

— 原著論文 —

DONETで測定できる最大加速度に関する検討

大堀 道広^{1*}, 中村 武史¹, 有吉 慶介¹, 神谷 眞一郎¹, 松本 浩幸¹,
荒木 英一郎¹, 佐久間 淳¹, 川口 勝義¹, 坪井 誠司^{2,3}, 金田 義行¹

本報告では、東南海地震の震源近傍に設置されるDONETのシステム構築の一環として最大加速度の距離減衰式に基づく検討手法を用いて、強震計の振幅レンジ±4g (3920cm/s²) についての評価を行っている。まず、2001年以降に海域で発生したM7程度以上の主な被害地震14地震（前震・余震も含む）に、震源近傍で4g（3成分合成値）を記録した2008年岩手・宮城内陸地震（M_w6.9）を加えた計15地震の最大加速度に関して、既往の距離減衰式を用いて分析し、距離減衰の補正を行うことで震源近傍での最大加速度のレベルの分布特性を評価した。続いて、上記の検討で3gを超える結果が得られた5地震を選び、それぞれの地震における観測値／計算値の分布特性を求めた上で、1944年東南海地震（M_w8.1）によるDONETの観測点で予測される最大加速度の分布特性を算出し、強震計の振幅レンジとして4gを含む閾値（1g, 2g, 3g, 4g）に対する数種類の超過確率を評価した。検討の結果、4gに対する超過確率は他の閾値に対する結果よりも格段に小さいことを確認した。震源近傍において地震発生時に強震動を振り切れることなく記録することは非常に難しいものの、振幅レンジを4gとすることで、その可能性を高めることができた結論付けられる。

キーワード：DONET, 強震観測, 振幅レンジ, 最大加速度

2010年1月21日受領；2010年6月3日受理

- 1 独立行政法人海洋研究開発機構・地震津波・防災研究プロジェクト
- 2 独立行政法人海洋研究開発機構・地球情報研究センター
- 3 独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域

*代表執筆者：

大堀 道広

独立行政法人海洋研究開発機構・地震津波・防災研究プロジェクト

〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25

045-778-5447

ohorim@jamstec.go.jp

著作権：独立行政法人海洋研究開発機構

— Original Paper —

A trial estimation of maximum acceleration expected for DONET

Michihiro Ohori^{1*}, Takeshi Nakamura¹, Keisuke Ariyoshi¹, Shin'ichiro Kamiya¹, Hiroyuki Matsumoto¹,
Eiichiro Araki¹, Atsushi Sakuma¹, Katsuyoshi Kawaguchi¹, Seiji Tsuboi^{2,3}, and Yoshiyuki Kaneda¹

Using the empirical attenuation relationship between the maximum acceleration and source distance, we evaluated the amplitude level of the strong ground motion which might be possible at stations of the DONET (Dense Ocean-floor Network System for Earthquakes and Tsunamis), deployed in the source area of the Tonankai earthquake. We firstly studied on how often the maximum acceleration data exceeds the criteria, such as 1g, 2g, 3g, and 4g, using the maximum acceleration data from recent fourteen off-shore earthquakes of magnitude around 7 or more and 2008 Iwate-Miyagi Inland earthquake (M_w 6.9). We modified the maximum accelerations by compensating the attenuation effect, so as to derive the distributions of the corrected acceleration values which might be observed at an epicentral area. Next, we evaluated the exceeding probabilities of such criteria at the DONET stations against the 1944 Tonankai earthquake (M_w 8.1). After selecting five reference events who involved the maximum acceleration data larger than 3g after such correction, we obtained the distribution of the ratio between the data and the prediction and evaluated the exceeding probabilities for above criteria. Through the study, it is clarified that the upper limit of the maximum measurable acceleration of the DONET should be 4g, to avoid saturation by the extremely strong ground shaking from nearby source rupturing as much as possible.

Keywords: DONET, strong motion observation, amplitude range, maximum acceleration

Received 21 January 2010 ; Accepted 3 June 2010

- 1 Earthquake and Tsunami Research Project for Disaster Prevention, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
- 2 Data Research Center for Marine-Earth Sciences, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
- 3 Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

*Corresponding author:

Michihiro Ohori

Earthquake and Tsunami Research Project for Disaster Prevention, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama 236-0001, Japan

Tel. +81-45-778-5447

ohorim@jamstec.go.jp

Copyright by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

1. はじめに

強震観測網が充実し、陸域の地震については震源から数百kmまで切れ目なく強震記録が蓄積されつつある時代を迎えているが、M8クラスの巨大地震となるとその発生頻度は低いため、震源域直上での観測データはいまだに不足しているのが現状である。また、地震動の最大加速度は地震の規模ばかりでなく震源断層と観測点との位置関係や観測点の地盤条件などに大きく依存するため、東南海地震の震源域に20点にも及ぶ稠密な地震・津波観測網を整備するDONET [Dense Ocean-floor Network System for Earthquakes and Tsunamis, 詳細は金田ほか(2007), 川口ほか(2007)]で対象とするM8クラスの巨大地震による震源近傍での最大加速度レベルを検討する上で、十分な裏付けとなるデータが見当たらないのが実情である。

国内では、1995年兵庫県南部地震の発生以降、全国的な強震観測網 [防災科学技術研究所K-NET (<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>), 同じくKiK-net (<http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>), 気象庁95型震度計など] が整備されている。このため、最近の内陸の浅い地震による強震動が震源近傍で観測される機会も増え、2g [gは重力加速度 (約980 cm/s²)] を上回る非常に大きな最大加速度もたびたび記録されている。例えば、2004年新潟県中越地震についてはJMA川口町観測点において2515 cm/s² (3成分合成値)、2008年岩手・宮城内陸地震ではKiK-netのIWTH25観測点で4022 cm/s² [3成分合成値, 4.10 g, (主成分はUD成分の3866 cm/s²)], AKTH04観測点で2449 cm/s² (NS成分, 2.50g) など記録されている。この中で最近注目を集めたIWTH25観測点における大加速度上下成分の生成要因については、トランポリン効果として説明されている (Aoi et al., 2008)。以上の2gを上回る事例はいずれも陸域で観測されたものであるが、海底の震源域でも2003年十勝沖地震の際に800 cm/s²を超える最大加速度が観測されている [JAMSTEC釧路・十勝沖海底ケーブルのKTOBS3における842 cm/s² (水平1成分, 0.86g)]。強震観測記録の蓄積は、震源過程の推定に向けた利用にとどまらず、耐震設計をはじめとする地震防災に大いに役立てられることから、地震発生時における強震動をできるだけ振り切れることなく記録できるように計画することが必要であり、震源近傍の海底に地震計を多数設置するDONETにおいては特に重要な課題となる。しかし、設定できる強震計の振幅レンジには限界があり、DONETではこれを4gに設定している。

前述のように、現在では強震観測網の整備により主に陸域における観測記録の蓄積が進み、さらに観測値の回帰分析により得られた最大加速度の距離減衰式 (例えば、

司・翠川, 1999) が提案されており、多くの地震について、計算値と観測値との良好な対応が確認されている (例えば, Honda et al., 2004)。距離減衰式による最大加速度の計算値は、マグニチュード、震源の深さを与えた時に、指定する震源距離に位置する観測点における最大加速度の平均的なレベルを与え、実際の観測値と計算値との差異 (偏差) は、各観測点の揺れやすさ・揺れにくさを表わすサイト特性とされている [例えば, 神野・三浦 (2005), 片岡・山本 (2007) など]。距離減衰式を用いた最大加速度の検討手法によれば、観測値に距離減衰の効果も補正し、各観測点を震源近傍 (震央位置) まで引き戻し、震源近傍での最大加速度の分布性状を評価することができる。

本報告では、最大加速度の距離減衰式に基づく検討手法を用いて、東南海地震の震源近傍に設置されるDONETの強震観測における最大加速度を算定し、設定した振幅レンジ4gについて、これを含む4段階の閾値 (1g, 2g, 3g, 4g) との比較検討という形で評価を行っている。まず、最大加速度の距離減衰式を用いて、最近海域で発生したM7程度以上の14地震 (前震, 余震を含む) と、震源近傍において4g (3成分合成値) を超える最大加速度を記録した2008年岩手・宮城内陸地震を加えた計15地震を対象として、観測された最大加速度に距離減衰の補正を行い、得られた結果を分析し、震源近傍での最大加速度の振幅レベルについて検討を行った。続いて、上記の検討で3gを超える結果が得られた5地震を参照地震として選択し、距離減衰式による計算値に対する観測値の比 (サイト特性) の分布特性を対数正規分布でモデル化した。この分布特性を用いて、1944年東南海沖地震 (M_w 8.1) によるDONETの観測点で予測される最大加速度の分布特性を算出し、各閾値に対する超過確率の評価を行った。

