

## 地震断層近傍の地震動と活断層近辺に分布する歴史的建造物

Nearfield Seismic Motions in Relation to Historical Architectures  
close to the Quaternary Active Faults川崎一朗<sup>1</sup>  
Ichiro Kawasaki<sup>1</sup>立命館大学特別招聘教授 歴史都市防災研究センター (〒603-8341 京都市北区小松原北町58)

Professor, Ritsumeikan University, Disaster Mitigation of Urban Cultural Heritage

Many of historical architectures in ancient and medieval ages are located close to the Quaternary active faults which would be sources of coming disastrous inland earthquakes. Points of theoretically synthesized and observed nearfield velocity seismograms due to the seismic faulting at the quaternary active faults are that they are of one or two pulses of pulse widths of a few seconds of up to 1 m/s and that the motions on a hanging wall is dominant to those on a footwall in case of low-angle reverse faulting. Careful earthquake resistance renovation against such nearfield motions should be needed to historical architectures especially on fault cliffs, edges of the hanging wall.

**Keywords:** nearfield seismic motion, Quaternary active fault, historical architecture

## 1. はじめに

本論では、活断層、断層モデルによる断層近傍の地震動、歴史的建造物の三要素を一つの枠組みに置き、歴史的建造物の地震防災の新たな視点を探る試みを行いたい。

京都の歴史的建造物の地震防災にとって、もっとも重要な仮想敵は、発生確率は小さいが、ひとたび発生すると甚大な被害を及ぼす内陸型地震である。マグニチュード（以下Mと略記する）7以上の大型の内陸型地震の多くは、既知の活断層を震源とする。近畿地方は、活動的な活断層が日本でも最も密に分布している場所である。例えば京都盆地では、図1のように、東縁には花折断層、桃山断層、黄檗断層などが南北に走り、西縁では、檜原断層、光明寺断層などが南北に走る。中でも、地震が起こった場合に京都盆地に一番大きな被害を与えると思われるのは花折断層である。地震調査委員会の長期評価<sup>2)</sup>では、花折断層帯中部と南部（花折峠以南）の最新活動時期は約2800年前以後、平均活動間隔は4200年—6500年、地震時の滑りは2mから5mの右横ずれ、想定M7.3とされている。

本論では、長期評価<sup>2)</sup>で扱われた110断層のみを考慮の対象とする。表1は、110活断層うち、京都盆地近辺の活断層を抜き出し、想定される規模と50年発生確率とともに示したものである。京都盆地や奈良盆地の境界には活動的な活断層が多く分布するにもかかわらず、少なくとも平安京が開かれて以来最近1200年間、それらが本格的に動いた地震はなかった。この事実は、逆に奈良盆地や京都盆地は内陸型地震のリスクが高まっていることを意味するものと考えられる。

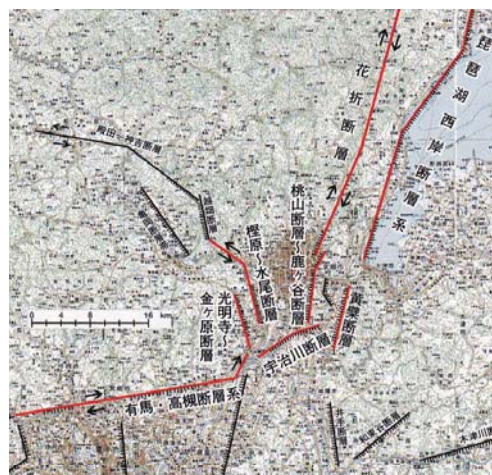


図1 京都盆地の活断層分布。京都市の第3次被害想定<sup>1)</sup>の資料による。

表1. 地震調査委員会の長期評価<sup>2)</sup>において、「我が国の主な活断層の中では活動度が高いグループ」、  
「やや高いグループ」、 「その他」と分類されている京都周辺の活断層と想定M、50年発生確率。

地震調査委員会の長期評価のHPによる。

活動度が高い	想定M	50年確率 (%)	活動度がやや高い+その他	50年確率 (%)
奈良盆地東縁断層帯	7.4	0~7	京都西山断層帯	7.5 0~1
中央構造線断層帯			花折断層帯中南部	7.3 0~1
金剛山地東縁	6.9	0~9	有馬一高槻断層帯	7.5 0~0.06
上町断層帯	7.5	3~5	琵琶湖西岸断層帯南部	7.5 0

以降の議論における歴史地震のMと被害の様相は「最新版 日本被害地震総覧 [416]-2001」(宇佐美、2003)<sup>3)</sup>による。歴史的建造物と活断層の位置関係は、国土地理院の「都市圏活断層図」から読み取った。「地震断層近傍」と言う場合は「地表断層線から2km以内」に限定する。近傍の中でも、特に地震断層線から200m以内の場所を「極近傍」と呼ぶことにする。2kmと200mの数値の意味は第7章で述べる。建造物が震源断層面の地表への投影区域内に含まれると思われる場合は「上盤」という。「断層線」として示すのは、建造物が断層線に接しているか、跨いでいる場合である。なお、断層のうち、地震の時に滑った(食い違った)部分に限定して「震源断層」と呼んで区別する。「地震断層」は震源断層が地表に表れた部分である。次章では、時代を追って、古墳、国府や国分寺、寺院や神社など活断層の関係の事例を挙げていきたい。

## 2. 巨大古墳と活断層

歴史を遡ると、巨大古墳の多くが活断層の上盤近傍に築かれている。例えば奈良県天理市では、奈良盆地東縁断層の上盤近傍に、崇神天皇(在位紀元前1世紀)陵、景行天皇(1世紀から2世紀)陵などの大古墳が並んでいる。

大阪府南部の羽曳野市と藤井寺市に分布する古市古墳群には、仁徳天皇陵に次いで大きな応神天皇(仁徳天皇の父、3世紀から4世紀)陵が、生駒断層系の一部である誉田断層を跨ぐように位置している。周辺では、允恭天皇(5世紀)陵、安閑天皇(6世紀)陵、河内国府とともに上盤に分布している。応神天皇陵の西部を縦断する誉田断層の段差を、日下(1980)<sup>4)</sup>と寒川(1984)<sup>5)</sup>は、1510年摂津・河内地震(M6.5~7.0)によるものとした。平安時代以来の歴史を有する葛井寺は、誉田断層に向き合う羽曳野断層の上盤極近傍に位置するが、戦国時代の戦乱で堂宇はほとんど焼き払われ、焼け残っていた建物も、1510年の地震のときにことごとく倒壊した。

大阪府堺市の百舌鳥古墳群には、図2のように、巨大な仁徳天皇(4世紀)陵が上町断層の低断層崖上に位置している。当時は海が断層崖まで迫っており、仁徳天皇陵からは大阪湾から淡路島を直接眺望できたであろう。

大阪府高槻市の今城塚古墳は、考古学的には継体天皇(6世紀)陵とされている(白石、2001)<sup>6)</sup>が、宮内庁からは陵墓指定されておらず、古墳としての形状が半ば崩壊した状態にある。その原因として、戦国時代に城が築かれたからと考えられてきた。寒川・他(1996)<sup>7)</sup>は、トレンチ発掘調査の結果に基づいて、有馬一高槻断層帯を震源とする1596年慶長伏見地震の時、今城塚古墳の下を東北東-西南西に横断する安威断層(有馬一高槻断層帯の支断層)が動いて古墳地形を大きく崩壊させた可能性を示唆した。

ここでは、古墳の名称として宮内庁によって陵墓指定されてる天皇名を用いたが、考古学的には異なる天皇を想定する見解が主流であることが多い。この点に留意されたい。



図2 上町断層と仁徳天皇陵、履中天皇陵、反正天皇陵。基図は「1:25,000 都市圏活断層図 大阪南西部」の一部。

## 3. 近畿地方の国府や国分寺と活断層

646年(大化2年)、大化改新詔によって律令政治の基本的枠組みが築かれ、全国に国府が置かれることな

った。741年（天平13年）、聖武天皇により国分寺建立の詔が発せられた。国府や国分寺の位置は、「必ず良い場所を選んでまことに長く久しく保つようにしなければならない」という詔に合う立地条件の良い場所が選ばれた。問題は、その場所が、地震学的にどのような場所なのか？である。

特に関西には、国府、国分寺、平安時代に成立した一の宮などが活断層近傍に立地している場合が多い。ここでは、畿内諸国の例を（図3参照）挙げる。単純化して言えば、畿内の5ヶ国の場合、国府、国分寺のほとんどが活断層の近傍（2km以内）に位置し、ほぼすべてが5km以内に位置している。

国府と国分寺の場所は、主として白石太一郎（2001）<sup>6)</sup>、佐藤信（2007）<sup>9)</sup>、佐藤信（2010）<sup>10)</sup>による。ただし、国分寺はほぼ3分の2が発掘遺跡で確定されているが、国府が確定されているのはほぼ4分の1しかない。そのため、存在場所は、単に地名などで比定されているだけの場合も多く、曖昧さがつきまとうことをお断りしておきたい。

(1) 山城国：国府比定地は木津川市山城町上狛、国分寺は木津川市加茂町（恭仁宮）で、いずれも京都盆地・奈良盆地東縁断層の極近傍上盤（4km）にある。

一の宮は京都市内の上賀茂神社（花折断層の下盤近傍5km）と下鴨神社（同下盤近傍1.5km）である。なお、活構造的には、花折断層はほぼ垂直の断層面の横ずれ型であるが、微小地震分布では断層面は東に向かって高角で傾いているので、ここでは、東側を上盤としておく。

(2) 大和国：国府比定地は橿原市大軽町で、奈良盆地東縁断層の西側5kmに位置する。国分寺は東大寺で奈良盆地東縁断層の撓曲地形上にあり、一の宮は桜井市の大神神社で奈良盆地東縁断層の上盤極近傍にある。

(3) 河内国：国府比定地の藤井寺市惣社も、国分寺の柏原市国分東条町も誉田断層の上盤近傍にある。

(4) 和泉国：国府比定地は和泉市府中町で上町断層の下盤（500m）、国分寺は和泉市国分町で上町断層の上盤（6km）、一の宮は堺市西区の大鳥大社で上町断層の撓曲部に位置する。

(5) 摂津国：国府比定地は大阪市北区国分寺で上町断層上盤（2.5km）、国分寺比定地は大阪市北区か天王寺区国分町で上町断層の上盤近傍、一の宮は大阪市住吉区の住吉大社で上町断層の撓曲部にある。

近畿地方の畿内以外でも、国府や国分寺の場所が活断層に近い事例が多い。近江国の場合、国府が大津市三大寺にあり（下盤3km）、遺跡が発掘調査されている。それに接する一の宮の建部神社も、琵琶湖西岸断層の下盤近傍（2.2km）に位置する。丹波国の場合、国分寺の遺跡が亀岡市千歳町（撓曲部）にあり、国府比定地は保津川対岸の千代町か南丹市八木のいずれかで、いずれの場合でも、西山断層帯に属する亀岡断層の下盤（3km）にある。一の宮の出雲神宮はまさに断層線上にある。

活断層近傍には、当時の技術力で制御できる程度の流量の水があり、集落から適当に離れていても人々が集まって来るのには交通の便が良い場所が多かったためであろう。

#### 4. 東山と花折断層

京都盆地の東縁には平安時代以降の歴史的建造物が密に分布している。以下で例示する寺社については、国宝または重要文化財に指定されている代表的な建造物を一棟と、文化庁の「国指定文化財等データベース」<sup>11)</sup>による建造年代を付記した。括弧内に通称などを示す。また、宮内庁は、皇室用財産である京都御所、修学院離宮、桂離宮を、文化財保護法の枠内ではなく、宮内庁で維持していく方針をとっており、国宝にも重要文化財にも指定されていない。しかし、歴史的建造物の範疇に十分入るものと思われるので、ここでは例に含めた。

京都盆地から若狭に至る鯖街道が花折断層に沿っていることはよく知られている。京都盆地では、図4のように、花折断層南部に沿って三千院往生極楽院（阿弥陀堂、1148）（上盤極近傍）、修学院離宮（1655～1659）（断層線）、真正極楽寺（真如堂）（本堂、1717）（上盤近

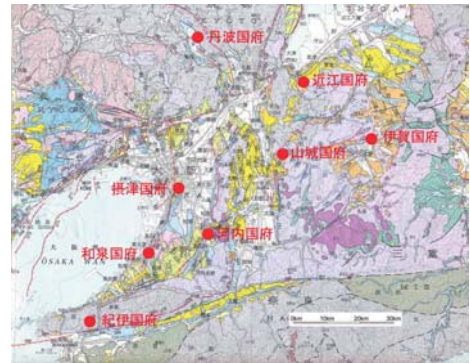


図3 近畿地方中央部の国府の位置（●）と活断層（赤線）。基図は「1:500,000 活構造図京都」<sup>8)</sup>。

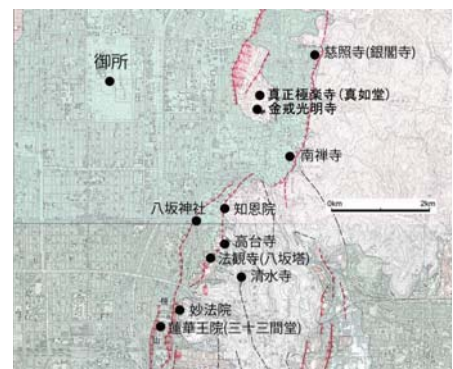


図4 花折断層・桃山断層近傍の歴史的建造物の例。基図は「1:25,000 都市圏活断層図 京都東北」と「同 京都東南」。

傍)、金戒光明寺(三重塔、1634)(上盤近傍)などが分布し、桃山断層に沿って知恩院(本堂、1639)(上盤極近傍)、八坂神社(楼門、1497)(撓曲部)、法観寺(五重塔、八坂塔、1440)(断層線)、南禅寺(方丈、1573-1591)(上盤極近傍)、高台寺(開山堂、1605)(上盤極近傍)、清水寺(本堂、1633)(上盤500m)、妙法院(大書院、1619)(上盤200m)、蓮華王院(本堂、三十三間堂、1266)(下盤100m)、東福寺(三門、1405)(撓曲部)などが密に分布している。吉田山の東側2kmには、花折断層の支断層である鹿ヶ谷断層が平行に走り、慈照寺(銀閣、銀閣寺、1489)(断層線)、南禅寺(三門、1628)(断層線)が分布する。大原三千院、法然院、高台寺などが低崖上に立っていることは、現地を見れば一目瞭然であるが、それは、比高5mから10mの低断層崖である。

花折断層と桃山断層から2kmほど離れているところには、賀茂御祖神社(下賀茂神社)(本殿、1863)、相国寺(本堂、1605)、冷泉家住宅(1790)、京都御所(紫宸殿、1855)、西本願寺(本堂、1760)、教王護国寺(東寺)(大師堂、1380)、京都盆地西縁を走る檜原断層から東2kmに桂離宮(1615)などがある。

山科の盆地東縁を走る黄檗断層に沿って、醍醐寺(五重塔、952)(上盤極近傍)、法界寺(阿弥陀堂、1185-1274)(撓曲部)、平等院(鳳凰堂、1053)(黄檗断層延長上)、宇治上神社(本殿、1086-1184)(黄檗断層延長上)、檜原断層に沿って大覚寺(紫宸殿、1615)(下盤近傍)、松尾大社(本殿、1542)(断層線)などが分布している。奈良盆地東縁では、撓曲や斜面崩壊地形が入り組み、断層地形はあまり明確でないが、新薬師寺(本堂、710-793)、東大寺(法華堂正堂、747)、春日大社(本殿、1393-1466)などが上盤に、興福寺(五重塔、1426)、東大寺(大仏殿、1705)などが撓曲部に分布している。

どの活断層からも2km以上離れているのは、京都盆地では、高山寺(石水院、1185-1274)、賀茂別雷神社(上賀茂神社)(本殿、1864)、広隆寺(講堂、1165)、仁和寺(金堂、1613)、妙心寺(三門、1599)、龍安寺(本堂、1606)、北野天満宮(本殿、1607)、大報恩寺(本堂、千本釈迦堂、1227)、二条城(二の丸御殿、1625-1626)、大徳寺(方丈、1635)、酬恩庵(一休寺)(本堂、1506)、奈良では法隆寺(五重塔、593-709)などしかなく、圧倒的な少数派である。

以上の事例から分かるように、京都や奈良の歴史的建造物は、活断層と切っても切れない関係にあると言えよう。逆に言うと、歴史的建造物の地震防災にとって重要なのは、「活動的な活断層を残らず把握し」、それら活断層の「地震発生リスクを評価し」、「震源断層近傍の地震動の特性を知り」、「対策を提案する」ことであろう。活断層の研究は、「新編日本の活断層」(活断層研究会、1991)<sup>12)</sup>、「近畿地方の活断層」(岡田・東郷編、2000)<sup>13)</sup>などにまとめられている。残りは、「震源断層近傍の地震動の特性を知り」、「対策を提案する」ことである。

## 5. 断層モデルによる地震動

「地震とは活断層のずれ運動である」ことを最初に指摘したのは、1891年濃尾地震(M8.0)の時に出現した根尾谷断層の調査を行った小藤文次郎(Koto, 1893)<sup>14)</sup>であった。本論では、「地震とは断層の突発的なズレ運動である」とする考えを「地震=断層説」と呼ぶことにする。

1906年には、アメリカ西海岸を、カリフォルニア湾からロスアンゼルの東方を通り、サンフランシスコ西方から太平洋に抜けるサンアンドレアス断層の北部セグメントでM7.8のサンフランシスコ地震が起こり、死者約500人の大きな被害が生じた。この地震のあと、地震断層を境にした地面の大きなずれから、Reid(1910)<sup>15)</sup>は断層反発説を提唱した。1963年に至って、地震研究所にいた丸山卓男(Maruyama, 1963)<sup>16)</sup>は、弾性体中に生じた転位から放出される弾性波とダブルカップルによって放出された弾性波とが同じであることを数学的に証明し、「地震=断層説」は最終的に確立された。1968年、プレートテクトニクス説が登場し、地球規模のダイナミクスの基本的枠組みとなり、プレート境界型巨大地震の発生メカニズムが明確になった。例えば、1923年関東大地震は、南関東の下に、30度の低角で沈み込むフィリピン海プレート上面と、上盤の南関東の地殻と

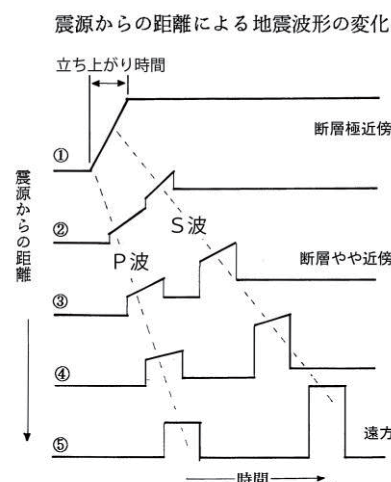


図5 地震動の震源からの距離による変化の模式図。川崎(2006)<sup>18)</sup>による。

の間で発生したプレート境界型の巨大地震であることが分かった。

式(1)は、Maruyama (1963)<sup>16)</sup>の表現式をコンパクトに書き直した、Aki and Richards (2002)<sup>17)</sup>の表現式である。 $u(\mathbf{x}, t)$ を弾性変位、 $Mo(t)$ を震源モーメント関数として、

$$\begin{aligned}
 u(\mathbf{x}, t) = & \frac{1}{4\pi\rho} A^N \frac{1}{r^4} \int_{r/\alpha}^{r/\beta} \tau Mo(t-\tau) d\tau && \text{近地場項} \\
 & + \frac{1}{4\pi\rho\alpha^2} A^{IP} \frac{1}{r^2} Mo(t-\frac{r}{\alpha}) + \frac{1}{4\pi\rho\beta^2} A^{IS} \frac{1}{r^2} Mo(t-\frac{r}{\beta}) && \text{中間項} \\
 & + \frac{1}{4\pi\rho\alpha^3} A^{FP} \frac{1}{r} \frac{d}{dt} \left[ Mo(t-\frac{r}{\alpha}) \right] + \frac{1}{4\pi\rho\beta^3} A^{FS} \frac{1}{r} \frac{d}{dt} \left[ Mo(t-\frac{r}{\beta}) \right] && \text{遠地場項}
 \end{aligned} \tag{1}$$

と書かれる。ただし、 $\mathbf{x}$ は観測点の座標、 $r$ は震源距離、 $t$ は時間、 $\alpha$ はP波速度、 $\beta$ はS波速度、 $\rho$ は密度、 $A$ はラディエーションパターンである。式(1)は点震源の場合の表現であり、断層が広がりを持つ場合には当てはまらないが、断層が広がりを持つ場合のコンパクトな表現式は無いので、式(1)で代用しておく。

式(1)から分かるように、「近地場」項は距離の4乗に反比例し、「遠地場」項は距離に反比例し、2つの中間項は距離の2乗に反比例する。このような性質のため、地震断層近傍では、「近地場項が圧倒的に卓越し、遠地場項の寄与は無視できる」が、遠地場では、「遠地項が卓越し、近地場項の寄与は無視できる」。このことを直感的に単純化して示すと図5のようになる。断層崖直上など、もっとも極端な極近地場(①)では、断層に平行する地面の動き(変位)は、足下の地震断層面の滑り運動そのものになり、永久変位となって残る。P波もS波も一体となって到達する。地震断層面の拡大プロセスは副次的な効果しかない。対極の遠方場(⑤)では、P波とS波が孤立して到達し、永久変位は残らない。中間場(②、③、④)では、①と⑤の要素が混在する。

地震断層面が滑り初めてから停止するまでの時間を「立ち上がり時間」と呼ぶ。「立ち上がり時間」は、滑りの大きさにほぼ比例する。滑りの大きさと立ち上がり時間は、M7の地震で、1m~3m、1秒~3秒、M8の地震で、3m~10m、3秒~10秒である。滑りの大きさを立ち上がり時間で割ったものを断層運動の滑り速度という。滑り速度はM依存性はあまり無く、1m/秒のオーダーである。断層近傍で観測された速度波形の最大震幅が~1m/秒なのは、断層の滑り速度が~1m/秒だからである。

## 6. 1966年パークフィールド地震の加速度記録

1966年、アメリカ西海岸のサンアンドレアス断層の一部でM6.6のパークフィールド地震が発生した。地震断層面はほぼ垂直の右横ずれ型の地震であった。このとき、地震断層からたった80mの観測点で加速度記録が得られた。残念ながら、もっとも重要な地震断層に平行な水平成分は動いていなかったが、地震断層に直交する水平成分の記録が得られた。図6は、上から順に、断層直交水平成分の加速度観測波形、時間について積分した速度波形、もう1回積分した変位波形を示す。Aki (1968)<sup>19)</sup>は、Maruyama (1963)の表現式を組み込み、地震断層近地場の理論波形を計算し、図6下の変位波形との比較から、地震断層面の滑りを約50cmと見積もった。すると、滑り速度はほぼ0.5m/秒となる。

地震断層近傍の波形を単純化して模式化すると図7のようになる。地震動の主要成分である断層滑りに平行な地震動の変位波形(図7右下。図5の①に対応)は、断層滑りそのもので直感的にも分かりやすい。断層滑りに直交する地震動の変位波形は、地震断層に平行成分の1回微分になり、図7左側のようになる。図6と図7左の加速度、速度、変位の主要なピークは互いに良く対応しており、「地震断層極近傍の速度波形(図6中段)の2つの大きなピークの間隔は立ち上がり時間に対応する」ことと、立ち上がり時間がほぼ1秒、滑り速度がほぼ0.5m/秒であることがよく分かる。

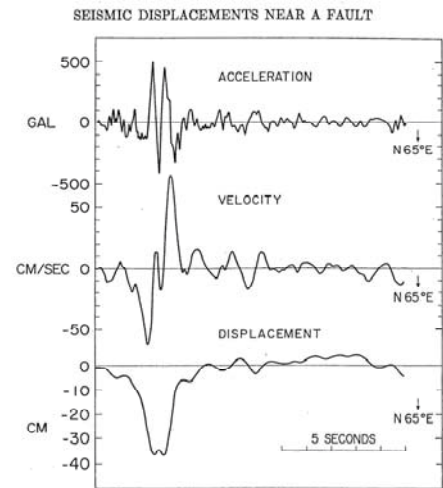


図6 上から順に、1966年パークフィールド地震の時の断層直交成分の加速度記録、時間について積分した速度、もう1回積分した変位。Aki(1968)<sup>19)</sup>による。

このような議論が当てはまるような断層近傍かどうかは、「断層滑り／観測点までの距離の比=K」が指標になる。パークフィールド地震の図6記録の場合は、 $K \sim 5 \times 10^{-3}$ である。この章の断層近傍の地震動の議論が当てはまるのは、Kが $10^{-3}$ より大きいかが目安である。第1章で、地震断層近傍と言う場合は「地表断層線から2km以内」に限定すると述べたが、それはKが $10^{-3}$ より大きい範囲という意味である。低角逆断層の上盤近傍では近地場項が圧倒的に卓越するのは明らかであるが、断層が高角の場合では近地場項が卓越する範囲は狭くなる。

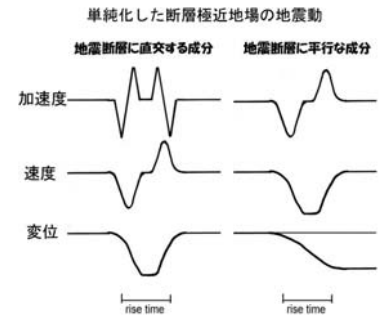


図7 断層極近地場の地震動波形を単純化した模式図。

## 7. 被害の非対象：1945年三河地震の例

次に、極端に非対称な被害分布の例を示そう。

1945年1月、太平洋戦争のさなか、M6.8の三河地震が起こり、愛知県蒲郡地域を中心にほぼ1200人の犠牲者を出した。

地震から28年後の1973年、安藤雅孝と著者は、蒲郡市金平地区の現地聞き取り調査を行い、図8の結果を得た。図の下盤側（東側）に分布する□は倒壊しなかった家屋、上盤側に多い■は倒壊した家屋、矢印は倒れた方向である。

地震断層線上盤（西側）の断層線から300m以内に位置する家屋の多くが東に向かって倒壊したが、共通して、「ゆらゆらと何度も揺られてから倒壊したのではなく、あっという間に倒れた」という証言であった。一方、下盤近傍（東側）のほとんどの家屋は、大きな被害は受けなかった。通り1つ隔てた上盤の隣家が倒壊したにもかかわらず、「また寝てしまった」とか、「柱時計も止まらなかった」というような証言も得られた。ただし、この調査は、論文にもならず、野帳も失われてしまったので、記憶にのみ頼っていることをお断りしておきたい。

Maruyama (1963) によって不連続境界面のない均質弾性媒質に生じた転位（=ダブルカップル=地震）による弾性波の理論式は得られたが、現実の地球のように自由表面がある半無限媒質の弾性波の理論式は数学的にいちだんと難しくなる。著者は、修士研究において理論的に導いたばかりの半無限媒質の計算（Kawasaki et al., 1973）<sup>21)</sup>によって、三河地震のような低角逆断層上盤と下盤近傍の理論地震動波形を計算したところ、図9下のような変位波形を得た。この例では、Kは $\sim 50 \times 10^{-3}$ のオーダーで本論で示した事例の中では極端に大きい。

波形は非常に単純で、地震断層面上盤（A）では観測点直下の地点の断層滑りに追従した動き（図7右下）になり、振幅は断層滑りとほぼ同じになる。逆に、下盤近傍（B）では、それより一桁小さい。図8の被害の極端な非対象性は、この地震動の振幅の非対称性がそのまま現れたものであろう。倒壊家屋の多くが断層線に向かって倒れた事実は、図9上の「地震前」の様に平衡状態にあった家屋が直下断層面の滑りの開始によって慣性で断層線と逆に振られ、断層滑りが停止したときは逆に断層線に向かって振られて倒壊したものと解釈できる。

この解釈は建物の固有周期を考慮していない。しかし、「建物の固有周期に近い地震動によって建物が倒壊する」という考え方をするときには、「共振が起こらない範囲では建物の歪みは小さく、倒壊しないが、共振

1945年三河地震による  
愛知県蒲郡市金平地区の倒壊家屋の分布

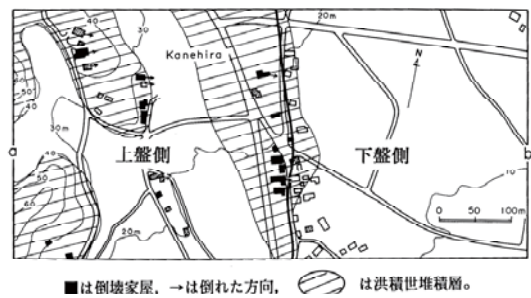


図8 1945年三河地震の時の、愛知県蒲郡市金平地区における地震断層と倒壊家屋の位置関係。矢印は倒壊した方向。安藤・川崎（1973）<sup>20)</sup>による。

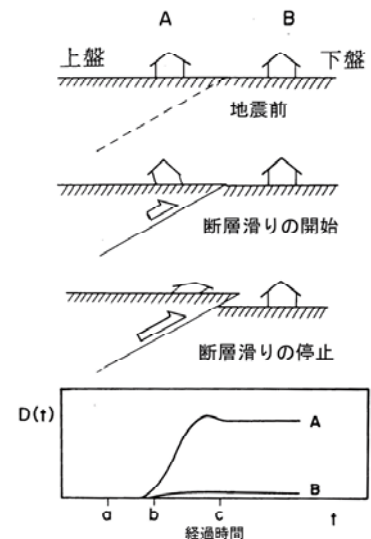


図9 上：上盤の大きな倒壊率の解釈。下：低角逆断層の上盤の地震動（A）と下盤の地震動（B）。安藤・川崎（1973）<sup>20)</sup>による。

によって限界を超えて倒れる」という考え方を暗に仮定している。しかし、三河地震の時の上盤直上の衝撃的な振動の場合は、建物の固有周期とは関係なく、最初の一撃によって逆方向に傾いて限界を超え、逆に振られて完全に倒壊したと考えることが出来る。1923年関東大地震のときの例を挙げると、鎌倉の大仏は、前方（南南東）に向かって30cmほど動いた。これは共振によって生じた現象ではなく、図9上のような地面の動きによって生じたのであろう。

なお、時代は異なるが、高橋（2005）<sup>22)</sup>は、1185年元暦の地震の時、法勝寺で、南北に主軸にある阿弥陀堂が東西方向に倒れ、金堂など方形に近い建物の多くが残ったのは、東西方向の揺れが激しかったからではないかと推定している。このとき、法勝寺西方の得長寿院の千体堂（三十三間堂）も倒れたが、南北に長い建物であった。三河地震断層の上盤での大きな家屋倒壊率の例と同様、図9上のような性質の断層近傍の地震動によって倒れたのであろう。

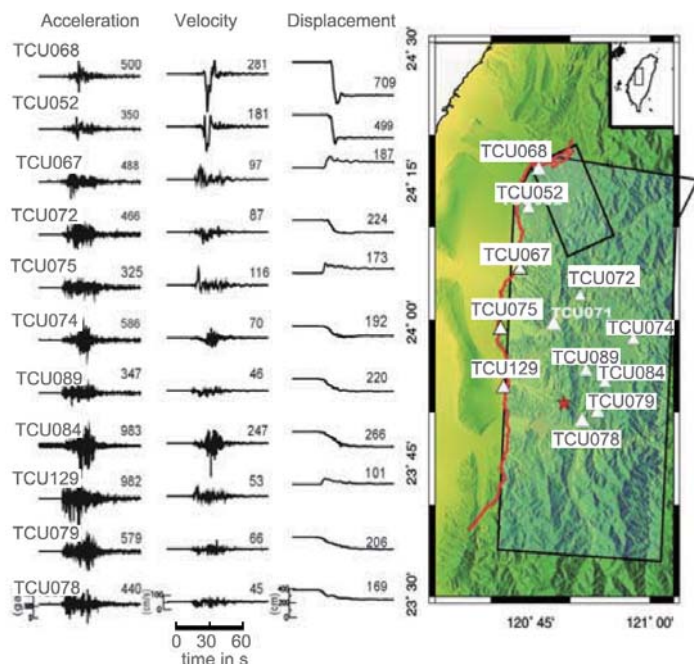


図10 右側の地図の★は1999年台湾集集地震の震央、赤線は車籠埔断層、四角は断層面の地表への投影、△は地震観測点。左側の地震波形は、左端から加速度原記録、1回積分した速度波形、1回積分した変位波形。Ma et al. (2003)<sup>23)</sup>の図に加筆した。

## 8. 1999年台湾集集地震の加速度記録

1999年9月、台湾中部の車籠埔断層でM7.6の大地震が起こり、4800人を越える犠牲者を出した。西側の地殻が車籠埔断層から東側の地殻の下に沈み込む低角逆断層型のメカニズムであった。

図10右側地図の変形四角は、地震断層面の地表への投影である。左側には、加速度記録、速度波形、変位波形が並べられている。加速度記録で見ると、地殻構造の複雑さなどに起因する短周期ノイズのために観測点による差異が大きいが、積分を2回行って変位に変換するとノイズは低下し、図7下や図9下のような片ランプ型の特徴的変位波形をしていることが分かる。別の視点から、「工学的に用いられている加速度模擬波は、変位に転換した時に片ランプ型になるかどうか、断層近傍の波形として相応しいかどうかのチェックポイントの一つになる」と言える。とはいえ、変位波形で見ても、観測点ごとに波形は微妙に異なる。この差は、足下数kmの地震断層面の滑りプロセス、つまり摩擦特性を直接反映しているのであろう。なお、これらの記録の場合、Kは $\sim 1 \times 10^{-3}$ である。

表2

地震名	$K \times 10^{-3}$	
1945年三河	$\sim 50$	断層極近傍
1966年パークフィールド	$\sim 5$	断層極近傍
1999年台湾集々	$\sim 0.5$	断層近傍

ここで、本論で挙げた地震動の例をKを軸に整理しておくと表2になる。Kが大きいほど図5①の断層近

傍の地震動の特性を持つ。参考までに、1995年兵庫県南部地震のときにおける地震断層と京都の位置関係の場合は  $K \sim 0.03 \times 10^{-3}$  である。

## 9. まとめ

以上の議論によって、歴史的に、古墳、国分寺や国府、社寺などの歴史的建造物の多くが活断層の近傍に作られてきたことを明らかにした。活断層で地震が生じたときの地震断層近傍の地震動の速度成分は、パルス幅が数秒の数パルスの単純な波形をしており、建物は足払いを受けて、図9上のような動きで倒れると予想される。地震動の議論としては定性的で、いささか中途半端なきらいがあるが、地震学の現段階では、将来の地震断層候補としての活断層面のアスペリティ分布が分からないで、断層近傍の地震動を数値的に精度良く議論することはできない限界があるが、歴史的建造物の耐震は、弾性限界を越える地震動に襲われる可能性を考慮することが必要であることが分かる。これを一例として、工学的分野における強震動予測では、断層モデルという考え方に不足している面があるように思われる。軟弱地盤によって増幅され、共振という要素が重要である長周期地震動の場合ならともかく、比較的均質な地盤の断層近傍の強震動の研究にとって、断層モデルは不可欠である。理学系と工学系の一層の研究交流が重要と言えよう。

## 参考文献

- 1) 京都市：京都市第3次被害想定、<http://www.city.kyoto.lg.jp/shobo/page/0000015600.html>.
- 2) 地震調査委員会：地震に関する評価、[http://www.jishin.go.jp/main/p\\_hyoka.htm](http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka.htm).
- 3) 宇佐美龍夫：「最新版 日本被害地震総覧 [416]-2001」、東京大学出版会、2003.
- 4) 日下雅義：「歴史時代の地形環境」、古今書院、1980.
- 5) 寒川旭：誉田山古墳（応神天皇陵）を切る活断層、地質ニュース、364、8-8、1984.
- 6) 白石太一郎：「古墳とその時代」、日本史リブレット4、山川出版社、2001.
- 7) 産総研地質調査総合センター：1:500,00 活構造図京都、2002.
- 8) 寒川旭・杉山雄一・宮地良典：有馬一高槻構造線活断層系の活動履歴及び地下構造調査、平成7年度活断層研究調査概要報告書、地質調査所研究資料集、No.259, 33-46、1996.
- 9) 佐藤信：「古代の地方官衙と社会」、日本史リブレット8、山川出版社、2007.
- 10) 佐藤信編：「奈良の都と地方社会」、史跡で読む日本の歴史4、吉川弘文館、2010.
- 11) 国指定文化財等データベース、<http://www.bunka.go.jp/bsys/>
- 12) 活断層研究会編：「新編日本の活断層」、東京大学出版会、1991.
- 13) 岡田篤正・東郷正美編：「近畿の活断層」、東京大学出版会、2000.
- 14) Koto, B. : On the cause of the great earthquake in central Japan, Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo, Vol.5, pp.295-353, 1893.
- 15) Reid, H. F. : The Mechanics of the Earthquake, The California Earthquake of April 18, 1906, Report of the State Investigation Commission, Vol.2, pp.16-28, Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C., 1910.
- 16) Maruyama, T. : On the force equivalents of dynamic elastic dislocations with reference to the earthquake mechanisms, Bulletin of Earthquake Research Institute, Vol.41, pp.467-486, 1963.
- 17) Aki, K. and Richards, P. : Quantitative Seismology, second edition, University Science Books, Herndon, VA, USA, 2002.
- 18) 川崎一朗：「スロー地震とは何か」、NHKブックス、日本放送協会、東京、2006.
- 19) Aki, K. : Seismic displacements near a fault, Journal of Geophysical Research, 73, 5359-5376, 1968.
- 20) 安藤雅孝・川崎一朗：低角逆断層近傍の加速度、昭和48年度地震学会秋季大会講演予稿集、pp.107, 1973.
- 21) Kawasaki, I., Suzuki, Y. and Sato, R. : Seismic waves due to a shear fault in a semi-infinite medium. Part I: Point source, Journal of Physics of the Earth, Vol.21, pp.251-284, 1973.
- 22) 高橋昌明：日本史学者の見た元暦二年七月京都地震について、月刊地球、27、11、2005.
- 23) Ma, K.-F., Brodsky, E., Mori, J., Ji, C., Song, T.-R., and Kanamori, H.: Evidence for fault lubrication during the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake (Mw7.6), Geophysical Journal Research Letters, Vol.30, No.5, 1244, doi: 10.1029/2002GL015380, 2003.