2003年5月26日宮城県沖地震 ($M7.1$) と 二重深発地震面上面の地震活動

—スラブ内大地震震源域における地震活動の特徴抽出—

東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター* 迫田浩司・岡田知己

菅ノ又淳一・長谷川 昭

Upper Plane Seismicity of the Double Seismic Zone beneath NE Japan and May 26, 2003, $M7.1$ off Miyagi Earthquake

—Characteristic Seismic Activity in and around the Source Area of
a Large Intraslab Earthquake—

Koji SAKODA, Tomomi OKADA, Junichi SUGANOMATA and Akira HASEGAWA

Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science,
Tohoku University, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan

(Received April 1, 2004: Accepted August 6, 2004)

A large ($M7.1$) intraslab earthquake occurred on May 26, 2003, on the upper plane of the double planed deep seismic zone off Miyagi Prefecture. No intraslab earthquakes with magnitudes greater than 7 have occurred since 1926 under the land area of Tohoku, northeastern (NE) Japan. We relocated hypocenters of the 2003 off Miyagi earthquake and its aftershocks to compare the background seismicity prior to this earthquake. We obtained relative earthquake locations using the Double-Difference method [Waldhauser and Ellsworth (2000)] and relative earthquake arrival times measured by waveform cross spectrum. Relocated aftershocks are distributed along a plane steeply dipping to WNW, which coincides with one of nodal planes of the focal mechanism of the main shock. Its dip angle slightly changes near the main shock hypocenter. The hypocenter of the main shock seems to be located near the Moho and aftershocks extend both into the crust and into the mantle of the slab. Many earthquakes occurred near the hypocenter of the main shock before the 2003 event. These events are distributed near the Moho and/or within the mantle of the slab. High background upper-plane seismicity within the mantle may correspond to the area to which the rupture within the crust is easier to extend, causing large intraslab events. We also relocated intraslab earthquakes in the northeastern part of Tohoku. There exist few areas where background upper-plane seismicity extends to the mantle of the slab such as the focal area of the 2003 off Miyagi earthquake. In previous studies, it has been suggested that earthquakes in the upper seismic plane of the double seismic zone in Tohoku are distributed uniformly in space, whereas those in the lower seismic plane are not. However, the results in this study suggest that the spatial distribution of upper plane events is not uniform, either. If intermediate earthquakes are caused by dehydration of hydrated crust minerals, the present result suggests that hydrated minerals are distributed unevenly in the crust.

Key words: intraslab earthquake, double seismic zone, 2003 off Miyagi earthquake

§1. はじめに

東北日本沈み込み帯では、プレート境界のみならず沈み込むスラブ内でも地震活動が活発であり、それらは二重深発地震面を形成している [Hasegawa *et al.* (1978),

* 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉

海野・長谷川(1975)]. また, スラブ内の地震活動の特徴として, 二重深発地震面上面の地震は空間的に一様に発生し, 下面の地震は空間的に非一様に発生することが知られている [長谷川・他(1983), Hasegawa *et al.* (1994), Igarashi *et al.* (2001)]. これらの稍深発地震を発生させる原因として, 上面の地震はスラブの地殻, 下面の地震はスラブマントルをそれぞれ構成する鉱物の脱水不安定によって説明する考え方があり, これまで多くの研究者によって議論がなされてきた [例えば, Hacker *et al.* (2003), Meade and Jeanloz (1991), Peacock (2001), Seno and Yamanaka (1996), Yamasaki and Seno (2003)]. この脱水不安定が稍深発地震の発生に関与しているとする, 上記の震源分布の特徴は, マントルでは含水鉱物の分布に空間的非一様性があり, 地殻ではそのような傾向がないことを意味する. したがって, 下面については, 将来において大きな地震の発生しやすい場所をある程度特定することができそうであるが, 上面の地震の場合は, その空間的一様性からどここの場所にも発生する可能性があることになる.

