

マグニチュード6クラスの内陸地震は全国どこでも起きているのか？ —活断層と内陸地震の位置の関係についての予備的解析

Do M6 class inland earthquakes occur everywhere in Japan ? — A preliminary analysis of a spatial relationship between active faults and inland earthquakes —

桑原保人¹・宮川歩夢²・大坪 誠¹・今西和俊¹

Yasuto Kuwahara¹, Ayumu Miyakawa², Makoto Otsubo¹ and Kazutoshi Imanishi¹

¹ 活断層・火山研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, y-kuwahara@aist.go.jp)

² 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute of Geology and Geoinformation)

Abstract: Spatial relationship between active faults and large inland earthquakes has been statistically tested to evaluate whether earthquakes with magnitudes (M) less than 7 occur everywhere in Japan or not. Surface trace data of active faults and epicenters of earthquakes with M larger than 5 are from “Active Faults in Japan (The Research Group for Active Faults in Japan; 1991)” and data of Unified Japan Meteorological Agency Earthquake Catalog, respectively. We compared a cumulative frequency curve of distances from active faults to declustered actual epicenters data and those curves created from random simulated data of epicenters. This comparison was also discussed in terms of a binominal distribution model. The present tests indicated that all the earthquakes of M larger than 5.0 tend to concentrate to vicinities of active faults. Further, the larger the magnitude is, the closer the epicenter is to an active fault: all the earthquake of M>6.8 occurred within about 10 km from active faults.

キーワード: 活断層, 内陸大地震, デクラスタリング, 位置関係, 統計的検定

Keywords: active fault, large inland earthquake, declustering, spatial relationship, statistical test

1. はじめに

日本列島の内陸では地震のマグニチュード (M) が6程度から被害が出始め, またM6程度の地震は日本列島のどこでも起きうると言われている. このことから, 内閣府中央防災会議では防災上の観点で安全側に立ち, 地震対策の指針として, M6.9以下の規模の地震は全国どこでも起こりうるとしている (中央防災会議, 2005). 全国の自治体でもおよそそれに沿った地震被害予測が行われている (例えば, 長野県, 2015). このM6程度の地震は全国どこでも起こりうるという考え方は, 大きな地震の時に現れる地表地震断層が, M7程度以下の地震では必ずしも出現しない場合があることから, 活断層以外の場所でも地震は起こる可能性があるという考えを基にしている (中央防災会議, 2005). 実際, 遠田 (2013) は1923年以後の日本の内陸地震で, 地表地震断層の出現率はM6.0~6.5で7% (5/73: 出現数/総数), M6.5~M7.0で20% (5/25), M7.0以上で44% (4/9) としている. このことから上記の, M6.9以下の規模の地震は全国どこでも起こりうるという想定は, 防災上の安全側に立つという立場からは間違えているとは言えないであろう.

それでは, 実際にM7よりも小さい地震は全国どこでも発生しているのだろうか. Matsuda (1981) は, 気象庁カタログおよびUtsu (1979) のデータを用い, 1885年から1979年までに報告されている24個のM6.5以上の内陸被害地震の震央と, 「日本の活断層」 (活断層研究会, 1980) による活断層の位置の関係を検討し, 被害地震のうちの80%が既知の活断層から5km以内で発生していることを報告している. しかし, この報告の後にも多くの内陸被害地震が発生し, またM6やM5程度の地震と活断層の位置の関係を議論した研究も見受けられないようである. これらの間に関係性が認められるのか, またあるとすればどのように関係しているのかを示すことができれば, 今後の防災施策にある程度の指針を与えられる可能性がある.

