

平成 28 年度

原子力発電施設等安全技術対策委託費  
(東京電力福島第一原子力発電所を対象とした  
核種移行評価手法に関する検討) 事業

— 報 告 書 —

平成 29 年 3 月 31 日

株式会社地圏環境テクノロジー



## 目 次

1. 序論 .....	1-1
1.1 件名 .....	1-1
1.2 目的 .....	1-1
1.3 業務内容 .....	1-2
1.3.1 検討スコープ・重要な着眼点の検討 .....	1-2
1.3.2 地下水・地盤モデリングの逆解析法に関する既往の研究事例の整理 .....	1-2
1.3.3 核種移行評価における逆解析法に関する基礎的検討 .....	1-2
1.3.4 核種移行評価における逆解析法の適用性に関する予察的検討 .....	1-3
1.3.5 有識者の意見聴取の実施 .....	1-3
2. 検討スコープ・重要な着眼点の検討 .....	2-1
2.1 逆問題の定義 .....	2-1
2.2 サイト固有の特徴・着眼点の洗出し .....	2-4
3. 地下水・地盤モデリングの逆解析法に関する既往の研究事例の整理 .....	3-1
3.1 2段階検索による逆解析事例の収集 .....	3-2
3.2 収集した逆解析事例の調査・分類・整理 .....	3-4
3.2.1 文献レビューの実施と調査票記入（クイックレビュー） .....	3-4
3.2.2 逆解析手法及び適用事例の相互比較表の作成（ディープレビュー） .....	3-7
3.3 核種移行評価に対する適用性の考察 .....	3-9
4. 核種移行評価における逆解析法に関する基礎的検討 .....	4-1
4.1 逆解析手法のスコアリングと選定 .....	4-1
4.1.1 逆解析の基本要件 .....	4-1
4.1.2 逆解析手法の分類 .....	4-3
4.1.3 逆解析手法の選定 .....	4-14
4.2 選定された逆解析法を行うためのツール整備 .....	4-15
4.2.1 逆解析の基本構成 .....	4-15
4.2.3 既存ツール .....	4-16
4.2.4 本検討で整備するツール .....	4-19
4.3 検証対象とする核種移行問題の作成 .....	4-22
4.3.1 1次元核種移行解析モデルによる順解析（カテゴリーA） .....	4-22
4.3.2 多次元核種移行解析モデルによる順解析（カテゴリーB） .....	4-25
4.4 逆解析手法の検証 .....	4-29
4.4.1 カテゴリーA .....	4-29
4.4.2 カテゴリーB .....	4-49
4.5 まとめ .....	4-61

5.	核種移行評価における逆解析法の適用性に関する予察的検討 .....	5-62
5.1	実事例の選定.....	5-62
5.1.1	H4 北エリア (トラブル①) .....	5-64
5.1.2	H6 エリア C1 タンク (トラブル③) .....	5-69
5.2	H6 エリア C1 タンク漏洩 (トラブル③) に関する逆解析の実施.....	5-73
5.2.1	対象系のフォワードモデリング .....	5-73
5.2.2	逆問題の設計 .....	5-78
5.2.3	逆解析のケース設定 .....	5-79
5.2.4	解析結果.....	5-81
5.3	H6 エリア C1 タンクに関する逆解析の実施.....	5-93
5.3.1	対象系のフォワードモデリング .....	5-93
5.3.2	逆問題の設計 .....	5-97
5.3.3	逆解析のケース設定 .....	5-98
5.3.4	解析結果.....	5-100
5.4	選定手法の適用性評価.....	5-124
6.	まとめ.....	6-1

## 表 目 次

表 2-1	逆問題を構成する未知変数, 制約条件, 目的関数の候補の抽出 .....	2-3
表 2-2	概念化された各コンポーネントの変遷 .....	2-8
表 2-3	地盤工学分野における逆解析の適用事例 .....	2-9
表 3-1	代表的レビュー論文・引用論文から抽出したキーワード .....	3-3
表 3-2	収集した文献の数 .....	3-4
表 3-3	主要な逆解析事例の相互比較表 (ディープレビュー) .....	3-8
表 4-1	本検討における逆解析手法に求められる基本要件 .....	4-2
表 4-2	逆解析手法のスコアリング結果 .....	4-14
表 4-3	逆解析法の基本構成で使用するコンバータプログラムの例 .....	4-21
表 4-4	解析ケース一覧 (カテゴリ A) .....	4-32
表 4-5	逆解析により推定されたパラメータ (ケース E1) .....	4-40
表 4-6	逆解析により推定されたパラメータ (ケース E2) .....	4-45
表 4-7	逆解析により推定されたパラメータ (ケース M1) .....	4-48
表 4-8	解析ケース一覧 (カテゴリ B) .....	4-50
表 5-1	原子力施設情報公開ライブラリーより取得した福島第一原子力発電所タンク エリアに関する汚染水漏洩トラブル .....	5-63
表 5-2	逆解析の検討ケース一覧 (トラブル③) .....	5-80
表 5-3	最大尤度時の各未知数の値 (トラブル③ : C3-1~C3-3) .....	5-83
表 5-4	最大尤度時の各未知数の値 (トラブル③ : C3-3~C3-5) .....	5-85
表 5-5	逆解析の検討ケース一覧 (トラブル①) .....	5-98
表 5-6	最大尤度時の各未知数の値 .....	5-104
表 5-7	最大尤度時の各未知数の値 (トラブル① : C1_E1,C1_E2) .....	5-119

## 目 次

図 2-1	対象システム概念	2-1
図 2-2	1F敷地内で実施されてきた汚染水対策	2-5
図 2-3	汚染水対策のタイムスケジュール	2-6
図 2-4	福島第一原子力発電所 構内配置図	2-7
図 3-1	既往研究事例の整理・分類の検討フロー	3-1
図 3-2	収集文献の集計結果 (1/2)	3-5
図 3-3	収集文献の集計結果 (2/2)	3-6
図 4-1	逆解析・最適化手法の分類	4-4
図 4-2	Progressive Genetic Algorithm による逆解析のフローチャート	4-6
図 4-3	Adaptive Simulated Annealing による逆解析のフローチャート	4-8
図 4-4	バックプロバゲーション型ニューラルネットワーク	4-9
図 4-5	Artificial Neural Network による逆解析のフローチャート	4-10
図 4-6	DREAM による計算効率 (収束性) の改善状況	4-12
図 4-7	MCMC 法による収束判定	4-13
図 4-8	逆解析の一般的手順	4-15
図 4-9	逆解析が実装されているオープンソースパッケージの代表例	4-16
図 4-10	UCODE2005 および UCODE2014 のマニュアル	4-18
図 4-11	1F を対象とした場合に想定される逆解析法の基本構成	4-20
図 4-12	対象系概念 (単一核種漏洩源・移行経路問題: カテゴリーA)	4-22
図 4-13	解析格子モデル, 境界条件および観測点配置 (カテゴリーA)	4-23
図 4-14	観測井 3 地点の破過曲線 (カテゴリーA)	4-24
図 4-15	対象系概念図 (単一核種漏洩源: カテゴリーB1)	4-25
図 4-16	対象系概念図 (複数核種漏洩源: カテゴリーB2)	4-26
図 4-17	解析格子モデル, 境界条件および観測点配置 (カテゴリーB2)	4-26
図 4-18	観測井 3 地点の破過曲線 (カテゴリーB1)	4-27
図 4-19	観測井 3 地点の破過曲線 (カテゴリーB2)	4-28
図 4-20	観測値または計算値に対する重みの変化	4-30
図 4-21	修正ガウスニュートン法による逆解析結果 (★: 正解値)	4-33
図 4-22	DREAM による逆解析結果 (ケース VE1,2,3)	4-35
図 4-23	目的関数に対する観測地点および観測データ毎の寄与度 (ケース VE1,2,3)	4-36
図 4-24	ケース E1 の Gelman-Rubin 統計量の収束状況	4-37
図 4-25	DREAM による逆解析結果 (ケース E1, ヒストグラム, 尤度関数)	4-38
図 4-26	DREAM による逆解析結果 (ケース E1, パラメータ毎の相関)	4-39

図 4-27	逆解析で得られた最頻値を用いた解析結果と観測値の比較 (ケース E1)	4-40
	.....	
図 4-28	ケース E2 で使用する観測データ	4-41
図 4-29	ケース E2 の Gelman-Rubin 統計量の収斂状況	4-42
図 4-30	DREAM による逆解析結果 (ケース E2)	4-43
図 4-31	DREAM による逆解析結果 (ケース E2)	4-44
図 4-32	逆解析で得られた最頻値を用いた解析結果と観測値の比較 (ケース E2)	4-45
	.....	
図 4-33	ケース M2 で使用する観測データ	4-46
図 4-34	逆解析で得られた最頻値を用いた解析結果と観測値の比較 (ケース M1)	4-47
	.....	
図 4-35	逆解析で得られた最頻値を用いた解析結果と観測値の比較 (ケース M1, $w=\text{const}$ )	4-47
図 4-36	修正ガウスニュートン法による逆解析結果 (ケース B0)	4-52
図 4-37	Gelman-Rubin 統計量の収斂状況 (ケース B1)	4-53
図 4-38	DREAM による逆解析結果 (ケース B1)	4-54
図 4-39	未知パラメータ間の相関性 (頻度, ケース B1)	4-55
図 4-40	未知パラメータ間の相関性 (尤度, ケース B1)	4-56
図 4-41	Gelman-Rubin 統計量の収斂状況 (ケース B2a)	4-57
図 4-42	DREAM による逆解析結果 (ケース B2a)	4-58
図 4-43	Gelman-Rubin 統計量の収斂状況 (ケース B2b)	4-59
図 4-44	DREAM による逆解析結果 (ケース B2b)	4-60
図 5-1	漏洩源の位置および漏洩時の状況 (H4 北エリア)	5-65
図 5-2	土のう等による漏洩拡大防止策 (H4 北エリア)	5-66
図 5-3	浅深度ボーリング調査結果 (H4 北エリア)	5-67
図 5-4	観測井の核種濃度の経時変化 (H4 北エリア)	5-68
図 5-5	漏洩源の位置および漏洩時の状況 (H6 タンクエリア)	5-70
図 5-6	核種濃度観測点の配置 (H6 タンクエリア)	5-71
図 5-7	観測井の核種濃度の経時変化 (H6 エリア)	5-72
図 5-8	既往解析結果による地下水位と地表水・地下水の流動経路 (トラブル③)	5-74
図 5-9	平面格子モデルと漏洩位置および観測井配置 (トラブル③)	5-75
図 5-10	G-1~G-3 における核種濃度の経時変化	5-77
図 5-11	漏洩量の経時変化の与え方と入力パラメータ	5-78
図 5-12	各ケースの Gelman-Rubin R による収束判定	5-82
図 5-13	最大尤度時の濃度の経時変化 (トラブル③: 重みによる相違)	5-84
図 5-14	最大尤度時の濃度の経時変化 (トラブル③: 漏洩値の同定)	5-86

図 5-15	漏洩位置の推定結果 (C3-5)	5-87
図 5-16	漏洩時間の推定結果 (C3-5)	5-88
図 5-17	最大尤度時の濃度の経時変化 (トラブル③: ノイズ除去)	5-90
図 5-18	漏洩位置の推定結果 (C3-6)	5-91
図 5-19	漏洩時間の推定結果 (C3-6)	5-92
図 5-20	既往解析結果よる地下水位と地表水・地下水の流動経路	5-94
図 5-21	平面格子モデルと漏洩位置および観測井配置 (トラブル①)	5-95
図 5-22	漏洩量の経時変化の与え方と入力パラメータ	5-97
図 5-23	各ケースの Gelman-Rubin R による収束判定	5-101
図 5-24	逆解析で設定した漏洩位置	5-103
図 5-25	核種濃度の観測値と解析結果の比較 (解析結果: C1_A1 の最大尤度時)	5-105
図 5-26	核種濃度の観測値と解析結果の比較 (解析結果: C1_A2 の最大尤度時)	5-106
図 5-27	漏洩フラックスの対数変換の有無によるパラメータの変化の比較 (重みなし)	5-108
図 5-28	漏洩フラックスの対数変換の有無による収束判定および尤度の比較 (重みなし)	5-109
図 5-29	漏洩フラックスの対数変換の有無によるパラメータの変化の比較 (重み考慮)	5-110
図 5-30	漏洩フラックスの対数変換の有無による収束判定および尤度の比較 (重み考慮)	5-111
図 5-31	漏洩源の位置に関する制約条件 (C1_C1, C1_C2)	5-112
図 5-32	漏洩源の同定結果 (C1_C2 の漏洩源 1)	5-113
図 5-33	漏洩源の同定結果 (C1_C2 の漏洩源 2)	5-114
図 5-34	最大尤度時の濃度の経時変化 (C1_C2)	5-115
図 5-35	漏洩源の位置に関する制約条件 (C1_D1, C1_D2)	5-116
図 5-36	最大尤度時の濃度の経時変化 (C1_D2)	5-117
図 5-37	観測データのグルーピングした範囲	5-119
図 5-38	各グループの核種濃度の経時変化	5-120
図 5-39	最大尤度時の濃度の経時変化 (C1_E1, C1_E2)	5-121
図 5-40	漏洩源の同定結果 (C1_E1, グループ 1)	5-122
図 5-41	漏洩源の同定結果 (C1_E2, グループ 2)	5-123

## 1. 序論

### 1.1 件名

平成 28 年度原子力発電施設等安全技術対策委託費（東京電力福島第一原子力発電所を対象とした核種移行評価手法に関する検討）事業

### 1.2 目的

東京電力株式会社福島第一原子力発電所では、原子炉等建屋内や一部の放水路等の埋設管内に放射性核種（以下「核種」という。）を含む溜まり水（以下「汚染水」という。）が認められており、汚染水の処理後も核種が残存している場合は、発電所敷地内（以下「敷地内」という。）に設置されたタンク等に貯留されている。そのため、敷地内では、これらの汚染水が周辺土壌への漏えいを防止する処置が行われるとともに、地下水中の核種濃度の定期的な計測といったモニタリングが実施されている。仮に、汚染水が敷地内の土壌に漏えいした場合、地盤中を浸透・拡散し、地下水と共に移行する。特に、漏えいした汚染水に含まれる核種濃度が高く、その水量が多い場合、環境への影響が及ぶ範囲は広がり、海への影響等が懸念される。したがって、モニタリングにおいては、地下水観測孔の配置や計測頻度の適切性を評価し、地下水中の有意な核種濃度の上昇を早期に捉える監視体制を構築することが求められる。一方、観測孔等において、地下水中の有意な核種濃度の上昇といった汚染水の漏えいが疑われる事象が検知された場合は、環境への影響範囲やその広がり程度を早期に確認するとともに、汚染源等の主たる要因を特定し、的確な対策を講ずる必要がある。しかしながら、敷地内の三次元的な水理地質構造や建屋等の人工構造物、地下水流入抑制対策等の地盤・地下水に対する人為的な擾乱の影響を受け、地下水の流向や流速といった地下水流動状況は一様でない。また、核種の移行には、土壌への吸着や帯水層中の分散といった地盤の物性（以下「核種移行パラメータ」という。）の影響も受ける。さらに、敷地内では、過去に、汚染水を貯留していたフランジ型タンクや海側配水トレンチ付近を経由した汚染水の漏えいが認められており、その一部は現在においても敷地内の地盤に残存し、地下水と共に移行していることが考えられる。これらより、観測孔等で測定された核種の濃度には、地下水流動状況や核種移行パラメータ、汚染源の分布や漏えい期間といった様々な影響を受けていることが想定される。そのため、地下水流動を通じた核種の環境への影響範囲を評価するためには、核種濃度の観測結果や汚染水の貯留状況、水理地質構造等より地下水中の核種移行状況を類推するための核種移行評価手法に関する知見を整備する必要がある。

以上のことを踏まえ、本事業では、敷地内の地質・構造物や各種対策が地下水流動状況に与える影響等の知見を整理するとともに、汚染水の土壌への漏えいによって生じる地下水中の核種移行状況を類推するための核種移行評価手法に関する知見を整備することを目的とする。

### 1.3 業務内容

平成 26 年度においては、敷地内の建屋周辺及び汚染水タンクエリア周辺を含む対象領域の水理地質構造モデルや Se-90 等の核種移行パラメータを整理し、既往の地下水流動・核種移行解析コードを用いた地下水流動・核種移行に関する試解析を行い、敷地内における広域の地下水流動状況について検討した。

平成 27 年度においては、平成 26 年度に整理した水理地質構造モデルや Sr-90 等の核種移行パラメータを用いて、地下水流入抑制対策等に対して想定され得る範囲での地下水流動等に関する感度解析を実施し、汚染水の漏えい可能性の観点から、各種対策が敷地内の地下水流動に与える影響等の知見を整理した。

本事業では、地下水中の核種濃度の有意な上昇が検知された場合を想定し、核種濃度等の観測結果に基づき、汚染源として可能性が高いと考えられる箇所や漏えい期間、核種移行パラメータの取り得る範囲（分布・ばらつき等）といった地下水中の概略的な核種移行状況を類推するための解析手法（以下、「逆解析法」という。）に関する知見の整理を行った。実施内容の概要を以下に示す。

#### 1.3.1 検討スコープ・重要な着眼点の検討

検討リソースの効率的配分と検討成果の最大化を図ることを目的とし、本事業で実施する事例調査、逆解析法の選定他を行う際の基本的考え方を明確にした。ここでは、地下水中の核種濃度の有意な上昇が検知された場合において、逆問題を構成する目的関数、未知変数制約条件の候補を抽出し整理した。

また、福島第一原子力発電所（以降、1F）に関する核種漏えいに関して、サイト固有の特徴および着眼点の洗い出しを行った。

#### 1.3.2 地下水・地盤モデリングの逆解析法に関する既往の研究事例の整理

前検討を踏まえ、対象とする逆問題の特徴に着目した的を絞った事例整理を行った。ここでは、逆解析法に関する既往の主な研究・検討事例やフィールドへの適用事例を収集し、それぞれの逆解析法の特徴をふまえた分類・整理を行った。調査対象とする既往の研究・検討事例を核種移行評価のみに限定せず収集・整理した。あわせて、分類・整理した逆解析法に対して、本事業において対象とする核種移行評価に対する適用性を考察した。

#### 1.3.3 核種移行評価における逆解析法に関する基礎的検討

核種移行評価における逆解析法に関する基礎的検討として、敷地内の地下水流動状況や 1.3.2 で実施した既往の研究事例の整理等をふまえて、地下水中の概略的な核種移行状況を類推するための逆解析法を選定した。ここでは、確率論的手法であるマルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）法の一つである DREAM を採用することとした。

また、選定した逆解析法の導入し、その検証を行った。対象となる核種や物性条件、境界条件が明確かつ簡易な概念モデルに対して、1次元および2次元の移流分散解析を実施し、観測箇所として模擬した着目地点の核種濃度やその時間変化といった解析結果を用いて、逆解析法の基本的な性能の検証を行った。

#### 1.3.4 核種移行評価における逆解析法の適用性に関する予察的検討

1 F モニタリングデータに基づく実事例を2つ選定し、導入した逆解析法の適用性に関する予察的検討を行った。ここでは、逆問題の設計（目的関数、未知変数、制約条件）を行い、順解析の概念モデル、数学モデルを確定し、漏洩時期、漏洩源位置、漏洩フラックスの組合せが異なる複数の逆問題を設計した。逆解析結果に基づき、選定手法の適用性を評価し、留意点と課題を明らかにした。

#### 1.3.5 有識者の意見聴取の実施

事業の実施にあたっては、3名の有識者からなる技術検討委員会を設置し、意見を聴取した。

## 2. 検討スコープ・重要な着眼点の検討

### 2.1 逆問題の定義

本事業において対象とする逆問題は、地下水中の核種濃度の有意な上昇が検知された場合を想定した。図 2-1 に対象システムの概念を示す。地下水中の核種に着目すると、漏洩源、移行経路、暴露（観測井）の3つの概念化されたコンポーネントに分類できる。例えば福島第一原子力発電所（以降、1F）であれば、地下水の漏洩源として、汚染水貯蔵施設、滞留水、建屋などからの汚染水の漏洩が考えられる。地下水中の核種の移行経路は、地表水や地下水を介して移動する。これには、移流、機械的分散、拡散、放射性崩壊、吸脱着などのプロセスが関与する。また、暴露では、各観測井のモニタリングデータが対象となる。

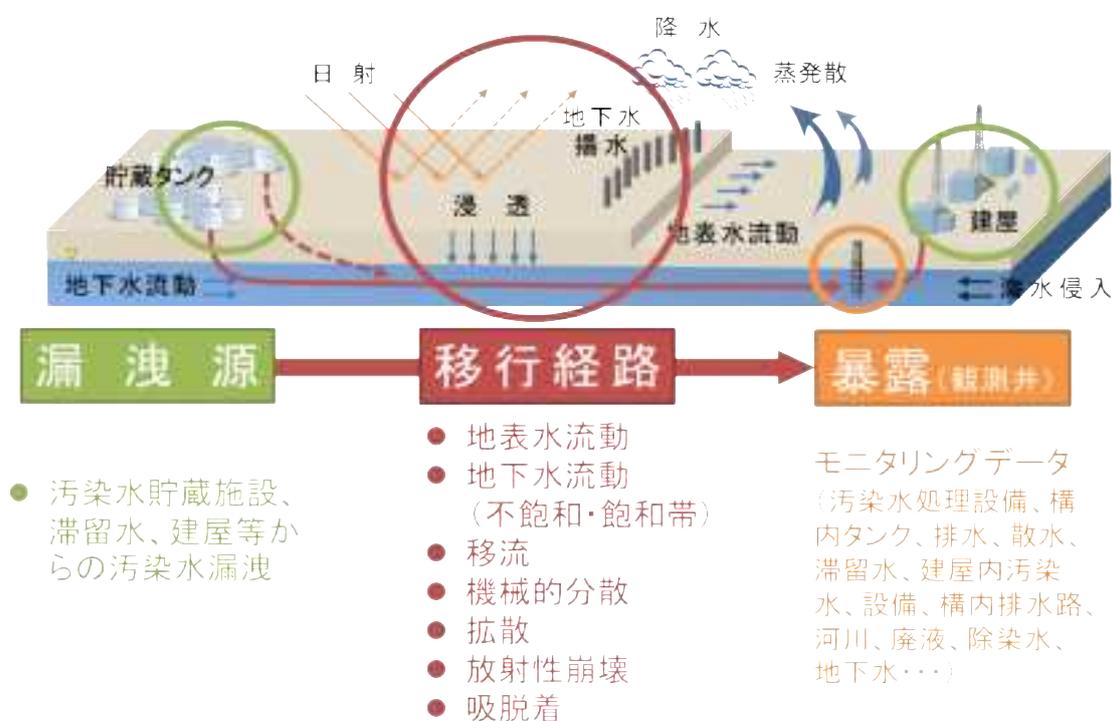


図 2-1 対象システムの概念

地下水に着目した場合，移行経路中の地下水流動および核種濃度については，以下のよう定式化される。

$$\begin{aligned}
 \text{速度場} \quad & -\nabla \cdot (\rho_p V_p) - \rho_p q_p = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_p \phi S_p) \quad (p = \text{water, air}) \\
 \text{濃度場} \quad & -\nabla \cdot (V_p C_{p,j}) + \nabla (D_{p,j} \cdot \nabla C_{p,j}) + \phi S_p \rho_p (-\lambda_j C_{p,j} + \lambda_{j-1} C_{p,j-1}) \\
 & + C_{p,j} z_j^{\text{ads}} - q_p C_{p,j} = \frac{\partial (\phi S_p C_{p,j})}{\partial t}
 \end{aligned}$$

ここで， $\rho$ は密度(kg/m<sup>3</sup>)， $V$ はダルシー流速(m/s)， $q$ は生産・消滅項(1/s)， $\phi$ は有効間隙率(-)， $S$ は飽和率， $C_{p,j}$ は核種濃度(kg/m<sup>3</sup>)， $D$ は拡散係数(m<sup>2</sup>/s)， $\lambda$ は反応速度定数(1/s)， $z_j^{\text{ads}}$ は吸着量(1/s)を示す。

例えば，漏洩前の核種濃度がゼロ，漏洩時間が時刻 0 から $T_{\text{obs}}$ ，その期間の漏洩地点  $(x_0, y_0, z_0)$  の濃度が既知 ( $C_{\text{src},j}(t)$ ) であった場合，核種濃度の初期条件および境界条件は以下のように定義できる。

$$\begin{aligned}
 C_{p,j}(x_0, y_0, z_0, t) &= C_{\text{src},j}(t) & 0 \leq t \leq T_{\text{obs}} \\
 C_{p,j}(\infty, t) &= 0 & 0 \leq t \leq \infty \\
 C_{p,j}(x, y, z, 0) &= 0 & T = 0
 \end{aligned}$$

通常，逆解析では，観測値と計算値の誤差を目的関数とし，与えられた制約の下で目的関数を最小化する最適化問題を解くことで，設定した未知変数の解を得る。表 2-1 に，逆問題を構成する未知変数，制約条件，目的関数の候補を，図 2-1 に示したコンポーネントに分類して抽出した。

未知変数については，漏洩源の位置や漏洩フラックス，移行経路の地下水流速や分散長などの核種移行パラメータが候補となる。制約条件については，漏洩源の地歴情報から推定される漏洩位置の候補や，核種移行パラメータの一般的範囲などとなる。また，目的関数は，暴露のみ該当し，核種濃度の経時データが該当する。

表 2-1 逆問題を構成する未知変数，制約条件，目的関数の候補の抽出

	未知変数	制約条件	目的関数
漏洩源 Sources	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 位置</li> <li>• 漏洩フラックス</li> <li>• 期間（ヒストリー）</li> </ul>	地上・地下貯蔵施設に関する地履情報から推定される漏洩源位置の候補	—
移行経路 Pathways	核種移行パラメータ <ul style="list-style-type: none"> <li>• 地下水流速</li> <li>• 分散長</li> <li>• 屈曲率</li> <li>• 実効拡散係数</li> <li>• 分配係数</li> </ul>	地質毎の一般的数値，室内・原位置実験データ等で明らかになっているパラメータ範囲	—
暴露 Receptors	—	—	濃度・放射能測定データ（多地点の観測井毎に，時間変化パターンが異なる）

## 2.2 サイト固有の特徴・着眼点の洗出し

1Fに関する核種漏えいに着目した場合、さまざまな汚染水対策などによる人為的かく乱が行われている。図 2-2 に汚染水対策の配置を、図 2-3 にそれぞれの対策工のタイムスケジュールを示す。東日本大震災以降、さまざまな汚染水対策が実施・計画されているが、それぞれの開始・実施時期は異なり、各種現場工事は同時平行的に進められ、時期により地下水流動場が大きく変化している可能性がある。また、図 2-4 に示すように漏洩源の可能性となりうる貯蔵タンクが敷地全体に設置されており、さまざまな場所が核種の供給源となり得る状況である。

表 2-2 に概念化された各コンポーネントの時間的変遷を示す。今後も、汚染水漏洩源の位置、漏えい量、その履歴に関する不確実性が大きく、このような 1F サイトを対象として逆解析を行う場合、以下の点に留意する必要がある。

- オンサイトの各種工事等による人為的かく乱
- 見えない地下の不確実性（場の不均質性、飽和・不飽和、塩淡混合域など）
- 核種漏洩源、移行経路は1つと限らず、核種移行挙動の過渡的变化を伴う
- 漏洩源の位置、強度に関する不確実性が大きい

また、逆解析手法は大きく分類して、決定論的手法と統計・確率論的手法がある。決定論的手法は、修正ガウスニュートン法等により目的関数の最小値を探索する。複雑な問題の場合、目的関数の最小値のほかに局所解が多く存在する場合があります。解の最適解を得ることや保証することが困難であることや、非適切 (ill-posed) な問題に適用できないことがあり決定論的手法の限界は明白である。そこで、本検討では、統計・確率論・最適化手法を用いたアプローチに的を絞ることとした。

なお、表 2-3 に地盤工学分野における逆解析の適用事例をまとめた。トンネル・動的問題、現場データ解析、施工管理など、さまざまな分野で逆解析が行われてきている。

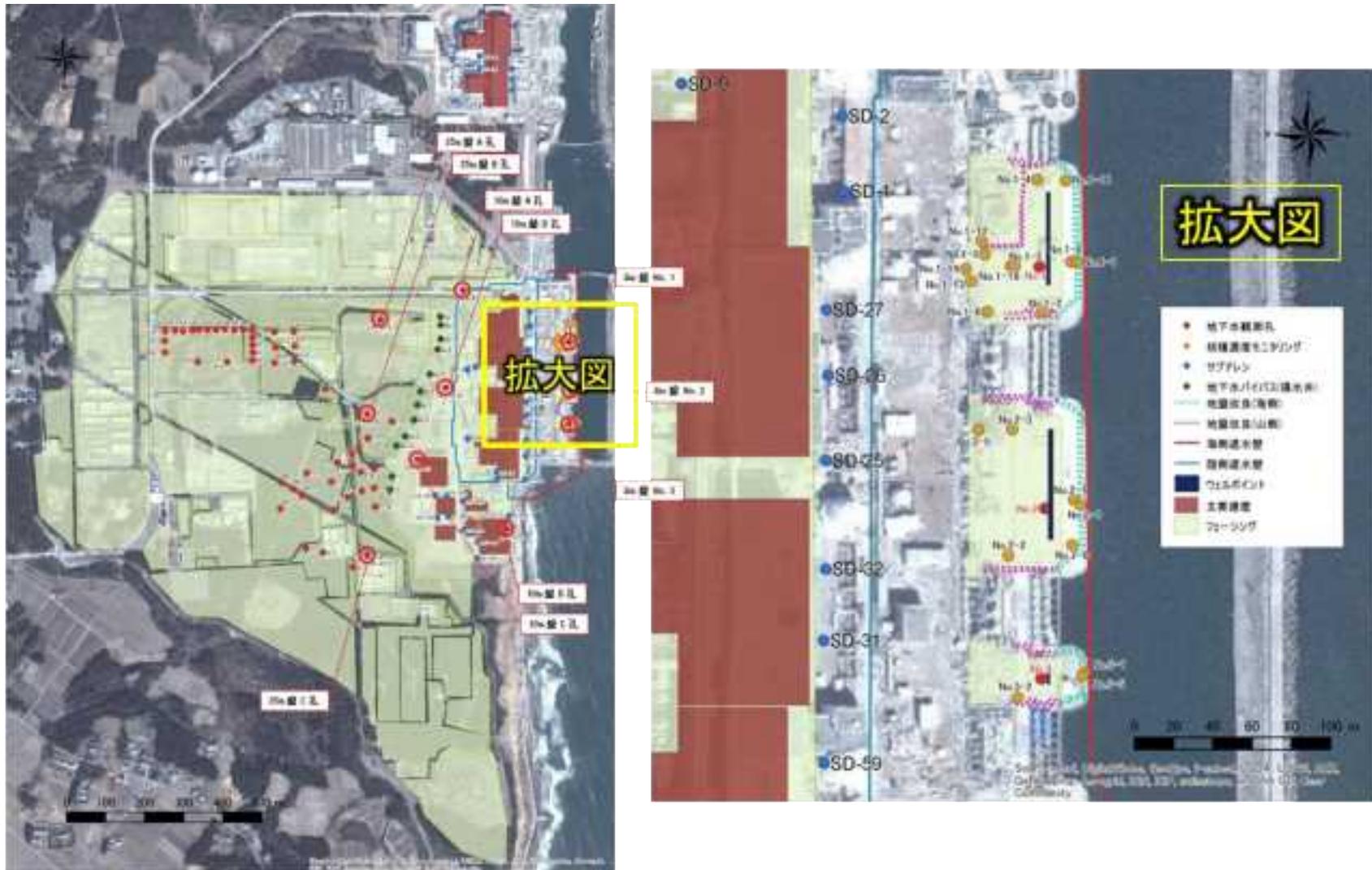


図 2-2 1F 敷地内で実施されてきた汚染水対策

(出典：地圏環境テクノロジー (2015))

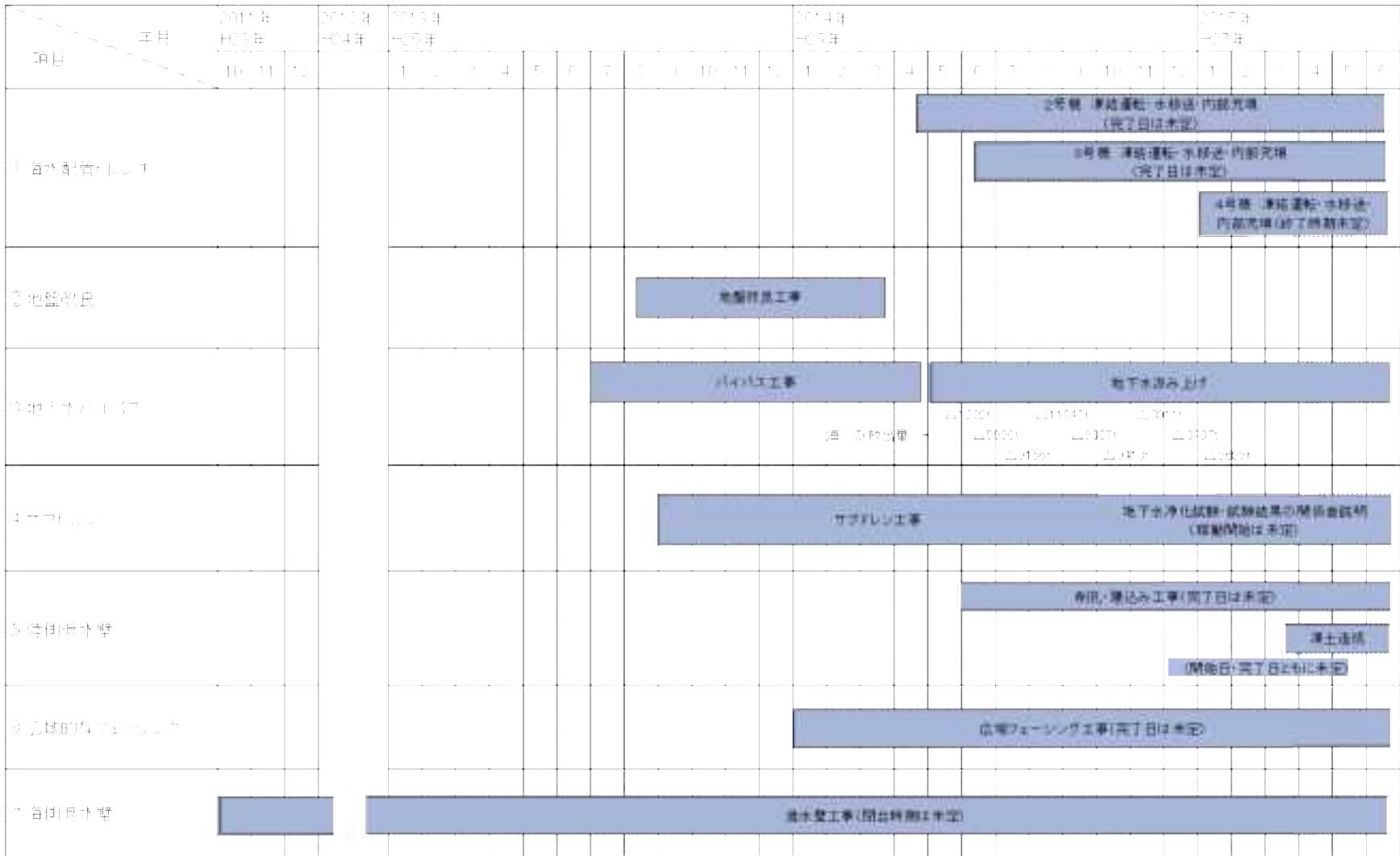


図 2-3 汚染水対策のタイムスケジュール  
 (出典：地圏環境テクノロジー (2015))



【参考資料：出典】東京電力㈱：東京電力福島第一原子力発電所の現状と今後の取り組み，2016年3月2日，  
<http://fpcej.jp/wp/wp-content/uploads/2016/03/1b817feb1f88997b39b6b812f8e2723b.pdf>

表 2-2 概念化された各コンポーネントの変遷

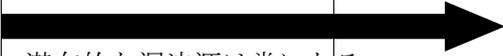
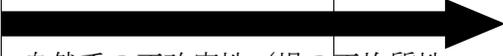
	汚染水対策 (-2020年)	燃料取り出し (-2020年)	燃料デブリ取り出し
漏洩源 Sources	<ul style="list-style-type: none"> <li>汚染水貯蔵施設</li> <li>滞留水を貯留している建屋</li> <li>対策工事等による人為的改変があり、それらは絶えず変化する</li> </ul>	<p>潜在的な漏洩源は常にある (潜在漏洩源の管理)</p> <p>汚染水漏洩源の位置、漏えい量、その履歴に関する不確実性が大きい</p>	
移行経路 Pathways	<ul style="list-style-type: none"> <li>地上</li> <li>敷地内排水路</li> <li>地下地層</li> <li>地下構造物</li> </ul>	<p>自然系の不確実性 (場の不均質性、飽和・不飽和、塩淡混合域など)</p>	
暴露 Receptors	<ul style="list-style-type: none"> <li>地表水</li> <li>地下水 (観測井)</li> <li>海洋</li> </ul>	<p>汚染水漏洩源、移行経路は1つと限らない</p> <p>漏洩源同定に有効な観測井も変化する</p>	

表 2-3 地盤工学分野における逆解析の適用事例

	地盤工学 の分類*	概 要
1	トンネル・動的 問題	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 弾性・非弾性解析による<u>初期応力と塑性ひずみ</u>の推定</li> <li>• <u>内部摩擦角・粘着力</u>の推定</li> <li>• 波動理論による<u>地盤構造</u>の推定</li> <li>• 地震記録から<u>基盤地震動と表層地盤物性</u>を推定</li> </ul>
2	杭・圧密・浸透	<ul style="list-style-type: none"> <li>• N 値や土被り圧の情報を用いて杭の<u>水辺地盤反力係数</u>を推定</li> <li>• 遺伝的アルゴリズムによる<u>浸透パラメータ</u>の推定</li> <li>• 拡張カルマンフィルターによる<u>境界条件</u>の推定</li> <li>• 異方性を持つ<u>透水係数</u>の逆解析</li> </ul>
3	現場データ解 析	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 道路盛土の計測データを用い、拡張カルマンフィルターによる<u>接線弾性係数の時間変化</u>を推定</li> <li>• 補強盛土の破壊実験データを用いて<u>応力-ひずみ関係</u>の空間分布を推定</li> <li>• 同、変位データから<u>内部摩擦角，粘着力</u>を推定</li> <li>• 同、変位データから<u>ヤング係数</u>を推定</li> </ul>
4	ダム・掘削・山 留め施工管理	<ul style="list-style-type: none"> <li>• フィルダム法尻掘削の施工管理</li> <li>• 拡張カルマンフィルターを用いた山留め施工管理システム</li> </ul>

\*太田秀樹・鈴木誠（1998）地盤工学における逆解析の適用と施工管理に関するシンポジウム開催報告，土と基礎，46(2)，89-91

### 3. 地下水・地盤モデリングの逆解析法に関する既往の研究事例の整理

2章での検討を踏まえ、対象とする逆問題の特徴に着目した事例整理を行った。図 3-1 に既往研究事例の整理・分類・整理の手順を示す。文献収集については、第一段階として代表的なレビュー論文を用いた引用論文やキーワードの抽出を行い、その後、さらに引用文献のキーワードに基づき文献検索および入手を行った。その後、文献レビューを行い、逆解析主要および適用事例の相互比較表の作成、逆解析手法へ求められる要件定義と適用性の考察を行った。

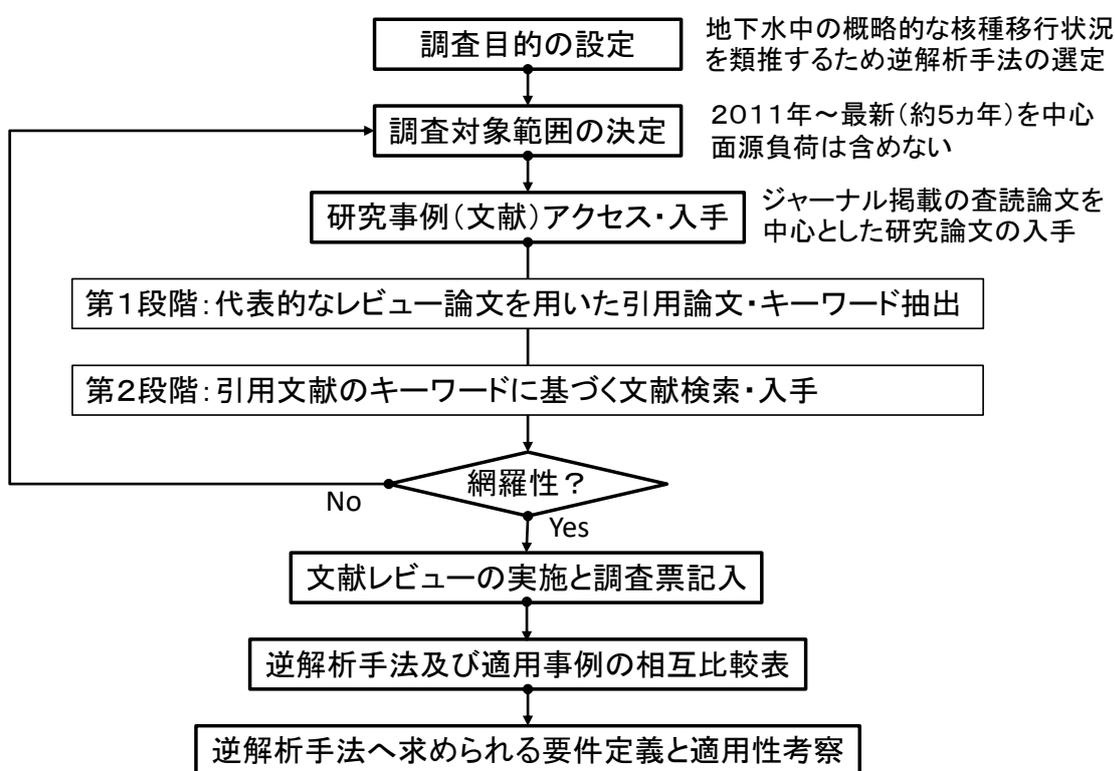


図 3-1 既往研究事例の整理・分類の検討フロー

### 3.1 2段階検索による逆解析事例の収集

まず初めに、代表的なレビュー論文(e.g. Datta and Kourakos, 2015; Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2010; Atmadja et al.,2001)を用いた引用論文から、キーワードを抽出した。結果を表 3-1 に示す。この抽出したキーワードに基づき、文献検索を行った。その結果、検討分野に関する文献は 1980 年以降多数該当した。” Source identification” , “Pollution detection” 等の漏洩源に関する代表的なキーワードのみを用い、対象期間を限定しない検索を行うと、数百～数千件以上の文献が該当した。そこで、象期間を 2011 年以降の約 5 年間とし、国際的な科学ジャーナル等に掲載されている査読論文からの研究・検討事例を主として 88 件の文献を選定した。88 件の内訳は、表 3-2 に示すように、2010 年以前は 35 件、それ以降は 53 件となった。

収集した文献のリストを付録 1 にまとめた。

表 3-1 代表的レビュー論文・引用論文から抽出したキーワード

№	Keywords	Category				№	Keywords	Category				№	Keywords	Category			
		A	B	C	D			A	B	C	D			A	B	C	D
1	Aquifer contamination	X				21	hybrid calibration			X		41	Optimization			X	
2	Bayesian estimation			X		22	Identification				X	42	Parameter estimation			X	
3	Bayesian inference			X		23	Inference under constraints			X		43	Point-like source		X		
4	Bayesian parametric estimation			X		24	Integral pumping test	X				44	Poisson statistics			X	
5	Coastal aquifers	X				25	Inverse problem			X		45	Pollution detection		X		
6	Contaminant source identification		X			26	Linked Simulation-Optimization			X		46	Pollution source		X		
7	Contaminant transport	X				27	Markov Chain Monte Carlo			X		47	Pollution source identification		X		
8	Contamination	X				28	MCMC			X		48	Probability density function				X
9	Cramer-Raobound			X		29	Mathematical models			X		49	Simulation-Optimization			X	
10	Differential evolution			X		30	Metropolis-Hastings			X		50	Soft data				X
11	Equifinality			X		31	Metropolis-Hastings algorithm			X		51	Source characterization		X		
12	FOKS				X	32	Monitoring network	X				52	Source identification		X		
13	Gamma radiation		X			33	Monitoring network design	X				53	Stochastic inverse modeling			X	
14	Geostatistics				X	34	Monte Carlo integration			X		54	Sudden water pollution		X		
15	Gibbs sampling			X		35	Multi-objective evolutionary algorithms			X		55	Uncertainty				X
16	Groundwater	X				36	Multiple responses			X		56	Unknown pollution source starting time		X		
17	Groundwater contamination	X				37	Multi-point source		X								
18	Groundwater management	X				38	Nonlinear programming			X							
19	Groundwater pollution	X				39	Optimization models			X							
20	Harmony search algorithm			X		40	Optimisation			X							

表 3-2 収集した文献の数

期間	文献数
～2010年	35件
2011年～2016年	53件

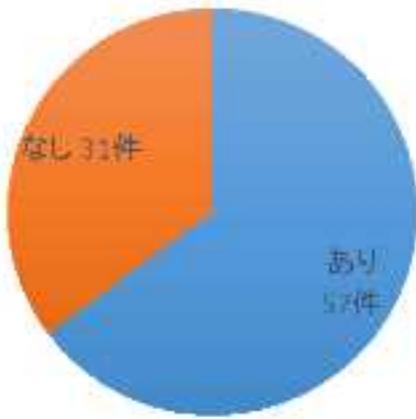
### 3.2 収集した逆解析事例の調査・分類・整理

#### 3.2.1 文献レビューの実施と調査票記入（クイックレビュー）

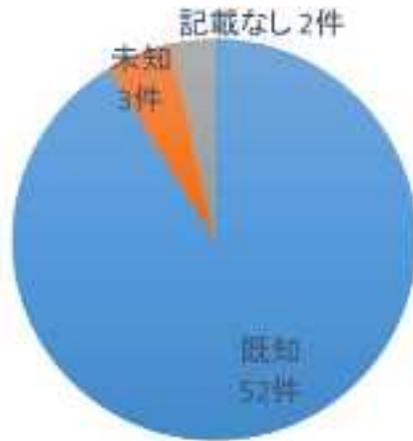
3.1 で収集した文献について、①汚染源の種類、②順解析手法、③観測情報、④逆解析手法の観点で収集した文献を分類し、調査票の記入を行った。作成した調査票を、付録2に示す。

