

2011年東北地方太平洋沖地震による温泉湧出異常と誘発地震*

山形大学地域教育文化学部 川辺孝幸・Terra-Fluid Systems 中野啓二

1 はじめに

平成23年3月11日14時46分頃に発生した、三陸沖を震源とするマグニチュード(Mw)9.0の平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(The off the Pacific coast of Tohoku Earthquake in 2011;図-1)により、その地震によって発生した巨大津波によって東日本の太平洋沿岸は甚大な被害を受けたほか、津波関東地方を中心に液状化被害が発生した。さらに、この地震の際の地殻変動によって、東北地方南部を中心に温泉の湧出異常が発生するとともに、誘発地震の発生や、太平洋沿岸域における広域的沈降運動などの地質現象がおこった。

筆者らは、1995年兵庫県南部地震の際や2004年新潟県中越地震の際に、地震を契機に温泉湧出異常が起こることに注目していたが、今回の大地震の発生後、温泉湧出異常の有無について聞き取りを中心に調査をおこない、温泉湧出異常が発生していることを確認するとともに、温泉湧出異常が、本州の東北地方を中心とする引張応力を伴う広域的な地殻変動によるものであることを明らかにすることができた。また、引張応力を伴う広域的な地殻変動によって、誘発地震が発生したことを見いだした。

以下に、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う温泉湧出異常と誘発地震について述べる。

2 2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地震活動と地殻変動

2011年東北地方太平洋沖地震に伴って、東北日本は5m近く東方向に引き延ばされるとともに、同時に太平洋沿岸では70cm前後沈降し、東北日本の地殻が大きな地殻変動がおこった(図-2, 国土地理院, 2011)。

また、2011年東北地方太平洋沖地震以降、本州の東北日本地質区の脊梁部より日本海側を中心に、点々と密集域をつくって、誘発地震が起こっている(図-1)。

このような地震活動や地殻変動は、2011年東北地方太平洋沖地震を起した巨大な断層のずれによって、上盤側の本州側が応力的により安定した状態に変形した結果であり、その結果、相対的に応力が低下した結果である。

温泉湧出異常や誘発地震の発生は、このような日本列島の地殻における伸張変形と相対的な圧力低下によるものとみられる。

3 2011年東北地方太平洋沖地震による温泉湧出異常

この地震を境に、東北日本のいくつかの温泉、なかでも山形県のいくつかの温泉で、湧出量が減少するなどの温泉湧出異常が広範囲に発生した。このような地震時の温泉湧出異常は、従来から、1995年兵庫県南部地震の際や、2004年新潟県中越地震などの内陸の浅所地震の場合に、その震央の近傍の温泉で発生することが知られている。

筆者らは、東日本のいくつかの温泉について、おもに電話によって、湧出量や湯温の変化について聞き取り調査をおこなった。対象の温泉は、自然湧出の温泉が少ないことや、井戸からのポンプでのくみ上げでは平常時を含めて湧出量を定量的に計測していないことが多いために、定量的な比較ができない問題がある。

*Water level and temprature change of hot springs and induced earthquakes by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Takayuki KAWABE, Keiji NAKANO

また、電話の応対のようすから、とくに変化無しと答えた回答の中には、必ずしも実態を反映しない返答と思われるものもあった。

このような問題点はあるものの、聞き取りをおこなった結果を図-3に示す。

図-3に示す温泉湧出異常には、地震を境に、湧出量と湯温の両方が低下し、現在も低下したままの温泉、地震直後には湧出量と湯温の両方が低下した、隣接地域で発生する余震とともに回復した、もしくは回復しつつある温泉、本震もしくは余震によって湧出量および湯温ともに上昇したものがある。

今回聞き取りした温泉湧出異常では、地震を境に、湧出量と湯温の両方が低下し、現在も低下したままの温泉、地震直後には湧出量と湯温の両方が低下した、隣接地域で発生する余震とともに回復した、もしくは回復しつつある温泉、本震もしくは余震によって湧出量および湯温ともに上昇した温泉の3つのタイプが認められる。温泉湯量および湯温の低下した温泉は、山形県に多く、ついで、棚倉破碎帯に隣接する地域、群馬県北部の温泉、新潟県弥彦山地東縁の温泉などがある。これらのうち、いくつかの温泉は、隣接地域で発生する余震とともに、回復しているものも多い。

