

池田安隆 (2003) : 地学的歪速度と測地学的歪速度の矛盾, 「総特集 日本列島の地殻変動と地震・火山・テクトニクス (下) 多田堯先生を偲ぶ」, 月刊地球, 25 巻 2 号, 125-129 頁, 海洋出版.

地学的歪速度と測地学的歪速度の矛盾

池田安隆

東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

摘要

東北日本弧においては, 地質学定時間スケールで進行する長期的な歪み蓄積速度をおよそ一桁上回る早さで, 過去 100 年間にわたって大きな歪みが蓄積されている. この歪みを解消する巨大地震発生の可能性を議論する.

はじめに

変動地形学的手法で検出できる地殻変動は, 過去数千年から数十万年間に積算された変動である. 測地学的データから得られる短い時間スケールでの地殻変動像は, 変動地形学的に検出される長時間スケールの地殻変動像と一致しないことがしばしばあるが, ほとんどの場合その原因は理解されていない.

不一致の原因の一つは, 測地データに含まれる誤差であろう. 例えば, 長路線・大起伏路線に沿う水準測量データはしばしば系統的な誤差を含む (Reilinger and Brown, 1981, など). もう一つの可能な (そして多分もっと重要な) 原因は, 測地観測期間より長い周期で起こるサイクリックな変動の存在である. 氷床の蓄積/消耗に伴う表面荷重の変化によって生じるアイソスタティックな上下変動や, 海水準変動に伴うハイドロ・アイソスタティックな上下変動を, この例としてあげることができる. このようなサイクリックな変動は, その効果が蓄積しないから, 変動周期より十分長い時間スケールでは観測されない. 例

例えば、スカンジナビア半島や北アメリカ大陸の高緯度地域では、過去数億年以上にわたって安定な大陸プレートであった（図 1a）にもかかわらず、最大 6-8 mm/yr 以上という極めて大きな速度の隆起が水準測量によって観測されている。これらの地域では、巨大な氷床が約十万年周期で発達/消耗を繰り返してきた。最終氷期の氷床は 1 万数千年前から急速に消耗し、その結果生じた表面荷重の減少によって、現在この地域は急速に隆起している（図 1b）。

測地学的観測期間（約 100 年）より長い周期の「ゆらぎ」は、上記のような外作用に起因するものだけでなく、以下に述べるように、テクトニックな作用そのものにも内在するらしい。このような長周期のゆらぎの原因を正しく理解するには、地質学的なデータが決定的に重要な役割を演ずる。

東北日本における歪み蓄積過程

日本列島でも、測地学的データと変動地形学的データの間には、大きな不一致が存在するらしいことが従来から指摘されていたが、近年の両分野におけるデータの質・量両面の向上に伴ってこの不一致の存在が益々明確になりつつある。

日本列島において過去百年間の三角測量によって観測された水平歪み速度は、およそ 10^{-7} /yr のオーダーである（例えば、橋本，1990）。この傾向は近年の GPS 測量の結果をみても同様である。東西方向の水平短縮歪みは、東北日本、中部・近畿において特に集中している。一方、活断層の平均すべり速度から計算される第四紀の平均歪み速度（Wesnousky *et al.*, 1982 ; Kaizuka and Imaizumi, 1984）、新第三紀・第四紀の地層の変形量から見積もった鮮新世以降の歪み速度（Sato, 1994）、および過去 400 年間の歴史地震に伴う地震モーメント解放量から見積もった歪み速度（Wesnousky *et al.*, 1984）の 3 者はともに 10^{-9} /yr のオーダーであり、測地歪みよりおよそ一桁も小さい。測地学的に観測される東北日本陸域における東西方向の水平短縮速度は数十 mm/yr に達しており、太平洋プレートとユーラシア・プレートとの間の収束速度（90 mm/yr）に匹敵することに注意する必要がある。

垂直変位速度についても、測地学的時間スケールの変動速度と地質学的時間

スケールの変動速度とは大きな不一致を示す。このことは、東北・北海道の太平洋岸で特に顕著である。水準測量および検潮記録のデータによれば、東北・北海道の太平洋岸は数 mm/yr から 10 mm/yr という異常に速い速度で過去百年間にわたって沈降し続けている（加藤・津村，1979）。ところが、この地域には海成段丘が発達し、最終間氷期（100-125 kyr）の汀線高度は現在 10～数 10 m の高さにあるから（例えば、小池・町田，2001）、地質学的な時間スケールでは逆に 0.1～0.5 mm/yr ぐらいの速度で隆起しているのである。

