faults: a review. *Earth-Science Reviews*, 68(3-4), 317-334.

Kimura, G., Hina, S., Hamada, Y., Kameda, J., Tsuji, T., Kinoshita, M., Yamaguchi, A. (2012). Runaway slip to the trench due to rupture of highly pressurized megathrust beneath the middle trench slope: The tsunamigenesis of the 2011 Tohoku earthquake off the east coast of northern Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 339, 32-45.

Kimura, G., Koge, H., Tsuji, T. (2018). Punctuated growth of an accretionary prism and the onset of a seismogenic megathrust in the Nankai Trough. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5(1), 78.

Kirkpatrick, JD., Rowe, CD., Ujiie, K., Moore, JC., Regalla, C., Remitti, F., Toy, V., Wolfson-Schwehr M., Kameda, J., Bose, S., Chester, FM. (2015). Structure and lithology of the Japan Trench subduction plate boundary fault. *Tectonics*, 34(1), 53-69.

Kishimoto, K. (1999). Combined bathymetric and topographic mesh data: Japan 250m.grd. GSJ Open - file Report No. 353. Geological Survey of Japan, Tsukuba.

Kodaira, S., Kurashimo, E., Park, JO., Takahashi, N., Nakanishi, A., Miura, S., Iwasaki, S., Hirata, K., Ito, Y., Kaneda, Y. (2002). Structural factors controlling the rupture process of a megathrust earthquake at the Nankai trough seismogenic zone. *Geophysical Journal International*, 149(3), 815-835.

Kodaira, S., No, T., Nakamura, Y., Fujiwara, T., Kaiho, Y., Miura, S., Takahashi, N., Taira, A. (2012). Coseismic fault rupture at the trench axis during the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Nature Geoscience*, 5(9), 646-650.

Koge, H., Fujiwara, T., Kodaira, S., Sasaki, T., Kameda, J., Kitamura, Y., Hamahashi, M., Fukuchi, R., Yamaguchi, A., Hamada, Y., Ashi, J., Kimura, G. (2014). Friction properties of the plate boundary megathrust beneath the frontal wedge near the Japan Trench: an inference from topographic variation. *Earth, Planets and Space*, 66(1), 153.

Koge, H., Yamada, Y., Ohde, A., Bauville, A., Yamaguchi, A., Ashi, J. (2018). Dynamic formation process of thick deformation zone on the shallow plate boundary fault of the Japan Trench: insight from analog experiments of half-graben subduction. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5(1), 69.

Kukowski, N., Oncken, O. (2006). Subduction Erosion—the “Normal” Mode of Fore-Arc Material Transfer along the Chilean Margin? In *The Andes* (pp. 217-236). Springer, Berlin, Heidelberg.

Kukowski, N., Greinert, J., Henrys, S. (2010). Morphometric and critical taper analysis of the Rock Garden region, Hikurangi Margin, New Zealand: Implications for slope stability and potential tsunami generation. *Marine Geology*, 272(1-4), 141-153.

Lallemand, SE., Malavieille, J., Calassou, S. (1992). Effects of oceanic ridge subduction on accretionary wedges: experimental modeling and marine observations. *Tectonics*, 11(6), 1301-1313.

Lallemand, SE., Schnürle, P., Malavieille, J. (1994). Coulomb theory applied to accretionary and nonaccretionary wedges: Possible causes for tectonic erosion and/or frontal accretion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B6), 12033-12055.

LaVision (2012) Product-Manual for Davis 8.0 StrainMaster. LaVision GmbH, Gottingen

Leggett, J., Aoki, Y., Toba, T. (1985). Transition from frontal accretion to underplating in a part of the Nankai Trough accretionary complex off Shikoku (SW Japan) and extensional features on the lower trench slope. *Marine and petroleum geology*, 2(2), 131-141.

Lehner, FK. (1986). Comments on "Noncohesive critical Coulomb wedges: An exact solution" by FA Dahlen. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B1), 793-796.

Lohrmann, J., Kukowski, N., Adam, J., Oncken, O. (2003). The impact of analogue material properties on the geometry, kinematics, and dynamics of convergent sand wedges. *Journal of Structural Geology*, 25(10), 1691-1711.

