

島弧衝突研究の新展開

伊藤谷生¹⁾・岩崎貴哉^{2)*}

¹⁾ 千葉大学理学部地球科学科

²⁾ 東京大学地震研究所

New Development on Crustal Studies on Arc-Arc Collision Zone

Tanio Ito¹⁾ and Takaya Iwasaki^{2)*}

¹⁾ Faculty of Science, Chiba University

²⁾ Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

Abstract

In Japanese islands, there exist two ongoing arc-arc collision zones (Hidaka region in Hokkaido and Izu region in Honshu). This paper presents an overview for recent geophysical and geological researches on the arc-arc collisions. In the Hidaka collision zone, the Kuril forearc has been collided onto the Northeast Japan arc since Miocene. A series of intensive seismic reflection and refraction since 1994 provided clear images on the collision style including the crustal delamination of the Kuril forearc in this region. These results constrain an important process for the formation of continental crust. Namely, delaminated lower (more mafic) crust of the Kuril forearc is descending down, and being transferred into the mantle by the plate subduction. The resultant crust becomes more felsic, which probably will be a core of the continental crust. The deep structure and deformation style of the Izu collision zone, where the Izu-Bonin arc is colliding to Honshu Island, has not been clarified as yet. In this paper, some of the recent geological and geophysical studies in these regions are introduced.

Key words: arc-arc collision, crust, delamination, Hidaka, Izu, reflection

1. はじめに

(1) 1990年代初頭までの到達点

島弧衝突は、プレートテクトニクス論の登場によって大陸地殻形成の基本的な過程の一つと考えられるに至り、重要な地球科学的研究課題となった。幸い日本列島には日高衝突帯と伊豆-丹沢衝突帯という現在進行中の島弧-島弧衝突帯が2つ存在し、島弧衝突研究の絶好のフィールドを提供している。このため1970年代以降精力的な地質学的研究が行われ、その成果は多数の論文等によって公表されている。これらの研究によって、衝突帯を構成する物質の初源的位置とその物質移動の時空的経過、衝突帯の上部地殻構造などが相当程度明らかに

なったといつてよい。その1990年代初頭までの到達点は、日高衝突帯に関してはKimura (1986)、北海道の地質と構造運動編集委員会編(1986)の諸論文、Komatsu *et al.* (1992)、伊豆-丹沢衝突帯に関しては、Modern Geology Vol. 14 Nos. 1 and 2 (1989)及び同Vol. 15 No. 4 (1991)に概ね集大成されている(DELPA Working Group for the South Fossa Magna, 1989; Niitsuma, 1991)。

一方、衝突帯における地球物理学的探査、特に地震波を用いた構造探査は、北海道における1968年の襟裳岬沖の海中ショット観測に始まる(Okada *et al.*, 1973)。その翌年には積丹半島沖のショットが行われ、北海道の

*e-mail: iwasaki@eri.u-tokyo.ac.jp (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

西部・中部の太平洋側の地殻構造が初めて求められた。その後の1984年と1992年には、国の地震予知計画に基づいて大規模な屈折法地震探査が行われた。これらの探査によって、日高地域を中心とする北海道の地殻構造の複雑さが浮かび上がってきたが、実験の観測点及び発振点密度が十分でなかったため、衝突を直接示唆するような構造のマッピングには至らなかった(爆破地震動研究グループ, 1988, 1993; Ozel *et al.*, 1996; Iwasaki *et al.*, 1998; Moriya *et al.*, 1998)。伊豆-丹沢衝突帯に関しては、1980年に伊豆半島沖から伊豆横断して鳩山に至る地殻構造探査が行われ(早川他, 1983)、その大局的な構造が提出された(Asano *et al.*, 1985)。一方、自然地震観測からは、この地域におけるフィリピン海プレートの形状把握が震源分布(例えば岡田, 1990; Ishida, 1992)や変換波観測(例えばIidaka *et al.*, 1991; 津村他, 1993)によって試みられている。更に、トモグラフィーによってプレートを含む3次元の構造が提出された(例えば, Ishida and Hasemi, 1988; Kamiya and Kobayashi, 2000)。しかし、衝突を直接示唆するような詳細な構造を提出するには至っていない。

このように島弧衝突の研究については、1980年代から90年代はじめまで地質学的アプローチと地球物理学的アプローチが事実上独立に進められ、両者の結合は実現しなかった。このため、島弧衝突の全体像を把握する糸口はつかめなかったのである。

(2) 開始された新たな衝突帯研究

1990年代初頭までの到達点に、新たな、しかも本質的転機を与えたのは、日高山脈南部を横断する国道236号線に沿って1994年行なわれた反射法による日高衝突帯地殻構造探査(日高94/文部省科学研究費補助金 代表: 北海道大学在田一則)である(井川他, 1997; Arita *et al.*, 1998など, Fig. 1)。この探査に引き続き、1997年までの間に更に2回の実験(日高96・日高97/96-97年文部省大学院研究科共同研究経費 代表: 千葉大学伊藤谷生)が行われ、東北日本弧に衝突している千島弧の地殻のDelamination(剝離現象)が明瞭な形でマッピングされた(Tsumura *et al.*, 1999; 伊藤, 2000; Ito, 2002)。これらの実験の成功によって、構造探査を推進力とした日高衝突帯研究は、地質学と地球物理学の共同研究態勢を基礎に、飛躍的な発展を遂げる。即ち、1998-2000年には、日高衝突帯中央部をほぼ東西に横断する大規模な屈折法・反射法地震探査(1998年文部省科学研究費補助金 代表: 東京大学岩崎貴哉, 99-00年“地震予知のための新たな観測研究計画”経費)が実施され(Iwasaki *et al.*, 2000 a, b; 岩崎他, 2001; Moriya *et al.*, 2000; 爆破地震動

