

地球統計学的手法を用いた 高知市中心部の基盤深さの推定

谷口 純一¹・三神 厚²

¹学生会員 徳島大学大学院 建設システム工学コース（〒770-8506 徳島県徳島市南常三島2丁目1番地）

E-mail: t.june.6juve@gmail.com

²正会員 徳島大学（〒770-8506 徳島県徳島市南常三島2丁目1番地）

E-mail: amikami@ce.tokushima-u.ac.jp

表層地盤の振動特性を評価するには、地表から基盤までの深さの空間的な分布を推定する必要がある。本研究では、高知市中心部を例として、ボーリングデータから離散的に得られる沖積層基底面深度と基盤岩上面深度を、幾つかの数学的手法によって補間し、その分布を推定した。ボーリングデータは、webで公開されているものを利用するが、これらのデータは元は公共工事などに伴い調査されたものが大半で、深くても沖積層基底面までしか得られていないことが多い。特に基盤岩上面が沖積層基底面に比べ明らかに深い地域では、基盤岩上面まで到達したボーリングデータは希少であるため、基盤岩上面深度の推定が困難である。本研究は、コクリギングを用いて基盤岩上面深度分布を推定する手法を提案するものである。高知市中心部の基盤岩上面深さ分布の推定結果は、既往の研究と整合するものとなった。

Key Words : boring log, interpolation, cokriging, kriging

1. はじめに

沖積地盤の堆積厚さはサイトの震動特性を大きく左右する要因の1つである。基盤が不整形で、地盤が2次元、3次元的な挙動を呈する場合、基盤までの深さの空間的な分布を評価する必要も生じる。

地盤構造を知る最も一般的な方法は、地盤のボーリングデータを用いることである。近年、例えばKunijiban¹⁾に見られるように、地盤のボーリングデータの公開が進んでいる。しかしながら、このようなWebサイトで公開されるボーリングデータは、本来、公共工事等を行う際の必要性に応じて得られたもので、今日のような公開目的で調査されたものではない。そのため、地盤調査位置の平面的分布は、エリアによって密だったり、疎だったり、ばらつきがある。またボーリング深さについても、深い場合もあれば、浅い場合もある（例えば、下水道工事用のボーリングデータは10m程度が多い）。耐震検討にあたり、地盤モデルを構築するためには、既知の地盤情報を空間的に補間しなくてはならない。地盤情報の補間手法に関しては、例えば、小嶋ら²⁾は、福井平野の基盤構造推定のために、常時微動観測から推定される基盤深さを、クリギング、コクリギングで補間している。

本論文では、高知市中心部を例に、幾つかの補間手法を適用し基盤深さの補間を試みる。高知市は複数の河川によって形成された沖積低地に位置しているが、これは日本の他の地域にも多くに見られる典型的な都市の立地形態である。高知市では、多数のボーリングデータをもとに地質学の専門家らが中心になり作成された「高知地盤図」³⁾なる書籍が用意されている。本研究では、ボーリングデータを元に、幾つかの数学的手法を用いて基盤深さを補間した結果と「高知地盤図」に示される基盤深さの推定結果との比較を行い、それを通して、各補間手法を用いた推定結果の特徴や違いについて考察する。

前述のように、Webサイトを通じて提供されるボーリングは、本来、別の目的で掘られたものなので、工学的基盤までは到達している場合が多いが、岩盤まで到達しているものはとても少ない。高知市においても、基盤岩が深さ約60mより深くなると、ボーリングデータが極めて少ないため、基盤岩上面の構造がよくわからない。この問題に対し、本研究では、コクリギングを適用することで、基盤岩上面深度の情報がほとんどない場所でも推定が可能になる1つの方法を提案した。コクリギングを用いた推定結果の精度については、P. Goovaerts⁴⁾などで検討されており、主変数と関連のある別の補助変数があ

るとき、主変数のみのクリギングに比べ、補助変数を用いたコクリギングのほうが良い精度であるといわれている。

2. 高知の地質

図-1、図-2は、高知地盤図による、沖積層（完新統）底面深度と、基盤岩（更新統底面）深度の推定図である。基盤岩深度は、深度60m以上についてはデータが不足しているため、推定できないとしている。

甲藤ら⁹⁾によると、火山灰より深くにある一番浅い礫層が最終氷期に堆積した層であり、この層の上面が沖積層の底面に当たる。さらに深くにある岩盤が更新統の底面である。

ボーリングデータは、こうち地盤情報公開サイト⁹⁾で公開されているものを利用した。火山灰に関する表記の

ないボーリングデータについては、沖積層底面深度はわからないものとした。

3. 地球統計学に基づく補間手法

ここでは、本研究で用いる計算手法について簡単に述べる。詳しくは「地球統計学」⁷⁾などを参照されたい。

(1) 通常クリギング (OK: Ordinary Kriging)