(1)温泉の湧出機構

温泉は、地下から湧出または地下から採取した水温25℃以上の湧水・地下水、もしくは温度によらず温泉法に規定する成分を一定量以上含むものとして、温泉法によって規定されている。

温泉の形成機構には、割れ目系型のほか、地下深くの透水層からくみ上げる帯水層型の温泉もあるが、地下に染み込んだ表流水が、地下にもたらされて地温によって暖められたり、接触した岩石や地層と反応してその成分を溶出させて取り込んでできる。古くは第三系における原油開発の副産物として、近年では関東や関西など未固結の鮮新～更新統が厚く発達するところにおける地下1,000mを越す地層中の深層地下水を採取して温泉として利用している。しかし、火山地域も含めて、古くからある既存の温泉の多くは、図-4に示すような割れ目系型の温泉である。火成岩、なかでも深成岩や先第三系の堆積岩などを構成する岩石は、通常固結して水を通さない。しかしこのような岩石から構成される岩体に発達する断層系や節理系などの割

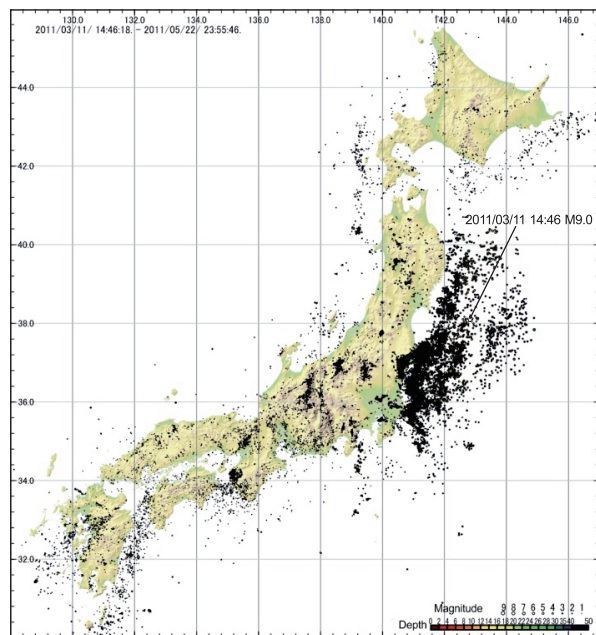


図-1 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の本震発生以降2ヶ月間の余震・誘発地震の震央分布

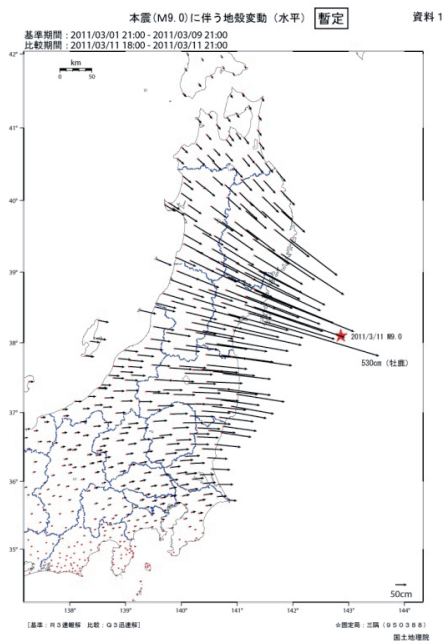


図-2 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震による東北地方のGPS変位(GSI,2011)