Mann, U., Müller, G., (1980). Composition of sediments of the Japan Trench transect, Leg 56 and 57, Deep Sea Drilling Project, in Initial reports of the Deep Sea Drilling Project, Volumes 56, 57: Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, p. 939-977, doi:10.2973/dsdp.proc.5657.133.

McClay, KR., Buchanan, PG. (1992). Thrust faults in inverted extensional basins. In *Thrust tectonics* (pp. 93-104). Springer, Dordrecht.

Miura, S., Takahashi, N., Nakanishi, A., Tsuru, T., Kodaira, S., Kaneda, Y. (2005). Structural characteristics off Miyagi forearc region, the Japan Trench seismogenic zone, deduced from a wide-angle reflection and refraction study. *Tectonophysics*, 407(3-4), 165-188.

Moeremans, R., Singh, S. C., Mukti, M., McArdle, J., Johansen, K. (2014). Seismic images of structural variations along the deformation front of the Andaman–Sumatra subduction zone: implications for rupture propagation and tsunamigenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 386, 75-85.

Moore, GF, Shipley, TH., Stoffa, PL., Karig, DE., Taira, A., Kuramoto, S., Tokuuyama, H., Suyehiro, K. (1990). Structure of the Nankai Trough accretionary zone from multichannel seismic reflection data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B6), 8753-8765.

Moore, GF, Bangs, NL., Taira, A., Kuramoto, S., Pangborn, E., Tobin, HJ. (2007). Three-dimensional splay fault geometry and implications for tsunami generation. *Science*, 318(5853), 1128-1131.

Morgan, JK., Bangs, NL. (2017). Recognizing seamount-forearc collisions at accretionary margins: Insights from discrete numerical simulations. *Geology*, 45(7), 635-638.

Nakamura, Y., Kodaira, S., Miura, S., Regalla, C., Takahashi, N. (2013). High - resolution seismic imaging in the Japan Trench axis area off Miyagi, northeastern Japan. *Geophysical Research Letters*, 40(9), 1713-1718.

Nakanishi, A., Takahashi, N., Park, JO., Miura, S., Kodaira, S., Kaneda, Y., Hirata, N., Iwasaki, T., Nakamura, M. (2002). Crustal structure across the coseismic rupture zone of the 1944 Tonankai earthquake, the central Nankai Trough seismogenic zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B1), EPM-2.

Nakanishi, M., Tamaki, K., Kobayashi, K. (1989). Mesozoic magnetic anomaly lineations and seafloor spreading history of the northwestern Pacific. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B11), 15437-15462.

Nakano, M., Hori, T., Araki, E., Kodaira, S., Ide, S. (2018). Shallow very-low-frequency earthquakes accompany slow slip events in the Nankai subduction zone. *Nature communications*, 9(1), 984.

Nishikawa, T., Ide, S. (2014). Earthquake size distribution in subduction zones linked to slab buoyancy. *Nature Geoscience*, 7(12), 904.

Obara, K. (2002). Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan. *Science*, 296(5573), 1679-1681.

Obara, K., Kato, A. (2016). Connecting slow earthquakes to huge earthquakes. *Science*, 353(6296), 253-257.

Okada, Y., Kasahara, K., Hori, S., Obara, K., Sekiguchi, S., Fujiwara, H., Yamamoto, A. (2004). Recent progress of seismic observation networks in Japan—Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net—. *Earth, Planets and Space*, 56(8), xv-xxviii.

Park, J.O., Moore, G.F., Tsuru, T., Kodaira, S., Kaneda, Y. (2004). A subducted oceanic ridge influencing the Nankai megathrust earthquake rupture. *Earth and Planetary Science Letters*, 217(1-2), 77-84.

Park, J.O., Tsuru, T., Kaneda, Y., Kono, Y., Kodaira, S., Takahashi, N., Kinoshita, H. (1999). A subducting seamount beneath the Nankai accretionary prism off Shikoku, southwestern Japan. *Geophysical Research Letters*, 26(7), 931-934.

Park, J.O., Tsuru, T., Kodaira, S., Cummins, P.R., Kaneda, Y. (2002). Splay fault branching along the Nankai subduction zone. *Science*, 297(5584), 1157-1160.

Park, J. O., Moore, G. F., Tsuru, T., Kodaira, S., Kaneda, Y. (2004). A subducted oceanic ridge influencing the Nankai megathrust earthquake rupture. *Earth and Planetary Science Letters*, 217(1-2), 77-84.

