

# 付加体形成と海底地すべり

山田 泰広<sup>1\*</sup>・松岡 俊文<sup>1</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

\*E-mail: yamada@earth.kumst.kyoto-u.ac.jp

近年の調査によって、日本周辺で多数の海底地すべりの痕跡が見つかっている。海底地すべりは陸上のものに比べて大規模であるため、社会基盤の損傷・破壊に直結する。また、西南日本の地質を構成する一基本要素の付加体が海底で形成される際に斜面崩壊・海底地すべりが発生する。これは浅部堆積層の擾乱を引き起こすため、付加体構造の複雑性の一因と考えられる。本研究では、モデル化した付加体形成過程をモデル実験で再現し、そこで観察された斜面崩壊現象について観察した。その結果、変形の先端部に位置する逆断層の活動に伴う斜面崩壊現象が普遍的に観察された。これは実際の付加体地域でも先端断層周辺で特に海底地すべりが発生することを示唆している。

**Key Words** :submarine landslide, accretionary prism, analogue experiments, PIV analysis

## 1. はじめに

近年の海底地形調査によって、日本列島周辺海域には海底地すべりの痕跡が多数見つかっている<sup>1)</sup>。これらの海底地すべりは、幅数kmから数十km・すべり面深度が数百m程度と陸上地すべりに比べてその規模が非常に大きく、通信インフラなどの社会基盤の損傷・破壊や、津波による災害などが海底地すべりによって引き起こされることが考えられている。

日本周辺での海底地すべりは、特に太平洋側に位置する日本海溝や伊豆・マリアナ海溝、南海トラフなどの海溝部で多数見つかっている<sup>1)</sup>。これらの場所では海洋プレートの沈み込みが起きているため、それに伴う地震活動が活発で、それがきっかけとなって海底地すべりが引き起こされている可能性が高い。なお、南海トラフ海域には付加体と呼ばれる変形地質体が形成されている<sup>2)</sup>ため、表層地質現象である海底地すべりの発生には付加体形成が密接に関係していると考えられる。

海底での地すべり現象は調査・計測が困難であるため、陸上地すべりほど調査・研究が進んでいない。そこで本論では、地質変形構造の形成過程を解析するための地質構造モデリングの手法<sup>3)</sup>を応用して、付加体形成に伴う海底地すべり現象に関する解析結果を報告する。

## 2. 付加体とは

地質学的調査や地球物理学的観測によると、日本周辺

には4つのプレートが分布しており、そのうちの太平洋プレートとフィリピン海プレートの二つが日本列島を構成しているユーラシアプレートと北アメリカプレートの下に沈み込んでいる。フィリピン海プレートが沈み込んでいる東海沖から紀伊半島沖、さらに足摺岬沖にかけての南海トラフと呼ばれている海域では、フィリピン海プレート上に堆積した泥や砂などの軟質堆積物がプレートとともに沈み込むことができず、はぎ取られて日本列島側に押し付けられた結果、付加体と呼ばれる複雑な地質体を形成している。この変形メカニズムは、ブルドーザーによってかき出された土砂の隆起変形に似ていることから、ブルドーザーモデルと呼ばれている<sup>4)</sup>。付加体は西南日本地域を構成する地質学的基本要素のひとつであるが、この「はぎ取り付加」による複雑な内部構造のために、トンネルなどの構造物建設の際に障害となっている。

## 3. 陸上地すべりと海底地すべり

陸上地すべりが発生する一般的な条件として、地形営力による斜面地形と風化・変質や応力開放などによって後にすべり面となる弱面が形成されること(素質の原因:素因)と、降雨・地震などの引き金となる直接的原因(誘因)が発生することが挙げられる。降雨があった場合には、地下水の流入・滞留によって間隙水飽和度と間隙水圧が上昇し、有効応力の低下によって摩擦力が低下するため、弱面の滑動が励起すると考えられる。地

震の場合には、振動による弱面の顕在化や局所的な間隙水圧の上昇などが考えられる。

一方、海底地すべりの場合には斜面・弱面の存在は必要条件であるが、岩石の間隙は通常完全に水飽和しているため、間隙水の飽和度変動は生じない。また、波浪・潮汐の影響はある程度の深度以深では無視できるため、これより深部の海底は環境的に安定していると考えられる。したがって、陸上地すべりにおける降雨のような弱面の強度・摩擦を激変させるような事象は、深海底では頻繁には起こらないと考えられる。唯一、発生しうる環境変化は地震振動による弱面の顕在化と津波による圧力変動であろう。

