

3. 直下地震の震源近傍における地震動強さの評価

Strong Ground Motion Estimation for Shallow Earthquake in Near-source Region

瀬川 秀 恭

Shukyo Segawa

Abstract

Several acceleration attenuation formulas derived from observed data within near source region are proposed along with the recent progress of strong ground motion observation network. These formulas shown in Fig.1 are characterized by relatively constant acceleration within 5km from the fault and the peak acceleration in the range of 500 to 700gal are predicted for M=7.2 earthquake.

To estimate the earthquake ground motion for engineering purpose, Midorikawa & Kobayashi's method, a semi-empirical method considering the spatial extension of the fault plane and the direction of the rupture propagation, is used in many cases. The merit of this method is that it can consider the dynamic model of fault and can easily calculate the frequency characteristics of the earthquake ground motion. But as shown in Fig.2, it overestimates the motion near the focal region. The one reason of this overestimate is the lack of data set within near source region in order to derive the empirical formula used in the method.

The strong ground motion near the fault were observed in several points during the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. It will be the almost first one from the beginning of modern earthquake observation in Japan. With these records, the empirical formula was revised. Then the revised way to estimate the earthquake ground motion to be applicable to near source region was proposed.

Midorikawa & Kobayashi's method estimate the velocity response spectrum by formula (1).

$$\log S_v(T) = a(T) \cdot (\log M_0 - 26.6) - b(T) \cdot \log X + 2.36 \dots \dots (1)$$

The revised formula (4) was proposed to satisfy the observed data in Kobe city as shown in Fig.4.

$$\log S_v(T) = a(T) \cdot (\log M_0 - 26.6) - b(T) \cdot \log(X + 10^{0.37M - 1.8}) + 2.36 \dots \dots (4)$$

It is to be noticed, however, that revised formula can be applicable to the earthquakes that resemble to the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. Also it should be paid attention to that this revision is not based on the spectrum (freq. domain), but maximum acceleration distribution.

1 はじめに

地震動強さの評価は、さまざまな工学的な場面で行われている。道路、ビルなど重要構造物の建設にあたっては、将来経験することが考えられる地震動の評価を避けて通ることはできない。もちろん、地震による地域の被害想定を行う際には地震動強さの評価がその基本として重要なことは言うまでもない。

将来発生する地震を想定した上で地震動を評価する場合、これまでは主に海域のプレート境界で発生する巨大地震を対象とし、内陸の地震は余り考慮されてこなかった。これはプレート境界部を震源とする地震が歴史時代

を通じて数多く繰り返し発生し、多くの被害を与えてきたことによる。しかし、兵庫県南部地震の発生により内陸の活断層を震源とする被害地震が現実のものとなり、想定地震を設定する上でも内陸の浅い断層を考慮することが強く求められるようになってきている。このため、これまで想定される震源域が沖合に位置していたので震源域近傍での地震動の評価が問題になることは少なかったが、内陸の地震を対象とする場合、震源域での地震動強さの評価を適切に行うことが重要になっている。

本報では、工学的目的で基盤での地震動の強さを評価する場合に広く用いられている、断層の広がりや破壊様式を考慮した半経験的方法である「翠川、小林の方法」

を、兵庫県南部地震での観測記録を使って震源域での評価に使えるように拡張した結果を報告する。

2 震源域での地震動強さ

地震動の強さを工学的に簡易に評価する場合に様々な手法が用いられているが、観測値を回帰分析して作成された経験式、あるいは経験式をもとに断層の広がり、破壊過程を考慮した半経験的方法が用いられることが多い。これまで数多くの経験式が提案されてきたが、震源付近での観測データが不足していたため、回帰式を外挿することになる断層近傍での信頼性は充分とは言えなかった。

しかし、最近、近年の地震観測網の充実に伴って、震源付近での実際の地震観測データを用いた回帰式が提案され、震源域での地震動の強さを経験式を用いて評価できるようになってきた。福島ら(1991)はこれら震源域で評価できる最大加速度の推定式についてまとめている。表-1には福島ら(1991)に取り上げられた経験式をまとめて示した。ただし、大野ら(1994)の式は同著者ら