研究グループ, 2002 a, b), 併せて稠密地震観測網を展開して日高山脈及びその周辺の地震活動観測が行われた(勝俣他, 2002)。更に、日高衝突帯南端部では、衝突に伴う地殻改変過程の全プロセスを明らかにする目的で、太平洋プレートまでの深部を対象とする地震探査(日高超深部2000/2000-01年度文部省科学研究費補助金 代表: 千葉大学伊藤谷生)へと発展した(津村他, 2001)。上記の測線の主なものは、Fig. 1に示してある。一方、1990年代には、それまでの成果を引き継いで自然地震データを用いた3次元速度構造モデルや詳細な発震機構解も提出された(Takanami, 1982; Miyamachi and Moriya, 1984, 1987; Miyamachi *et al.*, 1994; 森谷他, 1997)。これらの研究によって日高地域の3次元的速度構造の知見が集積し、屈折法・反射法地震探査結果や地質学的知見と合わせて、日高地域の衝突過程研究をおおいに進展させた。

伊豆-丹沢衝突帯については、在田らによる日高衝突帯反射法地震探査の開始(1994年)よりも早く既に1990~92年に反射法地震探査(笠原他, 1991)が防災科学技術研究所によって実行され、極めて重要なデータを提供しているが、地質学と地球物理学の共同研究態勢の構築に至らなかった。

本小論においては、本特集号に掲載されている諸論文も紹介しつつ、新段階に入った島弧衝突帯研究の到達点を概観し、今後の課題を議論する。

2. 日高衝突帯研究の新段階

(1) 到達点

1) 日高衝突帯の基本構造

日高衝突帯の基本構造として、南部における地殻構造探査を基礎に、delamination-wedge構造が提示された。即ち、①千島弧下部地殻が往復走時7.5秒付近(深度およそ23 km)で上下にデラミネーション(delamination)を起こし、下部地殻上半分+上部地殻が日高主衝上断層(HMT)を底面として西方に向かって東北日本弧側に衝上している。一方、下部地殻下半分+上部マントルは西に向かって下降している。②東北日本弧東縁は楔(wedge)状の形態をとってデラミネートした千島弧の間に突入している(Fig. 2)。このdelamination-wedge構造の下には太平洋プレートの沈み込みが存在するが、その意味については後程議論する。

このdelamination-wedge構造は、それまで根拠について十分な説明がなされてなかった2つの事実について合理的な回答を与える。第1に、日高主衝上断層(HMT)によって千島弧の下部地殻が地表に露出してい

