

# 台湾集集地震記録に基づく地震動のマクロ空間相関特性

## MACRO-SPATIAL CORRELATION OF SEISMIC GROUND MOTION ON STRONG MOTION RECORDS OF THE 1999 CHI-CHI EARTHQUAKE

高田 毅士\*, 下村 哲人\*\*

Tsuyoshi TAKADA and Tetsuto SHIMOMURA

Evaluating macro-spatial correlation of seismic ground motion for wide area is very important for earthquake damage prediction and portfolio analysis in which simultaneous damage in different sites has to be taken into consideration. In this study, focused on is the residual value between observed and predicted ground motion. The spatial correlation of the residual value is modeled assuming that the correlation depends only on the relative distance between two sites. The strong motion records of the 1999 Chi-Chi Earthquake are used for this analysis since very high-dense observation has been made throughout the Taiwan Island. As the result, the correlation length which represents the spatial correlation structure of the residual value is found about 14-30km for this particular earthquake event.

**Keywords:** Attenuation equation, uncertainty of attenuation equation, peak ground motion, spatial correlation, the 1999 Chi-Chi Earthquake

距離減衰式, 距離減衰式の不確定性, 最大地動, 空間相関, 1999年台湾集集地震

### 1. 序

広域における強震動予測は、都市・自治体レベルにおける地震防災、建築・土木構造物の耐震設計において極めて重要であり、自治体等の広域地震防災計画や、高層ビル・公共インフラ等の耐震性の検討に大いに貢献している。また、最近では、地震保険分野において、異なる地点に位置する複数の建物資産のポートフォリオ解析がなされるようになり、広域地震動予測結果が広汎な分野で有効に利用されつつある。

現在、自治体等で実施されている地震動予測地図<sup>1)</sup>や、確率論的地震動予測地図<sup>2)3)4)</sup>は、あるサイズの格子点における強震動評価結果を等高線などで表現したものである。震源から伝播される地震波は、経験的な距離減衰式あるいは半経験的手法、理論モデルを用いて、評価地点での地震動強さに変換され、対象とする広がりに対して地震動の空間分布が予測されている。

特定地点でなく、広域を対象に地震動予測する際には、確定的、確率論的手法を問わず、地震動強さの空間分布の同時性が重要である。特に、経験的な距離減衰式を用いる場合には、その平均特性と式の不確定性の空間的相関特性を適切に考慮する必要があるが、このような特性は十分研究されていないのが現状で、既往の研究においては、石川ら<sup>5)</sup>では異なる地点での地震動強さを完全相関と仮定しているほか、福島ら<sup>6)</sup>では、異なる地点での距離減衰式のばらつきを完全独立とし

て扱っている。また、Achiwa *et al.*<sup>7)</sup>では、建物の被害関数に地震動強さのばらつきを入れ込んでいるなど、複数地点における地震動強さの相関特性の扱いは様々である。

特定の震源で発生した地震波の減衰特性は、既往の距離減衰式を用いて極めて簡便に予測可能であり、対象地点の地震動強さの平均特性は距離減衰式の中央値式を用いて十分予測しうるが、異なる2地点間で中央値からの偏差量(ばらつき)がどのような相関特性を有するかが本研究の着目するところである。このような特性を評価するには、できるだけ高密度の観測記録が必要であるが、従来はこのような記録は少なかった。1995年の兵庫県南部地震においては観測記録は数多く得られているものの、上記の相関特性を特定できるほど高密度なものではなかった<sup>8)</sup>。一方、1999年の台湾集集地震では、台湾全土に高密観測網が整備された後であったため、高密度の記録が採取され既に公開されている。

そこで、本研究では、1999年の台湾集集地震で得られた高密度な観測記録を用いて、地震動強さの平均減衰特性からの偏差量の空間相関モデルを提案するものである。このような空間相関モデルが構築できれば、確率論的地震ハザード評価や確率論的地震動評価に利用できることが期待できる。すなわち、ある地点の地震動強さが既知の時に、そこから  $x$  km離れた地点の地震動強さが確率的に予測できることにな

\* 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 助教授・工博

\*\* 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 大学院生

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, the University of Tokyo, Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, the University of Tokyo

り、単一地点の評価結果の集まりとしての確率論的地震動予測地図の情報に加えて、空間的な地震動強さの相関特性を反映した深い評価が可能となる。

なお、本研究では、地震動強さの広域的な空間分布の相関特性に着目していることから、これを地震動のマクロ空間相関特性と称しており、高密度アレー観測記録を用いた時空間領域での相関解析<sup>9)10)</sup>のように経時特性も含めたものをミクロ空間相関特性と考えている。川上<sup>11)</sup>は千葉アレーとSMART-1における観測データにおいて異なる2地点の最大加速度比を用いて本研究と似た議論を展開しているが、対象としている範囲は最大で5km程度であり、本研究と比較して狭い領域を扱っている。

## 2. 台湾集集地震動データと既往距離減衰式の適合度

### 2.1. 観測記録

1999年台湾集集地震において得られた観測記録のうち、中央気象局(CWB)による441観測点の主要動に関する加速度記録がW. H. K. Lee *et al.*<sup>12)</sup>によってCD-ROMとしてまとめられ、日本においては財団法人震災予防協会を通して頒布されている。本研究では、これら441観測点の加速度記録のうち、W. H. K. Lee *et al.*による同梱のレポートによりD qualityとされているものを対象外とした。さらに、旧型の地震計(A800)の記録のうち、より新しい強震計が併設されているものも対象外とし、残る398の観測点のデータを相関解析に用いた(図1)。空間相関特性の評価においては、最大地動加速度および最大地動速度を対象とした。

これらの加速度記録は、pre-eventデータに基づくDC-offsetの除去は行われているものの、ほとんどの記録において無視できない基線のずれが起こっており、補正が必要である<sup>13)</sup>。本研究では、加速度記録を積分したものに対して、基線のずれが1回のみであるとしてずれ幅およびずれた時刻を最小二乗法によって推定し、これを差し引くことによって補正を行い<sup>13)</sup>、線形加速度法によって最大加速度値および最大速度値を求めている<sup>14)</sup>。

### 2.2. 既往の距離減衰式との適合性

はじめに、上記の地震動データについて既往の距離減衰式との適合性を調べた。

距離減衰式として最大地動加速度および最大地動速度の推定式を用いた。 $\sigma$ は常用対数における対数標準偏差である。なお安中式においては、安中らの文献<sup>15)</sup>の図-4より固有周期0.04秒における応答スペクトルの対数標準偏差を読みとり、地震間および地震内のばらつきをそれぞれ $\sigma_e$ および $\sigma_o$ として記している。本研究ではひとつの地震のみを対象にしているため、 $\sigma_o$ のみが関連する。

#### ・ 最大地動加速度の推定式

1. 安中式<sup>15)</sup> ( $\sigma_e=0.16$ ,  $\sigma_o=0.22$ )

$$\log_{10} Acc = 0.606M_J + 0.00459H - 2.136 \log_{10}(R + 0.334e^{0.653M_J}) + 1.73 \quad (1)$$

2. 福島・田中式<sup>16)</sup> ( $\sigma=0.29$ )

$$\log_{10} Acc = 0.42M_w - \log_{10}(R + 0.025 \times 10^{0.42M_w}) - 0.0033R + 1.22 - 0.14L \quad (2)$$

#### ・ 最大地動速度の推定式

1. 安中式<sup>15)</sup> ( $\sigma_e=0.16$ ,  $\sigma_o=0.22$ )

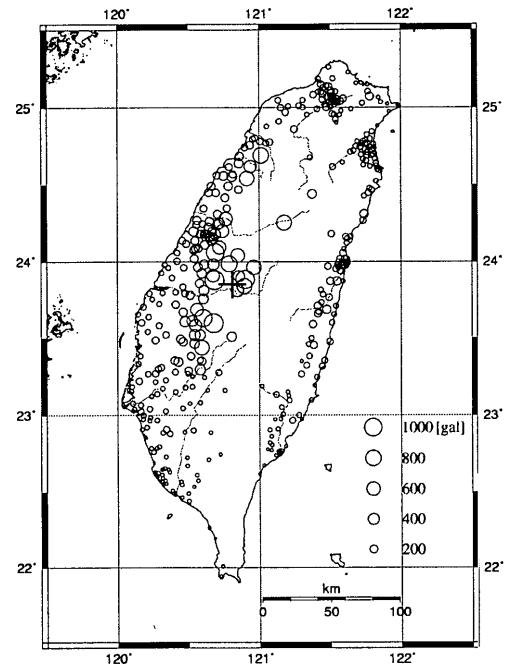


図1 1999台湾集集地震における最大地動加速度の分布<sup>12)</sup>

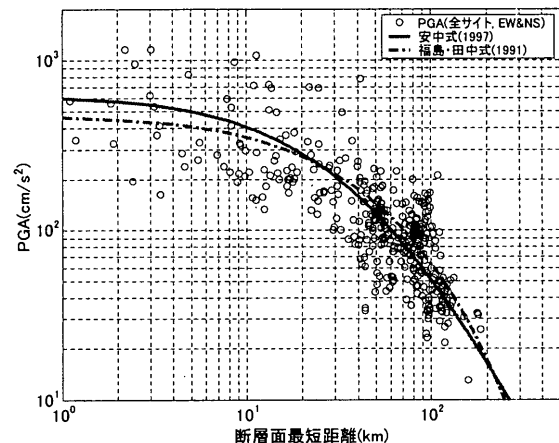


図2 PGAと既往の距離減衰式の関係

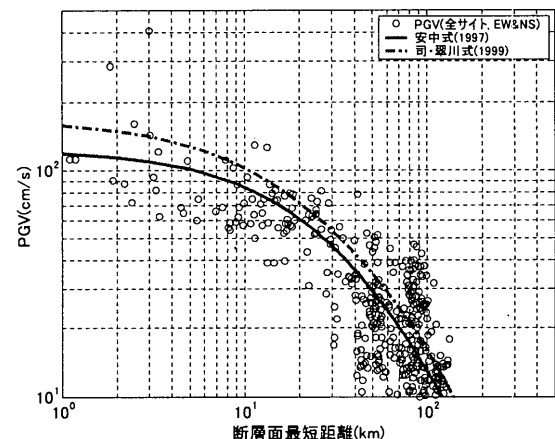


図3 PGVと既往の距離減衰式の関係

$$\log_{10} Vel = 0.725M_J + 0.00318H - 1.918\log_{10}(R + 0.334e^{0.653M_J}) - 0.519 \quad (3)$$

2. 司・翠川式<sup>17)</sup> ( $\sigma = 0.23$ )

$$\log_{10} Vel = 0.58M_w + 0.0038H - 1.29 - \log_{10}(R + 0.0028 \times 10^{0.50M_w}) - 0.002R \quad (4)$$

各距離減衰式のパラメータは、距離 $R$ として断層面最短距離を、モーメントマグニチュード $M_w$ として7.6を、震源深さ $H$ として11kmを与えた<sup>18)</sup>。福島・田中式<sup>16)</sup>については、層別因子 $L$ として外国の場合の値 $L=1$ を与えた。司・翠川式<sup>17)</sup>については最大速度の粘性減衰に関する係数 $k$ として $k=0.002$ を与え、断層タイプをプレート境界型地震とした<sup>19)</sup>。

モーメントマグニチュード $M_w$ から気象庁マグニチュード $M_J$ への変換には、式(5)および式(6)を用いた<sup>20)</sup>。式(5)は、Kanamori<sup>21)</sup>によるモーメントマグニチュード $M_w$ と地震モーメント $M_0$ の関係式から導かれた式である。また、式(6)は、福島・田中<sup>22)</sup>による地震モーメント $M_0$ と気象庁マグニチュード $M_J$ の関係式である。

$$\log_{10} M_0 = 1.5M_w + 16.1 \quad (5)$$

$$\log_{10}(M_0^{-1} + 10^{-17} M_0^{-1/3}) = -1.10M_J - 17.92 \quad (6)$$

各観測点の最大地動加速度および最大地動速度と各距離減衰式の中央値式より推定される値の関係を図2および図3に示す。ここでは、各地震動の値としてNS成分とEW成分のベクトル和を用いている。最大地動速度については地盤の30mまでの平均S波速度 $V/S_{30}$ を200m/sとして地盤増幅率を求めた<sup>17)</sup>。いずれの距離減衰式もおおむね観測値をよく説明している。

ここで、位置 $x_i$ において観測された地震動強さ $A(x_i)$ の、距離減衰式の中央値に対する推定残差の常用対数を $\varepsilon_i$ とする。

$$\varepsilon_i = \log_{10}(A(x_i)/a(x_i)) \quad (7)$$

ただし、 $a(x_i)$ は位置 $x_i$ における距離減衰式の中央値とする。

距離減衰式の適合度を示す指標として、推定残差の全観測点の平均値 $\bar{\varepsilon}$ 、標準偏差 $\sigma_\varepsilon$ 、断層面最短距離 $R$ と $\varepsilon$ の相関係数 $\rho_{Re}$ の3つを表1に示した。また、文献に示された各距離減衰式の数値標準偏差 $\sigma$  (安中式については $\sigma_\varepsilon$ )をあわせて示している。

各距離減衰式の推定残差の平均値 $\bar{\varepsilon}$ を比較すると、最大地動加速度に関する安中式と福島・田中式は観測値に良く合っていることがわかるが、最大地動速度に関する安中式と司・翠川式はややずれが見られる。

次に、推定残差の標準偏差 $\sigma_\varepsilon$ がいずれも距離減衰式の数値標準偏差に比べ同程度か小さい値を示していることから、観測値のばらつき量は既往の距離減衰式のばらつき量によってほぼ説明できると言える。

$\rho_{Re}$ は、距離減衰式に対する推定残差の距離依存性に関する指標であり、 $\rho_{Re}$ が0に近いほど、推定残差の震源からの距離に対する依存性が低い、すなわち観測値の距離減衰特性をよく説明していることを意味している。ここで挙げた距離減衰式の中では、最大地動加速度に関する福島・田中式の $\rho_{Re}$ がもっとも0に近い値を示しており、今回のデータにおける地震動強さの距離減衰特性が、中央値式の中に適切にもっとも適切に表現されていることがわかる。

表1 距離減衰式と観測記録の比較

|                 |                             | 最大地動加速度 |        | 最大地動速度 |       |
|-----------------|-----------------------------|---------|--------|--------|-------|
| 距離減衰式           |                             | 安中      | 福島・田中  | 安中     | 司・翠川  |
| 対数標準偏差 $\sigma$ |                             | 0.22    | 0.29   | 0.22   | 0.23  |
| 推定残差            | 平均値 $\bar{\varepsilon}$     | 0.004   | -0.049 | 0.283  | 0.219 |
|                 | 標準偏差 $\sigma_{\varepsilon}$ | 0.214   | 0.204  | 0.226  | 0.224 |
|                 | 相関係数 $\rho_{Re}$            | 0.315   | 0.097  | 0.258  | 0.248 |

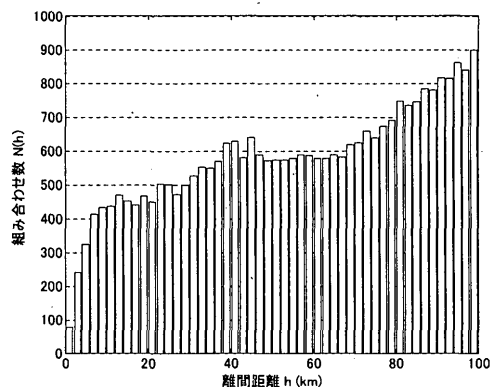


図4 離間距離と観測点の組み合わせ数の関係

### 3. マクロ空間相関特性の推定手法

#### 3.1. 地震動のマクロ空間相関モデル

神原・高田<sup>8)</sup>は、ある一つの地震の揺れによって平面上の位置 $x$ において観測される地震動強さ $A(x)$ を、震源からの空間的な位置によって特徴づけられる地震動強さの中央値 $T(x)$ と、ランダム成分 $R(x)$ の積によって表されるとしてモデル化をおこなった。すなわち、 $T(x)$ は距離減衰式の中央値(確定量)を表し、 $R(x)$ は中央値周りのばらつき(確率量)を表すものと考えている。

$$A(x) = T(x)R(x) \quad (8)$$

ここで、 $R(x)$ の常用対数を $L(x)$ とする。

$$L(x) = \log_{10} R(x) \quad (9)$$

この対数ランダム成分 $L(x)$ を、等方的かつ定常な2次元確率場と仮定してモデル化する。この仮定は、震源と観測点を結ぶ方向における地震動伝播の不均質性、観測点の地盤条件の相違などの複雑な要因により、決して成立するものではないが、極めて少ないパラメータを説明変数とする距離減衰式を用いていることから、局所的な条件の反映は今後の課題とし、第一近似的に、マクロな範囲の地震動強さの分布を距離減衰式の中央値式と空間的定常性の仮定を用いてモデル化した。なお、この仮定の成立性については、次に示す解析結果によりある程度判断できる。

この仮定のもとでは、 $L(x)$ に関して、2点間の共分散はその離間距離 $h = |x_a - x_b|$ のみによって決まり、空間共分散関数 $C_{LL}(h)$ は次の式によって推定することができる。

$$C_{LL}(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (L(x_{a_i}) - \mu_L) (L(x_{b_i}) - \mu_L) \quad (10)$$

$$\mu_L = \frac{1}{N_{all}} \sum_{i=1}^{N_{all}} L(x_i) \quad (11)$$

ただし、 $N_{all}$ は観測点総数、 $N(h)$ は離間距離が $h$ となる2観測点の組み合わせ( $x_a, x_b$ )の個数である。実際には連続的な値 $h$ について $C_{LL}(h)$ を求めることはできないので、 $h$ を適切な間隔の離散値とし、 $N(h)$ がある程度の個数(数十個以上)となるようにする必要がある。本研究では $h$ を2km間隔とした。このときの $h$ と $N(h)$ の関係を図4に示すが、式(10)を評価するのに十分な個数が得られており、台湾集集地震の観測記録が十分に高密度なものであったことが分かる。

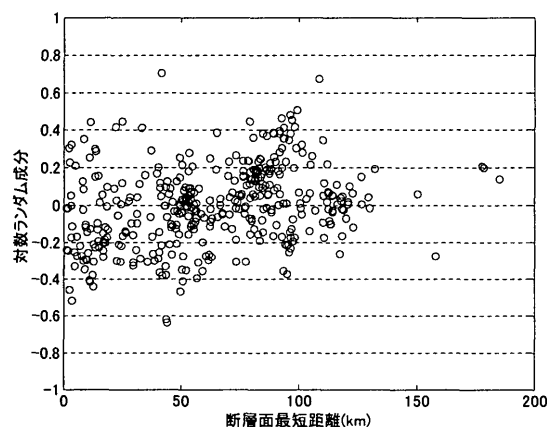
式(10)で表される $C_{LL}(h)$ より、自分自身の地点の分散で基準化することにより、マクロ空間相関係数関数 $R_{LL}(h)$ を次式のように定義する。

$$R_{LL}(h) = C_{LL}(h) / \sigma_L^2 \quad (12)$$

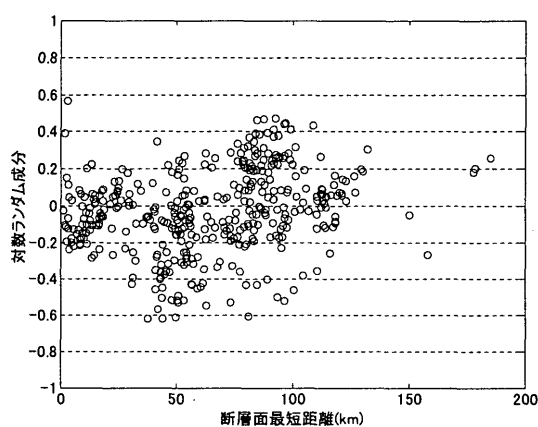
ただし、 $\sigma_L$ は $L(x)$ の標準偏差である。

このようにして離散的な離間距離 $h$ について求められた $R_{LL}(h)$ を式(13)のような指数関数で近似し、相関距離 $b$ を推定する。 $b$ は、2観測点の地震動の相関係数が $1/e \approx 0.37$ に低下するような離間距離を意味するパラメータである。

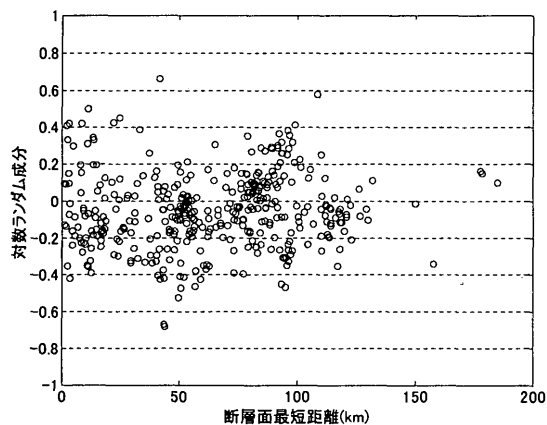
$$R_{LL}(h) = e^{-\frac{h}{b}} \quad (13)$$



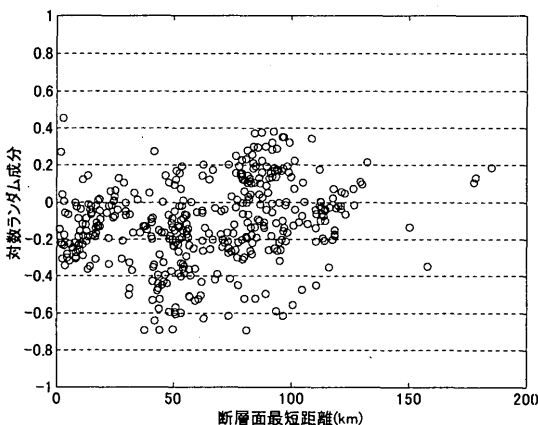
[PGA, 安中式<sup>15)</sup>, EW&NS 成分]



[PGV, 安中式<sup>15)</sup>, EW&NS 成分]



[PGA, 福島・田中式<sup>16)</sup>, EW&NS 成分]



[PGV, 司・翠川式<sup>17)</sup>, EW&NS 成分]

図5 PGAに関する対数ランダム成分と断層面最短距離

図6 PGVに関する対数ランダム成分と断層面最短距離

### 3.2. 集集地震の観測データにおける対数ランダム成分の分布

断層面最短距離に対して対数ランダム成分 $L(x)$ をプロットしたものを、図5および図6に示す。最大地動加速度の対数ランダム成分については、断層面最短距離0~100km程度の範囲でほぼ±0.4の間で分布していることがわかる。このことは、定常な2次元確率場という仮定に矛盾しない。一方、最大地動速度の対数ランダム成分については、断層面最短距離0~30kmの範囲ではばらつきが小さいが、50km前後においては対数ランダム成分の小さい観測点が多くなっている。逆に、80~100kmの範囲では、対数ランダム成分の大きい観測点が多い傾向が見られる。

対数ランダム成分 $L(x)$ を地図上にプロットしたものを図7に示す。(a)と(b)を比較すると、最大地動加速度の場合は対数ランダム成分が正の観測点と負の観測点の分布が比較的混在し、あまり地域性がないのに対し、最大地動速度の場合は正の観測点が偏在する領域(北西部)と負の観測点が偏在する領域(南東部)が明確に見られる。これは、図5および図6における対数ランダム成分と断層面最短距離との関係に見られる傾向とよく対応している。

このことは、地盤条件等の影響も考えられるが、本研究で用いた最大地動速度の距離減衰式が集集地震の観測値の距離減衰特性をかならずしも適切に説明できていなかったことによる影響が最も大きいと考えられる。

最大地動加速度に比べて最大地動速度の場合の地域性が顕著となる理由として、最大地動速度は加速度波形を積分して求めたことから、ランダム性の強いスパイク状のピークの影響を受けにくくなり、相対的に地域性が現れやすくなったことが挙げられる。

以上のことから、最大地動加速度の対数ランダム成分については、定常な2次元確率場という仮定が近似的に成立するものとして扱うことができると考えられる。一方、最大地動速度の対数ランダム成分については比較的強い地域性が認められ、この仮定が必ずしも成立しないが、本研究では、比較のために最大地動速度についても同じ手法で空間相関係数関数の推定をおこなった。

#### 4. 推定結果

##### 4.1. 推定された相関距離

以上の方法で推定した空間相関係数関数の例を図8および図9に示す。離間距離が大きくなるに従って指数関数的に相関が低下していくことがわかる。各距離減衰式について、観測記録のEW成分、NS成分およびベクトル和それぞれについて、最小二乗法を用いて相関距離 $b$ を推定した結果を表2に示す。距離減衰式の違い、最大地動加速度と最大地動速度の違い、観測記録の成分の違いによって若干結果は変わるが、おおむね $b=14\sim30\text{km}$ の範囲となっている。

##### 4.2. 距離減衰式の違い

最大地動加速度に関する福島・田中式による $b$ の値は、他の式によるものにくらべて明らかに小さい。また、表1における $\rho_{Re}$ の値の大小と表2における $b$ の値の大小が調和的である。すなわち、 $\rho_{Re}$ の値が0に近くない場合は、その距離減衰式によって評価された対数ランダム成分に、推定残差の距離依存性に応じたトレンドが残ってしまい、対数ランダム成分の空間相関が過大に評価される(相関距離 $b$ が大きくなる)可能性がある。

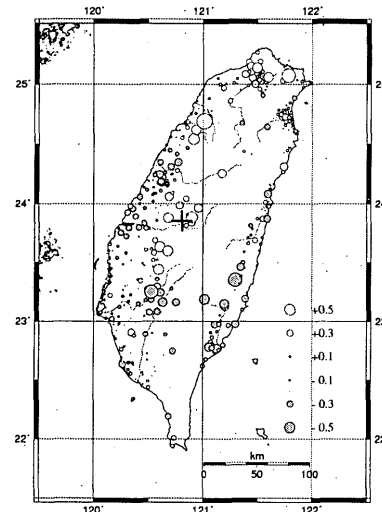
このことから、最大地動加速度に関する福島・田中式によるものに比べて、他の式によるものは相関距離 $b$ を過大に評価している可能性があり、用いる距離減衰式による影響は無視できないと考えられる。

##### 4.3. 最大地動加速度と最大地動速度の違い

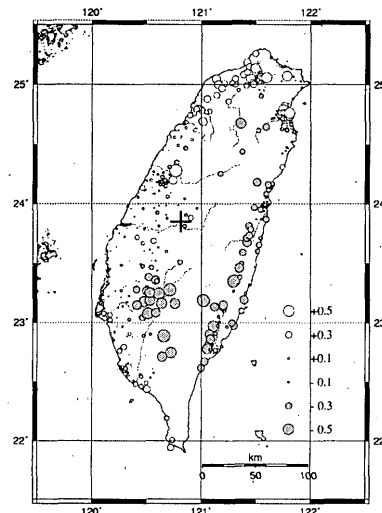
最大地動加速度に関する空間相関係数関数のプロット(図8)を見ると、離間距離が大きくなるに従って相関がなめらかに低下しており、式(13)で仮定した指数関数型の関数形によくフィットしていることが分かる。

一方で、最大地動速度に関する空間相関係数関数のプロット(図9)を見ると、離間距離20km程度までは指数関数的に相関が低下していくが、20~60kmの範囲ではやや大きくなり、60km以上で再び低下していく傾向が共通に見られる。このように、離間距離が大きくなっても相関がなめらかに低下していかないのは、最大地動速度の対数ランダム成分について顕著な地域性があるからである。このために、推定された空間相関係数関数は、式(13)において仮定した関数形にあまりよくフィットしておらず、相関距離 $b$ を過大に評価してしまっているものと考えられる。

これらのことから、地震動の対数ランダム成分に顕著な地域性がみられるときには、本研究の手法では相関距離 $b$ を過大に評価してしまうと言える。このような場合でも適切に評価する手法については今後の課題である。



(a) PGA [福島・田中式<sup>16)</sup>]



(b) PGV [司・翠川式<sup>17)</sup>]

図7 対数ランダム成分  $L(x)$  の分布 [全サイト, EW&NS 成分]

表2 最大地動の成分ごとの相関距離  $b$  の比較 [km]

| 観測値の成分 | 最大地動加速度 |       | 最大地動速度 |      |
|--------|---------|-------|--------|------|
|        | 安中      | 福島・田中 | 安中     | 司・翠川 |
| EW&NS  | 27.1    | 16.1  | 28.8   | 28.1 |
| EW     | 23.2    | 13.9  | 30.1   | 29.5 |
| NS     | 26.8    | 15.2  | 21.9   | 20.9 |

表3 サイトクラスごとの相関距離  $b$  の比較 [km]

| サイトクラス | 観測点数 | 最大地動加速度 |       | 最大地動速度 |       |
|--------|------|---------|-------|--------|-------|
|        |      | 安中      | 福島・田中 | 安中     | 司・翠川  |
| 全サイト   | 398  | 27.1    | 16.1  | 28.8   | 28.1  |
| B&C    | 98   | 21.6    | 18.2  | 125.6  | 121.3 |
| D&E    | 285  | 35.7    | 19.7  | 43.1   | 42.5  |

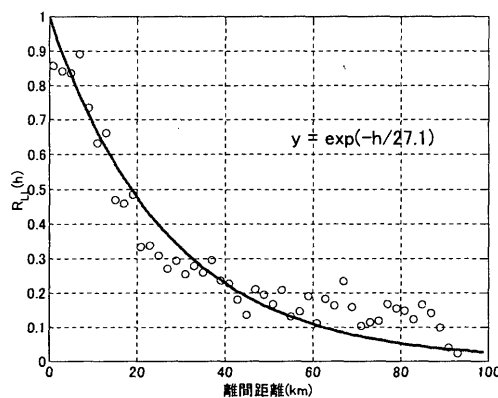
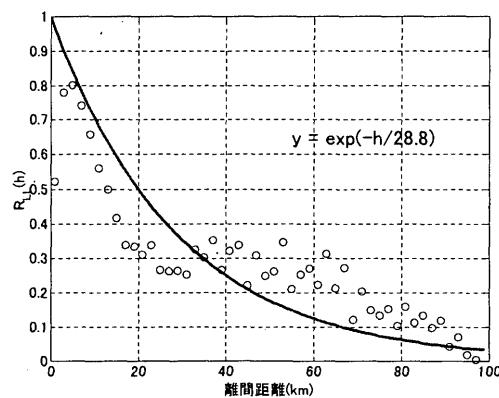
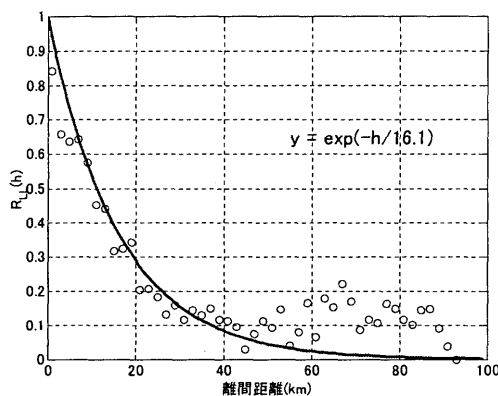
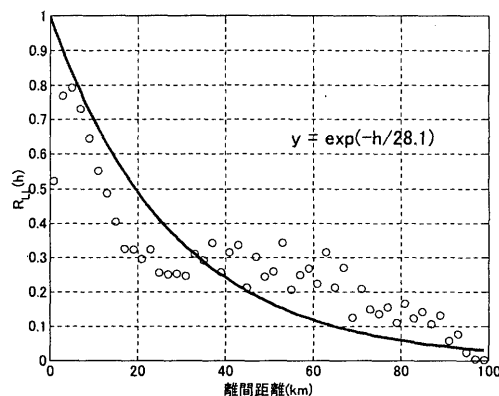

(a)安中式<sup>15)</sup>

(a)安中式<sup>15)</sup>

(b)福島・田中式<sup>16)</sup>

(b)司・翠川式<sup>17)</sup>

図8 PGAに関する空間相関係数関数 [EW&amp;NS成分, 全サイト]

図9 PGVに関する空間相関係数関数 [EW&amp;NS成分, 全サイト]

#### 4.4. 観測記録の成分の違い

集集地震では、南北に走る断層が東西方向にずれたため、地震動強さの分布はEW成分とNS成分ではっきり異なっている<sup>12)</sup>にもかかわらず、最大地動加速度に関する相関距離は方向成分による相違は見られない。本研究のモデルによって得られる最大地動加速度に関する空間相関特性は、地震動の成分や断層の方向にはあまり影響されないと考えられる。

一方、最大地動速度については、NS成分から得られた相関距離が、EW&NS成分またはEW成分から得られたものより小さな値となっている。

ここで、図10に、最大地動速度に関する司・翠川式を用いた場合の、EW成分およびNS成分の空間相関係数関数のプロットを示した。EW&NSの場合のプロットは図9(b)に示してある。

比較してみると、NS成分によるものが全体的にやや相関が小さい傾向が見られるが、その違いはわずかである。震源と観測点を結ぶ方向と直交する方向での波動伝播特性が異なることによる影響も考えられるが、離間距離0～20kmの範囲だけを取り出して相関距離 $b$ の推定をおこなうといずれも17km程度という結果が得られることから、実質的な相関特性は観測値の方向成分にはほとんどよらないと考えられる。にもかかわらず表2における $b$ の値が方向成分の違いによりこれだけ異なっているのは、最大地動速度から得られた空間相関係数関数が、式(13)において仮定した関数形にあまりフィットしていないために、相関距離 $b$ を

過大に評価してしまう影響だと考えられる。異なる関数形を用いる、あるいはフィッティングの手法を工夫することによって改善することは可能だと考えられるが、今後の課題としたい。

#### 4.5. 地盤条件による違い

観測点の地盤条件による違いを見るため、全サイト、サイトクラスBおよびC、サイトクラスDおよびEについて各々分析した結果を表3に示す。

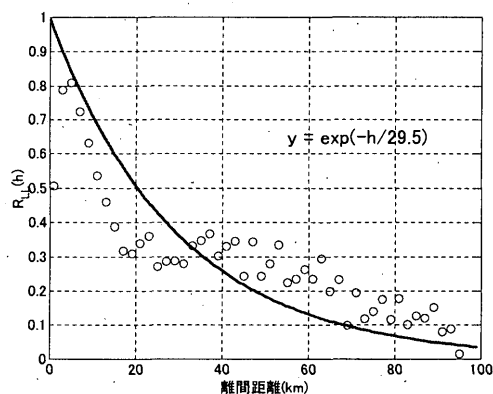
サイトのクラス分類はC.T. Leeによる。サイトクラスB、C、DおよびEはそれぞれ1997 UBC provisions におけるS<sub>B</sub>、S<sub>C</sub>、S<sub>D</sub>およびS<sub>E</sub>に対応する。サイトクラスB(rock)およびC(stiff clays and sandy soils)は比較的固い地盤、D(soft soils)およびE(special-study soft soils)は軟らかい地盤である<sup>12)</sup>。

地盤条件ごとに分類すると、推定された相関距離 $b$ が大きな値となる傾向が見られる。

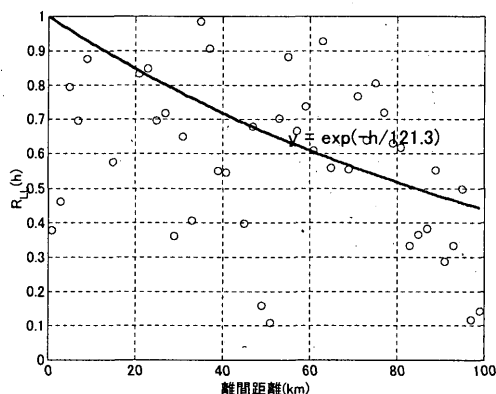
ただし表3においても、最大地動加速度に関する福島・田中式によるものに比べて他の推定結果は過大評価となっている可能性がある。

最大地動速度に関して、サイトクラスB&CおよびサイトクラスD&Eの値は明らかに過大である。図11に、司・翠川式の場合についてこれらの空間相関係数関数をプロットしたものを示す。

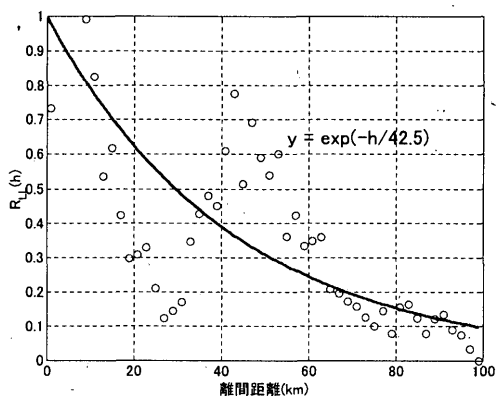
サイトクラスB&C(図11(a))においては、離間距離に対して相関が激しく変動しており、このようなデータに対して最小二乗推定をおこなって相関距離 $b$ を推定することは適切ではない。これは、観測点数が98点と少ないために離間距離ごとの組み合わせの数 $N(h)$ が十分に得られず、



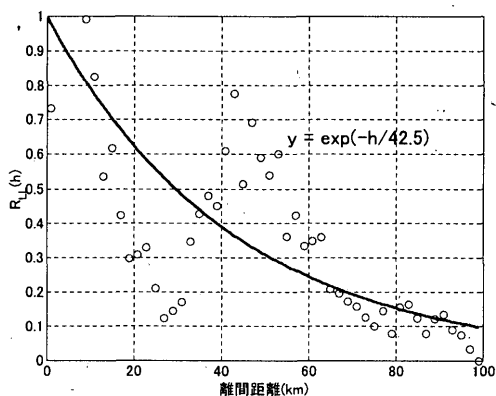
(a)EW 成分



(b)NS 成分

図 10 EW と NS の違いの例  
空間相関係数関数 [PGV, 司・翠川式<sup>17)</sup>, 全サイト]


(a)サイトクラス B&amp;C



(b)サイトクラス D&amp;E

図 11 相関距離が過大に評価される例  
空間相関係数関数 [PGV, 司・翠川式<sup>17)</sup>, EW&NS 成分]

安定した空間共分散関数が得られなかったためだと考えられる。

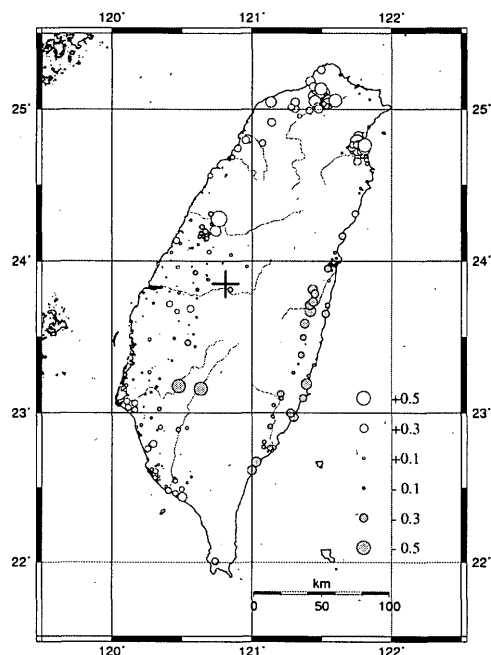
サイトクラスD&E(図11(b))においては、離間距離50km前後のところに極めて高い相関を示す山が見られ、最小二乗推定の結果相関距離 $b$ が過大な値を示している。図12に、このときの最大地動速度の対数ランダム成分を地図上にプロットしたものを示す。この図において、島の北部に対数ランダム成分が正となる観測点が集中している領域が2つ見られる(台北周辺および宜蘭周辺<sup>19)</sup>)。これらの領域間の距離がほぼ50kmであるため、離間距離50km前後において相関が極めて高いという結果になっている。これらは、台北盆地における盆地効果<sup>23)</sup>など、局所的な地盤条件の影響が考えられるが、全サイトについて評価を行った場合(図9(b))はこの影響があまりみられないことから、サイトクラスで分類することによって評価に用いる観測点数が少なくなった結果、局所的な地盤条件の影響を受けやすくなり、相関距離 $b$ が過大な評価となっていると考えられる。

#### 4.6. 本研究の手法の適用について

以上のことから、本研究の手法を用いて相関距離 $b$ を推定するにあたっては、次のような条件が必要であると考えられる。

まず、観測値の距離減衰特性をよく説明する適切な距離減衰式を用いる必要がある。

次に、離間距離ごとの観測点の組み合わせが十分に確保されていること。本研究の例では、すべての観測点を用いた場合に、図4に示すように離間距離2km以上においては離間距離ごとに数百組以上の組


図 12 対数ランダム成分  $L(x)$  の分布  
[PGV, 司・翠川式<sup>17)</sup>, サイトクラス D&E, EW&NS 成分]

み合わせを得ている。

本研究における最大地動速度の場合のように、これらの条件を満たさない場合における相関特性の推定については、今後の課題とした。

## 5. まとめ

本研究では、地震動強さの広域的な空間分布の相関特性(マクロ空間相関特性)のモデル化を行った。このとき、距離減衰式によって予測される中央値と、観測値との偏差量(対数ランダム成分)に着目し、一つの地震の揺れについて、異なる2点における対数ランダム成分の共分散がその離間距離によって決まるものとした。

このモデルを用いて、1999年台湾集集地震の主要動の強震記録について、地動最大加速度と地動最大速度のマクロ空間相関係数関数の推定をおこない、最小二乗推定によって相関特性を求め、次のような結論を得た。

- (1) 台湾集集地震における強震記録は、マクロ空間相関特性を評価するのに十分な密度であった。相関距離 $b$ はおおむね14~30kmと推定された。
- (2) 本研究で用いたマクロ空間相関特性は、地震動の方向成分や断層の方向にはあまり影響されないと考えられる。
- (3) 距離減衰式に対する観測値のばらつき(対数ランダム成分)を定常な2次元確率場とする仮定が、最大地動加速度については近似的に成立すると考えられるが、最大地動速度については不適切であり、得られた結果は過大評価であったと考えられる。これは、対数ランダム成分の評価に用いた距離減衰式の影響が大きい。
- (4) 地盤条件によって分類すると、相関距離 $b$ が大きな値となる傾向が見られた。しかし、分類することによって観測点数が少なくなると、局所的な地盤条件の影響を強く受けてしまい、相関距離が過大に評価される可能性がある。このような場合でも適切に評価する方法は今後の課題である。

以上のようにして求められたマクロ空間相関特性は、地震被害予測やポートフォリオ解析などにおいて、空間的な地震動強さのばらつきの相関特性を考慮した評価に有効に利用できると考えられる。

ただし、本論で用いたデータは1つの地震における記録のみであり、この結果をただちに一般の地震に対して用いることはできない。今後、複数の地震観測記録について検討を行う必要がある。また、台湾だけではなく他の地域についても検討を行い、地域ごとの特性を明らかにすることも必要である。

## 参考文献

- 1) 横浜市地下構造調査委員会：横浜市地震マップ，横浜市，2000
- 2) Arthur Frankel *et al*: National Seismic-Hazard maps: Documentation June 1996, U. S. Geological Survey, 1996.1
- 3) 藤原広行，河合伸一ら：確率論的手法による地震動予測地図作製手法の研究 確率論的地図作成法の検討と試作例，独立行政法人防災科学技術研究所，2002.3
- 4) 損害保険料率算定会：活断層と歴史地震とを考慮した地震危険度評価の研究～地震ハザードマップの提案～，地震保険調査研究 47, 2000.6
- 5) 石川裕，武田正紀，奥村俊彦，林康裕，掛川秀史：建物の地震リスクの評価方法，日本建築学会技術報告集 第11号 pp.275-278, 2002.12
- 6) 福島誠一郎，矢代晴美：地震ポートフォリオ解析による多地点に配置された建物群のリスク評価，日本建築学会計画系論文集 第552号 pp.169-176, 2002.2
- 7) M. Achiwa, M. Sato and M. Mizutani: Seismic Risk Assessment Procedures

for a System consisting of Distributed Facilities -Part three- Insurance Portfolio Analysis, Structural Safety and Reliability ICOSSAR '01, 2001

- 8) 神原浩，高田毅士：地震動強度のマクロ空間相関特性，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，pp. 225-226, 1996.9
- 9) Loh, C. H.: Analysis of the spatial variation of seismic waves and ground movements from SMART-1 array data, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 13, pp. 561-581, 1985
- 10) 中村博一，山崎文雄：高密度アレー観測記録に基づく地震動の空間相関モデル，土木学会論文集，No. 519/I-32, pp. 185-197, 1995.7
- 11) 川上英二，茂木秀則：強震動アレーデータに基づく隣接二地点間の最大加速度比の確率分布，土木学会論文集 No. 626/I-48, pp. 219-230, 1999.7
- 12) W. H. K. Lee, T. C. Shin, K. W. Kuo, K. C. Chen, C. F. Wu: CWB Free-Field Strong-Motion Data from the 921 Chi-Chi Earthquake: Processed Acceleration Files on CD-ROM, Seismology Center, Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan, 2001.4
- 13) David M. Boore: Effect of Baseline Corrections on Displacements and Response Spectra for Several Recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am. 91, no. 5, pp. 1199-1211, 2001.10
- 14) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994.5
- 15) 安中正，山崎文雄，片平冬樹：気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案，第 24 回地震工学研究発表会講演論文集，pp. 161-164, 1997.7
- 16) 福島美光：断層近傍まで適用可能な最大加速度の距離減衰式の導出と改訂，清水建設研究報告 第63号，pp.75-88, 1996.4
- 17) 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集 No. 523, pp.63-70, 1999.9
- 18) T. C. Shin, K. W. Kuo, W. H. K. Lee, T. L. Teng, Y. B. Tsai: A Preliminary Report on the 1999 Chi-Chi (Taiwan) Earthquake, Seism. Res. Lett. 71, 24-30, 2000.4
- 19) 飛鳥建設株式会社技術研究所地盤耐震研究室：1999年9月21日台湾集集大地震被害調査報告書，1999.10
- 20) 原子力発電技術機構：平成8年度 地震に係る確率論的安全性評価手法の整備(その6)に関する報告書，INS/M96-15, 1997.3
- 21) H. Kanamori: The Energy Release in Great Earthquakes, Journal of Geophysical Research Vol. 82, No. 20, pp. 2981-2987, 1977.7
- 22) 福島美光，田中貞二：気象庁マグニチュードによる震源スペクトルのスケールリング則，日本建築学会構造系論文報告集 No. 425, pp. 19-25, 1991.7
- 23) Tsui-Yu Chang, Fabrice Cotton, Jacques Angelier: Seismic Attenuation and Peak Ground Acceleration in Taiwan, Bull. Seism. Soc. Am. 91, no. 5, pp. 1229-1246, 2001.10

(2002年9月10日原稿受理，2002年12月19日採用決定)