

II

近畿地方のひずみ集中帯と 内陸地震

京都大学防災研究所
地震災害研究センター 教授

西村 卓也氏



まず、地殻変動・断層と地震の関係について説明します。【図1】

大地の動き = 地殻変動

- 「地殻変動」
 - 地殻に生ずる動き、また、それによって起こる種々の変形・変位、隆起・沈降、断層や褶曲、造山運動など。（大辞林より）
 - 地震に伴う地殻変動などを除いて私たちが実感することはできない微小な動きである。地殻変動が活発な場所でも爪の伸びる長さと同程度のため、検知するためには、精密な測量が必要。
 - 地震によって生じるが、地震だけが原因ではない。




東北地方太平洋沖地震によって沈没した船川港（宮城県石巻市）
兵庫県南部地震で浜島島に現れた地表地殻断層（大阪府区民会館前）

図1

私は地殻変動を通して、断層にどのように力がかかっているのかを詳しく調べています。

この地殻変動という言葉は、一般に様々なところで使われている言葉ですが、辞書を引いてみると『地殻に生ずる動き、また、それによって起こる種々の変形・変位、隆起・沈降、断層や褶曲、造山運動など』と書かれています。

地震のときは、1 mから数mという非常に大きな地殻変動が起こるのですが、普段も、私達の実感することのできない微小な地殻変動は常に起こっています。ただ、それは爪の伸びる長さや髪の毛の伸びる速さと同程度のスピードで起こっているため、検知するためには、精密な測量が必要になります。

これは【図2】、ニュージーランドの地震によって隆起した断層の写真です。この写真では、右側が陸地になっていますが、実は地震が起こる前は、右側も全部海だったのです。ここにまっすぐ線のように伸びているところが、地震のときに隆起した跡です。この隆起によって右側が陸地になったわけで、断層が実感できるような事態が起こったのです。

地震は断層のずれによって生じる



2016年のニュージーランドの地震によって隆起した海岸
<http://humbler.net/earthquake-mag10/the-most-complex-fault-rupture-ever-2771/>

震源が浅い地震では、実際に断層のずれが地表に現れて、観察できる。地表まで断層のずれが達しなくても、地下でずれれば地表にも変形は現れる。

図2

地震は度々同じ場所で数千年、数万年に繰り返して起こり、そのような中で、どんどん地形も変化を見せるのです。

これは【図3】、その断層のずれを模式的に書いたものです。もともと、川や谷はまっすぐできるものなのですが、ちょうど図のこのラインでは、断層が地下にあったこともあり、地震の度にずれていくということが起きると、もともと、まっすぐだった谷も、まっすぐ流れていた川も、断層を挟んで横にずれるような動きになるのです。このように地震が繰り返し、断層のずれが累積して出来た地形を活断層と言います。

地震が作った活断層



活断層のずれによってできた地形
『新編日本の活断層』(活断層研究会編、1991年)より

A: 三角末端面 B: 活断層 C: 断層 D: 谷 E: 断層谷 F: 地溝
G: 横ずれ谷 H: 断層谷 I: 断層谷 J: 断層 K: 断層 L: 断層 M: 断層 N: 断層 O: 断層 P: 断層 Q: 断層 R: 断層 S: 断層 T: 断層 U: 断層 V: 断層 W: 断層 X: 断層 Y: 断層 Z: 断層

- 地震が繰り返し発生し、断層のずれが累積してできた地形が「活断層」
- 活断層で大地震が起こりやすいのは確かだが、活断層と認められていないところでも大地震は発生する。

図3



活断層は、過去に地震が何度も繰り返した痕跡です
から、将来もこのような活断層のある地点では、地震
が起りやすいだろうと考えられています。

ただ、このようにわかりやすく地形的に活断層とし
て認定されるところだけで、全ての地震が起こってい
るわけではありません。地震によっては地表での痕跡
が小さかったり、あるいは地震によってこのように谷
がずれても、その後雨が降ったり洪水が起きたりする
と、それが綺麗に残るとは限りません。今、我々が地
表で見ても、それが断層かどうかわからない場合も多
いです。活断層で地震が起りやすいというのは勿論
確かなのですが、今、活断層だと思われていないとこ
ろでも地震が起ることに留意してください。