2. 対象とする地震と観測点

2001年以降に海域で発生した主な被害地震として、2001年3月芸予地震 (M_w 6.8), 2003年9月十勝沖地震の本震 (M_w 7.9) と余震 (M_w 7.3), 2004年9月に紀伊半島沖で発生したM7クラスの地震 (本震, M_w 7.5) とその前震 (M_w 7.2), 二つの余震 (M_w 6.5, M_w 6.1), 2005年3月福岡県西方沖の地震 (M_w 6.6), 2005年8月宮城県沖の地震 (M_w 7.1), 2006年12月に台湾の南方沖で発生した二つの地震 (M_w 7.0, M_w 6.9), 2007年3月能登半島地震 (M_w 6.7), 2007年7月新潟県中越沖地震 (M_w 6.6), 2009年8月駿河湾の地震 (M_w 6.2), 以上14地震を対象地震として選んだ。さらに、4gを超える最大加速度が得られていることと、海域の地震との比較という観点

から、2008年岩手・宮城内陸地震 (M_w 6.9) を検討対象とした。以上、計15地震の諸元をTable 1に示す。なお、整理の都合上、15地震には発生順にEvent 1~15と名付け、図・表の記載に用いている。15地震の中から、6地震 (Event 2, 5, 7, 8, 12, 14) を例として、震央と観測点との位置関係をFig. 1に示す。

解析に用いる主要な最大加速度のデータとして、国内で発生した13地震についてはK-NET (<http://www.bosai.go.jp/>) による公表値、台湾の2地震については台湾中央気象局 (<http://www.cwb.gov.tw/>) の公表値をそれぞれ用いる。ただし、2008年岩手・宮城内陸地震については、震源近傍のKiK-net観測点において非常に大きな最大加速度が得られていることから、K-NETに加え、KiK-netに関する公表値も用いる。さらに、JAMSTEC海底ケーブルセンターのデータベース (http://www.jamstec.go.jp/scdc/top_j.html) より、2003年十勝沖地震の本震 (M_w 7.9) において釧路・十勝沖システムで観測された最大加速度と、2004年紀伊半島沖の3地震 (本震, M_w 7.5; 前震, M_w 7.2; 最大余震, M_w 6.5) において室戸岬沖システムで観測された最大加速度をそれぞれ利用する。なお、いずれの地震についても、後述する距離減衰式 [司・翠川 (1999)] の利用条件を考え、最大加速度は水平2成分のうちの最大値を採用する。水平2成分を合成した最大値は、水平2成分の最大値よりも1.2倍程度 (最大1.4倍) 大きくなる場合もあるが、両者の結論に大きな差はないとみなす場合も見られる [例えば、藤原ほか (2005)]。本研究では、後者の考え方を採用する。最大加速度を一律1.2倍とした場合や水平2成分を合成した最大値を用いた場合には計算結果は変わってくるであろうが、DONETの強震計の振幅レンジ4gを他の閾値と比較して相対的に評価す

る上では、水平2成分の最大値を用いても大きな問題は無いと考えている。

距離減衰式を用いて最大加速度を計算する際には、気象庁一元化震源に対する震源距離を用いる。ただし、震源モデルを考慮できる地震の場合には断層最短距離を利用する。ここでは、2001年芸予地震についてはOhori (2008)、2003年十勝沖地震の本震についてはHonda et al. (2004)、2005年宮城県沖の地震についてはYaginuma et al. (2005)、以上を参考に矩形の断層面を設定している。また、2005年福岡県西方沖の地震、2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2009年駿河湾の地震、以上5地震については、防災科学技術研究所が地震観測ポータルサイトにおいて公表している各地震の震源過程の結果 (<http://www.bosai.go.jp/>) を参考にしている。[2003年十勝沖地震の余震、2004年紀伊半島沖の4地震、2006年台湾南方沖の2地震、以上の7地震については、断層モデルを考慮していない。]

各地震で観測されたデータの選択に際して、次の点に注意を払っている。震源距離が大きくなるにつれて、トリガーされる可能性が高い観測点は、震源から伝播経路沿いの減衰が小さい方向に位置する観測点や表層地盤の増幅性が高い観測点が多くなる。この時、ある程度の震源距離以上になると、観測値がトリガーレベルに近づき、データ分布の距離依存性が不明瞭となる。こうしたデータを混在させると、同じ震源距離でも揺れやすい観測点に重みをおく結果を招く。これを回避するために、距離減衰曲線上に重ね描きした全観測点のデータを表示して判断した結果、Figs. 1, 2に例示するように全ての地震について震源距離300km以上の観測点のデータは解析対象から外すことにした。

Table 1. Summary of targeted earthquakes.

表1. 対象とする地震とその諸元.

| Event | Abbrev. for Event Name | Origin Time | Longitude (deg.) | Latitude (deg.) | Depth (km) | M | M_w | Depth* (km) | Strike (deg.) | Dip (deg.) | Rake (deg.) |
|-------|--------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|------------|-----|-------|-------------|---------------|------------|-------------|
| 1 | 2001 Geijo | 2001/03/24 15:27 | 34.120 | 132.709 | 51.4 | 6.7 | 6.8 | 50.0 | 188.0 | 59.0 | -56.0 |
| 2 | 2003 off Tokachi (Mains shock) | 2003/09/26 04:50 | 41.780 | 144.079 | 42.0 | 8.0 | 7.9 | 23.0 | 249.0 | 15.0 | 127.0 |
| 3 | 2003 off Tokachi (Aftershock) | 2003/09/26 06:08 | 41.707 | 143.695 | 21.4 | 7.1 | 7.3 | 53.0 | 194.0 | 22.0 | 76.0 |
| 4 | 2004 off Kii Peninsula (Foreshock) | 2004/09/05 19:07 | 33.030 | 136.801 | 37.6 | 6.9 | 7.2 | 14.0 | 86.0 | 38.0 | 89.0 |
| 5 | 2004 off Kii Peninsula (Mains shock) | 2004/09/05 23:57 | 33.144 | 137.142 | 43.5 | 7.4 | 7.5 | 11.0 | 115.0 | 39.0 | 132.0 |
| 6 | 2004 off Kii Peninsula (Aftershock) | 2004/09/07 08:29 | 33.206 | 137.296 | 41.0 | 6.4 | 6.5 | 11.0 | 74.0 | 42.0 | 61.0 |
| 7 | 2004 off Kii Peninsula (Aftershock) | 2004/09/08 23:58 | 33.114 | 137.291 | 36.1 | 6.5 | 6.1 | 5.0 | 239.0 | 37.0 | 54.0 |
| 8 | 2005 West off Fukuoka Pref. | 2005/03/20 10:53 | 33.739 | 130.176 | 9.2 | 7.0 | 6.6 | 11.0 | 122.0 | 87.0 | -11.0 |
| 9 | 2005 off Miyagi Pref. | 2005/08/16 11:46 | 38.151 | 142.280 | 41.6 | 7.2 | 7.1 | 44.0 | 199.0 | 21.0 | 66.0 |
| 10 | 2006 off Taiwan (1st) | 2006/12/26 20:26 | 21.810 | 120.520 | 19.6 | 7.0 | 7.0 | 20.0 | 165.0 | 30.0 | -76.0 |
| 11 | 2006 off Taiwan (2nd) | 2006/12/26 20:34 | 22.020 | 120.400 | 32.8 | 7.0 | 6.9 | 33.0 | 151.0 | 48.0 | 0.0 |
| 12 | 2007 Noto Peninsula | 2007/03/25 09:41 | 37.221 | 136.686 | 10.7 | 6.9 | 6.7 | 8.0 | 58.0 | 66.0 | 132.0 |
| 13 | 2007 Chuetsu off | 2007/07/16 10:13 | 37.557 | 138.610 | 16.8 | 6.8 | 6.6 | 8.0 | 49.0 | 42.0 | 101.0 |
| 14 | 2008 Iwate-Miyagi Inland | 2008/06/14 08:43 | 39.030 | 140.881 | 7.8 | 7.2 | 6.9 | 5.0 | 209.0 | 51.0 | 104.0 |
| 15 | 2009 Suruga Bay | 2009/08/11 05:07 | 34.786 | 138.499 | 23.3 | 6.5 | 6.2 | 20.0 | 307.0 | 47.0 | 119.0 |

