

1995年兵庫県南部地震の破壊成長過程

—地震のブライトスポットと跳び石—

梅田 康弘¹⁾

1. はじめに

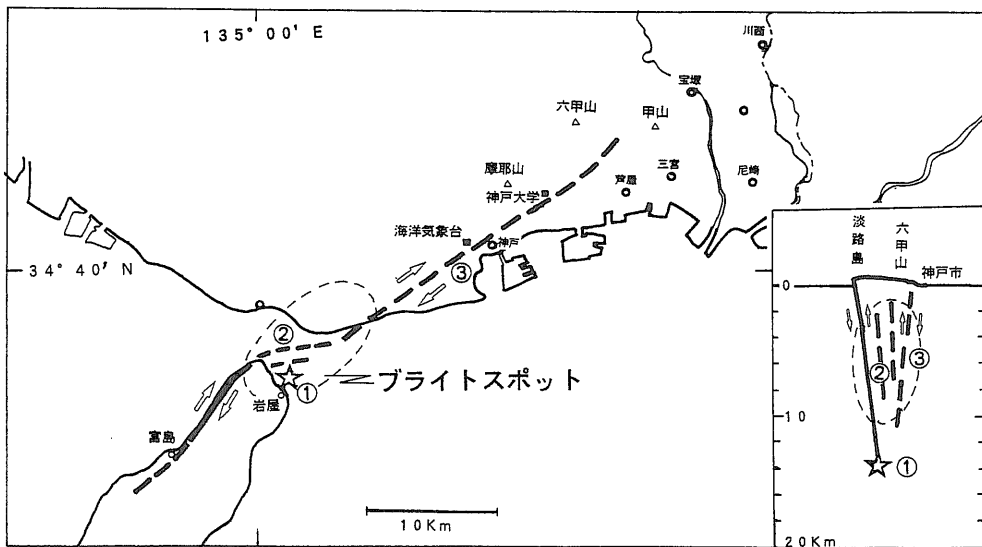
1995年1月17日に発生したM7.2の地震は神戸市とその周辺地域に甚大な被害をもたらせた。制定以来初めてという震度7, そしてあちこちで見られたビルや橋桁の衝撃破壊。このような大きな被害を引き起こした地震の破壊過程とはいったいどんな様子だったのだろうか。

菊池(1995)は、いち早く遠方の地震波形記録を用いた解析を行い、全体的な震源過程モデルを提出した。近地の地震記録を用いた解析(石原, 1995)の他、近くの強震計記録を用いたやや詳しい破壊モデルも、橋本・宇平(1995), 井出ほか(1995), 筧ほか(1995), 堀川・梅田(1995)等によって提案さ

れている。また多田ほか(1995)によって測地学的データに基づいた断層モデルも提案されている。

破壊過程を知る上で時刻歴をもつ地震記録は最有力データではあるが、それだけでは充分とは言えない。例えばよく行われるインバージョン法では分解能の制約から破壊過程の絶対的な位置や細部の記載に限界がある。特に高周波地震動の発生源については一般的な方法ではわからない。

本論では、地震波形の解析結果に基づきつつ、余震観測、断層調査あるいは巨大歪計としての明石海峡大橋のずれ、海底調査など破壊過程を知る上で重要な多くの観測データを考慮して本震の破壊成長過程を議論したい。



