

# 地殻内における大規模な地震後の最大余震 M と地震活動下限深度 Magnitude of the Largest Aftershock and the Cutoff Depth of Seismic Activity in the Crust

関谷 博<sup>1</sup>, 高市翔平<sup>1\*</sup>, 山口泰弘<sup>1\*\*</sup>, 川田 保<sup>1</sup>

Hiroshi SEKITANI<sup>1</sup>, Shohei TAKAICHI<sup>1\*</sup>, Yasuhiro YAMAGUCHI<sup>1\*\*</sup>, and Tamotsu KAWATA<sup>1</sup>

(Received August 22, 2018; Accepted February 6, 2019)

## 1 はじめに

大規模な地震発生(本震)後の地震防災において、余震活動の状況を把握することは重要である。余震活動の一指標として最大余震の規模(マグニチュード(M))が挙げられ、本震と最大余震のMの差(D1)は経験的に1程度と考えられてきたが、最大余震のMが本震と同程度の場合、余震被害の拡大が懸念されるなど、D1は本震後の地震防災上重要な要素である。よって、最大余震のM、つまりD1の推定は、余震被害防止の観点から非常に有益と考える。

D1は地震発生の際の応力分布・媒質の物性(強度)・温度構造など様々な要素に起因していると考えられている。古本(2005)によると、地殻内地震において、D1は地殻の温度構造に対応の良い地殻熱流量との関係が報告されている。その関係が示された地殻の温度構造は、地震活動を制御するなど(Ito, 1999; 堀内・他, 2005)、最大余震を含め地震発生の要因の一つと考えられており、また地殻内の地震発生の下限の深さ(地震の下限深度)との関係が指摘されている(田中・伊藤, 2002)。

気象庁地震カタログ(気象庁, 2018)においては、観測網の整備や震源決定方法の改良、改訂作業等により、精度向上・改善が図られている。D1については、1980年代以降、Mの精度が向上し、詳細な検討が行えるようになってきた。また、大学等関係機関との地震観測データの一元化処理業務開始(1997年

10月)以降、地震検知能力が向上し、震源決定精度が高まった(太田・他, 2002)。高感度地震観測網(Hi-net)データとの併合処理開始以降は、地殻内の地震では深さ方向の震源精度が向上した結果、微小地震を捉えた震源分布、特に地震の下限深度を詳細に把握できるようになった。

そこで、本調査では、大規模な地震発生(本震)後の地震防災に資するため、地殻内において、地震防災に重要なD1と、地震発生の要因である温度構造と関係する地震の下限深度について調べ、関連性を示す結果を得たので報告する。

## 2 方法

### 2.1 調査対象地震

本調査は、気象庁地震カタログを用いて行った。調査にあたり、D1の特性を正確に理解するためには、得られたD1、つまり本震と最大余震のMが比較検討(同等な扱い)可能な精度を有する必要がある。カタログの精度は、観測網の整備、改訂作業等により向上が図られており、現段階で、期間を通して一定のMの精度が確保されていると考えられる1983年から2017年までの地殻内地震(深さ20km以浅)を調査対象(本震)とした。

D1を求めるにあたり、本震は、大きな被害が生じる可能性があるM6.5以上の事例を対象とした。最大余震は、単に主余震域内で発生した最大規模の地

<sup>1</sup> 大阪管区気象台気象防災部地震火山課, Seismology and Volcanology Division, Disaster Mitigation Department, Osaka Regional Headquarters

\*現所属: 地震火山部地震予知情報課, Earthquake Prediction Information Division, Seismology and Volcanology Department

\*\*現所属: 地球環境・海洋部地球環境業務課, Administration Division, Global Environment and Marine Department

震（本震後 10 日以内）とし、主余震域内の地震活動等は考慮していない。つまり、D1 は単純な本震と最大余震のエネルギー差とし、そのため、本震 - 余震型に当てはまる事例を対象とした。

