



JAEA-Data/Code

2015-019

DOI:10.11484/jaea-data-code-2015-019

クリギングに基づく放射能分布推定プログラム
ESRAD2の開発
—使用手引—

Development of ESRAD2 Program for Estimation of
Spatial Radioactivity Distribution Based on Kriging
- User's Manual -

石神 努 島田 太郎 関 優哉 向井 雅之

Tsutomu ISHIGAMI, Taro SHIMADA, Masaya SEKI and Masayuki MUKAI

安全研究・防災支援部門
安全研究センター
環境安全研究ディビジョン

Environmental Safety Research Division
Nuclear Safety Research Center
Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness

December 2015

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

本レポートは国立研究開発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。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方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
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, 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, 2015

クリギングに基づく放射能分布推定プログラム ESRAD2 の開発
—使用手引—

日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門
安全研究センター 環境安全研究ディビジョン
石神 努、島田 太郎、関 優哉[※]、向井 雅之

(2015 年 9 月 4 日 受理)

原子力施設の廃止措置の最終段階となるサイト解放検認では、測定で得られた敷地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、対象領域内の幾つかの測定データから空間的相関を考慮して領域全体の空間的放射能濃度分布および平均濃度を推定すること、また、推定平均濃度を濃度基準値と比較して、それに適合するか否かの判断を行うことが必要である。この推定平均濃度には測定データの数（測定点数）に依存して不確かさが含まれているため、判断には不確かさの度合いに応じてある確率で過誤が伴う。安全確保のためには、この過誤率と測定点数の関係を明らかにして測定点数を決定することが重要である。そこで、サイト解放の判断を支援するために、既存の放射能分布推定プログラム ESRAD (Estimation of Spatial RadioActivity Distribution) の拡張版として、対象領域の平均放射能濃度を推定するとともに過誤率に応じて必要とされる測定点数を算出する ESRAD の第 2 版 (ESRAD2) を整備した。

本報告書は、サイト解放検認手法の概要、ESRAD2 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。

**Development of ESRAD2 Program for Estimation of Spatial
Radioactivity Distribution Based on Kriging
- User's Manual -**

Tsutomu ISHIGAMI, Taro SHIMADA, Masaya SEKI[✽] and Masayuki MUKAI

Environmental Safety Research Division, Nuclear Safety Research Center
Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 4, 2015)

In ensuring compliance with the criterion of site release as the final stage of termination of decommissioning of nuclear facilities, it is supposed to confirm the radioactivity concentration obtained by measurement in the site is less than or equal to the concentration corresponding to the criterion. It is needed to estimate the distribution and mean of radioactivity concentration in the evaluation unit using a number of measured data. It is further needed to compare the estimated result with the concentration corresponding to the criterion of site release and to decide if the evaluation unit should comply with the criterion. The estimated result exhibits uncertainty depending on the number of measurement points, which results in a certain probability of the occurrence of decision error according to the uncertainty. It is important to decide the number of measurement points required by revealing a relationship of the error probability to the number of measurement points for site security. We have developed the ESRAD2 (Estimation of Spatial RadioActivity Distribution program version 2), which is an extended version of the existing ESRAD, for estimating the mean of radioactivity concentration and calculating the number of measurement points required according to the error probability.

This report describes a method for ensuring compliance with the criterion of site release, structure and functions, input file format, output examples, execution method of ESRAD2, and sample run with ESRAD2.

Keywords: Site Release, Measurement Points, Radioactivity, Kriging, Variogram, Decommissioning, Decision Error

✽Collaborating Engineer

目 次

1	はじめに	1
2	想定されるサイト解放検認の流れと検認方法	3
2.1	サイト解放検認の流れ	3
2.2	検認方法	3
3	クリギング	6
3.1	バリオグラムモデルと通常型クリギング	6
3.2	交差検証法とバリオグラムモデルの最適化法	7
3.3	平均クリギング	9
3.4	測定誤差を考慮した場合のクリギング	11
4	サイト解放検認に係る必要測定点数の決定方法	14
4.1	平均クリギング I	16
4.2	平均クリギング II	16
5	ESRAD2 の構成と機能	18
5.1	構成	18
5.2	機能	19
6	入力仕様と出力例	28
6.1	入力仕様	28
6.2	出力例	46
7	実行方法	77
7.1	ディレクトリとファイルの構成	77
7.2	標本抽出コードの実行方法	86
7.3	バリオグラム計算コードの実行方法	100
7.4	交差検証コードの実行方法	103
7.5	クリギング計算コードの実行方法	103
7.6	必要標本数計算コードの実行方法	105
8	サンプルラン	107
9	おわりに	114
	参考文献	114
	付録 1 通常型クリギングと平均クリギング I の関係	116
	付録 2 サンプルランの主な入力ファイル	119

Contents

1	Introduction-----	1
2	Postulated Procedure for Ensuring Compliance with Release Criterion and its Method-----	3
2.1	Outline of procedure for ensuring compliance with release criterion-----	3
2.2	Method of ensuring compliance with release criterion-----	3
3	Kriging-----	6
3.1	Variogram model and ordinary kriging -----	6
3.2	Cross validation and optimization of variogram model-----	7
3.3	Mean kriging -----	9
3.4	Kriging with measurement error -----	11
4	Method to Determine the Minimum Number of Measurement Points Required-----	14
4.1	Mean kriging I-----	16
4.2	Mean kriging II -----	16
5	Structure and Function of ESRAD2-----	18
5.1	Structure -----	18
5.2	Function -----	19
6	Input Specification and Example of Output-----	28
6.1	Input specification-----	28
6.2	Example of output-----	46
7	Execution Methods of ESRAD2 -----	77
7.1	Structure of directories and files -----	77
7.2	Execution method of the sampling code-----	86
7.3	Execution method of the variogram calculation code -----	100
7.4	Execution method of the cross validation code -----	103
7.5	Execution method of the kriging calculation code -----	103
7.6	Execution method of the code for calculating a minimum number of measurement points ----	105
8	Sample Run-----	107
9	Concluding Remarks -----	114
	References -----	114
Appendix 1	The relationship between ordinary kriging and mean kriging I-----	116
Appendix 2	Main input files of sample run -----	119

表リスト

表 5.1	計算コードとファイルの概要	24
表 7.1	krig_system ディレクトリ内のファイル一覧	79
表 7.2	bin ディレクトリ内のファイル一覧	80
表 7.3	dat ディレクトリ内のディレクトリ・ファイル一覧	80
表 7.4	inp ディレクトリ内のディレクトリ・ファイル一覧	80
表 7.5	out ディレクトリ内のディレクトリ・ファイル一覧	81
表 7.6	scripts ディレクトリ内のファイル一覧	85
表 8.1	トロージャン発電所敷地内領域の ^{137}Cs と ^{60}Co の放射能濃度	109
表 8.2	^{137}Cs と ^{60}Co の放射能濃度に関するバリオグラムモデルパラメータの計算結果	109
表 8.3	^{137}Cs と ^{60}Co の平均放射能濃度と標準誤差の計算結果	110
表 8.4	平均の推定値 (f_n^*) と標準誤差および必要測定点数の計算結果	110

図リスト

図 2.1	廃止措置終了確認において想定される検認手順のフロー	5
図 3.1	バリオグラムを距離 h の関数で近似するときの概念図	13
図 5.1	ESRAD2 の構成	27
図 6.1	評価領域 (番号の付いた大メッシュから構成される領域)、大メッシュ、 詳細メッシュ、および調整前後の測定点と評価点	73
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の出力例	74
図 6.3	バリオグラム雲、標本バリオグラム、バリオグラムモデルおよび 最適バリオグラムモデルの出力例	74
図 6.4	確率密度関数と累積分布関数の出力例	75
図 6.5	放射能情報推定値の分布図表示例	76
図 6.6	共分散クラウドと標本共分散の出力例	76
図 7.1	ディレクトリ構成 (例)	78
図 7.2	標本抽出コードのメイン画面	86
図 7.3	標本抽出コードの画面構成	87
図 7.4	領域設定画面 (例)	88
図 7.5	評価領域が設定されたメイン画面 (例)	89
図 7.6	放射能情報データファイル選択ダイアログ (例)	90
図 7.7	放射能情報データをロードしたメイン画面 (例)	91
図 7.8	評価領域ファイル選択確認ダイアログ	91
図 7.9	評価領域指定ファイル選択ダイアログ (例)	92
図 7.10	現在開いている評価領域への上書き確認ダイアログ	92

図 7.11	無作為抽出設定画面 (例)	93
図 7.12	無作為抽出法による測定点の選定結果を表示したメイン画面 (例)	94
図 7.13	測定点にデータを入力した例	94
図 7.14	LHS 出力ファイル選択ダイアログ	95
図 7.15	LHS 法によって抽出された測定点の表示画面 (例)	96
図 7.16	選択タブを開いたメイン画面 (例)	97
図 7.17	無作為抽出設定画面 (例)	98
図 7.18	無作為抽出された測定値の画面 (例)	98
図 7.19	評価領域の設定画面 (例)	99
図 7.20	保存設定画面 (例)	99
図 7.21	ディレクトリ選択ダイアログ (例)	100
図 7.22	コマンドプロンプト起動画面 (例、モザイクはシステムのユーザー名)	101
図 7.23	カレントディレクトリの移動 (例)	102
図 8.1	評価領域 (39 の区画)	111
図 8.2	^{137}Cs と ^{60}Co に対するバリオグラム雲、標本バリオグラム、標本バリオグラムに最も一致するバリオグラムモデルおよび最適バリオグラムモデル	112
図 8.3	^{137}Cs と ^{60}Co に対する推定放射能濃度分布	113

List of Tables

Table 5.1	Outline of computer codes and files -----	24
Table 7.1	List of files contained in the krig_system directory-----	79
Table 7.2	List of files contained in the bin directory -----	80
Table 7.3	List of directory and files contained in the dat directory -----	80
Table 7.4	List of directories and files contained in the inp directory -----	80
Table 7.5	List of directories and files contained in the out directory -----	81
Table 7.6	List of files contained in the scripts directory -----	85
Table 8.1	Radioactivity concentrations of ¹³⁷ Cs and ⁶⁰ Co at the survey unit on the Trojan site -----	109
Table 8.2	Calculated values of the parameters in the variogram model for radioactivity concentrations of ¹³⁷ Cs and ⁶⁰ Co -----	109
Table 8.3	Calculated values of means and standard errors for 109 radioactivity concentrations of ¹³⁷ Cs and ⁶⁰ Co -----	110
Table 8.4	Estimated values of mean (f_n^*) and its standard error, and the number of measurement points required -----	110

List of Figures

Fig. 2.1	Postulated procedure for ensuring compliance with release criterion-----	5
Fig. 3.1	Concept of a variogram model approximated with a function of distance h -----	13
Fig. 5.1	Structure of ESRAD2 -----	27
Fig. 6.1	Evaluation area (composed of numbered large meshes), large mesh, small mesh, and measurement point and evaluation point with/without adjustment -----	73
Fig. 6.2	Output example of variogram cloud, experimental variogram, and variogram model-----	74
Fig. 6.3	Output example of variogram cloud, experimental variogram, variogram model and optimized variogram model -----	74
Fig. 6.4	Output example of probability density function and cumulative distribution function-----	75
Fig. 6.5	Output example of radioactivity distribution (estimated value)-----	76
Fig. 6.6	Output example of cross covariance cloud and experimental cross covariance -----	76
Fig. 7.1	Structure of directory (example) -----	78
Fig. 7.2	Main screen of the sampling code-----	86
Fig. 7.3	Screen structure of the sampling code -----	87
Fig. 7.4	Screen for determining area (example) -----	88

Fig. 7.5	Main screen with evaluation area determined (example) -----	89
Fig. 7.6	Dialog box for selecting a radioactivity information data file (example) -----	90
Fig. 7.7	Main screen where radioactivity information data are loaded (example) -----	91
Fig. 7.8	Dialog box for confirming and selecting evaluation area -----	91
Fig. 7.9	Dialog box for selecting an evaluation area specification file (example) -----	92
Fig. 7.10	Dialog box for updating and confirming the evaluation area that is currently open -----	92
Fig. 7.11	Screen for determining parameter values for random sampling (example) -----	93
Fig. 7.12	Main screen displaying measurement points selected with random sampling method (example)-----	94
Fig. 7.13	Example of data input at measurement points -----	94
Fig. 7.14	Dialog box for selecting LHS output file -----	95
Fig. 7.15	Display screen of selected measurement points with the LHS method (example) -----	96
Fig. 7.16	Main screen with selection tab opened (example) -----	97
Fig. 7.17	Screen for determining parameter values for random sampling (example) -----	98
Fig. 7.18	Example of measured data selected with random sampling method (example)-----	98
Fig. 7.19	Screen for determining evaluation area (example) -----	99
Fig. 7.20	Screen for storing data (example) -----	99
Fig. 7.21	Dialog box for selecting directory (example)-----	100
Fig. 7.22	“command prompt” start screen (example; mosaic denotes user’s name of the computer system) -----	101
Fig. 7.23	Changing current directory (example)-----	102
Fig. 8.1	Evaluation area (39 meshes)-----	111
Fig. 8.2	Variogram clouds, experimental variograms, optimally fitted variogram models for the experimental variograms, and optimized variogram models for ¹³⁷ Cs and ⁶⁰ Co -----	112
Fig. 8.3	Distributions of estimated radioactivity concentrations of ¹³⁷ Cs and ⁶⁰ Co-----	113

1 はじめに

原子力発電所をはじめとする種々の原子力施設においては、その使命を終えた施設に対して廃止措置が実施される。そして、最終的には規制当局による廃止措置終了の確認が行われて当該施設の廃止措置が終了する。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」¹⁾がある。この要件が満たされれば当該敷地（サイト）に対する規制上の管理は解除される（サイト解放）。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（サイト解放検認）が必要と考えられる。その際、評価対象とする領域内の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、科学的合理性に基づいた測定と検認の方法を計画し実行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 MARSSIM²⁾というマニュアルが開発され、また、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³⁾。一方、我が国ではサイト解放に係る放射能濃度の基準値、検認手順および検認手法は未整備であり、その検討が進められている^{4),5),6),7)}。

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」の整備を進めており、その一環としてサイト解放に係る安全評価手法の検討を進めている。平成23年度には、サイト解放に係る標本抽出に基づく評価手法に係る計算コード開発の第一段階として、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: Estimation of Spatial RadioActivity Distribution）を開発した⁸⁾。ESRADでは、評価対象とする領域（これを評価単位という）内の幾つかの測定点における放射能濃度等に係る測定・評価結果に基づいて他の地点での放射能濃度等をその不確かさも含めて推定することができる。

ところで、サイト解放の判断に当たっては、評価単位の放射能濃度がサイト解放のための基準値（MARSSIMでは、この基準値を DCGL : Derived Concentration Guidance Level と呼んでいる）以下であることを確認する必要がある。その際比較すべき放射能濃度は評価単位の平均放射能濃度とすることが妥当であると考えられる（詳細は参考文献 6)参照）。評価単位の平均放射能濃度推定結果には不確かさが含まれることから、サイト解放の判断に当たってはこの不確かさを考慮した判断が必要となる。不確かさの要因には、①クリギングという近似法を用いることで生ずるものと、②クリギングを実行する際に入力となる測定値そのものに含まれるもの（測定誤差）がある。①に起因する不確かさは推定の基となる測定点の数（以下、これを測定点数または標本数という）に依存し、放射能濃度推定値の標準誤差として表される。そこで、①に関する不確かさは測定点数にどのように依存するか、また判断に係る過誤の確率（過誤率）を設定したときに必要な測定点数はどの程度にすべきかを把握する必要がある。しかし、既存の ESRAD には、平均濃度とその不確かさ（標準誤差）を推定する機能、その不確かさの測定点数への依存性および過誤率に応じた必要最小の測定点数を計算する機能までは含まれていない。

そこで、ESRAD を改良・拡張して、さらに以下の機能を有する ESRAD 第 2 版 (ESRAD2) を開発した。

- ① 通常型クリギングにおいて最適バリオグラムモデルを決定する機能
- ② 評価単位の平均放射能濃度とその推定分散を計算する機能
- ③ 測定誤差を考慮した場合のクリギングによる計算機能
- ④ 過誤率に応じた必要最小の測定点数を計算する機能

①は、通常型クリギングを用いて得られる推定結果が測定値に一致する度合いが最も高いバリオグラムモデル（最適バリオグラムモデル）を交差検証法と最適化手法に基づいて決定する機能である。

本報告書は、ESRAD2 における計算手法とプログラムの使用手引を述べたものである。2 章で、想定されるサイト解放手順と検認方法を述べる。3 章でクリギングの手法の概要、4 章でサイト解放検認に係る必要測定点数の決定方法について述べる。5 章で ESRAD2 の構成と機能、6 章で入力仕様と出力例、7 章で実行方法を述べる。そして 8 章でサンプルランについて述べる。

2 想定されるサイト解放検認の流れと検認方法

2.1 サイト解放検認の流れ

わが国ではサイト解放の手順に関して、MARSSIM を参照して助川らによって検討された例がある⁵⁾。そこで想定されたサイト解放検認手順の流れを図 2.1 に示す。概要は次のとおりである。施設の使用履歴調査結果を基に当該サイトは、影響を受けた領域（影響領域）と受けなかった領域（非影響領域）に区分される。非影響領域は汚染なしと決定され測定行為なしに基準適合とされる。影響領域は、クラス分類サーベイの結果に基づき、残存放射能レベルに応じて3つのクラスに分けられる。クラス 1 は、放射能濃度が放射能濃度基準値（以下、濃度基準値）を超える可能性がある領域である。濃度基準値は、サイト解放後の公衆の安全を確保するために公衆の被ばく線量が、線量基準値を超えないように、それに対応して放射性核種ごとに定められる放射能濃度である。クラス 2 は、放射能濃度が濃度基準値を超えない領域とされる。クラス 3 は、放射能濃度がバックグラウンド相当の領域とされる。

クラス 1 に対しては必要に応じて除染作業が行われ、確認サーベイの後クラス 2 とされる。クラス 2 と 3 に対しては、評価単位が設定され、測定・判断方法が決定された後、各評価単位に対する最終サーベイが行われる。最終サーベイは、走査測定と静止測定から構成される。検認対象が土壌の場合、走査測定では主にホットスポットの位置を同定するためにグロス γ 線が測定される。静止測定は、当該評価単位が基準に適合しているかを最終的に判断するために用いる放射能濃度を取得するためのものである。ここでは、例えば、数十の地点で試料を採取しそれを放射能測定装置で測定し、同地点の放射能濃度を決定する。得られた放射能濃度の情報をもとに、当該評価単位が基準に適合しているか否かを判断する。こうして、全ての評価単位が基準に適合していると判断されれば、設置者は廃止措置終了確認の申請を規制当局に提出する。その後、規制当局による確認が終了すれば、廃止措置が終了する。

上述の手順の中で ESRAD2 が係わる場所は、最終サーベイの中の静止測定とその結果に基づく判断に関わる部分である。すなわち、測定・評価された放射能濃度に基づく当該評価単位の平均放射能濃度の推定と、それが基準値に適合するか否かの検認に係る部分である。

2.2 検認方法

サイト解放検認においては、当該評価単位の放射能濃度が濃度基準値を超えないことを確認する必要がある。ここで、当該評価単位の放射能濃度としては、濃度基準値の導出における前提条件との整合性を考慮して平均放射能濃度を用いることが妥当である。そこで、サイト解放基準に適合するための判断として、(2.1)式および(2.2)式を採用する。

$$f \leq 1 \quad (2.1)$$

$$f = \sum_k \bar{z}(k) / d(k) \quad (2.2)$$

ここに、 $\bar{z}(k)$ は放射性核種 k の評価単位における平均放射能濃度であり、 $d(k)$ は放射性核種 k の濃度基準値である。平均放射能濃度 $\bar{z}(k)$ および物理量 f は、評価単位内の幾つかの測定点での測定値に基づき推定される。この推定結果には、(a)測定点は評価単位の全域を網羅できないこ

と、(b)測定データには測定誤差が付随していること、等に起因した不確かさが含まれている。

この不確かさの大きさに応じてサイト解放の判断にはある確率で過誤が生ずることになる。判断の過誤率は測定点数に依存するから、過誤率と測定点数の関係を明らかにすることが重要である。この関係は、従来の統計手法を用いる場合について、例えば参考文献 9)、10)に、また、クリギングを用いる場合については、参考文献 6)、7)に示されている。この関係から、過誤率を与えた場合にそれに対応して安全を確保するのに必要な測定点数が決定される。クリギングを用いる場合の必要な測定点数を決定する方法については 4 章で述べる。

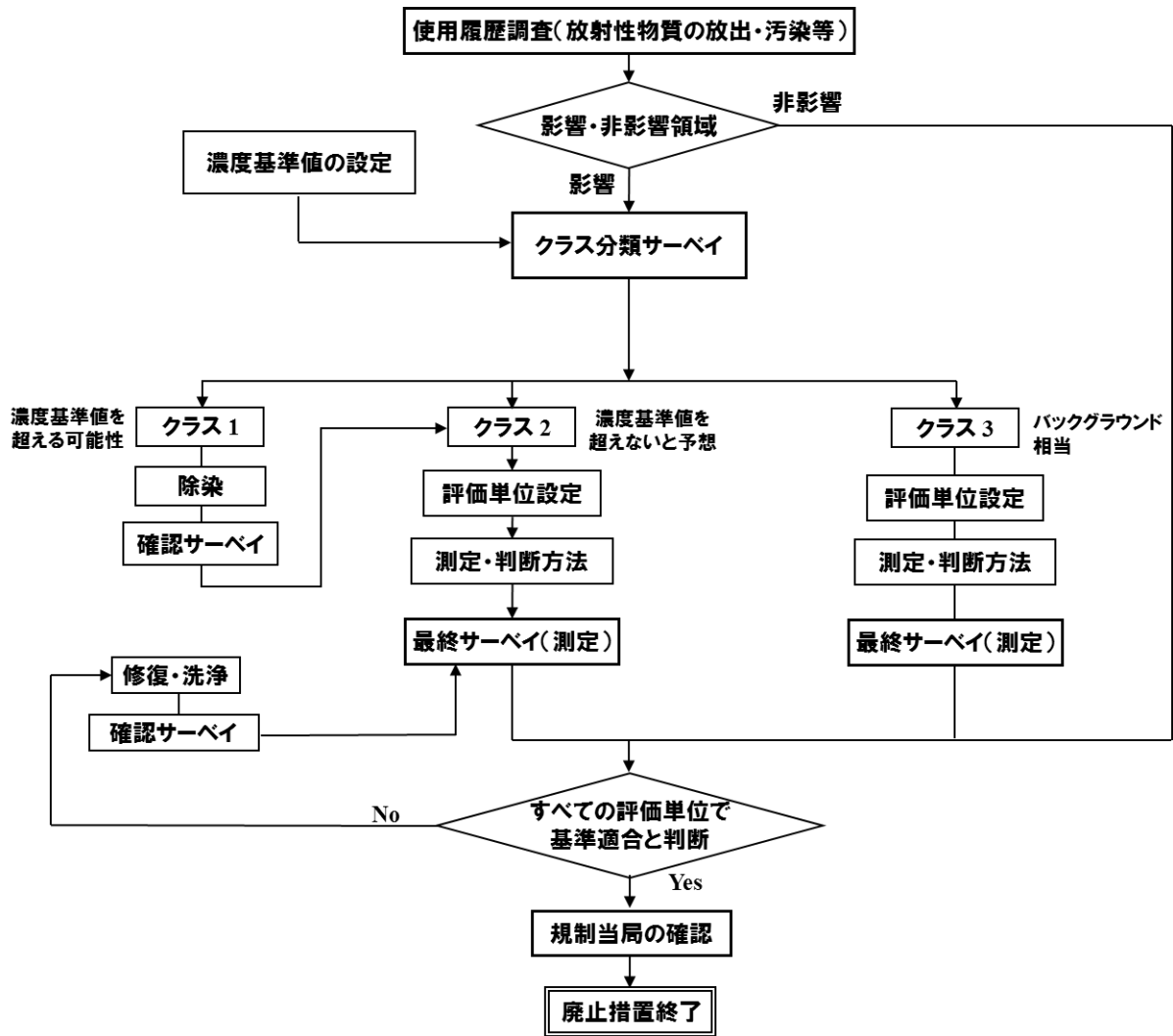


図 2.1 廃止措置終了確認において想定される検認手順のフロー (参考文献 5)より一部編集)

3 クリギング

3.1 バリオグラムモデルと通常型クリギング¹⁾

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測定点（または標本点という）での測定値（または標本データという）を基に任意の地点での値を推定する空間の線形補間法である。

いま、ある領域（以下、2次元の場合を考える）において、幾つかの測定点 $(\mathbf{x}_\alpha, \alpha=1, 2, \dots, n)$ 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、放射能濃度等の測定値）が得られているとする。このとき、任意の点 \mathbf{x}_i での値 $z(\mathbf{x}_i)$ を測定値 $z(\mathbf{x}_\alpha)$ を用いて推定するという問題を考える。クリギングでは、物理量を表す変数 $Z(\mathbf{x}_i)$ および $Z(\mathbf{x}_\alpha)$ が確率変数として扱われ、 $Z(\mathbf{x}_i)$ の近似解 $Z^*(\mathbf{x}_i)$ が $Z(\mathbf{x}_\alpha)$ の一次結合で与えられる。

$$Z^*(\mathbf{x}_i) = \sum_{\alpha=1}^n w_\alpha^i Z(\mathbf{x}_\alpha) \quad (3.1)$$

ここに、 w_α^i は重み係数である。クリギングでは、確率場 $Z(\mathbf{x})$ に対して2次定常性、すなわち

$$E[Z(\mathbf{x}+\mathbf{h}) - Z(\mathbf{x})] = 0 \quad (3.2)$$

および

$$\text{var}(Z(\mathbf{x}+\mathbf{h}) - Z(\mathbf{x})) = 2\gamma(\mathbf{h}) \quad (3.3)$$

を仮定する。ここに、 $E[Z(\mathbf{x})]$ は $Z(\mathbf{x})$ の期待値を、 $\text{var}(Z(\mathbf{x}))$ は $Z(\mathbf{x})$ の分散を表す。このとき、理論バリオグラム $\gamma(\mathbf{h})$ が次式で定義される。

$$\gamma(\mathbf{h}) = E[\{Z(\mathbf{x}+\mathbf{h}) - Z(\mathbf{x})\}^2] / 2 \quad (3.4)$$

(3.4)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}_α 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 $\tilde{\gamma}(\mathbf{x}_\alpha, \mathbf{h})$ が次式で導入される。

$$\tilde{\gamma}(\mathbf{x}_\alpha, \mathbf{h}) = \{z(\mathbf{x}_\alpha + \mathbf{h}) - z(\mathbf{x}_\alpha)\}^2 / 2 \quad (3.5)$$

横軸に標本点間の距離 h 、縦軸に上記の非類似度が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 $\gamma^*(\mathbf{h}_k)$ が導入される。

$$\gamma^*(\mathbf{h}_k) = \frac{1}{2n(\mathbf{h}_k)} \sum_{\alpha, \beta=1}^n \{z(\mathbf{x}_\alpha) - z(\mathbf{x}_\beta)\}^2 \quad (3.6)$$

ここに、 \mathbf{h}_k は2点間の距離ベクトルについて、その距離および方向がそれぞれある区間内にある距離ベクトル群からなるクラスを表わし、 $n(\mathbf{h}_k)$ はクラス \mathbf{h}_k に含まれるペアの数を表す。また、和はそのクラスに含まれるすべてのペアに対して実行される。標本バリオグラムの計算で

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。

は、距離および方向のそれぞれがいくつかのクラスに分けられる。等方性を有する標本バリオグラム（以下、等方バリオグラム）は距離だけの関数であり、実際の計算でよく用いられる。理論バリオグラムは、標本バリオグラムに基づきバリオグラムモデルで近似される。一般にバリオグラムモデルは関数形と3つのパラメータ (a, b, c) で表現される。バリオグラムモデルとして、球形モデル、指数型モデル、ガウス型モデル等が提案されている。例えば、等方性を仮定した球形モデルは距離 $h = |\mathbf{h}|$ の関数として次式で表される。

$$\gamma_M(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ c + b \left\{ 3/2 \times (h/a) - 1/2 \times (h/a)^3 \right\} & 0 < h \leq a \\ c + b & h > a \end{cases}$$

ここに、 a 、 $b+c$ そして c は、それぞれレンジ、シル、ナゲット効果と呼ばれている（図 3.1）。

(3.1)式における重み係数の総和を1、すなわち

$$\sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha}^i = 1 \tag{3.7}$$

とすれば、(3.2)式より、 $Z^*(\mathbf{x}_i)$ は $Z(\mathbf{x}_i)$ の不偏推定量となる。すなわち

$$E[Z^*(\mathbf{x}_i)] = E[Z(\mathbf{x}_i)]$$

$Z^*(\mathbf{x}_i)$ についての推定分散は次式で与えられる。

$$\sigma_i^2 = \text{var}(Z^*(\mathbf{x}_i) - Z(\mathbf{x}_i))$$

制約条件(3.7)式の下で σ_i^2 を最小とするために最小二乗法を適用すると、 w_{α}^i を決定する以下の方程式（以下、クリギング方程式と呼ぶ）が得られる。

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^n w_{\beta}^i \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) + \mu^i = \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_i) & (3.8) \\ \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha}^i = 1 & (3.7) \end{cases}$$

ここに、 μ^i はラグランジュ未定乗数である。クリギング方程式の解を用いると推定分散は次式で与えられる。

$$\sigma_i^2 = \mu^i + \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha}^i \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_i) \tag{3.9}$$

3.2 交差検証法とバリオグラムモデルの最適化法

バリオグラムモデルはクリギングによる計算結果、すなわち非測定点での物理量の推定値およびその推定分散等、に影響を及ぼす重要なファクターである。したがって、最も適切なバリオグラムモデルをどのように設定すべきかということが問題となる。バリオグラムモデルのパラメータ値を決めるための最適化を行う上で、2つの目的関数が考えられる。一つは標本バリオグラムであり、他の一つは実際の測定値である。前者については、Pardo-Iguzquizaにより、