2003年5月26日に宮城県気仙沼市付近の深さ68 kmで $M7.1$ のスラブ内地震が発生した(以下, 2003年宮城県沖地震). この地震は上面で発生し, 他の上面の地震と同様にダウディップコンプレッション(DC)型のメカニズム解をもつ [Okada and Hasegawa (2003)]. 東北地方の陸域下で $M7$ を越すようなスラブ内地震の発生はこれまで知られておらず, $M6$ を超える地震も1987年1月9日に岩手県岩泉町付近でDC型の地震($M6.6$) [東北大学理学部(1987)]が発生して以来, 上面では発生していなかった. 上面で発生する地震が空間的に一様な分布をしているということから考えると, このような規模の大きな地震がスラブ内のどこにでも発生しうるのはか否かは地震発生予測の点から重要である. Okada and Hasegawa (2003)は, 2003年宮城県沖地震について調べ, (1) 2003年宮城県沖地震の破壊域はスラブ内の地殻とマントルの両方に広がり, 震源(破壊開始点)はスラブ内のモホ面付近に位置する, (2) 震源近傍にはこの地震発生前にも地震活動が見られる, (3) 2003年宮城県沖地震の震源近傍は, その南側領域に比べ, 二重面が不明瞭であり, 上面と下面の間に地震活動が見られる特異な領域であることを明らかにした. 彼らは, 震源決定の手法として, 均質観測点法 [Ansel and Smith (1975)]を使用している. 均質観測点法は特定の観測点での読み取り値のみを使用する相対震源決定法であるが, 使用する観測点の読み取り値がすべてそろった一部の地震のみしか震源位置を求めることができず, この地震発生前の地震活動との比較があまり明瞭ではなかった.

また, 彼らは震源域のごく近傍の領域における活動との比較を行ったのみであり, より広範囲の領域における震源分布との比較から, 2003年宮城県沖地震震源域の特異性を明確にするとともに, 同様に特異な地域が他にも存在するか否かを明らかにする必要がある.

そこで本稿では, 2003年宮城県沖地震の本震・余震および本震発生前の地震について, 波形を用いたクロススペクトル解析を行うことで, 走時差の読み取り精度を向上させるとともに, Double-Difference法 [Waldhauser and Ellsworth (2000)]を用いた震源再決定を行い, 今回の地震の震源域周辺の二重深発地震面, 特に上面付近における微小地震活動の空間分布の特徴について再調査する.

§2. 解析手法およびデータ

Double-Difference法 [Waldhauser and Ellsworth (2000)]は相対震源決定法の一つである. この手法では, 各々の地震に対して, 隣接して発生する全ての地震との走時差を求める. それにより, 震源決定が可能な地震を空間的に広範囲に拡大することが可能となり, これまでより, より広域に分布する多数の地震の相対震源決定が可能となる. この手法では, 各地震ペアの走時差の残差(Double-Difference)を最小にすることによって震源を求める. 本解析ではこの手法を用いて震源決定を行った.

相対震源決定を行う場合, 走時差をできるだけ正確に求めることが決定精度向上の上で重要となる. 通常のP波, S波初動の読み取りは個々の地震に対して行うため, 近接して発生した相似性の高い地震波形間についても, 読み取り値に大きなばらつきが生じてしまう. そこで, 波形の相似性を用いて二つの地震間の相対的な初動の読み取り精度を向上させる手法として, クロススペクトル解析 [例えば, Fremont and Malone (1987), Poupinet *et al.* (1984)]がしばしば用いられる. ほぼ同一の震源で同一メカニズムをもった地震同士は, 同一観測点では相似性の高い波形記録が得られる. これは, 震源から観測点までの波線がほぼ同一なことから速度構造の不均質性の影響は両地震ともほぼ等しいためである. そのような相似性の高い二つの地震に対してクロススペクトル解析を行うことで, 高い時間精度で走時差を求めることが可能となり, 二つの地震間での相対震源精度を向上させることができる. 本解析では, 互いに近接した地震については, 上記の解析を行い, 走時差を精度良く求めた.