#### 4. 海底地すべりのモデル実験

##### (1) モデル実験と相似律

一般に自然現象は複雑で複数の要因が関与するため、直接的に数値化・数式化することは困難である。そこで、現象に対する理解をより深め、各要因を抽出し数値化・数式化することを目的として、モデリングが行われる。モデリングを行うことによって、各要因による個々の影響を個別に評価できるだけでなく、要因間の相互作用に関する評価も可能となる<sup>3)</sup>。

今回はモデル実験による検討を行った。モデル実験とは、相似律<sup>5)6)</sup>と呼ばれる相似条件に従って実際の地質構造の形成過程を物理的等価に縮小し、実験室で再現する地質構造モデリング手法の一つである<sup>3)</sup>。モデル実験を行うためには、検討対象の変形挙動や物性などをモデル化し、それに対応する実験材料と実験条件を選択する必要がある。数キロメートルから数十キロメートル規模の地質構造をモデル化する場合には、同じスケールでの岩石変形挙動や物性を評価する必要がある。一般にこのスケールでの岩石変形挙動は脆性破壊で近似できる<sup>7)</sup>ため、同様の変形挙動を示す粒状体材料を用いることでモデル実験が可能となる。脆性破壊挙動を前提とした場合、相似律が要求する二つの条件、すなわち「材料の固着強度が無視できる程度に小さいこと」と「内部摩擦係数が岩石と実験材料で同等であること」を満足する材料を選択することが可能である<sup>3)</sup>。

##### (2) 海底地すべりのモデル化

海底地すべり現象をモデル実験で検討するためには、前章で述べた環境や前項で述べた条件を考慮してモデルを構築する必要がある。まず海底地すべりの規模が前述したように非常に大きいことから、岩石の変形挙動を脆性破壊と近似し、実験材料には粒状体材料の一種である砂を採用した。

また、岩石が完全水飽和状態であることから、実験材料の粒子間隙は単一流体で満たす必要がある。実験中の実験材料内に圧力変動を生じさせないためには、流体の粘性を低く保つ必要がある。そこで今回は間隙流体を空気とし、完全乾燥状態での実験を行った。このとき実験材料である乾燥砂は、岩石の一般的な内部摩擦角(30°程度)に近い角度(35°程度)を示す<sup>8)</sup>。

今回の実験では、実験と実物の長さ比を1/100,000とした。このとき、代表的な岩石の固着強度(例えば250MPa程度)は実験材料中では2.5kPaとする必要がある。乾燥砂の固着強度は数百Pa程度であるので、相似律を満たしていると判断できる<sup>3)</sup>。なお、この長さ比によると、実験での1cmは実際の1kmに相当する。

今回は付加体形成に伴う海底地すべり現象を検討対象とするため、付加体形成を前述のブルドーザーモデルでモデル化し、その表層部に出現する変動現象を観察した。

##### (3) モデル実験装置と方法

今回のモデル実験は、ブルドーザーモデルを用いた実験装置(図-1)を使用して実施した。アクリル製の箱状装置(長さ120cm、高さ22cm、幅50cm)の底部にプラスチックシートを張り、実験中の底面摩擦を一定に保持させた。シートの上に乾燥砂を空中落下法で均等に6cm堆積させ、砂層を圧密させないように留意して表面を平坦に成形した。このとき、物性を変化させないように着色した砂層をマーカー層として砂層中に挿入した。次に、毎分1cmの速度で片方の垂直壁を装置内部方向に変位させることによって、砂層に短縮変位を与えた(図-1)。また、実験装置上方と側方約120cmにそれぞれ設置したデジタルカメラを用いて、実験中のモデルを一定時間間隔で写真撮影し、記録・解析を行った。

