

高精度地震動マップの作成のための
尾張旭市地域の地盤特性に関する統計解析
～実測値との比較による推定誤差の解析法とその試算例～

**Stochastic Analyses of Site Amplifications for Providing Digital Hazard Maps of
Strong Ground Motion at the Areas in the City of Owariasahi
～ An Analysis of the Accuracies Based on the Observations～**

菅井径世*・小川克郎*・森保弘**・廣内大助***・西村雄一郎****

正木和明*****・倉橋奨*****

SUGAI Michiyo*, OGAWA Katsuro*, MORI Yasuhiro, HIROUCHI Daisuke***,
NISHIMURA Yuichiro****, MASAKI Kazuaki***** & KURAHASHI Susumu*******

*名古屋産業大学大学院、**名古屋大学大学院、***信州大学大学院、****奈良女子大学大学院、*****愛知工業大学

*Nagoya Sangyo University、**Nagoya University、***Shinshu University、****Nara Women's University &

*****Aichi Institute of Technology

Abstract: The present report introduces an example of the simplest methods of calibration for strong ground motion estimators based on the observation of real earthquakes. In the previous report, the reporters proposed and architected a system for estimates of strong ground motions in the city of Owariasahi. The proposed system employed the Kriging methods to estimate the spatial distribution of the strong ground motions because of four main reasons as follows. Firstly the methods can easily and immediately provide the estimation of the ground strong motion at every building in the city. Secondly they can make the estimations in perfectly objective manner. Thirdly they can provide the quantitative accuracies of the estimations. Fourthly they provide cost of operating the system is the minimum compared with the other methods.

The established system can estimate the strong ground motion at the centroid of every building in the city with the concrete accuracies (estimation errors) at each building. There, the two types of errors were generated by two reasons. The first is errors generated with interpolate operations (referred as “interpolation errors” in the present report), and the second is by the way of calculating the strong ground motions at each boring point (referred as “calculation errors” in the present report). The way is based on the assumption of one dimensional ground layered systems while the layered systems three dimensionally distribute. While the method can provide the two errors concretely and objectively, there can be the third type errors between estimated and observed strong ground motions, caused by various reasons. As a first trial, five seismometers were settled by the authors at five points in the city, and the real strong ground motions were observed when two real earthquakes occurred in 10th November, and 14th December 2012. The reporters estimated, by statistical analysis simply with the most likelihood method using the estimated and observed strong ground motions. Then the reporters find it out, based on the comparisons between estimated and observed strong motions, that the third type errors are important and cannot be ignored. The third type of errors is about 0.309 in terms of standard deviation when the mean values are about 2.4, so the coefficient of variation is about 5.3% in the cases.

Keywords: earthquake, hazard map, ground strong motion, stochastic, accuracies, Kriging, the most likelihood method

1. はじめに

本報告では、昨年度までに提案した地震動分布マップ推定法の精度を、実測値に基づいて評価する手法について考察した結果を紹介する。

著者らは、昨年度までの研究において、地球統計学を活用することにより任意の地点(=ピンポイント)での地震動推定を可能とする手法を提案した。この手法では、客観的実測データのみを利用し、システムティックな統計解析法(=地球統計学)を利用することにより、地震動マップの作成コストを大幅に抑え、地震対策の中心的役割を担うべき中小自治体にも装備可能な高精度地震災害情報システムの開発を目的としている。

昨年度までの研究では、提案手法が既に用いられているハザードマップよりもはるかに優れた内容を、簡易かつ経済的に提供できることが分かった。また、その精度については、ハザードマップ作製システムに組み入れられたロジックによって保障され、継続的に向上可能であることも大きな特徴として示した。すなわち、その時点までに蓄積された地盤、地震情報を最大限に活用し、最高精度でハザードマップを提供するロジックを、一つの同じ実用的なハザードマップ作製システムに組み込んだという点が、昨年度における研究による成果の際立って優れた特徴の1つであった。

また、Web-GISの利用により、手軽に利用できる点、今後は、耐震診断、耐震補強の効果を推定するシステムを組み込める点、地震の発生確率も考慮した最適災害抑制対策に関する意思決定のための重要なデータとなる点、防災拠点などの重要地理情報が容易かつ即時にアップデートできる点、避難ルートの検索などにも利用できる点など、多くの点において、大きな可能性を有していることも示唆した。

さらに、名古屋産業大学環境情報ビジネス学会主催のシンポジウムなどにおいて本研究の結果の一部を公表した際に、本マップについては市民等から極めて高い関心を得た。今後、市民、行政とも協力して、研究活動を進めることも検討すべきである。これにより、本研究の継続は、さらに大きな結果を得るものと考えた。

本年度は、提案した手法を実用化するために、本手法による地震動推定値と地震計で観測した実測値を比較することにより、本手法における実用的な精度を明らかとする手法について研究を積み重ねた。本報告では、この結果について紹介する。

ただし、地震動の計測データがいまだ十分ではないので、ここで紹介するのは、情報量(データ量)に合わせた解析手法の原理である。今後システムの普及により、計測数が増えると、その実用的な精度とその活用法の有用性が明白になると期待できる。

なお、研究の全体構想については付録において紹介する。

2. 2011年度の研究活動と成果、および2012年度の研究の構想と実施

研究の全体構想の中で、2011年度においては、

- 1) 尾張旭市から提供された600本あまりのボーリングデータの電子化、
- 2) 尾張旭市内の4地点5カ所への地震計の設置、
- 3) 2011年に発生した3つの地震におけるボーリングデータ位置での地震動再現計算(入力地震動は愛知県春日井市内のKiK-NETデータ:基盤上面に設置された地震計による)
- 4) 再現された地震動の空間分布に関する統計計算、
(ア) 統計計算方法の定式化
(イ) 統計計算結果
- 5) 統計解析に基づく尾張旭市内3万4千軒の建物における地震動分布推定(推定値と推定精度の計算)、
- 6) 上記の地震Ⅰと地震Ⅱにおける尾張旭市内に設置された地震計による実測値と空間統計による推定値の比較を行った。

2012年度においては、

- 1) 愛知県から緊急雇用対策事業により、尾張旭市内およびその周辺の600本あまりのボーリングデータの精確な電子化と確認作業を尾張旭市の事業として業者委託した。なお、この入力、独立行政法人防災科学技術研究所と独立行政法人産業技術総合研究所によるボーリングデータ処理システムを利用して整理され、2013年3月までに完了予定である。すなわち、一般的、汎用性の高いデータベースの中で、容易に利用できるデータとして整理されることとなり、今後の利用には、地震動推定の他にも様々な期待が寄せられる。
- 2) ボーリングデータの精確なデータベース化と並行して、地震動観測を続けたが、いつ

