2009年米領サモア地震・津波の発生メカニズムの検討

The Source Mechanism of the 2009 Samoa Earthquake and Tsunami

郷右近英臣¹・越村俊一²・今井健太郎³

Hideomi GOKON, Shunichi KOSHIMURA and Kentaro IMAI

The tsunami that accompanied with a magnitude-8 earthquake attacked the Samoan and northern Tongan islands on 29 September 2009. Since the event occurred, two scenarios ascertain the mechanism of the earthquake that a series of normal and thrust faults caused the large earthquake and tsunami. However, it is still uncertain which one was the first rupture. In this paper, the authors focus on the tsunami waveforms of Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (DART), and proposed the tsunami source scenario that is the most consistent with the observed tsunami. The scenario is that, the rise time of the thrust fault rupture is 480 seconds, which starts from 3 minutes before the normal fault rupture, and the rise time of the normal fault rupture is 60 seconds.

1. 序論

2009年9月29日、米領サモア南西180kmを震源とする Mw 8.1の地震が発生した。本地震の発生メカニズムに関して、Nature誌(2010年8月)に掲載された2編の論文(Beavanら, 2010; Layら, 2010)では、スラブ内における正断層型地震とプレート境界の逆断層型地震の双子地震であったと述べている。しかし、どちらの断層破壊が先に発生したかについての主張が対立し、地震学においては未だ決着がついていない。

そこで本研究では、NOAAの海底水圧計DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis)の観測波形を用いて津波の逆伝播解析、破壊領域の再決定、さらに断層破壊の時刻やその継続時間に関するパラメータスタディを行い、津波工学の観点から本地震の発生機構を明らかにすることを目的とする。

2. 既往研究

まず、Nature誌に掲載された2編の論文における地震発生メカニズムに対する解釈をそれぞれ整理する。

(1) Layら(2010)の解釈

Layら(2010)は、地震計で観測したW-phaseの地震波に着目して解析し、本地震は、正断層型地震が短周期の逆断層型地震を誘発したものであると解釈した。そして、ライズタイムが60秒程度の正断層型地震が発生した後に、短周期の逆断層型地震が2回発生したと仮定して断層破壊モデルを考えると、観測した地震波をよく説明できることを明らかにした。

(2) Beavanら(2010)の解釈

Beavanら(2010)は、地震発生メカニズムを解明するために、GPS測位による地殻変動量と津波数値解析、地震計により観測した地震ノイズを使用するなど、総合的な解析を行った。結果、本地震は数分に及ぶゆっくりとした長周期の逆断層破壊が、短周期の正断層破壊を誘発したと解釈した。

3. 既往モデルによる津波数値解析

既往の断層破壊モデルを用いて、線形長波式に基づく津波数値解析を実施する。断層パラメータを表-1に、断層の位置を図-1(b), (c)に示す。Layら(2010)は、逆断層型地震の断層破壊を2回想定しているのので、表-1では2枚の逆断層を逆断層1、逆断層2と記述する。以上の断層パラメータを使用し、それぞれの断層破壊モデルの再現計算を行う。津波数値解析結果の精度評価には、DARTの観測波形を使用する。本研究では、NOAAの所有する複数のDARTのうち、本地震の震央から最も近い、Station51425, Station51426, Station54401の3点を選択した。各DART位置関係は、図-1(a)の通りである。

(1) Layら(2010)のモデル

Layら(2010)は、逆断層の断層パラメータのうち断層幅と断層長さおよび断層滑り量を明確にしていないので、本研究で独自に設定した。まず断層長さとして断層幅は、Papazachosら(2004)の提案した算定式を用いて、Mwより断層面積を算出し、断層幅と断層長さの比を1:2と仮定することで、算出した。そして、断層滑り量は、地震発生場所が地殻浅部であることを根拠に、地殻の剛性率を $3.0 \times 10^{10} \text{Nm}^{-2}$ と仮定し、剛性率と地震モーメントの関係式を用いて算出した。そして、正断層のライズタイムを60秒、逆断層のライズタイムを30秒×2セットと

