スラブ内地震活動と その発生メカニズム

東京大学地震研究所*

瀬野 徹三

Intraslab Seismicity and its Generation Mechanisms

Tetsuzo SENO

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

(Received March 31, 2008; Accepted July 1, 2008)

History of studies of intraslab seismicity and its generation mechanisms, since the work by Wadati, is reviewed. Through the initial stage of studies of morphology of the intraslab seismicity, there followed the stage of discussion of focal mechanisms and terminal depths by mechanics and temperature of the slab. In 1970s, double seismic zones were discovered and their generation mechanisms were discussed in terms of bending or thermal stresses. In recent years, to overcome a difficulty that very high pressure prevents intraslab seismicity, dehydration embrittlement and phase transformation have been invoked for the mechanisms of intermediate and deep earthquakes, respectively. If the intermediate seismicity represents dehydration, it may give us a key to understand the distribution of fluids to the upper plate and to the seismogenic interplate thrusts, and finally to understand tectonics and volcanism in subduction zones.

Key words: Intraslab seismicity, Intermediate seismicity, Deep seismicity, Phase change, Dehydration embrittlement

§ 1. はじめに

深発地震の存在とその形態を初めて明らかにするという仕事を和達清夫が始めてから 80 年が経った [和達 (1927, 1928a, b)]. 稍深発地震 (深さ 50 ~ 300 km), 深発地震 (深さ 300 ~ 690 km) をまとめて, ここでは (稍) 深発地震ないしスラブ内地震活動という呼び方をする. 後者の呼び方は, それらが, 沈み込みつつあるプレート, すなわちスラブの中で起こっているという新たなパラダイム—プレートテクトニクス革命 [Isacks *et al.* (1968)]—を経たということを意味している. その革命が生まれる直前, (稍) 深発地震面が低減衰・地震波高速度の層を

なしているという Utsu (1966) と Oliver and Isacks (1967) らの仕事があり, 当時, 海底地質学・地球物理学でなされた新たな発見の近くにいた Oliver 達はグローバルテクトニクス (プレートテクトニクス) に到達した. その後の時代は, プレートテクトニクスの枠組みの中で, スラブ内地震活動の形態の研究の時代を経て, 地震活動がスラブ内のどこで, どのように, どのような条件のもとに起こっているのか, それらはなぜ起こっているのか, の研究の時代と言えるだろう. そのなかで二つの大きな発展があった. 一つは二重地震面の発見であり, もう一つは稍深発地震は脱水脆性化で起こるという視点である. 後者は, スラブ内地震活動の原因に関する一つの説に過ぎないという見方もあるかもしれないが, 最後に述べるように, おそらくそれ以上の意味を持つだろう.

§ 2. 初期形態学の時代

1930 ~ 1960 年代には, Wadati (1935) の地震震源分布に刺激されて, (稍) 深発地震面, ひいてはスラブの形態を調べることが盛んに行われた [Frohlich (1987) 参照]. Gutenberg and Richter (1938, 1939), Benioff (1954) などが代表的なものだが, プレートテクトニクス革命の後もこのような仕事は各地域で引き続き行われた [例えば Katsumata and Sykes (1969), Santo (1969), Isacks and Barazangi (1977), Cardwell *et al.* (1980), Burbach *et al.* (1984), Pardo and Suarez (1995)]. それらの研究からは, 浅いスラブ内地震活動もあれば深いスラブ内地震活動もあるが, 深い場合には 300 km 程度の深さに地震活動の極小があり, そこを境に稍深発地震と深発地震が分けられた [Gutenberg and Richter (1939)]. 深い場合でも, 上部マントルと下部マントルの境界より少し深い 690 km 程度が最深であることがわかった [Rees and Okal (1987)].

§ 3. スラブの応力, 温度構造による成因論

(稍) 深発地震はスラブの中で起こっているから, スラブの力学や温度構造からその発生を理解しようとする試みが生まれた. プレートテクトニクス初期のころ, Isacks and Molnar (1971) はスラブ内地震の発震機構を各地で調べ, スラブの長短や下部マントルへの突入などから期待されるスラブ内応力との関係を論じた. このような研究はその後, 地域的あるいはグローバルに行われた [例えば Vassiliou and Hager (1988), Yamanaka (1993)].

初期のころは, スラブの温度が低いためにスラブが固く, そのため地震がスラブ内で起こるという考えが一般的であった. [スラブの沈降速度] × [プレートの年代] というパラメーター (thermal parameter) は, スラブ内のある一つの等温線が与えられた時, いろいろなスラブ

*〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

で、その等温線がどの程度の深さまで下がるかの大小を表している。これと地震活動の最深点との関係が調べられた [例えば Molnar *et al.* (1979), Wortel and Vlaar (1988), Emmerson and McKenzie (2007)]. 初めは最深点と温度が単純に対応すると考えられたが、後にわかったことは、thermal parameter が 5000 km あたりで、最深点が 300 km から 650 km ヘジャンプすることであった [例えば Kirby *et al.* (1996a)]. このことは、温度という単一のパラメーターで地震発生の最深点を説明することは困難であること、稍深発地震と深発地震とでは、発生メカニズムが異なっていることを示している。また、温度が高くなった場合にスラブが十分柔らかくなるか否かについても疑問が投げかけられた [Brodholt and Stein (1988)].

