

## - 4 陸域震源断層の深部すべり過程のモデル化に関する総合研究

### Modeling Slips and Their Acceleration Processes at the Deeper Part of the Seismogenic Zone

(研究期間 平成 14～15 年度)

国際地震工学センター

International Institute of Seismology and Earthquake Engineering

芝崎文一郎

Bunichiro Shibazaki

Important concerns for the generation processes of large inland earthquakes are how the stress concentrates and nucleation starts and whether the slip accelerates in and below the deeper part of the seismogenic zone prior to the mainshock. To investigate the mode of shear localization in the lower crust, we investigated volumetric deformation by using a FEM code for non-linear visco-elasticity, plasticity, and faulting based on the Geo-FEM. Furthermore, to model the slip acceleration and nucleation processes, we developed the fault model with two kinds of constitutive laws for unstable-stable transition zone or frictional-plastic transition zone.

#### 【研究目的及び経過】

内陸の大地震の発生過程に関しては、その物理機構が未だよくわかっていない。地震発生危険度予測を高度化するためには、そのメカニズムを解明することは重要な課題である。

内陸の断層帯は、その変形様式により、二つの異なる領域、摩擦が支配している脆性領域と流動則が支配している延性領域からなる。摩擦が支配している脆性領域は、さらに、地震が発生する不安定領域、不安定—安定遷移領域、安定領域からなる。このような断層の構造は内陸地震の発生過程に大きな影響を及ぼすと考えられる。例えば、内陸地震の発生として以下の仮説が考えられている (e.g. Iio and Kobayashi, 2002; Iio et al, 2002)。内陸地震断層の下部延長に局在化した延性せん断帯が存在する。

定常的なすべりが深部延長で進行し、地震発生域の深部延長に応力集中をもたらす。断層深部延長ですべりが加速し、地震発生下部に高速破壊の核が形成される。

本研究では、理論的立場から、この内陸地震発生の仮説を検証することである。本稿では、(I) 遷移領域における構成則を用いたすべりと加速過程のモデル化と (II) 新しく開発した GeoFEM に基づく非線形粘弾塑性プログラムによる断層深部の変形過程のモデル化について報告する。

#### 【研究内容】

(I) 遷移領域の構成則を考慮したモデル化：従来は、不安定 - 安定遷移領域を単純にすべり速度と状態変数に依存する摩擦構成則における a-b の値を負から正に変えることで表現してきた。最近になって、多数のメカニズムが

共存、競合する摩擦構成則が提案されている。例えば、以下のような機構が考えられる。

非常に低すべり速度では、流動が支配し、すべり速度と併に強度が増大する。

ある程度すべり速度が増大すると強度の弱化が起こる。

さらにすべり速度が増大するとすべり速度強化が起こる。

本研究では、先ず から への過程を再現するために摩擦構成則がべき乗型クリープと直列に繋がった断層構成則を提案した。また、 から への遷移を再現するために、Estrin and Bréchet (1996) のモデルを基に低すべり速度ではすべり速度弱化、高すべり速度ではすべり速度強化に遷移する摩擦構成則を提案した。これらの摩擦構成則を用いて、断層深部におけるすべり過程とその加速過程の再現を行った。

(II) 非線形粘弾塑性解析ソフトの開発：断層の深部下  
部延長の変形様式を解明するために、高度情報機構が開  
発した並列有限要素法プログラム GeoFEM を基に非線形流  
動ソフトを開発した。機能の概要は以下の通りである。

非線形粘弾性

塑性 (Mohr-Coulomb 則)

大変形 (Updated Lagrange 法)

熱、浸透流解析コードとの連成機能

断層運動 (スプリットノード法)

非線形粘弾性解析機能ではべき乗型の流動則を用いた。本プログラムで、摩擦 (塑性) が支配している上部地殻、延性 (粘性流動) が支配している下部地殻の変形過程の再現が可能となった。