収集した文献について、主な項目の集計を行った結果を図 3-2 および図 3-3 に示す。収集した 88 件の文献のうち、逆解析事例および手法の記述があるものが 57 件あった。また、順解析については、57 件のうちの 53 件がシミュレーションを用い、残り 4 件が理論解を用いたものであった。シミュレーションは、各研究者が自作したものが 15 件であり、MODFLOW や MT3DMS を使用するものが同じく 15 件あった。解析次元は 2 次元が最も多く、次いで 1 次元、3 次元の順となった。

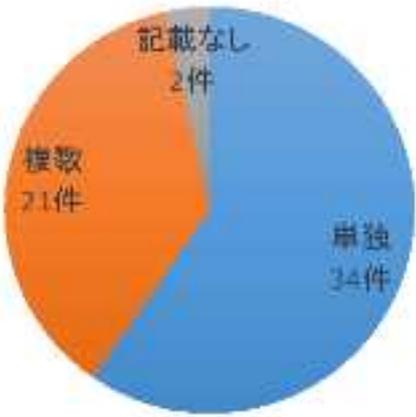
逆解析手法については、決定論的手法が 34 件、確率論的手法が 23 件収集できた。決定論的手法は遺伝的アルゴリズム (GA) を用いたものが最も多く、次いで焼き鈍し方 (SA) であった。ニューラルネットワーク (ANN) を用いたものも 3 件あった。



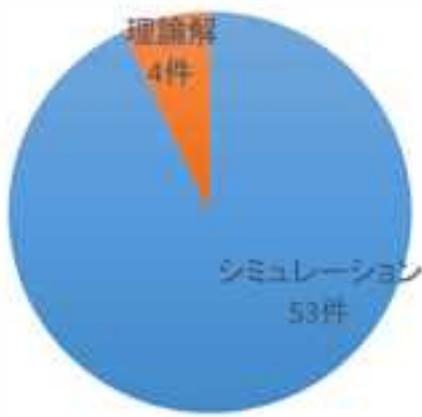
逆解析事例および手法の記述の有無



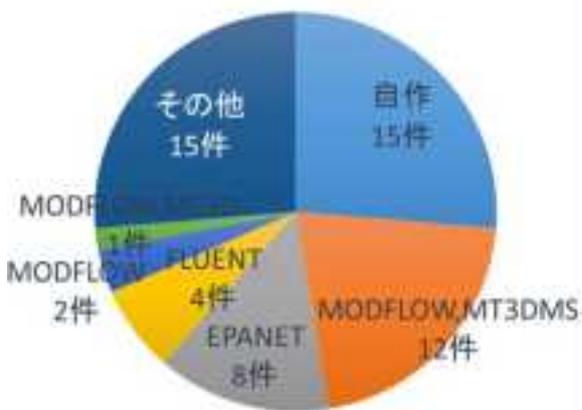
漏洩源の位置



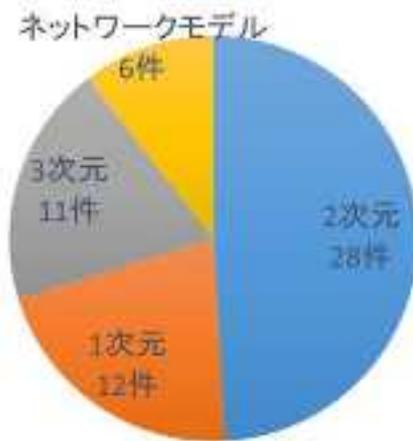
漏洩源の数



順解析の解析手法

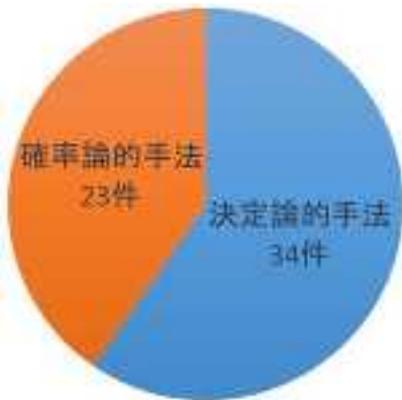


順解析の解析コード



順解析の解析次元

図 3-2 収集文献の集計結果 (1/2)



逆解析の手法

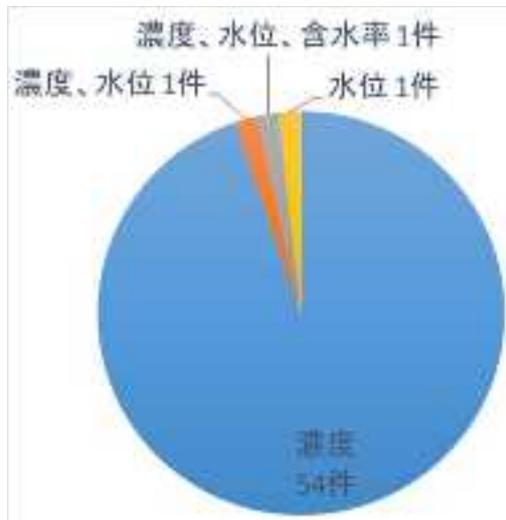


決定論的手法の内訳

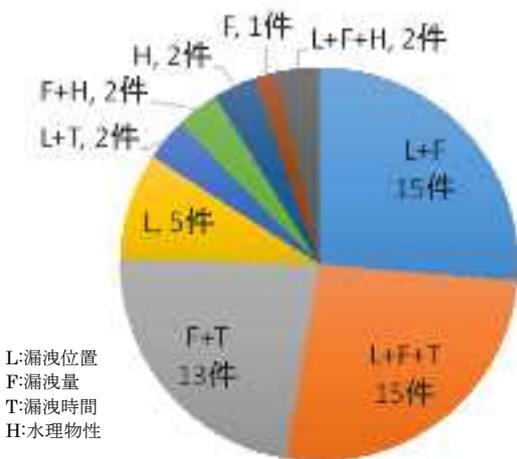
BGA: 地球統計法  
 MCMC: マルコフ連鎖モンテカルロ法  
 HGA: Hybrid Gibbs Sampling  
 MC: モンテカルロ法  
 LHS: ラテンハイパーキューブサンプリング法



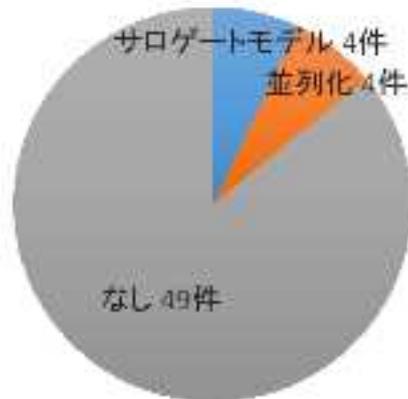
確率論的手法の内訳



目的関数の変数



未知変数



効率化の工夫

図 3-3 収集文献の集計結果 (2/2)

### 3.2.2 逆解析手法及び適用事例の相互比較表の作成（ディープレビュー）

クイックレビューを行った文献に対し、本検討で使用する手法の選択において、不確実性の高い漏洩源推定への適用事例や計算効率性に関する内容など有用と思われる論文を抽出した。抽出した文献について、順・逆解析の手法などについて相互比較表を作成した。表 3-3 に結果を示す。

表 3-3 主要な逆解析事例の相互比較表（ディープレビュー）

先行研究	対象とする系		汚染源 分類 <sup>※1</sup>	観測 地点数	順解析 種類	観測 地点数	順解析 コード名	逆解析			アウトプット		
	次元	領域						分類 <sup>※2</sup>	最適化 <sup>※3</sup>	コード名	漏洩量	漏洩位置 <sup>※4</sup>	漏洩時間 <sup>※5</sup>
Aral et al. (2001)	2D	地下	N	1	点源	4	—	E	PGA	—	✓	✓ ( F )	✓ ( R1 )
Ayvas (2010)	2D	地下	N	3	点源	6	—	E	HS	—	✓	✓ ( R )	✓ ( F )
Bagtzoglou et al. (1992)	2D	地下	N	1-2	点源	20 - 60	—	S	MC	—	—	✓ ( F )	—
Butera et al. (2013)	2D	地下	N	1	点源	2	MODFLOW,MT3D	S	BGA	—	✓	✓ ( R )	✓ ( R1 )
Cristo et al. (2008)	NW	水道管	S	1	点源	6	EPANET	G	DO	—	✓	—	—
Cupola et al. (2015)	2D	地下	E	1	点源	2	MODFLOW,MT3DMS	S	BGA	—	✓	✓ ( R )	✓ ( R1 )
“	2D	地下	E	1	点源	2	MODFLOW,MT3DMS	E	ASM	MATLAB	✓	✓ ( F )	—
Datta et al. (2009, 2011)	2D	地下	N	8	点源	18	SUTRA	G	RG, SQP	MINOS, NPSOL	✓	✓ ( R )	✓ ( F )
Gorelick et al. (1983)	2D	地下	N	2	点源	5	—	-	—	—	✓	✓ ( R )	✓ ( F )
Guan et al. (2006)	NW	水道管	S	2	点源	13	EPANET	G	RG	—	✓	✓ ( R )	✓ ( F )
Gzyl et al. (2014)	2D	地下	S	5	面源	20	MODFLOW,MT3D	S	BGA	—	✓	✓ ( F )	✓ ( R1 )
Hazart et al. (2014)	3D	地下	N	1	点源	8	—	S	HGA	MATLAB	✓	✓ ( F )	✓ ( R2 )
“	3D	地下	S	1	点源	1	—	S	HGA	—	✓	✓ ( F )	✓ ( R2 )
Jha et al. (2012, 2013)	3D	地下	N	2	点源	5	MODFLOW,MT3DMS	E	GA, ASA	—	✓	✓ ( R )	✓ ( F )
Liu et al. (1999)	1D	地下	S	1	点源	多数	—	G	Tikhonov	—	✓	—	✓ ( R1 )
Mirghani et al. (2012)	2D	地下	N	1	点源	5	PGREM	E	GA	MATLAB	✓	✓ ( F )	—
“	3D	地下	N	1	点源	18	PGREM	E	GA	MATLAB	✓	—	—
Snodgrass et al. (1997)	1D	地下	N	1	点源	25	—	S	BGA	—	✓	—	✓ ( R1 )
Neupauer et al. (2000)	1D	地下	N	1	点源	25	—	G	Tikhonov, MRE	CONTIN, MATLAB	✓	—	✓ ( R1 )
Prakash et al. (2014)	3D	地下	N	3	点源	6	MODFLOW,MT3DMS	E	SA	SIMANN	✓	—	✓ ( F )
Srivastava et al. (2015)	2D	地下	N	1	点源	4	MOC	E	ANN	MATLAB	✓	✓ ( R )	✓ ( R1 )
Zeng et al. (2012)	2D	地下	N	1	点源	9	MODFLOW,MT3DMS	E	SCM, DRAM	—	✓	✓ ( F )	✓ ( R2 )
“	2D	地下	N	1	点源	4	MODFLOW,MT3DMS	E	SCM, DRAM	—	✓	—	✓ ( R1 )
Zhang et al. (2013)	2D	大気	S	1	点源	1	FLUENT	G	Tikhonov	MATLAB	✓	—	✓ ( R1 )
“	3D	大気	N	1	点源	1	FLUENT	G	Tikhonov	MATLAB	✓	—	✓ ( R1 )
Zhang et al. (2015)	2D	地下	N	1	点源	1 -10	MODFLOW,MT3DMS	E	DRAM	—	✓	✓ ( F )	✓ ( R2 )
“	2D	地下	N	1	点源	1 -10	MODFLOW,MT3DMS	E	DRAM	—	✓	✓ ( F )	✓ ( R2 )
Zhao, Y. et al. (2015)	2D	地下	N	2	点源	6	MODFLOW,MT3DMS	E	GA	MATLAB	✓	✓ ( R )	✓ ( F )
Amirabdollahian et al. (2013) <sup>※</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Lu et al (2014)	—	—	—	—	—	—	—	E,P	DREAM	UCODE_2014	—	—	—
Sadegh et al. (2014)	—	—	—	—	—	—	—	E,P	DREAM	MATLAB	—	—	—
Vrugt (2016)	—	—	—	—	—	—	—	E,P	DREAM	MATLAB	—	—	—
Vrugt et al. (2011)	—	—	—	—	—	—	—	E,P	DREAM	MATLAB	—	—	—
Wellmann et al. (2014) <sup>※</sup>	—	—	—	—	—	—	—	S	MC	—	—	—	—

※) N : 数値実験, E : 室内試験, S : 実サイト      ※) G : 勾配ベース, E : 進化論ベース, P : サンプリングベース  
 ※) ANN : ニューラルネットワーク, ASA : 適応焼きなまし法, ASM : 随伴関数法, BGA : Bayesian geostatistical approach, DO : 離散最適化, DRAM : Delayed Rejection Adaptive Metropolis(MCMC), DREAM : DiffeRential Evolution Adaptive Metropolis(MCMC), GA : 遺伝的アルゴリズム, HGA : Hybrid Gibbs Algorithms, HS : ハーモニーサーチアルゴリズム, MC : モンテカルロ法, PGA : Progressive Genetic Algorithm, RG : Reduced-Gradient method, SQP : Sequential Quadratic Programming, SA : 焼きなまし法, SCM : Stochastic Collocation Method(MCMC), Tikhonov : テイホノフ正則化, MRE : 最少相対エントロピー法  
 ※) R : 複数の候補から推定, F : 候補なしで推定      ※)R1 : 関数によるフィッティング, R2 : 複数期間に分けて矩形で推定, F : フリー  
 ※) 逆解析モデリングの枠組み構築に関する文献

### 3.3 核種移行評価に対する適用性の考察

収集した文献を分析した結果を以下にまとめる。

- 現状では、2次元モデルが主流である。これは、逆解析において、多数の順解析を実施する必要があり、順解析の演算時間がボトルネックとなる。
- 複雑な系を対象とする場合、順解析の演算時間に留意する必要がある。なるべく簡略化を行う、場合によってはサロゲートモデルを構築することなどの検討を行う必要があると考えられる。
- 逆解析手法には、従来から検討されている決定論的手法のほかに、近年では計算機の高性能化とともにマルコフ過程モンテカルロ計算 (MCMC) などに代表される確率論的手法の研究も多く報告されてきている。
- 観測データが少ない場合や誤差が多く含まれている場合、逆問題が Ill-posed となることや安定な解が存在しないことが想定される。そのため、未知数の確率分布を得ることができる確率論的手法の整備が有用であると考えられる。
- 逆解析では、汚染源の漏洩量の時間変化をガウス分布などの関数で簡易的に表現する手法が多く、簡略化せずに経時変化そのものを求める事例は少ない。簡略化しない場合は、先見情報や制約条件などの影響を大きく受ける可能性が示唆される。まずは、漏洩速度を簡易的に関数で表現する手法を整備し課題や問題点を整理した上で、経時変化そのものを求める手法を整備した方がよいと考えられる。

## 4. 核種移行評価における逆解析法に関する基礎的検討

### 4.1 逆解析手法のスコアリングと選定

#### 4.1.1 逆解析の基本要件

2章および3章により逆解析の範囲や着眼点、逆解析事例の収集を行った。それらをもとに、表4-1に、逆解析・最適化手法、感度解析、不確実性の定量化、逆解析手法に分類し、求められる基本要件をまとめた。

未知パラメータとしては、位置、期間および漏洩強度などを定式化し、任意の漏洩源を定式化出来ることや、異なる漏洩源のモデルを任意に複数の組合せで定義出来ることが求められる。また、目的関数については、任意の形式で目的関数が定式化でき、地下水位や地下水中の核種濃度の残差を反映した任意の組合せを評価できることが求められる。また、計算コストとして、逆解析では順解析を多数の計算することが求められるため、並列化やサロゲートモデルなどを用いて高速化、効率化を行う必要がある。

表 4-1 本検討における逆解析手法に求められる基本要件

分類		要件	
1	逆解析 最適化手法	未知パラメータ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 任意の漏洩源モデル(位置, 期間, 強度)を定式化できること</li> <li>● 異なる漏洩源モデルの複数の組合せを任意に定義できること</li> <li>● 任意の複数の水理パラメータ(透水係数, 間隙率など), 核種移行パラメータを未知パラメータとすることができること</li> </ul>
		制約条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 先見情報として得られる漏洩源モデルの特性を制約条件として与えることができること</li> <li>● 複数の制約条件の組合せを定義できること</li> </ul>
		目的関数	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 地下水中の核種濃度, 地下水位の残差を反映した任意の組合せを評価できること</li> <li>● 任意の形式の目的関数を定式化できること</li> </ul>
	反復計算		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 地下水流動解析, 粒子追跡解析, 核種移行解析の順解析コードの修正を必要としない, または十分に少ないこと</li> <li>● 反復収斂計算の収束性に優れていること</li> <li>● Ill-pose な逆問題へ適用できること</li> </ul>
		解探索	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 効率的な探索</li> </ul>
2	感度解析	勾配計算	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 効率的な勾配計算</li> </ul>
3	不確実性の 定量化	信頼区間	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 不確実性を定量評価できる統計諸量を算定できること</li> </ul>
		信用区間	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 効率的なサンプリング</li> <li>● 局値解への収斂回避(広域最適化)</li> </ul>
4	共通	計算コスト	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 演算の効率化</li> <li>● 演算の高速化</li> </ul>

#### 4.1.2 逆解析手法の分類

文献調査の結果に基づくと、近年の漏洩源同定に適用されている逆解析・最適化手法には様々なものがあるが、例えば、Chadalavada and Datta(2011)らによると。以下のように分類される

##### I. **Classical optimisation** (Gradient-based techniques)

- Least Square method
- Gauss-Newton method
- Minimum Relative Entropy method
- Regularization
  - Tikhonov Regularization
  - Singular Value Decomposition
  - Quasi-Reversibility technique

##### II. **Non-classical optimisation** (Evolution-based techniques)

- Maximum Likelihood Estimation
- Genetic Algorithm
- Random Particle method
- Simulated Annealing method
- Markov Chain Monte Carlo sampling algorithm

##### III. **Hybrid optimisation**

ここでは、収集した文献に基づき、図 4-1 のように分類した。逆解析手法を決定論的手法と確率論的手法として分類した場合、従来から良く使われているガウスニュートン法に代表される勾配ベースの手法は、決定論的手法に分類される。一方で、近年、コンピュータの計算速度の向上に伴い検討事例が増えているサンプリングによる手法は確率論的手法に分類される。一方で、遺伝的アルゴリズムや焼き鈍し法など、進化論をベースとした手法は、決定論的手法や確率論的手法のどちらにも対応したものと分類される。

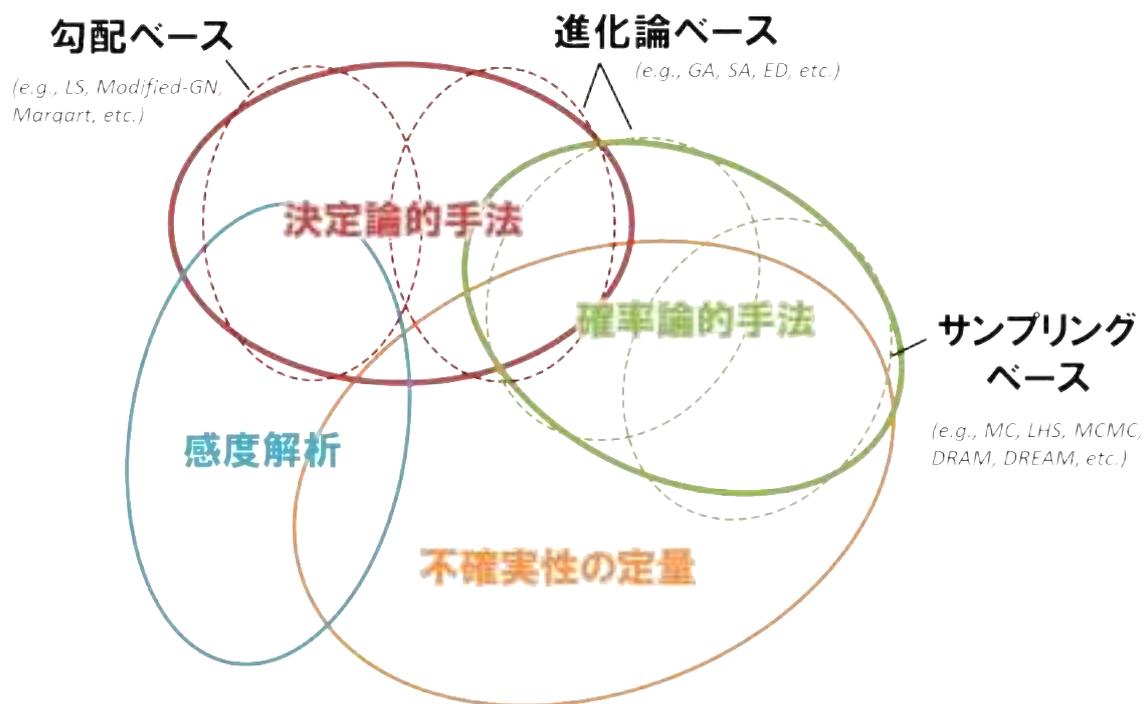


図 4-1 逆解析・最適化手法の分類

**PGA:** Progressive Genetic Algorithm

**ASA:** Adaptive Simulated Annealing

**ANN:** Artificial Neural Network

**MC:** Monte Carlo sampling

**LHS:** Latin-Hypercube Sampling

**MCMC:** Markov Chain Monte Carlo sampling

**DREAM:** DiffeRential Evolution Adaptive Metropolis

以下に、代表的な手法の事例を示す。

(1) **PGA: Progressive Genetic Algorithm**

Zheng and Wang (2003)で採用した手法であり、遺伝的アルゴリズムをベースとした手法である。逆解析のフローチャートを図 4-2 に示す。候補となる汚染源の集合である母集団に対して選択、交叉、突然変異などの遺伝的操作を確率的に繰り返すことによって解を探索する古典的GAをベースとしたものである。

対象領域をサブ領域に分割し、それぞれに1つの汚染源候補を配置する。濃度、位置（X，Y座標）と残差濃度の線形性を仮定し、地下水流動・物質移行解析モデルを用いて次式を解くことで、最適解を得る。

$$\begin{aligned} & \mathbf{A}_1 \Delta \mathbf{C}_y + \mathbf{A}_2 \Delta \mathbf{X} + \mathbf{A}_3 \Delta \mathbf{Y} + \mathbf{e} = \mathbf{b} \\ & \left. \begin{aligned} & \Delta C_{y \min} \leq \Delta C_y \leq \Delta C_{y \max} \\ & \Delta X_{\min} \leq \Delta X \leq \Delta X_{\max} \\ & \Delta Y_{\min} \leq \Delta Y \leq \Delta Y_{\max} \end{aligned} \right\} \text{解空間} \end{aligned}$$

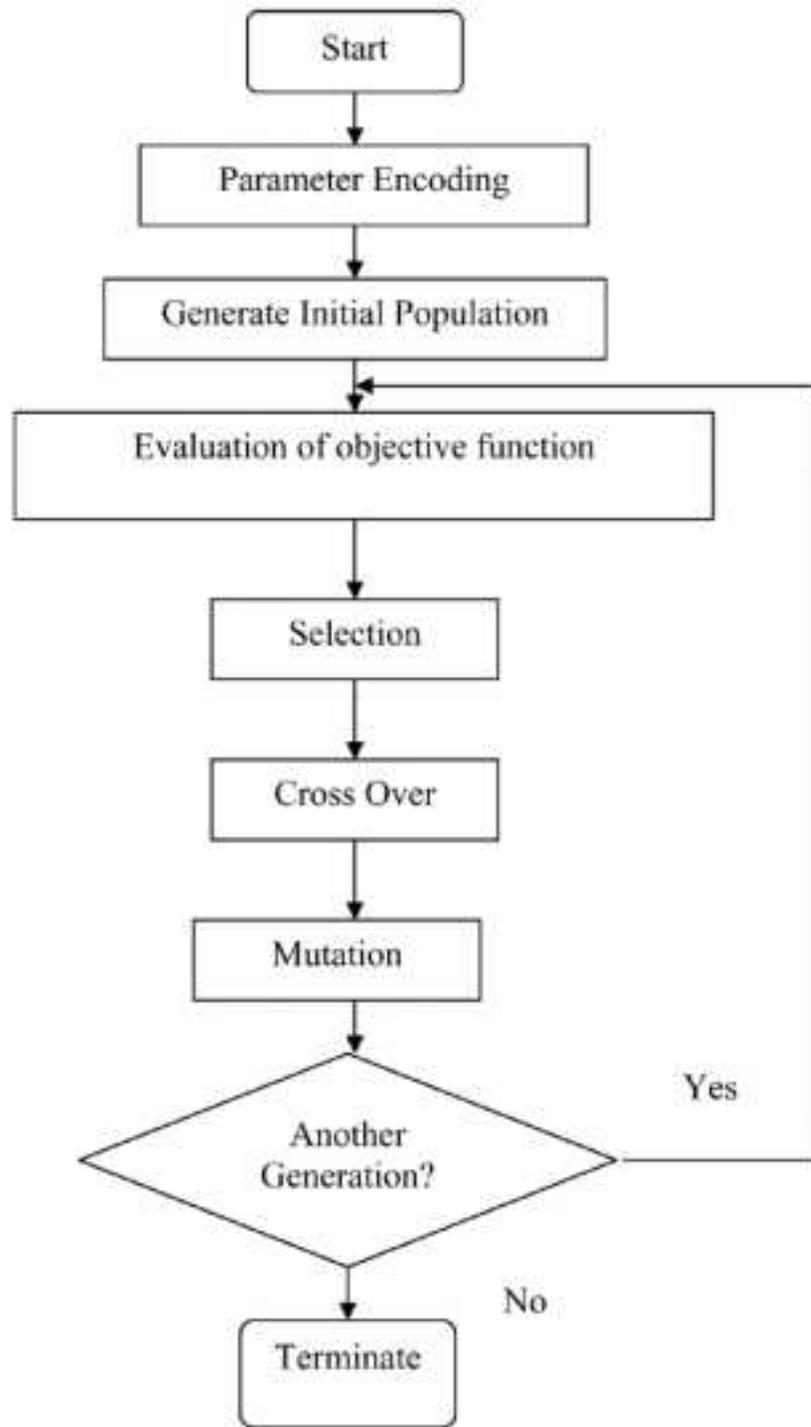


図 4-2 Progressive Genetic Algorithmによる逆解析のフローチャート

(2) **ASA: Adaptive Simulated Annealing**

Jha, M., & Datta, B. (2013).が採用した手法であり，古典的な焼き鈍し法(SA)をベースとしている。図 4-3 にフローチャートを示す。初期化，アニーリング，クーリング，終了判定といった手順で最適解を見いだす。ASA は SA に対してパラメータ空間における遷移状態の生成，採択，クーリング等に関するパラメータの自動調整アルゴリズムを組み込んだ手法であり，ASA は SA に対してパラメータを調整する試行錯誤を必要としないため高速に収束する点の特徴である。

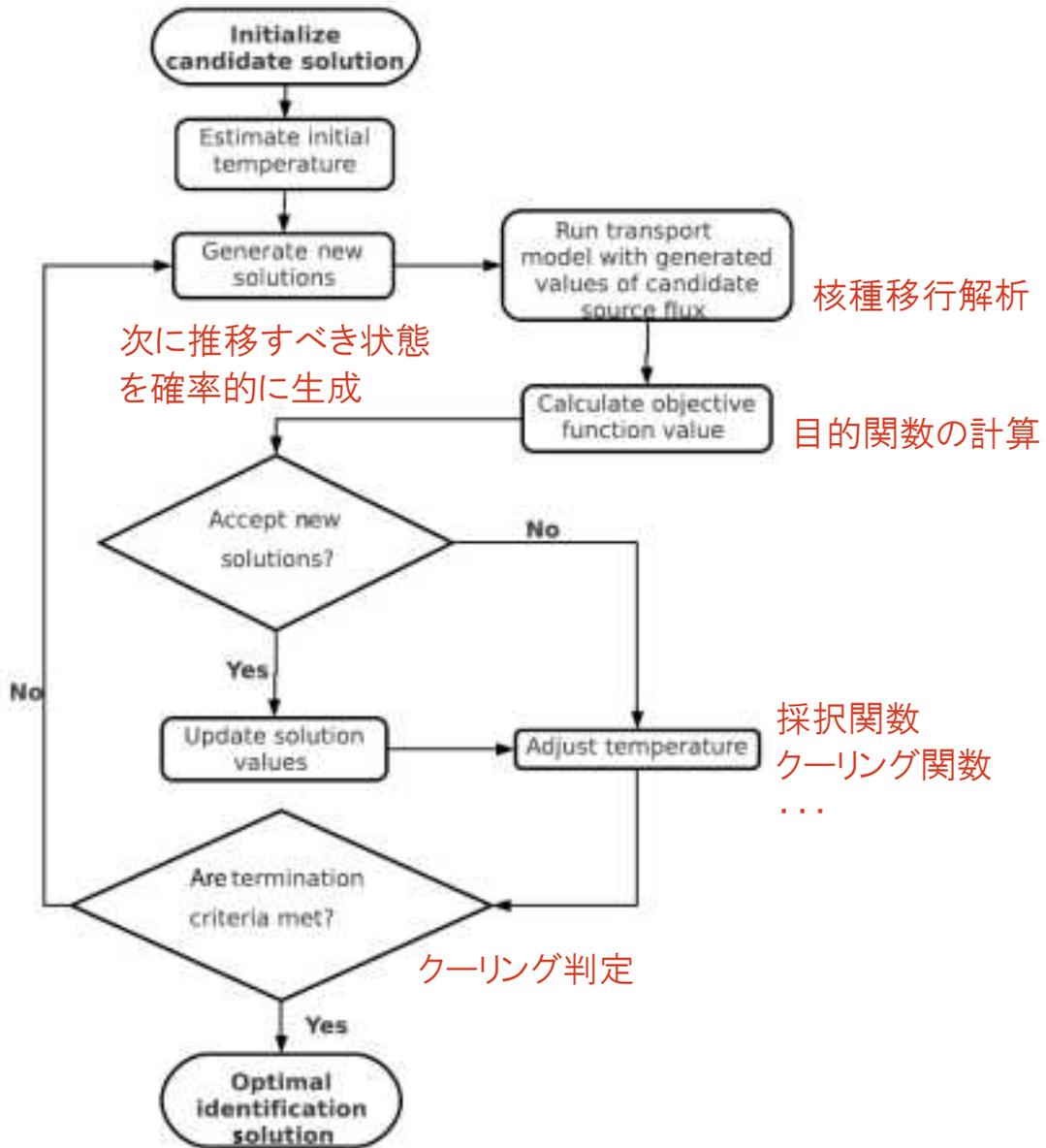


Fig. 1. Schematic representation of linked simulation-optimization

図 4-3 Adaptive Simulated Annealing による逆解析のフローチャート

(3) ANN: Artificial Neural Network

Mirghani, B. Y., et al. (2012)は人工ニューラルネットワーク(ANN)を用いた逆解析手法を採用した。地下水流動解析・核種移行解析の入力データと出力データの間をANNに学習させ、汚染源、水理・物質移行パラメータの同定を行った。汚染源は候補となる位置に対する漏洩フラックス、期間により記述した。破過曲線は、濃度の総和、平均値、標準偏差、歪度によりパラメタライズした諸量として、ANNへ与えた。

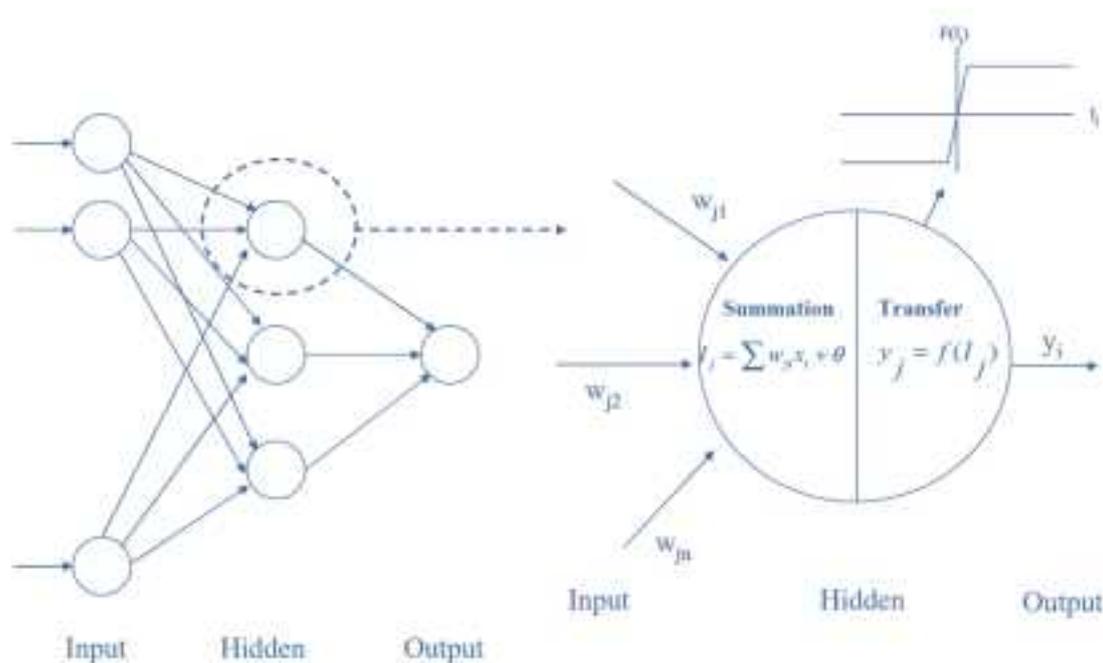


図 4-4 バックプロパゲーション型ニューラルネットワーク

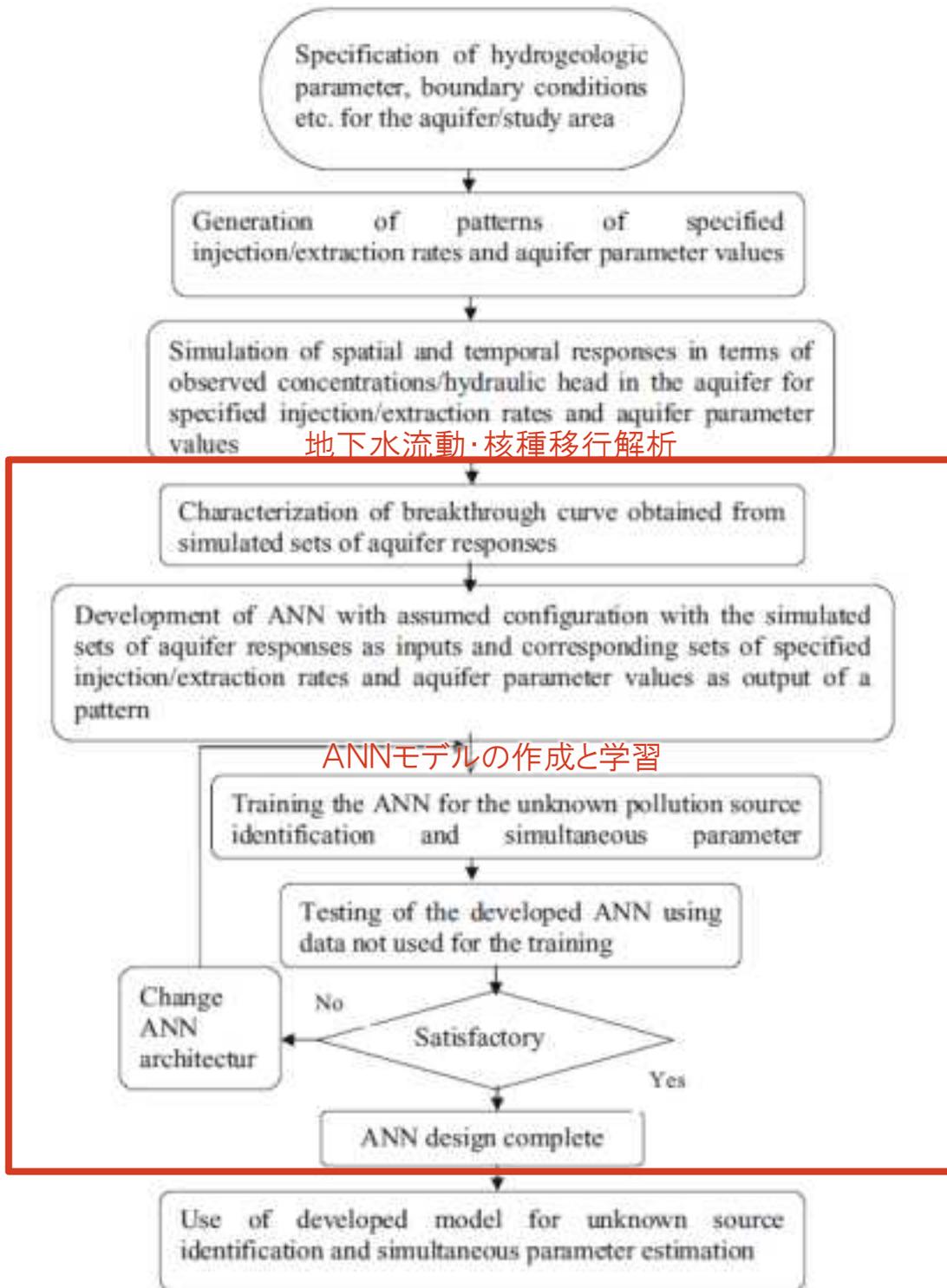


図 4-5 Artificial Neural Networkによる逆解析のフローチャート

(4) **MCMC: Markov Chain Monte Carlo sampling**

MCMC 法は、マルコフ連鎖の状態遷移を仮定して、ベイズ公式に基づく事後確率（確率密度関数）を推定手法の総称である。MCMC 法の初期では、Metropolis サンプラーが用いられている。これは、サンプリングするのが困難な確率分布から統計標本の配列を生成するのに用いられる方法であり、以下の手順でサンプリングする。

(1) 標本候補を提案分布（事前確率）からサンプリング

(2) Metropolis 比  $\alpha$  を用いて標本の採択・棄却の判定

$$\alpha = \frac{p(\mathbf{x}^*|\mathbf{Y})}{p(\mathbf{x}^t|\mathbf{Y})} \begin{cases} \geq 1, \mathbf{x}^{t+1} = \mathbf{x}^* \\ < 1 \begin{cases} \alpha > r \sim U(0,1), \mathbf{x}^{t+1} = \mathbf{x}^* \\ otherwise, \mathbf{x}^{t+1} = \mathbf{x}^t \end{cases} \end{cases}$$

(5) **DREAM: DiffeRential Evolution Adaptive Metropolis**

MCMC では初期値として与える提案分布(proposal distribution)の性状によっては収束が遅く計算効率が下がる場合がある。これに対して、DREAM ではサンプリングをしながら提案分布の自動調整・更新機能を行うことで、多峰性、高次元の複雑な問題に対する計算効率(収束性)を大幅に改善させたものであり、以下の点の特徴である。

- 標本候補の生成に対して、選定された次元を更新
- 差分進化(Differential Evolution)による標本候補のサンプリング
- スタックした生産性のない連鎖を取り除く

図 4-6 は、代表的な MCMC 法を比較したものである。FE が反復(試行)回数を示しており、DREAM を用いた場合、他の手法に比べて少ない回数で終了していることが報告されている。

また、MCMC 法では、提案分布が平衡状態に至っているか判定する必要がある。Cowles ら(1996)は、それまで提案されている判定指標を取り纏めている。Gelman と Rubin らにより提案された指標は、現在も多く使用されている。

**Table 3:** Comparison of DREAM ( $n_{CR} = 3$ ;  $\delta = \{1,2,3\}$ ) against the Random Walk Metropolis (RWM), Delayed Rejection Adaptive Metropolis (DRAM) and DiffeRential Evolution-Markov Chain (DE-MC) MCMC schemes for the 10-dimensional twisted Gaussian distribution with  $b = 0.1$ .  $N$  denotes the number of parallel chains;  $FE = N \cdot$  (number of generations) = number of function evaluations in an  $N$  chain sampler needed to reach convergence and  $AR$  the acceptance rate (%). The reported values represent averages over 100 independent trials.

	$N$	$D$	$FE \cdot 10^4$	AR (%)
RWM	1	0.12	6.71	24.3
DRAM	1	0.08	4.82	51.6
DE-MC	20	0.09	9.45	6.33
DREAM	10	0.09	4.01	9.50
DREAM	10	0.08	3.54	10.1

<sup>†</sup>  $n_{CR} = 3$  without adaptation,  $p_1 = p_2 = p_3 = 1/3$ .

図 4-6 DREAM による計算効率(収束性)の改善状況

Table 1. Summary of Convergence Diagnostics

Method	Quantitative graphical	Single or multiple chains	Theoretical basis	Univariate/full joint distribution	Bias/variance	Applicability	Ease of use
Gelman and Rubin (1992)	Quantitative	Multiple	Large-sample normal theory	Univariate	Bias	Any MCMC	a
Raftery and Lewis (1992)	Quantitative	Single	2-state Markov chain theory	Univariate	Both	Any MCMC	a
Geweke (1992)	Quantitative	Single	Spectral analysis	Univariate	Both	Any MCMC	a
Roberts (1992, 1994)	Graphical	Multiple	Probability theory	Joint	Bias	Some	c
Ritter and Tanner (1992)	Graphical	Either	Importance weighting	Joint	Bias	Gibbs only	c
Zellner and Min (1995)	Quantitative	Single	Conditional probability	Joint	Bias	Some	d
Liu, Liu, and Rubin (1992)	Both	Multiple	Probability theory	Joint	Bias	Gibbs only	c
Gamén and Smith (1993)	Qualitative	Multiple	Eigenvalue analysis	Univariate	Bias	Gibbs only	b
Johnson (1994)	Quantitative	Multiple	Fixed-point theorems	Joint	Bias	Some	a or c
Heidelberger and Welch (1983)	Quantitative	Single	Brownian bridge, spectral analysis	Univariate	Both	Any MCMC	a
Mykland, Tierney, and Yu (1995)	Graphical	Single	Markov chain regeneration	Joint	Bias	Some	d
Yu (1994)	Graphical	Single	$L_1$ distance, kernel density estimation	Joint	Bias	Some	d
Yu and Mykland (1994)	Graphical	Single	Cusum path plots	Univariate	Both	Any MCMC	b

NOTE: When all full conditionals are conjugate, Johnson's method requires no additional coding beyond that required for implementing the regular Gibbs sampler. Otherwise, Johnson's method may require special, problem-specific coding to use the median algorithm to generate both the lower-order full conditionals.

