

3.2.1.2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

「プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
国立大学法人東北大学 大学院理学研究科	教授	長谷川昭	hasegawa@aob.geopys.tohoku.ac.jp
	助教授	松澤暢	matuzawa@aob.geopys.tohoku.ac.jp
	助教授	日野亮太	hino@aob.geopys.tohoku.ac.jp
	助手	中島淳一	nakajima@aob.geopys.tohoku.ac.jp
	助手	西野実	nishino@aob.geopys.tohoku.ac.jp

(c) 業務の目的

海溝型地震発生予測の高度化のためには、その震源となるプレート境界面における海陸プレート間固着強度の空間分布を知ることが決定的な役割を果たすものと考えられるが、固着度の空間変化を高い精度で直接推定するのは困難である。しかし、プレート間固着強度は、プレート境界周囲の不均質構造の影響を強く受けたものである可能性が高く、カップリング強度と不均質構造との対応関係を解明できれば、地震学的な構造イメージングを通してプレート間の結合の強さの空間分布の把握が飛躍的に進むものと期待できる。そこで、本研究は、プレート境界及びその周辺域の3次元構造の解析により、プレート境界における固着度の分布に対比されるような不均質パターンを見いだすことが可能か否かの検証を目的とする。さらに、深部地下構造を把握することによって強震動予測の高精度化に資することも本研究の目的に含まれる。

(d) 5カ年の年次実施計画

1) 研究計画1年目

三陸沖北部において長期観測型海底地震計による長期観測を行うとともに、既存海底地震観測データを活用してプレート境界域の3次元地震波速度不均質構造の推定する。さらに、日本海溝・千島海溝周辺における相似地震活動の時空間的な分布を求める。

2) 研究計画2年目

平成16年度に設置した海底地震計を回収してそのデータ処理・解析に着手し、根室沖で長期観測型海底地震計による長期観測を実施する。また、既存データを活用した地震波速度不均質構造の推定および推定技術の向上に関する研究、ならびに日本海溝・千島海溝周辺における相似地震活動の時空間的な分布に関する研究を継続して実施する。

3) 研究計画 3 年目

平成 17 年度に設置した海底地震計を回収してそのデータ処理・解析に着手し、三陸沖北部から十勝沖にかけての領域で長期観測型海底地震計による長期観測を実施する。また、三陸沖北部において得られた海底地震観測データによる地震波速度不均質構造の推定を行うとともに、日本海溝・千島海溝周辺における相似地震活動の時空間的な分布に関する研究を継続して実施する。

4) 研究計画 4 年目

平成 18 年度に設置した海底地震計を回収してそのデータ処理・解析に着手し、福島県沖から房総沖にかけての領域で長期観測型海底地震計による長期観測を実施する。また、根室沖において得られた海底地震観測データによる地震波速度不均質構造の推定を行うとともに、日本海溝・千島海溝周辺における相似地震活動の時空間的な分布に関する研究を継続して実施する。

5) 研究計画 5 年目

平成 19 年度に設置した海底地震計を回収してそのデータ処理・解析に着手し、三陸沖中部から福島沖にかけての領域で長期観測型海底地震計による長期観測を実施する。最終年度であるため、この観測についても年度内に終了させてデータの回収・処理・解析を進める。また、福島県沖から房総沖ならびに三陸沖中部から福島沖の海域で得られた海底地震観測データによる地震波速度不均質構造の推定を行うとともに、日本海溝・千島海溝周辺における相似地震活動の時空間的な分布に関する研究を継続して実施し、地震波速度構造の不均質性と準静的すべりの空間分布との間の関連を明らかにする。

(e) 平成 16 年度業務目的

1968 年十勝沖地震の地震時すべりが大きかった領域（アスペリティ）のうち、1994 年三陸はるか沖地震の際に破壊しなかったと考えられる北側のアスペリティの周辺における地震活動および地震波速度構造の解明を目的として、12 観測点からなる長期海底地震観測網を設置し海底地震観測を開始した。また、海底地震観測データを用いたプレート境界地震発生領域の地震波速度構造推定方法の最適化を目指して、既存の海底地震観測データを活用して三陸沖の 3 次元地震波速度構造トモグラフィ解析を行った。また、プレート境界域における準静的なすべりの時空間的な分布の解明を目的として、2003 年十勝沖地震震源域周辺において発生した相似地震活動の時空間変化を詳細に調査した。

