

地震波速度異方性からみた南極昭和基地下の 地殻-マンツルのデカップリング

久保 篤規*・金尾 政紀*

Crust-Mantle Decoupling Revealed by Seismic Velocity Anisotropy beneath Syowa Station, Antarctica

Atsuki KUBO* and Masaki KANAO*

Abstract: We analyzed shear wave splittings in the crust beneath Syowa Station, using Moho converted P_s waves. Three set of receiver functions and stacked receiver functions from Tonga events are analyzed. Results are interpreted by combining with seismic anisotropy in the mantle, which have been revealed by SKS splitting. The observed fast polarized direction of crustal shear wave splitting shows $N50^\circ W$, which is nearly perpendicular to that in the mantle ($N49^\circ E$). Delay times of crustal anisotropy reach 0.5 s. Although part of crustal anisotropy can be caused by the deformation due to Gondwana's break up, the most plausible explanation of crust-mantle decoupled anisotropy is related to the collisional deformation 500 Ma. If delamination between the crust and the mantle occurred in a former stage of metamorphism with subsequent crustal extrusion and mantle subduction, then observed seismic anisotropy in both the crust and the mantle can be explained.

要旨: 昭和基地で広帯域地震計によって記録されたモホ面での P_s 変換波に対して S 波スプリティングの解析を行い、地殻内の地震波速度の異方性の主軸方位、遅延時間差を求めた。すでに報告されている、SKS スプリティングによるマンツルの異方性の特徴と比較することにより、この地域が受けた変形との関係を議論した。地殻部分の S 波スプリティングは平均的に $N50^\circ W$ 方向に速く、遅延時間差は 0.5 秒であり、速度の速い方位はマンツルの場合 ($N49^\circ E$) とほぼ直交する。地殻の異方性のみであれば部分的にはゴンドワナ大陸の分裂でも説明できるが、観測された地殻-マンツル間でデカップルした異方性が生じる原因としては、5 億年前の衝突型の変成作用に伴う変形が最も考えやすい。大陸地殻の衝突に特徴的な地殻とマンツルの剥離が起こり、その後地殻は横方向に extrusion し、マンツルが沈み込むという形態をとっていけば、地震波速度異方性から予想されるそれぞれの流動方向を説明可能である。

1. はじめに

地震波速度の異方性は造岩鉱物の選択配向や定方位のクラックの開口などの原因で生じていると考えられている。このうちクラック起源の異方性は、下部地殻以深では、高い封圧によりクラックが閉じてしまうため上部地殻でのみ卓越する。下部地殻や上部マンツルでの異

* 国立極地研究所, National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

方性の起源としては、結晶レベルの選択配向が考えられている (NICOLAS and CHRISTENSEN, 1987). 地震波の解析から求められる異方性は、このような微細構造を大域的に捕えていると考えられ、流動方向を示す重要な観測量である。マンツルの異方性を探るために、SKS波を使ったスプリティング (スプリティングとは光の複屈折と同様の横波の偏波現象で、弾性定数の異方性により、その主軸方向に振動する波に分裂し、速度差に対応する到達時間差が見られる現象をさす。図1参照) の解析が行われている (例えば SILVER, 1996). この方法で求められた測定量は、コア-マンツル境界以浅の地震波速度の異方性を捕えることができるが、通常は地殻や下部マンツルの岩石が持ちうる異方性が上部マンツルの場合と比べて、積分量として小さいだろうという予想から、SKSスプリティングによって捕えられる異方性の大部分は、上部マンツルに存在すると解釈されている (BARRUOL and MAINPRICE, 1993; MONTAGNER and KENNET, 1996).

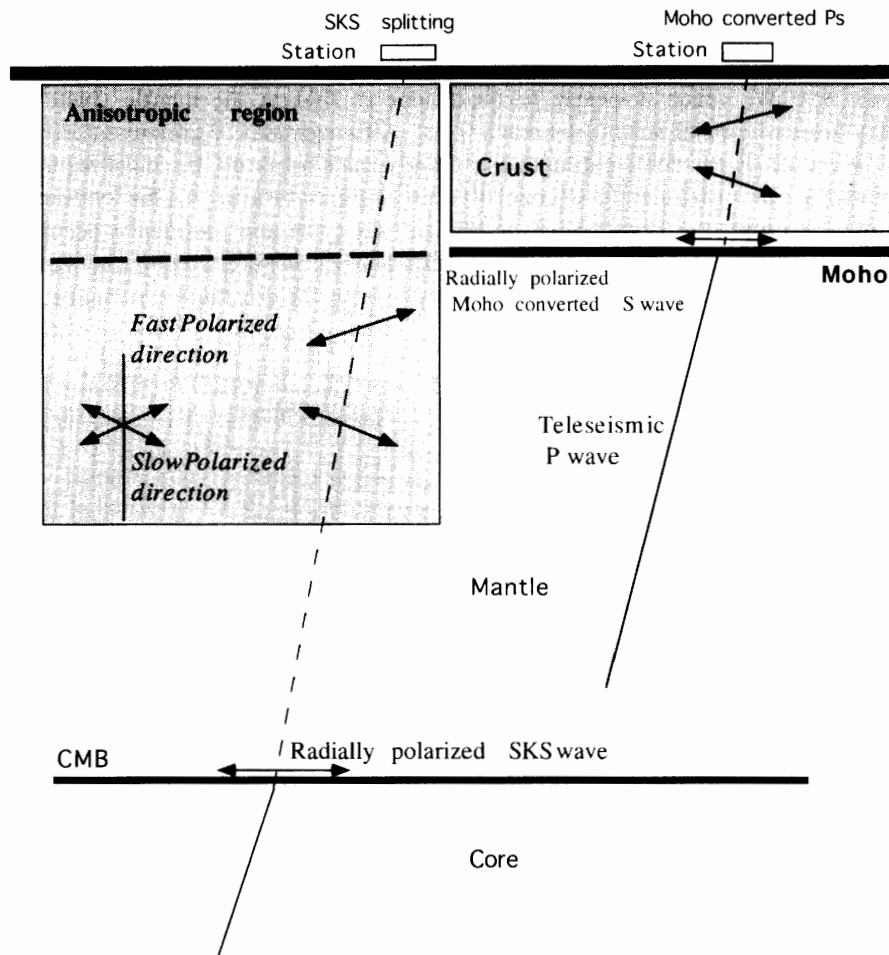


図1 SKS波とモホ面で変換したS波をそれぞれ用いたS波スプリティング解析の設定。左はSKS波を使ったS波スプリッティング、右はモホ面でPs変換を起こした波のS波スプリティングのもの。

Fig. 1. Illustration of setting of SKS & Moho converted Ps splitting analysis. Left hand figure shows setting of shear wave splitting using SKS waves. Right hand figure is similar figure with left hand figure but for Moho converted Ps waves.

我々は昭和基地での *SKS* スプリティングの解析から、リュツォ・ホルム湾地域の上部マンツルの地震波速度異方性の起源について報告した (KUBO *et al.*, 1995). 昭和基地で捕えられた平均的な *SKS* スプリティングによる異方性の性質は、 $N49^\circ E$ 方向が速く時間差が 0.7 s であった. この異方性の起源としては、約 5 億年前のリュツォ・ホルム湾周辺に累進変成作用を起こした際の変形 (SHIRAISHI *et al.*, 1994) である可能性が高い (KUBO *et al.*, 1995).

昭和基地付近のマンツルの異方性形成を引き起こしうる変形過程として、1) 現在のプレート運動による変形、2) 約 1.5 億年前の超大陸が分裂したときの変形、3) 5 億年前の変成作用を起こした際の変形などが挙げられる. マンツルでの異方性はその流動方向と関係付けられ、流動方向と地震波速度の速い振動方位が一致すると考えられている (例えば NICOLAS and CHRISTENSEN, 1987). HS2-NUVEL1 (GRIPP and GORDON, 1990), NNR-NUVEL1 (ARGUS and GORDON, 1991) による昭和基地の現在のプレート運動の方向はそれぞれ 120° , 340° の方向であるが、これらの方向は観測される昭和基地下の *SKS* スプリティング結果と調和的ではなく 1) の結果は観測事実をうまく説明出来ない. 2) の超大陸が分裂した際の拡大方向は、海洋底の Fracture zone の走行から NW-SE と考えられる (NOGI *et al.*, 1996). 同様の比較からこの場合もマンツルの剪断流動の方向が地震波速度の速い方向と一致するという関係を満たしていない. 一方 3) による変形では 5 億年前の変成作用を起こした変形は、*P-T-t* 経路の解析から衝突型の変成作用であると考えられている (MOTOYOSHI *et al.*, 1989). HIROI *et al.* (1991) はプリンスオラフ海岸からリュツォ・ホルム湾へ海岸に沿って変成度が強くなっていることを示した. 昭和基地近傍では KIZAKI (1964) による褶曲軸、ジョイントの方向の解析から *ENE-WSW* 方向の圧縮軸を持った変成作用後期の変形作用が残っていると考えられる. この圧縮軸方向に衝突が起こりその方向のマンツルの流れが化石化し *SKS* スプリティングとして観測されているならば、観測結果と昭和付近の地質学的データは、矛盾なく説明することができる (KUBO *et al.*, 1995). この際、変成岩の露出形態は、必ずしも衝突作用だけでは決まらず、変成作用と上昇作用で両方の影響を受けていると考えられるが、上昇時に衝突が止まっている場合でも浮力による上昇過程を考える場合は、衝突時に地殻物質による質量超過が大きかった部分がその後大きく上昇することになり、露出形態は衝突時の作用を物語っている可能性は大きい.

地殻部分の地震波速度異方性もすでに *S* 波スプリティングや屈折法で求められつつある (KANESHIMA *et al.*, 1989; MCNAMARA and OWENS, 1993; HERQUEL *et al.*, 1995; GREENHALGH *et al.*, 1990). 特に GREENHALGH *et al.* (1990) は、グラニュライトが地表に表れているような変成岩帯で地殻の地震波速度異方性を求めており、変成帯の伸びている方向に地震波速度が速い性質を明らかにしている. 南極大陸では地震活動度が低いので極近傍の地震波形の *S* 波スプリティングを解析することは難しいが、遠地地震の直達 *P* 波がモホ面で *S* 波に変換した波を用いれば、昭和基地近傍の地殻全体での *S* 波スプリティングを求めることが可能であ

る。本研究ではこの解析を行いその結果を従来のSKS スプリティングによる結果と比較することにより、地殻とマントルを分離して異方性を求め(図1に模式図を示す)、マントルと地殻の変形の間関係を調べた。

2. データと方法

モホ面でP波からS波に変換する波は、SKS波がコア-マントル境界でP波からS波に変換する場合に比べて変換効率が弱く、またP波との時間差が5秒程度で短いので、震源時間関数の長さなどにも影響を受けやすい。よって波の同定がSKS波を用いた場合よりも難しくなる。本研究ではMcNAMARA and OWENS (1993)のように、震源と地震計の特性を取り除いた伝達関数(レシーバー関数)を求めS波スプリティングの解析に用いた。ここではOWENS *et al.* (1984)によるスペクトル上で水平動波形を上下動波形でデコンボリューションする方法を用いた。解析には昭和基地で得られたSTS広帯域地震計(KAMINUMA *et al.*, 1997)による波形データを用いた。1990年から1992年までの遠地地震の波形のうち、震央距離が40-90°, 実体波マグニチュードが5.3以上のものについて、初動付近40秒間のレシーバー関数を計算した。遠地地震では初動から4-5秒近傍にモホ面でS波に変換した波がよく見られる(OWENS *et al.*, 1984; KANAO, 1997; KANAO *et al.*, 1996)。この部分に、波の到来方向(レディアル方向)の水平動の振幅だけではなく、同時に直交する方向(トランスバース方向)の水平動の振動が確認できる場合は、モホ面で変換した波がS波スプリティングを起こしている可能性がある。そのような波形、12個を選び、これらに対してSILVER and CHAN (1988)による方法でS波スプリティングの解析を行った。この方法では、S波スプリティングを起こす前の波形の水平振動方向がレディアル方向に限られるということを利用して、最も良くもとの振動を再現できるように2つのスプリティングパラメータ(ϕ : 速く到達する振動方向, δt : 直交する2つのスプリットした波の遅延時間差)を決定する。さらに方位角は限定されるが、最も多くの波形が利用可能な、トンガの地震群の波形について重ね合わせ(スタッキング)を用いた解析を行う。スタッキングを用いることによって、ノイズ等による波形上の偶然誤差による影響を除去し、より再現性の高いシグナルを残すことが出来る。この手法による結果が、1イベントのレシーバー関数での解析結果と矛盾無く求められるかどうか確認を行った。

3. 解析と結果

スプリティング解析に用いたレシーバー関数の例を図2に示す。モホ面でP波からS波へ変換した波がP波よりも4.5-5秒遅れて観測されることが明瞭にわかる。求められたスプリティングパラメータを使って、異方性媒質の伝播の影響を補正することにより、どの程度もとのレディアルの振動が回復されるかの例を図3に示した。解析波形(a)に比べて、復元後

(b) の波形の直線性がよくなり, レシーバー関数の有効性が示されている. 先に述べた 12 個の解析結果から誤差条件 (ここでは時間差で 0.4 秒, 方向で 30° 以下) を満足するもの 3 つの結果を表 1 に示す. モホ面で変換した P_s 波と SKS 波スプリティングによる結果を方位角に対してプロットしたものを図 4 に示す. 白丸がモホ面で変換した P_s 波による S 波スプリティングの個々の解析結果を示し, +印はあとで述べるスタッキングによる結果である. 黒丸は SKS 波による結果 (KUBO *et al.*, 1995) である. 個々の P_s 波に対する 3 つの結果 (表 1)

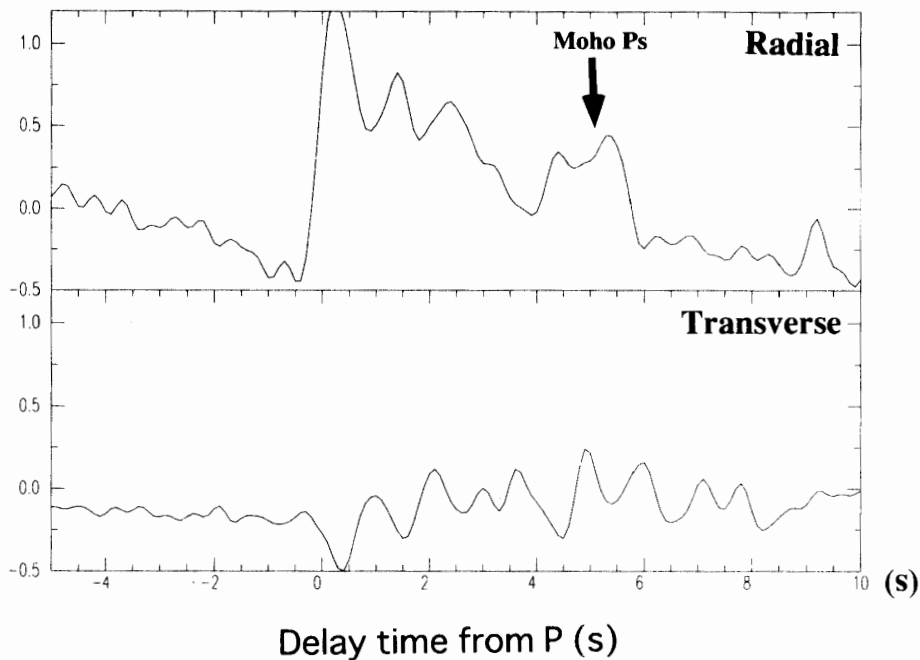


図 2 解析に用いたレシーバー関数の例. 上下はそれぞれレディアル成分, トランスバース成分. 地震は表 1 の 91110116.

Fig. 2. Example of receiver functions for splitting analysis. The upper trace is the radial component, the lower component is the transverse component. The event is 91110116 in Table 1.

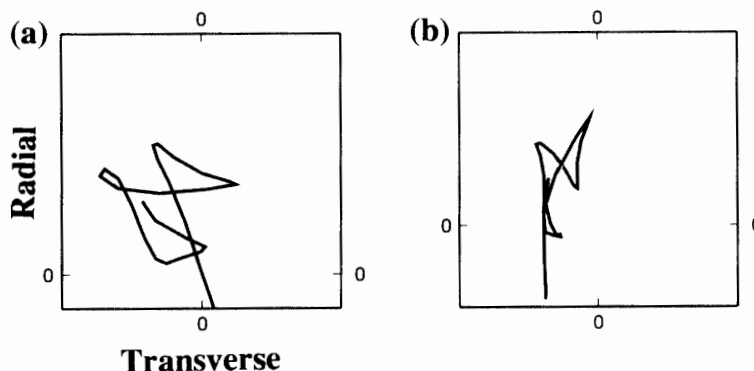


図 3 レシーバー関数の S 波スプリティング解析例. (a) 3.5-6 秒までの水平動のパーティクルモーション, (b) スプリティングを補正したパーティクルモーション. 用いた地震は表 1 の 91110116.

Fig. 3. Examples of analysis of shear wave splitting of receiver functions. (a) Original particle motion in the time window 3.5-6.0 s. (b) Reconstructed particle motion by correcting obtained splitting parameters. The event is 91110116 in Table 1.

表1 モホ面で変換したS波を用いたS波スプリティングの解析結果. 最下行は方位角 140–150° の地震に対してスタックした場合のもの.

Table 1. Splitting parameters for three sets of Moho converted Ps receiver functions and for stacked receiver functions at back azimuth range 140–150°.

Event	lat. (deg)	long. (deg)	depth (km)	BAZ (deg)	ϕ (deg)	Err- ϕ (deg)	δt (s)	Err- δt (s)
92080206	-0.88	127.58	19	88.4	146	12	0.6	0.1
91110116	-30.25	-177.98	21	147.2	120	22	0.4	0.2
91121120	-23.37	-171.04	37	152.0	117	29	0.4	0.3
Stacked result (BAZ 140–150)				140–150	40		0.6	

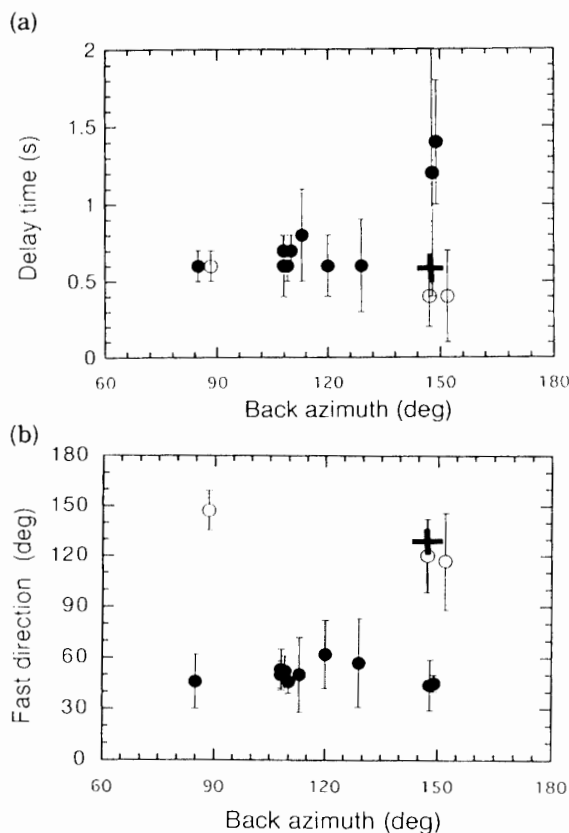


図4 Moho 面で変換した波とSKS波のスプリティングパラメータを地震への方位角で示した (a) δt と (b) ϕ . 黒丸はSKS, 白抜き丸はモホ面Ps変換波を示す. 後に示すスタッキングによる結果 (方位角 140–150°) の結果を+印で示す.

Fig. 4. Splitting parameters (a) δt and (b) ϕ of SKS and Moho converted Ps as a function of back azimuth. Solid and open circles show SKS and Moho Ps results, respectively. Results using the stacking technique (as shown later) are plotted as crosses.

は, お互い矛盾のない結果を示し, 昭和基地下の地殻の異方性をとらえていることが示唆される. しかし解析数がSKS波に比べてまだ少なく, 方位角依存性を十分には確認できない.

次に昭和基地から 140–150° の方位角にあるトンガの地震帯からの記録に対して, スタッキングを用いた結果を報告する. 用いた 17 波形を図5に示す. この波形は, 後に述べるように得られた異方性主軸の方向に回転した2つの成分について示してある. 両成分ともに5秒付近にモホ面で変換したと考えられる波が見られるが, S/N比は高くない. これらを10°ごとに振動方向を変化させながらスタックしたものが図6である. このスタック波形に対して, 3.5から6秒の解析ウィンドウで, 直交する2成分の相互相関係数を10°ごとに計算し, その値が最大になるスプリティングパラメータを求めた. その結果40°と130°の組み合わせ

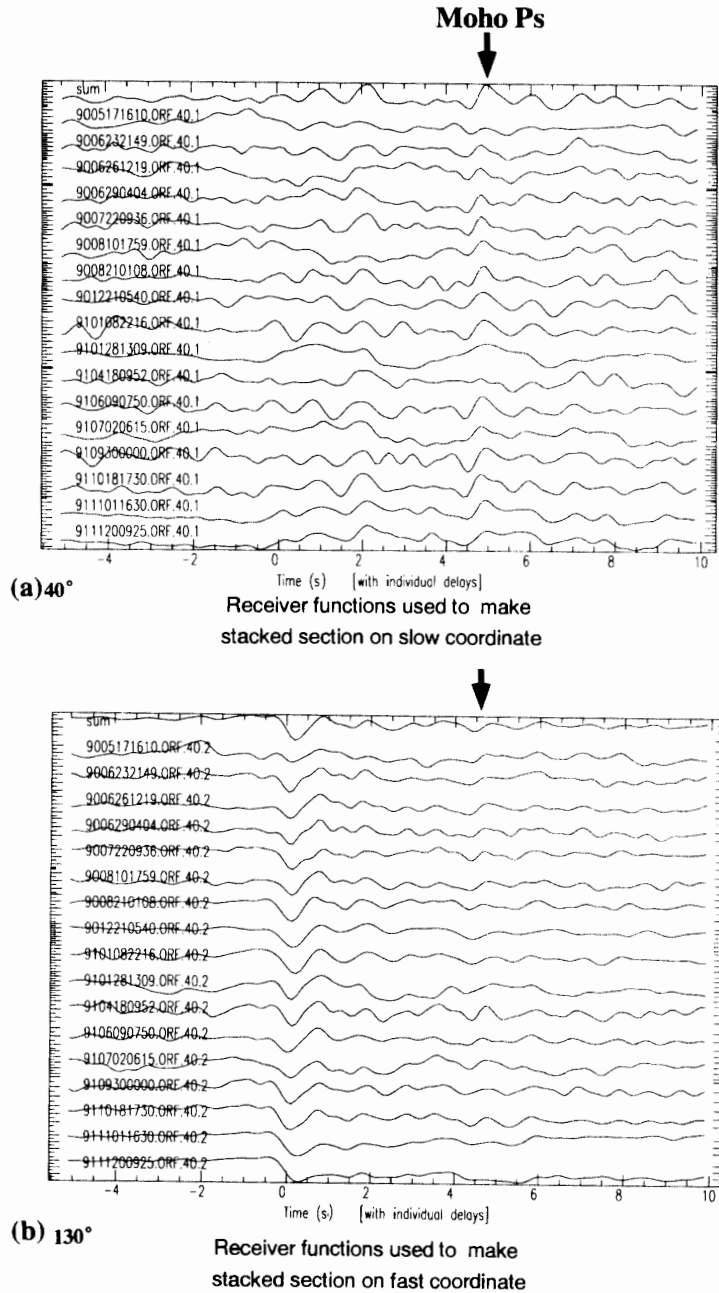


図5 スタッキングに用いたトンガ (140–150°) 方向から入射する17個の遠地地震のレシーバー関数。それぞれ最上トレースはスタックしたもの、振動方向は後で示す方位異方性の主軸方向40° (a)、130° (b) にそれぞれ回転させたもの。

Fig. 5. Seventeen teleseismic receiver functions for the stacking analysis. For events occurred in Tonga, the back azimuth from Syowa Station is between 140° and 150°. Polarization directions of the two figures are 40° (a) and 130° (b), respectively. These are principal axes of shear wave splitting. Uppermost trace of each figure shows the stacked waveform.

せで最も相互相関係数が大きくなり、速い方向、時間差はそれぞれ130°, 0.6秒である。これらの主軸方位に対するスタックしたレシーバー関数を図7に示す。先に示した個々のレシーバー関数の解析とスタックによる結果は全体として矛盾無く求まっている。

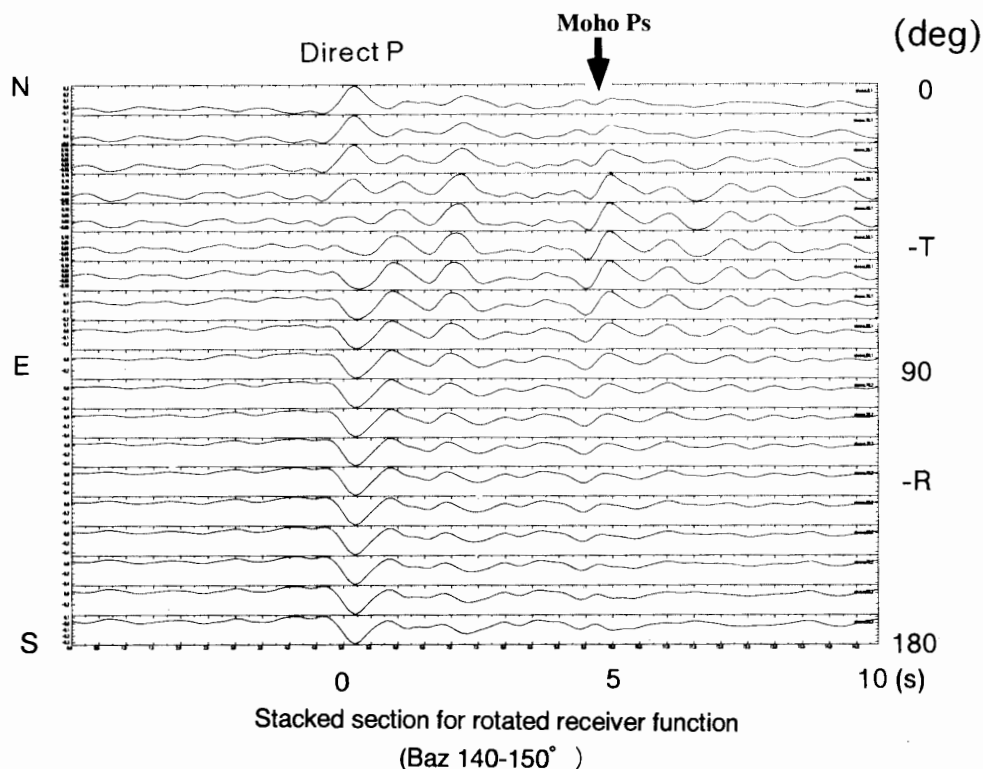


図6 トンガ ($140\text{--}150^\circ$) 方向から入射する遠地地震のレシーバー関数 (図5) を振動方向を 10° おきに回転させながらスタックしたもの (17 波形). 各トレースの振幅は最大振幅で規格化してある.

Fig. 6. Stacked section of waveform shown in Fig. 5 for various directions with 10° spacing. The amplitude of each traces is normalized by the maximum.

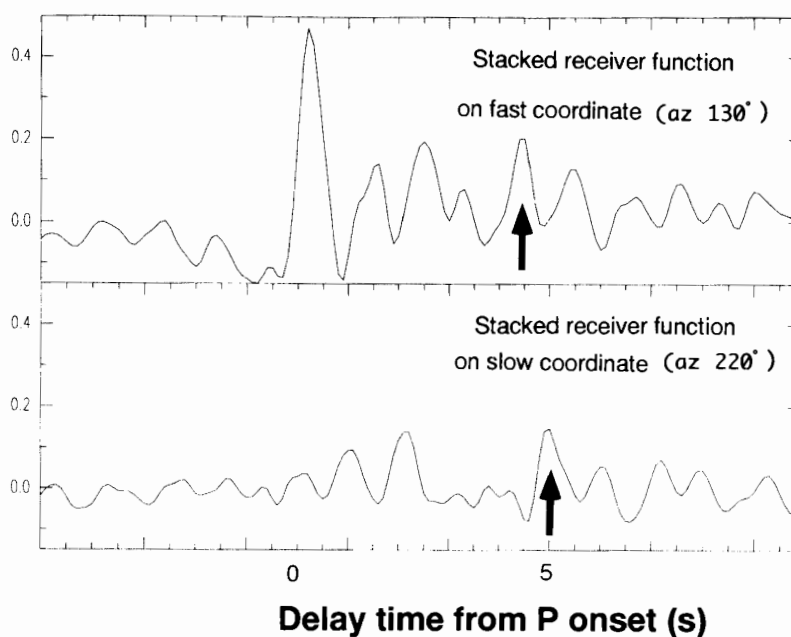


図7 速い方位と遅い方位のスタック波形 (130° , 40°) の波形, ただし下図はパルスの対応がつきやすいように振幅を反転させ 220° 方向の振動である.

Fig. 7. Stacked receiver functions of fast (130°) and slow (40°) coordinates. The lower figure shows the 220° component, because of adjustment of polarity.

ここで扱っているようなレシーバー関数のトランスバース方向の振動は、しばしばS波スプリティングではなく、地下の傾斜構造などで波が曲げられることによって説明されている (ZHU *et al.*, 1995). 具体的にはモホ面の傾斜などが原因となりトランスバース成分が振動する可能性がある。しかしレディアル成分のレシーバー関数を昭和基地からの方位角で並べると (図8), モホ面で変換する4.0-4.5秒程度の波は広く存在し、その深さの変化は顕著には見られない。よってモホ面で変換した波が球殻成層による伝播からずれている可能性は小さい。これとは別にモホ面での変換波とは独立な別の波が、ほぼ同時に重ねあわされている可能性は残る。しかし図7に示すようにトランスバース成分に近い220°方向の振幅と、レディアル方向 (130°) の振幅が同じ程度であるので、入射方向の異なるかなり強い波が重なり合わない限り波形を説明できない。この効果でトランスバース成分の振幅を説明するためにはモホ面より浅い部分に強い水平不均質な散乱体を想定する必要がある。現在のところそのような強い不均質の証拠は得られていないので、トランスバース成分の振動はS波スプリティングによると判断するのが妥当であろう。

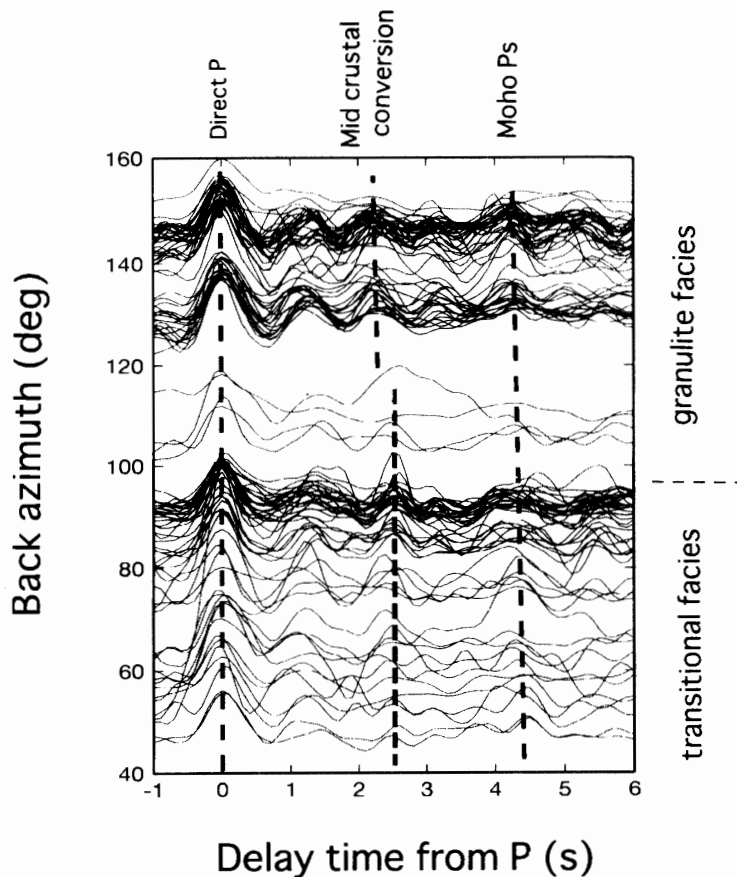


図8 大陸側 (40-160°) から入射するレシーバー関数の方位角に対する変化。
Fig. 8. Variation of radial receiver functions as a function of back azimuth (40-160°).

4. 議 論

モホ面での P_s 変換波の解析から求めた地殻の S 波速度の速い振動方位は、 SKS スプリティングが示すマントルのもの (KUBO *et al.*, 1995) とほぼ直交する (図9)。またその時間差は平均として0.5秒、と地殻全体の示す S 波スプリティングの時間差としては、HERQUEL *et al.* (1995) や McNAMARA and OWENS (1993) の求めた値 (~ 0.3 秒) よりも大きい。地殻の地震波速度異方性には、上部地殻でのクラックによるものと地殻の流動で形成される結晶配列による異方性の2通りが考えられる。クラックによる場合は水平最大応力によって、それに直交する方向に伸びるクラックが閉じてしまうので、結果として水平最大主応力軸方向に速い異方性が形成される。地殻の流動による異方性は、上部マントルと同じように結晶レベルの配列が効いていると考えられる。地殻の異方性は面構造の面内の方向、線構造の方向に速い速度をもつ。例えば石英では格子内回転による c 軸の選択配向が起こり、流動方向に速い異方性が予想される (竹下・唐戸, 1989)。

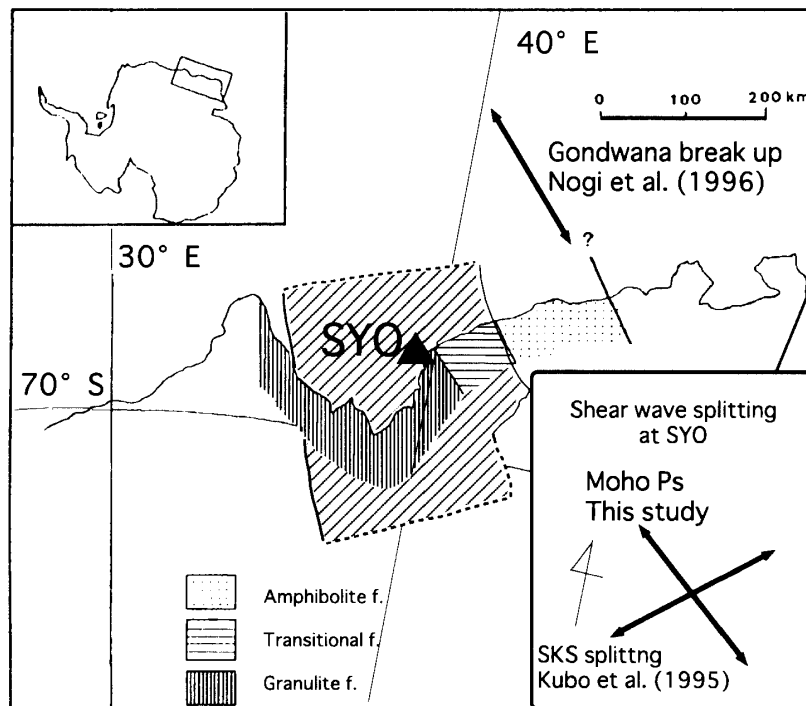


図9 リュツォ・ホルム湾地域の変成度の分布 (MOTOYOSHI *et al.*, 1989) と昭和基地における SKS スプリティング (KUBO *et al.*, 1995) とモホ面 P_s 変換波のスプリティング (本研究) による地震波速度の速い振動方位の対応。ゴンドワナ大陸の分裂方向は NOGI *et al.* (1996) による。GOLYNSKY *et al.* (1996) によるリュツォ・ホルム湾地域の正の磁気異常の大局的な分布領域を斜線で示した。黒▲は昭和基地。

Fig. 9. Progressive metamorphism in the Lützow-Holm Bay region (MOTOYOSHI *et al.*, 1989) and fast polarized directions of SKS splitting (KUBO *et al.*, 1995), and Moho converted P_s wave (this study) at Syowa Station. The direction of Gondwana break up is obtained by NOGI *et al.* (1996). Area of the oblique shade shows rough distribution of positive magnetic anomaly by GOLYNSKY *et al.* (1996). Solid triangle shows location of Syowa Station.

クラック起源による異方性は上部地殻で支配的であり 0.2–0.3 秒以下とされているので、昭和基地で得られた 0.5 秒と比較的大きな δt の説明には十分ではない (KANESHIMA, 1989). また現在の昭和基地付近は安定であり、地殻が横方向に流動する変形も考えにくい。観測された昭和基地付近での地殻とマンツルの地震波速度異方性が両方説明できるためには、地殻とマンツルがデカップリングを起こしていることが必要であろう。カップリング、デカップリングとは、地殻とマンツルのそれぞれの流れが広域な応力場に対して同じ方向を向いているか否かということである (ROYDEN, 1996).

リフティングなどの分裂拡大に伴う変形では、下から物質が供給され水平に運動する地殻とマンツルの流動は、両者ともに 2 次元的な鉛直面内を移動するような変形に限られる。強さに差があれば両者がカップリングした変形のみが起こる (NAKADA, 1994), この場合は本稿の主題である地殻とマンツルの方位異方性の主軸がそれぞれで異なるという現象は起こさない。例えばもし昭和基地付近で観測される地震波速度の異方性が 1.5 億年前の分裂で形成されたとすると、拡大方向は NW–SE が考えられ (NOGI *et al.*, 1996), この際の地殻の流動方向は異方性の解析結果が示す流動方向に一致するが、予想されるマンツルの流れも同じ方向になるから、SKS スプリティングの観測事実はこのような拡大では説明できない。この変形が地殻のみの異方性に寄与した可能性は否定できない。この問題についての考え方は分裂が能動的か受動的だったかなどによって大きく変わってくる。分裂に際して良く考えられるように、熱いマンツルが上昇してリソスフェアを熱的にまたは流体力学的に侵食してしまうと考える場合は、地殻だけに NW–SE 方向の異方性形成が生じたと考えるのは困難である。受動的であれば積極的なマンツルの流れは想定しなくともよい。実際、昭和基地付近の熱流量と下部地殻の反射面の深さとの関係は、典型的な古い大陸の状態を示しており (ITO and KANAOKA, 1995), 5 億年前の変成作用以後、現在に至るまで順調に冷却過程にあると考えた方が素直である。その場合でもマンツルの流動特性が下部地殻と同じ程度であれば、マンツル側の異方性形成も起こる可能性があり、あいまいさが残る。

次に 5 億年前の衝突型の変形による可能性を考えよう。衝突型の変形ではデカップリングでは 3 次元的なものが起こりえる (ROYDEN, 1996). 衝突による変形では、質量超過を解消するために、沈み込み (下)、extrusion (横) や山脈形成 (上) のうちのどれか、またはそれらの組み合わせによる変形が進行するだろう。また地殻とマンツルでは、密度や強度に差があるので衝突に伴ってデラミネーション (剥離) が起こるかどうかが重要になる。衝突型の設定を想定すれば、地殻とマンツルの衝突後の振る舞いとして考えられるパターンは、以下のようものが挙げられる。

- 1) 地殻とマンツルがカップリングしており横方向に extrusion を起こす。沈み込みはしない。
- 2) 地殻とマンツルがカップリングしており、沈み込みを起こす。

- 3) 地殻とマントルがデカップルしており、地殻だけが横方向に extrusion を起こす。マントルは沈み込みを起こす。
- 4) 地殻とマントルがデカップルしており、マントルだけが横方向に extrusion を起こす。地殻は質量超過の分アイソスタシーを保ちながら山を作る。
- 1) のような例として、チベットではモホ面で変換した *S* 波、*SKS* 波に対する *S* 波スプリティング解析から地殻 (HERQUEL *et al.*, 1995) とマントル (MCNAMARA *et al.*, 1994) の異方性が求められている。両者とも extrusion の方向に振動する波が、速い地震波速度を示し、地殻とマントルは同じ方向に流動している。PETERSON and ROBINSON (1993) はマサチューセッツの変成岩帯で石英の *c* 軸のファブリックを調べ、衝突方向とそれに直交する変成帯の走向の沿う 2 種類の結晶軸配列を見いだした。このような結晶軸配列に対する彼らの解釈は、a) もともとの衝突方向の流動による選択配向と、b) 変成帯の上昇時に地殻の一部が深部に対して力学的に切り離されてしまい、衝突方向とは直交する変成帯の走行方向に流れることによる選択配向との、両方が見えているというものである。マントルの振る舞いについてはわからないがこのケースは 1), 3) のどちらかに分類できる。その他、地殻の異方性がわかっていなくても、一般に *SKS* スプリティングによる地震波速度の速い方位が山脈に平行になる特徴は、すでに認識されている (NICOLAS, 1993; VAUCHEZ and NICOLAS, 1991)。例えば測地学的に求めた天山山脈での衝突の方向と (ABDRAKHMATOV, *et al.*, 1996) とその下のマントルの異方性 (MAKEYEVA *et al.*, 1992) は直交している。この場合、地殻の振る舞いは明確にはわからないが 1), または 4) の可能性を示す。2) の可能性は、地震波速度異方性を中心に見たレビューではこれまでの研究にはあられわれず、大陸地殻同士の衝突では現実的ではないことを示唆する。

上記の場合分けのうち、どれが実際の昭和基地付近における衝突型の変成作用の際の変形に対応しうるかを考えてみる。KUBO *et al.* (1995) では衝突運動の方向を *SKS* スプリティングの結果をもとに、変成相の分布 (HIROI *et al.*, 1991) と昭和基地周辺での褶曲、ジョイントの方向 (KIZAKI, 1964) 等との関係から ENE-WSW と考えた。そこでは *SKS* スプリティングによる異方性が衝突そのものの運動方向では無く、すでに extrusion を起こした流れを見ている可能性は議論されていなかった。しかし GOLYNSKY *et al.* (1996) による地磁気異常の研究によると大陸海洋間のコントラスト以外に、リュツォ・ホルム湾地域には強い磁気異常が見つかった。これは地表の地質学で認識されている累進変成作用によるグラニュライト相—遷移相—角閃石相地域の分布の内、グラニュライト相のあらわれる地域と比較的よい一致を示しており、NNW-SSE 方向に伸びている (図 9)。大きな磁気異常が見られる地域は、地表面でのグラニュライト相—遷移相の境界よりも東まで広がっているが、地殻磁気異常のキューリー点深度までの岩石の磁化を反映していることと、リュツォ・ホルム岩体では地表の変成相は西側にいくに従って変成度が上昇するような分布をしていることを考えれば、空

中磁気異常から考えてもこの地域の変成帯の伸びる方向は NNW-SSE とすれば、衝突運動の方向は ENE-WSW でありそれと直交する方向ではなかったであろう。

衝突運動の方向が ENE-WSW であるとする 1), 4) の可能性がなくなる。地殻-マンツル間の地震波速度の異方性が直交することから、お互いの流動方向の直交性を想定すると 3) の可能性のみが残る。衝突作用にともない地殻-マンツル間が剥離して、地殻は軽い地表付近で山脈を作るが重力のためあまり高くなれない。よって extrusion を起こし、もとの衝突運動の方向からそれに直交する方向に向きを変える。マンツル部分は相手側のマンツルとの間に多少の密度差さえあれば、沈み込みが起こりうる。沈み込みが可能であれば、マンツル部分は水平方向にはもとの衝突の方位を保ったまま進む。ゴンドワナ大陸の完成とともに衝突が止まり、そのまま冷却されてリソスフェアが形成されれば、観測される異方性の特徴をすべて説明できる可能性がある。このように地震学的に観測されている異方性がすべて、5 億年前の変成作用で出来たと見る場合には、その後のゴンドワナの分裂などの変形は、より海側で起こっていて特にマンツル部分の異方性を壊さないような条件が求められる。

昭和基地付近での地殻の異方性 ($\delta t \approx 0.5$ s) は他の地域に比べても強い (HERQUEL *et al.*, 1995; McNAMARA and OWENS, 1993). BARRUOL and MAINPRICE (1993) によれば地殻物質として考えられる岩石の鉱物ファブリックから計算した異方性は、地殻の厚さ 10 km 当たり 0.2 秒以内の S 波スプリティングを作ることができる。30 km 程度の地殻を考えれば、昭和基地での観測データは地殻の大部分の深さで同様な方向の異方性が形成されている場合のみ許される。この原因として現在の昭和基地付近の大陸地殻は、変成帯として上昇している分だけ流動特性の高いもとの下部地殻の占める割合が高いと考えれば説明できるであろう。

地殻の異方性は SKS スプリティングのものとほぼ直交関係にあるのでマンツルの異方性の認識が KUBO *et al.* (1995) のものと少し変わる。SKS スプリティングの時間差は 0.7 秒でこの種の解析結果の世界的なコンパイルに現れるピーク 1.2 秒よりもかなり小さい (SILVER, 1996)。しかし地殻とマンツルで主軸がほぼ共通で、地震波速度の速い、遅いのみが逆転するので地殻の異方性は SKS のスプリティングを相殺するように働いていると考えられる。このことを考慮するとマンツルのみでのスプリティングは 1.3 秒程度となり、平均的な大陸のピークとほぼ同じかやや強めのマンツルの異方性が考えられる。

5. 結論と今後の課題

昭和基地の STS 地震計の観測波形を用いたモホ面で P_s 変換する波の S 波スプリティングの解析からこの地域の地殻の地震波速度の異方性を求めた。得られた異方性は地殻のものとしては強く、すでに報告されている SKS 波を使ったマンツルの異方性とは直交している。上部地殻でのクラックが原因と考えられる異方性では一般に小さい異方性しか観測されていないので、得られた異方性の原因をすべて上部地殻に求めることは難しいだろう。従って昭和

基地周辺の地殻の異方性も上部マントルと同様に流動による変形で異方性が形成されたと考えられる。 Gondwana の分裂の際の変形では、地殻部分のみの寄与の可能性は残るが、マントル部分の異方性の流動特性が地殻に比べてどうなっていたかに依存するあいまいさが残る。 5 億年前の変成作用が衝突型の変形であり、その際に大陸どうしの衝突には特徴的であろうと考えられる地殻-マントル間の剥離がおり、その後地殻が横方向への *extrusion*、マントルが沈む込みをそれぞれ起こしたとすれば、観測される地殻とマントルの地震波速度の異方性を両方を形成することが可能であったであろう。

今後の課題としては、昭和基地の解析数の増加と表面波の振動異常の周波数依存性による異方性の深さ依存性の解析、また空間的な解像度を増すための臨時観測を使った異方性の解析が必要となろう。

昭和基地の下の地震波速度の異方性は、この付近の褶曲軸の向きやジョイントの向き (NE-SW, ENE-WSW 方向; KIZAKI, 1964)、とリュツォ・ホルム湾-プリンスオラフ海岸までの変成相の分布 (HIROI *et al.*, 1991) や GOLYNSKY *et al.* (1996) による空中磁気異常などともに、ENE-WSW の衝突でほぼ矛盾がなく説明できる。しかしリュツォ・ホルム湾内の Rundvågshetta で ISHIKAWA *et al.* (1994) は WNW-ESE 方向の結晶軸の線構造や最高変成度の際の変形が NS 方向の圧縮で特徴付けられることなどを報告している。同じリュツォ・ホルム湾内でも昭和基地周辺とは違った変形の主軸方位を示していることから、大規模な変成帯レベルの構造と局所的な地質構造が、同じ方向の衝突作用で変形されたとしていいかどうか問題となる。構造地質学的な照らし合わせも今後の重要な課題である。

謝 辞

匿名の 2 名の査読者と白石和行教授には有益なコメントと著者の誤りを指摘して頂きました。記して感謝の意を表します。

文 献

- ABDRAKHMATOV, K. Y., ALDZHANOV, S. A., HAGER, B. H., HAMBERGER, M. W., HERRING, T. A., *et al.* (1996): Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present day crustal deformation rates. *Nature*, **384**, 450-453.
- ARGUS, D. E. and GORDON, R. G. (1991): No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1. *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 2039-2042.
- BARRUOL, G. and MAINPRICE, D. (1993): A quantitative evaluation of the contribution of crustal rocks to the shear-wave splitting of teleseismic SKS waves. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **78**, 281-300.
- GOLYNSKY, A. V., MASOLOV, V. N., NOGI, Y., SHIBUYA, K., TARLOWSKY, C. and WELLMAN, P. (1996): Precambrian Terranes of the East Antarctic shield coastal region (20° E-50° E) and Magnetic Anomalies. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **9**, 24-39.
- GREENHALGH, S. A., WRIGHT, C., GOLEBY, B. and SOLEMAN, S. (1990): Seismic anisotropy in granulite facies rocks of the Arunta block, central Australia. *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 1513-1516.
- GRIPP, A. E. and GORDON, R. (1990): Current plate velocities relative to the hot spots incorporating the NUVEL-1 global plate motion model. *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 1109-1112.

