

3. 2 長期海底地震観測によるプレート間すべりに関する研究

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

長期海底地震観測によるプレート間すべりに関する研究

(b) 担当者

| 所属機関 | 役職 | 氏名 | メールアドレス |
|-----------|-------|--------|---------|
| 東京大学地震研究所 | 教授 | 金沢敏彦 | |
| | 准教授 | 篠原雅尚 | |
| | 助教 | 望月公廣 | |
| | 助教 | 山田知朗 | |
| | 特任研究員 | 桑野亜佐子* | |
| | 技術職員 | 橋本信夫 | |
| | 技術職員 | 八木健夫 | |

* 退職

(c) 業務の目的

宮城県沖地震のアスペリティの固着状態あるいはその周囲におけるすべり状態のモニタリングの高精度化を目指し、宮城県沖地震の想定震源域において長期観測型海底地震計を用いた繰り返し観測を実施することにより、高精度な震源分布及び地下構造を明らかにするとともに、この海域における地震活動の特性を把握することを目的とする。

(d) 5カ年の年次実施計画

1) 平成17年度：

宮城県沖地震の想定震源域においてアスペリティ周辺における地震活動の空間的な特徴を把握するため、想定震源域における繰り返し観測を5観測点で平成17年12月から開始した。東京大学地震研究所で新規整備した海底地震計の設置作業は、東北大学と協力して実施した。また、海底地震計の大量のデータを処理するための一次処理装置の構築を行った。

2) 平成18年度：

新規整備した長期観測型海底地震計6台を、平成17年度に設置した5台の海底地震計を回収する際に設置して、観測を継続したほか、回収した地震記録の解析を行った。6観測点のうち2観測点は前年度と同一地点である。新たに記録処理装置一式を追加導入し、海底地震計データの一次処理能力を向上させた。

3) 平成19年度：

複数回の航海に分割して、長期観測型海底地震計の設置回収を行った。平成19年度全体では、新規整備した5台及び再整備した5台の長期観測型海底地震計を、平成18年度に設置した6台の海底地震計を回収する際に設置して観測を継続したほか、回収した地震記録の解析を行った。10観測点のうち5観測点は前年度と同一観測点である。

4) 平成20年度：

複数回の航海に分割して、長期観測型海底地震計の設置回収を行った。平成19年度全

体では、新規整備した4台及び回収後に再整備した11台の長期観測型海底地震計を、前年度に設置した10台の海底地震計を回収する際に設置して、観測を継続するほか、回収した地震記録の解析を行った。計15観測点のうち10観測点は前年度と同一の観測点である。また、データ量が増加したため、一次処理装置の追加整備を行った。

5) 平成21年度：

計画の最終年度であるため、年度内に2回の航海に分けて、全15点の海底地震計を回収して、解析を行い、計画の最終成果をまとめた。

(2) 5カ年の成果

(a) 業務の要約

宮城県沖地震のアスペリティ周辺における地震活動の特徴を把握するために、長期観測型海底地震計を用いた繰り返し観測を実施し、蓄積されたデータを用いることにより、想定震源域周辺の地震波速度構造ならびに詳細な震源分布の推定を行った。また、得られた高精度震源分布との比較により、気象庁の地震カタログの信頼性に関する検討を行った。さらに、そうした検討結果に基づくデータ選別を気象庁地震カタログに対して施し、そのデータセットを活用して、2005年8月16日の宮城県沖の地震の前後での地震活動の時空間変化に関する解析を行った。

海底地震観測は、1年間連続して観測可能な長期観測型海底地震計（写真1）の回収と再設置を繰り返すことにより、海域において通年連続観測に準ずる観測態勢を整えることを目標として進めた。計画的に機材を追加導入することにより、最終的に15観測点からなる海底地震観測網が実現できた。こうした観測で得られたデータを解析し、宮城県沖における多くの地震はプレート境界面の近傍に集中して発生していることが明らかとなった。一方で、1978年宮城県沖地震のアスペリティのうち北側のものの直上において、プレート境界上盤側に局在する地震活動を見いだした。

一方、気象庁一元化カタログからプレート境界周辺で発生していると考えられる地震を抽出し、宮城県沖における地震活動度の時空間的な変化の推定を試みた。その結果、2005年の地震の破壊域内部では、活発な余震活動は2ヶ月程度で終息する一方で、顕著な余効すべりがみられた破壊域の東側及び南側の領域については、余効すべりの継続時間と同程度の間余震活動が活発な状態が継続したことが明らかになった。一方で、1978年地震の北側アスペリティ周辺では、プレート境界近傍ならびに上盤側プレート内地震のいずれの活動度も、顕著な時間変動を示しておらず、このアスペリティが固着したままの状態であることが示唆される。

(b) 業務の実施方法

宮城県沖地震の想定震源域周辺における地震活動が示す空間的な特徴を把握するためには、同一の観測点配置による観測を長期間継続し、データの蓄積を図ることが重要である。そこで、本業務では想定震源域における繰り返し観測を5観測点で平成17年12月から開始し（本業務開始前の17年度上半期に東京大学の交付金により5観測点がすでに設置されていたため、あわせて10地点で観測を行った）、以後機材を新規調達することにより、観



写真1 本業務で使用した長期観測型海底地震計。

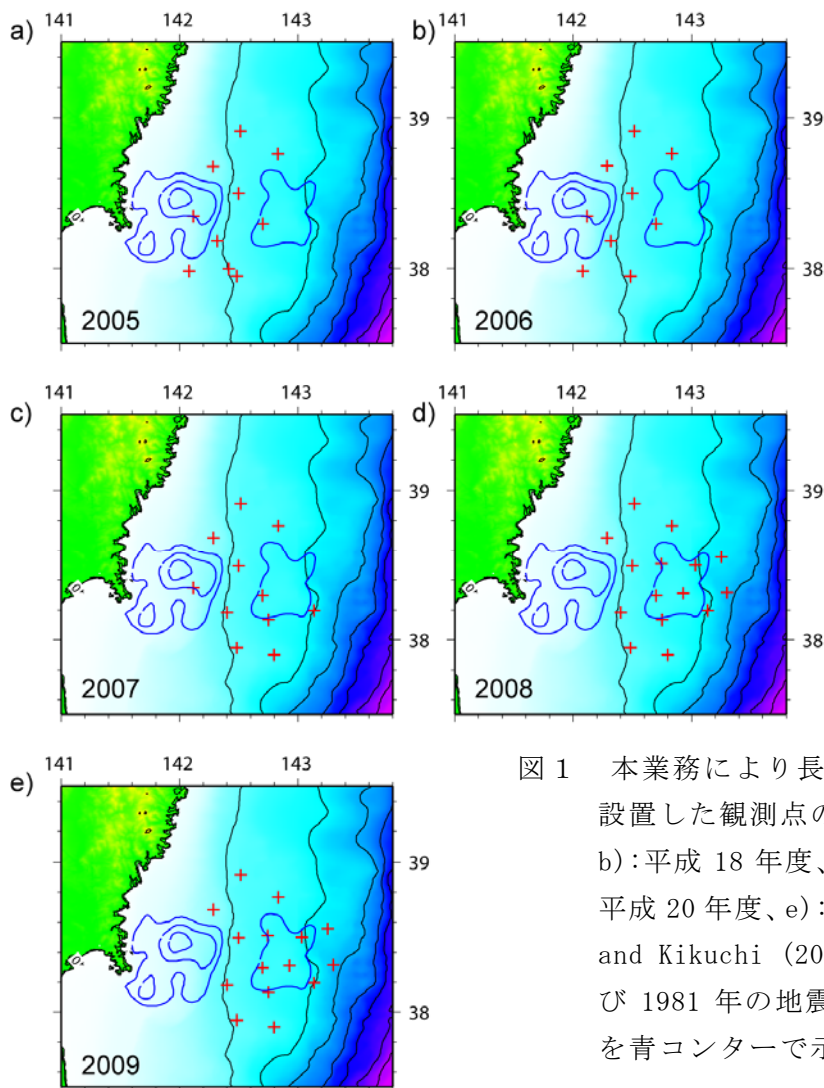


図1 本業務により長期観測型海底地震計を設置した観測点の配置。a):平成17年度、b):平成18年度、c):平成19年度、d):平成20年度、e):平成21年度。Yamanaka and Kikuchi (2004)¹⁾による1978年及び1981年の地震のアスペリティの位置を青コンターで示す。

測点数の増強を図った。その結果、最終的には15観測点における連続観測の態勢が整った（図1）。

本業務で用いた長期観測型海底地震計は、マイクロコンピュータ制御のジンバルシステム（姿勢制御機構）付きの固有周期1秒の3成分速度型地震計の波形記録を24ビットのダイナミックレンジを持つデジタル収録式レコーダに連続記録するもので、センサーなどの装置はすべてチタン合金製の耐圧容器に収容されている（写真2～5）。この海底地震計は音響通信による遠隔制御機能を有しており、海上の観測船から、地震計までの距離を計測できるほか、観測終了後の記録停止命令や、おもりを切り離して浮上させて回収するための離底命令などを送信することができる。電源には1年間の長期観測を実現するために大容量のリチウム電池を組み合わせ使用している。こうした電池の組み合わせを含め、海底地震計システムの調整・組み立て作業は東京大学地震研究所で実施した（写真6、7）。また、地震計の他、地震計を遠隔制御するための音響通信制御装置、海底地震計の時刻校正を行う際の基準となるGPS時計制御システム、地震計を設置する船舶あるいはヘリコプターの位置を記録する海底地震観測用GPS測位システム等の海上作業支援装置の総合的な整備も、地震計の整備作業とともに実施した。

