JAEA-Data/Code
2012-023

クリギングに基づく放射能分布推定プログラム ESRAD の開発

—使用手引—

Development of ESRAD Program for Estimation of Spatial Radioactivity Distribution Based on Kriging

- User's Manual -

石神 努　向井 雅之　助川 武則　松原 武史

Tsutomu ISHIGAMI, Masayuki MUKAI, Takenori SUKEGAWA and Takeshi MATSUBARA

安全研究センター
サイクル施設等安全研究ユニット

Fuel Cycle Safety Research Unit
Nuclear Safety Research Center

November 2012

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構　研究技術情報部　研究技術情報課
〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

JAEA-Data/Code 2012-023

クリギングに基づく放射能分布推定プログラム ESRAD の開発
—使用手引—

日本原子力研究開発機構　安全研究センター　サイクル施設等安全研究ユニット
石神　努、向井　雅之、助川　武則、松原　武史*

(2012 年 8 月 27 日　受理)

原子力施設の廃止措置終了を確認する上でサイト解放に係る検認作業が必要となる。この検認作業では、測定によって放射能濃度が基準値以下であることを確認することが想定される。そこでは、なるべく合理的な測定・検認を実施するために、対象領域からの標本データを用いて領域全体の空間的放射能分布を推定・評価することが重要である。この空間的放射能分布の推定・評価に、地球統計学の中心的手法であるクリギングを適用し、放射能分布推定プログラム ESRAD: **E**stimation of **S**patial **R**adio**A**ctivity **D**istribution）を開発した。ESRAD は、標本地点抽出を支援する機能、クリギングにおいて重要な役割を担うバリオグラムに関する物理量を計算する機能、およびクリギング方程式を解き評価対象領域の空間的放射能分布を推定する機能を有している。

本報告書は、クリギングの手法の概要、ESRAD の構成と機能、入力ファイルの仕様と出力例、プログラムの実行方法およびサンプルランについてまとめたものである。

原子力科学研究所(駐在)：〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4
＊ (株)ヴィジブルインフォメーションセンター

JAEA-Data/Code 2012-023

Development of ESRAD Program for Estimation of Spatial Radioactivity Distribution Based on Kriging
- User's Manual -

Tsutomu ISHIGAMI, Masayuki MUKAI, Takenori SUKEGAWA,
and Takeshi MATSUBARA*

Fuel Cycle Safety Research Unit, Nuclear Safety Research Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 27, 2012)

Verification for site release is needed to confirm termination of decommissioning of nuclear installations. In carrying out the verification, it is supposed to be confirmed that the radioactive concentration at the site is lower than the criterion value by measurement. To perform rational measurement and verification it is important to estimate and evaluate spatial radioactivity distribution in the whole area of evaluation by using sample data from the area. We have applied the Kriging technique which is one of the most powerful methods in the geostatistics to estimation and evaluation of the spatial radioactivity distribution, and developed the ESRAD program (**E**stimation of **S**patial **R**adio**A**ctivity **D**istribution). The ESRAD program has functions of supporting sample selection, calculating physical quantities relating to variogram which has a key role in Kriging, and estimating a spatial radioactivity distribution for the area of evaluation by solving Kriging equation.

This report describes outline of the Kriging technique, structure and functions of ESRAD, input file format, output examples, and execution procedure of ERSAR, and sample run with ESRAD.

Keywords: Site Release, Measurement and Verification, Kriging, Variogram, Decommissioning, ESRAD

---

* Visible Information Center, Inc.

目　次

1　はじめに ---------- 1
2　クリギング ---------- 3
2.1 概要 ---------- 3
2.2 バリオグラムモデル ---------- 5
2.3 通常型クリギング ---------- 8
3　放射能分布推定プログラムの構成と機能 ---------- 10
3.1 構成 ---------- 10
3.2 機能 ---------- 13
4　入力仕様と出力例 ---------- 16
4.1 入力ファイル仕様 ---------- 16
4.2 出力例 ---------- 26
5　実行方法 ---------- 44
5.1 ディレクトリとファイルの構成 ---------- 44
5.2 標本抽出コードの実行方法 ---------- 49
5.3 バリオグラム計算コードの実行方法 ---------- 61
5.4 クリギング計算コードの実行方法 ---------- 64
5.5 利用上の留意点 ---------- 65
6　サンプルラン ---------- 66
7　おわりに ---------- 78
謝辞 ---------- 78
参考文献 ---------- 79
付録 1　Nelder-Mead 法を用いたバリオグラムモデルのパラメータ値の決定方法 ---------- 80

Contents

1 Introduction ---- 1
2 Kriging ---- 3
2.1 Outline ---- 3
2.2 Variogram model ---- 5
2.3 Ordinary kriging ---- 8
3 Structure and Function of ESRAD ---- 10
3.1 Structure ---- 10
3.2 Function ---- 13
4 Specifications of Input and Output ---- 16
4.1 Input file specification ---- 16
4.2 Example of output data ---- 26
5 Methods of Program Execution ---- 44
5.1 Structure of directories and files ---- 44
5.2 Method of the sampling code execution ---- 49
5.3 Method of the variogram calculation code execution ---- 61
5.4 Method of the kriging calculation code execution ---- 64
5.5 Notes on use ---- 65
6 Sample Run ---- 66
7 Concluding Remarks ---- 78
Acknowledgements ---- 78
References ---- 79
Appendix 1 Method for determining parameter values in a variogram model with the Nelder-Mead Method ---- 80

表リスト

表 3.1　計算コードとファイルの概要 11
表 5.1　krig_system ディレクトリ内のファイル一覧 45
表 5.2　bin ディレクトリ内のファイル一覧 45
表 5.3　dat ディレクトリ内のファイル一覧 46
表 5.4　inp ディレクトリ内のファイル一覧 46
表 5.5　out ディレクトリ内のファイル一覧 46
表 5.6　scripts ディレクトリ内のファイル一覧 48
表 6.1　標本抽出コードへの入力ファイル 68
表 6.2　バリオグラム計算コードへの主な入力データ 68
表 6.3　バリオグラム計算コードへの入力ファイル 69
表 6.4　クリギング計算コードへの主な入力データ 70
表 6.5　クリギング計算コードへの入力ファイル 71
表 6.6　標本バリオグラムの計算結果 72
表 6.7　バリオグラムモデルに係るパラメータの計算結果 72
表 6.8　^{137}Cs の計数率(cps)のパーセンタイル値 72
表 6.9　測定地点における測定値と推定値の比較 73

図リスト

図 2.1　標本地点のデータによる任意の評価対象地点の値の推定 5
図 2.2　バリオグラム雲の概念図 7
図 2.3　バリオグラムを距離 h の関数で近似するときの概念図 7
図 3.1　放射能分布推定プログラムの構成 12
図 4.1　評価領域とメッシュ、標本地点、評価地点の概念図 19
図 4.2　バリオグラム雲、標本バリオグラムおよびバリオグラムモデルの出力例 31
図 4.3　放射能情報推定値の分布図表示例 40
図 4.4　放射能情報推定値+1σの分布図表示例 40
図 4.5　放射能情報推定値+2σの分布図表示例 41
図 4.6　放射能情報推定値+3σの分布図表示例 41
図 4.7　放射能情報推定標準偏差の分布図表示例 42
図 4.8　確率密度関数のグラフ表示例 43
図 4.9　累積分布関数のグラフ表示例 43
図 5.1　ディレクトリ構成 44
図 5.2　標本抽出コードのメイン画面 49

図 5.3　標本抽出コードの画面構成 50
図 5.4　領域設定画面(例) 51
図 5.5　評価領域が設定されたメイン画面(例) 51
図 5.6　放射能情報データファイル選択ダイアログ(例) 52
図 5.7　放射能情報データをロードしたメイン画面(例) 53
図 5.8　評価領域ファイル選択確認ダイアログ 53
図 5.9　評価領域指定ファイル選択ダイアログ(例) 54
図 5.10　現在開いている評価領域への上書き確認ダイアログ 54
図 5.11　無作為抽出設定画面(例) 55
図 5.12　無作為抽出法による標本地点の選定結果を表示したメイン画面(例) 56
図 5.13　標本地点にデータを入力した例 56
図 5.14　LHS 出力ファイル選択ダイアログ 57
図 5.15　LHS 法によって抽出された標本地点の表示画面(例) 57
図 5.16　選択タブを開いたメイン画面(例) 58
図 5.17　無作為抽出設定画面(例) 59
図 5.18　無作為抽出された標本データの画面(例) 59
図 5.19　保存設定画面(例) 60
図 5.20　ディレクトリ選択ダイアログ 61
図 5.21　cmd 起動画面(モザイクはシステムのユーザー名) 62
図 5.22　カレントディレクトリの移動(例) 63
図 6.1　^{137}Cs の放射線測定値(計数率，単位: cps) 74
図 6.2　バリオグラム雲、標本バリオグラムおよびバリオグラムモデル 74
図 6.3　^{137}Cs の計数率(cps)の分布図(推定結果) 75
図 6.4　^{137}Cs の計数率(cps)推定値に対する推定標準偏差の分布図 76
図 6.5　^{137}Cs の計数率(cps)の確率密度関数(ヒストグラム) 77
図 6.6　^{137}Cs の計数率(cps)の累積分布関数 77

List of Tables

Table 3.1 Outline of computer codes and files ---- 11
Table 5.1 List of files contained in the krig_system directory ---- 45
Table 5.2 List of files contained in the bin directory ---- 45
Table 5.3 List of files contained in the dat directory ---- 46
Table 5.4 List of files contained in the inp directory ---- 46
Table 5.5 List of files contained in the out directory ---- 46
Table 5.6 List of files contained in the scripts directory ---- 48
Table 6.1 Input file to the sampling code ---- 68
Table 6.2 Main input data to the variogram calculation code ---- 68
Table 6.3 Input file to the variogram calculation code ---- 69
Table 6.4 Main input data to the kriging calculation code ---- 70
Table 6.5 Input file to the kriging calculation code ---- 71
Table 6.6 Calculated results of experimental variogram ---- 72
Table 6.7 Calculated results of parameters in the variogram model ---- 72
Table 6.8 Percentile of ^{137}Cs count rate (cps) ---- 72
Table 6.9 Comparison of measurement value and estimated value at measurement point ---- 73

List of Figures

Fig. 2.1 Estimation of physical quantity at an arbitrary point using data at sampling points ---- 5
Fig. 2.2 Concept of variogram cloud ---- 7
Fig. 2.3 Concept of a variogram model approximated with a function of distance *h* ---- 7
Fig. 3.1 Structure of ESRAD ---- 12
Fig. 4.1 Concept of evaluation area, mesh, sampling point and evaluation point ---- 19
Fig. 4.2 Output example of variogram cloud, experimental variogram, and Variogram model ---- 31
Fig. 4.3 Display example of radioactivity distribution (estimated value) ---- 40
Fig. 4.4 Display example of radioactivity distribution (estimated value +1 σ) ---- 40
Fig. 4.5 Display example of radioactivity distribution (estimated value +2 σ) ---- 41
Fig. 4.6 Display example of radioactivity distribution (estimated value +3 σ) ---- 41
Fig. 4.7 Display example of estimated standard deviation distribution of radioactivity ---- 42
Fig. 4.8 Graphical display example of probability density function ---- 43

Fig. 4.9 Graphical display example of cumulative distribution function 43
Fig. 5.1 Structure of directory 44
Fig. 5.2 Main screen of the sampling code 49
Fig. 5.3 Structure of screen of the sampling code 50
Fig. 5.4 Screen for determining area (example) 51
Fig. 5.5 Main screen with evaluation area determined (example) 51
Fig. 5.6 Dialog box for selecting a radioactivity information data file (example) 52
Fig. 5.7 Main screen where radioactivity information data are loaded (example) 53
Fig. 5.8 Dialog box for confirming and selecting evaluation area 53
Fig. 5.9 Dialog box for selecting an evaluation area specification file (example) 54
Fig. 5.10 Dialog box for updating and confirming the current evaluation area 54
Fig. 5.11 Screen for determining parameter values for random sampling (example) 55
Fig. 5.12 Main screen displaying sampling points selected with random sampling method (example) 56
Fig. 5.13 Example of data input at sampling points 56
Fig. 5.14 Dialog box for selecting LHS output file 57
Fig. 5.15 Display screen of selected sampling points with the LHS method57 (example) 57
Fig. 5.16 Main screen with selection tab opened (example) 58
Fig. 5.17 Screen for determining parameter values for random sampling (example) 59
Fig. 5.18 Example of sample data selected with random sampling method (example) 59
Fig. 5.19 Screen for storing data (example) 60
Fig. 5.20 Dialog box for selecting directory 61
Fig. 5.21 “cmd” start screen (mosaic denotes user’s name of the computer system) 62
Fig. 5.22 Migration of current directory (example) 63
Fig. 6.1 Radiation measurement value of ^{137}Cs (count rate in cps) 74
Fig. 6.2 Variogram cloud, experimental variogram and variogram model 74
Fig. 6.3 Distribution of estimated ^{137}Cs count rate (cps) 75
Fig. 6.4 Distribution of estimation standard deviation of estimated ^{137}Cs count rate (cps) 76
Fig. 6.5 Probability density function of ^{137}Cs count rate (cps) 77
Fig. 6.6 Cumulative distribution function of ^{137}Cs count rate (cps) 77

1　はじめに

我が国で商業用原子力発電所の運転が開始されてから既に 45 年を超え、いくつかの老朽化した発電所については廃止措置が実施されている。これにともない、廃止措置終了の確認の具体的な方法についての必要性が認識され、その検討も開始されている [1),2)]。廃止措置終了確認の基準の 1 つに、「廃止措置対象施設の敷地に係る土壌および当該敷地に残存する施設について放射線による障害の防止の措置を必要としない状況にあること」[3)]があり、これに関連して「サイト解放」に係る放射能濃度の基準値の設定、具体的な解放手順および検認の整備という課題がある。ここで、サイト解放とは、「原子力施設の廃止措置の終了後に、放射性物質の汚染による影響等がないことを確認した上で、敷地及び建屋に対する原子力の安全規制を解除すること」[1)]である（ここでは、土地や建物およびその他の構造物を「サイト」と呼ぶ）。サイト解放を行うには、敷地及び建屋に残存する放射能濃度が基準値以下であることを放射線測定によって評価・確認することが必要と考えられる。その際、対象とするサイトの領域が広い場合、幾つかの代表地点に対して測定を行うという標本抽出（サンプリング）の方法を用いて、なるべく合理的な測定と検認の方法を計画することが重要となる。

サイト解放に係る手順・検認について、米国では MARSSIM[4)]というマニュアルが開発され、米国の幾つかのサイト解放において同マニュアルが用いられた実績がある。MARSSIM では、最終状況サーベイにおける測定のために標本抽出の方法を用いて測定地点を設定し、そこでの放射能濃度を用いて評価対象領域の平均放射能濃度が評価され、サイト解放の判定がなされる。汚染濃度の高い領域が判明した場合には、その領域に対してさらに測定地点を増やして測定がなされるものの、標本地点以外を含む全評価対象領域の放射能濃度分布の推定・評価はなされない。全評価対象領域の放射能濃度等の分布を推定・評価するために、フランスでは地球統計学の中心的手法であるクリギングを適用した検討がなされている [5)]。

このような背景の下、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）安全研究センターでは、廃止措置開始からサイト解放に至るまでの一連の廃止措置に係る安全性を総合的に評価する「廃止措置安全評価コードシステム（DecAssess）」の整備を進めており、この一環としてサイト解放に係る安全評価手法の検討を開始した。この中で、サイト解放に係る検認では、建屋または敷地における放射能濃度等を、安全の観点から保守的に、またコストの観点から効率的に評価することが必要である。このためには、対象とする評価領域の中から幾つかの試料を採取し、または幾つかの代表地点を選定し(標本抽出)、その測定値を基に当該評価領域の放射能濃度等を推定する計算プログラムを開発することが有用である。クリギングでは、標本抽出で得られたデータ（標本データ)をもとに、標本地点以外の地点での放射能濃度等を推定するとともに推定結果に含まれる不確かさ(推定誤差)を、すなわち、全評価対象領域の空間的放射能濃度等の分布とその推定誤差を計算することができる。従って、サイト解放に係る標本抽出に基づく評価方法を検討する上でこのクリギングの手法を計算プログラムとして整備することが有意義であると判断し、クリギングに基づく放射能分布推定プログラム（以下、放射能分布推定プログラム ESRAD: **E**stimation of **S**patial **R**adio**A**ctivity **D**istribution）を開発した。

本報告書では、2 章でクリギングの手法の概要、3 章で本プログラムの構成と機能、4 章で入

力ファイルの仕様と出力例、5 章で本プログラムの実行方法、そして 6 章でサンプルランについて述べる。

2　クリギング

2.1　概要

クリギングは、1950 年代初頭の鉱山業界において鉱物資源埋蔵量（鉱量）の算出法を改善する目的で南アフリカの技師 D.G.Krige と統計学者の H.S.Sichel が提案した手法に始まる。その後 1950 年代の後半に G.Matheron がその概念を発展させ技術の体系化を図り、その手法をクリギングと名付けた。鉱山学の分野では、例えば次のような問題を扱うことが重要となる。すなわち、対象とする領域において鉱量がどのように分布しているかを把握するために、まず幾つかの代表点を採掘して標本調査することになる。このとき、領域内の全ての点を調査することは経済的に不可能であることから、なるべく少数の標本地点をもとに、対象領域全体における鉱量の分布を推定することが重要である。クリギングは、近距離間のデータは類似性が高いという空間的な相関を考慮して、ある領域において観測された幾つかの地点でのデータを基に任意の地点での値を推定する空間の線形回帰法である。

このようにクリギングの手法は元々､鉱量の算出を目的に開発･発展してきたものであるが、今日では、空間的あるいは時間的に相関のあるデータの定量評価が必要な科学・工学の種々の分野で適用されている。ここで、鉱量を放射能に係る情報(放射能濃度、放射線計数率等、以下放射能情報という)に置き換えて考えると､放射能情報も空間的な相関性を有すると考えられる（例えば､2 点間の距離が近いほど両地点の放射能濃度は近い値になると予想される)。そこで、標本調査に基づく鉱量の算出とサイト解放における最終状況サーベイで実施される代表地点の測定結果に基づく放射能濃度の評価は類似の問題を扱うことになる。

上記に鑑み、サイト解放に係る空間的放射能濃度等の分布（以下、放射能分布）の推定のためにクリギングを適用することとした。クリギングの基本的な考え方は次のとおりである[6),7)]。

いま、ある領域(以下、2 次元の場合を考える)において、幾つかの標本地点 $(\mathbf{x}_\alpha, \alpha = 1, 2, \cdots, n)$ におけるある物理量を表す変数 $Z(\mathbf{x}_\alpha)$[1]の値 $z(\mathbf{x}_\alpha)$[2]（例えば放射線計数率、放射能濃度等の実測値、以下、標本データという)が得られているとする。このとき、任意の点 $\mathbf{x}_0$ での値 $z(\mathbf{x}_0)$ を標本データ $z(\mathbf{x}_\alpha)$ を用いて推定するという問題を考える(図 2.1)。クリギングでは、空間の線形回帰法の考え方に基づいて物理量を表す変数 $Z(\mathbf{x}_0)$ を次式で定義される変数 $Z^*(\mathbf{x}_0)$ で近似する。

$$Z^*(\mathbf{x}_0) = \sum_{\alpha=1}^{n} w_\alpha Z(\mathbf{x}_\alpha) \tag{2.1}$$

ここに、w_α は重みを表す係数である。この係数を求めるためのクリギングにおけるアプローチは次のとおりである。

まず、基本的考え方として、クリギングでは点 $\mathbf{x}_0$、$\mathbf{x}_\alpha$ における変数 $Z(\mathbf{x}_0)$、$Z(\mathbf{x}_\alpha)$ を確率変

---

[1] 問題としている物理量を（確率）変数で示すときは大文字で表示する。
[2] 変数の値を示すときは小文字で表示する。

数として扱う。また、確率変数$Z(\mathbf{x}_0)$等は、当該領域の任意の点$\mathbf{x}$で定義される確率場$Z(\mathbf{x})$（これは、確率変数を無限に集めたもの）の部分集合であると仮定する。これは、その物理量の値がある特定の値に本来固定されておらず、ある空間分布を成しているとするものである。実測値は、この分布に従った多くの可能性の中からたまたまある一つの値が確定して実現された値、すなわち確率場からの実現値とみなす。

クリギングでは、この確率場$Z(\mathbf{x})$に対して2次定常性という仮定を設ける。2次定常性とは、任意の2点の組が、互いの相対的位置関係を保ったまま他の部分に移動しても特徴が不変である(移動不変)、すなわち、期待値と共分散関数がともに移動不変であることを意味する。具体的には、次の1)と2)が成立することを仮定する。

1) 当該領域の任意の点$\mathbf{x}$において$Z(\mathbf{x})$の平均が存在し、その値は場所に依らずに一定である。

$$E[Z(\mathbf{x})] = m \tag{2.2}$$

ここに、$E[*]$は、$*$の平均を意味する。

2) 点$\mathbf{x}$と$\mathbf{x}+\mathbf{h}$における$Z(\mathbf{x})$と$Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})$の間に共分散関数が存在し、それは2点間のベクトル$\mathbf{h}$のみに依存する。

$$C(\mathbf{h}) = \mathrm{cov}[Z(\mathbf{x}), Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})] = E[Z(\mathbf{x})\cdot Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})] - m^2 \tag{2.3}$$

ここに、$\mathrm{cov}[Z(\mathbf{x}), Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})]$は$Z(\mathbf{x})$と$Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})$の間の共分散関数を意味する。

また、クリギングでは$Z(\mathbf{x})$の空間変動を記述する$Z(\mathbf{x})-Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})$に対して、固有定常性を仮定する。固有定常性とは、対をなす2点間の確率場の差分値に対して1次および2次モーメントの定常性を仮定することである。具体的には、(2.4)、(2.5)式が成立すると仮定する。

$$E[Z(\mathbf{x})-Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})] = 0 \tag{2.4}$$

$$\mathrm{var}[Z(\mathbf{x})-Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})] = 2\gamma(\mathbf{h}) \tag{2.5}$$

この固有定常性の仮定はバリオグラムの概念を導く重要な性質である。(2.5)式から、次式で定義される量が導入される。

$$\gamma(\mathbf{h}) = E[\{Z(\mathbf{x})-Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})\}^2]/2 \tag{2.6}$$

この$\gamma(\mathbf{h})$はバリオグラムと呼ばれ、共分散関数と次式で関係づけられる。

$$\gamma(\mathbf{h}) = C(\mathbf{0}) - C(\mathbf{h}) \tag{2.7}$$

バリオグラムはこのままでは求められないため、実際の計算では標本データを用いて近似的にバリオグラムモデルを求めることになる(2.2参照)。

近似として(2.1)式で導入された変数$Z^*(\mathbf{x}_0)$は、確率変数$Z(\mathbf{x}_\alpha)$の一次結合として表されおり、

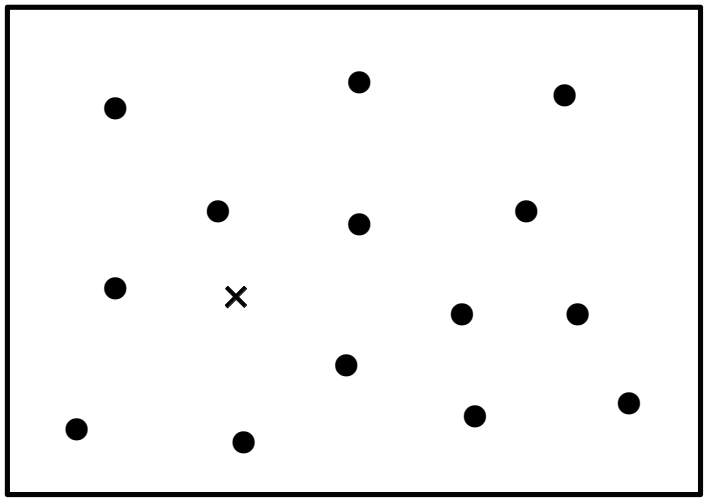
確率変数となる。このとき、係数w_αは近似した確率変数$Z^*(\mathbf{x}_0)$と元の確率変数$Z(\mathbf{x})$の差の 2

乗の平均(期待値)を最小とするように決定される(詳細は、2.3)。

係数が求まれば、点 $\mathbf{x}_0$ での確率変数 $Z(\mathbf{x}_0)$ の値 $z(\mathbf{x}_0)$ は、(2.1)式に対応した次式から得られる。

$$z^*(\mathbf{x}_0) = \sum_{\alpha=1}^{n} w_\alpha z(\mathbf{x}_\alpha) \tag{2.8}$$

以下では、2.2 でバリオグラムモデルの求め方や性質について述べ、2.3 で上記の係数 w_α を決定する具体的方法について述べる。



●:標本地点　　×:評価対象地点

図 2.1　標本地点のデータによる任意の評価対象地点の値の推定

2.2　バリオグラムモデル

(2.6)式で定義されたバリオグラムを求めるためには、確率場 $Z(\mathbf{x})$ についての正確な統計情報が必要であるが、その情報を予め得ることはできない。そこで、まず標本データを用いて、点 $\mathbf{x}_\alpha$ と点 $\mathbf{x}_\beta = \mathbf{x}_\alpha + \mathbf{h}$ での $z(\mathbf{x}_\alpha)$ と $z(\mathbf{x}_\beta)$ の非類似度を次式で導入する。

$$\hat{\gamma}(\mathbf{x}_\alpha, \mathbf{h}) = \{z(\mathbf{x}_\alpha + \mathbf{h}) - z(\mathbf{x}_\alpha)\}^2 / 2 \tag{2.9}$$

