

地震のメカニズム解

京都大学名誉教授
産業技術総合研究所 客員研究員
梅田康弘

1. はじめに

地震が起きると、直ちに震源や地震の規模 (M), 各地の揺れなどが報道されます。しばらくして気象庁は記者会見を行い、余震の発生状況とか付近にある既存の断層など、やや詳しい情報を発表します。その時の配布資料には必ず「地震のメカニズム解」が載っています。タイトルの左にありますビーチボールのような図です。この図を基に、地震によって出来た断層の説明や既存の活断層との関連などが説明されます。これからはこの図が、もっと早い段階でしばしば登場すると思われま

す。地震学的用語としては「地震の発震機構 (解)」といいます。つまり地震が起こったとき、震源にはどのような力が働いていたのか、またどのような運動 (断層運動) が起こったのかを示すものです。これらの力や運動の方向は、観測された地震波形から逆解析 (inversion) することによって求めるのですが、観測結果を最もよく説明しうる解 (答え) を求めることから“解”がつけられています。

本稿では、最初にメカニズム解 (ビーチボール) の見方を説明します。そのためにどうやって図を作るのかを簡単に説明します。次にメカニズム解と断層との対応について見ていきます。3つめは気象庁や USGS (米国地質調査所) などが実際に発表しているメカニズム解の見かたを説明します。

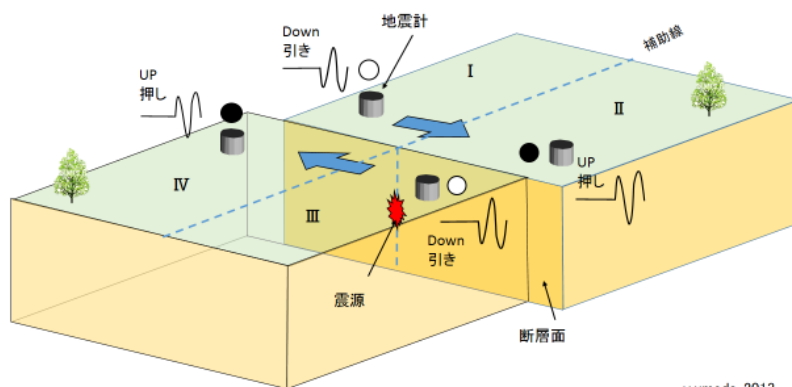
2. メカニズム解の描き方と見かた

この節では地震が起きたとき、各地で地面が最初にどう動くかを調べます。図1では地震による断層のずれを青い矢印で示していますが、矢印の先に当たる地点では、地面は震源から押される方向に動きます。逆に、矢印の後ろに当たる地点では震源の方に引かれる方向に動きます。地震計 (上下動地震計) では、地面の押しが、記録上で上向きになるように設置しますので、最初の動き (初動と言います) は図のように押しの領域では上向きに、引きの

領域では下向きになります。地震記録で上向きの観測点を黒丸で、下向きの観測点を白丸で記します。これは世界共通の約束事です。

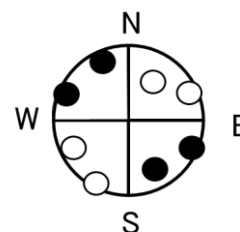
図1では震源の真上の地表に、断層と直交するように補助線を点線で引いていますが、断層（線）とそれに直交する補助線とで地面は4つの領域、すなわちⅠ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳの4象限に分けられます。先ほどの押し引きを象限で言い換えますと、ⅠとⅢ象限では引き、ⅡとⅣ象限では押しになることがわかります。

図1



次に、震央を中心に地表に円を描き、その中に断層線と補助線を図2のように十文字に書きます。分けられた4つの象限に先ほどの押し引き分布を黒丸と白丸でプロットします。これがビーチボールの元絵です。図2では断層の走行が北と仮定しています。

