

# 福岡県西方沖地震：強震計の記録が語るその震源断層像

竹中博士\*・山本容維\*・中村武史\*・豊国源知\*・川瀬 博\*\*

## 1. はじめに

2005年3月20日午前10時53分誰もが予想だにしていなかった場所で私達の足元を揺るがすマグニチュード7.0の地震が発生した。震源（破壊の開始点）は福岡県西方沖の深さ約10kmである。この地震により福岡県の福岡市中央区、東区、前原市、佐賀県のみやき町で震度6弱を記録したほか、九州北部を中心に九州地方から関東地方の一部にわたる広い地域で震度1～5強を観測した。これによって、震源域の玄界島において全家屋225棟の約半分が全壊するという甚大な被害が生じ、福岡市の中心部でも建物被害が集中したことが報告されている<sup>1)</sup>。

簡単に言ってしまうと、地震は地中の断層が滑って地震波を放射する現象である。滑りの先端では破壊現象（せん断破壊）が起きている。破壊が地表まで達して断層が地上に現れることもあるが、地震が小さい場合は現れないことが多い。マグニチュード7を超える大きな地震の場合、断層が現れることが多いが、今回の地震では震源域が海で確認しにくいためかもしれないが、地震後の海底調査でも見つからない。地上に断層が現れなくとも私達はその大体の位置を知ることができる。大きな地震（本震）が起きると滑った断層面及びその極近傍で余震が発生するので、その位置からおおよそわかるのである。図1に本震と本震後24時間以内に起きた余震の震央（震源を地表面に投影した位置）を示す。星印が本震の震央、灰色の点が余震である。本震後24時間以内に起きた余震の分布がほぼ本震が滑った断層面に対応することが（経験的に）知られている。これを見ると、余震は北西-南東方向に30km近く分布しており、本震の震央は余震分布の中心ま

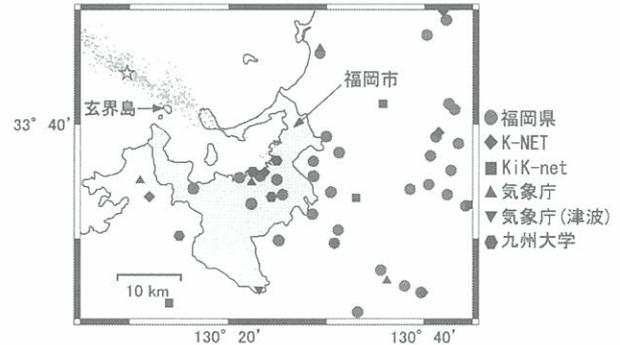


図1 地震と強震観測点の分布

たはやや北西よりに位置している。ここでは示していないが、余震の深さ方向の分布は、およそ深さ2kmから18kmのまでで、数kmの幅で上から下までほぼ鉛直に分布している。

このような余震分布で、おおよその断層面の位置や大きさは把握できる。しかし、面の走行、傾斜角といった幾何学的情報や滑りの方向（これらを断層パラメーターと言う。図2参照）まで抽出することはできない。断層パラメーターは、P波初動が上向き（押しと言う）か下向き（引きと言う）かの空間的なパターン（押し引き分布または初動解と呼ばれる）から推定されることが多いが、初動解は震源（破壊開始点）近傍の局所的な情報しか反映していないため、大きな地震では断層全体の情報を反映する長周期（数10秒以上）の波形を用いて推定された

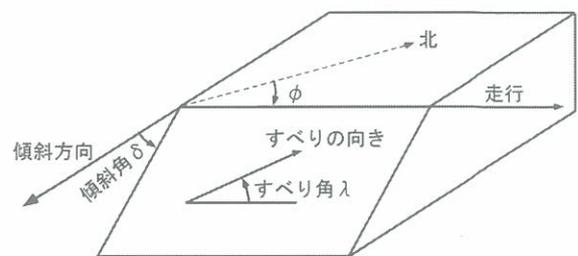


図2 断層パラメーターの定義

\*九州大学大学院理学府 \*\*九州大学大学院人間環境学府

表1 各機関が推定した本震の断層パラメーターとマグニチュード

機関	$\phi$	$\delta$	$\lambda$	Mw
(a) 防災科学技術研究所	122°	87°	-11°	6.4
(b) 東京大学地震研究所	123°	87°	6°	6.5
(c) 気象庁	302°	68°	-3°	6.7
(d) 山中 (2005)	302°	87°	5°	6.6
(e) アメリカ地質調査所 (USGS)	124°	87°	-1°	6.5
(f) ハーバード大学	122°	89°	8°	6.6