第1図 兵庫県南部地震の断層モデル。①, ②, ③は破壊の順。右下に挿入した枠内は断面図。

1) 京都大学防災研究所: 〒611 宇治市五カ庄

キーワード: 兵庫県南部地震, 破壊成長, 地震のブライトスポット, 断層のステップオーバー, 跳び石, 衝撃破壊

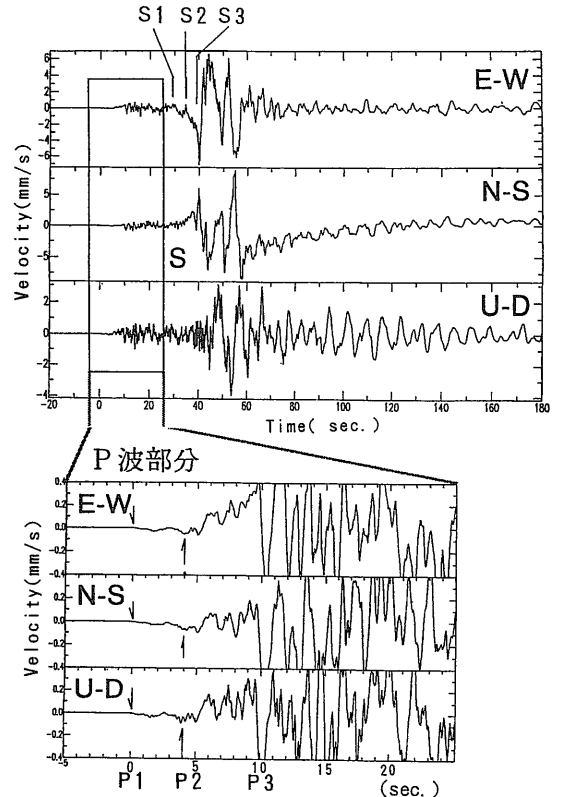
2. 兵庫県南部地震の破壊成長過程

1月17日05時46分52秒、最初の破壊が明石海峡の直下14 km から出発した(第1図の①)。初めはゆっくり野島断層(N45°E)の基底部分を円形状に拡大していった。約4秒後から断層運動は次第に加速しはじめ、明石海峡直下に次々と新しい破壊面(N72°E~N86°E)を形成していった(第1図の②)。これらの破壊群によって衝撃的な地震動が発生した。この領域を地震のブライトスポットと呼んでいる。破壊群は互いに干渉しあって小断層に止まったが、比較的干渉の少ない東外側の新たな破壊面だけが須磨海岸直下よりN55°E方向に大きく成長した。この時点で大局的な断層運動は淡路島の野島断層から神戸の新断層にステップオーバーした。野島断層の破壊は7~8秒後に終了したが、神戸市直下での断層運動はやや低速ながら成長し続け、9秒後に大きな破壊を引き起こした後、およそ13秒後に終了した。

3. 地震波形の特徴

京都大学上宝観測所の広帯域速度型(STS)地震計による本震記録を第2図に示した。波形の特徴を詳しく見るために図の下にP波部分の拡大記録を示した。P1, P2, P3と印したように、この地震は3つの破壊段階から成りたっていることがわかる。3つのうちP1からP2までの間は初期破壊と呼んでおり、非常に低周波・小振幅の波動で、その継続時間はおよそ4秒である。初期破壊の後、速度振幅は次第に大きくなると共に短周期波が重なってくる。そして3つ目の破壊は同図上のS3にも見られるように最も大きく、卓越周期は約6秒である。但し、上宝観測所の震央距離は280 km あるので、S3以降には表面波が卓越していると思われる。

震源情報を得るにはもっと震源に近い観測点が有利であるが、逆に3つの破壊段階を分離することが難しくなる。というのは(S-P)時間が9秒以下の観測点ではP3波以前にS1が到達し両フェイズが混在するからである。これらの分離が可能で最も震源に近い観測点として、断層の走向と直交方向に120 km 離れた久米観測点の速度型強震計記録を第3図に示した。3つ目の破壊によるP3は大振幅・



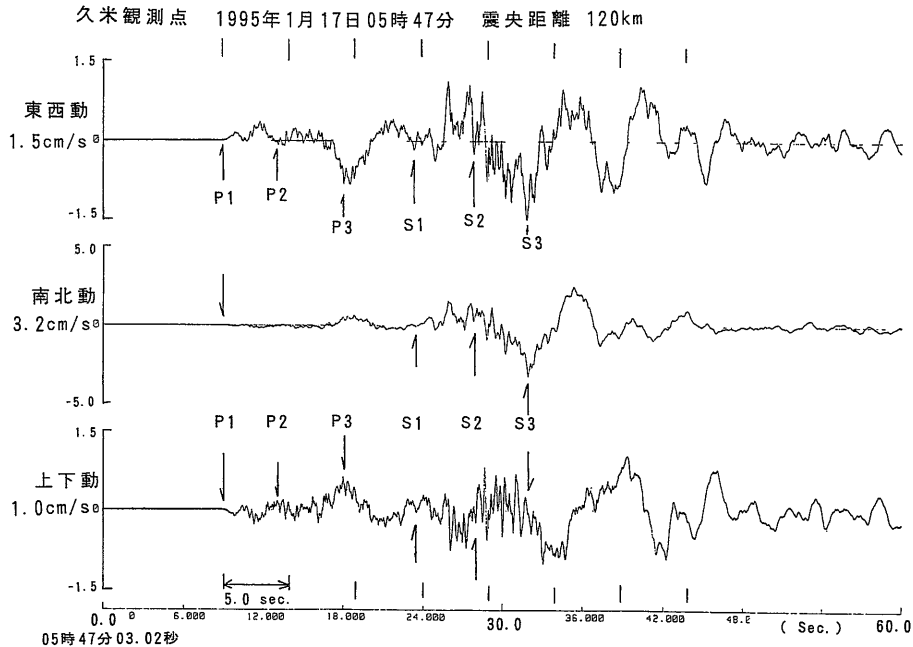
第2図 上宝観測所(137.3269°E, 36.2800°N)における広帯域速度型地震計(STS)による本震記録。上は全波形、下はP波のはじめの部分拡大した。記録は澁谷拓郎氏提供。

長周期であること、またS2と印した前後の短周期波は非常に大きい事がわかる。なお、S3以降にはやはり表面波が卓越すると思われるので振幅はともかくとして、その周期はP3に続く波のそれと同じく6秒と長い事に注目したい。

前節で2番目の破壊の大振幅の短周期波は明石海峡直下での破壊群によると述べたが、その証拠やメカニズムはどのようなものであろうか。

4. 兵庫県南部地震のブライトスポット

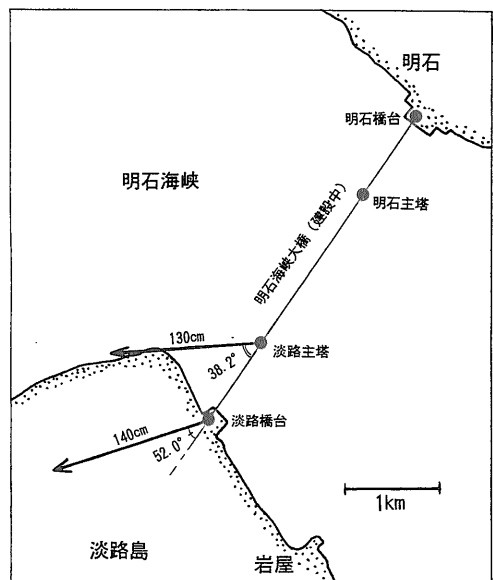
最も強烈な波動を放出したと思われる領域が海底であるため、目に見える証拠は少ない。しかし、架設工事中の明石海峡大橋が巨大な歪計となって海底のずれを測定してくれた。第4図に示したように淡路島側の主塔と橋台が明石側のそれらに対して南西方向にずれているが、それぞれ少しづつ違った方向と大きさを示している。このことは明石側と淡路



