

## 2 . 平成 22 年度に発生した大地震及び火山噴火に関する成果

### 2 - 1 . 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震

#### ・何が起こったのか

平成 23 年東北地方太平洋沖地震は、マグニチュード 9.0、震源断層の大きさが約 500km × 200km、最大滑り量は 50m にも達するという推定結果もある超巨大地震であった。宮城県牡鹿半島の東方沖、日本海溝から約 100km 西方の海底下で始まった断層滑りは、約 40 秒間に直径 100km 程度の領域に広がった (図 1)。この時点で断層の広がり、すでに 2003 年十勝沖地震 (マグニチュード 8.0) と同程度となっている。十勝沖地震の場合は最大滑り量が 7m 程度であり、地震発生後 20 秒以内に断層の滑りは止まっている。一方、東北地方太平洋沖地震では、その後も断層が滑り続けた。

断層滑り開始から約 40 秒後、東へ広がった滑りの先端は海溝に近づき、急激に滑りが加速し、海溝付近では滑り量が最大となったと思われる。この理由については、断層滑りの領域が海底面に達したことにより断層が動きやすくなって一気に加速したことによる、あるいは、断層運動により発生した熱のため断層が滑りやすくなったためなど、いくつかの可能性が指摘されている。いずれにしても、断層浅部での滑り量が大きかったため、海底面が大きく隆起して、巨大な津波が発生した。さらに、海溝付近の海底では岩盤がやわらかく、大きな滑りが岩盤の局所的変形をもたらし、津波をさらに大きくした可能性も考えられている。

以上が、観測データから推定された東北地方太平洋沖地震開始から約 3 分間に起こったことである。この地震の断層滑り量の分布については、種々の観測データに基づいた推定が行われている。得られた結果は、いずれも破壊開始点付近に大きな滑り量が推定されている点で共通性が見られるものの、詳しく見ると相互に異なっている点もあり (図 3)、今後も東北地方太平洋沖地震の地震像についての詳細な研究が必要である。

#### ・東北地方太平洋沖地震発生までにわかっていたこと

東北地方太平洋沖地震のような超巨大地震が日本海溝沿いに発生することは、これまでほとんど予想されていなかった。沈み込む太平洋プレートは年代が古く、冷たくて重いため、若くて軽いプレートの沈み込むチリ沖やアラスカ沖とは違って断層の固着が弱いという解釈が 1970 年代になされていた。また、1990 年代末頃以降の観測により、大地震後の余効滑りが顕著であることも明らかになっていた。そのため、この地域では地震だけではなく、余効滑りでもひずみエネルギーを解放し、発生しうる地震の規模は最大でもマグニチュード 8 クラスとされていた。図 3 に 20 世紀に発生したマグニチュード 7 クラスの大地震で破壊された固着領域 (アスペリティ) を示している。これらの地震の主なアスペリティは 50km × 50km 程度の領域に限られており、そこではプレート境界がしっかり固着しているが、その周辺はずるずると滑っている (固着が弱い) ため、普段は地震を起こさないと考えられていた。図 3 に示すように、宮城県沖では、アスペリティは 1978 年や 1936 年の陸に近い側のもの、1981 年の海溝に近い側の東西 2 か所に分かれて存在している。これらが単独で滑るとマグニチュード 7 クラスの地震となり、まれに連動しても、滑り量はせいぜい倍程度で、マグニチュード 8 クラスの地震になると考えられていた。最近になって 869 年の大津波を起こした貞観地震 (図 2) の滑り量は 7m 以上で、マグニチュード 8.4 以上の地震であることが推定されていた。それ以外にも数百年間隔で津波が発生していることは徐々にわかってきたが、その原因となった地震の実体は十分に解明されていない。

プレート境界の固着の強弱の判断のために有効な地殻変動データは、ほとんどが陸域での観測で

得られたものであったため、陸域から遠く離れた海溝付近のプレート境界面の固着状態を推定するには、精度が不足していた。地震前に得られた結果では、宮城県沖の広い範囲で断層が固着していることを示していたが(図6)、精度の不足から固着の強さの推定量がそれほど正確ではないと考えられていた。一方、繰り返し地震から周辺部の滑りを推定し、それからプレートの固着状態を推定する手法も開発され、固着の強い領域があることが分っていた。しかし、滑り量の推定手法に課題があり、確度の高い情報は得られていなかった。つまり、プレートの固着状態を測る2つの物差しを持ち、両者とも震源域で固着が大きいことを示していたが、その推定精度の限界から、固着が強いということは研究者全体の合意となっていなかった。