の新しい式に差し替えたものである。図-1には兵庫県南部地震と同じマグニチュード=7.2の場合の各推定式における水平最大加速度を示した。距離は、断層面あるいは断層のもっとも浅い辺の地表投影からの距離を用いている。大野ら(1994)の式は等価震源距離を用いているが図-1では他の距離と同様に取り扱っている。これによれば、各式の結果とも水平最大加速度の大きさは断層から5km位から頭打ち傾向が強くなり、その大きさは500~700gal程度と推定されている。これらの推定式は適応地盤は使用した観測データに依存するが、おおむね「各種地盤」であり、堆積層から岩盤までを含んでいるものと考えられる。水平2成分の取り扱いやマグニチュードの定義の違いもあるが、現状では震源域での地震動の強さについての重要な情報を与えているものである。

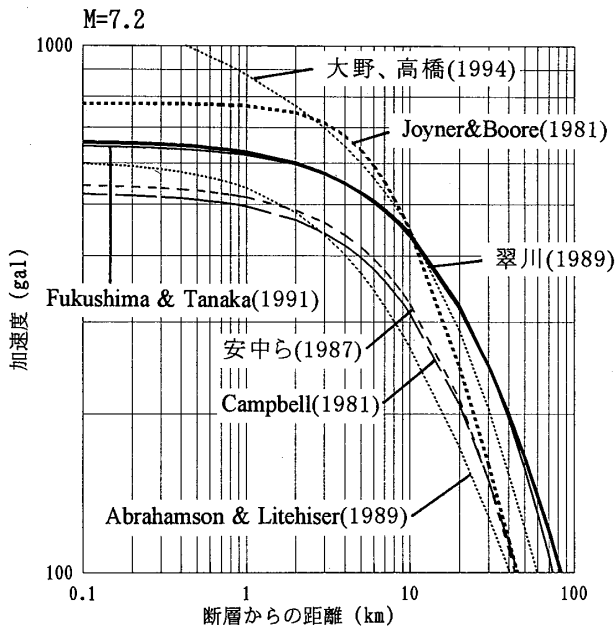
3 「翠川、小林の方法」における距離の影響

地震基盤における地震動の推定方法として「翠川、小林の方法」(翠川、小林(1979)、Midorikawa &

表-1 震源域で適用できる水平最大加速度の推定式
Table 1 Attenuation formulas of horizontal maximum acceleration applicable to near source region

No	提案者	推定式	加速度 A	マグニチュード M [*]	距離 R(km)	地盤
1)	Joyner & Boore(1981)	$\log A = 0.249M - \log D - 0.00255D - 1.02$ $D = (R^2 + 7.3^2)^{1/2}$	2成分の大きい方 単位: g	M _w	断層線 最短距離	各種地盤
2)	Campbell(1981)	$A = 0.0185 \exp(1.28M) \cdot D^{-1.75}$ $D = R + 0.147 \exp(0.732M)$	2成分の平均 単位: g	6 > : M _L 6 ≤ : M _s	断層線 最短距離	岩盤以外
3)	安中ら(1987)	$\log A = 0.627M + 0.00671H - 2.212 \cdot \log D + 1.711$ $D = R + 0.35 \exp(0.65M)$ H:震源深さ(km)	2成分の平均 単位: gal	M _J	断層面 最短距離	V _s ≥ 300m/s
4)	Abrahamson & Litehiser(1989)	$\log A = -0.62 + 0.177M - 0.982 \log(R + e^{0.284M}) + 0.132F - 0.0008E \cdot R$ F=(1:縦ずれ, 0:その他) E=(1:7°レト間, 0:7°レト内)	2成分の大きい方 単位: g	6 > : M _L 6 ≤ : M _s	断層線 最短距離	各種地盤
5)	Fukushima & Tanaka(1991)	$\log A = 0.51M - \log(R + 0.006 \cdot 10^{0.51M}) - 0.0034R + 0.59$	2成分の平均 単位: gal	M _J	断層面 最短距離	各種地盤
6)	翠川(1989)	$\log A = 0.40M - \log D - 0.00164D + 1.31$ $D = R + 10^{0.37M - 1.33}$	2成分の平均 単位: gal	M _J	断層面 最短距離	各種地盤
7)	大野、高橋(1994)	$\log A = 0.318M - \log X_{00} - 0.00164X_{00} + 1.597$ X ₀₀ :等価震源距離 観測点が円形断層の中心に垂直に位置する場合 $X_{00}^{-2} = (1/r^2) \cdot \ln [1 + (r/X)^2]$ X:断層中心からの距離(km) r:円形断層の半径(km)	2成分独立 単位: gal	M _w	等価 震源距離	岩盤