日本海溝における巨大地震発生の可能性

上述の問題についての可能な解釈は以下の通りである（池田，1996）。日本列島の地殻変動は、基本的には、太平洋プレートが本州を含むプレートを押し縮めることによって生じる。日本列島の背後にある日本海と中国大陸のプレートは、ほとんど未変形である。一方、日本海東縁の大陸斜面を含む日本列島内帯は、リソスフェリック・マントルを欠くために変形しやすいらしい（図 2；嶋本，1989）。したがって、日本海溝のプレート境界断層が固着して滑らなければ、90 mm/yr 位の速さで西進する太平洋プレートの運動は、ほとんどすべて日本列島が縮むことによって吸収される。その結果我々は異常に大きな水平歪み速度を観測することになるだろう。また、太平洋プレートの沈み込みに伴って上盤側のプレートが引きずり込まれるから、太平洋岸では大きな速度の沈降を観測することになるだろう。もしそうだとすれば、現在蓄積されている大きな水平歪み（弾性歪み）は、日本海溝で起こるプレート境界地震によって解放されると考えられる；太平洋岸の急速な沈降も、このようなプレート境界地震に伴う隆起によってキャンセルされるであろう。

ところが不思議なことに、過去 100 年間に日本海溝沿いでは M7～M8 の地震がいくつか発生しているが、この規模の地震では水平歪みと沈降運動の解消は起こっていない。図 3 は、東部北海道太平洋岸の 2 つの検潮所における過去 30 年間の潮位記録を示す。海溝に近い釧路では、約 8 mm/yr の急速な沈降が観測されている。この観測点に近い浦河の潮位との差をとって季節変動を除去してみると、この沈降運動が極めて定常的に続いていることが分かる。過去 30 年間に、1973 年根室沖地震（M7.4）、1982 年浦河沖地震（M7.1）、1993 年釧

路沖地震 (M7.8), の 3 つ地震が起きているが, いずれの地震の際にも釧路における沈降をキャンセルする動きは観測されていない. 三陸から福島県沖の日本海溝でも過去 100 年間に M7~M8 の地震がいくつか発生しているが, 水平歪みと沈降運動の解消は起こっていない.

上述の M7~M8 級の地震では太平洋岸の沈降運動を解消できないばかりか, 1993 年釧路沖地震ではむしろ沈降を加速したようにみえることから判断すると, これらの地震の破壊領域は比較的浅く海溝寄りにあり, プレート間カップリング領域の深部まで達していないものと解釈される. 従って, 過去 100 年間以上にわたって蓄積された弾性歪みを解消させる地震イベントは, プレート境界面の固着を深部まで完全に断ち切るようなもっと大規模なものであるに違いない (図 4; 池田, 1996).

このような巨大デカップリング地震は少なくとも過去 100 年間起こっていない. それでは, もっと過去までさかのぼって歴史記録や変動地形学的データから巨大デカップリング地震の証拠が見つかるのであろうか? Atwater ほか (2002) は, 北海道東部太平洋岸における干潟の環境変遷を復元し, その結果この地域では 17 世紀に急激な離水 (隆起) が起こり, その後現在まで連続的に沈降していることが明らかになった. 17 世紀におけるこの急速な離水イベントの証拠は, 北海道東部太平洋岸に沿って (風蓮湖から厚岸まで) 少なくとも 50 km にわたって追跡できる. また, 平川ほか (2000) は, 十勝において津波堆積物を調査し, その結果過去 2500-3000 年間に 5 回の巨大津波が発生していることを明らかにした. このうち最新の巨大津波は, 標高 17m の段丘上まで遡上しており, これ以後発生した津波の規模を遥かに上回る. この津波は, 1667 年 AD に噴出した樽前火山起原の火山灰が降下する直前に起こっており, Atwater ほか (2000) が発見した離水イベントと同一の地震である可能性が高い.