### 【研究結果】

(I) 遷移領域の構成則を考慮したモデル化：Shigematsu et al. (2004) は、過去に脆性—延性遷移領域に存在したと考えられる畑川破碎帯における変形様式を調べ、脆性—延性遷移領域に沿って、延性変形が局所的に集中しているモデルを提案した。この領域では、地震間に準静的な流動が進行し、その周辺に応力集中をもたらした可能性がある。従って、この周辺で高速破壊の核が形成された可能性がある。Shigematsu et al. (2004) が提案した畑川破碎帯における変形と破壊核の形成過程のモデルを検証するために、摩擦と流動が競合する構成則を用いて、破壊核形成過程の再現を行った。シミュレーションの結果、流動がしやすい領域に地震間に非地震的なすべりが進行し、不安定が近づくとその周辺にすべりの加速が生じ、高速破壊の核が形成された。脆性 - 塑性遷移領域において、非常に流動しやすい領域が存在する場合、その周辺が破壊核形成領域になりやすいことが示された。

また、本研究では、低速ですべり速度弱体化、高速ですべり速度強化を示す摩擦構成則を用いたモデル化により、断層深部で発生する加速すべりを再現することに成功した。この構成則では、直接効果に対して遮断速度をもつ Dieterich/Ruina の摩擦構成則を用いてモデル化を行っている。

(II) 非線形粘弾塑性解析ソフトの開発：下部地殻の延性せん断帯の形成に関して、幾つかの要因が考えられる。例えば、マントルにおける沈み込み、上部地殻における断層運動による延性せん断帯の形成、下部地殻における間隙流体や熱構造の不均質性等が挙げられる。

まず、Ellis et al. (2001) を参照し、下部地殻の底部にマントルからのドラッグがあり、あるところから沈み込む場合を想定した。この境界条件により、下部地殻下部に応力集中が生じ、V字型の断層が形成された。

また、図 1 のように中心部に高温領域が存在する場合にどのような変形が生じるか調べた。図 2 がシミュレーション結果で、塑性変形と非線形流動による非弾性変形を示したものである。高温の流動しやすい領域が短縮変形し、その結果、その両脇から、せん断帯が形成されることがわかった。内陸の震源断層の深部延長には、高温で流動がしやすい領域があることが理論的に予想される。

### 【参考文献】

Ellis, S., S. Wissing, A. Pfiffner, Strain localization as a key to reconciling experimentally derived flow-law data with dynamic models of continental collision, *Int. J. Earth Science*, 90, 168-180, 2001.

Estrin, Y., Y. Bréchet, On a Model of Frictional Sliding, *Pageoph.*, 147, 1996.

Iio, Y., Y. Kobayashi, Is the plastic flow uniformly distributed below the seismogenic region?, *Earth Planets Space*, 54, 1085-1090, 2002.

Shigematsu, N., K. Fujimoto, T. Ohtani, H. Tanaka, Y. Miyashita, T. Tomita, Structures of fault zones in the brittle-plastic transition zone of the continental earth's crust: A case study of the Hatagawa fault zone, *Proceedings of the Second International Symposium on Slip and Flow Processes in and below the Seismogenic Region*, 2004.

【備考】本研究の詳細については以下の論文を参照のこと

Garatani, K. B. Shibazaki, Y. Iio, T. Sagiya, H. Okuda, FEM modeling crustal deformation with non-linear visco-elasticity, plasticity, and faulting, this issue, 2004.

Shibazaki, B., Y. Iio, On the physical mechanism of silent slip events along the deeper part of the seismogenic zone, *Geophys. Res. Lett.* 30, 2003GL017047, 2003.

Shibazaki, B., H. Tanaka, H. Horikawa, Y. Iio, Modeling slip processes at the deeper part of the seismogenic zone using a constitutive law combining friction and flow laws, *Earth Planets Space*, 54, 1211-1218, 2002

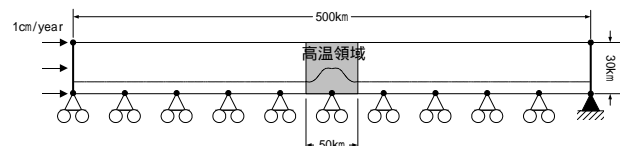


図 1 . 400x30 分割メッシュでの解析例。  
中心部に高温領域が存在する。

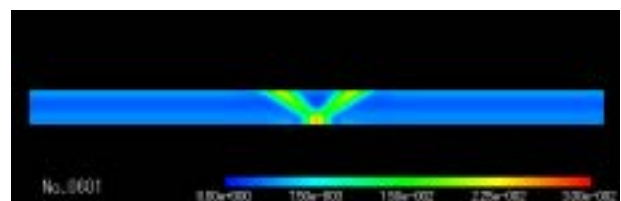


図 2 . 非弾性歪み (塑性歪み + 粘性歪み) の分布図。