

地震と荷重の微妙な関係

日 置 幸 介

1. はじめに

一年の中で地震の発生数が多い季節と少ない季節があることは百年以上前から研究者の議論の対象であった(Omori, 1901; Mogi, 1969; 岡田, 1982)。なかでも南海・駿河・相模トラフの海溝型地震の発生時期が秋冬に偏っていることはよく知られている (Ohtake and Nakahara, 1999)。

季節の移り変わりは、地球の自転軸が黄道面（地球の公転面）にまっすぐでなく傾いていることにより、太陽の高さが年周変化するために生じる。一方地震は、プレートの動きによるゆっくりとしたストレス（応力）の蓄積の結果、断層がすべる現象である。一見無関係に思われる両者は、荷重(load)というキーワードを介して結びついている可能性がある。その心は、鯨の上に要石を置けば（地面を荷重で押さえつけば）断層が動きにくくなるのではということである。そして、雪や大気など荷重の多くは季節とともに変動する。本稿では日本列島における荷重の季節変化と地震活動の変化の関係について最近の研究を紹介する。

2. 荷重の季節変動：衛星による観測

2002年3月に米国によって打ち上げられたGRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 衛星は、同一の軌道に少しずつ投入された双子衛星から成る。片方の衛星がもう片方を追いかけるのである。地球の重力にはわずかながら強いところと弱いところがある。それに反応して衛星の速度が微妙に変動するため、二つの衛星の間の距離が変動する。それを電波で精確に測れば地球の重力場の全貌を短期間に決定できる。今までに、2002年以來の地球の一月毎の重力場が、球関数の次数で150次まで（緯度経度で1度くらいの大

きさの重力異常が見える細かさ）に展開され、その係数が研究者に公開されている。

GRACEの重要な科学目標は重力の季節変化や永年変化から大気、海洋、陸水（土壌水分や雪氷など）の動態や環境変動を解明することである。例えば南米アマゾン中流の水位は振幅10メートルにおよぶ季節変化をみせる。GRACEの初期成果として真っ先に捉えられたのが、アマゾン盆地にたまった水の量の変動がもたらす重力場の季節変化であった(Tapley et al., 2004; Davis et al., 2004)。アラスカ南東部の山岳氷河は地球の温暖化によって急激に縮みつつあるが、衛星から見た重力場には、氷の引力が減ることによる永年減少が検出されている(Tamisiea et al., 2005)。

地表にたまった水や氷は、重力を増やすだけでなく地殻変動をもたらす。荷重は地面を押し下げ、かつ水平方向に縮ませるのである。そのため荷重はGPS (Global Positioning System) 等で位置変化としても観測できる。アマゾン盆地中央部の都市、マナウスにあるGPS連続観測局の上下位置は河川の水位変動にともなう年間5cmから7.5cmというすさまじい振幅の季節的な上下変動を示す(Bevis et al., 2005)。これだけの荷重の変化があれば地下の応力状態も季節によって大きく変わるだろう。残念ながらアマゾン盆地はプレート境界から遠く、荷重によって地震活動が季節変動を示すことは知られていない。

さて、日本列島の日本海側はこの冬何十年ぶりの豪雪を記録し、雪が二階の窓まで積もった様子がテレビや新聞に繰り返して登場した。四季のはっきりした日本はアマゾンに負けない荷重変動大国である。荷重の変動が地震活動にどのような影響を与えるのか、次の章でもう少し定量的に考えてみたい。

3. クーロン破壊応力の永年変動と季節変動

寺田寅彦は大正五年三月に「現代の科学」に次のように書いている。「・・・地殻の歪が漸次蓄積して不安定の状態に達せる時、適当なる第二次原因たとえば気圧の変化のごときものが働けば地震を誘発する事は疑いなきものごとし。ゆえに一方において地殻の歪を測知し、また一方においては主要なる第二次原因を知悉するを得れば地震の予報は可能なるらしく思われる。この期待はいかなる程度まで実現されうべきか・・・」。