* Derived from CMT solution or Moment Tensor Inversion

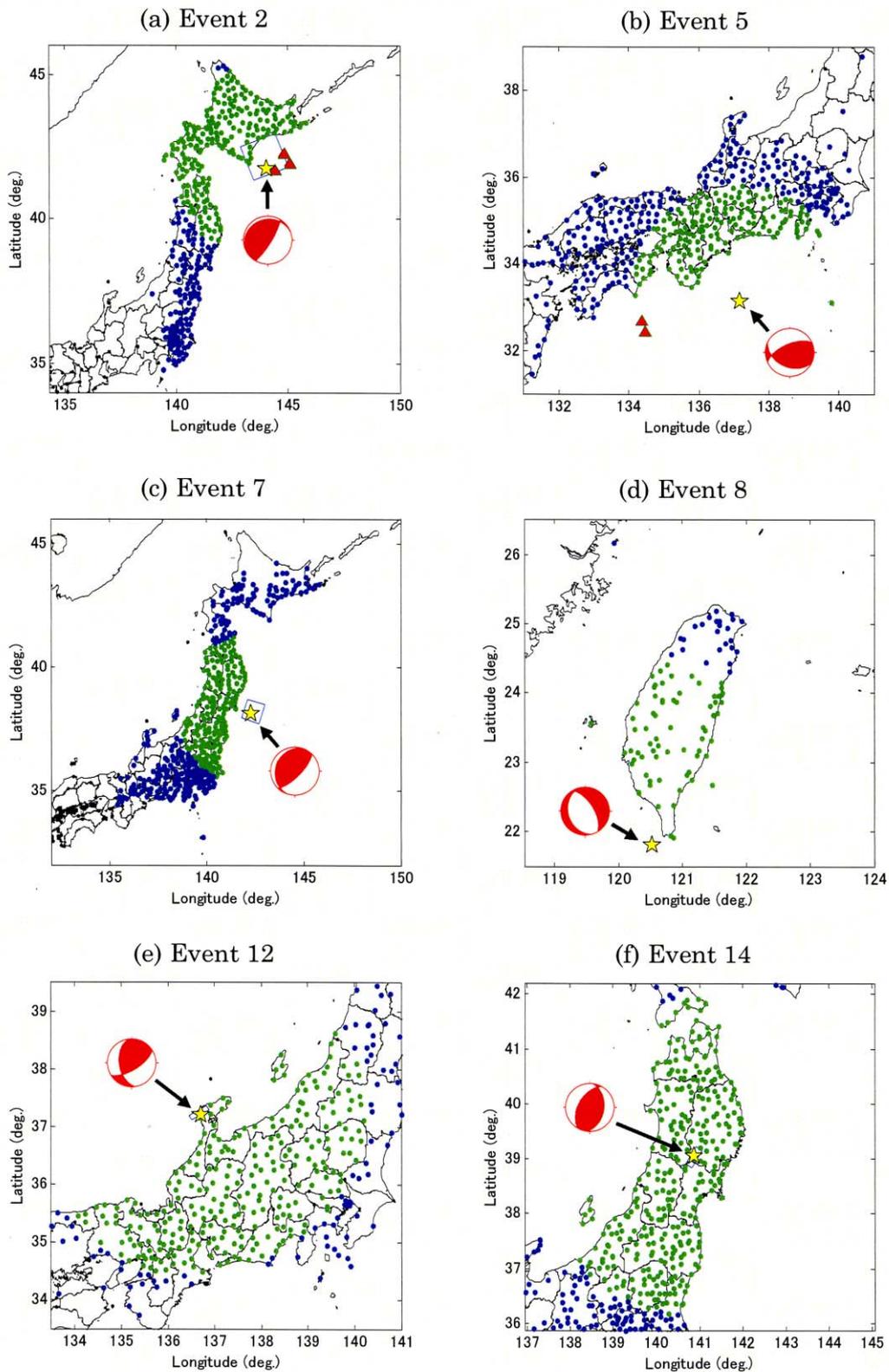


Fig. 1. Examples of locations of targeted epicenters and stations. In each diagram, an epicenter is indicated with a star. Used stations within 300 km in a source distance are denoted by green dots, and others are by blue dots. In (a) and (b), stations at ocean bottom are denoted by red solid triangles. In (a), (c), (e) and (f), the projections of the fault plane are shown by rectangles, which are used for evaluation of the closest source distance.

図1. 対象とする地震と観測点の例。星印は震央を示す。震源距離300km以内に位置する観測点（緑点印）を解析対象とし、それ以外（青点印）を対象外としている。(a)、(b)では、解析対象観測点のうち、海底ケーブルによる観測点を赤三角形印で示す。(a)、(c)、(e)、(f)では、断層最短距離を算出するに用いる断層面の水平面方向の投影線を黒線で表示している。

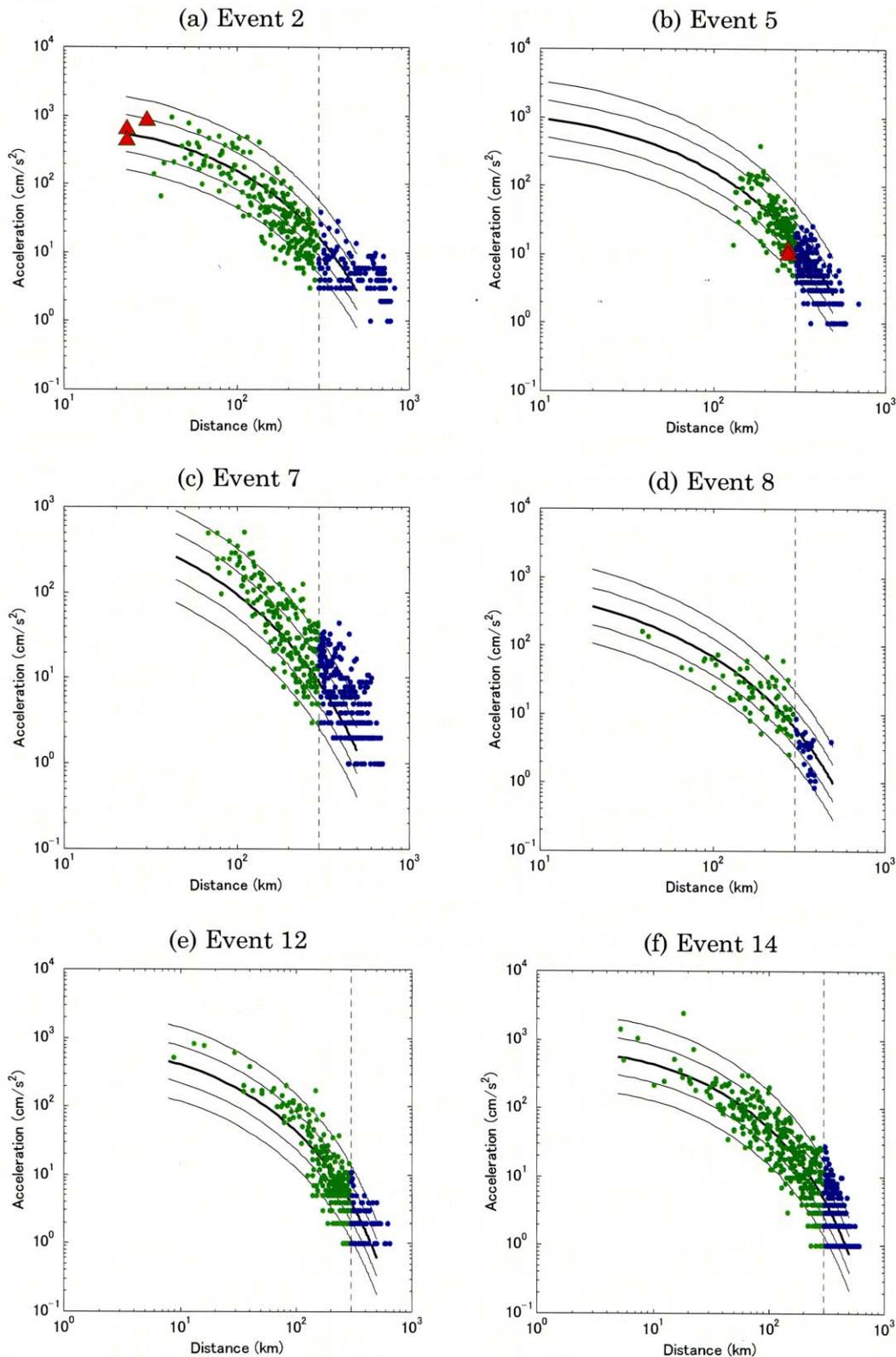


Fig. 2. Examples of characteristics of the maximum acceleration attenuation. In each diagram, a bold solid line corresponds to the mean prediction, and other thin lines correspond to the prediction included single or double standard deviations. Used stations within 300 km in a source distance (shown by vertical dashed lines) are denoted by green dots, and others are by blue dots. In (a) and (b), stations at ocean bottom are denoted by red solid triangles.