海溝近くでは、海洋プレートが沈み込んでから十分に時間が経過しておらず、プレート境界の場所も浅くて圧力が低いため、境界面付近が十分に固化していないと考えられていた。このため、境界面の摩擦は小さく、地震を起こすほどは固着していないと思われていた。それを裏付けるように、震源域の海溝付近では定常的に微小地震活動は非常に低い。これらから、海溝近くではプレート境界面の固着が極めて弱く、地震が発生しにくいと考えていた。しかしながら、紀伊半島や四国沖のプレート境界のようにしっかり固着していて、微小地震活動が低い場合もあり、微小地震活動が低いことから、プレート境界の固着の強弱を判定することができなかった。更に、東北地方太平洋沖は伊豆・小笠原～マリアナ海溝沿いのように巨大地震が全く発生しない海域に類似しているという思いこみもあった。以上のように、既知の情報をすべて駆使しても、マグニチュード9の超巨大地震の発生を事前に予想することは、残念ながら困難であった。地震後に解析された海底地殻変動観測データにより、今回の地震の震源域では、海溝近くでもほぼ全域で固着している可能性が高いことが分かってきた。海溝付近では摩擦が小さいと考えられるにもかかわらず、固着している可能性が高い理由については様々な説があるが、いまだ結論が得られていない。

#### ・超巨大地震の発生機構解明に向けて

図3に示すように、東北地方太平洋沖地震の震源付近では、ここ数十年の間にもマグニチュード7~8クラスの地震が何回か発生している。ほぼ同じ領域で、何故少なくとも過去約200年間はマグニチュード7~8クラスの地震(震源断層が50km×50km程度)が繰り返し、何故今回の東北地方太平洋沖地震の場合はマグニチュード9の地震(震源断層500km×200km程度)となったかは、極めて重要な問題である。これを説明する以下のような考えが提案されているが、これらの発生機構のどれが有効に働いたか、あるいは複数が関係したかを解明するには今後の研究を待たなければならない。

もし、東北地方太平洋沖地震の震源域のうち、1981年のアスペリティの東側で数百年もの長期にわたってプレート境界が強く固着していたとすれば、西側のより深部では、マグニチュード7~8クラスの地震が繰り返し発生したとしても滑り遅れが蓄積されていく。長期間固着していた領域が破壊されたことにより、マグニチュード7~8クラスの地震の発生域に蓄積されていた滑り遅れも同時に解放されて大きく滑りマグニチュード9の地震になったと考えられる。長期にわたってプレート境界が固着していた原因は現時点ではわかっていないが、そこでの摩擦強度が非常に高かった可能性がある。

別の考えとして以下のものがある。一般に、地震は滑りの進行とともに断層面にはたらく摩擦力が低下して滑りやすくなるために発生する。東北地方太平洋沖地震では、断層滑りが進行するとともに、摩擦力が段階的に低下した。マグニチュード7~8クラスの地震では摩擦力は1段階しか低

下しないのに対して、何らかの原因によりさらにもう1段階低下すると、超巨大地震となる。

2段階目の摩擦力の低下の原因は現時点では不明であるが、1つの可能性として、断層運動により発生する摩擦熱の効果が挙げられている。また、摩擦力が大きく低下すると超巨大地震後の応力が非常に小さくなるために、次の破壊を起こすまでの時間が非常に長時間になり、長期にわたってプレート境界が固着することになる。

#### ・今後何が起こるのか

東北地方太平洋沖地震の発生後、震源断層の周辺、特に陸に近い断層深部を中心に、余効滑りが発生し、地震時には沈下した海岸沿いで隆起が起こり始めている。余効滑りは数十年間継続して、地震時に起こった沿岸部の沈降が復元する可能性も考えられる。さらに、震源断層の南側と北側でも余効滑りが続いており、これらがそれぞれの地域で、巨大な地震を引き起こす可能性もある。海溝軸外側で発生が懸念される正断層型巨大地震も含めて、今後の地震活動予測に関する研究を一層推進する必要がある。

