

5. 考察

5-1 強震観測開始以前の地震に関する調査

a) 検討方針

4章で示した地震動レベルは、強震観測開始以後に発生した地震に基づき設定している。当然のことながら、強震観測開始以前にも日本国内で多くの内陸地殻内地震が発生しており、これらの地震についても、事前に震源を特定可能であったかを調査する必要がある。震源を特定できる、できないを評価するに際し、これらの地震は強震観測以前のこともあり、震源断層の特定には十分なデータが存在しないものも多い。震源断層の特定という観点では、十分なデータが得られない場合であっても、耐震設計を行うという観点では、当該規模の地震を事前に評価可能か否かということが重要であるとの認識のもと、当該地震付近で当該地震規模に見合う活断層あるいは活構造が認められるか否かに着目し評価をおこなった。

本節では、地震カタログが充実している1885年以降に内陸で発生した地震を対象とし、文献調査および必要に応じて空中写真判読、現地地表踏査を行い、活断層または活構造との関係を検討した。対象は深さ20kmより浅い地震とし、Mj6.5より大きい地震を調査した。地震規模は1885年から1925年については宇津(1982、1985)^{58), 59)}に、1926年以降については気象庁カタログ(1982)⁶⁰⁾に基づき抽出した。対象となる地震として20地震がリストアップされたが、以下に示す6地震は余震、または震源が深い等の理由により検討対象から除外した。

1923年山梨県南東部の地震(Mj6.8)、1924年丹沢山塊の地震(Mj7.3)は、震央位置から判断するとプレート境界で発生した1923年関東地震の余震と考えられる。1939年男鹿の地震(Mj6.7)は、同年に発生した男鹿地震(Mj6.8)の余震に対応しており、本震は後で示すように串川断層と関連づけられている。これらの地震の本震は事前に震源が特定可能であったため、余震は本震の規模を上回らないという前提のもと、本震が震源を特定できる地震と判断できる以上、その余震については震源が特定できるか否かは課題となないと判断し、検討対象から除外した。

1932年新冠川地震(Mj7.0)は深さ約20kmの地震とされていたが(気象庁、1982)⁶⁰⁾、2001年度版の地震年報(気象庁、2003)⁶¹⁾では震源深さが66kmに改定されている。本地震の発生位置では深さ20~60kmの地震が多発しており、プレートの沈み込みに関連したやや深い地震と考えられている(Moriya, 1986)⁶²⁾。1948年日高川地震(Mj6.7)の深さは10kmとされているが(気象庁、1982)⁶⁰⁾、震源メカニズム解は北東~南西方向の正断層を示しており、同地域の深さ25km以深で発生する地震の特徴を示していることから、地殻下部で発生したと推定されている(中村、1996)⁶³⁾。なお、いずれの地震も水準変動が現れていない。以上より、これらの2地震は内陸上部地殻内で発生したとは考えにくいため、検討対象から除外した。

1914年桜島の地震(Mj7.1)は測地データが得られている。桜島をとりまくように同心円状に50cm以上の陥没が認められるが、線状を呈しておらず、水平変動を見ても大きな変動は認められない。余震分布も得られておらず、微小地震の活動も顕著でない(地震調査委員会、1997)⁶⁴⁾。同日に桜島の大噴火が記録されており(宇佐美、2003)⁶⁵⁾、本地震は火山活動に伴って生じた可能性が高く、活断層の活動によるものではないと判断され、検討対象から除外した。なお、火山性の地震であっても、震源が事前に特定できなければ地震動との観点で考慮が必要との見方もあり得るが、火山の場合は、そのメカニズムから活動の区域は事前に想定可能なものであり、原子力発電施設等の重要構造物を設置する上で、火山近傍は避けるという判断が可能であるため、ここで検討対象とはならないものである。

以上の検討を踏まえ、1885年以降に内陸で発生したMj6.5より大きい14地震を以後の調査対象とし、これらの地震を図10に示す。

b) 明瞭な地表地震断層が出現した地震

3章の検討と同様に、地表地震断層が出現した地震とそうでない地震に分類した。その結果、図10の左側に示した8地震は地表地震断層が明瞭に現れており、図中に[]内で示した当該震源付近で既存の活断層と関連付けられている(活断層研究会、1991)¹⁴⁾。参考までに、既存文献に示されている活断層の長さと、地震規模の関係を整理した結果を付表1-1に示す。3-2章と同様に、松田の経験式⁹⁾を目安に活断層長さとマグニチュードMjを見ると、1939年男鹿地震(L=5.5km, Mj=6.8)、1943年鳥取地震(L=8.0km, Mj=7.2)、1945年三河地震(L=7.0km以上, Mj=6.8)以外は、いずれも地震規模に見合う以上の活断層長さが事前に認められる。このうち、男鹿地震は付表1-1の右欄に地質状況を示したように、約20kmの地震性地殻変動域の存在が男鹿半島に指摘されている。鳥取地震は活断層の端部が沖積平野に、三河地震は活断層の端部が海域に没しており、地表の情報のみでは活断層長さの評価が難しい地震である。この種の地震については、3-2章と同様に、ボーリング調査、音波探査、弾性波探査を実施すれば、規模に見合う長さが事前に特定可能と判断した。以上より、明瞭な地表地震断層が出現した地震は、地震規模の割に活断層長さが短い場合であっても、発生位置および規模を事前に特定できると判断した。

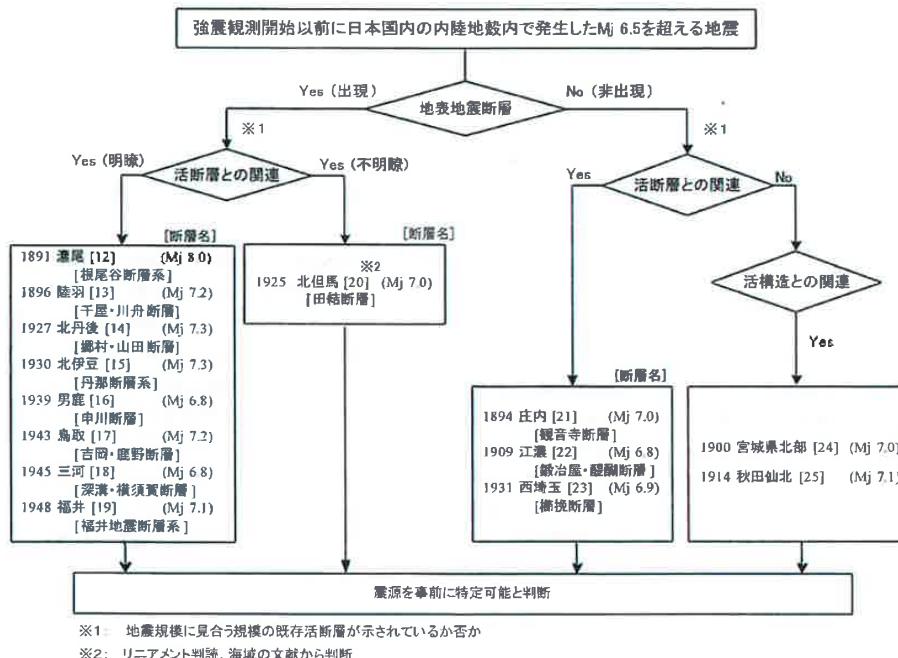


図10 強震観測開始以前に国内で発生したMj6.5を超える地震の分類
 []の数字は図1(a)の震央位置に対応

c) 明瞭な地表地震断層が出現しなかった地震

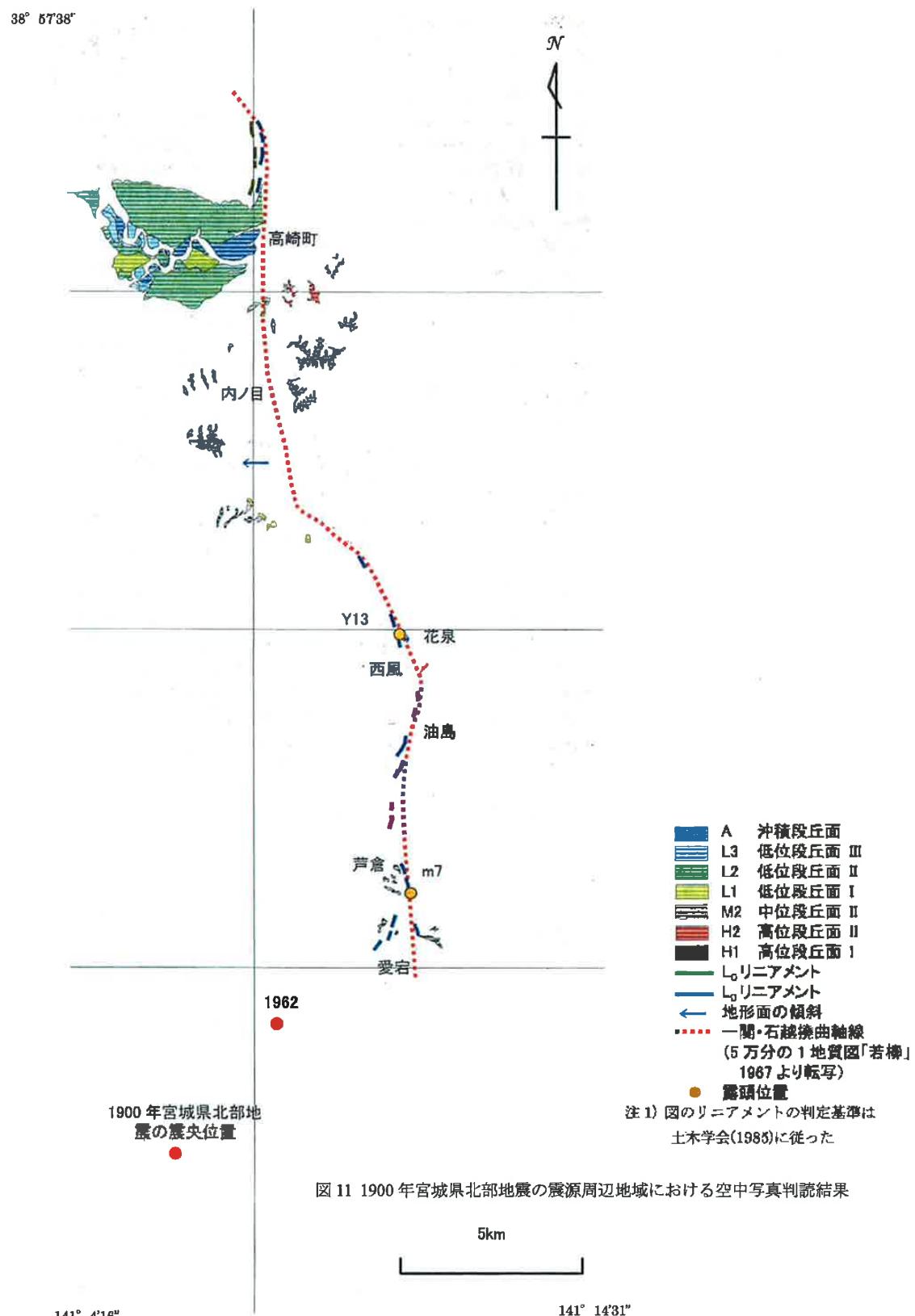
地表地震断層が明瞭でない地震、および地表地震断層が出現しなかった図 10 の計 6 地震について文献調査を行った。(a)方針で示したように、これら 6 地震については、当該地震付近で当該地震規模に見合う活断層あるいは活構造が認められるか否かに着目し評価をおこなった。その結果、1894 年庄内地震(Mj7.0)、1909 年江濃地震(Mj6.8)、1925 年北但馬地震(Mj7.0)、1931 年西埼玉地震(Mj6.9)の 4 地震については付表 2 に示した根拠により活断層との関連が推定可能で、事前に震源を特定可能であったと判断した。各々の地震に対応する活断層を図中の[]内に示す。残りの 2 地震、1900 年宮城県北部地震および 1914 年秋田仙北地震は、文献調査からは活断層との関係が不明であったため、空中写真判読および現地踏査による検討を行った。

1900 年宮城県北部地震の震源周辺地域における空中写真判読結果を図 11 に示す。松野(1967)⁶⁶⁾は、一関市北方から石越町にかけて、ほぼ南北方向に連続する一関一石越撓曲線を示しており、この撓曲運動によって下黒沢層(中新統)から築館層(鮮新統)までが変位し、さらに胆沢扇状地面に傾斜の急変部となつて現れているとし、この撓曲運動はきわめて新しい時代に完成したものと指摘している。空中写真判読からも一関一石越撓曲線にはほぼ対応して図 11 に示す L_c 、 L_d リニアメントが判読される。リニアメントの判定基準は土木学会(1985)⁶⁷⁾に従った。これらのリニアメントは一関市西方で比較的明瞭であり、西侧の丘陵と東側の沖積低地との境界付近にみられる丘陵末端の急崖、扇状地面上の崖等として認められる。文献に示されている一関一石越撓曲線の存否、および判読したリニアメントと一関一石越撓曲線との関係を明らかにするために、地表地質踏査を実施した。地表踏査結果によると、一関市西方から花泉町花泉、油島を経て、石越町愛宕に至る約 20km 間において、断続的ではあるが、瀬峰層～竜ノ口層(鮮新統)に西上がりの撓曲構造が認められ、図 12(a)に示すように最大 50°～80° の東傾斜となっている。この撓曲構造は上述の文献による一関一石越撓曲線および空中写真判読によるリニアメントの位置と概ね対応しており、花泉町花泉、同町西風の撓曲部において、高位段丘堆積物が東方に 17° 程度の傾斜を示している。また、石越町芦倉のリニアメント延長部においては、下位より砂層およびシルト層からなる段丘堆積物が分布し、砂層およびシルト層は図 12(b)のように最大 10° 程度の傾斜を示しており、この堆積物はその上部を覆うローム層最下部に鳴子一迫テフラ(約 11 万年前～約 14 万年前)が挟在することから、南関東の下末吉層に対比される。本地震の震源付近では、最近でも微小地震が頻発しており、震源付近から一関市付近にかけ、ほぼ南北方向に微小地震の活動が認められる(地震調査委員会、1997)⁶⁸⁾。以上の調査結果より、この地域ではこの断層を評価することにより、この程度の地震規模は評価可能であると判断した。

次に、1914 年秋田仙北地震の震源周辺地域における空中写真判読結果を図 13 に示す。本震の北方の協和町船岡から西仙北町宿に至る約 14.5km 間、本震の南西方向の南外村南横岡から東由利町法内に至る約 18km 間、および本震の南方の大森町夏見沢から羽後町郷ノ目に至る約 23km 間に L_c 、 L_d リニアメントが判読された。リニアメントの判定基準は土木学会(1985)⁶⁷⁾に従った。短線は縦ずれの低下側を示す。さらに地表踏査を実施した結果、夏見沢から塚須沢に至る間において、リニアメントに対応して新第三系に西上がりの撓曲構造が認められた。また、塚須沢から郷ノ目に至る間においても、リニアメントに対応して同様の撓曲構造が認められ、図 14(a)および(b)に示すように一部で西上がりの断層が推定あるいは確認された。この断層は、大沢・他(1979)⁶⁹⁾による滝ノ沢太平山断層群に対応している。

この断層に対応してリニアメントが判読されることなどから、この断層の第四紀後期における活動の可能性は否定できない。小田切・島崎(2001)⁶⁸⁾は、確実性のランクは低いが本地震が断層または活褶曲による地震の可能性を指摘している。これらの調査結果より、この地域ではこの断層を評価することにより、この程度の地震規模は評価可能であると判断した。

以上の調査結果より、図 10 に示す強震観測開始以前に発生し、Mj が 6.5 を超える内陸地殻内の 14 地震についても、事前に震源を特定可能であったと考えた。



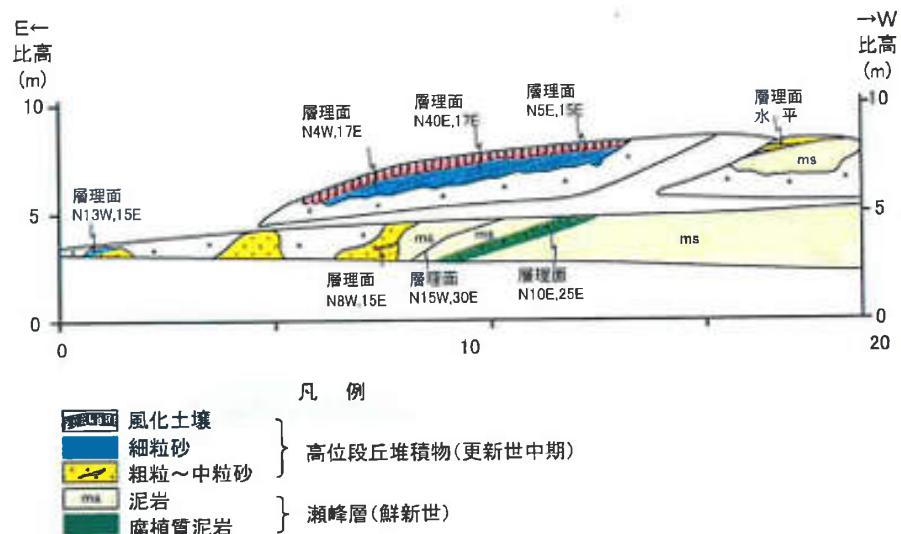
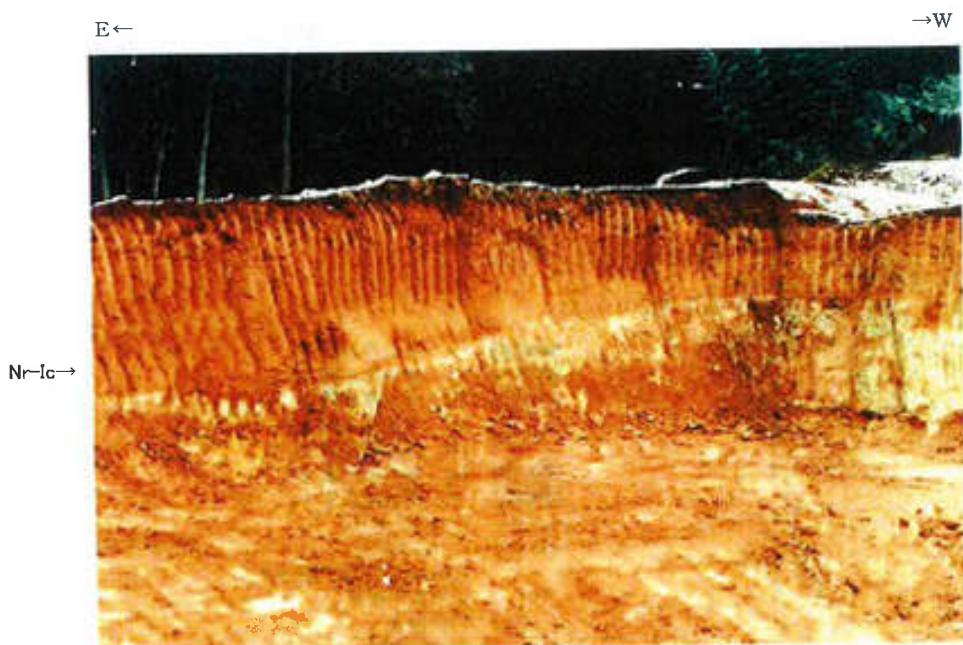


図 12(a) 1900 年宮城県北部地震の震源周辺地域の地表踏査結果：
断層露頭スケッチ (Y13 地点, 花泉町花泉)



段丘堆積物上部のシルト層は最大約 10° 東傾斜を示す。
シルト層の直上には鳴子一一迫テフラ(Nr-Ic)と推定される火山灰層が認められる。

図 12(b) 1900 年宮城県北部地震の震源周辺地域の地表踏査結果：
中位段丘堆積物にみられる変形 (m7 地点, 石越町芦倉)

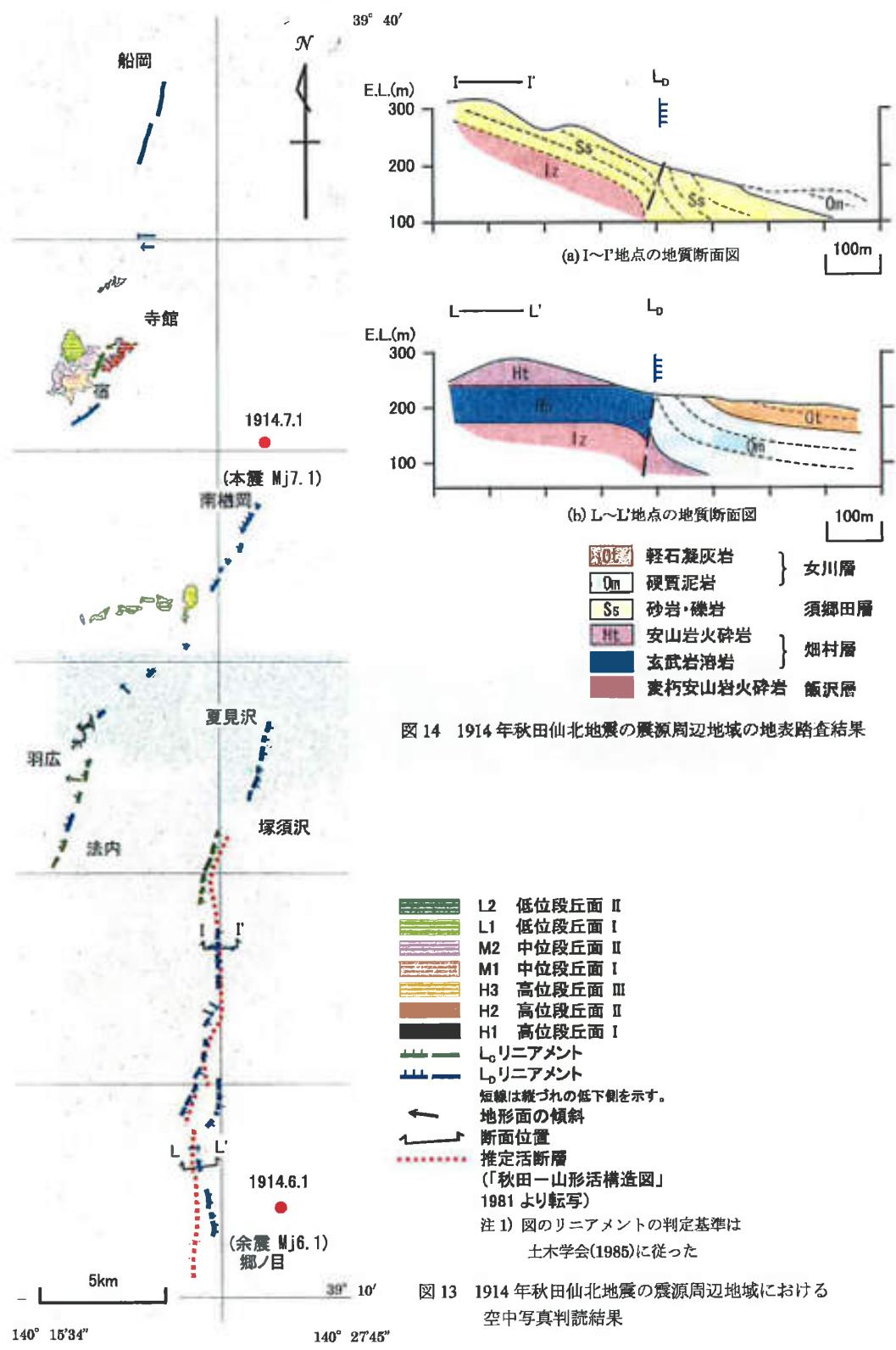


図 14 1914 年秋田仙北地震の震源周辺地域の地表踏査結果

図 13 1914 年秋田仙北地震の震源周辺地域における
空中写真判読結果

5-2 1984年長野県西部地震に関する検討

1984年長野県西部地震(Mj6.8)は、震源を事前に特定できないと判断した地震の中で、最も規模の大きな地震である。この地震に関しては、本震の震源域で得られた強震動記録は存在しないが、震源から24kmほど離れた高根第一ダム(TKN)、および38kmほど離れた奈川渡ダム(NGD)において加速度記録が得られている(JCLD, 2002)⁶⁹⁾。そこで、両地点の観測記録から震源近傍の地震動レベルの日安を推定し、図9で設定した震源を事前に特定できない地震の地震動レベルと比較した。2地点と震央の位置関係を図15に、観測点と記録の諸元を表4に示す。地震計はダム堤体から離れた岩盤の横抗内に設置されており、1/200,000の地質図によるとダム周辺の地層は古生層に分類される。観測点位置における詳細な速度構造は不明であるが、ダム管理者（TKNは中部電力、NGDは東京電力）により観測点近傍で地盤調査が実施されている。両地点の地盤状況は、せん断波速度Vsが3.0km/s相当の地震基盤とは見なせないが、TKNではPS検層結果によりVs=1.5km/s程度、NGDはP波の弾性波試験結果からVsを推定するとVs=1.0～2.0km/sの範囲にあると見られる。

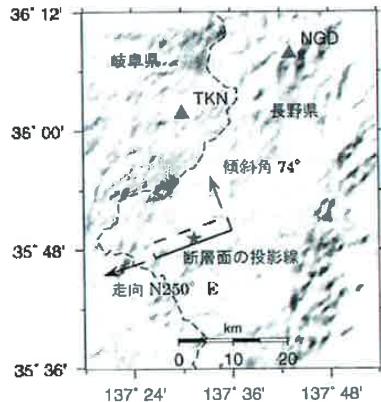


図15 1984年長野県西部地震の断層面と観測点位置
(断層面位置と破壊開始点は Yoshida and Koketsu, 1990 による)

表4 1984年長野県西部地震における観測点および観測記録の諸元

	略号	北緯(°)	東経(°)	Xsh(km) ¹⁾	最大加速度(cm/s/s) FP, FN, UD ²⁾
奈川渡ダム	NGD	36.1294	137.7211	33.6	18.2, 27.1, 13.4
高根第一ダム	TKN	36.0289	137.4978	22.7	71.4, 40.0, 43.2

注1) Xsh:断層最短距離

注2) FP:断層走向平行方向, FN:断層走向直交方向, UD:上下方向

震源近傍の地震動はNGDおよびTKNの観測スペクトルを距離補正することにより推定した。距離補正是、データベースに震源近傍の記録が含まれているAbrahamson and Silva (1997)⁷⁰⁾による加速度応答スペクトルの評価式を用いた。Abrahamson and Silva (1997)⁷⁰⁾は1940年のImperial Valley地震以後に世界中で発生した、Mw=4.4~7.4の58の地殻内地震に対する655記録の水平2成分の幾何平均スペクトルを基に、距離減衰式を作成している。観測点から震源への距離は、断層最短距離Xsh(原論文では r_{rup} と表記)が用いられており、Xshの適用範囲は0.1~200kmである。横ずれ断層に対する岩盤サイトの距離減衰式⁷⁰⁾を下式に示す。

$$\ln Sa(M_w, X_{sh}) = a_1 + a_2(M_w - c_1) + a_{12}(8.5 - M_w)^n + [a_3 + a_{13}(M_w - c_1)] \ln R$$

$$R = \sqrt{X_{sh}^2 + c_4^2} \quad (2)$$

ここで、Saは加速度応答スペクトル(単位:g)を表し、a1~a13、c1、c4、nなどの係数は周期毎(0.01~5.0秒)に定められている。

NGDおよびTKNのXshを計算するには長野県西部地震の断層面を仮定する必要がある。ここでは、Yoshida and Koketsu (1990)⁷¹⁾が波形インバージョンを行った際の断層面を用いることとした。断層面の諸元は、断層長さ15km、断層幅10km、断層上端深さ0.3km、走向N250°E、傾斜角74°であり、断層面の地表投影面を図15に示してある。この断層面に対するNGDのXshは33.6km、TKNのXshは22.7kmとなる。Yoshida and Koketsu (1990)⁷¹⁾による M_0 からMwを評価するとMw=6.2と求められるが、ハーバード大学によるCMT解の M_0 を用いても同じ値(Mw=6.2)が得られた。両地点で観測された加速度応答スペクトルを、Abrahamson and Silva (1997)⁷⁰⁾による距離減衰式を用いて推定したスペクトル振幅と比較して図16に示す。原論文に従い、応答スペクトルは水平2成分の幾何平均を用いている。距離減衰式によるスペクトル振幅は観測スペクトルよりやや大きいが、観測スペクトルの形状はほぼ表現されている。

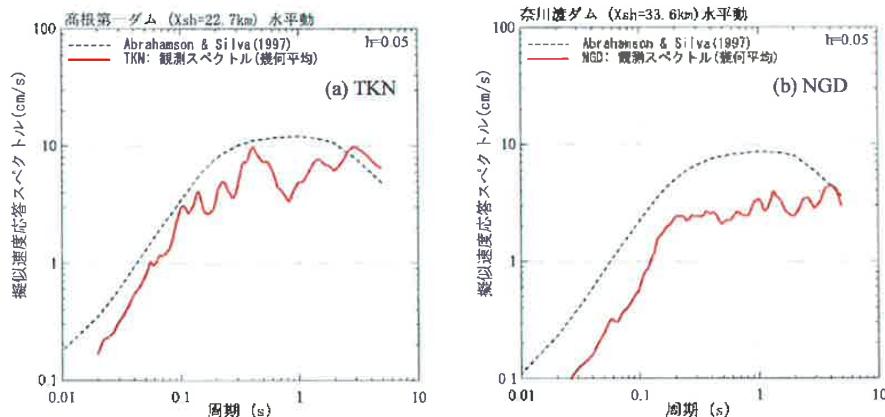


図16 1984年長野県西部地震の近地ダムサイトにおける観測スペクトルと
Abrahamson and Silva (1997)による距離減衰式からの推定値との比較

両地点で観測された加速度応答スペクトルを、Abrahamson and Silva (1997)⁷⁰⁾の距離減衰式を用いて震源直上相当の $X_{sh}=0.3\text{km}$ に補正した。すなわち、(2)式を基にして以下の(3)式から距離補正係数を計算し、TKN と NGD における観測記録の応答スペクトルに距離補正係数を乗じることによって断層直上相当のスペクトルレベルを推定した。

$$\text{距離補正係数} = \frac{Sa(6.2, 0.3)}{Sa(6.2, X_{sh})} \quad (3)$$

その際、TKN と NGD の X_{sh} は、各々 22.7km 、 33.6km を用いており、(3)式を用いて評価した距離補正係数を、両地点について図 17 に示す。上記の距離補正係数を用い、TKN と NGD の観測スペクトルから断層直上相当のスペクトルレベルを推定した結果を図 18 の太実線および太破線で示す。図中の赤実線は、図 9 に示した震源を事前に特定できない地震の地震基盤における地震動レベル、それ以外の線は $V_s=1.5$, 1.0 , 0.7km/s のレベルを各々示す。

震源近傍では、破壊の進行方向に位置する地点において地震動振幅が大きくなる現象が指摘されており、破壊伝播効果と呼ばれている。この現象は、断層直行方向(FN)で顕著となる(Somerville *et al.*, 1997; 大野・他, 1998)^{72), 73)}。Somerville *et al.* (1997)⁷²⁾ は震源近傍の観測スペクトルと、本論文でも用いた Abrahamson and Silva (1997)⁷⁰⁾ の距離減衰式から評価したスペクトルとの残差から、破壊の進行方向でスペクトル振幅が増加する影響を以下の式でモデル化している。

$$y_1 = C_1 + C_2 X \cos \theta \quad (4)$$

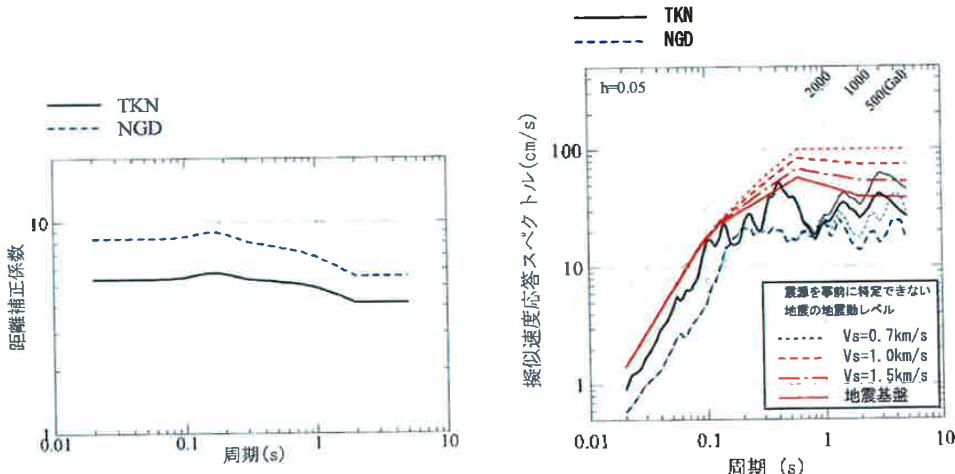


図 17 Abrahamson and Silva (1997)の距離減衰式を用いた近地のダムサイトに対する断層直上相当 ($X_{sh}=0.3\text{km}$) の距離補正係数

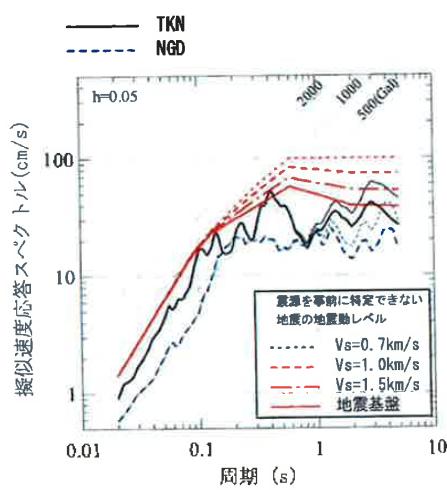


図 18 1984 年長野県西部地震の震源域における水平動の地震動推定レベルと震源を事前に特定できない地震の地震動レベル
(太実線と太破線は断層直上相当のレベル、細実線と細破線は更に破壊伝播効果を考慮した FN 成分のレベル)

さらに、破壊の進行方向で FN 成分が卓越する効果を以下の式でモデル化している。

$$y_2 = \cos 2\theta [C_3 + C_4 \ln(X_{sh} + 1) + C_5(M_w - 6)] \quad (5)$$

ここで θ と X は観測点位置と断層の地表投影線から幾何学的に定まるパラメータ(原論文⁷²)の Figure 5 参照を、 $C_1 \sim C_5$ は周期毎に定められた係数を表す。なお、破壊伝播効果が顕著になるのは周期 0.6 秒から長周期側であり、周期 0.6 秒以下は $y_1=y_2=0$ となっている。(4)式と(5)式を用い、Somerville *et al.* (1997)⁷² は震源近傍の破壊伝播効果を考慮した応答スペクトルを、以下の式で提案している。

$$\text{断層直行成分(FN)} : S_a(T)_{FN} = S_a(T) \times e^{y_1} \times e^{y_2} \quad (6)$$

$S_a(T)$ は Abrahamson and Silva (1997)⁷⁰などの、距離減衰式から評価した加速度応答スペクトルを表す。

図 18 の太実線および太破線で示したスペクトルレベルは、震源直上相当の平均的な振幅に対応している。そこで、Somerville *et al.* (1997)⁷²による補正係数($e^{y_1} \times e^{y_2}$)を用い、破壊伝播効果の影響について考察した。図 15 に示すように、長野県西部地震の震央は断層面の中央に位置している。この場合、Somerville *et al.* (1997)⁷²によれば、FN 成分の振幅が最も大きくなるのは $X=0.5$ 、 $\theta=0^\circ$ の位置であり、断層端部直上に相当する。(4)～(6)式に $X=0.5$ 、 $\theta=0^\circ$ 、 $X_{sh}=0.3\text{km}$ 、 $M_w=6.2$ を挿入した場合の補正係数($e^{y_1} \times e^{y_2}$)を表 5 に示す。周期 5 秒で破壊伝播効果の影響が最も顕著になるが、その補正係数の値は 1.7 倍程度である。また、周期 0.6 秒以下の補正係数は 1.0 であり、短周期成分は破壊伝播の影響を受けないことになる。同様の傾向は大野・他(1998)⁷³も指摘している。図 18 の太実線および太破線で示したスペクトルレベルに、表 5 の補正係数を考慮した結果を図中に細実線および細破線で示す。先に述べたように、TKN のせん断波速度 V_s は 1.5km/s 程度、NGD は $V_s=1.0 \sim 2.0\text{km/s}$ の範囲にあると見られる。破壊伝播の影響を考慮すると、周期 0.6 秒以上で振幅が大きくなるが、TKN は図中に示した $V_s=1.5\text{km/s}$ のレベルに、NGD は地震基盤のレベルにはほぼ包絡されている。

表 5 Somerville *et al.* (1997)に基づく破壊伝播効果の補正係数($e^{y_1} \times e^{y_2}$)

周期 (s)	0.02	0.60	0.75	1.00	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00
破壊伝播効果の補正係数	1.00	1.03	1.07	1.12	1.21	1.28	1.50	1.68	1.69

図 8 に示したように、震源を事前に特定できない地震の地震動レベルは、周期 1 秒以上の長周期帯域では基になった観測スペクトルを大きく上回って設定してある。しかしながら、図 18 の結果を見る限りにおいては、震源を事前に特定できない地震の地震動の設定レベルが、距離補正した応答スペクトルと比べて大きく上回る傾向は見られない。図 8 の地震動レベルの設定に用いた観測記録の最大の M_j は 6.6 相当である。一方、長野県西部地震の M_j は 6.8 であり、図 8 の地震動レベルの設定に用いた地震よりも規模が大きい地震である。従って、長野県西部地震に相当する規模の地震までを考慮すると、図 8 に示した周期 1 秒以上の長周期帯域のレベルは妥当であると判断した。加えて、周期 1 秒以下の帯域においても、図 8 で設定した地震動レベルは長野県西部地震に相当する規模の地震を概ね包絡している。

なお、1997 年山口県北部地震は震源から離れた地点においても硬質岩盤上の観測点が存在しないため、上記の検討は行わなかった。

6. まとめ

内陸地殻内で発生する地震に対し、「震源を事前に特定できない地震」に対する地震動レベルを、震源近傍の強震観測記録を用いて検討した。ここで、震源を事前に特定できない地震とは、既存の活断層図等の文献による調査に加え、必要に応じて空中写真判読によるリニアメント調査、現地における地表踏査等の地質学的調査を実施してもなお、事前に震源の位置、または規模の特定が困難と判断される地震とした。なお、活断層端部が海域または沖積平野に延長する場合は活断層長さの特定が難しくなるが、そのような場合は弾性波探査等と組み合わせることにより、規模に見合う長さが事前に特定可能と判断している。

先ず、強震観測開始以後に日本(1953年～、Mj=6.2～7.3)およびカリフォルニア(1940年～、Mw=5.6～7.5)の内陸地殻内で発生した27地震に対し、震源近傍の強震観測記録を収集した。次に、収集した地震に対し、地表地震断層が出現した地震とそうでない地震に分類した。1995年兵庫県南部地震等、地表地震断層が出現した12地震は、地震が起きる以前に活断層と認識されていた場所で発生しており、震源位置と地震規模を事前に特定可能である。地表地震断層が明瞭でない、または出現しなかった15地震についても地質学的調査を行った結果、1984年長野県西部地震と1997年山口県北部地震、および1997年3月および5月の鹿児島県北西部地震については、現段階の調査からは震源を特定できなかった。Mj6.5(Mw6.2)以下の7地震は地質学的調査により事前に震源位置と地震規模を評価できた可能性がある。しかしながら、仮に上記の7地震について震源が事前に特定できた可能性があるとしても、震源断層のスケーリング則の観点から同程度の規模の断層が確実に事前に震源を特定できるとは断定できない。以上の点を鑑み、本論文では長野県西部地震等の4地震に加え、上記の7地震も震源を事前に特定できない地震の上限レベルの検討に採用する方針とした。

これら11地震のうち、震源近傍の硬質地盤上で強震記録が得られているのは9地震12地点の計15記録(30水平成分)であり、断層最短距離Xsh=3～17kmの範囲にある。以上の観測記録について水平動の擬似速度応答スペクトルを計算し、その上限レベル(最大加速度値450cm/s/s、加速度応答値1200cm/s/s、速度応答値100cm/s)を、震源を事前に特定できない内陸地殻内地震の地震動レベルとして設定した。これらの観測点はVs=700m/s相当の岩盤上に位置している。Vs=700m/sから地震基盤に至る水平動の地震動レベルは、上記の上限レベルに既往研究の地盤増幅率を考慮することにより設定した。

以上の地震動レベルは、強震観測開始以後に発生した地震に基づき設定している。当然のことながら、強震観測開始以前にも日本国内で多くの内陸地殻内地震が発生しており、これらの地震についても調査する必要がある。そこで、地震カタログが整備されている1885年以後、強震観測が始まる1953年までに発生し、Mjが6.5より大きい14地震を対象として地質学的調査を実施した。その結果、これらの地震は活断層または活褶曲と関連づけることが可能であり、震源を事前に特定可能であったと判断した。

先に述べたように、長野県西部地震は詳細な地質学的調査を行っても、現段階では震源を事前に特定することは困難である。本震の震源域で得られた強震動記録は存在しないが、震源から24、38km離れた2地点で強震記録が得られている。そこで既往の距離減衰式の係数を用いて極近距離相当に変換した地震動を算定し、上記の地震動レベルと比較した結果、設定した地震動レベルは長野県西部地震に相当する規模の地震(Mj6.8)を概ね包絡することを確認した。

本論文の主旨は、震源近傍の硬質岩盤上の記録から直接「震源を事前に特定できない地震の地震動レベル」を決めることがある。その過程において、個々の地震に対して震源近傍の観測点が1～3点と少ないのも事実である。この点を補うために、断層モデルを用いて震源近傍の面的な強震動分布を推定する方法もある。しかしながら、いかに断層モデルが進歩したとは言え、強震動評価の精度から考えると、最大の地震動レベルを決めるることは現状で非常に難しいと思われる。むしろ、個々の強震観測記録のスペクトルには大きな山谷があり、限られた観測値とはいえ、異なる地震の異なるサイトの記録全てを包括させることにより、現在利用できる強震記録の上限値として震源を事前に特定できない地震の地震動レベルを設定するのが最善と考えている。著者らは、ここで設定した地震動レベルを上回る地震が、将

来発生する可能性を完全に否定しているわけではない。確率論的アプローチを用い、現在設定した地震動レベルを超える地震の発生確率を考察することも重要と考えており、将来の検討課題としたい。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、鹿島技術研究所の池浦友則博士から貴重な意見を頂いた。3名の査読者のご指摘とご意見は本稿の改善に大変役立ちました。活断層の評価については、社団法人土木学会原子力土木委員会断層活動性分科会での議論が有用であった。ここに記して感謝の意を表します。本研究では日本およびカリフォルニアで得られた多数の強震記録を用いており、これらの記録を収集・公開していただいた各種機関に感謝いたします。K-NET の AKT022 は防災科学技術研究所、鶴田ダム、奈川渡ダムの強震記録は Japan Commission on Large Dams⁶⁹⁾により収集された記録を使用させて頂いた。

参考文献

- 1) 宇津徳治：地震学、共立出版、1977.
- 2) 武村雅之、諸井孝文、八代和彦：明治以後の内陸浅発地震の被害から見た強震動の特徴—震度 VII の発生条件—、地震、第 2 輯、50、1998、pp485-505.
- 3) 垣見俊弘：「活断層地震」と「バックグラウンド地震」のはざまの地震—鳥取県西部地震を例として—、災害の研究、第 33 卷、損害保険料率算定会、2002、pp113-125.
- 4) 松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について、地震、第 2 輯、28、1975、pp269-283.
- 5) 地震調査研究推進本部：糸魚川—静岡構造線断層帯（北部、中部）の地震を想定した強震動評価について、<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>、2002.
- 6) 地震調査研究推進本部：震源を予め特定しにくい地震等の評価手法について（中間報告）、<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>、2002.
- 7) 武村雅之、大野晋、高橋克也：強震記録から見た震源近傍での硬質地盤上における地震動—レベル 2 地震動の共通基準—、第 25 回地震工学研究発表会講演論文集、第 1 分冊、1999、pp 61-64.
- 8) 土木学会、原子力土木委員会：原子力発電所地質・地盤の調査・試験法および地盤の耐震安定性の評価手法、1985.
- 9) 井上大榮、宮腰勝義、上田圭一、宮脇明子、松浦一樹：2000 年鳥取県西部地震震源域の活断層調査、地震、第 2 輯、54、2002、pp557-573.
- 10) Fukushima, Y. and T. Tanaka: A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 1990, pp757-783.
- 11) Ohno, S., M. Takemura, M. Niwa, and K. Takahashi: Intensity of strong ground motion on pre-quaternary stratum and surface soil amplifications during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Japan, *J. Phys. Earth*, 44, 1996, pp623-648.
- 12) Shimazaki, K.: Small and large earthquakes: The effect of the thickness of seismogenic layer and the free surface, *Earthquake Source Mechanics, AGU Geophysical Monograph* 37, 1986, pp209-216.
- 13) 武村雅之：日本列島における地殻内地震のスケーリング則、地震、第 2 輯、51、1998、pp211-228.
- 14) 活断層研究会：新編日本の活断層、東京大学出版会、1991.
- 15) Yeats, R. S., K. Sieh, C. R. Allen: *The geology of earthquakes, Oxford University Press*, 1997.
- 16) 松浦一樹、豊巣勇、佐護浩一、石本裕己、小林淳、岸本弘樹：鳥取県西部地震に伴う地表地震断層と思われる地変について、日本地震学会講演予稿集、2000、T22.
- 17) 伏島祐一郎、吉岡敏和、水野清秀、小松原琢、宍倉正展、佐々木俊法、井村隆介：2000 年鳥取県西部地震の地表地震断層、地球惑星科学関連学会合同大会講演予稿集、2001、S3-P016.
- 18) 武村雅之：日本列島における震源断層のスケーリングと近傍での強震動および被害、日本建築学会第 28 回地盤震動シンポジウム、2000、pp71-84.

- 19) Kawasaki, I.: The focal process of the Kita-Mino earthquake of August 19, 1961, and its relationship to a Quaternary fault, the Hatogaya-Koike fault, *J. Phys. Earth*, **23**, 1975, pp227-250.
- 20) 森本良平・松田時彦：北美濃地震被害地の地質、第1報 福井県打波川上流～岐阜県石徹白川上流地域、地震研究所彙報、**39**、1961、pp935-942.
- 21) Mikumo, T.: Faulting mechanism of the Gifu earthquake of September, 9, 1969 and some related problems, *J. Phys. Earth*, **21**, 1973, pp191-212.
- 22) 恒石幸正：岐阜県中部地震に関連した断層、地質学論文集、12、1976、pp129-137.
- 23) U.S. Geological Survey Circular 1045: Lessons Learned from the Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989.
- 24) 島崎邦彦：1989年サンフランシスコ（Loma Prieta）地震と地震の長期予測、地震保険調査研究「地震災害予測の研究」、損害保険料率算定会、**29**、1991、pp157-174.
- 25) Dibblee, T.W.: Geologic map of the Polvadero Gap quadrangle, California, U.S. Geological Survey, 1969.
- 26) Anderson, D. L.: The San Andreas fault, *Scientific American*, **225** (5), 1971, pp52-68.
- 27) Yeats, R. S., Huftile, G. J., and Stitt, L. T.: Late Cenozoic tectonics of the east Ventura basin, Transverse Ranges, California, *AAPG Bull.*, **78**, 1994, pp1040-1074.
- 28) Jennings, C.W.: Fault map of California with volcanoes, thermal springs and thermal wells, 1:750,000 scale: *California Department of Conservation, Division of Mines and Geology, Geologic Data Map 1*, 1975.
- 29) Winterer, E.L., and Durham, D.L.: Geology of southeastern Ventura basin, Los Angeles County, California, *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, **334**, 1962, pp275-366.
- 30) Sharp, R.V.: Displacement on tectonic ruptures, *California Div. Mines and Geology Bull.* **196**, 1975, pp187-194.
- 31) Ziony, J.I. and Yerkes, R.F.: Evaluating earthquake and surface-faulting potential, In Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region – An earth-science perspective (edited by Ziony, J. I.), *U.S. Geological Survey Professional Paper 1360*, 1985, pp43-92.
- 32) Yeats, R.S. and Huftile, G.J.: The Oak Ridge fault system and the 1994 Northridge earthquake, *NATURE*, **373**, 1995, pp418-420.
- 33) Catchings, R.D., Goldman, M.R., Lee, W.H.K., Rymer, M.J. and Ponti, D.J.: Faulting apparently related to the 1994 Northridge, California, earthquake and possible co-seismic origin of surface cracks in Potrero Canyon, Los Angeles County, California, *Bull. Seism. Soc. Am.* **88**, 1998, pp1379-1391.
- 34) Rymer, M.J., Fumal, T.E., Schwartz D.P., Powers, T.J., and Cinti, F.R.: Distribution and recurrence of surface fractures in Potrero Canyon associated with the 1994 Northridge, California, earthquake, in The Northridge, California, Earthquake of 17 January 1994, Mary C. Woods and W. Ray Seiple (Editors), *Calif. Div. Mines Geol. Spec. Publ.* **116**, 1995, 133-146.
- 35) 菊地正幸：2000年10月6日鳥取県西部の地震(M7.3)、E.I.C.地震学ノート、No.93、2000。
- 36) 相澤泰隆・小林健太・梅津健吾・山本亮：2000年鳥取県西部地震震源域における地質構造、2003年地球惑星科学関連学会合同大会、2003、J063-P002。
- 37) 阿部信太郎・宮腰勝義・井上大榮：2000年鳥取県西部地震震源域における反射法地震探査、地球惑星科学関連学会合同大会、2001、S3-P013。
- 38) 青柳恭平・阿部信太郎・宮腰勝義・井上大榮・小田義也・津村紀子・西田良平：稠密余震観測により推定した鳥取県西部地震直後の断層形状と地殻構造、日本地震学会講演予稿集、2001、P056。
- 39) 上田圭一・宮腰勝義・井上大榮：2000年鳥取県西部地震に伴う導水路トンネルの左横ずれ変位、地震、第2輯、**54**、2002、pp547-556。
- 40) Dalguer, L. A., K. Irikura, and J. D. Riera: Simulation of tensile crack generation by three-dimensional dynamic shear rupture propagation during an earthquake, *J. Geophys. Res.*, **108**, 10.1029/2001JB001738,

2003.

- 41) Dalguer, L. A., K. Irikura, W. Zhang, and J. D. Riera: Distribution of dynamic and static stress changes during 2000 Tottori (Japan) earthquake: Brief interpretation of the earthquake sequences; foreshocks, mainshock and aftershocks, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 10.1029/2001GL014333, 2002.
- 42) Lee, W.H.K., C.E. Johnson, T.L. Hemyey, and R.F. Yerkes: A Preliminary study of the Santa Barbara, California, earthquake of August 13, 1978 and its major aftershocks, *U.S. Geol. Surv. Circular* **797**, 1978, 11pp.
- 43) Corbett, E.J. and Johnson, C.E.: The Santa Barbara, California, earthquake of 13 August 1978, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **72**, 1982, pp2201-2226.
- 44) Yeats, R.S. and Olson, D.J.: Alternate fault model for the Santa Barbara, California, earthquake of 13 August 1978, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **74**, 1984, 1545-1553.
- 45) Yerkes, R.F.: Geologic and seismologic setting, In Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region – An earth-science perspective (edited by Ziony, J. I.), *U.S. Geological Survey Professional Paper* **1360**, 1985, pp25-42.
- 46) Oppenheimer, D.H., Bakun, W.H. and Lindh, A.G.: Slip partitioning of the Calaveras fault, California, and prospects for future earthquakes, *Jour. Geophys. Res.* **95**, 1990, pp8483-8498.
- 47) Kelson K.I., Simpson, G.D., Lettis, W.R. and Haraden, C.C. : Holocene slip rate and earthquake recurrence of the northern Calaveras fault at Leyden Creek, northern California, *Jour. Geophys. Res.* **101**, 1996, pp5961-5975.
- 48) Vickery, F.F.: The interpretation of the physiography of the Los Angeles coastal belt, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **11**, 1927, 417-424.
- 49) Shaw, J.H., Plesch, A., Dolan, J.F., Pratt, T.L. and Fiore, P.: Puente Hills blind thrust system, Los Angeles, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 2002, pp2946-2960.
- 50) Hauksson, E.: The 1991 Sierra Madre earthquake sequence in southern California: Seismological and tectonic analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, 1994, pp1058-1074.
- 51) 山科健一郎、松田時彦、有山智雄：1984年長野県西部地震による地変、地震研究所彙報、**60**、1985、pp249-280。
- 52) 小林啓美、大町達夫、翠川三郎：長野県西部地震1984の断層について、地震学会講演予稿集、春季、1985、15。
- 53) Fumal, F.E., J.F. Gibbs, and E.F. Roth: Near-surface geology and seismic-wave velocities at six strong motion stations near Gilroy, California, *U.S. Geological Survey Bulletin* **1639**, 1987, pp81-88.
- 54) Kinoshita, S : Kyoshin Net (K-NET), *Seismol.Res. Lett.*, **69**, No.4, 1998, pp309-332.
- 55) (社)日本電気協会・電気技術基準調査委員会：原子力発電所耐震設計技術指針、JEAG 4601、1987.
- 56) 国土交通省建築研究所編著：改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景、ぎょうせい、2001.
- 57) Nishimura, I., S. Noda, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Tohdo, and T. Watanabe: Response spectra for design purpose of stiff structures on rock sites, *Transactions of SMIRT 16, Paper #J133*, 2001, pp1-8.
- 58) 宇津徳治：日本付近のM6.0以上の地震および被害の地震の表（1885年～1980年）、地震研究所彙報、**57**、1982、pp401-463。
- 59) 宇津徳治：日本付近のM6.0以上の地震および被害の地震の表（1885年～1980年）一訂正と追加、地震研究所彙報、**60**、1985、pp639-642。
- 60) 気象庁：改訂日本付近の主要地震の表（1926年～1960年）、地震月報別冊第6号、1982、p.109.
- 61) 気象庁：地震年報、平成13年。
- 62) Moriya, T.: Collision of forearcs and overlapped deep seismic zone in the transitional zone between the northern Honshu and Kurile arcs, *J. Phys. Earth*, **34**, suppl., 1986, ppS175-S192.

- 63) 中村正夫：微小地震観測の研究成果からみた南海道地震、歴史地震、12、1996、pp131-140.
- 64) 地震調査委員会：日本の地震活動－被害地震から見た地域別の特徴－、1997、p391.
- 65) 宇佐美龍夫：最新版日本被害地震総覧[416]-2001、2003、東京大学出版会。
- 66) 松野久也：若柳地域の地質、地域地質研究報告（5万分の1地質図幅）、地質調査所、1967.
- 67) 大沢穂、大口健志、高安泰助：浅舞地域の地質、地域地質研究報告（5万分の1地質図幅）、地質調査所、1979.
- 68) 小田切聰子、島崎邦彦：歴史地震と起震断層との対応、地震、第2輯、54、2001、pp47-61.
- 69) Japan Commission on Large Dams: Acceleration records on dams and foundations, No.2, 2002, p73.
- 70) Abrahamson, N. D. and W. J. Silva: Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes, *Seism. Res. Let.*, 68, 1997, pp94-127.
- 71) Yoshida, S. and K. Koketsu: Simultaneous inversion of waveform and geodetic data for rupture process of the 1984 Naganoken-Selbu, Japan, earthquake, *Geophys.J.Int.*, 103, 1990, pp355-362.
- 72) Somerville, P. G., N. F. Smith, R. W. Graves, and N. A. Abrahamson: Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity, *Seism. Res. Let.*, 68, 1997, 199-222.
- 73) 大野晋、武村雅之、小林義尚：観測記録から求めた震源近傍における強震動の方向性、第10回日本地震工学シンポジウム、1998, 133-138.

(原稿受理日：2003年7月2日)
(採用決定日：2004年7月9日)

付表 1-1 地表地震断層が出現した国内の地震に対する文献調査(1/2)

地震名	発生年	Mj	文献に示されている活断層の長さ	文献による地質状況等
濃尾	1891	8.0	湯見断層(I):39km 根尾谷断層(I):37km 梅原断層(I):19km (活断層研究会, 1991) ^{A1)}	トレンチ調査により、繰り返し活動していることが確認されている(例えば、岡田, 1986) ^{A2)} 。
陸羽	1896	7.2	駒ヶ岳西麓断層群(I~II):10km 白岩六郷断層群(I):26km (活断層研究会, 1991) ^{A3)}	トレンチ調査等により、繰り返し活動していることが確認されている(例えば、千屋断層研究グループ, 1986) ^{A3)} 。
北丹後	1927	7.3	郷村断層(I):13km 山田断層(I):約20km (活断層研究会, 1991) ^{A4)}	北方延長は海域に連続している。地震前後の三角点の変動データも、海岸部で最大隆起量を示している(Tsurobi, 1930) ^{A4)} 。
北伊豆	1930	7.3	北伊豆豆断層系(I):約30km (活断層研究会, 1991) ^{A5)}	トレンチ調査等により、繰り返し活動していることが確認されている(丹那断層発掘調査研究グループ, 1983) ^{A5)} 。
男鹿	1939	6.8	申川断層(I):5.5km (活断層研究会, 1991) ^{A1)}	地震前後の測量結果、余震分布、津波の解析から男鹿半島西縁に沿う震源断層が想定されている(吉岡, 1974) ^{A6)} 。段丘面の傾動も地震時の変動と調和している(今泉, 1977) ^{A7)} 。今泉(1977) ^{A7)} は、段丘面の傾動から男鹿半島西部に断層を想定している。男鹿半島は第四紀を通して地震性地殻変動域(波長20km±)にあって、さらにより広域な隆起(変動)を受けているとしている。男鹿半島は東西25km、南北20km程度の大きさをもつ島状の地塊であるとしている。
鳥取	1943	7.2	鹿野断層(I):8km (活断層研究会, 1991) ¹⁾	地震前後の測量結果から求めた三角点の変位は、両断層の近くを通り、長さ30km程度ほぼ東西に延びる震源断層の存在を示している(Sato, 1973) ^{A8)} 。黒川(1983) ^{A9)} 、西田・他(1991) ^{A10)} によると、吉岡断層が鳥取平野西縁断層で伸びていたとされる。ボーリングデータによると、鳥取平野下における震源断層推定位置を境に第四系及び基盤上面に高度差が認められる。金田・岡田(2002) ^{A11)} によると鹿野—吉岡断層系の長さは鳥取平野の東方対岸まで延長したとして、約20kmとされている。
三河	1945	6.8	深溝断層(II):>3km 津平断層(I):4km (活断層研究会, 1991) ¹⁾	上田・他(1998) ^{A12)} により繰り返し活動していることが確認されている。田山(1949) ^{A13)} 、小川・他(1991) ^{A14)} により、約6km間海域に連続することが確認されている。
福井	1948	7.1	細呂木断層(II):12km 篠岡断層(II):2km 松岡断層(II):8km (活断層研究会, 1991) ¹⁾	福井県(1999) ^{A15)} によると福井地震断層に沿うリニアメントは認められないものの、第四系の一部に累積的な変形を及ぼしていることが確認されている。一方、近畿あるいは丘陵と平野との境界部に連続するリニアメントが認められるとされ、既往文献においても細呂木断層、福井東側断層、松岡断層が約27km区間に示されている。竹内(1989) ^{A16)} は、福井地震断層位置付近に地形の段差がみられるとして、岡本・他(1989) ^{A17)} はボーリング調査による地層の変形量から約3000年間隔で活動しているとしている。
伊豆半島沖	1974	6.9	石廊崎断層(I):8km (活断層研究会, 1991) ¹⁾	岡田(1975) ^{A18)} は約8km間に石廊崎断層を示し、右横ずれを示唆する屈曲が認められ、屈曲量と谷の長さとの関係から活動度をB級と推定している。地表地震断層の南東端は海域に連続しており、測地学的断層モデル(多田, 1976) ^{A19)} では長さ15kmとしている。
伊豆大島近海	1978	7.0	根木の田断層(II):4km (活断層研究会, 1991) ¹⁾	活断層研究会(1991) ^{A10)} によると、長さ4kmの確実度IIが示され、東端は海域に連続している可能性がある。測地学的断層モデル(岡田, 1978) ^{A20)} 、余震分布などからも海域の断層が活動したことが示唆される。

↓
強震観測以後

付表 1-1 地表地震断層が出現した国内の地震に対する文献調査(2/2)

地震名	発生年	Mj	文献に示されている活断層の長さ	文献による地質状況等
兵庫県南部	1995	7.3	六甲－淡路断層帶:60km 松田 (1996) ^{A21)}	地震時に、野島断層の北東延長海域において、明石大橋の橋脚間に変位が生じており、既存の断層も知られている。神戸側では、地表地震断層は認められないものの、活断層として六甲断層帶等の存在が知られている。活断層研究会 (1991) ^{A11)} によると、淡路島北半は六甲山地の延長的性質を示しているとしている。
岩手県北部	1998	6.2	西根断層群(I～II):16km (活断層研究会, 1991) ^{A11)}	宮内ほか(1998) ^{A22)} によると、山地と平野との境界に西根断層を示し、義崎地表断層の南端は同断層に収斂することから、義崎地表断層は地下では西根断層と同じであるとされている。

[付表 1-1 の参考文献]

- A1) 活断層研究会：新編日本の活断層、東京大学出版会, 1991.
- A2) 岡田篤正：1981 年濃尾活断層系梅原断層(高田地区)トレンチ調査、活断層研究, 3, 1986, pp28-32.
- A3) 千屋断層研究グループ：1982 年千屋断層(小森地区)のトレンチ調査、活断層研究, 3, 1986, pp 65-73.
- A4) Tuboi, C.: Investigation on the Deformation of the Earth's Crust in the Tango District connected with the Tango earthquake of 1927 (Part I), *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, 8, 1930, pp153-221.
- A5) 丹那断層発掘調査研究グループ：丹那断層(北伊豆・名倉地区)の発掘調査、地震研集報, 58, 1983, pp797-830.
- A6) 吉岡直人：地震の発生機構と地殻変動及び津波、東京大学大学院理学系研究科修士論文, 1974.
- A7) 今泉俊文：男鹿半島の地殻変動と地震、東北地理, 29, 1, 1977, pp35-44.
- A8) Sato, H.: A study of horizontal movement of the earth crust associated with destructive earthquakes in Japan, *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, 19, 1973, pp89-130.
- A9) 黒川泰：吉岡・鹿野断層と最近の地震活動について、鳥取大学卒業論文, 1983.
- A10) 西田良平・他：地震活動と鹿野・吉岡断層(鳥取地震)、地震学会講演予稿集, 1991, p19.
- A11) 金田平太郎・岡田篤正：1943 年鳥取地震の地表地震断層－既存資料の整理とその変動地形学的解釈－、活断層研究, 21, 2002, 73-91.
- A12) 上田圭一・他：深溝断層、蒲郡市一色町におけるトレンチ調査(演旨)、日本地震学会講演予稿集秋季大会, 1998, p114.
- A13) 田山利三郎：渥美湾海底変化の地形学的地質学的吟味、水路要報, 12, 1949, pp39-46.
- A14) 小川光明・他：三河湾における深溝断層延長部と中央構造線の音波探査、活断層研究, 9, 1991, pp41-52.
- A15) 福井県：平成 10 年度地震関係基礎調査交付金、福井平野東縁断層帯に関する調査概要報告書, 1999.
- A16) 竹内文朗：福井地震の繰り返しの総合的解釈、月刊地球, 11, 1, 1989, pp31-35.
- A17) 岡本拓夫・他：福井地震断層周辺でのボーリング調査、月刊地球, 11, 1, 1989, pp26-30.
- A18) 松田時彦：活断層としての石廊崎断層系の評価、1974 年伊豆半島沖地震災害調査研究報告, 1975, pp121-125.
- A19) 多田亮：1974 年伊豆半島沖地震による地殻変動と断層モデル、地震, 2, 29, 1976, pp117-126.
- A20) 岡田義光：地殻歪から見た 1978 年伊豆大島近海地震、東京大学地震研究所彙報, 53, 1978, pp823-840.
- A21) 松田時彦：「要注意断層」の再検討、活断層研究, 14, 1996, pp1-8.
- A22) 宮内崇裕・他：畢竟盆地西縁断層帯(西根断層群)の詳細位置と第四紀後期の活動性、活断層研究, 17, 1998, pp26-30.

付表 1-2 地表地震断層が出現したカリフォルニア州の地震に対する文献調査

地震名	発生年	Mw	文献に示されている活断層の長さ	文献による地質状況等
Imperial Valley	1940	7.0	60km : Imperial断層 (Fuis <i>et al.</i> , 1982 ^{B11} ; Yeats <i>et al.</i> , 1997 ^{B22})	Imperial断層の北部区間は、断層変位地形(断層崖)が顕著(Buwalda & Richter, 1941 ^{B33} ; Yeats <i>et al.</i> , 1997 ^{B22})。Imperial断層においては繰り返し中規模地震が発生。クリープ変位も認められる(Hill <i>et al.</i> , 1990 ^{B20} ; Jennings, 1994 ^{B35})。物理探査により断層の存在が示される(Biehler, <i>et al.</i> , 1964 ^{B36})。Imperial断層はサンアンドレアス断層の南方延長部のトランスマーブル断層(Fuis <i>et al.</i> , 1982 ^{B11} ; Yeats <i>et al.</i> , 1997 ^{B22})。
	1979	6.5		
Kern County	1952	7.5	総延長 : 73km • 45km : White Wolf断層 (平野下の伏在区間19kmを含む) • 26km : Wheeler Ridge断層(活断層) • 37km : Pleito断層(活断層) (Oakeshott, 1954 ^{B37} ; Smith, 1964 ^{B38} ; Jennings, 1994 ^{B35})	White Wolf断層は山地と平野の境界(山麓急斜面の脚部)に位置し1906年以前から地質図に図示(Oakeshott, 1954 ^{B37})。White Wolf断層の伏在区間のボーリングデータより、第四紀後期の同断層の平均変位速度(上下変位成分)は3~9mm/年(Stein & Thatcher, 1981 ^{B39})。
Parkfield	1966	6.2	37km : サンアンドレアス断層 (Slack Canyon～Cholame 区間) (Wesnousky, 1986 ^{B10})	明瞭な断層変位地形(Brown, 1970 ^{B11})。Parkfieldにおけるサンアンドレアス断層は1857年以降、6回のイベント時に変位(Bakun & McEvilly, 1984 ^{B12})。Parkfieldにおけるサンアンドレアス断層のクリープ変位速度は13mm/年(Burford & Harsh, 1980 ^{B13})。
San Fernando	1971	6.6	17km : San Fernando断層 38km : Santa Susana断層 8km : Mission Hills断層 17km : Sierra Madre (B) : 21km : Verdugo断層 (Wesnousky, 1986 ^{B10})	San Fernando断層の中部～東部区間は山地と平野の境界に位置し、地震前から山地前線の明瞭な崖として認識(Miller, 1928 ^{B14} ; 1934 ^{B15})。San Fernando断層の西部は平野部に位置するが、地震前に撮影された空中写真の判読により、急斜面を示す地形(崖)が認められる(USGS Staff, 1971 ^{B16})。地震後のトレンチ調査により、同断層系の1回前のイベント年代は100～300年前(Bonilla, 1973 ^{B17})。
Supperstition Hills	1987	6.6	総延長 : 36km • 22km : Supperstition Hills断層 • Wiemer断層 (Wesnousky, 1986 ^{B10} ; Sharp <i>et al.</i> , 1989 ^{B18} ; Jennings, 1994 ^{B35})	Supperstition Hills断層は横ずれ変位地形が明瞭で、累積変位量の計測。トレンチ調査により、1987年以前の複数のイベントが推定されている(Hudnut & Sieh, 1989 ^{B19} ; Lindvall <i>et al.</i> , 1989 ^{B20})。Supperstition Hills断層に沿って地震活動域。クリープ変位も認められる(Doser & Kanamori, 1986 ^{B21} ; Sharp <i>et al.</i> , 1989 ^{B18})。Wesnousky(1986) ^{B10} は、Supperstition Hills断層(長さ22km)を震源とする地震の規模を事前にM _L =6.4と見積もっていた。
Landers	1992	7.3	総延長 : 約90km Camp Rock断層～Homestead Valley断層～Johnson Valley断層 (Hart <i>et al.</i> , 1993 ^{B22} ; Jennings, 1994 ^{B35})	Johnson Valley断層, Homestead Valley断層, Emerson断層, Camp Rock断層は変位地形が明瞭で、本地震前に活断層として図示されていた(Allen <i>et al.</i> , 1965 ^{B23} ; Wesnousky, 1986 ^{B10} ; Hart <i>et al.</i> , 1993 ^{B22})。
Hector Mine	1999	7.1	総延長約57km Pisgah断層～Bullion断層 (Hart <i>et al.</i> , 1993 ^{B22}) 総延長 : 約91km Pisgah断層～Bullion断層～Mesquite Lake断層 (Hart <i>et al.</i> , 1993 ^{B22})	Bullion断層, Lavic Lake断層の南部は変位地形が明瞭で、本地震前に活断層として図示(Allen <i>et al.</i> , 1965 ^{B23} ; Wesnousky, 1986 ^{B10} ; Hart <i>et al.</i> , 1993 ^{B22})。Lavic Lake断層の北部も地震後の空中写真判読、現地調査、トレンチ調査により、地表地表断層沿いに1999年の地震以前に形成された変位地形、イベントが認められた(Treiman <i>et al.</i> , 2002 ^{B24} ; Rymer <i>et al.</i> , 2002 ^{B25})。

[付表 1-2 の参考文献]

- B1) Fuis, G.S., Mooney, W.D., Healey, J.H., McMechan, G.A., and Lutter, W.J.: Crustal structure in the Imperial Valley region, in The Imperial Valley, California, earthquake of October 15, 1979, *U.S. Geological Survey Professional Paper 1254*, 1982, pp25-49.
- B2) Yeats, R.S., Sieh, K. and Allen, C.R.: The Geology of Earthquake, *Oxford University Press*, 1997, p568.
- B3) Buwalda, J.P. and Richter C.F.: Imperial Valley earthquake of May 18, 1940, (Abstract), *Bull. Geol. Soc. Am.* **52**, 1941.
- B4) Hill, D.P., Eaton, J.P., and Jones, L.M.: Seismicity, 1980-86, in The San Andreas Fault System, *California, U.S. Geological Survey Professional Paper 1515*, 1990, pp115-152.
- B5) Jennings, Charles W. : Fault Activity Map of California and Adjacent Areas with Location and Ages of Recent Volcanic Eruptions, *California Geologic Data Map Series, Map No. 6. California Division of Mines and Geology*, 1994.
- B6) Bichler, S., Kovach, R.L. and Allen C.R.: Geophysical framework of northern and of Gulf of California structural province, *Am. Assoc. Petroleum Geologist Memoir*, **3**, 1964, pp126-296.
- B7) Oakeshott, G.B.: Geologic setting and effects of Kern County earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.* **44**, 1954, pp326-337.
- B8) Smith A.R.: Geologic map of California "Bakersfield sheet", Scale 1:250,000, *Division of Mines and Geology*, 1964.
- B9) Stein, R. S., and W. Thatcher: Seismic and aseismic deformation associated with the 1952 Kern County, California, earthquake and relationship to the Quaternary history of the White Wolf fault, *J. Geophys. Res.*, **86**, 1981, pp4913-4928.
- B10) Wesnousky, S.G.: Earthquakes, Quaternary faults, and seismic hazards in southern California, *J. Geophys. Res.*, **19**, No. B12, 1986, pp12587-12631.
- B11) Brown, R.D., Jr.: Map showing recently active breaks along the San Andreas and related faults between the northern Gabilan Range and Cholome Valley, California, scale 1:62,500, *U.S. Geol. Surv. Misc. geol. Invest. Map.*, I-575, 1970.
- B12) Bakun, W.H. and McEvilly, T.V.: Recurrence models and Parkfield, California, earthquake, *J. Geophys. Es.*, **89**, 1984, pp3051-3058.
- B13) Burford, R.O., and Harsh, P.W.: Slip on the San Andreas fault in central California from alignment array surveys, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **70**, 1980, pp1233-1261.
- B14) Miller, W.J.: Geomorphology of the southwestern San Gabriel Mountains of California, *Calif. Univ. Pubs. Geol. Sci.*, **17**, 1928, pp193-240.
- B15) Miller, W.J.: Geology of the western San Gabriel Mountains of California, *Calif. Univ. Los Angeles Pubs. Math and Physical Sci.*, **1**, 1934, pp1-114.
- B16) U.S. Geological Survey Staff: Surface faulting, in The San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971, *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* **733**, 1971, pp55-76.
- B17) Bonilla, M.G.: Trench exposures across surface fault ruptures associated with San Fernando earthquake in San Fernando, California, earthquake of February 9, 1971, *U.S. Department of Commerce, Washington, D.C.*, vol. 3, 1973, pp173-182.
- B18) Sharp, R., Budding, K., Boatwright, J., Ader, M., Bonilla, M., Clark, M., Fumal, T., Harms, K., Lienkaemper, J., Morton, D., O'Neill, B., Ostergren, C., Ponti, D., Rymer, M., Saxton, J., and Sims, J.: Surface faulting along the Superstition Hills fault zone and nearby faults associated with the earthquakes of 24 November 1987, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **79**, 1989, pp252-281.
- B19) Hudnut, K.W., and Sieh, K.E.: Behavior of the Superstition Hills Fault during the Past 330 Years, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **79**, 1989, pp304-329.
- B20) Lindvall, S.C., Rockwell, T.K., and Hudnut, K.W.: Evidence for prehistoric earthquakes on the Superstition Hills fault from offset geomorphic features, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **79**, 1989, pp342-361.
- B21) Doser, D. I. and H. Kanamori: Spatial and temporal variations in seismicity in the Imperial valley (1902-1984), *Bull. Seism. Soc. Am.* **76**, 1986, pp421-438.
- B22) Hart, E.W., Bryant, W.A. and Treiman, J.A.: Surface faulting associated with the June 1992 Landers earthquake, California, *California Geology*, **46**, (1), 1993, pp10-16.
- B23) Allen, C.R., Amand, P.St., Richter, C.F. and Nordquist, J.M.: Relationship between seismicity and geologic structure in the southern California region, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **55**, 1965, pp753-797.
- B24) Treiman, J.A., Kendrick, K.J., Bryant, W.A., and Rockwell, T.K. and McGill, S.F.: Primary surface rupture associated with the Mw 7.1 16 October 1999 Hector Mine earthquake, San Bernardino County, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 2002, pp1171-1191.
- B25) Rymer, M.J., Seitz, G.G., Weaver, K.D., Orgil, A., Faneros, G., Hamilton, J.C. and Goetz, C.: Geologic and paleoseismic study of the Lavic Lake fault at Lavic Lake pLaya, Mojave Desert, south California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 2002, pp1577-1591.

付表2 強震観測開始以前に発生した地震に対する活断層調査結果

地震名	発生年月	M	深さ(km)	断層モデル メカニズム解	余震分布、被害分布、微小地震分布との対応	文献に示されている活断層	総括
庄内	1894/10	7.0	vs	なし	被害は庄内平野東縁断層帯に沿う(宇佐美, 2003) ^{C2)}	観音寺断層 確実度: I ~ II 長さ: 21km (活断層研究会, 1991) ^{C3)}	・地震被害域の東縁に沿って活断層群が示されており、本地震は観音寺断層等の活動によるものとされている(鈴木・他, 1989) ^{C4)} 。
						庄内平野東縁断層帯 活断層 長さ: 40km (中田・今泉, 2002) ^{C5)}	
江瀬 (姉川)	1909/8	6.8	vs	なし	被害は鍛冶屋断層及び醍醐断層に沿う(宇佐美, 2003) ^{C2)}	鍛冶屋断層 醍醐断層 確実度: I ~ II 長さ: 16km (活断層研究会, 1991) ^{C3)}	・地震被害域の北東縁に沿って鍛冶屋断層などの活断層群が示されている(活断層研究会, 1991) ^{C3)} 。
						活断層、一部推定 長さ: 20km (中田・今泉, 2002) ^{C5)}	
北但馬	1925/5	6.8	vs	なし	微小地震分布は頗著ではない	田結地震断層 確実度: 一 長さ: 2km (活断層研究会, 1991) ^{C3)}	・ Lcランクのリニアメントが数 km 程度判読できる。 ・ 海城延長においても海底面に高度差が認められるが、活動時期が不明のため、第四紀後期の活動を否定できない。
西埼玉	1931/9	6.9	0	N74W/80S 長さ 20km 幅 10km 上端 1km 北側隆起 左横ずれ 1m (Abe, 1974) ^{C1)}	余震は櫛挽断層付近に分布する (気象庁データから作成)	櫛挽断層ほか 確実度: I 長さ: 20km (活断層研究会, 1991) ^{C3)}	・ 震源近傍には平井一櫛挽断層などがある(活断層研究会, 1991) ^{C3)} 。 ・ 断層の方向は、断層モデル(Abe, 1974) ^{C1)} 、余震分布と調和している。
						平井一櫛挽断層帯 活断層 長さ: 約 30km (中田・今泉, 2002) ^{C5)}	

[付表2の参考文献] C1) Abe, K.: Seismic Displacement and ground motion near a fault: The Saitama earthquake of September 21, 1931, *J. Geophys. Res.*, 79, 1974, pp4393-4399. C2) 宇佐美龍夫:最新版日本被害地震総覧[416]-2001、2003、東京大学出版会. C3) 活断層研究会:新編日本の活断層、東京大学出版会、1991. C4) 鈴木康弘、池田安隆、渡辺満久、須貝俊彦、米倉伸之:庄内平野東縁における完新世の断層活動と1894年(明治27年)庄内地震、地震、42、1989. C5) 中田高、今泉俊文 [編]:活断層詳細デジタルマップ、東京大学出版会、2002. pp151-159.

Earthquake Ground Motions by Blind Faults in the Upper Crust

**- Categorization of Earthquakes Based on Geological Survey and
Examination of the Upper Level from Strong Motion Records -**

KATO Kenichi¹⁾, MIYAKOSHI Katsuyoshi²⁾, TAKEMURA Masayuki³⁾

INOUE Daiei⁴⁾, UETA Keiichi⁵⁾, Dan Kazuo⁶⁾

1) Member, Deputy Senior Manager, Kobori Research Complex, Kajima Corporation, Dr. Eng.

2) Senior Research Geologist, Central Research Institute of Electric Power Industry

3) Member, Deputy Director, Kobori Research Complex, Kajima Corporation, Dr. Sci.

4) Associate Vice President, Central Research Institute of Electric Power Industry, Dr. Sci.

5) Research Geologist, Central Research Institute of Electric Power Industry

6) Member, General Manager, Ohsaki Research Institute, Inc., Dr. Eng.

ABSTRACT

Upper level of seismic ground motions caused by blind faults in the upper crust is examined on the basis of near-source strong motion records observed on rock sites in Japan and California. In this paper, the blind fault is defined as the fault that cannot be identified in advance by the detailed geological surveys such as the lineament analysis from aerial photographs, field investigation, and so on. We investigate 41 earthquakes that occurred in the upper crust with a moment magnitude (Mw) from 5.6 to 7.5, and use 30 strong motion records observed at 15 stations on rock sites from 11 earthquakes to determine the upper strong motion level for blind faults. The estimated upper level is as follows: the peak ground acceleration is 450 cm/s/s, the flat level of the acceleration response spectra is 1200 cm/s/s, and the flat level of the velocity response spectra is 100 cm/s on rock sites with shear wave velocity of about 700 m/s.

Key Words: *Upper Level, Strong Motion Records, Blind Fault, Geological Survey, Near-source*