

## 1. はじめに

「大地動乱の時代」という言葉は、石橋克彦氏が1994年の著書のタイトルで用いたものです [石橋, 1994]。石橋さんは、関東地震と小田原付近のM7クラスの地震の繰り返しに関する研究から、1923年関東地震から70年が経過したときに首都圏の地震に対する脆弱性を指摘し、備えの充実を訴えるためにこの言葉を考案したのでしょう。その後多くの方々に使われ、阪神・淡路大震災から東日本大震災、さらには予想される次の南海トラフ沿いの地震に至る日本列島の地震活動の活動期を示す言葉として定着しているように見えます。しかし、私はこれ以前から日本列島、さらに世界は「大地動乱の時代」に入っていたように思います。すなわち、日本海東縁部のプレート境界で1983年、1993年と大地震が発生し、伊豆周辺で歴史上極めて稀な火山噴火が連発し、さらに2つの大震災も起きました。海外に目を転じると、アラスカ地震からほぼ半世紀ぶりに2つのM9前後地震、スマトラ・アンダマン地震とチリ・マウレ地震が、それぞれ2004年と2010年に起きました。また、犠牲者が一万人を超える地震は、21世紀に入って実に7回も発生しています。

私は、1984年に京都大学大学院理学研究科地球物理学専攻を修了し、建設省（現国土交通省）国土地理院に就職しました。地理院では主に地殻調査部に所属し、測地測量データを解析し地震や火山噴火に伴う地殻変動を検出する仕事に携わりました。1997年に京都大学防災研究所に異動し、地殻変動研究を続けています。私のキャリアは、まさに「大地動乱の時代」のまっただ中にあると言えます。

## 2. 私が関わった地震・火山噴火

表1をご覧ください。この表は、私が論文発表した主な地震・火山噴火のリストです。1990年からの雲仙普賢岳噴火や2000年の三宅島噴火・新島神津島群発地震など、出向など諸般の事情で手がけなかった重要な事象もあります。とはいえ、ほとんど毎年のように事象が起きていることがわかります。表の右側にそれぞれの特徴を示していますが、極めてバラエティに富んでいることにお気づきになられるでしょう。教科書に見られるプレート境界や既存の活断層での繰り返しの地震と言えるものも当然ありますが、中には理解に苦しむ地震もあります。また、火山噴火についてもしかりです。これらの中から、私の研究者人生を大きく変えたといっても過言ではないいくつかの事象を紹介します。

### 1) 1986年伊豆大島噴火

私は1986年4月に、地殻調査部の地殻変動解析室に配属になりました。国土地理院に入って3年目のことです。この部署は、国土地理院が実施する測地測量データを集積し、解析・処理して地殻変動データを取りまとめ、地震予知連絡会と火山噴火予知連絡会に提出する資料を作成することが本務です。当時の室長は多田堯氏で、当時地震関係では国土地理院の「顔」でした。多田室長は、本務である資料作成とは別に、興味のある地域の地殻変動を研究することを勧め、つくばで開催される研究会などにも連れて行ってくださいました。そこで、建築研の石橋さん、瀬野徹三さん、筑波大の小林洋二さん、防災科研の岡田義光さんなど日本を代表する研究者に出会うことができたことは、大きな幸運でした。

表 1. 筆者が研究対象とした主な地震・火山噴火。「規模」は、地震は USGS Earthquake Hazards Program の Significant Earthquake Archive (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/significant.php>) の Mw, 火山噴火は Smithsonian Institute の Global Volcanism Program (<https://volcano.si.edu>) のデータベースより。

事象	規模	特徴
1986 年伊豆大島噴火	3	500 年ぶりの山腹割れ目噴火
1989 年伊東沖海底噴火	1	有史初
1993 年釧路沖地震	7.6	深さ 100km
1993 年北海道南西沖地震	7.7	奥尻島沈降
1994 年北海道東方沖地震	8.3	プレート内地震
1995 年兵庫県南部地震	6.9	野島断層出現. 神戸側には地表地震断層なし
2003 年十勝沖地震	8.2	約 50 年で再来
2004 年紀伊半島南東沖地震	7.2, 7.4	プレート内地震
2004 年スマトラ・アンダマン地震	9.1	インド洋で M9
2005 年スマトラ・ニアス地震	8.6	S-A 地震の隣で M8
2006 年モザンビーク地震	7.0	大地溝帯の果て
2007 年能登半島沖地震	6.7	東北東-西南西走向の逆断層
2008 年中国・汶川地震	7.9	複雑な地震 1
2010 年ハイチ地震	7.0	山が沈降, 扇状地が隆起
2011 年東北沖地震	9.1	日本周辺で初の M9
2011 年いわきの地震	6.6	複雑な地震 2
2015 年ネパール・ゴルカ地震	7.8	ヒマラヤが沈下
2016 年熊本地震	7.0	大きい余効変動
2016 年鳥取県中部の地震	6.2	南南東-北北西走向の左横ずれ
2017 年フィリピン・レイテ島オルモック地震	6.5	フィリピン断層の運動

1986 年夏, 火山噴火予知連絡会で伊豆大島の火山活動が話題になりました。東大地震研が実施している元町から山頂へ向かう水準測量の結果, 三原山山頂の方が麓からみて沈降していることがわかりました。島全体の変動を知る必要があるため, 地理院に島を一周する路線の測量の依頼がなされました。残念ながら調整が付かず実施されずにいたところ, 11 月 15 日午後 (地震予知連絡会開催中) に三原山山頂火口から溶岩の噴出が始まりました。これを受けて急遽水準測量班が送り込まれました。しかし, 21 日に 500 年ぶりの山腹割れ目噴火が発生し, 全島民と共に測量班は島を離れました。その後, 噴火活動が低調になったことから, 改めて測量班 2 班が派遣されました。測量班は迅速な観測を行い, 連日速報データをつくばに送ってきました。それは一見して驚愕するものでした。島の北端の岡田港からスタートした変動グラフは, 2~3km 西で大きく落ち込みました。どこまでこの沈降が続くのか, ハラハラしながら毎日の速報を待ちました。聞くところによると, 自動車を気にする必要がなかったので, 作業は順調に進み, 数日で一周路線の測量は完了しました。その結果, 驚くべき変動が明らかになりました。