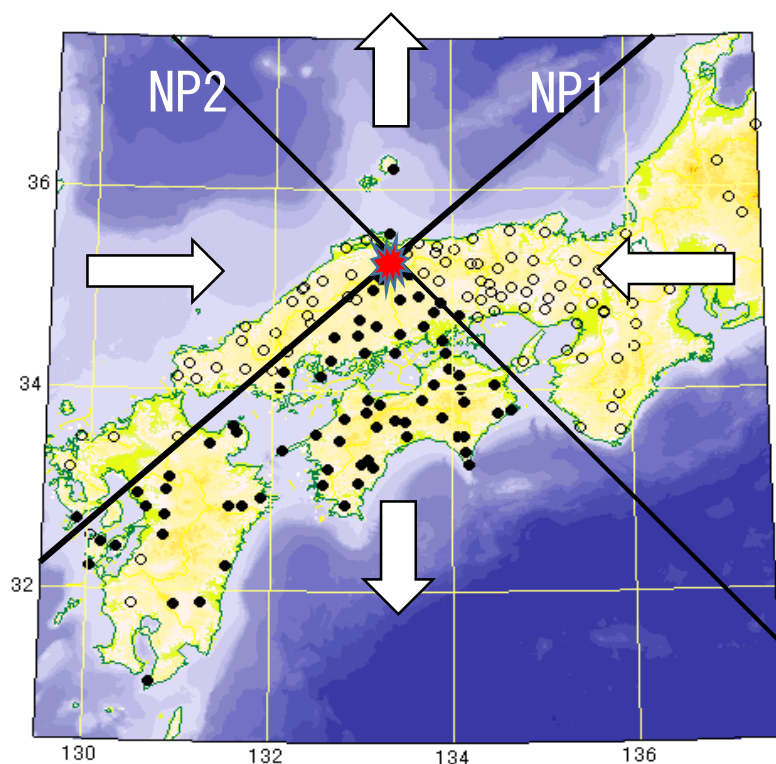
図2



実際の場合として、2000年鳥取県西部地震の押し引き分布を図3に示しました。前述のように黒丸は押し、白丸は引きです。2本の線は断層（線）と、それに直交する線で、図にはNP1, NP2と記しています。NPはNodal Planeの頭文字で、節面の意味です。押しと引きの境界は、初動の振幅がゼロの節（ふし、Node）になることから、このように呼ばれています。

図には4つの白抜き矢印が描かれています。これには重要なふたつの意味があります。これまで述べてきた意味は、地震によって最初に地面が動いた方向（初動の方向）を示すものです。各地の地面からすると、震源から押されたか（図では南北）、震源に向かって引かれたか（図では東西）ですが、震源にとってみれば話は逆で、東西から押され、南北に引っ張られたこととなります。震源にとっては東西の圧縮力（相対的に南北の引張力）によって、地震が起こったことを意味しています。原因（地震）と結果（各地の揺れ）とでは表現の仕方が逆になりますが、後でお話しますように、メカニズム解（ビーチボール）では両方を同時に表現します。

図3 2000年鳥取県
西部地震
気象庁のHPより.

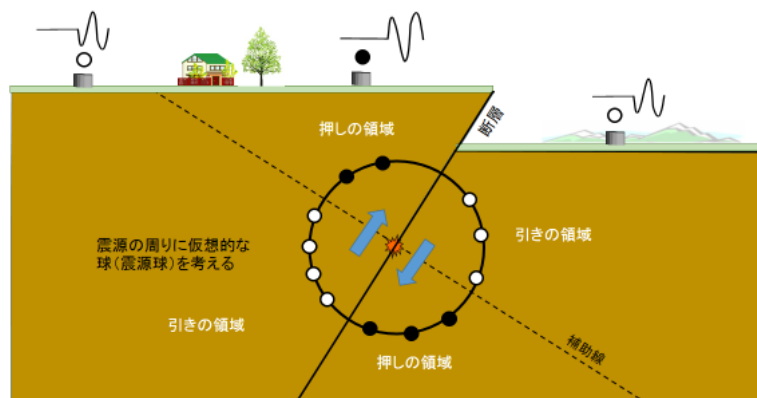


3. 断層が縦ずれの場合

地震断層が縦ずれの場合、断面図を図4に示しました。水平ずれのときと同じように、震源を通過して断層に直交する補助線（点線）を引き、4つの象限に分けますと、押しの領域と引きの領域に分けられます。そこで、震源を中心に仮想的な球を考えます。図4は断面図ですの円でなっています。この球殻上（図では円周上）に、押しは黒丸、引きは白丸をプロットしますと図2と同じようなビーチボールの元図ができます。

ところで、図4で下の方の押しの黒丸はどうやってプロットするのでしょうか。地震波がまっすぐ伝わるとすると、真下は地球の裏側のプエノスアイレスあたりになります。実際には

図4



地震波は伝播速度の早い深部を伝わって、曲がって進みますから、日本ではだいたい震源から 120km 以上離れますと、下方に出て行った波が地上に初動として到達します。この様子はいずれ基礎講座「地震波の伝わり方」で詳しく説明したいと思います。

4. 震源球に投影

前のふたつの節では、水平ずれ、縦ずれのふたつのタイプの断層を見てきましたが、震源球を考えると、どんな断層のタイプでも表現できます。図4の円の下半分を立体的に描くと図5のようになります。震源球の下半球です。立体図は気象庁のHPから借用しましたから断層の角度は少し違っていますが、図4と同様、下側に押し、両サイドは引きになっています。黒丸、白丸の代わりに影を付けた押しの領域と、引きの白い領域とに立体的に分けています。両者の節面が断層で、地表に現れた逆断層が震源球と交差する円弧が赤で示されています。青は、それと直交する断層面が震源球と交わる円弧です。

図5 震源球の下半球（気象庁のHP，2013 9 より）

http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/mech/kaisetu/model_gyaku.html