現代の地球物理学者は、地震の誘発の議論に、クーロン破壊応力(Coulomb Failure Stress, CFS) と呼ばれる量をしばしば用いる。これは特定の場所の特定の種類(横ずれとか逆断層とか)の断層に対して、その断層をずらすとする岩盤中の力の度合いを示す量である。断層をずらすせん断応力と(断層をずらす向きに正)、断層の法線応力(断層を押さえつける力がゆるむ方向に正)に摩擦係数をかけたものの和であり、単位面積あたりの力(単位Pa、 1 m^2 あたり1Nの力)として表される。せん断応力はプレート運動等の原因で徐々に増え、近くで発生した地震や雪等の地表の荷重の消長などによる擾乱(ΔCFS)がそれに加わる。月や太陽の引力による潮汐力も同じような擾乱を与えるが、潮汐と地震活動との相関も古くから議論されている。これらに関しては多くの研究があるので、興味のある読者はCochran et al. (2004)等を参考にしたい。

応力が断層固有のしきい値を超えたときに破壊が始まるとすると、正(負)の ΔCFS は次の地震を早め(遅らせ)る。近傍で発生した地震はステップ状の ΔCFS をもたらす。季節的な荷重の変動、地球潮汐等は周期的な ΔCFS をもたらす。周期的な ΔCFS が地震の発生時期に影響を与えるかどうかは、その振幅と永年的な上昇との量関係で決まる。一年周期の ΔCFS がある場合を考えてみよう。テクトニックな原因による応力の永年上昇率を一年で $a\text{ Pa}$ とし、表面荷重の消長による年周変動の振幅を $b\text{ Pa}$ とすると、 $d\Delta\text{CFS}/dt$ に比例する

瞬時の地震発生相対確率は $a-2\pi b$ と $a+2\pi b$ の間を一年周期で変動する。比 $2\pi b/a$ は、定常的な地震活動と季節変化分の比 P_m/P_0 (Lockner and Beeler, 1999)になる。

応力の永年上昇率 a はどの程度だろうか。プレート間地震で生じる応力降下を数MPa、繰り返し間隔を100年とすると、せん断応力の永年的な蓄積速度は年間数十kPaと考えられる。内陸地震では応力降下が大きい、繰り返す間隔も長くなるため応力が蓄まる速度はこれと大差ないと考える。 b が a の1/10の場合を図1aに示すが、 $d\Delta\text{CFS}/dt$ は大きな変動を受け地震発生確率は季節変動を見せる($P_m/P_0 \approx 0.6$)。なお地震発生確率の極大は $d\Delta\text{CFS}/dt$ の極大に重なり、 ΔCFS 自体の極大より1/4年早い(例えば積雪荷重は負の ΔCFS をもたらすため地震発生の極大はCFS最大の夏の無雪期ではなく1/4年早い春の雪どけに重なる)。

図1bは周期成分が永年上昇に比べて大きい場合($a < 2\pi b$)を示す。周期の短い(すなわち一周期の間の永年増加が少ない)半日周の潮汐による地震の誘発等がこれに相当する。この場合は図1bに示すように永年変化と周期変動の合計が負の傾きを示す時期が生じ、応力が過去の極大値を越えるまで時期地震発生確率がゼロとなる「影」の期間が生じる。この場合地震発生確率の極大は $d\Delta\text{CFS}/dt$ 極大より ΔCFS 自身の極大の方にずれる。

4. 日本列島における荷重の季節変化

季節変化する荷重の代表は大気と積雪の荷重であろう。大気圧の平均値はおよそ100kPa(1000hPa、 1 m^2 あたり10tの荷重に相当)であるが、その一部が季節変化し、日本列島の大部分では冬季に気圧が高くなる。Ohtake and Nakahara (1999)は、陸域で冬に大気圧が約1kPa上がることが南海・駿河・相模トラフの地震が起りやすくしていると考え、陸域での大気圧上昇がプレート境界の逆断層のせん断応力をどれくらい増加させるかを見積もっている。しかし計算結果はわずか数十Paであり、地震発生に影響をおよぼすには小さすぎ

