

# 現代地震発生物理学に基づく 海溝型古地震研究の新展開

安藤亮輔<sup>1) 2)</sup>

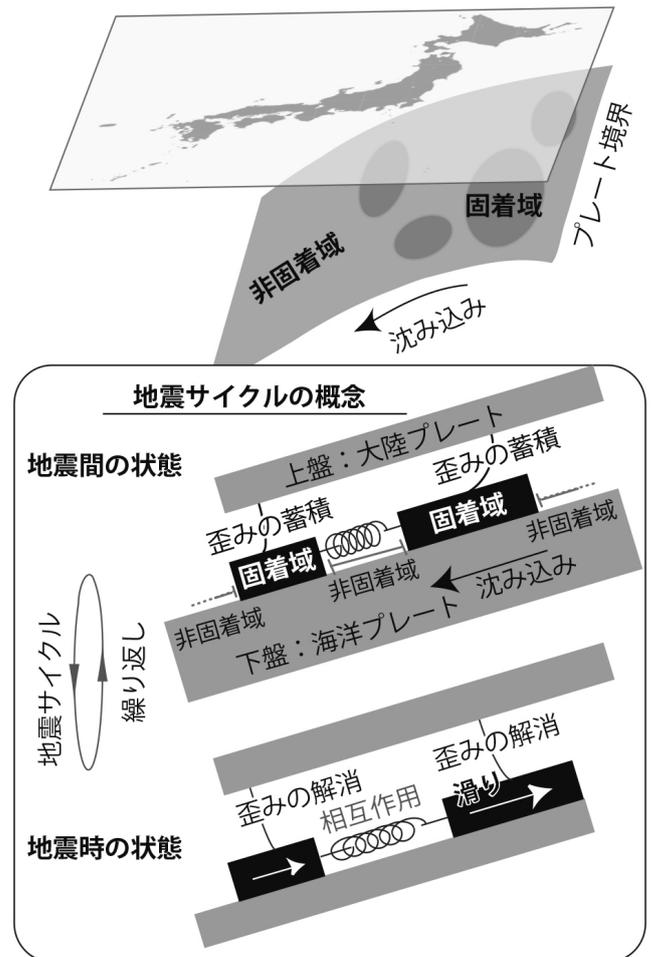
## 1. はじめに

次の巨大地震がいつ、どこで、どの程度の規模で発生するかは、防災上きわめて重要なテーマである。2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) はわが国の観測史上最大の地震であった。この地震に伴い、非常に大きな津波が発生し、東日本の沿岸に甚大な被害をもたらした。この地震の発生と同時に注目されたのが869年貞観地震 (Mw8.4以上: Sawai *et al.*, 2012) であった。なぜなら、貞観地震による津波は、2011年地震津波と同様に宮城県石巻・仙台平野で大きな浸水をもたらしており、歴史学的・地質学的には必ずしも想定外ではなかったからである。本シンポジウムのテーマである南海トラフ沿岸でも、過去に巨大地震津波が繰り返し来襲したことがわかっており、南海トラフ沿いにおける過去の地震を正しく解明することが、将来に発生する地震を予測する上で重要なカギである。

## 南海トラフにおける地震学・古地震学研究

南海トラフにおいて過去に発生した地震に関する研究、1498年明応地震や1707年宝永地震、1854年安政地震、1944年・1946年昭和地震など、個々の地震のモデルを個別に構築する研究に特化されてきた。すなわち、これらの地震については、主として歴史記録から推定された震度分布や津波高さ分布をデータとして考慮し、それらを再現するような断層モデルが検討されている。さらに、そのようにして推定された個々の地震の規模や、それぞれの地震の発生間隔に基づき、次に発生が予測される地震の発生領域や規模が推定されてきた。しかしながら、これらの検討は過去の地震それぞれについて推定された断層滑り量と破壊域のみで決まる手法であり、断層の摩擦特性やプレート運動等の物理的な条件を考慮した検討とは言えない。

