

総 説

## 沈み込む海山と上盤プレートとの相互作用 —大地震の発生との関連について

山崎俊嗣\*

Toshitsugu YAMAZAKI (2000) Interaction between subducting seamounts and overriding forearc wedges, and its relation to large earthquakes: a review. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 51 (2/3), p. 103-111, 5 figs.

**Abstract:** This paper presents a review of recent studies on the interaction between the overriding plates and topographic highs on subducting plates like seamounts, and its relation to large earthquake generation. Seamount subduction produces characteristic structures on forearc wedges. A topographic swell and new backthrusts occur landward of a subducting seamount. Behind the seamount, a topographic depression with a scarp is formed at first, and landward dipping normal faults are produced when the seamount subduction proceeds further. Recently, the possibility that topographic highs on subducting plates act as seismogenic asperities is calling attention of many researchers. It was proposed that large thrust-type earthquakes at Chilean-type margins are generated by rupture of jammed seamounts at the base of the overriding plates. Another model postulates that subduction of oceanic plateaus and seamount chains increases seismic coupling. Based on precise bathymetry and seismicity data in the Middle America convergent margin off Costa Rica, however, it was proposed that subduction of rough seafloor could cause low interplate coupling along relatively small asperities compared with the regions of flat seafloor covered with sediments which could have large and strong contact zones. A similar interpretation was presented for the relation between seismicity along the Northeast Japan margin and relief of the subducting Pacific plate. Swath mapping of margins around Japan are in progress, which will enable us a closer examination of the relationship.

### 要 旨

沈み込むプレート上の海山等の高まりと上盤プレートとの間の相互作用, 及び, それの地震活動との関連に関する最近の研究をレビューした。海山の沈み込みにより, 陸側斜面には特徴的な構造ができる。沈み込む海山の前面には地形的高まりとバックスラストが形成される。海山の背後には, まず急崖を伴う凹地が残され, 海山の沈み込みが進むにつれ, 陸側に傾斜する正断層群が形成されるようになる。最近, 沈み込むプレート上の高まりが, 地震の asperity になる可能性が注目されている。チリ型沈み込み帯におけるスラスト型巨大地震が, 海底下深く沈み込んだ海山が上盤プレート底にぶつかって剪断されることにより起きるとするモデルや, 海台・海山列の沈み込みがサイスミック・カップリングを増加させているとするモデルが出されている。一方, 陸側斜面の精密地形データと地震活動データがそろっている中米海溝コス

タリカ沖では, 海山のような起伏の存在が比較的小規模な asperity を作り, 海山の存在しない平坦な領域が面的なカップリングを持つのに比べて, 全体としてのカップリングの強度を減少させていると推定されている。東北日本沈み込み帯においても, 沈み込む太平洋プレートの起伏と大地震の発生との関連について, 同様の考えが出されている。日本周辺では, 海溝から大陸棚にかけての陸側斜面の系統的な精密海底地形マッピングが進行しており, より精密な議論が可能になりつつある。

### 1. はじめに

海洋プレート上には多数の海山や海嶺が存在し, 例えば第一鹿島海山や小笠原海台の様に, 海溝に到達してまきに沈み込もうとしているものがあることから, 海溝陸側斜面下にはすでに沈み込んだ海山が存在するであろう

Keywords: Seamount subduction, asperity, earthquake, trench

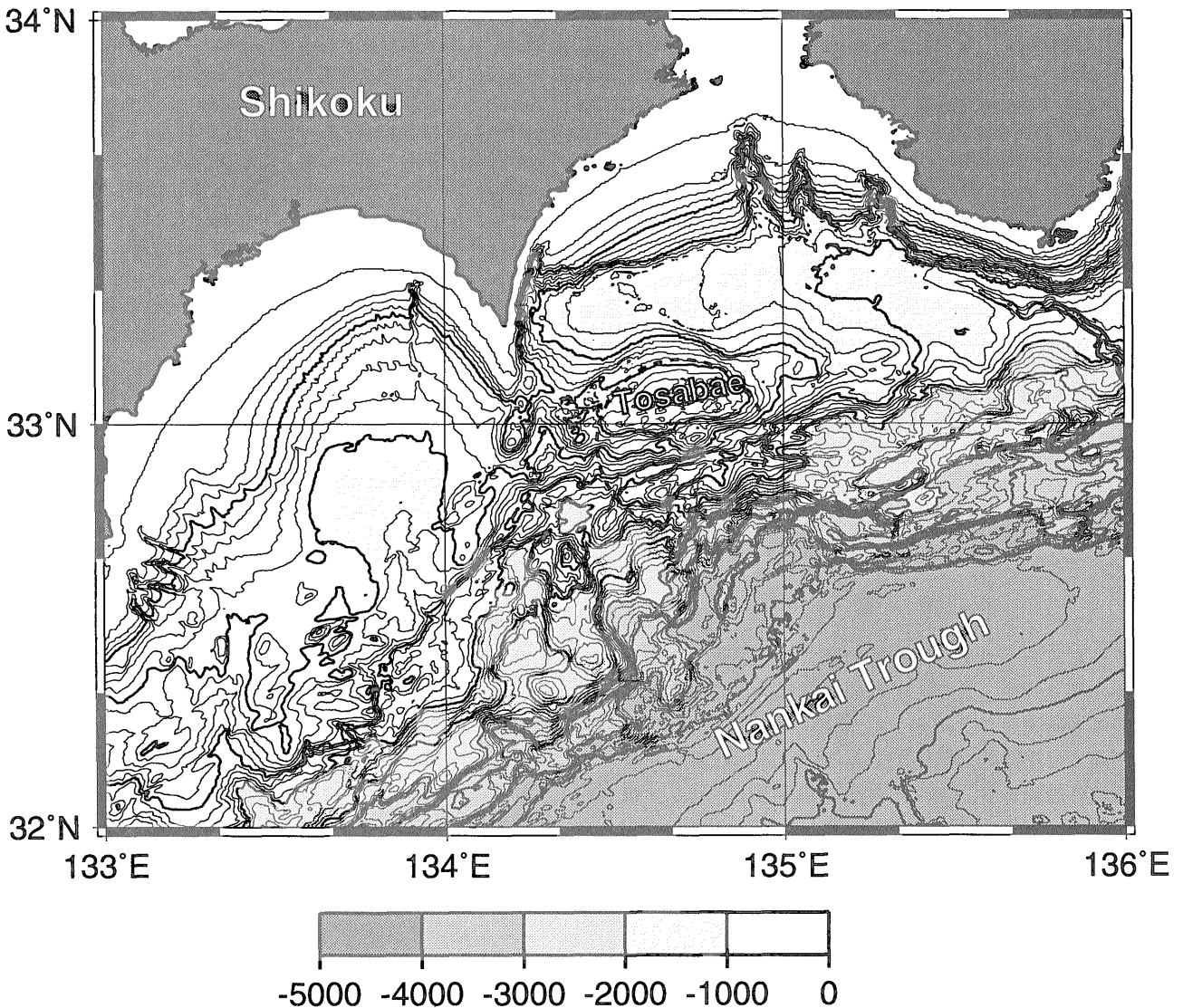
\*海洋地質部 (Marine Geology Department, GSJ)