ると結論づけた。一方 Heki (2001)は、積雪荷重は最大で大気圧の季節変化より一桁大きいことを示したが、それでも海溝型地震の断層における ΔCFS (主にせん断応力の増加が効いている) は高々0.1 kPa に過ぎず、やはり地震活動への影響はないと考えた。前の章の議論からわかるように、地震に季節性をもたらすには ΔCFS の振幅は、数 kPa が必要なのである。

GPS 局の座標に見られる季節変化成分は、ゆっくり地震などの検出の妨げになる。Heki (2001)は、それらのかかなりの部分は積雪荷重の季節変化によるものと考えた。Heki (2004)はその考えを発展させ、積雪荷重だけでなく、大気荷重、ダム貯水による荷重、土壌水分の荷重、非潮汐性の海洋荷重など、日本列島陸域にはたらく荷重を様々なモデルとデータから計算した。それら荷重の季節変化から生じる水平、上下の地殻変動を計算し、GPS で見られる年周地殻変動と良く一致することを確かめた。日本では稠密 GPS 網のおかげで、衛星重力ミッションを待たずとも陸水の季節的な挙動がかなり明らかにされているのである。

最も大きな荷重変動をもたらすものは積雪である。日本列島には AMeDAS 積雪計による積雪深度のデータがあるが、設備の都合で標高の低い谷沿いに設置されており実際の平均的な積雪深度よりかなり低い値を示す傾向がある。Heki (2004)では、地域毎に積雪深度と標高を一次式で関係付け、地域毎の平均標高における積雪深度を計算して実際の積雪深度とした。さらに初冬から雪どけに季節が進行するに従って増大する積雪密度は、全国数点の積雪断面調査の結果を参考に補正した。日本全国を細かいブロックに分けて積雪加重の季節変化を求め、水に換算した振幅をヒストグラムで示したものが図2である。大きい場所では、雪は水の深さで1 m を超える荷重をもたらす。

5. 日本列島の内陸地震発生時期の季節性

このような大きな年周変動を示す積雪荷重や大気荷重であるが、既に述べたように海溝型地震の

断層面に及ぼす応力の擾乱は無視できるほど小さい。しかしそれらが直下の地震断層へ与える応力の擾乱はかなり大きいに違いない。これらの荷重が内陸地震の発生時期に影響を与える可能性はある。過去の論文では大規模地震の発生時期のみを扱っており (Mogi (1969)は近代では $M \geq 7.5$ 、歴史地震は $M \geq 8$ としている)、 $M 7.5$ を越えることがまれな内陸地震は十分な議論の対象となっていなかった。ここでは内陸地震に注目し、その発生時期の季節性と積雪荷重の関係を見てみよう。

宇佐美(1996)がまとめた過去の被害地震から内陸地震($M \geq 6.0$)を取り出し、その震源を図2に示す。これらの地震をもたらす断層は、東北日本では脊梁山脈と平野部を分ける高角逆断層(千屋断層等)が多く、それらの走向はプレート収束方向に垂直、つまり積雪帯に平行である。中部・西南日本では横ずれ断層が支配的であり、西北西—東南東のアメリカ北米プレート収束方向(図3)を反映し、西南西—東北東(跡津川断層等)または北北西—南南東(根尾谷断層等)の共役断層群が発達する。それらの走向は積雪帯にそれぞれほぼ平行および垂直である。