表-1 地震動の空間統計試算結果

	(ア) 地震Ⅰ	(イ) 地震Ⅱ	(ウ) 地震Ⅲ
発生日	2011年3月11日	2011年11月10日	2011年12月14日
震源位置	三陸沖	あま市内	瑞浪市内
震源深さ	約24km	約10km	約50km
マグニチュード	M=9.0	M=3.9	M=5.2
AIC	-654.5	492.3	308.7
分散(シル) σ_i^2	0.00596	0.15346	0.09638
自己相関距離(レンジ)(m)	124.8	435.4	218.0
誤差分散 σ_i^2	0.00251	0.20442	0.09264
トレンド関数の係数 (a_0)	2.24	2.02	2.29

地震が発生するかについては不明である。そこで、本研究では、実測値に基づいて評価する手法について考察した。次章では、主にその方法について紹介する。

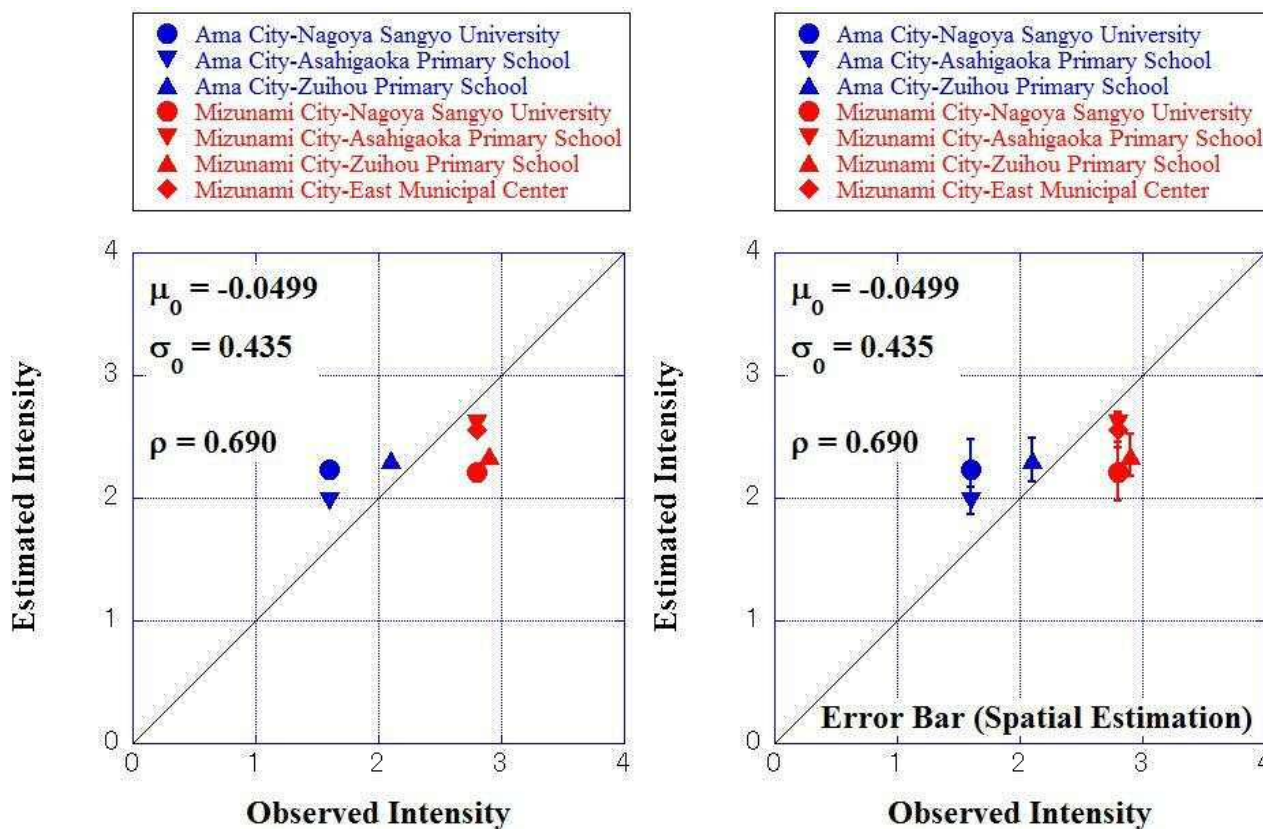
3. 実測値との比較による推定精度、キャリブレーションの方法について

最初に、観測された実測地震動 SI 値(計測地震度

相当)と、推定した地震動の関係を図-1 に示す。補間推定に用いた空間統計解析結果は、表-1 に示したとおりである(昨年度報告書を参照)。

地震の観測点は、尾張旭市内の4地点5カ所で、下記のとおりである。

- (ア) 名古屋産業大学 3号館1階
- (イ) 名古屋産業大学 3号館屋上
- (ウ) 尾張旭市 旭ヶ丘小学校



(A) 地震動の観測値と推定値の比較

(B) 地震動の観測値と推定値、推定誤差の比較

図-1 地震動の観測値と推定値、推定誤差の比較

(エ) 尾張旭市 瑞鳳小学校

(オ) 尾張旭市 東部市民センター

地震計の設置および観測データの収取は、名古屋産業大学および尾張旭市との協力のもと、愛知工業大学によって行われた。

また、表-1に示した3つの地震におけるボーリングデータ位置での地震動再現計算を行うための入力地震動は、愛知県春日井市内のKiK-NETデータ（基盤上面に設置された地震計）を利用した。

表-1には3つの地震データが示されているが、地震計が設置されたのが、2011年3月11日以降であったため、図-1には、地震ⅡとⅢのみの実測値と推定値の比較を示している。2つの地震に対しては、青（地震Ⅱ）、青（地震Ⅲ）の色別に示しており、観測場所については、●（名古屋産業大学 3号館1階）、▼（尾張旭市 旭ヶ丘小学校）、▲（尾張旭市 瑞鳳小学校）、◆（尾張旭市 東部市民センター）の形別に示している。

図-1 (A)には、実測値と推定値の単純比較を示したが、図中に示したように、実測値に対する推定値の平均誤差 μ_{im} は、-0.0499と実測値の平均の2%程度と小さく、標準偏差 σ_{ϵ} は0.435程度であった。また、実測値と推定値の相関係数は0.69と比較的良好な相関を示している。

図-1 (B)には、平均誤差 $\mu_{im}=-0.0499$ による平均値の補正值と、標準偏差 $\sigma_{\epsilon} 0.435$ も含めたエラーバーを示す。エラーバーの標準偏差は次式によって求めた値である。