- HERQUEL, G., WITTLINGER, G. and GUILBERT, J. (1995): Anisotropy and crustal thickness of northern-Tibet, New Constraints for tectonic modeling. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1925–1928.
- HIROI, Y., SHIRAIISHI, K. and MOTOYOSHI, Y. (1991) Late Proterozoic paired metamorphic complexes in East Antarctica. *Geological Evolution of Antarctica*, ed. by M. R. A. THOMPSON *et al.* Cambridge, Cambridge University Press, 83–87.
- ISHIKAWA, M., MOTOYOSHI, Y., FRASER, G. L. and KAWASAKI, T. (1994): Structural evolution of Rundvågshetta region, Lützow-Holm Bay, East Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **7**, 69–89.
- ITO, K. and KANAO, M. (1995): Detection of reflected waves from the lower crust on the Mizuho Plateau, East Antarctica. *Nankyoku Shiryo* (Antarct. Rec.), **39**, 233–242.
- KAMINUMA, K., KANAO, M. and SHIBUYA, K. (1997): Present status on seismological observations at Syowa Station, East Antarctica. *Proc. VII Int. Symp. Antarct. Earth Sci.*, Siena, Italy (in press).
- KANAO, M. (1997): Variations in the crustal structure of shear waves velocity in the Lützow-Holm Bay region, East Antarctica. *Tectonophysics*, **270**, 43–72.
- KANAO, M., KUBO, A. and SHIBUTANI, T. (1996): Crustal velocity models of shear waves in East Antarctica by receiver function inversion of broad band waveforms. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **9**, 1–15.
- KANESHIMA, S., ITO, H. and SUGIHARA, M. (1989): Shear wave polarization anisotropy observed in a rift zone in Japan. *Tectonophysics*, **157**, 281–300.
- KIZAKI, K. (1964): Tectonics and petrography of the East Ongul Island, Lützow-Holm Buk. *JARE Sci. Rep.*, Ser. C, **1**, 1–23.
- KUBO, A., HIRAMATSU, Y., KANAO, M., ANDO, M. and TERASHIMA, T. (1995): An analysis of the SKS splitting at Syowa Station in Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **8**, 25–34.
- MAKEYEVA, L. I., VINNIK, L. P. and ROECKER, S. W. (1992): Shear-wave splitting and small-scale convection in the continental upper mantle. *Nature*, **358**, 144–147.
- MCNAMARA, D. E. and OWENS, T. J. (1993): Azimuthal shear wave velocity anisotropy in the Basin and Range Province using Moho *P_s* converted phases. *J. Geophys. Res.*, **98**, 12003–12017.
- MCNAMARA, D. E., OWENS, T. J., SILVER, P. G. and WU, F. T. (1994): Shear wave anisotropy beneath Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res.*, **99**, 13655–13665.
- MONTAGNER, J. P. and KENNET, B. L. N. (1996): How to reconcile body-wave and normal-mode reference earth models. *Geophys. J. Inter.*, **125**, 229–248.
- MOTOYOSHI, Y., MATSUBARA, S. and MATSUBARA, H. (1989): *P-T* evolution of the granulite facies rocks of the Lützow-Holm Bay region, East Antarctica. *Evolution of Metamorphic Belts*, ed. by S. DALY *et al.* Oxford, Blackwell, 325–329 (Geol. Soc. Spec. Publ., No. 43).
- NAKADA, M. (1994): Convective coupling between ductile lower crust and upper mantle, and its tectonic implications. *Geophys. J. Inter.*, **118**, 579–603.
- NICOLAS, A. (1993): Why fast polarization directions of SKS seismic waves are parallel to mountain belts. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **78**, 337–342.
- NICOLAS, A. and CHRISTENSEN, N. I. (1987): Formation of anisotropy in upper mantle peridotite—A review in composition, structure, geodynamics of lithosphere—. *Geodyn. Ser.*, **16**, 111–123.
- NOGI, Y., SEAMA, N., ISEZAKI, N. and FUKUDA, Y. (1996): Magnetic anomaly lineations and fracture zones deduced from vector magnetic anomalies in the West Enderby Basin. *Weddell Sea Tectonics and Gondwana Break-up*, ed. by B. C. STOREY. London, The Geological Society, 265–273 (Geological Society Special Publication No. 108).
- OWENS, T. J., ZANDT, G. and TAYLOR, S. R. (1984): Seismic evidence for an Ancient Rift Beneath the Cumberland Plateau, Tennessee: A detailed analysis of broadband teleseismic *P* waveforms. *J. Geophys. Res.*, **89**, 7783–7795.
- PETERSON, V. L. and ROBINSON, P. (1993): Progressive evolution from uplift to orogen-parallel transport in a late—Acadian, upper amphibolite—to granulite-facies shear zone, south-central Massachusetts. *Tectonics*, **12**, 550–567.
- ROYDEN, L. (1996): Coupling and decoupling of crust and mantle in convergent orogens: Implications for strain partitioning in the crust. *J. Geophys. Res.*, **101**, 17679–17705.
- SHIRAIISHI, K., ELLIS, D. J., HIROI, Y., FANNING, C. M., MOTOYOSHI, Y. and NAKAI, Y. (1994): Cambrian Orogenic Belt in East Antarctica and Sri Lanka: Implications for Gondwana Assmly. *J. Geol.*, **102**, 47–65.

- SILVER, P. G. (1996): Seismic anisotropy beneath the continents: Probing the depths of geology. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **24**, 385–432.
- SILVER, P. G. and CHAN, W. W. (1988): Implications for continental structure and evolution from anisotropy. *Nature*, **335**, 34–39.
- 竹下 徹・唐戸俊一郎 (1989): 岩石の塑性流動によって形成された地球内部の異方性. *地震* **2**, **42**, 255–269.
- VAUCHEZ, A. and NICOLAS, A. (1991): Mountain building: Strike-parallel motion and mantle anisotropy. *Tectonophysics*, **185**, 183–201.
- ZHU, L., OWENS, T. and RANDALLS, G. E. (1995): Lateral variation in crustal structure of the northern Tibetan Plateau inferred from teleseismic receiver functions. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **85**, 1531–1540.

(1997年4月11日受付; 1997年5月23日改訂稿受理)