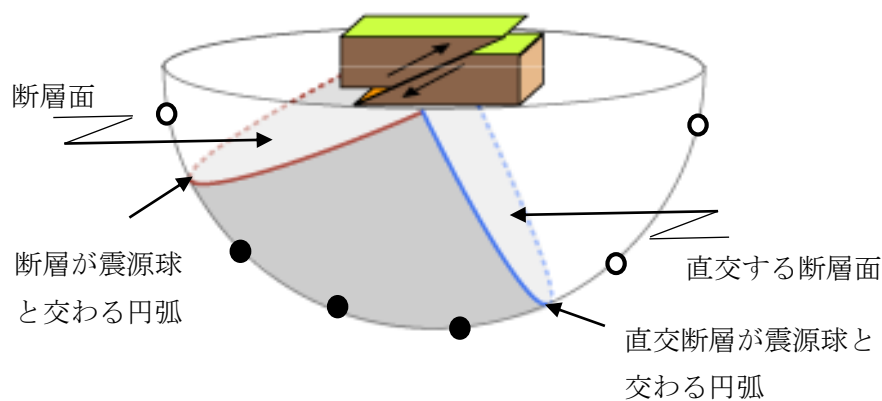
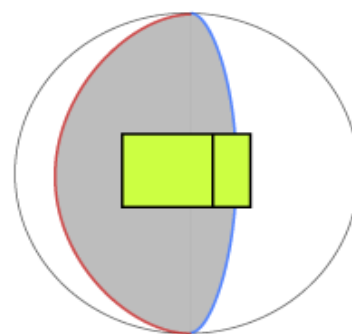


図6

図5を真上から見ると図6のようになります。影の部分の左側の赤い半円弧は図5の赤い円弧に対応しています。青い円弧も同様です。中央のグリーンは地表で断層の位置を示すために描かれていますが、これを取り除けばビーチボールの完成です。



5. 実際の例

2節で引用した2000年鳥取県西部地震(図3)のメカニズム解を図7-Aに示しました。影をつけた領域が押し、白いところは引きの領域です。NP1とNP2の2つの節面のうち、どちらが地震のとき動いた断層かは、メカニズム解だけではわかりませんので、余震分布から決めています。この地震の余震分布を図7-Bに示しましたが、余震は北北西—南南東に並んでいることがわかります。このことから地震断層はNP2と決定されました。NP2に沿っては地割れなど地震断層の一部も現れました。一方NP1に沿った地表には目立った変動はありませんでしたが、余震分布図を見ますと東の大山付近や西側の県境付近にも地震(誘発地震と呼ばれています)が起きており、地下では何らかの力学的変化があったと思われます。たいていの地震は二つの節面のうち、どちらかが地震断層になりますが、1927年北丹後地震(M7.3)のように、郷村断層とそれに直行する山田断層が同時に地表に現れた例もあります。

図7-A 2000年鳥取県西部地震のメカニズム解(JMAのHPより引用)

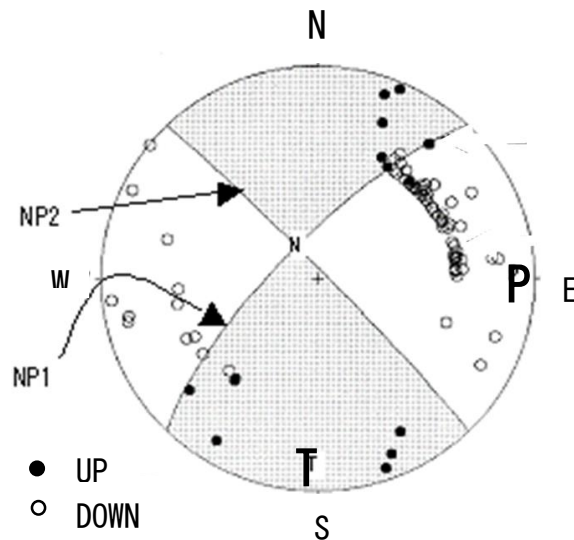
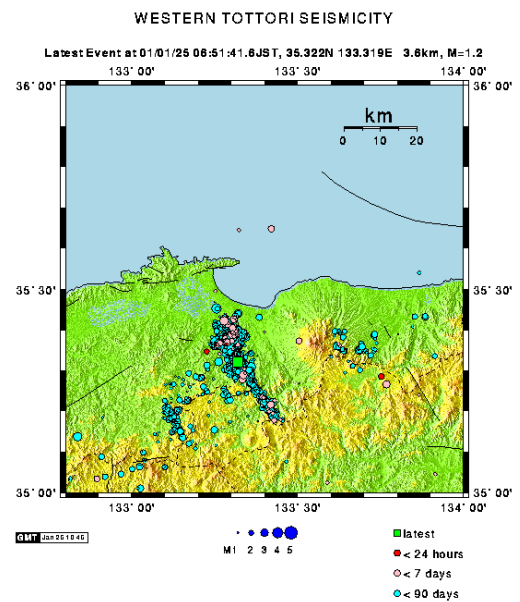


図7-B 2000年鳥取県西部地震の余震分布(京大防災研のHPより引用)



NP2は、ほぼ直線ですから断層は垂直(90度)だったことがわかります。NP1は少し北西側に湾曲していますので、この節面は北西方向に少し傾いている(北西に傾き下がる)ことがわかります。

図7-Aの震源球の東と南の縁に、PとTという文字が記されています。これらは図3の白抜き矢印で説明しましたように、震源にかかった力の方向を表しています。Pは圧縮軸(Pressure)、Tは引張軸(Tension)の頭文字で、この地震は東西の圧縮力(相対的に南北の引張力)によって起きたことを意味しています。