また、この超巨大地震により、日本列島全域で応力場が変化し、火山地域を含め各地で誘発地震と考えられる地震が頻発している。内陸で発生する直下型地震は、規模が小さくても大きな被害を生じることがある。世界的には巨大地震の発生後、近隣の火山で噴火活動が活発化することも知られている。今後数年から数十年はそのような地震や火山噴火の発生の可能性があり、誘発される内陸地震の研究も重要である。

## 2 - 2 . 平成 23 年 (2011 年) 霧島山 (新燃岳) の噴火

霧島山新燃岳 (鹿児島県・宮崎県) では、2011 年 1 月 19 日に小規模な噴火が始まり、26 日午後から 27 日 18 時頃までに高い噴煙を連続的に上げる噴火 (準プリニー式噴火) が 3 回発生した。その後、溶岩が火口に蓄積されはじめ、1 月 31 日まで溶岩が火口全体を埋めるまでに成長した。2 月 1 日以降は間欠的に噴石を飛ばす、1 月よりも規模の小さな噴火 (ブルカノ式噴火) を繰り返したが、その後、次第に頻度は減少し、現在に至っている。霧島山 (新燃岳) の本格的なマグマ噴火は 1716 ~ 17 年以来、約 300 年ぶりの現象であり、噴火間隔の長い火山の噴火現象発生や推移を理解するうえで、今回の噴火過程の解明は極めて重要である。

霧島山では火山基盤観測網の整備計画により、噴火前に深度 100 ~ 200m のボアホール型地震計と傾斜計を併設した 3 観測点の新設を完了していた。これらの観測点に加えて、新燃岳南東約 8km にある高感度地震観測網の観測点も含め、噴火前後の現象を記録した高感度地震計と傾斜計のデータは、この噴火現象を解明するうえで貴重な観測データとなっている。さらに、各機関が、広帯域地震観測網、GPS 観測網、傾斜観測網を整備していたため、火山現象解明に有用な多項目の観測データが取得されている。

今回の霧島山 (新燃岳) 噴火の前兆現象と考えられるものとして、2008 年 8 月 22 日の小規模な水蒸気爆発が最初に挙げられる。この活動の際に噴出した火山灰には、新たなマグマの関与が認められなかった。そのことから、この活動はマグマの直接的な関与はなく、高温の火山ガスが地下深部から供給され、水蒸気爆発を引き起こしたと考えられる。

GPS 観測データによれば、この水蒸気爆発の 1 年余り後の 2009 年 12 月下旬より、新燃岳北西 7 ~ 8km の地下約 10km に、マグマの蓄積によると考えられる山体膨張が始まった。この山体膨張は

2011年1月の準プリニー式噴火の開始まで続き、マグマの蓄積速度はほぼ一定であったと見積もられている。このマグマ蓄積の開始後の2010年3月から7月の間に小規模な水蒸気爆発が7回発生した。5月下旬に放出された火山灰の中に、ごくわずかながらマグマ起源の火山ガスの泡を含む黒色のガラス質成分が確認され、噴出物に極めて少量ではあるが新鮮なマグマ物質が混じり始めたことを示していた。以上のように、マグマ蓄積が進み、火山噴出物に新鮮なマグマ物質が含まれはじめたことから、これらの水蒸気爆発は、2011年1月のマグマ噴火に直接つながる準備過程であったと思われる。