横軸に標本地点間の距離 h、縦軸に上記の非類似度をプロットしたときの概念図を図 2.2 に示す。このプロットされた点の集合はバリオグラム雲と呼ばれ、距離が大きくなるにつれて非類似度が大きくなることが多い。このバリオグラム雲のデータを基に各標本地点間の位置ベクトル $\mathbf{h}$ をその大きさと方向でクラス分けし、クラスごとに非類似度の平均値を求めて、次式で定義される標本バリオグラムを導入する。

$$\gamma^*(\mathbf{h}_j) = \frac{1}{2N(\mathbf{h}_j)} \sum_{\alpha=1}^{N(\mathbf{h}_j)} \{z(\mathbf{x}_\alpha + \mathbf{h}) - z(\mathbf{x}_\alpha)\}^2 \tag{2.10}$$

ここに、$\mathbf{h}_j$ はクラス j に属する代表的な位置ベクトル、$N(\mathbf{h}_j)$ はクラス j に含まれるペアの数を表し、右辺の和は標本データ間の位置ベクトル $\mathbf{h}$ がクラス j に含まれるペアのみを対象とする。各標本地点間の位置ベクトル $\mathbf{h}$ をクラスで分類する際は、まず方向でクラス分けし、次に方向が同じクラスに属する標本地点を距離でクラス分けする。なお、方向依存性が小さく等方性が成立する場合は、単に距離だけでクラス分けすることができる。

この標本バリオグラムに基づいてバリオグラムモデルが構築される。バリオグラムモデルは、標本バリオグラムに対してさまざまな関数形を当てはめたものである。いま、等方性が成立するとした場合、その関数は距離 $(h = |\mathbf{h}|)$ の関数として図 2.3 に示すような形状で表わされ、次の性質がある。距離 $h = 0$ では 0 であるが、$h = 0$ に向かって外挿していくと原点に収束せず、切片となる値をとる場合がある。この値はナゲット効果とよばれる。また、ある距離以上になるとデータ間の相関がなくなり、一定の値（$Z(\mathbf{x})$ の分散）に近づく。この一定の値となる最小の距離はレンジ、一定の値はシルと呼ばれる。バリオグラムモデルは、バリオグラムをこのような関数としてモデル化したものであり、次式で表わされる。

$$\gamma_T(h,a,b,c) = c + b \cdot g(h,a) \qquad (a, b, c \text{ はパラメータ}) \tag{2.11}$$

ここに、関数 $g(h,a)$ について例えば次の 4 種類が提案されている。

a) ナゲット効果型モデル

$$\begin{aligned} g(h,a) &= 0 \qquad h = 0 \\ &= 1 \qquad h > 0 \end{aligned} \tag{2.12}$$

b) 指数型モデル

$$g(h,a) = 1 - \exp(-h/a) \tag{2.13}$$

c) 球型モデル

$$\begin{aligned} g(h,a) &= 3/2 \times (h/a) - 1/2 \times (h/a)^3 \qquad h \le a \\ &= 1 \qquad h > a \end{aligned} \tag{2.14}$$

d) ガウス型モデル

$$g(h,a) = 1 - \exp(-h^2/a^2) \tag{2.15}$$

ここに、レンジ、シル、およびナゲット効果は、それぞれ a、$b+c$、および c である。

バリオグラムモデルを確定するためには、これらのパラメータの値を設定する必要がある。設定方法については、3.2(2)で述べる。

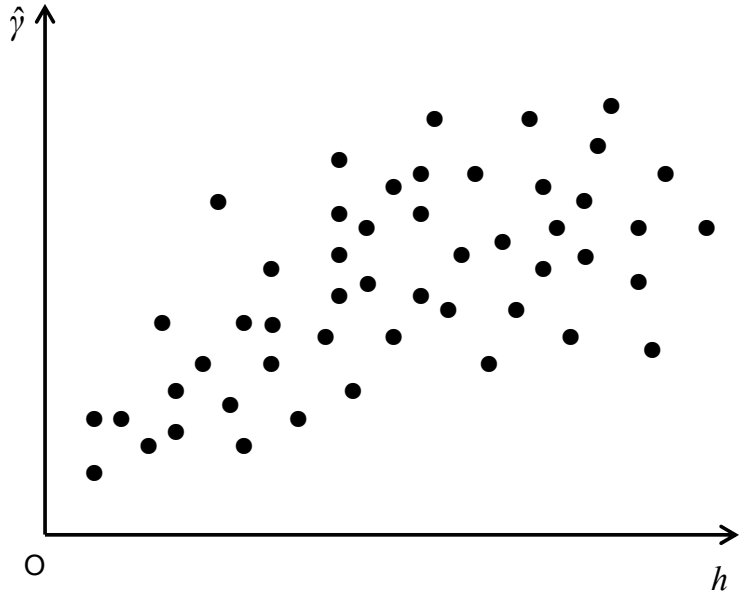


図 2.2　バリオグラム雲の概念図

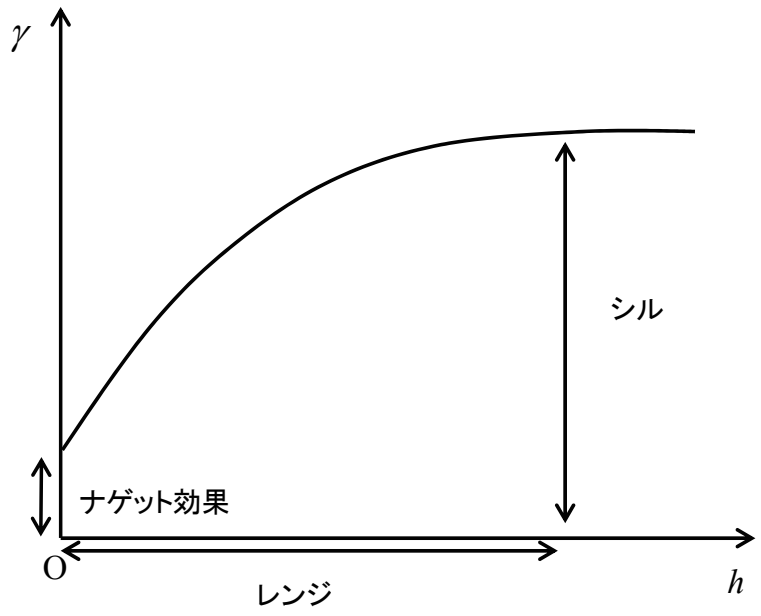


図 2.3　バリオグラムを距離 h の関数で近似するときの概念図

2.3　通常型クリギング

クリギングには幾つかの計算手法が開発されているが、その中で最も利用度が高い手法の 1 つとされている通常型クリギングを適用することとした。通常型クリギングでは、確率変数 $Z(\mathbf{x}_0)$ を近似した(2.1)式における重み係数 w_α に対して以下の制約条件を置く。

$$\sum_{\alpha=1}^{n} w_\alpha = 1 \tag{2.16}$$

このとき、2 次定常性の 1)により次式が成立する。

$$\begin{aligned} E[Z^*(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)] &= E[\sum_{\alpha=1}^{n} w_\alpha Z(\mathbf{x}_\alpha) - Z(\mathbf{x}_0)] \\ &= \sum_{\alpha=1}^{n} w_\alpha E[Z(\mathbf{x}_\alpha) - Z(\mathbf{x}_0)] = 0 \end{aligned} \tag{2.17}$$

すなわち、近似した確率変数 $Z^*(\mathbf{x}_0)$ と元の確率変数 $Z(\mathbf{x}_0)$ の平均値は一致することが保証される。次に、$Z^*(\mathbf{x}_0)$ と $Z(\mathbf{x}_0)$ の差（推定誤差）の分散（以下、推定分散）を考える。

$$\begin{aligned} \sigma_E{}^2 &= \mathrm{var}(Z^*(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)) \\ &= E[\{Z^*(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)\}^2] \\ &= E[\left\{\sum_{\alpha=1}^{n} w_\alpha Z(\mathbf{x}_\alpha) - Z(\mathbf{x}_0)\right\}^2] \\ &= -\gamma(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_0) - \sum_{\alpha,\beta=1}^{n} w_\alpha w_\beta \gamma(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_\beta) + 2\sum_{\alpha=1}^{n} w_\alpha \gamma(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_0) \end{aligned} \tag{2.18}$$

ここに、var(＊)は＊の分散を表す。この推定分散を(2.16)式の条件のもとに最小にするという要請を課すと、ラグランジュの未定乗数法により、$(n+1)$ 個の未知数を含む次の連立 1 次方程式（以下、クリギング方程式）が得られる。

$$\sum_{\beta=1}^{n} w_\beta \gamma(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_\beta) + \mu = \gamma(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_0) \qquad (\alpha = 1, 2, \cdots, n) \tag{2.19}$$

$$\sum_{\alpha=1}^{n} w_\alpha = 1 \tag{2.20}$$

ここに、μ はラグランジュの未定乗数である。また、点 $\mathbf{x}_0$ での推定分散 $\sigma_{OK}{}^2$ は、上式の解 w_α^{OK} と μ_{OK} を用いて次式で与えられる。

$$\sigma_{OK}{}^2 = \mu_{OK} - \gamma(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_0) + \sum_{\alpha=1}^{n} w_\alpha^{OK} \gamma(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_0) \tag{2.21}$$

なお、(2.19)式および(2.20)式をマトリックス形式で書くと

$$\begin{bmatrix} \mathbf{\Gamma} & \mathbf{1} \\ \mathbf{1}^t & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w} \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\gamma} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2.22}$$

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} \gamma(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_1) & \gamma(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2) & \cdots & \gamma(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \gamma(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_1) & \gamma(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_2) & \cdots & \gamma(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_n) \end{bmatrix} \tag{2.23}$$

$$\mathbf{w}=\begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix},\quad \mathbf{1}=\begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix},\quad \boldsymbol{\gamma}=\begin{bmatrix} \gamma(\mathbf{x}_1-\mathbf{x}_0) \\ \vdots \\ \gamma(\mathbf{x}_n-\mathbf{x}_0) \end{bmatrix} \tag{2.24}$$

ここに、$\mathbf{1}^t$ は列ベクトル $\mathbf{1}$ を転置した行ベクトルである。（2.22）式から、重み係数 w_α の解は次式で表わされる。

$$\mathbf{w}^{OK}=\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\boldsymbol{\gamma}+\frac{1-\mathbf{1}^t\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\boldsymbol{\gamma}}{\mathbf{1}^t\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\mathbf{1}}\cdot\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\mathbf{1} \tag{2.25}$$

また、このときの推定分散は、次式となる。

$$\sigma_{OK}{}^2=\boldsymbol{\gamma}^t\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\boldsymbol{\gamma}-\frac{(\boldsymbol{\gamma}^t\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\mathbf{1}-1)^2}{\mathbf{1}^t\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\mathbf{1}} \tag{2.26}$$

上記のように、クリギング方程式を決定づけるのはバリオグラムであり、これを精度よく求めることが重要となる。バリオグラムにはバリオグラムモデル((2.11)～(2.15)式）または標本バリオグラムが用いられる。

なお、通常型クリギングでは、推定の対象となる地点 $\mathbf{x}_0$ が標本地点 $\mathbf{x}_\alpha$ と一致する場合、そこでの推定値は標本地点での標本データと一致する。

3　放射能分布推定プログラムの構成と機能

3.1　構成

サイト解放における建屋または敷地の放射能汚染状況を標本抽出によって測定・評価し検認を行う場合、次の作業手順が想定される。

1)　対象領域における標本抽出のための標本数と標本地点の決定
2)　標本地点における放射線測定と測定値の取得
3)　標本地点における放射線測定値（標本データ）に基づく対象領域の放射能分布の推定と評価
4)　3)の評価結果とサイト解放適合基準との比較・検討および解放の判定

上記の手順の中で、放射能分布推定プログラムは1)における標本地点の決定と3)に係る作業を支援するものである。この支援のために本プログラムを利用する際の手順として以下が想定される。

①　対象領域をメッシュで区分した上で標本地点となるメッシュを抽出する。
②　抽出されたメッシュでの標本データを基に標本バリオグラムを求め、バリオグラムモデルを設定する。
③　標本データとバリオグラムモデルを用いてクリギング方程式の解を求め、対象とする全領域の放射能分布を推定する。

本プログラムは、①～③の各手順に対応する標本抽出コード、バリオグラム計算コード、クリギング計算コードに加えて、標本抽出に係るMTコード[8]、各計算コードの出力データを作図するためのアプリケーションソフトウェアであるGNUPLOTコード[9]、そして、これら計算コードへの入出力ファイルから構成される。MTコードは乱数生成にメルセンヌツイスターを利用した標本抽出のための計算コードである。本プログラムの全体構成図を図3.1に、また同図に示した計算コードおよびファイルの概要を表3.1に示す。ここに、クリギング計算コードで入力として必要なバリオグラムモデルに関する情報(バリオグラムモデルの関数形と3つのパラメータ (a, b, c) ）については、ユーザーが⑫の入力ファイルで与えることとしている。

なお、図3.1中のLHSコード[10]は、LHS(Latin Hypercube Sampling)法を用いて標本抽出を行う計算コードであり、本プログラムには含まれない外部の計算コードである。ユーザーは同コードを別途実行し、その出力を本プログラムに入力する必要がある。

表3.1　計算コードとファイルの概要

計算コード		
番号 a)	計算コード名	概要
(1)	標本抽出コード	対象領域から標本地点を抽出するコード
(2)	バリオグラム計算コード	標本バリオグラムおよびバリオグラムモデルに含まれるパラメータの値を計算するコード
(3)	クリギング計算コード	クリギング方程式を解き放射能分布を計算するコード
(4)	LHS コード b)	LHS 法を用いて標本を抽出するコード
(5)	MT コード	標本を無作為に抽出するコード
(6)	GNUPLOT コード	出力データの作図用アプリケーションソフトウェア
ファイル		
番号 a)	ファイル名	概要
①	放射能情報データファイル	標本地点の座標データと標本データを収めたデータファイル
②	評価領域指定ファイル	評価対象領域の範囲とメッシュ分割数を指定するファイル
③	標本抽出済み放射能情報データファイル	①のデータから標本抽出したデータを収めたデータファイル
④	MT 入力ファイル	MT コードへの入力ファイル
⑤	MT 出力ファイル	MT コードの出力ファイル
⑥	LHS 出力ファイル b)	LHS コードの出力ファイル
⑦	入力ファイル	バリオグラム計算コードへの入力ファイル
⑧	標準出力ファイル	バリオグラム計算コードの出力ファイル
⑨	グラフ作成用データ出力ファイル	バリオグラム計算結果のグラフを作成するために必要なデータファイル群
⑩	グラフ作成用 GNUPLOT スクリプトファイル	バリオグラム計算結果のグラフ化に必要な GNUPLOT のコマンドが記述されているスクリプトファイル
⑪	グラフファイル	GNUPLOT により作成された EPS (Enhanced PostScript)形式のグラフの画像データ
⑫	入力ファイル	クリギング計算コードへの入力ファイル(バリオグラムモデルに関する情報を含む)
⑬	真値比較用放射能情報データファイル	標本地点の座標データと標本データを収めたデータファイル
⑭	標準出力ファイル	クリギング計算コードの出力ファイル
⑮	グラフ作成用データ出力ファイル	クリギング計算結果のグラフを作成するために必要なデータファイル群
⑯	グラフ作成用 GNUPLOT スクリプトファイル	クリギング計算結果のグラフ化に必要な GNUPLOT のコマンドが記述されているスクリプトファイル
⑰	グラフファイル	GNUPLOT により作成された EPS (Enhanced PostScript)形式のグラフの画像データ

a)　図 3.1 における番号

b)　放射能分布推定プログラムには含まれない外部の計算コード、ファイル

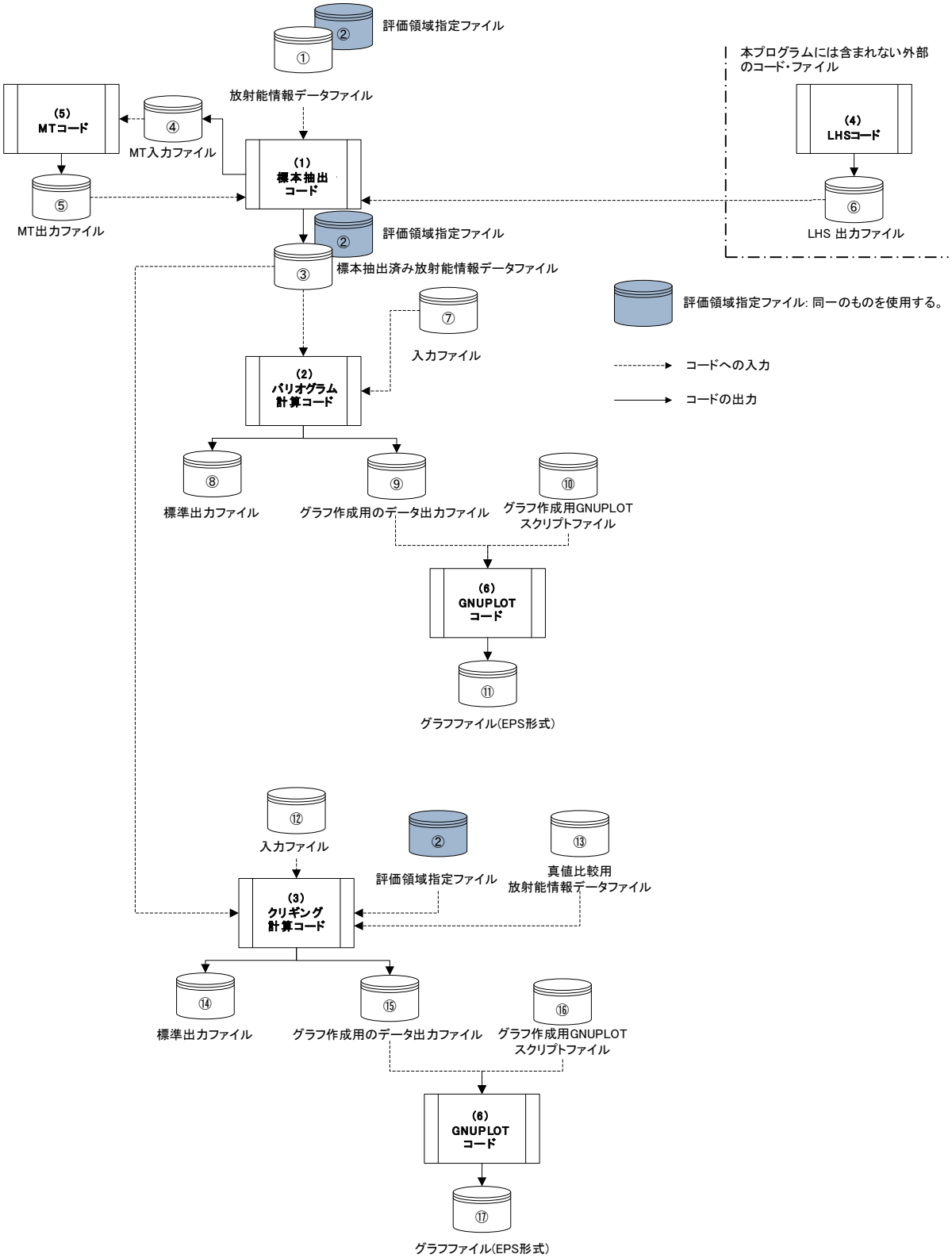


図 3.1　放射能分布推定プログラムの構成

3.2　機能

放射能分布推定プログラムの構成要素である標本抽出コード、バリオグラム計算コード、およびクリギング計算コードのそれぞれの機能は次のとおりである。

(1)　標本抽出コード

サイト解放に係る検認では、評価対象領域を複数の区画(以下、メッシュ)で区分した上で標本地点となるメッシュを抽出することが必要となる。標本抽出コードは、対象領域をメッシュで分割し、その中から標本地点を抽出する機能を有する。標本地点は抽出されたメッシュの中央とされる。標本地点抽出の方法として次の3つの方法が可能である。

① ユーザーが任意に指定する方法:ユーザーは抽出するメッシュの X 座標と Y 座標の値を指定する。
② 無作為抽出法：ユーザーが抽出する標本地点の数を入力すると、MT コードにより標本地点が抽出される。
③ LHS 法：ユーザーが抽出する標本地点の数を入力すると、LHS 法を用いて標本地点が抽出される。ただし、ユーザーは別途 LHS コードを予め実行し、その出力ファイルを用意しておくことが必要である。なお、ここでは扱う領域を 2 次元としていることから、LHS 法における変動パラメータは「X 軸のメッシュ」と「Y 軸のメッシュ」となる。

一方、標本地点とそこでの測定値(標本データ)が既に存在する場合がある。これは、3.1の作業手順で1)と2)が終了した時点、あるいは、放射線事故等により汚染が予想される地域に対して放射線モニタリングが実施され複数の地点での放射線情報が取得されている場合に該当する。このような場合、一部の標本データを用いて放射能分布推定プログラムを実行すれば、使用しなかった標本データ(真値)と対応する推定値を比較することにより、評価手法の精度について検討することができる。全標本地点の中から一部の標本地点を抽出する作業量を低減するために、標本抽出コードには、入力済み標本地点の中から任意の数の標本地点をGUIを通じて容易に抽出する機能も含まれている。

標本地点抽出の具体的な実行方法については、5.2で述べる。

(2)　バリオグラム計算コード

バリオグラム計算コードの機能は次のとおりである。

- 標本データを用いて2標本地点間の距離の関数としてバリオグラム雲を計算する。ただし、バリオグラム雲を方向まで含めた位置ベクトルの関数として扱う機能は含まれていない。
- バリオグラム雲のデータに基づき標本バリオグラムを計算する。
- バリオグラムモデルとして以下の5つのモデルを利用することができる。

(a) ナゲット効果型モデル
(b) 指数型モデル
(c) 球型モデル
(d) ガウス型モデル
(e) 標本バリオグラムの各点を線形補間した「線形補間モデル」（ただし、ナゲット効果は考慮されない）

(a)～(d)のモデルに含まれるパラメータの値を定める方法として、①加重付最小2乗法に基づく方法、および②ユーザーによるパラメータ値指定、が可能である。

加重付最小2乗法には、Pardo-Iguzquizaが提案した方法(計算コード：VARFIT)[11]を用いている。そこでは、関数のフィッティングには、Nelder-Mead法[12]に従ったシンプレックス法が用いられている。加重付最小2乗法は、次式の関数 Y を最小とするようにパラメータセット a, b, c を決定するものである。

$$Y_i = \sum_{n=1}^{nclass} w(n) \cdot (\gamma^*(h_n) - \gamma_T(h_n, a_i, b_i, c_i))^2 \tag{3.1}$$

ここに、

Y_i	： i (i =1~IPARA＋1)点に対する関数 Y の値
IPARA	：パラメータの数
$nclass$	：標本バリオグラムのクラス数
$w(n)$	：加重係数（(3.2)式参照）
$\gamma^*(h_n)$	：距離 h_n における標本バリオグラム
$\gamma_T(h_n, a_i, b_i, c_i)$	：距離 h_n におけるバリオグラムモデルの値(2.11)～(2.15)式参照)
a_i	：バリオグラムモデルにおけるパラメータ(レンジ)
b_i	：バリオグラムモデルにおけるパラメータ(シル＝ $b_i + c_i$)
c_i	：バリオグラムモデルにおけるパラメータ(ナゲット効果)

である。加重係数 $w(n)$ は、標本バリオグラムの各クラスのデータ数の違いを考慮することを目的に導入された係数であり、以下の式で与えられる。バリオグラム計算コードでは、この中の1つを入力で指定する。

$$\left.\begin{aligned} &w(n) = 1 \\ &w(n) = N(n) \\ &w(n) = 1/\gamma_T(h_n, a_i, b_i, c_i)^2 \\ &w(n) = N(n)/\gamma_T(h_n, a_i, b_i, c_i)^2 \\ &w(n) = N(n)/h_n{}^2 \end{aligned}\right\} \tag{3.2}$$

ここに、

$N(n)$ ：標本バリオグラムのクラス n に含まれる標本数

である。なお、Nelder-Mead 法を用いたバリオグラムモデルのパラメータ値の決定方法を付録 1 に記述する。

本コードの出力であるバリオグラム雲、標本バリオグラム、およびバリオグラムモデルは、グラフ作成用アプリケーションソフト GNUPLOT によりプロット図として出力・表示される(出力例については、4.2 を参照)。

(3) クリギング計算コード

クリギング計算コードの機能は次のとおりである。

- 標本データとバリオグラムモデルを用いてクリギング方程式の解を求め、対象領域内の各メッシュでの放射能情報を計算する。
- 上記の計算結果（推定値）に対する推定分散の平方根（以下、推定標準偏差）を計算する。
- すべてのメッシュでの放射能情報の推定値をもとに、対象領域における放射能情報の確率密度関数および累積分布関数を計算する。
- コード検証のためには､推定値が真値をどの程度再現するかを把握することが必要となる。標本データの一部を用いてクリギングを実行した場合には、次式を用いて、クリギングの実行に使用しなかった標本データ(真値)と推定値の比較を行う（ARE: Absolute Relative Error）。

$$ARE[\%] = \left| (z_p - z_a) / z_a \right| \times 100 \tag{3.3}$$

ここに、z_p と z_a はそれぞれ放射能情報の推定値と真値である。

本コードの出力である放射能情報推定値と推定標準偏差についての分布情報は、グラフ作成用アプリケーションソフトGNUPLOTにより、2次元マップとして出力・表示される。また、確率密度関数および累積分布関数は、プロット図として出力・表示される(出力例については、4.2を参照)。