一方で、「地震発生物理学」と総称される地球物理学的手法を用いた地震の起こり方の研究が発展している。近年の地震学や測地学などの観測で、プレート境界断層の摩擦

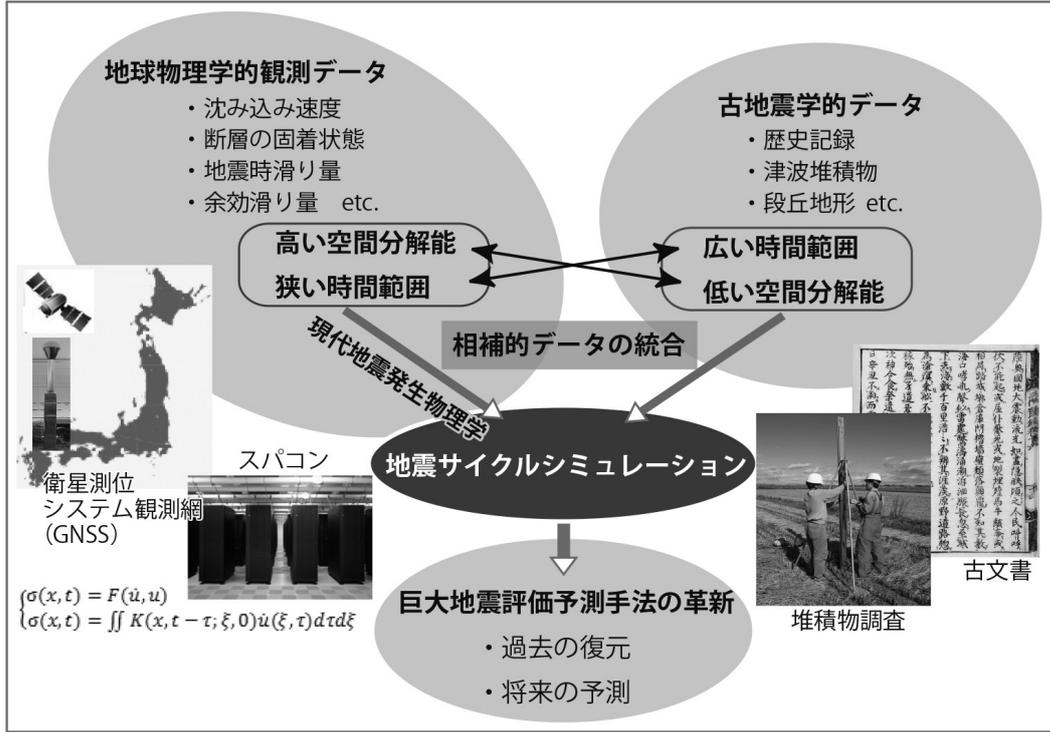


第1図 プレート境界の摩擦特性と地震サイクルの概念。

特性の不均質な構造や地域特性が徐々に明らかになってきた (例えば, Uchida *et al.*, 2009; Loveless and Meade, 2011). それによると、プレート境界には普段は強固に固着して地震時に高速に滑る領域 (固着域) と、普段から定常的に滑るとともに地震後には余効滑りとしてゆっくり滑るような領域 (非固着域) に大局的には区別され (当然その遷移領域も存在するが)、それらが相補的に分布している (第1図). さらに、大規模な計算機による「地震サイクルシミュレーション」に、そのような摩擦特性を考慮す

1) 産総研 地質分野研究企画室  
2) 産総研 活断層・地震研究センター

キーワード: 地震発生物理学, 古地震学, 東北地方太平洋沖地震, 貞観地震, 南海トラフ



第2図 新しい研究の特徴と流れ。

地球物理学的観測データと古地震学的データという相補的特徴を持つデータを地震サイクルシミュレーションという共通のプラットフォーム上で統合するのが最大の特徴。

ること実際の地震の起こり方が再現されている(例えば, Tse and Rice, 1986; Hori *et al.*, 2004; Ando and Okuyama, 2010). この地震サイクルシミュレーションでは, 地震時の滑りだけでなく, 地震後の余効滑りや地震間のプレート運動も含まれている。

## 2. 地震サイクルシミュレーションと地球物理学的観測

第1図(下)に示すように, プレート境界における地震の繰り返しとは, プレート運動によりプレートの歪みが蓄積され, それが地震時に解消され, またプレートの運動によって歪みが蓄積されるという, 一連の現象の繰り返しである。これを物理的に考察すると, 基本的には以下の3つの構成要素に分解される。実際にはもっと複雑であるが, この図のようなブロックとバネから構成される物理モデルを考えると分かりやすい。要素の一つ目は, 下盤の運動で表されるプレートの沈み込み運動であり, これがシステムを駆動する力となる。二つ目は, バネで表されるプレートの弾性媒質としての性質である。これにより, プレートが運動するとプレート内部に弾性歪みと応力が蓄積される。三つ目は, ブロックと下盤の境界面で表される, プレート

の境界面, すなわち断層面の摩擦力の特性である。地震を起こす固着域の性質を再現するためには, 高速に滑るほど摩擦力が減少するという滑り速度弱化特性を持つ必要があり, 定常滑りや余効滑りを起こす非固着域の性質を再現するためには, 高速に滑るほど摩擦力が増加するという滑り速度強化特性を持つ必要があることが, 地震サイクルシミュレーションによって分かっている(例えば, Tse and Rice, 1986; Hori, 2006)。

これらの要素は, それぞれ, プレート相対運動速度, 弾性係数や摩擦強度, 固着域の位置というようなモデルパラメータによって表現され, それらは観測によって求められるべき量である。それらに, ブロックのある時点での位置(断層のずれ量)を観測で求めて初期条件として与えれば, 天文学において惑星の運動がモデルと精密な観測でよく正確に予測できるように, 原理的にはそれ以降の地震の起こり方について予測できることになる。しかし, そうは問屋が卸さないのが, 地震現象の難しいところである。現代的な観測を精密に行っても, プレート運動速度, 弾性係数と固着域の位置の情報は得られるものの, 摩擦強度の大きさそのものと, 初期条件の情報を得ることが容易ではないのである。

### 3. 地球物理学・古地震学のデータ統合の重要性

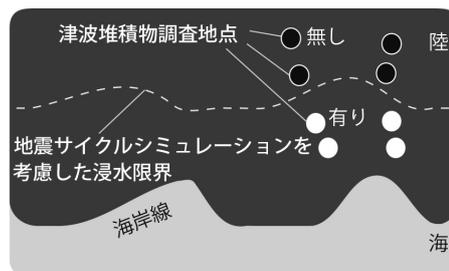
その難しさを乗り越えるカギが、地球物理学と古地震学の観測データを統合的に考慮することであると筆者は考えている。現代的な地球物理観測は、特に日本での最近の地震計観測網とGNSS (GPS) 観測網の整備の結果、前述の通りプレートの固着域分布については、相当程度高い解像度で推定することが可能になってきた。ところが、これらのデータは基本的には最近数十年以内の情報しか持ち得ない。一方で、古地震学的データは、歴史資料は千年程度、地形学的データは数千年、地質学的データは数万年以上遡ることも可能である。しかしながら、古地震学的データからは、直接的に地震時の地震波形、地殻変動量、津波の波形を復元することはできず、解析者の解釈が多かれ少なかれ関与する。また、古地震の痕跡が残される場所が限られており空間解像度や網羅性が低い。このように、両者のデータはそれぞれ異なる本質的な限界を持っているが、逆に言えば相補的である (第2図)。

従来、それぞれの分野の研究はそれぞれ独自に遂行される傾向が大変に強かった。例えば、地震サイクルシミュレーションにおいて、古地震学的データとその解釈そのものに立ち返った検討はあまり行われていない。地震のサイクルにおいては、過去の地震が将来の地震の初期条件となり、その推定次第で将来予測は変化する。また、摩擦特性として固着域の範囲は現代的観測で推定されるものの、そこでの摩擦力の大きさは過去の滑りの発生間隔に基づいて推定するのが最も確実な方法である。過去の地震の情報は、古地震学的データによって与えられるにも関わらず、そこに十分なメスが入っていないことになる。

これまでの研究史が物語るように、異なる学問分野で得られたデータを比較検討することは容易ではない。そこで本研究では、地震サイクルシミュレーションという共通のプラットフォームを構築し、その上に現代的な観測データと古地震学的データを統合することを試みる (第2図)。