ことは想像に難くない。このようなプレート上の地形的高まりが海溝から沈み込んでいく際の、上盤側プレートとの相互作用について、日仏 KAIKO 計画(e.g. Cadet *et al.*, 1987) を契機に1980年代中頃から盛んに研究されるようになった。これは、マルチナロービーム測深システムによる精密な海底地形が、海溝及び陸側斜面について得られるようになり、海山の沈み込みに伴う陸側斜面の変形の実態を観測できるようになったことが大きい。90年代に入ってから、沈み込んでいく海山の存在が、沈み込み帯における地震活動に影響しているのではないかと議論がなされるようになってきた。本小論は、工業技術院特別研究「海域活断層の評価手法の研究」の一

環として行った、海山等の起伏の沈み込みと上盤プレートとの相互作用に関する最近の研究のレビューである。

## 2. 海山の沈み込みによる海溝陸側斜面の変形構造

Yamazaki and Okamura (1989) は、襟裳岬沖の日本海溝・千島海溝接合部の陸側斜面下と、室戸岬沖南海トラフ陸側斜面下に沈み込んだ海山が存在することを指摘し(第1図)、海山の沈み込みに伴う陸側斜面の変形に関する次のようなモデルを提出した。海山が海溝に到達し、海山の前面の裾が海溝陸側斜面下に沈み込みを始めると、陸側斜面は上昇しはじめる。海山の頂部が沈み込ん



第1図 室戸岬沖南海トラフ陸側斜面の海底地形と、沈み込んだ海山の推定される位置(破線の円)(Yamazaki and Okamura, 1989)。海山の前面の高まり(土佐碧)が、後面に急崖と凹地が形成されている。等深線間隔は100 m。海底地形は、岸本(準備中)による250 mメッシュのグリッドデータを使用した。

Fig. 1 Bathymetry of the forearc along the Nankai Trough off Muroto Peninsula, and estimated position of a subducting seamount (broken circle) (Yamazaki and Okamura, 1989). A swell occurs landward of the subducting seamount (Tosabae), and a depression with a scarp seaward of it. Contours are at 100m intervals. Gridded bathymetric data of 250m mesh (Kisimoto, in preparation) were used.

でしまうと、海山の背後には急崖を伴う凹地が残される。これは海山が前面の地層を押し上げるためと、海山が完全に沈み込んでしまっただけでアクリーションが復活するまで海山背後には堆積物が供給されないからである。このようにして、沈み込む海山に対応して陸側斜面上には、「高まりと凹地の対」という特徴的な地形ができる(第1図)。

その後、各地の沈み込み帯で同様の発見が相次いだ。例えば、ニューヘブリデス海溝 (Collot and Fisher, 1989), 地中海 (von Huene *et al.*, 1997b), 中米海溝 (von Huene *et al.*, 1995), チリ海溝 (von Huene *et al.*, 1997a) などである。特に、中米海溝沈み込み帯コスタリカ沖のココス海嶺が沈み込んでいる付近では、陸側斜面全域のマルチナロービームによるマッピングが行われ、沈み込んでいる海山に起因する特徴的地形の詳細が明らかになっている。沈み込む海山は、その比高の約4倍の深さに達するまで、前弧に特徴的凹地を残す。ここではプレートの沈み込み角度が浅いため、海溝軸から約55 km 陸側まで海山沈み込みの明瞭な痕跡が残っている。一方、コスタリカ沖でも付近に海山がなく平らなプレートが沈み込んでいる陸側斜面は、海溝軸にほぼ平行な等深線からなる単純な地形をしている (von Huene *et al.*, 1995)。

上記の変動地形が海山の沈み込みによるものであることの重要な根拠の一つは、地磁気異常であった (Yamazaki and Okamura, 1989)。普通は顕著な地磁気異常の存在しない海溝陸側斜面下部にあって、ちょうど沈み込んだ海山の想定される位置に、海山程度のサイズ及び磁化強度で説明できる地磁気異常が観測された。これは海山がほぼ原形を保っていることを強く示唆した。Yamazaki and Okamura (1989) 以降、沈み込んだ海山の地磁気異常を解析した論文はあまりなかったが、最近、コスタリカ沖中米海溝の陸側斜面の地磁気異常の特徴を、沈み込んだ海山でうまく説明できることが、Barckhausen *et al.* (1998) により示された。この論文では、地磁気の日変化補正に工夫があり、より高分解能の地磁気異常が得られていること、及び、磁化のない付加堆積物とやや磁化のある前弧下の基盤とを区別してモデル化していることなどの進歩があるが、基本的な点は Yamazaki and Okamura (1989) と同じである。

南海トラフでは、大規模な高精度深部構造探査が最近行われ (Kodaira *et al.*, 1999), Yamazaki and Okamura (1989) の指摘した場所に、沈み込んだ海山と考えられる構造が実際にとらえられた。さらに、別の沈み込んだ海山も発見された (Park *et al.*, 1999)。

Dominguez *et al.* (1998) は、海山の沈み込みを模した砂箱実験を行い、コスタリカ沖中米海溝陸側斜面の実際の地形と比較した。その結果、海山の沈み込みによる陸側斜面の構造のより詳細が明らかになった。沈み込んでいく海山の前面には、海側に傾斜するバックスラスト

が形成され、海山の進行とともに新たに陸側に形成されていく。それとともに、沈み込んでいる海山の頂上付近から陸側のバックスラストへ発散していく横ずれ断層のネットワークが形成される(第2, 3図)。海山が完全に沈み込み、海山の海側で再び付加帯が形成されはじめ、沈み込む堆積物の底付けが行われるようになると、海山の海側には、陸側に傾斜する正断層群が形成される(第2図)。

陸側斜面の変形に関連して、さらに、海山の沈み込みは海溝における tectonic erosion の機構として重要であること (Ballance *et al.*, 1989; von Huene and Lallemand, 1990), 大規模なメランジェの形成機構として重要であること (Okamura, 1991) が指摘されている。

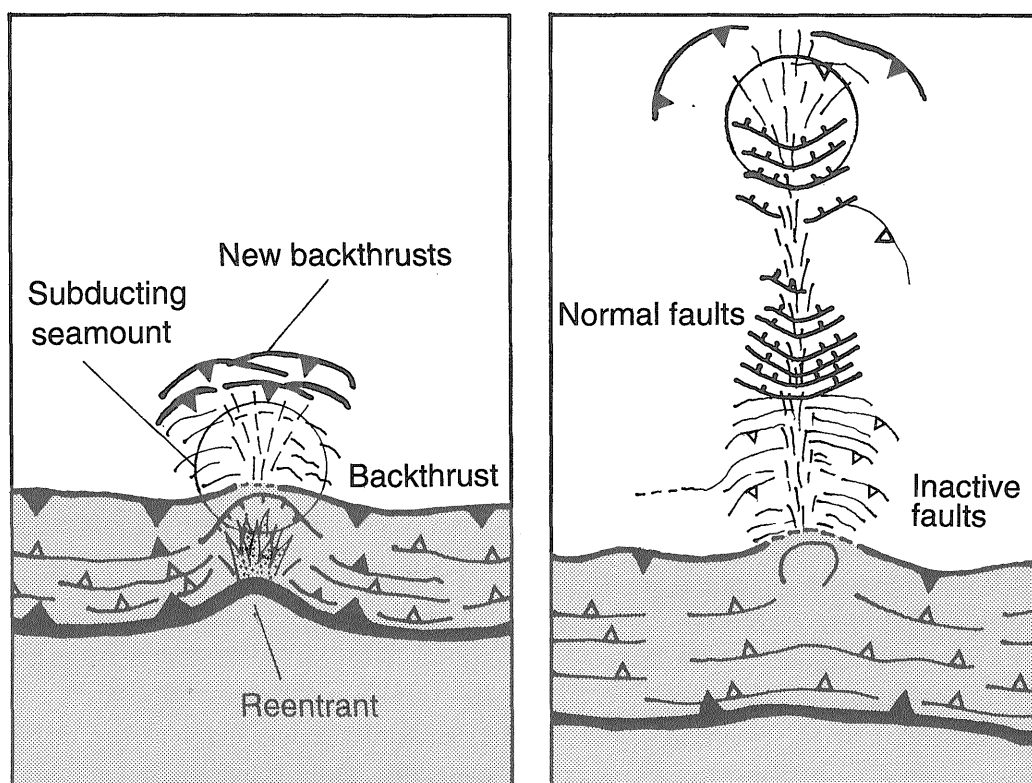
### 3. 沈み込む海山と大地震の発生

#### 3.1 モデル

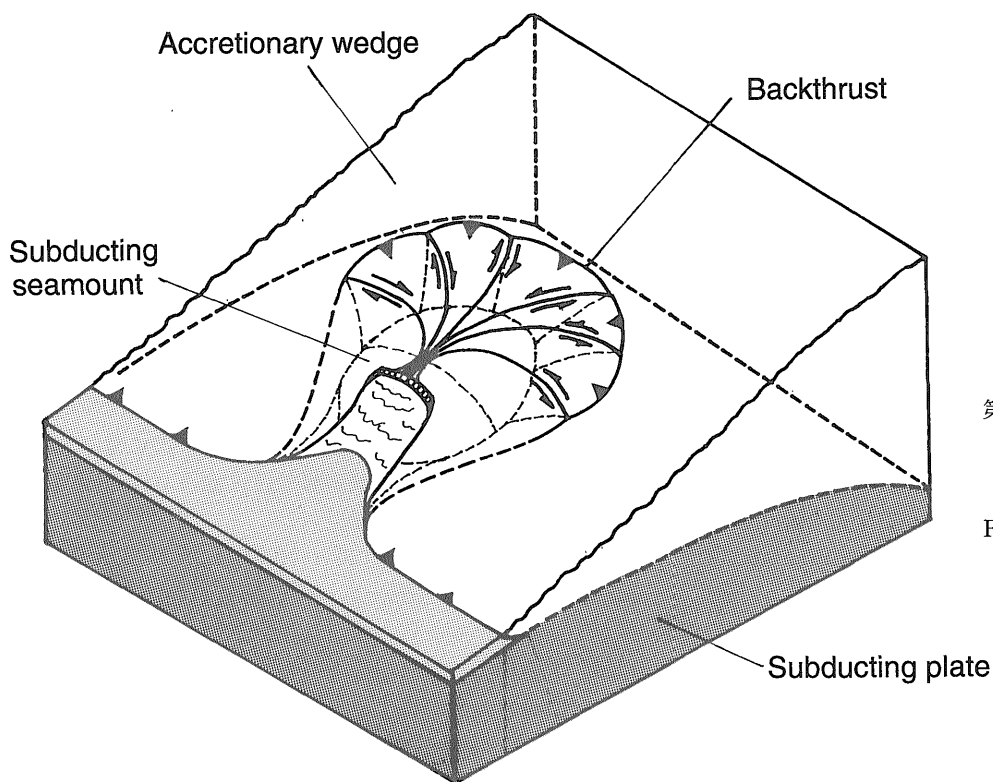
断層面上は強度的に不均質であり、強度の弱い部分は本震前に破壊し、やがて応力の高まりにより強度の強い部分 (asperity) が破壊して本震が生ずる、とする Asperity model の提唱 (Lay and Kanamor, 1981; Kanamori, 1981) 以降、海山の様な沈み込むプレート上の高まりが、沈み込み帯におけるスラスト型地震の asperity になる可能性について、議論されるようになった。菊池・須藤 (1984) による1982年茨城県沖地震についての議論はその先駆的なものであった。

Cloos (1992) は、陸側斜面下に沈み込んでいく海山が、上盤プレートの底 (剪断帯の頂部) にひっかかることにより asperity になり、海山の比高が大きいほど地震のマグニチュードが大きくなると提案した。このモデルは、海山の基底部のサイズが地震波形解析から求められる asperity のそれと同じくらいであること、及び、ほとんど同じ震源位置で大地震が繰り返されること、つまり asperity の場所が同じであることをうまく説明する。しかし、このモデルでは、沈み込み帯の二つのエンドメンバーとされるマリアナ型沈み込み帯、チリ型沈み込み帯 (Uyeda and Kanamori, 1979) の地震活動の違い、つまり、海底の起伏が堆積物で覆われることなく沈み込むマリアナ型海溝で大地震が起こらず、堆積物に覆われ平坦な海底が沈み込むチリ型海溝で巨大地震が起きることをうまく説明できなかった。

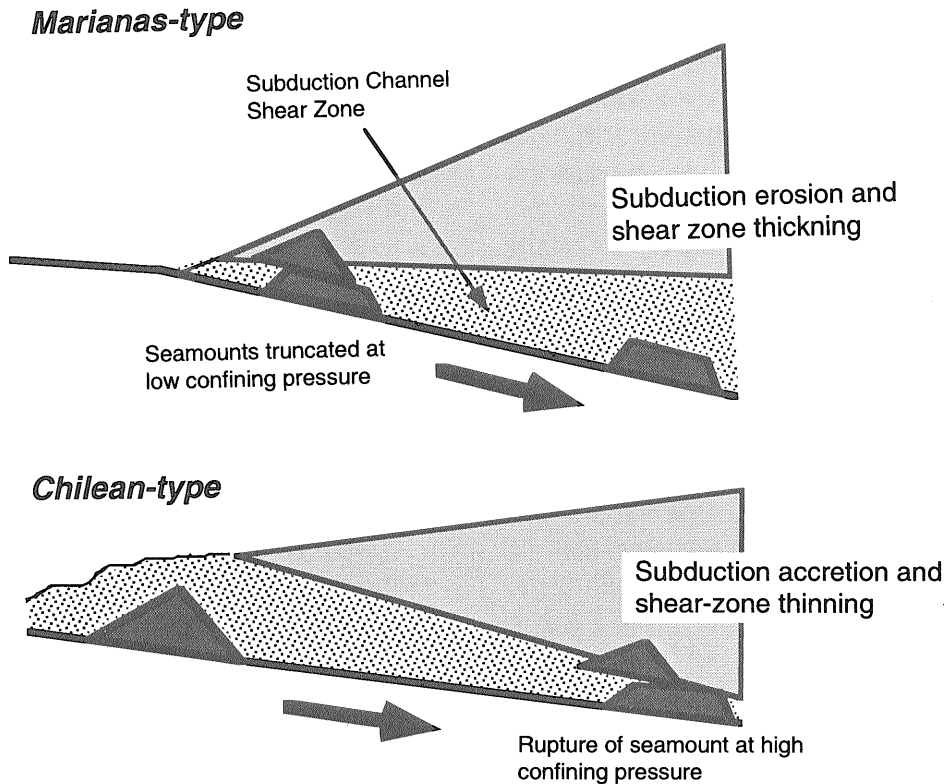
Cloos and Shreve (1996) は、Subduction-channel shear zone model (Shreve and Cloos, 1986) と組み合わせることで上記モデルを修正した(第4図)。このモデルによれば、地震の大きさは海山の高さで決まるのではなく、海溝に供給される堆積物の量に左右される。マリアナ型沈み込み帯では海溝に供給される堆積物が少なく、Subduction-channel の入り口は狭いが陸側へ厚くなる。海山は海溝に近い低い封圧の場所で剪断され、大地震は



第2図 砂箱を用いた実験に基づく、沈み込む海山による陸側斜面の変形構造 (Dominguez *et al.*, 1998).  
 Fig.2 Deformation structure of forearc wedge caused by seamount subduction based on sandbox experiments (Dominguez *et al.*, 1998).



第3図 沈み込む海山の前面に形成される断層の模式図 (Dominguez *et al.*, 1998).  
 Fig.3 Geometry of fault planes in the forearc landward of a subducting seamount (Dominguez *et al.*, 1998).



第4図 海山の沈み込みにより、マリアナ型沈み込み帯とチリ型沈み込み帯における地震活動の違いを説明するモデル (Cloose and Shreve, 1996).

Fig. 4 A model of earthquake generation by seamount subduction, and differences between Chilean- and Marianas-type margins (Cloose and Shreve, 1996).

発生しない。一方、チリ型沈み込み帯では大量の堆積物が海溝に供給され、subduction-channelは海溝では広く陸側へ薄くなる。海山は初めは堆積物に埋もれて剪断されずに沈み込んでいくが、しだいに堆積層のアンダープレートリングが進み、地下40kmに達するあたりで海山が上盤プレート底にぶつかり、高封圧のもとで剪断されスラスト型巨大地震を生む。これはなかなか魅力的なモデルであるが、まだ実際の観測に裏付けられていない。チリ型沈み込み帯で深く沈み込んだ海山をとらえるのは容易ではないと考えられるが、マリアナ型沈み込み帯において海溝から深く沈み込む前に海山が破壊されているかどうかは、陸側斜面の地形・地磁気観測、深部構造探査、地震観測を総合的に行なうことにより判定可能であろう。

一方、Scholz and Small (1997) は、Cloos (1992)、Cloos and Shreve (1996) を批判した。マリアナ型沈み込み帯である伊豆-小笠原弧とマリアナ弧の接合部に沈み込んでいる小笠原海台とその東方に連なる海山群、さらに、やはりマリアナ型沈み込み帯であるトンガ・ケルマディク弧に沈み込んでいるルイスビル海山列を例に、海山列が沈み込んでいる所ではサイズミック・カップリングが大きくなり、中小規模の地震の数が非常に少なくなっている一方で、再来周期の長い巨大地震が起き得る

が観測期間がそれより短いため今まで観測にかかっていないとした。しかし、マリアナ海溝海側の太平洋プレート上には多数の海山が海溝に接近していることから、マリアナ海溝に沈み込んでいるのは小笠原海台だけでなく、陸側斜面下には沈み込んだ海山が多数あるものと考えられる。それでも、中小規模の地震の数が明らかに少なくなっているのは、マリアナ海溝では全般に地震活動度が低いのははっきりしないものの小笠原海台付近だけのようなのである。また、チリ海溝にファン・フェスナンデス (Juan Fernandez) 海嶺が沈み込んでいる場所では逆に、海嶺を陸側に延長した線上にプレート上面の地震が集中する傾向があることが指摘されている (von Huene *et al.*, 1997a)。プレートの剛性によりその荷重が支えられている通常のサイズの海山 (例えばルイスビル海山列) と、巨大な海台 (例えば小笠原海台) のようにアイソスタティックにより近い (いわゆる根を持っている) 高まりとは、サイズミック・カップリングに与える影響が異なるであろうから、別々に議論する必要がある。

### 3.2 中米海溝コスタリカ沖

中米海溝コスタリカ沖では、海山の沈み込みによる陸側斜面の変形構造の詳細と地震活動のデータがそろっており、これらの関連についての議論の材料がそろってい

る。

ココス海嶺が沈みこんでいる付近から北東側へニコヤ岬沖付近まで、沈み込むココス・プレートは起伏が大きく、多数の海山が存在している、陸側斜面には海山の沈み込みに伴う変動地形が見られる。一方、その北西ではほとんど海山のない平らなプレートが沈み込んでいて、陸側斜面の構造は単純である。起伏の多いプレートが沈み込んでいる領域では、1990年のMw=7.0の地震をはじめとして、ほぼ同じ場所で約50年の再来周期でM7クラスの地震が発生していて、これをProtti *et al.* (1995)は沈み込んだ海山がasperityになっていると解釈した。この領域では、地震の最大規模はM7.0程度である。一方、海山の少ない平らなプレートが沈み込んでいる領域では、より大きな、M7.5以上の大地震が起きている(Protti *et al.*, 1994)。海山のような起伏の存在が、比較的小規模なasperityを作ることになり、全体としてのカップリングの強度を減少させていると考えられる(Protti *et al.*, 1995)。

Fisher *et al.* (1998)は、沈み込むココスプレート上の海山等の起伏が前弧のキネマティクスと密接に結びついていることを示した。ココス海嶺をはじめとする起伏は、海溝にほぼ直角に沈み込んでいる。前弧は海溝に対して直交に近い方向の断層によりブロック化しており、ブロックの隆起のパターンはプレートの起伏とよい相関を持つことが示された。地震時に断層運動はブロックの境界を越えて伝播しないようであり、ブロック、すなわち沈み込むプレートの起伏は地震の規模をコントロールしているようである。

### 3.3 日本海溝および南海トラフ

地震観測網が整備されている東北日本沈み込み帯において、地震活動と沈み込むプレートの起伏について議論されている。

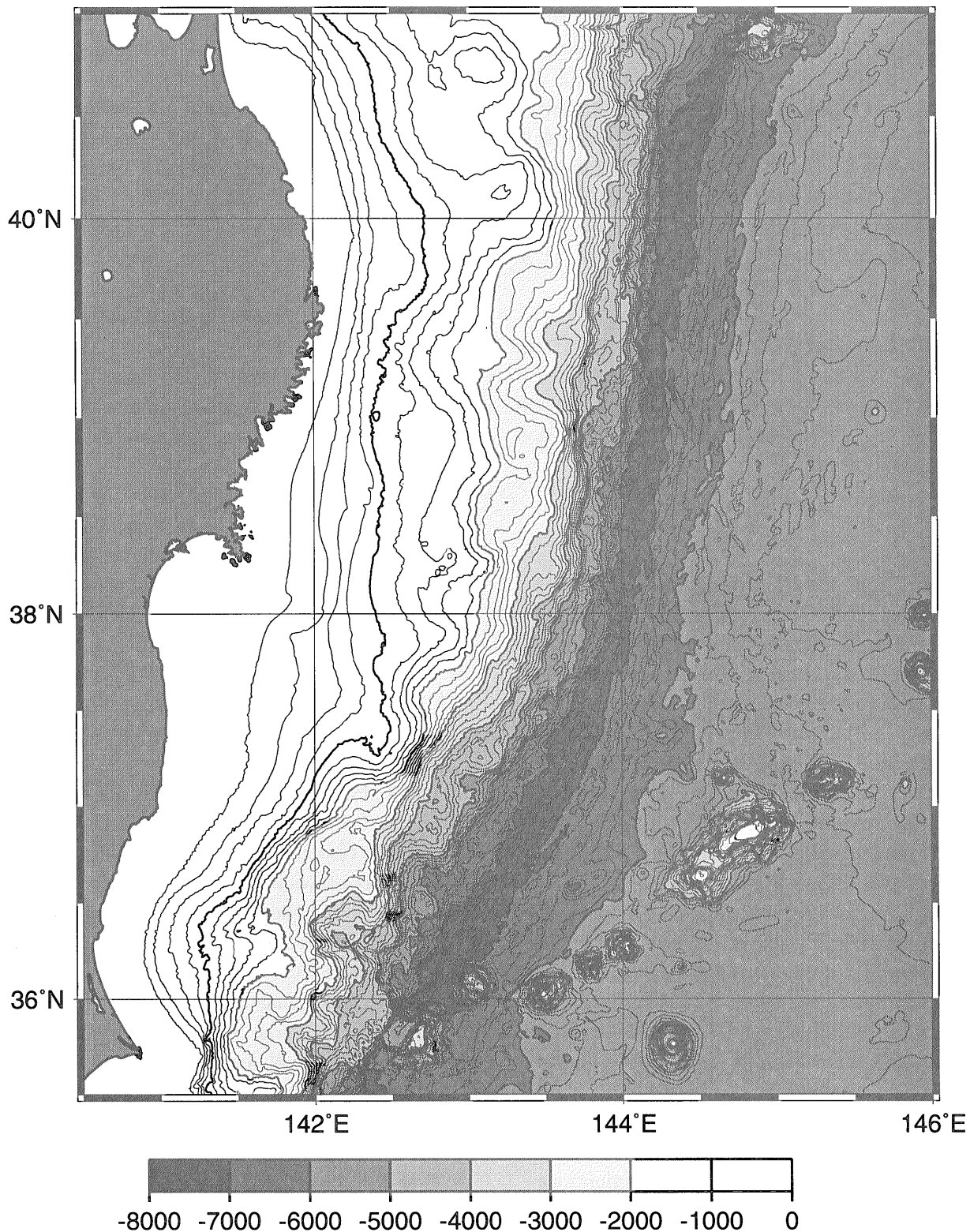
Tanioka *et al.* (1997)は、北緯38度以北の地震活動と太平洋プレートの地形との相関を議論した。北緯40度以北と39度以南では、典型的なスラスト型プレート境界地震が発生している。その間の、北緯39~40度では大きなアンダースラスト地震が起きていないかわりに、日本海溝付近の“aseismic” zoneで津波地震が発生する。さらに海溝海側の周縁隆起帯で巨大な正断層地震が発生している。沈み込む太平洋プレートの海底地形は、北緯39~40度でホルスト/グラベンが発達し起伏が激しいのに対し、その南側および北側では比較的平らになっている。この関係は、起伏の激しい領域では凸の部分の小規模な強いコンタクトを作るが、全体としてのサイズミックカップリングは、平坦な領域が面的なカップリングを持つのに比べて小さいためであると説明された。これはProttiらによる中米海溝コスタリカ沖の事例と同様の考え方である。

西澤(1999)は、東北日本沈み込み帯のより広域の地震活動と海底地形を議論した。特に、北緯38.5度以北の三陸沖ではM8クラスの巨大地震が起きているのに対し、北緯38.5度以南の福島県沖~茨城県沖ではM8級の歴史地震はないことを、以下のように海底地形のコントラストと関連づけた。沈み込む太平洋プレート上のホルスト/グラベン構造が、北では海溝軸に平行なのに対し、南ではジグザグである。そのため、南では地震断層の海溝軸に平行な方向の成分が北より短くなり、大きな地震を起こしにくくしている可能性がある。また、南部では海溝周縁隆起帯に小規模な(比高300m, 水平スケール5 km程度)の凹凸があるが、北部ではそのような微地形は存在しないようであり、このような小規模山体の存在が破壊のバリアーになっている可能性がある。

しかし、日本海溝に沈み込む太平洋プレートをもっと巨視的に見た場合、最も目に付くのは、南部に海山が多数存在しているのに対し、北部は少ないことである(Yamazaki and Okamura, 1989) (第5図)。従って、南部の陸側斜面下には沈み込んだ海山が存在すると考えるのが自然である。陸側斜面の地形は、北部では等深線が海溝軸に平行に近く単純であるのに対し、南部では出入りが激しく複雑であり、海山の沈み込みによる変形を思わせる。菊池・須藤(1984)は、1982年茨城県沖地震に対して、沈み込んだ海山がasperityとなっていることを提案している。中米海溝コスタリカ沖と同様に、沈み込んだ海山の存在が、全体としてのサイズミックカップリングを小さくする働きをしている可能性がある。

日本海溝陸側斜面の精密地形マッピングは、日仏KAIKO計画等で海溝軸に近い部分が行なわれた後、しばらく調査が進まなかったが、最近、海上保安庁水路部によるSeaBeam 2000を用いた系統的なマッピングが行なわれている(西澤, 1999)。今後、南部の複雑な地形について、先に紹介したような海山の沈み込みに伴う特徴的変形構造を検討することにより、具体的に沈み込んだ海山を指摘できる可能性がある。海山が沈み込んでいくに従い、前面のバックスラスト帯、背面の正断層帯も前進する。これらは大陸斜面上の活断層として重要と考えられる。沈み込んでいる海山が大型の場合、これらの断層の長さが数10kmに達する可能性もあることから、地震が発生すれば相当規模の津波を引き起こし得ると推定される。

南海トラフから琉球海溝にかけては、先に紹介した室戸岬沖の土佐簀付近に沈み込んでいる海山の他、九州パラオ海嶺、奄美海台などが沈み込んでいると考えられる。土佐簀付近に沈み込んだ海山は、四国海盆中央部を北北西-南南東に走る紀南海山列の北方延長上にある。Okino and Kato (1995)は、マルチナロービーム測深による南海トラフの精密な地形図をもとに、フィリピン海プレートの起伏に起因するさまざまなスケールの変形構



第5図 東北日本沈み込み帯の海底地形。等深線間隔は200m、北緯38度以南では、日本海溝近くの太平洋プレート上には多くの海山が存在し、陸側斜面が複雑な地形をしていることに注意。海底地形は、岸本(準備中)による250mメッシュのグリッドデータを使用した。

Fig. 5 Bathymetry of the Northeast Japan subduction zone. Contours are at 200m intervals. Note that many seamounts occur on the Pacific plate near the Japan Trench north of 38°N, and that the corresponding forearc wedge shows rough topography. Gridded bathymetric data of 250m mesh (Kisimoto, in preparation) were used.

造を記述している。また, Honkura *et al.* (1999) は, 駿河湾の地磁気異常から, 石花海は銭洲のような海山列が沈み込んでできたと推定しており, 地震活動との関連が注目される。南海トラフ域から琉球海溝におけるフィリピン海プレートの沈み込みによる通常の地震活動は, 太平洋プレートによる日本海溝域に比べて一般に低い, 前述の沈み込む高まりの延長上には地震活動の高い部分があるようにも見える(西澤, 1999の Fig. 1)。すなわち, 先に紹介した, チリ海溝に沈み込むファン・フェルナンデス海嶺の事例と同様である可能性がある。しかし, 巨大地震との関係は不明である。

**謝辞** 地質調査所地震地質部の佐竹健治主任研究官には原稿を査読していただき, 貴重なコメントをいただきました。地質調査所海洋地質部の岸本清行室長には海底地形のグリッドデータを提供していただきました。これらの方々に感謝します。

## 文 献

- Ballance, P.F., Scholl, D.W., Vallier, T.L. and Herzer, R.H. (1989) Subduction of a late Cretaceous seamount of the Louisville Ridge at the Tonga Trench: a model of normal and accelerated tectonic erosion. *Tectonics*, 8, 853-962.
- Barckhausen, U., Roeser, H.A. and von Huene, R. (1998) Magnetic signature of upper plate structures and subducting seamount at the convergent margin off Costa Rica. *J. Geophys. Res.*, 103, 7079-7093.
- Cadet, J.-P., Kobayashi, K., Auboin, J., Boulegue, J., Deplus, C., Dubois, J., von Huene, R., Jolivet, L., Kanazawa, T., Kasahara, J., Koizumi, K., Lallemand, S., Nakamura, Y., Pautot, G., Suyehiro, K., Tani, S., Tokuyama, H. and Yamazaki, T. (1987) The Japan Trench and its juncture with the Kuril Trench: cruise results of the Kaiko project, Leg 3. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 83, 267-284.
- Cloos, M. (1992) Thrust-type subduction-zone earthquake and seamount asperities: A physical model for seismic rupture. *Geology*, 20, 601-604.
- Cloos, M. and Shreve, R.L. (1996) Shear-zone thickness and the seismicity of Chilean- and Marianas-type subduction zones. *Geology*, 24, 107-110.
- Collot, J.-Y. and Fisher, M.A. (1989) Formation of forearc basins by collision between seamount and accretionary wedges: An example from the New Hebrides subduction zone. *Geology*, 17, 930-933.
- Dominguez, S., Lallemand, S.E., Malavieille, J. and von Huene, R. (1998) Upper plate deformation associated with seamount subduction. *Tectonophysics*, 293, 207-224.
- Fisher, D.M., Gardner, T.W., Marshall, J.S., Sak, P.B. and Protti, M. (1998) Effect of subducting sea-floor roughness on fore-arc kinematics, Pacific coast, Costa Rica. *Geology*, 26, 467-470.
- Honkura, Y., Nagaya, Y. and Kuroki, H. (1999) Effects of seamounts on an interplate earthquake at the Suruga trough, Japan. *Earth Planets Space*, 51, 449-454.
- Kanamori, H. (1981) The nature of seismicity patterns before large earthquakes. In Simpson, D.W. and Richards, P.G. ed., *Earthquake Prediction: An International Review* (Maurice Ewing Series 4), American Geophysical Union, Washington D.C., 1-19.
- 菊池正幸・須藤 研 (1984) 1982年7月23日茨城県沖地震の震源過程—海山沈没と Asperity—。月刊地球, 7, 72-78.
- Kodaira, S., Takahashi, N., Miura, S., Nakanishi, A., Park, J.-O., Tsuru, T., Mikada, H., Obana, K. and Kaneda, Y. (1999) A challenge to high resolution deep seismic imaging- 1999 on shore-off shore integrated active seismic survey in the Nankai Trough seismogenic zone, SW Japan-. *EOS Trans.*, 80, Fall Meet. Suppl., F570.
- Lay, T. and Kanamori, H. (1981) An asperity model of large earthquake sequences. In Simpson, D.W. and Richards, P.G. ed., *Earthquake Prediction: An International Review* (Maurice Ewing Series 4), American Geophysical Union, Washington D.C., 579-603.
- 西澤あずさ (1999) マルチビーム音響測深器 SeaBeam 2000でみる海底地形(2)プレート境界域の精密海底地形と浅発地震の震央分布。水路部研究報告, 35, 109-124.
- Okamura, Y. (1991) Large-scale melange formation due to seamount subduction: an example from the Mesozoic accretionary complex in Central Japan. *J. Geology*, 99, 661-674.
- Okino, K. and Kato, Y. (1995) Geomorphological



- study on a clastic accretionary prism: The Nankai Trough. *The Island Arc*, **4**, 182-198.
- Park, J.-O., Tsuru, T., Kaneda, Y., Kono, Y., Kodaira, S., Takahashi, N. and Kinoshita, H. (1999) A subducting seamount beneath the Nankai accretionary prism off Shikoku, southwestern Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 931-934.
- Protti, M., McNally, K. and Guendel, F. (1994) Correlation between the age of the subducting Cocos Plate and the geometry of the Wadati-Benioff zone under Nicaragua and Costa Rica. *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper*, no. 295, 309-326.
- Protti, M., McNally, K., Pacheco, J., Gonzalez, V., Montero, C., Segura, J., Brenes, J., Barboza, V., Malavassi, E., Guendel, F., Simila, G., Rojas, D., Velasco, A., Mata, A. and Schillinger, W. (1995) The March 25, 1990 (Mw=7.0, ML=6.8), earthquake at the entrance of the Nicoya Gulf, Costa Rica: Its prior activity, foreshocks, aftershocks, and triggered seismicity. *J. Geophys. Res.*, **100**, 20345-20358.
- Scholz, C.H. and Small, C. (1997) The effect of seamount subduction on seismic coupling. *Geology*, **25**, 487-490.
- Shreve, R.L. and Cloos, M. (1986) Dynamics of sediment subduction, melange formation, and prism accretion. *J. Geophys. Res.*, **91**, 10229-10245.
- Tanioka, Y., Ruff, L. and Satake, K. (1997) What controls the lateral variation of large earthquake occurrence along the Japan Trench? *The Island Arc*, **6**, 261-266.
- Uyeda, S. and Kanamori, H. (1979) Back-arc opening and the mode of subduction. *J. Geophys. Res.*, **84**, 1049-1061.
- von Huene, R. and Lallemand, S. (1990) Tectonic erosion along the Japan and Peru convergent margins. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **102**, 704-720.
- von Huene, R., Bialas, J., Flueh, E., Cropp, B., Csernok, T., Fabel, E., Hoffmann, J., Emeis, K., Holler, P., Jeschke, G., Leandro, M. C., Perez Fernandez, I., Chavarria, S.J., Florez, H.A., Escobedo, Z.D., Leon, R. and Barrios, L. O. (1995) Morphotectonics of the Pacific convergent margin of Costa Rica. *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper*, no. 295, 291-397.
- von Huene, R., Corvalan, J., Flueh, E.R., Hinz, K., Korstgard, J., Ranero, C.R., Weinrebe, W. and the CONDOR Scientists (1997a) Tectonic control of the subducting Juan Fernandez Ridge on the Andean margin near Valparaiso, Chile. *Tectonics*, **16**, 474-488.
- von Huene, R., Reston, T., Kukowski, N., Dehghani, G.A., Weinrebe, W. and IMERSE Working Group (1997b) A subducting seamount beneath the Mediterranean Ridge. *Tectonophysics*, **271**, 249-261.
- Yamazaki, T. and Okamura, Y. (1989) Subducting seamounts and deformation of overriding forearc wedges around Japan. *Tectonophysics*, **160**, 207-229.

(受付: 1999年5月14日; 受理: 2000年1月19日)