( $\phi$  : 走行,  $\delta$  : 傾斜角,  $\lambda$  : すべり角, Mw : モーメント・マグニチュード)

断層パラメーターが採用されることが多い (注: 大きな地震では、地震波の放射エネルギーが高いところは、アスペリティーと呼ばれるすべりの大きな領域で、破壊開始点である震源から離れていることが多い)。表1に大きな地震に対してほぼルーチ的に断層パラメーターを推定している主な機関が発表した福岡県西方沖地震の断層パラメーターの値を示す<sup>2) - 7)</sup>。表の最後の欄にあるMwは地震学的に地震の大きさを表すのに最も物理的な尺度とされる地震モーメントから求められるモーメント・マグニチュードである。通常我が国で報道されるマグニチュードは気象庁マグニチュードで、日本でしか使用されていないが、モーメント・マグニチュードは世界共通である。福岡県西方沖地震の場合、気象庁マグニチュードは7.0であるが、モーメント・マグニチュードは6.6前後とやや小さい。その意味で断層面が地表(海底)まで達していなくても不思議はないのかもしれない。表1を見ると、どの機関の推定値も走行が(北から時計回りに計って)約120度または300度、傾斜角は鉛直に近い。ここで面の傾斜方向は、走行120度の場合は南西方向(N210°E)、走行300度では北東方向(N30°E)となる。すべり方向(すべり角)は断層の上盤側が下盤側に対して動く(滑る)向きであり、いずれの機関の結果も断層面に対して反対側の岩盤が左にずれる(滑る)「左横ずれ」断層であることを意味している。表1の値は、国内あるいは海外の地震観測網の(震源から)遠い観測点で記録された波形から推定されたもので、ばらつきから予想できるように断層パラメーターで10度程度の誤差は覚悟しなければならない。たかが10度であるが、震源域における震動の評価

に大きな影響を及ぼす。それでは、もっと精度良く断層面を知るにはどうしたらよいであろうか。震源域近傍で記録された波形を使えば可能かもしれないと誰もが想像するであろう。でもはたしてそのような都合のいい場所に地震観測点があるであろうか。最初にも書いたように、今回の地震は誰もが起きると予想していなかった場所で起きた(北部九州は地震危険度が日本で最も低い地域の一つと信じられていた)のだが、それが、あるのである。残念ながら震源域内は海域ということで地震観測点はなかったが(注: 現在は玄界島に設置されている)、震源域に近い福岡県や佐賀県内にそれも密にあった。それは地震発生後気象庁から発表される震度を測る震度観測点と独立行政法人防災科学技術研究所のK-NET, KiK-net観測点を中心とする強震計の観測網である(注: 現在では多くのK-NET観測点の震度も気象庁から発表されている)。これらのほとんどは1995年兵庫県南部地震(阪神淡路大震災)以降に設置された。強震計というのは強い震動を振切れずに測定できるように作られた地震計のことで、震度計のセンサーも実は強震計である。我々は、この強震計の記録を解析してこの地震の断層面を精度良く求め、地震時のその運動の詳細を解明する研究を行っており、本拙稿ではその結果の一部<sup>8)</sup>を紹介する。

## 2. 強震計で観測された地震動の特徴

図1に我々が本震の波形記録を解析している主な強震観測点を示す。K-NET, KiK-netと九州大学の観測点以外は震度観測点で、そのうち気象庁の点以外は全て福岡県が設置した震度観測点である。残念ながら佐賀県が設置した震度観測点では波形記録を残すようになっていないため、その点が入っていない。強震計には通常、北南・東西・上下の互いに直交する3成分の地動を個別に記録するセンサーが組み込まれている。したがって、地動を正確に記録するためには、センサーの「北」が地理上の正しい北(真北)に向くように設置されていなければならない。それが理想であるが、実際には通常方位は