シンプレクス法に基づく関数の最適化手法を用いた計算コードが開発され¹²⁾、その手法は従来の ESRAD にすでに組み込まれている。しかし、同手法ではクリギングによる計算結果が測定値と比較されないため、得られたバリオグラムモデルが最も適切であるかを検証することはできない。後者については、交差検証法が有効とされている。

交差検証法の概要は次のとおりである。バリオグラムモデルの関数形が与えられているとき、 $Z(\mathbf{x}_i)$ の推定値 $z^*(\mathbf{x}_i)$ は、パラメータ (a, b, c) の関数として表される。

$$z^*(\mathbf{x}_i) = z^*(a, b, c; \mathbf{x}_i) \quad (3.10)$$

点 \mathbf{x}_i を測定点 \mathbf{x}_α とし、 \mathbf{x}_α 以外の残りの測定点での値を用いてクリギングを実行すれば推定値 $z^*(a, b, c; \mathbf{x}_\alpha)$ が得られ、この $z^*(a, b, c; \mathbf{x}_\alpha)$ を測定値 $z(\mathbf{x}_\alpha)$ と比較することができる。これを各測定点に対して順次実行する。パラメータの値は、設定する目的関数を最小とするように決定される。

目的関数として以下が考えられる。

① 誤差の平均

誤差の平均は

$$Y_1 = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n \{z(\mathbf{x}_\alpha) - z^*(a, b, c; \mathbf{x}_\alpha)\} \quad (3.11)$$

で定義される。この値が 0 に近い場合には、著しい偏りは存在しないものと考えられる。一方、誤差の平均が有意な負（正）の値を示す場合には、系統的に過大（過小）評価されている可能性がある。

② 平均二乗誤差

平均二乗誤差は、

$$Y_2 = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n \{z(\mathbf{x}_\alpha) - z^*(a, b, c; \mathbf{x}_\alpha)\}^2 \quad (3.12)$$

で定義される。この量は測定値を最もよく再現するパラメータ値を決めるうえで有効な量である。

③ 平均二乗標準誤差

地点 \mathbf{x}_α での推定値 $z^*(a, b, c; \mathbf{x}_\alpha)$ に対する推定分散平方根 $\sigma_{[\alpha]}$ を用いて表される以下の量

$$(z(\mathbf{x}_\alpha) - z^*(a, b, c; \mathbf{x}_\alpha)) / \sigma_{[\alpha]} \quad (3.13)$$

は、実際の誤差と予測誤差の大きさを比較するものといえる。平均二乗標準誤差は

$$\frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n (z(\mathbf{x}_\alpha) - z^*(a, b, c; \mathbf{x}_\alpha))^2 / \sigma_{[\alpha]}^2 \quad (3.14)$$

で定義される。この値が 1 に近い場合、実際の値と推定値との差がモデルによる予測誤差にほ

ば等しいといえる。

④ ARE の平均

ARE (Absolute Relative Error : 相対誤差絶対値) は

$$ARE = \left| (z^*(a, b, c; \mathbf{x}_\alpha) - z(\mathbf{x}_\alpha)) / z(\mathbf{x}_\alpha) \right| \times 100\% \quad (3.15)$$

で定義される。その平均を表す以下の量

$$\frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n \left| (z^*(a, b, c; \mathbf{x}_\alpha) - z(\mathbf{x}_\alpha)) / z(\mathbf{x}_\alpha) \right| \times 100\% \quad (3.16)$$

は推定値と実際の値との比較に有用な量である。

3.3 平均クリギング

領域 R にわたる $Z(\mathbf{x})$ の平均は次式で与えられる¹³⁾。

$$\bar{Z} = \frac{1}{R} \int_R d\mathbf{x} Z(\mathbf{x}) \quad (3.17)$$

ここに、 \mathbf{x} についての積分は R 内の全領域で行われる。平均クリギングには、平均クリギング I と平均クリギング II がある。両者とも、 $Z(\mathbf{x})$ の平均を $Z(\mathbf{x}_\alpha)$ の一次結合で近似する点は同じであるが、重み係数の決め方が異なる。平均クリギング I は平均 \bar{Z} の推定量と真の量の差の分散を最小とし、一方平均クリギング II は平均 \bar{Z} の推定量の分散を最小とする方法である。

平均クリギング I と平均クリギング II の概要は次のとおりである。なお、以下におけるバリオグラムモデルは、通常型クリギングでのバリオグラムモデルと同一である。

3.3.1 平均クリギング I

平均クリギング I では、 $Z(\mathbf{x})$ の平均 \bar{Z} は次式で近似される。

$$\bar{Z}_n^* = \sum_{\alpha=1}^n \bar{w}_\alpha Z(\mathbf{x}_\alpha) \quad (3.18)$$

\bar{Z} と \bar{Z}_n^* の期待値を等しくするという条件から重み係数 \bar{w}_α に対して次式が得られる。

$$\sum_{\alpha=1}^n \bar{w}_\alpha = 1 \quad (3.19)$$

推定分散は推定量 \bar{Z}_n^* と真の量 \bar{Z} の差の分散として次式で定義される。

$$\sigma_n^2 = E \left[\left(\sum_{\alpha=1}^n \bar{w}_\alpha Z(\mathbf{x}_\alpha) - \frac{1}{R} \int_R d\mathbf{x} Z(\mathbf{x}) \right)^2 \right]$$

この推定分散を(3.19)式の条件の下で最小化することで次のクリギング方程式が得られる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{\beta=1}^n \bar{w}_{\beta} \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) + \bar{\mu} = \frac{1}{R} \int_R d\mathbf{x} \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}) \\ \sum_{\alpha=1}^n \bar{w}_{\alpha} = 1 \end{array} \right. \quad (3.20)$$

ここに、 $\bar{\mu}$ はラグランジュ未定乗数を表す。クリギング方程式の解を用いて、平均の推定値および推定分散は、それぞれ次式で与えられる。

$$m^* = \sum_{\alpha=1}^n \bar{w}_{\alpha} z(\mathbf{x}_{\alpha}) \quad (3.21)$$

$$\sigma_n^2 = \bar{\mu} + \sum_{\alpha=1}^n \bar{w}_{\alpha} \frac{1}{R} \int_R d\mathbf{x} \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}) - \frac{1}{R^2} \int_R d\mathbf{x} d\mathbf{x}' \gamma(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \quad (3.22)$$

実際の数値計算では、領域 R はメッシュと呼ばれる小区画の集合体として扱われ、(3.20)式と(3.22)式は、それぞれ以下のように書き換えられる。

$$\sum_{\beta=1}^n \bar{w}_{\beta} \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) + \bar{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_i) \quad (3.23)$$

$$\sigma_n^2 = \bar{\mu} + \sum_{\alpha=1}^n \bar{w}_{\alpha} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_i) - \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \gamma(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) \quad (3.24)$$

ここに、 N は領域内の全メッシュ数である。クリギング方程式から分かるように、平均クリギング I では、すべてのメッシュの代表点間のバリオグラムが考慮されている。

3.3.2 平均クリギング II

平均クリギング II においても、 $Z(\mathbf{x})$ の平均 \bar{Z} は次式で近似される¹¹⁾。

$$\bar{Z}_n^* = \sum_{\alpha=1}^n \bar{w}_{\alpha} Z(\mathbf{x}_{\alpha}) \quad (3.25)$$

\bar{Z} と \bar{Z}_n^* の期待値を等しくするという条件から重み係数 \bar{w}_{α} に対して次式が得られる。

$$\sum_{\alpha=1}^n \bar{w}_{\alpha} = 1 \quad (3.26)$$

平均クリギング II では、推定分散は推定量 \bar{Z}_n^* の分散として次式で定義される。

$$\sigma_n^2 = E\left[\left(\sum_{\alpha=1}^n \bar{w}_{\alpha} Z(\mathbf{x}_{\alpha}) - m\right)^2\right]$$

ここに、 m は真の平均値（確率変数ではなく値）を表す。この推定分散を(3.26)式の条件の下で最小化することで次のクリギング方程式が得られる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{\beta=1}^n \bar{w}_{\beta} \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) + \bar{\mu} = 0 \end{array} \right. \quad (3.27)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{\alpha=1}^n \bar{w}_{\alpha} = 1 \end{array} \right. \quad (3.26)$$

ここに、 $\bar{\mu}$ はラグランジュ未定乗数を表す。クリギング方程式の解を用いて、平均の推定値および推定分散は、それぞれ次式で与えられる。

$$m^* = \sum_{\alpha=1}^n \bar{w}_{\alpha} z(\mathbf{x}_{\alpha}) \quad (3.28)$$

$$\sigma_n^2 = \sigma^2 - \sum_{\alpha, \beta=1}^n \bar{w}_{\alpha} \bar{w}_{\beta} \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) \quad (3.29)$$

ここに、 σ^2 は $Z(\mathbf{x})$ の分散であり、次式で計算される。

$$\sigma^2 = E[Z(\mathbf{x})^2] - \{E[Z(\mathbf{x})]\}^2 = \gamma(|\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}| = \infty) = b + c \quad (3.30)$$

クリギング方程式から分かるように、平均クリギング II では、測定点間のバリオグラムのみが考慮されている。

3.4 測定誤差を考慮した場合のクリギング

測定点 \mathbf{x}_{α} において、測定誤差が σ_{α} の測定機器を用いて測定値 $z(\mathbf{x}_{\alpha})$ が得られるものとする。この場合、この測定誤差を考慮したクリギングは次のとおりである。

3.4.1 通常型クリギング¹¹⁾

測定値 $z(\mathbf{x}_{\alpha})$ に対応する確率変数を $Z(\mathbf{x}_{\alpha})$ とし、各測定点についてのモデルを $Z(\mathbf{x}_{\alpha}) = Y(\mathbf{x}_{\alpha}) + E_{\alpha}$ とする。 E_{α} は測定誤差を表す確率変数であり、その誤差分散 $\text{var}(E_{\alpha}) = \sigma_{\alpha}^2$ が既知とする。このとき実際に測定したい量は $Y(\mathbf{x}_{\alpha})$ である。ここで次の仮定を置く。

- $Y(\mathbf{x}_{\alpha})$ は 2 次定常性を有す。
- 測定誤差は位置と無関係である： $\text{cov}(Y(\mathbf{x}_{\alpha}), E_{\alpha}) = 0$
- それぞれの誤差は独立である： $\text{cov}(E_{\alpha}, E_{\beta}) = 0, \alpha \neq \beta$

ここに、 $\text{cov}(E_{\alpha}, E_{\beta})$ は、確率変数 E_{α} と E_{β} の間の共分散であり、次式で定義される。

$$\text{cov}(E_{\alpha}, E_{\beta}) = E[(E_{\alpha} - E[E_{\alpha}])(E_{\beta} - E[E_{\beta}])]$$

$Y(\mathbf{x}_i)$ を $Z(\mathbf{x}_{\alpha})$ の一次結合で近似する。すなわち、

$$Y^*(\mathbf{x}_i) = \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} Z(\mathbf{x}_{\alpha})$$

これに対する通常型のクリギング方程式は次式で与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{\beta=1}^n w_{\beta}^i \{ \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) - \sigma_{\alpha}^2 \delta_{\alpha\beta} \} + \mu_i = \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_i) \\ \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha}^i = 1 \end{array} \right. \quad (3.31)$$

$$\quad (3.32)$$

また、推定分散は次式で与えられる。

$$\sigma_i^2 = \mu_i + \sum_{\beta=1}^n w_{\beta}^i \gamma(\mathbf{x}_{\beta} - \mathbf{x}_i) \quad (3.33)$$

3.4.2 平均クリギング I

平均クリギング I の場合、 $Y(\mathbf{x})$ の平均は、

$$\bar{Y} = \frac{1}{R} \int_R d\mathbf{x} Y(\mathbf{x}) \quad (3.34)$$

この \bar{Y} が次式で近似される。

$$\bar{Y}^* = \sum_{\alpha=1}^n \bar{w}_{\alpha} Z(\mathbf{x}_{\alpha}) \quad (3.35)$$

通常型クリギングの場合と同様に、以下のクリギング方程式が得られる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{\beta=1}^n \bar{w}_{\beta} \{ \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) - \sigma_{\alpha}^2 \delta_{\alpha\beta} \} + \bar{\mu} = \frac{1}{R} \int_R d\mathbf{x} \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}) \\ \sum_{\alpha=1}^n \bar{w}_{\alpha} = 1 \end{array} \right. \quad (3.36)$$

$$\quad (3.37)$$

推定分散 σ_n^2 は、上式の解を用いて次式で与えられる。

$$\sigma_n^2 = \bar{\mu} + \sum_{\alpha=1}^n \bar{w}_{\alpha} \frac{1}{R} \int_R d\mathbf{x} \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}) - \frac{1}{R^2} \int_R d\mathbf{x} d\mathbf{x}' \gamma(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \quad (3.38)$$

実際の数値計算では、(3.36)式と(3.38)式の積分は評価領域の全メッシュにわたる和として、それぞれ次式で書き換えられる。

$$\sum_{\beta=1}^n \bar{w}_{\beta} \{ \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) - \sigma_{\alpha}^2 \delta_{\alpha\beta} \} + \bar{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_i) \quad (3.39)$$

$$\sigma_n^2 = \bar{\mu} + \sum_{\alpha=1}^n \bar{w}_{\alpha} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_i) - \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \gamma(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) \quad (3.40)$$

3.4.3 平均クリギング II

平均クリギング II の場合も、同様に測定誤差を考慮した平均クリギングのクリギング方程式は次式で与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{\beta=1}^n \bar{w}_{\beta} \{ \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) - \sigma_{\alpha}^2 \delta_{\alpha\beta} \} + \bar{\mu} = 0 \\ \sum_{\alpha=1}^n \bar{w}_{\alpha} = 1 \end{array} \right. \quad (3.41)$$

$$\quad (3.42)$$

推定分散は、クリギング解を用いて次式で与えられる。

$$\sigma_n^2 = \bar{\mu} + \sigma^2 \quad (3.43)$$

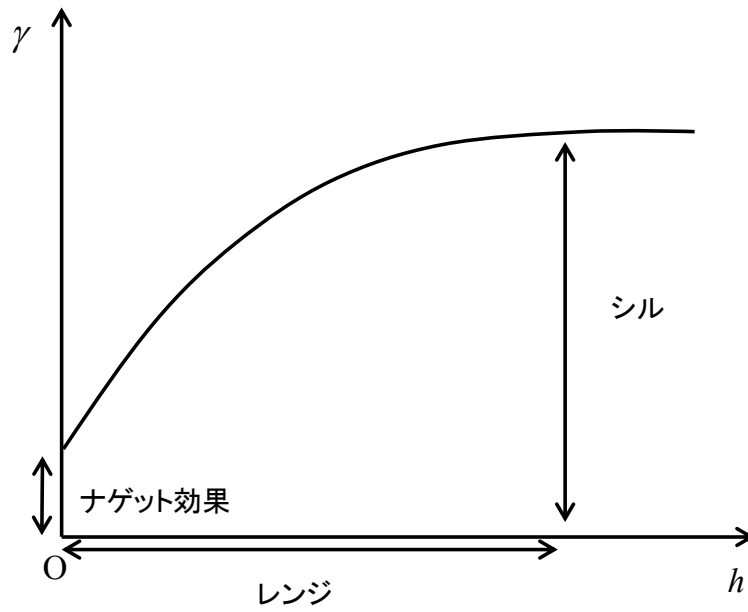


図 3.1 バリオグラムを距離 h の関数で近似するときの概念図
(参考文献 8)より転載)

4 サイト解放検認に係る必要測定点数の決定方法

サイト解放検認では、物理量 f ((2.2)式) の推定とその結果に含まれる不確かさを推定することが必要である。核種 k の平均放射能濃度 $\bar{z}(k)$ に対応する確率変数を $\bar{Z}(k)$ とすれば、 f に対応する確率変数 F は次式で表される。

$$F = \sum_k \bar{Z}(k)/d(k) \quad (4.1)$$

$\bar{Z}(k)$ を平均クリギングを用いた推定量 $\bar{Z}_n^*(k)$ で置き換えると、 F は次式で近似される。

$$F_n^* = \sum_k \bar{Z}_n^*(k)/d(k) \quad (4.2)$$

また、 f の推定値 f_n^* は次式で与えられる。

$$f_n^* = \sum_k \bar{z}_n^*(k)/d(k) \quad (4.3)$$

平均放射能濃度の推定値 $\bar{z}_n^*(k)$ には不確かさが含まれており、その不確かさは測定点数 n に依存する標準誤差（推定分散の平方根とする）で表される。この結果、 f_n^* にも測定点数 n に依存する不確かさが含まれる。サイト解放に係る判断は f_n^* に基づくことから、 f_n^* に含まれる不確かさに起因してその判断にはある確率で過誤が伴うことになる。この過誤には、第 I 種の過誤と第 II 種の過誤が知られている。第 I 種の過誤は f の真値が 1 より大きいときに f を 1 以下とする過誤である。第 II 種の過誤は f の真値が 1 以下のときに f を 1 より大きいとする過誤である。安全をある信頼度の範囲に保つような判断を行うためには、意思決定者がこれらの過誤率を制御することが必要である。特に、サイト解放時には基準値を超えているのに基準値以下であると判断される確率を小さくするよう、第 I 種の過誤を小さくすることが求められる。これは、過誤率と測定点数の関係に応じて測定点数を調整することで可能となる。統計的仮説検定を用い、また f_n^* が正規分布に従うと仮定すると、第 I 種の過誤率を α 以下、第 II 種の過誤率を β 以下に制御するのに必要な最小の測定点数は以下の方程式の解で与えられる⁶⁾。

$$\mu_1 + (k_\alpha + k_\beta) \sigma_n(f_n^*) = 1 \quad (4.4)$$

ここに、 $\sigma_n(f_n^*)$ は測定点数 n の場合の f_n^* の標準誤差であり、 k_α および k_β は、それぞれ標準正規分布における上側 α 点および β 点である。 μ_1 は f の真の値（不明）とされユーザーによって設定される。以下では、 μ_1 を f の推定値、すなわち、 $\mu_1 = f_n^*$ とする。このとき(4.4)式は次式となる。

$$f_n^* + (k_\alpha + k_\beta) \sigma_n(f_n^*) = 1 \quad (4.5)$$

f_n^* の n 依存性は弱いと考えられ、一方 $\sigma_n(f_n^*)$ は n の減少関数であることから、(4.5)式の左辺（以下、比較関数と呼ぶ）は n の減少関数になると予想される。必要最小の測定点数は、測定点数

を X 軸、比較関数を Y 軸とする直交座標系において比較関数が $Y=1$ と交差する点の X 座標で与えられる。

必要最小の測定点数を求めるためには、(4.5)式の $\sigma_n(f_n^*)$ を n の関数として陽に表す必要がある。平均クリギングIまたは平均クリギングIIの解を用いると、 $\sigma_n(f_n^*)^2$ は(4.6)~(4.9) 式で表される。

$$\sigma_n(f_n^*)^2 = E\left[\left(F_n^* - E[F]\right)^2\right] = \sum_k \sigma_n(k)^2 / d(k)^2 + C(f) \quad (4.6)$$

$$C(f) = \sum_{\substack{k,k' \\ (k \neq k')}} \text{Cov}(k, k') / (d(k) \cdot d(k')) \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}(k, k') &= E[(\bar{Z}_n^*(k) - E[\bar{Z}(k)]) \cdot (\bar{Z}_n^*(k') - E[\bar{Z}(k')])] \\ &= \sum_{\beta, \beta'=1}^n \bar{w}_\beta(k) \bar{w}_{\beta'}(k') C_{kk'}(\mathbf{x}_{\beta'} - \mathbf{x}_\beta) \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$C_{kk'}(\mathbf{x}_{\beta'} - \mathbf{x}_\beta) = E[(Z(k, \mathbf{x}_\beta) - \bar{z}(k))(Z(k', \mathbf{x}_{\beta'}) - \bar{z}(k'))] \quad (4.9)$$

$C(f)$ は、2つの放射性核種の濃度間の相関からの寄与を表す量である。共分散関数 $C_{kk'}(\mathbf{x}_{\beta'} - \mathbf{x}_\beta)$ の計算は、標本バリオグラムの計算の場合と同様に、 $Z(k, \mathbf{x}_\beta)$ の測定値を用いて、また $\bar{z}(k)$ を $\bar{z}_n^*(k)$ で近似することで可能となる。共分散関数 $C_{kk'}(\mathbf{x}_{\beta'} - \mathbf{x}_\beta)$ の値を $(\mathbf{x}_{\beta'} - \mathbf{x}_\beta)$ の関数でプロットすれば同関数値の点の集合体（散布図）ができる。ここでは、この集合体を共分散クラウドと呼ぶ。また、距離 $h = |\mathbf{x}_{\beta'} - \mathbf{x}_\beta|$ を幾つかのクラスに分け、各クラスにおける共分散関数 $C_{kk'}(\mathbf{x}_{\beta'} - \mathbf{x}_\beta)$ の標本平均を当該クラスの平均距離の関数と表したものを標本共分散と呼ぶ。

(4.6)式の第1項である $\sigma_n(k)^2$ については、測定値に含まれる測定誤差を考慮しない場合と考慮する場合を分けて考える必要がある。測定誤差を考慮しない場合、平均クリギングIではバリオグラムの性質、すなわち2点間の距離がゼロの場合にはバリオグラムがゼロになること、また、通常型クリギングの解の性質、すなわち測定点の推定値は測定値を再現すること、を用いて $\sigma_n(k)^2$ を近似的に n の関数として陽に表すことができる。また、平均クリギングIIでは、バリオグラムの性質を用いて $\sigma_n(k)^2$ を n の関数として陽に表すことができる。一方、測定誤差を考慮する場合、上述の通常型クリギングの解の性質が成立しないため、平均クリギングIでは $\sigma_n(k)^2$ を n の関数として陽に表すことは困難である。平均クリギングIIでは、バリオグラムの性質のみが用いられるため、考慮しない場合と同じ関数形で表すことができる。以下では、測定誤差を考慮しない場合について $\sigma_n(k)^2$ の関数形と必要最小の測定点数を求める計算式の結果を示す⁷⁾。なお、測定誤差を含む場合の必要測定点数を見積る方法、および検認方法については、参考文献7)で述べられている。

4.1 平均クリギングI

$\sigma_n(k)^2$ の関数形は次式で与えられる（導出については付録1を参照）。

$$\sigma_n(k)^2 = (1 - \frac{n}{N}) (\frac{1}{n} \gamma_{1w}(k) + \gamma(k)) \quad (4.10)$$

$$\gamma(k) = \gamma_1(k) - \gamma_{1w}(k) - (1 - \frac{1}{N}) (\gamma_2(k) - \gamma_{2w}(k)) \quad (4.11)$$

$$\gamma_{1w}(k) = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n \langle w \gamma_{\alpha}(k) \rangle = \frac{1}{(N-n)(n-1)} \sum_{\alpha=1}^n \sum_{s=n+1}^N \sum_{\beta=1}^n w_{\alpha}^s(k) \gamma_k(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) \quad (4.12)$$

$$\gamma_1(k) = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n \langle \gamma_{\alpha}(k) \rangle = \frac{1}{N-n} \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n \sum_{s=n+1}^N \gamma_k(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_s) \quad (4.13)$$

$$\gamma_2(k) = \frac{1}{(N-1)(N-n)} \sum_{s=n+1}^N \sum_{i=1}^N \gamma_k(\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_i) \quad (4.14)$$

$$\gamma_{2w}(k) = \frac{1}{(N-1)(N-n)} \sum_{\beta=1}^n \sum_{s=n+1}^N w_{\beta}^s(k) \sum_{i=1}^N \gamma_k(\mathbf{x}_{\beta} - \mathbf{x}_i) \quad (4.15)$$

(4.6)式と(4.10)式を(4.5)式に代入し、 f_n^* を最初に設定した n_0 個の測定値を用いて計算された量 $f_{n_0}^*$ で置き換えると、必要な測定点数 n を求めるための以下の2次方程式が得られる。

$$\sum_k (1 - \frac{n}{N}) (\frac{1}{n} \gamma_{1w}(k) + \gamma(k)) / d(k)^2 + C(f) = \left(\frac{1 - f_{n_0}^*}{k_{\alpha} + k_{\beta}} \right)^2 \quad (4.16)$$

$$f_{n_0}^* = \sum_k \bar{z}_{n_0}^*(k) / d(k) \quad (4.17)$$

ここに、付録で述べられているように $\gamma_1(k)$, $\gamma_{1w}(k)$, $\gamma_2(k)$, $\gamma_{2w}(k)$ は、最初に設定した測定点（測定点数 n_0 ）における測定値を用いて計算されたものである。必要最小の測定点数 n_{\min} は(4.16)式の解で与えられる。なお、ユーザーは2次方程式(4.16)が与える2つの解のなかから物理的な解を選択する必要がある。

4.2 平均クリギングII

(3.29)式より次式が得られる。

$$\sigma_n(k)^2 = \sigma(k)^2 - (1 - 1/n) \bar{\gamma}(k) \quad (4.18)$$

$$\bar{\gamma}(k) = \frac{n}{n-1} \sum_{\alpha, \beta} \bar{w}_{\alpha}(k) \bar{w}_{\beta}(k) \gamma_k(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) \quad (4.19)$$

ここに、 $\sigma(k)^2$ は核種 k に対する $Z(x)$ の分散である。最初に設定した実際の測定点の数 n_0 を用いて(4.19)式を計算し、(4.6)式と(4.18)式を(4.5)式に代入し、 f_n^* を n_0 個の測定値を用いて計算さ

れた量 $f_{n_0}^*$ で置き換えると、測定点数 n についての以下の 1 次方程式が得られる。

$$\sum_k \left\{ \sigma(k)^2 - (1 - 1/n) \bar{\gamma}(k) \right\} / d(k)^2 + C(f) = \left(\frac{1 - f_{n_0}^*}{k_\alpha + k_\beta} \right)^2 \quad (4.20)$$

必要最小の測定点数 n_{\min} は(4.20)の解で与えられる。平均クリギング II では、 n_{\min} が全メッシュ数 N に依存しないことが留意される。

5 ESRAD2 の構成と機能

5.1 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法によって測定・評価し検認を行う場合、次の作業手順が想定される。

- 1) 対象領域における測定点抽出のための測定点数と測定点の決定
- 2) 測定点における放射線測定と測定値の取得
- 3) 測定値に基づく対象領域の放射能濃度分布と平均放射能濃度の推定
- 4) 3)の結果とサイト解放適合基準（濃度基準値）との比較・検討および解放の判定

上記の手順の中で、ESRAD2は1)、3)および4)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作業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測定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測定値を基に標本バリオグラムを求める。
- ③ 交差検証法により、最適なバリオグラムモデルを求める。
- ④ 測定値と最適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濃度分布と平均放射能濃度を推定する。
- ⑤ 不確かさを含む平均放射能濃度推定値と濃度基準値およびサイト解放判断に係る過誤率（ユーザー指定）を基に、サイト解放判断に係る必要な測定点数を求め、その結果を最初に設定した測定点数と比較する。
- ⑥ 必要な測定点数が最初に設定した測定点数より多いときはそこで終了する。少ないときは、必要な測定点数を超えるまで測定点数を追加し、既存の測定値と新たに得られた追加の測定値を基に②に戻る。または、当該対象領域の除染作業を行い、除染後の放射能濃度を測定し②に戻る。

本プログラムは、①～⑥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、交差検証コード、クリギング計算コード、および必要標本数計算コードに加えて、標本抽出に係るMTコード¹⁴⁾、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GNU PLOTコード¹⁵⁾とGMT¹⁶⁾による作図コード、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5.1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5.1に示す。ここに、交差検証コードおよび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、それぞれ⑨および⑮のバリオグラムパラメータファイルで与えることとしている。

なお、図5.1中のLHSコード¹⁷⁾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。

5.2 機能

ESRAD2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、交差検証コード、クリギング計算コード、および必要標本数計算コードのそれぞれの機能は次のとおりである。

5.2.1 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）で区分した上で測定点の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、その中から測定点を抽出する機能を有する。測定点は抽出されたメッシュの中央とされる。測定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測定点の数を入力すると、MT コードにより測定点が無作為に抽出される。
- ③ LHS 法：ユーザーが抽出する測定点の数を入力すると、LHS 法を用いて測定点が抽出される。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必要がある。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、測定点とそこでの測定値が既に存在する場合がある。これは、5.1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、一部の測定値を用いてESRAD2を実行すれば、使用しなかった測定値（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。全測定点の中から一部の測定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、入力済み測定点の中から任意の数の測定点をGUIを通じて容易に抽出する機能も含まれている。

測定点抽出の具体的な実行方法については、7.2で述べる。

5.2.2 バリオグラム計算コード

バリオグラム計算コードの機能は次のとおりである。

- ① 測定値を用いて2測定点間の距離または角度の関数としてバリオグラム雲を計算する。角度範囲を指定する場合、バリオグラム雲を角度範囲ごとに距離の関数として計算する。
- ② 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。
- ③ 標本バリオグラムモデルと一致度の最も高いバリオグラムモデルを決定する。バリオグ

ラムモデルとして以下の5つのモデルを用いることができる。

(a) ナゲット効果型モデル

$$\gamma_M(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ c & h>0 \end{cases} \quad (5.1)$$

(b) 指数型モデル

$$\gamma_M(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ c+b\{1-\exp(-h/a)\} & h>0 \end{cases} \quad (5.2)$$

(c) 球型モデル

$$\gamma_M(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ c+b\{3/2 \times (h/a) - 1/2 \times (h/a)^3\} & 0 < h \leq a \\ c+b & h > a \end{cases} \quad (5.3)$$

(d) ガウス型モデル

$$\gamma_M(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ c+b\{1-\exp(-h^2/a^2)\} & h>0 \end{cases} \quad (5.4)$$

(e) 線形補間モデル

標本バリオグラムの各点を線形補間したモデルである（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は、バリオグラムモデルが標本バリオグラムに最も一致するように定められ、その方法として加重付最小2乗法に基づく方法が整備されている。また、ユーザーによるパラメータ値の指定も可能である。

