

## 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～

## Stochastic Analyses of Site Amplifications for Providing Digital Hazard Maps of Strong Ground Motion at the Areas in the City of Owariasahi ~ Toward Wide Public Use of Strong Ground Motion Hazard Maps With High and Guaranteed Accuracies ~

菅井径世\*・小川克郎\*・廣内大助\*\*・西村雄一郎\*\*\*

正木和明\*\*\*\*・倉橋奨\*\*\*\*

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

\*名古屋産業大学大学院、\*\*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、\*\*Shinshu University、\*\*\*Nara Women's University & \*\*\*\*Aichi Institute of Technology

**Abstract:** The aim of the present study is to propose and to architect a system for estimates of strong ground motions in the city of Owariasahi. The system can be utilized to take optimum countermeasures against earthquake disasters by embedding some systems for calculating the seismic resistance of the buildings and root finding systems for escapes and emergency rescues. The proposed system employed the Kriging methods to estimate the spatial distribution of the strong ground motions. This is firstly because the methods can easily and immediately provide the estimation of the ground strong motion at every building in the city, secondly because the method can make the estimations in perfectly objective manner, thirdly because can provide the quantitative accuracies of the estimations, and fourthly because the cost of the estimations are minimum. Firstly the authors digitalized the results of boring investigations in the city, secondly established the bath system to calculate the strong ground motions at the points of the boring investigations, thirdly architected the system to perform stochastic analyses by the Kriging method to estimate the spatial distributions, fourthly established the system to estimate the strong ground motion at the centroid of every building in the city. At first, the authors perfumed the stochastic analyses and estimated the strong ground motion and its accuracy at the every building point by utilizing the data of hypocenter of the real earthquake occurred in 11<sup>th</sup> March 2012. Finally the system is to be statistically compensated to guarantee the highest accuracy of the estimation based on the comparisons between real-observed and estimated strong ground motions. 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 10<sup>th</sup> November, and 14<sup>th</sup> December 2012. Though the optimizations of the system in now under way because the observed data are not enough yes, the comparisons the strong ground motions at the five points during the two earthquakes are shown in the present reports.

**Keywords:** earthquake, hazard map, ground strong motion, stochastic, accuracies, Kriging, GIS, web-GIS

## 1. はじめに

本研究では、客観的実測データのみを利用した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、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な地震災害情報システムの開発を目的としている。地球統計学を活用すれば任意の地点(=ピンポイント)での地震動推定が可能である。そこで、これを活かして実測地震動と推定地震動を比較し、国内外初めての試みとして地震動の推定精度を検証する。ついで、その検証結果から精度つき最高精度地震動マップの作成方法を提案し、その普及を図ることを最終目的としている。

## 2. 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、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。

#### 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で利用する計算法による誤差特性を分析し、最も補整誤差の小さい計算法を選択する。

### (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。

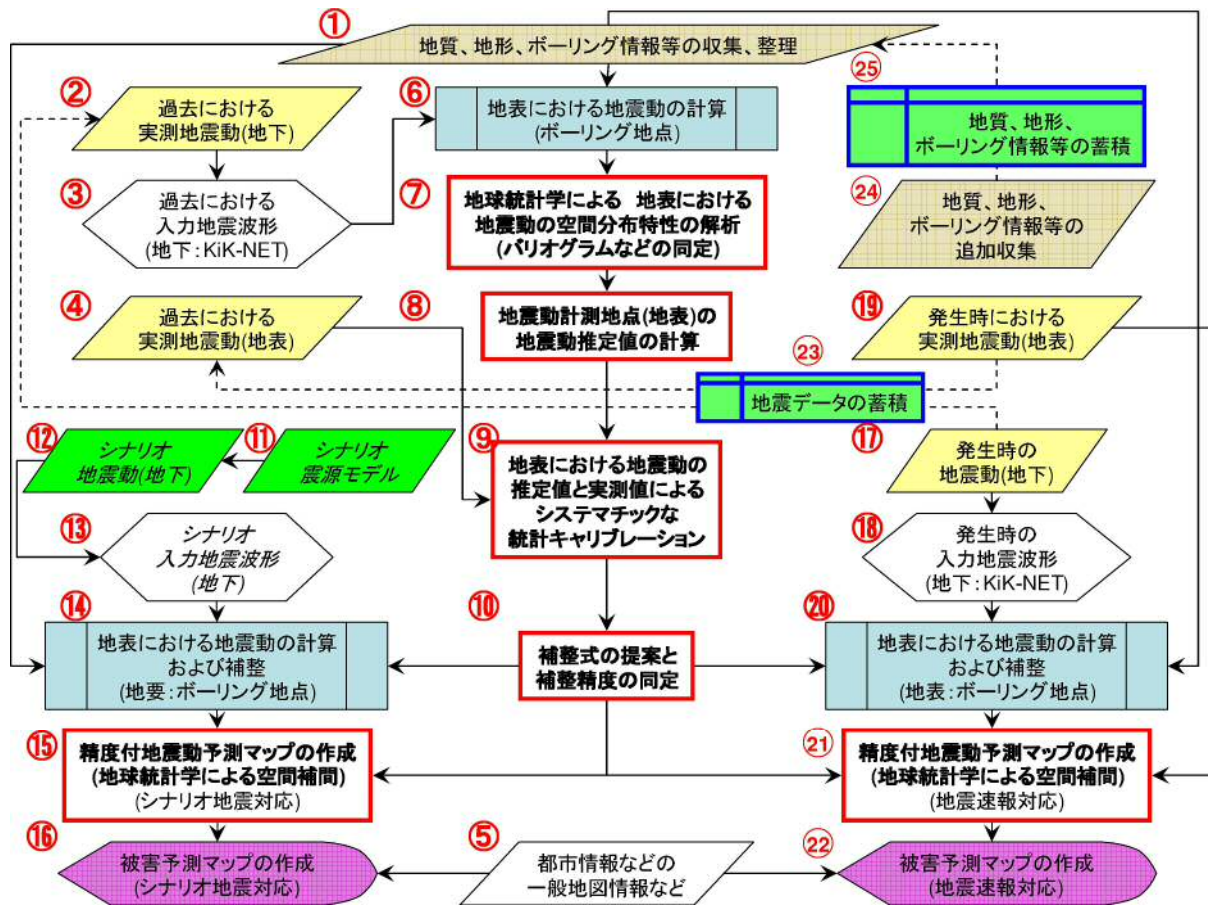


図-1 解析のフローチャート

(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、⑭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、⑮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、⑯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、⑮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⑰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(⑰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)

㉑で、㉒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

㉓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

㉔で、地質、地形、ボーリングデータを追加収集し、㉕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、⑰、⑱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。特にこれまでの紙バインディングのマップと異なり、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畳表示し、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。

### 3. 2011年度の研究の構想と実施

以上の全体構想において、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

を計画し、実施した。以下に得られた結果を示す。

### 4. 2011年度の研究で得られた結果

- A) 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

尾張旭市では、平成17年、東海、東南海、南海の3連動地震動マップを作成している。この際に利用されたボーリングデータとその後、建築確認などのために収集されたボーリングデータの計600本以上のボーリングデータの主要部を表計算ソフトに入力、電子化した主な電子化の容は以下のとおりである。

- a) ボーリング位置(緯度経度、標高、住所等)
- b) 実施日時
- c) 坑内水位
- d) 土質柱状図(各層の標高と層厚、および土質分類)
- e) 標準貫入試験結果(N値とその計測震度等)

ただし、ボーリング位置の緯度、経度については、記載されていないものが半分程度あった。今後、市行政と協力して位置を特定すべきである。

- B) 尾張旭市内の4地点5カ所への地震計の設置

下記、4地点5カ所への地震計の設置が愛知工業大学によって、名古屋産業大学および尾張旭市との協力によって行われた。

- (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 瑞鳳小学校
- (エ) 尾張旭市 旭ヶ丘小学校
- (オ) 尾張旭市 東部市民センター