本解析で使用したデータは, 東北大学地震・噴火予知研究観測センターの微小地震観測網で得られた波形記録

およびそのルーチン処理 [Hasegawa *et al.* (1978), 堀内・他 (1999)] で得られた震源と P 波・S 波到達時刻である。ルーチン処理によって得られた震源は震源再決定の際の初期震源として使用した。震源再決定の際には東北大学ルーチン処理で使用されている一次元速度構造モデル [Hasegawa *et al.* (1978)] を使用した。観測点は解析領域の中心から半径 200 km 以内に位置するものを使用した。使用する走時差は東北大学ルーチン処理によって得られた P 波・S 波到達時刻差データである。さらに、2002 年以降では、防災科学技術研究所の高感度地震観測網 (Hi-net) の運用が東北地方でも開始されたため、気象庁の一元化震源の読み取り値を加えて併合し、それを解析に使用した。一般に、S 波の到達時刻の読み取りは、P 波コーダ部分の影響を受けるために P 波の読み取りに比べて精度が悪い。そのため東北大学ルーチン処理による震源決定では、S 波の重みを P 波の 1/5 にして震源決定を行っている。本解析でも同様に S 波の重みを P 波に対して 1/5 として震源再決定を行った。

さらに、 $M1.0$ 以上の地震に対しては、クロススペク

トル解析で得られた走時差を併用した。ただし、2003 年宮城県沖地震の本震および余震同士の解析ではクロススペクトルデータが得られる地震の組み合わせが極めて少ないので、クロススペクトル解析による走時差は用いずに震源決定を行った。クロススペクトルの計算には、 $M1$ 以上の地震に対して P 波・S 波の初動を含んだ各 2.56 秒について、3~12 Hz のバンドパスフィルターをかけた上下動成分の波形記録を使用した。地震ペアには震央間距離が 10 km 以下のものを抽出して行った。また、クロススペクトル法によって求められた走時差のうち、コヒーレンスの平均値が 0.8 以上のものを震源決定に採用した。

§ 3. 解析結果

3.1 本震および余震の震源再決定

2003 年宮城県沖地震の本震およびそれ以降に発生した余震 4 日間分について、震源再決定を行った。地震数は 1363 個である。Double-Difference (DD) の数は P 波 182058 個、S 波 116998 個である。震源再決定により

Fig. 1. Hypocenter distribution of the May 26, 2003, off Miyagi earthquake (star) and its aftershocks (circles) (a) before relocated, and (b) after relocated. Upper and lower panels show epicentral distributions and the vertical cross section along the line A-B, respectively. Moment tensor solution by Okada and Hasegawa (2003) is also shown. Gray bold lines denote the location of the upper plate boundary estimated by Zhao *et al.* (1997). Gray dashed lines are the Moho discontinuity presently inferred.

Fig. 2. Vertical cross sections of aftershocks for regions A through J shown in the top-right figure. Gray circles show all the events.

Double-Difference の Root-Mean-Square (RMS) は 0.147 秒から 0.109 秒に減少した。震源再決定前の東北大学ルーチン処理によって得られた震源分布図を Fig. 1 (a) に、震源再決定により得られた震源分布図を Fig. 1 (b) にそれぞれ示す。また、断層の走向に直交した面に沿って、5 km 幅ごとに表現した鉛直断面図を Fig. 2 に示す。再決定によって得られた余震分布は全体としてばらつきが抑えられ、西に傾斜した高角の面状の分布がより明瞭となった。この面状の分布は本震のモーメントテンソル解 [Fig. 1: Okada and Hasegawa (2003)] の節面的一方とほぼ一致し、本震の断層面に対応していることがわかる。また、余震分布の傾斜は深さ 68 km 付近を境

として余震域浅部ではほぼ鉛直であるのに対し、深部はやや緩くなっているように見える。この傾向はより狭い幅でとった鉛直断面図 (Fig. 2) でより明瞭に見られる (特に、領域 F・G)。また、余震域南部の深さ 70~72 km 付近 (領域 C・D など) には、西傾斜の面状分布から東に数 km 離れた場所にも地震活動が見られ、震源断層の分岐や共役断層を示唆するような、やや複雑な分布となっていることがわかる。

本震は余震分布の傾斜の角度が変わる場所の近くで発生している。本震の震源は初期震源 (東北大学ルーチン震源) では余震の分布する面から数 km 程度東に位置していたが、再決定により余震分布の中に震源が求められ