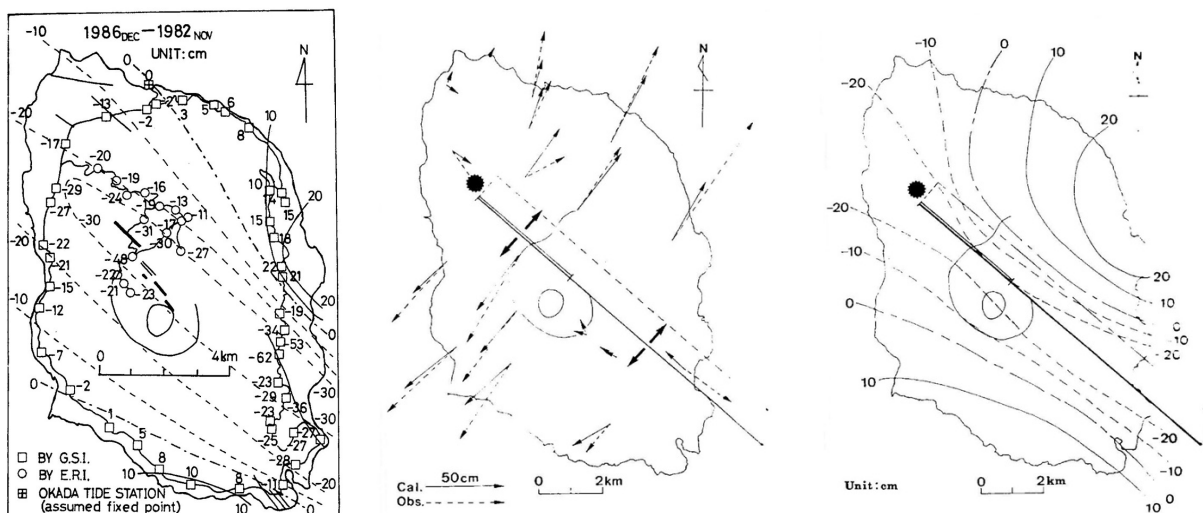


図 1. 1986 年伊豆大島噴火に伴う地殻変動とそのモデル. (a)水準測量で得た上下変位. 基準は岡田検潮所 (+付きの□). □は水準点. (b)観測およびモデル水平変位と開口割れ目+球形圧力源モデル. (c)開口割れ目+球形圧力源モデルと理論上下変位. [Hashimoto and Tada, 1990]

図 1(a)は、多田室長が東大地震研の測量結果と 1 枚の変動図にまとめられたものです。島を北西-南東方向に横断する 30cm に達する沈降帯が生じたのです。それまで火山噴火に伴う地殻変動は、球形圧力源 [Mogi, 1958] で解釈されてきました。しかし、山頂火口から等距離の地点でも沈降したところもあれば、逆に隆起した地点もあり、とても球形圧力源では説明できません。何か別なメカニズムが必要です。

幸運なことに、この事件の前年、防災科研の岡田さんが米国地震学会誌に論文発表されており [Okada, 1985]、私も別刷りを頂いていました。この論文はディスロケーション・モデルの理論式を簡潔にとりまとめられたもので、初めて断層面に対して直交する方向の食い違い、すなわち割れ目の開口による地表変位の理論式も示しています。さっそく、この理論式を Fortran でコーディングしました。そして、入力パラメータをいろいろ変えてながら上下変位のパターンを計算し、観測結果と比較しました。現在ならば、計算機上で瞬時に解ける逆問題ですが、当時は計算機の能力も低く、逆問題の解法の知識もありません。そこで、一定間隔の格子点の上下変位をラインプリンタに打ち出して目視で等値線を引き、トレース台上でそれを観測結果の図と重ね、最もよく合うものを探しました [橋本・多田, 1988]。国土地理院が翌 1987 年に光波測量、1988 年に GPS 測量を実施しましたので、水平変動も明らかになりました(図 1(b))。両者を合わせて開口割れ目モデルを改定して (図 1(c))、国際誌 (PEPI) に発表しました [Hashimoto and Tada, 1990]。実に泥臭いやり方で、誤差評価もなされていない褒められたモデルではありませんが、当時だからこそ発表できた論文といえます。しかし、このような作業を通じて、パラメータに対する感度を体感し、その後の事象への対応に役立ったと思っています。

## 2) 1989 年東伊豆海底噴火

伊豆大島の対岸の伊豆半島東部では 1970 年代半ばから群発地震活動が毎年のように発生し、地域の大きな懸念となっていました。このため、国土地理院ははじめ多くの機関が観測網を展開し、地殻活動のモニターを続けていました。1978 年から 1988 年までの 10 年間の積算の変動量を、図 2(a)に示します。「東伊

豆の隆起」と言われたように、伊東市南部の伊東験潮場（伊東市富戸）を中心として、20 cm 以上隆起していました。ニュースになりませんでした。熱海市沖合の初島と小室山など伊豆半島の三角点との距離が20 cm 以上伸びていました（図2(a)）。また、初島に設置された潮位計も隆起を示していました。一方、群発地震の震源は、初島と伊豆半島間の海底下であり、隆起域とは合いません。この不思議な活動については、隆起域の地下にマグマ溜まりがありそれが膨張する「マグマ説」と、群発地震域のあたりに断層があってゆっくりすべる「クリープ・ディスロケーション説」の2つの対立する考えがありました。いずれの説も決定打を欠いていました。ある日、この変動図に試みに伊豆大島のモデル化で用いた等値線図の一つと重ねてみました。すると、驚くほどよく合うことに気がつきました。すなわち、開口割れ目を群発地震震源域に置くと、開口割れ目の両側にあたる伊豆半島東部と初島が隆起し、初島と伊豆半島の距離も伸びます。観測されている地殻変動の特徴をうまく説明できるので、思わず快哉を叫びたくなりました。

