

移行パラメータ信頼性評価手法の確立(Ⅱ)

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2005年1月

前田建設工業株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122 (代表)

ファックス：029-393-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2005

移行パラメータ信頼性評価手法の確立（Ⅱ）
（核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書）

吉野尚人※ 野本康介※ 松井幹雄※ 梨本裕※

要 旨

地層処分の安全評価では様々な不確実要因が内在し、これらを完全に排除することは困難である。そのため、安全評価の不確実性を定量的に評価する手法に関する検討が必要となる。そこで地下水流動解析に着目し、調査試験データや解析で求められる値の空間的なバラツキの定量化を目的として、2003年度に以下の検討を行った。

- ・透水係数設定方法の整理と分散の定量化手法の検討
- ・確率論による浸透流解析に基づく評価項目のバラツキの定量化手法の開発
- ・二次元鉛直断面における事例検討

また、これらの検討の中で二次元断面を対象とした地下水流れ到達点の不確実性評価プログラム（以下、2次元プログラム）を作成している。

本業務では2003年度の検討結果を踏まえ、以下の検討および作業を行った。

- ①任意点からの地下水流れの到達点のバラツキ評価の検証
- ②2次元プログラムの3次元化
- ③3次元プログラムによる事例検討

本報告書は、前田建設工業株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

機構担当課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ

※ 前田建設工業株式会社

A study about the certainty evaluation of nuclear transport parameter II
(Document Prepared by Other Organization, Based on the Contract)

Naoto Yoshino*, Kosuke Nomoto*, Mikio Matsui*,
Yutaka Nashimoto*

Abstract

There are various uncertainty factors in the safety assessment for the geological disposal of High Level Nuclear Waste. And it is difficult to eliminate these uncertainty factors completely. Then it is important to evaluate the various uncertainty factors quantitatively for the safety assessment of the geological disposal. Japan Nuclear Cycle Development Institute focused on the groundwater flow analysis and studied about following issues in 2003 in order to quantify the variance of values which obtained by field investigation or numerical analysis.

- The method to estimate the hydraulic conductivity and quantify the variability of estimated hydraulic conductivity.
- The quantification of the key parameter's variability based on probability flow rate analysis.
- Case study by the vertical two dimensional field.

Two-dimensional numerical simulation program in which the uncertainty of the reach point in the ground water flow can be estimated was developed in above subjects. In this study, following three issues are studied

- verification about the variance of the reach point estimated by 2-dimensional simulation program
- development of 3-dimensional simulation program
- Case study by 3-dimensional simulation program

This Work was performed by Maeda Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC Liaison : Repository System Analysis Group, Waste Isolation Research Division,
Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

※Maeda Corporation

目 次

1. はじめに	1
2. 対象データの概要	2
3. 2次元プログラムの地下水流れ到達点の検証	4
3.1 確率有限要素法による浸透流解析	4
3.2 2次元プログラムの検証方法とV解析法の概要	12
3.3 解析条件	14
3.4 解析ケース	15
3.5 検証結果	17
4. 2次元プログラムの3次元化と事例検討	145
4.1 3次元プログラムの特徴	145
4.2 事例検討	146
5. おわりに	179
・参考文献	180
・付録-1 3次元プログラムのマニュアル	付-1(1)

表 目 次

表 3.4-1	検証の解析ケース	15
表 3.5-1	解析結果表示のインデックス	17
表 3.5-2	収束確認時系列プロットのインデックス	52
表 4-1	移行到達位置 結果インデックス	157
表 4-2	移行到達位置 結果一覧	167
表 4-3	移行到達時間 結果インデックス	172
表 4-4	移行到達時間 結果一覧	177

目 次

図 2-1	MIU-1～4 号孔の配置図	2
図 2-2(a)	透水係数 MIU-1 号孔	3
図 2-2(b)	透水係数 MIU-2 号孔	3
図 2-2(c)	透水係数 MIU-3 号孔	3
図 2-2(d)	透水係数 MIU-4 号孔	3
図 3.1-1	2次元プログラムの解析フロー	4
図 3.1-2	解析領域での任意点からの地下水流れの模式図	10
図 3.1-2	地下水流れ到達点の表示方法	11
図 3.3-1	解析に使用した不飽和特性曲線	14
図 3.4-1	移行開始点のケース設定に使用した流速図	16
図 3.5-1(a)	解析結果 確率 FEM 開始点 (236, 0) 1000 年～3000 年	19
図 3.5-1(b)	解析結果 K 解析法 開始点 (236, 0) 1000 年～3000 年	20
図 3.5-1(c)	解析結果 V 解析法 開始点 (236, 0) 1000 年～3000 年	21
図 3.5-2(a)	解析結果 確率 FEM 開始点 (236, -100) 1000 年～4000 年	22
図 3.5-2(b)	解析結果 K 解析法 開始点 (236, -100) 1000 年～4000 年	23
図 3.5-2(c)	解析結果 V 解析法 開始点 (236, -100) 1000 年～4000 年	24
図 3.5-3(a)	解析結果 確率 FEM 開始点 (236, -100) 5000 年	25
図 3.5-3(b)	解析結果 K 解析法 開始点 (236, -100) 5000 年	26
図 3.5-3(c)	解析結果 V 解析法 開始点 (236, -100) 5000 年	27
図 3.5-4(a)	解析結果 確率 FEM 開始点 (236, -200) 1000 年～4000 年	28
図 3.5-4(b)	解析結果 K 解析法 開始点 (236, -200) 1000 年～4000 年	29
図 3.5-4(c)	解析結果 V 解析法 開始点 (236, -200) 1000 年～4000 年	30
図 3.5-5(a)	解析結果 確率 FEM 開始点 (236, -200) 5000～8000 年	31
図 3.5-5(b)	解析結果 K 解析法 開始点 (236, -200) 5000～8000 年	32
図 3.5-5(c)	解析結果 V 解析法 開始点 (236, -200) 5000～8000 年	33
図 3.5-6(a)	解析結果 確率 FEM 開始点 (236, -200) 9000 年～12000 年	34
図 3.5-6(b)	解析結果 K 解析法 開始点 (236, -200) 9000 年～12000 年	35
図 3.5-6(c)	解析結果 V 解析法 開始点 (236, -200) 9000 年～12000 年	36
図 3.5-7(a)	解析結果 確率 FEM 開始点 (236, -200) 13000 年～15000 年	37
図 3.5-7(b)	解析結果 K 解析法 開始点 (236, -200) 13000 年～15000 年	38
図 3.5-7(c)	解析結果 V 解析法 開始点 (236, -200) 13000 年～15000 年	39
図 3.5-8(a)	解析結果 確率 FEM 開始点 (236, -300) 1000 年～4000 年	40
図 3.5-8(b)	解析結果 K 解析法 開始点 (236, -300) 1000 年～4000 年	41
図 3.5-8(c)	解析結果 V 解析法 開始点 (236, -300) 1000 年～4000 年	42
図 3.5-9(a)	解析結果 確率 FEM 開始点 (236, -300) 5000～8000 年	43

図 3.5-9 (b)	解析結果	K 解析法	開始点 (236, -300)	5000~8000 年	44
図 3.5-9 (c)	解析結果	V 解析法	開始点 (236, -300)	5000~8000 年	45
図 3.5-10 (a)	解析結果	確率 FEM	開始点 (236, -300)	9000 年~12000 年	46
図 3.5-10 (b)	解析結果	K 解析法	開始点 (236, -300)	9000 年~12000 年	47
図 3.5-10 (c)	解析結果	V 解析法	開始点 (236, -300)	9000 年~12000 年	48
図 3.5-11 (a)	解析結果	確率 FEM	開始点 (236, -300)	13000 年~14000 年	49
図 3.5-11 (b)	解析結果	K 解析法	開始点 (236, -300)	13000 年~14000 年	50
図 3.5-11 (c)	解析結果	V 解析法	開始点 (236, -300)	13000 年~14000 年	51
図 3.5-12 (a)	収束性の確認	K 解析法	期待値 開始点 (236, 0)	1000 年後	54
図 3.5-12 (b)	収束性の確認	V 解析法	期待値 開始点 (236, 0)	1000 年後	54
図 3.5-13 (a)	収束性の確認	K 解析法	期待値 開始点 (236, 0)	2000 年後	55
図 3.5-13 (b)	収束性の確認	V 解析法	期待値 開始点 (236, 0)	2000 年後	55
図 3.5-14 (a)	収束性の確認	K 解析法	期待値 開始点 (236, 0)	3000 年後	56
図 3.5-14 (b)	収束性の確認	V 解析法	期待値 開始点 (236, 0)	3000 年後	56
図 3.5-15 (a)	収束性の確認	K 解析法	期待値 開始点 (236, -100)	1000 年後	57
図 3.5-15 (b)	収束性の確認	V 解析法	期待値 開始点 (236, -100)	1000 年後	57
図 3.5-16 (a)	収束性の確認	K 解析法	期待値 開始点 (236, -100)	2000 年後	58
図 3.5-16 (b)	収束性の確認	V 解析法	期待値 開始点 (236, -100)	2000 年後	58
図 3.5-17 (a)	収束性の確認	K 解析法	期待値 開始点 (236, -100)	3000 年後	59
図 3.5-17 (b)	収束性の確認	V 解析法	期待値 開始点 (236, -100)	3000 年後	59
図 3.5-18 (a)	収束性の確認	K 解析法	期待値 開始点 (236, -100)	4000 年後	60
図 3.5-18 (b)	収束性の確認	V 解析法	期待値 開始点 (236, -100)	4000 年後	60
図 3.5-19 (a)	収束性の確認	K 解析法	期待値 開始点 (236, -100)	5000 年後	61
図 3.5-19 (b)	収束性の確認	V 解析法	期待値 開始点 (236, -100)	5000 年後	61
図 3.5-20 (a)	収束性の確認	K 解析法	期待値 開始点 (236, -200)	1000 年後	62
図 3.5-20 (b)	収束性の確認	V 解析法	期待値 開始点 (236, -200)	1000 年後	62
図 3.5-21 (a)	収束性の確認	K 解析法	期待値 開始点 (236, -200)	2000 年後	63
図 3.5-21 (b)	収束性の確認	V 解析法	期待値 開始点 (236, -200)	2000 年後	63
図 3.5-22 (a)	収束性の確認	K 解析法	期待値 開始点 (236, -200)	3000 年後	64
図 3.5-22 (b)	収束性の確認	V 解析法	期待値 開始点 (236, -200)	3000 年後	64
図 3.5-23 (a)	収束性の確認	K 解析法	期待値 開始点 (236, -200)	4000 年後	65
図 3.5-23 (b)	収束性の確認	V 解析法	期待値 開始点 (236, -200)	4000 年後	65
図 3.5-24 (a)	収束性の確認	K 解析法	期待値 開始点 (236, -200)	5000 年後	66
図 3.5-24 (b)	収束性の確認	V 解析法	期待値 開始点 (236, -200)	5000 年後	66
図 3.5-25 (a)	収束性の確認	K 解析法	期待値 開始点 (236, -200)	6000 年後	67
図 3.5-25 (b)	収束性の確認	V 解析法	期待値 開始点 (236, -200)	6000 年後	67

図 3.5-26(a)	収束性の確認	K解析法	期待値	開始点 (236, -200)	7000 年後	68
図 3.5-26(b)	収束性の確認	V解析法	期待値	開始点 (236, -200)	7000 年後	68
図 3.5-27(a)	収束性の確認	K解析法	期待値	開始点 (236, -200)	8000 年後	69
図 3.5-27(b)	収束性の確認	V解析法	期待値	開始点 (236, -200)	8000 年後	69
図 3.5-28(a)	収束性の確認	K解析法	期待値	開始点 (236, -200)	9000 年後	70
図 3.5-28(b)	収束性の確認	V解析法	期待値	開始点 (236, -200)	9000 年後	70
図 3.5-29(a)	収束性の確認	K解析法	期待値	開始点 (236, -200)	10000 年後	71
図 3.5-29(b)	収束性の確認	V解析法	期待値	開始点 (236, -200)	10000 年後	71
図 3.5-30(a)	収束性の確認	K解析法	期待値	開始点 (236, -200)	11000 年後	72
図 3.5-30(b)	収束性の確認	V解析法	期待値	開始点 (236, -200)	11000 年後	72
図 3.5-31(a)	収束性の確認	K解析法	期待値	開始点 (236, -200)	12000 年後	73
図 3.5-31(b)	収束性の確認	V解析法	期待値	開始点 (236, -200)	12000 年後	73
図 3.5-32(a)	収束性の確認	K解析法	期待値	開始点 (236, -200)	13000 年後	74
図 3.5-32(b)	収束性の確認	V解析法	期待値	開始点 (236, -200)	13000 年後	74
図 3.5-33(a)	収束性の確認	K解析法	期待値	開始点 (236, -200)	14000 年後	75
図 3.5-33(b)	収束性の確認	V解析法	期待値	開始点 (236, -200)	14000 年後	75
図 3.5-34(a)	収束性の確認	K解析法	期待値	開始点 (236, -200)	15000 年後	76
図 3.5-34(b)	収束性の確認	V解析法	期待値	開始点 (236, -200)	15000 年後	76
図 3.5-35(a)	収束性の確認	K解析法	期待値	開始点 (236, -300)	1000 年後	77
図 3.5-35(b)	収束性の確認	V解析法	期待値	開始点 (236, -300)	1000 年後	77
図 3.5-36(a)	収束性の確認	K解析法	期待値	開始点 (236, -300)	2000 年後	78
図 3.5-36(b)	収束性の確認	V解析法	期待値	開始点 (236, -300)	2000 年後	78
図 3.5-37(a)	収束性の確認	K解析法	期待値	開始点 (236, -300)	3000 年後	79
図 3.5-37(b)	収束性の確認	V解析法	期待値	開始点 (236, -300)	3000 年後	79
図 3.5-38(a)	収束性の確認	K解析法	期待値	開始点 (236, -300)	4000 年後	80
図 3.5-38(b)	収束性の確認	V解析法	期待値	開始点 (236, -300)	4000 年後	80
図 3.5-39(a)	収束性の確認	K解析法	期待値	開始点 (236, -300)	5000 年後	81
図 3.5-39(b)	収束性の確認	V解析法	期待値	開始点 (236, -300)	5000 年後	81
図 3.5-40(a)	収束性の確認	K解析法	期待値	開始点 (236, -300)	6000 年後	82
図 3.5-40(b)	収束性の確認	V解析法	期待値	開始点 (236, -300)	6000 年後	82
図 3.5-41(a)	収束性の確認	K解析法	期待値	開始点 (236, -300)	7000 年後	83
図 3.5-41(b)	収束性の確認	V解析法	期待値	開始点 (236, -300)	7000 年後	83
図 3.5-42(a)	収束性の確認	K解析法	期待値	開始点 (236, -300)	8000 年後	84
図 3.5-42(b)	収束性の確認	V解析法	期待値	開始点 (236, -300)	8000 年後	84
図 3.5-43(a)	収束性の確認	K解析法	期待値	開始点 (236, -300)	9000 年後	85
図 3.5-43(b)	収束性の確認	V解析法	期待値	開始点 (236, -300)	9000 年後	85

図 3.5-44 (a)	収束性の確認	K 解析法	期待値	開始点 (236, -300)	10000 年後	86
図 3.5-44 (b)	収束性の確認	V 解析法	期待値	開始点 (236, -300)	10000 年後	86
図 3.5-45 (a)	収束性の確認	K 解析法	期待値	開始点 (236, -300)	11000 年後	87
図 3.5-45 (b)	収束性の確認	V 解析法	期待値	開始点 (236, -300)	11000 年後	87
図 3.5-46 (a)	収束性の確認	K 解析法	期待値	開始点 (236, -300)	12000 年後	88
図 3.5-46 (b)	収束性の確認	V 解析法	期待値	開始点 (236, -300)	12000 年後	88
図 3.5-47 (a)	収束性の確認	K 解析法	期待値	開始点 (236, -300)	13000 年後	89
図 3.5-47 (b)	収束性の確認	V 解析法	期待値	開始点 (236, -300)	13000 年後	89
図 3.5-48 (a)	収束性の確認	K 解析法	期待値	開始点 (236, -300)	14000 年後	90
図 3.5-48 (b)	収束性の確認	V 解析法	期待値	開始点 (236, -300)	14000 年後	90
図 3.5-49 (a)	収束性の確認	K 解析法	標準偏差	開始点 (236, 0)	1000 年後	91
図 3.5-49 (b)	収束性の確認	V 解析法	標準偏差	開始点 (236, 0)	1000 年後	91
図 3.5-50 (a)	収束性の確認	K 解析法	標準偏差	開始点 (236, 0)	2000 年後	92
図 3.5-50 (b)	収束性の確認	V 解析法	標準偏差	開始点 (236, 0)	2000 年後	92
図 3.5-51 (a)	収束性の確認	K 解析法	標準偏差	開始点 (236, 0)	3000 年後	93
図 3.5-51 (b)	収束性の確認	V 解析法	標準偏差	開始点 (236, 0)	3000 年後	93
図 3.5-52 (a)	収束性の確認	K 解析法	標準偏差	開始点 (236, -100)	1000 年後	94
図 3.5-52 (b)	収束性の確認	V 解析法	標準偏差	開始点 (236, -100)	1000 年後	94
図 3.5-53 (a)	収束性の確認	K 解析法	標準偏差	開始点 (236, -100)	2000 年後	95
図 3.5-53 (b)	収束性の確認	V 解析法	標準偏差	開始点 (236, -100)	2000 年後	95
図 3.5-54 (a)	収束性の確認	K 解析法	標準偏差	開始点 (236, -100)	3000 年後	96
図 3.5-54 (b)	収束性の確認	V 解析法	標準偏差	開始点 (236, -100)	3000 年後	96
図 3.5-55 (a)	収束性の確認	K 解析法	標準偏差	開始点 (236, -100)	4000 年後	97
図 3.5-55 (b)	収束性の確認	V 解析法	標準偏差	開始点 (236, -100)	4000 年後	97
図 3.5-56 (a)	収束性の確認	K 解析法	標準偏差	開始点 (236, -100)	5000 年後	98
図 3.5-56 (b)	収束性の確認	V 解析法	標準偏差	開始点 (236, -100)	5000 年後	98
図 3.5-57 (a)	収束性の確認	K 解析法	標準偏差	開始点 (236, -200)	1000 年後	99
図 3.5-57 (b)	収束性の確認	V 解析法	標準偏差	開始点 (236, -200)	1000 年後	99
図 3.5-58 (a)	収束性の確認	K 解析法	標準偏差	開始点 (236, -200)	2000 年後	100
図 3.5-58 (b)	収束性の確認	V 解析法	標準偏差	開始点 (236, -200)	2000 年後	100
図 3.5-59 (a)	収束性の確認	K 解析法	標準偏差	開始点 (236, -200)	3000 年後	101
図 3.5-59 (b)	収束性の確認	V 解析法	標準偏差	開始点 (236, -200)	3000 年後	101
図 3.5-60 (a)	収束性の確認	K 解析法	標準偏差	開始点 (236, -200)	4000 年後	102
図 3.5-60 (b)	収束性の確認	V 解析法	標準偏差	開始点 (236, -200)	4000 年後	102
図 3.5-61 (a)	収束性の確認	K 解析法	標準偏差	開始点 (236, -200)	5000 年後	103
図 3.5-61 (b)	収束性の確認	V 解析法	標準偏差	開始点 (236, -200)	5000 年後	103

図 3.5-62(a)	収束性の確認	K解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	6000年後	104
図 3.5-62(b)	収束性の確認	V解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	6000年後	104
図 3.5-63(a)	収束性の確認	K解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	7000年後	105
図 3.5-63(b)	収束性の確認	V解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	7000年後	105
図 3.5-64(a)	収束性の確認	K解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	8000年後	106
図 3.5-64(b)	収束性の確認	V解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	8000年後	106
図 3.5-65(a)	収束性の確認	K解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	9000年後	107
図 3.5-65(b)	収束性の確認	V解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	9000年後	107
図 3.5-66(a)	収束性の確認	K解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	10000年後	108
図 3.5-66(b)	収束性の確認	V解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	10000年後	108
図 3.5-67(a)	収束性の確認	K解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	11000年後	109
図 3.5-67(b)	収束性の確認	V解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	11000年後	109
図 3.5-68(a)	収束性の確認	K解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	12000年後	110
図 3.5-68(b)	収束性の確認	V解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	12000年後	110
図 3.5-69(a)	収束性の確認	K解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	13000年後	111
図 3.5-69(b)	収束性の確認	V解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	13000年後	111
図 3.5-70(a)	収束性の確認	K解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	14000年後	112
図 3.5-70(b)	収束性の確認	V解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	14000年後	112
図 3.5-71(a)	収束性の確認	K解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	15000年後	113
図 3.5-71(b)	収束性の確認	V解析法	標準偏差	開始点(236, -200)	15000年後	113
図 3.5-72(a)	収束性の確認	K解析法	標準偏差	開始点(236, -300)	1000年後	114
図 3.5-72(b)	収束性の確認	V解析法	標準偏差	開始点(236, -300)	1000年後	114
図 3.5-73(a)	収束性の確認	K解析法	標準偏差	開始点(236, -300)	2000年後	115
図 3.5-73(b)	収束性の確認	V解析法	標準偏差	開始点(236, -300)	2000年後	115
図 3.5-74(a)	収束性の確認	K解析法	標準偏差	開始点(236, -300)	3000年後	116
図 3.5-74(b)	収束性の確認	V解析法	標準偏差	開始点(236, -300)	3000年後	116
図 3.5-75(a)	収束性の確認	K解析法	標準偏差	開始点(236, -300)	4000年後	117
図 3.5-75(b)	収束性の確認	V解析法	標準偏差	開始点(236, -300)	4000年後	117
図 3.5-76(a)	収束性の確認	K解析法	標準偏差	開始点(236, -300)	5000年後	118
図 3.5-76(b)	収束性の確認	V解析法	標準偏差	開始点(236, -300)	5000年後	118
図 3.5-77(a)	収束性の確認	K解析法	標準偏差	開始点(236, -300)	6000年後	119
図 3.5-77(b)	収束性の確認	V解析法	標準偏差	開始点(236, -300)	6000年後	119
図 3.5-78(a)	収束性の確認	K解析法	標準偏差	開始点(236, -300)	7000年後	120
図 3.5-78(b)	収束性の確認	V解析法	標準偏差	開始点(236, -300)	7000年後	120
図 3.5-79(a)	収束性の確認	K解析法	標準偏差	開始点(236, -300)	8000年後	121
図 3.5-79(b)	収束性の確認	V解析法	標準偏差	開始点(236, -300)	8000年後	121

図 3.5-80 (a)	収束性の確認	K 解析法	標準偏差	開始点 (236, -300)	9000 年後	122
図 3.5-80 (b)	収束性の確認	V 解析法	標準偏差	開始点 (236, -300)	9000 年後	122
図 3.5-81 (a)	収束性の確認	K 解析法	標準偏差	開始点 (236, -300)	10000 年後	123
図 3.5-81 (b)	収束性の確認	V 解析法	標準偏差	開始点 (236, -300)	10000 年後	123
図 3.5-82 (a)	収束性の確認	K 解析法	標準偏差	開始点 (236, -300)	11000 年後	124
図 3.5-82 (b)	収束性の確認	V 解析法	標準偏差	開始点 (236, -300)	11000 年後	124
図 3.5-83 (a)	収束性の確認	K 解析法	標準偏差	開始点 (236, -300)	12000 年後	125
図 3.5-83 (b)	収束性の確認	V 解析法	標準偏差	開始点 (236, -300)	12000 年後	125
図 3.5-84 (a)	収束性の確認	K 解析法	標準偏差	開始点 (236, -300)	13000 年後	126
図 3.5-84 (b)	収束性の確認	V 解析法	標準偏差	開始点 (236, -300)	13000 年後	126
図 3.5-85 (a)	収束性の確認	K 解析法	標準偏差	開始点 (236, -300)	14000 年後	127
図 3.5-85 (b)	収束性の確認	V 解析法	標準偏差	開始点 (236, -300)	14000 年後	127
図 3.5-86	到達点期待値の比較	開始点 (236, 0)				131
図 3.5-87	到達点期待値の比較	開始点 (236, -100)				132
図 3.5-88	到達点期待値の比較	開始点 (236, -200)				133
図 3.5-89	到達点期待値の比較	開始点 (236, -300)				134
図 3.5-90	移行距離の比較	開始点 (236, 0)				135
図 3.5-91	移行距離の比較	開始点 (236, -100)				136
図 3.5-92	移行距離の比較	開始点 (236, -200)				137
図 3.5-93	移行距離の比較	開始点 (236, -300)				138
図 3.5-94	到達点分散の比較	開始点 (236, 0)				139
図 3.5-95	到達点分散の比較	開始点 (236, -100)				140
図 3.5-96	到達点分散の比較	開始点 (236, -200)				141
図 3.5-97	到達点分散の比較	開始点 (236, -300)				142
図 3.5-98	解析時間の比較					143
図 4-1	解析領域の概要					147
図 4-2	解析に使用した不飽和特性曲線					148
図 4-3	透水係数の期待値					150
図 4-4	透水係数の変動係数					151
図 4-5	全水頭の期待値					153
図 4-6	全水頭の標準偏差					154
図 4-7	流速ベクトルの期待値					155
図 4-8	流量の期待値, 標準偏差					156
図 4-9 (a)	移行到達位置	始点 (0, 0, 0)	確率 FEM			159
図 4-9 (b)	移行到達位置	始点 (0, 0, 0)	V 解析法			160
図 4-10 (a)	移行到達位置	始点 (0, 0, -200)	確率 FEM			161

図 4-10 (b)	移行到達位置	始点 (0, 0, -200)	√解析法	162
図 4-11 (a)	移行到達位置	始点 (0, 40, 0)	確率 FEM	163
図 4-11 (b)	移行到達位置	始点 (0, 40, 0)	√解析法	164
図 4-12 (a)	移行到達位置	始点 (0, 40, -200)	確率 FEM	165
図 4-12 (b)	移行到達位置	始点 (0, 40, -200)	√解析法	166
図 4-13 (a)	移行到達位置	始点 (0, 0, 10)	確率 FEM	168
図 4-13 (b)	移行到達位置	始点 (0, 0, 10)	√解析法	169
図 4-14	任意点から指定面までの期待値と分散の概念図			171
図 4-15 (a)	移行到達時間	始点 (0, 0, 0)	期待値	173
図 4-15 (b)	移行到達時間	始点 (0, 0, 0)	標準偏差	173
図 4-16 (a)	移行到達時間	始点 (0, 0, -200)	期待値	174
図 4-16 (b)	移行到達時間	始点 (0, 0, -200)	標準偏差	174
図 4-17 (a)	移行到達時間	始点 (0, 40, 0)	期待値	175
図 4-17 (b)	移行到達時間	始点 (0, 40, 0)	標準偏差	175
図 4-18 (a)	移行到達時間	始点 (0, 40, -200)	期待値	176
図 4-18 (b)	移行到達時間	始点 (0, 40, -200)	標準偏差	176
図 A-1	解析の概略的な流れ			付-1 (2)
図 A-2	作業進行状況の表示ダイアログボックス			付-1 (4)
図 A-3	サブフォルダ自動作成の通知ダイアログボックス			付-1 (4)
図 A-4	経験的バリオグラムおよび球モデルフィッティングの画面表示例			付-1 (6)
図 A-5	不飽和特性割り当てダイアログボックス			付-1 (7)
図 A-6	流れ場の計算に使用するデータ選択ダイアログボックス			付-1 (7)
図 A-7	計算実行ダイアログボックス			付-1 (8)
図 A-8	計算終了の通知ダイアログボックス			付-1 (8)
図 A-9	収束判定条件の設定ダイアログボックス			付-1 (8)
図 A-10	トレース計算に使用するデータ選択ダイアログボックス			付-1 (9)
図 A-11	移行到達位置トレース計算の条件入力ダイアログボックス			付-1 (10)
図 A-12	移行到達時間トレース計算の条件入力ダイアログボックス			付-1 (11)
図 A-13	到達面の設定ダイアログボックス			付-1 (12)
図 A-14	input.dat 作成例			付-1 (15)
図 A-15	面番号の定義			付-1 (31)

1. はじめに

「第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構，1999）」以後の地層処分技術に関する研究開発段階においては，実際の地質環境データに基づいて水理地質構造モデルを構築し，地下水流動特性や地下水移行経路を評価するとともに，その評価結果に基づく安全評価体系の整備が重要となっている。特に，地上からの調査研究段階では，地表踏査や試錐孔等の調査試験データを用いることになるため，安全評価のベースとなる水理地質構造モデルやそのモデルを用いた解析結果（例えば，地下水流動解析や移行経路解析）の信頼性は，地表踏査や試錐孔等で実施された限られた調査試験のデータに依存する。そのため，安全評価体系の整備に際しては地質構造モデルやそのモデルを用いた解析結果の不確実性を適切に評価することが求められている。

上記の背景に対して，地下水流動解析に必要な調査試験データや解析で求められる値の空間的なバラツキの定量化を目的として，2003年度に以下の検討を行った。

- ・透水係数設定方法の整理と分散の定量化手法の検討
- ・確率論による浸透流解析に基づく評価項目のバラツキの定量化手法の開発
- ・二次元鉛直断面における事例検討

さらに，上記の検討結果をもとに，2次元鉛直断面を対象とした浸透流解析プログラム（以下，2次元プログラム）を開発した。2次元プログラムはクリギング等により未知空間の透水係数の平均値および分散が推定でき，確率有限要素法により水頭や流速の平均値および分散を推定することができる。また，任意点からの地下水流れの到達点とそのバラツキも評価でき，安全評価体系の整備に資すると考えられる。2次元プログラムの主たる課題として，以下の2点が挙げられる。

①任意点からの地下水流れの到達点のバラツキ評価の検証

任意点からの地下水流れの到達点のバラツキ評価の基本的な概念は，確率有限要素法により推定した流速ベクトルの大きさのバラツキを地下水流れの経路で加算する方法となっている。この手法によれば，計算上到達点のバラツキは評価できるが，数学的にどの程度の誤差を伴うものであるかの検証はなされていない。そのため，数学的に認知された他の手法により解析結果の妥当性を検証する必要がある。

②2次元プログラムの3次元化

2次元鉛直断面内での検討では，断面に垂直な方向の浸透流を考慮することができないため，解析結果は実際の地下水流れと異なると考えられる。地層処分の物質移行に関して地下水流れを検討する際には，3次元的な広がりや考慮できる浸透流解析が必要となる。そのため，2次元プログラムを3次元化する必要がある。

本業務では，上記2点の課題に対応した検討を行い，2次元プログラムの改良を行うことを目的とした。

2. 対象データの概要

本研究では岐阜県東濃地域にある「深地層研究所計画用地：MIU サイト」（動力炉・核燃料開発事業団，1997；核燃料サイクル開発機構，2001）を解析対象領域とし，MIU-1～4号孔の透水係数データを使用した解析を行った。

MIU-1～4号孔の孔口の平面配置を図2-1に示す。図中には，各孔の坑口標高も併記している。MIU-1号孔～3号孔はほぼ直線状に配置されており，鉛直方向に掘削されている。一方，MIU-4号孔は方位N25Eで垂直から30度の傾斜で掘削されている。

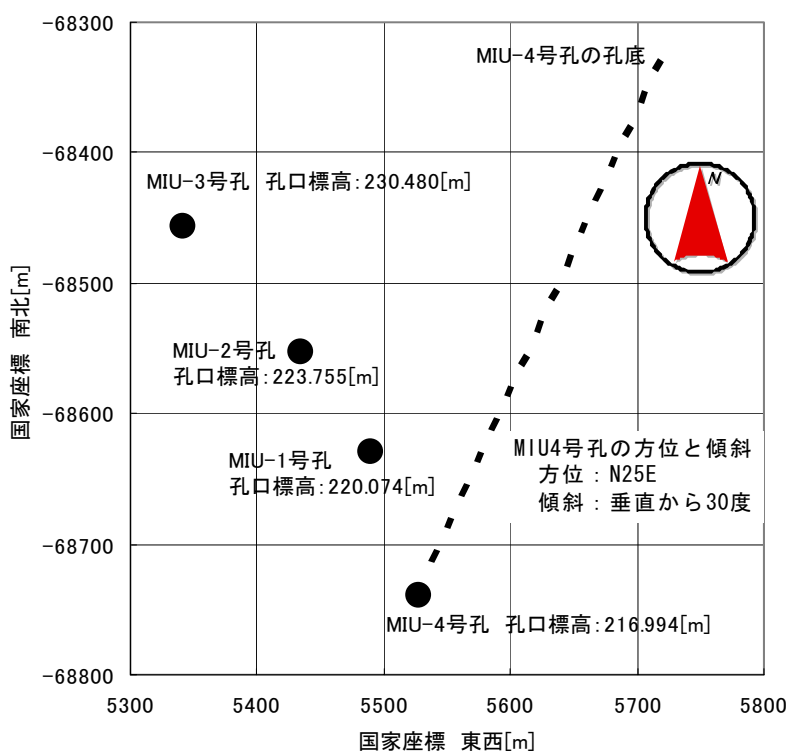


図 2-1 MIU-1～4号孔の配置図

図 2-2 には、各孔別の透水係数を示す。MIU-1 号孔と MIU-2 号孔の透水係数は約 10^{-12} [m/sec]~ 10^{-5} [m/sec]に分布していた。MIU-3 号孔は 10^{-10} [m/sec]~ 10^{-5} [m/sec]に分布しており、MIU-1 号孔 2 号孔と比較すると分布の幅が小さかった。MIU-4 号孔は、 10^{-11} [m/sec]~ 10^{-5} [m/sec]に分布していた。

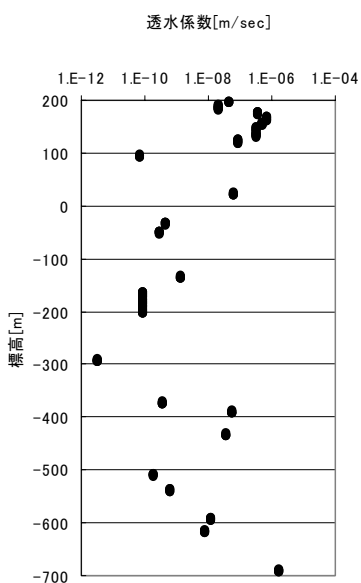


図 2-2(a) 透水係数 MIU-1 号孔

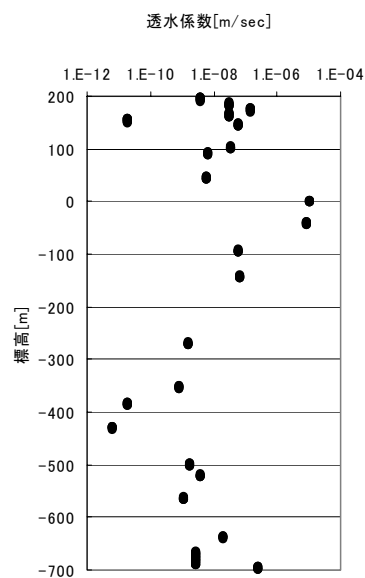


図 2-2(b) 透水係数 MIU-2 号孔

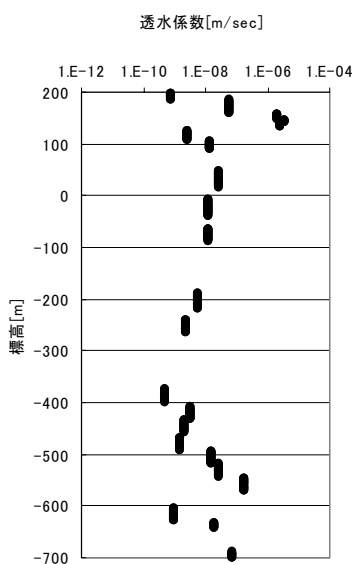


図 2-2(c) 透水係数 MIU-3 号孔

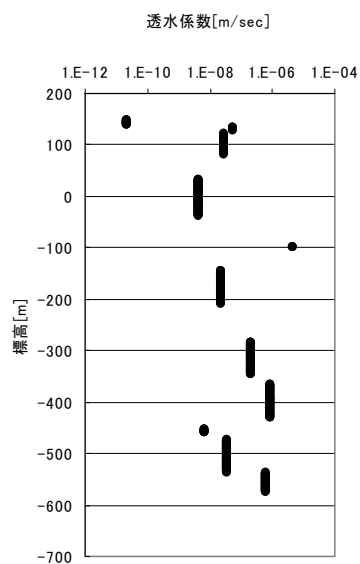


図 2-2(d) 透水係数 MIU-4 号孔

3. 2次元プログラムの地下水流れ到達点の検証

3. 1 確率有限要素法による浸透流解析

2次元プログラムによる解析の流れを図3.1-1に示す。2次元プログラムでは、クリギングなどによる未知領域透水係数の推定と確率有限要素法による浸透流解析を行っている。ここでは、確率有限要素法による浸透流解析について説明する。

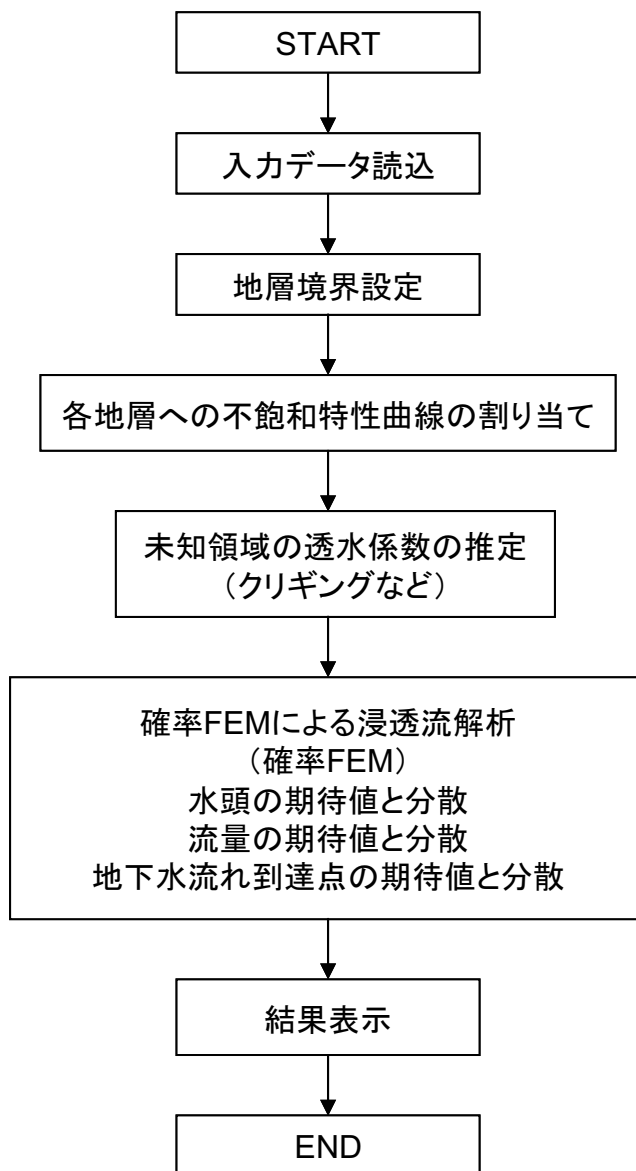


図 3.1-1 2次元プログラムの解析フロー

(1) 線形一次近似理論

飽和・不飽和定常浸透流問題は有限要素法を導入することにより、次式で表される。

$$[K]\{h\} = \{q\} \quad (3.1-1)$$

ここに、 $[K]$ は浸透マトリクス、 $\{h\}$ は節点全水頭ベクトル、 $\{q\}$ は節点流量ベクトルであり、 $[K]$ がM個の不確定要因 $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M\} \equiv \alpha$ の関数であるとするれば、 $\{h\}$ も α の関数となる。

$$h_i = h_i(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M) \equiv h_i(\alpha) \quad (3.1-2)$$

ここに、 h_i は節点iの全水頭を表す。 h_i を α についてマクローリン展開し、その2次以上の高次項を無視する近似(1次近似)をすると次式となる。

$$\begin{aligned} h_i &\cong h_{i(0,0,\dots,0)} + \sum \frac{\partial h_i}{\partial \alpha_m (0,0,\dots,0)} \alpha_m \\ &\equiv h_{i(0)} + \sum \frac{\partial h_i}{\partial \alpha_m (0)} \alpha_m \end{aligned} \quad (3.1-3)$$

ここで、 $\partial h_i / \partial \alpha_m (0)$ は、偏導関数 $\partial h_i / \partial \alpha_m$ の $\alpha = \{0, 0, \dots, 0\} = \mathbf{0}$ における値である。以下では、全ての α_m の期待値が零であると仮定する。さらに式の簡略化のため、それぞれの不確定要因は互いに独立であるとする。このとき、 h_i の期待値と分散は次式で与えられる。

$$E[h_i] \cong E \left[h_{i(0)} + \sum \frac{\partial h_i}{\partial \alpha_m (0)} \alpha_m \right] = h_{i(0)} + \sum \frac{\partial h_i}{\partial \alpha_m (0)} E[\alpha_m] = h_{i(0)} \quad (3.1-4)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[h_i] &\cong E[(h_i - E[h_i])^2] \cong E \left[\left(\sum \frac{\partial h_i}{\partial \alpha_m (0)} \alpha_m \right)^2 \right] \\ &= \sum \sum \frac{\partial h_i}{\partial \alpha_m (0)} \frac{\partial h_i}{\partial \alpha_n (0)} \text{Cov}[\alpha_m, \alpha_n] \\ &= \sum \left(\frac{\partial h_i}{\partial \alpha_m (0)} \right)^2 \text{Var}[\alpha_m] \end{aligned} \quad (3.1-5)$$

節点iの流量 q_i についても同様に次式で与えられる。

$$q_i = q_i(\alpha) \cong q_{i(0)} + \sum \frac{\partial q_i}{\partial \alpha_m (0)} \alpha_m \quad (3.1-6)$$

$$E[q_i] \cong q_{i(0)} \quad (3.1-7)$$

$$\text{Var}[q_i] \cong \sum \left(\frac{\partial q_i}{\partial \alpha_m (0)} \right)^2 \text{Var}[\alpha_m] \quad (3.1-8)$$

$$\text{Cov}[q_i, q_j] = \sum \frac{\partial q_i}{\partial \alpha_m (0)} \frac{\partial q_j}{\partial \alpha_m (0)} \text{Var}[\alpha_m] \quad (3.1-9)$$

要素eの流速ベクトルのx方向成分 v_{xe} 、y方向成分 v_{ye} および流速の大きさ $|v|_e$ についても同様に、それぞれの期待値、分散および共分散が一次近似式で与えられる。ここに、 x, y

は基準座標を表す。以下に主なものを示す。

$$v_{xe} = v_{xe}(\boldsymbol{\alpha}) \cong v_{xe}(\mathbf{0}) + \sum \frac{\partial v_{xe}}{\partial \alpha_m(\mathbf{0})} \alpha_m \quad (3.1-10)$$

$$E[v_{xe}] \cong v_{xe}(\mathbf{0}) \quad (3.1-11)$$

$$\text{Var}[v_{xe}] \cong \sum \left(\frac{\partial v_{xe}}{\partial \alpha_m(\mathbf{0})} \right)^2 \text{Var}[\alpha_m] \quad (3.1-12)$$

$$|v|_e = |v|_e(\boldsymbol{\alpha}) \cong |v|_e(\mathbf{0}) + \sum \frac{\partial |v|_e}{\partial \alpha_m(\mathbf{0})} \alpha_m \quad (3.1-13)$$

$$E|v|_e \cong |v|_e(\mathbf{0}) \quad (3.1-14)$$

$$\text{Var}[|v|_e] \cong \sum \left(\frac{\partial |v|_e}{\partial \alpha_m(\mathbf{0})} \right)^2 \text{Var}[\alpha_m] \quad (3.1-15)$$

ここに、

$$|v|_e = (v_{xe}^2 + v_{ye}^2)^{1/2} \quad (3.1-16)$$

$$\frac{\partial |v|_e}{\partial \alpha_m} = \left\{ v_{xe} \frac{\partial v_{xe}}{\partial \alpha_m} + v_{ye} \frac{\partial v_{ye}}{\partial \alpha_m} \right\} (v_{xe}^2 + v_{ye}^2)^{-1/2} \quad (3.1-17)$$

全節点の合計流入量 Q_{in} を

$$Q_{in} = \sum q_i \quad ; \text{ただし, } E[q_i] > 0 \quad (3.1-18)$$

で定義すれば、合計流入量の期待値と分散も一次近似式で表される。

$$E[Q_{in}] = \sum E[q_i] \cong \sum q_{i(\mathbf{0})} \quad ; \text{ただし, } E[q_i] > 0 \quad (3.1-19)$$

$$\text{Var}[Q_{in}] = \sum \sum \text{Cov}[q_i, q_j] \cong \sum \left[\sum \frac{\partial q_i}{\partial \alpha_m(\mathbf{0})} \right]^2 \text{Var}[\alpha_m] \quad (3.1-20)$$

; ただし, $E[q_i] > 0$, $E[q_j] > 0$

全節点の合計流出量 Q_{out} についても同様に、一次近似式で表される。

以上に示したように、節点の水頭と流量、要素内の流速および全節点の合計流出入量の期待値は、 $\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{0}$ において式 (3.1-1) を解くことによって求められる。これらの分散や共分散を求めるには、以下に示す偏導関数の $\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{0}$ における値が必要となる。

$$\frac{\partial \{h\}}{\partial \alpha_m(\mathbf{0})}, \frac{\partial \{q\}}{\partial \alpha_m(\mathbf{0})}, \frac{\partial \{v\}}{\partial \alpha_m(\mathbf{0})} \quad ; m = 1, 2, \dots, M \quad (3.1-21)$$

(2) 偏導関数の算出

ここでは、式 (3.1-21) に示した偏導関数の算出方法を示す。

浸透マトリックス $[K]$ は次式で表される。

$$[K] = \sum \int [B]^T [D][B] dV \quad (3.1-22)$$

ここに、 $[D]$ および $[B]$ は基準座標系に対する要素 e 内の流速と動水勾配を関係付けるマトリックスおよび動水勾配と節点全水頭を関係付けるマトリックス、 V は要素 e の領域を表す。要素 e の全水頭 h は形状関数 (内挿関数) $[\psi]$ と節点全水頭によって $h = [\psi]\{h\}$ で与えられるから、

$$\frac{\partial h}{\partial \alpha_m} = [\psi] \frac{\partial \{h\}}{\partial \alpha_m} \quad (3.1-23)$$

が成り立つ。ただし、 $[B]$ および $[\psi]$ は座標のみの関数であり、確定量であるとする。 $[D]$ が次式のように表されるものとする。

$$[D] = \beta \cdot r \cdot [\bar{D}] \quad (3.1-24)$$

ここで、 β は透水係数のばらつきを表すパラメータで α_m の関数、 r は圧力水頭 φ に依存する透水係数の非線形性を表すパラメータで φ の関数、 $[\bar{D}]$ は確定量であるとする。このとき、次式が導かれる。

$$\frac{\partial [D]}{\partial \alpha_m} = \frac{\partial \beta}{\partial \alpha_m} \frac{\partial [D]}{\partial \beta} + \frac{\partial r}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial \alpha_m} \frac{\partial [D]}{\partial r} = \frac{\partial \beta}{\partial \alpha_m} \frac{\partial [D]}{\partial \beta} + \frac{\partial r}{\partial \varphi} [\psi] \frac{\partial \{h\}}{\partial \alpha_m} \frac{\partial [D]}{\partial r} \quad (3.1-25)$$

次に、式 (3.1-1) の両辺を α_m で偏微分することにより次式を得る。

$$\frac{\partial [K]}{\partial \alpha_m} \{h\} + [K] \frac{\partial \{h\}}{\partial \alpha_m} = \frac{\partial \{q\}}{\partial \alpha_m} \quad (3.1-26)$$

ここで、上式の第1項は、式 (3.1-22)、(3.1-23) より以下のように表される。

$$\frac{\partial [K]}{\partial \alpha_m} \{h\} = [K'_\beta] \{h\} + [K'_r] \frac{\partial \{h\}}{\partial \alpha_m} \quad (3.1-27)$$

ここに、

$$[K'_\beta] = \sum \frac{\partial \beta}{\partial \alpha_m} \int [B]^T \frac{\partial [D]}{\partial \beta} [B] dV \quad (3.1-28)$$

$$[K'_r] = \sum \int [B]^T \frac{\partial [D]}{\partial r} [B] \{h\} \frac{\partial r}{\partial \varphi} [\psi] dV \quad (3.1-29)$$

これより、式 (3.1-26) は次式となる。

$$[[K]_{(\alpha)} + [K'_r]_{(\alpha)}] \frac{\partial \{h\}}{\partial \alpha_m (\alpha)} = \frac{\partial \{q\}}{\partial \alpha_m (\alpha)} - [K'_\beta]_{(\alpha)} \{h\}_{(\alpha)} \quad (3.1-30)$$

従って、偏導関数 $\partial \{h\} / \partial \alpha_m$ の $\alpha = \mathbf{0}$ における値は次式によって算出できる。

$$\frac{\partial \{h\}}{\partial \alpha_m (\mathbf{0})} = [[K]_{(\mathbf{0})} + [K'_r]_{(\mathbf{0})}]^{-1} \left\{ \frac{\partial \{q\}}{\partial \alpha_m (\mathbf{0})} - [K'_\beta]_{(\mathbf{0})} \{h\}_{(\mathbf{0})} \right\} \quad (3.1-31)$$

同様に、偏導関数 $\partial\{q\}/\partial\alpha_m$ の $\alpha=0$ における値は次式によって算出できる。

$$\frac{\partial\{q\}}{\partial\alpha_m(0)} = \left[[K]_{(0)} + [K'_r]_{(0)} \right] \frac{\partial\{h\}}{\partial\alpha_m(0)} + [K'_\beta]_{(0)} \{h\}_{(0)} \quad (3.1-32)$$

ただし、節点 i が

$$\begin{aligned} \text{水頭固定境界にあるとき} &: h_i = \bar{h}_i, \partial h_i / \partial \alpha_m = 0 \\ \text{流量固定境界にあるとき} &: q_i = \bar{q}_i, \partial q_i / \partial \alpha_m = 0 \\ \text{領域の内部にあるとき} &: q_i = 0, \partial q_i / \partial \alpha_m = 0 \end{aligned} \quad (3.1-33)$$

要素 e の流速ベクトルについても同様に偏導関数 $\partial\{v\}/\partial\alpha_m$ の $\alpha=0$ における値が算出できる。

以上のようにして、 $\partial\{h\}/\partial\alpha_m, \partial\{q\}/\partial\alpha_m, \partial\{v\}/\partial\alpha_m$ の $\alpha=0$ における値を求めることにより、 h (節点水頭)、 q (節点流量)、 v (要素流速)、 Q (全節点の合計流出入量) についてのその分散を算出することができる。

(3) 構成則と確率変数

流れはダルシー則に従い透水特性は等方性であるとする、流速と動水勾配を関係付ける構成式が次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I_x \\ I_y \end{Bmatrix} \quad (3.1-34)$$

ここに、 v_x, v_y は流速ベクトルの x, y 方向成分、 k は透水係数、 I_x, I_y は動水勾配ベクトルの x, y 方向成分である。ここでは、飽和していない場合の流れも考慮するため、透水係数を次式で表す。

$$k = k_{sat} \cdot r \quad (3.1-35)$$

ここに、 k_{sat} は飽和時の透水係数、 r は (不飽和/飽和) 比透水係数パラメータであり圧力水頭 ϕ の関数として与えられる無次元量である。

飽和・不飽和定常浸透流の決定論的解析において、結果に最も大きな影響を及ぼす材料特性値は飽和時の透水係数である。そして、飽和時の透水係数を実際に測定するとバラツキが存在する。現実の地盤は異方性であると思われるが、多くの地点で主方向ごとの透水係数やバラツキ具合を調査することは不可能に近い。不飽和特性についても同様である。

従ってここでは、前提条件として、 r は圧力水頭 ϕ の関数として確定的に与えられるとし、飽和時の透水係数が次式で与えられるものとする。

$$k_{sat} = \bar{k}_{sat} \cdot \beta \quad (3.1-36)$$

ここに、 \bar{k}_{sat} は飽和透水係数の平均値、 β は確率変数 α の関数として与えられる無次元量であり、飽和透水係数が正規分布に従うとき (対数正規分布に従う場合については省略) それぞれ次式で定義する。

$$\begin{aligned} \bar{k}_{sat} &= \mu, & \beta &= \beta(\alpha) = 1 + \alpha \\ \alpha &= (k_{sat} - \mu) / \mu \end{aligned} \quad (3.1-37)$$

ここに、 α は正規分布に従う確率変数(無次元量)であり、その期待値は零である($E[\alpha]=0$)。このように定義すると、次の関係が成り立つ

$$\text{Var}[\alpha] = (\sigma / \mu)^2 = \nu^2 \quad (3.1-38)$$

ここに、材料定数 μ, σ および ν は、飽和透水係数の平均値、標準偏差および変動係数をそれぞれ表す。

以上より、透水マトリックス $[D]$ は式 (3.1-39) のようになる ($[D] = \beta \cdot r \cdot [\bar{D}]$)。ここに、 $[\bar{D}]$ は確定量であり次式で表される。

$$[\bar{D}] = \begin{bmatrix} \bar{k} & 0 \\ 0 & \bar{k} \end{bmatrix} \quad (3.1-39)$$

さて、定義式 (3.1-37) によれば、飽和透水係数が正規分布に従う場合、 $\alpha=0$ のとき $\beta=1, \partial\beta/\partial\alpha=1$ となる。よって、 $[D]$ の偏導関数 $\partial[D]/\partial\beta$ および $\partial[D]/\partial r$ の $\alpha=0$ における値は次式で表される。

$$\frac{\partial[D]}{\partial\beta} \Big|_{(\alpha=0)} \frac{\partial\beta}{\partial\alpha} \Big|_{(\alpha=0)} = r_{(\varphi(\alpha=0))} \cdot [\bar{D}] \quad (3.1-40)$$

$$\frac{\partial[D]}{\partial r} \Big|_{(\alpha=0)} = [\bar{D}] \quad (3.1-41)$$

(4) 不飽和特性

不飽和特性については、飽和度 S と圧力水頭 φ の関係が式(3.1-42)と式(3.1-43)で、飽和度 S と比透水係数 r の関係が式(3.1-44)で、それぞれ表されるものとする。

$$\frac{S - S_r}{100 - S_r} = \text{sech} \frac{\varphi - \varphi_c}{a} \quad \varphi \leq \varphi_c \quad \text{のとき} \quad (3.1-42)$$

$$S = 100 \quad \varphi \geq \varphi_c \quad \text{のとき} \quad (3.1-43)$$

$$r = \left(\frac{S - S_k}{100 - S_k} \right)^b \quad (3.1-44)$$

ただし、 S は飽和度(0~100%)、 S_r は残留飽和度、 φ は圧力水頭、 φ_c は限界毛管水頭(0 以下)、 r は比透水係数(=現在の透水係数/飽和時の透水係数)、 a は土質定数(0 以上)、 S_k は土質定数($S_k \leq S_r$)、 b は土質定数(3~4)である。

(5) 任意点からの地下水流れの到達位置とその分散

ある位置 O にあった地下水が時間 t だけ移行した後の位置を P とする。位置 O を原点として図 3.1-2 に示すように X, Y 軸をとると、位置 P の座標 (X_t, Y_t) は次式で表される。

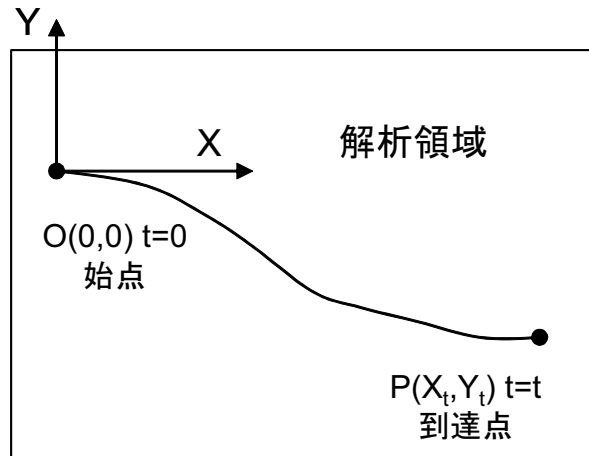


図 3.1-2 解析領域での任意点からの地下水流れの模式図

$$\begin{Bmatrix} X_t \\ Y_t \end{Bmatrix} = \int_0^t \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix} dt \quad (3.1-45)$$

以下では、 X_t の期待値と分散を求める手法について記述する。なお、 Y_t も同様な手法で算出できる。

まず、 $0 \sim t$ を微小な時間間隔 Δt で Nt 等分($\Delta t = t/Nt$)すれば、式(3.1-45)右辺の時間積分は次式に示すように、離散化された総和式で近似できる。

$$X_t = \int_0^t v_x dt \cong \Delta t \sum_{i=1}^{Nt} v_{x((i-1)\Delta t)} \quad (3.1-46)$$

式(3.1-46)について一次近似法を適用すると式(3.1-47)のようになり、到達点PのX座標の期待値と分散が式(3.1-48)、式(3.1-49)で算出できる。

$$X_t \cong \Delta t \sum_{i=1}^{Nt} v_{x((i-1)\Delta t)}(\alpha=0) + \Delta t \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{Nt} \frac{\partial v_x}{\partial \alpha_m} \Big|_{((i-1)\Delta t)(\alpha=0)} \cdot \alpha_m \quad (3.1-47)$$

$$E[X_t] \cong \Delta t \sum_{i=1}^{Nt} v_{x((i-1)\Delta t)}(\alpha=0) \quad (3.1-48)$$

$$\text{Var}[X_t] \cong (\Delta t)^2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \left\{ \sum_{i=1}^{Nt} \frac{\partial v_x}{\partial \alpha_m} \Big|_{((i-1)\Delta t)(\alpha=0)} \right\} \left\{ \sum_{j=1}^{Nt} \frac{\partial v_x}{\partial \alpha_n} \Big|_{((j-1)\Delta t)(\alpha=0)} \right\} \text{Cov}[\alpha_m, \alpha_n] \quad (3.1-49)$$

いま、解析対象領域を有限要素で分割し、ある1つの要素e内では地下水の流速ベクトルおよび α に関する流速ベクトルの偏微分がそれぞれ一定であるとして、それぞれ式(3.1-50)、式(3.1-51)が成立すると仮定する。

$$v_x = v_{x(e)} \quad (3.1-50)$$

3. 2 2次元プログラムの検証方法の概要

2次元プログラムによる地下水流れ到達点の不確実性評価の妥当性について検討するため、モンテカルロ法による検証を行った。以下にその検証方法を概説する。

(1) 透水係数のバラツキに着目した検証方法 (K解析法)

K解析法は、クリギングにより推定した未知領域の透水係数に対してモンテカルロ法を適用することで移行到達点の不実性を評価する検証方法である。

いま、各要素の透水係数の推定値 Z_k とその分散 σ_E^2 がわかっている。正規乱数 N_I を使用して、式(3.2-1)に示すように、各要素の n 試行回数での透水係数 $k(n)$ を求める。

$$k(n) = Z_k + N_I \cdot \sigma_E \quad (3.2-1)$$

その後浸透流解析を行い、各要素の流速ベクトルを算出するとともに、この流速ベクトルをもとに、ある地点からの移行到達点を粒子追跡法で算出した。これを所定の試行回数繰り返し、移行到達点を複数点プロットして、その分布から移行到達点の不確実性を評価した。この手法により移行到達点の不確実性は評価できるが、試行回数分の浸透流解析を実行する必要があるため解析時間が比較的長くなる傾向がある。要素数などが多くなる場合には、解析時間が膨大となり事実上解析が不可能となる場合もあると考えられる。

(2) 流速のバラツキに着目した検証方法 (V解析法)

前節の問題を解決するため、比較的短時間で移行到達点の不確実性評価ができる手法を考案した。具体的には、線形一次近似理論に基づく確率論的有限要素法による浸透流解析を行い、各要素内の流速の期待値と分散を算出し、その結果に対してモンテカルロ法を適用した。

いま、 M 個の不確実性要因 $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M\} = \boldsymbol{\alpha}$ (ここでは、各要素での透水係数のバラツキ) があるとき、各要素 e 内の流速ベクトルの X 方向成分 v_{xe} を $\boldsymbol{\alpha}$ についてマクローリン展開し、その2次以上の高次項を無視する1次近似を行うと次式のようなになる。

$$v_{xe} = v_{xe}(\boldsymbol{\alpha}) \cong v_{xe(0)} + \sum_{m=1}^M \frac{\partial v_{xe}}{\partial \alpha_m(0)} \alpha_m \quad (3.2-2)$$

さらに、 $\alpha_1 \sim \alpha_M$ は互いに独立で、期待値が零であると仮定すると、 v_{xe} の期待値と分散は次式で表せる。

$$E[v_{xe}] \cong v_{xe(0)} \quad (3.2-3)$$

$$\text{Var}[v_{xe}] \cong \sum_{m=1}^M \left(\frac{\partial v_{xe}}{\partial \alpha_m(0)} \right)^2 \text{Var}[\alpha_m] \quad (3.2-4)$$

ここで、 $\partial v_{xe} / \partial \alpha_m(0)$ は、偏導関数 $\partial v_{xe} / \partial \alpha_m$ の $\boldsymbol{\alpha} = \{0, 0, \dots, 0\} = \mathbf{0}$ における値である。

同様にして、 Y 方向成分 v_{ye} およびその期待値 $E[v_{ye}]$ と分散 $\text{Var}[v_{ye}]$ も求まる。

次に、要素 e 内の流速に対してモンテカルロ法を適用して、次式に示すように n 試行回

数での流速ベクトルの X 成分と Y 成分 ($v_{xe}(n)$, $v_{ye}(n)$) を求める。

$$v_{xe}(n) = E[v_{xe}] + N_1 \cdot \sqrt{\text{Var}[v_{xe}]} \quad (3.2-5)$$

$$v_{ye}(n) = E[v_{ye}] + N_2 \cdot \sqrt{\text{Var}[v_{ye}]} \quad (3.2-6)$$

上式を用いて粒子追跡法により、ある地点からの移行到達点を複数点プロットして、その不確実性を評価する。

V 解析法では浸透流解析は、式(3.2-3)および式(3.2-4)を解く際にそれぞれ 1 度ずつ実行するだけでよいことから、前節の解析法と比較して短時間で不確実性評価ができる。

3. 3 解析条件

(1) 使用データ

解析には、MIU-1号孔～3号孔の透水試験結果のみを使用した。

(2) 未知領域の透水係数の推定方法

未知領域の透水係数はシンプルクリギングを使用して推定した。

(3) 要素分割

MIU-1～3号孔で囲まれた部分を2次元鉛直断面として、X座標の始点をMIU-1号孔の位置(X=0[m])とし、終点をMIU-3号孔の位置(X=236.8[m])とした。Y座標については便宜的に始点を-700[m]とし、終点を220[m]とした。要素分割では、1要素の形状がほぼ正方形に近くなるように配慮して、X方向分割数を20、Y方向分割数を92とした。このとき、1要素のX方向の長さは11.84[m]、Y方向の長さは10[m]となる。

(4) 水理境界条件

水理境界条件として、MIU-1号孔を左端、MIU-3号孔を右端として、それぞれの孔で計測された地下水位の平均値(左端は202.0[m]、右端は213.9[m])を使用して水頭固定境界とした。また、底辺を標高-700[m]として、便宜的に不透水境界とした。

(5) 不飽和特性

不飽和領域の透水特性として図3.3-1に示す不飽和特性曲線を使用した。

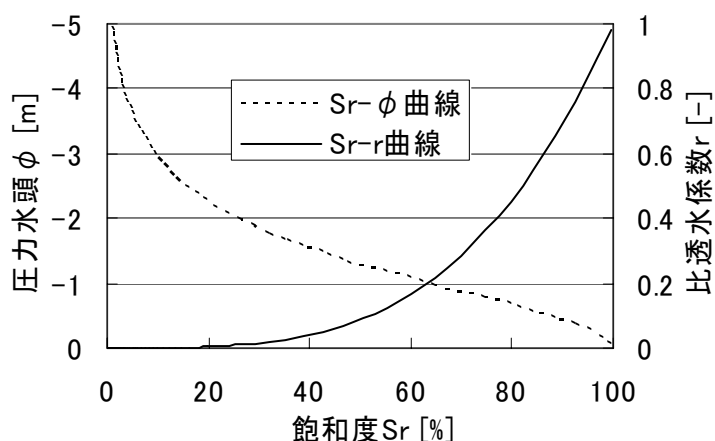


図 3.3-1 解析に使用した不飽和特性曲線

3. 4 解析ケース

解析ケースを表 3.4-1 に示す。2次元プログラムによる解析（以下、確率 FEM）および確率 FEM に対する検証として K 解析法と V 解析法による解析を行った。まず、クリギングで未知領域の透水係数の期待値と分散を算出し、浸透流解析を行い地下水の概略的な傾向を把握した（図 3.4-1 参照）。移行経路の複雑性と流速の大小を考慮して、地下水流れの開始点を MIU-3 号孔近傍の (X,Y)=(236m,0m), (236m,-100m), (236m,-200m), (236m,-300m) の 4 点を採用した。(236m,0m)は移行経路が複雑で流速が大となり初期は下降して後に上昇するケース, (236m,-100m)は, 移行経路は複雑で流速も大だが前ケースとは流路の傾向が異なる（初期は上昇して後に下降する）ケース, (236m,-200m)は, 移行経路は若干複雑だが流速は小さいケース, (236m,-300m)は, ほぼ直線的な流れで流速が小さいケースである。移行時間は地下水流れ到達点対象領域内に収まる時間を考慮して各移行開始点別に設定した。K 解析法と V 解析法でのモンテカルロ法の試行回数は 10000 回までとした。

表 3. 4-1 検証の解析ケース

解析法	開始点	移行時間	試行回数	経路の概略的傾向
	(X[m],Y[m])	[年]	[回]	
K 解析法	(236,0)	1000,2000,3000	1~10000 回	複雑で流速大（初期上昇, 後期下降）
	(236,-100)	1000,2000,3000,4000,5000		複雑で流速大（初期下降, 後期上昇）
	(236,-200)	1000,2000,3000,4000,5000,6000,7000,8000,9000,10000,11000,12000,13000,14000,15000		若干複雑で流速小
	(236,-300)	1000,2000,3000,4000,5000,6000,7000,8000,9000,10000,11000,12000,13000,14000		ほぼ直線的な流れで流速小
V 解析法	同上		同上	
確率 FEM	同上		—	

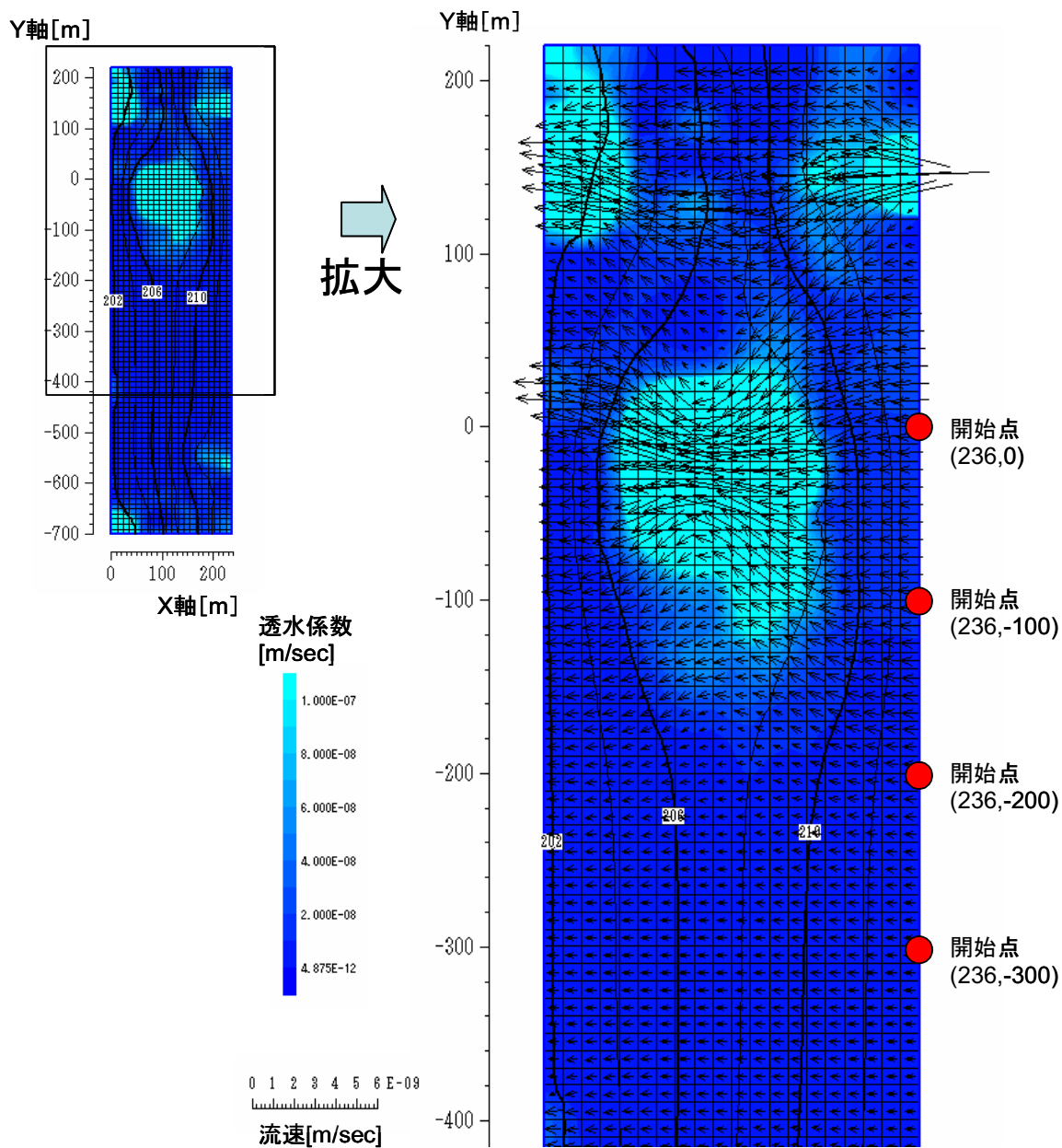


図 3.4-1 移行開始点のケース設定に使用した流速図

3. 5 検証結果

(1) 解析結果の表示

図 3.5-1～図 3.5-11 に解析結果を表示する。プログラムの制限より、以降到達点は最大で4つの時間しか表示できなかつたため、4つ以上の時間を表示する場合には複数のグラフで示した。各図の移行開始点、移行時間、解析法についてまとめたインデックスを表 3.5-1 に示す。なお、K 解析法と V 解析法でのモンテカルロ法の試行回数は 10000 回である。

表 3.5-1 解析結果表示のインデックス

図番号	移行開始点	移行時間	解析法
図 3.5-1 (a)～(c)	(236,0)	1000 年, 2000 年, 3000 年	(a)確率 FEM (b)K 解析法 (c)V 解析法
図 3.5-2 (a)～(c)	(236,-100)	1000 年, 2000 年, 3000 年, 4000 年	
図 3.5-3 (a)～(c)	(236,-100)	5000 年	
図 3.5-4 (a)～(c)	(236,-200)	1000 年, 2000 年, 3000 年, 4000 年	
図 3.5-5 (a)～(c)	(236,-200)	5000 年, 6000 年, 7000 年, 8000 年	
図 3.5-6 (a)～(c)	(236,-200)	9000 年, 10000 年, 11000 年, 12000 年	
図 3.5-7 (a)～(c)	(236,-200)	13000 年, 14000 年, 15000 年	
図 3.5-8 (a)～(c)	(236,-300)	1000 年, 2000 年, 3000 年, 4000 年	
図 3.5-9 (a)～(c)	(236,-300)	5000 年, 6000 年, 7000 年, 8000 年	
図 3.5-10 (a)～(c)	(236,-300)	9000 年, 10000 年, 11000 年, 12000 年	
図 3.5-11 (a)～(c)	(236,-300)	13000 年, 14000 年, 15000 年	

図 3.5-1 より、移行開始点(236,0)では初期に下降し、その後上昇していることが確認できる。これは、流速ベクトル図(図 3.4-1)の傾向と同様である。また、確率 FEM、K 解析法、V 解析法のいずれの解析法でも、1000 年から 3000 年と時間が大きくなるにしたがい、到達点のバラツキ程度が大きくなっていることがわかる。到達点の期待値は 1000 年, 2000 年, 3000 年のいずれの時間でも解析法によらず同様な位置にあるようにみえる。また、K 解析法や V 解析法での到達点の分布は到達点近傍の流線に沿って長軸、その直角方向に短軸をもつ楕円であることがわかる。

図 3.5-2～図 3.5-3 より、(236,-100)を移行開始点とした場合、初期は上昇して後から下降する流れとなることがわかる。これは、流速ベクトル図(図 3.4-1)から読み取れる傾向と同じであり、移行開始点を(236,0)とした場合とは逆の傾向である。移行時間 1000 年～5000 年までの K 解析法と 1000 年～4000 年後までの V 解析法のバラツキ分布は流線に沿った楕円で表示されることがわかる。しかし、V 解析法の 5000 年後の形状は三日月状に分布していた。この原因としては、隣接する要素の流速ベクトルの方向が異なり、到達点の分布が

楕円とならなかったためではないかと考えられる。

図 3.5-4～図 3.5-8 より、前出の移行開始点(236,0)や(236,-100)と比較すると、移行開始点(236,-200)の移行経路の流速は極めて小さく、対象領域内(MIU-3号孔～MIU1号孔の間)を通過するためには約15000年以上の時間が必要となることがわかる。8000年以降のV解析法の分布傾向は2種類の楕円が合成されたような形状となっているように見える。この原因としては、前述したように隣接する要素の流速ベクトルの方向が異なり、到達点の分布が楕円とならなかったためではないかと考えられる。

図 3.5-9～図 3.5-11 より、各解析法(確率FEM, K解析法, V解析法)での到達点の分布の傾向はほぼ同様であることがわかる。移行開始点(236,-300)からの地下水流れはほぼ直線であり、流れの方向の変化がほとんどない場合には、各解析法での到達点のバラツキはほぼ同様であることがわかる。

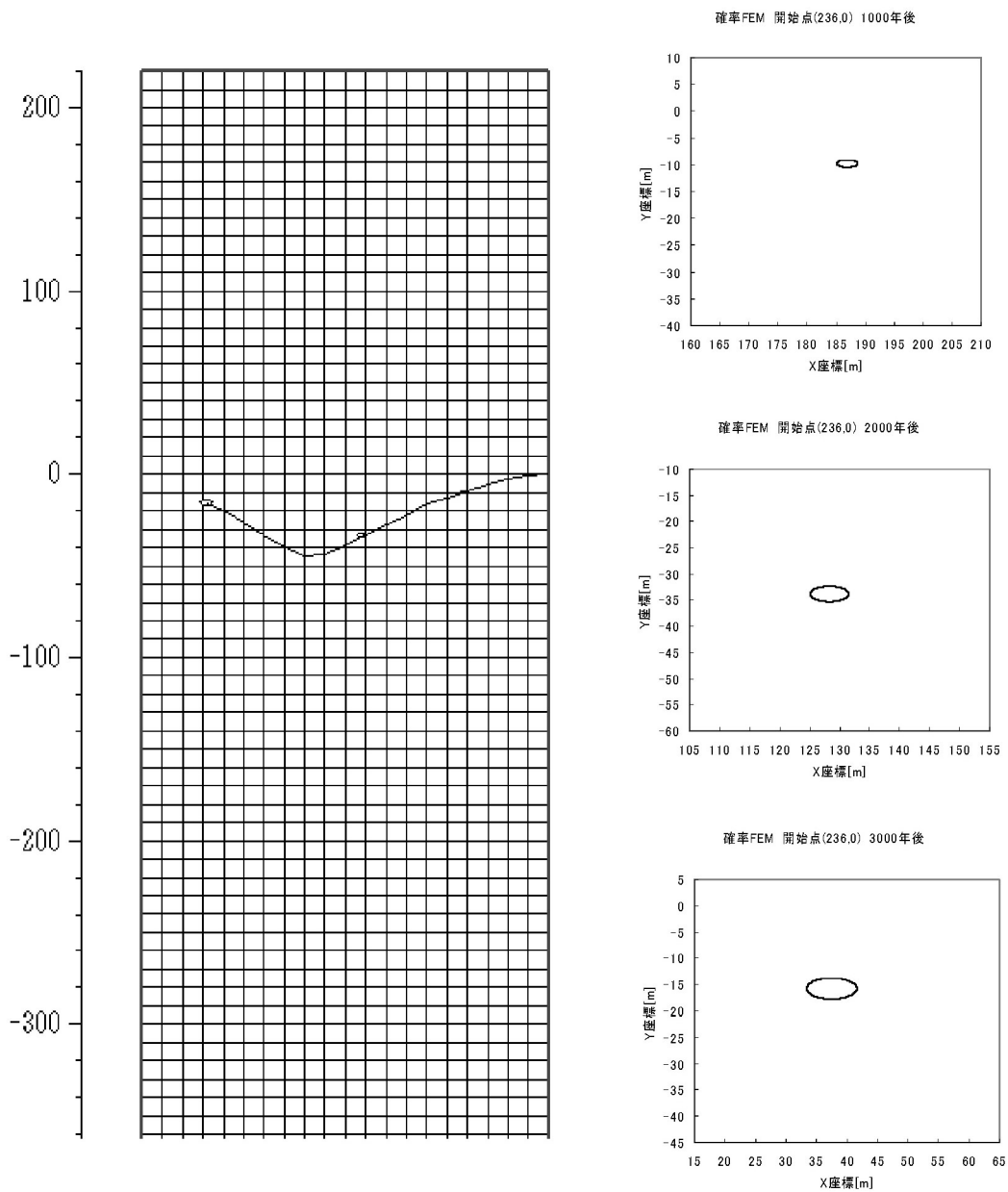


図 3.5-1(a) 解析結果 確率FEM 開始点(236,0) 1000年~3000年
右から1000年, 2000年, 3000年後の到達点

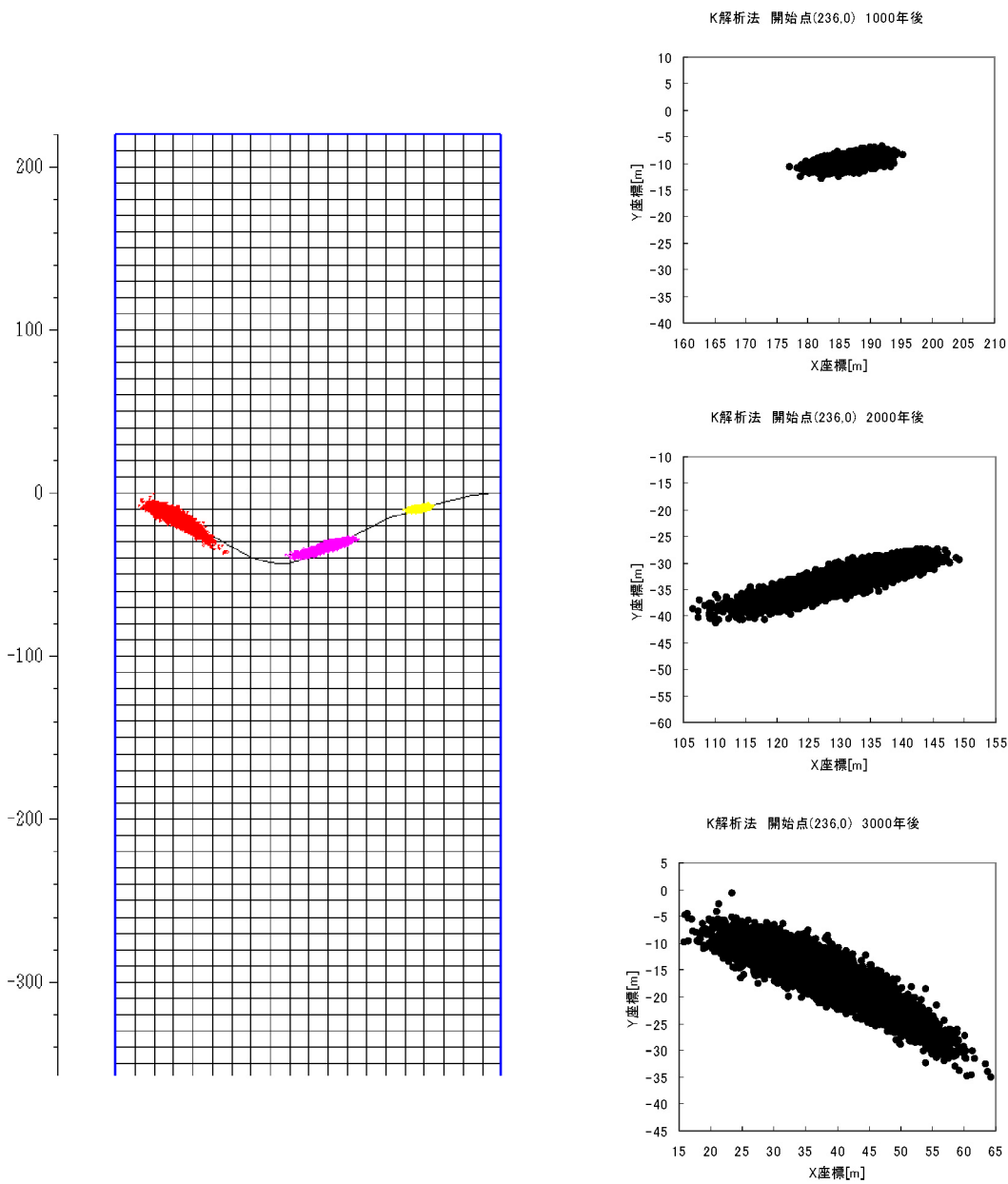


図 3.5-1(b) 解析結果 K 解析法 開始点 (236, 0)
 1000 年～3000 年
 右から 1000 年, 2000 年, 3000 年後の到達点

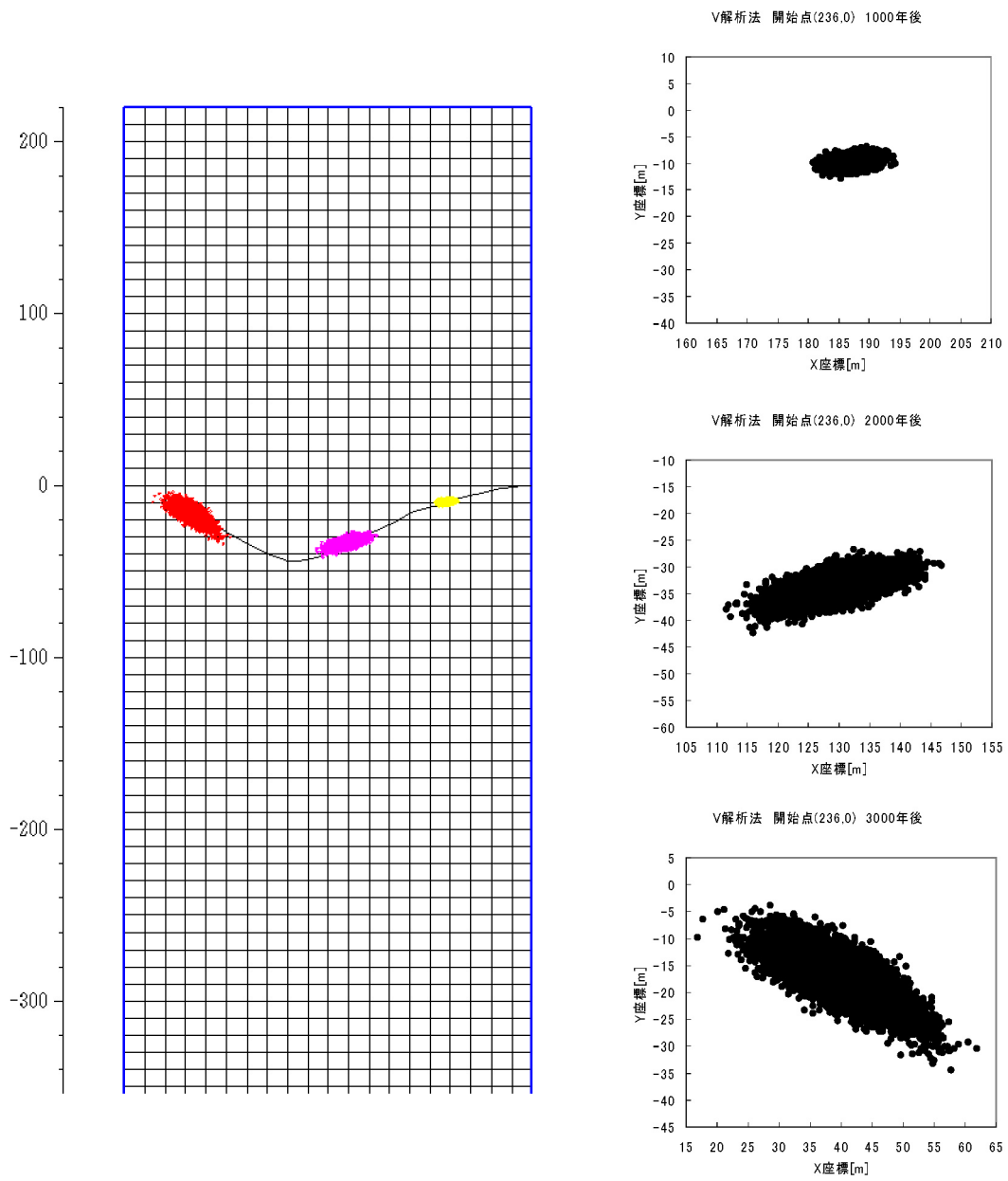


図 3.5-1(c) 解析結果 V解析法 開始点(236,0)
 1000年～3000年
 右から1000年, 2000年, 3000年後の到達点

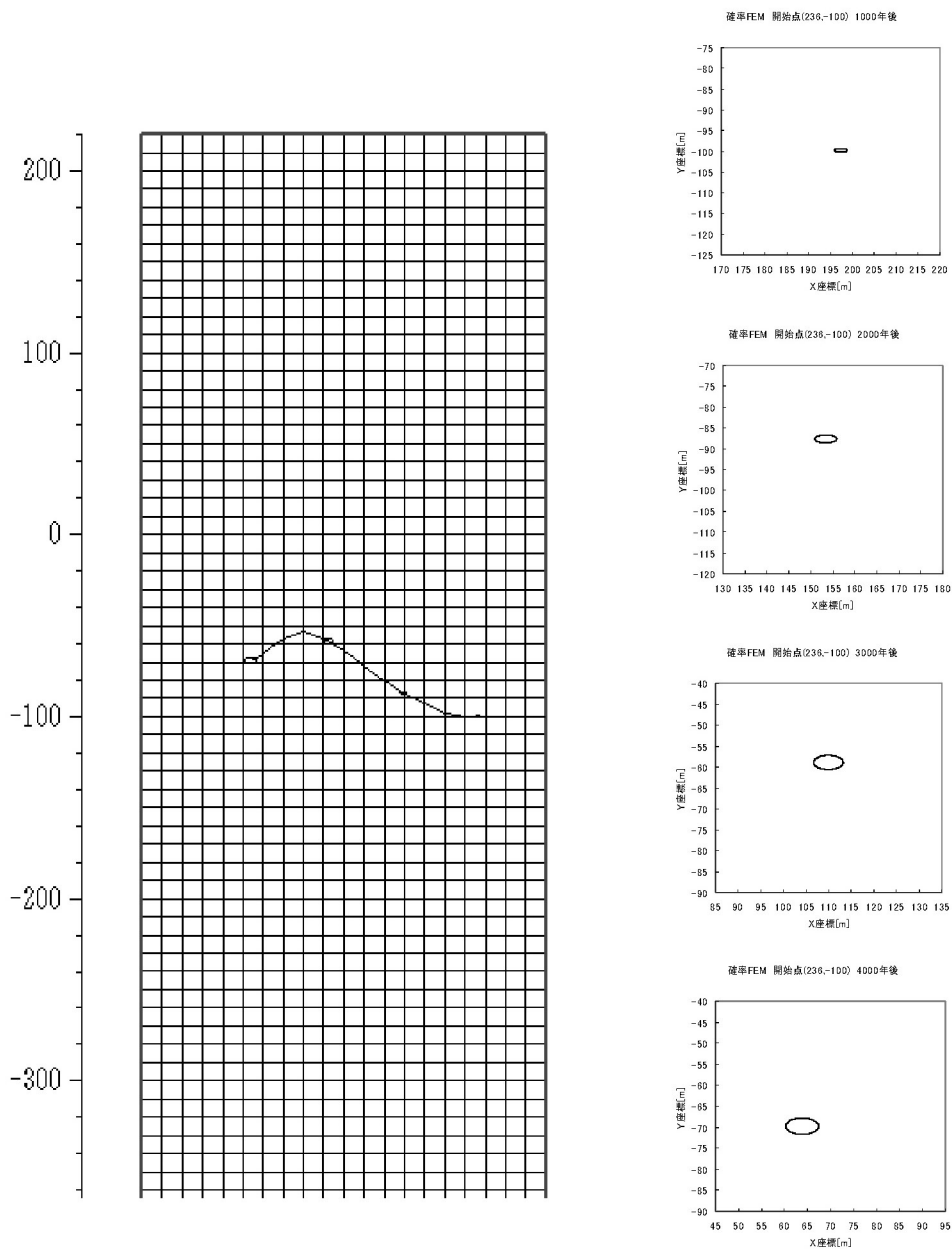


図 3.5-2(a) 解析結果 確率 FEM 開始点 (236, -100)
 1000 年~4000 年
 右から 1000 年, 2000 年, 3000 年, 4000 年後の到達点