た。一般に、震源決定で使用する初動の読み取り、特にS波の読み取りは、地震の規模が大きくなるにつれ振幅の大きなP波後続波の影響で振幅の大きな部分でしか読み取れない。その結果としてS波の到達時刻を遅くし、S-P時間を長くしてしまう傾向が生じる。そのため、通常の震源決定では震源は観測網から見て遠方に求められてしまう。今の場合、おもに陸域(震源から見て西側)に観測点が分布するため、初期震源では余震に比べて東寄りに求められていた可能性が考えられる。本解析による震源決定ではS波の重みをP波に比べて1/5に下げていることに加え、本震のデータとして用いたDouble-Differenceの数がP波の方が多い(P波309, S波16)。そのため、本震のS波の読み取り誤差による影響が小さくなり、本震が余震の分布に近づく結果となったと考えられ、本震は余震分布が示す断層面で発生したことが確かめられた。

得られた震源分布とZhao *et al.* (1997)によって推定されたプレート境界面との比較を行った(Fig. 1)。ここで、沈み込むスラブの地殻の厚さはおよそ5~10 kmと推定されていることから[例えば, Matsuzawa *et al.* (1986)], 本解析ではスラブのモホ面は最も深い場合でもプレート境界下10 kmに位置すると考え、Fig. 1でのモホ面をZhao *et al.* (1997)によるプレート境界面から10 km深部に示している。余震はZhao *et al.* (1997)によるプレート境界面直下で発生していて、余震域上端はプレート境界下数kmのところに位置する。最大で10 kmと推定されているスラブの地殻の厚さを考慮すると、余震は沈み込んだスラブの地殻内とマントル内の両方で発生していることが考えられる。また、余震分布の傾斜角が変わっている位置はプレート境界下8 km付近であり、本震もその近傍に位置している。このことから、スラブのモホ面付近で、余震分布の傾斜角が変化し、本震の破壊はそこから開始したと推定される。ただし、傾斜角の変化は以下のように見かけの変化である可能性もある。スラブ内の地殻は、高压相に相変化する前はマントルよりも約6%程度低速である[Matsuzawa *et al.* (1986)]。スラブマントルで発生した地震の場合、スラブの地殻で発生した地震の場合よりも、高速度のスラブマントル内をより長く伝播するため、地震波は観測点に速く到達する。それにより、震源は観測網により近い側に求められる。したがって、観測網のある陸域に引き寄せられてしまう傾向があるはずである。そのため、余震分布の折れ曲がりが見かけ上生じたものである可能性がある。ただし、そうであるか否かは、上記の効果が震源位置にどの程度影響を及ぼすかを、より定量的に解析する必要がある。いずれにしても、モホ面付近で本震の

破壊が開始し、それが地殻およびマントル内に伝播したことを示唆する結果である。

3.2 余震のメカニズム解推定

得られた震源分布をもとに、P波の初動押し引き分布を用いてメカニズム解の推定を行った。メカニズム解推定の対象とする地震を選定する際には以下の基準を設けた。

- (1) Polarity データが10点以上存在する。
- (2) Polarity データにより節面が抑えられている。

これらの条件を満たした地震について、推定されたメカニズム解をFig. 3およびFig. 4に示す。ほとんどの地震が逆断層型の地震である。多くの地震で、メカニズム解の節面の一方が余震の分布する面に近いが、余震の分布面と斜交しているものも見受けられる。特に断層面傾斜角の変わる付近よりも浅部の領域でその傾向が強い。さらに、正断層型の地震や、逆断層型の地震の場合でも節面の一つが余震の分布面とは明らかに一致しないメカニズム解をもつ地震も多く存在している。また、Fig. 2領域C~Eの深さ70~75 km付近に見られるような断層面から離れた領域で発生した地震や、断層面付近でも狭い範囲で見ると断層面とは異なる分布をしているものもある(例えば、Fig. 2領域Jの深さ60~65 km付近)ことから、余震分布の微細構造が反映されていることも考えられ、複雑さが見て取れる。ただし本解析で得られた結果は、以下のような理由から、余震分布から推定される断層面に沿って生じた余震が少ないというこ

Fig. 3. Focal mechanisms of aftershocks estimated by using polarity data of P-wave initial motions. Gray circles show epicenter of all the events presently relocated.