- C) 2011年に発生した下記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)

#### (ア) 地震I

- ① 発生日 2011年3月11日
- ② 震源位置 三陸沖
- ③ 震源深さ 約24km
- ④ 大きさ M=9.0

#### (イ) 地震II

- ① 発生日 2011年11月10日
- ② 震源位置 あま市内
- ③ 震源深さ 約10km
- ④ 大きさ M=3.9

(ウ) 地震Ⅲ

- ① 発生日 2011年12月14日
- ② 震源位置 瑞浪市内
- ③ 震源深さ 約50km
- ④ 大きさ M=5.2

D) 再現された地震動の空間分布に関する統計計算

(A) 統計計算方法の定式化

① 定式化の概要

本研究では、空間統計法のうち、最少二乗不偏線形推定値を求めるクリギングの各手法を利用することにより新しい地震動予測方法を提案する。この方法によれば、任意の空間における地震動パラメタの分布推定及びその精度推定が可能であり、予測が客観的であり、地震動パラメタの算出における人為的ミスが少なくなり人件費を低廉化することが可能である。また、実際に起こった実地震において計測された地震動パラメタと予測された地震動パラメタとの、より有意な統計的キャリブレーションが可能であり、両パラメタの相関関数の同定と相関精度推定が可能である地震動予測方法の評価方法を提供できる。さらに、この相関関数と推定精度は、より高精度で信頼度の高い地震動予測を実施するために役立たせることができる。

すなわち、本研究では、第1に、ボーリング情報に基づく地震動予測方法を開発する。この手法では、最初に、ボーリング調査によって実測された柱状図や各地層のN値等の地盤データをもとに、将来起こるであろう仮想地震に対してボーリング地点における地震動パラメタを算出する。ここで、地震動パラメタとは、例えば最大加速度、最大速度、最大変位、震度、実効加速度、卓越周期、S I値等である。次に、算出した多数の地震動パラメタに基づき、クリギングの手法によって、任意地点又は任意領域における地震動パラメタを客観的に推定し、その推定誤差を算出する。本章では、この推定誤差(精度)を“空間分布推定誤差(精度)”と呼ぶこととする。クリギングの手法としては特に限定はなく、トレンドが一定でかつ既知という条件で解析するシンプル(単純)クリギング、トレンドが未知という条件で解析を行うオーディナリー(通常)クリギング、トレンドを位置の関数の線形結合として解析するユニバーサル(普遍)クリギング、ノンリニア(非線形)クリギング等の各種クリギングの手法を、データの性質に応じて用いることができる。この地震動予測方法にお

ける作業は、電子化されたデータを計算機によって処理することにより実行できる。しがたって、人為的判断によって作成された地盤モデルに基づくことなく、その予測を客観的に行うことができる。すなわち、人為的ミスもなく、人件費も低廉となる。

また、この手法を基本として、地震観測装置が設置されている観測地点において実際に発生した実地震の地震動パラメタを採取して、当該の実地震を想定してボーリング地点で算出した地震動パラメタとの共変量クリギングを行うことにより、客観的、統計的に、観測した地震動パラメタと計算した地震動パラメタとのキャリブレーションを行い、2つのパラメタの相関関数を同定し、相関精度を推定することが可能となる。精度を観測地点でこの相関関数と相関精度を利用すれば、計算した地震動パラメタから実際の地震動パラメタの補正予測し、その予測精度を計算することができる。共変量クリギングの手法を用いれば、観測地点とボーリング地点の位置や数が一致していなくても、地震動パラメタのキャリブレーションを行うことができる。すなわち、多数のデータによる精度の高い統計的キャリブレーションを行うことができる。あるいは、ボーリング地点で推定し、補間することにより推定した観測地点での補間推定値と、当該の観測地点で実測した地震動パラメタを比較することで予測精度を計算することができる。このとき、算出した相関精度は、地震動予測方法の精度の指標とすることができる。本章では、この推定誤差(精度)を“解析誤差(精度)”と呼ぶこととする。すなわち、この精度を評価指標規準として、各種の地震動予測方法の優劣を判断することができるので、より精度の高い地震動予測方法を開発する際に利用できる。

なお、キャリブレーションの精度は、一般に、計測された地震動パラメタおよび算出された地震動パラメタのデータ量が多くて多様なほど向上する。すなわち、今後、実地震が発生する度に、より多様な地震動パラメタが観測され、より多数の観測地点においてより多数の地震動パラメタが蓄積される時、キャリブレーションの精度を向上させることができる。また、観測地点の周辺内において、より多くの地盤データが採取され、算出される地震動パラメタの数が増加するほど、キャリブレーションの精度が向上する。多数の多様なデータが蓄積されれば、より詳細な地震動予測方法の評価が可能となり、より精度の高い地震動予測方法を開発する際にも有利と

なる。

すなわち、以上の手法により、地盤地震動の地域性や局所性を予測できるとともに、予測精度も明確となる。したがって、合理的な性能設計法を活用する際にも極めて有利である。さらに、都市再生プロジェクトにおいては、徹底か耐震化かを議論する際にも重要な情報を提供できる。結果として、安全・安心の社会形成へ大きく役立てることができる。

## ② クリギングによる地震動空間分布解析法の提案 ークリギング法の定式化

### (ア) はじめに

地震動パラメタが空間分布する領域において、いくつかの特定(ボーリング)地点において計算した地震動パラメタから、クリギング法によって任意の地点(あるいは任意の部分領域)における地震動パラメタを推定することができる。

このためには、特定地点において計算した地震動パラメタから領域を表現する確率場モデルを推定し、同定する必要がある。

一般に、ボーリング地点における地震動解析については、既に提案されているいくつかの手法を利用することができる。後述するが、各手法の精度については、クリギング手法を活用することにより、統計的、客観的に推定することが可能である。また、確率場モデルを同定すれば、直ちに、これに基づいて、特定地点において計算した地震動パラメタから統計的補間を行い、各任意地点における推定値と推定値ともなう推定誤差を求める作業が可能となる。この空間補間計算は、現代のコンピュータを持ってすれば容易な作業であり、短時間で客観的に完了することができる。

すなわち、クリギング推定において最も重要な解析は、確率場モデルの同定であり、特に自己相関関数の推定である。全体の推定精度は、ほぼ自己相関関数によって支配されるのである。また、確率場モデルの同定は、データによって難易度が異なり、精度にも影響を及ぼす。確率場モデルの同定は、重要であり、高度な解析技術を要するクリギング推定法の要である。本節では、いくつかの同定手法を紹介し、実際のボーリング地点における地震動計算結果を利用して、その有効性を確認する。

また、その後、クリギング手法を活用したボーリング地点における地震動の計算精度の推定法についても論述する。

### (イ) 確率場モデルの推定方法

最初に、ボーリング地点  $\mathbf{u}_i = \mathbf{u}(x_i, y_i)$  において、調査されたボーリングの実データから地震動パラメタ  $\mathbf{z}(\mathbf{u}_i)$  を計算する。

最初に、対象とする地震の震源モデルを仮定する。近年、東南海地震、東海・東南海連動型地震、あるいは南海地震や、これら東南海地震と南海地震の連動型地震等の震源想定についての研究が進められており、いくつかの震源モデルが提案されている。活断層等、想定される他の震源についても、いくつかの震源モデルを仮定することが可能であり、今後発生する地震については、こうした震源モデルをいくつか仮定することから地表の地震動を推定することになる。