4　入力仕様と出力例

4.1　入力ファイル仕様

標本抽出コード、バリオグラム計算コード、およびクリギング計算コードについての入力ファイル仕様を述べる。なお、標本抽出コードについては、GUI による入力がが可能である。これについては、5.2 で説明する。

4.1.1　標本抽出コード

標本抽出コードへの入力ファイルは、

(1) 放射能情報データファイル

(2) 評価領域指定ファイル

および、無作為抽出法と LHS 法による標本抽出に関する

(3) MT 入力ファイル

(4) MT 出力ファイル

(5) LHS 出力ファイル

である。各ファイルの仕様を以下に示す。

(1) 放射能情報データファイル

放射能情報を登録するためのデータファイルである。X 座標と Y 座標は同じ単位系であること、また、放射能情報は 1 つのファイル内では同一単位のデータであることが必要である。

標本抽出コードは、拡張子「.rif」のついているファイルを放射能情報データファイルとして認識する。放射能情報データファイルの仕様は次のとおりである。

パラメータ	型	概要	データ例
Comment	文字列	データファイルに関するコメントを入力する。#comment ～ #end_comment タグで挟まれている部分をコメントとする。	#comment A 施設の敷地における放射能濃度分布の推定 #end_comment
以下の内容は、1 行内に 1 標本地点の情報として繰り返す			
X	実数	標本地点 X 座標	5.5
Y	実数	標本地点 Y 座標	0.5
Z	実数	標本地点での放射能情報(放射能濃度、放射線計数率等)	0.43

放射能情報データファイルの例を以下に示す。

```
#comment
 A 施設の敷地における放射能濃度分布の推定
#end_comment
* x, y, z
      0.5      0.5      0.1
      2.5      0.5     0.16
      5.5      0.5     0.43
      6.5      0.5     1.05
      7.5      0.5        1
      8.5      0.5     0.75
      6.5      1.5     1.15
     10.5      1.5      1.1
      1.5      2.5      0.1
      7.5      2.5     1.14
      8.5      2.5     1.62
      9.5      2.5     1.29
     11.5      2.5     0.47
      7.5      3.5     0.92
      8.5      3.5     1.05
      9.5      3.5     0.89
     10.5      3.5     0.45
      7.5      4.5     0.39
      3.5      5.5     0.09
     13.5      5.5     0.03
```

(2) 評価領域指定ファイル

評価領域に関する設定を行う。このファイルはバリオグラム計算コードおよびクリギング計算コードでも使用される(図 3.1 参照)。なお、X、Y の各座標及び分割幅の距離単位は放射能情報データファイルの単位に合わせて設定する必要がある。

標本抽出コードは、拡張子「.area」のついているファイルを評価領域指定ファイルとして認識する。評価領域指定ファイルの仕様は次のとおりである。

パラメータ	型	概要	データ例
Comment	文字列	データファイルに関するコメントを入力する。#comment ～ #end_comment タグで挟まれている部分をコメントとする。	#comment A施設の敷地における放射能濃度分布の推定 #end_comment
Card 1 領域の分割数の指定(フリーフォーマット)			
nx	整数	評価領域の X 方向分割数	14
ny	整数	評価領域の Y 方向分割数	7
Card 2 評価領域の指定(フリーフォーマット)			

xmin	実数	評価領域の左下X座標。使用する放射能情報データファイルの標本地点が含まれるよう設定すること。	0.0
xmax	実数	評価領域の右上X座標。使用する放射能情報データファイルの標本地点が含まれるよう設定すること。	14.0
ymin	実数	評価領域の左下Y座標。使用する放射能情報データファイルの標本地点が含まれるよう設定すること。	0.0
ymax	実数	評価領域の右上Y座標。使用する放射能情報データファイルの標本地点が含まれるよう設定すること。	7.0

評価領域指定ファイルの例を以下に示す。

```
#comment
   A 施設の敷地における放射能濃度分布の推定
#end_comment
* nx, ny
  14      7
* xmin, xmax, ymin, ymax
  0    14      0      7
```

標本抽出コードを用いて入力された放射能情報は、メッシュの中央点での値となる(図 4.1)。また、クリギング計算コードにおける評価地点も、メッシュ内の中央点としている。

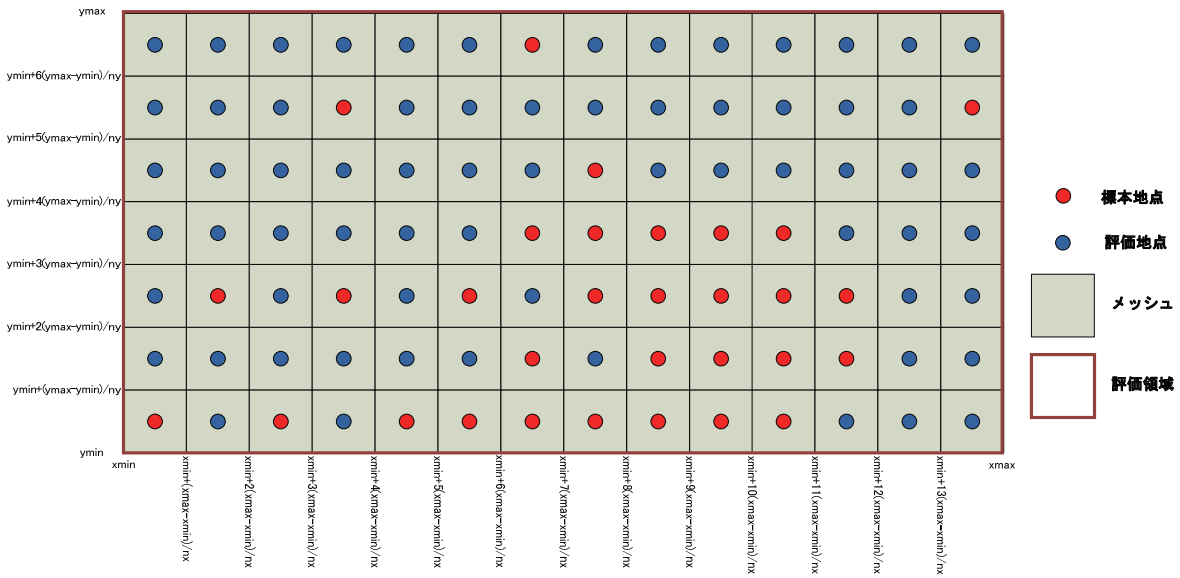


図 4.1　評価領域とメッシュ、標本地点、評価地点の概念図

(3) MT 入力ファイル

乱数生成にメルセンヌツイスターを利用した MT コードへの入力ファイルである。標本抽出コードから出力され、MT コードにおいて無作為抽出プロセスが終了すると自動的に削除される。

MT 入力ファイルのファイル名は mt.inp である。MT 入力ファイルの仕様は次のとおりである。

パラメータ	型	概要	データ例
ndata	整数	標本抽出の対象となるデータ数	31
seed	整数	乱数の種。整数であること。	4771
nchose	整数	標本の抽出数	20
以下、ndata 行繰り返し。1 データ 1 行。カンマ区切りで記述すること			
x	実数	評価地点の X 座標	0.5
y	実数	評価地点の Y 座標	0.5
z	実数	放射能情報(データがない場合は入力不要)	0.1

(4) MT 出力ファイル

MT コードの出力ファイルであり、標本抽出コードで利用される。MT 出力ファイルの仕様は次のとおりである。

パラメータ	型	概要	データ例
入力データパラメータ nchose 行繰り返し。1 データ 1 行。カンマ区切りで出力される			
x	実数	評価地点の X 座標	0.5
y	実数	評価地点の Y 座標	0.5
z	実数	放射能情報(データがない場合は出力されない)	0.1

(5) LHS 出力ファイル

LHS コードの出力であり、標本地点を指定するデータとして標本抽出コードで利用される。なお、変数は X、Y の順序で出力されるように LHS コードの入力作成時に注意すること。

LHS 出力ファイルの仕様は次のとおりである。

パラメータ	型	概要	データ例
NOBS	整数	標本数	number of observations=20
NV	整数	標本抽出の対象となる変数の数	number of variables=2
NM	文字列	変数名。1 行に NV 個分出力。	X　　Y
以下、NOBS 行繰り返し。1 データ 1 行。			
X	実数	評価地点の X 座標	0.5
Y	実数	評価地点の Y 座標	0.5

ここに、LHS 出力ファイルの X、Y の値は実際の標本地点の X 座標と Y 座標の値ではないため、標本抽出コードの中で標本地点の X 座標と Y 座標の値に変換される。

4.1.2　バリオグラム計算コード

バリオグラム計算コードへの入力ファイルは、

(1) 標本抽出済み放射能情報データファイル、および

(2) 入力ファイル

である。(1)の仕様は 4.1.1 で示した放射能情報データファイルのそれと同じである。(2)は、標本バリオグラムやバリオグラムモデルの計算に必要なパラメータ値を設定するためのファイルである。このファイルにつける拡張子は「.vinp」である。入力ファイルの仕様は次のとおりである。

パラメータ	型	概要	データ例
Comment	文字列	データファイルに関するコメントを入力する。 #comment～#end_comment タグで挟まれている部分をコメントとする。	#comment A 施設の敷地における放射能濃度分布の推定 #end_comment
Card 1 ファイルの指定			
fdat	文字列	標本抽出済み放射能情報データファイルのパスを指定する	.¥dat¥sampleA_20.rif
Card 2 標本バリオグラム			
nclass	整数	標本バリオグラムのクラス数（最大200)。	4
ilog	整数	標本データ z を対数化して計算するか否かのオプション 対数化しない：0 常用対数で対数化（$\log_{10}(z)$）：1 自然対数で対数化（ln(z)）：　2	0
h_limit	実数	標本バリオグラムの作成にあたり考慮する距離の最大値(0.を入れると最大値は考慮しない)	7.
Card 3 バリオグラムモデルの指定			
model	文字列	バリオグラムモデルを指定するパラメータ ナゲット効果型モデル: nugget 指数型モデル: exponent 球型モデル: spherical ガウス型モデル: gauss 線形補間モデル: linear	exponent
Card 4 モデル内のパラメータ値の設定。フリーフォーマット。			
lsm	整数	最小 2 乗法によるパラメータ値の設定 最小 2 乗法：　0 ユーザー指定：1	0
range	実数	a (レンジ) (lsm=1 のときのみ入力)	
sill	実数	b (lsm=1 のときのみ入力)	
nugget	実数	c (ナゲット), (lsm=1 のときのみ入	

		力)	
Card 5 重み付最小 2 乗法に関する設定			
nugget	整数	ナゲット効果を考慮するか否かの指定 考慮しない：0 考慮する：　1	0
weight_model	整数	加重係数 $w(n)$ の指定 $w(n)=1$: 1 $w(n)=N(n)$: 2 $w(n)=1/\gamma_T(h_n,a_i,b_i,c_i)^2$: 3 $w(n)=N(n)/\gamma_T(h_n,a_i,b_i,c_i)^2$: 4 $w(n)=N(n)/h_n{}^2$: 5	1

Card 3 の「model」における「線形補間モデル : linear」は、標本バリオグラムを意味する。入力ファイルの例を以下に示す。

```
#comment
 A 施設の敷地における放射能濃度分布の推定
#end_comment
* ---------------------------------------------------------------------------
* Card 1 データファイルの指定
*  放射能情報データファイル
.¥dat¥sampleA_20.rif
* ---------------------------------------------------------------------------
* Card 2 標本バリオグラム
* nclass: クラス数
*  対数化オプション(/0/対数化しない/ /1/log10(z)/ /2/ln(z)/)
 4      0
* h_limit: 距離として考慮する最大値(0.のときはすべて使用する)
 7.
* ---------------------------------------------------------------------------
* Card 3 バリオグラムモデルの指定
* (左詰めですべて小文字で記載すること)
* nugget  : ナゲット効果モデル
* spherical : 球形モデル
* gauss   : ガウスモデル
* exponent: 指数型モデル
* linear  : 線形補間モデル
*nugget
*spherical
*gauss
exponent
* ---------------------------------------------------------------------------
* Card 4 モデル関数の推定方法
* lsm(/0/LSM 実施//1/実施しない/)
   0
* lsm=1 のとき、各モデルのパラメータを指定する(0 のときは入力しないこと)
* range   sill nugget
*
* ---------------------------------------------------------------------------
* Card 5 重み付最小二乗法に関する設定
* nugget_effect: ナゲットを考慮するかどうかのフラグ(/0/考慮しない/ /1/考慮する/)
* weight_model : 加重モデル     1.  1.0
*                               2.  N(h)
*                               3.  1.0/((G(h))**2)
*                               4.  N(h)/((G(h))**2)
*                               5.  N(h)/(h**2)
* nugget_effect   weight_model
          0                1
```

4.1.3　クリギング計算コード

クリギング計算コードへの入力ファイルは、

(1) 標本抽出済み放射能情報データファイル

(2) 評価領域指定ファイル

(3) 真値との比較用放射能情報データファイル、および

(4) 入力ファイル

である。

(1)と(3)のファイル仕様は、ともに放射能情報データファイルのそれと同じであり、(2)のファイル仕様は、4.1.1 の(2)の評価領域指定ファイルと同じである。ここに、(3)は、本プログラムの推定結果を真値と比較する際に用いるファイルであり、*ARE*((3.3)式)の計算において真値として用いる放射能情報データが書き込まれている。(4)は、クリギングの計算に必要なパラメータ値を設定するためのファイルである。このファイルにつける拡張子は「.kinp」である。入力ファイルの仕様は次のとおりである。

パラメータ	型	概要	データ例
Comment	文字列	データファイルに関するコメントを入力する。 #comment～#end_comment タグで挟まれている部分をコメントとする。	#comment A 施設の敷地における放射能濃度分布の推定 #end_comment
Card 1 ファイルの指定			
fdat	文字列	標本抽出済み放射能情報データファイルのパスの指定	.¥dat¥sampleA_20.rif
farea	文字列	評価領域指定ファイルのパスの指定	.¥dat¥sampleA.area
fcmp	文字列	真値の放射能情報データファイル(推定値との比較に用いられる) 本ファイルが存在しない場合は fdat と同じファイルを指定する	.¥dat¥sampleA.rif
ilog	整数	推定値および推定標準偏差を出力する際のオプション ・計算結果をそのまま出力（対数化しない場合）：0 ・$10^{計算結果}$を出力（元の標本データを常用対数で対数化した場合）：1 ・$e^{計算結果}$を出力（元の標本データを自然対数で対数化した場合）：2	0
Card 2 バリオグラムモデルの指定(左詰めで 1 行以内に記述する)			
model	文字列	モデルの指定 ナゲット効果型モデル: nugget 指数型モデル: exponent	exponent

		球型モデル: spherical ガウス型モデル: gauss 線形補間モデル: linear	
Card 3 パラメータの指定(線形補間モデルの場合は不要、フリーフォーマット)			
Range	実数	a（レンジ）	5.1048
Sill	実数	b	0.47373
Nugget	実数	c（ナゲット）	0.
Card 4 パラメータの指定(線形補間モデルの場合のみ入力、フリーフォーマット)			
nClass	整数	標本バリオグラムのクラス数	
以下の 2 パラメータを nClass 回繰り返し入力(フリーフォーマット)			
h	実数	クラス i の平均距離	
g	実数	クラス i の標本バリオグラム	
Card 5 確率密度関数の区間数設定			
npdf	整数	確率密度関数の区間数	8
Card 7 ユーザーの指定領域の評価			
nrange	整数	ユーザーの指定領域数 個別に評価したい領域数を入力する（最大 9）	0
以下の 6 パラメータを nrange 回繰り返し入力(フリーフォーマット)			
lx	実数	左下 X 座標	
ly	実数	左下 Y 座標	
ux	実数	右上 X 座標	
uy	実数	右上 Y 座標	
nx	整数	X 方向分割数	
ny	整数	Y 方向分割数	

Card 7 の「ユーザーの指定領域の評価」は、評価領域の中の一部の領域について、あらかじめ設定した代表メッシュ点以外の点での放射能情報を推定するためである。ユーザー指定の領域に対するメッシュ間隔をユーザーのニーズに合わせてより短く指定することができる。

入力ファイルの例を以下に示す。

```
#comment
A 施設の敷地における放射能濃度分布の推定
#end_comment
* ------------------------------------------------------------------------------
* Card 1  データファイルの指定
*  放射能情報データファイル
.¥dat¥sampleA_20.rif
*  評価範囲指定ファイル
.¥dat¥sampleA.area
*  放射能情報データファイル(ARE 計算の真値として利用)
.¥dat¥sampleA.rif
* ilog :  バリオグラムの選定時に設定した対数化オプション(/0/対数化しない/ /1/log10(z)/ /2/log(z)/)
   0
* ------------------------------------------------------------------------------
* Card 2  モデルの指定
*  モデル
*nugget
*spherical
exponent
*gauss
*linear
* ------------------------------------------------------------------------------
* Card 3  モデルパラメータの指定(linear の場合は入力しないこと)
*  パラメータ
* range      sill      nugget
   5.1048    0.47373      0.
* ------------------------------------------------------------------------------
* Card 4  モデルパラメータの指定(linear 以外の場合は入力しないこと)
* nclass:  クラス数
*     4
*-  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -
* h:  各クラスにおける平均距離
* g:  各クラスにおける標本バリオグラム
*   (h, g の入力を nclass 回繰り返す)
* h          g
* ------------------------------------------------------------------------------
* Card 5
* npdf: PDF(確率密度関数)の区間数
8
* ------------------------------------------------------------------------------
* Card 7  ユーザー指定領域の評価
* nrange:  任意領域の評価(/0/評価しない//>1/指定された数分の領域を評価/)
        0
* lx:  左下隅 X 座標
* ux:  左下隅 X 座標
* ly:  左下隅 X 座標
* uy:  左下隅 X 座標
* nx:  左下隅 X 座標
```

4.2　出力例

標本抽出コード、バリオグラム計算コード、およびクリギング計算コードについての出力例を示す。なお、バリオグラム計算コードとクリギング計算コードの出力にはグラフおよび 2 次元分布情報が含まれるため、これらの情報も併せて示す。

4.2.1　標本抽出コード

標本抽出コードの出力ファイルは、

(1) 標本抽出済み放射能情報データファイル、および

(2) 評価領域指定ファイル

である。

標本抽出済み放射能情報データファイルの仕様は 4.1.1 の(1)の放射能情報データファイルと同じである。なお、標本抽出を行わない場合は、放射能情報データファイルを標本抽出済みとしてそのまま使用する。評価領域指定ファイルについては 4.1.1(2)で述べたとおりである。

出力情報は GUI を通じて画面上に表示される(画面例については、5.2 参照)。

4.2.2　バリオグラム計算コード

バリオグラム計算コードの出力ファイルは、

(1) 標準出力ファイル、および

(2) グラフ作成用のデータ出力ファイル

である。(2)は、グラフ作成用アプリケーションソフト GNUPLOT によるプロット用のデータ出力である。

(1) 標準出力ファイル

本出力ファイルには、バリオグラム雲、標本バリオグラム、およびバリオグラムモデルの情報が含まれる。

<u>バリオグラム雲(Table 1)</u>

バリオグラム雲の情報として標本地点のデータと標本地点のペアに関するデータが出力される。出力例を以下に示す。

```
#Table 1 Variogram cloud
ID      X          Y          Z          ID      X          Y          Z          H      GAMMA
   1 5.000E-01 5.000E-01 1.000E-01       2 2.500E+00 5.000E-01 1.600E-01 2.000E+00 1.800E-03
   1 5.000E-01 5.000E-01 1.000E-01       3 5.500E+00 5.000E-01 4.300E-01 5.000E+00 5.445E-02
   1 5.000E-01 5.000E-01 1.000E-01       4 6.500E+00 5.000E-01 1.050E+00 6.000E+00 4.512E-01
   1 5.000E-01 5.000E-01 1.000E-01       5 7.500E+00 5.000E-01 1.000E+00 7.000E+00 4.050E-01
   1 5.000E-01 5.000E-01 1.000E-01       6 8.500E+00 5.000E-01 7.500E-01 8.000E+00 2.112E-01
   1 5.000E-01 5.000E-01 1.000E-01       7 6.500E+00 1.500E+00 1.150E+00 6.083E+00 5.512E-01
   1 5.000E-01 5.000E-01 1.000E-01       8 1.050E+01 1.500E+00 1.100E+00 1.005E+01 5.000E-01
        ……
```

各標本地点のデータとして ID 番号(ID)と X、Y 座標および放射能情報の値（Z)、(上記の例では 1 行目が ID 番号 1 と ID 番号 2、2 行目が ID 番号 1 と ID 番号 3)、ペアに関するデータとして 2 標本地点間の距離(H)およびとバリオグラム雲を構成する非類似度(GAMMA：

（2.9）式）のデータが出力される。

標本バリオグラム(Table 2)

標本バリオグラム（(2.10）式）のデータが出力される。出力例を以下に示す。

```
#Table 2 Experimental Variogram
     lower       upper       average      gamma        sd
 0.000E+00 1.750E+00 1.199E+00 1.011E-01 1.036E-01     25
 1.750E+00 3.500E+00 2.588E+00 1.323E-01 1.773E-01     51
 3.500E+00 5.250E+00 4.381E+00 2.051E-01 2.118E-01     45
 5.250E+00 7.000E+00 6.281E+00 4.468E-01 3.240E-01     30
```

データは、原点に近いクラスから順に出力される。カラムの左から、当該クラスに対する距離の下限値(lower)、上限値(upper)、距離の平均(average)、標本バリオグラム(gamma)、その標準偏差(sd)、およびクラスに含まれる標本数である。

バリオグラムモデルに係るパラメータ(Table 3)

バリオグラムモデルに係るパラメータ値を最小 2 乗法によって求めた場合の計算結果である。出力例を以下に示す。

```
#Table 3 Fitting result
 PARAMETERS TO ESTIMATE:                2
 Parameters estimated.
  N. of Iterations:      62
 MODEL            exponential
 RANGE                      :     5.1048
 SILL                       :   0.47373
 NUGGET EFFECT              :     0.0000
 WEIGHT FUCTORS             :
   LAGS              1              2              3              4
            1.000E+00   1.000E+00   1.000E+00   1.000E+00
 モデル関数による推定値と標本バリオグラムの残差平方和平方根の平均値:     3.55E-02
```

上の行から順に、求めるパラメータの数、最適化における反復計算の数、バリオグラムモデルの種類（バリオグラム計算コードへの入力ファイルの Card 3 を参照）、レンジ、シル（ここでのシルの値はパラメータ b の値である）、ナゲット効果、加重係数、および残差平方和平方根の平均値である。加重係数は、標本バリオグラムの各クラスに対して距離の短い方から順に出力される（上の例では、「LAGS」の行に 1～4 のクラス番号が、次の行にそのクラス

に対応する加重係数が示してある。なお、この例では、加重モデル１を入力しているため、各クラスの加重係数は 1 となっている)。また、残差平方和平方根の平均値は次式で定義される。

$$RMS = \sqrt{\sum_{n=1}^{nclass} (\gamma^*(h_n) - \gamma_T(h_n, a, b, c))^2} \Big/ nclass \qquad (4.1)$$

ここに h_n は標本バリオグラムのクラス n における平均の距離(標本バリオグラム(Table2)の出力例における”average”)である。

(2) グラフ作成用のデータ出力ファイル

バリオグラム計算コードの実行後に作成されるグラフ用の出力ファイルであり、以下のファイルから構成される。

ファイル名	内容
cloud.dat	バリオグラム雲のデータ
expvrio.dat	標本バリオグラムの値
model.dat	バリオグラムモデルのパラメータ値

各ファイルの出力項目は次のとおりである。

<u>cloud.dat</u>

出力項目

出力データ名	書式	概要	出力例
1 行につき 1 データ。(標本地点の数) ×{(標本地点の数)-1)}/2 の行の繰り返し			
距離	1PE10.3	2 地点間の距離	2.000E+00
γ	1PE10.3	2 地点の非類似度	1.800E-03

出力例を以下に示す。

```
2.000E+00 1.800E-03
5.000E+00 5.445E-02
6.000E+00 4.512E-01
7.000E+00 4.050E-01
8.000E+00 2.112E-01
6.083E+00 5.512E-01
1.005E+01 5.000E-01
2.236E+00 0.000E+00
    ・・・
```

expvario.dat

出力項目

出力データ名	書式	概要	出力例
1 行につき 1 データ。(標本バリオグラムのクラスの数)+1(距離 0 の点)の行の繰り返し			
距離	1PE10.3	クラスに含まれる標本地点の距離の平均値	1.199E+00
γ	1PE10.3	クラスの標本バリオグラム	1.011E-01

出力例を以下に示す。

```
0.000E+00 0.000E+00
1.199E+00 1.011E-01
2.588E+00 1.323E-01
4.381E+00 2.051E-01
6.281E+00 4.468E-01
```

model.dat

出力項目

出力データ名	書式	概要	出力例
1 行目			
モデル名	文字列	モデル関数の名称が出力される	exponential
2 行目			
a	1PE10.2	モデルパラメータ a	5.10E+00
b	1PE10.2	モデルパラメータ b	4.74E-01
c	1PE10.2	モデルパラメータ c	0.00E+00

