陸域制御震源地震探査から 明らかになりつつある 島弧地殻・上部マントル構造

東京大学地震研究所 *

岩崎 貴哉・佐藤比呂志

Crust and Uppermantle Structure of Island Arc Being Elucidated from Seismic Profiling with Controlled Sources in Japan

Takaya IWASAKI and Hiroshi SATO

Earthquake Research Institute, the University of Tokyo,
Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

(Received March 31, 2008; Accepted March 6, 2009)

Recent seismic expeditions with controlled sources in Japan provided important constraints on the deformation styles and physical properties of the island arc crust and uppermantle. The crustal structure in the Japanese Islands is characterized by an upper part with a large velocity variation (5.5-6.1 km/s), a middle part with a velocity of 6.2-6.5 km/s overlying a lower part whose velocity is 6.6-7.0 km/s. In many cases, most shallow microearthquakes are concentrated in the upper crust and upper half of middle crust while the lower half of middle crust and lower crust are reflective with very low seismicity. The uppermost mantle is characterized by a low P_n velocity of 7.5-7.9 km/s. Several observations on P_nP phase indicate that the Moho is not a sharp boundary with a distinct velocity jump, but forms a transition zone from the upper mantle to the lower crustal materials. A detailed structural section across the NE Japan Arc from intensive onshore-offshore profiling in 1997-1998 revealed crustal deformation associated with the Miocene backarc spreading of the Sea of Japan. The backbone range of this arc shows a pop-up structure formed by inversion tectonics due to the present compressive stress regime. Crustal thinning associated with the backarc spreading is very clear west of this pop-up structure where the crust deduces in thickness from 30 to 25 km. A section across the SW Japan arc elucidated the detailed subduction geometry of the Philippine Sea Plate and inland crustal evolution associated with processes of accretion and magmatic intrusion. The Outer Zone south of the Median Tectonic Line is characterized by northward dipping structures of accretionary complexes, while the lower part of the crust in the Inner Zone is quite reflective, probably modified and homogenized due to the magmatic intrusion at Cretaceous time. Clear structural images obtained for arc-arc collision

zones in central Hokkaido and easternmost part of the SW Japan arc provides direct evidence of crustal delamination. The structure in Hokkaido strongly indicates that the delamination of the Kuril forearc occurs at its brittle-ductile transition zone.

Key words: Crust, Uppermantle, Island arc, Seismic expedition, Japan

§ 1. 緒 言

日本列島はアジア大陸の東側の活動的縁辺域に位置し、沈み込み、付加、背弧拡大、衝突プロセスによって大きく改変を受けている (Fig. 1). 日本列島の地殻・上部マントル構造の解明は、単に複雑な地質環境下における地殻の地震波速度や形状を明らかにするという意味だけでなく、島弧地殻の発達・改変過程や物性構造、地震活

Fig. 1. Tectonic map in and around Japan. Profile lines presented in this paper are also shown. H1: Moriya *et al.* (1998) and Iwasaki *et al.* (1998). H2: Iwasaki *et al.* (1998). H3: Iwasaki *et al.* (2004). TH1: Iwasaki *et al.* (1994). TH2: Takahashi *et al.* (2004). TH3: Iwasaki *et al.* (2001). TH4: Nishisaka *et al.* (1999, 2001). KT1: Sato *et al.* (2005a). TK1: Matsu'ura *et al.* (1991). TK2: Kodaira *et al.* (2004). TK3: Idaka *et al.* (2003). KI1: Research Group of Explosion Seismology (1992) and Yoshii *et al.* (1990). KI2: Ito *et al.* (2006). SW1: Kodaira *et al.* (2002). SW2: Kurashimo *et al.* (2002). SW3: Sato *et al.* (2005b) and Ito *et al.* (2008). SW4: Sato *et al.* (2004, 2006). RK1 and RK2: Iwasaki *et al.* (1990). KS1: Nakahigashi *et al.* (2004). A broken line (A-A') indicates a profile line crossing NE Japan arc (Oga-Kesennuma profile) undertaken in 1960's and 1970's [e.g., Yoshii *et al.* (1981)].

*〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

動や地殻変動現象のメカニズムを理解する上でも極めて重要である。制御震源を用いた日本の地殻構造研究は、1950年の石淵探石発破の観測に始まる[例えば Research Group for Explosion Seismology (1951)]。その後、1960年代から1970年代の国際プロジェクト(International Upper Mantle Project 及び International Geodynamics Project)によって東北日本、北海道及び中部日本の横断地殻構造探査が行われた[例えば Hashizume *et al.* (1968), Aoki *et al.* (1972), Okada *et al.* (1973, 1978, 1979), Asano *et al.* (1979), Yoshii and Asano (1972), Yoshii *et al.* (1981)]。特に東北日本を横断する探査では、日本列島の太平洋側海域から東北日本弧を経て日本海に至る構造断面が求められた(男鹿―気仙沼測線, Fig. 1の破線A-A')。その結果によれば、東北日本弧は5.9及び6.6 km/sのP波速度を持つ上部及び下部地殻から構成され、その下の上部マントルの速度が大陸地殻に較べて非常に遅く7.5 km/s程度であることが判明した[例えば, Yoshii and Asano (1972), Yoshii *et al.* (1981)]。この構造断面は、島弧地殻・上部マントルの代表的なモデルとしての役割を果たした。1979年からは、地震予知計画の一環として上部地殻の構造解明に焦点をあてた屈折法構造探査が実施され、地殻最上部のP波速度の著しい不均質性や主要構造線・断層を境とした構造の急変など、日本列島の上部地殻の複雑さが浮き彫りとなった。1980年代までの日本における構造探査については、吉井(1994)によってまとめられている。

1990年代になって、制御震源を用いた日本の地殻構造研究は大きく進展した。これは、探査形態の進歩に裏打ちされたもので、屈折法主体の探査から反射法探査を組み入れたより総合的な探査となったこと、屈折法探査自体においても観測機器の進歩によって観測点を数100 m間隔にした稠密展開が可能となり分解能が著しく向上したことが主たる理由と言えよう。1990年代になって大々的に実施されるようになった反射法地震探査の初期の成果については、伊藤・他(1998)によってまとめられている。また、海底地震計の技術的進歩も著しく、後述のように、1980年代から1990年代前半までの間でほとんど行われなかった海陸統合探査も頻繁に実施されるようになった。その結果、海溝軸から島弧を経て縁海である日本海に至る地殻構造断面が提出された。一方、島弧地殻自体についても、断層構造や不明な点の多かった下部地殻構造、更に北海道日高地域や伊豆における島弧―島弧衝突構造などが次々と明らかとなった。

本論文では、主として1990年代以降の構造探査から得られた日本列島域の島弧地殻・上部マントル構造の重要な成果について紹介することとする。

§ 2. 日本列島下島弧地殻の平均的構造

§ 1で述べたように、日本における1990年代以降の屈折・広角反射法探査では、観測計器のデジタル化が進み、稠密観測が可能となった。また、地殻下部までの構造の解明を図るため、測線長も長く(150～200 km)取られることが多くなった。その結果をまとめることによって、日本列島の地殻の特徴を抽出することができる。