以上の観点から, ここではM5以上の内陸地震について, あるマグニチュードの範囲ごとに地震の震央と活断層の位置との関係を調べた. 地下での想定震源断層は傾斜している場合もあることから, 震源断層と震源位置の関係も興味深い, 現状では想定震源断層には曖昧性が残る. また防災上の観点からは, 既知の活断層情報が地震を想定する上でどの程

度有効かを示すには、活断層の地表トレースと地震の震央を比較することが最も有効であると考えた。

2. データ

地震の震央位置については、気象庁震源カタログから M 5.0 以上で深さ 20 km 以浅、期間は 1923 年 1 月 11 日から 2016 年 4 月 27 日までの内陸地震を抜き出した。2016 年 4 月の熊本地震（最大 M : 7.3）も含まれており、これら大きな地震の余震も含まれている。地震カタログからの内陸地震の選択は、ここでは標高 0 m 以上の地域で発生した地震を機械的に抜き出した。この際、地形データは、ETOPO1 (Amante & Eakins, 2009) を用いた。また、内陸地震を選択するためのこの方法では、1995 年兵庫県南部地震 (M 7.3) の震央は明石海峡の海域にあり除外されることになるが、この地震は内陸の重要な地震であると考え、この地震のみ上記手法によるリスト作成後に手動で追加した。このようにして選んだ地震数は全部で 551 個あり、このうち M 7 以上が 11 個、 $6.8 \leq M < 7.0$ が 6 個、 $6.3 \leq M < 6.8$ が 32 個、 $5.8 \leq M < 6.3$ が 65 個、 $5.0 \leq M < 5.8$ は 437 個であった。ここで取った M の範囲については後述する。

さらに、地震の震央データについては大地震が活断層近傍で起こりその余震も活断層近傍で起こることが多いことから、解析結果への余震活動の影響を見ておく必要があると考えられる。そのため、上記のデータから余震を除外するため Reasenber (1985) によるプログラムコード“CLUSTER2000”を用いてデクラスタリング処理をおこなった。デクラスタリングのパラメータは、日本国内の地震活動に適用した Wiemer *et al.* (2005) などの先行研究に倣い、Reasenber (1985) がカリフォルニア地域に対して用いたものと同じものを与えた。その結果、49 個のクラスタが認定され、元々選ばれた 550 の地震数が、クラスタ内の最大地震と、いずれのクラスタにも属さない個別の地震の合計で 385 個に減少した。385 個の内訳は、M 7 以上が 11 個、 $6.8 \leq M < 7.0$ が 6 個、 $6.3 \leq M < 6.8$ が 26 個、 $5.8 \leq M < 6.3$ が 36 個、 $5.0 \leq M < 5.8$ は 305 個となった。 $5.8 \leq M < 6.3$ で約 45%、 $5.0 \leq M < 5.8$ で約 30% がより大きな地震のクラスタとして認定されたことになる。2016 年熊本地震 (M 7.3)、2011 年福島県浜通りの地震 (M 7.0)、2008 年岩手・宮城内陸地震 (M 7.2) などの内陸地震の余震は除外されていることを確認した。なお、2016 年熊本地震の前震 (M 6.5) は 2016 年熊本地震 (M 7.3) と同じクラスタに認定されたが、前震としては M も被害も大きく、また関係する断層帯も異なる可能性もあることから今回は特殊な場合と考え、個別の地震として残すことにした。このような特殊な例は 1 例だけであり、解析結果への影響はほとんど無い。

活断層の地表トレースの位置については、「新編日本の活断層」(活断層研究会, 1991) を有限会社ジオデータサプライが数値化したデータ「20 万分の 1 活断層データ FAULTL」の確実度 III までの全データを用いた。第 1 図がこのようにして選んだ全地震の震央 (a 図)、デクラスタ後の震央 (b 図) と活断層の地表トレース (c 図) である。活断層の存在や位置の認定については「新編日本の活断層」のデータの他にも、例えば「活断層詳細デジタルマップ」(今泉ほか, 2018) など、その確実度や認定結果が各種あり、今後それぞれの認定によりどの程度結果が変わるのか詳細にみていく必要があるだろう。しかし、ここではまずは予備的解析として、社会でも広く認知されていると考えられる「新編日本の活断層」のデータでテストし、その結果を示すことにする。