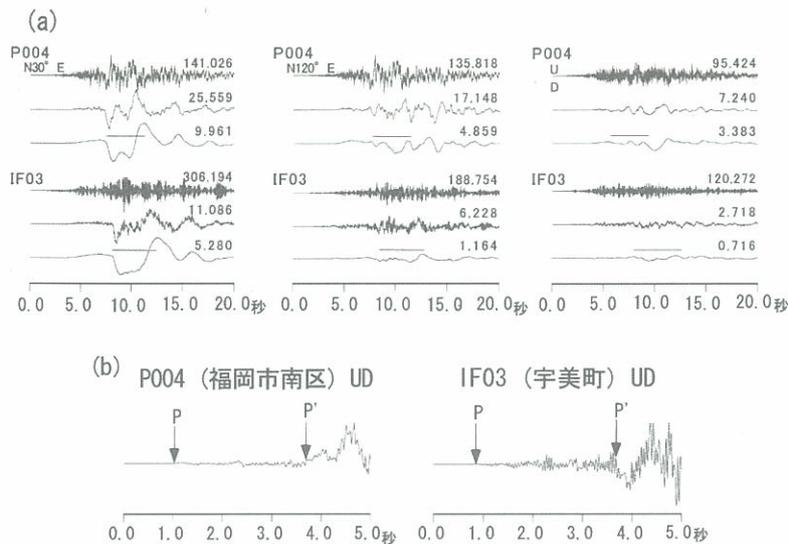


図3 強震記録の例

方位磁石で測られることが多いため、真北ではなく磁北（真北との差は地域によって異なる）にセットされていたり、そばにある金属や電気機器などの影響で方位磁石が狂ってしまったりといった設置時の状況によって、しばしばセンサーの「北」は真北からずれている。このずれ（設置方位誤差）は10度以内であることが多いが、数10度を超える場合もある。そこで、我々は方位磁石ではなく光ファイバー・ジャイロを使って、図1にある観測点のうち、気象庁の観測点を除くほとんどの観測点の設置方位誤差を一点一点測定して回り、それを補正した波形記録を解析している。ちなみにこの設置方位誤差は震度の計算には影響を与えない。

図3は観測された強震波形の例である。観測点は福岡市南区の震度観測点（福岡県）とKiK-net宇美町観測点（地上強震計）で、余震域のほぼ延長上に位置する（詳しい位置関係は図5参照）。図3(a)の波形は、一番左の列が断層の走行（表1）にほぼ直交する成分（断層直交成分）の地動、中央が断層にほぼ平行な成分（断層平行成分）、その右が上下成分である。また、観測点ごとに一番上の波形が地動加速度波形、真ん中が地動速度波形、その下が地動変位波形である（それぞれの波形の右肩にその最大値が書いてあり、単位は加速度  $\text{cm/s}^2$ 、速度  $\text{cm/s}$ 、変位  $\text{cm}$ ）。強震計センサーは地動加速度を記録しており（九州大学の観測点の一部は地動速度を記

録）、速度波形と変位波形は加速度波形を積分して得たものである。これらの記録には、二つの顕著な特徴が認められる。次にそれについて述べる。

一番目の特徴は、地動速度と地動変位ともに断層平行成分よりも断層直交成分が卓越しており、速度波形の断層直交成分の主要動（S波）の始めにやや長周期（幅1秒程度）の大きなパルスが見えることである。これは、地殻内で起きる大きな横ずれタイプの地震において断層近傍、特に破壊の進行方向の狭い領域で見られる現象で、このパルスは通称「キラー・パルス」と呼ばれている。キラー・パルスは、建物の倒壊に直結する周期帯（0.5～2秒）が卓越するパルスで、兵庫県南部地震（気象庁マグニチュード7.3）の際には神戸の「震災の帯」（注：震度7の帯状領域）付近の強震計で大振幅のキラー・パルスが2波観測されており、阪神淡路大震災の神戸側の大きな被害をもたらした原因と考えられている。

二番目の特徴は、速度波形上下成分の初動付近に現れている。図3(b)はその拡大図である。震源（破壊の開始点）から出たP波が到着（図のPの矢印）後しばらくして急に大きな振幅の波（P波）が始まっている（図のP'の矢印がその立ち上がり）。これは、ほとんど全ての観測点で見られた。このような現象は、過去の大きな地震でしばしば見られたもので、最近では2000年鳥取県西部地震（気象庁マグニチュード7.3）で観測されている<sup>9)</sup>。これは、