1990年以前には、日本列島の地殻は上部地殻(V_p が6 km/s程度)と下部地殻(V_p が6.5 km/s程度)の2層構造としてモデル化されることがほとんどであった(Fig. 2(a))。しかし、稠密探査の解析によれば日本列島下の地殻構造はそうのように単純なものではなく、Fig. 2(b)に示すように、堆積層下において、上部地殻($V_p = 5.5 \sim 6.1$ km/s)、中部地殻($V_p = 6.2 \sim 6.5$ km/s)及び下部地殻($V_p = 6.6 \sim 7.0$ km/s)の三つの部分に分かれると考えるのが妥当である[Iwasaki *et al.* (2002a, b)]。特に、中部地殻の存在はかなり多くの探査地域で見られるものであり、日本列島域の島弧地殻に共通した特徴として注目される。

大陸地殻における反射法地震探査によれば下部地殻は極めて反射的と言われている[例えば Barazangi and Brown (1986a,b), Mooney and Meissner (1992)]。1990年代中頃から行われるようになった反射法地震探査によって、日本列島内の多くの場所でも、反射的下部地殻の存在が直接的に確認された[横倉・他(1994, 1997), Arita *et al.* (1998), Tsumura *et al.* (1999), 伊藤(2000), Sato *et al.* (2002a, b)]。屈折・広角反射法による観測でも、地殻内には多数の反射面が存在し、Fig. 2(b)に示すように中部地殻の下部及び下部地殻内は特に反射的であることが報告されていた[吉井(1990), Iwasaki *et al.* (2002a, b)]。これらの報告は、島弧地殻内の反射的中・下部地殻からの広角反射波を捉えたものと解釈される。

下部地殻の速度については、それほど多く求められているわけではない。それは、下部地殻からの屈折波が初動となる震央距離範囲が極めて限られているためで、下部地殻上面での反射波の振幅から、理論地震記象を計算してその速度を推定する場合も多い。その結果として求められた速度は、6.6～7.0 km/sの範囲にある。大陸地殻の下部地殻の速度をコンパイルした結果によれば、その頻度分布は、6.6～6.8及び7.2～7.5 km/sの値に2つのピークを持つ[Holbrook *et al.* (1992)]。日本列島で求められている下部地殻速度は前者に近い。後者のような高速度は主として古い大陸地殻(shieldやplatform)下部に対応するもので、日本列島において7 km/sを超える下部地殻速度が報告された例はない[Iwasaki *et al.*, (2002a,

b)]. これまでの探査結果によれば, 上部・中部地殻を合わせた厚さは, 15 ~ 25 km, 下部地殻の厚さは 5 ~ 15 km 程度である. その結果として, 地殻全体の厚さは 30 ~ 40 km と見積もられる. Iwasaki *et al.* (2002a, b) は, 日本列島における Moho 面からの反射波がパルスの単純な波形ではなく, 2 ~ 3 秒の継続時間を持った波群として観測されることを指摘した. これは, Moho 面が単純な速度不連続面ではなく, Fig. 2 (b) に示すようなマントル-地殻遷移層のような構造を持っていることを示唆する [Iidaka *et al.* (2006)]. この様なモホの特徴は, 大陸地殻においては既に知られているところであり [Mooney and Meissner (1992)], 日本列島でも類似の構造が確認されたことは, 島弧下のモホの成因を考える上で重要である.

日本列島下の地殻内地震活動は活発であるが, 地殻内地震は, 上述の中部地殻以浅(地震発生層)に集中している (Fig. 2 (c)). 地震発生層と地殻内反射面との対応関係については, Ito (1993, 1999) によって詳しく論じられており, 地震発生層下端は, 地殻内反射面の 2 ~ 3 km 上部にある. 従って, この中部地殻と地殻内反射面分布は, 地殻内のレオロジー構造を規定している可能性が高い.

§ 3. 島弧横断地殻・上部マントル構造

3.1 東北日本弧横断構造

第 7 次地震予知計画の一環として 1997 年及び 1998 年に実施された東北日本弧横断地殻構造探査は, 太平洋側から東北日本を経て日本海に至る全長約 600 km の大規模屈折・広角反射法地震探査と東北日本脊梁山地反射

法地震探査から構成される [笠原・他 (1998), 長谷川・平田 (1999), Takahashi *et al.* (2004)]. 前者は, 東北日本弧の地殻の変形過程を構造の面から明らかにしようとするものであった [笠原・他 (1998), 爆破地震動研究グループ (1999), 西坂・他 (1999, 2001), Iwasaki *et al.* (2001)]. 後者は, この探査地域に到達する断層構造等の地殻スケールの構造不均質を解明し, 地震活動・地殻変動に代表される地殻活動との関連性の解明を目的とした [平田・他 (1999), Sato *et al.* (2002a, b)]. この実験を契機に, 反射法を組み込んだ大規模かつ稠密な地殻構造探査や海域から陸域までの数 100 km の測線での海陸統合構造探査が実施されるようになり, 日本列島及びその周辺海域における構造の知見が飛躍的に高まった.

上述の東北日本弧の屈折・広角反射法断面 [西坂・他 (1999, 2001), Iwasaki *et al.* (2001), Takahashi *et al.* (2004)] を Fig. 3 に示した. この断面では, 太平洋側のプレート沈み込み構造が深さ 20 ~ 30 km まで求められており, 付加帯の構造とともに島弧側下部地殻が海岸線から東に 80 ~ 120 km の距離まで確認できる [Takahashi *et al.* (2004)]. また, この部分のマントル最上部速度 (P_n 速度) が 8 km/s 程度であることも大きな特徴と言える. 島弧内地殻は全体として Fig. 2 に示した様に上部・中部・下部地殻の三つの部分から構成されており, 低周波地震を除く地殻内地震のほとんどは上部・中部地殻で発生している [Iwasaki *et al.* (2001)]. この部分の構造は, 地殻発達のプロセスをよく反映していることがわかる. 東部の北上山地 (Fig. 3 の “A” の部分) は白亜紀の intrusion を被っているが, 中新世の日本海拡大における伸長応力場による改変を受けなかった地域である. 実際, その上部

Fig. 2. Schematic crustal models and seismic activity with depth. (a) Classical structure model of crust. (b) Crustal model based on the recent seismic expeditions. (c) Seismic activity within in the crust. Frequency of earthquakes is schematically shown with depth.

Fig. 3. Crust and uppermantle section across the NE Japan arc modified from Nisisaka *et al.* (1999, 2001), Iwasaki *et al.* (2001), and Takahashi *et al.* (2004). The corresponding profile lines (TH2-4) are shown in Fig. 1. Open triangles indicate coast lines. A: Kitakami Mountains. B: Kitakami lowland. C: Ou backbone range. F1: Western boundary fault of the Kitakami lowland. F2: Kawafune fault. F3: Sen'ya fault. QVF: Quaternary volcanic front. Crustal thinning is evident in a region from -150 - 0 km. Beneath the Yamato basin (shaded area), the upper and lower crustal thicknesses are almost constant.