出力例を以下に示す。

```
exponential
   5.10E+00    4.74E-01    0.00E+00
```

上記のファイルは、GNUPLOT を介してグラフ化される。

グラフ化に使用される GNUPLOT 用のスクリプトは以下の通りである。

ファイル名	内容
variogramplot.plt	cloud.dat, expvario.dat を使用して、バリオグラム雲と標本バリオグラムを表示し、model.dat のデータを使用したバリオグラムモデルをグラフ化するためのスクリプトファイル。

作成されたグラフは、以下の”vario.eps”の名称で保存される。

ファイル名	内容
vario.eps	バリオグラム雲、標本バリオグラム、バリオグラムモデルのグラフが描画された画像ファイル(EPS 形式)

グラフの出力例を以下に示す。

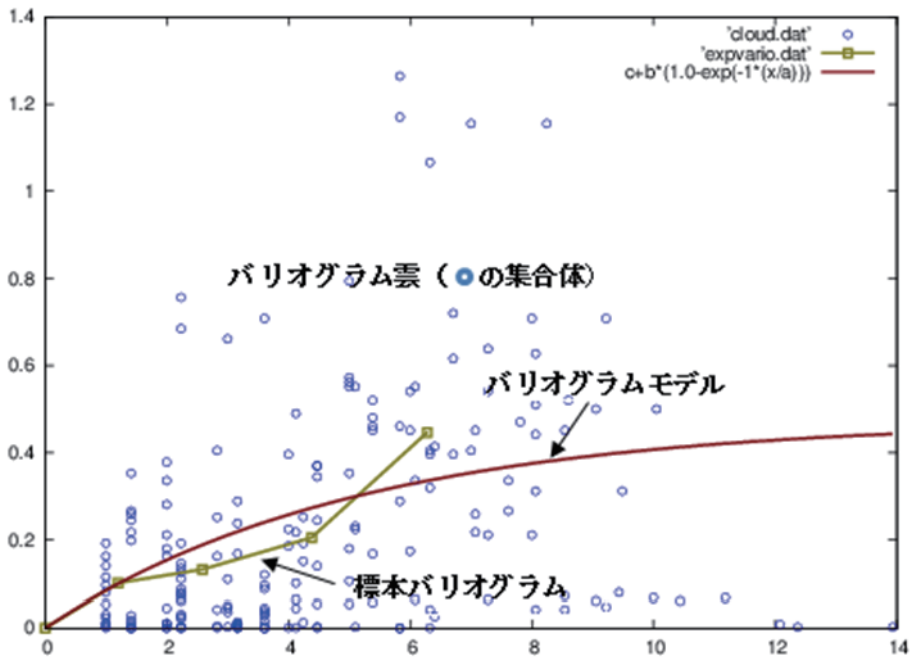


図 4.2　バリオグラム雲、標本バリオグラムおよびバリオグラムモデルの出力例

4.2.3　クリギング計算コード

クリギング計算コードの出力ファイルは、

(1) 標準出力ファイル、および

(2) グラフ等作成用のデータファイル

である。 (2)は、GNUPLOT によるグラフおよび分布図の作成用データファイルである。

(1) 標準出力ファイル

本ファイルには、各メッシュの代表点（中央点としている）における放射能情報推定値、推定値の推定標準偏差、対象領域における放射能情報推定値の確率密度関数と累積分布関数、および真値と推定値の比較についての情報が含まれる。これらの出力例を以下に示す。

各メッシュ代表点における推定値（Table 1）

各メッシュ代表点における放射能情報推定値として、推定値（Table 1.1）、推定値＋1σ（σ：推定標準偏差; Table 1.2）、推定値＋2σ(Table 1.3)、推定値＋3σ(table 1.4)が（X，Y）座標のマトリックス形式で出力される。推定値の出力例を以下に示す。

推定値の出力例

#Table 1　各メッシュ代表点における推定値

#Table 1.1 平均値

X/Y	0.50	1.50	2.50	3.50	4.50	5.50	・・・
6.50	1.15E-01	1.04E-01	9.71E-02	1.05E-01	1.42E-01	1.81E-01	・・・
5.50	1.07E-01	9.97E-02	9.52E-02	9.00E-02	1.76E-01	2.41E-01	・・・
4.50	1.04E-01	1.05E-01	1.22E-01	1.70E-01	2.61E-01	3.60E-01	・・・
3.50	9.96E-02	1.09E-01	1.52E-01	2.34E-01	3.61E-01	5.25E-01	・・・
2.50	9.56E-02	1.00E-01	1.66E-01	2.68E-01	4.27E-01	6.66E-01	・・・
1.50	9.75E-02	1.14E-01	1.68E-01	2.63E-01	4.11E-01	6.85E-01	・・・
0.50	1.00E-01	1.24E-01	1.60E-01	2.44E-01	3.38E-01	4.30E-01	・・・

推定値＋$k\sigma$　$(k=1,2,3)$ の出力例も上記と同様である。

各メッシュにおける推定標準偏差(Table 2.1)

各メッシュにおける放射能情報推定値の推定標準偏差のデータが、（X，Y）座標のマトリックス形式および昇順に出力される。出力例を以下に示す。

（X，Y）座標のマトリックス形式の出力例

#Table 2 各メッシュ代表点における推定標準偏差（σ）

#Table 2.1 推定標準偏差のメッシュ出力

X/Y	0.50	1.50	2.50	3.50	4.50	5.50
6.50	6.32E-01	5.71E-01	4.90E-01	4.25E-01	4.64E-01	5.08E-01
5.50	5.88E-01	5.16E-01	4.03E-01	1.82E-08	3.78E-01	4.46E-01
4.50	5.38E-01	4.70E-01	4.05E-01	3.60E-01	4.00E-01	4.19E-01
3.50	4.67E-01	3.85E-01	3.92E-01	4.15E-01	4.27E-01	4.12E-01
2.50	3.91E-01	2.33E-08	3.48E-01	4.11E-01	4.19E-01	3.84E-01

1.50	3.46E-01	3.06E-01	3.23E-01	3.78E-01	3.81E-01	3.16E-01
0.50	1.11E-08	3.02E-01	3.32E-08	3.51E-01	3.52E-01	2.23E-08

昇順の出力例

```
#Table 2.2 推定標準偏差の昇順出力
          (*: 測定点)
     X          Y          sd
   11.500     2.500    4.50E-09 *
    9.500     2.500    5.38E-09 *
    8.500     3.500    6.43E-09 *
    7.500     4.500    7.21E-09 *
    0.500     0.500    1.11E-08 *
    7.500     0.500    1.21E-08 *
   10.500     3.500    1.31E-08 *
    8.500     2.500    1.32E-08 *
    6.500     1.500    1.42E-08 *
    6.500     0.500    1.67E-08 *
   10.500     1.500    1.78E-08 *
    9.500     3.500    1.80E-08 *
    3.500     5.500    1.82E-08 *
    7.500     2.500    1.99E-08 *
    7.500     3.500    2.19E-08 *
    5.500     0.500    2.23E-08 *
    1.500     2.500    2.33E-08 *
    8.500     0.500    2.56E-08 *
   13.500     5.500    3.04E-08 *
    2.500     0.500    3.32E-08 *
   10.500     2.500    2.65E-01
    7.500     1.500    2.75E-01
    8.500     1.500    2.87E-01
    9.500     1.500    2.93E-01
    …
```

推定標準偏差（3 列目の「sd」）の値の中で「*」が付いているものは、その地点が標本地点(測定点)であることを表す。なお、クリギングでは、標本地点における推定値は標本データと一致し、そこでの推定標準偏差は 0 となる。この例では、数値計算の結果が 10^{-8} 程度となっている。

確率密度関数(PDF: Probability Density Function) (Table 3)

全メッシュの代表点における推定値を母集団とする確率密度関数の表形式データが出力される。出力例を以下に示す。

確率密度関数の表形式データの出力例

```
#Table 3 確率密度関数(PDF)
          Zp                PDF
     Lower      Upper        -
      0.03       0.23    3.98E-01
      0.23       0.43    2.76E-01
      0.43       0.63    9.18E-02
      0.63       0.82    6.12E-02
      0.82       1.02    7.14E-02
      1.02       1.22    7.14E-02
      1.22       1.42    2.04E-02
      1.42       1.62    0.00E+00
```

確率密度関数を区間ごとに表したとき、Zp は各区間における放射能情報推定値の下限値(Lower)及び上限値(Upper)であり、PDF は当該区間での確率(当該区間の度数÷全度数)である。

累積分布関数(CDF: Cumulative Distribution Function)（Table 4）

全メッシュの代表点における推定値を母集団とする累積分布関数の値が表形式で出力される。出力例を以下に示す。

累積分布関数の表形式データの出力例

```
#Table 4 累積分布関数(CDF)
     COUNT        Zp          CDF
       1     3.00E-02    1.02E-02
       2     6.24E-02    2.04E-02
       3     9.00E-02    3.06E-02
       4     9.52E-02    4.08E-02
             ..............
      96     1.23E+00    9.80E-01
      97     1.29E+00    9.90E-01
      98     1.62E+00    1.00E+00

*** CDF要約値 ***
     1%        5%        10%       25%       50%       75%       90%
```

```
95%          99%          mean          SD
   3.00E-02    9.52E-02    9.97E-02    1.42E-01    2.67E-01    5.61E-01    1.05E+00
1.19E+00    1.62E+00    4.15E-01    3.56E-01
```

CDF は放射能情報の推定値を昇順に並べ、各データに等確率を付与して作成される。Zp は放射能情報の推定値を、CDF は Zp に対応する累積確率を示す。また。CDF の要約値として、1%値，5%値，10%，・・・，90%値，95%値，99%値，平均(mean)、および標準偏差（SD）が表示される。

真値と推定値の比較（Table 5）

クリギング計算コードへの入力ファイルの Card1 の fcmp で指定した入力ファイル（推定値との比較に用いられる真値の放射能情報データファイル）のデータを真値とし、推定値との比較結果を示す ARE の計算結果が出力される。出力例を以下に示す。

真値と推定値の比較の出力例

```
#Table 5 真値と推定値の比較(ARE, %)
        X          Y        Za         Zp        ARE         SD
     0.50       0.50   1.00E-01   1.00E-01   3.69E-12   1.11E-08
     2.50       0.50   1.60E-01   1.60E-01   2.41E-12   3.32E-08
     4.50       0.50   2.90E-01   3.38E-01   1.66E+01   3.52E-01
     5.50       0.50   4.30E-01   4.30E-01   3.36E-13   2.23E-08
     6.50       0.50   1.05E+00   1.05E+00   2.11E-14   1.67E-08
     7.50       0.50   1.00E+00   1.00E+00   6.66E-14   1.21E-08
     8.50       0.50   7.50E-01   7.50E-01   2.22E-13   2.56E-08
     9.50       0.50   7.30E-01   9.06E-01   2.42E+01   3.47E-01
    10.50       0.50   7.30E-01   8.91E-01   2.20E+01   3.91E-01
     ..........
```

X, Y は、真値の入力されている座標、Za は真値、Zp は推定値、ARE は（3.3）式で定義された推定値と真値との差の真値に対する比(%値)、そして SD は推定標準偏差である。

ユーザー指定の評価領域が入力で設定されている場合(クリギング計算コードへの入力ファイルの Card7 を参照)、当該評価領域に対する結果は評価領域全体に対する計算結果(上記)に続いて出力される。出力仕様は評価領域全体に対する計算結果と同様である。

(2) グラフ等作成用のデータファイル

クリギング計算コードの実行後に作成されるグラフや 2 次元分布情報用の出力ファイルであり、以下のファイルから構成される。

ファイル名	内容
average_cont.dat	評価領域における X 座標、Y 座標、放射能情報推定値
average1s_cont.dat	評価領域における X 座標、Y 座標、放射能情報推定値+1σ
average2s_cont.dat	評価領域における X 座標、Y 座標、放射能情報推定値+2σ
average3s_cont.dat	評価領域における X 座標、Y 座標、放射能情報推定値+3σ
variance_cont.dat	評価領域における X 座標、Y 座標、推定標準偏差
pdf.dat	確率密度関数のグラフ出力用のデータ
cdf.dat	累積分布関数のグラフ出力用のデータ

ユーザー指定の領域については、指定した順に(1)、(2) … がファイル名に追加されて出力される(例: average_cont(1).dat)。

以下にグラフ用データの出力項目と出力例を示す。

average_cont.dat, average1s_cont.dat, average2s_cont.dat, average3s_cont.dat, sd_cont.dat

出力項目

出力データ名	書式	概要	出力例
1 行目			
ヘッダ	文字列	2 行目の内容を表す列ヘッダ	# nx　ny
2 行目			
コメント文字	文字列	GNUPLOT でのコメント行を示す文字	#
nx	整数	評価領域の X 方向分割数	14
ny	整数	評価領域の Y 方向分割数	7
3 行目			
ヘッダ	文字列	4 行目以降の内容を表す列ヘッダ	# x　y　z
4 行目以降、1 行につき 1 データ。評価地点の数だけ行の繰り返し			
x	1PE10.2	評価地点 x 座標	5.00E-01
y	1PE10.2	評価地点 y 座標	5.00E-01
z	1PE10.2	評価地点における値 average_cont：推定値 average1s_cont：推定値+1σ average1s_cont：推定値+2σ average1s_cont：推定値+3σ sd_cont：推定標準偏差	1.00E-01

出力例

```
# nx     ny
#      14       7
# x    y    z
   5.00E-01   5.00E-01   1.00E-01
   5.00E-01   1.50E+00   9.75E-02
   5.00E-01   2.50E+00   9.56E-02
   5.00E-01   3.50E+00   9.96E-02
   5.00E-01   4.50E+00   1.04E-01
   5.00E-01   5.50E+00   1.07E-01
   5.00E-01   6.50E+00   1.15E-01
   1.50E+00   5.00E-01   1.24E-01
   1.50E+00   1.50E+00   1.14E-01
   1.50E+00   2.50E+00   1.00E-01
    ・・・・・
```

pdf.dat

出力項目

出力データ名	書式	概要	出力例
1 行につき 1 データ。PDF 分割数×2+2 の数だけ行の繰り返し			
pdf 境界値	1PE10.2	pdf における分割境界の値	3.00E-02
確率	1PE10.2	確率	0.00E-00

出力例

```
  3.00E-02   0.00E+00
  3.00E-02   3.98E-01
  2.29E-01   3.98E-01
  2.29E-01   2.76E-01
  4.27E-01   2.76E-01
  4.27E-01   9.18E-02
  6.26E-01   9.18E-02
  6.26E-01   6.12E-02
  8.25E-01   6.12E-02
  8.25E-01   7.14E-02
  1.02E+00   7.14E-02
  1.02E+00   7.14E-02
```

```
1.22E+00   7.14E-02
1.22E+00   2.04E-02
1.42E+00   2.04E-02
1.42E+00   0.00E+00
1.62E+00   0.00E+00
1.62E+00   0.00E+00
```

cdf.dat

出力項目

出力データ名	書式	概要	出力例
1 行につき 1 データ。評価地点の数だけ行の繰り返し			
推定値	1PE10.2	推定値	3.00E-02
累積確率	1PE10.2	累積確率	1.02E-02

出力例

```
3.00E-02   1.02E-02
6.24E-02   2.04E-02
9.00E-02   3.06E-02
9.52E-02   4.08E-02
9.52E-02   5.10E-02
9.56E-02   6.12E-02
9.71E-02   7.14E-02
9.75E-02   8.16E-02
9.96E-02   9.18E-02
  ....
```

上記のデータは、GNUPLOT を介してグラフ出力することが可能である。グラフ出力で使用する GNUPLOT 用のスクリプトは以下のとおりである。

ファイル名	内容
contour.plt	放射能分布の等値線図及びカラーマップの作成用のスクリプト。average_cont.dat, average1s_cont.dat, average2s_cont.dat, average3s_cont.dat の等値線図描画に使用される。
pdf.plt	確率密度関数のグラフ作成用のスクリプトファイル。pdf.dat のグラフ作成に使用される。
cdf.plt	累積分布関数のグラフ作成用スクリプトファイル。cdf.dat のグラフ作成に使用される。

ユーザー指定の領域については、指定した順に(1)、(2) … がファイル名に追加されて出力される(例: average_cont(1).plt)。

GNUPLOT により作成されるグラフは以下の通りである。

ファイル名	内容	作図例
average_cont.eps	評価領域における X 座標、Y 座標、放射能情報推定値の分布図。	図 4.3
average1s_cont.eps	評価領域における X 座標、Y 座標、放射能情報推定値 +1σ の分布図。	図 4.4
average2s_cont.eps	評価領域における X 座標、Y 座標、放射能情報推定値 +2σ の分布図。	図 4.5
average3s_cont.eps	評価領域における X 座標、Y 座標、放射能情報推定値 +3σ の分布図。	図 4.6
variance_cont.eps	評価領域における X 座標、Y 座標、放射能情報推定値の推定標準偏差の分布図。	図 4.7
pdf.eps	確率密度関数のグラフ。	図 4.8
cdf.eps	累積分布関数のグラフ。	図 4.9

ユーザー指定の領域については、指定した順に(1)、(2) … がファイル名に追加されて出力される(例: average_cont(1).eps)。

上記グラフの画像出力例を図 4.3~4.9 に示す。等値線間隔やグラデーションは、スクリプトファイルを編集することにより修正することが可能である。

なお、GNUPLOT への入力データはメッシュの中央の点のデータであるが、GNUPLOT では同データを格子点データとして扱うため、作成された画像の中でメッシュ単位で塗りつぶされたものはユーザーが意図したものと若干異なることに留意する必要がある。

