沈み込み帯でのプレート間大地震発生前における「地震活動のドーナツパターン」形成の背景に関する一考察

著者	江口 孝雄
雑誌名	防災科学技術研究所　研究報告
巻	58
ページ	47-52
発行年	1998-03
URL	http://doi.org/10.24732/nied.00001087

防災科学技術研究所研究報告　第58号　1998年3月

沈み込み帯でのプレート間大地震発生前における「地震活動のドーナツパターン」形成の背景に関する一考察

江口孝雄*

A Study on the Background of the Formation of "Doughnut Pattern in Seismicity" Prior to a Large Interplate Earthquake at Subduction Zones

By

Takao EGUCHI

Solid Earth Science Division,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

Abstract

During the cycle of major interplate earthquakes at subduction zones, the stress state on the plate interface between the overriding and downgoing lithospheres varies with time. Based upon recent studies of interplate mechanical coupling at subduction zones etc., we discussed the dynamic background of the so-called "doughnut pattern in seismicity" which is sometimes apparent (just) prior to major interplate seismic slip. We assume that the tightly coupled plate interface and the neighboring zone have inhomogenuous structures, even on a smaller scale. By utilizing a 2-D plate interface model with a large asperity, for temporal change of the location of "DMIC (the depth of the maximum interplate coupling)" on the plate-interface, we inferred the following characteristics associated with the seismic doughnut pattern.

The depth of the upward penetrating in-plane crack front is always (just) below DMIC on the interface. During quiescent stage, DMIC is deeper, although slightly shallower beneath the asperity zone, because the shear strength is higher there. Minor events occur to form the seismic doughnut pattern during this stage. Prior to the instantaneous rupture of the asperity, DMIC rises up the interface with the exception of the zone beneath the asperity. During this stage, the asperity tends to suppress the upward movement of the crack front just beneath the asperity, forming a concaved dish-like shape of DMIC on the interface. The rising velocity of the crack front might be accelerated just prior to major seismic slip. Such time-dependent dynamic movements of the crack front give rise to the occurrence of seismic events with smaller-magnitudes at areas surrounding the tightly coupled plate interface whereas few events on the asperity, forming a seismic "doughnut" pattern. During the instantaneous rupture process of the large asperity, DMIC beneath the asperity is pushed up.

Thus, temporal changes in the depth-variable interplate coupling at subduction zones would provide the dynamic origin of the seismic doughnut pattern.

Key words : Major interplate earthquakes at subduction zones, Plate interface, Doughnut pattern in seismicity, Depth of the maximum interplate coupling

1．はじめに

海溝沿いでの大地震発生後から振り返ってみると，大地震直前の地震活動は来るべき大地震の「震源域」を取り囲むように震源域の周辺部に遍在し，見かけ上震源域を取り囲む「ドーナツパターン」を形成する場合があるとの指摘がなされている（例えば，Mogi，1969，1979）．このようなドーナツパターンは，Mogi（1979）に従えば

*防災科学技術研究所　地圏地球科学技術研究部

「第2種の空白域（または静穏域）」に対応する．大地震発生直前には，来るべき大地震の震源域での地震活動度は低いことが多い．本論では，沈み込み帯のプレート境界面に存在していた一個の大きな「アスペリティ」で大地震が起こる場合を想定し，「地震活動のドーナツパターン」がどの様にして出現できるのかについて，岩石摩擦実験により得られた構成方程式を前提して行われた数値計算（例えば，Tse and Rice, 1986；Gao *et al.*, 1991）等を参考にして定性的に考察する．

2．沈み込み帯におけるプレート境界面のモデル

一個の大きなアスペリティ存在域として，沈み込み帯でのプレート間大地震の震源域を念頭に置く．ここでは，簡単のため，斜め沈み込みでない「直交沈み込み」型海溝域を想定する．また，陸側と海側のプレート間境界面での相互作用はプレート間大地震を繰り返し引き起こすと仮定する．