東北日本弧の永久変形

現在東北日本弧に蓄積されつつある歪みの全てが, 日本海溝で発生する巨大デカップリング地震によって解消される訳では無い. 地質学的な観測データによれば, 東北日本弧の上部地殻内の水平短縮速度は, 現在測地学的に観測され

ている歪み速度のおよそ 10-20%であり,これは主として島弧内に発達する活断層のすべりによって生じる永久変形であろう.残る 80-90%の歪みは弾性歪みであり,巨大デカップリング地震によって解消されると考えられる.

一般に,大陸や島弧のプレートの中で地震が発生するのは 15 km ぐらいの厚さの上部地殻の中だけで,それより下の下部地殻やマントルの中では地震が起こらない.下部地殻では温度が高いために延性流動が生じ,そのために地震を起こすような急激な破壊が発生しないと考えられている.東北日本弧内帯は,高強度のリソスフェリック・マントルを欠き,下部地殻は直接アセノスフェアと接していると考えられている.東北日本弧において地質学的に観測されるゆっくりとした地殻水平歪みの蓄積は,上部地殻内ではプレート内活断層の活動によって,下部地殻内では延性的な流動によって生じる永久変形であると考えられる(図 4;池田, 1996).

本稿で述べたシナリオが事実かどうかを明らかにする鍵は,最近の地質時代における島弧内変形を正確に決定することであり,そのためには日本海東縁の海底を含む島弧内の活断層について,断層面の深部形態と正確なすべり速度とを明らかにする必要がある.

文献

- Atwater, B.F., Y. Ikeda, H.M. Kelsey, K. Satake, 2002, Chilean Analog for 17th-Century Uplift Along the Southern Kuril Trench, *Abstracts AGU Fall Meeting*.
- Atwater, B.F., E. Hemphill-Haley, R. Furukawa, Y. Ikeda, K. Kashima, K. Kawase, H.M. Kelsey, A.L. Moore, F. Nanayama, Y. Nishimura, S. Odagiri, Y. Ota, S.C. Park, Y. Sawai, K. Satake, K. Shimokawa, and M. Umitsu, 2002, Seventeenth-century uplift in eastern Hokkaido, Japan, *Holocene* (submitted).
- Fairbridge, R.W., 1983, Isostasy and eustasy, In: *Shorelines and Isostasy*, Smith, D.E., and A.G. Dawson (eds.), *Inst. British Geographers Spec. Pub.*, 16, 3-25.

- 橋本 学, 1990, 測地測量により求めた日本列島の地震間の平均的な地殻水平歪速度 (I): 本州・四国・九州, 地震, 43, 13-26.
- 平川一臣・中村有吾・原口強, 2000, 北海道十勝沿岸地域における巨大津波と再来間隔, 月刊地球, 号外 28, 154-161.
- 池田安隆, 1996, 活断層と日本列島の現在のテクトニクス, 活断層研究, 15, 93-99.
- Kaizuka, S., and Imaizumi, T., 1984, Horizontal strain rates of the Japanese Islands estimated from Quaternary fault data, Geogr. Rep. Tokyo Metrop. Univ., 19, 43-65.
- 加藤照之・津村建四朗, 1979, 潮位記録から推定される日本の垂直地殻変動 (1951~1978), 地震研究所彙報, 54, 559-628.
- 小池一之・町田洋, 2001, 日本の海成段丘アトラス, 東京大学出版会.
- Reilinger, R., and L. Brown, 1981, Neotectonic deformation, near-surface movements and systematic errors in U.S. leveling measurements: implications for earthquake prediction, In: D.W. Simpson, and P.G. Richards (eds.), Earthquake Prediction: An International Review, Am. Geophys. Union, 422-440.
- Sato, H., 1994, The relationship between late Cenozoic tectonic events and stress field and basin development in northeast Japan, J. Geophys. Res., 99, 22261-22274.
- 嶋本利彦, 1989, 岩石のレオロジーとプレートテクトニクス—剛体プレートから変形するプレートへ, 科学, 59, 170-180.
- Wesnousky, S.G., Scholtz, C.H., Shimazaki, K., and Matsuda, T., 1982, Deformation of an island arc: rates of moment release and crustal shortening in intraplate Japan determined from seismicity and Quaternary fault data, J. Geophys. Res., 87, 6829-6852.

