

2011 年 M9 東北沖地震によって内陸部で誘発された群発地震のまとめ

川崎一朗 東濃地震科学研究所 客員研究員

§ 1. はじめに

2011 年東北沖地震の後、日本列島内陸部では、沈み込むプレートから離れた東北地方の活火山地域でも第四紀火山でもない場所も含めて、実に多様な地震現象が生じた。東西圧縮の地殻応力の 1000 年に一度の低下という条件の下で、何故、この様に多様な群発地震活動が起きたのか不思議である。

図1は、地球を周回した周期 100 秒から 200 秒の表面波が日本列島に戻ってきた時間帯である 2011 年東北沖地震発生後 3.5 時間以内、M3 以上、30km 以浅の地震分布である。関東地方北縁から中部地方と伊豆半島周辺で M3 以上のレベルの群発地震が誘発されたこと、不思議なことに東北地方陸域では福島県浜通りを除いて誘発地震が M3 以上のレベルでは生じなかったことなどが読み取れる。



地震の深度、M、誘発の遅れ、火山との関連などの要素に依って誘発地震と群発地震を手短に整理したいが、現象もあまりにも多様で、到底単純には仕分けできない。以下では、表1と表2を参考に、ある程度要点として浮かび上がってきたと思われるものを幾つか述べておきたい。

図1 東北沖地震後 3 時間半以内に発生した 30 km 以浅、M3 以上の誘発地震。気象庁のHPの「震度データベース検索」によって作図

§ 2. 類型に分類

多くの誘発群発地震は次の様な類型に分類できる。

[類型1]東北沖地震地震発生後 3.5 時以内に生じた、新島・神津島、立山・黒部、焼岳・穂高岳、日光白根山、箱根山などの活火山の 10km より浅い群発地震。

[類型2]大日山、高社山、森吉山など、「第四紀火山で、日遅れ・月遅れで生じた深度 10 km から 5 km 程」の群発地震。

[類型3]北秋田や大倉ダムなど「火山でない地域で日遅れ・月遅れで生じた深度 15 km から 10 km 程」の誘発群発地震。

[類型4]蔵王山など「年遅れで活発化した深部低周波地震」。

[類型5]福島県浜通や東京湾北部など「余震域境界部の下部地殻を含む」誘発群発地震。

表1 その日うちに誘発された地震と群発地震

地域	時刻	M	深度	最大地震	Mx	深度	群発深度
新島	14:50	4.7	10km	3月11日	4.7	10km	14km- 6km
立山・黒部	14:54	4.1	0km	5月17日	4.5	2km	3km- 0km
焼岳・穂高岳	14:57	4.7	2km	3月21日	4.8	3km	5km- 2km
日光白根山	15:03	3.0	7km	3月12日	4.5	6km	8km- 3km
箱根山	15:08	4.6	6km	3月11日	4.6	6km	7km- 0km
乗鞍岳	15:13	3.1	2km	6月06日	4.1	8km	10km- 2km
大日山	18:11	3.2	7km	3月11日	4.0	9km	9km- 7km

時刻とMと深度は、3月11日に最初にM3以上の地震が発生した時刻とMと深度。最大地震とMxと群発深度は、最初の6ヶ月以内の最大地震が発生した月日、そのM、M2以上の地震の深度範囲。

[類型 6] 神津島・新島 (深度 15 km から 5 km) や富士山 (深度 15 km から 6 km) など「フィリピン海プレート」の活火山」の群発地震。

[類型 7][類型 1] から [類型 6] の枠組みに入らない会津盆地 (深度 9 km から 7 km) の群発地震。

[類型番外] 福島県西部や 2008 年岩手・宮城内陸地震などの静穏化。

表 2 東北地震から日遅れで発生した群発地震

地域	開始日	M	深度	最大地震	Mx	深度	群発深度
東京湾北部	3月12日	3.9	25km	3月15日	4.1	23km	27km-19km
苗場山	3月13日	3.3	0km	4月12日	5.6	0km	3km- 0km
松本	3月14日	3.1	3km	6月30日	5.4	4km	10km- 3km
富士山	3月15日	6.4	14km	3月15日	6.4	14km	15km- 6km
大仙	3月14日	3.1	7km	4月19日	4.9	6km	10km- 4km
会津盆地	3月19日	3.0	9km	5月07日	4.6	8km	9km- 7km
北秋田	3月26日	3.4	12km	4月01日	5.0	12km	13km-12km
大倉ダム	4月30日	3.2	13km	6月03日	3.4	12km	13km-11km
月山	7月30日	3.7	6km	7月30日	3.7	5km	10km- 5km
森吉山	12月05日	3.1	6km	12月24日	3.2	6km	10km- 5km

時刻とMと深度は、3月11日に最初にM3以上の地震が発生した時刻とMと深度。最大地震とMxと群発深度は、最初の6ヶ月以内の最大地震が発生した月日。そのM、M2以上の地震の深度範囲。月山と森吉山のみは最初の1年以内で、深度範囲は図18-15による。

§ 3. シリカの溶解度の温度依存性の逆転

Bodnar and Costain (1991)は、分子動力学に基づいてシリカの溶解度の温度変化をシミュレーションし、上部地殻浅部 (4km 以浅) の応力範囲内では、350 °C から 550 °C ほどの温度領域で温度が上昇するほど溶解度が減少する逆転現象が生じることを示した。

日下部 (2018) はこの温度依存性の逆転現象こそが熱水を閉じ込めるメカニズムであることを示唆した。地下水が地表から地中深く浸透して行くと温度が上昇し、溶解度も上昇する。ところが 350 °C の深度より深くなると溶解度は低下し、溶かし込んでいたらシリカを固体として析出して目詰まりを起こすはずである。このような層を自己閉塞層と呼ぶ。

源内・他 (2002) は、黒部峡谷直下に分布する、東西幅 10km 程、深度 7km ~ 6km から 3km ~ 2km、密度 2.0gr/cm³ から 2.1gr/cm³ の超低密度域を提案した。この密度は 30% 程の超低密度域が熱水混合層であることを意味しており、その上端は自己閉塞層なのであろう。東北沖地震による誘発群発地震の深度下限はアルペンルート以南では 3km 程、以北の黒部川花崗岩体分布域 (十字峡から阿曾原) では 1.5km 程である。それは自己閉塞層の深度を示しており、黒部峡谷における誘発群発地震は自己閉塞層の綻びから染み出してきた熱水に依るものであろう。

焼岳・穂高岳、日光白根山、箱館山、乗鞍岳などの [類型 1] の活火山の誘発群発地震も熱水混合層—自己閉塞層の考えが適応できるのであろう。

§ 4. 仙台大倉ダム群発地震

[類型 3] の仙台大倉ダム周辺の誘発群発地震 (図 2(B)) は深度 15 km から 10 km なので、上述の熱水混合層—自己閉塞層の考え方を直接適応することはできないが、一部は準用することができる。

Yoshida and Hasegawa (2018) は、この問題に 1 つの答えを出した。彼らは月遅れの仙台大倉ダム群発地震の震源を再決定し、次の様な解析結果を示した。

- ① 最初は深い方 (13 km 程) で発生し、次第に地震の分布面に沿って斜め上方に浅く (同 10 km 程) なる。
- ② 震源は、明瞭に、複数枚の面に沿って面状に分布する。
- ③ その面がそこで発生した比較的大きな地震の断層面となった。

この解析結果から、彼らは、「東北沖地震による東西圧縮の地殻応力の低下によって地殻下部から高圧の熱水が面状に上昇しやすくなり、熱水が流入してきたことによって断層面の摩擦強度が低

下して地震が発生しやすくなり、地震が群発するようになった」と結論した。

しかし、筆者には以下のような疑問が残るように見える。

疑問1: 近くに活火山は無く、一番近い活火山の蔵王山から 30 km も離れている。地震波トモグラフィー (Nakajima et al., 2006) でも震源域 (深度 15 km から 10 km) は周囲よりも相対的に速度が大きく、部分熔融マグマなどが分布しているとは思えない。一見水気のない領域の、どこに、何故、熱水は貯留されていたのか？

疑問2: 普通は、引張応力が増大 (圧縮応力が減少) すると熱水貯留層が膨張し、熱水は流出しにくくなるはずである。なぜ東北沖地震の後に上昇するようになったのだろうか？

疑問3: 熱水が上昇しやすくなったのなら、何故多くの活火山や活断層でそれは起こらなかったのだろうか。

疑問4: 1998 年仙台愛子 (あやし) 地震 (図2(A)) の時には M5.2 の地震が発生したのに、2011 年の仙台大倉ダム群発地震 (同(B)) の時には何故 M3.4 で終わったのか？

東北沖地震による東西圧縮応力の 1000 年に一度の低下を除いて、地震環境はほぼ同じのはずである。熱水が上昇しやすくなったのなら、2011 年の群発地震からこそ大地震に成長するものがでもおかしくなかったはずである。

Yoshida and Hasegawa (2018) が示唆しているように沈み込むプレートから継続的に供給されて何らかのメカニズムで熱水貯留層が形成されたとすると、時間が経つにつれて過剰間隙圧になり、疑問2にも関わらず、東北沖地震による巨大地震動によって熱水自己閉塞層に生じた綻びが生じるとシリカをたっぷり溶かし込んだ熱水が上昇し、群発地震を起こしたと考えることが出来る。

なぜ日遅れで上昇するようになったのかは分からない。

上昇してきたシリカを含んだ熱水が断層面に沿って上昇して温度が下がるとシリカを析出し、断層面を固着させるであろう。1998 年仙台愛子地震の時には、固着作用より東西圧縮応力が勝ったので M5.2 の地震にまで成長することが可能であったが、2011 年仙台大倉地震の時にはシリカ析出による固着作用が勝ったので M3.4 の地震で終わってしまったということではないだろうか。

いずれにせよ、以下の系が導かれる。

(系1) 主役は熱水

東北沖地震以降の内陸部の誘発地震の主役は熱水貯留層から染み出してきたシリカをたっぷり含んだ熱水であろう。

(系2) [類型 2] の第四紀火山の誘発地震の深度は温度構造で決まっている

第四紀火山の場合、誘発群発地震の深度範囲が 10 km から 6 km 程の森吉山 (110 万年前から 70 万年前)、10 km から 5 km 程の高社山 (30 万年前から 20 万年前)、深度 6 km 程から 0 km の月山 (90 万年前から 30 万年前)、M1 から M3 までの微小地震では深度 10 km から 0 km (M2 以上では深度 3 km から 0 km) の苗場山 (80 万年前から 20 万年前) など様々である。

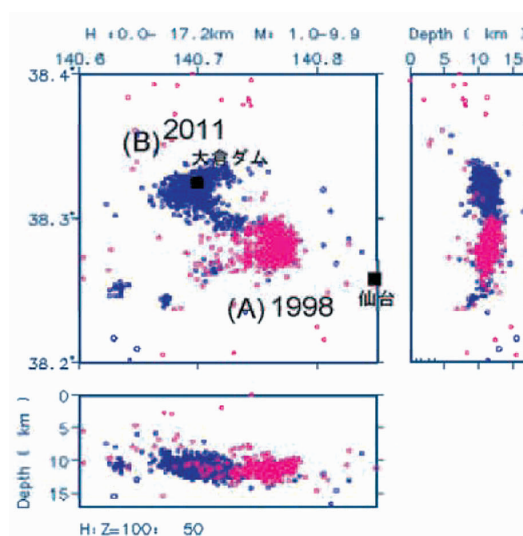


図2 (A)1998 年仙台愛子群発地震と (B) 2011 年仙台大倉群発地震の分布の3次元分布。東大地震研の TSEIS で作図

森吉山を除いて、火山活動が終わったのが比較的最近(30万年前から20万年前)で、350℃程の等温面が5km程の深さであることを示唆しているものと思われる。

§ 5. 未解決の問題

未解決の問題はいっぱい残っている。

東北地方内陸部で生じた誘発群発地震の日遅れ・月遅れの原因も分からない。時間的経過で言うと、最初の30分に誘発された活火山の深度5kmから0km程の浅い群発地震、10kmから5km程の誘発群発地震は3日目以降、15kmから10kmの深い誘発群発地震は2週間後以降と深いほど反応が遅れた。深部低周波地震がもともと活動的な多くの火山では、東北沖地震以降に活動度は低下したが、蔵王山の深部低周波地震活動(深度40kmから20km)は9ヶ月遅れで活発化した。この日遅れ・月遅れが何を意味するのかも理解できていない。なぜ遅くなるほど深くなり、最大地震のMが小さくなっていったのかもわからない。

とはいえ、あえてまとめれば、「巨大地震波によって幾つかの場所の熱水貯留層の頂部(S波反射面)に綻びが生じ、高圧熱水が染み出し、日遅れ月遅れとは言え多くの群発地震となった。しかし、東西圧縮応力の大幅な低下のために大きな地震には成長出来なかったのが東北沖地震後の日本列島内陸部であった」という言い方が適切なのではないだろうか。

参考文献

Bodnar, R.J. and J. K. Costain, Effect of varying fluid composition on mass and energy transport in the Earth's crust. *Geophys. Res. Lett.* 18, 983-986, 1991.

堀修一郎・海野徳仁・河野俊夫・長谷川昭, 東北日本弧の地殻内S波反射面の分布, *地震* 2, 56, 435-446, 2004.

源内直美・平松良浩・河野芳輝, 重力異常から推定された飛騨山脈下超低密度域の三次元分布, *火山*, 第47巻, 第5号, 411-418頁, 2002.

日下部実, 熱水地球化学から見た乗鞍火山列群発地震の発生メカニズム, *自然災害科学 J.JSNDS*, 37-1, 62-72, 2018.

Nakajima, J., A. Hasegawa, S. Horiuchi, K. Yoshimoto, T. Yoshida, and N. Umino, Crustal heterogeneity around the Nagamachi-Rifu fault, northeastern Japan, as inferred from travel-time tomography, *Earth Planets and Space*, 58, 843-853, 2006.

Yoshida, K. and A. Hasegawa, Sendai-Okura earthquake swarm induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake in the stress shadow of NE Japan: Detailed fault structure and hypocenter migration, *Tectonophysics*, 733, 132-147, 2018.