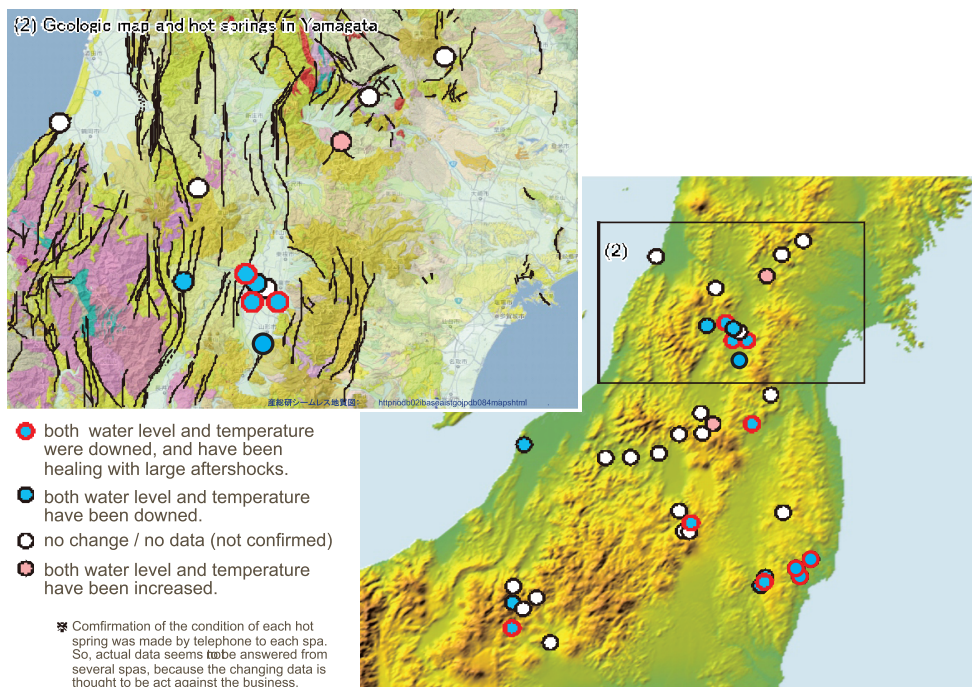


図-3 2011年東北地方太平洋沖地震に伴う温泉湧出異常。削井井戸からの動力揚水が多いため、不明の場合は除外した。また、調査は基本的に電話による聞き取りでおこなったために、必ずしも正確でないと思われる場合もあり、その際は白丸で示した。なお、いわき市周辺のもの、3.11の地震では水位低下、4月中旬の地震以降、湧出量の増大に転じた。

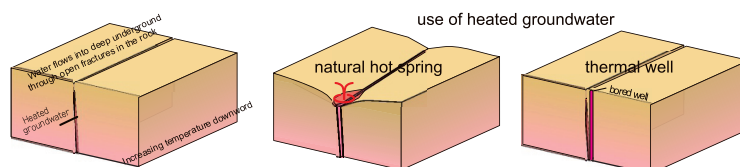


図-4 割れ目系温泉の湧出機構のモデル図

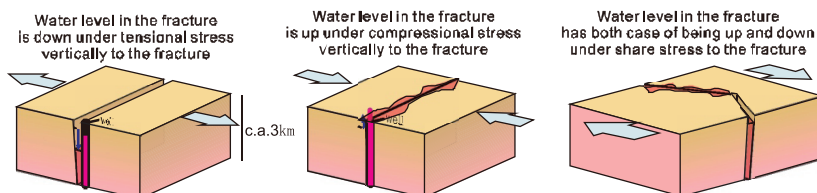


図-5 温泉を貯存する割れ目系に対する応力変化の違いによる割れ目系温泉の水位変化の違い

れ目系のうち、新鮮な癒着していない割れ目で、かつ割れ目が開いているものでは、表流水が地下に浸透・滞留して、深層地下水になる。浸透する地下水に対して、位置ポテンシャルがより低い場所で湧出しやすく、自然湧出の温泉は谷底などに多いが、深井戸によって地下の割れ目系を捕らえることで、より安定的に温泉の採取が可能であるため、現在の温泉の多くは、深井戸によって採取されているものがほとんどである。

(2) 割れ目系温泉における割れ目幅の変化による湧出量の変化

図-3で示すように、山形県内で温泉湧出異常のみられる温泉は、南北方向の断層から採取しているもの

がほとんどで、北東方向の断層に伴うものは、変化が無いものが多い。なお、山形盆地内に多くの温泉があるが、これらの温泉は、深さ600m以上の深層ボーリングによって、盆地内を埋める最大層厚400m前後の第四系の基盤となっている火山性第三系から採取されているもので、基本的には、以下に述べる割れ目系に伴う温泉であり、割れ目系は山形盆地に限る南北方向の断層系と同方向の断層系があり、その割れ目に賦存する温泉を採取していると思われる。

このように、割れ目系に伴う温泉の湧出異常には、異方性が認められる。

これは、割れ目系を構成する割れ目の幅が、外力に対するテンソル解によって、同じ外力が働いても、割れ目の向きによって、開く度合いが違うということである(図-5)。すなわち、外力に対して直交する割れ目では、引張力は、割れ目を開く力としてそのまま働いて割れ目が開く。一方、割れ目と外力とが平行する場合には、割れ目の幅方向の力は働かないので、割れ目幅に変化はない。

