3.2.6 海溝型地震と内陸沿岸地震の関連メカニズムの評価準備

# 目 次

- (1) 業務の内容
  - (a) 業務題目
  - (b) 担当者
  - (c) 業務の目的
  - (d) 8 か年の年次実施計画(過去年度は、実施業務の要約)
    - 1) 平成25年度
    - 2) 平成26年度
    - 3) 平成27年度
    - 4) 平成28年度
    - 5) 平成29年度
    - 6) 平成30年度
    - 7) 平成31年度
    - 8) 平成32年度
  - (e) 平成27年度業務目的
- (2) 平成27年度の成果
  - (a) 業務の要約
  - (b) 業務の実施方法と成果
    - 1) 巨大地震サイクルを考慮した東北日本の応力場のモデル化
    - 2) 東北沖地震後の応力の時間変化
    - 3) 東北沖地震前の応力場
  - (c) 結論ならびに今後の課題
  - (d) 引用文献
  - (e) 成果の論文発表・口頭発表等
  - (f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定
- (3) 平成28年度業務計画案

## (1) 業務の内容

## (a) 業務題目

2.6 海溝型地震と内陸沿岸地震の関連メカニズムの評価準備

(1_ )	+0	NZ	±۲.
נטי	1旦	$\equiv$	伯

所属機関	役職	氏名	
東京大学地震研究所	教授	佐藤比呂志	
	教授	岩崎 貴哉	
	助教	石山 達也	
	特任研究員	橋間 昭徳	
	特任研究員	加藤 直子	

(c) 業務の目的

海域・海陸統合構造調査などによって得られるデータ(サブサブテーマ 2.2、2.3)や、 構成岩石モデル(サブサブテーマ 2.5.3)から得られるレオロジー特性を反映させ、より現 実的な日本海周辺域の構造を反映した構造モデルを構築する。この構造モデル内に、断層 の形状モデル(サブサブテーマ 2.5.1)を取り入れ、プレート境界での変位に伴う内陸の断 層面上での応力変化を求めることにより、海溝型地震と内陸沿岸地震の関連メカニズムの 評価準備を行う。

(d) 8 か年の年次実施計画(過去年度は、実施業務の要約)

1) 平成25年度:

構成岩石の暫定モデル(サブサブテーマ 2.5.3)にもとづいて、日本海域周辺のリソス フェアー構造を日本列島の三次元モデルに反映させるための、デジタルデータを作成した。

2) 平成26年度:

日本海および沿岸域の断層形状モデル(サブサブテーマ 2.5.1)と構成岩石の初期モデル(サブサブテーマ 2.5.3)にもとづいて、日本海域周辺の粘弾性モデル(初期モデル) を作成し、東北地方太平洋沖地震後の応力緩和に対応した断層面に作用するクーロン応 力変化を求めた。

3) 平成27年度:

平成26年度に作成した粘弾性モデル(初期モデル)の入力信号として、2011年東北 地方太平洋沖地震以前の巨大地震も合わせて考慮し、巨大地震の発生前と発生後の内陸 断層のクーロン応力変化を共に評価した。

4) 平成28年度:

過去のプレート境界の巨大地震に相当する変化を与え、その後の過去の被害地震の発

生の復元性について検討を加える。

5) 平成29年度:

構造調査などの成果、更新した断層モデルを統合モデルに反映させる。過去のプレー ト境界の巨大地震と、内陸被害地震の関係について、数値実験によって検討する。

6) 平成30年度:

東北地方太平洋地震に伴うすべりを震源域に与え、その後の上盤プレート内での応力 変化、地殻変動を求め、観測された測地データ・発震機構解のデータと比較する。同時 に、震源・波源断層面上のクーロン応力を求め、地震の発生のし易さを評価する手法を 検討する。

7) 平成31年度:

数値実験を行い、東北太平洋沖地震後、地震が発生しやすい断層群を抽出する。

8) 平成32年度:

南海トラフ・千島海溝沿いでのすべり欠損の増大に伴う、内陸・海域の断層群周辺の 応力変化を求め、プレート境界での応力蓄積に伴う内陸での地震の起こりやすさについ て、定量的に明らかにする。

#### (e) 平成27年度業務目的

平成26年度に作成した粘弾性モデル(初期モデル)の入力信号として、2011年東北地 方太平洋沖地震以前の巨大地震も合わせて考慮し、巨大地震の発生前と発生後の内陸断層 のクーロン応力変化を共に評価する。