クリギングは、以下のバリオグラム関数 $\gamma(h)$ に基づく重み付き平均をもって補間する計算手法である。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E |Z(x) - Z(y)|^2 \quad (1)$$

x, y はある地点を、 Z はある地点での値を示す。 E は期待値を表し、 h は、 x, y の距離である。

バリオグラム関数を用いて、任意の点 $Z(x_0)$ の推定値

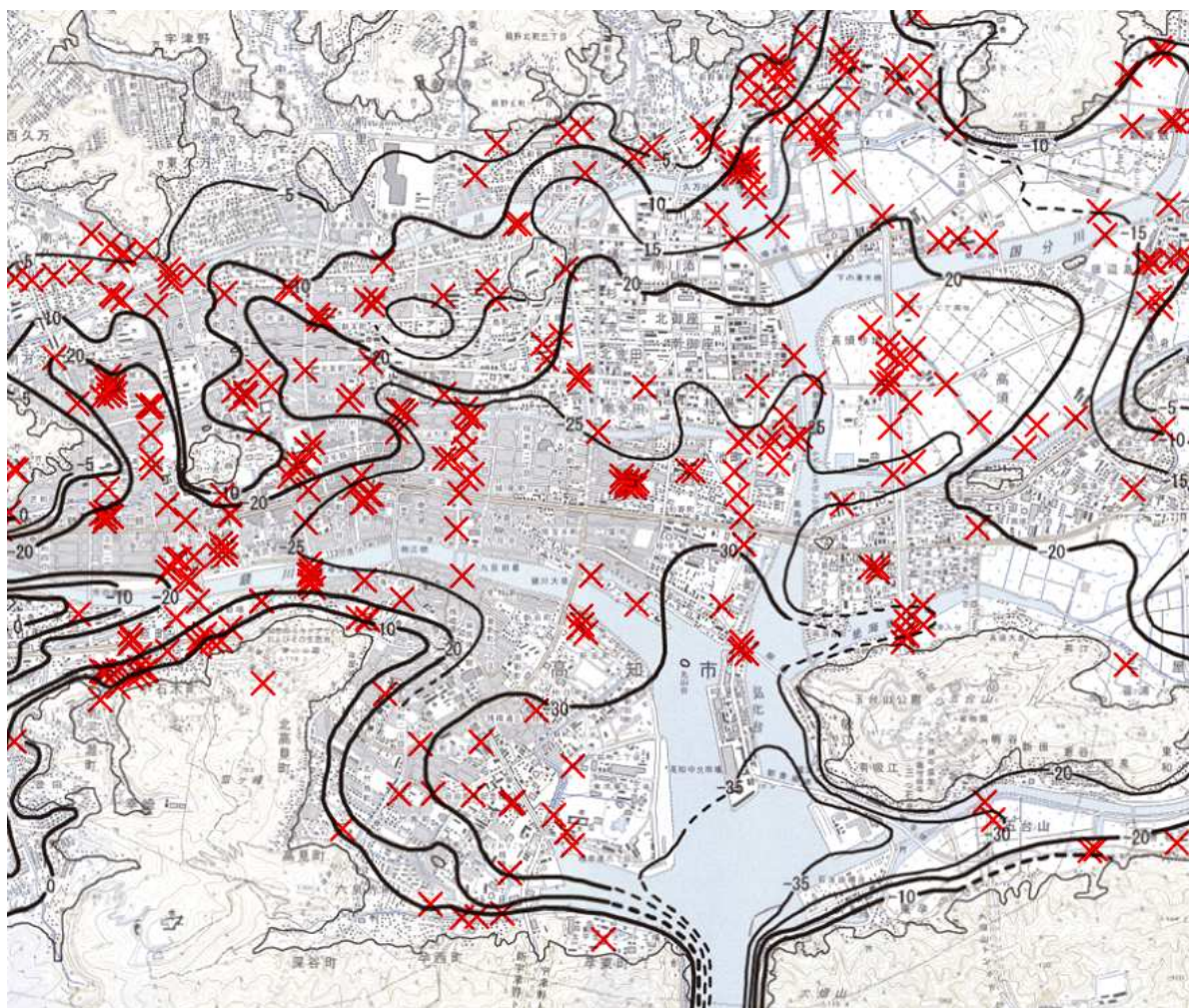


図-1 完新統底面深度と、完新統底面深度の得られたボーリングデータの位置
(高知地盤図を参考に、平成20年国土地理院発行の1/25,000地形図に加筆)