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）¹²⁾を用いている。そこでは、関数のフィッティングにNelder-Mead法¹⁸⁾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 の値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。

$$Y_i = \sum_{n=1}^{n_{class}} w(n) \cdot (\gamma^*(h_n) - \gamma_M(h_n, a_i, b_i, c_i))^2 \quad (5.5)$$

ここに、

Y_i : i ($i=1 \sim \text{IPARA}+1$) 点に対する関数 Y の値

IPARA: パラメータの数

n_{class} : 標本バリオグラムのクラス数

$w(n)$: 加重係数 ((5.6)式参照)

$\gamma^*(h_n)$: 距離 h_n における標本バリオグラム

$\gamma_M(h_n, a_i, b_i, c_i)$: 距離 h_n におけるバリオグラムモデル ((5.1)～(5.4)式) の値

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。

$$\begin{cases} w(n) = 1 \\ w(n) = N(n) \\ w(n) = 1/\gamma_M(h_n, a_i, b_i, c_i)^2 \\ w(n) = N(n)/\gamma_M(h_n, a_i, b_i, c_i)^2 \\ w(n) = N(n)/h_n^2 \end{cases} \quad (5.6)$$

ここに、 $N(n)$ は標本バリオグラムのクラス n に含まれる標本数である。

本コードでは、異方性を考慮したバリオグラムを扱うことができる。すなわち、一般に(5.7)式で定義される標本バリオグラムにおいて、異方性を考慮した(5.8)式で表される標本バリオグラムを扱うことができる。

$$\gamma^*(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{k=1}^{N(h)} (z(\mathbf{x}_\alpha) - z(\mathbf{x}_\beta))^2 \quad (5.7)$$

ここに、

$\gamma^*(\mathbf{h})$: 距離ベクトル \mathbf{h} における標本バリオグラム

$z(\mathbf{x}_\alpha)$: 地点 \mathbf{x}_α における測定値

$N(\mathbf{h})$: $\mathbf{h} = \mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_\beta$ を満たす測定値のペアの数

距離ベクトル \mathbf{h} を方向のクラス i で分割したうえで、さらに同一の方向クラスにおいて距離のクラスで分割する。すなわち、

$$\gamma^*(i, j) = \frac{1}{2N(i, j)} \sum_{k=1}^{N(i, j)} (z(\mathbf{x}_\alpha) - z(\mathbf{x}_\beta))^2 \quad (5.8)$$

$i = 1, \dots, NDIR, \quad j = 1, \dots, NLAG(i)$

ここに、

$NDIR$: 方向のクラス数 (分割数)

$NLAG(i)$: 方向のクラス i における距離のクラス数 (分割数)

$\gamma^*(i, j)$: 方向のクラス i 、距離のクラス j に対する標本バリオグラム

$N(i, j)$: 方向のクラス i 、距離のクラス j に属する測定値のペアの数

なお、方向および距離の分割数は入力で与えるとしている。

(5.8)式の標本バリオグラムを基に、方向のクラス i ごとのバリオグラムモデルが探索される。バリオグラムモデルのパラメータ値を決めるために、初めに等方性を仮定してバリオグラムモデルのパラメータを探索し、次にその値を初期値として、方向のクラスごとのパラメータ値を探索する。(2 または 3) × $NDIR$ の数のパラメータが最適化の対象となる。

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 GNU PLOT 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、6.2 を参照)。

5.2.3 交差検証コード

交差検証コードの機能は次のとおりである。

- ① 測定値のデータセットから各測定値 $z(\mathbf{x}_\alpha)$ ($\alpha=1, 2, \dots, n$) を順次取り除き、その地点における値を、残りの $n-1$ 個の測定値を用いて計算する。ここに、計算時間の短縮のために O.Dubrule の開発した計算手法¹⁹⁾を用いている。
- ② バリオグラム計算コードで算出したバリオグラムモデルのパラメータ値を初期値とし、目的関数の値が最小になるバリオグラムモデル（最適バリオグラムモデルと呼ぶ）を求める。最適化手法には、Nelder-Mead法を用いている。
- ③ 最適化の目的関数として以下の3つを選択することができる。

$$Y_{ARE} = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n w(\alpha) \left| \frac{z^*(a, b, c; \mathbf{x}_\alpha) - z(\mathbf{x}_\alpha)}{z(\mathbf{x}_\alpha)} \right| \times 100\% \quad (5.9)$$

$$Y_{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n w(\alpha) (z(\mathbf{x}_\alpha) - z^*(a, b, c; \mathbf{x}_\alpha))^2 \quad (5.10)$$

$$Y_{MSSSE} = \left| \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n w(\alpha) (z(\mathbf{x}_\alpha) - z^*(a, b, c; \mathbf{x}_\alpha))^2 / \sigma_{[\alpha]}^2 - 1 \right|^2 \quad (5.11)$$

ここに、

n : 測定点数

$z(\mathbf{x}_\alpha)$: 測定点 \mathbf{x}_α における測定値

$z^*(a, b, c; \mathbf{x}_\alpha)$: 測定点 \mathbf{x}_α における測定値を除く残りの測定値から推定した
測定点 \mathbf{x}_α における値

$\sigma_{[\alpha]}$: 測定点 \mathbf{x}_α での推定値 $z^*(a, b, c; \mathbf{x}_\alpha)$ に対する推定分散平方根

$w(\alpha)$: 加重係数（ユーザー指定）

- ④ バリオグラムモデルとして次の3つのモデルを利用することができる。
 - (a) 指数型モデル
 - (b) 球型モデル
 - (c) ガウス型モデル

最適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GNU PLOT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、6.2を参照）。

5.2.4 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。

- ① 測定値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濃度とその推定分散を計算する。

- ② 平均クリギングⅠと平均クリギングⅡの手法を用いて、評価対象領域の放射能濃度の平均とその推定分散を計算する。
- ③ すべてのメッシュでの放射能濃度の推定値をもとに、対象領域における放射能濃度の確率密度関数および累積分布関数を計算する。
- ④ 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。測定値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測定値（真値）と推定値の比較を行うことができる。

$$ARE[\%]=\left| (z_i^* - z_i) / z_i \right| \times 100 \quad (5.12)$$

ここに、 z_i^* と z_i はそれぞれ放射能濃度の推定値と真値である。

本コードの出力である放射能濃度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 GMT 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、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、6.2を参照）。

5.2.5 必要標本数計算コード

必要標本数計算コードの機能は次のとおりである。

- ① クリギング計算コードから出力された各核種の平均放射能濃度の計算結果およびサイト解放に係る濃度基準値および判断に係る過誤率（ユーザー入力）を基に、平均クリギングⅠおよび平均クリギングⅡにおける必要測定点数を計算する。
- ② 共分散関数を各標本データのペアでプロットした共分散クラウド及び共分散関数の近似曲線としての標本共分散を計算する。

共分散クラウド及び標本共分散のデータは、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、6.2を参照）。

表 5.1 計算コードとファイルの概要 (1/3)

番号 ^{a)}	計算コード	
	計算コード名	概要
(1)	標本抽出コード (S コード)	対象領域から標本点を抽出するコード
(2)	バリオグラム計算コード (V コード)	標本バリオグラムおよびそれに基づき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)	交差検証コード (C コード)	交差検証法により最適なバリオグラムモデルパラメータ値を計算するコード
(4)	クリギング計算コード (K コード)	クリギング方程式を解き放射能濃度分布と平均放射能濃度を計算するコード
(5)	必要標本数計算コード (N コード)	平均放射能濃度と過誤率に基づき必要測定点数を計算するコード
(6)	MT コード	標本を無作為に抽出するコード
(7)	LHS コード ^{b)}	LHS 法を用いて標本を抽出するコード
(8)	GNU PLOT 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
(9)	GMT 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

番号 ^{a)}	ファイル	
	ファイル名	概要
①	放射能情報データファイル	測定点の座標データと測定値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	V コード入力ファイル	バリオグラム計算コードへの入力ファイル
⑧	V コード標準出力ファイル	バリオグラム計算コードの出力ファイル

表 5.1 計算コードとファイルの概要 (2/3)

番号 ^{a)}	ファイル	
	ファイル名	概要
⑨	V コードバリオグラムパラメータファイル	バリオグラム計算コードで求めたバリオグラムモデルパラメータ値を収めたデータファイル
⑩	V コード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
⑪	V コードグラフ作成用 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
⑫	V コードグラフファイル	GNUPLOT により作成された EPS (Enhanced PostScript) 形式のグラフの画像データファイル
⑬	C コード入力ファイル	交差検証コードへの入力ファイル
⑭	C コード標準出力ファイル	交差検証コードの出力ファイル
⑮	C コードバリオグラムパラメータファイル	交差検証コードで求めた最適なバリオグラムモデルパラメータ値を収めたデータファイル
⑯	C コードグラフ作成用 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
⑰	C コードグラフファイル	GNUPLOT により作成された EPS (Enhanced PostScript) 形式のグラフの画像データファイル
⑱	K コード入力ファイル	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)
⑲	真値比較用放射能情報データファイル	標本点の座標データと標本データを収めたデータファイル
⑳	K コード標準出力ファイル	クリギング計算コードの出力ファイル
㉑	必要標本数計算用データファイル	クリギング計算コードの出力ファイル。必要標本数計算コードの入力データとして使用。
㉒	K コード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
㉓	K コードグラフ作成用 GNUPLOT および GMT 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 および GMT のコマンドが記述されているスクリプトファイル

表5.1 計算コードとファイルの概要 (3/3)

番号 ^{a)}	ファイル	
	ファイル名	概要
②④	K コードグラフファイル	GNU PLOT および GMT により作成された EPS (Enhanced PostScript) 形式のグラフの画像データファイル
②⑤	N コード入力ファイル	必要標本数計算コードの入力ファイル
②⑥	N コード標準出力ファイル	必要標本数計算コードの出力ファイル
②⑦	共分散クラウド、標本共分散データファイル	共分散クラウド、標本共分散のグラフ化に用いるデータファイル
②⑧	N コードグラフ作成用 GNU PLOT スクリプトファイル	共分散クラウド、標本共分散のグラフ化に必要な GNU PLOT のコマンドが記述されているスクリプトファイル

a) 図 5.1 における番号

b) ESRAD2 には含まれない外部の計算コード、ファイル

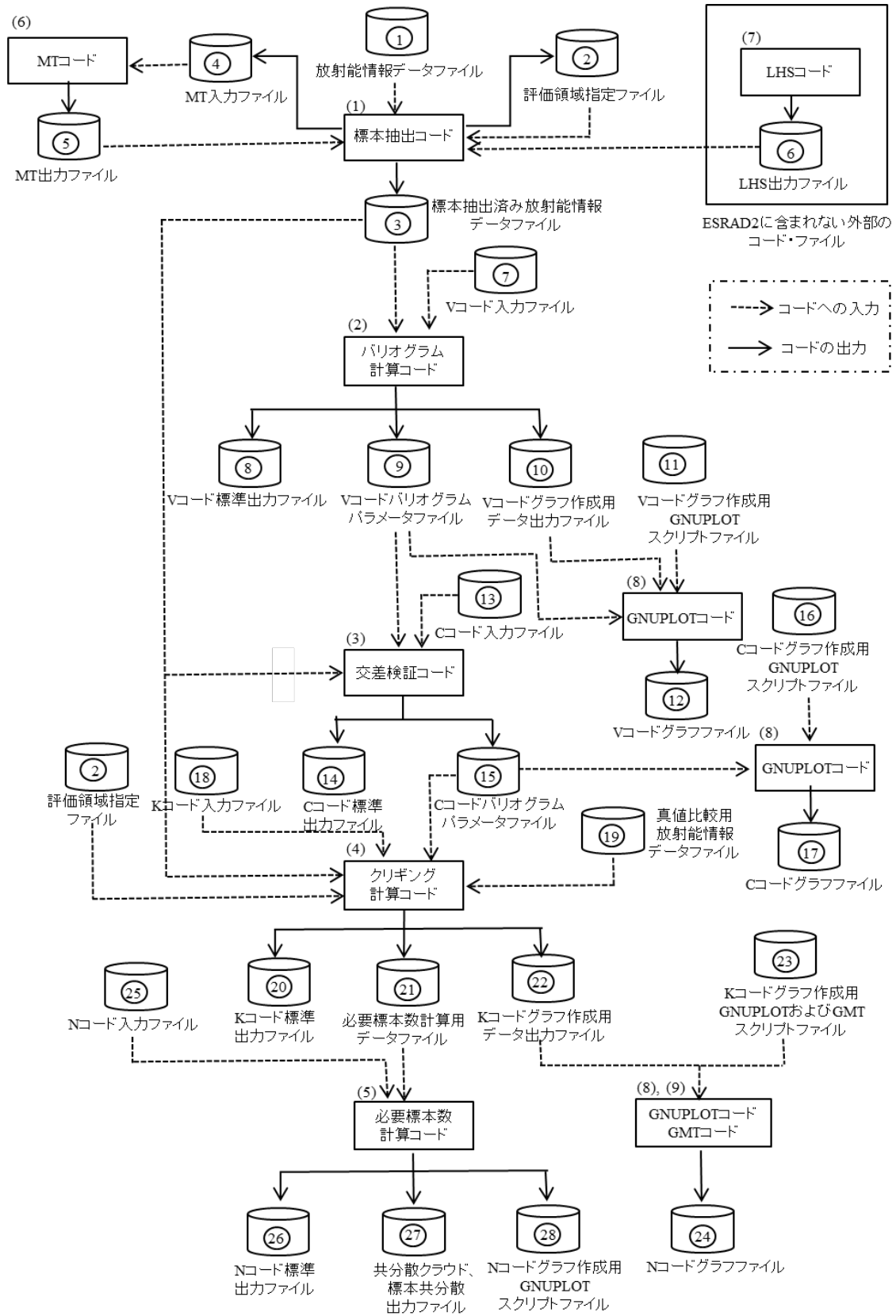


図 5.1 ESRAD2 の構成

6 入力仕様と出力例

6.1 入力仕様

標本抽出コード、バリオグラム計算コード、交差検証コード、クリギング計算コード、および必要標本数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による入力が可能である。これについては、7.2 で述べる。

6.1.1 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。なお、MT 入力ファイルは MT コードへの入力ファイルであるが、MT コードの出力ファイル (MT 出力ファイル) が標本抽出コードへの入力ファイルとなる (図 5.1 参照) ことから、ここで言及する。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。 但し、放射能情報データに誤差分散を含める場合は、#comment と #end_comment の間に =sigma2=0 または 1 =type=0, 1, または 2	#comment A 施設の敷地における放射能濃度分布の推定 #end_comment

パラメータ	型	概要	データ例
		の 2 行のデータを入れる。	
以下の内容は、1 行内に 1 測定点の情報として繰り返す。			
X	実数	測定点 X 座標	5.5
Y	実数	測定点 Y 座標	0.5
Z	実数	測定点での放射能情報 (放射能濃度、放射線計 数率等)	0.43
sigma	実数	平均値または中央値に 対する誤差分散平方根 の割合、または、誤差分 散の値	0.3

放射能情報データファイルにある測定値に誤差分散を与える方法は以下のとおりである。

1) 測定値を中央値とするか平均値とするかの指定

#comment と #end_comment の間に

=sigma2=0

または

=sigma2=1

で指定する。

=sigma2=0 は測定値を平均値とする、

=sigma2=1 は測定値を中央値とする、

場合の指定である。

なお、=sigma2=0 および=sigma2=1 の記載がない場合には、誤差分散は与えない形式である。

2) 誤差分散の与え方

誤差分散は、#comment と #end_comment の間に

=type=0

または

=type=1

または

=type=2

で指定する。

=type=0 は誤算分散を強制的に 0 にする、

=type=1 は誤差分散平方根を測定値に対する割合とする、

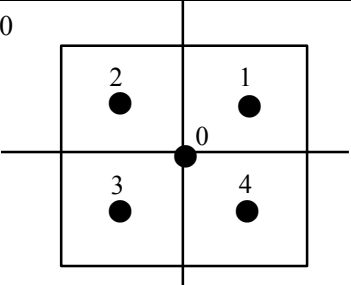
=type=2 は誤差分散 (σ^2) の値とする、

場合の指定である。

(2) 評価領域指定ファイル

このファイルは評価領域に関する指定を行うものであり、クリギング計算コードへの入力ファイルにもなる（図 5.1 参照）。この指定では、測定点の指定で用いたメッシュ（大メッシュまたは区画という）よりも小さいメッシュで評価点を指定することができるように、大メッシュをさらに分割したメッシュ（詳細メッシュ）を用いることが可能である。詳細メッシュを使用すると、測定点の座標が詳細メッシュの中央とならない場合がありうるため、その場合測定点を大メッシュの中央から最寄りの詳細メッシュの中央に変更する機能が含まれている。以下に示すファイル仕様における Card1 の nx, ny で大メッシュを、Card 1 の nxs, nys で詳細メッシュを指定する。測定点を詳細メッシュの中央と一致させる必要がある場合には Card 1 の mp で指定する。評価領域は、放射能情報データファイルの測定点が含まれるよう設定する必要がある。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」の付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
Nxs	整数	評価領域の X 方向詳細分割数	1
ny	整数	評価領域の Y 方向分割数	7
nys	整数	評価メッシュ内の Y 方向詳細分割数	1
mp	整数	評本点の調整方法 0：調整なし 1：右上に調整 2：左上に調整 3：左下に調整 4：右下に調整	0 

パラメータ	型	概要	データ例
		(調整値は詳細メッシュ幅の半分)	
Card 2 評価領域を含む矩形領域の指定 (フリーフォーマット)			
xmin	実数	矩形領域の左下 X 座標	0.0
xmax	実数	矩形領域の右上 X 座標	14.0
ymin	実数	矩形領域の左下 Y 座標	0.0
ymax	実数	矩形領域の右上 Y 座標	7.0
Card 3 評価領域の指定 (フリーフォーマット) 評価領域を構成する大メッシュの数だけ繰り返す。			
xpoint	実数	評価領域の X 座標 (詳細分割する前の大メッシュ中心)	0.5
ypoint	実数	評価領域の Y 座標 (詳細分割する前の大メッシュ中心)	0.5
nopint	整数	部分評価領域の番号	1

Card 2 の評価領域を含む矩形領域とは、Card 3 で指定する評価領域を覆う矩形領域である。図 6.1 の例では、番号の付いた大メッシュが評価領域であり、その外側の番号の付いていない大メッシュと評価領域を併せたものが、評価領域を含む矩形領域である。

標本抽出コードを用いて入力された放射能情報は、大メッシュの中央または調整された点(詳細メッシュの中央)での値となる(図 6.1)。なお、クリギング計算コードにおける評価点も、大メッシュ内の中央または調整された点となる。

(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

パラメータ	型	概要	データ例
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、標本抽出コードへの入力となる。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	抽出された測定点の X 座標	0.5
y	実数	抽出された測定点の 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 コードの出力ファイルであり、測定点を指定するデータとして標本抽出コードへの入力となる。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 個出力。	X Y
以下、NOBS 行繰り返し。1 データ 1 行。			
X	実数	抽出された測定点の X 座標	0.5
Y	実数	抽出された測定点の Y 座標	0.5

ここに、LHS 出力ファイルの X, Y の値は実際の測定点の 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測定点の X 座標と Y 座標の値に変換される。

6.1.2 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) Vコード入力ファイル

である。(1)の仕様は 6.1.1 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。(2)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 Cs137, 標本点数 39, モデル=spherical, ナ ゲット効果=あり, 加 重係数=1 #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¥sample2¥Trojan_ Cs137.rif
Card 2 対数化オプション			
ilog	整数	測定値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
Card 3 標本バリオグラム			
nclass	整数	全方向の距離に対する標本バリオグラムのクラス数 (最大 200)。	4
nclassang	整数	非類似度の角度依存性をプロットするために区分する角度の分割数 (最大 200)。結果は 0° ～ 180° を等分割して表示される。	8
Card 4 距離の最大			
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)	63

パラメータ	型	概要	データ例
Card 5 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	spherical
Card 6 モデル関数の推定方法 (フリーフォーマット)			
lsm	整数	パラメータ値の設定 最小 2 乗法 : 0 ユーザー指定 : 1	0
Card 7 モデル内のパラメータ値の設定 (フリーフォーマット) (Card 6 において lsm=0 と設定しているためデータ例は空欄となっている)			
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、なおパラメータ名は「sill」であるが、ここでは b のことである)	
nugget	実数	c (ナゲット効果), (lsm=1 のときのみ入力)	
Card 8 重み付最小 2 乗法に関する設定			
inugget	整数	ナゲット効果を考慮するか否かを指定する。 考慮しない : 0 考慮する : 1	1
weight_model	整数	加重係数 $w(n)$ を指定する。 $w(n)=1$: 1 $w(n)=N(n)$: 2 $w(n)=1/\gamma_M(h_n, a_i, b_i, c_i)^2$: 3 $w(n)=N(n)/\gamma_M(h_n, a_i, b_i, c_i)^2$: 4 $w(n)=N(n)/h_n^2$: 5	1
Card 9 角度設定方法に関する指定			
iangletype	整数	角度設定方法を指定する。 0 : 分割しない (Card 10 以降の入力はない) 2 : 角度範囲で指定 (Card 10, Card 11	0

パラメータ	型	概要	データ例
		で角度分割法を指定。iangletype=2の場合に飛ぶ。値が1でなく2である点に注意のこと)	
Card 10 方向クラスに関する指定。方向クラスの数だけ Card 10~Card 17 を繰り返す (iangletype=2 の場合)。(Card 9 において iangletype =0 と設定しているため Card 10~Card 17 のデータ例は空欄となっている)			
noangleclass	整数	1 番目の方向クラスに対する角度範囲の数を指定する (Card10~Card17 の繰り返しにおいて順次 2 番目、・・・の方向クラスに対する角度範囲の数を指定する)。	
Card 11 角度範囲を各 noangleclass 組 (iangletype=2 の場合) に対して指定する。1 行に一組の開始角度と終了角度を入力する。Noangleclass 行の入力となる。			
anngleclassstart	実数	開始角度 (度) (0 から 180 度)	
anngleclassend	実数	終了角度 (度) (0 から 180 度)	
Card 12 標本バリオグラム			
nclass	整数	標本バリオグラムの距離クラス数 (最大 200)	
Card 13 距離の最大			
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)	
Card 14 バリオグラムモデルの指定 (左寄せですべて小文字で入力すること)			
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	
Card 15 モデル関数の推定方法 (フリーフォーマット)			
lsm	整数	パラメータ値の設定 最小 2 乗法: 0 ユーザー指定: 1	
Card 16 モデル関数のパラメータ指定 (フリーフォーマット) (lsm=1 のときのみ入力)			
range	実数	a (レンジ) (lsm=1 のときのみ入力)	

パラメータ	型	概要	データ例
sill	実数	b (lsm=1 のときのみ入力、なおパラメータ名は「sill」であるが、ここでは b のことである)	
nugget	実数	c (ナゲット)、(lsm=1 のときのみ入力)	
Card 17 重み付最小二乗法に関する設定 (lsm=0 のときのみ入力)			
inugget	整数	ナゲット効果を考慮するか否かを指定する。 考慮しない : 0 考慮する : 1	
weight_model	整数	加重係数 $w(n)$ を指定する。 $w(n)=1$: 1 $w(n)=N(n)$: 2 $w(n)=1/\gamma_M(h_n, a_i, b_i, c_i)^2$: 3 $w(n)=N(n)/\gamma_M(h_n, a_i, b_i, c_i)^2$: 4 $w(n)=N(n)/h_n^2$: 5	

Card 5 と Card 14 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。

6.1.3 交差検証コード

交差検証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) V コードバリオグラムパラメータファイル
- (3) C コード入力ファイル

である。(1)の仕様は 6.1.1 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、バリオグラム計算コードの出力ファイルであり、最適なバリオグラムモデルを設定するための初期値を提供するファイルである。これについては、その出力例を 6.2.2(2)に示す。(3)は、最適なバリオグラムモデルを設定するための条件、最適化の目的関数等を指定するためのファイルである。ここで指定するバリオグラムモデルのパラメータ値は交差検証法により最適なバリオグラムモデルを探索する際の初期値として使用される。パラメータ初期値の指定には、ユーザーが入力する方法と、V コードバリオグラムパラメータファイルを読み込む方法の 2 通りがある。このファイルにつける拡張子は「.cinp」である。(3)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 Cs137、 標本点数

パラメータ	型	概要	データ例
		#comment~#end_comment タグで挟まれている部分をコメントとする。	39、モデル=spherical、ナゲット効果=あり、加重係数=1、 ARE #end_comment
Card 1 ファイルの指定			
fdat	文字列	抽出済み放射能情報データファイルのパスを指定する。	.YdatYsample2YTrojan_Cs137.rif
Card 2 交差検証法と最適化に関する条件の指定 (フリーフォーマット)			
itarget	整数	最適化の目的関数の番号を指定する。 (5.9)~(5.11)式参照 1 : Y _{ARE} 2 : Y _{MSE} 3 : Y _{MSSE}	1
iweight	整数	加重係数を指定する。 1 : 均一 2 : 入力で設定	1
ichkcross	整数	交差検証計算を実行する際に用いる計算方法を指定する。 0 : Olivier Dubrule による計算方法 1 : 通常計算	0
Card 3 加重係数 (iweight = 2 の場合入力) (フリーフォーマット) (Card 2 において iweight = 1 と設定しているためデータ例は空欄となっている)			
weight	実数	標本抽出済み放射能情報データファイルの測定点 (標本点) の並びに対応して加重係数を設定する。	
Card 4 対数化オプション			
ilog	整数	測定値 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
Card 5 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 指数型モデル: exponent	Spherical

パラメータ	型	概要	データ例
		球型モデル: spherical ガウス型モデル: gauss	
Card 6 モデル内のパラメータ値の設定 (フリーフォーマット) (交差検証法と最適化を実行する際に最適化のための初期値として設定される)			
range	実数	a (レンジ)	6.7347
sill	実数	b (パラメータ名は「sill」であるが、ここでは b のことである)	0.31688E-06
nugget	実数	c (ナゲット)	0.12018E-06
inugget	整数	ナゲット効果を考慮するか否かを指定する。 考慮しない: 0 考慮する: 1	1
Card 7 標本バリオグラムメのクラス数			
nclass	整数	標本バリオグラムメのクラス数 (最大 200)	4
Card 8 角度設定方法に関する指定			
iangletype	整数	角度設定方法を指定する。 0: 分割しない=>入力終了 2: 角度範囲で指定=>Card8-1 へ	0
Card 8-1 方向クラス数の指定 (iangletype=2 の場合) (Card 8 において iangletype=0 と設定しているためデータ例は空欄となっている)			
ndirset	整数	方向クラス数	
Card 9 角度分割に関する指定。Card 9~Card 13 を繰り返す (iangletype=2 の場合)。(Card 8 において iangletype=0 と設定しているため Card 9~Card 13 のデータ例は空欄となっている)			
noangleclass	整数	1 番目の方向クラスに対する角度範囲の数を指定する (Card 9~Card 13 の繰り返しにおいて順次 2 番目、... の方向クラスに対する角度範囲の数を指定)。	
Card 10 角度範囲			
anngleclassstart	実数	開始角度 (度) (0 から 180 度)	
anngleclassend	実数	終了角度 (度) (0 から 180 度)	
Card 11 バリオグラムモデルの指定 (左寄せですべて小文字で入力すること)			
model	文字列	バリオグラムモデルを指定するパラメータ	

パラメータ	型	概要	データ例
		指数型モデル: exponent 球型モデル: spherical ガウス型モデル: gauss	
Card 12 モデル関数のパラメータ指定 (フリーフォーマット)			
range	実数	a (レンジ)	
sill	実数	b (パラメータ名は「sill」であるが、ここでは b のことである)	
nugget	実数	c (ナゲット)	
inugget	整数	ナゲット効果を考慮するか否かを指定する。 考慮しない: 0 考慮する: 1	
Card 13 標本バリオグラムクラスの数			
nclass	整数	標本バリオグラムのクラス数 (最大200)	

V コードバリオグラムパラメータファイルの読み込み機能

「Card 4」の位置で、バリオグラム計算コードの出力ファイル model.dat を設定する方法である。model.dat を用いることにより、それ以降の入力と置き換えることができる。その場合の入力ファイルの仕様を以下に示す。

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 Cs137, 標本点数 39,モデル= spherical, ナゲッ ト効果=あり、加 重係数=1、 ARE #end_comment
Card 1 ファイルの指定			
fdat	文字列	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¥sample2¥Trojan_Cs137.rif
Card 2 交差検証機能条件の指定 (フリーフォーマット)			
itarget	整数	最適化の目的関数の番号を指定する。 (5.9)~(5.11)式参照 1: Y _{ARE}	1

パラメータ	型	概要	データ例
		2 : Y_{MSE} 3 : Y_{MSSE}	
iweight	整数	加重係数を指定する。 1 : 均一 2 : 入力で設定	1
ichkcross	整数	交差検証計算を実行する際に用いる 計算方法を指定する。 0 : Olivier Dubrule による計算方法 1 : 通常計算	0.
Card 3 重み (iweight=2 の場合入力) (Card 2 において iweight=1 と設定しているためデータ例は空欄となっている)			
weight	実数	標本抽出済み放射能情報データファイルの測定点 (標本点) の並びに対応して重みを設定する。	
Card 4 バリオグラムパラメータファイルの指定			
modelfilename	文字型	第1カラムを = としてバリオグラムパラメータファイル名を指定	=¥out¥sample2¥Cs 137_SP-NU-01¥model.dat

6.1.4 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) 真値比較用放射能情報データファイル
- (4) C コードバリオグラムパラメータファイル (交差検証コードの出力ファイル)
- (5) K コード入力ファイル