図 4-7 MCMC 法による収束判定

### 4.1.3 逆解析手法の選定

文献調査結果に基づき、本検討で導入する逆解析手法の選定を行った。2章でも述べたが、決定論的手法は非適切 (ill-posed) な問題に適用できないことがあるため、ここでは、確率論的手法に限定し、代表的な手法について相対的な比較を行った。Ill-posed 問題への適用性、効率的な探索・サンプリング、不確実性の定量化、広域最適化、計算コストに着目し、他よりも優れている場合を加点、劣っている場合を減点としてスコアリングを行った。スコアリング結果を表 4-2 に示す。ここでは、MCMC 法の一つである DREAM が最高点である 5 となったため、本検討では、逆解析手法として DREAM を採用することとした。

なお、採用されていない手法についても、決定論的手法に対して十分優位であり、手法の相違により、ill-posed な問題への適用性が異なることが予想される。本検討でレビューした文献では、同一問題によるベンチマークした結果がほとんど無いため、複雑な問題に適用した場合の手法間の相違や優位性に関する情報を得ることが出来なかった。本検討では DREAM を採用したが、代表的な手法については、今後、比較・検証を行った方が良いと考えられる。

表 4-2 逆解析手法のスコアリング結果

	PGA	ASA	ANN	MC	LHS	MCMC	DREAM
1 Ill-posed 問題への適用性	1	1	1	1	1	1	1
2 効率的な探索・サンプリング		1		-1			1
3 不確実性の定量化	-1	-1	-1	1	1	1	1
4 広域最適化	1	1	1	1	1	1	1
5 計算コスト	-1			-1			1
<b>スコア合計</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>5</b>

**PGA:** Progressive Genetic Algorithm

**ASA:** Adaptive Simulated Annealing,

**ANN:** Artificial Neural Network

**MC:** Monte Carlo sampling

**LHS:** Latin-Hypercube Sampling

**MCMC:** Markov Chain Monte Carlo sampling

**DREAM:** DiffeREntial Evolution Adaptive Metropolis

## 4.2 選定された逆解析法を行うためのツール整備

### 4.2.1 逆解析の基本構成

図 4-8 に、逆解析を行う際の一般的な手順を示す。通常、逆解析では、多数の順解析の計算が行われる。順解析は、図のように複数のシミュレータが連動して計算することもある。逆解析は、順解析の入力ファイル内の未知パラメータを変更，順解析の実行，結果の抽出，目的関数の評価の手順で行う。この手順は，決定論的手法や確率論的手法のどちらも基本的に相違はない。

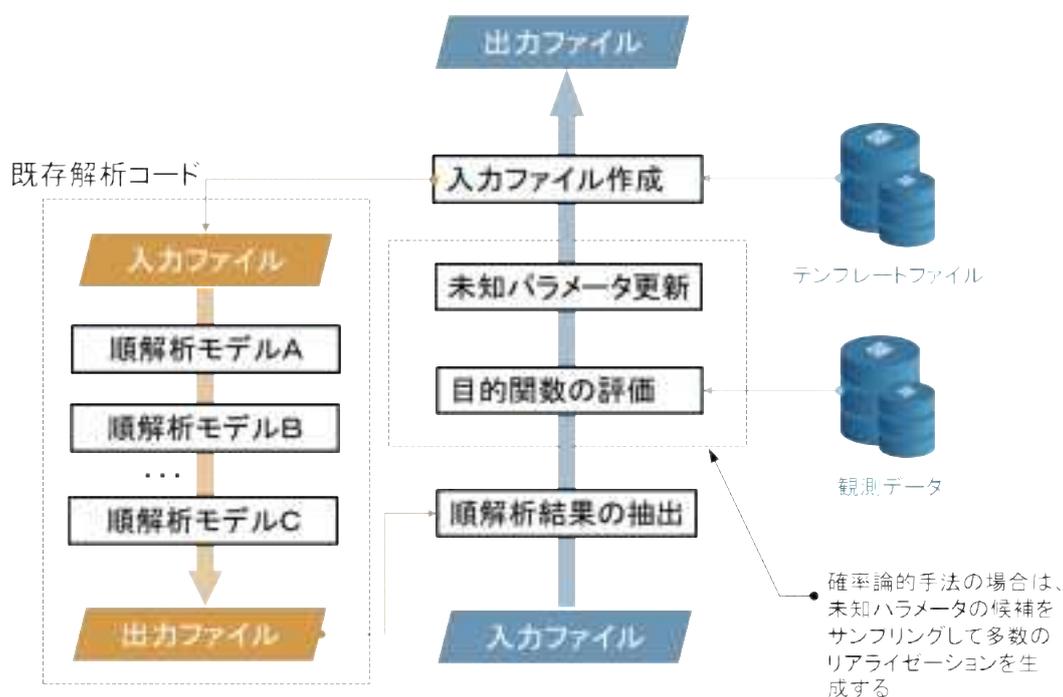


図 4-8 逆解析の一般的手順

### 4.2.3 既存ツール

近年、ユーザーが使用している既存の順解析と組合せて、逆解析が容易に実装できるフレームワークがいくつか公開されている。図 4-9 に、逆解析が実装されているオープンソースパッケージの代表例を示す。例えば、DAKOTA(Design Analysis Kit for Optimization and Terascale Applications)は米国エネルギー省が管轄するサンディア国立研究所より公開されており、エンジニアリングに関する問題を解くための最適化ツール群である。UCODE は米国地質調査所 (USGS) で開発されたものであり、いくつかの逆解析手法や感度解析、不確実性解析などのツールが実装されている。また、汎用のプログラミング言語である Python にも、PyMC ライブラリなどが提供されている。ユーザは、これらのツールを使用することにより、比較的容易に逆解析を導入できる環境にある。

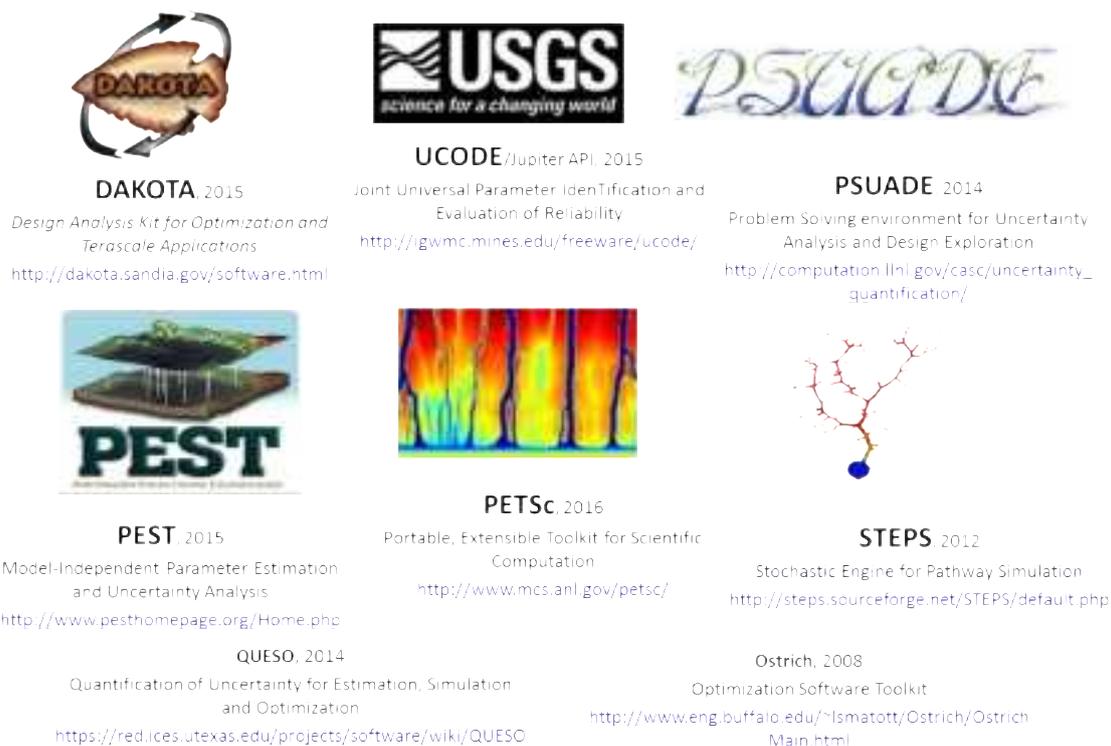


図 4-9 逆解析が実装されているオープンソースパッケージの代表例

UCODE には、逆解析手法の選定で候補に挙げた DREAM が実装されており、本事業では、UCODE を使用して逆解析を実装することとした。ここで、UCODE は 2005 年に一度公開されおり、2014 年に後継バージョンとして機能を追加したものが公開されている。以下に、概要をまとめる。

#### UCODE\_2005 (Poeter, et al., 2005)

- UCODE\_2005 とモデル残差，線形・非線形性，不確実性等の 6 つのポストプロセッサからなり，既存の任意のプロセスモデルとリンクさせて，キャリブレーション，不確実性解析等を効率的に行うことができるツール
- リンクさせることができる既存のプロセスモデルは ASCII テキスト形式のものに限定
- 任意の未知パラメータ，制約条件，目的関数を指定することができる
- 複数のプロセスモデルへも拡張可能

#### UCODE\_2014 (Poeter, et al., 2014)

- UCODE\_2005 の後続バージョン
- 重み付け機能の更新
- 観測データの重み付けを決める変動係数 COV を用いる際の機能拡張
- 特異値分解を用いた逆解析機能
- 感度解析機能の拡張
- パラメータ推定，予測の不確実性の定量化機能の拡張

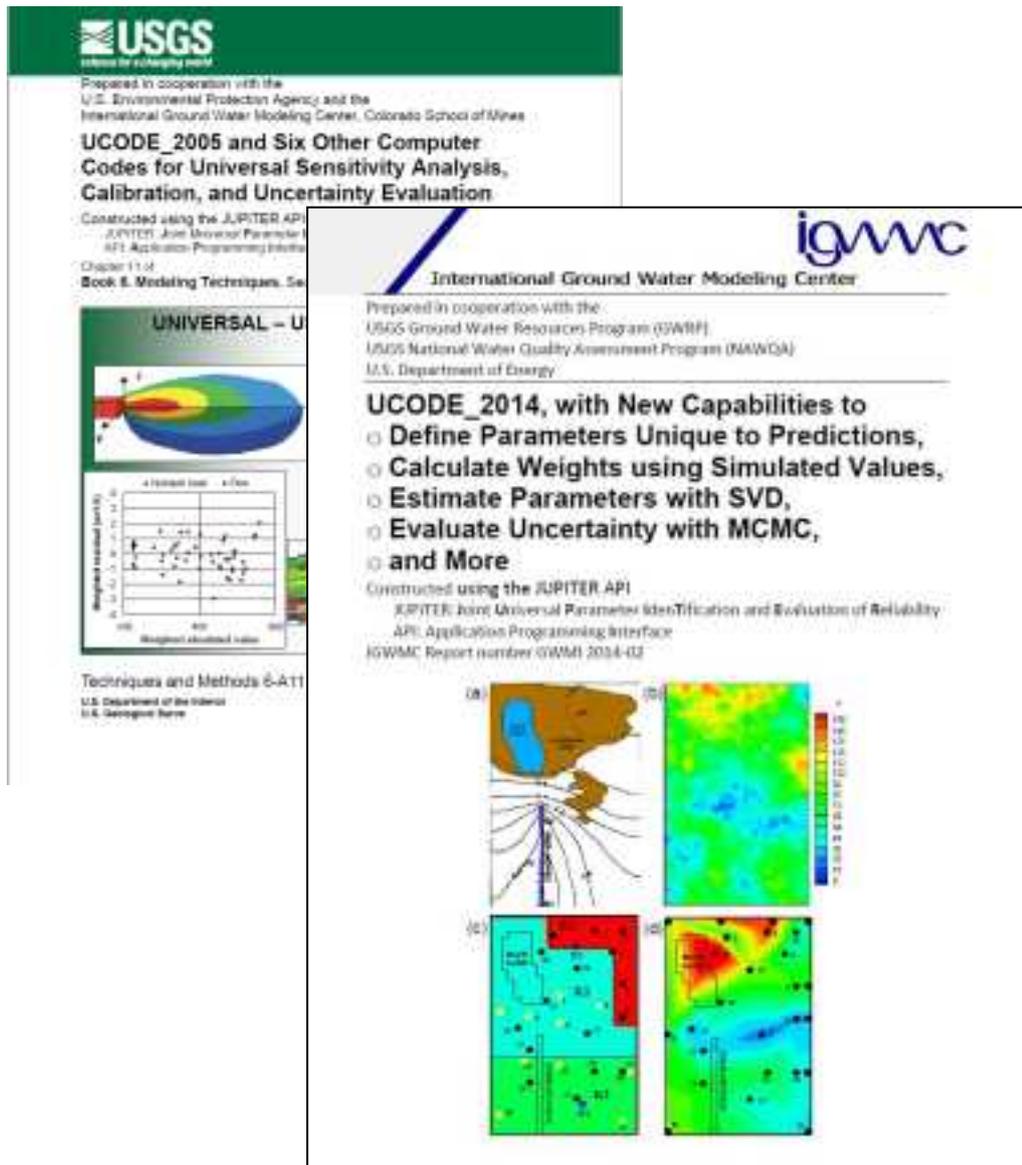


図 4-10 UCODE2005 および UCODE2014 のマニュアル

#### 4.2.4 本検討で整備するツール

UCODE\_2014 を逆解析の基本エンジンとし、1F を対象とした解析などに適用することを考えた場合の基本構成を図 4-11 に示す。これは、3次元地下水流動解析(GWS)の結果を用いて、粒子追跡解析(PTS)による核種移行経路の抽出を行い、経路毎の核種移行解析(RTS)を実行し、観測地点の核種濃度を検証データとして用いることを想定したものである。GWS, PTS, RTS は、コンバータにより連結させる。また、UCODE\_2014 とは、RTS の入力データの作成のためのコンバータ、出力データの形式変換のためのコンバータが必要となる。シミュレータ入出力ファイルの形式により、UCODE\_2014 が直接読み書き出来る様な場合は、コンバーターは不要となる。

この基本構成は、3次元の地下水流動場から核種移行経路経路を抽出し、1次元ないし2次元の核種移行解析を実施するものと想定したものである。これは、逆解析では、多数の核種移行解析を実行する必要があるため、一回当たりの演算時間をなるべく少なくする点に配慮したものである。3次元の核種移行解析の演算時間が短い場合、粒子追跡解析を実施せずに、直接3次元地下水流動場を用いて逆解析を行うことも可能である。

逆解析法の基本構成で使用するコンバータプログラムの例を表 4-3 に示す。本検討では、必要に応じてこれらのプログラムの作成を行った。

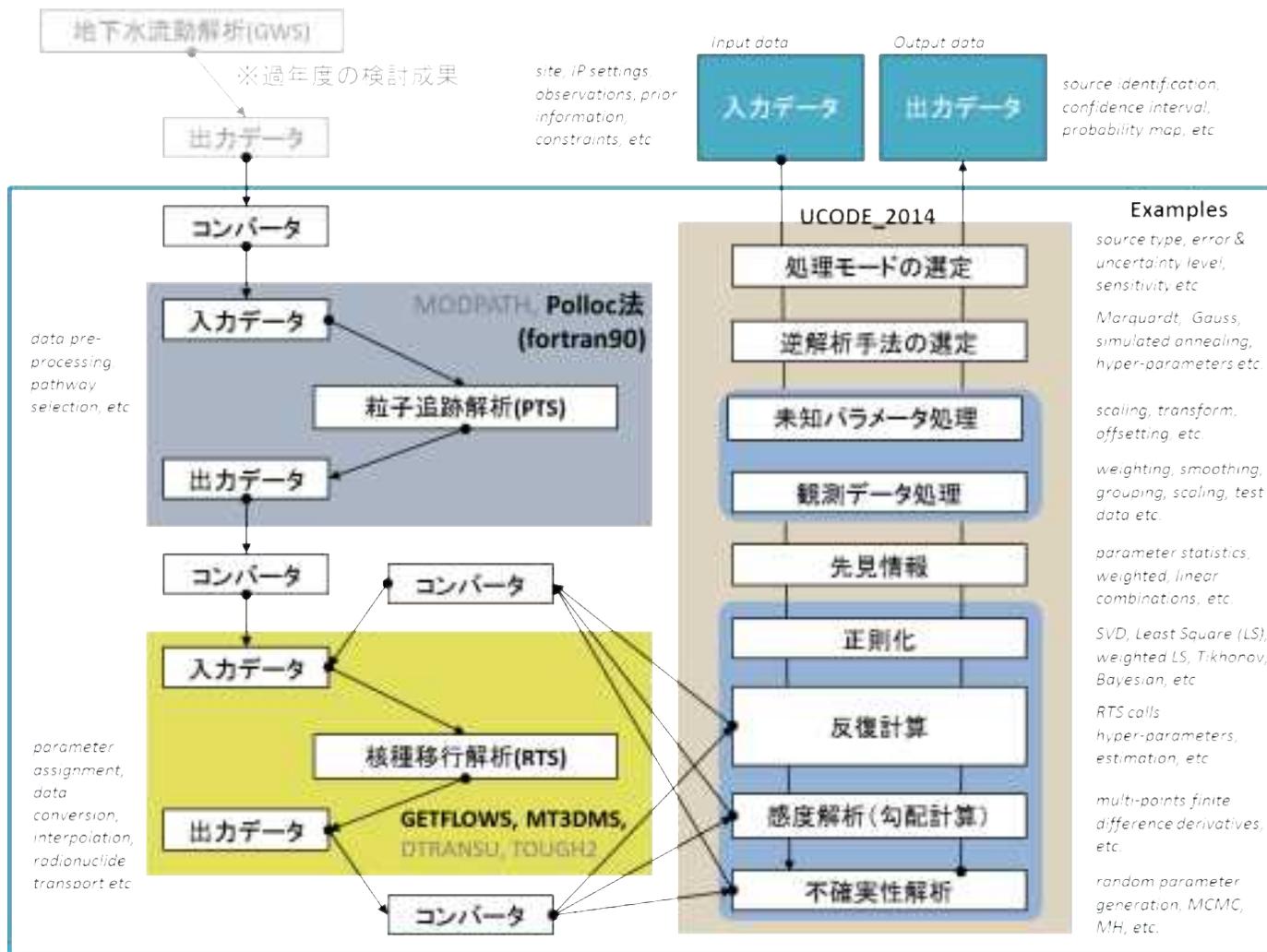


図 4-11 1F を対象とした場合に想定される逆解析法の基本構成

表 4-3 逆解析法の基本構成で使用するコンバータプログラムの例

ID	コンバータプログラム	処理内容	関連モジュール		データ	
			(上流)	(下流)	(入力)	(出力)
1	MakeFlowField	地下水流動場（速度場）の定義	GWS	PTS, RTS	GWS 出力	地下水流速
2	ExtractPathways	核種移行経路の抽出・生成	PTS	RTS	PTS 出力	核種移行場
3	ConvertUnknowns	未知パラメータの変換 (scaling, weighting, etc.)	-	RTS, OPT	変換前の未知パラメータ	変換後の未知パラメータ
4	MakeSource	漏洩源モデルの作成	-	RTS	核種漏洩期間, 位置, 強度	濃度, フラックス時刻歴データ
5	MakePathways	核種移行パラメータの指定	-	RTS	核種移行パラメータ	核種移行場
6	PreRTS	核種移行解析入力データ作成	PTS	RTS	汚染源, 移行経路, パラメータ	RTS 入力
7	AddNoise	観測誤差の組み込み	-	UCODE	濃度データ (ノイズフリー)	核種濃度の模擬観測データ
8	ExtractObs	指定観測地点の出力抽出	RTS	UCODE	観測地点	観測地点の GWS, RTS 出力諸量
9	MakeObjectives	目的関数の作成	RTS	UCODE	観測データ, GWS, RTS 出力諸量	目的関数値
10	GetStatistics	パラメータ感度, 不確実性, 情報量基準等の統計諸量の算出	RTS	UCODE	UCODE 出力諸量	各種統計諸量

### 4.3 検証対象とする核種移行問題の作成

ここでは、決定論的手法、確率論的手法のそれぞれを用いて、構築ツールの基本動作を検証することを目的とし、1次元および2次元の移流分散解析による順解析の結果を用いて、逆解析法の基本的な性能の検証を行った。

#### 4.3.1 1次元核種移行解析モデルによる順解析（カテゴリーA）

##### (1) 対象系

1次元の移流分散解析の概念図を図4-12に示す。系全体の長さを200mとし、漏洩源は1地点、漏洩源から下流側に3点の観測点を配置したものである。流動場は、均質な多孔質媒体を想定し、系全体を一樣流れ（一定流速場）を想定する。漏洩核種は $^3\text{H}$ を想定し、漏洩フラックスはステップ上に変化することとした。

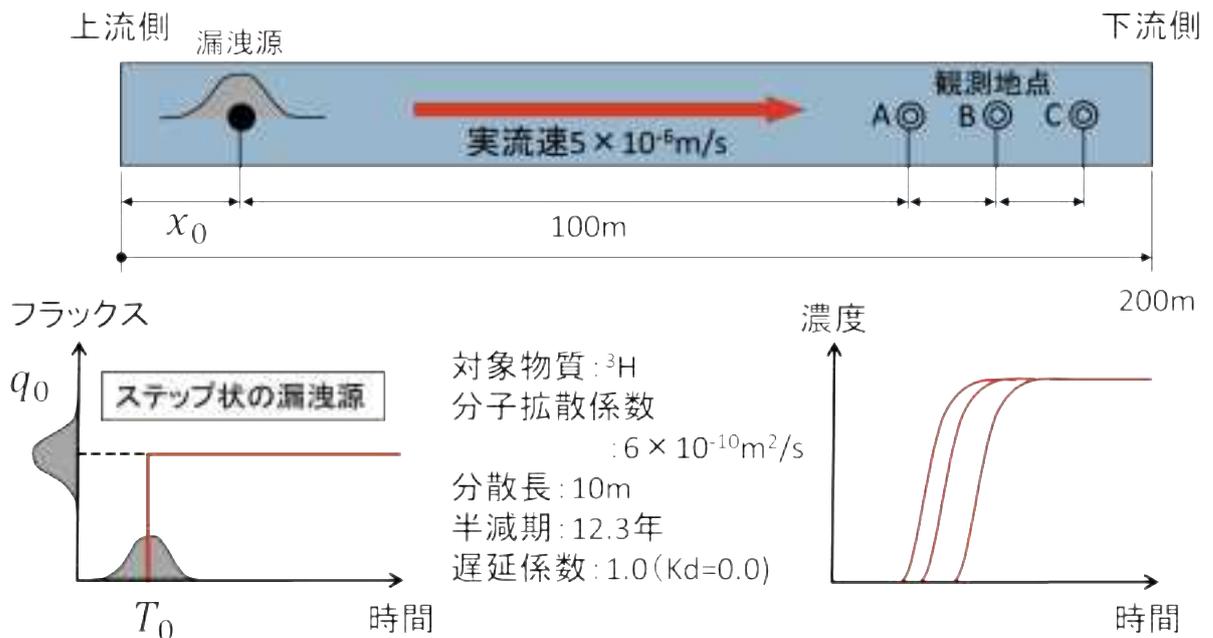


図 4-12 対象系の概念（単一核種漏洩源・移行経路問題：カテゴリーA）

## (2) 解析条件

本検討では、流速場の計算に MODFLOW96 を、濃度場の計算に MT3DMS 5.3 を使用した。移流項の計算には、3 次 TVD である ULTIMATE を使用し、分散拡散は、完全陰解法を用いた。また、マトリックスソルバーには前処理付き共役勾配法を使用し、前処理には修正不完全コレスキー分解を選択した。

図 4-13 は、構築した 1 次元解析モデルを示したものである。全長を 200m とし、上流側の格子サイズを 0.2m、下流側を 1.0m として全 340 メッシュで構築した。漏洩源位置は、上流側の端部から 20m の位置とし、その下流側の観測点を 3 地点配置した。

上流端および下流端の格子は、水位固定および濃度勾配固定の境界条件を与え、初期の核種濃度をゼロと設定した。

地下水の実流速を  $5 \times 10^{-6}$  m/s、分子拡散係数を  $6 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s、縦分散長を 10m、半減期を 12.3 年とし、遅延（吸着）は考慮しないものとした。



図 4-13 解析格子モデル，境界条件および観測点配置（カテゴリーA）

(3) 解析結果

上記条件で解析した結果を図 4-14 に示す。漏洩点から近い方から地点 A, B, C とし、各地点の破過曲線を示したものである。

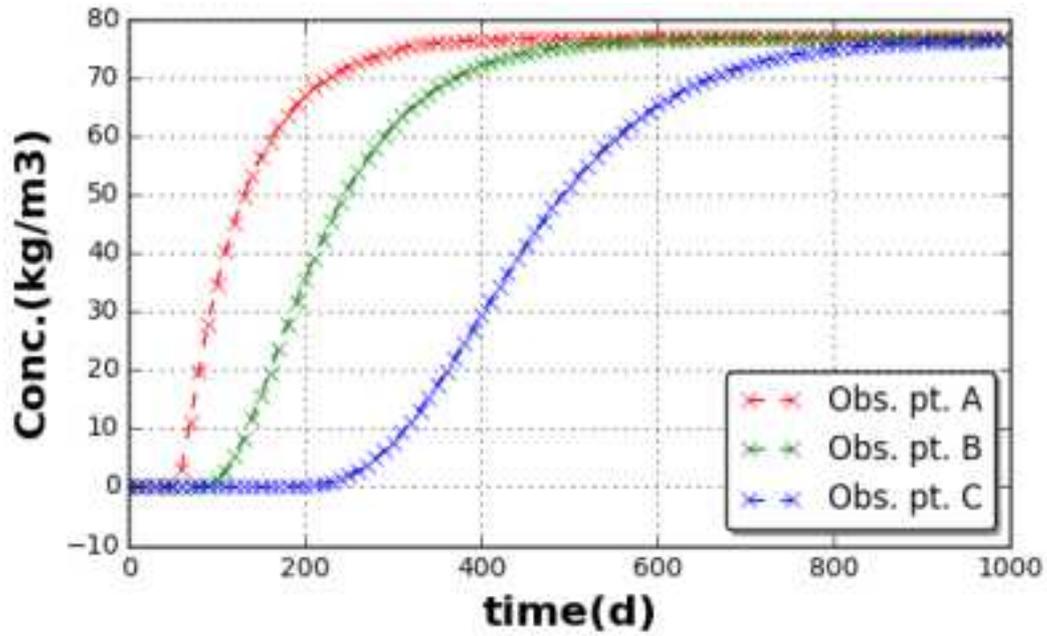


図 4-14 観測井 3 地点の破過曲線 (カテゴリ-A)

#### 4.3.2 多次元核種移行解析モデルによる順解析（カテゴリーB）

カテゴリーBでは、カテゴリーAに対して、以下の事項が逆解析の可否にどのように影響を及ぼすかを確認する。

- ✓ 核種移行経路（濃度場）の次元の相違
- ✓ 複数の漏洩源による観測データに含まれる濃度干渉

##### (1) 対象系

設定する順解析は、前述の1次元問題に対して、流動に直交する方向に拡張した2次元平面系を考えることとした。図4-15に、漏洩源を1地点とした場合（カテゴリーB1）における概念図を示す。1次元問題に準じた設定とし、漏洩源の下流側に3箇所の観測地点を設ける。また、漏洩源を2地点とした場合（カテゴリーB2）における概念図を図4-16に示す。Y軸方向に鏡面对称とし、それぞれの漏洩源の下流側に3地点ずつの計6地点の観測点を配置したものである。

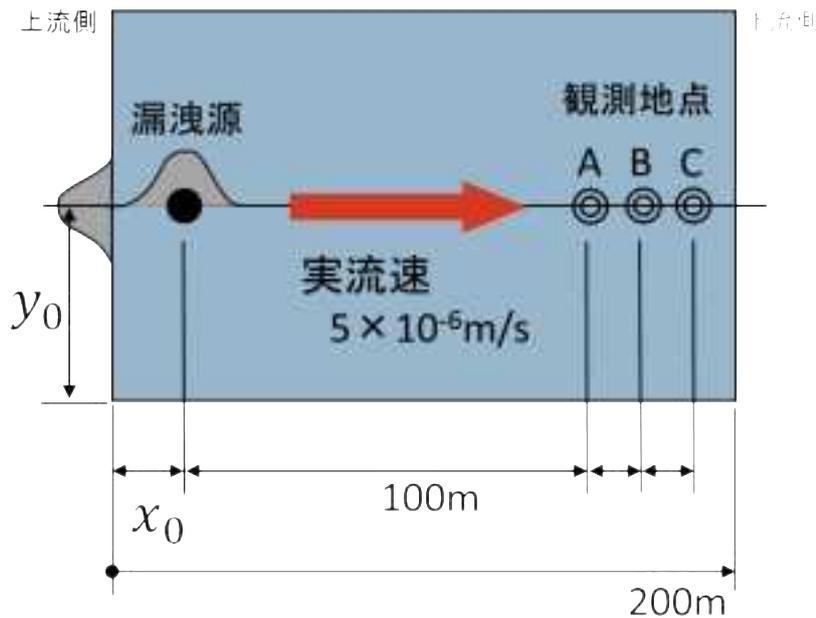


図 4-15 対象系の概念図（単一核種漏洩源：カテゴリーB1）

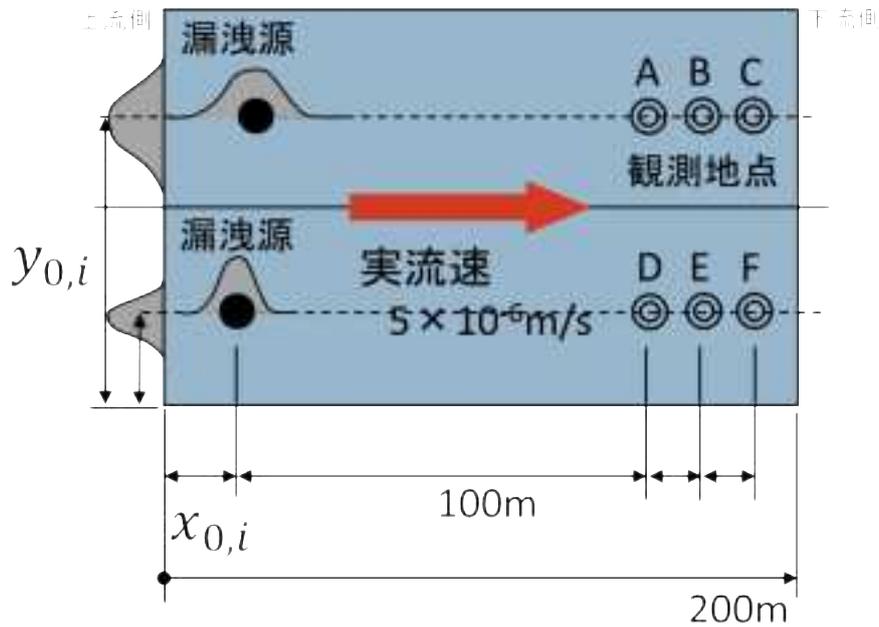


図 4-16 対象系の概念図（複数核種漏洩源：カテゴリ-B2）

(2) 解析条件

解析コード，流速場，核種移行パラメータはいずれもカテゴリ-A と同一条件とした。2次元解析により入力が必要となる横分散長については，縦分散長の 1/10 とした。

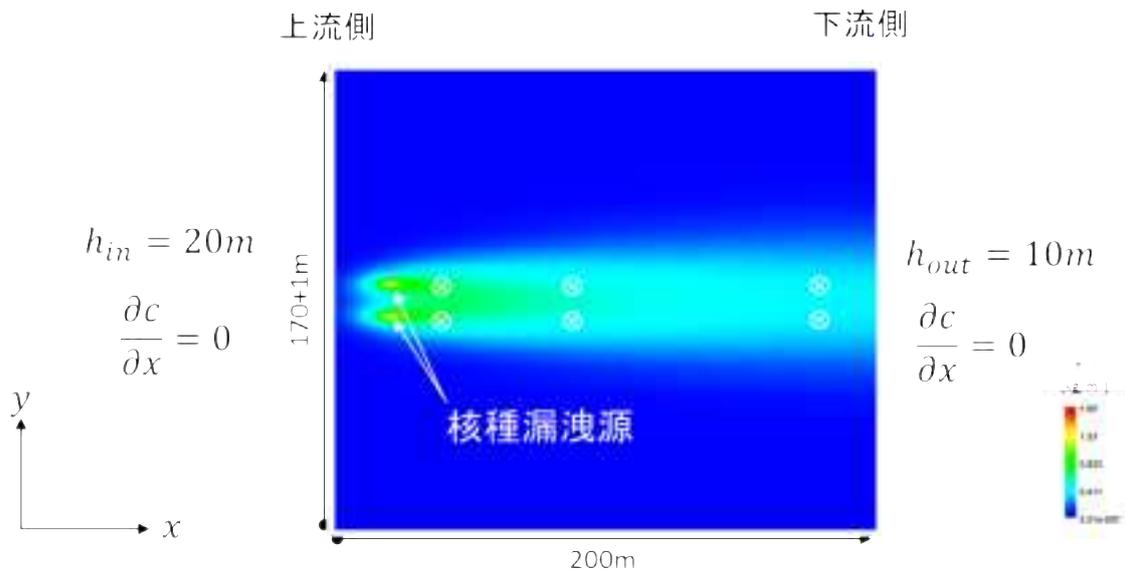


図 4-17 解析格子モデル，境界条件および観測点配置（カテゴリ-B2）

### (3) 解析結果

上記条件で解析したカテゴリ-B1の結果を図 4-18 に示す。漏洩点から近い方から地点 A, B, C とし、各地点の破過曲線を示したものである。また、図 4-19 はカテゴリ-B2 の解析結果を示したものである。対称性により、A と D, B と E, C と F が同じ破過曲線が得られていることを確認することが出来る。

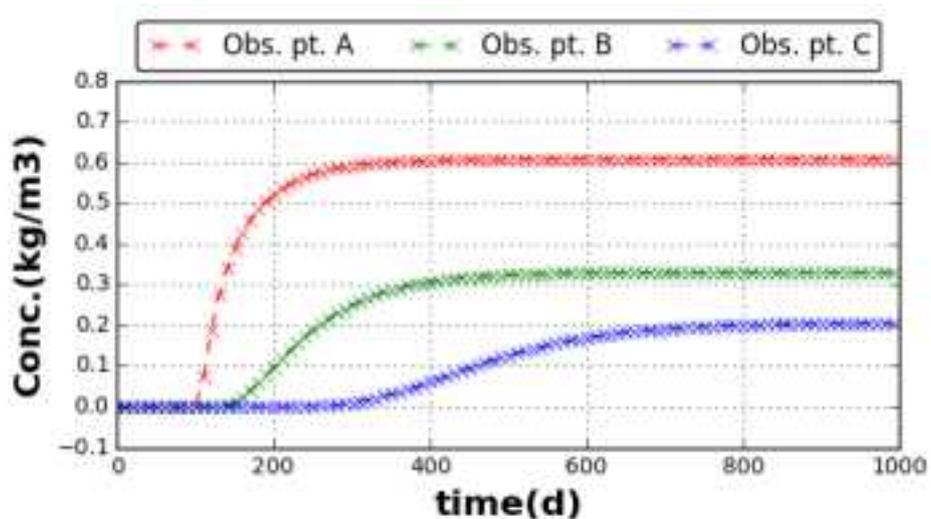


図 4-18 観測井 3 地点の破過曲線 (カテゴリ-B1)

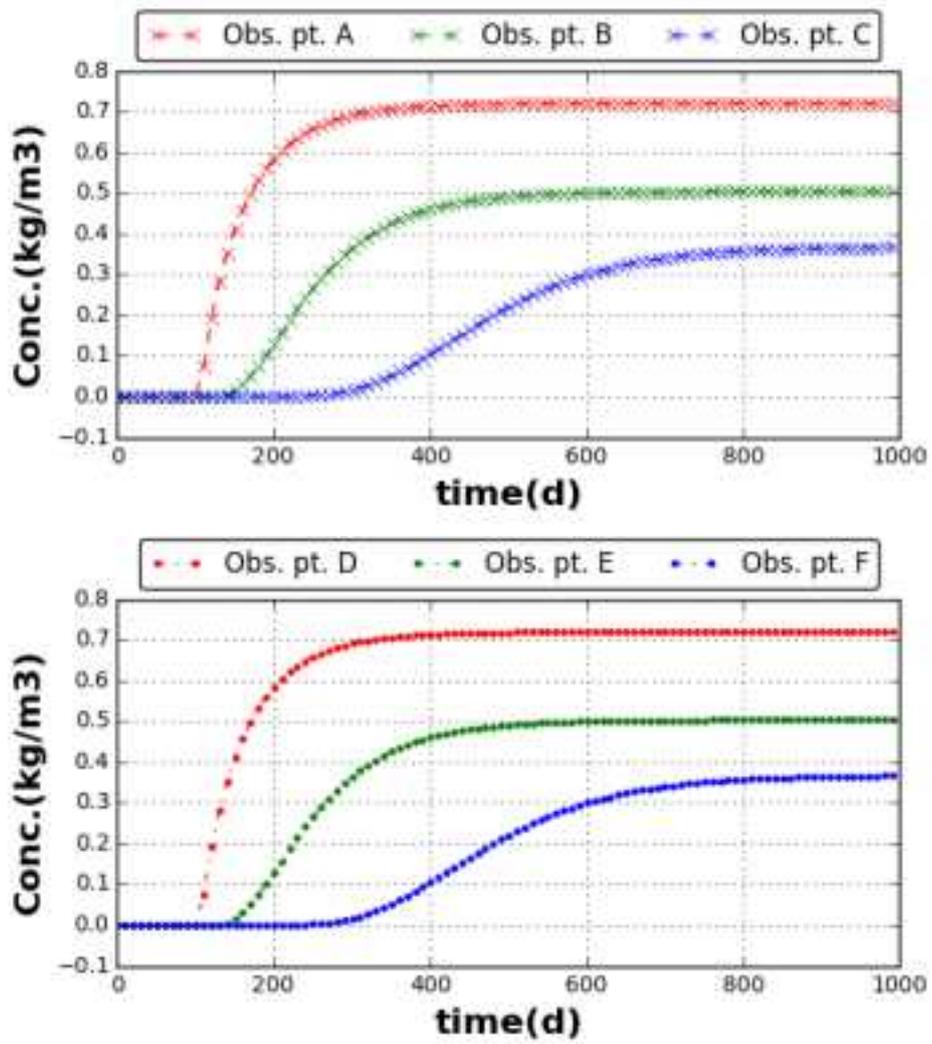


図 4-19 観測井 3 地点の破過曲線 (カテゴリー-B2)

## 4.4 逆解析手法の検証

### 4.4.1 カテゴリーA

4.3章で作成した核種漏洩源の①位置，②時期，③漏洩フラックスが明らかな単純な一次元核種移行過程を対象としたカテゴリーAの順問題に対し，複数ケースの逆解析を設定した。

#### (1) 逆問題の定式化

まず，簡単な問題については決定論的手法による逆解析を行い，正確に解が得られるか動作確認を行う。その後，確率論的手法を用いて，基本動作の確認を行う事を考えた。

決定論的手法では，観測地点の濃度の重み付き残差二乗和を目的関数として最小化する。また，確率論的手法は，残差二乗和を尤度関数として用い，対数尤度関数の最大化を行う。

重みについては，次式を用いた。

$$\omega_i = \frac{1}{(cv_i \cdot \hat{y}_i + \eta)^2}$$

ここで， $\omega_i$ は重み， $cv_i$ は変動係数， $\hat{y}_i$ は正解値， $\eta$ は定数， $i$ は観測値の識別子である。本検討では， $cv_i$ を全ての観測値に対して1.0と固定し， $\eta$ を0.01とした。

なお，重みは観測値の逆数となっているため，数値が小さいものほど重みが大きくなる。これは，正解値のオーダーが大きく異なる場合に，評価関数における残差二乗和の寄与を同程度にする効果がある。しかし，正解値がゼロ近傍である場合などでは，当該地点の重みが非常に大きくなり，僅かな数値誤差の影響を受け易くなるため，解が得られないことがある。そこで， $\eta$ を設定することで，重み関数の上限を決める事ができ（図 4-20），正解値のゼロ近傍の寄与を小さくすることで，解消することが可能となる。

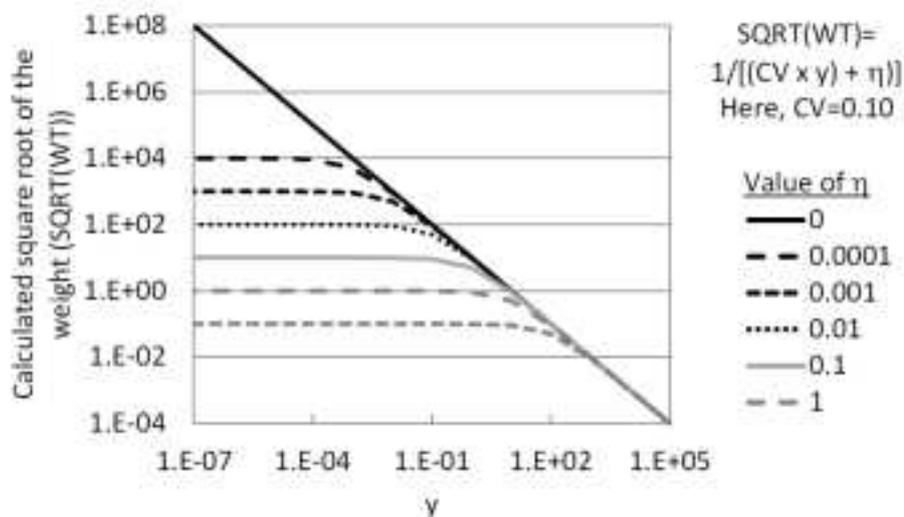


Figure 2. Weights calculated with  $\eta$  equal to six values between 0.0, 1.0. The true value  $\bar{y}_i$  (labeled  $y$  in the figure) is generally approximated using either the observed or simulated value. In either case, this figure shows the effect of  $\eta$  in equation (1). SQRT, square root; WT, weight; CV, coefficient of variation.

図 4-20 観測値または計算値に対する重みの変化<sup>1</sup>

また、未知パラメータは、漏洩源における核種フラックスの時間変化を、漏洩フラックス  $Q_0$ 、漏洩位置  $X_0$ 、漏洩開始時間  $T_0$  の3つのパラメータで表現した。また、未知パラメータに対する制約条件を与えているものの、ほぼ制約無しの条件とするように、正解値に対して十分大きな範囲を設定した。

以下に、条件設定をまとめた。

I. 目的関数・尤度関数

- ・ 重み付き残差二乗和

II. 未知パラメータ

- ・ 単一の漏洩源における核種フラックスの時間変化をステップ関数で仮定
- ・ ① 漏洩フラックス  **$Q_0$ (kg/d)**
- ・ ② 漏洩位置  **$X_0$ (m)**
- ・ ③ 漏洩開始時間  **$T_0$ (d)**

III. 制約条件 (※実質的には制約なしに近い)

- ・ ①  **$Q_0$**  ~ [0.0, 1000.0]
- ・ ②  **$X_0$**  ~ [0.0, 150.0]
- ・ ③  **$T_0$**  ~ [0.0, 100.0]

<sup>1</sup> Poeter, E. P., Hill, M. C., Lu, D., Tiedeman, C. R., & Mehl, S. (2014). UCODE\_2014, with new capabilities to define parameters unique to predictions, calculate weights using simulated values, estimate parameters with SVD, evaluate uncertainty with MCMC, and more. Integrated Groundwater Modeling Center Report GWMI, 2.