地震の下限深度は、主余震域内の地震から求める。地震の下限深度解析では、震源の深さが重要な要素となるため、内陸の地震に比べ震源精度（特に深さ方向）が劣る海域が主余震域となる事例は、調査対象から除いた。

以上の検討結果から、本調査では、1983 年から 2017 年までの 10 事例（M6.6～M7.3）の地殻内地震を調査対象地震とした（図 1、表 1）。なお、1997 年の山口県中部・2014 年の長野県北部の地震を除く 8 事例は、本震と最大余震ともに発震機構解が得られており、各事例とも本震と最大余震の解は、概ね調和的であった（1997 年の鹿児島県薩摩地方の地震は、鹿児島大学理学部（1997）による）。

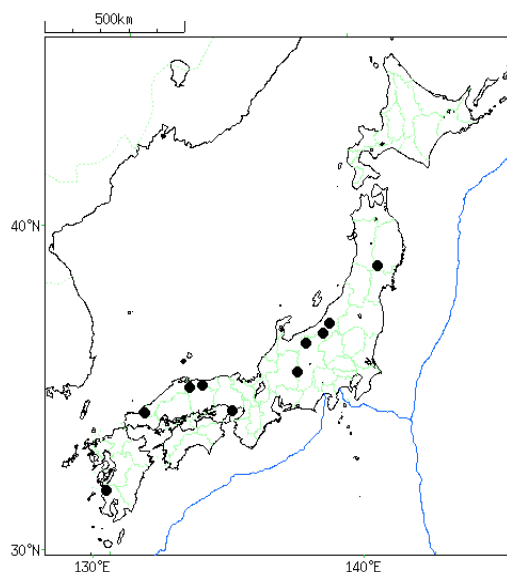


図 1 調査対象地震分布図（1983 年～2017 年、M6.5 以上、深さ 20km 以浅）。

## 2.2 地震の下限深度

地震の下限深度は、調査対象地震の主余震域内の地震から求める。地震の下限深度解析にあたり、本調査では、調査対象地震の主余震域での地殻の温度構造状態は、調査期間を通して大きな時間変化はないとし、温度構造と関係する地震の下限深度についても、地震発生時及び定常時を含め調査期間中は同様であると考え、調査を行った。

気象庁地震カタログにおいては、一元化処理業務開始以降、地震検知能力が高まり、微小地震を捉えた震源分布、地震の下限深度を詳細に把握できるようになった。そこで、主余震域内での微小地震活動を反映した詳細な地震の下限深度を得るために、一元化処理業務開始以降、特に深さ方向の精度がより向上し Hi-net 等他機関のデータとの併合処理が全国一様に安定運用していた 2006 年から 2015 年の 10 年間を、全ての調査対象地震においての地震の下限深度解析期間とした（解析には、M1.0 以上、深さ 30km 以浅の震源データを使用）。地震の下限深度解析にあたり、本調査では、調査期間中の下限深度は大きな変化はないと考えるため、本解析期間 10 年間の地震活動から得られた解は、本震発生が下限深度解析期間内外にかかわらず、調査対象地震における地震の下限深度とする。また、地震の下限深度解析で用いた震源の精度は、全調査対象地震において同程度と考えられるため、得られた地震の下限深度は、各事例と比較検討可能な解として扱う。

地震の下限深度解析期間（2006 年～2015 年）に主余震域内で発生した地震の深さ分布より、浅い方から 5%と 95%の深さを求め、それぞれの深さを上限・下限とする、地震数の 90%が含まれる層の下限の深さを地震の下限深度（d95）とした。d95 を求めるにあたり、得られた解が解析期間の地震活動を反映で