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、6.1.1の(2)の評価領域指定ファイルと同じである。ここに、(3)は、*ARE* ((3.15)式)を用いて推定結果を真値と比較する際に用いるファイルであり、真値の放射能情報データが書き込まれている。(4)は、交差検証コードの出力ファイルであり、最適バリオグラムモデルの情報を提供するファイルである。これについては、その出力例を6.2.3(2)に示す。(5)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。バリオグラムモデルの設定には、ユーザーが入力する方法と、交差検証コードで得られた最適バリオグラムモデルを読み込む方法の2通りがある。このファイルにつける拡張子は「.kinp」である。(5)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 Cs137、 標本点数 39、モデル= spherical、 ナゲッ ト効果=あり、加重 係数=1 #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。	.YdatYsample2YTrojan_Cs137_.rif
farea	文字列	評価領域指定ファイルのパスを指定する。	.YdatYsample2YTrojan_Cs137.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）のパスを指定する。 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。	.YdatYsample2YTrojan_Cs137.rif
Card 2 交差検証法の計算方法を指定（フリーフォーマット）			
ichkcross	整数	クリギング計算コードの中で、交差検証コードとの比較のために行う交差検証の計算方法を指定する。 0 : Olivier Dubrule による計算方法 1 : 通常計算	0
Card 3 対数化オプション			
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（元の測定値を常用対数で対数化した場合）：1 ・ e ^{計算結果} を出力（元の測定値を自然対数で対数化した場合）：2	0
Card 4 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	モデルを指定する。 ナゲット効果型モデル: nugget	spherical

パラメータ	型	概要	データ例
		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	
Card 5 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)	13.469
Sill	実数	b (パラメータ名は「sill」であるが、ここでは b のことである)	0.63376E-06
Nugget	実数	c (ナゲット)	0.24036E-06
inugget	整数	ナゲット効果を考慮するか否かを指定する。 考慮しない: 0 考慮する: 1	1
Card 6 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) (Card 4 において球型モデルと設定しているためデータ例は空欄となっている)			
nClass	整数	標本バリオグラムのカラス数	
以下の2つのパラメータを 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 7 放射能濃度推定値の確率密度関数の区間数の設定			
npdf	整数	確率密度関数の区間数	8
Card 8 角度設定方法に関する指定			
iangletype	整数	角度設定方法を指定する。 0: 分割しない => 入力終了 2: 角度範囲で指定 => Card 8-1 へ	0
Card 8-1 方向クラス数の指定 (iangletype=2 の場合は以下の入力が必要) (Card 8 において iangletype =0 と設定しているためデータ例は空欄となっている)			
ndirset	整数	区分分割数	
Card 9 角度分割に関する指定 Card 9~Card 14 を繰り返す (iangletype=2 の場合)。 (Card 8 において iangletype =0 と設定しているため Card 9~Card 14 のデータ例は空欄となっている)			
noangleclass	整数	1 番目の方向クラスに対する角度範囲の数を指定 (Card 9~Card 13 の繰り返しにおいて順次 2 番目、・・・の方向クラスに対する角度範囲の数を指定)	

パラメータ	型	概要	データ例
Card 10 角度範囲 noangleclass 組 (iangletype=2 の場合)			
anngleclasstart	実数	開始角度 (度) (0 から 180 度)	
anngleclassend	実数	終了角度 (度) (0 から 180 度)	
Card 11 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	モデルを指定する。 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	
Card 12 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)	
Sill	実数	b (パラメータ名は「sill」であるが、ここでは b のことである)	
Nugget	実数	c (ナゲット)	
inugget	整数	ナゲット効果を考慮するか否かを指定する。 考慮しない: 0 考慮する: 1	
Card 13 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 14 放射能濃度推定値の確率密度関数の区間数の設定 (Card 7 と同じ値を指定する)			
npdf	整数	推定濃度の確率密度関数の区間数	
Card 15 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 回繰り返し入力する (フリーフォーマット)。(Card 15 において nrange=0 と設定しているためデータ例は空欄となっている)			
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	

パラメータ	型	概要	データ例
nx	整数	X 方向分割数	
ny	整数	Y 方向分割数	

Card15 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。

C コードバリオグラムパラメータファイルの読み込み機能

「Card 3」の位置で、交差検証計算コードの出力ファイル modelcross.dat を設定することにより、“Card 3 の対数化オプション”から“Card 14 確率密度関数の区間数設定”までの入力を置き換えることができる。その場合の入力ファイルの仕様を以下に示す。

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 Cs137、 標本点数 39、 モデル=spherical、 ナゲット効果=あり、 加重係数=1 #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¥sample2¥Trojan_Cs137._rif
farea	文字列	評価領域指定ファイルのパスを指定する。	.¥dat¥sample2¥Trojan_Cs137.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）のパスを指定する。 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¥sample2¥Trojan_Cs137.rif
Card 2 交差検証法の計算方法の指定（フリーフォーマット）			
ichkcross	整数	クリギング計算コードの中で、交差検証コードとの比較のために行う交差検証法の計算方法を指定する。 0 : O. Dubrule による計算方法 1 : 通常計算	0

パラメータ	型	概要	データ例
Card 3 バリオグラムパラメータファイルの指定			
modelfilename	文字型	第 1 カラムを = としてバリオグラムパラメータファイル名を指定する。	=.¥out¥sample2¥Cs137_SP-NU-01¥modelcross.dat
Card 4 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)。(Card 4 において nrange=0 と設定しているためデータ例は空欄となっている)			
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	

6.1.5 必要標本数計算コード

必要標本数計算コードへの入力ファイルは、

- (1) 必要標本数計算用データファイル
- (2) Nコード入力ファイル

である。

(1)は、クリギング計算コードから出力される必要標本数計算用のデータファイル ncaldata.dat であり、6.2.4(3)に出力例を示す。(2)は、各核種の必要標本数計算用のデータファイルや、濃度基準値および過誤率等の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「.ninp」である。(2)の仕様は次のとおりである。

パラメータ	型	概要	データ例
Card 1 核種の種類の数と使用する平均クリギングのタイプ			
n_nuc ntype	整数	核種の種類の数を指定する。	2
	整数	使用する平均クリギングのタイプ 1 : 平均クリギング I 2 : 平均クリギング II	1
Card 2 必要標本数の評価に係るデータファイル			
fdat(1:n_nuc)	文字列	クリギング計算コードから出力された ncaldata.dat を指定する。n_nuc 個のフ	.¥out¥H25¥Cs137_SP-NU-01¥ncaldata.dat

		ファイルを指定する。	.Yout¥H25¥Co60_SP-N U-01¥ncaldata.dat
Card 3 濃度基準値			
dcgl(1:n_nuc)	実数	濃度基準値を指定する。fdat(1: n_nuc) で指定した核種の順で指定する。	0.01 0.0035
Card 4 μ_1 ((4.4)式参照) の設定			
tmp1	実数	μ_1 を指定する。 $\mu_1 \leq 0, \mu_1 \geq 1$ を入力した場合はデフ ォルト値 $f_n^* = \sum_k \bar{z}_{n_0}^*(k)/d(k)$ が用いら れる。	-1
Card 5 上側 α 点、 β 点の α 、 β			
alpha	実数	上側 α 点の α を指定する。	0.05
beta	実数	上側 β 点の β を指定する。	0.1
Card 6 角度依存性の考慮			
Card 6-(1) :核種 A-核種 B の組合せ数			
n_tmp	整数	核種 A-核種 B の組合せ数を指定する。	1
Card 6-(2) :角度依存性の考慮の設定 (n_tmp 行繰り返す)			
i_tmp1	整数	核種 A	1
i_tmp2	整数	核種 B	2
i_tmp3 (n_angle)	整数	角度の分割数 負値を入力すると該当核種間の相関 を考慮しない計算を行う。	1
tmp1 (init_angle)	実数	初期角度	45.0
i_tmp4 (n_h_class)	整数	距離区分数	4
tmp2 (h_limit)	実数	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)	63

6.2 出力例

標本抽出コード、バリオグラム計算コード、交差検証コード、クリギング計算コードおよび必要標本数計算コードについての出力例を示す。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、これらの出力例も併せて示す。なお、ここで示す出力例は、「8. サンプルラン」における出力の一部である。

6.2.1 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 6.1.1 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放射能情報データファイル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、標本抽出コードにおいて GUI を通じて同ファイルの編集・保存が可能である (7.2 で詳述)。ファイル仕様は 6.1.1(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、7.2 参照)。

6.2.2 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) V コード標準出力ファイル
- (2) V コードバリオグラムパラメータファイル
- (3) V コードグラフ作成用データ出力ファイル

である。

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

(1) V コード標準出力ファイル

V コード標準出力ファイルのファイル名は vario.out である。このファイルには、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。標本バリオグラム、およびバリオグラムモデルの情報についてはバリオグラムモデルを等方向として設定した場合の情報に加えて、指定した角度範囲での情報を出力することができる。

バリオグラム雲 (Table 1)

バリオグラム雲の情報として測定点のデータと測定点のペアに関するデータが出力される。出力例 (一部) を以下に示す。

#Table 1 Variogram cloud										
ID	X	Y	Z	ID	X	Y	Z	H	GAMMA	方向(度)
1	4.500E+00	2.250E+01	2.550E-03	2	4.500E+00	3.150E+01	2.290E-03	9.000E+00	3.380E-08	9.000E+01
1	4.500E+00	2.250E+01	2.550E-03	3	1.350E+01	3.150E+01	2.220E-03	1.273E+01	5.445E-08	4.500E+01
1	4.500E+00	2.250E+01	2.550E-03	4	1.350E+01	2.250E+01	2.330E-03	9.000E+00	2.420E-08	0.000E+00
.....										

各測定点のデータとして 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測定点間の距離(H)およびバリオグラム雲を構成する非類似度(GAMMA:(3.5)式)および方向(度)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 (3.6) 式のデータが出力される。等方向を設定し、標本バリオグラムを距離でクラス分けした出力例と、標本バリオグラムの方向(角度)依存性を表す出力例を以下に示す。

等方向を設定し距離でクラス分けした出力例

```
#Table 2 Experimental Variogram
  lower    upper    average    gamma    sd
0.000E+00 1.575E+01 1.068E+01 4.092E-07 5.557E-07 109
1.575E+01 3.150E+01 2.324E+01 4.719E-07 6.401E-07 226
3.150E+01 4.725E+01 3.898E+01 4.674E-07 5.459E-07 201
4.725E+01 6.300E+01 5.456E+01 3.931E-07 4.740E-07 114
```

データは、原点に近いクラスから順に出力される。上の例では、距離を4のクラスに分割したものである。カラムの左から、各クラスにおける距離の下限値(lower)、上限値(upper)、平均(average)、標本バリオグラムの値(gamma)、その標準偏差(sd)、およびクラスに含まれる標本数(ペアの数)である。ここに、距離の平均は当該クラスに含まれるすべてのペアの距離を平均したものである。

方向依存性を表す出力例

```
*****
* 方位依存性評価 : X 軸から反時計廻りでの角度 (度) *
* (距離が 0.0 のデータを除外したもので評価) *
*****

#Table 2 Experimental Variogram
  lower    upper    average    gamma    sd
0.000E+00 2.250E+01 6.929E+00 3.373E-07 4.683E-07 287
2.250E+01 4.500E+01 3.581E+01 4.718E-07 5.967E-07 149
4.500E+01 6.750E+01 5.909E+01 5.499E-07 6.595E-07 42
6.750E+01 9.000E+01 8.602E+01 4.616E-07 5.947E-07 66
9.000E+01 1.125E+02 1.084E+02 5.344E-07 8.390E-07 7
1.125E+02 1.350E+02 1.297E+02 4.711E-07 6.916E-07 67
```

1.350E+02	1.575E+02	1.505E+02	4.260E-07	4.799E-07	49
1.575E+02	1.800E+02	1.677E+02	3.725E-07	4.492E-07	74

データは、角度の小さいクラスから順に出力される（反時計廻り）。上の例では、角度（度）を8のクラスに分割したものである。カラムの左から、各クラスにおける角度の下限值 (lower)、上限値 (upper)、平均 (average)、標本バリオグラムの値 (gamma)、その標準偏差 (sd)、およびクラスに含まれる標本数（ペアの数）である。ここに、平均は当該クラスに含まれるすべてのペアの角度を平均したものである。

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:          3
Parameters estimated.
No. of Iterations:      34
MODEL                    spherical
RANGE                    :    6.7347
SILL                     :    0.31688E-06
NUGGET EFFECT           :    0.12018E-06
WEIGHT FACTOR           :
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:  1.74E-08
```

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 5 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。

$$RMS = \sqrt{\sum_{n=1}^{n_{class}} (\gamma^*(h_n) - \gamma_M(h_n, a, b, c))^2} / n_{class} \quad (6.1)$$

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である。

(2) Vコードバリオグラムパラメータファイル

Vコードバリオグラムパラメータファイルのファイル名は `model.dat` である。バリオグラム計算コードで計算されたバリオグラムパラメータ値が出力される。このファイルは、標本バリオグラム等のバリオグラムに関する情報をユーザーに提示するとともに、交差検証コードへの入力情報を提供する。これは、最適バリオグラムモデルのパラメータ値を探索するための初期値とするためである。

なお、クリギング計算において最適なバリオグラムモデルを用いる場合は、交差検証コードの出力ファイル（Cコードバリオグラムパラメータファイル（`modelcross.dat`）、6.2.3 参照）が入力ファイルとなる。一方、バリオグラム計算コードで計算されたバリオグラムパラメータ値を用いる場合は、クリギング計算コードの入力ファイルにユーザーがバリオグラムパラメータ値を直接入力する。

出力例を以下に示す。

```

* Card   バリオグラムの選定時に設定した対数化オプション
* 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   モデルの指定
* モデル
*nugget
*spherical
*exponent
*gauss
*linear
spherical
* -----
* Card   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          nugget_option
      6.73466E+00    3.16879E-07    1.20181E-07      1
* -----
* Card   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
* nclass: クラス数
      4
* Card   方向性考慮に関する指定
* iangletype 0:方向性を考えない, 1:等分割する, 2:角度範囲で分割する
      0
    
```

ここに、sill（シル）の値はパラメータ *b* の値である。

(3) V コード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

cloud.dat と expvrio.dat の出力例を以下に示す。なお、model.dat については(2)で示したとおりである。

cloud.dat

```

9.000E+00 3.380E-08 9.000E+01
1.273E+01 5.445E-08 4.500E+01
9.000E+00 2.420E-08 0.000E+00
1.800E+01 2.420E-08 0.000E+00
. . . . .
    
```

1 行につき 1 セットのデータが、左の列から 2 地点間の距離、2 地点の非類似度、および 2 地点の方向関係（度）の順に出力される。データは、ペアの数すなわち、(測定点の数) × {(測定点の数)-1} / 2 の行の繰り返しとなる。

expvario.dat

標本バリオグラムの出力項目として、距離依存（全方向、方向別）と方向依存（角度）を計算したものがあある。全方向を対象に距離でクラス分けした標本バリオグラムと、方向別に角度でクラス分けした標本バリオグラムの出力例を示す。

```

*****
*           全方向のデータを使用した評価           *
*****

0.000E+00 0.000E+00
1.068E+01 4.092E-07          109
2.324E+01 4.719E-07          226
3.898E+01 4.674E-07          201
5.456E+01 3.931E-07          114

*****
* 方向依存性評価：X 軸から反時計廻りでの角度（度） *
*  （距離が 0.0 のデータを除外したもので評価） *
*****

0.000E+00 0.000E+00
6.929E+00 3.373E-07          287
3.581E+01 4.718E-07          149
5.909E+01 5.499E-07          42
8.602E+01 4.616E-07          66
1.084E+02 5.344E-07           7
1.297E+02 4.711E-07          67
1.505E+02 4.260E-07          49
1.677E+02 3.725E-07          74
    
```

全方向を対象に距離でクラス分けした標本バリオグラムについては、2 行目以降、左の列から 2 地点間の距離（平均）、標本バリオグラムの値、クラスに含まれるペアの数である。なお、1 行目は、原点に対応しており計算対象外としている。

方向別に角度でクラス分けした標本バリオグラムについては、2 行目以降、左の列から 2 地点間の角度（平均）、標本バリオグラムの値、クラスに含まれるペアの数である。なお、1 行目は、原点に対応しており計算対象外としている。

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、”vario.eps”のファイル名で保存される。

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）

GNU PLOT によるグラフの出力例を図 6.2 に示す。

6.2.3 交差検証コード

交差検証コードの出力ファイルは、

- (1) C コード標準出力ファイル
- (2) C コードバリオグラムパラメータファイル

である。

(2)は、クリギング計算において最適なバリオグラムモデルを用いる場合にクリギング計算コードへの入力ファイルになるとともに、最適バリオグラムモデルのグラフ作成用のデータ出力ファイルである。

(1) C コード標準出力ファイル

C コード標準出力ファイルのファイル名は `crossvalidation.out` である。本出力ファイルには、交差検証の収束状況、交差検証結果、およびバリオグラムモデルの情報が含まれる。等方向のバリオグラムモデルを用いた場合の出力例を以下に示す。

交差検証の収束状況

対数化オプション : 0						
分散データなし						
交差検証機能 : Olivier Dubrule 法						
最適化の目的関数 : YARE						
パラメータの初期値 :						
				6.73E+00	3.17E-07	1.20E-07
反復回数	YARE	YMSE	YMSSE	パラメータ値 :		
5	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
6	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07

7	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
8	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
9	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
10	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
11	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
12	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
13	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
14	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
15	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
16	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
17	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
18	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
19	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
20	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
21	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
22	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
23	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
24	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
25	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
26	2.93804E+01	4.07985E-07	5.52259E+05	1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
最終パラメータ値：				1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
パラメータ値下限：				3.37E+00	1.58E-07	0.00E+00
パラメータ値上限：				1.35E+01	6.34E-07	2.40E-07
Parameters estimated.						
No. of Iterations: 27						

交差検証における収束状況として、

- ・バリオグラムモデルパラメータ初期値
 - ・反復回ごとの目的関数値（左から YARE, YMSE, YMSSE : (5.9)~(5.11)式参照）、バリオグラムパラメータ値（左から a , b （ナゲット効果を考慮しない場合）または a , b , c （ナゲット効果を考慮する場合））、
 - ・バリオグラムパラメータの最終値
 - ・バリオグラムパラメータの下限値
 - ・バリオグラムパラメータの上限値
 - ・収束までの反復回数
- が順に出力される。

交差検証結果

#	x	y	z	z(通常型)	z(交差検証)	差(z-交差)	差/標準誤差	
#Table 0 標本点における推定値								
ARE								
	4.50	22.50	2.55E-03	2.55E-03	2.27E-03	2.78E-04	2.97E-01	1.09E+01
	4.50	31.50	2.29E-03	2.29E-03	2.30E-03	-1.01E-05	-1.08E-02	4.42E-01
	13.50	31.50	2.22E-03	2.22E-03	2.22E-03	-4.67E-06	-5.04E-03	2.10E-01

	94.50	22.50	2.81E-03	2.81E-03	2.28E-03	5.33E-04	5.75E-01	1.90E+01
	85.50	22.50	2.18E-03	2.18E-03	2.24E-03	-6.01E-05	-6.48E-02	2.76E+00
#交差検証における誤差の平均								
	-2.61E-07							
#平均二乗誤差								
	4.08E-07							
#平均二乗標準誤差								
	5.52E+05							
#ARE の平均								
	2.94E+01							

左から順に x, y, z はそれぞれ評価点の x 座標、y 座標、そこでの測定値(z)である。z(通常型)は通常型クリギングで求めた結果、z(交差検証)は交差検証で求めた結果、差(z - 交差)は測定値と交差検証で求めた結果の差、差/標準誤差は差を z(交差検証)の標準誤差で除した量、ARE は(5.9)式である。

バリオグラムモデルの情報

バリオグラムモデルの関数形と、最適化で用いられたパラメータの初期値と求められた最適な最終値が出力される。

<< 交差検証コードに初期値として与えたバリオグラムデータ >>	
全方向のデータを使用した評価値	
MODEL	: spherical
RANGE	: 6.7347
SILL-NUGGET:	0.31688E-06
NUGGET	: 0.12018E-06

<< 交差検証機能により求めたバリオグラムデータ >>

全方向のデータを使用した評価値

```

MODEL      : spherical
RANGE      :   13.469
SILL-NUGGET: 0.63376E-06
NUGGET     :   0.24036E-06

```

(2) C コードバリオグラムパラメータファイル

C コードバリオグラムパラメータファイルのファイル名は `modelcross.dat` である。本ファイルの出力項目はバリオグラム計算コードの出力ファイル `model.dat` と同一である。出力例を以下に示す。

```

* Card   バリオグラムの選定時に設定した対数化オプション
* 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   モデルの関数形
* モデル
*spherical
*exponent
*gauss
spherical
* -----
* Card   モデルパラメータ値
* パラメータ
*   range      sill-nugget      nugget      nugget_option
    13.4693200000000      6.337580000000000E-007      2.403620000000000E-007
    1
* -----
* Card
* nclass: クラス数
    4
* Card   方向性の考慮
* iangletype 0:方向性を考えない, 2:角度範囲で分割する
    0

```

(2)の `modelcross.dat` はバリオグラム計算コード出力ファイルの `cloud.dat`, `expvario.dat`、

modelcross.dat と共に 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
crossvalidation.plt	cloud.dat、expvario.dat、modelcross.dat および modelcross.dat modelcross.dat のデータを用いてバリオグラム雲、標本バリオ グラム、バリオグラムモデルおよび最適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、”crossvalidation.eps”のファイル名で保存される。

ファイル名	内容
crossvalidation.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お よび最適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)

GNUPLOT によるグラフの出力例を図 6.3 に示す。

6.2.4 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) K コード標準出力ファイル
- (2) K コードグラフ作成用データ出力ファイル
- (3) 必要標本数計算用データファイル

である。

(2)は、GNUPLOT および GMT 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) K コード標準出力ファイル

K コード標準出力ファイルのファイル名は krig.out である。本ファイルには、計算条件（バリオグラムモデルの情報）、通常型クリギングにおける重み係数とラグランジュの未定乗数、平均クリギング I における推定分散内訳、平均クリギング I における重み係数とラグランジュの未定乗数、平均クリギング II における重み係数とラグランジュの未定乗数、交差検証の情報、各メッシュ代表点における放射能情報推定値、平均クリギング I、II の情報、各メッシュの代表点における放射能情報の推定標準偏差、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。

バリオグラムモデル等に係る計算条件

入力データ

対数化オプション : 0
 分散データなし
 交差検証機能 : Olivier Dubrule 法

<< 計算に使用したバリオグラムデータ >>
 全方位のデータを使用した評価値

MODEL : spherical
 RANGE : 13.469
 SILL-NUGGET: 0.63376E-06
 NUGGET : 0.24036E-06

通常型クリギングにおける重み係数とラグランジュの未定乗数

<< 通常型クリギングにおける重み係数 W と、ラグランジュの未定乗数 mu >>

評価地点 ID	W(1)	W(2)	W(3)	...	W(39)	mu
1	2.778E-01	-5.205E-03	2.533E-02	...	2.039E-02	2.364E-08
2	2.910E-01	-6.978E-03	2.533E-02	...	2.011E-02	2.332E-08
3	3.039E-01	-8.714E-03	2.533E-02	...	1.983E-02	2.300E-08
.....
.....
35100	7.074E-03	7.081E-03	6.360E-03	...	2.411E-01	7.459E-09

平均クリギング I における推定分散内訳

<< 平均クリギング I における推定分散内訳 >>

評価地点の数(N)= 35100
 標本地点の数(n)= 39
 標本地点と位置が一致した評価地点の数(matchcount)= 39

gamma1w= 8.663545459422154E-07
 gamma1= 8.544970594723911E-07
 gamma2= 8.551454338174874E-07
 gamma2w= 8.544539264788223E-07
 gamma= -1.254897410742561E-08
 推定分散値 (標本数推定)= 9.654505858165308E-09

ここに、gamma1w, gamma1, gamma2, gamma2w, gamma, 推定分散値は、それぞれ(4.12)式、(4.13)式、(4.14)式、(4.15)式、(4.11)式、(4.10)式に対応する。

平均クリギング I における推定分散内訳

```

<< 平均クリギング I における重み係数 >>
    1 2.496735570176532E-02
    2 2.467914656010746E-02
    3 2.525296620209736E-02
    4 2.622129571110045E-02
      . . . . .
      . . . . .
    39 2.558545651814288E-02
sum(w) = 0.999999999999992

<< 平均クリギング I におけるラグランジュの未定定数 >>
1.034505897766550E-08
    
```

平均クリギング II における重み係数とラグランジュの未定乗数

```

<< 平均クリギング II における重み係数 >>
    1 2.826988079933243E-02
    2 2.829848026091213E-02
    3 2.541543880540877E-02
    4 2.566348289165835E-02
      . . . . .
      . . . . .
    39 2.570349431936019E-02
sum(w) = 0.999999999999999

<< 平均クリギング II におけるラグランジュの未定定数 >>
-8.443136295684136E-07
    
```

交差検証の情報 (Table 0)

これは、交差検証結果の確認のために出力される。

#Table 0 標本点における推定値									
#Table 0.1 平均値									
#	x	y	z	z(通常型)	z(交差検証)	差(z-交差)	差/標準誤差	ARE	
	4.50	22.50	2.55E-03	2.55E-03	2.27E-03	2.78E-04	2.97E-01	1.09E+01	
	4.50	31.50	2.29E-03	2.29E-03	2.30E-03	-1.01E-05	-1.08E-02	4.42E-01	
	13.50	31.50	2.22E-03	2.22E-03	2.22E-03	-4.67E-06	-5.04E-03	2.10E-01	
	13.50	22.50	2.33E-03	2.33E-03	2.31E-03	2.08E-05	2.24E-02	8.93E-01	
								

```

. . . . .
94.50      22.50  2.81E-03  2.81E-03  2.28E-03  5.33E-04  5.75E-01  1.90E+01
85.50      22.50  2.18E-03  2.18E-03  2.24E-03 -6.01E-05 -6.48E-02  2.76E+00

#交差検証における誤差の平均
-2.61E-07
#平均二乗誤差
4.08E-07
#平均二乗標準化誤差
5.52E+05
#ARE の平均
2.94E+01
    
```

各メッシュ代表点における放射能情報の推定値 (Table 1)

各メッシュ代表点における放射能情報の推定値として、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。

```

#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      0.15      0.45      0.75      1.05      1.35      1.65      . . .
26.85    2.34E-03  2.35E-03  2.35E-03  2.35E-03  2.36E-03  2.36E-03  . . .
26.55    2.35E-03  2.35E-03  2.35E-03  2.36E-03  2.36E-03  2.36E-03  . . .
26.25    2.35E-03  2.35E-03  2.36E-03  2.36E-03  2.37E-03  2.37E-03  . . .
. . . . .
18.15    2.34E-03  2.34E-03  2.35E-03  2.35E-03  2.35E-03  2.36E-03  . . .
X/Y      0.15      0.45      0.75      1.05      1.35      1.65      . . .
35.85    2.27E-03  2.27E-03  2.27E-03  2.27E-03  2.27E-03  2.27E-03  . . .
35.55    2.27E-03  2.27E-03  2.27E-03  2.27E-03  2.27E-03  2.27E-03  . . .
35.25    2.27E-03  2.27E-03  2.27E-03  2.27E-03  2.27E-03  2.27E-03  . . .
. . . . .
    