## (2) ケース設定

表 4-4 にカテゴリ A の逆解析のケース一覧を示す。

VE0 は、決定論的手法である修正ガウスニュートン法を用い漏洩フラックスのみを未知変数として、未知数の同定を試みたものである。

それ以降は確率論的手法を用いたものであり、徐々に高度化を図るようにした。VE1, VE2, VE3 は、確率論的手法である DREAM を用いて、3 つの未知数を独立にした場合のケースであり、観測ノイズを含まない最も簡易なケースを想定したものである。

E1 は、VE1~3 に対し、全てのパラメータを同時に未知数として逆解析を行ったものである。E2 は、E1 に対して観測値に数値的なノイズを入れたものであり、且つ、観測地点を 2 地点に減らし、時間的なサンプリングも少なくしたものである。M1 は、E2 に対してノイズをさらに大きくしたものである。

表 4-4 解析ケース一覧 (カテゴリ A)

ケース	逆解析手法 <sup>1)</sup>	同定対象とする 汚染源モデルパラメータ <sup>2)</sup>	観測井 の数	観測ノイズ の有無	備考
VE0	<input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> P	<input type="checkbox"/> $x_0$ <input checked="" type="checkbox"/> $q_0$ <input type="checkbox"/> $T_0$	3	<input checked="" type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有	
VE1	<input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> P	<input type="checkbox"/> $x_0$ <input checked="" type="checkbox"/> $q_0$ <input type="checkbox"/> $T_0$	3	<input checked="" type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有	
VE2	<input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> P	<input checked="" type="checkbox"/> $x_0$ <input type="checkbox"/> $q_0$ <input type="checkbox"/> $T_0$	3	<input checked="" type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有	
VE3	<input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> P	<input type="checkbox"/> $x_0$ <input type="checkbox"/> $q_0$ <input checked="" type="checkbox"/> $T_0$	3	<input checked="" type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有	
E1	<input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> P	<input checked="" type="checkbox"/> $x_0$ <input checked="" type="checkbox"/> $q_0$ <input checked="" type="checkbox"/> $T_0$	3	<input checked="" type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有	観測誤差を考慮しない (ノイズフリー) サンプリング密
E2	<input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> P	<input checked="" type="checkbox"/> $x_0$ <input checked="" type="checkbox"/> $q_0$ <input checked="" type="checkbox"/> $T_0$	2	<input type="checkbox"/> 無 <input checked="" type="checkbox"/> 有	軽度の観測誤差, サンプリング粗
M1	<input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> P	<input checked="" type="checkbox"/> $x_0$ <input checked="" type="checkbox"/> $q_0$ <input checked="" type="checkbox"/> $T_0$	2	<input type="checkbox"/> 無 <input checked="" type="checkbox"/> 有	中程度の観測誤差, サンプリング粗

1) D: 決定論的手法, P: 確率論的手法

2)  $x_0$ : 漏洩源位置 (X 座標),  $q_0$ : 核種漏洩フラックス,  $T_0$ : 漏洩開始時間

### (3) 解析結果

#### 1) ケース VE0

図 4-21 に、決定論的手法である修正ガウスニュートン法による逆解析結果を示す。左軸は未知数である漏洩フラックス，右軸は目的関数，横軸は，逆解析の反復回数を示したものである。★は漏洩フラックスの正解値である。1 変数のみであり非線形性が無いため，修正ガウスニュートン法により 1 ステップで解が得られており，逆解析が正常に動作することを確認した。

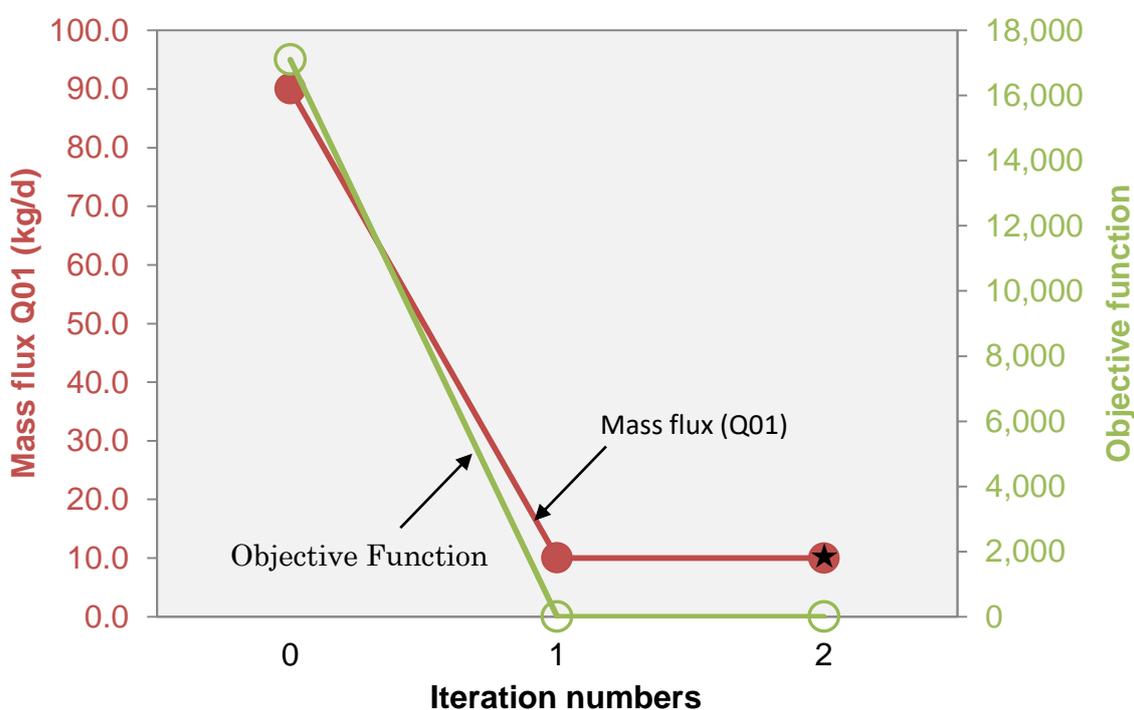


図 4-21 修正ガウスニュートン法による逆解析結果 (★ : 正解値)

## 2) ケース VE1, VE2, VE3

本ケースは、確率論的手法である DREAM を用いて、3つの未知数を独立に逆解析を実施したものである。ここでは、各地点の濃度に観測ノイズを含まないものである。

図 4-22 に、収束判定指標の Gelman-Rubin 統計量、未知数のヒストグラム、対数尤度関数の分布を示したものである。Gelman-Rubin 統計量は、2000~3000 ステップの反復回数で 1.0 に漸近しており、解が収斂していることが確認できる。また、ヒストグラムは、Gelman-Rubin 統計量のグラフの緑線以降のステップを集計対象とした場合の、未知数の頻度を示したものである。黄色の三角は正解値である。各ヒストグラムのピークと一致していること、対数尤度関数においても正解値で最大値となっており、確率論的手法が正常動作していることを確認した。

図 4-23 は、UCODE\_2014 に実装されている感度解析を実施し、目的関数に対する観測地点毎および観測データ毎の寄与度を算出したものである。Q0, T0 の推定には、3つの観測点のデータが同程度に寄与するのに対し、観測点 B のデータが X0 の推定に最も影響を及ぼすことが分かる。特に、観測データのうち低濃度の期間の寄与が極端に大きいため、観測誤差に対する感度も高いと予測される。

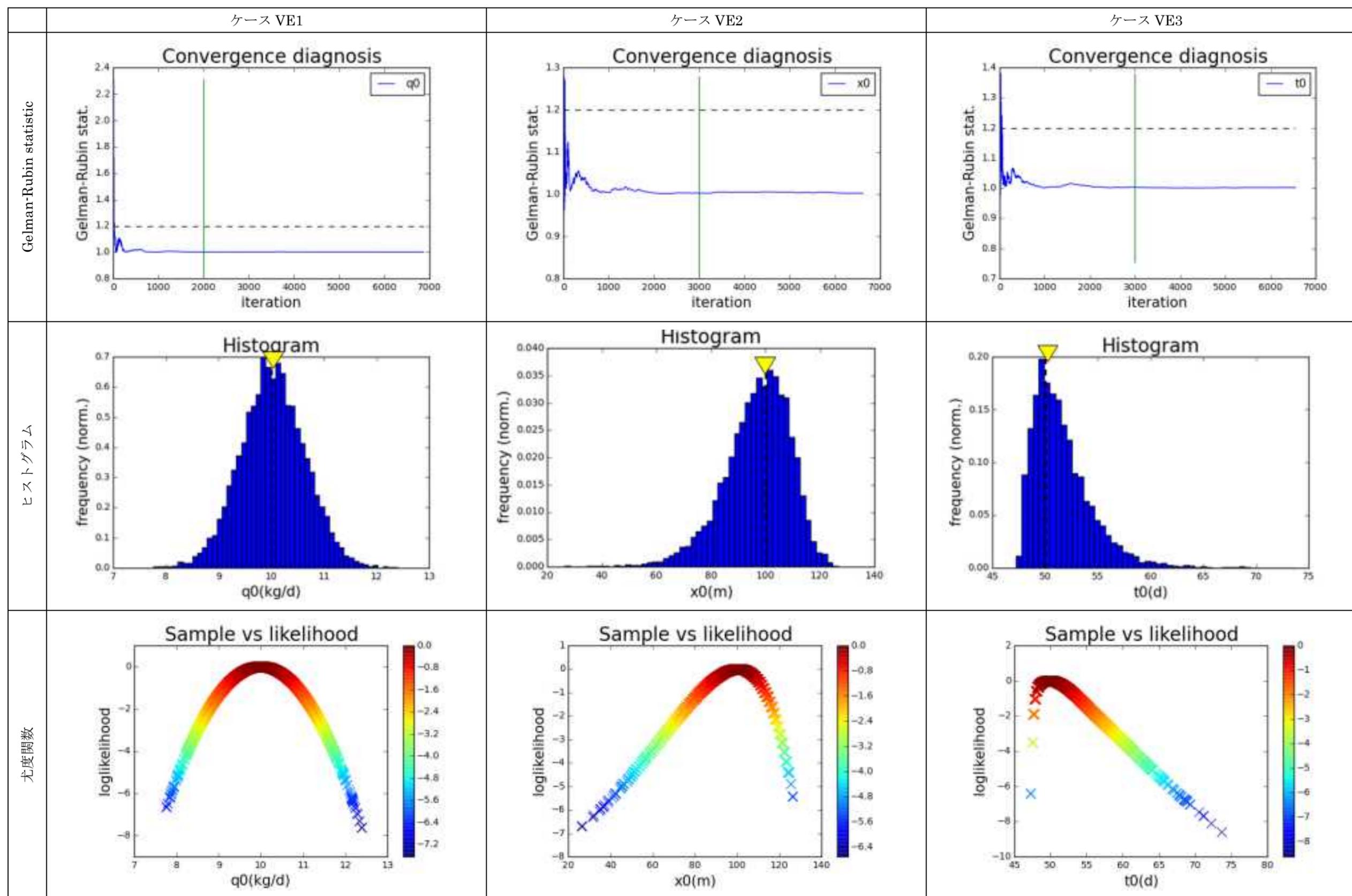


図 4-22 DREAM による逆解析結果 (ケース VE1, 2, 3)

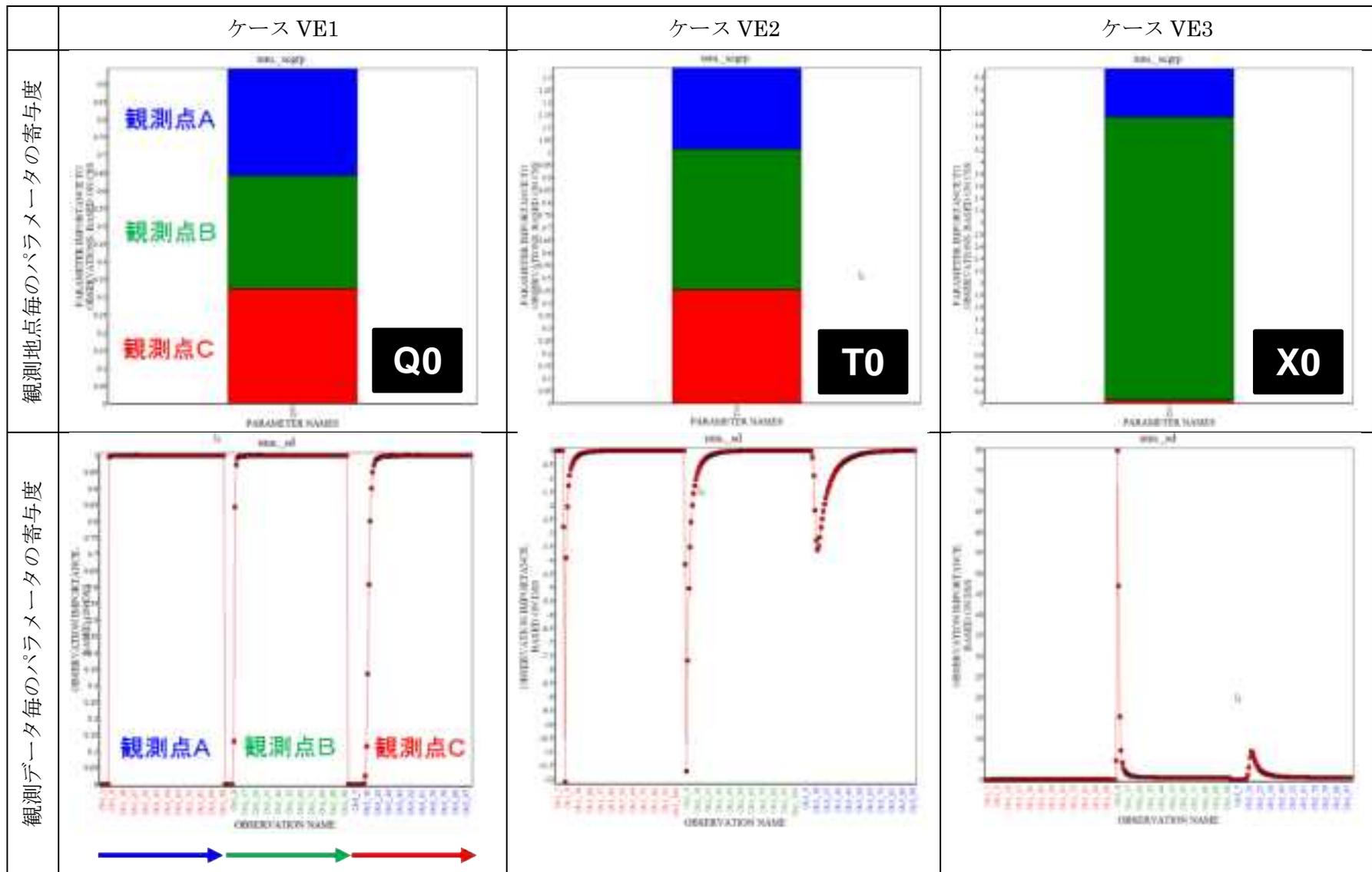


図 4-23 目的関数に対する観測地点および観測データ毎の寄与度（ケース VE1, 2, 3）

### 3) ケース E1

VE1~3 では未知数を個別に逆解析を実施したものであるが、本ケースは、全てのパラメータを同時に未知数として逆解析を行ったものである。

図 4-24 に Gelman-Rubin 統計量を示す。最初の 200 ステップで収斂の目安である 1.2 を下回り、1500 ステップ以降 1.0 に漸近しており、十分収斂していることが確認出来る。

図 4-25 は、ヒストグラムおよび尤度関数を示したものである。約 3000 ステップの後半の 1/2 のデータを使用して作成した。3 つの未知パラメータは、ほぼ真値またはその近傍をピーク（最頻値）とした確率密度関数を同定した。尤度のピークも比較的明瞭に表れている。

図 4-26 は、ヒストグラムおよび尤度関数の 2 次元分布図により、未知パラメータ間の相関性を把握したものである。図中★が真値であり、真値は頻度と尤度が高くなるあたり（パラメータ空間）に存在するが、その幅は比較的広く分布する。また、漏洩フラックス  $Q_0$  と漏洩開始時間  $T_0$ 、 $Q_0$  と漏洩位置  $X_0$  に明瞭な相関はみられないが、 $X_0$  と  $T_0$  は正の相関が認められる。

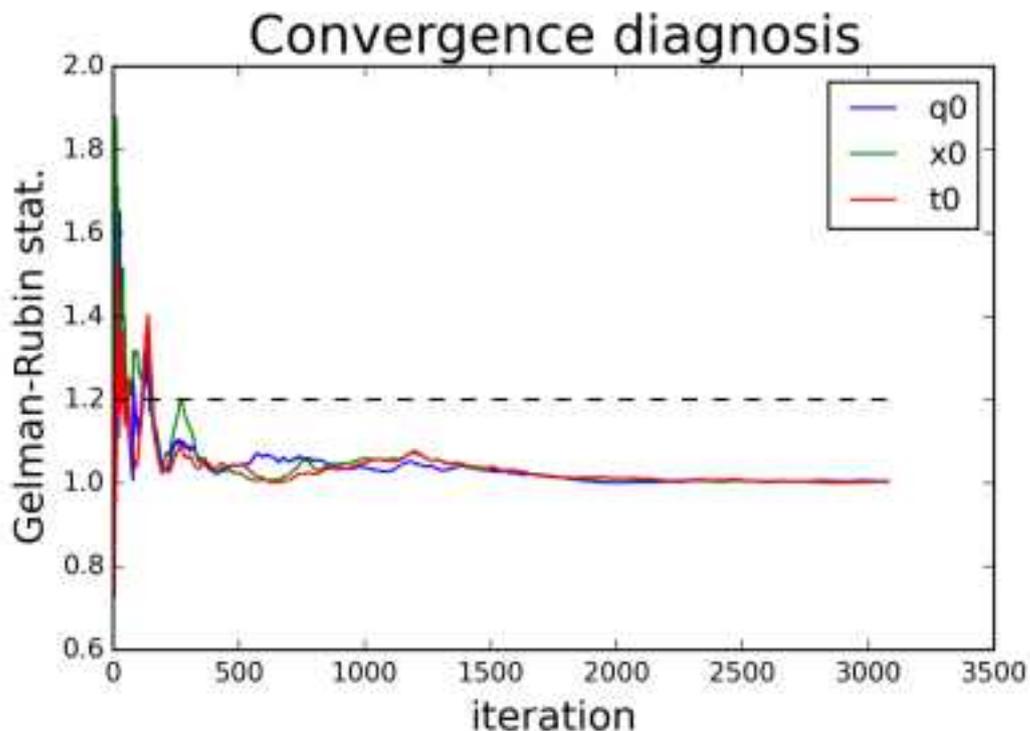


図 4-24 ケース E1 の Gelman-Rubin 統計量の収斂状況

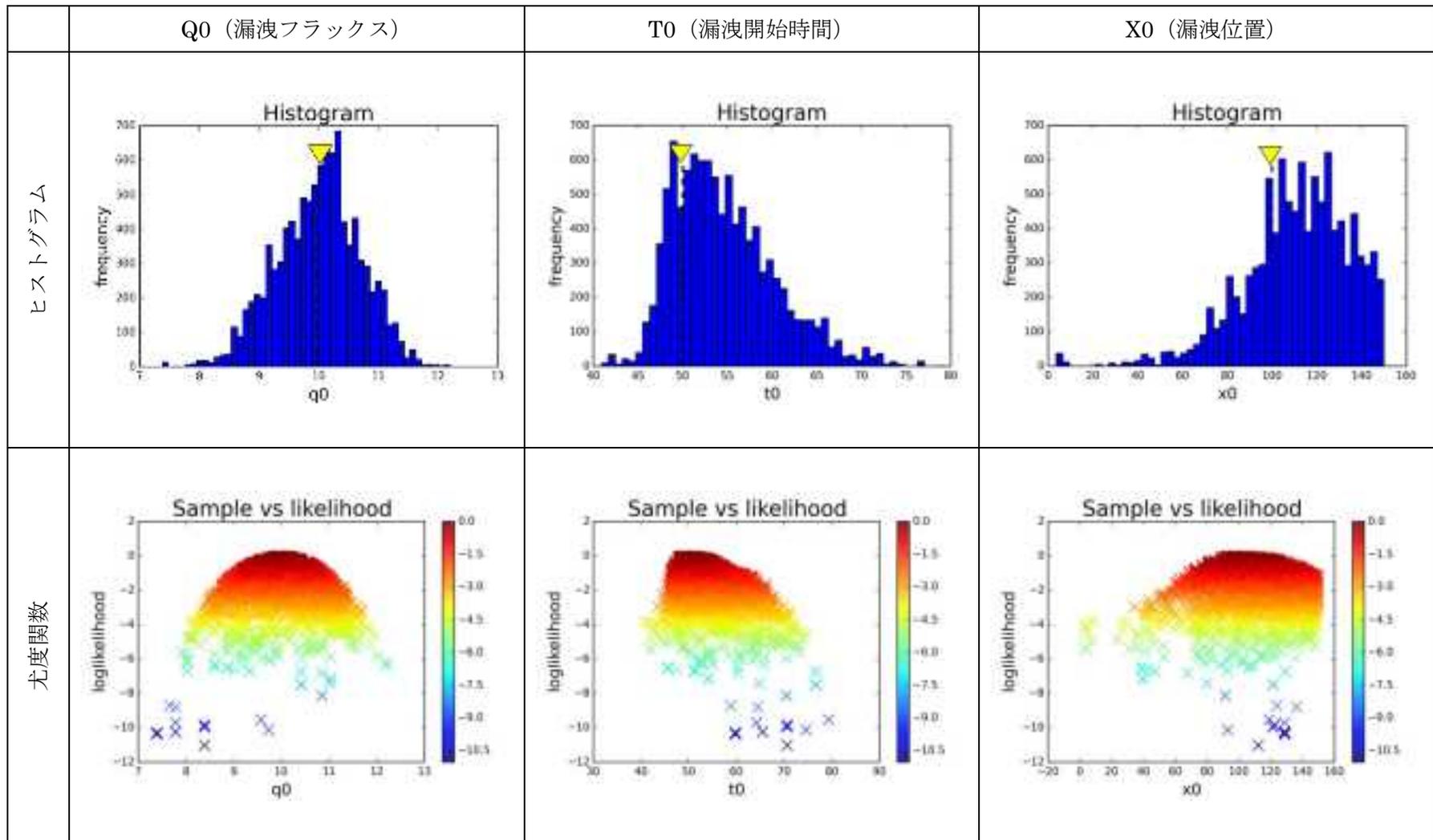


図 4-25 DREAM による逆解析結果 (ケース E1, ヒストグラム, 尤度関数)

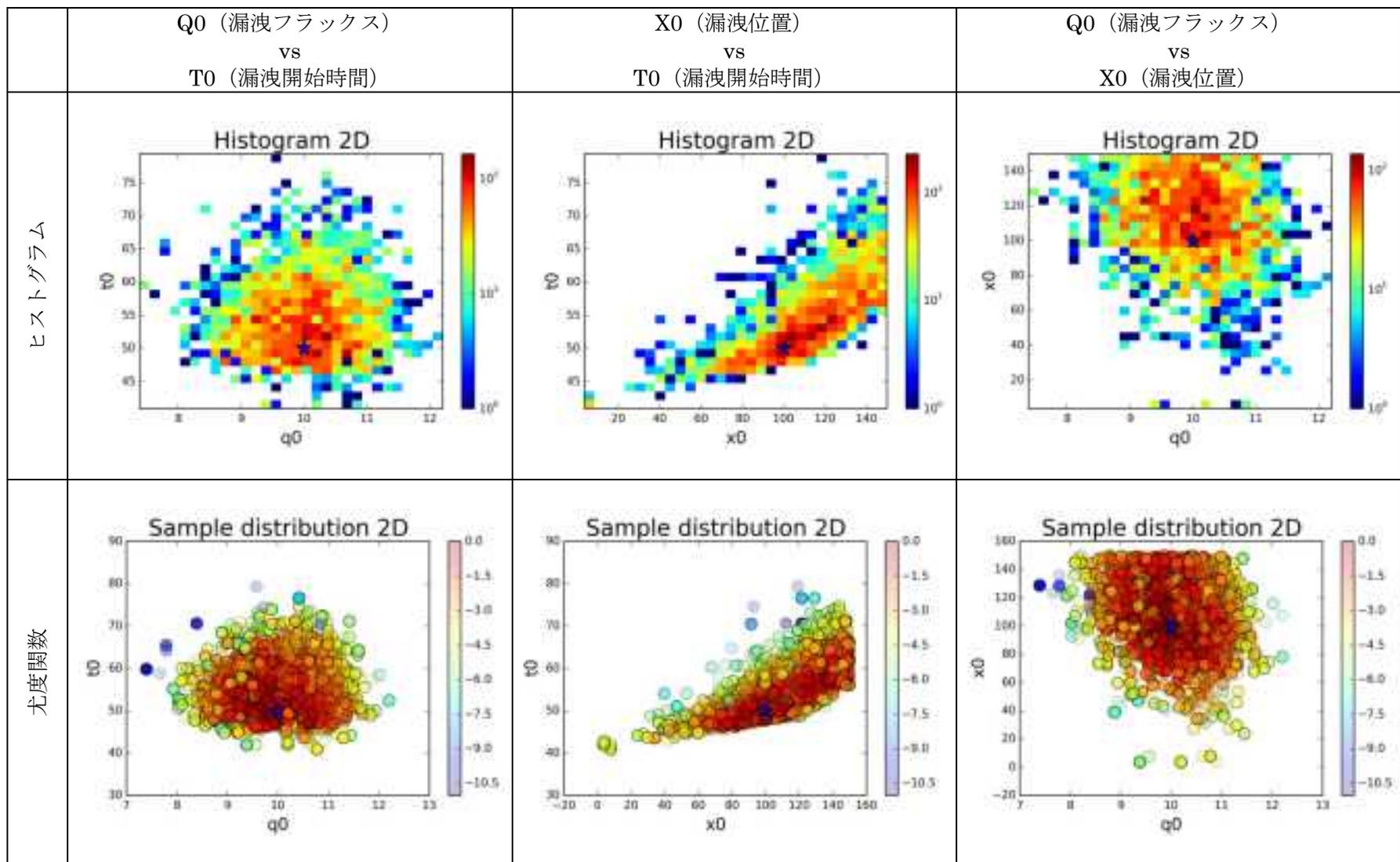


図 4-26 DREAM による逆解析結果 (ケース E1, パラメータ毎の相関)

表 4-5 は、逆解析より推定された各未知数の中央値、最頻値をまとめたものである。最頻値のパラメータにより順解析を実施した結果と、真値により得られた結果を図 4-27 に示す。ほぼ両者が整合する結果が得られた。

表 4-5 逆解析により推定されたパラメータ（ケース E1）

条件		Q0 漏洩フラックス	T0 漏洩開始時間	X0 漏洩位置
順解析（正解値）		10.000	50.000	100.000
逆解析	中央値	10.012	54.197	108.828
	（重み： $\eta = 0.01$ ） 最頻値	10.000	49.568	98.148

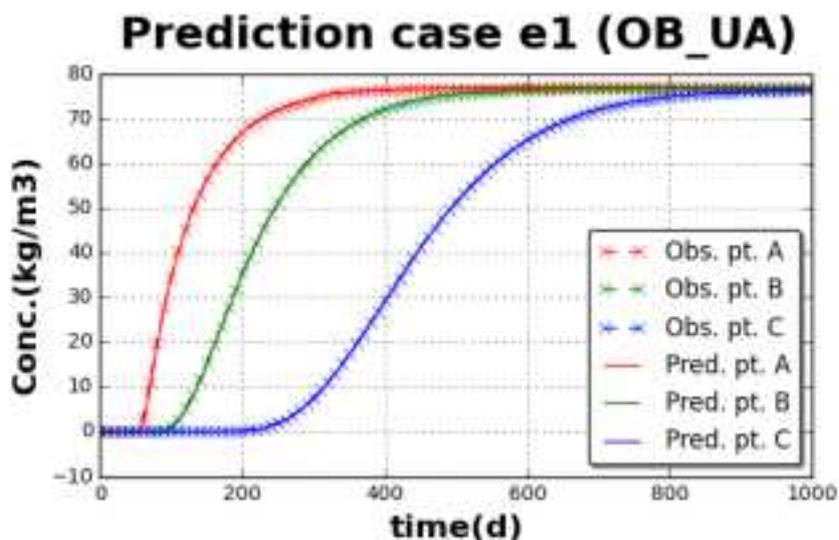


図 4-27 逆解析で得られた最頻値を用いた解析結果と観測値の比較（ケース E1）

#### 4) ケース E2

本ケースは、E1 に対して観測値に数値的なノイズを入れたものである。図 4-28 は、本ケースで使用した観測値である。観測地点 B,C のみを使用し、サンプリング数も少なくしたものである。

図 4-29 に Gelman-Rubin 統計量の変化を示す。今までのケースと同様、数百ステップで収束状況の目安である 1.2 を下回る。図 4-30 は各パラメータのヒストグラムおよび尤度関数を、図 4-31 はパラメータ毎の相関を示したものである。また、表 4-6 は、逆解析より推定された各未知数の中央値、最頻値をまとめたものである。最頻値のパラメータにより順解析を実施した結果と、観測値を図 4-32 に示す。逆解析で得られたパラメータを使用することで、概ね観測値をトレースできていることが確認できる。

漏洩フラックス  $Q_0$  の事後確率は、平均値と最大値が接近し、尤度のピークも比較的明瞭に表れている。漏洩開始時間  $T_0$  と漏洩位置  $X_0$  は事後確率の平均値と最大値の差異が顕著となった。

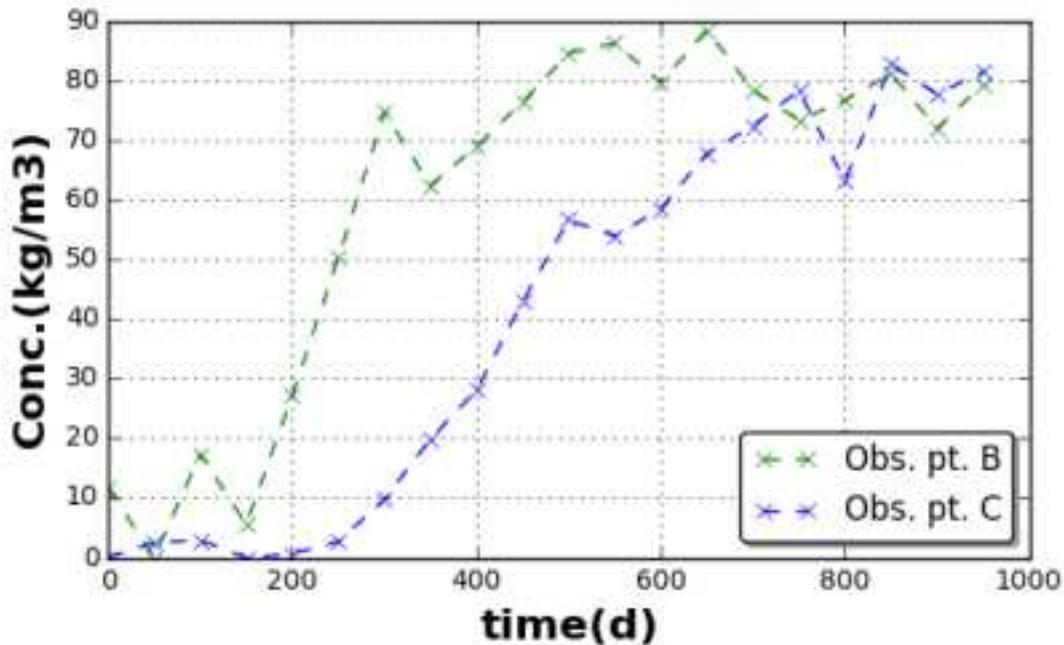


図 4-28 ケース E2 で使用する観測データ

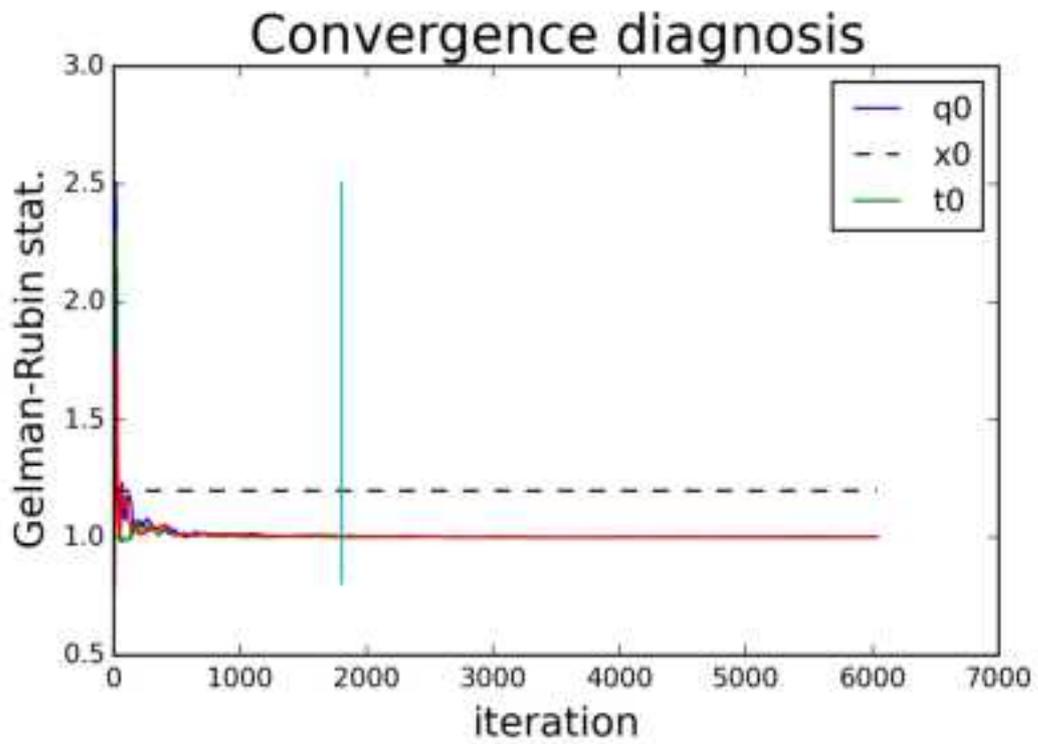


図 4-29 ケース E2 の Gelman-Rubin 統計量の収斂状況

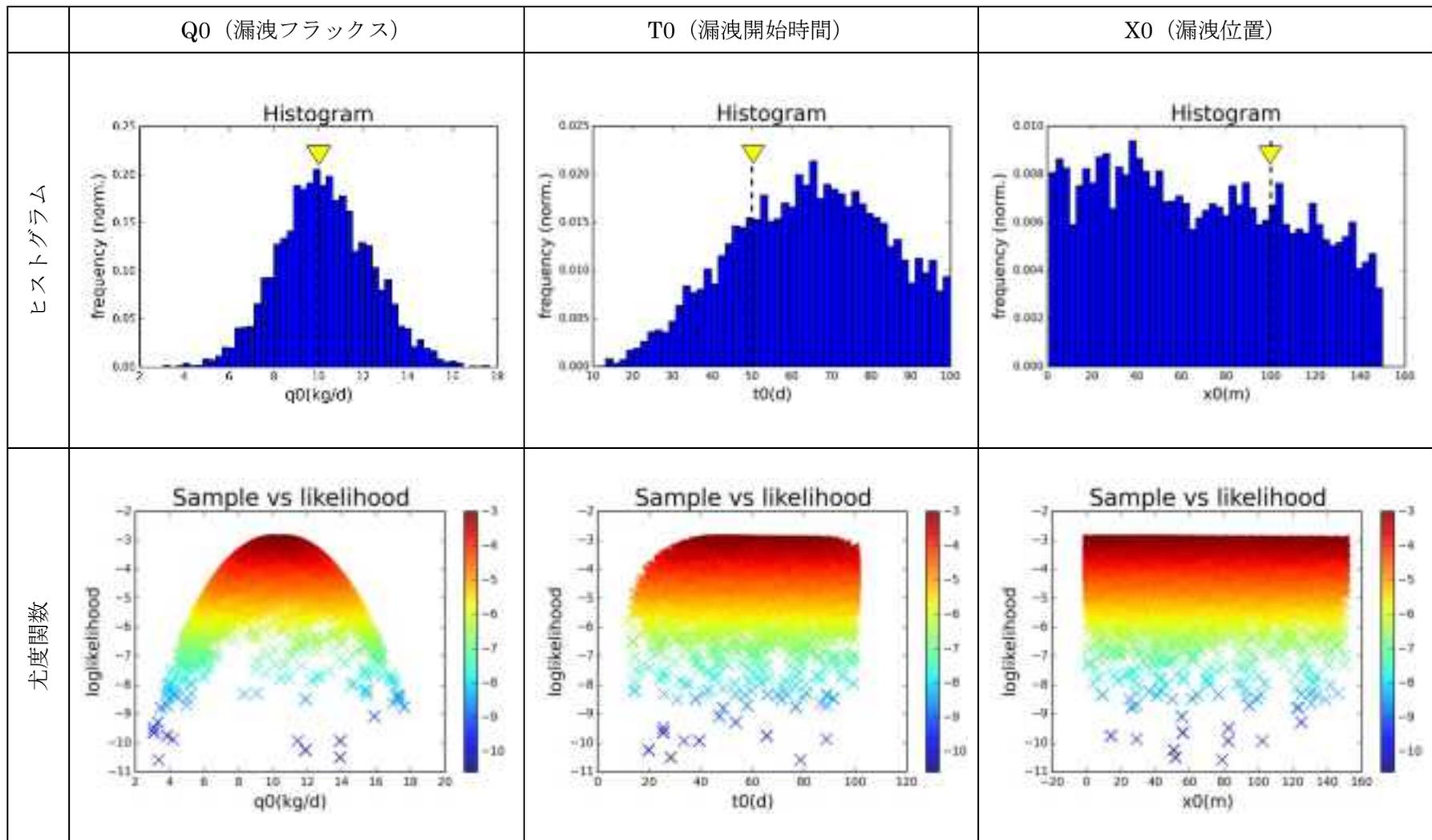


図 4-30 DREAM による逆解析結果 (ケース E2)

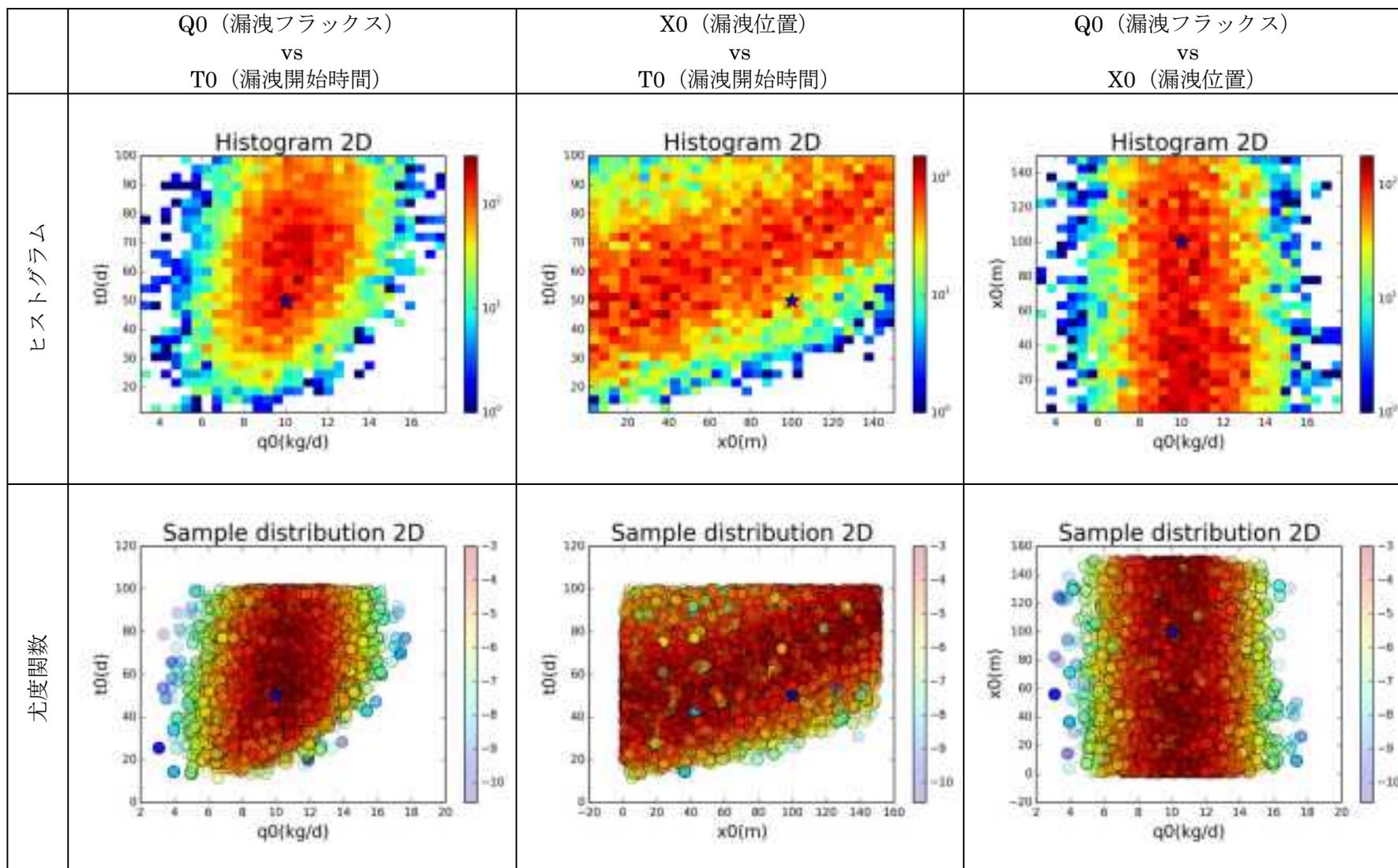


図 4-31 DREAM による逆解析結果 (ケース E2)

表 4-6 逆解析により推定されたパラメータ (ケース E2)

条件		Q0 漏洩フラックス	T0 漏洩開始時間	X0 漏洩位置
順解析 (正解値)		10.000	50.000	100.000
逆解析	中央値	10.195	64.158	39.340
	最頻値	10.338	46.519	2.725

核種漏洩源の逆解析結果 (漏洩源の特性諸量) を用いた破過曲線の解析結果と誤差の影響

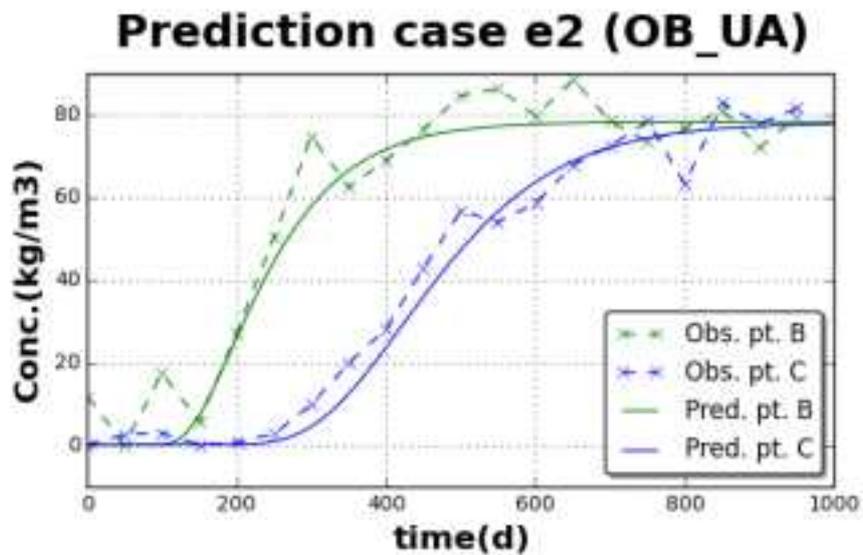


図 4-32 逆解析で得られた最頻値を用いた解析結果と観測値の比較 (ケース E2)

### 5) ケース M1

本ケースは、前述の E2 に対してノイズをさらに大きくしたものである。図 4-33 は観測値に用いた破過曲線である。

ケース E2 と同様に逆解析を行い、最頻値による順解析結果と観測値を比較すると、図 4-34 に示すように大きく異なり、適切な解が得られていないことが分かった。解析結果を分析すると、観測地点 C の 150 日の観測値がゼロとなっており、重みが極端に大きくなっているため、そのデータによる誤差が全体の形状を決定していることが分かった。そこで、各観測データに対する重みを一定にしたケースを実施したところ、図 4-35 に示すように観測値を概ねトレースする結果を得ることが出来た。真値の取り得る幅が数オーダにわたって変化する場合、重みにより残差の関数形を変更することで目的関数への感度を制御することができることが分かった。

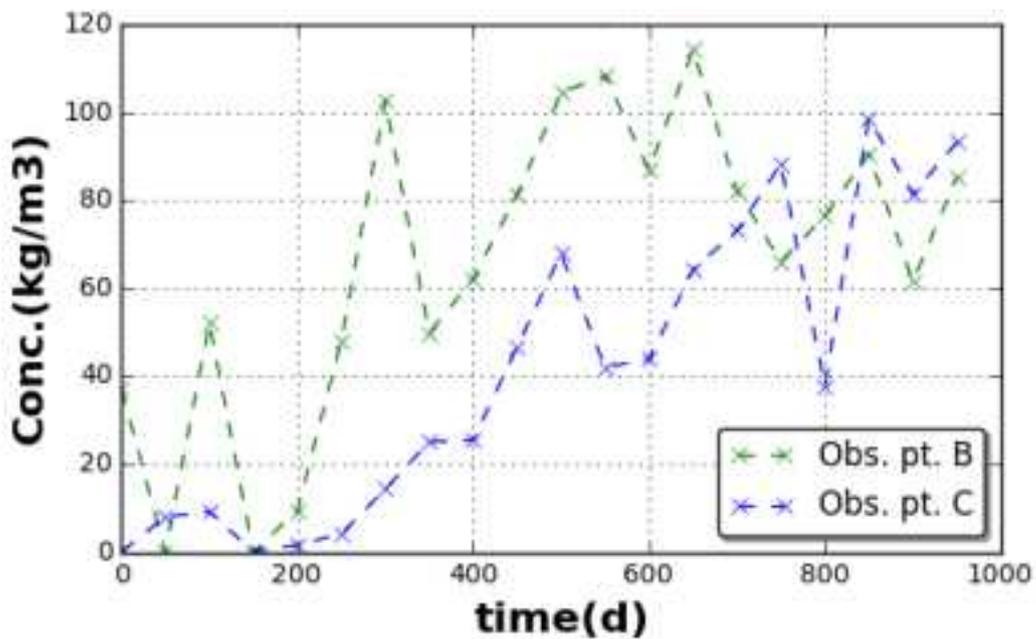


図 4-33 ケース M2 で使用する観測データ

**Prediction case m1 (OB\_UA\_mod)**

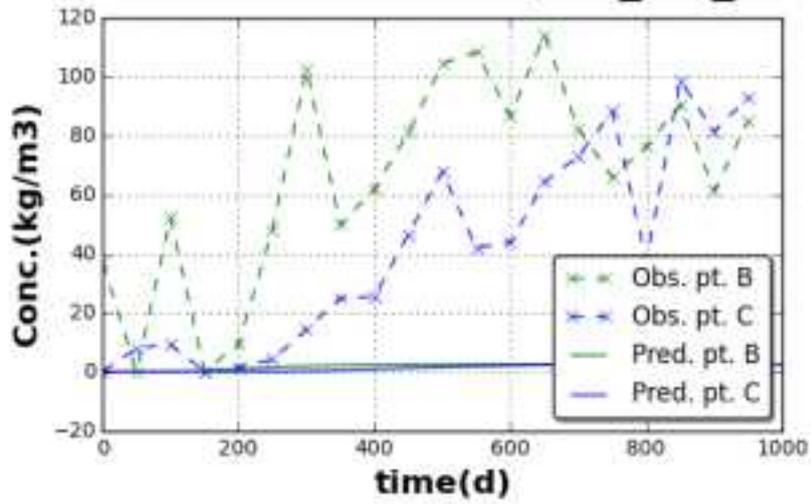


図 4-34 逆解析で得られた最頻値を用いた解析結果と観測値の比較（ケース M1）

**Prediction case m1 (OC\_UA)**

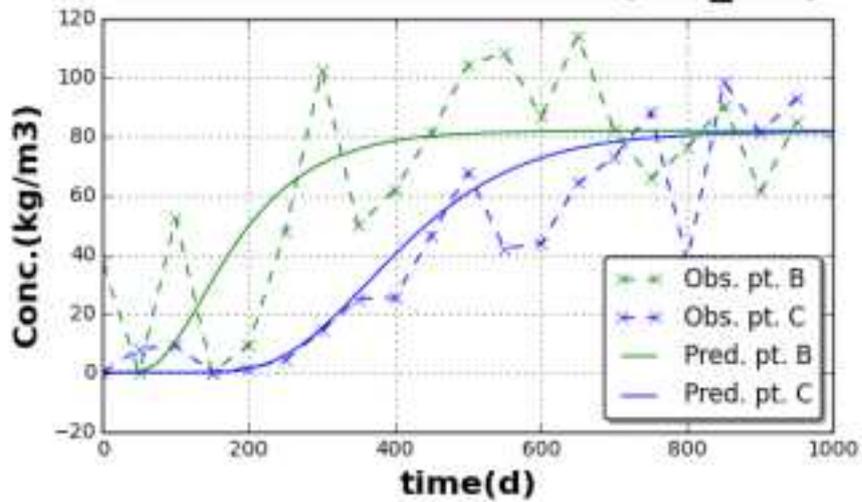


図 4-35 逆解析で得られた最頻値を用いた解析結果と観測値の比較（ケース M1,  $w=\text{const}$ ）

表 4-7 逆解析により推定されたパラメータ (ケース M1)

条件		Q0 漏洩フラックス	T0 漏洩開始時間	X0 漏洩位置
順解析 (正解値)		10.000	50.000	100.000
逆解析	中央値	0.325	87.667	37.142
(重み : $\eta = 0.01$ )	最頻値	1.086	99.933	1.519
逆解析	中央値	10.676	56.415	70.765
(重み : $w = \text{const}$ )	最頻値	10.745	46.538	13.919

## 4.4.2 カテゴリーB

### (1) 逆問題の定式化

カテゴリーAと同様、まず、簡単な問題については決定論的手法による逆解析を行い、正確に解が得られるか動作確認を行う。その後、確率論的手法を用いて、基本動作の確認を行った。

決定論的手法では、観測地点の濃度の重み付き残差二乗和を目的関数として最小化する。また、確率論的手法は、残差二乗和を尤度関数として用い、対数尤度関数の最大化を行う。

流速場、核種移行パラメータ（分子拡散係数、分散長、半減期、遅延係数）はいずれもカテゴリーAと同一条件とする。カテゴリーAのテストケースに対して、以下の事項が逆解析の可否にどのように影響を及ぼすかを確認する。

- ✓ 核種移行経路（濃度場）の次元の相違
- ✓ 複数の漏洩源による観測データに含まれる濃度干渉

#### I. 目的関数

重み付き残差二乗和

#### II. 未知パラメータ

漏洩源における核種フラックスの時間変化をステップ関数で仮定  
以下のパラメータで形状を表す。

- ① 漏洩フラックス            **Q01,Q02(kg/d)**
- ② 漏洩位置                 **X01,X02,Y01,Y02(m)**
- ③ 漏洩開始時間            **T01,T02(d)**

#### III. 制約条件（※実質的には制約なしに近い）

- ① **Q01,Q01**    ~    [0.0, 1000.0]
- ② **X01,X02**    ~    [0.0, 60.0]
- ③ **Y01,Y02**    ~    [10.0, 30.0]
- ④ **T01,T02**    ~    [0.0, 500.0]

(2) ケース設定

表 4-8 にカテゴリ B の逆解析のケース一覧を示す。

B0 および B1 は、2次元平面上の単一の汚染源に対して逆解析を実施したものであり、観測井は3地点である。B0 は決定論的手法である修正ガウスニュートン法を、B1 は確率論的手法を用いたものである。B2a,B2b は漏洩源を2地点とし、確率論的の主要により逆解析を実施したものである。B2a に対して B2b は漏洩地点の Y 座標を正解値として逆解析を行ったものである。

表 4-8 解析ケース一覧 (カテゴリ B)

ケース	逆解析手法 <sup>1)</sup>	同定対象とする汚染源モデルパラメータ <sup>2)</sup>	観測井の数	漏洩源の数
B0	■D □P	■ $x_{0,1}$ ■ $y_{0,1}$ ■ $q_{0,1}$ ■ $T_{0,1}$	3	1
B1	□D ■P	■ $x_{0,1}$ ■ $y_{0,1}$ ■ $q_{0,1}$ ■ $T_{0,1}$	3	1
B2a	□D ■P	■ $x_{0,1}$ ■ $y_{0,1}$ ■ $q_{0,1}$ ■ $T_{0,1}$ ■ $x_{0,2}$ ■ $y_{0,2}$ ■ $q_{0,2}$ ■ $T_{0,2}$	6	2
B2b	□D ■P	■ $x_{0,1}$ □ $y_{0,1}$ ■ $q_{0,1}$ ■ $T_{0,1}$ ■ $x_{0,2}$ □ $y_{0,2}$ ■ $q_{0,2}$ ■ $T_{0,2}$	6	2

1) D: 決定論的手法, P: 確率論的手法

2)  $x_{0,i}$ : 漏洩源位置 (X 座標),  $y_{0,i}$ : 漏洩源位置 (Y 座標),  $q_{0,i}$ :核種漏洩フラックス,  $T_{0,i}$ : 漏洩開始時間,  $i = 1,2$

### (3) 解析結果

#### 1) ケース B0

図 4-36 に、決定論的手法である修正ガウスニュートン法による逆解析結果を示す。上から順に、目的関数、漏洩フラックス (Q01)、漏洩時間 (T01)、漏洩位置 (X01, Y01) のイタレーション毎の変遷を示す。86 ステップで、正解値と一致する結果となった。カテゴリーA では1ステップで解が得られていたのに対して、多くのステップ数を要しているものの、解を得ることが出来た。

なお、決定論的手法では、初期値の設定如何によっては収斂しない場合がある。本検討の場合、数値実験であるため、観測値に対する正解値が存在する。数値的な誤差が観測値に含まれている場合など局所解が存在する問題では、複数の初期値の候補に対して、感度を調べながら逆解析を行う必要がある。

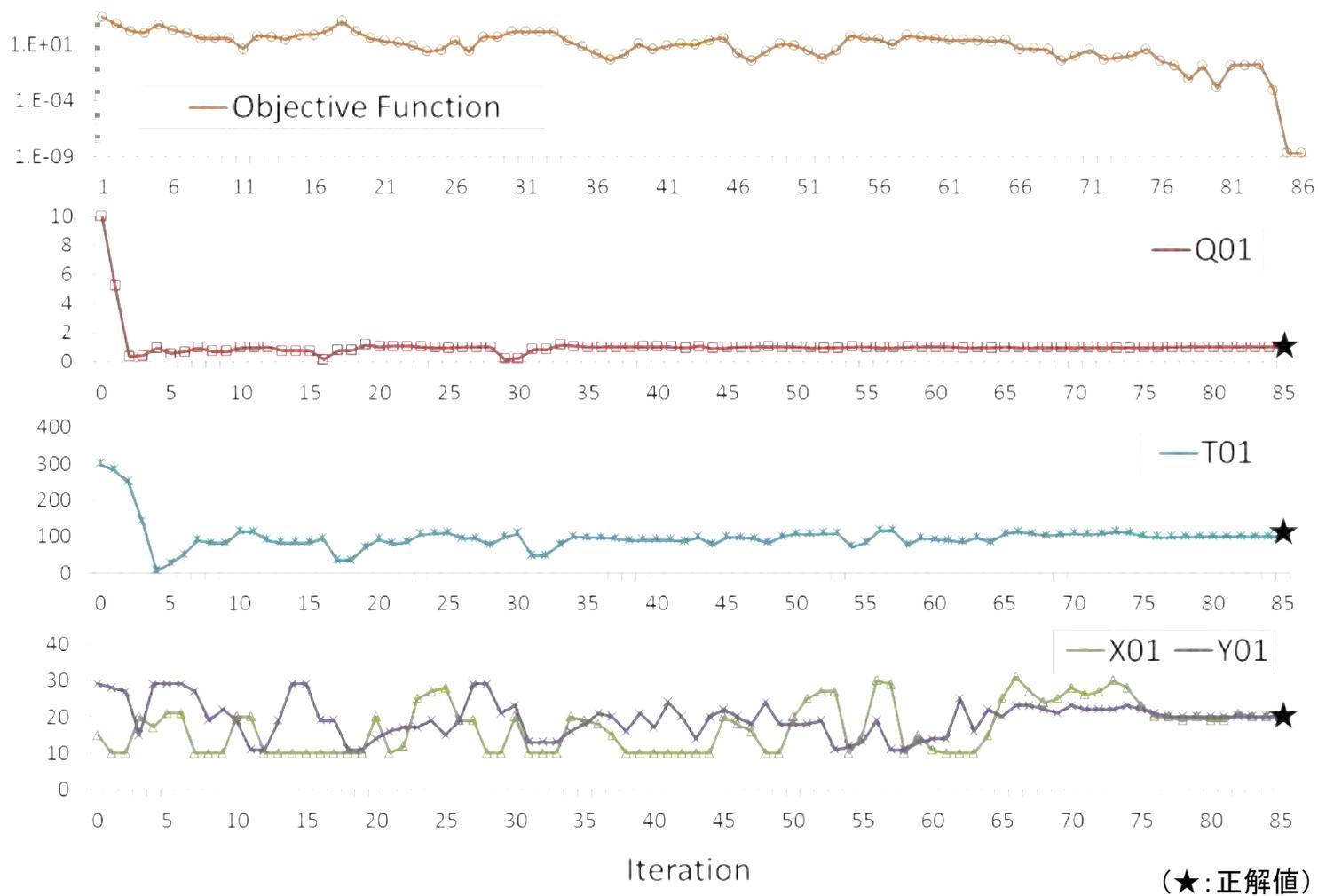


図 4-36 修正ガウスニュートン法による逆解析結果 (ケース B0)

## 2) ケース B1

前述のケース B0 と同じ問題を、確率論的手法である DREAM を用いて逆解析を行ったケースである。

図 4-24 に Gelman-Rubin 統計量を示す。最初の 200 ステップで収斂の目安である 1.2 を下回り、1000 ステップ以降 1.0 に漸近しており、比較的速やかに収斂している。

図 4-38 は各パラメータのヒストグラムおよび尤度関数を、図 4-39 および図 4-40 はパラメータ毎の相関を示したものである。4 つの未知パラメータは、ほぼ真値またはその近傍をピーク（最頻値）とした確率密度関数を同定した。また、尤度のピークも比較的明瞭に表れている。未知パラメータ間の相関性を見ると、真値は頻度と尤度が高くなるあたりのパラメータ空間に存在するが、その幅は広く分布している。漏洩位置 X01 は、漏洩開始時期 T01、漏洩フラックス Q01 と相関を示し、漏洩位置 Y01 は Q01 と X01 に対して多峰性を示す

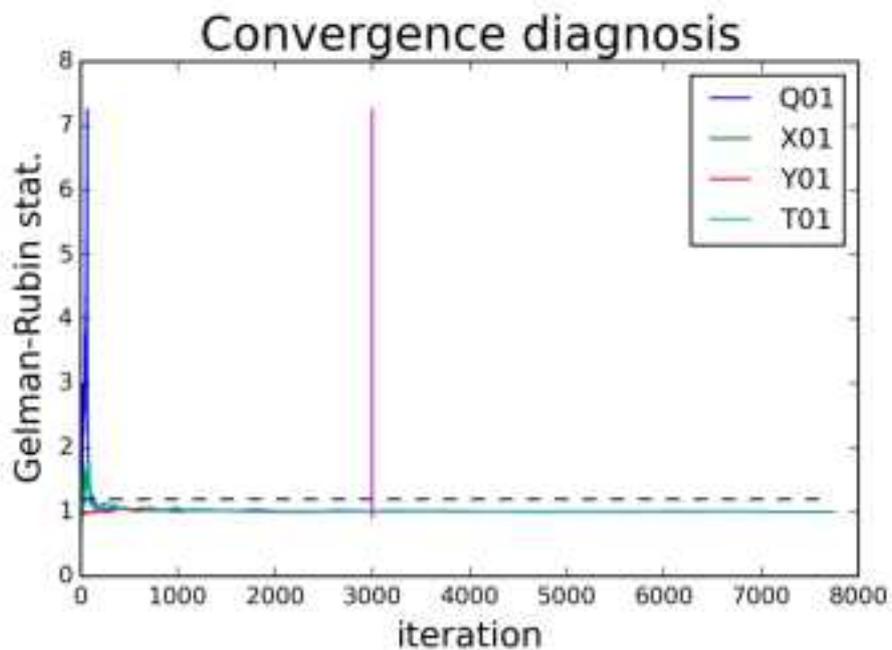


図 4-37 Gelman-Rubin 統計量の収斂状況（ケース B1）

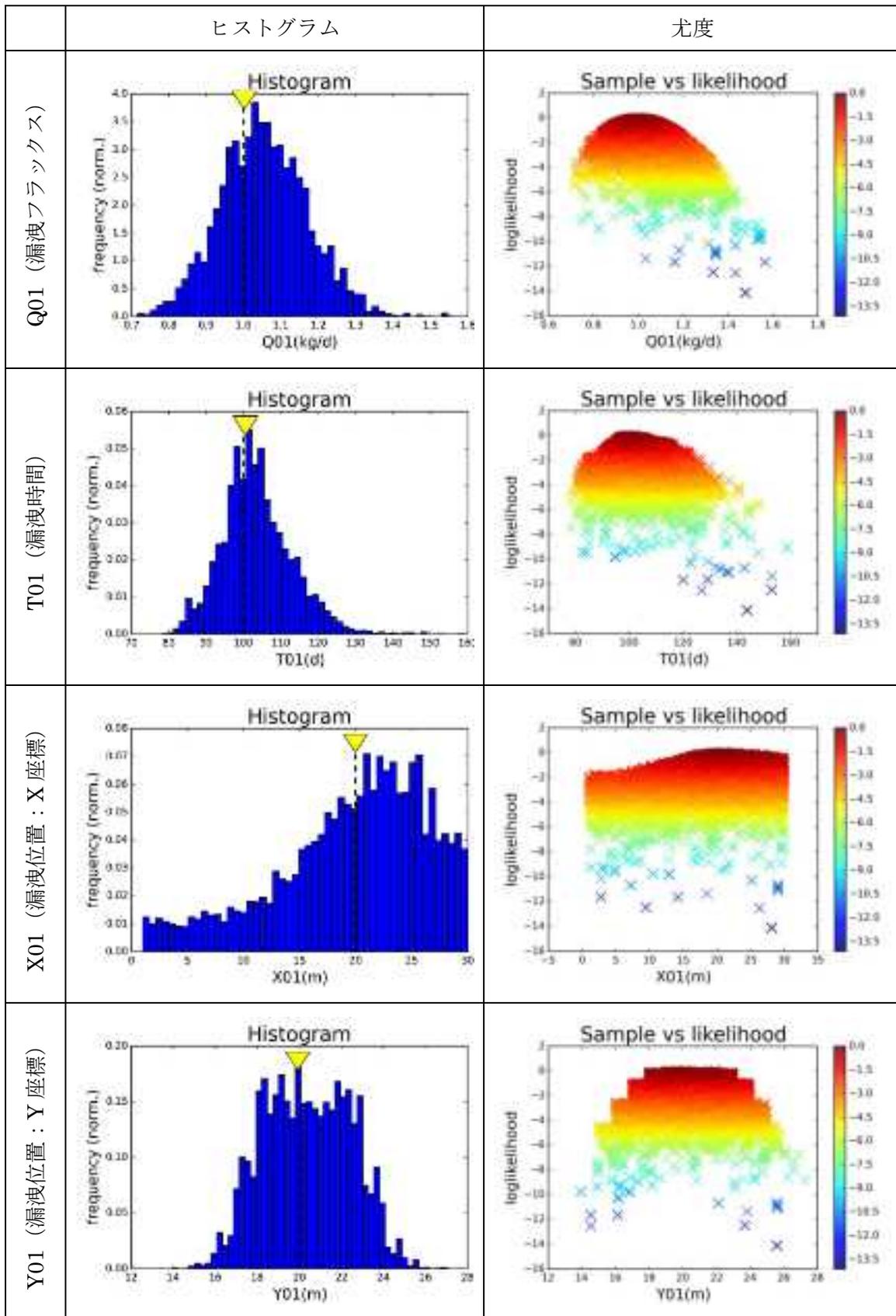


図 4-38 DREAM による逆解析結果 (ケース B1)

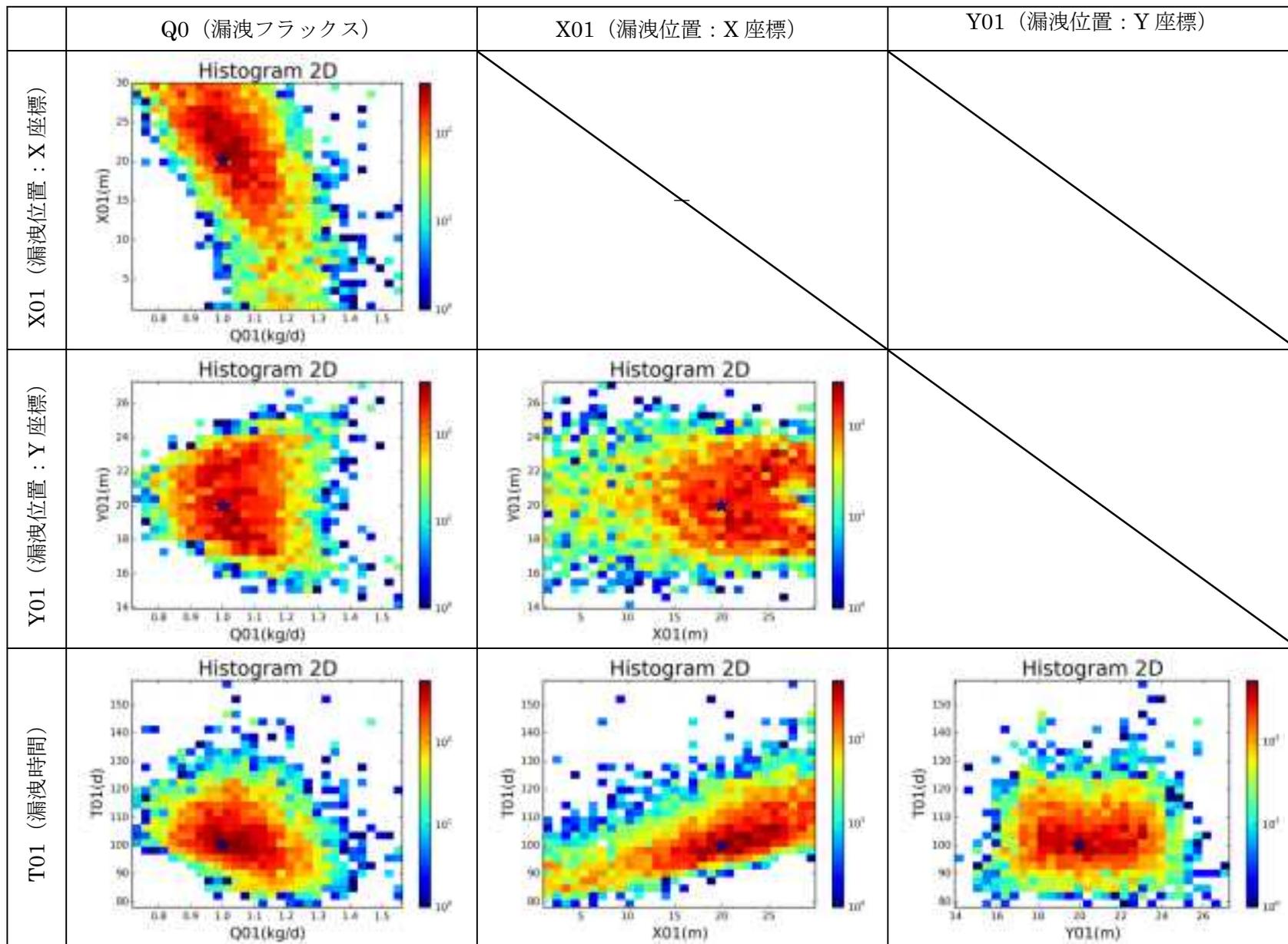


図 4-39 未知パラメータ間の相関性 (頻度, ケース B1)

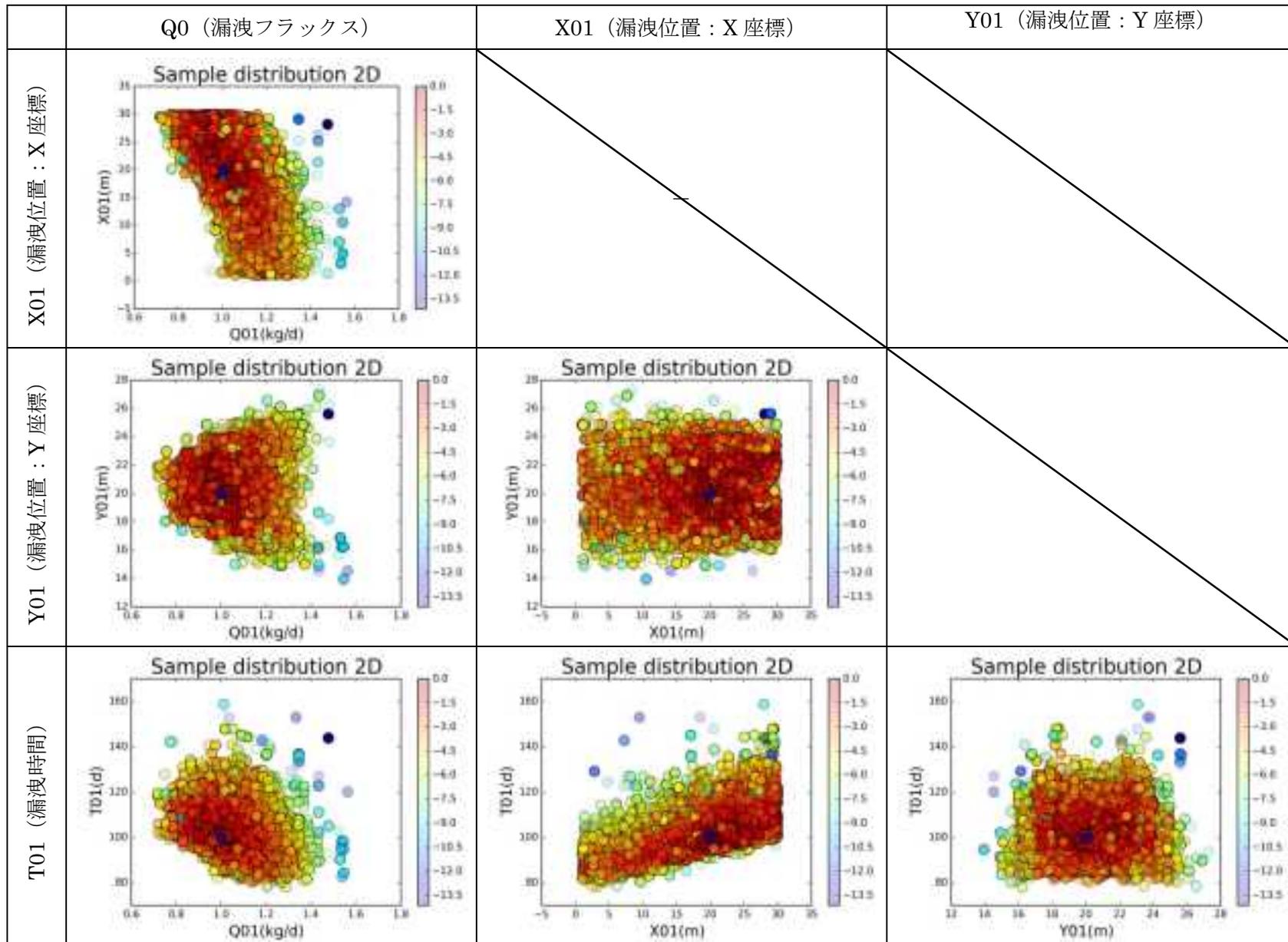


図 4-40 未知パラメータ間の相関性 (尤度, ケース B1)

### 3) ケース B2a

核種漏洩源を 2 地点としたカテゴリーB2 の順解析結果を用いて、確率論的手法である DREAM による逆解析を行った。

図 4-41 に Gelman-Rubin 統計量を示す。30000 ステップを超えても収斂の目安である 1.2 を下回らず、これまでのケースと比較して収斂までに多くの時間を要する。

図 4-42 は各パラメータのヒストグラムおよび尤度関数を示したものである。Y 座標については、図中に正解値が 2 つあるが漏洩源が二つあるためである。4 つの未知パラメータのうち漏洩時間 (T01, T02) は、ほぼ真値またはその近傍をピーク (最頻値) とした確率密度関数を同定しているのに対し、他のパラメータは正解値とヒストグラムのピークの位置がずれている。漏洩源①については、漏洩量の最頻値は 0.0 近傍であり、漏洩源②は 2.0 近傍である。また、漏洩源②の Y 座標  $j$  は正解値の中心にピークが表れている。このことから、逆解析では、1 地点の漏洩源に集約されており、その漏洩位置は正解値の間に位置する解が得られたことと推察できる。これは、正解値は 2 地点の漏洩源の位置が上下対称であり、漏洩量漏洩開始時間、漏洩量が同量であったため、1 地点漏洩源を想定した場合においてお、ほぼ等価に各地点の破過曲線が再現できる結果となり得ることを示しているものである。

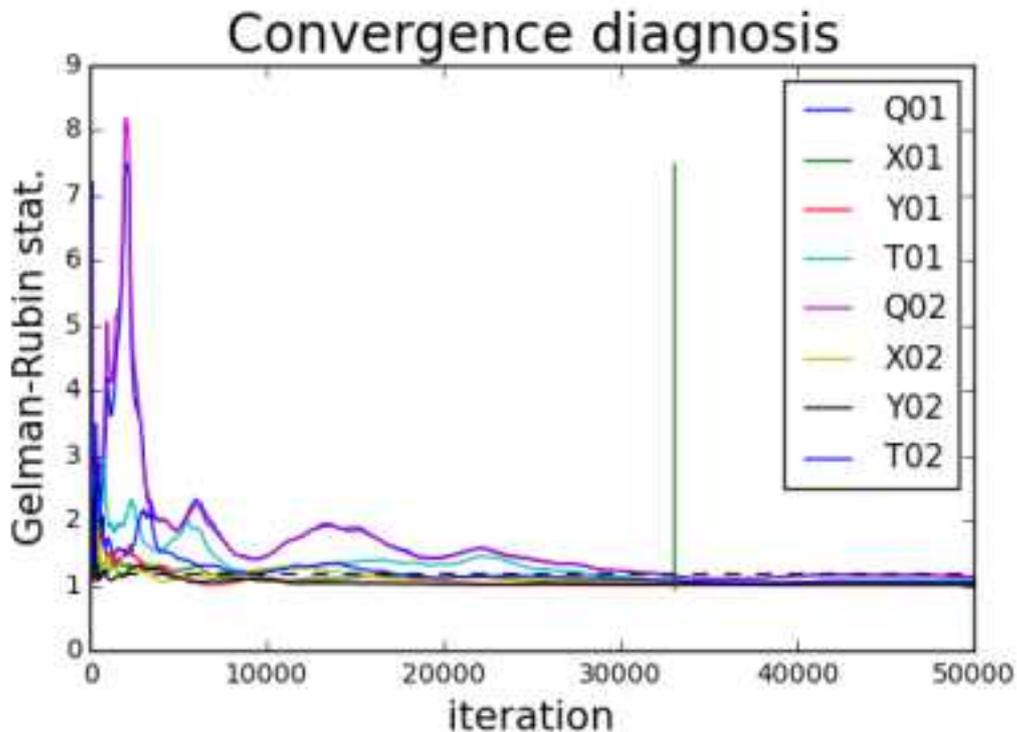


図 4-41 Gelman-Rubin 統計量の収斂状況 (ケース B2a)

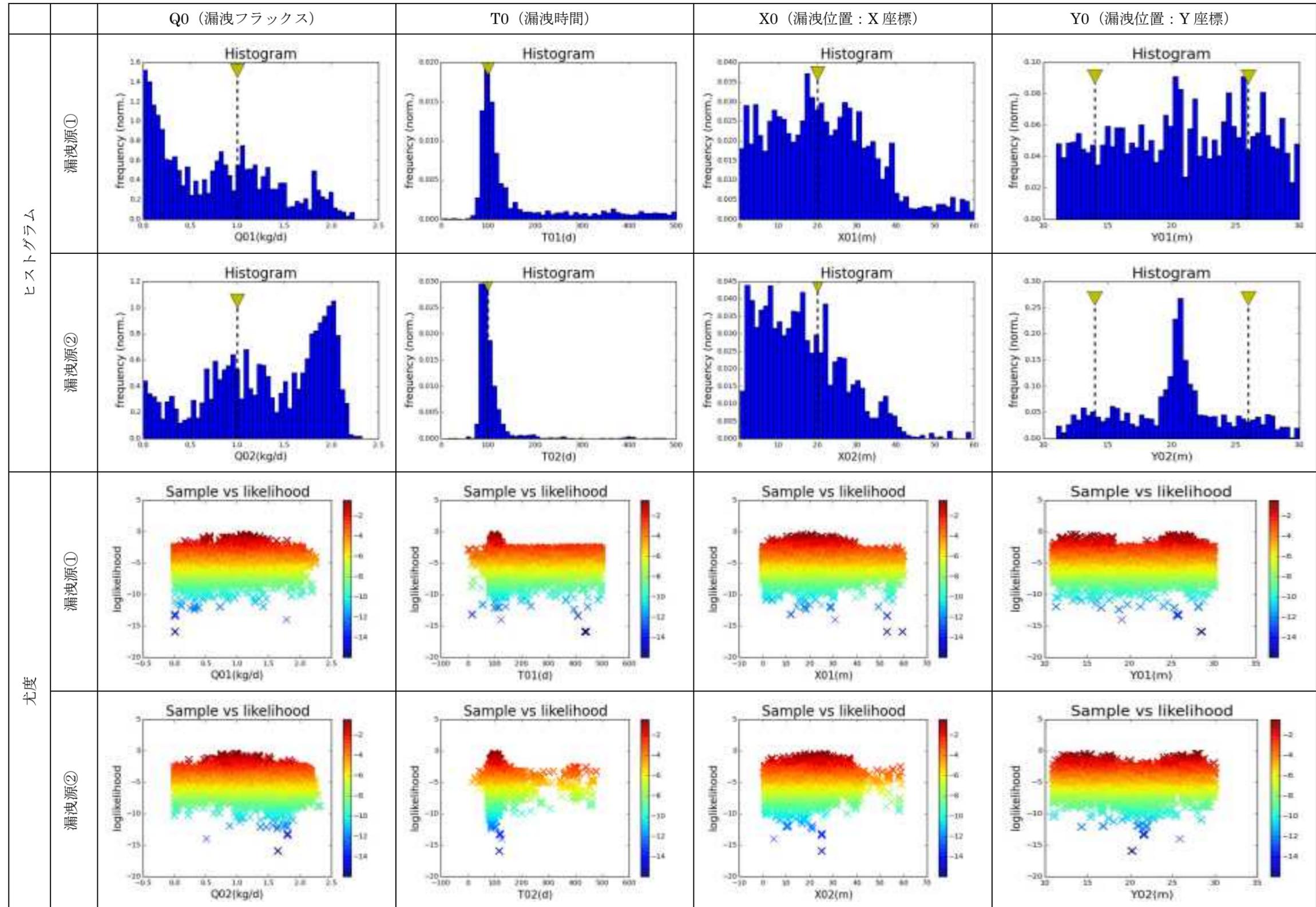


図 4-42 DREAM による逆解析結果 (ケース B2a)

#### 4) ケース B2b

ケース B2a では、2つの漏洩源のY座標の正解値を得ることが困難であった。そこで、ケース B2b では、Y座標を既知として逆解析を実施したものである。

図 4-43 に Gelman-Rubin 統計量を示す。ケース B2a では、30000 ステップを超えても収斂の目安である 1.2 を下回らなかったもの、ケース B2b では 1500 ステップ程度でほぼ収斂した状況となった。図 4-44 は各パラメータのヒストグラムおよび尤度関数を示したものである。6つの未知パラメータは、ほぼ真値またはその近傍をピーク（最頻値）とした確率密度関数を同定しており、ケース B2a における正解値と逆解析結果の最頻値の相違は、未知パラメータに Y座標が含まれていることが原因であることが分かった。

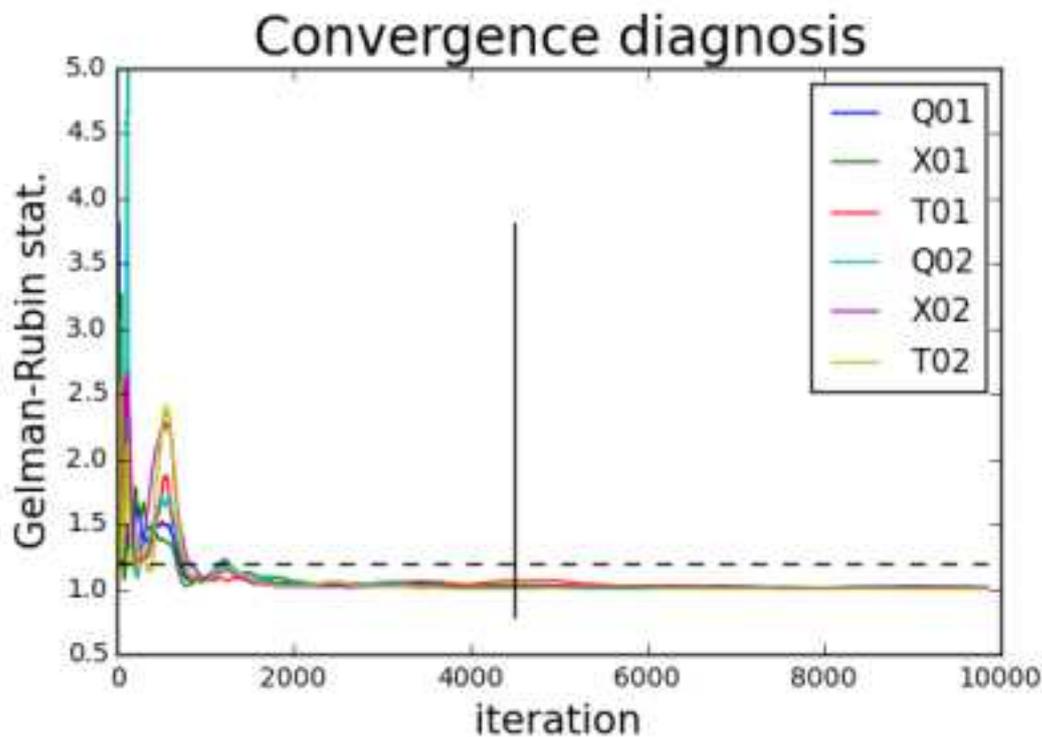


図 4-43 Gelman-Rubin 統計量の収斂状況（ケース B2b）

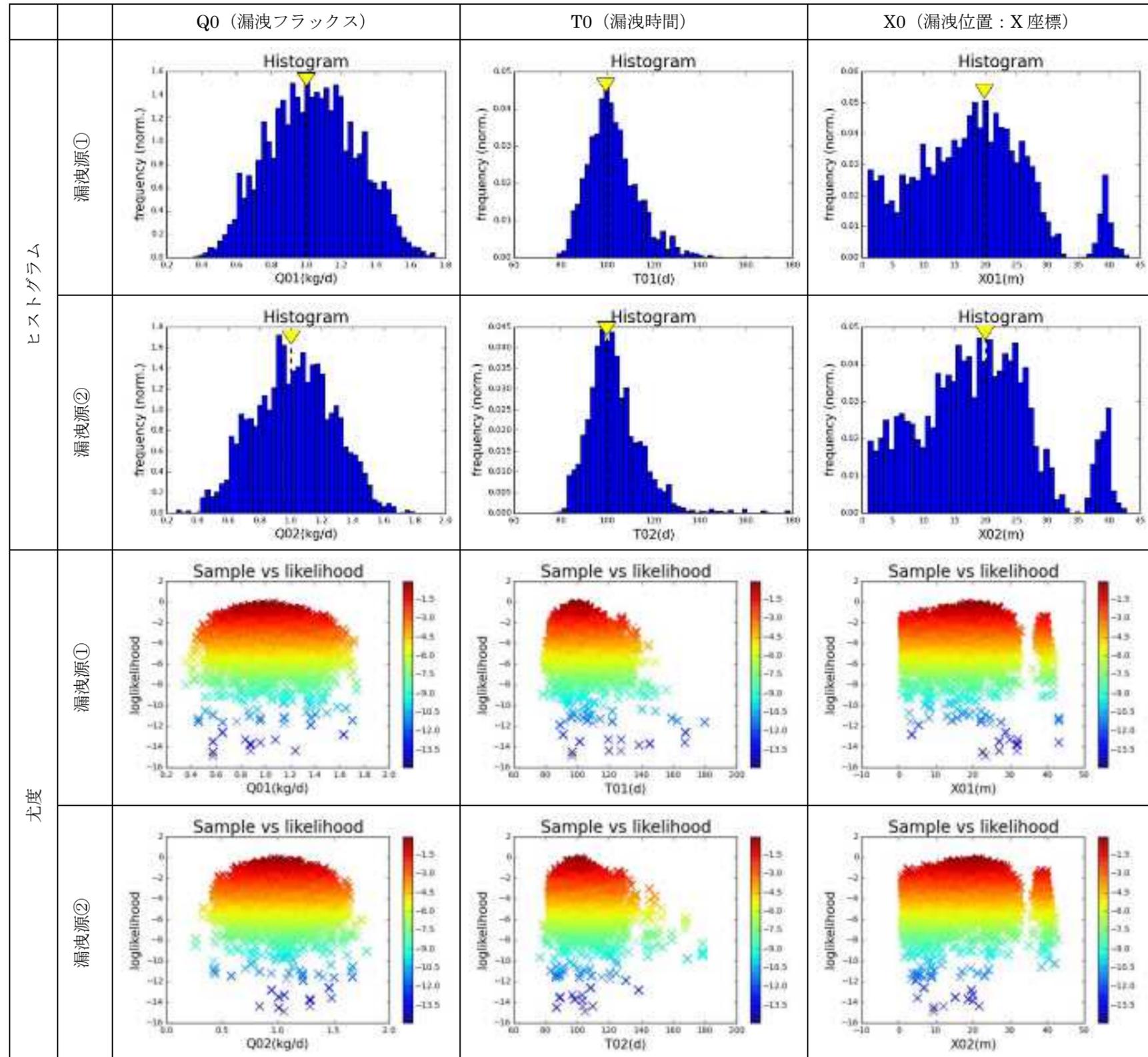


図 4-44 DREAM による逆解析結果 (ケース B2b)

## 4.5 まとめ

文献調査の結果を踏まえ、対象とする問題設定、観測データの量と質に応じて使い分けや試行錯誤が可能な逆解析手法を選定した。選定手法に基づき、順解析モデル、逆解・最適化解析法、感度解析、不確実性解析から構成されるフレームワーク及びツールを UCODE\_2014 を利用して構築した。また、核種漏洩を想定した核種移行問題を設定し、逆解析手法、漏洩源の数、観測点数、観測誤差、次元の違いを考慮した逆解析を実施し、構築ツールの基本的な動作が適切であることを確認した。

1次元核種移行解析モデルによる逆解析（カテゴリーA）の検討より、以下の成果が得られた。

- 未知パラメータの個数
  - 未知パラメータが1つの場合は、決定論的手法、確率論的手法のいずれを用いても同定可能
  - 観測井の場所（漏洩源からの距離）によっては、未知パラメータの同定に寄与する程度（重要度）が異なる場合がある
- 観測データの誤差（ノイズ）、地点数、頻度
  - 未知パラメータを3つとし、観測誤差が無い場合はいずれも事後確率の平均値と最大値は同等となり、適切な同定が可能であった
  - 観測頻度が粗なデータに誤差を加え、かつ1地点を除外する（2地点のみを用いる）と、一部の未知パラメータが同定困難となる場合があった
  - 先見情報に基づく適切な重みを加えることで同定できる場合もあった

また、1次元核種移行解析モデルによる逆解析（カテゴリーB）を通じて、以下の成果が得られた。

- 核種移行経路（濃度場）の次元の相違
  - 観測誤差を考慮しない場合は、決定論的手法、確率論的手法のいずれでも同定可能であるが、漏洩位置 Y01 の事後確率の不確実性が顕著となる
  - これは濃度場の対称性を検知できる観測配置がないことも関与すると考えられ、濃度分布の広がりに適した観測配置が重要であることを示唆するものである
- 複数の漏洩源からの濃度干渉
  - 観測誤差を考慮し、漏洩源×2地点、未知パラメータ×8のテストケースでは、真値の同定が困難なパラメータが複数出現し、多数の反復回数を要する見込みである
  - 先見情報に基づく制約条件の1つとして、漏洩位置 Y01, Y02 が既知であるとした場合、他の6つの未知パラメータを適切に同定することができた

## 5. 核種移行評価における逆解析法の適用性に関する予察的検討

前章までで、本事業で導入した確率論的手法を用いた逆解析の動作確認を行った。ここでは、1Fモニタリングデータに基づく実事例を2つ選定し、導入した逆解析法の適用性に関する予察的検討を行った。

### 5.1 実事例の選定

まず、1Fに関するモニタリングデータの収集を行った。本検討では、遮水壁などによる人為的な改変等の影響が少ないタンクエリアに着目することとした。法令に基づき国への報告が必要となる情報は、原子力施設情報公開ライブラリー (<http://www.nucia.jp>) から公開されており、タンクエリア汚染水漏洩に関するトラブルを検索した。表 5-2 に検索結果を示す。これらのうち、核種濃度グラフが公開されていて、有意な濃度上昇が見られたものは『汚染水貯留設備 RO 濃縮水貯槽からの漏えいについて (H4 北エリア)』(以降、トラブル①)、『H6 エリアタンク上部からの水の漏えいについて』(以降、トラブル③) の2つのトラブルであった。

表 5-1 原子力施設情報公開ライブラリーより取得した福島第一原子力発電所タンクエリアに関する汚染水漏洩トラブル

No.	通番	報告書番号	件名	事象発生日
①	11799	2013-東京-T022	汚染水貯留設備 RO 濃縮水貯槽からの漏えいについて (H4 北エリア)	2013/8/19
②	11833	2013-東京-T028	汚染水貯留設備 RO 処理水貯槽からの漏えいについて (B 南タンクエリア)	2013/10/2
③	11919	2013-東京-T042	H6 エリアタンク 上部からの水の漏えいについて	2014/2/20
④	12058	2014-東京-T006	汚染水タンクエリアに設置してある 4000 トンノッチタンク群からの水漏れについて	2014/6/9
⑤	12158	2014-東京-T015	多核種除去設備処理水の J6 移送ラインからの漏えいについて	2014/12/17
⑥	12306	2015-東京-T007	H4 北タンクエリアにおける内堰からの雨水漏えいについて	2015/9/11
⑦	12307	2015-東京-T006	H6 タンクエリアにおける内堰からの雨水の漏えいについて	2015/9/14
⑧	12432	2016-東京-T002	G6 タンクエリア移送配管からのストロンチウム処理水の滴下について	2016/4/20

### 5.1.1 H4 北エリア（トラブル①）

図 5-1 に、漏洩源の位置および漏洩時の状況を示す。平成 25 年 8 月 18 日～19 日に、定例の現場パトロールにおいて、H4 北エリア RO 濃縮水貯槽周辺に設置してある堰内に水溜まりを発見。その後、当該堰の外側 2 か所に水溜まりを発見された。平成 25 年 8 月 20 日には、No.5 タンク付近から水溜まりが広がっているように見えることや、タンク内水位の低下を確認した。その後、図 5-2 に示すように土のう等により漏洩拡大防止策が取られている。

実施された周辺モニタリング調査は以下のとおりである。

- ・ 浅深度ボーリング調査（図 5-3）
- ・ 漏えいタンク直下のボーリング調査
- ・ 深部地下水汚染状況調査のボーリングコア調査
- ・ 深部地下水汚染状況調査のボーリングコア調査
- ・ 地下水バイパスへの影響調査

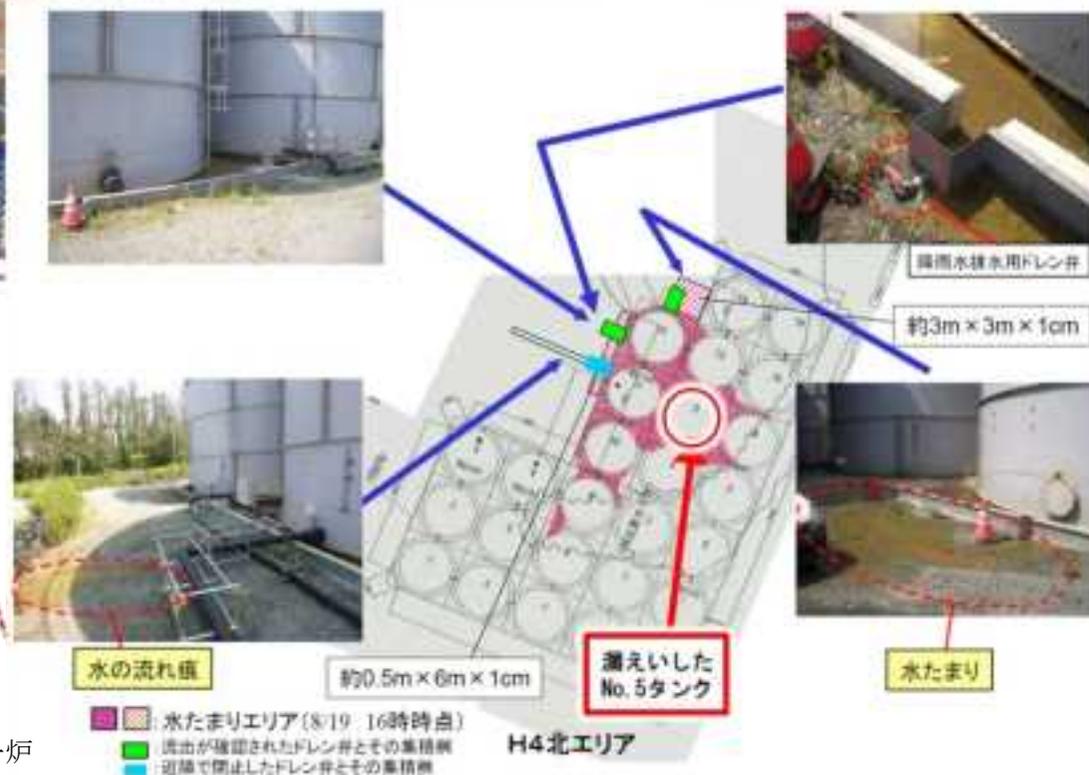
タンクからの漏洩量は、タンク内水位が約 3m 低下していたことから最大で約 300m<sup>3</sup>の漏えい量と評価（Sr-90, <sup>3</sup>H の漏えい量は  $4.5 \times 10^{13}$ ,  $7.2 \times 10^{11}$ Bq と評価）されている。また、漏洩した RO 濃縮水の大半は土壤に浸透した可能性が高いと推定されている。また、発見時の漏えい率は約 5m<sup>3</sup>/6h と考えられることから、8 月 19 日の 15 日以前から漏えいしていた可能性が指摘されている。また、平成 25 年 8 月 22 日までに別の貯槽 No.10 タンクへ移送しており、その他にも様々な漏えい拡大防止策を実施していることから、これ以降、大量の漏えいが継続したとは考えにくい。

図 5-4 は、漏洩タンク周辺の地下水中の核種濃度の経時変化を示す。



- 定例の現場パトロールにおいて、H4 北エリア R0 濃縮水貯槽周辺に設置してある堰内に水溜まりを発見。その後、当該堰の外側 2 か所に水溜まりを発見（平成 25 年 8 月 18 日～19 日）
- No. 5 タンク付近から水溜まりが広がっているように見えること、タンク内水位の低下を確認（平成 25 年 8 月 20 日）