想定した震源から工学的基盤の上表面(=表層地盤の底面)までに存在する“工学的基盤”内における地震波の伝播に関しては、上記のようなハイブリッド法等を利用することができる。すなわち、こうした手法により、表層地盤の底面に伝わる地震波を推定することが可能である。

このとき、上記のように、FDEL、FLUSH、SHAKE等の解析方法を利用することにより、ボーリング底部(=表層地盤の底面)において推定された地震波から、地表面(=表層地盤の上面)の地震波=地震動を計算することができる。

ただし、今後発生する地震の予測ではなく、工学的基盤や表層地盤における地震動伝播解析手法の精度を推定するために行う既往の地震のシミュレーション解析においては、実測した地震波を利用することができる。工学的基盤の表層については、例えば、KiK-Net をそうした深い位置での地震動波形を計測するためのネットワークとして活用できる。また、表層基盤の表層(地表)については、K-Net 等が、地表における地震動波形を計測するために活用できるネットワークの代表例である。

ボーリング底面に伝播した地震動を入力パラメタとし、既往の解析手法とボーリング情報によって  $n$  個のボーリング地点で計算された地震動パラメタを次式のような地震動パラメタベクトル  $\mathbf{z}$  で表す。

$$\mathbf{z} = \{z(\mathbf{u}_1), \dots, z(\mathbf{u}_n)\} \quad (1)$$

$\mathbf{z}$  は、例えば、高さや色によって、図-4. 3. 2 のようにその大きさと位置分布を表現することができる。

このとき、計算した任意地点の地震動パラメタ

$z(\mathbf{u}_i)$ と $z(\mathbf{u}_j)$ の共分散関数 $C(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j)$ による共分散行列を $\mathbf{C}$ とする。ここで共分散関数 $C(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j)$ とは、 $\mathbf{u}_i$ と $\mathbf{u}_j$ で計算した $z(\mathbf{u}_i)$ と $z(\mathbf{u}_j)$ の相関性の度合いを表した関数であり、一般に $\mathbf{u}_i$ と $\mathbf{u}_j$ 間の距離 $h=|\mathbf{h}|$ が長くなるほど小さく(相関性が小さく)なるような確率モデルによって表される。例えば、以下のような指数型モデル等が利用される。

$$C(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j) = C(\mathbf{h}) = \sigma^2 \rho(h) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{h}{\ell}\right) \quad (2)$$

$$\text{Where } \ell > 0 \text{ and } h = |\mathbf{h}| = |\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j| \geq 0 \quad (3)$$

ここで、 $\sigma^2$ は分散、 $\ell$ は自己相関距離と呼ばれる正の係数である。上式から分かるように、 $\rho(0)=1$ 、で $\rho(\infty)=0$ である。 $\rho(h)$ は、 $h$ が増加するにつれて急速に減少する。

このとき、 $\mathbf{u}_i$ と $\mathbf{u}_j$ との共分散関数 $C(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j)$ による共分散行列 $\mathbf{C}$ は、一般に、次式のように表すことができる。

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_1) & C(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2) & \cdots & C(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_n) \\ C(\mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_1) & C(\mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_2) & \cdots & C(\mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C(\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_1) & C(\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_2) & \cdots & C(\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

また、地震動パラメタの計算値の空間分布が正規確率密度分布にしたがうと仮定すれば、 $n$ 個のデータから得られる同時確率密度関数 $p(\mathbf{z}|\boldsymbol{\theta})$ は次式で得られる。

$$p(\mathbf{z}|\boldsymbol{\theta}) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right)^n |\mathbf{C}|^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{z}-\boldsymbol{\mu})^T \mathbf{C}^{-1}(\mathbf{z}-\boldsymbol{\mu})\right\} \quad (5)$$

ここで $\boldsymbol{\mu}$ は地震動パラメタのトレンドベクトル $\boldsymbol{\mu}=\{\mu(\mathbf{u}_1), \dots, \mu(\mathbf{u}_n)\}^T$ である。 $\mu(\mathbf{u}_i)$ は、以下に示すトレンド関数 $f_k(\mathbf{u}_i)$  ( $k=0, \dots, K$ )によるトレンド関数ベクトル $\mathbf{f}(\mathbf{u}_i)$ と、係数パラメタ $b_k$  ( $k=0, \dots, K$ )による係数パラメタベクトル $\mathbf{b}$ とによる位置座標 $\mathbf{u}_i$ の関数モデルであると仮定することが多い。すなわち、

$$\mu(\mathbf{u}_i) = \sum_{k=0}^K b_k f_k(\mathbf{u}_i) \quad (6)$$

において、 $\mathbf{f}(\mathbf{u}_i)$ は次式のように表される。

$$\mathbf{f}(\mathbf{u}_i) = \{f_0(\mathbf{u}_i), \dots, f_K(\mathbf{u}_i)\}^T \quad (7)$$

また、係数ベクトル $\mathbf{b}$ は次式のように表される。

$$\mathbf{b} = \{b_0, \dots, b_K\}^T \quad (8)$$

ここで $\mathbf{X}$ は次式のようなトレンド行列とする。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} f_0(\mathbf{u}_1) & f_1(\mathbf{u}_1) & \cdots & f_K(\mathbf{u}_1) \\ f_0(\mathbf{u}_2) & f_1(\mathbf{u}_2) & \cdots & f_K(\mathbf{u}_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_0(\mathbf{u}_n) & f_1(\mathbf{u}_n) & \cdots & f_K(\mathbf{u}_n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

この時、 $\boldsymbol{\mu}$ は次式のように表すことができる。

$$\boldsymbol{\mu} = \mathbf{X}\mathbf{b} \quad (10)$$

ここで、クリギング法による地震動の統計的空間補間をする際には、地震動の空間分布の統計モデルである上記の共分散関数行列 $\mathbf{C}$ とトレンド行列 $\mathbf{X}$ および係数ベクトル $\mathbf{b}$ を決定する必要がある。

(ウ) 共分散関数-バリオグラム関数およびトレンド関数の推定方法

i. はじめに

上記のように、自己相関関数 $\rho(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j)$ は、地震動パラメタの空間分布のばらつき、特に地点 $\mathbf{u}_i$ と $\mathbf{u}_j$ における地震動パラメタ $z(\mathbf{u}_i)$ と $z(\mathbf{u}_j)$ の相関性を表している。自己相関距離 $\ell$ は、ばらつきの大きな地盤において短く、比較的均質な地盤において長い。地震動パラメタ $\mathbf{z}$ の空間分布は特にこの自己相関距離 $\ell$ によって表現される。地震動パラメタの空間分布を表現するパラメタ(トレンド関数 $\mu(\mathbf{u})$ 、分散(シル) $\sigma^2$ 、自己相関距離 $\ell$ )のなかでも、自己相関距離 $\ell$ の推定が最も難しいことが知られている。

一方、指数型、双曲型、球型など多数が提案されているが、パラメタの空間分布のばらつきが大きい地盤工学においては自己相関関数のタイプが計算に影響するようなことは稀である。

以下においては、地震動パラメタの自己相関関数のパラメタを適切に決定する代表的な方法を紹介する。ただし、手法の選択について重要なのはデータの性質や量によって手法を使い分けることであることを記しておく。

ii. 最尤法

最尤法は、最も一般的に確率場あるいは確率場を現す統計パラメタを推定する手法であり、上記の同時確率密度関数 $p(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta})$ 、または下記のように同時確率密度関数 $p(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta})$ の対数値 $L(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta})$ の最大化を基準として、モデルパラメタを決定する手法である。

$$L(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta}) = \ln p(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta}) \\ = -\frac{n}{2} \ln(2\pi) - \frac{1}{2} \ln|\mathbf{C}| - \frac{1}{2} (\mathbf{z} - \mathbf{X}\mathbf{b})^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{X}\mathbf{b}) \quad (11)$$