```

推定値 + kσ (k=1,2,3) の出力例も上記と同様である。

平均クリギング I、II の情報

平均クリギング I、II による平均の推定値およびその推定分散の計算結果が出力される。出力例を以下に示す。

```

#通常型クリギングによる平均値
2.27E-03
#平均クリギング I による平均値
2.27E-03
#平均クリギング I による推定分散値
9.65E-09
#平均クリギング I による推定分散値 (標本数推定)
    
```

9.65E-09
#平均クリギング II による平均値
2.27E-03
#平均クリギング II による推定分散値
2.98E-08
#平均クリギング II による推定分散平方根
1.73E-04

各メッシュにおける放射能情報の推定標準偏差 (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。推定標準偏差の出力例は「各メッシュ代表点における推定値 (Table 1)」と同様である。推定標準偏差を昇順に出力した例を以下に示す。

#Table 2.2 推定標準偏差の昇順出力		
(*: 測定点)		
X	Y	sd
4.650	31.650	2.59E-11 *
22.650	22.650	1.03E-07 *
13.650	31.650	1.12E-07 *
31.650	22.650	1.21E-07 *
13.650	22.650	1.40E-07 *
22.650	31.650	1.54E-07 *
.
.
52.950	11.250	6.26E-01
52.650	10.950	6.27E-01
52.350	11.250	6.27E-01
52.350	10.950	6.27E-01
52.650	11.250	6.27E-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、その地点が標本点 (測定点) であることを表す。

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。

#Table 3 確率密度関数(PDF)		
Zp		PDF
Lower	Upper	-
8.88E-04	1.53E-03	3.18E-02
1.53E-03	2.16E-03	2.52E-01
2.16E-03	2.80E-03	6.88E-01
2.80E-03	3.44E-03	2.81E-02

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值

(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。

#Table 4 累積分布関数(CDF)					
COUNT	Zp	CDF			
1	8.88E-04	2.85E-05			
2	9.62E-04	5.70E-05			
3	1.04E-03	8.55E-05			
4	1.11E-03	1.14E-04			
5	1.22E-03	1.42E-04			
...			
...			
35100	3.44E-03	1.00E+00			
*** CDF要約値 ***					
1%	5%	10%	25%	50%	75%
90%	95%	99%	mean	SD	
1.37E-03	1.63E-03	1.79E-03	2.12E-03	2.33E-03	2.48E-03
2.72E-03	2.90E-03	2.27E-03	3.22E-04		

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%値、・・・、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、推定値との比較を示す ARE の計算結果が出力される。出力例を以下に示す。

#Table 5 真値と推定値の比較(ARE, %)					
X	Y	Za	Zp	ARE	SD
4.50	22.50	2.55E-03	2.55E-03	1.53E-04	2.48E-07
4.50	31.50	2.29E-03	2.29E-03	1.73E-04	2.59E-11
13.50	31.50	2.22E-03	2.22E-03	1.81E-04	1.12E-07
13.50	22.50	2.33E-03	2.33E-03	1.67E-04	1.40E-07
...
...

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(3.15)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 Card15 (バリオグラムパラメータファイルを読み込む場合は Card4) 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。出力仕様は上記のそれと同様である。

(2) K コードグラフ作成用データ出力ファイル

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
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
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+1 σ
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+2 σ
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+3 σ
variance_cont.dat	評価領域における X 座標、Y 座標、推定標準偏差

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。

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 $\times 2+2$ 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

8.88E-04	0.00E+00
8.88E-04	3.18E-02
1.53E-03	3.18E-02
1.53E-03	2.52E-01
2.16E-03	2.52E-01
2.16E-03	6.88E-01
2.80E-03	6.88E-01
2.80E-03	2.81E-02
3.44E-03	2.81E-02
3.44E-03	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	1.04E-03
累積確率	1PE10.2	累積確率	8.55E-05

出力例

8.88E-04	2.85E-05
9.62E-04	5.70E-05
1.04E-03	8.55E-05
1.11E-03	1.14E-04
1.22E-03	1.42E-04
...	...

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	# ncalpoint
2 行目			
ncalpoint	整数	評価点数 (全メッシュ数)	35100
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+1 σ average1s_cont : 推定値+2 σ average1s_cont : 推定値+3 σ sd_cont : 推定標準偏差	1.00E-01

出力例

```
# ncalpoint
#      35100
# x    y    z
1.500000E-01  1.815000E+01  3.2552698E-03
4.500000E-01  1.815000E+01  3.2553447E-03
7.500000E-01  1.815000E+01  3.2552416E-03
1.050000E+00  1.815000E+01  3.2549736E-03
1.350000E+00  1.815000E+01  3.2545802E-03
1.650000E+00  1.815000E+01  3.2540908E-03
1.950000E+00  1.815000E+01  3.2535292E-03
. . . . .
```

上記のデータの中、確率密度関数と累積分布関数については 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
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。

GNUPLOT によるグラフ出力の例を図 6.4 に示す。

放射能情報推定値、放射能情報推定値 $z^*(\mathbf{x}_\alpha) + k\sigma$ ($k=1, 2, 3$)、および推定標準偏差の 2 次元分布情報については、GMT を介して詳細メッシュ単位で値に応じて色で塗り分けされたものを出力することが可能である。

グラフ出力で使用する GMT 用のバッチファイルは以下のとおりである。

ファイル名	内容
average_cont_plt.bat	放射能分布の 2 次元分布図の作成用のバッチファイル。それぞれ average_cont.dat, average1s_cont.dat, average2s_cont.dat, average3s_cont.dat, sd_cont.dat の 2 次元分布図描画に使用される。
average1s_cont_plt.bat	
average2s_cont_plt.bat	
average3s_cont_plt.bat	
sd_cont_plt.bat	

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)。

GMT 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
average_cont.ps	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
average1s_cont.ps	評価領域における X 座標、Y 座標、放射能情報推定値+1 σ の分布図
average2s_cont.ps	評価領域における X 座標、Y 座標、放射能情報推定値+2 σ の分布図
average3s_cont.ps	評価領域における X 座標、Y 座標、放射能情報推定値+3 σ の分布図
sd_cont.ps	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値の分布図

放射能情報推定値についての 2 次元分布図の出力例を図 6.5 に示す。

(3) 必要標本数計算用データファイル

必要標本数計算用データファイルのファイル名は、ncaldata.dat である。データファイルの出力例を以下に示す。

```
* data for evaluation of n
* gamma_rev, s2, mean
8.665324092938982E-07 8.741199999999999E-07 2.270975054425895E-03
* ndata
    39
* id      x          y          z          weight
  1  4.650000E+00  2.265000E+01  2.550000E-03  2.8269881E-02
  2  4.650000E+00  3.165000E+01  2.290000E-03  2.8298480E-02
  3  1.365000E+01  3.165000E+01  2.220000E-03  2.5415439E-02
  4  1.365000E+01  2.265000E+01  2.330000E-03  2.5663483E-02
  5  2.265000E+01  2.265000E+01  2.330000E-03  2.3086744E-02
  . . . . .
 38  9.465000E+01  2.265000E+01  2.810000E-03  2.5464043E-02
 39  8.565000E+01  2.265000E+01  2.180000E-03  2.5703494E-02
* data for evaluation of n for 平均クリギング I
* gamma1w      gamma1      gamma2      gamma2w      gamma
0.866355E-06   0.854497E-06   0.855145E-06   0.854454E-06  -0.125490E-07
```

このファイルに出力されるデータの説明を以下に示す。

パラメータ	内容
gamma_rev	平均クリギング II における必要標本数の計算に用いるパラメータ ((4.19)式で与えられる $\bar{\gamma}(k)$)
s2	平均クリギング II における必要標本数の計算に用いるパラメータ ((3.30)式で与えられる σ^2)
mean	平均クリギング II による平均の推定値 ((3.28)式で与えられるの m^*)
ndata	測定点 (標本点) 数
id	測定点の識別番号
x	測定点の x 座標

y	測定点の y 座標
z	測定点の放射能データ
weight	平均クリギング II における測定点の重み係数
gamma1w gamma1 gamma2 gamma2w gamma	平均クリギング I における推定分散に係る係数。gamma1w, gamma1, gamma2, gamma2w, gamma は、それぞれ(4.11)式、(4.12)式、(4.13)式、(4.14)式、(4.10)式で与えられる。

6.2.5 必要標本数計算コード

必要標本数計算コードの出力ファイルは、

- (1) N コード標準出力ファイル
- (2) 共分散クラウドデータファイル
- (3) 標本共分散データファイル
- (4) N コードグラフ作成用 GNU PLOT スクリプトファイル

である。

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

- (1) N コード標準出力ファイル

N コード標準出力ファイルのファイル名は ncal.out である。出力例を以下に示す。

グレー領域 Δレー領域の設定,設= -1.000
 グレー領域 Δレー領域 Δの設定において、 $\mu \leq 0$ または $\mu \geq 1$ が入力されたためデフォルト値が使用されます

input alpha= 0.050, calculated k_alpha= 1.645, P[Z>k_alpha]= 0.050
 input beta = 0.100, calculated k_beta = 1.282, P[Z>k_beta]= 0.100

i	gamma1w(i)	gamma1(i)	gamma2(i)	gamma2w(i)	gamma(i)
1	0.8664E-06	0.8545E-06	0.8551E-06	0.8545E-06	-0.1255E-07
2	0.1266E-06	0.1262E-06	0.1262E-06	0.1262E-06	-0.4872E-09

設定された Δ : 0.07021

 * NUC01 - NUC02 *

#Table 1 Experimental Covariance

 * 全方位のデータを使用した評価 *

lower	upper	average	cov	n
0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.308E-08	39
0.000E+00	1.575E+01	1.068E+01	-1.103E-08	218
1.575E+01	3.150E+01	2.324E+01	-6.871E-09	452
3.150E+01	4.725E+01	3.898E+01	8.551E-09	402
4.725E+01	6.300E+01	5.456E+01	-1.264E-08	228

Fitting result:
 at |h|>0, C_ab(h)= 2.747E-15
 at |h|=0, C_ab(h)= 5.308E-08

 * 方位区分毎のデータを使用した評価 *
 * Direction Number : 1 *
 * 45.00 度 ~ 45.00 度 *
 * X 軸から反時計廻りでの角度(度) *

lower	upper	average	cov	n
0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.308E-08	39
0.000E+00	1.575E+01	1.068E+01	-1.103E-08	218
1.575E+01	3.150E+01	2.324E+01	-6.871E-09	452
3.150E+01	4.725E+01	3.898E+01	8.551E-09	402
4.725E+01	6.300E+01	5.456E+01	-1.264E-08	228

Fitting result:
 at |h|>0, C_ab(h)= 2.747E-15
 at |h|=0, C_ab(h)= 5.308E-08

CF= |h|=0, C_ab(h)= 5.308E-08(= { |h|=0, C_ab(h)= 5.308 Σ i(mean(i)/tinp%dcgl(i))

```

0.1532E-09          0.5756E-03          0.9298E+00
tinp%n_nuc      ntype      ndata
  2              1          39
*****
*
*      平均クリギング I に対する必要標本数計算ルーチン      *
*
*****
2次方程式の係数：  A          B          C
                  -0.4570E-08  0.7365E-03 -0.1856E-01
*****
* 必要標本数の計算結果 *
* (F:推定値, sigmaF2:推定分散, N1,N2:必要標本数) *
*****
*(1) 核種間の相関を考慮しない場合
*   F,   CF,      N1,   N2
     0.93 0.000E+00  25.20 161126.34