プレート間地震のモデル化については，まずGao *et al.*（1991）による「面内（*In-Plane*）クラックの破壊域の進展に関する数値計算」（図1参照）を参考にして，アスペリティに相当する「周囲に比べて相対的に強度の高い有限領域」がクラック進展に対して抵抗する状態からその後の屈服（破壊）に至る経緯に注目する．図1中でアスペリティに対応する領域は丸い影を付けた部分であり，周囲に比べて2倍の「破壊じん性」（K_c）を持つと設定している．図1では，3列のアスペリティを仮定してるが，本論の目的からすると，簡単のため一個の大きなアスペリティのみを有するプレート境界面を設定した場合を想定しよう．一個の大きなアスペリティのみの問題の結果は図1の場合と本質的には変わらない．特に，アスペリティ周囲でのクラック進展状況に注目する必要がある．

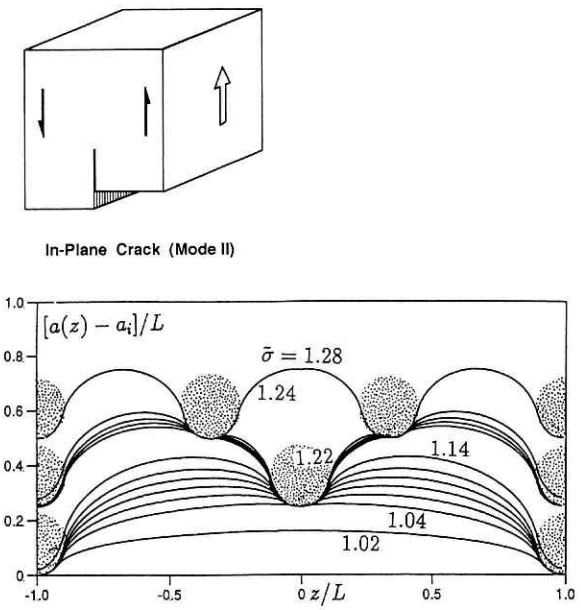


図1　Gao *et al.*（1991）による「面内（In-Plane）クラックの破壊域の進展に関する数値計算」の結果の一例．（周囲に比べて相対的に強度の高い有限領域に相当する）アスペリティは，影を付けた丸い部分であり，周囲に比べて2倍の「破壊じん性」（K_c）を持つと設定している．等値線は，有効応力負荷を1.0から1.3まで0.02毎に増加した状態でのクラックの「破壊前線」に対応する．

Fig. 1　A result of numerical simulation of upward in-plane crack front penetrating from the bottom line on a to-be-ruptured plane with three rows of circular asperity (modified from Gao, Rice and Lee, 1991). All asperities have the strength (K_c) twice as large as of elsewhere of the plane. Contour lines indicate the crack front, due to (effective) stress load increase from 1.0 to 1.3 at 0.02 step.

より現実的な議論とするため，沈み込み帯で逆断層型大地震を引き起こす単純なプレート境界面を想定し，この境界面での時空間的な「プレート間相互作用」の変化，即ち境界面におけるプレート間相互作用の分布関数の様子とその時間変化を考察しよう（例えば，江口，1989，1992；*Tichelaar and Ruff*，1991）．なお，本論での「プレート間相互作用」とは，プレート境界面（およびその近傍の海・陸プレート内部）でのせん断歪蓄積を生み出す摩擦力に対応するものと考える．まず，「境界面でのプレート間相互作用は，浅部から次第に増加し，ある深さ（*the Depth of the Maximum Interplate Coupling*，以下 *DMIC*）で最大となり，境界面の最深部付近と最浅部付近での相互作用は無限小である」と考える（江口，1992）．プレート境界面にアスペリティが存在すると，プレート境界面のせん断強度の深さ方向分布は海溝軸方向でみても一様ではないので，深さ方向のみならず水平方向をも考慮する必要がある．