3. 解析と結果

上記のデータについてマグニチュード (M) の範囲ごとに活断層からの距離の累積頻度分布を作成したものが第 2 図であり、(a) 図がデクラスタ前、(b) 図がデクラスタ後の結果である。ここで距離は、活断層と地震の震央との最短距離を計算したものである。M の範囲の取り方について、M 6.8 を境界の 1 つとしたのは、武村 (1998) の報告にある $M \geq 6.8$ から地表地震断層の出現率が急増することを考慮したものである。M 6.8 以外の境界については便宜的なものである。まず (a) 図に注目すると、M 6.8 より小さい地震はすべて似たような分布であることがわかる。M が 6.8 を超えると活断層近傍に集中していく傾向があり、M 6.8 以上の地震の 80% は活断層近傍約 5 km 以内に集中し、さらに 100% すべてが約 10 km 以内で起こっている。また M 5 クラスでもその 80% 以上の地震が活断層から約 10 km 以内に集中していることも興味深い。上記の傾向はデクラスタリング処理をした (b) 図でも変わらないようである。すなわちすべての M の範囲でその 80% 以上の地震が活断層から 10 km 以内で起こり、M が 6.8 を超えると活断層近傍に集中していく傾向が見て取れる。以上から、今後は、本研究の目的に、より適合していると思われる余震の影響を除外したデクラスタリング後のデータを用いて詳細に検討していくことにするが、デクラスタリング前のデータの場合でも結果に大きな影響はないことは確認している。

図 2 で示したような M の範囲ごとの分布の特徴は、日本列島のように活断層が面的に密に分布する中で、仮に震央が一様ランダムに分布したものと比較するとどのようなことが言えるのだろうか。このことをモンテカルロ法によって次のように試してみた。M の範囲ごとに実際に起こった地震と同数の擬似震央データセットを日本列島の内陸に一様ランダムに配置し、それぞれデータセットを 100 回生成し実デー

タの分布と比較してみる。第3図(a)は、ある乱数で作った疑似震央分布の例である。第3図(b)は、比較のため実際の地震のデクラスタリング後の震央分布の図1(b)を再掲したもので、(a)と比較するとかなり特定の場所に集中しているように見える。第3図(a)のようにして作成した100セットの疑似震央分布から、実データの時と同様の方法でそれぞれのMの範囲ごとに震央と活断層の距離の累積頻度分布図を作り、実際のデータと比較したものが第4図(a)~(e)である。第4図(a)の $5.0 \leq M < 5.8$ の場合は、実データの分布は100通りの疑似データの分布範囲から明らかに外れているように見える。すなわちM5クラスでも活断層近傍に集中して発生していると言えることがわかる。(b)~(e)の図を見ると、地震数が減少するに従って、累積頻度分布の幅は広がっていく。しかし(b)~(e)のどの場合もランダムな時の累積分布の中でおよそ10%程度以下の確率でしか起きないような範囲で活断層に集中していると言える。

4. 二項分布の問題としての解釈

上記のような確率分布の問題の理解には、二項分布を用いることができる。活断層の地表トレースから、ある距離 x kmまでに入る面積を $A(x)$ 、日本全体の面積を A_0 とすると、日本全体にランダムに点を配置した時にある点が $A(x)$ に入る確率 p は $p(x) = A(x)/A_0$ となり、これを成功確率と呼ぶことにする。この時、あるMの範囲の地震が n 個あった時に、成功確率 p のもとで実際に起こる成功回数 k の確率分布 P は、次の二項分布で表される。

$$P(n, k, x) = {}_n C_k p(x)^k (1-p(x))^{n-k} \quad (k=0, 1, 2, \dots, n)$$

ここで、 ${}_n C_k$ は組み合わせである。成功確率 p は、ランダムな分布で多数試行した時の $5.0 \leq M < 5.8$ の場合から分かり、例えば断層からの距離が10 kmの時、 $p(10)$ は約0.7である。このような立場で改めて図4を見ると、 $M \geq 6.8$ の時には、 $M \geq 7$ も含め、 $n=17$ である。 $M \geq 6.8$ ではすべてが活断層からおおよそ10 km以内で起こっていることから、 x が10 kmの時に $p(10)=0.7$ 、 $k=17$ であり、それが実現する確率は約0.2%と計算できる。同様に、 $6.3 \leq M < 6.8$ の場合は、 $n=26$ 、 $p(10)=0.7$ 、 k が22であり、その実現確率は7%、 $5.0 \leq M < 5.8$ の場合は、 $n=305$ で、 $p(10)=0.7$ 、 k が260以上であり、その実現確率はほぼ0%となる。以上の考察でも、今回解析したM5以上の地震はすべてのマグニチュードの範囲で断層近傍に集中していると言えるであろう。