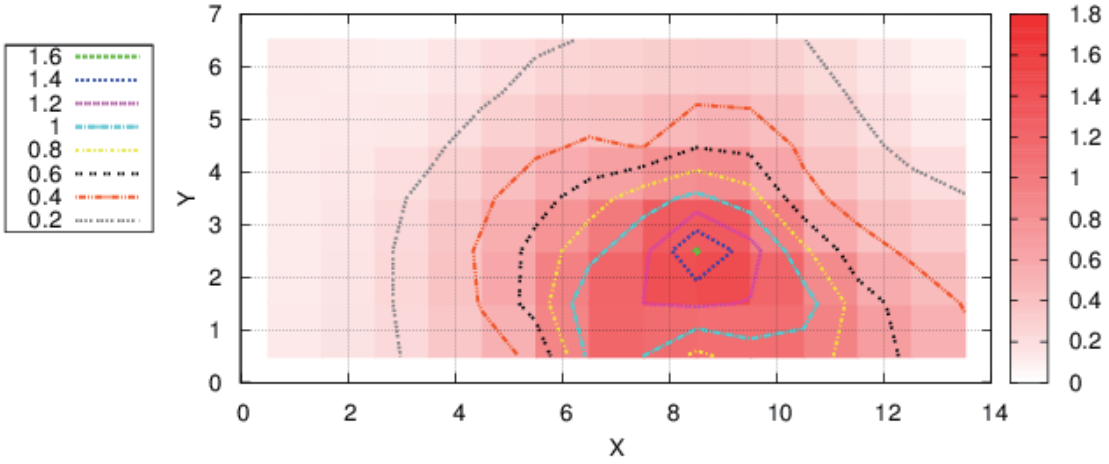


図 4.3　放射能情報推定値の分布図表示例

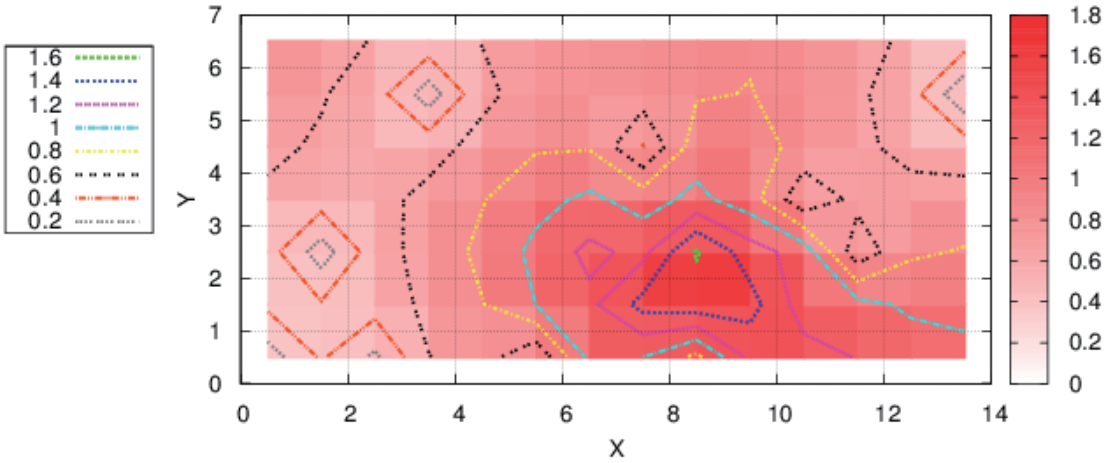


図 4.4　放射能情報推定値+1 σ の分布図表示例

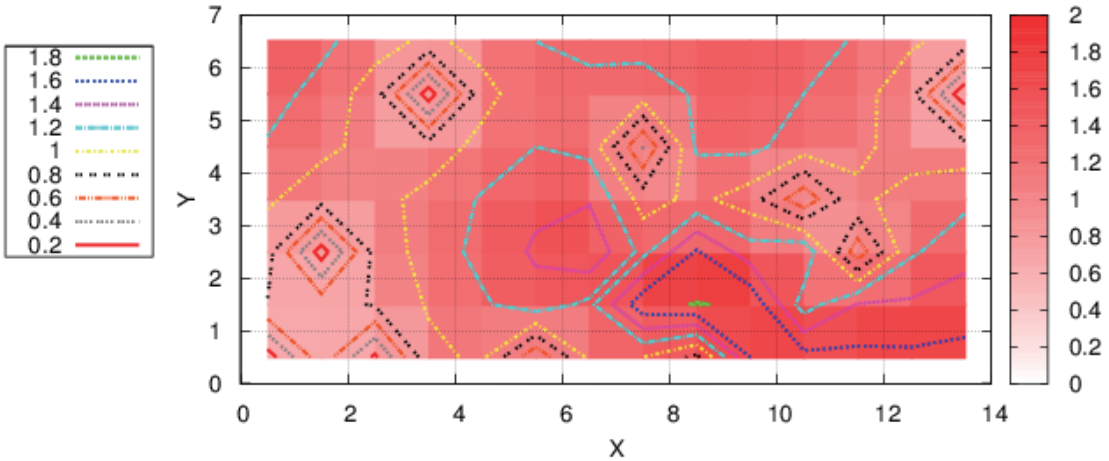


図 4.5　放射能情報推定値+2σの分布図表示例

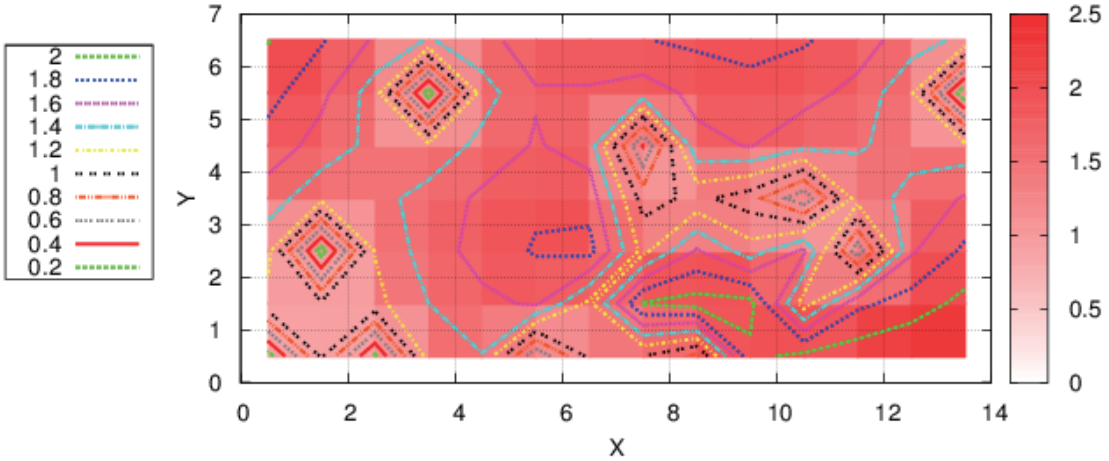


図 4.6　放射能情報推定値+3σの分布図表示例

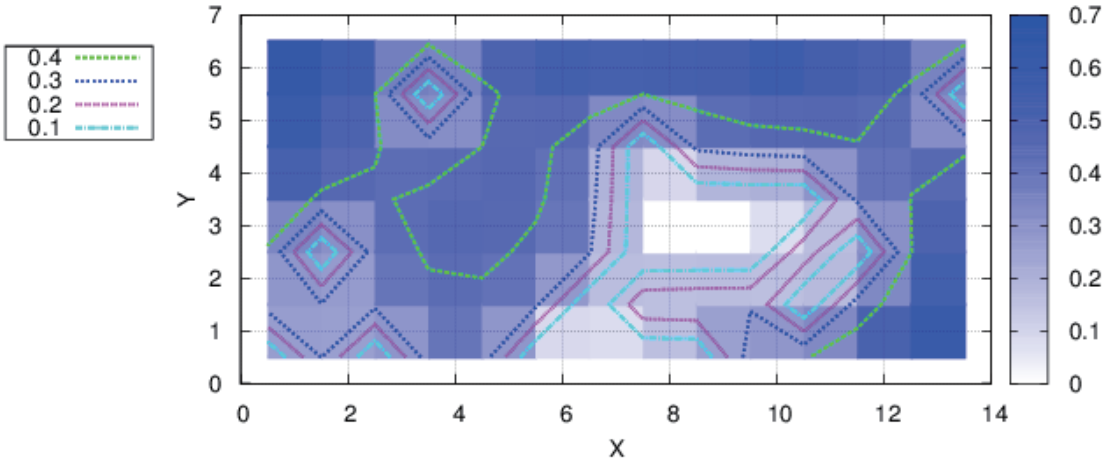


図 4.7　放射能情報推定標準偏差の分布図表示例

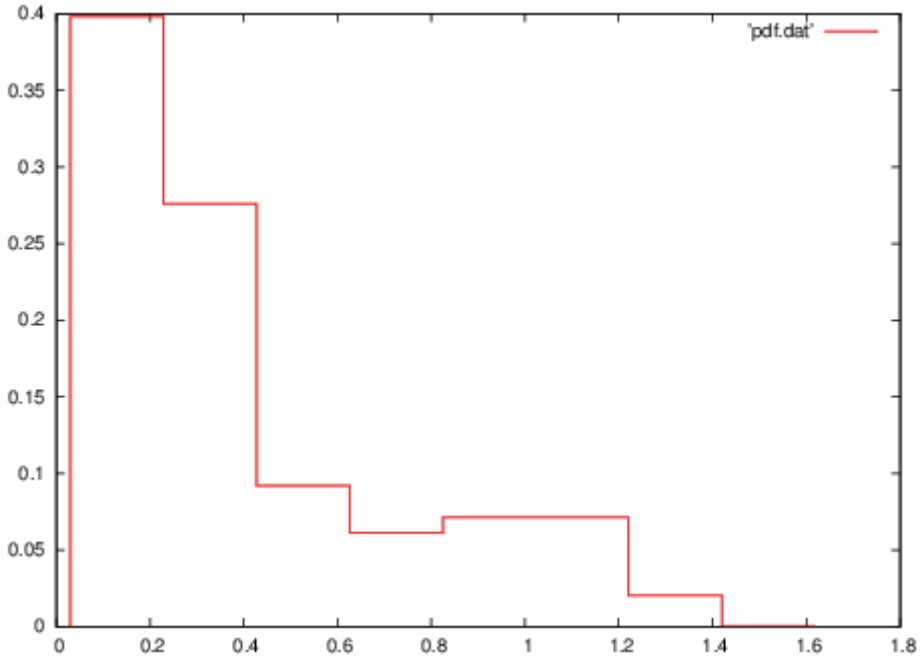


図 4.8　確率密度関数のグラフ表示例

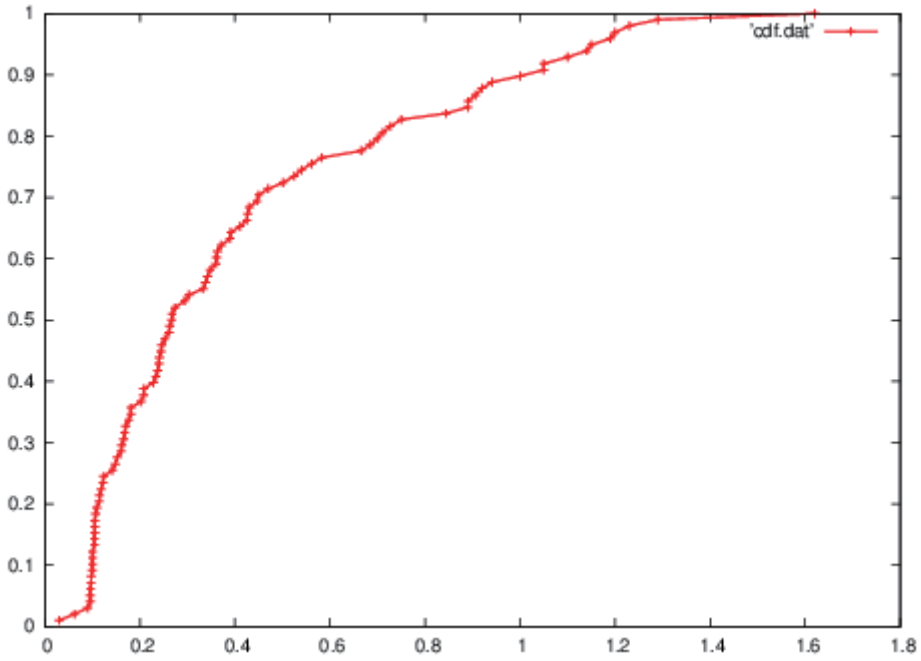


図 4.9　累積分布関数のグラフ表示例

5　実行方法

放射能分布推定プログラムを構成する種々のファイル群は、幾つかのディレクトリに配置されている。本プログラムを実行するに当たっては、このファイル群の配置場所を把握することが必要である。そこで、まず本プログラムにおけるディレクトリとファイル群の構成を述べ、次に、標本抽出コード、バリオグラム計算コード、およびクリギング計算コードのそれぞれの実行方法を述べる。

5.1 ディレクトリとファイルの構成

放射能分布推定プログラムのディレクトリ構成を図 5.1 に示す。また、放射能分布推定プログラムを構成するファイル群を表 5.1~5.6 に示す。なお、“inp”および“out”ディレクトリ以外のディレクトリに収められているファイルは、放射能分布推定プログラムが参照または管理するファイルであるため、内容やファイル名の変更ならびにファイルそのものを削除しないこと。

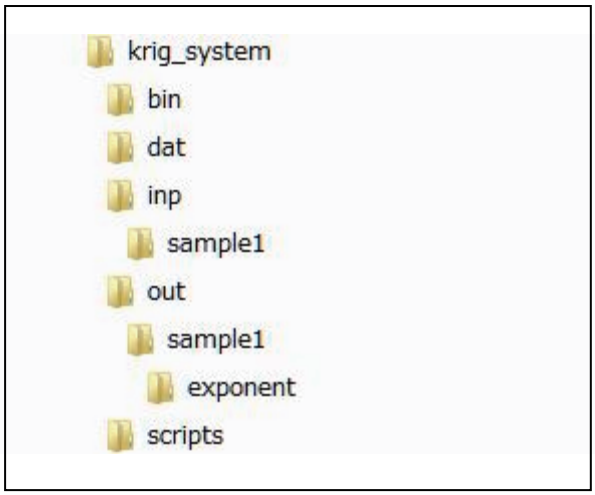


図 5.1　ディレクトリ構成

表 5.1　krig_system ディレクトリ内のファイル一覧

ファイル名	種類	内容
area.tpl	テンプレートファイル	評価領域指定ファイルを作成するためのテンプレート。標本抽出コードが使用する。
averagegraph.rb	Ruby スクリプトファイル	分布図作成のためのファイル制御を行うルビースクリプトファイル。
cdfgraph.rb	Ruby スクリプトファイル	累積分布関数のグラフ作成のためのファイル制御を行うルビースクリプトファイル
dat.tpl	テンプレートファイル	放射能情報データファイルを作成するためのテンプレート。標本抽出コードが使用する。
DataSampling.exe	実行ファイル	実行形式の標本抽出コードの本体
DataSampling.exe.config	XMLファイル	標本抽出コードのGUI関連の設定ファイル
krig.bat	バッチファイル	クリギング計算コードの実行バッチ
mt.tpl	テンプレートファイル	MTコードへの入力ファイルを作成するためのテンプレート。標本抽出コードが使用する。
pdfgraph.rb	Ruby スクリプトファイル	確率密度関数のグラフ作成のためのファイル制御を行うルビースクリプトファイル
pltout_base.rb	Ruby スクリプトファイル	クリギング計算コード実行後のグラフ作成のためのファイル制御を行うルビースクリプトファイル
vario.bat	バッチファイル	バリオグラム計算コードの実行バッチ
vario.rb	Ruby スクリプトファイル	バリオグラム計算コード実行後のグラフ作成のためのファイル制御を行うルビースクリプトファイル

表 5.2　bin ディレクトリ内のファイル一覧

ファイル名	種類	内容
kriging.exe	実行ファイル	クリギング計算コードの本体
variogram.exe	実行ファイル	バリオグラム計算コードの本体
mt.exe	実行ファイル	MTコードの本体

表 5.3　dat ディレクトリ内のファイル一覧

ファイル名	種類	内容
sample1.rif	データファイル	放射能情報と標本地点座標を収めたサンプル問題用の放射能情報データファイル
sample1.area	評価範囲定義ファイル	評価範囲を定義するデータを収めたファイル

表 5.4　inp ディレクトリ内のファイル一覧

ファイル名	種類	内容
sample1	ディレクトリ	サンプル用の入力ファイルを収めたディレクトリ
exponent.kinp	クリギング用入力ファイル	サンプル問題におけるクリギング計算コードへの入力ファイル
exponent.vinp	バリオグラム用入力ファイル	サンプル問題におけるバリオグラム計算コードへの入力ファイル

表 5.5　out ディレクトリ内のファイル一覧

ファイル名	種類	内容
sample1	ディレクトリ	サンプル用の出力ファイルを収めたディレクトリ
exponent	ディレクトリ	サンプル用の入力ファイル（exponent.vinpおよびexpontnt.kinp）に対する出力を収めたディレクトリ
average_cont.dat	クリギング出力ファイル	放射能分布推定値の2次元分布図を描くために必要な情報を出力したデータファイル
average_cont.plt	GNUPLOTスクリプトファイル	放射能分布推定値の2次元分布図を描くためのGNUPLOTスクリプトファイル
average_cont.eps	Enhanced postscript形式ファイル	放射能分布推定値の2次元分布図。閲覧にはEPS形式に対応した画像ビューワが必要。
average[n]s_cont.dat	クリギング出力ファイル	放射能分布推定値+[n]σの分布図を描くために必要な情報を出力したデータファイル(n: 1～3)。
average[n]s_co	GNUPLOTスクリプトファ	放射能分布推定値+[n]σの分布図を描くた

nt.plt	イル	めのGNUPLOTスクリプトファイル(n: 1～3)。
average[n]s_cont.eps	Enhanced postscript形式ファイル	放射能分布推定値+[n]σの分布図。閲覧にはEPS形式に対応した画像ビューワが必要(n: 1～3)。
cdf_cont.dat	クリギング出力ファイル	放射能分布推定値の累積分布関数を描くために必要な情報を出力したデータファイル
cdf_cont.plt	GNUPLOTスクリプトファイル	放射能分布推定値の累積分布関数を描くためのGNUPLOTスクリプトファイル
cdf_cont.eps	Enhanced postscript形式ファイル	放射能分布推定値の累積分布関数図。閲覧にはEPS形式に対応した画像ビューワが必要
cloud.dat	バリオグラム出力ファイル	バリオグラム雲をプロットするためのデータファイル
expvario.dat	バリオグラム出力ファイル	標本バリオグラムをプロットするためのデータファイル
krig.out	クリギング標準出力ファイル	クリギング計算コードの標準出力ファイル
model.dat	バリオグラム出力ファイル	バリオグラムモデルをプロットするためのデータファイル
pdf_cont.dat	クリギング出力ファイル	放射能分布推定値の確率密度関数を描くために必要な情報を出力したデータファイル
pdf_cont.plt	GNUPLOTスクリプトファイル	放射能分布推定値の確率密度関数を描くためのGNUPLOTスクリプトファイル
pdf_cont.eps	Enhanced postscript形式ファイル	放射能分布推定値の確率密度関数図。閲覧にはEPS形式に対応した画像ビューワが必要
variance_cont.dat	クリギング出力ファイル	放射能分布推定標準偏差値の2次元分布図を描くために必要な情報を出力したデータファイル
variance_cont.plt	GNUPLOTスクリプトファイル	放射能分布推定値の推定標準偏差値の2次元分布図を描くためのGNUPLOTスクリプトファイル
variance_cont.eps	Enhanced postscript形式ファイル	放射能分布推定値の推定標準偏差値の2次元分布図。閲覧にはEPS形式に対応した画像ビューワが必要

vario.eps	Enhanced postscript形式ファイル	バリオグラム雲、標本バリオグラム、バリオグラムモデルのプロット図。閲覧にはEPS形式に対応した画像ビューワが必要
vario.out	バリオグラム標準出力ファイル	バリオグラム計算コードの標準出力ファイル
Variogramplot.plt	GNUPLOTスクリプトファイル	vario.epsを描くためのGNUPLOTスクリプトファイル

表 5.6　scripts ディレクトリ内のファイル一覧

ファイル名	種類	内容
cdf.plt.erb	Rubyひな形ファイル	累積分布関数のグラフ作成用スクリプトのひな形ファイル
contour.plt.erb	Rubyひな形ファイル	2次元分布図作成用スクリプトのひな形ファイル
pdf.plt.erb	Rubyひな形ファイル	確率密度関数のグラフ作成用スクリプトのひな形ファイル
Variogramplot.plt.erb	Rubyひな形ファイル	バリオグラム雲および標本バリオグラムとバリオグラムモデルのグラフ作成用スクリプトのひな形ファイル

5.2　標本抽出コードの実行方法

(1) 起動方法

“krig_system”ディレクトリにある”DataSampling”をダブルクリックするとプログラムが起動し下図のメイン画面が表示される。

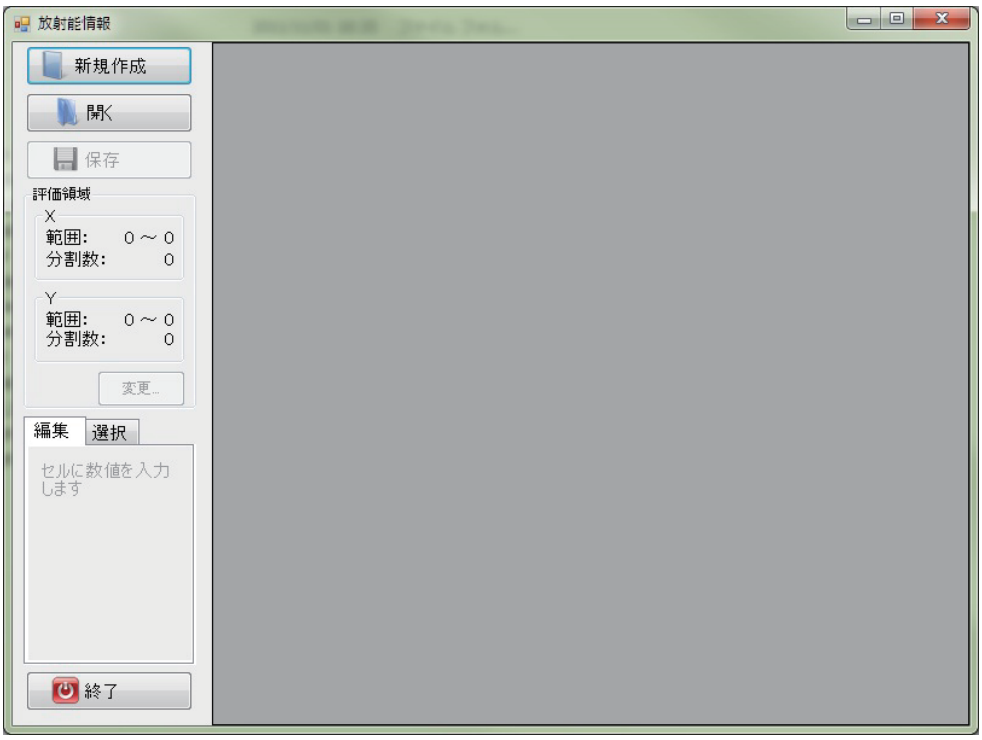


図 5.2　標本抽出コードのメイン画面

(2) 画面構成

標本抽出コードの画面の構成図を図 5.3 に示す。メイン画面左側のパネルから各機能を呼び出して使用する。編集モード/選択モード切替タブパネルはマウスで選択すると、パネルを切り替えることができる。

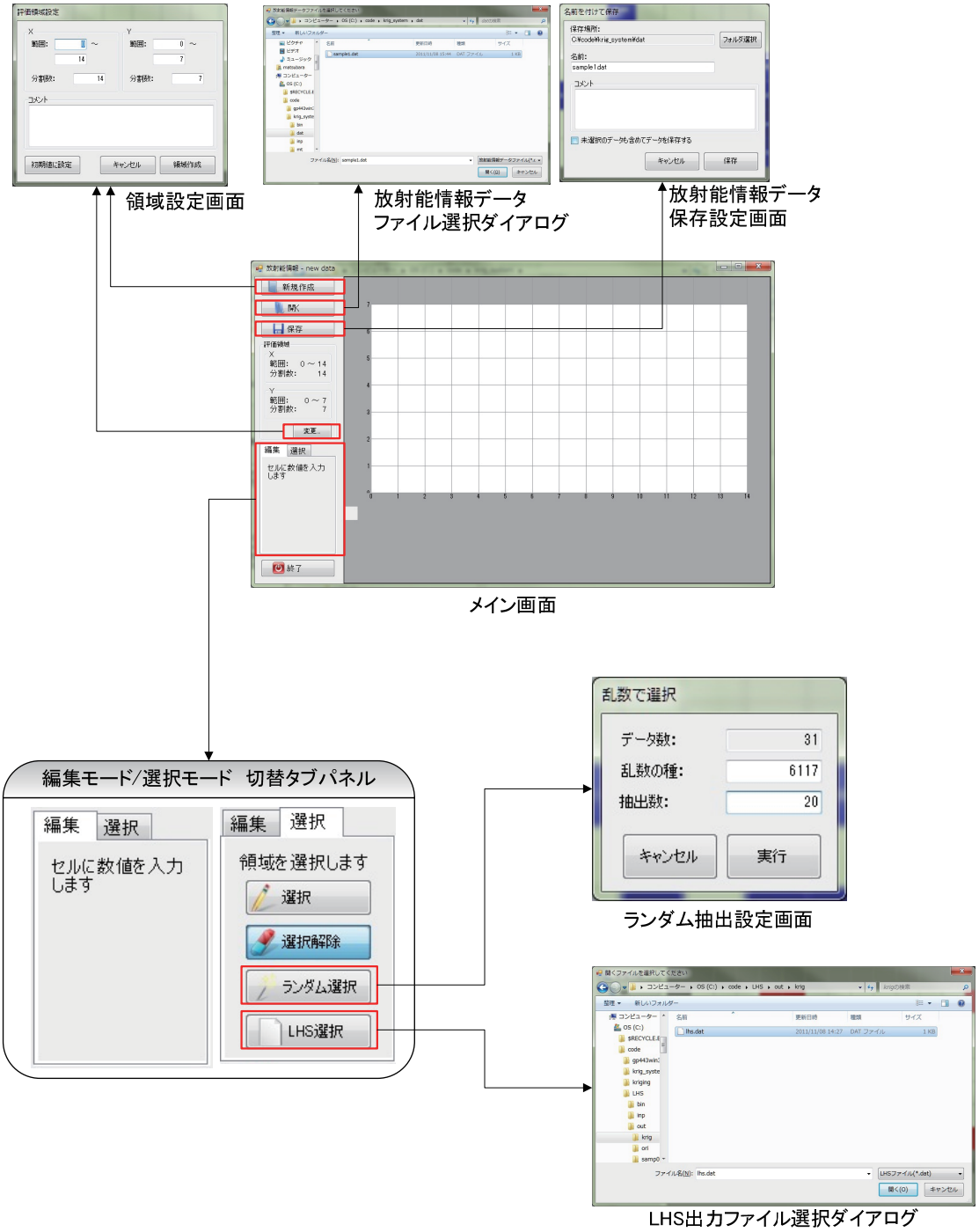


図 5.3　標本抽出コードの画面構成

(3) 新規データの入力

メイン画面左側の[新規作成]ボタンを押すと、領域設定画面(図 5.4)が表示される。

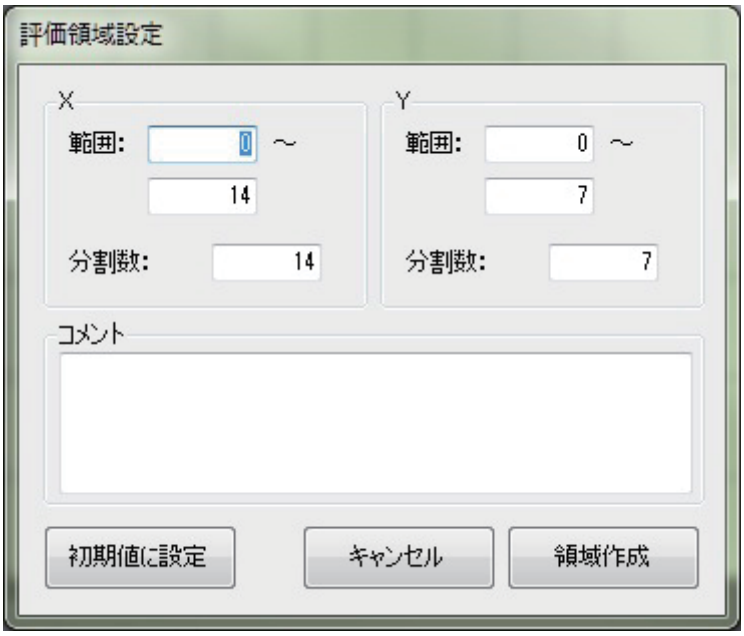


図 5.4　領域設定画面（例）

この画面では、X 方向の最小値と最大値およびメッシュの分割数、Y 方向の最小値と最大値およびメッシュの分割数、さらにコメントを入力する。

領域設定の入力を行い、「領域作成」ボタンをクリックすると、領域設定画面が閉じ、メイン画面右側に設定した評価領域がメッシュで表示される(図 5.5)。

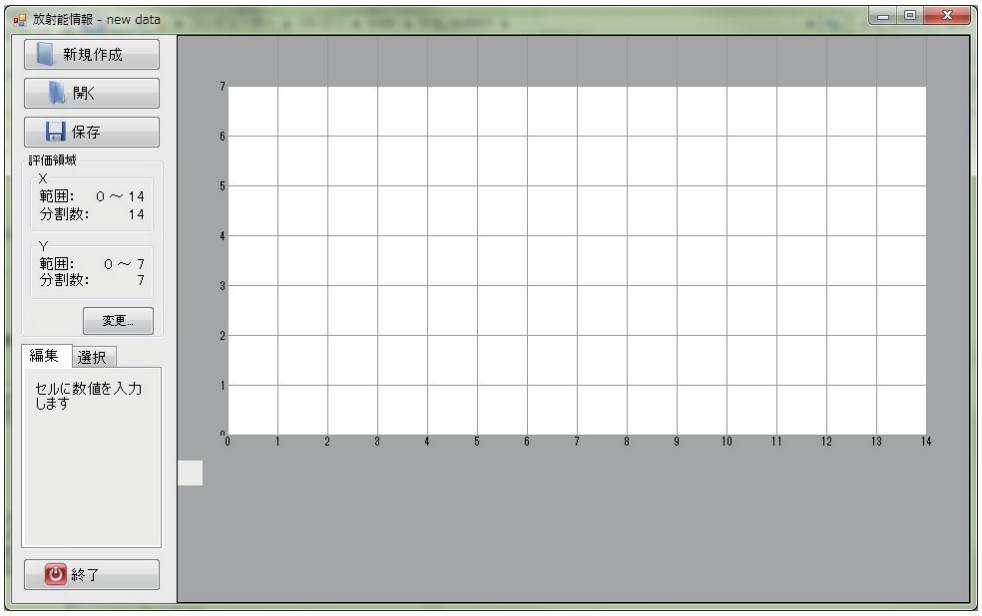


図 5.5　評価領域が設定されたメイン画面（例）

[編集/選択]の切替タブパネルの[編集]タブを選択した状態にし、放射能情報データと対応するメッシュをマウスで選択し放射能情報データを入力する。

(4) 既存データの読み込み

既存の放射能情報データファイルを読み込む場合は、メイン画面左側の[開く]ボタンを押す。放射能情報データファイル選択ダイアログ(図 5.6)が表示されるので、目的のファイルを選択し、[開く(O)]ボタンを押す。

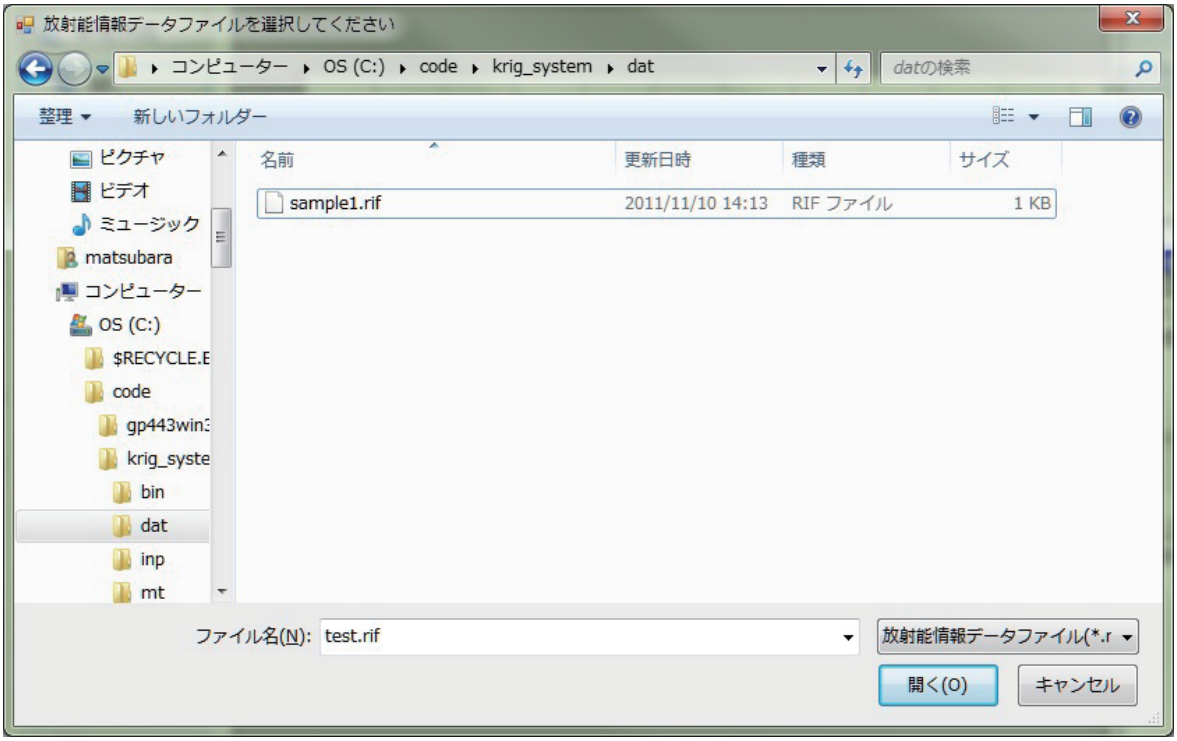


図 5.6　放射能情報データファイル選択ダイアログ(例)