1 学生会員 東北大学大学院工学研究科
2 正会員 博(工) 東北大学准教授 大学院工学研究科
3 正会員 博(工) 東北大学助教 大学院工学研究科

図-1 サモア諸島付近のDART位置および、既往モデルの断層位置

表-1 Nature誌に掲載された断層パラメータ (Lay.): Layら (2010), (Bev.): Beavanら (2010)

断層パラメータ	正断層 (Lay.)	逆断層1 (Lay.)	逆断層2 (Lay.)	正断層 (Bev.)	逆断層 (Bev.)
Strike (°)	144	185	185	352	175
Dip (°)	65	29	29	48	16
Rake (°)	-91	90	90	-41	85
Lat (°)	-15.510	-15.750	-16.000	-15.542	-15.940
Lon (°)	-172.03	-172.250	-172.250	-172.237	-172.718
Length (km)	156	124.312	124.312	114	109
Width (km)	27	62.156	62.156	28	90
Area (km ²)	3510	7726.81	7726.81	3192	9810
Depth (km)	15	5	5	13	18
Slip (m)	10	2.243	2.286	8.6	4.1
Time delay (sec)	0	+50	+90	0	-105
Rise time (sec)	60	30	30	0	200
Rigidity (Nm ⁻²)	5.1E+10	3.00E+10	3.00E+10	3.00E+10	3.00E+10
Moment (Nm)	1.80E+21	0.52E+21	0.53E+21	0.82E+21	1.19E+21
Mw	8.1	7.8	7.8	7.9	8.0

設定した。

(2) Beavanら (2010) のモデル

逆断層の200～1000秒にわたる比較的ゆっくりした破壊が正断層の破壊を誘発したとするBeavanら (2010) のモデルを再現するために、Beavanら (2010) が論文中で津波数値解析に使用したライズタイム (正断層: 0秒, 逆断層200秒) を使用した。そして、逆断層の破壊発生から105秒後に正断層の破壊が発生したとするモデルを忠実に再現した。

(3) 既往モデルの評価

上記2つの津波発生モデルによる津波数値解析結果の検証には、DARTの観測波形を用いる。観測波形は、5～180分のバンドパスフィルタをかけることにより、津波成分のみを抽出した。Station51425, Station51426, Station54401のDART観測波形と津波数値解析結果を、図-3, 図-4に示す。各DART観測波形において、津波到達前の10～30分前に顕著な振動が見られるが、これらは地震発生と同時に発生した物であり、地震動の影響

によるものと考えられる。

Beavanら（2010）のモデルを用いた初期水位変化の解析例を図-2に示す。図中において、破線は沈降を示し、実線は隆起を示しており、水位分布の間隔は0.2mである。図-2より、初動が押しの津波は、正断層由来であり、引きの津波は、逆断層由来であることがわかる。震央の北側に位置するDART51425の観測波形は引き波で始まり、震央の南側に位置するDART51426とDART54401が押し波で始まることを考慮すると、DART51425に先に到達する津波が図中右上の正断層由来であり、DART51426とDART54401に先に届く津波が図中左下の逆断層由来であることがわかる。このことを満足するためには、津波発生に寄与した正断層は逆断層よりも北側に位置する必要がある。これらの前提を踏まえた上で、各モデルの津波数値解析結果の検討を行う。

Layら（2010）のモデルを使用した津波数値解析結果は、DART51426とDART54401が引き波で始まる点において、観測波形と乖離している。これらは、津波発生に寄与した正断層の南端が、南に寄りすぎている事を示している。また、DART51425の初動が観測波形よりも早く始まる事により、正断層の北端が北に寄りすぎていることがわかる。つまり、Layら（2010）のモデルでは、正断層破壊の規模を過大に評価していることがわかった。