5. まとめと今後に向けて

以上、M5よりも大きい地震と「新編日本の活断層」

に示される確実度IIIも含めた活断層の位置の関係を検討し、全ての地震が活断層近傍に集中して起こっており、Mが5~6.8の範囲の地震ではその80%程度が活断層から10 kmで起こり、Mが6.8以上ではすべて地震が活断層から10 km以内で起こっていることがわかった。遠田(2013)が指摘しているように、M7程度の大地震でもその半数以上は地表地震断層が出現しないが、地表地震断層が現れないような地震でも活断層近傍でしか起こっていないと言える。先に述べたように、活断層の認定については認定の確実度の違いや、最新の知見により活断層かどうかの判断も変わる場合がある。今後、異なる活断層の認定結果との比較も行っていくことでより理解が深まると思われるが、今回の結果によって、「新編日本の活断層」に示されるデータで上記のことが結論づけられたことは、防災上も意義深いと考える。また、さらにMが5よりも小さい地震の分布についても調べてみることも意義があると思われる。

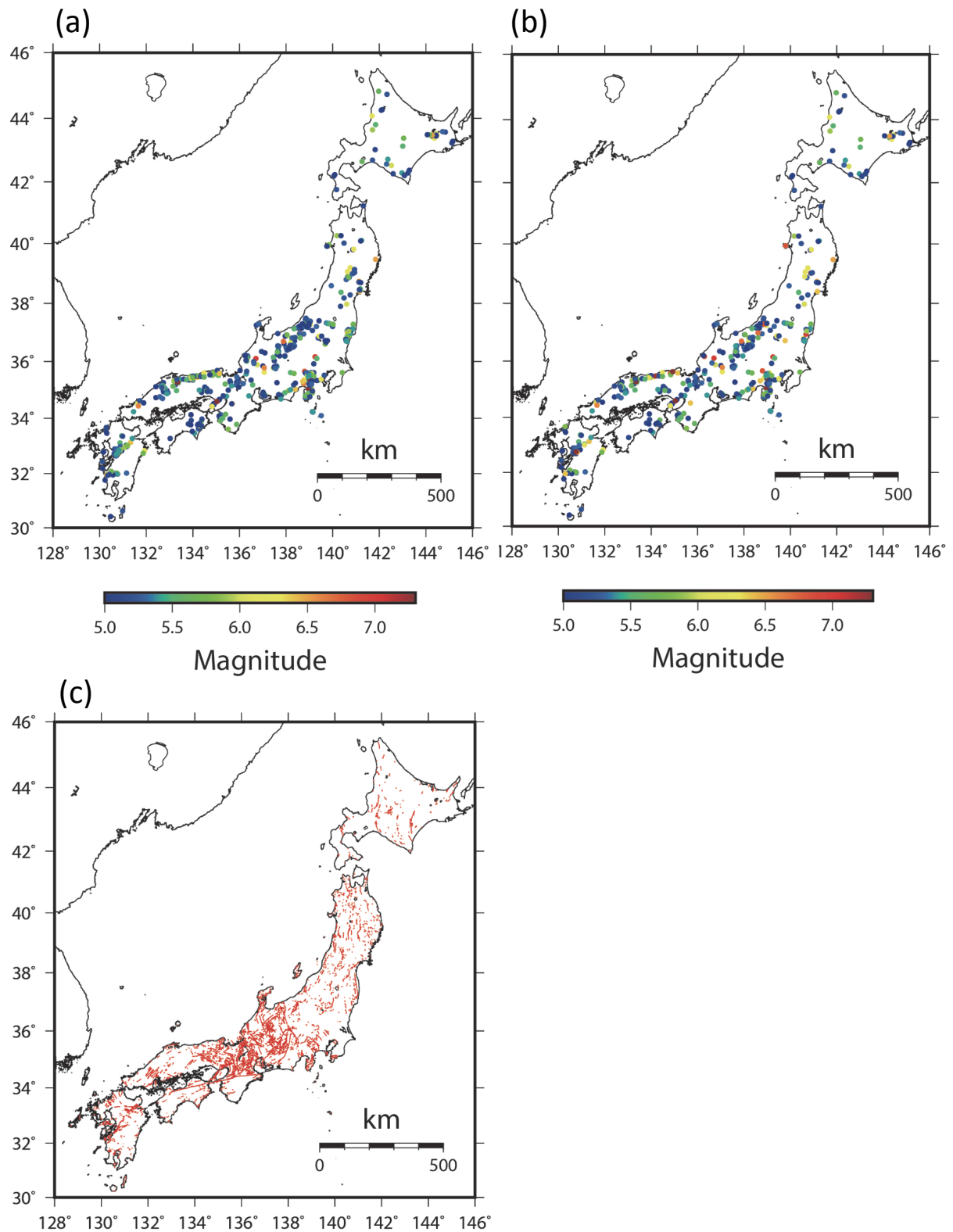
謝辞 気象庁一元化カタログを使用しました。Reasenberg (1985) によるプログラムコード“CLUSTER2000”は、米国地質調査所のサイト (<https://earthquake.usgs.gov/research/software/#CLUSTER> (2018年9月2日閲覧)) のものを使用しました。図の一部はGeneric Mapping Tools (Wessel and Smith, 1998) で作成しました。また、査読者の内出崇彦氏と編集担当の松本則夫氏のコメントにより本稿は大幅に改善されました。

