

関東平野の揺れ易さについて

—最大加速度値による検討—

SEISMIC INTENSITY DISTRIBUTION IN KANTO REGION

—ESTIMATION BY THE MAXIMUM OF ACCELERATION—

齊藤芳人* 上代悟史**
Yoshihito SAITO and Satoshi JODAI

This paper presents a method to evaluate a ground factor distribution on the seismic intensity in Kanto region. The method uses the Kriging interpolation to extract the factor distribution only, excluding the direct factors of seismic force such as the magnitude, attenuation effect and the way of seismic propagation. So, the intention is to look at only the effect of the surface ground characteristics upon the intensity, where variogram is employed for evaluating the properties of the stochastic field of ground factor. As the factor is estimated by the maximum of acceleration, so it is considered that this proposed ground factor distribution is estimated in the domain of short-period. Furthermore, the method to define the optimal configuration of the new observation points is described.

Keywords : kriging method, variogram, short-period ground motion, earthquake ground motion, optimal configuration

クリッギング手法、バリオグラム、短周期地震動、地震動特性、最適配置

1. はじめに

多地点で観測された地震観測記録をもとに、各地点における地震動の揺れ易さに関する検討が従来から行われている。また、それらをもとに地震時における危険度を評価し、マイクロゾーネイションを行うことは地震防災対策の観点からも重要な課題である。地震時の揺れ易さに関しては、やや長周期の地震動を対象にした日本全国の揺れ易さに関する研究がある。工藤¹⁾は一倍強震計記録のスペクトル解析を通じ、周期の関数としての全国の揺れ易さを求めている。また、岡田ら²⁾は気象庁各観測点の1倍・100倍地震計の地震記録を統計処理し、各地点における揺れ易さ・揺れ難さを相対的に評価している。そこでは、地震ごとに最大振幅と震央距離の平均的な減衰曲線を最小二乗法で定め、それからの各地点での記録振幅のずれを全地震について集計し、その平均値をもってその観測点での揺れ易さ（揺れ難さ）の代表値としている。こうした全国規模での比較に対して、平野あるいは盆地など地形的にある広がりを有する地域における

地盤震動特性の平面的な分布を把握することも、地震時の強震動特性を推定したり被害を予測評価する上で重要な課題である。少ない観測データをもとにこうした平面的な分布特性を推定する手法の一つにKriging手法がある。これは、Krige³⁾により鉱山工学分野で開発されたものであり、現在では地盤工学、鉱山工学における多くの文献^{4) 5) 6) 7)}が示されている。清野ら^{8) 9)}はSMART-1アーデータ¹⁰⁾をKriging手法を用いて解析し、最大加速度の空間分布特性を推定するとともにサンプリング点の最適配置について検討している。また、星谷ら^{11) 12)}は静的および動的な問題に対し、Kriging手法を応用了した条件付き確率場のシミュレーション理論を提案している。

以上の研究を踏まえ、本研究では対象領域内で得られたいいくつかの地震観測データ（最大水平加速度値）をもとに設定した距離減衰式を基準にして対象領域での相対的な揺れ易さ（揺れ難さ）の指標値を設定し、Kriging手法により領域全体の指標値を推定することで、対象領

*前田建設工業（株）技術研究所耐震研究室 主任研究員

Senior Research Engineer, Earthquake Engineering Section,
Technical Research Institute, MAEDA CORPORATION
Research Engineer

**前田建設工業（株）技術研究所耐震研究室 研究員

域全体の揺れ易さ（揺れ難さ）について検討する。さらに現状の観測体制（位置）に加え、観測点を増やす場合の最適配置の問題についても検討する。

2. 対象地震および観測位置

ここで対象とする地震は、表-1に示すような3地震とする。また、同表には観測位置、各地震に対する震央距離および観測された最大水平加速度値を示してある。

なお、表-1中の最大水平加速度値は本来ならば観測された水平2成分の時刻歴記録を時間領域で合成し、その絶対最大値を用いるべきであるが、ここでは簡易的に水平2成分のそれぞれの最大加速度値のいずれか大きい方の値に対して8%割り増し¹³⁾した値を最大水平加速度値として用いている。

3. 距離減衰式および揺れ易さ指標値の設定

最大水平加速度値に関する距離減衰式に関しては様々な式が提案されているが、一般に次のような型で表現できる¹⁴⁾。

$$\log A = a \times M - b \times \log(\Delta + \Delta_0) + c \quad (1)$$

ここに

A : 最大水平加速度値 (gal)

M : 地震のマグニチュード

Δ : 震央距離 (km)

Δ_0 : Δが小さい範囲のAを調整する定数 (km)

a, b, c : 定数

各観測位置で得られた最大水平加速度値 (A_D) およびマグニチュード、震央距離をもとに式(1)中の定数a, b, cを回帰した結果、次式が得られた。ただし、 Δ_0 に関しては文献15)、16)を参考に $\Delta_0 = 30$ (km) として回帰を行った。

$$\log A_p = 0.442 \times M - 2.836 \times \log(\Delta + 30) + 4.761 \quad (2)$$

ここに、

A_p : 距離減衰式から求まる最大水平加速度の予測値

なお、図-1には観測された最大水平加速度値の対数($\log(A_D)$)と式(2)を用いて予測した最大水平加速度値の対数($\log(A_p)$)との関係を示してある。

図中に示した直線は観測値と式(2)による予測値とが一致した場合を表しており、各プロット値の直線からのずれはその観測点での揺れ易さ（揺れ難さ）を表現していると考えることができる。そこで、個々の観測位置(x)で観測された最大水平加速度値($A_D(x)$)と式(2)から得られる同観測位置での予測値($A_p(x)$)を用いて式(3)を定義し、これをその地点での揺れ易さを示す指標値($z(x)$)とする。

$$z(x) = \log \frac{A_D(x)}{A_p(x)} \quad (3)$$

表-1 地震諸元および最大水平加速度値

No.(地名)	E02(伊豆大島近海)		E03(神奈川県西部)		E04(東京湾)	
	発生年月日		1990年2月20日		1990年8月5日	
	震央位置		北緯34°42'	東経139°16'	北緯35°12'	東経139°6'
	マグニチュード・深度	M6.5・17km		M5.1・14km		M5.9・93km
観測位置 NO.	震央距離(km)	最大水平加速度値(gal)	震央距離(km)	最大水平加速度値(gal)	震央距離(km)	最大水平加速度値(gal)
1	114		78		46	149.7
2	120	8.9	85		49	123.9
3	89	20.4	56	15.1	28	49.2
4	119		84	5.1	48	
5	133	7.3	104	4.6	58	90.2
6	123	13.6	76	11.1	66	61.9
7	126	17.6	85	6.2	59	
8	120	10.8	79		56	
9	109	28.0	64	23.9	53	
10	72	30.0	15	298.5	62	
11	117	15.8	70		61	
12	91		57		30	49.7
13	119	2.9	84	9.4	48	87.5
14	127		99		51	87.5
15	95		76	8.3	18	113.4
16	90		72		13	79.3
17	93		57		33	157.7
18	84	27.8	47		31	41.0
19	123	8.1	89		51	102.3
20	136		98		65	49.5
21	126	15.3	84	6.6	62	79.1
22	99	25.5	59	9.9	39	60.3
23	116		76	4.7	50	182.0
24	113		66		58	143.2
25	173	4.6	135		101	18.7
26	90	26.9	46	26.2	42	69.7
27	74	39.0	31	47.4	41	31.4
28	100	20.0	63	9.5	37	98.2
29	91		41	29.3	51	48.6
30	110		74		41	127.0
31	124		92		50	79.3
32	104		82		27	157.6

一般に、ある地点での地震動の強さ（揺れ易さ）は地震の特性（規模、震源域の形状、破壊過程）、伝搬経路（距離、地殻の構成）および地盤条件によって支配されると考えられるが、式(3)で与えられる $z(x)$ は、各観測位置で観測されたデータをもとに、地震の規模（マグニチュード）と震央距離の影響を取り除いた指標値と考えることができ、 $z(x) = 0$ が対象とする領域の平均的な揺れ易さ（揺れ難さ）を示す指標値と考えることができる。つまり、指標値が正の場合が揺れやすい地域、負の場合が揺れ難い地域を表していると考えることができる。また、式(3)から得られる指標値は一般に正規分布に従うことが知られている^{13) 14)}。

図-2には、観測記録をもとに得られた指標値 $z(x)$ の頻度分布を示してある。同図より、 $z(x)$ は平均値 (m_z) = 0、標準偏差 (σ_z) = 0.24 の正規分布に従うことがわかった。なお、この値は地盤種別、および地震動の種別によらずほぼ同程度の値であるといわれている¹³⁾ ことから、ほぼ妥当な数値と思われる。

4. 非観測点における揺れ易さ指標値の最適推定

ここでは、対象とする領域内で3.に示したような揺れ易さを示す指標値 $z(x)$ が次式で表されるような定常正規確率場を構成すると仮定する。

$$E[z(x)] = m_z \quad (4)$$

$$E[\{z(x) - m_z\}^2] = \sigma_z^2 \quad (5)$$

ここに、

$E[X]$: Xの期待値

さらに、次式で定義されるバリオグラム^{4) 5)}を考える。

$$\gamma(d_{ij}) = \frac{1}{2} V[z(x_i) - z(x_j)] \quad (6)$$

ここに、

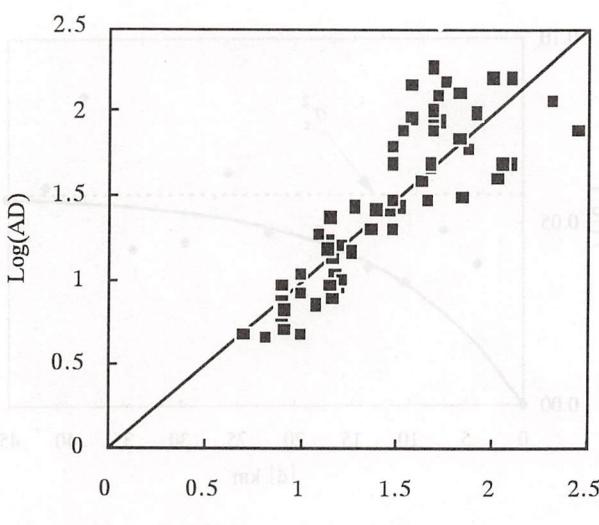


図-1 予測値と観測値の比較

d_{ij} : 2観測点 x_i と x_j の距離 ($d_{ij} = |x_i - x_j|$)

$V[X]$: Xの分散

このとき、式(4)および式(5)より式(6)は次のように変形することができる。

$$\begin{aligned} \gamma(d_{ij}) &= \frac{1}{2} V[z(x_i) - z(x_j)] \\ &= \frac{1}{2} E[\{z(x_i) - z(x_j)\}^2] - \frac{1}{2} \{E[z(x_i) - z(x_j)]\}^2 \\ &= \frac{1}{2} E[\{z(x_i) - z(x_j)\}^2] \\ &= \frac{1}{2} E[\{z(x_i) - m_z\}^2] - E[\{z(x_i) - m_z\}\{z(x_j) - m_z\}] \\ &\quad + \frac{1}{2} E[\{z(x_j) - m_z\}^2] \\ &= \frac{1}{2} \sigma_z^2 - C[z(x_i), z(x_j)] + \frac{1}{2} \sigma_z^2 \\ &= \sigma_z^2 - C[z(x_i), z(x_j)] \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、

$C[X, Y]$: XとYの共分散

ここで、非観測点 (x_r) での指標値 $z(x_r)$ の最適推定値 $z^*(x_r)$ を既に観測されている各観測点の指標値 $z(x_i)$ を用いて、kriging手法により推定する。

最適推定値 $z^*(x_r)$ が各観測点での指標値 $z(x_i)$ の線形和として式(8)で表現できると仮定する。

$$z^*(x_r) = \lambda_0(x_r) + \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) z(x_i) \quad (8)$$

ここに、

$\lambda_i(x_r)$: 非観測点 (x_r) における指標値を予測する際の係数

N : 観測点数

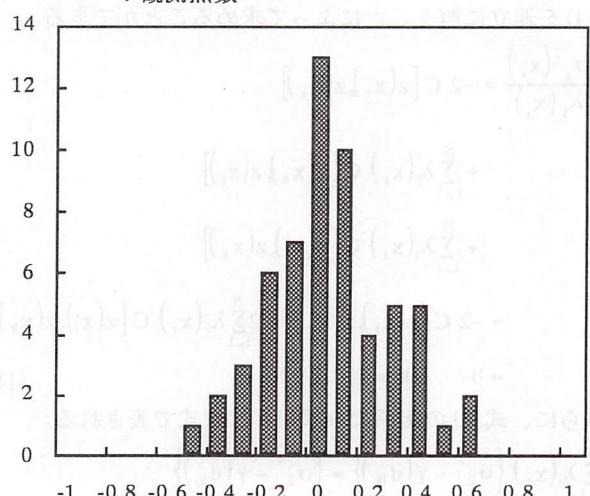


図-2 指標値の頻度分布図

ここで、式(8)および不偏推定の条件式である式(9)から式(10)が得られる。

$$E[z(x_r)] = E[z^*(x_r)] \quad (9)$$

$$\lambda_0(x_r) + \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) m_z = m_z \quad (10)$$

さらに、式(8)および式(10)より $\lambda_0(x_r)$ を消去すると次式が得られる。

$$z^*(x_r) = m_z + \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \{z(x_i) - m_z\} \quad (11)$$

これより、非観測点 (x_r) における予測値は式(11)の各係数 $\lambda_i(x_r)$ が決まれば求めることができる。ここで、 $\lambda_i(x_r)$ は推定誤差の分散が最小となるように決定する。

まず、推定誤差は式(11)より次式で表される。

$$\begin{aligned} \varepsilon(x_r) &= z(x_r) - z^*(x_r) \\ &= \{z(x_r) - m_z\} - \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \{z(x_i) - m_z\} \end{aligned} \quad (12)$$

従って、推定誤差の分散は次式となる。

$$\begin{aligned} \sigma_\varepsilon^2(x_r) &= E[\{\varepsilon(x_r)\}^2] = E[\{z(x_r) - z^*(x_r)\}^2] \\ &= E[\{z(x_r) - m_z\}^2] \\ &\quad - 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) E[\{z(x_r) - m_z\} \{z(x_i) - m_z\}] \\ &\quad + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i(x_r) \lambda_j(x_r) E[\{z(x_i) - m_z\} \{z(x_j) - m_z\}] \\ &= \sigma_z^2 - 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) C[z(x_r), z(x_i)] \\ &\quad + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i(x_r) \lambda_j(x_r) C[z(x_i), z(x_j)] \end{aligned} \quad (13)$$

従って、式(13)を最小にする係数 $\lambda_i(x_r)$ は、式(13)を $\lambda_k(x_r)$ ($k=1, 2, \dots, N$) で微分することによって、式(14)を連立に解くことによって求めることができる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_\varepsilon^2(x_r)}{\partial \lambda_k(x_r)} &= -2 C[z(x_r), z(x_k)] \\ &\quad + \sum_{j=1}^N \lambda_j(x_r) C[z(x_k), z(x_j)] \\ &\quad + \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) C[z(x_i), z(x_k)] \\ &= -2 C[z(x_r), z(x_k)] + 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) C[z(x_i), z(x_k)] \\ &= 0 \quad (k=1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (14)$$

さらに、式(7)の関係より式(14)は次式で表される。

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \left\{ \sigma_z^2 - \gamma(d_{ik}) \right\} = \left\{ \sigma_z^2 - \gamma(d_{kr}) \right\} \quad (k=1, 2, \dots, N) \quad (15)$$

従って、バリオグラム $\gamma(d_{ij})$ が与えられれば、係数

$\lambda_i(x_r)$ は式(15)を連立に解くことによって求めることができる。また、このとき推定誤差の分散は式(13)および式(15)より、次式で表される。

$$\begin{aligned} \sigma_\varepsilon^2(x_r) &= \sigma_z^2 - \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) C[z(x_r), z(x_i)] \\ &= \sigma_z^2 - \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \left\{ \sigma_z^2 - \gamma(d_{ri}) \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

なお、式(15)の関係から非観測位置 (x_r) が任意の観測位置 (x_i) に一致したとき、その推定値は観測値と完全に一致することになる。従って、そのときの推定誤差の分散は0となる。

5. バリオグラムの設定

ここでは各観測点で得られた指標値 $z(x_i)$ ($i=1, 2, \dots, N$) をもとに、バリオグラムを設定する。

指標値の定まっている2観測地点の距離が ($a-1$) $\times d$ から $a \times d$ の間 ($a=1, 2, \dots$) にある2つの観測地点 (x_i および x_j) における指標値 $z(x_i)$ と $z(x_j)$ の組が $N(a)$ 個あるとすると、式(18)により求まる値を式(17)で与えられる距離 d_a におけるバリオグラムの値とする。なお、ここでは離散間隔 d は4(km)としている。

$$d_a = \frac{1}{N(a)} \sum_{i=1}^{N(a)} d_{ij} \quad (a=1, 2, \dots) \quad (17)$$

$$\gamma(d_a) = \frac{1}{2N(a)} \sum_{i=1}^{N(a)} [z(x_i) - z(x_j)]^2 \quad (a=1, 2, \dots) \quad (18)$$

こうして、観測データから求められたバリオグラムの離散値を図-3にプロットしてある。これをもとに、ここでは指数関数形の式(19)を用いて定数 L (相関距離)を回帰した。その結果を図中に曲線で示してある。

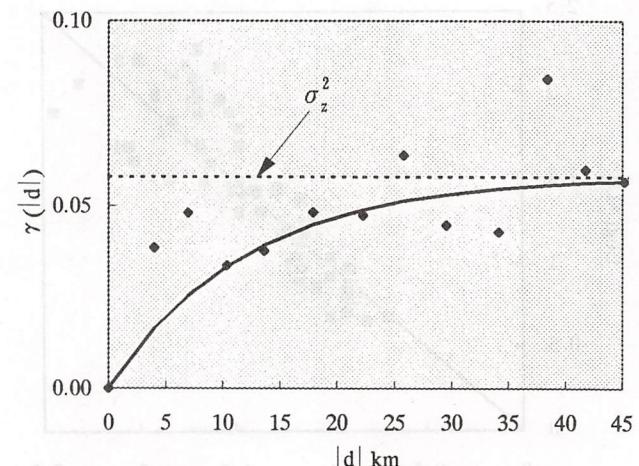


図-3 バリオグラム

$$\gamma(d) = \sigma_z^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{d}{L}\right) \right] \quad (19)$$

なお、このとき回帰された定数 L (相関距離) の値は、12 (km) となった。

6. 対象領域の揺れ易さおよび追加観測する場合の最適位置

ここでは、対象とする領域を 4 km 四方のメッシュに区分けし、各観測位置で設定された揺れ易さの指標値をもとに、4. および 5. の手法を用いて対象領域全体の揺れ易さを推定する。さらに、現在の観測体制 (位置) に加えて新たな観測位置を設定する場合の最適な観測位置の決定方法について検討する⁹⁾。対象領域、メッシュおよび揺れ易さ指標値の与えられている位置を図-4 に示す。

まず、4. および 5. の手法により非観測位置の揺れ易さ指標値を推定した後の対象領域全体の揺れ易さを

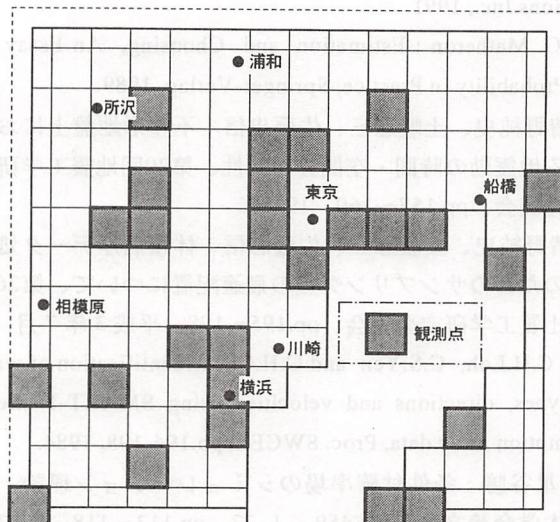


図-4 観測点位地

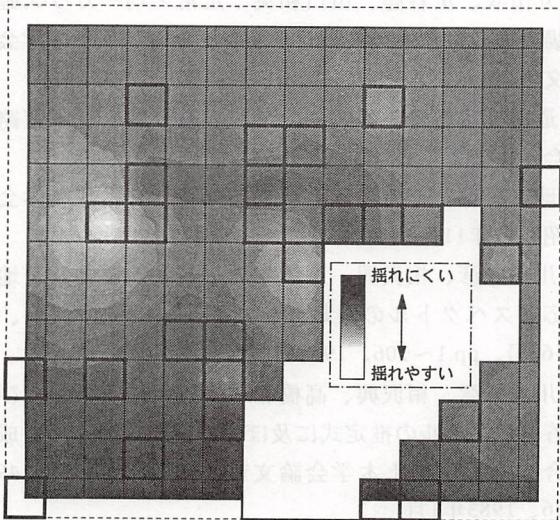


図-5 対象領域全体の揺れ易さ

図-5 に示す。また、非観測位置における推定誤差の分散を図-6 に示す。ただし、4. でも示したように、観測データから指標値の得られている地点においては、推定誤差の分散は常に 0 となっている。なお、本指標値は最大水平加速度値をもとに算定されているため、ここでいう揺れ易さは比較的短周期領域での揺れ易さを示しているものと思われる。

次に、新たな観測位置を設定する場合の最適な観測位置の決定方法について検討する。4. において、非観測点での推定誤差の分散は式(16)により求めることができた。ここで、非観測点である M 地点のうちの 1 地点 (x_k) で揺れ易さの指標値 $z(x_k)$ が得られたと仮定する。なお、そのときの指標値には領域全体の期待値である m_z を用いることにする。これを既に得られている N 地点の指標値に加え、計 ($N + 1$) 地点で指標値が得られたとして、それ以外の ($M - 1$) 地点の推定誤差の分散を式(16)より求め、そのときの対象領域全体の推定誤差の分散を表す指標値として次式を定義する。

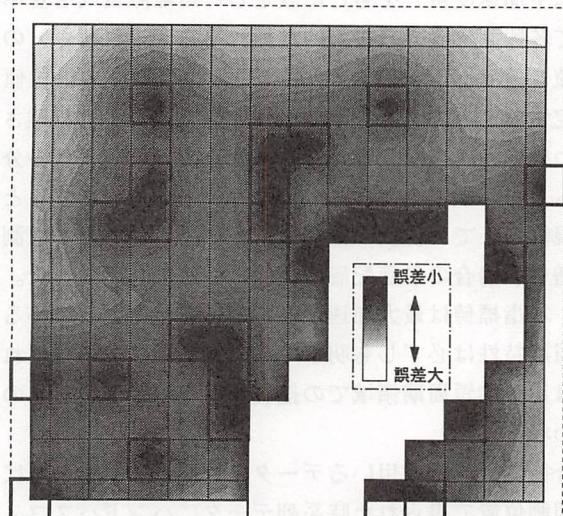


図-6 非観測位置における推定誤差の分散

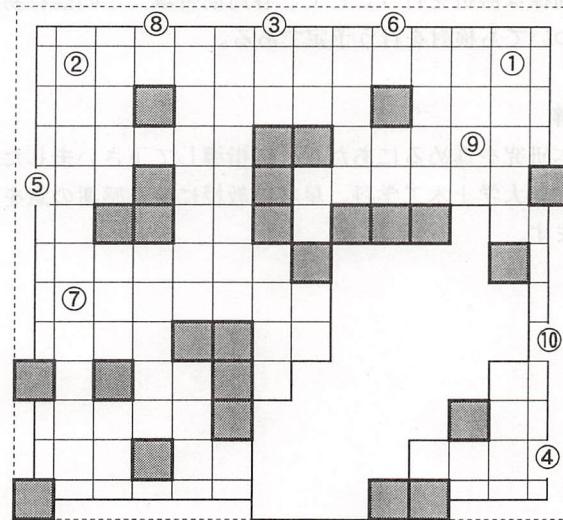


図-7 追加観測する場合の最適配置順位

$$I_o(x_k) = \sum_{i=1}^{M-1} \sigma_e^2(x_i) \quad (20)$$

ここに、

$I_o(x_k)$: x_k 地点が追加観測された場合の領域全体の推定誤差分散を表す指標値

$\sigma_e^2(x_i)$: 非観測点 (x_i) における推定誤差分散

こうして得られる M 個の指標値 $I_o(x_k)$ ($k=1, 2, \dots, M$) を比較し、最も小さな値が得られる地点 (x_k) を追加観測点に選ぶことによって、領域全体としての推定誤差を最小にするという規範の下での最適配置を設定することができる⁹⁾。さらに、もう 1 地点の追加観測を考える場合には、同様な方法で最適配置を設定することができる。こうして、求めた最適配置の優先順位を図-7 に示してある。

7.まとめ

対象領域内で得られたいいくつかの地震観測データ（最大水平加速度値）をもとに設定した距離減衰式を基準にして各観測位置での相対的な揺れ易さ（揺れ難さ）の指標値を設定し、Kriging 手法により領域全体の指標値を推定することで、対象領域全体の揺れ易さ（揺れ難さ）について検討した。さらに非観測点での推定誤差の分散をもとに、領域全体としての推定誤差を最小にするという規範の下で、現状の観測体制（位置）に加えて観測点を増やす場合の最適配置の問題についても検討した。なお、本指標値は最大加速度値をもとに算定されているため周期特性は必ずしも明瞭でないが、ここでいう揺れ易さは比較的短周期領域での揺れ易さを示しているものと思われる。

今後は、解析に用いるデータの数を増やすとともに、各観測位置で得られた時系列データにバンドパスフィルターを施した後の最大加速度値または最大速度値を用いて同様な解析を行うことで、各周期帯域ごとの揺れ易さについても検討を行う予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、御指導して下さいました武藏工業大学土木工学科、星谷勝教授に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 工藤一嘉：深い地盤による長周期地震動の卓越－1983日本海中部地震による新潟での石油溢流、長周期地震動強さの地域性に関する－、第12回地盤震動シンポジウム、日本建築学会、pp.47～56、1984年6月
- 2) 岡田成幸、鏡味洋史：やや長周期の地盤特性とその全国分布、第5回地盤震動シンポジウム、日本建築学会、pp.67～74、1977年2月
- 3) D.G.Krige : Two-dimensional Weighted Moving Average Trend Surfaces for Ore Evaluation, Proc. of sym. on Math. Stat. and Computer Appl. for Ore Evaluation, Johannesburg, South Africa, pp.13-38, 1966.
- 4) J.P.Delhomme: Kriging in the Hydrosciences, Advances in Water Resources Vol.1, No.5, pp.251～266, 1978
- 5) G.Bastin, M.Gevers : Identification and Optimal Estimation of Random Fields from Scattered Point-wise Data, Automatica, Vol.21, No.2, pp.139～155, 1985
- 6) N.A.C.Cressie: Statistics for Spatial Data, John Wiley and Sons Inc., 1991.
- 7) G.Matheron : Estimation and Choosing, An Essay on Probability in Practice, Springer-Verlag, 1989.
- 8) 清野純史、土岐憲三、佐藤忠信：不整形地盤上における地震動の時間・空間分布特性、第20回地震工学研究発表会、pp.157～160、1988年
- 9) 清野純史、土岐憲三、佐藤忠信：体積層厚データ処理のためのサンプリング点の最適配置について、第26回土質工学研究発表会、pp.195～198、平成3年7月
- 10) C.H.Loh, C.S.Yen and C.H.Chen: Identification of wave types, directions and velocities using SMART-1 strong motion array data, Proc. 8WCEE, pp.194-198, 1984.
- 11) 星谷勝：条件付確率場のシミュレーション理論、土木学会論文集、No.459/I-22, pp.113～118、1993年1月
- 12) 丸山収、星谷勝、山口和英：定常・均一ガウス確率場の条件付き地震波動シミュレーション、土木学会論文集、No.489/I-27, pp.177～185、1994年4月
- 13) 道路橋示方書・同解説、V耐震設計編、日本道路協会、平成2年2月
- 14) 地震荷重－その現状と将来の展望、日本建築学会、昭和62年11月20日
- 15) 川島一彦、相沢興、高橋和之：最大地震動及び地震応答スペクトルの距離減衰式、土木研究所報告、第166号、pp.1～106、1985年9月
- 16) 川島一彦、相沢興、高橋和之：最大地震動および応答スペクトルの推定式に及ぼす強震記録の水平2成分合成の影響、土木学会論文報告集第329号、pp.49～56、1983年1月