京都の周辺も、活断層で覆われています。

そもそも盆地がどのようにできるのかというと、盆
地の中のいわゆる平らな部分は、どんどん地面が沈下
していき、それをまわりから河川等で集まってくる土
砂が埋め立て、平らな土地が形成されていき、一方、
周りの山地はどんどん隆起していきます。このように
して、盆地は形成されたのです。そのような地面の隆
起沈降は何が原因かという、地下の断層の動きで
す。すなわち、京都盆地は地震が造ったといっても過

言ではありません。【図4・図5】

次に、地震の基礎的な知識について簡単に説明させ
ていただきます。【図6】

震度とマグニチュードは、よく間違えられる概念で
す。地震の強さを表すのによく震度とマグニチュード

震度とマグニチュード

・震度

- ・地震動(ゆれ)の強さを表す尺度
- ・1つの地震でも場所によって異なる。基本的には震源から遠ざかるほど小さくなる。特に地盤の影響によって、すぐそばでも2段階程度異なることもある。
- ・0, 1, 2, 3, 4, 5弱, 5強, 6弱, 6強, 7の10段階



明るさ(震度)は人のいる場所によって異なる

・マグニチュード (M)

- ・地震(断層のずれ)の規模を表す尺度
- ・0~10程度の範囲。被害が生じるような地震は、通常M6以上。
- ・マグニチュードにも決め方が何種類あり、日本では気象庁マグニチュードが一般的に使われる。



マグニチュードは電球自体の明るさに対応

図6

が使われるのですが、震度というのは、ある場所の地
震の揺れ、地震動の強さを表す尺度です。一つの地震
でも場所によって異なり、基本的には震源から遠ざ
かっていくほど小さくなります。ただ必ずしも震源か
ら遠ざかると単純に小さくなるというものでもなく、
特に地盤の影響もあり、2段階程度変わることがあり
ます。一方、マグニチュードは、震度とは違い、地震
について一つしかなく、地震の断層のずれの規模を表
す尺度です。これが大きければ大きいほど、地震の規
模が大きいということなのですが、大体被害が生じる
地震というのは、マグニチュード6以上の地震です。
マグニチュードというものは、決め方が何種類かあ
り、日本では、気象庁が定めるマグニチュードが一般
的に使われています。電球と明るさで説明すると、マ
グニチュードというのは電球の大きさ、電球のワット
数に対応します。それに対して震度というのは、地震
動の強さを表す尺度ですから、その場所の明るさに対
応し、場所によって異なります。

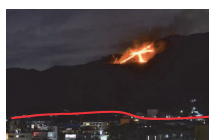
日本列島では、地震が非常に多いというのが実状で
す。

この図【図7】は1ヶ月間の日本付近で発生する地
震の分布で、震源の位置を○印で書いたもので、その
○印の色が震源の深さを表しています。赤系統が比較
的浅いところで起こる地震を表し、黄色から緑、青に
いくに従って震源が深いところで起こる地震を表して
います。ですから、日本列島で多いのは赤で示されて
いる震源が浅い地震ですが、深い地震が結構起って

京都の風景も地震が作った



東寺と京都西山



大文字山



石清水八幡宮から京都盆地を望む

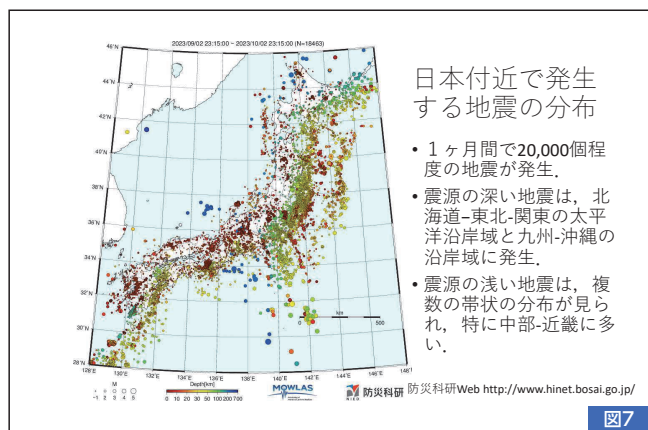
地震などによる地殻変動が長期間累積して山や平野が出来た。京都盆地は活断層に囲まれている。