2011年1月19日に発生した小規模な噴火では、火山灰の中に含まれる新鮮なマグマ物質の割合が顕著に増加した。これと同時に火山性の連続微動が発生し始めたことから、この噴火が今回のマグマ噴火の活動開始を示すと考えられる。連続微動の振幅は1月26日08時頃から一段階大きくなった。26日14時49分に最初の準プリニー式噴火が始まると同時に、更にもう一段階大きくなり、噴火が継続していた約4時間程度、大振幅の微動が継続した。準プリニー式噴火は、27日01時頃と15時頃にも発生し、26日14時49分の噴火と同様に噴火に同期して火山性微動の振幅も大きくなった。噴火時の傾斜計記録から、準プリニー式噴火時にはマグマ溜まりが急激に収縮し、噴火活動の停滞期には収縮が弱まる様子が明瞭に捉えられた。これら3回の準プリニー式噴火で放出された軽石と火山灰は新燃岳周辺地域に堆積し、現地調査によるとその量はマグマ換算で約1,000万 $\text{m}^3$ と見積もられた。さらに、28日21時頃から31日18時頃にかけて、マグマ溜まりの収縮がゆっくり継続し、この間に山頂火口内に溶岩が蓄積された。火口内に蓄積される溶岩の成長は、悪天候のために航空機からの目視観測はできなかったが、SAR画像により明瞭に捉えられ、噴火活動推移の把握に大変有効であった。また、噴火の様子はドップラーレーダーでも捉えられ、噴煙高度推定、火山灰の流れの観測に極めて有用であった。2月1日の時点での火口内に蓄積した溶岩の量は、マグマ換算で約1,400万 $\text{m}^3$ と推定され、1月26日から2月1日までの噴火で約2,400万 $\text{m}^3$ のマグマが噴出したと見積もられた。一方、GPS等の観測データから、この期間のマグマ溜まりの体積減少量を推定すると約2,400万 $\text{m}^3$ となり、噴出量と一致している。これは、新燃岳北西7~8km地下約10kmにあるマグマ溜まりから火口へ、マグマが移動したことを定量的に示す貴重なデータである(図4)。

2011年6月中旬まで、新燃岳では小規模なブルカノ式噴火が間欠的に発生した。噴火前に山体浅部が膨張し、火山性地震の発生回数が増加する。噴火後は膨張した山体は元に戻り、地震数も減少する(図5)。これは火口付近の浅部にあるマグマの一部が発泡し、火口を覆う溶岩を噴き飛ばしていた現象であろう。一方、深さ10kmのマグマ溜まりは1月26日~31日の噴火により、2009年12月から1月26日の噴火前までに蓄積したマグマの四分之三の量を放出したが、その後、噴火前とほぼ同じ速度でマグマの蓄積が続いている。噴出物の分析から2011年6月下旬からは、これまでのブルカノ式噴火からマグマ水蒸気爆発に移行しているように思われる。今後の活動推移については、準プリニー式噴火(爆発的噴火)が再度発生するのか、溶岩流出(非爆発的噴火)が起こるのか、マグマ水蒸気爆発が発生するのかなど、いくつかの噴火推移(噴火シナリオ)が想定される。進行中の噴火活動に対面して、噴火シナリオを準備し、観測・監視することは、噴火事象分岐のメカニズムを理解することにつながるため、火山噴火予知研究の中心課題と言える。この噴火活動の観測研究を一層推進する必要がある。