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_{\epsilon}^2} \quad (1).$$

ここでは、推定値に対して、空間補間による推定誤差が付帯していることに注目すべきである。この誤差は、昨年度の報告で詳細を述べたように、1次元の地震動増幅解析を3次元空間に適応することによる誤差（本報告では以下“計算誤差”と呼ぶ）も付帯している。図-1 (B)に示したように、今回の計測と解析においては、概ね、エラーバーが大きい場合ほど、実測値と推定値の差が大きい。エラーバーが大きくなるのは、観測地点（地震計設置地点）から、最近のボーリング調査地点までの距離が長い場合、観測地点付近にボーリング調査地点が少ない場合である。推定値に誤差が付帯している以上、実測値に対する推定値の誤差は、この誤差の影響を議論したうえで、推定すべきである。

本報告では、 σ_e では説明できない実測値に対する推定値の誤差を、“解析誤差”と定義する。解析誤差には、空間補間による誤差（本報告では以下“補間誤差”と呼ぶ）や、先の“計算誤差”は含まれない。解析誤差が生じるのは、解析に利用した力学モデルと実際の地盤挙動の違い、すなわち解析方法と実際の地盤の挙動との違いなどが主な原因となる。

この解析誤差については、地震波の周波数特性や、大きさなど、様々な要因が考えられる。特に、図-1をみると、地震Ⅱ（震源あま市内）では、実測値よりも推定値の値が大きくなっており、地震Ⅲ（震源瑞浪市内）では、実測値よりも推定値の値が小さくなっている。この原因について、力学的な観点などから考察することは非常に重要である。しかしながら、現時点では、観測による情報量が少ないことを考慮して詳細な検討は行わない。以下では、一般的な解析誤差の推定法について議論する。

図-1においては、各観測値 i ($i=1, \dots, 7$) に対する地震動推定値を μ_{i0} として、実測値に対する誤差

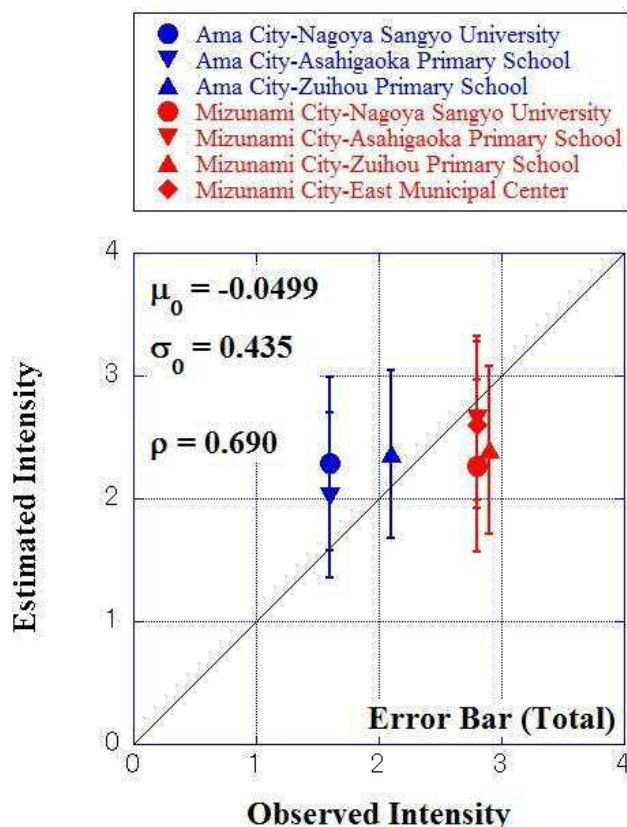


図-2 地震動の観測値と修正推定値、推定誤差の比較

(推定値に $\mu_{im}=-0.0499$ 、
 エラーバーに $\sigma_{\epsilon}=0.435$ を含めている)

(平均値 $\mu_{im} = -0.0499$ 、標準偏差 $\sigma_\varepsilon = 0.435$) を計算した。しかし、各観測点 i の地震動推定値が μ_i であった場合、各推定値 μ_i による尤度 $likelihood_{se}$ は、昨年度の解析において μ_i が正規分布することを仮定しているので、次式で表すことができる。

$$Likelihood_{se} = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left\{-\left(\frac{\mu_i - \mu_{i0}}{\sqrt{2}\sigma_i}\right)^2\right\} \quad (2).$$

一方で、解析誤差に関する尤度 $likelihood_{ae}$ は次式で表すことができる。

$$Likelihood_{ae} = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\varepsilon} \exp\left\{-\left(\frac{\mu_i - \mu_{im} - \mu_\varepsilon}{\sqrt{2}\sigma_\varepsilon}\right)^2\right\} \quad (3).$$

そこで、本報告では、式 (1) および (2) の尤度 $likelihood_{se}$ と $likelihood_{ae}$ の総積 $likelihood_{te}$ を最大化する基準をもって、平均値 μ_{im} 、標準偏差 σ_ε 、および、各観測点 i における修正推定値 μ_{i0} を推定する。すなわち、次式の最大化によって各パラメータを推定する。

$$\begin{aligned} & \max_{\mu_0, \sigma_0, \mu_{i=1, n}} p(\mu_0, \sigma_0, \mu_{i=1, n}) \\ &= \max_{\mu_0, \sigma_0, \mu_{i=1, n}} \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\varepsilon} \exp\left\{-\left(\frac{\mu_i - \mu_{im} - \mu_\varepsilon}{\sqrt{2}\sigma_\varepsilon}\right)^2\right\} \\ & \quad \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left\{-\left(\frac{\mu_i - \mu_{i0}}{\sqrt{2}\sigma_i}\right)^2\right\} \end{aligned} \quad (4).$$

ただし、一般に、最尤法では、最大化する尤度の対数値を用いるので、式 (3) は以下のように変形する。

$$\begin{aligned} \max_{\mu_0, \sigma_0, \mu_{i=1, n}} LL &= \max_{\mu_0, \sigma_0, \mu_{i=1, n}} \ln p(\mu_0, \sigma_0, \mu_{i=1, n}) \\ &= \max_{\mu_0, \sigma_0, \mu_{i=1, n}} \prod_{i=1}^n \ln \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\varepsilon} \exp\left\{-\left(\frac{\mu_i - \mu_{im} - \mu_\varepsilon}{\sqrt{2}\sigma_\varepsilon}\right)^2\right\} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left\{-\left(\frac{\mu_i - \mu_{i0}}{\sqrt{2}\sigma_i}\right)^2\right\} \right] \\ &= \max_{\mu_0, \sigma_0, \mu_{i=1, n}} \sum_{i=1}^n \left[\ln\left(\frac{1}{2\pi}\right) + \ln\left(\frac{1}{\sigma_\varepsilon}\right) + \ln\left(\frac{1}{\sigma_i}\right) - \left(\frac{\mu_i - \mu_{im} - \mu_\varepsilon}{\sqrt{2}\sigma_\varepsilon}\right)^2 - \left(\frac{\mu_i - \mu_{i0}}{\sqrt{2}\sigma_i}\right)^2 \right] \end{aligned} \quad (5).$$

ただし、

$$\begin{aligned} LL &= \sum_{i=1}^n \left[\ln\left(\frac{1}{2\pi}\right) + \ln\left(\frac{1}{\sigma_\varepsilon}\right) + \ln\left(\frac{1}{\sigma_i}\right) - \left(\frac{\mu_i - \mu_{im} - \mu_\varepsilon}{\sqrt{2}\sigma_\varepsilon}\right)^2 - \left(\frac{\mu_i - \mu_{i0}}{\sqrt{2}\sigma_i}\right)^2 \right] \\ &= \sum_{i=1}^n \left[\ln\left(\frac{1}{2\pi}\right) - \ln(\sigma_\varepsilon) - \ln(\sigma_i) - \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_i - \mu_{im} - \mu_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_i - \mu_{i0}}{\sigma_i}\right)^2 \right] \\ &= \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{1}{2\pi}\right) - \sum_{i=1}^n \ln(\sigma_\varepsilon) - \sum_{i=1}^n \ln(\sigma_i) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\mu_i - \mu_{im} - \mu_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon}\right)^2 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\mu_i - \mu_{i0}}{\sigma_i}\right)^2 \\ &= -n \cdot \ln(2\pi) - n \cdot \ln(\sigma_\varepsilon) - \sum_{i=1}^n \ln(\sigma_i) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\mu_i - \mu_{im} - \mu_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon}\right)^2 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\mu_i - \mu_{i0}}{\sigma_i}\right)^2 \end{aligned} \quad (6).$$

この時、 LL の最大化は、 LL の負値を $LLN (= -LL)$ としてこれを最小化することと同意義である。 LLN を最小化するパラメタ μ_{im} 、 σ_ε 、および μ_{i0} では、 LLN の各パラメタによる微分値が 0 になることから次式が成立する。

$$\frac{\partial LLN}{\partial \mu_\varepsilon} = \sum_{i=1}^n \frac{(\mu_i - \mu_{im} - \mu_\varepsilon)}{\sigma_\varepsilon^2} = 0$$

(7).

よって、

$$\mu_\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mu_i - \mu_{im})$$

(8).

$$\mu_\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_{im}$$

(9).

$$\frac{\partial LLN}{\partial \sigma_\varepsilon} = \frac{n}{\sigma_\varepsilon} - \sum_{i=1}^n \frac{(\mu_i - \mu_{im} - \mu_\varepsilon)^2}{\sigma_0^3} = 0$$

(10).

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mu_i - \mu_{im} - \mu_\varepsilon)^2$$

(11).

$$\frac{\partial LLN}{\partial \mu_i} = \frac{\mu_i - \mu_{im} - \mu_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon^2} + \frac{\mu_i - \mu_{i0}}{\sigma_i^2}$$

$$= \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon^2} - \frac{\mu_{im} + \mu_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon^2} + \frac{\mu_i}{\sigma_i^2} - \frac{\mu_{i0}}{\sigma_i^2} = 0$$

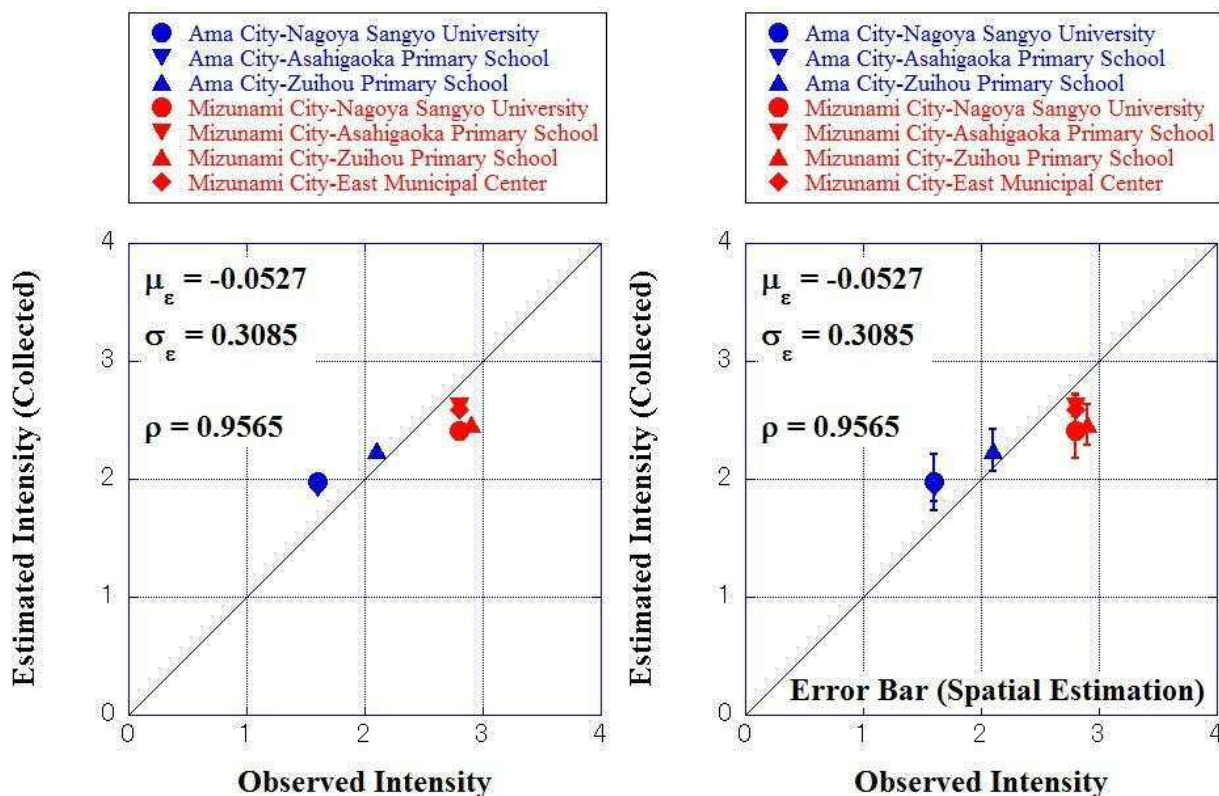
(12).

$$\frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon^2} + \frac{\mu_i}{\sigma_i^2} = \frac{\mu_{im} + \mu_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon^2} + \frac{\mu_{i0}}{\sigma_i^2}$$

(13).

$$\left(\frac{1}{\sigma_\varepsilon^2} + \frac{1}{\sigma_i^2}\right) \mu_i = \frac{\mu_{im} + \mu_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon^2} + \frac{\mu_{i0}}{\sigma_i^2}$$

(14).



(A) 地震動の観測値と修正推定値の比較

(B) 地震動の観測値と推定値、修正推定誤差の比較

図-3 地震動の観測値と修正推定値、修正推定誤差の比較

$$\left(\frac{\sigma_i^2 + \sigma_\varepsilon^2}{\sigma_\varepsilon^2 \cdot \sigma_i^2}\right) \mu_i = \left(\frac{\sigma_i^2 \cdot (\mu_{im} + \mu_\varepsilon) + \sigma_\varepsilon^2 \cdot \mu_{i0}}{\sigma_\varepsilon^2 \cdot \sigma_i^2}\right) \quad (15).$$

$$\mu_i = \frac{\sigma_i^2 \cdot (\mu_{im} + \mu_\varepsilon) + \sigma_\varepsilon^2 \cdot \mu_{i0}}{\sigma_i^2 + \sigma_\varepsilon^2} \quad (16).$$

以上において式(9)、(11)、(16)から、 μ_ε 、 σ_ε は、 μ_i によって定まり、 μ_ε は、 μ_ε 、 σ_ε によって定まるので、逐次近似法によって、各パラメタを求めることが可能である。ただし、パラメタの収束性によって、各種関数の最小化アルゴリズムに基づく数値計算プログラムを利用することも可能である。

4. 実測値との比較による推定精度、キャリブレーションの結果と考察

ここで、観測された実測地震動と、キャリブレーションで推定した地震動 μ_i の関係を図-3に示す(図-1と対比)。

図-3(A)には、実測値と修正推定値の単純比較を示したが、図中に示したように、実測値に対する推定値の平均誤差 μ_{im} は-0.0527と、実測値の平均の約2%程度と極めて小さく、図-1(A)の場合と比較しても大差ない。また、標準偏差 σ_ε は0.3085程度であるが、図-1(B)の場合と比較するとかなり小さな値となっている。これは、まさに推定値 μ の誤差を考慮した結果である。また、実測値と推定値の相関係数は0.9565と極めて高い結果となっている。

図-4には、平均誤差 $\mu_{im}=-0.0527$ による平均値の補正値と、標準偏差 σ_ε も3.085も含めたエラーバーを示す。すなわち、エラーバーの標準偏差は式(1)において、 σ_ε をもって σ_0 にかえて求めた値である。図-4を図-2と比較すると、当然のことながら、図-4において、実測値に対して推定値がより近い値となっており、その推定誤差も小さい値となっていることが分かる。これらに図の比較にみられる推定精度の向上は、当初、著者らが期待した以上のものであった。

上記のように、平均誤差値 μ_{im} の違いは、0.0029(=-0.0499-(-0.0527))であり、図-1～4に示した実測地震動の値と比較すると、0.1%程度の差しかないことが分かる。しかしながら、解析誤差を代表する値 σ_ε については、実際に存在する“計算誤差”と“補間誤差”を、考慮する場合としない場合との違

いが、0.1262(=0.4347-0.3085)であり、図-1～4に示した実測地震動の平均的な値と比較すると5.3%程度になる。この値から、地震動推定における信頼区間を90%としても、図-1～4に示した実測地震動の値と比較して6.82%、信頼区間が95%の場合8.75%、信頼区間が99%の場合では12.4%と、非常に大きな信頼区間の差が生じることが分かる。

また、現在のところ、計算速度が、精確にどの程度になるかは不明であるが、実測値を利用することで精度が大きく向上する以上、適切なポイントに地震計を設置し、さらにボーリングデータのある地点で地震動を計算して、その双方のデータから地震動を空間補間する場合、かなり高い精度で、個々の住宅、その他の建物におけるそれぞれの地震動とその推定精度を計算できると期待できる。もちろん、この際には、当該の地震が発生する以前の地震動データによって、キャリブレーションにおける補正係数(この報告の例では、 μ_ε 、 μ_ε 、 σ_ε)や、補正方式そのものをさらに高精度化しておくことも重要で

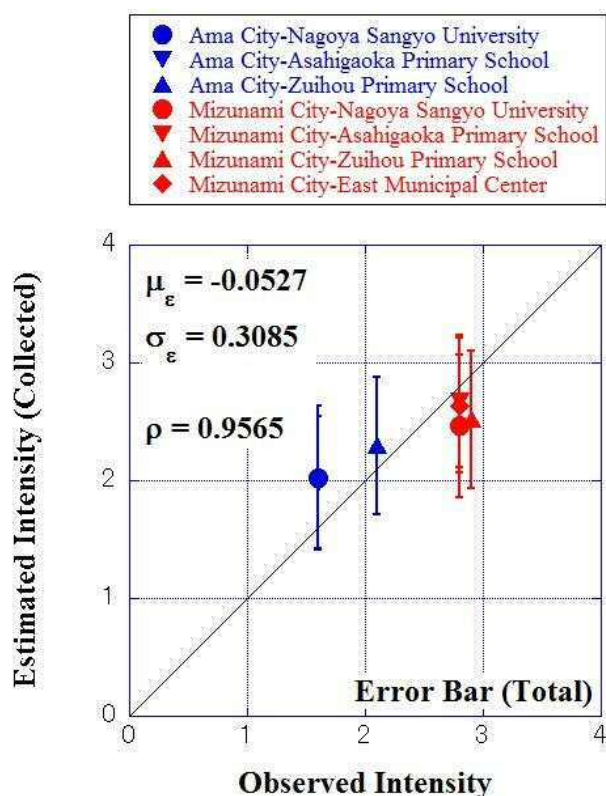


図-4 地震動の観測値と修正推定値、推定誤差の比較

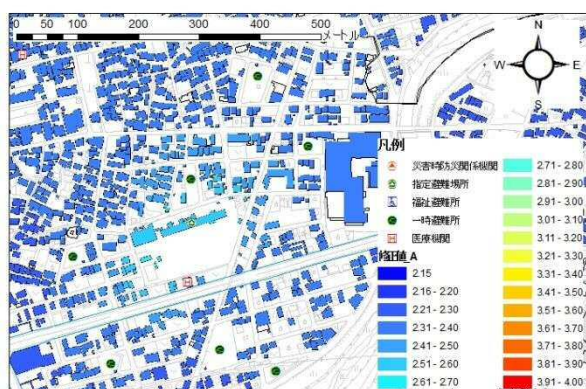
(推定値を $\mu_\varepsilon=-0.0527$ で補正した μ_ε とし、エラーバーに $\sigma_\varepsilon=0.3085$ を含めている)

あり、可能である。

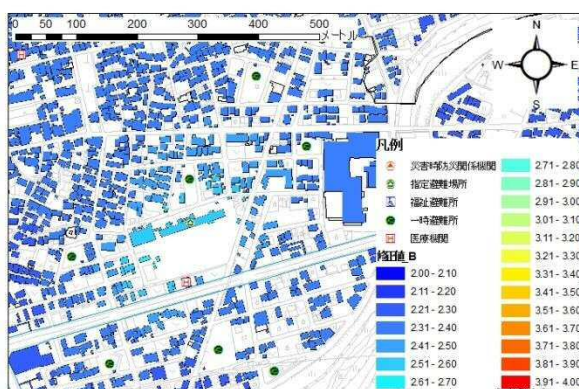
地震動の推定においては、ボーリングデータなどによる地盤情報量の増加が、その推定精度の向上に寄与することは明白であるが、本報告で実測値を用いて明らかとしたように、本提案手法（地震動マップ作成手法）を利用すれば、地震動の継続的な観測とキャリブレーションにより、さらに大きく推定精度の向上に寄与することができることが明白である。

図-5 に、キャリブレーションの結果に基づいて作

成した地震動マップの一例（尾張旭市内：表-1 における地震 I、三陸沖、2011 年 3 月 11 日発生）を示す。図-5 には、図-2 に基づいてキャリブレーションを行った結果(A)、および μ_i が確率変数であることを考慮して図-4 に基づいてキャリブレーションを行った結果(B)の2つの図を示す。2つの図から分かるように、推定値そのものには、あまり大きな差は見られない。一方、図-5(A)および(B)に対応させて、同じ地震に対する同じ地区内における 99%信頼区間に関

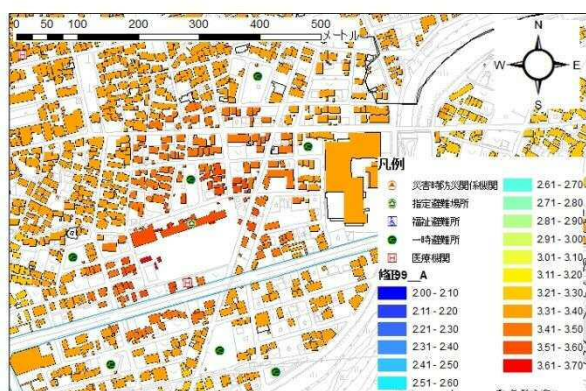


(A) 地震動マップ（図-2 に示す結果に基づく）
 （補正推定値）

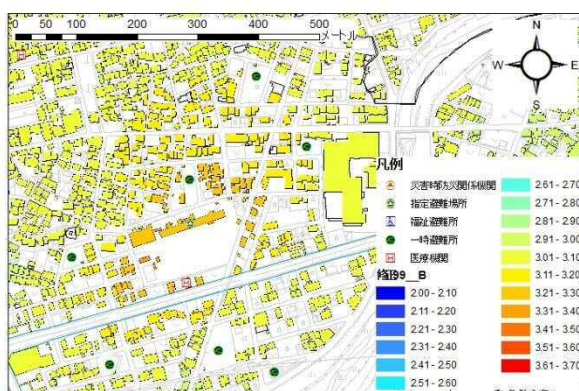


(B) 地震動マップ（図-4 に示す結果に基づく）
 （補正推定値）

図-5 観測地震動によるキャリブレーション結果に基づく地震動マップ図



(A) 地震動マップ（図-2 に示す結果に基づく）
 （信頼区間 99%）



(B) 地震動マップ（図-4 に示す結果に基づく）
 （信頼区間 99%）

図-6 観測地震動によるキャリブレーション結果に基づく地震動マップ図（信頼区間 99%）

する地震動マップを、それぞれ図-6(A)および(B)に示す。ここで、99%信頼区間とは、図-2 および 4 に示したキャリブレーション結果に基づく推定値（平均値）と推定精度（標準偏差）から、図-6 に示した地震動を下回る確率が 99%となる値を意味する。当然のことながら、図-6 に示した地震動は図-5 に示した地震動よりも大きな値となっている。図-6(A)と(B)の比較では、それぞれ、図-2、4 に示した推定値（平均誤差）にはさほどの差がないものの、推定精度に大きな差があるため、図-6(A)よりも(B)の分布の方がかなり小さな地震動を示していることが分かる。地震動推定において、このように有意な差がある以上、ここでも、確率変数に対する認識と、正確なキャリブレーションのためのデータの蓄積は非常に重要であることが分かる。

5. おわりに

昨年度までの研究によって、高性能地震動マップ作製システムの基盤を作成することができた。

本年度、これに基づき実施した研究では、わずかな観測例からではあるが、キャリブレーションによる推定結果には有意と判断できる差があり、地震対策を実施していく際にもは重要な結果を及ぼすとを予測した。地震動推定の定量的な精度向上が、初めてシステムティックに可能となったのは、本研究の最大の成果の1つであり、地震動の観測データによるキャリブレーションが重要であることを実際のデータに基づいて示唆したことは本研究の大きな意義の1つである。

したがって、今後、さらに地震観測体制を整え、地盤情報の整理し、最高精度の地震動マップを更新していくことが重要である。幸い、尾張旭市においては、愛知県の平成 24 年度緊急雇用創出事業基金事業の一つとして「地震危険度マップデータ入力等業務」を実施しており、電子情報として、整備予定のボーリングデータを主とする「地盤・地質データ」が収集・整理されている。さらに、平成 25 年度よりは、科学研究費助成事業の採択を受け、尾張旭市内で、本格的な地震観測網を設置していく予定である（基盤研究(B)建物ごとに高精度に表示される地震ハザードマップの構築とその活用に関する研究）。

以上により、今後も、データ収集と解析研究を進めながら、地震推定の力学的、自然地理学的研究を進めていく予定である。さらに微動振動計測調査、地震動の継続的観測なども重要であり、今後は、工

学基盤、地震基盤とよばれる表層地盤より深い位置に分布する地盤の情報収集や解析の重要な課題と考えている。また、耐震診断、耐震補強、家具の固定、避難計画、緊急体制の整備計画、災害弱者への対応、住民の災害対策意識の向上など、様々な地震動の推定マップの利用方法についても今後の課題としたい。

参考文献

- [1] 菅井径世、小川克郎、廣内大助、西村雄一郎、正木和明、倉橋奨：高精度地震動マップの作成のための尾張旭市地区の地盤特性に関する統計解析～高精度地震動マップの公益的な普及に向けて～、平成23年度名古屋産業大学環境経営研究所年報11号、pp. 46-62、2012年3月
- [2] Akaike, H.: Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, 2nd International symposium on Information Theory, edited by B.N. Petrov and F. Csaki, pp.267-281, Akad. Kiado, Budapest, Hungary, 1973.
- [3] Akaike, H.: Likelihood and Bayes procedure with discussion, Bayesian Statistics, edited by J.M. Bernardo et al., pp.143-166, 185-203, Univ. Press, Valencia, Spain, 1980.
- [4] Akaike, H.: Selection of prior distribution and its application, Bayesian Statistics and Its Applications, (in Japanese) edited by Y. Suzuki and N. Kunitomo, pp.81-98, Univ. of Tokyo Press, Japan 1989.
- [5] Krige, D.G.: A statistical approach to some mine valuation and allied problems on the Witwatersrand, Master's thesis, University of Witwatersrand, South Africa, 1951.
- [6] Matheron, G.: Traie de geostatistique appliqué, Technip, Paris, Vol.1 (1962), Vol.2 (1963) edition, 1962.
- [7] Matheron, G.: Principles of geostatistics, Economic Geology, Vol. 58, pp.1246-1266, 1963
- [8] Michiyo Sugai, Yuichiro Nishimura, Susumu Kurahashi, Haruna Yamada, Sayaka, Tomida : Detailed Scale Ground Motion Maps with the Highest and Guaranteed Accuracies and it's sharing using Web-GIS with the Local Government and the Community, Proc. of 15WCEE, 15th World Conference of Earthquake -, Lisbon, Portugal, 2012.9, Abstract submitted
- [9] Michiyo Sugai, Yusuke Honjo : Introduction to a new methodology, to develop earthquake ground motion prediction maps and their accompanying accuracies , International Symposium on Earthquake Engineering - Commemorating Tenth Anniversary of the 1995 Kobe Earthquake (ISEE Kobe 2005), Engineering Seismology "Simulation of strong ground motions and seismic hazard assessment", Kobe/Awaji, January 13 - 16, 2005
- [10] Wackernagel, H. 2003, Geostatistic, the 2nd edition (translated into Japanese) Morikita Shuppan

付録. 研究の全体構想

初めに、解析のフローチャートを示しながら、本研究の計画・方法（：研究の全体構想）を、(A)解析の手順、(B)データの蓄積と精度アップのシステム、(C)成果のイメージと利用の順に示す。

(A) 解析の手順

解析は、(a)補整式とその精度の同定、(b)シナリオ地震に対する被害予測マップの作成、(c)地震速報のための被害予測マップの作成の3つの手順に分けて進める。ただし、本年度中に解析したのは、既往の地震の再現解析と補整式とその精度の同定である。

(a) 補整式とその精度の同定

1. データの収集と整理

最初に、付図の解析のフローチャートに示すように、①で地質、地形、ボーリングデータ等地盤情報を収集し、地質データに基づいて、解析領域を分ける。さらに、②で過去に発生した地震データ(震源、

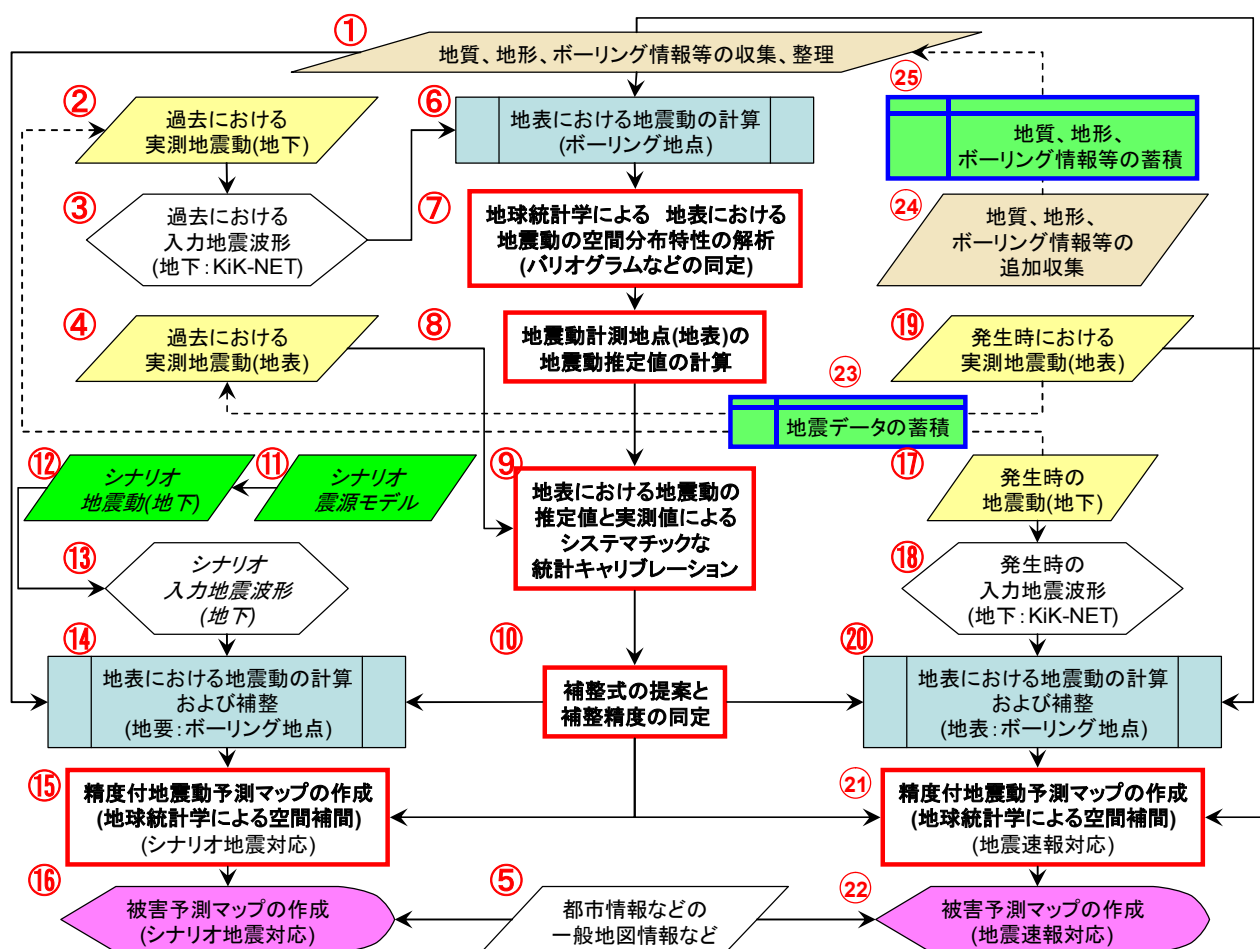
マグニチュードなど)を収集し、③で当該地震の地下深部における地震波形を KiK-NET から収集する。さらに、④で当該の地震による地表における地震動の記録を収集する。また、⑤で、地震被害を推定するための都市情報などを収集する。

2. 地震動の再現計算

次に、④のデータを入力地震動とし、①のボーリングデータに対して、各種方法を用い、⑥でボーリング地点(地表)での地震動を計算する。

3. 地震動計測空間分布の算定

⑦で、⑥で各ボーリング地点において計算した地震動(地表)に対し、クリギング法により地球空間統計特性を同定する。この時、確率場モデル(正規分布、対数正規分布等)、バリオグラムに関する検討と同定を行う。特に、⑥で三次元に広がる地盤に対して一次元を仮定した計算法を適することによって発生する誤差を、クリギング解析上、“観測誤差”として計算を進める。



付図-1 解析のフローチャート

4. 推定地震動の空間補間推定

⑧で、⑦での解析結果と⑥で推定した地震動に基づき、④で収集した地震計の設置された地点での地震動を補間推定する。

5. 推定地震と実測地震動の比較、キャリブレーション

⑨で、⑧で推定した地震動と④で収集した地震動を比較し、統計解析によりキャリブレーションを行い、⑩で、実測値に対する推定値の補整式とその補整精度を求める。また、この時、⑥で利用する計算方法による誤差特性を分析し、最も補整誤差の小さい計算方法を選択する。

(b)シナリオ地震に対する被害予測マップの作成

シナリオ震源モデルの設定と地震伝播の計算

1. 最初に、⑪で、シナリオ地震の震源モデルを設定する。あるいは、過去に提案された東南海地震の震源モデルを利用する。また、⑪に基づいて基盤中の地震伝播(主に距離減衰)を計算し、⑬の解析対象地域における地震波を推定する。
地震動の推定と補整

次に、⑭で、⑬で推定した地震波を入力地震動とし、①のボーリングデータに対して、⑨で選択した最も精度のよい計算方法を用いて、ボーリング地点(地表)での地震動を計算する。さらに、この推定値を⑩の補整式で補整し、その精度を計算する。

2. 精度付地震動予測マップの作成(シナリオ地震対応)：推定地震動の空間補間推定

⑮で、⑭で各ボーリング地点において計算、補整した地震動(地表)に対し、⑦で同定した確率場モデルを利用して、クリギング法により、任意の地点、あるいは、任意の領域における地震動を推定し、その推定精度を計算する。

3. 被害予測マップの作成(シナリオ地震対応)

⑯で、⑮で推定した地震動と、その推定精度に基づき、⑤で収集した都市データ等を利用して、被害予測マップを作成する。マップは行政の様々な情報と重乗し、解析することを念頭に、GIS を用いて表示するとともに、拡張可能なシェイプ形式で管理活用していく。

(c)地震速報のための被害予測マップの作成

1. 発生時の地震情報の収集

最初に、⑰で、地震発生時の震源情報を収集する。

2. 発生地震の地震波(解析対象領域の地下)の収集
同時に、⑱で、発生地震の地下深部における地震

波形を KiK-NET から収集する。また、⑲で地表における地震動をリアルタイムに計測し収集する。

3. 地震動の推定と補整

次に、⑳で、⑱で推定した地震波を入力地震動とし、①のボーリングデータに対して、⑨で選択した最も精度のよい計算方法を用いて、ボーリング地点(地表)での地震動を計算する。さらに、この推定値を⑩の補整式で補整し、その精度を計算する。

4. 精度付地震動予測マップの作成(地震速報対応)：推定地震動の空間補間推定

㉑で、㉒で各ボーリング地点において計算、補整した地震動(地表)と⑲で実測した地震動(地表)の2種類のデータに対し、それぞれの推定精度(⑲の場合は誤差=0)を付帯させて、⑦で同定した確率場モデルを利用して、クリギング法により、任意の地点、あるいは、任意の領域における地震動を推定し、その推定精度を計算する。

5. 被害予測マップの作成(地震速報対応)

㉓で、㉑で推定した地震動と、その推定精度に基づき、⑤で収集した都市データ等を利用して、被害予測マップを作成する。

(B) データの蓄積と精度アップのシステム

(a) 地震データの追加収集と整理

㉔で、⑰と⑱および⑲と収集した地震データにより、⑩で提案した補整式と補整精度の精度を向上させる。

(b) 地質、地形、ボーリングデータの追加収集と整理

㉕で、地質、地形、ボーリングデータを追加収集し、㉓で、蓄積するデータは①のデータに追加し、さらなる地震動予測の精度アップに利用する。

(c) 追加データの収集の方法とメリット

特に、⑮、⑯、㉑、㉒の予測マップを基に、ボーリング情報や地震計測の不足している地点などを洗い出すことができる。この場合、ボーリング調査の追加や、地震計の設置場所の追加、変更などによって、さらに予測精度の高いマップを作成することが可能となる。

また、⑤のデータも逐次更新することが望ましい。

(C) 成果のイメージと利用方法の検討：高精度地震動マップとGISを活用した利活用へのカスタマイズ

作成した高精度地震動マップは、行政が行う様々な災害事前、事後対策のベースマップとして活用可能である。特にこれまでの紙ベースのマップと異なり、地震動観測データの蓄積やボーリング試料の追加に

よる地震動マップの予測精度の向上に伴う更新(進化)に加え、付加情報の更新も同時に可能である。したがって災害の事前対策から即時の災害情報提供まで、幅広く提供可能である。GISを用いた空間的な地震動マップに、例えば耐震化と非耐震構造物分布を重乗表示し、橋梁や道路の被災予測、緊急輸送道路のネットワーク検索など、GISの分析機能を用いた精査が可能である。これらについて行政と議論しながらカスタマイズを行っていく。