図4

京都盆地周辺の活断層



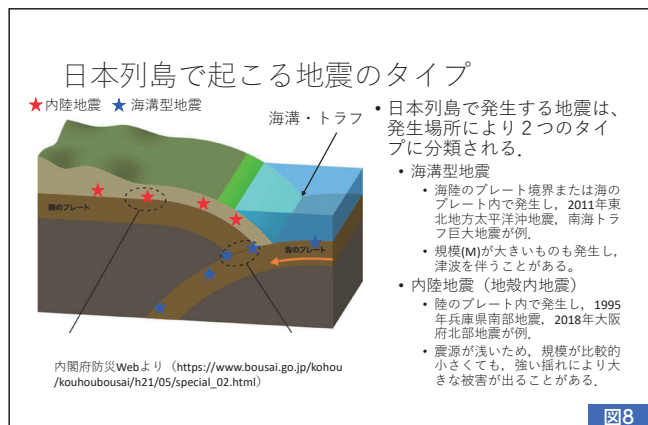
図5



いるところもあり、北海道、東北から関東の太平洋沿岸域と九州から沖縄の沿岸域で起こっているということがわかります。一方、関西周辺は、あまり深い地震が起こっていないということになります。色々な地震のタイプがあるのですが、地震はまんべんなく起こるのではなく、起こりやすいところと起こりにくいところがあるということがこの図からわかります。

日本列島では様々な地震が起こっているのですが、これは大きく分けると2つのタイプに分けることができます。海溝型地震と内陸地震です。

これは【図8】、日本列島を輪切りにして、地下を模式的に表したものです。まず、海溝型地震というの



は、海のプレートと陸のプレートの境目、あるいは海のプレートの中で発生する地震のことを言います。日本列島の周りには、海のプレートと陸のプレートがあり、それらが押し合っています。そもそも、プレートというのは世界中で10枚から20枚あり、プレート同士は独立に動いているのですが、海と陸のプレートは、出来ている物質が違います。海のプレートの方が少し重く、密度の高い物質で出来ています。ですので陸と海のプレートがぶつかると、海のプレートが下に

潜り込みます。日本列島の周りでも太平洋側は海のプレート、中国大陸側は陸のプレートになっていますが、それがぶつかってしまうと、海のプレートが必ず陸のプレートの下に沈み込み、プレートの境界部分が断層となって擦れるような状態になります。このように海のプレートと陸のプレートがぶつかる場所が、西日本では南海トラフ、東日本側では日本海溝や千島海溝になっているわけです。

この、海のプレートと陸のプレートの境界、あるいは海のプレートの中自体で起こる地震が海溝型地震です。海溝型地震の特徴としては、比較的規模が大きいというものもありますが、海の下で起こる地震ですので、津波を伴うという特徴もあります。一方、陸のプレートの中でも勿論地震は起こっており、それは内陸地震と呼ばれます。これは地殻内地震という呼び方をされることもあり、1995年の兵庫県南部地震、2018年の大阪府北部地震がその例になります。内陸地震は、地震の規模としては海溝型地震ほど大きくならないのが普通なのですが、震源が人が住んでいる街、都市のすぐ近くで起こる可能性があるため、震源に近いところでは強く揺れて、大きな被害が出る場合があります。【図9】

次に、断層がなぜずれるのかということについて、簡単に説明します。【図10】

近年の被害地震					赤字：内陸(地殻内)地震
発生日	場所	M	最大震度	被害	
2023/5/5	石川県能登地方	6.5	6強	死1、負49	
2022/3/16	福島県沖	7.4	6強	死4、負247	
2021/2/13	福島県沖	7.3	6強	死1、負187	
2018/9/7	胆振地方中東部	6.7	7	死43、負782	
2018/6/18	大阪府北部	6.1	6弱	死6、負462	
2016/4/14, 15	熊本県熊本地方	7.3	7	死273、負2809	
2012/12/7	三陸沖	7.3	5弱	死1、負15	
2012/3/14	千葉県東方沖	6.1	5強	死1、負1	
2011/6/30	長野県中部	5.4	5強	死1、負17	
2011/4/11	福島県浜通り	7.0	6弱	死4、負10	
2011/4/7	宮城県沖	7.2	6強	死4、負296	
2011/3/12	長野県・新潟県東端	6.7	6強	死3、負57	
2011/3/11	三陸沖	9.0	7	死19729、不明2559、負6233	
2009/8/11	駿河湾	6.5	6弱	死1、負319	
2008/7/24	岩手県沿岸北部	6.8	6弱	死1、負211	
2008/6/14	岩手県内陸南部	7.2	6強	死17、不明6、負426	