文 献

- Amante, C. and B. W. Eakins (2009) ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19pp. <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html> (2018年7月24日閲覧)
- 中央防災会議 (2005) 首都直下地震対策専門調査会報告 平成17年7月、「首都直下地震対策専門調査会」, <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutochokkajishinsenmon/pdf/houkoku.pdf> (2018年7月24日閲覧)
- 今泉俊文, 宮内崇裕, 堤 浩之, 中田 高 (2018) 活断層詳細デジタルマップ 新編, 東京大学出版会, 154p.
- 活断層研究会 (1980) 日本の活断層一分布図と資料一, 東京大学出版会, 363p.
- 活断層研究会 (1991) 新編日本の活断層 分布図と資料, 東京大学出版会, 437p.
- Matsuda, T. (1981), Active faults and damaging earthquakes in Japan -Macroseismic zoning and precaution fault zones, In Earthquake Prediction: An International Review, Maurice Ewing Series 4, American Geophysical Union, 279-289.

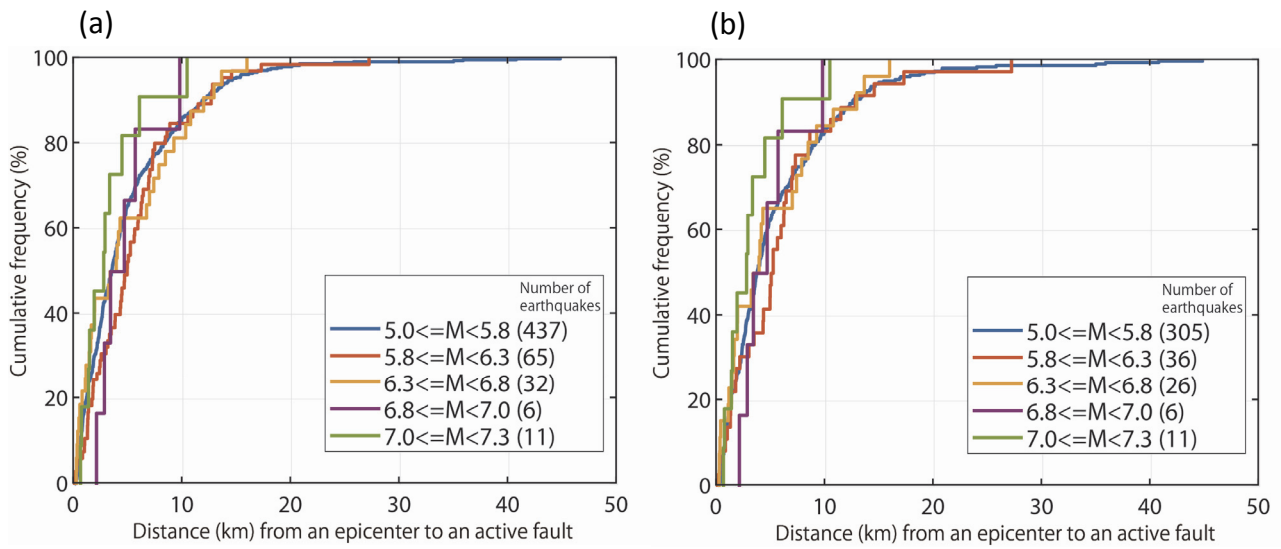
- 長野県 (2015) 第3次長野県地震被害想定報告書, 平成27年3月, 長野県, <https://www.pref.nagano.lg.jp/bosai/documents/houkokusyo04031.pdf> (2018年7月24日閲覧)
- Reasenber, P. (1985) Second-Order Moment of Central California Seismicity, 1969-1982, *J. Geophys. Res.*, 90, 5479-5495.
- 武村雅之 (1998) 日本列島における地殻内地震のスケーリング則—地震断層の影響および地震被害の関係—. *地震第2輯*, 51, 211-228.
- 遠田晋次 (2013) 内陸地震の長期評価に関する課題と新たな視点, *地質学雑誌*, 119, 105-123.
- Utsu, T. (1979) Seismicity of Japan from 1885 through 1925—A new catalog of earthquake of $M > 6$ felt in Japan and smaller earthquakes which caused damage in Japan, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 54, 253-308.
- Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1998) New, improved version of the Generic Mapping Tools released. *EOS Trans. AGU*, 79, 579.
- Wiemer, S., Yoshida, A., Hosono, K., Noguchi, S. and Takayama, H. (2005) Correlating seismicity parameters and subsidence in the Tokai Region, Central Japan, *J. Geophys. Res.*, 110(B10), doi:10.1029/2003JB002732.

(受付: 2018年8月1日, 受理: 2018年9月25日)