3．プレート境界面での地震活動のドーナツパターン形成のモデル

図1のような数値計算結果を参考にして，一個のアスペリティが存在するプレート境界面でのDMICの時間変化と大地震発生に関する定性的な2次元モデルを図2に示す．プレート境界面上の最深部側から境界面を上昇してくるクラックフロントは，常にDMICより深い．換言すると，アスペリティ破壊直前におけるプレート境界面上でのクラックフロントの上昇はDMICの位置を押し上げると考えられる．DMICなる深度は，一サイクル前のアスペリティ破壊（大地震）以後，プレート間相対運動の継続によるアスペリティとその周辺でのプレート間相互作用の蓄積（つまり，せん断歪の蓄積）により，次第に鮮明になってくるであろう（江口，1989，1992）．そしてアスペリティ破壊が近づくと，DMICは時間と共に幾分深度が上昇する．ただし，境界面でのDMICの上昇は，アスペリティ下部側では抑制されるが，アスペリティ側方域ではアスペリティの浅部の深さまで継続することも場合によっては可能となろう．その後のプレート間相対運動により，遂にはアスペリティ自身が破壊する．

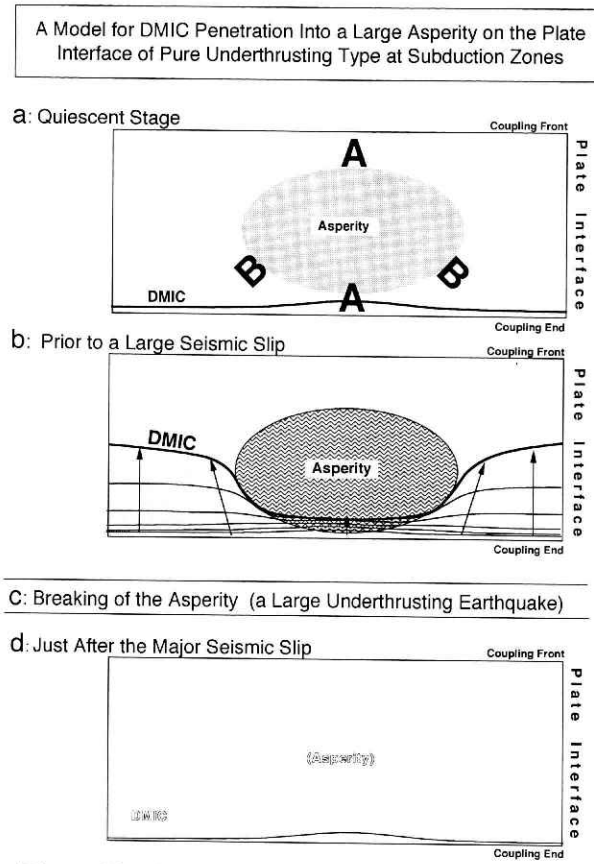


図2　斜め沈み込みでないプレート境界域でのプレート境界面上における「プレート間相互作用が最大となる深度」(DMIC)の位置の時間変化の2次元モデル．境界面には，大地震の際にのみ破壊する大きなアスペリティを仮定する．ここで，プレート間相互作用とは，プレート間相対運動と共にプレート境界面付近で広域的に増加するせん断歪蓄積を生み出す摩擦力に対応する．面内クラックの破壊前線は，常にDMICの直下であることに注目．大地震サイクルの「静穏期」には深い．なお，この時期はアスペリティでの相互作用が強いため，，アスペリティ下方のDMICは若干浅くなる．大地震発生直前の時期では，アスペリティ下方を除いてDMICが上昇する．この時期は，アスペリティはDMICの上昇を妨げる働きをする．そのため，DMICは凹地状となる．アスペリティの周囲のAとBで示したゾーンでは，それぞれII型とIII型のクラック破壊進展モードとなる．アスペリティが瞬時に破壊する大地震の際には，アスペリティ下のDMICが上昇してその後不鮮明となる．図中の「カップリング前線」は，海陸プレートの力学的（または動力学的）相互作用が開始する場所（海溝付近）である．また，「カップリング終端」場所は，プレート境界面の最深部に相当する．

Fig. 2　A shematic 2-D model for temporal change of the location of "DMIC (the depth ofthe maximum interplate coupling)" on the plate interface at subduction zones with pure underthrusting. We assume that a large asperity exists at the plate interface which ruptures only when during a large interplate seismic event. In this paper, "the interplate coupling" corresponds to the shear resistance force, acting on the plate interface, against the regional stress load due to the continuing relative plate convergence. Here, it should be noted that the depth of the upward penetrating in-plane crack front is always (just) below DMIC. During the quiescent stage of the large interplate earthauake cycle, DMIC is deeper, but slightly shallower beneath the asperity zone, because the shear strength is higher there. Just prior to a large seismic slip, DMIC tends to rise except the zone beneath the asperity. During this stage, the asperity forces to suppress the rising of crack front beneath the asperity, forming a concave-like shape of DMIC. At zones shown by "A" and "B" surrounding the large asperity, the fronts of the cracks of mode II and III types are extending, respectively. During a large seismic slip that is the instantaneous rupture stage of the asperity, DMIC beneath the asperity would rapidly ascend to some extent and finally become obscure itself. "Coupling front" is the starting site of mechanical (or dynamic) interaction between the oceanic and continental plates on the plate interface near the trench axis. "Coupling end" is the deepest portion of the plate interface.

そしてアスペリティ破壊直後は，プレート境界面の両側でのせん断歪の量が小さくなるため，DMICは不鮮明となろう．これが単純な2次元モデルでの大地震の一サイクルであると考える(図2参照)．なお，本論ではプレート境界面の形状や境界面近傍の弾性論的な構造はmオーダーでも一様ではないと仮定する．即ち，プレート境界面とその近傍はmオーダーでも「不均質」であると考える．

ここで，上述した大地震の一サイクルの中で，アスペリティ破壊が近づく時期に注目する．この時期は，アスペリティ周囲のうち最深部(図2a中，深部側のA)と側領域の帯状領域（図2a中，B）でのせん断主応力の勾配は大きい状態で推移し，ゆっくりとしたクラックの進展を伴いつつDMICは上方へ移動する．この時期のクラックの進展，即ちプレート境界面上での「前駆的すべり」は，中・小・微小規模の地震すべりとなることも十分有り得よう．均質でないと仮定したプレート境界面とその近傍における変形に伴うこのような前駆的すべりは，「破壊強度より低い応力下でも，不均質な岩石試料に加わる歪変化の速度が大きい場合は，岩石試料の破壊前のAE発生率が高くなる」という，AE実験で知られている現象（例えば，Sano *et al.*, 1981）から類推したことである．

なお，混乱を避けるため図2中には示していないが，プレート境界面浅部側からもプレート間相対運動の進行

によりプレート境界面に沿った面内クラックが少しずつ深部方向へ成長するであろうが，プレート境界面でのせん断強度は海溝付近からDMICに至るまでほぼ単調増大するため，加えてアスペリティが存在するため，その進展は抑制される傾向にあると考えられる．しかし，浅部側からの面内クラックの進展は無視できない場合があろう．

大地震発生直前での静かなアスペリティの周囲における中・小・微小規模地震の活動は，アスペリティの（浅部・）深部側（図2a中，深部側のA域）と側方側（図2a中，B域）の「一部分」を構成するであろう．これにより，「地震活動のドーナツパターン」が出現する．クラックの型としては，A域およびB域は各々Mode II, Mode IIIに相当するといえよう．なお，プレート境界面上でのクラック進展に伴ってA・B域の何れでもプレート境界面上の地震が起きるから，図2のモデルの場合ではこれらの地震の際のスリップ・ベクトルは境界面最大傾斜方向にあることを強調したい．これは，アスペリティの破壊が起きる直前のプレート境界面の力学的状況を認識する上で重要な特徴である．例えば，境界面のアスペリティの破壊が近づいているかどうかを検討する場合には境界面上での（微）小地震の発震機構を注意深く調査する必要がある．以上のことから，大地震発生直前には，アスペリティ周囲の境界面での地震活動度の増加と，それに対比されるアスペリティの静穏という「地震活動のドーナツパターン」，即ち「第2種の空白域（静穏域）」が出現すると考えられよう．なお，この節の議論では，プレート境界面での地震（つまり，プレート間地震）の活動に限定している．

4．プレート境界面での地震活動のドーナツパターン形成に対するプレート内部地震活動の影響

ここでは，地震活動のドーナツパターンに関して，アスペリティ破壊前のプレート境界面上の地震活動そのものではなく，プレート境界面近傍のプレート内部での地震活動に着目する．なお，ここでも前述したAE実験事実を議論の背景にする．

まず，プレート境界面付近の海洋プレート内部の様子を考える．沈み込み帯のアウターライズ（Outer Rise）での折れ曲がり地震（Bending Earthquake）の活動，並びに島弧直下での二重深発地震面での地震活動は何れもプレート境界面での大地震の発生サイクルの間で時間的に変化するという指摘がなされている（例えば，Eguchi *et al.*, 1987; Dmowska *et al.*, 1988; Lay *et al.*, 1989）．沈み込み帯のプレート境界面における，このようなプレート間相互作用の時間変化と海洋プレート内部地震活動の関連に関するモデルを図3に示す．プレート境界面でのプレート間相互作用は，DMICより浅部の海洋プレート内部（の特に上層部）に“Downdip Compression（以下，DC）”，そしてDMICより深部の海洋プレート内部には“Downdip Tension（以下，DT）”がそれぞれ生じ，アスペリティ破壊時期が近づくほどDC, DT共増大する

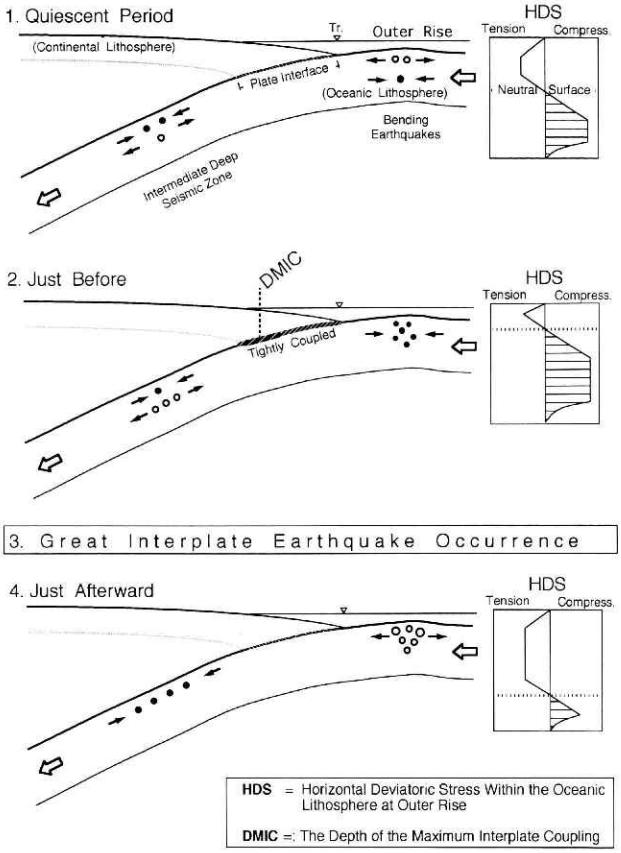


図3　沈み込み帯のプレート間大地震サイクルにおける海洋プレート内部での偏差応力分布に関するモデル（海陸プレートを跨ぐ断面図）．図中，右側の小図は，「アウターライズ」での水平方向の偏差応力の断面図を模式的に示す．海溝軸に平行なプレート境界面でのDMICは図2に示したように変化すると考えられる．1)静穏期．2)プレート間大地震発生直前．3)プレート間大地震発生．4)プレート間大地震発生直後．

Fig. 3　A vertical cross section model of the intraplate deviatoric stress pattern within the oceanic lithosphere both at the outer rise and at the intermediate-depth double-seismic zone, during the cycle of great interplate earthquake at subduction zones. Small inset map in the right shows the cross section view of the HDS (the horizontal deviatoric stresses) at the outer rise. The along-strike location of DMIC on the plate interface during this stage might change as shown in Fig. 2. 1). Quiescent period. 2). Just before the great interplate earthquake. The interplate coupling becomes dominant. 3). Occurrence of great interplate earthquake. 4). Just afterwards.

と考えられる（例えば，江口，1989）．DMICより浅部での海洋プレート内部（の特に上層部）については，海溝付近でのプレート折れ曲がり応力の影響もあるため，この折れ曲がり応力とDCとの合力の時間変化がドーナツパターン浅部での地震活動につながるのではないか．ま

た，DMIC（付近）より深部の海洋プレート内部では，いわゆる“Plate Unbending Stress（以下，US）”を仮定すると，USとDTの合力の時間変化により，ドーナツパターン域中の深部側に対応する領域（図2a中，深部側のA域）での海洋プレート内部地震が励起されることもあろう．このような海洋プレート内での地震活動の一部は，平面図上でみるとアスペリティ域に重なるため，一見ドーナツパターンを不鮮明にする傾向にある．しかし，このような海洋プレート内部地震のメカニズムはプレート間地震とは異なるであろうから，仮に高密度の微小地震観測網等によりプレート内部地震として認識できるなら，これらの海洋プレート内部の地震活動はプレート境界面での地震活動に関するドーナツパターンの議論用のデータから除外できることになり，結局ドーナツパターンは不鮮明ではなくなる可能性があろう．

次に，アスペリティ破壊前のプレート境界面近傍における陸側プレート内部での地震発生の可能性を考える．

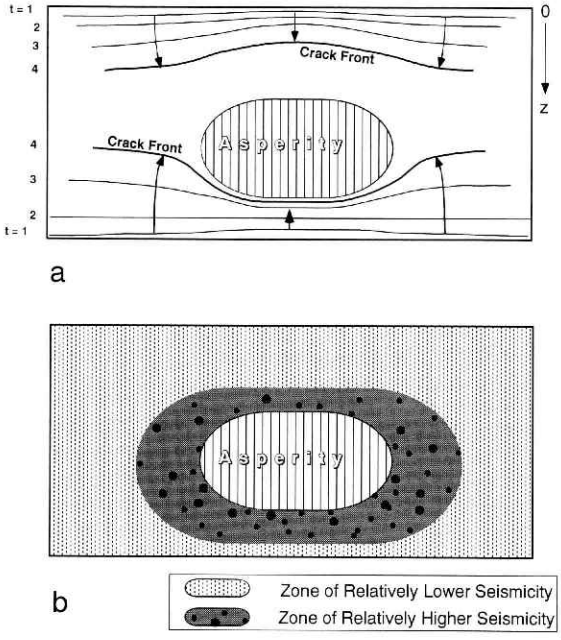


図4　a）沈み込み帯でのプレート境界面の大きなアスペリティを取り巻くクラック破壊前線位置の時間変化に関するモデル．ここで，プレート境界面とその近傍は，プレート間大地震前の大きな偏差応力下においても小規模地震を引き起こすに十分な不均質構造を有すると仮定した．「プレスリップ」と呼ばれるものに対応する現象が実在する場合は，大地震前にはクラック破壊前線の移動は加速されると考えられる．図中，太実線はクラック前線位置の時間変化を模式的に示す．矢印は，クラック破壊進展方向を示す．b）沈み込み帯での大きなアスペリティの破壊の直前におけるプレート境界面上の地震活動のドーナツパターン．プレート境界面とその近傍では，（プレスリップが有る場合を含め）特にアスペリティの縁辺部において，歪み速度が大きく変化する．歪み速度の変化によりプレート境界面とその近傍で小規模地震活動を励起するが，アスペリティ内部では強く結合しているため小規模の地震すら殆ど発生しない．アスペリティの瞬間的な破壊前のプレート内地震活動を取り除くと，プレート境界面での地震活動のドーナツパターンが鮮明となるであろう．

プレート境界面では海側と陸側のプレートが相互作用するので，アスペリティ破壊時期が近づくとDMIC周辺の陸側プレート下面近傍に大きな歪が蓄積し，陸側プレート内の少なくともプレート境界面のDMIC上方の領域あたりではプレート間相対運動方向に圧縮軸を持つような地震の発生が可能となる．海洋プレート内部での地震活動と同様に，このような陸側プレート内での地震活動は，平面図上でみるとドーナツパターンを不鮮明にする傾向があるが，陸側プレート内地震のメカニズムはプレート間地震とは異なるであろうから，微小地震観測網のデータ等を用いて除外することにより，ドーナツパターンは鮮明になることもあろう．

このように，ドーナツパターン形成の有無を認識するには，境界面での地震活動のみならず，海洋プレート内部と陸側プレート内部での地震活動も注意深く調査する必要があろう．

以上を総合すると，「プレート境界面でのDMICの移

Fig. 4　a). A simplified model for temporal change of the crack front location of deeper and shallower cracks surrounding a near-to-be-ruptured large asperity on the plate interface at subduction zones. Here, we assumed that the plate interface and the neighboring zones are both inhomogenuous enough to excite seismic events with smaller-magnitudes under the large deviatoric stress condition (just) prior to the major interplate earthquake. The crack front movement due to smaller seismic failure, if any, (just) prior to the instantaneous rupture of the asperity, i.e., so-called “preslip phenomenom,” might be accelerated. Bold lines show the hypothetical locations of crack front at selected time steps. Arrows indicate the sense of the crack front movement. b). Doughnut pattern in seismicity, just before the instantaneous rupture of the large asperity on the plate interface at subduction zones. Together with the preslip process, strain rate on and around the plate interface changes especially at the border area of the asperity. This strain rate change would excite seismic events with smaller-magnitudes on and around the plate interface, in contrast to calmness at the approximately fixed plane of the asperity. By removing the intraplate smaller events before the instantaneous fracture of the asperity, “the doughnut pattern in seismicity” on the interface would be dominant.

動の原因であるクラックの進展，即ち“プレスリップ”により，大地震発生直前では，アスペリティの周囲で歪速度の増大が認められよう．この歪変化はアスペリティ周囲での散発的な地震の活動を励起することになろう（図4参照）．」なお，図4ではアスペリティの浅部側と深部側の何れの方向からもクラックが進展してくる場合を想定している．

ここで，以下の点を付記したい．「従来のドーナツパターンの考え方では，プレート間地震とプレート内部地震を区別せず議論していた．今後は，高密度の地震観測網を陸域・海域に展開して，プレート境界面での地震とプレート内部での地震とを識別してプレート間大地震の前駆的現象としてのドーナツパターンの研究をより高度化する必要があろう．」

5．おわりに

本論では，沈み込み帯でのプレート間相互作用の時間変化に着目して，地震活動のドーナツパターン形成を議論した．沈み込み帯での大地震の発生様式の解明の際しては，上述したような「DMICの時間変化とアスペリティ破壊の関連性，並びにプレート境界面地震とプレート内部地震の識別」を含めて検討すべきではなかろうか．また，今後は，上記のような定性的議論に加えて，数値計算や実際の地震活動の観測データを基に本論の考え方の是非を定量的に検討する必要があろう．

参考文献

1) Dmowska, R., J.R. Rice. L.C. Lovison and D. Josell (1988): Stress transfer and seismic phenomena in coupled subduction zones during the earthquake cycle. J. Geophys. Res., **93**, 7869-7884.
2) Eguchi, T., M. Ukawa, and Y. Fujinawa (1987): Bending earthquakes located by an ocean bottom seismograph array on the zenisu ridge, the outer rise of the eastern Nankai trough, Japan and their tectonic implications. EOS, Am. Geophys. Union, p407.
3) 江口孝雄(1989)：沈み込み帯でのプレート間相互作用が最大となる深さ．地震学会講演予稿集，p48.
4) 江口孝雄(1992)：関東南部でのプレート間相互作用が最大となる深さの推定．地震学会講演予稿集，p88.
5) Gao, H., J.R. Rice and J. Lee (1991): Penetration of a quasi-statically slipping crack into a seismogenic zone of heterogeneous fracture resistance, J. Geophys. Res., **96**, 21535-21548.
6) Lay, T., L. Astiz, H. Kanamori and D.H. Christensen (1989): Temporal variation of large interplate earthquakes in coupled subduction zones, Phys. Earth Planet. Inter., **54**, 258-312.
7) Mogi, K. (1969): Some features of recent seismic activity in and near Japan (2), activity before and after great earthquakes, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, **47**, 395-417.
8) Mogi, K. (1979): Two kinds of seismic gaps, Pure Appl. Geophys., **17**, 1172-1186.
9) Sano, O., I. Ito and M. Terada (1981): Influence of strain rate on dilatancy and strength of Oshima granite under uniaxial compression, J. Geophys. Res., **86**, 9299-9311.
10) Tichelaar, B.W. and L.J. Ruff (1991): Seismic coupling along the Chilean subduction zone, J. Geophys. Res., **96**, 11997-12022.
11) Tse, S.T. and J.R. Rice (1986): Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of frictional slip propeties, J. Geophys. Res., **91**, 9452-9472.

（原稿受理：1997年12月3日）

要　旨

沈み込み帯でのプレート間大地震サイクルを通して，海陸プレートの境界面の応力場は時間と共に変化する．沈み込み帯でのプレート間相互作用に関する最近の研究等を基に，プレート間大地震直前に認められることがあるという「地震活動のドーナツパターン」の動力学的背景を議論しよう．本論では，プレート境界面とその近傍は不均質であると仮定する．プレート境界面上のDMIC（プレート間相互作用が最大となる深度）の位置の時間変化に関して，プレート間大地震の震源域に対応する「アスペリティ」を持つ2次元境界面モデルを用いて議論した結果，下記のような地震活動のドーナツパターンに関する知見が得られた．

プレート境界面で深部側から上方に進展する面内クラックの破壊前線は，常にDMICの（直）下にある．大地震サイクルの静穏期ではDMICは深く，ドーナツパターン形成につながる地震活動は殆どない．アスペリティの瞬間的破壊直前には，DMICはアスペリティ直下まで，またアスペリティの脇ではもう少し浅い所まで上昇する．このため，上昇したDMICはアスペリティを下方から囲む「皿」のような曲線になる．面内クラック上昇はアスペリティ破壊直前に加速される．この時期，クラック前線の非定常的上昇運動はアスペリティ周囲での小規模地震活動を引き起こすが，アスペリティ内部では地震活動は殆どない．この結果，地震活動にアスペリティを取り囲むドーナツパターンが生み出される．アスペリティ破壊時には，DMICはアスペリティ存在域を上昇する．

このように，沈み込み帯でのプレート間相互作用の時間的変化が地震活動のドーナツパターン生成の起源になりうると考えられる．

キーワード：沈み込み帯でのプレート間大地震，プレート境界面，地震活動のドーナッツパターン，プレート間相互作用が最大となる深度