*)M_w:モーメントマグニチュード、M_L:ローカルマグニチュード、M_s:表面波マグニチュード、M_J:気象庁マグニチュード
 出典:1)Joyner, W. B. and D. M. Boore(1979): Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, Bull. Seism. Soc. Amer., 71.
 2)Campbell, K. W. (1981): Near-source attenuation of peak horizontal acceleration, Bull. Seism. Soc. Amer., 71.
 3)安中正、山谷敦、桃林治彦、野沢是幸(1987): 関東および周辺地域の地震観測記録を用いた基盤における最大加速度推定式の検討, 第19回地震工学研究発表会講演概要, 土木学会耐震工学委員会.
 4)Abrahamson, N. A. and J. J. Litehiser(1989): Attenuation of vertical peak acceleration, Bull. Seism. Soc. Amer., 79.
 5)Fukushima, Y. and T. Tanaka(1991): A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake motion in Japan, Shimizu Tech. Res. Bull., 10.
 6)翠川三郎(1989): 小地震の加速度包絡波形の合成による大地震の最大加速度の推定, 日本建築学会論文報告集, 第398号.
 7)大野晋、高橋克也(1994): 米国カリフォルニア州強震観測記録を用いた地震動スペクトル評価, 第9回日本地震工学シンポジウム.



※安中ら(1987)はH=0として記載、
 Abrahamson & Litehiser(1989)はF=0,E=0として記載、
 大野、高橋(1994)は観測点が円形断層の中心上にあると仮定し、
 円形断層の半径rを $r=10^{0.5M-2.28}$ (大野ら(1990))で仮定して記載

図-1 距離減衰式の比較
 Fig.1 Comparison of attenuation formulas

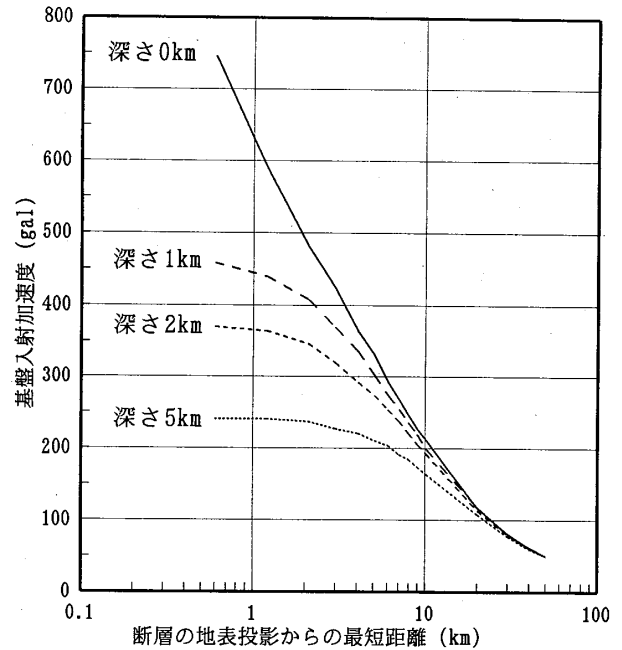


図-2 翠川、小林の方法による基盤入射加速度の計算例
 Fig.2 Example of calculated incident acceleration by Midorikawa & Kobayashi's method

Kobayashi (1982) が広く使用されている。この方法では、最大加速度、最大速度のみならず、速度応答スペクトルを求めることができる点、断層の広がり、断層の破壊方向を考慮した地震動の推定ができる利点がある。手法の詳細については殿内、金子 (1984) に解説がある。地域の地震被害想定調査、いわゆるマイクロゾーニング調査でもこの利点が評価され各地の調査で使用されている。しかし、それらの調査の中で、断層のごく近傍では過大な評価を与えることも指摘されている。

兵庫県南部地震をモデルとした図-3のような断層を考えた場合の、翠川、小林の方法による基盤での地震動の計算結果を図-2に示した。計算される物理量は応答スペクトルであるが、この方法に含まれる経験式を使って加速度に換算している。図-3の断層は長さ40km、幅15km、マグニチュード7.2とし、断層の深さは基盤面からの深さを意味するが、0 km~5 kmまで変化させた。断層から10km以上離れると断層深さによらず計算結果はほぼ一致するが、10km以内では断層深さによって結果が大きく異なる。断層の深さが0 kmの場合は地震動は断層近傍でも頭打ちの傾向が見られず、断層のごく近傍では非常に大きな値となる。翠川、小林の方法では基盤 (Vs=3 km/s相当層) 上面での入射が計算されるため、神戸の地盤を考えると地表での観測値は一般に