*(2) 核種間の相関を考慮する場合
*   F,   CF,      N1,   N2
     0.93 1.532E-10  25.20 161126.34

```

ここに、CF の計算結果は、すべてのペアデータを用いて計算した平均値である。

(2) 共分散クラウドデータファイル

共分散クラウドデータファイルには、共分散クラウドデータファイルおよび方向別共分散クラウドデータファイルが含まれる。

① 共分散クラウドデータファイル (cov_cloud_**_.dat)

各核種の組合せに対する全方向に関する共分散クラウドデータファイルである。バリオグラム雲の作成と同様にして、2 地点の位置情報 (X, Y)、共分散値 $Z = (z(k, \mathbf{x}_\beta) - \bar{z}(k))(z(k', \mathbf{x}_{\beta'}) - \bar{z}(k'))$ 、2 地点間の距離 H、角度 Deg のリストを作成する。ファイル名 cov_cloud_**_.dat における**_**は、核種番号の組合せ（データファイルを入力ファイルで指定した順）を表す。核種数が N_{nuc} の場合、核種の組合せは $N_{nuc}(N_{nuc} - 1)/2$ 通りである。それぞれの組合せに対して本ファイルが出力される。出力例を以下に示す。

# Covariance cloud											
# NUC	1, NUC			2							
#	ID	X	Y	Z	ID	X	Y	Z	H	COV	Deg.
	1	4.650E+00	2.265E+01	2.550E-03	1	4.650E+00	2.265E+01	2.740E-03	0.000E+00	6.954E-08	0.000E+00
	1	4.650E+00	2.265E+01	2.550E-03	2	4.650E+00	3.165E+01	2.590E-03	9.000E+00	2.769E-08	9.000E+01
	1	4.650E+00	2.265E+01	2.550E-03	3	1.365E+01	3.165E+01	2.290E-03	1.273E+01	-5.602E-08	4.500E+01
	1	4.650E+00	2.265E+01	2.550E-03	4	1.365E+01	2.265E+01	2.220E-03	9.000E+00	-7.555E-08	0.000E+00
	1	4.650E+00	2.265E+01	2.550E-03	5	2.265E+01	2.265E+01	2.040E-03	1.800E+01	-1.258E-07	0.000E+00
	1	4.650E+00	2.265E+01	2.550E-03	6	2.265E+01	1.365E+01	2.920E-03	2.012E+01	1.198E-07	3.334E+02
	1	4.650E+00	2.265E+01	2.550E-03	7	2.265E+01	3.165E+01	2.590E-03	2.012E+01	2.769E-08	2.657E+01
	1	4.650E+00	2.265E+01	2.550E-03	8	3.165E+01	3.165E+01	2.550E-03	2.846E+01	1.653E-08	1.843E+01
.....											
	39	8.565E+01	2.265E+01	2.180E-03	37	1.037E+02	2.265E+01	2.890E-03	1.800E+01	-3.632E-08	0.000E+00
	39	8.565E+01	2.265E+01	2.180E-03	38	9.465E+01	2.265E+01	3.000E-03	9.000E+00	-4.633E-08	0.000E+00
	39	8.565E+01	2.265E+01	2.180E-03	39	8.565E+01	2.265E+01	2.150E-03	0.000E+00	3.100E-08	0.000E+00

各測定点のデータとして 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 行目が核種 1 の ID 番号 1 と核種 2 の ID 番号 1、2 行目が核種 1 の ID 番号 1 と核種 2 の ID 番号 2)、ペアに関するデータとしてこれら 2 測定点間の距離 (H) および共分散値 (COV) および方向 (Deg.) のデータが出力される。

② 方向別共分散クラウドデータファイル (cov_cloud_**_**_**.dat)

各核種の組合せに対する方向別の共分散クラウドのデータファイルである。該当方向のデータ組合せについて、2 地点間の距離 H、共分散値 $Z = (z(k, \mathbf{x}_\beta) - \bar{z}(k))(z(k', \mathbf{x}_{\beta'}) - \bar{z}(k'))$ のリストを作成する。ファイル名 cov_cloud_**_**_**.dat の **_**_** における最初と 2 番目は核種の番号 (入力ファイルでデータファイルのディレクトリを指定した順)、3 番目は方向分割したときの方向の番号を表す。なお、方向番号="00"は全方向を意味する。

核種数を N_{nuc} としたとき、核種の組合せは $N_{nuc}(N_{nuc}-1)/2$ 通りである。それぞれの組合せに対し、指定した方向クラスの数 N_{DIR} 個のファイルが出力される。全方向に対する出力例を以下に示す。

0.000E+00	6.954E-08
9.000E+00	2.769E-08
1.273E+01	-5.602E-08
9.000E+00	-7.555E-08
1.800E+01	-1.258E-07
2.012E+01	1.198E-07
2.012E+01	2.769E-08
2.846E+01	1.653E-08
2.700E+01	-1.369E-07
2.846E+01	-1.676E-07
.....	
.....	
1.800E+01	-3.632E-08
9.000E+00	-4.633E-08
0.000E+00	3.100E-08

1 列目が 2 地点間の距離 H、2 列目が共分散値である。

(3) 標本共分散データファイル (cov_exp_**_**_.dat)

各核種の組合せに対して、方向別の標本共分散データファイルである。標本バリオグラム作成と同様にして、“共分散クラウド”を方向でクラス分けし、距離階級毎の平均化処理を行う。距離平均値、共分散平均値、各階級のデータ数が出力される。また、最後の 2 行に平均値を出力する。なお、これらの処理は、ユーザーが設定した距離最大値以内のデータのみを対象として行われる。

ファイル名 cov_exp_**_**_.dat の**_**_**における最初と 2 番目は核種の番号（入力ファイルでデータファイルのディレクトリを指定した順）、3 番目は方向分割したときの方向の番号を表す。なお、方向番号="00"は全方向を意味する。核種 nuq_1 , nuq_2 の組合せに対する方向の区分数を $NDIR(nuq_1, nuq_2)$ としたとき $NDIR(nuq_1, nuq_2)+1$ 個のファイルが出力される。

共分散関数はバリオグラム関数と異なり、一般に距離 $h=0$ で 0 ではない値を取る。このため、 $h=0$ のみから成る距離クラスを設けている。

全方向に対する出力例を以下に示す。

0.000E+00	5.308E-08	39
1.068E+01	-1.103E-08	218
2.324E+01	-6.871E-09	452
3.898E+01	8.551E-09	402
5.456E+01	-1.264E-08	228
#mean =	2.747E-15	
#at 0 =	5.308E-08	

最後の 2 行を除き、1, 2, 3 列目は、それぞれ距離クラスの距離の平均値、クラスの標本共分散、クラスに含まれるかペアの数である。最後の 2 行は、標本共分散の全体にわたる平均、および距離 $h=0$ における平均である。

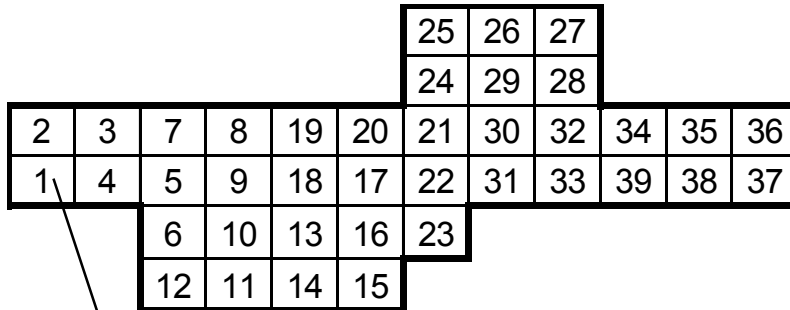
(4) N コードグラフ作成用 GNUPLOT スクリプトファイル

共分散クラウドデータおよび標本共分散データを GNUPLOT を介してグラフ表示するためのファイルである。次の 2 種類のファイルから構成される。

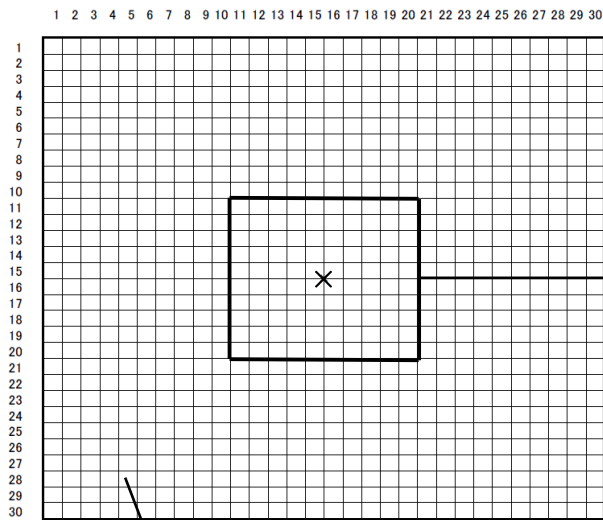
ファイル名	内容
covplot_cloud_and_exp_**_**_.plt	方向別の共分散クラウドと標本共分散を重ねてプロットする。 (方向 $1 \sim N_{DIR}$ について、別々のグラフ上に出力。**-**-00.plt は方向分割しない場合の共分散クラウドと標本共分散) ファイル名に付いている**-**-**は 2 桁の数字で、最初と 2 番目は核種

	の番号（入力ファイルでデータファイルのディレクトリを指定した順）、3番目は方向分割したときの方向の番号を表す。
covplot_exp_**-***.plt	核種**-**の方向別の標本共分散をプロット。 （方向 $1 \sim N_{DR}$ および方向分割しない場合の標本共分散を、1つのグラフ上に出力） ファイル名に付いている**-**は2桁の数字で、核種の番号（入力ファイルでデータファイルのディレクトリを指定した順）を表す。

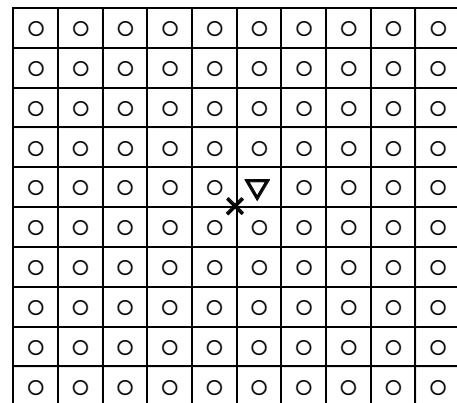
全方向に対する共分散クラウドと標本共分散を重ね合わせた図の例を、図 6.6 に示す。



大メッシュ: $9 \times 9 \text{ m}^2$ (例)



詳細メッシュ: $30 \times 30 \text{ cm}^2$ (例)



- × : 調整前の測定点
- ▽ : 調整後の測定点(mp=1の場合)
- : 評価点

図 6.1 評価領域 (番号の付いた大メッシュから構成される領域)、大メッシュ、詳細メッシュ、および調整前後の測定点と評価点

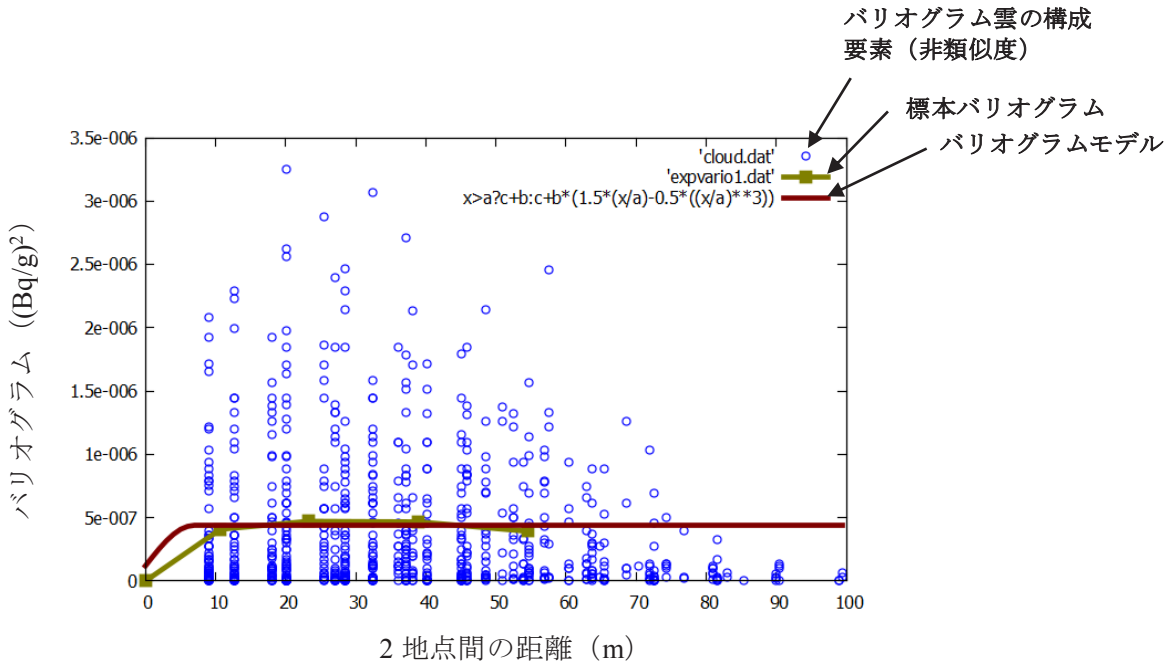


図 6.2 バリオグラム雲、標準バリオグラムおよびバリオグラムモデルの出力例

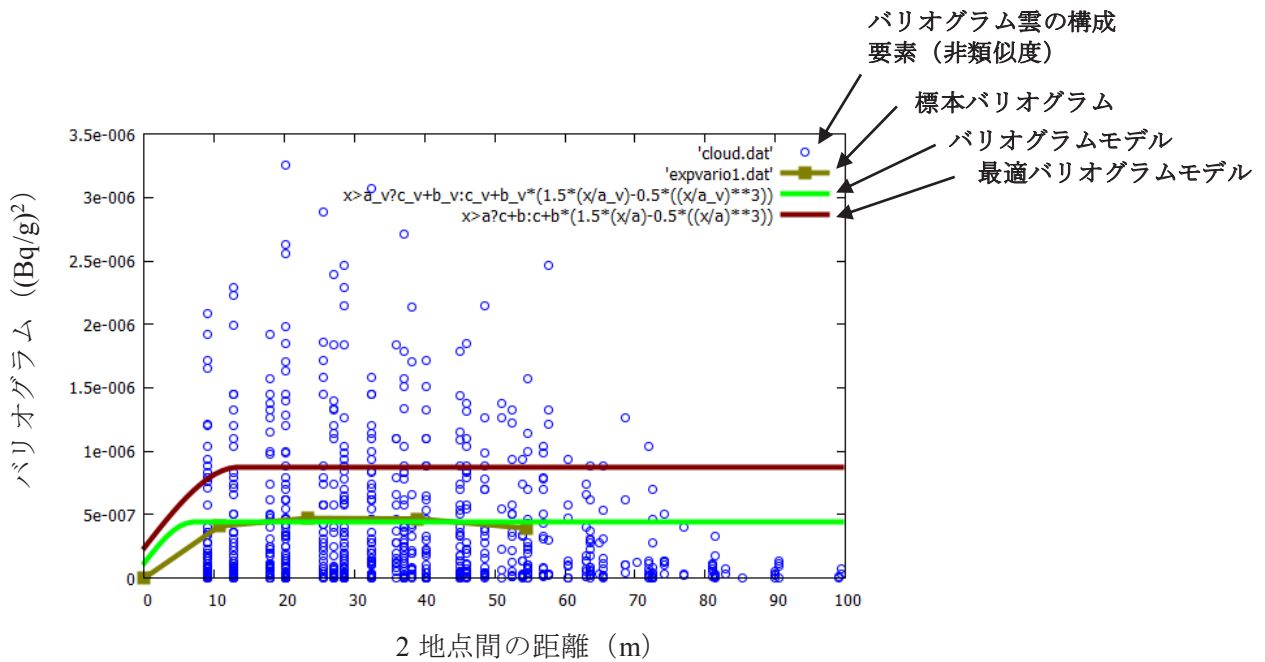
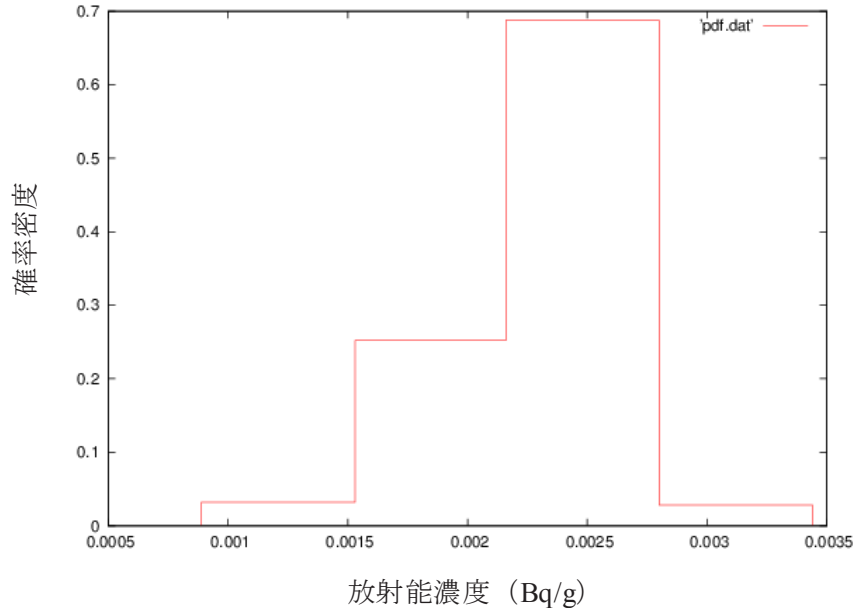
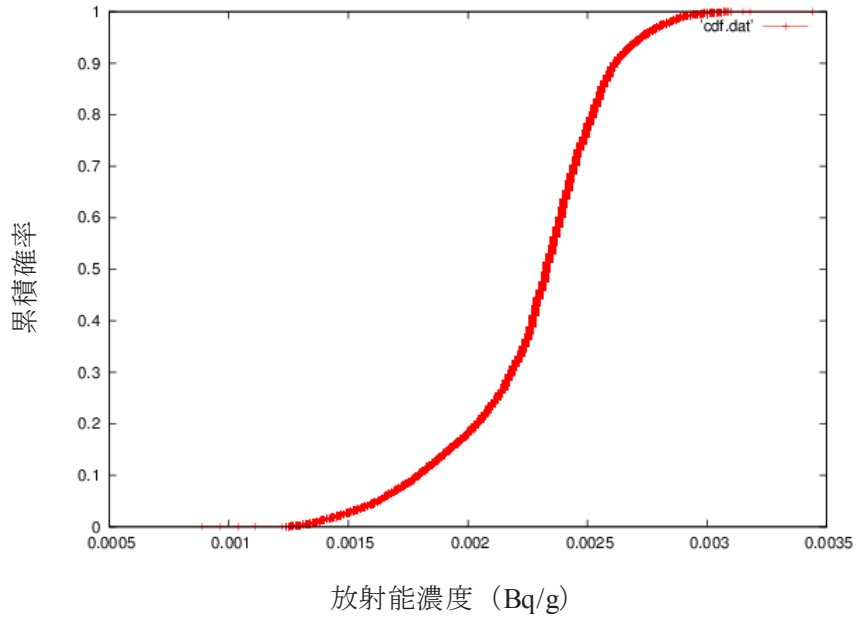


図 6.3 バリオグラム雲、標準バリオグラム、バリオグラムモデルおよび最適バリオグラムモデルの出力例



(a) 確率密度関数



(b) 累積分布関数

図 6.4 確率密度関数と累積分布関数の出力例

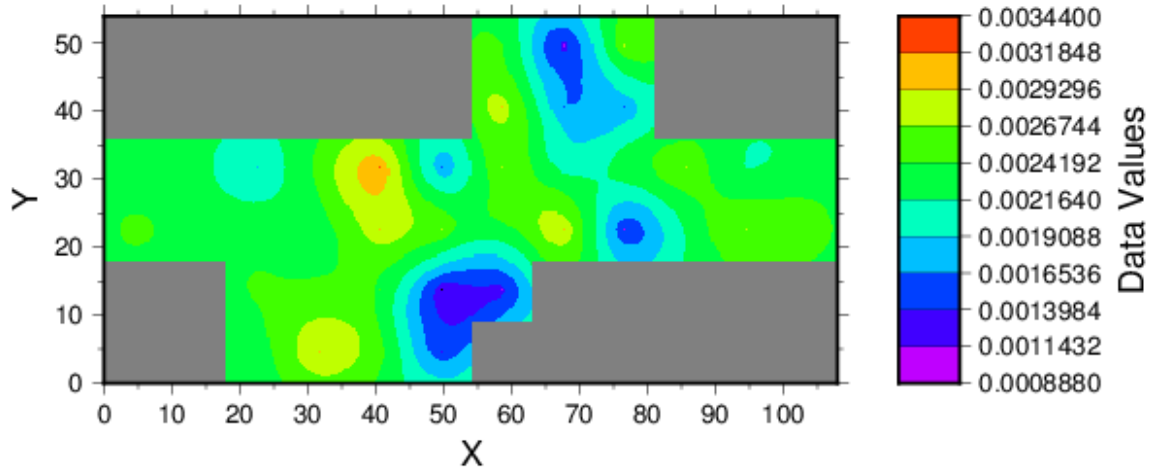


図 6.5 放射能情報推定値の分布図表示例

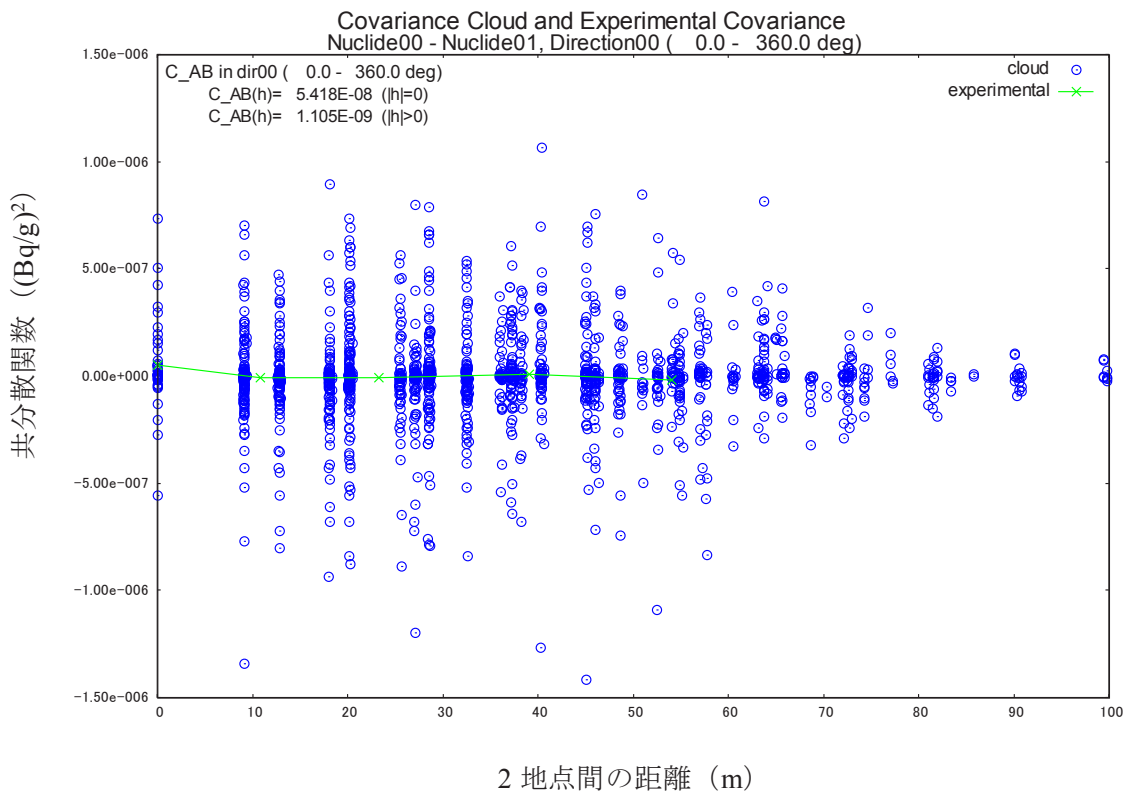


図 6.6 共分散クラウドと標本共分散の出力例

7 実行方法

ESRAD2 を実行するに当たっては、ESRAD2 を構成する種々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 ESRA22 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、交差検証コード、クリギング計算コードおよび必要標本数計算コードのそれぞれの実行方法を述べる。ここに、ESRAD2 を動作させる必要なソフトウェア環境は以下のとおりである。

OS	Windows® 7 以上
スクリプト言語	Ruby 1.9 以降
グラフ作成ツール	GNU PLOT 4.4 以降 GMT5
グラフ画像ビューアー	Ghostscript 及び Ghostview
.NET Framework	.NET Framework 3.5 SP1 以上

7.1 ディレクトリとファイルの構成

ESRAD2 のディレクトリ構成（例）を図 7.1 に示す。また、ESRAD2 を構成するファイル群を表 7.1~7.6 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、ESRAD2 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。

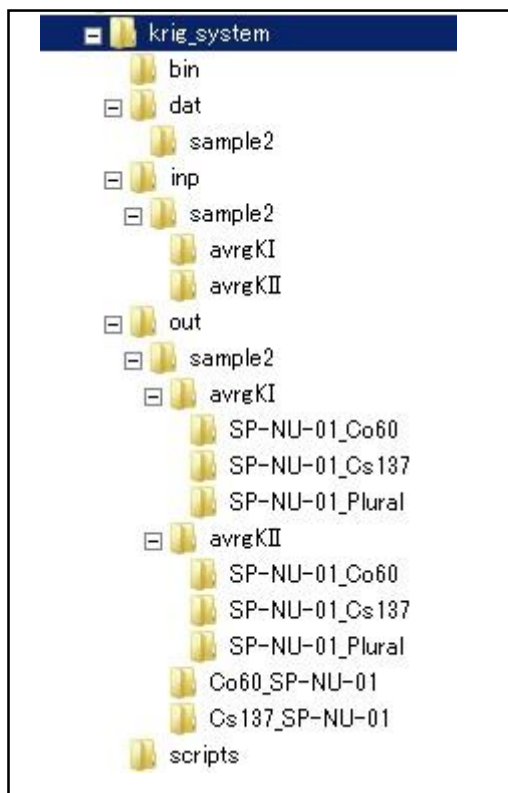


図 7.1 ディレクトリ構成 (例)

表 7.1 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。
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
crossvalidation.bat	バッチファイル	交差検証コードの実行バッチ
crossvalidation.rb	Ruby スクリプトファイル	バリオグラム交差検証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
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 7.2 bin ディレクトリ内のファイル一覧

ファイル名	種類	内容
crossvalidation.exe	実行ファイル	交差検証コードの本体
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
ncal.exe	実行ファイル	必要標本数計算コードの本体

表 7.3 dat ディレクトリ内のディレクトリ・ファイル一覧

ディレクトリ・ファイル名	種類	内容
Sample2	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
Trojan_Cs137.rif	データファイル	放射能情報と測定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
Trojan_Cs137.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 7.4 inp ディレクトリ内のディレクトリ・ファイル一覧 (1/2)

ディレクトリ・ファイル名	種類	内容
Sample2	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
Cs137_SP-NU-01.vnp	バリオグラム計算コード用入力ファイル	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
Cs137_SP-NU-01.cinp	交差検証コード用入力ファイル	サンプル問題における交差検証コードへの入力ファイル
Cs137_SP-NU-01.kinp	クリギング計算コード用入力ファイル	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
Co60_SP-NU-01.vnp	バリオグラム計算コード用入力ファイル	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 7.4 inp ディレクトリ内のディレクトリ・ファイル一覧 (2/2)

ディレクトリ・ファイル名	種類	内容
Co60_SP-NU-01. cinp	交差検証コード用入力ファイル	サンプル問題における交差検証コードへの入力ファイル
Co60_SP-NU-01. kinp	クリギング計算コード用入力ファイル	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
avrgKI	ディレクトリ	平均クリギングIにおける必要標本数計算コード入力ファイルの格納フォルダ
avrgKII	ディレクトリ	平均クリギングIIにおける必要標本数計算コード入力ファイルの格納フォルダ
SP-NU-01_Co60.ni np	必要標本数計算コード用入力ファイル	サンプル問題における必要標本数計算コードへの入力ファイル
SP-NU-01_Cs137. ninp	必要標本数計算コード用入力ファイル	サンプル問題における必要標本数計算コードへの入力ファイル
SP-NU-01_Plural. ninp	必要標本数計算コード用入力ファイル	サンプル問題における必要標本数計算コードへの入力ファイル

表 7.5 out ディレクトリ内のディレクトリ・ファイル一覧 (1/5)

ディレクトリ・ファイル名	種類	内容
Sample2	ディレクトリ	サンプル用の出力ファイルを取めたディレクトリ
Cs137_SP-NU-01	ディレクトリ	サンプル用の出力ファイル (Cs137_SP-NU-01.vinp、 Cs137_SP-NU-01.cinpおよび Cs137_SP-NU-01.kinp) に対する出力を取めたディレクトリ
Co60_SP-NU-01	ディレクトリ	サンプル用の出力ファイル (Co60_SP-NU-01.vinp、Co60_SP-NU-01.cinp およびCo60_SP-NU-01.kinp) に対する出力を取めたディレクトリ

表 7.5 out ディレクトリ内のディレクトリ・ファイル一覧 (2/5)

ディレクトリ・ファイル名	種類	内容
average_cont.dat	クリギング計算コード出力ファイル	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.bat	GMTバッチファイル	放射能分布推定値の2次元分布図を描くためのGMTバッチファイル
average_cont.ps	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PS形式に対応した画像ビューワが必要。
average[n]s_cont.dat	クリギング計算コード出力ファイル	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_cont.bat	GMTバッチファイル	放射能分布推定値+[n] σ の分布図を描くためのGMTバッチファイル (n: 1~3)
average[n]s_cont.ps	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PS形式に対応した画像ビューワが必要 (n: 1~3)。
cdf.dat	クリギング計算コード出力ファイル	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.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.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	バリオグラム計算コード出力ファイル	バリオグラム雲をプロットするためのデータファイル
crossvalidation.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および最適バリオグラムの図。閲覧にはEPS形式に対応した画像ビューワが必要。
crossvalidation.out	交差検証コード標準出力ファイル	交差検証コードの標準出力ファイル

表 7.5 out ディレクトリ内のディレクトリ・ファイル一覧 (3/5)

ディレクトリ・ファイル名	種類	内容
crossvalidation.plt	GNUPLOTスクリプトファイル	バリオグラム雲、標本バリオグラム、バリオグラムモデルおよび最適バリオグラムモデルの図を描くためのGNUPLOTスクリプトファイル
expvario.dat	バリオグラム計算コード出力ファイル	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
expvario_cross.plt	GNUPLOTスクリプトファイル	バリオグラム雲および標本バリオグラムの図を描くためのGNUPLOTスクリプトファイル
expvario_cross_00.dat	交差検証コード出力ファイル	等方向の標本バリオグラムのデータファイル
expvario_cross_00.plt	GNUPLOTスクリプトファイル	等方向のバリオグラム雲、標本バリオグラムおよび最適バリオグラムモデルの図を描くためのGNUPLOTスクリプトファイル
Expvario1.dat	交差検証コード出力ファイル	標本バリオグラムのデータファイル
krig.out	クリギング計算コード標準出力ファイル	クリギング計算コードの標準出力ファイル
model.dat	バリオグラム計算コード出力ファイル	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
modelcroos.dat	交差検証コード出力ファイル	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
ncaldata.dat	クリギング計算コード出力ファイル	必要標本数計算コード用のデータファイル
pdf.dat	クリギング計算コード出力ファイル	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.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.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。

表 7.5 out ディレクトリ内のディレクトリ・ファイル一覧 (4/5)

ディレクトリ・ファイル名	種類	内容
sd_cont.dat	クリギング計算コード出力ファイル	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
sd_cont.bat	GMTバッチファイル	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GMTバッチファイル
sd_cont.ps	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PS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	バリオグラム計算コード標準出力ファイル	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
avrgKI	ディレクトリ	平均クリギングIにおける必要標本数計算コード出力ファイルの格納フォルダ
avrgKII	ディレクトリ	平均クリギングIIにおける必要標本数計算コード出力ファイルの格納フォルダ
SP-NU-01_Co60	ディレクトリ	入力ファイル名に対応した出力ファイル格納フォルダ
SP-NU-01_Cs137	ディレクトリ	入力ファイル名に対応した出力ファイル格納フォルダ
SP-NU-01_Plural	ディレクトリ	入力ファイル名に対応した出力ファイル格納フォルダ
ncal.out	必要標本数計算コード標準出力ファイル	必要標本数計算コードの標準出力ファイル
cov_cloud_**-**.dat	必要標本数計算コード出力ファイル	共分散クラウドの散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 (全方向)
cov_cloud_**-**-**.dat	必要標本数計算コード出力ファイル	共分散クラウドの散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 (方向別)

表 7.5 out ディレクトリ内のディレクトリ・ファイル一覧 (5/5)

ディレクトリ・ファイル名	種類	内容
cov_exp_**-**.dat	必要標本数計算コード出力ファイル	標本共分散のデータファイル
cov_exp_**-**-*.dat	必要標本数計算コード出力ファイル	標本共分散の散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 (方向別)
covplot_exp_**-**.plt	GNUPLOTスクリプトファイル	標本共分散の散布図を描くためのGNUPLOTスクリプトファイル (全方向)
covplot_cloud_and_exp_**-**-*.plt	GNUPLOTスクリプトファイル	標本共分散の2次元分布図を描くためのGNUPLOTスクリプトファイル (方向別)

表 7.6 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
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、標本バリオグラムおよび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
crossvalidation.plt.erb	Rubyひな形ファイル	バリオグラム雲、標本バリオグラム、バリオグラムモデルおよび最適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

7.2 標本抽出コードの実行方法

GUIを介した標本抽出コードの実行方法を述べる。ここでは、縦と横のメッシュ数がそれぞれ7と14で与えられる評価対象領域とした。

(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図7.2のメイン画面が表示される。

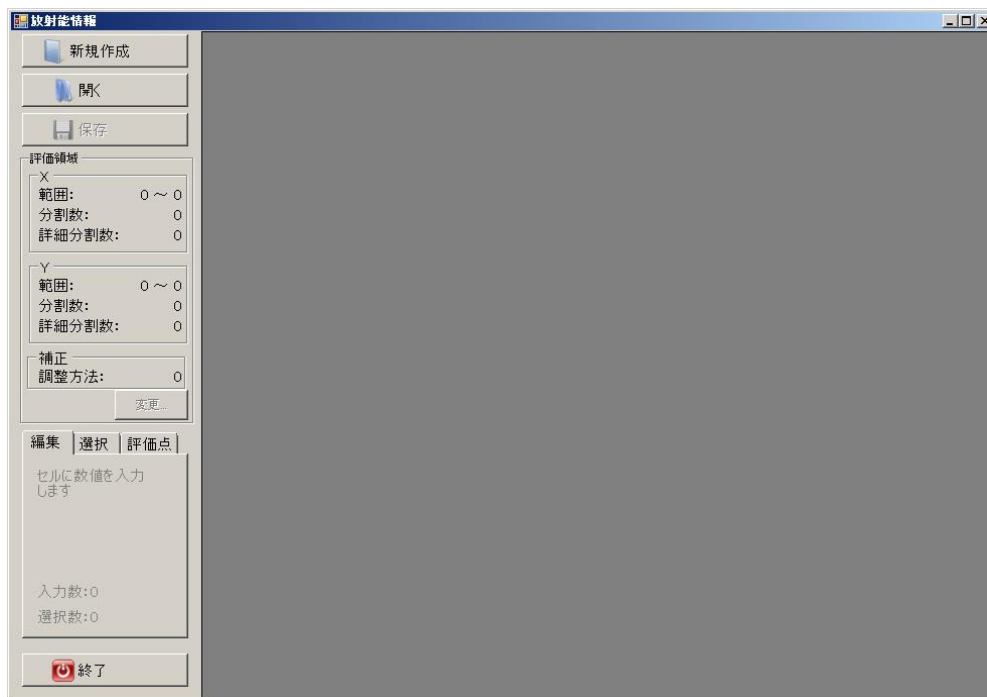


図 7.2 標本抽出コードのメイン画面

(2) 画面構成

標本抽出コードの画面の構成図を図7.3に示す。メイン画面左側のパネルから各機能呼び出して使用する。編集モード/選択モード/評価点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。

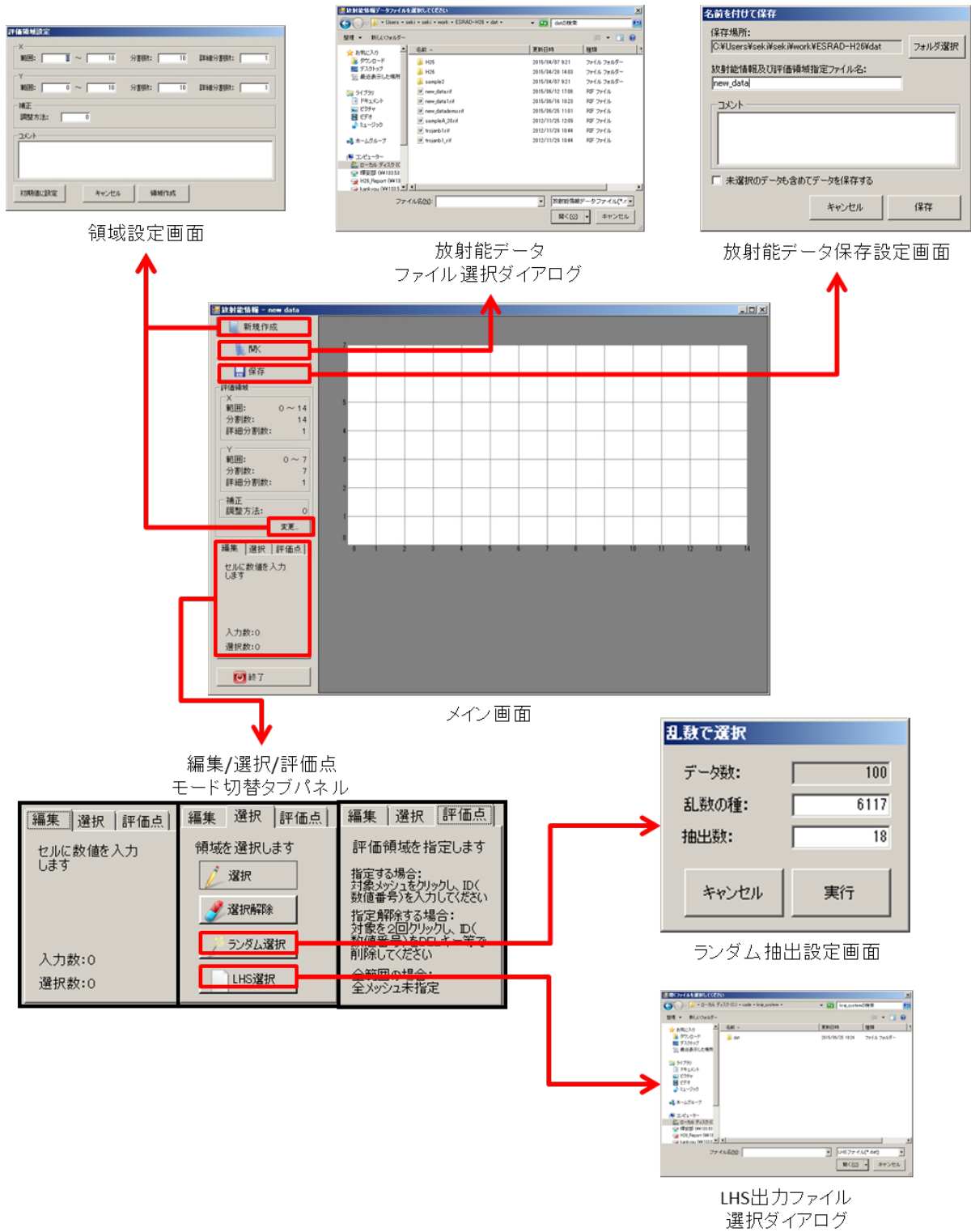


図 7.3 標本抽出コードの画面構成

(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 7.4）が表示される。

The screenshot shows a dialog box titled "評価領域設定" (Evaluation Area Setting). It contains the following fields and controls:

- X 方向:** 範囲 (Range): 0 ~ 10; 分割数 (Division Count): 10; 詳細分割数 (Detailed Division Count): 1
- Y 方向:** 範囲 (Range): 0 ~ 10; 分割数 (Division Count): 10; 詳細分割数 (Detailed Division Count): 1
- 補正 (Correction):** 調整方法 (Adjustment Method): 0
- コメント (Comment):** A large empty text area for entering notes.
- Buttons:** 初期値に設定 (Set to Initial Value), キャンセル (Cancel), 領域作成 (Create Area)

図 7.4 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と詳細分割数、Y 方向の最小値と最大値およびメッシュの分割数と詳細分割数、メッシュ中心位置の補正方法、さらにコメントを入力する。詳細メッシュ分割は、最初に分割されたメッシュをさらに細分割するための機能で、指定された詳細分割数でメッシュ内を等分割する。

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（大メッシュ）で表示される（図 7.5）。

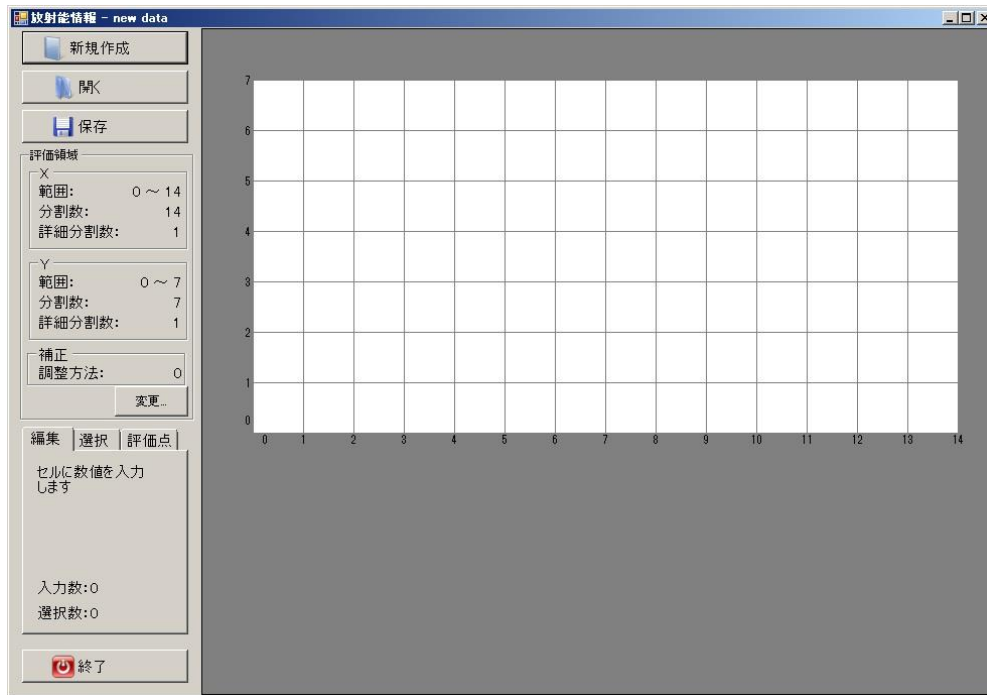


図 7.5 評価領域が設定されたメイン画面（例）

[編集/選択/評価点]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 7.6）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。

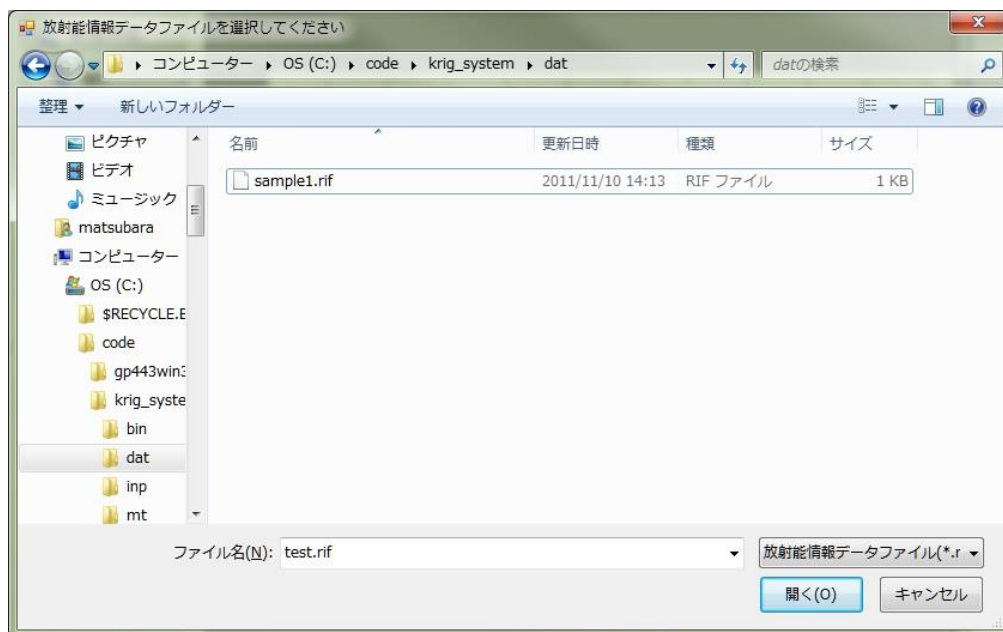


図 7.6 放射能情報データファイル選択ダイアログ (例)

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 7.2)。

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 7.7)。

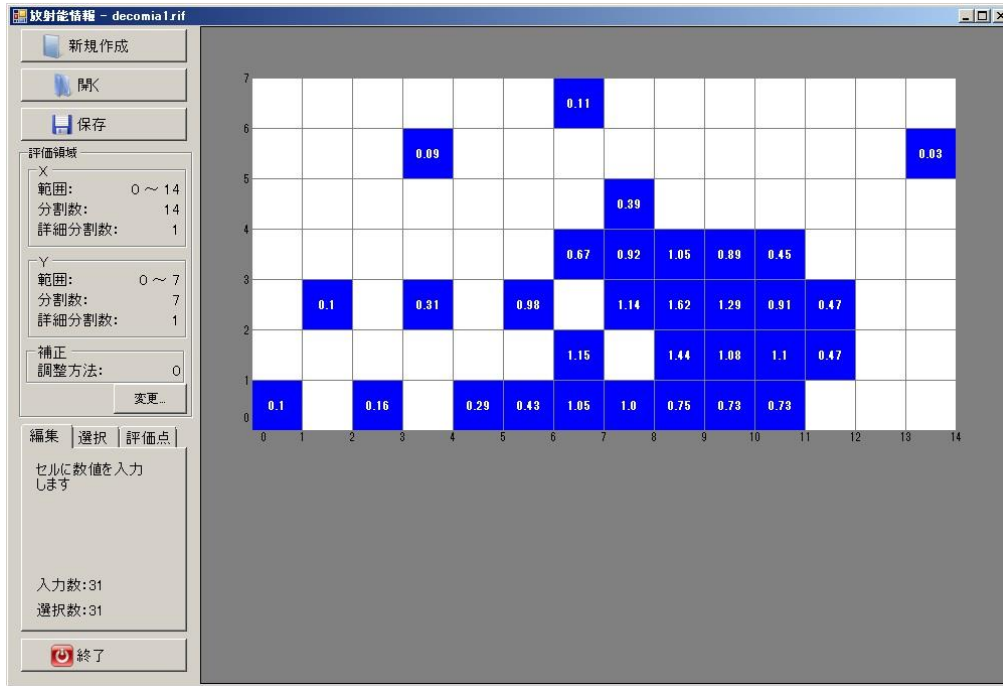


図 7.7 放射能情報データをロードしたメイン画面 (例)

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選択するかどうかの確認を促すダイアログ (図 7.8) が表示される。

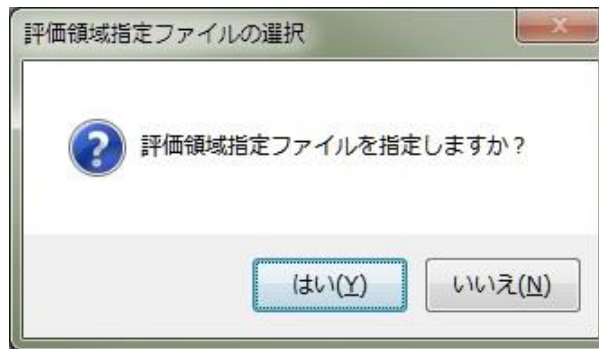


図 7.8 評価領域ファイル選択確認ダイアログ

[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 7.9) 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読み、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 7.7)。

[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。

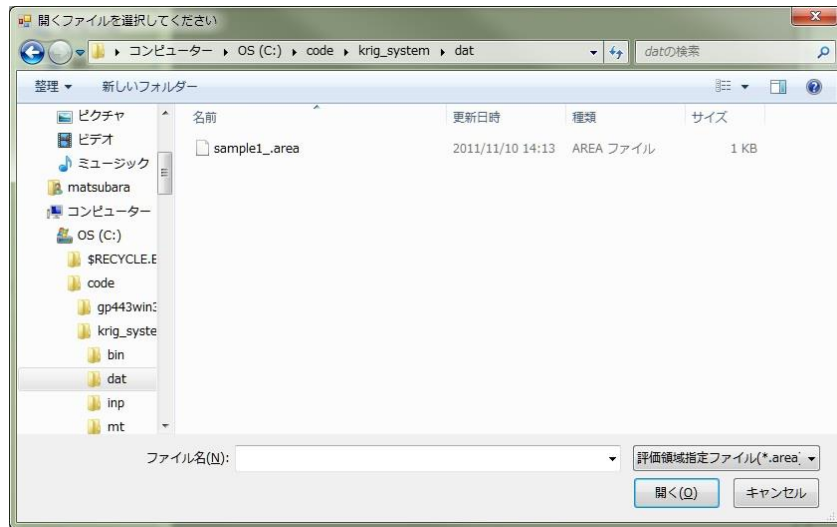


図 7.9 評価領域指定ファイル選択ダイアログ (例)

メイン画面に評価領域が設定されている場合

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 7.10) が表示される。

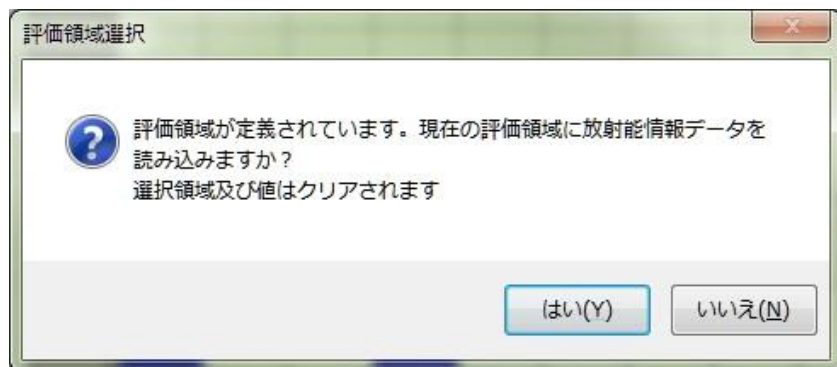


図 7.10 現在開いている評価領域への上書き確認ダイアログ

[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 7.7)。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 7.8) 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 7.9) 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 7.7)。[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) 測定点の選出法

評価領域の中から測定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 無作為抽出法

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場合、[編集/選択/評価点]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[ランダム選択]ボタンを押すと、ランダム選択設定画面（図 7.11）が表示される。

図 7.11 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測定点の数を入力する。

[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 7.12）。

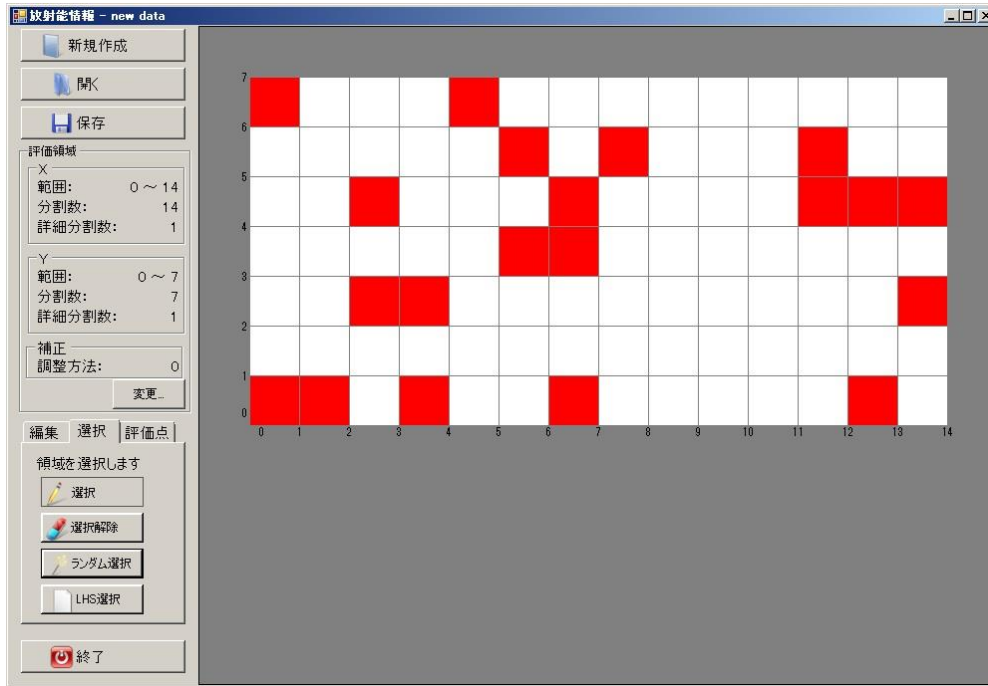


図 7.12 無作為抽出法による測定点の選定結果を表示したメイン画面（例）

赤く塗られたメッシュが、選択された測定点である。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 7.13）。

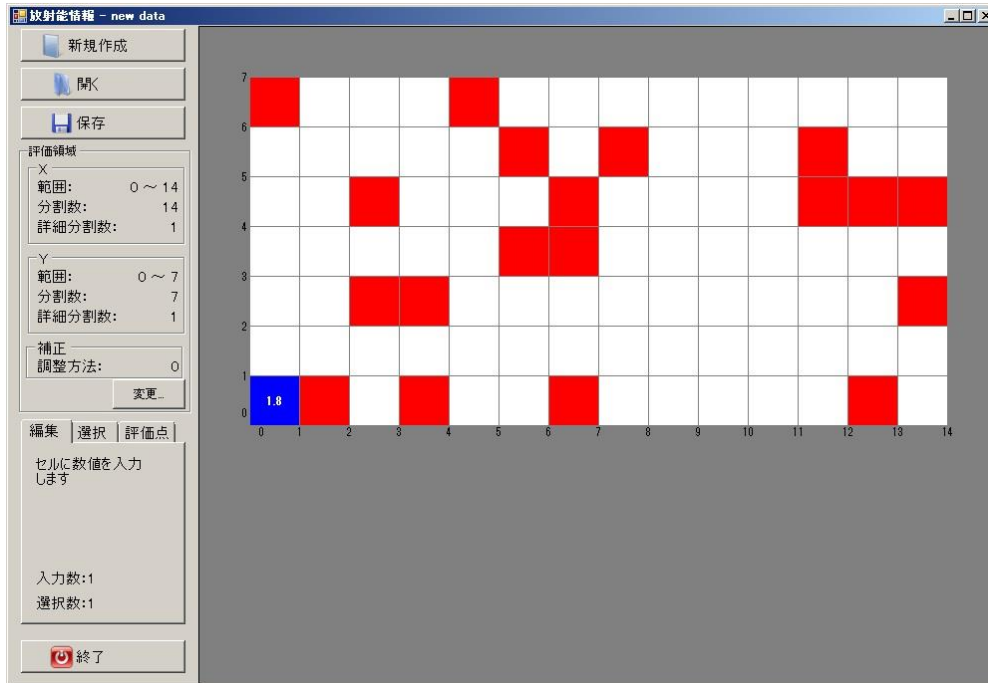


図 7.13 測定点にデータを入力した例

② LHS 法

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/評価点]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 7.14）。

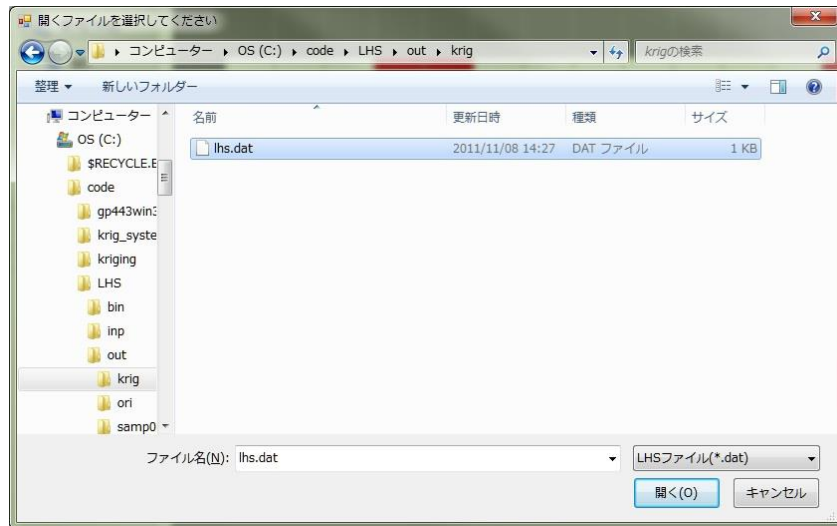


図 7.14 LHS 出力ファイル選択ダイアログ

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 7.15）。赤く塗られたメッシュが、選択された測定点である。

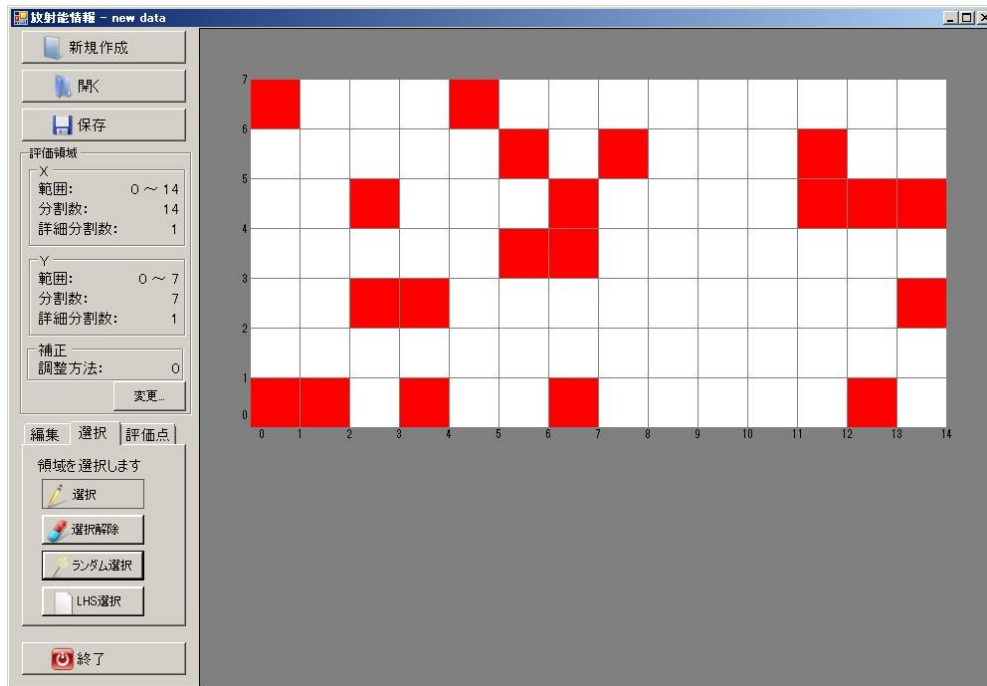


図 7.15 LHS 法によって抽出された測定点の表示画面 (例)

(6) 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測定点を抽出する。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、測定値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測定点における真値（測定値）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測定値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

ユーザーが任意の測定点のデータを選択/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/評価点]切替タブパネルの[選択]タブを開いた状態にする(図 7.16)。

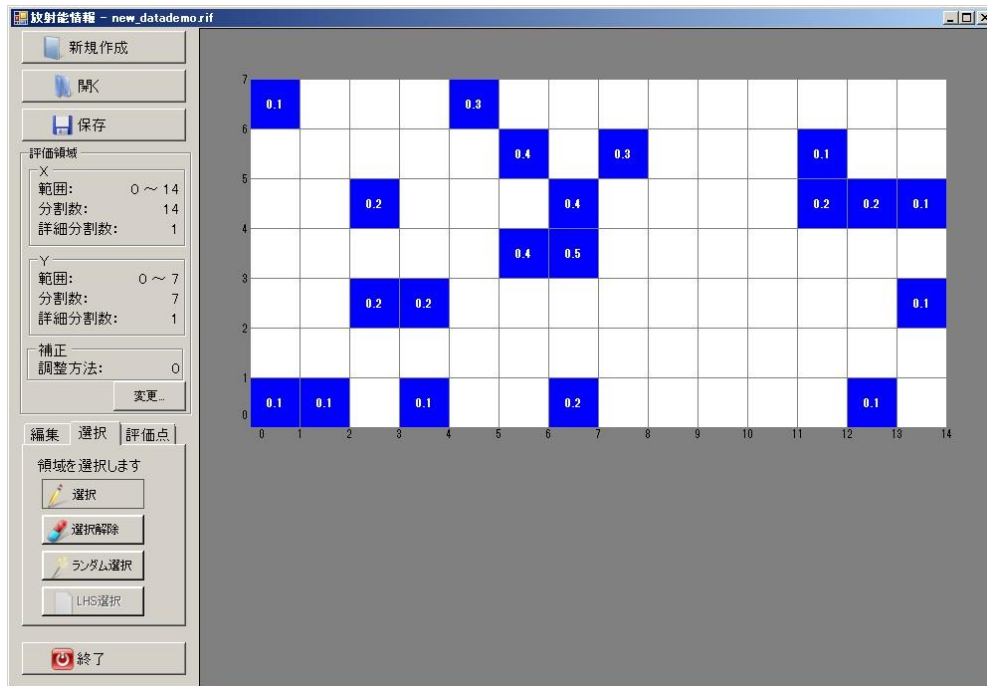


図 7.16 選択タブを開いたメイン画面 (例)

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により一回で実行できる。

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/評価点]切替タブパネルの[選択]タブを開いた状態する (図 7.16)。[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 7.17)。

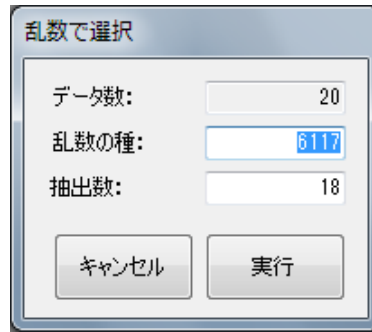


図 7.17 無作為抽出設定画面 (例)

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」未満の値）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 7.18）。

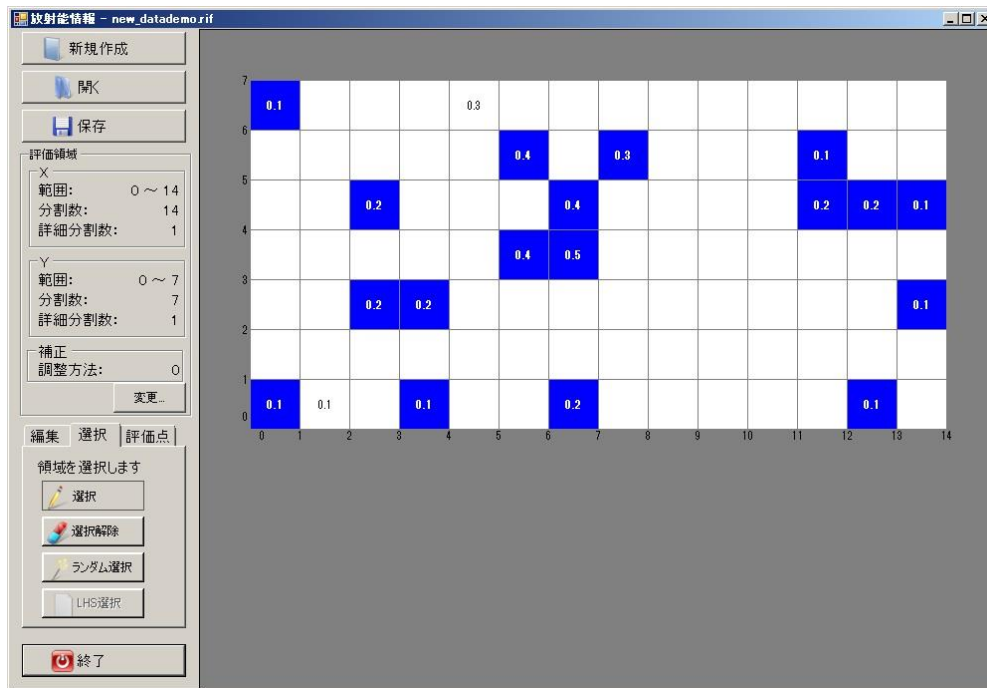


図 7.18 無作為抽出された測定値の画面 (例)

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。

(7) 評価領域の指定方法

評価点領域を指定する場合は、[編集/選択/評価点]の切替タブパネルの[評価点]タブを選択した状態（図 7.19）にし、評価対象のメッシュをマウスでクリックし ID データ（参照用の数値番号）を入力する。ここで設定されたデータは、データの保存時に評価領域指定ファイルに保存される。一旦設定した評価領域の一部を解除する場合には、解除対象のメッシュを 2 回クリ

ックし ID データを Delete キーで削除する。

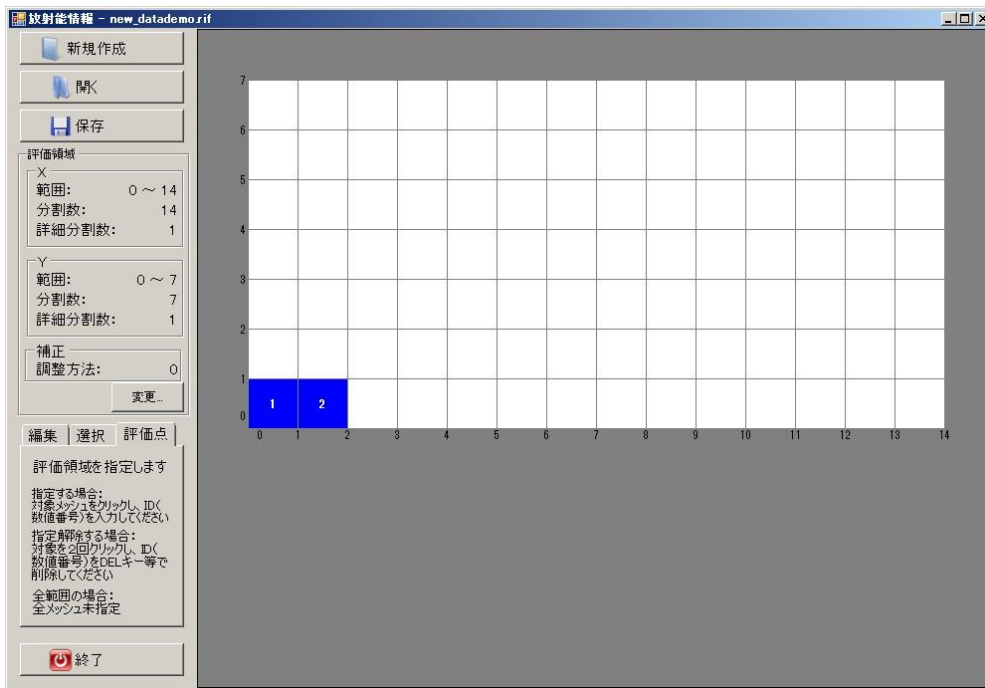


図 7.19 評価領域の設定画面 (例)

(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 7.20) が表示される。

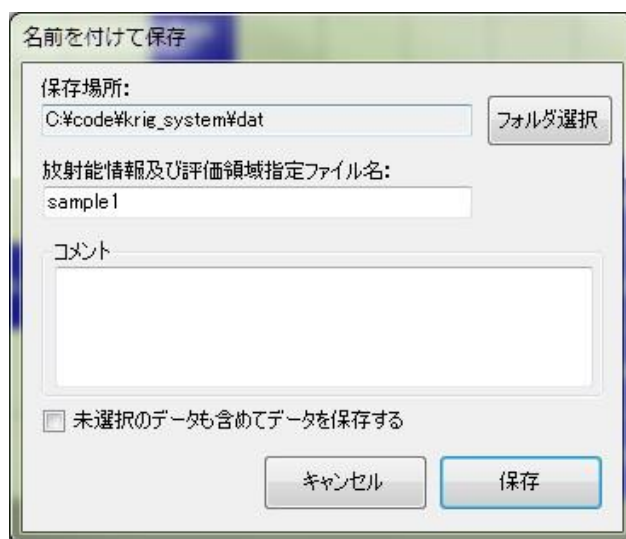


図 7.20 保存設定画面 (例)

[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 7.21）を使用する。



図 7.21 ディレクトリ選択ダイアログ（例）

[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。

7.3 バリオグラム計算コードの実行方法

(1) 準備

バリオグラム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。

バリオグラム計算コードでは、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 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、コマンドプロンプトが起動する。

② カレントディレクトリの移動

ESRAD2 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 7.22)。

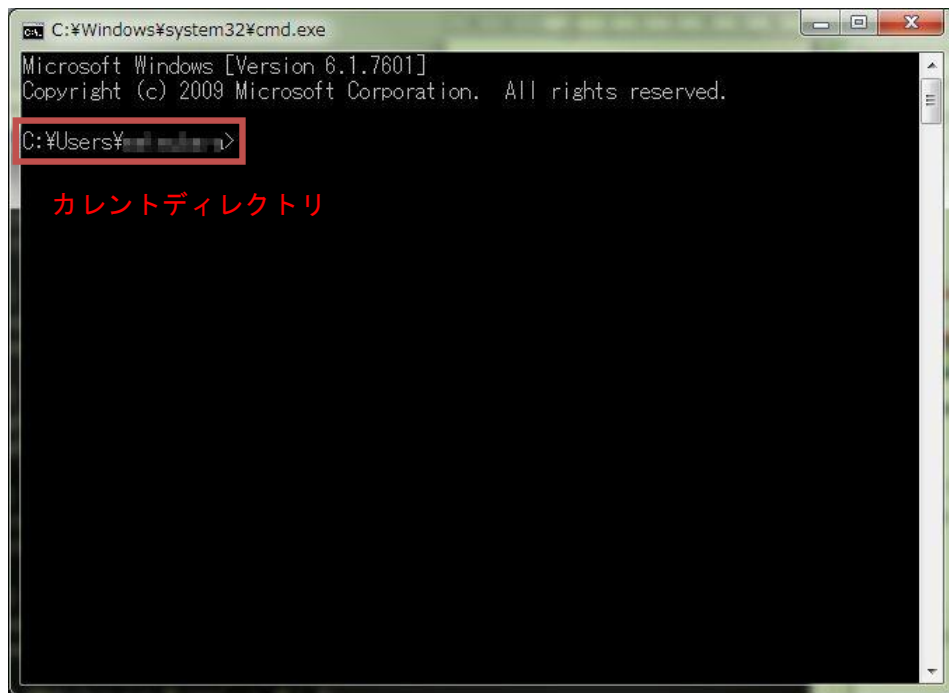


図 7.22 コマンドプロンプト起動画面 (例、モザイクはシステムのユーザー名)

カレントディレクトリが ESRA2 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 ESRA2 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 7.23)。