表 1 調査対象地震（本震）と最大余震、及び調査結果（D1, d95）。

No.	本震 発生日時	命名地震名称または震央地名	本震M	最大 震度	最大余震 発生日時	最大 余震M	d95解析 地震数	D1	d95 (km)	$\Delta_{dep}^{**}$ ( $\pm$ km)
1	1984/09/14 08:48	昭和59年(1984年)長野県西部地震	6.8	4	09/15 07:14	6.2	2052	0.6	11.26	0.52
2	1995/01/17 05:46	平成7年(1995年)兵庫県南部地震	7.3	7	01/17 07:38	5.4	1543	1.9	16.14	0.70
3	1997/03/26 17:31	鹿児島県薩摩地方	6.6	5強	04/03 04:33	5.7	435	0.9	10.68	0.50
4	1997/06/25 18:50	山口県中部	6.6	5強	06/26 01:34	4.3	102	2.3	18.29	0.38
5	2000/10/06 13:30	平成12年(2000年)鳥取県西部地震	7.3	6強	10/08 20:51	5.2	720	2.1	14.30	0.59
6	2004/10/23 17:56	平成16年(2004年)新潟県中越地震	6.8	7	10/23 18:34	6.5	2239	0.3	15.71	0.99
7	2008/06/14 08:43	平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震	7.2	6強	06/14 09:20	5.7	19011	1.5	10.91	0.80
8	2011/03/12 03:59	長野県北部	6.7	6強	03/12 04:31	5.9	2065	0.8	12.11	1.39
9	2014/11/22 22:08	長野県北部	6.7	6弱	11/22 22:37	4.5	1459	2.2	15.99	1.23
10	2016/10/21 14:07	鳥取県中部	6.6	6弱	10/21 14:53	5.0	67	1.6	13.29	0.43

※d95 解析に用いた震源の平均深さ誤差。

地殻内における大規模な地震後の最大余震 M と地震活動下限深度

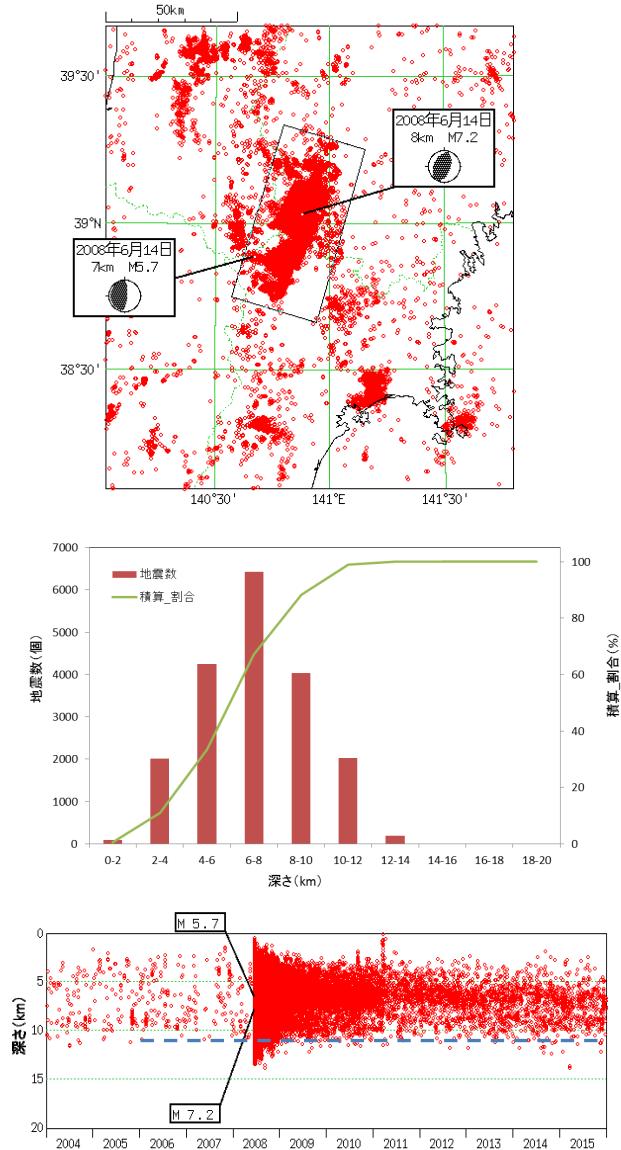
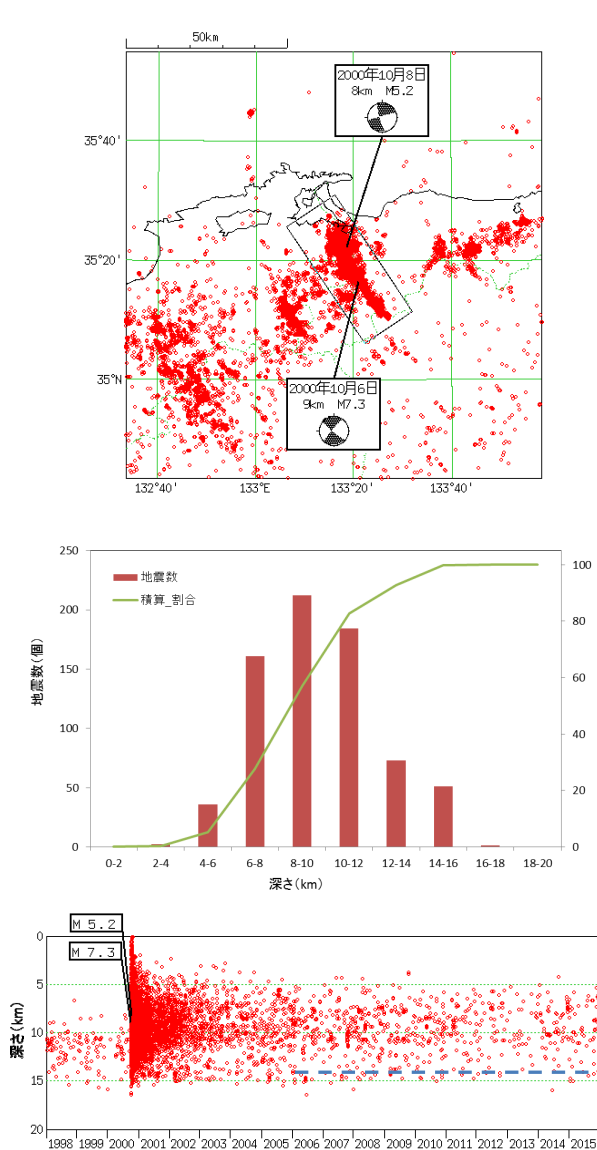


図 2a 解析事例(d95 解析期間前に本震発生事例, 平成 12 年(2000 年)鳥取県西部地震).  
 上図: 震央分布図(1998 年~2015 年, M1.0 以上, 深さ 20km 以浅, 気象庁震源(震源決定フラグ K)). 本震・最大余震については, M, 発震機構解(下半球等積投影)を示す. 矩形は主余震域を示す.  
 中図: 震央分布図の矩形内(主余震域)の地震の深さ分布図(d95 解析時(2006 年~2015 年), 震源決定使用観測点数 15 以上, 震源決定初期条件深さ未知数, M 種別フラグ D または V).  
 下図: 震央分布図の矩形内(主余震域)の地震の深さ時系列分布図. 青点線は d95(深さ)及び d95 解析期間を示す.

図 2b 解析事例(d95 解析期間中に本震発生事例, 平成 20 年(2008 年)岩手・宮城内陸地震).  
 上図: 震央分布図(2004 年~2015 年).  
 以下, 図 2a と同様.