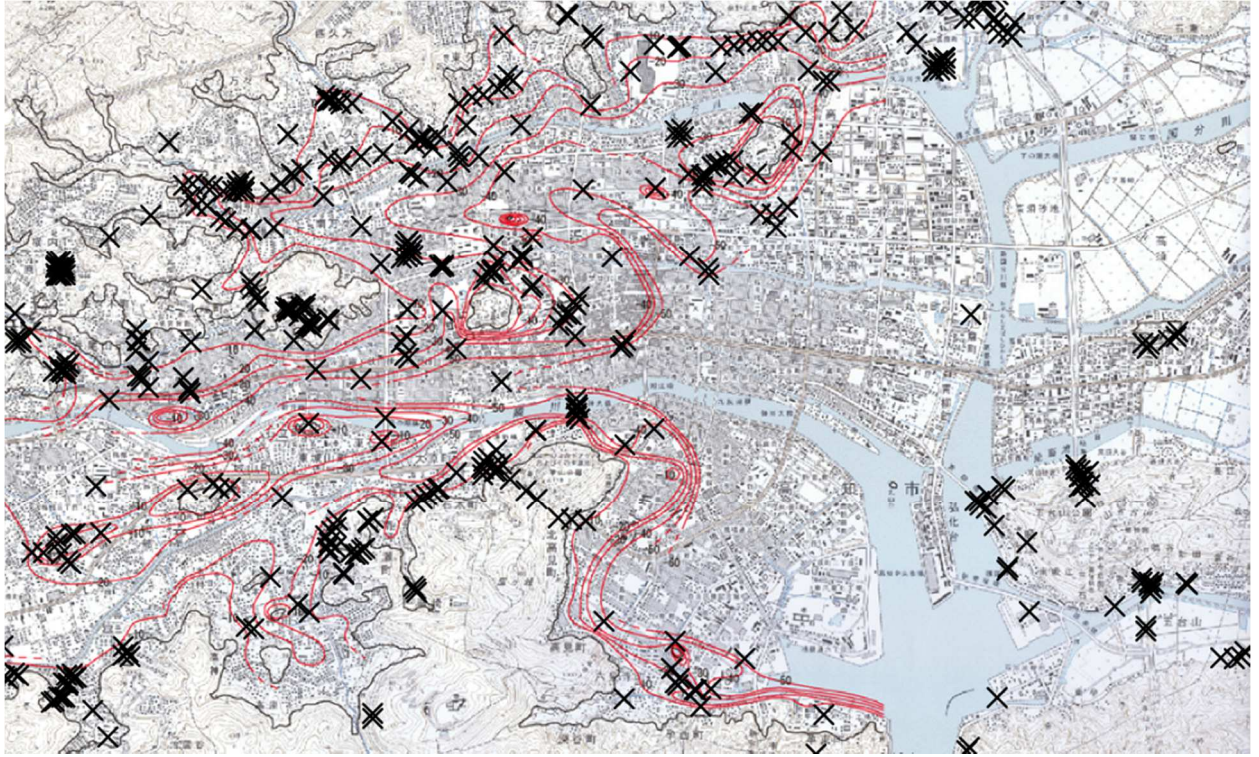


図-2 更新統底面（基盤岩）深度図と，更新統底面深度の得られたボーリングデータの位置
（高知地盤図を参考に，平成 20 年国土地理院発行の 1/25,000 地形図に加筆）

は，重み係数 ω_α を用いて以下の様にかける．

$$Z(x_0) = \sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha Z(x_\alpha) \quad (\alpha=1,2,3,\dots,n) \quad (2)$$

重み係数 ω_α は，以下の方程式の解である．

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^n \omega_\beta \gamma(x_\alpha - x_\beta) + \mu = \gamma(x_\alpha - x_0) \\ \sum_{\beta=1}^n \omega_\beta = 1 \end{cases} \quad (\alpha=1,2,3,\dots,n) \quad (3)$$

ここで， μ はラグランジュ乗数である．

また，通常クリギングの推定分散は次式で与えられる．

$$\sigma^2 = \mu - \gamma(0) + \sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha \gamma(x_\alpha - x_0) \quad (4)$$

(2) 通常コクリギング(OCK: Ordinary Co-Kriging)

クリギングでは1変数しか扱えなかったが，コクリギングは，これを多変数へ拡張したものである．コクリギングでは，バリオグラム関数の代わりに変数 i,j のクロスバリオグラム $\gamma_{ij}(h)$ を用いる．

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{2} E[(Z_i(x+h) - Z_i(x))(Z_j(x+h) - Z_j(x))] \quad (5)$$

これは $i=j$ のとき，バリオグラム関数と同じ式になる．

変数 i のデータが n_i 個あるとすると，重み係数 ω_α^i を

用いて，任意の地点 x_0 の変数 i_0 の値は次の重み付き平均の形で表せる．

$$Z_{i_0}(x_0) = \sum_{i=1}^N \sum_{\alpha=1}^{n_i} \omega_\alpha^i Z_i(x_\alpha) \quad (6)$$

重み係数 ω_α^i は次の方程式の解である．

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N \sum_{\alpha=1}^{n_j} \gamma_{ij}(x_\alpha - x_\beta) + \mu_i = \gamma_{i i_0}(x_\alpha - x_0) \\ \sum_{\beta=1}^{n_i} \omega_\beta^i = \begin{cases} 1 & (i=i_0) \\ 0 & (i \neq i_0) \end{cases} \end{cases} \quad (i=1,\dots,N) \quad (\alpha=1,\dots,N) \quad (7)$$

μ はラグランジュ乗数である．

また，通常コクリギングの推定分散は次式で与えられる．

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{\alpha=1}^{n_i} \omega_\alpha^i \gamma_{i i_0}(x_\alpha - x_0) + \mu_{i_0} - \gamma_{i_0 i_0}(0) \quad (8)$$

4. 計算結果

集めたボーリングデータを用いて，以下の3パターンで基盤岩深さの推定をした．

- 基盤岩深さを通常クリギングで補間する
- 完新統の厚さ，更新統の厚さそれぞれに通常クリギングで補間し，和をとる．
- 完新統の厚さ，更新統の厚さをそれぞれを補助変

数として、それぞれの厚さを通常コクリギングで補間し、和をとる。

(1) バリオグラム・クロスバリオグラム

図-3～図-6は、計算に用いるためのバリオグラム・クロスバリオグラムの計算結果である。図中の点は、距離10000mを15分割して、それぞれの分割された区間内のバリオグラムを、その分割区間の中央値で代表させてプロットしたものである。