Beavanら（2010）のモデルを使用した津波数値解析結果は、DART51426とDART54401においては観測波形と整合性が取れているものの、DART51425の初動の押し波を十分再現しているとはいいがたい。逆断層破壊のメカニズムは、GPSによる地殻変動量測定結果を使用しているため信頼性が高いものの、正断層破壊のメカニズムに関する検討が、さらに必要であると考えられる。

ここまでの解析により、Beavanら（2010）のモデルの方が津波を説明するには適切であることが分かった。しかし、正断層と逆断層の破壊のどちらが先に発生したのかを解明するにはまだ検討の余地がある。そこで本研究では、Beavanら（2010）のモデルを基礎とし、津波数値解析とDARTの観測波形を検討していくことにより、断層破壊のメカニズムがどのように進化したのかを明らかにする。

4. 数値解析による断層破壊メカニズムの解明

本研究では、断層破壊の発生メカニズムを解明するために、逆伝搬解析と、正断層と逆断層ごとに個別の解析を行った。

(1) 逆伝搬解析

まず初めに、各DARTより津波逆伝播解析を行うことにより、津波発生に寄与した断層位置の上限・下限を推定する。本研究では、震央から最も近い、DART51425と

図-2 Beavanら（2010）の断層モデルによる初期水位分布（実線：隆起、破線：沈降）

表-2 本研究で決定した断層パラメータ

断層パラメータ	正断層1	正断層2	逆断層
Strike (°)	330	330	175
Dip (°)	48	48	16
Rake (°)	-150	-90	85
Length (km)	52.5	17.5	109
Width (km)	45	45	90
Area (km ²)	2362.5	743.75	9810
Depth (km)	13	13	18
Slip (m)	8.6	8.6	4.1
Time delay (sec)	0	0	-180
Rise time (sec)	60	60	480
Rigidity (Nm ⁻²)	3.00E+10	3.00E+10	3.00E+10
Moment (Nm)	0.61E+21	0.19E+21	1.19E+21
Mw (total = 8.13)	7.79	7.45	7.98

DART51426の二点からの逆伝播図を作成した。どちらの既往モデルにおいても、正断層の断層破壊開始時刻を2009年9月29日17時48分（GMT）としたため、正断層由来の引き波が先に到達したDART51425の観測波形を使用することにより、正断層の北限位置を図-5のように特定した。そして、逆断層由来の引き波が先に到達したDART51426からの逆伝播図は、正断層の断層破壊開始時刻に基づき作成すると、図-5のように、Beavanら（2010）の提案した断層位置の南限に到達しない。そして、逆断層の規模や断層パラメータは、GPSにより測定した地殻変動量に基づいているため、信頼性が高い。よって、逆断層の破壊は、正断層の破壊発生時刻よりも数分程度早いことがわかった。

(2) 津波数値解析

次に、津波発生に寄与した断層破壊のメカニズムを、正断層と逆断層に分けて、線形長波式に基づく解析を行うことにより、決定する。まず、正断層のみによる数値解析と、逆断層のみによる数値解析をそれぞれ個別に実

図-3 Layら (2010) の断層モデルによる津波数値解析結果と各DARTにおける観測波形との比較

図-4 Beavanら (2010) の断層モデルによる津波数値解析結果と各DARTにおける観測波形との比較

施し、DARTの観測波形を説明するための断層破壊の時間差について検討した。すなわち、正断層破壊による津波と逆断層破壊による津波がどのような時間差で発生すれば津波観測波形を最も良く説明できるか、パラメータスタディにより検討した。

具体的には、逆伝播解析により断層面の位置を推定した後、正断層のライズタイムを60秒、断層破壊開始時刻を2009年9月29日17時48分 (GMT) と固定した。次に逆断層のみを用いて、線形長波式に基づく津波数値解析を、ライズタイム30秒～600秒までの30秒間隔で20セット実施した。そして、逆断層の断層破壊開始時刻を、正断層破壊の開始時刻の前後10分毎に設定し、正断層によるDART観測地点における計算波形と重ね合わせることで、パラメータスタディを行った。数百ケースの検討を行う中で、Beavanら (2010) の提案した正断層の断層パラメータをそのまま使用すると、震央よりも北側と南側のDART波形の初動を、同時に満たす事が難しいことがわかった。そこで正断層の断層パラメータを、本震発生から1週間の余震分布を参考に、地震モーメントの整合を保ちながら修正し、北側と南側のDARTの初動を

説明できるように検討を行った。最終的に決定した断層パラメータを表-2に示す。本研究ではパラメータスタディの結果、逆断層のライズタイムが480秒で、断層破壊開始時刻が正断層破壊の開始3分前に発生すると、3点全てのDART波形を最もよく説明できることがわかった。最終的に算出したDARTの観測波形と、数値解析結果を図-6に示す。

本研究では、正断層の断層パラメータを地震モーメントの整合を保ちながら修正したが、修正後の正断層の破壊位置は、U.S. Geological Survey (2009) の地震波のインバージョン解による断層破壊滑り量分布図のうち、滑り量12m以上の大きく滑った領域とほぼ一致しており、また、逆断層破壊はライズタイムのみの改良にとどめているため、本研究で提案した断層破壊モデルは、地震学的にも大きな矛盾はないと考えられる。

5. 結論

本研究では、2009年サモア地震津波の発生機構を解明したNature誌 (2010年8月) に掲載された2編の論文 (Beavanら, 2010; Layら, 2010) で提案された津波発生モ

図-5 逆伝播解析による津波波源域の推定

デルに基づき津波の再現計算を行い、DARTの観測波形に着目することにより、各モデルの課題を整理した。その上で、津波逆伝播解析と津波到達時間に着目し、2009年サモア諸島沖地震の発生機構について、地震波解析や地盤変動解析からは特定出来なかった発生メカニズムを津波波形により明らかにすることができた。本研究とBeavanら(2010)の津波数値解析手法の根本的な違いは、DART波形にバンドパスフィルタをかけることにより、高精度な津波成分の解析を実施した事、そして、断層パラメータの改良を加えたことにある。Beavanら(2010)の津波数値解析結果からは、本地震が正断層と逆断層破壊がほぼ同時に発生した双子地震であることは示されるが、どちらの断層破壊が先に発生したかを説明するには不十分であった。本研究の意義は、津波工学という第三者的な立場から、地震の発生機構を明らかにした事にある。主要な結論を以下に挙げる。

1. 津波発生に寄与した正断層および逆断層震源域の位置を特定した。
2. 逆断層の破壊が正断層よりも早く発生したとする方が津波観測波形と整合することを示した。
3. 逆断層の断層破壊継続時間を480秒、正断層の断層破

図-6 本研究で提案する断層モデルによる津波数値解析結果と各DARTにおける観測波形との比較

壊継続時間を60秒とし、逆断層の断層破壊が3分ほど進んだところで正断層の破壊が発生する場合に、最もDARTの津波観測波形を説明できることを示した。

謝辞：本研究の一部は平成20年度産業技術研究助成事業（プロジェクトID：08E52010a）および科学研究費補助金（課題番号：22681025, 21221007）の補助を受けて実施された。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- Beavan, J., X. Wang, C. Holden, K. Wilson, W. Power, G. Prasetya, M. Bevis and R. Kautoke (2010) : Near-simultaneous great earthquakes at Tongan megathrust and outer rise in September 2009, *Nature*, Vol. 466, 19, doi:10.1038/nature09292
- Lay, T., C. J. Ammon, H. Kanamori, L. Rivera, K. D. Koper, A. R. Hutko (2010) : The 2009 Samoa-Tonga great earthquake triggered doublet, *Nature*, Vol. 466, 19, doi:10.1038/nature09214.
- Papazachos B. C., Scordilis E. M., Panagiotopoulos D. G., Papazachos C. B. and Karakaisis G. F. (2004) : Global relations between seismic fault parameters and moment magnitude of earthquake
- U.S. Geological Survey(2009) : Earthquake Hazard Program, http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2009/us2009mbdi/finite_fault.php, 参照2011-3-1.