Deformation cycles of subduction earthquackes in a viscoelastic Earth Kelin Wang et al. (2012)

井出研 M2 菊地 淳仁

abst

- 沈み込み帯では繰り返し巨大地震が発生
- 過去20年、測地学によって地震間の地殻変動の理解 が劇的に進歩
- 沈み込み帯を比較することで、変形サイクルの様々な ステージの情報が得られる
- それらの情報を統合することで、短期・長期のマントルの粘性 的振る舞いによって変形が支配されていることがわかった
- ・ <u>弾性モデルに基づいた従来の考え方</u>は見直す必要がある
 →coseismicはinterseismicの逆再生

- 沈み込み帯では長期間"ロック"していた所が滑って地震を引き起こす
- 一度破壊してから次の地震へ至る過程での、応力・歪みの変化の一連の流れをSEC (Subduction Earthquake Cycle)という
- ・ 定常的なプレート運動とプレート境界でのjerkyな変形
 →SECにおけるマントルクリープの役割



2-D viscoelastic model

1970年代 マクスウェル粘弾性体の導入
 地球深部では弾性的に応力の伝播をするが、<u>粘性流体的に振る舞う</u>
 ex) マントル対流、氷除去後の応答

- 二次元マクスウェル粘弾性体モデル [Thatcher & Rundle, 1984]
 大地震の後に起こる三つの主要プロセスを説明するモデル (南海の100年変形記録を説明するためのモデル)
 - 1. afterslip (余効すべり)
 - 2. viscoelastic relaxation (粘弹性緩和)
 - 3. relocking

沈み込み帯でのアセノスフィアの粘性(~10¹⁹Pa s)の見積もりに成功

←グローバルな粘性率よりオーダーで1~2小さい



二次元モデルでは三次元方向の破壊長で緩和時間をスケーリングできない →粘性の重要性に懐疑的

- 1990年代 GPSの導入
 - co-, post-, inter-seismicな変形が多くの沈み込み帯で観測された 同時期、PC技術の発展により三次元粘弾性SECモデルの計算が可能 しかし、多くのモデルでは断層での 固着や摩擦に注目し、純粋弾性体 を仮定

Coasi

Elastic

Burgers

最近の10~20年 ハイクオリティ測地観測

それぞれの沈み込み帯からSECの"スナップショット"が得られる →それぞれのスナップショットから断層の状態を 推察するうえで弾性モデルが便利

それぞれのスナップショットを併せると 主要3プロセスを含む一般的なSECを反映している

SEC(Subduction Earthquake Cycle)



Earthquake cycle = rupture + (1) + (2) + (3)

Observing subduction earthquake cycles

- a. Sumatra of 2004, Mw 9.2, moving seaward (1 year after main shock)
- b. Chile of 1960, Mw 9.5, coastal & island opposing motion (40 years after main shock)



Viscoelastic mantle relaxation

- rock creep の室内実験→ transient phase & steady-state phase
- マクスウェルレオロジー
- ▶ steady-state phase(マクスウェル粘弾性体の粘性要素に対応) →造山運動、マントル対流などの長期プロセスに適している
- ▶ 100~1000年スケールの氷河地殻平衡や10年スケールのSECのモデリングに有用
 - ・モデル

弾性モデル(上部マントルの粘性率 10²⁰-10²¹ Pa s ~ elastic) ≠マクスウェルSECモデル(<u>沈み込み帯での粘性率 10¹⁸-10¹⁹ Pa s</u>) スマトラでの測地、背弧での熱流量観測 etc より

GPS観測→本震直後は長期の変形よりもかなり早い 岩石実験→早い短期の変形は afterslip + transient rock creep

 bi-viscous Burgers レオロジー
 短期のtransient phaseと長期のsteady-state phase
 →粘弾性緩和の二つのタイムスケールに対応

rheology



温度T, 圧力P, 応力σー定の条件下

 $\varepsilon_{\rm E}$: initial elastic deformation $\dot{\varepsilon}_{\rm T}$: transient creep of rapidly changing strain rate $\dot{\varepsilon}_{\rm S}$: steady-state creep of constant strain rate

steady-state flow law

$$\dot{\varepsilon}_{s} = D\sigma^{n} \exp\left[-(Q + PV)/RT\right]$$

nはミクロな変形メカニズムで決まる n=1 in case Newtonian Maxwell fluid (SEC model)