バリオグラムは普通、距離が離れるほど大きな値となり、いくらか離れるとその値が一定値に近づく。しかし、実際のデータを用いると、遠距離のデータは近距離のものに比べ少なくなるため、値が安定しなかったり、小さくなっていったりする。そのため、これにフィットする線を描く際には、安定して増加している点までは、曲線を用い、その点以降は一定値を持つものとする。用いたモデルは次の指数モデルと呼ばれる式である。

$$\gamma(h) = a(1 - \exp(-\frac{h}{b})) \quad (9)$$

曲線は、最小二乗法によるフィッティングを行った。

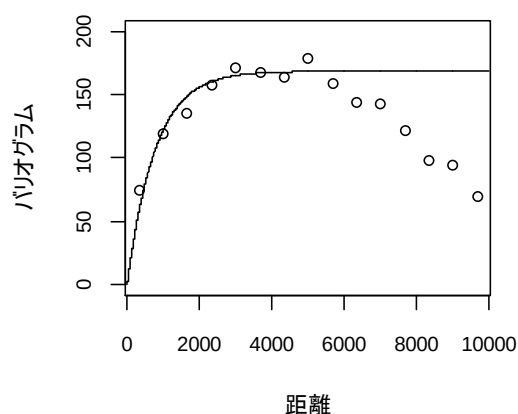


図-3 基盤岩深度バリオグラム

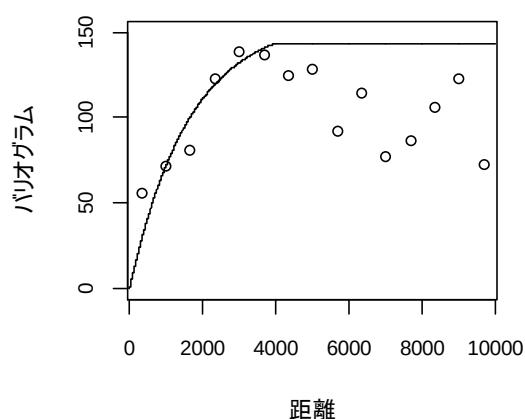


図-5 更新統厚さバリオグラム

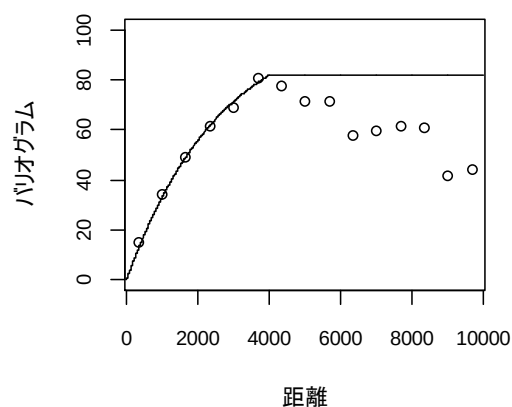


図-4 完新統底面深度バリオグラム

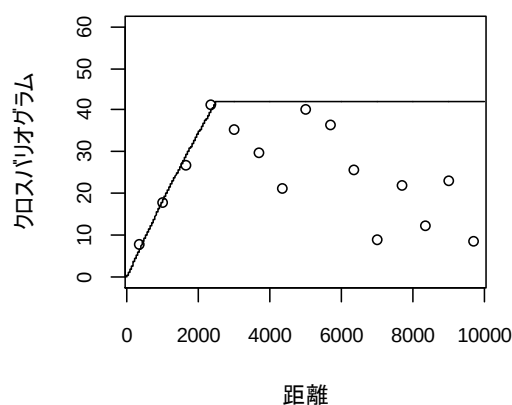


図-6 完新統厚さ・更新統厚さクロスバリオグラム

(2) 交差検証

3つの計算パターンのどれが計算精度が高いのかを検証するために、交差検証なる方法を用いた。交差検証は、補間精度などの検証によく用いられている（例えば⁴⁾）。この方法は、既知のデータのうち1点を未知とし、その点の値をほかのデータを使って補間し求める。この作業を全点で行い、推定値と正解値の差をとることによって精度の検証を行うもので、補間手法の精度検証に用いられる。この差の平均をとると、計算パターンやバリオグラムの過小・過大評価を判断でき、二乗平均平方根(RMS: Root Mean Square)をとることで、誤差の評価ができる。なお、基盤岩深さのみがわかっているデータを使うと、基盤岩深さを通常クリギングで補間するパターンのみ多くの点が使えるようになり、RMSの比較ができなくなるため、交差検証では基盤岩深さのみがわかっているデータは用いていない。

結果を表-1にまとめた。表中の灰色の行が、今回対象とした基盤岩深さの予測値に対応するものである。

各層厚に対して通常クリギング、通常コクリギングを適用した結果を比較すると、どちらの層厚に対しての結果も、やや通常コクリギングのほうがRMSが大きいため、クロスバリオグラムの評価がよくない可能性がある。

(3) 基盤岩深度図

図-7～図-12は、3種類の方法それぞれの基盤岩深度推定結果と、その誤差分散を表したものである。

誤差分散を表す各図で、誤差分散が0となる点があるのは、クリギングが既知の点を通るような補間手法であるためである。

それぞれの結果と、図-2の高知地盤図による予測を比較すると、全体的な傾向はどれも似ているが、深度60mのラインを比較すると、層厚の和をとる計算パターンが近く、通常コクリギングの結果のほうがやや近い結果といえる。