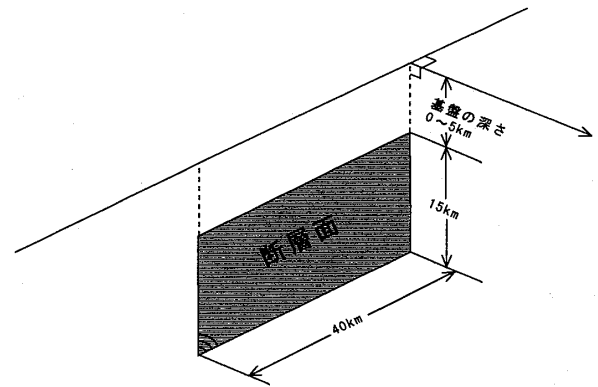


図-3 仮定した断層モデル
 Fig.3 Hypothetical fault model

通常地盤ではこの5倍程度の値になる。断層が深いほど頭打ちの傾向が見られるようになり、断層の深さ5 km程度を仮定すると実際の観測値と整合する結果が得られるが、工藤 (1996) がまとめた各種の提案されている断層モデルによると断層の深さは、第1近似的には基盤表面近くまで達している。

以上のように翠川、小林の方法では浅い内陸の地震に適用した場合に断層のごく近傍では過大評価となり、頭打ちの傾向が見られないという問題点がある。翠川、小林の方法では基盤での応答スペクトルを計算する際、断層全体としてのスペクトルを経験式で求め、これと各小領域から寄与するスペクトルの合計が等しいとして計算

を行うが、この際に用いる経験式は過去のいくつかの地震で観測された地震記録から作成されている。この際に使用された地震はそのほとんどが海域で発生した地震で、もっとも近距離の地震でも観測点から50km離れた地震であり、このことが断層近傍での過大評価につながっているものと考えられる。

4 経験式の修正案

翠川、小林の方法ではその中で使用されている経験式が断層近傍での観測データを含んでいないため、浅い内陸の地震では過大評価となる。そこで、兵庫県南部地震で得られた、日本ではほとんど初めてと言っていい、震源域のごく近傍での貴重な地震観測記録を使ってこの経験式を補正することを試みた。

4・1 兵庫県南部地震での震源域での観測記録

兵庫県南部地震では多くの観測記録が得られ、その一部は波形データも含めて公表されている。しかし、強震波形を飽和させずに観測できる強震計は、必ずしも十分な台数が神戸市付近に配置されていたわけではなく、残念ながら震度7と気象庁が認定したいいわゆる「震災の帯」の中にはほとんど設置されていなかった。日本建築学会兵庫県南部地震特別研究委員会(1996)には、公表された強震観測資料がまとめられている。これから断層から5km以内に位置している表-2に示す4地点での観測記録波形を解析に用いた。なお、兵庫県南部地震の震源断層としては、金子ら(1996)が本震後24時間以内の余震分布から設定した断層モデル(上端深さは基盤表面から0kmとした)を用いた。

これらの記録の水平2成分の最大加速度の平均値を図-4a)に、基盤($V_s = 3$ km/sec相当)入射加速度の平均値を図-4b)に示した。入射加速度は図-5に示した地盤モデルを使って、1次元線形応答計算によって基盤に戻してもとめたものである。図-5に示した地盤モデルは、それぞれ最寄りの柱状図や既存資料から推定したものである。図-4にはFukushima & Tanaka(1991)の式による加速度減衰曲線も一緒に示した。図-4b)の入射加速度の減衰曲線は、図-4a)の地表の(各種地盤での)減衰曲線から、4観測点の表層付近のS波速度を用いてMidorikawa et al.(1980)によるS波速度と加速度増幅度の関係式によって推定した通常地盤に対する増幅度4.5を用いて換算してある。Fukushima & Tanaka(1991)の式はおおむね観測値と整合しているが、頭打ちの加速度がマグニチュード7.2の場合650gal程度であり、やや小さい推定値を与えている。

4・2 「翠川、小林の方法」で使われている経験式

翠川、小林の方法は、基盤での応答スペクトルを計算する際、断層全体としてのスペクトルを経験式で求めるものである。この際には以下の式を用いている。

$$\log S_v(T) = a(T) \cdot (\log M_0 - 26.6) - b(T) \cdot \log X + 2.36 \quad \dots\dots\dots (1)$$

S_v : 速度応答スペクトル (kine)
 T : 周期 (sec)
 M_0 : 地震モーメント (dyne · cm)
 X : 震源距離 (km)
 $a(T)$, $b(T)$: 周期に依存する係数

実際には、断層を小領域に分割し、個々の小領域からの寄与の合計が(1)と等しいとして断層の破壊伝播を考慮して重ね合わせを行うため、(1)式を単純に用いているわけではないが、(1)式が基本となっている。

また、加速度応答スペクトル(速度応答スペクトルに各周波数 ω を乗じて求める)を加速度に変換する場合には以下の経験式を用いている。

$$A_{max} = 1.2 \cdot \int_{0.1}^{0.5} S_a(T) dT \quad \dots\dots\dots (2)$$

S_a : 加速度応答スペクトル (gal)

(1), (2)式を使って計算した、兵庫県南部地震の加速度を図-4に示した。ただし、a)の地表の場合はMidorikawa & Kobayashi(1982)による値を4.5倍して地表での値に換算してある。なお、式(1)は地震の規模としてマグニチュードではなく地震モーメントを用いているが、図-4を描く際には兵庫県南部地震の地震モーメントとして菊地(1995)の求めた $M_0 = 2.49 \times 10^{26}$ (dyne · cm)を用いた。

図-4から明らかなように、Midorikawa & Kobayashi(1982)の式を使うと、図-1に示した、他の経験式に見られるような震源近傍での頭打ち傾向が見られず、断層に近いところでは明らかに過大評価となっている。これは基本的には、この手法の発表当時においては国内では断層近傍での観測記録がほとんど存在していなかったために、(1)式を作る際のデータに断層近傍での観測結果が含まれていないことも一因である。図-4に見られる限りではマグニチュード7.2の場合、断層から10km以内では過大評価となる可能性が指摘できる。

4・3 経験式の修正案

断層近傍での4観測点の最大加速度を説明できるように、(1)式に震源近傍での頭打ちを加えることを試みた。

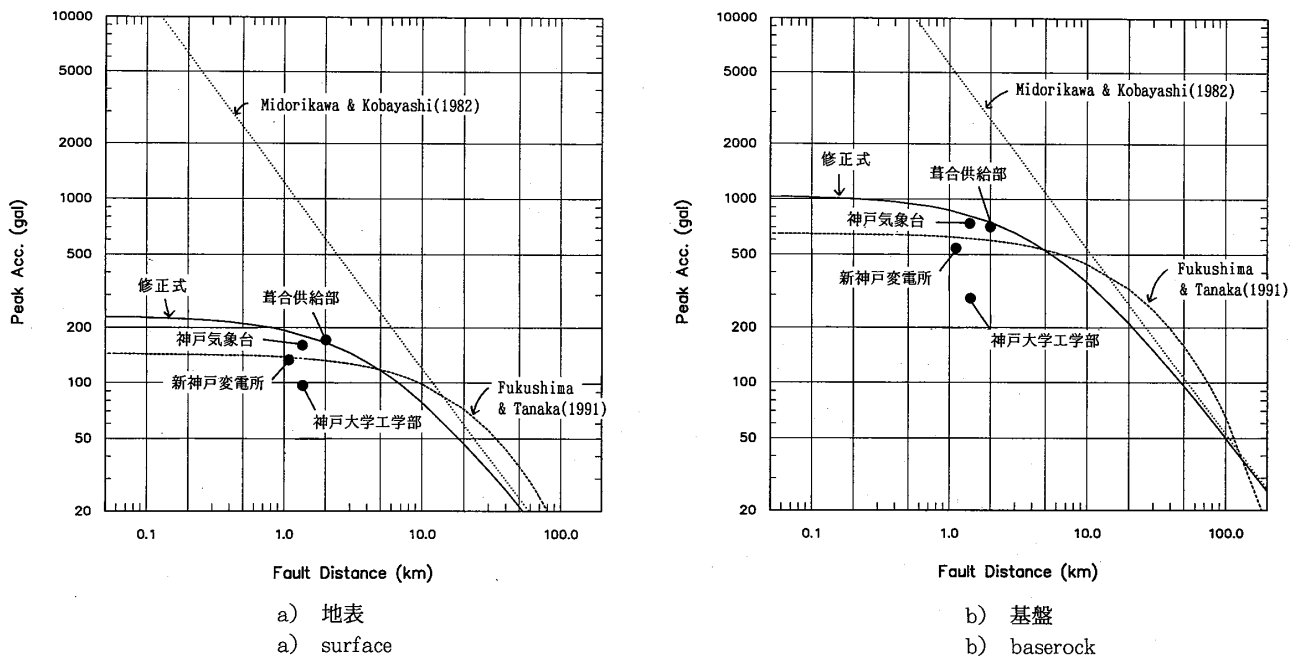


図-4 震源域での加速度と推定式

Fig.4 Acceleration in near source region and estimation function

表-2 使用した観測データ

Table 2 Observed data used in analysis

	地表加速度 (gal)		基盤入射加速度 (gal)		断層からの最短距離 (km)	観測機関
	NS	EW	NS	EW		
神戸気象台	818	617	205	113	1.3	気象庁
葦合供給部	687	802	163	182	2.0	大阪ガス
新神戸変電所	511	584	131	138	1.1	関西電力
神戸大学工学部	270	305	114	82	1.3	関西地震観測研究協議会

表-1, 図-1には加速度の距離減衰式として翠川(1989)の提案した以下の式が示されている。

$$\log A = 0.40M - \log D - 0.0016D + 1.31 \dots\dots (3)$$

$$D = X + 10^{0.37M - 1.33}$$

この式は図-1からわかるように Fukushima & Tanaka (1991) とほぼおなじ値となり、断層近傍で頭打ちの傾向を表現している。この傾向は、距離Xにマグニチュードにのみ依存する定数項を加えたDを用いていることの効果である。そこで、(3)式における震源近傍での頭打ちに関する項を援用して、(1)式を修正することを試み、観測結果を説明できるよう、以下の式を修正案として作成した。

$$\log S_v(T) = a(T) \cdot (\log M_0 - 26.6) - b(T) \cdot \log(X + 10^{0.37M - 1.8}) + 2.36 \dots\dots (4)$$

この際、定数項 $10^{0.37M - 1.8}$ の係数1.8に関しては、観測記

深さ (m)	Vs (m/sec)	ρ (g/cm^3)
0		
7	240	1.8
13	280	1.9
24	390	2.0
110	440	2.0
270	650	2.0
340	800	2.1
650	1000	2.3
	3000	2.7

a) 神戸気象台

深さ (m)	Vs (m/sec)	ρ (g/cm^3)
0		
4	170	1.7
17	350	1.9
20	240	1.6
100	350	1.9
230	410	1.9
230	650	2.0
440	800	2.1
540	1000	2.3
950	3000	2.7

b) 葦合供給部

深さ (m)	Vs (m/sec)	ρ (g/cm^3)
0		
30	400	1.9
70	640	2.0
200	780	2.1
300	1350	2.5
	3000	2.7

c) 新神戸変電所

深さ (m)	Vs (m/sec)	ρ (g/cm^3)
0		
6	340	1.9
10	590	2.0
10	850	2.1
23	960	2.2
30	1120	2.3
43	1350	2.5
100	3000	2.7

d) 神戸大学工学部

図-5 各観測点の推定地盤モデル

Fig.5 Estimated ground model of observed point

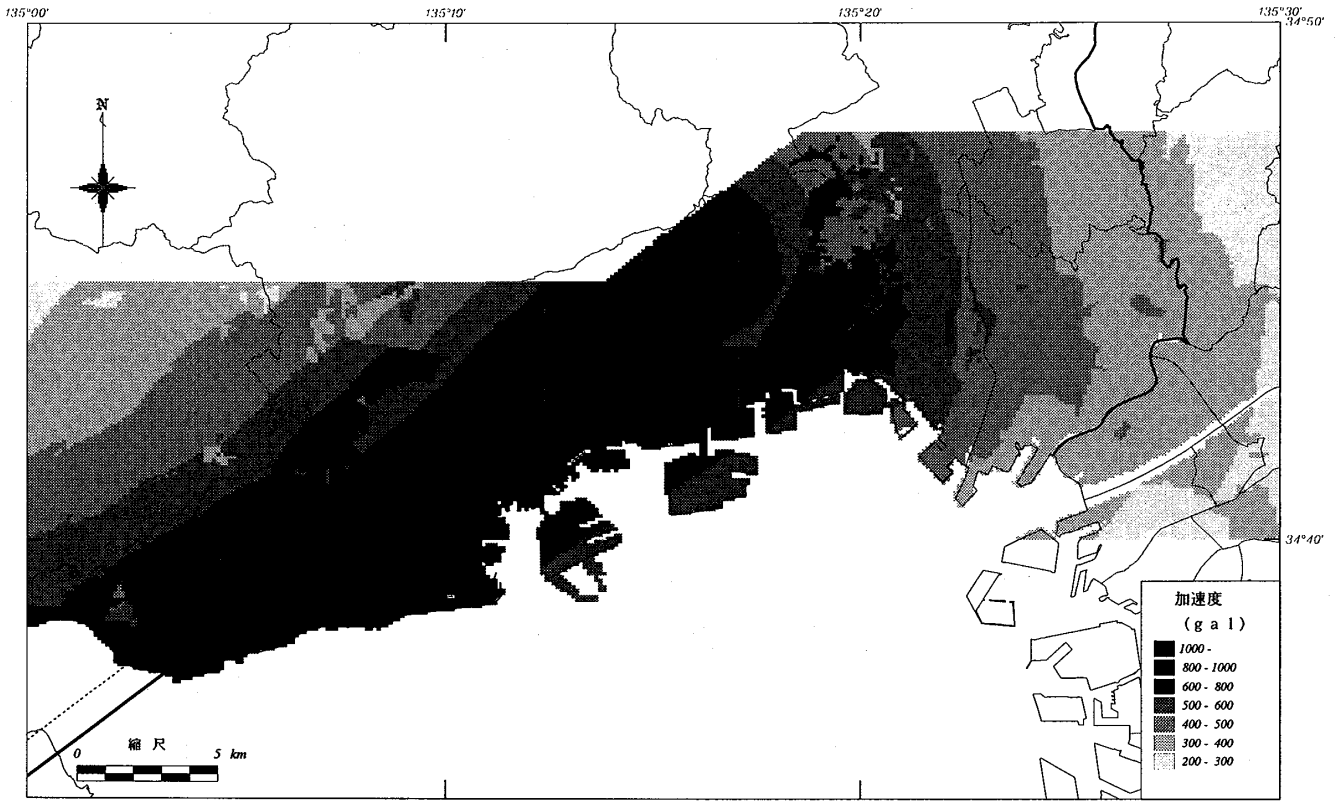


図-6 地表加速度分布 (式(1)による)
 Fig.6 Surface acceleration distribution (in case of formula (1))



図-7 地表加速度分布 (式(4)による)
 Fig.7 Surface acceleration distribution (in case of formula (4))

録を説明できるよう試行錯誤を行って決定した。

(4)式による計算結果を図-4に実線で示した。

5 修正案の兵庫県南部地震への適用

修正案, 式(4)を兵庫県南部地震の神戸周辺に適用してみた。図-6は経験式として式(1)を使った場合の地表加速度分布, 図-7は式(1)の代わりに式(4)を用いて計算した地表加速度分布である。表層の増幅特性は金子ら(1996)と同じく, 国土数値情報を使って松岡ら(1993)にしたがって求めた増幅率を用いた。

いずれの場合も断層の上端深さは0kmとした。式(1)を用いた場合は六甲山中においても加速度が600galを越え, ポートアイランド, 六甲アイランドの埋立地でも600gal程度の加速度が計算される。また断層に沿って1000gal以上の地域が広がる結果となっている。一方, 式(4)を用いた場合は六甲山中や埋立地では300gal程度の加速度であり, いわゆる震災の帯と呼ばれる地域で500~700gal程度の値となった。これは図-8に示した神戸市周辺での強震観測とも整合する結果である。

6 おわりに

兵庫県南部地震における神戸での観測記録に基づいて,

翠川, 小林の方法で使用されている経験式を断層のごく近傍まで使用できるように拡張を行った。しかし, この拡張は, 兵庫県南部地震での状況は説明できたが他の地震については検証されていない。従って, 本報告における拡張はマグニチュード7クラスの, 兵庫県南部地震と似た条件でのみ使用しうるものと考えべきである。また, 本報告においては最大加速度に着目して修正案を作成したが, 本来翠川, 小林の方法で推定されるものは加速度応答スペクトルであり, 今後はスペクトルの形状の違いをも説明しうる拡張を検討する必要がある。

参考文献

- 金子史夫, 瀬川秀恭, 早川譲, 小丸安史 (1996): 直下地震による地震動分布の予測, 応用地質技術年報 兵庫県南部地震特集号.
- 菊地正幸 (1995): 遠地実体波による震源のメカニズム, 月刊地球号外, 13.
- 工藤一嘉 (1996): 地震のメカニズム, 兵庫県南部地震特別研究委員会第1回公開シンポジウム資料.
- 殿内啓司, 金子史夫 (1984): 基盤地震動の評価方法について, 応用地質調査事務所年報, 6.

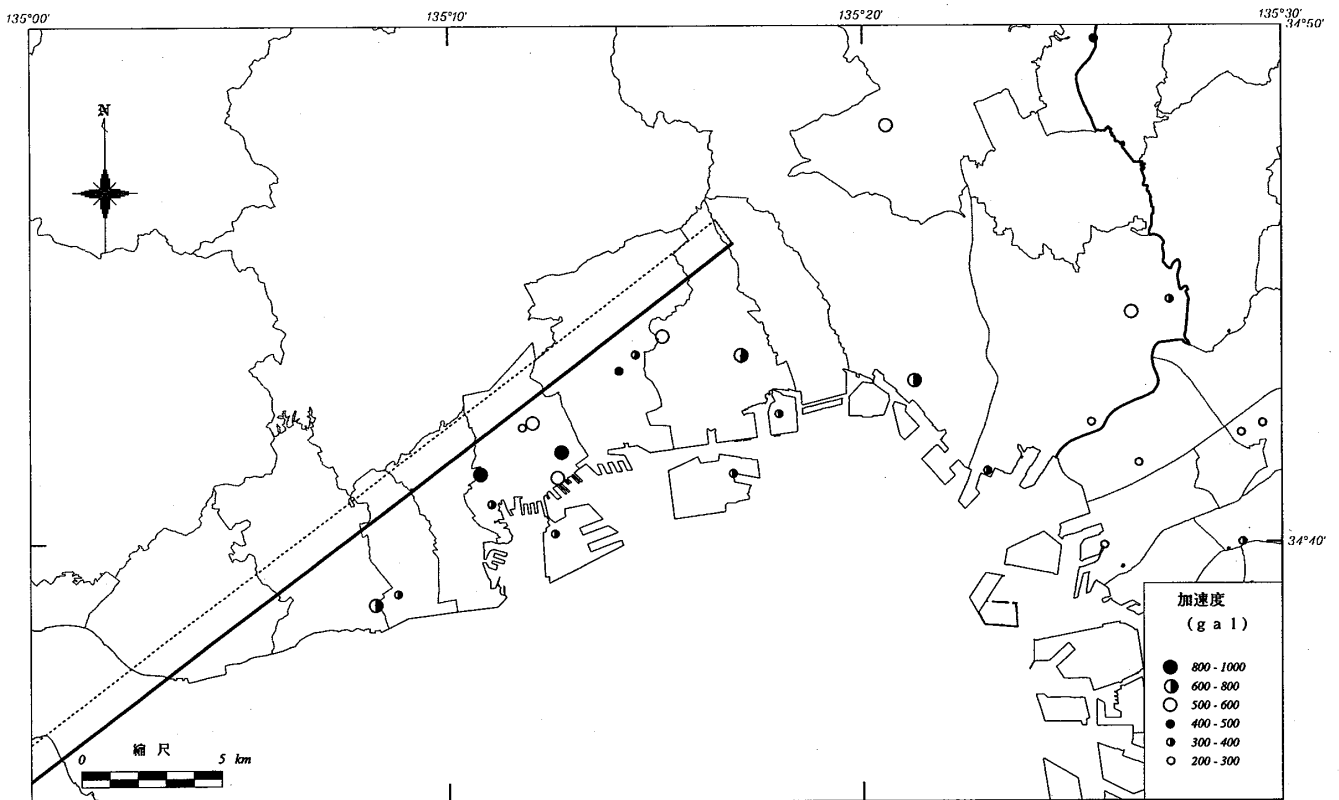


図-8 神戸市周辺の加速度観測値

Fig. 8 Observed acceleration around Kobe city

- 日本建築学会兵庫県南部地震特別研究委員会 (1996) :
1995年兵庫県南部地震強震記録資料集.
- 福島美光, 田中貞二, 渡辺孝英 (1991) : 震源域における地震動強さの統計的考察, 第19回地盤震動シンポジウム.
- 松岡昌志, 翠川三郎 (1993) : 国土数値情報を利用した地盤のS波速度の推定, 日本建築学会論文報告集, 443.
- 翠川三郎, 小林啓美 (1979) : 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, 282.
- Midorikawa, S. and H. Kobayashi (1980) :
Iseismal map in near-field with regard to fault rupture and site geological condition, 7th WCEE.
- Midorikawa, S. and H. Kobayashi (1982) : A semiempirical method for estimating response spectra on near-field ground motions with regard to fault rupture, Proc. 7th ECEE.
- 翠川三郎 (1989) : 小地震の加速度包絡波形の合成による大地震の最大加速度の推定, 日本建築学会論文報告集, 第398号.