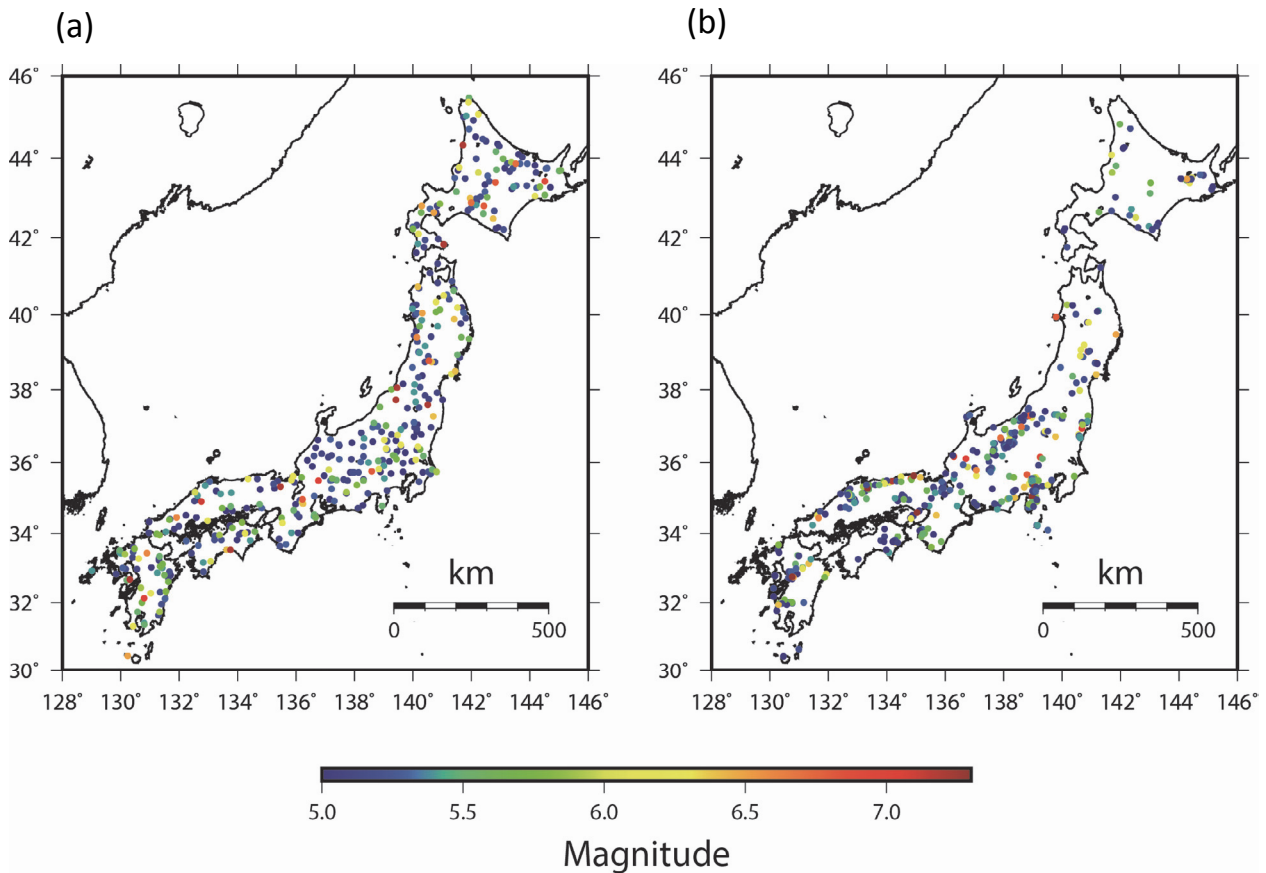


第1図. (a) マグニチュード5以上の内陸地震の震央分布 (気象庁震源カタログより). 期間は1923年1月から2016年4月27日. 総数は551個. (b) デクラスタリング処理後の震央分布. 総数は384個に減少. (c) 「新編日本の活断層」(活断層研究会, 1991)による活断層の分布.

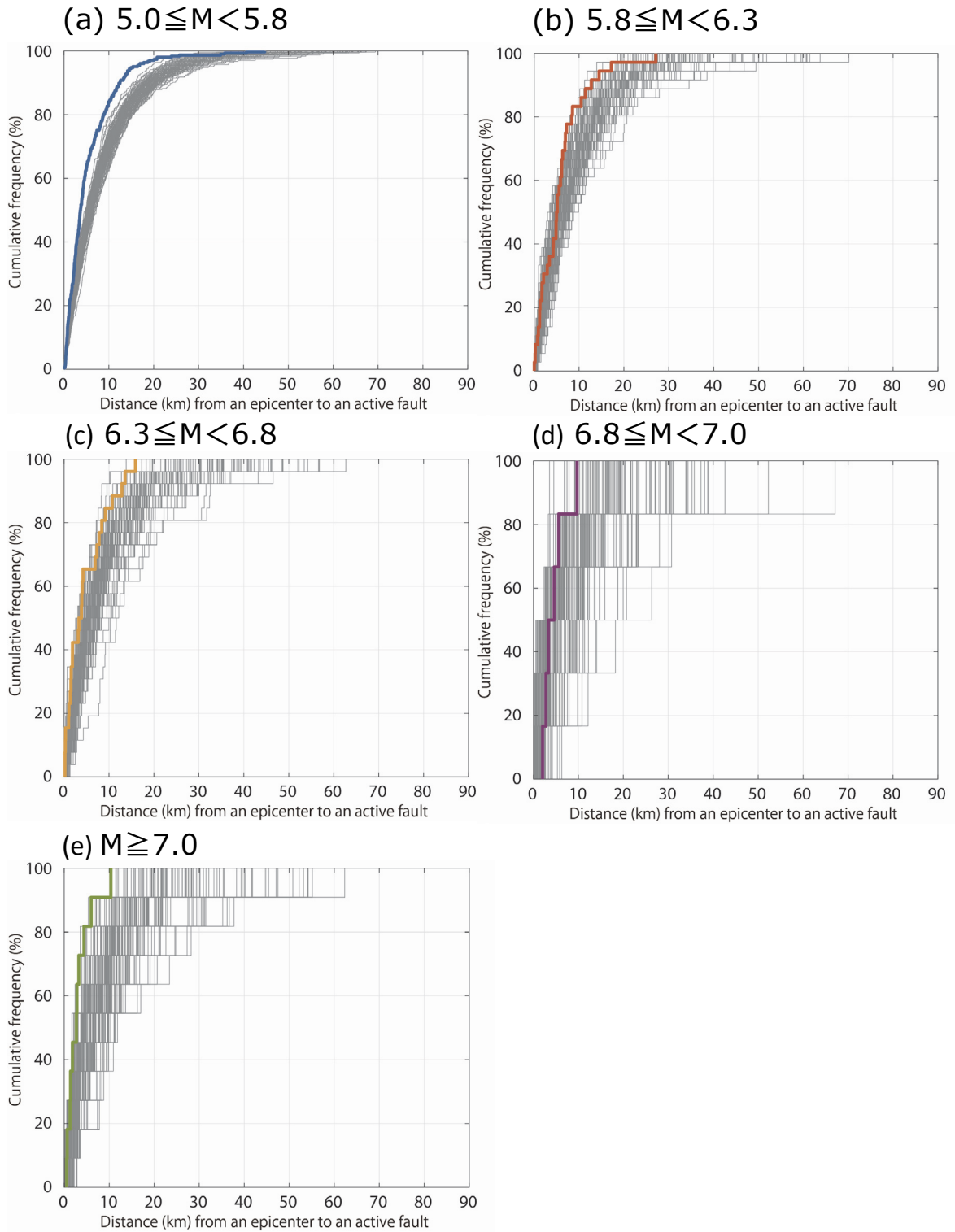
Fig. 1. (a) Map of earthquake epicenters of $M \geq 5$ during the period of January 3, 1923 to April 27, 2017 from the Earthquake Catalog of Japan Meteorological Agency. Total number of events is 551. (b) Epicentral map for declustered data. Total number of events decreased to 384. (c) Active fault map from “Active Fault in Japan” (The Research Group for Active Fault in Japan:1991).



第2図. 各マグニチュード範囲の地震の震央と活断層の距離の累積頻度分布. 凡例のカッコ内の数字はそれぞれの地震数.
 (a) 図はデクラスタリング前, (b) 図はデクラスタリング後の分布.
 Fig. 2. Cumulative frequency of distances from epicenters of earthquakes within a certain magnitude range to active faults. The number of earthquakes in each magnitude range is shown in parentheses. (a) Result for non-declustering data. (b) for declustering data.



第3図. (a) ランダムに発生させた疑似震央分布. (b) デクラスタリング後の実際の地震の分布. 第1図 (b) の再掲である.