第3図 久米観測点(133.8491°E, 35.0885°N)に於ける速度型強震計(VSE)による本震記録。

主塔の間に1本の、さらに淡路主塔と淡路橋台の間にもう1本の、少なくとも2本の断層が明石海峡直下に形成されたことをこの巨大歪計が教えている。第1図に点線で示した明石海峡の2つの推定断層は、この事実に加え第4図のずれベクトルをも考慮して描いてある。海上保安庁水路部(1995)の調査によれば、さらに東の海底にも新断層が見つかり、明石海峡直下には多くの小断層が形成されたことは確かである。

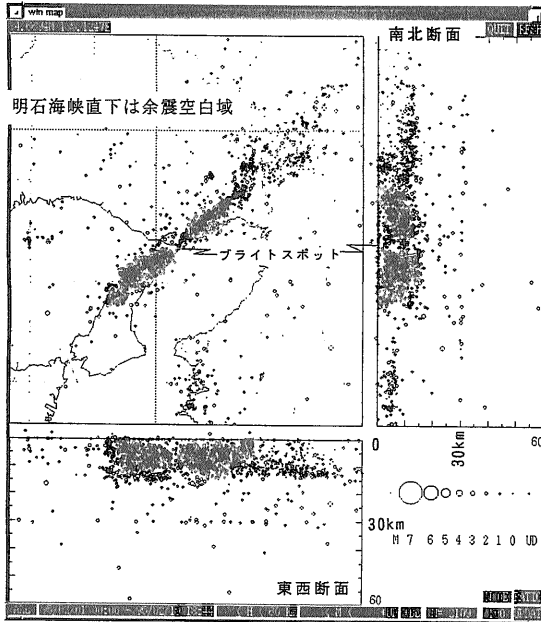
大学連合の兵庫県南部地震緊急地殻活動調査(1995)による余震分布を第5図に示した。明石海峡付近では余震が非常に少ない。このことは、いくつもの断層が空間的に形成されたことにより、ストレスも空間的に解放されたため、その領域では余震発生能力が無くなったものと考えられている(例えば、Umeda, 1992)。また、いくつもの破壊が相互作用をしながら進展と停止を繰り返すために、そのつど放出される短周期波が重畳して大振幅の波動になる(Yamashita and Umeda, 1994)。前節で述べたようにこのような領域を我々は地震のブライトスポットと呼んでいる。第3図のS2付近に見られるように強烈な短周期波が集中的に放出されるため、ブライトスポットではしばしば“跳び石現象”が見ら



第4図 明石海峡大橋の主塔と橋台のずれ(朝日新聞3月8日朝刊による)。

れる。

いくつもの断層群のうち最も相互作用を受けない外側の、今回の地震では最も東側の断層のみがすり抜けて、すなわちステップオーバーして神戸市直下



第5図 兵庫県南部地震緊急地殻活動調査グループ(GROUPS-95)による余震分布。ブライトスポットは余震が非常に少ない。

の大断層に成長した。

5. 跳び石

柳谷・梅田(1995)による入念な調査にもかかわらず、発見された跳び石の数は今回の地震では非常に少ない。余震空白域から推定されるブライトスポットの領域の大半が明石海峡ということもあるが、神戸市垂水区の余震空白域においても跳び石は今のところ発見されていない。

北淡町梨本地区の道路わきの跳び石の例を写真1と第6図に示した。直径30 cmほどのこの石は、断面図でわかるように低いところからやや高い方向へ54 cm 移動していること、もとの位置と石の間の草や小石を傷つけていないことから、跳び上がったことは間違いない。第6図の平面図にA, B, C, Dと印したようにこの石は反時計まわりに約65°回転していた。

梨本で地表に出現した断層から100 m くらい離れたこの付近では、他にもその場で反転した石やずれた石が見つかっている。今回発見された跳び石の分布は断層に沿っているが、震源に近いブライトス

ポット内では拳程度の大きさの跳び石が主で、むしろ断層の北東端の芦屋市奥池で直径2 mほどの大石がずれている(柳谷, 1995)という特徴がある。

6. 2段階時間差打撃による被害

地震規模, M7.2の平均的な卓越周期(T)は笠原の式(例えば, 宇津ほか, 1987)

$$\text{Log}T = 0.51M - 2.95$$

によれば5.3秒である。3節で述べたように今回の地震の長周期成分は6秒程度であり、笠原の式から期待される値と一致する。一方、第3図でS2付近の卓越周期は0.5~1.5秒と非常に短い。関西地震観測研究協議会(香川, 1995)によって得られた神戸大学における速度型強震計(第3図の久米観測点と同じ地震計)記録でもS2付近の1.5秒程度の短周期波が最大振幅になっている。

このような周期の異なる2種類の波動の出所をもう1度確認しておきたい。S2付近の強烈な短周期は、破壊開始のおよそ4秒後から極めて短時間の内に集中的に放出されたが、この時点では破壊はまだ地表に達していない。気象庁発表の震源、すなわち破壊出発点の深さは14 kmである。最初の破壊は波形の低周波・小振幅から見て非常にゆっくりだったと思われるので、破壊伝播速度を仮に2.0 km/s とすると、4秒後の破壊先端は地表下6 kmに達したところである。すなわち、強烈な短周期波放出はもっぱら明石海峡直下の出来事であり、ここがこの地震のブライトスポットである。その後、第3の破壊が神戸市直下で発生した。破壊開始の9秒後のことで、P3, S3 フェーズに見られるように約6秒の長周期波が放出された。

最初の初期破壊は小さなものでほとんど被害には影響なかったと思われる。しかし、ブライトスポットから出た衝撃的な波動は多くの建造物にクラックを生じさせるなど、耐久力を著しく低下させたと思われる。それだけならば持ちこたえたかもしれないが、続く長周期の波動によって大きくゆすぶられた結果ついには倒壊してしまったものも少なくないと思われる。

初めに衝撃的な短周期波、続いて長周期大振幅の波が襲うという、いわば2段階時間差攻撃タイプの地震が被害を著しく大きくした。実は震度7が

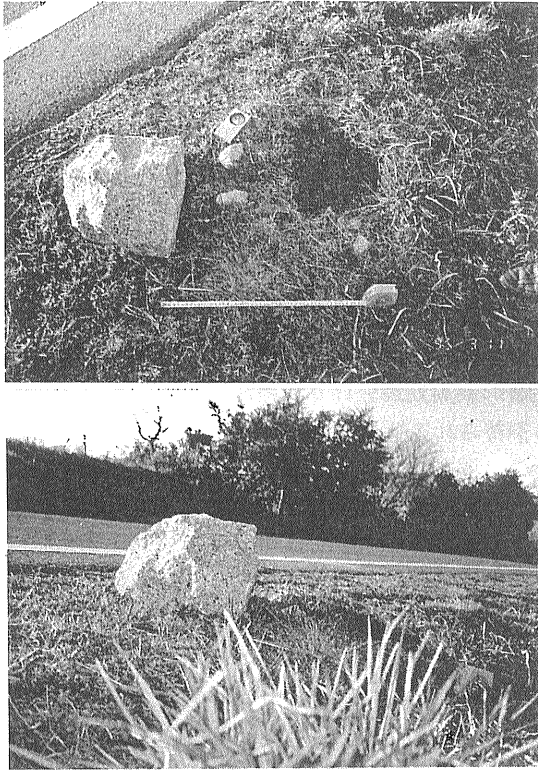
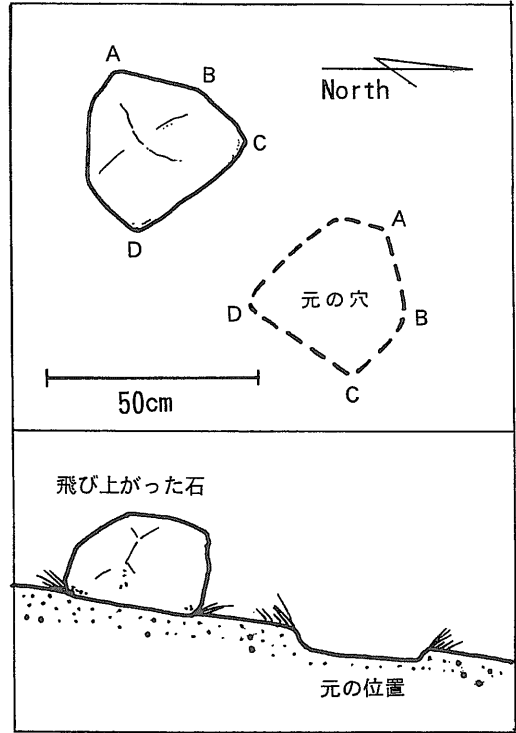


写真1 地震で跳んだ石(第6図の石)。北淡町梨本。
上の写真は上部から、下は側面から撮った。



第6図 地震で跳んだ石(写真1の石)。上：平面図、
下：側面図

制定された福井地震はまさにこのタイプであったことが既に指摘されていた(梅田, 1988)。

7. ま と め

1995年兵庫県南部地震は3つの段階を経て大きく成長した。初めはゆっくりした破壊が、明石海峡直下14 kmの深さから上方へ伝播した。破壊は次第に加速し、約4秒後には複数の断層が一斉に破壊することによって強烈な短周期波がほとんど一瞬の内に放出された。これが第2の破壊であり、この領域すなわち明石海峡直下にブライトスポットが形成された。ここでは今も余震が発生しない、いわゆる余震空白域となっている。また複数の副断層の存在が明石海峡大橋の主塔や橋台のずれ、あるいは海底調査によって確認されている。

今回の地震による跳び石は多くはなかった。特にブライトスポットでは少数の小石が跳んだ程度であった。むしろ断層に沿った北東端で直径2 m以上

もの大石のずれが見られた。

断層運動は、破壊開始より9秒後に神戸市直下で長周期波を放出する第3の破壊を引き起こした。神戸市や芦屋、西宮市ではブライトスポットからきた衝撃的な短周期波と、しばらく遅れてきた直下からの長周期波の2回の打撃を受けた。

このような時間差のある2段階打撃は、震度7が制定された福井地震と酷似しており、甚大な被害を引き起こした震源過程の特徴である。

文 献

朝日新聞(1995)：3月8日朝刊，13版。
橋本徹夫・宇平幸一(1995)：兵庫県南部地震の近地強震波形による震源過程解析。地球惑星科学関連学会1995合同大会ポスター，Q143。
堀川晴央・梅田康弘(1995)：強震計記録を用いた兵庫県南部地震の震源過程の解析。内陸地震の不均質と地震活動に関する研究集会，2月28日，京都大学防災研究所。
兵庫県南部地震緊急地殻活動調査グループ(1995)：大学合同による兵庫県南部地震緊急地殻活動調査。地球惑星科学関連学会1995合同大会ポスター，Q154。
井出 哲ほか(1995)：強震波形に基づく兵庫県南部地震の震源過程(副断層上の震源時間関数の推定)。地球惑星科学関連学会

- 1995合同大会ポスター, Q144.
- 石原 靖(1995): 近地広帯域記録の解析による1995年兵庫県南部地震の破壊過程. 地球惑星科学関連学会1995合同大会ポスター, Q145.
- 香川敏生(1995): 平成7年兵庫県南部地震による関西地震観測研究協議会の観測記録. 地球惑星科学関連学会1995合同大会ポスター, Q149.
- 海上保安庁水路部(1995): 第113回地震予知連絡会資料.
- 寛 楽麿・入倉孝次郎・干場充之(1995): 強震加速度記録のエンベロープ・インバージョンによる兵庫県南部地震の断層面上の高周波生成域の推定. 地球惑星科学関連学会1995合同大会ポスター, P149.
- 菊池正幸(1995): 兵庫県南部地震の震源過程モデル—遺地の地震波解析速報—. 地質ニュース, no. 486, 12-15.
- 多田 堯・橋本 学・鷲谷 威(1995): 1995年兵庫県南部地震に伴った地殻変動と断層モデル. 地球惑星科学関連学会1995合同大会ポスター, Q133.
- Umeda Y. (1992): The bright spot of an earth-quake. *Tectonophysics*, **211**, 13-22.
- 梅田康弘(1989): 双発型福井地震. 月刊地球 **11**, 47-51.
- 宇津徳治・嶋 悦三・吉井敏烈・山科健一郎(1987): 地震の事典, 朝倉書店, 244p.
- Yamashita, T. and Umeda, Y. (1994): Earthquake rupture complexity due to dynamic nucleation and interaction of subsidiary faults. *PAGEOPH*, **143**, 89-116.
- 柳谷 俊・梅田康弘(1995): 1995年兵庫県南部地震による跳び石の調査. 地球惑星科学関連学会1995合同大会ポスター, Q151.
-
- UMEDA Yasuhiro (1995): Rupture growth process of 1995 Southern Hyogo prefectural earthquake.
-
- 〈受付/受理: 1995年5月8日/5月10日〉

古文書に残る強震動の記録

今年(1995)1月に起こった神戸の地震(兵庫県南部地震)では, 甚大な被害をもたらした原因のひとつとして, 強い上下動を含む激しい揺れが注目された。日本ではこれまで経験したことの無い「未曾有」で「予想外」の地震動であったかのような報道もなされた。今回の地震は本当に「空前絶後」だったのであろうか。歴史地震に詳しい専門家の間ではよく知られている強震動の記録の中から, 編集過程で気づいた2つの例を紹介しよう。いずれも震源が近かったとみられ, 上下動の激しかった例である。

1. 1799年加賀の地震(M6.0±1/4, 一説に6.6-7.0)

金沢に大きな被害をもたらした。宇佐見龍夫著『新編日本被害地震総覧』には, 以下のような記述がある(p. 99)。「上下動が激しかったらしく, 屋根石が1尺(30 cm)とび上がったたり, 石灯笼の竿石が6尺(1.8 m)とび上がったたり, 田の水が板のようになって3-4尺(約1 m)上がったなどという記事が見える。」

2. 1855年安政江戸地震(M6.9)

江戸下町を中心に震度6-7の激しい揺れが襲い, 死者1万人にのぼる被害をもたらした都市直下型の地震である。石橋克彦著『大地動乱の時代』には以下のような記述がある(p. 41)。「江戸では全般に

上下動がきわめて強かったらしい。高輪東禅寺(港区南部)では, 山の上に四本足の鐘楼があったが, 2本の足を残して山の下に飛び落ち, 2本足で地面に刺さっていた。たぶん, 地球の引力を超える上向きの地震動によってほうり上げられたのだろう。」

なお, この地震では, 幸い風が穏やかだったため火災が余り拡大せず, 消失面積は大正関東地震の1/17程度ですんだ。死者の多くは圧死者であった(石橋, 1994)。

地震動の性格は, 一つひとつの地震により異なり, また同じ地震でも場所により異なる。従って, 強震計で得られたデータだけを耐震設計の基準値として絶対視したり, 数値化されていないからとして古文書の記述を無視したりするのは, 科学的ではなく危険であろう。古文書に残る祖先の貴重な経験が, 理学と工学の双方から注目され, 今後の地震防災に充分活かされるようになってほしいものである。

(地質ニュース編集委員会 佐藤興平)

文 献

- 石橋克彦(1994): 大地動乱の時代. 岩波新書350, 234p.
 宇佐見龍夫(1987): 新編日本被害地震総覧. 東京大学出版会, 434p.