## 東北地方太平洋沖地震の破壊プロセス

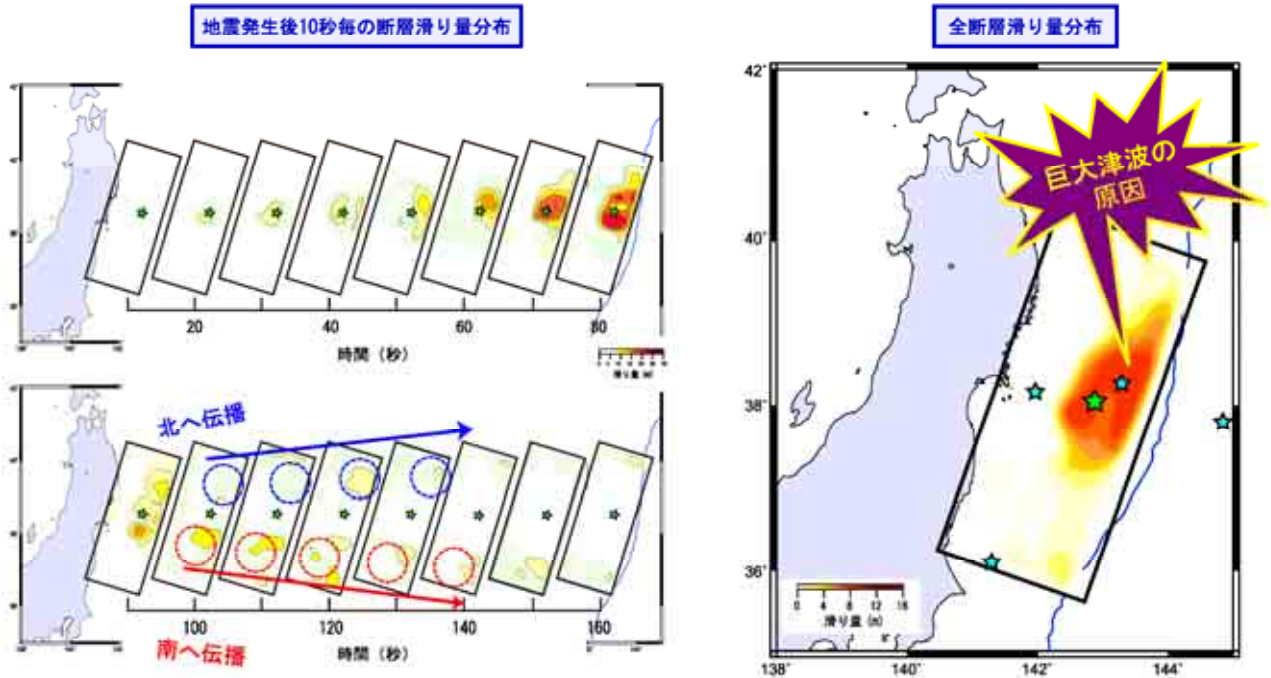


図1. 2011年東北地方太平洋沖地震の破壊プロセス  
 強震観測網等の地震波形を解析して推定された10秒毎の断層滑り量のスナップショット(左図)と全滑り量の分布(右図)。断層滑りは破壊開始直後、震源(緑星印)から主として東の海溝側へ伝播していき、80秒後からは南北に伝播していった。海溝近傍では30m以上の滑り量が推定されており、それが大津波の原因となったと考えられる。

## 東日本太平洋沿岸の津波堆積物分布から推定された大地震

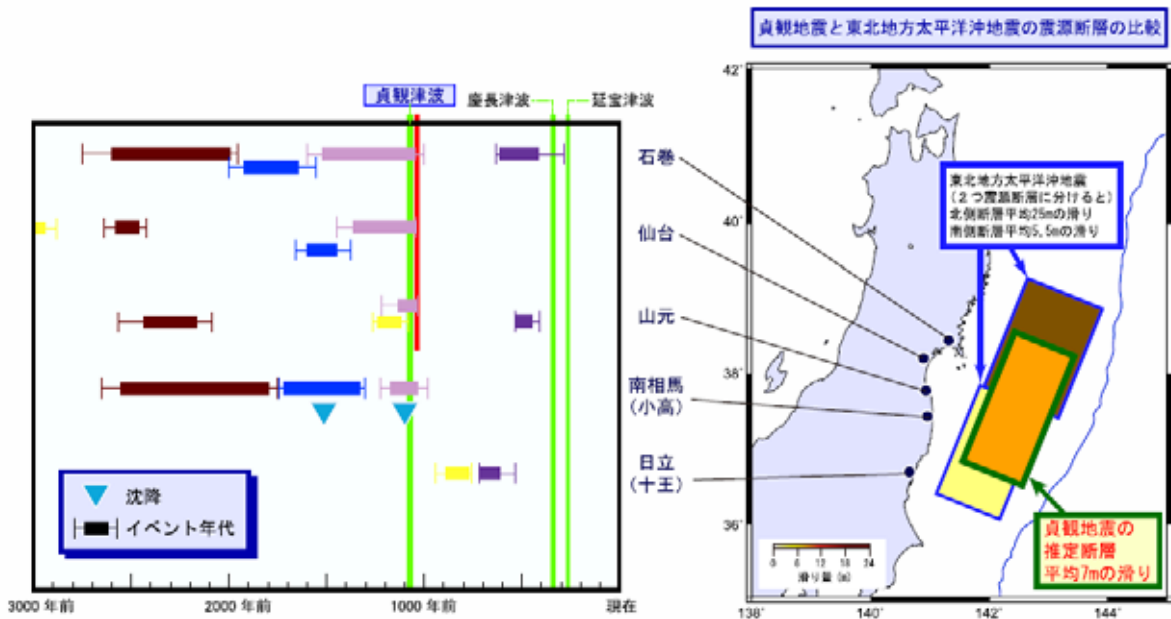
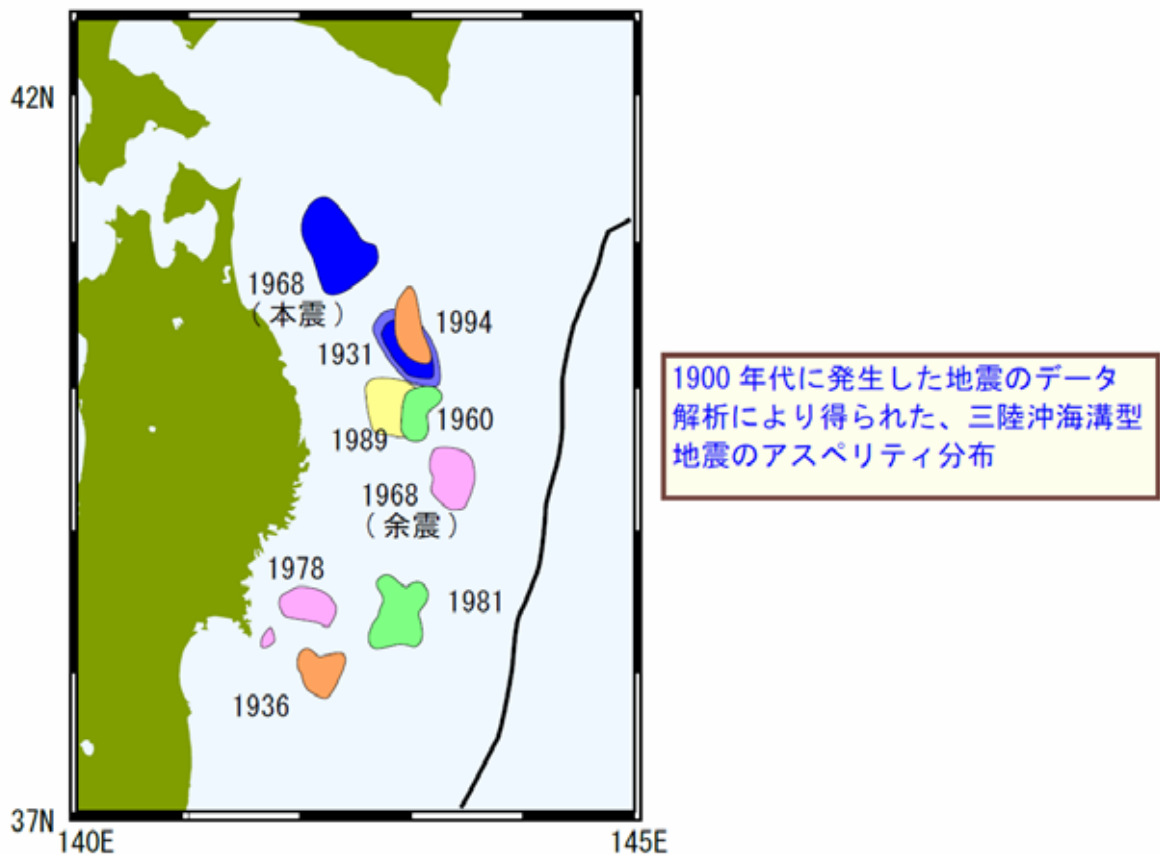


図2. 津波堆積物から推定された東北地方太平洋沿岸で過去に発生した地震  
 左図：日本海溝沿いの津波堆積物調査結果から推定された大地震発生年代の広域的な対比。右図：東北地方太平洋沖地震の滑り量分布と、津波の浸水域に基づいて推定された869年貞観地震の震源断層モデル(地震断層の長さ200km以上、幅100km以上、平均滑り量7m以上、マグニチュード8.4以上)。

## 2011年東北地方太平洋沖地震の滑り分布と、 1900年代の地震で破壊したアスペリティ



### 種々のデータ解析により推定された東北地方太平洋沖地震の滑り分布

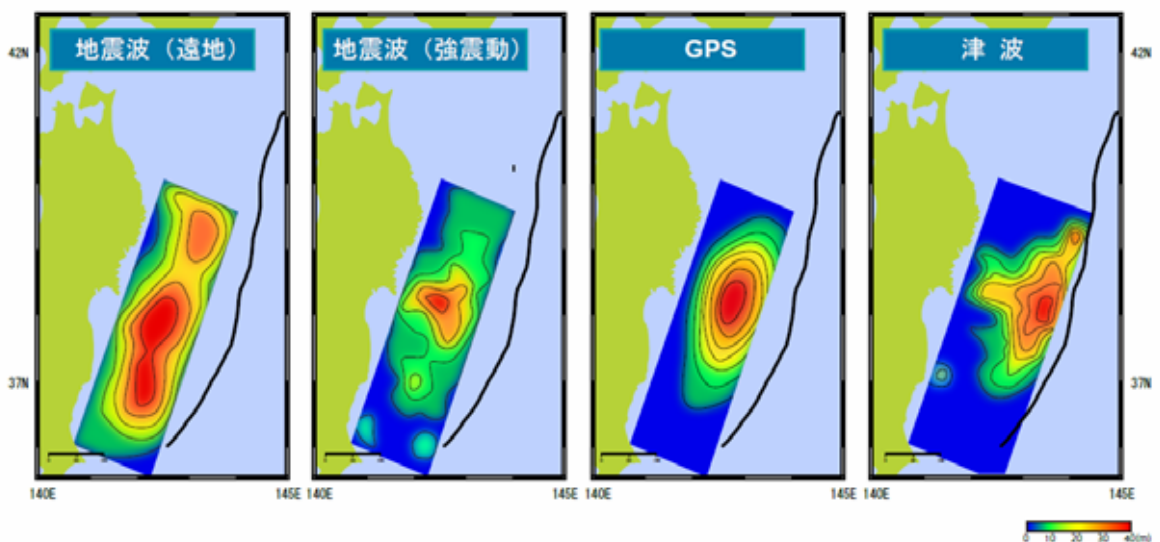


図3 . 2011年東北地方太平洋沖地震と三陸沖アスペリティ

上図：20世紀に発生した大地震のアスペリティ分布。下図：遠地震波、強震動、GPS、津波の各種データ解析により推定された東北地方太平洋沖地震の滑り分布。得られた結果は、海溝付近の滑りなど詳しく見ると異なっている点もあるものの、いずれも破壊開始点付近で大きく滑っているなど共通性が見られ、これまでに存在のわかっていたアスペリティの複合破壊では説明できないことを示している。

## 2011年1月霧島山（新燃岳）噴火時のマグマ移動

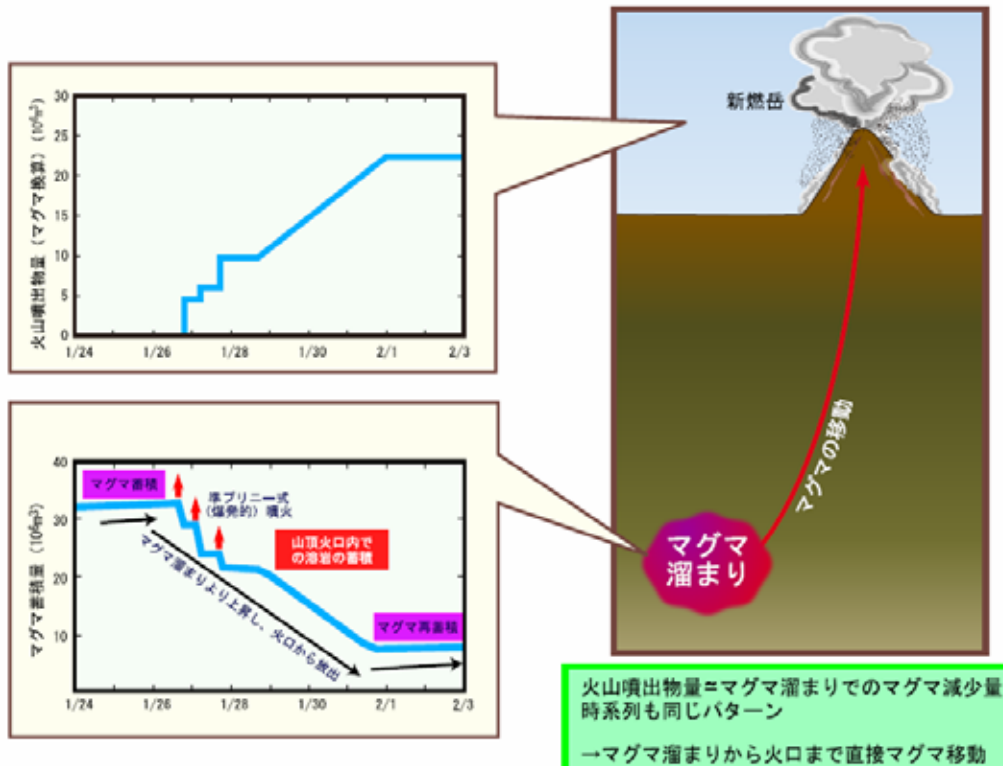


図4 . 2011年1月霧島山（新燃岳）噴火時のマグマの移動

2011年1月26日～31日にかけて、霧島山新燃岳で約300年ぶりに本格的なマグマ噴火が発生した。その際に、火口北西7～8km深さ約10kmのマグマ溜まりから、火口へマグマが移動するようすが明瞭に捉えられた。マグマ噴火を理解するうえで、重要な情報である。

## 霧島山（新燃岳）平成23年2～3月の噴火

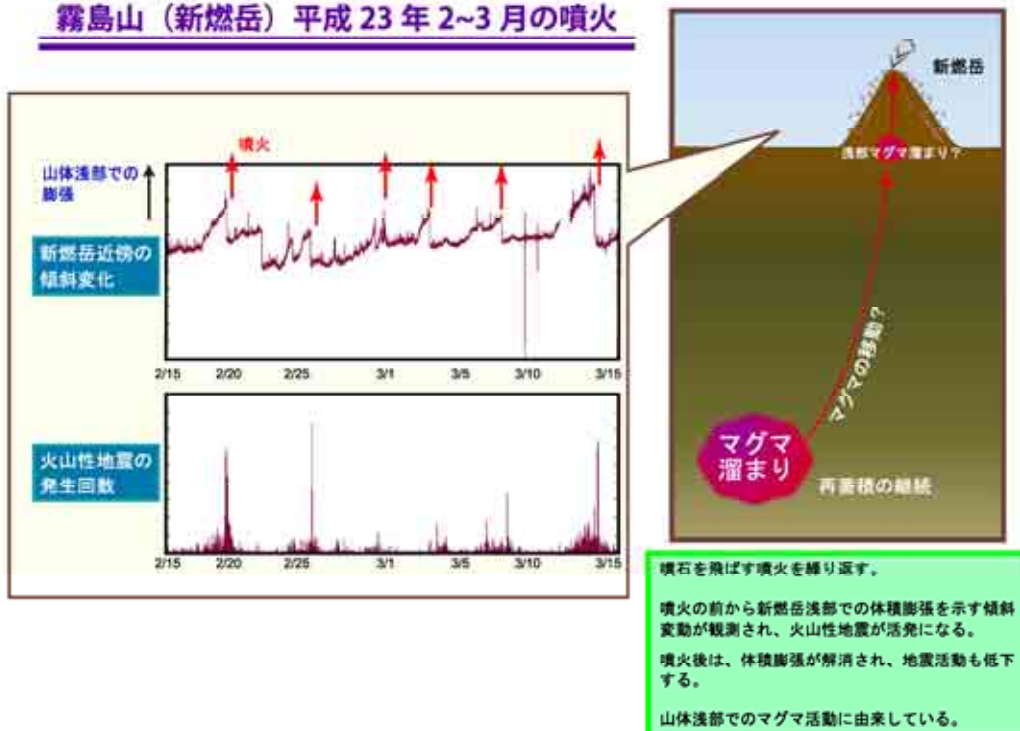


図5 . 2011年2月～3月の霧島山（新燃岳）の噴火活動

1月26日～31日のマグマ噴火後は、火山活動は相対的に低下したが、その後も継続している。2011年2月～3月にはブルカノ式噴火が発生した。噴火前に山体浅部での体積膨張があり、徐々に火山性地震の回数が増加する。噴火時に地震活動が極大となり、噴火後は地震活動が低下し、山体浅部も急激に収縮し、元の状態に戻る。このようなサイクルを数日間間隔で繰り返す活動が見られた。