 Fig. 3. (a) Example of random simulated data of epicenters. (b) Declustered actual data of epicenters. Data are the same as Fig. 1.



第4図. 各マグニチュード範囲で、ランダムに発生させた疑似震央と活断層の距離の累積頻度分布と、デクラスタリング後の実際の震央データによる累積頻度分布との比較. 各マグニチュード範囲で実データと同数のランダム疑似震央のデータセットを100回発生させた. 薄い灰色が100回の疑似震央データによる結果. (a) $5.0 \leq M < 5.8$. 実データは青色. (b) $5.8 \leq M < 6.3$. 実データは赤色. (c) $6.3 \leq M < 6.8$. 実データは黄色. (d) $6.8 \leq M < 7.0$. 実データは紫色. (e) $7.0 \leq M$ 実データは緑色.

Fig. 4. Comparison of cumulative frequency of distances from epicenters to active faults between random simulated and declustered actual data. The number of random data set in light gray is 100. (a) $5.0 \leq M < 5.8$. Actual dataset is in blue. (b) $5.8 \leq M < 6.3$. Actual dataset is in red. (c) $6.3 \leq M < 6.8$. Actual dataset is in yellow. (d) $6.8 \leq M < 7.0$. Actual dataset is in purple. (e) $M \geq 7.0$. Actual dataset is in green.