メイン画面に評価領域が設定されていない場合

メイン画面に評価領域が設定されていない場合とは、メイン画面の左側に示されている評価領域のデータであるX,Y座標の範囲と分割数がともに0と表示されている場合である(図 5.2)。

選択した放射能情報データファイルと同じ名称の評価領域指定ファイルがあれば、評価領域指定ファイルをロードし、メイン画面にメッシュと放射能情報データが表示される(図 5.7)。

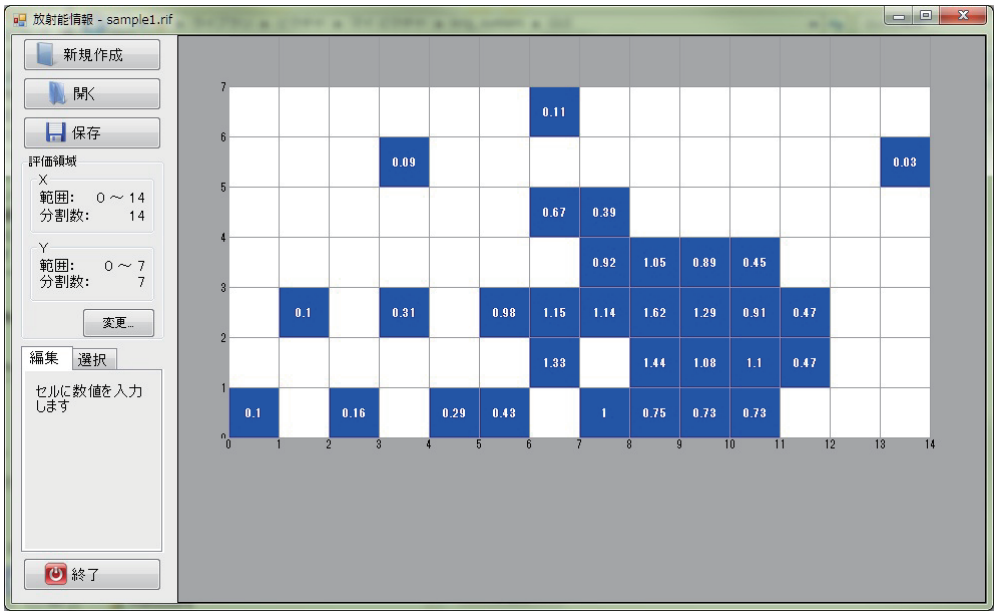


図 5.7　放射能情報データをロードしたメイン画面(例)

放射能情報データファイルと同じ名称の評価領域指定ファイルがない場合、評価領域指定ファイルを指定するかどうかの確認を促すダイアログ(図 5.8)が表示される。

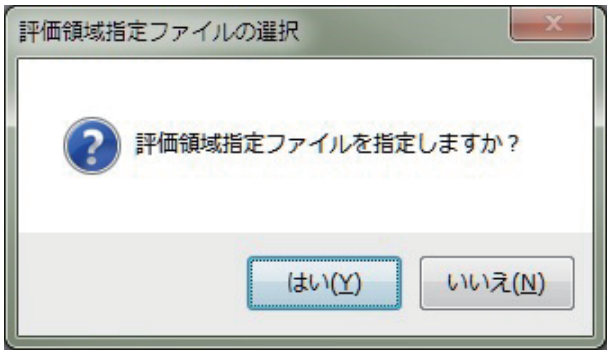


図 5.8　評価領域ファイル選択確認ダイアログ

[はい(Y)]を選択すると、評価領域指定ファイル選択ダイアログ(図 5.9)が表示される。評価領域指定ファイルを選択すると、評価領域指定ファイルをロードし、メイン画面にメッシュと放射能情報データが表示される(図 5.7)。

[いいえ(N)]を選択すると放射能情報データファイルのロードはキャンセルされる。

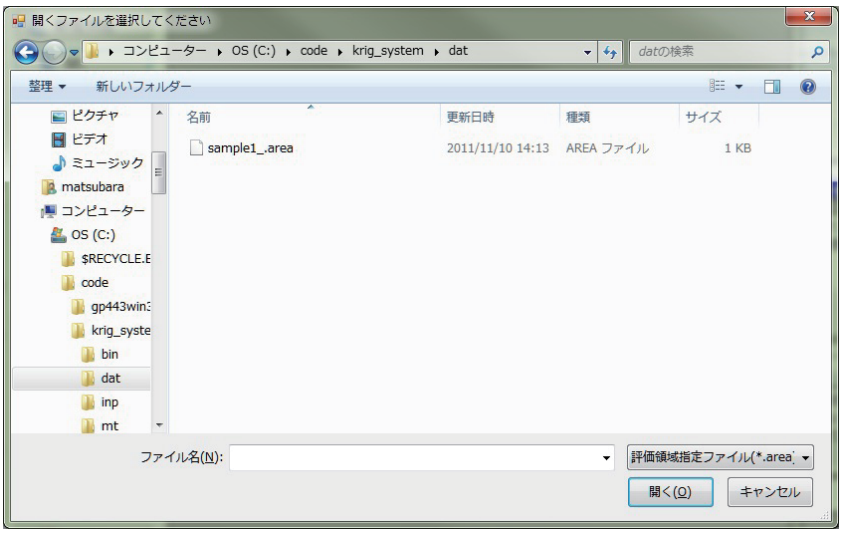


図 5.9　評価領域指定ファイル選択ダイアログ(例)

<u>メイン画面に評価領域が設定されている場合</u>

選択した放射能情報データファイルを現在表示されている評価領域上にロードするかどうかを確認するダイアログ(図 5.10)が表示される。

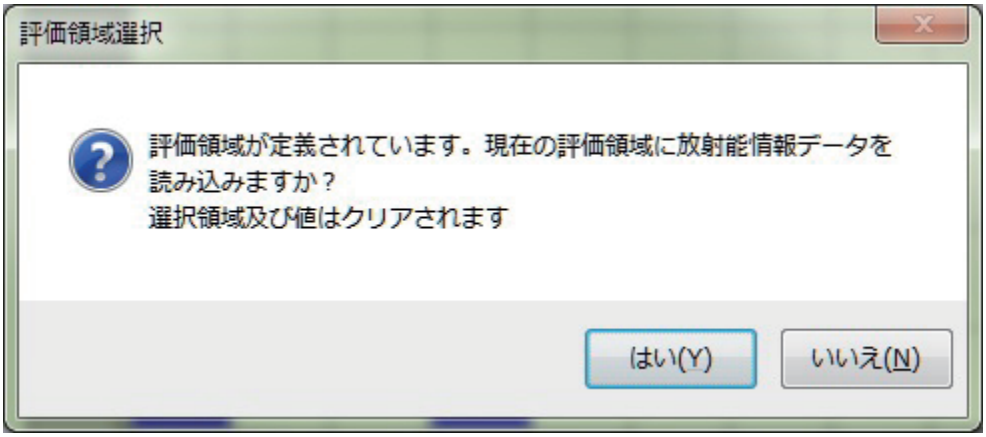


図 5.10　現在開いている評価領域への上書き確認ダイアログ

[はい(Y)]を選択すると、現在表示されているメッシュの対応する個所に、放射能情報データが表示される。

[いいえ(N)]を選択すると、放射能情報データファイルと同じ名称の評価領域指定ファイルがあるかプログラムがチェックを行い、ある場合は評価領域指定ファイルをロードし、メイン画面にメッシュと放射能情報データが表示される(図 5.7)。放射能情報データファイルと同じ名称の評価領域指定ファイルがない場合、別の評価領域指定ファイルを指定するかどうかの確認を促すダイアログ(図 5.8)が表示される。[はい(Y)]を選択すると、評価領域指定ファイル選択ダイアログ(図 5.9)が表示され、評価領域指定ファイルを選択すると、評価領域指定ファイルをロー

ドし、メイン画面にメッシュと放射能情報データが表示される(図 5.7)。[いいえ(N)]を指定すると放射能情報データファイルのロードはキャンセルされる。

(5) 標本地点の選出法

評価領域の中から標本地点を無作為に抽出する方法として以下の 2 通りの手法が用意されている。

① 無作為抽出法
② LHS 法

標本抽出コードには、①のために MT コードが組み込まれている。②については、ユーザーが別途 LHS コードを実行して作成される出力ファイル(LHS 出力ファイル)を読み込むこととしている。

① 無作為抽出

はじめにメイン画面の[新規作成]で評価領域の指定を行う。次に、放射能情報データが未入力の画面で、[編集/選択]切替タブパネルの[選択]タブを選択した状態する。選択タブパネル内の[ランダム選択]ボタンを押すと、ランダム選択設定画面(図 5.11)が表示される。

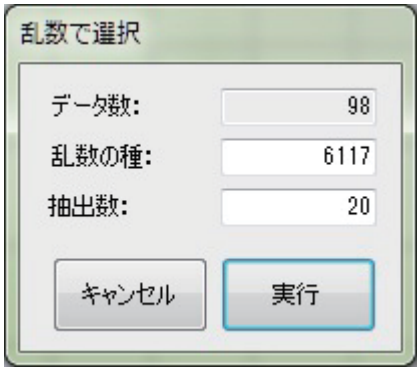


図 5.11　無作為抽出設定画面(例)

データ数には、現在設定されている評価領域の全メッシュ数が表示される。乱数の種には任意の整数を指定する。抽出数には設定したい標本地点の数を入力する。

[実行]ボタンを押すと、ランダム選択の結果がメイン画面に表示される(図 5.12)。

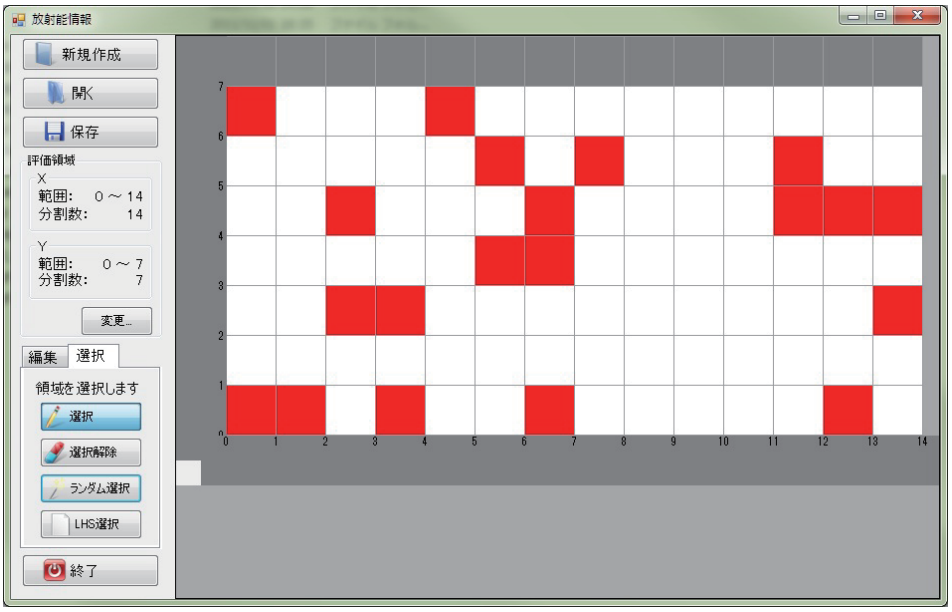


図 5.12　無作為抽出法による標本地点の選定結果を表示したメイン画面(例)

赤く塗られたメッシュが、選択された標本地点である。このメッシュに放射能情報データを入力すると、青に変わる(図 5.13)。

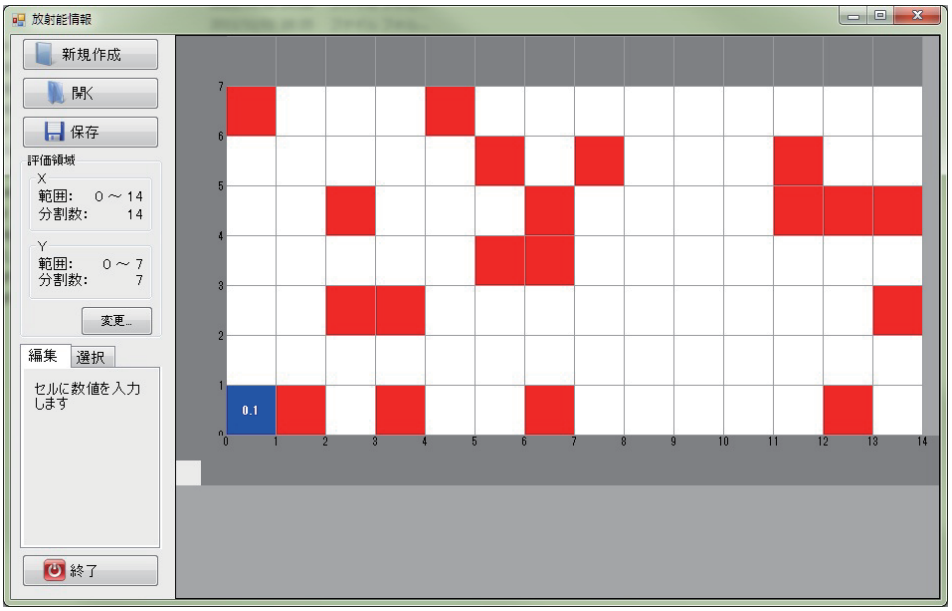


図 5.13　標本地点にデータを入力した例

(6) LHS 出力ファイルの読み込み

LHS コードの出力ファイルを読み込み表示する。

はじめに、メイン画面の[新規作成]で評価領域の指定を行う。次に、放射能情報データが未入力の画面で、[編集/選択]切替タブパネルの[選択]タブを選択した状態にする。選択タブパネル内の[LHS 選択]ボタンを押すと、LHS 出力ファイル選択ダイアログが表示される(図 5.14)。

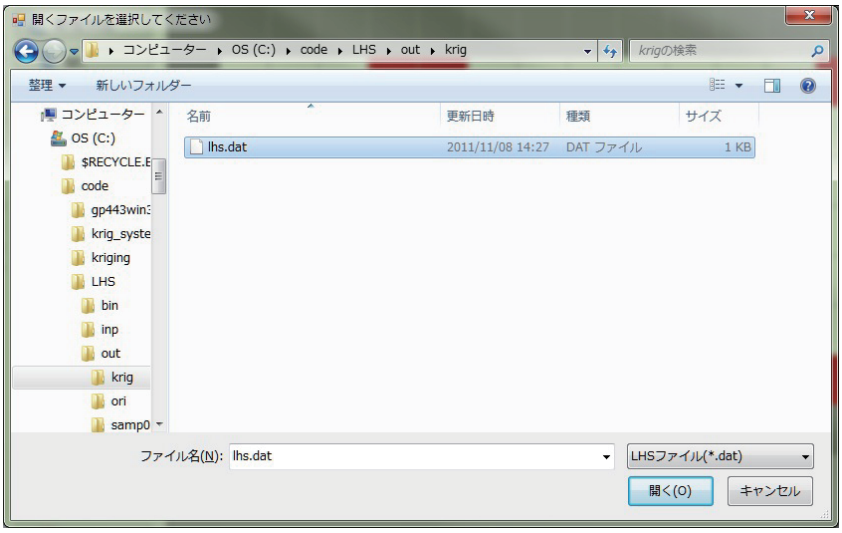


図 5.14　LHS 出力ファイル選択ダイアログ

ファイルを選択し、[開く(O)]ボタンを押すと、LHS コードの出力を読み込んだ結果がメイン画面に表示される(図 5.15)。赤く塗られたメッシュが、選択された標本地点である。

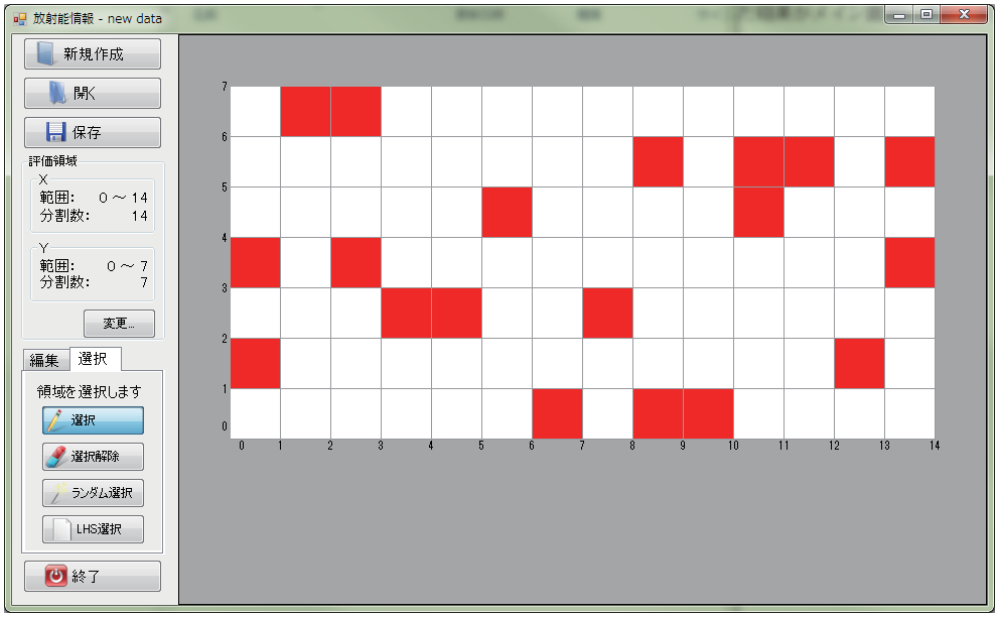


図 5.15　LHS 法によって抽出された標本地点の表示画面(例)

(7) 入力済み放射能情報データからの標本抽出

入力済みの放射能情報データから任意に指定した数の標本地点を抽出する。この機能は、クリギングによる推定結果の妥当性を検討する上で有用なものである。すなわち、この妥当性を検討するためには、標本データの一部を用いてクリギング計算を行い、クリギング計算に用いなかった他の標本地点における真値(標本データ)と推定結果とを比較することが必要となる。本機能は、この比較計算において使用する標本データの抽出を支援するものである。

標本抽出コードでは、メッシュの色が青く塗られている状態を「選択状態」、白く塗られている状態を「選択解除状態」と定義している。「選択状態」のメッシュについては、データが標本抽出済み放射能情報データファイルに出力されるが、「選択解除状態」のメッシュについてはデータが入力されていても標本抽出済み放射能情報データファイルには出力されない。

標本抽出の方法には、ユーザー指定と無作為抽出の 2 通りがある。各抽出方法の手順は次のとおりである。

① ユーザー指定による標本抽出

ユーザーが任意の標本地点のデータを選択/選択解除することができる。放射能情報データが入力された状態で、[編集/選択]切替タブパネルの[選択]タブを開いた状態にする(図 5.16)。

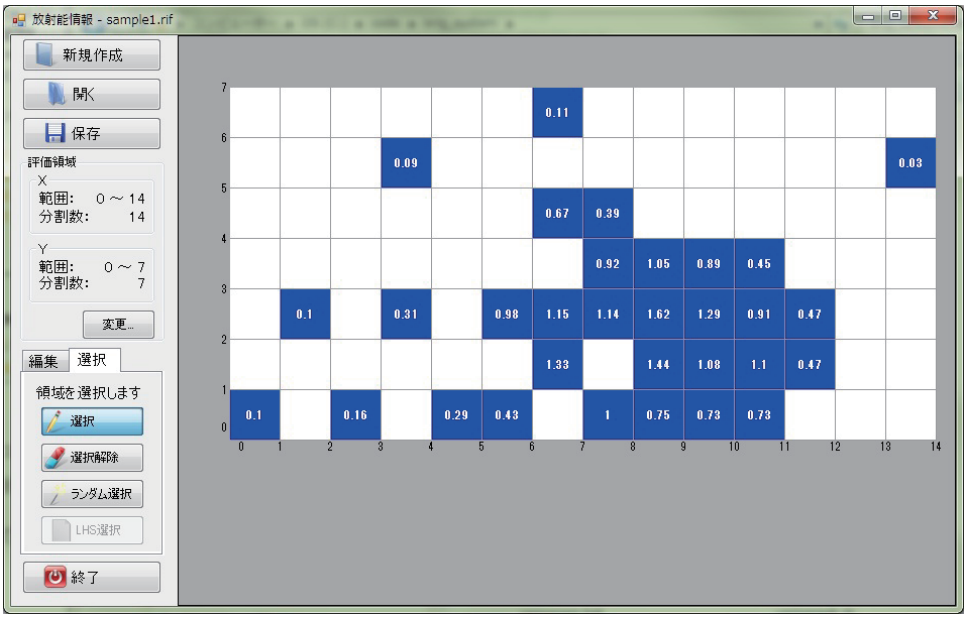


図 5.16　選択タブを開いたメイン画面（例）

選択タブの[選択]スイッチと[選択解除]スイッチを使用する。選択したいときは、[選択]スイッチをクリックし、選択モードにする。次に、選択状態にしたいメッシュをマウスでクリックすると、クリックされたメッシュは「選択状態」になり、青になる。

選択を解除したいときは、[選択解除]スイッチをクリックし、選択解除モードにする。解除したいメッシュをマウスでクリックすると、クリックされたメッシュは「選択解除状態」になり、白くなる。

なお、全部のデータを選択または解除したい場合は、[選択]スイッチまたは[選択解除]スイッチをクリックした後、メッシュの端から端までマウスをドラッグすることで一気に実行できる。

② 無作為抽出

抽出したい標本数を指定して、無作為に抽出する。

放射能情報データが入力された状態で、[編集/選択]切替タブパネルの[選択]タブを開いた状態する(図 5.16)。[ランダム選択]ボタンを押すと、無作為抽出設定画面が表示される(図 5.17)。

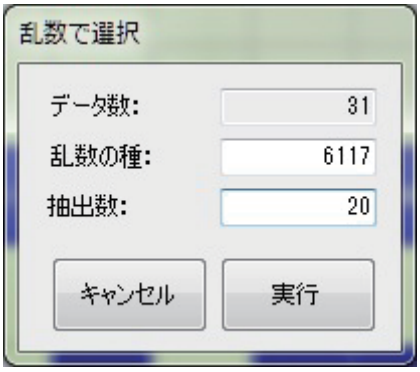


図 5.17　無作為抽出設定画面（例）

現在、「選択状態」になっているメッシュの数が「データ数」として表示される。「乱数の種」には任意の整数を入力し、「抽出数」には、抽出したい標本数（「データ数」以下の値）を指定する。