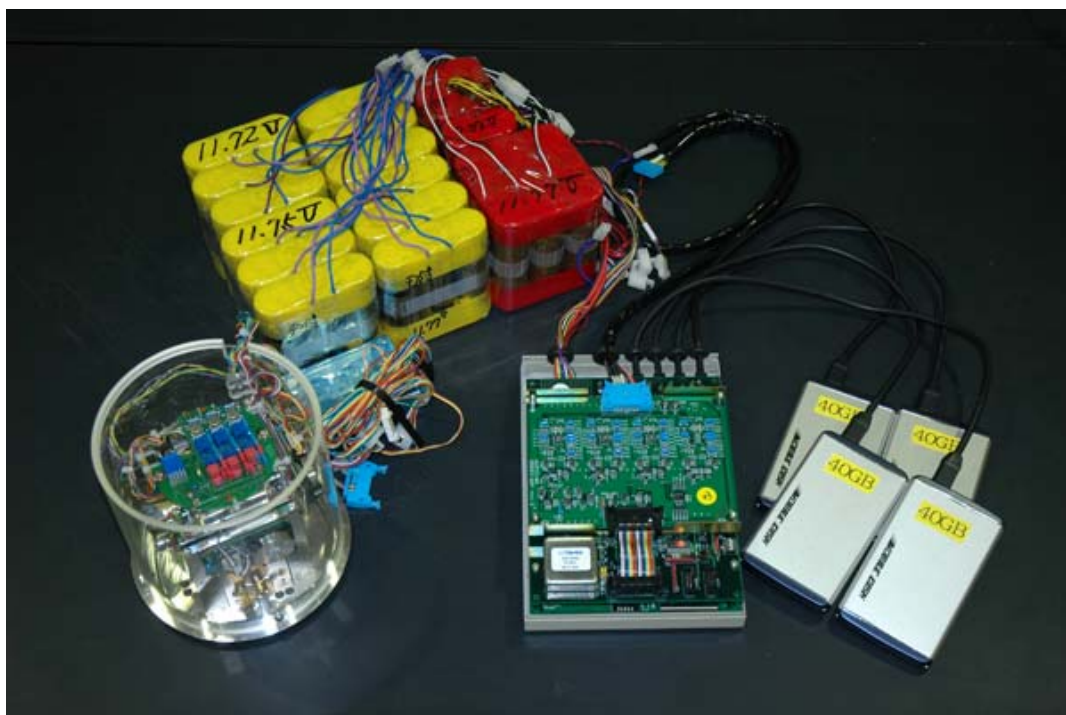


写真2 長期観測型海底地震計の主要パーツ。観測に利用した能動制御式ジンバル付き1秒センサーと記録器・リチウム電源。

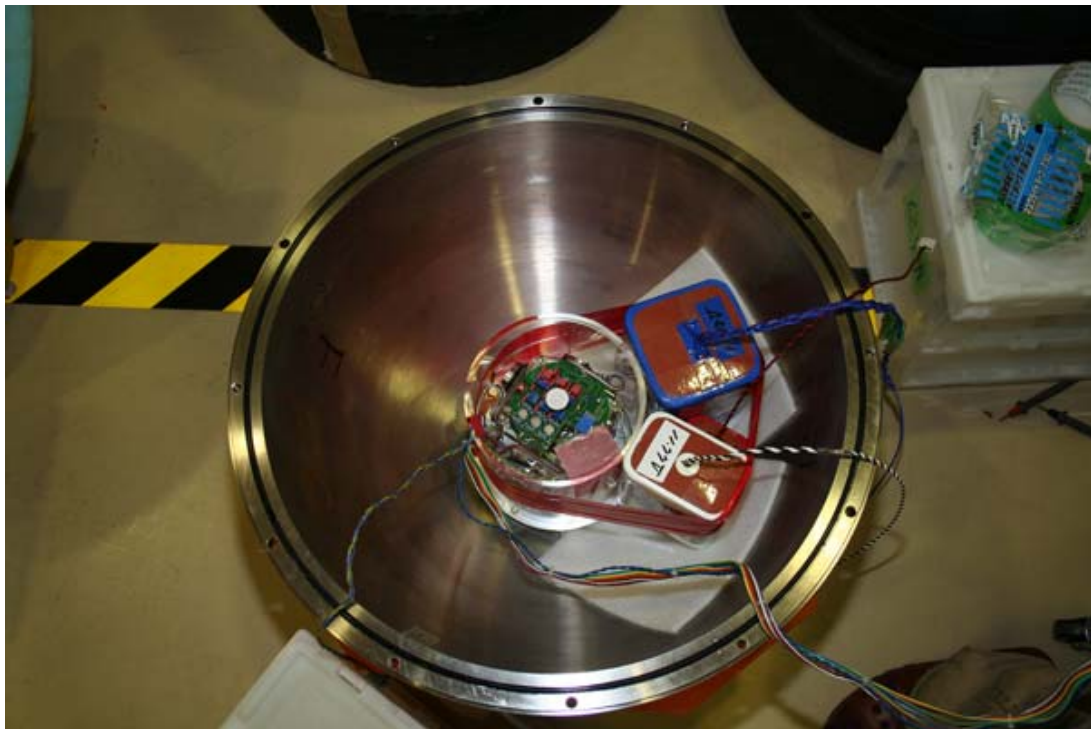


写真3 長期観測型海底地震計。チタン製耐圧容器下半球に地震計センサーユニットと電池を組み込んだ状態。



写真4 長期観測型海底地震計。中蓋の上にデータレコーダ、ハードディスクを設置した状態。



写真5 長期観測型海底地震計。データレコーダとともに音響通信制御装置を取り付けた状態。

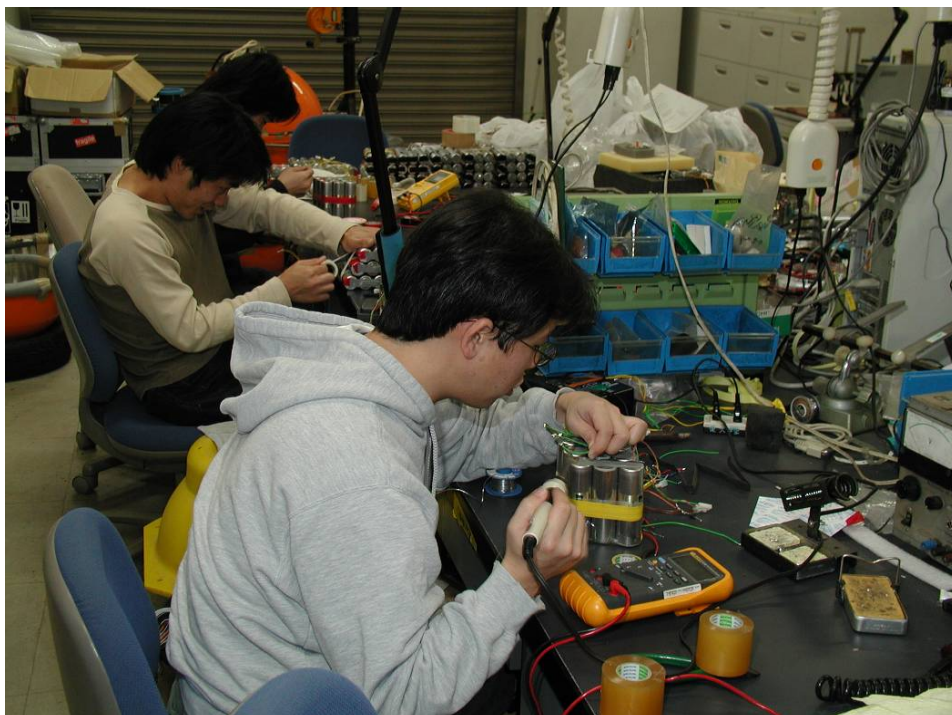


写真6 長期観測型海底地震計の組立作業。海底地震計計測部を作動させるためのリチウム電池パックの組み立て。

地震計の設置・回収作業は、東北大学大学院理学研究科と共同して実施した。平成 17 年度（2006 年 1 月）及び平成 19 年度（2008 年 12 月）の設置作業は大型ヘリコプター（朝日航洋株式会社エアロスペース AS332L 型機）で実施した（写真 8～10）が、それ以外の設置・回収作業は船舶（気象庁観測船「凌風丸」、函館海洋气象台観測船「高風丸」、海洋研究開発機構学術調査船「白鳳丸」、同支援母船「よこすか」及びオフショアオペレーション作業船「かいゆう」、同「第 5 海工丸」、同「第 12 海工丸」）により実施した（写真 11）。地震計の海底への設置位置は、地震計が海底に着底した後、音響制御装置を用いた測量により決定した。また、設置地点の水深は各作業を実施した船舶が有する精密音響測深儀により計測した。地震計の設置をヘリコプターで行った場合は、地震計の位置・投入地点水深の測定は、回収時に船舶により行った。

回収された海底地震計はいずれも、回収作業に用いた船舶の入港地から東京大学地震研究所に輸送した後、同研究所内において開封を行った。開封時に、データが記録されたハードディスクを取り出すとともに、海底地震計を構成する装置群や観測支援装置の点検・調整を行い、次期の観測に備えた（平成 18～20 年度）。

海底における観測期間中の地震波形観測記録は、レコーダに内蔵のハードディスクに時刻情報とともに連続して記録される。この時刻情報は、レコーダが内蔵する高精度水晶時計によるものである。この時計の水晶の発振周波数の安定度は 0.01ppm ときわめて高く、設置直前と回収直後に地震計の内蔵時計と GPS 時計との時刻差を測定することにより、観測期間中の時刻差が、それらを線形内挿して得られるものとして、地震波形データの時刻管理を行っている。

各海底地震計から取り出したハードディスクに記録されているデータはすべて、処理システムに転送した後、全観測点のデータを、時間軸を揃えて統合した後、1 分ごとのファイルに編集した（図 2）。さらに、東北大学及び気象庁が宮城県沖海域において実施している短期観測型海底地震計による海底地震観測のデータと統合を行った。こうした得られた海底地震観測データについて、気象庁の一元化カタログに掲載されている地震に対して P 及び S 波の到達時刻の読み取りを東北大学と協力して行い、震源の再決定を行った。

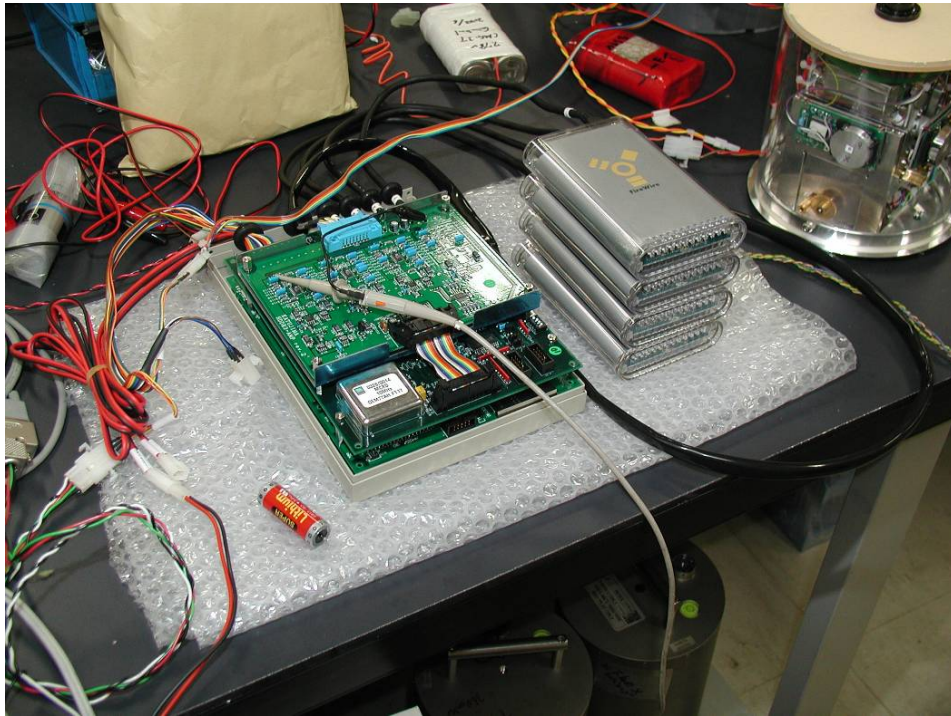


写真7 長期観測型海底地震計計測部の組立作業。ジンバル付き1秒センサーと記録器を接続しての作動試験。



写真8 石巻臨時ヘリポートに到着した長期観測型海底地震計と東北大学が借り上げた大型ヘリコプター（朝日航洋株式会社アエロスパシアルAS332L型機）。



写真9 大型ヘリコプター機内に搭載した5台の長期観測型海底地震計。



写真10 ヘリコプター機内に搭載された海底地震計の海底設置位置測定システム。



写真11 備船にて回収された長期観測型海底地震計。

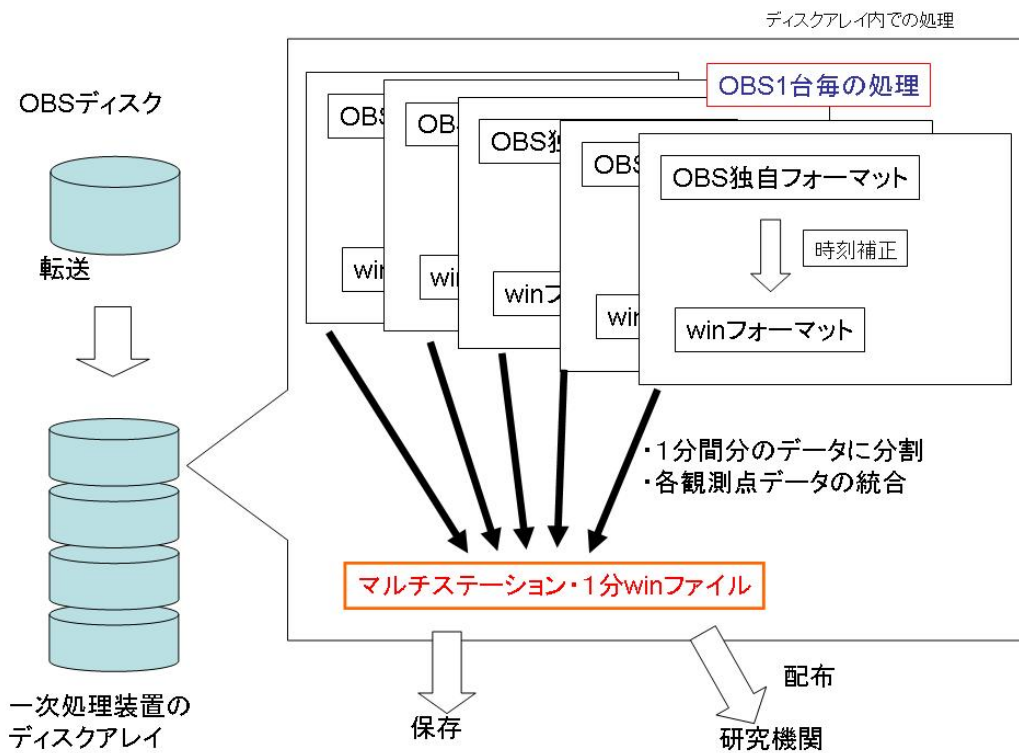


図2 本業務で行った長期観測型海底地震計観測データの一次処理。

(c) 業務の成果

1) 3次元速度構造の推定とそれを用いた震源決定

より正確な震源分布を明らかにするために、海底地震観測により得られたデータを用いた震源決定を行った。震源決定の対象となったのは気象庁一元化処理により震源が決定されたもので、対象期間は、宮城県沖における海底地震観測が開始された2002年9月から本業務による観測が終了した2009年10月までである。こうした地震について、陸上の観測点でのP及びS波の到達時刻データに本業務の海底地震観測のデータを加えることにより、震源再決定を行った。なお、海底地震観測のデータには、本サブテーマで行っている長期観測型海底地震計により得られたデータだけでなく、サブテーマ1で実施した短期観測型海底地震計による観測で得られたデータも追加した。上記の観測期間中であっても、海底地震計の欠測や海底における地動ノイズレベルが高いなどの理由で、海底地震計での読み取り値が得られなかった地震は、震源再決定の対象から除外した。図3に解析にデータを用いた観測点の配置を示す。

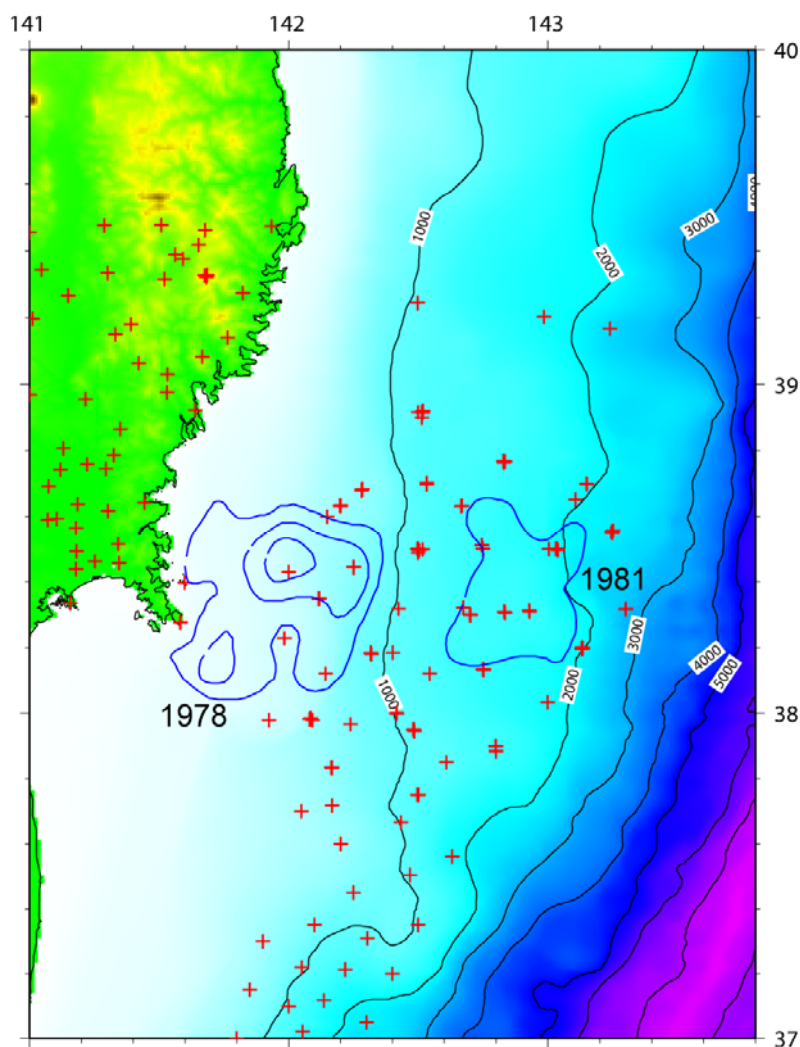


図3 本業務で行った震源再決定に用いた観測点の配置。Yamanaka and Kikuchi (2004)¹⁾による1978年及び1981年の地震のアスペリティの位置を青コンターで示す。

震源決定に用いた速度構造にはサブテーマ1で得られた3次元速度構造モデルを用い、速度構造の推定に用いたのと同じDouble-differenceトモグラフィ法(Zhang & Thurber, 2003²⁾)の震源決定アルゴリズムを用いて地震波到達時刻データから震源の再決定を行った。なお、海底地震観測点のデータを加えても、宮城県沖の海域の周辺部においては、観測点配置に偏りが生じてしまうため、直近までの観測点の距離が30 km以下の地震の中で、GAP(地震からみた観測点の方位角間隔の最大値:地震を観測点で取り囲めていない場合大きくなる)が270°より小さいものを選別して解析に用いた。

本業務により再決定した震源位置の、気象庁による震源位置との差の頻度分布を図4に示す。海底地震計のデータと3次元速度構造モデルを用いて推定した震源の信頼度の方が高いと考えれば、この不一致の主な要因は、気象庁カタログデータの震源情報を含む誤差であると考えられる。震央位置の残差分布に関しては、経度(x)、緯度(y)方向で顕著な違いは見られず、概ね5 km程度のばらつきをもって分布している。また、このばらつきの中心は0ではなく、気象庁カタログの震央にわずかながら、系統的なシフトがあることを示す。シフトの量は東西(x)方向南北(y)方向ともに、2~3 km程度で、気象庁震央が系統的に北西側に偏っている。この海域の地震の多くは、主として宮城県周辺の観測点での観測データにより震源決定されているため、震源からみて北西側に観測点が集まることになる。こうした偏りが原因となって、ここでみられるような震央位置の系統的な偏りが生じるものと考えられる。一方で、震央位置に比べて、深さ方向のばらつきは大きく(10 km程度)、陸上観測点から震源深さを正確に求めることの難しさが改めて確認された。ばらつきが非常に大きいため、震央位置にみられるような系統的なシフトがあるかどうかはよくわからない。

図5に、本業務で再決定された震源の分布を示す。一元化カタログの地震と比較すると、震央位置・震源深さともに集中する傾向にある。ただし、上で指摘したような震央位置の系統的なずれは、この縮尺では顕著ではない。

宮城県沖の海域における地震活動度は、空間的に非常に不均質であることが従来から指摘されている。例えば、Okada et al. (2005)³⁾は、1978年宮城県地震や2005年宮城県沖地震の余震活動が発生しているのは、定常的に地震活動が活発な場所に限られることを示している。その傾向は、海底地震計のデータを用いた高精度の震央分布でも同様であり、しかも、再決定された震央はより高い集中度を示すことから、地震活動領域の面積は、実際にはかなり小さいことがわかった。

震源深さ分布をみると、陸側に傾き下がる分布が顕著であり、この海域における地震の多くがプレート境界付近に集中して発生していることが確かめられた。今回再決定の対象となった地震のなかでも、特に震源決定精度が高い(GAP<180°、初期震源決定における走時残差0.5秒以下などの条件を満たすもの)と思われる地震について注目すると、陸側に傾斜する震源群の厚さはさらに薄くなることから、地震が発生しているのはプレート境界面の極近傍に限られると予想される。

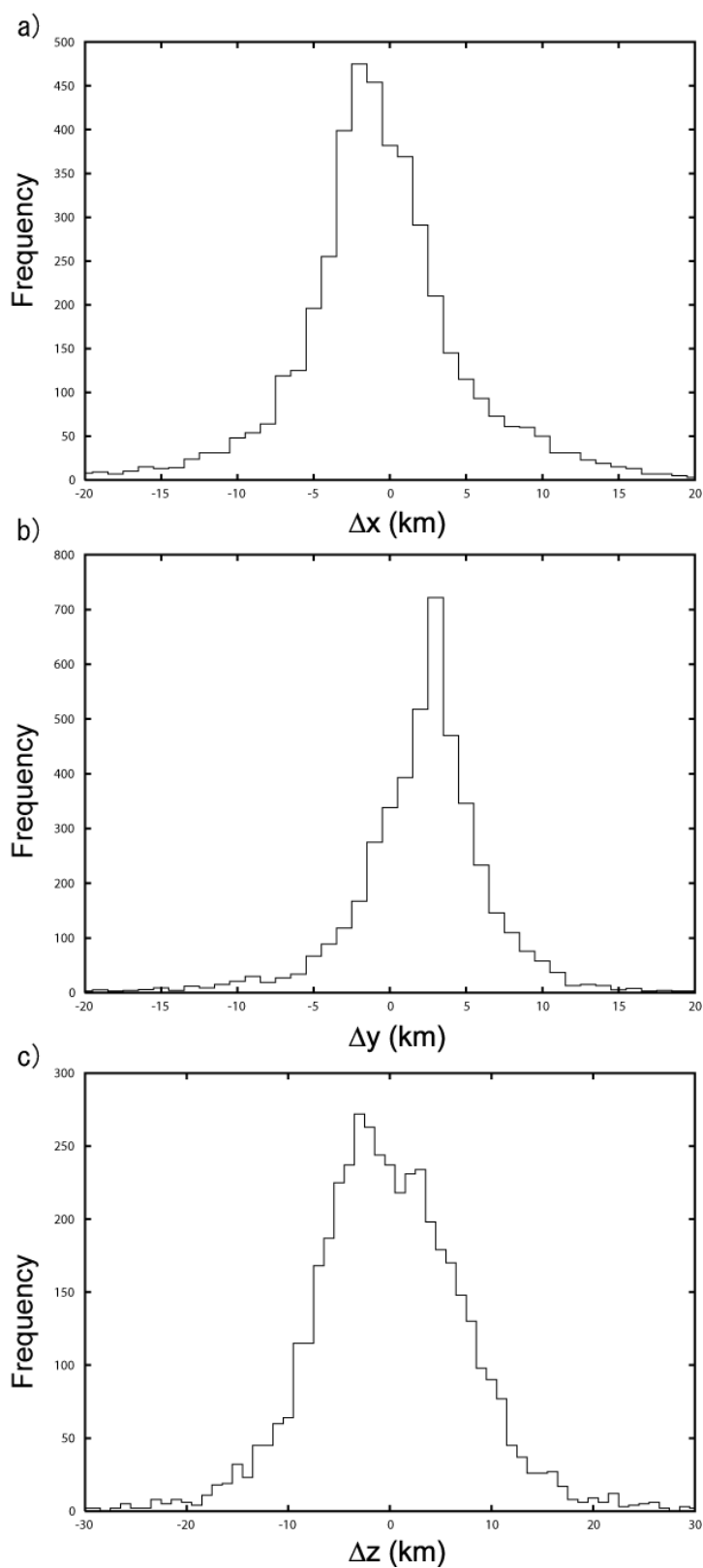


図4 再決定震源と気象庁一元化カタログによる震源位置の違いの頻度分布。a) 東西方向、b) 南北方向、深さ方向。いずれも、(気象庁震源－再決定震源)の差を示した。

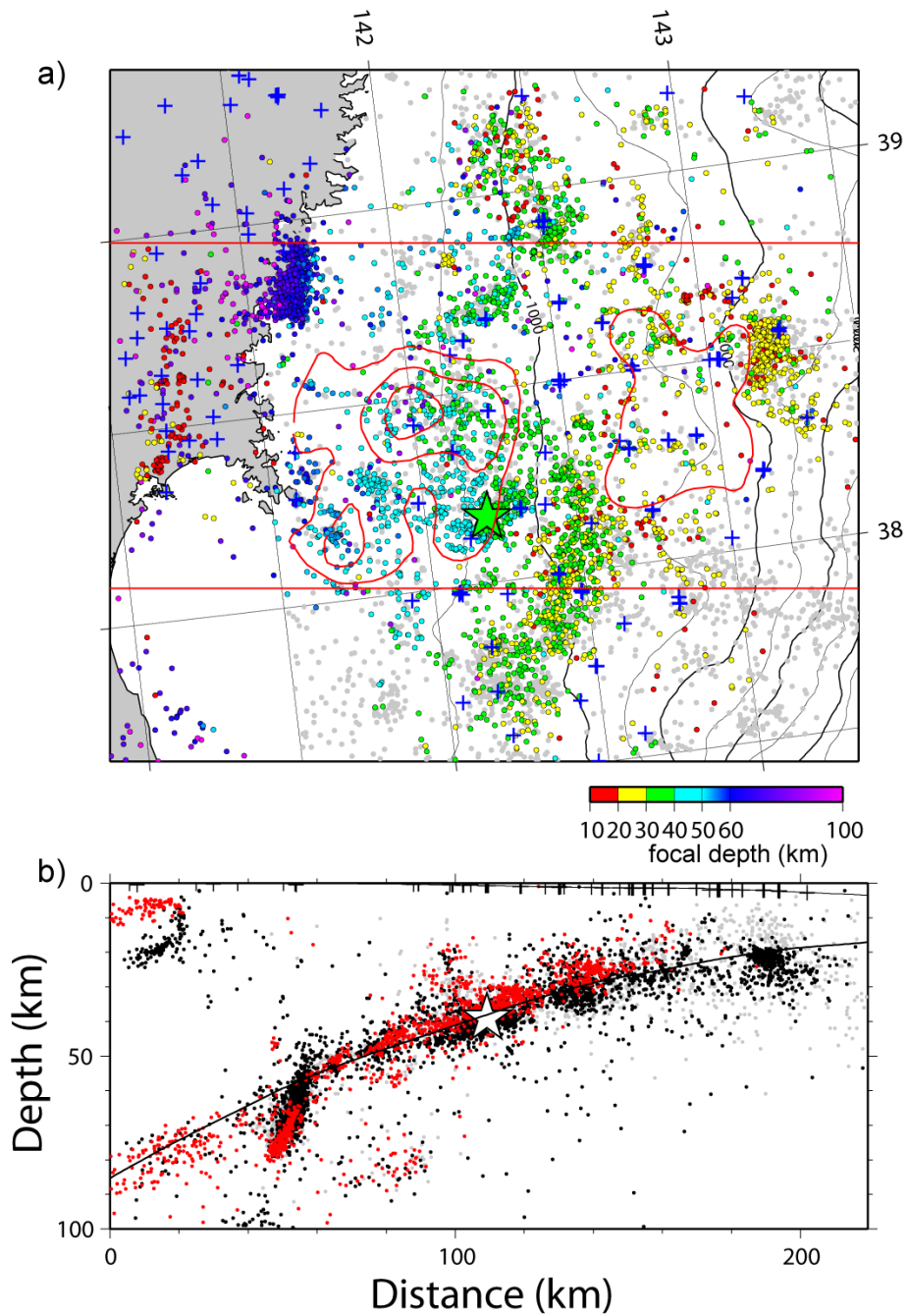


図5 本業務の再決定により得られた、宮城県沖における震源分布。a) 震央分布。震源深さを色別で表示した。赤色コンターはYamanaka and Kikuchi (2004)¹⁾による1978年及び1981年の地震のアスペリティの位置。灰色丸は気象庁一元化震源。b) 震源深さを示す鉛直断面図。黒丸が再決定された震源。赤丸はそのなかでも特に震源決定精度が高いもの。灰色丸は気象庁一元化震源。曲線でプレート境界地震を選択する際の基準とした面を示す(詳細は本文)。断面図の位置をa)内に赤矩形で示した。星印は再決定された2005年の地震の本震震源。

これらの地震の震源分布をこの海域で実施された人工地震探査(図6)により得られたP波速度構造モデル(Shinohara et al., 2007)⁴⁾と比較したものを図7に示す。人工地震探査による構造モデルのプレート境界面の位置は、主として反射波の走時により推定されたものであるが、得られた震源分布の上側をなぞるような位置関係にある。宮城県沖における3次元地震波速度構造を推定した山本(2007)⁵⁾は、プレート境界面を陸側に傾斜する震源分布の上面と定義すると、そこがスラブ地殻の低速度帯と上盤側の高速度マントルウエッジとの境界と良い一致を示すことを指摘している。従って、宮城県沖における地震の多くはプレート境界に沿って発生しているが、詳細にみると、プレート境界面上で起こるものと、沈み込む海洋性地殻内部で発生するものからなっていると解釈することができる。逆に、こうしたプレート境界面沿いの地震活動には、境界より上盤側の地震はほとんど含まれていないと考えることができる。

しかしながら、地震波速度構造から定義されるプレート境界面より上側で発生している震源が、数は少ないものの確実に存在することも確かである。震源決定精度が特に高い地震の中にも、プレート境界面付近に震源が決まった他の地震と比べて、顕著に浅い地震が存在している。図8に、Yamamoto et al. (2008)⁶⁾により定義されたプレート境界よりも5 km以上浅い震源深さをもつ地震の分布を示す。震央分布及び断面図をみると、1978年の地震のアスペリティの近傍の深さ20 km以深に顕著な集中がみられる。この地域の地殻の厚さは20 km以下であることから(たとえば、Ito et al., 2005⁷⁾)、こうした地震は上盤のマントルウエッジ内で発生していることになる。

Uchida et al. (2010, in press⁸⁾)は、同様な局在するクラスター状のマントルウエッジ内地震活動を東北日本弧下に見だし、supraslab earthquake(スラブ上方地震)と名付けている。彼らは、こうしたsupraslab地震活動の原因として、沈み込む太平洋プレートから引きはがされた海山がマントルウエッジ内を上昇する過程で、その内部で脆性破壊が発生する可能性を指摘している。

1978年地震の北側アスペリティ直下で発生する上盤側プレート内地震も、活動様態からみればsupraslab earthquakeに分類可能である。山本・他(2009)⁹⁾は、こうした地震活動の周囲は、supraslab地震活動がみられない宮城県沖南部に比べると、地震波速度が低下していることを指摘している。こうした特異な構造が存在するために、1978年地震の北側アスペリティは、2005年に再活動した南側アスペリティとは異なる摩擦特性を持つのかもしれない。

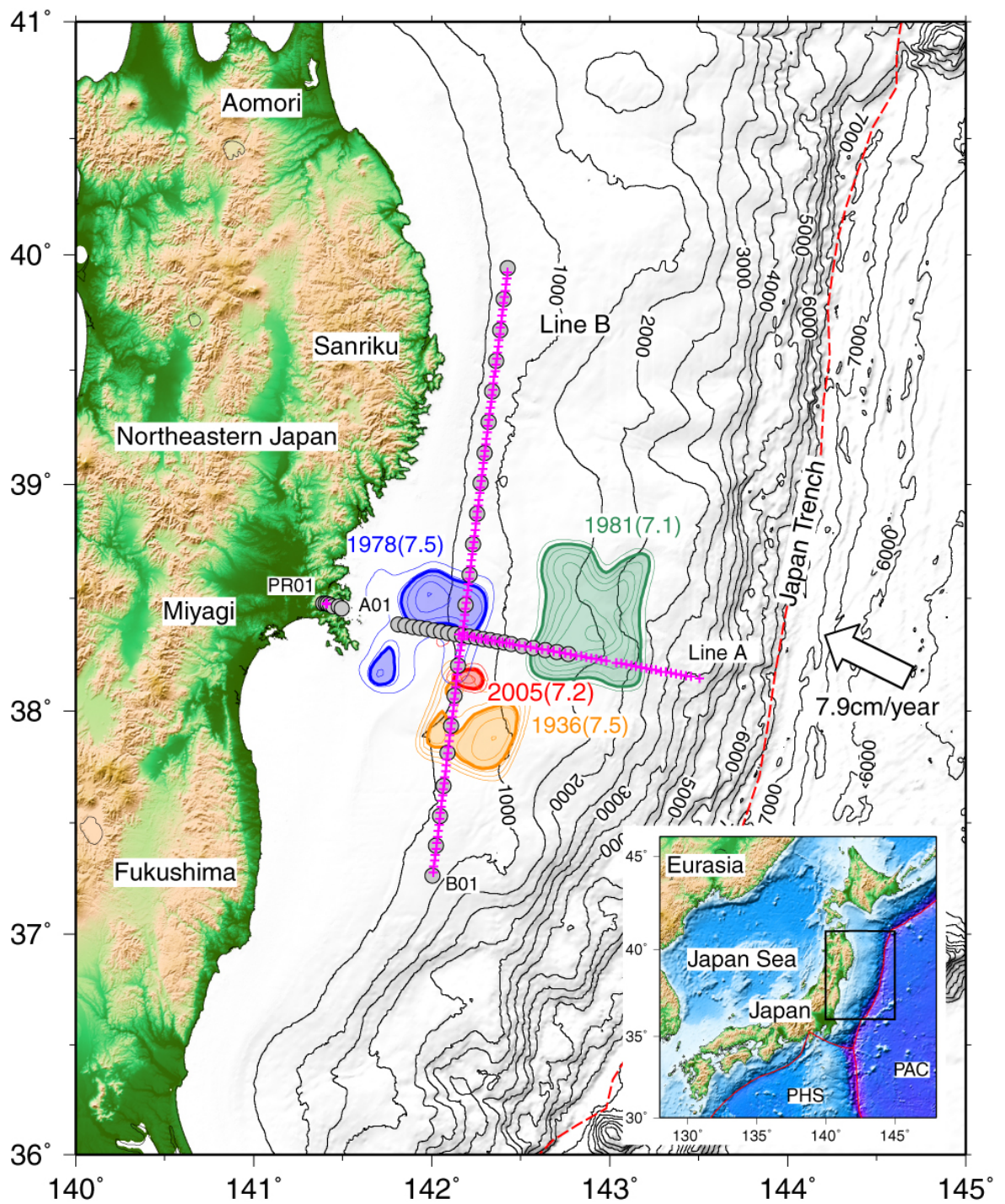


図6 2004年に実施した構造探査実験の測線と過去の大地震のアスペリティ (Yamanaka and Kikuchi, 2004¹⁾)。

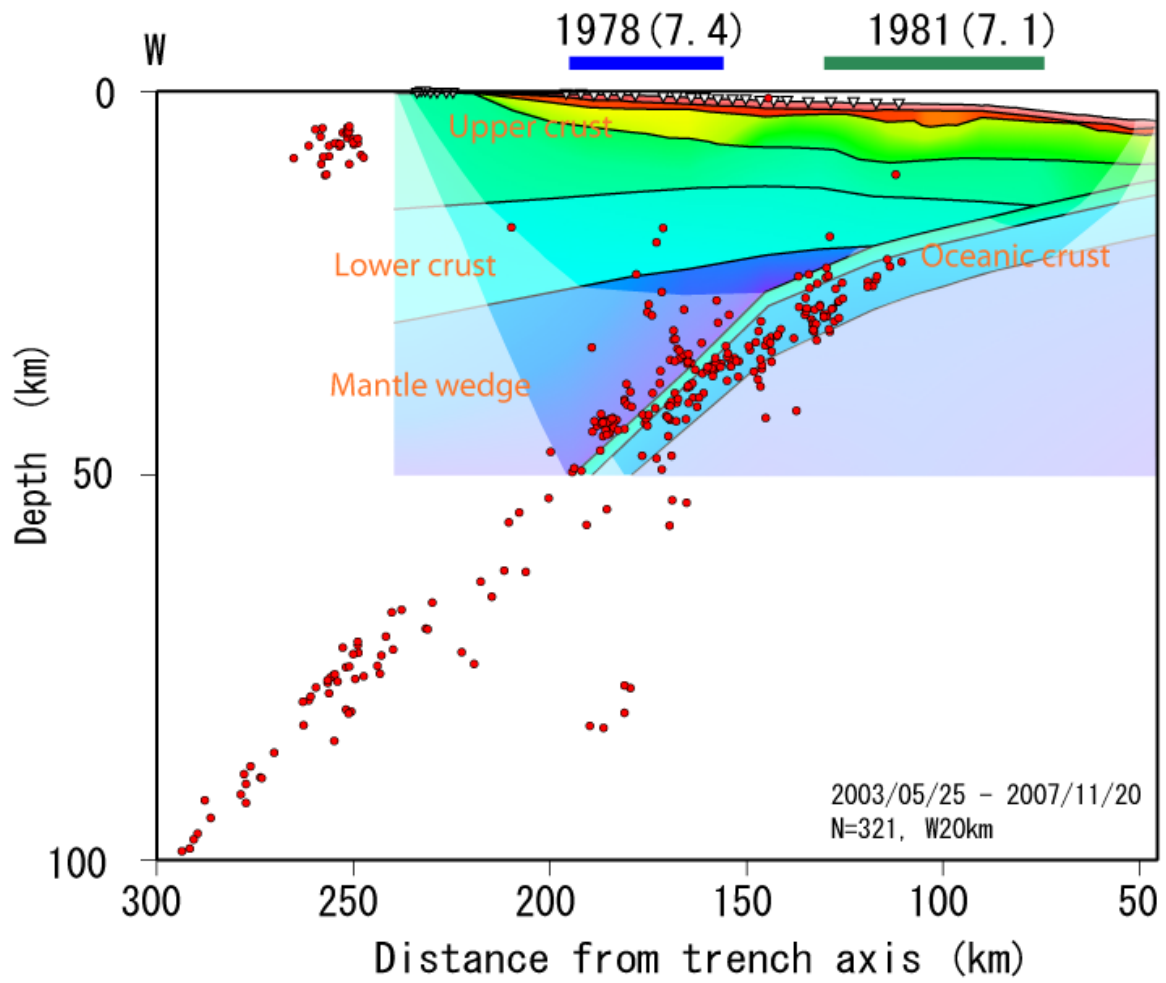


図7 人工地震探査により得られたP波速度構造モデルと、再決定された震源分布。探査測線近傍（測線を中心に±10 kmの範囲内）の震源のみを表した。1978年及び1981年の地震の破壊域の拡がりを図上側の横棒で示す。

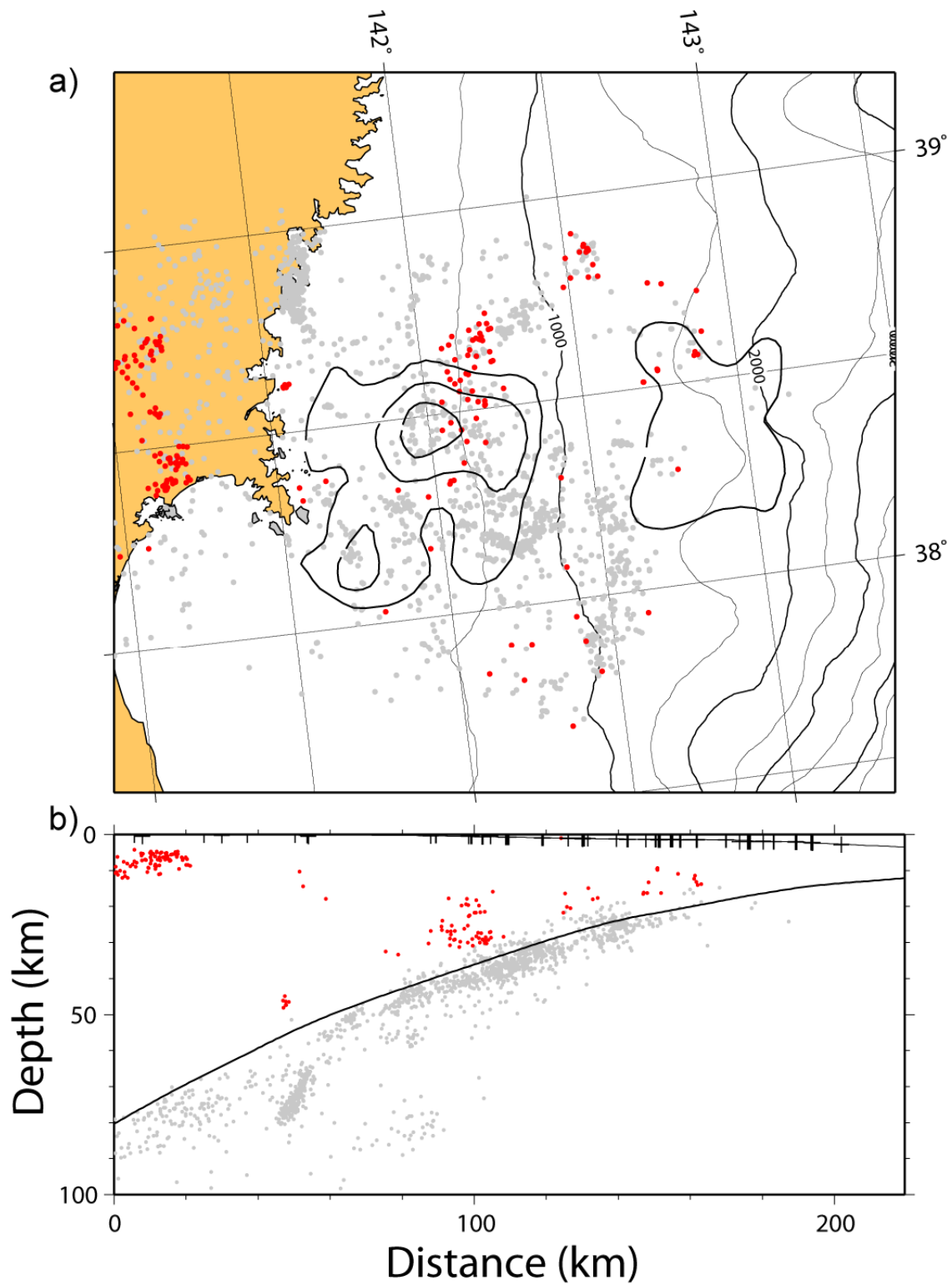


図8 プレート境界上盤側に震源が決定された地震の分布。a)震央分布。b)震源深さを示す鉛直断面図。赤丸はプレート境界面（b中曲線で表示）より5 km以上浅い震源深さをもつ地震。プレート境界面のモデルはYamamoto et al. (2008)¹⁾による。灰色丸は図5中赤丸で示した地震。

2) 一元化カタログに基づく地震活動の時空間変動の検討

ここでは、宮城県沖における地震活動の時空間的な変動について、気象庁一元化カタログに基づいて検討を行う。本来であれば、海底地震観測のデータにより再決定された震源位置を用いた解析を行うべきであるが、次のような理由により、気象庁カタログに掲載された震源要素を用いて解析を行った。

本業務では、長期観測型海底地震計の数を増やしながらか観測網の増強を行ったために、観測点配置が長期間にわたって一定ではない。そのために、海底地震観測データを用いて再決定された震源の決定精度が時間変化するとともに、再決定可能な地震の規模の下限もまた変化してしまう。海底観測データを用いて高精度で決定された震源は、地震活動の空間分布に関する議論を行う上では有効であるが、時間変動を検出するための解析に再決定された地震のカタログをそのまま使用することは適切ではない。一方で、気象庁カタログの震源位置の信頼度に関しては、本業務で行った海底地震観測の結果との比較により定量的に評価することができたので、その分解能の範囲内であれば、気象庁カタログによる解析結果もまた信頼に足るといえる。つまり、解析そのものは気象庁カタログによるものであっても、そうした解析の合理性の根拠は本業務による海底観測の結果が与えているのである。

ここでの解析では、2005年8月16日のM7.2の地震の発生前後での、地震活動の変化に注目する。サブテーマ1で行ったGPS解析の結果からは、M7.2の本震発生後には顕著な余効すべりがみられることが指摘されているが、この地震の破壊域近傍では相似地震活動が活発ではないため、相似地震解析からはそうしたプレート間すべりの加速は確認されていない。そこで、相似地震にこだわらず、プレート境界近傍で発生するすべての地震に着目し、その活動度にプレート間すべりの加速・減速に対応するような変動があるかを検討する。地震活動度の指標としては地震の発生個数を選び、2004年1月から2010年3月までの期間で、宮城県沖における地震発生個数の時間変化を調べた。

対象となる宮城県沖は、陸上の観測網から遠いため、気象庁カタログを用いたとしても、検知能力が時間・空間的に変動してしまう可能性がある。そこで、解析対象には、そうした検知能力の変動による影響を受けないような十分に大きい地震を選ぶ必要がある。そうした「十分に大きい地震」の選択基準は、宮城県沖の地震に対して作成した規模別累積頻度分布（図9）をもとに決めた。気象庁カタログにおける宮城県沖の地震については、 $M \geq 2.5$ の範囲では、G-R式によく従うが、それより小さい地震では累積頻度に顕著な頭打ちがみられる。そこで、 $M=2.5$ を検知能力の下限と考え、以下の解析は、カタログから $M \geq 2.5$ の地震を抽出して行った。

ここでは、プレート間すべりの加速・減速に対応するような地震活動の変動の検出を試みるため、プレート境界面の近傍で発生した地震を対象として解析を行う。本業務で再決定された震源との比較から、気象庁カタログの震源深さには ± 10 km程度の誤差が含まれていることをすでに指摘した。そこで、本業務で海底観測のデータを用いて推定された震源分布のほぼ中心を通るような面（図5）を基準として、そこから深さ方向に ± 10 kmの範囲内にある地震を解析の対象として選ぶこととした（図10）。上でも述べたように、震源はプレート境界面より下側に偏って発生していると考えられるため、この基準面はプレート境界面そのものではなく、その5 km下側を通る面として定義した。

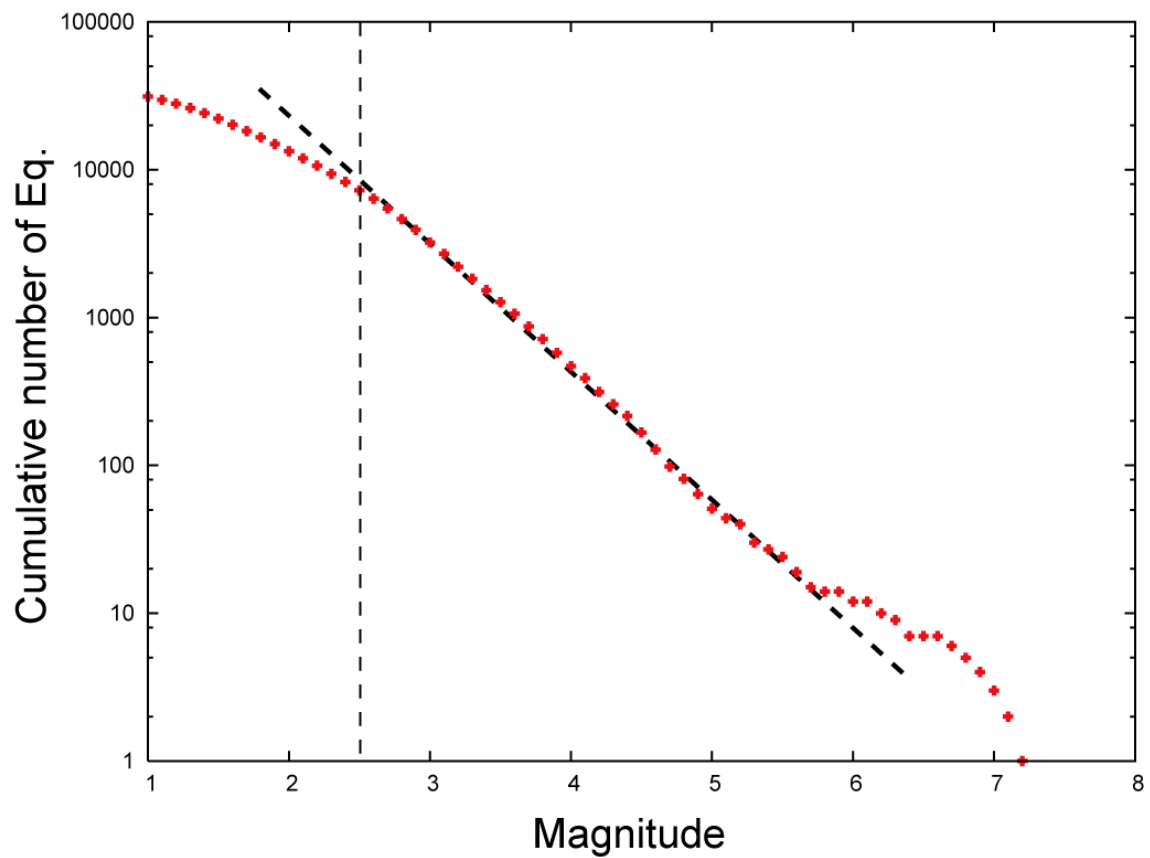


図9 宮城県沖で2004年1月～2010年3月の間に発生した地震の規模別累積頻度分布。気象庁一元化カタログによる。

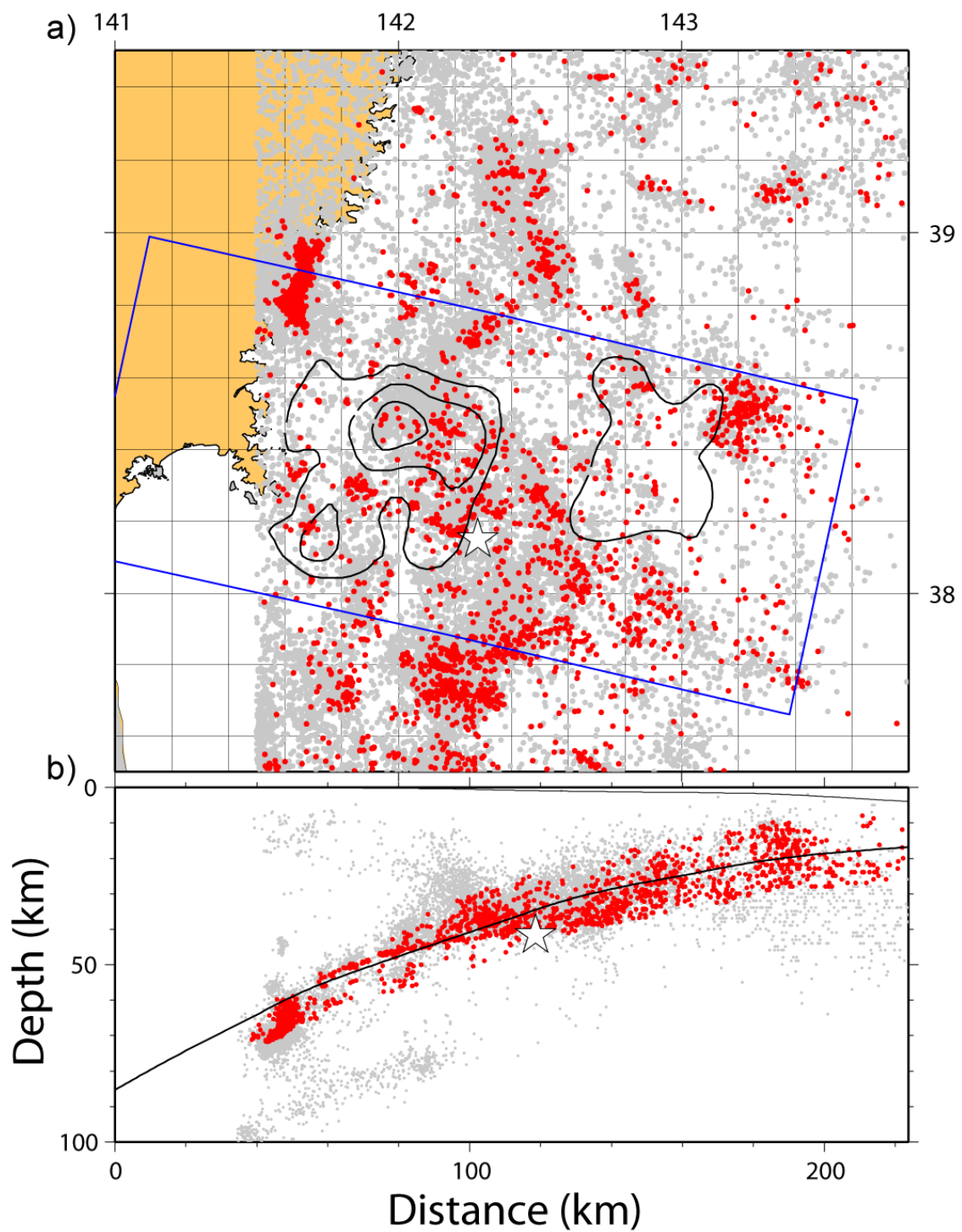


図10 解析対象とした地震の分布。a)震央分布。b)震源深さ分布。解析対象として抽出した地震を赤丸で示す。灰色丸は、それ以外の地震（気象庁一元化カタログによる）。

以上のようにして気象庁カタログから抽出された地震カタログを用いて、地震発生個数の時空間変化を推定した。宮城県沖においては、地震活動度の空間的な変化が極めて大きいため、活動度の時空間変動を見るためには、ある時期における活動度の空間分布を基準として、それからの変動に注目する必要がある。ここでは、2005年8月16日の本震の発生による影響に注目するため、本震発生前の発生個数分布を基準にそこからの増減から、地震活動の活発化・静穏化を判断することにした。

図11 は、本震発生前（2004年1月1日～2005年8月16日11時46分）に対する地震活動度の変動を、①本震発生からおよそ4ヶ月後の12月2日にM6.6の最大余震発生まで（図11a）、②最大余震発生から2007年1月1日まで（図11b）、③2007年1月1日以降（図11c）、の3つの期間にわけて調べた結果である。本震前と本震後の3期間のそれぞれに対して、緯度・経度 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ で分割した小領域内での地震個数を積算したのち、1日あたりの地震発生レートを推定し、地震発生レートの変化を

$$\frac{\text{（本震後の地震発生レート）}}{\text{（本震前の地震発生レート）}}$$

により表した。この比が1より大きければ、地震活動は本震発生前より活発化、1より小さければ静穏化したことを示す。

本震発生直後では（図11a）、本震震央周辺の地域で顕著な地震活動の活発化が目立つ（領域A、B）。また、本震発生後の8月24日と8月31日に、本震震源から約100 km北東に離れた場所でM6.3の地震が発生し、多数の余震を伴ったため、海溝に近い領域でも顕著な活発化域が存在している（領域D）。これに比べ、2005年の地震では破壊しなかったと考えられている、1978年の北側アスペリティ周辺（領域C）での地震活動の活発化は、あまり顕著でない。

一方、最大余震の発生後では（図11b）、本震破壊域においては地震活動の活発化傾向は見られない。2005年の地震の破壊域は本震震央の西側に位置するが（Yaginuma et al., 2006¹⁰⁾）、その中に位置する領域Aやその西側に隣接する地域では、むしろ静穏化を示している。このことは、破壊域のごく近傍での余震活動はごく短期間の内に終息してしまったことを意味する。一方で、本震破壊域の東側及び南側では、継続して地震活動が活発な状態にある。こうした違いは、地震発生個数の時系列（図12）をみれば、一目瞭然である。本震破壊域内部の領域Aでは、本震発生直後にきわめて活発な余震活動がみられたが、2ヶ月程度のうちに終息してしまっている。これに比べ、破壊域東側の領域Bは、本震直後にも地震活動が活発化（余震活動）しているが、最大余震発生に伴って再活発化し（最大余震の二次余震）、その後も継続して活動度が高い状態を維持していることがわかる。このように、最大余震後も継続して活動度が高い領域は、サブテーマ1で余効すべりが検出された領域とほぼ一致していることは興味深い。このことは、プレート境界近傍の地震活動が、プレート境界におけるすべり速度に対応して変化している可能性を示すものである。また、地震時すべりと余効すべりが相補的な関係にあるのだとすれば、本震の破壊域内部で地震活動が低下しているのは、そこでのプレート間すべりが停止してしまったことによるという解釈が可能である。

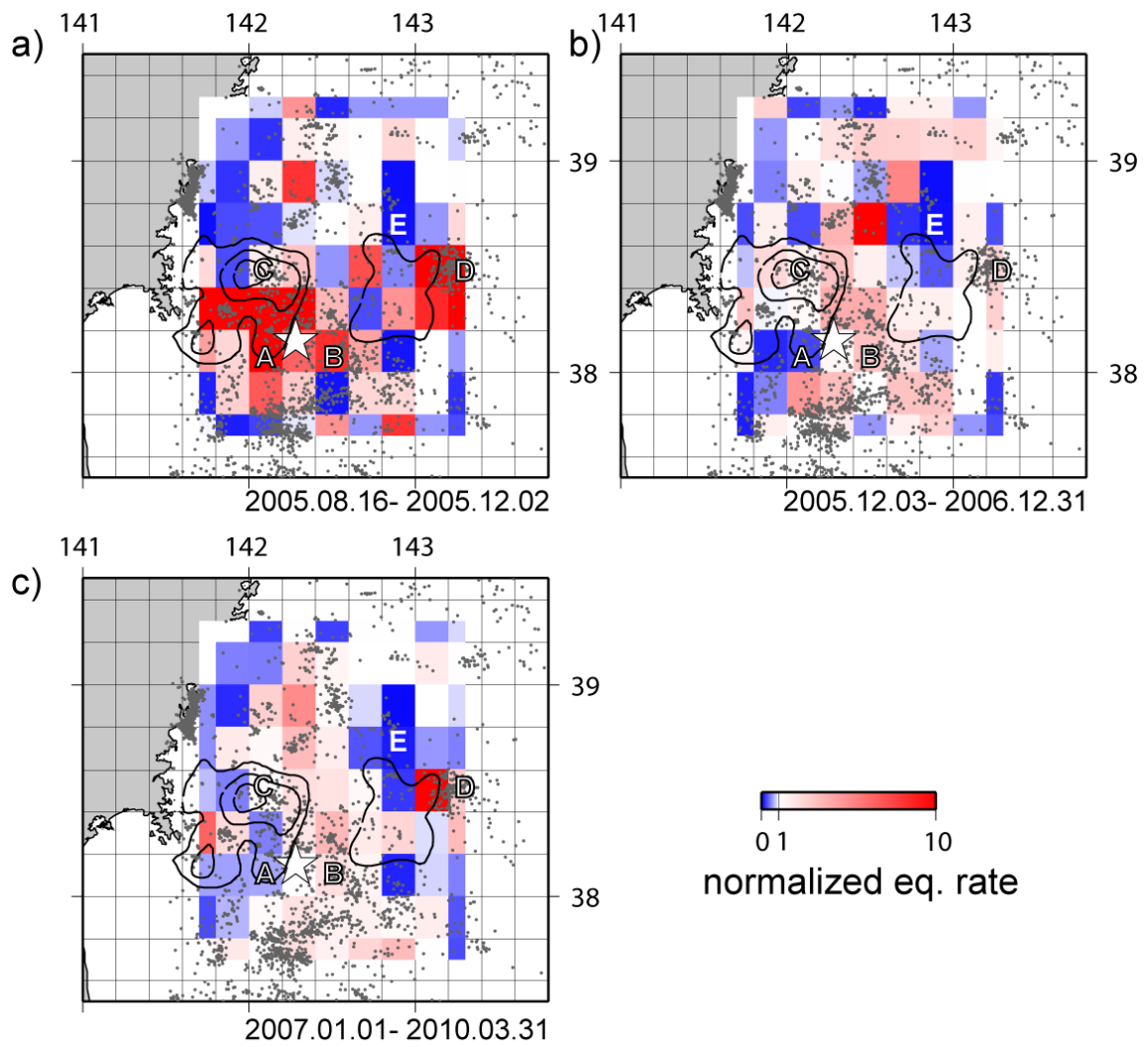


図11 宮城県沖における地震活動の時空間変化。a) 2005年の地震の本震発生直後から最大余震発生まで。b) 最大余震発生直後から2006年末まで。c) 2007年1月1日以降。灰色点は解析対象の地震。星印は本震震央。1978年及び1981年の地震のアスペリティの位置をコンターで示した。

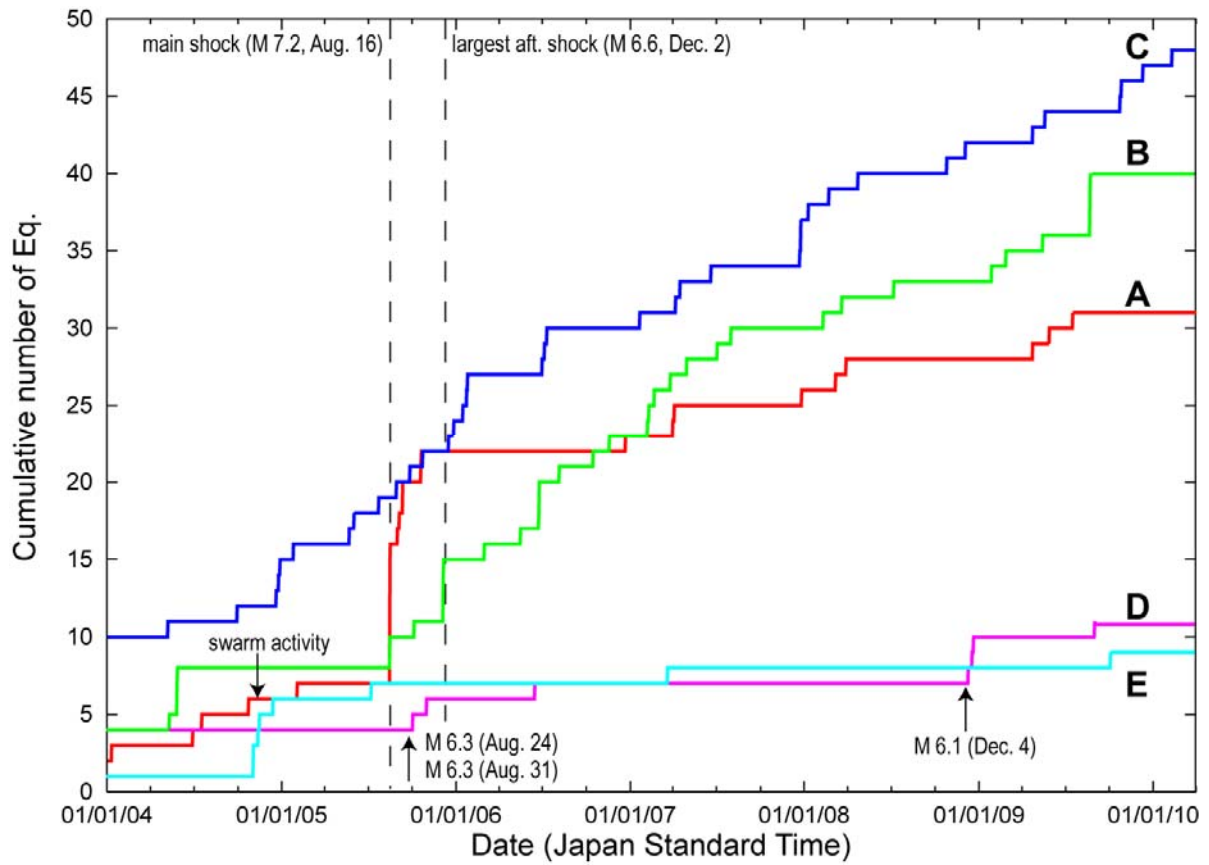


図12 図11中のA~E領域における地震発生個数の時系列。時間表示は「月／日／年」。

震央分布についての議論でも述べた通り、宮城県沖においては、地震活動領域の面積が小さい。それを取り囲むように存在する地震活動が低調な領域で非地震性のすべりが卓越するのであるとすれば、そうしたすべりは面積が小さい地震性領域に対して载荷を加えることになる。従って、プレート間すべり速度の加速は、プレート境界面上・海洋性地殻内のいずれで発生する地震についても、発生を促進するのかもしれない。

一方で、1978年の地震の北側アスペリティ周辺での地震活動の変化は、本震発生直後と同様にあまり顕著でない。時系列でみると、北側アスペリティ近傍の領域Cにおける地震発生レートは、本震の影響をわずかに受けている可能性はあるものの、2004年から2010年までの全期間にわたってほとんど変化していない（図12）。地震活動からみても、2005年の地震時すべり及び余効すべりは北側アスペリティ周辺の状態にあまり影響を及ぼしていない、ということができる。

サブテーマ1でも議論されたように、GPSデータによれば、2007年頃からプレート間の固着はほぼ回復したと考えられる。これに対応するように、地震活動度も全域でほぼ2005年の本震発生前と同様のレベルに戻っている。領域Dでは再び活発化がみられるが、これは2008年12月4日に発生したM6.1のプレート境界型地震の影響である（図12）。この活動には相似地震も含まれており、相似地震解析からもプレート間すべりの加速が指摘されている。

一方で、領域Eでは、図11a～cのいずれの期間でも顕著な静穏化が示されている。この周辺では、2004年の11月に群発的な地震活動があり、基準とした本震発生前の期間の地震発生レートが高くなっているために生じたみかけの静穏化である。

ここまでは、プレート境界近傍の地震活動の時空間変化について検討したが、プレート境界から離れた地震の活動についても検討を行った。1978年地震の北側アスペリティの近傍には、顕著な上盤側プレート内地震の活動が見られる。アスペリティの近傍にあるプレート内地震活動は、プレート間固着状態の変化によりもたらされるプレート内の応力状態変化を反映する可能性がある（Matsumura, 1997¹¹⁾）ため、プレート境界近傍の地震と同様にその活動度の変化は注目される。

気象庁の一元化カタログからこうした上盤側プレート内地震を抽出するのは容易ではないが、ここでは、プレート境界近傍の地震を抽出するのと同じ基準で、上盤側プレート内地震を選別した。すなわち、基準面（図5）から10 km以上浅い地震をプレート内地震とする。そうすると、選ばれた地震の多くは、本業務の海底地震観測によって見いだされたもの（図8a）と同様に、1978年地震の北側アスペリティ近傍に集中している（図13）。このことから、こうした簡便な基準によっても、プレート内地震を気象庁カタログから抽出することができると考えられる。こうして選別した地震群から、特に北側アスペリティの周辺の地震に着目してその活動度変化を図14に示すが、全期間にわたって、顕著な活発化・静穏化の傾向は見られない。1978年地震の北側アスペリティにおいては、プレート境界近傍の地震ならびに直上のプレート内地震の地震活動がともに、大きな変化を示していないことから、2005年地震の発生前の状態が基本的には保たれたままであり、このことは、北側アスペリティが未破壊で固着した状態のままであるという考えを支持する。

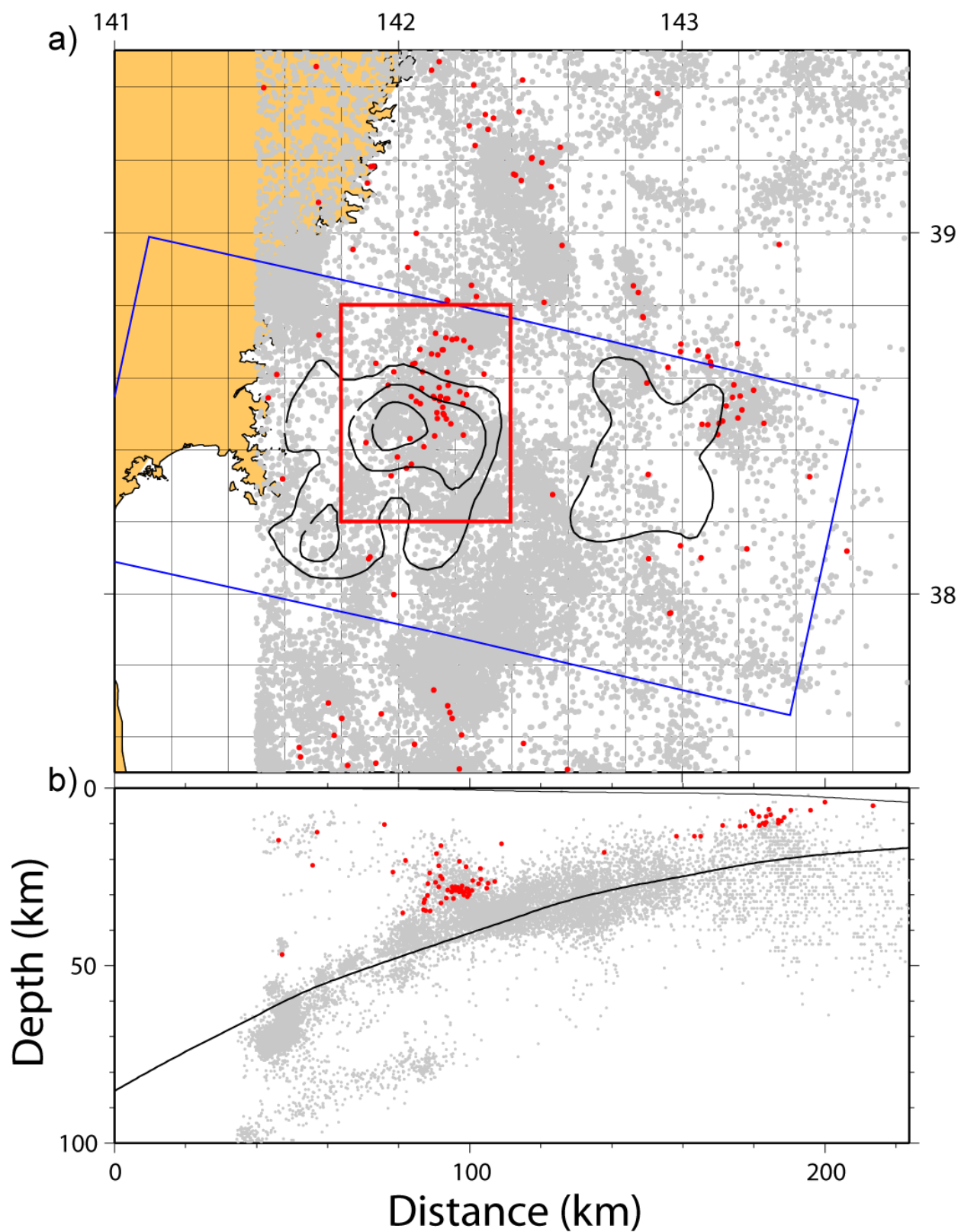


図13 気象庁一元化カタログから抽出された上盤プレート内地震の震源分布。a) 震央分布。b) 震源深さ分布。赤丸が抽出された地震。断面の範囲をa) 中青色矩形で示した。b) の曲線は、抽出作業に用いた基準面（図5と同じ）。

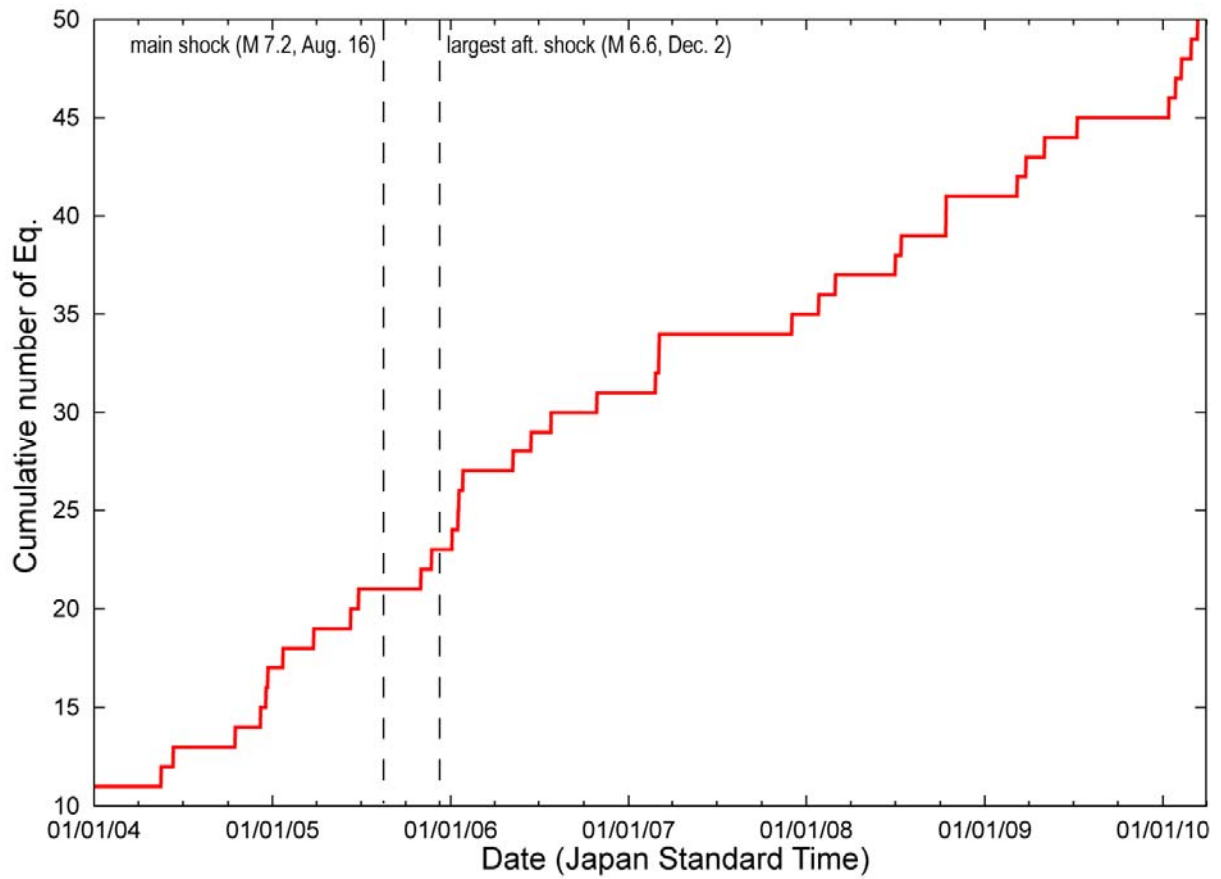


図14 上盤プレート内地震の発生個数の時系列。1978年地震の北側アスペリティ近傍（図13aの赤色矩形で示した範囲）の地震について。

(d) 結論ならびに今後の課題

長期観測型海底地震計を用いた繰り返し海底地震観測を実施し、2002年に開始された連続観測を2009年まで継続することができた。得られたデータを、本業務のサブテーマ1で実施されている短期海底地震観測点ならびに陸上地震観測網で得られたデータと共に解析し、宮城県沖における詳細な震源分布を得た。その結果、多くの地震活動はプレート境界面の近傍に集中して発生していることが明らかとなった。なかでも高精度で決定された震源を人工地震探査の結果と比較することにより、こうした地震はプレート境界ならびに海洋性地殻内部で発生していることが示された。プレート境界上盤側の地震活動は、局在する活動域を除いては、低調である。特に顕著な上盤プレート内地震発生域が、1978年宮城県沖地震のアスペリティのうち北側のものの直上にみられる。

また、気象庁一元化カタログから、プレート境界周辺で発生していると考えられる地震を抽出し、宮城県沖における地震活動度の時空間的な変化の推定を試みた。2005年8月16日の地震発生以前の1日あたりの地震発生レートを基準として、地震活動の活発／静穏化の様子を、2005年の地震発生直後、最大余震発生後、プレート間固着回復後の3期間について調べた。その結果、本震の破壊域内部においては、本震発生直後には活発な余震活動がみられるが2ヶ月程度で終息してしまっただこと、破壊域の東側及び南側の領域については最大余震発生後に至るまで余震活動が活発な状態が継続したことが明らかになった。特に余震活動が長期化した領域は、GPS解析から余効すべりが検出された位置と良い一致を示すことから、相似地震以外の一般的な小地震の活動からも、プレート間すべりの様子を推定できる可能性が示された。一方で、1978年地震の北側アスペリティ周辺では、プレート境界近傍ならびに上盤側プレート内地震のいずれの活動度も、顕著な時間変動をしめしておらず、このアスペリティが固着したままの状態であることが示唆される。

本業務では、気象庁のカタログを用いることにより、大局的な地震活動の時空間変化についての検討を行った。しかし、震源情報の不確定さがあるために、そうした時空間変動がおこる機構やその意味を理解するには不十分といえる。今後は、海底地震観測データをさらに活用して、海底観測データがない（少ない）地震についての震源決定精度の向上を図ることにより、①定常的に地震活動が活発な領域の特定、②地震活動域ごとの地震活動の特徴抽出とその時間変動の検知、を進める必要がある。また、地震活動の指標についても、地震発生頻度だけでなく、モーメント解放率など、物理的背景が明瞭な量による検討も必要である。ただし、そうした高度な解析を行うためには、プレート間地震とプレート内地震の区別が必要であり、震源間の（特に深さ方向の）相対的な位置を高精度で推定するための手法の開発が求められる。

(e) 引用文献

- 1) Yamanaka, Y. and M. Kikuchi, Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *J. Geophys. Res.*, 109, B07307, doi:10.1029/2003JB002683, 2004.
- 2) Zhang, H. & C. H. Thurber, Double-Difference Tomography: the method and its application to the Hayward Fault, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, 1875-1889, 2003.
- 3) Okada, T., T. Yaginuma, N. Umino, T. Kono, T. Matsuzawa, S. Kita, and A. Hasegawa, The 2005 M7.2 Miyagi-Oki earthquake, NE Japan: Possible rerupturing of one of asperities that caused the previous M7.4 earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L24302, doi:10.1029/2005GL024613, 2005.
- 4) Shinohara, M, I. Watanabe, K. Nakahigashi, G. Fujie, K. Mochizuki, T. Yamada, T. Kanazawa, R. Hino, T. Takanami, T. Sato, K. Uehira, Y. Kaneda and T. Iwasaki, Seismic structure of plate boundary zone off Miyagi by seismic survey -relation between geometry of plate boundary and asperity-, 日本地球惑星科学連合2007年大会, S152-P035, 2007.
- 5) 山本揚二郎, 東北日本前弧域の地震波速度不均質とその地震テクトニクスの意義, 東北大学博士論文, 127 pp, 2007.
- 6) Yamamoto, Y., R. Hino, K. Suzuki, Y. Ito, T. Yamada, M. Shinohara, T. Kanazawa, G. Aoki, M. Tanaka, K. Uehira, G. Fujie, Y. Kaneda, T. Takanami, and T. Sato, Spatial heterogeneity of the mantle wedge structure and interplate coupling in the NE Japan forearc region. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L23304, doi:10.1029/2008GL036100, 2008.
- 7) Ito, A., G. Fujie, S. Miura, S. Kodaira, R. Hino, and Y. Kaneda (2005), Bending of the subducting oceanic plate and its implication for rupture propagation of large interplate earthquakes off Miyagi, Japan, in the Japan trench subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L05310, doi:10.1029/2004GL022307.
- 8) Uchida, N., S. H. Kirby, T. Okada, R. Hino, A. Hasegawa, Supraslab earthquake clusters above the subduction plate boundary offshore Sanriku, NE Japan: Seismogenesis in a graveyard of detached seamounts?, *J. Geophys. Res.*, 2010 (in press).
- 9) 山本揚二郎・日野亮太・篠原雅尚・藤江剛・三浦誠一・小平秀一, 宮城県前弧域の地震波速度構造と地震活動, 日本地震学会講演予稿集, B11-3, 2009.
- 10) Yaginuma, T., T. Okada, Y. Yagi, T. Matsuzawa, N. Umino and A. Hasegawa, Co-seismic slip distribution of the 2005 off Miyagi earthquake (M7. 2) estimated by inversion of teleseismic and regional seismograms, *Earth Planets Space*, 58, 1549-1554, 2006.
- 11) Matsumura, S., Focal zone of a future Tokai earthquake inferred from the seismicity pattern around the plate interface, *Tectonophysics*, 273, 271-291, 1997.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

| | | | |
|--|---|---------------------|-----------------|
| 山本揚二郎・日野亮太・西野実・桑野亜佐子・山田知朗・金沢敏彦・青木元・橋本徹夫・阿部正雄 | 宮城県沖地震震源域の地震波速度構造と微小地震活動 | 日本地震学会 2005年秋季大会 | 平成17年 10月20日 |
| 日野亮太・山本揚二郎・西野実・金沢敏彦・山田知朗・中東和夫・望月公廣・篠原雅尚・青木元・田中昌之・金田義行・荒木英一郎・小平秀一・藤江剛 | 海底地震観測による2005年8月16日宮城県沖地震の本震および余震の震源分布 | 日本地震学会 2005年秋季大会 | 平成17年 10月20日 |
| 鈴木健介, 日野亮太, 西野実, 桑野亜佐子, 山本揚二郎, 金沢敏彦, 山田知朗, 中東和夫, 望月公廣, 篠原雅尚, 青木元, 田中昌之, 荒木英一郎, 小平秀一, 藤江剛, 金田義行 | 海底地震観測による2005年宮城県沖の地震(M7.2)の本震・余震の震源分布とメカニズム解 | 日本地球惑星科学連合2006年大会 | 平成18年5月18日 |
| 日野亮太, 西野実, 桑野亜佐子, 山本揚二郎, 鈴木健介, 金沢敏彦, 山田知朗, 中東和夫, 望月公廣・篠原雅尚・青木元・田中昌之・荒木英一郎・小平秀一・藤江剛・金田義行 | Ocean bottom seismographic observation of the aftershock activity accompanied with the 2005 off Miyagi Earthquake (M 7.2) | 日本地球惑星科学連合2006年大会 | 平成18年5月18日 |
| 山本揚二郎, 日野亮太, 鈴木健介, 山田知朗, 篠原雅尚, 金沢敏彦, 青木元, 田中昌之, 金田義行 | Double-Difference Tomography 法による宮城県沖地震震源域の地震波速度構造 | 日本地震学会 2006年秋季大会 | 平成18年11月1日 |
| 鈴木健介, 日野亮太, 山本揚二郎, 西野実, | 海底地震観測による2005年宮城県沖の地震 | 日本地震学会 2006年秋季大会 | 平成18年11月2日 |