図2. 最大加速度の距離減衰特性の例。距離減衰曲線は、平均値、平均値に標準偏差を考慮したもの、平均値に2倍の標準偏差を考慮したもの、計5本の曲線を描いている。縦の点線で示す震源距離300km以内に位置する観測点（緑点印）を解析対象とし、それ以外（青点印）を対象外としている。また、(a)、(b)では、解析対象観測点のうち、海底ケーブルによる観測点を赤三角形印で示す。

3. 検討結果

3.1. 距離減衰特性

最大加速度の距離減衰特性の例として、Fig. 1に示した6地震に対する結果をFig. 2に示す。いずれの地震においても、観測された最大加速度値は、既往の強震記録に基づき算定された距離減衰曲線により経験的に推定される計算値に概ね一致していることがわかる。他の9地震に関しても同様の特徴が見られ、対象とした15地震の最大加速度の距離減衰性が、過去の地震と比較して特異なものではないことが確認できる。

続いて、JAMSTECの海底観測点におけるデータに着目する。Fig. 1 (a) およびFig. 2 (a)に釧路・十勝沖における海底ケーブル観測点の位置とその最大加速度を赤三角形印で示す。釧路・十勝沖における3点の観測点位置は震源に近く、その最大加速度は、2点が距離減衰式で算出される平均値に近く、1点が平均値 $\times\sigma$ [σ は対数標準偏差、常用対数値0.27 (真数値1.86)] のレベルに近いことがわかる。Fig. 1 (b) およびFig. 2 (b)に室戸岬沖における海底ケーブル観測点の位置とその最大加速度を赤三角形印で示す。2004年紀伊半島沖の地震（本震）発生時の室戸岬沖における2点の最大加速度はともに約 10 cm/s^2 で、同程度の震源距離の陸域観測点の最大加速度に比較してやや小さく、距離減衰式の結果と比較すると平均値 $\div\sigma$ のレベルに近いことが読み取れる。この傾向は、同地震の前震および最大余震においても同様であることを確認している。最大加速度はある程度のばらつきを考慮して検討すべきものであり、少ない例ではあるが、海域のデータは、陸域のデータと大きくかけ離れたものではないことが例示された。以降、本研究では、陸域で観測された最大加速度の分布特性が、海底に設置されるDONETの地震計において観測される最大加速度の分布特性と等価であるという前提に立ち、検討を進めることにする。

3.2. 補正最大加速度を用いた震源近傍での地震動レベルの検討

3.2.1. 補正最大加速度の算定方法

震源近傍における最大加速度を推定するために、ここでは司・翠川（1999）による最大加速度の距離減衰性を利用して、各地震の最大加速度に距離減衰の考慮をして、震央位置まで引き戻した補正値を算定する。（以降、この補正値を補正最大加速度と呼ぶ。）補正最大加速度を算定し、その分布特性を検討する手順は次の通りである。

- (1) 震源距離を x とし、各観測点の最大加速度の観測値を $A_{obs}(x)$ 、距離減衰式に基づく計算値を $A_{cal}(x)$ とする。計算値に対する観測値の比 $A_{obs}(x)/A_{cal}(x)$ を観測点の揺れ

やすさ・揺れにくさを表わすサイト特性と定義する [例えば、神野・三浦（2005）、片岡・山本（2007）など]。

- (2) 各観測点で得られた最大加速度について距離減衰を補正して、震央位置（震源距離は震源の深さ d となる）まで引き戻して得られる補正最大加速度を $A'_{obs}(d)$ とすれば、これは震央位置での最大加速度の計算値 $A_{cal}(d)$ に先ほど定義したサイト特性 $A_{obs}(x)/A_{cal}(x)$ を乗じて、

$$A'_{obs}(d) = A_{obs}(x) / A_{cal}(x) \times A_{cal}(d) \quad (1)$$

と表わせる。 $A'_{obs}(d)$ は各観測点のサイト特性をそのままとして、距離減衰性のみを考慮して震央位置まで引き戻した算定値である。

- (3) 最大加速度の振幅レベルとして、DONETの強震計の振幅レンジを $4g$ に設定していることを踏まえ、 $1g$ 、 $2g$ 、 $3g$ 、 $4g$ 、以上4通りの閾値を設定した上で、補正最大加速度の分布特性を統計的に分析し、これが各閾値を超える割合を調べるとともに、補正最大加速度が大きい観測点の抽出とその地盤条件の分析を行う。

3.2.2. 補正最大加速度の分布性状

補正最大加速度の分布特性について、その代表例をFig. 3に示す。また、4段階の閾値（1g, 2g, 3g, 4g）を上回る観測点の数と対象観測点の総数に対する割合を整理してTable 2に示す。これらの図表について閾値ごとに概観する。まず、1gの閾値に対しては、いずれの地震に関してもこれを上回る観測点が見られ、震源近傍で1gを超える最大加速度が得られても不思議ではないと解釈することができる。次に、2gの閾値に対しては、15地震のうち10地震において、これを上回る観測点が見られる。3gの閾値に対しては、2004年紀伊半島沖の3地震（前震、本震、最大余震）、2007年能登半島地震、2008年岩手・宮城内陸地震、以上の5地震において、これを上回る観測点が見られる。さらに、4gの閾値に対しては、2004年紀伊半島沖の本震（MIE007観測点）、2008年岩手・宮城内陸地震（AKTH04観測点）、以上の2地震において、これを上回る観測点が見られる。ところで、補正最大加速度が4gを超えたMIE007観測点では、最大加速度384cm/s²が補正最大加速度において6812cm/s²（6.95g）と算定されている。同じく、AKTH04観測点では、最大加速度2449cm/s²（2.5g）が補正最大加速度において4418cm/s²（4.5g）と算定されている。なお、2008年岩手・宮城内陸地震において3成分合成値が4gを超える加速度を記録したIWTH25観測点については、本研究

で上下成分を考慮していないため、水平成分の最大加速度1433 cm/s²が補正最大加速度において1450 cm/s²と微増する結果となっている。

各地震に関して、補正最大加速度が閾値2gを超える観測点を抽出したところ、総計29点〔台湾で発生した地震に対する観測点1点（地盤情報は不明）を含む〕となった。これらのうち、地盤情報が判明している28点について、司・翠川（1999）の方法に基づき、PS検層結果を用いて表層30mまでの平均S波速度AVS30を推定した。AVS30とは、表層地盤の増幅特性を評価する上で広く用いられる簡易指標であり、この値が小さくなるほど軟弱な地盤となり増幅が大きいと考えられている〔例えば、藤原ほか（2005）〕。AVS30を算定した結果、軟弱な地盤と考えられるAVS30<200m/sの観測点は3点のみで、比較的良好な地盤と考えられるAVS30≥400m/sの観測点が9点、200≤AVS30<400m/sとなる観測点が16点という内訳となった。これより、補正最大加速度が大きくなるのは必ずしも軟弱な表層地盤上に設置された観測点とは限らないことがわかる。例えば、補正最大加速度が4gを超えた先述のMIE007観測点とAKTH04観測点のAVS30はそれぞれ450m/s、466 m/sと算定されており、通常は良好な地盤と判断される観測点であることがわかる。

Table 2. Stations and probability exceeding each criterion at an epicentral area.