単純な島弧と積雪帯の形状を仮定し、積雪荷重がもたらす断層面の法線応力を計算したものを図4に示す。幅200km、長さ1000kmの南北走向の島弧を考え、幅140kmの積雪帯を島弧西端におく。積雪の最深部は島弧中心軸の30km西で2.5mとする。平均積雪密度を 0.4 g/cm^3 とすると(Heki, 2001)、これは積雪最深点での荷重は深さ1mの水、または大気圧10 kPaの増加に相当する。西に45度傾き下がる逆断層(図4a)と、鉛直な横ずれ断層(図4b)を仮定する。いずれも走向は積雪帯に平行とする。荷重に対する岩盤の弾性変形はFarrell (1972)に基づいて計算した(剛性率: 30 GPa、ポアソン比: 0.25)。内陸地震の発生深度は高々10-20kmなので地球は半無限弾性体で近似した。

いずれの場合も断層の法線応力(圧縮)は積雪帯を中心に5 kPaを超える(図4bで断層走向を積雪帯に垂直にするとこの値は1/3程度減少)。荷重によって逆断層ではせん断応力も変化し(法線

応力のおよそ 1/3 で断層ずれを押さえる向き)、 ΔCFS の減少に貢献する(摩擦係数を 0.5 とすると全体で ΔCFS は -5kPa)。一方横ずれ断層では走向が積雪帯に垂直、平行にかかわらず積雪荷重によるせん断応力は生じないため、法線応力に摩擦係数を掛けたものがそのまま ΔCFS となる(摩擦係数 0.5 で $-2\sim 3\text{kPa}$)。いずれの場合も ΔCFS は負で大きさは数 kPa となり、永年的な応力の蓄積が数十 kPa/yr だとした場合、地震活動に有意な季節変化を与えることができる。

岡田(1982)は内陸地震を積雪地域内で発生したものとそれ以外に分けて月別の発生数を調べ、前者が春夏に多いことを示唆した。Heki (2003)は宇佐美(1996)の新しい被害地震カタログを用い、かつ積雪地域を過去 5 年間のアメダス積雪計データによる平均最大積雪量が 20 cm を越える地域として改めて定義し、岡田(1982)と同様の傾向を確認した。積雪地域とそれ以外について、地震発生回数を二ヶ月毎のヒストグラムで図 5a,b に示す。茂木(1969)や岡田(1982)に倣って余震は除外し、かつ一年以内に近傍で同程度の規模の地震が発生した場合は最初の地震のみ勘定した。積雪地域(丸)とそれ以外(三角)で発生した内陸地震の震源を最大積雪深度とともに図 5c に示す。

積雪地域の 26 個の $M7.0$ 以上の地震の発生時期(図 5a)は岡田(1982)に示されたとおり春夏に多く、雪のない地域での地震(図 5b)はそのような傾向を示さない。しかし図 5a に古典的な検定法(Schuster, 1897)を施すと、これがランダムな現象の結果である(季節性がない)という仮説を 95%以上の信頼度で棄却できない。これは地震の数が少ないため、必ずしも季節性の存在を否定するものではない。

Lockner and Beeler (1999)のように地震発生数の推移を定常成分(P_0)と季節変化成分(P_m)に分けて考えると、後者は前者のおよそ半分となる(図 5a の曲線)。この値は従来知られている最も有意性の高い半日周潮汐との相関(e.g., Wilcock, 2001; Cochran et al., 2004)の検出例よりも大きい。図 5a と相似な月別分布で地震数が増加すれば 54 個を

越えた時点で上記の検定に 95%の信頼性で合格する。それにはあと千年の時間が必要であるが、潮汐との相関が数百や数千という地震の発生時刻を統計処理してようやく有意とされることを考えると、54 個という数は小さいといえる。

この研究の動機は、年周地殻変動の主な原因として同定された積雪荷重の地震発生への影響評価である。したがって Heki (2003)は地震発生の季節性が統計的に有意であることは主張していない。また有意であっても秋冬に地震が発生しないわけではないので、防災的な意義もさほどないだろう。しかし季節変化の位相(最大確率時期が雪どけ期に重なる)や振幅($P_m/P_0 \approx 0.5$ は、 ΔCFS の周期変動が永年変化の 1/10 程度という推定に調和的)が雪どけ(積雪荷重の除去)が地震を誘発するという考察を支持することは地球物理学的に興味深い。

6. おわりに

Mogi(1969)や岡田(1982)で指摘されているように、地震発生時期の季節変化は小規模の地震で不鮮明になる傾向がある。図 5a でも $7.0 > M \geq 6.0$ の地震の二ヶ月毎の発生時期を示す白いヒストグラムには明瞭な季節変化が見られない。Heki (2003)は大きな地震ほど季節性が出やすいのは、大きな地震ほど震源核形成に長い期間を必要とするためと考えた。

Shibazaki and Matsu'ura (1992)は地震の発生過程を、準静的な震源核形成、それに続く動的加速フェーズ、最終的な主破壊、の三段階に分けた。Ellsworth and Beroza (1995)は地震計記録の初期フェーズ(上記の動的加速フェーズに相当)を分析して、地震の最終的なサイズが大きいほど初期フェーズの継続時間が長いことを見出した。準静的な震源核形成がどの程度継続するのかについては明瞭な測地学的観測の例はないが、大きな地震ほど継続時間が長いと考えることは自然である。Kato and Hirasawa (1999)は摩擦構成則に基づく数値実験で、東海地震のようなプレート間地震の前兆すべりの継続時間は数日に及ぶことを示唆した。

もし $M \geq 7.0$ の地震の震源核形成が数日またはより長い時間スケールで生じるなら、それらの地震は半日周潮汐などの短周期の CFS 変動には反応せず、積雪荷重のような長周期の変動にのみ反応するであろう。震源核形成に要する時間が短い小規模地震は逆に潮汐や気圧変動等の短周期変動によって簡単にトリガーされ、その発生時期の季節変動が不明瞭になるのではないか。なお融雪に伴う地下水水位の上昇が断層における間隙水圧を上昇させ、地震発生を誘発するという考えもあるが、その場合の CFS 変動を定量的に見積もることは難しいかも知れない。

さて積雪荷重が海溝型地震の発生に影響する可能性が小さいことは既に述べた。岡田(1982)は海面高の季節変化による荷重変動が海溝型地震の発生に影響している可能性を示唆した。太平洋側の検潮所はいずれも 20cm におよぶ海面高の季節変動(9月に最も潮位が高くなる)を示す。これが積雪と同じく海溝型地震の発生時期に影響すると考えると、最大潮位の1/4年後の12月に地震発生数が極大を示す傾向(Ohtake and Nakahara, 1999)と調和的である。

潮位の季節変動の大部分は質量の変化を伴わない海水の熱膨張に過ぎないことが知られている。しかし国立天文台江刺地球潮汐観測施設で連続観測を行っている超伝導重力計には明瞭な年周変動が見られる。それによると、海面高変動のかなりの部分が熱膨張ではあるが、それらの補正後も日本近海で10-20cm程度の質量変動が残留するらしい(Sato et al., 2001)。これは非潮汐性の海水荷重の季節変動が海溝型地震の発生時期の季節性をもたらしている可能性を示唆し興味深い。しかし最終的な結論を出すには、海底圧力計(Fujimoto et al., 2003)や衛星重力ミッションによって、日本近海の海水質量の季節変動を計測する等の直接証拠が必要だろう。

参考文献

Bevis, M., D. Alsdorf, E. Kendrick, L. P. Fortes, B. Forsberg, R. Smalley Jr., and J. Becker,

2005, Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L16308, doi:10.1029/2005GL023491.

Cochran, E.S., J.E. Vidale, and S. Tanaka, 2004, Earth tides can trigger shallow thrust fault earthquakes, *Science*, 306, 1164-1166.

Davis, J.L., P. Elosegui, J.X. Mitrovica, and M.E. Tamisiea, 2004, Climate-driven deformation of the solid Earth from GRACE and GPS, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L24605, doi:10.1029/2004GL021435.

Ellsworth, W.L. and G. C. Beroza, 1995, Seismic evidence for an earthquake nucleation phase, *Science*, 268, 851-855.

Farrell, W. E., 1972, Deformation of the Earth by surface loads, *Rev. Geophys. Space Phys.* 10, 761-797.

Fujimoto, H., M. Mochizuki, K. Mitsuzawa, T. Tamaki and T. Sato, 2003, Ocean bottom pressure variation in the southeastern Pacific following the 1997-98 El Nino event, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1456, doi:10.1029/2002GL016677.

Heki, K., 2001, Seasonal modulation of interseismic strain buildup in northeastern Japan driven by snow loads, *Science*, 293, 89-92.

Heki, K., 2003, Snow load and seasonal variation of earthquake occurrence in Japan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 207, 159-164.

Heki, K., 2004, Dense GPS array as a new sensor of seasonal changes of surface loads, in *The State of the Planet: Frontiers and Challenges in Geophysics*, edited by R. S. J. Sparks and C.J. Hawkesworth, *Geophys. Monograph*, 150, 177-196, American Geophysical Union, Washington.

Kato, N. and T. Hirasawa, 1999, A model for possible crustal deformation prior to a coming large interplate earthquake in the Tokai district, central Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 1401-1417.

Lockner, D.A. and N.M. Beeler, 1999, Premonitory slip and tidal triggering of earthquakes, *J. Geophys. Res.* 104, 20,133-20,151.

Mogi, K., 1969, Monthly distribution of large earthquakes in Japan, *Bull. Earthq. Res. Inst.* 47, 419-427.

Ohtake, M. and H. Nakahara, 1999, Seasonality of great earthquake occurrence at the northwestern margin of the Philippine Sea Plate, *Pure Appl. Geophys.* 155, 689-700.

岡田正実, 1982, 日本付近の大地震発生の季節変動と地域性, *地震* 2, 35, 53-64.

Omori, F., 1902, Annual and diurnal variations of seismic frequency in Japan, *Pub. Earthq. Invest. Comm.* 8, 1-94.

Sato, T. et al., 2001, On the observed annual gravity variation and the effect of sea surface height variations, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 123, 45-63.

Schuster, A., 1897, On lunar and solar periodicities of earthquakes, *Proc. R. Soc. London* 61, 455-465.

Shibazaki, B. and M. Matsu'ura, 1992, Spontaneous processes for nucleation, dynamic propagation, and stop of earthquake rupture, *Geophys. Res. Lett.* 19, 1189-1192.

Tamisiea, M.E., E.W. Leuliette, J.L. Davis, and J.X. Mitrovica, 2005, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L20501,

doi:10.1029/2005GL023961.

Tapley, B., S. Bettadpur, J.Ries, P. Thompson, and M. Watkins, 2004, GRACE measurements of mass variability in the Earth system, *Science*, 205, 503-505.

宇佐美龍夫, 1996, 新編日本被害地震総覧 (増補改訂版), 東京大学出版会, 493 pp.

Wilcock, W.S.D., 2001, Tidal triggering of microearthquakes on the Juan de Fuca Ridge, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3999-4002.

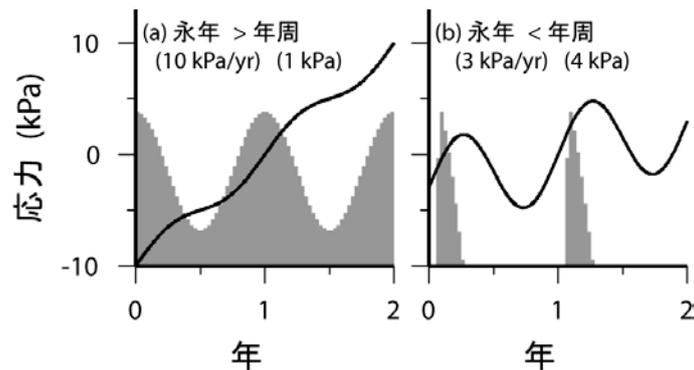


図1 永年的に増加する応力と周期的な変動の組み合わせ (黒い曲線)。それらから予測される地震活動度の変化 (灰色のヒストグラム) は定常的(P_0)および年周的(P_m)な項からなる (縦軸は相対値)。(a) は永年増加が比較的大きい場合、(b)はその反対の場合で、応力値が過去の最大値より小さい期間(stress shadow)が生じる。

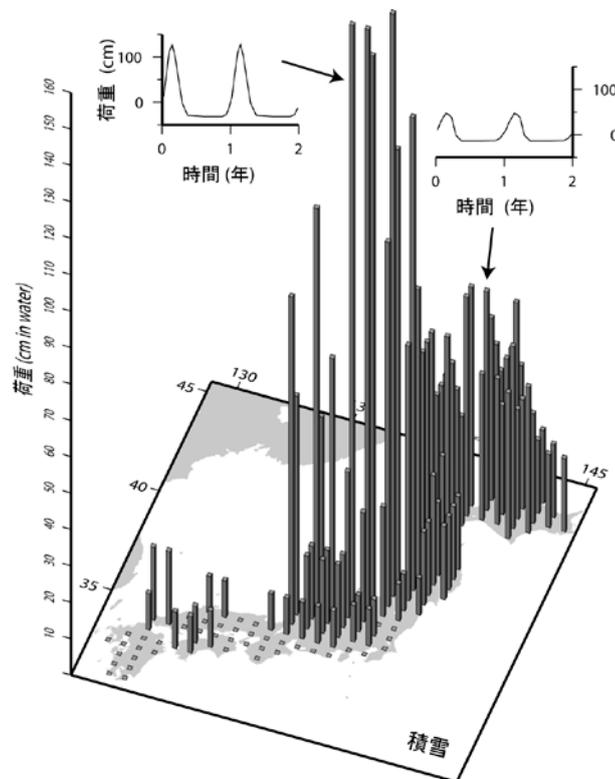


図2 ブロックに分けた日本列島各地の積雪荷重の変動の振幅の大きさ(Heki, 2004)。うち二つのブロックについて時系列を小さく示している。AMeDAS 積雪計データに標高の補正を行い、さらに積雪断面調査に基づく積雪密度をかけたものを基礎データとしている。

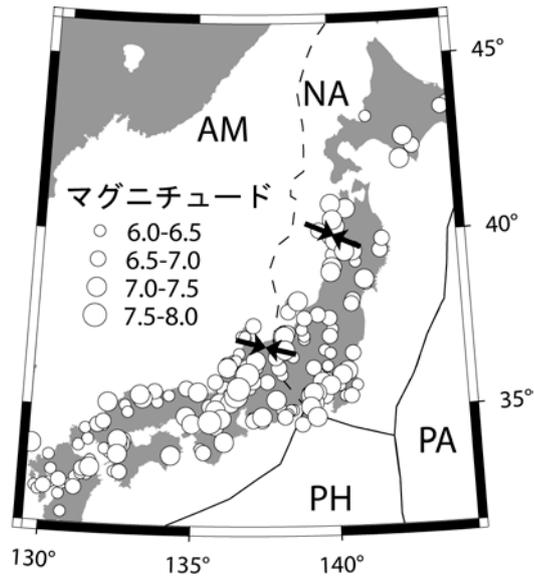


図3 宇佐美(1996)に基づく過去の被害地震($M \geq 6.0$)の震源。AM,NA,PA,PHはアムール、北米、太平洋、フィリピン海の各プレートを示す。黒い矢印はNA-PA およびNA-AM の収束方向(長さには意味はない)。