(2) 平成 16 年度の成果

(a) 業務の要約

過去に三陸沖において実施された海底地震観測データをコンパイルし、東北大学の微小地震観測網のデータと併合して解析に用いることにより、1994 年三陸はるか沖地震の震源域およびその周辺域の 3 次元地震波速度構造を地震波トモグラフィによって推定し、1994 年の地震時のすべり量分布や地震発生後の余効すべり分布と対応するような不均質構造を見いだした。また、2003 年十勝沖地震の震源域周辺で発生している相似地震の時空間的な分布を解析し、大地震発生前後に準静的すべり領域が、本震の地震時すべりが大きい領域（アスペリティ）を避けるように、拡大していく様子が明らかとなった。さらに、東京大学地震研究所・北海道大学とともに、三陸沖北部に長期観測型海底地震計による観測網を構築し、17 年度まで観測を継続する予定である。

(b) 業務の実施方法

本年度の下記の 5 項目からなる業務を下記の要領で実施した。

1) 観測点配置に関する調整

東京大学とともに当該海域における地震活動状況および陸上の既設地震観測網の配置を考慮して研究遂行上最適な観測点配置について検討し、観測実施にあたり関係各機関・団体等との調整を行う。

2) 海底地震計の設置

東京大学とともに長期観測型海底地震計による海底地震観測網を三陸沖北部の海域に展開する。

3) データ処理システムの整備

データ処理システムを導入し、既存の海陸観測データと海底地震観測で得られるデータが円滑に統合されるよう調整・整備を行う。

4) 陸域観測網データの収集

海陸併合処理のために、上記処理システムへ既存の陸域地震観測網のデータを収録・保存を行う。

5) データ解析手法の開発

従来のデータ解析技術および研究対象領域の地震活動と地震学的構造に関するレビューを行い、三陸沖北部における観測データに最適なデータ解析手法の開発を行う。

(c) 業務の成果

1) 観測点配置に関する調整

2) 海底地震計の設置

これら 2 つ業務については、東京大学とともに実施したものであり、成果について

は3.2.1.1. に報告されている通りであるので、ここでは省略する。

3) データ処理システムの整備

本受託業務では、長期観測型海底地震計による約1年間の観測データを用いた解析を行うため、短期間に大量のデータを処理・解析する必要があり、それに相応する能力を備えたデータ処理システムの整備が必要であった。そこで、本学で従来進めてきた海底地震観測のデータ処理解析と陸上の多点観測網のデータによる高分解能地震波トモグラフィ解析の経験を総合して、本業務の遂行に最適な計算機システムの仕様の検討を進め、次のことが判明した。

- ・ 長期観測型海底地震計による観測波形データとその観測期間中の陸上観測網の波形データを一度に処理するために、2TB以上の物理容量をもつ外部記憶装置が必要である。
- ・ 高い空間分解能で不均質構造を明らかにするためには、20GB以上のメモリ空間が必要である。
- ・ 上記のメモリ空間を使用した演算をするためには、64bitCPUを使用したコンピュータ・システムが必要である。
- ・ データ解析の効率を向上させるためには、条件設定の異なる演算解析を複数同時に行う必要があるため、高度なジョブ管理機能を有するクラスター・タイプのコンピュータ・システムが必要である。

こうした機能を有する計算機システムは本学の大型計算機センター（情報シナジーセンター）に存在するが、ほぼフル稼働の状態であって、本業務を円滑に遂行するためには専用の計算機システムを導入するほかない、という結論に達した。上記のような高性能コンピュータ・システムを製造・販売する業者数社の技術的な協力の下、擬似データや実データ（陸上観測の事例を用いた）を使った演算テストを2ヶ月にわたり実施した上で、最終的なシステム仕様を決定し、その導入をおこなった。図1は、本業務によって設計されたデータ処理システムの構成図である。

4) 陸域観測網データの収集

東北大学では従来から、地震・噴火予知研究観測センターにおいて、東北大学をはじめ北海道大学・弘前大学・東京大学・気象庁・防災科学技術研究所が運営する陸上地震観測点の波形データを実時間収録し、これを気象庁一元化震源リストに従ってイベント毎のファイルとして編集を行っている。高精度の3次元地震波速度構造を求めるためには、海陸の観測点で共に高いS/N比でPおよびS波の到達時刻を検出できるような地震の波形データが必要であり、こうした基準を満たすような地震イベントのデータを収集するには、気象庁の一元化震源リストに掲載されたもので十分であると判断した。従って、連続波形データではなく、イベント毎の波形データを確実に保存することとした。今年度、こうして保存された陸上観測点のイベント波形データを、回収した海底地震計の波形データと統合するためのシステムを作成した。その結果、海底地震計のデータ処

理後直ちに陸上観測網のデータと統合編集して海陸の併合解析に用いることが可能な体制が整った。

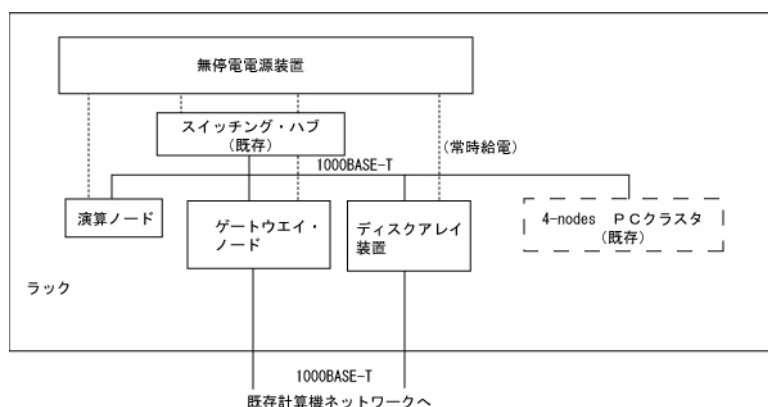


図1 平成16年度に導入したデータ処理システムの概略図

ディスクアレイ装置、演算ノード、ゲートウェイノードから構成され、高速LAN（1000BASE-T）により東北大学地震・噴火予知研究観測センターの既存のワークステーション群と接続される。

5) データ解析手法の開発

本年度に海底地震観測を開始する三陸沖北部の海域の南側においては、1994年三陸はるか沖地震が発生している。この地震の発生後には、18台の自己浮上式海底地震計を用いた約1ヶ月間にわたる余震観測が実施された。Ito et al. (2000)はこのデータを陸上地震観測網のデータと併合して解析することにより3次元地震波速度構造を求めているが、それにより求められた不均質構造を本震の破壊過程などに対応することは必ずしも容易ではない。その理由として、彼らは形状が正確にわかっていない速度不連続面を仮定していることと、陸域の浅部不均質構造の影響を取り除いていないために、深部構造のイメージが歪められている可能性がある。そこで、速度不連続面を仮定せず、陸域の地殻浅部の不均質構造と震源域の構造を同時に逆解析することを試みた。

その結果、およそ20kmの空間分解能で、1994年三陸はるか沖地震震源域の地震波速度構造モデルを得ることができた（図2）。プレート境界あるいは海洋性地殻のモホ面に対応するような速度境界を仮定しなくても、沈み込む海洋性地殻に対応する低速度層が深さ40km以深にまで連続して分布している様子がイメージングされた。求められた海洋性地殻の上面は、深さ20kmまでの範囲で人工地震探査により推定されているプレート境界面と良い一致を示す。震源も速度構造モデルと同時に求めているが、再決定された震源の深さ方向のバラツキが、過去の解析結果に比べて顕著に小さくなっており、これも今回の解析による改善点である。求められた速度構造モデルから、プレート境界に沿って上盤側でのP波速度の空間変化をみると（図3）、島弧地殻が局所的に薄くなっている場所が北西-南東の走向をもって分布することがわかる。このような島弧地殻の不均質構造に対応してプレート境界面に沿った地震波速度は不規則な分布を示すが、こうした速度不均質のパターンと1994年の地震時すべりの大きかった領域（アスペリ

3.2.1.2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

ティ)の空間的な広がりとの間には対応関係があるように見える。

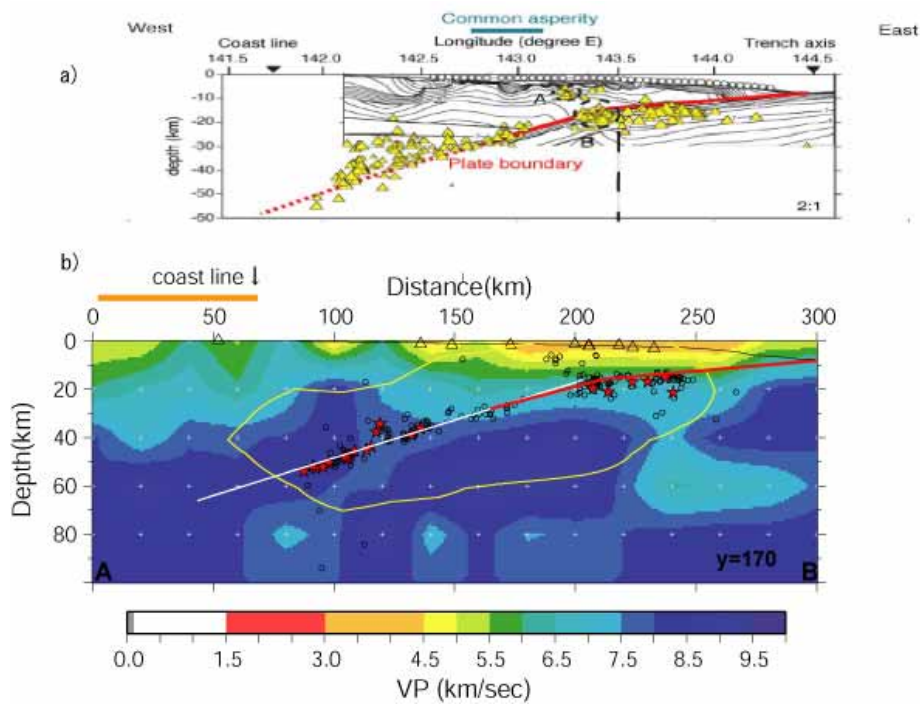


図2 三陸はるか沖地震震源域のP波速度構造 (a) Ito et al. (2004)による人工地震探査の結果 (b) 本研究の3次元トモグラフィ解析により得られたものから作成した断面。赤星は解析に用いた震源のうち相似地震に対応する震源。赤実線は(a)のプレート境界面と対応。黄色実線内が解像度の高い領域。

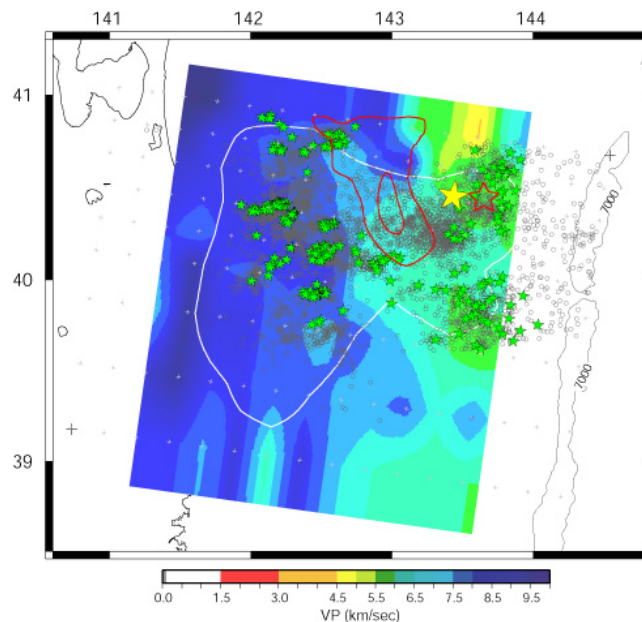


図3 プレート境界面(図1(b)の白実線)に沿った断面。白実線内が解像度の高い領域。赤い実線は永井・他(2001)による1994年三陸はるか沖地震のアスぺリティ。灰丸は1994/4/1-1995/12/31の期間に発生した地震の震央を再決定したもの。そのうち、相似地震に対応するものを緑星で示す。黄星は再決定された本震の破壊開始点。

海底地震計データを用いた不均質速度構造推定手法に関する検討と並行して、相似地震活動の解析からアスペリティ周辺における準静的すべりの発展を推定する手法についても検討を進めた。対象としたのは三陸沖北部の東側の海域であり、2003年十勝沖地震の発生後、その震源域周辺において多くの相似地震の活動がみられた。そこで、1993年7月～2005年2月8日の期間を対象として、北海道大学、東北大学、弘前大学の微小地震観測網によるM2.5以上の地震の波形データを用い、十勝沖地震前後での相似地震活動の時空間的な変化を求めることにした。相似地震の同定は、震央間距離が40km以内のすべての地震の組み合わせについて、同じ観測点の波形の比較を行うことによった。相似地震と判定する基準は、2つ以上の観測点でP波、S波を含む40秒間の波形について、2～8Hzのコヒーレンスの平均が0.95以上のものとし、同一の地震を共有する組み合わせは、同じ相似地震グループに属するものとした。

相似地震の分布(図4)は、千島海溝沿いでは、日本海溝沿いに比べ、海溝近くでの活動が少ない傾向が見られた。また、2003年十勝沖地震や2004年11月29日の釧路沖地震のアスペリティを避けて分布する傾向が見られた。相似地震の積算すべりから求められたすべりレートは、2003年十勝沖地震前について、襟裳岬から南西の東北日本弧沿いの深部(深さ50km程度)では5～10cm/yrと比較的大きいものに対し、十勝沖～釧路沖にかけては、全域でおおよそ5cm/yr以下と小さめに推定された(図5)。これはこの期間にこの地域でのプレート間の固着が強かったことを示していると考えられる。相似地震から推定された2003年十勝沖地震後の余効すべりはそのアスペリティの南部や東部で大きく、GPSデータを用いた推定結果と比較すると、それより滑り量はやや小さいものの、分布パターンはほぼ一致する。

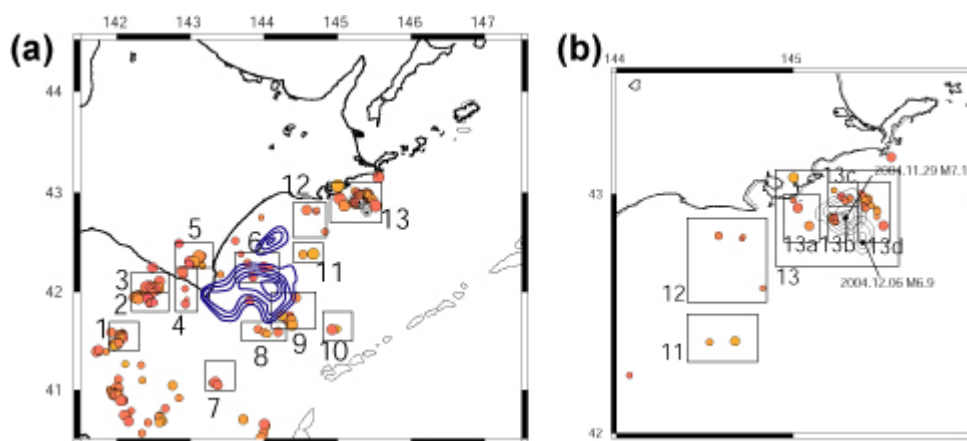


図4 (a) 北海道南東沖および (b) 釧路沖の相似地震分布
相似地震グループの重心の位置を橙色の丸で示す。コンターは、2003年十勝沖地震(M8.0)、2004年11月29日M7.1の地震、2004年12月6日M6.9の地震のすべり量分布(Yamanaka and Kikuchi, 2003; 山中, 2004)。