Saffer, D.M., Tobin, H.J. (2011). Hydrogeology and mechanics of subduction zone forearcs: Fluid flow and pore pressure. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39, 157-186.

斎藤実篤, 木村学, 堀高峰 (2010) 付加体の理論と地震発生, 付加体と巨大地震発生帯, 東京大学出版会, 木村学, 木下正高 編

Sasaki, T., Tamaki, K. (2005). Seafloor morphology of the frontal part of the trench landward slope in the Japan Trench and proceedings of the subduction erosion off Miyagi. *Earth Mon*, 51: 125-129.

Scholz, C. H. (1998). Earthquakes and friction laws. *Nature*, 391(6662), 37.

Scholz, C.H., Small, C. (1997). The effect of seamount subduction on seismic coupling. *Geology*, 25(6), 487-490.

Schreurs, G., Hänni, R., Panien, M., Vock, P. (2003). Analysis of analogue models by helical X-ray computed tomography. Geological Society, London, Special Publications, 215(1), 213-223.

Schwartz, SY., Rokosky, JM. (2007). Slow slip events and seismic tremor at circum - Pacific subduction zones. Reviews of Geophysics, 45(3).

白石和也, 山田泰広, 松岡俊文 (2007) アナログモデル実験で再現された付加体構造に対する反射法地震探査記録の合成. 石油技術協会誌, 72(3), 279-289.

Strasser, M., Kölling, M., Ferreira, CDS., Fink, HG., Fujiwara, T., Henkel, S., Ikehara, K., Kanamatsu, T., Kawamura, K., Kodaira, S., Römer, M., Wefer, G., R/V Sonne Cruise SO219A, JAMSTEC Cruise MR12-E01 scientists (2013). A slump in the trench: Tracking the impact of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. Geology, 41(8), 935-938.

Subarya, C., Chlieh, M., Prawirodirdjo, L., Avouac, JP., Bock, Y., Sieh, K., Meltzner, J., Natawidjaja, D., McCaffrey, R. (2006). Plate-boundary deformation associated with the great Sumatra-Andaman earthquake. Nature, 440(7080), 46.

Sun, T., Wang, K., Fujiwara, T., Kodaira, S., He, J. (2017). Large fault slip peaking at trench in the 2011 Tohoku-oki earthquake. Nature communications, 8, 14044.

Tajima, F., Mori, J., Kennett, BL. (2013). A review of the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0): Large-scale rupture across heterogeneous plate coupling. Tectonophysics, 586, 15-34.

Tanioka, Y., Ruff, L., Satake, K. (1997). What controls the lateral variation of large earthquake occurrence along the Japan Trench? Island Arc, 6(3), 261-266.

Terzaghi, K. (1951). Theoretical soil mechanics. Chapman And Hall, Limited.; London.

Thatcher, W. (1990). Order and diversity in the modes of circum - Pacific earthquake recurrence. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 95(B3), 2609-2623.

Tominaga, M., Sager, WW., Tivey, MA., Lee, SM. (2008). Deep - tow magnetic anomaly study of the Pacific Jurassic Quiet Zone and implications for the geomagnetic polarity reversal timescale and geomagnetic field behavior. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 113(B7).

Tsuji, T., Kamei, R., Pratt, RG. (2014). Pore pressure distribution of a mega-splay fault system in the Nankai Trough subduction zone: Insight into up-dip extent of the seismogenic zone. Earth and Planetary Science Letters, 396, 165-178.

Tsuji, T., Kawamura, K., Kanamatsu, T., Kasaya, T., Fujikura, K., Ito, Y., Tsuru, T., Kinoshita, M. (2013). Extension of continental crust by anelastic deformation during the 2011 Tohoku-oki earthquake: The role of extensional faulting in the generation of a great tsunami. Earth and Planetary Science Letters, 364, 44-58.

Tsuru, T., Park, J. O., Miura, S., Kodaira, S., Kido, Y., Hayashi, T. (2002). Along - arc structural variation of the plate boundary at the Japan Trench margin: Implication of interplate

coupling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B12), ESE-11.