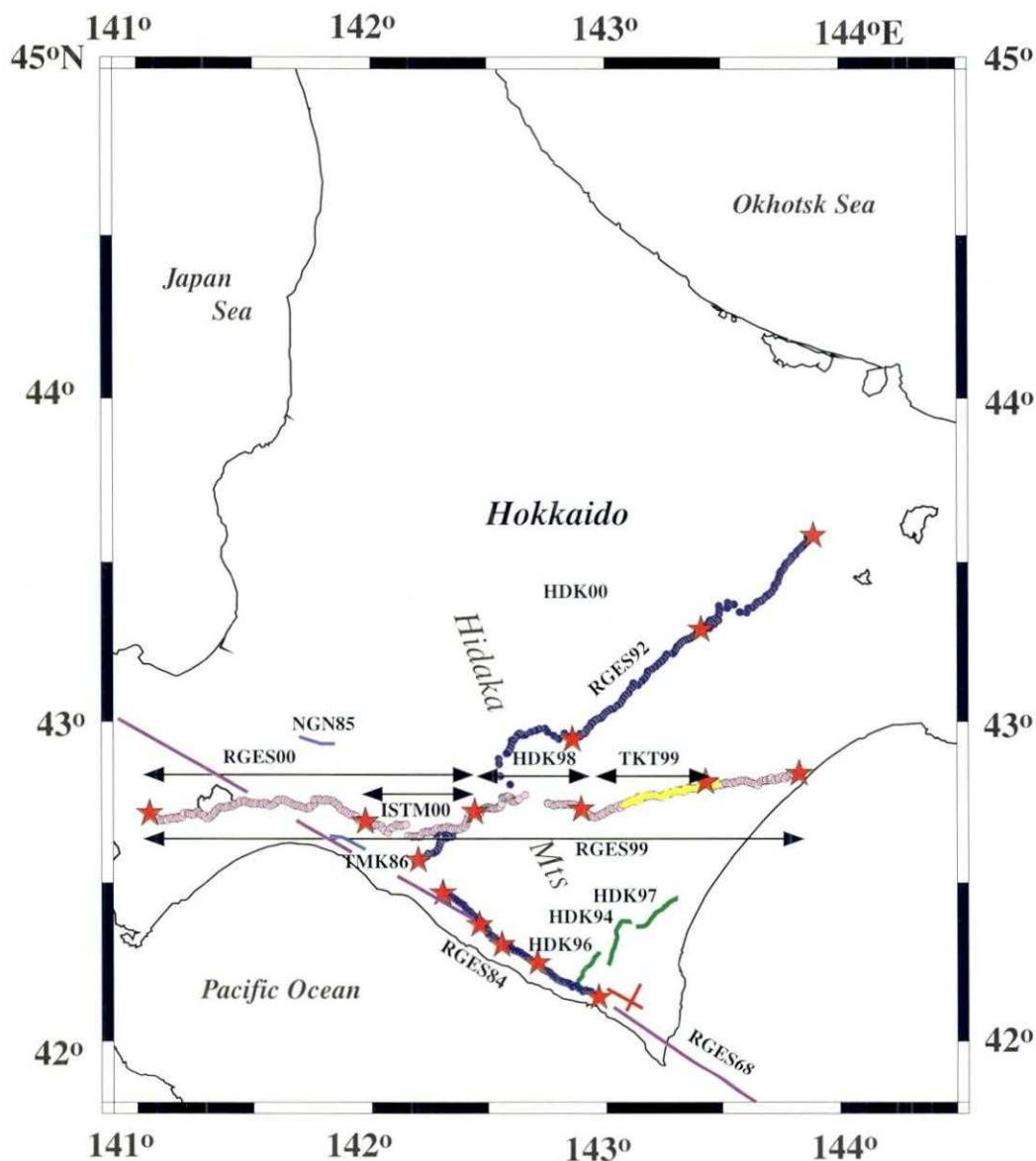


Fig. 1 Location map of seismic profile lines undertaken in Hokkaido, Japan. RGS68: A refraction line in 1968 (Okada *et al.*, 1973). RGS84: A refraction and wide-angle reflection line in 1984 (RGES, 1988; Iwasaki *et al.*, 1998; Moriya *et al.*, 1998). RGS92: A refraction and wide-angle reflection line in 1992 (RGES, 1988; Ozel *et al.* 1996, Iwasaki *et al.*, 1998). RGS99: A refraction and wide-angle reflection line in 1999 (Iwasaki *et al.*, 2000a, 2000b, Moriya *et al.*, 2000, RGES, 2002a, 1999–2000, Research Group for Hokkaido Transect 1999–2000, 2002). RGS00: A refraction and wide-angle reflection line in 2000 (RGES, 2002b, 1999–2000, Research Group for Hokkaido Transect 1999–2000, 2002). NGN85 and TMK86: Reflection lines in 1985–86 by Asano (1989). HDK94, 96, 97: Reflection lines in the southern part of the Hidaka Collision zone (Ikawa *et al.*, 1997; Arita *et al.*, 1998; Tsumura *et al.*, 1999; Ito, 2000, 2002). HDK98: A reflection line across the middle part of the collision zone in 1998 (Iwasaki *et al.*, 2001, Adachi, 2002). TKT99: A reflection line across the Tokachi Basin in 1999 (Adachi, 2002; Research Group for Hokkaido Transect 1999–2000, 2002). ISTM00: A reflection line across the foreland region of the collision zone in 2000. HDK00: Reflection profiles for super deep structure of the Hidaka collision zone (Tsumura *et al.*, 2001).

るが、その下部地殻は形成深度 23km 以浅の部分であることが、小松他 (1982) によって既に明らかにされていた。Delamination 構造は、23 km 以深の下部地殻 (小山内他, 1986) の“行方”に初めて合理的な説明を与えるものである。第 2 に、日高衝突帯の地殻速度構造は、P

波速度 6 km/s 以上の高速度領域が“鰐”のように西に向かって口を開いた形状をしており、その“鰐口”の“口内”は周辺より低速度、高減衰領域となっていることが、Miyamachi and Moriya (1984, 1987), 森谷他 (1997) によって明らかにされていた。この“鰐口”の位置と形

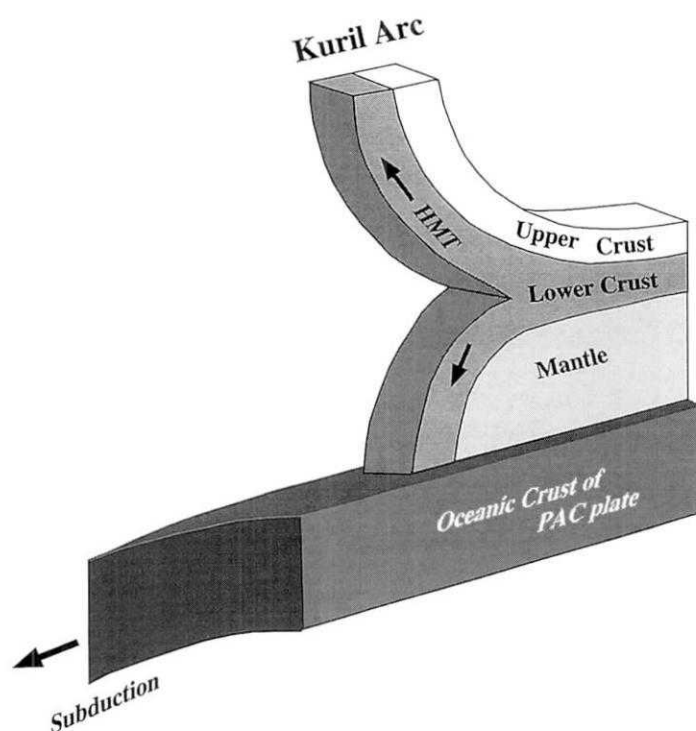


Fig. 2. Schematic representation of the delamination structure of the Kuril arc in the southern part of the Hidaka Collision zone. The Northeast Japan arc is intruded into the delaminated Kuril arc with a wedge shape. Note that the oceanic crust of the Pacific plate is subducting beneath the Hidaka Collision zone.

状は、上記 delamination-wedge 構造と極めてよく対応している。即ち、delamination を起こした千島弧下部地殻が“鱈口”に、wedge が“口内”に相当する。森谷らによる“鱈口”構造は、delamination-wedge 構造によって形成されたと解釈するのが合理的である。

2) 大陸地殻形成のプロセス

そもそも島弧衝突が注目されるのは、それが大陸地殻の形成過程と深く関わっていると考えられてきたからである。しかし、島弧衝突が大陸地殻形成に関わるプロセスについては十分な解答が得られていなかった。日高衝突帯に関するこれまでの成果は、そのプロセスに一つの重要な解答を与えるものになっている。具体的な議論に入る前に、島弧衝突が大陸地殻形成に至るための必要条件を挙げておく。第1に、島弧地殻の SiO_2 含有量はその成熟段階に応じて増大するが、大陸地殻となるためにはさらに珪長質となって SiO_2 含有量が60%程度までにならなければならない (Condie, 1997)。第2に、地殻が大陸地殻の平均的厚さである40 km程度 (Christensen and Mooney, 1995) まで厚化しなければならない。第3に、厚化した地殻が水平的拡大し、成長しなければならない。

日高衝突帯の基本構造として提示された delamina-

tion-wedge 構造は、第1、第2の必要条件を準備する。

Fig. 3をみていただきたい。まず、衝突する島弧Aが A_U (上部地殻+下部地殻上半分) と A_L (下部地殻下半分+上部マントル) が上下に分離し、 A_L が本体から剥離 (delamination) することによって島弧地殻のなかでも相対的に苦鉄質の下部が島弧地殻から引き裂かれ、島弧地殻全体としてはより珪長質となる準備がなされる。こうして delamination が進行すればするほど島弧Aにおいては第1の必要条件は整うこととなる。次に、上下に分離した島弧Aのなかに突入したもう一つの島弧Bが楔 (wedge) 状に接合することの意味を考える。まず突入する過程で島弧B側の上下2つのプリズム B_U , B_L が形成され、それらが移動させられる。 B_U は島弧Bの上に重なり、 B_U' となる。 B_L の行方の判断は難しいが、 A_L とともに下方に移動させられると考えるのが順当であろう。島弧Bについても相対的に苦鉄質の部分 B_L が島弧地殻から排除され、第1の必要条件が満足される。一方、相対的に珪長質な A_U , B_U は重なり合って地殻厚化に寄与するため、第2の必要条件も満足される。こうして delamination-wedge 構造は、大陸地殻形成のための第1、第2の必要条件に適合する。

衝突過程が継続し、苦鉄質が除去されるためには、本

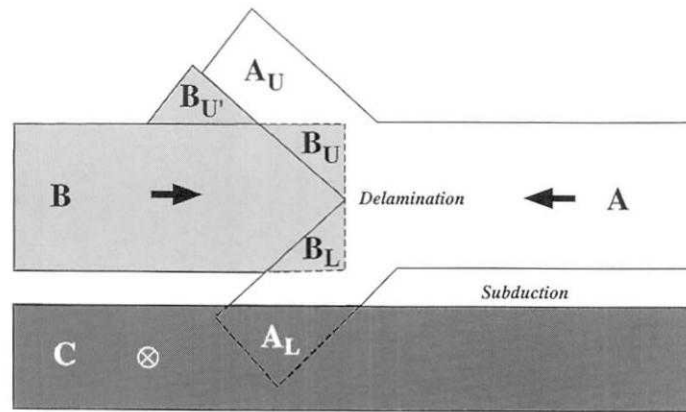


Fig. 3. Schematic diagram for explaining growth of continental crust through arc-arc collision. Arc "A" is colliding against Arc "B". More felsic A_U (Upper crust and upper part of the lower crust of Arc A) and more mafic A_L (Lower part of the lower crust + upper mantle of Arc A) is delaminated from each other. A_U thrusts over on Arc B, whereas A_L is descending down. More felsic B_U and more mafic B_L , representing upper and lower parts of the front of Arc B, respectively, are tectonically eroded forming a wedge. B_U is shifted onto Arc B and transformed into B_U' , whereas B_L is split from Arc B. Then A_L and B_L are transferred into the mantle by the subduction of plate C. Thus more mafic parts of Arc A and B are deleted from the collision zone. The resultant upper part is a more felsic merger of the two arcs, which is a nucleus of continental crust.

体から分離した A_L , B_L が衝突帯の下部から排除されるシステムが必要である。なぜなら、そのようなシステムがなければ物質過剰のため衝突が停止するからである。これに関して重要なことは、島弧と島弧の衝突が、衝突に先立って存在した3つの沈み込み帯のうち1つを消滅、2つを合体させ、1つの新たな沈み込み帯を衝突帯の下部に形成させることである。実は、この沈み込み帯が A_L , B_L を衝突帯下部から剥ぎ取り、マントル内部に運搬する役割を果たしていると考えられる。こうして衝突帯下部から間断なく物質が排除されるために衝突過程の継続が保証されるのである。衝突の継続は delamination-wedge 構造の成長をもたらす、従って地殻の厚化部を水平的に拡大する。こうして第3の必要条件も満足される。

3) 衝突に伴う上部地殻構造の改変

日高衝突帯を挟んでそれと平行に帯状地質構造が発達することについては既に知られていたが、delamination-wedge 構造が提示されたことによって、帯状構造の形成過程を合理的に説明し得る地殻構造断面を描く展望が生まれた。その試みは伊藤 (2000) などによって概略的になされ、日高衝突帯から石狩低地帯までの幅約 70 km の地域は delamination-wedge 構造から派生するマスターデタッチメントの成長によって形成された西フェルゲンツの前縁褶曲衝上断層帯として認識されたのである。この認識は、前縁褶曲衝上断層帯における総短縮量がおおよそ 50~60 km であり、これは千島弧の delamina-

tion 量 (構造方向に直交する断面上における HMT の長さ) に相当することによって支持される。この流れを受けて、本特集号に掲載されている香東他 (2002) は、石油公団の陸上基礎物理探査「日高」のデータを再処理することによって、前縁褶曲衝上断層帯の詳細な断面を描き、短縮量の評価を行なっている。

前縁褶曲衝上断層帯の活動最前線は現在、馬追丘陵~勇払地域に到達し、地表到達ならびに伏在の活断層群を形成している。近年、馬追丘陵~勇払地域については浅野 (1989) に引き続き、高分解能反射法地震探査 (佐藤他, 1998; 折戸, 2000) が行なわれ、活断層研究においても新たな前進が開始された。本特集号掲載の加藤他 (2002) はその成果のひとつである。

一方、日高衝突帯の東方には、十勝平野、およびその東縁に西フェルゲンツの十勝盆地東縁活断層群と褶曲帯 (池田他, 2002) がある。本特集号掲載の鈴木他 (2002)、越後他 (2001) などを考慮すれば、十勝平野は日高衝突帯の後背低地であり、その東縁は後背褶曲衝上断層帯をなしているとみなすことができよう。

こうして、東北日本弧-千島弧の衝突に伴う上部地殻構造の改変は、前縁および後背褶曲衝上断層帯を含めて 120 km に及ぶことになる。本来、衝突帯という語は、この改変域全体に用いるべきであるが、既に日高衝突帯という表現が HMT 周辺を指して定着していることを考慮し、改変域全体に言及する場合には東北日本弧・千島弧衝突帯と呼ぶことにする。

(2) 新たな課題

日高衝突帯研究は新たな段階に入り、前記のように2つの点で重要な前進を遂げたが、完成あるいは解決すべき課題も明確になってきた。

1) 構造断面の完成

delamination-wedge 構造は日高衝突帯南部での地震探査を基に提案されたものであるが、現在までに公表されている1998-2000年に行われた中央部での地震探査結果によれば衝突構造は、より複雑である可能性が高い(1999-2000年北海道日高衝突帯構造探査グループ, 2002; 足立, 2002)。

Fig. 2に示したように、日高帯南部では、千島弧側上部地殻と下部地殻の上部が西側に衝上している。日高帯中央部においても、このような衝上は明瞭な反射面としてmappingされた。しかし、南部と違って深さ20-22kmにはほぼ水平な強い反射面が存在し、南部のような下部地殻下半分の下降現象は認められない。この違いが、地殻剝離形式の違いを反映しているのか、あるいは南部とは異なる衝突様式によるものなのか、は今後の詳細な検討が必要である。

一方、日高主衝上断層下には、東上がりの反射面が確認された。これは、屈折法データからは見えなかった新しい発見である。更に、屈折法探査から、衝突帯前縁部の複雑な構造が明らかになった(1999-2000年北海道日高衝突帯構造探査グループ, 2002)。特に二重の速度逆転層は、衝突によって東北日本弧側地殻浅部が折りたたまれ変形した結果と解釈できるかもしれない。そうであれば、この結果は、日高衝突帯における地殻短縮率の推定に、重大な拘束条件を与えることになる。

このような知見を踏まえ、構造の南北変化も含めた衝突帯の構造断面の完成が急がれる。

前述のようにdelamination-wedge構造はその下方に沈み込み帯が存在することによって、衝突が継続するシステムを作っている。delamination-wedge構造とsubductionの関係を具体的に解明することが重要である。日高超深部2000(HDK 00, Fig. 1参照)の成果が期待されている。

2) 衝突過程の復元

衝突過程は、前縁ならびに後背褶曲衝上断層帯のなかに記録されている。この褶曲衝上断層帯における反射法地震探査結果を活用した構造地質学的研究、堆積学的解析を通じて、衝突開始時期、衝突過程の進行に伴う短縮量の増大等が解明され得る。そのためには、衝突開始前の地質構造を合理的に復元する、すなわち初期条件を明らかにするという難問に立ち向かわなくてはならない。

まず、現在の地質構造が、東北日本弧に見られる始新世までの西向き沈み込みに起因するものと、千島弧の衝突によるものという少なくとも2つの要素が重複して形成されていることに留意して、それらを分離することが必要である。先に紹介した本特集号掲載の香東他(2002)論文では、石狩層群を規準として、それが水平に連続するように衝突開始時の構造を復元する方法を採っている。しかし、付加体物質で構成されるイドンナップ帯については、このような明快な規準面を選び出すことが難しく、地質学的手法によって衝突前の構造を推定する必要がある。

3) 現行テクトニクスとプレート境界問題

北海道ならびにその近傍のプレート境界に関しては様々な議論があるが、この問題を精力的に研究しているSeno *et al.* (1996)によれば、北海道が属しているオホーツクプレートとユーラシアプレートの境界は日本海東縁にあり、その収束速度は北海道西方で9mm/yとされている。仮に両プレートの境界が北海道中央部にあるとしても、両プレート間の収束速度は8mm/yであり、大差ない。一方、詳細な解析は今後待つが、衝突開始が前期ないし中期中新世、総短縮量がおおよそ60km程度という評価(Ito, 2002)は大筋で変わらないと思われるので、日高衝突域での平均短縮速度は3~4mm/yとなる。このことは日高衝突域でオホーツク、ユーラシア両プレートの全収束速度の50%を担っていることを意味する。従って、両プレートの収束運動が日本海東縁に集中しているという見解は再検討を要するのではないかと。後背褶曲衝上断層帯、日高衝突帯の構造的延長である天北地方の衝上断層帯における短縮量の評価を行ないながら、北海道ならびにその周辺地域のプレート境界問題に新たな光を投げかけるべきであろう。その際、プレートが剛体的に振舞うことを前提として設定されるプレート境界を、広範な領域にわたって地殻全体が変形するような島弧衝突域で線引きすることがそもそも妥当かどうかという原理的問題も問われる必要がある。

4) delamination-wedge 構造形成のメカニズム

日高衝突帯の基本構造としてのdelamination-wedge構造はどのようにして成立し、成長していったのか、という根源的問題はまだ手がつけられていないといつてよい状態である。この問題を解く上で1990年代に入って重要な研究成果が報告されている。

第1に、衝突に先立って千島側に既に形成されていた島弧地殻の変形過程について、Komatsu *et al.* (1989)は、D1(主変成作用)、D2(中・上部地殻の水平滑り)およびD3(右横ずれ衝上運動)の3ステージに区分し

た。さらに、志村(1992)はD2期に下部地殻中部付近に生じた部分熔融域が水平滑りの一つとなり、それがHMTの先駆的な剪断面となったと指摘している。このことは、delaminationの開始が、衝突前の構造に支配されていることを示唆する。西向き沈み込みが終了し、衝突が開始されるまでの間、すなわち漸新世に現在の北海道中軸部に相当する地域でどのようなテクトニクスが進行していたのか、これを解明することがdelamination-wedge構造形成のメカニズムに迫る上で1つの鍵を与えると思われる。なお、この点と関連して、HMTに随伴してその上盤側(千島側)に分布する上部マントル起源の超苦鉄岩類の存在に注目する必要がある。delamination-wedge構造のみでは上部マントルをHMT上盤に移動させるのは困難であるからである。

第2に、日高衝突帯の隆起過程に時間目盛を入れる作業である(Arita *et al.*, 1993; 在田他, 2001)。その成果によれば、日高衝突帯における下部地殻上半分のデラミネーションによる高角化は既に18~19 Maには完了し、その当時、現在地表に露出している部分は地温およそ300°Cの深度(約10 km)にあった。このことは衝突初期にデラミネーションによる高角化が起こり、それ以降、衝突継続はデラミネーション拡大によって保証されていることを意味している。本特集号小野(2002)論文も日高衝突帯隆起過程を取り扱っており、こうした研究の進捗がdelamination-wedge構造形成のメカニズムに迫る上でもう1つの鍵を与えると思われる。

5) 地震活動

日高衝突帯及びその周辺の地震学的研究については、北海道大学の研究者によって精力的に行われてきた(例えば鈴木・本谷, 1981; 森谷, 1972; 森谷他, 1983, 1997, Miyamachi and Moriya, 1984, 1987; Miyamachi *et al.*, 1994; Takanami, 1982)。1999-2000年には大学合同臨時地震観測が行われ、海域部まで含めた詳細な地震活動が明らかとなった(勝俣他, 2002; 村井他, 2002)。これらの研究によれば、高い地震活動は、浦河沖から日高山脈西部にかけて見られ、20-40 kmの深さに集中している。一方、15 km以浅の活動は、極めて低い。これは、例えば西南日本等でみられる深さ12-15 kmより浅い部分での活発な地震活動とは大きく異なる(例えばIto, 1990)。更に地殻より深いマントル域(深さ30-100 km)での地震活動が見られることは、注目に値する。最近の稠密観測では、日高山脈の東側から十勝沖にかけてのプレート内の地震活動も明らかになってきた。即ち、プレートの傾斜が急変する場所において、プレートに対してほぼ垂直な地震群が存在する。この地震群は、この地域の2重

深発地震面の上面と下面をつなぐような形で存在しており、プレート内の断裂帯である可能性がある(勝俣ほか, 2002)。

一方、自然地震の発震機構解から推定される日高及びその周辺地域応力場は、基本的には東西から北東-南西の圧縮である(森谷他, 1997)。おそらくは、プレートの沈み込みより衝突運動がこの地域の応力状態の支配要因であると考えられる。しかし、日高山脈直下の地震の発震機構は、上記の基本場からはずれられる場合も多く見られ、日高山脈における衝突運動が、地殻深部・マントルにおいて複雑な応力状態を生み出している可能性がある(森谷他, 1997; 勝俣他, 2002)。

3. 伊豆-丹沢衝突帯研究の新課題

本州弧と伊豆弧の衝突に伴う日本列島の屈曲は日本列島の地殻構造の大規模な改変を伴って進行したことは疑いない。西南日本側の屈曲については本特集号掲載の狩野(2002)論文に詳しくレビューされている。また、西南日本と東北日本の接続関係の復元については同じく本特集号の山北・大藤(2002)論文において試みられている。しかし、伊豆-丹沢衝突帯構造の研究は90年代に例えばSoh *et al.* (1998)並びにTaira *et al.* (1998)などによる成果はあるものの、狩野(2002)が強調しているように従来の地表地質調査のみでは既に限界に達しており、何よりも反射法深部地殻構造探査の本格的実施が強く求められている。この点に関わって丹沢-足柄地域反射法地震探査(笠原他, 1991)データを再処理した結果と解釈が、笠原他(2002)の論文として本特集号に掲載されている。それによれば、今後の本格的な反射法地震探査によって衝突境界である国府津松田断層-神縄断層系深部構造解明の展望は十分あるといえよう。

4. おわりに

島弧-島弧衝突研究の絶好のフィールドである2つの衝突帯(日高衝突帯, 伊豆-丹沢衝突帯)について、研究の到達点と課題をそれぞれ述べてきた。両者はいずれもT字形の接合形態をなしているものの、構造的には異なっている。すなわち、日高衝突帯ではTの字の縦棒にあたる千島弧の進行方向にフェルゲンツを持つ衝上断層が発達しているのに対して、伊豆-丹沢衝突帯では伊豆弧進行の逆方向にフェルゲンツを持つ衝上断層が発達している。この差の根拠と大陸地殻形成における意味の解明を目指して、今後、2つの衝突帯研究の成果を積極的に統合することが重要である。そのことによって島弧衝突の普遍性についての議論が初めて可能となるであら

う。

謝 辞

本小論は、1970年代から日高衝突帯研究を一貫して進めて来られた北海道大学大学院理学研究科の在田一則助教授ならびに森谷武男助教授との日常的な議論が基礎となっている。特に記して感謝の意を表したい。また、本小論の草稿を査読された北海道大学大学院理学研究科の在田一則助教授ならびに東京大学地震研究所佐藤比呂志助教授には有意義かつ的確なコメントをいただき、本小論を改善する上で大変参考になった。厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 足立啓二, 2002. 高密度制御震源地震探査データに基づく日高衝突帯上部地殻構造, 東京大学大学院理学系研究科修士論文.
- Arita K., T. Shingu and T. Itaya, 1993, K-Ar geochronological constraints on tectonics and exhumation of the Hidaka metamorphic belt, Hokkaido, northern Japan, *J. Min. Pet. Econ. Geol.*, **88**, 101-113.
- Arita K., T. Ikawa, T. Ito, A. Yamamoto, M. Saito, Y. Nishida, H. Satoh, G. Kimura, T. Watabane, T. Ikawa, T. 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.
- 在田一則・雁澤好博・板谷徹丸, 2001, 日高山脈のテクトニクスと上昇過程—放射年代学からの検討, 地震研究所彙報, **76**, 93-104.
- Asano, S., K. Wada, T. Yoshii, M. Hayakawa, Y. Misawa, T. Moriya, T. Kanazawa, H. Murakami, F. Suzuki, R. Kubota and K. Suyehiro, 1985, Crustal structure in the northern part of the Philippine Sea plate as derived from seismic observation of Hatoyama-Off Izu Peninsula explosions, *J. Phys. Earth*, **33**, 173-189.
- 浅野周三, 1989, 地震動予測精密化のための地下深部構造の研究, 文部省科学研究費自然災害特別研究研究成果, 自然災害科学総合研究班, No. A-63-3.
- 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-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, 1993, 北海道地域における爆破地震動の観測(津別-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, 2002 a, 北海道日高衝突帯横断屈折・広角反射法地震探査(大滝-浦幌測線), 地震研究所彙報(本特集号).
- 爆破地震動研究グループ, 2002 b, 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-平取測線), 地震研究所彙報(本特集号).
- Christensen, N.I. and W.D. Mooney, 1995, Seismic velocity structure and composition of the continental crust: a global review, *J. Geophys. Res.*, **100**, 9761-9788.
- Condie, K.C., 1997, Plate Tectonics and Crustal Evolution. 4th ed., Butterworth-Heinemann, 282 pp.
- DELP Working Group for the South Fossa Magna (1989) Collision Tectonics in the South Fossa Magna, Central Japan (I). *Modern Geology* Vol. 14 Nos. 1 and 2, 1-152.
- 越後智雄・宮内崇裕・河村知徳・佐藤比呂志・蔵下英司・加藤一・井川 猛・川中 卓・折戸雅幸・長谷川貴志・伊藤谷生, 2001, 反射法地震探査による十勝活断層帯中部の浅部構造, 地震研究所彙報, **76**, 129-134.
- 早川正巳・浅野周三・山田敏彦・三沢良文・吉井敏尅・末広潔・和田一成・森谷武男・鈴木文大・久保田隆二・村上寛一・飯塚 進・一ノ瀬洋一郎, 1983, 鳩山・伊豆沖測線における爆破地震動観測, 科学技術庁委託研究「屈折法による地殻大構造調査」観測資料集 (I), 東海大学海洋研究所, 清水, 40 pp.
- 北海道の地質と構造運動編集委員会編, 1986. 北海道の地質と構造運動. 地団研専報, **31**, 518 p.
- Iidaka, T., M. Mizoue, I. Nakamura, T. Tsukuda, K. Sakai, M. Komayashi, T. Haneda and S. Hashimoto, 1991, The upper boundary of the Philippine Sea plate beneath the western Kanto region estimated from S-P and P converted waves, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **66**, 333-349.
- 井川 崇・在田一則・伊藤谷生・木村 学・渡辺暉夫・井川 猛・黒田 徹, 1997. 日高衝突帯のバイプロサイス反射断面, 構造地質, **42**, 3-13.
- 池田安隆・今泉俊文・東郷正美・平川一臣・宮内崇裕・佐藤比呂志, 2002, 第四紀逆断層アトラス. 東京大学出版会, 254.
- Ishida, M. and A. Hasemi, 1988, Three-dimensional fine velocity structure and hypocentral distribution of earthquakes beneath the Kanto-Tokai district, Japan, *J. Geophys. Res.*, **93**, 2076-2094.
- Ishida, M., 1992, Geometry and relative motion of the Philippine Sea plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan, *J. Geophys. Res.*, **97**, 489-513.
- Ito, K., 1990, Regional variations of the cutoff depth of seismicity in the crust and their relation to heat flow and large inland-earthquakes, *J. Phys. Earth*, **38**, 223-250.
- 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 *Convergent Plate Boundary*, Eds. Y. Fujinawa and A. Yoshida, pp. 219-224, TERRAPUB, Tokyo.
- 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., T. Moriya, K. Arita, N. Hirata, H. Sato, T. Ito and T. Yoshii, 2000 a, 1999 Hokkaido Transect, Japan (A multidisciplinary crustal study for arc-arc collision zone), 9th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and Their Margins, 25.
- Iwasaki, T., K. Arita, N. Hirata, H. Sato, E. Kurashimo, T. Ito, T. Kozawa, T. Kawanaka and T. Ikawa, 2000 b. Crustal section of arc-arc collision zone, Hokkaido, Japan, from seismic reflection profiling, 9th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and Their Margins, 67.
- 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.
- Kamiya, S. and Y. Kobayashi, 2000, Seismological evidence for existence of serpentinized wedge mantle, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 819-822.
- 狩野謙一, 2002, 伊豆弧衝突に伴う西南日本弧の地殻構造改変, 地震研究所彙報 (本特集号).
- 笠原啓司・山水史生・井川 猛・清水祥四郎, 1991, 足柄平野-国府津・松田断層を横切る地震波反射断面, 地震学会講演予稿集, No. 2, 324.
- 笠原啓司・田中 環・井川 猛・太田陽一・川崎慎治・伊藤谷生, 2002, 丹沢・足柄地域における防災科学技術研究所反射法地震探査 90-AS・91-TAN データの再解析, 地震研究所彙報 (本特集号).
- 加藤直子・佐藤比呂志・松多信尚・平川一臣・越谷 信・宮内崇裕・戸田 茂・加藤 一・蔵下英司・越後智雄・三縄岳大・永井 悟・荻野スミ子・鏡 顕正・川中 卓・井川 猛, 2002, 日高衝上断層系前縁部・馬追丘陵を横切る反射法地震探査, 地震研究所彙報 (本特集号).
- 勝俣他, 2002, 大学合同臨時地震観測によって決定された島弧-島弧型日高衝上帯付近の震源分布と震源メカニズム解, 地震研究所彙報 (本特集号).
- 香東卓郎・菊池伸輔・伊藤谷生, 2002, 日高衝上帯前縁褶曲・衝上断層帯の地下構造: 石油公団 日高測線 (H 91-2, 3) 反射記録の再処理と再解釈, 地震研究所彙報 (本特集号).
- Kimura, G., 1986, Oblique subduction and collision: Forearc tectonics of the Kuril arc, *Geology*, 14, 404-407.
- 小松正幸・宮下純夫・前田仁一郎・小山内康人・豊島剛志・本吉洋一・在田一則, 1982, 日高変成帯における大陸性地殻-上部マントル衝上体の岩石学的特徴, 岩鉞特別号 3, 229-238.
- Komatsu, M., Y. Osanai, T. Toyoshima and S. Miyashita, 1989, Evolution of the Hidaka metamorphic belt, Northern Japan. In Daly, J.S., Cliff, R.A. and Yardley, B.W.D., eds., Evolution of Metamorphic Belt. Geol. Soc. London, Spec. Pap., No. 43, 487-493.
- Komatsu, M., H. Shibakusa, S. Miyashita, H. Ishizuka, Y. Osanai and M. Sakakibara, 1992, Subduction and collision related high and low P/T metamorphic belts in Hokkaido. Metamorphic belts and related plutonism in the Japanese islands, 29th IGC Field Trip Guidebook vol. 5, 1-62, Geological Survey of Japan.
- Miyamachi H. and T. Moriya, 1984, Velocity structure beneath the Hidaka Mountains in Hokkaido, Japan, *J. Phys. Earth*, 32, 13-42.
- Miyamachi H. and T. Moriya, 1987, Velocity structure and aftershock distribution of the 1982 Urakawa-oki Earthquake, *J. Phys. Earth*, 35, 309-326.
- Miyamachi, H., Kasahara, M., Suzuki, S., Tanaka, K. and Hasegawa, A., 1994, Seismic velocity structure beneath Northern Japan, *J. Phys. Earth*, 42, 269-301.
- 森谷武男, 1972, 日高山脈地震 (1970年1月21日) の余震活動, 地震II, 24, 287-297.
- 森谷武男・宮町宏樹・加藤 進, 1983, 1982年浦河沖地震の前震・本震及び余震分布とそれらのメカニズム解, 北海道大学地球物理学研究報告, 42, 169-190.
- 森谷武男・宮町宏樹・オウゾオゼル, 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.
- Moriya, T., K. Ohtsuka, T. Taira, T. Iwasaki, T. Takeda, T. Yamada, K. Ohtake, K. Gouke, T. Matsushima and H. Miyamachi, 2000, Seismic refraction/wide-angle reflection across arc-arc collision zone, central Hokkaido, Japan, 9th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and Their Margins, 68.
- 村井芳夫・秋山 諭・勝俣 啓・高波鉄夫・渡邊智毅・山品匡史・長 郁夫・田中昌之・桑野亜佐子・和田直人・島村英紀・趙 大鵬・三田亮平, 2002, 海底及び陸上稠密地震観測から明らかになった日高衝上帯の地下構造, 地球惑星科学関連学会 2002年合同大会予稿集, S086-002.
- Niitsuma, N. (1991) Collision Tectonics in the South Fossa Magna, Central Japan (II). *Modern Geology* Vol. 15 No. 4, 314-411.
- 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.
- 岡田義光, 1990, 南関東地域のサイスマテクトニクス, 地震II, 43, 153-175.
- 小野昌子, 2002, フィッシュンートラック法からみた日高山脈の隆起時期, 地震研究所彙報 (本特集号).
- 折戸雅幸, 2000, 苫小牧市勇弘における伏在断層の活構造解析, 千葉大学大学院自然科学研究科修士論文 (MS).
- 小山内康人・宮下純夫・在田一則・番場光隆, 1986, 大陸地殻-海洋地殻接合衝上体における変成作用と温度・圧力構造-日高変成帯主帯・西帯の例一, 地団研専報 31, 205-222.
- 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, *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser VII, 10, 31-56.
- 佐藤比呂志・平川一臣・池田安隆・折戸雅幸・井川 猛, 1998, 苫小牧東部勇弘に伏在する活断層, 石油技術協会誌, 63, 323-324.
- Seno, T., T. Sakurai and S. Stein, 1996, Can the Okhotsk plate be discriminated from the North American Plate? *JGR*, 101y, 11, 305-11, 315.
- 志村俊昭, 1992, 花崗岩質マグマの進入と日高変成帯の衝上テクトニクス, 地質雑, 98, 1-20.
- 志村俊昭・小松正幸・伝井 哲・大和田正明・高橋 浩, 1997, 日高変成帯における花崗岩質マグマと壁岩の熱的および化学的相互作用, 地質学論集, 47, 1-12.
- Soh, W., K. Nakayama and T. Kimura, 1998, Arc-arc collision in the Izu collision zone, central Japan, deduced from the Ashigara Basin an adjacent Tanzawa Mountains. *The Island arc*, 7, 330-341.
- 鈴木和子・河村知徳・越後智雄・岩崎貴哉・平田 直・佐藤比志・宮内崇裕・伊藤谷生・井川 猛, 2002, 稠密展開屈折法探査による十勝構造盆地浅部構造の解明, 地震研究所彙報 (本特集号).
- 鈴木貞臣・本谷義信, 1981, 北海道の微小地震活動-テレメータ観測による一, 地震, 34, 251-267.
- Taira, A., S. Saito, K. Aoike, S. Morita, H. Tokuyama, K. Suyehiro, N. Takahashi, M. Shinohara, S. Kiyokawa, J. Naka and A. Klaus, 1998, Nature and growth rate of the Izu-Bonin (Ogasawara) arc crust and their implications for continental crust formation. *The Island arc*, 7, 395-407.
- Takanami, T., 1982, Three dimensional seismic structure of

the crust and upper mantle beneath the orogenic belts in southern Hokkaido, Japan, *J. Phys. Earth*, **30**, 87-104.
津村紀子・堀内茂木・長谷川昭・笠原敬司: 山梨県東部におけるフィリピン海プレート上部境界面の位置 SP 変換波による推定, *地震* **46**, 109-119, 1993.
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.
津村紀子・伊藤谷生・鈴木和子・菊地伸輔・在田一則・森谷武男・齋藤秀雄・川中 卓・小澤岳史・井川 猛・岩崎貴

哉・長谷川昭・阿部信太郎, 2001, 日高衝突帯超深部探査 (Super-deep Hidaka 2000): 概要と今後の課題, 日本地震学会講演予稿集, C23.
山北 聡・大藤 茂, 2002, 伊豆弧衝突に伴う西南日本弧・東北日本弧の地殻変形と日本海拡大以前の両弧の連続性の復元, *地震研究所彙報* (本特集号).
1999-2000 年北海道日高衝突帯構造探査グループ, 2002, 北海道日高衝突帯における制御震源探査, *月刊地球*, **24**, 475-480.

(Received November 5, 2002)

(Accepted November 29, 2002)