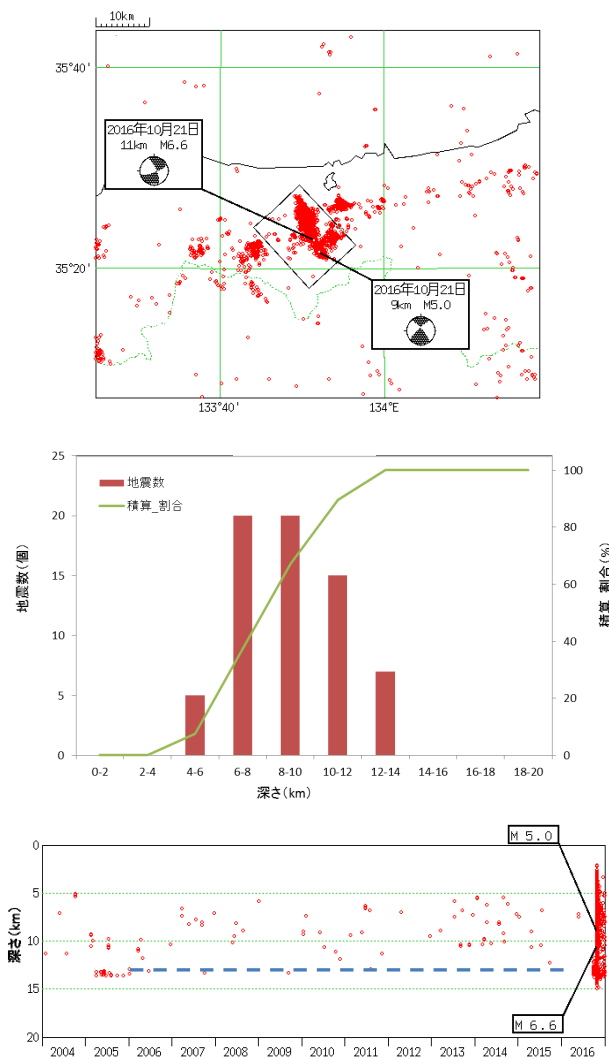


図 2c 解析事例(d95 解析期間後に本震発生事例, 2016 年の鳥取県中部の地震).  
 上図: 震央分布図 (2004 年~2016 年).  
 以下, 図 2a と同様.

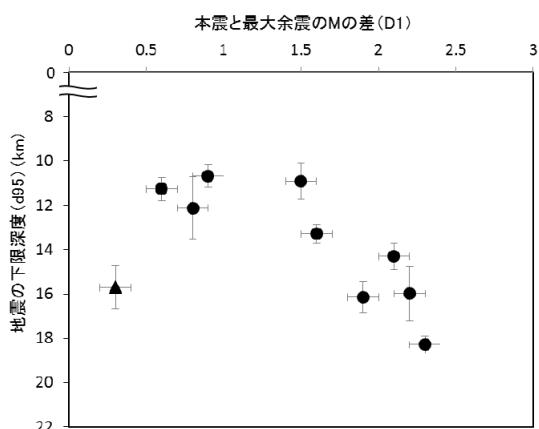


図 3 本震と最大余震の M の差 (D1) と地震の下限深度 (d95) の関係 (▲は平成 16 年 (2004 年) 新潟県中越地震). 誤差範囲は  $\Delta D1$  (横軸, 全事例  $\pm 0.1$ ) 及び  $\Delta dep$  (縦軸) を示す.

きているか, 最終的に, 深さの時系列分布において確認した. d95 解析期間前に発生した調査対象地震は 6 事例, 期間中は 3 事例, 期間後は 1 事例あり, 特に, 解析期間中に本震発生の事例では, d95 は本震直後の余震活動に強く依存するものと思われたが, 本震前後の活動と比較しても, 両者で違いはなかった. 図 2 に代表的な解析事例 (d95 解析期間前に本震発生, 期間中に本震発生, 期間後に本震発生の各事例) を示す.

### 3 結果

本調査結果として, 調査対象地震 10 事例の D1, d95 を表 1 に, その関係について図 3 に示す. D1 と d95 には, 正の相関関係の傾向がみられた.

D1 は, 平成 16 年 (2004 年) 新潟県中越地震 (以下, 2004 年新潟県中越地震) が最小で 0.3, 最大は 2.3 で 1997 年の山口県中部の地震であった.

d95 は, 1997 年の鹿児島県薩摩地方の地震の約 11km が最小で, 最大は 1997 年の山口県中部の地震の約 18km であった.

なお, 気象庁地震カタログに M の決定精度を表す値は掲載されておらず, D1 を求める本震及び最大余震の M 決定誤差 ( $\Delta M$ ) の正確な値はわからないが, M 決定計算方法 (気象庁地震火山部地震予知情報課データ処理係, 2004), 及び観測網や震源決定精度 (気象庁, 2018) を考慮すると,  $\Delta M$  はカタログ掲載の M 値 (最小桁が 1/10 の位) の丸め誤差程度と推測され, 全事例で  $\pm 0.1$  を見込めば十分と考える. このため M の差分である D1 の誤差 ( $\Delta D1$ ) も全事例において  $\pm 0.1$  程度と考えられる (図 3).

また, 各事例の d95 解析に用いた震源の平均深さ誤差 ( $\Delta dep$ ) は  $\pm 1.0$ km 程度であった (表 1, 図 3).

### 4 考察

本調査結果より, D1 と地震の下限深度には正の相関関係の傾向がみられた. 2004 年新潟県中越地震を除けば, 相関関係はより明瞭となる. 地震の下限深度については, 地殻の温度構造に対応の良い地殻熱流量と負の相関関係があるとされている (田中・伊藤, 2002). ゆえに, 地震の下限深度と D1 及び地殻熱流量との相対的な関係を考慮すると, 本調査結果は, D1 と地殻の温度構造との関係を示唆していると考えられる. 温度構造は地震発生の要因の一つとさ

れ、この関係はとても興味深い。

また、2004年新潟県中越地震を除くと、d95が約16km以深の場合、D1は2前後を示した。つまり、上部地殻の深部に地震の下限深度が得られる事例は、D1は比較的大きな値となる傾向があるようにみえる。加えて、D1が1以下となる事例のd95は、深さ約12km以浅であった。地震の下限深度が10km以浅となる事例の調査はできていないが、最大余震と本震のMが同程度に近いD1が1以下となるのは、地震の下限深度が上部地殻の浅部となる場合であることを表しているのかもしれない。

本調査では、D1は地殻の温度構造との関係が示唆された。温度構造に関係する地震の下限深度は、600K程度に相当し地殻を構成する岩石の脆性-塑性遷移域に概ねあたるとされる(Ito, 1990)。地殻の温度勾配により遷移域が決まり塑性変形のはじまる深さが変化するので、温度構造、つまり地震の下限深度(遷移域の深さ)の変化により地殻内に強度の不均質が生じると考えられる。本調査で示されたD1と地震の下限深度の関係について、一つの可能性として、上述の地殻の媒質(岩石)の強度と温度構造との関係が内在し地震の下限深度と地殻の強度が対応するならば、D1の差は地殻の強度の違いを反映していると推測される。しかし、地震の下限深度下の下部地殻(塑性領域)では、変形は一様ではなく断層の深部延長部で局所的に集中する(Iio and Kobayashi, 2002)など、地殻の強度については単純な構造ではないと考えられ、調査結果についてはより詳細な考察が必要である。

2004年新潟県中越地震は、他の事例とは異なる結果となった。一連の中越地震の活動は、複数の断層面によるもので、本震と最大余震が別の断層面で発生しているなど複雑な応力分布が推測される報告がなされている(気象研究所地震火山研究部・気象庁地震予知情報課, 2005)。中越地震の調査結果は、D1が温度構造のみに依存してはいないことを示していると思われる。

## 5 おわりに

本調査では、地殻内地震(本震-余震型)において、本震と最大余震のMの差(D1)と地殻内の地震発生下限の深さ(地震の下限深度)の間に、概ね正の相関関係がみられた。このことから、D1は地

震発生の要因の一つと考えられる地殻の温度構造との関係が示唆される。今後の課題として、事例数や調査対象の時空間的な制限、他の物理量との比較などが挙げられる。

大規模な地震発生(本震)後の地震防災においては、地震発生後の地震活動に対する防災上の呼びかけを行うための指針が示され、防災情報のあり方が見直される(地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2016)など、余震被害防止のための防災情報の重要度はより増している。本調査対象である最大余震のMが、本震と同程度の場合、余震被害の拡大が懸念されるなど、最大余震のM、つまりD1は本震後の余震被害防止の観点において、地震防災上重要な要素である。D1の定量的な見積りは難しいと思われるが、仮に、D1が地震の下限深度に強く依存するならば、その関係は、本震後の地震防災に有益な情報を与えるかもしれない。

## 謝辞

本調査は、国立研究開発法人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、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国土地理院、国立研究開発法人海洋研究開発機構、公益財団法人地震予知総合研究振興会、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、2016年熊本地震合同観測グループのオンライン臨時観測点(河原、熊野座)、米国大学間地震学研究連合(IRIS)の観測点(台北、玉峰、寧安橋、玉里、台東)及び気象庁のデータを用いた気象庁地震カタログを使用させて頂きました。図作成にあたり地震活動解析プログラム(横山, 1997)を使用させて頂きました。また、大阪府気象研究会、近畿地区気象研究会、及び匿名の査読者、地震火山部地震予知情報課データ処理係、菊田晴之地震情報官をはじめ大阪管区気象台の皆様には、本稿を改善する上で有益な助言を頂きました。記して深く感謝申し上げます。

## 文献

太田健治・藤原義寿・前田憲二(2002): 気象庁の地震検知能力の時間空間的变化, 験震時報, **65**, 111-122.  
鹿児島大学理学部(1997): 1997年3月26日と5月13日に鹿児島県北西部で発生した地震(M6.3, M6.2),

地震予知連絡会会報, **58**, 630-637.

気象研究所地震火山研究部・気象庁地震予知情報課  
(2005): 平成 16 年 (2004 年) 新潟県中越地震の余震  
分布に見られる二重の地震面, 地震予知連絡会会報,  
**73**, 341-345.

気象庁 (2018): 地震月報 (カタログ編) 震源データ,  
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/hypo.html>,  
(参照 2018 年 8 月 20 日).

気象庁地震火山部地震予知情報課データ処理係 (2004):  
気象庁マグニチュードの改訂に関する比較調査, 験震  
時報, **67**, 21-35.

地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2016): 「大地震  
後の地震活動の見通しに関する情報のあり方」報告書,  
[https://www.jishin.go.jp/main/yosoku\\_info/honpen.pdf](https://www.jishin.go.jp/main/yosoku_info/honpen.pdf) ,  
(参照 2018 年 8 月 20 日).

田中明子・伊藤久男 (2002): 長野県西部地域における地  
殻内地震の下限深度とその場の温度, 地震 2, **55**, 1-10.

古本宗充 (2005): 本震と最大余震のマグニチュード差  
と地殻熱流量, 地震 2, **58**, 221-224.

堀内茂木・高井香里・飯尾能久 (2005): 高サンプリング  
地震観測による長野県西部の地震活動, 断層破碎帯の  
構造, 月刊地球, 号外 **50**, 215-220.

横山博文 (1997): X ウィンドウシステムを用いた地震活  
動解析プログラム, 験震時報, **60**, 37-51.

Iio, Y. and Y. Kobayashi (2002): Is the plastic flow  
uniformly distributed below the seismogenic region?,  
Earth Planets Space, **54**, 1085-1090.

Ito, K. (1990): Regional variations of the cutoff depth of  
seismicity in the crust and their relation to heat flow and  
large inland-earthquakes, J. Phys. Earth, **38**, 223-250.

Ito, K. (1999): Seismogenic layer, reflective lower crust,  
surface heat flow and large inland earthquakes,  
Tectonophysics, **306**, 423-433.

(編集担当 菊田晴之)