断層面の主な破壊（主破壊）が震源近傍ではなく、少し離れたところで始まったことを意味している。

強震波形に現れたこれら2つの特徴は、本震の断層について決定的な情報を持っている。我々は、一番目の特徴を解析して断層面の位置を非常に高精度に求め、さらに二番目の特徴から主破壊が開始した点を推定した。次とその次の節でそれらについて説明する。

### 3. 地震動が示す断層面の位置

図4のように浅い左横ずれ断層が滑ったとする。図中の点線は、断層面の地上への延長が地表を切る線（以下「断層線」と呼ぶ）である。このとき、図の破壊進行方向の観測点では断層線に直交する方向に振動する主要動（S波）が見られるが、その運動の回転方向に着目すると、図のように断層線をはさんで回転の向きが反対になることが理論的に予測できる。すなわち、今回の地震の場合、断層線のすぐ北東側の観測点では「時計回り」、南西側では「反時計回り」になることが期待される。そこで、図1の余震分布の延長方向に位置する観測点における変位波形の主要動部分（キラー・パルスを含むS波部分で、図3(a)では横棒を引いた部分）の水平面内の運動について調べた。図5がその結果である。

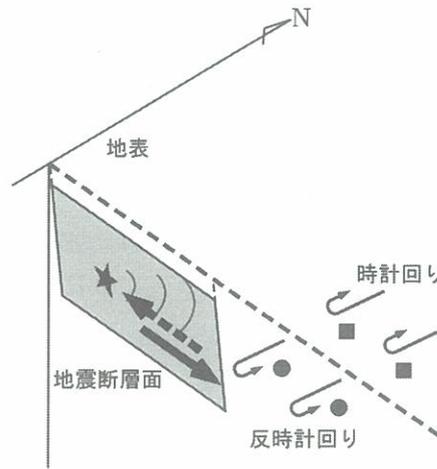


図4 断層面と予想される主要動の震動方向との関係

図5に描かれている軌跡は各観測点における主要動部の水平変位を表している。丸印で示した観測点はその軌跡が「時計回り」、四角印の観測点は「反時計回り」であった（注：軌跡の一部は地下構造の不整形性の影響で生じたと考えられる二次的な波によって乱されているので注意）。理論的には図の丸印の点と四角印の点をちょうど分離する線が、断層線である。そのような線はほぼユニークに引くことができ、図に描かれた点線がそうである。この線は方位N124°EとN304°Eに平行であり、もしこの線が1度でもずれると丸印の点と四角印の点を完全に分けることはできない。このことから、断層