Ujiie, K., Tanaka, H., Saito, T., Tsutsumi, A., Mori, J., Kameda, J., Brodsky, E.E., Chester, F.M., Eguchi, N., Toczko, S., Expedition 343 and 343T Scientists (2013). Low coseismic shear stress on the Tohoku-Oki megathrust determined from laboratory experiments. *Science*, 342(6163), 1211-1214.

von Huene, R., Lallemand, S. (1990). Tectonic erosion along the Japan and Peru convergent margins. *Geological Society of America Bulletin*, 102(6), 704-720.

Wang, K., Hu, Y. (2006). Accretionary prisms in subduction earthquake cycles: The theory of dynamic Coulomb wedge. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B6).

Wang, K., Hu, Y., Von Huene, R., Kukowski, N. (2010). Interplate earthquakes as a driver of shallow subduction erosion. *Geology*, 38(5), 431-434.

Yamada, Y., Baba, K., Matsuoka, T. (2006). Analogue and numerical modelling of accretionary prisms with a decollement in sediments. *Geological Society, London, Special Publications*, 253(1), 169-183.

Yamada, Y., Baba, K., Miyakawa, A., Matsuoka, T. (2014). Granular experiments of thrust wedges: insights relevant to methane hydrate exploration at the Nankai accretionary prism. *Marine and Petroleum Geology*, 51, 34-48.

Yamada, Y., Yamashita, Y., Yamamoto, Y. (2010). Submarine landslides at subduction margins: insights from physical models. *Tectonophysics*, 484(1-4), 156-167.

謝辞

本論文をまとめるにあたり、大学院博士後期課程在学中に常に熱心なご指導と、自由な研究をさせていただいた指導教員である芦寿一郎准教授には心から御礼申し上げます。社会人から大学院に戻るご相談に乗っていただいたことなど、在学前から大変親切にしてくださりました。

大学院博士前期課程からお世話になっております山口飛鳥准教授には巡検や調査など多くの地質学を楽しむ多くの機会を下さり、また論文ご執筆などでご指導をいただいたこと、心から御礼申し上げます。さらに本研究における砂箱実験・画像解析に関して、海洋研究開発機構の山田泰広博士には、装置のことから、結果の解釈など、在学中を通じ通じ相談に乗っていただき大変感謝しております。

2章の共同研究者である東京大学大気海洋研究所の大出晃弘博士には、実験に関して非常に多くの場面でお手伝いいただきましたことお礼申し上げます。また海洋研究開発機構の Arthur Bauville 博士には数値シミュレーションからの視点で様々なアドバイスをいただき感謝しております。また3章では東京大学大気海洋研究所の朴進午准教授に PSDM データをまとめて提供いただきましたことお礼申し上げます。

東京大学大学院新領域創成科学研究科の須貝教授、小口教授、東京大学大気海洋研究所の朴進午准教授、産業技術総合研究所地質情報研究部門の宮川歩夢博士には、博士論文審査の副審として御審査をいただき、本論文に対して多くの助言を頂戴しました。

博士前期課程において指導教官である東京海洋大学特任教授木村学には、他の分野から来た自分に粘り強くプレートテクトニクス、構造地質学など多岐にわたる分野での学問を基礎から指導していただきました。また研究室のメンバーの親切と学問への真摯な姿勢に刺激を受け、博士課程までの進学の励みになりました。また大学院博士前期課程から長い間、先輩として福地里奈博士には研究生生活に関し大変お世話になりました。

博士後期課程において東京大学大気海洋研究所の皆様、先生方、スタッフの皆様、学生の皆様には在学中大変お世話になり、また常日頃から多くの刺激をいただきました。特に海洋底科学部門の沖野郷子教授、山崎俊嗣教授、朴進午准教授、黒田潤一郎准教授にはセミナー中に多大な議論をいただきました。また修士課程の同期である石輪健樹博士、矢ヶ崎一浩氏、また博士課程の同期である太田雄貴氏、奥津なつみ氏には切磋琢磨の刺激を受けました。大変感謝しております。また、金原富子氏には研究生生活の様々な面でお世話になり、常に激励をいただきました。

最後に、両親である父・尚史、母・明美、姉・由合には修士・博士課程の進学を許し、存分に研究をする機会を与えていただいたことに感謝しております。

以上、これまで様々な形で筆者を支えてくださった方々に対し、ここに記して感謝の意を表します。