```
C:\Users\jaca>cd C:\code\krig_system
```

※ 下線部は ESRA2 のインストール先に合わせること。

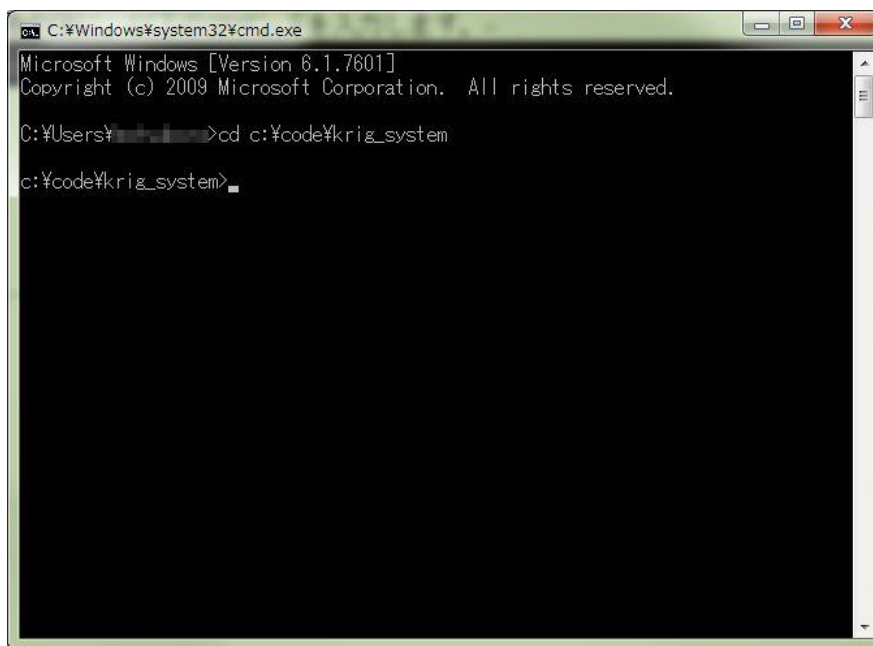


図 7.23 カレントディレクトリの移動（例）

なお、ESRAD2 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:\code\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（拡張子につけないこと）

例えば、`sample2` ディレクトリ内の `Cs137_SP-NU-01.vnp` を使用する場合は、

```
variogram.bat sample2 Cs137_SP-NU-01
```

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。

7.4 交差検証コードの実行方法

(1) 準備

交差検証コードの実行前に、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。

交差検証コードでは、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

交差検証コードへの入力ファイルを作成し、“`.cinp`”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 コマンドプロンプトの起動とカレントディレクトリの移動

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。これらの手順はバリオグラム計算コードの場合と同様である (7.3 参照)。

② 交差検証コードの実行

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、

```
crossvalidation.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、`sample2` ディレクトリ内の `Cs137_SP-NU-01.cinp` を使用する場合は、

```
crossvalidation.bat sample2 Cs137_SP-NU-01
```

と、入力する。

以上で交差検証に関する計算が開始され、計算結果が出力される。

7.5 クリギング計算コードの実行方法

(1) 準備

クリギング計算コードの実行前に、入力ファイルを取めるディレクトリを `inp` ディレクトリ

内に作成する。

クリギング計算では、(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* ((3.15)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測定点数より少ない測定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(測定値)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 コマンドプロンプトの起動とカレントディレクトリの移動

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。これらの手順はバリオグラム計算コードの場合と同様である (7.3 参照)。

② クリギング計算コードの実行

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取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、*sample2* ディレクトリ内の *Cs137_SP-NU-01.kinp* を使用する場合は、

```
krig.bat sample2 Cs137_SP-NU-01
```

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。

7.6 必要標本数計算コードの実行方法

(1) 準備

必要標本数計算コードでは 6.1.5 の(1)必要標本数計算用データファイルおよび(2)入力ファイルを用いる。必要標本数計算用データファイルについては、そのファイルの場所を確認する。入力ファイルについては、それを収めるディレクトリを inp ディレクトリ内に作成する。

(2) ディレクトリと入力ファイルの作成

inp ディレクトリ内に作成するディレクトリは、用いる平均クリギングのタイプに応じて次の 2 種類とする。

平均クリギング I を用いる場合：avrgKI

平均クリギング II を用いる場合：avrgKII

入力ファイルについては、用いる平均クリギングのタイプに応じて作成された上記のディレクトリ内に対象とする核種やその数に応じたものを作成し、“`.ninp`” の拡張子を付ける。例えば、2 つの核種 ^{60}Co と ^{137}Cs の放射能濃度に対応して実行された kriging 計算コードからの出力ファイル「`Co60_SP-NU-01¥ncaldata.dat`」と「`Cs137_SP-NU-01¥ncaldata.dat`」を用いる場合、計算を行う平均クリギングのタイプおよび核種の数に応じてディレクトリ構成とファイル名を以下のようにする。

核種の数	平均クリギングのタイプ		
	平均クリギング I	平均クリギング II	
複数核種	inp¥avrgKI¥SP-NU-01_Plural.ninp	inp¥avrgKII¥ SP-NU-01_Plural.ninp	
単核種	^{60}Co	inp¥avrgKI¥SP-NU-01_Co60.ninp	inp¥avrgKII¥SP-NU-01_Co60.ninp
	^{137}Cs	inp¥avrgKI¥SP-NU-01_Cs137.ninp	inp¥avrgKII¥SP-NU-01_Cs137.ninp

(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 コマンドプロンプトの起動とカレントディレクトリの移動

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。これらの手順はバリオグラム計算コードの場合と同様である (7.3 参照)。

② 必要標本数計算コードの実行

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、

ncal.bat [ディレクトリ名] [計算タイプ名] [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取めたディレクトリ名

[計算タイプ名]：必要標本数計算における平均クリギングのタイプ

[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、sample2 ディレクトリにおいて計算タイプが平均クリギング I (avrgKI)、複数の核種（核種用データファイル：SP-NU-01_Plural.ninp）を対象に必要な標本数計算コードを実行する場合は

```
nca1.bat sample2 avrgKI SP-NU-01_Plural
```

と、入力する。

以上で必要標本数計算が開始され、計算結果が¥out¥sample2¥avrgKI¥SP-NU-01_Plural に出力される。

8 サンプルラン

米国のトロージャン原子力発電プラント（加圧水型、熱出力 1,155MWt）は、1976 年から商用運転を開始し 1993 年に永久停止した。その後、1996 年から廃止措置が開始され 2005 年にサイト解放が行われた。サイト解放に当たっては、発電所敷地内の土壌放射能濃度が測定され、その結果に対してサイト解放検認が行われた²⁰⁾。ここでは、そこで得られた放射能濃度測定データを用いて ESRAD2 によるサンプル計算を行った。

(1) 対象領域と測定データ

使用した測定データは、「G51045E」という評価単位 ID コードの付いた領域を対象としたものである。この領域は 39 個の $9 \times 9\text{m}^2$ の正方区画（以下、メッシュ）から構成され、各メッシュに対して 1 つの測定データが得られている。測定された核種は ^{137}Cs と ^{60}Co である。領域の模式図とメッシュ番号を図 8.1 に、各メッシュの測定データを表 8.1 に示す。測定点は領域全域にわたり均等に配分されている。

本サンプルランでは、この領域における 2 核種の放射能濃度に関する最適なバリオグラムモデル、放射能濃度分布、平均放射能濃度、およびサイト解放検認に必要な測定点数についての計算結果を示す。

(2) 計算条件と入力データ

(1) で設定したメッシュの面積は 81m^2 であり、これを 1 つの測定点で代表するには広すぎるため、このメッシュをさらに $30 \times 30\text{cm}^2$ の詳細メッシュに分割した。この結果、領域全域は 35,100 の詳細メッシュから構成され、そのなかで測定された詳細メッシュの数は 39 となる。このサンプルランでは、測定されていない 35,061 の詳細メッシュの放射能濃度を ESRAD2 を用いて推定することになる。

主な計算条件は次のとおりである。

- ① バリオグラムモデルについて、バリオグラムの方向依存性は小さいとし、等方のバリオグラムモデルを設定した。モデルの関数形は球形とした。バリオグラムモデルパラメータの値は、交差検証法と最適化を組み合わせた手法で決定した。最適化におけるバリオグラムモデルパラメータの初期値には標本バリオグラムに最も一致するように最小 2 乗法で得られたものとした。
- ② サイト解放判断に係る過誤率について、安全をより優先させるために第 I 種の過誤率 α を第 II 種の過誤率 β より小さくした。すなわち、 $\alpha = 0.05$ 、 $\beta = 0.1$ とした。
- ③ サイト解放に係る濃度基準値について、Trojan サイトでは ^{137}Cs と ^{60}Co に対して、それぞれ 0.407Bq/g 、 0.141Bq/g である。しかし、ここでは意図的に濃度基準値をその $1/40$ とした。その理由は、表 8.1 に示したように両核種の放射能濃度は元の濃度基準値に比べて 2 桁程度低いいため、そのままでは必要な測定点数を論ずる上で適当ではないからである。

(3) 計算結果

① バリオグラム計算コードと交差検証コード

^{137}Cs と ^{60}Co に対するバリオグラム雲、標本バリオグラム、標本バリオグラムに最も一致するバリオグラムモデル（以下、フィッティングバリオグラムモデル）、および最適バリオグラムモデルを、それぞれ図 8.2(a)と図 8.2(b)に示す。 ^{137}Cs に対する最適バリオグラムモデルにおける 3 つのモデルパラメータ (a, b, c) の値はフィッティングバリオグラムモデルにおける値と大きく異なることが分かる。一方、 ^{60}Co に対する最適バリオグラムモデルとフィッティングバリオグラムモデルは一致している。標本バリオグラムは、両核種の場合とも原点から少し離れた (10m 程度) だけで一定になる。このことは、濃度の空間的な相関が非常に弱いことを表している。表 8.2 は最適バリオグラムモデルのモデルパラメータ (レンジ、シル、ナゲット効果) の計算結果を示したものである。両核種についてナゲット効果が認められる。これは、2 点間の放射能濃度が短距離でも大きく変動することを示唆している。

② クリギング計算コード

^{137}Cs と ^{60}Co に対する推定された放射能濃度分布を図 8.3 (Fig.10) に示す。 ^{137}Cs 濃度は 0.001 ~ 0.003 (Bq/g)、 ^{60}Co 濃度は 0.002 ~ 0.003 (Bq/g) の狭い範囲で変動していることが分かる。すなわち、両核種とも領域全域にわたりほぼ一様に分布しているといえる。

領域全体の平均放射能濃度と標準誤差の計算結果を表 8.3 (Table 6) に示す。平均放射能濃度については、平均クリギング I と平均クリギング II で一致するが、標準誤差は平均クリギング II の方が幾分大きくなる。

③ 必要標本数計算コード

^{137}Cs と ^{60}Co に対するサイト解放基準への適合性を判断するための物理量 f ((2.2)式) の推定値 f_n^* ((4.3)式)、その標準誤差 $\sigma_n(f_n^*)$ ((4.5)式参照)、および必要な測定点数についての計算結果を表 8.4 に示す。 f_n^* については、平均クリギング I と平均クリギング II で一致する。これは、②で述べたように ^{137}Cs と ^{60}Co に対する平均放射能濃度の推定値が一致するからである。一方、標準誤差については、 ^{137}Cs と ^{60}Co の両核種について平均クリギング II の結果が大きくなることを反映して、平均クリギング II の結果が大きくなる。必要測定点数については、平均クリギング I では 26、平均クリギング II では 37 となる。これは、 f_n^* の標準偏差が平均クリギング II の方が大きくなることによる。

表 8.1 トロージャン発電所敷地内領域の ^{137}Cs と ^{60}Co の放射能濃度
(参考文献 20) より、単位を pCi/g から Bq/g へ変換)

区画番号	^{137}Cs	^{60}Co	区画番号	^{137}Cs	^{60}Co
1	2.55E-03	2.74E-03	21	2.81E-03	2.07E-03
2	2.29E-03	2.59E-03	22	2.33E-03	2.18E-03
3	2.22E-03	2.29E-03	23	1.04E-03	2.48E-03
4	2.33E-03	2.22E-03	24	2.96E-03	3.03E-03
5	2.33E-03	2.04E-03	25	2.52E-03	2.22E-03
6	2.52E-03	2.92E-03	26	9.62E-04	2.29E-03
7	1.85E-03	2.59E-03	27	2.78E-03	3.48E-03
8	2.59E-03	2.55E-03	28	1.55E-03	2.26E-03
9	2.29E-03	2.00E-03	29	1.52E-03	2.55E-03
10	2.55E-03	1.89E-03	30	1.96E-03	2.55E-03
11	3.18E-03	3.11E-03	31	3.15E-03	2.70E-03
12	2.29E-03	2.29E-03	32	2.37E-03	2.37E-03
13	2.44E-03	2.33E-03	33	1.11E-03	2.37E-03
14	2.59E-03	2.55E-03	34	2.74E-03	2.48E-03
15	1.22E-03	2.55E-03	35	2.07E-03	2.48E-03
16	8.88E-04	2.00E-03	36	2.29E-03	2.48E-03
17	2.74E-03	2.52E-03	37	2.66E-03	2.89E-03
18	3.03E-03	2.52E-03	38	2.81E-03	3.00E-03
19	3.44E-03	2.26E-03	39	2.18E-03	2.15E-03
20	1.48E-03	3.15E-03			

表 8.2 ^{137}Cs と ^{60}Co の放射能濃度に関するバリオグラムモデルパラメータの計算結果

放射性核種	レンジ(m)	シル [(Bq/g) ²]	ナゲット効果 [(Bq/g) ²]
^{137}Cs	13.5	8.74E-07	2.40E-07
^{60}Co	7.47	1.27E-07	8.43E-08

表 8.3 ^{137}Cs と ^{60}Co の平均放射能濃度と標準誤差の計算結果

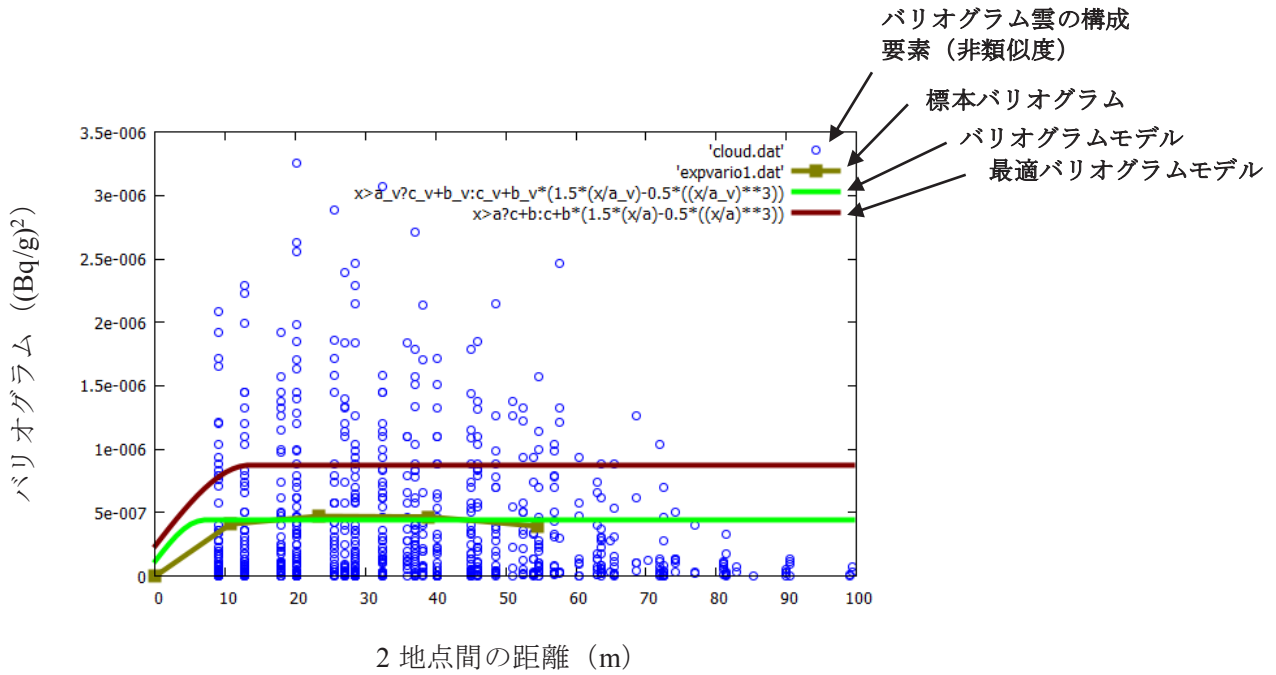
(a) ^{137}Cs と ^{60}Co の濃度			
放射性核種	手法	平均推定値 (Bq/g)	標準誤差 (Bq/g)
^{137}Cs	平均クリギング I	2.27E-03	9.83E-05
	平均クリギング II	2.27E-03	1.73E-04
^{60}Co	平均クリギング I	2.49E-03	5.25E-05
	平均クリギング II	2.49E-03	5.70E-05

表 8.4 平均の推定値 (f_n^*) と標準誤差および必要測定点数の計算結果

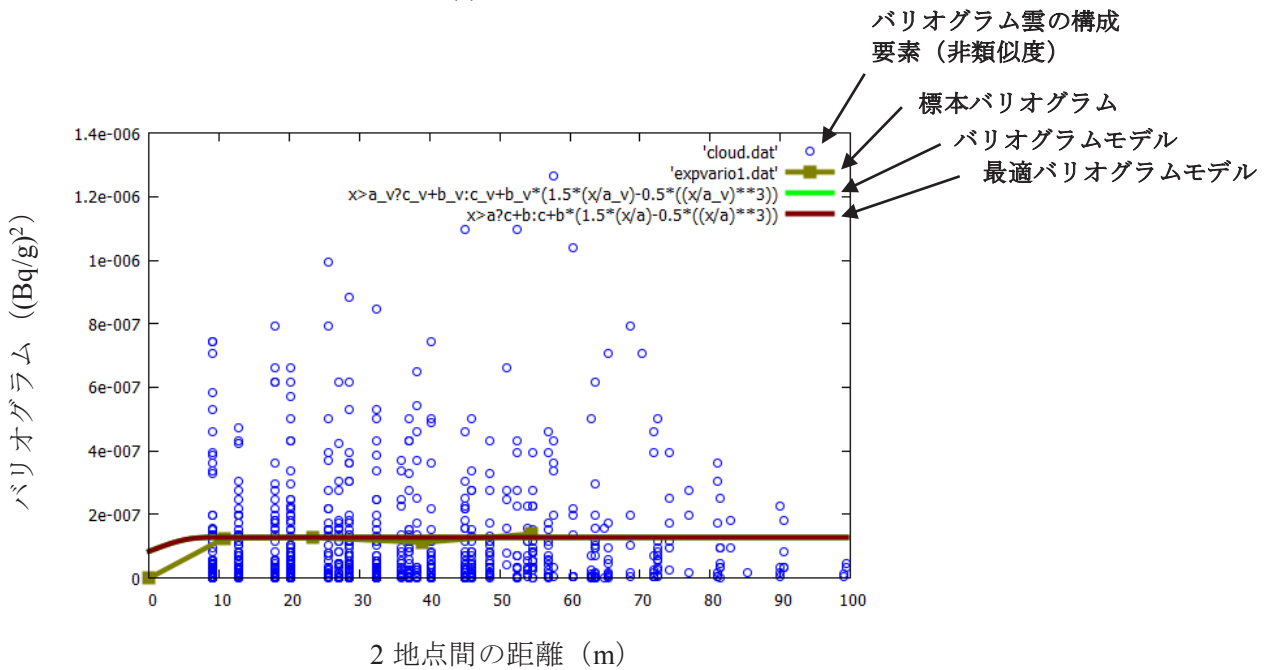
手法	推定値 (Bq/g)	標準誤差 (Bq/g)	必要測定点数
平均クリギング I	2.32E-02	4.44E-04	26
平均クリギング II	2.32E-02	5.86E-04	37

						25	26	27				
						24	29	28				
2	3	7	8	19	20	21	30	32	34	35	36	
1	4	5	9	18	17	22	31	33	39	38	37	
		6	10	13	16	23						
		12	11	14	15							

図 8.1 評価領域 (39 の区画)

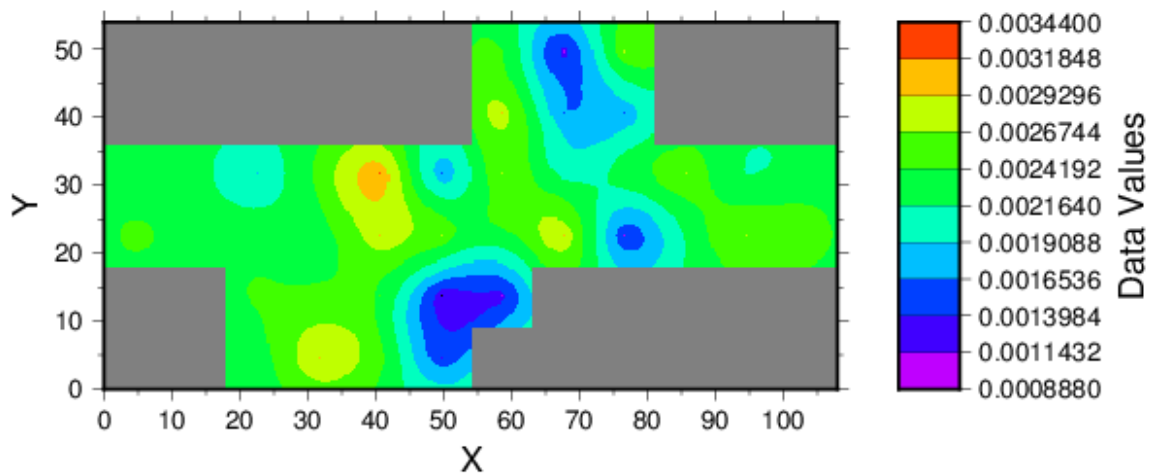


(a) ¹³⁷Cs

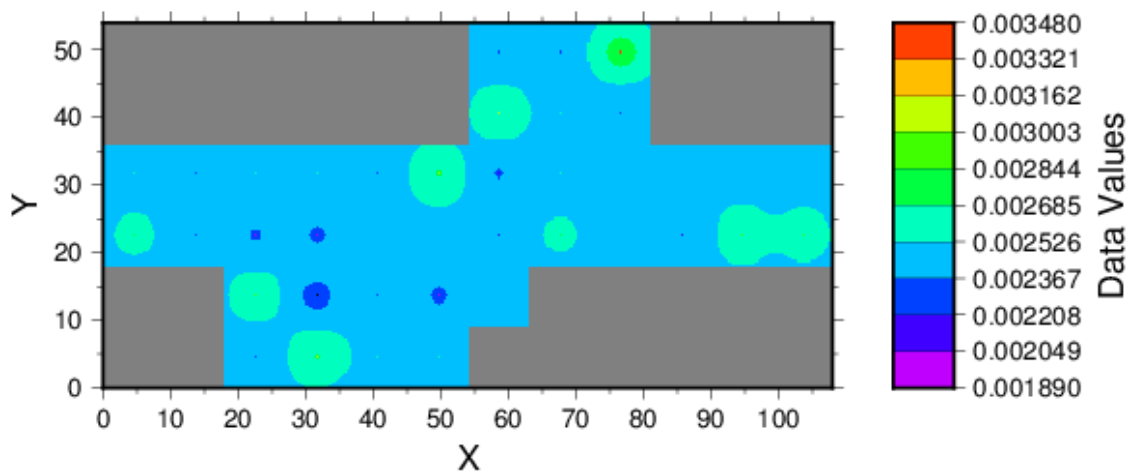


(b) ⁶⁰Co

図 8.2 ¹³⁷Cs と ⁶⁰Co に対するバリオグラム雲、標準バリオグラム、標準バリオグラムに最も一致するバリオグラムモデルおよび最適バリオグラムモデル



(a) ^{137}Cs



(b) ^{60}Co

図 8.3 ^{137}Cs と ^{60}Co に対する推定放射能濃度分布

9 おわりに

原子力施設の廃止措置の最終段階であるサイト解放検認作業を支援するための、クリギングに基づく放射能分布推定プログラムの第2版ESRAD2を開発した。そこでは、放射能濃度分布の推定機能を有するESRADを改良・拡張して、サイト解放検認に必要とされる評価領域の平均放射能濃度とその標準誤差の推定機能およびサイト解放判断の過誤率を考慮した必要測定点数の計算機能等を整備した。また、廃止措置施設の周辺土壌に対して実施された放射能濃度測定結果を用いてサンプル計算を行った。その結果、本プログラムがサイト解放検認を合理的に実施する上で有用なツールとして利用可能性の高いことを確認した。

参考文献

- 1) 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：平成二六年一二月一〇日原子力規制委員会規第七号。
- 2) 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.
- 3) Nokhamzon.J.G. et al., Softwares for Radiological Assessment of Buildings & Soils, available from http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/documents/IDN/ANL%20Course/Day_9/CEATools.pdf（参照：2015年5月14日）。
- 4) 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.
- 5) 助川武則他，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, 86p.
- 6) 石神努，島田太郎，サイト解放検認のための測定点数の算出方法と判断手順の検討，JAEA-Research 2013-048, 2014, 40p.
- 7) Ishigami T., Shimada T., Study on application of kriging to evaluation of radioactivity concentration for ensuring compliance with the criterion of site release, J Nucl Sci Technol, Vol. 52, issue 9, 2015, pp.1186-1204.
- 8) 石神努他，クリギングに基づく放射能分布推定プログラム ESRA2 の開発 -使用手引-，JAEA-Data/Code 2012-023, 2012, 83p.
- 9) United States Department of Defense, Department of Energy, Environmental Protection Agency, Nuclear Regulatory Commission, Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment Manual (MARSAME), NUREG-1575 Supp. 1, EPA 402-R-09-001, DOE/HS-0004, 2009.
- 10) Berger, J. D., Manual for Conducting Radiological Surveys in Support of License Termination,

NUREG/CR-5849, 1992.

- 11) 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.
- 12) Pardo-Iguzquiza, E., VARFIT: A Fortran-77 Program for Fitting Variogram Models by Weighted Least Squares, Computers & Geosciences, Vol.25, 1999, pp.251-261.
- 13) Wang J. F., Li L. F., Christakos G. Sampling and kriging spatial means: efficiency and conditions. Sensors. 2009; 9:5224-5240.
- 14)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>
- 15) GNUPLOT のホームページ : <http://www.gnuplot.info/>
- 16) GMT のホームページ : <http://gmt.soest.hawaii.edu/>
- 17) 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.
- 18) Nelder, J.A. and R. Mead R., A Simplex Method for Function Minimization, The Computer Journal, Vol. 7, no.4, 1965, pp. 308-313.
- 19) Dubrule, O., Cross Validation of Kriging in a Unique Neighborhood, Mathematical Geology, Vol. 15, No.6, 1983, pp.687-699.
- 20) Trojan nuclear plant final survey report for support facilities and site grounds. United States: Portland General Electric; 2004, Docket 50-344.

付録 1 通常型クリギングと平均クリギング I の関係

通常型クリギングの解、すなわち重み係数 w_α^i とラグランジュ未定乗数 μ^i を用いて(A.1)式と(A.2)式で定義される量を導入する。

$$w_\alpha = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_\alpha^i \quad (\text{A.1})$$

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu^i \quad (\text{A.2})$$

本文の(3.8)式において $i=1$ から N まで足し合わせた量を N で除すと次式が得られる。

$$\sum_{\beta=1}^n \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_\beta^i \gamma(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_\beta) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu^i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_i) \quad (\text{A.3})$$

(A.1)式と(A.2)式を(A.3)式に代入すると次式が得られる。

$$\sum_{\beta=1}^n w_\beta \gamma(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_\beta) + \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_i) \quad (\text{A.4})$$

また、 w_α について以下の条件が成立する。

$$\sum_{\alpha=1}^n w_\alpha = \sum_{\alpha=1}^n \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_\alpha^i = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \sum_{\alpha=1}^n w_\alpha^i = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} = 1 \quad (\text{A.5})$$

(A.4)式、(A.5)式をそれぞれ(3.23)式、(3.19)式と比較すると、導入した w_α および μ は、平均クリギング I の解である \bar{w}_α および $\bar{\mu}$ と同じ方程式を満たしていることがわかる。このことは、 w_α および μ が平均クリギング I の解となることを示している。

そこで、平均クリギングの解は通常型クリギングの解を用いて以下のように表される。

$$\bar{w}_\alpha = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_\alpha^i \quad (\text{A.6})$$

$$\bar{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu^i \quad (\text{A.7})$$

平均の推定値およびその推定分散は次式で表される。

$$\bar{z}_n^* = \frac{1}{N} \sum_{\alpha=1}^n \sum_{i=1}^N w_\alpha^i z(\mathbf{x}_\alpha) \quad (\text{A.8})$$

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu^i + \frac{1}{N^2} \sum_{\alpha=1}^n \sum_{i=1}^N w_\alpha^i \sum_{j=1}^N \gamma(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_j) - \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \gamma(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) \quad (\text{A.9})$$

次に、 $\sigma_n(k)^2$ の n 依存性を近似的に求めるために、通常型クリギングの解およびバリオグラム
の性質に着目する。通常型クリギングの解は測定値を正確に再現する性質がある。すなわち、
測定点 \mathbf{x}_β における重み係数とラグランジュ未定乗数は次式で表される。

$$w_{\alpha}^{\beta}(k) = \delta_{\alpha\beta} \quad (\text{A.10})$$

$$\mu^{\beta}(k) = 0 \quad (\text{A.11})$$

ここに、

$$\delta_{\alpha\beta} = \begin{cases} 1 & \text{for } \alpha = \beta \\ 0 & \text{for } \alpha \neq \beta \end{cases}$$

また、バリオグラムについては、原点におけるバリオグラムの値はゼロ、すなわち $\mathbf{x}_{\alpha} = \mathbf{x}_{\beta}$ のとき $\gamma_k(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) = 0$ となる性質がある。以下では、測定点を \mathbf{x}_{β} ($\beta = 1, 2, \dots, n$)、測定点以外の点を \mathbf{x}_s ($s = n+1, n+2, \dots, N$)、そして両方いずれかの点を \mathbf{x}_i ($i = 1, 2, \dots, N$) と記すこととする。

(3.8), (A.6), および(A.11)式を用いると、(A.9)式の右辺の第1項は以下のように書き換えられる。

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu^i(k) = \frac{1}{N} \sum_{s=n+1}^N \mu^s(k) = \frac{1}{N} \sum_{s=n+1}^N \gamma_k(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_s) - \frac{1}{N} \sum_{s=n+1}^N \sum_{\beta=1}^n w_{\beta}^s(k) \gamma_k(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}). \quad (\text{A.12})$$

(A.12)式の右辺の第1項、第2項の和においてに寄与する項の数は、それぞれ $(N-n)$ 、 $(N-n)(n-1)$ である。 $w_{\beta}^s(k)$ の平均は $1/n$ ((3.7)式参照) であることを考慮して、(A.12)式の右辺の第1項、第2項に対して、それぞれ次の平均量を導入する。

$$\langle \gamma_{\alpha}(k) \rangle = \frac{1}{N-n} \sum_{s=n+1}^N \gamma_k(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_s) \quad (\text{A.13})$$

$$\langle w\gamma_{\alpha}(k) \rangle = \frac{1}{(N-n)(n-1)} \frac{1}{n} \sum_{s=n+1}^N \sum_{\beta=1}^n w_{\beta}^s(k) \gamma_k(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) \quad (\text{A.14})$$

上式を用いると次式が得られる。

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu^i(k) = \left(1 - \frac{n}{N}\right) \left\{ \frac{1}{n} \langle w\gamma_{\alpha}(k) \rangle + \langle \gamma_{\alpha}(k) \rangle - \langle w\gamma_{\alpha}(k) \rangle \right\} \quad (\text{A.15})$$

$\langle \gamma_{\alpha}(k) \rangle$ および $\langle w\gamma_{\alpha}(k) \rangle$ は測定点 \mathbf{x}_{α} に依存するが、一方、(A.15)式は \mathbf{x}_{α} に依存しない。なぜなら、同式の左辺は \mathbf{x}_{α} に依存しない $\mu^i(k)$ を全メッシュについて足し合わせ全メッシュ数 N で除したものであるからである。 $\langle \gamma_{\alpha}(k) \rangle$ および $\langle w\gamma_{\alpha}(k) \rangle$ の測定点 \mathbf{x}_{α} への依存性をなくするために、(A.15)式の両辺を全測定点 \mathbf{x}_{α} ($\alpha = 1, 2, \dots, n$) にわたり足し合わせ全測定点数 n で除すると、(A.15)式は次式のように書き換えられる。

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu^i(k) = \left(1 - \frac{n}{N}\right) \left(\frac{1}{n} \gamma_{1w}(k) + \gamma_1(k) - \gamma_{1w}(k) \right) \quad (\text{A.16})$$

$$\gamma_{1w}(k) = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n \langle w\gamma_{\alpha}(k) \rangle = \frac{1}{(N-n)(n-1)} \sum_{\alpha=1}^n \sum_{s=n+1}^N \sum_{\beta=1}^n w_{\beta}^s(k) \gamma_k(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) \quad (\text{A.17})$$

$$\gamma_1(k) = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n \langle \gamma_{\alpha}(k) \rangle = \frac{1}{N-n} \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n \sum_{s=n+1}^N \gamma_k(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_s) \quad (\text{A.18})$$

同様に、(A.9)式の右辺の第2項と第3項の和は次式のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} & \sum_{\beta=1}^n \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_{\beta}^i(k) \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \gamma_k(\mathbf{x}_{\beta} - \mathbf{x}_j) - \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \gamma_k(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) \\ &= -\left(1 - \frac{1}{N}\right) \left(1 - \frac{n}{N}\right) (\gamma_2(k) - \gamma_{2w}(k)) \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

$$\gamma_2(k) = \frac{1}{(N-1)(N-n)} \sum_{s=n+1}^N \sum_{i=1}^N \gamma_k(\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_i) \quad (\text{A.20})$$

$$\gamma_{2w}(k) = \frac{1}{(N-1)(N-n)} \sum_{\beta=1}^n \sum_{s=n+1}^N w_{\beta}^s(k) \sum_{i=1}^N \gamma_k(\mathbf{x}_{\beta} - \mathbf{x}_i) \quad (\text{A.21})$$

(A.16)～(A.21)式を組み合わせると次式が得られる。

$$\sigma_n(k)^2 = \left(1 - \frac{n}{N}\right) \left(\frac{1}{n} \gamma_{1w}(k) + \gamma(k)\right) \quad (\text{A.22})$$

$$\gamma(k) = \gamma_1(k) - \gamma_{1w}(k) - \left(1 - \frac{1}{N}\right) (\gamma_2(k) - \gamma_{2w}(k)) \quad (\text{A.23})$$

予想されるように(A.22)式から、 $n=N$ の場合には $\sigma_n(k)^2$ がゼロになることがわかる。これは、測定が当該領域の全メッシュにわたり実行されることから不確かさは生じないからである。ここで、次のことが留意される。これまで導出されてきた $\sigma_n(k)^2$ の計算式には近似が含まれておらず、 $\sigma_n(k)^2$ の n 依存性は陽に取り出されていないということである。すなわち、 $\gamma_1(k)$ 、 $\gamma_{1w}(k)$ 、 $\gamma_2(k)$ 、 $\gamma_{2w}(k)$ は測定点数 n に依存する量である。 $\sigma_n(k)^2$ の n 依存性を陽に取り出すために、以下の近似を行う。それは、 $\gamma_1(k)$ 、 $\gamma_{1w}(k)$ 、 $\gamma_2(k)$ 、 $\gamma_{2w}(k)$ の計算を最初に設定した測定点数 n_0 における測定値を用いて行うものである。なぜなら、これらの値は平均量であることから n 依存性が弱いと考えられるからである。こうして $\sigma_n(k)^2$ の n 依存性は、 $\gamma_{1w}(k)$ および $\gamma(k)$ を定数として、(A.22)式で表される。

付録2 サンプルランの主な入力ファイル

(1) バリオグラム計算コードへの入力ファイル : Cs137_SP-NU-01.vinp

```

#comment
Cs137, 標本点数 39, モデル=spherical, ナゲット効果=あり, 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%sample2%Trojan_Cs137.rif
* -----
* Card 2 対数化オプション
* 対数化オプション(/0/対数化しない/ /1/log10(z)/ /2/ln(z)/)
0
* -----
* Card 3 標本バリオグラム
* nclass: クラス数
* nclassang: 方向クラス数
4      8
* -----
* Card 4 距離の最大
* 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)
63.
* -----
* Card 5 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
spherical
* -----
* Card 6 モデル関数の推定方法
* lsm(/0/LSM 実施//1/実施しない/)
0
* -----
* Card 7
* 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 8 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

```

```

1      1
* -----
* Card 9 方位分割方法に関する指定
* iangletype 0:分割しない, 1:等分割する, 2:角度範囲で指定する
0

```

(2) 交差検証コードへの入力ファイル : Cs137_SP-NU-01.cinp

```

#comment
Cs137, 標本点数 39, モデル=spherical, ナゲット効果=あり, 加重係数=1, ARE
#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¥sample2¥Trojan_Cs137.rif
* -----
* Card 2 最適化のパラメータ指定
* itarget 最適化の関数 1:1/nΣ |(z*(X[α])-z(Xα))/z(Xα)|×100
* 2:1/nΣ (z(Xα)-z*(X[α]))^2
* 3:|1/nΣ (z(Xα)-z*(X[α]))^2/σ[α]^2 -1|
* iweight 加重の重み 1:一律 2:ユーザー入力
* ichkcross 交差検証確認計算 0:Olivier Dubrule の方法 1:通常計算
* itarget, iweight, ichkcross
  1      1      0
* -----
* Card 3 加重データ
* iweight = 2 の場合に標本点分を設定
* weightdata
*
*read from file
=¥out¥sample2¥Cs137_SP-NU-01¥model.dat
* 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

```

(3) クリギング計算コードへの入力ファイル : Cs137_SP-NU-01.kinp

```

#comment
Cs137, 標本点数 39, モデル=spherical, ナゲット効果=あり, 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¥sample2¥Trojan_Cs137_.rif
* 評価範囲指定ファイル
.%dat¥sample2¥Trojan_Cs137.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¥sample2¥Trojan_Cs137.rif
* -----
* Card 2 交差検証確認計算オプションの指定
* ichkcross 交差検証確認計算 0:Olivier Dubrule の方法 1:通常計算
* ichkcross
0
* -----
* Card 3 バリオグラムの選定時に設定した対数化オプション
*read from file
=.%out¥sample2¥Cs137_SP-NU-01¥modelcross.dat
*skip_start
*skip_end
* -----
* Card 15 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

```

(4) 必要標本数計算コードへの入力ファイル : SP-NU-01_Plural.ninp

```

* Card 1 核種の種類の数 n_nuc,標本数計算タイプ ntype ( 1 :for type I, 2: for type II )
2 2
* -----
* Card 2 必要標本数の評価に係るデータファイルの場所 (クリギング計算コードから出力され
た ncaldata.dat を指定する。n_nuc 個のファイルを指定。)
¥out¥sample2¥Cs137_SP-NU-01¥ncaldata.dat
¥out¥sample2¥Co60_SP-NU-01¥ncaldata.dat
* -----
* Card 3 濃度基準値
0.010175
0.003525
* -----
* Card 4  $\mu$  1 の設定 (グレー領域  $\Delta=1-\mu$  1)
-1.0
* -----
* Card 5 上側  $\alpha$  点、 $\beta$  点
0.05 0.1
* -----
* Card 6 角度依存性の考慮。
* (1)Card 6-1
* 核種 A-核種 B の組合せ数 n (※核種番号はデータファイルの指定順。A<B のみ設定す
る。B-A の設定は A-B と同じ値が設定される。)
* (2)Card 6-2
* 核種 A-核種 B の組合せ、角度の分割数 n_angle と、初期角度 init_angle、距離区分数
n_h_class、考慮する距離最大値 h_limit を指定する。
* -----
* (1)Card 6-1: n
1
* -----
* (2)Card 6-2:
* 核種 A 核種 B n_angle(A,B) init_angle(A,B) n_h_class(A,B) h_limit(A,B)
1 2 1 45.0 4 63.

```

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량	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組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
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	キログラム毎立方メートル	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
比透磁率 ^(b)	(数字の)	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	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	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)	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
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
酸素活性化	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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	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
	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	名称	記号	乗数	名称	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=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=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	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 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=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=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
バイン	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単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	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	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 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 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=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻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 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