図9

地震がなぜ起こるのかということについては、1910年にアメリカの地質学者であるリード氏が提唱した弾性反発説というもので説明されています。このリード氏は、1906年のサンフランシスコ地震のときにサンアンドレアス断層において、地面が数mずれていることを発見しました。これは、地表が断層によってずれるということを科学的に示した、初めての地震でした。そして、これによって、断層がずれることが

なぜ断層はずれるのか？ -地震発生の理論-

- 地震の弾性反発説(H. F. Reid, 1910)
 - 1906年サンフランシスコ地震
 - サンアンドレアス断層を境に地面が数mずれたところが随所に発見された。
 - 断層がずれることが地震の原因であるという弾性反発説を提唱するきっかけとなった。



サンフランシスコ地震でずれたサン・アンドレアス断層



H. F. Reid (Wikipediaより)

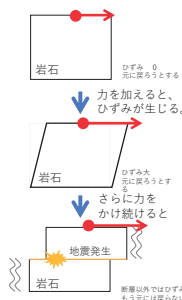
※ 弾性
力を加えたら変形するが、
力を取り去ると元の形に戻る性質。
金属や岩石も弾性体である。

図10

地震の原因であるという弾性反発説を提唱するきっかけになったのです。弾性とは、金属や岩石もそうですが、あるところに力を加えようとすると元に戻ろうという力が発生する性質のことです。しかし、力をどんどん強くして、限界点を超えると、その物質がパキッと割れてしまいます。この割れることが地震という現象だとリード氏は気がついたのです。

これは【図11】、その弾性反発説をわかりやすく図にしたものです。もともと、四角い岩石に右側への力を与えたとします。すると、岩石は徐々に右にずらされるので、変形していくのですが、その場所でもし手を離せば元に戻ります。その元に戻ろうとする性質を弾性というのですが、その力が岩石の弾性限界に達すると、岩石は割れ、断層がずれて地震が発生するわけです。大体岩石の場合は、 10^{-3} 乗から -4 乗程度のひずみを与えると、岩石が弾性の性質を失うと言われているのですが、 10^{-3} 乗とは、1000分の1です。1 mの物を1 mmずらすと 10^{-3} 乗になるので、それ以上ずらすと岩石は弾性を失うことになります。その数字を大きいと考えるか、小さいと考えるかは人によって違うかもしれませんが、それ位までは岩石は耐えられるわけです。ですが、それ以上ずらす

弾性反発説におけるひずみと地震



- 物体に力をかけるとひずみが生じる。
- 応力がある限界（降伏応力）を超えると弾性体としての性質が失われ、さらに応力が增大すると脆性（ぜいせい）破壊(=断層)の急激なずれが生じる。
- 脆性破壊が生じる絶対ひずみ量は無断層の岩石の場合は、概ね $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 程度であることが知られている。
- 断層は、周辺の無断層の岩石に比べると強度が弱いので、同じ応力下では断層が最初にくずれ、よって断層で繰り返し地震が発生する。

ひずみと地震の発生は密接に関係している。

断層以外ではひずみもう元には戻らない

図11

と、パキッと割れてしまうというのが地震という現象になります。もともと、力がかかる前は、ひずみがない状態なのですが、プレート運動などにより、地下の岩石に力がかかると段々ひずみが岩石に蓄積されていき、蓄積の限界を超えると、地震が起こるという考え方が今から百数十年前に提唱されたわけです。

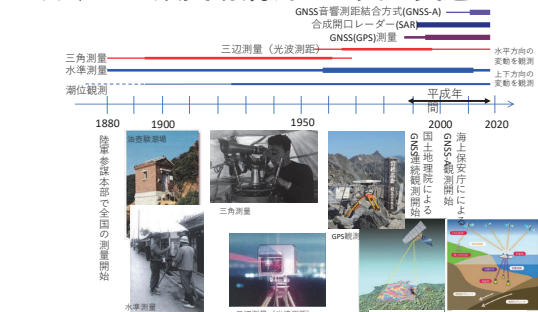
このひずみを測れば、地震のこともある程度わかるのではないかというのが私の研究です。

ここから、そのひずみをどのようにして測るかということの説明させていただきます。

現代では、色々な測量方法があり【図12】、明治以降日本列島では様々な測量が行われてきました。明治から昭和初期には三角測量や水準測量が行われ、それが1950年代から三辺測量に置き換えられました。三角測量は機械を用いて、角度を測ることにより三角形の形を求めるのですが、レーザー等を飛ばして直接距離を測ることにより、三角形の形を求めるのが三辺測量です。

そして1990年代ぐらいからは、今、私達が使っているGNSSやGPSと呼ばれるものが測量の主流になりました。【図13】

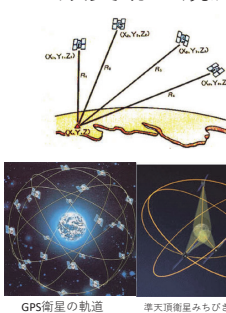
日本の地殻変動観測の歴史と変遷



出典：国土院院、海上保安庁

図12

地殻変動の観測方法 GNSS (GPS)



- GNSS (衛星測位システム) とは、人工衛星を利用して、ある地点の位置を正確に測定することが出来るシステム。
- GNSSの代表例がGPS (アメリカ) であるが、GLONASS (ロシア)、Galileo (EU)、北斗 (中国) や準天頂衛星システム (日本) など多くのシステムが利用可能となっている。
- 従来の測量に比べてさまざまな利点。
 - 全天候、24時間連続、無人観測が可能。
 - 精度は、概ね水平方向で2-3mm、上下方向で1cmが達成。

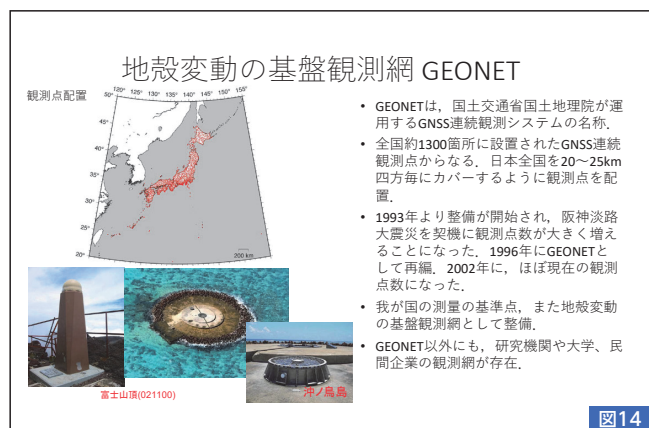
図13

GNSSは、日本語では衛星測位システムと言い、人



工衛星を利用して、ある地点の位置を正確に測定できるシステムのことです。ではGPSとは何かというと、GNSSのうちの1種類であり、アメリカが打ち上げている人工衛星を使った、位置を計測するシステムのことを言います。このアメリカのシステムは早くから使われていますが、その後、ロシアやEU、中国あるいは日本等が運用する多くのシステムが、利用可能となっています。そのため今は、GPSを含む各国のシステムを総称して、GNSSと呼んでいます。

日本列島には、このGNSSの観測機器がかなり多く整備されており、特にこのGEONET【図14】という

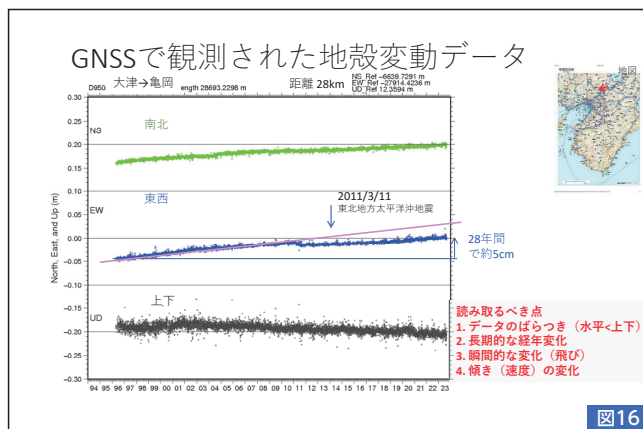


名前がついている国土交通省国土地理院が運用するGNSS連続観測システムが、広く使われています。全国約1300箇所にGNSSの観測点があり、日本列島を20～25km四方毎にカバーするように観測点が配置されています。1993年より整備され、阪神淡路大震災を契機に観測点数が大きく増えることになり【図15】、2002年にほぼ現在の観測点数になりました。GNSSを用いた観測によって、例えば、この28年間で津市に対して亀岡市が5 cmぐらい東側に動いており、両者の距離が大体5 cmぐらい縮まったということがわかりました。【図16】このように地殻変動は、ゆっくり

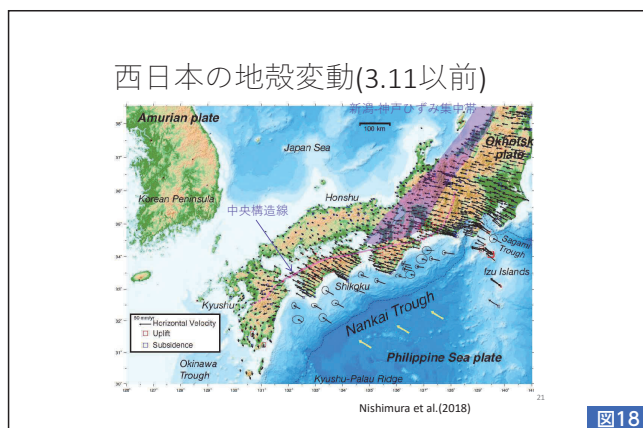
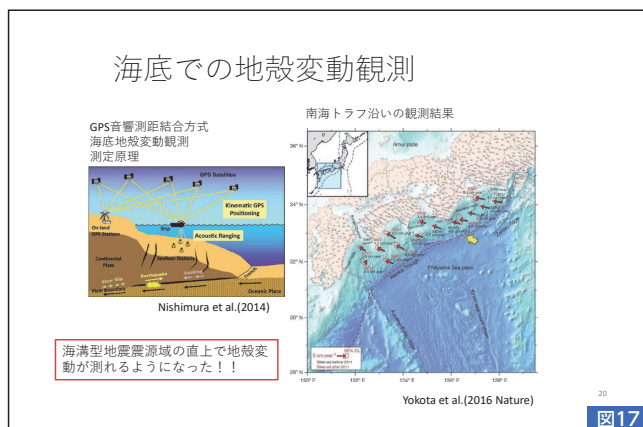


ですが、常に起こっていることなのです。

海底での地殻変動も、観測されるようになっていきます。【図17・図18】



西日本の沿岸、特に太平洋側では年間、大体5 cm 近く北西方向に動いています。これは、太平洋側から

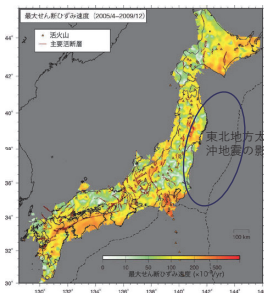


沈み込んできている海のプレートが陸地を押しているのが原因です。日本列島の中でもひずみ速度の大きい場所は、ひずみ集中帯と言われていて、GPS、GNSSの観測によって初めて、その分布がわかるようになってきました。【図19】

近畿地方のひずみ速度の分布を見ると、ひずみの速

日本列島のひずみ速度分布

2005年4月~2009年12月の平均



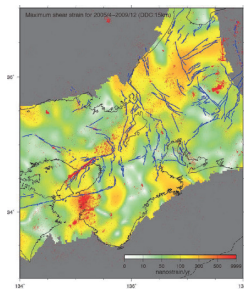
- 日本列島のひずみは不均一で、ひずみ集中帯と呼ばれるひずみの大きな場所がある。
- 下記の地震を含む陸域で発生した大地震の多くはひずみ速度の大きな場所で発生している。

- 2011年長野県北部地震 (M6.7, 最大震度6弱)
- 2014年長野県北部地震 (M6.5, M7.3, 最大震度6弱)
- 2016年熊本地震 (M6.5, M7.3, 最大震度6弱)
- 2018年島根県西部地震 (M6.1, 最大震度5弱)
- 2018年大分県北部地震 (M6.1, 最大震度6弱)
- 2018年北海道胆振東部地震 (M6.7, 最大震度7)

図19

度の大きいところで、大阪北部地震や兵庫県南部地震など、大きな地震が起こっているように見えます。さらに、ひずみ速度の大きな場所はもう少し広範囲に、大阪湾から大阪北部、京都、琵琶湖の方にひずみ速度の大きな場所が続いており、活断層がある場所ではひずみ速度も大きい傾向があります。【図20】

近畿地方のひずみ速度分布 (拡大)

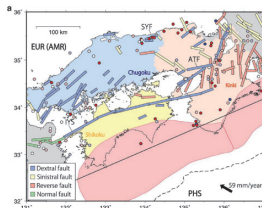


- 近畿地方には、日本列島の内陸部で特にひずみ速度の大きい「新潟-神戸ひずみ集中帯」が琵琶湖西岸-京都-大阪北部-神戸-淡路島を通過している。
- この地域は活断層も多数存在し、歴史的にも内陸地震が多く発生している。京都もひずみ集中帯

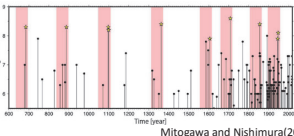
図20

ここで我々が知っておかなければならないのは、内陸地震と南海トラフ地震と関係があるのではないかとされているということです。【図21】

南海トラフ地震と西南日本の内陸地震の活動期



西暦800年以降の西日本の内陸地震の発生時期 (網掛けが「活動期」)



Mitogawa and Nishimura (2020)

- 南海トラフ地震の前後 (前50年、後10年) に、西日本では内陸地震が集中しているため、この期間は「内陸地震の活動期」と呼ばれる (Hori and Oike, 1996)。
- 1944, 1946年の南海トラフ地震の前には、1925年北但馬地震 (M6.8)、1927年北丹後地震 (M7.3)、1936年河内大和地震 (M6.4)、1943年鳥取地震 (M7.2) などの内陸地震が発生

図21

南海トラフ地震は、今後30年の間に70~80%の確率で起こると言われているのですが、その南海トラフ

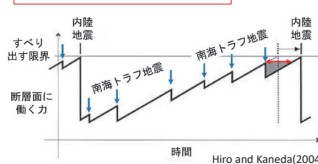
地震の前後で、内陸地震が活発化するということも過去の地震活動から知られています。

実際、1944年、1946年の南海トラフ地震の前には、1925年の北但馬地震、1927年の北丹後地震、1936年、1943年にも地震がありました。なぜ南海トラフ地震の前に内陸地震が起きるのかは、研究により、かなりの部分が解明されてきています。【図22】

これは【図23・図24】、ある断層でのひずみや力のかかり方の時間変化をグラフとして分かり易く書いたものです。弾性反発説で説明したように、徐々に断層に力がかかってきて、それが限界を超えると地震に

内陸地震の活動期はなぜできる？

内陸地震の震源断層にかかるストレス



JAMSTECホームページより
(http://www.jamstec.go.jp/f/jamstec_news/20180622/tw)

- 内陸地震の震源断層に働くストレスが南海トラフ地震によって減少する場合は、南海トラフ地震の直後から地震前のストレスレベルまで回復する期間まで内陸地震が発生しないことになる。
- その結果、南海トラフ地震の後しばらくは内陸地震が発生せず、南海トラフ地震の前に発生することになる。
- 次の南海トラフ地震が近づいているいま、内陸大地震についても警戒が必要。

図22

南海トラフ地震の繰り返しにおける内陸地震のストレスの計算例

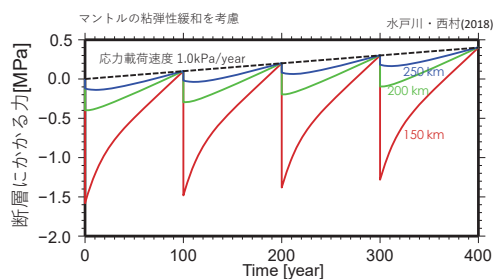


図. 走向90°傾斜90°の右横ずれ断層のΔCFFの時系列

図23

南海トラフ地震の繰り返しにおける内陸地震のストレスの計算例

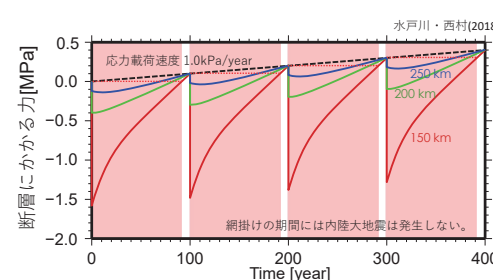
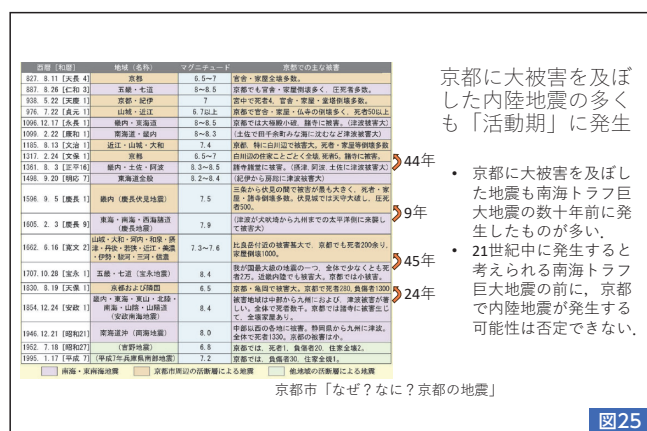


図. 走向90°傾斜90°の右横ずれ断層のΔCFFの時系列

図24



なるのですが、近畿地方の多くの断層では、南海トラフ地震が起こると、少しひずみが弱まり、それによって、近畿地方の地震が起こりにくくなるのです。100～150年に1度起こる南海トラフ地震が、内陸にかかっている断層にかかる力を少し低下させるのです。それによって、弾性が限界に近づくのを少し遠ざけるのです。ただ断層には継続してゆっくり力がかかっていきますので、そのような効力はそのうちに切れてしまい、次の南海トラフ地震が近づくと、前回の南海トラフ地震の時よりも力が強い状態になってくると考えられます。そのため、内陸地震は南海トラフ地震の前に発生する傾向があるのです。【図25】



地震の予知や予測に関して、社会の期待や関心は、依然として高いのですが、いつ地震が発生するかというのを正確に予知・予測することはできないというのが現状です。【図26】その一方で、様々なところで週刊誌やインターネットを介して多くの予測が氾濫しているのですが、それらは、現状では占いの類を超えるものではありませんし、明らかに間違った知識を社会に拡散しているものもありますので、予測に躍らされることなく、日頃から地震に備えていただき



たいと思います。

先程のGNSSのデータも示すように、日本列島には常に力がかかっていて、ひずみも溜まっています。また地震も起こりやすいところと起こりにくいところがあるので、GNSSデータを用いて、どこが地震が起こりやすいのか、すなわち、地震の長期予測に関する研究を、我々も進めていきたいと思っています。

私自身が今行っている研究で、内陸地震の予測に関する研究を紹介します。この地図【図27】は、今後西日本で内陸地震が30年間で、何%の確率で起こるのかを表したものです。暖色系の方が確率が高く、黄色から水色に変わるところが1%の確率です。また、この赤丸が付いているところは、歴史的な大きな地震が過去に起こったところですが、琵琶湖から京都、大阪に非常に密集しているというのがわかります。このようなことから、過去の地震を見ても、GNSSデータから将来の予測をしても、やはり西日本の中では琵琶湖から京都、大阪にかけてはある程度地震発生確率の高い場所だといえます。

京都は「ひずみ集中帯」に位置しており、過去の大地震の痕跡である活断層も多いため、今後も内陸地震に対する備えが特に必要だと言える地域です。ただ、これがいつ起こるかということまではわかりません。確率は比較的高いとは言えても、その発生時期の予測はできないのです。

ただ、先程もご説明しましたが、近畿地方の内陸地震は、南海トラフ地震の前後（前50年、後10年）の活動期に発生する傾向にあります。次の南海トラフ地震が近づきつつある現在が、地震に対する備えを強化すべき時期だと言えます。先延ばしにすることなく、常に意識を持ち続けて、地震に対して備えていただきたいと思います。