3.2.1.2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

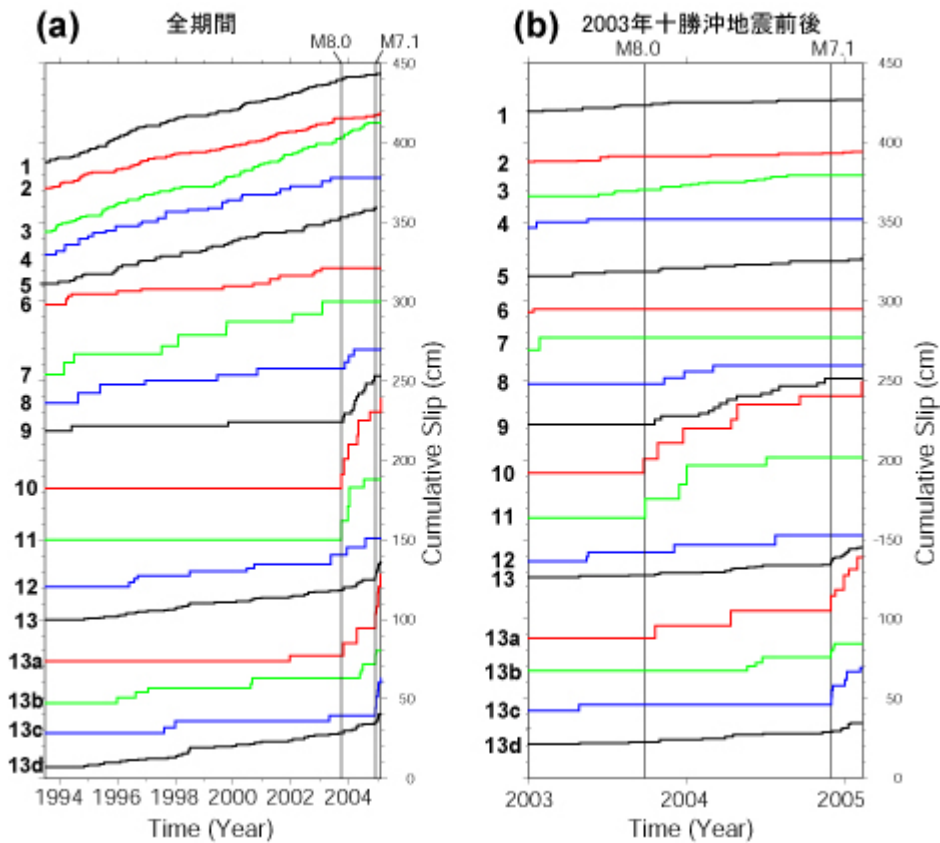


図5 (a) 1993年7月～2005年2月8日および (b) 2003年1月1日～2005年2月8日の期間における相似地震解析に基づくプレート間の積算すべり

縦棒は2003年十勝沖地震および2004年11月29日(M7.1)の地震の発生時を示す。ウィンドウ10では、2003年十勝沖地震の2日前に1つの相似地震が発生している。

(d) 結論ならびに今後の課題

平成 16 年度には、

- 1) 観測点配置に関する調整
- 2) 海底地震計の設置
- 3) データ処理システムの整備
- 4) 陸域観測網データの収集
- 5) データ解析手法の開発

の業務を実施した。

予定通り三陸沖北部において長期海底地震計による海底地震観測を開始することができ、陸上地震観測網のデータの編集整理および海底地震計との統合のための準備も整いつつある。一方、既存のデータを用いて、本業務計画で得られるデータ解析に必要な計算機システムの仕様の詳細な検討を行い、最適と考えられるシステムの導入を行った。

これらと同時に、過去に実施した海底地震観測のデータを用いて、プレート境界地震発生領域における3次元地震波速度構造を推定する手法について検討を加えた。その結果、少なくとも 20km 程度の空間分解能の不均質構造を解像することが可能であり、こうした解析によって M7 以上の地震のアスペリティに対応するような不均質構造が技術的に検出可能であることを明らかにした。さらに、陸上地震観測網により蓄積されたデータを用いた相似地震の解析により、大地震のアスペリティ周辺における準静的すべりの時空間的な変動を捉えることが可能であることが明らかとなってきた。

平成 17 年度には、導入された新システムを用いて 16 年度と同様のデータ解析を行って、システムの性能実証を行う予定である。また、データ解析手法の開発の面では、S 波速度構造の推定精度および空間分解能の向上を課題として挙げたい。現在の解析結果で求められた V_p/V_s 分布の空間的なゆらぎは、モデル空間全域で P 波速度構造に比べて顕著に大きく、正確な構造がイメージされていない可能性が高い。 V_p/V_s はアスペリティ / 非アスペリティの違いと密接に関連すると予測されるため、S 波速度構造推定のための技術の向上が極めて重要である。現在の解析手法では、表層堆積層の著しい低 S 波速度の影響は考慮しているが、それより深部の堆積層においても S 波速度が低速度でかつ大きな空間変化をしている可能性がある。従って、逆解析の際のパラメタ拘束などの面で十分な工夫をこらさないと、深部構造のイメージが劣化してしまう可能性があり、こうした面での検討を今後進めていく予定である。

(e) 引用文献

- 1) Ito, A., G. Fujie, T. Tsuru, S. Kodaira, A. Nakanishi and Y. Kaneda, Fault plane geometry in the source region of the 1994 Sanriku-oki earthquake, *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 223, 163-175, 2004.
- 2) Ito, S., R. Hino, S. Matsumoto, H. Shiobara, H. Shimamura, T. Kanazawa, T. Sato, J. Kasahara and A. Hasegawa, Deep seismic structure of the seismogenic plate boundary in the off-Sanriku region, northeastern Japan, *Tectonophysics*, 261-274, 2000.
- 3) 永井理子・菊地正幸・山中佳子、三陸沖における再来大地震の震源過程の比較研究 - 1968年十勝沖地震と1994年三陸はるか沖地震の比較 -、*地震*2、267-280、2001。
- 4) 山中佳子、11月29日釧路沖の地震(Ms7.1)、EIC地震学ノート、158、(URL http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2004/EIC158.html)、2004。
- 5) Yamanaka, Y. and M. Kikuchi, Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *J. Geophys. Res.*, 109, doi:10.1029/2003JB002683, 2004.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

現在はまだ無し。

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

無し。

(3) 平成 17 年度業務計画案

(a) 観測点配置に関する調整

東京大学、北海道大学とともに当該海域における地震活動状況および陸上に既設の地震観測網の配置を考慮して研究遂行上最適な観測点配置について検討し、観測実施にあたり関係各機関・団体等との調整を行う。

(b) 海底地震計の設置・回収

東京大学、北海道大学とともに三陸沖北部の海域に展開した長期観測型海底地震計を回収すること。また、長期観測型海底地震計による観測網を根室沖の海域に展開する。

(c) データ処理システムの整備

データ処理システムを強化し、既存の海陸観測データおよび三陸沖北部の海底地震観測で得られたデータが円滑に統合されるよう調整・整備を行う。

(d) 陸域観測網データの収集

海陸併合処理のために、上記処理システムへ既存の陸域地震観測網のデータを収録・保存を行う。

(e) 海陸データ処理の分担

東京大学、北海道大学とともに三陸沖北部のより正確な地震活動の把握をすすめるため、海・陸の地震データの処理を分担する。

(f) データ解析

プレート間結合特性と比較検討してプレート間結合を規定する要因を探るため、プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造を推定する。また、プレート間結合特性の情報を抽出するため、相似地震解析も合わせて行う。