

Estimation of Earthquake Ground Motion Based on Active Faults in Reihoku Region, Fukui Prefecture

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-10-28 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 小嶋, 啓介, Kojima, Keisuke メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/7790

福井県嶺北地域の断層活動に基づく福井平野の地震動の推定

Estimation of Earthquake Ground Motion Based on
Active Faults in Reihoku Region, Fukui Prefecture

小嶋 啓介
(福井大学工学部建築建設工学科)

1. はじめに

戦後間もない1948年6月28日の福井地震では、3,700名余りの方が犠牲となり、福井、丸岡、春江などの坂井平野に位置する集落では、家屋の倒壊率が80%以上という未曾有の被害に見舞われた。福井地震による建築構造物の被害状況の激しさから新設された気象庁震度階7は、約半世紀を経た1995年兵庫県南部地震ではじめて適用された。1993年の北海道南西沖地震以来、釧路沖地震、北海道東方沖地震などの大地震が頻発し、日本列島周辺は地震の活動期を迎えたとする見方も多い。

福井県周辺は、規模が大きく活動度の高い活断層が多く分布する中部地域に位置しているとともに、市街地の多くが厚い軟弱地盤に覆われた平野部に位置しているために、地震被害に遭遇する危険度が高いといえる。福井県は過去2度にわたって、地震被害予測調査を実施し、人的被害、家屋、社会基盤などの被害を推定し、その対策を検討している^{1) 2)}。しかしながらその予測は、福井地震断層などの特定の断層活動に起因する地震を想定しているため、普遍的な地震被害予測とはいえない面がある。本研究では、福井県嶺北地方に分布する断層が活動することによって引き起こされる地震を対象とし、福井平野周辺の地震動の推定値を提示し、多くの方々に関心を持ってもらうとともに、地震防災の基礎資料としていただくことを目的としている。

2. 地震動推定手法

翠川・小林^{3) 4)}は、地震断層の破壊過程を考慮した地震基盤面への入射波速度応答スペクトルの計算手法を提案した。定式化に際し以下の3つの仮定をしている。

1) 図-1(a)に示すように、地震動の継続時間 d は、破壊が生じてから終了するまでの時間 d_{source} と、観測点に最も速く到着する波と最も遅く到着する波の到達時間差 d_x の和で表される。また、地震動は定常的でなく、単純に考えれば図に示すような矩形で表すことができる。

2) 入射波の包絡線は、断層小領域からのインパルスの重ね合わせで表される。小領域からのインパルスの形状は、図-1(b)に示すように、小領域の破壊継続時間 d'_{source} は一定、それ以後は最も遅く到達する波が到着する時間 d_x まで線形的に減衰する。

3) 1質点系の応答包絡線は、入力地震動のそれと相似である。

以上の仮定にしたがって、断層面を図-2に示すような長方形と仮定し、長さ L 、幅 W の断層面 S を n 個の小領域 ΔS_i (長さ ΔL 、幅 ΔW)に分割する。破壊開始点である震源から、各小領域が地震動を放出しながら破壊し、断層全体に破壊が及ぶとする。この小領域ごとのインパルスを重ね合わせることで、地震動をシミュレートすることができる。まず、破壊継続時間と最早-最遅到着時間差は、次式で与えられるとする。

$$d'_{source} = \Delta L / V_R, \quad d'_x = C \times X_i \cong 0.24 \times X_i \quad (1)$$

(キーワード：活断層，入射波速度応答スペクトル，重複反射法，表層地震動)

Keisuke Kojima, Department of Architecture and Civil Engineering, Fukui University,
Fukui, 910-8507

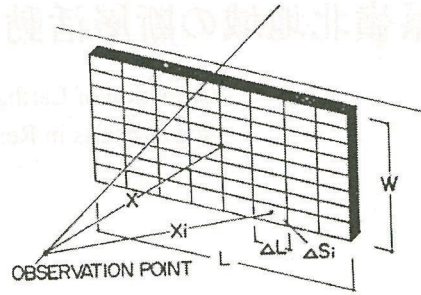
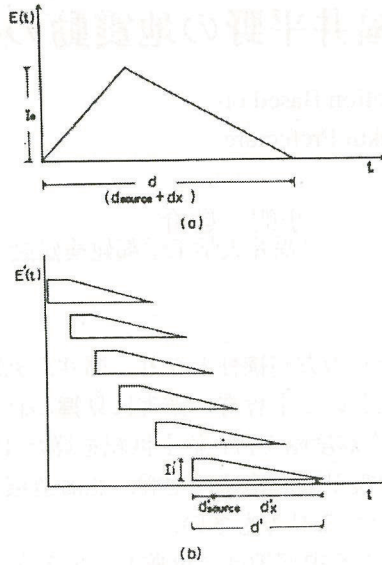


