

分配テクトニクス：トランスプレッション場における 走向移動とスラスト（褶曲）の運動論的分配*

Partitioning tectonics : Kinematic partitioning of strike-slip and thrust faulting (or folding) at transpression zones*

高木秀雄**

Hideo Takagi**

Abstracts: Oblique convergence can be partitioned into pure convergence on thrust faults and pure strike-slip faults with strike parallel to the plate boundary (trench) as firstly presented from seismic evidence by Fitch (1972). Thus the time-space change in the obliquity of slip vector of plate convergence with respect to the boundary-normal must play an important role for understanding kinematic history of trench-linked faults and shear zones at the convergent region such as island arcs, reactivated strike-slip faults along the suture zone of the continental collision zone, and also transform faults undergoing transpression regime. Such kinematic partitioning can occur not only macroscopic scale but also mesoscopic scale such as thrust and duplex in the accretionary complex.

This paper reviews above mentioned various tectonic setting of the transpression regime where kinematic partitioning is possibly taken place. I also discuss the significance of kinematic partitioning to understand geotectonic evolution of various convergent regions and briefly point out future subjects to be solved about the *partitioning tectonics*.

Key words: *kinematic partitioning, plate conversion, transpression, oblique subduction, strike-slip fault, thrust*

はじめに

日本列島のようなプレート収束域のテクトニクスを議論するときに、海溝軸と沈み込むプレートの移動方向との斜交関係の時空的变化が、プレート境界周辺域や内陸の変形や断層運動に大きな影響を及ぼすと考えられ、またそれらの変形や運動の重要な制約条件になり得る。たとえば、水平面上で海溝軸に直交する方向とプレートの移動方向とのなす角度を収束の斜交度 (obliquity : γ) としたとき、 γ が 0° の場合は、沈み込み帯における断層運動はプレートの移動方向と逆向きの移動ベクトルを持つ衝上運動により短縮歪を解消す

るであろう。しかし、 γ が 0° と 90° の間の場合、スラストにおける移動方向は、単純に考えればプレートの移動方向と逆向きの斜めすべりを示すと予想されるが、現実には沈み込み帯における断層運動の多くは、よりスラスト成分が卓越していることが知られている。この時、残ったプレートの走向移動ベクトルを解消する形で、海溝軸に平行な内陸側に生ずる高角度の走向移動断層が活動する。このほぼ同時に生じる衝上運動と走向移動の分配モデルは、スマトラ島-ジャワ海溝などの島弧-海溝系における地震学的観測結果から導かれている (Fitch, 1972; McCaffrey, 1991)。

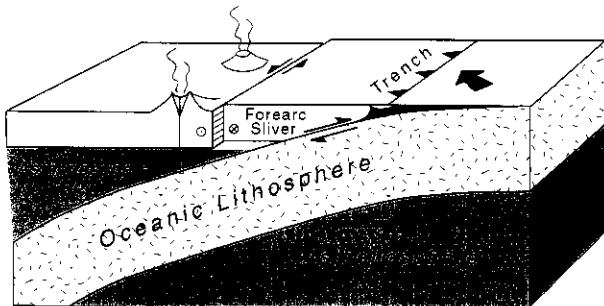
本論では、このような斜め収束場を含むトランスプレッション場における衝上運動と走向移動運動の分配 (以下運動論的分配) についていくつかの実例をレビューし、内陸性の活断層や付加体の断層および剪断帯の運動と変形にもたらすその重要性について論じる。

1999年4月7日受付、1999年7月22日受理。
* 構造研1997年冬の例会「21世紀の構造地質学にむけて」にて一部発表

** 早稲田大学教育学部地球科学教室
Department of Earth Sciences, School of Education,
Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8050, Japan

プレートの沈み込み帯における運動論的分配

Fitch (1972) は、プレートの斜め収束はプレート境界（海溝軸）に直交する成分と、上盤側のプレート内部における走向移動断層の横ずれ成分とに分配されるという単純なモデルを提唱した（第1図）。それが最も明確に表れている場所として、スマトラの例を挙げている。スマトラでは、オーストラリアプレートがユーラシアプレートに対してほぼ北向きに年間5 cm の速度でジャワ海溝に沈み込んでいる（DeMets et al., 1990）。ジャワ海溝はジャワ島の南ではほぼ東西（N 80° W）に伸びており、従ってプレートの移動方向と海溝軸がほぼ直交するが、スンダ海峽を挟んだジャワ島西方のスマトラ島の南では海溝軸が N 36° W 方向に伸びているため、斜交度 γ は中程度となっている。一方、沈み込み帯における地震の発震機構に基づく断層運動の解析結果は、その運動方向が弓形をなすスンダ弧のどの部分でも海溝軸に対して直交方向に近いこ

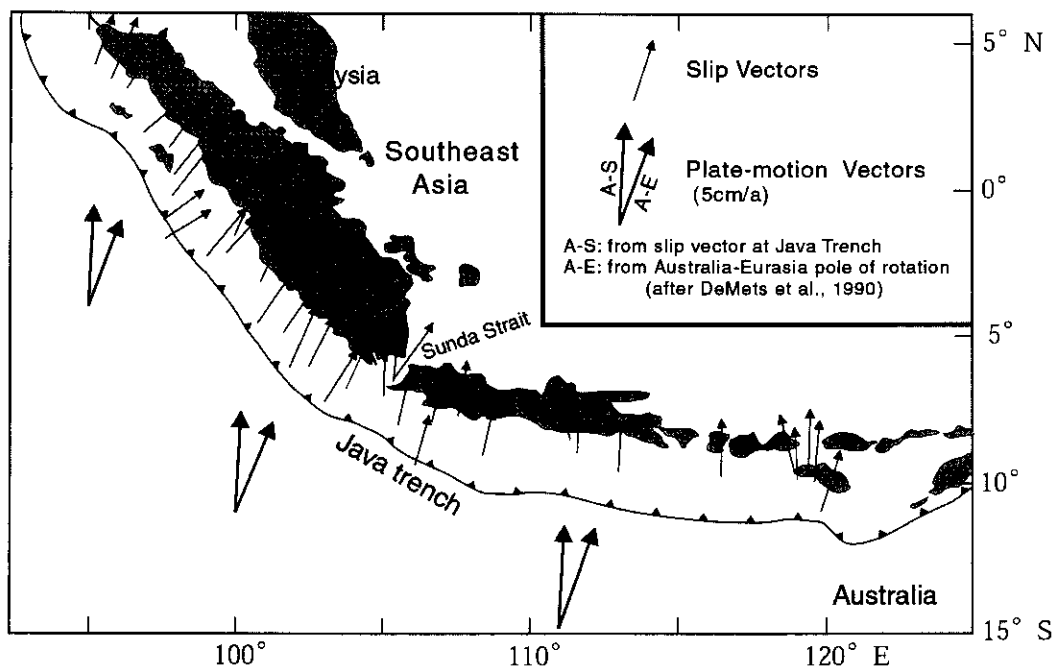


第1図 プレートの斜め沈み込みに伴うスラスト-走向移動分配モデル (Fitch, 1972, Fig. 1, 3を修正・加筆)

とを示している（第2図）。スマトラでは斜め沈み込みの横ずれ成分を解消する形で、中央スマトラ断層という右横ずれ断層が存在する（Huchon and Le Pichon, 1984; McCaffrey, 1991）。一方、沈み込み方向が海溝軸とほぼ直交するジャワ島には、そのような走向移動断層は知られていない（第2図）。したがって、中央スマトラ断層の末端部にあたるスマトラ島とジャワ島間のスンダ海峽は、北西-南東方向に伸張している（Huchon and Le Pichon, 1984）。

斜め沈み込み帯の海溝軸にほぼ直交するスラスト運動は、ニューギニア（Abers and McCaffrey, 1988）、伊豆-マリアナ（McCaffrey, 1996）、フィリピン（Barrier et al., 1991; McCaffrey, 1992）、T島（Kimura, 1986）、アリューシャン（Ekstrom and Engdahl, 1989; McCaffrey, 1992）などでも知られており、大太平洋西岸域で一般的な現象である（McCaffrey, 1996）。また、Fitch (1972) は、中央構造線の発生と運動も、プレートの斜め沈み込みに伴う運動の走向移動成分を解消する形で生じていると考えた。Beck (1983) は、このような運動論的分配をスンダ型テクトニクスと呼び、このような分配が生ずる条件として、(1)海溝軸に対してプレートの沈み込む斜交度が大きいこと、(2)プレートの沈み込む沈下角が小さいこと、(3)分配に伴って生ずる走向移動断層の剪断強度が火山弧の熱的な影響により小さいこと、を挙げている。

Jarrard (1986) は、環大太平洋の沈み込み帯における斜交度 γ とベニオフ帯のスラスト面の傾斜角度、海溝軸と平行な内陸側の走向移動断層の移動速度などのデータに基づき、 γ が大きくなるほど、走向移動断層



第2図 スマトラ-ジャワ島におけるプレートの移動方向と発震機構に基づくスリップベクトルとの関係 (McCaffrey, 1991 の Fig. 1 を簡略化)。詳細は本文参照。

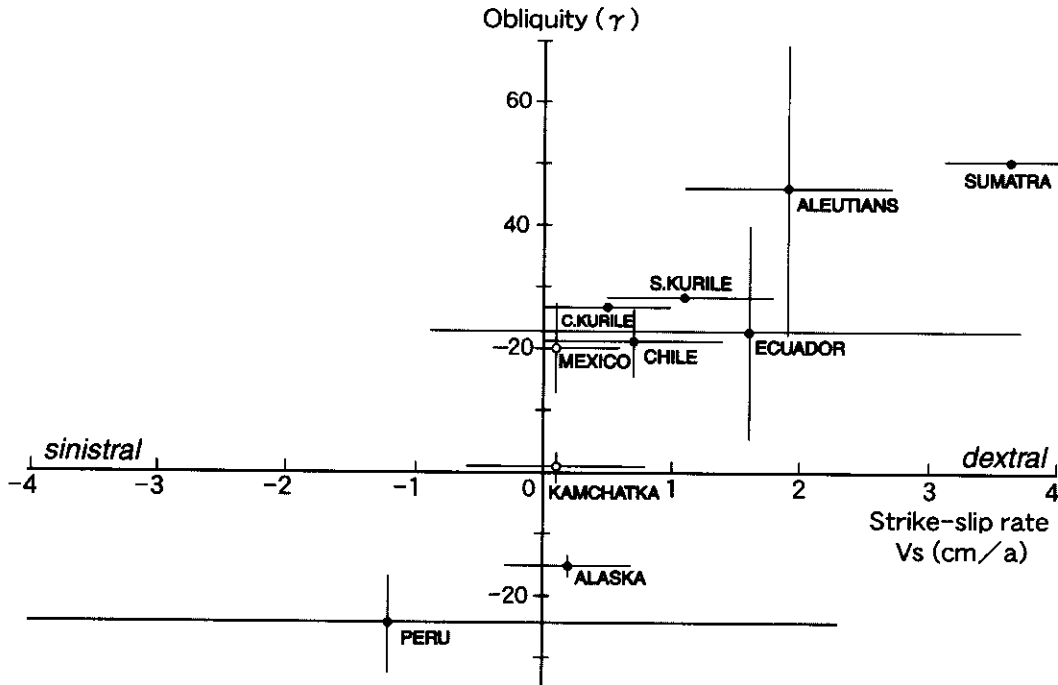
の移動速度が大きくなることを示した(第3図)。また、プレート移動方向が海溝軸に対して直交する場合(カムチャッカなど)は走向移動運動の証拠がないこと、海溝軸から直交する方向に対して時計回りに斜交する場合(ペルーなど)は左ずれの運動(第1図参照)が、反時計回りに斜交する場合(スマトラ、アリューシャン、千島、チリなど)は右ずれの運動が生じるとした。

McCaffrey (1992) は、弧状をなすスマトラとアリューシャンのプレートの斜め沈み込みの斜交度、発震機構により求められたスラスト面のスリップベクトルのデータに基づき、水平面上に投影した運動論的分配を解析した。その中でも、斜交度 γ と、海溝軸の直交方向とスリップベクトルとのなす角度 Ψ との関係は興味深いものである(第4図 a, b)。ここで第4図 c に示すように、 γ と Ψ は海溝軸に直交する方向に対して反時計回りを正にとっており、 γ が+のときは右ずれ、 γ が-のときは左ずれの走向移動に分配されることになる。この図において、 $\Psi=\gamma$ の線に乗れば、プレートの沈み込みと逆方向の斜め滑りがスラスト面で生じたことを意味し、運動論的分配はなかったことになる。一方、 $\Psi=0$ の線に乗れば、スラスト面上のスリップベクトルが完全に傾斜移動(pitchが 90°)であることを意味し、Fitch (1972) のモデルのように、完全なスラスト-走向移動の分配が生じ得ることになる。この γ - Ψ 図に示されているように、実際の結果は γ が小さい時は $\Psi=\gamma$ の線に近い位置にプロットされ、 γ

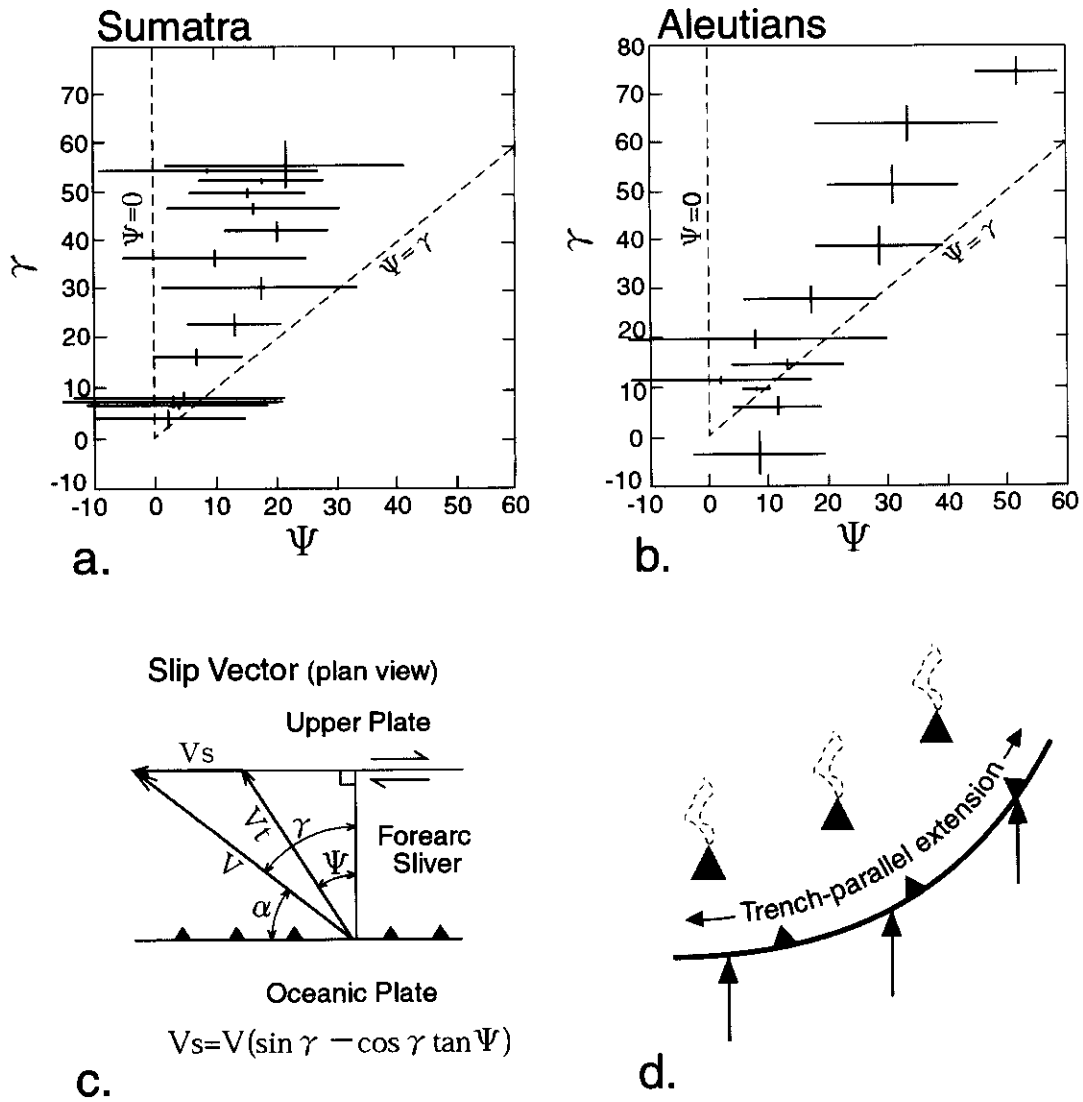
が大きくなると、 Ψ には大きな変化がなくなり、ある一定の値をもつ傾向が読み取れる。McCaffrey (1992) はこの一定の値を Ψ_{max} と定義し、スマトラでは 20° 前後、アリューシャンでは 35° 前後であることを示した(第4図 a, b)。このような島弧-海溝系による Ψ_{max} の違いは、走向移動断層の剪断強度の違いに依存するものと考えられている。McCaffreyの結果は、 Ψ_{max} に達するまでの斜交度 γ の範囲内では分配が起こりにくく、 Ψ_{max} に達した後はプレートの沈み込みの斜交度 γ が大きくなるにつれて走向移動成分も大きくなることを示している。このことは、前述したJarrard (1986)の結果(第3図)にも示されている。すなわち、第3図において、 $\gamma=20^\circ$ を越えた所から、 γ と V_s にはほぼ直線的な相関が読み取れる。逆に、 γ が 20° 以下では走向移動断層に運動論的分配がほとんど生じない。

γ の値が走向方向に変化する場合、海溝軸はプレートが収束してくる海側に凸をなすのが一般的である。その場合は走向移動速度成分の海溝軸に沿った変化により、海溝軸と平行な伸張が生じる(第4図 d: McCaffrey, 1992)。このことは、斜交度 γ が軸方向に変化する島弧-海溝系の変形を考察する上で重要である。

中央構造線の初期の走向移動運動については、 $100\sim 85$ Maのイザナギプレートの北北西への移動方向と $74\sim 53$ Maの太平洋プレートの北西への移動方向(Engebretson et al., 1985; Maruyama and Seno, 1986)、および15 Maの西南日本の時計回りの回転



第3図 プレート移動方向の海溝軸に対する斜交度 γ と、分配された走向移動断層の変位速度との関係 (Jarrard, 1986, Fig. 1による)。 γ が $\pm 20^\circ$ の間は、ほとんど走向移動が認められない。一方、 $\pm 20^\circ$ を超えると、 γ の増加とともに走向移動速度も増大する。メキシコとカムチャッカの例(白点)では、活動的な走向移動断層は知られていない。

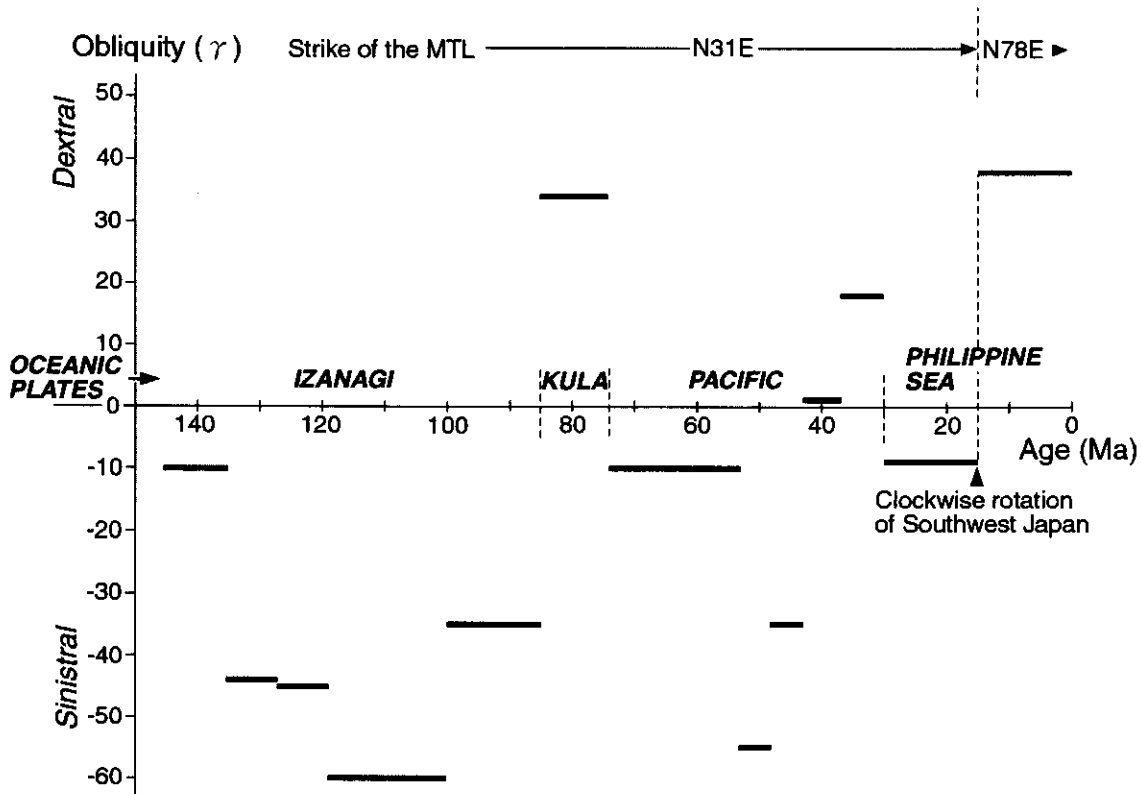


第4図 スマトラ (a) とアリューシャン (b) における γ と Ψ (c) の関係。本文参照。d: 海側に凸の弧-海溝系に働く海溝軸に平行な伸張。いずれも McCaffrey (1992), Fig. 3, 5, 6 を一部修正。

(Otofujii and Matsuda, 1987) を戻したときの MTL の走向 (N31°E) との斜交関係が、マイロナイトに認められる左ずれをもたらしたものと考えられている (第5図: 高木, 1997)。西南日本の回転が終了した 15 Ma より後は、現在に至るまで海溝軸 (南海トラフ) に対して右横ずれをもたらす斜交関係にあり、特に第四紀の右横ずれ運動が断層地形から明らかにされている (岡田, 1971 など)。このような走向移動の反転 (strike slip inversion: 高木, 1990) は東北日本の棚倉構造線 (例えば越谷, 1986) や社地神剪断帯 (久田・高木, 1992) などでも認められており、日本列島における走向移動断層の運動史が、海溝軸に対するプレートの沈み込みの角度の変化と日本列島の回転に大きな影響を受けていると考えられる。

以上のように、沈み込み帯における逆断層と内陸側の走向移動断層の両方の運動によって沈み込みの斜め

成分の剪断歪が様々な割合で解消されている可能性は高い。それでは、海溝軸と平行な低角スラストと高角走向移動断層は、断層深部でどのように結合しているのだろうか。この問題は、MTL などの海溝軸と平行な走向移動断層が、地下深部においてどのような姿勢をとっているか、という問題とも関わってくる。また、走向移動断層とスラストに挟まれた楔状の地塊 (前弧スリバー) が弾性的にふるまうのか、あるいは多少なりとも延性的にふるまうのか、によっても分配の様式は異なるであろう。仮に前弧スリバーが弾性的にふるまうとするならば、斜め沈み込みに伴う前弧スリバーの走向方向の運動が、スリバー底面をなすデコルマ面に走向方向の運動の軌跡を刻印する可能性がある (第1図)。この問題を明らかにするためにも、嶋本 (1989) に示されたような、沈み込み帯と走向移動断層の強度断面を求める試みが重要である。



第5図 中央構造線の走向に対する海洋プレートの相対移動方向の斜交性 γ の変遷。中央構造線の走向は、西南日本（近畿および四国）の平均的な走向、15 Ma 以前の走向は、15 Ma における西南日本の時計回りの回転（ 47° : Otofujii and Matsuda, 1987）を元に戻した時の角度。プレートの相対移動方向は Maruyama and Seno (1986) による。中央構造線の初期の活動（マイロナイト化）は、花崗岩類の冷却曲線とマイロナイト化の変形条件から 100~85 Ma のイザナギプレートと 74~53 Ma の大太平洋プレートの斜め沈み込みに呼応して生じた（高木, 1997）。

大陸衝突域における運動論的分配

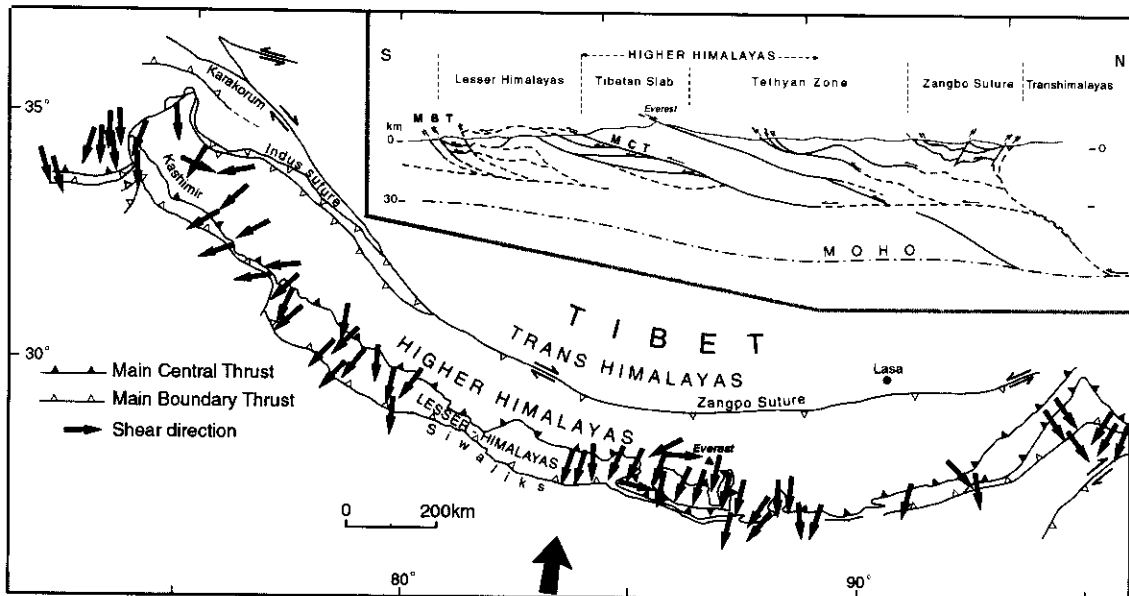
新生代の大陸衝突域の代表ともいえるヒマラヤ造山帯では、インド亜大陸のユーラシア大陸への衝突により、世界の屋根であるヒマラヤ山脈が形成された。その衝突に伴って、北に低角度で傾斜する多数のスラストやナップが発達し、特に構造帯の境界として重要なものがヒマラヤ主境界スラスト (MBT) とヒマラヤ主中央スラスト (MCT) である。また、近年 MCT の北方に南チベットデタッチメント断層系 (STDS) と呼ばれる低角正断層が知られている (Burchfiel et al., 1992)。これらの断層の走向は、南に凸の弧 (ヒマラヤ弧) をなしている。MCT は幅 20 km 以上の幅をもつ剪断帯をなし、高ヒマラヤ帯の藍晶石を含む片麻岩帯 (上盤) と低ヒマラヤ帯の変成堆積岩や眼球片麻岩からなる下ナップ (下盤) との境界をなしている。この剪断帯に発達する伸張線構造と非対称微小構造から決定される第三紀における上盤側の相対移動方向は、スラストの走向にはほぼ直交し、弧の中央部を除くと、北上するインドプレートの移動ベクトルと斜交する (第6図)。また、断層のスリップベクトルを現在の地震波の発震機構で求めた結果も、現在活動的な MBT に対して同様の斜交関係をもつことが知られている

(Ni and Barazangi, 1984)。

ヒマラヤ弧の両側における上記の斜交関係の結果として、スラストの走向に平行な走向移動断層が、内陸側に生ずることが期待される。例えば、高ヒマラヤ帯の北部に MBT と平行に連続するインダス-ツェンボ縫合帯に沿って、ヒマラヤ弧西側では右横ずれ断層 (カラコルム断層) が、また東側では左横ずれ断層が知られている (Brunel, 1986)。これらの走向移動断層は、その走向が MBT とほぼ平行であり、Brunel (1986) の断面図によると、かつての縫合帯が高角度に変化していることから、上記のように衝上運動の結果として残留した剪断歪が走向移動断層の活動をもたらした可能性がある。ただし、この縫合帯は前述のような沈み込み帯に伴う火山弧ではないこともあり、断層面の剪断強度が高ければ運動論的分配は生じないであろう。インダス-ツェンボ縫合帯には多量のオフィオライトを伴うことから、断層面に沿って蛇紋岩が広く分布していれば、運動論的分配も起こりやすいかもしれない。今後の検証が期待される。

トランスフォーム断層における運動論的分配

北米西岸カリフォルニアのサンアンドレアス断層



第6図 ヒマラヤのMCT付近の変成岩中に認められる剪断運動方向 (Brunel, 1986, Fig. 1, 18を一部修正・簡略化)。下の太い矢印はインドプレートの相対移動方向。MCT沿いの矢印は、上盤側の南方センスを示すが、その方向はMCTにはほぼ直交する。右上の断面図に示されているように、高角度に変化したインダス-ツァンボ縫合帯に沿って、横ずれ運動が示されており、運動論的分配が生じた可能性がある。

は、大陸におけるトランスフォーム断層として、世界で最も研究が進んでいる断層である。この断層は、北米プレートと太平洋プレートの境界をなし、両プレートの断層面に対する収束角 α ($=90^\circ - \gamma$: 第4図c)が 5° で、トランスプレッション場を生じている (DeMets et al., 1990; Tikoff and Teyssier, 1994)。実際に、走向移動断層であるサンアンドレアス断層を中心に、この断層と同じトレンドをもつスラストや褶曲が幅広く発達している (Namson and Davis, 1988)。Namson and Davis (1988)は、サンアンドレアス断層に並走する褶曲-スラスト帯の構造解析から、トランスプレッション場において、走向移動とスラスト-褶曲に伴われる短縮が分配されていると考えた。また、これらのスラストが、脆性-延性遷移領域において水平なデタッチメント断層としてサンアンドレアス断層に連結した断面図を示した。Tikoff and Teyssier (1994)は、トランスプレッション場における運動論的分配について、サンアンドレアス断層と中央スマトラ断層を比較した。それによると、走向移動の分配が生じる条件として、 α が 20° 以下である必要があり、スマトラでは α がおおよそ 50° であったため分配が不十分であるのに対し、サンアンドレアス断層では α が 5° なので、分配は完全であったとしている。同様の運動論的分配は、同じトランスフォーム断層 (アルパイン断層)を有するニュージーランドでも議論されている (Norris et al., 1990; Teyssier et al., 1995)。Teyssier et al. (1995)によると、アルパイン断層の収束角 α は 29° であるため、断層面に直交する短縮成分が大きき、走向移動への分配はほとんど生じていないとしてい

る。

1980年代後半に、サンアンドレアス断層について大きな議論を巻き起こした論文が発表された。それは、掘削孔の変形や地震波の発震機構から導かれたサンアンドレアス断層周辺の最大圧縮応力 (σ_1) ベクトルが、断層面に対して 80° 前後でほぼ直交するという事実である (Zoback et al. 1987; Mount and Suppe, 1987)。ただし、断層面から隔たった地域では、断層面に対して σ_1 が 50° 程度で斜交する。Zobackらは、そのような応力場にあるにもかかわらず走向移動運動が生じ得る原因として、地殻における地震発生領域の断層の剪断応力が著しく低いことを挙げた。すでに1960年代後半に、Brune et al. (1969)は、サンアンドレアス断層沿いの地殻熱流量が著しく低いことから、断層沿いの摩擦抵抗がせいぜい $10\sim 20$ MPaしかないと解釈されていた。この値は、岩石の摩擦強度の実験的研究 (Byerlee, 1978)から想定されていた剪断応力 (>100 MPa)よりも一桁小さいものであったことから、地殻応力問題のパラドックスとして大きな議論を巻き起こしていた (Molnar, 1992)。Zobackたちの結果は、その地殻応力問題を再燃させたものである。断層帯の剪断強度 (有効応力)を下げる要因として、間隙水圧の増加が考えられている。実際に、断層帯ではガウジ化に伴い、粘土鉱物が生成し、浸透率を下げ、そのことが間隙水圧を上げる可能性がある (Byerlee, 1990; Rice, 1992)。しかし、間隙水圧は σ_3 を越えた場合は水圧破砕を生じて周囲の割れ目に水が吸収される可能性が高いので、間隙水圧の上昇のみで、一桁以上も小さい剪断応力は生み出せない (Zoback et al. 1987; 塚

原, 1997 b). 断層運動を支配する破碎-塑性遷移領域 (高木, 1998) においてサンアンドレアス断層を構成する断層岩がどのようなものか, がこの問題を解く鍵となる (Hickman, 1991; Molnar, 1992). たとえば, 断層岩がスコットランド Moine Thrust やスイスアルプスの Glarus Overthrust にみられるように, 炭酸塩岩によって構成されているとするならば, それは潤滑材の役割を演じ剪断応力を下げるであろう.

また, サンアンドレアス断層のようなトランスフォーム断層の場合は 100 km 程度の厚さをもつプレートの境界をなすこと (Teyssier and Tikoff, 1998 参照) から, 地殻内の地震発生領域 (~20 km) の断層運動は, それより深部の剪断運動に対して受動的にふるまうに過ぎないものと考えられる. Molnar (1992) は, 上部地殻の走向移動断層は, より深部の上部マントルにおける 200 km 程度の幅の広い剪断帯に繋がっており, その剪断帯における剪断応力 (100 MPa) によってカリフォルニア中央部に観測されている広域の高い地殻熱流量 (30 m W/m^2) をもたらし得るとした. 地殻上部の弱い断層面とマントル上部の強くて幅広い剪断帯が地殻下部でどのようにカップリングしているのであろうか. 今後の課題である.

活断層における運動論的分配

甚大な被害をもたらした 1995 年兵庫県南部地震において, 淡路島北部に野島断層の変位が表れ, 最大 2 m の右横ずれ変位が表れた. 日本列島の特に関中部~近畿地方に発達している活断層をみると, 野島断層と同じ走向を示す NE-SW 走向の活断層 (跡津川断層など) は右ずれ, 一方, NW-SE 走向の活断層 (阿寺断層や根尾谷断層) は左ずれであることが知られている. このことから, 両方向の断層系は共役をなすと考えられており, その関係から最大水平圧縮応力 σ_{Hmax} の方向がほぼ東西であるとされている (例えば松田, 1967; 藤田, 1980). 浅発地震の発震機構から求めた応力場も, 西北西-東南東から東西方向を示している (Ichikawa, 1971). この地域の活断層をみると, 一部の活断層は上記の最大圧縮応力方向に直交する南北性の走向を有している. すなわち, 一見広域応力場からみると走向移動しそうなない走向を持つ断層が, 第四紀後半に走向移動を起こしている部分がある. その 1 つの例である花折断層は若狭湾南方から京都市東部に向かって $N 16^\circ E$ 方向に延びる約 50 km の活断層で, 右横ずれ変位速度 $1 \sim 10 \text{ mm/a}$ が見積もられている (吉岡, 1986). ただし, 花折断層の古い活動は左横ずれ (吉田, 1995) であり, 走向移動の反転が花折断層についても生じた可能性がある. ここで注目すべきこととして, 花折断層の東部に, ほぼそれと同じ走向を持ち, 西に傾斜する琵琶湖西岸断層系と呼ばれるス

ラストの存在がある. 少なくともその一部は, 地震考古学的調査から, 1662 年の寛文近江地震により活動したことが明らかにされている (Matsuda et al., 1978; 大長・松田, 1982; 寒川・佃, 1987). 吉岡ほか (1997) によるトレンチ調査によると, この 1662 年の地震のときに花折断層北部も活動したとしており, 最新活動 (約 1000 年前以降) の変位量は右横ずれ $2 \sim 5 \text{ m}$ であると見積もられている. つまり, 前述のサンアンドレアス断層における走向移動とスラストおよび褶曲の運動学的分配が, 花折断層と琵琶湖西岸断層帯のような走向移動とスラストの内陸性活断層の組み合わせでも生じている可能性がある. それらが本当に同時期に活動したのか, 片方の断層で地震を起こした直後の応力場がもし変化するとすれば (塚原, 1997 a), その変化がもう一方の断層の活動を誘発した可能性はないか. これらの問題の解決にむけて, 断層近傍の応力場の長期観測が必要とされる.

付加体における運動論的分配

わが国における付加体の研究は, 放散虫層序学の確立や, 四万十帯など露頭状況の良好さともあいまって, 世界的にも進んだ研究がなされている (狩野, 1998 参照). 近年, 付加体の重要な構成要素の 1 つであるメランジュ中の非対称構造や, デュープレックスや Out-of-sequence-thrust などに認められる剪断帯の構造解析から, 剪断運動時のスリップベクトルを求めて, 当時のプレートの運動方向を復元する試みがなされている (狩野ほか, 1991; Kano et al., 1991; Onishi and Kimura, 1995; 橋本ほか, 1997). それらの研究によると, 復元されたプレートの相対運動方向と剪断帯の運動方向とはよく一致しているという結果が得られている. ただし, たとえば四万十帯の付加体形成時期である白亜紀~古第三紀にかけての西南日本は, 新第三紀に時計回りに回転したことが古地磁気学的研究 (例えば Otofujii and Matsuda, 1987) から知られており, その回転角度や当時のプレートの相対移動方向 (Engelbreton et al., 1985) についても誤差を伴うことから, 厳密に両者が一致しているかどうかの判断は難しい. 特に, プレートの移動方向にはゆらぎがあることが, ハワイの火山列の方向から論じられている (Jackson et al., 1975). それによると, 42 Ma から現在までの一見直線的に見えるハワイの火山列の詳細な解析から, 太平洋プレートの移動方向が最大約 60° の範囲内でゆらいでいたことが知られている. 上記の付加帯の研究においてこのゆらぎについては考慮されていないが, 付加帯の変形に関する研究における時間分解能は低いので, そこまで議論するのは難しいかもしれない.

木村 (1996) は九州四万十帯古第三系日向層群中に

発達するスラストの運動像の解析を行った。それによると、当時のプレートの移動方向が付加体のトレンドに対し 70° 時計回りに斜交していたにもかかわらず、スラストの運動方向はほぼ付加体のトレンドに直交することを示し、付加体での褶曲・スラストの運動方向が、沈み込みの方向ではなく、付加体のトレンド（走向）に規制されたことを示すとした。この結果は、上記の運動論的分配が、メソスコピックなスラストやデュープレックスにおいても多少なりとも成り立っている可能性を示唆する点で興味深い。したがって、プレートの沈み込み方向が付加体のトレンド（＝海溝軸）とほぼ直交する場合を除くと、付加体の構造から当時のプレートの運動方向を考察するには注意が必要である。日向層群の付加体の場合、仮に運動論的分配が成り立っているとすれば、走向移動成分をスラストと同じ走向をもつ付加体内部の高角断層で担っている可能性がある。たとえば、Onishi and Kimura (1995) や橋本ほか (1997) が解析した四国西部四万十帯（白亜紀後期～始新世）のメランジュファブリックは、走向移動が卓越した斜めすべり運動を記録しており、当時のプレートの移動方向の変化によく対応しているとしている。しかし、走向移動が卓越する場合、プレートの斜め沈み込みの斜交度 γ が大きいのか、もしくはもともと高角度の剪断帯であったために、走向移動が卓越した分配が生じた可能性もある。いずれにせよ、分配されたスラストと走向移動断層のペアを認定し、両者の活動の準同時性が証明できれば、付加体内部において運動論的分配が成立していることが証明できるはずである。前述の前弧スリパーが西南日本外帯のように付加体のパイルナップで構成されているとするならば、それは剛性的にふるまうのではなく複雑な運動をその内部に包含するというのが現実ではなかろうか。

それでは、付加体深部の高圧変成帯では、どのような運動像が描けるのであろうか。近年、三波川変成帯の剪断運動像の復元が試みられている (Faure, 1983; Wallis et al., 1992; Abe et al., 1998)。ここで興味深いことは、四国においても、関東山地においても、三波川変成岩に発達する伸張線構造が、変成帯のトレンド、すなわち、当時の海溝軸とほぼ平行であるという事実である。三波川帯の構造は、後生的な変動で高角度になった中部地方を除くと、四国も関東も低角度である。それにもかかわらず、走向移動を示すのはなぜなのだろうか？ 下記の3つの可能性が考えられる。

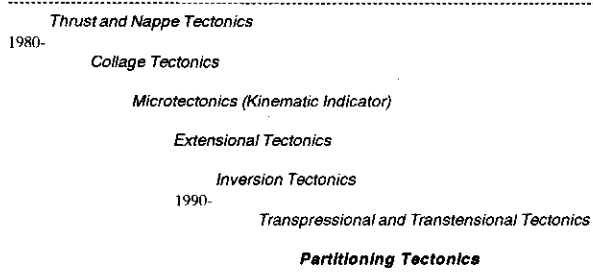
(1) 大槻 (1992) は、斜め沈み込みの斜交度が大きい時に、走向移動成分が卓越する反流が付加プリズムの三次元形態のある境界条件で生じうることをシミュレーションで示した。しかし、その条件はかなり偶然性が高く、天然の場合に当てはまるか否かは疑問が残る。(2) Wallis (1995) は、上記の McCaffrey (1992) のモデル (第4図d) に基づき、プレートの斜め沈み

込みの斜交度が変成帯の走向方向で変化することにより、走向方向に卓越する伸張が生じたためであるとした。三波川変成帯形成時の海溝軸が海側に凸の弧状をなしていたか、もしくは海溝軸が直線であった場合でもプレートの相対移動ベクトルが軸方向に変化していたか、いずれの場合も考えられるが、それを証明する必要がある。(3) 三波川帯の剪断のセンスを示す指標としては、石英のc軸ファブリックやシアバンドなどがよく使われている。それらの指標が最終的に凍結する時期は、三波川変成帯の変成のピーク以降の上昇の時期であると考えられる。その場合、もしアンダープレートティングによってより古い付加体を構成する三波川帯のナップの姿勢が、その上昇に伴って比較的高角度になっていたとするならば、運動論的分配により、もともと三波川変成岩には走向移動の線構造を生成したと考えることもできる。その時に分配された走向に直交する短縮は、スラストではなく褶曲によりまかなわれていた可能性も十分考えられる。もし三波川帯がもともと比較的高角度であったとすると、その構造的上位に存在し、トランスプレッション場で進行したと考えられている跡倉ナップや金勝山ナップの初期の走向移動 (Kobayashi, 1996) や南方への押し被せ褶曲 (新井・高木, 1998) に伴って三波川変成岩類も南側に衝上してきて、現在みられる低角度の三波川帯の姿勢が形成されたとも考えることも可能である。

上記のいずれのモデルにせよ、決定的な論拠にはまだ乏しい。今後斜め収束域における高圧変成帯の微細構造から求められる運動像が、その上昇過程のなかでどのようにつくられたかについて、様々な分野からの総合的な検討が必要であろう。

おわりに

小論では、プレートの斜め収束域やトランスプレッションの領域で、プレート間の相対変位が、走向移動による変位成分とスラスト運動 (褶曲) などによる短縮変位成分とに分配される実例についてレビューしてきた。自然界における地震学的観測結果や構造地質学的データに基づく分配の例のみならず、このような分配を実験的に再現する試みとして、Richard and Cobbold (1989, 1990), Pinet and Cobbold (1992), Burbidge and Braun (1998) らによるアナログモデル実験例や、Braun and Beaumont (1995) による数値実験例が報告されている。しかしながら、例えばサンアンドレアス断層における地殻応力問題をみてもわかるように、まだ断層の破碎-塑性遷移領域、ならびに地殻深部からマントル上部における応力の変化やレオロジーについて必ずしも十分理解されているわけではないので、アナログモデルの結果にはかなりの任意性が生じ得ることも否めない。



第7図 1980年代以降の構造地質学-テクトニクスの流行の変遷。これらのテーマの多くは、ロンドン地質学会の Special Publication として特集されており、ここに挙げたテーマの中で最も最近のものは、1998年に発刊された“Continental Transpressional and Transtensional Tectonics”で、その中に“Partitioning Tectonics”に関連した論文も収められている。

小論で挙げた様々な問題点、たとえば中央構造線のような海溝軸と平行な走向移動断層と沈み込み帯に平行なスラストの深部が連結しているのか、震源域の応力場の変化は活断層に沿った地震の前後でどのように変化するのか、付加体内部の運動学的分配はどのようになっているのか、斜め沈み込み場における高圧変成帯の上昇メカニズムと走向移動を示唆する線構造の姿勢との関係はどのようになっているのか、などについて検討できる題材が、斜め収束域である日本列島にも数多く存在している。小論で述べた分配テクトニクスに関する諸問題は、我が国の構造地質学者と地球物理学者が21世紀にむけて海外に発信できる重要なテーマではなかろうか(第7図)。

謝 辞

本論説をまとめるにあたり、査読者の塚原弘昭教授、村田明広教授には、貴重な御指摘を賜った。編集者の山北 聡博士には、お世話になった。記して厚くお礼申し上げます。

文 献

- Abe, T., Takagi, H., Miyashita, A., 1998, Geological structures of the Sambagawa belt in the Kanto Mountains, central Japan. *In* Koh, H.J. and Lee, B.J., eds., *Tectonic evolution of East Asia-The First Joint Meeting of Japanese and Korean Structure and Tectonic Research Group*. 103-108.
- Abers, G. and McCaffrey, R., 1988, Active deformation in the New Guinea fold-and-thrust belt : seismological evidence for strike-slip faulting and basement-involved thrusting. *Jour. Geophys. Res.*, **93**, 13332-13354.
- 新井宏嘉・高木秀雄, 1998, 関東山地, 跡倉ナップの構造発達 : 押被せ褶曲の復元. *地質雑*, **104**, 861-876.
- Barrier, E., Huchon, P. and Aurelio, M., 1991, Philippine fault : A key for Philippine kinematics. *Geology*, **19**, 32-35.
- Beck, M.E.Jr., 1983, On the mechanism of tectonic transport in zones of oblique subduction. *Tectonophysics*, **93**, 1-11.
- Braun, J. and Beaumont, C., 1995, Three-dimensional numerical experiments of strain partitioning at oblique plate boundaries : implications for contrasting tectonic styles in the southern Coast Ranges, California, and central South Island, New Zealand. *Jour. Geophys. Res.*, **100**, 18059-18074.
- Brune, J.N., Henryey, T.L. and Roy, R.F., 1969, Heat flow, stress, and rate of slip along the San Andreas fault, California. *Jour. Geophys. Res.*, **74**, 3821-3827.
- Brunel, M., 1986, Ductile thrusting in the Himalayas : shear sense criteria and stretching lineations. *Tectonics*, **5**, 247-265.
- Burbidge, D.R. and Braun, J., 1998, Analog models of obliquely convergent continental plate boundaries. *Jour. Geophys. Res.*, **103**, 15221-15237.
- Burchfiel, B.C., Chen, Z., Hodges, K.V., Liu, Y., Royden, L.H., Deng, C. and Xu, J., 1992, The South Tibetan detachment system, Himarayan orogen : extension contemporaneous with and parallel to shortening in a collisional mountain belt. *Geol. Soc. Amer., Spec. Pap.*, no. 269, 41 p.
- Byerlee, J.D., 1978, Friction in rocks. *Pure Appl. Geophys.*, **116**, 615-626.
- Byerlee, J.D., 1990, Friction, overpressure and fault normal compression. *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 2109-2112.
- 大長昭雄・松田時彦, 1982, 寛文二年の近江の地震—地変を語る郷帳. 萩原尊禮編, 占地震, 東大出版会, 203-230.
- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F. and Stein, S., 1990, Current plate motions. *Geophys. Jour. Int.*, **101**, 425-478.
- Ekstrom, G. and Engdahl, E.R., 1989, Earthquake source parameters and stress distribution in the Adak Island region of the central Aleutian Islands, Alaska. *Jour. Geophys. Res.*, **94**, 15449-15519.
- Engelbretson, D., Cox, A. and Gordon, R.G., 1985, Relative motions between oceanic and continental plates in the northern Pacific basin. *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.*, **206**, 1-59.
- Faure, M., 1983, Eastward ductile shear during the early tectonic phase in the Sambagawa Belt. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **89**, 319-329.
- Fitch, T.J., 1972, Plate convergence, transcurrent faults,

- and internal deformation adjacent to southeast Asia and the western Pacific. *Jour. Geophys. Res.*, **77**, 4432-4460.
- 藤田和夫, 1980, 中部・近畿北部の第四紀テクトニクスと造構応力場. *地球*, **2**, 586-595.
- 橋本善孝・大西智恵美セリア・木村 学, 1997, 付加体の構造性メランジュのファブリックとプレート相対運動. *月刊地球*, **19**, 160-167.
- Hickman, S.H., 1991, Stress in the lithosphere and the strength of active faults. *Rev. Geophys. Suppl.*, 759-775.
- 久田 司・高木秀雄, 1992, 阿武隈山地東縁, 社地神剪断帯の断層岩の変形と運動. *地質雑*, **98**, 137-154.
- Huchon, P. and Le Pichon, X., 1984, Sunda Strait and Central Sumatra fault. *Geology*, **12**, 668-672.
- Ichikawa, M., 1971, Reanalyses of mechanism of earthquakes which occurred in and near Japan, and statistical studies on the nodal plane solutions obtained, 1926-1968. *Geophys. Mag.*, **35**, 207-274.
- Jackson, E.D., Shaw, H.R. and Bargar, K.E., 1975, Calculated geochronology and stress field orientations along the Hawaiian chain. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **26**, 145-155.
- Jarrard, R.D., 1986, Terrane motion by strike-slip faulting of forearc slivers. *Geology*, **14**, 780-783.
- 狩野謙一, 1998, 付加体の構造地質学—四方十帯を中心とした研究の現状と課題—. *地質学論集*, no. 50, 107-130.
- Kano, K., Nakaji, M. and Takeuchi, S., 1991, Asymmetrical melange fabrics as possible indicators of the convergent direction of plates: a case study from the Shimanto Belt of the Akaishi Mountains, central Japan. *Tectonophysics*, **185**, 375-388.
- 狩野謙一・竹内真司・中路正弥, 1991, メランジュ中の非対称変形組織—四方十帯における例—. *静岡大地球科学研報*, no. 17, 63-85.
- Kimura, G., 1986, Oblique subduction and collision: Forearc tectonics of the Kuril arc. *Geology*, **14**, 404-407.
- 木村克己, 1996, 四方十帯付加コンプレックスの Out-of-Sequence Thrust—宮崎県北部日向層群の例—. *日本地質学会第 103 年学術大会演旨*, 293, p. 237.
- Kobayashi, K., 1996, Rotation of slip direction of the Atokura Nappe viewed from microstructural analyses of brittle shear zones in the Sambagawa belt, Southwest Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **18**, 563-571.
- 越谷 信, 1986, 棚倉破砕帯の変形と運動. *地質雑*, **92**, 15-29.
- Maruyama, S. and Seno, T., 1986, Orogeny and relative plate motions: example of the Japanese islands. *Tectonophysics*, **127**, 305-329.
- 松田時彦, 1967, 地震の地質学. *地震*, **20**, 230-235.
- Matsuda, T., Okada, A. and Daicho, A., 1978, The great earthquake of 1662 and the associated crustal deformation around Lake Biwa —A preliminary report. *In* Horie, S., ed., *Paleolimnology of Lake Biwa and the Japanese Pleistocene*, **6**, 54-65.
- McCaffrey, R., 1991, Slip vectors and stretching of the Sumatran forearc. *Geology*, **19**, 881-884.
- McCaffrey, R., 1992, Oblique plate convergence, slip vectors, and forearc deformation. *Jour. Geophys. Res.*, **97**, 8905-8915.
- McCaffrey, R., 1996, Slip partitioning at convergent plate boundaries of SE Asia. *In* Hall, R. and Blundell, D., eds., *Tectonic evolution of Southeast Asia. Geol. Soc. Spec. Pub.*, no. 106, 3-18.
- Molnar, P., 1992, Brace-Goetze strength profiles, the partitioning of strike-slip and thrust faulting at zones of oblique convergence and the stress-heat flow paradox of the San Andreas Fault. *In* Evans, B. and Wong, T-F., eds, *Fault mechanics and transport properties of rocks*. Academic Press, San Diego, 435-459.
- Mount, V.S. and Suppe, J., 1987, State of stress near the San Andreas fault: implications for wrench tectonics. *Geology*, **15**, 1143-1146.
- Namson, J.S. and Davis, T.L., 1988, Seismically active fold and thrust belt in the San Joaquin Valley, central California. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **100**, 257-273.
- Ni, J. and Barazangi, M., 1984, Seismotectonics of the Himalayan collision zone: Geometry of the underthrusting Indian plate beneath the Himalaya. *Jour. Geophys. Res.*, **89**, 1145-1163.
- Norris, R.J., Koons, P.O. and Cooper, A.F., 1990, The obliquely-convergent plate boundary in the South Island of New Zealand: implications for ancient collision zones. *Jour. Struct. Geol.*, **12**, 715-725.
- Northup, C.J. and Burchfiel, B.C., 1996, Orogen-parallel transport and vertical partitioning of strain during oblique collision, Eofjorden, north Norway. *Jour. Struct. Geol.*, **18**, 1231-1244.
- 岡田篤正, 1971, 動いている中央構造線. *科学*, **41**, 666-669.
- Onishi, C.T. and Kimura, G., 1995, Change in fabric of melange in the Shimanto Belt, Japan: Change in relative convergence? *Tectonics*, **14**, 1273-1289.
- Otofuji, Y. and Matsuda, T., 1987, Amount of clockwise rotation of Southwest Japan —fan shape opening of the southwestern part of the Japan Sea. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **85**, 289-301.
- 大槻憲四郎, 1992, プレートの斜め沈み込みによる高圧変成帯の上昇とせん断変形—準三次元 lubricant モデルによる検討—. *地質雑*, **98**, 435-444.
- Pinet, N. and Cobbold, P.R., 1992, Experimental insights

- into the partitioning of motion within zones of oblique subduction. *Tectonophysics*, **206**, 371-388.
- Rice, J. R., 1992, Fault stress states, pore pressure distributions, and the weakness of the San Andreas Fault. In Evans, B. and Wong, T-F., eds., *Fault mechanics and transport properties of rocks*. Academic Press, San Diego, 475-503.
- Richard, P. and Cobbold, P. R., 1989, Structures en fleur positives et décrochements crustaux : modélisation analogique. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **308**, II, 553-560.
- Richard, P. and Cobbold, P. R., 1990, Experimental insights into partitioning of fault motions in continental convergent wrench zones. *Ann. Tectonicae*, **4**, 35-44.
- 寒川 旭・佃 栄吉, 1987, 琵琶湖西岸の活断層と寛文2年(1662年)の地震による湖岸地域の水没. 地質ニュース, no. 390, 6-12.
- 嶋本利彦, 1989, 西南日本・中央構造線のレオロジー的位置. 活断層研究, **7**, 87-92.
- Suzuki, K. and Adachi, M., 1998, Denudation history of the high T/P Ryoke metamorphic belt, southwest Japan : constraints from CHIME monazite ages of gneisses and granitoids. *Jour. Metam. Geol.*, **16**, 23-37.
- 高木秀雄, 1990, Strike-slip inversion. 構造地質研究会 1990冬の例会予稿集, 24-25.
- 高木秀雄, 1997, 中部地方領家帯のマイロナイト化の時期. 地球, **19**, 111-116.
- 高木秀雄, 1998, 破碎-塑性遷移領域の断層岩類. 地質学論集, no. 50, 59-72.
- 田中秀実・高木秀雄・井上 良, 1996, 中部地方中央構造線に伴う断層破碎岩類の変形・変質様式と断層活動史. 構造地質, no. 41, 31-44.
- Teyssier, C. and Tikoff, B., 1998, Strike-slip partitioned transpression on the San Andreas fault system : a lithospheric-scale approach. In Holdworth, R. E., Strachan, R. A. and Dewey, J. F., eds., *Continental transpressional and transtensional tectonics*. Geol. Soc. Lond., Spec. Pub., no. 135, 143-158.
- Teyssier, C., Tikoff, B. and Markley, M., 1995, Oblique plate motion and continental tectonics. *Geology*, **23**, 447-450.
- Tikoff, B. and Teyssier, C., 1994, Strain modeling of displacement-field partitioning in transpressional orogens. *Jour. Struct. Geol.*, **16**, 1575-1588.
- 塚原弘昭, 1997 a, 本州・四国の地殻応力分布と地質大構造, 地震テクトニクス. 日本列島の地質大構造と地震テクトニクス, 地震研シンポジウム演旨, 71.
- 塚原弘昭, 1997 b, 断層近傍の地殻応力. 日本地質学会第104年討論会演旨, 21, p. 49.
- Wallis, S., 1995, Vorticity analysis and recognition of ductile extension in the Sambagawa belt, SW Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **17**, 1077-1093.
- Wallis, S., Banno, S. and Radvanec, M., 1992, Kinematics, structure and relationship to metamorphism of the east-west flow in the Sanbagawa Belt, southwest Japan. *The Island Arc*, **1**, 176-185.
- 吉田鎮男, 1995, 花折断層とその活動性. 地質ニュース, no. 489, 6-16.
- 吉岡敏和, 1986, 花折断層の変位地形. 地理評, **59**, 191-204.
- 吉岡敏和, 荻谷愛彦, 七山 太, 岡田篤正, 竹村恵二, 1998, トレンチ発掘調査に基づく 花折断層の最新活動と1662年寛文地震. 地震, **51**, 83-97.
- Zoback, M. S., Zoback, M. L., Mount, V. S., Suppe, J., Eaton, J. P., Healy, J. H., Oppenheimer, D., Reasenber, P., Jones, L., Raleigh, C. B., Wong, I. G., Scotti, O. and Wentworth, C., 1987, New evidence on the state of stress of the San Andreas Fault System. *Science*, **238**, 1105-1111.