図出典：東京電力株式会社，東京電力株式会社，福島第一原子力発電所の現状と今後の取り組み，2016 年 3 月 2 日



図出典：東京電力株式会社，発電用原子炉施設故障等報告書，平成 26 年 6 月 30 日

図 5-1 漏洩源の位置および漏洩時の状況（H4 北エリア）

## 2. H4北エリア周辺における漏えい拡大防止策



図3 土のう式堰の外側の対策



図4 土のう等施工状況

図 5-2 土のう等による漏洩拡大防止策（H4 北エリア）

図出典：東京電力株式会社，発電用原子炉施設故障等報告書，平成 26 年 6 月 30 日

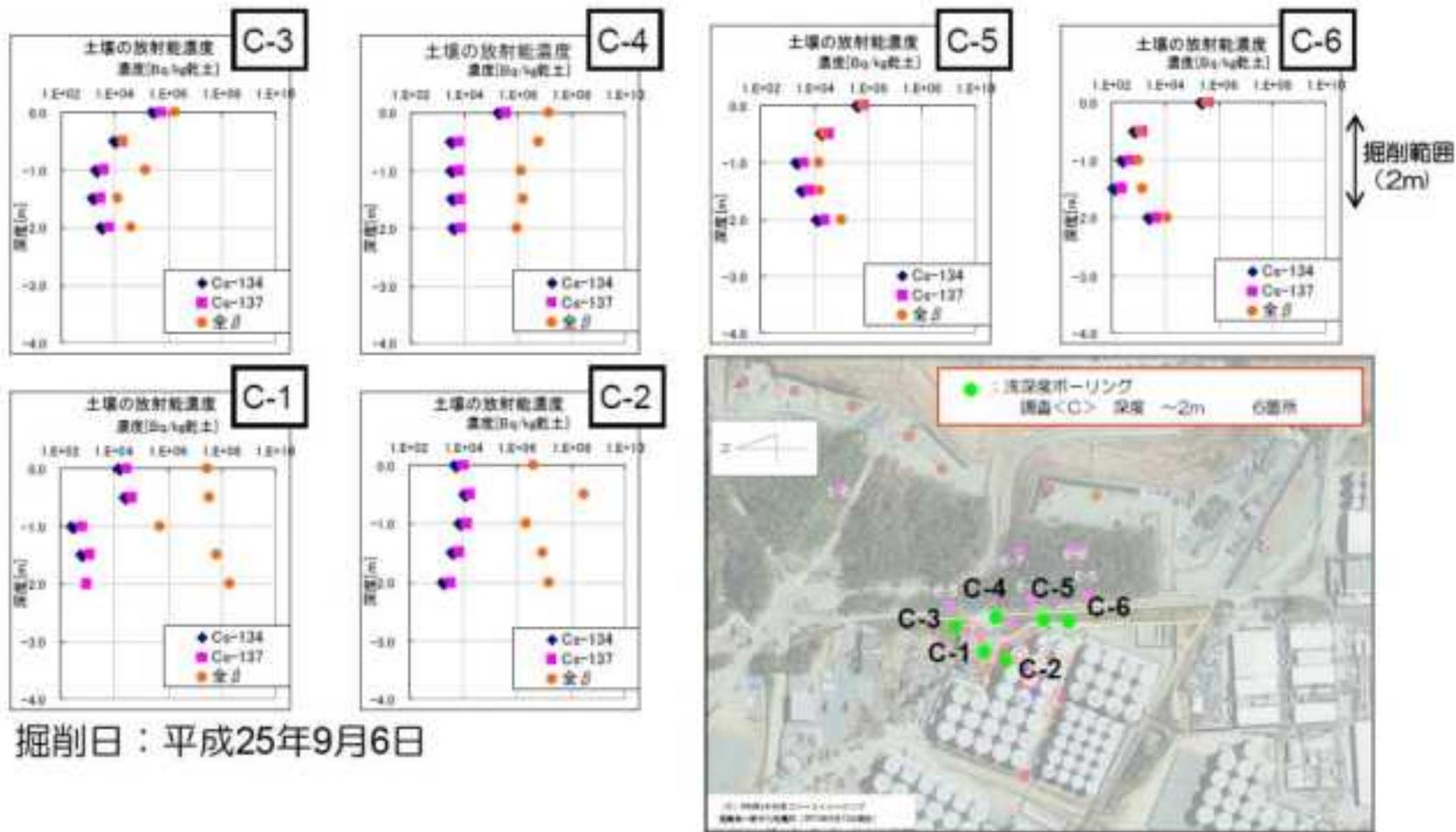


図 5-3 浅深度ボーリング調査結果 (H4 北エリア)

図出典：東京電力株式会社：発電用原子炉施設故障等報告書，平成26年6月30日

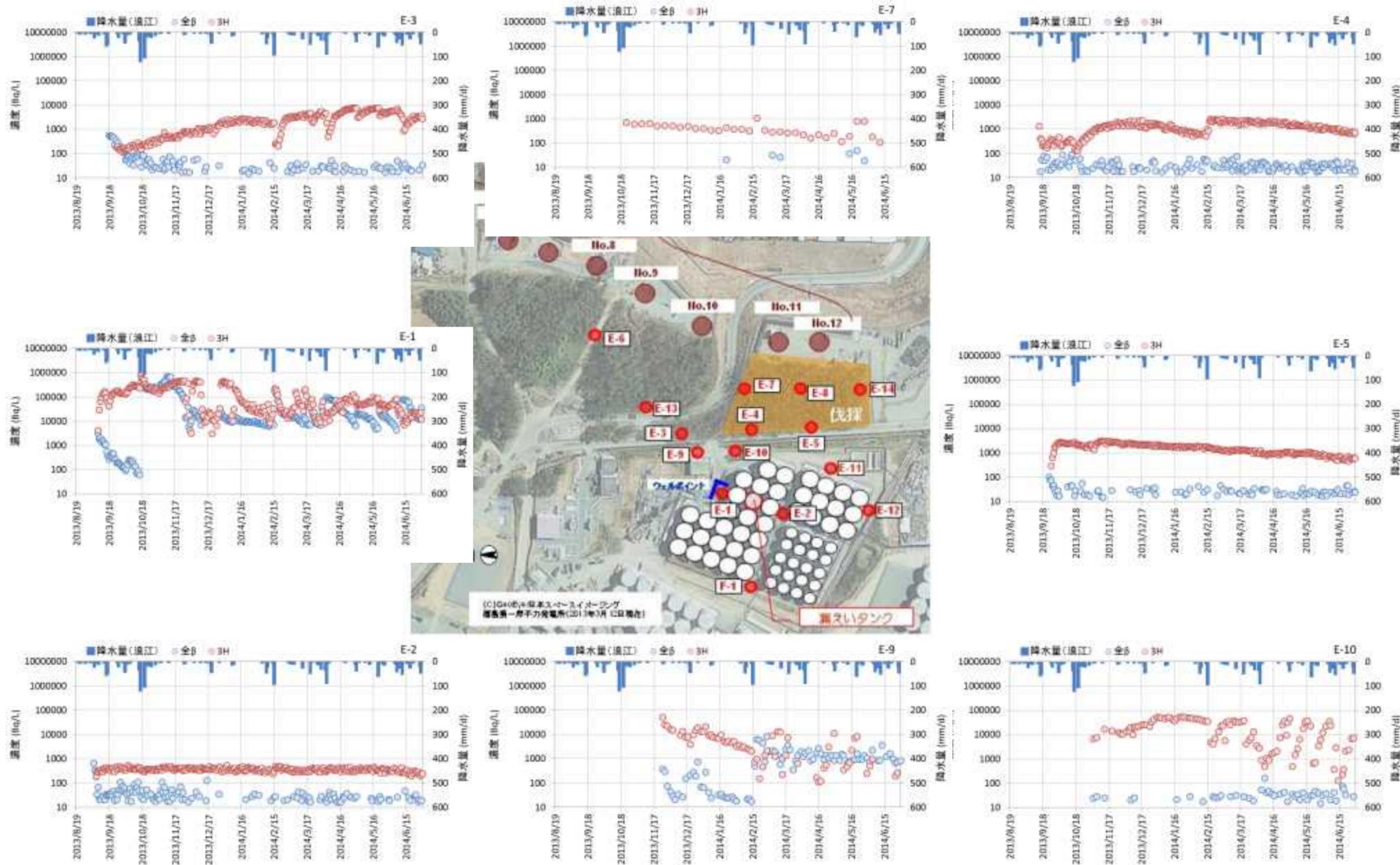


図 5-4 観測井の核種濃度の経時変化 (H4 北エリア)

### 5.1.2 H6 エリア C1 タンク（トラブル③）

図 5-5 に、漏洩源の位置および漏洩時の状況を示す。平成 26 年 2 月 19 日～20 日に、定例の現場パトロールにおいて、H6 エリア C1 タンクの天板部から水が漏えいしていることが確認された。その後、C1 タンクの水位が天板部まで達していること、漏えいした水が H6 タンクエリア堰内に落ちる雨水を堰外に排出する目的で設置した雨樋を伝って堰外にも漏洩していることが確認された。

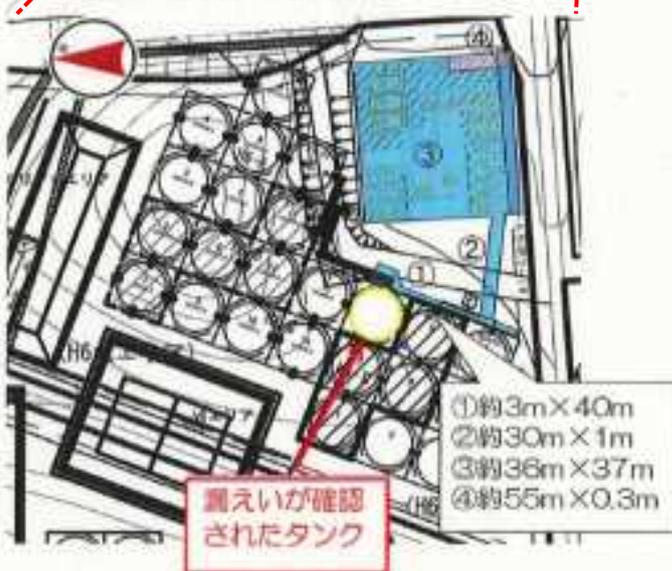
漏洩水量は RO 濃縮水供給ポンプの移送量、C1 タンクの空容量から約 100m<sup>3</sup> と評価されており、RO 濃縮水の <sup>3</sup>H 濃度より漏洩核種量は  $4.2 \times 10^9 \text{Bq}$  と推定される。また、漏洩は E エリアタンクと C1 タンクの水位の変動から、平成 26 年 2 月 19 日 13 時 43 分以降と考えられる。平成 26 年 2 月 20 日 3 時 30 分頃、C1 タンクから他のタンクへ水を移送し、C1 タンクの水位低下や天板部からの漏洩・雨樋からの漏洩が停止していることを確認したことから、これ以降、大量の漏えいが継続したとは考えにくい。その後、漏洩水の回収や土壌の掘削・回収等の漏えい防止対策を実施がされている。

図 5-6 は地下水中の核種濃度の観測地点を、図 5-7 は核種濃度の経時変化を示す。



【H6 タンクエリア周辺の漏えい状況】

- 題の外、流れた漏えい水 (100m<sup>3</sup>)
- ① H6 タンクエリア雑遊傍
- ② 電気ケーブルが収納されているU字溝
- ③ 淡水化装置 (ボイラ設備) エリア
- ④ 雑溝 (排水路には接続なし)



漏えいの状況 (①エリア)



漏えいの状況 (③エリア)

図 5-5 漏洩源の位置および漏洩時の状況 (H6 タンクエリア)

図出典:東京電力株式会社, 福島第一原子力発電所 汚染水貯留設備 RO 濃縮水貯槽(H6 エリア C1 タンク)からの漏えいについて, 平成 26 年 6 月 30 日



図 5-6 核種濃度観測点の配置 (H6 タンクエリア)

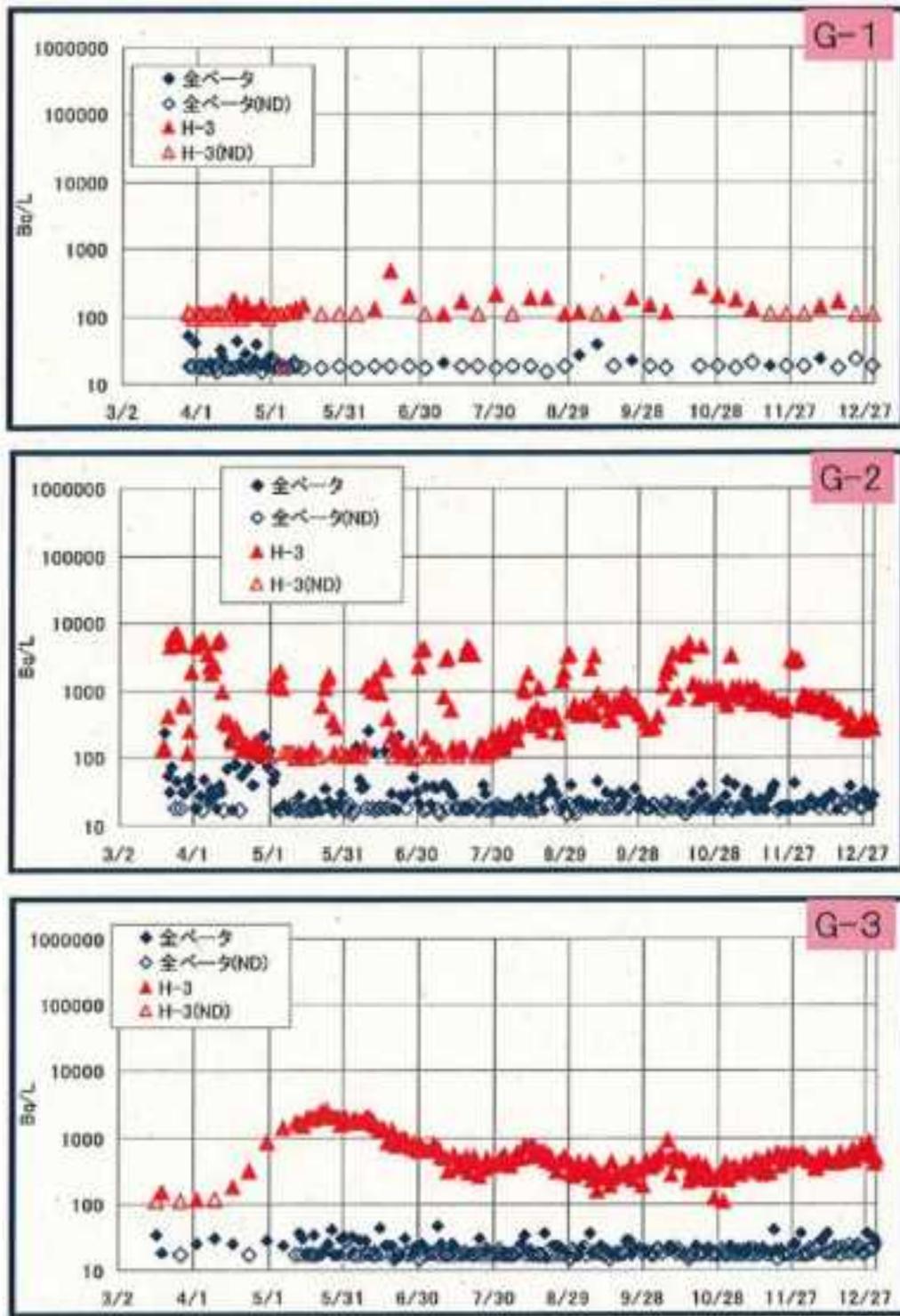


図 5-7 観測井の核種濃度の経時変化 (H6 エリア)

図出典：東京電力株式会社：福島第一原子力発電所汚染水貯留設備 RO 濃縮水貯槽 (H6 エリア C1 タンク) からの漏えいについて，平成 27 年 6 月

## 5.2 H6 エリア C1 タンク漏洩(トラブル③)に関する逆解析の実施

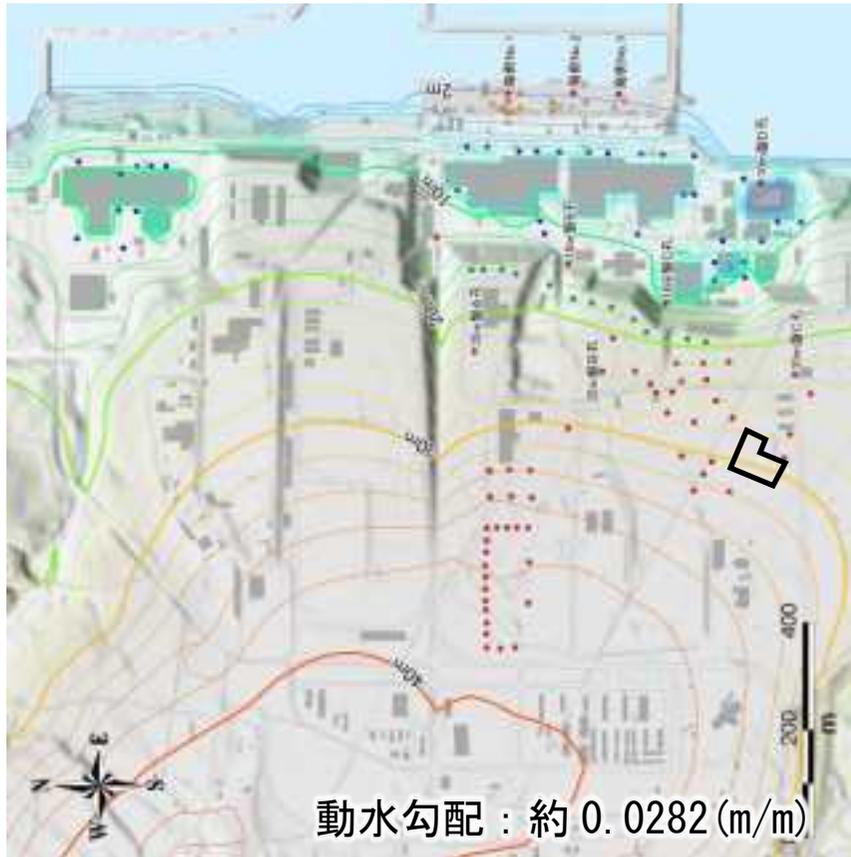
### 5.2.1 対象系のフォワードモデリング

#### (1) 流速場

対象サイト周辺の地下水流動状況を把握するため、既存（地圏環境テクノロジー(2015)）の3次元地下水流動解析による結果を活用した。図 5-8 は、1F サイト周辺の不圧地下水位と地表水・地下水の流動経路を示したものである。動水勾配は、約 0.0282(m/m)であり、流動方向は海に向かってやや南側に傾いている状況である。図 5-6 に示す核種濃度の観測井の位置は、漏洩地点から地下水流動方向に沿って配置されている。

ここでは、地下水流動場を2次元平面で近似することとし、地下水流同方向に沿った平面格子を作成した。図 5-9 に作成した格子を示す。解析領域は漏洩源から観測井 G3 を包含する範囲として 200m×170m の領域とした。総格子数は 7800 (=200×39) となった。

## 不圧地下水位等高線



## 流動経路

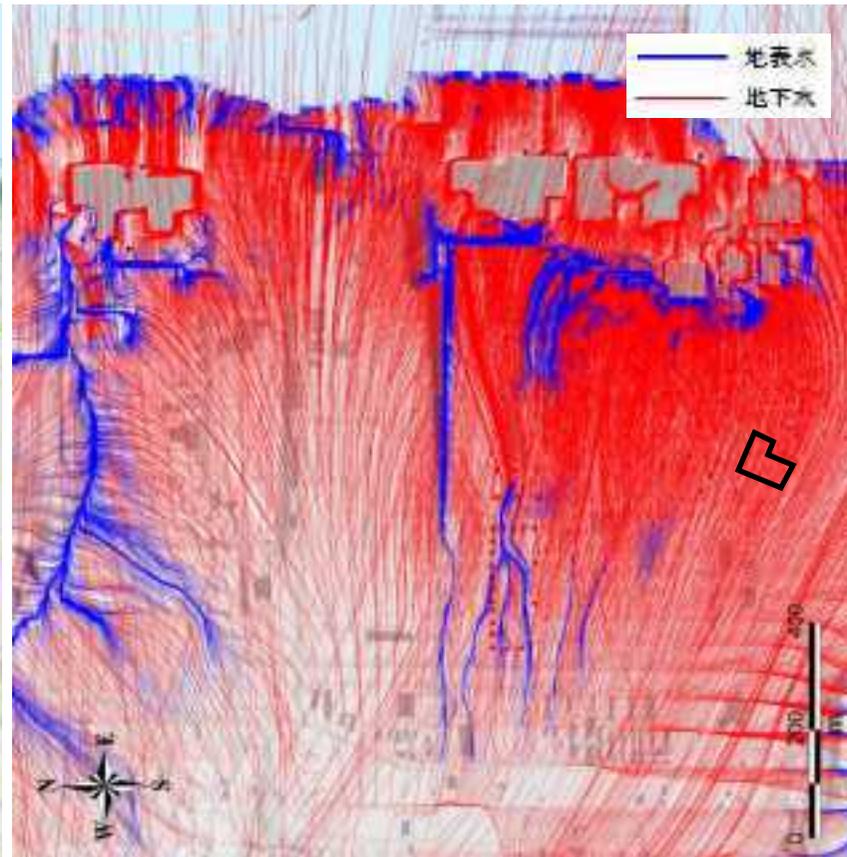


図 5-8 既往解析結果による地下水位と地表水・地下水の流動経路（トラブル③）

図出典：地圏環境テクノロジー，2015。平成26年度 東京電力福島第一原子力発電所敷地内における核種移行解析の妥当性確認のための海水影響等を考慮した試解析—業務報告書—

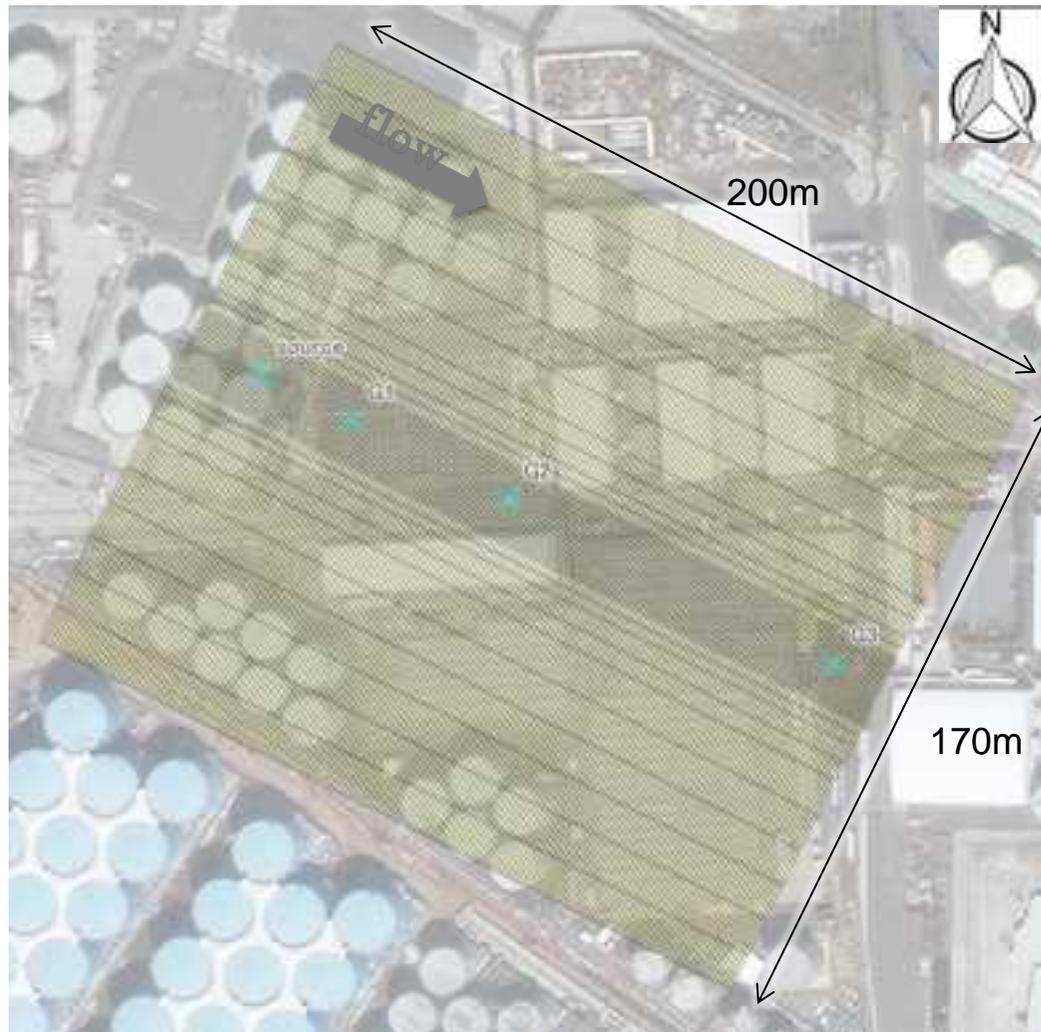


図 5-9 平面格子モデルと漏洩位置および観測井配置 (トラブル③)

## (2) 濃度場

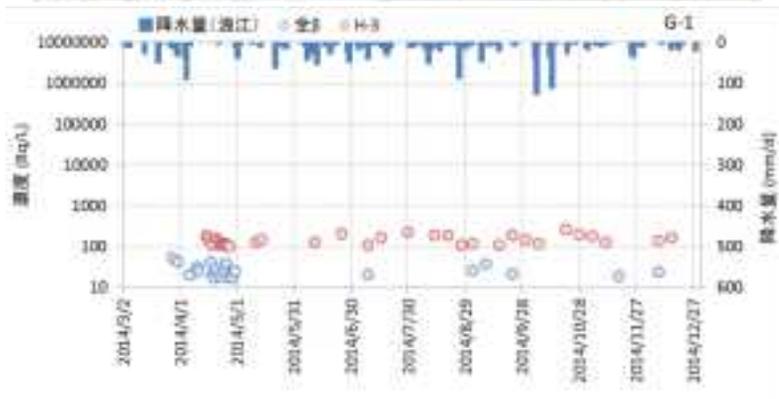
地下水流動方向に対して、漏えいタンクより下流側に位置する観測井 G-1, G-2, G-3 が設置されている。図 5-10 に、各観測井の核種濃度の経時変化を示す。漏洩源から最近傍の G-1 地点では、観測期間中に大きな濃度上昇は認められない。一方で、下流側の G-2 では、2014 年 4 月頃と 8 月～12 月にかけて  $^3\text{H}$  濃度が数千 Bq/l まで上昇している。G-3 では、2014 年 4 月中旬～7 月中旬にかけて  $^3\text{H}$  濃度が上昇している。G-2 と G-3 の濃度上昇の関係から、G-2 の 4 月頃と、G-3 の 2014 年 4 月中旬～7 月中旬の濃度上昇が対応していることが推察される。一方で、G-2 の 2014 年 8 月～12 月の濃度上昇は、G-3 では対応する濃度上昇の傾向は観測されておらず、G-2 近傍での局所的な影響など、本イベントと異なる事象である可能性も考えられる。

そこで、トラブル③では、 $^3\text{H}$  を対象とし、2014 年 6 月までの期間の核種濃度の観測データを対象とした逆解析を行うこととした。

本検討では、流速場の計算に MODFLOW96 を、濃度場の計算に MT3DMS 5.3 を使用した。移流項の計算には、3 次 TVD である ULTIMATE を使用し、分散拡散は、完全陰解法を用いた。また、マトリックスソルバーには前処理付き共役勾配法を使用し、前処理には修正不完全コレスキー分解を選択した。分子拡散係数を  $6 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ 、縦分散長を 10m、半減期を 12.3 年とし、遅延（吸着）は考慮しないものとした。 $^3\text{H}$  の初期濃度（バックグラウンドの濃度）は、110Bq/L とした。解析対象期間は 2013 年 1 月 1 日～2014 年 6 月 30 日とした。



イベントに伴う有意な濃度上昇



イベントとは異なる濃度上昇か？

図 5-10 G-1~G-3における核種濃度の経時変化

### 5.2.2 逆問題の設計

逆問題の解法は、確率論的手法を用いる。G-1～G-3における<sup>3</sup>H濃度の観測値と解析結果の残差二乗和を尤度関数として用い、対数尤度関数の最大化を行った。

未知変数は、漏洩源位置、漏洩パターン、地下水流動、分散長に関する以下のパラメータとした。

- 漏洩位置座標 : X, Y (m)
- 漏洩開始時間 : T0 (d)
- 漏洩継続時間 : T1 (d)
- 漏洩フラックス : Q0 (Bq/d)
- 間隙流速 : V(m/d)
- 縦分散長 :  $\alpha L$ (m)

漏洩パターンは、図 5-11 に示すステップ関数で表現し、漏洩開始時間 T0、漏洩継続時間 T1、漏洩フラックス Q0 の 3つのパラメータで形状を表現した。分散長は、縦分散長を未知数とし、横分散長は縦分散長の 1/10 とした。

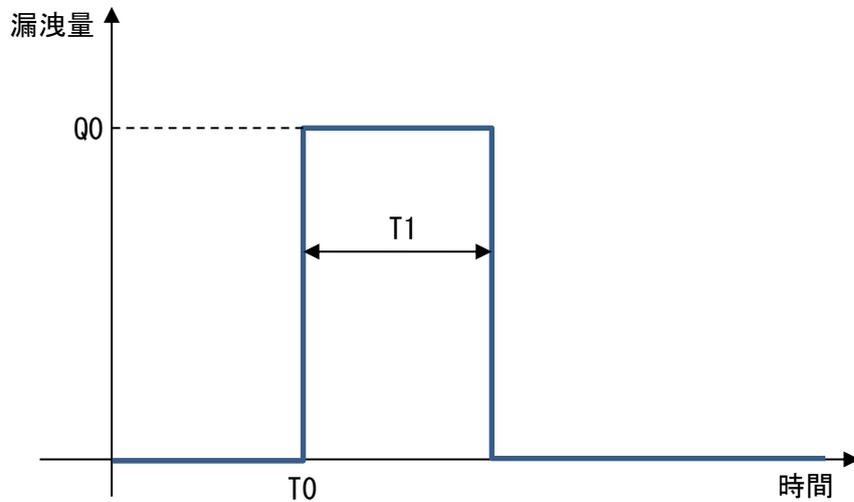


図 5-11 漏洩量の経時変化の与え方と入力パラメータ

### 5.2.3 逆解析のケース設定

表 5-2 に、トラブル③における逆解析の検討ケースの一覧を示す。ケース C3-1～C3-3 は、尤度関数の重みによる影響を把握するケースとした。漏洩位置を漏洩タンクの位置に固定し、漏洩フラックス、地下水流速、分散長に関するパラメータを未知数としたものである。検討は、観測データごとに重みを変えたケース (C3-1)、観測井ごとに重みを買えたケース (C3-2)、重みを考慮しないケース (C3-3) を設定し、各ケースの重みは、以下の式に従った。

#### ■データごと (C3-1)

$$\omega_{i,j} = \frac{1}{(\tilde{y}_{i,j} + \eta)^2}$$

#### ■観測井ごと (C3-2)

$$\omega_{i,j} = \frac{1}{(\max_i(\tilde{y}_{i,j}))^2}$$

#### ■なし (均等) (C3-3)

$$\omega_{i,j} = \text{Constant}$$

ここで、 $\omega_{i,j}$  は観測データ毎の重み、 $\tilde{y}_{i,j}$  は観測値、 $\eta$  は定数、 $i$  は観測井、 $j$  は時間を示す。なお、 $\eta$  は 0.01 と設定した。

ケース C3-4 は漏洩源の X 座標を未知数としたケース、ケース C3-5 は X 座標、Y 座標を未知数としたケースである。これらのケースは、未知パラメータを徐々に多くし、逆解析の難易度を高くしていったものである。ケース C3-6 は、ケース C3-5 に対して観測値のノイズと見られる不規則な変動を除去したものである。

表 5-2 逆解析の検討ケース一覧（トラブル③）

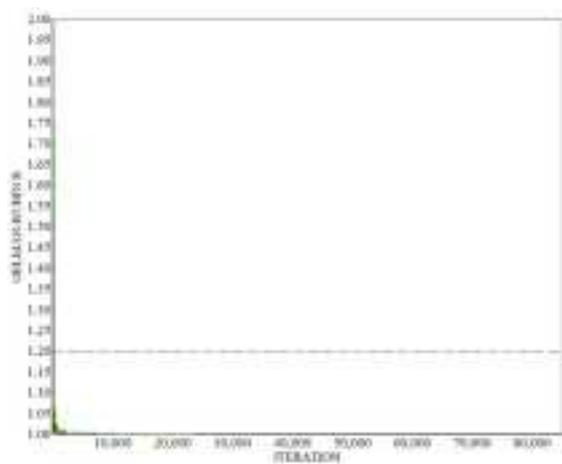
ケース	同定対象とする汚染源 モデルパラメータ <sup>1)</sup>	尤度関数の重み	観測データ
C3-1	□ $x$ □ $y$ ■ $q$ ■ $T_0$ ■ $T_1$ ■ $v$ ■ $\alpha$	データ毎	全データ
C3-2	□ $x$ □ $y$ ■ $q$ ■ $T_0$ ■ $T_1$ ■ $v$ ■ $\alpha$	観測井毎	全データ
C3-3	□ $x$ □ $y$ ■ $q$ ■ $T_0$ ■ $T_1$ ■ $v$ ■ $\alpha$	なし	全データ
C3-4	■ $x$ □ $y$ ■ $q$ ■ $T_0$ ■ $T_1$ ■ $v$ ■ $\alpha$	なし	全データ
C3-5	■ $x$ ■ $y$ ■ $q$ ■ $T_0$ ■ $T_1$ ■ $v$ ■ $\alpha$	なし	全データ
C3-6	■ $x$ ■ $y$ ■ $q$ ■ $T_0$ ■ $T_1$ ■ $v$ ■ $\alpha$	なし	ノイズ除去

1)  $x, y$ : 漏洩源位置 (X, Y 座標),  $q$ : 核種漏洩フラックス,  $T_0$ : 漏洩開始時間,  $T_1$ : 漏洩継続時間,  $v$ : 実流速,  $\alpha$ : 分散長

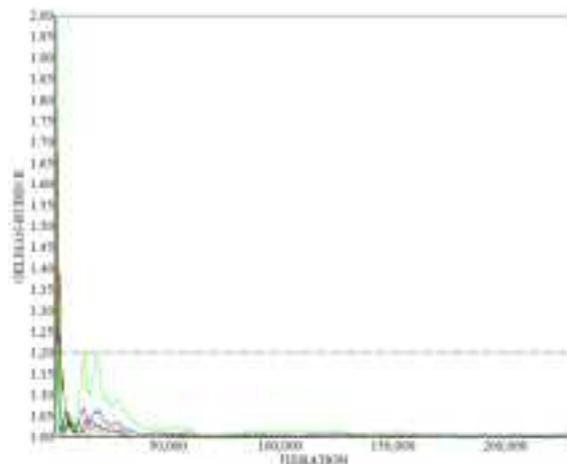
#### 5.2.4 解析結果

前述で設定した解析ケースに対して、確率論的手法である DREAM を用いて逆解析を実施した。図 5-12 に Gelman-Rubin 統計量による収斂状況を示す。4 章で実施した数値実験による逆解析の検証では、数 1000 ステップ程度で Gelman-RubinR 統計量が収斂の目安である 1.20 以下になっているのに対し、トラブル③を対象とした逆解析では、長いもので 1 万ステップを要するケースもあり、収斂に時間を要する結果となった。

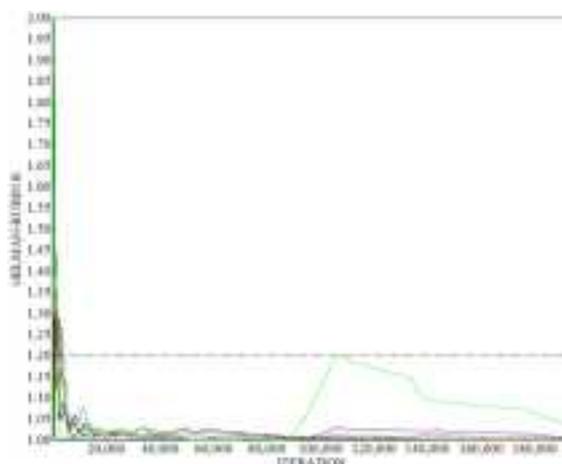
これ以降、各ケースを、尤度関数の重みによる相違、漏洩位置の同定、ノイズ除去による影響に着目して結果をまとめた。



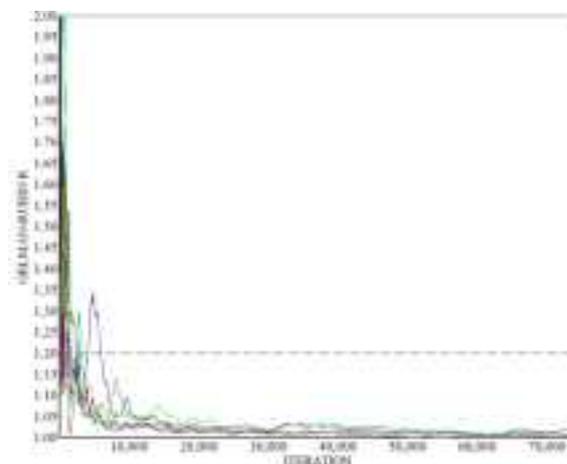
(a) C3-1



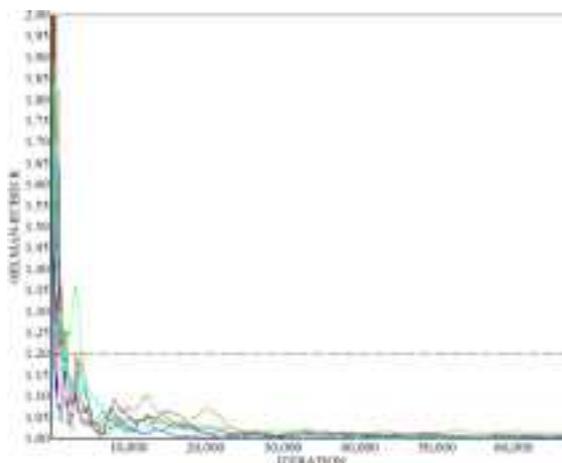
(b) C3-2



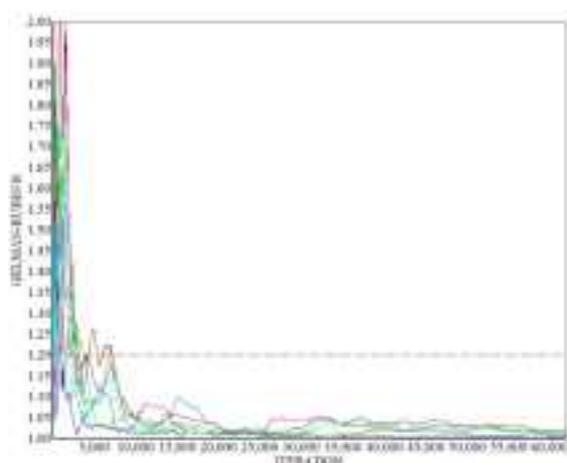
(c) C3-3



(d) C3-4



(e) C3-5



(f) C3-6

図 5-12 各ケースの Gelman-Rubin R による収束判定

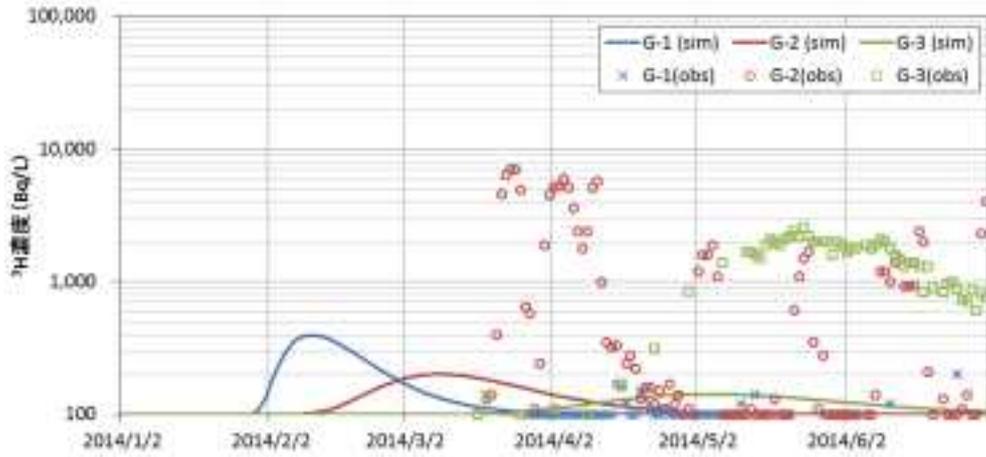
(1) 尤度関数の重みによる影響把握

ここでは、ケース C3-1～C3-3 を用いて、尤度関数の重みによる逆解析への影響を把握した。

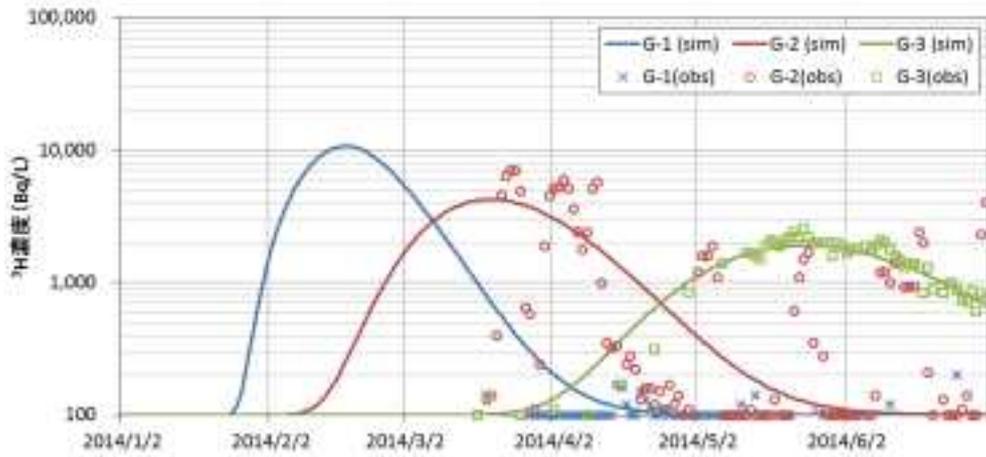
図 5-13 は、表 5-3 に示す各ケースの最大尤度における未知パラメータを用いて順解析を実施し、解析結果と観測値の濃度を比較したものである。尤度関数の重みの評価方法により、尤度関数が最大となる解析結果に相違が認められることが分かる。C3-1 は、全体的に核種濃度を過小評価している。これは、4.4.1(3)で示したケース M1 の結果と同様、観測が低濃度の方が重み大きくなるためである。C3-2 は、G-3 の再現性が良い結果が得られた。また、C3-3 は、G-3 は C3-2 と比較して再現性が悪くなるものの、G-1 および G-2 の再現性は改善しており、トラブル③においては、重みなしとした方が、3 地点の観測データを再現することができる見通しを得た。これ以降の検討では、重みなしとした C3-3 を基本とする。

表 5-3 最大尤度時の各未知数の値 (トラブル③ : C3-1～C3-3)

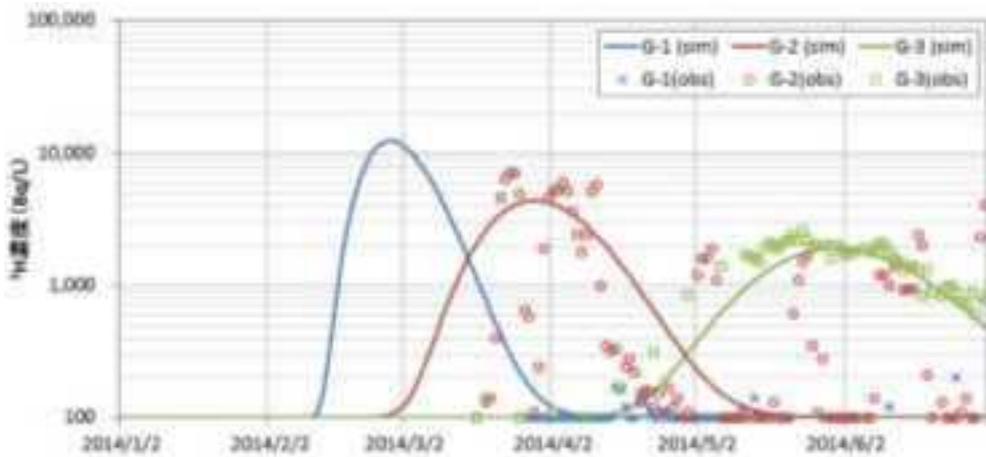
	Q(Bq/d)	T0	T1(day)	V(m/d)	$\alpha L$ (m)
C3-1	610.1	1/28	2.50	1.66	3.50
C3-2	2780.9	1/23	16.58	1.43	1.99
C3-3	18393.7	2/10	0.95	1.50	0.65



(a) C3-1 (重み：観測データ毎に値を設定)



(b) C3-2 (重み：観測地点毎に重みを設定)



(c) C3-3 (重みなし)

図 5-13 最大尤度時の濃度の経時変化 (トラブル③：重みによる相違)

## (2) 漏洩位置の同定

漏洩位置を固定した C3-3 に対し、漏洩位置を未知数とした逆解析を実施した。C3-4 は X 座標のみを、C3-5 は X 座標、Y 座標の両方を未知数とした。

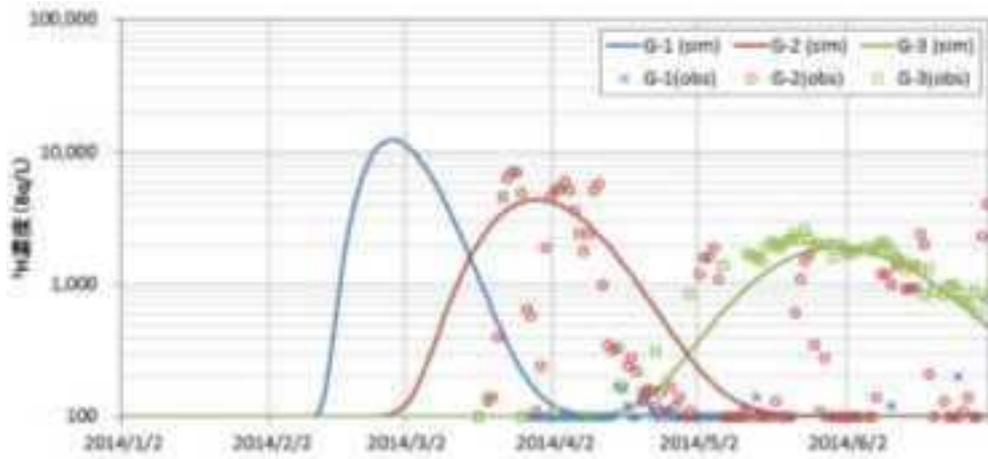
図 5-14 は、表 5-4 に示す各ケースの最大尤度における未知パラメータを用いて順解析を実施し、解析結果と観測値の濃度を比較したものである。なお、表中の『( )』は、未知変数とせず固定値としたものであり、括弧内の数値は設定した値である。C3-4 および C3-5 の濃度の経時変化は、3 地点を概ね再現している。G-1 濃度がほとんど上昇しない点が特徴的である。また、漏洩時期は、両ケースとも、漏洩時間は 3/20 と 3/16 となっており、実際の漏洩時期である 2/10 よりも 1 月程度遅い結果となった。

図 5-15 は、漏洩位置の推定結果を示す。右図は、実際に現地で回収した汚染土壌の範囲であり、G-1 から G-2 にかけて地下へ漏洩していたことが分かる。一方で、左図は、C3-5 の逆解析における漏洩源位置の確率分布を空間的に示したものである。確率分布は、G-2 周辺で高くなっており、実際の漏洩源と矛盾しない結果が得られている。

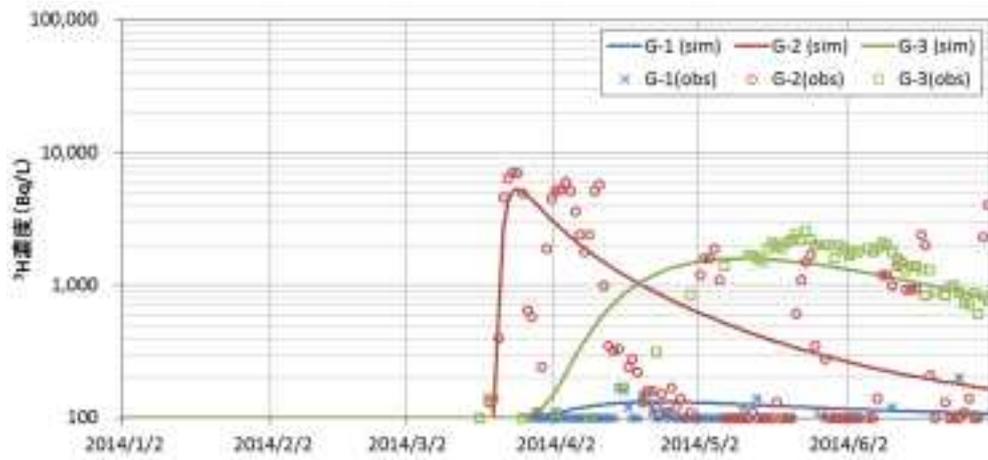
また、図 5-16 は、C3-5 により推定された漏洩開始時間の確率分布であるが、実際の漏洩時間に対応した頻度のピークを得ることはできなかった。これは、観測値に漏洩点直近の G-1 の濃度の上昇が観測されていないことに起因するものと考えられる。

表 5-4 最大尤度時の各未知数の値 (トラブル③ : C3-3~C3-5)

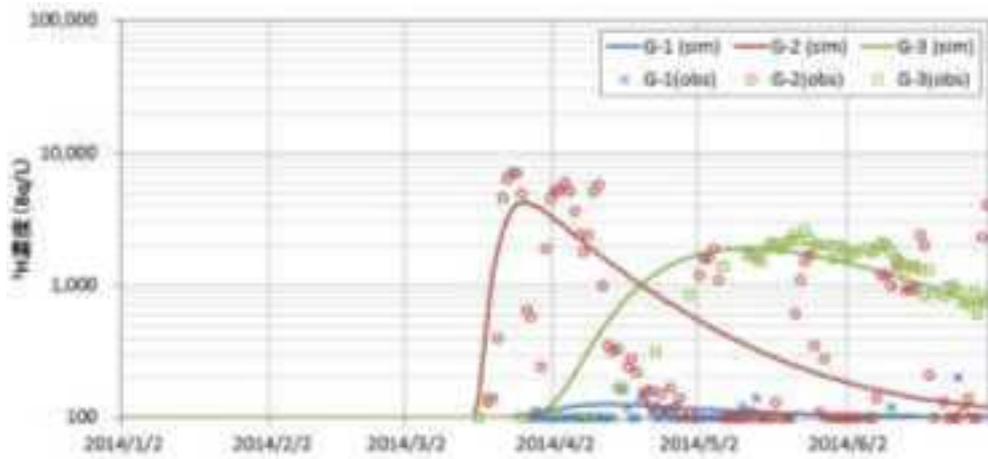
	Q(Bq/d)	T0	T1(day)	V(m/d)	$\alpha L$ (m)	X(m)	Y(m)
C3-3	18393.7	2/10	0.95	1.50	0.65	(19.5)	(85.5)
C3-4	96259.5	3/20	1.08	1.14	13.72	104.5	(85.5)
C3-5	16734.4	3/16	5.80	1.47	9.01	91.5	79.5



(a) C3-3 (漏洩位置固定)



(b) C3-4 (X座標のみ未知数)



(c) C3-5 (XY座標を未知数)

図 5-14 最大尤度時の濃度の経時変化 (トラブル③: 漏洩値の同定)

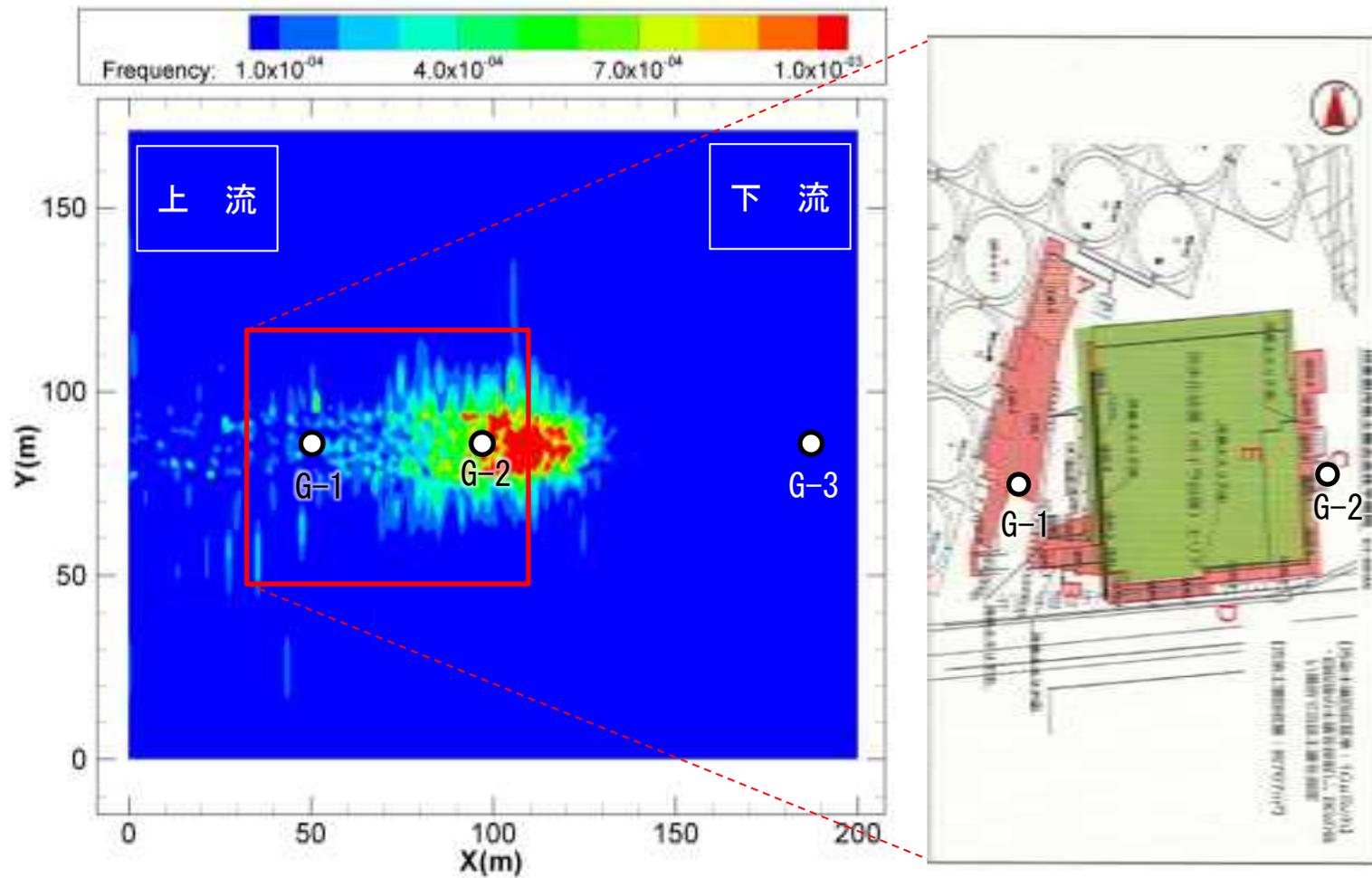


図 5-15 漏洩位置の推定結果 (C3-5)

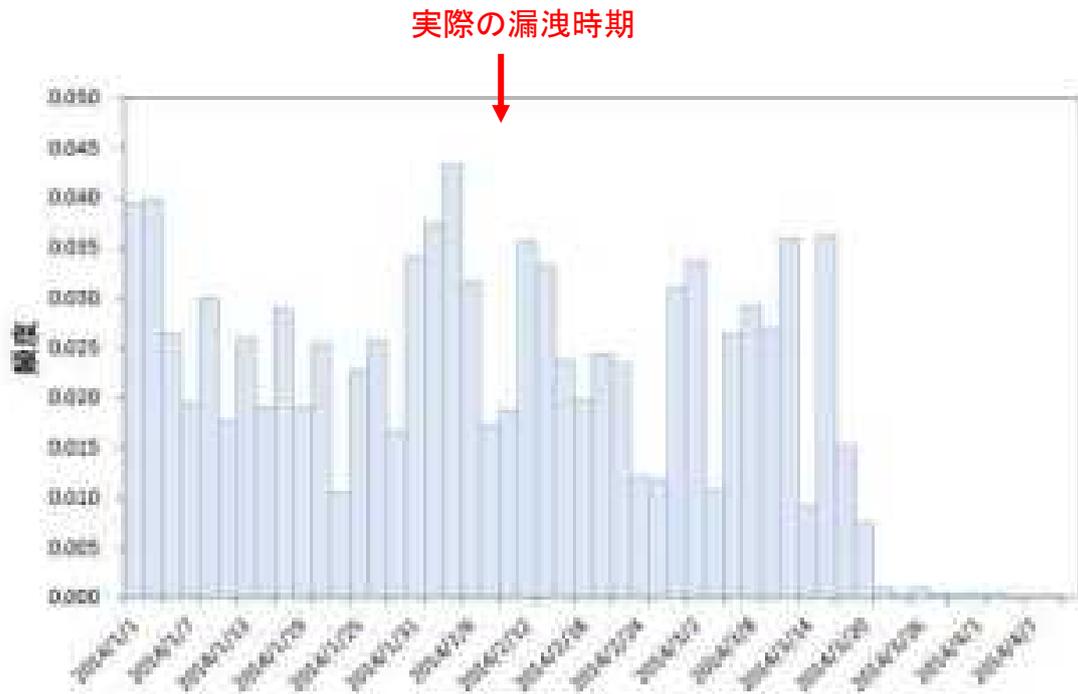
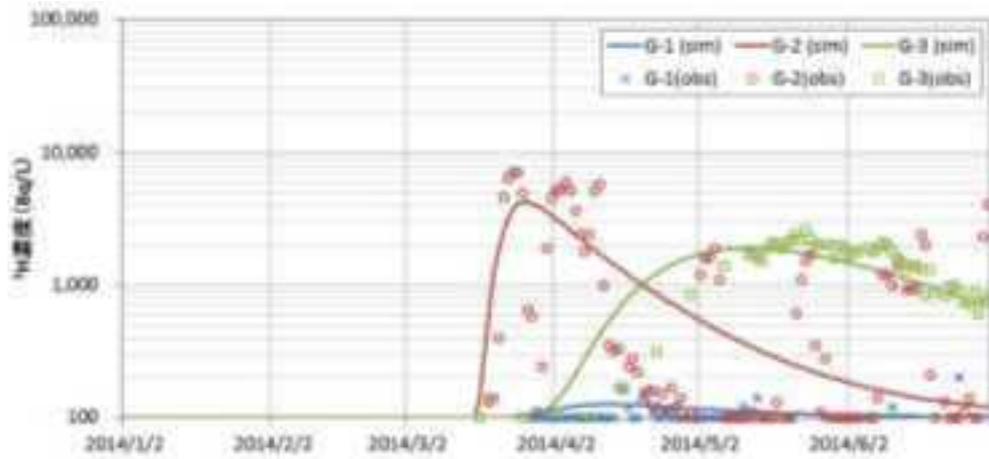


図 5-16 漏洩時間の推定結果 (C3-5)

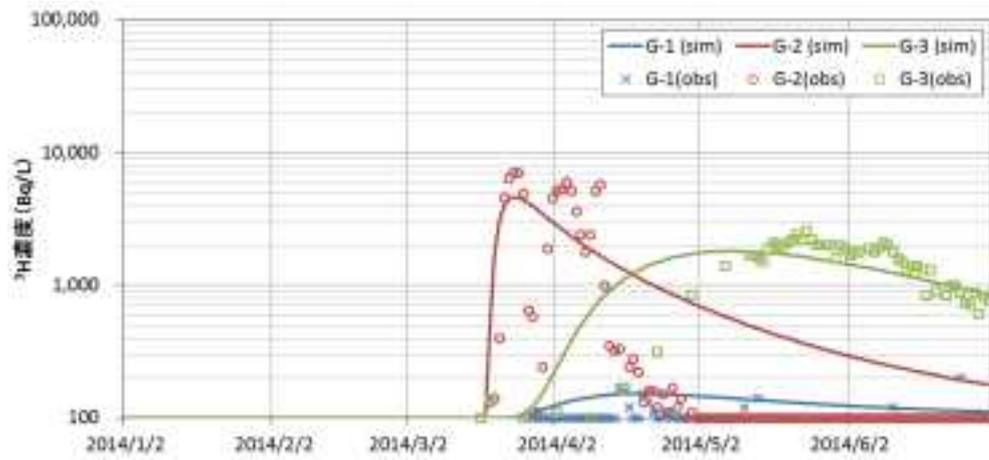
(3) ノイズ除去による影響

G-2 地点では, 2014 年 5 月以降, 濃度が不規則な増加や減少が認められる。そこで, C3-6 では, 前述の C3-5 に対し, 観測値から当該期間の観測値を除去し, 逆解析を実施したものである。

図 5-17 は, 最大尤度における未知パラメータを用いて順解析を実施し, 解析結果と観測値の濃度を比較したものである。図 5-18 は逆解析における漏洩源位置の確率分布を空間的に示したものである。また, 図 5-19 は推定された漏洩開始時間の確率分布である。C3-5 とほぼ同じ結果となっており, ノイズを除去しても再現性が大幅に変化することが無いことから, ロバストな解が得られていると考えられる。



(a) C3-5



(b) C3-6 (観測データのノイズ除去)

図 5-17 最大尤度時の濃度の経時変化 (トラブル③: ノイズ除去)

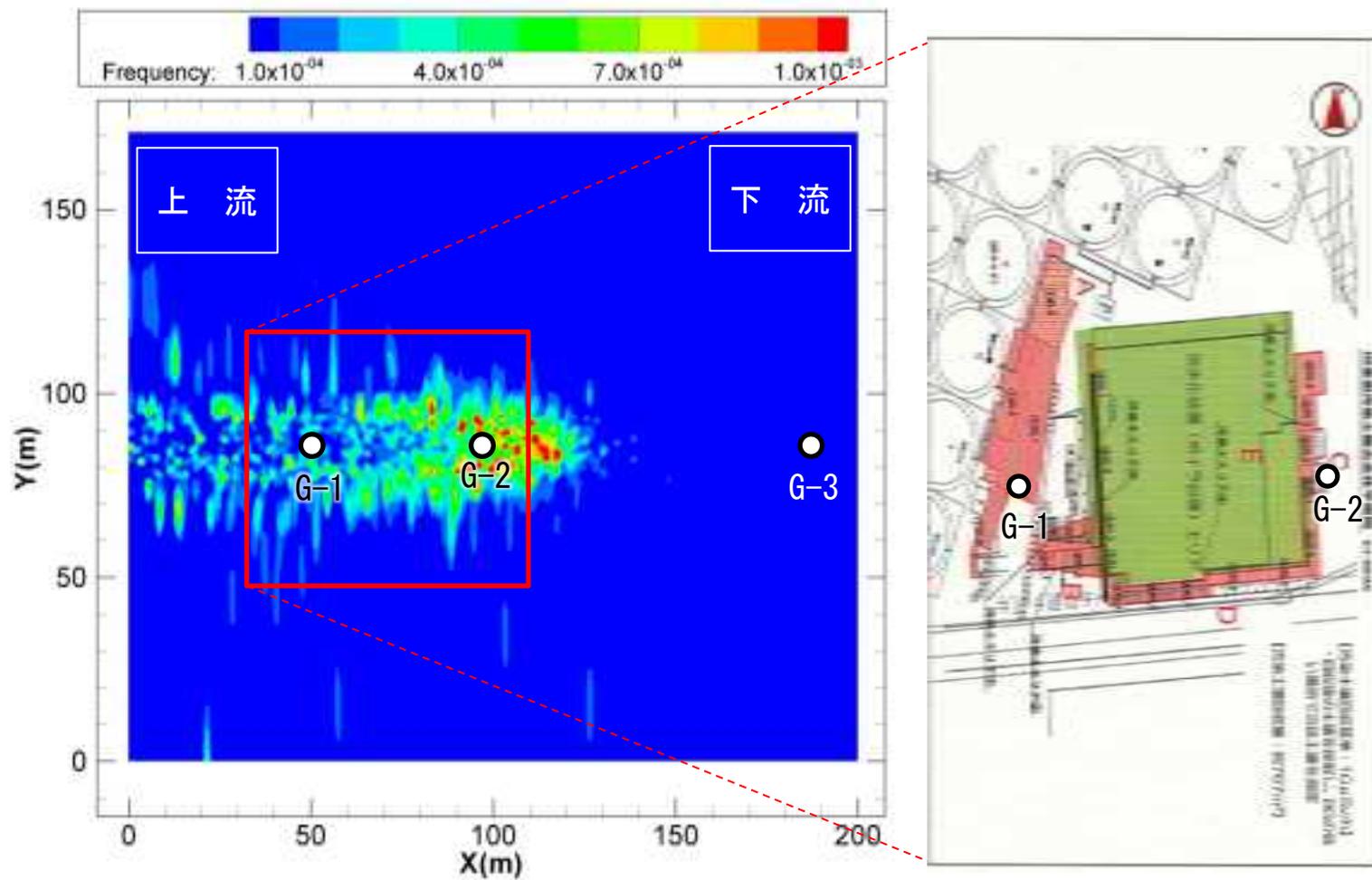


図 5-18 漏洩位置の推定結果 (C3-6)

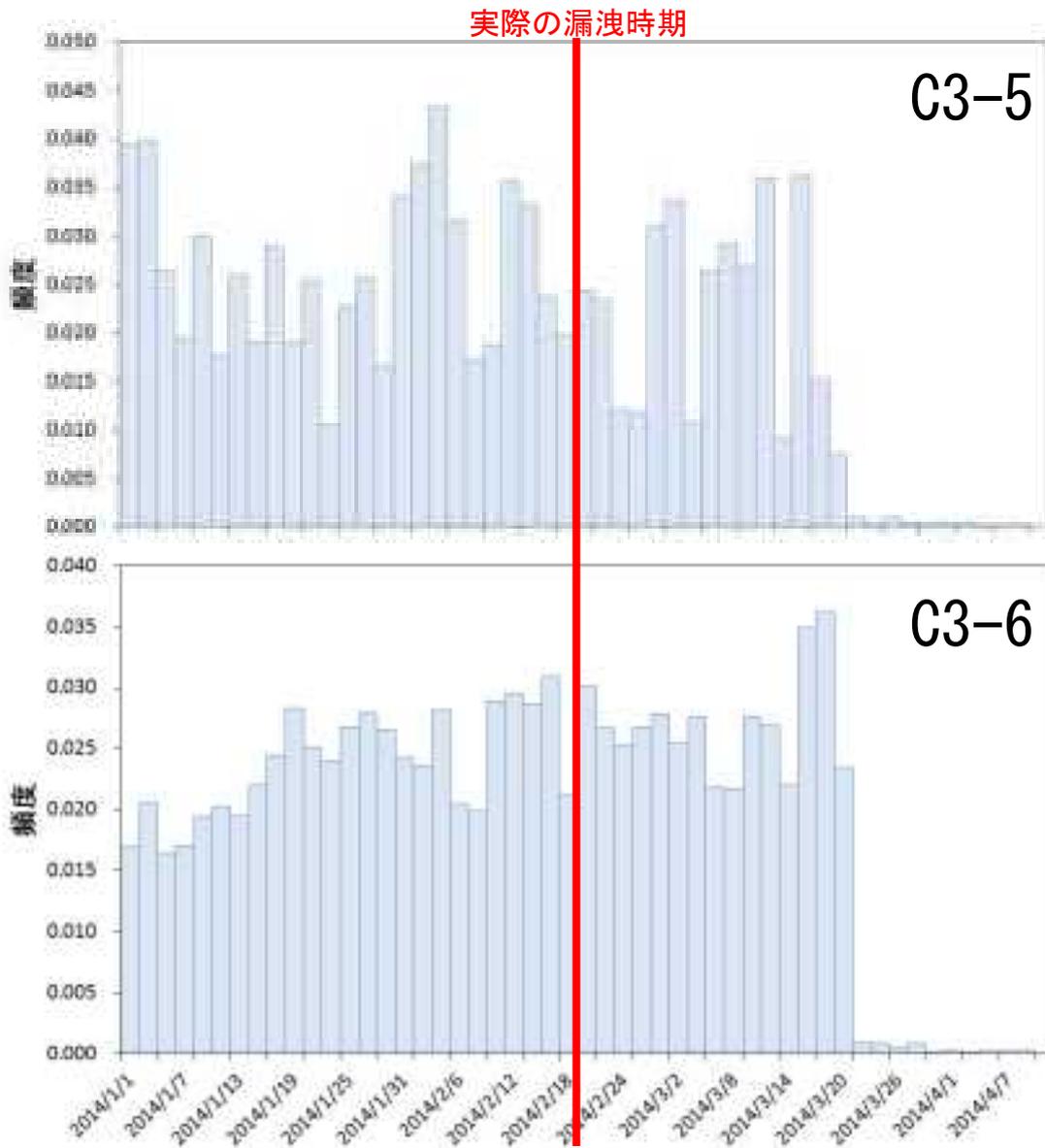


図 5-19 漏洩時間の推定結果 (C3-6)

## 5.3 H6 エリア C1 タンクに関する逆解析の実施

### 5.3.1 対象系のフォワードモデリング

#### (1) 流速場

トラブル③と同様，対象サイト周辺の地下水流動状況を把握するため，既存（地圏環境テクノロジー(2015)）の3次元地下水流動解析による結果を活用した。図 5-20 は，1F サイト周辺の不圧地下水位と地表水・地下水の流動経路を示したものである。動水勾配は，約 0.0423 (m/m)であり，流動方向は海に向かってやや南側に傾いている状況である。

図 5-4 に示す核種濃度の観測井の位置は，漏洩地点からさまざまな方向で配置されている。ここでは，地下水流動場を2次元平面で近似することとし，地下水流同方向の沿った平面格子を作成した。図 5-21 に作成した格子を示す。解析領域は漏洩源から各観測井を包含する範囲として 560m×520m の領域とした。総格子数は 15,743 (=173×91) となった。

### 不圧地下水位等高線



### 流動経路

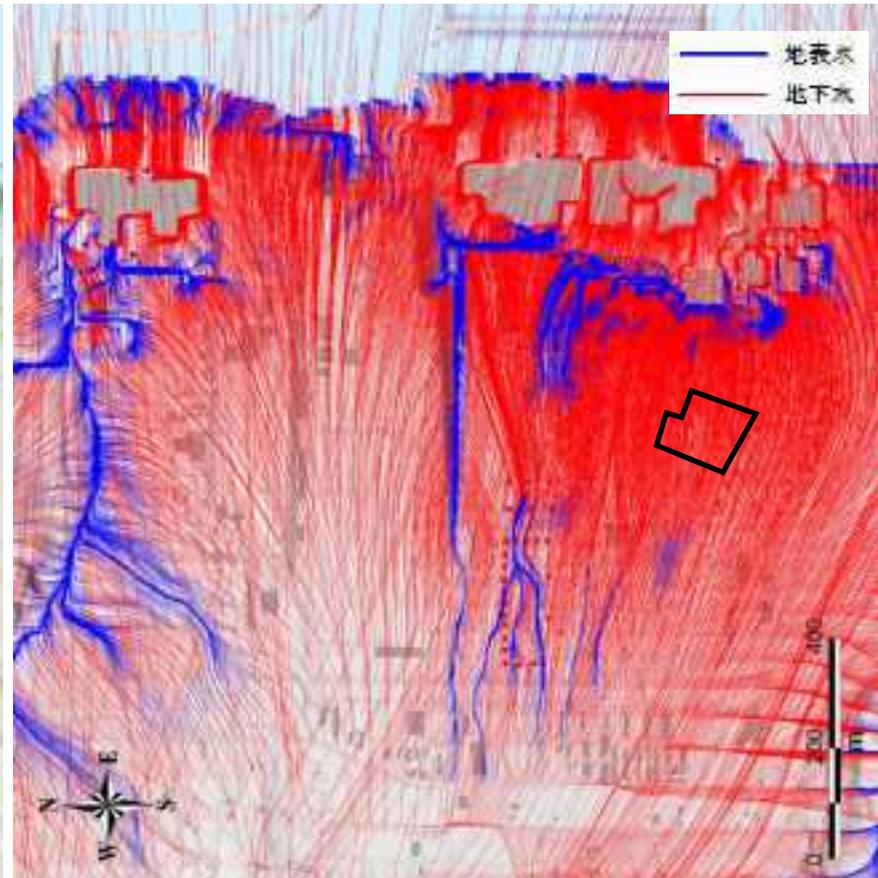


図 5-20 既往解析結果による地下水位と地表水・地下水の流動経路

図出典：地圏環境テクノロジー, 2015. 平成 26 年度 東京電力福島第一原子力発電所敷地内における核種移行解析の妥当性確認のための海水影響等を考慮した試解析—業務報告書—



図 5-21 平面格子モデルと漏洩位置および観測井配置 (トラブル①)

## (2) 濃度場

図 5-6 に示した各観測井の濃度の経時変化を見ると、地下水流動方向に対して、漏えいタンクより上流側の E-2 地点では、 $^3\text{H}$  濃度が一定で推移している。バックグラウンド濃度の 500Bq/L 程度と推察される。漏えいタンク近傍の E-1, E-9, E-10 地点での  $^3\text{H}$  濃度が高く、降雨に対する応答が見られる。また、漏洩タンクからやや離れた、E-3, E-4, E-5, E-7 地点の  $^3\text{H}$  濃度はやや低めで推移している。なお、ここでは示していないが、地下水バイパス揚水井における濃度は、数 100Bq/L 程度であり、濃度の上昇はほとんど認められない。

トラブル①では、2014 年 12 月までの期間の核種濃度の観測データを対象として、観測データを全て使用して逆解析を行うこととした。

本検討では、流速場の計算に MODFLOW96 を、濃度場の計算に MT3DMS 5.3 を使用した。移流項の計算には、3 次 TVD である ULTIMATE を使用し、分散拡散は、完全陰解法を用いた。また、マトリックスソルバーには前処理付き共役勾配法を使用し、前処理には修正不完全コレスキー分解を選択した。分子拡散係数を  $6 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ 、縦分散長を 10m、半減期を 12.3 年とし、遅延（吸着）は考慮しないものとした。 $^3\text{H}$  の初期濃度（バックグラウンドの濃度）は、110Bq/L とした。解析対象期間は 2013 年 6 月日から 2014 年 12 月 31 日とした。

### 5.3.2 逆問題の設計

逆問題の解法は、確率論的手法を用いる。G-1～G-3における<sup>3</sup>H濃度の観測値と解析結果の残差二乗和を尤度関数として用い、対数尤度関数の最大化を行った。

未知変数は、漏洩源位置、漏洩パターン、地下水流動、分散長に関する以下のパラメータとした。

- 漏洩位置座標 : X, Y (m)
  - 漏洩開始時間 : T0 (d)
  - 漏洩継続時間 : T1 (d)
  - 漏洩フラックス : Q0 (Bq/d)
  - 間隙流速 : V(m/d)
  - 縦分散長 :  $\alpha L$ (m)
- } 漏洩源毎に設定

漏洩パターンは、図 5-11 に示すステップ関数で表現し、漏洩開始時間 T0、漏洩継続時間 T1、漏洩フラックス Q0 の 3 つのパラメータで形状を表現した。分散長は、縦分散長を未知数とし、横分散長は縦分散長の 1/10 とした。なお、漏洩源については、複数地点からの核種が地下へ浸透したことが示唆されているため、ここでは、複数地点を想定することとした。

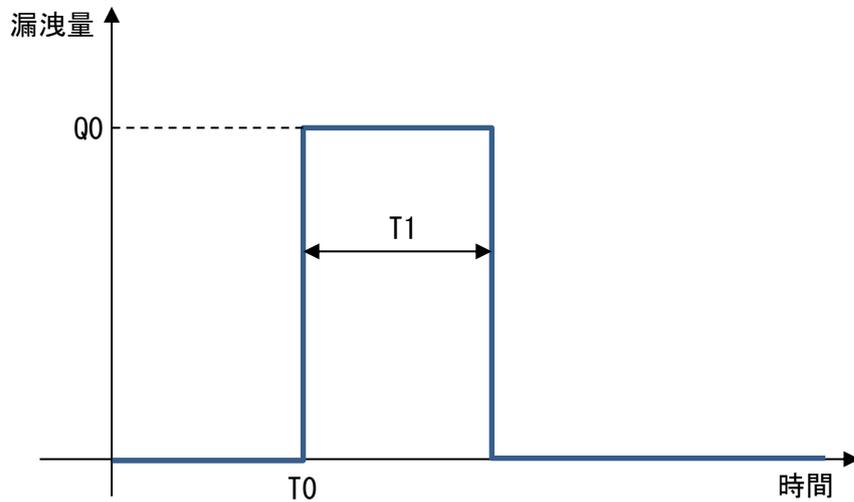


図 5-22 漏洩量の経時変化の与え方と入力パラメータ

### 5.3.3 逆解析のケース設定

表 5-5 逆解析の検討ケース一覧（トラブル①）

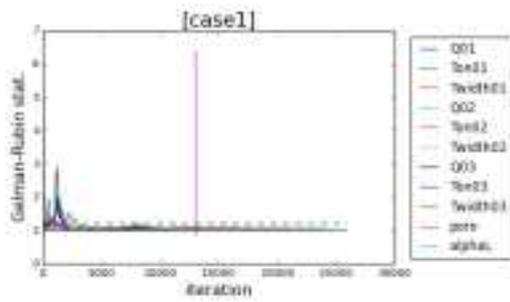
ケース	尤度関数の重み	汚染源数	漏洩源位置	漏洩フラックスの対数変換	観測データ
C1_A1	無	3	固定	無	全データ
C1_A2	有 <sup>1)</sup>	3	固定	無	全データ
C1_B1	無	3	固定	有	全データ
C1_B2	有	3	固定	有	全データ
C1_C1	有	2	未知数	無	全データ
C1_C2	有	2	未知数	有	全データ
C1_D1	有	1	未知数	無	全データ
C1_D2	有	1	未知数	有	全データ
C1_E1	有	1	未知数	有	Group1 <sup>2)</sup>
C1_E2	有	1	未知数	有	Group2 <sup>3)</sup>

- 1) 観測井毎に重みを設定
- 2) 漏洩地点近傍の観測井のみ選定
- 3) 漏洩地点から離れた観測井のみ選定

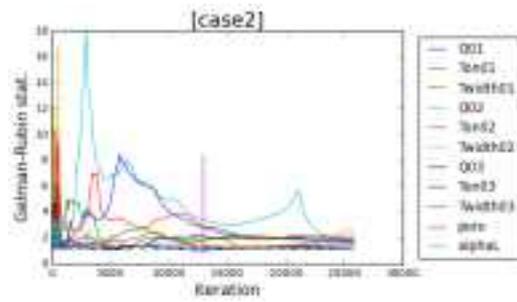
ケース	同定対象とする モデルパラメータ	パラメータ数
C1_A1 C1_A2	■Q1      ■T1      ■Tw1    □X1    □Y1 ■Q2      ■T2      ■Tw2    □X2    □Y2 ■Q3      ■T3      ■Tw3    □X2    □Y2 ■V            ■alpha	11
C1_B1 C1_B2	■Qlog1   ■T1    ■Tw1    □X1    □Y1 ■Qlog2   ■T2    ■Tw2    □X2    □Y2 ■Qlog3   ■T3    ■Tw3    □X2    □Y2 ■V            ■alpha	11
C1_C1	■Q1      ■T1      ■Tw1    ■X1    ■Y1 ■Q2      ■T2      ■Tw2    ■X2    ■Y2 ■V            ■alpha	12
C1_C2	■Qlog1   ■T1    ■Tw1    ■X1    ■Y1 ■Qlog2   ■T2    ■Tw2    ■X2    ■Y2 ■V            ■alpha	12
C1_D1	■Q1      ■T1    ■Tw1    ■X1    ■Y1 ■V            ■alpha	7
C1_D2	■Qlog1   ■T1    ■Tw1    ■X1    ■Y1 ■V            ■alpha	7
C1_E1 C1_E2	■Qlog1   ■T1    ■Tw1    ■X1    ■Y1 ■V            □alpha	6

#### 5.3.4 解析結果

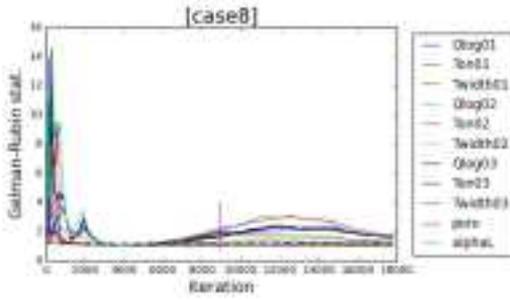
前述で設定した解析ケースに対して、確率論的手法である DREAM を用いて逆解析を実施した。図 5-23 に Gelman-RubinR 統計量による収斂状況を示す。トラブル③と比較して、Gelman-RubinR 統計量の数値が大きく収斂に反復回数を要している。



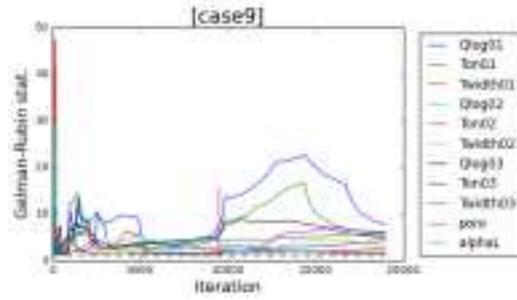
(a) C1\_A1



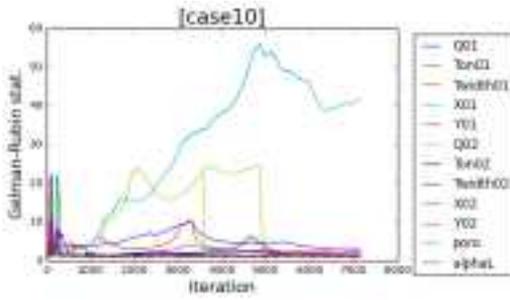
(b) C1\_A2



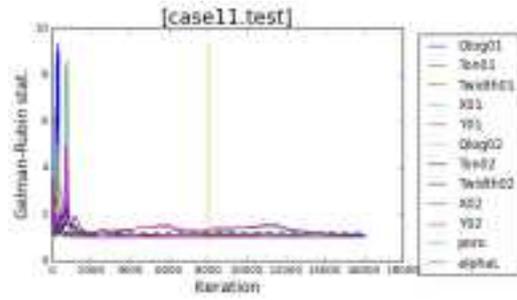
(c) C1-B1



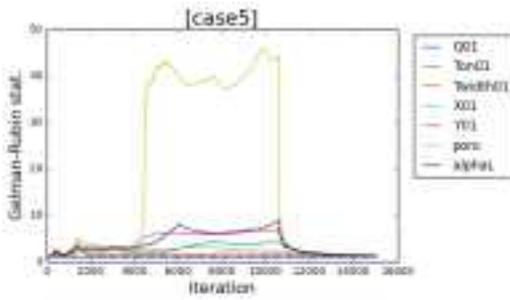
(d) C1\_B2



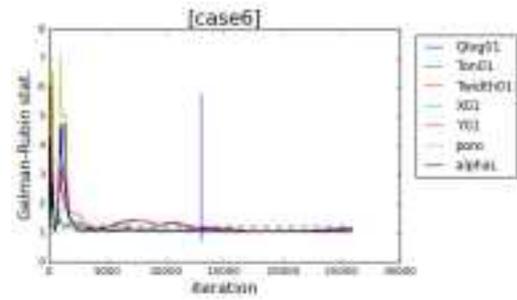
(e) C1\_C1



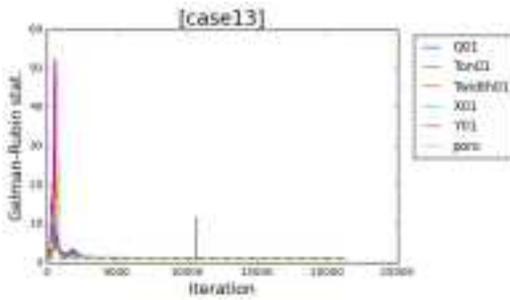
(f) C1\_C2



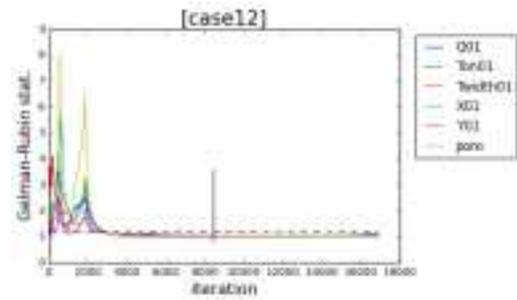
(g) C1\_D1



(h) C1\_D2



(i) C1\_E2



(j) C1\_E1

図 5-23 各ケースの Gelman-Rubin R による収束判定

(1) 尤度関数の重みによる影響把握

まず、未知数を少なくするため、現地調査結果に基づき設定した図 5-24 に示す 3 地点の漏洩箇所を固定した場合の検討を実施した。ここでは、尤度関数に対する重みの設定方法が逆解析への影響を把握するため、前述の C1\_A1 および C1\_A2 を設定した。C1\_A1 は重みを考慮しないケース、C1\_A2 は観測井毎に最大濃度により規格化する重みを設定したケースである。

図 5-23 に示した Gelman-Rubin 統計量を見ると、重みの有無により、解の収斂が大きく異なる。とくに、ケース C1\_A2 は収斂が遅い結果となった。

図 5-25 および図 5-26 は、各観測井における核種濃度の観測値と、表 5-6 に示す各ケースの最大尤度時における未知パラメータを用いて順解析を実施した解析結果を比較したものを示す。重みなしの C1\_A1 は、観測井 E1,E13 の最大濃度を概ね再現出来ているものの、観測濃度が小さい E2 や E6 等では、解析結果は過大評価となっている。一方で、重みを考慮した C1\_A2 は、C1\_A1 とは逆に、観測濃度が隆一展の再現性は悪いが、観測濃度が小さい地点の再現性が良く、濃度が低下する傾向も全体的に再現性は良い。

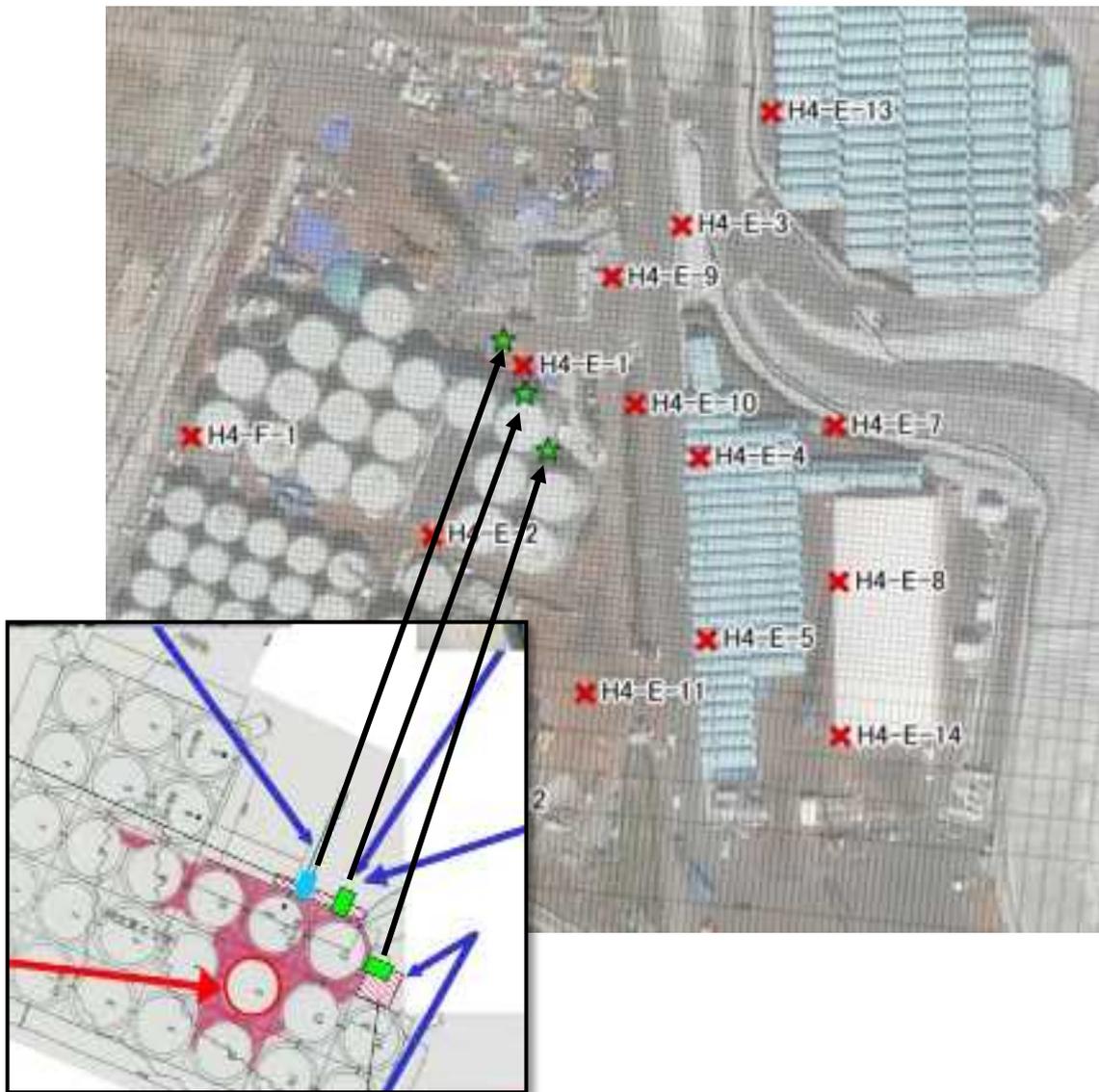


図 5-24 逆解析で設定した漏洩位置

表 5-6 最大尤度時の各未知数の値

漏洩位置	設定値	C1_A1	C1_A2
Source1	Q(Bq/d)	10,093,754	786,024
	T0(d)	12.37	8.87
	T1(d)	0.21	1.38
Source2	Q(Bq/d)	42,030,634	327,660
	T0(d)	95.17	152.08
	T1(d)	4.27	2.45
Source3	Q(Bq/d)	51,181,866	59,522
	T0(d)	117.06	71.05
	T1(d)	12.51	16.34
Transport	V(m/d)	0.015	0.19
	$\alpha L$ (m)	499.65	294.05