### 4. 古地震の復元

現在取り組んでいる、地震サイクルシミュレーションを古地震象の復元に活用する筆者らの研究の一例 (Namegaya *et al.*, 2013) を紹介する。2011年東北地方太平洋沖地震の発生領域は、プレート境界断層の海溝軸付近のごく浅い所から深さ数十kmまで広がっている。第4図に示すように、特に浅部における滑り量は顕著であった (例えば, Fujii *et*



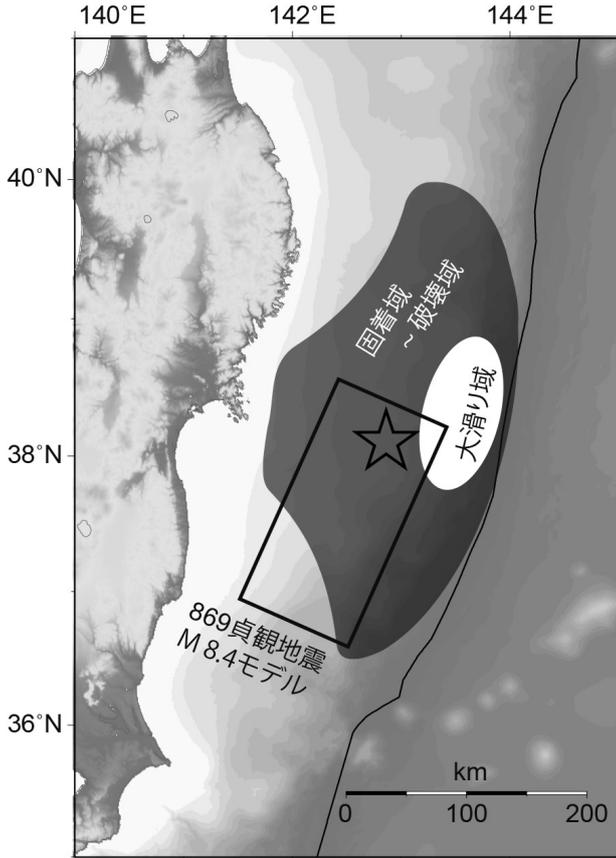
第3図 地震サイクルシミュレーションの結果と津波堆積物の測定データの直接比較。

*al.*, 2011). 一方で、この領域では過去に1896年明治三陸地震が発生している (例えば, Tanioka and Satake, 1996). この地震は浅部のみが破壊した「津波地震」と呼ばれるもので (Kanamori, 1972), 強い揺れは生じなかったものの巨大な津波が三陸沿岸を襲った。869年貞観地震の震源域として、深部領域が必須であることはすでに報告されているが (Satake *et al.*, 2013), 貞観地震が2011年地震と同様に浅部にまで破壊が及んだかどうかは明らかになっていない。浅部まで破壊したかどうかを知らなければ、この領域でどのように地震が繰り返しているのかを明らかにすることはできず、将来の予測すらもままならない。

そこで、貞観地震では浅部領域が破壊しなかったと仮定し、貞観地震時の滑った断層面上の応力の変化量は2011年の場合と等しくなるというモデルを仮定した。これは地震サイクルシミュレーションによく用いられる、「断層面上の摩擦特性は空間的に非一様であり、地震数サイクル分では大きく変化しない」というモデルに相当する。このモデルを用いて宮城県石巻・仙台平野、および福島県小高・請戸低地における貞観地震の津波堆積物分布域周辺での浸水計算を行った。その結果、浅部領域が破壊しない場合には、一部の津波堆積物の位置まで浸水しない結果となった。このことは、貞観地震時も浅部にまで破壊が及んだ可能性があることを示しており、従来手法による推定では明らかにできなかった限界を、この新たな手法が乗り越えられる可能性があることを意味している。

### 5. まとめと今後の展望

貞観地震のモデル推定の研究が示すように、いったん同じ領域で生じた大地震が現代観測により捕らえられれば、古地震モデルの推定が飛躍的に高精度化する可能性がある。一方、まだ大地震が現代的に観測されていない場合でも、地震間の観測データにより推定される、固着域・非



第4図 異なるデータに基づく震源像の比較。  
津波堆積物分布に基づいた869年貞観地震モデル、測地学的観測等により得られた固着域と2011年東北地方太平洋沖地震において数十mの滑りを観測した領域を大まかに示す。ここでの固着域と2011年イベントの破壊域には比較的良好な対応関係が見られる (Loveless and Meade, 2011)。