図-2 断層面とセグメント

図-1 各セグメントからのインパルスと地震動の包絡線

ここに、 V_R : 破壊伝播速度、 X_i : 小領域中心から観測点までの距離であり、係数 C は、伝播経路の弾性波速度に依存するが、過去の地震動記録などから経験的に 0.24 に設定している。一方、インパルスの大きさについては、小領域 ΔS_i からのインパルスの形状が、放出されるエネルギーが分割数 n によらないことから、以下の式で求められる。

$$I'_i = \frac{d}{n(2d'_{source} + d'_X)} \times I_0 \quad (2)$$

I'_i を求めるためには、 I_0 を求める必要があるが、翠川・小林は、多くの実地震記録の回帰分析から、地震基盤からの入射波速度応答スペクトル (減衰定数 $h = 5\%$) が次式で与えられ、これを I_0 とすることを提案している。

$$\log_{10} S_{v0}(T) = a(T) \cdot M - b(T) \cdot \log_{10} x - c(T) \quad (3)$$

ここに、 M : 地震のマグニチュード、 x : 震源距離、 a, b, c : 周期 T に依存する係数である。上式に対象断層に起因する地震のマグニチュード M と、観測地点までの震源距離 x を代入することにより得られる応答値を式(3)の I_0 とすることにより、各小領域からのインパルスの大きさ I'_i を求めることができる。以上のように、翠川・小林の入力地震動推定モデルは、断層面の小領域から放出される周波数成分ごとのインパルス特性を実験式から決定し、伝播してくる各インパルスの重ね合わせから、地震動による 1 質点系の応答包絡線を求め、地震基盤からの入射波速度応答スペクトルを計算しようとするものである。

3. 福井県嶺北地方の活断層

活断層研究会⁶⁾によれば、福井県嶺北地域は西南日本内帯東部-中部山地に区分されている。中部山地は、西側を敦賀湾-伊勢湾線、東側をフォッサマグナ、南側を中央構造線で取り囲まれた領域であり、横ずれおよび逆断層タイプの大規模で活動度の高い活断層が多数分布している地域にあたる。福井県に限って見た場合、 $M = 8$ 級の地震を発生させるような長大な断層は認められていないものの、 $M = 7$ 級の断層が複数存在し、地震被害の潜在的な危険性が高い地域であるといえる。

山本⁷⁾は断層露頭調査、空中写真判読による断層変位地形の発達程度、段丘面の形状・高度変化等を基に、福井県嶺北地方に存在する活断層リストを作成している。図-3は山本の活断層分布図であり、実線で示された活断層として、大小含めて 34 あげられている。なお福井地震断層については、明瞭な表層断層ならびに断層地形が確認できていないことから対象外としているが、ここでは Kanamori⁷⁾、吉

福井県嶺北地域の断層活動に基づく福井平野の地震動の推定

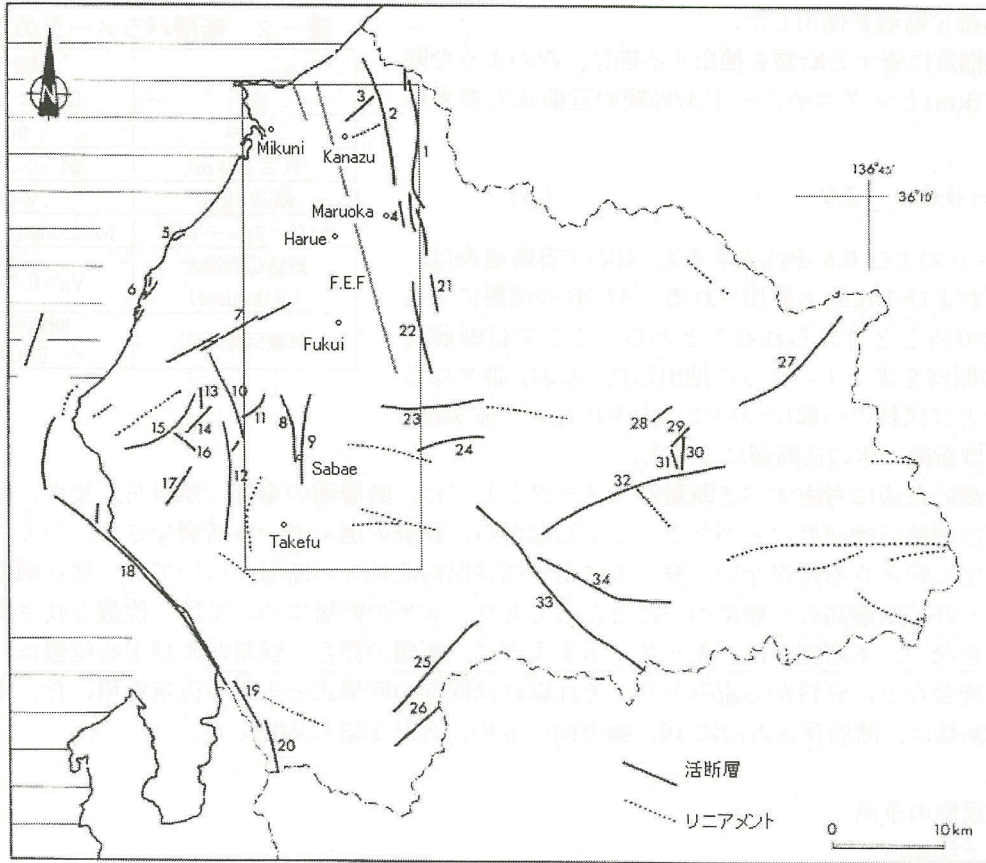


図-3 福井県嶺北地方の活断層分布 (山本に修正加筆)

表-1 地震動の推定を行った活断層の概要

番号	断層名	長さ (km)	M	確実度	活動度	タイプ	走行 (°)	傾斜 (°)
1	剣ヶ岳断層	20	6.4	II	B~C	東隆起	N20.5° E	90*
2	細呂木断層	11	5.9	II	B~C	東隆起	N12° W	90*
7	更毛断層	12	6.0	II	B~C	北隆起/右	N60° E	90*
8	鯖江台地西縁断層	6	5.4	II	B	東隆起	N12° W	90*
9	鯖江断層	9	5.8	II	B	西隆起	N3° E	90*
10	宝泉寺断層	9	5.8	II	B~C	西隆起/左	N18W	90*
11	朝日断層	6	5.4	II	B	東隆起	N40E	90*
12	蟬口断層	12	6.0	II	B~C	西隆起	N3W	90*
15	笹川断層	8	5.6	II	?	-	N54E	90*
18	甲楽城断層	22	6.6	II	B	東隆起	N41W	90*
20	柳ヶ瀬断層	37	7.0	II	B	左	N21W	90*
22	松岡断層	8	5.6	II	B	東隆起	N13W	90*
23	白椿山断層	9	5.8	II	B~C	南隆起/右	N84E	90*
24	殿上山断層	6	5.4	II	B~C	南隆起/右	N80E	90*
25	金草岳断層	10	5.8	I / II	B	東隆起/右	N41E	90*
26	笹ヶ峰断層	10	5.8	II	B~C	南東隆起/右	N46E	90*
27	鳩ヶ湯-小池断層	14	6.1	II~III	C	北側隆起/右	N46E	90*
32	宝慶寺断層	18	6.4	II	B~C	南隆起/右	N69E	90*
33	温見断層	39	7.0	I / II	A~B	左	N52W	90*
34	巢原断層	22	6.5	III	?	-	N81W	90*
F	福井地震断層	43	7.1	潜在	A	北隆起/右	N15E	80

岡³⁾による推定断層を採用した。

地震動の推定に資する断層を抽出する際に、次のような断層の長さ L (km) とマグニチュード M の間の近似式を参考にした。

$$\log L = 0.6M - 2.9 \quad (4)$$

上式に、 $M=6$ および 6.5 を代入すると、対応する断層長は、それぞれ 5 および 10 km と算出される。 $M < 6$ の地震による被害は軽微であると考えられることから、ここでは断層長 5 km 以上の断層を表-1のように抽出した。なお、番号ならびに位置および傾斜の一部については山本に従い、確実度、活動度などは新編日本の活断層によった。

地震動予測のために考慮すべき断層パラメータとしては、断層面の走行、傾斜角、長さ、幅、破壊伝播形式および破壊伝播速度などがある。しかしながら、調査の進んでいる断層でさえ、いくつかのパラメータは推定に頼らざるを得ない。表-1に示す福井県嶺北地方の断層についても、柳ヶ瀬断層や福井地震断層の一部が断層調査の緒についたところであり、大半の断層については、位置と長さ程度の情報しか把握できない。本研究では、表-2で示すように、断層の長さ、傾斜および中心位置は、山本および活断層研究会などに資料から読みとり、それ以外は既存の回帰式と表中の仮定を用いた。また、セグメントの分割数は、断層長さ方向に 16 、幅方向に 8 の、合計 128 に固定した。

4. 表層地震動の予測

1) 地震動予測領域

地震動の推定対象領域として、図-3に示す四角で囲まれた領域を設定した。これは、福井、鯖江、武生の三市、ならびに三国、芦原、金津、丸岡、坂井、春江の六町の市街地を含み、福井県の全人口の約 6 割以上が居住する地域であること、地震動の振幅の増幅を伴う第四紀層が厚く堆積した福井平野の範囲などを考慮して決定した。領域の南北および東西の境界はそれぞれ、北緯 $35^{\circ} 52' \sim 36^{\circ} 15'$ および東経 $136^{\circ} 8' \sim 136^{\circ} 18'$ としている。緯度、経度方向ともに $1'$ に相当する小領域に分割し、緯度方向 23 、経度方向に 10 の合計 230 個の小領域に分割し、各小領域の中心点を評価点とした。

2) 予測領域の地盤条件

2章で示した翠川・小林の地震動推定手法で得られる地震動は、地震学的基盤(せん断波速度で 3 km/sec 程度の層)からの入射波であるため、上部堆積地盤における重複反射にともなう地震動の変化を明らかにする必要がある。山中らが微動のアレイ観測から¹¹⁾、また鳥海、大場¹³⁾は弾性波探査からそれぞれ、福井平野の地震学的基盤は、概ね深さ 1 km 程度に存在することを示している。しかしながらその情報は点あるいは線的であり、福井平野全域の3次元的な広がりについては未解明の点が多い。また、工学では地震入力基盤として、S波速度が 300 m/sec 程度の層にとることもまれではないことから、本論文では以下に示す第3紀最上層に第2章で示した方法で得られた地震動を入力することとした。

S波速度で 1.8 km/sec の第3紀最上層ならびにその上部に広がる洪積および沖積層については、ボーリングデータおよび水門学、地質学的見地から、その堆積構造の概略がまとめられている。また、福井県の震災予測調査²⁾に際して $GL-150$ m に達するPS検層も行われている。図-4は、福井平野東縁断層帯の調査¹³⁾の一環として行われたP波弾性波探査による地質断面である。P波探査は、潜在断層の確認のため、春江駅付近から東側の山麓までの約 6 km の測線で行われた。図より明らかなように、P波速度で $2380 \sim 2400$ m/sec を示す基盤(第3紀最上層)は、東の山地境界付近で数 10 m であるのに対し、西の平野中央に向かうほど深くなり、春江付近では 300 m 程度に達していることがわかる。また、P波速度が 2000 m/sec より小さな沖積層についても、春江駅に向かって厚く堆積している様子がうかがえる。なお、図に示した●印は、筆者ら¹¹⁾が行っている地震観測地点を示しており、観測地震動についても平

表-2 断層パラメータの設定方法

	設定方法
走行	図-3より入力
傾斜	90°
長さ L (km)	図-3より入力
幅 W (km)	$W=L/2$
マグニチュード M	$M=2 \cdot \log_{10} (L/0.012)$
破壊伝播速度 V_R (km/sec)	$V_R=0.7 \times 10^{0.08M}$
破壊伝播形式	断層中心から同心円状

福井県嶺北地域の断層活動に基づく福井平野の地震動の推定

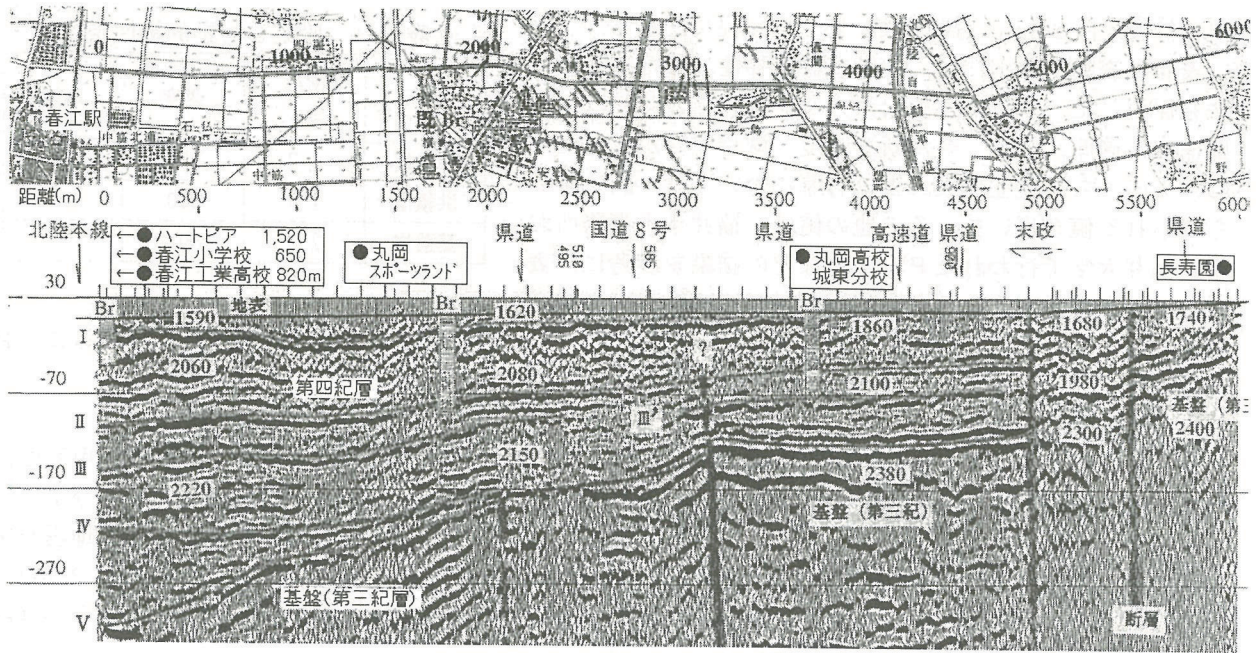


図-4 P波探査による地質断面および地震観測地点 (福井県に加筆)

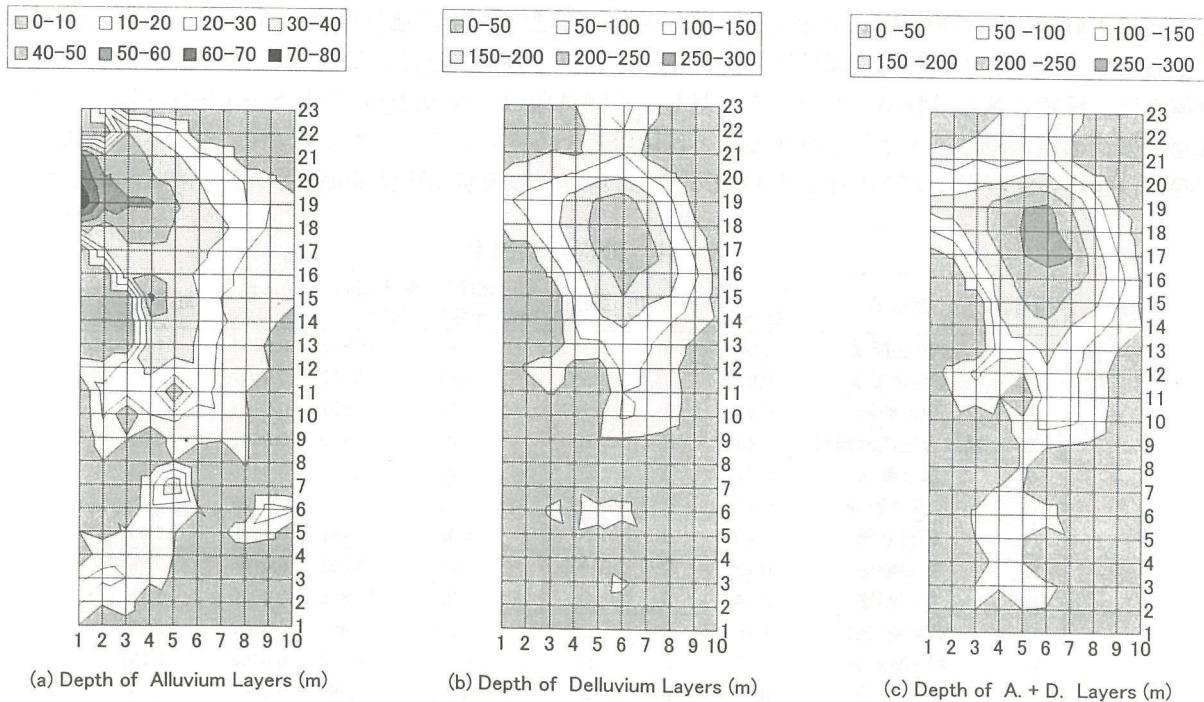


図-5 沖積層および洪積層の厚さ

野中央部ほど周期が長く、振幅が大きくなる傾向が明らかであり、上記の堆積構造と調和している。

図-5は、以上の資料を基に作成した予測対象領域の沖積層、洪積層および第4紀層の厚さの分布である。洪積層は坂井平野の中央部付近を中心としたボール状に堆積しており、春江町から坂井町付近では250mにも達することがわかる。一方、沖積層の堆積形態は洪積層の場合とはやや異なり、九頭竜川、日野川、足羽川からなる九頭竜川水系の上流側から下流に向かって深く堆積しており、現在の九頭竜川

河口付近では 80m にも達していることが見てとれる。

表層地震動の算出には、地盤を線形弾性とした重複反射法を採用した。解析に必要な入力パラメータとしては、地盤構成、層厚、密度、せん断波速度、減衰定数が必要である。このうち、地盤構成および層厚については、図-5 から得られる値を用いて、その他の値は、福井土木事務所および福井大学で行われた P S 検層などの結果を参考に、表-3 のように設定した。なお、地盤材料の剛性および減衰特性のひずみ依存性を考慮していないことから、算出される表層の応答は、大きめに評価されることを念頭に置く必要がある。

3) 地震動予測結果

表-1 に示すすべての活断層による地震動を算定した。そのうちの代表例として、剣ヶ岳、甲楽城、温見、福井地震断層の 4 断層による基盤からの入力加速度、表層加速度の最大値を図-6 および 7 に示す。図-6 の入力地震動分布を見ると、地震動算定範囲内に距離の大きな断層が存在する福井地震断層を除いて、全体的に断層からの距離に比例的に入力加速度が現れていることがわかる。また、長さ 20km、M=6.4 級の剣ヶ岳断層クラスでも、震源近傍においては 250gal に達する地震動が入射されることが理解される。

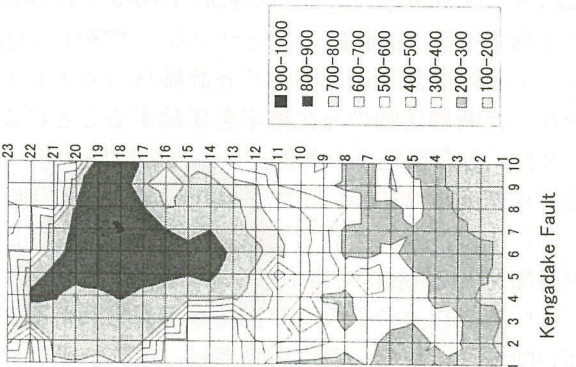
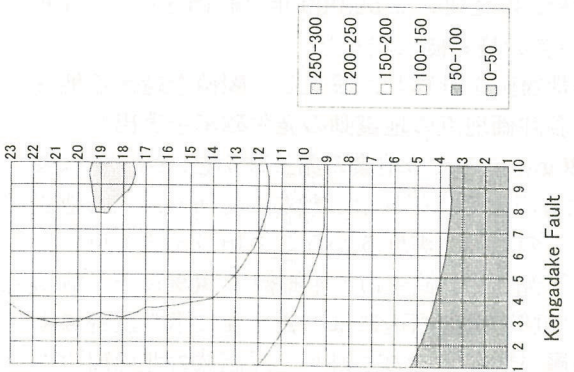
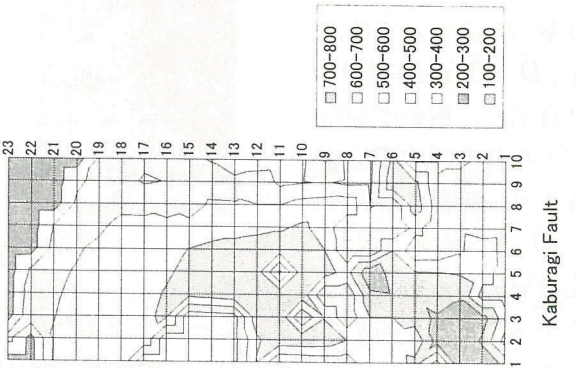
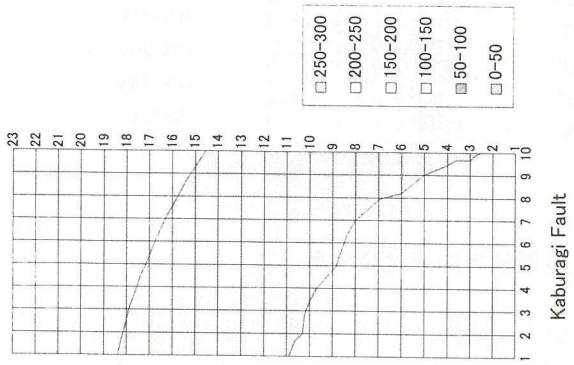
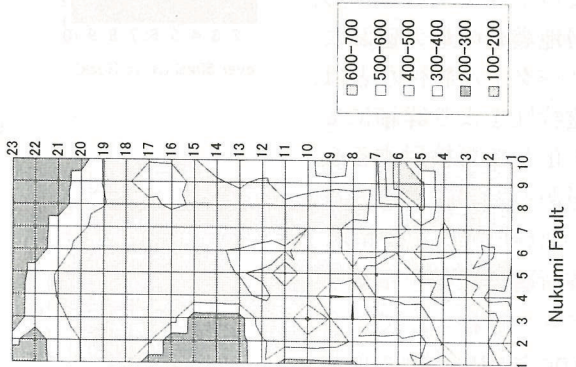
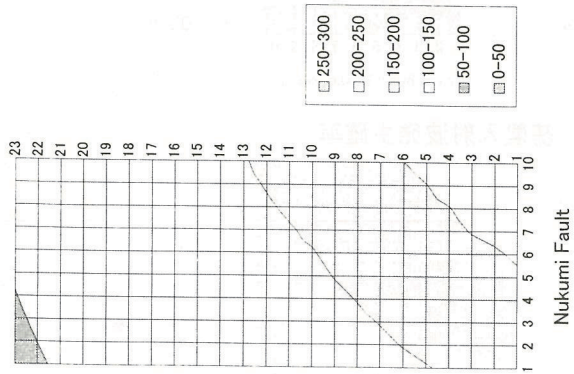
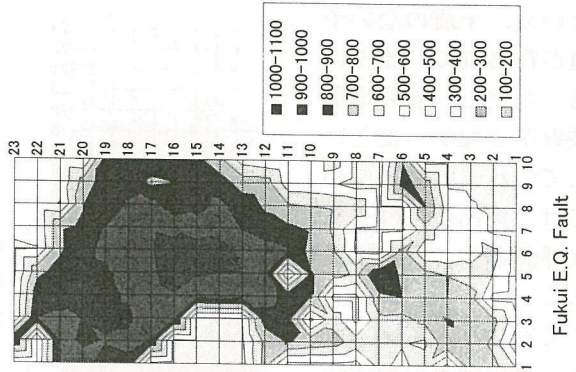
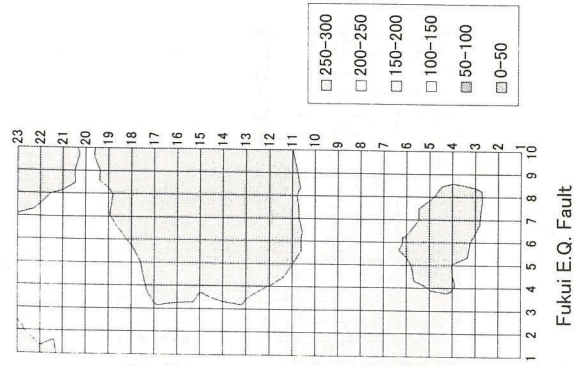
図-7 の表層加速度分布では、震源距離に加えて図-5 に示した地盤条件の影響が非常に大きく、沖積および洪積層の厚い領域で地震動が大きく増幅される傾向が明らかである。沖積層で覆われた平野部の表層地震動は、入力地震動の 4 倍前後に増幅され、震源断層が評価領域内に存在する剣ヶ岳および福井地震断層では、福井平野中央部付近で 1000gal を越える地震加速度が算出されている。1993 年釧路沖地震では、建物の被害は軽微であったのに対し、釧路気象台では 919gal の最大加速度が得られており、加速度の最大値のみで被害予測を論ずることは困難であるといえる。しかしながら、1948 年の福井地震の際に、建物の倒壊率が 80% を越えた地域¹⁴⁾ は、本解析の表層加速度 900gal 以上の領域と対応してい

表-3 設定した動的物性定数

	密度 (t/m ³)	せん断波 速度 (m/sec)	Q 値
沖積層	1.7	200	10
洪積層	1.9	650	10
基盤岩	2.3	1800	50

表-4 断層活動確率

番号	断層名	すべり量 D(m)	确实度	活動度	変位速度S (m/千年)	発生間隔 R(年)	発生確率 (100年)	寄与率
1	剣ヶ岳断層	1.59	II	B~C	0.1	15,887	0.0063	1.3%
2	細呂木断層	0.87	II	B~C	0.1	8,738	0.0114	2.4%
7	更毛断層	0.95	II	B~C	0.1	9,532	0.0104	2.2%
8	鯖江台地西縁断層	0.48	II	B	0.32	1,489	0.0649	13.9%
9	鯖江断層	0.71	II	B	0.32	2,234	0.0438	9.4%
10	宝泉寺断層	0.71	II	B~C	0.1	7,149	0.0139	3.0%
11	朝日断層	0.48	II	B	0.32	1,489	0.0649	13.9%
12	蟬口断層	0.95	II	B~C	0.1	9,532	0.0104	2.2%
15	笹川断層	0.64	II	C	0.032	19,858	0.0050	1.1%
18	甲楽城断層	1.75	II	B	0.32	5,461	0.0181	3.9%
20	柳ヶ瀬断層	2.94	II	B	0.32	9,184	0.0108	2.3%
22	松岡断層	0.64	II	B	0.32	1,986	0.0491	10.5%
23	白椿山断層	0.71	II	B~C	0.1	7,149	0.0139	3.0%
24	殿上山断層	0.48	II	B~C	0.1	4,766	0.0208	4.4%
25	金草岳断層	0.79	I/II	B	0.32	2,482	0.0395	8.4%
26	笹ヶ峰断層	0.79	II	B~C	0.1	7,943	0.0125	2.7%
27	鳩ヶ湯-小池断層	1.11	II~III	C	0.032	34,752	0.0029	0.6%
32	宝慶寺断層	1.43	II	B~C	0.1	14,298	0.0070	1.5%
33	温見断層	3.10	I/II	A~B	1	3,098	0.0318	6.8%
34	巢原断層	1.75	III	C	0.032	54,610	0.0018	0.4%
F	福井地震断層	3.42	潜在	B	1	3,416	0.0289	6.2%
確率合計=							0.4681	



図一六 基盤からの入力加速度の最大値分布

図一七 表層加速度の最大値分布

るといえ、矛盾のない予測値が得られているといえる。ただし、福井地震で被害が少なかったといわれている三国付近については、算出結果はやや過大評価をしているようである。いずれにしても、ここで得られた表層地震動は、評価地点の地盤特性と極めて単純なモデルによって与えているため、表層地震動の最大値およびスペクトル特性などは、地盤特性をより詳細にモデル化して再検討する必要があると認識している。

4) 地震危険度予測結果

各断層の活動を単純なポアソン過程として、今後 100 年間における地震の発生確率を表-4 のように評価した。表中のすべり量 D については、 $\log_{10} D = 0.6M - 4.0$ より算出し、活動度から見積もられる平均変位速度 S より、活動間隔 R を、 $R = D/S$ として求めた。

発生間隔は、断層活動に伴うすべり量と平均変位速度によって決まるため、規模が小さく活動度の高い断層で短くなり、規模が大きく活動度の低い断層で長くなる。例えば、朝日断層はB級で、長さが6kmであるが、この場合1回の地震によるすべり量は約50cmと算出され、活動間隔は概ね1,500年となる。これに対し、C級で長さが22kmの巣原断層は、すべり量が1.75mと計算されるため、再起期間は55,000年と評価される。各断層の活動確率を、活動確率の合計で割って寄与率を算出し、表の最右欄に記した。

すべての断層活動に起因する各評価点の入力および表層地震動を計算し、設定した閾値を越える地震動を与えた断層活動の発生確率を累積することによって、各評価地点の地震動の発生確率を算出した。図-8は、各評価地点の基盤への入力加速度が50および80galをこえる地震の発生確率を、図-9は表層最大加速度が250galおよび400galを越える地震の発生確率をそれぞれ示したものである。入力地震動については、鯖江市および武生市付近での確率が高い。このため、震度5から6に相当すると思われる表層加速度250galの発生確率は、足羽山より南の福井市、鯖江市、武生市の平野部で30%以上と算出されている。以上のような算出結果が得られた要因は、評価域の南部周辺には、表-4に示した寄与率の高い断層、すなわち鯖江台地西縁、鯖江、朝日などの断層が散在するのに対し、評価域の北部周辺の

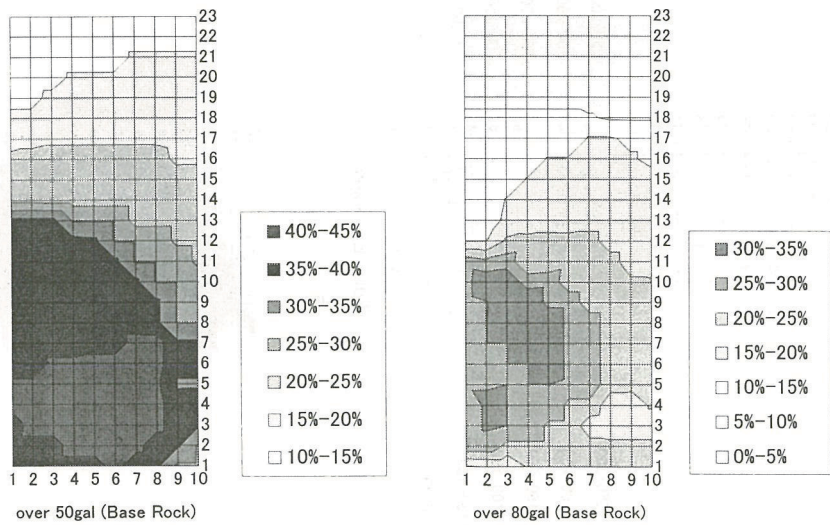


図-8 基盤入射波発生確率

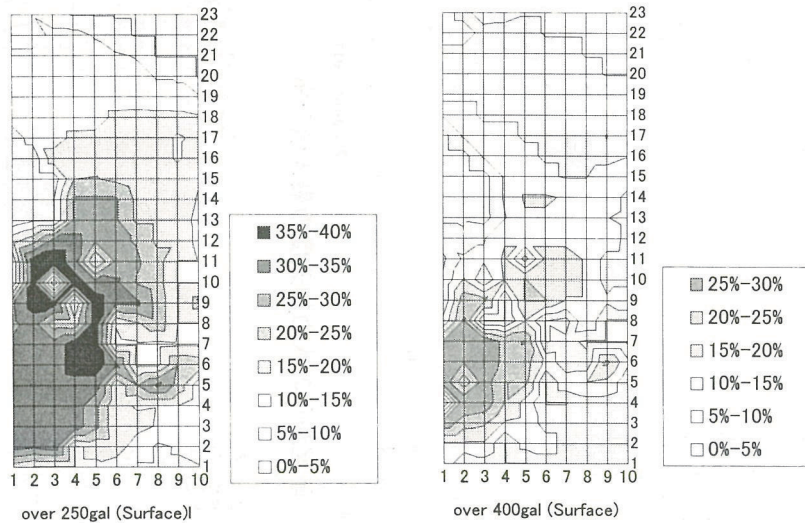


図-9 表層最大加速度発生率

断層は、活動度が小さく寄与率が比較的小さいことによるものと思われる。

5. おわりに

福井県嶺北地方に分布する断層が活動することによって引き起こされる地震動の算出を試みた。活断層の抽出には山本のリストを、入力地震動の算出には、翠川・小林の方法を、表層地震動の算出には、地盤の剛性および減衰生のひずみ依存性を考慮しない重複反射法を適用した。評価地域の地盤情報が十分でないことから、厳密な評価を行うには、今後の修正が必要と思われるが、既存断層の活動にともなう、各地の地震動の概略的な期待値として使用できる程度の推定値が得られたものと考えている。その結果、活動度が高く平均変位速度が大きく、活動間隔の短い断層の分布密度が高い地域では、震度5から6に相当する地震動に遭遇する確率が高くなる傾向が認められた。

しかしながら、地震断層の設定に際しての課題として、断層パラメータ、特に活動度についての詳細なデータが存在せず、概略値を使用せざるを得なかったこと、福井地震断層に代表されるような平野部に潜在する未知の断層、海域の断層については評価を行えなかったことがあげられ、地盤のモデル化に関しても、地盤の動的特性のひずみ依存性を考慮しなかったこと、沖積層および洪積層内部の成層構成については考慮しなかったことなどが問題点として残されている。今後、以上の問題の改善を進め、予測結果の信頼性の向上に努める所存である。

参考文献

- 1) 福井県(1989)：福井県地震被害想定調査総合報告書。
- 2) 福井県(1997)：福井県地震被害予測調査報告書。
- 3) 翠川三郎, 小林啓美(1989)：地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定, 日本建築学会論文報告集, 第282号, pp.71-79.
- 4) 翠川三郎, 小林啓美(1988)：地震動の地震基盤からの入射波スペクトルの性質, 日本建築学会論文報告集, 第273号, pp.43-54.
- 5) M. D. Trifunac (1976)："Preliminary Empirical Model for Scaling Fourier Amplitude Spectra of Strong Ground Acceleration in Terms of Earthquake Magnitude, Source-to-Station Distance, and Recording Site Conditions", Bull. Seism. Soc. Am., Vol.66, pp.1343-1373.
- 6) 活断層研究会(1991)：新編日本の活断層, 東京大学出版会
- 7) 山本博文(1997)：福井県嶺北地方の活断層, 日本海地域の自然と環境, 第4号, pp.1-36.
- 8) Kanamori, H. (1973): Mode of strain release associated with major earthquake in Japan, Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 1, 213-239.
- 9) 吉岡直人(1974)：地震の発震機構と地殻変動および津波, 東京大学大学院理学系研究科, 地球物理学専門課程修士論文。
- 10) 山中浩明他(2000)：微動アレイ観測による福井平野の速度構造の推定, 地震, 第2輯, 第53巻, pp.37-43
- 11) 小嶋啓介, 鳥海勲(1998)：福井平野の地下構造と堆積層表面波, 日本地震学会講演予稿集 1998年秋季大会, A17.
- 12) 鳥海勲, 大場新太郎(1993)：福井平野の地下構造, 地震, 第2輯, 第46巻, pp.45-47.
- 13) 福井県(1998)：福井平野東縁断層帯に関する調査成果報告書。
- 14) 日本学術会議福井地震調査研究特別委員会(1949)：福井地震調査研究速報。