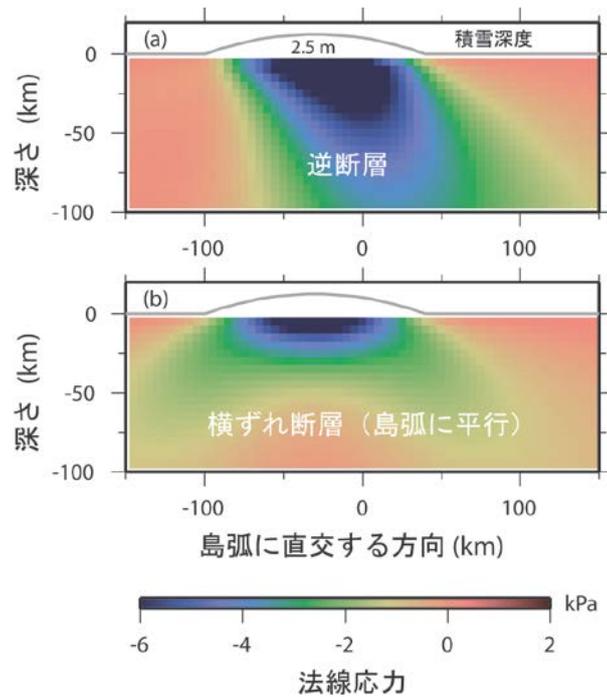


図4 断層の法線応力(圧縮を正)分布の断面を逆断層(走向は島弧に平行、45度で西落ち)(a)、および横ずれ断層(走向は島弧に平行)について描いたもの。島弧の幅は200 km(-100 km から+100 km)で、その西側(-100 km から+40 km)が積雪で覆われ、-30 km 地点で最大深度2.5 mの値をとる(曲線)と仮定。

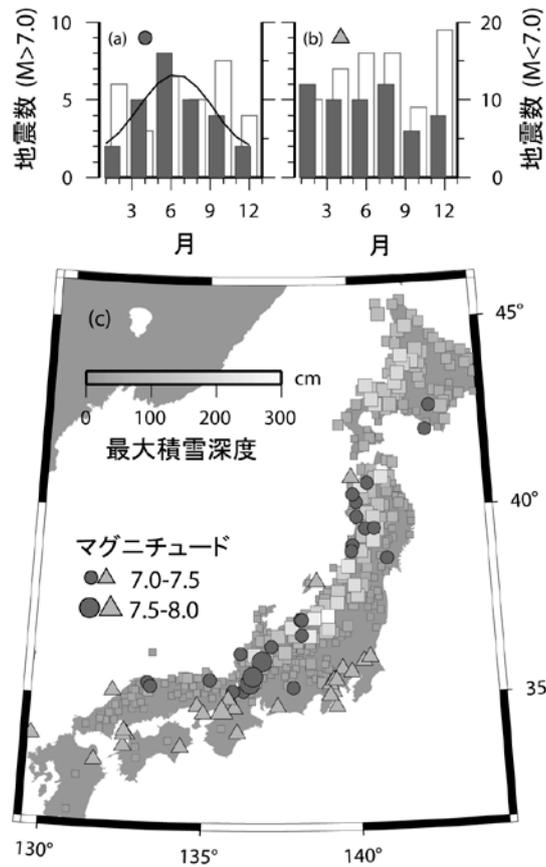


図5 (a)積雪地域、(b)それ以外で発生した内陸地震の発生時期を二ヶ月ごとのヒストグラムで描いたもの。灰色と白のヒストグラムはそれぞれ $M \geq 7.0$ (ラベルは左側) および $7.0 > M \geq 6.0$ (ラベル右側) の地震に関するもの。(c)で灰色の四角は AMeDAS による過去5年間の平均最大積雪深度を示す (20.0 cm 以上の地点のみ)。 $M \geq 7.0$ の地震の震源を積雪地域とそれ以外ではそれぞれ丸と三角で示す。(a)に描かれた曲線は定常成分および年周変化成分の二つを仮定した場合の最適確率密度曲線。