Fig. 4. Vertical cross sections of aftershocks and focal mechanisms for regions A through J shown in the top-right figure. Focal mechanisms are shown with projection onto the NNE hemisphere. Gray circles show hypocenters of all the events.

とを意味するものではない。本解析ではP波初動押し引きによる分布から節面の抑えがきいてない場合はメカニズム解を決めていない。メカニズムを決定する際、陸域に偏った観測点配置により震源球面上での押し引き分布には偏りが生じやすい。そのため、押し引きデータは震源球上で集中する傾向があり、高角の断層面をもったメカニズムの場合拘束を効かせた解が得られにくい。そのため本震と同様な高角の断層面のメカニズム解をもつ地震が割合として少なくなった可能性がある。

3.3 本震震源域周辺の地震活動

2003年宮城県沖地震が既存の弱面による reactiva-

tion であるかどうかの検討をより詳細に行うため、本震震源域と周辺領域で発生しているバックグラウンドの地震活動の比較を行った。1997~2003年5月25日(本震発生前日)に発生した地震をバックグラウンドの地震とし、それらと本震および本震発生後2日間に発生した余震とを併合し(Fig. 5(a)), Double-Difference法を用いて震源再決定を行った。余震は852イベント、バックグラウンドの地震は629イベントで本震と併せて計1482イベントである。前章で述べたように、本震および余震に対しては有用な数のクロススペクトルによる走時差が得られなかった。そのため、ここではバックグラ

Fig. 5. Hypocenter distributions of the 2003 off Miyagi earthquake (star), its aftershocks (pink circles) and background earthquakes for the period from January 1, 1997 to May 25, 2003 (black circles) before relocated (a) and after relocated (b). Upper panels show epicenter distributions, and lower panels show vertical cross sections along the line XY shown in the upper panels. Green bold and dashed lines denote the locations of the upper plate boundary and the Moho, respectively.

ウンド同士のイベントペアに対してのみ波形の相似性を用いたクロススペクトル解析による走時差の推定を行った。DD の数は P 波 170874 個、S 波 112969 個であった。得られた結果を Fig. 5(b) に示す (ただし 2003 年宮城県沖地震の余震は桃色で示す)。震源再決定により RMS は 0.743 秒から 0.242 秒に減少した。これらの地震について、前節と同様に、再決定した震源を基準にメカニズム解を推定したところ、低角逆断層型の地震が含まれることがわかった (Fig. 5 中、LT で示す)。この地震の震源位置はプレート境界に対応すると考えられる。したがって、Fig. 5 においては、低角逆断層型の地震がプレート境界の位置となるように Zhao *et al.* (1997) のプレート境界の位置を深部に約 3 km 平行移動し表示している。これは、Zhao *et al.* (1997) の推定が東北日本全域について行われたもので、この地域での推定誤差を考慮してのことである。

震源再決定前は、バックグラウンドの地震は空間的に比較的一様に発生しているように見えていたが、震源再決定により地震活動の高い領域は主に 3 カ所に限られていることがわかった。一つは東側の領域で低角逆断層型の地震を含み、プレート境界で発生した地震群であると考えられる。もう一つは西側の領域の深さ 80 km 付

近で発生しているクラスターである。3 カ所のうち、最も地震活動の高い領域が中央付近、2003 年宮城県沖地震の震源域周辺にある。すなわち、2003 年宮城県沖地震は地震発生前から地震活動が高い領域で発生したことがわかる。Okada *et al.* (2003) は、2001 年 12 月に岩手県南部の深さ 120 km 付近で発生した二重深発地震下面の地震 ($M6.4$) について同様の比較を行い、この地震がその発生前から脱水不安定により小さな地震活動が始まっていた領域で再び活動したことにより生じた地震である可能性を指摘した。2003 年宮城県沖地震についての本解析の結果からは、バックグラウンドの地震の発生域が余震域と重複しており、この領域が以前から地震活動の高い領域であったことがわかる。また、バックグラウンドの地震は特に本震の震源近傍で多いようにも見える。仮にスラブ内地震が脱水不安定により引き起こされる既存の弱面のすべりにより生じているとするならば、バックグラウンドの地震活動の高い震源周辺域は他の領域に比べて含水鉱物を多く含む領域であり、そのうちの一部ですでに進行しつつあった脱水反応の反映として、バックグラウンドの地震が発生していたと推定される。したがって、本震の破壊全体が既存の断層面に沿った reactivation によるものかどうかの議論を行うことは難