割れ目幅が変化すると、割れ目に賦存される地下水の体積は変わらないので、割れ目の幅が変化したことによって水平方向の断面積が変化するので、高さ＝水位の変化が起こる。具体的に例を挙げると、温泉を賦存する割れ目の存在する深さ(岩石が塑性域の深さを超えると割れ目は存在しえない)を3kmまでと仮定すると、もともと割れ目の幅が1mmである場合には、 $1(\text{mm}) \times 6 / 3000(\text{m}) = 2(\mu\text{m})$ となり、 $2\mu\text{m}$ 、すなわち0.2%の割れ目幅の拡大／縮小によって、約6mの水位変化が起きることが可能である。

山形県内における湧出量低下した温泉が依存する、南北方向断層系は、第2図に示す地震に伴うGPS変位結果(国土地理院, 2011)の伸張ベクトルの方向にほぼ直交する方向であり、伸張による外力が割れ目幅を広げる方向に、もっとも効果的に働いたことがわかる。また、湯量に変化しない温泉は、北東－南西方向の断層系や北北西－南南東方向の断層系に依存しており、GPS変位結果の伸張ベクトルの方向に斜交する方向になっていて、割れ目幅の変化にあまり影響を与えなかったとみられる。このような伸張方向に直交および斜交する割れ目系を境にした伸張量の違いは、鹿目ほか(2011)による山形盆地周辺の詳細なGPS観測結果とも調和的である。

同様な傾向は、福島県南部でも見られる。北北西－南南東方向の断層系(棚倉破砕帯)に依存する温泉では、ほとんど変化が無く、いわき市周辺では、本震では水位が低下した。しかし、3月中旬の福島県南部～茨城県北部のメカニズム解が正断層の地震群の発生以降、とくに、2011年4月11日に発生した福島県浜通りの地震によって、大きく増加に転じた。これは福島県南部～茨城県南部にかけて起こった正断層系の地震群でみられるような上部地殻の巨大ブロックが東方向に移動して、そのブロックの北東縁にあたるいわき市周辺の断層系が圧縮を受けたためであると考えられる。

以上のように、割れ目系に依存する温泉の水位は、外力によって割れ目に働く応力のテンソル解に従って変化する。今回の場合には、定量的な変化をとら

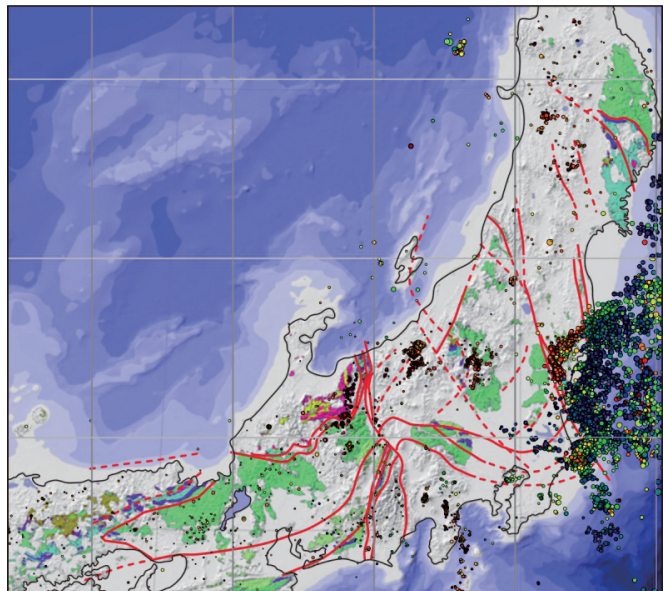
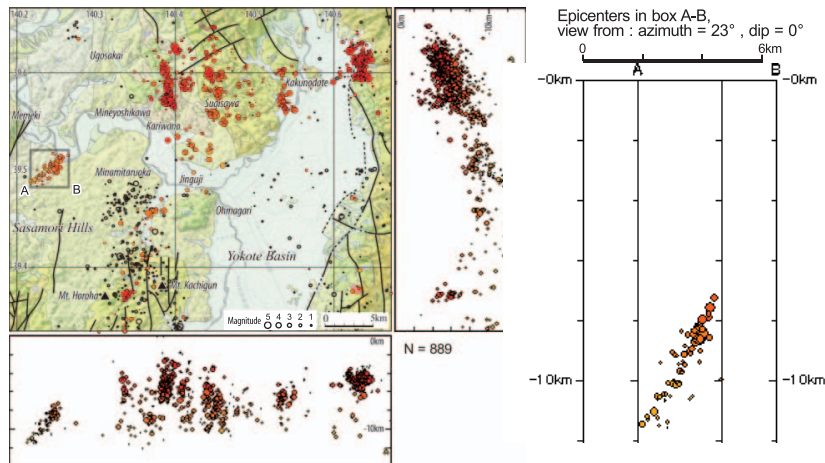


図-6 日本列島中央部～東北地方の地質構造線分布と誘発地震
誘発地震は、本州内陸側のどこでも起こっているわけではなく、地質構造線付近に起こっていることがわかる。

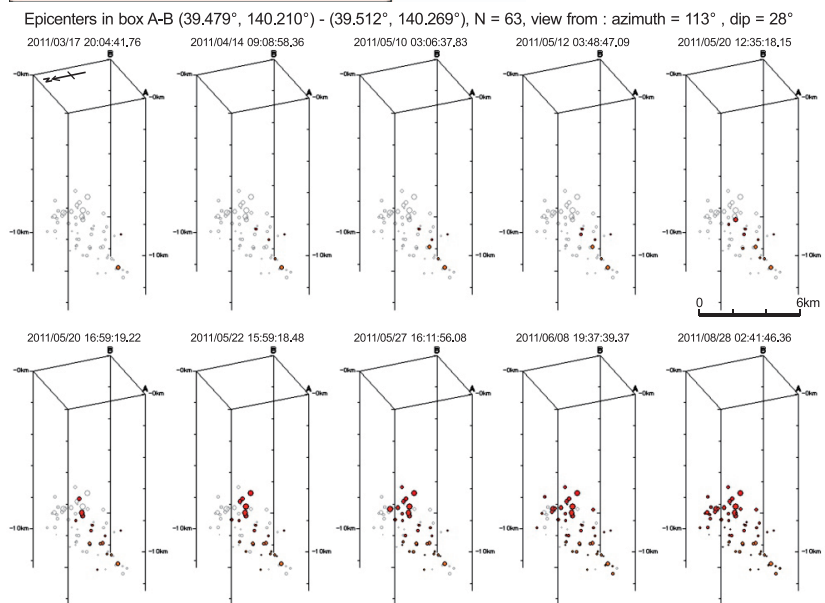
えることはできなかったが、定性的に明らかにすることができた。揚水試験によって割れ目幅を計測し、常時から定量的に水位観測をおこなうことによって、割れ目幅の変化を個々の温泉でとらえることによって、広域的な応力変化を明らかにすることができ、地震予知の有力な手段になり得ると考えられる。



4. 誘発地震の特徴と成因

2011年3月11日以降に発生した誘発地震は、本州の東北日本地質区の脊梁部より日本海側にいくつかのクラスターをつかって発生している(図-6)。これらのクラスターは、図-6に示すように、東北日本地質区の基盤に発達する構造線上、あるいは構造線の交差部に発生していることがわかる。

すなわち、図-2に示されるような本州東北日本地質区の太平洋側への伸張に関して、日本列



島全体が塑性的に伸張したのではなく、上述の温泉湧出異常や、鹿目ほか(2011)の山形盆地周辺における詳細なGPS観測結果でも明らかのように、断層などの断裂性の地質構造要素を境に起こっているということがわかる。日本列島の基盤を境する大規模な構造線は、おそらく、地殻下部でも明瞭な物性境界となっている可能性を示している、地殻下部における引張を一手に担っていると考えられる。

このような誘発地震群が発生している個々のクラスターの震源分布を詳細にみると、図-8や図-9のように、既存の地質構造の一部が、それらの伸びの方向とは無関係に、直径10km前後の楕円形の分布をなして分布していることがわかる。すなわち、各クラスターにおける震源分布は、誘発地震が、力学的な原因によって引き起こされているのではないことを示している。