表-1:各モデルの交差検証の結果

	RMS	(推定値) - (正解値) の平均
OK(基盤岩深さ)	9.062	0.012
OK(完新統厚さ)	3.729	0.032
OK(更新統厚さ)	7.233	-0.051
OK(完新統厚さ+更新統厚さ)	8.218	-0.357
OCK(完新統厚さ)	3.742	0.035
OCK(更新統厚さ)	7.510	0.034
OCK(完新統厚さ+更新統厚さ)	8.446	0.290

誤差分散については、通常コクリギングが全体的に低い値になっているが、クロスバリオグラムの計算がうまくいっていない可能性もあるため、精度が最も良いと言い切ることはできない。(計算手法的に優れているとは言える。)

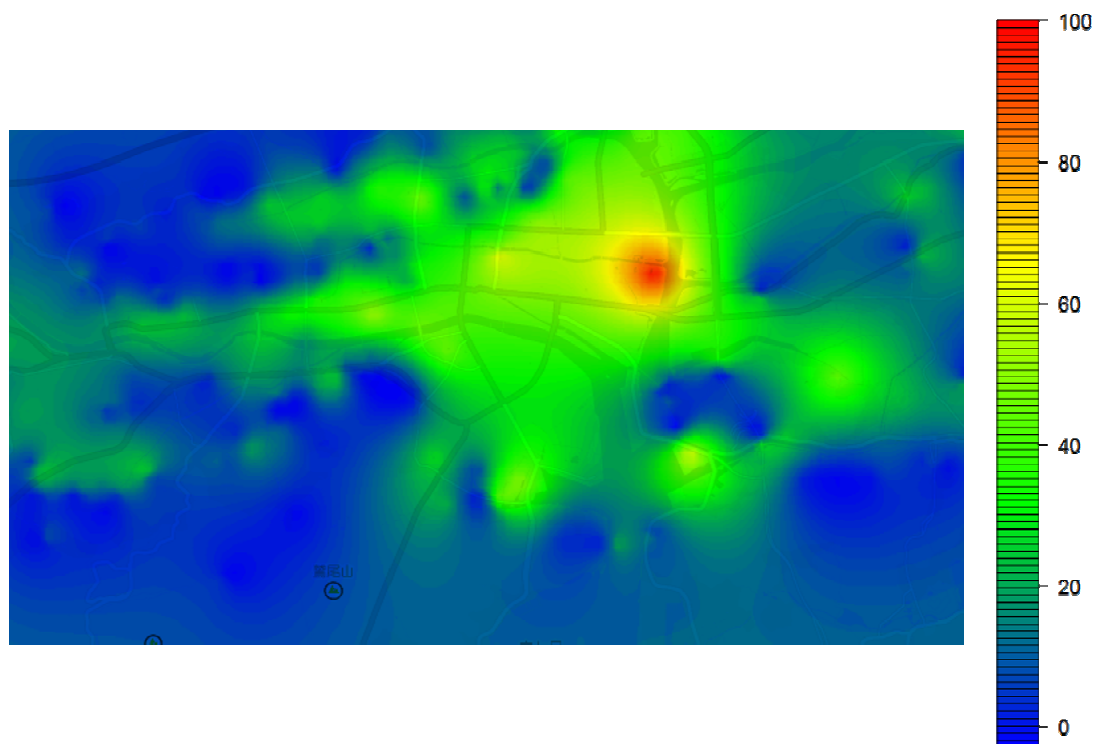


図-7通常クリギング（基盤岩深さ）による基盤岩深度推定結果
(Google map ©2014 Google,ZENRIN に加筆)

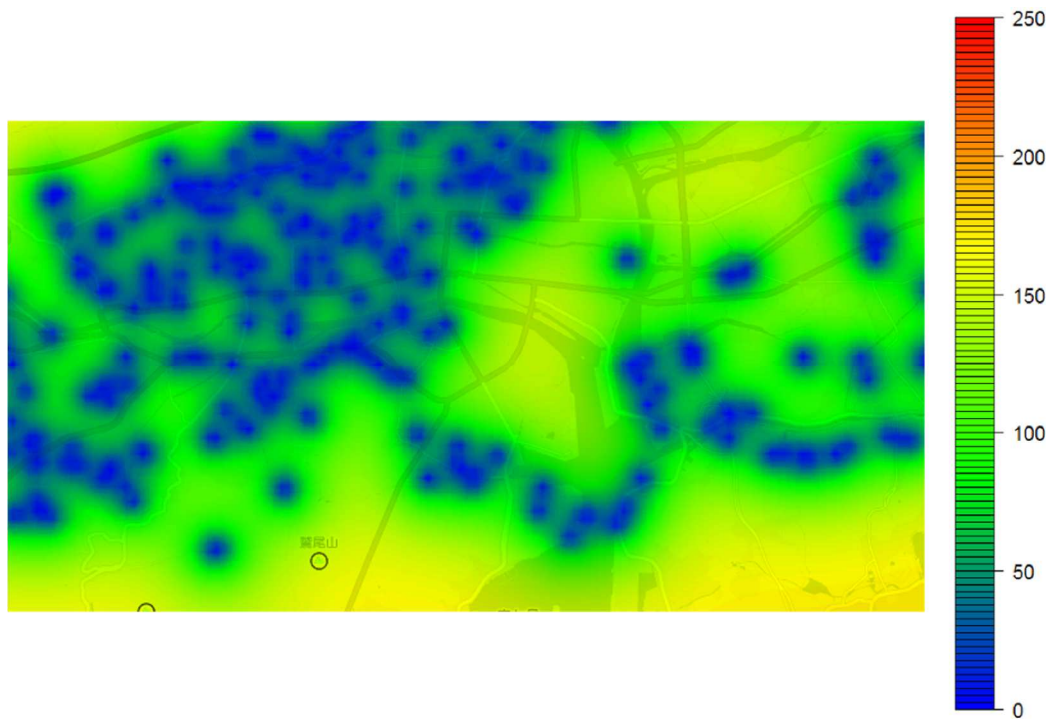


図-8 通常クリギング（基盤岩深さ）による基盤岩推定の誤差分散.
(Google map ©2014 Google,ZENRIN に加筆)

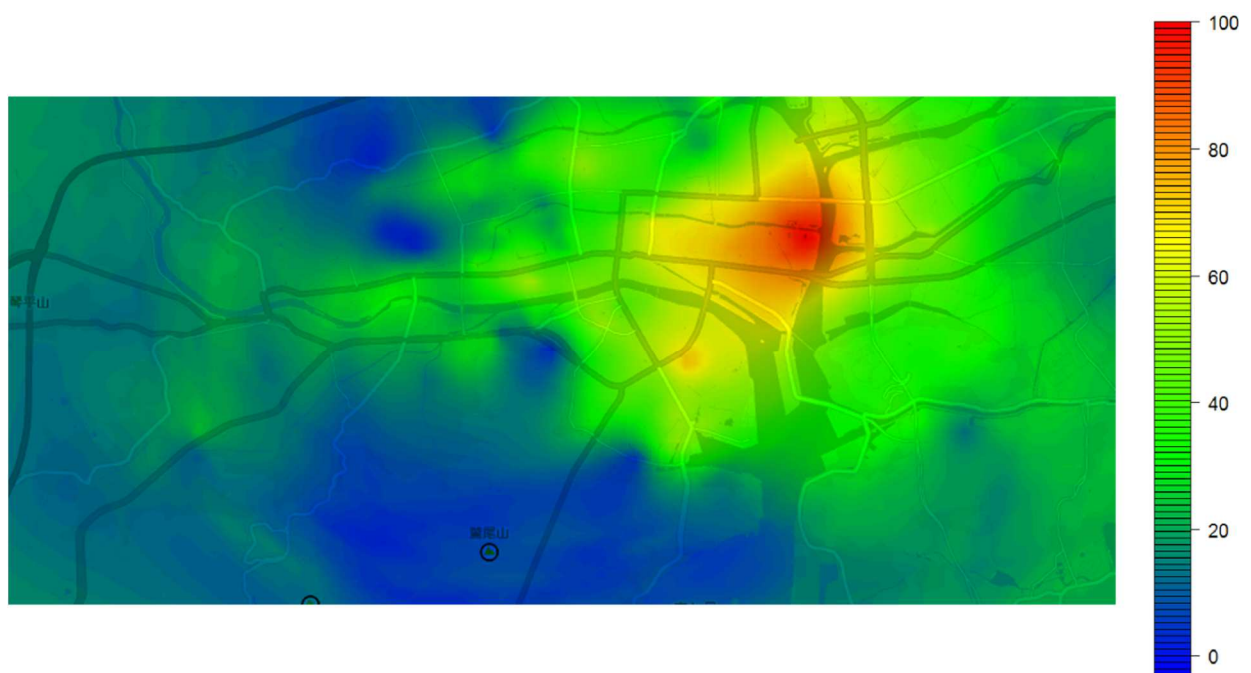


図-9 通常クリギング（完新統厚さ+更新統厚さ）による基盤岩推定結果.
(Google map ©2014 Google,ZENRIN に加筆)

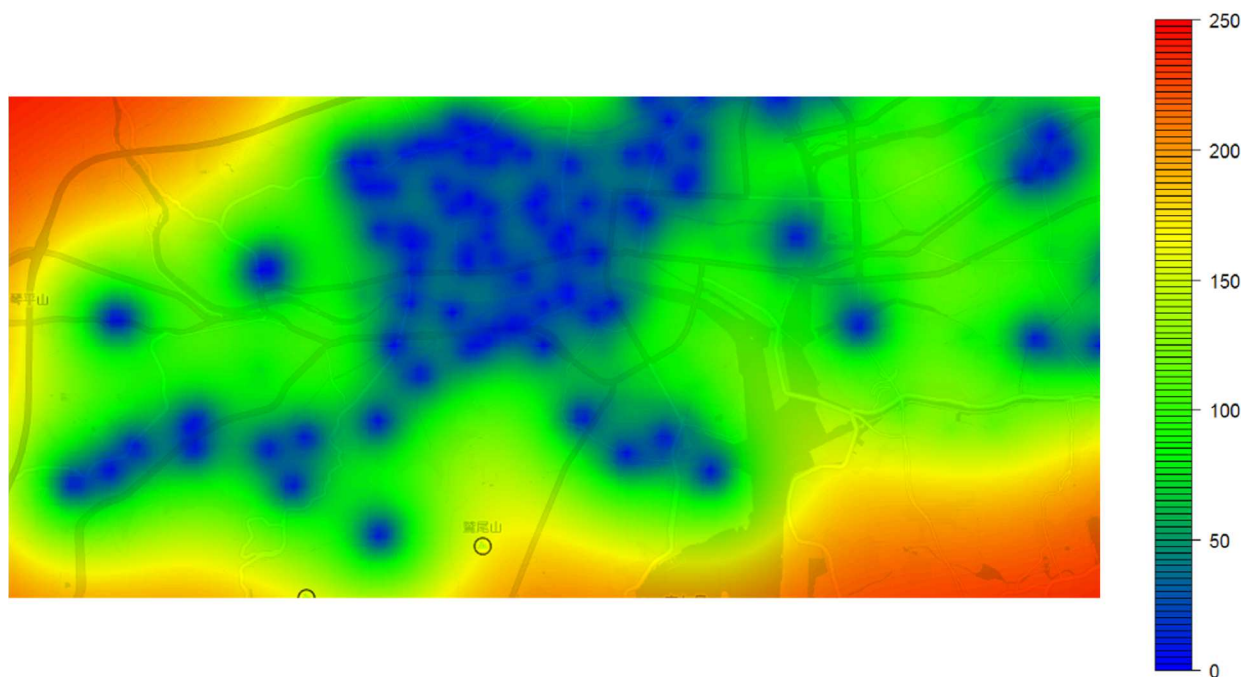


図-10 通常クリギング（完新統厚さ+更新統厚さ）による基盤岩推定の誤差分散.
(Google map ©2014 Google,ZENRIN に加筆)

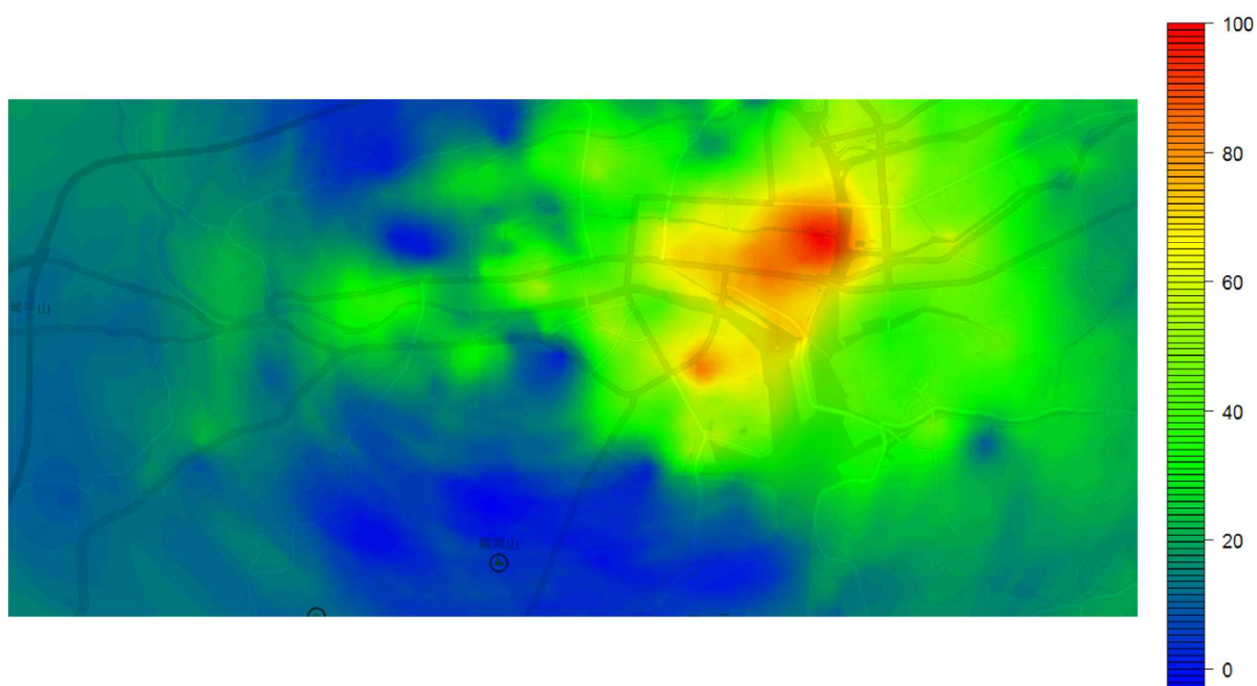


図-11 通常コクリギング（完新統厚さ+更新統厚さ）による基盤岩深度推定結果
(Google map ©2014 Google,ZENRIN に加筆)

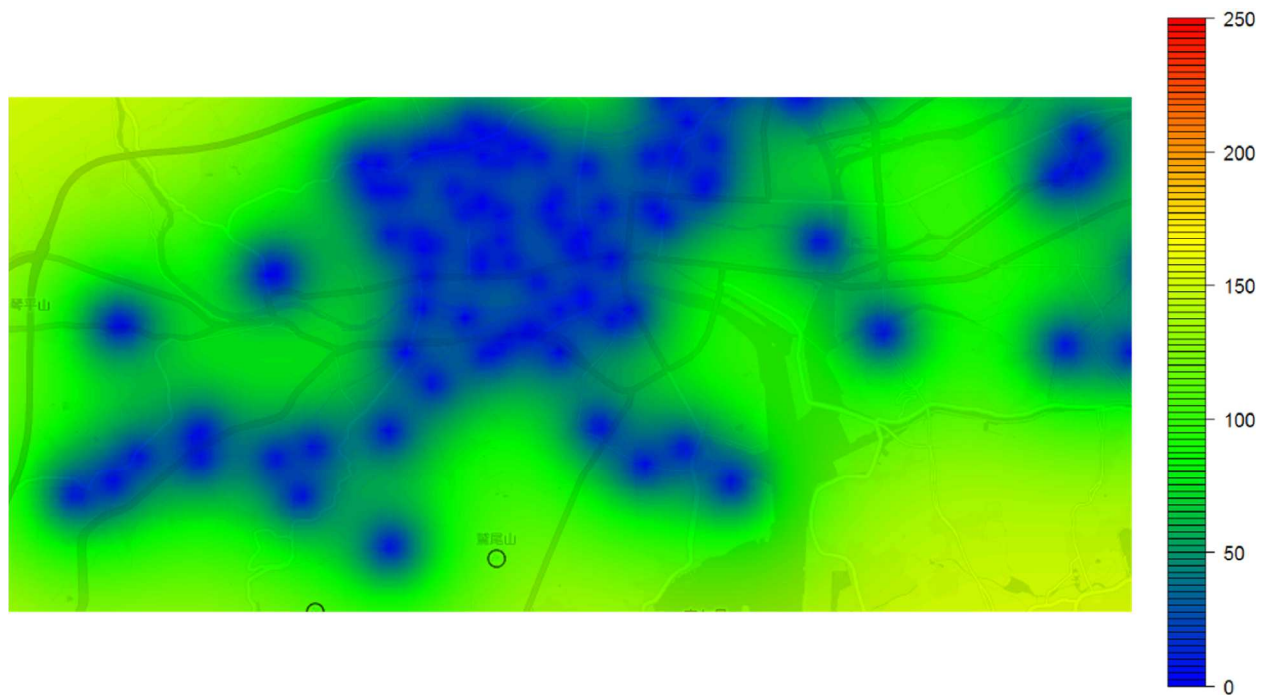


図-12 通常コクリギング（完新統厚さ+更新統厚さ）による基盤岩深度推定の誤差分散
(Google map ©2014 Google, ZENRIN に加筆)

5. まとめ

高知市中心部の基盤岩深度推定するために、ボーリングデータを用いて、通常クリギング、通常コクリギングによる補間を試みた。基盤岩が深くにある地域は、基盤岩深度が得られているボーリングデータが少なく、基盤岩深さをそのまま補完する方法は、あまり良い結果が出なかった。完新統、更新統の各層厚の和をとる方法は、直接基盤岩深さを補間するよりも、高知地盤図や、大堀ら⁹⁾による推定結果と整合するものとなった。

謝辞：本研究では、こうち地盤情報公開サイトにて公開されているボーリングデータを利用させていただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省: 国土地盤情報検索サイト, KuniJiban, <http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/>, (2014年9月3日閲覧)
- 2) 小嶋 啓介, 鈴木 大輔: 常時微動観測と地盤統計手法に基づく福井平野の第四期構造の推定, 応用地質, 第46巻, 第1号, pp9-19, 2005.
- 3) 高知地盤図編集委員会: 高知地盤図, 高知県建築設計監理協会, 1992.
- 4) P. Goovaerts: Ordinary Cokriging Revisited, Mathematical Geology, Vol 30, No. 1, 1998.
- 5) 甲藤 次郎, 西 和彦, 平 朝彦, 岡村 真, 中野 隆正: 高知平野地下の第四系ならびに地質災害について. 高知大学学術研究報告 第32巻, 1984.
- 6) 高知地盤情報利用会: こうち公開サイト, <http://www.geonews.jp/kochi/> (2014年9月3日閲覧)
- 7) Hans Wackernagel 原著, 地球統計学研究委員会 訳編, 青木 謙治 監訳: 地球統計学, 森北出版, 2003.
- 8) 大堀 道弘, キタクセチキン, 中村 武史, 坂上 実, 武村 俊介, 古村 孝志, 武本 帝人, 岩井 一央, 久保 篤規, 川谷 和夫, 田島 佐和, 高橋 成実, 金田 義行: 高知市街地の浅層地盤モデルの構築. 日本地震工学会論文集 第13巻, 第一号, 2013.

ESTIMATION OF BEDROCK DEPTH DISTRIBUTION IN CENTRAL KOCHI CITY WITH THE AID OF GEOSTATISTICAL METHODS

Jun'ichi TANIGUCHI, Atsushi MIKAMI

For the evaluation of dynamic characteristics of surface soil deposit, it is necessary to estimate spatial distribution of bedrock depth from the surface. This study estimates the spatial distribution of bedrock depth in central Kochi city with the aid of some mathematical interpolation methods. Boring logs available on the web is used for the estimation, however, there is deviation in the distribution of the data. Another issue is that as most of the data was originally obtained for the construction purpose of public works, soil profiles are mostly available only to the bottom of alluvium. Hence, it is difficult to estimate bedrock depth in the area where bedrock depth is much deeper than alluvium bottom. This study proposes a method of estimating spatial distribution of bedrock depth with the aid of cokriging technique. Obtained results are similar to the results obtained by a previous research.