固着域のコントラストとプレート相対運動速度の空間分布は、地震の規模を制約するのに極めて重要な情報を含む。このような相互作用が有機的に働けば、現代観測の分野にとっても新たな刺激となるだろう。

従来古地震データの不足によって解明の進んでいないイベントについても、地球物理データ・モデルと古地震データを融合させることによって、新たな知見を与えることが可能となるかもしれない。例えば、歴代の東海（東南海）地震に着目すると、1944年昭和地震のように駿河湾内に破壊が及ばなかった地震や、1854年安政地震のように同湾内に破壊が及んだ地震が知られているが、そのひとつ前の1707年宝永地震では破壊したか（例えば、相田, 1981）否か（例えば、Ando, 1975）について意見が分かれている。駿河・南海トラフから富士川河口断層帯までを考慮した地震サイクルシミュレーションに駿河湾奥での隆起・沈降に関する地質学的データを加えると、東海地震発生領域における活動の履歴がよ

りよく理解されるようになると期待される。

このような方向での研究は、地震サイクルシミュレーションにおいてモデルパラメータと将来予測のための初期条件を推定することの高精度化につながるだろう。南海トラフには様々な古地震データが存在するが、既出の古地震モデルは、個々の古地震データにのみ依存しており地球物理学的な検討が十分とは言えない。情報量の限られる個別の古地震データの解析に現代地震発生物理学の手法を適用して、過去の地震象の再現能力を高め、将来の地震像の予測能力を高めていきたい。

## 文献

- 相田 勇 (1981) 東海道沖におこった歴史津波の数値実験. 東京大学地震研究所彙報, 56, 367-390.
- Ando, M. (1975) Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai trough, Japan. *Tectonophysics*, 27, 119-140.
- Ando, R. and Okuyama, S. (2010) Deep roots of upper plate faults and earthquake generation illuminated by volcanism. *Geophys. Res. Lett.*, 37, L10308.
- Fujii, Y., Satake, K., Sakai, S., Shinohara, M. and Kanazawa, T. (2011) Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, 63, 815-820.
- Hori, T., Kato, N., Hirahara, K., Baba, T. and Kaneda, Y. (2006) A numerical simulation of earthquake cycles along the Nankai Trough in southwest Japan: lateral variation in fictional property due to the slab geometry controls the nucleation position. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 228, 215-226.
- Kanamori, H. (1972) Mechanism of tsunami earthquakes. *PEPI*, 6, 346-359.
- Loveless, J. P. and Meade, B. J. (2011) Spatial correlation of interseismic coupling and coseismic rupture extent of the 2011 MW = 9.0 Tohoku-oki earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 38, doi:10.1029/2011GL048561.
- Namegaya, Y., Ando, R. and Satake, K. (2013) Constructing Fault Model of the 869 Jogan Earthquake on the basis of fault physics and modern observations. *AOGS Annual meeting, Brisbane*, SE04-A017.
- Satake, K., Fujii, Y., Harada, T. and Namegaya, Y. (2013) Time and space distribution of coseismic slip of the

- 2011 Tohoku earthquake as inferred from tsunami waveform data. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **103**, doi:10.1785/0120120122.
- Sawai, Y., Namegaya, Y., Okamura, Y., Satake, K. and Shishikura, M. (2012) Challenges of anticipating the 2011 Tohoku earthquake and tsunami using coastal geology. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, doi10.1029/2012gl053692.
- Tanioka, Y. and Satake, K. (1996) Fault parameters of the 1896 Sanriku tsunami earthquake estimated from tsunami numerical modeling. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 1549–1552.
- Tse, S. and Rice, J. R. (1986) Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of frictional slip properties. *J. Geophys. Res.*, **91**, 9452–9472.
- Uchida, N., Nakajima, J., Hasegawa, A. and Matsuzawa, T. (2009) What controls interplate coupling?: evidence for abrupt change in coupling across a border between two overlying plates in the NE Japan subduction zone. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **283**, 111–121.
- 
- ANDO Ryosuke (2013) New development of paleoseismology based on modern physics of earthquakes.
- 

(受付:2013年5月24日)