| | | | |
|---|--|--------------------------|-----------------|
| 金沢敏彦, 山田知朗, 中東和夫, 望月公廣, 篠原雅尚, 桑野亜佐 子・植平賢司・青木 元・田中昌之・荒木英 一郎・小平秀一・藤江 剛・金田義行 | (M7.2) の余震のメカニ ズム解 | | |
| Suzuki, K., R. Hino, Y. Yamamoto, M. Nishino, T. Kanazawa, T. Yamada, K. Nakahigashi, K. Mochizuki, M. Shinohara, A. Kuвано, K. Uehira, G. Aoki, M. Tanaka, E. Araki, S. Kodaira, G. Fujie, and Y. Kaneda | Aftershock distribution of the 2005 off Miyagi Earthquake (M7.2) by ocean bottom seismographic data | AGU 2006 Fall Meeting | 平成18年12 月12日 |
| Yamamoto, Y., R. Hino, K. Suzuki, T. Yamada, M. Shinohara, T. Kanazawa, G. Aoki, M. Tanaka, and Y. Kaneda | Seismic velocity structure in the focal area of the Miyagi-Oki earthquake revealed by double-difference tomography | AGU 2006 Fall Meeting | 平成18年12 月12日 |
| Yamamoto, Y. R. Hino, M. Nishino, T. Yamada, T. Kanazawa, T. Hashimoto and G. Aoki | Three-dimensional seismic velocity structure around the focal area of the 1978 Miyagi-Oki earthquake | Geophys. Res. Lett. | 平成18年 |
| Hino, R., Y. Yamamoto, A. Kuвано, M. Nishino, T. Kanazawa, T. Yamada, K. Nakahigashi, K. Mochizuki, M. Shinohara, K. Minato, G. Aoki, N. Okawara, M. Tanaka, M. Abe, E. Araki, S. | Hypocenter distribution of the main- and aftershocks of the 2005 Off Miyagi Prefecture Earthquake located by ocean bottom seismographic data | Earth Planet Science | 平成19年 |

| | | | |
|---|---|---|-------------|
| Kodaira, G. Fujie and Y. Kaneda | | | |
| 鈴木健介, 日野亮太, 山本揚二郎, 金沢敏彦, 山田知朗, 篠原雅尚, 植平賢司, 田中昌之, 金田義行 | 海底地震観測による2005年宮城県沖の地震(M7.2)の余震分布 | 日本地球惑星科学連合2007年大会 | 平成19年5月19日 |
| 山本揚二郎, 日野亮太, 鈴木健介, 伊藤喜宏, 山田知朗, 篠原雅尚, 金沢敏彦, 田中昌之, 金田義行, 植平賢司 | 宮城県沖および福島県沖前弧域の地震学的構造 | 日本地震学会2007年秋季大会 | 平成19年10月24日 |
| 鈴木健介, 日野亮太, 山本揚二郎, 伊藤喜宏, 金沢敏彦, 山田知朗, 篠原雅尚, 植平賢司, 田中昌之, 金田義行 | 放射特性を用いた2005年宮城県沖の地震(M7.2)の余震のメカニズム解分布 | 日本地震学会2007年秋季大会 | 平成19年10月24日 |
| Yamamoto, Y., R. Hino, K. Suzuki, T. Yamada, M. Shinohara, T. Kanazawa, M. Tanaka, Y. Kaneda, K. Uehira | THREE-DIMENSIONAL SEISMIC VELOCITY STRUCTURE IN THE OFF-MIYAGI AND OFF-FUKUSHIMA FOREARC REGION | EASTEC symposium 2007 Dynamic Earth -its origin and future- | 平成19年9月1日 |
| Suzuki, K., R. Hino, Y. Yamamoto, Y. Ito, T. Kanazawa, T. Yamada, M. Shinohara, K. Uehira, M. Tanaka, Y. Kaneda | Focal mechanism distribution of main- and after- shock of the 2005 off Miyagi Earthquake (M7.2) by using radiation pattern of P- and S-wave | AGU 2007 | 平成19年12月13日 |
| 日野亮太・鈴木健介・山本揚二郎・西野実・金沢敏彦・山田知朗・中東和夫・望月公廣・篠原雅尚・桑野 | 海底地震観測による2005年宮城県沖地震(M7.2)の余震分布(速報) | 地震2 | 平成19年 |

| | | | |
|---|---|--|--------------------|
| 垂佐子・青木 元・田中昌之・荒木英一郎・小平秀一・藤江剛・金田義行 | | | |
| 山本揚二郎, 日野亮太, 伊藤喜宏, 鈴木健介, 山田知朗, 篠原雅尚, 金沢敏彦, 金沢敏彦, 田中昌之, 高波鐵夫・植平賢司・金田義行 | Three-dimensional seismic velocity structure in the off-Miyagi and off-Fukushima forearc region | 地球惑星科学連合 2008 年大会 | 平成 20 年 5 月 30 日 |
| 山本揚二郎, 日野亮太, 伊藤喜宏, 藤本博己 | Tomographic imaging of seismic velocity structure in the NE Japan forearc region | 地球惑星科学連合 2008 年大会 | 平成 20 年 5 月 27 日 |
| 東龍介, 日野亮太, 伊藤喜宏, 高波鐵夫, 三浦亮, 一條和宏, 望月公廣, 五十嵐俊博, 植平賢司, 佐藤利典・篠原雅尚・金沢敏彦 | Vp velocity structure of the crust and the slab mantle of the subducted Pacific Plate near the Japan Trench by airgun-OBS survey | 地球惑星科学連合 2008 年大会 | 平成 20 年 5 月 26 日 |
| 鈴木健介, 日野亮太, 山本揚二郎, 伊藤喜宏, 金沢敏彦, 山田知朗, 篠原雅尚, 植平賢司, 田中昌之, 金田義行 | 宮城県沖海底地震観測による小地震の発震機構解の空間分布 | 地球惑星科学連合 2008 年大会 | 平成 20 年 5 月 25 日 |
| Azuma, R. R, Hino, Y. Ito, T. Takanami, T. Miura, Y. Ichijo, K. Mochizuki, T. Igarashi, K. Uehira, T. Sato, M. Shinohara, and T. Kanazawa | P-wave velocity structure of the crust and the uppermost mantle of the subducted Pacific plate near the Japan trench by airgun-OBS seismic survey | 13 th International symposium on deep seismic profiling of the continents and their margins | 平成 20 年 6 月 8-13 日 |
| Hino, R., Y. Yamamoto, Y. Ito, R. Azuma, A. Hasegawa, | 3D seismic structure of the forearc area in eastern Hokkaido, | 13 th International symposium on | 平成 20 年 6 月 12 日 |

| | | | |
|--|---|--|--------------------|
| T. Yamada, K. Nakahigashi, A. Kuwano, K. Mochizuki, S. Sakai, M. Shinohara, T. Kanazawa, T. Takanami, Y. Murai, S. Amamiya, and Y. Machida | Japan ,by using ocean bottom seismographic observation | deep seismic profiling of the continents and their margins | |
| Yamamoto, Y., R. Hino, Y. Ito, K. Suzuki, T. Yamada, M. Shinohara, T. Kanazawa, G. Aoki, M. Tanaka, T. Takanami, K. Uehira, and Y. Kaneda | Three-dimensinal seismic velocity structure in the off-Miyagi and off-Fukushima forearc region | 13 th International symposium on deep seismic profiling of the continents and their margins | 平成 20 年 6 月 8-13 日 |
| Suzuki. K, R. Hino, Y. Yamamoto, Y. Ito, T. Kanazawa, T. Yamada, M. Shinohara, K. Uehira, M. Tanaka, Y. Kaneda | Precise hypocenters and focal mechanisms revealed by using 3D velocity structure in the Miyagi-Oki region | The 7 th General Assembly of Asian Seismological Commission | 平成 20 年 11 月 25 日 |
| Yamamoto, Y., R. Hino, M. Shinohara, K. Suzuki, T. Yamada, T. Kanazawa | Tomographic imaging in the off-Miyagi forearc region by joint inversion using both active and passive source data | The 7 th General Assembly of Asian Seismological Commission | 平成 20 年 11 月 27 日 |
| Azuma, R., R. Hino, Y. Ito, T. Takanami, R. Miura, K. Ichijo, K. Mochizuki, T. Igarashi, K. Uehira, T. Sato, M. Shinohara and T. Kanazawa | Seismic velocity structure of the subducting Pacific Ocean slab near the Japan trench deduced by airgun-OBS surveys | The 7 th General Assembly of Asian Seismological Commission | 平成 20 年 11 月 27 日 |

| | | | |
|---|--|--|-------------------|
| Azuma, R., R. Hino, Y. Ito, T. Takanami, R. Miura, K. Ichijo, K. Mochizuki, T. Igarashi, K. Uehira, T. Sato, M. Shinohara and T. Kanazawa | Seismic velocity structure of subducting Pacific Ocean slab near Japantrench deduced by airgun-OBS surveys | AGU 2008 Fall meeting | 平成 20 年 12 月 19 日 |
| Yamamoto, Y., R. Hino, K. Suzuki, Y. Ito, T. Yamada, M. Shinohara, T. Kanazawa, G. Aoki and M. Tanaka, K. Uehira, G. Fujie, Y. Kaneda, T. Takanami, and T. Sato | Spatial heterogeneity of the mantle wedge structure and interplate coupling in the NE Japan forearc region | Geophys. Res. Lett. doi:10.1029/2008GL036100 | 平成 21 年 |
| 山本揚二郎, 日野亮太, 篠原雅尚, 藤江剛, 三浦誠一, 小平秀一 | 宮城県沖地震震源域の地震波速度構造とプレート境界深度 | 日本地球惑星科学連合 2009 年大会 | 平成 21 年 5 月 16 日 |
| 東龍介、日野亮太、伊藤喜宏、高波鐵夫、三浦亮、一條和宏、望月公廣、五十嵐俊博、植平賢司、佐藤利典、篠原雅尚、金沢敏彦 | 人工地震波探査で推定した沈み込む太平洋プレートの P 波・S 波速度構造 | 日本地球惑星科学連合 2009 年大会 | 平成 21 年 5 月 19 日 |
| 鈴木健介、日野亮太、伊藤喜宏、金沢敏彦、山田知朗、篠原雅尚、植平賢司、田中昌之、山本揚二郎、金田義行 | 海底地震観測による宮城県沖地震震源域周囲の応力場の推定 | 日本地球惑星科学連合 2009 年大会 | 平成 21 年 5 月 20 日 |
| 東龍介、日野亮太、伊藤喜宏、鈴木健介 | 中部東北日本前弧下に沈み込む太平洋スラブの地震波速度構造 | 日本地震学会 2009 年秋季大会 | 平成 21 年 10 月 21 日 |
| 山本揚二郎、日野亮太、篠原雅尚、藤江剛、三浦誠一、小平秀一 | 宮城県前弧域の地震波速度構造と地震活動 | 日本地震学会 2009 年秋季大会 | 平成 21 年 10 月 21 日 |

| | | | |
|--|---|-----------------------|-------------|
| 伊藤喜宏, 日野亮太, 鈴木秀市, 山田知朗, 篠原雅尚, 金沢敏彦 | 海底地震計記録を用いた地震波干渉法による日本海溝陸側斜面下の不均質構造推定の試み | 日本地震学会 2009年秋季大会 | 平成21年10月21日 |
| 鈴木健介, 日野亮太, 伊藤喜宏, 金沢敏彦, 山田知朗, 篠原雅尚, 植平賢司, 山本揚二郎, 金田義行 | 2005年宮城県沖の地震(M7.2)による応力変化と宮城県沖の応力場の推定 | 日本地震学会 2009年秋季大会 | 平成21年10月21日 |
| K. Suzuki, R. Hino, Y. Ito, T. Kanazawa, T. Yamada, M. Shinohara, K. Uehira, Y. Yamamoto, Y. Kaneda | Stress change due to the 2005 Miyagi-Oki earthquake and stress field of the Miyagi-Oki region | AGU 2009 Fall meeting | 平成21年12月18日 |
| 篠原雅尚, 山田知朗, 金沢敏彦 | 海底における強震動観測のための加速度計搭載海底地震計の開発 | 海洋調査技術 | 平成21年 |
| 金沢敏彦, 篠原雅尚, 塩原肇 | 海底地震観測の最近の進展 - 海底地震観測システムと海底における自然地震観測の進展について - | 地震 | 平成21年 |

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし