JNC TJ8440 2003-001

原位置トレーサー試験の逆解析による核種移行特性の不確実性評価（II）

（核燃料サイクル開発機構　契約業務報告書）

2003 年 1 月

大成建設株式会社

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：029-282-7980
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)
2003

JNC TJ8440 2003-001
2003 年 1 月

原位置トレーサー試験の逆解析による
核種移行特性の不確実性評価（II）

（核燃料サイクル開発機構　契約業務報告書）

畑明仁*，井尻裕二*，大石雅也*，小野誠*，杉原豊*

要　　旨

高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価においては，モデルやデータの不確実性を評価することが重要な課題の 1 つとなっている。特に，天然バリア中核種移行評価においては原位置で実施された様々な調査結果に基づきモデルやデータが設定される。しかしながら，天然バリアは本来不均質であるにもかかわらず調査数量は限られ，調査結果には多くの不確実性を伴う。したがって，天然バリア評価において，原位置調査結果から推定されるモデルやデータの不確実性を定量的に評価する手法を確立する必要がある。

このような観点から，一昨年度はツール開発の一環として，核種移行解析コード LTG を対象とした逆解析コードの開発を行い，続けて昨年度は SKB の ASPO HARD ROCK LABORATORY（HRL）で行われた TRUE 試験結果に対し開発プログラムを適用し，逆解析の同定精度やデータ及びモデルの不確実性の定量的評価に関する検討を行った。

本年度は，逆解析コードの適用実績を広げ，その信頼性を向上させるために，昨年度の SKB ASPO HRL とは異なる NAGRA の Grimsel Test Site で行われた MI 試験結果に対し，昨年と同様な手順で逆解析を行い同様の検討を行った。その結果，昨年の TRUE に対する結果と同様に，比較的容易に精度良くパラメータが同定できること，観測値と計算値の誤差に起因する不確実性は，試験条件やモデルの設定条件に起因するパラメータの不確実性に比べて極めて小さいこと、モデルの良否を選択する基準として情報量基準を用いれば，もっとも同定精度の高いモデルを選択できることが明らかとなった。

――

本報告書は，大成建設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。

機構担当部課室：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
*大成建設株式会社

JNC TJ8440 2003-001
January, 2003

The evaluation of the uncertainty of the solute transport with the inversion analysis of in-situ tracer tests

(Document Prepared by Other Institute, Based on the Contract)

Akihito HATA*, Yuji IJIRI*, Masaya OISHI *, Makoto ONO*, Yutaka SUGIHARA*

Abstract

One of key issues in assessing a safety of a deep geological disposal system for high-level nuclear waste is to evaluate the effects of model uncertainty and data uncertainty on the results of the radionuclide migration analysis. Therefore, it is crucial to develop a tool which evaluate appropriateness of a model and the reliability of data.

From this point of view, authors developed the inversion code of LTG, which solves radionuclide migration in fractured media owned by JNC, and have applied to the inverse modeling of the in-situ radionuclide transport experiments, SKB TRUE in the last year's work.

This year, to improve the reliability and to broaden the application experience of the inversion code, back-analysis of the in-situ radionuclide tracer tests conducted at MI shear zone, Grimsel Test Site by NAGRA in different conditions from those in which SKB TRUE was carried out. The analysis results showed that it was relatively easy to identify optimum parameters with the use of the inversion code, the uncertainty originated from the error between observed values and the calculated appeared to be much smaller than the uncertainty caused by the difference of models and the information criteria was really useful in selecting the best model, as were in the case of TRUE carried out last year.

This work was performed by Taisei Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Agency.

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

目　　次

1. はじめに 1
2. 核種移行解析コード LTG マニュアル 2
2.1 ファイル構成 2
2.2 入力パラメータ 3
2.3 入力ファイル 4
2.3.1 メインファイル ltg.dat 4
2.3.2 メッシュデータファイル grid.in 7
2.3.3 メインファイル pipevel.in 8
2.3.4 亀裂表面収着データファイル retard.in 8
2.3.5 拡散領域データファイル pipeimm.in 9
2.3.6 拡散領域特性データファイル immdata.in 9
2.4 出力ファイル 10
2.4.1 メインファイル ltg.out 10
2.4.2 時系列ファイル###.sum 10
2.4.3 時系列ファイル###.win 10
3. 逆解析プログラム LTGINV マニュアル 11
3.1 ファイル構成 11
3.2 プログラムの実行 13
3.2.1 逆解析プログラムの実行 13
3.2.2 描画プログラムの実行 13
3.3 入力ファイル 14
3.3.1 逆解析コントロールデータファイル back01.dat 14
3.4 出力ファイル 18
3.4.1 残差情報ファイル back01.log 18
3.4.2 残差情報ファイル back01.csv 19
3.4.3 結果出力ファイル back01.p## 20
3.4.4 計算値出力ファイル back01.r## 22
3.5 描画プログラム用入力ファイル 23
3.5.1 目的関数コンター用データ作成ファイル back01.1 23
3.5.2 収束履歴の描画用コントロールデータファイル back01.2 24
4. the Nagra-JNC Radionuclide Migration Experiment(MI) 25
4.1 Grimsel Test Site（GTS） 25
4.2 トレーサー試験対象領域の地質構造および水理地質構造 29
4.2.1 領域条件 29
4.2.2 MI せん断帯の特徴 29
4.2.3 鉱物組成 31
4.2.4 空隙構成 31

4.2.5 透水経路 31
4.3 トレーサー試験対象領域の化学的条件 33
4.4 トレーサー試験対象領域の水理場 34
4.5 使用トレーサーと収着特性に関わる調査 34
4.5.1 室内試験 34
4.5.2 原位置における地下水化学平衡試験 35
4.5.3 原位置における分配係数の推定 35
5. Radionuclide Migration Experiment（MI）におけるトレーサー試験 36
5.1 トレーサー試験の概要 36
5.2 検討対象とするトレーサー試験結果 40
6. 逆解析結果 43
6.1 逆解析の実施方針 43
6.1.1 移流及び亀裂内分散 43
6.1.2 マトリックス内の拡散 43
6.1.3 核種の収着 43
6.1.4 複数経路間の流量配分 44
6.1.5 入力パラメータの設定 44
6.1.6 逆解析ケースと入力パラメータ 48
6.2 逆解析結果 49
6.2.1 STEP1A の結果 49
6.2.2 STEP1B の結果 56
6.2.3 STEP2A の結果 60
6.2.4 STEP2B の結果 65
6.2.5 STEP3 の結果 69
6.3 同定パラメータとモデルの不確実性に関する検討 74
6.3.1 同定パラメータと試験条件の関係 74
6.3.2 同定パラメータの不確実性 78
6.3.3 モデルの不確実性 85
6.3.4 同定精度と逆解析収束状況の関係 87
7. おわりに 88

図目次

図 2-1　核種移行解析コード LTG 入力ファイル構成 ········ 2
図 2-2　入力パラメータ模式図 ········ 3
図 3-1　逆解析フローとファイル構成（LTG.DAT ファイルを更新する場合） ········ 11
図 3-2　描画用ファイル構成 ········ 12
図 3-3　測定値および計算値ファイルからのデータ読込み ········ 16
図 4-1　Grimsel 位置図 ········ 25
図 4-2　Grimsel Test Site 周辺鳥瞰図 ········ 26
図 4-3　Grimsel Test Site 周辺の透水構造概略図 ········ 26
図 4-4　Grimsel Test Site 内のトレーサー試験位置 ········ 27
図 4-5　Grimsel Test Site 平面図 ········ 28
図 4-6　MI せん断帯近接写真（VT420 周辺，坑壁東面） ········ 30
図 4-7　VT420 における MI せん断帯のひずみ分布 ········ 30
図 4-8　せん断帯サンプル写真（幅 6cm，変形した花崗閃緑岩と雲母質マイロナイト） ········ 32
図 5-1　MI せん断帯上でのボーリング孔位置関係 ········ 37
図 5-2　Uranine の破過曲線 ········ 41
図 5-3　収着性核種の破過曲線（Sr，Cs，移行経路長=4.9m） ········ 42
図 6-1　流れ場の理論解（BETA：ダイポール比） ········ 45
図 6-2　MI せん断帯の透水経路に関する概念モデル ········ 47
図 6-3　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP1A，#62） ········ 50
図 6-4　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP1A，#61） ········ 50
図 6-5　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP1A，#73） ········ 51
図 6-6　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP1A，#47） ········ 53
図 6-7　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP1A，#51） ········ 53
図 6-8　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP1A，#78） ········ 55
図 6-9　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP1A，#76） ········ 55
図 6-10　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP1B，#90-2，Sr-85 と同時注入） ········ 57
図 6-11　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP1B，#90-1，Cs-137 と同時注入） ········ 57
図 6-12　Sr-85 の破過曲線と逆解析結果（STEP1B，#90-2） ········ 59
図 6-13　Cs-137 の破過曲線と逆解析結果（STEP1B，#90-1） ········ 59
図 6-14　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP2A，#47） ········ 62
図 6-15　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP2A，#51） ········ 62
図 6-16　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP2A，#61） ········ 64
図 6-17　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP2A，#76） ········ 64
図 6-18　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP2B，#90-2，Sr-85 と同時注入） ········ 66
図 6-19　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP2B，#90-1，Cs-137 と同時注入） ········ 66
図 6-20　Sr-85 の破過曲線と逆解析結果（STEP2B，#90-2） ········ 68
図 6-21　Cs-137 の破過曲線と逆解析結果（STEP2B，#90-1） ········ 68
図 6-22　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP3，#47） ········ 71
図 6-23　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP3，#51） ········ 71
図 6-24　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP3，#61） ········ 73
図 6-25　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP3，#76） ········ 73
図 6-26　流速同定値と孔間距離の関係 ········ 74
図 6-27　縦方向分散長同定値/孔間距離と孔間距離の関係 ········ 74
図 6-28　マトリックス拡散寄与面積率と孔間距離の関係 ········ 75
図 6-29　アスペクト比と孔間距離の関係 ········ 75
図 6-30　流速同定値とダイポール比の関係 ········ 76
図 6-31　縦方向分散長同定値とダイポール比の関係 ········ 76
図 6-32　マトリックス拡散寄与面積率とダイポール比の関係 ········ 77
図 6-33　アスペクト比とダイポール比の関係 ········ 77
図 6-34　流速の同定値と 95%信頼区間 ········ 79
図 6-35　縦方向分散長/孔間距離の同定値と 95%信頼区間 ········ 79

図 6-36　マトリックス拡散寄与面積率の同定値と 95%信頼区間 ･･････････････････････････････････ 79
図 6-37　流速の同定値と 95%信頼区間（#47） ･･ 80
図 6-38　分散長/孔間距離の同定値と 95%信頼区間（#47） ･･････････････････････････････････ 80
図 6-39　マトリックス拡散寄与面積率の同定値と 95%信頼区間（#47） ･･････････････････････ 80
図 6-40　流速の同定値と 95%信頼区間（#51） ･･ 81
図 6-41　縦方向分散長/孔間距離の同定値と 95%信頼区間（#51） ･･････････････････････････ 81
図 6-42　マトリックス拡散寄与面積率の同定値と 95%信頼区間（#51） ･･････････････････････ 81
図 6-43　流速の同定値と 95%信頼区間（#61） ･･ 82
図 6-44　縦方向分散長/孔間距離の同定値と 95%信頼区間（#61） ･･････････････････････････ 82
図 6-45　マトリックス拡散寄与面積率の同定値と 95%信頼区間（#61） ･･････････････････････ 82
図 6-46　流速の同定値と 95%信頼区間（#76） ･･ 83
図 6-47　縦方向分散長/孔間距離の同定値と 95%信頼区間（#76） ･･････････････････････････ 83
図 6-48　マトリックス拡散寄与面積率の同定値と 95%信頼区間（#76） ･･････････････････････ 83
図 6-49　情報量基準と残差二乗和（#47） ･･ 85
図 6-50　情報量基準と残差二乗和（#51） ･･ 85
図 6-51　情報量基準と残差二乗和（#61） ･･ 86
図 6-52　情報量基準と残差二乗和（#76） ･･ 86
図 6-53　残差二乗和と収束計算回数の関係 ･･ 87

表目次

表 2-1　核種移行解析コード LTG 入力ファイル一覧 ・・・ 2
表 2-2　入力パラメーター一覧 ・・・ 3
表 2-3　ltg.dat ファイル ・・・ 4
表 2-4　ltg.dat ファイルの変数一覧 ・・・ 5
表 2-5　grid.in ファイル ・・・ 7
表 2-6　grid.in ファイルの変数一覧 ・・・ 7
表 2-7　pipevel.in ファイル ・・・ 8
表 2-8　pipevel.in ファイルの変数一覧 ・・・ 8
表 2-9　retard.in ファイル ・・・ 8
表 2-10　retard.in ファイルの変数一覧 ・・・ 8
表 2-11　pipeimm.in ファイル ・・・ 9
表 2-12　pipeimm.in ファイルの変数一覧 ・・・ 9
表 2-13　immdata.in ファイル ・・・ 9
表 2-14　immdata.in ファイルの変数一覧 ・・・ 9
表 2-15　ltg.out ファイル ・・・ 10
表 2-16　sum ファイル ・・・ 10
表 2-17　win ファイル ・・・ 10
表 3-1　逆解析ファイル一覧 ・・・ 12
表 3-2　back01.dat ファイル ・・・ 14
表 3-3　back01.dat ファイルの変数一覧 ・・・ 14
表 3-4　back01.ltg ファイル ・・・ 17
表 3-5　back01.ltg ファイルの変数一覧 ・・・ 17
表 3-6　back01.log ファイル ・・・ 18
表 3-7　back01.log ファイルの変数一覧 ・・・ 18
表 3-8　back01.csv ファイル ・・・ 19
表 3-9　back01.csv ファイルの変数一覧 ・・・ 19
表 3-10　back01.p##ファイル ・・・ 20
表 3-11　back01.p##ファイルの変数一覧 ・・・ 21
表 3-12　back01.r##ファイル ・・・ 22
表 3-13　back01.r##ファイルの変数一覧 ・・・ 22
表 3-14　back01.1 ファイル ・・・ 23
表 3-15　back01.1 ファイルの変数一覧 ・・・ 23
表 3-16　back01.2 ファイル ・・・ 24
表 3-17　back01.2 ファイルの変数一覧 ・・・ 24
表 4-1　MI せん断帯中の地下水の水質（AU96） ・・・ 33
表 4-2　種々の方法により求めた放射性核種の分配係数 ・・・ 35
表 5-1（a）（b）　トレーサー試験の試験条件 ・・・ 38
表 5-2　検討対象とするトレーサー試験 ・・・ 40
表 5-3　使用したトレーサーと崩壊特性 ・・・ 40
表 5-4　各試験ケースにおけるピーク到達時間 ・・・ 42
表 6-1　理論解より仮定した流れ場の幅 ・・・ 44
表 6-2　入力パラメーター一覧 ・・・ 48
表 6-3　逆解析ケース一覧表 ・・・ 48
表 6-4　試験条件（孔間距離=1.7m） ・・・ 49
表 6-5　同定パラメータの初期値と最適値（孔間距離=1.7m） ・・・ 49
表 6-6　試験条件（孔間距離=4.9m） ・・・ 52
表 6-7　同定パラメータの初期値と最適値（孔間距離=4.9m） ・・・ 52
表 6-8　試験条件（孔間距離=14.0m） ・・・ 54
表 6-9　同定パラメータの初期値と最適値（孔間距離=14.0m） ・・・ 54
表 6-10　試験ケース#90 の試験条件 ・・・ 56

表 6-11　同定パラメータの初期値と最適値（試験ケース#90） ･････････････････････････････････ 56
表 6-12　同定パラメータの初期値と最適値（試験ケース#90） ･････････････････････････････････ 58
表 6-13　断面積同定時に用いた流速，分散長，湿潤辺長（STEP2A） ･････････････････････････ 60
表 6-14　同定パラメータの初期値と最適値（STEP2A，#47，Uranine） ･････････････････････ 61
表 6-15　同定パラメータの初期値と最適値（STEP2A，#51，Uranine） ･････････････････････ 61
表 6-16　同定パラメータの初期値と最適値（STEP2A，#61，Uranine） ･････････････････････ 63
表 6-17　同定パラメータの初期値と最適値（STEP2A，#76，Uranine） ･････････････････････ 63
表 6-18　試験ケース#90 の試験条件（再掲） ･･･ 65
表 6-19　同定パラメータの初期値と最適値（試験ケース#90-2） ･････････････････････････････ 65
表 6-20　同定パラメータの初期値と最適値（試験ケース#90-1） ･････････････････････････････ 65
表 6-21　同定パラメータの初期値と最適値（試験ケース#90） ･････････････････････････････････ 67
表 6-22　断面積同定時に用いた流速，分散長，湿潤辺長（STEP3） ･････････････････････････ 69
表 6-23　同定パラメータの初期値と最適値（STEP3，#47，Uranine） ･････････････････････ 70
表 6-24　同定パラメータの初期値と最適値（STEP3，#51，Uranine） ･････････････････････ 70
表 6-25　同定パラメータの初期値と最適値（STEP3，#61，Uranine） ･････････････････････ 72
表 6-26　同定パラメータの初期値と最適値（STEP3，#76，Uranine） ･････････････････････ 72
表 6-27　逆解析対象ケースの試験条件 ･･･ 78
表 6-28　遅延係数の同定値と 95%信頼区間 ･･･ 84
表 6-29　分配係数の同定値と 95%信頼区間 ･･･ 84
表 6-30　種々の方法により求めた放射性核種の分配係数（表 4-2 再掲） ･････････････････････ 84

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価においては，モデルやデータの不確実性を評価することが重要な課題の 1 つとなっている。特に，天然バリア中核種移行評価においては原位置で実施された様々な調査結果に基づきモデルやデータが設定される。しかしながら，天然バリアは本来不均質であるにもかかわらず調査数量は限られ，調査結果には多くの不確実性を伴う。したがって，天然バリア評価において，原位置調査結果から推定されるモデルやデータの不確実性を定量的に評価する手法を確立する必要がある。

このような観点から，一昨年度はツール開発の一環として，核種移行解析コード LTG に対して逆解析によりパラメータが同定できるとともに，そのモデルや同定したパラメータの不確実性を定量的に評価することが可能なコードを作成した。また，昨年度には，開発したコードを用いて SKB ÄSPÖ HRL で実施された TRUE 試験結果に対してパラメータ同定およびパラメータとモデルの不確実性に関する検討を行い，開発ツールの有効性を確認するとともに，パラメータとモデルの不確実性の定量的表現法とその意義について考察を行った。

今年度は，昨年度実施したパラメータ同定およびパラメータやモデルの不確実性の検討手法の適用実績を広げ，その有効性に関する信頼度を向上させるために，昨年度とは異なる原位置試験結果を用いて昨年と同様の検討を行うものとする。

本報告書の構成は，2〜3 章がプログラムの使用法に関する章であり，4〜7 章がトレーサー試験の逆解析に関する章となっている。

2 章，3 章においては LTG と逆解析プログラムの具体的な使用方法を示す。この内容は，昨年度報告書内容に本年度のプログラム改良点などを加筆修正したものである。4 章，5 章においては今回対象となったトレーサー試験とその実施されたサイトに関する要点の整理を行っている。また，6 章では逆解析の結果および，その結果の評価について述べ，最後に 7 章で全体の総括を行っている。

2. 核種移行解析コード LTG マニュアル

2.1 ファイル構成

核種移行解析コード LTG の入力ファイルの構成と一覧を図 2-1および表 2-1に示す。

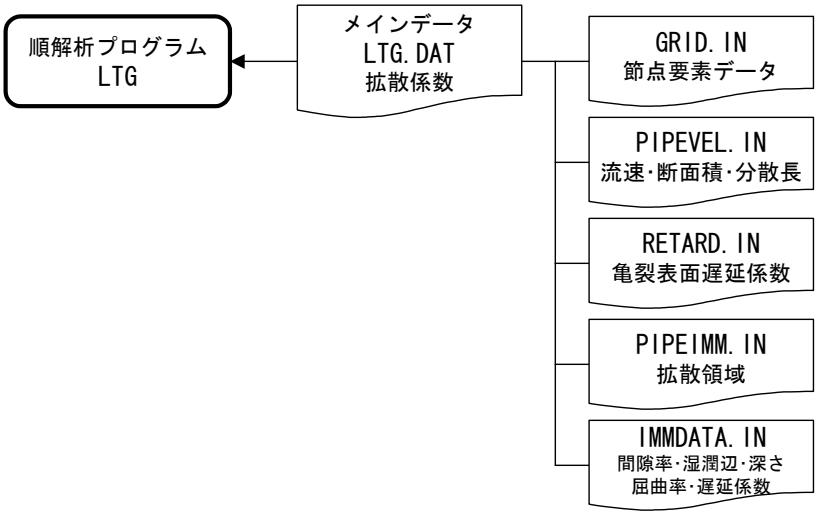


図 2-1 核種移行解析コード LTG 入力ファイル構成

表 2-1 核種移行解析コード LTG 入力ファイル一覧

ファイル名	データ内容	パラメータ
ltg.dat	メインファイル	拡散係数
grid.in	メッシュデータ	節点，要素
pipevel.in	パイプ特性データ	流速，断面積，分散長
retard.in	亀裂表面収着データ	遅延係数［核種毎］
pipeimm.in	拡散領域データ	拡散領域数，拡散領域番号
immdata.in	拡散領域特性データ	間隙率，湿潤辺長，マトリクス拡散深さ，屈曲率，遅延係数［核種毎］

2.2　入力パラメータ

解析に必要なパラメータを図 2-2と表 2-2に示す。

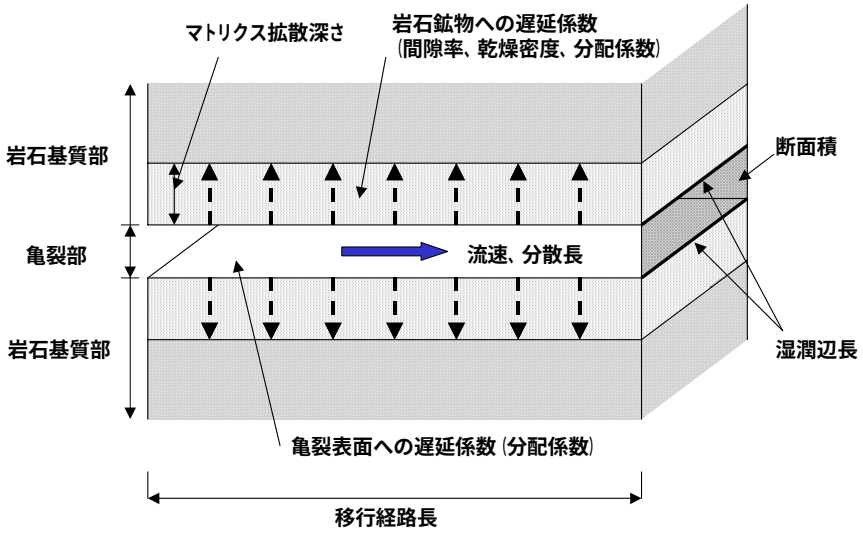


図 2-2　入力パラメータ模式図

表 2-2　入力パラメーター覧

パラメータ	備考
移行経路長［m］	移行経路の長さ
流速［m/y］	亀裂内実流速：$q(l)$
断面積［m²］ (=亀裂幅×開口幅)	フラックス（mol/y；Cauchy 境界）から濃度への換算流量（＝流速×断面積）に用いられる。（$A(l)=W(l)\times 2b(l)$）
縦方向分散長［m］	亀裂内分散長：α_L $\Big\}\ D=\alpha_L q(l)+D_0$
拡散係数［m²/y］	自由水中の拡散係数：D_0
屈曲率［-］	1.0 に固定
有効間隙率［-］	マトリクス拡散に寄与する間隙率
湿潤辺長［m］	亀裂幅×2 倍： $L(\ell)=2f\cdot\dfrac{A(\ell)}{2b(\ell)}$ f はマトリクス拡散寄与面積率[-]，$2b(l)$は亀裂開口幅[m]
ﾏﾄﾘｸｽ拡散深さ［m］	マトリクス拡散に寄与する岩石基質の割れ目表面からの垂直距離
遅延係数［-］ （亀裂表面）	$R_n(\ell)=1+\dfrac{Ka_n}{b(\ell)}$ Ka_n は亀裂表面への分配係数[m]，通常は保守的に無視して 1.0
遅延係数［-］ （岩石基質）	$R_n^m=1+\dfrac{\rho^m Kd_n}{\theta^m}$ ρ^m は岩石基質の乾燥密度[kg/m³]，Kd_n は岩石鉱物への分配係数[m³/kg]

2.3　入力ファイル

2.3.1　メインファイル ltg.dat

メインファイル ltg.dat を表 2-3に，変数一覧を表 2-4に示す。

表 2-3　ltg.dat ファイル

```
grid10Cs  !6 character file root
!
!mxnn maxne maxspecies maxpipes maxzonespp
!maxbcs maxipnodes maxbctimes maxopnodes maxoptimes mxwindows phist
399 380 1 380 1 1 19 2 399 61 0 0

PAWORKS-LTG Simulation for Cs

.TRUE.     !logprt
.FALSE.    !multifile
.TRUE.     !Cauchy=.true. Dirichlet=.false.
.FALSE.    !time output to single file (multiflux)
2          !peclet_LTG (PAW:5000)

1          !nspecies
0, 4.730000e-03, 3.010000e-07           !npa, diffusion, lamda (1)
380
.TRUE.     !immob_zone_from_file
.TRUE.     !pipe_vel_from_file
.TRUE.     !retard_from_file
380
.TRUE.     !immob_zone_from_file
.TRUE.     !grid_from_file
1          !number of bec nodes (for species 1)
19          !nBCs (for species 1)
21, 42, 63, 84, 105, 126, 147, 168, 189, 210,
231, 252, 273, 294, 315, 336, 357, 378, 399,
2           !n_BC_times (for species 1)
1.000000e+00, 1.000000e+00     !BC_time, Bval
1.000000e+07, 1.000000e+00     !BC_time, Bval
399        !n_output_nodes
       1       2       3       4       5       6       7       8       9      10
      11      12      13      14      15      16      17      18      19      20
      21      22      23      24      25      26      27      28      29      30
                                        ・
                                        ・
     391     392     393     394     395     396     397     398     399
61         !n_output_times
1.000000e+01
1.258900e+01
       ・
       ・
1.000000e+07
0                    !nwindows
1.000000e-12         !deltol
500                  !nitmax
5                    !nterm
1.000000e-10         !relerr
5.000000e+00         !tmax_fac
```

表 2-4　ltg.dat ファイルの変数一覧

	変数名	説　明
1	ltgtst	LTG アウトプットのファイル名に使う 6 文字
2	comments	“!”以下はコメント文となる
3	mxnn	節点数
	maxne	要素数
	maxspecies	核種数
	maxpipes	パイプ種類数
	maxzonespp	パイプあたりの拡散領域（immobile zones）数
	maxbcs	境界条件数
	maxipnodes	境界条件節点数
	maxbctimes	境界条件時間数
	maxopnodes	出力節点数
	maxoptimes	出力時間数
	mxwindows	最大出力 windows 数
	phist	p-space ファイルの取扱い
	=0	全シミュレーションを実施して，逆変換ファイルは消去
	=1	逆変換を実施し，p-space ファイルを保存
4	Test Case for LTG	出力ファイルのタイトル
5	logprt	出力形式　　：【.true.】詳細出力，【.false.】概要出力
6	multifile	エコー出力先：【.true.】別ファイル【.false.】ltgtst.out ファイル
7	Cauchy	ソース境界条件：【.true.】フラックス，【.false.】濃度
8	Multiflux	節点濃度出力：【.true.】時間毎別ﾌｧｲﾙ（*.tim）,【.false.】全時間 1 ﾌｧｲﾙ
9	peclet_LTG	数値収束改善のためのペクレ数（＝流速×パイプ長／分散係数）（この値よりも大きい場合はメッシュを分割）
10	nspecies	核種数
	For each species *i*	核種 *i* の親核種の数
11	npa	核種 *i* の自由水中の拡散係数
	diffusion	核種 *i* の崩壊定数
	lamda	
	end species loop	パイプ種類の数（LTG.DAT と pipeimm.in の値と同じ）
12	nptypes	拡散領域データ：【.true.】pipeimm.in，【.false.】LTG.DAT
13	pipe_imm_from_file	流速，断面積，分散長データ：【.true.】pipevel.in,【.false.】LTG.DAT
14	pipe_vel_from_file	亀裂表面の遅延：【.true.】retard.in，【.false.】LTG.DAT
15	retard_from_file	拡散領域の種類数（LTG.DAT と immdata.in の値と同じ）
16	niztypes	

	if niztypes>0	拡散領域データ：【.true.】immdata.in,　【.false.】LTG.DAT
	immob_zone_from_file	
	end niztypes if loop	拡散領域データ：【.true.】grid.in,　【.false.】LTG.DAT
17	grid_from_file	
	loop *i* : 1 to # of species	核種 *i* の境界条件数
18	number bc	
	loop *k* : 1 to number bc	核種 *i*，境界条件 *k* の節点数
19	nBCnodes	境界条件節点番号（10 節点／行）
20	bc nodes	核種 *i*，境界条件 *k* のソース形状を決めるための点数
21	n_BC_times	
	loop *m* : 1 to n_BC_times	時間，ﾌﾗｯｸｽ（mol/y；Cauchy）または濃度（Direchlet）
22	time value	
	end *m* loop	
	end *k* loop	
	end *i* loop	外部へのﾌﾗｯｸｽを計算する節点数
23	n_output_nodes	節点番号（10 節点／行）
24	output_nodes	出力時間数
25	n_output_times	出力時間
26	output_times	ﾌﾗｯｸｽを計算する window の数
27	nwindows	
	loop *i* : 1 to nwindows	window の 4 隅の座標
28	“window”	
	next “window”	ソルバーの許容誤差（10^{-12}）
29	deltol	ソルバーの最大繰返し回数（500）
30	nitmax	de Hoog 逆変換（2×nterm+1）の p-space 値の数（推奨値 5 以上）
31	nterm	逆変換の相対誤差で FE 解の期待精度に等しく設定，値が小さすぎると
32	relerr	解の精度が悪くなる（10^{-10} < relerr < 10^{-7}）
		時間領域の逆変換の時間の乗数（5）
33	tmax_fac	

2.3.2　メッシュデータファイル grid.in

メッシュデータファイル grid.in を表 2-5に，変数一覧を表 2-6に示す。

表 2-5　grid.in ファイル

```
399, 380  !nn, ne
-9.000000e+01, -1.000000e+01, 0.000000e+00        !x, y, z, node 1, pipe 380 h168
-9.000000e+01, -3.934030e-06, 0.000000e+00        !x, y, z, node 2, pipe 380 t189
-9.000000e+01,  1.000000e+01, 0.000000e+00        !x, y, z, node 3, pipe 381 t210
                          .
                          .
9.000000e+01,  1.000000e+02, 0.000000e+00         !x, y, z, node 398, pipe 758 t435
9.000000e+01, -1.000000e+02, 0.000000e+00         !x, y, z, node 399, pipe 759 h436
1, 2, 1   !
2, 3, 2   !
4, 1, 3   !
    .
    .
396, 398, 379       !
399, 397, 380       !
```

表 2-6　grid.in ファイルの変数一覧

	変数名	説　明
1	nn	節点数
	ne	要素数
	loop : 1 to nn	
2	Xcoord, Ycoord, Zcoord	節点の x，y，z 座標
	end loop	
	loop : 1 to ne	
3	node1,node2	要素の節点番号
	pipe type	種類
	end loop	

2.3.3　メインファイル pipevel.in

移行経路特性ファイル pipevel.in を表 2-7に，変数一覧を表 2-8に示す。

表 2-7　pipevel.in ファイル

```
380          !ne_check
4.083103e-01, 5.176000e-06, 2.000000e+00          !pipe 1
4.083099e-01, 5.176000e-06, 2.000000e+00          !pipe 2
4.083101e-01, 5.176000e-06, 2.000000e+00          !pipe 3
                    .
                    .
1.070680e+00, 1.357000e-05, 2.000000e+00          !pipe 380
```

表 2-8　pipevel.in ファイルの変数一覧

	変数名	説　明
1	ne_check	パイプの種類数
	loop : 1 to ne_check	
2	pipe velocity	流速
	area	断面積
	dispersion length	分散長
	end loop	

2.3.4　亀裂表面収着データファイル retard.in

亀裂表面収着データファイル retard.in を表 2-9に，変数一覧を表 2-10に示す。

表 2-9　retard.in ファイル

```
380          !ne_check
1.000000e+00,        pt=1
1.000000e+00,        pt=2
1.000000e+00,        pt=3
      .
1.000000e+00,        pt=380
```

表 2-10　retard.in ファイルの変数一覧

	変数名	説　明
1	ne_check	パイプの種類数
	loop *j* : 1 to ne_check	
	loop *k* : 1 to nspecies	
2	retardation of pipe j	遅延係数
	species k	核種
	end loop	

2.3.5　拡散領域データファイル pipeimm.in

拡散領域データファイル pipeimm.in を表 2-11に，変数一覧を表 2-12に示す。

表 2-11　pipeimm.in ファイル

```
380          !nPipeTypes
1, 1
  .
1, 380
```

表 2-12　pipeimm.in ファイルの変数一覧

	変数名	説　明
1	nptypes_check	パイプの種類数
	loop *j* : 1 to nptypes_check	
	loop *k* : 1 to maxzonespp	
2	immobile zones attached to pipe type	拡散領域数
	immobile zone number	拡散領域番号
	end loop	

2.3.6　拡散領域特性データファイル immdata.in

拡散領域特性データファイル immdata.in を表 2-13に，変数一覧を表 2-14に示す。

表 2-13　immdata.in ファイル

```
380          !ne_check
2.000000e-02, 2.000000e-01, 1.000000e-01, 1.000000e+00       !pipe 1, imzone 1:1
6.601000e+03
                          .
2.000000e-02, 2.000000e-01, 1.000000e-01, 1.000000e+00       !pipe 380, imzone 1:1
6.601000e+03
```

表 2-14　immdata.in ファイルの変数一覧

	変数名	説　明
1	niztypes_check	拡散領域の種類数
	loop *j* : 1 to niztypes_check	
2	porosity	間隙率
	perimeter,	湿潤辺
	max.diff.dist.	マトリクス拡散深さ
	tortuosity	屈曲率
	loop *k* : 1 to nspecies	
3	retardation factor	遅延係数
	end loop	

2.4　出力ファイル

2.4.1　メインファイル ltg.out

メインファイル ltg.out を表 2-15に示す。

表 2-15　ltg.out ファイル

```
*************************************************************
*                                                           *
*                Laplace Transform Galerkin                 *
*                          LTG                              *
*                      Version  2.00                        *
*                                                           *
*************************************************************

PAWORKS-LTG Simulation for Cs

Maximum number of nodes              =        399
Maximum number of elements           =        380
Maximum number of species            =          1
```

2.4.2　時系列ファイル###.sum

フラックスおよび積算フラックスの時系列ファイル###.sum を表 2-16に示す。

表 2-16　sum ファイル

Species	Time	Outflux rate	Cum. Release
1	1.00000E+01	1.41335E-12	7.29365E-12
1	1.25890E+01	8.46392E-11	6.35699E-11
1	1.00000E+07	9.90905E-01	9.88805E+06

2.4.3　時系列ファイル###.win

LTG の window 出力ファイル###.win を表 2-17に示す。

表 2-17　win ファイル

Species	Window	Time	Flux	Cum. Flux	Conc
1	1	1.00000E+04	-4.5768E-08	-1.9895E-03	1.4100E-10
1	1	1.10000E+04	-5.1190E-09	-2.0404E-03	-6.4803E-10
1	1	1.30000E+04	3.7798E-11	-2.0435E-03	1.2607E-07

3. 逆解析プログラム LTGINV マニュアル

3.1 ファイル構成

逆解析のフローとファイル構成を図 3-1に，目的関数コンターとパラメータの収束履歴描画のフローとファイル構成を図 3-2に，逆解析のファイル一覧を表 3-1に示す。図には，LTG.DAT ファイルに規定されているパラメータを同定する場合のフローを示す。

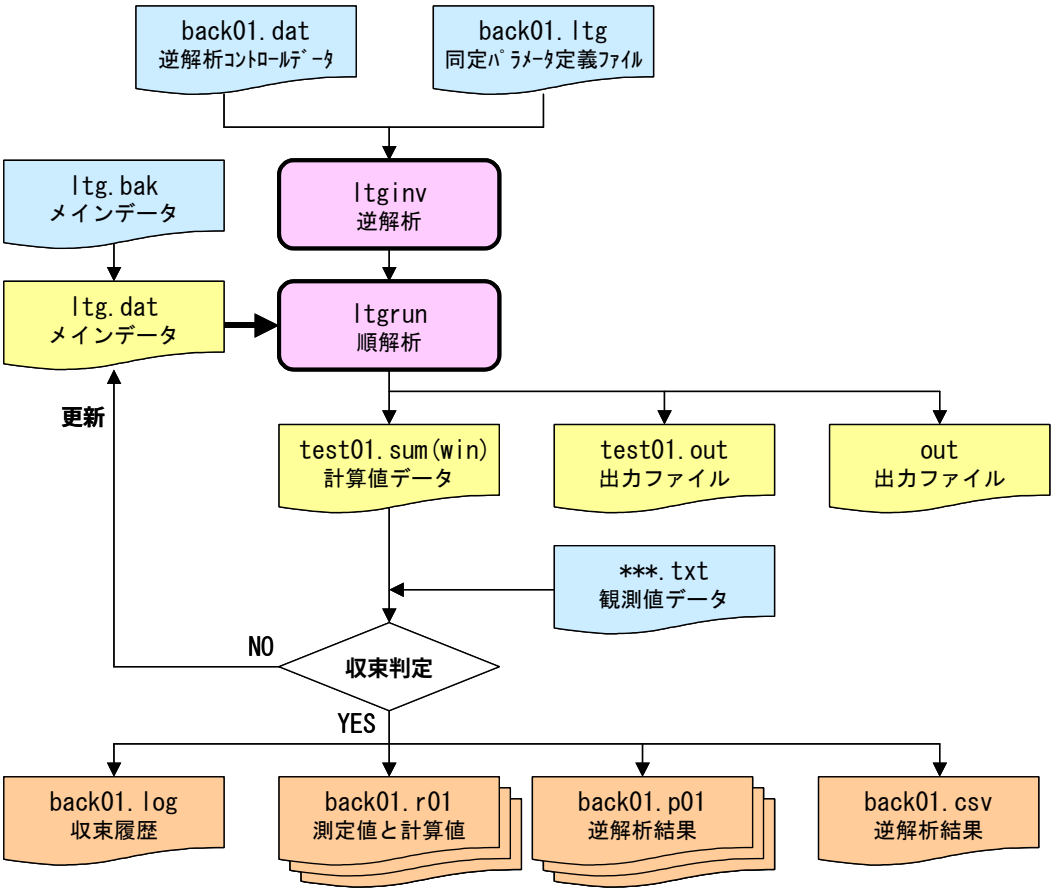


図 3-1 逆解析フローとファイル構成（LTG.DAT ファイルを更新する場合）
（赤：プログラム，青：必須入力ファイル，橙：解析結果ファイル，黄：その他出力ファイル）

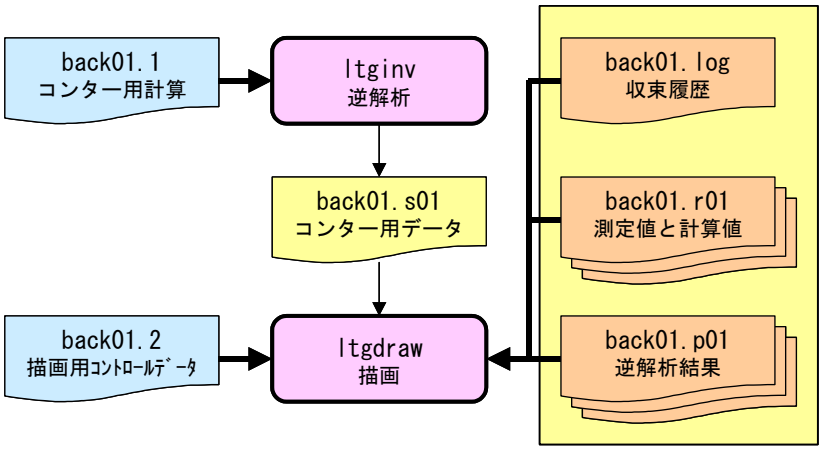


図 3-2　描画用ファイル構成

表 3-1　逆解析ファイル一覧

種　別	ファイル名	内　容
プログラム	ltgrun.exe ltginv.exe ltgdraw.exe	順解析プログラム LTG 逆解析プログラム LTGINV 描画用プログラム LTGDRAW
入力ファイル （逆解析用）	back01.dat back01.ltg ltg.bak ltg.dat ***.txt	逆解析コントロールデータファイル 逆解析同定パラメータ定義ファイル 入力データファイル（逆解析で更新されない） 入力データファイル（逆解析で更新される） 観測値データファイル（名前の付け方は任意）
（描画用）	back01.1 back01.2	目的関数コンター計算用コントロールデータファイル 描画用コントロールデータファイル
出力ファイル （ltg）	test01.sum test01.win test01.out out	計算値データファイル 計算値データファイル（window 出力） LTG 出力ファイル LTG 出力ファイル
（ltginv）	back01.log back01.csv back01.p## back01.r##	収束履歴 収束経路 結果（AIC 等，パラメータ推定値，感度マトリックス） 測定値および計算値データ
（ltginv；描画）	back01.s01	目的関数コンター用データファイル

3.2　プログラムの実行

3.2.1　逆解析プログラムの実行

逆解析プログラムを実行するには，DOS 画面上で，

```
ltginv⏎
back01.dat⏎
```

とする。

注意：最終的に作られる“ ltg.dat ”や“ test01.sum ”はヤコビアン行列を計算する際に作成されたものであり，最適推定値で計算されたファイルではない。

3.2.2　描画プログラムの実行

コンター図作成のための順解析を実行する。

```
ltginv⏎
back01.1⏎
```

“ back01.s01 ”ファイルが作成され，以下の操作でコンター図が描画される。

```
ltgdraw⏎
back01.2⏎
```

3.3　入力ファイル

3.3.1　逆解析コントロールデータファイル back01.dat

逆解析コントロールデータファイル back01.dat を表 3-2に，変数一覧を表 3-3に示す。また，同定パラメータ定義ファイル back01.ltg をに，変数一覧をに示す。back01.ltg は順解析用ファイル ltg.bak の変更パラメータ部分のみを修正して作成すればよい。

表 3-2　back01.dat ファイル

```
*command
copy ltg.bak ltg.dat
*datain   2         206       0         5                    npara,ndata,idata,base
'STT1Uranine.txt'   1         1         1                    nskip,jskip,nmod
'test01.sum'        1         2         1                    nskip,jskip,nmod
'LTGRUN > out'
'back01.ltg'
'ltg.dat'
              vary  nloop     eps1      eps2      eps3      nreset    alpa
pini    pobs  id    pmin      pmax      varx      edv
*inverse       0    100       1.0e-5    1.0e-9    1.0e-9    10        0.5
1.872    0     0    0.1       10.0      0         0.1    initial,observed,imat,pmin,pmax,varx,edv
0.468    0     0    0.05      10.0      0         0.1    initial,observed,imat,pmin,pmax,varx,edv
*end
```

表 3-3　back01.dat ファイルの変数一覧

行	変数名	説　明
1	*command	DOS コマンド入力行
3	*datain	
	npara	逆解析で同定するパラメータの数
	ndata	測定値データの数
	idata	目的関数作成方法オプション
		=0：通常，=1：観測値および計算値の対数を用いる
	base	idata=1 の際に用いる対数の底
		（idata=0 の場合も数値を省略できない。）
4	'STT1Uranine.txt'	測定値データのファイル名
	nskip	最初にスキップする行数（図 3-3参照）
	jskip	スキップするデータ数（図 3-3参照）
	nmod	スキップする行数
5	‘test01.sum’	計算値データのファイル名
	‘LTGRUN > out’	順解析 LTGRUN の実行と out への出力

	'back01.ltg'	同定パラメータ定義ファイル名（拡張子：ltg）
	*inverse	最小二乗法コントロールデータ
	vary	観測値分散σ_c^2 <0：分散未知（初期値=vary×-1） =0：分散未知（初期値=1） >0：分散既知
	nloop	最大繰返し計算回数（式(3.44)参照）
	eps1	目的関数収束基準（=0 で nloop 回計算実施；式(3.45)参照）
	eps2	目的関数の変化収束基準（式(3.46)参照）
6	eps3	重みλの変化収束基準（分散未知の場合；式(3.49)参照）
	nreset	重みλの更新計算回数
	alpa	収束緩和係数（推奨値：0.5～0.7） 式（3.26）において $p_{k+1} = \alpha p_{k+1} + (1-\alpha) p_k$ として，次の出発点とする。すなわち， α=1：近似値を完全に更新 α=0：近似値を更新しない となる。
	loop *j* : 1 to npara	
	pini(j)	パラメータ初期値
	pobs(j)	パラメータ観測値
	id	=0：通常，=1：対数
	pmin	下限値
	pmax	上限値
	varx(j)	パラメータ分散 <0：分散未知（初期値=varx(j)×-1） =0：分散未知（初期値=1） >0：分散既知
	edv	数値微分における振れ幅（初期値＋振れ幅）
	end loop	
8	*end	

jskip (=3)

Species	Time	Outflux rate	Cum. Release	
1	1.58490E+00	-6.04646E-50	-6.04646E-50	nskip (=4)
2	1.58490E+00	-6.04646E-50	-6.04646E-50	
3	1.58490E+00	-6.04646E-50	-6.04646E-50	
4	1.58490E+00	-6.04646E-50	-6.04646E-50	
5	1.58490E+00	-6.04646E-50	-6.04646E-50	nmod (=8)
6	1.58490E+00	-6.04646E-50	-6.04646E-50	
7	1.58490E+00	-6.04646E-50	-6.04646E-50	
8	1.58490E+00	-6.04646E-50	-6.04646E-50	
1	2.51190E+00	-2.63768E-49	-2.63768E-49	
2	2.51190E+00	-2.63768E-49	-2.63768E-49	
3	2.51190E+00	-2.63768E-49	-2.63768E-49	
4	2.51190E+00	-2.63768E-49	-2.63768E-49	
5	2.51190E+00	-2.63768E-49	-2.63768E-49	nmod (=8)
6	2.51190E+00	-2.63768E-49	-2.63768E-49	
7	2.51190E+00	-2.63768E-49	-2.63768E-49	
8	2.51190E+00	-2.63768E-49	-2.63768E-49	
1	3.98110E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	
2	3.98110E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	
3	3.98110E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	
4	3.98110E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	
5	3.98110E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	
6	3.98110E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	
7	3.98110E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	
8	3.98110E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	

図 3-3　測定値および計算値ファイルからのデータ読込み

表 3-4　back01.ltg ファイル

```
! TESTRUN DATA FOR ILTG - 2001.10.10
!  test01:EXP=STT1,Before optimization.
test01    !6 character file root
                    ~
.FALSE.                                  ! pipe_vel_from_file
&011pe10.3          0.001  &021pe10.3    ! pipe VELOCITY, pipe AREA, pipe DISPERSION LENGTH
%011pe10.3 2.0 3.0  0.001  &021pe10.3    ! pipe VELOCITY, pipe AREA, pipe DISPERSION LENGTH
.FALSE.                                  ! retard_from_file
                    ~
```

表 3-5　back01.ltg ファイルの変数一覧

行	変数名	説　明
	&011pe12.5	（1～3 カラム）：&01 = 変数番号（01～99） （4 カラム以降）：書式
	%011pe12.5␣ B␣ A	（1～3 カラム）：%01 = 従属変数番号（01～99） （4 カラム以降スペースまで）：書式 （スペース以降）：%01=A×&01+B （注） ・ 他の独立変数と 1 次形式で従属する変数を指定する。 ・ 上記例では変数”%01”は変数”&01”に線形従属し，%01=A×（&01）+B という関係となる。 ・ A，B はフリーフォーマット ・ スペースは 1 個のみとする（複数連続不可）。

3.4　出力ファイル

3.4.1　残差情報ファイル back01.log

繰返し計算回数，残差，最大残差の値を出力する。

分散が未知の場合は，重みλが収束するまで繰返し計算が実施されるため，作成された back01.p##ファイルや back01.r##ファイルの最大数字ではなく，back01.log ファイルに示された最大繰返し回数に相当する back01.p##ファイルや back01.r##ファイルが最終結果に相当する。

表 3-6　back01.log ファイル

```
 ncal  =   1 , sumj =  4.45127E+07 , delj =  4.45127E+07
 ncal  =   2 , sumj =  2.08402E+07 , delj =  2.36725E+07
 ncal  =   3 , sumj =  9.66265E+06 , delj =  1.11775E+07
 ncal  =   4 , sumj =  4.95266E+06 , delj =  4.70999E+06
 ncal  =   5 , sumj =  1.66769E+06 , delj =  3.28497E+06

                    ～

ncal  =   1 , sumj =  1.52534E+06 , delj =  3.12345E+00
ncal  =   2 , sumj =  1.52501E+06 , delj =  0.00000E+00
```

表 3-7　back01.log ファイルの変数一覧

行	変数名	説　明
	loop *ii* : 1 to nncal	
	loop *i* : 1 to ncal	
1	ncal	繰返し計算回数
	sumj	残差二乗和　$\sum\left\{c^{*}-c\right\}^{2}$
	delj	最大残差　$\max\left\lvert c^{*}-c\right\rvert$
	end loop	
	end loop	（注）分散更新後の結果が追記される。 **nncal** は分散の更新回数。

3.4.2　残差情報ファイル back01.csv

繰り返し計算の各 STEP におけるパラメータ値，および残差二乗和を出力する。

表 3-8　back01.csv ファイル

```
1          1.87E+00  4.68E-01  4.45E+07
2          1.43E+00  1.16E+00  2.08E+07
3          1.11E+00  1.48E+00  9.66E+06
4          9.15E-01  2.49E+00  4.95E+06
5          7.63E-01  3.73E+00  1.67E+06

                     ～

1          7.54E-01  3.88E+00  1.53E+06
2          7.53E-01  3.89E+00  1.53E+06
```

表 3-9　back01.csv ファイルの変数一覧

行	変数名	説　明
	loop *ii* : 1 to nncal	
	loop *i* : 1 to ncal	
1	ncal	繰返し計算回数
	loop *j* : 1 to ncal	
	paramj	パラメータ値
	end loop	
	sumj	残差二乗和　$\sum\left\{c^{*}-c\right\}^{2}$
	end loop	
	end loop	
		（注）分散更新後の結果が追記される。 **nncal** は分散の更新回数。

3.4.3　結果出力ファイル back01.p##

残差情報，情報量基準値，同定値，分散値など結果情報を出力する。

表 3-10　back01.p##ファイル

```
             2   npara
           206   ndata
  1.51707E+03   vary
  0.00000E+00   sump
  2.06000E+02   sumy
  3.12517E+05   sumj
  1.71486E+03   sums
  1.71886E+03   aic
  1.72551E+03   bic
  1.72155E+03   arma
  1.73499E+03   dmfm

  5.98539E-01    0  1.00000E-01  1.00000E+01  0.00000E+00 -1.27346E+00
  7.10266E+00    0  5.00000E-02  1.00000E+01  0.00000E+00  6.63466E+00

  3.36505E-05 -7.84357E-04
 -7.84357E-04  7.57955E-02

  3.91639E+04  4.05282E+02
  4.05282E+02  1.73874E+01

  5.38165E+02  2.76390E+01
  5.89832E+02  2.83440E+01
  6.39367E+02  2.88220E+01
  6.86260E+02  2.90800E+01
  7.30230E+02  2.91500E+01
  7.71280E+02  2.90600E+01
```

表 3-11　back01.p##ファイルの変数一覧

行	変数名	説　明
1	npara	同定パラメータ数
2	ndata	データ数
3	vary	観測値の分散
4	sump	パラメータの重みつき残差 J_p / σ_p^2
5	sumy	観測値の重みつき残差 J_c / σ_c^2
6	sumj	目的関数 $J = J_c + \lambda J_p$
7	sums	目的関数 S
8	aic	赤池の情報量基準
9	bic	〃
10	arma	ARMA（自己回帰移動平均）基準
11	dmfm	修正 Kashyap 基準
	loop *i* : 1 to npara	
10	pest	パラメータ最適推定値
	id	=0：実数，=1：対数
	pmin	パラメータ下限値
	pmax	パラメータ上限値
	varx	パラメータ分散値
	diff	観測値と推定値との差（観測値がないときは初期値と推定値の差，なお，実数は実数，対数は対数で表示）
	end loop	
	loop *i* : 1 to ndata	
11	covar (j=1 to npara)	パラメータ推定値の共分散行列
	end loop	
	loop *i* : 1 to ndata	
12	invcovar(j=1 to npara)	パラメータ推定値の共分散行列の逆行列
	end loop	
13	**loop *i* : 1 to ndata**	ヤコビアン行列
	jacobian(j=1 to npara)	
	end loop	

3.4.4　計算値出力ファイル back01.r##

時間ごとの観測値，計算値および（観測値－計算値）を出力する。

表 3-12　back01.r##ファイル

```
206
  1  4.64065E+01  4.80000E+00  1.71102E+00  9.91226E-01  7.19792E-01
  2  7.06608E+01  9.60000E+00  1.87887E+00  1.16435E+00  7.14518E-01
  3  9.58703E+01  1.68000E+01  2.00376E+00  1.33846E+00  6.65307E-01

205  1.75918E+00  2.40000E+00  8.29894E-01  8.69232E-01 -3.93377E-02
206  1.70610E+00  2.40000E+00  8.26470E-01  8.69232E-01 –4.27617E-02
```

表 3-13　back01.r##ファイルの変数一覧

行	変数名	説　明
1	ndata	データ数
	loop *i* : 1 to ncal	
2	data	計算値
	sum	観測値
	data2	log（計算値+base），idata=0 のときは計算値
	sum2	log（観測値+base），idata=0 のときは観測値
	del	data2－sum2
	end loop	

3.5　描画プログラム用入力ファイル

3.5.1　目的関数コンター用データ作成ファイル back01.1

目的関数コンター用のデータファイル作成のための計算を実施する。

表 3-14　back01.1 ファイル

```
*command
copy ltg.bak ltg.dat
*datain   2          206       0         5                    npara,ndata,idata,base
'STT1Uranine.txt'    1         1         1                    nskip,jskip,nmod
'test01.sum'         1         2         1                    nskip,jskip,nmod
'LTGRUN > out'
'back01.ltg'
'ltg.dat'

*scalc    1          51        0         1                    nsta,nend,ids,mode
1         0          10                                       locx,idx,ndivx
2         0          10                                       locx,idx,ndivx

*end
```

表 3-15　back01.1 ファイルの変数一覧

行	変数名	説　明
1-5		back01.dat ファイルと同じ
	loop *j* : 1 to npara	コンター表示したいパラメータの組合せの数だけ繰返し
6	*scalc	
	nsta	コンター上にプロットしたい繰返し計算の開始回数
	nend	〃　収束回数
	ids	コンターの残差=1：対数
7	mode	=0：，=1：最大値・最小値の範囲を計算
	locx	*x* 軸のパラメータ番号
	idx	（現在，使用していない）
8	ndivx	（2×ndivx）分割
	locy	*y* 軸のパラメータ番号
	idy	（現在，使用していない）
	ndivy	（2×ndivy）分割
9	**end loop**	
	*end	

3.5.2　収束履歴の描画用コントロールデータファイル back01.2

目的関数コンター図中に逆解析における収束履歴を描画する。

表 3-16　back01.2 ファイル

*sdraw	1	-10	10	-10	10	0.1	1.0e-1	1	0
*sdraw	1	-10	0	0	10	0.1	1.0e-1	1	0
*sdraw	1	-10	-5	0	5	0.1	1.0e-1	1	0

表 3-17　back01.2 ファイルの変数一覧

行	変数名	説　明
	loop *j* : 1 to npara	
1-5	*sdraw	
	ncalc	ファイル番号（scalc の順番）
	nstax	コンター描画範囲指定；*x* 軸開始分割点数
	nendx	〃　；*x* 軸終了　〃
	nstay	〃　；*y* 軸開始　〃
	nendy	〃　；*y* 軸終了　〃
	alpha	F 分布のα（(1-α)×100%信頼区間を設定）
	fact	楕円を fact 倍拡大して描画
	beta	コンターの色分割を実際の値の beta 乗で行う。
	ids	描画領域の目的関数値の内挿方法 =0：目的関数値をそのまま内挿 =1：目的関数値の対数を内挿
	end loop	

4. the Nagra-JNC Radionuclide Migration Experiment(MI)

核燃料サイクル機構は Nagra との共同研究として，Grimsel Test Site（以下 GTS）において，Nagra-JNC Radionuclide Migration Experiment（以下 MI）とよばれる試験を 1985 年～1996 年の期間で実施している。本研究では逆解析を行う原位置試験データとして，MI で得られた一連のデータを用いることとする。本章では，MI が行われた GTS の概要，MI の概要を示す。

4.1 Grimsel Test Site（GTS）

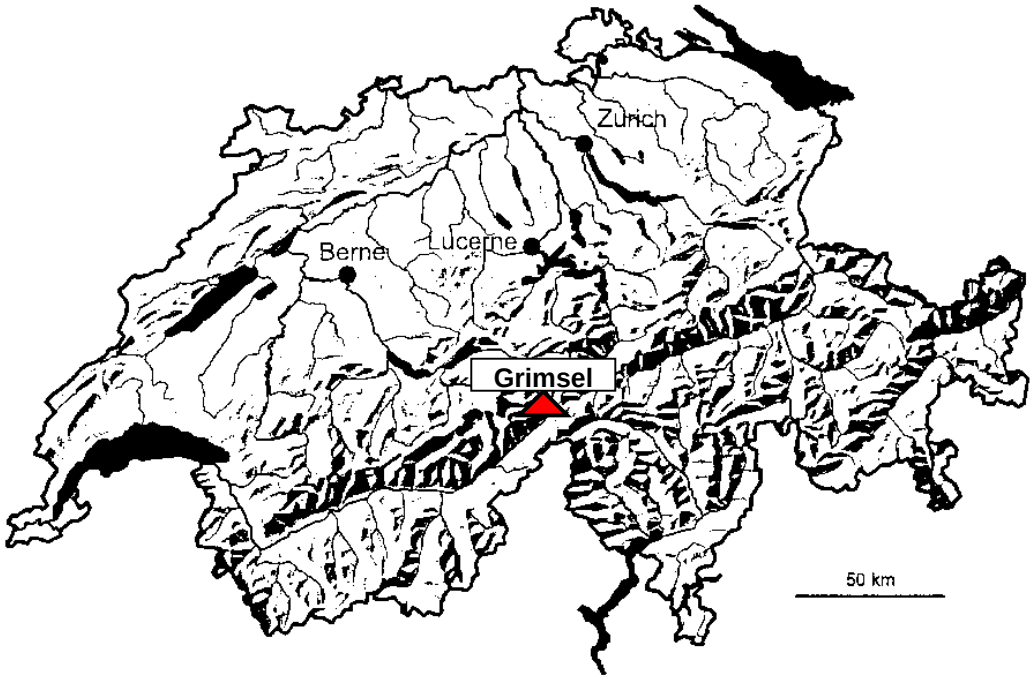
GTS はスイス中央部の Juchlistock 山（図 4-1，図 4-2，図 4-3）の東縁に位置し，水力発電所用に掘削された既存のアクセストンネルから，坑道径 3.5m の坑道を TBM を用いて新たに分岐掘削し，試験場として用いているものである（図 4-4，図 4-5）。Juchlistock 山は中央スイスアルプスのアーレ地塊に属する花崗岩からなる山岳であり, GTS は地下 450m の深度に位置するが, その高度は海抜 1749～1789m となる。

GTS における研究の目的は以下のようになる。

・廃棄物処分場用地選定に資する調査手法，測定技術，試験装置を開発し適用する現実的な機会を得ること。

・廃棄物処分場安全評価に関連する物理的および化学的現象に関する調査を行うこと。

・原位置試験の計画，実施およびデータの分析に必要な科学的および技術的ノウハウを蓄積すること。



Location of Nagra's underground test facility at the Grimsel Pass in the Central Alps (Bernese Alps) of Switzerland

図 4-1 Grimsel 位置図

図 4-2　Grimsel Test Site 周辺鳥瞰図

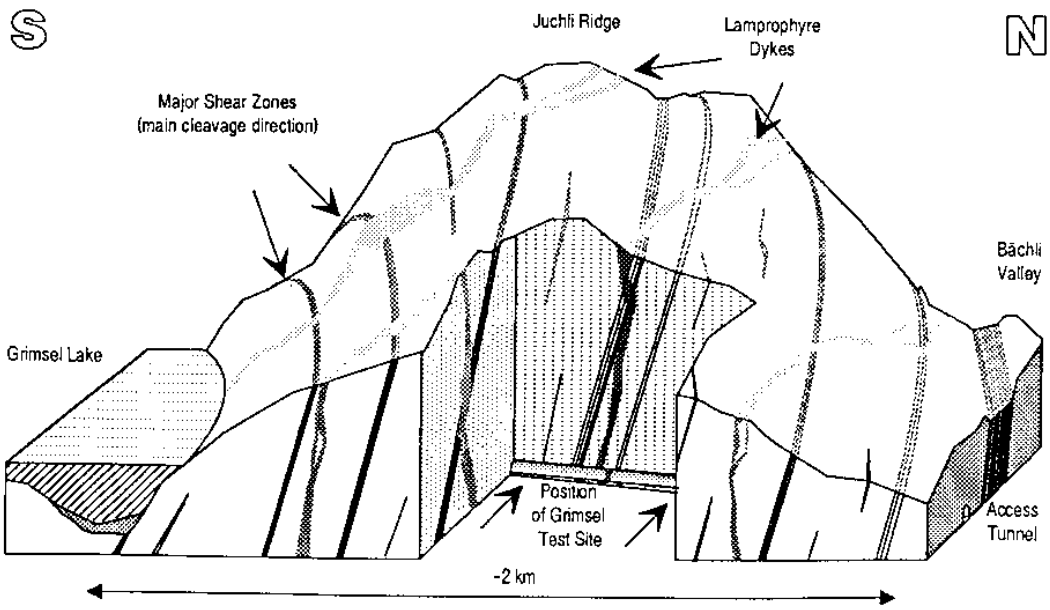
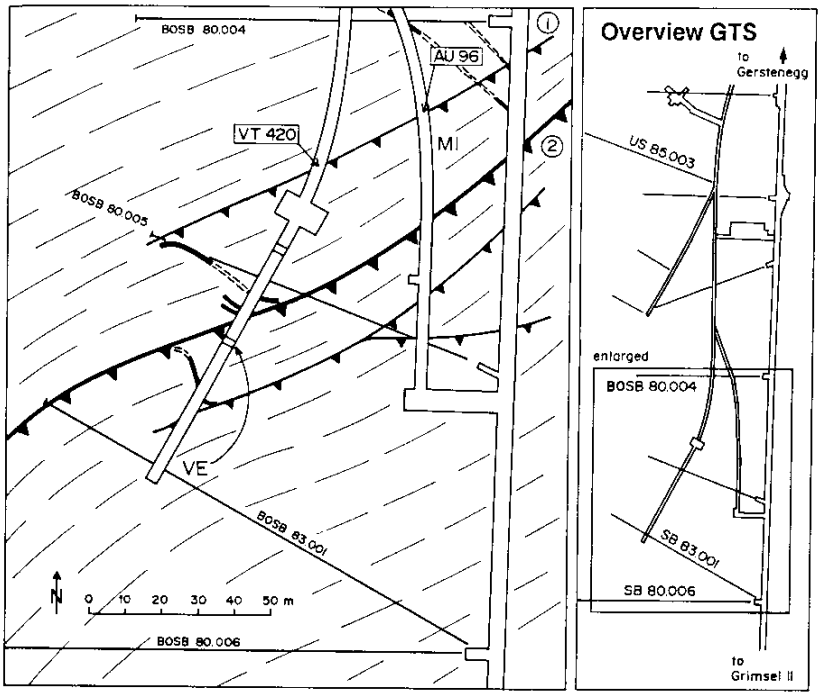


図 4-3　Grimsel Test Site 周辺の透水構造概略図



Shear-Zone (Thrust)

Lamprophyre Dyke

Trace of Cleavage

① "Migration" Shear-Zone (MI)

② "Ventilation" Shear-Zone (VE)

VE Site of the Ventilation Experiment

MI Site of the Migration Experiment

BO Projection of Borehole

図 4-4 Grimsel Test Site 内のトレーサー試験位置

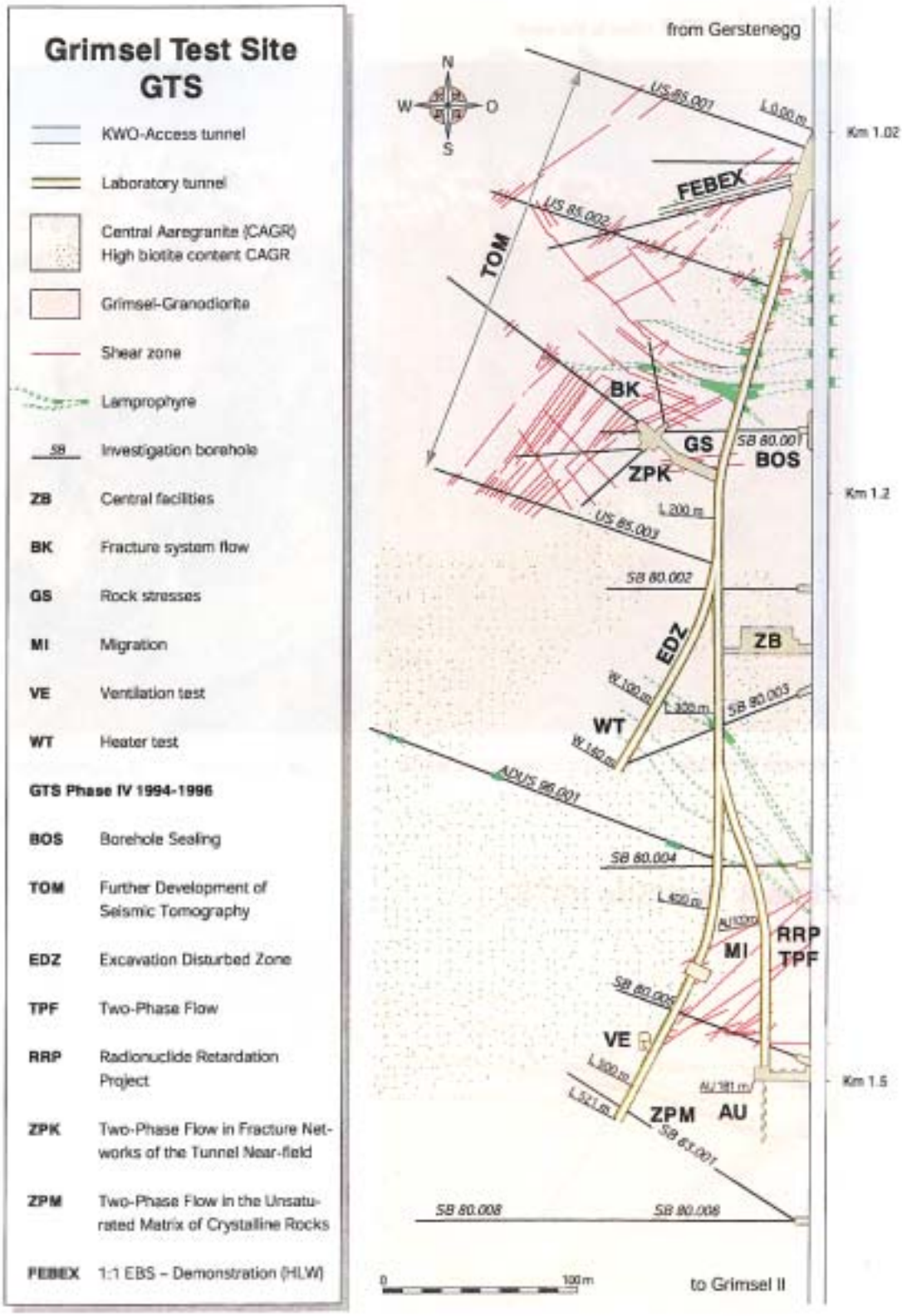


図 4-5　Grimsel Test Site 平面図

4.2　トレーサー試験対象領域の地質構造および水理地質構造

4.2.1　領域条件

GTS が位置するアーレ地塊は中央アーレ花崗岩やグリムゼル花崗閃緑岩などのヘルシニア（=バリスカン, 2.8～3.2 億年前）花崗岩により貫入を受けた変堆積岩からなり, アーレ地塊のすべての岩は約 2500 万年前頃のアルプスの低温変成作用と変形作用の影響を受けている。GTS 周辺の変成条件は 400℃，2.5～3kbar（10^8N/m^2）程度と見積もられており，また，その変形作用による褶曲と圧砕変成せん断帯がアーレ地塊に見られる。

4.2.2　MI せん断帯の特徴

GTS 周辺の母岩は上記グリムゼル花崗閃緑岩からなり，トレーサー試験が行われた MI せん断帯は上記変形作用により出来た圧砕変成せん断帯である。MI せん断帯の走行は北西～南東方向，傾斜は 80°以上であり，周辺の亀裂群とほぼ平行に走っている。せん断帯幅は数 cm～数十 cm（図 4-6）で，雲母質の圧砕帯である。せん断帯の北側ではせん断帯から母岩である花崗閃緑片麻岩への変形勾配が大きく，南側では小さいことが特徴的である。（図 4-7）

MI せん断帯の中には角礫状（粒径>1mm）や粘土状（粒径<1mm）の充填鉱物が見られるが，これらは上記変成作用後生じた低温低圧下でのカタクラスティックな変形により生じたものと考えられる。この変形は隆起によるもので，この隆起は現在も 1～2mm/yr.の速度で進行中である。せん断帯中に見られる充填鉱物は数 mm の幅でつらなり，それらが離散的に分布している。こうした充填鉱物は比較的浅い箇所（一般的に土被り 5km 以下）における地殻変動により生じたものであり，脆性的に変形しており，未固結である。MI せん断帯においては，変形後の熱水変成もほとんど見当たらず，充填鉱物は透水性を保持している。充填鉱物のつらなりは，数 m スケールで観察すると相互に連結しており，せん断帯中の透水経路を成している。

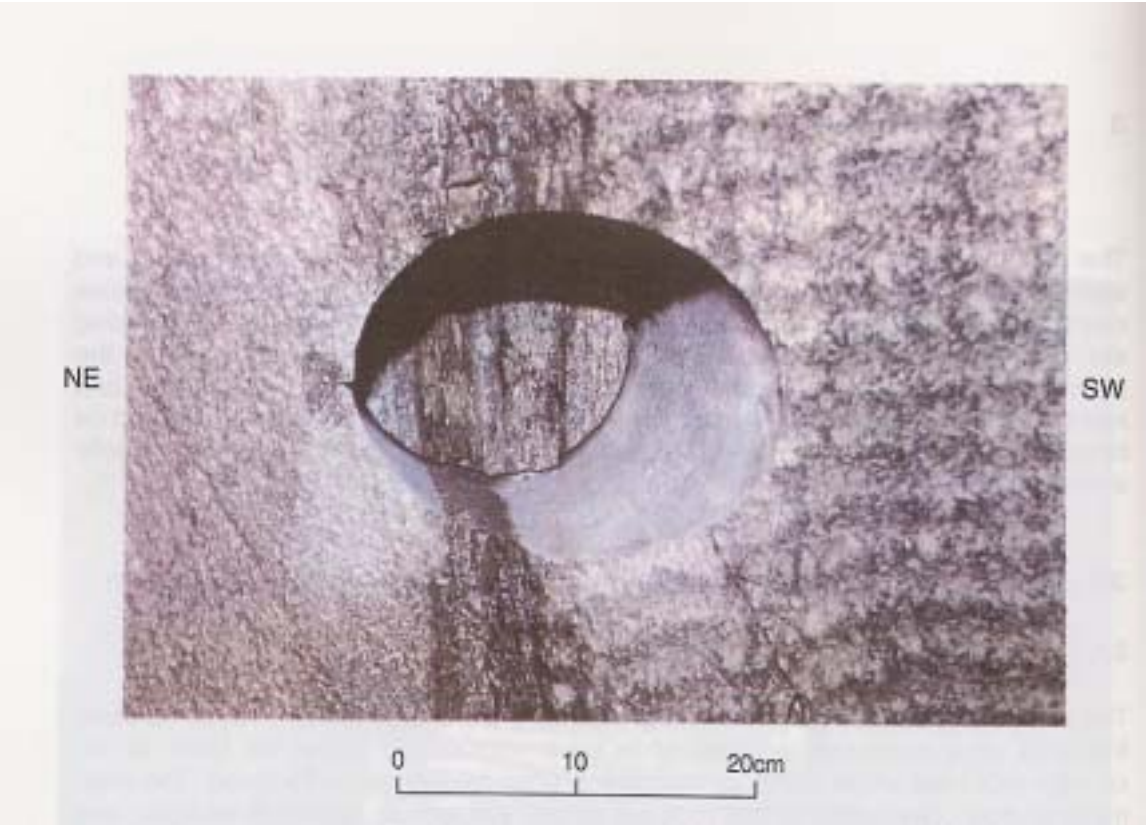


図 4-6　MI せん断帯近接写真（VT420 周辺，坑壁東面）

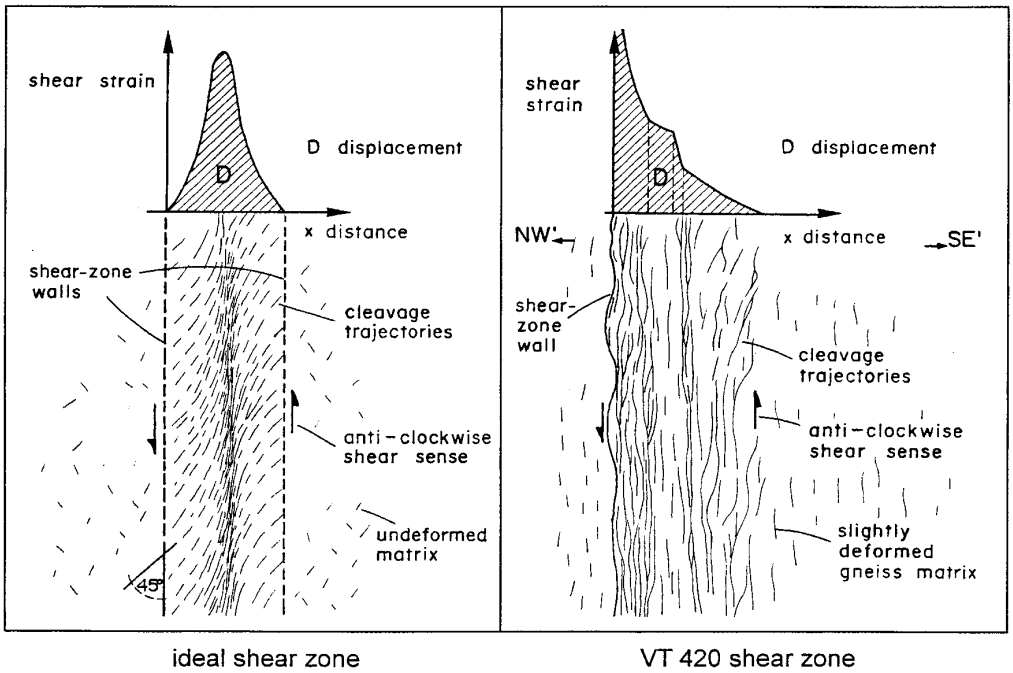


図 4-7　VT420 における MI せん断帯のひずみ分布

4.2.3　鉱物組成

MI せん断帯の母岩は中粒から粗粒の花崗閃緑岩であり，その主成分は石英，斜長石，カリ長石，黒雲母である。また，母岩部や圧砕せん断帯では変成作用により曹長石，黒雲母，緑泥石，白雲母，緑レン石，チタン石の成長が見られる。母岩のカタクラスティックな変形により生じた充填鉱物の組成も母岩と同様である。これは脆性的変形後に熱水の影響を受けることがほとんどなかったためであり，充填鉱物の組成に関して変成の影響を考慮する必要はほとんどない。唯一熱水変成により生成したと思われる鉱物としてスメクタイトが観測されるが，1 体積%程度である。

4.2.4　空隙構成

MI せん断帯周辺の空隙構成は水銀注入法, および原位置における染料注入法により観測されている。その結果によれば, 変形を生じていない花崗閃緑岩部では 0.8～1.5 体積%であり，（マイロニティクな）圧砕部では 0.5～0.9 体積%程度に減少する。これは変成作用を伴う延性的な圧砕変形においては再結晶化にともないより密実な構造となるためである。一方，充填鉱物の周辺（数 cm 幅）においては，脆性的変形により機械的な損傷を受け，間隙率が 2 体積%程度まで増加する。

充填鉱物には比較的大きな空隙が分散しており，間隙率は 10～40 体積%程度となる。

4.2.5　透水経路

MI せん断帯における主要な透水経路は以下の 3 つが考えられる。

- 充填鉱物と母岩の界面
- 充填鉱物内の空隙連結による透水経路（地下水による局所的侵食により形成される。）
- 微小亀裂の連結による透水経路

また，せん断帯近傍の母岩部は，マイロニティックな変形のため空隙率が小さいものの，空隙の連結性は確認されており，マトリックス拡散に寄与している。

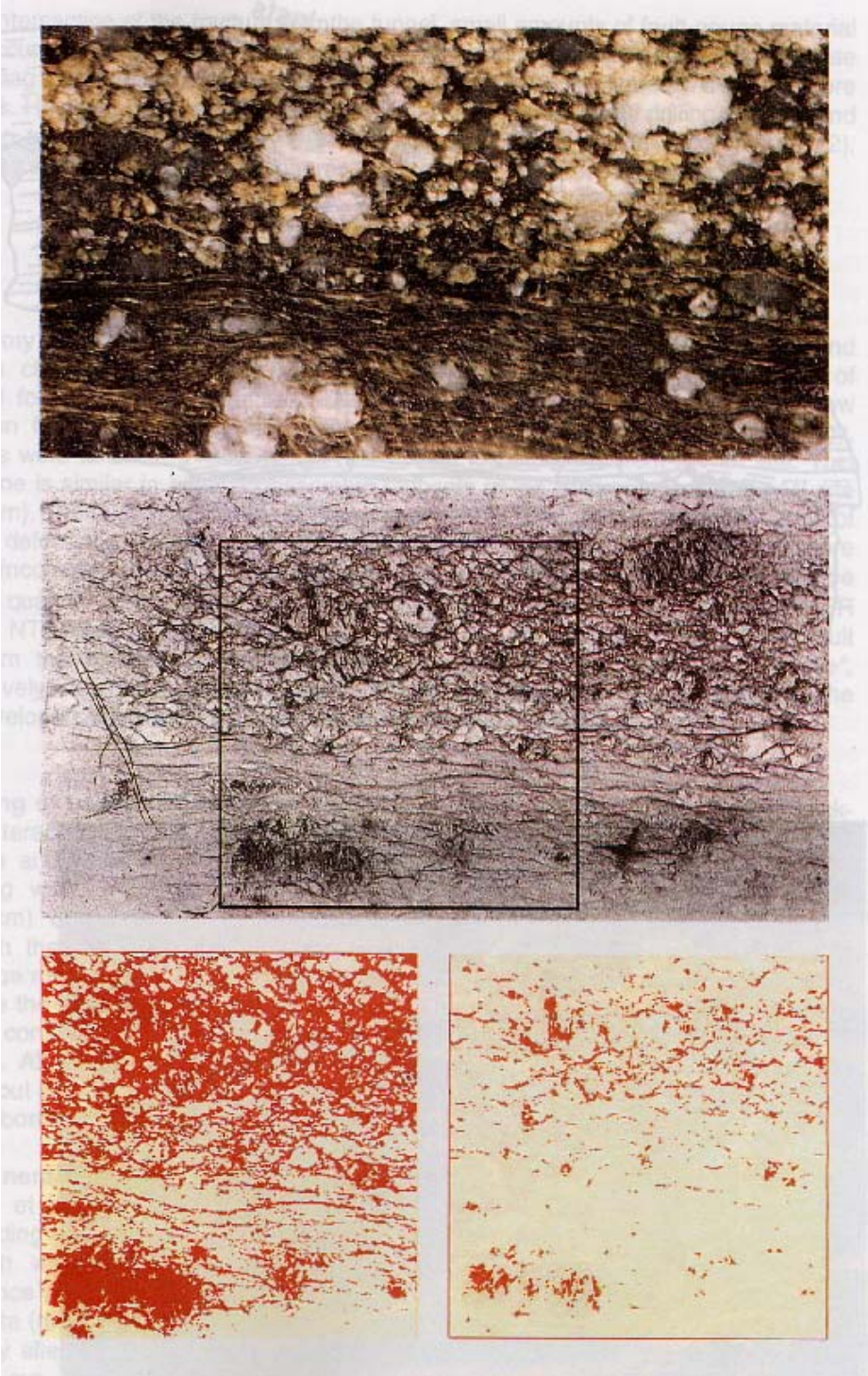


図 4-8　せん断帯サンプル写真（幅 6cm，変形した花崗閃緑岩と雲母質マイロナイト）
上段：光学写真
中断：C-14 を注入後，β線撮影
下段：画像処理後（左：空隙率=0.6%，右：空隙率=0.2%）

4.3 トレーサー試験対象領域の化学的条件

GTS 内を流れる地下水流としては，Grimsel の花崗岩や花崗閃緑岩に貫入するコウ斑岩の岩脈中の流れが主たるものであり，せん断帯中の地下水流はむしろ小さい。地下水の水質は若干鉱化しており，アルカリ性を示す（pH=8.5～10.3）。

MI 試験を行ったせん断帯中の地下水は，低イオン強度（0.0012M）の Na-Ca-HCO_3 タイプで，弱還元雰囲気である。地下水環境が非平衡状態であるので，正確な酸化還元電位は特定できない。

以下にせん断帯中の地下水組成を示す。

表 4-1　MI せん断帯中の地下水の水質（AU96）

pH	9.6 ± 0 .2
Ionic strength [M]	0.0012
Temperature [°C]	12 ± 1
Electrical Conductivity [μS cm^{-1}]	103 ± 5

Cations:		
Na^+	[M]	6.0 - 6.9 × 10^{-4}
K^+	[M]	3.2 - 5.0 × 10^{-6}
Mg^{2+}	[M]	2.9 - 6.2 × 10^{-7}
Ca^{2+}	[M]	1.3 - 1.4 × 10^{-4}
Sr^{2+}	[M]	1.8 - 2.0 × 10^{-6}
Rb^+	[M]	1.9 - 2.5 × 10^{-8}
Cs^+	[M]	5.0 - 5.2 × 10^{-9}
[5] total cations	[eq L^{-1}]	9.5 - 9.9 × 10^{-4}
Anions:		
SO_4^{2-}	[M]	5.7 - 6.4 × 10^{-5}
SO_3^{2-}	[M]	5 × 10^{-7}
HS^-	[M]	1 × 10^{-6}
$H_2S_{(g)}$	[M]	1 × 10^{-6}
F^-	[M]	3.2 - 3.6 × 10^{-5}
Cl^-	[M]	1.5 - 1.8 × 10^{-4}
Br^-	[M]	2.7 - 4.2 × 10^{-7}
I^-	[M]	1.0 × 10^{-9}
[1] alk	[eq L^{-1}]	4.2 - 4.5 × 10^{-4}
[5] total anions	[eq L^{-1}]	10.2 - 10.4 × 10^{-4}

Other Species:		
Si	[M]	1.6 - 2.5 × 10^{-4}
Fe (total)	[M]	2.3 - 3 × 10^{-9}
Mn (total)	[M]	5 × 10^{-9}
Cu (total)	[M]	6 × 10^{-10}
U (total)	[M]	6 × 10^{-10}
CO_2	[M]	< 7 × 10^{-7}
[2] O_2	[M]	< 3 × 10^{-8}
N_2	[M]	7 - 8 × 10^{-4}
NH_4^+	[M]	5 × 10^{-10}
NO_2^-	[M]	not detected
NO_3^-	[M]	1 × 10^{-6}
TIC	[ppm]	2.6
TOC	[ppm]	0.5 - 0.9
[3] **Calculated:**		
[4] HCO_3^-	[M]	2.9 × 10^{-4}
[4] CO_3^-	[M]	4.2 × 10^{-5}
[4] OH^-	[M]	1.3 × 10^{-5}
[4] $H_3SiO_4^-$	[M]	4.2 × 10^{-5}
H_4SiO_4	[M]	2.1 × 10^{-4}

Legend:
[1] alk = alkalinity
[2] on site measurements at the Grimsel Test Site
[3] calculated for relevant pH and temperature
[4] major species contributing to alkalinity
[5] total anion concentrations are slightly smaller than the cation content; this might be caused by small systematic errors in the alkalinity, which is particularly sensitive to precise pH determination.

Data are compiled from BAJO et al. (1989), AKSOYOGLU et al. (1991), DEGUELDRE et al. (1990), EIKENBERG et al. (1991 and 1994), ALEXANDER (1991) and FRICK et al. (1992a).

4.4　トレーサー試験対象領域の水理場

MI せん断帯は 100m スケールのほぼ鉛直な 2 次元構造と考えられ, 試験坑道とほぼ直角に交差している。MI せん断帯から試験坑道内に発生する湧水は過去 10 年の間にゆっくりと減少してはいるが，1996 年 5 月の段階で約 400ml/min.の湧水が確認されている。

MI せん断帯は主に比較的透水性の低い圧砕変成構造からなるが，BOSSART&MAZUREK（1991）は上記のような湧水の透水経路になりうる構造として，コアサンプルの詳細な観察から以下の透水構造を確認している。一つは数 mm 幅の亀裂とそれを充填する充填鉱物（ガウジ）である。このガウジは極めてポーラスな構造を持っている。もう一方は，ガウジ，層状珪酸塩，脆性破壊による粒状構造の中にある空隙が互いに連続して形成される透水経路である。

こうした観察結果はサンプルの詳細な観察により得られたものであり，MI せん断帯の大規模構造にわたって同様の構造があることを示すことは困難であるが，試験坑道以外より採取された MI せん断帯のサンプルからも同様な構造が見出されており, Grimsel Test Site 周辺の各種の調査結果と整合している。

4.5　使用トレーサーと収着特性に関わる調査

MI 試験については，トレーサー試験とは別に，室内試験および収着特性に関わる原位置予備調査を行っている。こうした調査の目的をまとめると以下のようになる。

・ MI せん断帯の化学特性を把握し，適切な収着性トレーサーを選定すること
・ 使用トレーサーの収着特性を室内試験により求めること
・ 室内試験結果より原位置における収着特性パラメータを予測すること

以下にそれぞれについて概要を示す。

4.5.1　室内試験

(1)　岩-水相互作用試験

本試験の目的は，トレーサー試験に要する時間にわたっての岩と水の化学的安定性を把握するために, 破砕した岩と水の相互作用を調査するものである。

具体的には MI せん断帯より採取した岩を 2mm 以下に粉砕し, 地下水とともに密封容器中に入れ, 200 日間繰り返し振動を加え，地下水組成をモニタリングする方法で行った。

実験で変更されたパラメータは以下の 3 種類である。

・ 水の組成の初期状態（自然地下水，人工地下水）
・ 温度（室内：約 25℃，原位置：12.5℃）
・ 岩-水比（1：2，1：10）

以上の試験の結果，地下水中の鉱物組成の生成要因は主として圧砕変成部の陽イオン交換であることが判明した。試料の陽イオン交換能（CEC：cation exchange capacity）と試験に用いた地下水組成とに整合性があり，地下水の陽イオン増加量と岩の陽イオン減少量とが一致したためである。この試験より得られたデータから陽イオン交換モデルを用いてトレーサーの分配係数 Kd を推定している。

(2)　バッチテスト

バッチテストは，陽イオン交換モデルによる収着特性の予測結果を検証するために行ったものである。試料は MI せん断帯より採取し, 250μm と 60μm のふるいを通過する粒径まで砕いて試験を実施した。

4.5.2　原位置における地下水化学平衡試験

原位置における地下水化学平衡試験は，MI せん断帯とは異なる場所で採取された地下水を MI せん断帯に注入し，揚水側から採取した水の分析を行うことにより，実施している。その結果，MI せん断帯では F^-や Cl^-といった陰イオンでは注入開始後 50 時間以内に平衡状態に達するのに対して，Na^+，Ca^{2+}では平衡状態に達するまでに 150 時間，Sr^{2+}，K^+，Mg^{2+}では 250 時間以上の時間を要することが判明した。こうした現象は，主に希釈と分散による混合効果と，MI せん断帯鉱物とイオンの陽イオン交換反応によるものと推定されており，その仮定に立った分析により，陽イオン交換能（CEC）と Na と Sr の分配係数を表 4-2のように推定している。

4.5.3　原位置における分配係数の推定

(1)　Na と Sr の分配係数の推定

原位置における分配係数は，MI せん断帯における核種の収着の支配的要因が陽イオン交換反応であることに注意して推定を試みている。すなわち，MI せん断帯より採取した試料の室内試験により求められた分配係数を，室内で求めた陽イオン交換能（CEC）と原位置での地下水化学平衡試験により求められた陽イオン交換能（CEC）の比で除することにより，原位置における分配係数を求めている。表 4-2 にその結果を示す。これによれば室内における CEC は 13 であり，一方地下水化学平衡試験結果では 2.4 であることから，13/2.4～5.4 であり，室内試験により求めた分配係数を 5.4 で除して，原位置における分配係数を求めている。表 4-2には，地下水化学平衡試験により求めた分配係数も示しているが，CEC により求めた推定値は地下水化学平衡試験の約 2 倍の値となっている。

(2)　Cs の分配係数の推定

Cs の分配係数は，線形・瞬時・可逆の収着モデルでは説明できないことが知られており，NAGRA でも，周辺の Cs 濃度に対して非線形で，またカリウムの存在による分解係数の変化も考慮している。それによれば，セシウム濃度，カリウム濃度により 0.5～3.9 程度の範囲で変動する。

表 4-2　種々の方法により求めた放射性核種の分配係数

	CEC（meq/kg）	Kd（Na）（m^3/kg）	Kd（Sr）（m^3/kg）	Kd（Cs）（m^3/kg）
室内試験（<63μm）	13	$(2.3\pm0.1)\times10^{-3}$	$(110\pm10)\times10^{-3}$	1.5～3.8
原位置における予測値	-	$(0.4\pm0.2)\times10^{-3}$	$(20\pm2)\times10^{-3}$	0.5～3.9
地下水化学平衡試験	2.4	0.2×10^{-3}	8×10^{-3}	-

5. Radionuclide Migration Experiment（MI）におけるトレーサー試験

MI では 1988 年から 1996 年にかけて多数のトレーサー試験が行われている。1988 年から 1990 年までは主に試験方法と試験装置の整備を目的とし，1991 年から 1996 年までは種々の水理場における核種移行特性を把握することを目的として実施された。以下にその概要を示す。

5.1 トレーサー試験の概要

トレーサー試験は以下に示す 9 つのフェーズに分類できる。

1988-1990（Phase1-4）：試験方法および試験装置の整備を目的とした予備試験

Phase1：非収着トレーサーを用いた予備試験

Phase2：試験装置の最適化および試験方法の確立

Phase3：Na-24 を用いた予備試験

Phase4：試験装置および試験方法の改良成果の検証

1991-1996（Phase5-9）：種々の水理場における核種移行特性把握を目的とした試験

Phase5：孔間距離 4.9m のダイポール場における Sr，Na，I を用いたトレーサー試験

Phase6：孔間距離 1.7m のダイポール場における Sr，Na，Rb を用いたトレーサー試験

Phase7：孔間距離 14m のダイポール場における非収着トレーサーを用いたトレーサー試験

Phase8：孔間距離 1.7m のダイポール場における Cs，Sr，He を用いたトレーサー試験

Phase9：孔間距離 4.9m のダイポール場における Cs，Sr，He を用いたトレーサー試験

Phase1～4 までは主に試験方法や試験装置の整備を目的とした予備試験であり，逆解析の検討対象としては主に Phase5 以降のデータを用いることとする。Phase5 以降では主に 4 本のボーリング孔において試験を行っているが，それぞれの位置関係は図 5-1に示すとおりである。また，それぞれの Phase における具体的な試験ケースを表 5-1（a），（b）に示す。

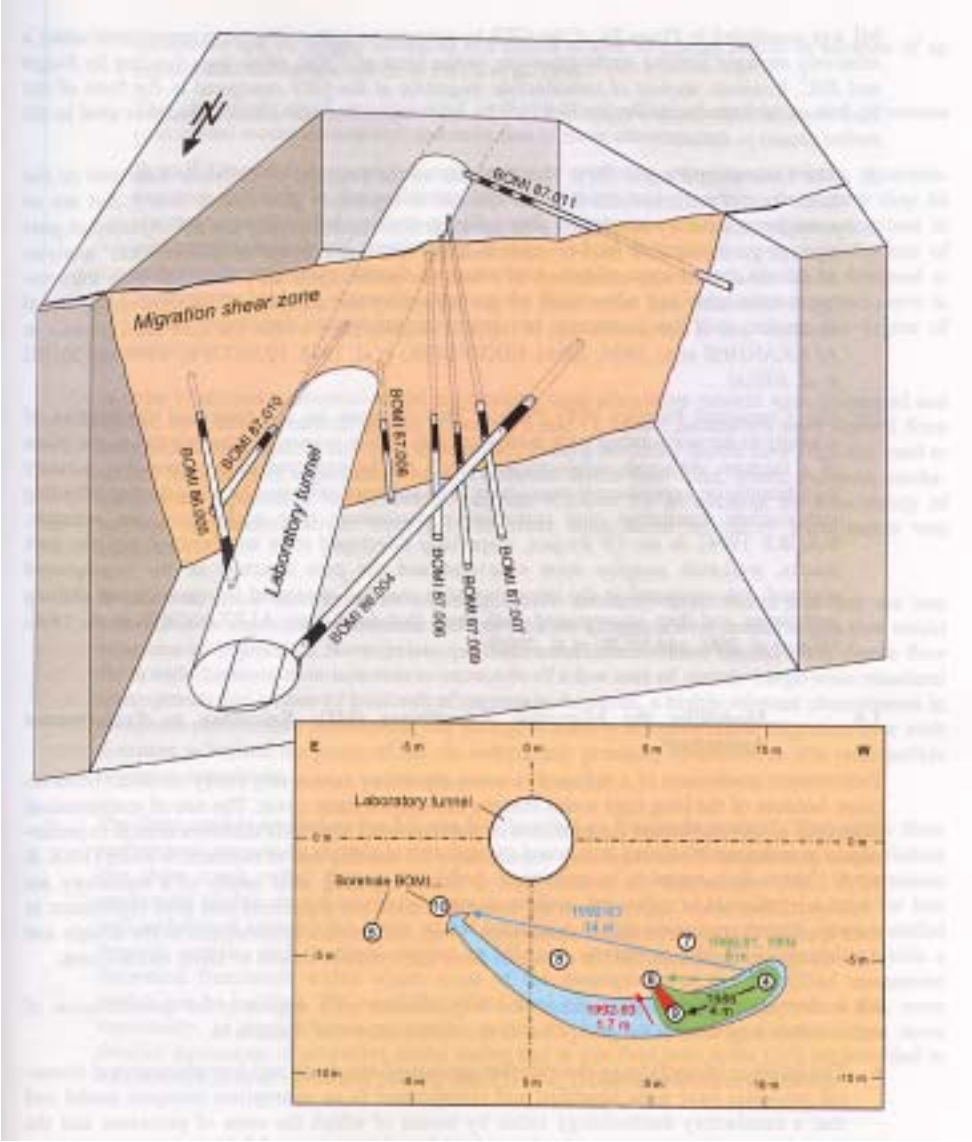


図 5-1　MI せん断帯上でのボーリング孔位置関係

表 5-1（a） トレーサー試験の試験条件（その 1）

Run	データの有無	Date of tracer injection	Phase	Flow field BOMI	Dipole Distance	Injection flow rate (ml/min.)	Extraction flow rate (ml/min.)	Dipole Ratio	Input Func.	Tracer used	(Recovery)	Tracer used	(Recovery)	Tracer used	(Recovery)	Tracer used	(Recovery)	Tracer used	(Recovery)	Remarks
#1	○	12.07.88	1	86.004 → 87.009	4.0	259	618	2.4		Uranine	(96.14)	Br-82	(98.51)							
#2	○	14.07.88	1	86.004 → 87.009	4.0	41	191	4.7		Uranine	(98.89)	Br-82	(99.92)							
#3	○	20.07.88	1	86.004 → 87.006	4.9	77	219	2.8		Uranine	(100.73)	Br-82	(94.75)							
#4	○	26.07.88	1	86.004 → 87.006	4.9	70	204	2.9		Uranine	(89.20)	Br-82	(90.25)							
#5	○	06.09.88	1	86.004 → 87.006	4.9	78	195	2.5		Uranine	(102.09)	Br-82	(104.35)							
#6	○	13.09.88	1	86.004 → 87.006	4.9	26	79	3.0		Uranine	(100.35)	Br-82	(55.22)							
#7	○	20.09.88	1	87.006 → 86.004	4.9	76	205	2.7		Uranine	(73.56)									
#8	○	04.10.88	1	87.006 → 86.004	4.9	24	82	3.4		Uranine	(60.84)	Br-82	(58.80)							
#14	×	06.12.88	2	86.004 → 87.006	4.9	73	221	3.0		Uranine	-									
#15	×	13.12.88	2	86.004 → 87.006	4.9	63	219	3.5		Uranine	-									
#16	×	14.12.88	2	86.004 → 87.006	4.9	68	250	3.7		Uranine	-									
#21	○	26.04.89	2	86.004 → 87.006	4.9	31	80	2.6	Pulse	Uranine	(49.83)	Br-82	(72.59)	He-4	-					
#22	×	11.05.89	2	86.004 → 87.006	4.9	30	76	2.5		He-4	-									
#29	○	27.06.89	3	86.004 → 87.006	4.9	78	167	2.1	Pulse	Uranine	(97.45)	Na-24	(63.13)	He-4	(92.69)					
#30	○	04.07.89	3	86.004 → 87.006	4.9	21	70	3.3	Pulse	Uranine	(46.03)	Na-24	(46.14)	He-4	(49.87)					
#31	○	10.07.89	3	86.004 → 87.006	4.9	5	80	16.0	Pulse	Uranine	(75.80)	Na-24	(62.01)	He-4	(74.25)	Br-82	(71.73)			
#32	○	23.08.89	4	86.004 → 87.006	4.9	80	160	2.0		Uranine	(90.28)	He-4	-							
#33	×	14.09.89	4	86.004 → 87.006	4.9	78	155	2.0		Uranine	-	He-4	-							
#40	○	02.10.89	4	86.004 → 87.006	4.9	30	85	2.8		Uranine	(73.20)	Br-82	(72.66)	He-4	-					
#41	○	07.03.90	4	86.004 → 87.006	4.9	30	80	2.7		Uranine	(77.94)	He-4	(84.57)							
#42	○	14.03.90	4	86.004 → 87.006	4.9	50	150	3.0		Uranine	(91.83)	Br-82	(89.70)	He-4	(92.70)					
#43	×	21.03.90	4	86.004 → 87.006	4.9	53	150	2.8		Uranine	-	Br-82	-							
#44	○	11.06.90	4	86.004 → 87.006	4.9	10	150	15.0		Uranine	(97.02)									
#45	○	26.06.90	4	86.004 → 87.006	4.9	10	150	15.0		Uranine	(97.28)	Br-82	(98.23)							
#46	○	03.07.90	4	86.004 → 87.006	4.9	10	150	15.0		Uranine	(99.47)	Na-22	(90.71)	He-4	-					
#47	○	05.02.91	5	86.004 → 87.006	4.9	51	150	2.9		Uranine	(84.60)	I-123	(86.95)							Input=#54
#48	○	07.02.91	5	86.004 → 87.006	4.9	51	150	2.9		Uranine	(83.75)	Na-24	(61.39)							Input=#54
#49	○	19.02.91	5	86.004 → 87.006	4.9	10	150	15.0		Uranine	(88.00)	I-123	(84.90)							
#50	○	27.02.91	5	86.004 → 87.006	4.9	10	150	15.0		Uranine	(99.89)	Na-22	(103.49)	Sr-85	(60.37)					
#51	○	26.11.91	5	86.004 → 87.006	4.9	10	150	15.0		Uranine	(99.32)									
#52	○	22.01.92	6	87.009 → 87.006	1.7	10	150	15.0		Uranine	(99.76)									
#53	○	28.01.92	6	87.009 → 87.006	1.7	48	148	3.1		Uranine	(97.50)									N.G.
#54	○	29.01.92	6	87.009 → 87.006	1.7	48	148	3.1		Uranine	(97.27)									Retry of #53
#55	○	04.02.92	6	87.009 → 87.006	1.7	0	147	-		Uranine	-	Br-82	-							
#56	○	04.02.92	6	87.009 → 87.006	1.7	0	128	-		Uranine	(97.37)	Br-82	(94.09)							
#57	○	07.02.92	6	87.009 → 87.006	1.7	0	45	-		Uranine	(71.00)	Br-82	(69.16)							
#58-1	○	11.02.92	6	87.009 → Drift		0	468	-		Uranine	(45.22)	Br-82	(54.90)							
#58-2	○	11.02.92	6	87.009 → Drift		0	468	-		Br-82	(47.91)									
#59	○	24.02.92	6	87.009 → 87.006	1.7	10	150	15.0		Uranine	(99.56)									
#60	○	26.02.92	6	87.009 → 87.006	1.7	6.6	97	14.7		Uranine	(91.32)									
#61	○	09.02.92	6	87.009 → 87.006	1.7	10	148	14.8		Uranine	(97.74)	Na-24	(98.55)							
#62	○	12.03.92	6	87.009 → 87.006	1.7	48	148	3.1		Uranine	(97.07)	Na-24	(97.79)							
#63	×	20.03.92	6	87.009 → 87.006	1.7	6.6	100	15.2		Uranine	-	He-4	-							
#64	×	26.03.92	6	87.009 → 87.006	1.7	6.6	100	15.2		Uranine	-	He-4	-							
#65	×	31.03.92	6	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	-	Na-24	-							

表 5-1 (b)　トレーサー試験の試験条件（その２）

Run	データの有無	Date of tracer injection	Phase	Flow field BOMI	Dipole Distance	Injection flow rate (ml/min.)	Extraction flow rate (ml/min.)	Dipole Ratio	Input Func.	Tracer used	(Recovery)	Tracer used	(Recovery)	Tracer used	(Recovery)	Tracer used	(Recovery)	Tracer used	(Recovery)	Remarks
#66-1	○	14.04.92	6	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(99.88)	Na-24	(93.47)	Sr-85	(96.08)					
#66-2	○	22.04.92	6	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(96.11)									
#66-3	○	29.04.92	6	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(98.06)									
#66-4	○	06.05.92	6	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(97.35)									
#67	×	21.05.92	6	87.009 → 87.006	1.7	10	150	15.0		Uranine	-	He-4	-							
#68	×	04.06.92	6	86.004 → 87.009	4.0	10	150	15.0		He-4	-									
#69	×	09.04.92	6	86.004 → 87.009	4.0	10	150	15.0		Uranine	-	He-4	-							
#70	×	19.06.92	6	86.004 → 87.009	4.0	15	225	15.0		Uranine	-	He-4	-							
#71	○	23.06.92	6	87.006 → 87.009	1.7	22	330	15.0		Uranine	(9.35)									
#72	○	25.06.92	6	87.009 → 87.006	1.7	4	60	15.0		Uranine	(93.53)									
#73	○	30.06.92	6	87.009 → 87.006	1.7	4	60	15.0		Uranine	(95.05)	Br-82	(99.86)							
#74	○	18.08.92	6	87.009 → 87.006	1.7	5.6	120	21.4		Uranine	(96.18)	Na-24	(81.06)							
#75-1	○	25.08.92	6	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(98.30)	Rb-86	(92.59)							
#75-2	○	10.09.92	6	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(99.56)	Sr-85	(98.56)							
#75-3	○	07.09.92	6	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(97.41)									
#75-4	○	11.09.92	6	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(95.97)									
#75-5	○	26.09.92	6	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(99.57)									
#76	○	27.10.92	7	86.004 → 87.010	14.0	8	120	15.0		Uranine	(92.87)	He-4	(82.28)							
#77	○	09.12.92	7	86.004 → 87.010	14.0	8	120	15.0		Uranine	(78.24)	He-3	(64.18)	I-123	(71.17)					
#78	○	13.01.93	7	86.004 → 87.010	14.0	8	120	15.0		Uranine	(96.73)	He-3	(81.89)	I-123	(88.08)					
#79	○	16.02.93	7	86.004 → 87.010	14.0	8	120	15.0		Uranine	(94.85)	Br-82	(89.70)	Tc-99m	(.08)					
#80-1	○	16.03.93	8	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(98.40)	Br-82	(100.30)							
#80-2	○	17.03.93	8	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(97.60)	Cs-137	(75.91)							
#80-3	○	24.03.93	8	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(100.00)									
#80-4	○	06.04.93	8	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(99.50)	Br-82	(99.70)							
#80-5	○	21.04.93	8	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(99.30)	He-3	(84.12)							
#81-1	○	18.05.93	8	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(97.30)									
#81-2	○	19.05.93	8	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(97.00)									
#82	○	25.05.93	8	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(100.25)	Tc-99m	(58.57)							
#83	○	01.06.93	8	87.009 → 87.006	1.7	4	60	15.0		Uranine	(80.83)	Br-82	(78.51)							
#84	○	02.06.93	8	87.009 → 87.006	1.7	6	90	15.0		Uranine	(96.61)	Br-82	(93.43)							
#85-1	○	03.06.93	8	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(100.30)	Cs-137	(69.14)							
#85-2	○	08.07.93	8	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(99.62)	He-3	(91.77)							
#86	○	24.08.93	8	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(99.30)	Cs-137	(99.96)							
#86a	○	02.09.93	8	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(98.13)	He-3	(85.32)							
#86b	○	02.11.93	8	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(98.40)	He-3	(80.83)							
#86c	○	08.02.94	8	87.009 → 87.006	1.7	8	120	15.0		Uranine	(96.11)	He-3	(94.75)							
#87	○	17.12.94	9	86.004 → 87.006	4.9	10	150	15.0		Uranine	(93.11)	He-3	(89.78)							
#88	○	15.05.94	9	86.004 → 87.006	4.9	10	150	15.0		Uranine	(92.93)	He-3	(90.81)	Br-82	(95.41)	H-3	(95.78)			
#89	○	21.06.94	9	87.006 → 86.004	4.9	14	193	13.8		Uranine	(97.02)									
#90-1	○	18.07.94	9	87.004 → 87.006	4.9	10	150	15.0		Uranine	(96.00)	Cs-137	(2.23)							
#90-2	○	13.09.94	9	87.004 → 87.006	4.9	10	150	15.0		Uranine	(96.25)	Sr-85	(75.24)							
#90-3	○	28.09.94	9	87.004 → 87.006	4.9	10	150	15.0		Uranine	(93.52)	He-3	(90.95)							
#90-4	○	10.05.94	9	87.004 → 87.006	4.9	10	150	15.0		Uranine	(92.01)									

5.2　検討対象とするトレーサー試験結果

表 5-1に示した試験ケースのうち、逆解析の検討対象とするケースを選択する。選択条件としては以下の項目を検討出来るものを考慮する。

① 試験が実施された水理場（dipole 比）の違いの影響

② スケール（孔間距離）の違いの影響

③ トレーサーの特性（収着特性）の違いの影響

ここでは，試験の実施状況の良否や，データの整備状況も考慮して，表 5-2に示すケースを逆解析の検討対象として選択した。表 5-3には使用した核種の半減期，1 時間あたりの崩壊定数を示す。また，図 5-2，図 5-3にそれぞれの破過曲線を示す。

ほとんど全てのケースにおいて，パルス的な入力に対して，パルス的な応答を示しているが，ケース#47 の応答にダブルピークが表れているのが特徴的である。また，#76 と#78 はほとんど同じ試験条件で行われており，破過曲線もほぼ同じ形状を示している。

表 5-4には移流速度の目安として注入濃度のピーク時刻と回収濃度のピーク時刻の間隔（ピーク到達時間）を示す。孔間距離が 1.7m のケース#62 と#61, 孔間距離が 4.9m のケース#47 と#51 を比較すると，同じ孔間を用いているにも関わらず, dipole 比が小さい方がピーク到達時間が短くなっている。これは，注入流量を大きくすると，流速も大きくなることを示している考えられる。ケース#61 と#73 を比較すると，dipole 比が同じでも注入流量が異なるとピーク到達時間に違いが現れている。これは，dipole 比だけでなく注入流量も孔間の流速に影響を与えることを示している。孔間距離による違いに着目すると，距離に応じてピーク到達時間が長くなり，核種の移行時間が大きくなっている。

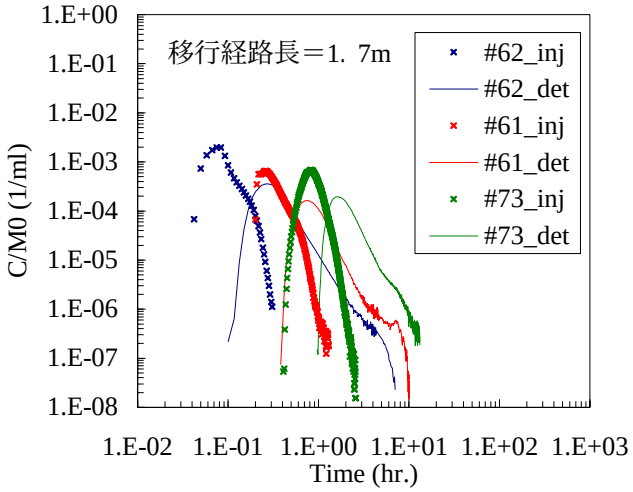
収着性核種については，図 5-3により，Sr-85，Cs-137 のそれぞれの収着特性に応じて，ピーク到達時間が長くなり，また回収濃度が小さくなっていることが分かる。

表 5-2　検討対象とするトレーサー試験

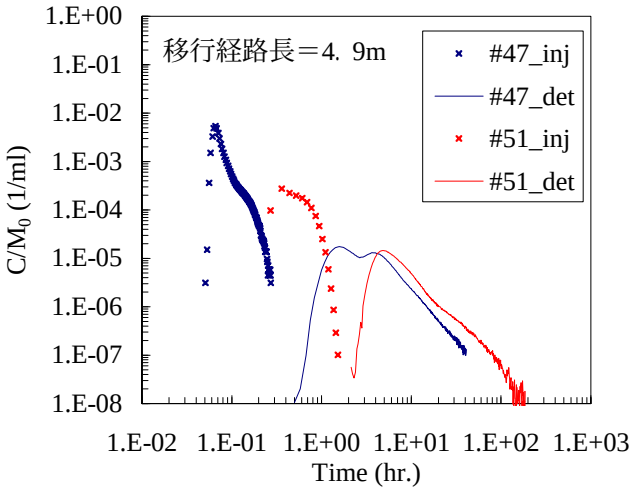
	検討項目	test #	Inj. Rate	Det. Rate	dipole 比	Length	核種			2経路	3経路
							非収着	弱収着	強収着		
1	dipole比による比較	#62	48	148	3.1	1.7m	Uranine				
	scaleによる比較	#61	10	148	14.8	1.7m	Uranine			○	○
		#47	51	150	2.9	4.9m	Uranine			○	○
		#51	10	150	15.0	4.9m	Uranine			○	○
		#76	8	120	15.0	14.0m	Uranine				
		#78	8	120	15.0	14.0m	Uranine			○	○
2	Inj. Rateによる比較	#73	4	60	15.0	1.7m	Uranine				
		#61	10	148	14.8	1.7m	Uranine				
3	tracerによる比較	#90-1	10	150	15.0	4.9m	Uranine		Cs-137	○	
		#90-2	10	150	15.0	4.9m	Uranine	Sr-85		○	

表 5-3　使用したトレーサーと崩壊特性

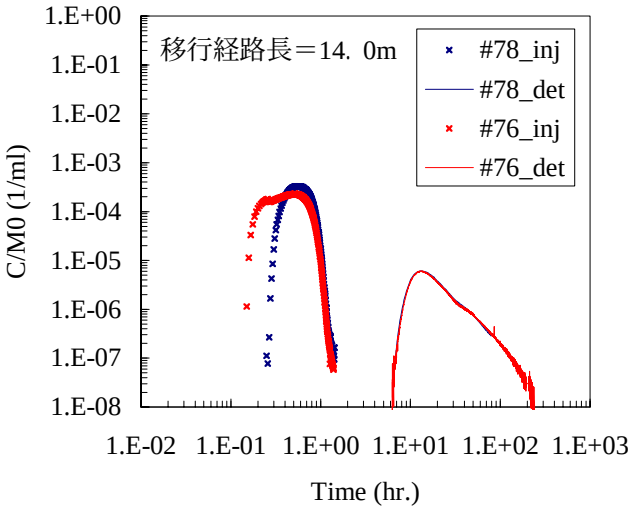
トレーサー	半減期	崩壊定数（1/h）
Uranine	-	-
Sr-85	65d.	4.44E-04
Cs-137	30yr.	2.64E-06



（a）移行経路長=1.7m（BOMI87.009－87.006）



（b）移行経路長=4.9m（BOMI87.004－87.006）



（c）移行経路長=14m（BOMI87.004－87.010）

図 5-2　Uranine の破過曲線

表 5-4　各試験ケースにおけるピーク到達時間

経路長 1.7m	Injection rate (ml/min.)	Extraction rate (ml/min.)	dipole比	ピーク注入時間 (hr.)	ピーク揚水時間 (hr.)	ピーク到達時間 (hr.)
#62	48	150	3.1	0.083	0.267	0.18
#61	10	150	15	0.258	0.733	0.48
#73	4	60	15	0.817	1.633	0.82
経路長 4.9m	Injection rate (ml/min.)	Extraction rate (ml/min.)	dipole比	ピーク注入時間 (hr.)	ピーク揚水時間 (hr.)	ピーク到達時間 (hr.)
#47	51	150	2.9	0.066	1.580	1.51
#51	10	150	15	0.360	4.720	4.36
経路長 14.0m	Injection rate (ml/min.)	Extraction rate (ml/min.)	dipole比	ピーク注入時間 (hr.)	ピーク揚水時間 (hr.)	ピーク到達時間 (hr.)
#78	8	120	15	0.542	13.050	12.51
#76	8	120	15	0.517	13.150	12.63

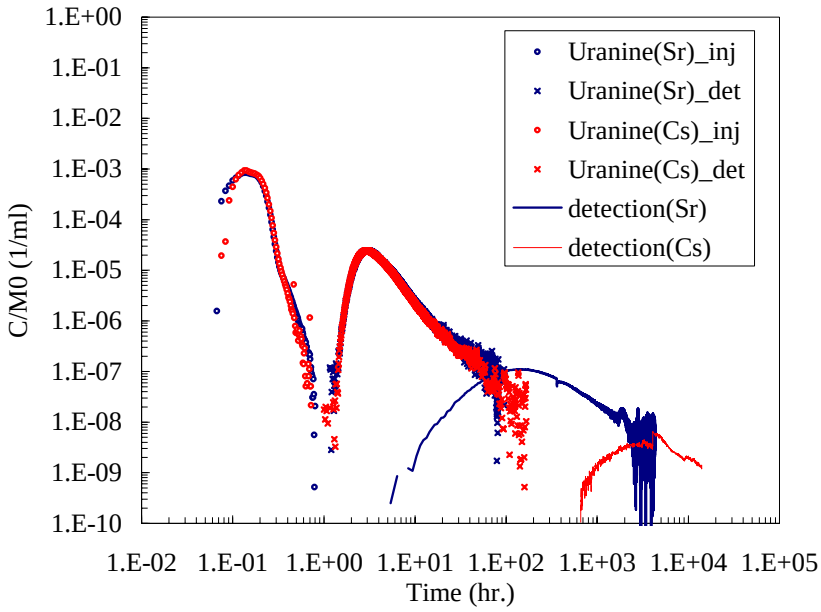


図 5-3　収着性核種の破過曲線（Sr，Cs，移行経路長=4.9m）

6. 逆解析結果

6.1 逆解析の実施方針

本検討で用いる核種移行モデルは,地下水の流動経路を平行平板中の 1 次元移流分散モデルで表現し,同時にマトリックス拡散と亀裂表面並びにマトリックス部における核種の収着を扱えるものである。このモデル中で，核種移行特性を左右するパラメータは多数あるが，特に以下の 5 つの物理特性に焦点を絞り，それぞれの同定パラメータを決定した。なお，本検討でターゲットとなるトレーサー試験結果には，核種崩壊による影響が排除されるようなデータ補正がなされているため，逆解析においても核種崩壊による影響は考慮しないものとする。また，逆解析を行う際には濃度が小さくなる破過曲線の同定精度を向上させるため，実測値と計算値の対数をとって逆解析を行った。

- 移流　：流速
- 亀裂内の分散　：縦方向分散長
- マトリックス内の拡散　：湿潤辺長
- 核種の収着（マトリックス内部）　：遅延係数
- 複数経路の流量配分　：断面積

以下にそれぞれについて順に説明を加える。

6.1.1 移流及び亀裂内分散

核種の移流と分散特性は，核種移行の特性を決定付けるもっとも主要なパラメータと言える。特に核種の巨視的な移行特性を少数本の移行経路中の流れにモデル化する手法では，見かけ上の分散特性が大きくなることに注意する必要がある。

本検討では，移行経路長を試験時のボーリング孔間の実際の距離に固定し，移流特性は流速により表現することとした。また，分散特性については，核種の分子拡散に比べて，地盤の不均質性に伴う機械的分散が卓越するため，拡散係数は固定し，縦方向分散長を同定パラメータとして用いる。

6.1.2 マトリックス内の拡散

マトリックス拡散を決定するパラメータには, 拡散係数, マトリックス部の間隙率, 及び湿潤辺長（あるいは開口幅との比）が挙げられる。本検討では，拡散係数，間隙率は固定値として，湿潤辺長を同定パラメータとした。なお，LTG においては断面積も固定値として与えているため，湿潤辺長を可変させることはすなわち開口幅も同時に変更することになる。

6.1.3 核種の収着

核種の岩への収着に関しては，亀裂表面における収着とマトリックス内部での収着を考慮できるが，JNC 第 2 次とりまとめでは亀裂表面への収着を考慮せず，マトリックス内部での収着のみを取り扱っている。本検討では JNC 第 2 次とりまとめに従い，マトリックス内部での収着のみを考慮して逆解析を行った。同定パラメータには遅延係数を用いる。

6.1.4　複数経路間の流量配分

核種の移行経路を直接決定付けるパラメータとしては，移行経路の本数，及び移行経路の不均質性を挙げることが出来る。とりわけ，トレーサー試験結果に顕著なダブルピークが見られるなど，複数本の卓越した移行経路が予想される場合には，移行経路の本数を増減させることが，試験結果の逆解析を行う際には有効であると思われる。

したがって，本検討では，移行経路本数を 1～3 本に変え，パラメータ同定を行う。なお，移行経路本数を増減させる場合には特にその流量配分に注目し，亀裂断面積を同定パラメータとする（流速は固定）。

6.1.5　入力パラメータの設定

(1)　流れ場に関する仮定

試験対象となるせん断帯の流れ場を既定する条件には以下の要素が挙げられる。

- せん断帯中の自然状態の地下水流れ
- ダイポール試験の注入および揚水量
- せん断帯中の透水量係数の不均一性

事前の観測から自然状態のせん断帯中の流れはダイポール試験により発生する流れに比べ十分小さいことが分かっており，ここでは無視することとする。

ダイポール試験により発生する流れ場は，注入量と揚水量の比（ダイポール比：β）により変化する。2 次元平面内の一様透水場を仮定すると，注入量/揚水量比により流れ場が以下のように変化することが理論的に求められる。孔間距離 L=4.9m の場合の解析結果を次ページに示す。試験条件が L=1.7m，および 14.0m の場合は流線の幾何学的相似を仮定し，それぞれ孔間距離の比に応じた値を採用した。

表 6-1　理論解より仮定した流れ場の幅

	β=3.0	β=15.0
L=14.0m	16.6m	4.0m
L=4.9m	5.8m	1.4m
L=1.7m	2.0m	0.49m

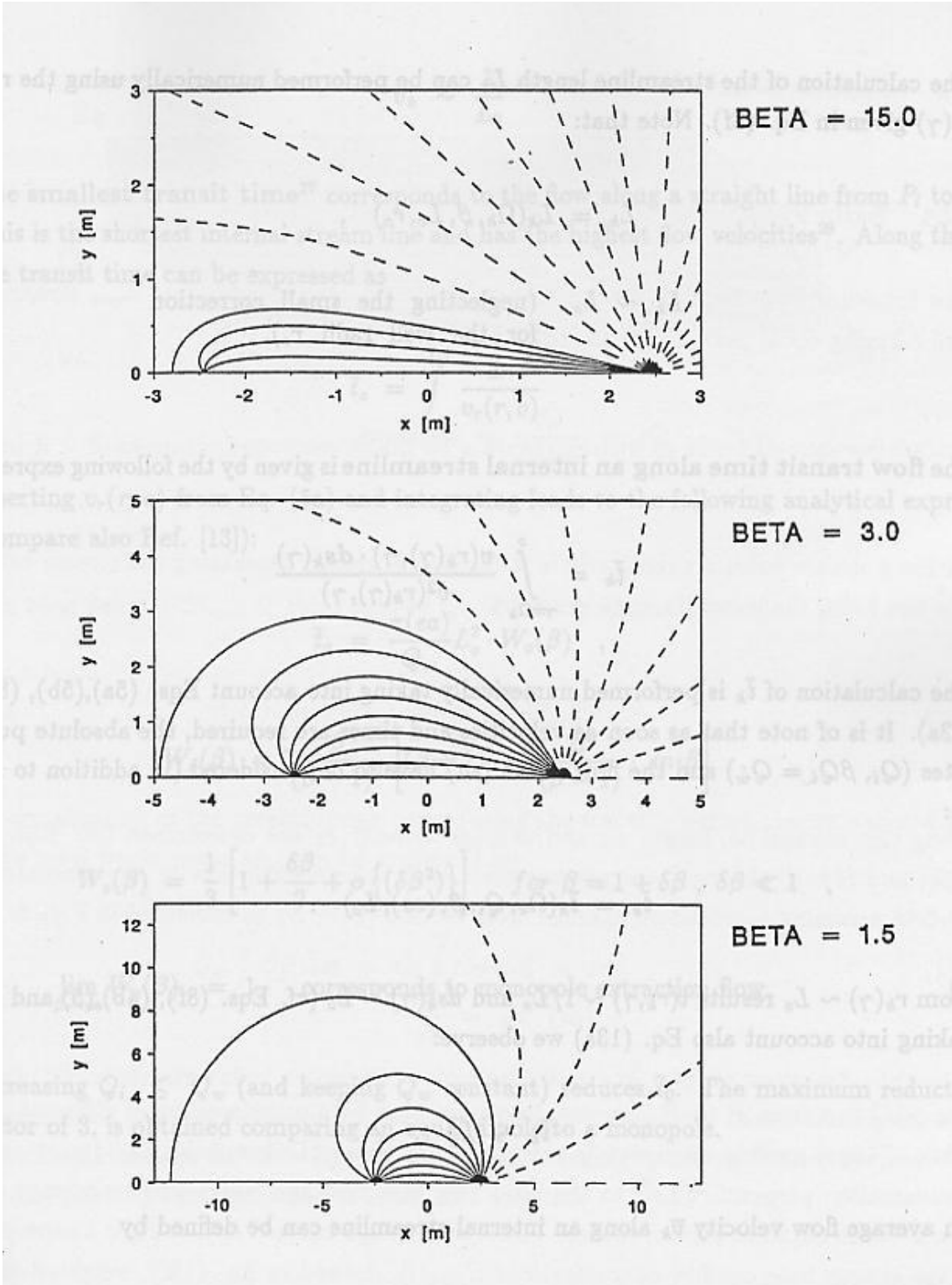


図 6-1　流れ場の理論解（BETA：ダイポール比）

(2) 亀裂内の流れに関する仮定

上記理論解は，せん断帯中の流れ場を均一な透水量係数場と仮定して求めているが，現実には不均一である。また，亀裂の開口幅方向（上記理論解の奥行き方向）にも流れは一様ではなく複雑な状況を呈している。Nagra によるせん断帯の詳細な観察の結果によれば，せん断帯中の流れは，主に以下の 2 種類に大別できる。

- 亀裂内のガウジ中やガウジと亀裂表面の界面に見られる主に移流が卓越する透水ゾーン
- 亀裂内のガウジ中や亀裂表面に存在する空隙がもとになる拡散が卓越するゾーン

なお，せん断帯の外側に存在するインタクトな岩については，間隙率が十分小さく，今回対象となる時間スケールではマトリックス拡散に寄与しないものと考えられる。

Nagra の観察によれば，せん断帯の幅は数 cm（約 5cm）のオーダーであるが，その中に上記移流ゾーンと拡散ゾーンが併存している。ここでは，過去の JNC が実施した逆解析の例に従い，開口幅 2b=1cm とし，せん断帯の残りの部分がマトリックス拡散に寄与するものと考え，本検討ではマトリックス拡散深さ d=2cm とする。マトリックス拡散の寄与面積を決定するパラメータとして，湿潤辺長，マトリックス拡散寄与面積率があるが, 湿潤辺長は流れ場の幅の 2 倍, マトリックス拡散寄与面積率は f=1 とする。また，マトリックス間隙率は 0.2 とする。

トレーサーの拡散係数については，$5.0\times10^{-6}m^2/hr.$（$1.39\times10^{-9}m^2/sec.$）の固定値とする。

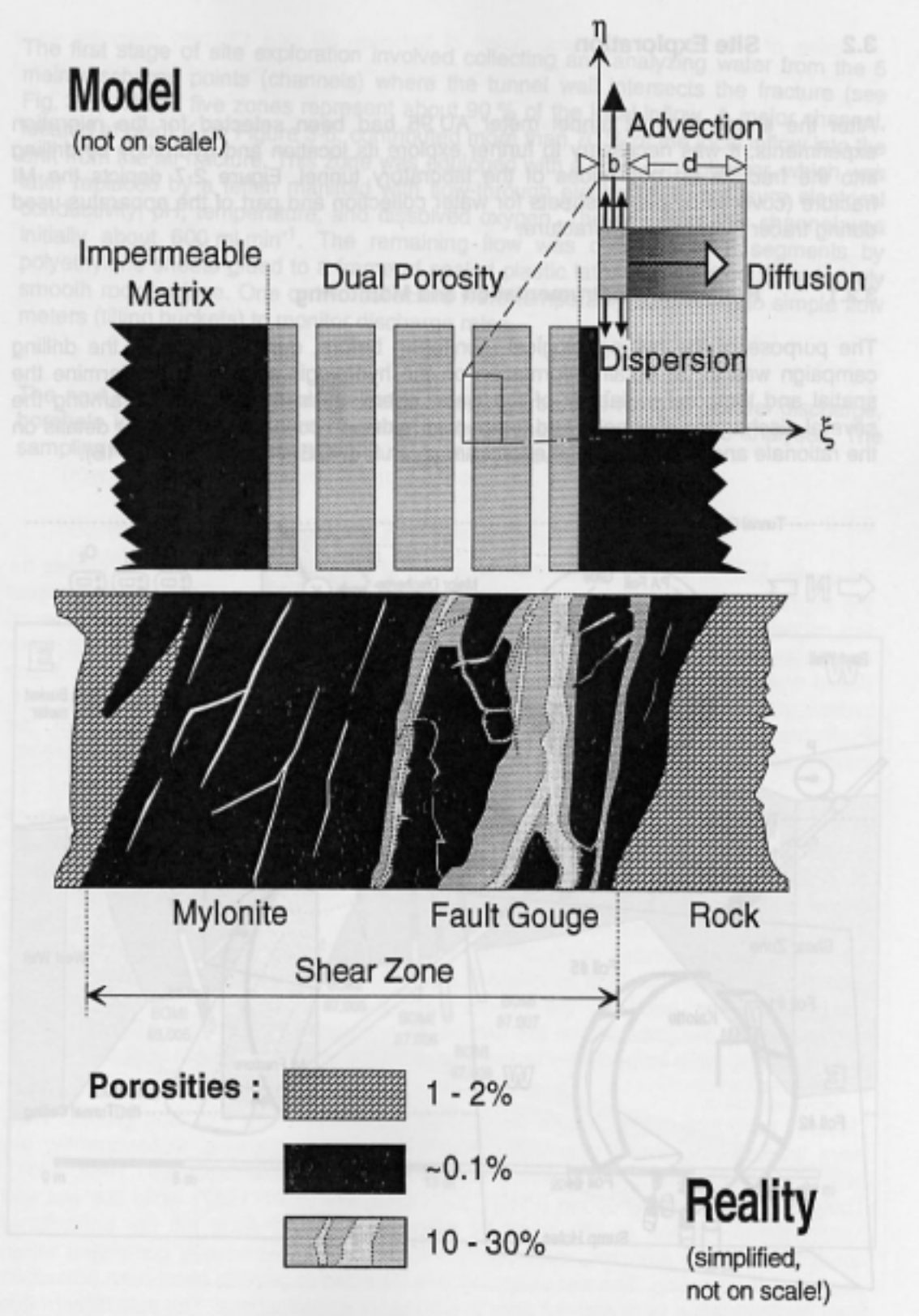


図 6-2　MI せん断帯の透水経路に関する概念モデル

6.1.6　逆解析ケースと入力パラメータ

上記内容にしたがって用いた LTG の入力データ及び，それぞれのケースで同定パラメータとして用いたものと固定値としたものを表 6-2にまとめている。また，実施した解析ケースを表 6-3に示す。

解析の実施手順としてはまず経路数を 1 本に固定した場合について流速，分散長，湿潤辺長の同定を行い（STEP-1A），その同定結果を用いて収着による遅延係数の同定を行った（STEP-1B）。また，STEP-2A および 2B においては，まず 2 本の経路の流量比を同定した後，STEP-1A，1B の内容を実施した。さらに，STEP-3 においては，3 本の経路について STEP2A と同様の内容を実施した。

次節以降では，逆解析結果を解析ケース順に示す。

表 6-2　入力パラメーター覧

ﾊﾟﾗﾒｰﾀ	同定対象	逆解析ｹｰｽ	備考
流速	○	STEP-1A,2A,3	移流パラメータとして同定する。
拡散係数	×	-	固定値を用いる。
縦方向分散長	○	STEP-1A,2A,3	分散パラメータとして同定する。
湿潤辺長	○	STEP-1A,2A,3	マトリックス拡散パラメータとして同定する。
有効間隙率	×	-	Nagra の観測結果を用いる。
マトリックス拡散深さ	×	-	MI せん断帯の特性を考慮して，0.02 に固定する。
屈曲率	×	-	1.0 に固定する。
遅延係数（岩石鉱物）	○	STEP-1B,2B	遅延パラメータとして同定する。
移行経路長	×	-	実際のボーリング孔間距離を用いる。
移行経路数	○	STEP-2A,3	1～3 本の間で変化させる。
断面積	○	STEP-2A,3	複数経路の流量配分パラメータとして同定する。

表 6-3　逆解析ケース一覧表

逆解析STEP	同定パラメータ	対象となる現象	対象トレーサー	備考
STEP-1A	流速 縦方向分散長 湿潤辺長	移流 分散 ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散	Uranine	
STEP-1B	遅延係数（ﾏﾄﾘｯｸｽ）	収着	Uranine,Sr,Cs	STEP-1Aの 決定パラメータを使用
STEP-2A	経路数（2本） 流速 縦方向分散長 湿潤辺長	移行経路選択 移流 分散 ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散	Uranine	同定順：A→v，α→L
STEP-2B	遅延係数（ﾏﾄﾘｯｸｽ）	収着	Uranine,Sr,Cs	STEP-2Aの 決定パラメータを使用
STEP-3	経路数（3本） 流速 縦方向分散長 湿潤辺長	移行経路選択 移流 分散 ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散	Uranine	同定順：A→v，α→L

6.2　逆解析結果

6.2.1　STEP1A の結果

STEP1A では，流速，縦方向分散長，湿潤辺長を同定パラメータとし，非収着トレーサーの移行特性について逆解析を実施した。以下に順に結果を示す。

(1)　孔間距離 1.7m の結果

表 6-4に対象ケースの試験条件，表 6-5にパラメータの同定結果を示す。また図 6-3～図 6-5に逆解析結果（破過曲線）を示す。

流速の初期値は孔間距離をピーク到達時間で除した値を代表流速として採用している。また，分散長の初期値は孔間距離の 1/10，湿潤辺長の初期値は仮定した流れ幅の 2 倍としている。

試験結果と逆解析の結果得られた破過曲線は良好に一致しており，トレーサー試験結果を精度よく再現する最適なパラメータが得られていると言える。

流速の同定値はダイポール比により，また，注入流量が変われば変化している。これは，対象領域の水理場が，注入流量によって変化することを示している。一方，縦方向分散長は，試験条件によらずほぼ一定の値、約 0.2m を示している。

マトリックス拡散を示す湿潤辺長については，ダイポール比による流れ場の広がりの影響をなくすため，湿潤辺長の 1/2 を、仮定した流れ幅で除したマトリックス拡散寄与面積率，および湿潤辺長の 1/2 を等価流れ幅として，断面積を等価流れ幅で除して求めた等価開口幅、および等価開口幅を等価流れ幅で除した等価アスペクト比も併記している。マトリックス拡散寄与面積率は 2.8～7.3 となり極めて大きい値となった。

表 6-4　試験条件（孔間距離=1.7m）

試験名	孔間距離 (m)	Inj.Rate (ml/min.)	Ext.Rate (ml/min.)	dipole比	仮定値		
					流れ幅 (m)	開口幅 (m)	断面積 (m^2)
#62	1.7	48	148	3.1	2.0	0.01	0.02
#61	1.7	10	148	14.8	0.49	0.01	0.0049
#73	1.7	4	60	15	0.49	0.01	0.0049

表 6-5　同定パラメータの初期値と最適値（孔間距離=1.7m）

試験名	初期値			同定値					残差二乗和
	流速 (m/hr.)	分散長 (m)	湿潤辺長 (m)	流速 (m/hr.)	分散長 (m)	湿潤辺長 (m)	ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率	ｱｽﾍﾟｸﾄ比 (-)	
#62	9.24	0.17	4.0	6.74	0.21	29.36	7.3	9.3E-05	2.83E-09
#61	3.58	0.17	0.98	2.89	0.17	2.70	2.8	2.7E-03	5.13E-10
#73	2.08	0.17	0.98	1.52	0.21	3.30	3.4	1.8E-03	6.65E-09

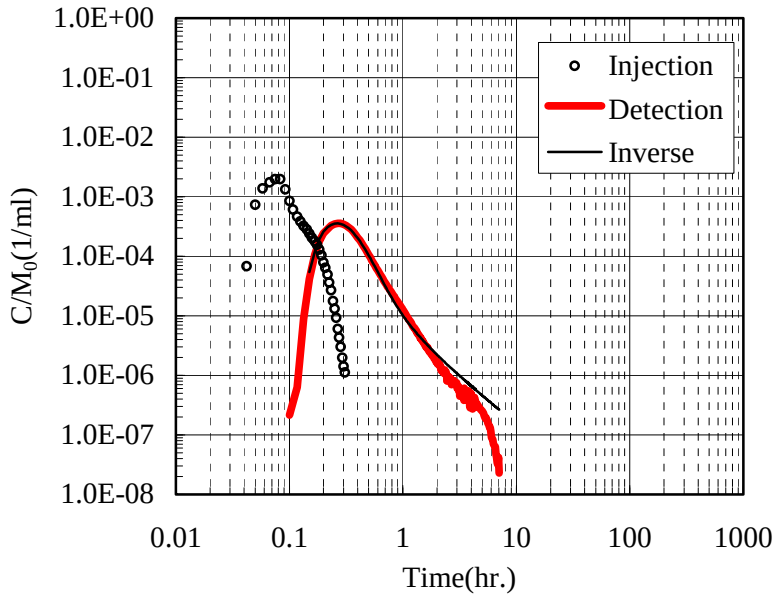


図 6-3　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP1A，#62）

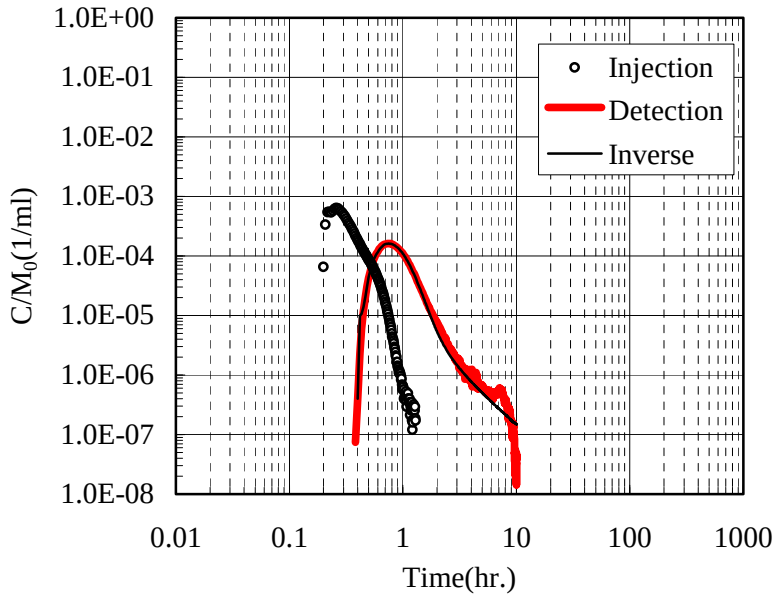


図 6-4　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP1A，#61）

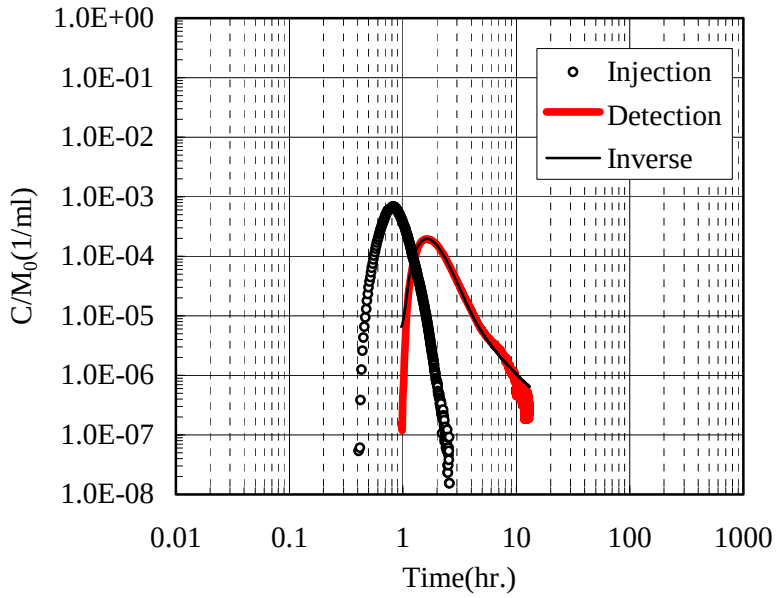


図 6-5　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP1A，#73）

(2) 孔間距離 4.9m の結果

表 6-6に対象ケースの試験条件，表 6-7にパラメータの同定結果を示す。また図 6-6～図 6-7に逆解析結果（破過曲線）を示す。本検討では 1 経路モデルを使用しているために，#47 のケースについては応答曲線のダブルピークは再現できていないものの，概ね良好に逆解析が実施できていると言える。

流速の同定値は注入流量が大きいほど大きい値となっており，孔間距離が 1.7m のケースと同様の結果となっている。一方，分散長，マトリックス拡散寄与面積率とアスペクト比は#47 と#51 で異なる傾向を示している。これはダブルピークを示す#47 の結果を 1 経路モデルで表現したためと考えられる。

表 6-6　試験条件（孔間距離=4.9m）

試験名	孔間距離 (m)	Inj.Rate (ml/min.)	Ext.Rate (ml/min.)	dipole比	仮定値		
					流れ幅 (m)	開口幅 (m)	断面積 (m^2)
#47	4.9	51	150	2.9	5.8	0.01	0.058
#51	4.9	10	150	15	1.4	0.01	0.014

表 6-7　同定パラメータの初期値と最適値（孔間距離=4.9m）

試験名	初期値			同定値					残差二乗和
	流速 (m/hr.)	分散長 (m)	湿潤辺長 (m)	流速 (m/hr.)	分散長 (m)	湿潤辺長 (m)	ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率	ｱｽﾍﾟｸﾄ比 (-)	
#47	3.24	0.49	11.6	2.47	0.48	7.45	0.6	4.2E-03	5.15E-10
#51	1.12	0.49	2.8	1.20	0.17	15.46	5.5	2.3E-04	3.00E-11

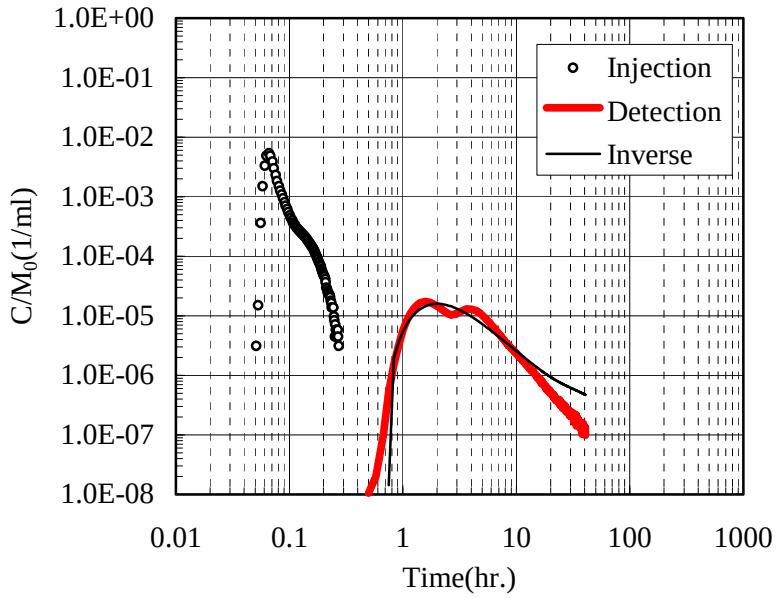


図 6-6　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP1A，#47）

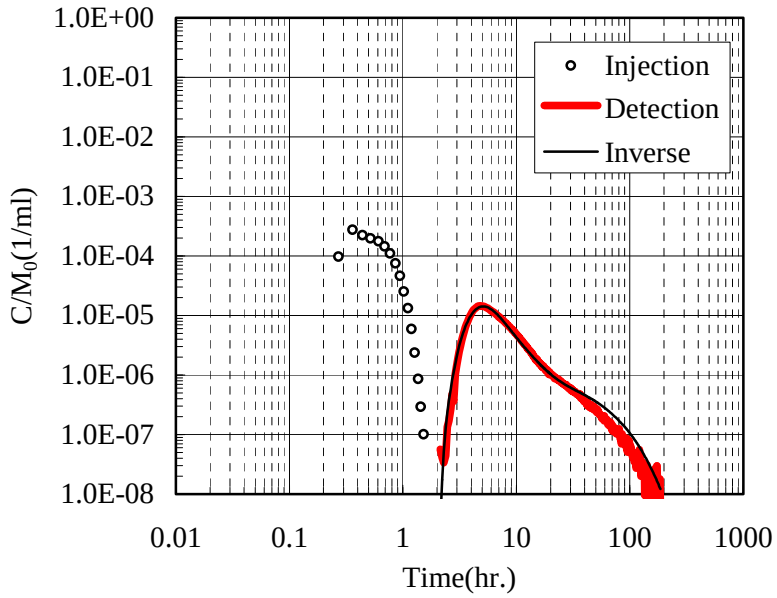


図 6-7　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP1A，#51）

(3) 孔間距離 14.0m の結果

表 6-8に対象ケースの試験条件，表 6-9にパラメータの同定結果を示す。また図 6-8～図 6-9に逆解析結果（破過曲線）を示す。#78 と#76 はほぼ同様の試験条件で実施されており，本検討では逆解析による同定結果もほぼ同じ結果を示すことを確認するために用いている。図 6-8，図 6-9から，#78，#76 とも良好に破過曲線が再現できていると言える。

また，流速，縦方向分散長，マトリクス拡散寄与面積率，アスペクト比の同定値もほぼ同じ値を示しており，両試験のトレーサーの移行特性がほぼ同じであることを示している。

表 6-8　試験条件（孔間距離=14.0m）

試験名	孔間距離 (m)	Inj.Rate (ml/min.)	Ext.Rate (ml/min.)	dipole比	仮定値		
					流れ幅 (m)	開口幅 (m)	断面積 (m^2)
#78	14	8	120	15	4.0	0.01	0.04
#76	14	8	120	15	4.0	0.01	0.04

表 6-9　同定パラメータの初期値と最適値（孔間距離=14.0m）

試験名	初期値			同定値					残差二乗和
	流速 (m/hr.)	分散長 (m)	湿潤辺長 (m)	流速 (m/hr.)	分散長 (m)	湿潤辺長 (m)	ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率	ｱｽﾍﾟｸﾄ比 (-)	
#78	1.12	1.4	8.0	1.16	0.48	24.25	3.0	2.7E-04	2.68E-12
#76	1.11	1.4	8.0	1.12	0.49	21.22	2.7	3.6E-04	1.11E-10

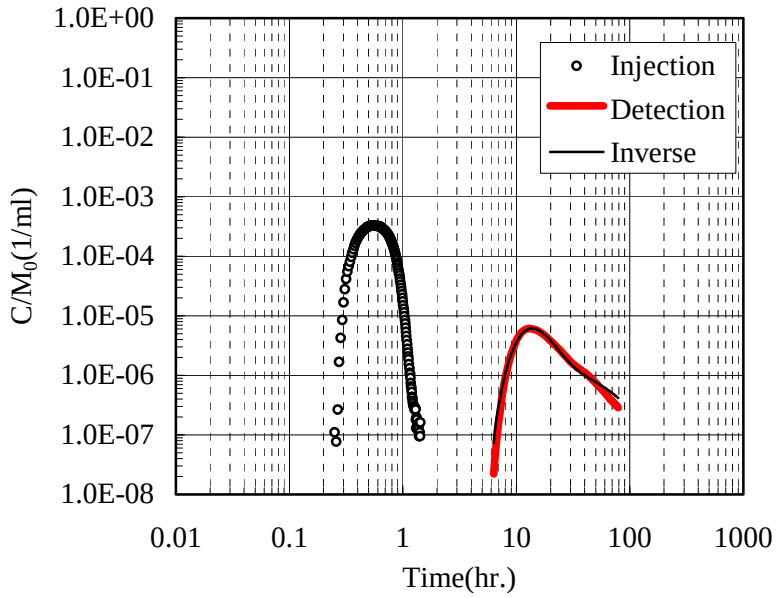


図 6-8　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP1A，#78）

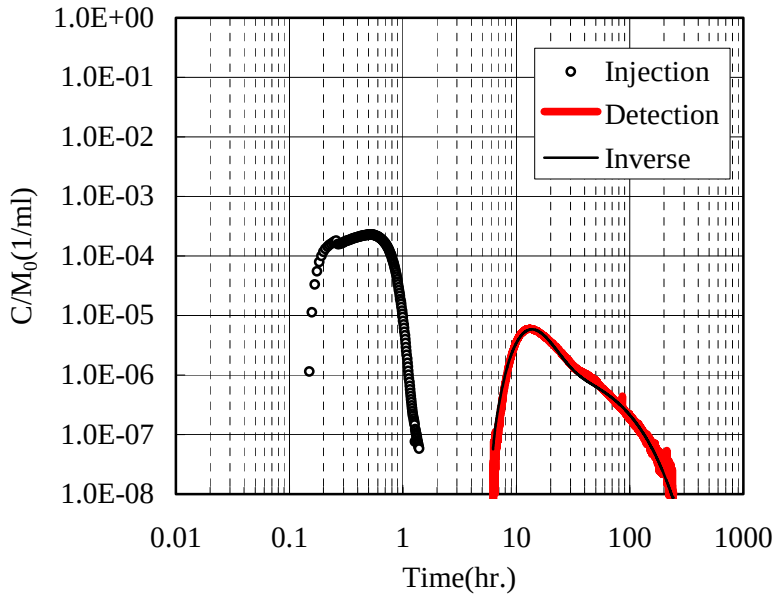


図 6-9　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP1A，#76）

6.2.2　STEP1B の結果

STEP1B については, 試験ケース#90 を対象として, 非収着トレーサーである Uranine を用いて, 流速, 分散長，湿潤辺長（アスペクト比）を同定した後，それらの値を用いて，Sr-85，Cs-137 の遅延係数を同定した。以下に順にその結果を示す。

(1)　非収着トレーサー（Uranine）の結果

表 6-10に試験ケース#90 の試験条件を示す。#90 では，Sr-85，Cs-137 のトレーサー試験を個別に行っているが，それぞれの試験時に Uranine も同時に注入している。流速，分散長，湿潤辺長（アスペクト比）の同定は Uranine について行った。表 6-10にパラメータの同定結果を，図 6-10～図 6-11に逆解析結果（破過曲線）を示す。#90 は#51 と同様の条件で試験を行っており，分散長，湿潤辺長，マトリックス拡散寄与面積率，アスペクト比の同定値も#51 の結果とほぼ同じ値となっている。

表 6-10　試験ケース#90 の試験条件

試験名	孔間距離 (m)	Inj.Rate (ml/min.)	Ext.Rate (ml/min.)	dipole比	仮定値			tracer	
					流れ幅 (m)	開口幅 (m)	断面積 (m^2)		
#90-2	4.9	10	150	15	1.4	0.01	0.014	Uranine	Sr-85
#90-1	4.9	10	150	15	1.4	0.01	0.014	Uranine	Cs-137

表 6-11　同定パラメータの初期値と最適値（試験ケース#90）

試験名	初期値			同定値					残差二乗和
	流速 (m/hr.)	分散長 (m)	湿潤辺長 (m)	流速 (m/hr.)	分散長 (m)	湿潤辺長 (m)	ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率	ｱｽﾍﾟｸﾄ比 (-)	
#90-2	1.729	0.49	2.8	1.71	0.19	14.68	5.2	2.6E-04	3.10E-10
#90-1	1.732	0.49	2.8	1.77	0.18	15.54	5.5	2.3E-04	1.97E-10

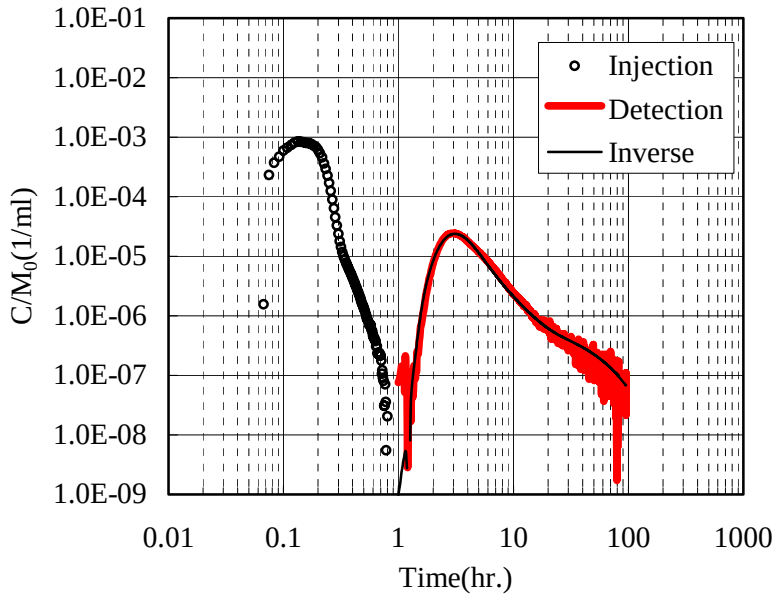


図 6-10　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP1B，#90-2，Sr-85 と同時注入）

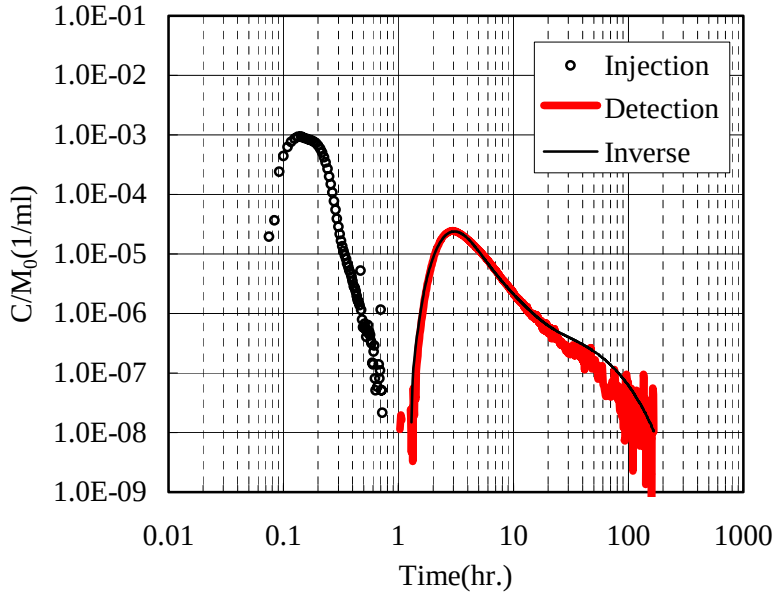


図 6-11　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP1B，#90-1，Cs-137 と同時注入）

(2) 収着性トレーサー（Sr-85，Cs-137）の結果

収着性核種の移行特性の検討については，それぞれと同時に流下させた Uranine の破過曲線より求めた流速，縦方向分散長，湿潤辺長を固定値とし，マトリックス部における遅延係数のみを同定パラメータとして逆解析を実施した。また，遅延係数の初期値は Sr-85 は 1，Cs-137 は 10000 とした。

表 6-12にパラメータの同定結果を，図 6-12，図 6-13に逆解析結果（破過曲線）を示す。破過曲線は，逆解析結果と観測結果が良好な一致を見ていることが分かる。特に強収着性核種である Cs-137 も精度よく再現できている。

表 6-12　同定パラメータの初期値と最適値（試験ケース#90）

試験ケース	核種	変更パラメータ	初期値	最適値	残差二乗和
#90-2	Sr	マトリックス遅延係数	1	286	1.88E-12
#90-1	Cs	マトリックス遅延係数	10000	12034	7.11E-15

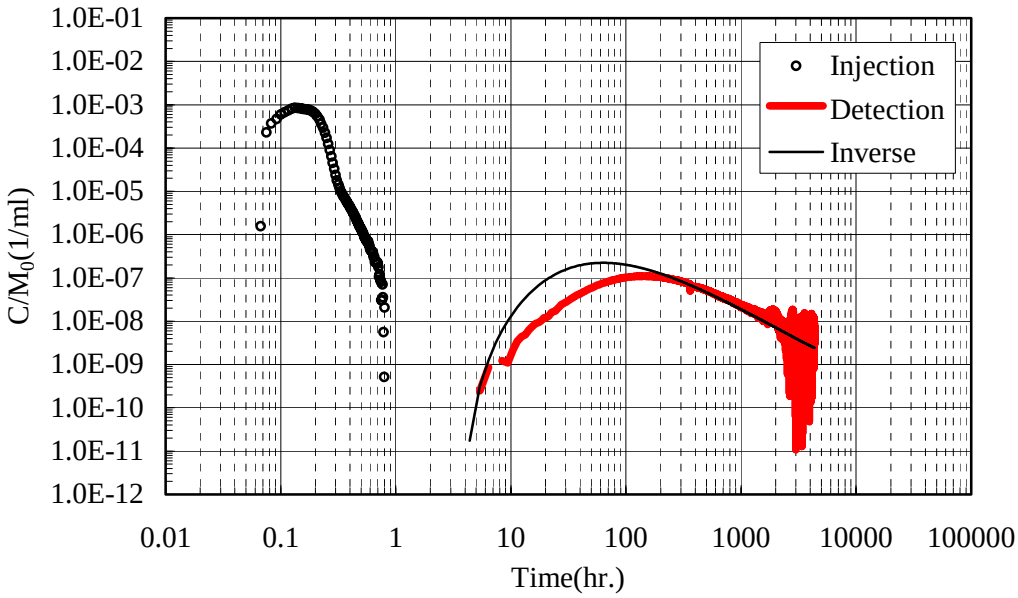


図 6-12　Sr-85 の破過曲線と逆解析結果（STEP1B，#90-2）

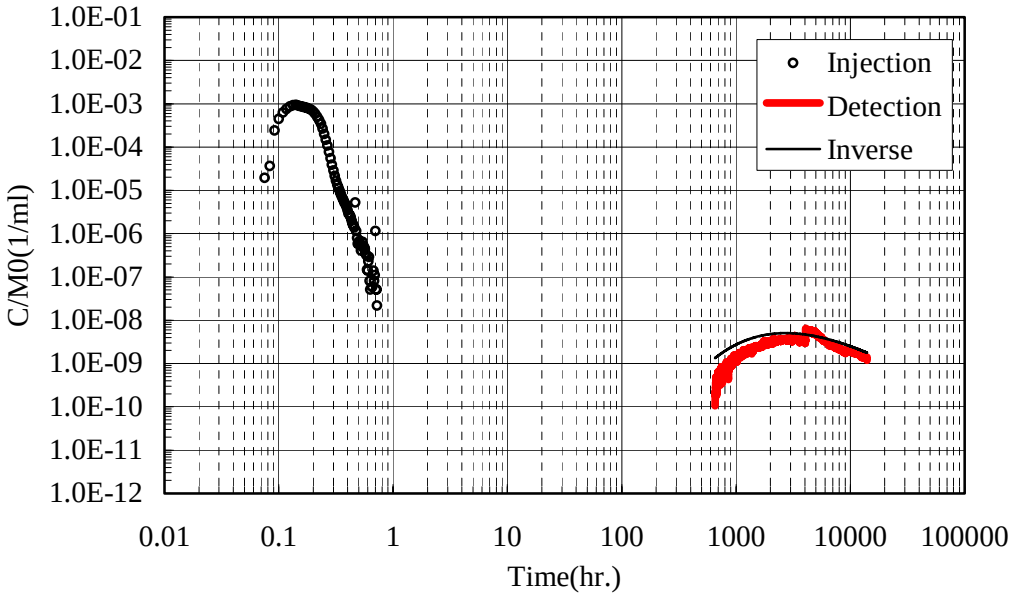


図 6-13　Cs-137 の破過曲線と逆解析結果（STEP1B，#90-1）

6.2.3　STEP2A の結果

(1)　実施方針

検討対象としては，ダブルピークが明瞭に表れている#47 と同じ孔間（4.9m）を用いた#51，また#51 と同じダイポール比で孔間距離が 1.7m の#61，14.0m の#76 とした。

同定手順としては，まず 2 本の移行経路の断面積（=流量比）を同定し，その後 STEP1A で同定した 3 種類のパラメータ（流速，縦方向分散長，湿潤辺長）の検討を行う。なお，断面積同定時の流速はダブルピークのそれぞれのピーク到達時間から求めた。ダブルピークが不明確なものは，テール部の角度変化部により求めた。

断面積同定後は，流速と縦方向分散長を同時に同定し，最後に湿潤辺長を同定する。

表 6-13に断面積同定時に用いた流速，分散長，湿潤辺長を示す。

表 6-13　断面積同定時に用いた流速，分散長，湿潤辺長（STEP2A）

試験名	流速1	流速2	分散長	湿潤辺長
#47	3.236	1.360	0.49	11.6
#51	1.124	0.206	0.49	2.8
#61	3.579	0.235	0.17	0.98
#76	1.108	0.428	1.4	8.0

(2) 孔間距離 4.9m の結果

表 6-14～表 6-15にパラメータの同定結果，図 6-14～図 6-15に逆解析結果（破過曲線）を示す。逆解析の結果，破過曲線が良好に再現されているのが分かる。特に，#47 の逆解析結果では 1 経路モデルでは再現できなかったダブルピークを良好に再現しており，また，その残差二乗和も表 6-7に示された 1 経路モデルによる逆解析結果よりも減少しており同定精度が向上しているのが分かる。また，#51 の結果についても，2 経路モデルを採用することにより、破過曲線の再現性が向上するとともに，残差二乗和も低減しており、同定精度の向上が見られた。

表 6-14　同定パラメータの初期値と最適値（STEP2A，#47，Uranine）

試験ケース	同定stage	同定パラメータ	初期値	最適値	残差二乗和
#47	1	断面積1(m2)	0.058	0.003	6.294E-10
		断面積2(m2)	0.058	0.009	
	2	流速1(m/hr.)	3.236	4.886	3.736E-11
		流速2(m/hr.)	1.360	1.485	
		分散長1(m)	0.49	0.092	
		分散長2(m)	0.49	0.071	
	3	湿潤辺長1（m）	11.6	11.59	3.718E-11
		湿潤辺長2（m）	11.6	11.53	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率1	1.0	1.0	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率2	1.0	1.0	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比1(-)	9.2E-05	9.2E-05	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比2(-)	2.6E-04	2.6E-04	

表 6-15　同定パラメータの初期値と最適値（STEP2A，#51，Uranine）

試験ケース	同定stage	同定パラメータ	初期値	最適値	残差二乗和
#51	1	断面積1(m2)	0.014	0.004	1.237E-09
		断面積2(m2)	0.014	0.006	
	2	流速1(m/hr.)	1.124	1.307	1.103E-11
		流速2(m/hr.)	0.206	0.515	
		分散長1(m)	0.49	0.133	
		分散長2(m)	0.49	0.482	
	3	湿潤辺長1（m）	2.8	2.796	1.722E-11
		湿潤辺長2（m）	2.8	2.900	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率1	1.0	1.0	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率2	1.0	1.0	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比1(-)	2.4E-03	1.8E-03	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比2(-)	5.4E-03	3.0E-03	

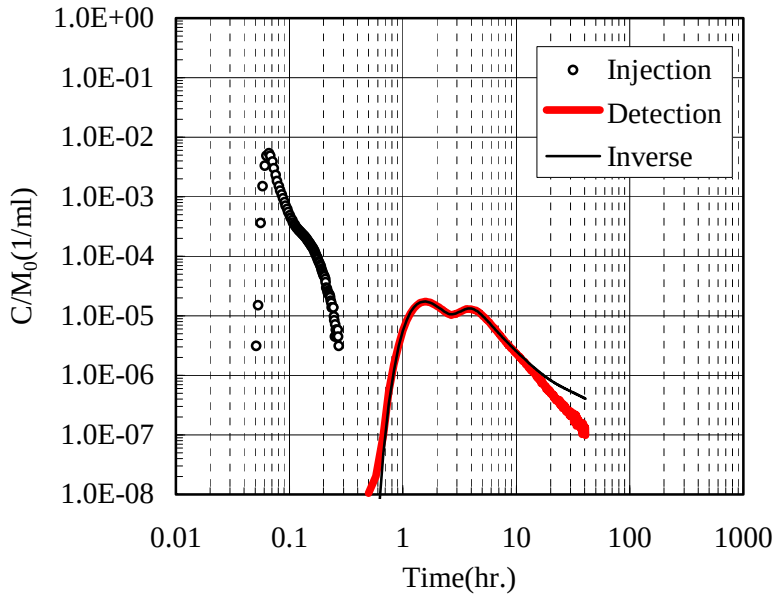


図 6-14　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP2A，#47）

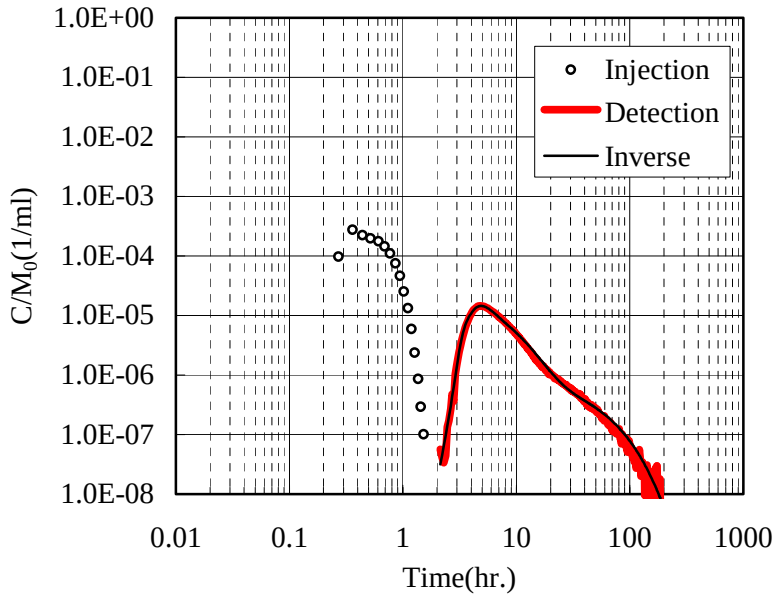


図 6-15　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP2A，#51）

(3) 孔間距離 1.7m，14.0m の結果

表 6-17，表 6-21にパラメータの同定結果，図 6-16，図 6-17に逆解析結果（破過曲線）を示す。逆解析の結果，破過曲線が良好に再現されているのが分かる。しかしながら，二経路モデルを採用することによる破過曲線の再現性の明確な向上はなく、それぞれの残差二乗和を確認すると，表 6-5および表 6-9に示された 1 経路モデルによる逆解析結果よりも#61, #76 の結果ともに若干同定精度が下がる結果となった。

表 6-16　同定パラメータの初期値と最適値（STEP2A，#61，Uranine）

試験ケース	同定stage	同定パラメータ	初期値	最適値	残差二乗和
#61	1	断面積1(m2)	0.0049	0.001	2.286E-08
		断面積2(m2)	0.0049	0.002	
	2	流速1(m/hr.)	3.579	3.322	1.109E-09
		流速2(m/hr.)	0.235	0.008	
		分散長1(m)	0.17	0.148	
		分散長2(m)	0.17	0.140	
	3	湿潤辺長1（m）	0.98	0.973	1.106E-09
		湿潤辺長2（m）	0.98	1.346	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率1	1.00	0.99	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率2	1.00	1.37	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比1(-)	3.2E-03	5.5E-03	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比2(-)	9.2E-04	4.9E-03	

表 6-17　同定パラメータの初期値と最適値（STEP2A，#76，Uranine）

試験ケース	同定stage	同定パラメータ	初期値	最適値	残差二乗和
#76	1	断面積1(m2)	0.04	0.041	1.983E-09
		断面積2(m2)	0.04	0.126	
	2	流速1(m/hr.)	1.108	1.159	1.446E-10
		流速2(m/hr.)	0.428	0.125	
		分散長1(m)	1.40	0.674	
		分散長2(m)	1.40	6.989	
	3	湿潤辺長1（m）	8.0	7.539	1.185E-10
		湿潤辺長2（m）	8.0	14.840	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率1	1.0	0.9	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率2	1.0	1.9	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比1(-)	1.4E-03	2.9E-03	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比2(-)	5.1E-03	2.3E-03	

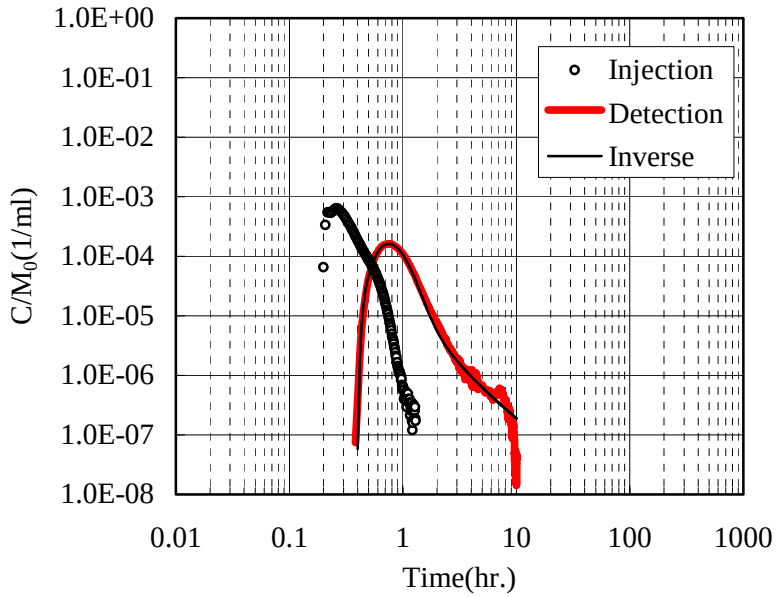


図 6-16　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP2A，#61）

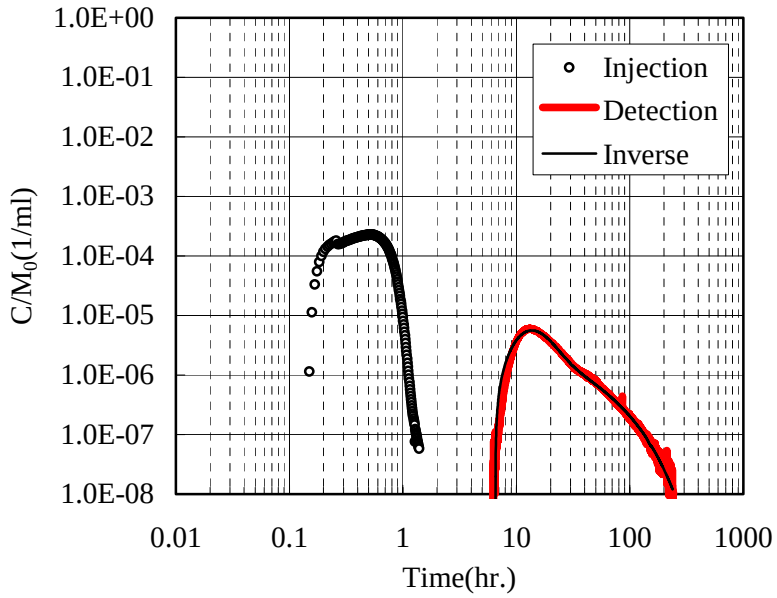


図 6-17　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP2A，#76）

6.2.4 STEP2B の結果

STEP2B については，STEP1B と同様に試験ケース#90 を対象として逆解析を実施した。確認のため，試験ケース#90 の試験条件を表 6-18に再掲する。同定手順も STEP1B と同様に非収着トレーサーである Uranine を用いて，流速，分散長，湿潤辺長（アスペクト比）を同定した後，それらの値を用いて，Sr-85, Cs-137 の遅延係数を同定した。以下に順に逆解析結果を示す。

表 6-18 試験ケース#90 の試験条件（再掲）

試験名	孔間距離 (m)	Inj.Rate (ml/min.)	Ext.Rate (ml/min.)	dipole比	仮定値			tracer	
					流れ幅 (m)	開口幅 (m)	断面積 (m^2)		
#90-2	4.9	10	150	15	1.4	0.01	0.014	Uranine	Sr-85
#90-1	4.9	10	150	15	1.4	0.01	0.014	Uranine	Cs-137

(1) 非収着トレーサー（Uranine）の結果

表 6-19，表 6-20にパラメータの同定結果を，図 6-18～図 6-19に逆解析結果（破過曲線）を示す。破過曲線は立上がり部からテール部に至るまで極めて良好に再現できている。しかしながら，その同定精度は表 6-11に示す 1 経路モデルによる結果と比較して同程度ではあるものの若干低下した。

表 6-19 同定パラメータの初期値と最適値（試験ケース#90-2）

試験ケース	同定stage	同定パラメータ	初期値	最適値	残差二乗和
#90-2	1	断面積1(m2)	0.014	0.004	1.394E-08
		断面積2(m2)	0.014	0.008	
	2	流速1(m/hr.)	1.729	2.090	1.355E-08
		流速2(m/hr.)	0.300	0.069	
		分散長1(m)	0.49	0.144	
		分散長2(m)	0.49	0.472	
	3	湿潤辺長1（m）	2.8	4.99	2.984E-09
		湿潤辺長2（m）	2.8	6.73	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率1	1.0	1.8	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率2	1.0	2.4	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比1(-)	7.1E-03	5.9E-04	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比2(-)	7.1E-03	6.9E-04	

表 6-20 同定パラメータの初期値と最適値（試験ケース#90-1）

試験ケース	同定stage	同定パラメータ	初期値	最適値	残差二乗和
#90-1	1	断面積1(m2)	0.014	0.004	1.304E-08
		断面積2(m2)	0.014	0.008	
	2	流速1(m/hr.)	1.732	1.896	9.136E-10
		流速2(m/hr.)	0.299	0.010	
		分散長1(m)	0.49	0.280	
		分散長2(m)	0.49	1.333	
	3	湿潤辺長1（m）	2.8	2.43	8.227E-10
		湿潤辺長2（m）	2.8	6.40	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率1	1.0	0.9	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率2	1.0	2.3	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比1(-)	7.1E-03	2.7E-03	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比2(-)	7.1E-03	7.8E-04	

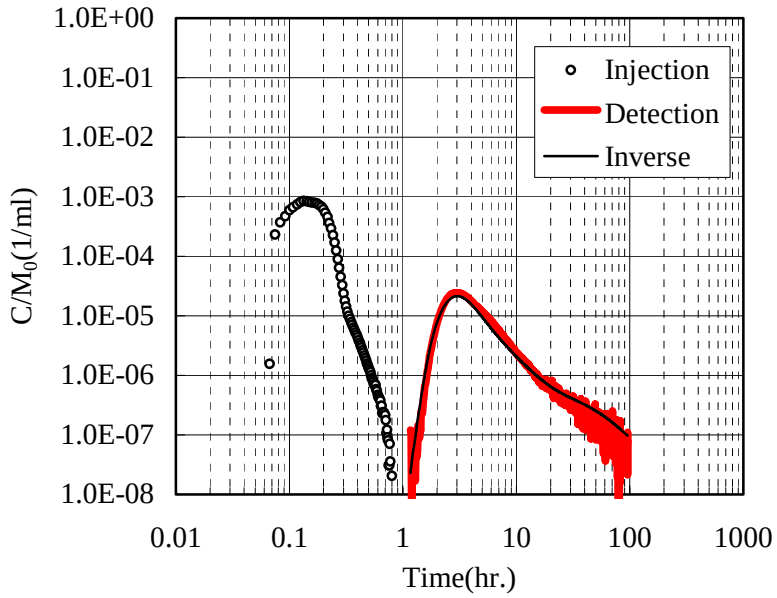


図 6-18　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP2B，#90-2，Sr-85 と同時注入）

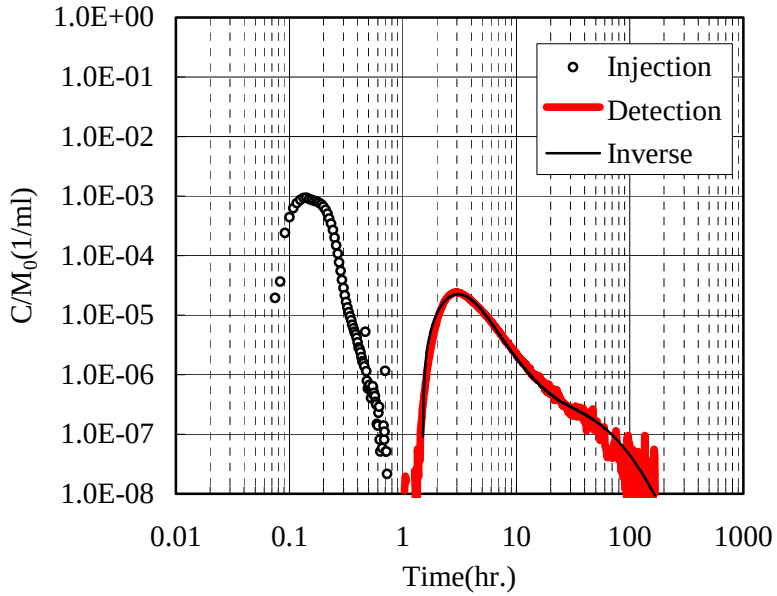


図 6-19　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP2B，#90-1，Cs-137 と同時注入）

(2) 収着性トレーサー（Sr-85，Cs-137）の結果

収着性核種の移行特性の検討については，それぞれと同時に流下させた Uranine の破過曲線より求めた流速，縦方向分散長，湿潤辺長を固定値とし，マトリックス部における遅延係数のみを同定パラメータとして逆解析を実施した。また，遅延係数の初期値は Sr-85 は 1，Cs-137 は 100000 とした。

表 6-21にパラメータの同定結果を，図 6-20，図 6-21に逆解析結果（破過曲線）を示す。破過曲線は，逆解析結果と観測結果が良好な一致を見ていることが分かる。特に Sr-85 については再現性が明確に向上し、強収着性核種である Cs-137 も精度よく再現できている。

表 6-12に示される 1 経路モデルによる結果と比較すると，Sr-85, Cs-137 ともに同定精度が向上した。

表 6-21　同定パラメータの初期値と最適値（試験ケース#90）

試験ケース	核種	変更パラメータ	初期値	最適値	最終残差二乗和
#90-2	Sr	マトリックス遅延係数	1	384	8.390E-14
#90-1	Cs	マトリックス遅延係数	100000	27732	4.030E-15

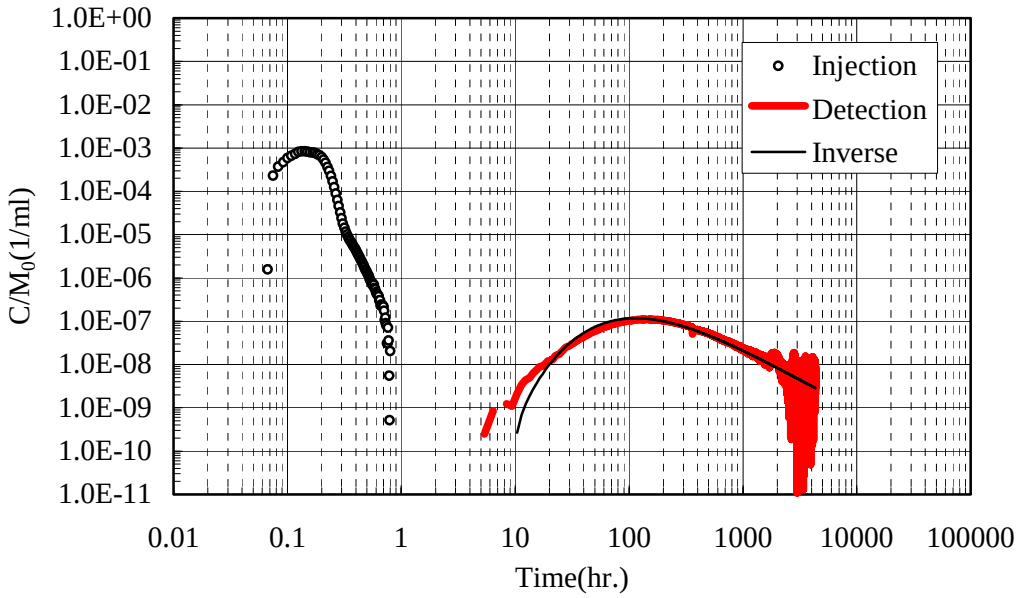


図 6-20　Sr-85 の破過曲線と逆解析結果（STEP2B，#90-2）

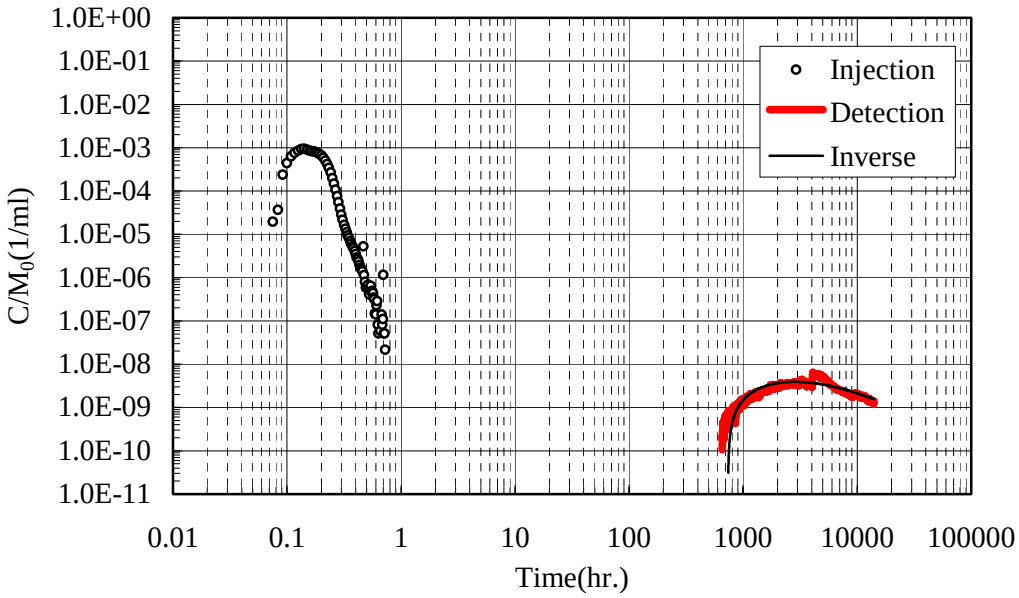


図 6-21　Cs-137 の破過曲線と逆解析結果（STEP2B，#90-1）

6.2.5　STEP3 の結果

STEP3 においては，STEP2A において検討を行ったケースについて，経路数を 3 本にすることによりどの程度の精度向上が見られるかの確認を行った。以下に順にその結果を示す。

同定手順としては，まず 3 本の移行経路の断面積（=流量比）を同定し，その後 STEP1A および STEP2A で同定した 3 種類のパラメータ（流速，縦方向分散長，湿潤辺長）の検討を行う。なお，断面積同定時の流速は二経路モデルで採用した流速に加え、それらの平均値を採用した。

断面積同定後は，流速と縦方向分散長を同時に同定し，最後に湿潤辺長を同定する。

表 6-22に断面積同定時に用いた流速，分散長，湿潤辺長を示す。

表 6-22　断面積同定時に用いた流速，分散長，湿潤辺長（STEP3）

試験名	流速1	流速2	流速3	分散長	湿潤辺長
#47	3.236	1.36	2.298	0.49	11.6
#51	1.124	0.206	0.656	0.49	2.8
#61	3.579	0.235	1.907	0.17	0.98
#76	1.108	0.428	0.768	1.4	8.00

(1)　孔間距離 4.9m の結果

表 6-23～表 6-24にパラメータの同定結果，図 6-22～図 6-23に逆解析結果（破過曲線）を示す。逆解析の結果，破過曲線が良好に再現されているのが分かる。特に，#47 の逆解析結果では 1 経路モデルでは再現できなかったダブルピークが 2 経路モデルの結果と同様に良好に再現している。また，それぞれの残差二乗和を確認すると，#47 については、表 6-7，表 6-14，表 6-15に示された 1 経路モデル，2 経路モデルによる逆解析結果よりも同定精度が向上している。一方、#51 については 1 経路モデル、2 経路モデルによる結果とほぼ同程度であるものの同定精度が若干低下している。

表 6-23　同定パラメータの初期値と最適値（STEP3，#47，Uranine）

試験ケース	同定stage	同定パラメータ	初期値	最適値	残差二乗和
#47	1	断面積1(m2)	0.058	0.004	4.438E-10
		断面積2(m2)	0.058	0.010	
		断面積3(m2)	0.058	0.002	
	2	流速1(m/hr.)	3.236	3.798	3.013E-11
		流速2(m/hr.)	1.360	1.445	
		流速3(m/hr.)	2.298	0.587	
		分散長1(m)	0.49	0.192	
		分散長2(m)	0.49	0.066	
		分散長3(m)	0.49	0.285	
	3	湿潤辺長1(m)	11.6	11.54	2.894E-11
		湿潤辺長2(m)	11.6	11.53	
		湿潤辺長3(m)	11.6	15.65	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率1	1.0	1.0	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率2	1.0	1.0	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率3	1.0	1.3	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比1(-)	1.72E-03	1.34E-04	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比2(-)	1.72E-03	2.89E-04	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比3(-)	1.72E-03	3.45E-05	

表 6-24　同定パラメータの初期値と最適値（STEP3，#51，Uranine）

試験ケース	同定stage	同定パラメータ	初期値	最適値	残差二乗和
#51	1	断面積1(m2)	0.014	0.003	2.035E-10
		断面積2(m2)	0.014	0.008	
		断面積3(m2)	0.014	0.015	
	2	流速1(m/hr.)	1.124	0.642	5.361E-11
		流速2(m/hr.)	0.206	0.292	
		流速3(m/hr.)	0.656	0.784	
		分散長1(m)	0.49	0.020	
		分散長2(m)	0.49	0.127	
		分散長3(m)	0.49	0.395	
	3	湿潤辺長1(m)	2.8	2.82	4.811E-11
		湿潤辺長2(m)	2.8	3.99	
		湿潤辺長3(m)	2.8	2.98	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率1	1.0	1.0	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率2	1.0	1.4	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率3	1.0	1.1	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比1(-)	7.14E-03	1.71E-03	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比2(-)	7.14E-03	1.98E-03	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比3(-)	7.14E-03	6.63E-03	

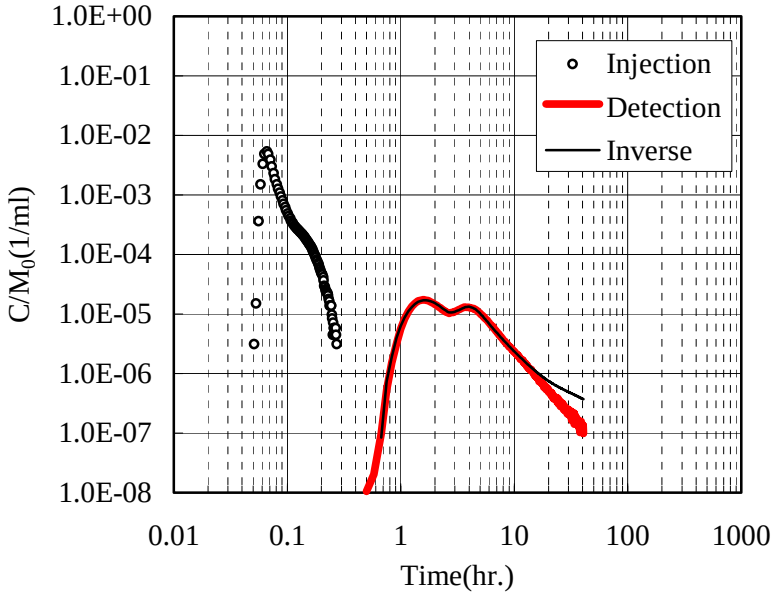


図 6-22　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP3，#47）

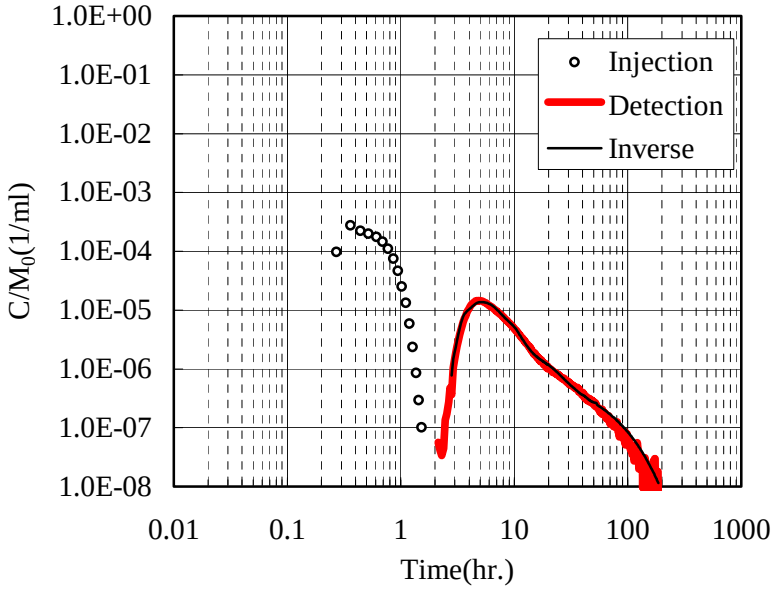


図 6-23　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP3，#51）

(2) 孔間距離 1.7m，14.0m の結果

表 6-25，表 6-26にパラメータの同定結果，図 6-24，図 6-25に逆解析結果（破過曲線）を示す。逆解析の結果，破過曲線が良好に再現されているのが分かる。また，それぞれの残差二乗和を確認すると，#61 の結果については表 6-5，表 6-16に示される 1 経路モデル、2 経路モデルの結果より同定精度が向上しているが、#76 の結果については、3 経路モデルの結果は 1 経路モデル、2 経路モデルより精度が悪い結果となった。

表 6-25　同定パラメータの初期値と最適値（STEP3，#61，Uranine）

試験ケース	同定stage	同定パラメータ	初期値	最適値	残差二乗和
#61	1	断面積1(m2)	0.0049	0.018	4.109E-09
		断面積2(m2)	0.0049	0.017	
		断面積3(m2)	0.0049	0.025	
	2	流速1(m/hr.)	3.579	3.618	2.094E-10
		流速2(m/hr.)	0.235	0.248	
		流速3(m/hr.)	1.907	1.812	
		分散長1(m)	0.17	0.132	
		分散長2(m)	0.17	0.244	
		分散長3(m)	0.17	0.214	
	3	湿潤辺長1(m)	0.98	0.92	2.064E-10
		湿潤辺長2(m)	0.98	0.35	
		湿潤辺長3(m)	0.98	0.92	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率1	1.00	0.94	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率2	1.00	0.36	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率3	1.00	0.94	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比1(-)	2.04E-02	8.25E-02	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比2(-)	2.04E-02	5.47E-01	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比3(-)	2.04E-02	1.17E-01	

表 6-26　同定パラメータの初期値と最適値（STEP3，#76，Uranine）

試験ケース	同定stage	同定パラメータ	初期値	最適値	残差二乗和
#76	1	断面積1(m2)	0.040	0.004	5.758E-10
		断面積2(m2)	0.040	0.041	
		断面積3(m2)	0.040	0.073	
	2	流速1(m/hr.)	1.108	1.425	1.741E-10
		流速2(m/hr.)	0.428	0.446	
		流速3(m/hr.)	0.768	0.871	
		分散長1(m)	1.4	9.094	
		分散長2(m)	1.4	0.317	
		分散長3(m)	1.4	0.792	
	3	湿潤辺長1(m)	8.0	0.10	1.443E-10
		湿潤辺長2(m)	8.0	8.16	
		湿潤辺長3(m)	8.0	10.15	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率1	1.0	0.01	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率2	1.0	1.0	
		ﾏﾄﾘｯｸｽ拡散寄与面積率3	1.0	1.3	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比1(-)	2.50E-03	1.64E+00	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比2(-)	2.50E-03	2.48E-03	
		ｱｽﾍﾟｸﾄ比3(-)	2.50E-03	2.83E-03	

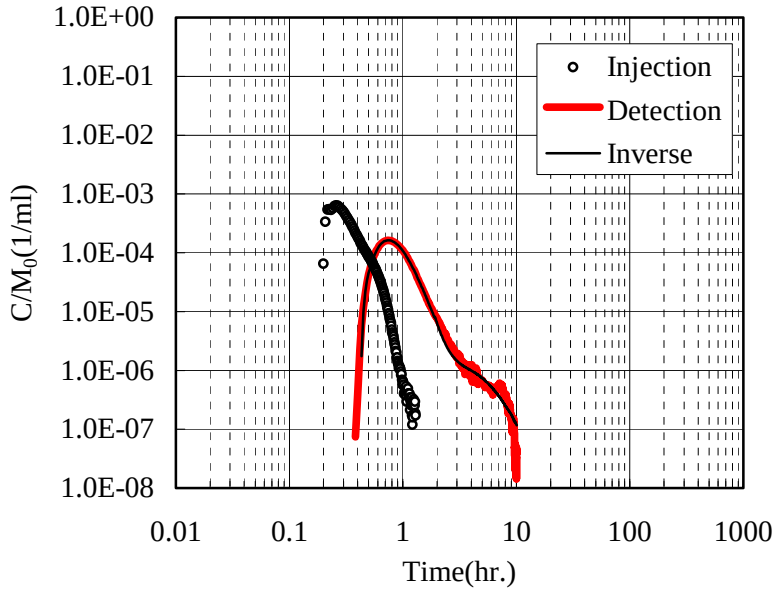


図 6-24　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP3，#61）

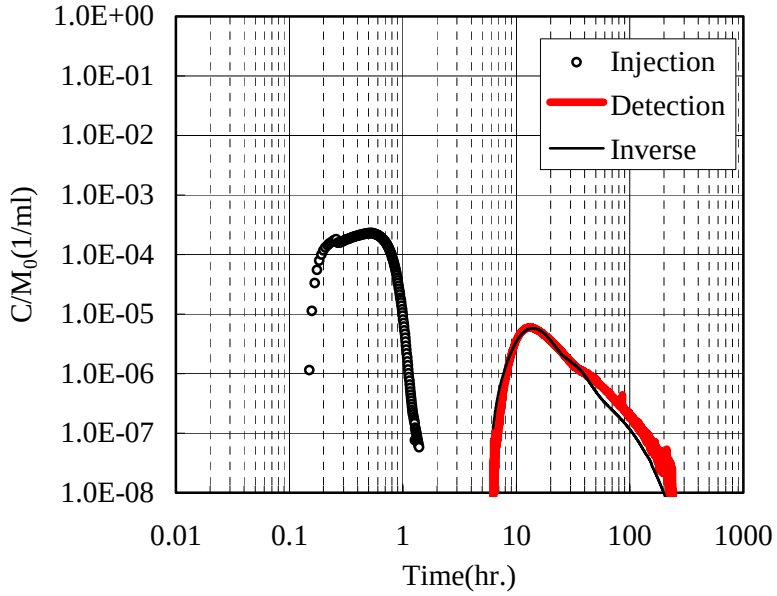


図 6-25　Uranine の破過曲線と逆解析結果（STEP3，#76）

6.3　同定パラメータとモデルの不確実性に関する検討

6.3.1　同定パラメータと試験条件の関係

1 経路モデル（STEP1）によるパラメータ同定値と試験条件との関係を整理した。以下に順に示す。

(1)　孔間距離と同定パラメータの関係

図 6-26～図 6-29に孔間距離と同定パラメータの関係を示す。流速はほぼ全ての試験条件において 1～3m/hr.である。#62 において流速が大きいのは，孔間距離が小さい条件で注入量を大きくしたためと考えられる。一方，縦方向分散長/孔間距離と孔間距離には弱い負の相関が見られる。すなわち孔間距離が 1.7m の試験結果では分散長/孔間距離=0.1～0.13 程度の値をとり，4.9m，14m の試験結果では 0.03 程度の値をとる。#47 の結果において 0.1 程度となっているが，これはダブルピークを持つ破過曲線を 1 経路モデルにより同定したために分散長を過大評価している可能性がある。また，マトリックス拡散寄与面積率は 3～5 の範囲に結果の大半が集中しており，試験位置周辺のマトリックス拡散特性を示していると考えられる。アスペクト比には明瞭な傾向は表れなかったが，大半は 0～0.001 の間にある。

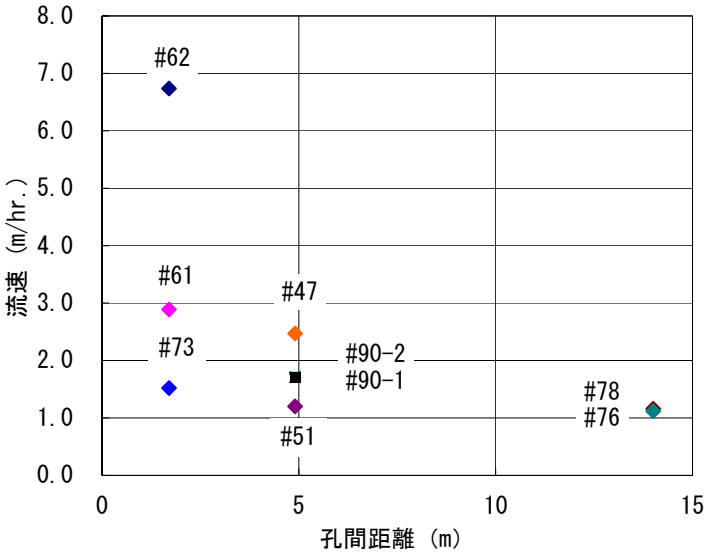


図 6-26　流速同定値と孔間距離の関係

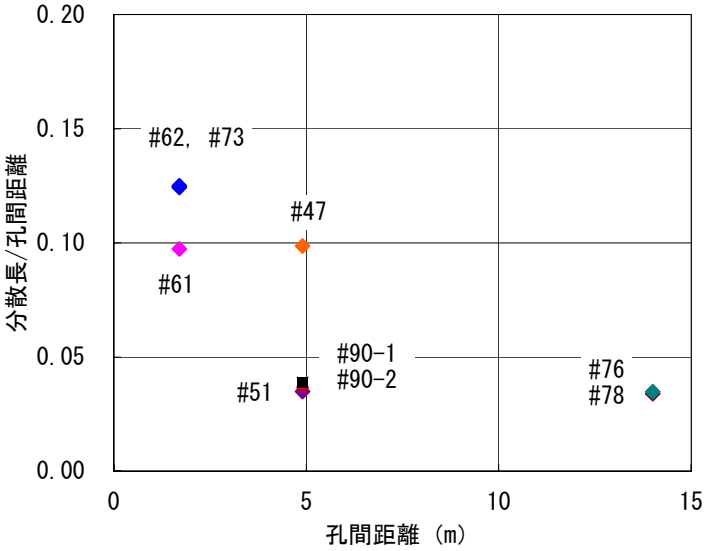


図 6-27　縦方向分散長同定値/孔間距離と孔間距離の関係

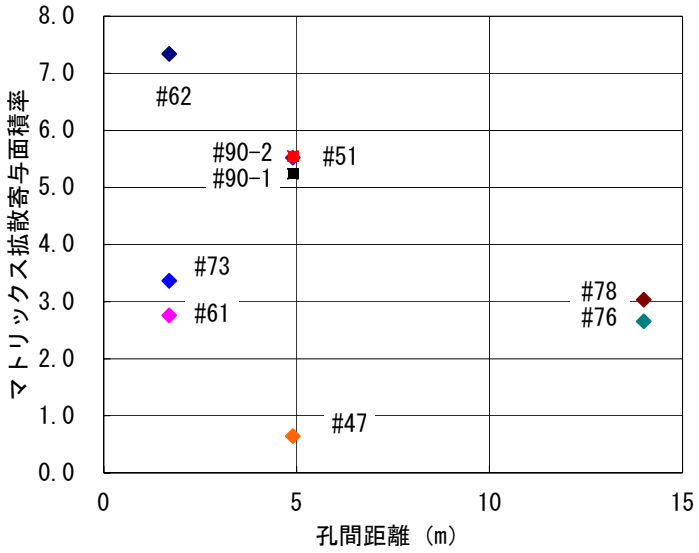


図 6-28　マトリックス拡散寄与面積率と孔間距離の関係

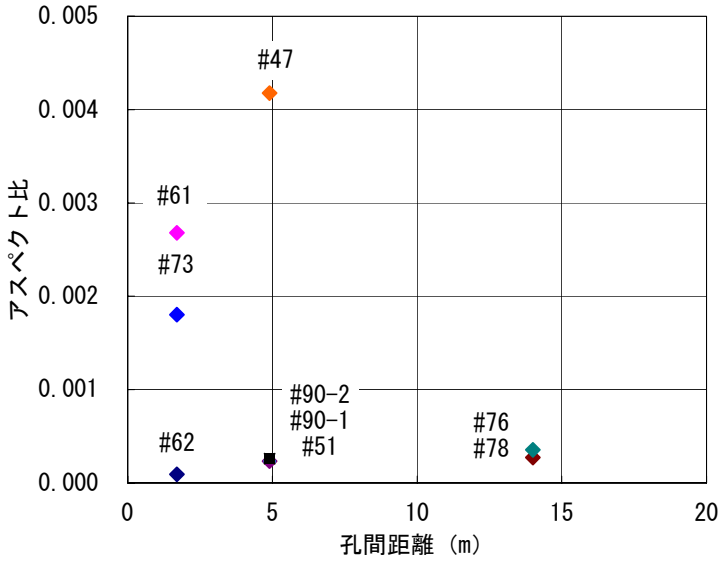


図 6-29　アスペクト比と孔間距離の関係

(2) ダイポール比と同定パラメータの関係

図 6-30～図 6-33にダイポール比と同定パラメータの関係を示す。流速とダイポール比の関係では，流速は注入流量の影響を受けると考えられるので，ダイポール比の小さい（=注入流量の大きい試験結果では）流速が大きくなると考えられる。破過曲線がダブルピークを示す#47 の 1 経路モデルによる同定結果では，想定される速い流れと遅い流れの平均的な流速を代表流速として評価している可能性があり，速い流れの流速で評価すれば負の相関が得られるものと考えられる。縦方向分散長/孔間距離，マトリックス拡散寄与面積率およびアスペクト比とダイポール比の間には明瞭な相関は見られなかった。

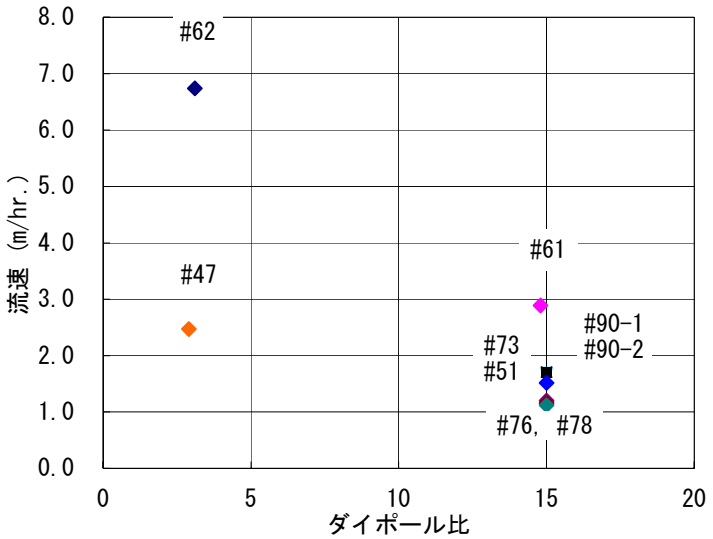


図 6-30 流速同定値とダイポール比の関係

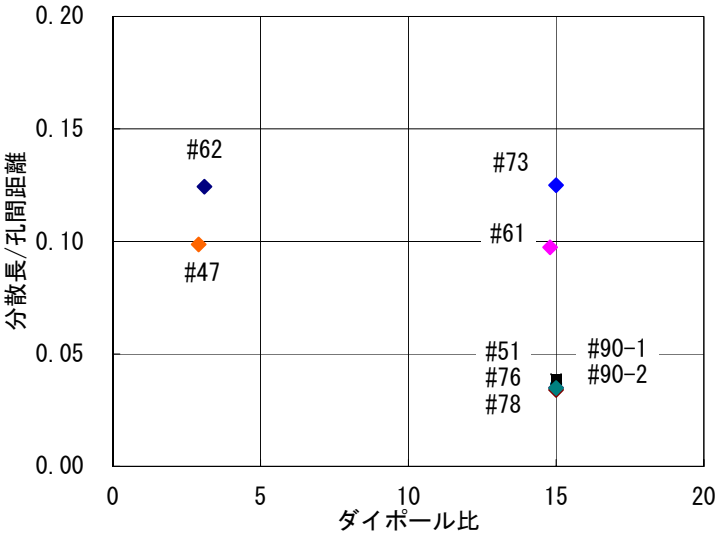


図 6-31 縦方向分散長同定値とダイポール比の関係

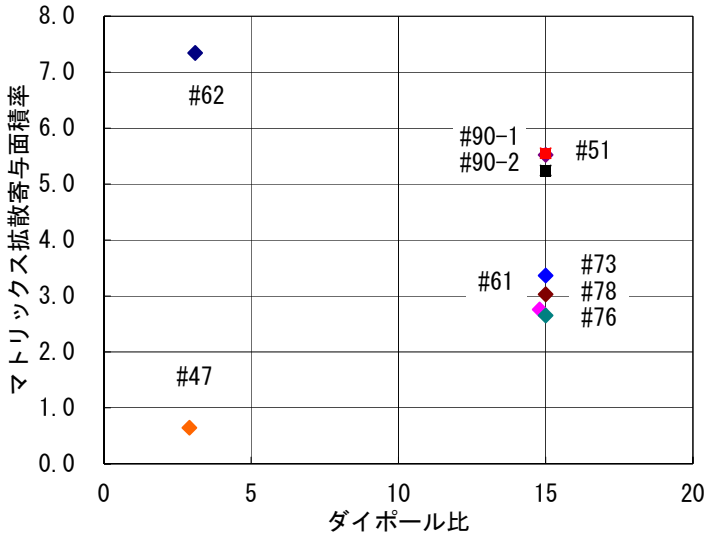


図 6-32　マトリックス拡散寄与面積率とダイポール比の関係

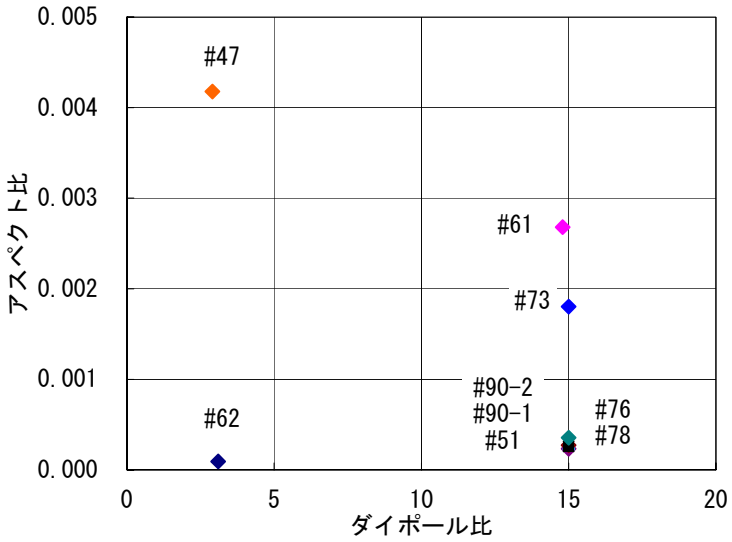


図 6-33　アスペクト比とダイポール比の関係

6.3.2　同定パラメータの不確実性

(1)　試験条件と同定パラメータの不確実性の関係

表 6-27に逆解析対象ケースの試験条件を示すとともに，図 6-34～図 6-36に各ケースの 1 経路モデルによるパラメータの同定値とその 95%信頼区間を示す。ただし，分散長は孔間距離で無次元化し，湿潤辺長は表 6-27に示す流れ幅の 2 倍で除して求めたマトリックス拡散寄与面積率で示している。

流速の同定値は，孔間距離が 1.7m の場合（#62，#61，#73）と 4.9m の場合（#47，#51，#90）ともに，ダイポール比が大きくなると小さくなる傾向を示している。これは流速が注入流量に依存しているためと考えられる。

一方，分散長/孔間距離に対しては孔間距離が 1.7m の場合については，ダイポール比に関わらず 0.1～0.13 程度の値をとり，4.9m，14m の場合も#47 のケースのみ除いて 0.03～0.04 程度の値をとる。#47 の結果のみ異なった理由は，破過曲線にダブルピークが見られる#47 の結果を，1 本の経路モデルにより表現したことによって生じたものと考えられ, #47 の分散長を過大評価している可能性が考えられる。

試験条件が同定パラメータの 95%信頼区間幅に与える影響は明確には見られず、全てのケースについて信頼区間幅は極めて小さくなった。これは、昨年 SKB のデータについて行った検討結果と同様の傾向を示すものである。

表 6-27　逆解析対象ケースの試験条件

試験名	孔間距離 (m)	Inj.Rate (ml/min.)	Ext.Rate (ml/min.)	dipole比	仮定値			観測値の個数
					流れ幅 (m)	開口幅 (m)	断面積 (m^2)	
#62	1.7	48	148	3.1	2.0	0.01	0.02	284
#61	1.7	10	148	14.8	0.49	0.01	0.0049	583
#73	1.7	4	60	15	0.49	0.01	0.0049	733
#47	4.9	51	150	2.9	5.8	0.01	0.058	482
#51	4.9	10	150	15	1.4	0.01	0.014	521
#78	14	8	120	15	4.0	0.01	0.04	155
#76	14	8	120	15	4.0	0.01	0.04	4625
#90-2	4.9	10	150	15	1.4	0.01	0.014	2080
#90-1	4.9	10	150	15	1.4	0.01	0.014	1746

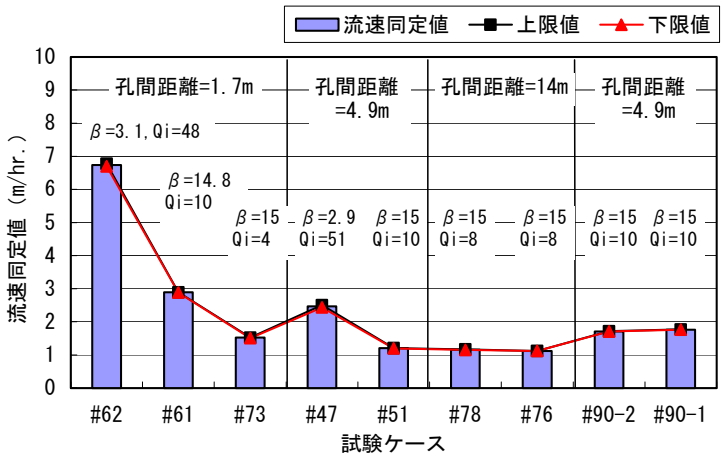


図 6-34　流速の同定値と 95%信頼区間

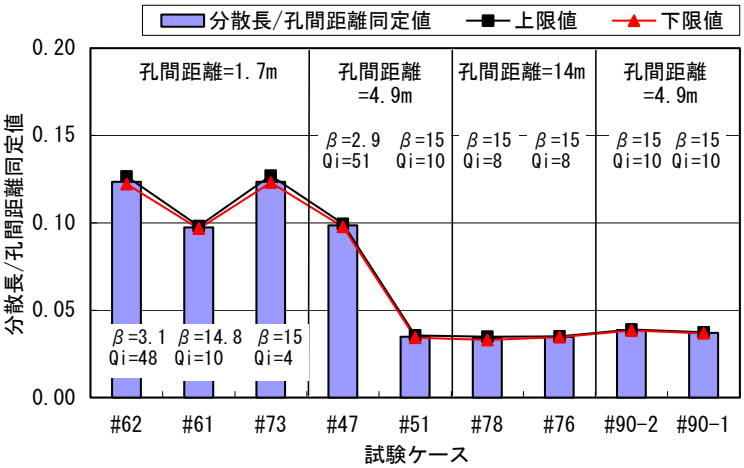


図 6-35　縦方向分散長/孔間距離の同定値と 95%信頼区間

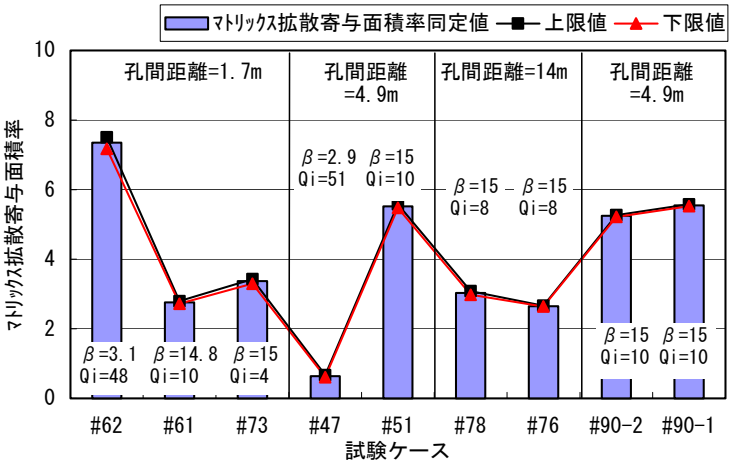


図 6-36　マトリックス拡散寄与面積率の同定値と 95%信頼区間

(2) 経路モデルと同定パラメータの不確実性の関係

図 6-37～図 6-48に#47，#51，#61，#76 の逆解析により求めた同定値と 95%信頼区間を示す。経路数を変更した場合も、前節の結果と同様に信頼区間幅は極めて小さくなっている。しかしながら、経路数を増加させた場合，1 経路モデルの結果に比べ信頼区間幅が大きい経路が存在する場合が見られた。これは、経路数を増やした場合、同定精度向上に寄与しない経路を付加してしまう場合があるためと考えられる。

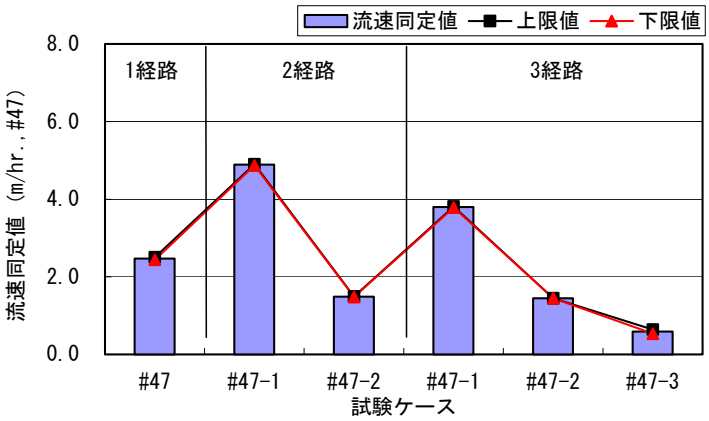


図 6-37 流速の同定値と 95%信頼区間（#47）

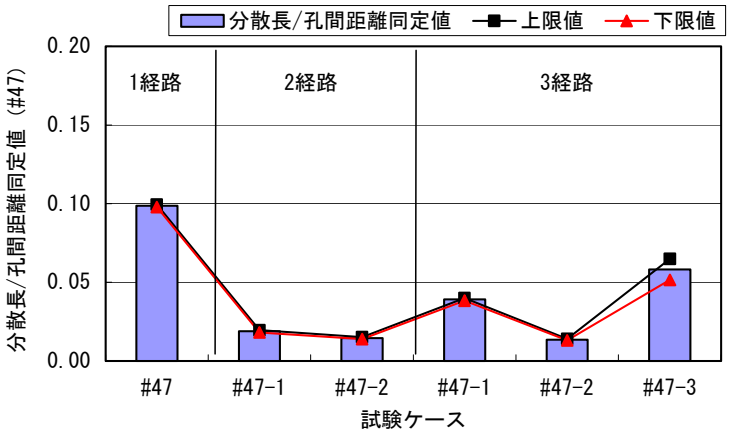


図 6-38 分散長/孔間距離の同定値と 95%信頼区間（#47）

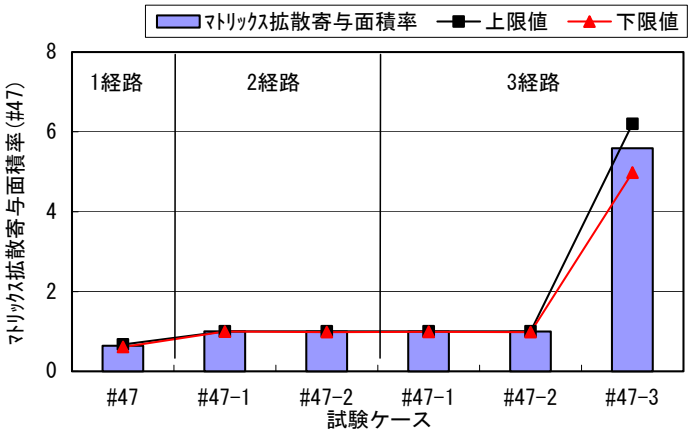


図 6-39 マトリックス拡散寄与面積率の同定値と 95%信頼区間（#47）

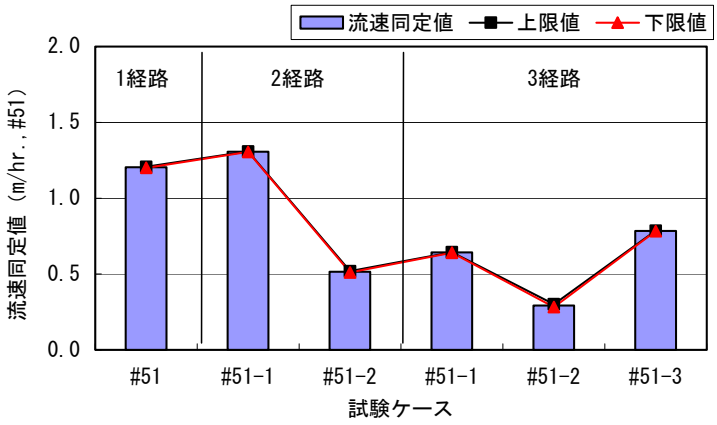


図 6-40　流速の同定値と 95%信頼区間（#51）

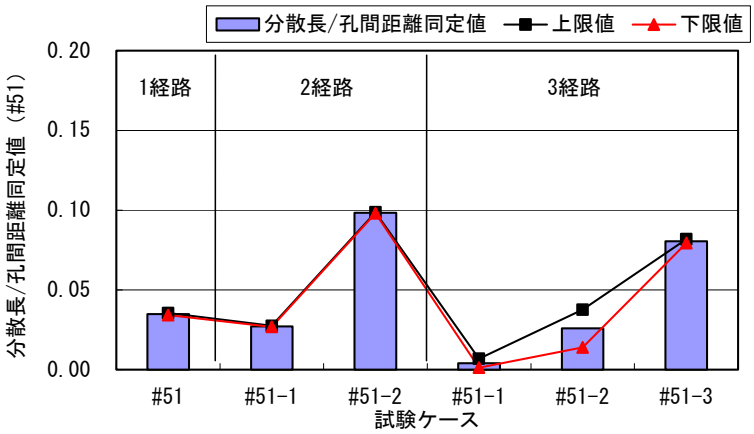


図 6-41　縦方向分散長/孔間距離の同定値と 95%信頼区間（#51）

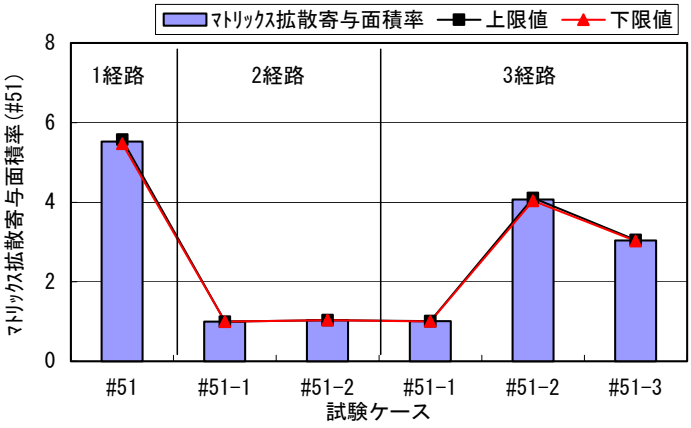


図 6-42　マトリックス拡散寄与面積率の同定値と 95%信頼区間（#51）

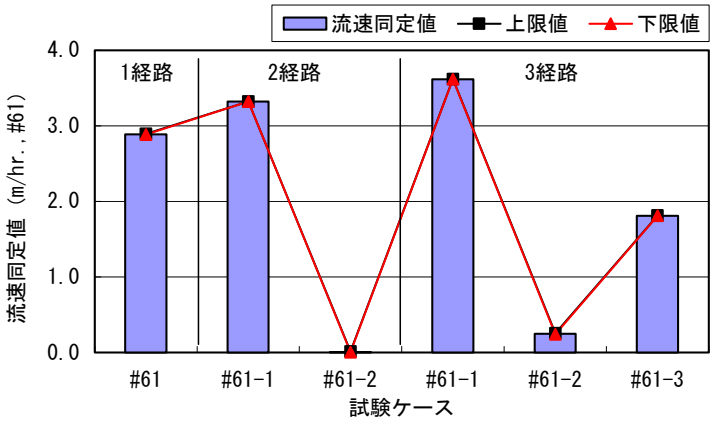


図 6-43　流速の同定値と 95%信頼区間（#61）

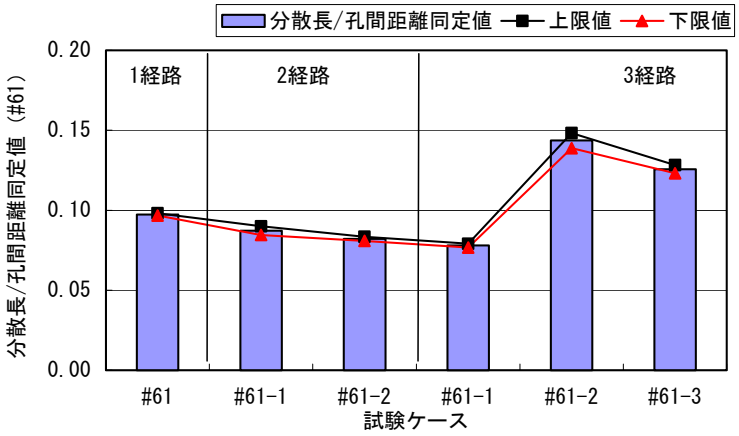


図 6-44　縦方向分散長/孔間距離の同定値と 95%信頼区間（#61）

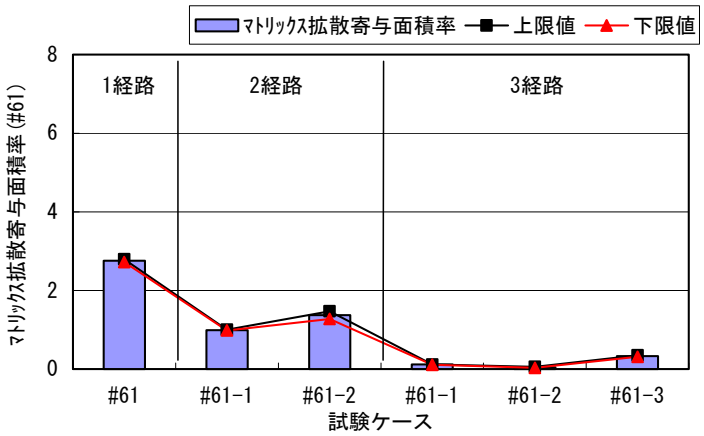


図 6-45　マトリックス拡散寄与面積率の同定値と 95%信頼区間（#61）

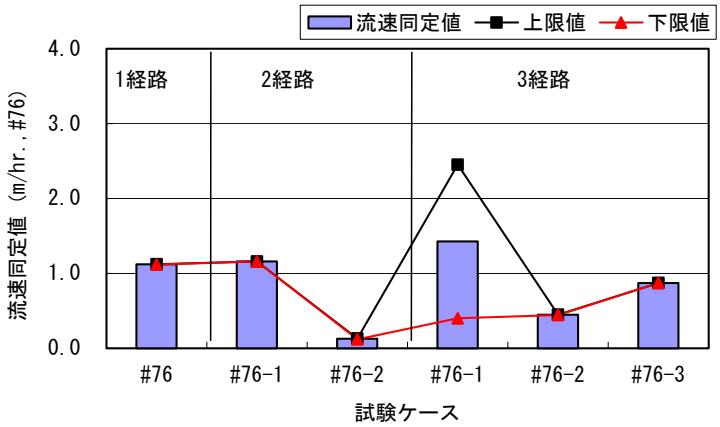


図 6-46　流速の同定値と 95%信頼区間（#76）

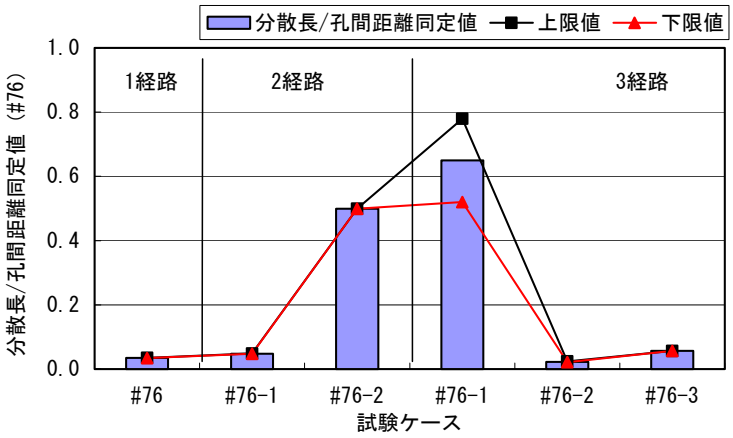


図 6-47　縦方向分散長/孔間距離の同定値と 95%信頼区間（#76）

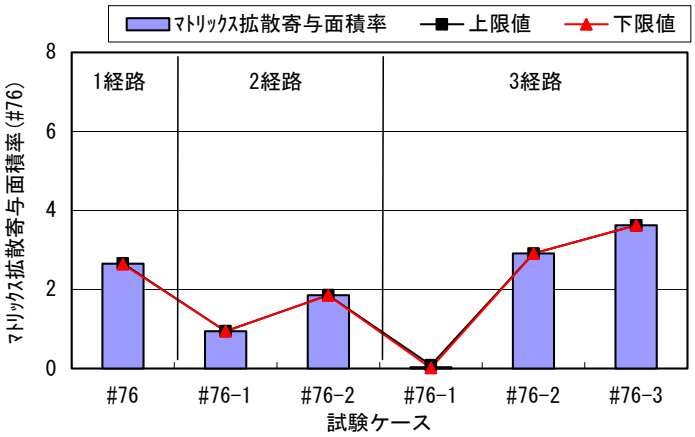


図 6-48　マトリックス拡散寄与面積率の同定値と 95%信頼区間（#76）

(3) 遅延係数（Rd）および分配係数（Kd）の不確実性

表 6-28に遅延係数の同定値とその 95%信頼区間を示す。全てのケースにおいて、95%信頼区間は極めて小さい。

表 6-28　遅延係数の同定値と 95%信頼区間

遅延係数		同定値	上限	下限
1経路	#90-2(Sr)	286	288	285
	#90-1(Cs)	12034	12034	12033
2経路	#90-2(Sr)	384	384	384
	#90-1(Cs)	27732	27732	27732

また，表 6-29に，遅延係数より求めた分配係数の同定値と 95%信頼区間を示す。分配係数を求める際には，以下の式を用い，それぞれの物性値は岩比重：ρ=2670kg/m3，空隙率：θ=0.2 として求めている。

$$R_d = 1 + \frac{\rho K_d}{\theta}$$

なお，参考のために表 6-30に表 4-2で示したイオン交換能（CEC）および Sr と Cs の分配係数を再掲する。逆解析の結果求められた分配係数は，NAGRA により得られている予測値とほぼ同様の値をとっている。また，遅延係数同様，95%信頼区間は極めて小さい。

表 6-29　分配係数の同定値と 95%信頼区間

Kd		同定値	上限	下限
1経路	#90-2(Sr)	0.021	0.021	0.021
	#90-1(Cs)	0.901	0.901	0.901
2経路	#90-2(Sr)	0.029	0.029	0.029
	#90-1(Cs)	2.077	2.077	2.077

表 6-30　種々の方法により求めた放射性核種の分配係数（表 4-2再掲）

	CEC（meq/kg）	Kd（Sr）（m^3/kg）	Kd（Cs）（m^3/kg）
室内試験（<63μm）	13	（110±10）×10^{-3}	1.5～3.8
原位置における予測値	-	（20±2）×10^{-3}	0.5～3.9
地下水化学平衡試験	2.4	8×10^{-3}	-

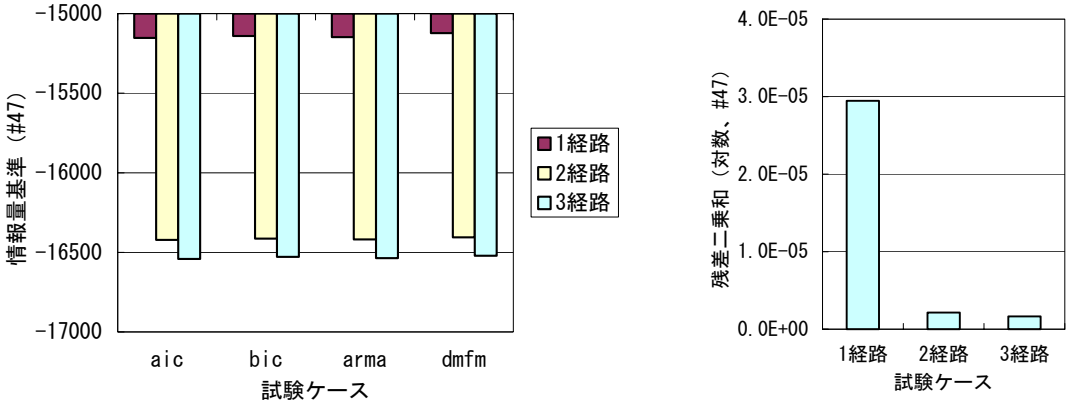
6.3.3　モデルの不確実性

(1)　情報量基準を用いたモデル評価

図 6-49～図 6-52に情報量基準と同定結果と観測値の残差二乗和を示す。なお、残差二乗和は揚水側で観測された最大濃度で正規化を行っている。

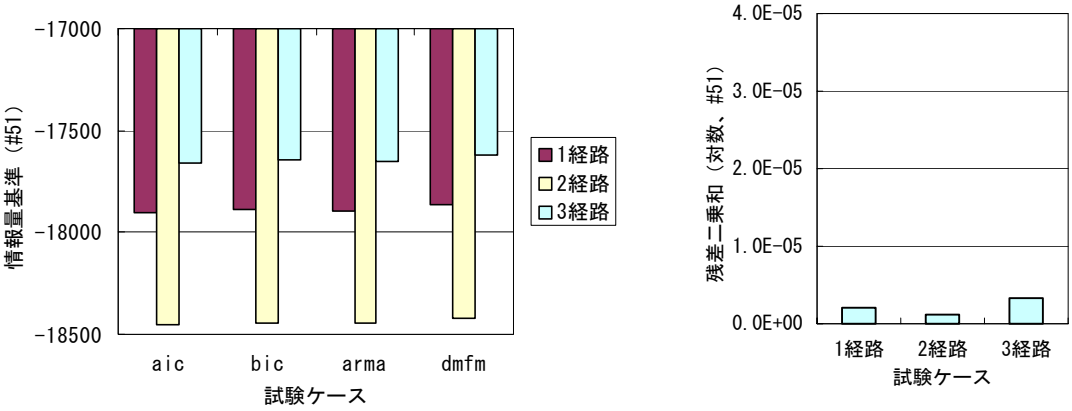
同定後の残差二乗和が小さくなるモデル，すなわち同定精度の高いモデルの情報量基準が小さくなっており，情報量基準の大小関係に従って最適と判断したモデルを用いれば，逆解析結果の同定精度が最良となっていることがわかる。

また、同定精度の優劣については、#47 の結果については、1 経路モデルよりも 2 経路モデルを使った場合、その同定精度が格段に向上し、2 経路モデルの 1 経路モデルに対する優位性が明確に表れた。ただし、#47 以外の結果については、際立って適性の高い最適経路数は表れず、モノピークを示す観測値を再現するために経路数の選択が与える影響は小さいと言える。



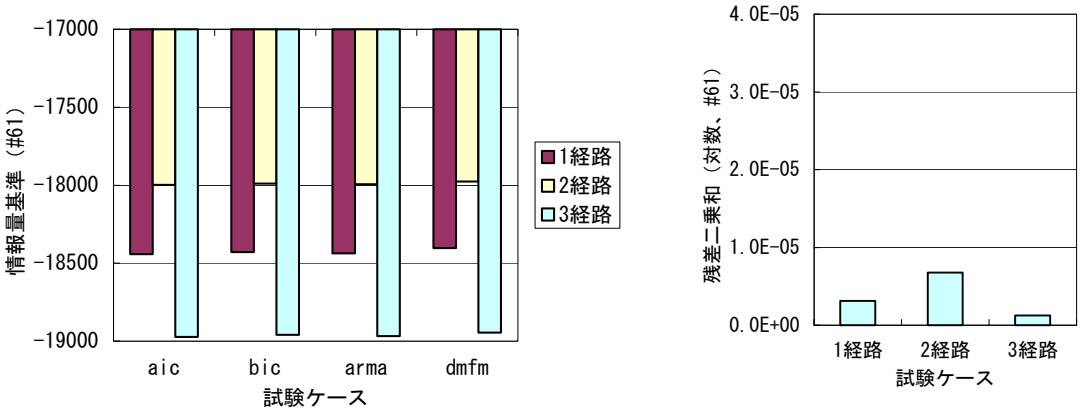
（a）情報量基準　　（b）残差二乗和

図 6-49　情報量基準と残差二乗和（#47）



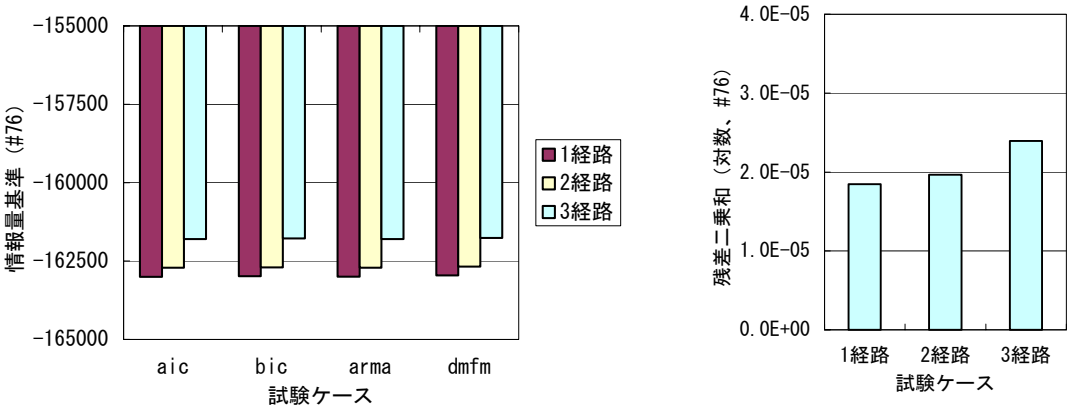
（a）情報量基準　　（b）残差二乗和

図 6-50　情報量基準と残差二乗和（#51）



（a）情報量基準　　（b）残差二乗和

図 6-51　情報量基準と残差二乗和（#61）



（a）情報量基準　　（b）残差二乗和

図 6-52　情報量基準と残差二乗和（#76）

6.3.4　同定精度と逆解析収束状況の関係

図 6-53に残差二乗和と逆解析の収束計算回数の関係を示す。収束計算回数が小さい時に同定精度が下がる場合が見られるが，残差二乗和と収束計算回数に明確な相関があるとは言えない。また，収束計算回数が大きくなっても必ずしも同定精度が低くはならない結果となった。

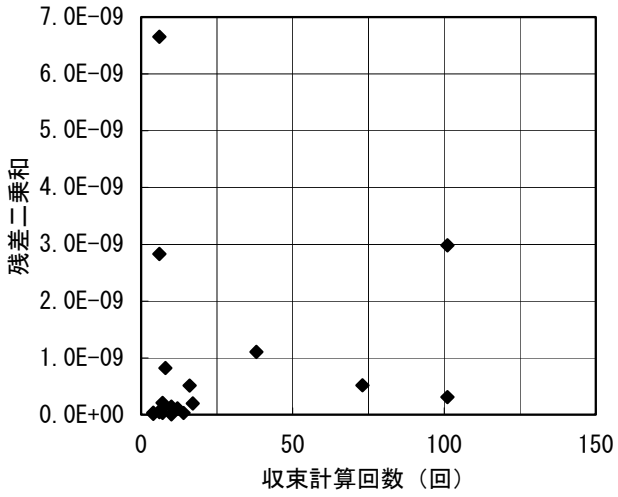


図 6-53　残差二乗和と収束計算回数の関係

7. おわりに

本年度は昨年度作成された逆解析プログラムを用いて，原位置トレーサー試験の逆解析を行った。その結果得られた知見をまとめると以下のようになる。

- 非収着トレーサーの破過曲線は，昨年度の検討と同様に，移流，分散，マトリックス拡散を表現する亀裂内流速，分散長，湿潤辺長をパラメータとして精度良く同定できる。
- 非収着トレーサーの破過曲線を用いて，流速，分散長，湿潤辺長，経路数が決まれば，収着核種の遅延係数はこれらのパラメータとは独立に同定パラメータとすることが出来る。この結果も昨年の適用実績と同様の結果である。
- 1 経路モデルによって得られた同定パラメータを試験条件により整理すると，分散長/孔間距離と孔間距離の間に弱い相関が見られ，孔間距離が 1.7m の場合，分散長/孔間距離～0.1 程度，孔間距離が 4.9m および 14m の場合，分散長/孔間距離～0.04 程度となった。
- 遅延係数から求めた分配係数は NAGRA が室内試験や原位置地下水平衡試験結果をもとに予測した値とほぼ同様の結果を得た。
- 本検討で同定対象とした全てのパラメータは，それぞれ観測値と計算値の誤差に起因する不確実性を持つが、その不確実性はモデル選択によるパラメータの変化よりも極めて小さい結果となった。こうした傾向は昨年の SKB のデータについて行った検討結果と整合するものである。
- 最適モデル選択の基準として情報量基準を用いると，最も精度良く試験結果を再現できるモデルを評価できる。
- 本逆解析プログラムを用いた場合，同定結果の精度は収束計算回数に関わらず保証される。

参考文献

1) The Radionuclide Migration Experiment - Overview of Investigations 1985-1990, NAGRA Technical Report 91-04
2) The Nagra-JNC in situ study of safety relevant radionuclide retardation in fractured crystalline rock I:Radionuclide Migration Experiment-Overview 1990-1996, NAGRA Technical Report 00-09
3) W.Heer, J. Hadermann: pp.31, Grimsel Test Site Modelling Radionuclide Migration Field Experiments, PSI-Bericht Nr. 94-13
4) GTS: The Nagra-PNC Radionuclide Migration Experiment(MI), Raw data report: Documentation of field tracer experiments 1988-1996, NAGRA INTERNER BERICHT 98-13
5) First TRUE Stage Evaluation of Tracer Retention Understanding Experiments (first stage) at Äspö, International Cooperation Report, ICR-00-01
6) 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―地層処分研究開発第 2 次取りまとめ―分冊３地層処分安システムの安全評価”，核燃料サイクル開発機構技術資料，JNC TN1400 99-023，(1999)
7) Carrera, J. and Neuman, S.P.: “Estimation of Aquifer Parameters Under Transient and Steady State Conditions: 1. Maximum Likelihood Method Incorporating Prior Information”, Water resources Research, Vol.22, No.2, pp.199-210, (1986)
8) Carrera, J. and Neuman, S.P.: “Estimation of Aquifer Parameters Under Transient and Steady State Conditions: 2. Uniqueness, Stability, and Solution Algorithms”, Water resources Research, Vol.22, No.2, pp.211-227, (1986)
9) Carrera, J. and Neuman, S.P.: “Estimation of Aquifer Parameters Under Transient and Steady State Conditions: 3. Application to Synthetic and Field Data”, Water resources Research, Vol.22, No.2, pp.228-242, (1986)
10) 東京大学教養学部統計学教室：統計学入門，東京大学出版会，(1991)
11) 東京大学教養学部統計学教室：自然科学の統計学，東京大学出版会，(1992)
12) 赤池弘次：情報量基準 AIC とは何か，数理化学，No.153, pp.5-11, (1976)