図-8は、秋田県西南部の出羽丘陵に発生した誘発地震の震源分布を示した図である。図-8のように、こ

図-7 秋田県秋田市雄和萱ヶ沢周辺の誘発地震分布と、その時系列俯瞰図。誘発地震群は、地表では撓曲になっている部分の地下への延長で、約2ヶ月間かけて、南西下方から北東上方に向けて、ほぼN67° E60° Nの面をつかって分布している。

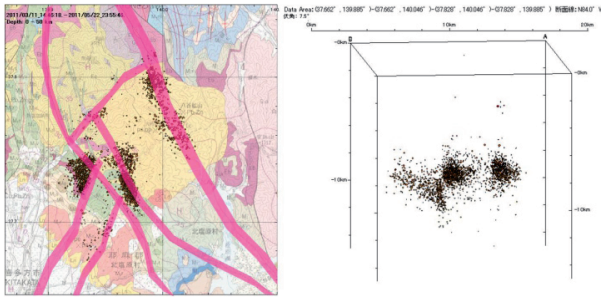


図-9 山形県一福島県境、大峠周辺の誘発地震の震源分布
誘発地震は、北西-南東方向および北北東-西南西方向の既存の地質構造線の一部を利用して、楕円形の分布をなしておこなっていることがわかる。

てほぼ同じ深度で起こるようになる。このような震源分布の時間をかけた動きは、力学的には説明できない。おそらく、流体が時間をかけて上昇してきたことを示していると思われる。

このような誘発地震の時間的・空間的変化は、2011年3月12日の長野県北部地震とその余震でもみられる。

このように、誘発地震は、流体が関与していることを強く示唆しているが、上述の誘発地震のクラスターの分布が、本州東北日本地質区の東への伸張を担っている基盤の地質構造と密接な関係をもっていることと考え合わせると、誘発地震は、本州東北日本地質区の伸張に伴う地質構造線に集中しておこる引張によって、地殻下部における圧力低下によって、流体の発生、もしくは流体から気体（バブル）の発生し、断裂系に沿って浅所に移動してきた流体、もしくは流体+気体によってもたらされたと考えることができる。

5. おわりに

2011年東北地方太平洋沖地震は、1000年に1度の大規模な地震であり、本州東北日本地質区は、陸地部分で、東側の太平洋側に向かって最大5m以上伸張した。この地震によって、温泉湧出異常が東北日本を中心に広範囲に起きた。その原因は、基本的には、この地震によって東北日本の東側への伸張が上部地殻に発達する既存の裂け目が開口することでおこり、その結果、割れ目系に賦存されていた温泉地下水の水位が、割れ目幅の変化に応じて水位が低下して、温泉湧出異常が生じたからである。このように、温泉の湧出量は応力のテンソル解に敏感であり、地震予知にも活用可能である。また、日本列島の伸張による応力変化は、地殻下部での圧力低下をもたらし、流体もしくは流体+気体を発生させ、それらの既存の地質構造を利用した浅所への移動が、誘発地震群のクラスターを多数生じさせたと考えられる。

なお、本研究においては、気象庁、防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、産業技術総合研究所地質調査総合研究センター、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市、海洋科学技術センターおよび2011年東北地方太平洋沖地震合同観測グループのデータを気象庁・文部科学省が処理した気象庁一元化処理検測値データを利用させていただいた。記してお礼申し上げる。

文 献

- 鹿目靖雄・長谷見晶子・島田誠一・加藤照之・小助川匠・日下貴史・松岡孝志・鈴木真嗣(2011)GPS 観測により得られた山形盆地断層帯南部周辺の地殻変動。2013年地惑連合大会, SSS030-P12, www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/~hirahara/pdf/S.Hirahara_2011-2.pdf.
- 国土地理院, 2011, GPS連続観測から得られた電子基準点の地殻変動, <http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html>.

でも誘発地震の分布と既存の地質断層との関係が明瞭である。このうち、地質図には新第三系を切る断層とは表現されていないが、地層の走行傾斜をみると撓曲構造をなしている部分に対応する、秋田市雄和と萱ヶ沢周辺の誘発地震の三次元分布と時系列分布に注目すると、全体としては、撓曲の地下構造に対応する断層面(N30° E65° NW)をつかって分布していることがわかる。しかし、誘発地震は、この面に西斜め下から東斜め上に向けて、斜めの線状の分布で、約1ヶ月以上かけて上昇し、さらに地下約6km付近で東側と西側に分かれ