6. メカニズム解と断層との対応

震源球をある程度見てきたところで、いろいろな断層との対応を見ておきます。図8-Aは図1と同じで、断層は垂直で右ずれです。「右ずれ」は図のように、人が断層に向かって立った時、向こう側が右に移動している場合を言います。人が反対側に立っても同じことが言えます。この断層が南北方向だったとしますと、ビーチボールは左上のようになります。影を付けた二つの象限が押しの領域です。図の中の白抜き矢印は、この断層をずれさせた力（圧縮力）の方向を示しています。断層面に対して45度の方向からの圧縮力が最も断層を動かしやすいのです。逆に言えば、圧縮力の方向（圧縮軸（P-軸）と言います）に対して45度の方向が最も破壊しやすい（滑りやすい）のです。

図8-A 断層面が垂直な水平ずれ

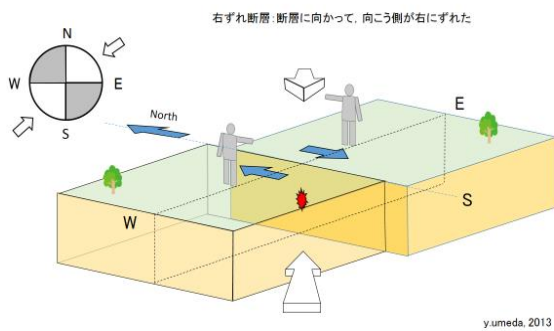
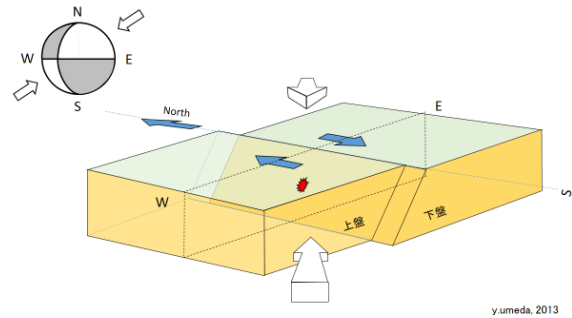


図8-B ひとつの断層面が傾斜



次に、断層が斜めに傾いている場合を図8-Bに示しました。この図には上盤、下盤と書いていますが、断層面の上に乗りにかかっているほうを上盤と言います。断層の方向が南北ですので、メカニズム解の図は、同図の左上のようになります。断層が西に向かって傾き下がっていますから、震源球と接する断層面は図のように西側に膨らんだ弧になります。これと直行する面は東西方向に直線ですから、断層面は垂直です。立体図では点線でしか描いていません。

図8-C 逆断層

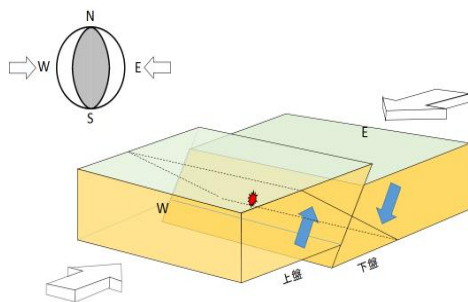


図8-D 正断層

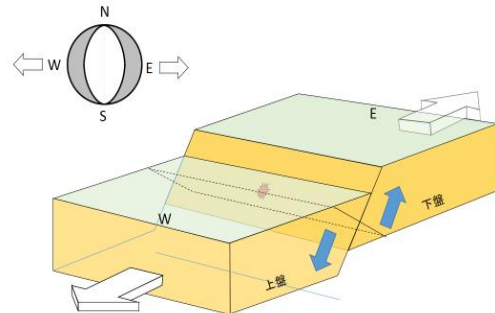


図8-C と 図8-D は、逆断層と正断層の場合です。どちらも片方の断層だけをずらせた図で、もう一方の直行する断層は点線で位置のみを描いています。それぞれのメカニズム解のビーチボールは、図8の左上ですが、立体図よりも図4や図5から推定したほうがわかりやすいかもしれません。しかし、気象庁はじめ各機関からは、メカニズム解の図（ビーチボール）のみが示されますので、それから立体図のようなことをイメージする必要があります。ビーチボールの中心付近が黒なら逆断層、白だったら正断層と、覚えておくのもいいと思います。

図8-D の正断層で、下にずり落ちたほうが上盤となっていますが、先にも申しましたように、断層面上にあるほうが上盤です。「正断層」というと何か「正しい断層」のように聞こえますが、英語では **Normal fault** です。イギリスあたりでは、この種の断層が“普通”だったので、こういう名前がつけられたそうです。日本語名はちょっと違和感があります。アルプスあたりでは逆の断層が多くあり、**Revers fault** と名付けられたということです。

図8-B で、もう一つの節面も傾いている場合を図8-E に示します。東西方向の節面は北に傾き下がっていますから、ビーチボールでは、北に張り出した弧になっています。

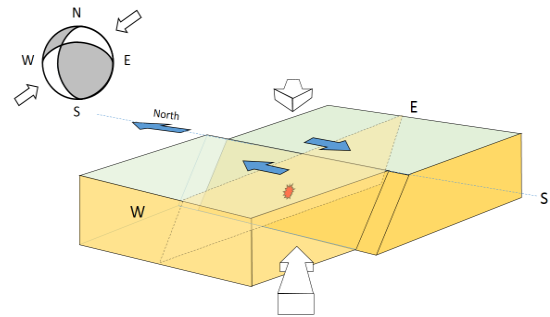


図8-E 2つの節面が傾斜している

7. 断層面とずれの一般的な記述

前節までは、横ずれのみ、あるいは縦ずれのみといった断層を見てきましたが、実際には図9に示したように、斜めにずれる、すなわち横ずれと縦ずれが同時に起きる断層もあります。むしろこれのほうが普通です。立体図では描きにくいので、図9の上盤側を取り外して下盤だけの図を図10に示しました。

図9 断層が斜めにずれた

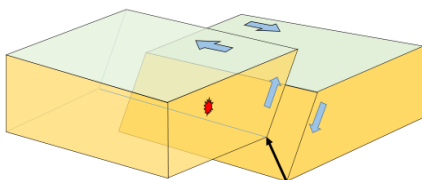
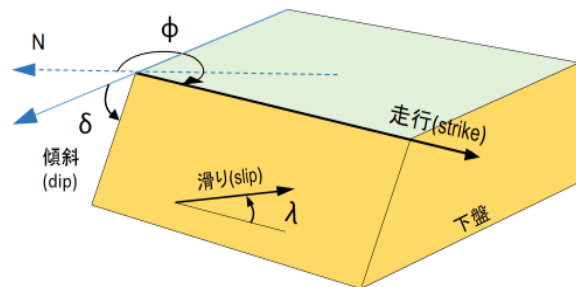


図10 断層の走行、傾斜と上盤の滑り



走行: 断層の水平方向。上盤から見て右向き方向を北から時計回りに測る
 傾斜: 断層の傾き。水平から測る
 滑り: 断層のずれ。水平から反時計回りに測る。

この図で、断層の走行、傾斜、上盤の滑りを説明します。走行 (strike) は、上盤 (図 10 には描かれていない) に立って断層を見たとき、右側をこの断層の走行とし、北から時計回りに測った角度 (ϕ) で表します。断層の傾斜 (dip) は、図のように水平から測った角度 (δ) で示し、角度を言うときは傾斜角 (dip angle) と言います。断層のずれの方向ですが、下盤に対する上盤の滑り (slip) の方向で示します。図のように水平から反時計回りに測った角度で表現します。

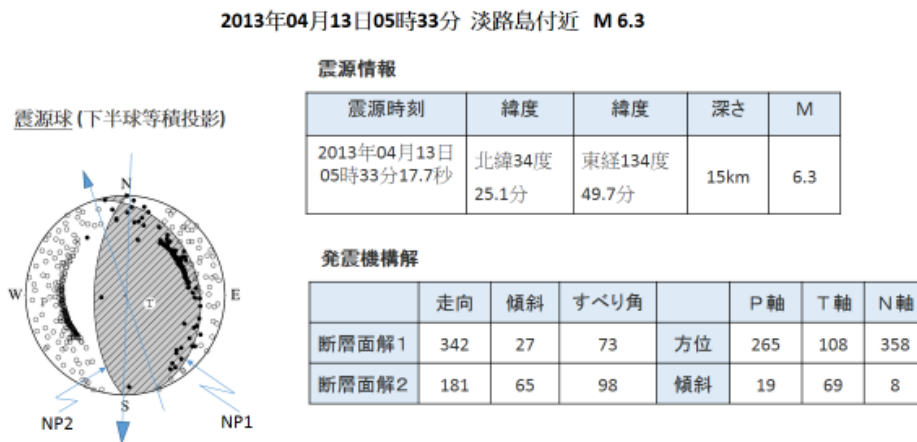
滑り角 (slip angle) (λ) を使えば、断層のタイプも表現できます。たとえば、 $\lambda=0$ 度の場合ですと、上盤が図の右手 (strike の方向) にずれたこととなりますから、左ずれ断層となります。 $\lambda=90$ 度ですと、上盤がせり上がりますので逆断層ですし、 $\lambda=180$ 度は右横ずれ、 $\lambda=270$ 度は正断層と言った具合です。もちろん図 9 のように斜めずれの場合でも、滑り角 (λ) を使えば自由に表現できます。

8. 気象庁発表の発震機構解

2013年4月13日の兵庫県の淡路島で起きたマグニチュード (M) 6.3 の地震について、気象庁は図 11 のように、震源情報と発震機構解を発表しました。左には震源球も載せました。中央付近が影になっていますので、逆断層だとわかります。

発震機構解の断層面解 1 (図 3、図 7-A で説明した NP1 です) を見てみますと、震源球と交差する弧が東のほうに張り出していますから、断層面は東に向かって傾き下がっています。その角度 (傾斜角) は 27 度と表に記載されています。その上に乗っかっているのが上盤で、東側 (図で言えば右側) となります。上盤から断層線を見て右側 (北北西方向の青い矢印の方向) が断層の走行 (strike) ですので、これを北から時計回りに測った角度として表には 342 度と記載されています。滑り角は 73 度ですから垂直に近い逆断層であることがわかります。

図 11

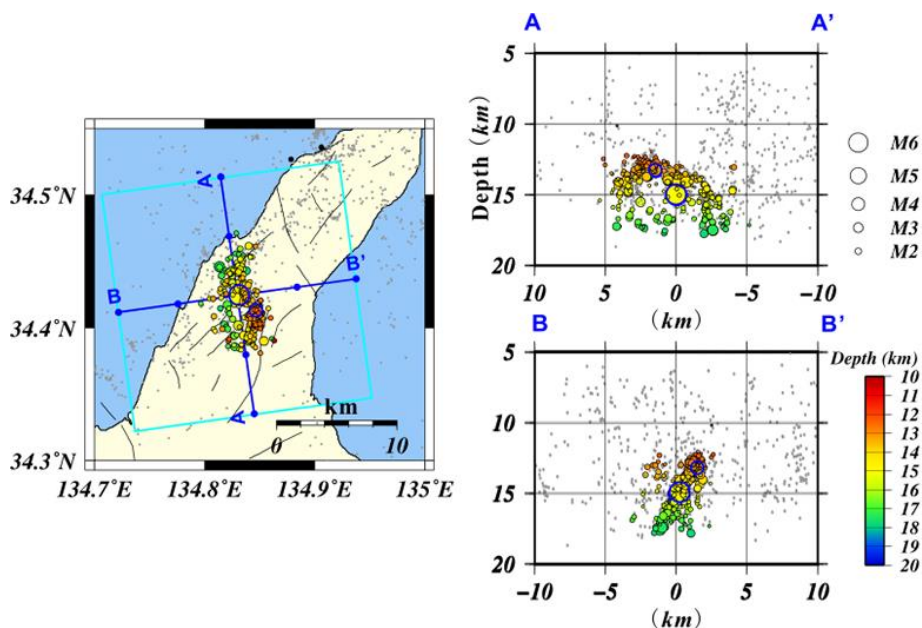


気象庁HPより <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/mech/ini/top.html>

NP2は西に向かって下がる逆断層で、走行は181度、ほとんど南北です。傾斜角も65度ですので急角度の逆断層です。滑り角が90度ですと完全に縦ずれのみの逆断層ですが、98度となっていますから8度だけ上盤が北向きの滑り成分を持っていることがわかります。

NP1, NP2のふたつの節面のうち、地震断層はどちらだったのかは、発震機構解からだけではわかりません、4節でも述べましたように余震分布から判別します。防災科研のHPから余震分布を引用し、図12に載せました。左の地図にプロットされた余震分布は、ほぼ南北に近いこと、B-B'断面を見ますと西側に傾き下がっていることがわかります。従って、この地震でできた断層は図11のNP2だということがわかります。

図12



防災科研 (NIED) 図 4. DD 法によって再決定された震源分布図 (2013 年 4 月 13 日 5:33 から 15 日 12:00 までの 243 個)。左図は震央分布、右図は、左図の**水色四角内**における震源を、A-A' および B-B' 鉛直断面に投影した図。本震を**青丸**で示す。灰丸は 2002 年以降の Hi-net 定常処理による震源分布を示す。<http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/awaji130413/?LANG=ja> (2013 9/16)

9. CMT 解とは

ここまで述べてきた発震機構解は P 波の始まり (初動) から求めたものでした。初動は破壊の始まりの波ですから、地震が起こった瞬間の力の加わり方や断層の方向、滑りの方向を表しています。地震が小さいうちはこれで充分ですが、大きくなりますと破壊が進展していくうちに、断層の方向が少し変わったり、ずれが大きくなる場合があります。そうなりますと、地震が終わってから、つまり断層ができてから断層全体の方向や、ずれの方向を割り出す必要があります。

前節までの断層の図は長方形を仮定して、断層の端も中央も同じ大きさのずれ、同じ方向と仮定してきました。実際には断層のずれは場所によって違っています。断層全体の様子を

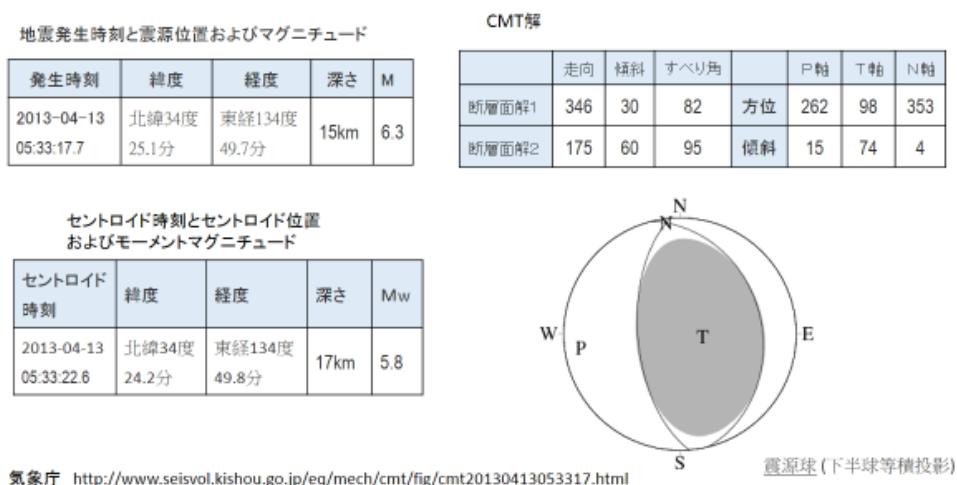
調べるには初動だけでは無理で、地震波全体を使って解析をします。そして、ずれ（断層変位）の大きいところを中心（セントロイド、Centroid）として、その大きさ（モーメント、Moment），そこに加わった力の方向（テンソル、Tensor）などを割り出します。それぞれの英語の頭文字をとって CMT 解と呼んでいます。

初動から求めた発震機構解を CMT 解と区別するときは、「初動解」などと呼んでいます。地震のどこに視点をおいて見るかの違いであって、メカニズム解の解釈は前節までに述べてきた内容と変わりありません

10. 気象庁の CMT 解

気象庁が発表した 4 月 13 日の淡路島の地震の CMT 解を、8 節の初動解と比較しながら説明します。図 13 の左上の表は、初動（P 波、S 波）から決めた震源で、そのほかは CMT 解です。初動から求めた地震の発生時刻は 5 時 33 分 17.7 秒ですが、セントロイドの時刻は 33 分 22.6 秒と 4.9 秒遅れています、この違いは、破壊が開始して（P 波や S 波を出して）から、断層のずれが最大になった時までの時間差です。緯度・経度を見ますと、破壊の開始点という意味での震源と、断層の最大のずれの位置が異なっていることもわかります。

図 13 気象庁による、初動から決めた震源（左上の表）と CMT 解（2013/9/16）



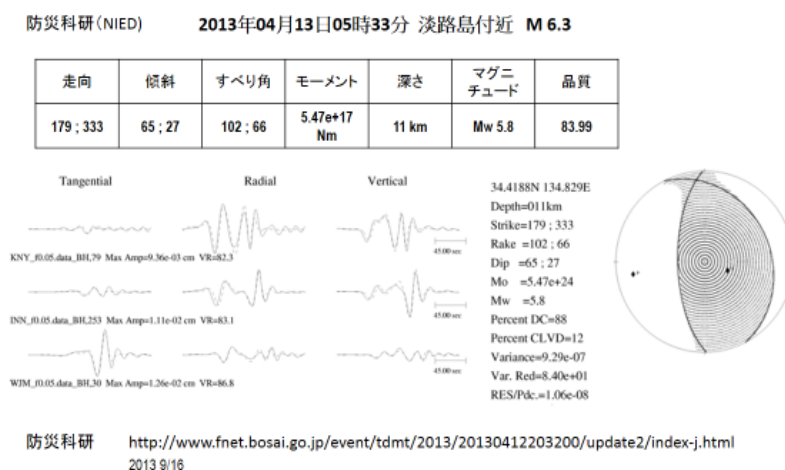
以前にお話ししましたように、地震波の最大振幅から決めたマグニチュードと CMT 解で求めたモーメントマグニチュードも少し違っています。

CMT 解による押しの領域（震源球の影の部分）は、やや丸みを帯びているのが特徴です。P 波初動のように決定的に押しと引きの領域が分けられるというより、断層面の主要な部分を代表しているためです。走向、傾斜、滑り角を、図 11 の初動発震機構解と比較すると少しずつ違っていますが、大きく変わることはありません。むしろ CMT 解のほうが、余震分布（図 12 の左）と良く合っているように見えます。

1.1. NIED, USGU の CMT 解

CMT 解を速報で発表している、2つの機関の例を紹介します。防災科学技術研究所（通称：防災科研, NIED）では「AQUA」システムによって地震発生の4~8分後にはCMT解を発表しています。図14は説明のため、「AQUA」システムではなく、手動で決めたCMT解を、防災科研のHPから引用しました。少し見づらいのようですが、地震波形のうち実線が観測波形、点線は右のCMT解を仮定したときの波形です。両波形の違いが最も小さくなるように解を求めます。断層の全体像を見るために、長い周期まで観測できる広帯域地震計を用いています。初動解や図13の気象庁のCMT解と比べますと、走行や滑り角など少しずつ異なりますが、これは解析に使った地震波形（特に周期帯）などよると思われます。

図14 防災科研によるCMT解




次に、アメリカ地質調査所 (USGS) の例を見てみます。USGS は世界中の地震情報を発表していますから、外国での地震情報を得るには最も効果的です。情報量が多いですので、初めに、目的とする地震情報に至るまでの URLなどを、図15で簡単に説明します。Google か何かで「USGS」を入力し、「Earthquake」を選びます。図にある URL を入れてもいいです。

「Real Time Earthquake Map」をクリックしますと、図15のような1日分（クリックしてから24時間前まで）の地震分布図が出てきます。はじめはアメリカ合衆国の大きな地図が出ますが、右上の-（マイナス）などで適当な地図に縮小し、知りたい地震をクリックしますと、色が水色になると共に、左の表の下に青文字で、地震のタイトル（この図の場合はM6.1, アラスカの地震）が出ます。ここをクリックしますと、その地震の詳しい情報が次の画面に出てきます。そこでSummaryを選びますと周辺の地震活動やテクトニクス、被害地震の場合は被害の状況などが記載されています。Science をクリックしますと、図15左下のようなCMT解が出てきます。

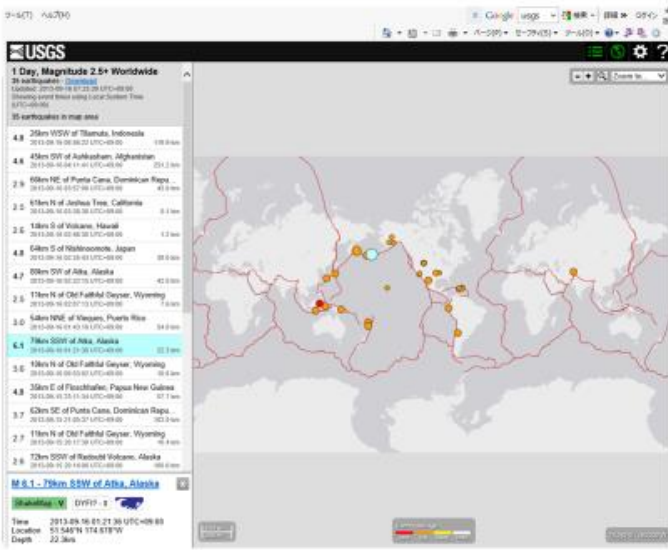
図 15 USGS の HP から地震情報をみる手順 (2011 9/16)

USGS → Earthquake
<http://earthquake.usgs.gov/>
 → Real-time Earthquake Map
 Latest E, Significant E

- Summary
- Scientific



2013 9/16



4月13日の淡路島の地震のように過去の地震を見たい時は、一般的な方法としてはちょっと面倒ですが「Search Earthquake Archives」から入ります。ネットでホテルを予約するときのような表が出てきます。専門的な利用でなければ、とりあえず年月日入力欄に「2013 04 12 - 2013 04 13」と入れれば、あとは空欄のままでも、淡路島の地震が出ると思います。

図 16 米国地質調査所 (USGS) による CMT 解

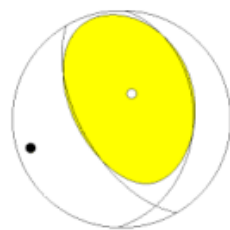
USGS Centroid Moment Solution
NEAR S. COAST OF WESTERN HONSHU

13/04/12 20:33:17.58 Epicenter: 34.369 134.828 MW 5.8
 USGS CENTROID MOMENT TENSOR 13/04/12 20:33:40.20
 Centroid: 34.548 134.568 Depth 10
 No. of sta: 46 Moment Tensor; Scale 10**17 Nm

Best Double Couple: Mo=5.5*10**17
 NP1: Strike = 2 Dip=34 Slip= 118
 NP2: 150 60 72

Principal axes:
 T Val= 5.89 Plg=69 Azm= 22
 N -0.78 15 159
 P -5.11 13 252

<http://earthquake.usgs.gov/>
 → Earthquake
 → Search Earthquake Archives
 2013 9/16



http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/fm/neic_b000g5yg_cmt.php

出てきた画面を図 16 に示しました。気象庁や防災科研の CMT 解と同じような図が描かれていますが、NP1 の Strike が 2 度になっているのが気になります。気象庁が 346 度、防災科研が 333 度でしたから、それらより USGS の解は 16 度～29 度東に振れています。図 12 の波形合わせのところでも少し述べましたが、地震波形を最もよく説明できるように解を求めますので、使った観測点（地震波形）によってもこのくらいの違いはあります。そのためスコア、防災科研では「品質」なども発表していますが、本稿では詳しくは述べません。

1 2. 終わりに

本稿では図 1 のように断層がずれて、その結果、押し引きの分布が 4 つの象限になることを説明しましたが、実際には 4 つの象限になるという観測事実の発見のほうが先にあって、断層のずれだという解釈はずっと後になってからでした。

4 象限型を最初に発見したのは、阿武山観測所を創設した志田順（しだとし）で、1917 年（大正 6 年）です。しかしながら震源に加わる力（力源）に関する理論的解釈の違いや観測点の不十分さのため、本稿で述べたように断層運動との関係が理解されたのは半世紀も経った 1960 年後半のことです。

図 3 のように押し（黒丸）、引き（白丸）がたくさんプロットされていれば、ふたつの節面も容易に決定することができますが、観測点が少ないと簡単ではありません。特に節面付近では初動の振幅が小さくなります。節面と 45 度の方向、図 3 では 4 つの白矢印の方向で最も振幅が大きく、節面に近づくにしがって小さくなります。節面での振幅はゼロです。このような事情に加えて観測点が多くない時代では節面を決めることさえ難しかったのです。そのためいろいろな解釈が可能で、例えば地殻にマグマが陥入して地震が起こるというマグマ陥入説も一世を風靡したことがありました。

現在では地震が起こると、テレビやラジオあるいはネットで、場所、時間、規模が準リアルタイムで報道されます。いずれ近いうちに発震機構解も目にするようになるでしょう。メカニズム解がわかると、既存の断層との関連性や、その地域（の地殻に）に作用している力の説明が容易にできます。上町断層とどんな関連性があるのか、東海地域で起こった地震であれば想定東海地震と同じ向きの断層なのか、力はフィリピン海プレートの方向と一致しているのかなど様々な議論や解説が可能です。

本稿の解説を参考にしていただいて、報道のお役にたてただければ幸いです。

2013 年 9 月 16 日 梅田