しいが、バックグラウンドの地震が本震の震源周辺で多いことから、本震の破壊の準備過程として脱水不安定に伴う reactivation によって破壊域が徐々に広がっている、本震の破壊につながったのではないかと推測される。

3.4 議論

2003 年宮城県沖地震のような上面で $M7$ クラスの地震が発生する場合、その規模から破壊領域はスラブの地殻の厚さ (5~10 km) をこえて、マントルまで到達することが予想される。今回の解析結果は、マントル部分で上面の地震活動が見られる領域は、通常の上面の地震が発生する地殻のみならずマントルまで脱水不安定により破壊が生じやすい領域であることを示唆する。マントル内に破壊が生じやすい領域があれば、あるきっかけによ

り地震が生じた場合、その破壊域はマントル部分まで拡がりやすくなり規模の大きな地震となる可能性があるとして推定される。

前節で求めた 2003 年宮城県沖地震の震源域付近で発生したバックグラウンドの地震の震源分布を見ると (Fig. 5(b)), スラブのモホ面周辺やマントル内で発生している地震も多く存在する。つまり、この領域ではマントル内でも破壊が生じやすい状態にあり、規模の大きな地震になりうる可能性を有する領域であったことを示唆する。バックグラウンドの地震がやや深く、スラブ内のモホ面を超えてマントル内に活動が拡がる傾向は、2003 年宮城県沖地震の発生域の西側の深さ 80 km 付近の地震活動が高い領域にも見られる。これは、この領域で過去に発生した規模の大きな地震の余震活動に対応

Fig. 6. Hypocenter distributions of the 2003 off Miyagi earthquake (star), its aftershocks (pink circles) and background earthquakes around the source area (black circles). (a) epicentral distribution. (b) vertical cross section along the line A-B in (a). Vertical axis is the distance from the upper plate boundary. Green dashed line denotes the location of the Moho discontinuity.

Fig. 7. Epicenter distribution of upper plane and lower plane earthquakes (a) before relocated, and (b) after relocated. Red and blue circles show earthquakes in the upper seismic plane, and in the lower plane, respectively. Gray line shows the locations of the western limit of the low-angle thrust (LT) events estimated by Igarashi *et al.* (2001). Star shows $M6.6$ event that occurred on January 1987. Box in the region D denotes the relocated area of Fig. 5.

しているか、あるいは今後規模の大きな地震が発生する可能性をもった領域であることを示しているのかもしれない。ただし、この領域で気象庁の地震カタログにより過去(1926 年以降)の地震活動の調査を行ったが規模の大きな地震が発生した事例は見られなかった。

このような、スラブ内の地殻からマントルにかけて連続的に分布する傾向をもつ上面の地震活動が、近隣の領域で見られるかどうかの比較を行った (Fig. 6)。モホ面以深でもいくつか地震は発生しているが、上記の場合のようにマントル内でも密集した地震活動が明瞭にみられる事例はないことがわかる。すなわち 2003 年宮城県沖地震は、通常の二重深発地震面上面の地震とは異なる「スラブマントル内で地震活動が高い」特異な領域で発生した地震であると言える。次にスラブマントル内に集中しているこのような特異な地震活動が、こ

の領域のみに見られるものか否かを調べるために、さらに領域を広げて検討を行った。岩手県から宮城県にかけての領域について、2001~2002 年に発生したスラブ内地震に対して、クロススペクトル解析に基づく走時差を併用した震源再決定を Double-Difference 法により行った (Figs. 7~9)。Fig. 9 からわかるように、2003 年宮城県沖地震発生領域 (領域 D の四角内の領域) と同様な、スラブマントル内での活動が顕著に活発な領域は見られない。すなわち、2003 年宮城県沖地震は東北日本の中でも希な「特異な」領域で発生した地震であることがわかる。ただし、岩手県北部の領域 A で上面の地震活動が深さ方向にやや広がりをもっているように見える。これは主として 1987 年 1 月 9 日にスラブ内上面で発生した $M6.6$ の地震の余震活動によると考えられる。また、その他にもモホ面近傍のやや深いところで発生した上面の

Fig. 8. Vertical cross sections of earthquakes located routinely by Tohoku University in regions A through E shown in Fig. 7(a). Triangles show the locations of the western limit of the LT events estimated by Igarashi *et al.* (2001). Box in the region D denotes the relocated area of Fig. 5. Red and blue circles show upper plane events and lower plane events, respectively. Green bold and dashed lines denote the plate boundary and the Moho, respectively.

Fig. 9. Vertical cross sections of relocated earthquakes in regions A through E shown in Fig. 7(b). Others are the same as in Fig. 8.

地震が点在している。このような通常の上面の地震よりもやや深いところで発生している上面の地震の存在は、1978年宮城県沖地震 ($M7.4$) の近傍や [Seno and Pongsawat (1981)] や岩手県釜石沖 [Okada *et al.* (2004)] においても指摘されている。それらのうち、2003年宮城県沖地震周辺域におけるスラブマントル内と思われるやや深部での地震活動は極めて顕著であり、2003年宮城県沖地震が東北日本の中でも特異な領域で発生したと

考えられる。

Figs. 7~9 に示す本解析の震源再決定結果で、下面の地震活動が空間的に非一様に分布する傾向にあることがより顕著になったのに加えて、上面の地震活動も活動度の高いクラスターをいくつか形成しその他の領域では地震活動が低い、という空間的非一様な分布をしていることが解析領域内について得られた。これは上記の2003年宮城県沖地震のバックグラウンドの地震活動に対して

得られた震源分布 (Fig. 5) と同様の結果である。特に震央分布 (Fig. 7) を見ると、再決定前との違いは明らかである。再決定前の震源分布に示すように、これまで、下面の地震は空間的に非一様に、一方上面の地震は空間的に比較的一様に発生していると考えられていた [長谷川・他 (1983)]。しかし、本解析による再決定の結果からは、上面で発生する地震も下面で発生する地震と同様に、地震の分布する領域とそうではない領域とがあることがわかる。すなわち、地震活動の高い領域は、含水鉱物を含む既存の弱面が多い領域であり、そのような領域がスラブの地殻内に非一様に分布していることを示しているのかもしれない。

§ 4. 結 論

2003年5月26日に宮城県気仙沼市直下で発生した宮城県沖地震の本震・余震およびその周辺の岩手県～宮城県北部で発生した稍深発地震に対して、Double-Difference 法による震源再決定を行った。その結果、稍深発地震の地震活動の特性について以下の3点が明らかになった。

- (1) 二重深発地震面上面で発生する地震も下面の地震と同様に空間的に非一様な分布をする。
- (2) 2003年5月26日に二重深発地震面上面で発生した宮城県沖地震はその破壊面がスラブ内の地殻からマントルにかけて広がったと推定される。
- (3) 2003年宮城県沖地震の本震震源付近では、本震発生前からスラブマントル内で高い地震活動が見られ、この地震は他の領域とは異なった「特異な」場所で発生したと推測される。

謝 辞

本解析を行うにあたり、気象庁、防災科学技術研究所のデータを使用しました。また震源決定の際には米国地質調査所の F. Waldhauser 博士によるプログラム hypoDD を使用させていただきました。図の作成には P. Wessel 博士と W. H. F. Smith 博士による GMT を使用させていただきました。松澤暢博士、海野徳仁博士には有意義なご助言をいただきました。趙大鵬博士には Zhao *et al.* (1997) の結果表示のプログラムを提供いただきました。記して感謝いたします。

文 献

Ansel, J. H. and E. G. C. Smith, 1975, Detailed structure of a mantle seismic zone using the Homogeneous Station Method, *Nature*, **253**, 518–520.
Fremont, M. J. and S. D. Malone, 1987, High precision

relative location of earthquakes at Mount St. Helens, Washington, *J. Geophys. Res.*, **92**, 10223–10236.
Hacker, B. R., S. M. Peacock, G. A. Abers and S. D. Holloway, 2003, Subduction factory 2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reaction?, *J. Geophys. Res.*, **108**, 10.1029/2001JB001129.
Hasegawa, A., S. Horiuchi and N. Umino, 1994, Seismic structure of the northeastern Japan convergent margin: A synthesis, *J. Geophys. Res.*, **99**, 22295–22311.
Hasegawa, A., N. Umino and A. Takagi, 1978, Double-planed structure of the deep seismic zone in the northeastern Japan arc, *Tectonophysics*, **47**, 43–58.
長谷川昭・海野徳仁・高木章雄・鈴木貞臣・本谷義信・亀谷 悟・田中和夫・澤田義博, 1983, 北海道および東北地方における微小地震の震源分布, *地震*, **2**, 36, 129–150.
堀内茂木・松澤 暢・長谷川昭, 1999, 地震が多発した場合にも処理可能な地震波自動処理システムの開発, *地震*, **2**, 52, 241–254.
Igarashi, T., T. Matsuzawa, N. Umino and A. Hasegawa, 2001, Spatial distribution of focal mechanisms for interplate and intraplate earthquakes associated with the subducting Pacific plate beneath the northeastern Japan arc: A triple-planed deep seismic zone, *J. Geophys. Res.*, **106**, 2177–2192.
Matsuzawa, T., N. Umino, A. Hasegawa and A. Takagi, 1986, Upper mantle velocity structure estimated from PS-converted wave beneath the north-eastern Japan arc, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **86**, 767–787.
Meade, C. and R. Jeanloz, 1991, Deep-focus earthquakes and recycling of water into the earth's mantle, *Science*, **252**, 68–72.
Okada, T. and A. Hasegawa, 2003, The M7.0 May 26, 2003 off-shore Miyagi Prefecture Earthquake in Northeast Japan: Source process and aftershock distribution of an Intra-Slab event, *Earth Planets Space*, **55**, 731–739.
Okada, T., N. Umino and A. Hasegawa, 2003, Source process of M6.4 intermediate-depth earthquake that occurred in the lower plane of double seismic zone beneath northeastern Japan, *J. Seism.*, in press.
Okada, T., K. Sakoda, T. Matsuzawa, R. Hino, A. Hasegawa, S. Sakai and T. Kanazawa, 2004, Characteristic seismic activity in the subducting plate boundary zone off Kamaishi, northeastern Japan, revealed by precise hypocenter distribution analysis using ocean-bottom seismometers, *Geophys. Res. Lett.*, in press.
Peacock, S. M., 2001, Are the lower planes of double seismic zones caused by serpentine dehydration in

- subducting oceanic mantle?, *Geology*, **29**, 299–302.
- Poupinet, G., W. L. Ellsworth and J. Frechet, 1984, Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: An application to the Calaveras Fault, California, *J. Geophys. Res.*, **89**, 5719–5731.
- Seno, T. and B. Pongsawat, 1981, A triple-planed structure of seismicity and earthquake mechanisms at the subduction zone off Miyagi Prefecture, northern Honshu, Japan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **55**, 25–36.
- Seno, T. and Y. Yamanaka, 1996, Double seismic zones, compressional deep trench-outer rise events, and superplumes, in “Subduction: Top to Bottom”, ed. by G. E. Bebout, *et al.*, Geophysical Monograph, 96, AGU, Washington D.C., 347–355.
- 東北大学理学部, 1987, 東北地方およびその周辺の微小地震活動(1986年11月～1987年4月), 地震予知連絡会会報, **38**, 11–52.
- 海野徳仁・長谷川昭, 1975, 東北日本にみられる深発地震面の二層構造について, *地震*, **27**, 125–139.
- Waldhauser, F. and W. L. Ellsworth, 2000, A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 1353–1368.
- Yamasaki, T. and T. Seno, 2003, Double seismic zone and dehydration embrittlement of the subducting slab, *J. Geophys. Res.*, **108**, 10.1029/2002JB00118.
- Zhao, D., T. Matsuzawa and A. Hasegawa, 1997, Morphology of the subducting slab boundary in the northeastern Japan arc, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **102**, 89–104.