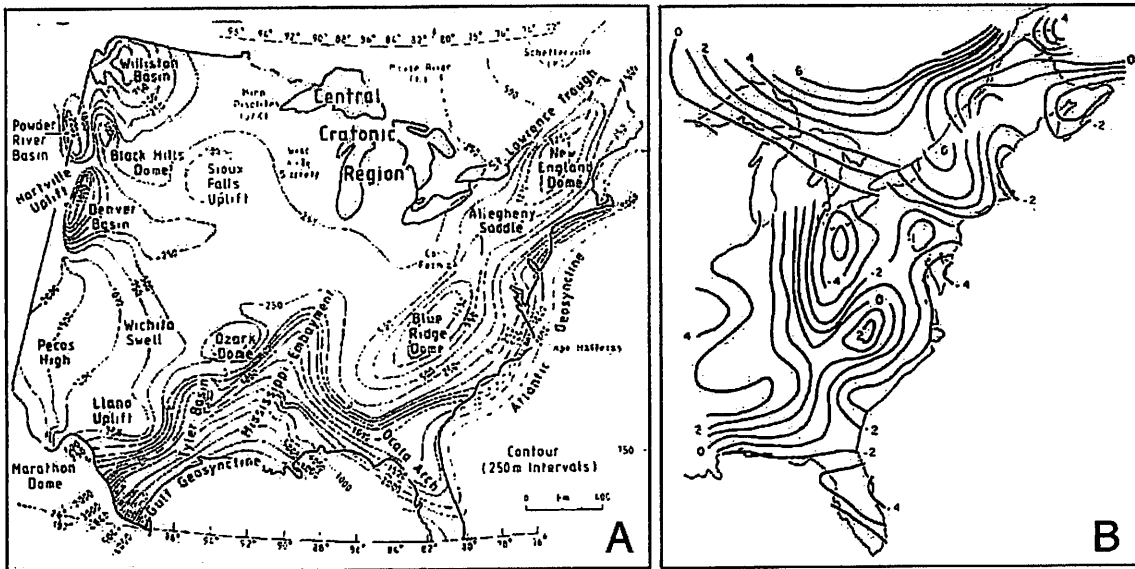


図 1. (A) 北米の安定大陸における中期中生代 (約 100 Ma) の準平原面の高度分布 (Fairbridge, 1983). 等高線は海拔標高 (単位 m) を示す. メキシコ湾岸のやや大きな沈降 (平均速度に換算すると $-0.06 \sim -0.07$ mm/yr) は, ミシシッピ川から供給される多量の堆積物の荷重によるアイソスタティックな変動である. これを除けば, 北米クラトンの大部分はほとんど無変形 (平均変位速度に換算して 0.005 mm/yr 以下) であることに注意. (B) 水準測量による北米大陸東部の垂直変位速度分布 (Brown and Reilinger, 1986). 等値線の単位は mm/yr. 図 A と比較して数桁大きな速度の変動が観測されていることに注意. 高緯度地域の最大 6 mm/yr を越える隆起は, ローレンタイド氷床の融解に伴うアイソスタティックな変動である. 五大湖より南でも数 mm/yr に達する大きな変動が観測されているが, この原因は分かっていない (測量誤差である可能性もある).

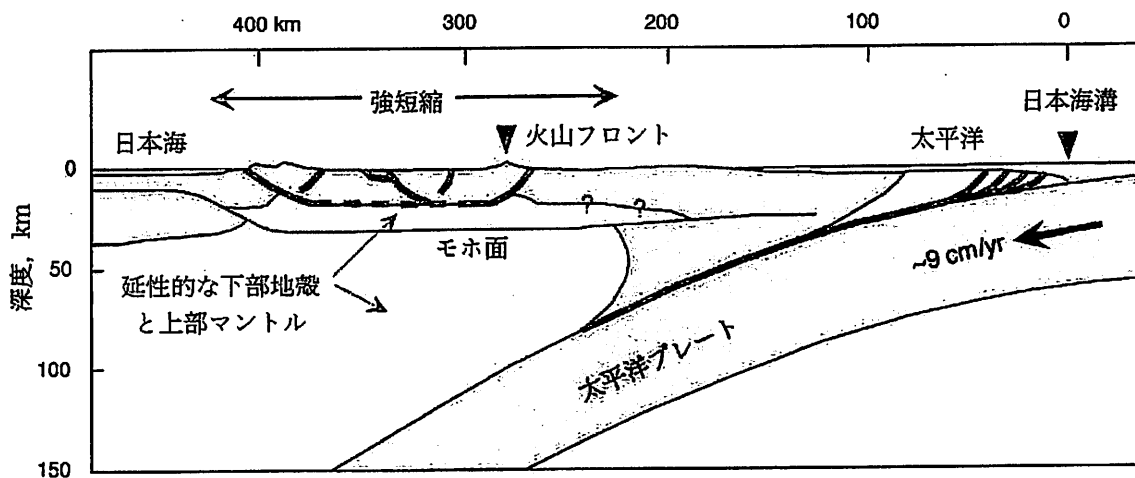


図 2. 東北日本弧を東西に横切る強度断面 (嶋本, 1989, を簡略化) と活断層の模式的な地下構造. 強度の高い部分を灰色で示す. 東北日本弧は, 強度の高いリソフェリック・マントルを欠

き、地殻が直接アセノスフェアと接している。そのために、プレートの強度が弱く、変形が集中しやすいと考えられる。

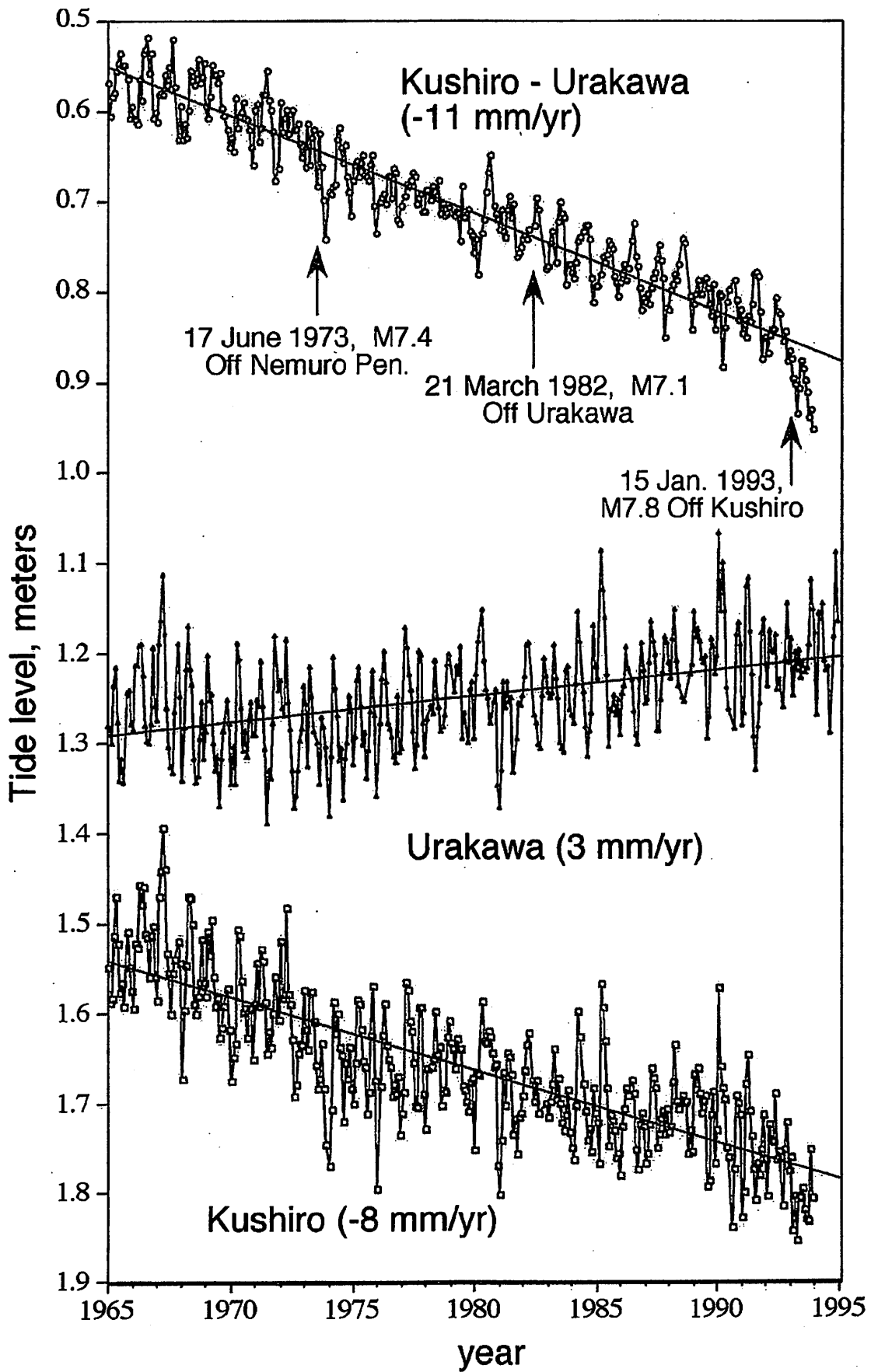


図 3. 北海道東部太平洋岸の 2 つの検潮所における過去 30 年間の潮位記録（気象庁および海上保安庁のデータによる）。海溝に近い釧路では、約 8 mm/yr の急速な沈降が観測されている。上のグラフは、浦河の潮位との差をとって季節変動を除去したもの。過去 30 年間に、1973 年根室沖地震（M7.4）、1982 年浦河沖地震（M7.1）、1993 年釧路沖地震（M7.8）、の 3 つ地震が起きているが、いずれの地震の際にも釧路における沈降をキャンセルする動きは観測されていない。

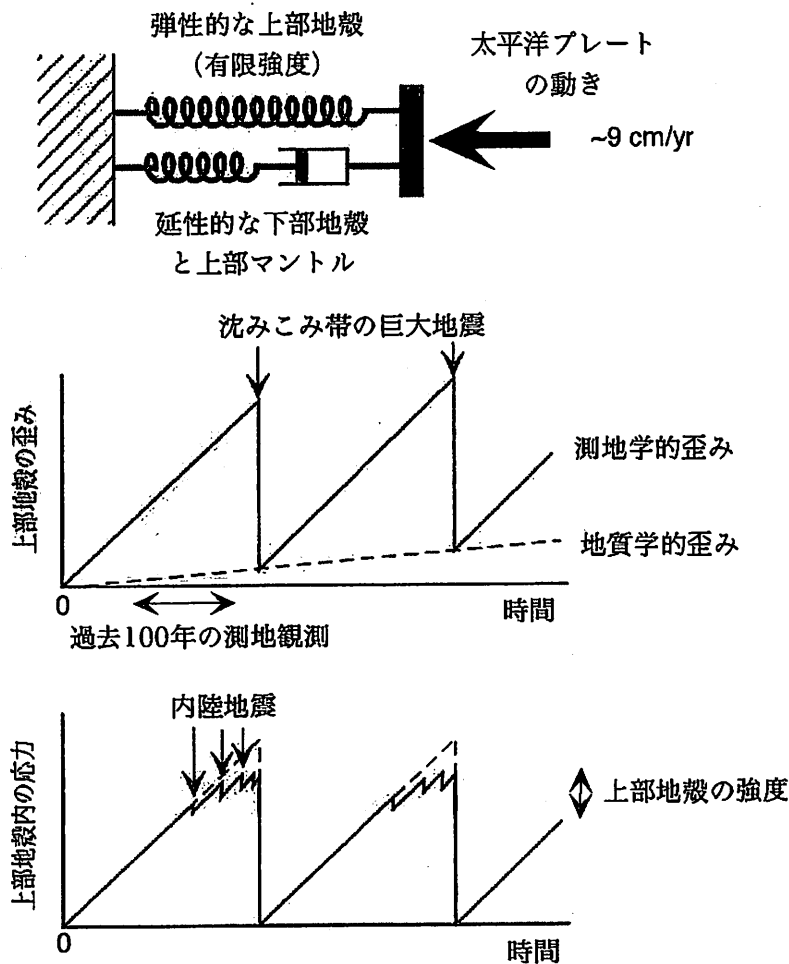


図 4. (上) 日本列島における地殻歪みの蓄積と解放の過程を説明する単純なモデル。上部地殻と下部地殻は、力学的に分離しているものとする。(中) 日本列島内帯の上部地殻の歪み蓄積過程。地質学的に観測される低速度の歪みは、下部地殻の流動を反映している。(下) 上部地殻内の応力。上部地殻内の応力が高まると、内陸活断層が動いて応力の一部を解消する。日本海溝で「たが」がはずれる（プレート境界断層が動く）と、上部地殻内の応力は一気に低下する。（池田，1996，による）