ここで、 $|\mathbf{C}|$ は $\mathbf{C}$ の行列式(determinant)、 $\mathbf{C}^{-1}$ は $\mathbf{C}$ の逆行列である。

また、このとき、トレンド成分 $\mathbf{X}\mathbf{b}$ の係数パラメタベクトル $\mathbf{b}$ については、次式の最小二乗法で推定することができる。

$$\hat{\mathbf{b}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{z} \quad (12)$$

ただし、上式には、共分散行列 $\mathbf{C}$ の逆行列が含まれるため、係数パラメタベクトル $\mathbf{b}$ は、対数尤度 $L(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta})$ を最大化する過程で同時に求めることとなる。

### iii. AICを利用する方法

上記からも明らかなように、例えば、トレンド関数における係数のパラメタ数(次数 $K$ )等は任意の数値である。また、共分散関数のパラメタ数等も任意である。一般に、同時確率密度関数 $p(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta})$ の対数値 $L(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta})$ の最大値は、パラメタ数が多くすることによってより大きくすることが可能である。しなしながら、パラメタ数を多くすることで、データ $\mathbf{z}$ が本来内在している情報量より以上に最尤値を最大化しても適切ではない。

一般に赤池統計量AICは、パラメタ数 $m$ と対数最大尤度 $\text{Max}\{L(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta})\}$ との適切なバランスを取るために利用される基準である。すなわち、確率場モデル、すなわち、共分散関数 $C(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j)$ やトレンド関数 $f(\mathbf{u}_i)$ 等の同定には、最大対数尤度とパラメタの数 $m$ に基づく情報量基準であるAIC(赤池統計量)基準によってその優劣を検討した結果を利用することができる。AICは、下記のように最大対数尤度の2倍の負値とモデルパラメタ数 $m$ の2倍との和を最小化する基準として定式化されている(Akaike1972)

$$\text{AIC} = -2 \times \text{Max}\{\ln p(\mathbf{z}|\mathbf{b}, \boldsymbol{\theta})\} + 2 \times (m) \quad (13)$$

最尤法あるいは赤池統計量基準法が有効であるのは、データ $\mathbf{z}$ に関する高質で十分な情報量が得られている場合である。すなわち、最大値となる基準を明確に推定することが可能である場合である。

### iv. 拡張ベイズ法

地盤工学において自然体積地盤を解析の対象とする場合には、データの質が低かったり、情報量が充分でなかったりすることが頻繁である。例えば、非

都市域や開発の初期にある郊外等においては、一般に実施されているボーリング調査数は小さい。このため、こうした地域において入手できるデータのみから得られる情報では、正確な地震動の分布を求めることが困難であることが多い。すなわち、最尤法や、AICの最小値が不明瞭となり、正しい統計パラメタを明確に特定できないことが多い。

以上のように、対象地域からのみ得られる情報量が小さい場合には、拡張ベイズ法(以下、EBMと略称する)を利用することができる。EBMによれば、近似した環境における既往の経験や情報を、“事前情報”として利用することにより、こうした少ない情報(尤度)から重要な情報を“抽出”することができる(Akaike 1989)

地震動パラメタを表す統計パラメタ $\boldsymbol{\theta}$ の事前情報が正規分布にしたがうと仮定すれば、事前分布は、以下のように表現することができる。

$$p'(\boldsymbol{\theta}|\mu_0, \sigma_0^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\boldsymbol{\theta} - \mu_0)^2}{2\sigma_0^2}\right\} \quad (14)$$

通常のベイズ推定とは異なり、EBMでは、事前分布における平均値 $\mu_0$ と分散 $\sigma_0^2$ は、次式で定義されるABIC値を最小化することによって推定される。

$$\text{ABIC}(\boldsymbol{\theta}|\mu_0, \sigma_0^2, m) \\ = -2 \times \ln \int p(\mathbf{z}|\boldsymbol{\theta}) \cdot p'(\boldsymbol{\theta}|\mu_0, \sigma_0^2) d\boldsymbol{\theta} + 2 \times (m') \quad (15)$$

ここで、統計パラメタ $\boldsymbol{\theta}$ は、 $\mu_0$ によって求められることとなる。実際の推定計算において、上式はラグランジェーガウス数値積分法等を利用することによって求められることになる。

一般の地盤工学においては、通常の上質パラメタの自己相関距離は、水平方向には数十から数百メートル、鉛直方向には数十センチメートル程度であることが多いことが知られている。こうした地盤調査における既往の情報や経験を活用することにより、目標地域におけるパラメタの $\mu_0$ や $\sigma_0^2$ をより適切に推定することが可能となり、地震動分布の予測に利用することが可能となる。

### (エ) データに推定誤差(ノイズ)がある場合

本手法においては、ボーリング地点において実際に計測した地盤情報に基づいて、ボーリング地点における地震動パラメタを推定し、これを空間補間する。しかしながら、地層構造も広い範囲にわたって均質ではないため、たとえボーリング地点における



地層構造も変動する局面の位置地点での構造に過ぎない。地層構造が連続あるいは、不連続に周囲と接していれば、周辺地盤の地震動の影響を受けて、当該ボーリング地点で生じる地震動は予測とは異なる可能性が高い。すなわち、一次元的な構造から当該地点の地震動を推定することはできないのであり、周囲の地盤の影響を受けて3次元的空间の中で生じた地震動をその当該地点での推定する必要がある。また、ボーリング調査をおこなっても当該地点における土質パラメータを細大漏らさず測定し、推定に反映させることはできない。したがって、ボーリング地点で推定した地震動パラメータといえども、これはある程度の推定誤差を持った値であることを評価することが適切である場合がある。ここでは、この推定誤差を“計算誤差”と呼ぶ。

“計算誤差”が存在するにも拘らず、これを評価しないで、自己相関関数を推定すると、自己相関距離が以上に短い値となり、全域の空間分布推定結果は、“ホワイトノイズ”のような分布状況となり、推定は無意味となる。

したがって、地震動パラメータの空間分布を推定する際には、このボーリング地点における推定誤差に配慮して、共分散(自己相関)関数を決定することが重要である。ボーリング地点で推定した地震動パラメータの値に誤差(ノイズ)が付帯している場合、このノイズは、ナゲットと呼ばれる阿多によって評価することができる。共分散関数は、このナゲットが以下のような3つの条件を満たすものと認められることから、容易に定式化して推定することができる。

- 1) ボーリング地点  $i$  におけるナゲットに関する統計(誤差)モデルは以下のように表すことができる。

$$z(\mathbf{u}_i) = y(\mathbf{u}_i) + \varepsilon_i \quad (16)$$

ここに  $\varepsilon_i$  は、ボーリング地点  $i$  における推定誤差であり、平均値は0で、分散  $\sigma_i^2$  は各地点  $i$  において既知であるとする。

また、ここで平均地震動パラメータのベクトル  $\mathbf{y}$  は、以下のように定義する。

$$\mathbf{y} = \{y(\mathbf{u}_1), \dots, y(\mathbf{u}_n)\} \quad (17)$$

- 2) ボーリング地点  $i$  における推定誤差は、平均地震動パラメータ  $y(\mathbf{u}_i)$  に対して独立である。すなわち、次式が成立する。

$$\text{cov}(y(\mathbf{u}_i), \varepsilon_i) = 0 \quad (18)$$

- 3) さらに、任意のボーリング地点  $i$  における推定誤差  $\varepsilon_i$  と、 $i$  とは異なる任意のボーリング地点  $j$  における推定誤差  $\varepsilon_j$  は互いに独立である。すなわち、次式が成立する。

$$\text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0 \quad (i \neq j) \quad (19)$$

上記3つの条件により、“計算誤差”  $\varepsilon$  はクリギング解析においてフィルタリングすることが可能であり、次式に示すような線形結合を用いて、 $z(\mathbf{u}_0)$  から  $y(\mathbf{u}_0)$  を推定することが可能である。

$$y^*(\mathbf{u}_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot z(\mathbf{u}_i) \quad (20)$$

ここで、ナゲットを付帯した共分散関数  $\mathbf{C}'$  は次式によって表すことができる。

$$\mathbf{C}' = \mathbf{C} + \mathbf{C}_{Obs} \quad (21),$$

$$\text{where } \mathbf{C}_{Obs} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

ここで、ナゲットの効果は、行列  $\mathbf{C}_{Obs}$  の誤差分散  $\sigma_i^2$  によって表現されている。注意すべきは、この誤差分散が行列  $\mathbf{C}_{Obs}$  の対角項のみに現れていることである。

“計算誤差”が付帯する場合の共分散関数は、行列  $\mathbf{C}$  ではなく、行列  $\mathbf{C}'$ 。に対して、最尤法、AIC法、拡張ベイズ法等を適用することによって推定することができる。誤差分散  $\sigma_i^2$  についても、トレンド関数  $\mu$ 、分散  $\sigma^2$ 、自己相関距離  $\ell$  を推定する過程において同時に推定することができる。“計算誤差”が無視し得ないほど大きい場合、行列  $\mathbf{C}'$  を利用することにより、ナゲット効果に配慮しない場合よりも長い自己相関距離を伴ったより適切な自己相関関数を推定することができる。

## ② クリギングによる空間分布推定法

一旦、共分散関数が決定されれば、空間補間計算は容易である。共分散関数の決定過程においては、トレンド関数等も同時に推定されるので、トレンドの空間分布、地震動予測分布、信頼区間分布について、一般的なパーソナル・コンピュータによって、ほぼ自動的に、極短時間で客観的な推定結果を得る

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) $\sigma_i^2$	0.00596	0.15346	0.09638
自己創刊距離(レンジ)(m)	124.8	435.4	218.0
誤差分散 $\sigma_r^2$	0.00251	0.20442	0.09264
トレンド関数の係数 ( $a_0$ )	2.24	2.02	2.29

ことができる。主な計算内容は以下のとおりである。

クリギング手法によれば、同定された確率場モデル領域内の任意の点  $\mathbf{u}_0$  における地震動パラメタの推定値  $Z(\mathbf{u}_0)$  とその推定誤差  $\sigma^2(\mathbf{u}_0)$  を次式によって求めることができる。

$$\hat{Z}_0(\mathbf{u}_0) = \lambda^T \mathbf{z} \quad (23)$$

$$\sigma_0^2(\mathbf{u}_0) = C(\mathbf{u}_0 - \mathbf{u}_0) - \mathbf{v}_0^T \mathbf{m}_0 \quad (24)$$

ここに、 $\lambda_0$  は、次式のような  $\mathbf{u}_0$  に関する重み係数ベクトルである。

$$\lambda_0 = \{\lambda_1(\mathbf{u}_0), \dots, \lambda_n(\mathbf{u}_0)\}^T \quad (25)$$

また、 $\mathbf{v}_0$  は、次式のような重み係数ベクトル  $\lambda_0$  と、ラグランジェの未定係数ベクトル  $\boldsymbol{\eta}$  による係数ベクトルである。

$$\mathbf{v}_0 = \begin{Bmatrix} \lambda_0 \\ -\boldsymbol{\eta} \end{Bmatrix} \quad (26)$$

さらに、 $\mathbf{m}_0$  は、次式のような  $\mathbf{u}_0$  における共分散ベクトル  $\mathbf{c}(\mathbf{u}_0)$  と、トレンド関数ベクトル  $\mathbf{f}(\mathbf{u}_0)$  によるベクトルである。

$$\mathbf{m}_0 = \begin{Bmatrix} \mathbf{c}(\mathbf{u}_0) \\ \mathbf{f}(\mathbf{u}_0) \end{Bmatrix} \quad (27)$$

共分散ベクトル  $\mathbf{c}(\mathbf{u}_0)$  は、 $\mathbf{u}_0$  について次式のように定義できる。

$$\mathbf{c}(\mathbf{u}_0) = \{C(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_0), \dots, C(\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_0)\}^T \quad (28)$$

また、トレンド関数ベクトル  $\mathbf{f}(\mathbf{u}_0)$  は、式(6)によって  $\mathbf{u}_0$  について次式のように定義できる。

$$\mathbf{f}(\mathbf{u}_0) = \{f_0(\mathbf{u}_0), \dots, f_K(\mathbf{u}_0)\}^T \quad (29)$$

すなわち、 $\mathbf{m}_0$  は、共分散ベクトル  $\mathbf{c}(\mathbf{u}_0)$  とトレンド関数ベクトル  $\mathbf{f}(\mathbf{u}_0)$  により既知である。

ここで共分散行列  $\mathbf{C}$  とトレンド行列  $\mathbf{X}$  とを結合した行列  $\mathbf{C}'$  を次式のように定義する。

$$\mathbf{C}'' = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{X} \\ \mathbf{X}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (30)$$

ただし、“計算誤差”に配慮する場合には、上記の行列  $\mathbf{C}$  ではなく、 $\mathbf{C}'$  を適用すればよい。

この時、 $\mathbf{v}_0$  は、次式を解くことによって決定することができる。

$$\mathbf{C}'' \mathbf{v}_0 = \mathbf{m}_0 \quad (31)$$

ここに、 $\mathbf{v}_0 (= \lambda_0 \text{ と } \boldsymbol{\eta})$ 、共分散関数  $C(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j)$  あるいは  $C'(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j)$  と、地震動パラメタベクトル  $\mathbf{z}$  から任意の点  $\mathbf{u}_0$  における地震動パラメタの推定値  $Z(\mathbf{u}_0)$  とその推定誤差  $\sigma^2(\mathbf{u}_0)$  を求めることができる。

#### E) 指数型モデル統計計算結果

表－1に、以上の方法によって推定した統計試算結果を示す。なお、バリオグラム関数には、一般的な指数型モデルを適用したが、その他のモデルでも大きな違いは見られない。

AICにより、本地震動解析においては、 $\mathbf{C}_{Obs}$  を持って、解釈したほうが妥当であることが分かった。また、同様に、AICにより、トレンド関数については、0次が妥当であることが分かった。これは、いわゆる通常クリギングと呼ばれる結果である。

以上は、表に示した3つの地震で共通して得られた結論であるが、この結果が普遍的であるわけではない。震源が比較的近くなると、通常クリギングよりも普遍クリギングがより妥当であるという結論が得られる可能性は容易に認められるところである。

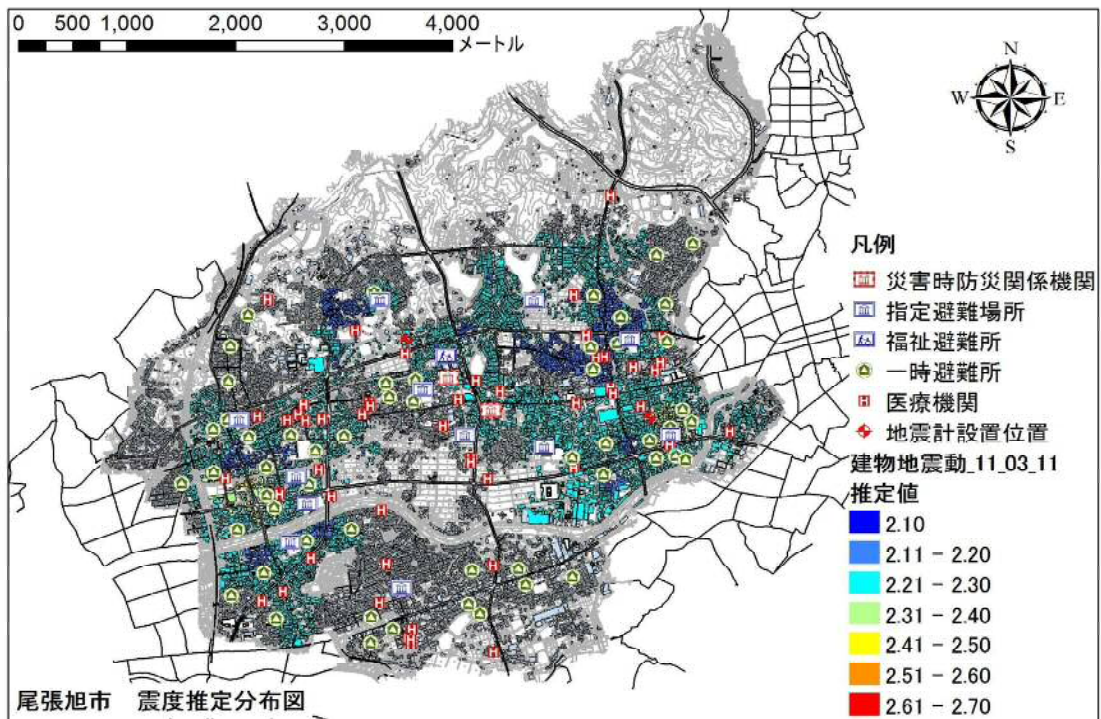


図-2 (A) 尾張旭市地震動推定マップ 全体図



図-2 (B) 尾張旭市地震動推定マップ 拡大図  
地震発生日 2011年3月11日 震源(三陸沖 約24km M=9.0)

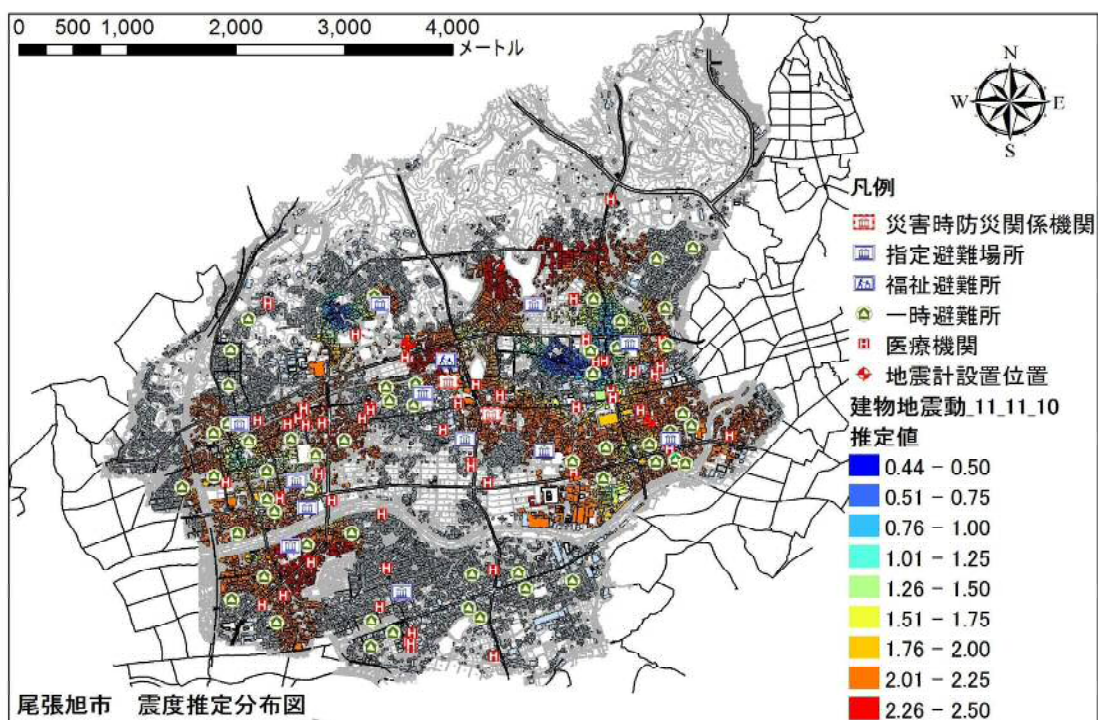


図-3 (A) 尾張旭市地震動推定マップ 全体図



図-3 (B) 尾張旭市地震動推定マップ 拡大図  
地震発生日 2011年11月10日 震源(あま市内 約10km M=3.9)

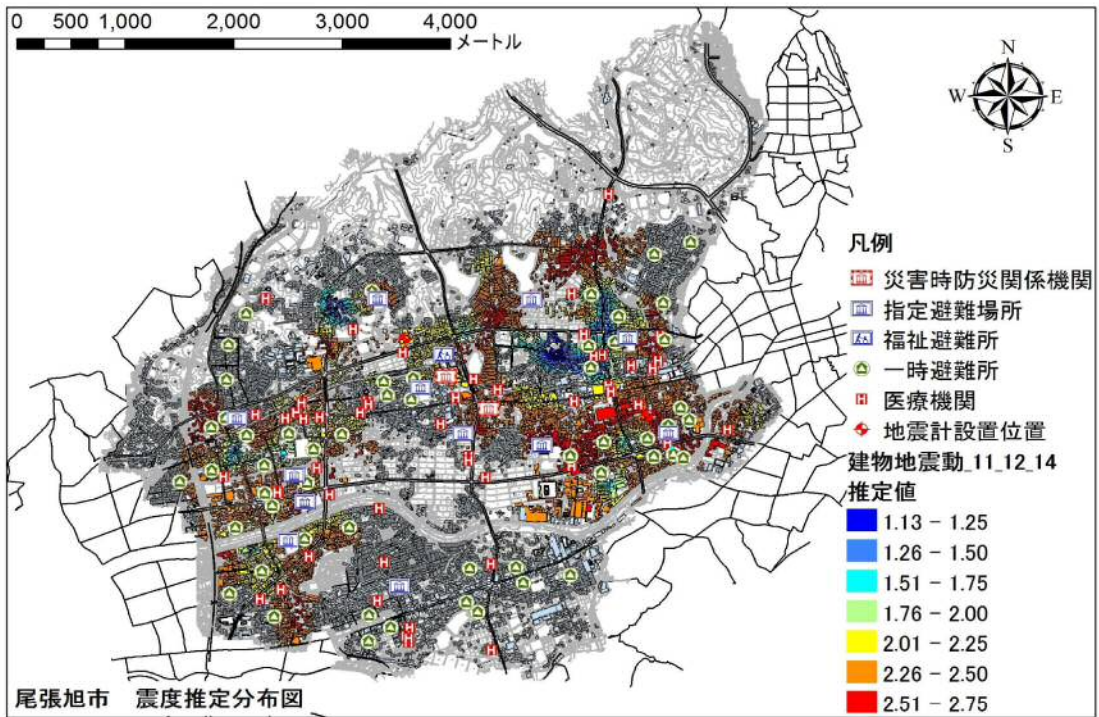


図-4 (A) 尾張旭市地震動推定マップ 全体図



図-4 (B) 尾張旭市地震動推定マップ 拡大図  
地震発生日 2011年12月14日 震源(瑞浪市内 約50km M=5.2)

また、誤差分散  $\sigma_i^2$  が、シル  $\sigma^2$  よりも十分に小さいのは、3月11日の地震動のみである。したがって、誤差分散  $\sigma_i^2$  が、シル  $\sigma^2$  よりも十分に小さな値とならない残りの試算結果については、その妥当性を議論することはできない。誤差分散  $\sigma_i^2$  が、シル  $\sigma^2$  に対して大きい場合、AIC も大きくなっていることは注目すべきである。より精度の高い結論を得るには、電子化したボーリングデータについて、土質力学的、地震工学的な視点から見直しを図る必要がある。特に N 値から S 波速度  $V_s$  を推定することは、結果に伴う誤差を大きくしているものと考えられる。さらに、3月11日の地震動のみ、AIC が小さいこと、誤差分散  $\sigma_i^2$  が、シル  $\sigma^2$  に対して小さいことから、地震動推定については、その震源に関する地震動の周波数特性や、震源との距離などについても検討を行う必要がある。

一方、自己相関距離は、空間分布推定の際のトレンド関数とも関係するため、ここでは一概にどの程度の精度があるのかは言明できない。しかしながら、表に示したレンジについては、120m 程度から 430m 程度となっており、土質パラメタの水平方向についてのレンジ（自己相関距離）が 100m から 2、300m 程度であることから、妥当な推定値であると判断できる。

#### (B) 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)

表—1 に示した空間統計計算結果に基づき、尾張旭市内の建築物 3 万 4 千軒の 1 件ごとにクリギング手法により空間補間計算を行い、推定値とその推定誤差を求めた。推定した点は一軒毎の建物の建蔽率に相当する面積部分の重心点である。結果を図 2～4 に示す。図 2～4 は、それぞれ表の地震 I～III に対応している（図 2～4 (A)）。また、図 2～4 には、それぞれの地震に対して、尾張旭市内の同じ地域について拡大した電子マップを示した（図 2～4 (B)）。それぞれの図では、各地震による市内の地震動の大きさの違いを明確に知るために、カラーリングしてある。したがって、各図で、その地震動の大きさの絶対値は異なっている。

一方で、電子化した 600 本余りのボーリングデータのうち、300 本余りのデータの位置が特定できなかったため、市内のいくつかの地域において、十分な精度で推定が不可能であると判断した。

すなわち、これらは、表—1 に示したレンジ (m) を基準としたの適切な距離の範囲にボーリングデータがない地域である。これらの地域内の建物については、グレーで色表示し、推定値を示していない。

図 2～4 (A) から分かるように、地震動は、概ね矢田川の北側にある暴れ川の跡と思われる地域で大きく、北へ向かって小さくなっている。これは、この地域の自然地理学的な状況をよく表している。ただし、上記のように推定していない地域、また、震源によって地域分布（空間分布）にある差異の原因については、今後の最重要の研究課題として注記しておきたい。

図 2～4 (B) からは、各建物の地震動の微妙な違いをよく推定できていることが分かる。本年度の解析の対象である表—1 に挙げた 3 つの地震は、尾張旭市から震源が遠いか、比較的近くても震源の大きさが小さいため、尾張旭市内にさほど大きな地震動を発生させていない。それでも、建物ごとに詳細な地震動の大きさの差を推定できたのは、図に示した地域内に十分なボーリング調査地点が分布しているためである。しかしながら、表—1 に関して述べたように、誤差分散  $\sigma_i^2$  が、シル  $\sigma^2$  に対して大きい場合、すなわち、AIC も大きくなっている推定結果となっている場合、こうした詳細な推定には大きな誤差が伴っていることに注意すべきである。誤差分散  $\sigma_i^2$  を十分に小さな値に抑えるためには、地盤情報の整備、地震動推定方法（特に表層地盤における地震動の増幅・減衰解析）に関する力学の精度、地震動の計測の継続による推定値と実測値の比較による補整方法の向上が重要な役割を果たしている。

本年度のシステム解析によって、これらの重要性が明瞭に浮き彫りとなったことは、本研究の最大の成果の 1 つである。以上の成果を踏まえ、地震動推定の精度を向上させることが今後の課題の 1 つである。

一方で、図 2～4 (B) を公表すれば、市民の災害抑制意識の向上に直結する。これにより、地震災害を最低限にまで抑える努力に貢献する可能性において、さらにもう 1 つの本研究の大きな成果と評価することができる。今後はこの観点から、地震動の推定と建物の耐震性を入力データとすることにより、全壊確率、破壊確率等を算定するシステムを組み込み、さらに災害対応能力を高めら

れるシステムに改良する研究を視野に入りたい。

さらに、本研究で提示した地震動ハザードマップシステムには、図2～4 (A) および (B) で示したように、地震災害の発災時の市役所、消防局、福祉センター、医療機関、避難場所、一時避難場所、災害用具倉庫などの対応拠点を、GIS で表示することは容易であり、こうした災害拠点の移動、新設、廃止にも即座に対応可能である。すなわち、本研究で開発した基礎システムの利用とその拡大には大きな可能性がある。

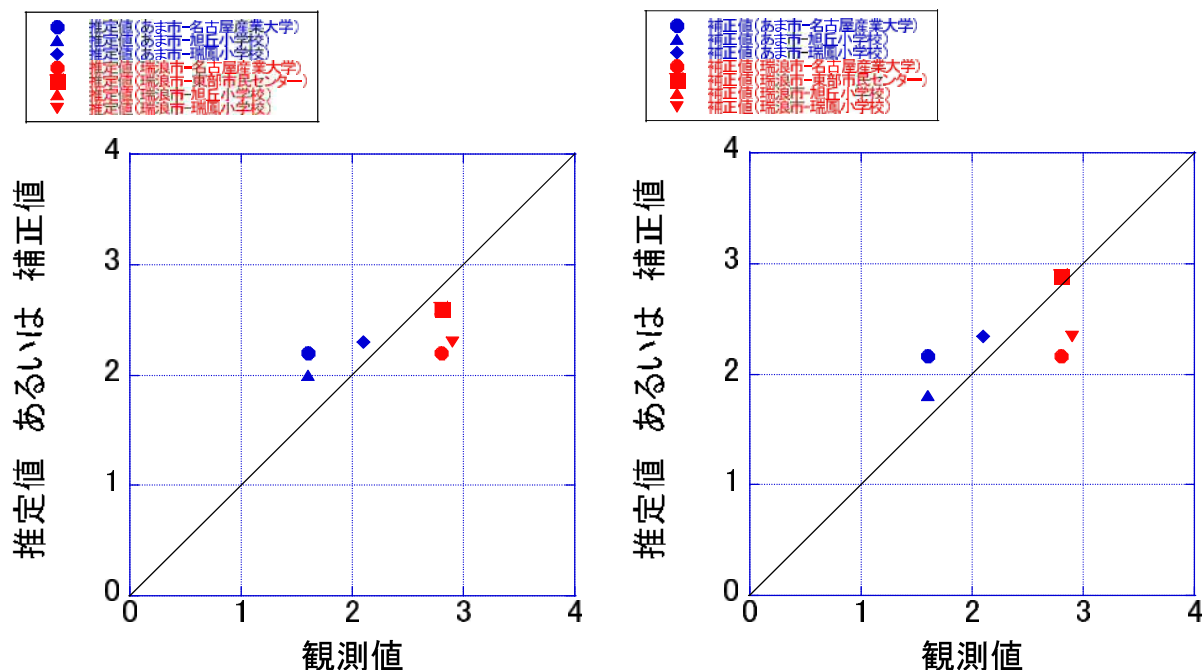
**(C) 上記の地震Ⅱと地震Ⅲにおける尾張旭市内に設置された地震計による実測値と空間統計による推定値の比較**

図-5 (A) に、上記の地震ⅡおよびⅢが発生した際に地震計で計測した実地震の観測値と本研究システムによる地震動推定値を比較した結果を示す。地震計を設置したのは、名古屋産業大学 3号館 1階、名古屋産業大学 3号館屋上、尾張旭市 瑞鳳小学校、同 旭ヶ丘小学校および同 東部市民センターである。地震動の推定値については、以上のすべての点で可能であるが、各地震時発生時に作動し

なかった地震計もあり、比較できた地震動は図のとおりである。また、地震Ⅰについては、設置した地震計での計測が始まっていなかったなどの理由により比較ができなかった。

図から分かるように、推定値は実測値と比較してよい相関性のあることを示している。比較できるデータ数が少ないこと、また、実測、推定した地震動が概ね同程度の大きさのものが多いこともあり、詳細なデータの解析については、継続的な計測を待つことにすべきであるが、この時点で、よい相関性のあることが分かる。誤差は、およそ15～20%程度である。地盤工学の実務的経験から、この値は予想外に小さいといえる。すなわち、本研究によるシステムでの推定値は、現時点においても既に相当の精度を有しているといえる。今後の計測に大きな期待を寄せられるところである。

一方で、地震Ⅱの際には、すべての計測地点で、観測値よりも推定値の方が大きな値を示している。すなわち、過大評価となっている。ところが、地震Ⅲの際には、すべての計測地点で、観測値よりも推定値の方が小さい値を示している。すなわち、過少



(A) 地震動の観測値と推定値の比較

(B) 地震動の観測値と補正値の比較

図-5 地震動の解析値と推定値（補正値）の比較

評価となっている。こうした結果が得られた原因を明らかとすることは、地震工学上、大変興味深い研究対象といえる。

図-6 に、過去に作成された別の地震動マップを示す。この図は、尾張旭市による平成 17 年度のものであるが、これまでに公表された地震動マップは、すべてこのようなメッシュ毎に地震動を計算した様式である。こうしたマップと比較すると、本研究によるシステムの方が、はるかに市民の災害抑制意識を高めやすいことが容易に理解できる。また、メッシュ毎の地震動マップでは、例えメッシュ内にボーリング調査が実施されていない場合でも、メッシュ毎にモデル地盤モデルを工学的判断に基づいて作成するため、客観性に乏しく、精度を検証することもできない。さらに、メッシュを詳細にすれば、莫大なコストが必要となる。すなわち、本研究によるシステムの方が、客観性、コスト、精度、精度保証と

いう点で既存の方法を遥かに凌ぐ優れており、将来においても、地震を計測する度に、ボーリング調査データが増えるにしたがって、あるいは微動振動計測など行う度に、これらのデータすべてを総動員して、地震動の推定精度を向上させられる点においても、既存の手法よりも有利であることが分かる。

参考までに、図-5 (B) に、実測値と、実測値に対して推定値を線形補整した補正值を比較した結果を示す。

## 5. 結論

本研究により、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。

## 6. 今後の研究課題

今後、地震動マップの推定精度をさらに高くするために、電子化したボーリングデータについて、土質力学的、地震工学的な視点から見直しを図る必要性がある。特に N 値から S 波速度  $V_s$  を推定するこ

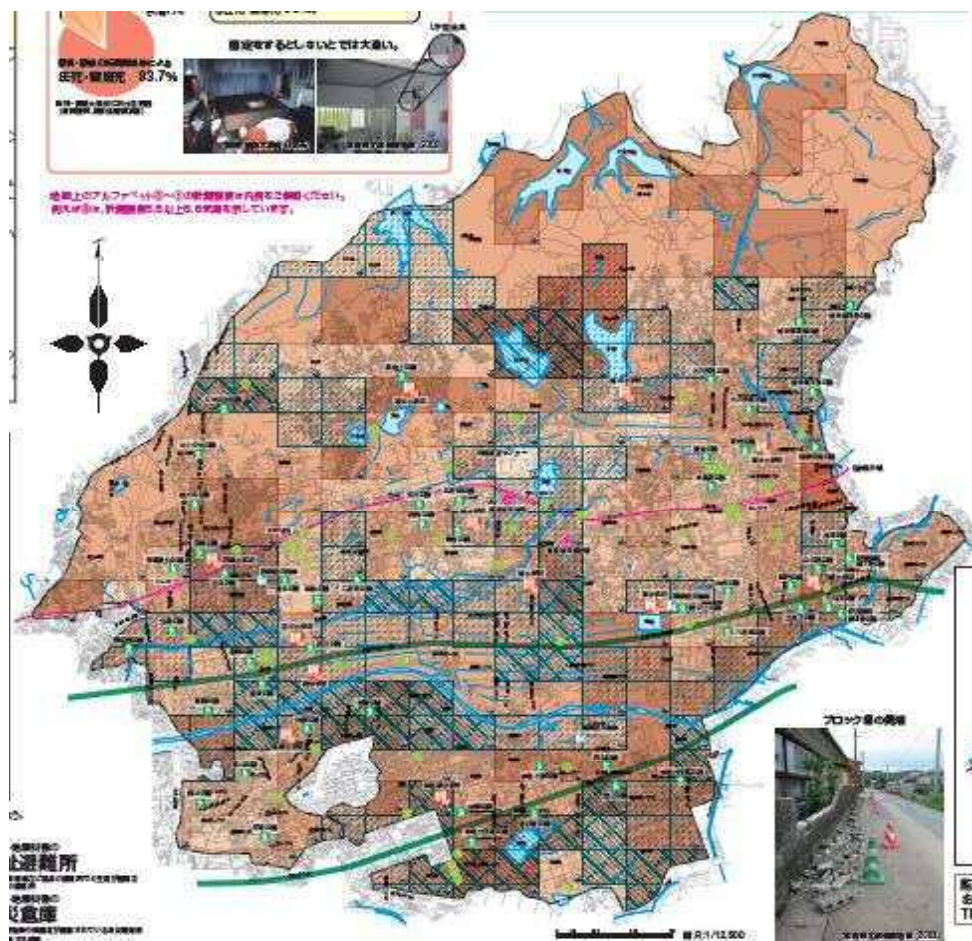


図-6 平成 17 年度 尾張旭市作成 東海・東南海・南海地震によるハザードマップ



とは、結果に伴う誤差を大きくしているものと考えられる。

さらに、3月11日の地震動のみ、AICが小さいこと、誤差分散 $\sigma_i^2$ がシル $\sigma^2$ に対して小さいことから、地震動推定については、その震源に関する地震動の周波数特性や、震源との距離などについても検討を行う必要がある。

図-5に示した観測地と推定値の比較などから、地震推定の力学的、自然地理学的研究を進める必要がある。ボーリング調査結果の整理、微動振動計測調査、地震動の継続的観測などが重要である。ただし、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。

## 7. おわりに

本研究では、既に既往の方法を遥かに上回る優れたシステムを提案し、その実例を示した。

本システムの特徴は、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、簡易的かつ経済的に提供できることにある。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、継続的に向上することも大きな特徴である。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、本研究による成果の際立つて優れた特徴の1つである。

いくつかの課題は残されたが、幸いに、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が得られた。

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、自身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。

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する。

## 参考文献

- [1] Akaike, H.: Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, 2<sup>nd</sup> International symposium on Information Theory, edited by B.N. Petrov and F. Csaki, pp.267-281, Akad. Kiado, Budapest, Hungary, 1973.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Honjo, Y. and Kazumba, S.: Estimation of autocorrelation distance for modeling spatial variability of soil properties by random field theory, Proc. of 47<sup>th</sup> Geotechnical Symposium, The Japanese Geotechnical Society, pp.279-286, 2002
- [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] Michiyo Sugai : Some Sensitivity Analyses of Probability of Earthquake Occurrence to Some Design Parameters , Proc. of the International Workshop Kamakura 2002, 11-12 April 2002 Hayama, Japan.
- [11] Wackernagel, H. 2003, Geostatistic, the 2nd edition (translated into Japanese) Morikita Shuppan
- [12] 中部都市再生研究会：最終報告書, 2005.3