[実行]ボタンを押すと、メイン画面に結果が表示される(図 5.18)。

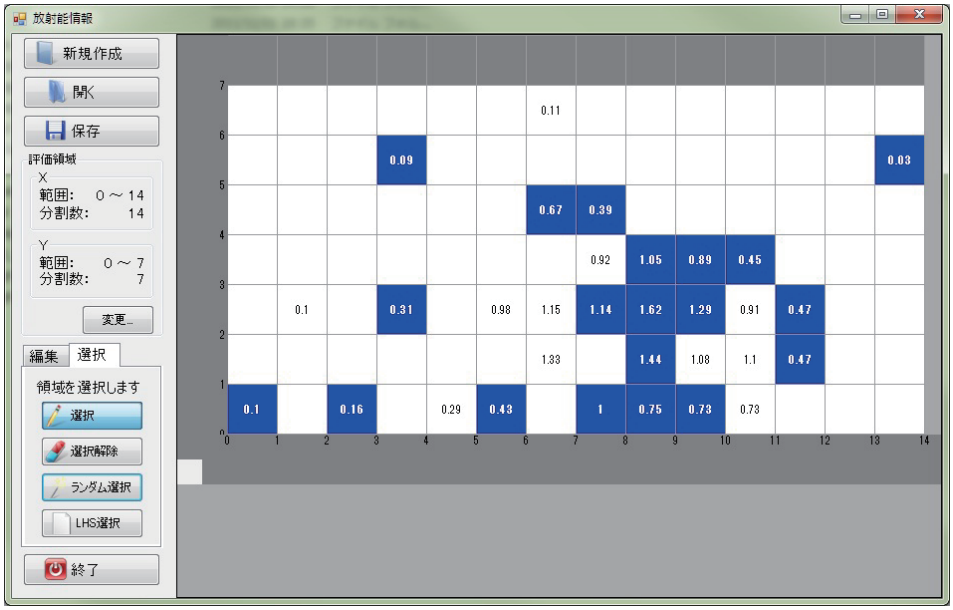


図 5.18　無作為抽出された標本データの画面（例）

抽出されたメッシュは青く表示され、抽出されなかったメッシュは白く表示される。

(8) データの保存

入力した放射能情報データを保存する。

メイン画面の[保存]ボタンを押すと、保存設定画面(図 5.19)が表示される。

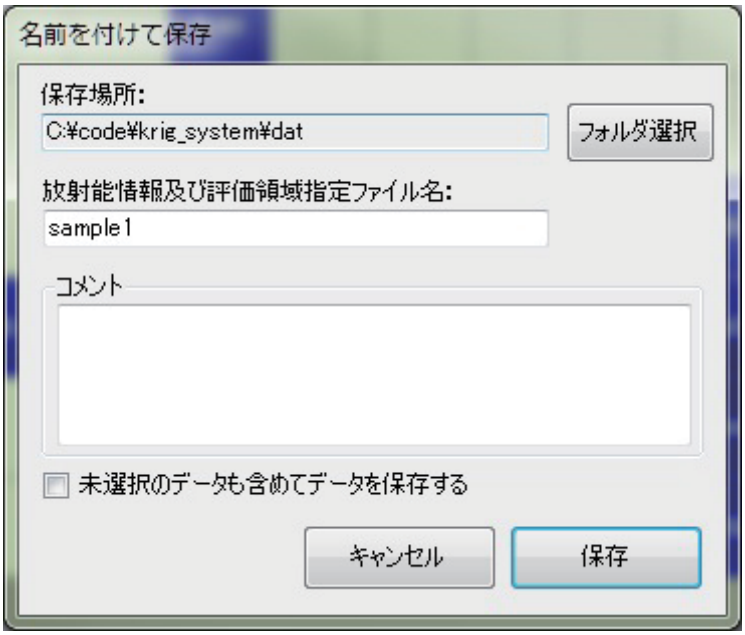


図 5.19　保存設定画面（例）

[保存場所]には、作成するファイルの保存ディレクトリを設定する。変更するには、[フォルダ選択]ボタンを押すと表示されるディレクトリ選択ダイアログ(図 5.20)を使用する。

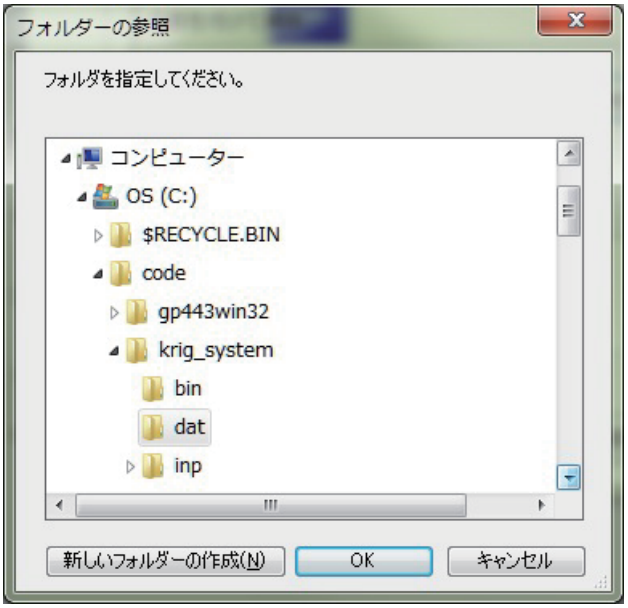


図 5.20　ディレクトリ選択ダイアログ

[放射能情報及び評価領域指定ファイル名]には、作成するファイルのファイル名を入力する。拡張子の指定は、プログラムが自動で付けるため不要である。

[未選択のデータも含めてデータを保存する]のチェックボックスをチェックすると、選択状態に関係なく評価メッシュ上に入力されているすべての放射能情報データが保存される。チェックが外れている状態では、選択状態のメッシュのデータのみが保存される。

5.3　バリオグラム計算コードの実行方法

バリオグラム雲および標本バリオグラムの作成、バリオグラム計算コードの実行方法を述べる。

(1) 準備

本計算コードの実行前に、入力ファイルを保存するためのディレクトリを inp ディレクトリ内に作成する。

バリオグラム計算に使用するファイルは次項の入力ファイル以外に、標本抽出済み放射能情報データファイルを用いるため、このファイルの場所を確認する。

(2) 入力ファイルの作成

バリオグラム計算コードへの入力ファイルを作成し、“.vinp”の拡張子を付けて(1)で作成したディレクトリ（inp ディレクトリ内）に保存する。

(3) 計算の実行

計算実行の手順は次のとおりである。

① CMD(コマンドプロンプト)の起動

「スタート」→「(すべての) プログラム」→「アクセサリ」→「コマンドプロンプト」の順に項目を選択すると、CMD が起動する。

② カレントディレクトリの移動

放射能分布推定プログラムのメインディレクトリ(“krig_system”ディレクトリ)まで、カレントディレクトリを移動する。「現在」のカレントディレクトリは、“>”の前に表示されているディレクトリである(図 5.21)。

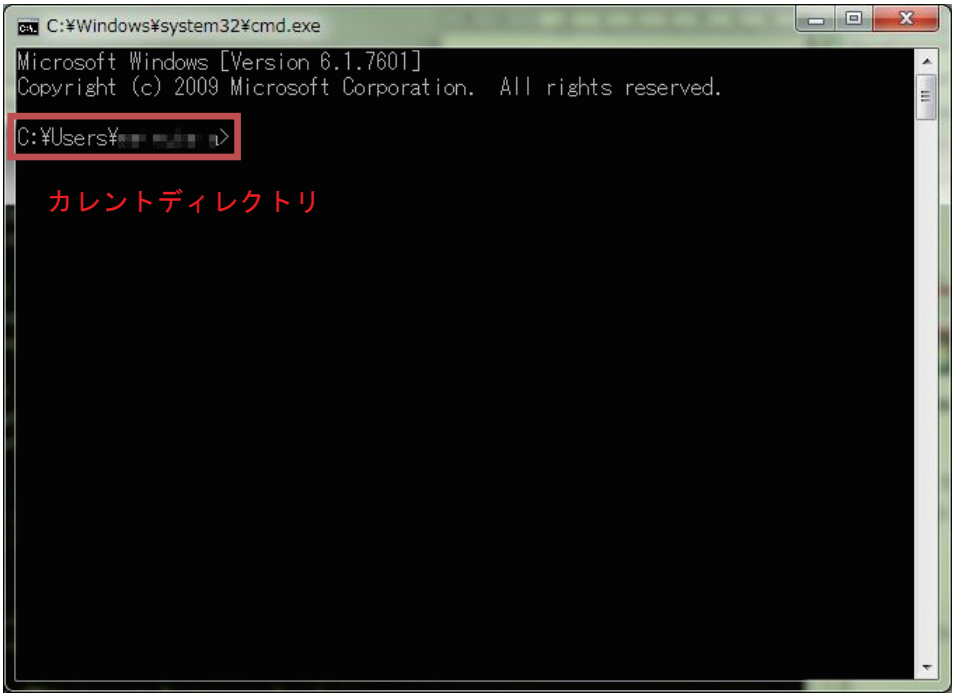


図 5.21　cmd 起動画面(モザイクはシステムのユーザー名)

カレントディレクトリが放射能分布推定プログラムのメインディレクトリでない場合は、カレントディレクトリを放射能分布推定プログラムのメインディレクトリ(“krig_system”ディレクトリ)に移動する。すなわち、“>” 記号の後に、以下のコマンド(例)を入力する(図 5.22)。

```
C:¥Users¥jaea>cd C:¥code¥krig_system
```

※　下線部は放射能分布推定プログラムのインストール先に合わせること。

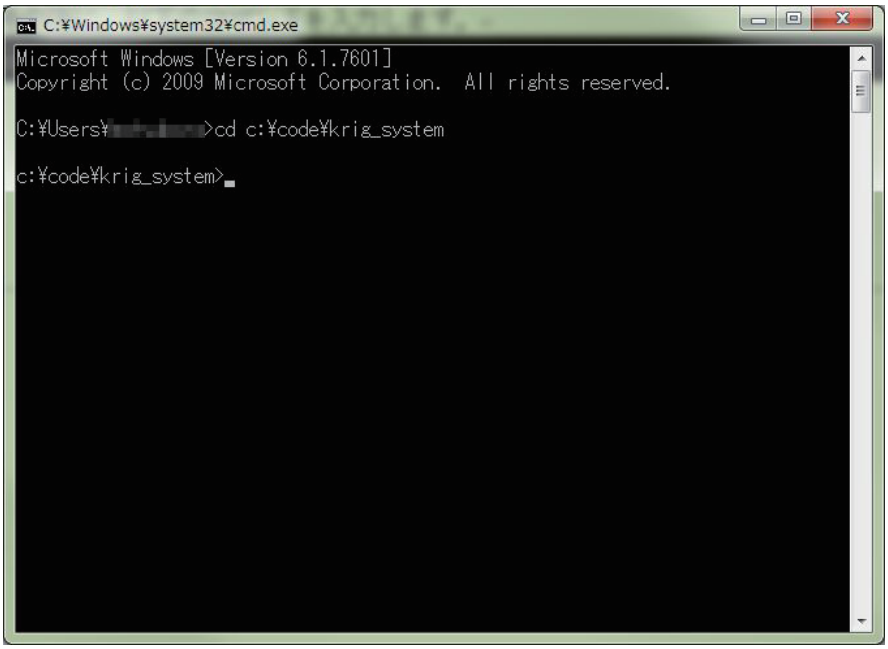


図 5.22　カレントディレクトリの移動（例）

なお、放射能分布推定プログラムのインストール先が C ドライブではなく、別のドライブの場合、cd の後に /d を付ける。

(例) cd /d d:¥krig_system

③ バリオグラム計算コードの実行
実行には、計算用バッチを使用する。
カレントディレクトリを krig_system ディレクトリに移動した状態で、

```
variogram.bat [ディレクトリ名] [入力ファイル名]
```

を入力する。
[ディレクトリ名] : (1)項で作成したディレクトリ名
[入力ファイル名] : (2)項で作成した入力ファイルのファイル名(拡張子はつけないこと)

例えば、sample1 ディレクトリ内の exponent.vinp を使用する場合は、

```
variogram.bat sample1 exponent
```

と、入力する。

以上でバリオグラムに関する計算が開始され、計算結果が出力される。

5.4　クリギング計算コードの実行方法

(1) 準備

まず、入力ファイルを収めるディレクトリを inp ディレクトリ内に作成する。

クリギング計算に使用するファイルは(2)の入力ファイル以外に、

1) 標本抽出済み放射能情報データファイル
2) 評価領域指定ファイル
3) 真値と推定値の比較の対象とする放射能情報データファイル

を用いるため、これらのファイルの場所を確認する。

3)は、*ARE*（(3.3)式参照）を計算する際に真値として使用する放射能情報データが収納されたファイルである。無作為抽出法やユーザー指定の方法で既存の標本地点数より少ない標本地点数を用いてクリギングを実行したときの評価地点での推定値がそこでの真値(標本データ)と比較される。

(2) 入力ファイルの作成

クリギング計算コードへの入力ファイルを作成し、“.kinp”の拡張子を付けて inp ディレクトリ内のディレクトリに保存する。

(3) 計算の実行

計算を実行する手順は次のとおりである。

①　cmd(コマンドプロンプト)を起動し、カレントディレクトリを krig_system に移動する。cmd の起動およびカレントディレクトリの移動についての手順はバリオグラム計算コードの場合と同様である（5.3 参照）。

② 計算の実行

計算実行には、計算用バッチを使用する。

カレントディレクトリを krig_system ディレクトリに移動した状態で、

```
krig.bat [ディレクトリ名] [入力ファイル名]
```

と入力する。ここに、

[ディレクトリ名] : (1)で作成した入力ファイルを収めたディレクトリ名
[入力ファイル名] : (2)で作成した入力ファイルのファイル名(拡張子はつけないこと)
である。

例えば、sample1 ディレクトリ内の exponet.kinp を使用する場合は、

```
krig.bat sample1 exponent
```

と、入力する。

以上でクリギング計算が開始され、計算結果が出力される。

5.5　利用上の留意点

放射能分布推定プログラムを利用するに当たっての留意点は次のとおりである。

- Windows XP SP2 以降のオペレーションシステムで動作する。
- プログラムの実行は、標準の Windows 環境で可能である。
- 各図の出力には、別途、オブジェクト指向スクリプト言語 Ruby 1.9[13]以降のバージョンおよびグラフ作成用アプリケーションソフト GNUPLOT のインストールが必要である。
- 結果の閲覧には ps 形式のファイルの閲覧可能なビューワソフトが必要である。
- Windows XP では、データサンプリング機能の GUI のために、.NET Framework 3.5 SP1[14]以上のバージョンの導入が必要である。

6　サンプルラン

原子力科学研究所敷地に建設されたプルトニウム研究 2 棟(以下 Pu2 棟)の廃止措置においては、平成 20 年 4 月に施設の管理区域が解除され、平成 21 年 2 月に建屋の撤去が完了した。その後、建屋の床下および周辺土壌中汚染器具等の調査および撤去作業が行われた。同作業の一環として Pu2 棟東側周辺土壌を対象に可搬型 Ge 半導体検出器によって放射線測定が実施された。ここでは、同測定で得られた測定結果を標本データとして ESRAD によるサンプル計算を行った。

(1)標本データ

Pu2 棟の周辺（X 方向 14m、Y 方向 7m）の領域を 1m×1m のメッシュに分割して ^{137}Cs の放射線が計測された。各メッシュの放射線測定値（計数率：cps）を図 6.1 に示す。データの数は 31 であるが、この中から 20 個のデータを標本データ(図 6.1 において数字の右上に* が付いたもの)として用いた。なお、他の 11 個のデータは当該地点における本プログラム計算結果(推定値)と比較のために利用した。

(2)入力データ

標本抽出コードへの入力データは、図 6.1 に示した 20 個の標本地点における ^{137}Cs の放射線測定値(cps)である。その入力ファイルを表 6.1 に示す。

バリオグラム計算コードへの主な入力データと入力ファイルをそれぞれ表 6.2 と表 6.3 に示す。バリオグラムモデルについては、ナゲット効果なしの球型モデルとし、パラメータ値を求めるために 2.2 で述べた最小 2 乗法を用いた。

クリギング計算コードへの主な入力データと入力ファイルをそれぞれ表 6.4 と表 6.5 に示す。バリオグラムモデルは、バリオグラム計算コードにより得られた次式である。

$$\begin{aligned}\gamma_T(h,a,b,c) &= 0.437\times\left\{3/2\times(h/9.11)-1/2\times(h/9.11)^3\right\} \qquad h\le 9.11\\ &= 9.1 \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad h>9.11\end{aligned} \tag{6.1}$$

(3)計算結果

バリオグラム計算コードの出力であるバリオグラム雲、標本バリオグラム、およびバリオグラムモデルの関数を図 6.2 に示す。また、標本バリオグラムとバリオグラムモデルに係るパラメータの計算結果を、それぞれ表 6.6 と表 6.7 に示す。バリオグラムモデルと標本バリオグラムの残差平方和平方根の平均値（(4.1)式）は 0.03 であり、この値は標本バリオグラムの全クラスにわたる平均 0.22 の約 14%に相当し両者は良く一致しているといえる。

クリギング計算コードの出力である放射能情報（^{137}Cs の計数率：cps）の推定値を分布図として表示したものを図 6.3 に、また推定値に対する推定標準偏差の分布図を図 6.4 に示す。これから、^{137}Cs の汚染は領域 $(X,Y)=(7\sim10,\ 1.5\sim4)$ において比較的高くそこから離れるにつれて低くなることが分かる。汚染が高い領域は標本地点が密に選択されていることから、そこでの推定標準偏差は小さくなっている。また、^{137}Cs の計数率の確率密度関数を図 6.4

に、累積分布関数を図 6.5 に、パーセンタイル値を表 6.8 に示す。^{137}Cs の計数率は、その平均値と標準偏差がそれぞれ 0.4、0.37 であり、90%の確率（累積確率：0.05～0.95）で 0.05～1.2 の範囲にあると推定される。表 6.9 は、図 6.1 の各測定地点について測定値と推定結果を比較したものである。測定値の中で標本データとして用いなかったもの(同表において＊の付いていない 11 個の測定地点のデータ)が比較の対象となる。両者の一致の度合いを示す *ARE* の値は、6.2~51%の範囲にあること、また、いずれの測定値も推定値±推定標準偏差の範囲にあることが分かる。なお、標本地点での推定値は測定値と一致することが確認される（通常型クリギング解の性質）。

表 6.1　標本抽出コードへの入力ファイル

```
#comment
サンプル
#end_comment
* x, y, z
   0.5    0.5    0.1
   2.5    0.5   0.16
   5.5    0.5   0.43
   6.5    0.5   1.05
   7.5    0.5      1
   8.5    0.5   0.75
   6.5    1.5   1.15
  10.5    1.5    1.1
   1.5    2.5    0.1
   7.5    2.5   1.14
   8.5    2.5   1.62
   9.5    2.5   1.29
  11.5    2.5   0.47
   7.5    3.5   0.92
   8.5    3.5   1.05
   9.5    3.5   0.89
  10.5    3.5   0.45
   7.5    4.5   0.39
   3.5    5.5   0.09
  13.5    5.5   0.03
```

表 6.2　バリオグラム計算コードへの主な入力データ

項　目	データ
標本バリオグラム	
クラス数	4
考慮する距離の最大値	7
バリオグラムモデル	球型
モデルパラメータの推定方法	最小2乗法
ナゲット効果の考慮の有無	考慮せず
最小二乗法における加重係数	1

表 6.3　バリオグラム計算コードへの入力ファイル

```
#comment
サンプル。標本点数20。球型モデル。ナゲット効果なし。加重係数＝1
#end_comment
* ---------------------------------------------------------------------------
* Card 1 データファイルの指定
* 放射能情報データファイル
.¥dat¥sampleA_20.rif
* ---------------------------------------------------------------------------
* Card 2 標本バリオグラム
* nclass: クラス数
* 対数化オプション(/0/対数化しない/  /1/log10(z)/ /2/ln(z)/)
 4    0
* h_limit: 距離として考慮する最大値(0.のときはすべて使用する)
 7.
* ---------------------------------------------------------------------------
* Card 3 バリオグラムモデルの指定
* (左詰めですべて小文字で記載すること)
* nugget  : ナゲット効果モデル
* spheric : 球形モデル
* gauss   : ガウスモデル
* exponent: 指数型モデル
* linear  : 線形補間モデル
spheric
*gauss
*exponent
* ---------------------------------------------------------------------------
* Card 4 モデル関数の推定方法
* lsm(/0/LSM 実施//1/実施しない/)
  0
* lsm=1のとき、各モデルのパラメータを指定する(0のときは入力しないこと)
* range  sill nugget
*
* ---------------------------------------------------------------------------
* Card 5 重み付最小二乗法に関する設定
* nugget_effect: ナゲットを考慮するかどうかのフラグ(/0/考慮しない/  /1/考慮する/)
* weight_model : 加重モデル    1.  1.0'
*                              2.  N(h)
*                              3.  1.0/((G(h))**2)
*                              4.  N(h)/((G(h))**2)
*                              5.  N(h)/(h**2)
* nugget_effect  weight_model
      0            1
```

表 6.4　クリギング計算コードへの主な入力データ

項　目	データ
バリオグラム	
モデル	球型
パラメータ a	9.11
パラメータ b	0.437
パラメータ c	0
確率密度関数の区間数	8

表 6.5　クリギング計算コードへの入力ファイル

```
#comment
 サンプル。標本点数20点。球形モデル。ナゲット効果なし。加重係数＝1。
#end_comment
* ---------------------------------------------------------------------------
* Card 1 データファイルの指定
* 放射能情報データファイル
.¥dat¥sampleA_20.rif
* 評価範囲指定ファイル
.¥dat¥sampleA.area
* 放射能情報データファイル(ARE計算の真値として利用)
.¥dat¥sampleA.rif
* ilog : バリオグラムの選定時に設定した対数化オプション(/0/対数化しない/  /1/log10(z)/ /2/log(z)/)
 0
* ---------------------------------------------------------------------------
* Card 2 モデルの指定
* モデル
*nugget
spherical
*exponent
*gauss
*linear
* ---------------------------------------------------------------------------
* Card 3 モデルパラメータの指定(linearの場合は入力しないこと)
* パラメータ
* range   sill   nugget
 9.1054  0.43675   0.
* ---------------------------------------------------------------------------
* Card 4 モデルパラメータの指定(linear以外の場合は入力しないこと)
* nclass: クラス数
*   4
* - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
* h: 各クラスにおける平均距離
* g: 各クラスにおける標本バリオグラム
*  (h, gの入力をnclass回繰り返す)
* h     g
* ---------------------------------------------------------------------------
* Card 5
* npdf: PDF(確率密度関数)の区間数
8
* ---------------------------------------------------------------------------
* Card 7 ユーザー指定領域の評価
* nrange: 任意領域の評価(/0/評価しない//>1/指定された数分の領域を評価/)
    0
* lx: 左下隅X座標
* ux: 左下隅X座標
* ly: 左下隅X座標
* uy: 左下隅X座標
* nx: 左下隅X座標
* ny: 左下隅X座標
* 任意評価領域1の座標(左下隅と右上隅)
* lx, ly, ux, uy, nx, ny
*   3.  1.  10.  6.  7  5
```

表 6.6　標本バリオグラムの計算結果

クラス	距離 (h)			$\gamma^*(h)$	標準偏差	データ数
	下限値	上限値	平均			
1	0	1.75	1.19	0.101	0.104	25
2	1.75	3.50	2.65	0.132	0.177	51
3	3.50	5.25	4.39	0.205	0.212	45
4	5.25	7.00	6.29	0.447	0.324	30

$\gamma^*(h)$ の定義は(2.10)式

表 6.7　バリオグラムモデルに係るパラメータの計算結果

パラメータ			残差平方和平方根の平均
a	b	c	
9.11	0.437	0	0.03

表 6.8　^{137}Cs の計数率(cps)のパーセンタイル値

累積確率(%)									平均	標準偏差
1	5	10	25	50	75	90	95	99		
0.02	0.05	0.07	0.11	0.25	0.54	1.05	1.2	1.62	0.4	0.37

表 6.9　測定地点における測定値と推定値の比較

測定地点 X	測定地点 Y	測定値	推定値	推定標準偏差(σ)	推定値-σ	推定値+σ	ARE(%)	標本地点 (*)
0.5	0.5	1.00E-01	1.00E-01	5.74E-08	1.00E-01	1.00E-01	9.71E-14	*
2.5	0.5	1.60E-01	1.60E-01	2.51E-08	1.60E-01	1.60E-01	2.78E-13	*
4.5	0.5	2.90E-01	3.37E-01	3.14E-01	2.30E-02	6.51E-01	1.63E+01	
5.5	0.5	4.30E-01	4.30E-01	5.47E-08	4.30E-01	4.30E-01	4.39E-13	*
6.5	0.5	1.05E+00	1.05E+00	3.88E-08	1.05E+00	1.05E+00	1.27E-13	*
7.5	0.5	1.00E+00	1.00E+00	1.72E-08	1.00E+00	1.00E+00	2.22E-14	*
8.5	0.5	7.50E-01	7.50E-01	3.48E-08	7.50E-01	7.50E-01	2.22E-13	*
9.5	0.5	7.30E-01	9.21E-01	3.16E-01	6.05E-01	1.24E+00	2.61E+01	
10.5	0.5	7.30E-01	9.03E-01	3.61E-01	5.42E-01	1.26E+00	2.37E+01	
6.5	1.5	1.15E+00	1.15E+00	3.13E-08	1.15E+00	1.15E+00	1.35E-13	*
8.5	1.5	1.44E+00	1.25E+00	2.53E-01	9.97E-01	1.50E+00	1.34E+01	
9.5	1.5	1.08E+00	1.20E+00	2.60E-01	9.40E-01	1.46E+00	1.12E+01	
10.5	1.5	1.10E+00	1.10E+00	1.34E-08	1.10E+00	1.10E+00	2.22E-13	*
11.5	1.5	4.70E-01	7.12E-01	3.15E-01	3.97E-01	1.03E+00	5.14E+01	
1.5	2.5	1.00E-01	1.00E-01	7.97E-09	1.00E-01	1.00E-01	1.80E-13	*
3.5	2.5	3.10E-01	2.86E-01	3.69E-01	-8.30E-02	6.55E-01	7.90E+00	
5.5	2.5	9.80E-01	6.89E-01	3.45E-01	3.44E-01	1.03E+00	2.97E+01	
7.5	2.5	1.14E+00	1.14E+00	2.48E-08	1.14E+00	1.14E+00	1.36E-13	*
8.5	2.5	1.62E+00	1.62E+00	3.30E-08	1.62E+00	1.62E+00	2.06E-13	*
9.5	2.5	1.29E+00	1.29E+00	2.29E-08	1.29E+00	1.29E+00	2.24E-13	*
10.5	2.5	9.10E-01	8.50E-01	2.34E-01	6.16E-01	1.08E+00	6.61E+00	
11.5	2.5	4.70E-01	4.70E-01	1.72E-08	4.70E-01	4.70E-01	1.04E-12	*
6.5	3.5	6.70E-01	7.12E-01	3.04E-01	4.08E-01	1.02E+00	6.20E+00	
7.5	3.5	9.20E-01	9.20E-01	3.14E-08	9.20E-01	9.20E-01	1.69E-13	*
8.5	3.5	1.05E+00	1.05E+00	2.12E-08	1.05E+00	1.05E+00	1.48E-13	*
9.5	3.5	8.90E-01	8.90E-01	1.49E-08	8.90E-01	8.90E-01	2.49E-13	*
10.5	3.5	4.50E-01	4.50E-01	1.04E-08	4.50E-01	4.50E-01	3.45E-13	*
7.5	4.5	3.90E-01	3.90E-01	1.93E-08	3.90E-01	3.90E-01	3.56E-13	*
3.5	5.5	9.00E-02	9.00E-02	1.87E-08	9.00E-02	9.00E-02	4.19E-12	*
13.5	5.5	3.00E-02	3.00E-02	1.51E-08	3.00E-02	3.00E-02	4.28E-12	*
6.5	6.5	1.10E-01	1.52E-01	5.11E-01	-3.59E-01	6.63E-01	3.83E+01	