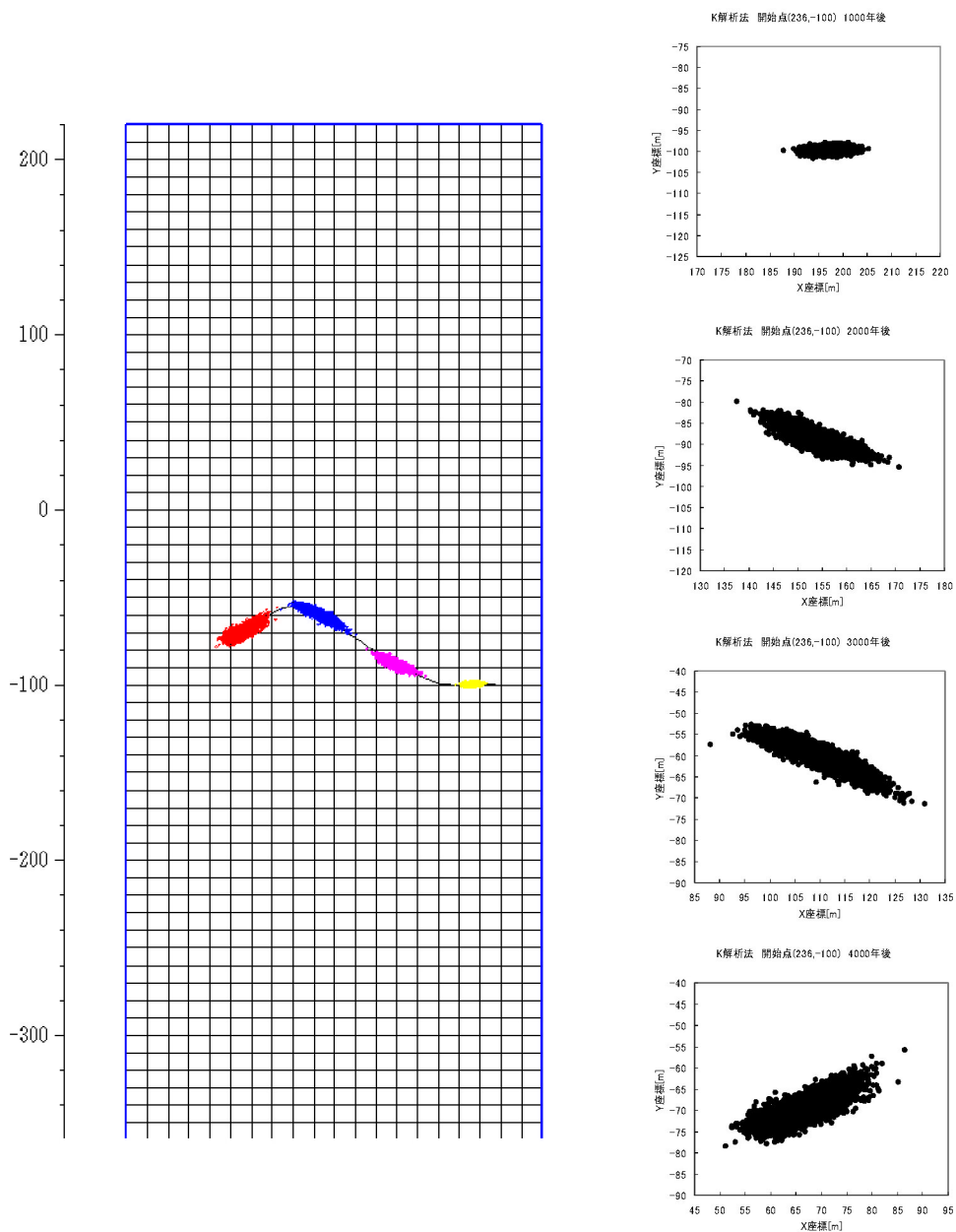


図 3.5-2(b) 解析結果 K 解析法 開始点 (236, -100)
 1000 年～4000 年
 右から 1000 年, 2000 年, 3000 年, 4000 年後の到達点

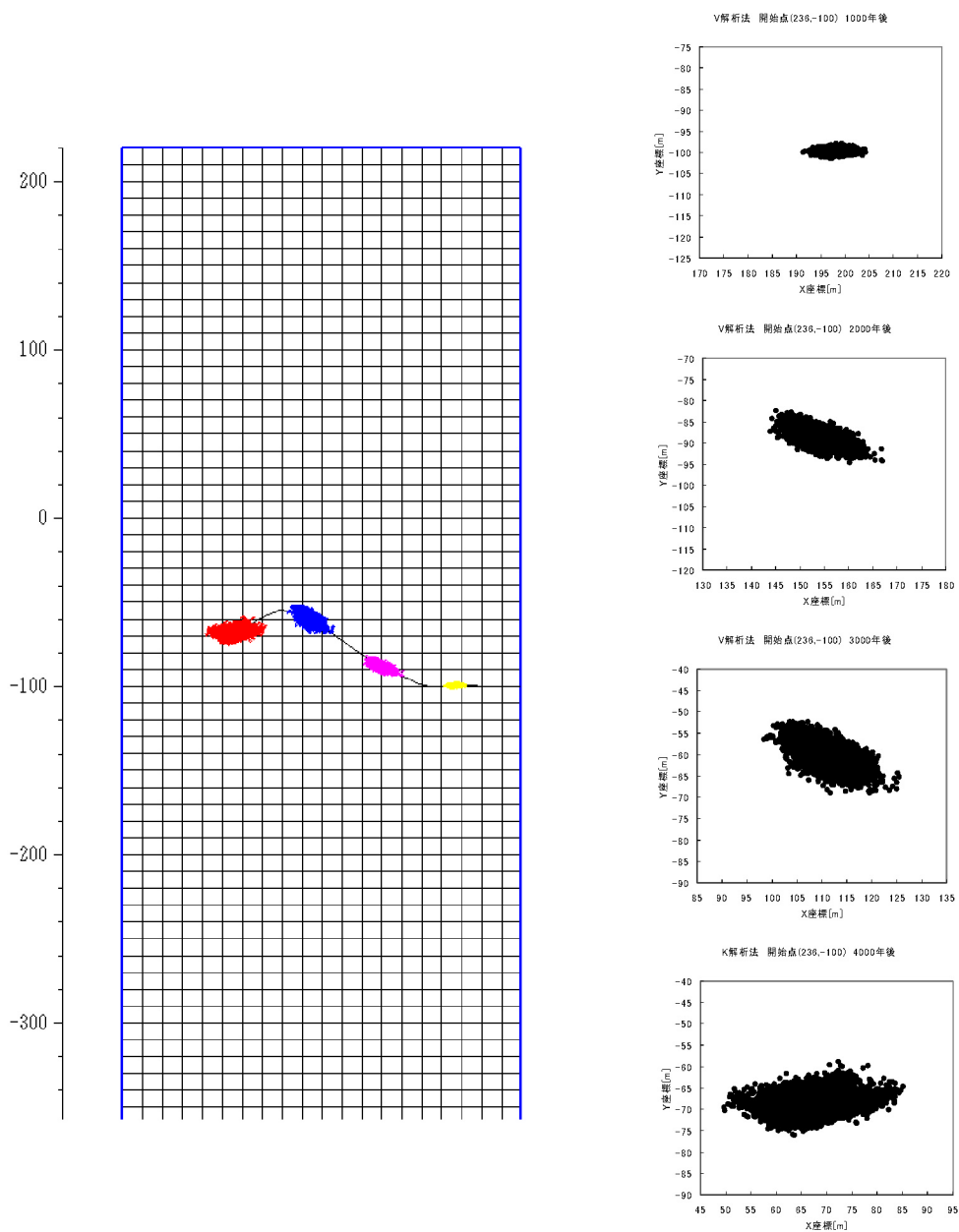


図 3.5-2(c) 解析結果 V 解析法 開始点(236, -100)
 1000 年～4000 年
 右から 1000 年, 2000 年, 3000 年, 4000 年後の到達点

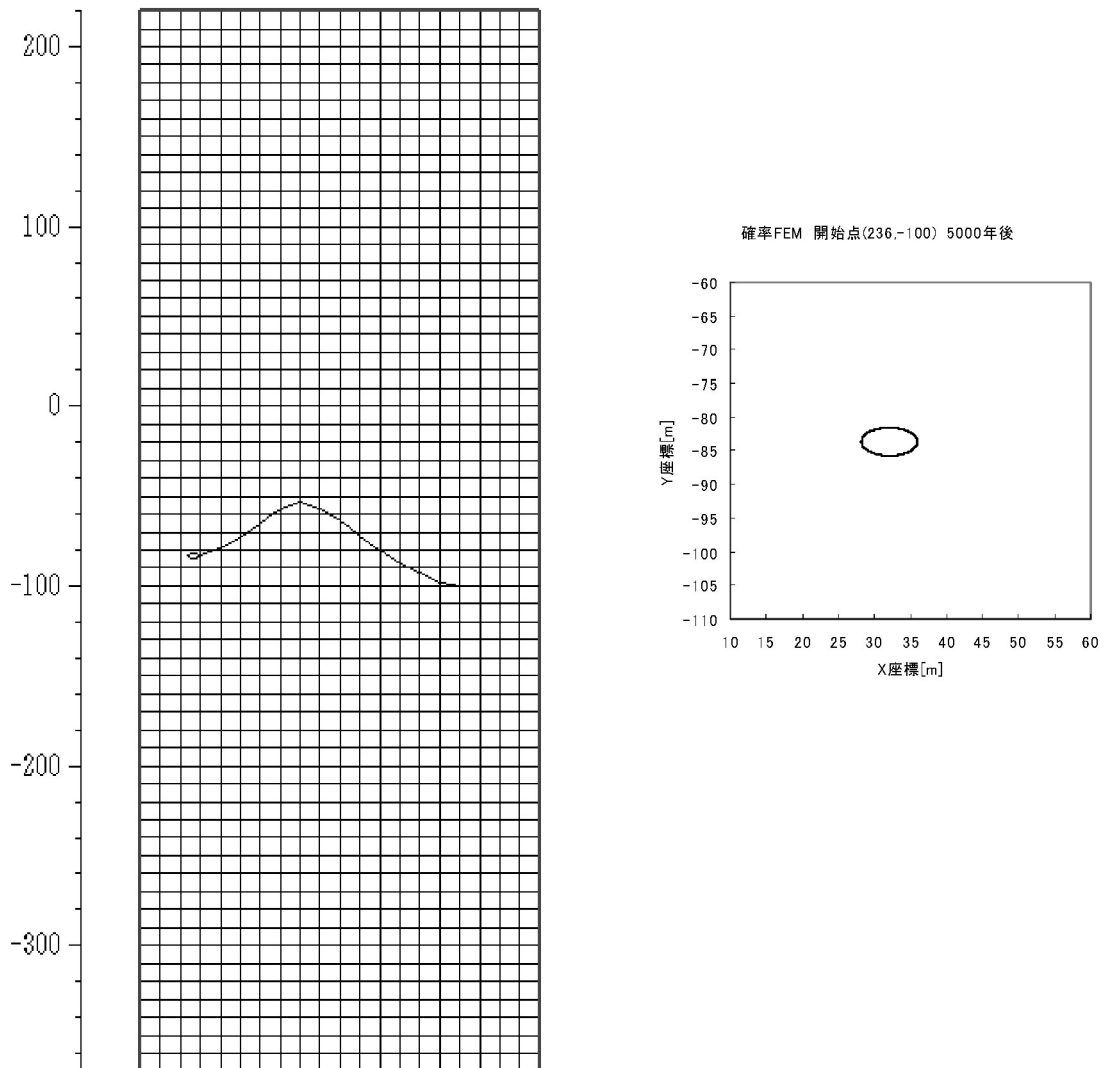


図 3.5-3(a) 解析結果 確率FEM 開始点(236, -100)
5000 年
5000 年後の到達点

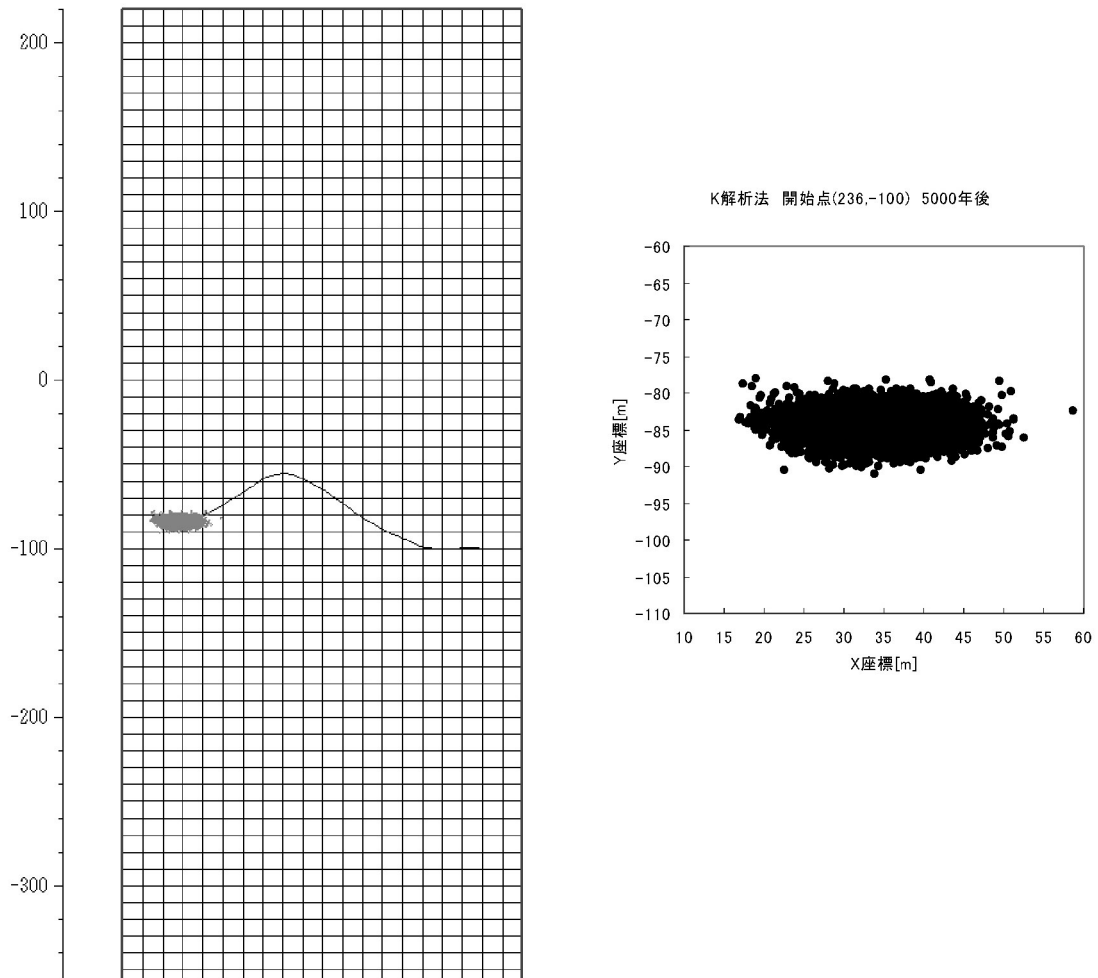


図 3.5-3(b) 解析結果 K解析法 開始点(236, -100)
5000 年
5000 年後の到達点

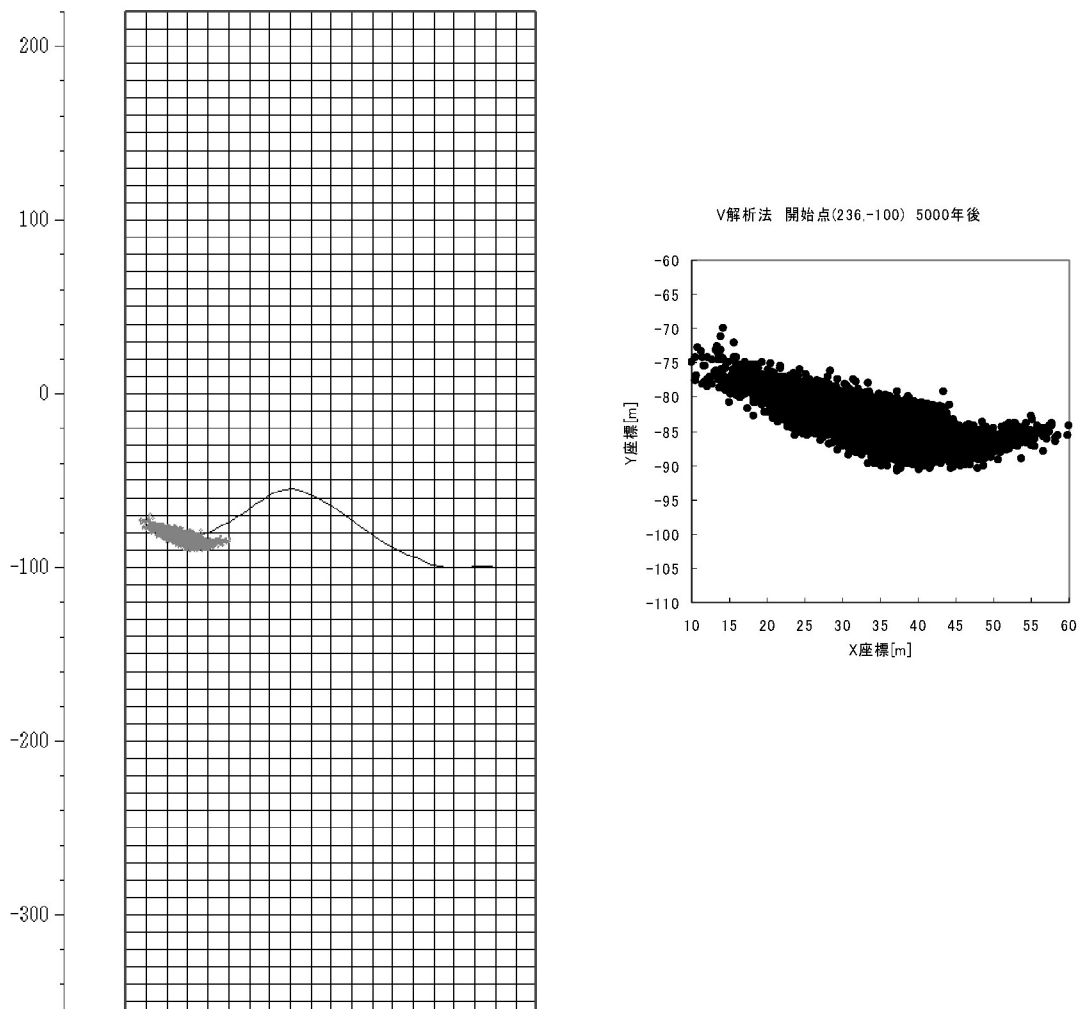


図 3.5-3(c) 解析結果 V解析法 開始点(236,-100)
5000年
5000年後の到達点

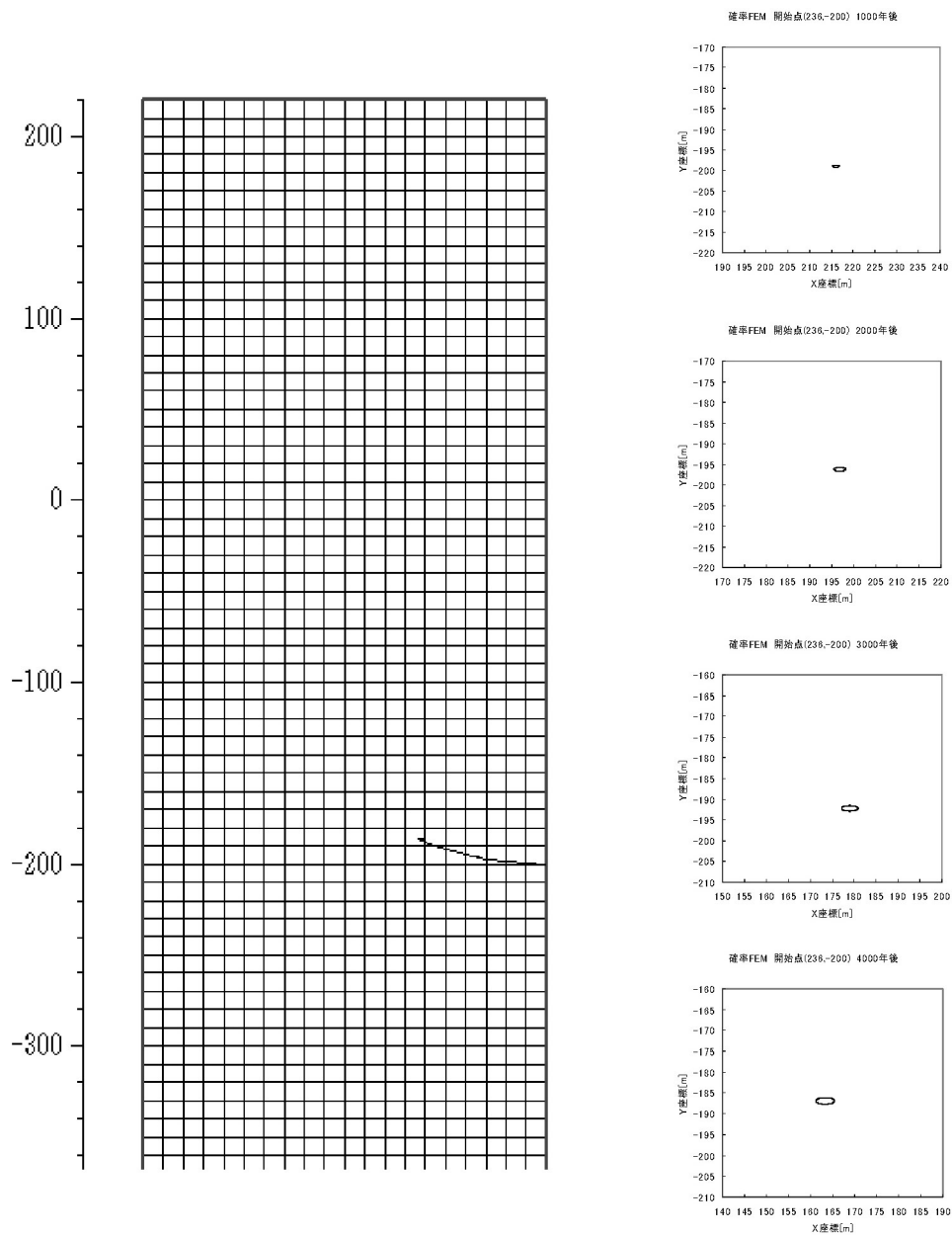


図 3.5-4(a) 解析結果 確率FEM 開始点(236,-200)

1000年~4000年

右から1000年, 2000年, 3000年, 4000年後の到達点

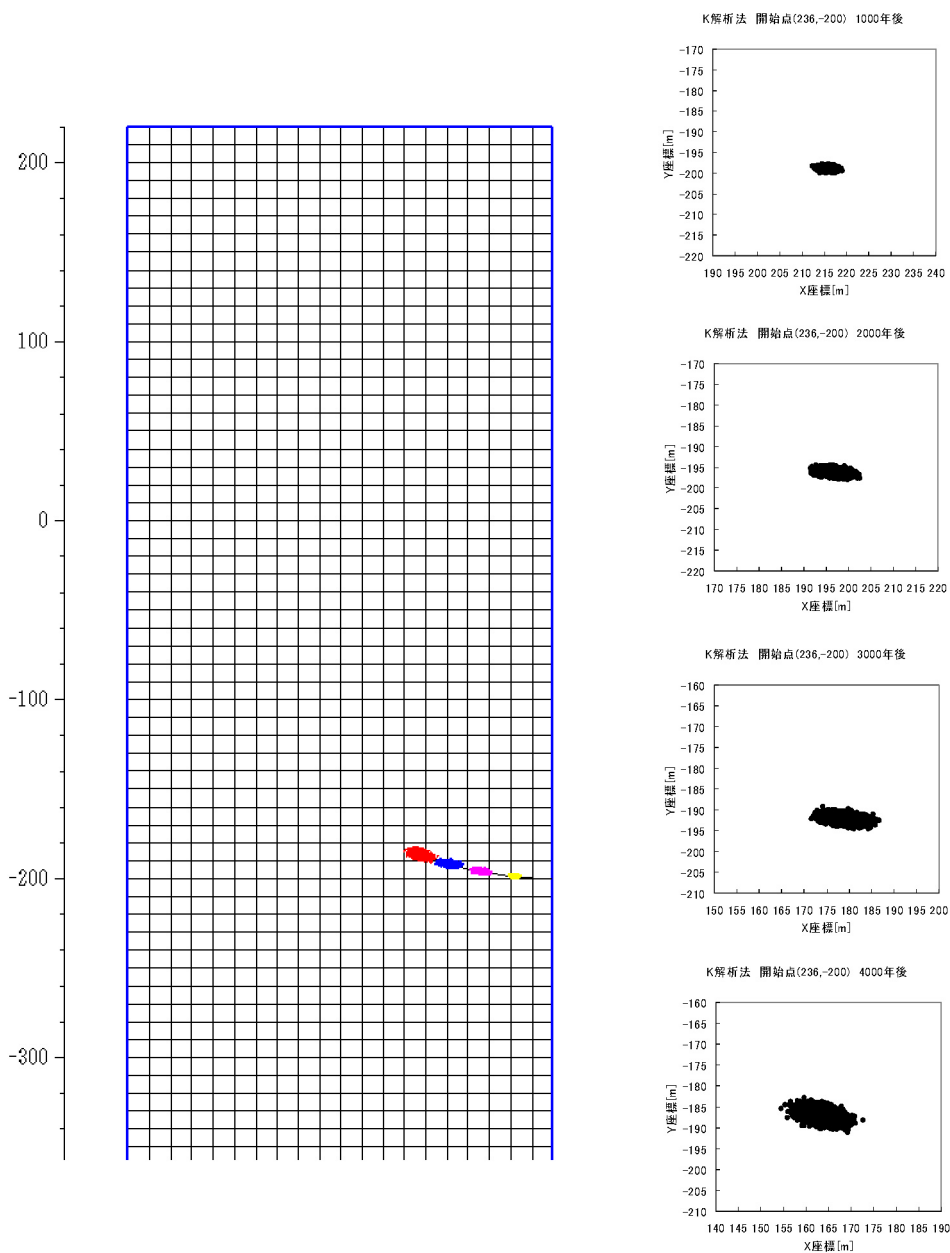


図 3.5-4(b) 解析結果 K解析法 開始点(236, -200)
 1000年~4000年
 右から1000年, 2000年, 3000年, 4000年後の到達点

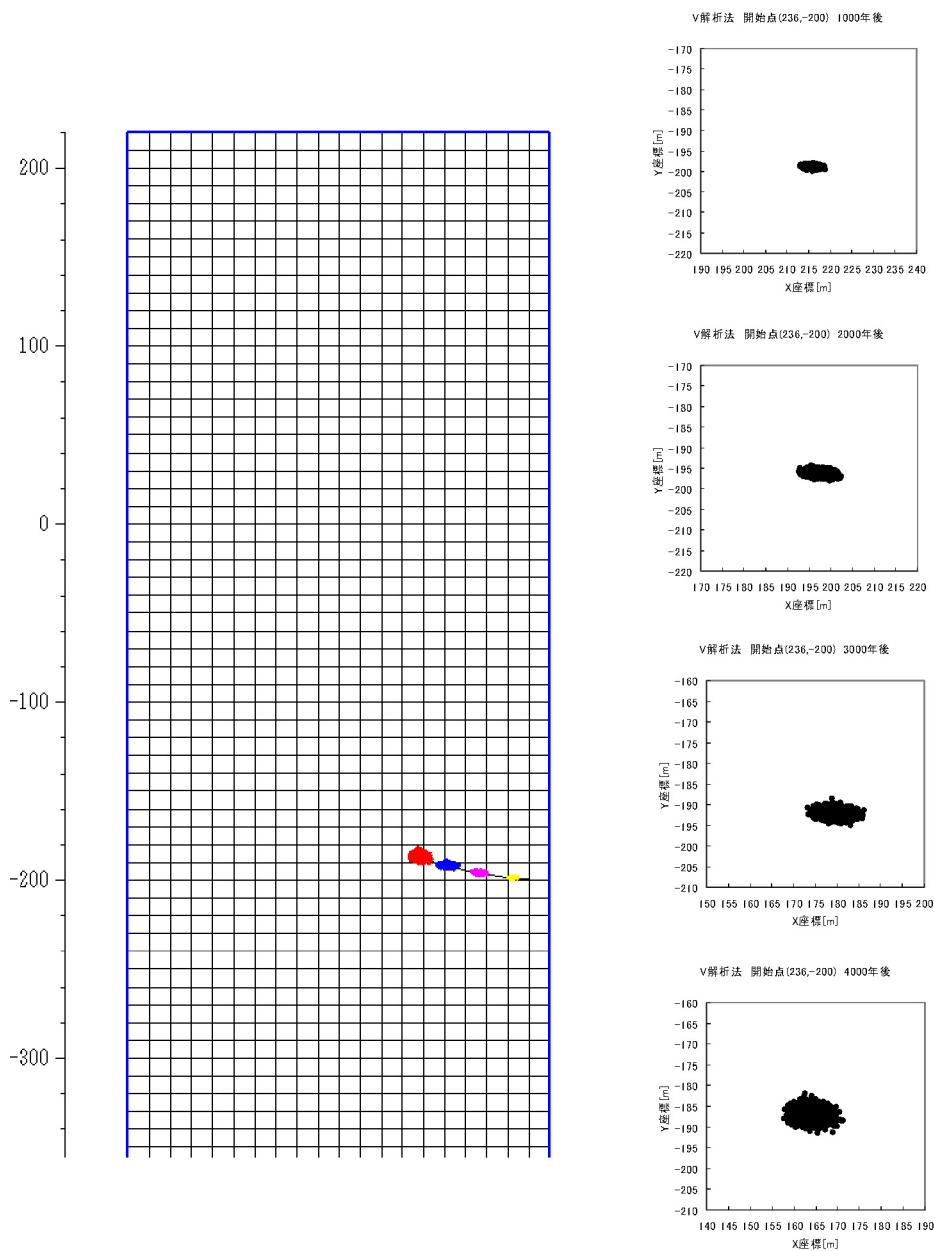


図 3.5-4(c) 解析結果 V解析法 開始点(236,-200)
 1000年～4000年
 右から1000年, 2000年, 3000年, 4000年後の到達点

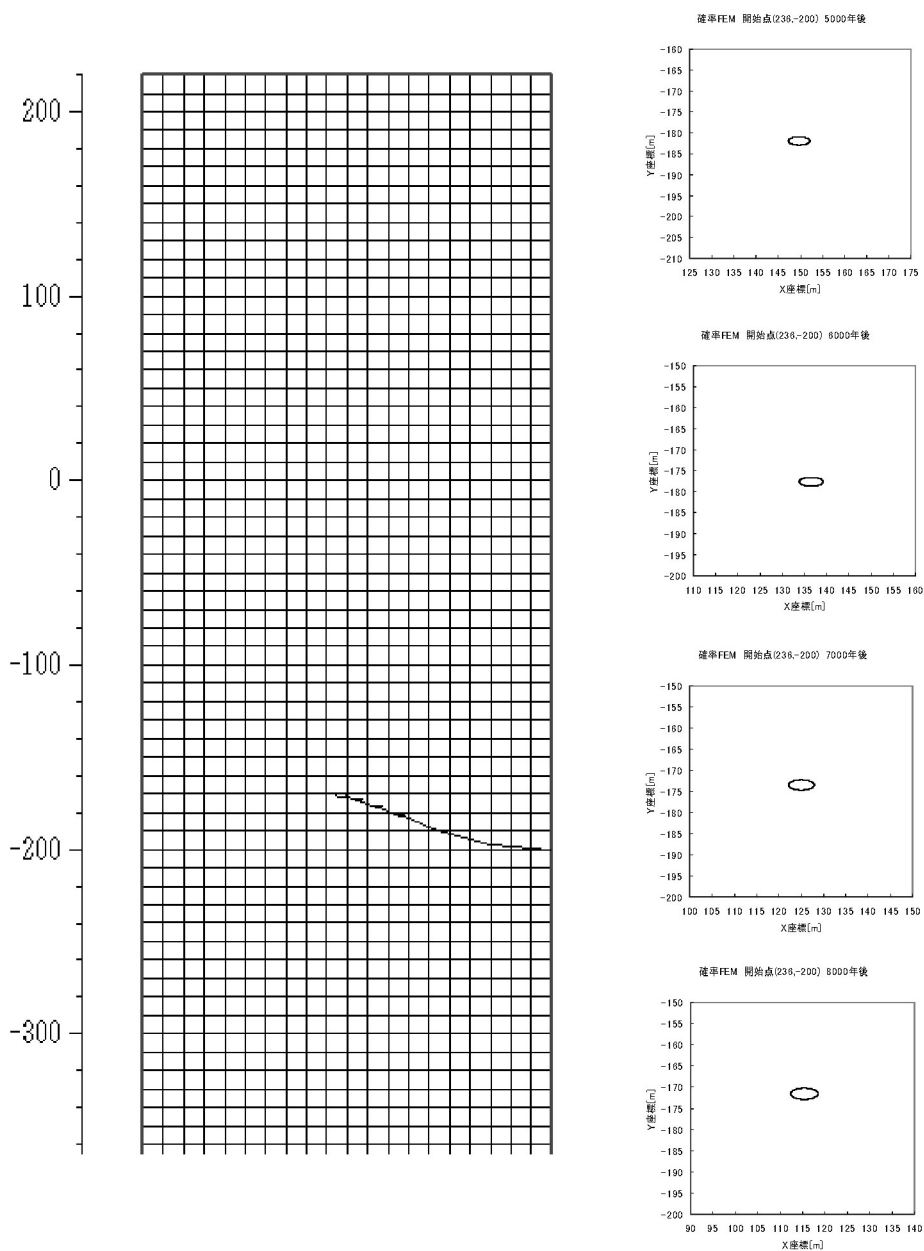


図 3.5-5(a) 解析結果 確率FEM 開始点(236, -200)
 5000~8000年
 右から5000年, 6000年, 7000年, 8000年後の到達点

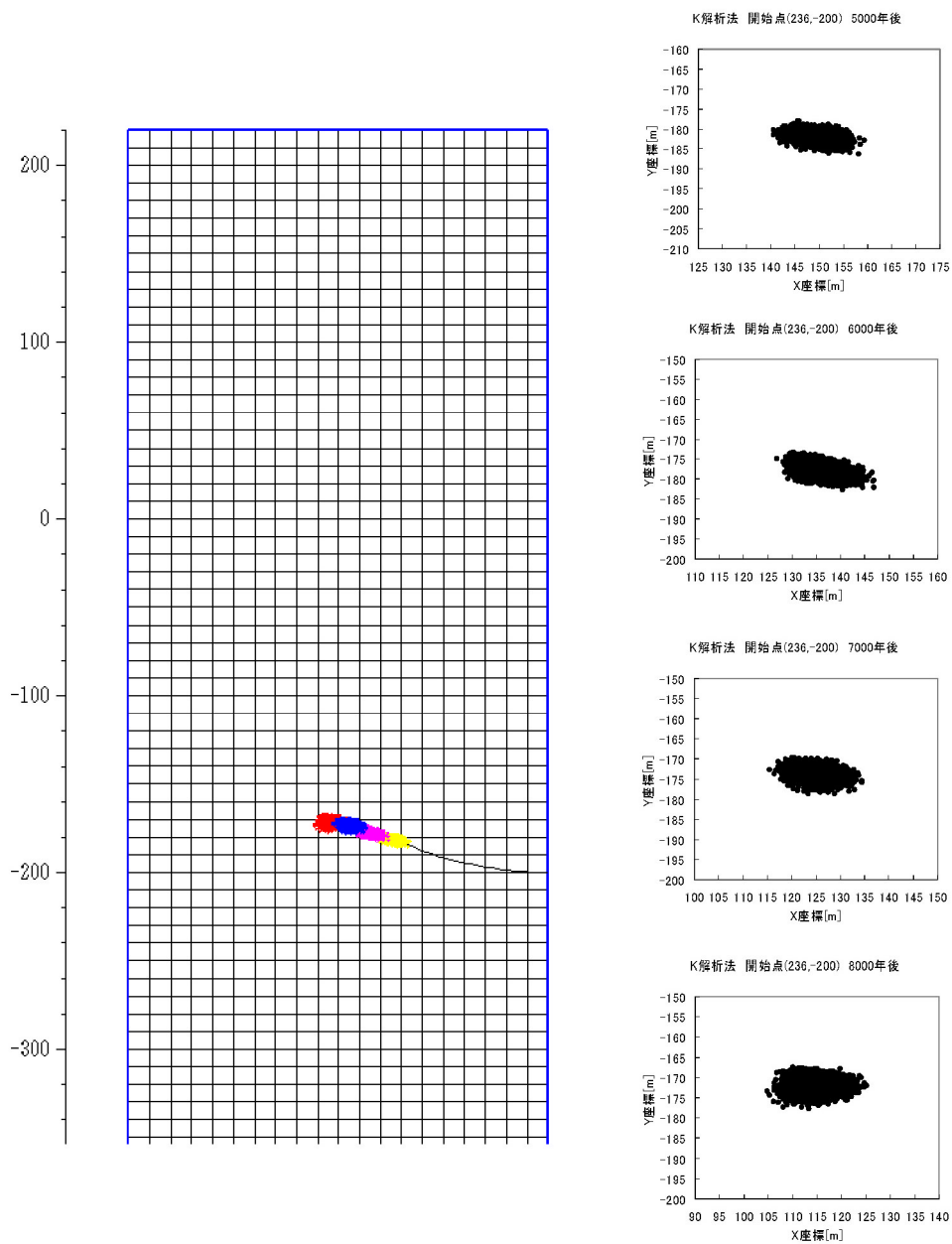


図 3.5-5(b) 解析結果 K 解析法 開始点(236, -200)
 5000~8000 年
 右から 5000 年, 6000 年, 7000 年, 8000 年後の到達点

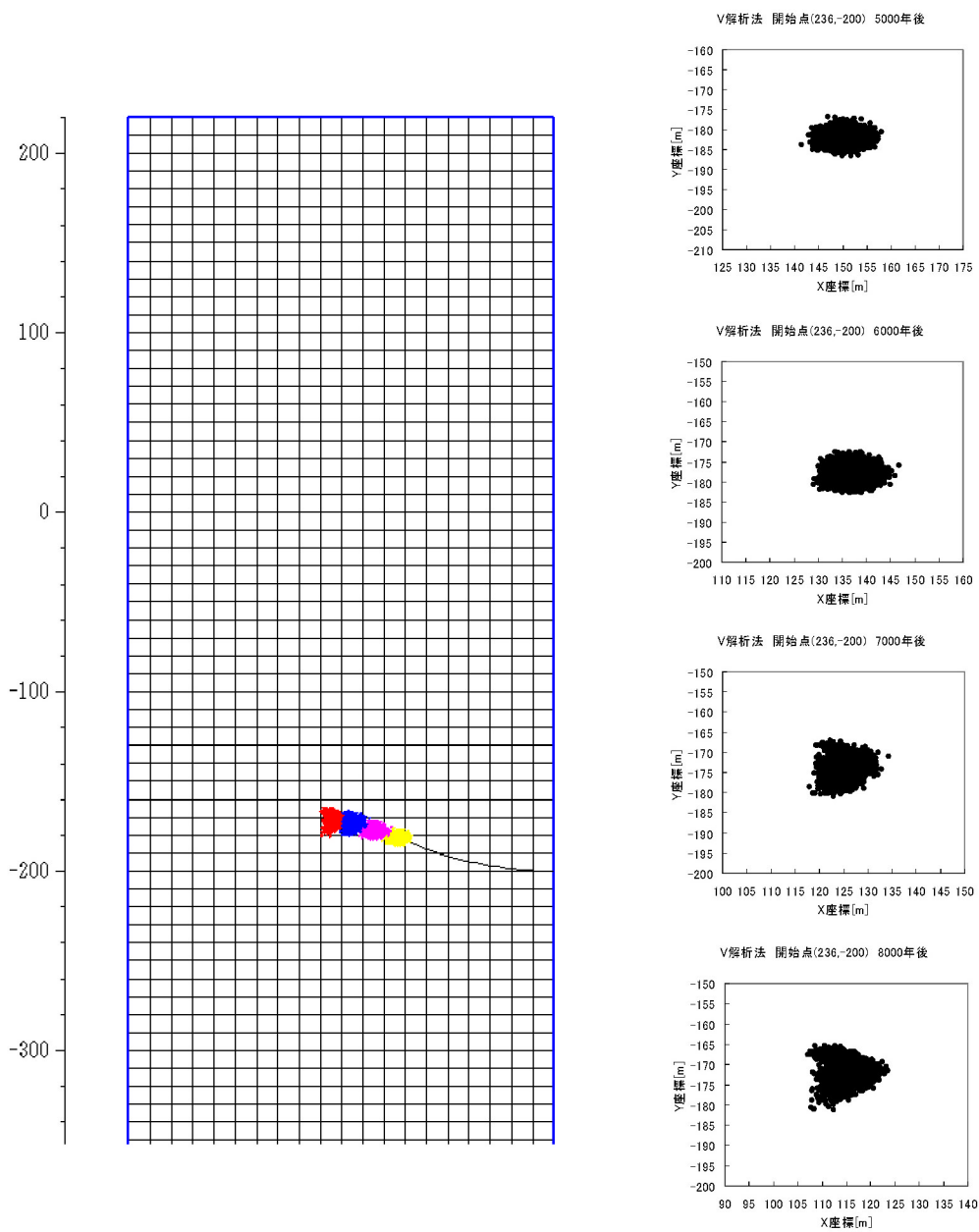


図 3.5-5(c) 解析結果 V解析法 開始点(236,-200)
 5000~8000 年
 右から 5000 年, 6000 年, 7000 年, 8000 年後の到達点

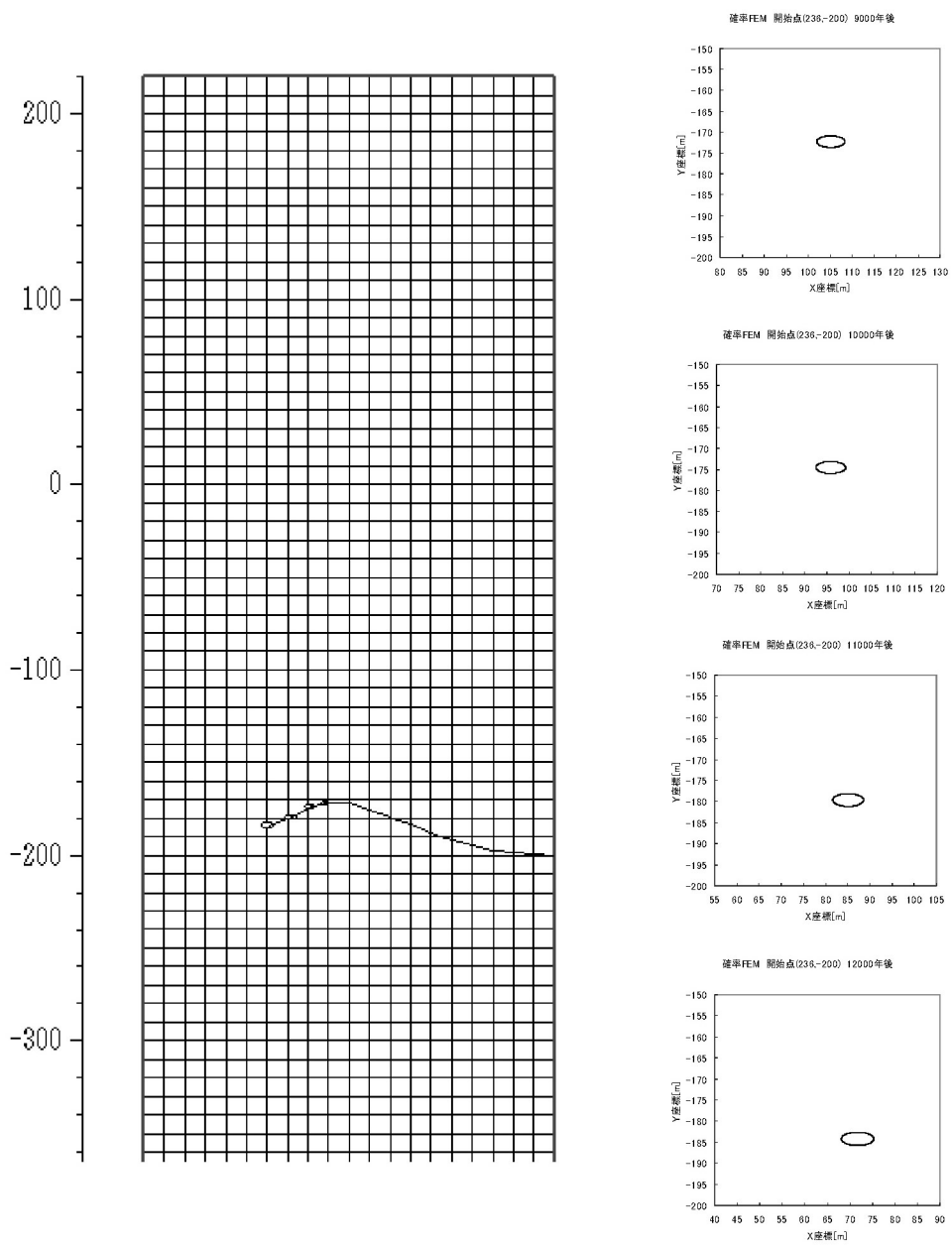


図 3.5-6(a) 解析結果 確率 FEM 開始点(236, -200)
 9000 年~12000 年
 右から 9000 年, 10000 年, 11000 年, 12000 年後の到達点

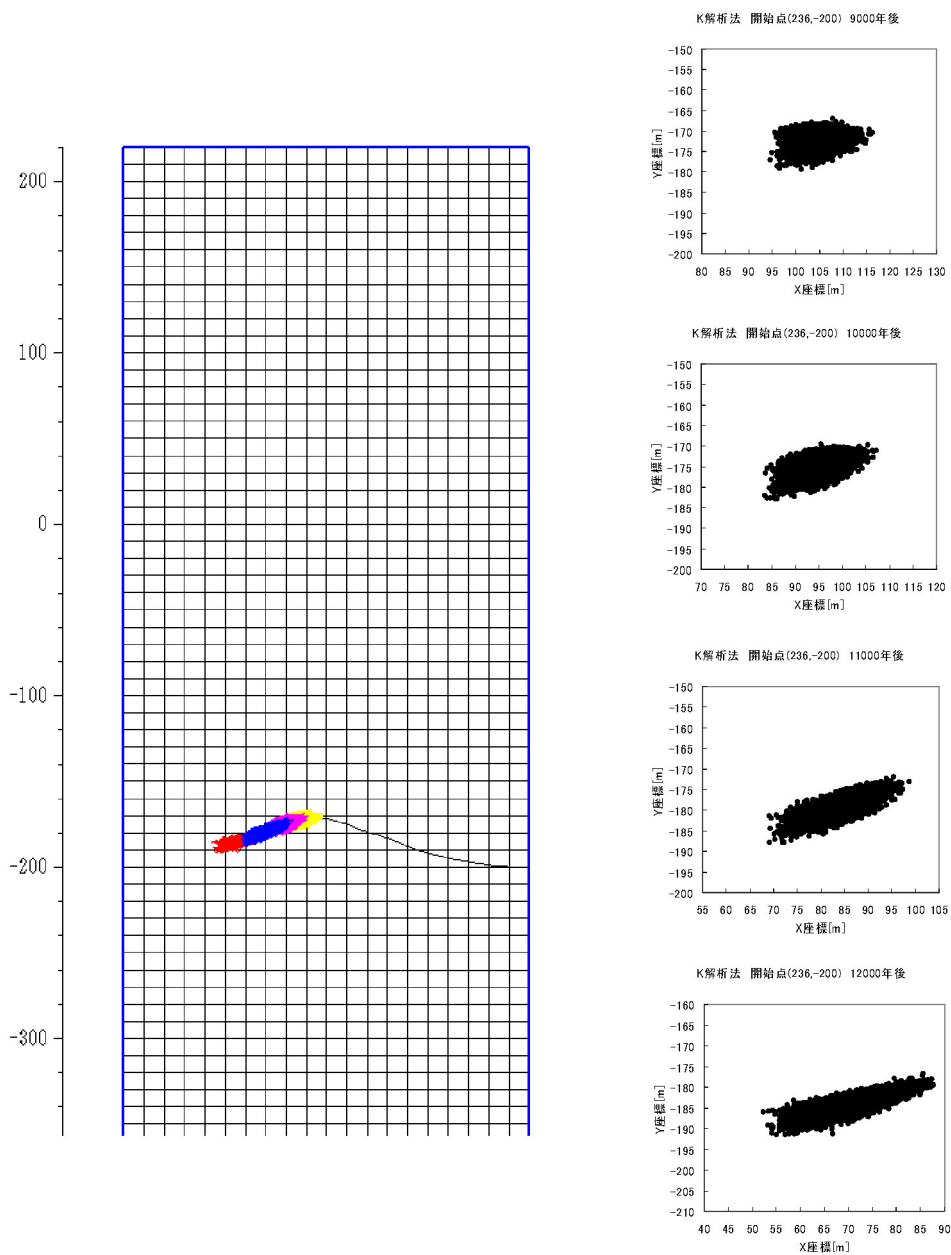


図 3.5-6(b) 解析結果 K解析法 開始点(236,-200)
 9000年~12000年
 右から9000年, 10000年, 11000年, 12000年後の到達点

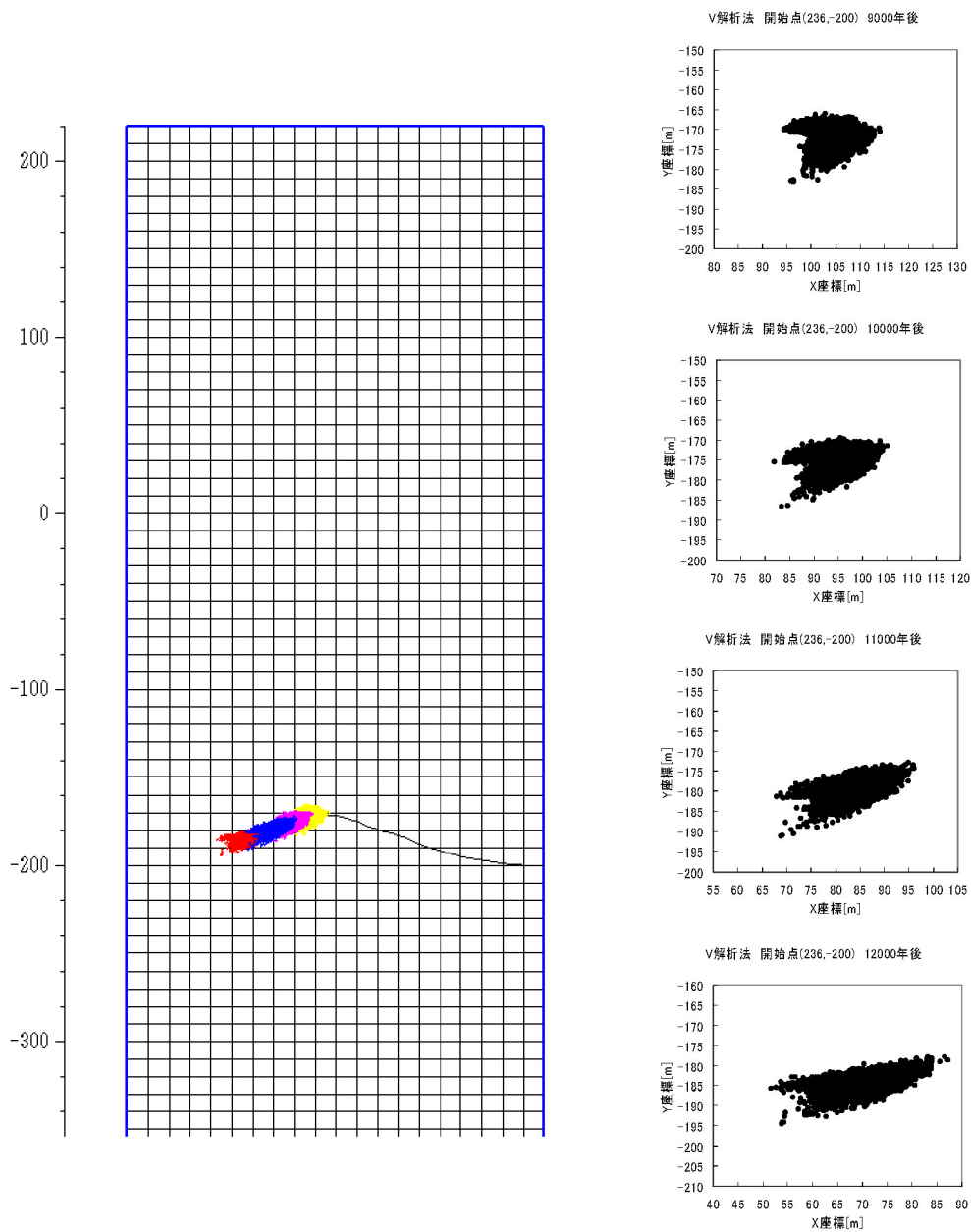


図 3.5-6(c) 解析結果 V 解析法 開始点(236,-200)
 9000 年~12000 年
 右から 9000 年, 10000 年, 11000 年, 12000 年後の到達点

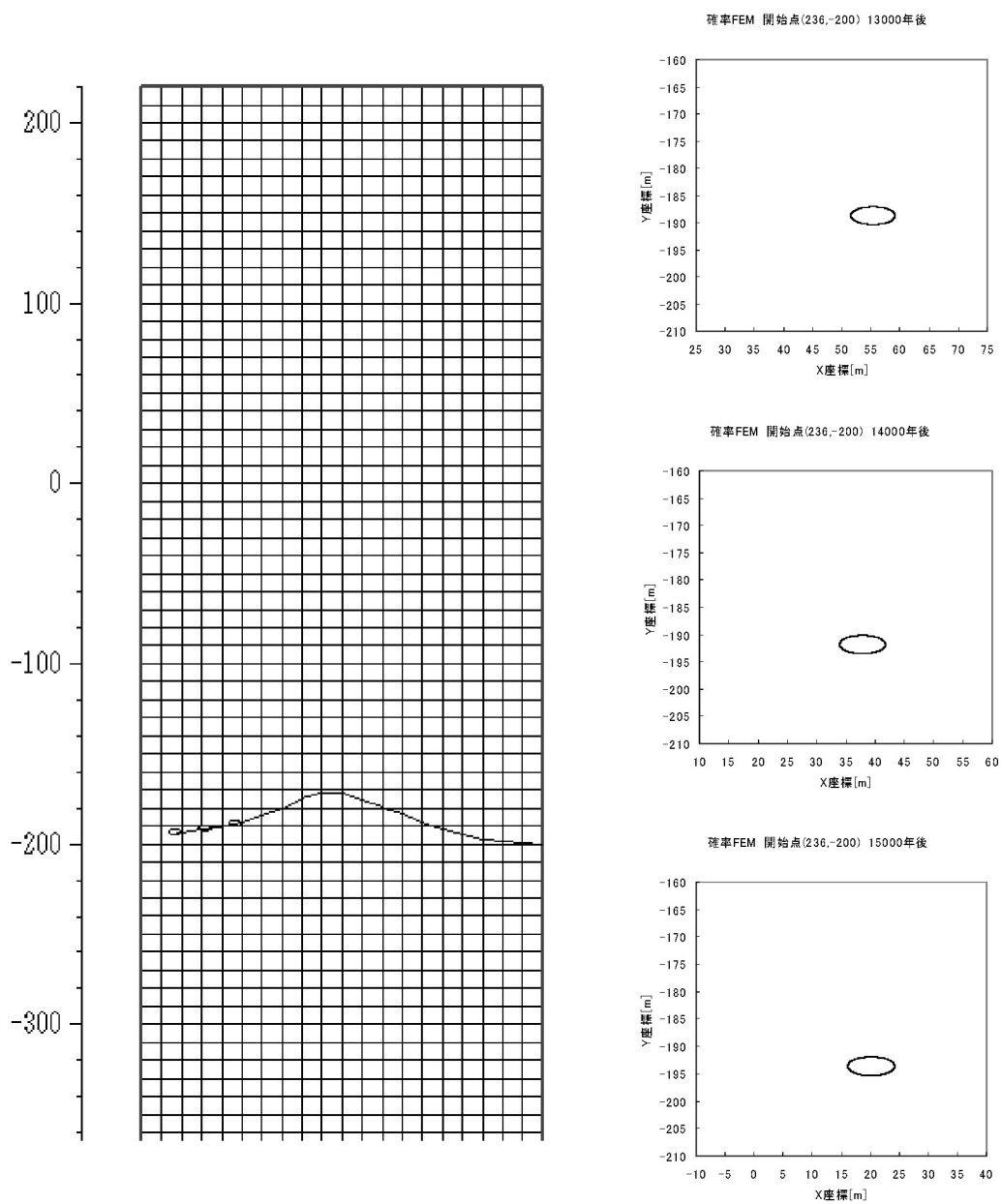


図 3.5-7(a) 解析結果 確率FEM 開始点(236,-200)
 13000年~15000年
 右から13000年, 14000年, 15000年後の到達点

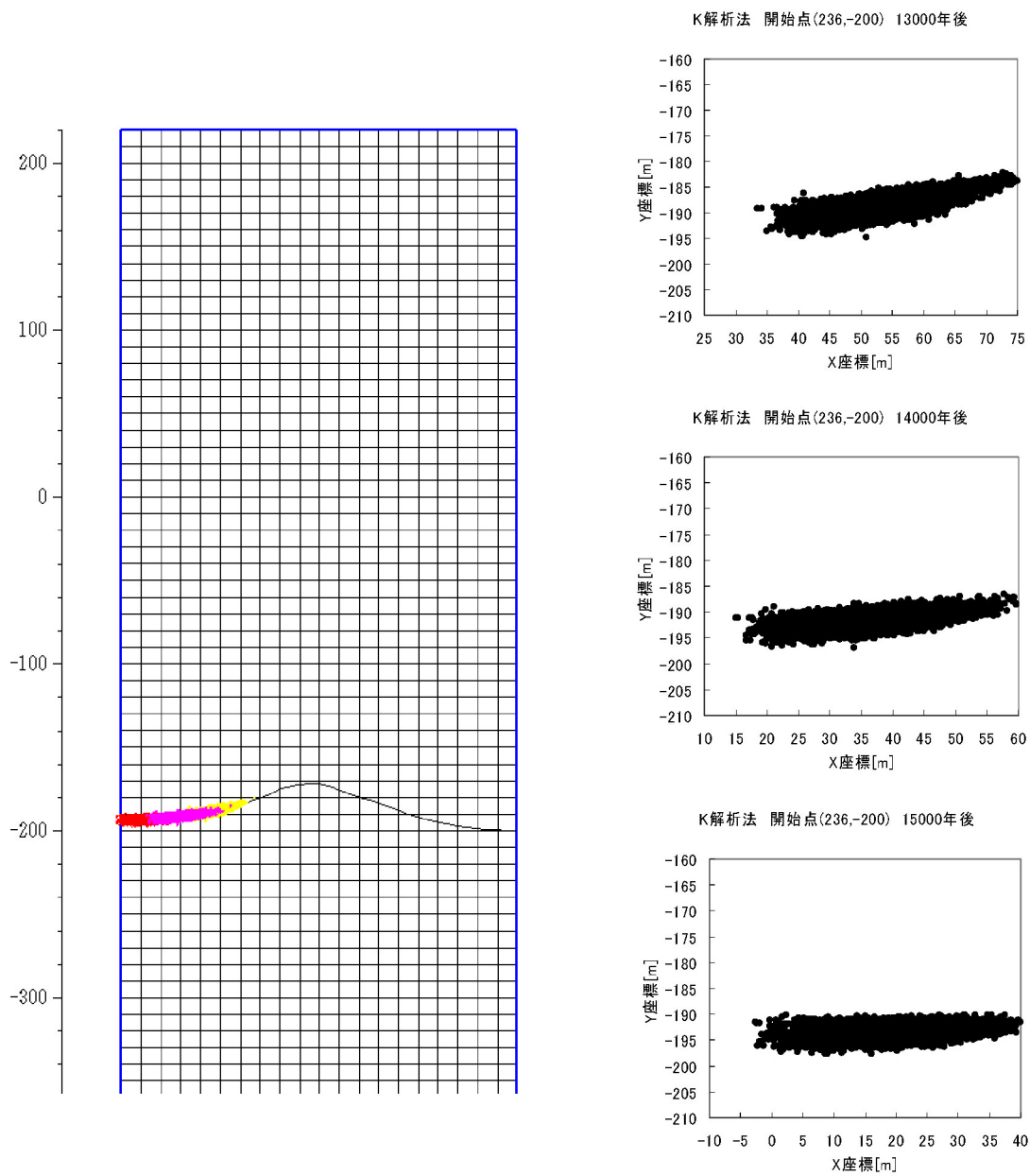


図 3.5-7(b) 解析結果 K 解析法 開始点 (236, -200)

13000 年～15000 年

右から 13000 年, 14000 年, 15000 年後の到達点

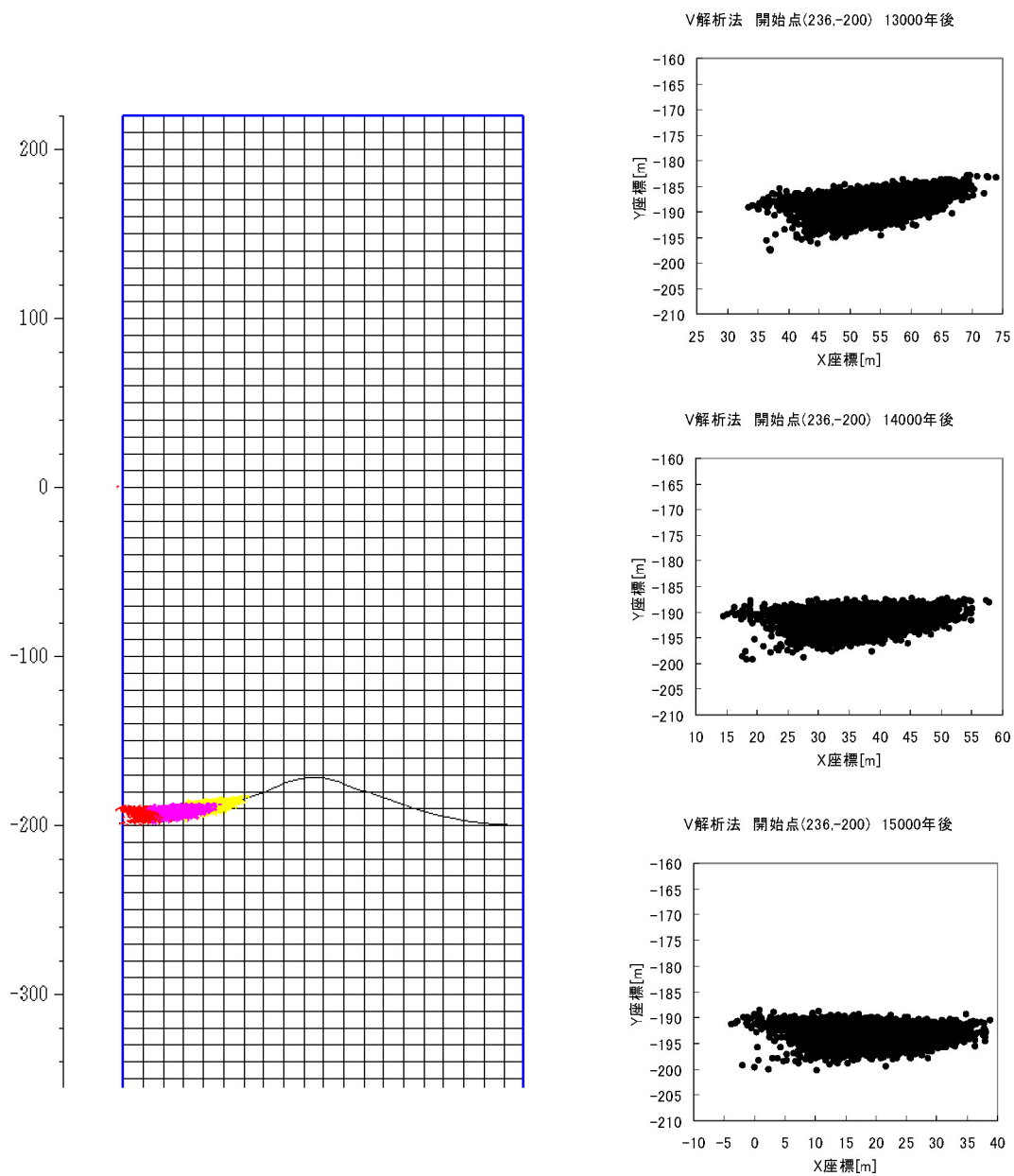


図 3.5-7(c) 解析結果 V解析法 開始点(236,-200)
 13000年~15000年
 右から13000年, 14000年, 15000年後の到達点

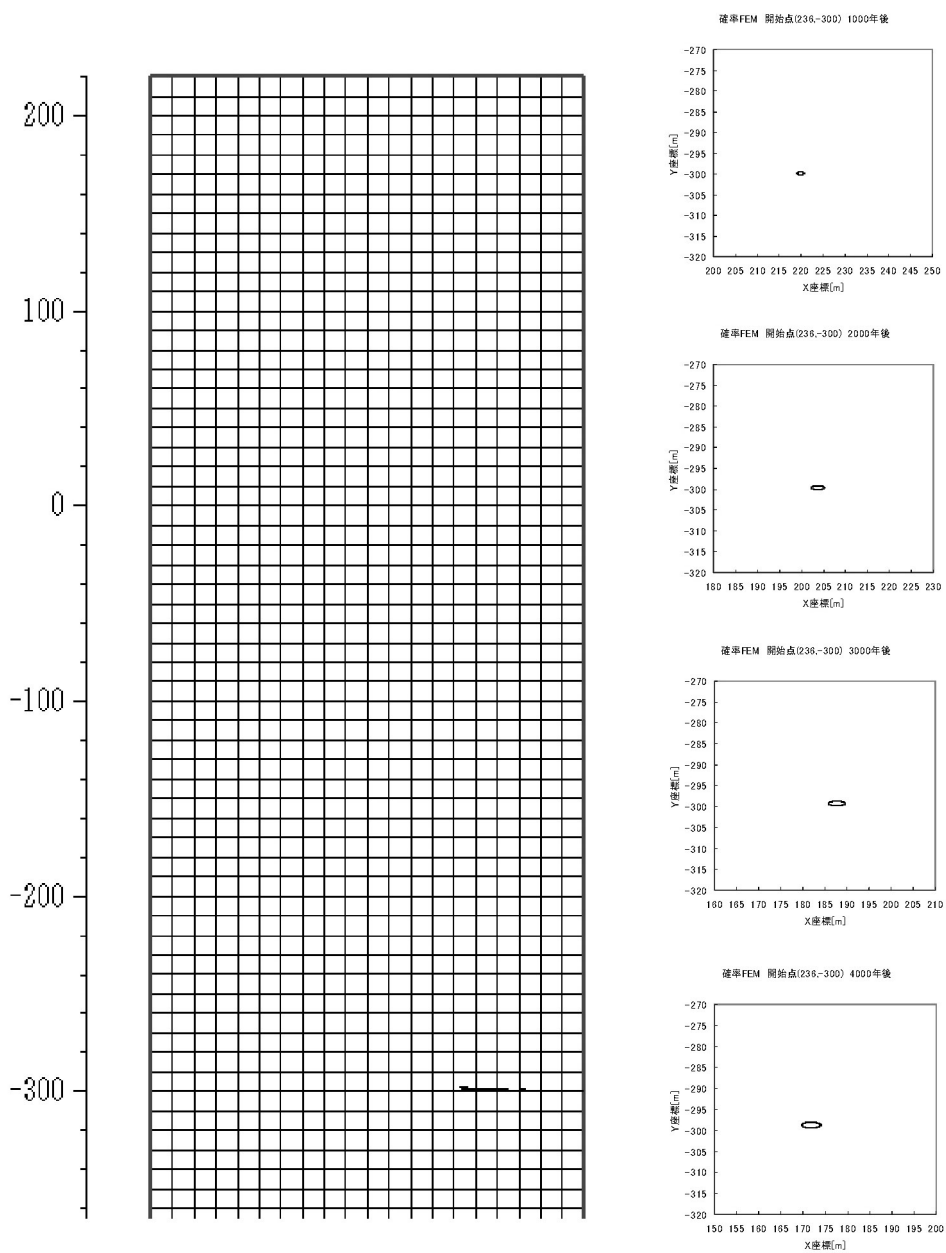


図 3.5-8(a) 解析結果 確率 FEM 開始点(236, -300)
 1000 年～4000 年
 右から 1000 年, 2000 年, 3000 年, 4000 年後の到達点

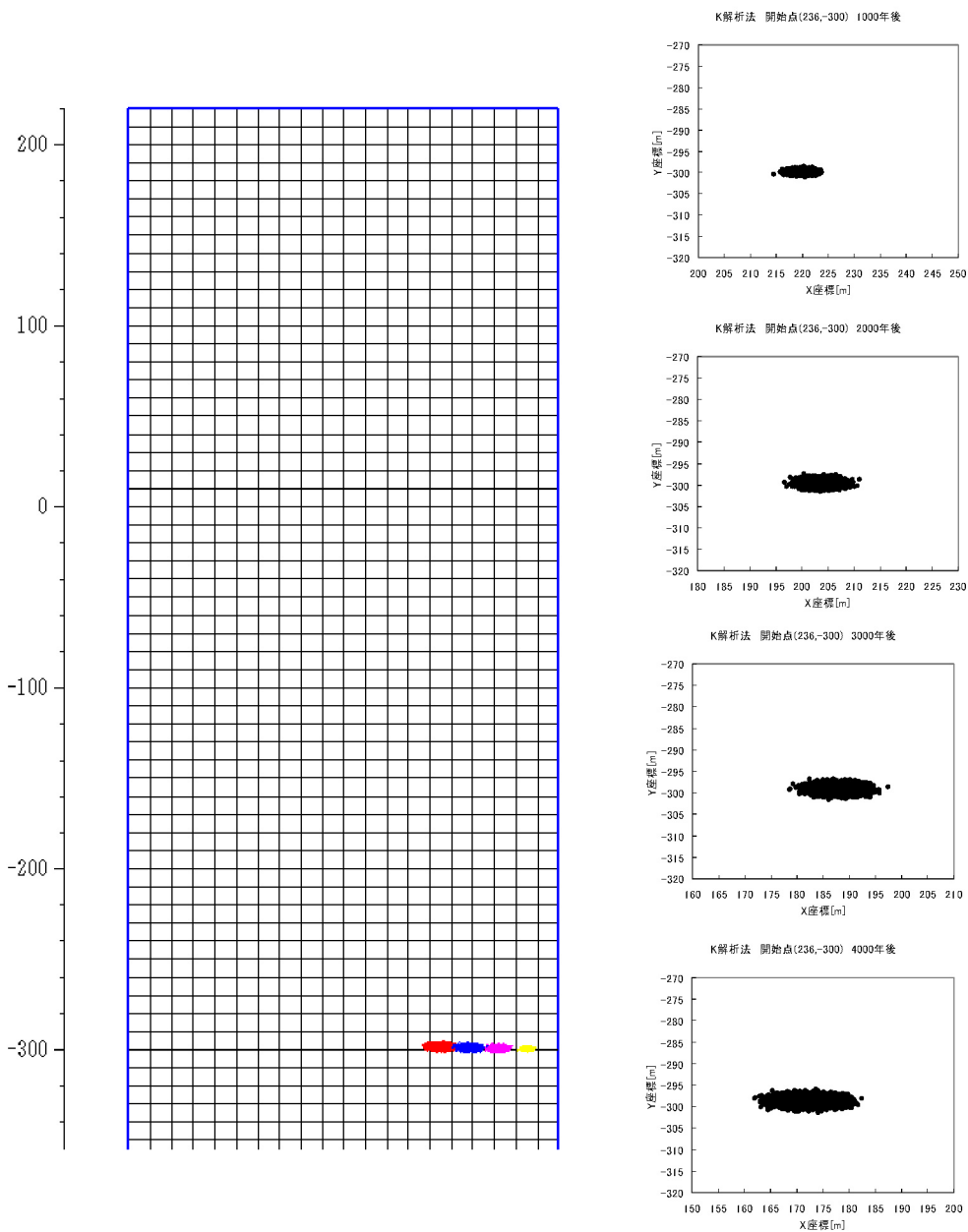


図 3.5-8(b) 解析結果 K解析法 開始点(236, -300)
 1000年～4000年
 右から1000年, 2000年, 3000年, 4000年後の到達点

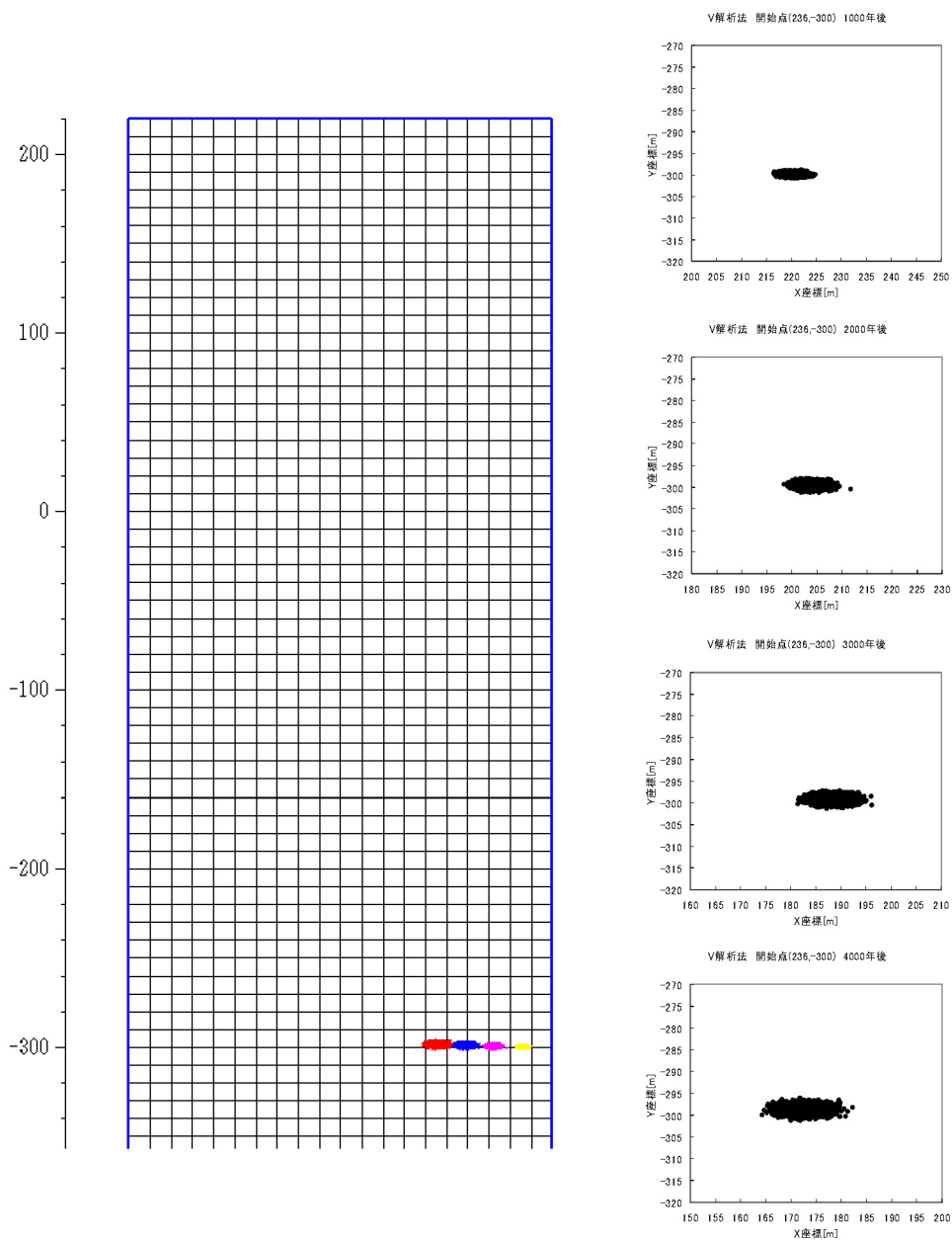


図 3.5-8(c) 解析結果 V解析法 開始点(236, -300)
 1000年~4000年
 右から1000年, 2000年, 3000年, 4000年後の到達点

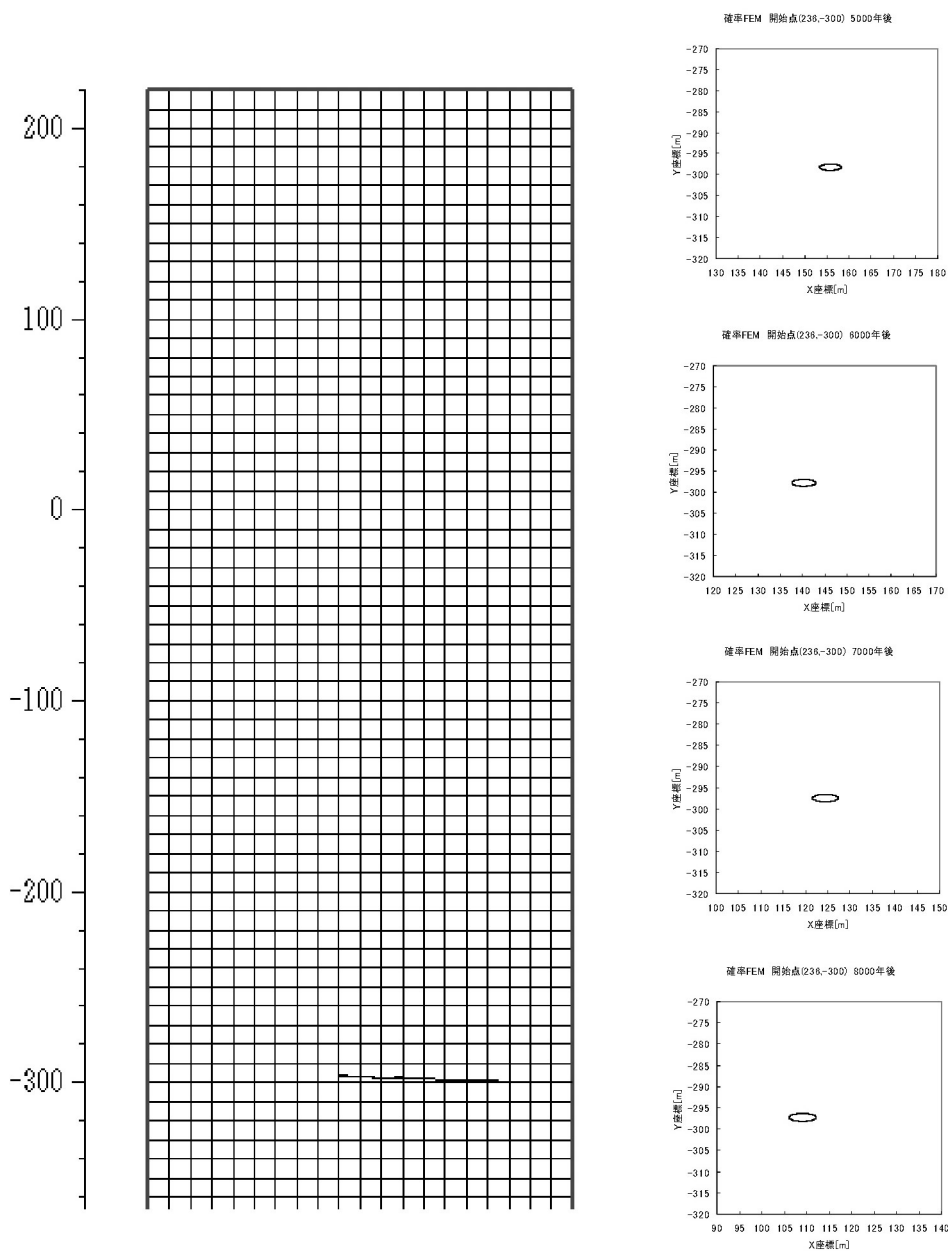


図 3.5-9(a) 解析結果 確率 FEM 開始点(236, -300)
 5000~8000 年
 右から 5000 年, 6000 年, 7000 年, 8000 年後の到達点

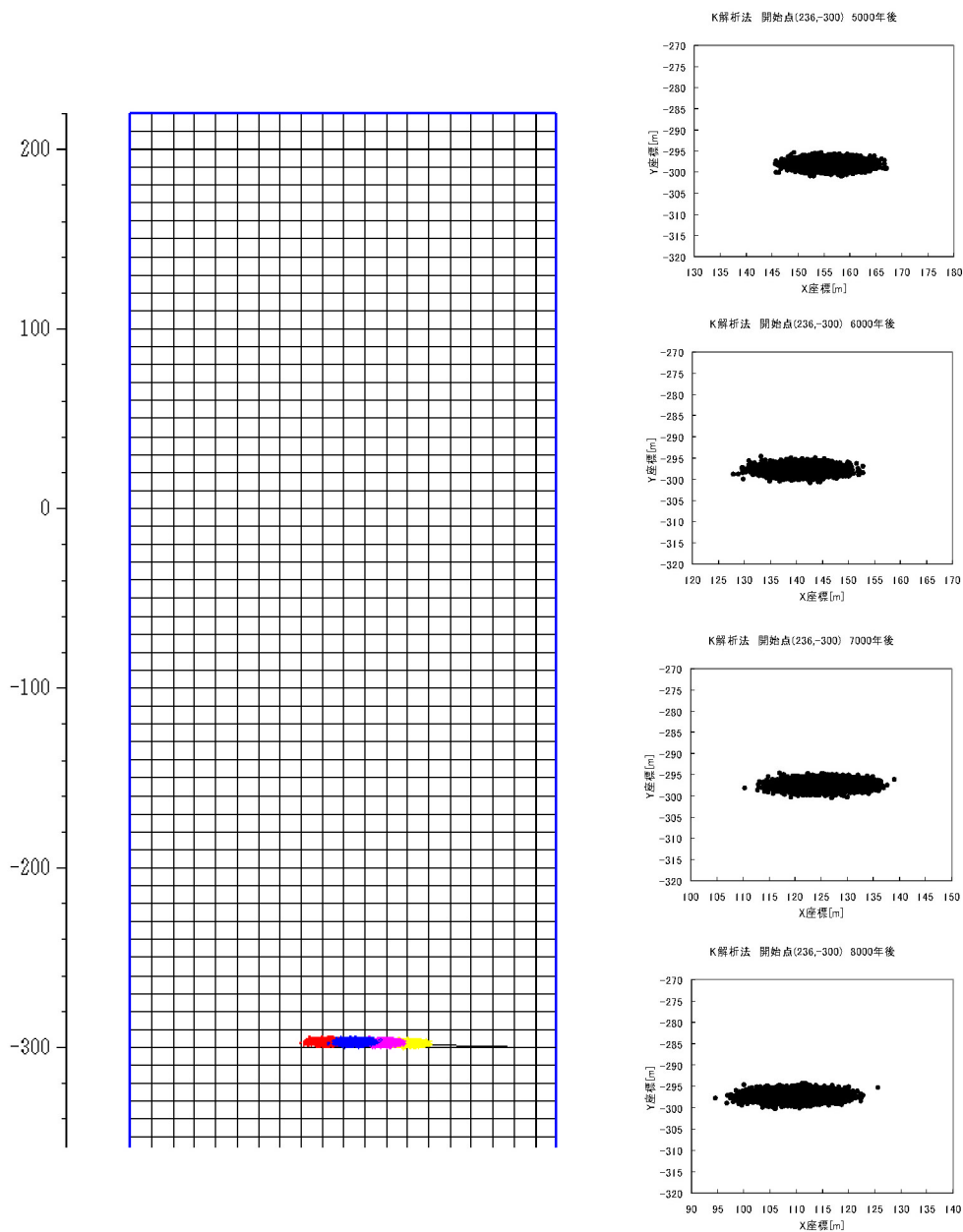


図 3.5-9(b) 解析結果 K解析法 開始点(236,-300)
 5000~8000年
 右から5000年, 6000年, 7000年, 8000年後の到達点

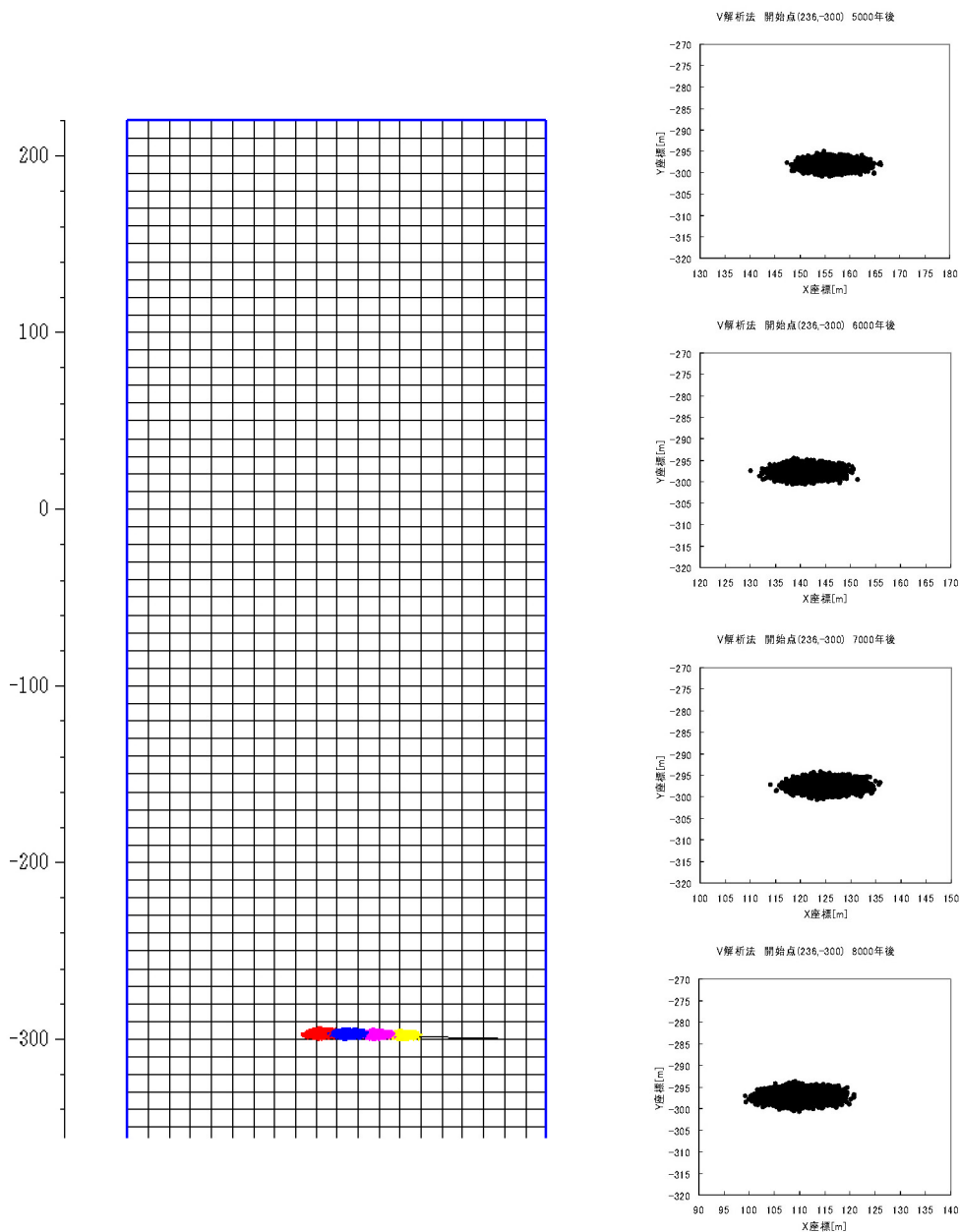


図 3.5-9(c) 解析結果 V解析法 開始点(236,-300)
 5000~8000年
 右から5000年, 6000年, 7000年, 8000年後の到達点

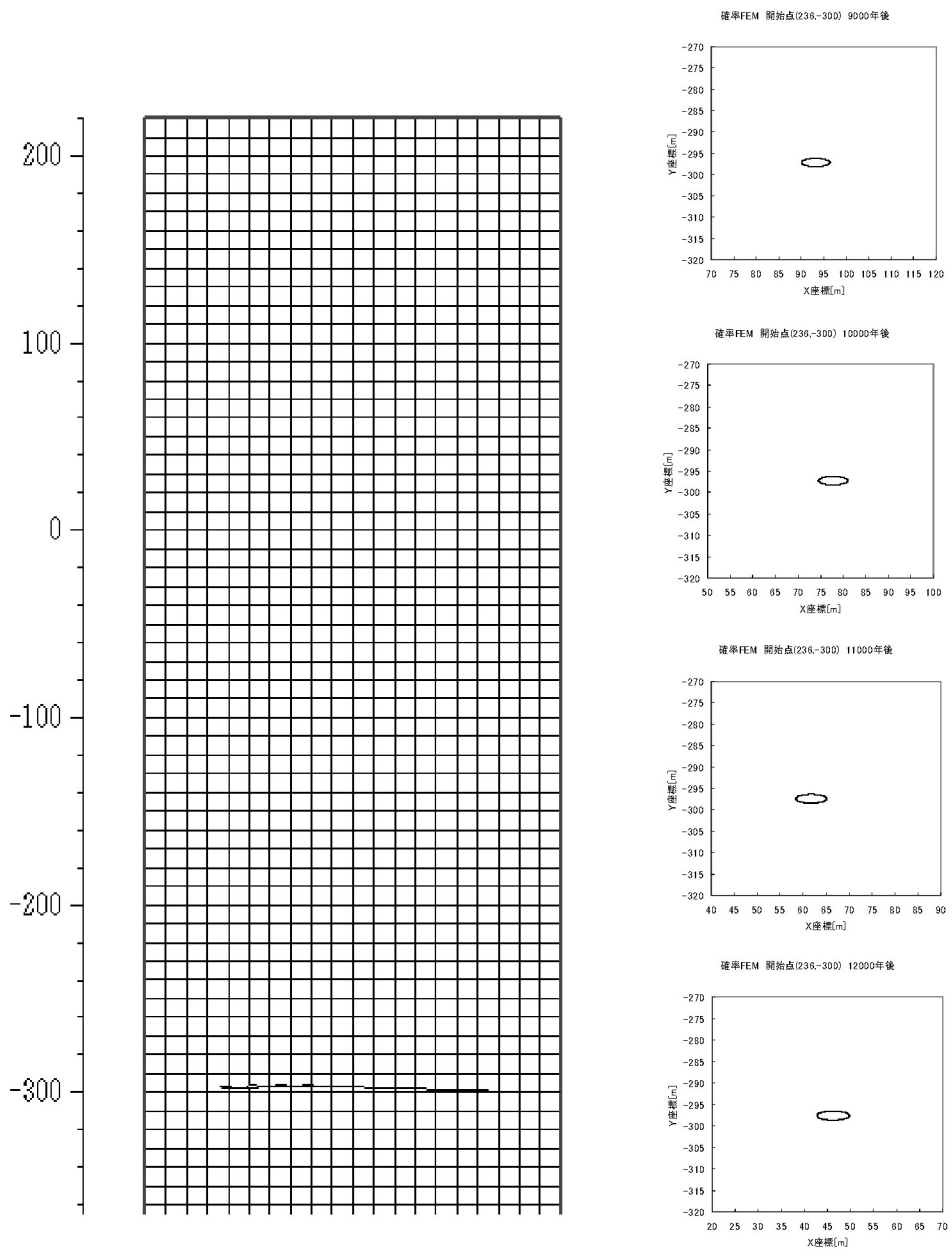


図 3.5-10(a) 解析結果 確率FEM 開始点(236,-300)
 9000年~12000年
 右から9000年, 10000年, 11000年, 12000年後の到達点

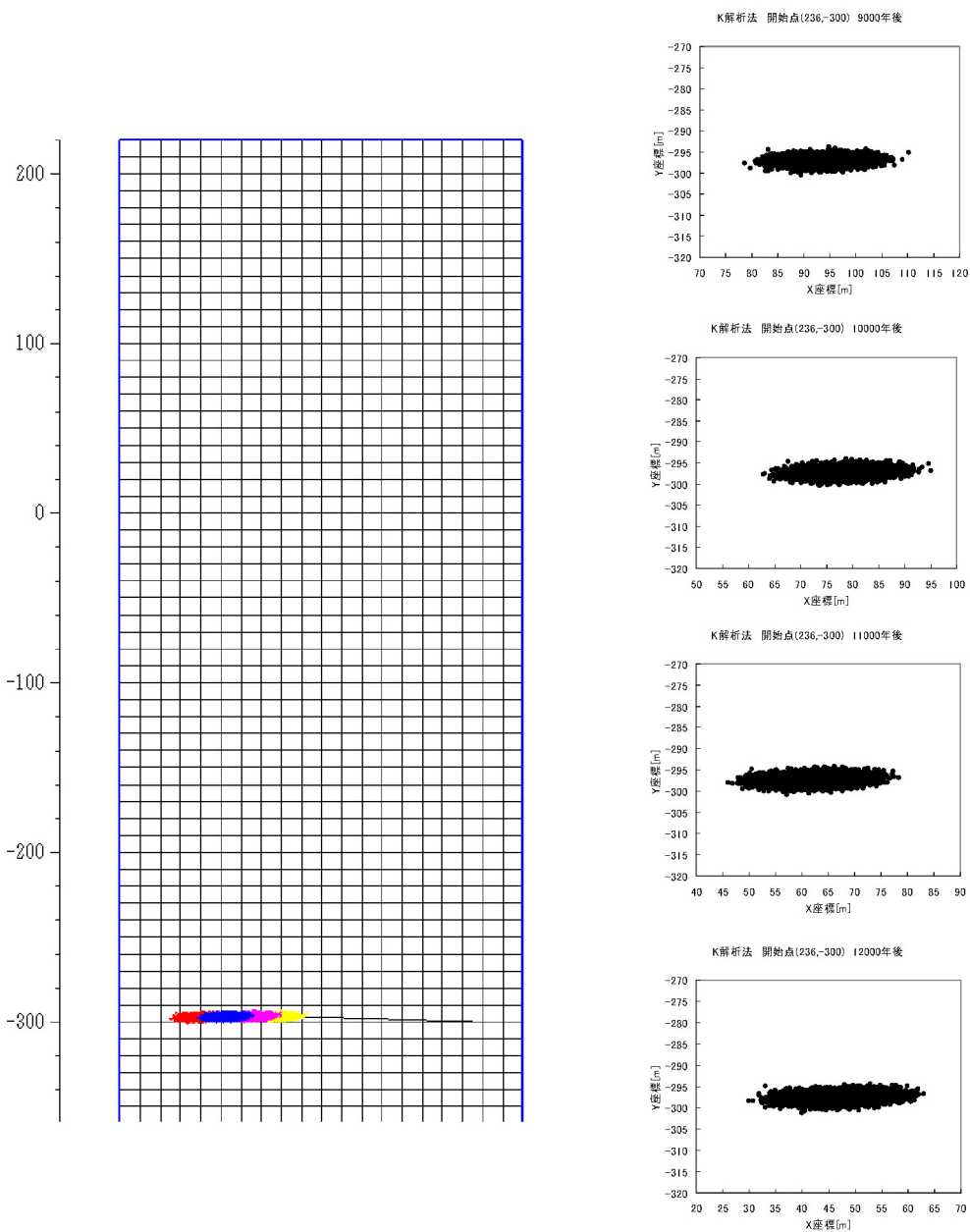


図 3.5-10(b) 解析結果 K 解析法 開始点(236, -300)
 9000 年~12000 年
 右から 9000 年, 10000 年, 11000 年, 12000 年後の到達点

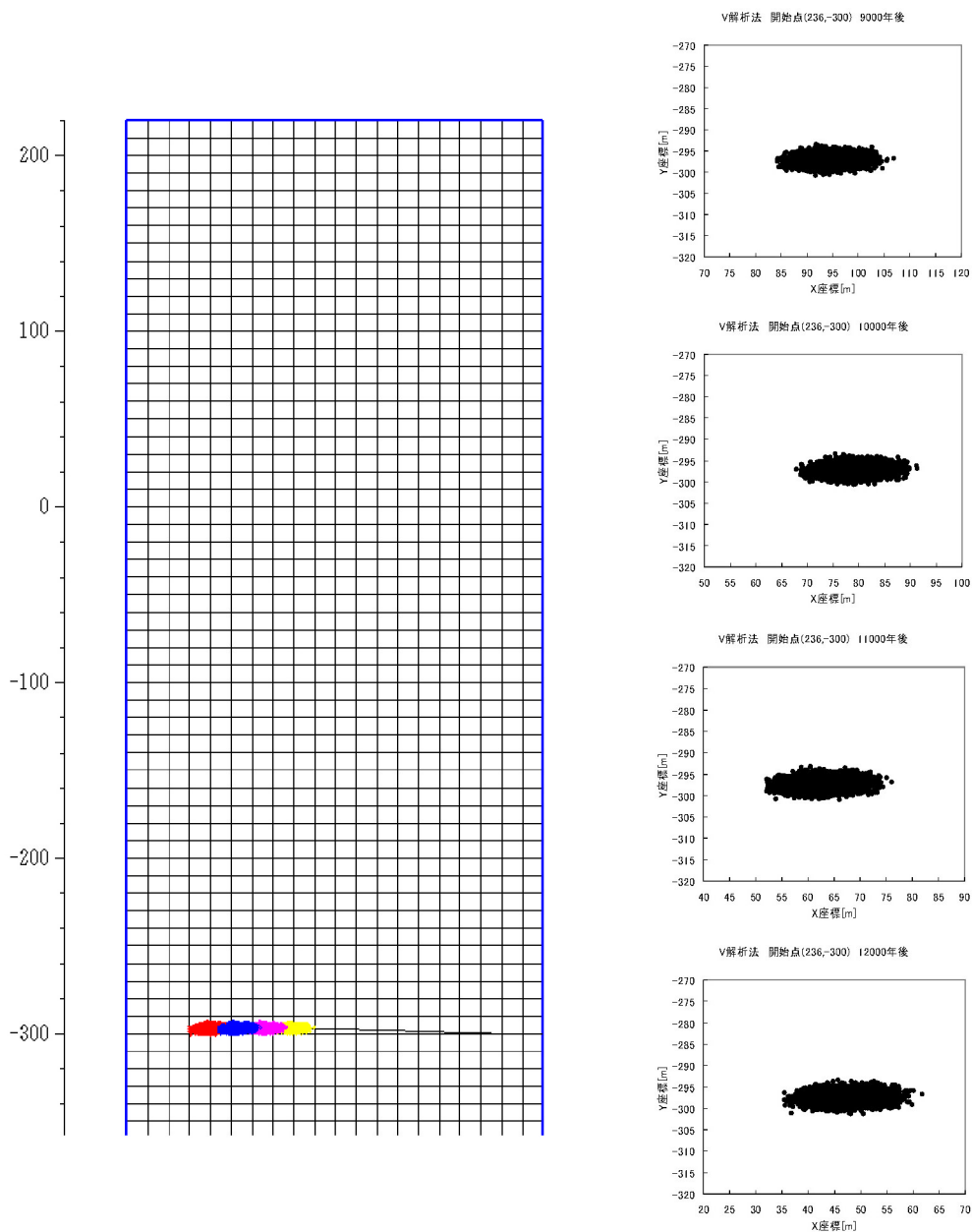


図 3.5-10(c) 解析結果 V解析法 開始点(236, -300)
 9000年~12000年
 右から9000年, 10000年, 11000年, 12000年後の到達点

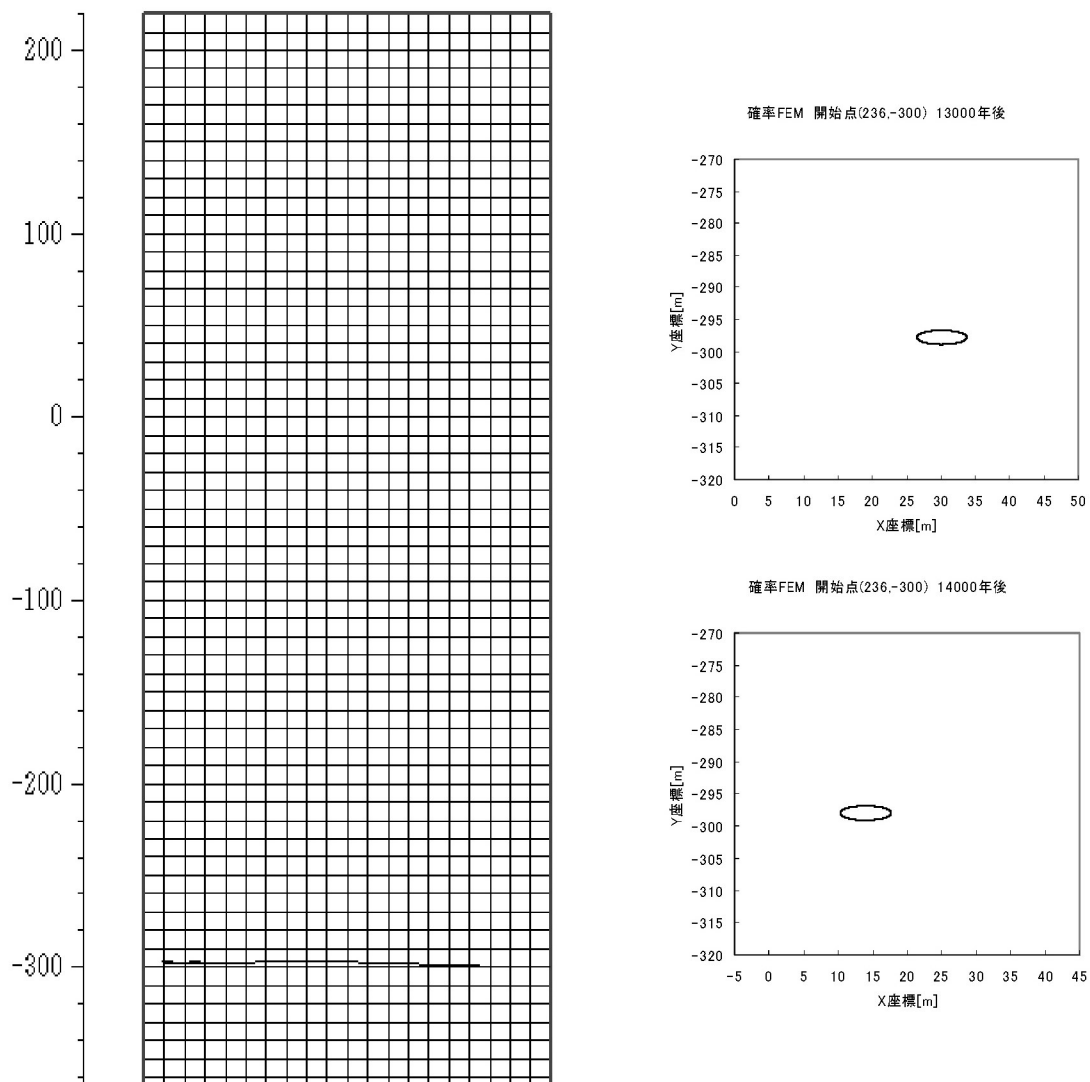


図 3.5-11(a) 解析結果 確率FEM 開始点(236, -300)
13000年~14000年
右から13000年, 14000年後の到達点

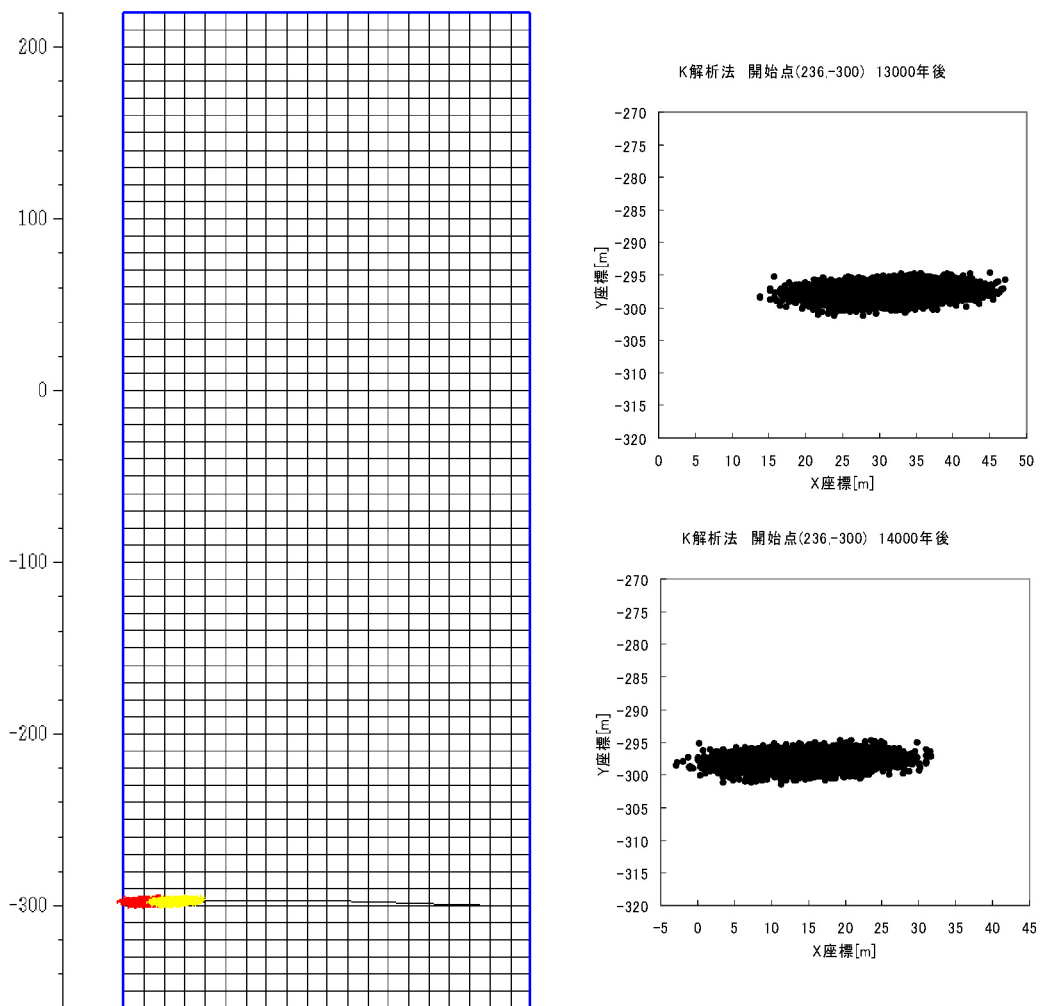


図 3.5-11(b) 解析結果 K解析法 開始点(236, -300)
13000年~14000年
右から13000年, 14000年後の到達点

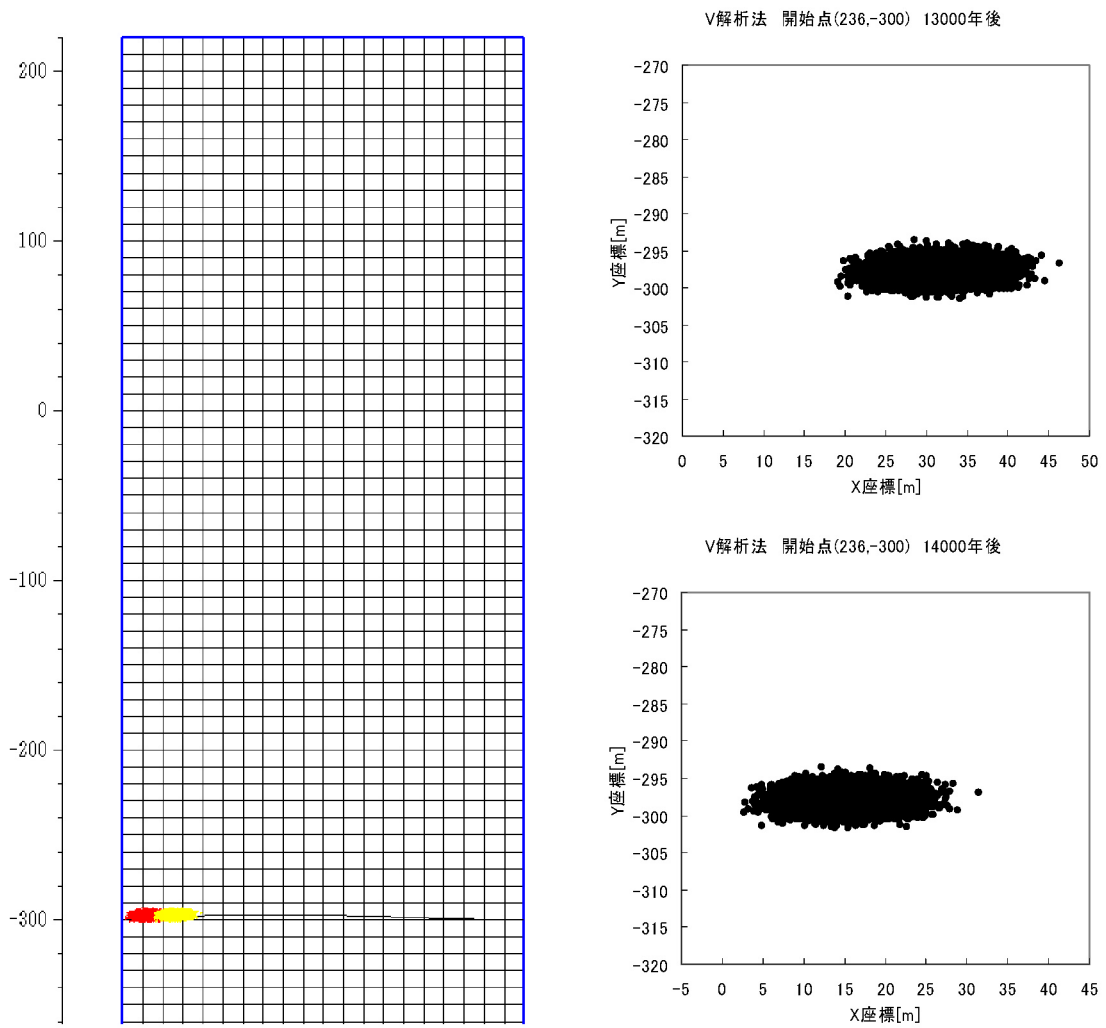


図 3.5-11(c) 解析結果 V解析法 開始点(236,-300)
13000年~14000年
右から13000年, 14000年後の到達点

(2) モンテカルロ法の収束性

モンテカルロ法では、出力した標本が均衡分布に従うまでは、初期値に依存する期間 (burn-in period : 稼動検査期間) であるとして棄却し、それ以降の標本を用いて推論を行うことになる。その場合、試行回数を何回以上行えば初期値に依存せず、均衡分布に収束するのかという問題が生じる。ここでは、K 解析法と V 解析法による解析結果の収束状況を把握するため、標本の時系列プロットによる検討を行った。各図の出力値、移行開始点、移行時間、解析法についてまとめたインデックスを表 3.5-2 に示す。

表 3.5-2 収束確認時系列プロットのインデックス

図番号	出力値	移行開始点	移行時間	解析法
図 3.5-12～図 3.5-14	期待値	(236,0)	1000～3000 年	(a)K 解析法 (b)V 解析法
図 3.5-15～図 3.5-19		(236,-100)	1000～5000 年	
図 3.5-20～図 3.5-34		(236,-200)	1000～15000 年	
図 3.5-35～図 3.5-48		(236,-300)	1000～14000 年	
図 3.5-49～図 3.5-51	標準偏差	(236,0)	1000～3000 年	
図 3.5-52～図 3.5-56		(236,-100)	1000～5000 年	
図 3.5-57～図 3.5-71		(236,-200)	1000～15000 年	
図 3.5-72～図 3.5-85		(236,-300)	1000～14000 年	

図 3.5-12～図 3.5-48 は到達点の期待値の X 座標と Y 座標を示している。それぞれの図の縦軸の幅は比較を容易にするため 5[m] に統一している。また、図 3.5-49～図 3.5-85 は到達点の X 方向分散と Y 方向分散を示している。各図の縦軸は比較を容易にするため、最大値を 10[m] に統一している。以下にそれぞれの図での収束状況について列挙する。

- ・ 図 3.5-12～図 3.5-14

K 解析法と V 解析法ともに到達点の期待値の X 座標および Y 座標は、1000 年後は約 200 回、2000 年後は約 700 回、3000 年後は約 1000 回試行回数で収束しており、経過時間が長くなると収束するのに必要な試行回数が多くなっていることがわかる。

- ・ 図 3.5-15～図 3.5-19

図 3.5-15(a) と (b) より X 座標は試行回数約 60～70 回で収束しているが、Y 座標は初期からほぼ収束している。図 3.5-2 より 1000 年までの移行経路はほぼ直線であることから、Y 方向のバラツキが極めて小さいため収束が早かったのではないかと考えられる。図 3.5-16～図 3.5-18 より K 解析法と V 解析法ともに試行回数が約 200～1000 回で収束していることがわかる。最も収束状況が遅いと考えられる図 3.5-19 の 5000 年後でも試行回数が約 2000 回でほぼ収束していることが確認できる。

- 図 3.5-20～図 3.5-34

図 3.5-20～図 3.5-26 より，移行開始点(236,-100)では移行時間が約 7000 年後までは，試行回数約 100 回以内で収束している。図 3.5-27～図 3.5-34 より，移行時間 8000 年～15000 年での X 座標は試行回数が約 100 回～300 回で収束している。Y 座標の収束状況は X 座標と同様なものもあるが，全体的にやや早く収束している傾向にある。

- 図 3.5-35～図 3.5-48

図 3.5-35～図 3.5-48 より，移行開始点(236,-300)の場合試行回数が約 100 回～1000 回で X 座標は収束していることがわかる。また，Y 座標はさらに早く収束している傾向にある。

- 図 3.5-49～図 3.5-85

移行時間が長くなると標準偏差は大きくなる傾向にある。また，X 方向標準偏差は Y 方向標準偏差より大きくなっている。いずれの図でも試行回数が約 100 回程度でほぼ収束していることがわかる。

以上より，移行時間，移行経路の特徴（複雑さ等），流速などによって，モンテカルロ法の収束状況は異なることが明らかとなった。K 解析法や V 解析法を行う場合には最も収束状況が悪いと考えられるケース（流速が大きく流路が複雑なケース）で収束状況を確認してから，算出値を使用する必要があることが明らかとなった。本研究のデータの場合，約 1000 回以上の試行回数であれば十分に収束していると考えられる。

開始点(236,0) 1000年後 K解析法

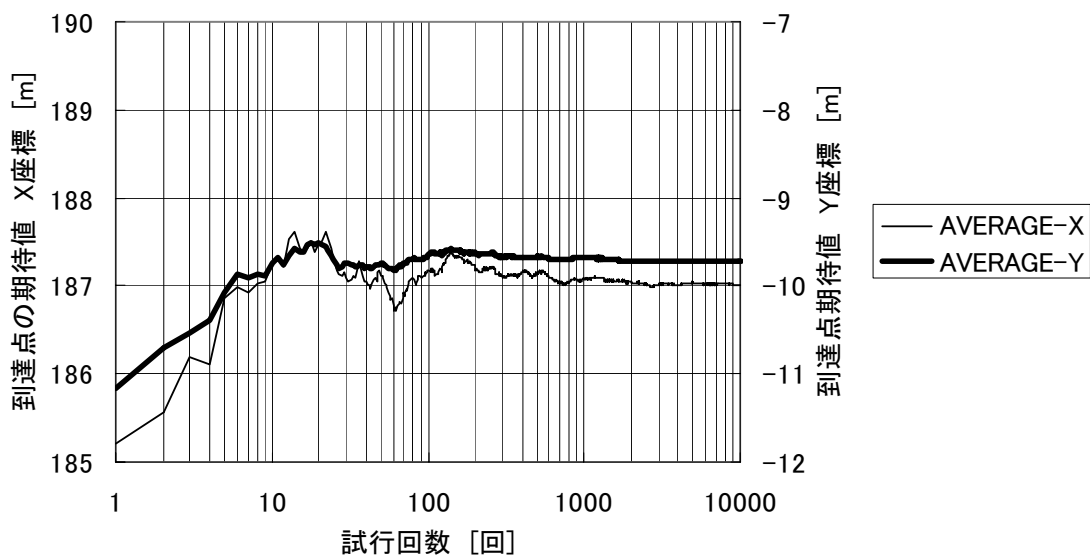


図 3.5-12(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,0) 1000年後

開始点(236,0) 1000年後 V解析法

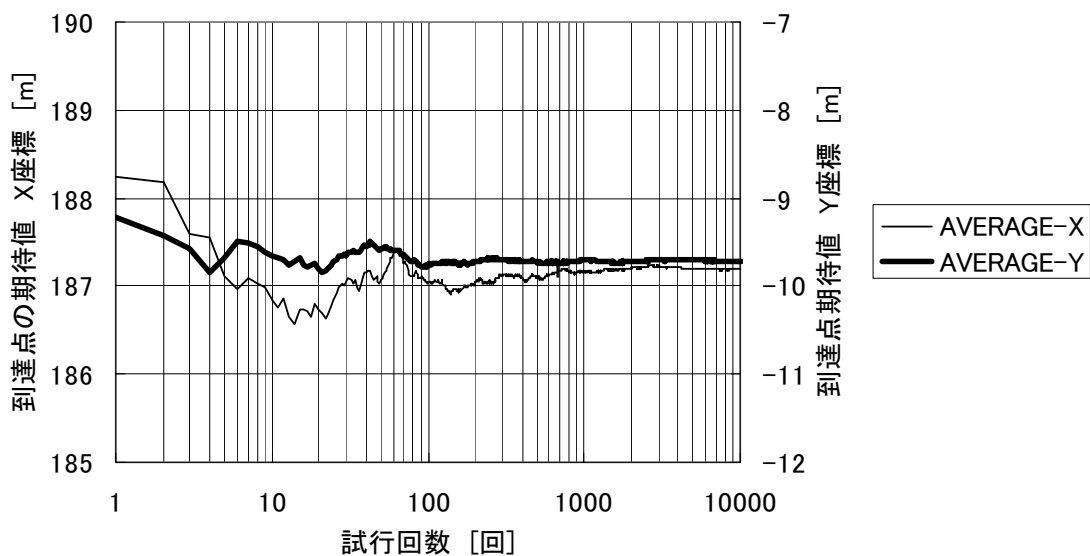


図 3.5-12(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,0) 1000年後

開始点(236,0) 2000年後 K解析法

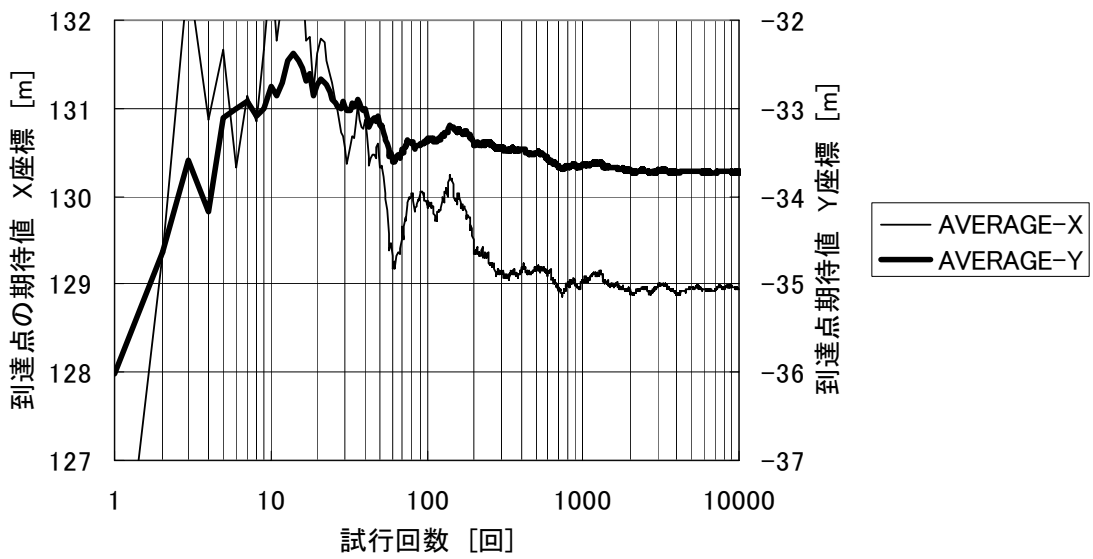


図 3.5-13(a) 収束性の確認 K 解析法 期待値 開始点(236,0) 2000 年後

開始点(236,0) 2000年後 V解析法

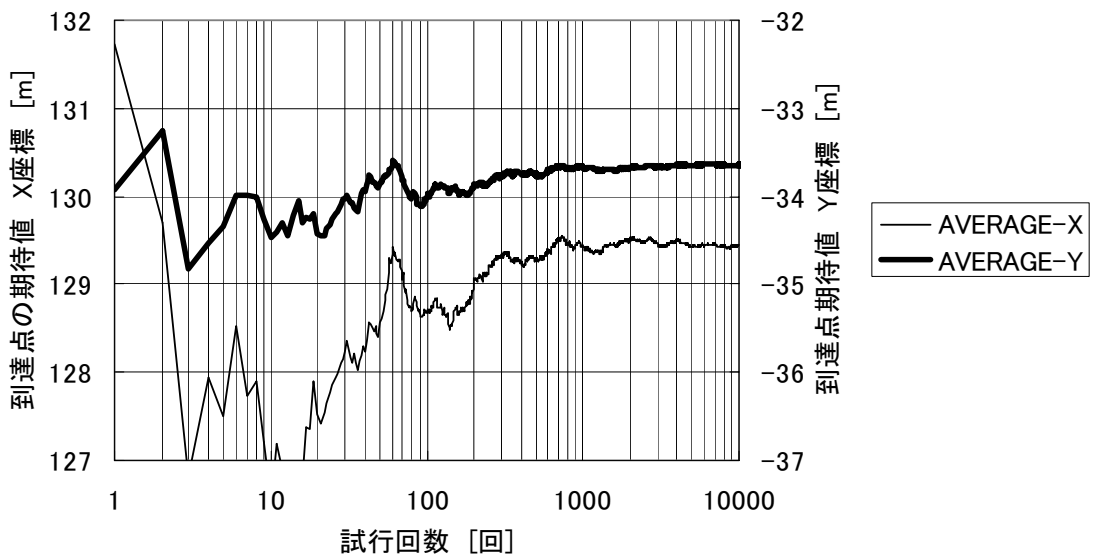


図 3.5-13(b) 収束性の確認 V 解析法 期待値 開始点(236,0) 2000 年後

開始点(236,0) 3000年後 K解析法

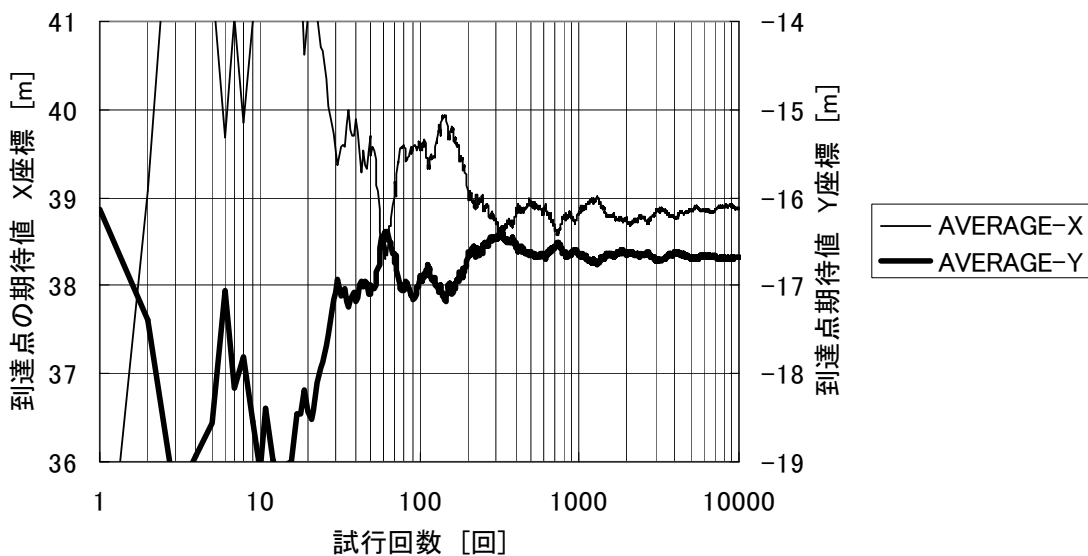


図 3.5-14(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,0) 3000年後

開始点(236,0) 3000年後 V解析法

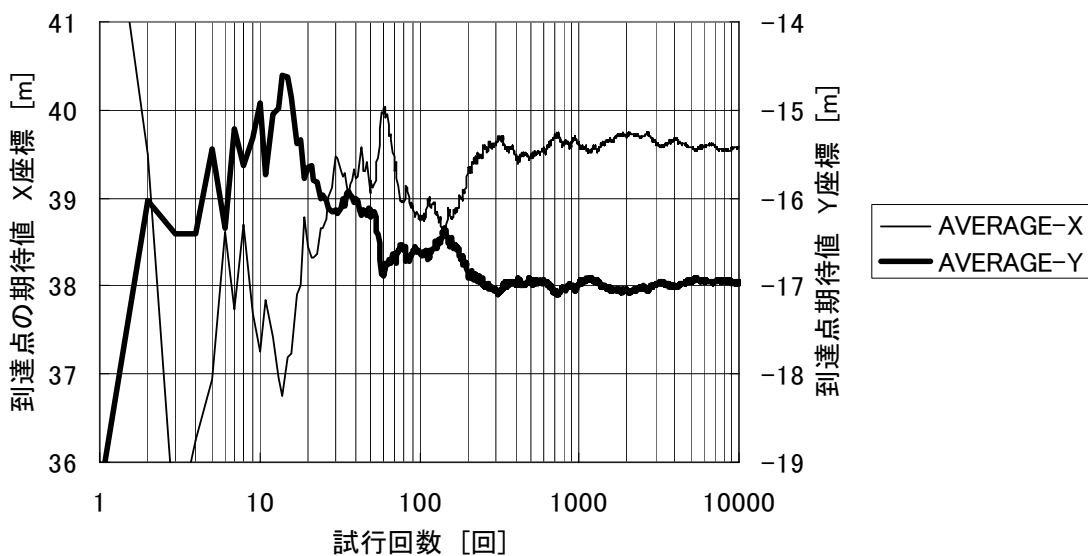


図 3.5-14(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,0) 3000年後

開始点(236,-100) 1000年後 K解析法

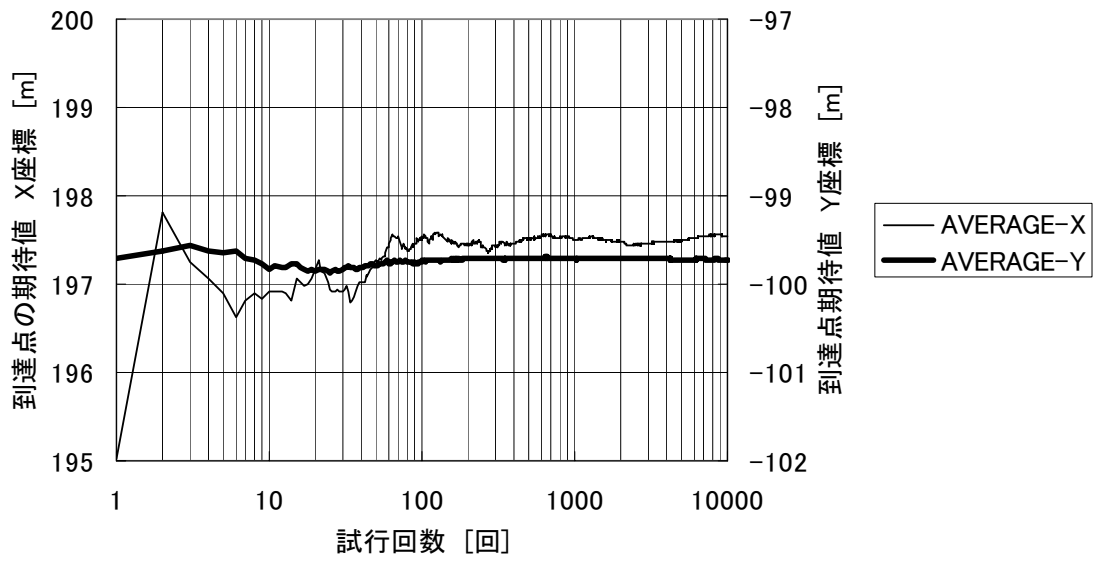


図 3.5-15(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-100) 1000年後

開始点(236,-100) 1000年後 V解析法

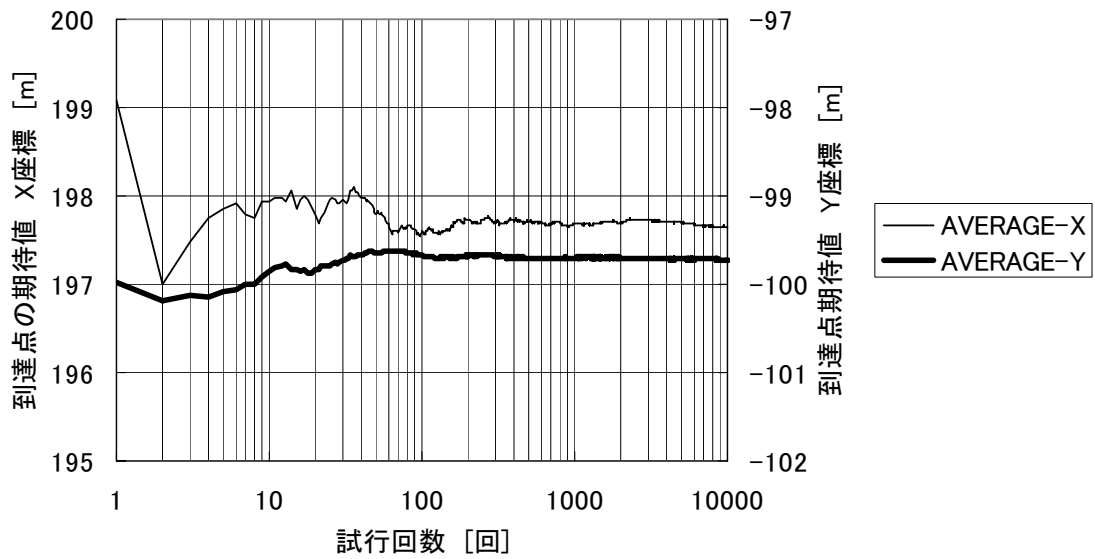


図 3.5-15(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-100) 1000年後

開始点(236,-100) 2000年後 K解析法

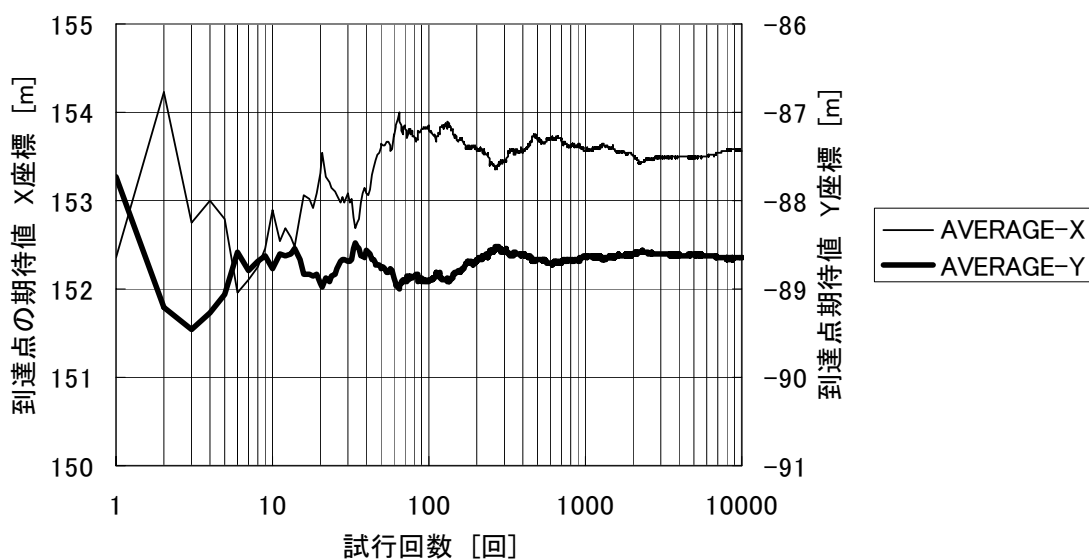


図 3.5-16(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-100) 2000年後

開始点(236,-100) 2000年後 V解析法

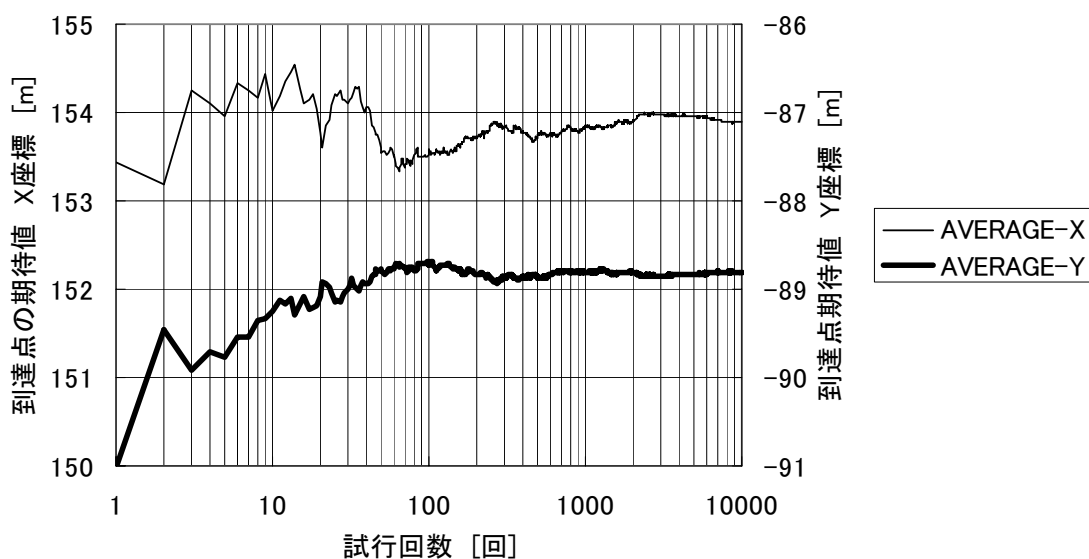


図 3.5-16(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-100) 2000年後

開始点(236,-100) 3000年後 K解析法

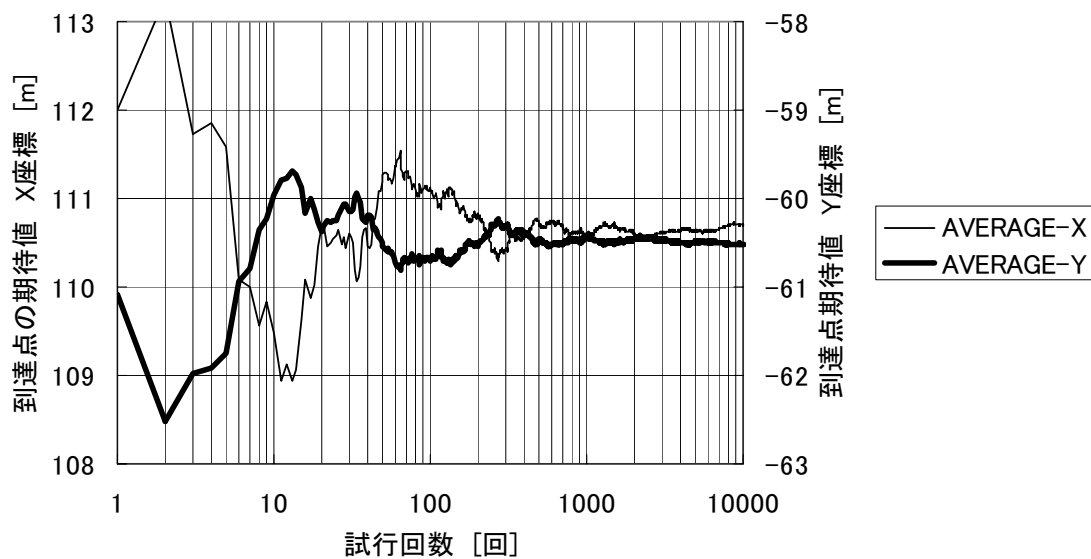


図 3.5-17(a) 収束性の確認 K 解析法 期待値 開始点 (236, -100) 3000 年後

開始点(236,-100) 3000年後 V解析法

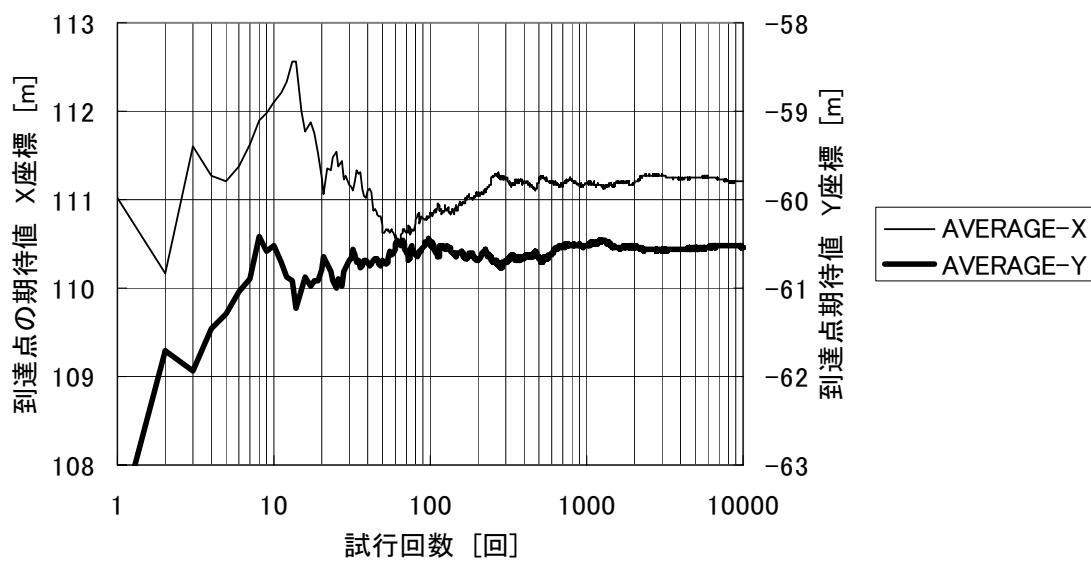


図 3.5-17(b) 収束性の確認 V 解析法 期待値 開始点 (236, -100) 3000 年後

開始点(236,-100) 4000年後 K解析法

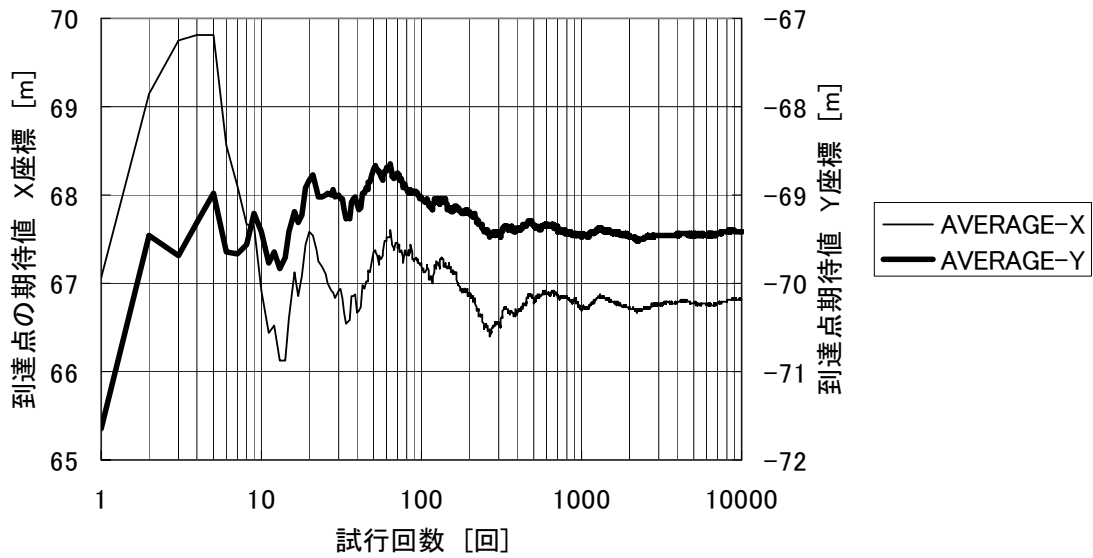


図 3.5-18 (a) 収束性の確認 K 解析法 期待値 開始点 (236, -100) 4000 年後

開始点(236,-100) 4000年後 V解析法

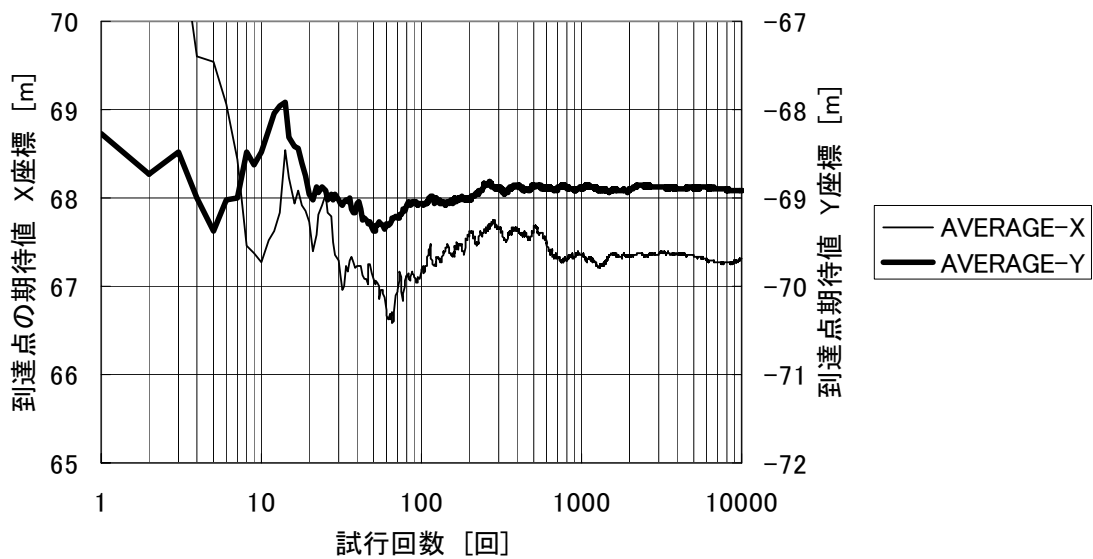


図 3.5-18 (b) 収束性の確認 V 解析法 期待値 開始点 (236, -100) 4000 年後

開始点(236,-100) 5000年後 K解析法

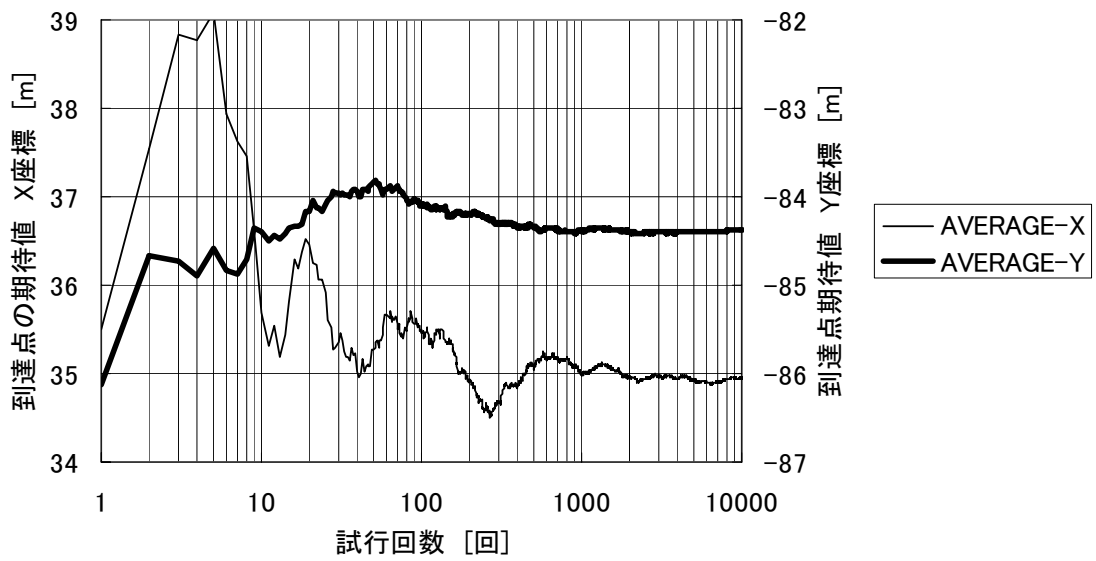


図 3.5-19(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-100) 5000年後

開始点(236,-100) 5000年後 V解析法

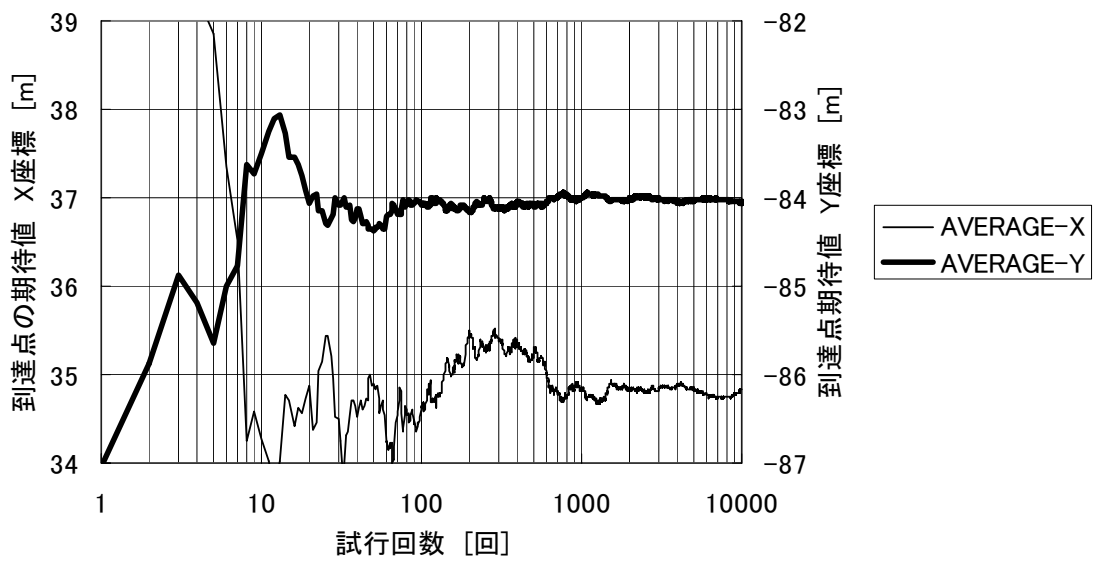


図 3.5-19(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-100) 5000年後

開始点(236,-200) 1000年後 K解析法

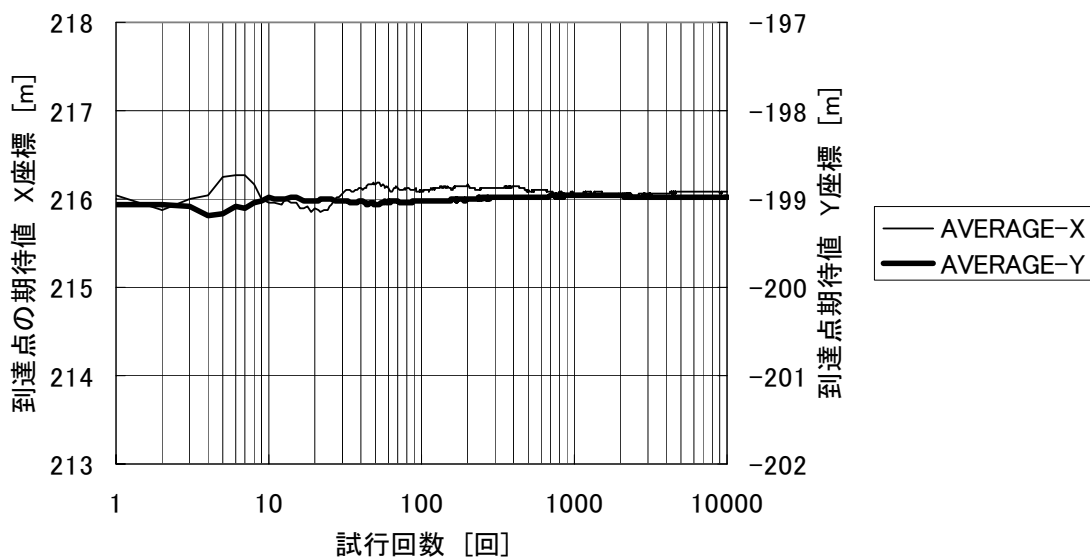


図 3.5-20(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-200) 1000年後

開始点(236,-200) 1000年後 V解析法

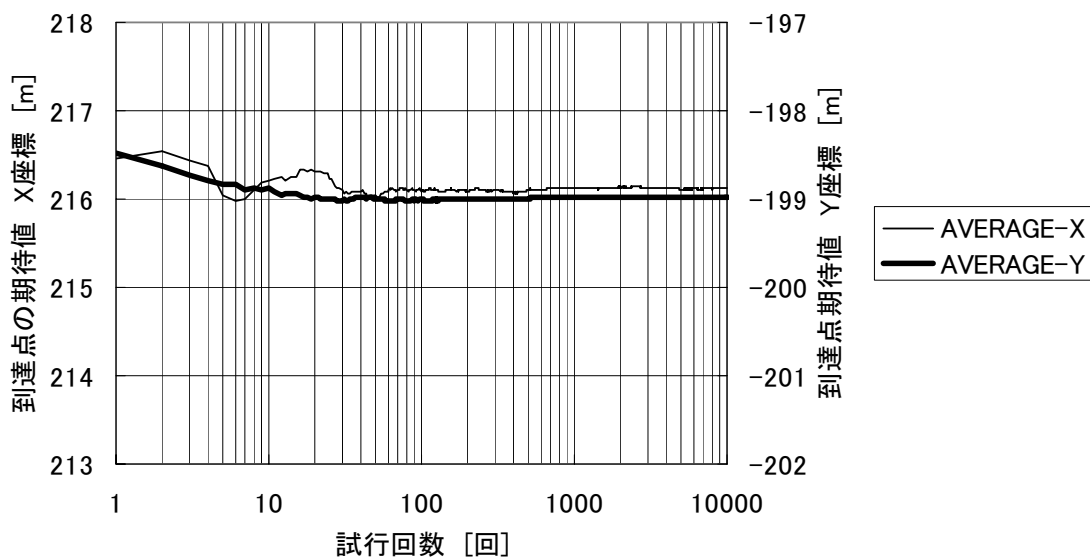


図 3.5-20(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-200) 1000年後

開始点(236,-200) 2000年後 K解析法

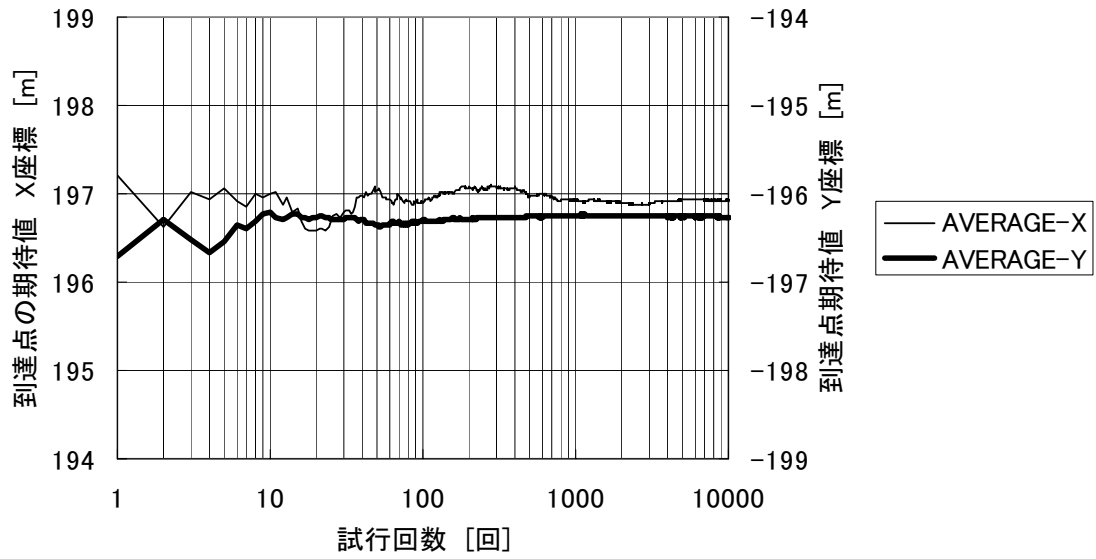


図 3.5-21(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-200) 2000年後

開始点(236,-200) 2000年後 V解析法

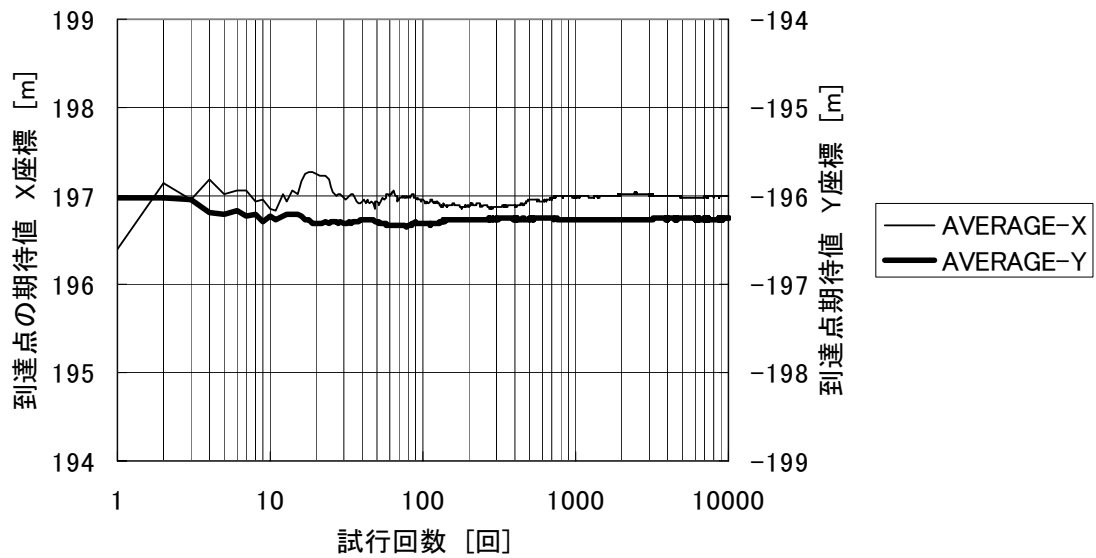


図 3.5-21(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-200) 2000年後

開始点(236,-200) 3000年後 K解析法

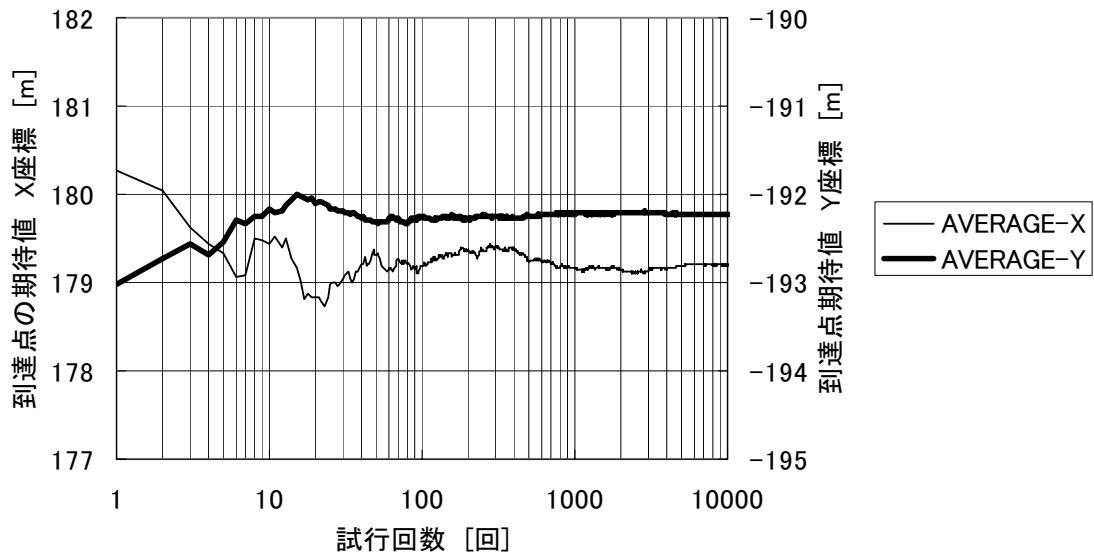


図 3.5-22(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-200) 3000年後

開始点(236,-200) 3000年後 V解析法

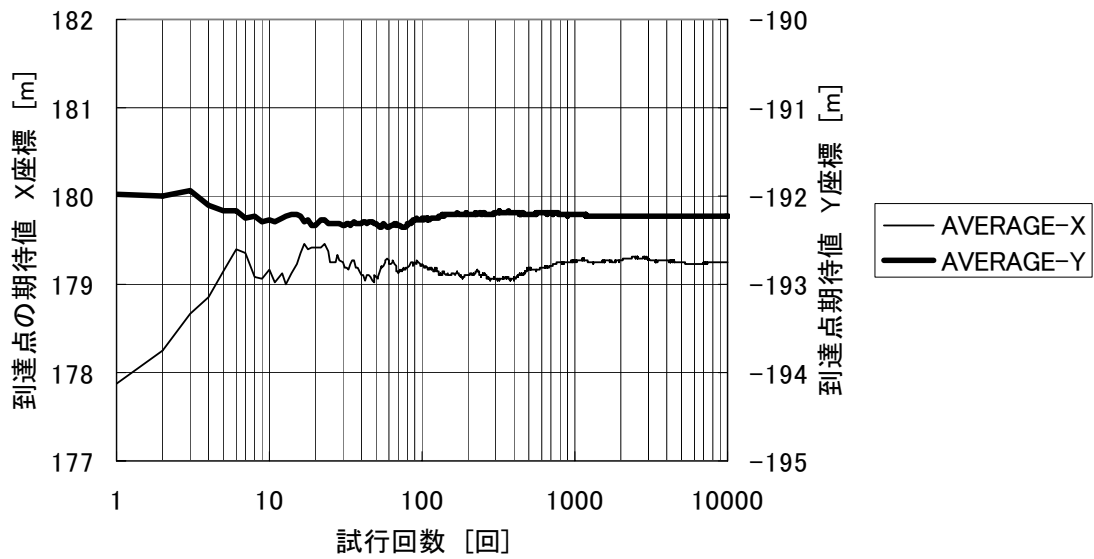


図 3.5-22(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-200) 3000年後

開始点(236,-200) 4000年後 K解析法

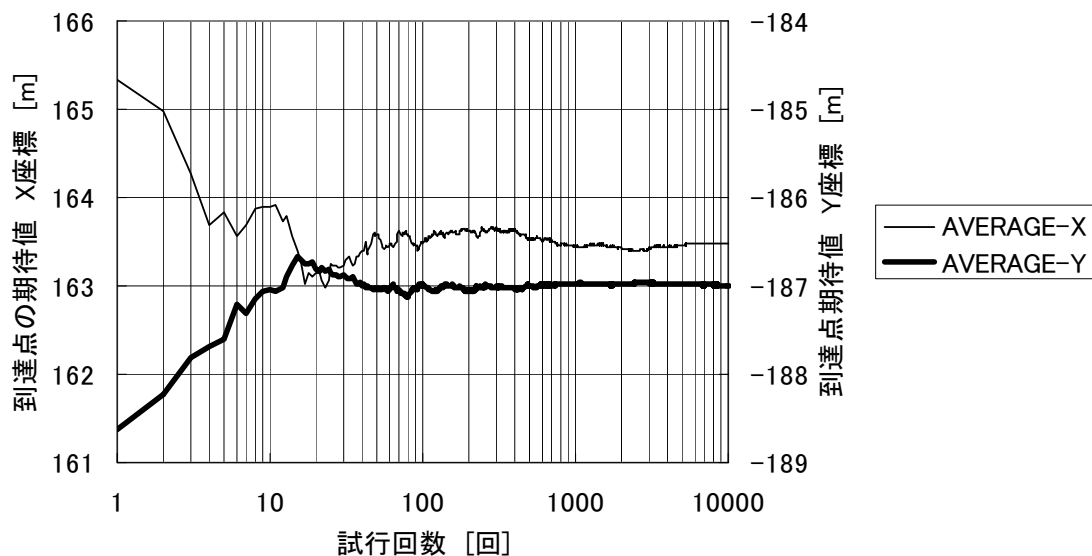


図 3.5-23(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-200) 4000年後

開始点(236,-200) 4000年後 V解析法

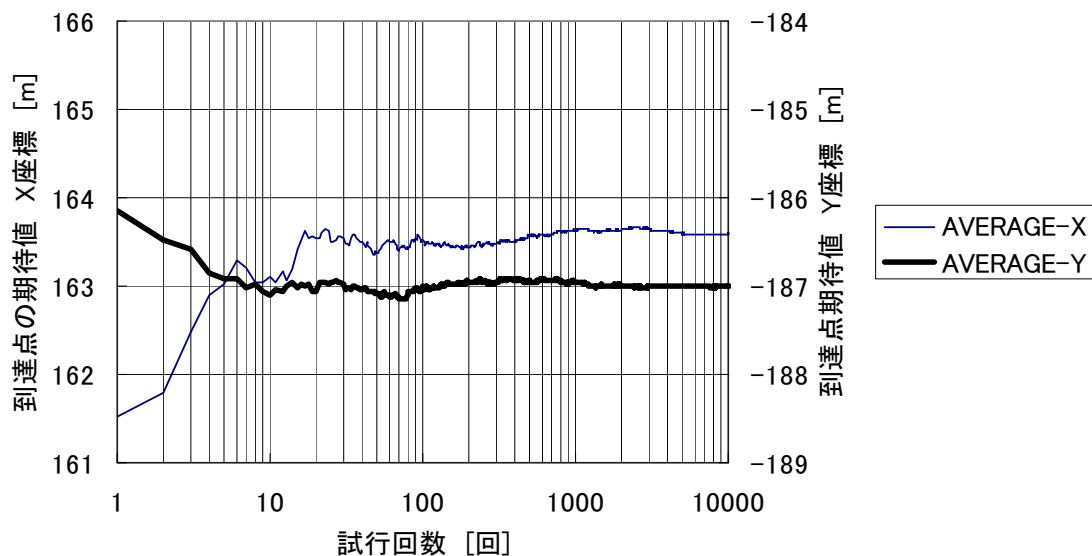


図 3.5-23(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-200) 4000年後

開始点(236,-200) 5000年後 K解析法

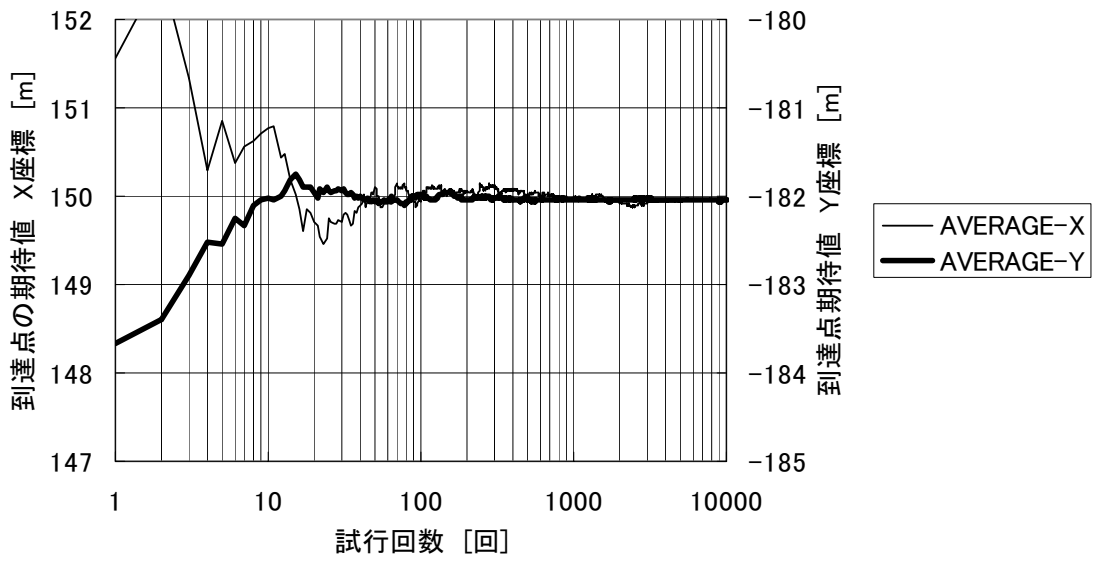


図 3.5-24 (a) 収束性の確認 K 解析法 期待値 開始点 (236, -200) 5000 年後

開始点(236,-200) 5000年後 V解析法

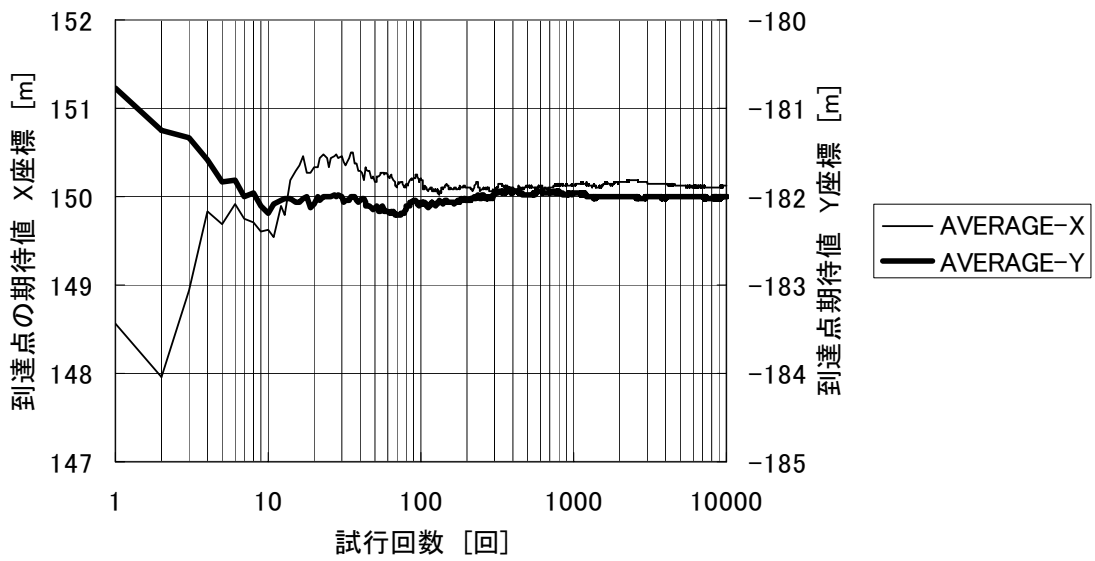


図 3.5-24 (b) 収束性の確認 V 解析法 期待値 開始点 (236, -200) 5000 年後

開始点(236,-200) 6000年後 K解析法

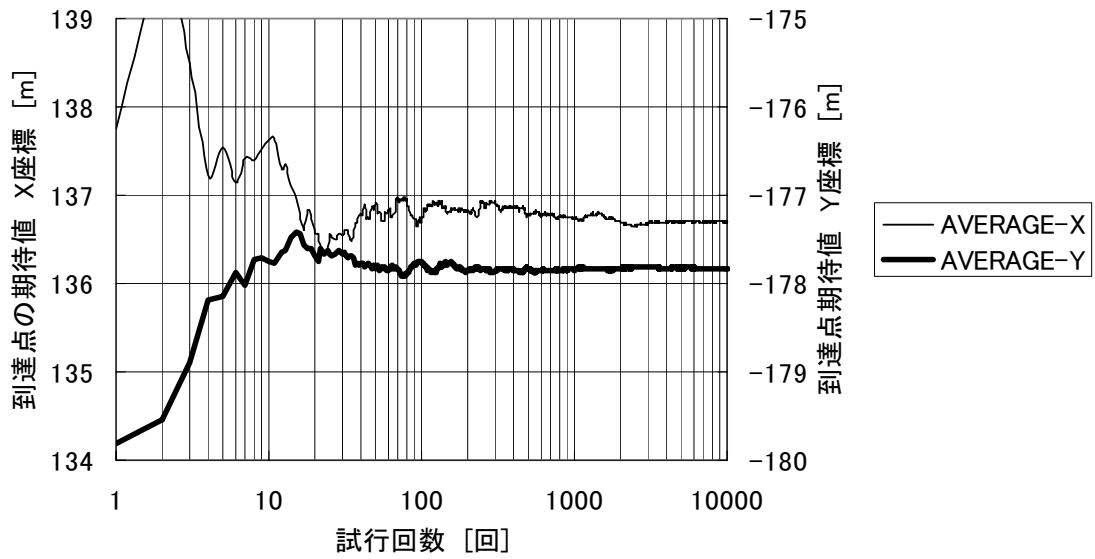


図 3.5-25 (a) 収束性の確認 K 解析法 期待値 開始点 (236, -200) 6000 年後

開始点(236,-200) 6000年後 V解析法

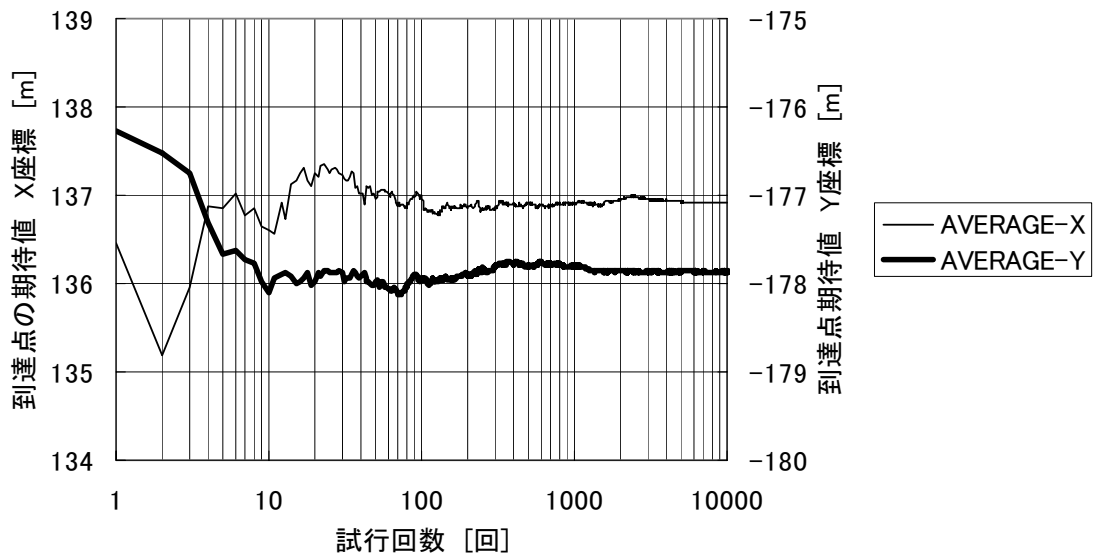


図 3.5-25 (b) 収束性の確認 V 解析法 期待値 開始点 (236, -200) 6000 年後

開始点(236,-200) 7000年後 K解析法

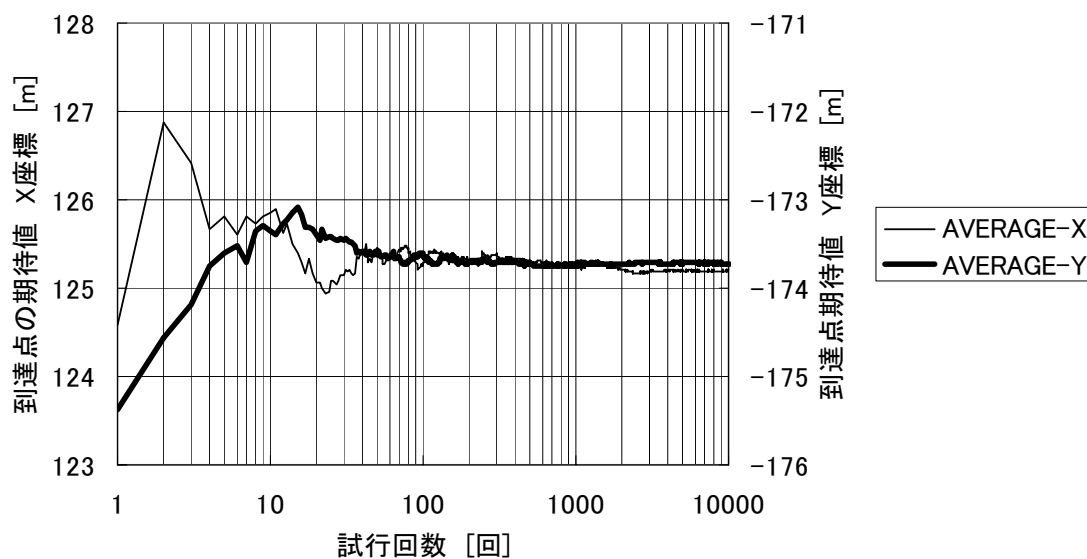


図 3.5-26(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-200) 7000年後

開始点(236,-200) 7000年後 V解析法

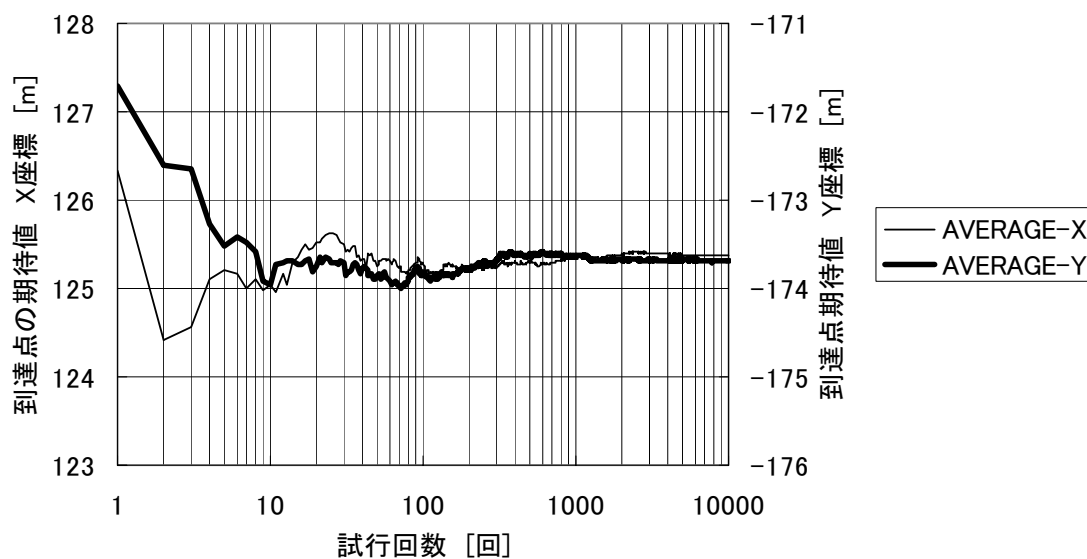


図 3.5-26(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-200) 7000年後

開始点(236,-200) 8000年後 K解析法

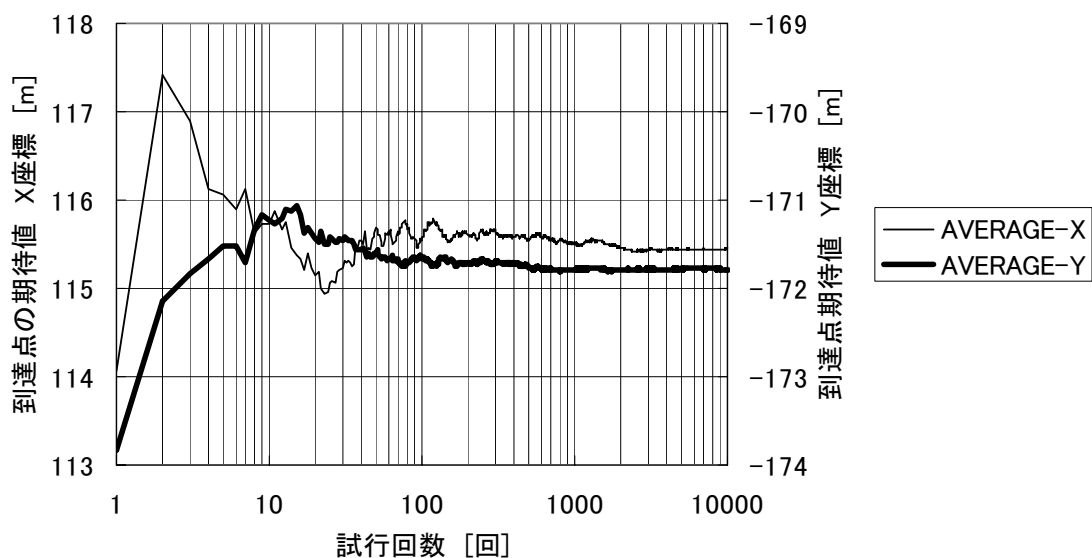


図 3.5-27(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-200) 8000年後

開始点(236,-200) 8000年後 V解析法

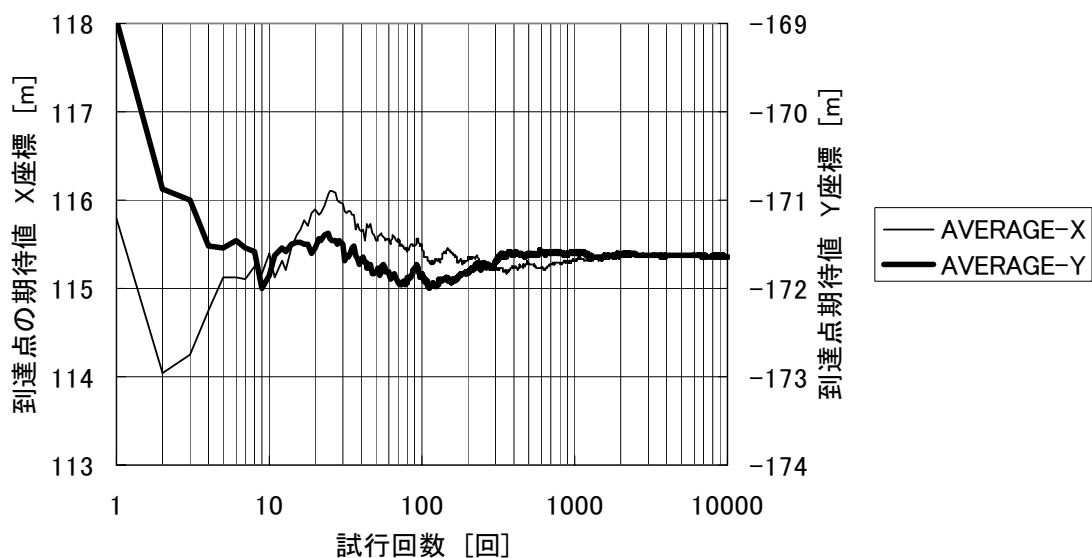


図 3.5-27(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-200) 8000年後

開始点(236,-200) 9000年後 K解析法

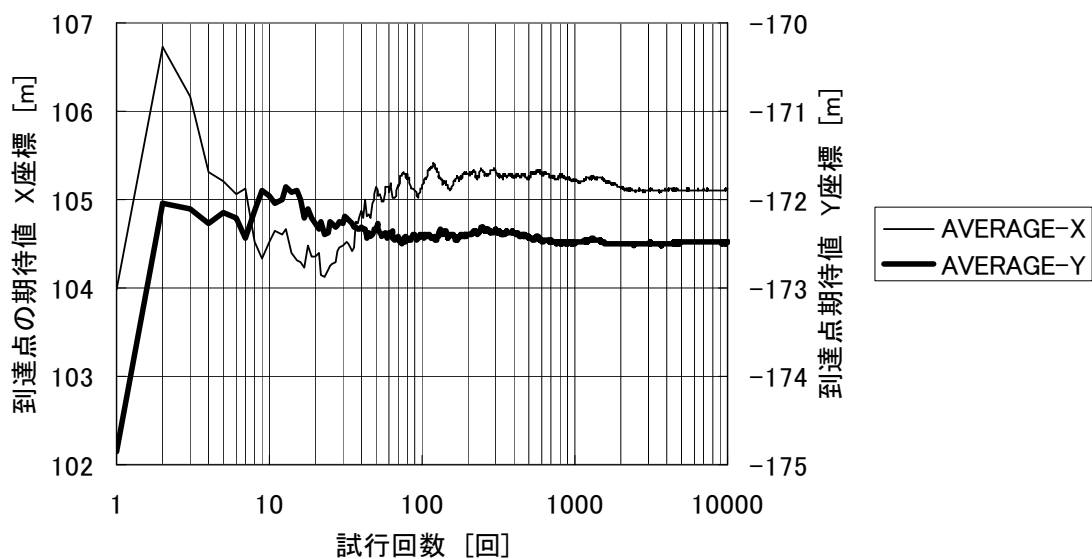


図 3.5-28(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-200) 9000年後

開始点(236,-200) 9000年後 V解析法

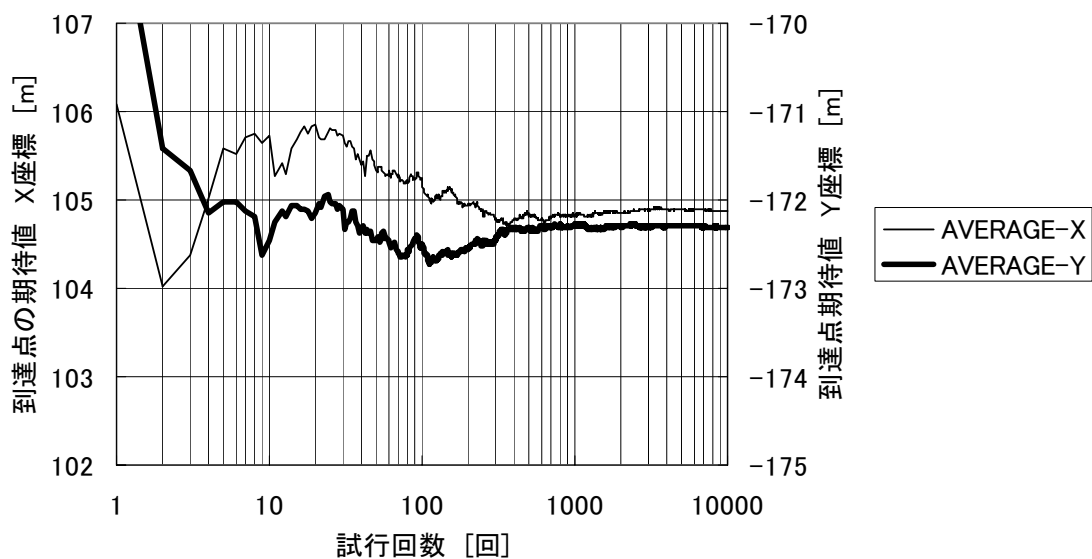


図 3.5-28(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-200) 9000年後

開始点(236,-200) 10000年後 K解析法

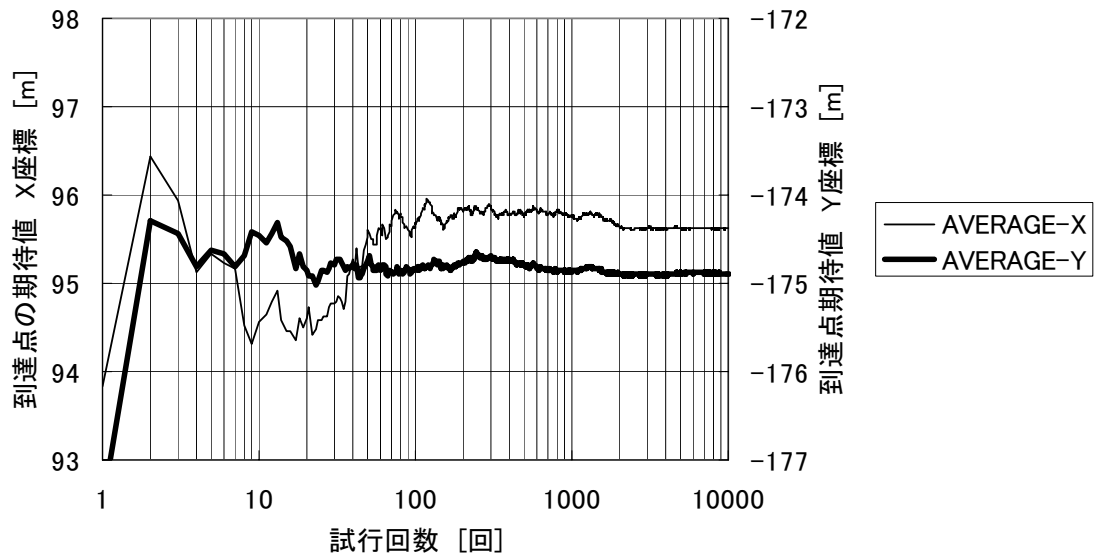


図 3.5-29(a) 収束性の確認 K 解析法 期待値 開始点 (236, -200) 10000 年後

開始点(236,-200) 10000年後 V解析法

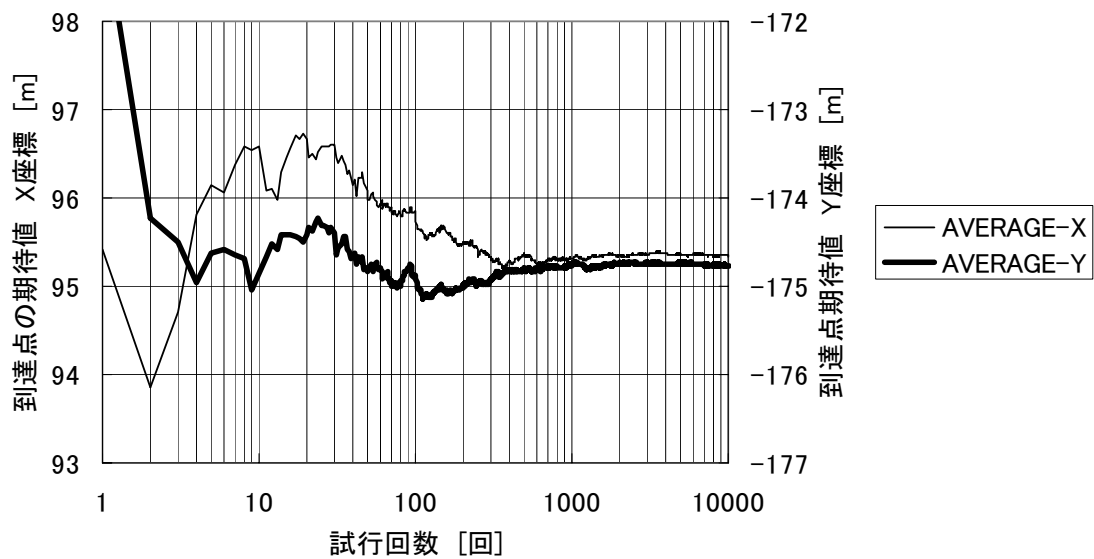


図 3.5-29(b) 収束性の確認 V 解析法 期待値 開始点 (236, -200) 10000 年後

開始点(236,-200) 11000年後 K解析法

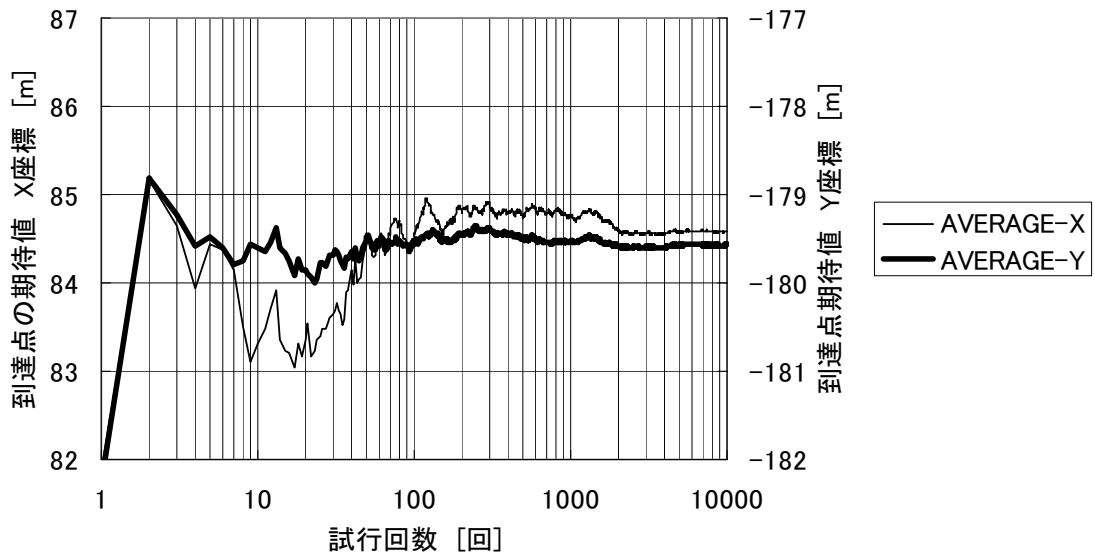


図 3.5-30(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-200) 11000年後

開始点(236,-200) 11000年後 V解析法

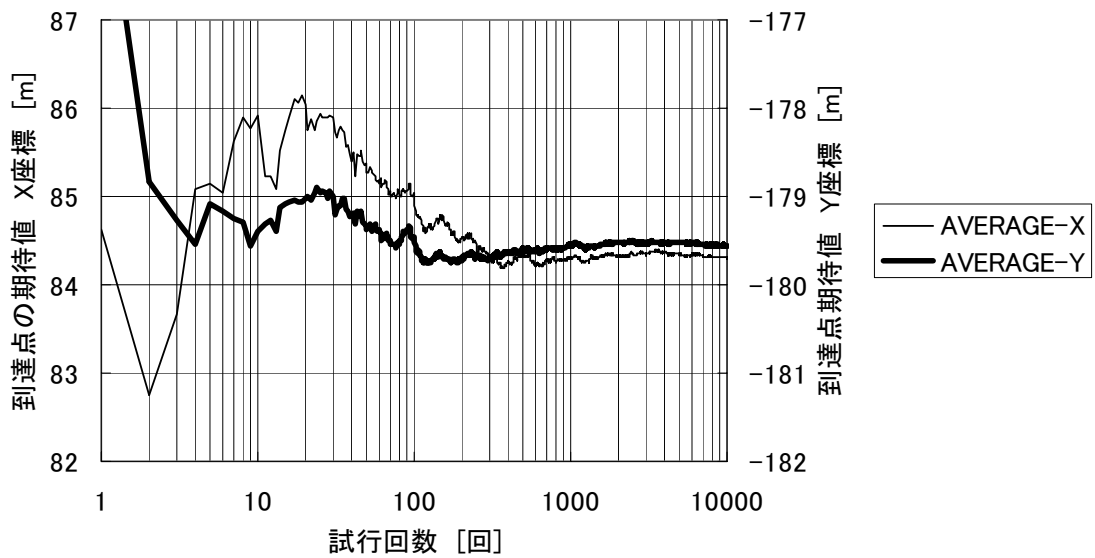


図 3.5-30(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-200) 11000年後

開始点(236,-200) 12000年後 K解析法

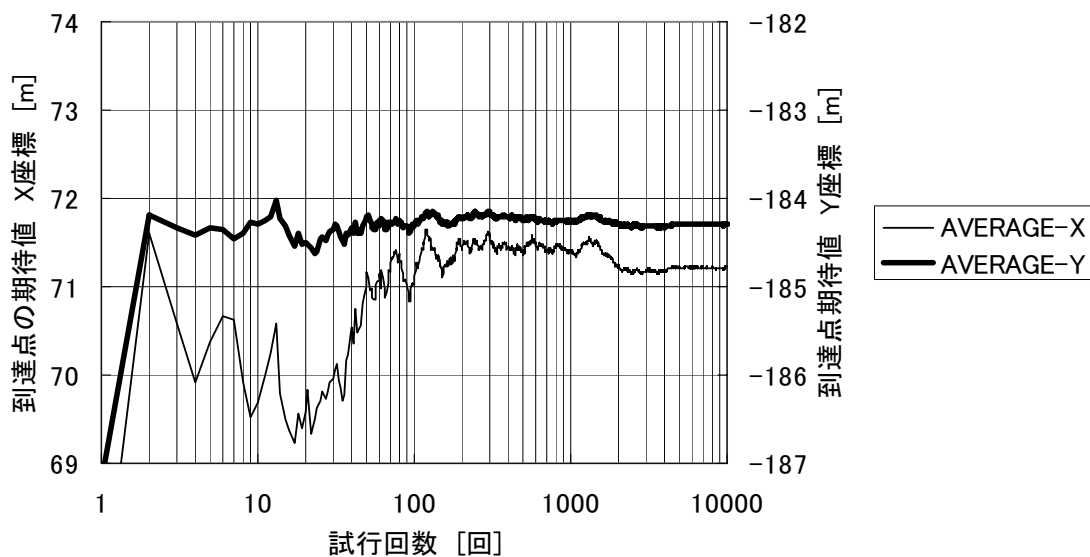


図 3.5-31(a) 収束性の確認 K 解析法 期待値 開始点 (236, -200) 12000 年後

開始点(236,-200) 12000年後 V解析法

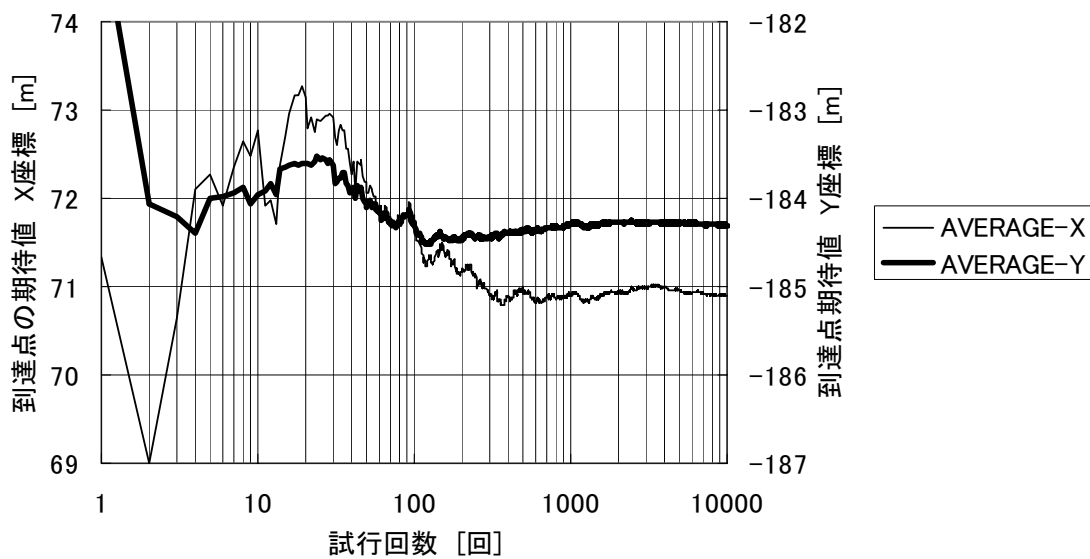


図 3.5-31(b) 収束性の確認 V 解析法 期待値 開始点 (236, -200) 12000 年後

開始点(236,-200) 13000年後 K解析法

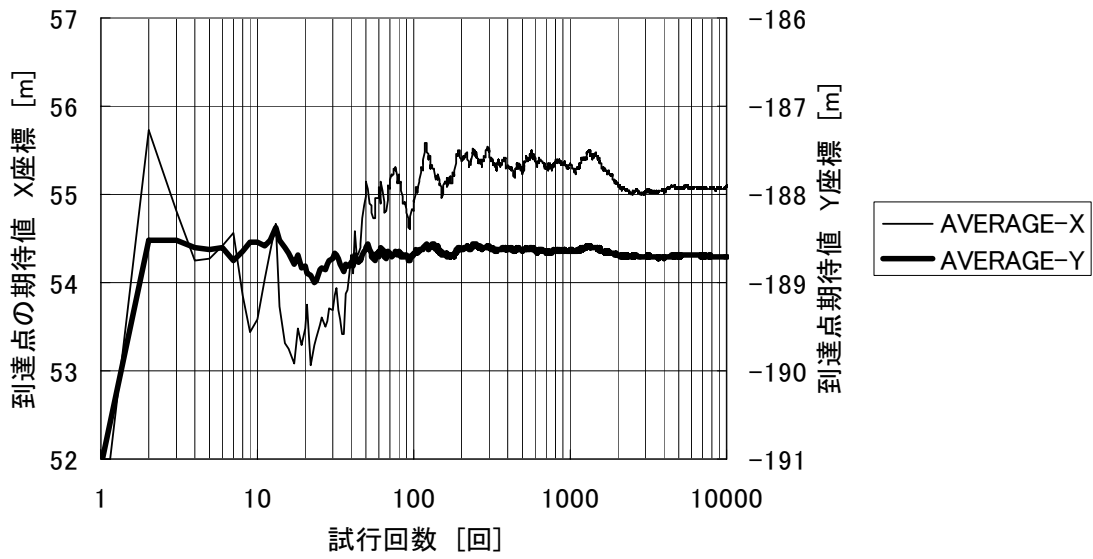


図 3.5-32(a) 収束性の確認 K 解析法 期待値 開始点 (236, -200) 13000 年後

開始点(236,-200) 13000年後 V解析法

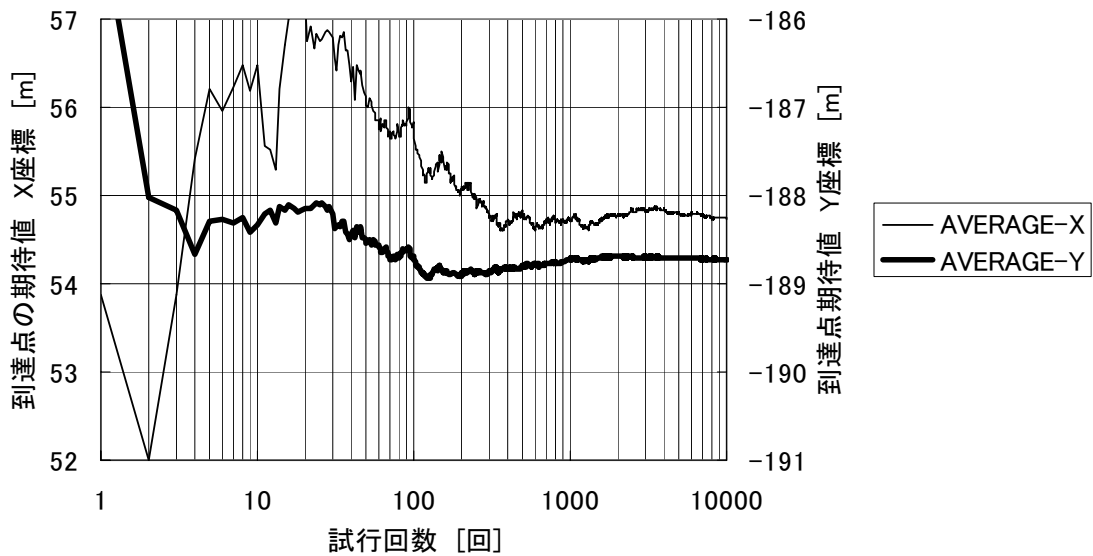


図 3.5-32(b) 収束性の確認 V 解析法 期待値 開始点 (236, -200) 13000 年後

開始点(236,-200) 14000年後 K解析法

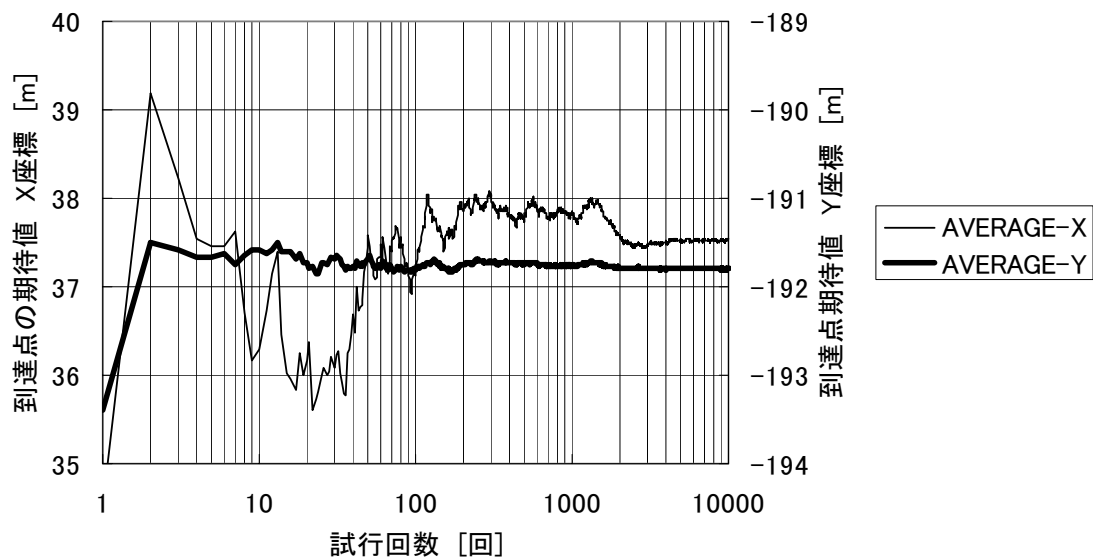


図 3.5-33(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-200) 14000年後

開始点(236,-200) 14000年後 V解析法

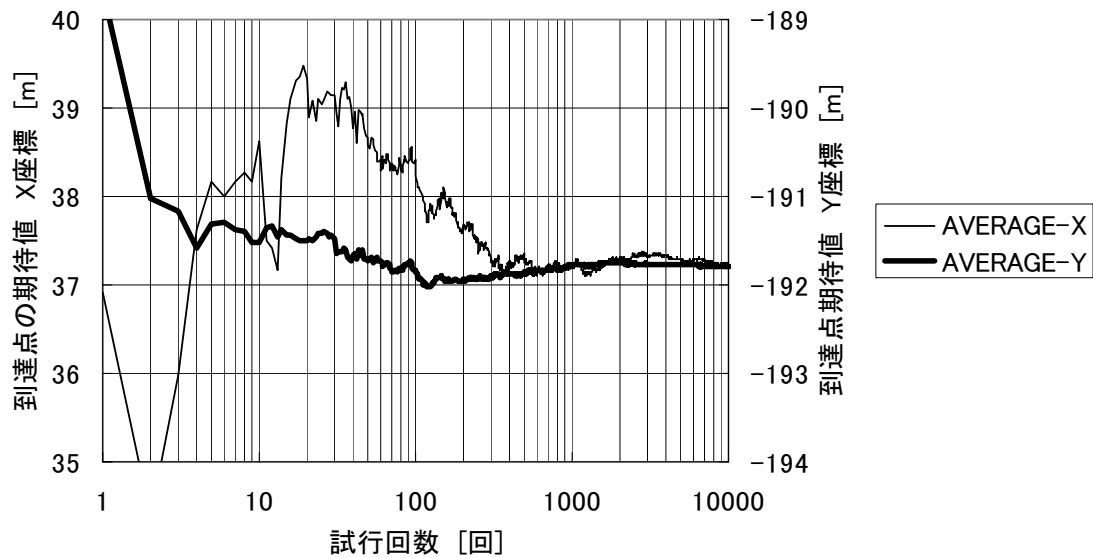


図 3.5-33(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-200) 14000年後

開始点(236,-200) 15000年後 K解析法

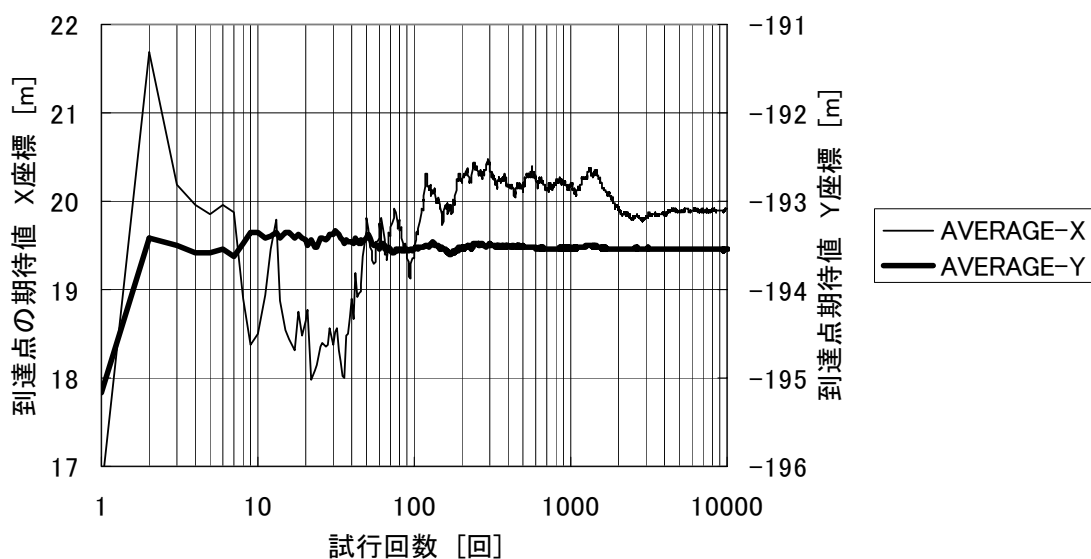


図 3.5-34 (a) 収束性の確認 K 解析法 期待値 開始点(236,-200) 15000 年後

開始点(236,-200) 15000年後 V解析法

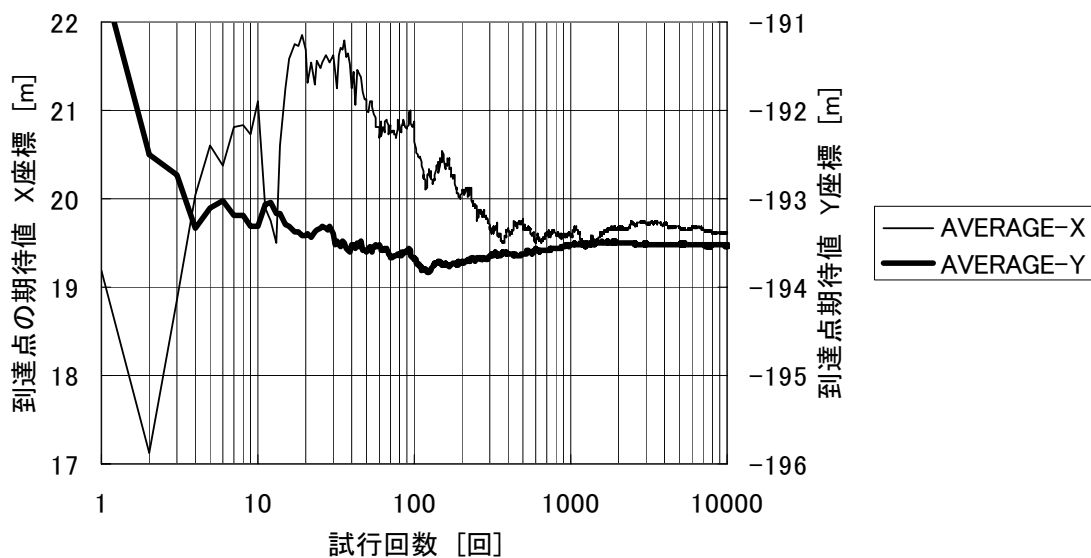


図 3.5-34 (b) 収束性の確認 V 解析法 期待値 開始点(236,-200) 15000 年後

開始点(236,-300) 1000年後 K解析法

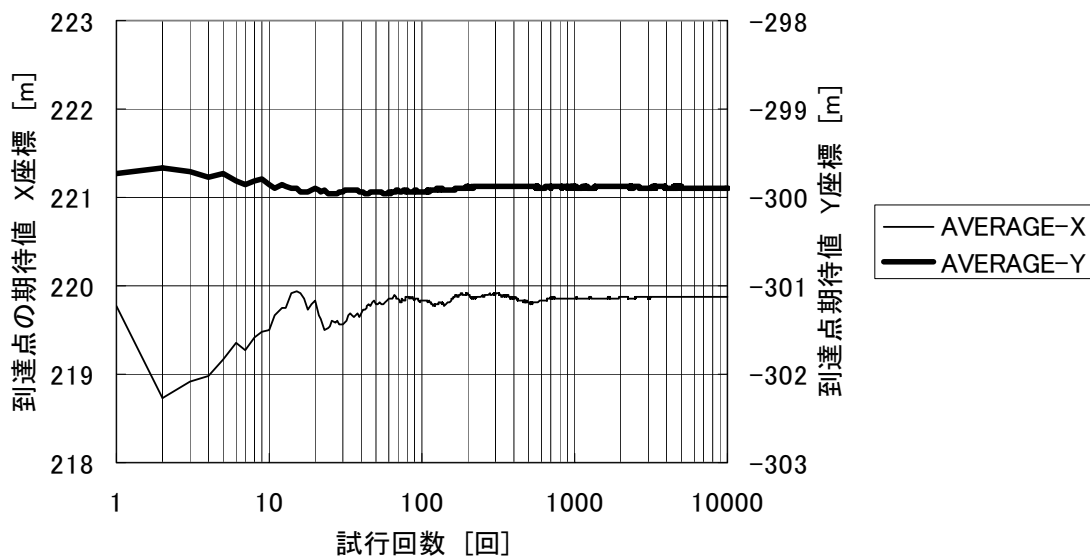


図 3.5-35(a) 収束性の確認 K 解析法 期待値 開始点 (236, -300) 1000 年後

開始点(236,-300) 1000年後 V解析法

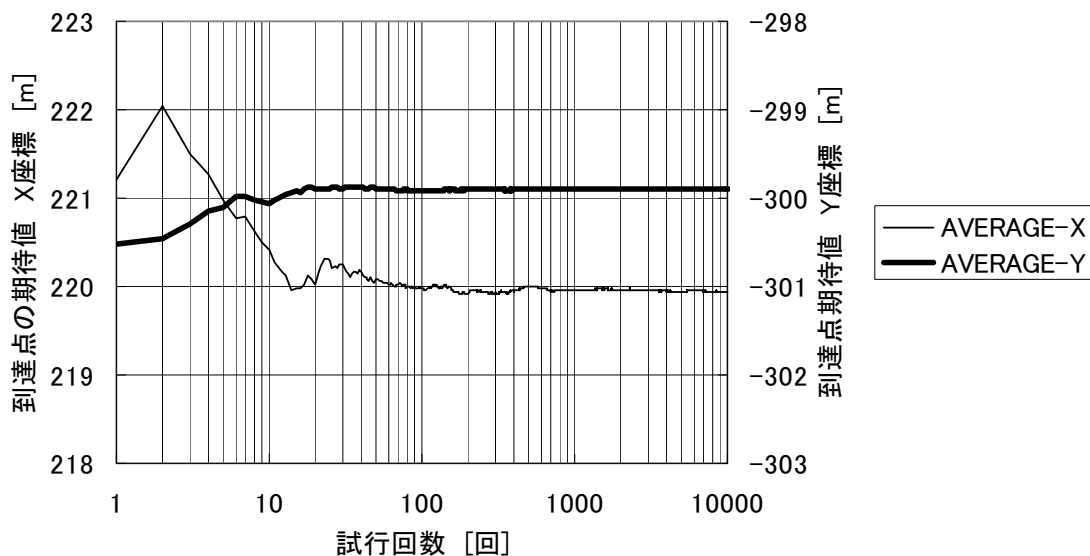


図 3.5-35(b) 収束性の確認 V 解析法 期待値 開始点 (236, -300) 1000 年後

開始点(236,-300) 2000年後 K解析法

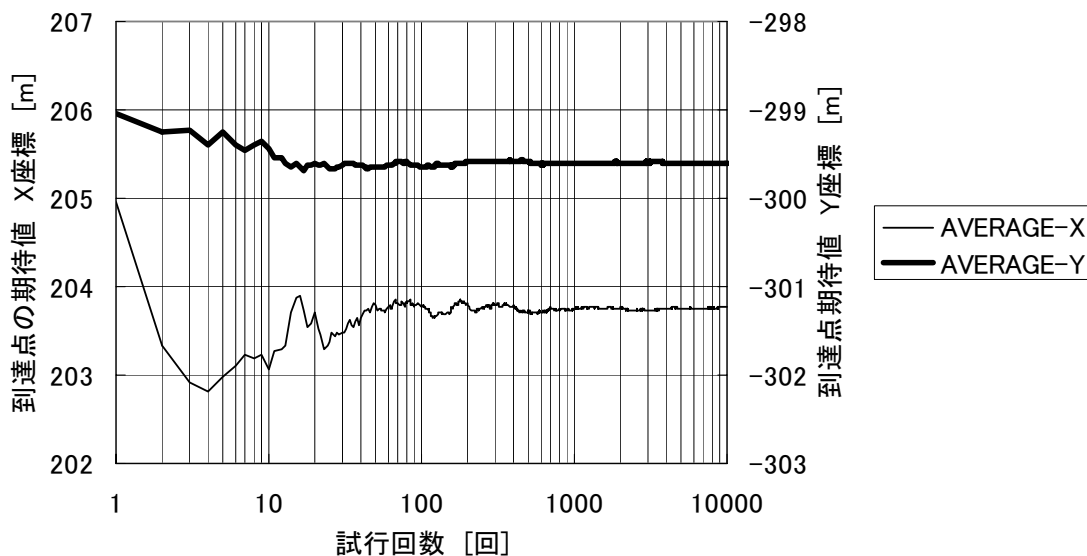


図 3.5-36 (a) 収束性の確認 K 解析法 期待値 開始点 (236,-300) 2000 年後

開始点(236,-300) 2000年後 V解析法

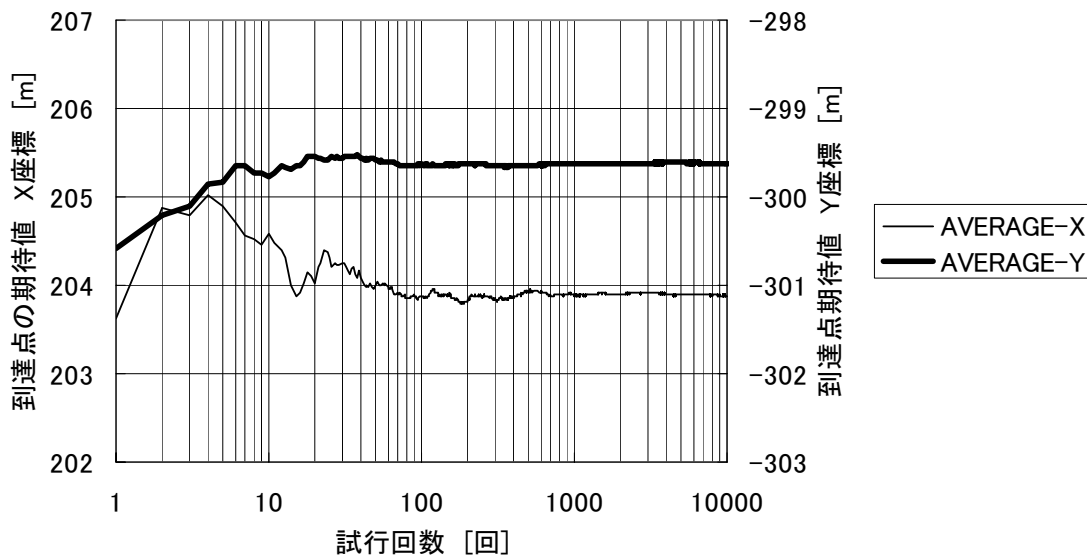


図 3.5-36 (b) 収束性の確認 V 解析法 期待値 開始点 (236,-300) 2000 年後

開始点(236,-300) 3000年後 K解析法

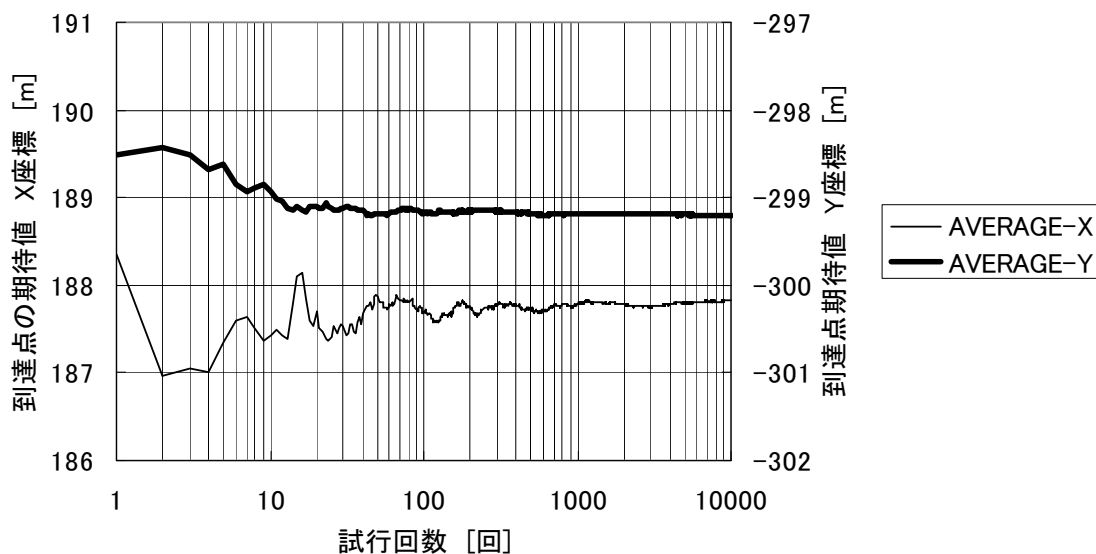


図 3.5-37(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-300) 3000年後

開始点(236,-300) 3000年後 V解析法

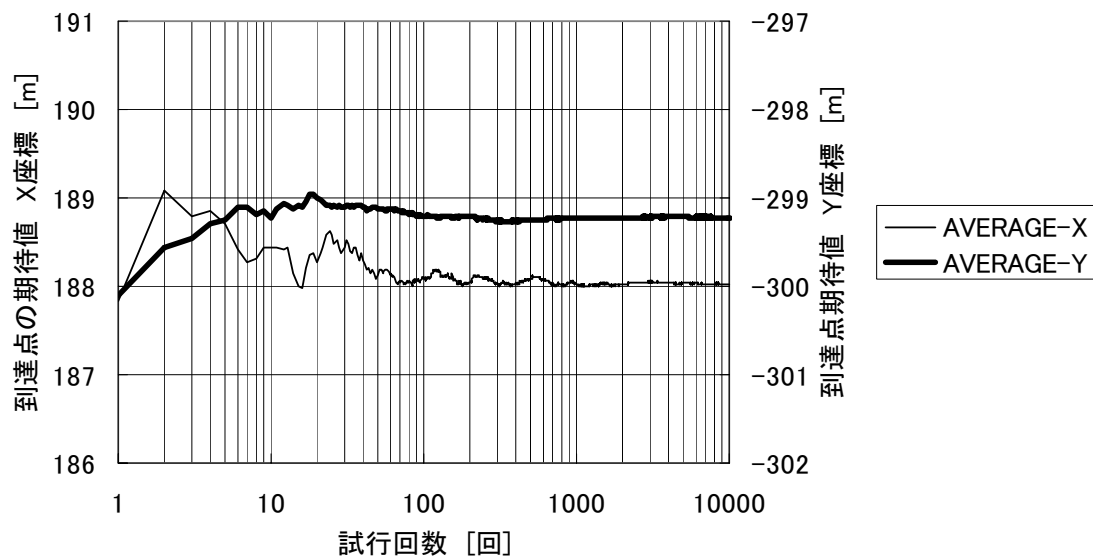


図 3.5-37(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-300) 3000年後

開始点(236,-300) 4000年後 K解析法

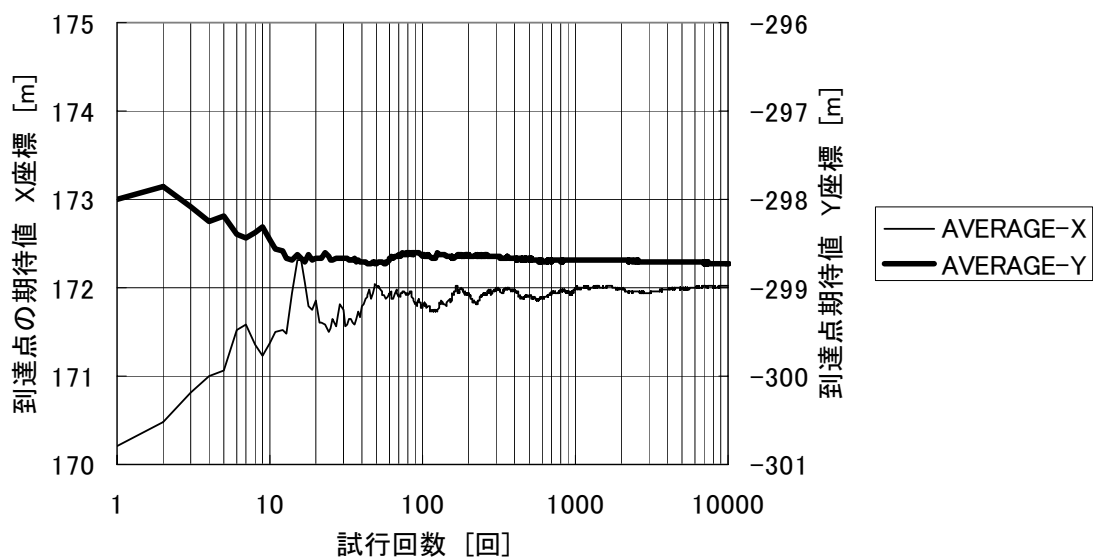


図 3.5-38(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-300) 4000年後

開始点(236,-300) 4000年後 V解析法

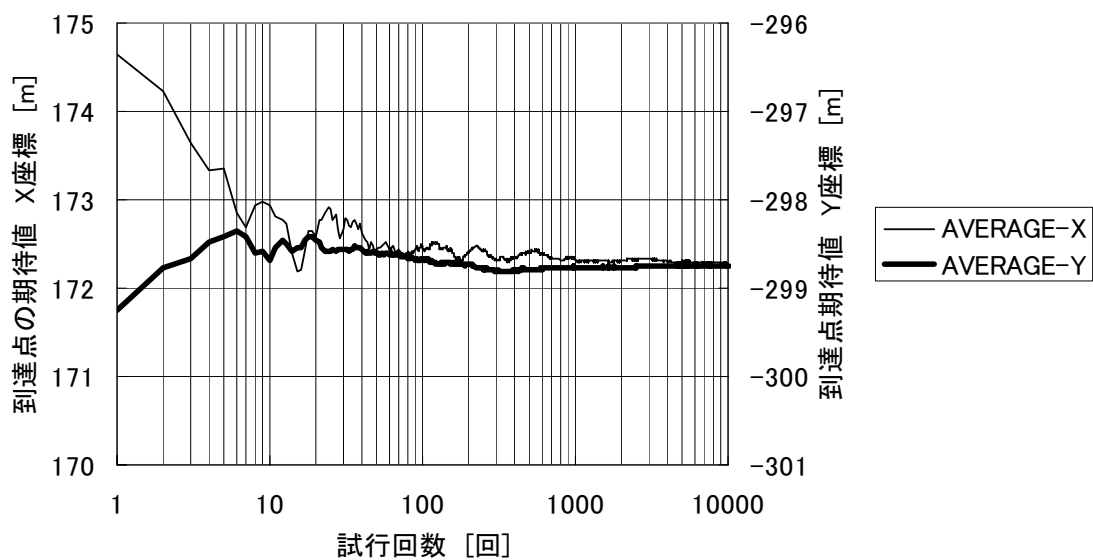


図 3.5-38(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-300) 4000年後

開始点(236,-300) 5000年後 K解析法

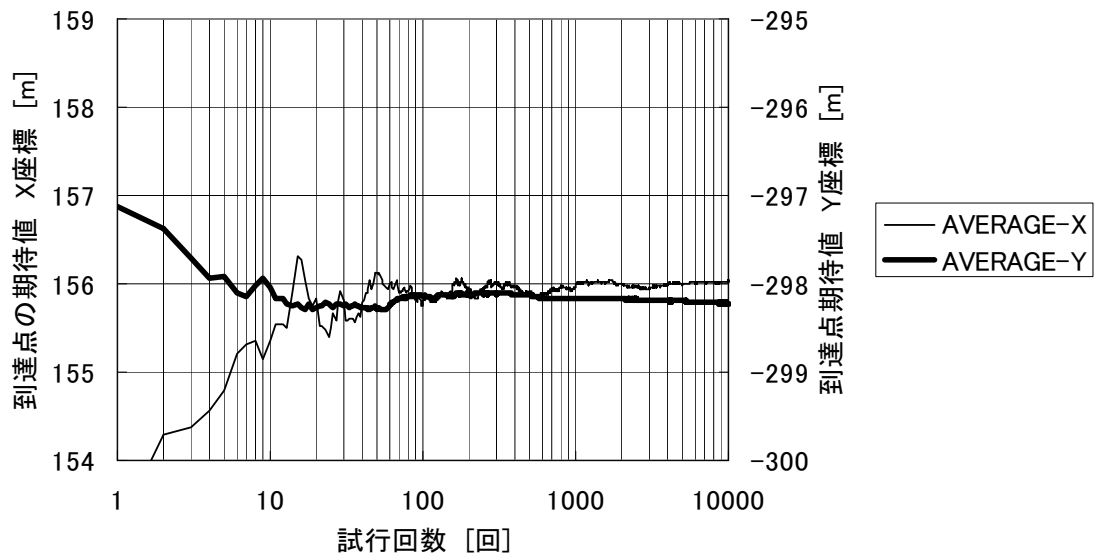


図 3.5-39(a) 収束性の確認 K 解析法 期待値 開始点 (236, -300) 5000 年後

開始点(236,-300) 5000年後 V解析法

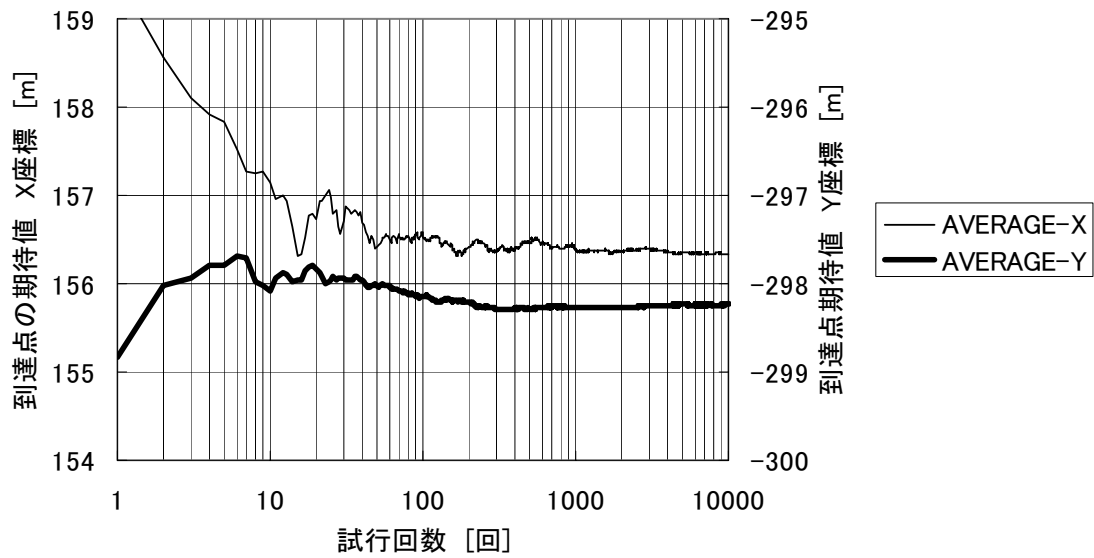


図 3.5-39(b) 収束性の確認 V 解析法 期待値 開始点 (236, -300) 5000 年後

開始点(236,-300) 6000年後 K解析法

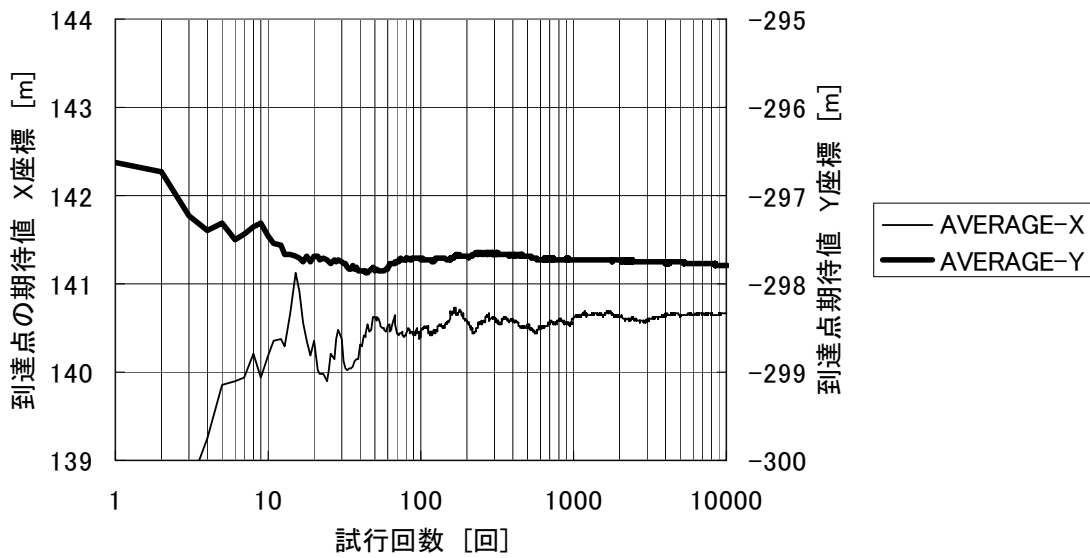


図 3.5-40(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-300) 6000年後

開始点(236,-300) 6000年後 V解析法

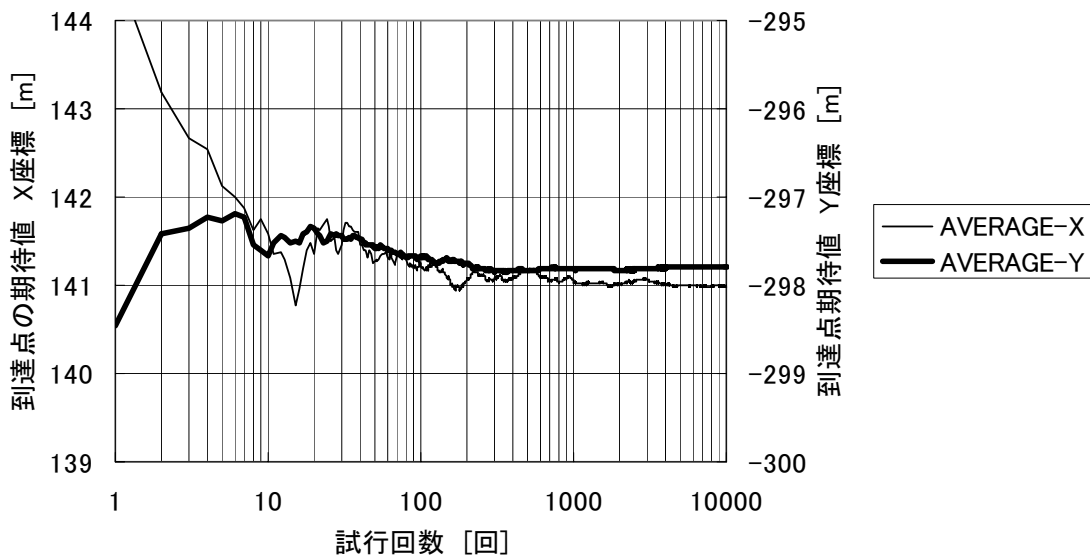


図 3.5-40(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-300) 6000年後

開始点(236,-300) 7000年後 K解析法

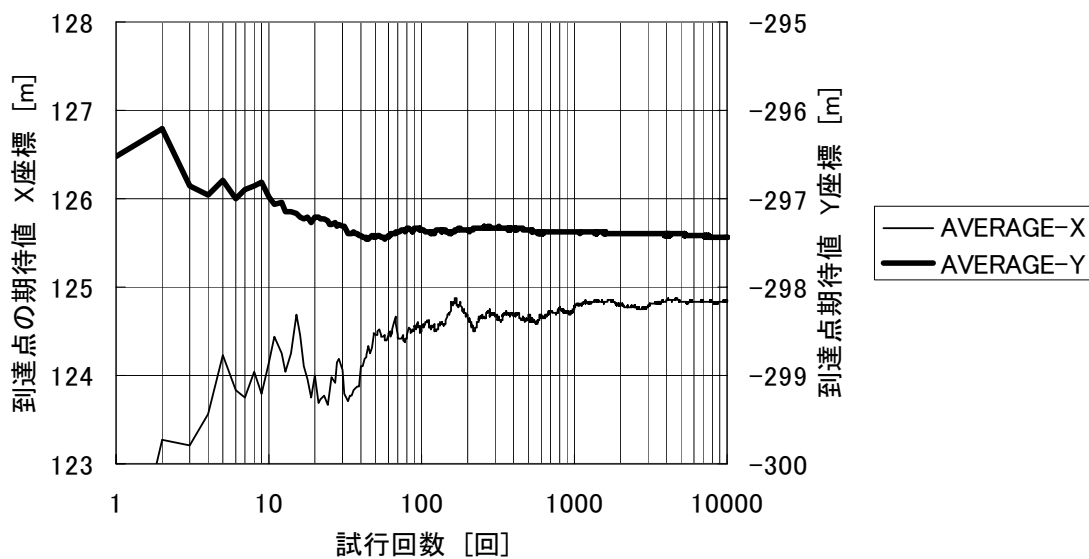


図 3.5-41 (a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-300) 7000年後

開始点(236,-300) 7000年後 V解析法

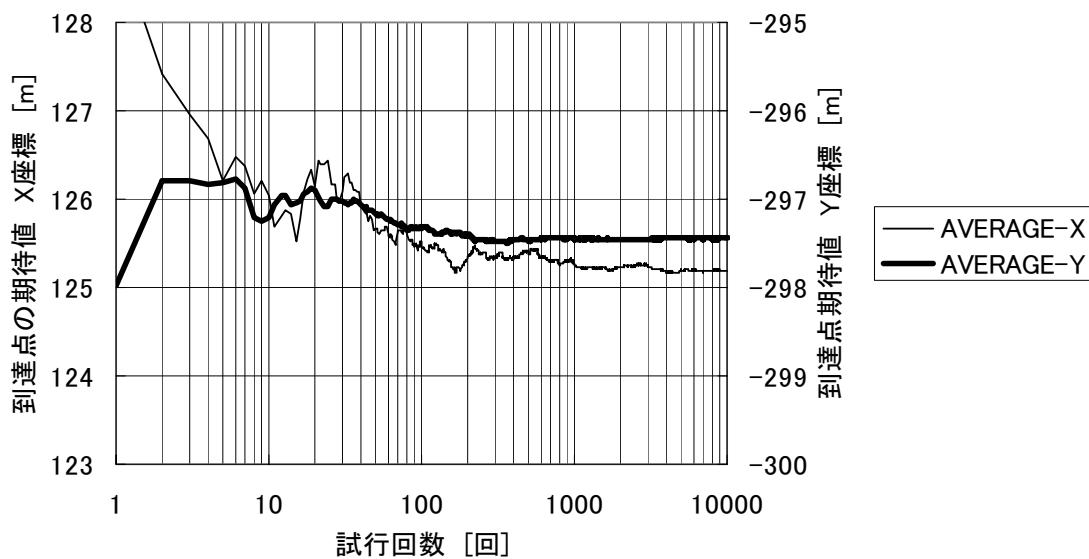


図 3.5-41 (b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-300) 7000年後

開始点(236,-300) 8000年後 K解析法

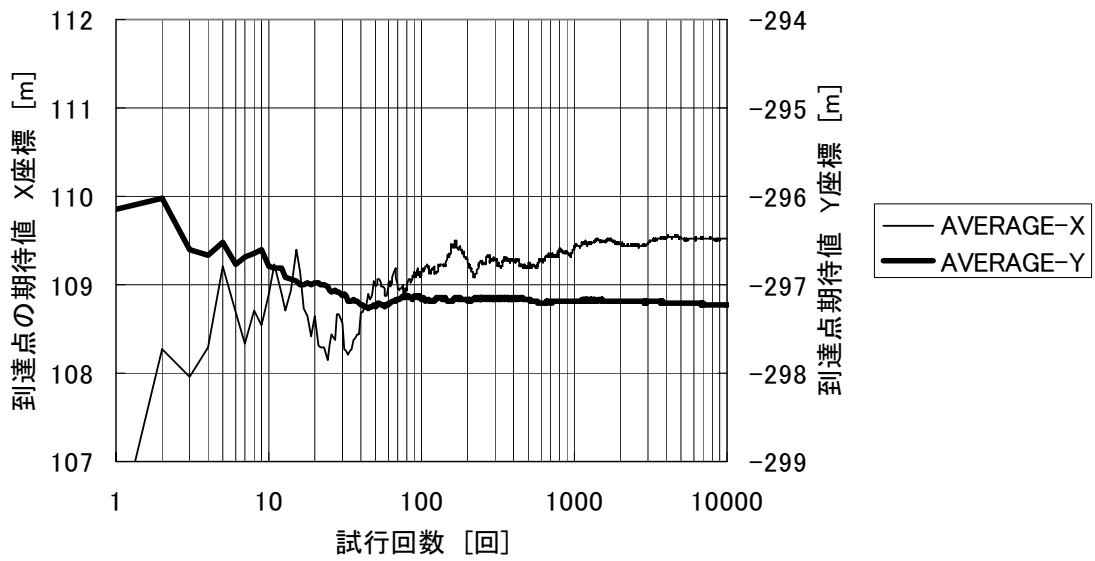


図 3.5-42 (a) 収束性の確認 K 解析法 期待値 開始点 (236, -300) 8000 年後

開始点(236,-300) 8000年後 V解析法

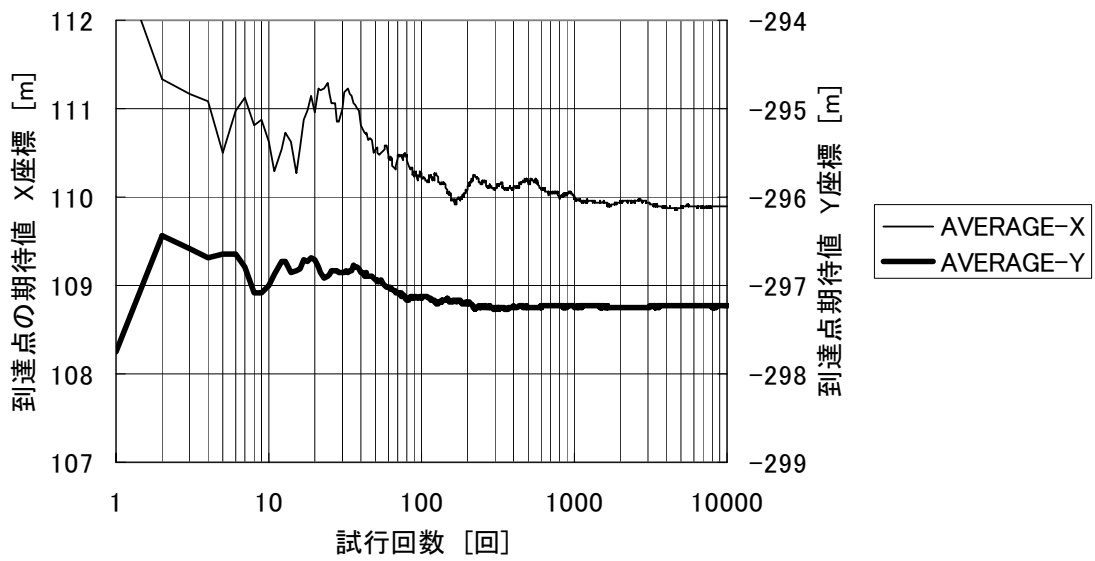


図 3.5-42 (b) 収束性の確認 V 解析法 期待値 開始点 (236, -300) 8000 年後

開始点(236,-300) 9000年後 K解析法

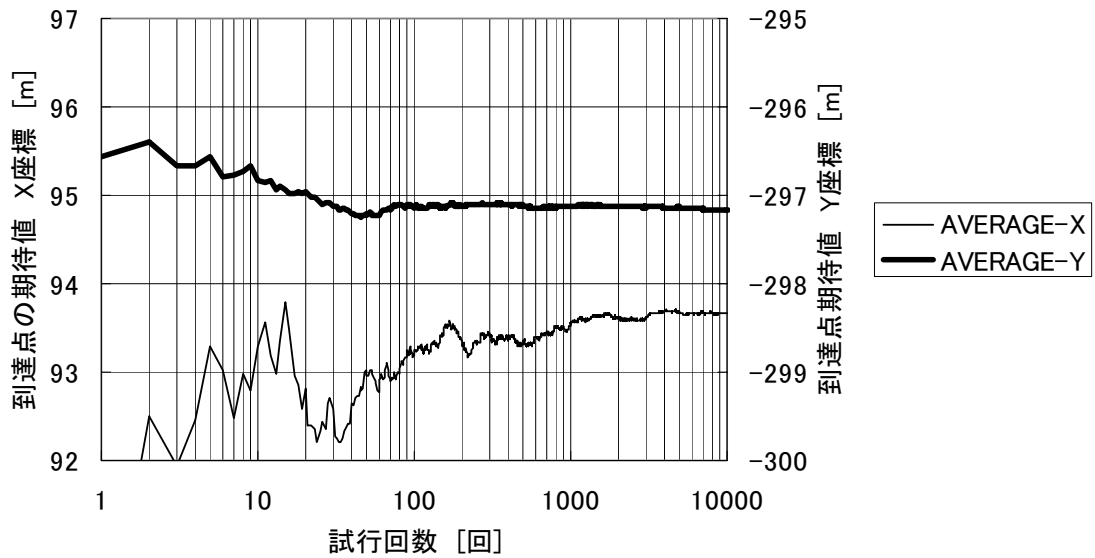


図 3.5-43(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-300) 9000年後

開始点(236,-300) 9000年後 V解析法

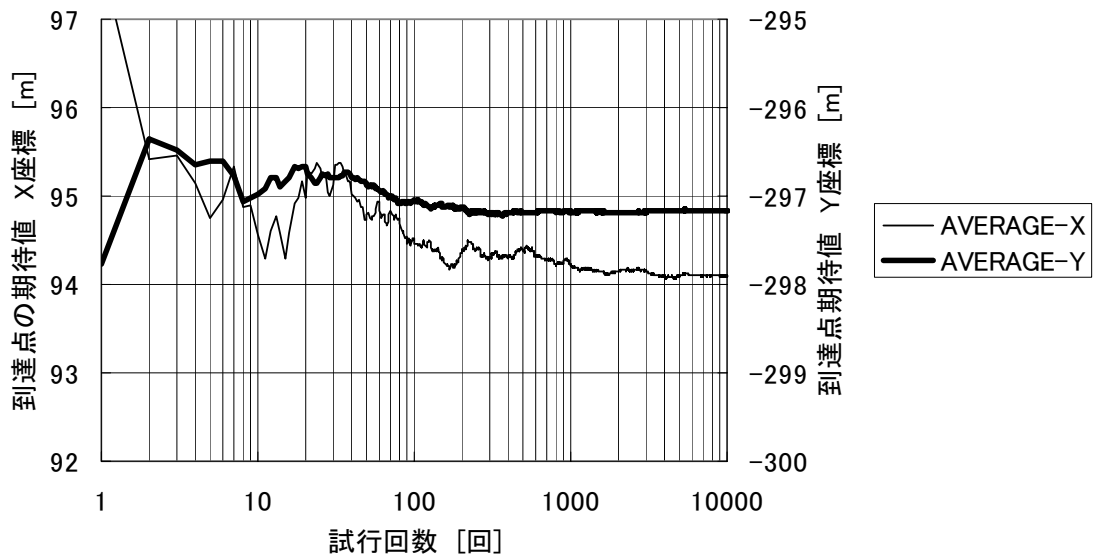


図 3.5-43(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-300) 9000年後

開始点(236,-300) 10000年後 K解析法

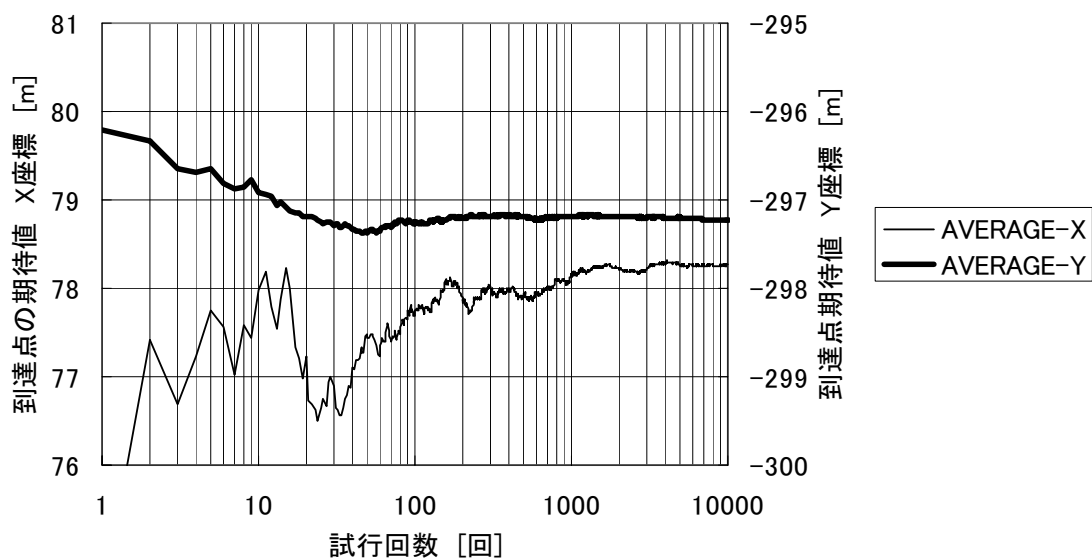


図 3.5-44(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-300) 10000年後

開始点(236,-300) 10000年後 V解析法

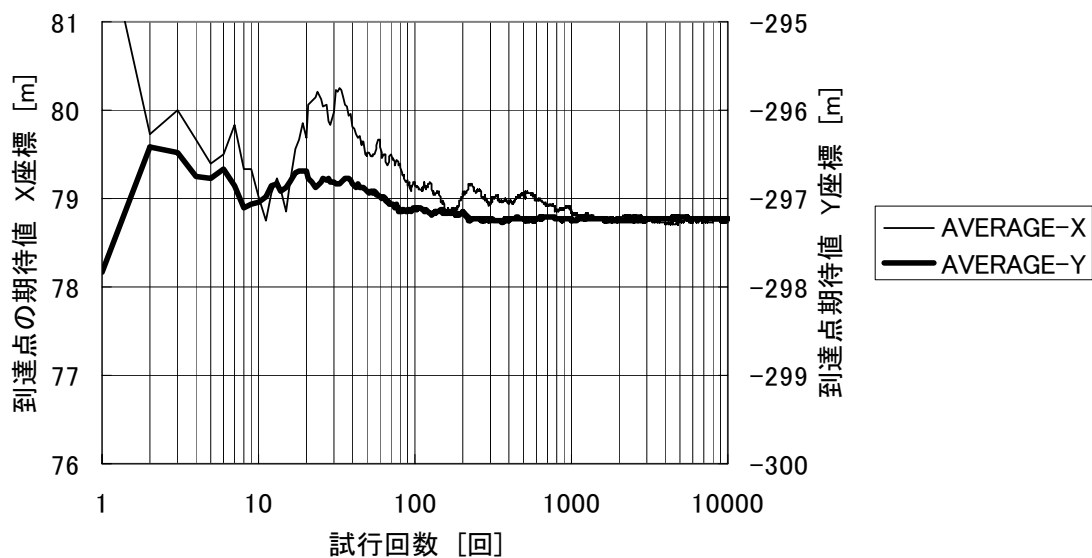


図 3.5-44(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-300) 10000年後

開始点(236,-300) 11000年後 K解析法

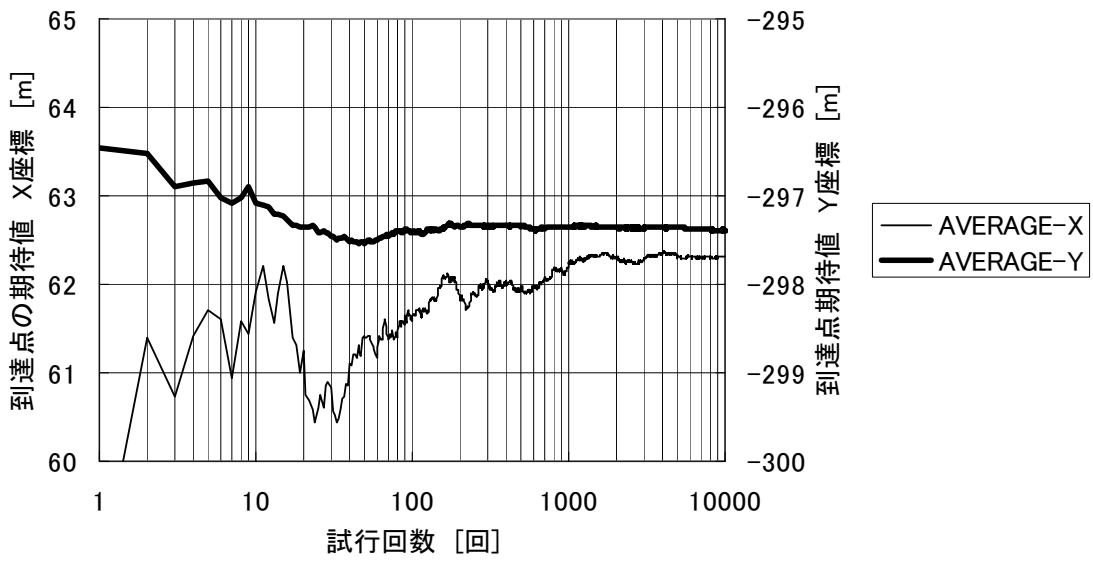


図 3.5-45(a) 収束性の確認 K 解析法 期待値 開始点 (236, -300) 11000 年後

開始点(236,-300) 11000年後 V解析法

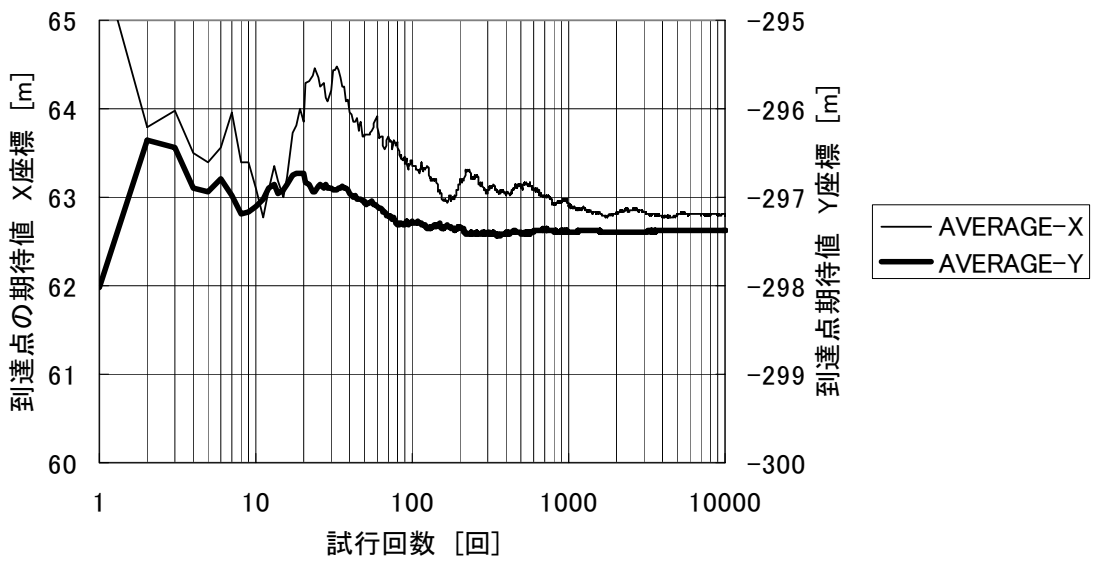


図 3.5-45(b) 収束性の確認 V 解析法 期待値 開始点 (236, -300) 11000 年後

開始点(236,-300) 12000年後 K解析法

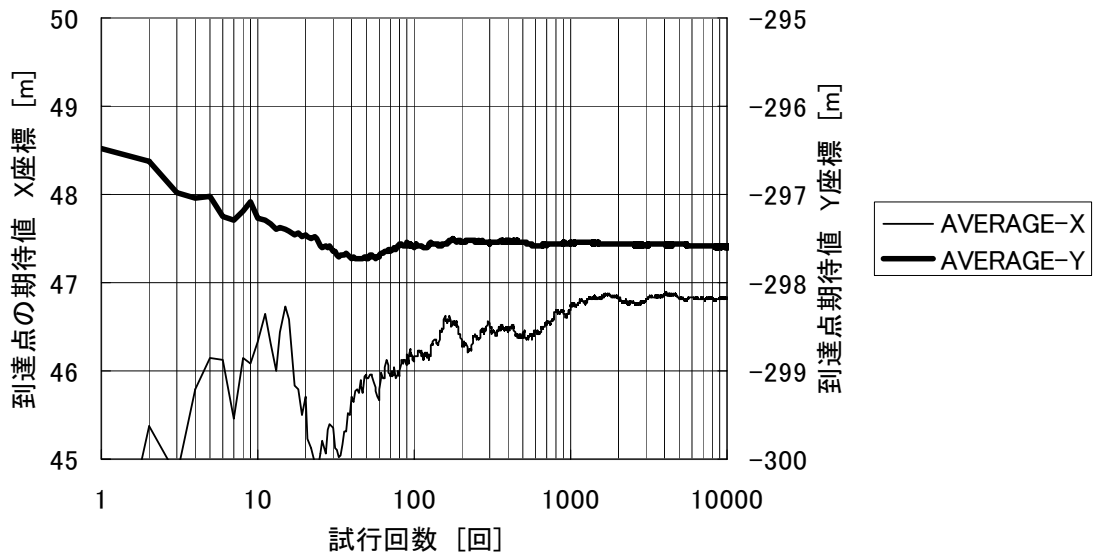


図 3.5-46(a) 収束性の確認 K 解析法 期待値 開始点 (236, -300) 12000 年後

開始点(236,-300) 12000年後 V解析法

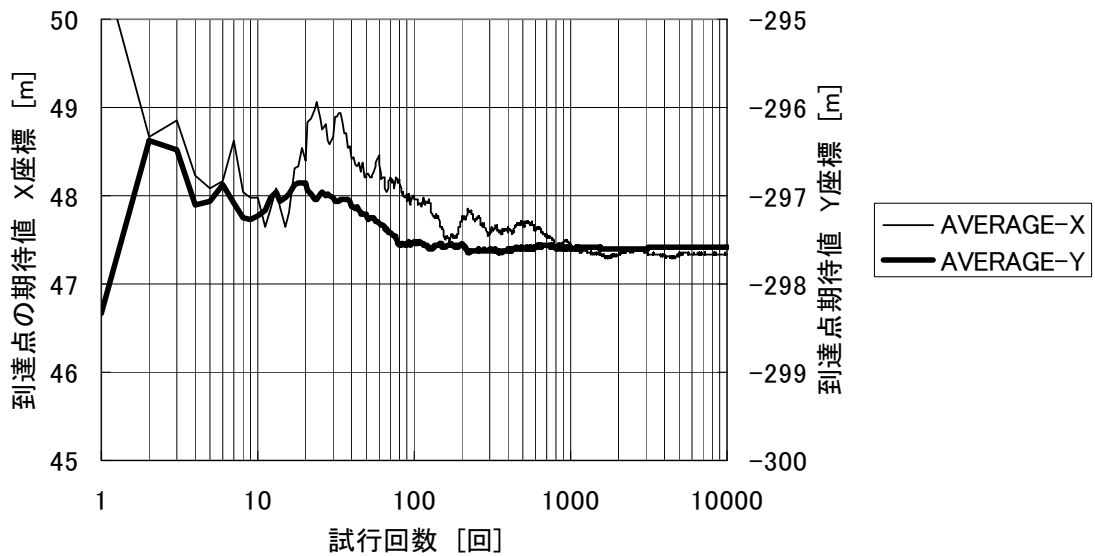


図 3.5-46(b) 収束性の確認 V 解析法 期待値 開始点 (236, -300) 12000 年後

開始点(236,-300) 13000年後 K解析法

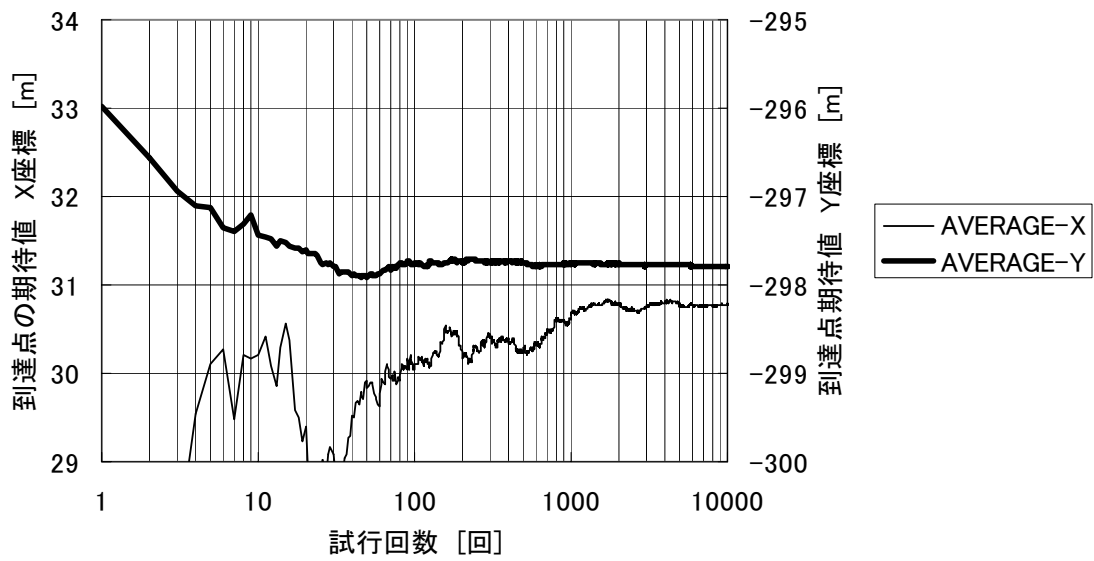


図 3.5-47(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-300) 13000年後

開始点(236,-300) 13000年後 V解析法

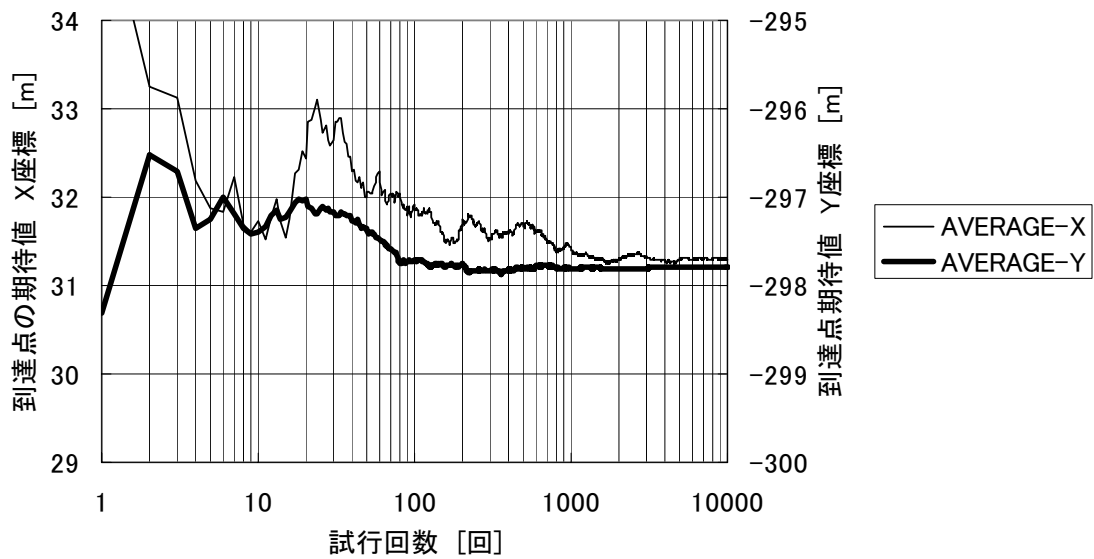


図 3.5-47(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-300) 13000年後

開始点(236,-300) 14000年後 K解析法

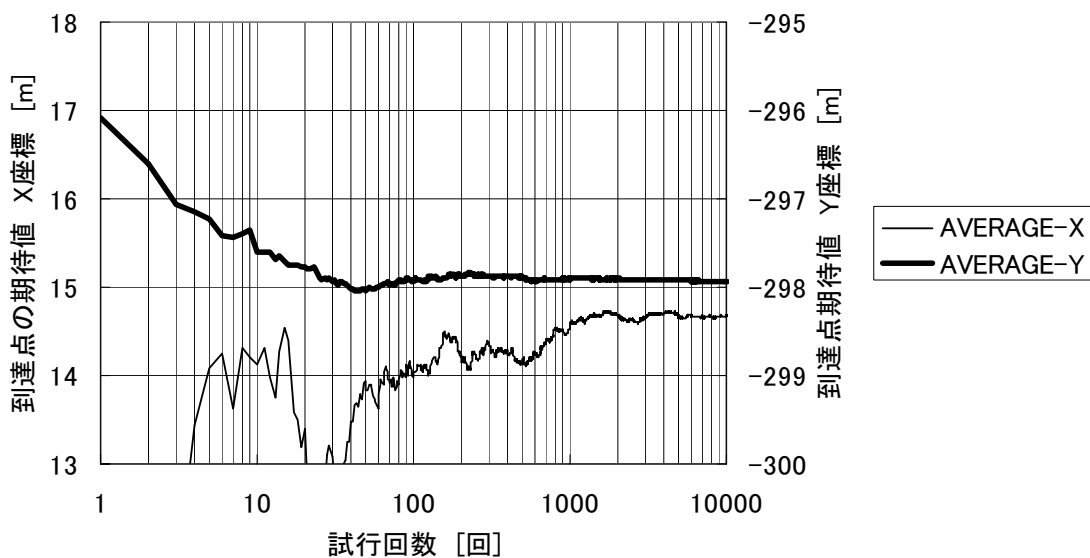


図 3.5-48(a) 収束性の確認 K解析法 期待値 開始点(236,-300) 14000年後

開始点(236,-300) 14000年後 V解析法

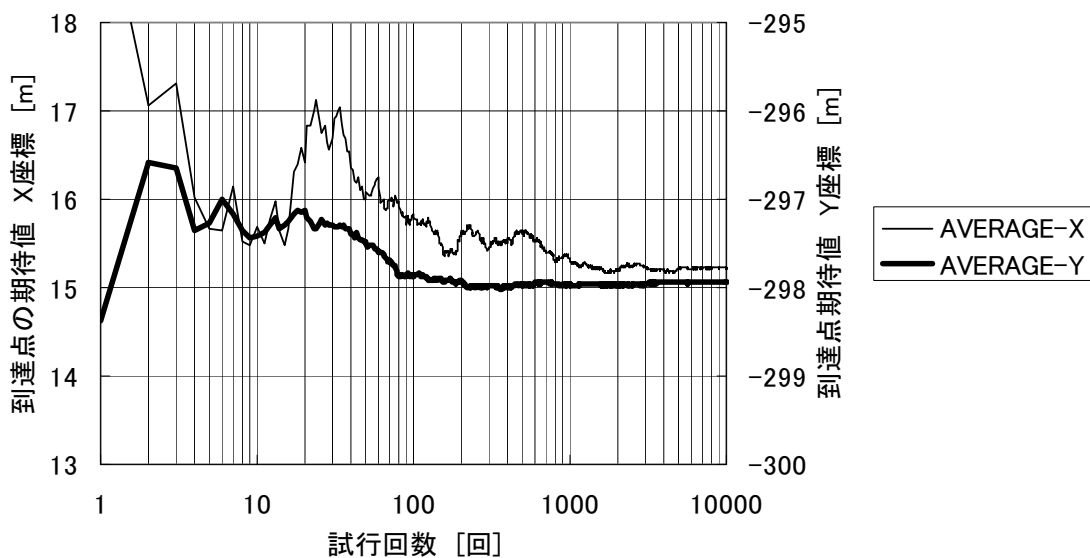


図 3.5-48(b) 収束性の確認 V解析法 期待値 開始点(236,-300) 14000年後

開始点(236,0) 1000年後 K解析法

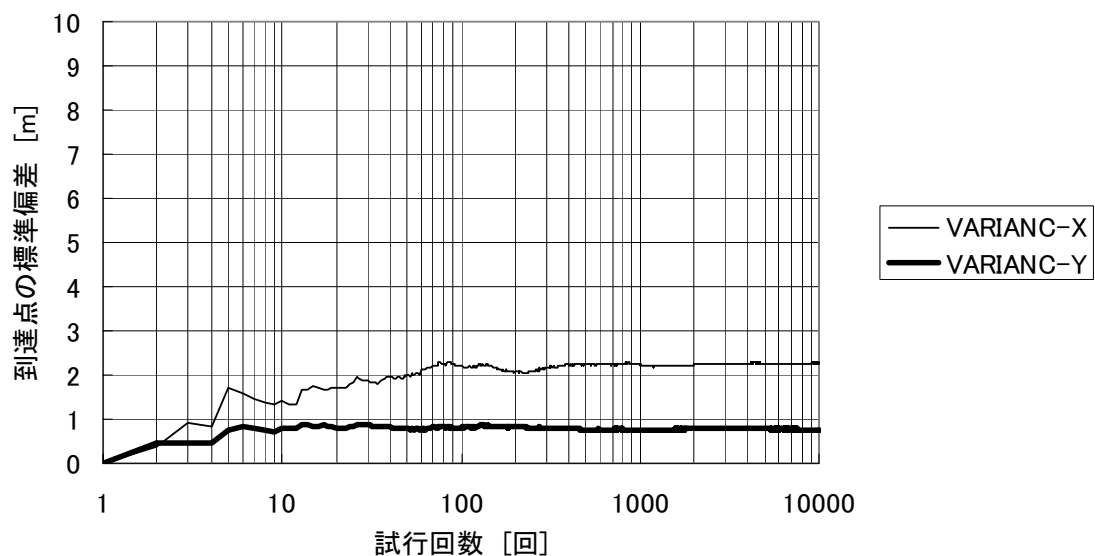


図 3.5-49 (a) 収束性の確認 K 解析法 標準偏差 開始点 (236, 0) 1000 年後

開始点(236,0) 1000年後 V解析法

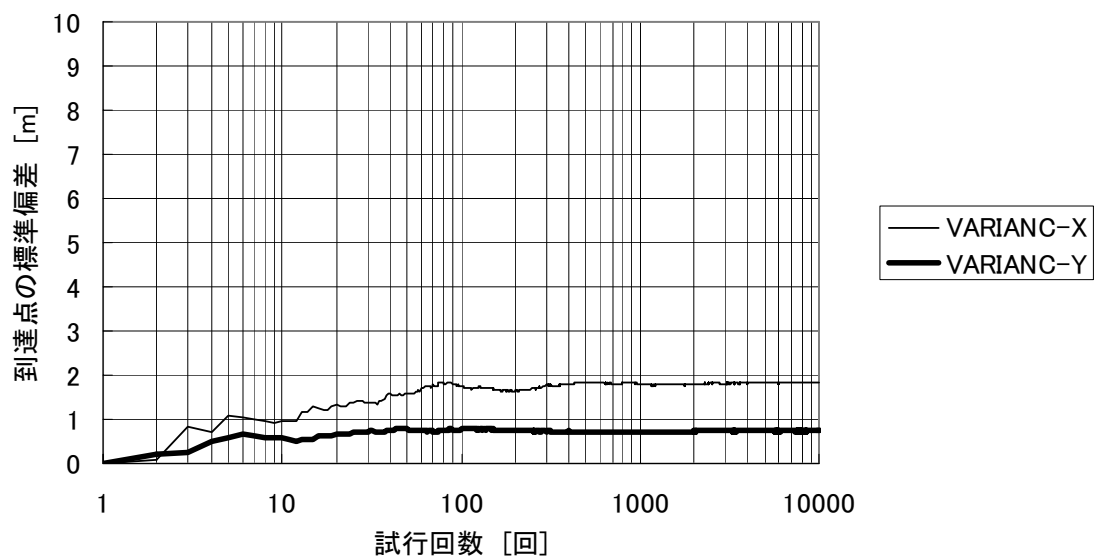


図 3.5-49 (b) 収束性の確認 V 解析法 標準偏差 開始点 (236, 0) 1000 年後

開始点(236,0) 2000年後 K解析法

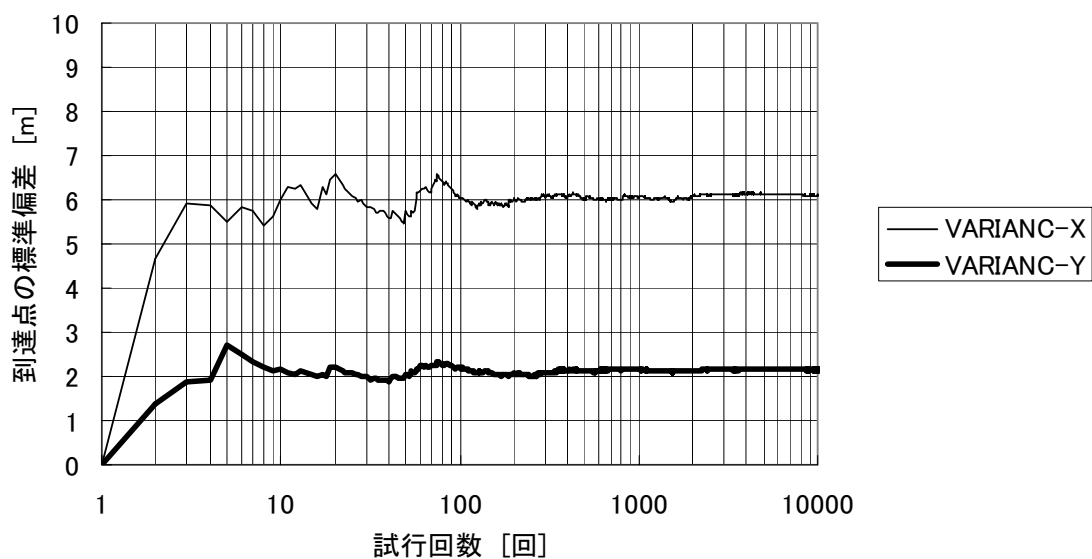


図 3.5-50(a) 収束性の確認 K 解析法 標準偏差 開始点(236, 0) 2000 年後

開始点(236,0) 2000年後 V解析法

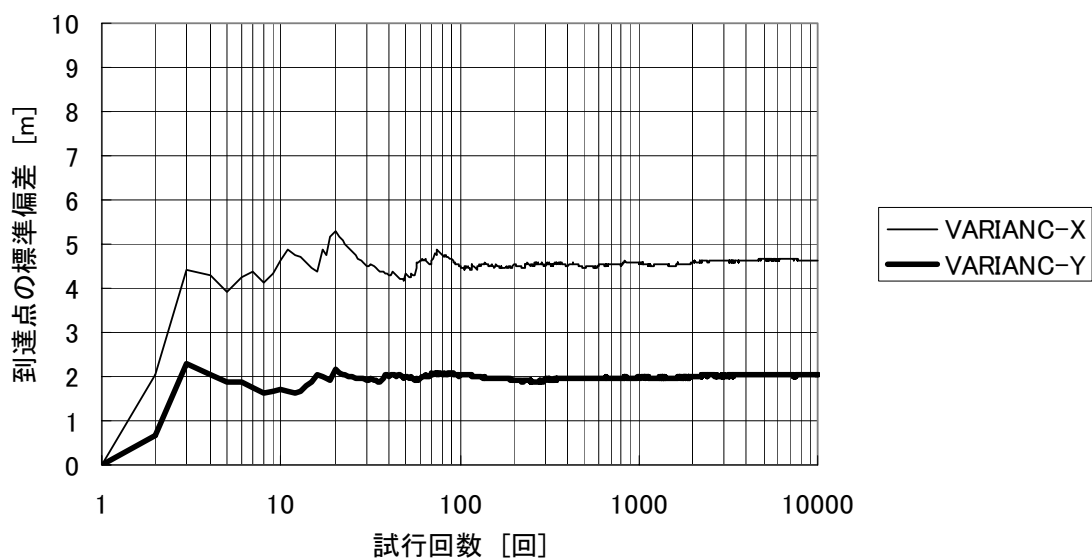


図 3.5-50(b) 収束性の確認 V 解析法 標準偏差 開始点(236, 0) 2000 年後

開始点(236,0) 3000年後 K解析法

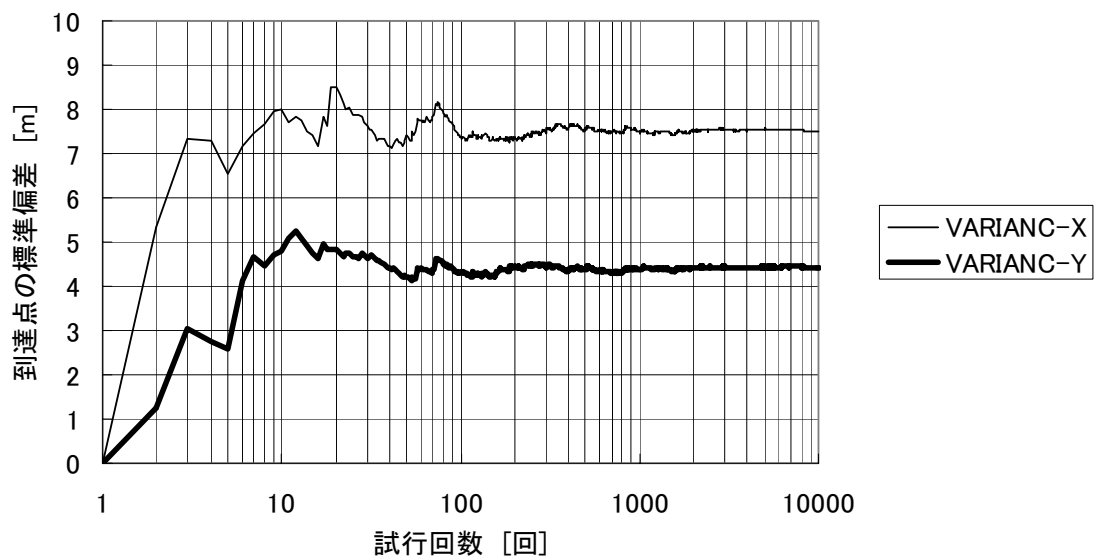


図 3.5-51 (a) 収束性の確認 K 解析法 標準偏差 開始点 (236, 0) 3000 年後

開始点(236,0) 3000年後 V解析法

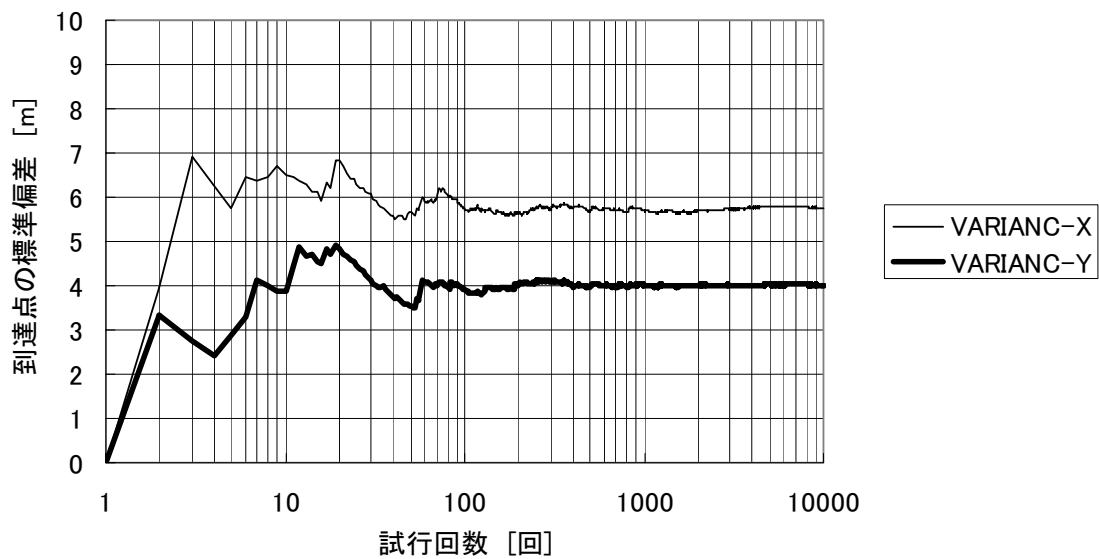


図 3.5-51 (b) 収束性の確認 V 解析法 標準偏差 開始点 (236, 0) 3000 年後

開始点(236,-100) 1000年後 K解析法

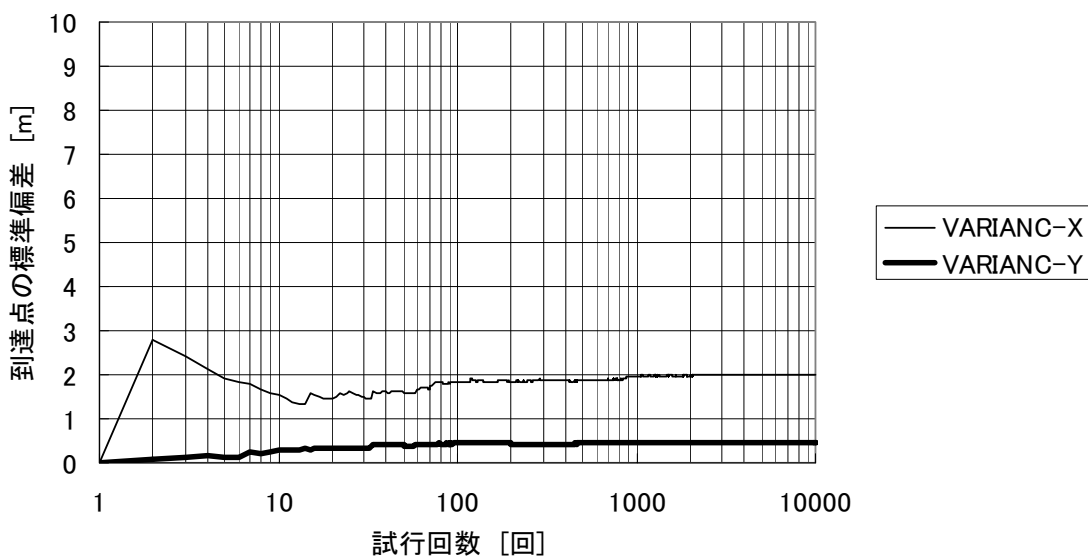


図 3.5-52(a) 収束性の確認 K解析法 標準偏差 開始点(236,-100) 1000 年後

開始点(236,-100) 1000年後 V解析法

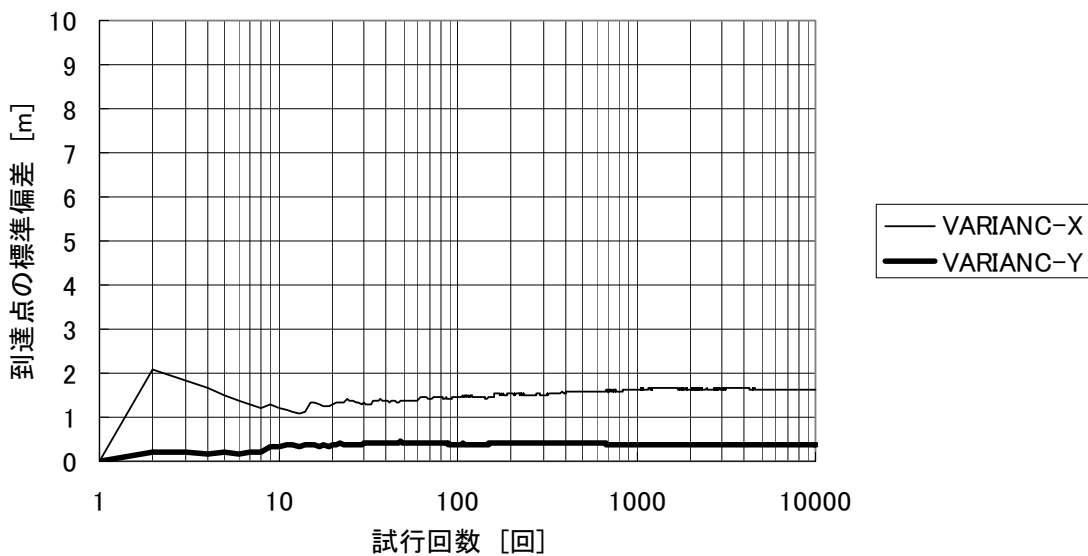


図 3.5-52(b) 収束性の確認 V解析法 標準偏差 開始点(236,-100) 1000 年後

開始点(236,-100) 2000年後 K解析法

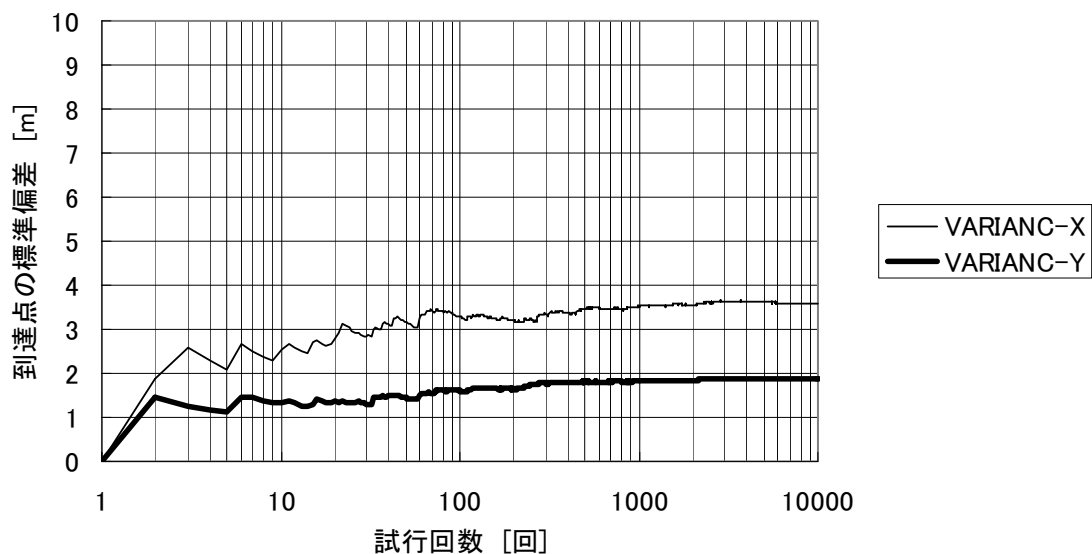


図 3.5-53(a) 収束性の確認 K 解析法 標準偏差 開始点 (236, -100) 2000 年後

開始点(236,-100) 2000年後 V解析法

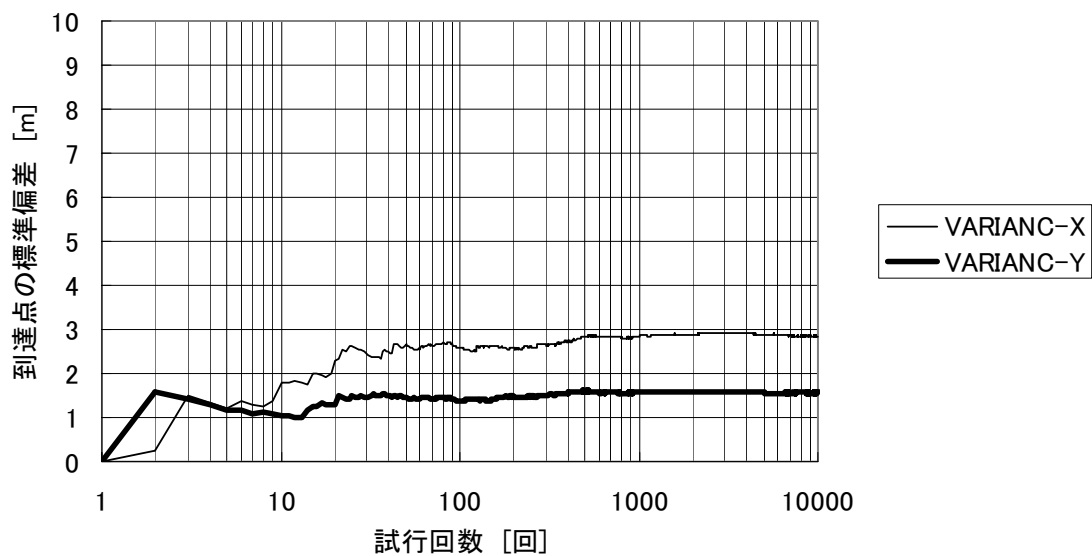


図 3.5-53(b) 収束性の確認 V 解析法 標準偏差 開始点 (236, -100) 2000 年後

開始点(236,-100) 3000年後 K解析法

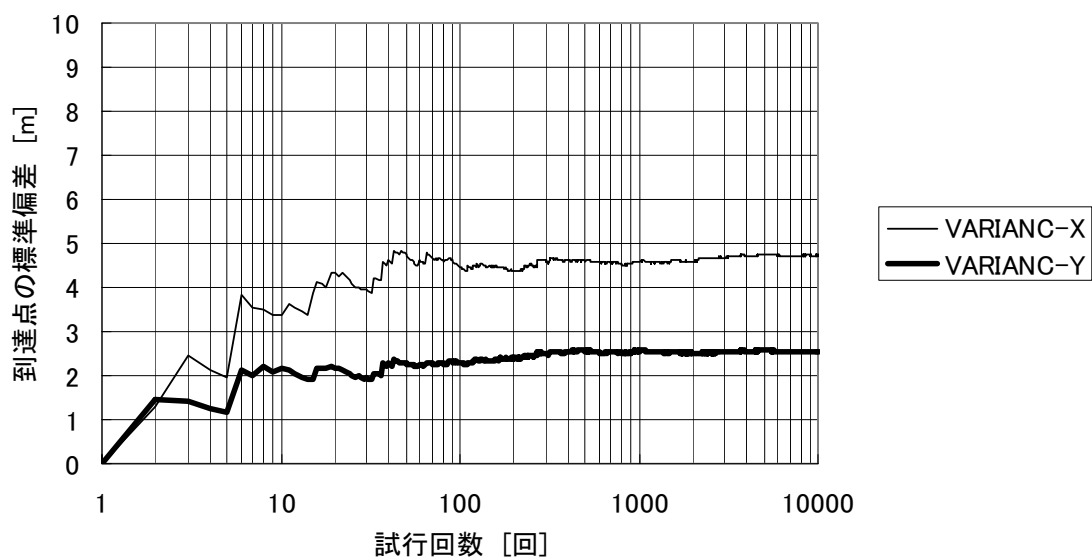


図 3.5-54(a) 収束性の確認 K解析法 標準偏差 開始点(236,-100) 3000年後

開始点(236,-100) 3000年後 V解析法

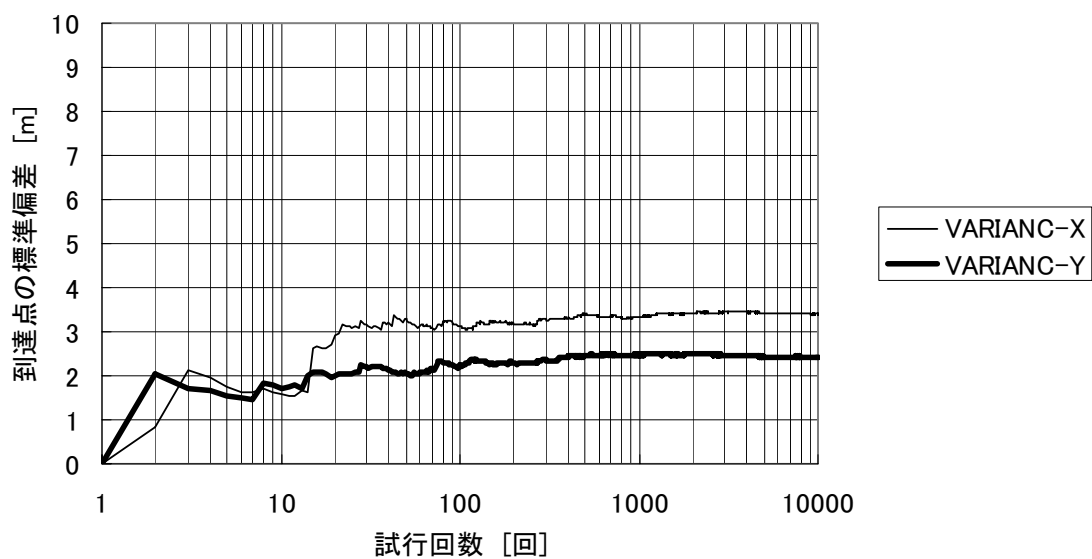


図 3.5-54(b) 収束性の確認 V解析法 標準偏差 開始点(236,-100) 3000年後

開始点(236,-100) 4000年後 K解析法

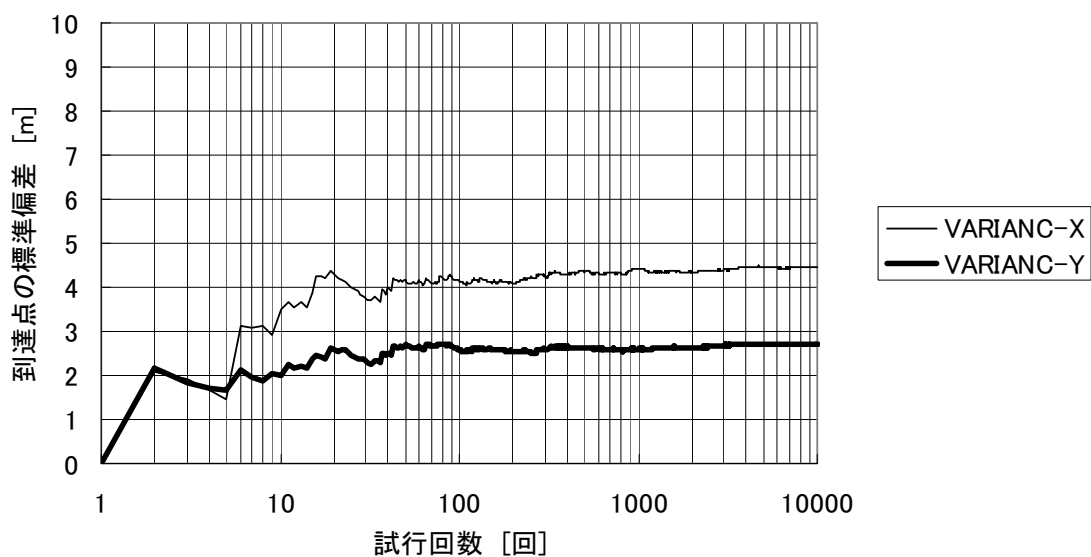


図 3.5-55(a) 収束性の確認 K 解析法 標準偏差 開始点 (236, -100) 4000 年後

開始点(236,-100) 4000年後 V解析法

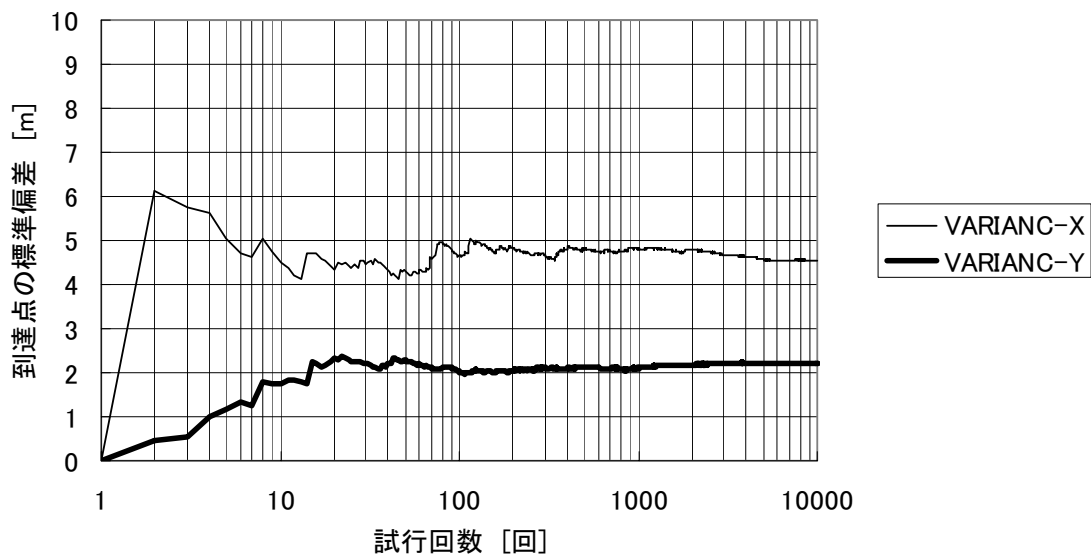


図 3.5-55(b) 収束性の確認 V 解析法 標準偏差 開始点 (236, -100) 4000 年後

開始点(236,-100) 5000年後 K解析法

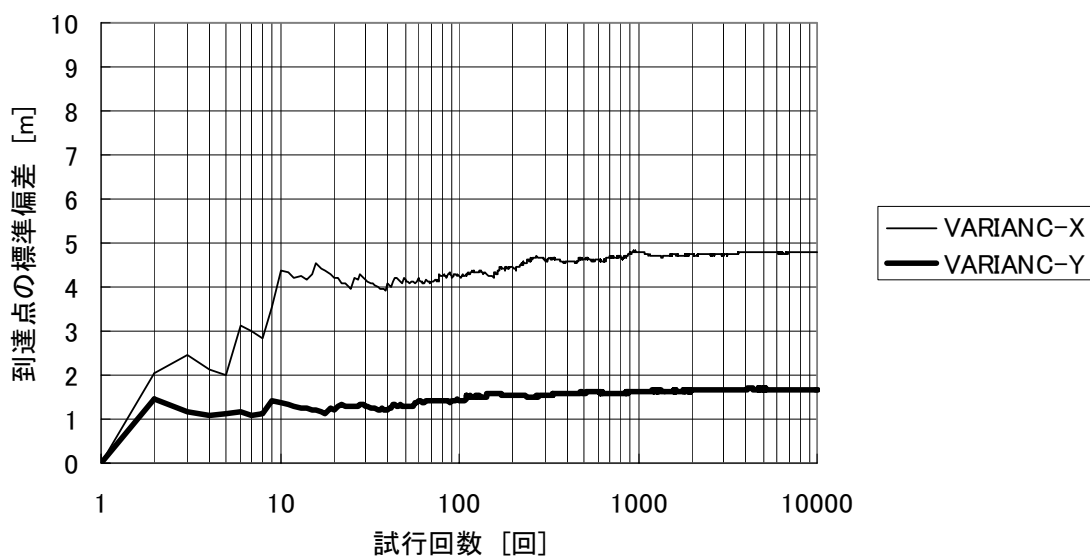


図 3.5-56 (a) 収束性の確認 K 解析法 標準偏差 開始点 (236, -100) 5000 年後

開始点(236,-100) 5000年後 V解析法

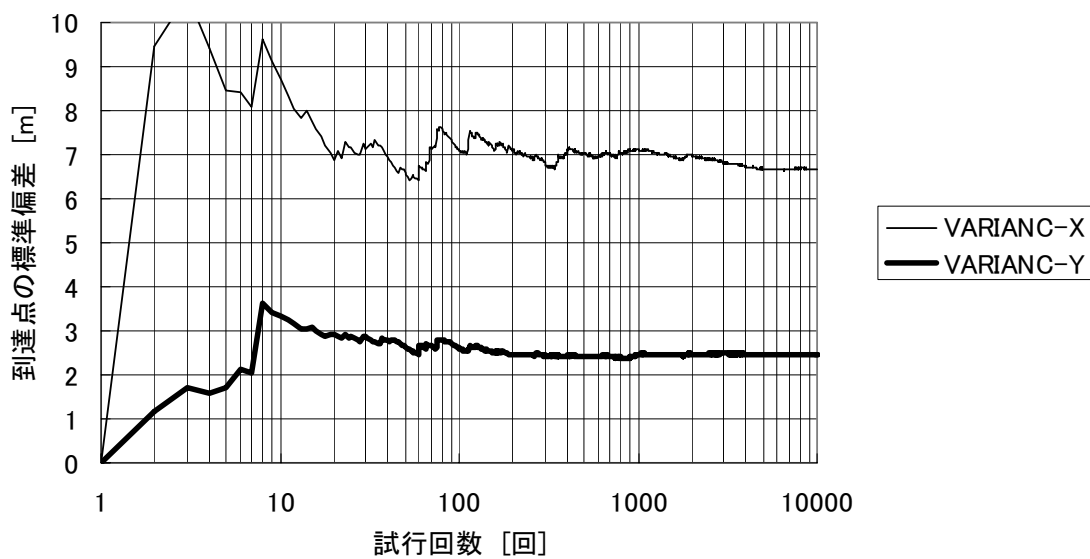


図 3.5-56 (b) 収束性の確認 V 解析法 標準偏差 開始点 (236, -100) 5000 年後

開始点(236,-200) 1000年後 K解析法

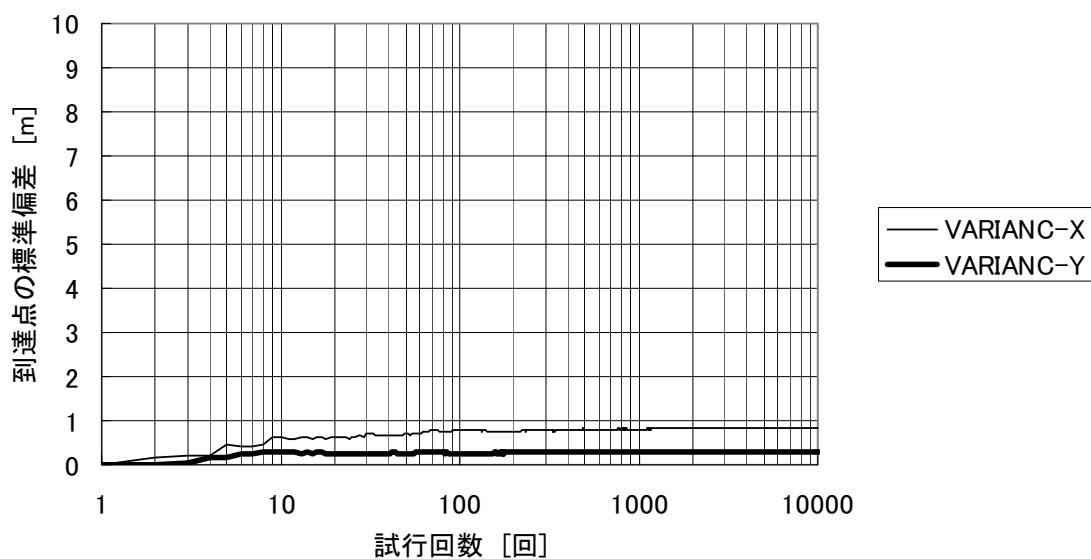


図 3.5-57(a) 収束性の確認 K 解析法 標準偏差 開始点(236, -200) 1000 年後

開始点(236,-200) 1000年後 V解析法

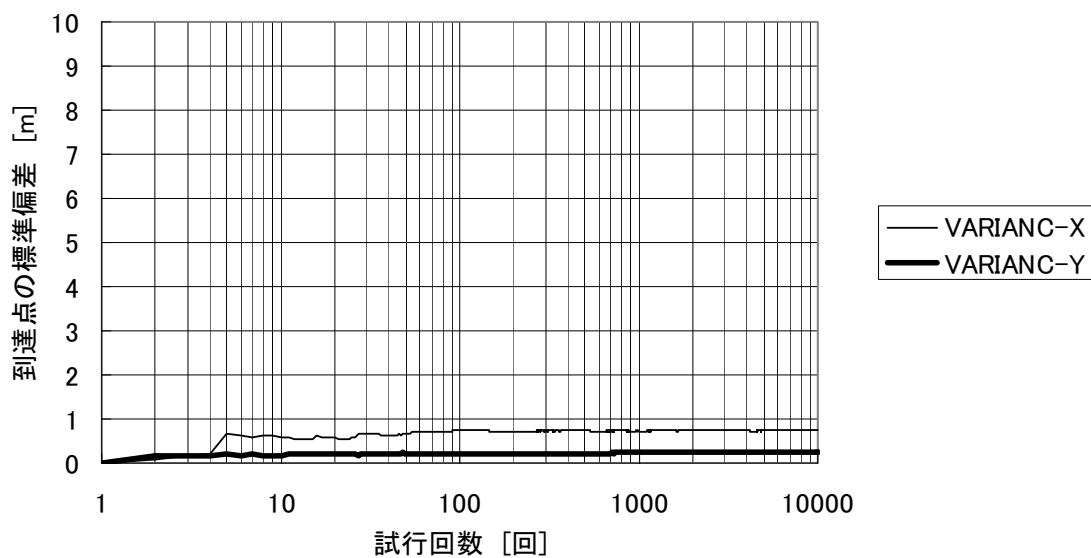


図 3.5-57(b) 収束性の確認 V 解析法 標準偏差 開始点(236, -200) 1000 年後

開始点(236,-200) 2000年後 K解析法

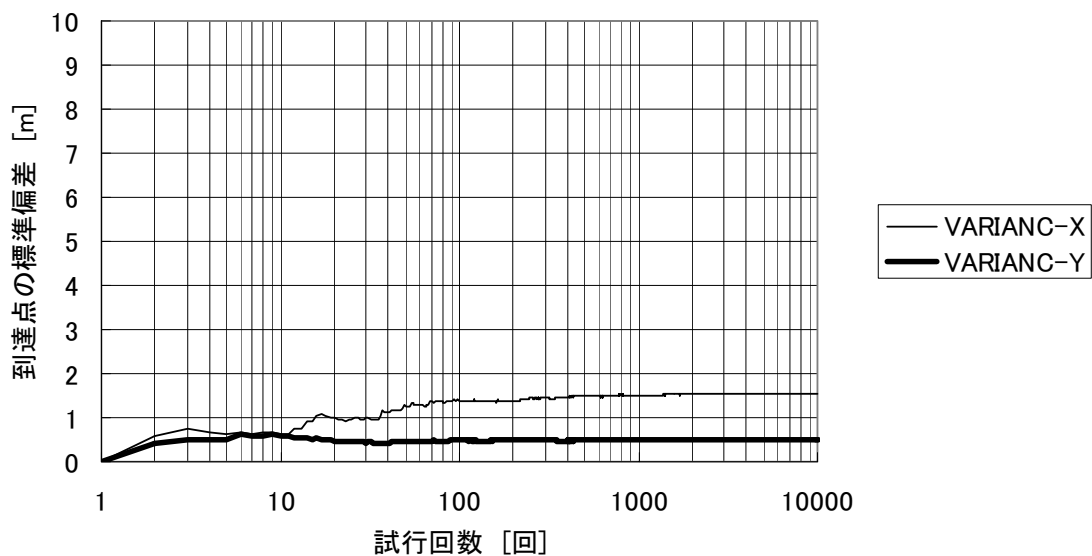


図 3.5-58(a) 収束性の確認 K解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 2000 年後

開始点(236,-200) 2000年後 V解析法

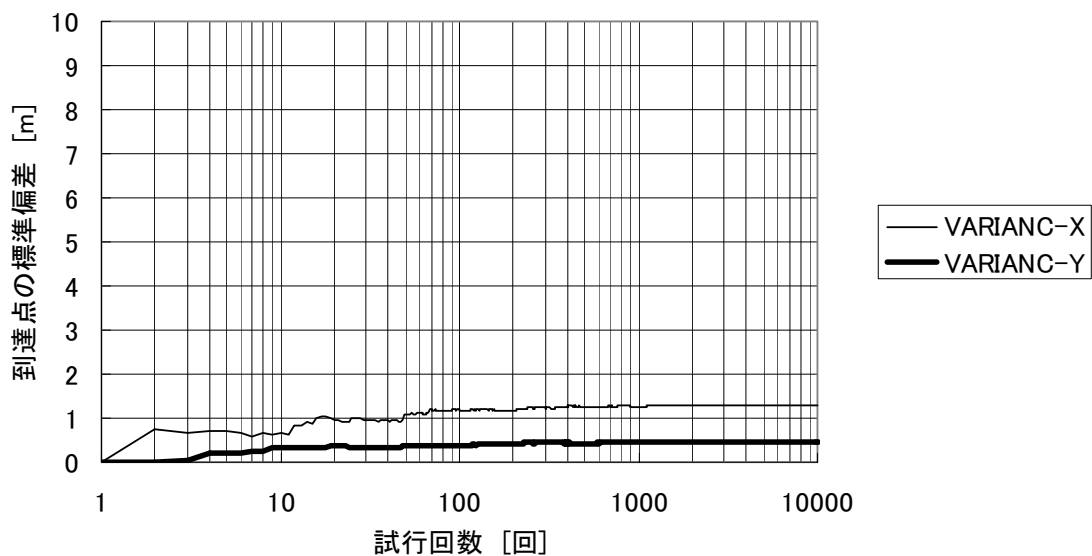


図 3.5-58(b) 収束性の確認 V解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 2000 年後

開始点(236,-200) 3000年後 K解析法

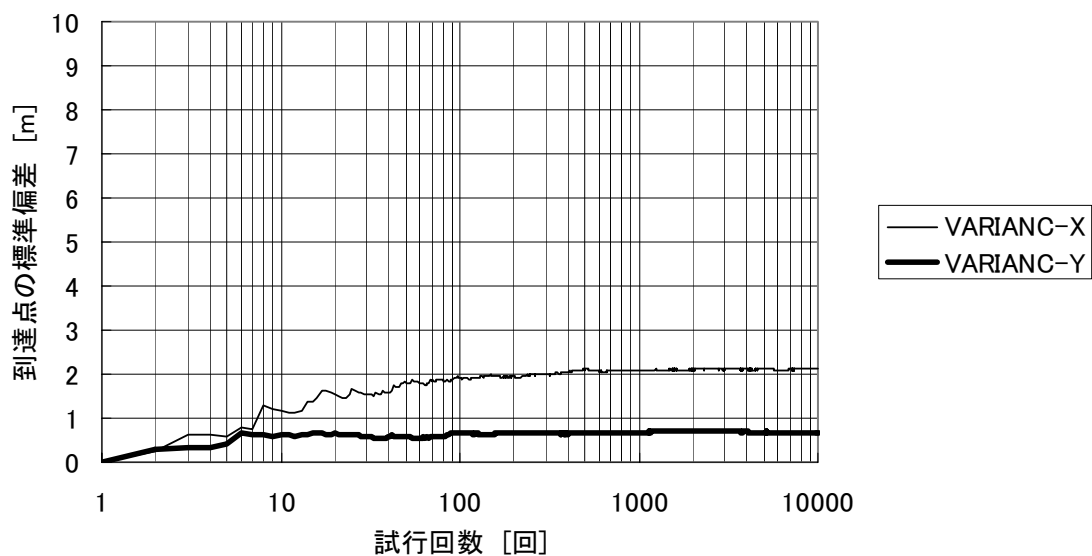


図 3.5-59 (a) 収束性の確認 K 解析法 標準偏差 開始点 (236, -200) 3000 年後

開始点(236,-200) 3000年後 V解析法

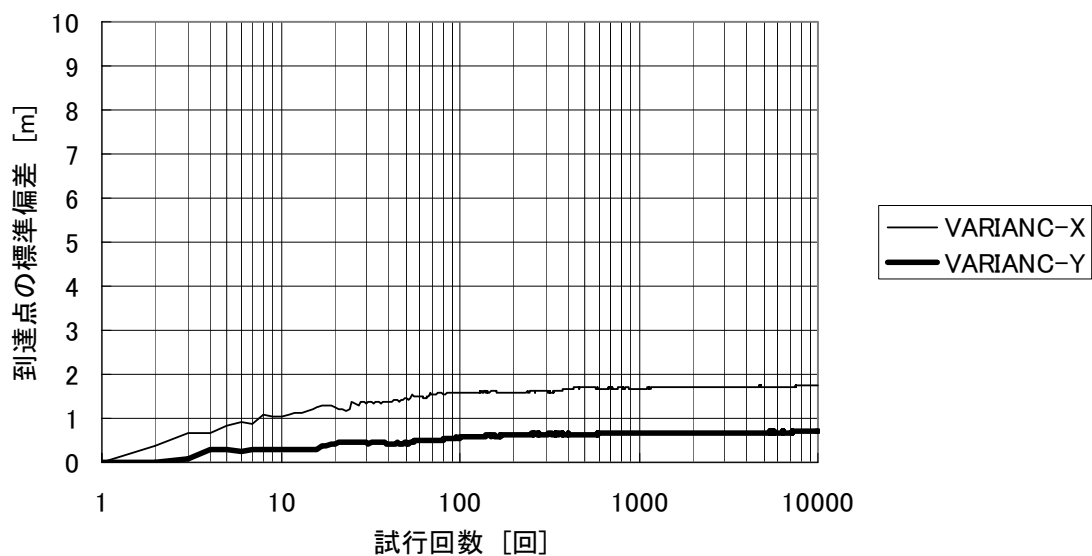


図 3.5-59 (b) 収束性の確認 V 解析法 標準偏差 開始点 (236, -200) 3000 年後

開始点(236,-200) 4000年後 K解析法

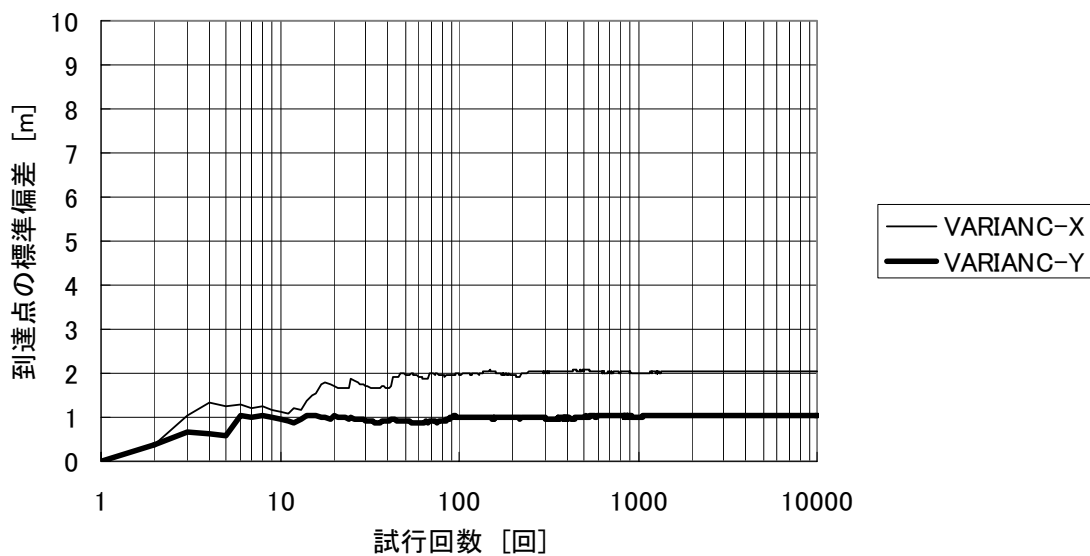


図 3.5-60(a) 収束性の確認 K 解析法 標準偏差 開始点(236, -200) 4000 年後

開始点(236,-200) 4000年後 V解析法

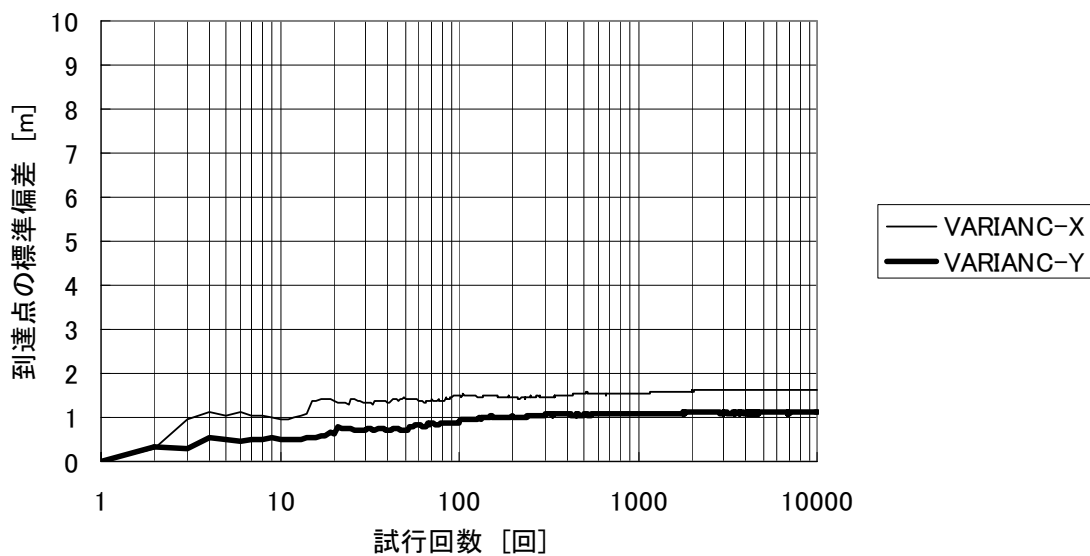


図 3.5-60(b) 収束性の確認 V 解析法 標準偏差 開始点(236, -200) 4000 年後

開始点(236,-200) 5000年後 K解析法

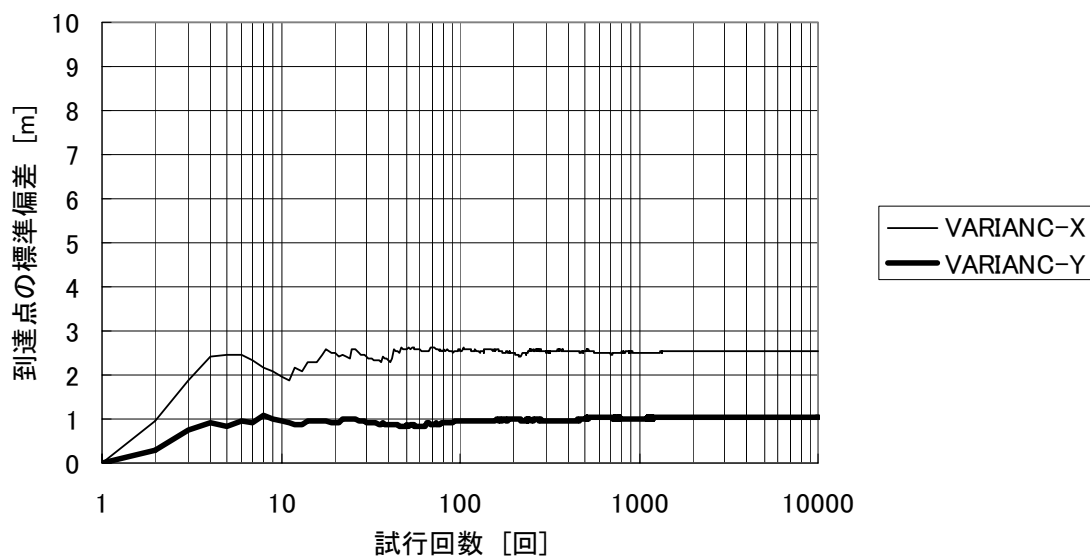


図 3.5-61(a) 収束性の確認 K解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 5000年後

開始点(236,-200) 5000年後 V解析法

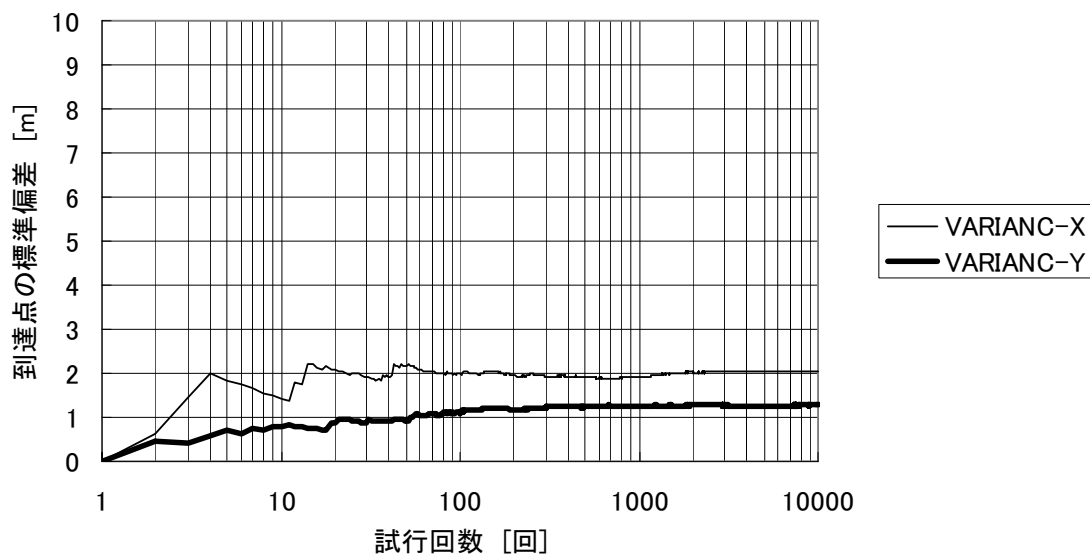


図 3.5-61(b) 収束性の確認 V解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 5000年後

開始点(236,-200) 6000年後 K解析法

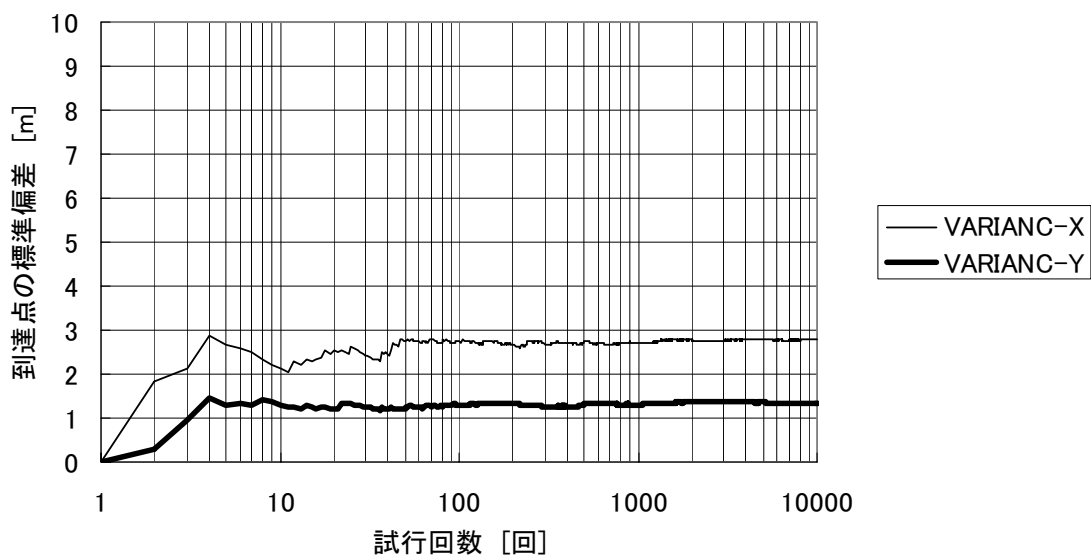


図 3.5-62 (a) 収束性の確認 K解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 6000 年後

開始点(236,-200) 6000年後 V解析法

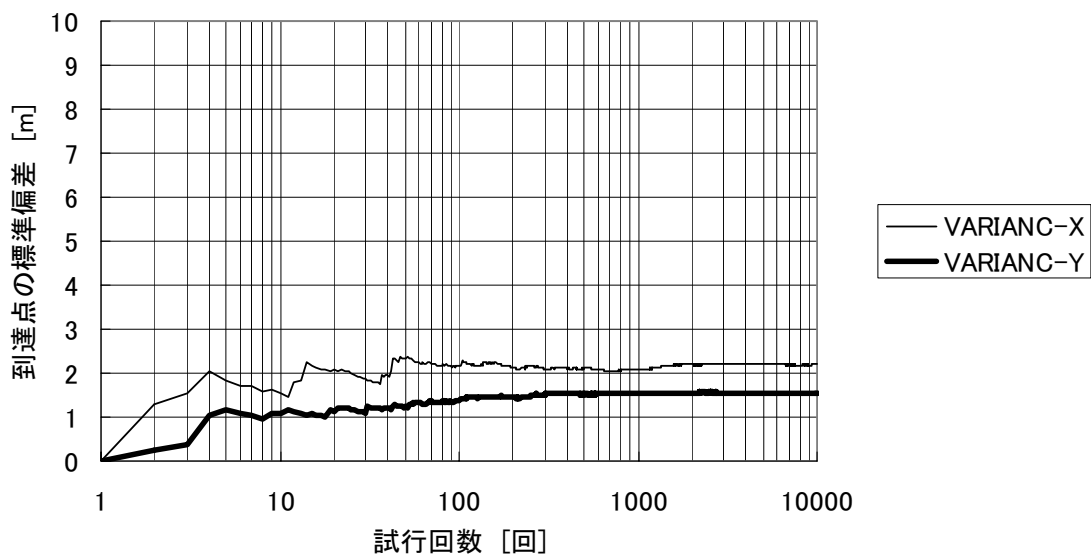


図 3.5-62 (b) 収束性の確認 V解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 6000 年後

開始点(236,-200) 7000年後 K解析法

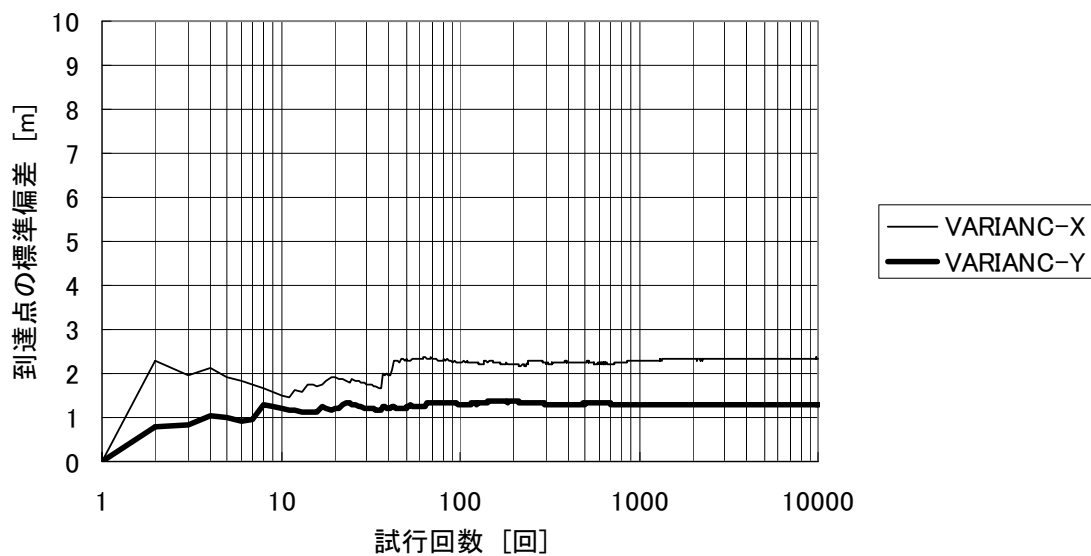


図 3.5-63(a) 収束性の確認 K解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 7000年後

開始点(236,-200) 7000年後 V解析法

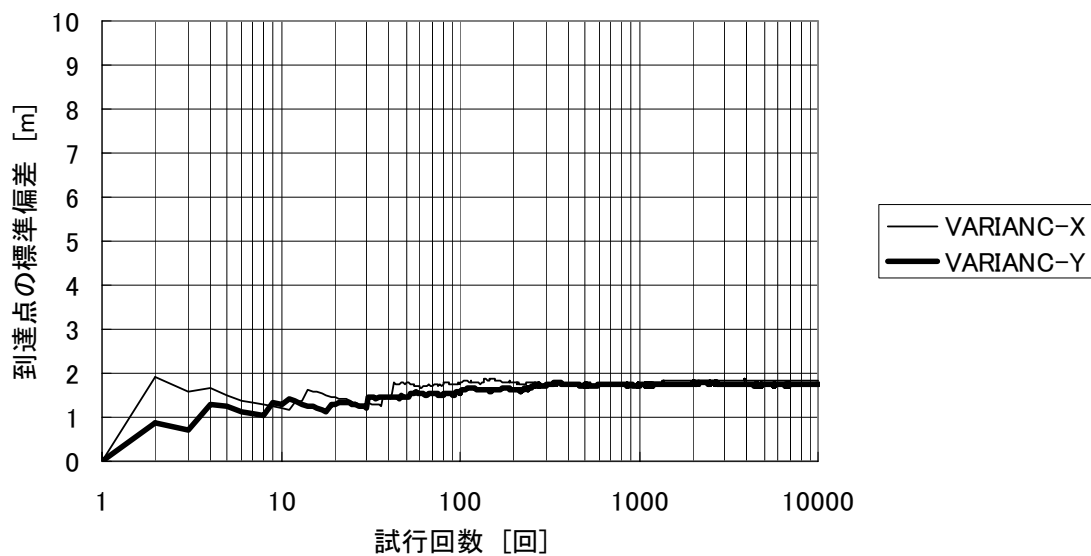


図 3.5-63(b) 収束性の確認 V解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 7000年後

開始点(236,-200) 8000年後 K解析法

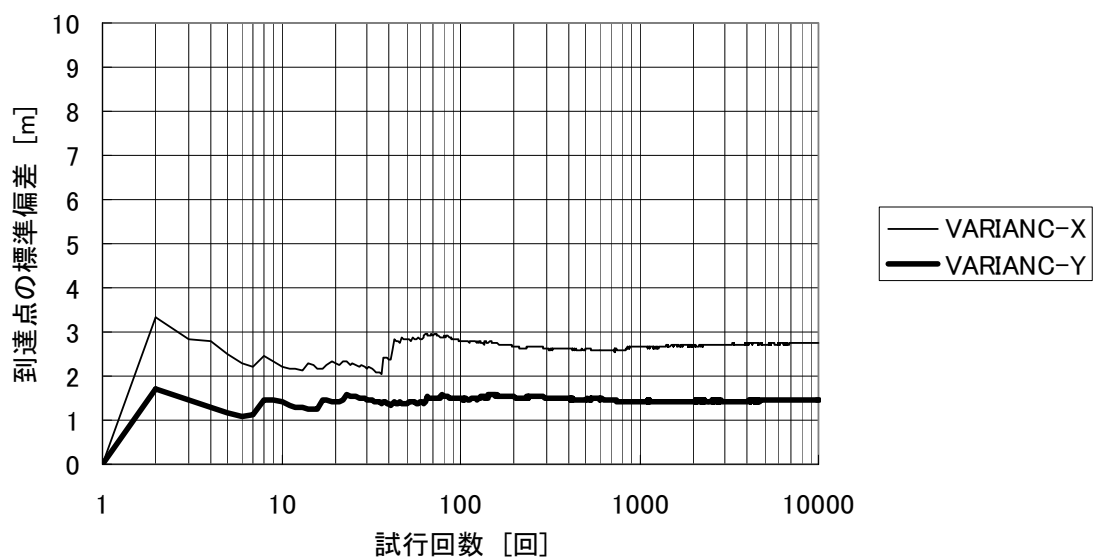


図 3.5-64(a) 収束性の確認 K 解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 8000 年後

開始点(236,-200) 8000年後 V解析法

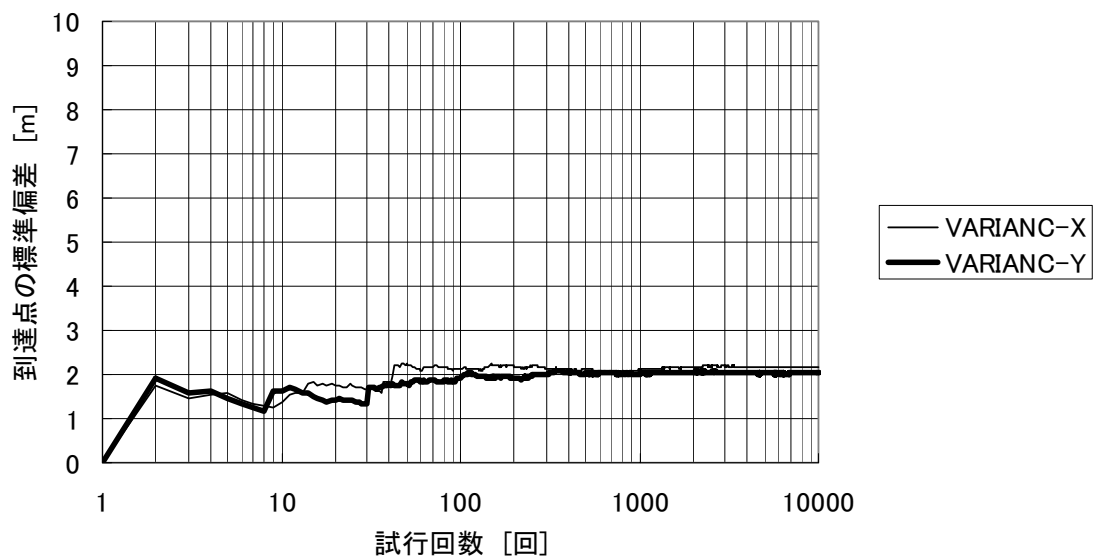


図 3.5-64(b) 収束性の確認 V 解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 8000 年後

開始点(236,-200) 9000年後 K解析法

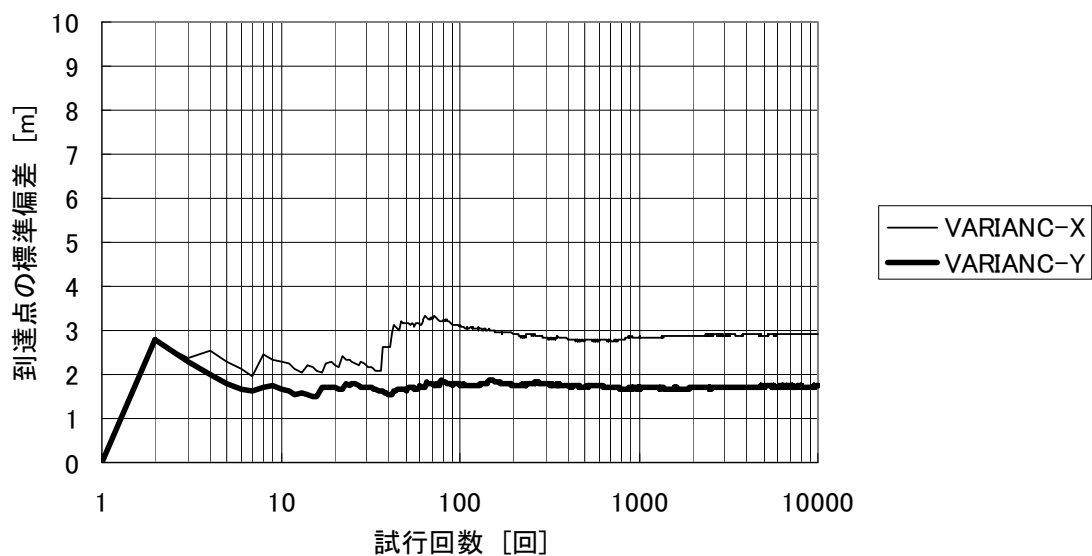


図 3.5-65 (a) 収束性の確認 K 解析法 標準偏差 開始点 (236, -200) 9000 年後

開始点(236,-200) 9000年後 V解析法

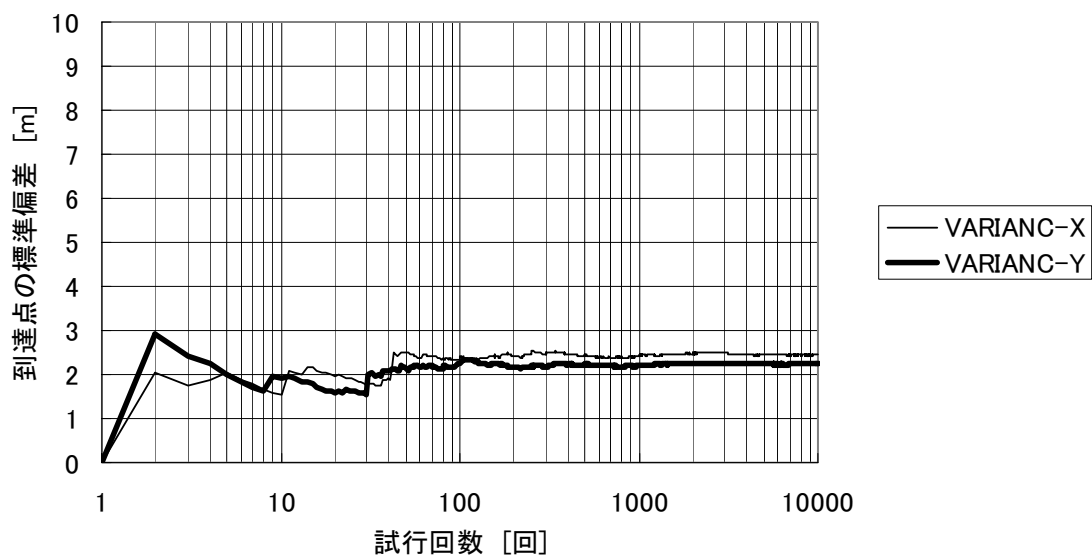


図 3.5-65 (b) 収束性の確認 V 解析法 標準偏差 開始点 (236, -200) 9000 年後

開始点(236,-200) 10000年後 K解析法

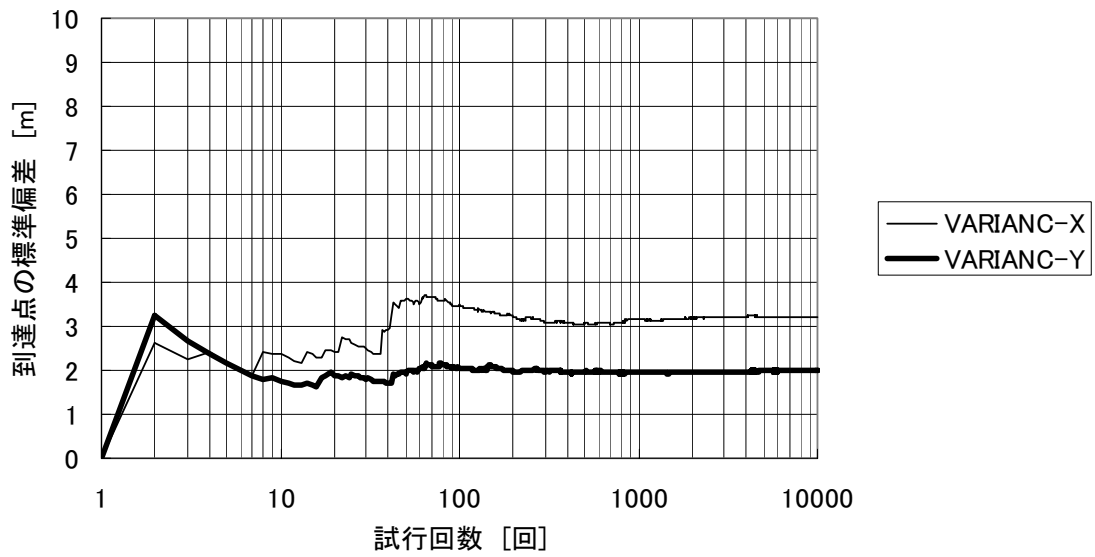


図 3.5-66(a) 収束性の確認 K解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 10000 年後

開始点(236,-200) 10000年後 V解析法

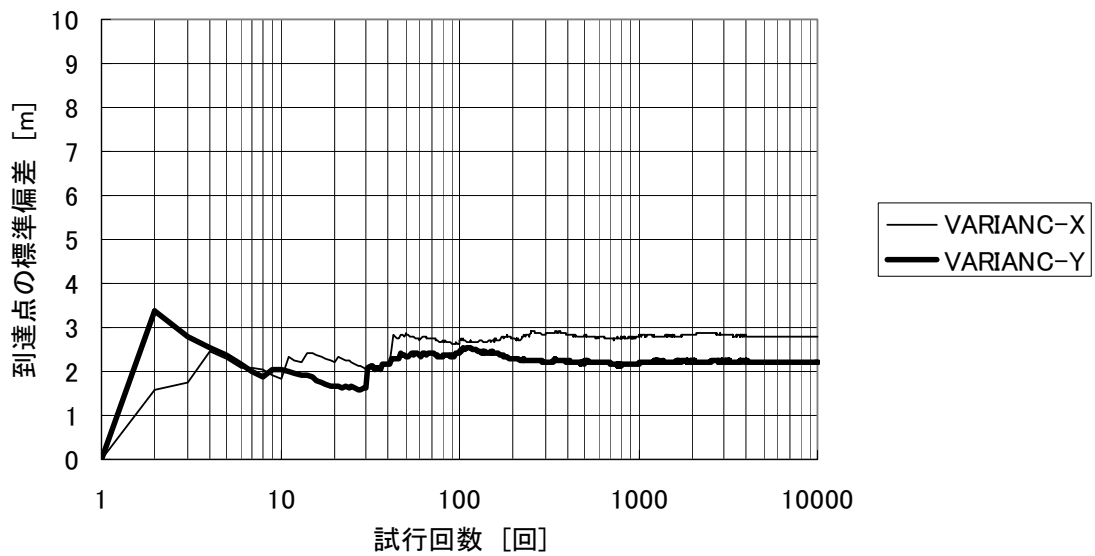


図 3.5-66(b) 収束性の確認 V解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 10000 年後

開始点(236,-200) 11000年後 K解析法

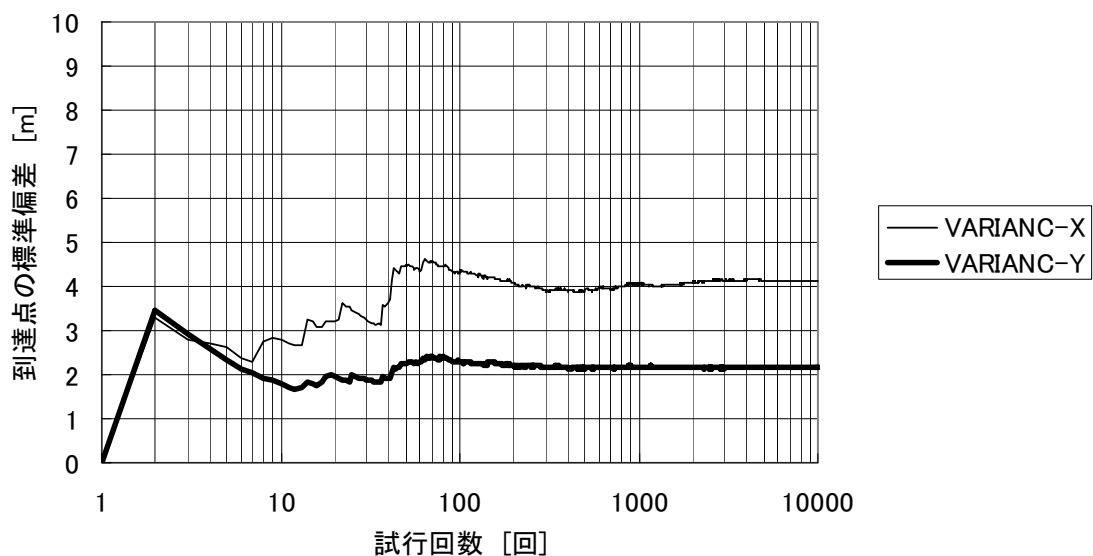


図 3.5-67(a) 収束性の確認 K解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 11000 年後

開始点(236,-200) 11000年後 V解析法

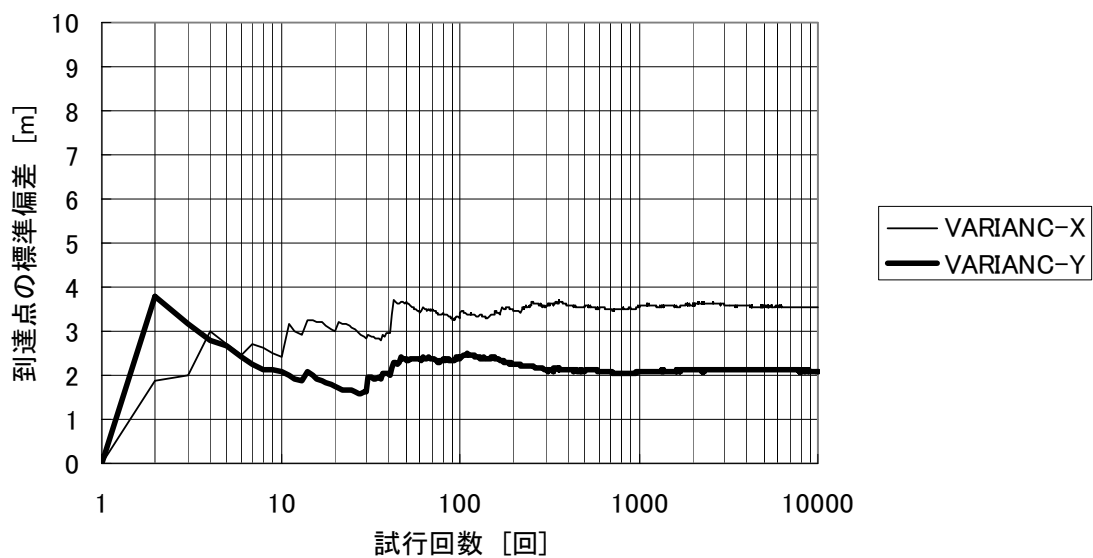


図 3.5-67(b) 収束性の確認 V解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 11000 年後

開始点(236,-200) 12000年後 K解析法

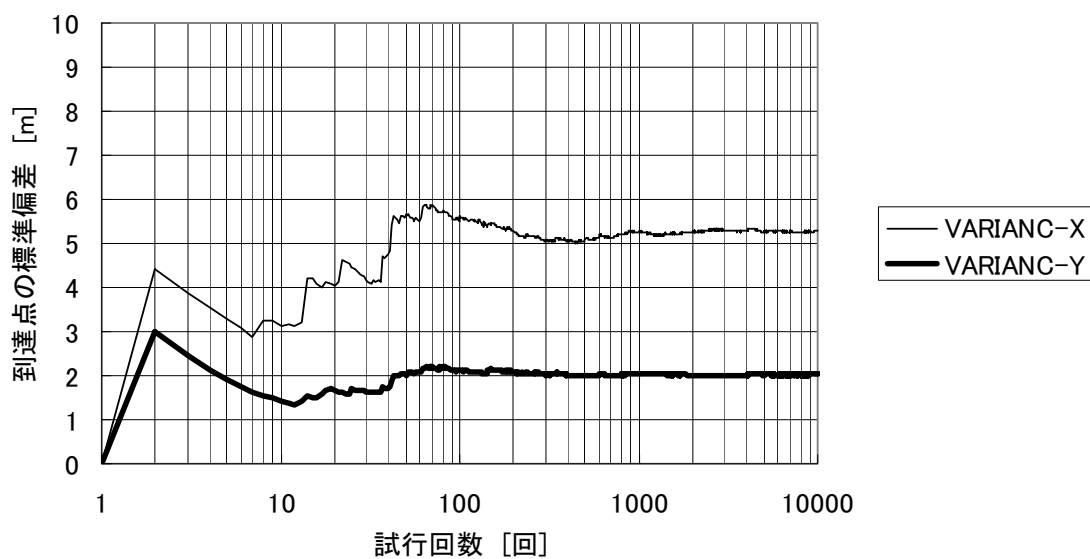


図 3.5-68(a) 収束性の確認 K解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 12000 年後

開始点(236,-200) 12000年後 K解析法

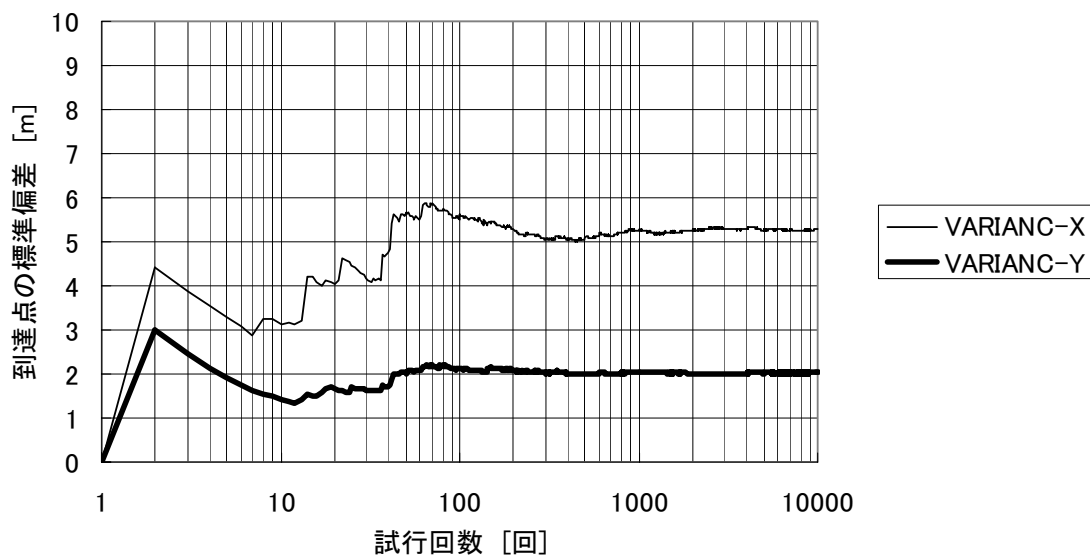


図 3.5-68(b) 収束性の確認 V解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 12000 年後

開始点(236,-200) 13000年後 K解析法

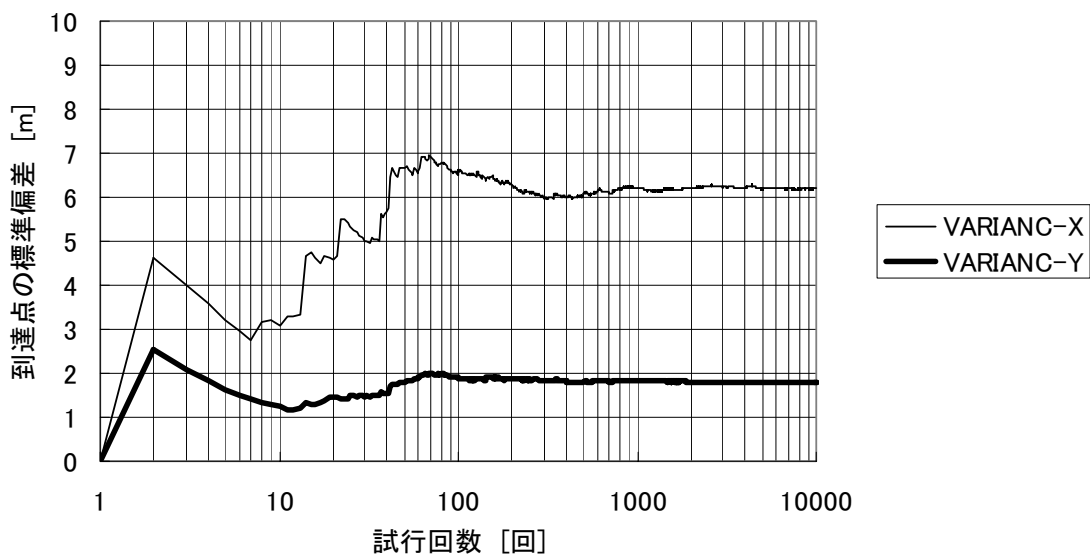


図 3.5-69(a) 収束性の確認 K解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 13000 年後

開始点(236,-200) 13000年後 V解析法

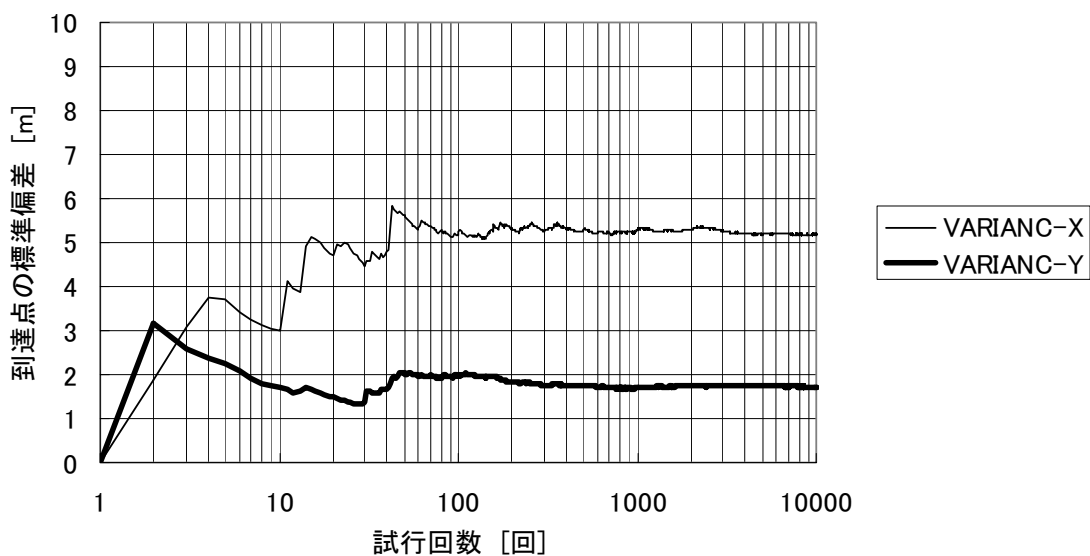


図 3.5-69(b) 収束性の確認 V解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 13000 年後

開始点(236,-200) 14000年後 K解析法

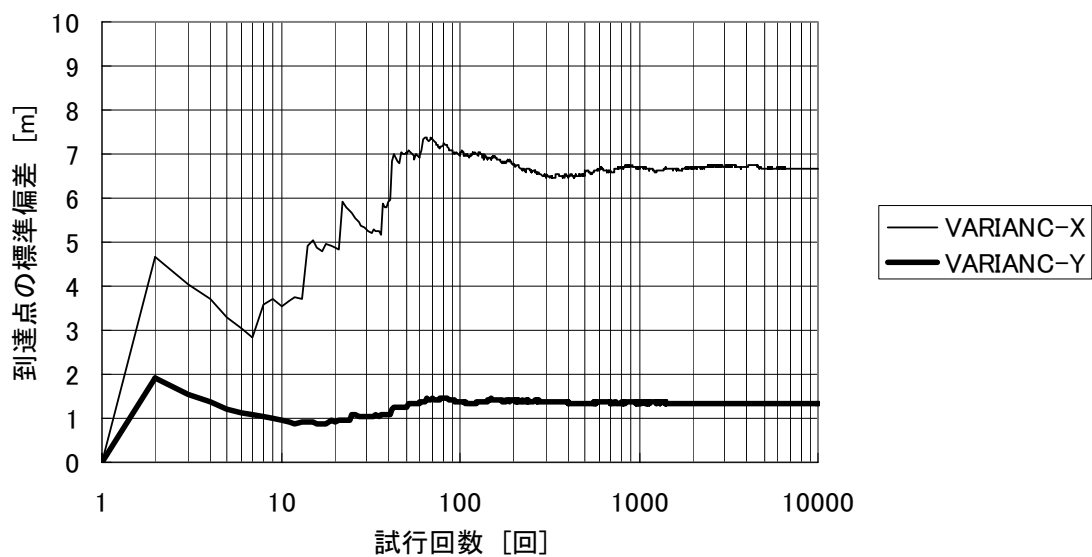


図 3.5-70(a) 収束性の確認 K 解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 14000 年後

開始点(236,-200) 14000年後 V解析法

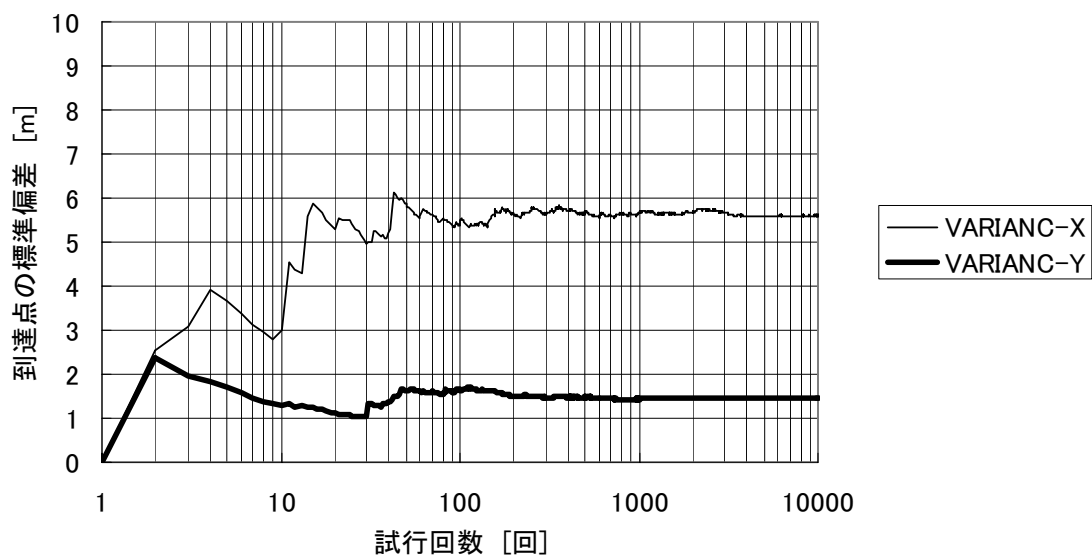


図 3.5-70(b) 収束性の確認 V 解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 14000 年後

開始点(236,-200) 15000年後 K解析法

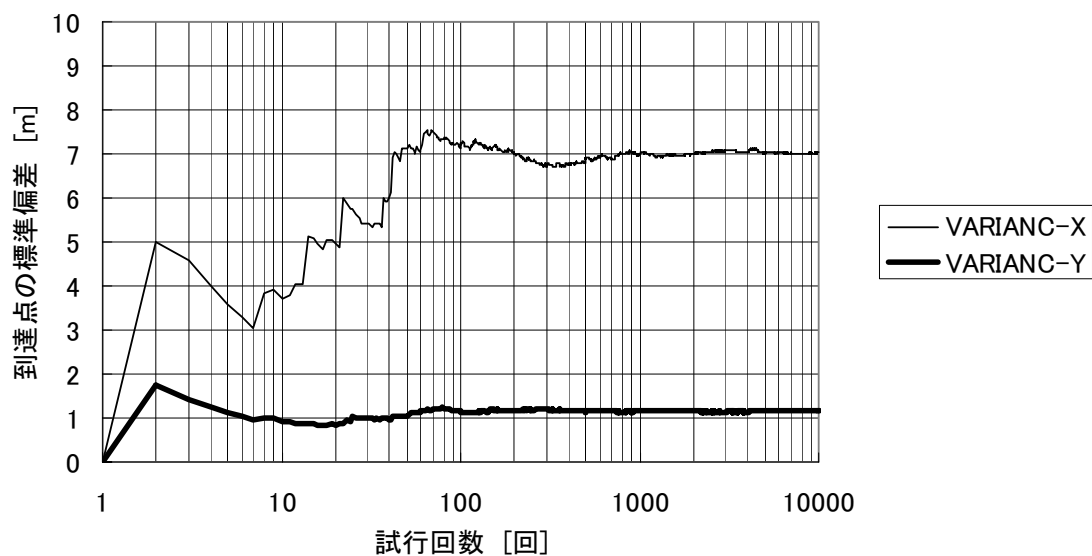


図 3.5-71(a) 収束性の確認 K解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 15000年後

開始点(236,-200) 15000年後 V解析法

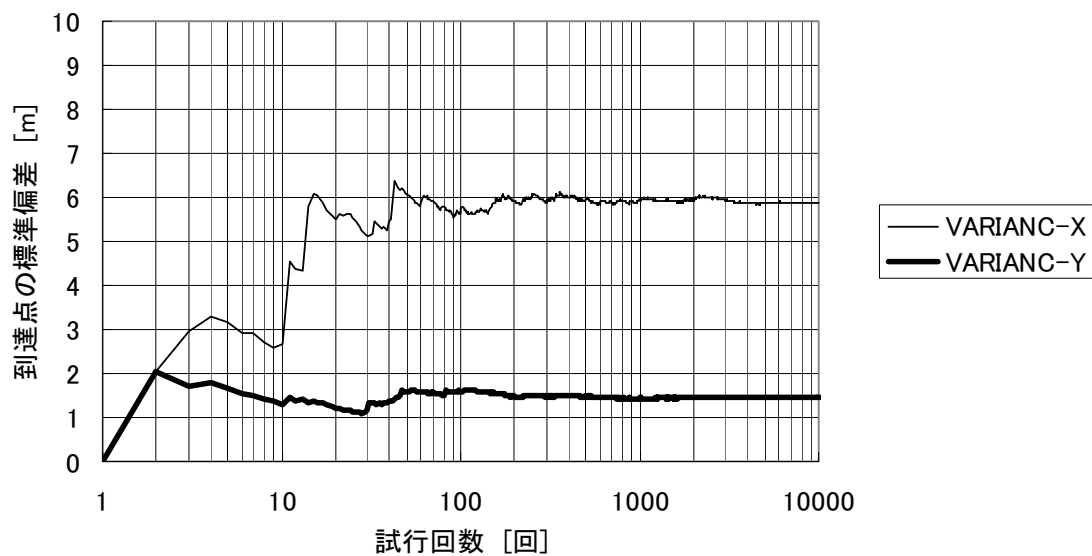


図 3.5-71(b) 収束性の確認 V解析法 標準偏差 開始点(236,-200) 15000年後

開始点(236,-300) 1000年後 K解析法

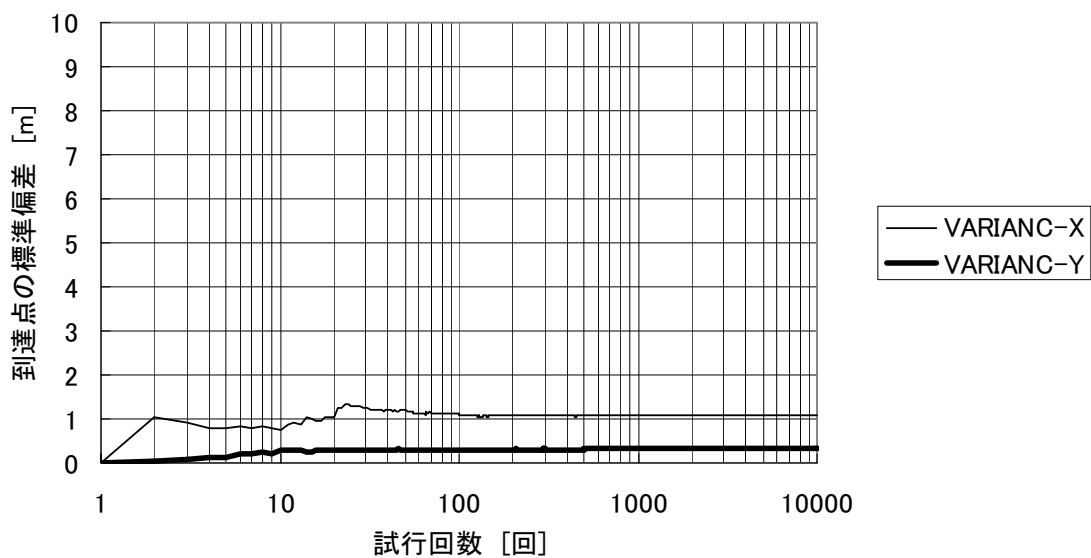


図 3.5-72(a) 収束性の確認 K解析法 標準偏差 開始点(236,-300) 1000 年後

開始点(236,-300) 1000年後 V解析法

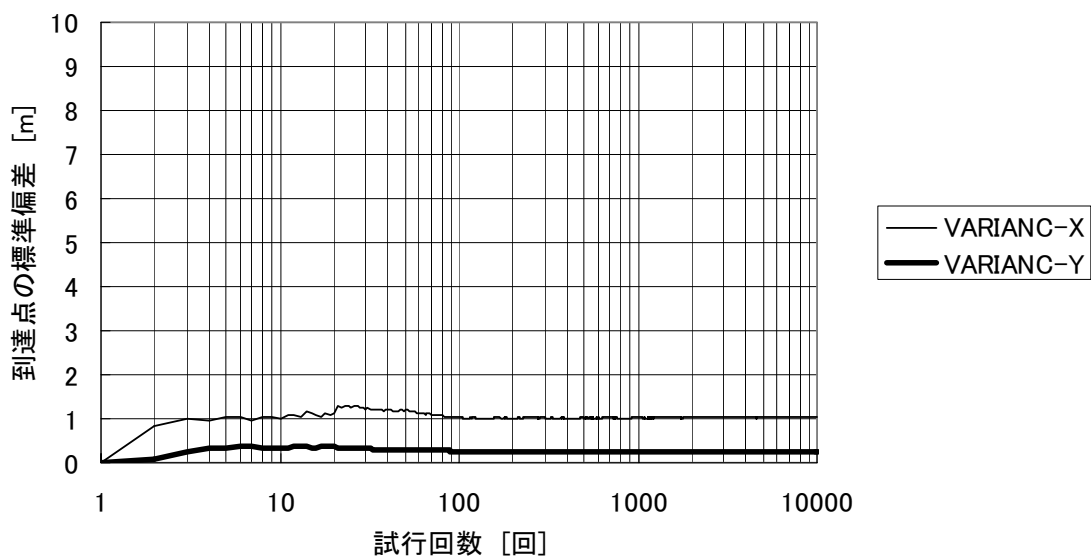


図 3.5-72(b) 収束性の確認 V解析法 標準偏差 開始点(236,-300) 1000 年後

開始点(236,-300) 2000年後 K解析法

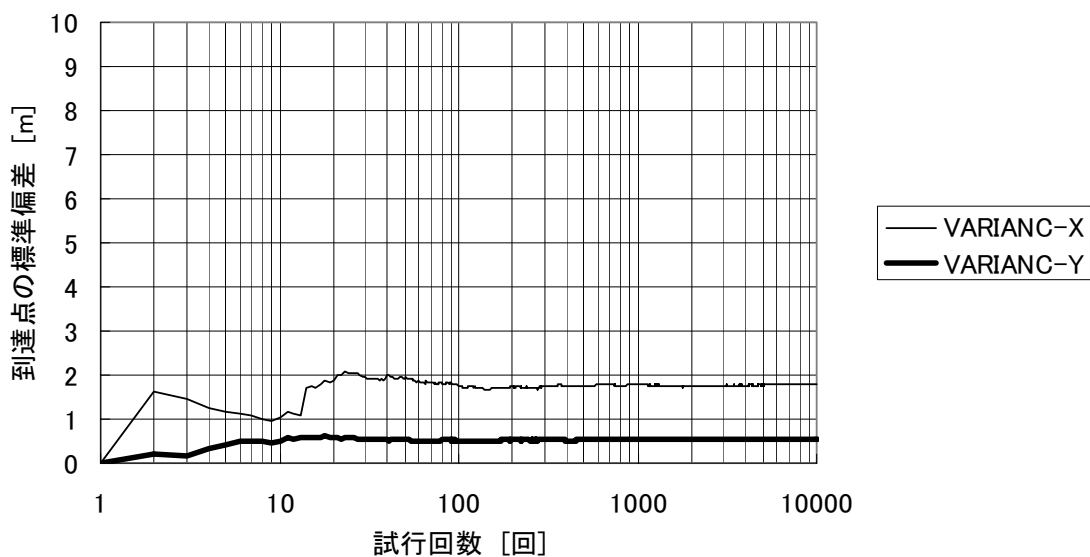


図 3.5-73 (a) 収束性の確認 K 解析法 標準偏差 開始点 (236, -300) 2000 年後

開始点(236,-300) 2000年後 V解析法

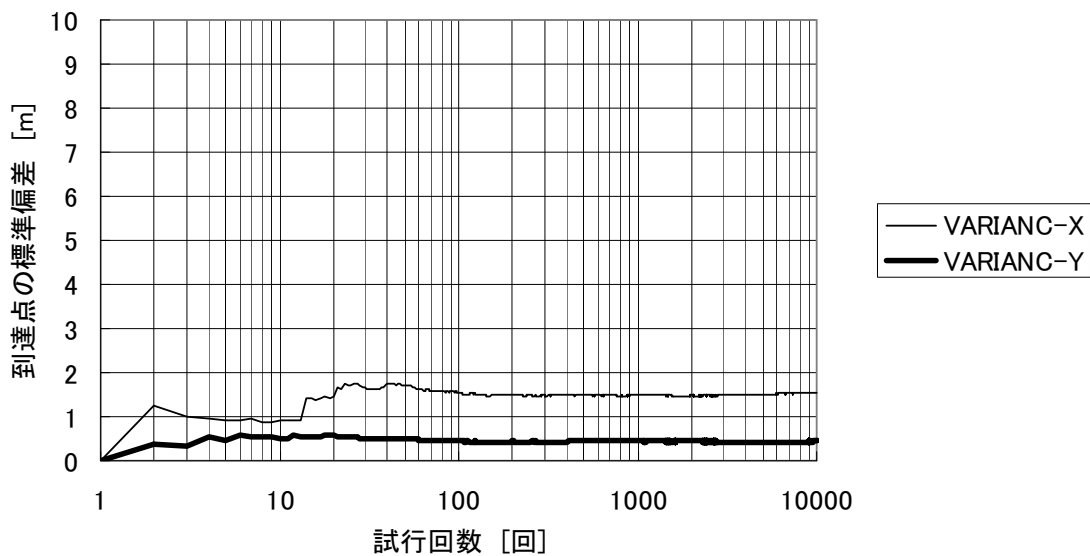


図 3.5-73 (b) 収束性の確認 V 解析法 標準偏差 開始点 (236, -300) 2000 年後

開始点(236,-300) 3000年後 K解析法

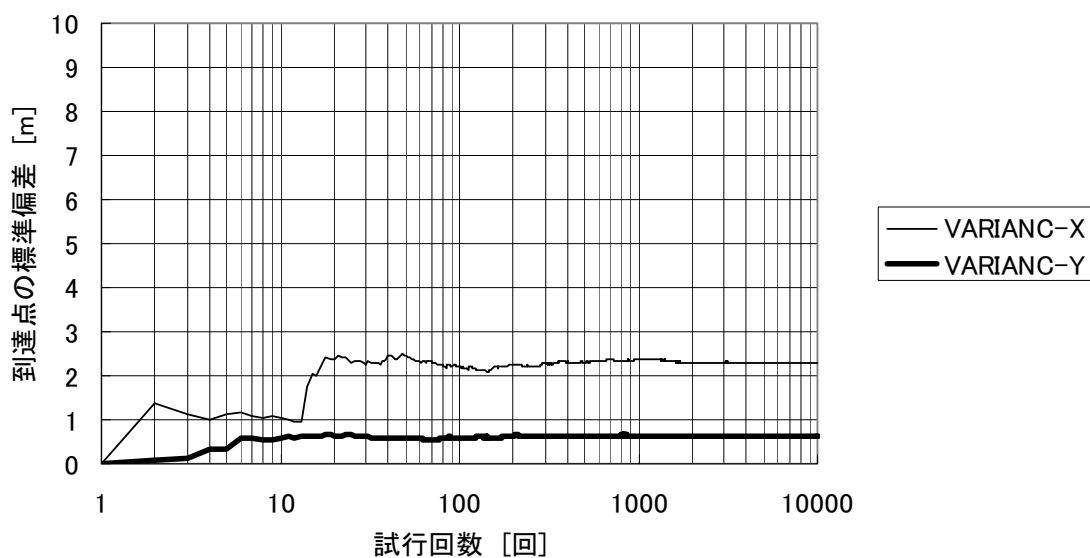


図 3.5-74(a) 収束性の確認 K解析法 標準偏差 開始点(236,-300) 3000 年後

開始点(236,-300) 3000年後 V解析法

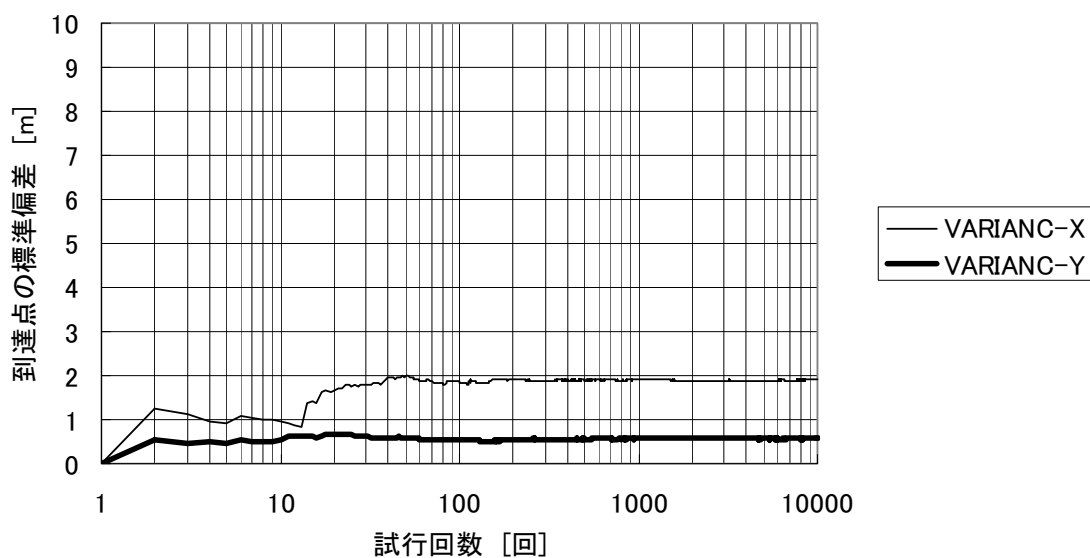


図 3.5-74(b) 収束性の確認 V解析法 標準偏差 開始点(236,-300) 3000 年後

開始点(236,-300) 4000年後 K解析法

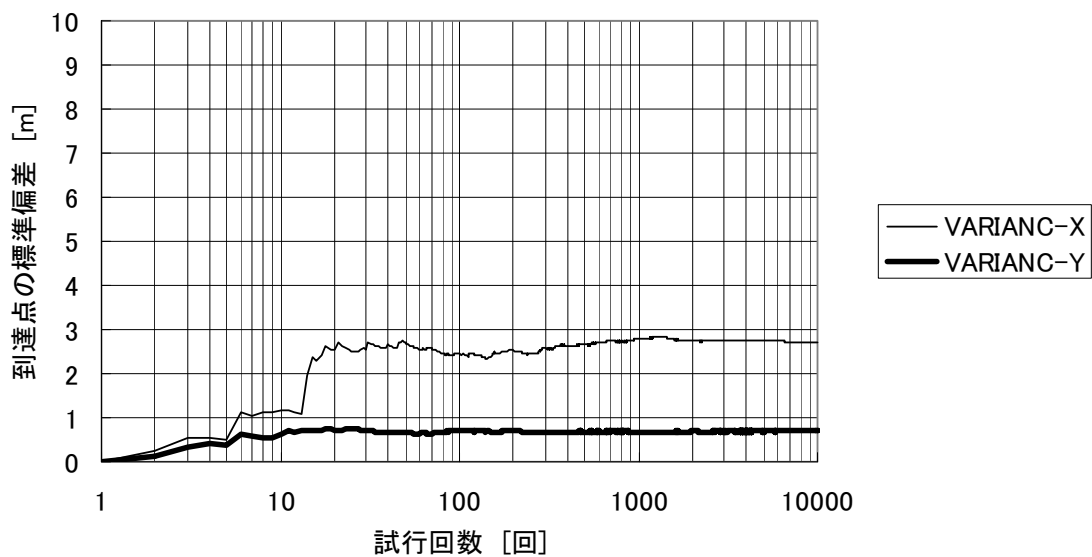


図 3.5-75 (a) 収束性の確認 K 解析法 標準偏差 開始点 (236, -300) 4000 年後

開始点(236,-300) 4000年後 V解析法

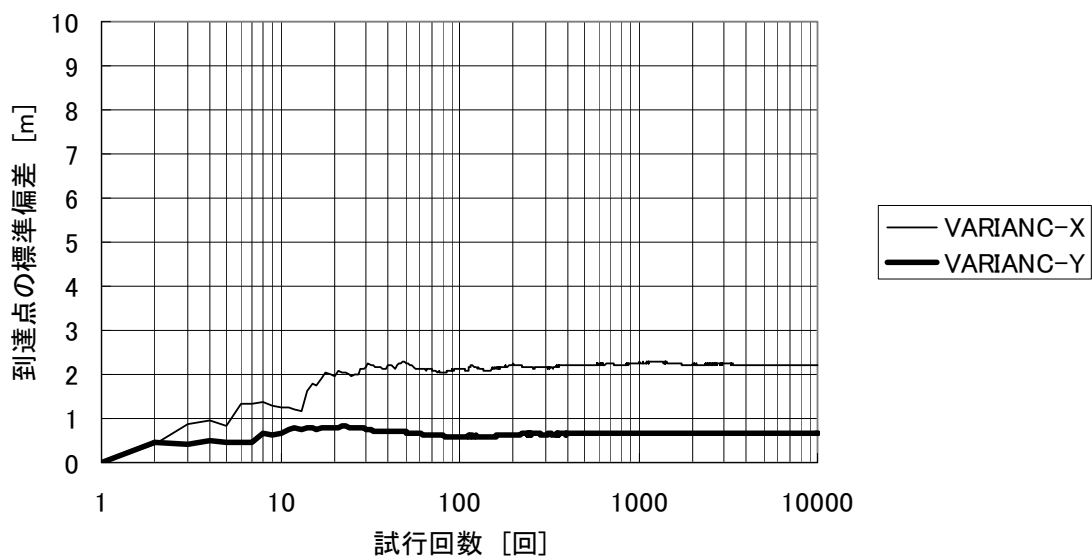


図 3.5-75 (b) 収束性の確認 V 解析法 標準偏差 開始点 (236, -300) 4000 年後

開始点(236,-300) 5000年後 K解析法

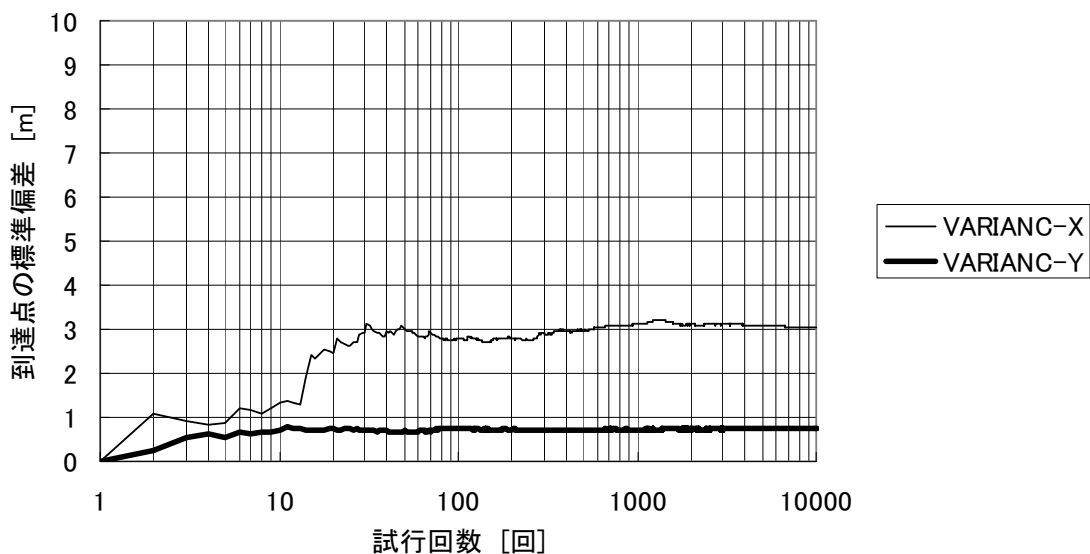


図 3.5-76 (a) 収束性の確認 K 解析法 標準偏差 開始点 (236, -300) 5000 年後

開始点(236,-300) 5000年後 V解析法

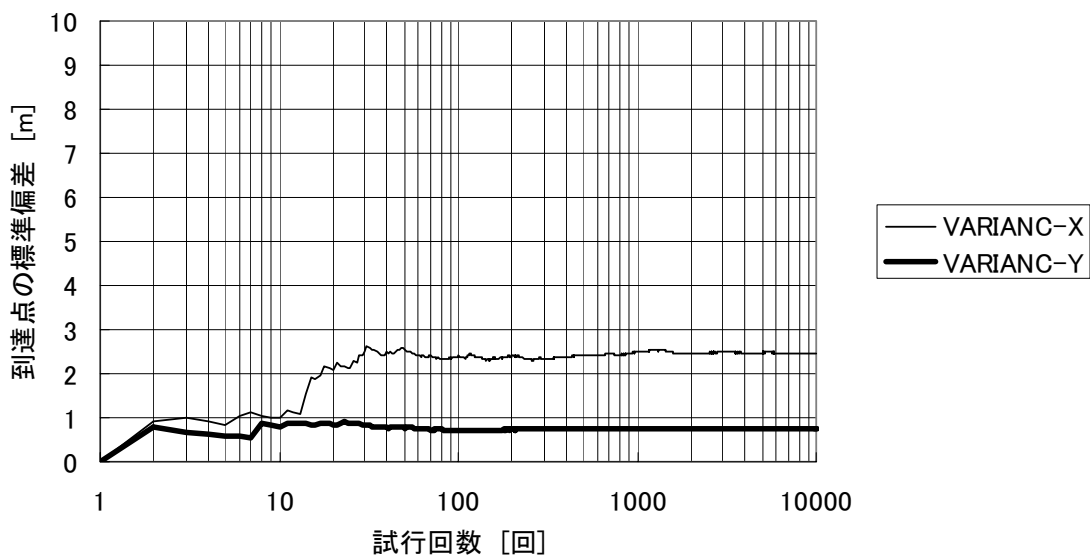


図 3.5-76 (b) 収束性の確認 V 解析法 標準偏差 開始点 (236, -300) 5000 年後

開始点(236,-300) 6000年後 K解析法

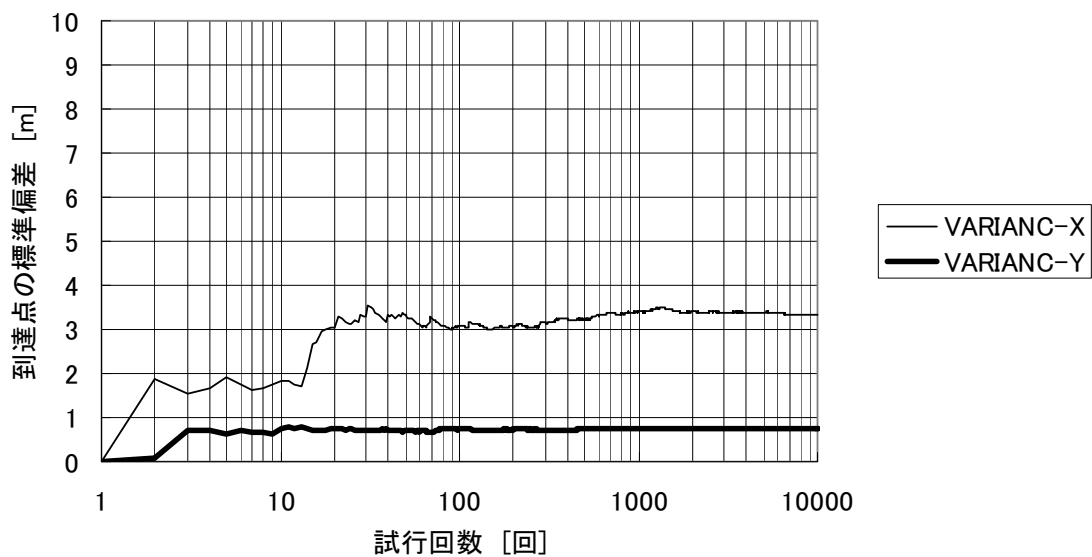


図 3.5-77(a) 収束性の確認 K 解析法 標準偏差 開始点(236,-300) 6000 年後

開始点(236,-300) 6000年後 V解析法

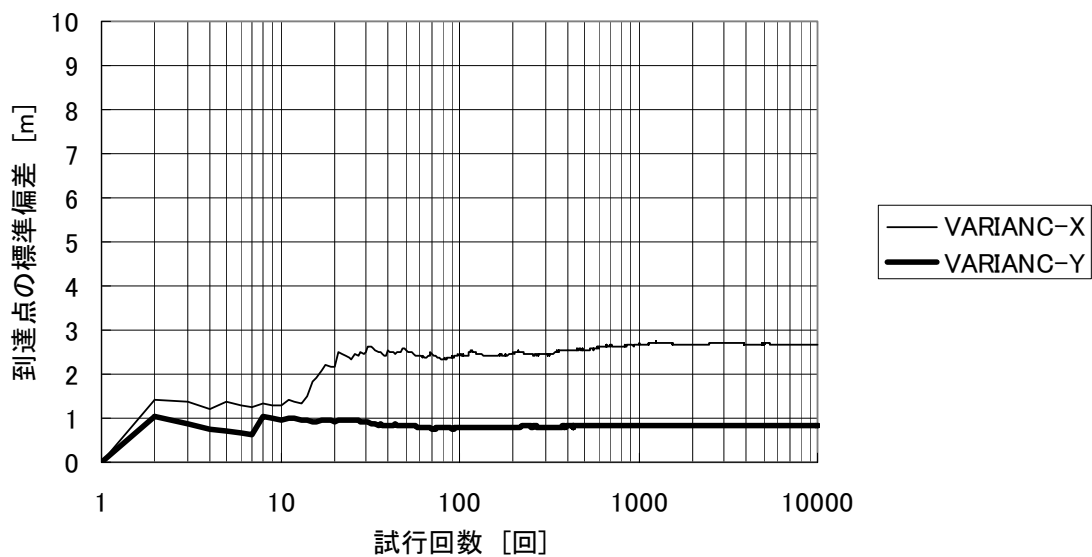


図 3.5-77(b) 収束性の確認 V 解析法 標準偏差 開始点(236,-300) 6000 年後

開始点(236,-300) 7000年後 K解析法

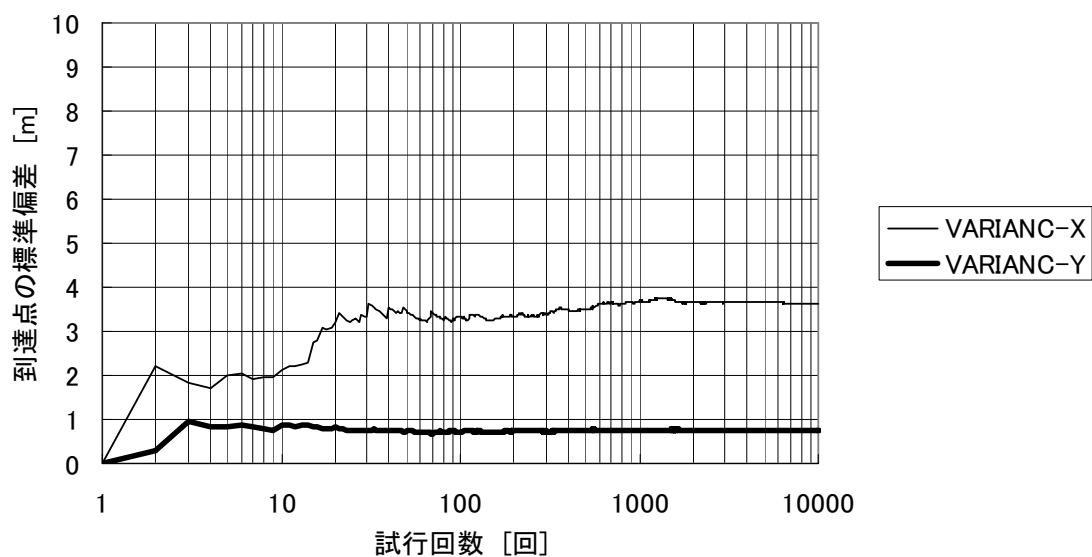


図 3.5-78(a) 収束性の確認 K解析法 標準偏差 開始点(236,-300) 7000年後

開始点(236,-300) 7000年後 V解析法

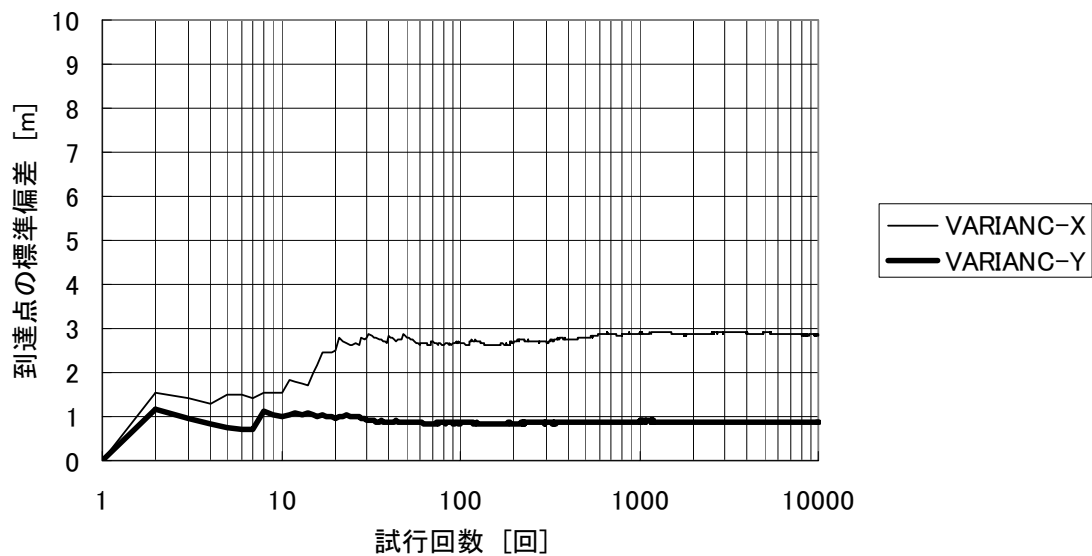


図 3.5-78(b) 収束性の確認 V解析法 標準偏差 開始点(236,-300) 7000年後

開始点(236,-300) 8000年後 K解析法

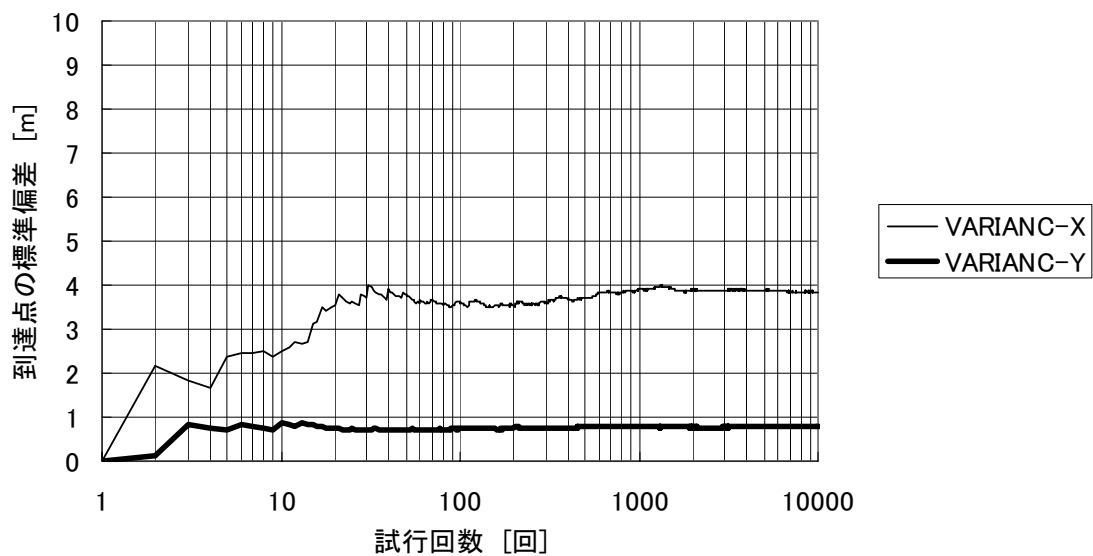


図 3.5-79 (a) 収束性の確認 K 解析法 標準偏差 開始点 (236, -300) 8000 年後

開始点(236,-300) 8000年後 V解析法

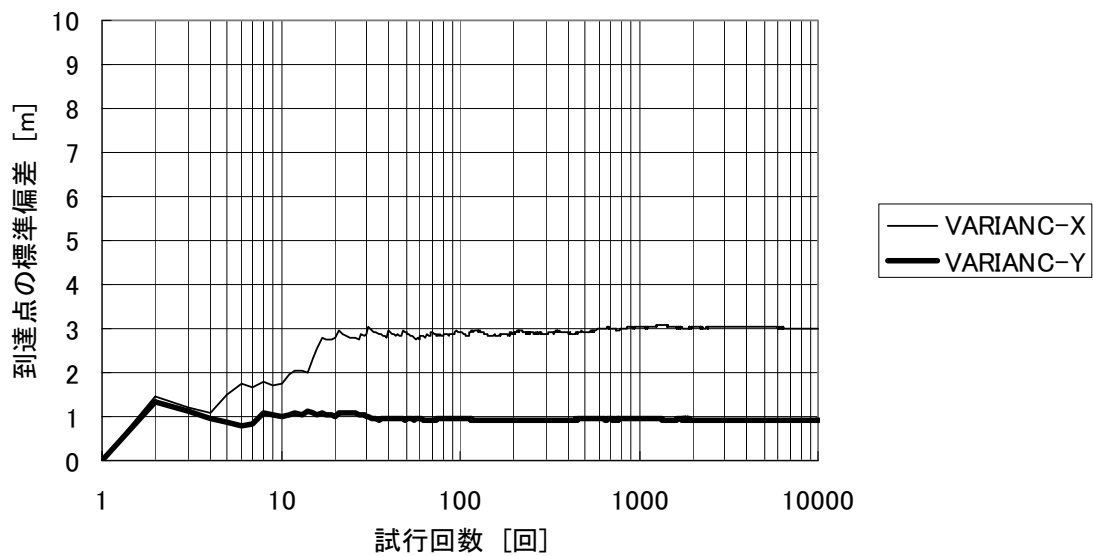


図 3.5-79 (b) 収束性の確認 V 解析法 標準偏差 開始点 (236, -300) 8000 年後

開始点(236,-300) 9000年後 K解析法

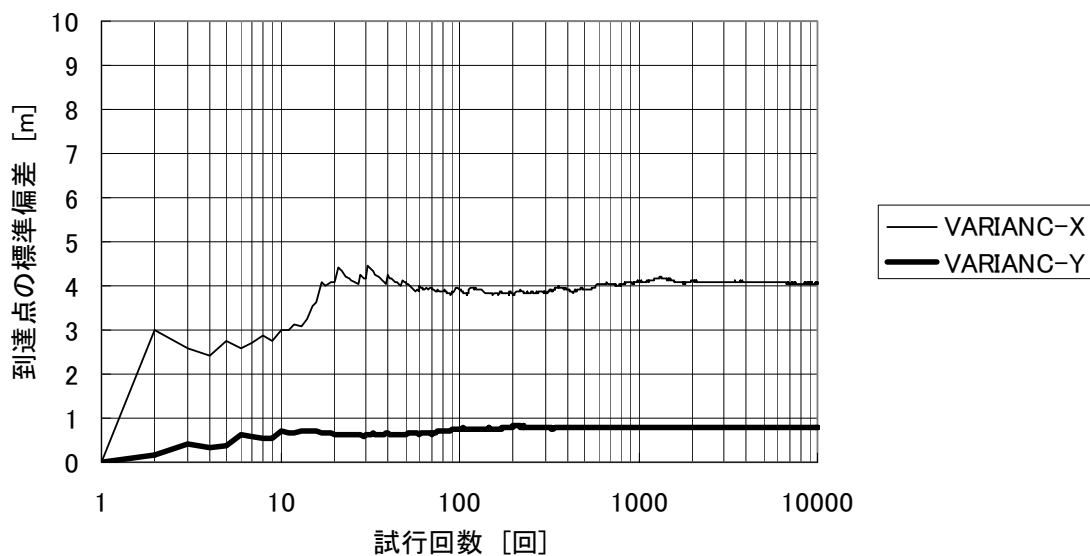


図 3.5-80(a) 収束性の確認 K 解析法 標準偏差 開始点(236, -300) 9000 年後

開始点(236,-300) 9000年後 V解析法

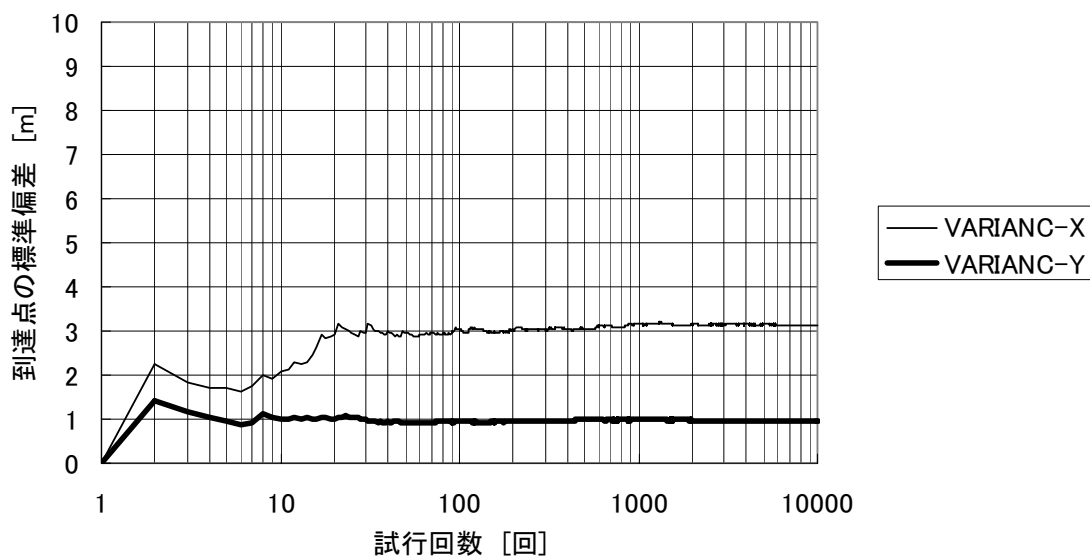


図 3.5-80(b) 収束性の確認 V 解析法 標準偏差 開始点(236, -300) 9000 年後

開始点(236,-300) 10000年後 K解析法

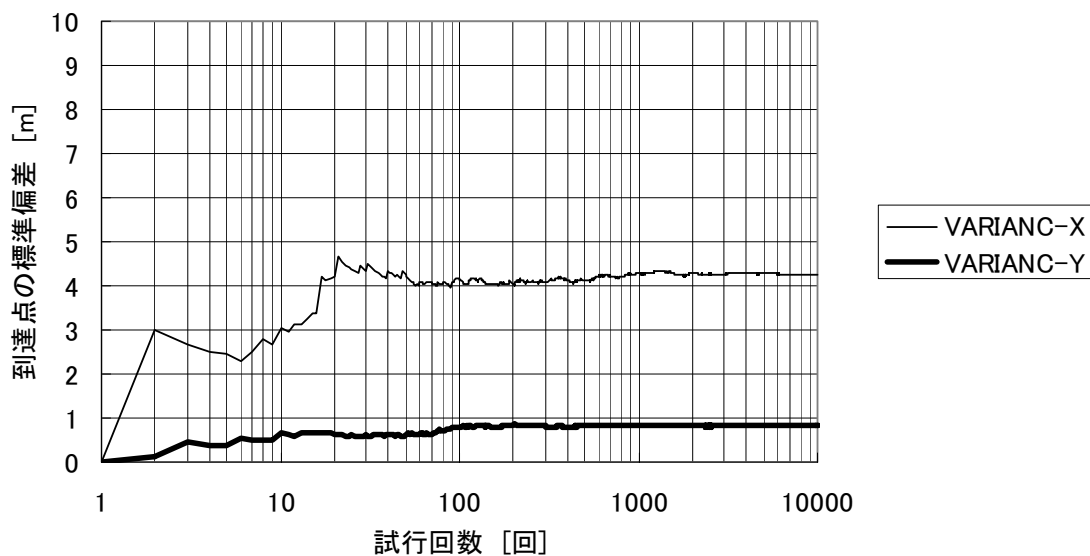


図 3.5-81(a) 収束性の確認 K解析法 標準偏差 開始点(236,-300) 10000 年後

開始点(236,-300) 10000年後 V解析法

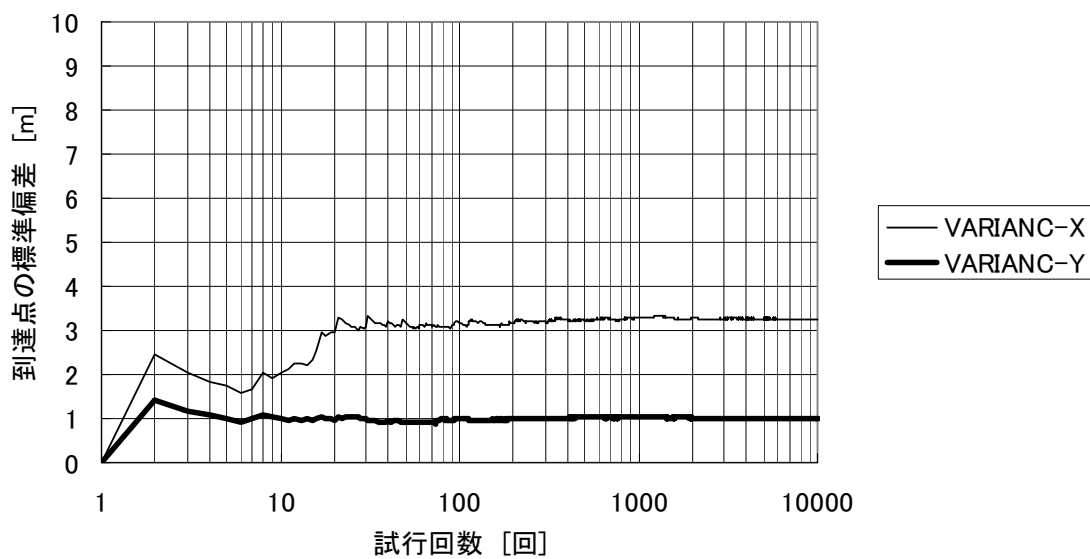


図 3.5-81(b) 収束性の確認 V解析法 標準偏差 開始点(236,-300) 10000 年後

開始点(236,-300) 11000年後 K解析法

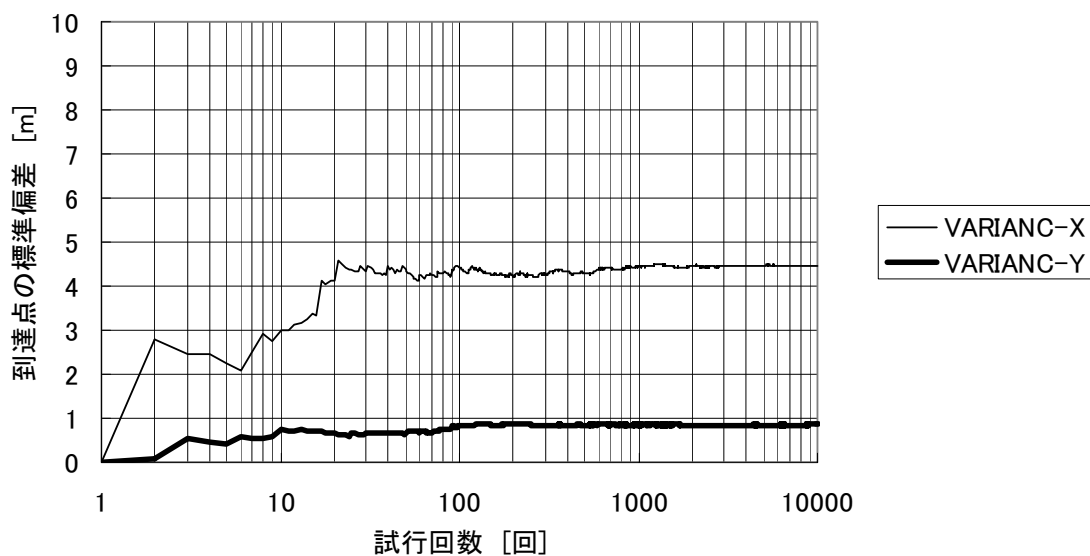


図 3.5-82(a) 収束性の確認 K解析法 標準偏差 開始点(236,-300) 11000 年後

開始点(236,-300) 11000年後 V解析法

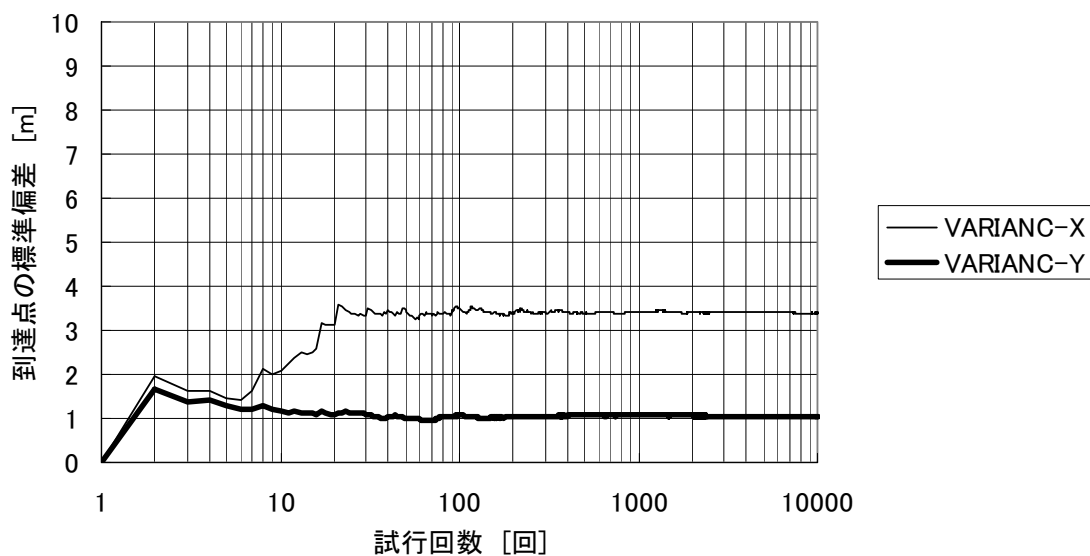


図 3.5-82(b) 収束性の確認 V解析法 標準偏差 開始点(236,-300) 11000 年後

開始点(236,-300) 12000年後 K解析法

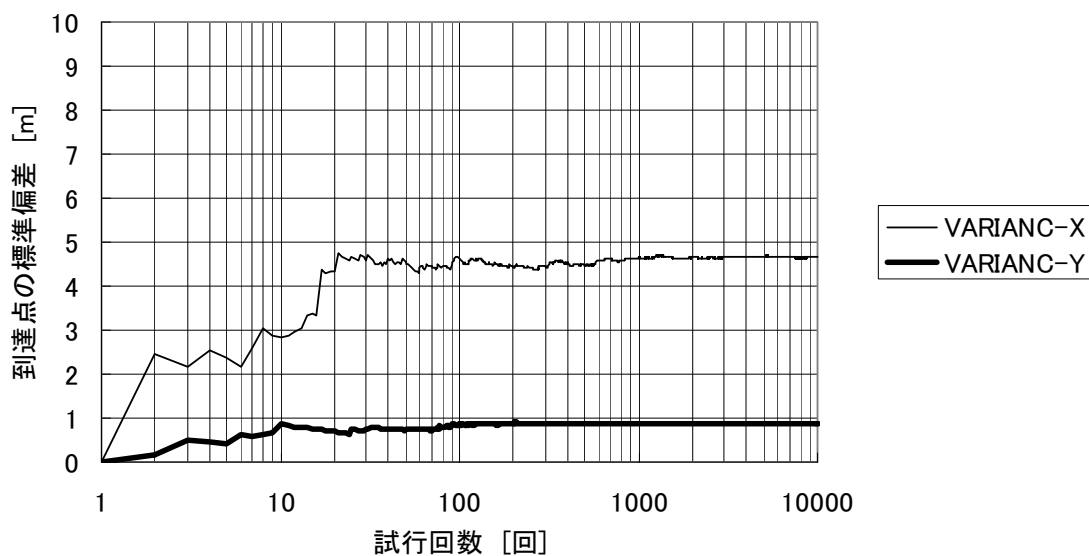


図 3.5-83(a) 収束性の確認 K解析法 標準偏差 開始点 (236, -300) 12000 年後

開始点(236,-300) 12000年後 V解析法

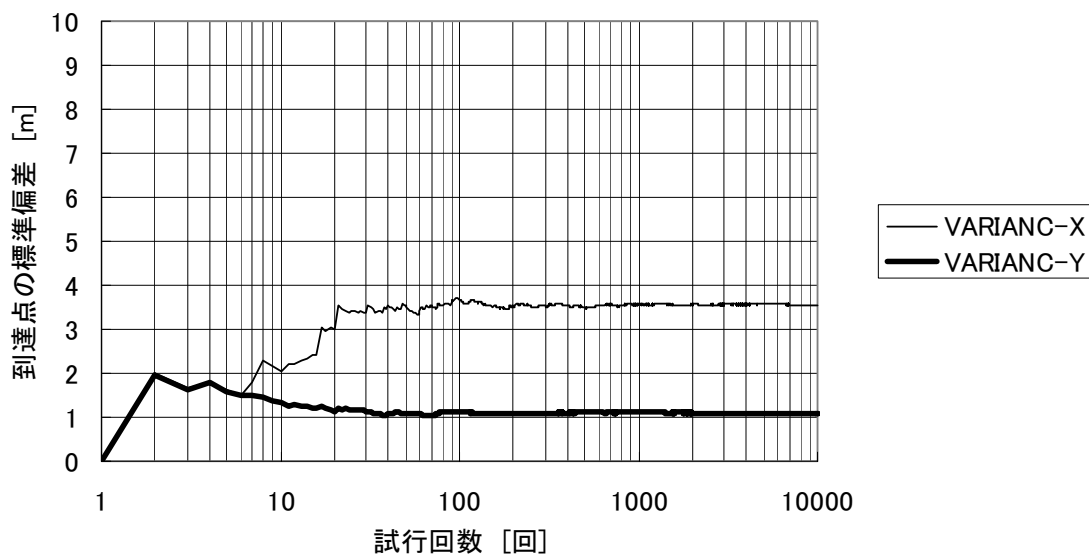


図 3.5-83(b) 収束性の確認 V解析法 標準偏差 開始点 (236, -300) 12000 年後

開始点(236,-300) 13000年後 K解析法

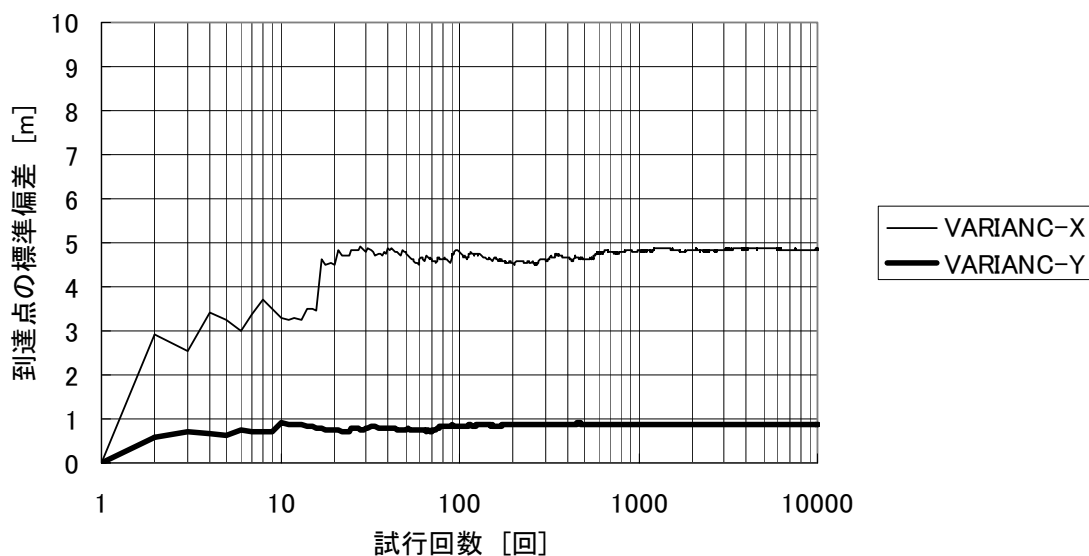


図 3.5-84(a) 収束性の確認 K解析法 標準偏差 開始点 (236, -300) 13000 年後

開始点(236,-300) 13000年後 V解析法

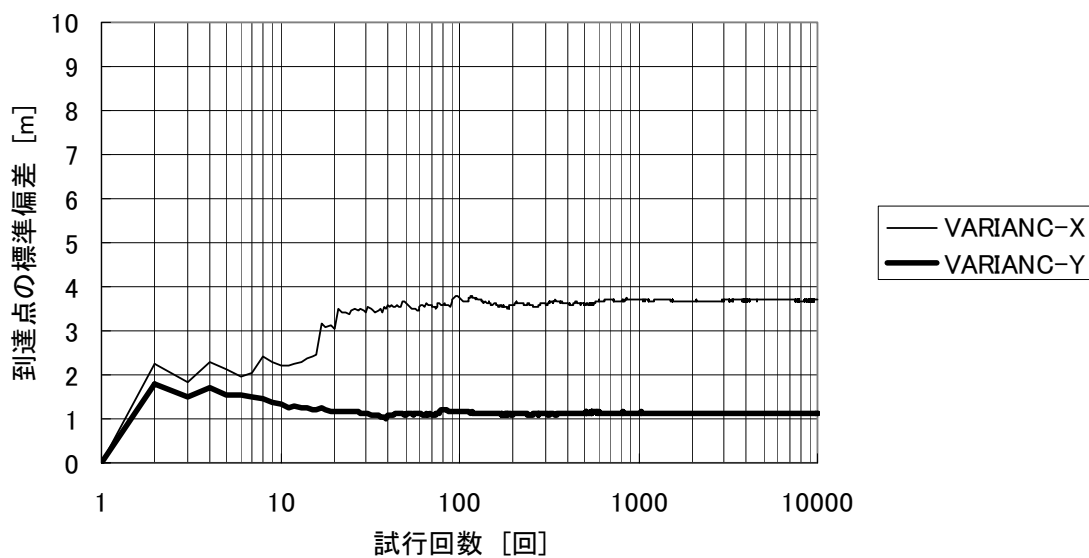


図 3.5-84(b) 収束性の確認 V解析法 標準偏差 開始点 (236, -300) 13000 年後

開始点(236,-300) 14000年後 K解析法

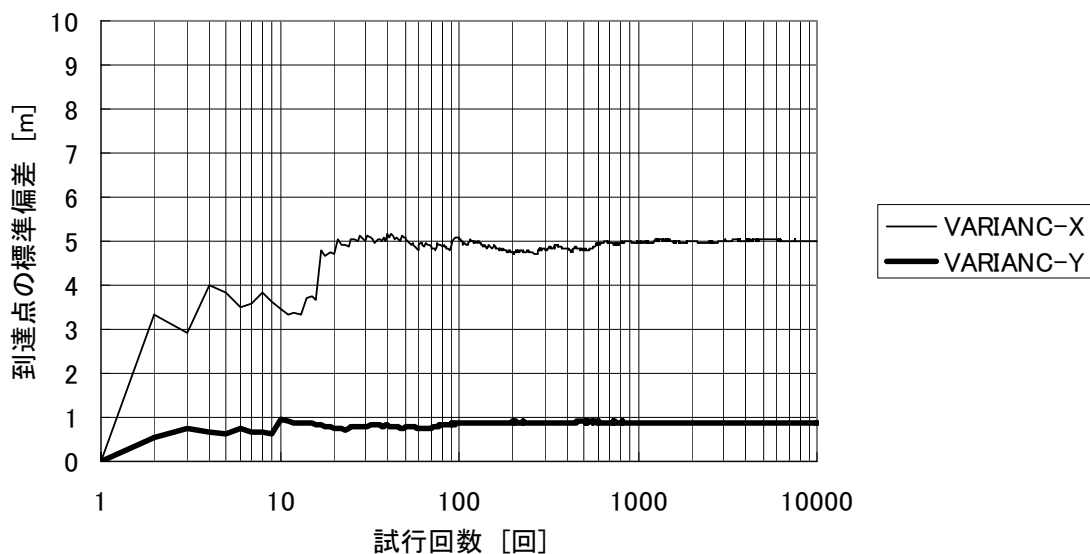


図 3.5-85(a) 収束性の確認 K 解析法 標準偏差 開始点 (236, -300) 14000 年後

開始点(236,-300) 14000年後 V解析法

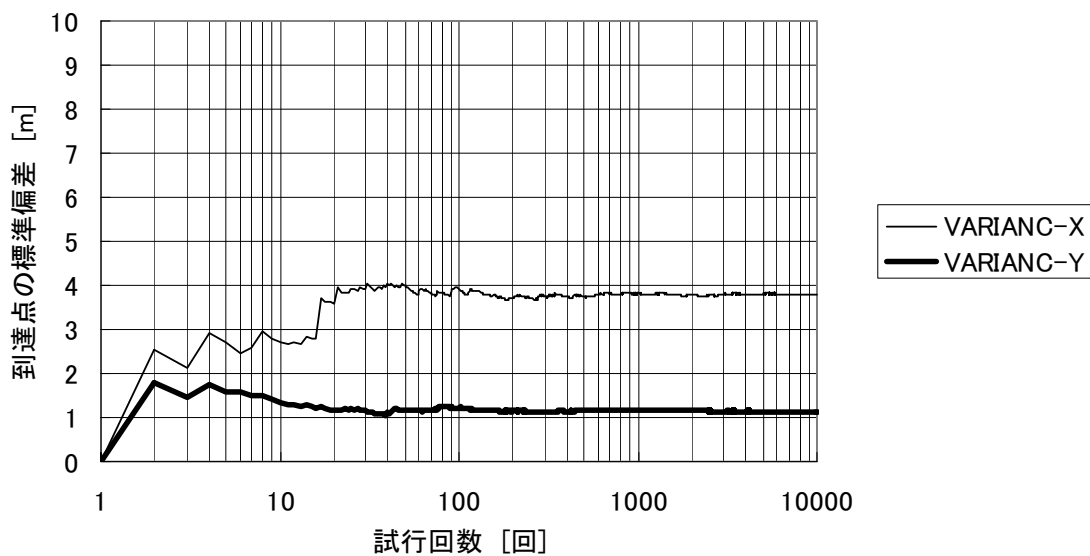


図 3.5-85(b) 収束性の確認 V 解析法 標準偏差 開始点 (236, -300) 14000 年後

(3) 検証結果の比較

ここでは、確率 FEM、K 解析法、V 解析法での地下水流れ到達点の不確実性評価結果の比較を行った。前節での検討をもとに、K 解析法と V 解析法での到達点の期待値および標準偏差が十分に収束する回数（1000 回以上）として試行回数 10000 回を採用した。

・到達点の期待値について

図 3.5-86～図 3.5-89 は、それぞれ移行開始点(236,0)、(236,-100)、(236,-200)、(236,-300)での移行到達点の期待値を示す。各図の X 軸と Y 軸の幅は 5[m]に統一している。

図 3.5-86 より、移行開始点(236,0)のとき、確率 FEM と K 解析法の期待値の誤差は、1000 年後でほとんどなく、2000 年後で約 1m、3000 年後で、約 2.5m であることがわかる。また、確率 FEM の結果を V 解析法で検証した場合誤差は大きくなる傾向にあった。しかし、その誤差は、3000 年後で約 3m であった。

図 3.5-87 より、移行開始点(236,-100)のとき、確率 FEM と K 解析法の誤差は 1000 年後でほとんどなく、2000 年後で約 1m、3000 年後で約 2m、4000 年～5000 年後で約 3m であることがわかる。4000 年から 5000 年にかけては期待値の誤差の変化は顕著ではなく、期待値の誤差は移行時間だけでなく、流路にも影響されると考えられる。なお、K 解析法と V 解析法の結果はほとんど同じ結果となっていた。

図 3.5-88 より、移行開始点(236,-200)のとき、1000 年～15000 年では確率 FEM と K 解析法、V 解析法の期待値の誤差はほとんどないことがわかる。

図 3.5-89 より、移行開始点(236,-300)のとき、確率 FEM と K 解析法、V 解析法の誤差は時間経過とともに徐々に大きくなっているが、14000 年後でその誤差は約 1m となっていることがわかる。

・移行距離について

図 3.5-90～図 3.5-93 は、それぞれ移行開始点(236,0)、(236,-100)、(236,-200)、(236,-300)での各解析法別の移行距離の期待値を示す。各図の移行距離の幅は 4[m]に統一している。

図 3.5-90 より、移行開始点(236,0)からのある時間での移行距離は確率 FEM が最も長く、K 解析法、V 解析法の順に短くなっていた。3000 年後では確率 FEM と K 解析法の誤差は約 1.5m、確率 FEM と V 解析法の誤差は約 1.8m であった。

図 3.5-91 より、移行開始点(236,-100)から移行時間 4000 年までの移行距離の長短関係は確率 FEM、K 解析法、V 解析法の順に短くなっているが、5000 年後では V 解析法の方が K 解析法より移行距離が長くなっていた。

図 3.5-92 より、移行開始点(236,-200)からのある時間での移行距離は、8000 年後までは確率 FEM > K 解析法 > V 解析法の順であるが、9000 年～15000 年後までは V 解析法 > K 解析法 > 確率 FEM となり大小関係が逆になっていた。この原因については、現在検討中である。

図 3.5-93 より、移行開始点(236,-300)からのある時間での移行距離は、確率 FEM > K 解析法 > V 解析法の順となっており、移行時間が大きくなるとその差は徐々に大きくなっていった。最も誤差の大きい 15000 年後で確率 FEM と K 解析法の誤差は約 0.6m、確率 FEM と V 解析法の誤差は約 1.2m であった。流速が小さく流れが直線的な場合には、確率 FEM、K 解析法、V 解析法での移行経路長はほぼ同じ値となることが明らかとなった。

・移行到達点のバラツキ（標準偏差）について

図 3.5-94～図 3.5-97 は、それぞれ移行開始点(236,0)、(236,-100)、(236,-200)、(236,-300)での各解析法別の移行到達点のバラツキ（標準偏差）を示す。各図の縦軸の最大値は 8[m] に統一している。

図 3.5-94 より、確率 FEM の X 標準偏差は 3000 年後で約 4[m]、Y 標準偏差は約 2[m]であることがわかる。一方、同じ 3000 年後での K 解析法の X 標準偏差は約 7[m]、Y 標準偏差は約 4[m]であり、V 解析法の X 標準偏差は約 6[m]、Y 標準偏差は約 4[m]であった。各解析法での標準偏差の大小関係は K 解析法 > V 解析法 > 確率 FEM の順で大きくなっており、移行時間別で比較してもその大小関係は同様であった。また、いずれの解析法においても標準偏差は単調増加となっていた。

図 3.5-95 より、確率 FEM の X 標準偏差は 5000 年後で約 4[m]、Y 標準偏差は約 2[m]であり、単調増加していた。一方、5000 年後の K 解析法での X 標準偏差は約 5[m]、Y 標準偏差は約 2[m]であり、V 解析法の X 標準偏差は約 7[m]、Y 標準偏差は 2.5[m]であった。X 標準偏差では、K 解析法の 3000 年後～4000 年で X 標準偏差が減少していた。また、K 解析法の Y 標準偏差は 4000 年～5000 年で、V 解析法の Y 標準偏差は 3000 年～4000 年で減少していた。5000 年後の V 解析法の Y 標準偏差は極端に減少しているが、これは到達点の分布形状が円弧状になっていることが原因ではないかと考えられるが、明確には判断できない。流速が大きい場合には K 解析法、V 解析法ともに標準偏差が小さくなる場合があることを示唆していると考えられる。

図 3.5-96 より、確率 FEM の X 標準偏差は単調増加しており、15000 年後で約 4[m]、Y 標準偏差は約 1.8[m]であることがわかる。15000 年後の K 解析法の X 標準偏差は約 7[m]、Y 標準偏差は約 1.1[m]であった。15000 年後の V 解析法の X 標準偏差は約 6[m]、Y 標準偏差は約 1.5[m]であった。確率 FEM は時間経過とともに単調増加しているが、K 解析法や V 解析法の標準偏差は単調増加しておらず、特に約 10000 年後の Y 標準偏差は時間経過とともに減少していく傾向にあった。移行開始点(236,-200)の移行経路は約 8000～10000 年で移行経路の方向が変化しており、流速が小さい場合でも移行経路が変化することにより移行到達点のバラツキに大きく影響する可能性があると考えられる。

図 3.5-97 より，確率 FEM の X 標準偏差は 14000 年後で約 3.8[m]，Y 標準偏差は約 1[m] であることがわかる。14000 年後の K 解析法の X 標準偏差は約 5[m]であるが，各解析法の標準偏差はほぼ等しい値となった。すなわち，流速が小さくほぼ直線的な流れの場合，移行到達点のバラツキは各解析法でほぼ等しい結果を得ることができると考えられる。

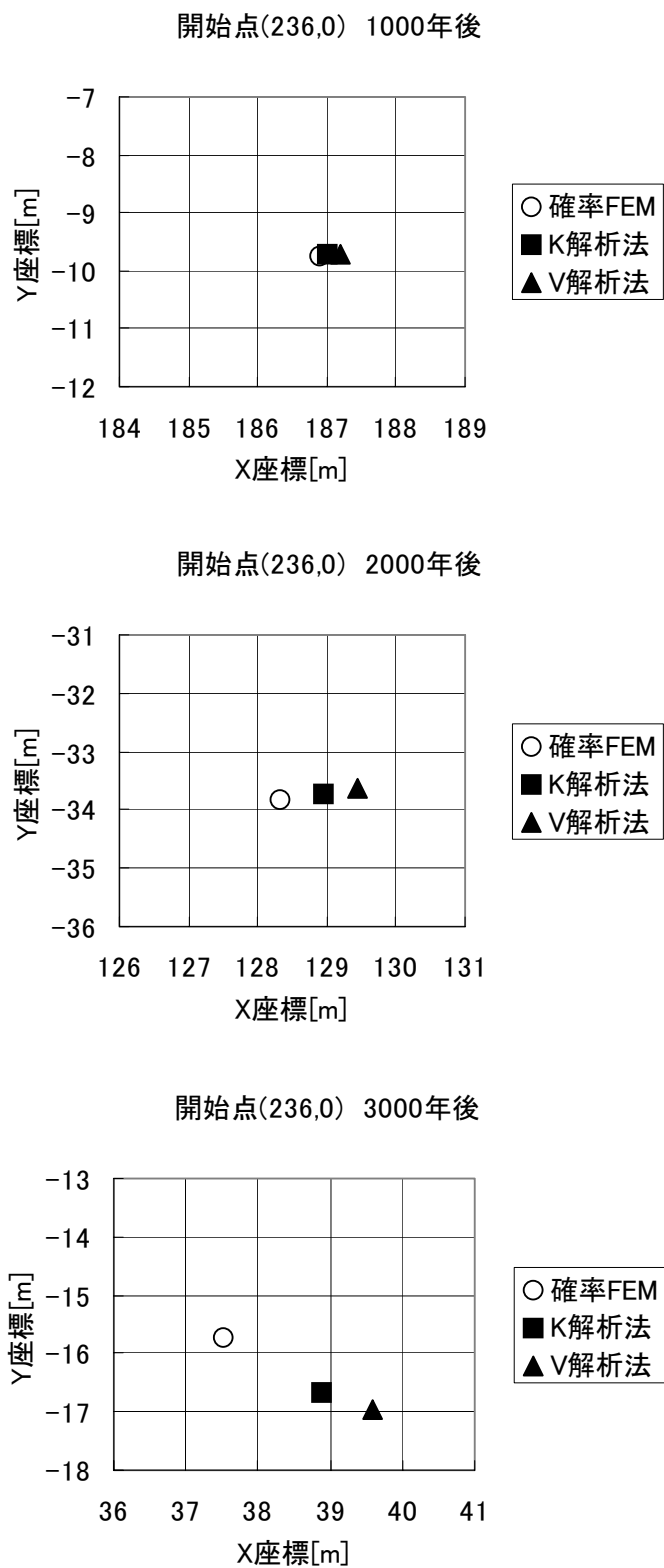


図 3.5-86 到達点期待値の比較 開始点 (236, 0)

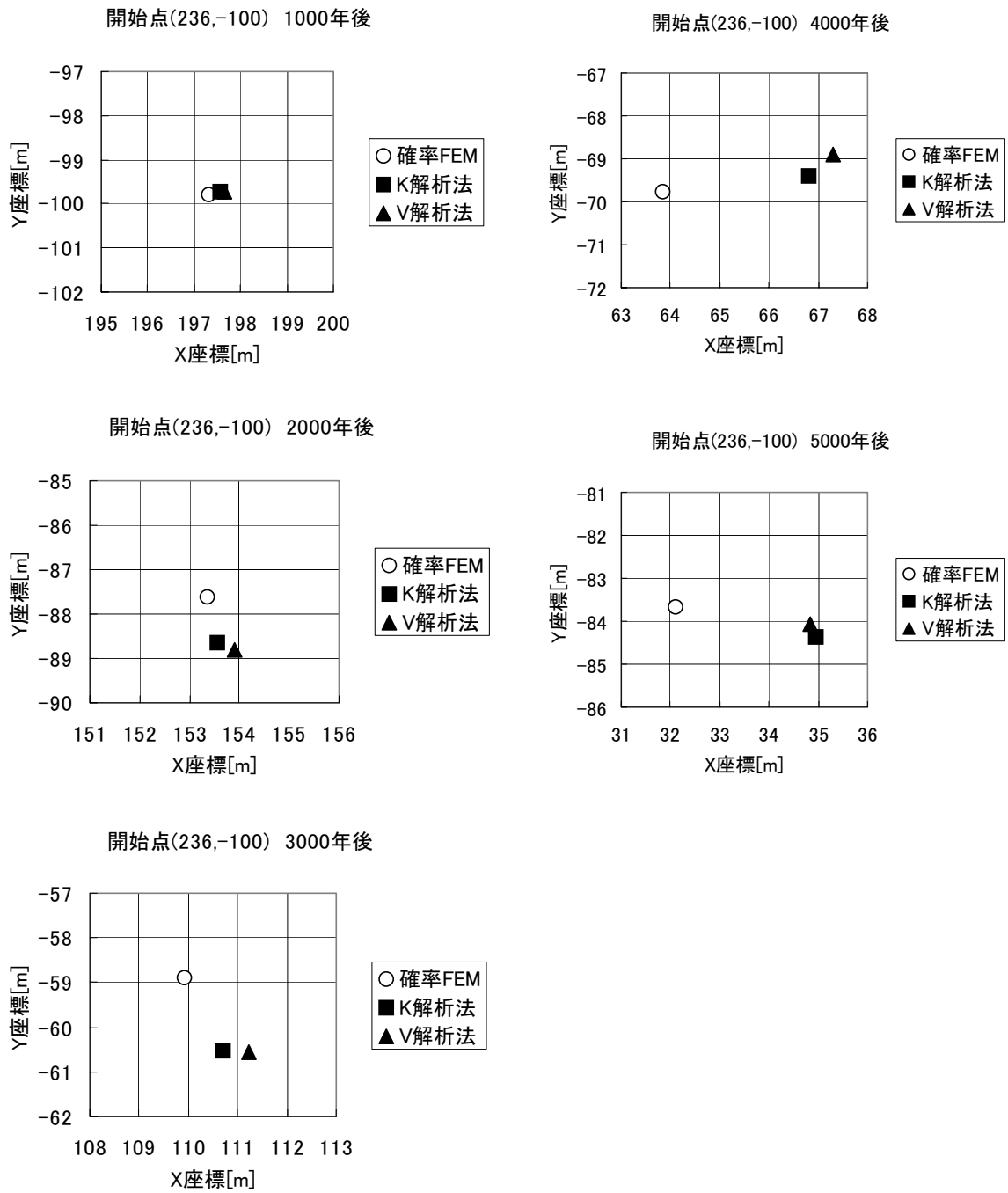


図 3.5-87 到達点期待値の比較 開始点 (236, -100)

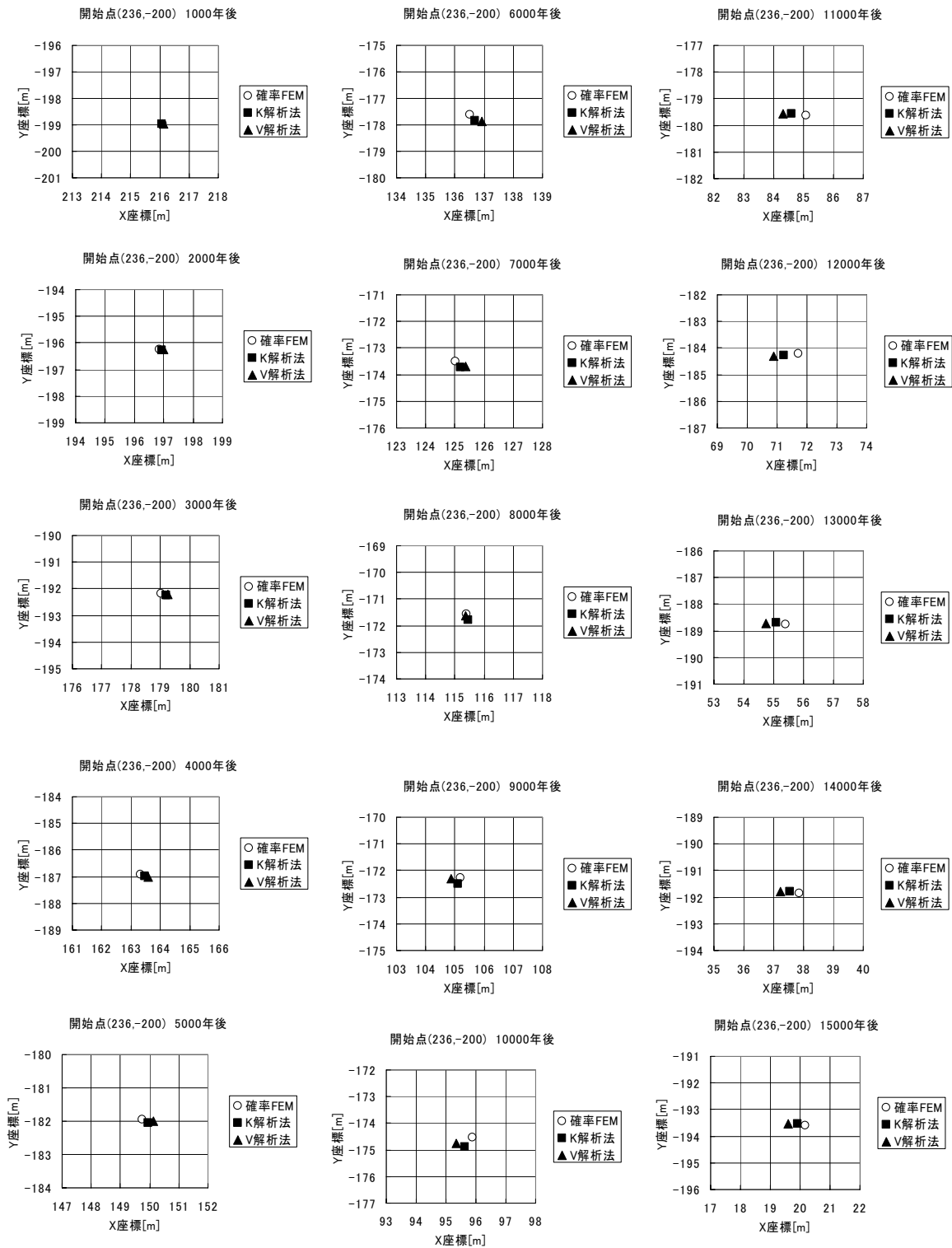


図 3.5-88 到達点期待値の比較 開始点(236,-200)

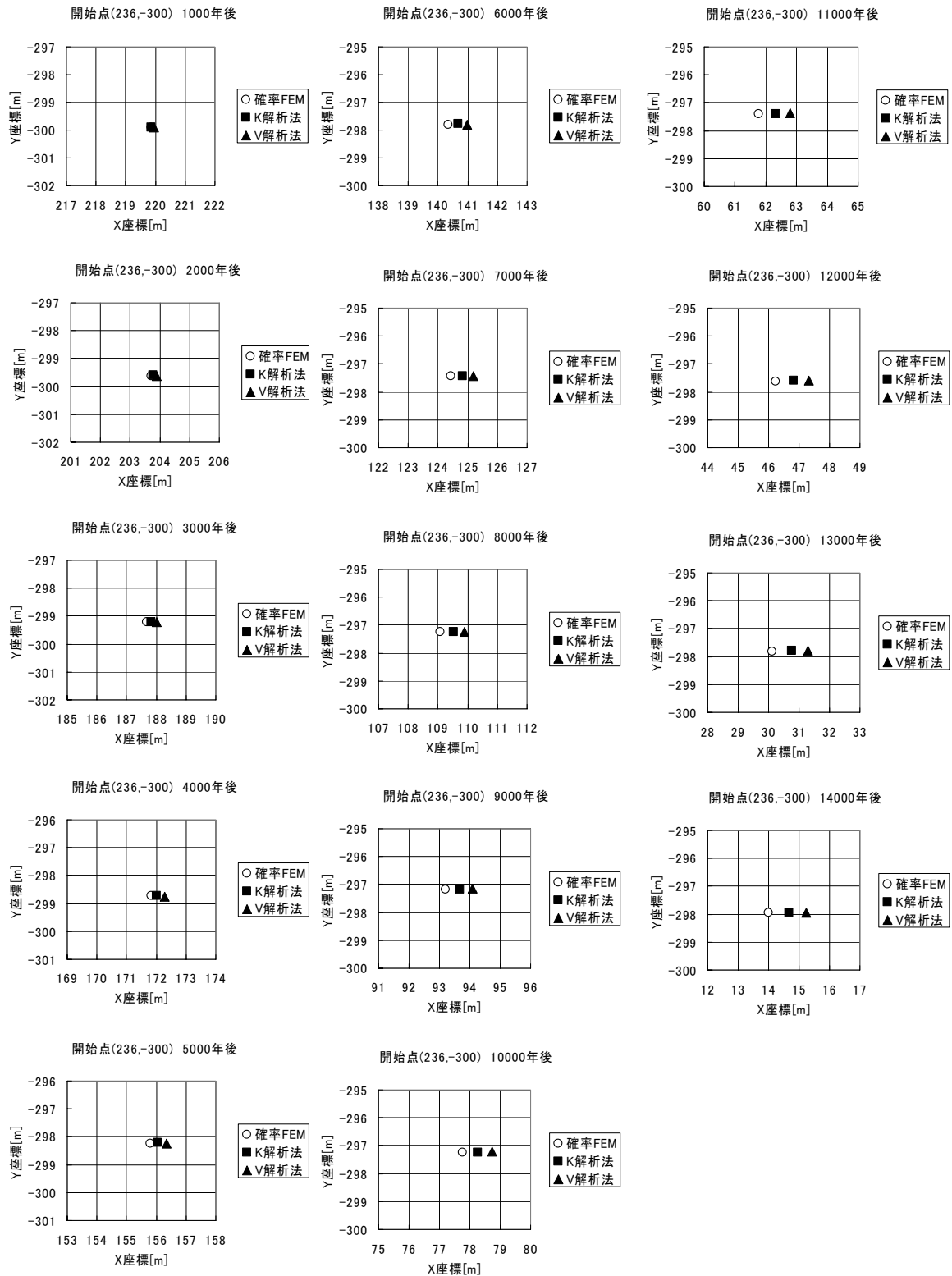


図 3.5-89 到達点期待値の比較 開始点 (236, -300)

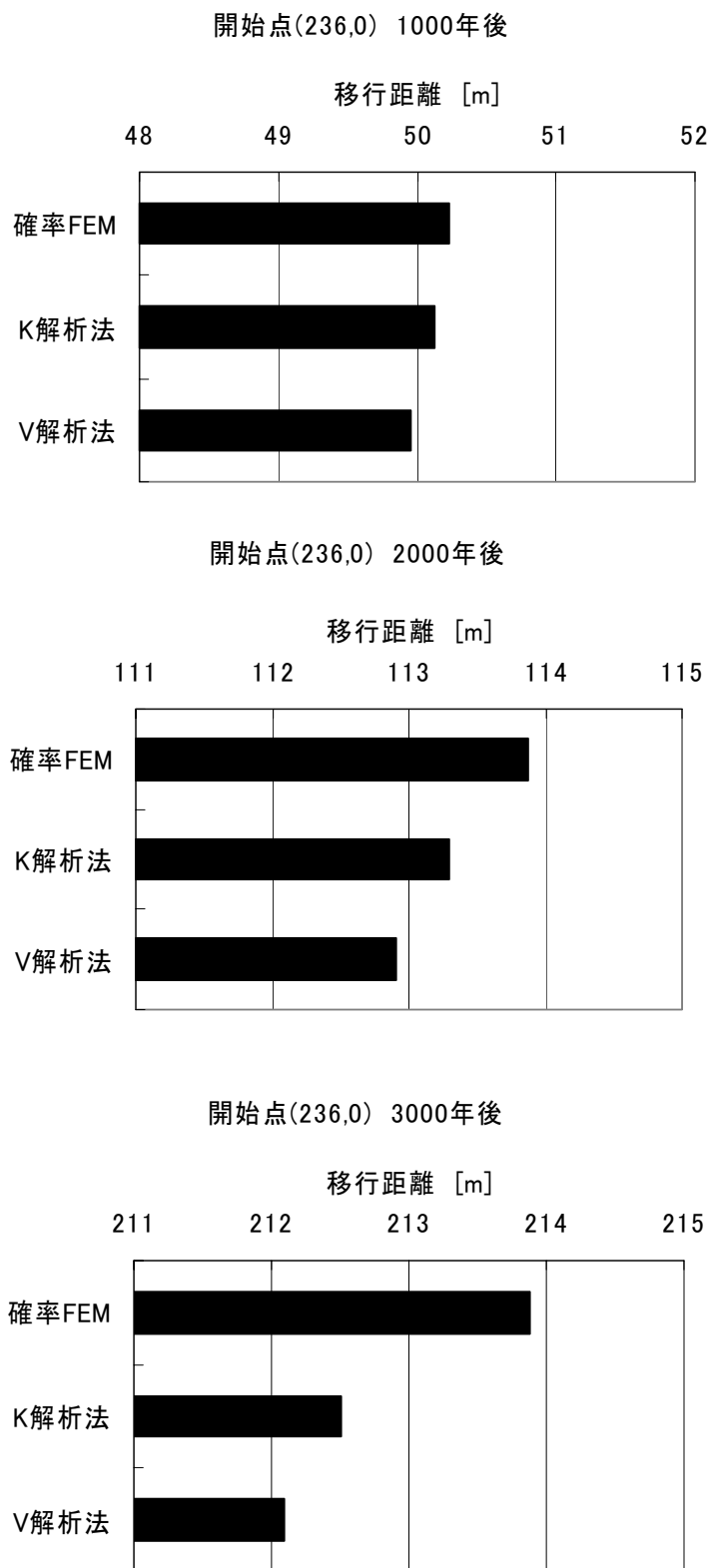


図 3.5-90 移行距離の比較 開始点 (236, 0)

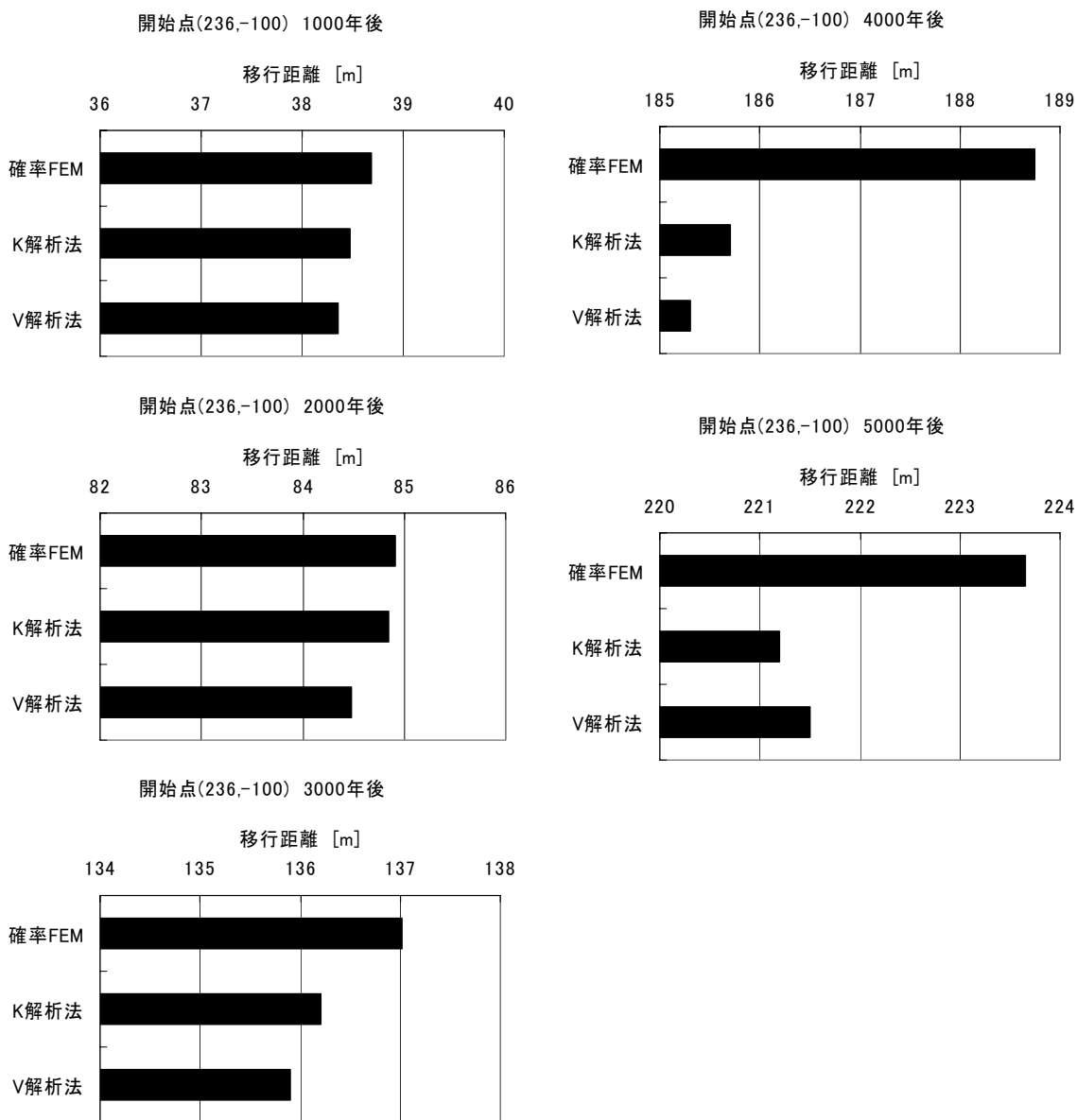


図 3.5-91 移行距離の比較 開始点(236, -100)

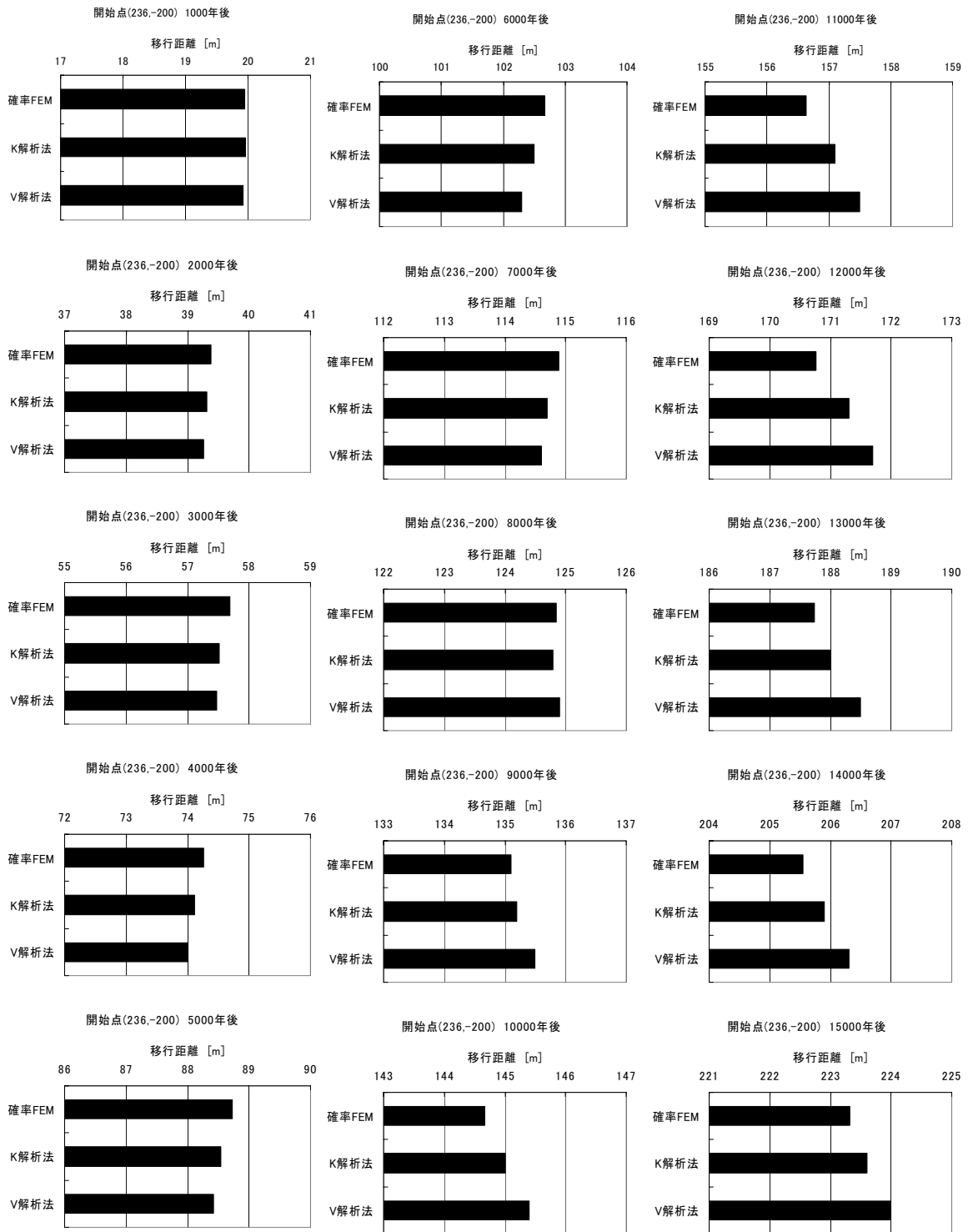


図 3.5-92 移行距離の比較 開始点 (236, -200)

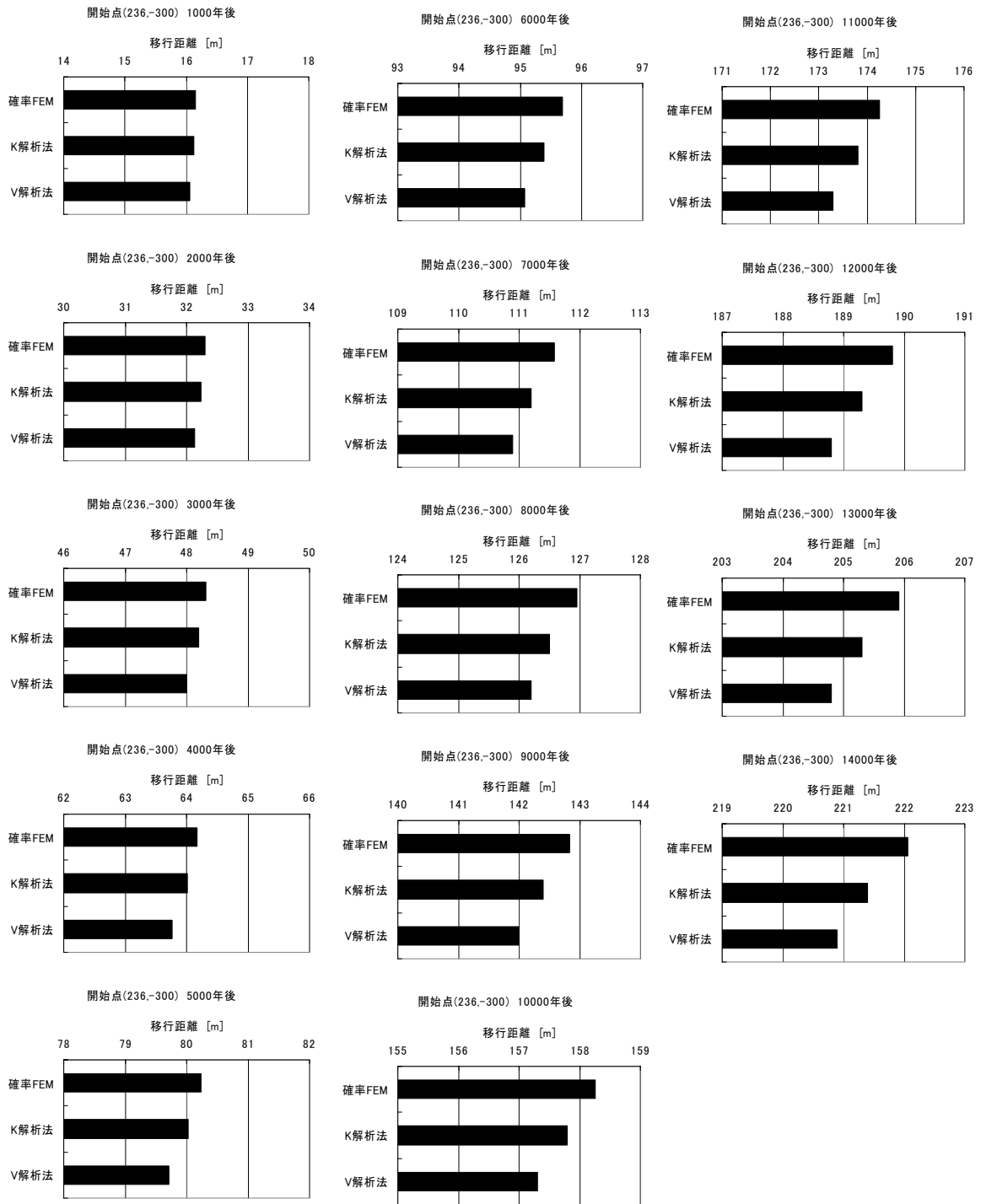
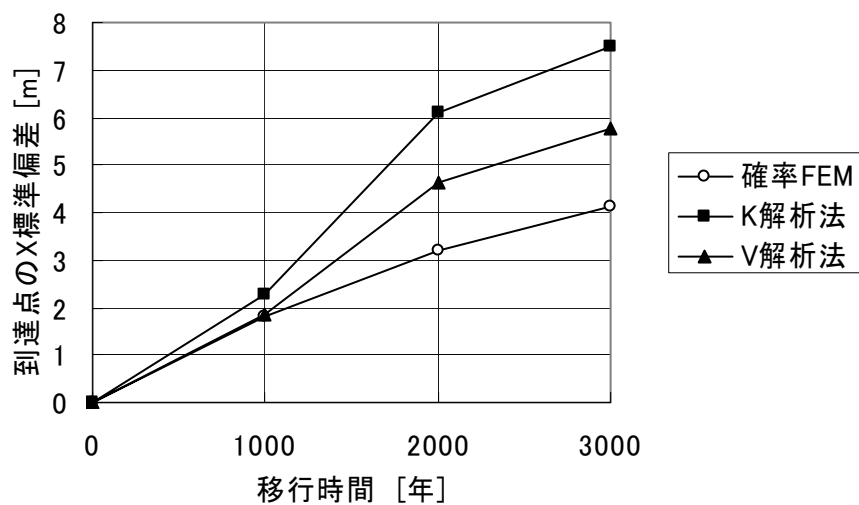


図 3.5-93 移行距離の比較 開始点(236,-300)

X方向標準偏差 開始点(236,0)



Y方向標準偏差 開始点(236,0)

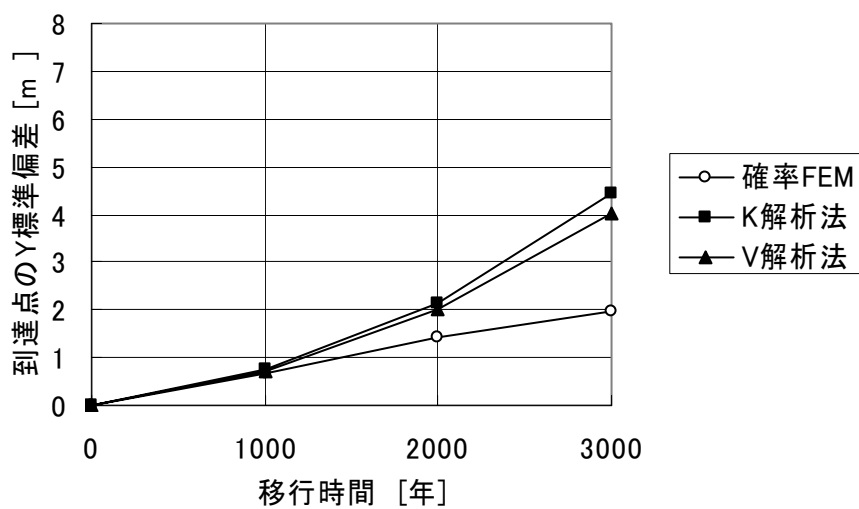
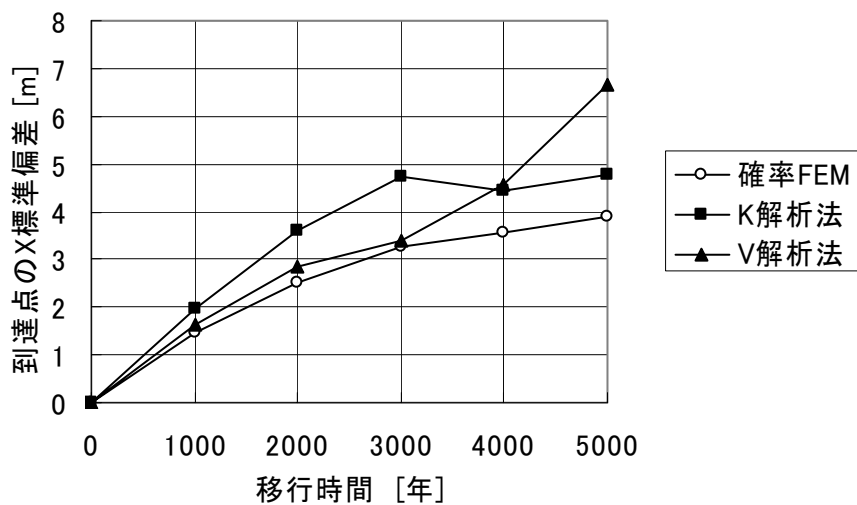


図 3.5-94 到達点分散の比較 開始点(236, 0)

X方向標準偏差 開始点(236,-100)



Y方向標準偏差 開始点(236,-100)

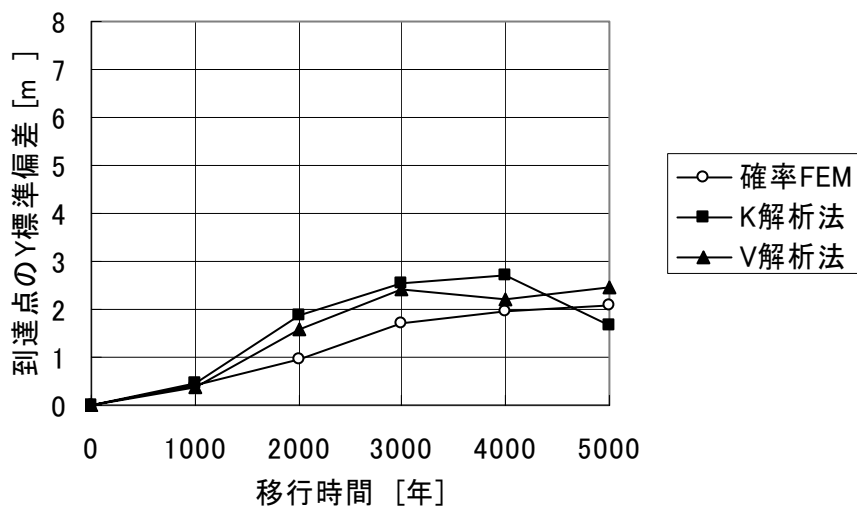
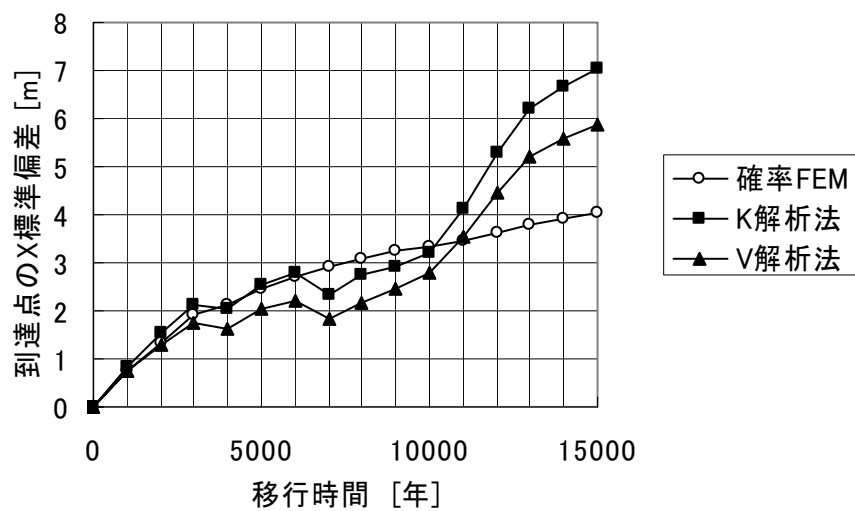


図 3.5-95 到達点分散の比較 開始点(236, -100)

X方向標準偏差 開始点(236,-200)



Y方向標準偏差 開始点(236,-200)

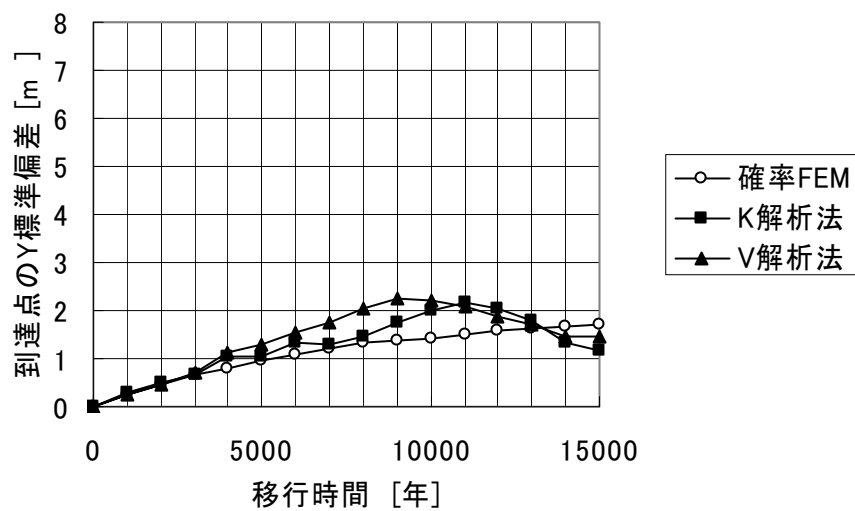
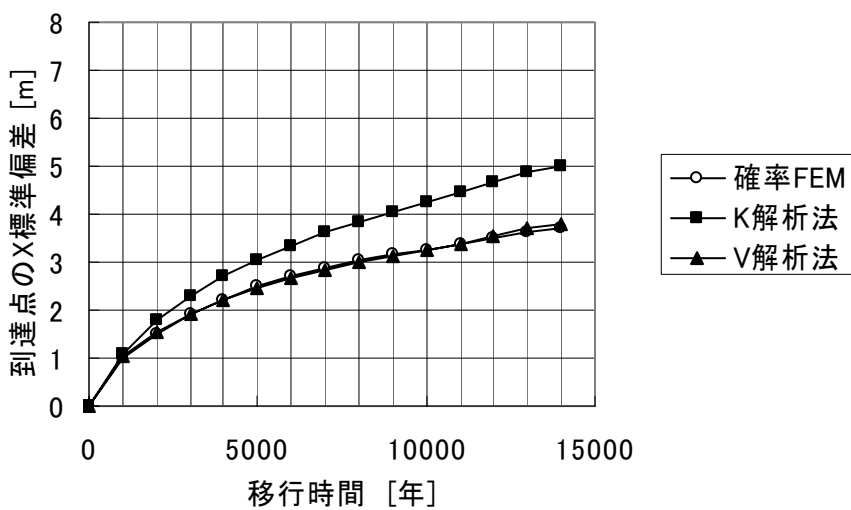


図 3.5-96 到達点分散の比較 開始点(236,-200)

X方向標準偏差 開始点(236,-300)



Y方向標準偏差 開始点(236,-300)

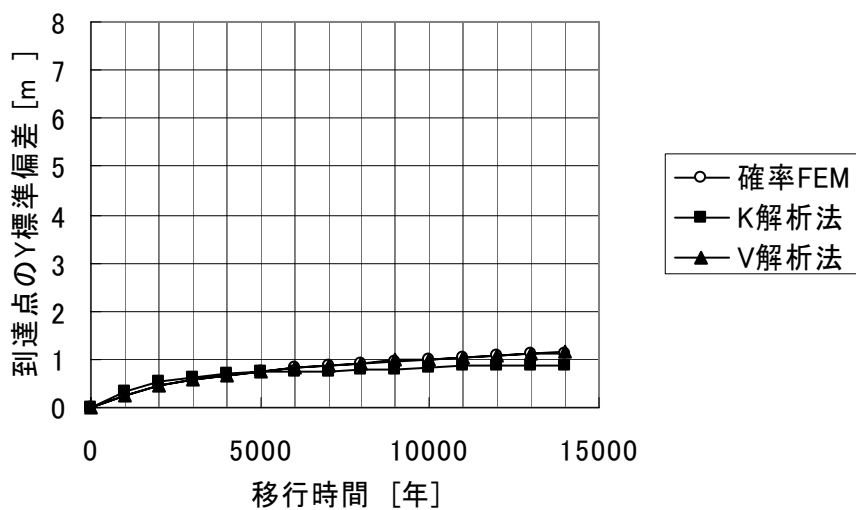


図 3.5-97 到達点分散の比較 開始点(236, -300)

(4) 解析時間の比較

図 3.5-34 は各解析方法による解析時間の測定結果を示す。解析には PC(Dell OPYIPLEX GX260 Pentium(R)IV 2.40GHz) を使用し、解析開始時刻と解析終了時刻を表示させて計測した。なお、確率 FEM はモンテカルロ法を使用しないことから、解析時間は試行回数によらず一定値となっている。同図より、V 解析法は K 解析法と比較して極めて短時間で解析できることが明らかとなった。

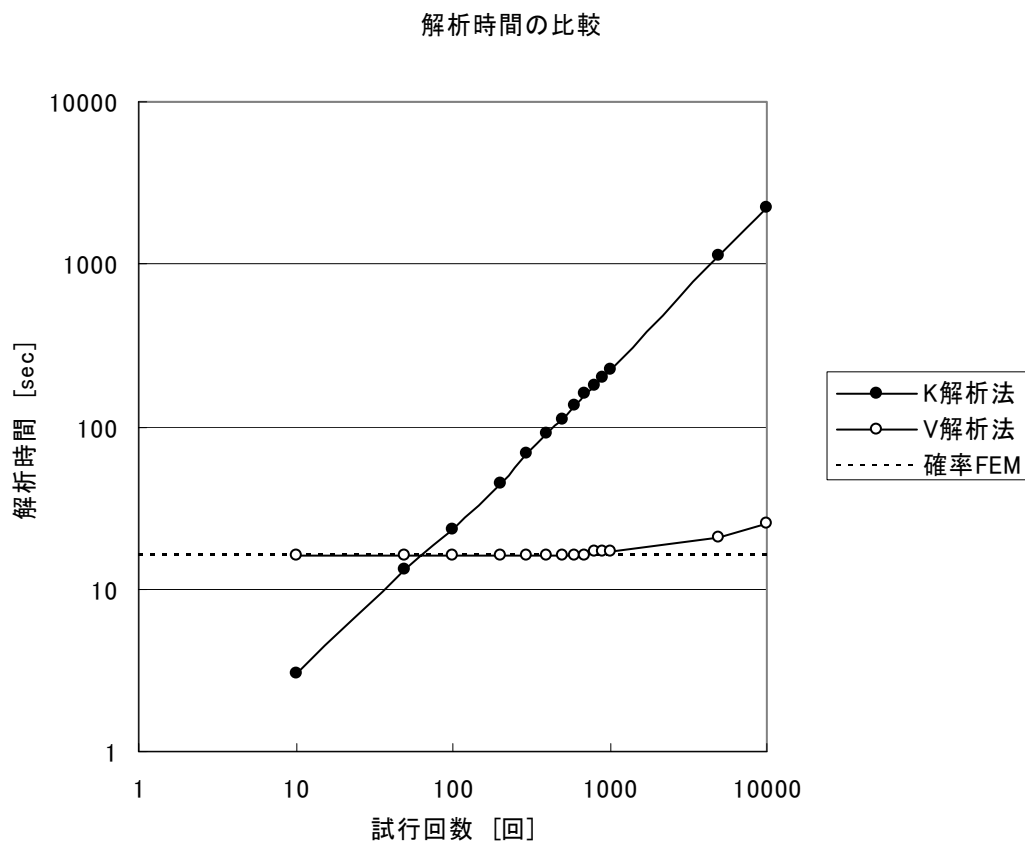


図 3.5-98 解析時間の比較

(5) 検証結果のまとめ

2次元プログラムによる解析結果の妥当性を検証するため、**K**解析法と**V**解析法による検証を行った。以下に検証結果で得られた知見を列挙する。

- ・ 到達点の分布形状より、**V**解析法では楕円状に分布しない場合がある。要素分割に影響されると考えられるが、今後検討する必要があると考えられる。
- ・ 到達点の収束状況から、本研究で取り上げたデータでは**K**解析法、**V**解析法でのモンテ・カルロ法の試行回数は1000回で十分である。ただし、収束状況は要素数などに影響されると考えられるため、新規に解析する際には収束状況について検討する必要がある。
- ・ 確率**FEM**、**K**解析法、**V**解析法到達点の期待値と移行距離の期待値はほぼ等しくなる。
- ・ 各解析法の移行距離の大小関係は流れの方向が変化する場合に逆転する場合がある。
- ・ 確率**FEM**のバラツキは単調増加するが、**K**解析法と**V**解析法のバラツキは単調増加しない。また、各解析法での大小関係は流速や流れの方向が変化することに影響されると考えられる。

4. 2次元プログラムの3次元化と事例検討

4. 1 3次元プログラムの特徴

以下に、3次元プログラムの特徴を列挙する。

- ・インディケータクリギングによりボーリングの測定値から解析領域の3次元的な地層境界を設定できる。
- ・算術平均，対数平均，地球統計法（クリギング，コクリギング）により透水係数の期待値，標準偏差の3次元的な分布を推定できる。
- ・確率 FEM により3次元流れ場（水頭，流量，流速）の期待値，標準偏差を推定できる。
- ・確率 FEM により任意点から指定時間後の移行到達位置の期待値，標準偏差を算定できる。
- ・確率 FEM により任意点から指定面への移行到達時間の期待値，標準偏差を算定できる。
- ・上2項をV解析法により検証できる。
- ・結果を MicroAVS（図化ソフト）形式でファイル出力する。

4. 2 事例検討

3次元プログラムによる事例検討を以下に示す。

(1) 使用データ

解析には、MIU-1号孔～4号孔の透水試験結果を使用した。

(2) 未知領域の透水係数の推定方法

未知領域の透水係数はクリギングにより推定した。

(3) 解析領域と要素分割

解析領域の概要を図4-1に示す。MIU-1～3号孔を通る鉛直面がZX面($Y=0$)となるようにして、X座標の始点をMIU-3号孔の位置($X=0[m]$)、終点をMIU-4号孔口の位置($X=337[m]$)とした。Y座標については始点を $-50[m]$ 、終点を $50[m]$ とした。Z座標については便宜的に始点を $-700[m]$ とし、終点を $220[m]$ とした。要素分割は1要素の形状がほぼ $10[m]$ 角の立方体に近くなるように配慮し、X方向分割数を20、Y方向分割数を10、Z方向分割数を92とした。これにより、1要素のX方向の長さは $11.8[m]$ 、Y方向は $10.0[m]$ 、Z方向は $10.0[m]$ となった。このとき要素数は30,360、節点数は34,782となった。なお、このときの解析時間は、PC(Pentium(R)4, 2.2GHz, 1.00GB RAM, HDD 120GB)を使用した場合、約6日であった。試計算より要素数を約1/2とした場合には約1/4の1.5日であったことから、解析時間は要素数の2乗に比例すると推定される。そのため、仮に要素数が約10万の場合、解析時間は約67日となると考えられる。解析時間の短縮が今後の課題と考えられる。このためには、以下のような解決法が考えられる。

- ・より高性能な計算機や大型計算機を用いることによるハード的な解決
- ・ソルバーを現行のCG法から要素数が多くても計算時間には負荷の少ないブロック・スカイライン法へ変更するソフト的な解決

なお、解析時間は水頭や流量などを求めるための流れ場の計算時間がほとんどを占めており、地下水流れ到達点算出のための計算時間は極めて短時間である。

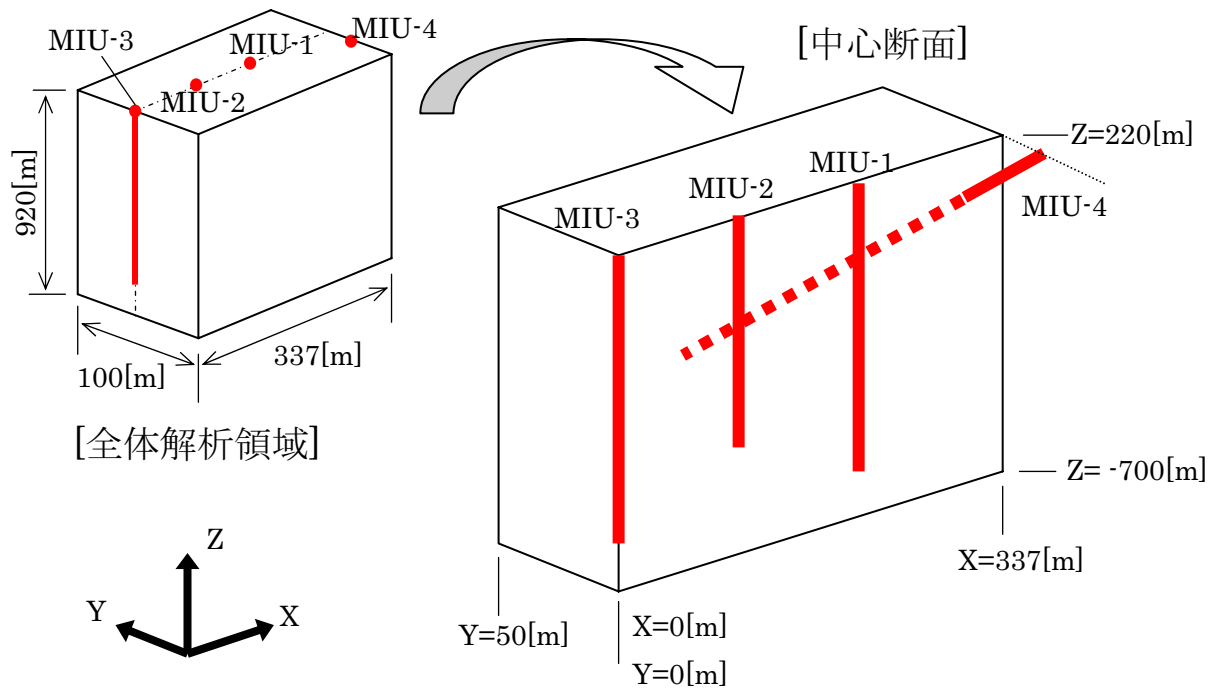


図 4-1 解析領域の概要

(4) 水理境界条件

X 軸最小値の境界面 (Xmin 面) は MIU-3 号孔の水頭の平均値(213.9[m])を採用し、水頭固定境界とした。X 軸最大値の境界面 (Xmax 面) は MIU-4 号孔口付近 (標高 220[m]~100[m]) のデータの平均値(199.0[m])を採用した。Y 軸最小値の境界面 (Ymin 面), Y 軸最大値の境界面 (Ymax 面), Z 軸最小値の境界面 (Zmin 面) は便宜的に不透水境界とした。

(5) 不飽和特性

不飽和領域の透水特性として図 4-2 に示す不飽和特性曲線を使用した。

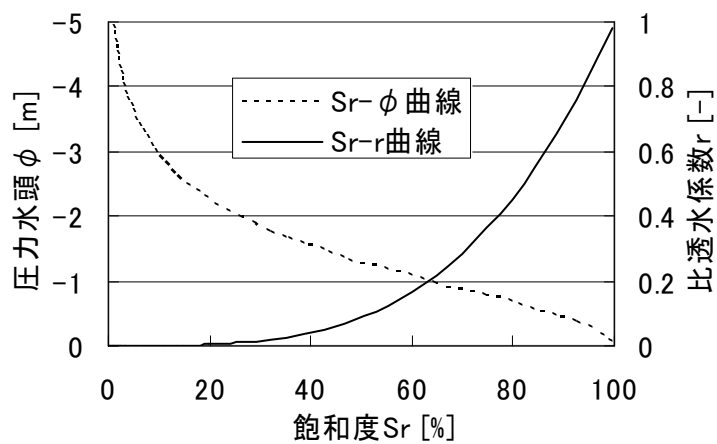


図 4-2 解析に使用した不飽和特性曲線

(6) 解析結果

解析結果を以下に示す。

(i) クリギング (透水係数の期待値, 変動係数)

図 4-3 は透水係数の期待値, 図 4-4 は透水係数の変動係数を示している。同図では垂直断面として, ① $Y=-50[m]$, ② $Y=0[m]$, ③ $Y=50[m]$ の 3 種類を表示している。

一般にクリギングで推定した変動係数はデータ測定位置近傍では小さくなり, 離れるにしたがって大きくなる傾向にある。測定位置が多く存在する② $Y=0$ 断面は変動係数が小さい箇所がボーリング孔のある付近に見られ, 本解析結果が一般的な結果と整合していることが確認できる。

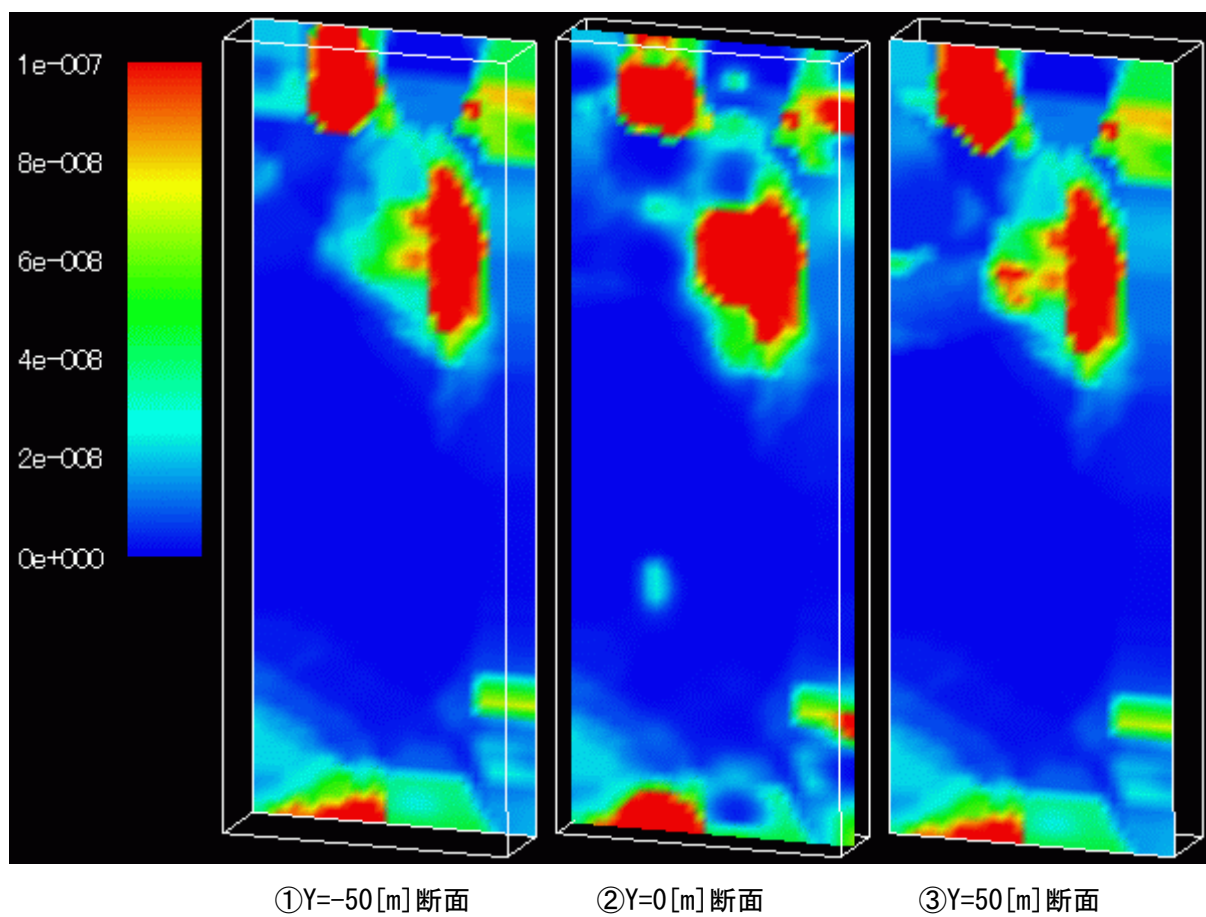
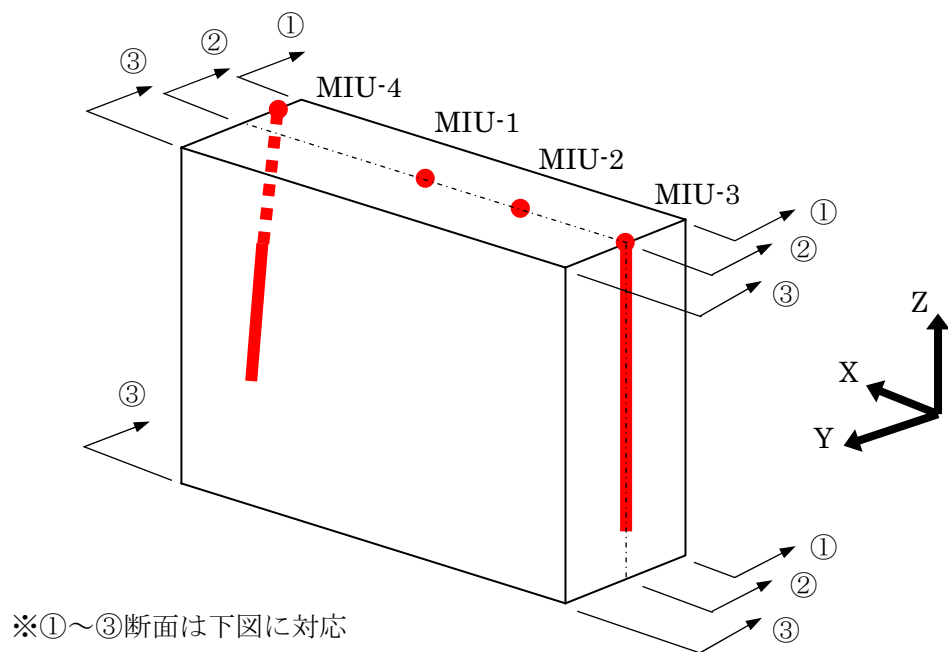


図 4-3 透水係数の期待値

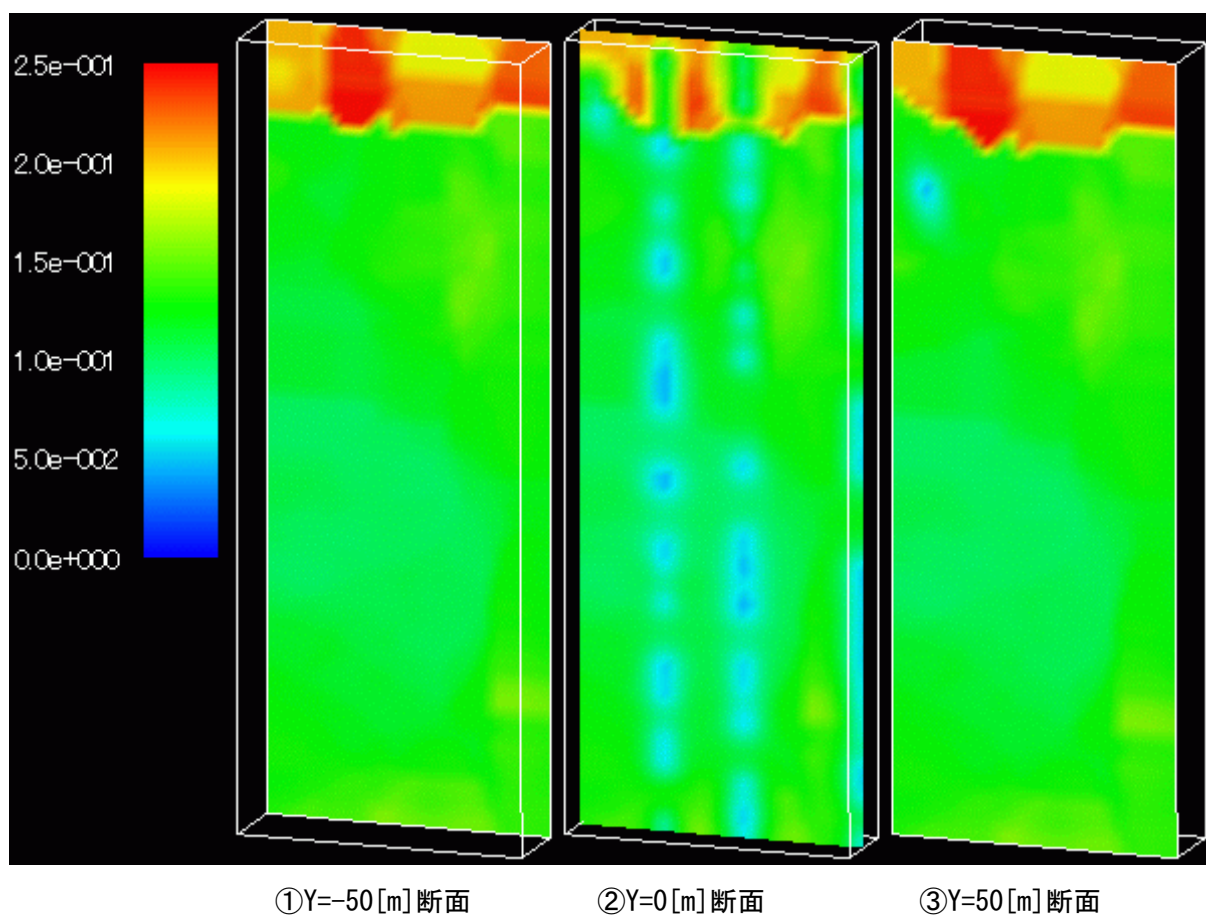
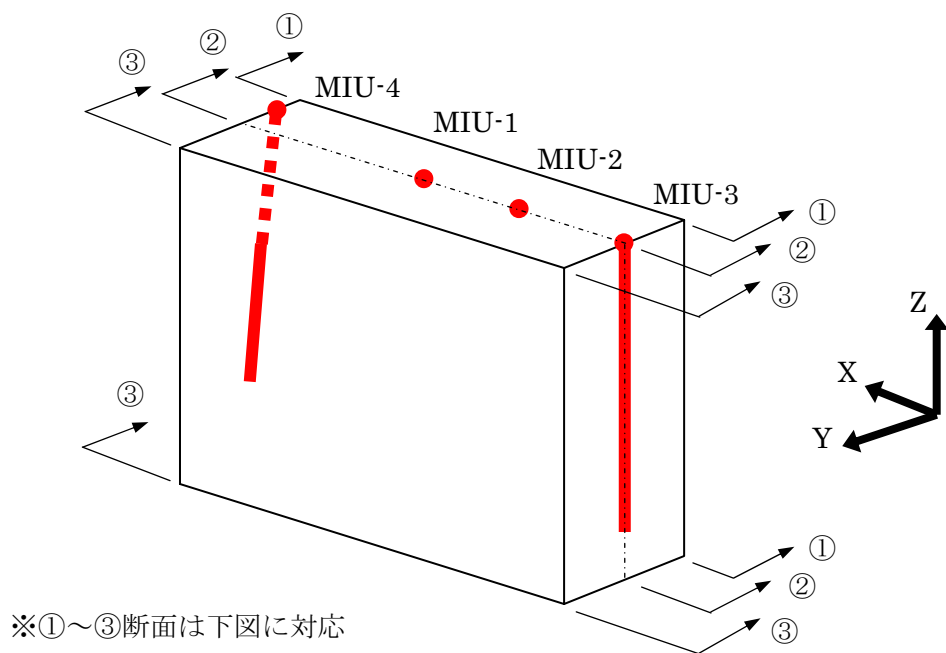


図 4-4 透水係数の変動係数

(ii) 流れ場計算結果

全水頭の期待値と標準偏差をそれぞれ図 4-5 と図 4-6 に示す。また、流速の期待値ベクトルを図 4-7 に示す。さらに、流量の期待値と標準偏差を図 4-8 に示す。流量が発生するのは水頭固定境界の① $X=0$ [m]面と② $X=337$ [m]面のみであり、その 2 面を図示している。

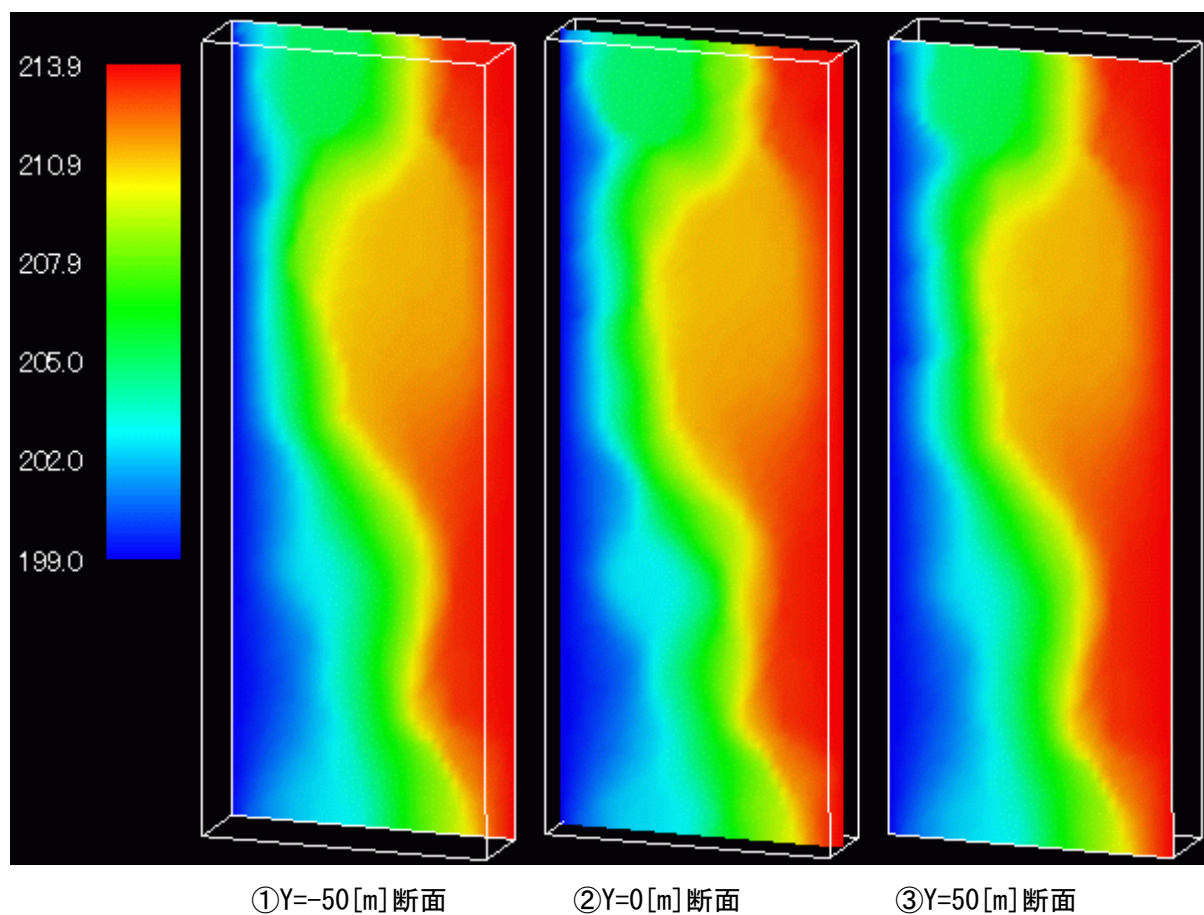
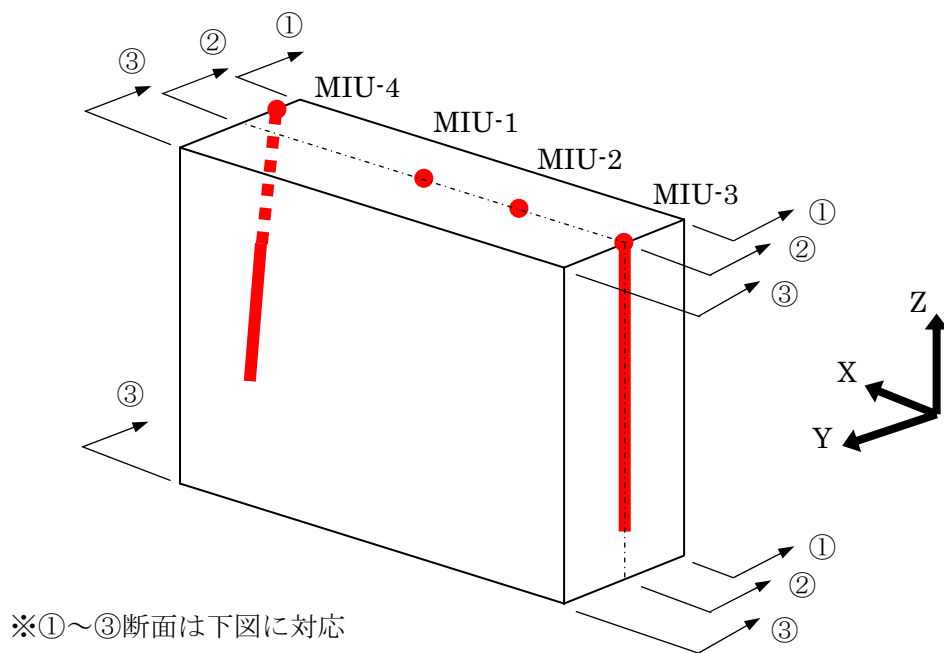


図 4-5 全水頭の期待値

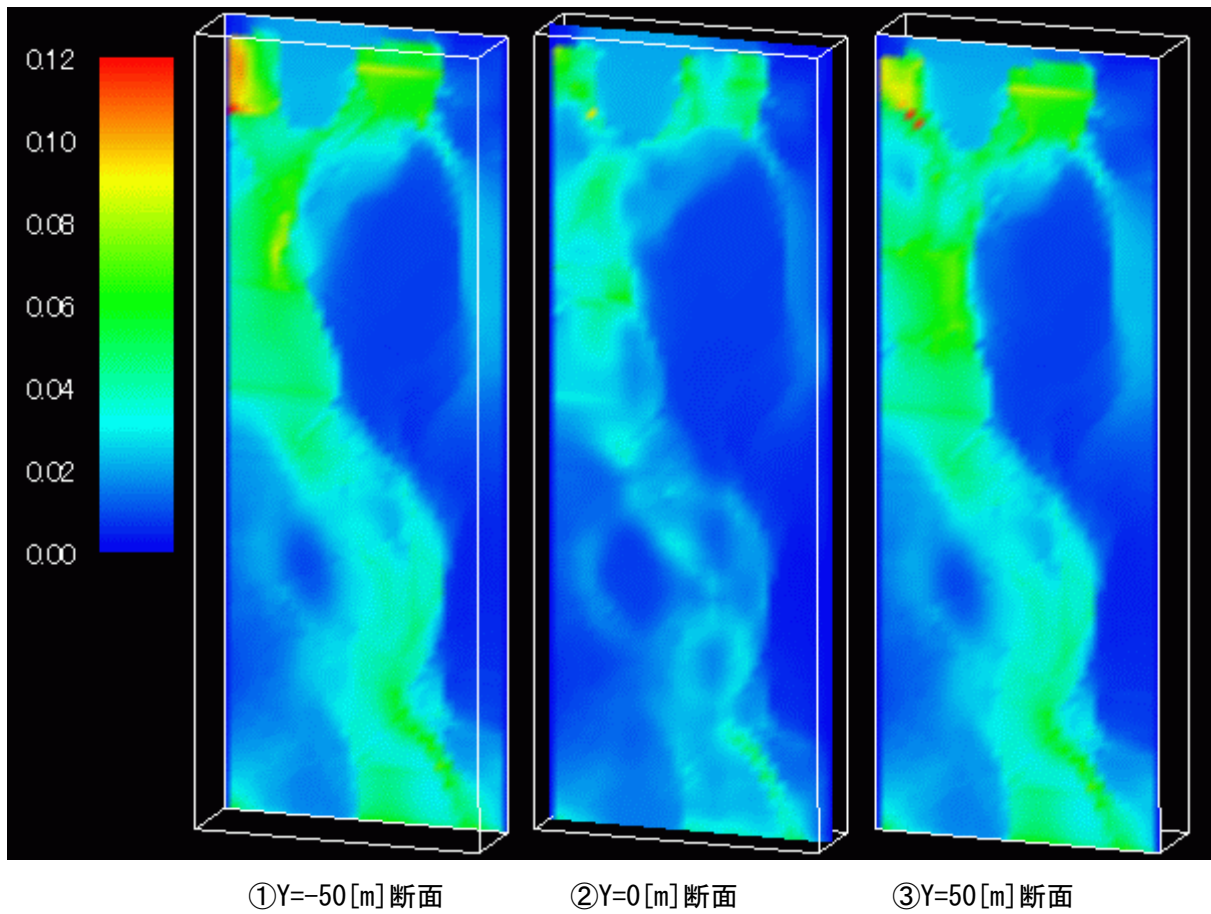
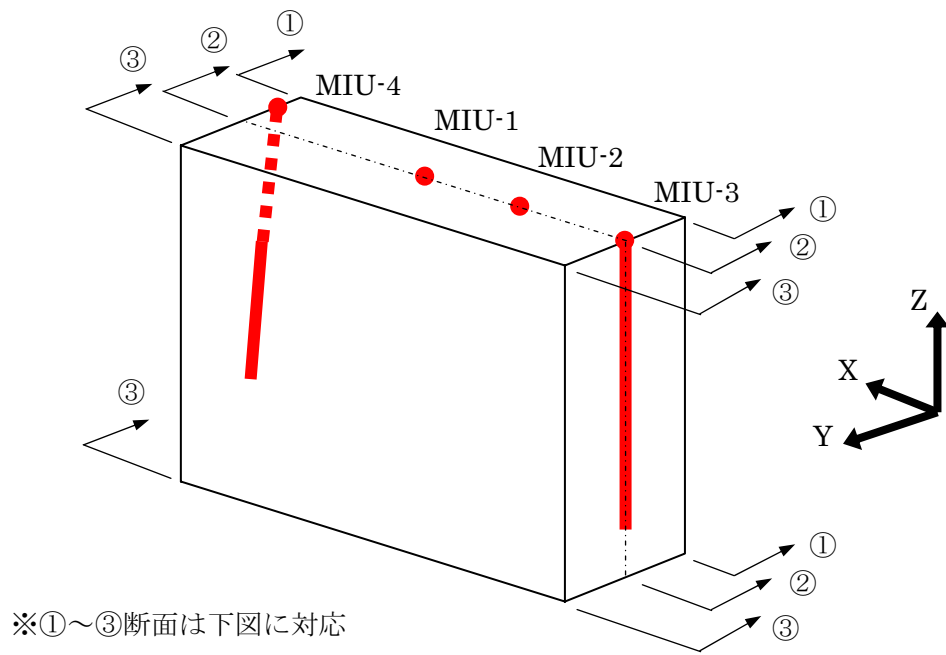


図 4-6 全水頭の標準偏差

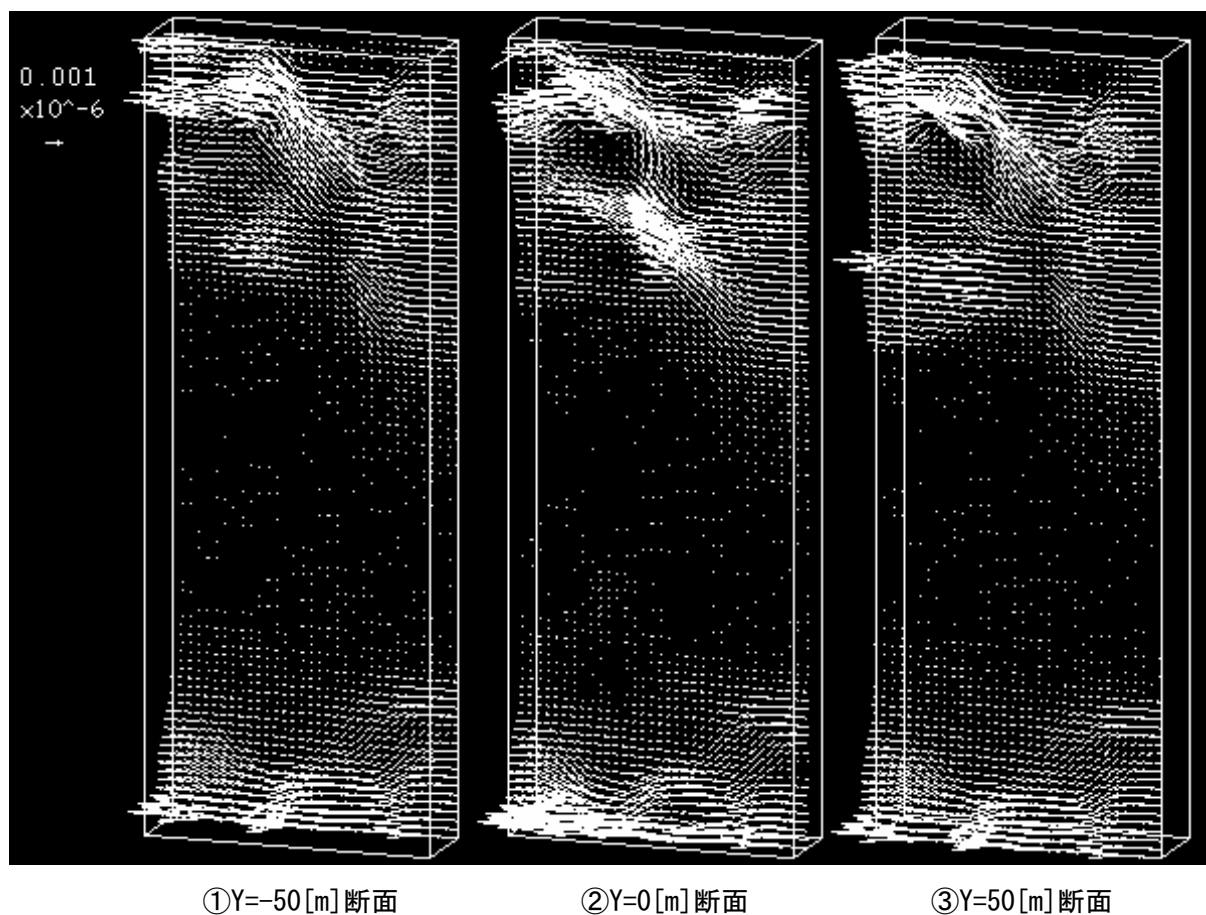
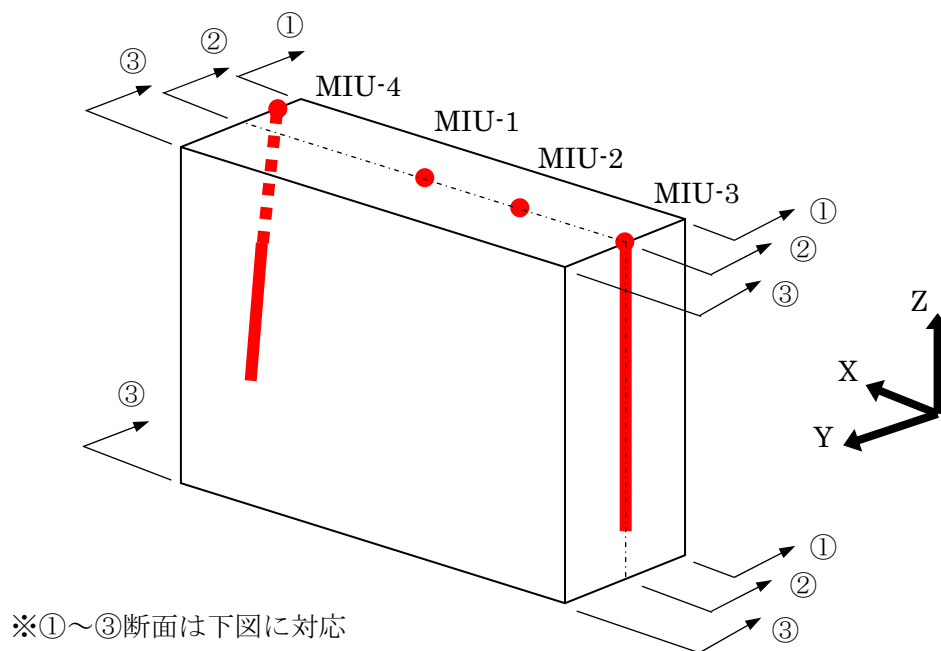
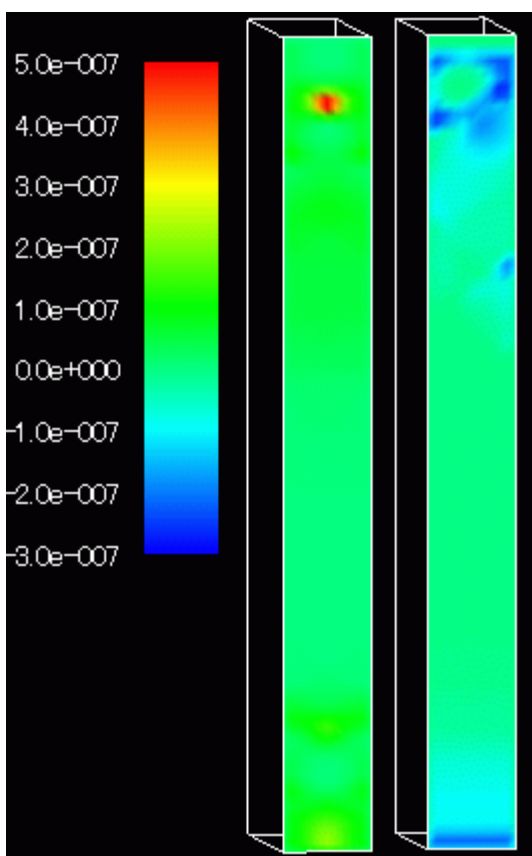
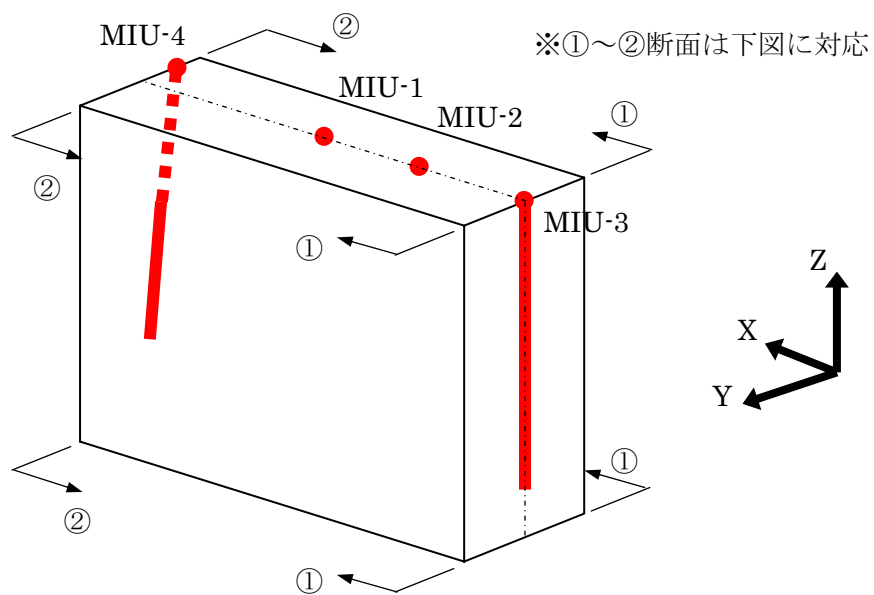
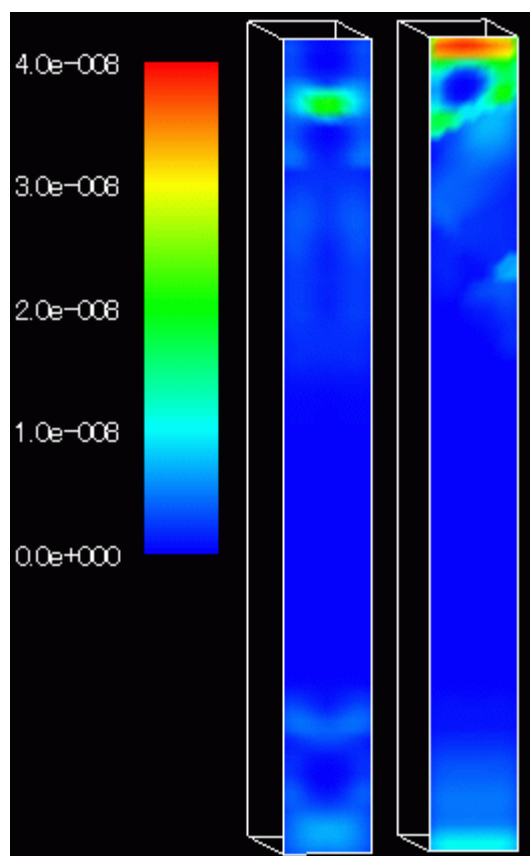


図 4-7 流速ベクトルの期待値



(a) 期待値
①X=0[m]面 ②X=337[m]面



(b) 標準偏差
①X=0[m]面 ②X=337[m]面

図 4-8 流量の期待値, 標準偏差

(iii) 移行到達位置結果（確率 FEM, V解析法）

ここでは、任意点からの地下水流れ到達点分布の期待値とバラツキ（標準偏差）を算出した。解析は移行開始点、移行時間を変化させ、解析法は確率 FEM と V 解析法を行った。解析結果を図 4-9～図 4-13 に、解析結果の一覧を表 4-2 に示す。また各図の図番号ごとの解析条件等をまとめたものを表 4-1 に示す。なお、V 解析法でのモンテ・カルロ法の試行回数は 2 次元の収束状況（「3. 5 (2) モンテ・カルロ法の収束性」参照）を参考に 1,000 回とした。また、確率 FEM の地下水流れ到達点分布は、microAVS の表示上の問題により、X 軸、Y 軸、Z 軸の 3 方向で最も大きい標準偏差で一様な半径の球を描いている。

表 4-1 移行到達位置 結果インデックス

図表番号	始点 (X,Y,Z)	移行時間 万年	解析法
図 4-9 (a), (b)	(0,0,0)	0.25, 0.5, 0.75, 1	(a)確率 FEM (b)V解析法
図 4-10 (a), (b)	(0,0,-200)	1.2, 2.4, 3.6, 4.8	
図 4-11 (a), (b)	(0,40,0)	0.4, 0.8, 1.2, 1.6	
図 4-12 (a), (b)	(0,40,-200)	1.2, 2.4, 3.6, 4.8	
図 4-13 (a), (b)	(0,0,10)	0.25, 0.5, 0.75, 1	

図 4-9(a)と図 4-9(b)はそれぞれ Xmin 面内の MIU-3 号孔が存在する位置の標高 0[m]を移行開始点としたときの確率 FEM と V 解析法の解析結果である。図 4-9(a)と図 4-9(b)を比較すると、到達点の期待値はほぼ同様な位置にあることがわかる。図 4-9(b)の XY 面の出力結果をみると 7.5 千年後の分布が 2 つの集合になっていることがわかる。2 次元プログラムの検証時にも同様に到達点の分布が 2 つの集合になっていたことから、V 解析法の問題点であると考えられる。

図 4-10(a)と図 4-10(b)はそれぞれ Xmin 面内の MIU-3 号孔が存在する位置の標高-200[m]を移行開始点としたときの確率 FEM と V 解析法の解析結果である。図 4-10(a)と図 4-10(b)を比較すると、到達点の期待値はほぼ同様な位置であることが確認できる。

図 4-11(a)と図 4-11(b)はそれぞれ Xmin 面内で Y=40[m]の標高 0[m]を移行開始点としたときの確率 FEM と V 解析法の解析結果である。到達点分布の期待値は両解析法ともにほぼ等しいと考えられるが、図 4-11(b)の XZ 平面表示図内での 1.2 万年後と 1.6 万年後の分布が大きくばらついているように見える。分布が大きくばらついている部分は透水係数が周囲と比較して小さい領域であることから、透水係数が急激に低下する領域を通過する場合には V 解析法の出力結果が大きくばらつくのではないかと考えられた。

図 4-12(a)と図 4-12(b)はそれぞれ Xmin 面内で Y=40[m]の標高-200[m]を移行開始点としたときの確率 FEM と V 解析法の解析結果である。図 4-12(b)の 4.8 万年跡は流線に沿って極めて長い分布を示していることがわかる。

以上の結果の数値結果をまとめたものが表 4-2 である。同表より、全般的には確率 FEM

の標準偏差は徐々に大きくなるが、V解析法の標準偏差は途中から急増する。また、V解析法の標準偏差は移行時間の経過に伴い小さくなることがあることがわかる。これらは、地下水流れの流線に沿った流速の変化に起因していると考えられるが、明確には原因は不明であり今後の課題としたい。

参考として、図 4-11(b)で示された V 解析法で地下水流れ到達点の分布が大きくばらつくより顕著な例を示す。図 4-13(a)と図 4-13(b)はそれぞれ Xmin 面内で MIU3 号孔がある位置 ($Y=0[m]$) の標高 10[m]を移行開始点としたときの確率 FEM と V 解析法の解析結果である。図 4-13(b)の 7.5 万年後および 1 万年後では透水係数が小さい領域を避けるように分布していることがわかる。

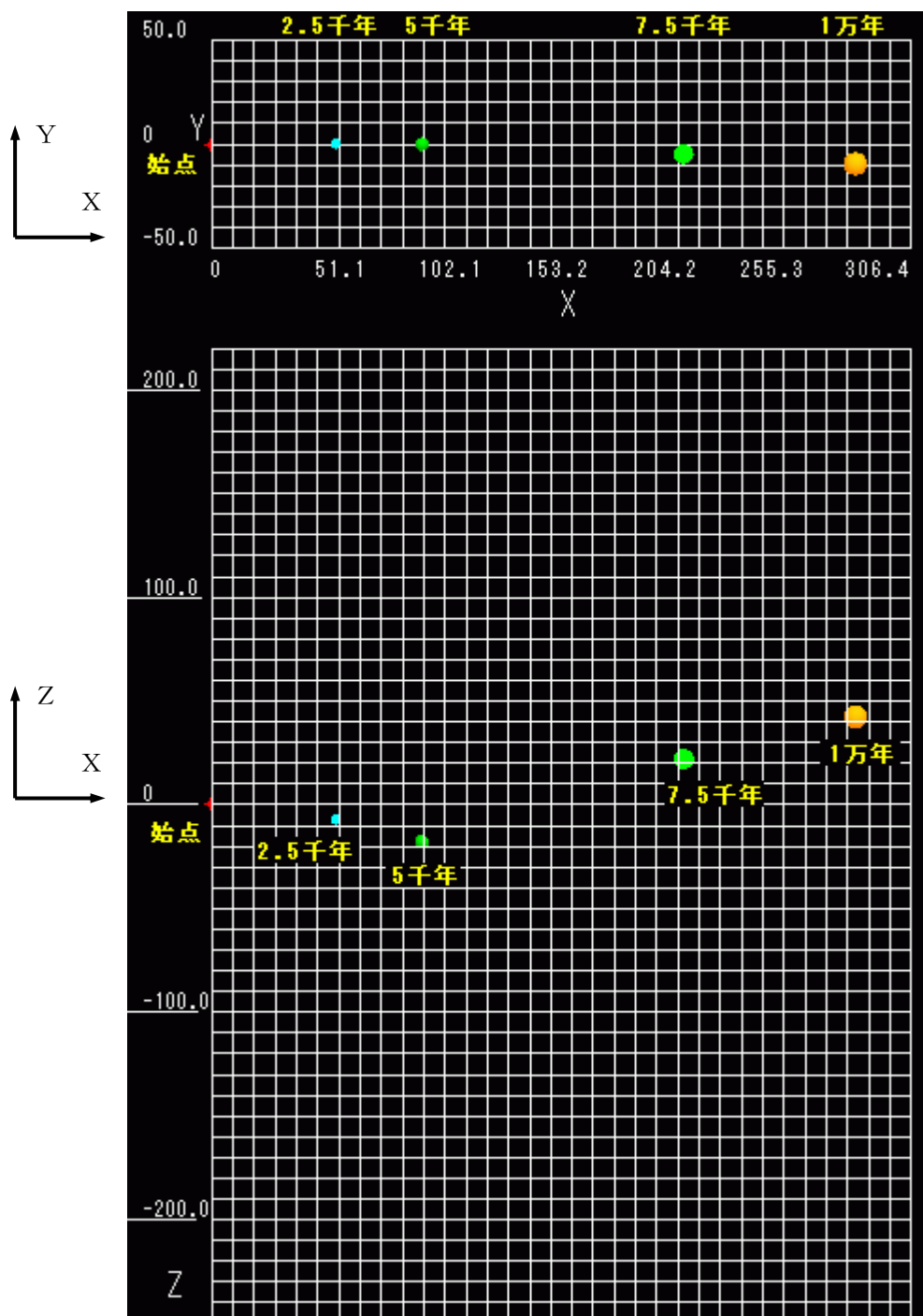


图 4-9(a) 移行到達位置 始点(0, 0, 0) 確率 FEM
上：平面 (XY 面)，下：立面 (ZX 面)

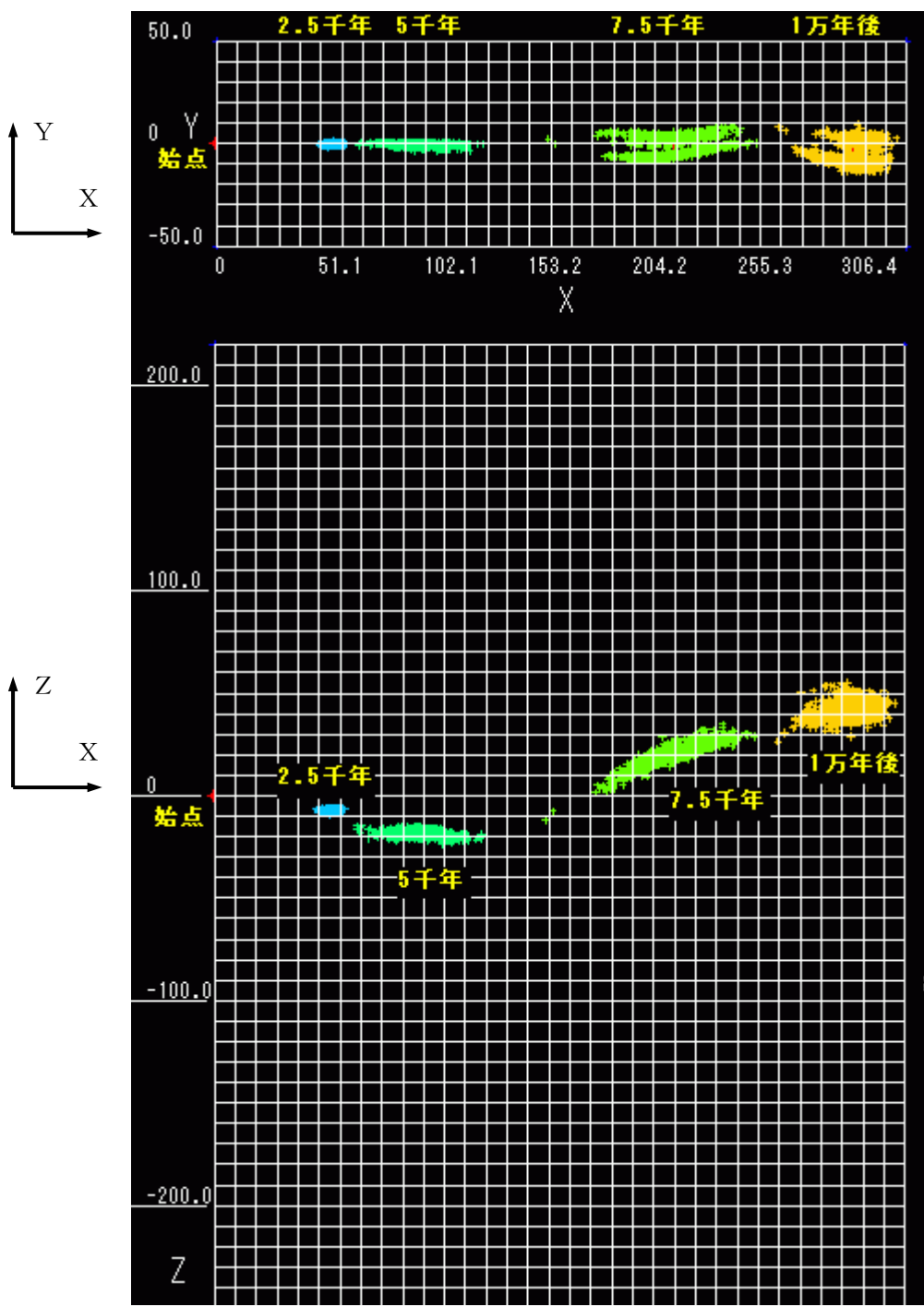


图 4-9(b) 移行到達位置 始点(0, 0, 0) V解析法
上：平面(XY面)，下：立面(XZ面)

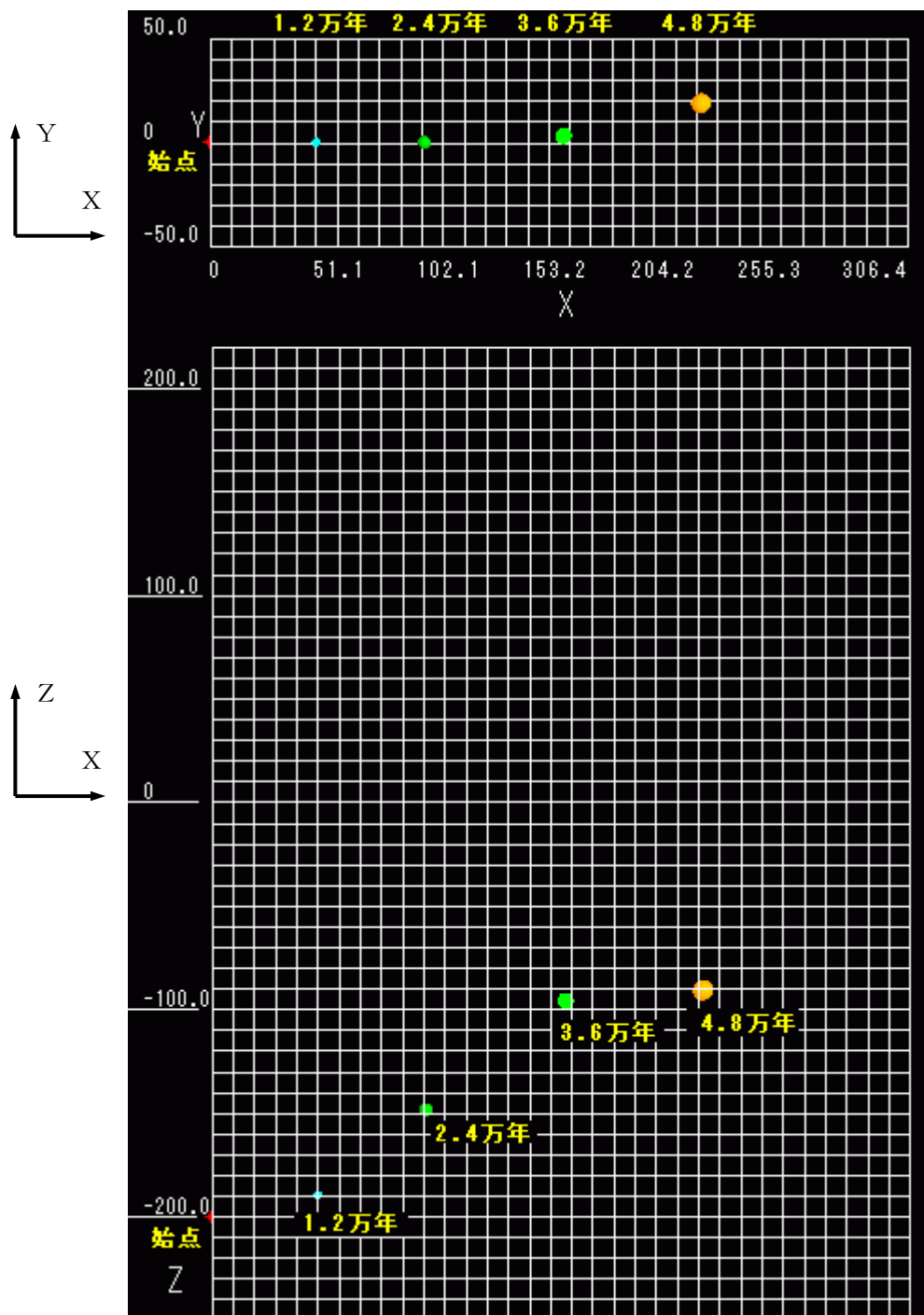


图 4-10(a) 移行到達位置 始点(0, 0, -200) 確率 FEM
上：平面 (XY 面)，下：立面 (ZX 面)

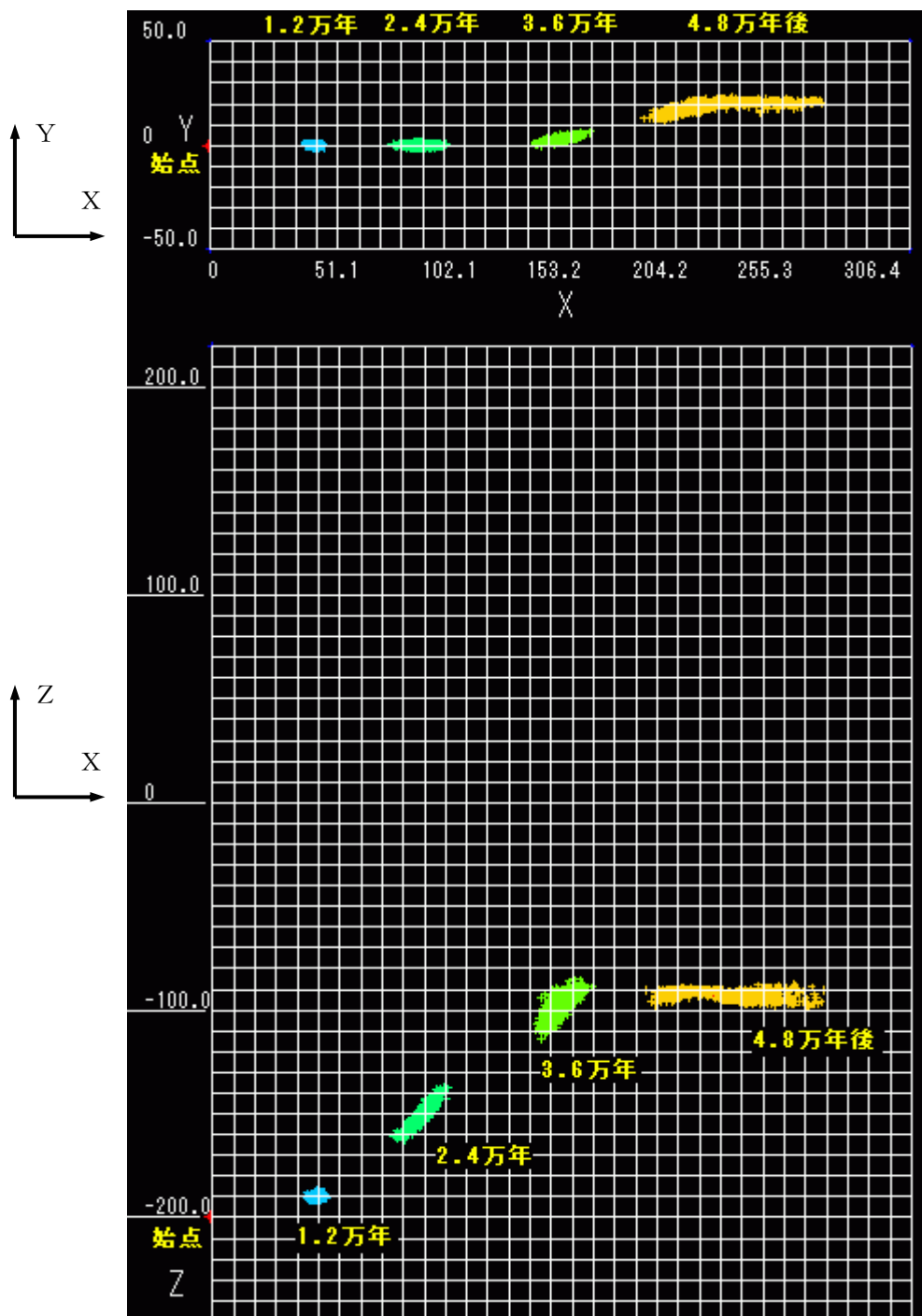


图 4-10(b) 移行到達位置 始点(0, 0, -200) V解析法
上：平面 (XY 面)，下：立面 (ZX 面)

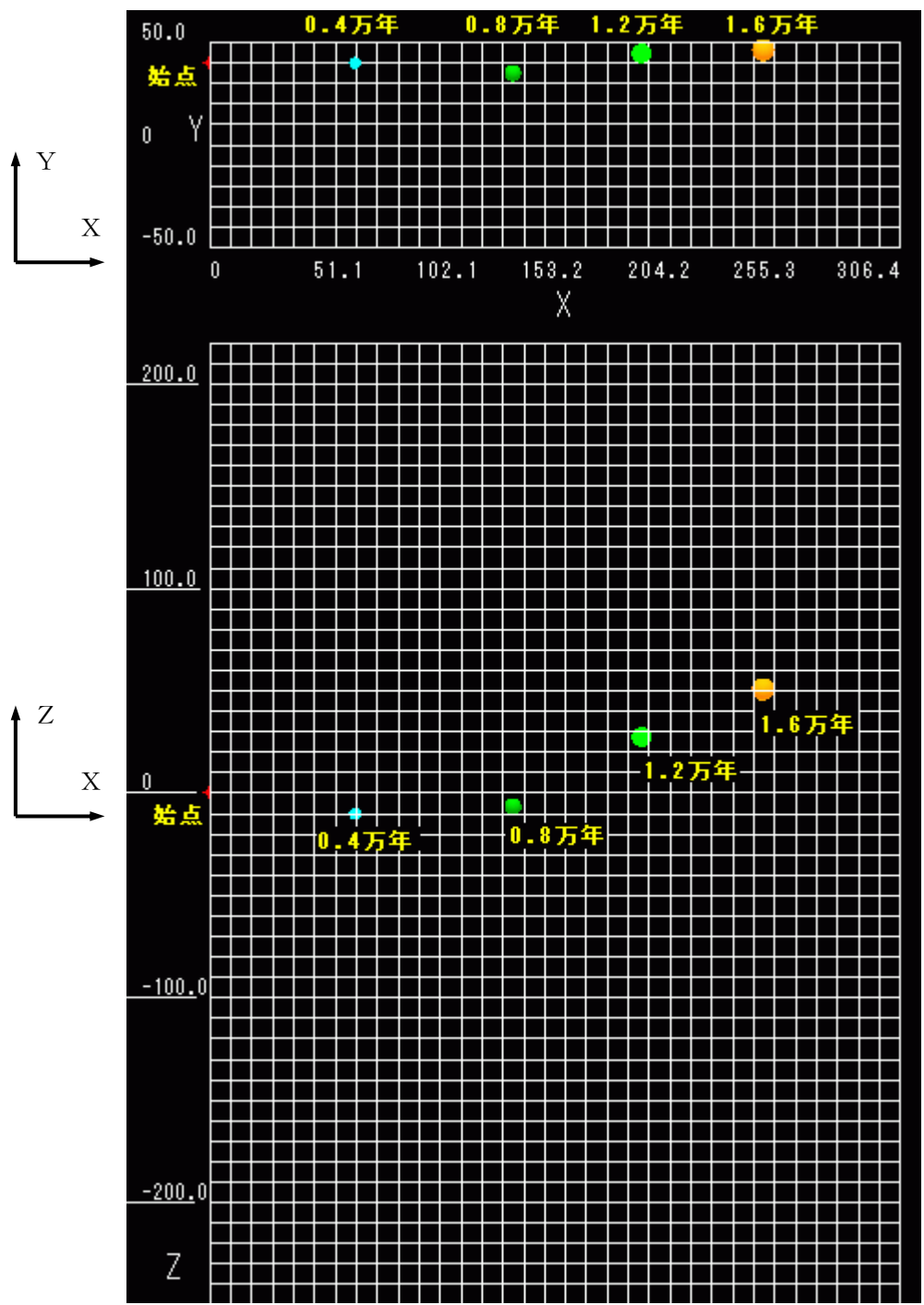


图 4-11(a) 移行到達位置 始点(0, 40, 0) 確率FEM
上：平面 (XY 面)，下：立面 (ZX 面)

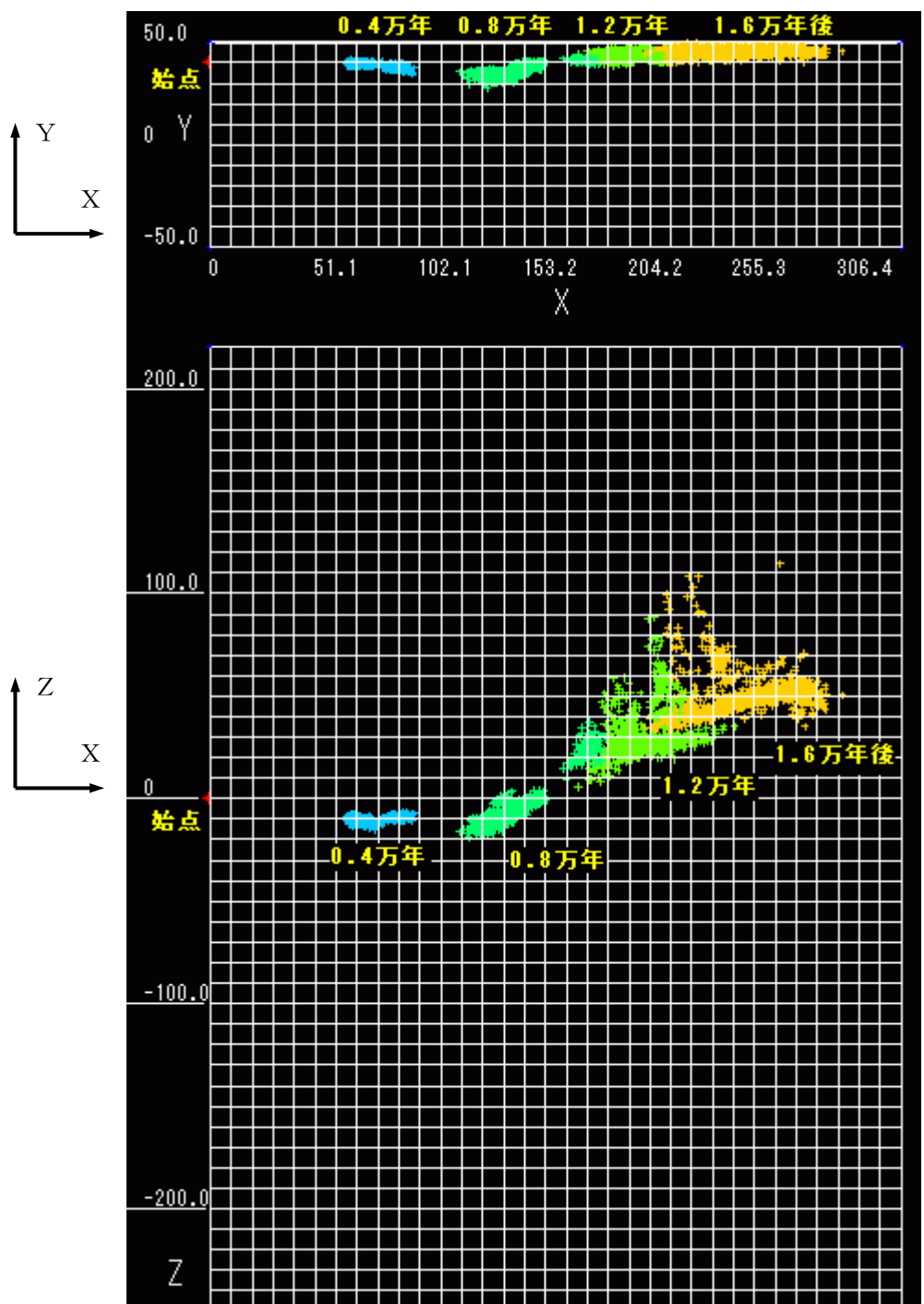


图 4-11(b) 移行到達位置 始点(0, 40, 0) V解析法
上：平面(XY面)，下：立面(ZX面)

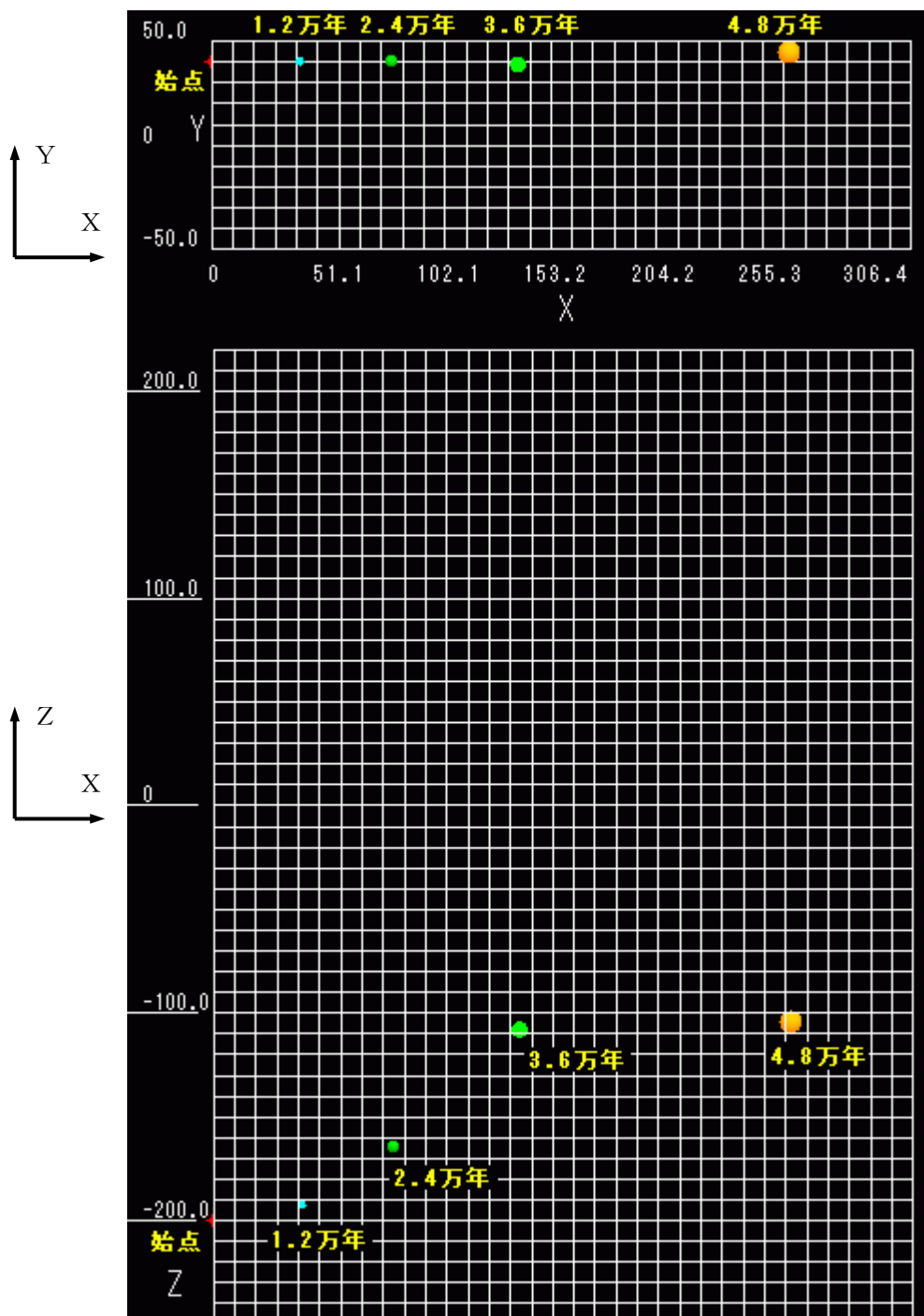


图 4-12 (a) 移行到達位置 始点(0, 40, -200) 確率 FEM
 上：平面 (XY 面)，下：立面 (ZX 面)

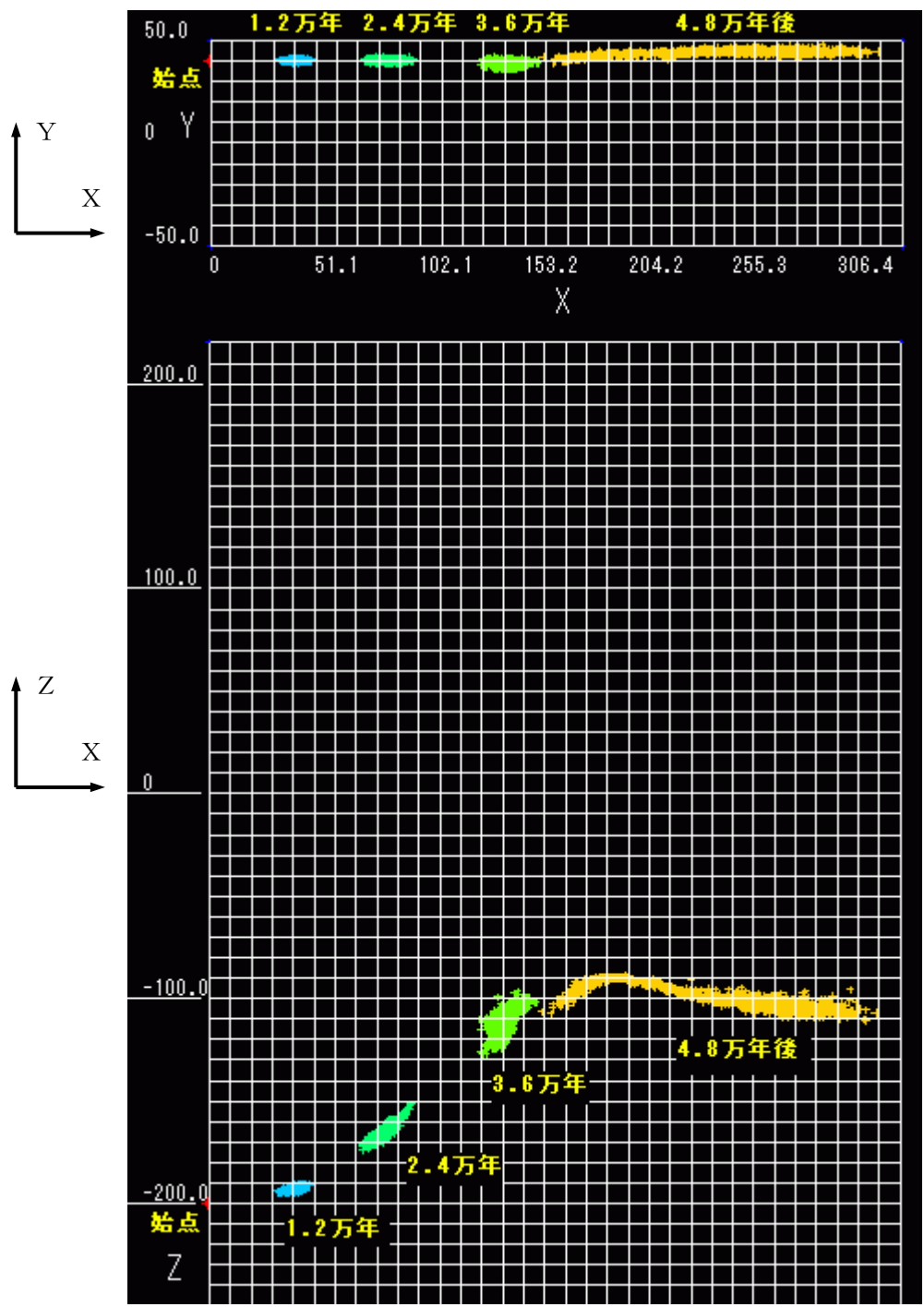


图 4-12(b) 移行到達位置 始点(0, 40, -200) V解析法
 上：平面 (XY 面)，下：立面 (ZX 面)

表 4-2 移行到達位置 結果一覽

單位：m

	移行時間	期待値				標準偏差		
		X	Y	Z	移行距離	X	Y	Z
始点 (0, 0, 0)								
確率 FEM	2500年	59.6	0.082	-7.15	60.1	2.50	0.371	0.496
	5000年	101	-0.019	-17.8	104	3.58	0.556	1.07
	7500年	227	-4.75	22.1	241	5.02	0.864	1.89
	10000年	310	-9.43	42.4	329	5.68	1.13	2.06
V 解 析法	2500年	58.8	0.075	-7.15	59.3	2.43	0.360	0.489
	5000年	99.9	-0.165	-18.2	102	8.56	0.552	1.22
	7500年	224	-1.19	20.5	238	13.4	4.54	5.18
	10000年	311	-3.83	42.2	330	9.09	5.65	3.84
始点 (0, 0, -200)								
確率 FEM	12000年	50.8	0.407	-189	52.3	1.95	0.312	0.601
	24000年	103	0.289	-148	119	3.03	0.580	1.96
	36000年	171	3.33	-95.6	205	3.70	0.737	2.63
	48000年	237	19.2	-90.4	275	4.52	1.04	2.72
V 解 析法	12000年	50.4	0.352	-189	52.0	1.60	0.394	0.765
	24000年	101	0.348	-150	117	4.06	0.506	4.35
	36000年	168	3.13	-96.6	204	4.14	0.857	4.55
	48000年	241	19.1	-91.7	280	15.8	2.13	1.95
始点 (0, 40, 0)								
確率 FEM	4000年	70.7	40.0	-10.1	72.1	3.16	0.450	0.989
	8000年	148	35.2	-6.46	153	4.63	0.978	1.37
	12000年	211	44.7	27.5	226	5.24	1.25	1.94
	16000年	270	46.3	50.7	290	5.78	1.32	2.27
V 解 析法	4000年	73.9	39.7	-10.1	75.2	7.50	0.941	1.18
	8000年	149	35.9	-4.12	154	14.0	3.04	10.7
	12000年	211	44.5	30.8	228	11.3	1.43	10.7
	16000年	260	45.9	50.8	282	21.0	1.56	10.1
始点 (0, 40, -200)								
確率 FEM	12000年	42.4	40.4	-192	43.3	2.13	0.309	0.604
	24000年	86.3	40.5	-164	96.0	2.83	0.442	1.35
	36000年	147	39.0	-108	180	3.58	0.668	2.41
	48000年	278	44.8	-104	318	4.95	0.869	2.75
V 解 析法	12000年	42.1	40.4	-192	43.0	2.07	0.306	0.776
	24000年	85.6	40.5	-165	95.2	3.82	0.449	3.15
	36000年	145	39.0	-111	177	3.98	1.10	5.14
	48000年	252	44.3	-99.7	292	39.5	1.28	5.15

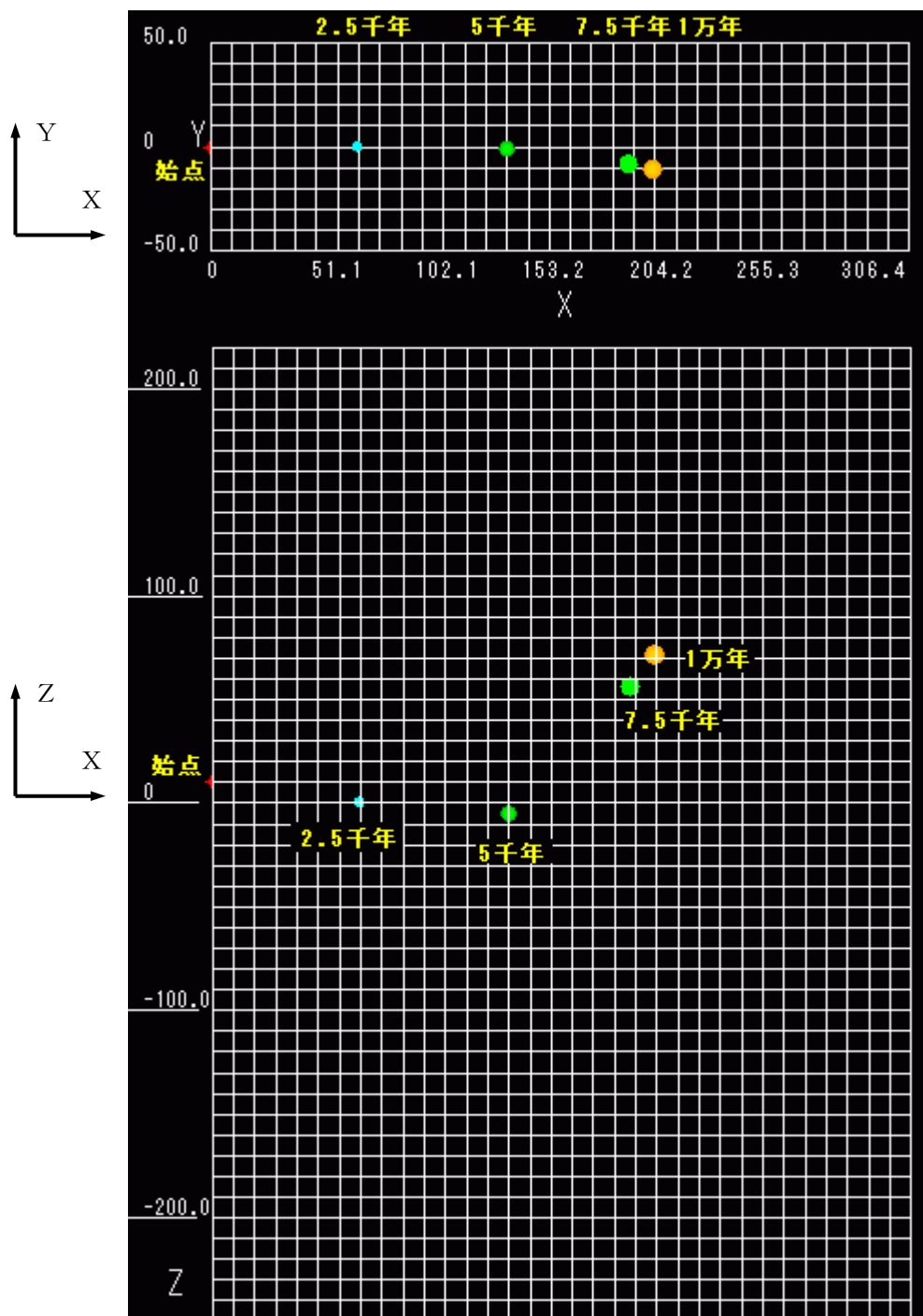


图 4-13(a) 移行到達位置 始点(0, 0, 10) 確率 FEM
 上：平面 (XY 面)，下：立面 (ZX 面)

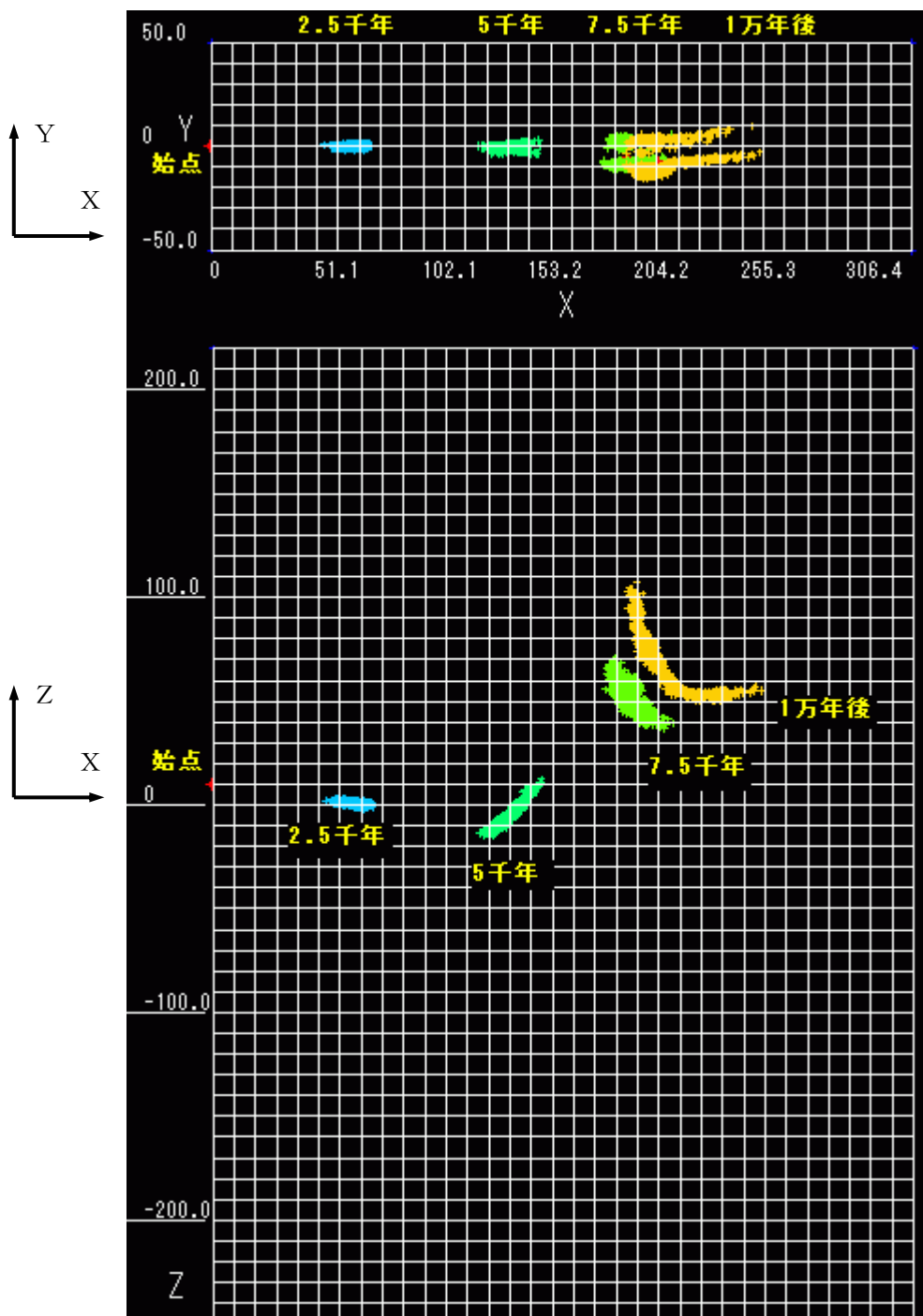


图 4-13(b) 移行到達位置 始点 (0, 0, 10) V 解析法
上：平面 (XY 面)，下：立面 (ZX 面)

(iv) 移行到達時間結果 (確率 FEM, V 解析法)

ここでは、任意点から地下水流れを開始させたとき、下流側の指定した面 (指定面) に到達する時間とそのバラツキ (分散) を算定することを試みた。下流側の指定した面は、X 軸、Y 軸、Z 軸に平行な YZ 平面、ZX 平面、XY 平面のいずれかを設定することとした。

なお、確率 FEM での指定面における到達時間の期待値と分散は、以下のようにして求めた。

いま、図 4-14 に示すような X 方向に対する到達時間を考える。移行開始点を O(0,0), 移行開始点から指定面までの垂直距離を X とすると、到達時間 T_x は以下の式で表される。

$$T_x = \int_0^X \frac{1}{v_x} dX \quad (4-1)$$

ここで、 v_x は流速ベクトルの X 方向成分である。0~X を微小な幅 ΔX で N 等分 ($\Delta X=X/N$) し、 ΔX に対してマクローリン展開して 1 次近似法を適用すると、 T_x は以下の式が得られる。

$$T_x \cong \Delta X \sum_{i=1}^{Nt} \frac{1}{v_x((i-1)\Delta X)} + \Delta X \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N -v_x^{-2} \frac{\partial v_x}{\partial \alpha_m((i-1)\Delta X)(\alpha=0)} \cdot \alpha_m \quad (4-2)$$

このとき、到達時間の期待値と分散は以下の式で表される。

$$E[T_x] \cong \Delta X \sum_{i=1}^N \frac{1}{v_x((i-1)\Delta X)(\alpha=0)} \quad (4-3)$$

$$\text{Var}[T_x] \cong (\Delta X)^2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \left\{ \sum_{i=1}^N -v_x^{-2} \frac{\partial v_x}{\partial \alpha_m((i-1)\Delta X)(\alpha=0)} \right\} \left\{ \sum_{j=1}^N -v_x^{-2} \frac{\partial v_x}{\partial \alpha_n((j-1)\Delta X)(\alpha=0)} \right\} \text{Cov}[\alpha_m, \alpha_n] \quad (4-4)$$

いま、解析対象領域を有限要素で分割し、ある 1 つの要素 e 内では地下水の流速ベクトルおよび α に関する流速ベクトルの偏微分がそれぞれ一定であるとして、それぞれ式(4-5)、式(4-6)が成立すると仮定する。

$$v_x = v_x\langle e \rangle \quad (4-5)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial \alpha_m} = \frac{\partial v_x}{\partial \alpha_m \langle e \rangle} \quad (4-6)$$

ここで、添え字 $\langle e \rangle$ は要素 e 内であることを表している。このとき、 T_x の期待値および分散は、 $\alpha_1 \sim \alpha_M$ が互いに独立であると仮定すると以下の式で与えられる。

$$E[T_x] \cong \sum_{e=1}^{N_e} \left(\frac{\Delta x_{\langle e \rangle}}{v_{x\langle e \rangle}} \right)_{(\alpha=0)} \quad (4-7)$$

$$Var[T_x] \cong \sum_{m=1}^M \left\{ \sum_{e=1}^{Ne} \left(\frac{\partial v_x}{\partial \alpha_{m \langle e \rangle}} \cdot \frac{\Delta X_{\langle e \rangle}}{v_{x \langle e \rangle}^2} \right)_{(\alpha=0)} \right\}^2 Var[\alpha_m] \tag{4-8}$$

ただし、 Ne は $\alpha = \mathbf{0}$ のときの移行開始点から指定面いたる移行経路を含む要素の個数、 $v_{x \langle e \rangle}$ はこれらの要素のうちの e 番目の要素の x 方向流速ベクトル成分、 $\Delta X_{\langle e \rangle}$ は移行経路のうち e 番目の要素内の経路長の X 成分、 $\partial v_x / \partial \alpha_{m \langle e \rangle}$ は、 e 番目の要素における α_m に関する x 方向流速の偏微分である。移行到達位置と同様に、 α_m は隣接する要素には影響が小さいものとする $\partial v_x / \partial \alpha_{m \langle e \rangle}$ はその要素が持つ $\alpha_{\langle e \rangle}$ 以外では 0 となり、以下の式に近似される。

$$Var[T_x] \cong \sum_{e=1}^{Ne} \left\{ Var[v_{x \langle e \rangle}] \cdot \frac{\Delta X_{\langle e \rangle}}{v_{x \langle e \rangle}^2} \right\} \tag{4-9}$$

なお、解析結果では、移行到達点のバラツキを標準偏差で表しているが、これは式(4-9)を 1/2 乗することで算出した。

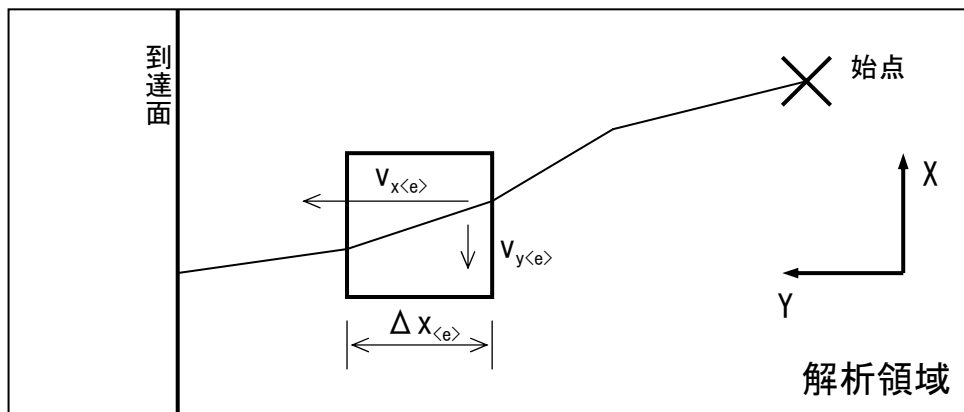


図 4-14 任意点から指定面までの期待値と分散の概念図

移行到達時間の算出結果を図 4-15～図 4-18 に示す。各図の解析条件等をまとめたものを表 4-3 に示す。また、移行到達時間の結果一覧を表 4-4 に示す。なお、指定面は MIU-2 号孔を通る面、MIU-1 号孔を通る面、下流側解析境界面として、 $X=142[m]$ 、 $237[m]$ 、 $337[m]$ の 3 種類を設定した。また、V 解析法のモンテ・カルロ法の試行回数は 1000 回とした。

表 4-3 移行到達時間 結果インデックス

図表番号	始点	指定面 (YZ 面)
図 4-15(a), (b)	(0,0, 0)	X=142[m], 237, 337
図 4-16(a), (b)	(0,0,-200)	
図 4-17(a), (b)	(0,40,0)	
図 4-18(a), (b)	(0,40,-200)	

図 4-15(a)と図 4-15(b)はそれぞれ Xmin 面内の MIU-3 号孔が存在する位置の標高 0[m]を移行開始点としたときの期待値と分散の解析結果である。同図より、期待値は確率 FEM と V 解析法とでほぼ等しい結果となっていることがわかる。両図より、到達時間の期待値および標準偏差は確率 FEM と V 解析法とでほぼ等しい結果となった。

図 4-16(a)と図 4-16(b)はそれぞれ Xmin 面内の MIU-3 号孔が存在する位置の標高-200[m]を移行開始点としたときの期待値と分散の解析結果である。同図より、期待値は確率 FEM と V 解析法とでほぼ等しい結果となっていることがわかる。到達時間の標準偏差は、確率 FEM と比較して V 解析法が途中から急増する傾向にあった。

図 4-17(a)と図 4-17(b)はそれぞれ Xmin 面内で Y=40[m]の標高 0[m]を移行開始点としたときの確率 FEM と V 解析法の解析結果である。到達時間の標準偏差は、確率 FEM と比較して V 解析法が最初から大きい傾向にあった。

図 4-18(a)と図 4-18(b)はそれぞれ Xmin 面内で Y=40[m]の標高-200[m]を移行開始点としたときの確率 FEM と V 解析法の解析結果である。同図より、期待値は確率 FEM と V 解析法とでほぼ等しい結果となっていることがわかる。到達時間の標準偏差は、確率 FEM と比較して V 解析法が途中から急増する傾向にあった。

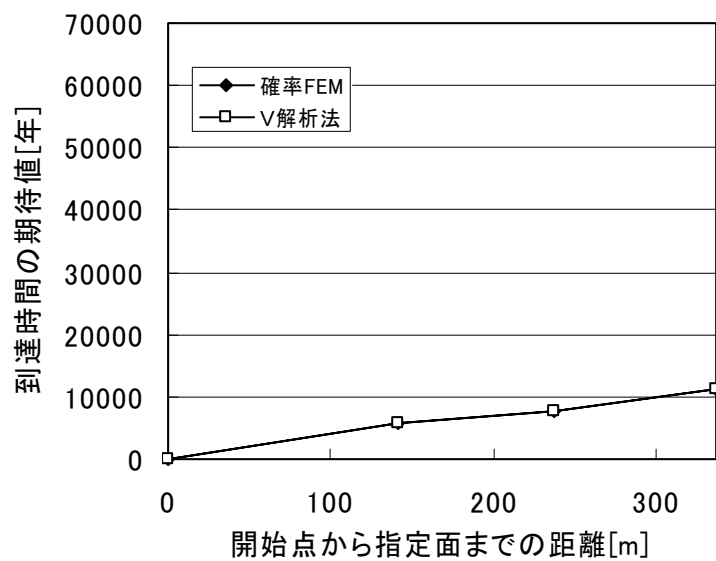


図 4-15 (a) 移行到達時間 始点(0, 0, 0) 期待値

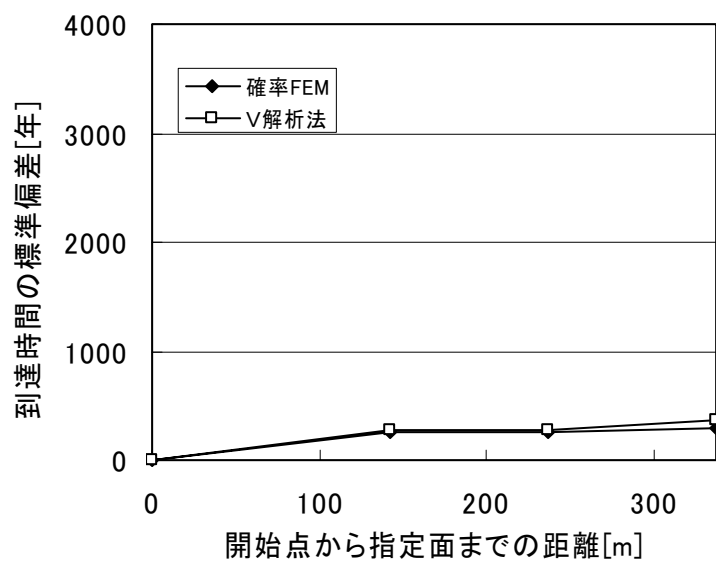


図 4-15 (b) 移行到達時間 始点(0, 0, 0) 標準偏差

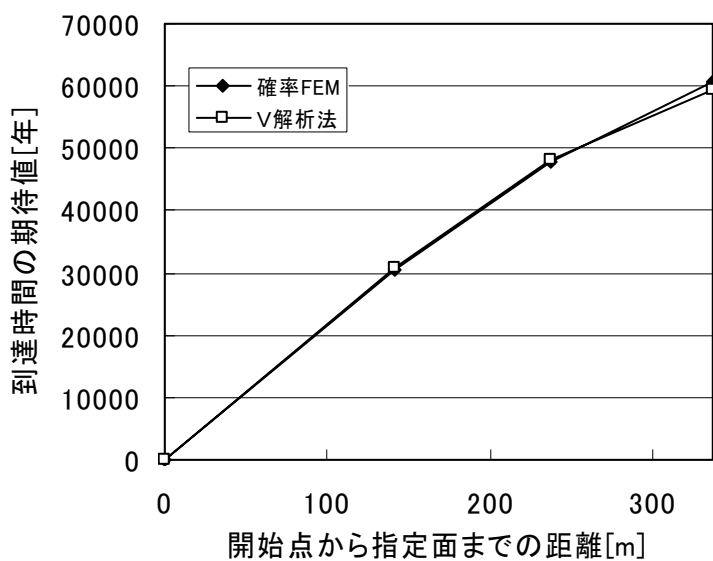


図 4-16 (a) 移行到達時間 始点(0, 0, -200) 期待値

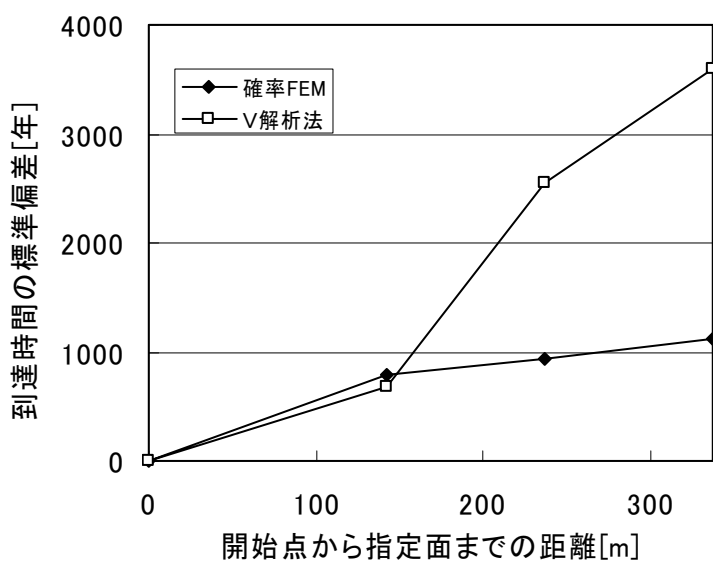


図 4-16 (b) 移行到達時間 始点(0, 0, -200) 標準偏差

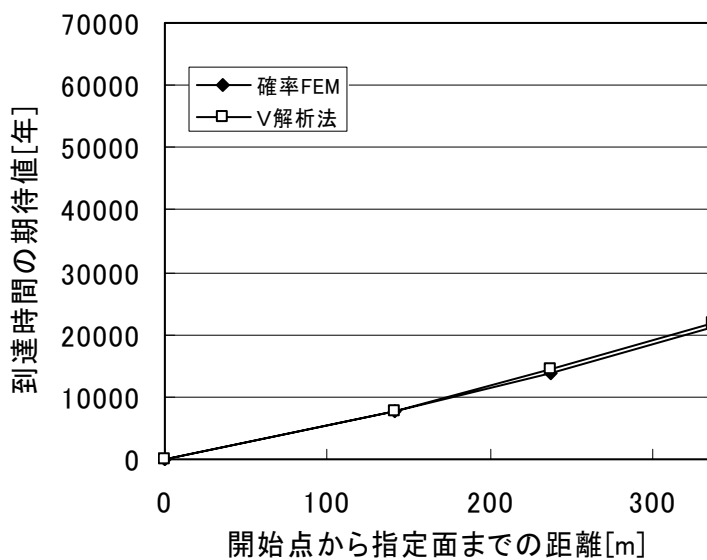


図 4-17(a) 移行到達時間 始点(0, 40, 0) 期待値

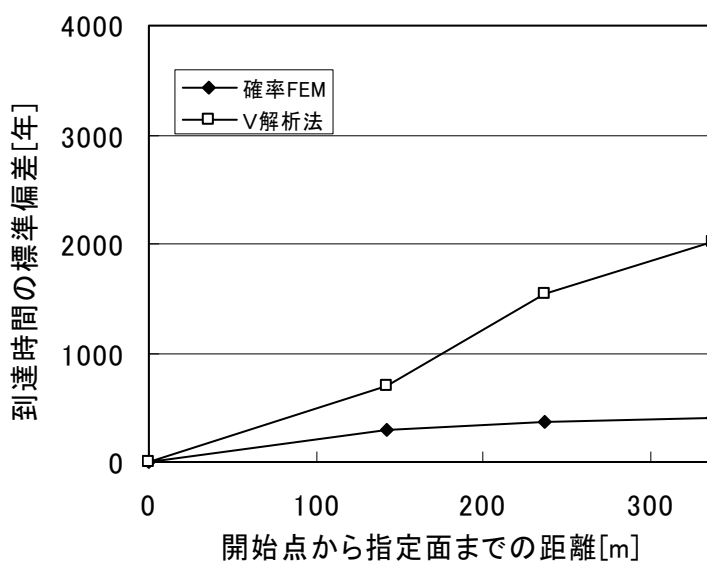


図 4-17(b) 移行到達時間 始点(0, 40, 0) 標準偏差

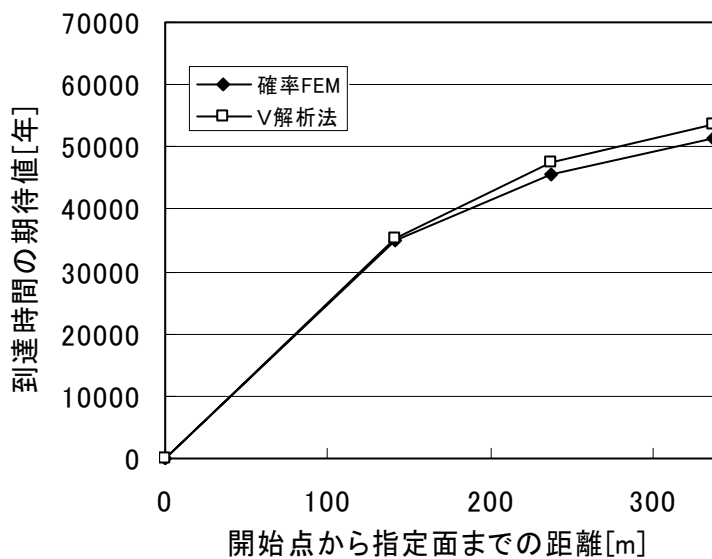


図 4-18 (a) 移行到達時間 始点 (0, 40, -200) 期待値

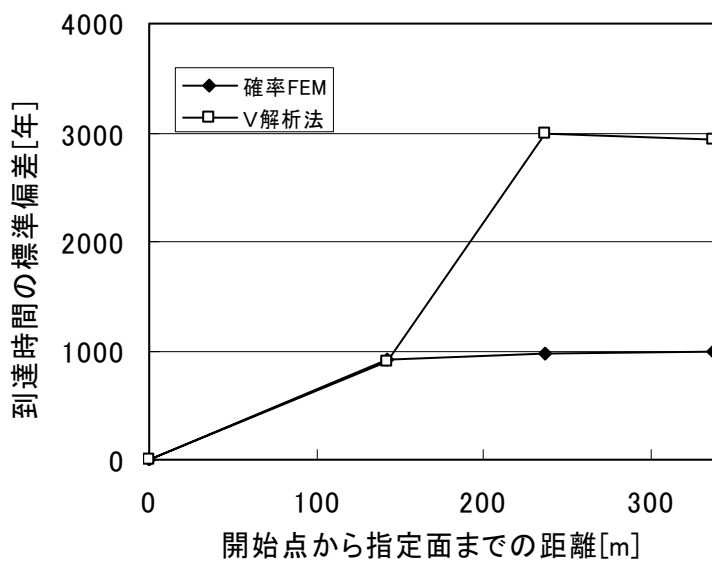


図 4-18 (b) 移行到達時間 始点 (0, 40, -200) 標準偏差

表 4-4 移行到達時間 結果一覽

移行始点	解析法	指定面	期待値	標準偏差
(X,Y,Z) [m]		X[m]	[年]	[年]
(0,0,0)	確率 FEM	142	5,770	249
		237	7,680	257
		337	11,200	286
	V解析法	142	5,850	271
		237	7,780	282
		337	11,200	375
(0,0,-200)	確率 FEM	142	30,600	797
		237	48,000	940
		337	60,600	1,120
	V解析法	142	30,900	688
		237	48,000	2,550
		337	57,500	3,590
(0,40,0)	確率 FEM	142	7,680	303
		237	13,900	369
		337	21,100	413
	V解析法	142	7,710	704
		237	14,500	1,550
		337	21,800	2,020
(0,40,-200)	確率 FEM	142	34,900	919
		237	48,600	980
		337	51,400	996
	V解析法	142	35,300	896
		237	47,400	2,990
		337	53,500	2,940

(7) 解析のまとめ

3次元プログラムによる解析結果をまとめると以下のとおりである。

- ・確率 FEM により 3次元流れ場の期待値，標準偏差を推定した。
- ・確率 FEM と V 解析法を用いた移行計算により，指定時間後の到達位置の期待値，標準偏差，あらかじめ指定した面へ到達するまでの時間の期待値，標準偏差を求めた。
- ・今後の課題として計算時間の短縮がある。計算機のハード的な解決，ソルバーの改良によるソフト的な解決，の2つの方法が挙げられる。

5. おわりに

本研究では、①任意点からの地下水流れの到達点のバラツキ評価の検証と②2次元プログラムの3次元化を行った。以下にその概要と得られた知見を示す。

①任意点からの地下水流れの到達点のバラツキ評価の検証

2次元プログラムの検証方法として、**K**解析法と**V**解析法を行った。**K**解析法は透水係数の期待値と分散に対してモンテカルロ法を適用する方法であり、複数の透水場を設定することで地下水流れ到達点のバラツキを評価する手法である。一方、**V**解析法は確率**FEM**で算出した流速の期待値と分散に対してモンテカルロ法を適用する方法であり、複数の流速場を設定することで地下水流れ到達点のバラツキを評価する手法である。

K解析法と**V**解析法ではモンテカルロ法を使用するため、その収束性について確認し、十分に収束した試行回数での**K**解析法と**V**解析法の結果と確率**FEM**の結果を比較した。比較項目は、到達点分布の期待値、移行距離の期待値、到達点分布の分散（標準偏差）である。また、移行開始点を4種類用意し、流路や流速が異なる場合でそれぞれの比較結果がどのように変化するかについても確認した。その結果、確率**FEM**での到達点の期待値、移行距離、到達点のバラツキが**K**解析法や**V**解析法の結果とほぼ等しい結果となることを確認した。また、それぞれの解析法の計算時間を計測した結果、確率**FEM**と**V**解析法は**K**解析法と比較して極めて短時間で計算ができることが明らかとなった。

②2次元プログラムの3次元化

上記の2次元プログラムを3次元化し、3次元プログラムを作成した。また、3次元プログラムの事例検討として、MIU-1号孔～4号孔までのデータを使用した解析を行った。その結果、以下の内容を確認した。

- ・ 確率**FEM**により3次元流れ場の期待値、標準偏差を推定できる。
- ・ 確率**FEM**と**V**解析法を用いた移行計算により、指定時間後の到達位置の期待値、標準偏差と指定した面へ到達するまでの時間の期待値と標準偏差を求めることができる。

今後の課題を以下に列挙する。

- ・ 3次元プログラムによる解析は2次元プログラムによる解析と比較してメッシュ数が極めて多くなることから、解析時間は大幅に増大した。そのため、計算時間の短縮が挙げられる。
- ・ 3次元データを使用した解析結果の精度に関する検討が必要である。
- ・ 核種移行の分散などの現象を表現できるようにする必要がある。
- ・ より複雑な地形を表現できるようにメッシュ形状や大きさを任意に設定できるようにする必要がある。

・参考文献

Clayton V. Deutsch, André G.Journal : "GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide Second Edition", Oxford University Press, New York Oxford (1998).

尾方伸久, 他 : "広域地下水流動研究基本計画書", PNC TN7020 98-001 (1997).

核燃料サイクル開発機構 : "わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究第2次取りまとめ-分冊3 地層処分システムの安全評価", V-54~V-74, JNC TN1400 99-023 (1999).

太田久仁雄, 他 : "超深地層研究所地層科学研究基本計画", JNC TN 7410 2001-009 (2001).

Krige,D.G. : "A statistical approach to some basic mine valuation problems in the Witwatersrand", Journal of Chemical. Metallurgical and Mining Society of South Africa, No.53 (3), pp47-64, Disc.,pp64-70 (1952).

間瀬茂, 武田純 : 空間データモデリングー空間統計学の応用ー, データサイエンス・シリーズ⑦, 共立出版株式会社 (2001).

嶋田三朗, 他 : "浸透流確率有限要素法", 前田技術研究所報 VOL.30, pp25-34 (1990).

・ 付録 3次元プログラムのマニュアル

(1) プログラムのインストール方法

PC内の適当な場所にフォルダを作成し、解析プログラム一式をコピーする。

¥setup フォルダ内のファイル名 **SETUP.EXE** をダブルクリックし、ガイドに従いインストールを行う。途中でシリアル番号を聞かれるが、シリアル番号の認証は行っていないため何か数字を入れれば次へ進めるようになる。

(2) 解析の概略的な流れ

解析の概略的な流れを図 A-1 に示す。

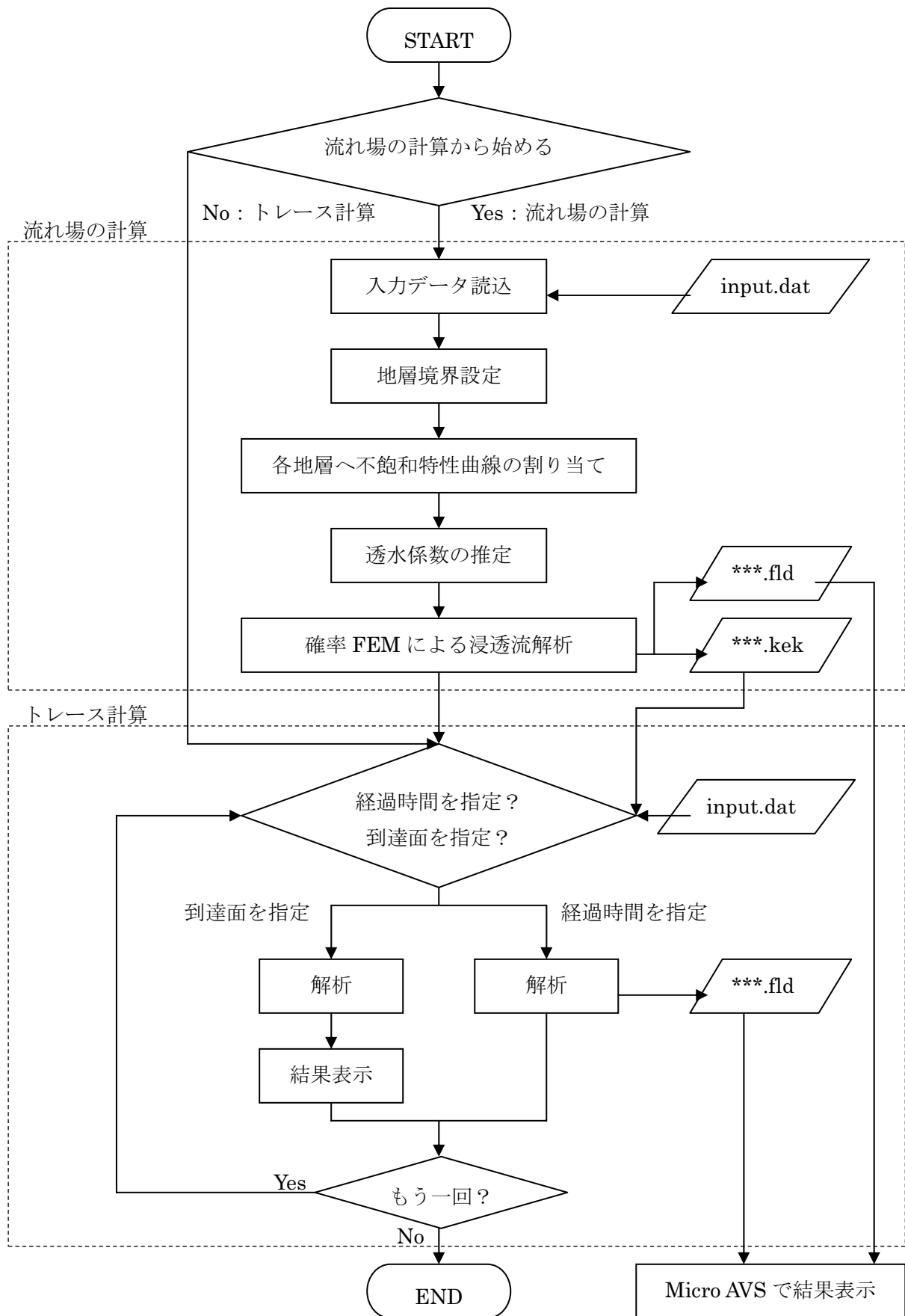


図 A-1 解析の概略的な流れ

(3) 解析手順

実際の解析手順を以下に示す。[]はプログラム内の操作ボタンもしくはツールバーボタン、< >は WINDOWS 上の操作ボタンを示す。

(i) 準備

入力ファイル(input.dat)を用意し、任意のフォルダ内に入れる。なお、計算に必要な入出力ファイル等はこの input.dat の階層下に自動的に作成されるフォルダ dat (クリギングの入出力ファイルなど) と kek (確率 FEM, V解析法の入出力ファイルなど) へ格納される。この際、これらの入出力ファイルの絶対パスが半角 256 文字を超えているとプログラムが正常に作動しないため、input.dat は階層の深過ぎるフォルダに入れな
いほうが良い。

例: 「C:\Program Files\MAEDA Corp\Fem23\sample3\dat\indic.dat」(55 字)

(ii) ソフトの起動

Windows の<スタート>→<プログラム>→<MAEDA_FEM23>→<Kakuritsu3>
をクリックしてプログラムを起動する。

(iii) 流れ場の計算

(a) 開始

[ファイル]→[流れ場の計算]をクリックして、input.dat を選択する。その入力データの現在の作業進行状況を示すダイアログボックス (図 A-2) が出てくるので「OK」を押して閉じる。



図 A-2 作業進行状況の表示ダイアログボックス

dat と kek フォルダが無い場合はここで自動作成した事を通知するダイアログボックス (図 A-3) が出る。

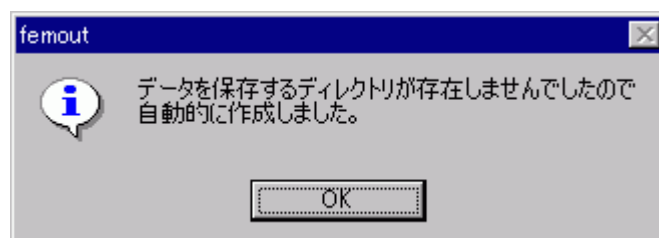


図 A-3 サブフォルダ自動作成の通知ダイアログボックス

(b) Step.1 地層境界の推定

地層が単一な場合にはこのステップは不要。

そうでない場合には、[事前処理]→[STEP1. 地層境界を地球統計法で推定する]をクリックし、インディケータクリギングにより地層境界を決定する。各地層での経験的バリオグラムの算出および球モデルでのフィッティングを行うダイアログボックスが出てくる（図 A-4）。経験的バリオグラムの算出では、区切り数(number of lags), 区切り幅(lag separation distance), 区切り許容幅(lag tolerance)の入力が必要である。初期状態では一般的な数値が入っているため、適宜変える。これらの詳細は GSLIB “Geostatistical Software Library and User’s Guide Second Edition” (Clayton V. et.al.,1998) を参照する。「グラフ再描画」ボタンを押すとグラフが更新される。レンジ、シル、ナゲット効果の値を適切に入力し、球モデルのラインがプロット点群に重なるようにフィッティングを行う。「グラフ再描画」ボタンを押すとグラフが更新される。

「全層決定」ボタンを押すとインディケータクリギングが開始される。

中止する場合には「キャンセル」ボタンを押すとダイアログボックスが閉じる。

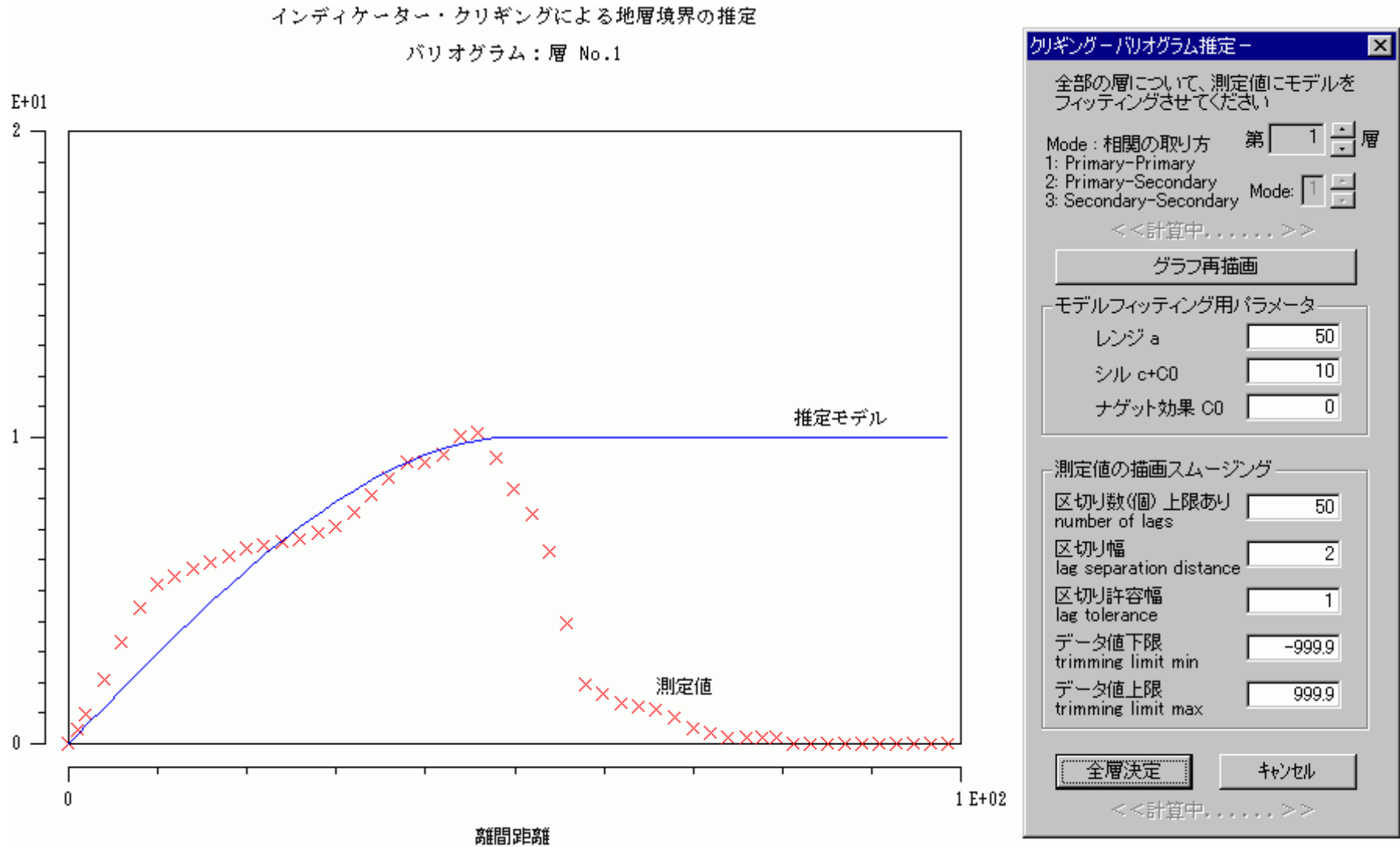


図 A-4 経験的バリオグラムおよび球モデルフィッティングの画面表示例

(c) Step.2 不飽和特性の割り当て

[事前処理]→[STEP2. 不飽和特性を地層に割り当てる]をクリックし、地層ごとに不飽和特性曲線を割り当てる (図 A-5)。不飽和特性が 1 種類しか入力されていない場合は全層にそれが自動で割り当てられる。

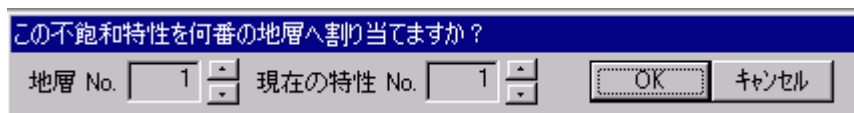


図 A-5 不飽和特性割り当てダイアログボックス

(d) Step.3 透水係数の推定

[事前処理]→[STEP3. 透水係数を統計的に推定する]→[算術平均 (対数平均, クリギング, コクリギング)]をクリックし、それぞれの推定方法で透水係数を推定する。なお、ここでクリギングかコクリギングを選択した場合 (iii) (b) と同様に経験的バリオグラムや球モデルによるフィッティングを行う必要があるが、(iii) (b) と同じパラメータを設定することが望ましい。

(e) 計算実行

[計算実行]→[Step.1 流れ場の計算]→[確率 FEM]をクリックし、「選択してください」ダイアログボックス (図 A-6) から計算に使用する透水係数の推定方法を選択する。もしくはツールバー上の「確率 FEM 計算実行」ボタンを押し、「選択してください」ダイアログボックスから計算に使用する透水係数の推定方法を選択する。

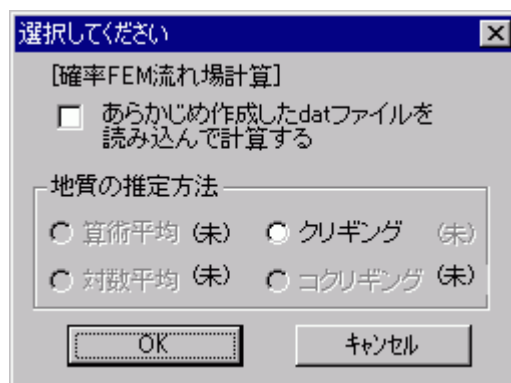


図 A-6 流れ場の計算に使用するデータ選択ダイアログボックス

ここで、あらかじめ自分で作成または修正しておいた「¥kek¥***_k.dat」を読み込んで計算を行いたい場合には、ダイアログボックス左上の「あらかじめ作成した dat ファイルを読み込んで計算する」にチェックを入れておく。細かい境界条件の設定やモデルの手修正が必要な場合にこの機能を用いる、通常は必要ない。

計算実行ダイアログボックス（図 A-7）が出るため、計算を開始して良いならば「計算開始」ボタンを押す。

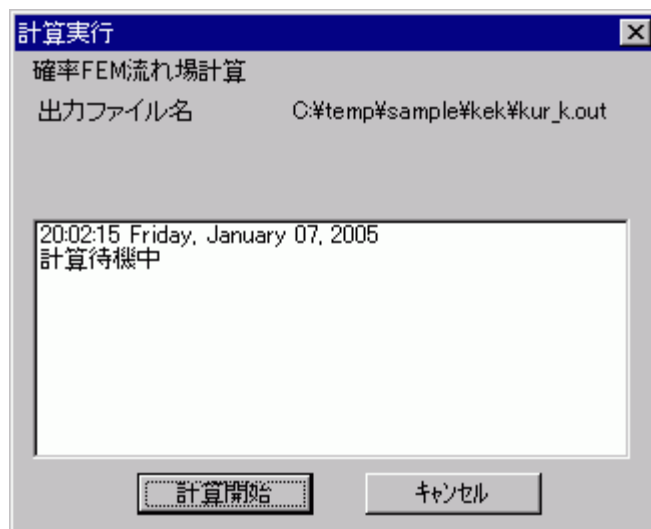


図 A-7 計算実行ダイアログボックス

計算が終了するとダイアログボックス（図 A-8）にて終了の表示が出るため、「OK」を押して閉じる。

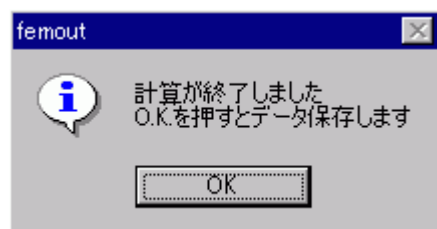


図 A-8 計算終了の通知ダイアログボックス

なお[計算実行]→[解析方法の設定]をクリックすると、不飽和領域の判定に関する収束条件を変更することができる（図 A-9）。

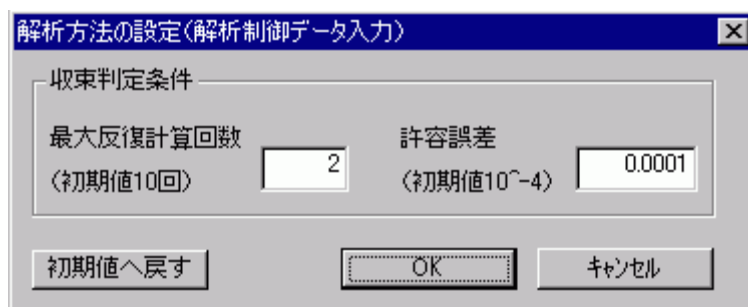


図 A-9 収束判定条件の設定ダイアログボックス

(iv) トレース計算

(a) 開始

流れ場の計算が終了すると自動的にトレース計算モードになる。

既存の流れ場の計算結果を用いてトレース計算から作業を開始したい場合には、[ファイル]→[既存の結果を用いてトレース計算]をクリックし、input.dat を選択する。その入力データに対する現在の作業進行状況を示すダイアログボックス (図 A-10) が出てくる。流れ場の計算結果が終了している項目についてはラジオボタンが選択できる状態に表示される。いずれかを選択し「OK」を押して閉じる。選択していないと忠告のダイアログボックスが出る。



図 A-10 トレース計算に使用するデータ選択ダイアログボックス

(b) 指定時間後の移行到達位置

ツールバー上の「到達時間」にチェックを入れずに[計算実行]→[Step.2 トレース計算]→[確率 FEM (またはV解析法)]をクリック, またはチェック無しでツールバー上の「確率 FEM トレース計算実行 (またはV解析法 トレース計算実行)」ボタンを押すと指定時間後の到達位置を計算するダイアログボックス (図 A-11) が出る。



図 A-11 移行到達位置トレース計算の条件入力ダイアログボックス

ダイアログボックスへ始点座標と指定時間, V解析法の場合にはそれに加えて試行回数を入力する。指定時間までの途中経過を見るための途中時間を3つまで設定することができる。

計算実行ダイアログボックスが出るため, 計算を開始して良いならば「計算開始」ボタンを押す。計算開始ダイアログボックスが出るため, [OK]ボタンを押す。結果をファイルへ吐き出して終了する。

(c) 指定面への移行到達時間

ツールバー上の「到達時間」にチェックを入れてから[計算実行]→[Step.2 トレース計算]→[確率 FEM (またはV解析法)]をクリック, またはチェック有りツールバー上の「確率 FEM トレース計算実行 (またはV解析法 トレース計算実行)」ボタンを押すと指定面への移行到達時間を計算するダイアログボックス (図 A-12) が出る。

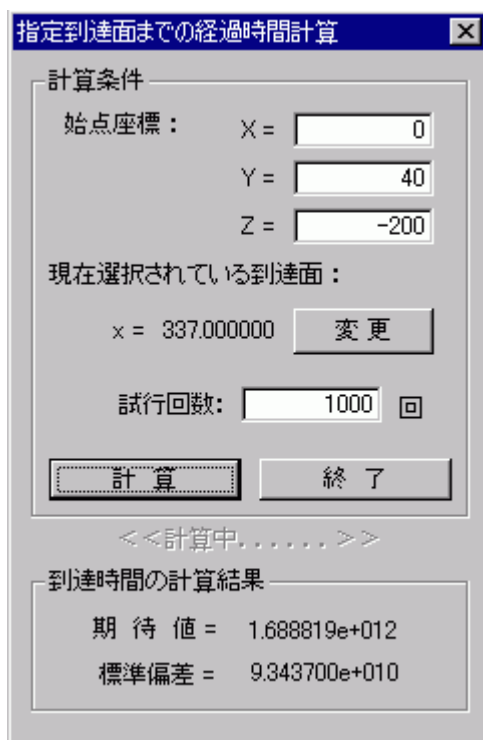


図 A-12 移行到達時間トレース計算の条件入力ダイアログボックス

ダイアログボックスへ始点と指定面, V解析法の場合にはそれに加えて試行回数を入力する。

「計算」ボタンを押すと下の「到達時間の計算結果」の欄に結果が表示される。

「終了」ボタンあるいはウィンドウ右上の「×」を押すと (iv) (a) の状態へ戻る。

到達面を変更したい場合には「変更」ボタンを押す。ダイアログボックス (図 A-13) が出てくるためその中で指定面を入力する。

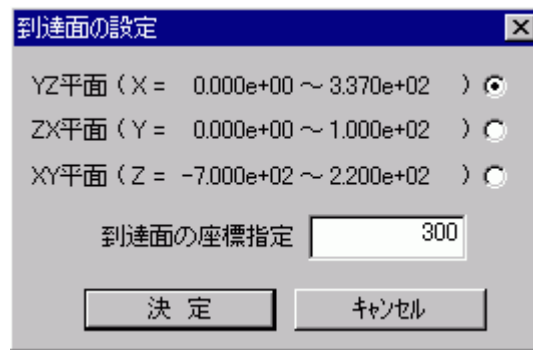


図 A-13 到達面の設定ダイアログボックス

(v) 補足

- [ヘルプ]→[現在の進行状況]では、それぞれの計算が実行済みか否かを確認できる。
- 画面には不飽和特性のグラフが表示されている。ツールバーの「特性番号」を横のスピンボタンで変更し「再描画」のボタンを押すと、その特性番号のグラフに切り替わる。
- [ヘルプ]→[3D 確率 FEM のバージョン情報]でソフトのバージョンを確認できる。

(4) 入力ファイル (input.dat) のフォーマット

計算を行うためにはあらかじめ入力ファイル (input.dat) を作成しておく必要がある。入力ファイルは、層数、不飽和特性曲線、メッシュ構成、境界条件、調査データを入力するために必要なファイルである。以下の (i) ~ (v) にフォーマットを示す。また、図 A-14 に入力ファイル (input.dat) の例を示す。

なお、解析メッシュの節点数、要素数は 99,999 を上限としている。誤ってこれ以上にしてしまった場合は、計算スタート後 input.dat を読み込んでいる最中にエラーで終了する。

(i) タイトルと全体設定

10	20	30	40	45	50
TITLE				層数	Flag
A40				i5	i5

Flag ……地層境界推定、クリギング・コクリギングによる透水係数設定時に透水係数を自然対数に変換する(=0), しない(=1)

(ii) 不飽和特性

5	15	25	35	45	55
E	ϕc	a	Sr	b	Sk
A5	f10.	f10.	f10.	f10.	f10.

E ……最後の行の 1 文字目に"E"を入れる

ϕc =限界毛管水頭

a=土質定数

Sr=残留飽和度,

b=土質定数(3~4)

Sk=土質定数($Sk \leq Sr$)

(iii) メッシュ

	10	20	30	40	50	60	65	70	75
始点 X	始点 Y	始点 Z	終点 X	終点 Y	終点 Z	分割 X	分割 Y	分割 Z	
f10.	f10.	f10.	f10.	f10.	f10.	i5	i5	i5	

$(\text{分割 X}) \times (\text{分割 Y}) \times (\text{分割 Z}) \leq 31,000$

$(\text{分割 X} + 1) \times (\text{分割 Y} + 1) \times (\text{分割 Z} + 1) \leq 35,000$

(iv) 境界条件 (全 5 行入力のこと)

	5	10	15
Kode	KB	B	
i5	i5	i5	

Kode ……1=Xmin 平面, 2=Zmin 平面, 3=Xmax 平面, 4=Ymin 平面, 5=Ymax 平面

KB ……0=流量固定, 1=圧力水頭固定, 2=全水頭固定, -1=分布流量固定

B ……境界条件の設定値

(v) サンプルングデータ

	5	15	25	35	40	50	60
E	X 座標	Y 座標	Z 座標	層番号	サンプル値 1	サンプル値 2	
A5	f10.	f10.	f10.	i5	f10.	f10.	

E ……最後の行の 1 文字目に"E"を入れる

層番号 ……サンプル値 1, 2 が欠落している場合にはマイナス値を入れると読み飛ばす,
そうでないと空欄=0 と判断してしまう

Test pattern for Kakuritsu FEM						2	0		
		0.0	1.0	0.0	3.5	20.0			
		0.0	10.0	20.0	3.5	0.0			
E		0.0	2.0	30.0	3.5	0.0			
	0.0	-50.0	220.0	337.0	50.0	-700.0	33	10	92
1	1	213.9							
2	0	000.0							
3	1	199.0							
4	0	000.0							
5	0	000.0							
		236.80	0.00	197.00	1	4.65E-08			3
		236.80	0.00	196.00	1	4.65E-08			1
		236.80	0.00	195.00	1	4.65E-08			1
		236.80	0.00	194.00	1	4.65E-08			2
		236.80	0.00	193.00	1	4.65E-08			1
		236.80	0.00	192.00	-1	-1			1
		236.80	0.00	191.00	-1	-1			2
		236.80	0.00	190.00	1	2.24E-08			7
		236.80	0.00	189.00	1	2.24E-08			2
		236.80	0.00	188.00	1	2.24E-08			4
(中 略)									
		174.37	316.87	-465.00	2	6.00E-07			0
		174.13	317.39	-466.00	2	6.00E-07			0
E		173.89	317.92	-467.00	2	6.00E-07			0

図 A-14 input.dat 作成例

(5) 計算入力ファイル (xxx_k.dat) のフォーマット

計算入力ファイル (xxx_k.dat : 「xxx」には透水係数の算定方法を表すアルファベットが入る。算術平均→「san」、対数平均→「tai」、クリギング→「kur」、コクリギング→「cok」) は、通常計算スタート直前に自動で作成される。しかし境界条件の詳細な設定や手作業による微修正が必要な場合は、それに応じてこの入力ファイルを書き換え汎用的に使うことができる。

そのときは必ず、[計算実行]→[Step.1 流れ場の計算]→[確率 FEM]をクリックし、「選択してください」ダイアログボックス左上の「あらかじめ作成した dat ファイルを読み込んで計算する」にチェックを入れておくこと。そうでないと自動作成機能が働いて上書きしてしまう。

計算入力ファイルのデータ形式を以下の (i) ~ (x) に示す。

(i) プログラムのサイズを定めるデータ

	4	5	10	15	25	35	45	55	60
SIZE		mnc	mnr	mnm	mnp	mne	mnb	mns	
SIZE		i5	i5	i10	i10	i10	i10	i10	i5

mnc：不飽和浸透特性曲線番号の許容最大値（省略時または 3 以下のときは 20）

mnr：不飽和浸透特性関係点数の許容最大値（ // または 20 以下のときは 30）

mnm：材料番号の許容最大値（ // のときは 99,000）

mnp：節点番号の許容最大値（ // // 99,000）

mne：要素番号の許容最大値（ // // 99,000）

mnb：境界条件節点数の許容最大値（ // // 10,000）

mns：ステップ数の許容最大値（ // // 3）

備考

- ① このデータを入力しないと、mnc～s をすべて省略した場合と同じように内部で自動的に決定する
- ② xxx_k.dat ファイルを自動作成した場合、mnm=要素数、mnp=節点数、mne=要素数、mnb=表面の節点数 が入力される

(ii) 解析制御データ

2		4		6		8		10		12		14		24		30		40		80	
if	ip	ie	ic	it	is	id	ダミー	maxit	GOSMAX	TITLE											
i2	i2	i2	i2	i2	i2	i2	10X	i6	E10.3	A40											

if	入力書式データの有無	<u>=0 : なし</u>	≠0 : あり
ip	指定節点の有無	<u>=0 : なし</u>	≠0 : あり
ie	指定要素の有無	<u>=0 : なし</u>	≠0 : あり
ic	新規か追加か	<u>=0 : 新規計算</u>	(変更不能)
it	定常か非定常か	<u>≠0 : 定常</u>	(変更不能)
is	解法の種類	<u>≠0 : CG 法</u>	(変更不能)
id	時間差分	<u>=0 : 後退差分 ($\xi = 1$)</u>	
		=1 : 中央差分 ($\xi = 1/2$)	=2 : ($\xi = 2/3$)

maxit 最大反復計算回数(0 以下または省略時は 500)

GOSMAX 許容誤差(省略時は 10^{-4})

TITLE 表題 (英・数・特殊文字で 40 文字以内。漢字・カタカナは不可)

備考

- ① 入力がない場合は下線の値が設定される
- ② 指定節点, 指定要素をありにした場合, その点または要素における結果値は***.out ファイルへ吐き出される
- ③ xxx_k.dat ファイルを自動で作成した場合, maxit, GOSMAX には[計算実行]→[解析方法の設定]で設定した収束判定条件の値が入る, また TITLE には indic.dat ファイルで指定したものが入る

(ii) (つづき) 入出力書式データ (if≠0 の時のみ入力)

80

FORM
A80

FORM : 入出力の書式 (Fortran の format 形式), 全部で 10 行

1 行目 指定節点データの入力
 2 行目 " 出力
 3 行目 指定要素データの入力
 4 行目 " 出力
 5 行目 節点データの入力
 6 行目 " 出力
 7 行目 要素データの入力
 8 行目 " 出力
 9 行目 境界条件データの入力
 10 行目 " 出力

備考

- ① これらの入出力書式を設定しないとき (if=0) は, 以下の標準書式が用いられる設定方法については下記を参考に要注意

指定節点データの入力 (A1,4x,10i5)
 " 出力 (1x,A1,4x,10i5)
 指定要素データの入力 (A1,4x,10i5)
 " 出力 (1x,A1,4x,10i5)
 節点データの入力 (A1,4x,6E12.5,3i5)
 " 出力 (1x,A1,4x,i5,4f8.3,i5,4f8.3)
 要素データの入力 (A1,4x,i7,46x,i7)
 " 出力 (1x,A1,4x,11i5)
 境界条件データの入力 (A1,4x,3i5,f10.0,10x,i5)
 " 出力 (1x,A1,4x,3i5,2f10.3,i5)

(iii) 指定節点データ (ip≠0 の時のみ入力)

	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
E		n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
A1	4x	i5	i5	i5	i5	i5	i5	i5	i5	i5	i5	i5

n : 指定節点番号

最後の指定節点データの1文字目に"E"を入れる

備考

- ① 上のカラムは標準書式時のもの
- ② 最大 100 個までで、途中に 0 またはブランクがあってもよい
- ③ 指定節点については全ステップの解析結果を印字する、印字する項目は以下のとおり
 $n > 0$ のときは指定節点ごとの ϕ , h , Q , V_x , V_y , V_z , $|V|$
 $n < 0$ のときは全節点の合計の Q_{in} , Q_{out} , $Q_{in} + Q_{out}$

(iv) 指定要素データ (ie≠0 の時のみ入力)

	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
E		n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
A1	4x	i5	i5	i5	i5	i5	i5	i5	i5	i5	i5	i5

n : 指定要素番号

最後の指定要素データの1文字目に"E"を入れる

備考

- ① 上のカラムは標準書式時のもの
- ② 最大 100 個までで、途中に 0 またはブランクがあってもよい
- ③ 指定要素については全ステップの解析結果を印字する、印字する項目は以下のとおり
 V_x , V_y , V_z , $|V|$

(v) ステージ毎の制御データ

	5	10	15	20	25	30	35	40	45
istage	ioutp	ioute	iuns	imat	imesh	inode	ielem	iboun	
i5	i5	i5	i5	i5	i5	i5	i5	i5	i5

istage : ステージ番号(≥ 1)

ioutp : $\neq 0$: 当ステージ終了時の全節点の解析結果を印字する =0:印字しない

ioute : $\neq 0$: 当ステージ終了時の全節点の解析結果を印字する =0:印字しない

iuns : $\neq 0$: 当ステージには不飽和浸透データあり =0:なし

imat : $\neq 0$: // 物性データあり =0:なし

imesh : $\neq 0$: // メッシュデータあり

=0:なし

<0:別の解析結果からメッシュ読み込み

inode : $\neq 0$: // 節点データあり =0:なし

ielem : $\neq 0$: // 要素データあり =0:なし

iboun : > 0 : // 境界条件データあり (1=圧力水頭, 2=全水頭)

=0:なし <0:境界条件ファイルあり

備考

- ① imesh<0 にできるのは第1ステージ(istage=1) のときのみ
- ② 16~45 カラムを全て0またはblankにすると計算は行なわず、当ステージ終了時の全節点(ioutp $\neq 0$), 全要素(ioute $\neq 0$)の解析結果を印字するだけ。ただし、この時のistage が解析済みのステージ番号でない場合は無視される

(vi) 不飽和浸透特性データ (iuns=1 の時のみ入力)

(a) 不飽和浸透特性 基本データ

	1	5	10	15	20	30	40	50	60	70
E		iban	n svp	nsvk	φ c	a	Sr(%)	b	Sk(%)	
A1	4x	i5	i5	i5	F10.	F10.	F10.	F10.	F10.	F10.

iban : 不飽和浸透特性曲線番号 (1 ≤ iban ≤ mnc)

nsvp : S-|φ| 関係の関係数 (2 ≤ nsvp ≤ mnv)

nsvk : S-Kr 関係の関係数 (2 ≤ nsvk ≤ mnv)

nsvp ≥ 2 かつ nsvk ≥ 2 のとき 21 カラム以降は不要 (入れても無視)

nsvp ≤ 0 かつ nsvk ≤ 0 のとき 下の②と③は不要 (入れるとエラー)

| φ c | < 0.0 のとき → | φ c | = 0.0

a ≤ 0.0 のとき → a = 1.0

Sr < 0.0 , Sr ≥ 100.0 のとき → Sr = 0.0

b < 1.0 のとき → b = 3.5

Sk < 0.0 , Sk ≥ 100.0 のとき → Sk = 0.0

(b) 飽和度 S-サクシオン | φ | 関係 (nsvp 個)

$$0.0 \leq \dots \leq S_{1,j} \leq S_{1,j+1} \leq \dots \leq 100.0 \quad | \phi |_j > | \phi |_{j+1} \geq 0.0$$

	10	20	30	40	50	60	70	80
S _{1,1} (%)	φ ₁	S _{1,2} (%)	φ ₂	S _{1,2} (%)	φ ₃	
F10.	F10.	F10.	F10.	F10.	F10.	F10.	F10.	F10.

S と | φ | のセットを nsvp 個入力する (80 文字目で折り返して次の行へ続ける)

————— 次のページへ続く —————

(c) 飽和度 S - 透水係数比 K_r 関係 (nsvk 個)

$$0.0 \leq \dots \leq S_{2,j} \leq S_{2,j+1} \leq \dots \leq 100.0$$

$$0.0 \leq K_r \leq 1.0$$

10	20	30	40	50	60	70	80
S _{2,1} (%)	K _{r1}	S _{2,2} (%)	K _{r2}	S _{2,3} (%)	K _{r3}	⋯⋯	⋯⋯
F10.	F10.	F10.	F10.	F10.	F10.	F10.	F10.



S と K_r のセットを nsvk 個入力する (80 文字目で折り返して次の行へ続ける)

1 つの特性曲線について①～③をこの順に連ねて 1 組のデータとする, ただし nsvp ≤ 0 または nsvk ≤ 0 のときは①だけ

最後の不飽和浸透特性データの①のデータの 1 文字目に"E"を入れる

(vii) 材料データ(imat≠0 の時のみ入力)

1	3	10	20	30	40	50	60	65	70
E		材料番号	飽和透水 係数 kx	飽和透水 係数 ky	飽和透水 係数 kz	透水係数の 変動係数	ダミー	飽和特 性番号	ダミー
A1	4x	i7	E10.3	E10.3	E10.3	E10.3	10x	i5	i5

最後の材料データの1文字目に"E"を入れる

(viii) 節点データ(inode≠0 の時のみ入力)

	1	5	17	29	41	53	65	77	82	87	92
E		1点目 X座標	1点目 Y座標	1点目 Z座標	2点目 X座標	2点目 Y座標	2点目 Z座標	分割数 NX	分割数 NY	分割数 NZ	
A1	4x	E12.5	E12.5	E12.5	E12.5	E12.5	E12.5	i5	i5	i5	

必ず1文字目に"E"を入れる

備考

- ① 直方体領域の対角になる2点の座標と、X,Y,Zそれぞれの分割数を入力

(ix) 要素データ (ielem≠0 のとき入力)

1	5	12	58	65
E		element No.	ダミー	material No.
A1	4x	i7	46x	i7

最後の要素データの1文字目に"E"を入れる

備考

- ① 同一ステージ内で同一要素番号のデータを何度入力してもよいが最後のみ有効，前ステージに比べて同番号なら修正され，新番号なら追加される
- ② 要素削除に伴う節点・境界条件の消失は自動的に処理される
- ③ 既存の要素を削除する場合は要素番号に負号を付ける，そのとき他のカラムデータは不要

(x) 境界条件データ (iboun<0 のときのみ入力)

80

境界条件ファイル
A80

備考

- ① 境界条件ファイルの内容は次ページ・次々ページと同じ

(x) (つづき) 境界条件データ (iboun>0 のとき入力) $kb \geq 0, n1 \neq 0$

	1	5	10	15	20	30	40	45
E		n1	n2	kb	B			kan
A1	4x	i5	i5	i5	F10.	10x		i5

$n2=0$ のとき 節点 n1 だけ (n2 を省略したときも同じ)

$n1 < n2$ のとき 節点 n1, n1+kan, n1+2kan, ..., n2

kan を省略すると kan=1, すなわち, n1~n2 の全ての節点

(例) $n1=5, n2=34, kan=3$ としたとき 5,8,11,14, ..., 29,32 番の節点が対象となる
最後の境界条件データの1文字目に"E"を入れる

	kb	B
流量固定	0	t 時の固定流量
水頭固定	1	t 時の固定水頭
露出面	2	ダミー
水面固定+露出面	3	t 時の水面水頭

備考

- ① 上のカラムは標準書式時のもの
- ② $kb=1$ または 3 のとき, B の入力水頭は圧力水頭 (iboun=1) または全水頭 (iboun=2)
- ③ ステージ内で同一節点について何度定義してもよいが最後のみ有効, 前ステージに比べて同番号なら修正され, 新番号なら追加される
- ④ B の値は次ステージに持ち越される

(x) (つづき) 境界条件データ (iboun>0 のとき入力) $kb \geq 0$, $n1=0$, $n2=0$

	1	5	10	15	20	30	40	45
E			n1	n2	kb	B		kan
A1	4x	i5	i5	i5	F10.	10x		i5

	10	20	30	40	50	60	70
	囲いこみ 1点目 X1	囲いこみ 1点目 Y1	囲いこみ 1点目 Z1	囲いこみ 2点目 X2	囲いこみ 2点目 Y2	囲いこみ 2点目 Z2	
10x	F10.	F10.	F10.	F10.	F10.	F10.	F10.

$n1=0$ $n2=0$ のとき 2 行目が有効, これを行うことで囲った範囲に含まれる節点を同一の境界条件で一括指定できる, kb , B については前ページと同じ
最後の境界条件データの 1 文字目に"E"を入れる

(x) (つづき) 境界条件データ (iboun<0 のとき入力) kb<0

	5	10	15	20	30
E		n1	n2	kb	B
A1	4x	i5	i5	i5	F10.

n1: 要素番号

n2: 面番号 (1 ≤ n2 ≤ 6 図 A-15 参照)

最後の境界条件データの1文字目に"E"を入れる

	kb	B
降雨面	-2	t時の降雨量

備考

- ① 上のカラムは標準書式時のもの
- ② ステージ内で同一要素面について何度定義してもよいが、降雨量や流量はそれらの合計になる
- ③ Bの値は次ステージに持ち越される

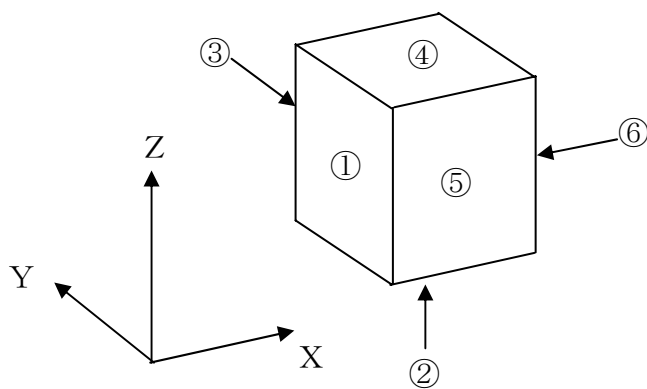


図 A-15 面番号の定義

(6) 入出力ファイルの内容

本プログラムでユーザーが必要となる可能性がある主要な入出力ファイルについて以下に列挙する。特に「バイナリ」と註釈の無いものはすべてアスキー型のデータ。

(i) input.dat があるフォルダ内

input.dat 入力ファイル

dread.out input.dat の読み込み確認, 出力ファイル

(ii) ¥dat フォルダ内

indic.dat インディケータクリギングにより地層境界を推定する際のシル, レンジ, ナゲット効果等のパラメータ値, 入出力ファイル

krigg.dat クリギングにより透水係数を推定する際のシル, レンジ, ナゲット効果等のパラメータ値, 入出力ファイル

cokri.dat コクリギングにより透水係数を推定する際のシル, レンジ, ナゲット効果等のパラメータ値, 入出力ファイル

fuhowa.dat 地層への不飽和特性の割り当てデータ, 入出力ファイル

kaiset.dat 計算時の収束条件データ, 入出力ファイル

indic.out 地層境界を推定する際のインディケータクリギング, 出力ファイル

san.dat 算術平均による透水係数, 出力ファイル

tai.dat 自然対数平均による透水係数, 出力ファイル

kri.dat クリギングによる透水係数, 出力ファイル

cok.dat コクリギングによる透水係数, 出力ファイル

(iii) ¥kek フォルダ内

(a) 流れ場の計算用

xxx_k.dat 計算入力ファイル

xxx_k.out 計算出力ファイル

xxx_k.kek 流れ場の計算結果, 出力ファイル (バイナリ)

xxx_k.fld, xxx_k.fl2, xxx_k.fl3 MicroAVS フォーマット, 出力ファイル

(b) トレース計算用 (指定時間後の移行到達位置)

xxx_k.ou2 確率 FEM, 計算結果データ, 出力ファイル

xxx_l.fld, xxx_l.fl2, 確率 FEM, MicroAVS フォーマット, 出力ファイル

xxx_h.ou2 V解析法, 計算結果データ, 出力ファイル

xxx_h.fld, xxx_h.fl2, V解析法, MicroAVS フォーマット, 出力ファイル

(c) トレース計算用 (指定面への移行到達時間)

xxx_k.tim 確率 FEM, 計算結果データ, 出力ファイル

xxx_h.tim V解析法, 計算結果データ, 出力ファイル

ここで「xxx」には透水計数の算定方法を表す以下のアルファベット 3 文字が入る

san ……算術平均

tai ……対数平均

kri ……クリギング

cok ……コクリギング