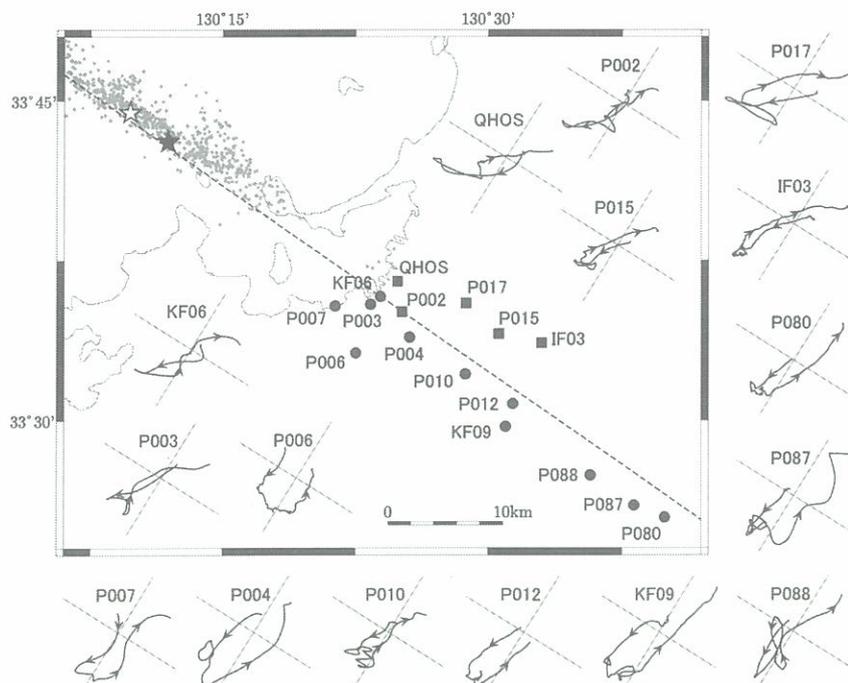


図5 観測された主要動の震動方向と推定断層線

面の走行はN124°EまたはN304°Eであることがわかる。これらの値は、表1に示した他機関の推定値と数度の範囲で一致している。ここで、断層線の推定には、本震の震源情報は使っておらず、まったく独立した情報であることに気づいて頂きたい。ところで、断層面の走行はN124°EとN304°Eのどちらであろうか。言い換えると、断層面の傾斜方向は南西(N214°E)と北東(N34°E)のどちらであろうか(図2参照)。図5の断層線と余震分布との位置関係を見ると、断層線が余震分布の西端を通っていることから断層面は北東傾斜であることが容易にわかる。つまり走行はN304°Eである。この推定誤差は1度以内である。

本震の震源が断層面上にあると仮定する(読者の皆さんは当たり前と思うかもしれない)と、震源の位置(点)と断層線(線)からひとつの面を構成できる(図4参照)。本震の断層面はこの面内にあるはずである。したがって、この面の傾斜角が断層面の傾斜角である。こうして推定した傾斜角は87度である。本震の震源の推定誤差を考慮するとこの傾斜角の推定誤算は3度程度と考えられる。

#### 4. 断層の主破壊はどこで始まったか?

次に第2節で述べた強震波形記録の2番目の特徴を使って主破壊が開始した場所を特定した。本節で

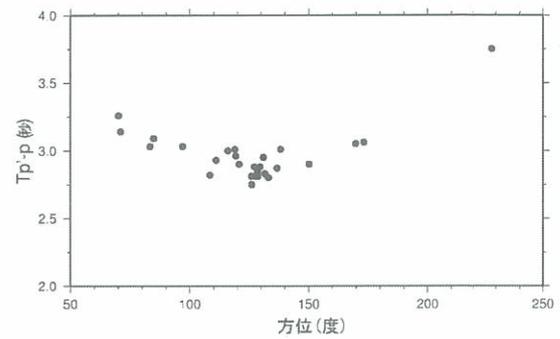


図6 PとP'の到着時間差の分布

はこれについて述べる。図6は図3(b)のPとP'の時間差を比較的震源から近くてP'の読取り精度の良い観測点28点についてプロットしたもので、横軸が観測点の方位(震央から見た観測点の向きを北から時計回りに測った角度)で、縦軸がPとP'の時間差である。このグラフを見ると前節で示した断層線と平行な方位124度付近に時間差の最小がある。これは、震源から見てその方向に主破壊開始点があることを意味している。そこで、グラフにプロットされた点の値(正確には、震源から見た各観測点の相対位置とPとP'の時間差)を最も満足する破壊開始点を前節の推定断層面内で探索すると、震源から断層線に沿って福岡市側に4.2km、断層面に沿って上方に2.9kmの点が求まった。また、同時に、震源で最初の破壊が始まって主破壊が開始するまでの時間は3.6秒と求まった。

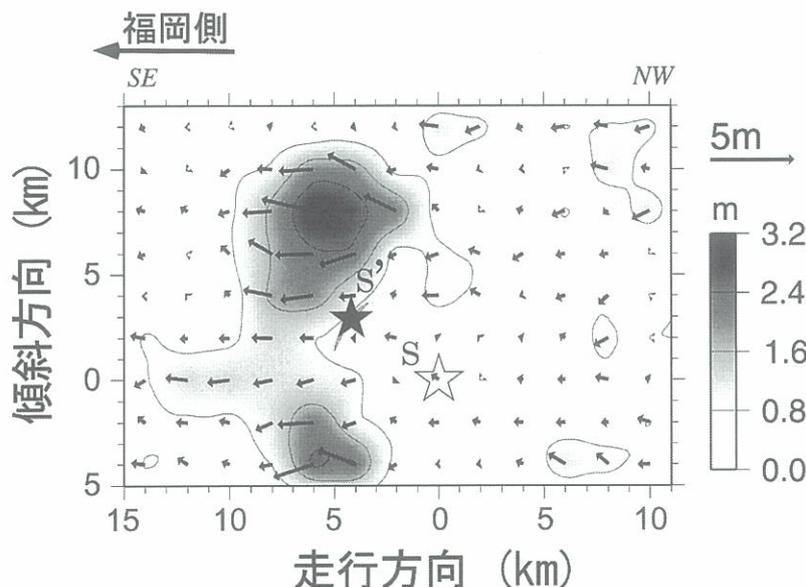


図7 推定した主破壊開始点の位置

図7のS（白抜き星印）が震源、S'（黒い星印）が今回求めた主破壊開始点である。図7のバックには、京都大学の浅野と岩田がK-NETとKiK-netの波形のS波部分を用いて推定した本震時のすべり分布<sup>10)</sup>を重ねてある。色の濃いところが大きく滑ったところで、アスペリティーと呼ばれる。矢印の向きは断層の南西側の岩盤が北東側の岩盤に対して動いた向き、矢印の長さはすべった量を表しており、すべり量のコンター（等値線）が0.8m間隔で描かれている（注：黒い星印に付随する三日月状のコンターは我々が求めた主破壊開始点の推定誤差を表すためのもの）。彼らの解析ではすべりの最大値が3.2m、描いてある面内の平均値が0.8mで、震源から福岡寄りの方上に大きなアスペリティーと下方に小さなアスペリティーが求まっている。彼らの仮定した断層面（走行N122°E、傾斜角87°）と我々の推定した断層面（走行N304°E、傾斜角87°）は同じではないが、両者はほぼ平行で違いは数度しかない。また、用いた震源の位置は彼らと我々では深さ方向に約4km異なる（彼らの方が深い）が、彼らがすべり分布を求めた方法は、この種の解析手法の中では震源位置等の誤差に最もロバストであり、この程度の震源の深さの違いも数度の断層面の向きの違いもすべり分布の結果にはほとんど効かないと考えられる。よって、ここではそのまま両者を震源の位置で一致させて重ねた。

図7を見ると、我々が求めた主破壊開始点は上方の大きなアスペリティーの震源側の下端（0.8mのすべりのコンターにほぼ一致）に位置しており、この点はこのアスペリティーの破壊開始点であることが強く示唆される。浅野・岩田のすべり分布は強震波形のS波部分を使って推定され、一方我々の主破壊開始点はP波部分の情報から推定した。両者はまったく独立した情報を用いているにも関わらず非常に良く調和している。我々の結果と浅野・岩田のすべり分布とを一緒に解釈すると、地震開始から3.6秒後に福岡寄りの浅部（玄界島の北方直下）にあったアスペリティー領域が震源から約5km離れた場所から壊れ始め、アスペリティー領域の破壊の進展

によって大きなエネルギーの地震波が放射されて破壊の進行方向にキラール・パルス（S波）が形成された。

## 5. 玄界島の被害との関係

図5を見ると我々が推定した断層線はちょうど玄界島の東側の海岸線を通っている。また白抜き星印で描いた最初の破壊開始点（震源）の震央と黒い星印で示した主破壊開始点の震央の位置から、主破壊開始点は震源と玄界島のちょうど中間に位置していることがわかる。これは地震時に断層の破壊フロント（すべりの先端）がまさに玄界島に向かって進行したことを意味する。破壊フロントは玄界島まで達してはいないが、玄界島はアスペリティーの破壊で形成されたキラール・パルスに直撃されたはずである。しかし、玄界島の被害は、急傾斜地に建てられている建築物に集中し、平坦地の建物には目立った被害は見られなかった<sup>1)</sup>。玄界島は、例えば被害の大きかった兵庫県南部地震の神戸に比べると堆積層が薄く、表層の地震動増幅効果が小さかったと考えられるが、岩盤部におけるキラール・パルスの振幅レベルそのものが兵庫県南部地震の場合に比べて小さかったのかもしれない。本震当時玄界島には地震計がなかったため直接その答えを知ることはできないが、精度の良い断層面とその破壊プロセスがわかると玄界島における当時の強震動をコンピューター上で再現することができ、その問いに答えることができるであろう。

## 6. おわりに

本稿では2005年3月に起こった福岡県西方沖地震の強震記録を解析して得られた結果を紹介した。この研究はまだ進展している。例えば、今回断層面（特にその傾斜角）を推定する際に震源が主要動（キラール・パルス）を励起した断層面上にあると仮定した（注：震源過程の解析ではこれは一般的）。しかし、細かい破壊プロセスを調べるためにはこの仮定を捨てなければならない。例えば、今回、震源で最初の破壊が始まって主破壊を開始するまでに3.6秒

の時間がかかったことがわかったが、破壊が震源から主破壊開始点までの直線距離5.1kmをこの時間で伝播したとするとその平均速度は1.4km/sであり、この値は震源付近のS波の伝播速度(3.5km/s)から経験的に予想される速度の約半分に過ぎない。このことは、破壊が主破壊開始前に一度止まっていたか、または破壊経路が直線ではなく曲がっていたことを示唆する。実際に本震の初動解(第1節参照)を調べると、初動解からわかる震源の極近傍の破壊面(初期破壊面)は走行が今回推定した断層線と10度弱ずれており、初期破壊面と主破壊面が異なる可能性がある。もっとも両者は接近しており、主破壊面の傾斜角は第3節で述べた値の推定誤差の範囲内である。

以上福岡県西方沖地震の震源断層について述べてきたが、強震記録は他にも興味深い問題を提示している。例えば、図5に描かれている主要動部分の変位軌跡(水平動)を見ると福岡市の中心部及びその東の観測点において、主要動の途中で断層線に平行なパルスが到来している。これは単純な地下構造モデルでは説明がつかず、この領域の地下構造に強い不整形が存在することを示唆している。この解明は、今回の地震の福岡市中心部における被害の評価のみならず、将来の地震を想定した強震動予測のためには重要な課題である。

余震の震源情報は九州大学地震火山観測研究センターが決定したものを我们用いました。尚、本震については、同センターの植平氏他が推定した超高精度(推定誤差 数100m)の震源位置<sup>11)</sup>を使用しました。また、防災科学技術研究所のK-NET及びKiK-netの強震記録、気象庁並びに福岡県の震度計データを利用しました。関係各機関の方々に感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：2005年福岡県西方沖地震災害調査報告，266pp.，丸善(2005)
- 2) <http://www.fnet.bosai.go.jp/freesia/event/tdmt/20050320015200/update1/index-j.html>
- 3) <http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/topics/20050320/index-j.html>
- 4) [http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/mech/outer/cmt/event/0503201053\\_.html](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/mech/outer/cmt/event/0503201053_.html)
- 5) [http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo\\_Note/2005/EIC163.html](http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2005/EIC163.html)
- 6) [http://neic.usgs.gov/neis/eq\\_depot/2005/eq\\_050320/neic\\_vwac\\_q.html](http://neic.usgs.gov/neis/eq_depot/2005/eq_050320/neic_vwac_q.html)
- 7) [http://neic.usgs.gov/neis/eq\\_depot/2005/eq\\_050320/neic\\_vwac\\_hrv.html](http://neic.usgs.gov/neis/eq_depot/2005/eq_050320/neic_vwac_hrv.html)
- 8) Takenaka, H., T. Nakamura, Y. Yamamoto, G. Toyokuni and H. Kawase: Precise location of the fault plane and the onset of the main rupture of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture earthquake, *Earth Planets and Space*, 58 (1), 75 – 80 (2006)
- 9) 平田美佐子, 梅田康弘, 川方裕則: 2000年鳥取県西部地震の初期破壊, *月刊地球*, 号外 No.38, 162 – 166 (2002)
- 10) Asano, K. and T. Iwata: Source process and near-source ground motions of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture earthquake, *Earth Planets and Space*, 58 (1), 93 – 98 (2006)
- 11) 植平賢司, 堀美緒, 清水洋, 金沢敏彦, 宮町宏樹, 篠原雅尚, 飯尾能久, 岡田知己, 高橋浩晃, 亀伸樹, 松尾のり道, 山田知朗, 中東和夫, 橋本信一, 内田和也, 齊藤政城: 福岡県西方沖地震精密余震活動(序報), *地球惑星科学関連学会2005年合同大会*, X113 – P005 (2005)