何らかの理由で地震活動の最深点があるとすれば [Ito and Sato (1991), Kirby *et al.* (1996a) 参照], 深発地震の見られなくなった深さよりも深部にまでスラブは続いている可能性がある。このような非地震性スラブを地震波トモグラフィで検出しようとする試みも盛んに行われた [例えば Creager and Jordan (1984), Zhou *et al.* (1990), van der Hilst *et al.* (1991), Fukao *et al.* (1992)]. その結果、マリアナ、南北アメリカ大陸、ジャワなどの地域では、非地震性スラブは下部マントルまで続いていることがわかった。

§ 4. 二重面と微細構造の時代

1970 年代、稍深発地震活動が東北日本・関東下で二重面をなすことが発見された [津村 (1973), Hasegawa *et al.* (1978)]. これは日本の微小地震観測網の成果だが、遠地の観測でも千島弧の下でわずかに見いだされていた [Sykes (1966), Veith (1974)]. この発見は、(稍) 深発地震のメカニズムの考察に大きな手がかりを与えると期待されたが、それを超えてプレートテクトニクスそのものの、あるいはその原動力の考察にも大きな影響を及ぼすのではないかと期待された [例えば瀬野 (1981) 参照]. ほとんどの場合、二重面の上面はスラブの海洋地殻にあり、その発震機構は down-dip compression、下面はスラブマントルにあり、発震機構は down-dip tension である [例えば Hasegawa *et al.* (1978), Matsuzawa *et al.* (1986)]. スラブ全体の応力に関して言えば、伸張、圧縮のいずれかが dip 方向に卓越してはいないことを意味する。この応力のペアは下に述べるようにその成因論に拘束を与えるが、プレート運動原動力の議論にはそれほど役だったとは思えない [そのような議論については瀬野 (2001) 参照]. しかし、最近になって二重面の存否は、脱水脆性化による稍深発地震成因論と関係して、スラブの水輸送問題に大きな影響を与えつつある。

このころ唱えられた二重面の成因論は、二重面の発震機構や上下面の間隔を説明しようとするもので、曲げ戻し (unbending) [Engdahl and Scholz (1977), Kawakatsu (1986)], たわみ (sagging) [Sleep (1975)], 熱応力 [Hamaguchi *et al.* (1983)] などがある。前者二つはプレートの沈み込みに伴う曲げ応力であり、後者は冷たいスラブが温かいアセノスフェアに接することによって発生する熱膨張に伴う応力で、これらは二重面の発震機構を説明するが、スラブの沈み込みでこのような応力は一般的に生じるから、二重面がどこにでも見いだされるわけではないという事実を説明しない。二重面がみられる沈み込み帯はむしろまれなのである。これらの応力が二重面の発現にある役割を果たしているとしても、それ以外の要素が二重面の発現に必要である。

二重面をさらに複雑にしている構造が東北日本で見いだされている。初期のころ、東北日本の火山フロント直下の上面の発震機構が、down-dip compression ではなく、正断層が卓越することが発見された [Matsuzawa *et al.* (1986)]. さらに Igarashi *et al.* (2001) は、同地域で、70 km 以深で上面が二つに分かれ、浅い方は正断層型であることを見いだした。これらは、上に示したような応力によって説明することは困難である。また上面と下面の間にも活動があり、上面下面を含めたそれらの活動の微細な空間的な違いと、沈み込むプレートの形態や構造との関連が調べられている [菅ノ又・他 (2006), 北・他 (2007)].

これまで主に東北日本について述べた。西南日本・関東の下に沈み込む、年代が若いフィリピン海スラブについては、一般にスラブ内地震活動は 60 ~ 100 km より浅く、二重面は存在しないものと考えられている。しかし、ここでもスラブの地殻内で起こる地震と、マントル部分で起こる地震が区別され [堀 (1997), Seno *et al.* (2001), Seno and Yamasaki (2003)], 本質的には二重面が存在すると思えねばならない。

§ 5. 物性・力学による成因論

応力のパターンから二重面の成因が議論されたが、スラブ内地震のメカニズムに関する最大の難問は、(稍) 深発地震発生深度では、脆性破壊強度あるいはすべり摩擦強度がきわめて大きくなるため、脆性破壊や摩擦すべりとしての地震は起こらないはずである、ということであった。例えば二重面とは限らず、スラブ内地震の成因として、アウターライズで活動した海洋プレート内の断層が再活動した、という議論がされている [例えば Savage (1969), Jiao *et al.* (2000), Ranero *et al.* (2003)]. 最近、アウターライズ断層の走向とは調和的でないス

スラブ内地震の例が多数見つかった [e.g., Warren *et al.* (2008)] ことに加えて、封圧が大きすぎて摩擦も大きいので、再活動だけでは発生の説明になっていないわけである。この困難は昔から気づかれていた [Griggs and Handin (1960)]。それに打ち勝つ説として、塑性不安定 [Post (1977), Hobbs and Ord (1988)], 剪断応力による部分熔融 [例えば Griggs and Baker (1968), Ogawa (1987), Kelemen and Hirth (2007)], 脱水脆性化 [Raleigh and Paterson (1965), Raleigh (1967), Meade and Jeanloz (1991)], オリビン-スピネル相転移 [Kirby (1987), Green and Burnley (1989), Kirby *et al.* (1991)] などが唱えられた。

これらの中でも、深発地震に関しては、有力なメカニズムとして脱水脆性化が注目されはじめた。変成玄武岩、蛇紋岩、緑泥石、タルクなどの含水鉱物を含む岩石がスラブを構成していた場合、それらの含水鉱物が、沈み込みによる温度圧力の上昇に伴って脱水する。放出された結晶粒の間隙に取り込まれた水の圧力は有効応力を大

きく下げ、地震を起こすことが可能になる。このメカニズムは、すでに 1960 年代 Raleigh and Paterson (1965) が、蛇紋岩の脱水に伴う脆性化の実験にもとづいて、深発地震に対して唱えている。この説が有力な理由は、脱水の相境界の温度圧力が高温高压実験から求まっているならば、地震の起こる場所をスラブの中で推定し、それと観測される地震分布とを比較できることである。また、海洋地殻の脱水は一般的に起こるが、スラブマントル部分の脱水は、それが蛇紋岩化されているか否かによる。したがって、スラブマントルの蛇紋岩化の有無で、二重面の有無を説明できる可能性がある (Fig. 1)。

Kirby *et al.* (1996b) は、スラブ地殻内地震と変成玄武岩の脱水脆性化を対応させた。その後、Peacock and Wang (1999) は、東北日本と西南日本下のスラブ温度構造を計算し、スラブ地殻内地震と変成玄武岩の脱水脆性化を定量的に対応させた。マントル部分の含水鉱物である蛇紋岩が脱水することと二重面を対応させたのは Nishiyama (1992) が最初であるが、Seno and Yamanaka

Fig. 1. A schematic cross-section showing the origin of intermediate and deep earthquakes within the slab and intraplate earthquakes within the upper plate [modified from Kirby *et al.* (1996a), Hasegawa *et al.* (2005) and Yamasaki and Seno (2003)]. Dehydration of the altered basalt and serpentinites in the subducting slab causes embrittlement of the slab and intermediate earthquakes. Dehydration would then provide H_2O into the wedge mantle above and cause partial melting. The partial melts bring H_2O to the crust of the upper plate and cause intraplate earthquakes. At greater depths, the metastable olivine would cause transformational faulting to produce deep earthquakes. In this figure, a simplified schematic transformation of olivine to α -spinel is shown, neglecting other spinel phases [Kirby *et al.* (1996a)].

(1996) は, Nishiyama とは独立にこの考えに到達した. Seno and Yamanaka (1996) は, アウターライズで, 逆断層と正断層のペアがある沈み込み帯には, スラブにも二重面があることを見だし, それらは海洋プレートの深部が, ホットスポット活動によって放出された水によって蛇紋岩化している場合に起こると考えた. 蛇紋岩化の原因として, Peacock (2001) は, アウターライズにおける正断層を通して二重面の下面の位置にまで水が注入されるとし, Omori *et al.* (2004) は, 断裂帯による水の注入を挙げている. また Kirby (1995) は, ホットスポット活動に伴うマグマに含まれる CO_2 が海洋プレート中へトラップされることとその揮発化を, 二重面下面の地震のメカニズムとして示唆している.

その後, 二重面の形状と脱水の相境界とをより詳しく比較した例として, Omori *et al.* (2002), Hacker *et al.* (2003), Yamasaki and Seno (2003) などが挙げられる. また, Kita *et al.* (2006) は, 東北日本の二重面上面の海洋地殻内の地震分布は, Hacker *et al.* (2003) によって予測された変成玄武岩の脱水境界でよく説明されるとした.

脱水脆性化を稍深発地震のメカニズムとして受入れたとしても, 二重面の上面が down-dip compression, 下面が down-dip tension というメカニズムは, 脱水脆性化とは直接関係がない. 例えば蛇紋岩の脱水相境界の dP/dT の傾きから, 100 km 以深では脱水に伴って体積縮小を伴う [Jung *et al.* (2004)] が, 地震のメカニズムは正断層とは限らない. メカニズムを反映する応力は, 大局的には曲げ応力などのスラブ応力で決まっているのだろう. しかし前節で述べた上面の正断層型地震のような特異な地震の場合, そのメカニズムが脱水反応と関係して論ぜられることがある [Igarashi *et al.* (2001), Wang (2002)].

また, 東北日本の上面で起こった稍深発地震である 2003 年宮城県沖地震 ($M_w 7.0$) の場合, スラブマントル部分にまで断層運動がはみ出すことが見られたが [菅ノ又・他 (2006)], フィリピン海スラブにおいても, 2001 年芸予地震 ($M_w 6.7$) の断層運動が, 地殻とマントル両方にわたっていることが見られた [Kakehi (2004)]. これらのような大きな地震の場合, 断層面の拡がりや 10 km を超えるから, 二重面の存在する領域を破壊域を超えている. しかし高封圧が存在した場合に破壊が自然には発生しないことは他の中小の地震と同じであるから, 破壊開始点は, 二重面の存在する領域に限られるはずである. 破壊開始後, 二重面付近を越えて偏差応力が必ずしも小さくはないために, 断層面が大きく拡がることもあるのだと考えられる.

300 km より深い深発地震に関しては, スラブに含まれる含水鉱物の多くはそれ以前に脱水してしまうの

で, 脱水脆性化はそのメカニズムではないとする考えが多い [Green and Houston (1995), Kirby *et al.* (1996a)] が, 含水鉱物が深発地震の深さにまで残るとする説もある [Omori *et al.* (2004)]. 深発地震はオリビン/スピネル多形相転移が原因であり [Sung and Burns (1976), Liu (1983), Goto *et al.* (1987)], 冷たいスラブの中に生じた metastable 領域が, マントル深部に沈み込むのに従って相転移して剪断面にそって塑性変形し, それに伴って断層すべりをする (transformational faulting) という説 [Fig. 1, Kirby (1987), Green and Burnley (1989), Kirby *et al.* (1991), Green and Houston (1995)] が 1980 年代後半から唱えられた. これは, 深発地震がマントル遷移層に限られることや深発地震の発震機構などをよく説明している [Kirby *et al.* (1996a) 参照]. Metastable 領域の相転移境界は上面下面の二つペアで生じるが, これに対応しているとみられる二重面が, トンガ弧や伊豆-小笠原弧で見つかった [Wiens *et al.* (1993), Iidaka and Furukawa (1994)]. また, 最近マリアナ弧北部下 590 km の深さのスラブで, metastable なウエッジを表すと見られる低速度層が見つかった [Kaneshima *et al.* (2007)].

深発地震においても, metastable 領域をはみ出すような大きな地震 [例えば 1993 年ボリビア地震 ($M_w 8.3$), Silver *et al.* (1995)] が起こったことがあるが, これは大きな稍深発地震が二重面をはみ出すのと同様な現象であるかもしれない. しかし Kaneshima *et al.* (2007) は, マリアナ弧下のスラブで, 相転移境界よりも 10 km も外側に離れた領域でかなりの数の地震が起こっていることから, 相転移ではなく, 剪断不安定を深発地震の原因として挙げている.

§ 6. テクトニクス・地震活動・火成活動を支配する水輸送の現れとしてのスラブ内地震活動

Hasegawa and Nakajima (2004), Hasegawa *et al.* (2005) は, 東北日本に関する地球物理学的研究をまとめ, ウエッジとその上の上盤側プレートへの, スラブによる水 (より一般的には水を含んだ流体) の輸送と分配が, 上盤側プレートの地殻内地震活動を支配するとした. Fig. 1 に, スラブの脱水とプレート間地震発生境界・ウエッジマントル・上盤側プレートへの水の輸送を模式的に示す. 最後に, この基本的で重要な考えに私見を付け加えて, 将来への展望としたい. 沈み込み帯にスラブが水を運ぶ役割を果たしていることはまぎれもないが, 分配先は, 上盤側ウエッジとプレート境界のスラスト帯 (プレート間地震発生帯) に分かれる. したがって, もしスラブ内地震が脱水脆性化によって起こっているならば, スラブ内地震活動を見ることによって, 脱水の強弱, ひいてはそ

の後の水の分配の強弱を、各分配先で少なくとも定性的に推定することができるだろう。

このような推定の例として、Seno and Yamasaki (2003)は、西南日本で、島弧地殻や海山などが沈み込んでいるところでは、低周波微動が起こっていないこと [Obara (2002)] から、スラブの海洋地殻からの脱水が起こっていない可能性を示した。これらの地域で脱水が起こっていないことと調和的のように、島弧地殻や海山などが沈み込んでいる地域のほとんどでは、沈み込む海洋地殻の中では地震が起こっていない。そのような場所でも、スラブマントル中では地震が起こっている東四国や関東と、スラブマントル中ですら地震が起こっていない伊豆に分けられる。このことから、伊豆北方では、水がプレート境界にほとんど供給されていないと考えられ、そのためにプレート境界地震が起こらず、衝突が起こっていると考えられる。

同様にヒマラヤやザグロスなどの衝突帯では、稍深発地震が起こっておらず、スラブからの脱水が少ないことが推察される [Seno (2007)]。これらの地域では大陸地殻が潜り込んでいるが、無脱水の原因は、大陸地殻の大半が花崗岩からなり、それに含まれる含水鉱物は雲母であり、100 km より深いところで脱水する [Ernst *et al.* (1998)] ためであろう。この無脱水のため、プレート境界断層の剪断応力が大きく、沈み込む大陸地殻上部が引き剥がされ、また、上盤側プレートが激しく変形していると考えられる。

ここで、これらの現象をより定量的に説明するために、プレート境界スラスト帯における間隙流体圧と静岩石圧との比 (間隙流体圧比) λ を導入しよう。プレート境界に供給される水は、スラブ脱水によるもの以外にはあり得ないから、 λ の値の大小は、結局、スラブ脱水の大小を表している。Seno (2008) は、 $\lambda = 0.4$ 以下で、衝突に伴う現象 (地殻の引き剥がしや上盤側のプレート内部変形など) が起こることを計算によって示している。また、Seno (2009) は、普通の沈み込み帯では λ は 0.96 程度であるが、アンデス型造山運動が起こる場合は 0.8 程度であることを示した。すなわち、 λ の大小が、沈み込み・衝突・造山運動など上盤側プレートのテクトニクスを支配しているらしい。スラブ内地震活動が脱水によって起こっているという仮定のもとに、スラブ内地震活動、スラブからの脱水、スラスト帯の λ の大小、上盤側プレートへの供給量の関係を定量化することが、プレート間地震、地球のテクトニクスの多様性や、いつどのようにしてプレートテクトニクスが始まったかという基本的問題の解明のパラダイムとなりうるであろう。これは地球にとどまらず、金星になぜプレートテクトニクスが存在し

ないのか、という問題にも関わってくる。

火成活動に関しては、非地震性海嶺などの沈み込みと、火成活動が存在しない場所との対応関係が以前から知られており [Nur and Ben-Avraham (1983), McGeary *et al.* (1985)], 海嶺の沈み込みのために水の供給が少なくなることが原因の一つである可能性がすでに指摘されている。一方で、これらの地域で稍深発地震活動がまったく無くなるわけではない [McGeary *et al.* (1985)]。ここでは、稍深発地震の形態と火成活動、プレート境界地震との対応を、海洋地殻からの脱水やスラブマントルからの脱水の有無など、より詳しい観点から見る必要があるだろう。

一方、上盤側に分配された水は、上盤側プレート内地震を引き起こす。現在はウエッジ・上盤側プレートへの分配のおおまかなストーリーがわかった段階 [例えば Hasegawa *et al.* (2005) 参照] で、分配の詳細と地震発生の引き金はよくわかっていない。これらを定量的に明らかにすることが、これからの地震予知を含めた地震学の課題である。

謝 辞

匿名の二人の査読者と小菅正裕編集担当委員の本稿の内容の改善に対する意見は大変有益でした。ここで感謝します。

文 献

- Benioff, H., 1954, Orogenesis and deep crustal structure – additional evidence from seismology, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **65**, 385-400.
- Brodholt, J. and S. Stein, 1988, Rheological control of Wadati-Benioff Zone seismicity, *Geophys. Res. Lett.*, **15**, 1081-1084.
- Burbach, G. V., C. Frohlich, W. D. Pennington, and T. Matsumoto, 1984, Seismicity and tectonics of the subducted Cocos plate, *J. Geophys. Res.*, **89**, 7719-7735.
- Cardwell, R. K., B. L. Isacks, and D. E. Karig, 1980, The spatial distribution of earthquakes, focal mechanism solutions and subducted lithosphere in the Philippine and northeastern Indonesian islands, in “The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands”, Part 1, ed. by D. E. Hayes, *Geophys. Monogr.*, **23**, AGU, Washington D. C., 1-35.
- Creager, K. C. and T. H. Jordan, 1984, Slab penetration into the lower mantle, *J. Geophys. Res.*, **89**, 3031-3049.
- Emmerson, B. and D. McKenzie, 2007, Thermal structure and seismicity of subducting lithosphere, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **163**, 191-208.
- Engdahl, E. R. and C. H. Scholz, 1977, A double Benioff zone beneath the central Aleutians: An unbending of the lithosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **4**, 473-476.

- Ernst, W. G., L. J. Mosenfelder, M. L. Leech, and J. Liou, 1998, H₂O recycling during continental collision: Phase-equilibrium and kinetic consideration, in "When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-pressure Rocks", ed. by B. R. Hacker and J. G. Liou, Dordrecht, Kluwer Acad. Publ., 275-295.
- Frohlich, C., 1987, Kiyoo Wadati and early research on deep focus earthquakes: Introduction to special section on deep and intermediate focus earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **92**, 13777-13788.
- Fukao, Y., M. Obayashi, H. Inoue, and M. Nenbai, 1992, Subducting slabs stagnant in the mantle transition zone, *J. Geophys. Res.*, **97**, 4809-4822.
- Goto, K., Z. Suzuki, and H. Hamaguchi, 1987, Stress distribution due to olivine-spinel phase transition in descending plate and deep focus earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **92**, 13811-13820.
- Green, H. W., II and P. C. Burnley, 1989, A new self-organizing mechanism for deep-focus earthquakes, *Nature*, **341**, 733-737.
- Green, H. W., II and H. Houston, 1995, The mechanics of deep earthquakes, *Ann. Rev. Earth Planet Sci.*, **23**, 169-213.
- Griggs, D. T. and J. Handin, 1960, Observations on fracture and a hypothesis of earthquakes, *Mem. Geol. Soc. Am.*, **79**, 347-373.
- Griggs, D. T. and D. W. Baker, 1968, The origin of deep-focus earthquakes, in "Properties of Matter Under Unusual Conditions", ed. by H. Marks and S. Fernbach, John Wiley, New York, 22-42.
- Gutenberg, B. and C. F. Richter, 1938, Depth and geographical distribution of deep-focus earthquakes, *Bull. Geol. Soc. Am.*, **49**, 249-288.
- Gutenberg, B. and C. F. Richter, 1939, Depth and geographical distribution of deep-focus earthquakes, *Bull. Geol. Soc. Am.*, **50**, 1511-1528.
- Hacker, B. R., S. M. Peacock, G. A. Abers, and S. D. Holloway, 2003, Subduction factory – 2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions?, *J. Geophys. Res.*, **108**, B1, doi:10.1029/2001JB001129.
- Hamaguchi, H., H. Goto, and Z. Suzuki, 1983, Double-planed structure of intermediate depth seismic zone and thermal stress in the descending plate, *J. Phys. Earth*, **31**, 329-347.
- Hasegawa, A. and J. Nakajima, 2004, Geophysical constraints on slab subduction and arc magmatism, in "The State of the Planet: Frontiers and Challenges in Geophysics", *Geophys. Monogr.*, **150**, IUGG and AGU, 81-93.
- Hasegawa, A., N. Umino, and A. Takagi, 1978, Double-planed structure of the deep seismic zone in the northeastern Japan arc, *Tectonophysics*, **47**, 43-58.
- Hasegawa, A., J. Nakajima, N. Umino, and S. Miura, 2005, Deep structure of the northeastern Japan arc and its implications for crustal deformation and shallow seismic activity, *Tectonophysics*, **403**, 59-75.
- Hobbs, B. E. and A. Ord, 1988, Plastic instabilities: Implications for the origin of intermediate and deep focus earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **93**, 10521-10540.
- 堀 貞喜, 1997, 関東地方下のフィリピン海プレート内地震の発生機構, *地震* **2**, **50**, 203-213.
- Igarashi, T., T. Matsuzawa, N. Umino, and A. Hasegawa, 2001, Spatial distribution of focal mechanisms for interplate and intraplate earthquakes associated with the subducting Pacific plate beneath the northeastern Japan arc: A triple-planed deep seismic zone, *J. Geophys. Res.*, **106**, 2177-2191.
- Iidaka, T. and Y. Furukawa, 1994, Double seismic zone for deep earthquakes in the Izu-Bonin subduction zone, *Science*, **263**, 1116-1118.
- Isacks, B., J. Oliver, and L. R. Sykes, 1968, Seismology and the new global tectonics, *J. Geophys. Res.*, **73**, 5855-5899.
- Isacks, B. and P. Molnar, 1971, Distribution of stresses in the descending lithosphere from a global survey of focal-mechanism solutions of mantle earthquakes, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **9**, 103-174.
- Isacks, B. L. and M. Barazangi, 1977, Geometry of Benioff zones: Lateral segmentation and downwards bending of the subducted lithosphere, in "Island Arcs, Deep Sea Trenches and Back Arc Basins", ed. by M. Talwani and W. C. Pitman III, Maurice Ewing Ser., **1**, AGU, Washington D. C., 99-114.
- Ito, E. and H. Sato, 1991, Aseismicity in the lower mantle by superplasticity of the descending slab, *Nature*, **351**, 140-141.
- Jiao, W., P. G. Silver, Y. Fei, and C. T. Prewitt, 2000, Do intermediate- and deep-focus earthquakes occur on preexisting weak zones? An examination of the Tonga subduction zone, *J. Geophys. Res.*, **105**, 28125-28138.
- Jung, H., H. W., II Green, and L. F. Dobrzynetskiy, 2004, Intermediate-depth earthquake faulting by dehydration embrittlement with negative volume change, *Nature*, **428**, 545-549.
- Takehi, Y., 2004, Analysis of the 2001 Geiyo, Japan, earthquake using high-density strong ground motion data: Detailed rupture process of a slab earthquake in a medium with a large velocity contrast, *J. Geophys. Res.*, **109**, B08306, doi:10.1029/2004JB002980.
- Kaneshima, S., T. Okamoto, and H. Takenaka, 2007, Evidence for a metastable olivine wedge inside the subducted Mariana slab, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **258**, 219-227.
- Katsumata, M. and L. R. Sykes, 1969, Seismicity and tectonics of the western Pacific: Izu-Mariana-Caroline and Ryukyu-Taiwan Regions, *J. Geophys. Res.*, **74**, 5923-5948.
- Kawakatsu, H., 1986, Double seismic zones: kinematics, *J. Geophys. Res.*, **91**, 4811-4825.
- Kelemen, P. B. and G. Hirth, 2007, A periodic shear-heating mechanism for intermediate-depth earthquakes in the mantle, *Nature*, **446**, 787-790.
- Kirby, S. H., 1987, Localized polymorphic phase transformations in high-pressure faults and applications to the physical mechanism of deep earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **92**, 13789-13800.
- Kirby, S. H., W. B. Durham, and L. A. Stern, 1991, Mantle phase changes and deep-earthquake faulting in subducting lithosphere, *Science*, **252**, 216-225.
- Kirby, S., 1995, Intraslab earthquakes and phase changes in subducting lithosphere, *Rev. Geophys., Suppl.*, **33**, 287-297.
- Kirby, S. H., S. Stein, E. A. Okal, and D. Rubie, 1996a,

- Metastable mantle phase transformations and deep earthquakes in subducting oceanic lithosphere, *Rev. Geophys.*, **34**, 261-306.
- Kirby, S., E. R. Engdhal, and R. Denlinger, 1996b, Intermediate-depth intraslab earthquakes and arc volcanism as physical expressions of crustal and uppermost mantle metamorphism in subducting slabs (Overview), in "Subduction Top to Bottom", ed. by G. E. Bebout, D. W. Scholl, S. H. Kirby, and J. P. Platt, *Geophys. Monogr.*, **96**, AGU, Washington D. C., 195-214.
- Kita, S., T. Okada, J. Nakajima, T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, 2006, Existence of a seismic belt in the upper plane of the double seismic zone extending in the along-arc direction at depths of 70-100 km beneath NE Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L24310, doi:10.1029/2006GL0028239.
- 北 佐枝子・岡田知巳・中島淳一・松澤 暢・内田直希・長谷川 昭・S. H. Kirby, 2007, 東北日本下のスラブ内地震の震源分布と起震応力場の特徴, 日本地震学会講演予稿集, 51.
- Liu, L.-G., 1983, phase transformations, earthquakes and the descending lithosphere, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **32**, 226-240.
- Matsuzawa, T., N. Umino, A. Hasegawa, and A. Takagi, 1986, Normal fault type events in the upper plane of the double-planed deep seismic zone beneath the northeastern Japan Arc, *J. Phys. Earth*, **34**, 85-94.
- McGeary, S., A. Nur, and Z. Ben-Avraham, 1985, Spatial gaps in arc volcanism: The effect of collision or subduction of oceanic plateaus, *Tectonophysics*, **119**, 195-221.
- Meade, C. and R. Jeanloz, 1991, Deep-focus earthquakes and recycling of water into the earth's mantle, *Science*, **252**, 68-72.
- Molnar, P., D. Freedman, and J. S. F. Shih, 1979, Length of intermediate and deep seismic zones and temperatures in downgoing slabs of lithosphere, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **56**, 41-54.
- Nishiyama, T., 1992, Mantle hydrology in a subduction zone: A key to episodic geologic events, double Wadati-Benioff zones and magma genesis, *Mathematical Seismology VII*, *Rep. Stat. Math. Inst.*, **34**, 31-67.
- Nur, A. and Z. Ben-Avraham, 1983, Volcanic gaps due to oblique consumption of aseismic ridges, *Tectonophysics*, **99**, 355-362.
- Obara, K., 2002, Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, **296**, 1679-1681.
- Ogawa, M., 1987, Shear instability in a viscoelastic material as the cause of deep focus earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **92**, 13801-13810.
- Oliver, J. and B. Isacks, 1967, Deep earthquake zones, anomalous structures in the upper mantle, and the lithosphere, *J. Geophys. Res.*, **72**, 4259-4275.
- Omori, S., S. Kamiya, S. Maruyama, and D. Zhao, 2002, Morphology of the intraslab seismic zone and devolatilization phase equilibria of the subducting slab peridotite, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **76**, 455-478.
- Omori, S., T. Komabayashi, and S. Maruyama, 2004, Dehydration and earthquakes in the subducting slab: empirical link in intermediate and deep seismic zones, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **146**, 297-311.
- Pardo, M. and G. Suarez, 1995, Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implications, *J. Geophys. Res.*, **100**, 12357-12373.
- Peacock, S. M., 2001, Are the lower planes of double seismic zones caused by serpentine dehydration in subducting oceanic mantle?, *Geology*, **29**, 299-302.
- Peacock, S. M. and K. Wang, 1999, Seismic consequences of warm versus cool subduction metamorphism: Examples from southwest and northeast Japan, *Science*, **286**, 937-939.
- Post, R. L. Jr., 1977, High-temperature creep of Mt. Burnet Dunite, *Tectonophysics*, **42**, 75-110.
- Raleigh, C. B., 1967, Tectonic implications of serpentine weakening, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **14**, 113-118.
- Raleigh, C. B. and M. S. Paterson, 1965, Experimental deformation of serpentinite and its tectonic implications, *J. Geophys. Res.*, **70**, 3965-3985.
- Ranero, C. R., J. P. Morgan, K. McIntosh, and C. Reichert, 2003, Bending-related faulting and mantle serpentinization at the middle America trench, *Nature*, **425**, 367-373.
- Rees, B. A. and E. A. Okal, 1987, The depth of the deepest historical earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, **125**, 699-715.
- Santo, T., 1969, Regional study on the characteristic seismicity of the world; part I, Hindu Kush region, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Univ. of Tokyo, **47**, 1035-1048.
- Savage, J. C., 1969, The mechanics of deep-focus faulting, *Tectonophysics*, **8**, 115-127.
- 瀬野徹三, 1981, 深発地震面—二重構造の発見とその後, *科学*, **51**, 479-480.
- 瀬野徹三, 2001, 続プレートテクトニクスの基礎, 朝倉書店, 162 pp.
- Seno, T., 2007, Collision versus subduction: from a viewpoint of slab dehydration, in "The Seismogenic Zone of Subduction Thrust Faults", ed. by T. Dixon and J. C. Moore, Columbia Univ. Press, 601-623.
- Seno, T., 2008, Conditions for a crustal block to be sheared off from the subducted continental lithosphere – What is an essential factor to cause features associated with collision? –, *J. Geophys. Res.*, **113**, B04414, doi:10.1029/2007JB005038.
- Seno, T., 2009, Determination of the pore fluid pressure ratio at seismogenic megathrusts in subduction zones: Implications for strength of asperities and Andean-type mountain building, *J. Geophys. Res.*, in press.
- Seno, T. and Y. Yamanaka, 1996, Double seismic zones, compressional deep trench – outer rise events and superplumes, in "Subduction Top to Bottom", ed. by G. E. Bebout, D. W. Scholl, S. H. Kirby, and J. P. Platt, *Geophys. Monogr.*, **96**, AGU, Washington D. C., 347-355.
- Seno, T. and T. Yamasaki, 2003, Low-frequency tremors, intraslab and interplate earthquakes in Southwest Japan – from a viewpoint of slab dehydration –, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2171, doi:10.1029/2003GL018349.
- Seno, T., D. Zhao, Y. Kobayashi, and M. Nakamura, 2001, Dehydration in serpentinized slab mantle: Seismic evidence

- from southwest Japan, *Earth Planets Space*, **53**, 861-871.
- Silver, P. G., S. L. Beck, T. C. Wallace, C. Meade, S. C. Meyers, D. E. James, and R. Kuehnel, 1995, Rupture characteristics of the deep Bolivian earthquake of 9 June and the mechanism of deep-focus earthquakes, *Science*, **268**, 69-73.
- Sleep, N. H., 1975, Stress and flow beneath island arcs, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **42**, 827-857.
- Stein, S. A. and D. C. Rubie, 1999, Deep earthquakes in real slabs, *Science*, **286**, 909-910.
- 菅ノ又淳一・岡田知巳・長谷川 昭・迫田浩司・S. Kirby, 2006, Double-Difference Location 法による東北日本弧下の稍深発地震の震源再決定, *地震* **2**, **59**, 1-18.
- Sung, C.-M. and R. G. Burns, 1976, Kinetics of the olivine-spinel transition: implications to deep-focus earthquake genesis, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **32**, 165-170.
- Sykes, L. R., 1966, Seismicity and deep structure of island arcs, *J. Geophys. Res.*, **71**, 2981-3006.
- 津村建四朗, 1973, 関東地方の微小地震活動, 関東大地震50周年論文集, 東大地震研究所, 67-87.
- Utsu, T., 1966, Regional differences in absorption of seismic waves in the upper mantle as inferred from abnormal distributions of seismic intensities, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, **VII**, **2**, 359-369.
- van der Hilst, R., R. Engdahl, W. Sparkman, and G. Nolet, 1991, Tomographic imaging of subducted lithosphere below northwest Pacific island arcs, *Nature*, **353**, 37-43.
- Vassiliou, M. S. and B. H. Hager, 1988, Subduction zone earthquakes and stress in slabs, *Pure Appl. Geophys.*, **128**, 547-624.
- Veith, K. F., 1974, The relationship of island arc seismicity to plate tectonics, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **55**, 349.
- Wadati, K., 1935, On the activity of deep-focus earthquakes in the Japan islands and neighbourhoods, *Geophys. Mag.*, **8**, 305-325.
- 和達清夫, 1927, 深層地震の存在と其の研究, *気象集誌* **2**, **5**, 119-145.
- 和達清夫, 1928a, 深層地震の存在と其の研究 (その二), *気象集誌* **2**, **6**, 192-216.
- 和達清夫, 1928b, 深層地震の存在と其の研究 (その三), *気象集誌* **2**, **6**, 226-248.
- Wang, K., 2002, Unbending combined with dehydration embrittlement as a cause for double and triple seismic zones, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, doi:10.1029/2002GL015441.
- Warren L. M., M. A. Langstaff, and P. G. Silver, 2008, Fault plane orientations of intermediate-depth earthquakes in the Middle America Trench, *J. Geophys. Res.*, **113**, B01304, doi:10.1029/2007JB005028.
- Wiens, D. A., J. J. McGuire, and P. J. Shore, 1993, Evidence for transformational faulting from a deep double seismic zone in Tonga, *Nature*, **364**, 790-793.
- Wortel, M. J. R. and N. J. Vlaar, 1988, Subduction zone seismicity and the thermo-mechanical evolution of state for the mantle, *Pure Appl. Geophys.*, **128**, 625-659.
- Yamanaka, Y., 1993, A unified model of the stress state in subducting slabs, Ph. D. Thesis, Univ. of Tokyo.
- Yamasaki, T. and T. Seno, 2003, Double seismic zones and dehydration embrittlement, *J. Geophys. Res.*, **108**, 2212, doi:10.1029/2002JB001918.
- Zhou, H., D. L. Anderson, and R. W. Clayton, 1990, Modeling of residual spheres for subduction zone earthquakes 1. Apparent slab penetration signatures in the NW Pacific caused by deep diffuse mantle anomalies, *J. Geophys. Res.*, **95**, 6799 - 6827.