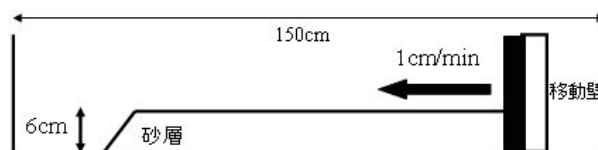


図-1 実験装置概念図

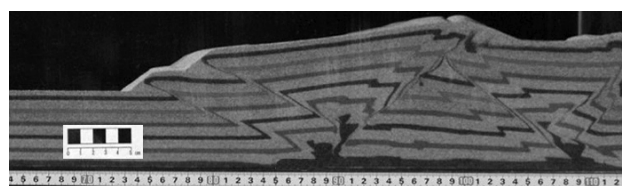


図-2 実験結果(モデルの側面)。スケールバーの長さは1cm刻みで計5cmである。

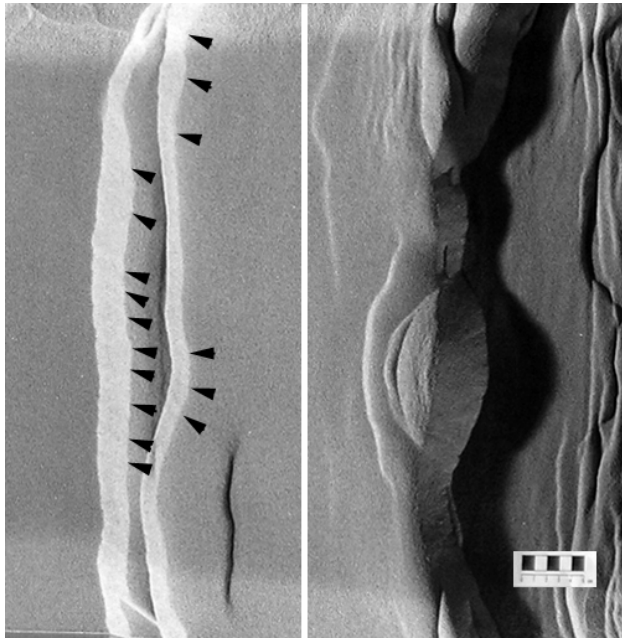


図-3 実験結果（モデルの上面）。矢印の先端から矢印の方向に斜面崩壊が見られる。なお、スケールバーの長さは1 cm刻みで計5 cmである。

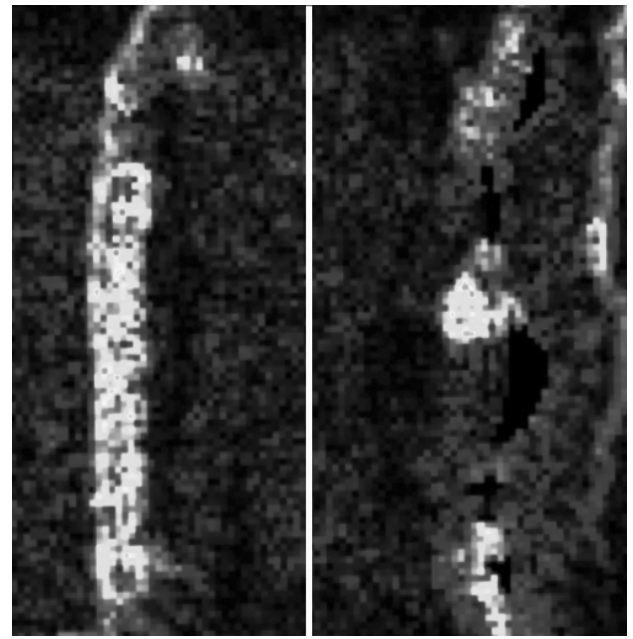


図-5 PIV歪み分布解析結果。PIV解析によって得た速度ベクトル分布（図-4）の変化率から求めた。淡色部が歪み領域を示す。縮尺は図-3と同じ。

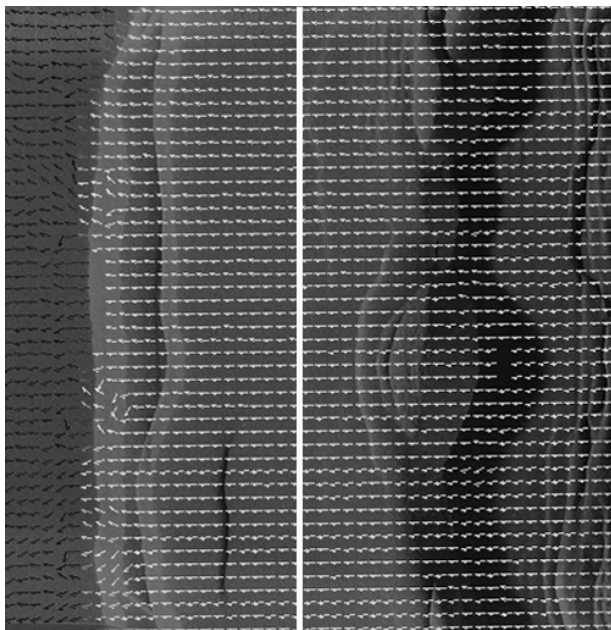


図-4 PIVベクトル解析結果。図-3上での水平方向移動ベクトルを表示。白色ベクトルは高速度、左端部の黒色ベクトルは低速度を示す。縮尺は図-3と同じ。

## 5. 実験結果と画像解析

### (1) モデル実験結果

実験の結果、実験材料中に低角の逆断層が形成され、壁から離れる方向に表面が傾いた隆起構造体が観察された（図-2）。この低角逆断層群のうち、先端部に位置する断層がモデル表面に出現した箇所に注目すると、安息角を持つ斜面が形成されていることが読み取れる。す

なわち、この断層の活動によって隆起した部分が崩壊して斜面を形成していることが分かる。実験結果を上方から観察すると、各逆断層の断層面や断層に関連する線構造は観察されず、断層沿いに形成された斜面に沿って多くの斜面崩壊が観察される（図-3）。

### (2) PIV解析

実験結果について画像解析手法を応用して、定量的な速度解析と歪み解析を行った。使用した手法はPIV（Particle Image Velocimetry）と呼ばれるものである。PIV解析では、ある二時刻の連続画像について、対象領域の画像間の移動量を各画像の輝度値に関する相互相関関数を用いて評価する<sup>9)</sup>。このPIV解析を時間間隔をおいて取得したモデル実験写真に適用することで、変位値とさらにその変位値からせん断歪み値を計算した。

PIV解析によって得られた速度ベクトル分布を図-4に示す。隆起域ではほぼ一様のベクトルパターンが認められ、この領域には速度差が認められない。一方、先端部の断層活動に伴う斜面部には、それより先方の未変形領域との間に明瞭な速度差が計測され、この場所に活発な短縮変形が進行しつつあることが読みとれる。

この速度ベクトル分布から歪み分布を解析した結果を図-5に示す。図上で淡色部に表現された領域は速度差による歪が検出された箇所である。この解析結果によると、この写真が撮影された前後に歪が生じている場所は、先端部の断層活動に伴う斜面および図面上でそれより右側に位置する隆起域の斜面である。これらの解析結果と実験中の観察事実を総合すると、歪みの検出域は斜面崩

壊現象が発生している箇所と一致する。なお後者の隆起構造は、実験結果断面図（図-2）から、先端断層の活動に伴って逆方向に形成される「バックスラスト」と呼ばれる種類の断層活動に対応するものである。つまり、実験結果で観察された多数の断層のうち、先端断層の活動に伴う変形域にのみ歪み分布が検出され、斜面崩壊が発生している。

## 6. まとめ

付加体形成過程を模擬したモデル実験を行った結果、モデル表面において斜面崩壊現象が普遍的に観察された。このことは、付加体を形成する沈み込み帯では、斜面崩壊が頻繁に発生しており、これが付加体の複雑な内部構造を構成する一因となっていることを示している。なおこの現象は、先端部に形成される断層とその活動に伴う構造変動周辺で特に活発である。実際の海底付加体形成においては、より複雑に他の要因が関与するものと考えられるが、基本的には先端部に位置する断層がもっとも活動性が高く、この活動に伴って海底斜面崩壊が生じているものと考えられる。

## 参考文献

- 1) 佐々木智之：広域精密海底地形データに基づいた北部日本海溝の沈み込みテクトニクスに関する研究，東京大学博士論文，p. 152，2003．
- 2) 平 朝彦：日本列島の誕生，岩波新書，1990．
- 3) 山田泰広：地質学雑誌，112，pp.153-159，2006．
- 4) von Huene, R. and Scholl, D. W. : Observations at convergent margins concerning sediment subduction, subduction erosion, and the growth of continental crust. *Reviews of Geophysics*, 29, pp. 279-316, 1991.
- 5) Hubbert, M. K. : Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. *GSA Bulletin*, 48, pp. 1459-1520, 1937.
- 6) Hubbert, M. K. : Mechanical basis for certain familiar geologic structures. *Geological Society of America Bulletin*, 62, 4, pp. 355-372, 1951.
- 7) McClay, K. R. : Deformation mechanics in analogue models of extensional fault systems. In: Rutter, E. H. & Knipe, R. J. (Eds.); *Deformation mechanisms, rheology and tectonics*. Special Publication Geological Society of London, 54, pp. 445-454, 1990.
- 8) Yamada, Y., Baba, K. and Matsuoka, T. : Analogue and numerical modelling of accretionary prisms with a decollement in sediments. In: Buiter, S. and Scherurs, G. (Eds.), *Numerical and Analogue Modelling of Crustal-Scale Processes*, Geological Society Special Publication 253. pp. 169-183, 2006.
- 9) 可視化情報学会編：PIV ハンドブック，pp.63-77，pp.126-129，森北出版株式会社，2002．

## ACCRETIONARY PRISM FORMATION AND SUBMARINE LANDSLIDE

Yasuhiro YAMADA and Toshifumi MATSUOKA

Submarine landslide is a common feature along the subduction margins around Japan. This study run analogue model experiments of an accretionary prism, which is a typical subduction style in South-West Japan, and found a number of slope failures in the models. Such slope failure is concentrated at deformation structures related to the frontal thrust (the low angle reverse fault at the deformation front) activity. This suggests real submarine landslide may also be active at the frontal thrust in the deep water.