### (2) 平成27年度の成果

(a) 業務の要約

平成26年度に作成した粘弾性モデル(初期モデル)の入力信号として、2011年東北地 方太平洋沖地震(以下東北沖地震と略称)以前の巨大地震も合わせて考慮し、巨大地震の 発生前と発生後の内陸断層のクーロン応力変化を共に評価した。

- (b) 業務の実施方法と成果
  - 1) 巨大地震サイクルを考慮した東北日本の応力場のモデル化

沈み込み帯における巨大地震サイクルによる周囲の変形場は Matsu'ura and Sato (1989)<sup>1)</sup>により定式化された。地下構造として、弾性リソスフェアーと粘弾性アセノスフ ェアーからなる構造を仮定し、プレートの沈み込み速度vの沈み込み帯で起こる巨大地震 サイクルを考える。第1次近似として、巨大地震は一定の繰り返し間隔Tで同じすべり分 布をもって発生し、地震間では完全に固着すると仮定する。この場合、ある巨大地震直後 を基準にとるとリソスフェアー内の任意の点x、時刻tにおける変位場は、

$$\boldsymbol{u}(\mathbf{x},t) = vt\boldsymbol{u}_{s}(\mathbf{x},\infty) - vt\boldsymbol{u}_{p}(\mathbf{x},\infty) + vT\sum_{k=0}^{\infty} \{\boldsymbol{u}_{p}(\mathbf{x},kT+t) - \boldsymbol{u}_{p}(\mathbf{x},kT)\} \quad (0 \le t < T)$$
(1)

と書ける。ここで、**u**<sub>s</sub>(**x**,t)はプレート境界面全体の一様なすべり、**u**<sub>p</sub>(**x**,t)は巨大地震のす べり分布による変位応答関数を表す。この式は、3 つの項がそれぞれ定常沈み込み、地震 間の固着、過去の巨大地震の粘弾性的効果に相当する。特に、第1項と第2項は、定常的 沈み込み運動と地震間の固着によるすべり欠損の増大によって、周囲に一定の速度

 $(vu_s(x,\infty), vu_p(x,\infty))$ で変形が線形的に蓄積することを示している。応力場 $\sigma_{ij}(x,t)$ は変位場の空間微分と弾性定数を乗じて以下のように表すことができる。

$$\sigma_{ij}(\mathbf{x},t) = \lambda \frac{\partial u_k(\mathbf{x},t)}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial u_i(\mathbf{x},t)}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j(\mathbf{x},t)}{\partial x_i} \right)$$

(2)

 $u_i(x,t)$ は変位u(x,t)のi成分、 $\lambda$ は Lamé 定数、 $\mu$ は剛性率、 $\delta_{ij}$ はクロネッカーのデルタと呼ばれ、i = jの時に $\delta_{ij} = 1$ 、 $i \neq j$ の時に $\delta_{ij} = 0$ の値をとる。式(2)は式(1)の線形微分項の和であるので、応力場も変位場同様、定常沈み込み、地震間の固着、過去の巨大地震の粘弾性効果の重ね合わせで表される。

式(1)の第2項と第3項は地震サイクルが終わり次の地震が起こると互いに相殺されるため、地震サイクルの繰り返しとともに周囲に蓄積されるのは第1項の定常的な沈み込みの効果のみである(Sato and Marsu'ura, 1988<sup>2)</sup>; Matsu'ura and Sato, 1989<sup>1)</sup>)。したがって 地質学的時間スケールでは定常的な沈み込みの効果は重要であるが、地震サイクル内の変 動を考える上では第2項の固着の効果と第3項の過去の巨大地震の粘弾性効果の寄与の方 が大きい。したがって、以降では第1項の効果は無視する。

式(1)第2項の固着の効果は、定常的な沈み込み運動に対する相対的なすべり量の過不足 の効果として表される。この相対すべり量は、固着の場合は負となるのですべり欠損ある いはバックスリップと呼ばれる。地震間の固着速度は測地観測が示しているように数年で 大きく変化し得るが(Nishimura et al., 2004<sup>3)</sup>)、100年以上の巨大地震サイクル内での 固着の増大を考えるときには、これらの時間変化はより長期的なトレンドからの短周期の 摂動と考えられる。式(1)の第2項は、この長期トレンドを線形近似したものと考えられる。 特に注意すべきなのは、変形の蓄積速度が、時間無限大におけるすべり応答、つまりアセ ノスフェアーの粘性緩和後の応答として表されていることである。多くの研究では、固着 による変動はその時々のすべり欠損の弾性的な(瞬間的な)応答として取り扱われている が(e.g., Nishimura et al., 2004<sup>3)</sup>; Suwa et al., 2006<sup>4)</sup>)、すべり欠損の持続的な増大を考 えれば粘弾性効果が当然含まれている。

Matsu'ura and Sato (1989)<sup>1)</sup> は一様なすべり分布と地下構造として単純な平行成層構造を考えたが、この定式化はより実際的な構造に関しても適用可能である。本課題では昨年度までに構築した日本列島域の有限要素モデルを用いる(図1)。この有限要素モデルによって得られた 2011 年東北沖地震のすべり分布(Hashima et al., 投稿中<sup>5)</sup>)と、粘性構造(Freed et al., 投稿中<sup>6)</sup>)を東北日本における巨大地震サイクルモデルに適用し、式(1)、式(2)を用いて巨大地震前後に形成される応力場を計算する。巨大地震の再来間隔 *T* = 1000年と仮定した。

## 2) 東北沖地震後の応力の時間変化

まず、地震直前の応力状態を基準として、1回の東北沖地震に相当する巨大地震による 応力場の時間変化を計算した。これは式1に含まれる*vTu<sub>p</sub>(x,t)*を求めることに相当する。 図2に地震後の応力変化を示した。東北沖地震後における東北地方の応力場は基本的に東 西方向の伸長場で特徴づけられるので(Nishimura et al., 2011<sup>7</sup>); Yoshida et al., 2012<sup>8</sup>)、 応力の東西伸長-圧縮成分を示した。また、日本海沖の断層上の応力をメカニズム表示で 示している。メカニズム解は白の象限が圧縮応力、黒の象限が伸長応力のかかる方向を示 している。地震直後の応力場(図2a)は、東北地方中部に強い東西伸長場が形成されるこ とを示し、地震活動から求められた応力場と調和的である(Yoshida et al., 2012<sup>8</sup>)。その 後の応力場(図2b-d)の変化は、アセノスフェアーの粘性緩和によって引き起こされるが、 基本的に東西伸長的であり、1 MPa 以上の伸長応力領域が時間とともに西の日本海と南の 関東地方に伝わっていく様子が見て取れる。一方、北緯40°以北は基本的に東西圧縮的で、 圧縮応力が時間とともに増加している。メカニズム解のパターンは時間を通して変化しな い。

図3に仙台市(38.3 °N, 140.9 °E)における応力の時間変化を示す。地震直後から数十年は応力値が変動し、100年経つとほぼ一定値に落ち着く。粘性緩和による効果が定常状態にいたるまでの応力変化は0.6 MPaであり、定常状態にいたるまでは地震活動に有意に影響を与えうる。しかし、その後は応力の蓄積はなされず、地震活動に直接的には影響を及ぼさない。津波の堆積物の分析から得られた東北沖地震の再来間隔が600年以上であることを考えると(Sawai et al., 2012<sup>9)</sup>, 2015<sup>10)</sup>)、東北日本では粘性緩和が影響を及ぼすのはサイクルのはじめのせいぜい100年程度で、東北沖地震前の変動は固着による効果が支配的だといえる。

### 3) 東北沖地震前の応力場

先に述べたように、東北沖地震前の変動は固着の効果が支配的と考えられる。そこで式 (1)の第2項を用いて固着の効果を計算する。図4に固着による地震前の応力蓄積速度を地 震直後の応力変化と比較して示す。図3と同様に、東西伸長--圧縮成分をプロットした。 地震前の応力場は基本的に、地震後の応力場とは反対で東西圧縮が卓越している。この傾 向は CMT インバージョンによって示された日本列島域の応力場と同様である(Terakawa and Matsu'ura, 2010<sup>11)</sup>)。

図 4a には計算した応力場の上に 1900 年から 2011 年東北沖地震までの期間の M6 以上 の内陸地震をプロットした。内陸地震はほとんどが東西圧縮の領域で起きており、この地 域の地震活動が基本的に東北沖地震前の固着に支配されていることを示している。東北沖 地震後の内陸の逆断層型の地震活動の急激な減少と地震前の固着による逆断層型の地震活 動を合わせて考えるならば、地震サイクルによる地震活動として以下のようなシナリオが 考えられる。(1) 巨大地震直後は内陸の東西圧縮的な応力が急激に低下し、場所によって は正断層型地震が卓越する。(2) 地震サイクルの初期は粘弾性緩和により引き続き逆断層 地震が抑えられる。(3) 粘弾性緩和は 100 年程度で終了し、以後はすべり域の固着により 内陸に東西圧縮的な応力を徐々に蓄積する。ただし、応力が内陸地震の破壊強度に達する までは、地震活動の回復は顕著には見られない。(4) 次の巨大地震が起こる前には、内陸 の応力が十分に蓄積され、逆断層型の地震が活発化する。

(c) 結論ならびに今後の課題

東北沖地震による単純な地震サイクルを仮定し、前年度までに作成した粘弾性モデルを 用いて、東北沖地震の発生前と発生後の応力場を求めた。仮定した日本列島域の粘性構造 では、東北日本は、巨大地震の発生後100年は粘性緩和の効果もあって東西伸長的であり、 以後は固着の効果により徐々に東西圧縮応力が蓄積される。東北沖地震の前は東西圧縮的 な応力場であり、内陸地震はこのような圧縮応力場のもとで発生する。この計算では東北 沖地震のすべり域における固着しか考慮していない。今後、北海道や中部地方の応力場を 考える場合には、千島海溝や南海トラフの固着もモデルに取り入れる必要がある。

(d) 引用文献

- 1) Matsu'ura, M., Sato, T.: A dislocation model for the earthquake cycle at convergent plate boundaries, Geophys. J. Int., Vol.96, pp.23-32, 1989.
- 2) Sato, T., Matsu'ura, M.: A kinematic model for deformation of the lithosphere at subduction zones, J. geophys. Res., Vol.93, pp.6410-6418, 1988.
- Nishimura, T., Hirasawa, T., Miyazaki, S., Sagiya, T., Tada, T., Miura, S., Tanaka, K.: Temporal change of interplate coupling in northeastern Japan during 1995-2002 estimated from continuous GPS observations, Geophys. J. Int., Vol.157, pp.901-916, 2004.
- Suwa, Y., Miura, S., Hasegawa, A., Sato, T., Tachibana, K.: Interplate coupling beneath NE Japan inferred from three-dimensional displacement field, J. geophys. Res., Vol.111, pp.B04402, doi:10.1029/2004JB003203, 2006.
- 5) Hashima, A., Becker, T.W., Freed, A.M., Sato, H., Okaya, D.A.: Coseismic deformation due to the 2011 Tohoku earthquake: influence of 3-D elastic structure around Japan, Earth Planets Space, (Submitted).
- 6) Freed, A.M., Hashima, A., Becker, T.W., Okaya, D.A., Sato, H., Hatanaka, Y.: Resolving depth-dependent subduction zone viscosity and afterslip from postseismic displacements following the 2011 Tohoku-oki, Japan Earthquake, Earth Planet. Sci. Lett., (Submitted).
- Nishimura, T., Munekane, H., Yarai, H.: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and its aftershocks observed by GEONET, Earth Planets Space, Vol.63, pp.631-636, 2011.
- 8) Yoshida, K., Hasegawa, A., Okada, T., Iinuma, T., Ito, Y., Asano, Y.: Stress before and after the 2011 great Tohoku-oki earthquake and induced earthquakes in inland areas of eastern Japan, Geophys. Res. Lett., Vol.39, pp.L03302, doi:10.1029/2011GL049729, 2012.

- 9) Sawai, Y., Namegaya, Y., Okamura, Y., Satake, K., Shishikura, M.: Challenges of anticipating the 2011 Tohoku earthquake and tsunami using coastal geology, Geophys. Res. Lett., Vol.39, pp.L21309, doi:10.1029/2012GL053692, 2012.
- 10) Sawai, Y., Namegaya, Y., Tamura, T., Nakashima, R., Tanigawa, K.: Shorter intervals between great earthquakes near Sendai: Scour ponds and a sand layer attributable to A.D. 1454 overwash, Geophys. Res. Lett., Vol.42, pp.4795-4800, doi:10.1002/2015GL064167, 2015.
- 11) Terakawa, T., Matsu'ura, M.: The 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from centroid moment tensor data of seismic events, Tectonics, Vol.29, pp.TC6008, doi:10.1029/2009TC002626, 2010.
- 12)橋間昭徳・A. Freed・佐藤比呂志・西村卓也・D. Okaya・石山達也・松原誠・岩崎貴 哉・T. Becker: 有限要素法による日本列島域における2011年東北沖地震の余効変動シ ミュレーション,日本地球惑星科学連合2013大会,SCG68-12, 2013.

著者	題名	発表先	発表年月日
Akinori Hashima,	Simulation of tectonic	European Geosciences	平成 27 年
Toshinori Sato,	evolution of the Kanto	Union General	4月17日
Hiroshi Sato,	basin of Japan since 1	Assembly 2015	
Kazumi Asao,	Ma due to subduction of		
Hiroshi Furuya,	the Pacific and		
Shuji Yamamoto,	Philippine sea plates and		
Koji Kameo,	collision of the Izu-Bonin		
Takahiro Miyauchi,	arc(ポスター発表)		
Tanio Ito, Noriko			
Tsumura, and			
Heitaro Kaneda			
橋間昭徳、Thorsten	東北日本下の地震波速度	日本地球惑星科学連合	平成 27 年
Becker, Andrew	異常領域による2011年東	2015 大会	5月27日
Freed、佐藤比呂志、	北沖地震の地殻変動への		
David Okaya、水藤	影響(口頭発表)		
尚、矢来博司、松原			
誠、武田哲也、石山			
達也、岩崎 貴哉			
岩崎貴哉·佐藤比呂	日本列島基本構造モデル	日本地震学会 2015 年秋	平成 27 年
志・篠原雅尚・石山	の構築・地形及びプレー	季大会	10月28日
達也・橋間昭徳	ト境界モデル・(ポスター		
	発表)		

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

橋間昭徳・T.W.	2011 年東北沖地震によ	日本地震学会 2015 年秋	平成 27 年
Becker • A. Freed •	る地殻変動に対する日本	季大会	10月28日
佐藤比呂志・D.	列島域の弾性構造の近地		
Okaya・水藤尚・矢	効果と遠地効果(ポスター		
来博司・松原誠・武	発表)		
田哲也・石山達也・			
岩崎貴哉			
Fry, B., Sato, H.,	Ambient noise imaging	The 10th Workshop of	平成 27 年
Takeda, T., Chen,	of the seismically	the International	10月7日
Q.F., Wang, K.	anisotropic lithosphere	Lithosphere Program	
	below the Sea of Japan	ILP-Task Force on	
	(口頭発表)	Sedimentary basins:	
		Lithosphere dynamics	
		of sedimentary basins	
		in subduction systems	
		and related analogues	
Hashima, A.,	Influence of 3-D elastic	The 10th Workshop of	平成 27 年
Becker, T., Freed,	heterogeneity on	the International	10月7日
A., Sato, H., Okaya,	coseismic deformation	Lithosphere Program	
D., Suito, H., Yarai,	due to the 2011 Tohoku	ILP-Task Force on	
H., Matsubara, M.,	earthquake(口頭発表)	Sedimentary basins:	
Takeda, T.,		Lithosphere dynamics	
Ishiyama, T.,		of sedimentary basins	
Iwasaki, T.		in subduction systems	
		and related analogues	
Iwasaki, T., Sato,	Fundamental structure	AGU Fall meeting	平成 27 年
H., Ishiyama, T.,	model of island arcs and		12月16日
Shinohara, M.,	subducted plates in and		
Hashima, A.	around Japan (ポスター		
	発表)		
Fry, B., Sato, H.,	Lithospheric structure of	AGU Fall meeting	平成 27 年
Takeda, T., Chen,	the Sea of Japan from		12月18日
Q.F., Okaya, D.,	surface wave		
Wang, K.	tomography(口頭発表)		

(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成28年度業務計画案

平成 27 年度までに作成した三次元粘弾性有限要素モデルの想定すべり領域を拡張し、 南海トラフや千島海溝における巨大地震の入力を可能にする。東北沖地震に加えて、南海 トラフや千島海溝における巨大地震による日本列島域の応力変化を計算し、それぞれの地 震による粘弾性的応力変化の特性を示し、過去の内陸の被害地震との関係を検討する。



図1本研究で用いた有限要素モデル(橋間ほか、2013<sup>12)</sup>)。 北西上方から眺めた図。見やすくするために太平洋(左上)/フィリピン海(右上)/ユ ーラシア(下)プレート間のプレート境界で分離して表示。緑色の要素はリソスフェアー、 白の要素はアセノスフェアー、マントルを示す。



図2 1回の巨大地震による応力場の時間変化。

a) 地震直後 b)5年後 c)15年後 d)200年後。カラースケールは東西方向の伸長—圧 縮応力成分。伸長場は赤~黄色で、圧縮場は水色~青で表される。矩形は日本海下の断層 モデル、断層面上の各時点における応力を非ダブルカップル成分を含むメカニズム表示で 示す。星印は仙台市の位置を示す。



図 3 a) 仙台市における東西伸長応力の時間変化。b) 仙台市の位置。 横軸は時間(年)、縦軸は応力値(MPa)を表す。



図4 東北日本の応力場

a) 地震前の応力蓄積速度。黄色と赤の丸印は東北6県と新潟県における1900-1950年と 1950年以降のM6以上の内陸地震を示す。b) 地震直後の地震直前に対する応力変化。図 2a) と同じ。