[共同研究成果]

相似地震震源域における

非相似地震発生の可能性

有吉 慶介,松澤 暢,長谷川 昭 東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター

相似地震震源域であっても,場合によっては通常とは異なる地震(非相似地震)が 発生するであろうと一般に考えられているが,そのメカニズムについては不明であっ た.本研究ではそのメカニズムの有力な原因の一つとして,他の震源域で発生した大 規模な余効すべりの通過に伴うすべり速度場の揺らぎであることを,数値シミュレー ションから示すことに成功した.これにより,相似地震解析に基づいて積算すべり量 の時系列を定量的に推定する上で,大きな指針を与えると考えられる.

1.はじめに

日本の沈み込みプレート境界に着目すると,大規模な地震[1]から小規模な地震[4] までの広いマグニチュード範囲で,同じような規模の地震が同じ場所で繰り返し起こ っていることが,近年明らかになってきた.このことは,(断層が一気にずれるため に地震を引き起こす)アスペリティ領域と(断層がゆっくりすべるため地震が起こら ない)非アスペリティ領域とが棲み分けるような強度分布[10]が,図1に示すように 少なくとも第一近似的には時空間的に大規模~小規模で存在していることを意味す る.特に,地震の規模に比べてその震源域近傍での固着期間内で生じる速度・応力場 の揺らぎが小さい場合には,地震波形で表わされる破壊様式が似ている(相似地震) だけでなく,発生間隔まで規則的になることも,観測から見出されてきている[4].ま た,地震の規模と地震一回当たりのすべり量は比例関係にあることが知られており[4], 相似地震の発生頻度からその震源域周辺でのすべり速度場をモニタリングする手法 も確立されつつある[4][6].

これらの現象を別の観点からみると,個々のアスペリティは,地震の破壊様式も発 生間隔も常に同一の地震が規則的に繰り返し発生している性質を本来持っているも のの,アスペリティが近接しているなどで相互作用が生じることによって,発生間隔 が異なり,相互作用の影響が強い場合には破壊様式まで異なり複雑になるという考え も可能である.これに相当する可能性のある観測事例として,釜石沖の相似地震活動 を挙げると,M4.8±0.1の規模の地震が5.52±0.62年の間隔で発生していることが 知られている[9].この相似地震は一般に知られている地震に比べて,変動係数(相対 標準偏差;標準偏差と平均値との比)が他の地震(例えば宮城県沖地震では,37.1± 6.61年)に比べて小さい.このことは,図1に示すように釜石沖の相似地震震源域周 辺では,他のアスペリティから孤立しており,速度や応力の揺らぎが小さいためだと 考えられている[8].釜石沖地震の発生間隔や規模が揺らぐ具体的な原因としては,前 回 1995年の地震発生間隔が短いのは,1992年に起きた最大M6.9の群発地震に伴う 余効すべりの加速によるものだという考えが挙げられているが,今のところ他の手段 から独立に確かめられていないのが現状である.

本稿では、シナジーセンターとの共同研究によって可能となった、極めて大規模な 数値シミュレーションを用いて、1992 年に発生した三陸はるか沖地震のような大規 模なアスペリティによって生じるすべり速度場・応力場の揺らぎによって、相似地震 活動がどのように変動するのか定量的に考察することを目的とする.



図4-1.本章でモデル化の対象となる,釜石沖地震周辺におけるアスペリティの 空間分布の概念図[8].

2.数値シミュレーションの計算手法

基本的には均質半無限弾性体中にある3次元プレート境界面にすべり速度/状態依 存摩擦構成則を用いた数値シミュレーション[11]であり,以下その概略について述べ



図2.本章で扱う共存アスペリティモデルの概要.(a)沈み込みプレート境界にお けるセルの空間配置の概略図.ここでは,実際のメッシュサイズより4倍粗く表示し ている.(b)プレート境界面上における摩擦パラメター $\gamma = (a - b)$ の空間分布図. 青色がアスペリティ領域,桃色が弱安定すべり領域,赤色が強安定すべり領域に相当 する.

本稿では,図2(a)に示すような離散化された各計算セルにおいてすべり速度の時系 列を逐次的に求めることで,プレート運動を表現することになる.すべりの成分は逆 断層型すべりのみを考慮し,横ずれ成分は計算に含まないものとする.また,地表を 除く対象領域外側では,定常的プレート収束速度V_{pl}で一様にすべっているものとす る.

計算領域内のプレート境界面では, dip slip により生じるせん断応力と摩擦力が準静的につり合っていると仮定し,摩擦係数は速度/状態依存摩擦構成則[12][13]の slowness law[14]に従うものとする.これらの条件のもとに,プレート境界面上での力の釣り合いは以下のように記述することができる.

$$\tau_i^{dislocation} = \sum_{j=1}^N K_{ij}(u_j(t) - V_{pl}t) - \frac{G}{2\beta} \frac{du_i}{dt}$$
(1)

$$\sigma_i(z) = (\rho_{rock} - \rho_w)gz \tag{2}$$

$$\tau_i^{\text{force}} = \mu_i \sigma_i \tag{3}$$

$$\mu_{i} = \mu_{0} + a_{i} \log(V_{i} / V_{0}) + b_{i} \log(V_{i} \theta_{i} / d_{c_{i}})$$
(4)

$$d\theta_i / dt = 1 - V_i \theta_i / d_c$$
⁽⁵⁾

$$\tau_i^{dislocation} = \tau_i^{force} \tag{6}$$

添え字*i*, *j* は分割セルの指標, *N* はセルの総数,(1)式の K_{ij} は半無限均質媒質での弾性論から求められたグリーン関数[15], *u* は変位,*t* は時間,式の右辺第2項は地震波放射による減衰項[16], σ は有効法線応力,(2)式の*z* は深さ,(6)式は食い違いによるせん断応力 $\tau^{dislocation}$ と摩擦力 τ^{force} の準静的なつり合い条件をそれぞれ示す.応力計算については,(1)式に示すように対象領域内での変位量と定常的なすべり量 $V_{pi}t$ との差分のみとし,定常的なすべりによる応力変化成分は高速すべりによる応力変化に比べて十分小さいものとして無視する[17].(4)(5)式は速度/状態依存摩擦構成則を表わし,*a*,*b*,*d*,*c*は,摩擦特性を示すパラメターを示し[12][13],(*a*-*b*)<0ではすべり速度と共に摩擦係数が低下し,不安定すべりを生じることが知られている.逆に(*a*-*b*)>0では,粘性のようにすべり速度の増加と共に摩擦が増加する性質をもつ.

め, Runge-Kutta法[18]を用いて数値的に解いていく.

定数については次のように与えた.剛性率G=30GPa.S 波速度 β =3.75km/s,岩石の密度 ρ_{rock} =2.7g/cm³,水の密度 ρ_w =1.0g/cm³,重力加速度g=9.8m/s²,基準速度 V_0 =1 μ m/s,基準速度時の摩擦係数 μ_0 =0.6,ポアッソン比 0.25(等方均質弾性体を仮定).

本稿では計算の高速化を図るために,(1)式中にある $\sum_{j=1}^{N} K_{ij}(u_j(t) - V_{pl}t)$ の積和について, 畳み込み計算と同様の形式をしている[16]ことから,海溝軸方向([X]軸方向)について FFT を適用することで,計算コストを約 1/30 まで大幅に軽減することに成功した.一般に,FFT の計算ではベクトル化が難しいとされているが,シナジーセンターで導入されている SX-7 ではベクトル化が可能であるため,FFT を導入してもベクトル化率が 98%と高いことが大きく関係している.このため,計算セルの総数が数十万のオーダーであっても,半日~数日程度で計算を実行することが可能となった.

摩擦パラメターの空間分布モデルについては,図2(b)に示すように,計算対象領域 を $\gamma = (a-b)$ の値によって, 大アスペリティ領域, 小アスペリティ領域, 弱安 定すべり領域, 強安定すべり領域の4つに分けることにした.

3.数値シミュレーションの計算結果から示された相似地震の揺らぎ

図3(a)に印された(, , , , , , ,) の5点と小アスペリティ領域中心点での 積算すべり履歴などを図5(b)に示す. は大アスペリティ領域の中心点に相当する. 大アスペリティの地震規模と発生間隔はそれぞれM7.3と49.3年のまま単一周期の地 震が繰り返し発生しており,これは小アスペリティ領域を弱安定すべり領域に置き換 えて単一のアスペリティとした場合でも同一であった.このことから,小アスペリテ ィ領域から生じる揺らぎは大アスペリティでの地震活動に対してほとんど影響を及 ぼさないことがわかる. ()は小アスペリティ領域中心点と対称の位置にあり,ここで の積算すべり履歴を図5(b)の赤と青の線で示すが,これらの曲線も小アスペリティの 有無に関わらず同じ時系列を示すことから,これらの曲線は大アスペリティ領域が小 アスペリティ領域に及ぼすすべり速度場の揺らぎに相当するものだと考えることが 出来る.この二つの曲線に挟まれたものが小アスペリティ領域中心点でのすべり履歴 として示しているが,両者はよく一致していることがわかる.相似地震解析に基づく 積算すべり量の推定は,第1章で述べたように,地震の規模と1回当たりのすべり量 が比例関係にあり,その比例係数を San Andreas 断層間に設置したクリープメータ ーで観測された地殻変動量から求めている[19].図5の結果は,この関係が沈み込み プレート境界面上のすべりにおいて相互作用が働く複雑な場合でも成り立つことを 意味し,別の見地から証明することが困難であった相似地震解析に基づく積算すべり 量の推定の妥当性について,速度/状態依存摩擦構成則に基づく数値シミュレーション から示したことになる.また,逆に言えば,小アスペリティ領域で発生する相似地震 の発生間隔及び規模の揺らぎは,周囲のすべり速度場と対応していることを示してい る.従来の地震発生時刻や規模の予測には,過去の地震カタログを元に確率論的に基 づいて推定したり,すべり速度場が時間変化せずに一定とした前提で見積もったりし ていたが,この結果によれば,GPS 観測等からアスペリティ領域周辺でのすべり速 度場を精度良く捉えることが出来れば,決定論的に推定できる可能性がある.

地震性すべりを抽出するために,小アスペリティ領域の中心点においてすべり速度 が1mm/secを超える高速すべりの成分を地震性すべりとして V>1mm/sec に示した. この履歴に注目すると,大アスペリティ領域で発生した地震に伴う余効すべりが小ア スペリティ領域を通過する前後で,地震性すべりが発生していないことがわかる.地 震性すべりを含めた総すべり量では大きなすべり量が解放されていることから,ここ では非地震性のスロースリップイベント[20]が発生していることがわかる.このこと は,相似地震震源域において,余効すべりに伴うすべり速度場の揺らぎによって非相 似性の地震が発生することを示唆するものである.言い換えると,相似地震解析にお いて,非相似地震と認識されるために積算すべり量の過小評価が為される可能性があ ることを意味する.

この観測事例として,十勝沖地震の余効すべり解析結果を図4に示す.図4(a)に示した8つの相似地震グループ領域について,相似地震解析から推定された平均すべり量(赤線)とGPS解析から推定されたすべり量(青線)を比較する[21]と,両者が一致しておらず,全体的に相似地震解析から推定されたすべり量について過小評価の傾向がみられる.中でも特に顕著なものとして,図4(a)中ので印された十勝沖地震震源及びその周囲に黒色の曲線で囲まれた地震性すべり領域(アスペリティ領域)から数十 km しか離れていない,相似地震グループ3,4に注目すると,ここではGPS解析から示されているように,震源域から近いため余効すべりが卓越すると考えられるが,相似地震解析ではほとんど捉えられていない.これは,相似地震震源域で非相似地震が起きたために相似地震解析ではすべり量として積算されないためだと考えられる.それに対して相似地震グループ5,7,8では,両者が一致していることか

ら,十勝沖震源域から十分離れたところでは,余効すべりによる速度場の揺らぎの影 響が小さいため,相似性が失われないと考えられる.

4.まとめ

「相似地震震源域では地震波形がそっくりな地震が毎回必ず起きるのか?」という 疑問や問題点は,多くの研究者が気づいていたと考えられるが,その可能性及びメカ ニズムについては,これまで全くの未知のものであった.本研究では,速度/状態依存 摩擦構成則に基づいた数値シミュレーションによって,巨大地震震源域近傍に相似地 震震源域が共存する場合,大規模な余効すべり通過前後において相似地震震源域にお いて非相似であるスロースリップイベントが発生することが示された.このことは十 勝沖地震の余効すべりにおいて,GPS 解析結果と相似地震解析結果が定量的に一致 していない現象を説明出来る可能性があると考えられる.

近年観測から捉えられているM4クラスの相似地震について,M7クラスの大アス ペリティとの相互作用を数値シミュレーションで表現することは,二つのアスペリテ ィのスケールの差が大き過ぎるために,計算コストが非常に高く困難であった.本研 究では,FFTを用いた計算の高速化に成功したことで,それを実現することが十分可 能なものとなった.実際の沈み込みプレート境界面は,図1に示すように,東北日本 であれば三陸はるか沖地震や十勝沖地震や宮城県沖地震など巨大なアスペリティが 複数存在する一方で,釜石沖のような小規模のもの,発生間隔がそれほど規則的でな いものも含めれば,それよりさらに数桁のスケールで規模の小さい相似地震震源域が 多数存在し,それらが相互作用の影響を受けて複雑な振る舞いをしているのが実際の 場であると考えられる.従って,実際の地震発生過程について数値シミュレーション からさらに踏み込んだかたちで説明するためには,今後さらに大規模な数値シミュレ ーションが出来るように計算環境を整える必要が迫られている.また,今回は計算コ ストの軽減のために,すべりの方向を固定し,有効法線応力の時間変化を無視した. これらもいずれ取り入れることで,より高精度の下で定量的な議論が出来ると期待さ れる.



図3.(a)で印した点[あるいは座標(X,W)]における(b)積算すべり履歴図.赤と青の実線は、〇の位置での履歴に相当し、赤青の間にある黒色の実線は、小アスペリティ中心点での履歴を示す.灰色の実線は、小アスペリティ領域のみが単独で存在する 場合のものを示し、V>1mm/secは、共存する場合の小アスペリティ領域中心点での すべり履歴のうち、すべり速度が1mm/secを超えた地震性すべりのものを示す.



50

144°

142°

146"

得られた 2003 年十勝沖地震(M8.0)後から 2004 年釧路沖の地震(M7.1)までの期間の準静的滑り速度分布.カラースケールは相似地震解析によって得られた準静的滑り速度分布,青コンターは GPS から推定した余効滑り速度分布.赤の数字はそれぞれの相似地震グループである.
 (b)(上)GPSと相似地震解析から推定されたプレート面すべり履歴.青が GPSの推定値,赤が相似地震解析による推定値を示す.左の番号は(a)のそれぞれの相似地震グループの領域番号を示す.[21]

参考文献

- [1] 永井理子・菊地正幸・山中佳子,三陸はるか沖における再来大地震の震源過程の 比較研究 1968年十勝沖地震と1994年三陸はるか沖地震の比較, 地震 2, 54, 267-280, 2001.
- [2] Yamanaka Y., and M. Kikuchi, Source process of the recurrent Tokachi-oki earthquake on September 26, 2003, inferred from teleseismic body waves, *Earth Planets Space*, 55, e21-e24, 2003.
- [3] Yamanaka Y., and M. Kikuchi, Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *J. Geophys. Res.*, 109, 10.1029/2003JB002683, 2004.
- [4] Igarashi, T., T. Matsuzawa, A. Hasegawa, Repeating earthquakes and interpolate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone, *J. Geophys. Res.*, **108**, 10.1029/2002JB001920, 2003.
- [5] Matsuzawa, T., T. Igarashi, and A. Hasegawa, Characteristic small-earthquake sequence off Sanriku, northeastern Honshu, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, doi:10.1029/2001GL014632, 2002.
- [6] Uchida, N., T. Matsuzawa, T. Igarashi, and A. Hasegawa, Interplate quasistatic slip off Sanriku, NE Japan, estimated from repeating earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi:10.1029/2003GL017452, 2003.
- [7] Uchida, N., A. Hasegawa, T. Matsuzawa, and T. Igarashi, Pre- and post-seismic slip on the plate boundary off Sanriku, NE Japan associated with three interplate earthquakes as estimated from small repeating earthquake data, *Tectonophysics*, **385**, 1-15, 2004.
- [8] Uchida, N., T. Matsuzawa, A. Hasegawa, and T. Igarashi, Recurrence intervals of characteristic M4.8+/-0.1 earthquakes off Kamaishi, NE Japan -Comparison with creep rate estimated from small repeating earthquake data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 233, 155-165, 2005.
- [9] Okada T., T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, Comparison of source areas of M4.8+-0.1 earthquakes off Kamaishi, NE Japan - Are asperities persistent features?, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **213**, 361-374, 2003.
- [10] Boatwright, J., and M. Cocco, Frictional constraints on crustal faulting, J. Geophys. Res., 101, 13895-13909, 1996.
- [11] Liu, Y., and J. R. Rice, Aseismic slip transients emerge spontaneously in

three-dimensional rate and state modeling of subduction earthquake sequences, *J. Geophys. Res.*, **110**, B08307, doi:10.1029/2004JB003424, 2005.

- [12] Dieterich, J. H., Modeling of rock friction, 1, Experimental results and constitutive equations, *J. Geophys. Res.*, **84**, 2161–2168, 1979.
- [13] Ruina, A. L., Slip instability and state variable friction laws, *J. Geophys. Res.*, 88, 10359-10370, 1983.
- [14] Beeler, N. M., T. E. Tullis, and J. D. Weeks, The roles of time and displacement in the evolution effect in rock friction, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 1987-1990, 1994.
- [15] Okada, Y., Internal deformation due to shear and tensile faults in a halfspace, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 1018–1040, 1992.
- [16] Rice, J. R., Spatio-temporal complexity of slip on a fault, *J. Geophys. Res.*, 98, 9885–9907, 1993.
- [17] Savage, J. C., A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone, *J.Geophys. Res.*, 88, 4984-4996, 1983.
- [18] Press, W. H., B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, and W. T. Vetterling, *Numerical Recipes*, 2nd. ed., Cambridge Univ. Press, New York, 1992.
- [19] Nadeau, R. M., and L.R. Johnson, Seismological studies at Parkfield: VI. Moment release rates and estimates of source parameters for small repeating earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 88, 790–814, 1998.
- [20] Kawasaki, I., Silent earthquakes occurring in a stable-unstable transition zone and implications for earthquake prediction, *Earth Planet. Sci.*, 56, 813-821, 2004.
- [21] 油井智史・三浦哲・長谷川昭・八木勇治, 2003 年十勝沖地震(M8.0)前後の北海道
 地方のプレート間カップリング状況, *日本地震学会 2005 年秋季大会*, 札幌, 北 海道大学, 2005 年 10 月.