実際のpostseismicでは応力の時間変化が急速なのでより複雑

bi-viscous Burgers rheology



より複雑な振る舞いの再現にはKelvin, Maxwell要素を適宜加える

Afterslip and relocking of the fault

沈み込み帯おける滑りは一次近似的には摩擦接触
 (海底のroughnessやトレンチsedimentsにも影響される)

- after slip → 速度強化の領域で発生
 70-80kmより深くなると、afterslip(断層プロセス)と粘弾性緩和(マントルプロセス)の区別が曖昧
- ・ 普通は、RSFで安定・不安定領域の振る舞いを表現 SECモデルでは、ロックしている領域にback slip rateを組み込むことで再現
- T_A(timescale of afterslip) 数ヶ月~数年
 「afterslipで粘性緩和に相当する変形を説明」する一方で
 「粘性緩和でafterslipに相当する短期変形を説明」するモデルもある
 → 実際のところはその中間。T_Aの見積もりや弾性緩和に対するafterslipに
 影響度を決めるのは難しい

Afterslip and relocking of the fault

T_L(timescale of fault locking) 数百年(interseismic period)
 粘弾性緩和は2番目の主要プロセスであるが、他のプロセス中でも起こっている

ex) locking プロセス

マントルが粘弾性体→上部マントルの広い範囲で弾性短縮

$$\mathcal{E}_{platemotion} = \mathcal{E}_{upperplate}^{\dagger} + \mathcal{E}_{locking}^{\dagger}$$

マントルが純弾性体→上部マントルの狭い範囲で弾性短縮

$$\varepsilon_{platemotion} = \varepsilon_{upperplate}^{/} + \varepsilon_{locking}^{+}$$

粘性の効果が不十分 → lockingの最大深度大

Piecing together an earthquake cycle

SECモデル

三地域(Sumatra, Chile, Cascadia)で同じパラメタを使用
 プレート年代や速度が違うが、多くの沈み込み帯は似た温度構造
 →一次近似ではOK

- 有限要素法
- ▶ 現実に近い断層構造や滑り分布の組み込みが可能
 ▶ 短期変形で、after slip & transient レオロジーを両方考慮
- ・球構造(遠地に影響)
- スラブ(マントルの流れに影響) etc...

SEC model (bi-viscous Burgers rheology)



温度や圧力による粘性構造の誤差はreference momentで調整可能 それぞれのパラメタはMaule(2010,Mw 8.8)やTohoku(2011)でより制約できそう

Ground motion

a) t ~ $T_A \& T_K$ seaward afterslip & transient (Kelvin) rheology

- b) t ~ T_M seaward & landward Maxwell relaxation & locking
- c)t>>T_M landward locking



Earthquake cycle = rupture +
$$(1)$$
 + (2) + (3)







Scaling with earthquake size

緩和時間は最初の応力擾乱に依存 $\rightarrow T_{\kappa}, T_{M}$ はseismic momentでスケール ex) 小さい地震の場合、緩和時間が短い \rightarrow 二番目のプロセスがとても短く、すぐlockingプロセスに入る $T=(M_{o}/M_{o}^{\circ}) \tau$



Example of scaling



れていない

→ interseismicでの変形に影響を与えるはず

Looking into the future

- interseismicでの変形の理解は、沈み込み帯のlocking状態の推察を可能にする
 →地震や津波の評価に役立つ
- 粘性効果を無視すると、lockingと断層の滑りだけで地表の変形を説明することになり不適切

→elasticモデルは粘性緩和を入れて再評価すべき

- 今回のモデルは一次近似として役立つが、transientや nonlinear レオロジーの 室内実験や観測データはもっと必要
- afterslipの有無は結果に大きな違いをもたらす(fig.4)
 →破壊場所近傍での観測が有用。その点で東北の海底GPSはかなり役立つ
- 広いgeodynamicな状況下でのSECの理解が必要
- ▶ episodic SSEs が沈み込み帯やSECのメガニズムの理解に役立つ
- ▶ 粘弾性がSECの不均衡を生み出している(coseismicな変形は破壊領域近傍に限るがinterseismicな変形は広範囲)

Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake Tianhaozhe Sun et al. (2014)



<postseismic deformation> 粘弾性レオロジーと滑りの挙動を知るうえで重要 ①afterslip (余効すべり)

②viscoelastic relaxation (粘弾性緩和)

3 relocking



短期(~数年)の変形は主にafterslipにより引き起こされ、 粘弾性緩和は長期変形でのみ重要だと考えられていた

しかし、

東北沖地震での海底GPS観測により、短期変形でも粘弾性緩和が重要な役割 を果たすことがわかった

abst

- ▶ 破壊域近傍での観測を考慮し、応力緩和でそこでの変形を再現できるような粘弾性モデルで計算
- ▶ 従来の弾性モデルではafterslipの破壊域の推定が間違っていた
- → 従来のモデルに基づいた断層での摩擦則は見直す必要がある

deformation of Tohoku-oki







プレート:弾性 マントル:粘弾性(Burgers rheology)

 asymmetric coseismic elastic deformation 海底が自由表面なので上盤は下盤より低stiffであり 大きく動く(上盤とseawardと沈み込むプレートの landwardの動きはオーダーが一つ違う)

マントルが粘弾性緩和してるとき、上盤の張力がトレンチを陸側に引っ張る







観測に合うようにtry & errorで粘性を最適化

- actual fault geometry
- > 震源再決定と地震波探査
- ▶ 赤い点のGPS観測点を用いてモデルを構築
- ▶ 海溝付近は細かいメッシュ

・ 主構造毎は均質

Mantle wedge		Oceanic mantle		LAB layer	
viscosity (Pa s)		viscosity (Pa s)		viscosity (Pa s)	
$\eta_{ m K}$	η_{M}	η_{K}	η_{M}	$\eta_{ m K}$	η_{M}
2.5×10 ¹⁷	1.8×10 ¹⁸	2.0×10 ¹⁸	1.0×10 ²⁰	2.5×10^{17}	2.5×10 ¹⁷

 μ_{plate} = 48 Gpa, μ_{K} = 136 Gpa, μ_{M} = 64 Gpa



- elastic cold nose (depth<70km)
- between cold nose and slab
- ➤ 深くなると徐々に厚くなる: fault → viscoelastic shearに対応
- weak layer
- ➤ LAB(Lithosphere-Athenosphere Boundary)のdecouplingに対応
- ▶ fluidsかpartial meltsによる
- ▶ 水平方向に対する鉛直方向の変位(沈降)が減少→観測と整合



coseismic raputure

- a planar fault \rightarrow 3D curved fault
- trench: 直線 → 曲線 (足りない部分は外挿で補完)
- ・ 補完によって増えた滑りの分 → 観測に合うように滑り量をスケーリング(92%)

違うcoseismic滑り分布を用いてもメインの結果は大きく変わらない



afterslip model

<先行>

- ・ 地震後8ヶ月→ power-lawで1年後まで時間発展
- ・純弾性を仮定(粘弾性緩和もafterslipで賄っていた)

→afterslipの分だけにスケールダウン(downdipで95%, main ruptureで30%削減)

<浅部afterslipは考慮しない(FUKU sta. は無視)>

- ・ 地震後16~24ヶ月の期間では発生していない
- 仮に観測期間以前に発生していたら、粘弾性緩和による海溝近くGPSの landwardはもっと大きいことになる!(本論文の主張を支持)



model vs GPS observation

- 一次近似的にかなり良く再現できている
- localな影響(おそらくdelayed afterslip)
 でズレている観測点がある



0194

0195

KAMN

GJT4

MYGW

KAMS

GJT3

MYGI

another model parameta



conclusion

<トレンチの陸側への動き> 弾性モデルだと起こらないが 粘弾性モデルだと細かいパラメタによらず起こる! ↓ 粘弾性モデルが適切