Fig. 4. Crust and uppermantle section across the SW Japan arc modified from Kodaira *et al.* (2002), Kurashimo *et al.* (2004), Sato *et al.* (2004), and Ito *et al.* (2008). The corresponding profile lines (SW1-4) are shown in Fig. 1. MTL: the Median Tectonic Line. BTL: the Butsuzo Tectonic Line. AF: Aki fault. QVF: Quaternary volcanic front.

地殻構造は単純で水平多層的である。しかし、その西側（“B”及び“C”の部分）での地殻最浅部の構造は大きく波打っており、その形状変化は奥羽脊梁山地周辺に発達している活断層（F1：北上低地帯西縁断層群，F2：川舟断層，F3：千屋断層）とよく対応している。これらの断層は中新世の日本海拡大に伴って形成された正断層系であり、4 Ma以降の圧縮応力場に転じてから逆断層として活動している（Inversion tectonics）。実際、この活断層に囲まれる部分の堆積層部分は上に凸の形状をしており、いわゆる pop-up 地形を形成している（“C”の部分）。地殻は北上低地帯東縁（“B”の部分）で最も厚く、その厚さは 35 km である。この場所は、8～10 Ma 以前の火山フロントと考えられており [Sato and Amano (1991)]、その西側から地殻は徐々に薄くなって日本海側海岸線下で 30 km から 25 km に急減する。また、島弧内の P_n 速度は 7.6～7.7 km/s であり、太平洋側及び日本海下のそれと較べて有意に遅い。日本海側での P_n 速度は、海岸線付近の幅 20～30 km の領域で大きく変化していると考えられる。

日本海側の構造の大きな特徴として、大和海盆側に向かったの更なる地殻の薄化が挙げられる [西坂・他 (1999, 2001)]。この薄化は上部・中部地殻の厚さの減少でまかなわれており、下部地殻の厚さにほとんど変化がないことが注目される。これは、下部地殻の変形モードが simple shear であることを示している [Iwasaki *et al.* (2001)]。このような地殻薄化の様式は、西南日本弧から日本海に至る測線でも見られる [例えば、Sato *et al.* (2004, 2006)]。また、1984 年に行われた沖縄トラフ北部の海底地震探査 [Iwasaki *et al.* (1990)] においても地殻の厚さの減少の主要因は上部地殻であり、同じく沖縄トラフの最北部で 1999 年に行われた海底地震探査でも同様の傾向が見られる [Nakahigashi *et al.* (2004)]。これは、北大西洋の受動的境界域で報告されているような大洋底側に向かう大陸側下部地殻の厚さの著しい減少と対照的であり [例えば Mjelde *et al.* (1992), Goldschmidt-Rokita *et al.* (1994), Kodaira *et al.* (1995)]、日本周辺の縁海形成のテクトニクスを考える上で重要である。

3.2 西南日本弧横断構造

2002 年に、西南日本弧の大規模構造を解明する目的で、四国室戸半島から中国地方日本海沿岸に至る南北測線において大規模な探査が行われた [Kurashimo *et al.* (2003, 2004), Sato *et al.* (2004, 2006), 佐藤・他 (2005b), Ito *et al.* (2008)]。この探査に先行する形で、1999 年に南海トラフ側である四国沖から四国及び中国地方南部で海陸共同探査も実施されており [Kodaira *et al.* (2002), 蔵下・他 (2002)]、2002 年探査のデータと合わせた解

析によって、南海トラフから西南日本弧を経て日本海に至る構造断面が得られつつある [Kurashimo *et al.* (2003, 2004), Sato *et al.* (2004, 2006), 佐藤・他 (2005b)]。これらの探査データから得られた構造断面を Fig. 4 に示す。

この構造断面の南海トラフ側の構造の大きな特徴は、土佐ばえの下の沈み込みつつある海山であり、これが、1946 年南海道地震にはバリアーとして働いたと考えられている [Kodaira *et al.* (2002)]。この海山より島弧側のプレート境界からは、非常に強い反射波が観測されている [蔵下・他 (2002), Kurashimo *et al.* (2003)]。陸上の地震探査によってフィリピン海プレートからの反射波が明瞭に観測されるという事実は、1980 年代に爆破地震動研究グループが東海地域や紀伊半島で行った探査 [爆破地震動研究グループ (1989, 1992)] から、吉井・他 (1990) 及び Matsu'ura *et al.* (1991) によってすでに報告されているところである。2000 年代になって実施した東海地域を含む中部日本や紀伊半島における稠密探査でも、巨大地震固着域の島弧側延長部においてもプレートからの強い反射波がほぼ共通に見られることが再確認され、これらの反射波の走時から沈み込むプレート境界が精度よく求められている [例えば Iidaka *et al.* (2003), Ito *et al.* (2006)]。また、強反射という特徴は、プレート境界の物性を拘束する上で重要である。Fig. 4 の四国の下のプレート境界からの強い反射波を説明するには、プレート境界面上に薄い低速度層（～3 km/s 程度）を考える必要があり、プレート深部で脱水された水がプレート境界上で停留している可能性がある [Kodaira *et al.* (2002)]。Kodaira *et al.* (2004) は、東海地域下においては ridge の沈み込みによって含水鉱物の集積化が進み、やや深部においてはその脱水のために強反射面で特徴づけられる slow slip 域 [Ozawa *et al.* (2002)] が形成されたとした。

2002 年の西南日本弧横断探査はショット点数が多く（10 点）、陸域測線全体の観測点数は、2,234 点に及ぶ [Kurashimo *et al.* (2004), 佐藤・他 (2005b), Ito *et al.* (2008)]。また、瀬戸内海小豆島から岡山県海岸域では、反射法地震探査も行われた [佐藤・他 (2005b), Ito *et al.* (2008)]。この膨大なデータの屈折法的解析によれば [Kurashimo *et al.* (2004)]、西南日本弧の地殻の速度は、その上部で 5.7～6.4 km/s、下部で 6.5 km/s である (Fig. 4)。一方、同じデータを反射法処理に処理することによって、外帯側の四万十帯、秩父帯及び三波川帯においては北傾斜の反射面が確認されている [佐藤・他 (2005b), Ito *et al.* (2008)]。また、西南日本の主要構造線である中央構造線がやはり北傾斜で深さ 20 km 程度まで捉えられた。一方、内帯側の中部・下部地殻は、反射体に富んでいるが、その分布パターンは水平である。これは、この領域

が白亜紀における granitic intrusion による改変を受け、地殻下部が均質化しているためと解釈される。

日本海側においてもエアガンと海底地震を用いた屈折・広角反射法探査が行われ [Sato *et al.* (2004, 2006)], その結果、探査測線の地殻の厚さは 15 km 程度にまで薄化していることがわかった。しかし、6.5 km/s を越える速度を持つ下部地殻は、島弧下と較べて、その厚さにほとんど変化が見られず、日本海拡大時の変形が、Fig. 3 に示す東北日本弧と同じ様式で進行した可能性が高い。

§ 4. 衝突構造

北海道の地殻形成・変形過程は、ジュラ紀以降の付加体の形成と島弧-島弧衝突に大きく支配されている。特に、北海道中軸部は、中新世より東北日本弧と千島前弧の衝突が進行している地球科学的に興味深い地域である [例えば、Kimura (1994)]。1984 年と 1992 年に中軸部及びその周辺で実施された屈折法地震探査では [爆破地震動研究グループ (1988, 1993)], 日高山脈西側の地殻浅部が低速度層 (速度逆転層) を含む複雑な構造を持つことが明らかとなったが、その構造と島弧-島弧衝突運動との関連性について十分な解釈がなされていなかった [Ozel *et al.* (1996), 森谷・他 (1997), Moriya *et al.* (1998), Iwasaki *et al.* (1998)]。

この衝突による地殻変形は、衝突帯南端部で 1994 ~ 1997 年に 3 回にわたって実施された反射法地震探査によって、地殻の剥離 (delamination) という形で明瞭にイメージングされた [Arita *et al.* (1998), Tsumura *et al.* (1999), 伊藤 (2000), 伊藤・岩崎 (2002), Ito (2002)]。これら一連の研究は、単に衝突に伴う地殻改変の形態を明らかにしただけではない。Ito (2002) は得られた構造に基づいて、felsic な成分に富む大陸地殻が、衝突に伴う delamination 等によって mafic な下部地殻を捨て去った島弧地殻の上部・中部地殻の集積によって形成されることを提唱した。しかし、この衝突帯の全体像を把握するためには、衝突帯を取り巻く領域即ち千島前弧及び東北日本弧を含めた構造の解明が必要である。更に、衝突帯南端部で発見された衝突様式がそのまま衝突帯全体で進行しているかどうか重要な問題であった。

1998 ~ 2000 年には、北海道日高衝突帯北部を横断する大規模な制御震源地震探査が行われた [岩崎・他 (2001), 爆破地震動研究グループ (2002a, b)]。これらの探査データを統合して得られた Iwasaki *et al.* (2004) による構造断面を Fig. 5 に示す。日高山脈の東側 (千島前弧側) においては、地殻最上部の堆積層が局所的に大きく変形している。堆積層の下は速度は、5.6 ~ 5.8 km/s である。この部分の一番の特徴は、測線東部で深さ 22 ~

25 km に存在する 2 枚の反射面 (A と A') で、日高山脈の東側から急激な西上がりとなる。この構造は、千島弧側の地殻上部が剥離し日高側に衝上していることを表している。下側の反射面 (A') は特に反射的であり、この反射面が西に立ち上がる付近では地震活動が見られる。また、反射面 (B) 下の下部地殻は反射的である。これらの結果を総合し、Iwasaki *et al.* (2004) は、千島弧側の地殻は、その脆性-延性の境界領域で剥離していると解釈した。また、A - A', B 及び C 面の存在から、千島弧側地殻が三つの部分に分かれているのかもしれない。しかし、衝突帯南端部で見られた反射断面 [Tsumura *et al.* (1999), 伊藤 (2000), Ito (2002)] では、千島弧地殻は二つの部分に分離し、その下部地殻は急激に西に傾斜している。この違いは、衝突帯内部の地殻剥離の様式の地域性を反映している可能性がある。

日高山脈直下では 5.9 ~ 6.0 km/s の速度の物質がほぼ地表まで達している。この速度は、周辺に比べて速く、また V_p/V_s 比も 1.88 ~ 1.90 と大きい値を示す。この高速度・高 V_p/V_s 領域は、地殻剥離によって衝上し地表に露出した中部・下部地殻起源の変成岩の分布域 [小松・他 (1986)] と良く一致する。日高山脈西部の褶曲衝上断層帯では、堆積層の厚さが 5 ~ 6 km に達する。この中で速度逆転層 (Fig. 5 中の 45 ~ 110 km の距離にある赤く塗色した層) が 2 回認められ、探査測線の 30 km 北のボーリング検層の結果と照合すると石狩層群であると考えられる [香東・他 (2002)]。この結果は、衝上断層によって本来は一つの層であった石狩層群が分断されて重なり合い、Fig. 5 に示されるような二枚の低速度層が形成されたと解釈される [Iwasaki *et al.* (2004)]。測線の西端付近の上部地殻は堆積層が薄く、5.0 ~ 5.6 km/s 及び 5.8 km/s の層から構成され、東北日本弧と類似の構造を示している [例えば、Iwasaki *et al.* (1994)]。

伊豆衝突帯の構造については、大都市大災害軽減化特別プロジェクトの一環として 2003 年に行われた関東山地東縁測線によって、その実態がわかってきた [Sato *et al.* (2005a)]。彼らによって提出された反射断面を気象庁による測線近傍の一元化震源とともに Fig. 6 に示した。この断面では、沈み込むフィリピン海プレートを示す北下がりの反射面 (図中の USPS) とともに、かつては伊豆弧に属していた丹沢地塊が、藤の木-愛川線に対応する北下がりの面 (F2) と南下がりの面 (R1) で囲まれる楔形の形状として捉えられた。Arai (2008) は、この測線データの屈折・広角反射法解析から、速度構造を求めた。この結果によれば、丹沢地塊は速度構造の面からも伊豆弧の上部・中部地殻に対応しており、その北端である藤の木-愛川線 (F2) が地表から北に傾斜する面とし

Fig. 5. Crustal section across the Hidaka collision zone, central Hokkaido modified from Iwasaki *et al.* (2004). The corresponding profile line (H3) is shown in Fig. 1. HMT: Hidaka main thrust. Two red layers at a distance range of 45-100 km are low velocity zones, geologically corresponding to the Ishikari Group.

Fig. 6. Crustal section across the Izu Collision zone modified from Sato *et al.* (2005). The corresponding profile line (KT1) is shown in Fig. 1. F1: Koju-Matsuda fault. F2 : Tonoki-Aikawa tectonic line. TZ: Tanzawa massif. PSP: Philippine sea plate. UPSP: Upper boundary of the Philippine sea plate. Hpn: Honsu pre-Neogene basement. KB: Kanto basin. Green circles are hypocenters from JMA catalog.

て、またその下に地殻剥離を示す南下がりの面 (R1) が広角反射データからも明瞭に示された。また、Sato *et al.* (2005a) が示したフィリピン海プレートに対応する反射面 (UPSP) は、沈み込む伊豆弧の下部地殻上面と解釈された。即ち、伊豆弧の地殻上部は衝突によって本州側に付加し、地殻下部が沈み込んでいと考えられるのである。Fig. 6 に示したように、この測線下では、沈み込むプレート内で発生する地震測線南部に集中している。従って、地震分布から測線中部或いは北部下のプレート形状を推定することは難しい。しかし、この探査によって、地震集中域の北西延長部の低地震活動域まで沈み込むプレートが初めて確認されたことになり、その意義は大きい。

§ 5. おわりに

1990 年代になって、日本における制御震源地震探査に基づく地殻・上部マントル構造研究は、大きく進展した。稠密な観測点展開による解像度の向上や反射法地震探査によるイメージングによって、それまでよくわからなかった下部地殻や Moho 面の構造が明らかになり、日本列島下においても多くの場所で反射の下部地殻の存在が確認された。また、地殻内の断層構造についてのイメージングも行われるようになった。その結果として得られた構造モデルは、探査地域の地殻・上部マントルの地質学的変遷の過程を解く重要な拘束条件を与えるものである。東北日本弧では、日本海拡大に伴う伸長応力場による地殻の変形と薄化を示す構造が提出された。また、脊梁山地では、伸張応力場で形成された断層構造と、その後の圧縮応力場による inversion tectonics で形成された pop-up 構造が明らかとなった。一方、西南日本弧においてはフィリピン海プレートの沈み込み構造とともに、外帯を構成する付加帯の構造と白亜紀の火成活動によって改変を受けた内帯側の構造の特徴が明らかとなった。即ち、外帯側は北西傾斜の反射面が多数存在し、付加プロセスを直接的に反映していると考えられる。一方、内帯側の中・下部地殻は水平の反射イベント群で特徴づけられる。これは、付加体内の初期構造が、白亜紀における火成活動によって著しく改変されたことを意味するのであろう。

北海道日高地域や伊豆地域では、島弧－島弧衝突構造と、それに伴う地殻の剥離を直接的に示す構造が得られた。この衝突による地殻変形は、衝突帯南端部で 1994～1997 年の反射法地震探査によって、東北日本弧側に衝突している千島弧側の地殻剥離が明瞭な形でイメージングされた [Arita *et al.* (1998), Tsumura *et al.* (1999), 伊藤・他 (2000), Ito (2002), 伊藤・岩崎 (2002)]。また、

1990 年代前半までに北海道で実施された屈折・広角反射法探査では、日高衝突帯前縁部の地殻浅部は堆積層が厚く、また広域的にわたる速度逆転層 (低速度層) の存在が指摘されていたが、地質学的に明解な解釈は提出されていなかった。しかし、1998 年からの稠密探査によって、衝突帯前縁の褶曲衝上断層帯の形成に伴う複雑な地殻変形の結果であることが初めてわかったのである。

反射法や屈折法探査は、地殻・上部マントル構造を調べるという点で最も精度の高い方法である。しかし、得られるモデルは、速度構造或いは反射強度構造を与えるものである。探査域の地殻・上部マントルの構造発達史や現在進行中の地殻活動を理解する上では、得られた構造モデルから物質モデルの構築へと発展させる必要がある。構造探査から得られる P 波速度から地殻を構成する岩石を推定する試みは東北日本弧において Nishimoto *et al.* (2005) によって行われている。金川・他 (2005) は日高変成帯で露出している変成岩類の地震波速度と密度を実験室内で直接測定し、それらの結果から理論反射記録を計算して実際の探査データ [Arita *et al.* (1998), Tsumura *et al.* (1999), 伊藤・他 (2000)] と比較した。その結果、反射断面で見られる強反射波群は、日高変成帯主帯最下部の角閃岩と felsic な変成岩・火成岩から成る互層構造から生ずる著しいインピーダンスコントラストに起因するものとした。吉井 (1994) は、1980 年代までの構造探査を振り返り、今後の問題として S 波構造や減衰構造に未解明の問題が多く残されていることを指摘している。S 波情報は、探査によって得られた構造モデルから岩石学的モデル (物質モデル) 構築する上での鍵となる [例えば Holbrook *et al.* (1992), Ozel *et al.* (1999)]。1990 年代以降の探査では、上下動データに記録された SV 波から S 波構造を求めた例があるが [Iwasaki *et al.* (1994, 1998), Ozel *et al.* (1999)]、岩石学的モデル構築には至っていないのが実情である。制御震源データから減衰構造を求める試みも幾つかの測線で行われている。例えば東北日本弧前縁側の北上山地では、周波数 8～12 Hz の帯域における P 波の Q 値が 200～300 以下であると推定されている [Iwasaki *et al.* (1994)]。しかしこのような推定はまだ一部の測線にとどまっており、減衰構造の、広域的かつ共通の特徴や地域的な地質構造との対応関係について不明の点が多く残されている。

制御震源地震探査ではその震源のエネルギーが小さいため、地震波減衰の大きい活動的縁辺域では深部からの屈折・反射波が検知できず、特に下部地殻や上部マントルの構造決定が難しい場合が多い。しかし、日本では、ほぼ国内全域にわたって高感度地震観測網が整備されており、この地震観測網から得られる自然地震データ

には下部地殻・上部マントル或いは沈み込むプレートに関する情報が含まれているはずである。実際、自然地震 tomography では、単に3次元的速度構造の提出に止まらずに、地殻・プレート内の水・メルト分布やマグマティズムにまで踏み込んだ研究も進展している [例えば Matsubara *et al.* (2004), 中島・長谷川 (2007)]。従って、自然地震データを制御震源地震データと統合解析すれば、自然地震データでは相対的に解像力が弱い最上部地殻の決定精度が向上し、その結果としてより深部まで信頼性の高いモデルの構築が可能となるであろう。

最後に、日本においては、これまで制御震源地震探査に携わった研究者の努力によって、1950年代からの構造データが維持・管理され、今日に至っている。今後は新しい探査を実施するだけでなく、既往データを現在の解析テクニックで再評価することも必要であろう。

謝 辞

本稿で紹介した成果は、旧爆破地震動研究グループをはじめとする多くの研究者の協力のもとで実施した構造探査によるものである。ここであらためて、探査に参加・協力して下さった関係者の方々に謝意を表す。また、本稿について、貴重なコメントを下された千葉大学理学研究科伊藤谷生教授に厚く感謝する。

文 献

- Aoki, H., T. Tada, Y. Sasaki, T. Ooida, I. Muramatsu, H. Shimamura, and I. Furuya, 1972, Crustal structure in the profile across central Japan as derived from explosion seismic observation, *J. Phys. Earth*, **20**, 197-223.
- Arai, R., 2008, Seismic wave velocity structure beneath the eastern part of the Izu collision zone – Reanalysis of the 2003 Odawara-Kiryu refraction/wide-angle reflection data –, Master thesis, Graduate school of Science, the University of Tokyo.
- Arita K., T. Ikawa, T. Ito, A. Yamamoto, M. Saito, Y. Nishida, H. Satoh, G. Kimura, T. Watabane, T. Ikawa, and T. Kuroda, 1998, Crustal structure and tectonics of the Hidaka Collision Zone, Hokkaido (Japan), revealed by vibroseis seismic reflection and gravity surveys, *Tectonophysics*, **290**, 197-210.
- Asano, S., H. Okada, Y. Yoshii, K. Yamamoto, T. Hasegawa, K. Ito, S. Suzuki, A. Ikami, and K. Hamada, 1979, Crust and upper mantle structure beneath northeastern Honshu, Japan as derived from explosion seismic observations, *J. Phys. Earth*, **27**, Suppl., S1-S13.
- 爆破地震動研究グループ, 1988, 日高山脈南西部における爆破地震動の観測 (新冠一様似測線), *地震研究所彙報*, **63**, 273-288.
- 爆破地震動研究グループ, 1989, 静岡県一愛知県における爆破地震動の観測 (春野一作手測線), *地震研究所彙報*, **64**, 533-551.
- 爆破地震動研究グループ, 1992, 紀伊半島におけるにおける爆破地震動の観測 (河内長野一紀和測線), *地震研究所彙報*, **67**, 37-56.
- 爆破地震動研究グループ, 1993, 北海道地域における爆破地震動の観測 (津別一門別測線), *地震研究所彙報*, **68**, 209-229.
- 爆破地震動研究グループ (執筆者 岩崎貴哉), 1999, 東北日本弧横断人工地震探査 (釜石一岩城測線), *地震研究所彙報*, **74**, 63-122.
- 爆破地震動研究グループ, 2002a, 北海道日高衝突帯横断屈折・広角反射法地震探査 (大滝一浦幌測線), *地震研究所彙報*, **77**, 139-172.
- 爆破地震動研究グループ, 2002b, 北海道日高衝突帯前縁部における屈折・広角反射法地震探査 (大滝一平取測線), *地震研究所彙報*, **77**, 173-198.
- Barazangi, M. and L. D. Brown (eds.), 1986a, *Reflection Seismology : a Global Perspective*, Geodynamics Series, **13**, AGU, Washington D. C., 311 pp.
- Barazangi, M. and L. D. Brown (eds.), 1986b, *Reflection Seismology : the Continental Crust*, Geodynamics Series, **13**, AGU, Washington D. C., 339 pp.
- Goldschmidt-Rokita, A., K. F. Hansch, H. B. Hirschleber, T. Iwasaki, T. Kanazawa, H. Shimamura, and M. A. Sellevoll, 1994, The ocean/continent transition along a profile through the Lofoten basin, Northern Norway, *Mar. Geophys. Res.*, **16**, 201-224.
- 長谷川 昭・平田 直, 1999, 総論 : 東北日本トランセクト, *月刊地球*, 号外 27, 5-13.
- Hashizume, M., K. Oike, S. Asano, H. Hamaguchi, A. Okada, S. Murauchi, E. Shima, and M. Nogoshi, 1968, Crustal structure in the profile across the north-eastern part of Honshu, Japan, as derived from explosion seismic observation, Part 2. Crustal structure, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **46**, 607-630.
- 平田 直・佐藤比呂志・岩崎貴哉・蔵下英司, 1999, 反射法地震探査からみた奥羽脊梁山地の地殻構造, *月刊地球*, 号外 27, 39-43.
- Holbrook, W. S., W. D. Mooney, and N. I. Christensen, 1992, The seismic velocity structure of the deep continental crust, in "Continental Lower Crust", ed. by D. M. Fountain, R. Arcules, and R. Kay, Elsevier, New York, 1-43.
- Iidaka, T., T. Iwasaki, T. Takeda, T. Moriya, I. Kumakawa, E. Kurashimo, T. Kawamura, F. Yamazaki, K. Koike, and G. Aoki, 2003, Configuration of subducting Philippine Sea plate and crustal structure in the central Japan region, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1219, doi:10.1029/2002GL016517.
- Iidaka, T., T. Iwasaki, and K. Yoshimoto, 2006, Non-transparent uppermost mantle in the island-arc region of Japan, *Tectonophysics*, **420**, 189-204.
- Ito, K., 1993, Cutoff depth of seismicity and large earthquakes near active volcanoes in Japan, *Tectonophysics*, **217**, 11-21.
- Ito, K., 1999, Seismogenic layer, reflective lower crust, surface heat flow and large inland earthquakes, *Tectonophysics*, **306**, 423-433.
- Ito, K., Y. Umeda, H. Sato, I. Hirose, N. Hirata, T. Kawanaka, and T. Ikawa, 2006, Deep seismic surveys in the Kinki District : Shingu-Maizuru line, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **81**,

- 239-245.
- 伊藤谷生, 2000, 日高衝突帯－前縁褶曲・衝上断層帯の地殻構造, 石油技術協会誌, **65**, 103-109.
- Ito, T., 2002, Active faulting, lower crustal delamination and ongoing Hidaka arc-arc collision, Hokkaido, Japan, in "Seismotectonics in Convergent Plate Boundary", ed. by Y. Fujinawa and A. Yoshida, TERRAPUB, Tokyo, 219-224.
- 伊藤谷生・岩崎貴哉, 2002, 島弧衝突研究の新展開, 地震研究所彙報, **77**, 87-96.
- 伊藤谷生・佐藤比呂志・井川 猛, 1998, 反射法地震探査の発展と構造地質学の新たな展望, 地質論集, **50**, 177-192.
- Ito, T., Y. Kojima, S. Kodaira, H. Sato, Y. Kaneda, T. Iwasaki, E. Kurashimo, N. Tsumura, A. Fujiwara, T. Miyauchi, N. Hirata, S. Harder, K. Miller, A. Murata, S. Yamakita, M. Onishi, S. Abe, T. Sato, and T. Ikawa, 2008, Crustal structure of southwest Japan, revealed by the integrated experiment Southwest Japan, 2002, Tectonophysics (in press).
- Iwasaki, T., N. Hirata, T. Kanazawa, J. Melles, K. Suyehiro, T. Urabe, L. Moller, J. Makris, and H. Shimamura, 1990, Crustal and upper mantle structure in the Ryukyu Island Arc deduced from deep seismic sounding, Geophys. J. Int., **102**, 631-651.
- Iwasaki, T., T. Yoshii, T. Moriya, A. Kobayashi, M. Nishiwaki, T. Tsutsui, T. Iidaka, A. Ikami, and T. Masuda, 1994, Precise P and S wave velocity structures in the Kitakami massif, Northern Honshu, Japan, from a seismic refraction experiment, J. Geophys. Res., **99**, 22187-22204.
- Iwasaki, T., O. Ozel, T. Moriya, S. Sakai, S. Suzuki, G. Aoki, T. Maeda, and T. Iidaka, 1998, Lateral structural variation across a collision zone in central Hokkaido, Japan, as revealed by wide-angle seismic experiments, Geophys. J. Int., **132**, 435-457.
- Iwasaki, T., W. Kato, T. Moriya, A. Hasemi, N. Umino, T. Okada, T. Miyashita, K. Mizogami, T. Takeda, S. Sekine, T. Matsushima, K. Tashiro, and H. Miyamachi, 2001, Extensional structure on northern Honshu Arc as inferred from seismic refraction/wide-angle reflection profiling, Geophys. Res. Lett., **28**, 2329-2332.
- 岩崎貴哉・佐藤比呂志・平田 直・伊藤谷生・森谷武男・蔵下英司・川中 卓・小澤岳史・一ノ瀬洋一郎・坂守・武田哲也・加藤 亘・吉川 猛・在田一則・高波鉄夫・山本明彦・吉井敏尅・井川 猛, 2001, 日高中軸帯北部における反射法地震探査, 地震研究所彙報, **76**, 115-128.
- Iwasaki, T., T. Yoshii, N. Hirata, and H. Sato, 2002a, New features of island arc crust inferred from seismic refraction/wide-angle reflection expeditions in Japan, in "Seismotectonics in Convergent Plate Boundary", ed. by Y. Fujinawa and A. Yoshida, TERRAPUB, Tokyo, 57-70.
- Iwasaki, T., T. Yoshii, T. Ito, H. Sato, and N. Hirata, 2002b, Seismological features of island arc as inferred from recent seismic expeditions in Japan, Tectonophysics, **355**, 53-66.
- Iwasaki, T., K. Adachi, T. Moriya, H. Miyamachi, T. Matsushima, K. Miyashita, T. Takeda, T. Taira, T. Yamada, and K. Ohtake, 2004, Upper and middle crustal deformation of an arc-arc collision across Hokkaido, Japan, inferred from seismic refraction/wide-angle reflection experiments, Tectonophysics, **388**, 59-73.
- 笠原順三, 1997 年度地震研用船乗船者, 1998, 日本海東縁秋田沖における地殻構造調査(序報), 地球惑星科学関連学会 1998 年合同大会予稿集, 361.
- 香東卓郎・菊池伸輔・伊藤谷生, 2002, 日高衝突帯前縁褶曲・衝上断層帯の地下構造：石油公団日高測線(H91-2, 3) 反射記録の再処理と再解釈, 地震研究所彙報, **77**, 97-109.
- Kimura, G., 1994, The latest Cretaceous-early Paleogene rapid growth of accretionary complex and exhumation of high pressure series of metamorphic rocks in northwestern Pacific margin, J. Geophys. Res., **99**, 22,147-22,164.
- Kodaira, S., A. Goldschmidt-Rokita, J. M. Hartmann, H. B. Hirschleber, T. Iwasaki, T. Kanazawa, H. Kraham, S. Tomita, and H. Shimamura, 1995, Crustal structure of the Lofoten continental margin, off northern Norway, from ocean-bottom seismographic studies, Geophys. J. Int., **121**, 907-924.
- Kodaira S., E. Kurashimo, J. O. Park, N. Takahashi, A. Nakanishi, S. Miura, T. Iwasaki, N. Hirata, K. Ito, and Y. Kaneda, 2002, Structural factors controlling the rupture process of as megathrust earthquake at the Nankai trough seismogenic zone, Geophys. J. Int., **149**, 815-835.
- Kodaira, S., T. Iidaka, A. Kato, J. O. Park, T. Iwasaki, and Y. Kaneda, 2004, High pore pressure may cause slow slip in the Nankai Trough, Science, **304**, 1295-1298.
- 小松正幸・宮下純夫・在田一則, 1986, 日高変成帯の構成, 地函研専報, **31**, 189-203.
- 蔵下英司・徳永雅子・平田 直・岩崎貴哉・小平秀一・金田義行・伊藤 潔・西田良平・木村昌三・井川 猛, 2002, 四国東部地域における地殻上部及び最上部マントルの地震波速度と沈み込むフィリピン海プレートの形状, 地震 2, **54**, 489-505.
- Kurashimo, E., N. Hirata, T. and Iwasaki, 2003, Physical properties of the top of the subducting Philippine sea plate beneath the SW Japan arc by AVO analysis, Abstr. 10th Int. Symp. "Deep Seismic Profiling of the Continents and Their Margins", p. 83.
- Kurashimo, E., T. Iwasaki, T. Iidaka, T. Kawamura, T. Moriya, K. Ito, T. Shibutani, H. Miyamachi, H. Sato, K. Miller, S. Harder, T. Ito, Y. Kaneda, and M. Onishi, 2004, Deep seismic structure beneath the southwestern Japan arc, revealed by seismic refraction/wide-angle reflection profiling, Abstr. 11th Int. Symp. "Deep Seismic Profiling of the Continents and Their Margins", p. 67.
- Matsubara, M., N. Hirata, H. Sato, and S. Sakai, 2004, Lower crustal fluid distribution in the northeastern Japan arc revealed by high-resolution 3D seismic tomography, Tectonophysics, **388**, 33-45.
- Matsu'ura R., T. Yoshii, T. Moriya, H. Miyamachi, Y. Sasaki, A. Ikami, and M. Ishida, 1991, Crustal structure of a seismic refraction profile across the Median and Akaishi tectonic lines, central Japan, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, **66**, 497-516.
- Mjelde, R., M. A. Sellevoll, H. Shimamura, T. Iwasaki, and T. Kanazawa, 1992, A crustal study off Lofoten, N. Norway, by use of 3-component ocean bottom seismographs,

- Tectonophysics, **212**, 269-288.
- Mooney, W. D. and R. Meissner, 1992, Multigeneric origin of crustal reflectivity: a review of seismic reflection profiling of the continental lower crust and Moho, in "Continental Lower Crust", ed. by D. M. Fountain, R. Arcules, and R. Kay, Elsevier, New York, 45-79.
- 森谷武男, 宮町宏樹, オウズオゼル, ヌルジャンオゼル, 岩崎貴哉, 笠原 稔, 1997, 日高山脈の地下構造と地震テクトニクス, 構造地質, **42**, 15-30.
- Moriya, T., H. Okada, T. Matsushima, S. Asano, T. Yoshii, and A. Ikami, 1998, Collision structure in the upper crust beneath the southwestern foot of the Hidaka Mountains, Hokkaido, Japan as derived from explosion seismic observations, Tectonophysics, **290**, 181-196.
- Nakahigashi, K., M. Shinohara, S. Suzuki, R. Hino, H. Shiobara, H. Takenaka, M. Nishino, T. Sato, S. Yoneshita, and T. Kanazawa, 2004, Seismic structure of the crust and uppermost mantle in the incipient stage of back arc rifting - northernmost Okinawa Trough, Geophys. Res. Lett., **31**, L02614, doi:10.1029/2003GL018928.
- Nakajima, J. and A. Hasegawa, 2007, Tomographic evidence for the mantle upwelling beneath southwestern Japan and its implications for arc magmatism, Earth Planet. Sci. Lett., **254**, 90-105.
- 中島淳一・長谷川 昭, 2008, 東北日本弧下のマントルウェッジの地震学的構造とその解釈, 地学雑誌, **117**, 76-92.
- Nishimoto, S., M. Ishikawa, M. Arima, and T. Yoshida, 2005, Laboratory measurement of P-wave velocity in crustal and upper mantle xenoliths from Ichino-megata, NE Japan: ultrabasic hydrous lower crust beneath the NE Honshu arc, Tectonophysics, **396**, 245-259.
- 西坂弘正・篠原雅尚・日野亮太・笠原順三・佐藤利典・望月公廣・末広 潔, 1999, 海底地震計と制御震源を用いた秋田沖日本海東縁部海陸境界域のP波速度構造, 月刊地球, 号外 27, 75-82.
- 西坂弘正・篠原雅尚・佐藤利典・日野亮太・望月公廣・笠原順三, 2001, 海底地震計と制御震源を用いた北部大和海域, 秋田沖日本海東縁部海陸境界域の地震波速度構造, 地震 2, **54**, 365-380.
- Okada, H., S. Suzuki, T. Moriya, and S. Asano, 1973, Crustal structure in the profile across the southern part of Hokkaido, Japan, as derived from explosion seismic observation, J. Phys. Earth, **21**, 329-354.
- Okada, H., T. Moriya, T. Masuda, T. Hasegawa, S. Asano, K. Kasahara, A. Ikami, H. Aoki, Y. Sasaki, N. Furukawa, and K. Matsumura, 1978, Velocity anisotropy in the Sea of Japan revealed by big explosions, J. Phys. Earth, **27**, Suppl., S15-S32.
- Okada, H., S. Asano, T. Yoshii, A. Ikami, S. Suzuki, T. Hasegawa, K. Yamamoto, K. Ito, and K. Hamada, 1979, Regionality of the upper mantle around northeastern Japan as derived by big explosions at sea I. SEIHA-1 explosion experiment, J. Phys. Earth, **27**, Suppl., S15-S32.
- Ozawa, S., M. Murakami, M. Kaidu, T. Tada, T. Sagiya, Y. Hatanaka, H. Yari, and T. Nishimura, 2002, Detection and monitoring of ingoing aseismic slip in the Tokai region, central Japan, Science, **298**, 1009-1012.
- Ozel, O., T. Moriya, T. Iwasaki, T. Iidaka, S. Sakai, G. Aoki, and S. Suzuki, 1996, Crustal structure in the central Hokkaido, Japan, from a seismic refraction experiment, J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., VII, **10**, 31-56.
- Ozel, O., T. Iwasaki, T. Moriya, S. Sakai, S. T. Maeda, C. Piao, T. Yoshii, T. S. Tsukada, A. Ito, S. Suzuki, A. Yamazaki, and H. Miyamachi, 1999, Crustal structure of central Japan and its petrological implications, Geophys. J. Int., **138**, 257-274.
- Research Group for Explosion Seismology, 1951, Explosion seismic observations in north-eastern Japan, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, **29**, 97-106.
- Sato, H. and K. Amano, 1991, The relationship between tectonics, volcanism, sedimentation and basin development, Late Cenozoic, central part of Northern Honshu, Japan, Sediment. Geology, **74**, 323-343.
- Sato, H., N. Hirata, and T. Iwasaki, 2002a, Deep geometry and evolution of active reverse faults in northern Japan, in "Seismotectonics in Convergent Plate Boundary", ed. by Y. Fujinawa and A. Yoshida, TERRAPUB, Tokyo, 201-207.
- Sato, H., N. Hirata, T. Iwasaki, M. Matsubara, and T. Ikawa, 2002b, Deep seismic profiling across Ou backbone range Northern Honshu Island, Japan, Tectonophysics, **355**, 41-52.
- Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, T. Iwasaki, T. Ito, T. Ikawa, T. Kawanaka, and S. Harder, 2005a, Earthquake source fault beneath Tokyo, Science, **309**, 462-464.
- 佐藤比呂志・児島悠司・村田明広・伊藤谷生・金田義行・大西正純・岩崎貴哉・於保幸正・荻野スミ子・狩野謙一・河村知徳・蔵下英司・越谷 信・高須 晃・竹下 徹・津村紀子・寺林 優・豊原富士夫・中島 隆・野田 賢・橋本善孝・長谷川修一・平田 直・宮内崇裕・宮田隆夫・山北聡・吉田武義・Steven Harder・Kate Miller・Galen Kaip・小澤岳史・井川 猛, 2005b, 西南日本外帯の地殻構造: 2002年四国-瀬戸内海横断地殻構造探査の成果, 地震研究所彙報, **80**, 53-71.
- Sato, T., S. Miura, G. Fujie, K. Obana, A. Ito, D.H. Kang, S. Kodaira, K. Suyehiro, Y. Kaneda, and T. Iwasaki, 2004, Deep seismic structure in the margin of the southwestern Yamato Basin, Japan Sea by ocean bottom seismographic experiment, Abstr. 11th Int. Symp. "Deep Seismic Profiling of the Continents and Their Margins", p. 97.
- Sato, T., N. Takahashi, S. Miura, G. Fujie, D.-H. Kang, S. Kodaira, and Y. Kaneda, 2006, Last stage of the Japan Sea back-arc opening deduced from the seismic velocity structure using wide-angle data, Geochim. Geophys. Geosys., **7**, Q06004, doi:10.1029/2005GC001135.
- Takahashi, N., S. Kodaira, T. Tsuru, J. O. Park, Y. Kaneda, K. Suyehiro, H. Kinoshita, S. Abe, M. Nishino, and R. Hino, 2004, Seismic structure and seismogenesis off Sanriku region, northeastern Japan, Geophys. J. Int., **159**, 129-145.
- Tsumura, N., H. Ikawa, T. Ikawa, M. Shinohara, T. Ito, K. Arita, T. Moriya, G. Kimura, and T. Ikawa, 1999, Delamination-wedge structure beneath the Hidaka collision zone, central Hokkaido, Japan, inferred from seismic reflection profiling, Geophys. Res. Lett., **26**, 1057-1060.
- 横倉隆伸・宮崎光旗・長谷川 功, 1994, 東北脊梁山脈下

- に見られた深部反射面 ―等温面の可能性―, 日本地震学会講演予稿集 1994 年度秋季大会, D19.
- 横倉隆伸・宮崎光旗・加野直巳・山口和雄, 1997, 南部北上地域下で見られた深部地殻反射波, 日本地震学会講演予稿集 1997 年度秋季大会, P64.
- 吉井敏尙, 1990, 屈折法爆破地震波形の反射法的処理, 地震学会講演予稿集, No. 2, 91.
- 吉井敏尙, 1994, 人工地震による日本列島の地殻構造, 地震 2, **46**, 479-491.
- Yoshii, T. and S. Asano, 1972, Time-term analyses of explosion seismic data, J. Phys. Earth, **20**, 47-57.
- Yoshii T., H. Okada, S. Asano, K. Ito, T. Hasegawa, A. Ikami, T. Moriya, S. Suzuki, and K. Hamada, 1981, Regionality of the upper mantle around northeastern Japan as revealed by big explosions at sea II. SEIHA-2 and SEIHA-3 experiment, J. Phys. Earth, **29**, 201-220.
- 吉井敏尙・中村正夫・伊藤 潔・山本正人, 1990, 爆破地震動の観測による紀伊半島の地下構造 (河内長野・紀和測線), 地震学会講演予稿集, No. 2, 89.