表2. 補正最大加速度の閾値に対する分布性状。

| Event | Whole Stations | Targeted Stations | Stations exceeding each Criterion | | | | Exceeding Ratio (%) | | | |
|-------|----------------|-------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|---------------------|------|------|------|
| | | | >1g | >2g | >3g | >4g | >1g | >2g | >3g | >4g |
| 1 | 316 | 260 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0.38 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2 | 360 | 217 | 19 | 2 | 0 | 0 | 8.76 | 0.92 | 0.00 | 0.00 |
| 3 | 287 | 168 | 23 | 3 | 0 | 0 | 13.69 | 1.79 | 0.00 | 0.00 |
| 4 | 416 | 171 | 49 | 5 | 1 | 0 | 28.65 | 2.92 | 0.58 | 0.00 |
| 5 | 432 | 171 | 76 | 12 | 3 | 1 | 44.44 | 7.02 | 1.75 | 0.58 |
| 6 | 301 | 174 | 29 | 3 | 1 | 0 | 16.67 | 1.72 | 0.57 | 0.00 |
| 7 | 153 | 124 | 6 | 1 | 0 | 0 | 4.84 | 0.81 | 0.00 | 0.00 |
| 8 | 299 | 197 | 5 | 0 | 0 | 0 | 2.54 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 9 | 456 | 187 | 14 | 1 | 0 | 0 | 7.49 | 0.53 | 0.00 | 0.00 |
| 10 | 95 | 69 | 3 | 1 | 0 | 0 | 4.35 | 1.45 | 0.00 | 0.00 |
| 11 | 95 | 70 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1.43 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 12 | 386 | 270 | 28 | 3 | 1 | 0 | 10.37 | 1.11 | 0.37 | 0.00 |
| 13 | 390 | 345 | 13 | 0 | 0 | 0 | 3.77 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 14 | 655 | 334 | 58 | 7 | 1 | 1 | 17.37 | 2.10 | 0.30 | 0.30 |
| 15 | 368 | 341 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0.29 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

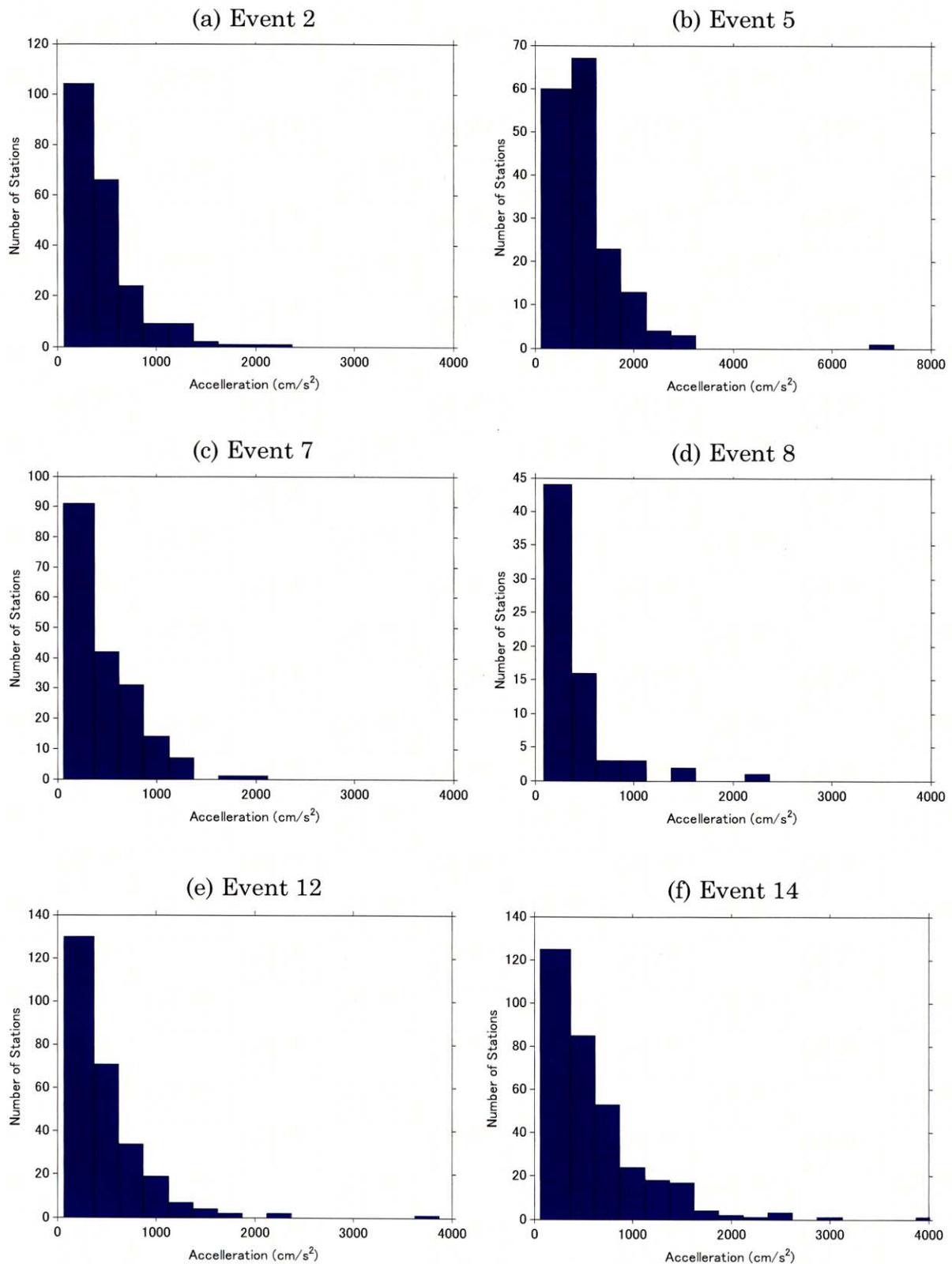


Fig. 3. Examples of histograms of the maximum acceleration after source distance correction. After compensation of the attenuation effect, corrected acceleration values correspond to the data which might be observed at an epicentral area.

図3. 補正最大加速度の頻度分布. 観測された最大加速度に距離減衰性を考慮した補正を行い, 各地震について震央位置まで引き戻している.

4. 1944年東南海地震に対するDONETの観測点での予測最大加速度

4.1. 最大加速度の距離減衰式による評価

1944年東南海地震に対してDONETの観測点でどのくらいの最大加速度が記録されるかを距離減衰式に基づき予測する。Fig. 4に、1944年東南海地震 (M_w 8.1, 震源の深さ20 km) の断層面 [山中 (2006) を参照] とDONETの観測点の分布を示す。DONETの観測点は沖合に位置する4観測点を除き、多くの観測点が断層面上に位置する。Fig. 5に、司・翠川 (1999) の最大加速度の距離減衰曲線上にDONETの観測点で予測される最大加速度をひし形印で重ね描きしている。距離減衰式の適用上、DONETの観測点までの断層最短距離は震源の深さが下限となり、20点のうち16点において震源距離が20 km, このほか4点において20.2~31 kmである。これらの震源距離における最大加速度は16点において608 cm/s^2 となり、このほか4点では493~605 cm/s^2 と算定されている。

4.2. 参照地震のサイト特性の分布モデル

検討対象とした15地震のうち、補正最大加速度が3gを超

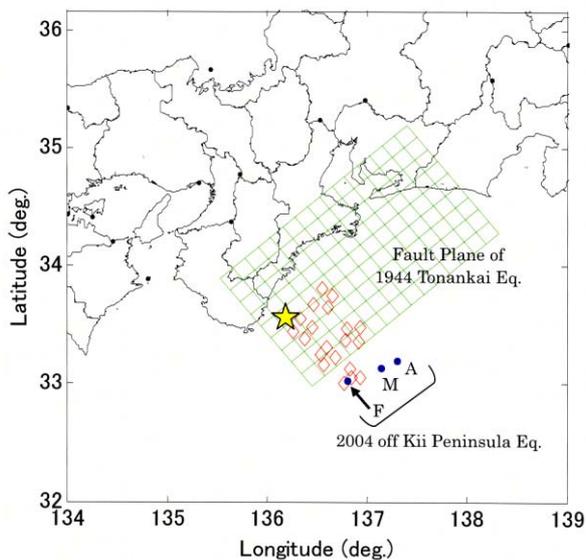


Fig 4. Map showing the locations of the fault model of the 1944 Tonankai Earthquake of M_w 8.1 (Yamanaka, 2006) and 20 stations of the DONET. The source (an open star) is located at 20 km in depth. The DONET stations are indicated with open diamonds. Epicenters of the foreshock (F), mainshock (M), and the largest aftershock (A) of the 2004 Kii-Peninsula earthquake are also plotted for reference.

図4. 1944年東南海沖地震 (M_w 8.1) の断層モデル [山中 (2006)] とDONET観測点の位置関係。震源位置 (深さ20km) を星印で示す。DONETの20観測点をひし形印で示す。参考として、2004年 紀伊半島沖の3地震の震央のうち、Fは前震、Mは本震、Aは最大余震を意味する。

える結果が見られたのは、2004年紀伊半島沖の3地震 (前震, 本震, 最大余震), 2007年能登半島地震, 2008年岩手・宮城県内陸地震, 以上の5地震 (Event 4, 5, 6, 12, 14) である。これらの5地震を参照地震とし、サイト特性の分布性状をモデル化する。サイト特性は対数正規分布で良く説明されると広く考えられており [例えば、理論地震動研究会 (1994), 片岡・山本 (2007) など], ここでも同様のモデル化をする。各地震のモデルパラメータ (対数平均値, 対数標準偏差) の推定結果をTable 3に示すとともに、2地震 (Event 5, 14) を例に、サイト特性の頻度分布および累積分布関数をFig. 6に示す。Fig. 6には、参照地震より得られたサイト特性の離散的なデータとそれをモデル化した結果を合わせて記載している。頻度分布を比較するために、離散的なデータと同数になるように、Table 3に示す対数正規分布に従う乱数を生成して表示している。さらに、モデル化した分布特性を用いた場合に、参照地震の補正最大加速度が各閾値を超過する確率を算定し、Table 4に示す。同表には、Table 2に示した補正最大加速度が閾値を超える比率も括弧内に併記している。Fig. 6およびTable 4より、参照地震のサイト特性の分布特性を対数正規分布により概ね近似できたと考えている。

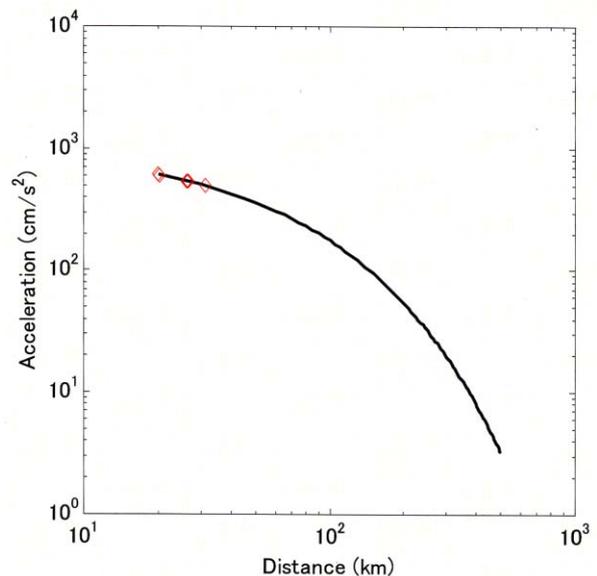


Fig 5. Characteristics of the maximum acceleration attenuation due to the 1944 Tonankai Earthquake (M_w 8.1). A bold solid line corresponds to the mean prediction. The estimated values at 20 stations of the DONET are denoted by open diamonds.

図5. 1944年東南海地震 (M_w 8.1) によるDONET観測点の最大加速度の評価。距離減衰曲線を太線で描いている。DONETの20観測点での予測値をひし形印で示す。

Table 3. Parameters of the logarithmic normal distribution model estimated from the site effects for selected five events. Note that μ and σ are the mean and standard deviation of the natural logarithm.

表3. 参照地震（5地震）のサイト特性より推定した対数正規分布モデルのパラメータ。 μ は対数平均値、 σ は対数標準偏差を表す。

| Event | μ | σ |
|-------|---------|----------|
| 4 | -0.0590 | 0.5547 |
| 5 | -0.0575 | 0.5973 |
| 6 | -0.0286 | 0.5868 |
| 12 | -0.2138 | 0.7516 |
| 14 | -0.1661 | 0.7387 |

Table 4. Probabilities exceeding each criterion for selected five events based on the logarithmic normal distribution model.

表4. 参照地震（5地震）においてサイト特性の分布モデルを用いて算定した補正最大加速度が閾値を超過する確率。

| Event | Exceeding Probability (%) | | | |
|-------|---------------------------|----------------|----------------|----------------|
| | >1g | >2g | >3g | >4g |
| 4 | 30.38 (28.65) | 3.89 (2.92) | 0.63 (0.58) | 0.13 (0.00) |
| 5 | 43.20 (44.44) | 9.15 (7.02) | 2.22 (1.75) | 0.63 (0.58) |
| 6 | 18.65 (16.67) | 1.91 (1.72) | 0.29 (0.57) | 0.06 (0.00) |
| 12 | 9.83 (10.37) | 1.34 (1.11) | 0.30 (0.37) | 0.09 (0.00) |
| 14 | 16.80 (17.37) | 2.87 (2.10) | 0.72 (0.30) | 0.23 (0.30) |

[memo] numerals in brackets: exceeding ratios in Table 2.

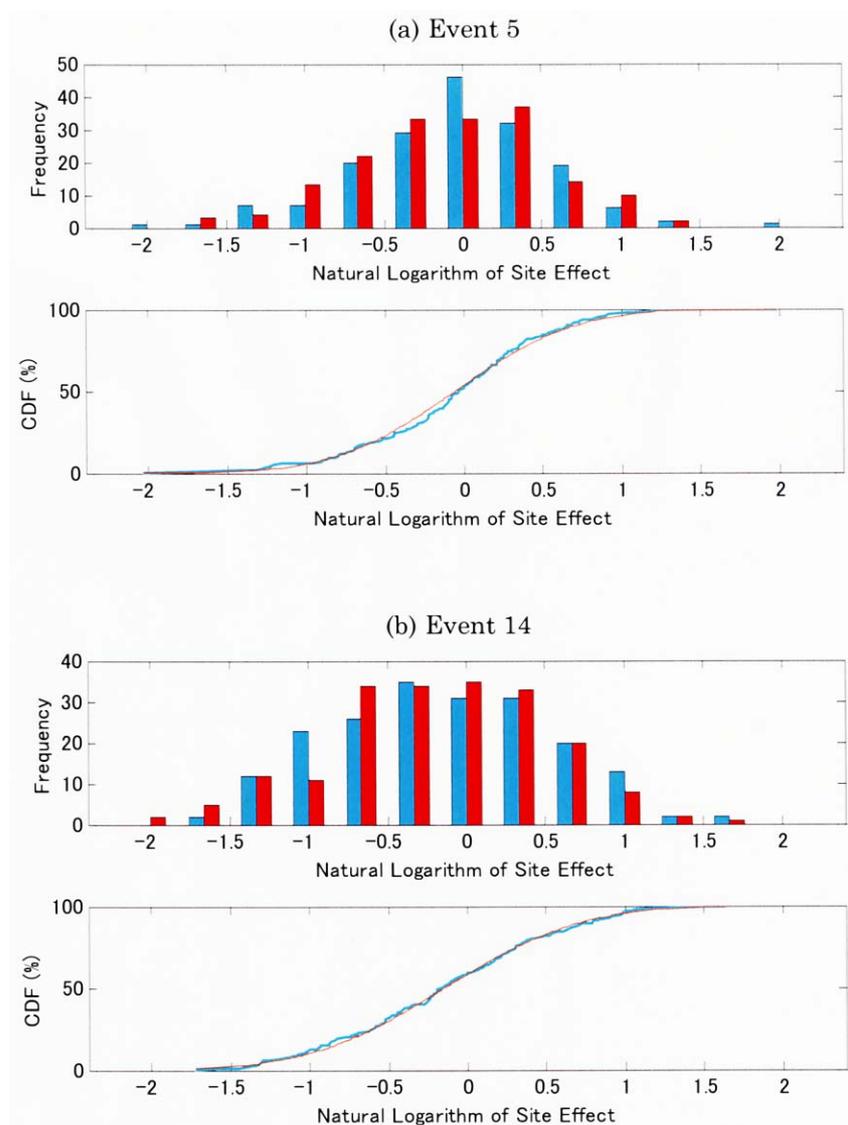


Fig. 6. Example distribution models of site effects of reference events. In panels of (a) and (b), frequency distributions of logarithmic of site effects (upper) and cumulative distribution functions (lower) are plotted. Data is plotted in light blue, and model is in red.

図6. 参照地震のサイト特性に関する分布モデルの推定結果の例。(a)、(b)の各図のそれぞれ上段にサイト特性の対数値に関する頻度分布を、下段にサイト特性の対数値に関する累積分布関数を示す。水色はデータを、赤色はモデルを表す。

4.3. DONETの各観測点における超過確率の評価

Table 3に示す参照地震のサイト特性の分布モデルを用いて、Fig. 5に示すDONETの20観測点の最大加速度に対してばらつきを与え、各観測点の閾値に対する超過確率を評価した結果を、Table 5に示す。各観測点における超過確率は、参照地震ごとにもばらつくものの、最大値に着目すると、1gに対して19.41%、2gに対しては3.51%、3gに対しては0.92%、4gに対して0.30%、以上の結果が得られた。これより、DONETの強震計の振幅レンジを4gとすることにより、他の閾値（1g、2g、3g）に比較して、超過確率が大いに低減されていることが確認できる。

4.4. DONET全体での超過確率の評価

1944年東南海地震に対して、DONETの20観測点中n点以上（ただし、n=1, 2, 3とする）において最大加速度がある閾値kを超過する確率 ${}_{20}P_n(k)$ を算定する。Table 5に要約されているが、観測点iの超過確率を $H_i(k)$ とし、これに対する非超過確率を $R_i(k)$ とすれば、 $R_i(k)=1-H_i(k)$ となる。従って、20観測点全点が閾値kに対して非超過となる確率（20観測のうち0点が閾値kに対して超過する確率） ${}_{20}Q_0(k)$ は、

$${}_{20}Q_0(k) = \prod_{i=1}^{20} R_i(k)$$

となる。従って、20観測点中1点以上で閾値kを超過する確率 ${}_{20}P_1(k)$ は、

$${}_{20}P_1(k) = 1 - {}_{20}Q_0(k) = 1 - \prod_{i=1}^{20} R_i(k) \quad (2)$$

と表わすことができる。同様に、20観測のうち1点のみが閾値kに対して超過する確率 ${}_{20}Q_1(k)$ は、

$${}_{20}Q_1(k) = \sum_{i=1}^{20} \{H_i(k) \prod_{j=1, j \neq i}^{20} R_j(k)\}$$

となる。従って、20観測点2点以上が閾値kに対して超過する確率 ${}_{20}P_2(k)$ は、

$${}_{20}P_2(k) = {}_{20}P_1(k) - {}_{20}Q_1(k) = {}_{20}P_1(k) - \sum_{i=1}^{20} \{H_i(k) \prod_{j=1, j \neq i}^{20} R_j(k)\} \quad (3)$$

と表わすことができる。同様に、20観測のうち2点のみが閾値kに対して超過する確率 ${}_{20}Q_2(k)$ を算出すれば、

$${}_{20}Q_2(k) = \sum_{i=1}^{19} [H_i(k) \sum_{j=i+1}^{20} \{H_j(k) \prod_{k=1, k \neq i, j}^{20} R_k(k)\}]$$

となる。従って、20観測点3点以上が閾値kに対して超過する確率 ${}_{20}P_3(k)$ は、

$$\begin{aligned} {}_{20}P_3(k) &= {}_{20}P_2(k) - {}_{20}Q_2(k) \\ &= {}_{20}P_2(k) - \sum_{i=1}^{19} [H_i(k) \sum_{j=i+1}^{20} \{H_j(k) \prod_{k=1, k \neq i, j}^{20} R_k(k)\}] \end{aligned} \quad (4)$$

と表わすことができる。

各閾値に対する超過確率を算出し、Tables 6~8に示す。まず、1gを超える確率は、参照地震によらず大きいことがわかる。その中で最も大きい超過確率に着目すると、 ${}_{20}P_1(1g)$ が98.33%、 ${}_{20}P_2(1g)$ が90.74%以上、 ${}_{20}P_3(1g)$ が74.35%と算定されている。従って20点中3点以上で1gを越える可能性が非常に高いことがわかる。2g以上の閾値に対する超過確率は、2008年岩手・宮城内陸地震（Event 14）の分布特性を用いた場合に最も高い結果となっており、以降、これに着目する。2g以上の閾値に対する超過確率は、 ${}_{20}P_1(2g)$ が49.11%、 ${}_{20}P_2(2g)$ が14.13%、 ${}_{20}P_3(2g)$ が2.73%と算定されている。これより、20点中1点以上で2gを超える可能性がほぼ50%であることがわかる。3gを超える確率は、 ${}_{20}P_1(3g)$ が15.83%、 ${}_{20}P_2(3g)$ が1.26%、 ${}_{20}P_3(3g)$ が0.064%と算定されている。4gを超える確率は、 ${}_{20}P_1(4g)$ が5.43%、 ${}_{20}P_2(4g)$ が0.14%、 ${}_{20}P_3(4g)$ が0.0024%と算定されている。参照地震より3地震（Event 5, 12, 14）を選び、Fig.7に超過確率 ${}_{20}P_1$ 、 ${}_{20}P_2$ 、 ${}_{20}P_3$ を重ねて描く。これより、閾値が大きくなるにつれて各超過確率が急速に小さくなっていること、2008年岩手・宮城内陸地震の分布モデルを用いた結果が2007年能登半島地震のそれに良く一致すること、等がわかる。

Table 5. Summary of probabilities exceeding each criterion at each station of 20 stations of the DONET due to the 1944 Tonankai Earthquake ($M_w 8.1$).

表5. 1944年東南海地震（ $M_w 8.1$ ）によりDONETの20観測点が閾値を超過する確率の概要。

| Event | Statistics | Exceeding Probability (%) | | | |
|-------|------------|---------------------------|------|------|------|
| | | >1g | >2g | >3g | >4g |
| 4 | max. | 16.66 | 1.33 | 0.16 | 0.03 |
| | mean | 15.78 | 1.23 | 0.15 | 0.02 |
| | min. | 8.96 | 0.48 | 0.04 | 0.01 |
| 5 | max. | 18.51 | 1.99 | 0.31 | 0.06 |
| | mean | 17.62 | 1.85 | 0.29 | 0.06 |
| | min. | 10.66 | 0.81 | 0.10 | 0.02 |
| 6 | max. | 19.41 | 2.05 | 0.31 | 0.06 |
| | mean | 18.48 | 1.90 | 0.29 | 0.06 |
| | min. | 11.16 | 0.82 | 0.10 | 0.02 |
| 12 | max. | 17.87 | 3.27 | 0.86 | 0.28 |
| | mean | 17.17 | 3.09 | 0.81 | 0.27 |
| | min. | 11.56 | 1.70 | 0.39 | 0.12 |
| 14 | max. | 19.17 | 3.51 | 0.92 | 0.30 |
| | mean | 18.42 | 3.32 | 0.86 | 0.28 |
| | min. | 12.43 | 1.82 | 0.41 | 0.12 |

[memo] max. : the maximum exceeding probability among 20 stations
 mean : the average exceeding probability among 20 stations
 min. : the minimum exceeding probability among 20 stations

Table 6. Probabilities exceeding each criterion at 1 station or more among 20 stations of the DONET due to the 1944 Tonankai Earthquake ($M_w 8.1$), ${}_{20}P_1$.

表6. 1944年東南海地震 ($M_w 8.1$) によりDONETの20観測点中の1点以上が閾値を超過する確率 ${}_{20}P_1$.

| Event | Exceeding Probability (%) | | | |
|-------|---------------------------|-------|-------|------|
| | >1g | >2g | >3g | >4g |
| 4 | 96.80 | 21.90 | 2.87 | 0.47 |
| 5 | 97.94 | 31.13 | 5.57 | 1.17 |
| 6 | 98.33 | 31.90 | 5.57 | 1.14 |
| 12 | 97.70 | 46.65 | 14.96 | 5.17 |
| 14 | 98.30 | 49.11 | 15.83 | 5.43 |

Table 7. Probabilities exceeding each criterion at 2 stations or more among 20 stations of the DONET due to the 1944 Tonankai Earthquake ($M_w 8.1$), ${}_{20}P_2$.

表7. 1944年東南海地震 ($M_w 8.1$) によりDONETの20観測点中の2点以上が閾値を超過する確率 ${}_{20}P_2$.

| Event | Exceeding Probability (%) | | | |
|-------|---------------------------|-------|------|----------|
| | >1g | >2g | >3g | >4g |
| 4 | 84.76 | 2.47 | 0.04 | 1.1.E-03 |
| 5 | 89.11 | 5.20 | 0.15 | 0.01 |
| 6 | 90.74 | 5.48 | 0.15 | 0.01 |
| 12 | 88.14 | 12.58 | 1.12 | 0.13 |
| 14 | 90.62 | 14.13 | 1.26 | 0.14 |

Table 8. Probabilities exceeding each criterion at 3 stations or more among 20 stations of the DONET due to the 1944 Tonankai Earthquake ($M_w 8.1$), ${}_{20}P_3$.

表8. 1944年東南海地震 ($M_w 8.1$) によりDONETの20観測点中の3点以上が閾値を超過する確率 ${}_{20}P_3$.

| Event | Exceeding Probability (%) | | | |
|-------|---------------------------|----------|----------|----------|
| | >1g | >2g | >3g | >4g |
| 4 | 63.26 | 1.8.E-01 | 3.4.E-04 | 1.5.E-06 |
| 5 | 71.11 | 5.7.E-01 | 2.6.E-03 | 2.3.E-05 |
| 6 | 74.35 | 6.1.E-01 | 2.6.E-03 | 2.1.E-05 |
| 12 | 69.27 | 2.27 | 5.4.E-02 | 2.0.E-03 |
| 14 | 74.11 | 2.73 | 6.4.E-02 | 2.4.E-03 |

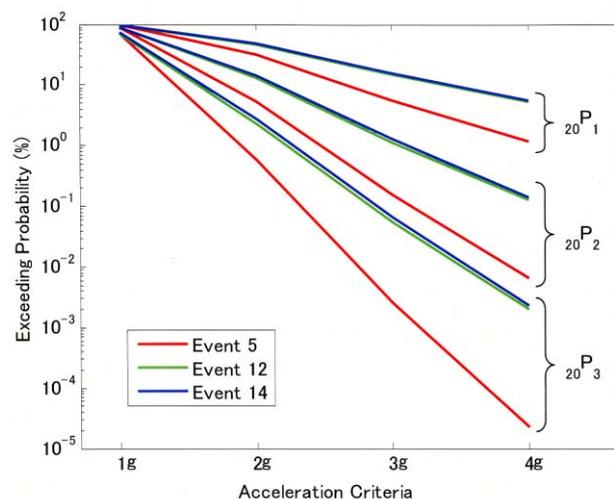


Fig. 7. Probabilities exceeding each criterion at k stations or more among 20 stations of the DONET due to the 1944 Tonankai Earthquake ($M_w 8.1$), ${}_{20}P_n$ ($n=1,2,3$). Results from three events are selected for graphical convenience.

図7. 1944年東南海地震 ($M_w 8.1$) によりDONETの20観測点中の n 点以上が閾値を超過する確率 ${}_{20}P_n$ ($n=1,2,3$). 作図の都合により、参照地震のうち超過確率の大きい3地震のみを表示している。

5. まとめ

本報告では、東南海地震の震源近傍に設置されるDONETのシステム構築の一環として最大加速度の距離減衰式に基づく検討手法を用いて、強震計の振幅レンジ $\pm 4g$ (3920cm/s^2) についての評価を行っている。

まず、最近海域で発生したM7クラス以上の地震とその前震、余震、計15地震（陸域の1地震を含む）により得られた最大加速度を分析し、震源近傍での最大加速度のレベルについての検討を行った。対象とした地震がこれまでの強震記録から予想される平均的な距離減衰特性を有することを確認した上で、観測値に距離減衰の補正を行い、震央位置に引き戻した最大加速度を推定した。さらに、補正最大加速度が閾値（1g, 2g, 3g, 4g）を超える割合を分析し、2004年紀伊半島沖の3地震（前震、本震、最大余震）、2007年能登半島地震、2008年岩手・宮城内陸地震、以上の5地震では、3gを超える結果が認められた。また、2004年紀伊半島沖の地震（本震）、2008年岩手・宮城内陸地震、以上の2地震では、4gを超える結果が認められた。

次に、補正最大加速度に3gを超える結果が見られた5地震を参照地震として、各地震の計算値に対する観測値の比（サイト特性）が対数正規分布に従うと仮定し、その分布特性を評価した。そして、1944年東南海沖地震の断層モデル（震源の深さは20 km）を用いて、DONETの各観測点での最大加速度の分布性状を算出し、各観測点において閾値（1g, 2g, 3g, 4g）を超える割合（超過確率）を算定した。その結果、各観測点における超過確率は、参照地震によればらつくものの、最大値としては、1gに対して19.41%、2gに対しては3.51%、3gに対しては0.92%、4gに対して0.28%、以上の結果を得た。さらに、1944年東南海沖地震に対するDONETの観測点全体に対する超過確率の算定を行った。DONETの強震計の振幅レンジ4gを超える確率は、2008年岩手・宮城内陸地震のサイト特性の分布モデルを用いた場合に最大となり、 ${}_{20}P_1(4g)$ が5.43%、 ${}_{20}P_2(4g)$ が0.14%、 ${}_{20}P_3(4g)$ が0.0024%という算定結果を得た。

以上より、DONETの強震観測において、最大加速度の振幅レンジ4gを超過する可能性は0%ではない。しかし、他の閾値（1g, 2g, 3g）に比較して、超過確率が非常に小さいことがわかる。震源近傍において地震発生時に強震動を振り切れることなく記録することは非常に難しい課題であるが、振幅レンジを4gに設定することで、その可能性が大きく高められたことを確認した。

謝辞

本検討に際して、防災科学技術研究所K-NET・KiK-net、台湾中央気象局、および海洋研究開発機構・海底ケーブルデータセンターの公開データを利用させて頂きました。記して関係者各位に深謝の意を表します。なお、本報告は文部科学省からの受託研究「地震・津波観測監視システムの構築」において、海洋研究開発機構が紀伊半島沖熊野灘に構築する海底ネットワークシステムのうち、強震観測の振幅レンジについての検討内容を取りまとめたものです。関連の打合せにおいて、貴重な意見を頂きました関係者各位に感謝の意を表します。最後になりますが、石原靖氏、匿名査読者ならびに編集委員の高橋成実氏から頂きました多数の建設的な意見により、当初の原稿を大きく改善することができました。記してお礼申し上げます。

参考文献

- Aoi, S., T. Kunugi, and H. Fujiwara (2008), Trampoline Effect in Extreme Ground Motion, *Science*, 322, 727-730, doi:10.1126/science.1163113.
- 防災科学技術研究所・K-NET,
<<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>> (参照2008-5-9).
- 防災科学技術研究所・KiK-net,
<<http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>> (参照2008-5-9).
- 防災科学技術研究所・地震観測ポータルサイト,
<<http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/>> (参照2008-5-9).
- 藤原広行, 河合伸一, 青井真, 功刀卓, 奥村俊彦, 石井透, 早川譲, 森川信之, 小林京子, 大井昌弘, 先名重樹, 奥村直子 (2005), 全国を対象とした確率論的地震動予測地図作成手法の検討, *防災科学技術研究所研究資料*, 275, 393pp.
- Honda R., S. Aoi, N. Morikawa, H. Sekiguchi, T. Kunugi, and H. Fujiwara (2004), Ground motion and rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake obtained from strong motion data of K-NET and KiK-net, *Earth Planets Space*, 56, 317-322.
- 神野達夫, 三浦賢治 (2005), 2001年芸予地震時における広島県の地盤震動特性評価, *日本建築学会構造系論文集*, 597, 151-157.
- 金田義行, 川口勝義, 荒木英一郎, 松本浩幸, 中村武史, 神谷眞一郎, 有吉慶介, 堀高峰, 馬場俊孝 (2007), 南海トラフ紀伊半島沖の海底観測ネットワークの構築, *日本地震学会秋季大会講演予稿集*, B11-07.
- 片岡俊一, 山本博昭 (2007), 地震動記録に基づく青森県内の強震観測点のサイト増幅度, *日本地震工学会*

- 論文集, 7 (1), 110-129.
- 川口勝義, 金田義行, 荒木英一郎 (2007), 海底高密度リアルタイム観測ネットワークのデザインコンセプト, *海洋理工学会誌*, 13 (1), 79-86.
- JAMSTEC海底ケーブルデータセンター,
<http://www.jamstec.go.jp/scdc/top_j.html> (参照 2008-5-9).
- Ohori, M. (2008), Strong motion simulation and modeling of the 2001 Geiyo (M_s6.7), Japan, Earthquake, using the empirical Green's Function method, *Proc. of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 02-0078 (CD-ROM).
- 理論地震動研究会 (1994), 地震動—その合成と波形処理—, 鹿島出版会, 256pp.
- 司宏俊, 翠川三郎 (1999), 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, *日本建築学会構造系論文集*, 523, 63-70.
- 台湾中央気象局, <<http://www.cwb.gov.tw/>> (参照2008-5-9).
- Yaginuma T., T. Okada, Y. Yagi, T. Matsuzawa, N. Umino, and A. Hasegawa (2006), Coseismic slip distribution of the 2005 off Miyagi earthquake (M7.2) estimated by inversion of teleseismic and regional seismograms, *Earth Planets Space*, 58, 1549-1554.
- 山中佳子 (2006), 再考—1944年東南海地震—, *日本地震学会秋季大会講演予稿集*, A019.