						0.11							
			0.09*										0.03*
							0.39*						
						0.67	0.92*	1.05*	0.89*	0.45*			
	0.1*		0.31		0.98		1.14*	1.62*	1.29*	0.91	0.47*		
						1.15*		1.44	1.08	1.1*	0.47		
0.1*		0.16*		0.29	0.43*	1.05*	1.0*	0.75*	0.73	0.73			

各区画は1m×1mとする。ブランクの箇所はデータがないことを意味する。

図 6.1　^{137}Cs の放射線測定値(計数率，単位: cps)

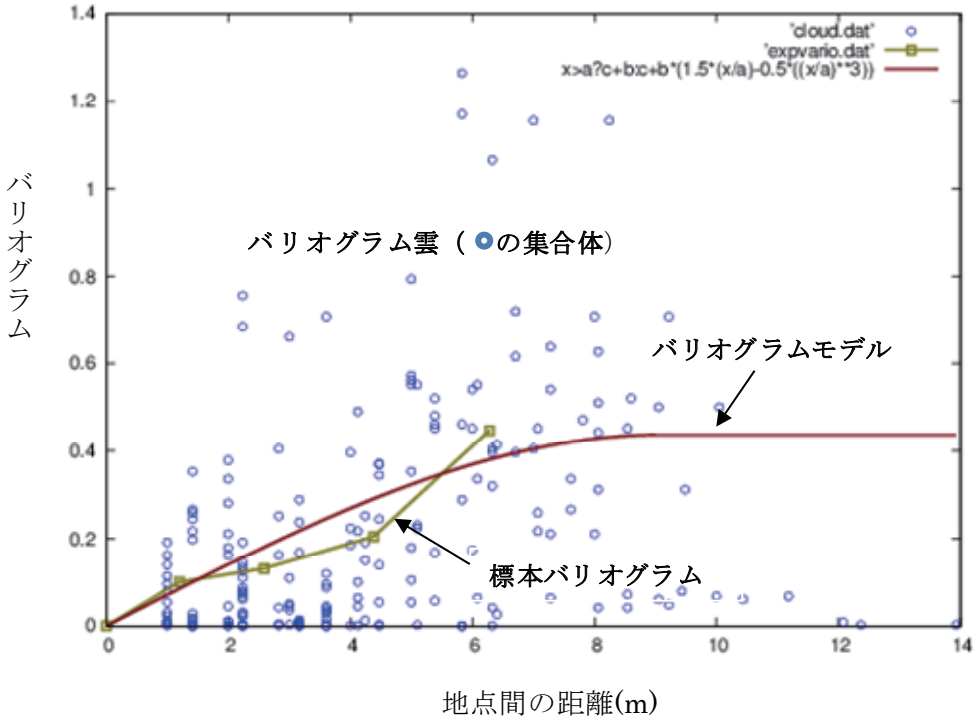
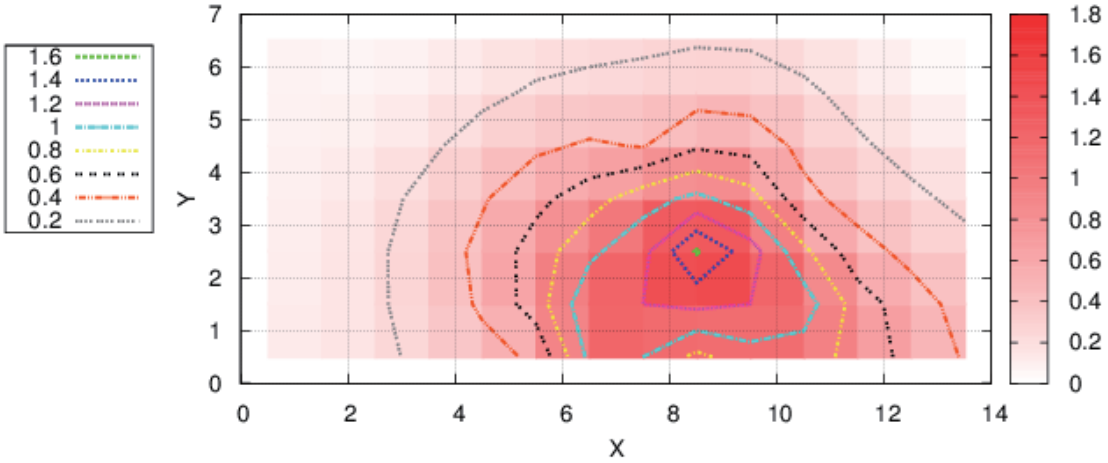
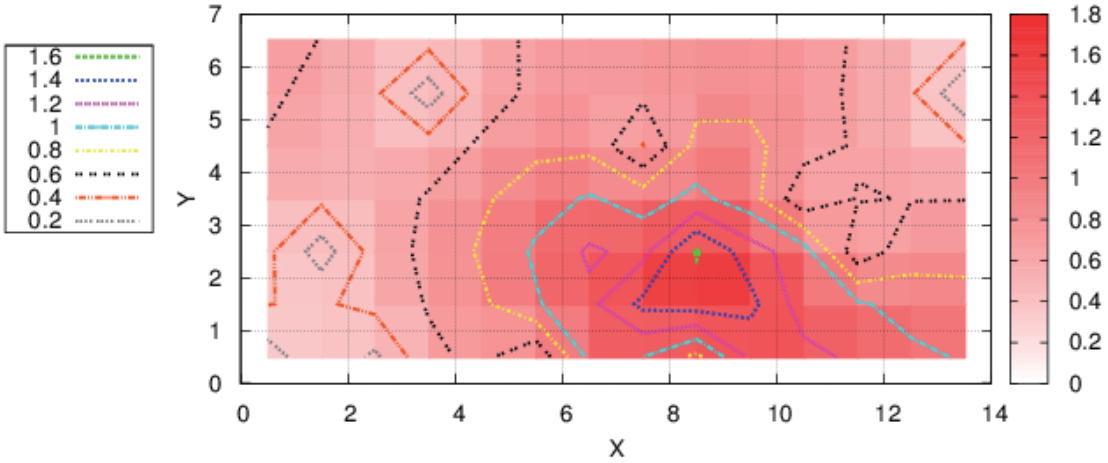


図 6.2　バリオグラム雲、標本バリオグラムおよびバリオグラムモデル



(a)　推定値



(b)　推定値＋推定標準偏差

図 6.3　^{137}Cs の計数率(cps)の分布図(推定結果)

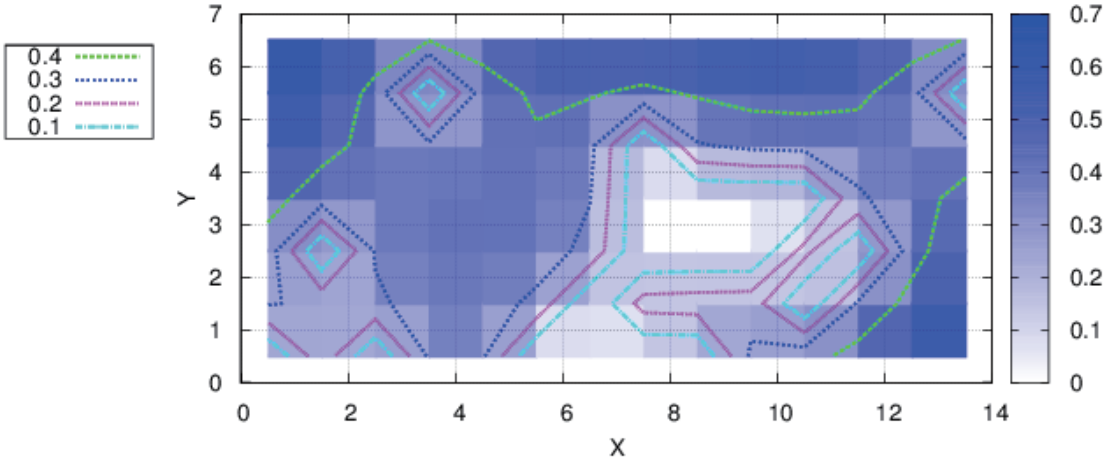


図 6.4　^{137}Cs の計数率(cps)推定値に対する推定標準偏差の分布図

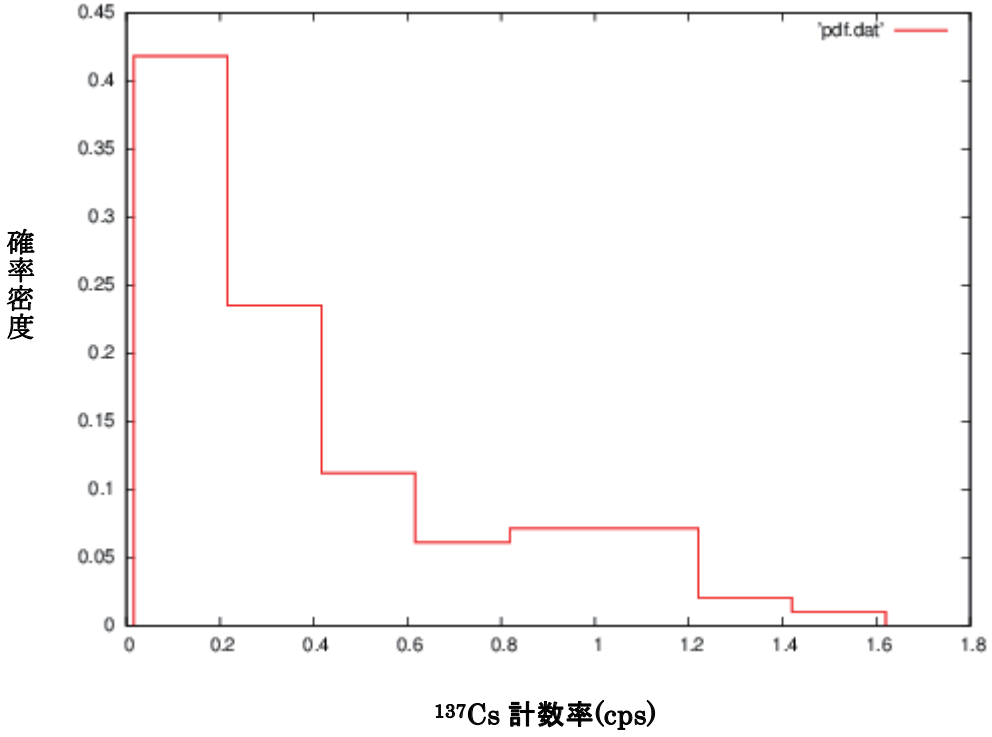


図 6.5　^{137}Cs の計数率(cps)の確率密度関数(ヒストグラム)

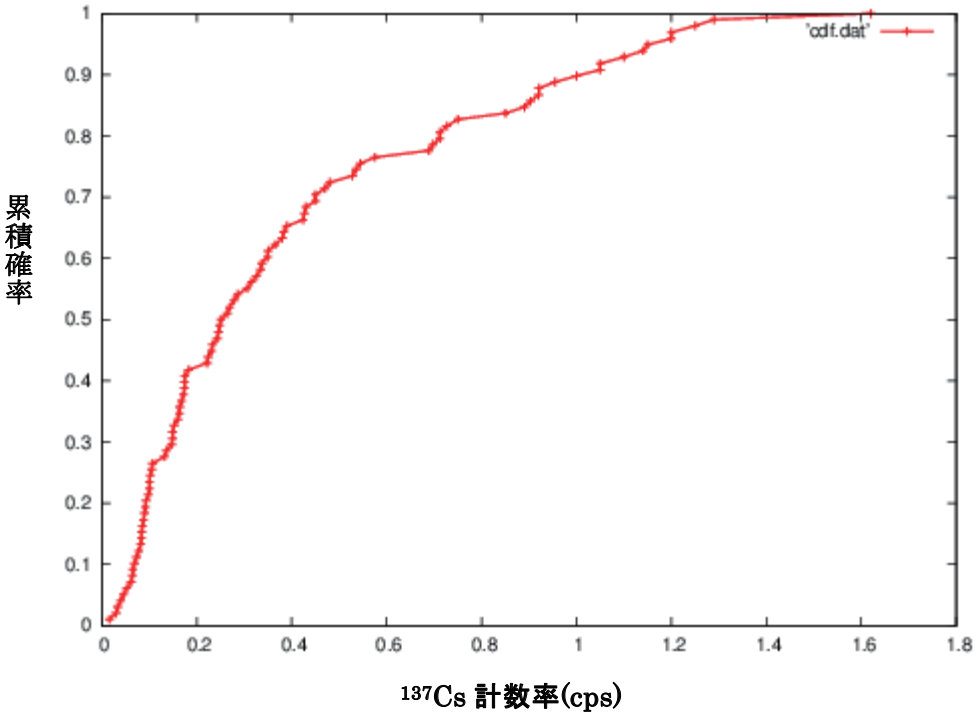


図 6.6　^{137}Cs の計数率(cps)の累積分布関数

7　おわりに

クリギングに基づく放射能分布推定プログラムを開発するとともに、廃止措置対象施設の周辺土壌に対して実施された放射線測定の結果を標本データとしてサンプル計算を行った。その結果、本プログラムは実測データを良く再現すること、評価対象領域において汚染の度合いが相対的に高い領域を同定することができること、を確認した。

クリギングの適用にあたっては、信頼性の高いバリオグラムモデルを構築することが重要であるが、バリオグラムモデルは対象とする問題に応じてユーザーの経験に基づいて設定されることが多く任意性がある。今後の課題は、バリオグラムモデルの標準的な設定方法を確立すること、また、本プログラムによる評価結果をサイト解放の判定に用いる具体的な方法を整備することである。

謝　辞

本報告書をまとめるにあたりご助言をいただいた安全研究センターの諸氏に感謝いたします。

参考文献

1) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃止措置安全小委員会, 廃止措置の終了の確認に係る基本的考え方（中間とりまとめ）-主な論点と今後の検討の方向性について-, 2011.

2) 助川武則ほか, 原子力発電所のサイト解放に関する技術的課題の検討 -米国の実績を参考としたサイト解放基準、手順、検認要件-（受託研究）, JAEA-Review 2009-075, 2010.

3) 実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則（昭和五十三年十二月二十八日通商産業省令第七十七号）最終改正：平成二四年三月二九日経済産業省令第二一号, 1978.

4) United States Department of Energy, Environmental Protection Agency, Nuclear Regulatory Commission and Department of Defense, Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (MARSSIM), NUREG-1575, 1997.

5) Nokhamzon.J.G. et al., Softwares for Radiological Assessmentof Buildings & Soils, available from http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/documents/IDN/ANL%20Course/Day_9/CEATools.pdf

6) Wackernagel, H.（原著）, 地球統計学研究委員会（訳編）, 地球統計学, 森北出版, 2003.

7) 間瀬茂ほか, 空間データモデリング－空間統計学の応用, 共立出版, 2001.

8) メルセンヌツイスターホームページ：http://www.math.sci.hiroshima-u.ac.jp/~m-mat/MT/mt.html

9) GNUPLOT のホームページ：http://www.gnuplot.info/

10) Iman, R.L. and Shortencarier, M.J., A FORTRAN77 Program and User's Guide for the Generation of Latin Hypercube and Random Samples for Use with Computer Models, NUREG/CR-3624, 1984.

11) Pardo-Iguzquiza, E., VARFIT: A Fortaran-77 Program for Fitting Variogram Models by Weighted Least Squares, Computers & Geosciences, Vol.25, 1999, pp.251-261.

12) Nelder, J.A. and R.Mead R., A Simplex Method for Function Minimization, The Computer Journal, Vol. 7, no.4, 1965, pp. 308-313.

13) オブジェクト指向スクリプト言語 Ruby のホームページ：http://www.ruby-lang.org/ja/

14) マイクロソフト .NET のホームページ：http://www.microsoft.com/ja-jp/net/default.aspx

付録 1

Nelder-Mead 法を用いたバリオグラムモデルのパラメータ値の決定方法

Nelder-Mead 法は、n 次元の引数の関数の最小化を行う場合に，初期状態では $n+1$ 個の点からなる多面体、すなわち、単体を選び、これを逐次的に改良することで最適化するものである。考え方は、以下のように $n+1$ 個の点の中で関数値が最大である点を、残り n 個の点が定める超平面の逆側に、単体の体積を保存したまま移動させる。

・移動後の点が最良点より良ければ，移動幅を大きく(拡大)
・谷状になっていることが検出されれば，移動幅を小さく(反射)
・最適値に近づいているようならば，単体の体積を縮小(収縮)

この手続きを繰り返し実行し、最適解を求める。処理の具体的内容は次のとおりである。

1) パラメータの数が IPARA(ナゲット効果を考慮しない場合は、a, b の 2 パラメータ、考慮する場合は a, b, c の 3 パラメータ)の場合、IPARA+1 個の点を設定し、それぞれのパラメータに IPARA+1 個の初期値を設定する。

バリオグラム計算プログラムでは、パラメータの初期値を VARFIT に従って、以下のとおり設定している。

点番号	パラメータ		
	a	b	c
ナゲット効果を考慮しない場合(IPARA=2)			
1	0.1×DMIN*1	0.1×S.D. *3	-
2	0.1×DMIN	2.0×S.D.	-
3	1.5×DMAX*2	2.0×S.D.	-
ナゲット効果を考慮する場合(IPARA=3)			
1	0.1×DMIN	0.1×S.D.	0.0
2	0.1×DMIN	0.1×S.D.	S.D.
3	0.1×DMIN	2.0×S.D.	0.0
4	1.5×DMAX	2.0×S.D.	S.D.

*1 DMINは標本バリオグラムにおける平均距離の最小値
*2 DMAXは標本バリオグラムにおける平均距離の最大値
*3 S.D.は全標本データにおける標本データの標準偏差

以下では、パラメータの数が 3 の場合について述べる。

2) 次式により IPARA+1 個の点に対する関数 Y の値を求める。

$$Y_i = \sum_{n=1}^{nclass} w(n) \cdot (\gamma^*(h_n) - \gamma_T(h_n, a_i, b_i, c_i))^2 \tag{A.1}$$

ここに、Y_i： i (i =1~IPARA+1)点に対する関数 Y の値

$nclass$： 標本バリオグラムのクラス数

$w(n)$： 加重係数（(3.2)式参照）

$\gamma^*(h_n)$： 距離 h_n における標本バリオグラム

$\gamma_T(h_n, a_i, b_i, c_i)$： 距離 h_n におけるバリオグラムモデルの値(2.11)～(2.15)式参照)

a_i： バリオグラムモデルにおけるパラメータ(レンジ)

b_i： バリオグラムモデルにおけるパラメータ(シル＝ $b_i + c_i$)

c_i： バリオグラムモデルにおけるパラメータ(ナゲット効果)

Y の最大値が得られた点 IMAX のパラメータセット $a_{IMAX}, b_{IMAX}, c_{IMAX}$ と最小値が得られた点 IMIN のパラメータセット $a_{IMIN}, b_{IMIN}, c_{IMIN}$ を保持する。

3) 次式を用いて変動させたパラメータセット a_{p1}, b_{p1}, c_{p1} を作成する(反射)。

$$\left.\begin{aligned}
a_{p1} &= (1 + REFL) \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^{IPARA+1} (a_i) - a_{IMAX}}{IPARA} \right) - REFL \cdot a_{IMAX} \\
b_{p1} &= (1 + REFL) \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^{IPARA+1} (b_i) - c_{IMAX}}{IPARA} \right) - REFL \cdot b_{IMAX} \\
c_{p1} &= (1 + REFL) \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^{IPARA+1} (c_i) - c_{IMAX}}{IPARA} \right) - REFL \cdot c_{IMAX}
\end{aligned}\right\} \tag{A.2}$$

$REFL$： 反射係数(デフォルト値: 0.5)

a_{p1}, b_{p1}, c_{p1} を用いて (A.1)式にしたがって Y_{p1} を求める。

4) 得られた Y_{p1} が、既存の Y の範囲内であれば、$a_{IMAX}, b_{IMAX}, c_{IMAX}, Y_{IMAX}$ を $a_{p1}, b_{p1}, c_{p1}, Y_{p1}$ に置き換える。

5) 次式を用いて収束判定を行う。

$$\sqrt{\frac{1}{IPARA+1}\cdot\sum_{i=1}^{IPARA+1}(Y_i-\overline{Y})^2} < EPS \tag{A.3}$$

$$\overline{Y} = \sum_{i=1}^{IPARA+1} Y_i/(IPARA+1) \tag{A.4}$$

EPS：収束判定基準(デフォルト値: 0.00001)

収束している場合、パラメータ推定を終了する。収束していない場合は 3)に戻る。

6) 3)で得られた Y_{p1} が、既存の Y の最小値より小さい場合、次式にしたがって新たにパラメータセット a_{p2}, b_{p2}, c_{p2} を作成する(拡大)。

$$\left.\begin{aligned}
a_{p2} &= (1+EXPA)\cdot a_{p1} - EXPA\cdot\left(\frac{\sum_{i=1}^{IPARA+1}(a_i)-a_{IMAX}}{IPARA}\right)\\
b_{p2} &= (1+EXPA)\cdot b_{p1} - EXPA\cdot\left(\frac{\sum_{i=1}^{IPARA+1}(b_i)-b_{IMAX}}{IPARA}\right)\\
c_{p2} &= (1+EXPA)\cdot c_{p1} - EXPA\cdot\left(\frac{\sum_{i=1}^{IPARA+1}(c_i)-c_{IMAX}}{IPARA}\right)
\end{aligned}\right\} \tag{A.5}$$

$EXPA$：拡大係数(デフォルト値: 2.0)

a_{p2}, b_{p2}, c_{p2} 用いて（A.1）式にしたがって Y_{p2} を求める。

7) 得られた Y_{p2} が既存の Y の最小値よりも小さいなら、$a_{IMAX}, b_{IMAX}, c_{IMAX}, Y_{IMAX}$ を $a_{p2}, b_{p2}, c_{p2}, Y_{p2}$ と置き換える。そうでない場合は、$a_{p1}, b_{p1}, c_{p1}, Y_{p1}$ を $a_{IMAX}, b_{IMAX}, c_{IMAX}, Y_{IMAX}$ と置き換える。置き換えた Y を用いて(A.3)式による収束判定を行う。収束している場合、パラメータ推定を終了する。収束していない場合は 3)に戻る。

8) 3)で得られた Y_{p1} が、既存の Y の最大値より大きい場合、$a_{p1}, b_{p1}, c_{p1}, Y_{p1}$ を $a_{IMAX}, b_{IMAX}, c_{IMAX}, Y_{IMAX}$ と置き換える。その上で、次式にしたがって新たにパラメータセット a_{p2}, b_{p2}, c_{p2} を作成する(収縮)。

$$\left.\begin{aligned} a_{p2} &= CONT \cdot a_{IMAX} + (1 - CONT) \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^{IPARA+1} (a_i) - a_{IMAX}}{IPARA} \right) \\ b_{p2} &= CONT \cdot b_{IMAX} + (1 - CONT) \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^{IPARA+1} (c_i) - b_{IMAX}}{IPARA} \right) \\ c_{p2} &= CONT \cdot c_{IMAX} + (1 - CONT) \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^{IPARA+1} (c_i) - c_{IMAX}}{IPARA} \right) \end{aligned}\right\} \quad \text{(A.6)}$$

$CONT$： 収縮係数(デフォルト値: 0.5)

a_{p2}, b_{p2}, c_{p2} を用いて（A.1）式にしたがって Y_{p2} を求める。

9) 得られた Y_{p2} が、既存の Y の最大値よりも大きい場合は、すべて点におけるパラメータを次式にしたがって置き換え(収縮)、置き換えたすべての点の Y を(A.1)式より求める。

$$\left.\begin{aligned} a_i &= (a_i + a_{IMIN}) / 2 \\ b_i &= (b_i + b_{IMIN}) / 2 \\ c_i &= (c_i + c_{IMIN}) / 2 \end{aligned}\right\} \quad \text{(A.7)}$$

置き換えた Y を用いて(A.3)式による収束判定を行う。収束している場合、パラメータ推定を終了する。収束していない場合は 3)に戻る。

10)　3)から 9)までの操作を繰り返す。繰り返し回数の最大値（デフォルト値：1000)までに収束しないときは、そこで終了する。得られた $a_{IMIN}, b_{IMIN}, c_{IMIN}$ をパラメータ値として出力する。

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の） 1	1
比透磁率[b]	（数字の） 1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ sA$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L，l	$1L=1=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3\ kg$

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}\ J$
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St=1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb=1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal=1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G =1Mx\ cm^{-2} =10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	$1\ \mu =1\mu m=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています