

灯籠の転倒方向から推定される 2007 年新潟県中越沖地震の地震動

加藤清次¹・道家涼介²

¹ダイチ株式会社 富山市一本木 259-1

²富山大学大学院理工学教育部 (理学) 富山市五福 3190

要 旨

2007 年新潟県中越沖地震時の被害地域で灯籠の転倒方向を調査した結果、卓越する円柱灯籠の転倒方向から、調査地域は 3 地区に分けられる。震源断層沿いの柏崎地区では北西-南東方向、それ以外の出雲崎地区では北東方向、上越地区では北東-南西方向が卓越する。

円柱灯籠の転倒方向と K-NET から算出した水平変位を対比した結果、円柱灯籠は、地震動を鋭敏に反映したと考えられる。円柱灯籠の転倒方向の震源断層に対する分布から推定される地震動の変位パターンは、逆断層型の地震によって生じる理論的な地震動で理解が可能である。

キーワード：2007 年新潟県中越沖地震、転倒方向、円柱灯籠、常夜灯、K-NET

KATO, Seiji and Ryosuke DOKE (2009) Characteristics of land movement of the 2007 Niigatoken Chuetsu-oki Earthquake inferred from fall-down directions of stone lanterns, Central Japan. Mem. Fukui Pref. Dinosaur Mus. 8 : 41-50.

From the result of our research of the fall-down of stone lanterns by the 2007 Niigatoken Chuetsu-oki Earthquake, the damaged Joetsu and Chuetsu areas are divided into three segments characterized by eminent fall-down directions of enchu-type stone lanterns. The eminent direction in the Kashiwazaki segment, which is located along the earthquake source fault, indicate NW-SE. In the Izumozaki and Joetsu segments, which are located on the NE and SW of the Kashiwazaki segment, NE and NE-SW are eminent, respectively. The fallen-down enchu-type stone lanterns reflect earthquake vibration, from the result of the comparison with the horizontal ground movements which are calculated from K-NET. The direction of horizontal ground vibration based on the enchu-type stone lanterns correspond with theoretical ground movement due to an earthquake occurred on typical reverse fault.

はじめに

墓石や灯籠などの人工構造物の変位調査は、地震計による観測網が十分でなかった時代にも行われており、墓石の転倒率や転倒方向等を用いることによって、加速度の大小、地盤の揺れの方向等についての有用な情報を与えてきた(大橋ほか, 1978 など)。最近では、地震計が全国各地に設置され、観測網の整備が進むと同時に、地震の諸性質が

より高密度に解析されるようになった。一方、人工構造物の変位調査にしばしば用いられる墓石や灯籠等は、寺院や神社に代表されるように、市街地だけでなく、山間地等にも全国に多数分布しており、地震計よりはるかに高密度に分布している。そのため、広範囲で、かつ、高密度なデータを提供しうる可能性を持ち、地震動を理解する上で、有用な観測網と言える。また、地震計のデータや地震時の種々の測定データと組み合わせることにより、地震動を理解する上で相互補完的な役割を担うことができる。最近では、2007 能登半島地震において、人工構造物の転倒方向と防災科学技術研究所(以下、「防災科研」と略記)の強震計 K-NET のデータと対比する試みが行われ、特に、水平断面形状の影響を受けにくい円柱灯籠の転倒方向が大局的な地震動を反映することが報告されている(柏木ほか, 2007a; 加藤ほか, 2008)。また、2008 年岩手・宮城内陸地震においては、石渡ほか(2009)が、円柱灯籠の転倒方向を報告した。

2009 年 3 月 17 日受付, 2009 年 6 月 30 日受理.

Corresponding author—Seiji KATO

Accutech Inc.

4-73 Tamaboko, Kanazawa, Ishikawa 921-8002, Japan

E-mail : s-katou@e-accutech.com

¹現所属 : アクテック株式会社 金沢市玉鉾 4 丁目 73 番地

²現所属 : 株式会社地層科学研究所 神奈川県大和市上和田 1794 鳥海ビル 2F

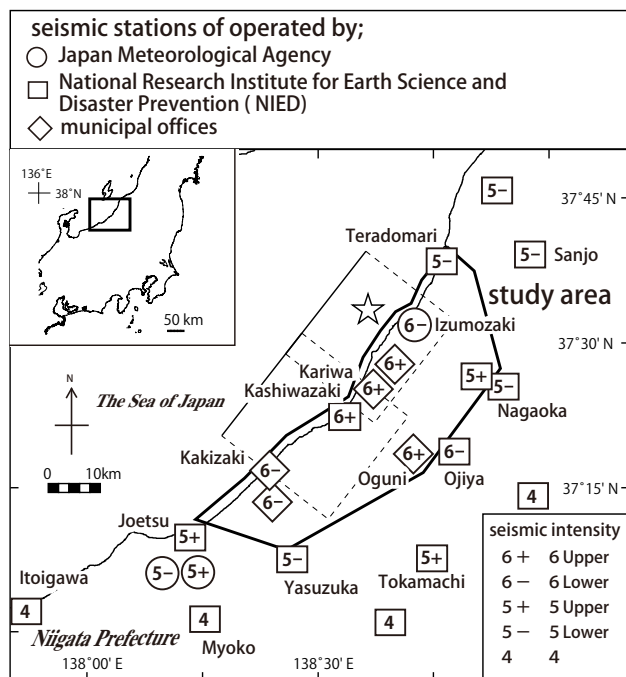


FIGURE 1. Distribution of the earthquake seismic intensity shocked by the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007, and a location of the study area. A star shows the epicenter. The earthquake seismic intensities are based on Japan Meteorological Agency (2007). Two rectangles show source earthquake fault modeled by Ozawa (2008). The bold line on the rectangles shows the upper edge of the fault.

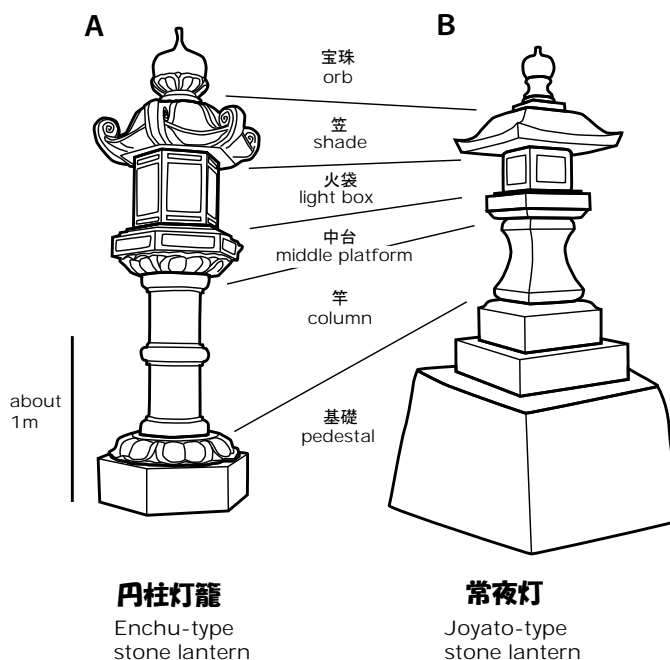


FIGURE 2. Typical shapes of stone lanterns (modified from Kato et al., 2008). The horizontal section shape of the column of the enchu-type stone lantern (A) is circular, and that of the joyato-type ones (B) are square.

筆者らは、2007年新潟県中越沖地震に際して、震央付近を含む、新潟県上越から中越地方において日本海岸沿いを中心に、灯籠の変位調査を行った。これらは地震動の諸性質を理解する上で、重要な基礎的データとなりうるので報告する。

なお、本稿は2008年9月に行われた日本地質学会第115年学術大会における筆者らの講演(加藤・道家, 2008)を基に再考し、まとめたものである。

新潟県中越沖地震

新潟県中越沖地震は、2007年7月16日10時13分に上中越沖(新潟県三島郡出雲崎町西方約10kmの海底下)で発生した、マグニチュード6.8、震源の深さ17kmの地震である(気象庁, 2007)。新潟県における、気象庁、防災科研、および自治体の地震計による震度分布に基づく、柏崎市、刈羽村、小国町で震度6強、柿崎、出雲崎町、小千谷市で震度6弱、上越市、十日町で震度5強、寺泊、三条市、安塚で震度5弱が記録されている(Fig. 1)。また、地殻変動観測および陸域観測技術衛星「だいち」のPALSARの干渉SAR解析から、長さ25kmの北東走向(N38E)で、傾斜角度の異なる南東傾斜の2つの断層(傾斜角度30度と44度)が走向方向に約5kmの範囲で重なり合っており、並ぶ総延長約45kmの断層モデルが推定されている(Fig. 1)。

調査方法

調査対象は、円柱灯籠と常夜灯とした(Fig. 2)。これらの灯籠は、基本的に上位から宝珠、笠、火袋、中台、竿、および基礎で構成され、円柱灯籠の竿は円柱状で円形の水平断面を示す。常夜灯の竿はくびれのある角柱状をなし、竿および上部の中台、火袋は正方形の水平断面を示す。

転倒方向は、クリノメーターを用いて、転倒構造物の位置とともに周辺地盤や構造物に付けられた打撃痕(柏木ほか, 2007b)等を考慮しながら計測した。なお、ここで扱う転倒とは、灯籠の構成部位の落下を指し、非転倒部位の上面を回転または並進をした後、最終的に落下したものも含まれるが、その経路は問わない。また、非変位は、目視で転倒、回転、および並進が認められないものを指す。

調査期間は、2007年7月17日(地震発生の翌日)～同年8月3日である。なお、調査の大部分は7月24日までに終え、8月3日は非変位の円柱灯籠数基を確認したのみである。調査範囲は、震央東側の陸域で、北は新潟県長岡市寺泊、南は上越市、東は長岡市、西は日本海沿岸までの北東-南西方向に約70km、北西-南東方向に約15kmの範囲である(Fig. 2)。

円柱灯籠および常夜灯の変位

円柱灯籠と常夜灯の転倒は、震度6強から震度5弱の地

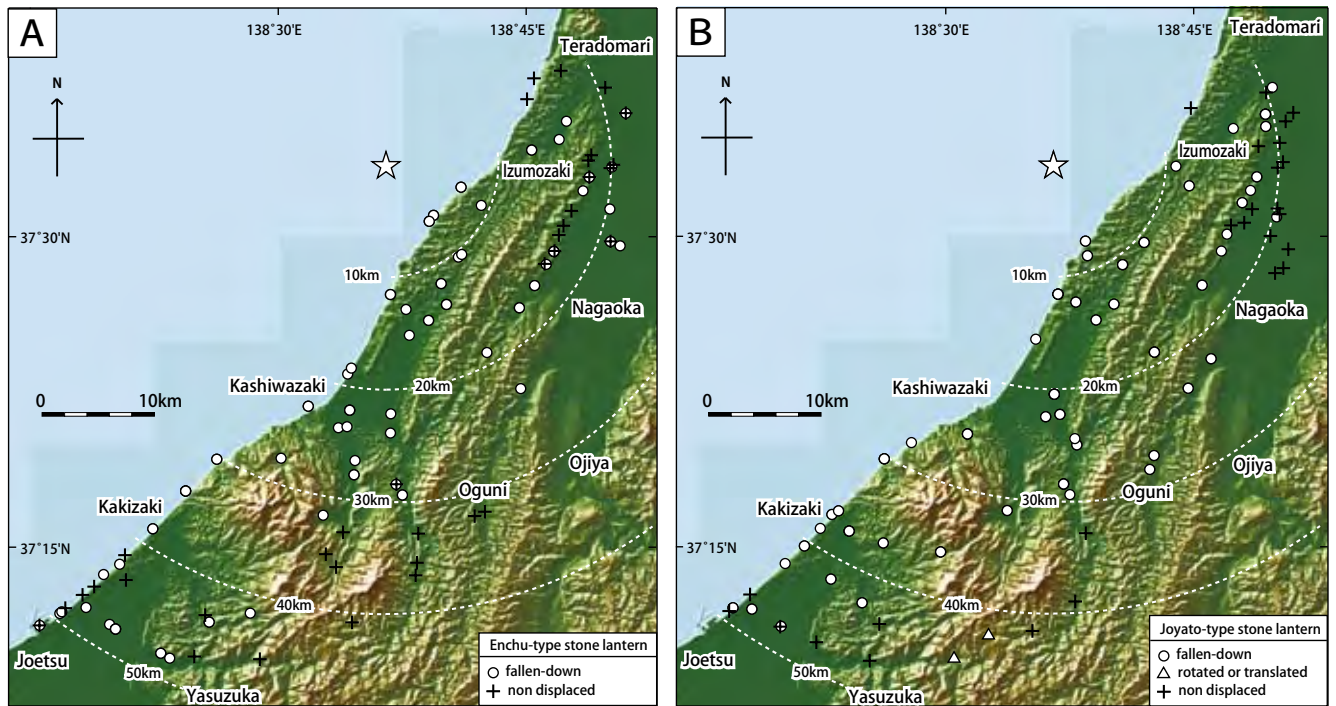


FIGURE 3. Distribution of researched enchu-type (A) and joyato-type (B) stone lanterns in the Joetsu and Chuetsu areas, Niigata Prefecture. Shaded relief map is drawn using 50 m DEM of Geographical Survey Institute (2001).

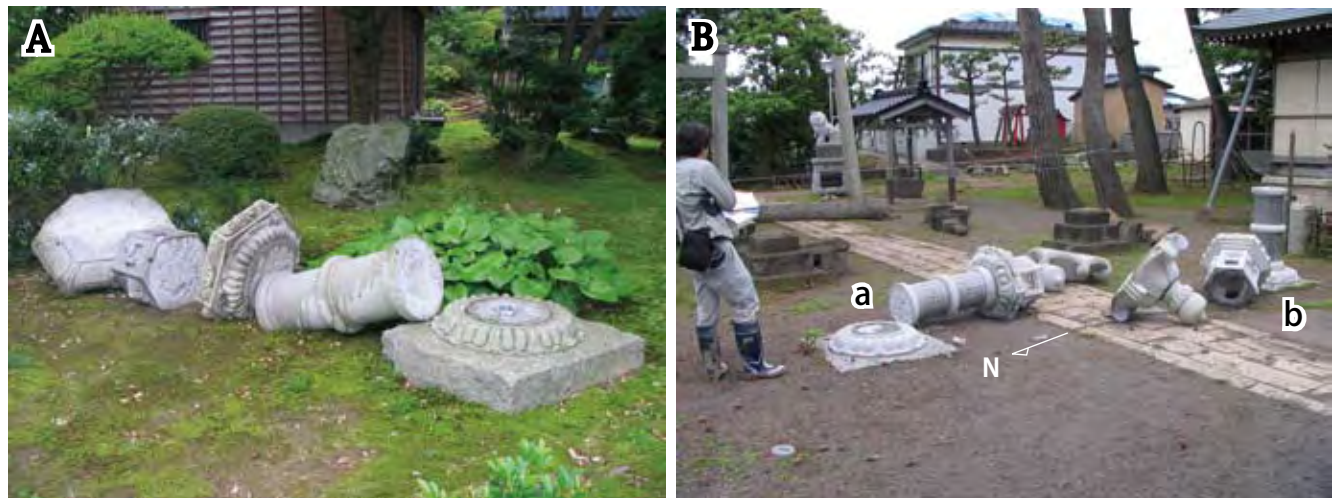


FIGURE 4. Field occurrences of fallen-down enchu-type stone lanterns. A, Fallen-down every part of stone lanterns arranged as a line; B, (a) Fall-down of lower column and (b) Fall-down of middle platform, whose directions are opposite each other.

域にはほぼ限られる。以下では、各々の灯笼ごとに、その状況について詳述する。

変位の範囲—円柱灯笼の転倒は、震央から北東～東方向でそれぞれ約 20 km 離れた寺泊—長岡まで、震央から南西方向で約 50 km 離れた上越まで見られ、寺泊—上越の日本海沿岸から、内陸に南東方向へ約 10 km 以内の地域に限られる (Fig. 3A)。また、円柱灯笼の回転または並進は

認められなかった。これについては、断面形状が円形であるため回転の判別が付かなかった可能性もある。非変位は、震央から北東～東方向では震央から約 20 km 離れた寺泊—長岡で見られ、この地域では、非変位が転倒より優勢となる。震央から南西～南方向では、震央から約 30–50 km 離れた小国—安塚間、および震央から約 40–50 km 離れた柿崎—上越間で非変位が見られる。柿崎—上越間の海岸



FIGURE 5. Field occurrences of fallen-down joyato-type stone lanterns. A, Fall-down of lower column; B, Fall-down of middle platform; C, Fall-down of light box. D, Fall-down of orb, which is an uppermost part of an joyato-type stone lantern. Red arrow shows the hit sign.

沿いでは、変位数と非変位数がほぼ同程度となる。

常夜灯の転倒は、震央から北東～東方向でそれぞれ約 20 km 離れた寺泊～長岡まで見られ、震央から南西方向では震央から約 50 km 離れた上越まで見られ、寺泊～上越の海岸沿いから、海岸と平行に南東方向へ約 15 km 以内の地域に限られる (Fig. 3B)。回転または並進は、震央から南へ約 45 km 離れた安塚北東方でわずかに見られる。また、非変位は、震央から北東～東方向では、震央から約 20 km 離れた寺泊～長岡で見られ、この区間は、非変位が転倒より優勢となる。また、震央から南西～南方向では、震央から約 30～50 km 離れた小国～安塚、および震央から約 50 km 離れた上越の北東方で見られる。上越北方では、変位数と非変位数がほぼ同程度となる。

転倒部位—調査した円柱灯籠は 88 基で、これらのうち 84 基は竿から上 (宝珠から竿まで) の部分が (Fig. 4A), 1 基は中台から上 (宝珠から中台まで) の部分が (Fig. 4B), 1 基は宝珠のみが転倒していた。また、2 基はすでに修復されていた。

常夜灯は 105 基で、このうち 53 基は竿から上部が (Fig. 5A), 33 基は中台から上部が (Fig. 5B), 8 基は火袋から上部が (Fig. 5C), 11 基は宝珠のみ (Fig. 5D) が転倒している。

円柱灯籠と常夜灯の転倒は、ともに竿から上部で最も多く、全体に占める割合は、円柱灯籠で 95%、常夜灯で 50% である。中台から上部の転倒の割合は円柱灯籠で 1%、常夜灯で 31%、火袋から上部の転倒の割合は円柱灯籠で

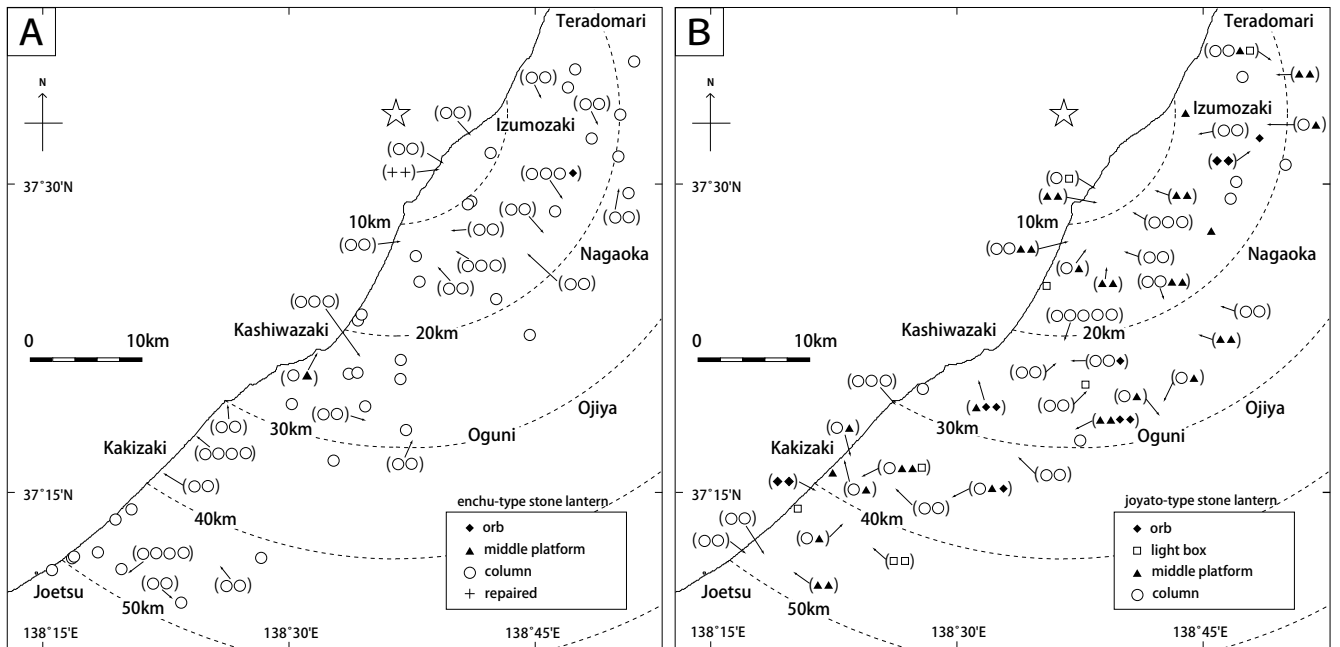


FIGURE 6. Regional distribution of fallen-down parts of enchu-type (A) and Joyato-type (B) stone lanterns in the Joetsu and Chuetsu areas, Niigata Prefecture. Arrows and parentheses indicate the sites where two or more lanterns were fallen-down. Each symbol indicates the part of a damaged lantern.

1%, 常夜灯で8%, また、宝珠のみが転倒した割合は、円柱灯笼で1%, 常夜灯で10%である。

竿から上部の転倒は、円柱灯笼と常夜灯ともに、震央付近から約 50 km 離れた上越にかけてみられる (Fig. 6). 常夜灯の竿から上部と中台から上部の転倒箇所の範囲はほぼ同範囲で、火袋から上部の転倒は転倒箇所が少ないものの、転倒箇所の範囲が前二者と概して調和的である。また、常夜灯の宝珠のみの転倒は、震央から約 15 km 以内では見られない。なお、円柱灯笼の中台から上部と宝珠のみの転倒については計測数が少なく、傾向を述べるに至らない。

転倒方向—灯笼の転倒方向は、88 基の円柱灯笼と 105 基の常夜灯で計測した。調査地域において、円柱灯笼の転倒方向 (Fig. 7A) は、全体的にばらつくものの、北東、南東、および西～北西方向が卓越する (Fig. 7B)。そして、卓越する転倒方向から、調査地域を 3 地区に区分できる (Fig. 7C)。出雲崎地区では北東、柏崎地区では南東および西～北西、上越地区では北東と南西方向が卓越する。また、卓越する転倒方向は、同地区内で 180 度反転して認められる傾向がある。

円柱灯笼の宝珠のみの転倒は、長岡付近の 1 基のみで、同一地点の円柱灯笼の転倒方向とは 40～60 度斜交する。常夜灯の転倒方向は、全体にばらつくものの、東方向と、これと 180 度反転する西方向に集中する傾向が認められる (Fig. 8)。転倒方向を計測した 105 基の常夜灯うち、83 基の転倒方向は灯笼の辺の向きと概ね同じ (直交または平行) で (Fig. 5A)、22 基の転倒方向は辺の向きとは斜交する (Fig. 5B)。これらの転倒方向の全体に占めるその割合は、前者が 79% で、後者が 21% を占める。

同一地点で複数の常夜灯の転倒がみられる 37 地点のうち、11 地点で転倒方向が一致し (Fig. 8A の Locs. a～k)、16 地点で概ね直交し (Fig. 8A の Locs. a, e, f, g, k～v)、6 地点で互いに逆方向を示す (Fig. 8A の Locs. p, t, w～z)。

考 察

地震動センサーとしての常夜灯および円柱灯笼—2007 年能登半島地震において、加藤ほか (2008) は、34 基の常夜灯の転倒方向を計測し、その 85% で灯笼の辺の向きと概ね同じで、15% で辺の向きとは斜交することを報告した。また、本研究においても、同様に、常夜灯の転倒方向は辺の向きと同じ方向を示す傾向が認められた。また、同一地点で複数の常夜灯の転倒がみられる場合の各地点の転倒方向は、互いに 90 度もしくは 180 度の位置関係にあることが多い。以上より、常夜灯の転倒方向は、構成する部位の正方形の水平断面の影響を強く受けていると判断される。

また、加藤ほか (2008) は、2007 年能登半島地震により転倒した 92 基の円柱灯笼と 45 基の常夜灯を調査し、転倒した構成部位毎の転倒数全体に占める割合は、竿から上部の転倒が円柱灯笼で 95%、常夜灯で 51%、中台から上部でともに数% となることを報告した。これらの値は震央との位置関係や地盤条件の異なる本研究の調査結果と調和的である。このことから、円柱灯笼と常夜灯の転倒部位の割合の相違は、形状の違いによるものと考えられる。すなわち、円柱灯笼の竿は常夜灯の竿と比べてより、その底面の幅に対する高さの比率が大きい。さらに、常夜灯には、

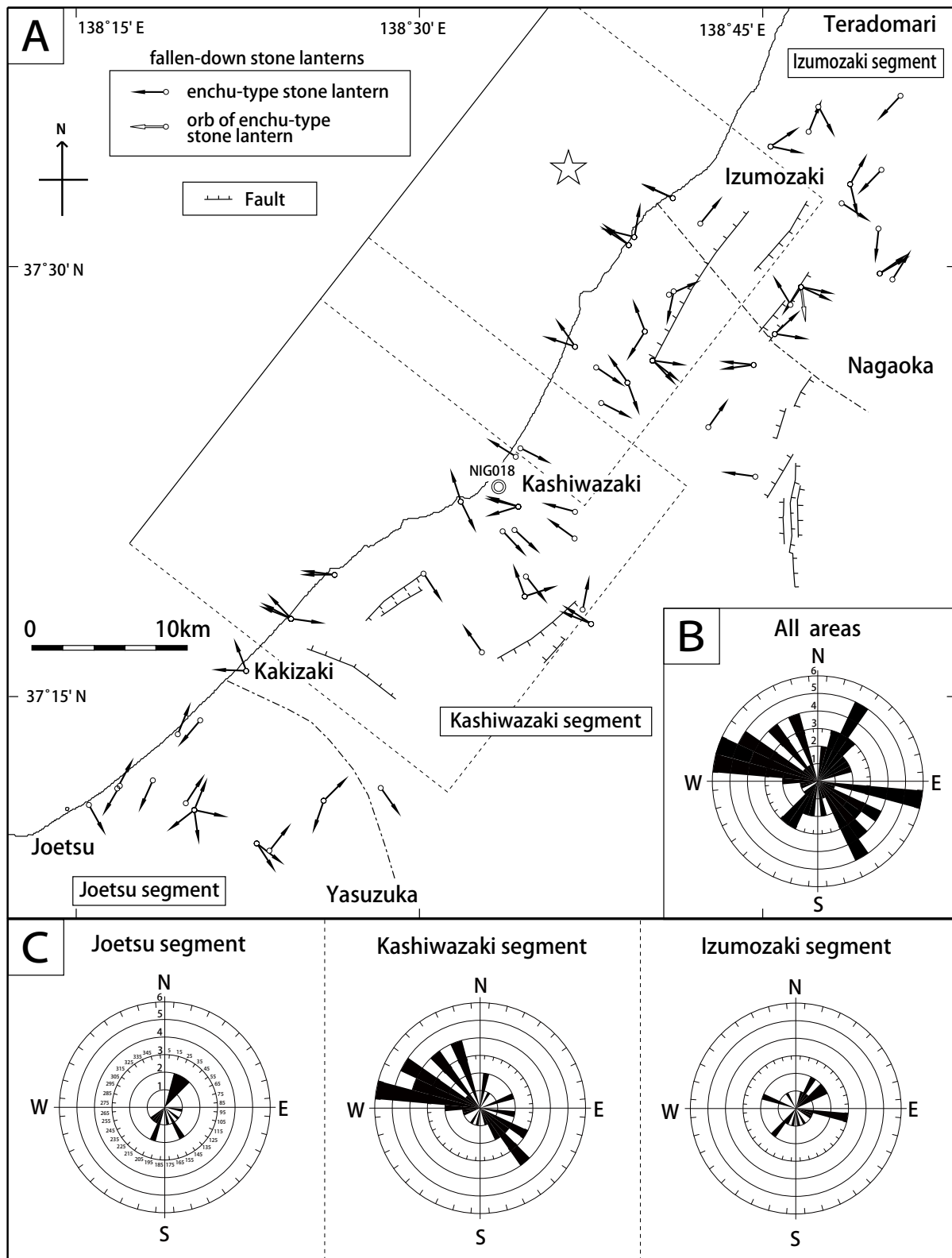


FIGURE 7. A-B, Fall-down directions of enchu-type stone lanterns in the Joetsu and Chuetsu areas, Niigata Prefecture. Active faults traces are based on the Research Group for Active Faults of Japan (1991). Double circle indicates K-NET stations, which is operated by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention; C, Fall-down directions of enchu-type stone lanterns in the Joetsu, Kashiwazaki and Izumozaki areas shown in Fig. 7A.

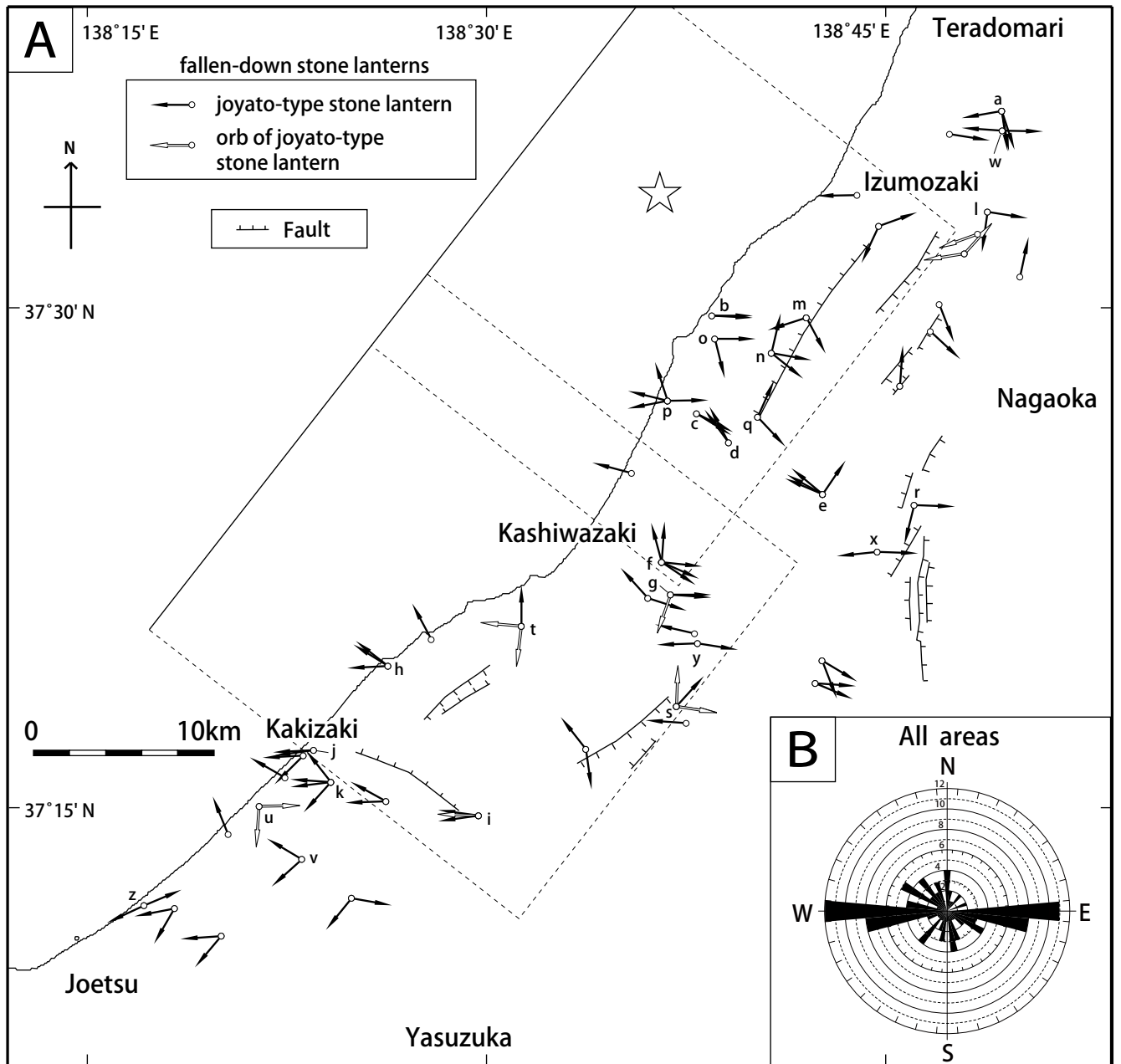


FIGURE 8. A, Fall-down directions of joyato-type stone lanterns in the Joetsu and Chuetsu areas, Niigata Prefecture. Active faults traces are based on the Research Group for Active Faults of Japan (1991); B, Fall-down directions of joyato-type stone lanterns in the area shown in Fig. 8A.

先述した水平断面形状による転倒方向の規制がある。このような理由から、円形の水平断面を持つ円柱灯笼は、常夜灯に比べて、地震動の方向を示す有効なセンサーであるといえる。

転倒方向と K-NET の地震波形との比較—円柱灯笼の転倒方向と地震動の対応関係を調べるため、強震記録 (K-NET) より算出した水平変位と比較を行った。変位の算出は、K-NET の加速度強震波形を基に、齊藤 (1978) の漸化式を用いてフィルターをかけ、0.1kHz ~ 20kHz の

領域のデータを使用している。また、算出する加速度波形の横軸の時間は、観測点における地震波到達時刻の 15 秒前を 0 秒とした時間 (sec) である。

NIG018 (柏崎) との対応関係に用いる円柱灯笼は、観測点から半径 6 km 以内の計 11 基とする。これらの転倒方向は、南東と北西~西北西方向が卓越し (Fig. 9D)、柏崎地区 (Fig. 7) の全体の傾向を代表する。一方、K-NET より算出した地震動は地震波到達 (15 秒) から 27.7 秒まで北西-南東方向へ振動する水平変位 (Figs. 9A, 9B, 9C)

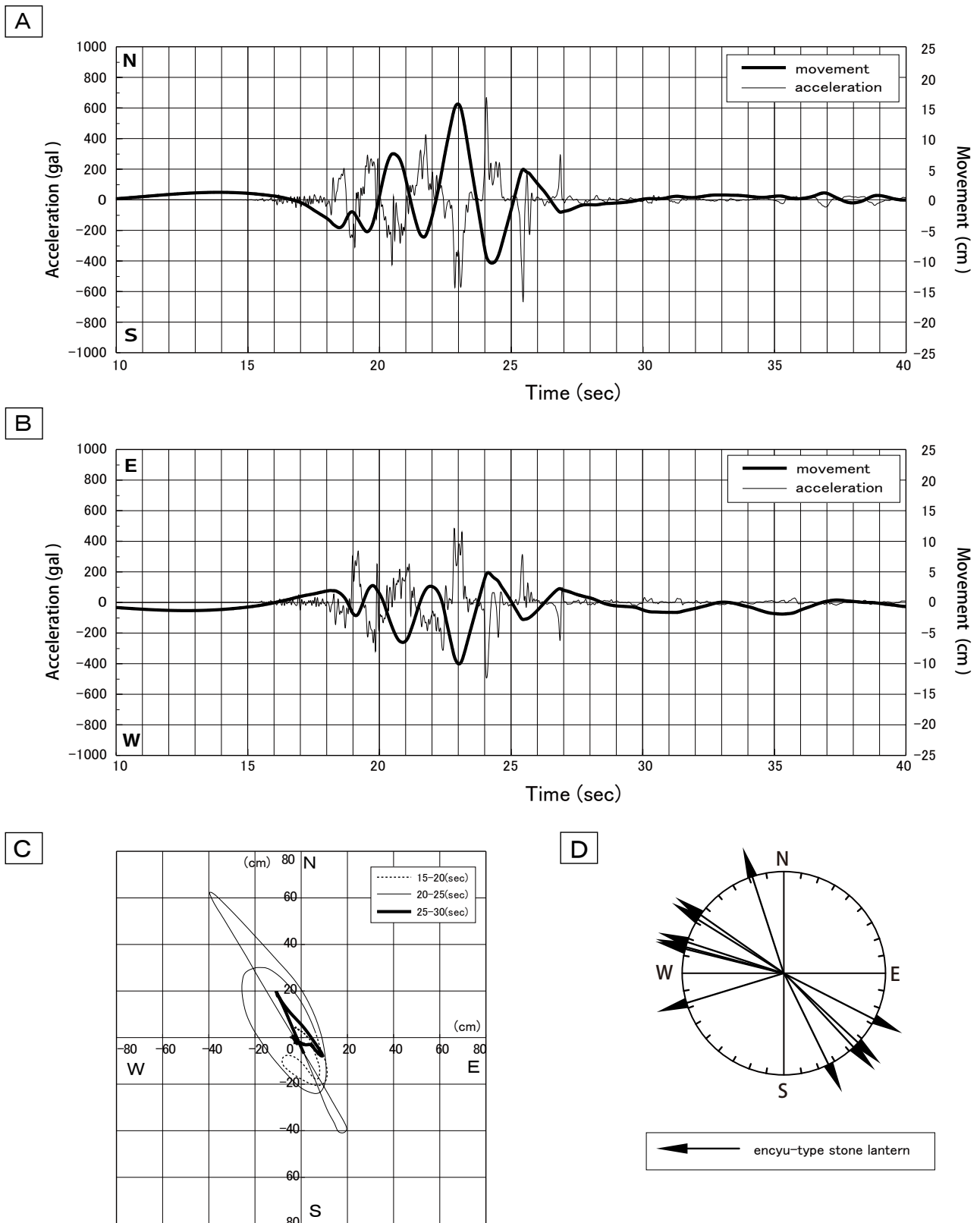


FIGURE 9. A, Temporal variation of acceleration and ground movement in N-S direction at Kashiwazaki (NIG018); B, Temporal variation of acceleration and ground movement in E-W direction at Kashiwazaki (NIG018); C, Horizontal particle motion of ground movement at NIG018 site; D, Fall-down directions of enchu-type stone lanterns within 6 km from NIG018 site.

が卓越し、円柱灯籠の転倒方向と概ね調和的である。

なお、柏崎の K-NET 観測点においては、強い非線形効果を受けたことが考えられているが（防災科研，2007）、現地では液状化の痕跡は確認されていない（吉田ほか，2007）。また、K-NET 柏崎が設置されている建物の敷地内に設置された自治体震度計の記録した計測震度と加速度波形を比較し、K-NET 柏崎の波形が、ごく表層の液状化等の影響によるものではなく、有る程度のエリアを代表する地震動を記録したものであると考えられている（防災科研，2007；青井ほか，2007）。

本地点においては一貫して北西－南東方向に振動する水平変位が認められるため、どの段階で円柱灯籠の転倒が生じたかが不明である。一方、加藤ほか（2008）では、2007 年能登半島地震において、K-NET 近傍の円柱灯籠の転倒が、S 波の立ち上がりから 5 秒以内の K-NET より算出した水平変位に対応することを報告している。従って、変位の大きさ等から考えて、比較的初期の段階に転倒した可能性が高い。

本研究の調査結果と既存の調査結果（柏木ほか，2007a；加藤ほか，2008）より、K-NET 近傍の円柱灯籠の転倒方向は、K-NET より算出される水平変位と概ね対応していると考えられ、円柱灯籠は地震による振動方向を理解するためのツールとして利用可能であることが追認された。

円柱灯籠の転倒方向より推定される地震動および地震変動との対応—本研究の結果、円柱灯籠の転倒の卓越方向から、2007 年新潟県中越沖地震の被害地域は 3 つの地区に分けられる（Fig. 7）。また、先述の検証より、円柱灯籠の転倒方向は初期の地震動を鋭敏に反映した結果と考えられる。従って、地震動の卓越方向は、調査地域内で異なっていた可能性がある。このうち、震源断層沿いに位置する柏崎地域では、震源断層に直交する北西－南東方向の地震動が卓越していたと考えられる。このように、震源断層沿いで断層に直交し、それ以外の地域で震源断層に平行になるパターンは、逆断層型の地震によって生じる理論的な地震動（理論地震動研究会編，1994）で理解が可能である。

まとめ

1. 円柱灯籠と常夜灯の転倒は、震央から北東～東方向でそれぞれ約 20 km 離れた寺泊－長岡まで、震央から南西方向で約 50 km 離れた上越まで見られた。調査地域は、円柱灯籠の卓越する転倒方向から 3 つの地区に区分できる。震源断層沿いの柏崎地区では北西－南東方向、それ以外の出雲崎地区では北東方向、上越地区では北東－南西方向が卓越する。

2. 常夜灯の転倒方向は、構成する部位の正方形の水平断面の影響を強く受けていると判断される。また、円柱灯籠と常夜灯の転倒部位の割合の相違は、形状の違いによるものと考えられる。よって、円形の水平断面を持つ竿から上部で転倒する円柱灯籠は、地震動に対し鋭敏に反応したと考えられる。

3. K-NET の NIG018（柏崎）とこの観測点から半径 6 km 以内の円柱灯籠の転倒方向を対比した結果、この範囲の転倒方向は、柏崎地域の全体の傾向を代表する南東と北西～西北西方向が卓越し、地震波到達から北西－南東方向

へ大きく振動する K-NET より算出した水平変位と概ね調和的である。このことから円柱灯籠は地震による振動方向を理解するためのツールとして利用可能であることが追認された。また、円柱灯籠の転倒方向の震源断層に対する分布は、逆断層型の地震によって生じる理論的な地震動で理解が可能である。

謝辞

富山大学理学部（当時）の川下裕之氏、柳井啓宏氏には調査をお手伝いいただいた。愛知工業大学の倉橋 奨氏には、K-NET データの解析方法についてご指導頂いた。東北大学東北アジア研究センターの石渡 明氏、独立行政法人産業技術総合研究所の寒川 旭氏、福井県立恐竜博物館の紀要編集幹事の一鳥啓人氏には、査読及び編集を通して、本稿を改善する上で有益な御意見を賜った。ここに記して感謝します。なお、本研究には、防災科学技術研究所の K-NET のデータを用いた。本論文の図の一部は GMT（Wessel and Smith, 1998）を用いて作成した。

引用文献

- 青井 真・功刀 卓・中村洋光・吉田 望・若松加寿江・藤原広行・白坂光行. 2007. 2007 年新潟県中越沖地震後の K-NET 柏崎 (NIG018) の様子. 日本地震学会講演予稿集 2007 年度秋季大会: 185.
- 独立行政法人防災科学技術研究所. 2007. K-NET 柏崎 (NIG018) に関して. http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/topics/chuetsuoki20070716/K-NET_Kashiwazaki.pdf
- 石渡 明・小栗尚樹・原田佳和. 2009. 岩手・宮城内陸地震 (2008) の墓石転倒率分布とその地質学的考察. 東北アジア研究 13: 1-16.
- 柏木健司・道家涼介・大藤 茂. 2007a. 円柱灯籠の転倒調査から推定される 2007 年能登半島地震の地震動. 第 46 回日本地すべり学会研究発表会講演予稿集: 293-294.
- 柏木健司・道家涼介・大藤 茂. 2007b. 地震時およびその後における墓石灯籠のノンテクトニックな変形の識別方法. 日本地質学会第 114 年学術大会講演予稿集: 281.
- 活断層研究会編. 1991. 日本の活断層－分布図と資料. 東京大学出版会, 東京, 437 pp.
- 加藤清次・道家涼介. 2008. 2007 年新潟県中越沖地震時の円柱灯籠の転倒. 日本地質学会第 115 年学術大会講演予稿集: 262.
- 加藤清次・柏木健司・道家涼介・香川 真・小林裕幸・野村彩香・藤川浩一・田縁陽一・小宮路清孝・石若寛子・松井隆志・須田明弘・厨井 満・佐伯 孝・米林 博・野坂泰弘・林 昭司・増山孝行・吉澤杉洋・米丘 誠・松元啓輔. 2008. 2007 年能登半島地震による能登半島南部地域の墓石・灯籠の変位について. 福井県立恐竜博物館紀要 7: 45-66.
- 気象庁. 2007. 災害時地震・津波速報 平成 19 年 (2007 年) 新潟県中越沖地震. <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/>

- books/saigaiji/saigaiji_200703.pdf (災害時自然現象報告書 2007 年第 3 号)
- 国土地理院. 2001. 数値地図 50 m メッシュ (標高) 日本 - II. 財団法人日本地図センター, 東京.
- 大橋昭光・岩崎敏男・川島一彦. 1978. 墓石の転倒状況からみた 1978 年 1 月伊豆大島近海の地震による地震動強度の推定. 土木研究所資料 1399 : 39.
- 斉藤正徳. 1978. 漸化式デジタル・フィルターの自動設計. 物理探鉱 31 : 112-135.
- Ozawa, T. 2008. Coseismic deformation of the 2007 Chuetsu-oki earthquake derived from PALSAR/InSAR and its fault model. *Earth, Planets and Space* 60 (11) : 1099-1104.
- 理論地震動研究会編. 1994. 地震動—その合成と波形処理. 鹿島出版会, 東京, 256 pp.
- Wessel, P., and W. H. F. Smith, 1998, New, improved version of the Generic Mapping Tools released. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 79 : 579.
- 吉田 望・後藤浩之・若松加寿江・福元俊一・三上武子. 2007. 2007 年新潟県中越沖地震における K-NET 柏崎の観測波形について. <http://www.civil.tohoku-gakuin.ac.jp/yoshida/inform/chuetsuoki/k-net.pdf>