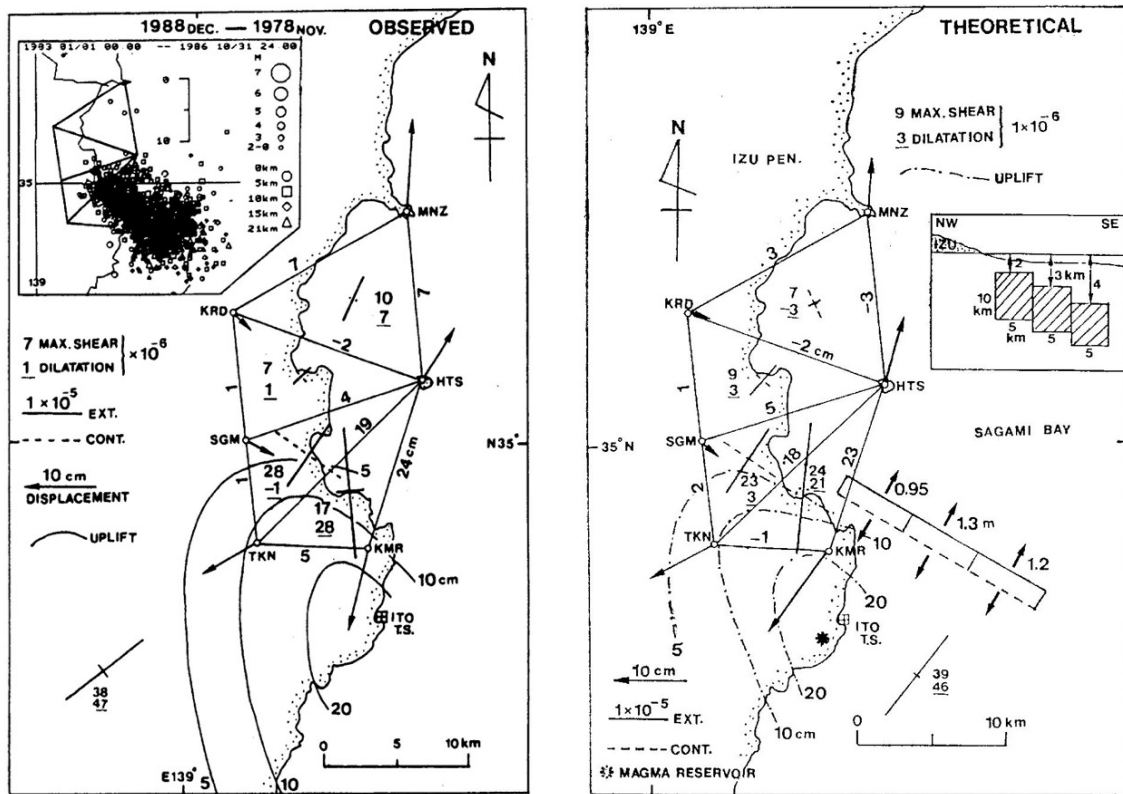


図2. 1978年から1988年の間の東伊豆の地殻変動と開口割れ目モデル。(a)実線は東伊豆精密測地網測量の基線。数値は距離変改。クロスは三角形領域内の歪で、数値は上が最大せん断ひずみ、下が面積ひずみ（下線添付）。左下の歪のクロスは、川奈基線網の測量結果。矢印は各三角点の水平変位。HTS：初島、MNZ：真鶴岬、KRO：玄岳、SGM：巢雲山、TKN：徳永村、KMR：小室山、コンターは水準測量で得られた上下変位。ITO TS.：伊東験潮場。挿入図は、この期間の震央分布。(b)開口割れ目（矩形）+球形圧力源（●）モデルと理論地殻変動。挿入図は、南から見たモデル開口割れ目の分布。一点鎖線が上下変動のコンター。伊豆半島の東方沖に歪のクロスは、川奈基線網の理論歪を示す。

しかし、多田室長に説明したところ、慎重でした。数日後、東大地震研の島崎邦彦先生が「東伊豆ダイク貫入説」なる文章を故中村和明先生の追悼本に寄稿されているのがわかり、我々も学会での発表に向け、モデルの検討を急ぎました。当初は開口割れ目1つのモデルでしたが、最終的に図2(b)に示す3つの開口割れ目と一つの球形圧力源のモデルとなりました [Tada and Hashimoto, 1991]。1988年春の地震学会で発表したと記憶していますが、その時の反応は期待するほどではなかったと思います。しかし、翌1989年の夏、自然が我々の考えの正しさを証明してくれました。有史初めてという海底噴火が発生したのです。1989年7月13日の噴火時には、私も光波測量班の一人として伊東に派遣され、小室山での観測に従事しました。その結果、初島との距離が16cmも伸びたことを突き止め、改めて自然のエネルギーの大きさを実感しました。

伊豆大島と東伊豆の海底噴火以降、火山噴火や群発地震活動に伴う地殻変動を説明するモデルとして、開口割れ目が用いられるようになりました。その端緒を開いたと密かに自負しています。

### 3) 1993年北海道南西沖地震

東伊豆の事件のあと、カリフォルニア大学ロサンゼルス校に1年間滞在し、帰国後には科学技術庁に2年間出向しました。計3年間筑波を離れた後、1993年4月に地殻変動解析室に戻るようになりました。この年は年初から各地で顕著な地震が発生し、新米管理職として多忙を極めていました。1993年7月12日、北海道西方沖を震源とするM7.8の地震が発生し、奥尻島に津波が押し寄せ、200名以上の方が亡くなりました。北海道南西沖地震です。この時点では、1948年福井地震以来最大規模の地震災害でした。

中村(1983)や小林(1983)の提案と1983年日本海中部地震が契機となって、日本海東縁部が新しいプレート境界と認識されつつありました。すなわち、日本海の海底は東に移動し、日本海東縁部から日本列島の下に沈み込むとする仮説です。日本海中部地震は東に傾き下がる断層面を持つ逆断層地震でしたので、この仮説を強力にサポートしました。当然、北海道南西沖地震も同じようにプレート境界説にマッチするものと、誰もが考えました。しかも、奥尻島は海岸段丘が発達していることで知られており、今回の地震も奥尻島を隆起させたいと予想されました。

ところが、地震後に開かれた予知連の特定地域部会において、現地調査から戻られた阿部勝征先生が、「奥尻島は沈降していますよ」と報告されました。この時、出席者全員が「にわかには信じられない」という趣旨の発言を口々にされたことを記憶しています。実際、地理院が三角点の高さをGPSで測量したところ、30~80cmの沈降が確認されました [国土地理院, 1994]。

早速、我々も断層モデルの検討を始めたが、これが容易ではありませんでした。最初は、日本海中部地震と同じく東に傾き下がる断層で試みましたが、断層を奥尻島の近くに仮定すると、沈降を作り出すことは可能です。実は奥尻島の対岸の渡島半島では、水準測量によりわずかな隆起が観測されていました。しかし、この東に傾き下がる断層モデルでは渡島半島も沈降させるので、矛盾します。そこで、西に傾き下がる断層面を用い、なんとかこの2つの観測事実を説明することができました [Hashimoto *et al.*, 1993]。

活断層やプレート境界の断層が繰り返し活動することで地形が形成される、と教わってきましたが、「長期間の地形形成に反する地震も起こりうる」という教訓を得ました。この経験から、それまで主流とされていた考えに対して少々懐疑的に見るようになったことは間違いありません。

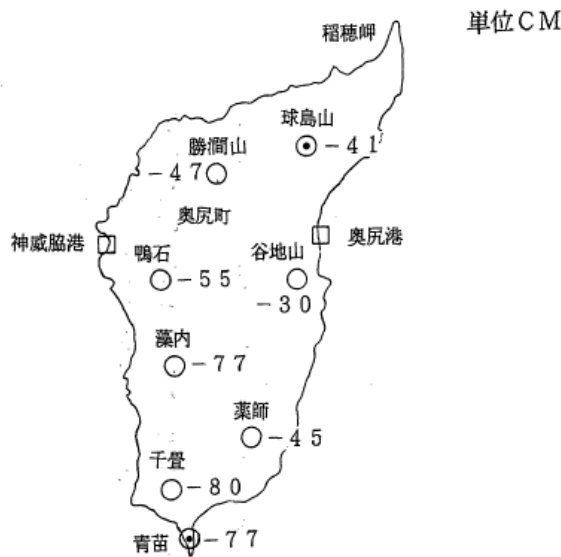


図 3. GPS 測量で得られた 1993 年北海道南西沖地震による奥尻島内の三角点の上下変位. [国土地理院, 1994]. 単位は cm.

#### 4) 1994 年北海道東方沖地震

GPS の大きな可能性が、伊豆や北海道南西沖地震の観測で確認され、国土地理院も本格的に GPS を測地測量の中心に据えることを決めました。折しも中曽根民活による補正予算が配分され、これを活用して GPS の連続観測網を構築しました。全国を約 100km 間隔で覆う観測網 GRAPES が 1994 年 10 月 1 日より稼働したところ、その 3 日後に北海道で大地震が発生しました。早速地理院では GRAPES の観測データの解析が進められました。ただ、精密暦が入手できるまで 10 日程度を要したことから、我々は最終結果が確定するまで待たされました。しかし、その結果は目を見張るばかりでした。

この北海道東方沖地震の気象庁マグニチュードは 8.2 とされ、2011 年東北沖地震までは我が国観測史上最大規模の地震です。この最大級の地震により、北海道は全体が東に引っ張られました [国土地理院, 1995]。根室で約 40cm の変位は、地震の規模から考えると驚くには当たりませんが、西岸の小樽や瀬棚といった観測点が約 4~5cm 変位しているのはとても驚きました。断層モデルから当然このような変位が予想されますが、震源から 7~800km も離れた地点において地震時変位が観測された例はこれまでなかったためです。というのも、GPS 連続観測導入以前は三角・三辺測量しかなく、たとえば北海道全域を測量するために年オーダーの時間が必要でした。しかし、GPS 連続観測のおかげで、私達はオフィスに居ながらにして、数日のタイムラグのみで巨大地震による変位の全貌を知ることができます。時代が大きく転換したことを実感しました。

なお、この地震は低角逆断層に似た発震機構解を持つものの、実はプレート内で発生した高角逆断層の地震です。1993 年 1 月の釧路沖地震（深さ約 100km で発生した水平の断層面を持つ 8 近い地震）、北海道南西沖地震に続き、教科書ではお目にかかれない地震が発生したことから、私の懐疑的な態度はさらに強化されました。

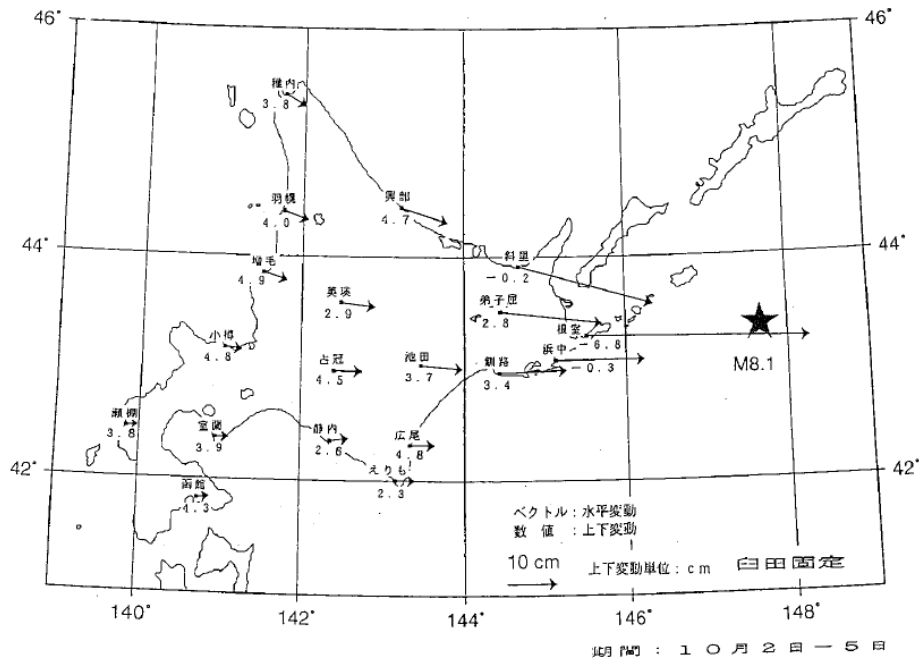


図 4. 1994 年北海道東方沖地震による GPS 連続観測網 GRAPES 観測点の変位 [国土地理院, 1995]. ★は震央を示す。

### 5) 阪神・淡路大震災

兵庫県南部地震と記載すべきかもしれませんが、地震の科学に大きなインパクトをもたらした現象として、私はあえて「阪神・淡路大震災」という固有名詞を用います。近年、地震の科学はスロースリップなどの発見に沸いていますが、この大災害がなければ今日見られる大規模な観測網の整備はなされず、到底得ることができなかった成果です。若い世代の人達は、自分たちの研究が多くの犠牲に因って立っていることを肝に銘じて欲しいと思います。

1995 年 1 月 17 日朝、テレビで見た光景は脳裏に焼き付いています。私は、ちょうど 1 年前の Northridge 地震の被害調査にも参加しましたが、「まさか日本でこのようなことは起こるまい」と高を括っていたことを悔いました。2 週間後に現地に行く機会を得て、壊れたビルや高速道路などを見ては、息を飲み込みました。研究者として一端のプライドを持っていましたが、木っ端みじんに打ち砕かれました。

しかし、立ち尽くしていることはできず、自分ができること、すべきことをしなければなりません。GRAPES が稼働してから 3 つ目の大地震とあって (2 つ目は 1994 年 12 月 28 日の三陸はるか沖地震)、地理院は速報暦を導入する体制が整い、地震後 2 日弱で変位を得ました (図 5(a)). それは見事に、4 象限型の変位分布、すなわち明石海峡を挟んで東西にある観測局 (御津, 箕面・吉野など) は震央に向い、南北に位置する観測局 (宮津, 海南・阿南など) は震央から離れる変位をしています。一見して、六甲断層帯で右ずれ運動が生じたことがわかりました。しかし、100km 間隔の観測局分布では、より詳細な変位場はわかりません。また、地理院としても測量の基準となる三角点の座標を更新する必要があります。このため、GPS を用いて一・二等三角点の緊急測量を実施しました。作業班は、ものすごい渋滞のために大変苦労したと伺いました。しかし、作業班の努力のおかげで、六甲山周辺の変位場が明らかになりました (図 5(b)).

図 5(b)中の赤実線が野島断層、赤鎖線が六甲断層帯の大まかな位置です。野島断層のすぐ東にある江崎山三角点は南西に1m移動しましたが、これは地表地震断層の動きを反映したものです。一方、六甲山系の三角点（六甲山～須磨）は北西に移動しています。これに対して、六甲山の麓の三角点（甲山、打出、和田岬）は西方に変位しています。従って、六甲山系の山麓直下の断層が活動したことは間違いありません。ただ、野島断層と六甲山直下の断層は一直線につながりません。このため、複数の小断層が必要であると考え、最終的に6枚の小断層からなるモデルを提案しました。重要なことは、六甲山直下の断層は地表まで破壊が及んでいませんでしたが、有意に1m以上のすべりをしていたことです。また、神戸市から西宮市に至る狭い地域に被害が集中していたことから、その直下に断層があるとの主張もありました。しかし、この三角点の変位図は六甲山と甲山の間に断層があることを示しています [Hashimoto *et al.*, 1996]。このように、GPS 連続観測はじめ、測地測量が地下に隠れた地震断層の運動を明らかにするために極めて有効な手段であることを、改めて示したと思います。

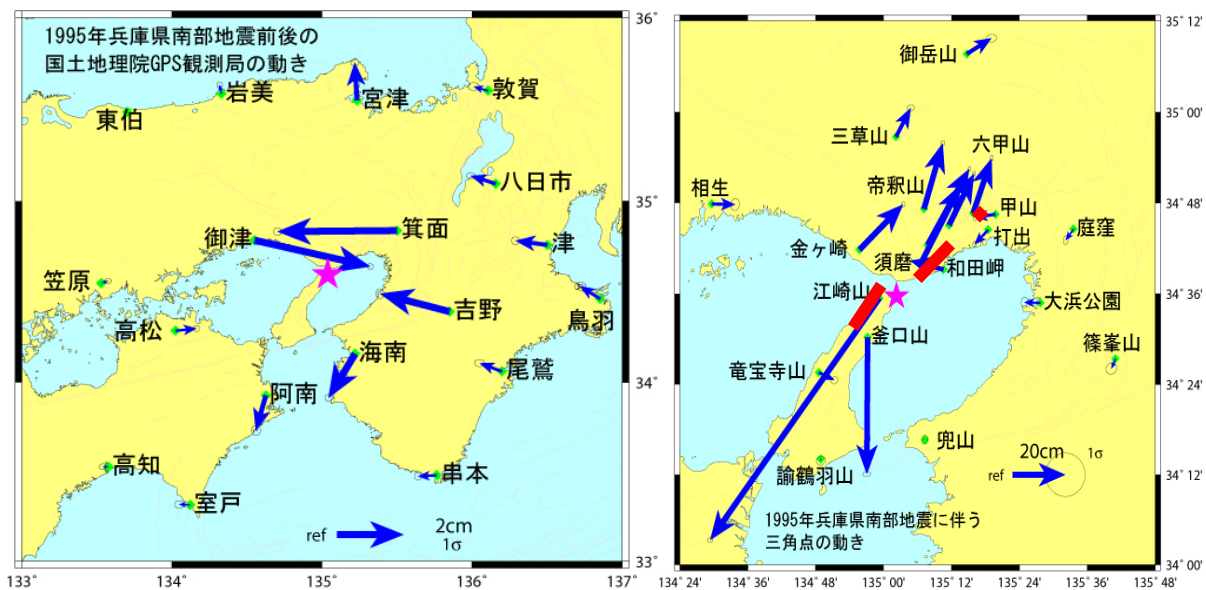


図 5. 1995 年兵庫県南部地震による地殻変動. (a)GRAPES 観測点の変位. 基準は東伯. ★は震央. (b)GPS 測量で得られた神戸周辺の三角点の変位. ★は震央. 赤太実線は野島断層, 一点鎖線は六甲断層の位置 [Hashimoto *et al.* (1996)より改変]

## 6) スマトラ・アンダマン地震

1997年に京大防災研に戻りました。私は、国土地理院OBという「特権」に頼らずにいこうと考えていました。そのため、地理院の観測網を埋めるように自分たちで行うことで、高い空間分解能で興味ある地域の地殻変動を検出することを一つの目標としました。これには田中寅夫先生はじめ細善信さん、大谷文夫さん、さらには高知大の田部井隆雄さん、東大地震研の加藤照之さんらのご支援を得、GPS 大学連合に加わり、2000年鳥取県西部地震後の余効変動観測などの現地観測に参加しました。データ解析も任せられました。実は地理院では管理職だった私はほとんど経験していませんでしたので、貴重な時間でした。

2004年12月26日、インドネシア・スマトラ島西方沖でM9という超巨大地震が発生しました。この年は紀伊半島南東沖地震、新潟県中越地震と国内で被害地震が相次ぎましたが、そんな一年もようやく



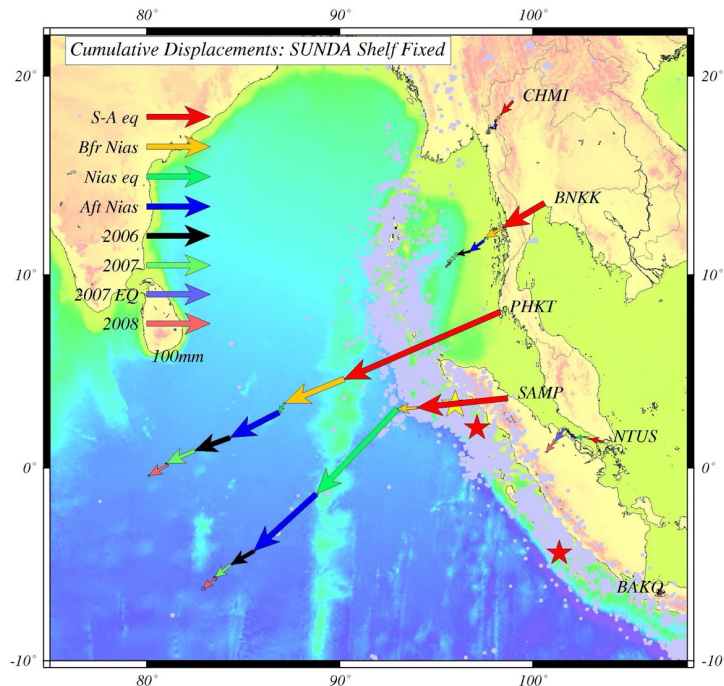


図 6. 2004 年スマトラ・アンダマン地震前後の周辺の GPS 観測点の変位. 黄色の★はスマトラ・アンダマン地震, 赤い★は 2005 年ニアス地震と 2007 年ブンクル地震の震央. 灰色の●は余震の震央を示す. 矢印は, 期間ごとの変位. 赤:スマトラ・アンダマン地震時変位, オレンジ:ニアス地震までの変位変位, 緑:ニアス地震時変位, 青, ニアス地震後 2005 年の変位, 黒:2006 年の変位, 黄緑:2007 年ブンクル地震までの変位, 群青:2007 年ブンクル地震後 2007 年の変位, 桃:2008 年の変位. 4 文字は観測点コード. CHMI:チェンマイ, BNKK:バンコク, PHKT:プーケット, SAMP:サンパリ, NTUS:シンガポール, BAKO:チビノン [橋本・他, 2009]

終わりを迎え、一息つこうとしていた時でした。いつものように PC を立ち上げ、メールチェックをしましたが、届いたメールをにわかには信じることができませんでした。それまでの私の知識では、M9 の超巨大地震はチリやアラスカ・アリューシャンなどの限られた沈み込み帯でのみ起こり、インド・オーストラリア・プレートのような十分に年代を経た海洋プレートが沈み込むところでは、超巨大地震は起きないとされていたためです。

何故このような超巨大地震が、インドネシアで起きたのか？疑問は尽きません。研究者として何かできることがないだろうかと思い、インドネシア周辺の IGS 観測点のデータをネットで取得し、解析してみました。スマトラ島の観測点が大きく変位し、シンガポールあたりにも影響が及んでいることがわかりました。この結果をどこかで見られたのか、理学研究科の竹本先生を通じて大先輩の橋爪先生のグループが運営されているタイの観測点のデータを提供いただけることになりました。その結果、タイ国内でも大きな変位が生じていることがわかりました。2005 年 3 月末にはさらに M8.6 のニアス地震が発生しました。これらの大地震に伴う地殻変動がどのような経緯を辿るのか、測地研究者としては目が離せません。しかし、タイ国内の観測点の多くは休止状態にあったため、急ぎ補強が必要です。幸い科研費に申請したところ採択され、2006 年～2008 年の 3 年間タイを訪れ、観測点の再設や受信機の更新を行うことができました。

図6に、2008年までの観測点の変位を示します [橋本・他, 2009]。この図には、2004年の地震以前から連続して変位を追える観測点の変位のみを示しています。これらの中ではタイのプーケットで、最も大きな変位が観測されています。地震時変位も大きいのですが、その後の余効変動も大きく、2008年まで同じ方向に移動しています。スマトラ島のサンパリが、次いで大きな変位を示しています。しかし、2005年のニアス地震が起きて、それ以降の変位は南西に変わっています。注目していただきたいのは、震央から1,000 km 近く離れたバンコクやチェンマイでも、2008年までに10 cm以上の南西向きの変位をしていることです。1994年北海道東方沖地震ではM8級の地震のエネルギーの大きさに驚嘆しましたが、M9の地震では余効変動もM8級と変わらない大きな変位を生じることを知り、またまた地球の持つエネルギーの大きさを実感しました。

### 7) SAR が教えてくれたこと

我が国の宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は 2006 年に陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) が打ち上げました。この衛星は高精度の合成開口レーダー (SAR) を搭載しており、一時停滞していた合成開口レーダーによる地殻変動研究への期待が高まりました。SAR は、地上に GPS などの観測装置を設置する必要がなく、世界中の陸上のほぼ全域の変動を捉えることができるという大きな利点があります。我が国の衛星搭載 SAR は、1995 年兵庫県南部地震の地殻変動検出などの実績を有します。幸い福島洋氏 (現東北大学災害科学国際研究所准教授) が新たに私達のグループに加わることになり、大学を中心とする SAR を用いた地殻変動研究グループに参加するとともに、京大防災研としての SAR の研究を立ち上げることができました。その後、2007 年能登半島沖地震などの地震が発生し、私達も解析の経験を積みました。

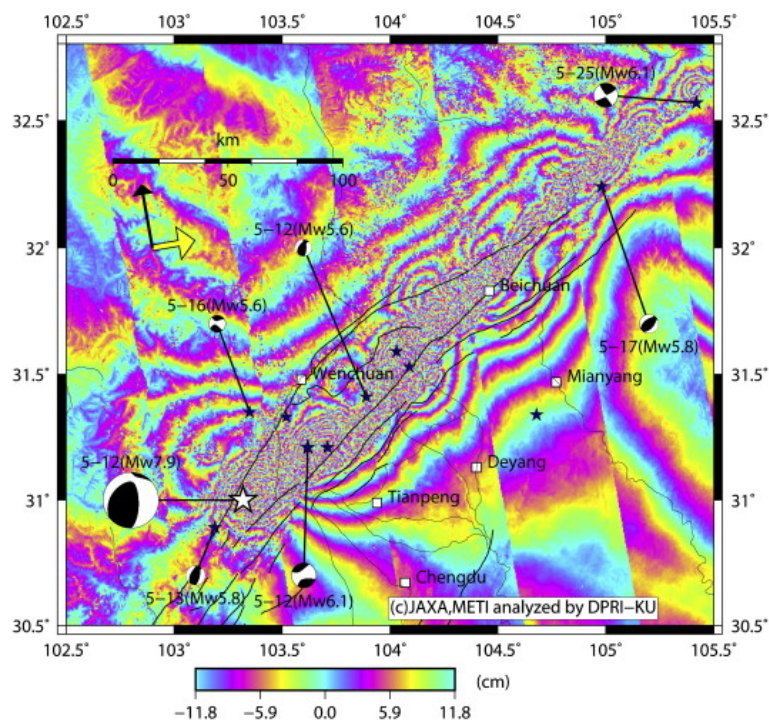


図7. 2008年5月12日の中国・汶川地震による変動。ALOS/PALSAR画像の干渉処理で得られた衛星と地表間の視線距離変化。ビーチボールはUSGS(2008)による本震と主な余震のCMT解。黒実線は活断層 [Densmore et al., 2007] による [Hashimoto et al., 2010]。

そんな中、2008年5月12日中国四川省でM7.9の地震が発生しました。早速JAXAは緊急観測を実施し、貴重なデータを提供してくれました。しかし、地震の規模が大きいため、1回の観測では震源域の一部しかカバーできません。このため、全域の観測が完了するまで1ヶ月を要しました。

図7はその干渉画像を集成したものです [Hashimoto et al., 2010]。この図では衛星は西南西上空にあり、東北東方向にマイクロ波を放射しています。そのため、得られた変位は東北東方向の水平成分と上下変位の合成になります。縞模様は変位の等値線を表していて、一つの色の縞模様から次の同じ縞模様までの間に約12 cmの変位の差があります。したがって、縞模様が混んでいるところは、変位が集中していることを示しています。斜めの不連続は1回の観測領域の端を示します。このケースでは7回の観測がなされました。本震の震央は☆で、この地震は南西端で破壊が開始して、東北東へ伝播したことがわかります。また、渦巻きのような模様が多く見られます。局所的に変位が集中しているところもいくつかある、複雑な断層運動であったことが読み取れます。断層モデルを推定すると、震源に近い南西では逆断層運動が大きいものに対し、北東に行くにつれて右横ずれ断層運動が優位になります。すなわち、この地震では逆断層運動から右横ずれ断層運動へと、破壊の進展に伴って運動の形態が変わっていったのです。このような観察は、SARの持つ面的に地表の動きを捉えるという能力のおかげです。これまでの測地測量やGPS観測など点の観測では捉えられない、極めて詳細な変動を捉えられることから、地震現象の理解に大きな貢献ができると確信しました。

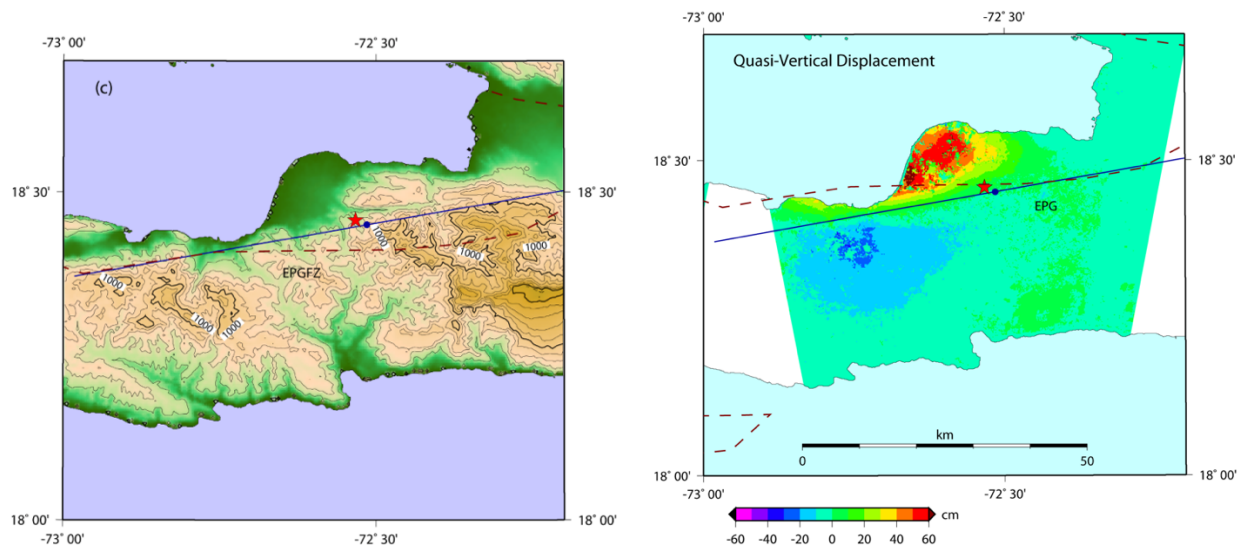


図8. (a)2010年ハイチ地震震源域周辺の地形. (b)ALOSデータの解析で得られた上下変位. [Hashimoto et al., 2011]

この後も世界中で大地震の発生がありました。被害の大きさという観点から見ると2010年1月12日のハイチ地震がスマトラ・アンダマン地震と並んで双璧です。また、このハイチ地震は地震とテクトニクスを議論する上で決定的な事実を与えました。

図8(a)は、ハイチ地震震源域周辺の地形図です。赤い★が震央で、破線が認定されていたエンリキロ断層です（この図では少々南にずれて描かれています。図8(b)の位置が正しいです）。この断層は右横ずれ断層で、カリブプレートと北アメリカプレートの相対運動を消費していると考えられていました。そのため、この地震では右横ずれの水平変位が卓越しているものと予想されました。しかし、実際にALOSの

データを解析し上下変位を求めると、意外な事実が見つかりました。図 8(b)で赤く塗られた部分が 60cm 近く隆起しています。しかし、この地域は地形図では海岸沿いの平野です。一方、その地域の少し西方の内陸部に青い部分があります。20cm 程度沈降したと推定されるこの地域は山地です。すなわち、この地震も北海道南西沖地震などと同様に、地形と逆相関の地殻変動を引き起こしたのです [Hashimoto *et al.*, 2011]。

では、なぜこんなことが起きたのでしょうか？ 答えは簡単です。私達の予想が間違っていて、想定していた断層とは異なる断層が運動したためです。これは、地震発生の長期予測にとって極めて重大な問題です。地震発生の長期予測では、その地域に代表的な断層を認定し、その過去の活動履歴を調べて、再来間隔と最新活動時期、平均変位速度などを推定することから始まります。ハイチ地震などの例は、この考え方では漏れ落ちる地震活動があることを示しています。したがって、現在の長期評価は地域の地震活動を過小評価していることになり、抜本的な見直しが不可欠です。

### 3. おわりに

本稿で紹介した地震・火山噴火以外にも、2011 年東北沖地震はじめ多くの地震・火山噴火に伴う地殻変動を研究してきました。その経験から得た教訓は、

- (1) それまでの「常識」が通用しない、
- (2) 単純な現象の繰り返しは稀かもしれない？
- (3) 地震断層運動は複雑、
- (4) 私達の持っている知識など、大したことない、
- (5) 先入観を捨てて、現象を素直にかつ丁寧に見ることが大事、

ということです。当然何らかの法則が隠れているとは思いますが、慌てて飛びつかず、常に懐疑的な態度を忘れてはいけなさと考えます。

約 40 年間、測地測量とこれに基づく地殻変動の研究に携わってきました。この間、多くの方々のご支援といくつかの幸運に恵まれ、仕事を残すことができました。改めて、皆様に感謝申し上げたいと思います。中でも、大学院時代の指導教官で卒業後も暖かく見守っていただいた三雲健先生、国土地理院に入って地殻変動研究の世界に導いていただいた故多田堯氏、UCLA での共同研究はじめその後もご指導いただいた Prof. David Jackson のお三方がなければ、今日の自分はあり得ませんでした。深く感謝申し上げます。

### 参考文献

- Densmore, A.L., *et al.* (2007) Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibetan Plateau, *Tectonics*, **26**, doi:10.1029/2006TC001987.
- 国土地理院 (1994) 北海道地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, **51**, 1-21.  
[https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou51/01\\_21.pdf](https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou51/01_21.pdf).
- 国土地理院 (1995) 北海道地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, **53**, 1-9,  
<https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou53/01-09.pdf>.
- Hashimoto, M., M. Enomoto, and Y. Fukushima (2010) Coseismic Deformation from the 2008 Wenchuan, China, Earthquake Derived from ALOS/PALSAR Images, *Tectonophysics*, **491**, 59-71, doi:10.1016/j.tecto.2009.08.034

- Hashimoto, M., Y. Fukushima, and Y. Fukahata (2011) Fan-delta uplift and mountain subsidence during the Haiti 2010 earthquake, *Nature Geoscience*, **4**, 255-259, doi:10.1038/NGEO1115.
- 橋本学・片木武・橋爪道郎・福田洋一・里村幹夫・伍培明・石井守・大塚雄一・加藤照之 (2009) GPS 連続観測で得られたスマトラ・アンダマン地震の余効変動とそのテクトニックな意義, 月刊地球, **31**, 3, 135-142, [https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL\\_ID=200902237141742550](https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL_ID=200902237141742550)
- Hashimoto, M., T. Sagiya, S. Ozawa, and T. Tada (1993) Fault models for the crustal movements associated with the 1993 Off Kuroshiro Earthquake and the Southwest Off Hokkaido Earthquake and their tectonic significance, *Proc. of the CRCM'93, Kobe, December 6-11, 1993*, 57-64.
- Hashimoto, M., T. Sagiya, H. Tsuji, Y. Hatanaka, and T. Tada (1996) Co-seismic displacements of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, *Journal of Physics of the Earth*, **44**, 255-279, doi:10.4294/jpe1952.44.255.
- 橋本学・多田堯 (1988) 1986 年伊豆大島噴火前後の地殻変動, 火山 2, **33**, 伊豆大島噴火特集号, S136-S144.
- Hashimoto, M., and T. Tada (1990) Crustal deformations associated with 1986 fissure eruption of Izu-Oshima volcano, Japan, and their tectonic significance, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **60**, 324-338, doi:10.1016/0031-9201(90)90272-Y.
- 石橋克彦 (1994) 「大地動乱の時代：地震学者は警告する」, 岩波書店, 234p.
- 小林洋二(1983) プレート沈み込みの始まり, 月刊地球, **5**, 510-518.
- Mogi (1958) Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them, *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, **36**, 99-134.
- 中村一明(1983) 日本海東縁新生海溝の可能性, 東京大学地震研究所彙報, **58**(3), 711-722.
- Okada, Y. (1985) Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of Seismological Society of America*, **75**, 1135-1154, <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article/75/4/1135/118782/surface-deformation-due-to-shear-and-tensile>.
- Tada, T., and M. Hashimoto (1991) Anomalous crustal deformation in the northeastern Izu peninsula and its tectonic significance - tension crack model, *Journal of Physics of the Earth*, **39**, 197-218, doi:10.4294/jpe1952.39.197.
- US Geological Survey (2008), (<http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/recenteqsww/Quakes/us2008ryan.php>).