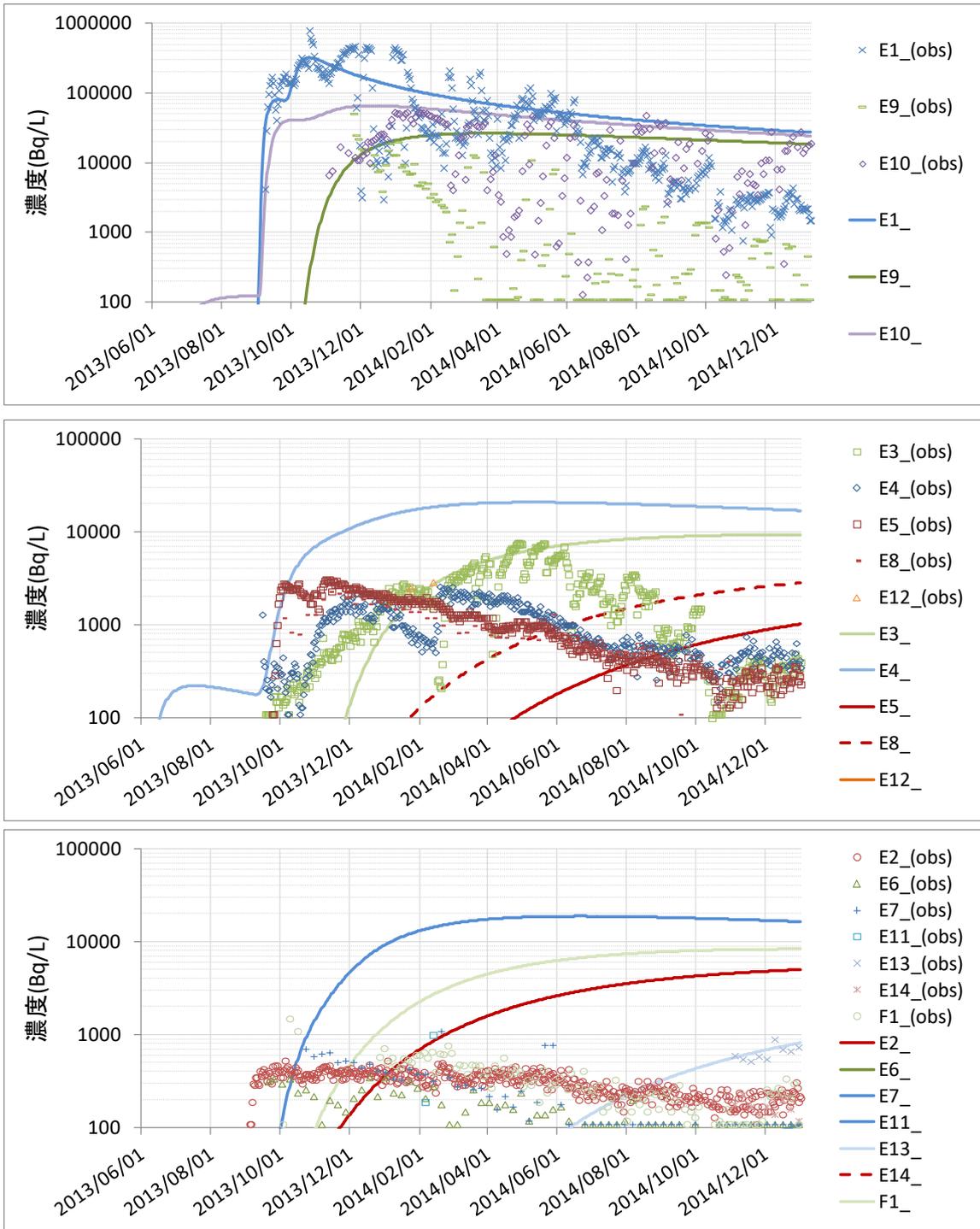


図 5-25 核種濃度の観測値と解析結果の比較（解析結果：C1\_A1 の最大尤度時）

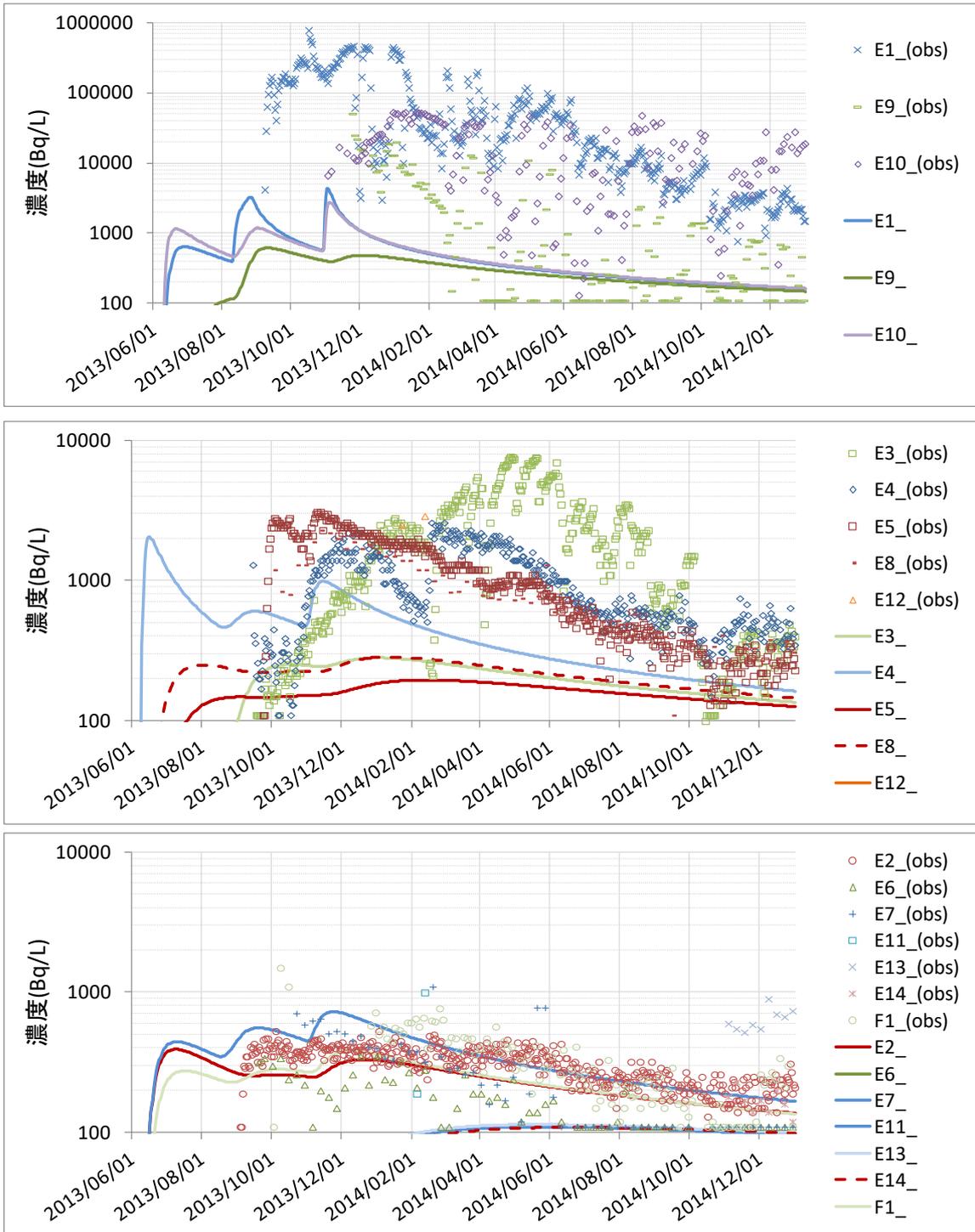


図 5-26 核種濃度の観測値と解析結果の比較 (解析結果 : C1\_A2 の最大尤度時)

## (2) パラメータの対数変換による影響把握

前述の C1\_A1 では、Gelman-Rubin 統計量が速やかに収斂する結果が得られた。イタレーション毎の変数の変化を図 5-27 に示す。左図は C1\_A1 であるが、3 地点の漏洩フラックス  $Q_1, Q_2, Q_3$  がほとんど変化せず、ミキシングがほとんど発生しない結果となっている。そこで、ここでは、漏洩フラックスの対数を未知数として逆解析を実施した。前述の C1\_A1 に対して対数変換したものが C1\_B1, C1\_A2 に対しては C1\_B2 が対応する。

図 5-27 の右図は、漏洩フラックスを対数変換されたパラメータを使用した C1\_B1 のパラメータの経時変化である。対数変換していない C1\_A1 と比較して漏洩フラックスのミキシングは改善されることが分かる。しかしながら、他のパラメータのミキシングは遅くなる傾向が見られる。図 5-28 は、Gelman-Rubin 統計量と対数尤度の経時変化を示す。対数尤度は、対数変換した C1\_B1 の方が大きい値となっており、C1\_A1 よりも C1\_B1 の方がより良い解が得られている。

重みを考慮した場合の結果を、図 5-29 および図 5-30 に示す。重みを考慮していない場合と同様に、対数変換を行ったケースのほうが、大きい尤度の結果が得られた。

以上から、トラブル①の逆解析では、漏洩フラックスに対数変換を行うと、混合が改善されており、大きい尤度の結果が得られた。しかしながら、この傾向は、問題により異なり、規則的ではないと考えられる。解く逆問題ごとに、より良い方を選択する必要がある。

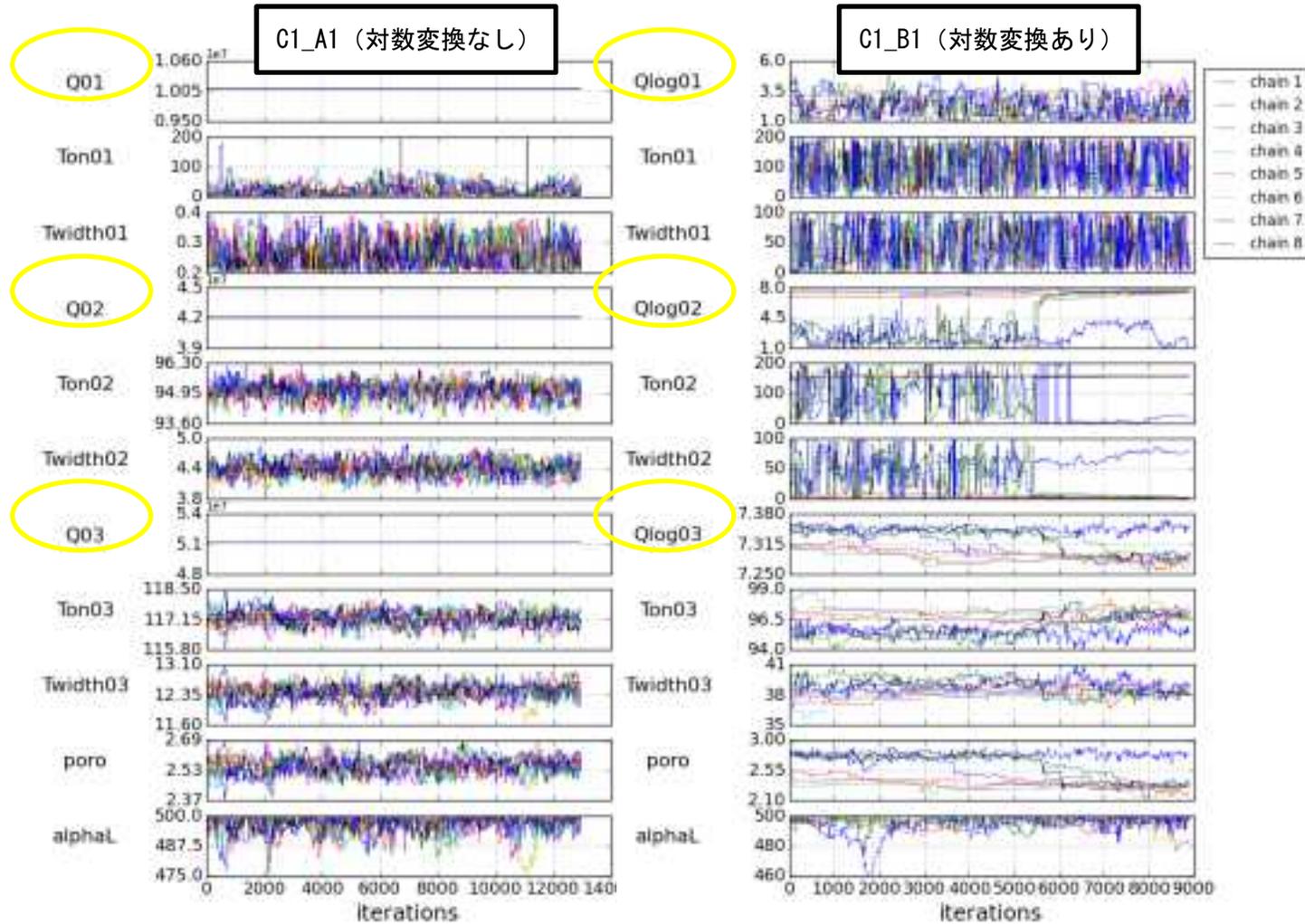


図 5-27 漏洩フラックスの対数変換の有無によるパラメータの変化の比較 (重みなし)

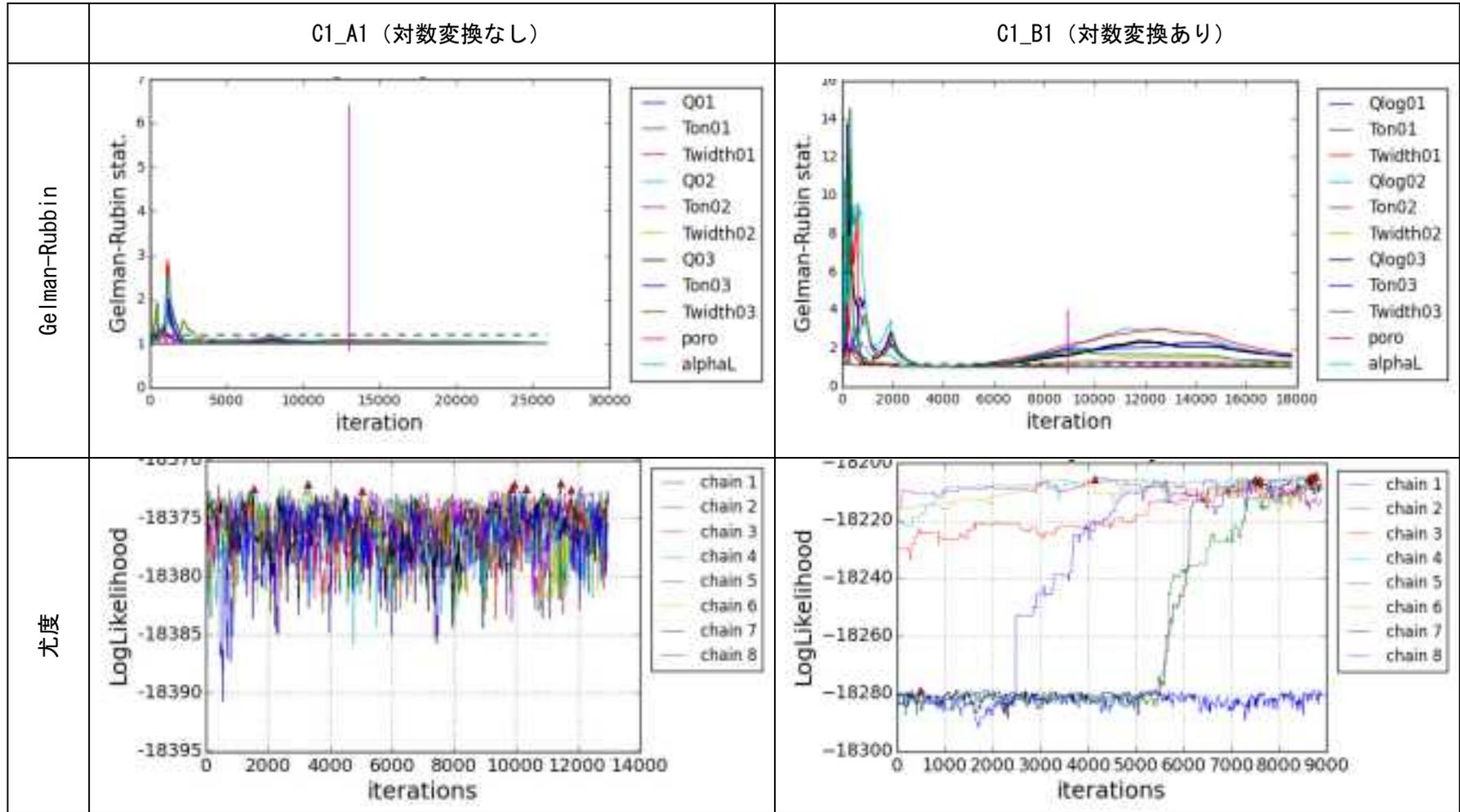


図 5-28 漏洩フラックスの対数変換の有無による収束判定および尤度の比較 (重みなし)

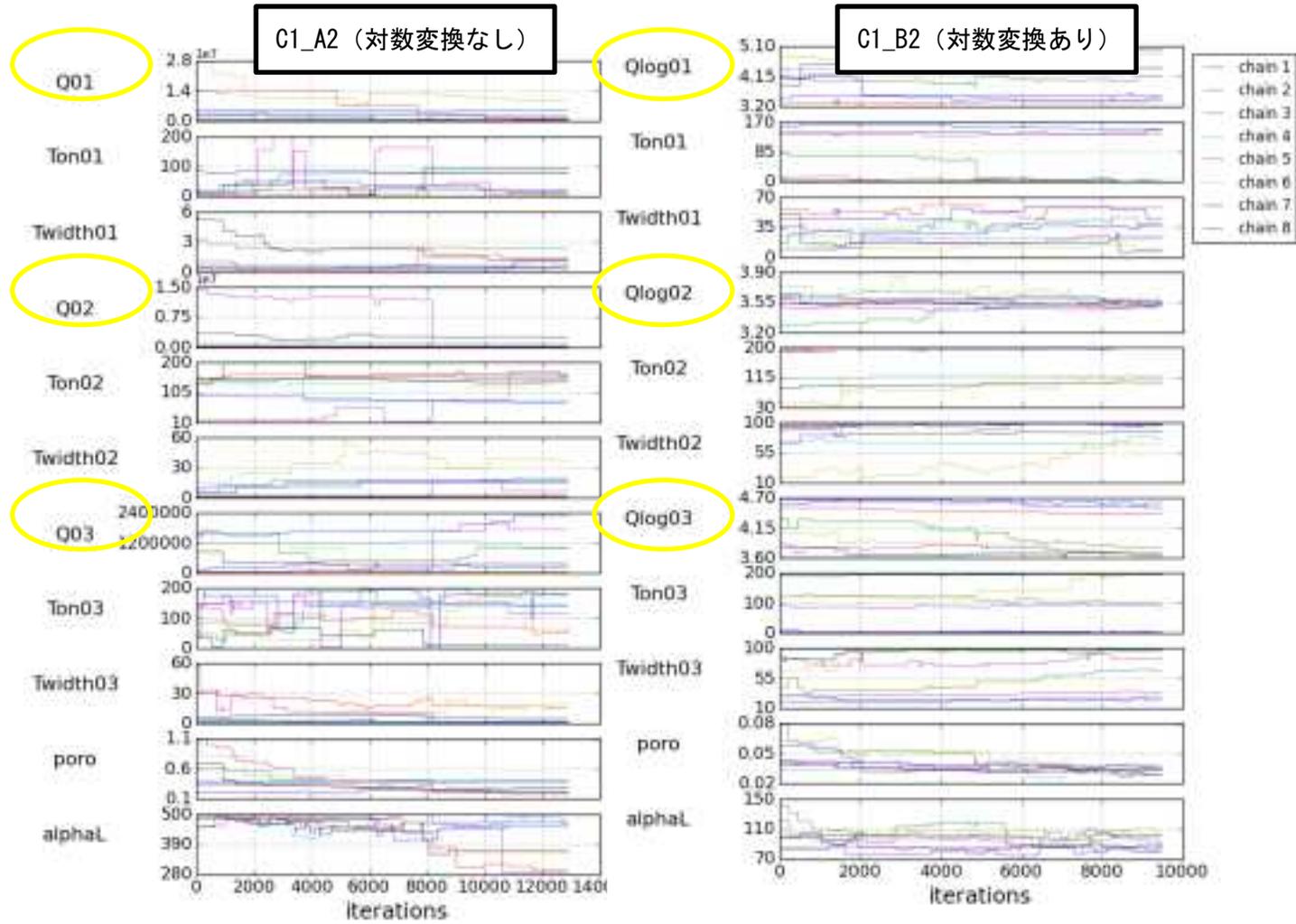


図 5-29 漏洩フラックスの対数変換の有無によるパラメータの変化の比較 (重み考慮)

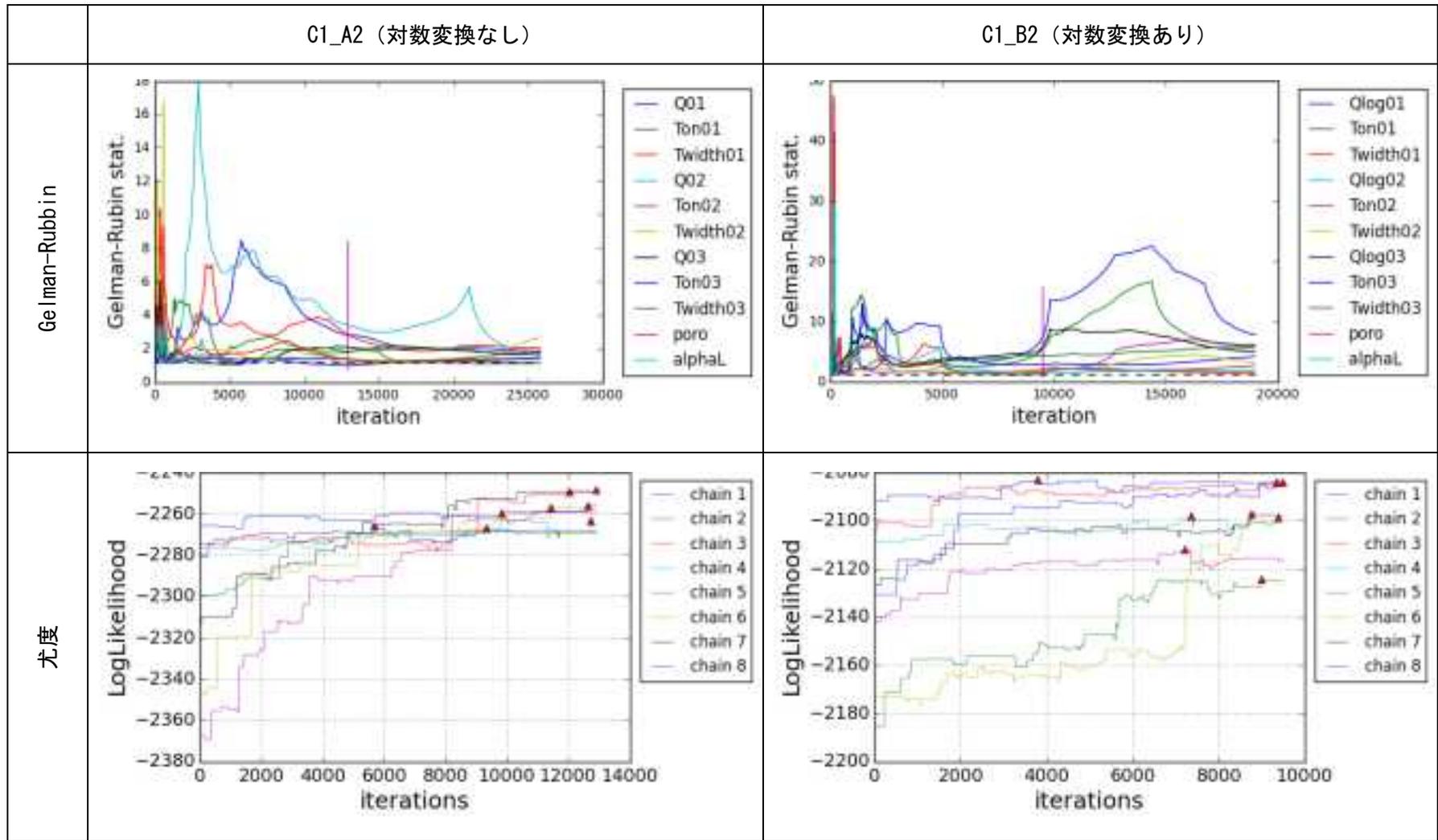


図 5-30 漏洩フラックスの対数変換の有無による収束判定および尤度の比較 (重み考慮)

### (3) 漏洩位置の同定

(1)および(2)の検討より、3つの漏洩源を固定した場合、観測値を再現することは困難であった。ここでは、漏洩位置を未知数に含め、漏洩位置に関する同定を行った。ただし、逆問題が複雑とならないように、自由度を低減させるため、潜在的な漏洩源を2地点とした。漏洩位置については、図 5-31 に示す範囲を制約条件として設定した。

これまでの検討により、漏洩フラックスは対数変換の有無の2ケースとし、尤度関数の重みは考慮することとした。なお、ここでは、対数変換を考慮した C1\_C2のみを示す。図 5-32 および図 5-33 に、設定した2つの漏洩源位置の確率分布を示す。図 5-34 に、最大尤度時の各観測井における核種濃度の経時変化を示す。最も観測された濃度が高い E1 地点付近もしくは上流の漏洩地点の確率分布はほぼゼロとなっており、濃度の経時変化も再現出来ていない。ただし、濃度の全体的な低減傾向は再現出来ている。



図 5-31 漏洩源の位置に関する制約条件 (C1\_C1, C1\_C2)

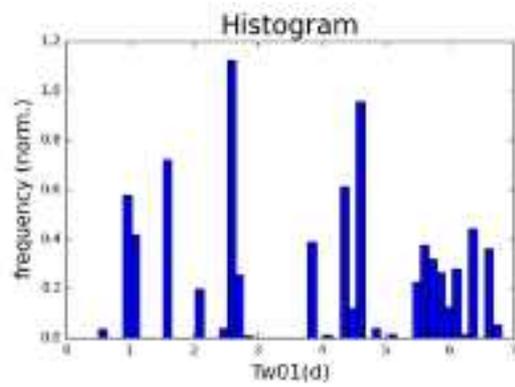
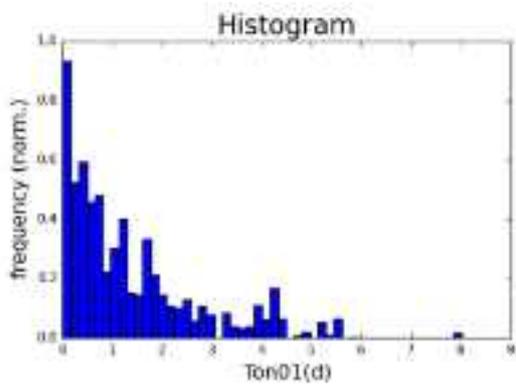


図 5-32 漏洩源の同定結果 (C1\_C2 の漏洩源 1)

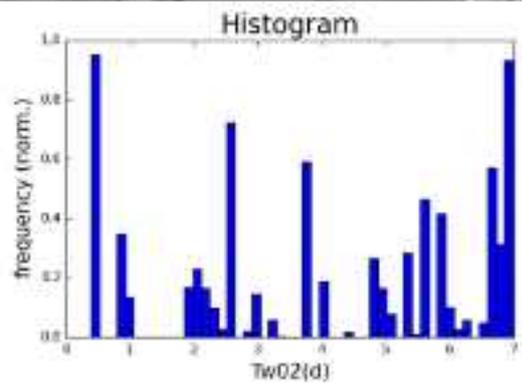
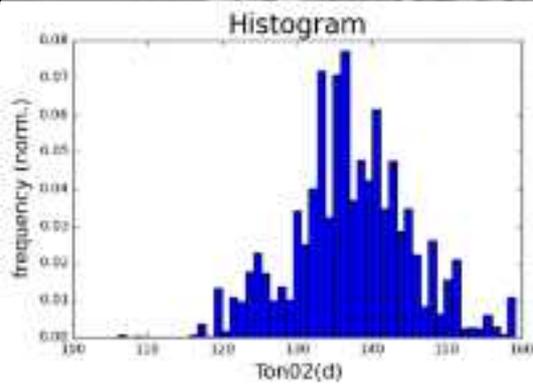


図 5-33 漏洩源の同定結果 (C1\_C2 の漏洩源 2)

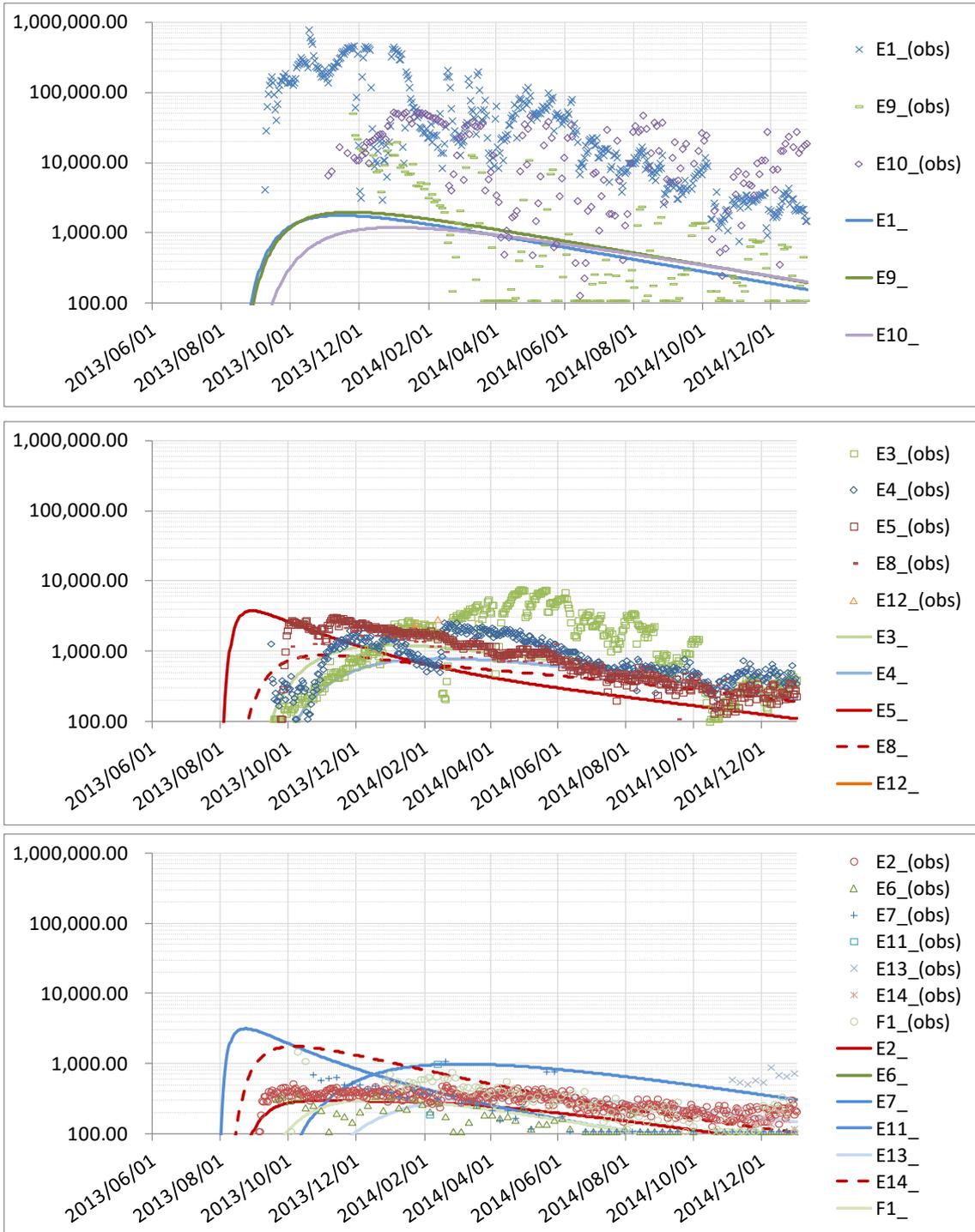


図 5-34 最大尤度時の濃度の経時変化 (C1\_C2)

#### (4) パラメータを減少させた場合

(3)では、高濃度の核種が観測された E1 地点の濃度の再現性が良くない結果となった。その一つの原因として、逆解析の未知数が多く、解の空間が広いため、解が得られない可能性が考えられる。そこで、ここでは、漏洩源の位置を一つにし、パラメータを少なくした場合の再現性の確認を行った。漏洩源の位置は、図 5-35 に示す範囲に限定した。図 5-36 に、最大尤度時の各観測井の核種濃度の経時変化を示す。前ケースと同様、高濃度の E1 は再現出来ず、全体的な濃度の低減傾向は再現する結果となり、適切な解を得ることができなかった。これは、モデル（漏洩源、移行経路）が観測された濃度を説明するのに適切ではないことを示していると考えられる。



図 5-35 漏洩源の位置に関する制約条件 (C1\_D1, C1\_D2)

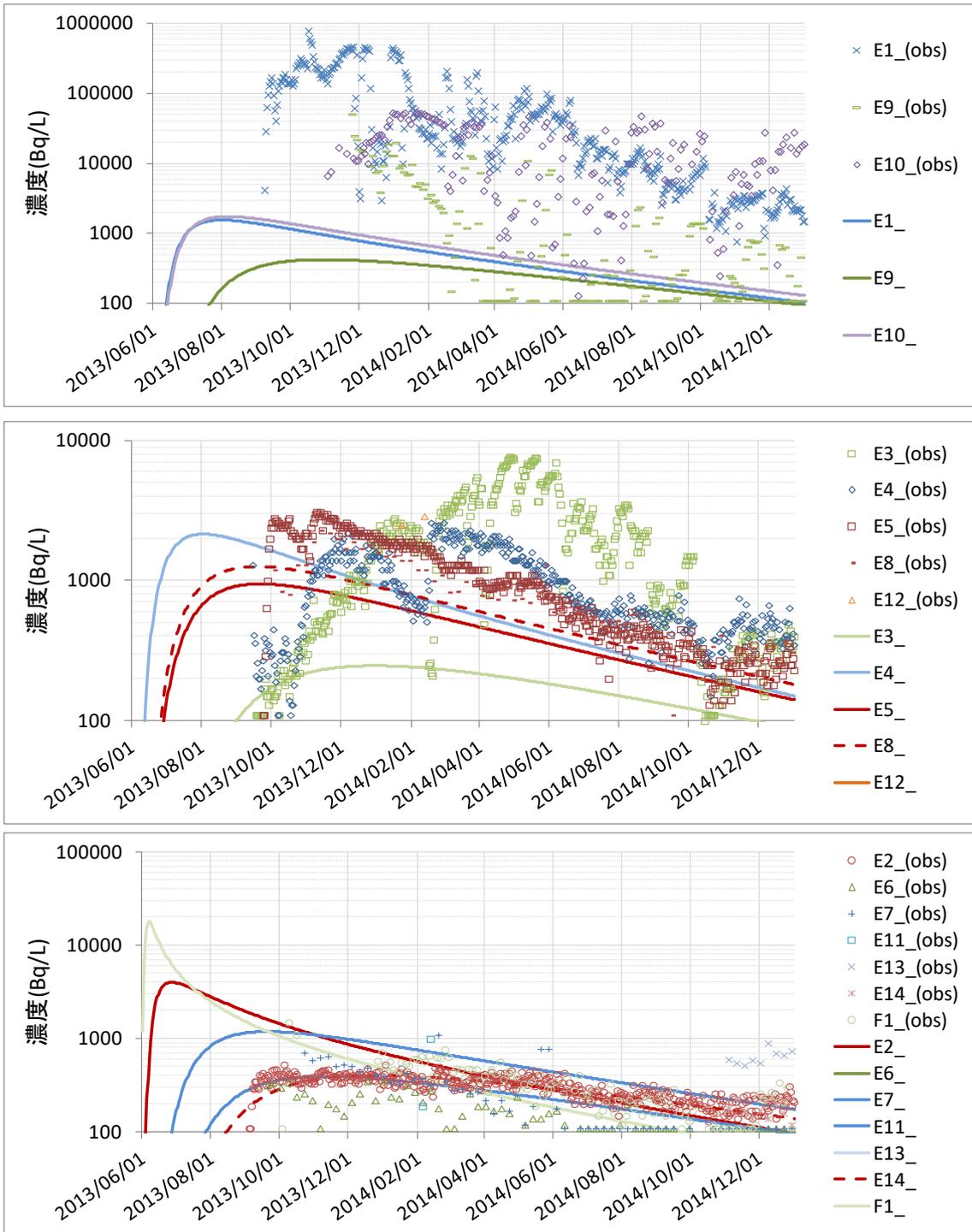


図 5-36 最大尤度時の濃度の経時変化 (C1\_D2)

#### (5) 検証データのグループ分けによる再現性検証

これまでの検討では、高濃度の核種が観測されている E1 等の再現性が悪く、適切な解を得ることができなかった。これは、モデル（漏洩源、移行経路）が観測された濃度を説明するのに適切ではないことを示していると考えられる。

ここでは、観測データを再度分析し、観測データを 2 つのグループに分類した。分類した観測井の配置を図 5-37 に、それらの観測データを図 5-38 に示す。グループ 1 は、漏洩点から近い観測井のグループとした。これらは、E-1 が最も濃度が高く、漏洩源から離れるにつれ、最大濃度が低下し、ピークの時間が遅くなる傾向を示している。一方で、グループ 2 は、漏洩源からやや離れた観測井のグループとし、最大濃度は数千 Bq/L、ピークの時間は 2013 年の 10 月～12 月に表れているものである。

ここでは、グループごとの観測データのみを用いて、逆解析を試みた。グループ 1 のデータのみを対象として逆解析を行ったケースを C1\_E1、グループ 2 のみを対象としたケースを C1\_E2 とした。図 5-39 に、表 5-7 それぞれのケースの最大尤度時における核種の経時変化を示す。また、図 5-40 および図 5-41 に、漏洩源位置の確率分布を示す。これまでの全ての観測データを使用した場合と比較して、それぞれのグループの観測値を再現する解を得ることができた。

しかし、C1\_E1 では、グループ 2 の観測データを過大評価している。これは、グループ 1 の濃度上昇を再現する漏洩源を想定した場合、その下流側に位置するグループ 2 周辺の地下水の核種濃度を上昇させてしまうため、今回設定した逆問題では、両者を満たす解を得ることが難しいことを示している。流動場や漏洩源のモデル化が実態との相違があることを示しており、以下に示す要因などが考えられる。

- 漏洩源
  - 不飽和ゾーンの影響
  - 漏洩パターンの単純化
- 流動場
  - 透水係数・間隙率の不均質性
  - 3 次元的な流動経路
- 観測
  - 掘削による外乱の影響
  - 他のイベントの影響



図 5-37 観測データのグルーピングした範囲

表 5-7 最大尤度時の各未知数の値 (トラブル① : C1\_E1, C1\_E2)

	Q(Bq/d)	T0(d)	T1(d)	V(m/d)	$\alpha$ L(m)	X(m)	Y(m)
C1_E1	2,570,395	2013/7/23	4.63	0.52	10 (fixed)	150	272
C1_E2	446,683	2013/6/2	2.15	0.60	10 (fixed)	146	228

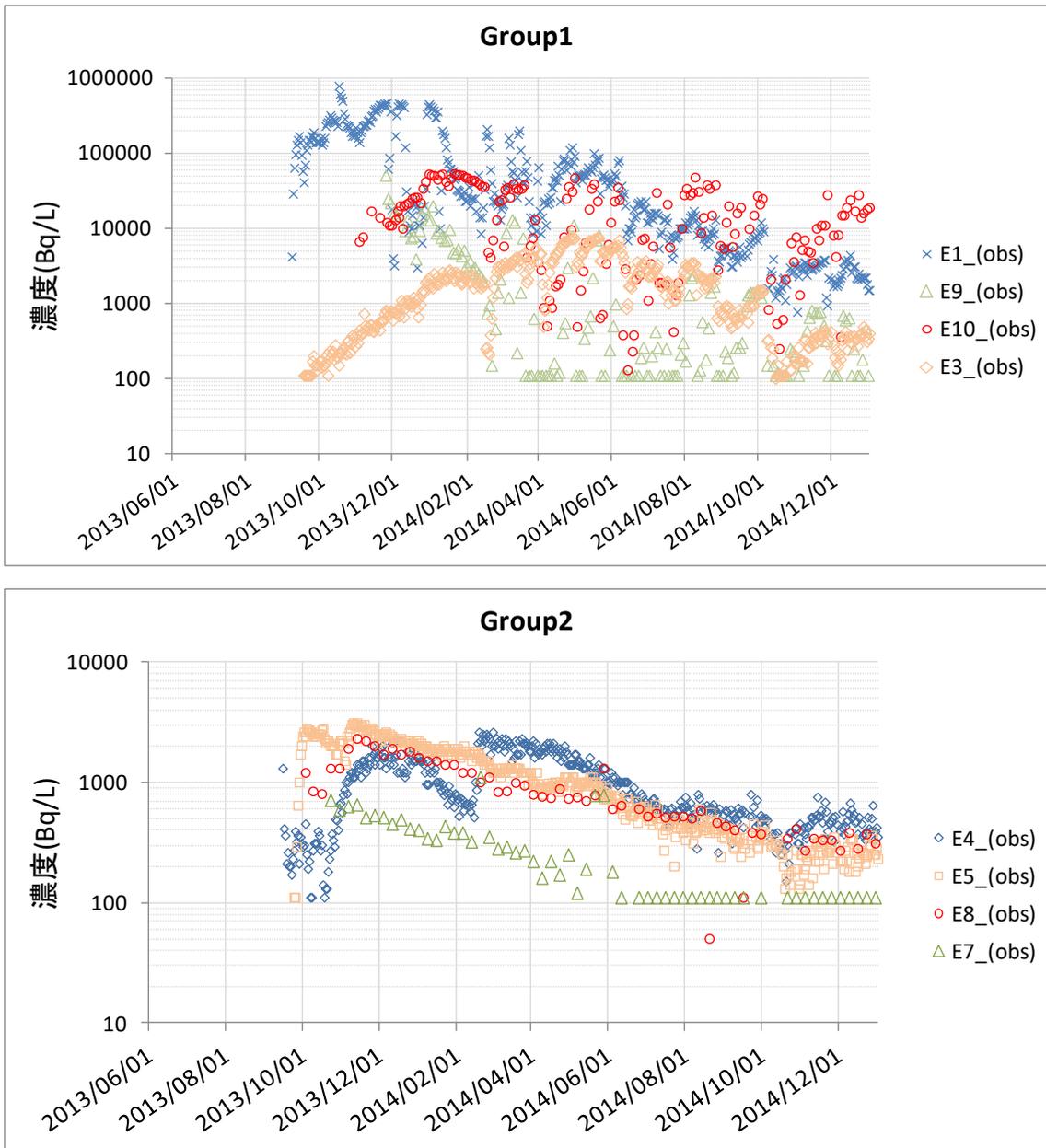


図 5-38 各グループの核種濃度の経時変化

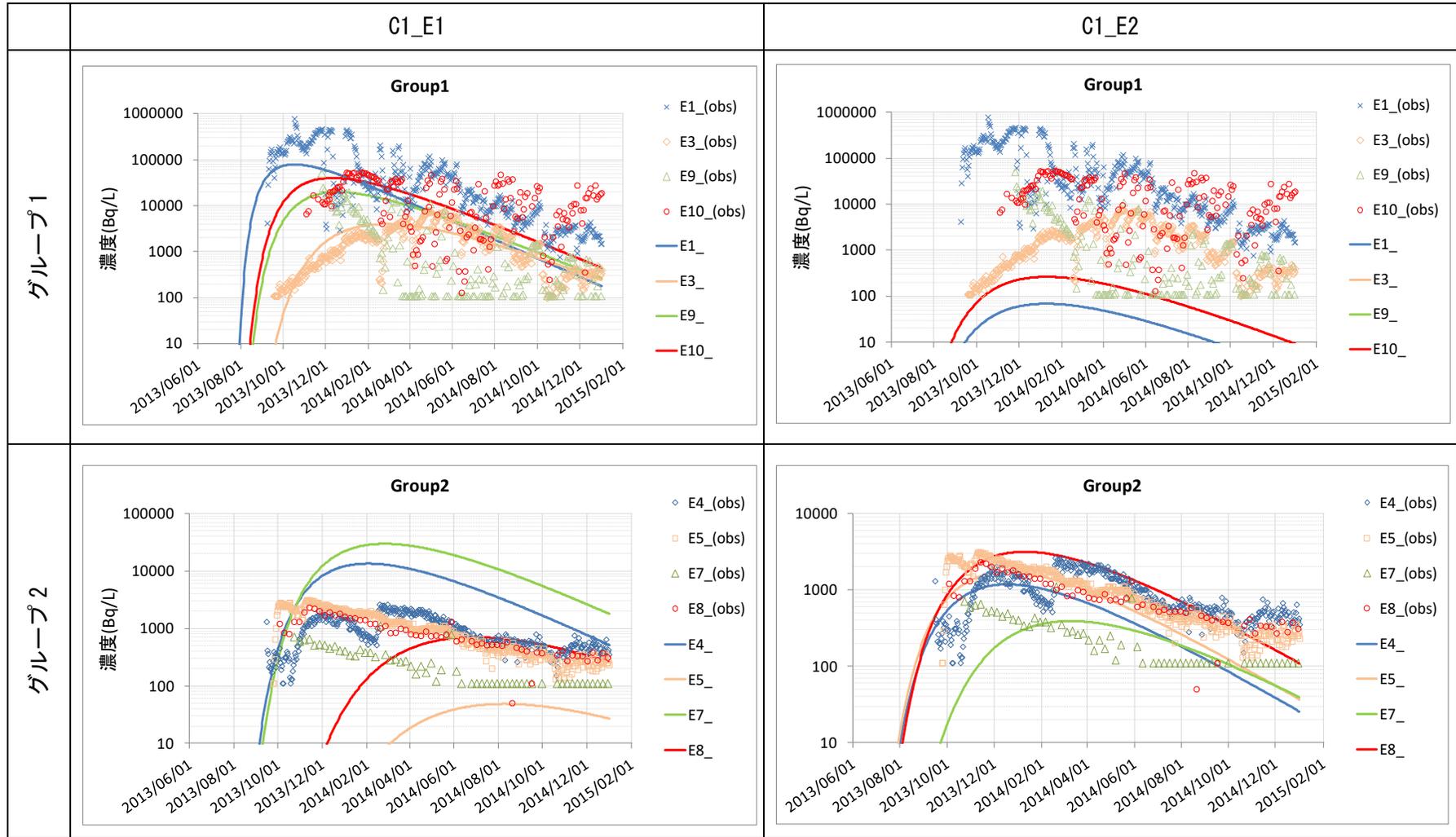


図 5-39 最大尤度時の濃度の経時変化 (C1\_E1, C1\_E2)

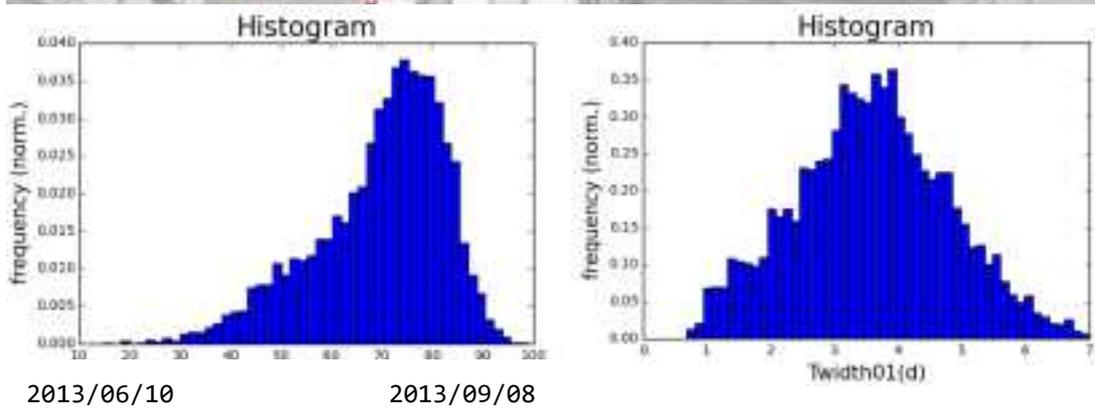
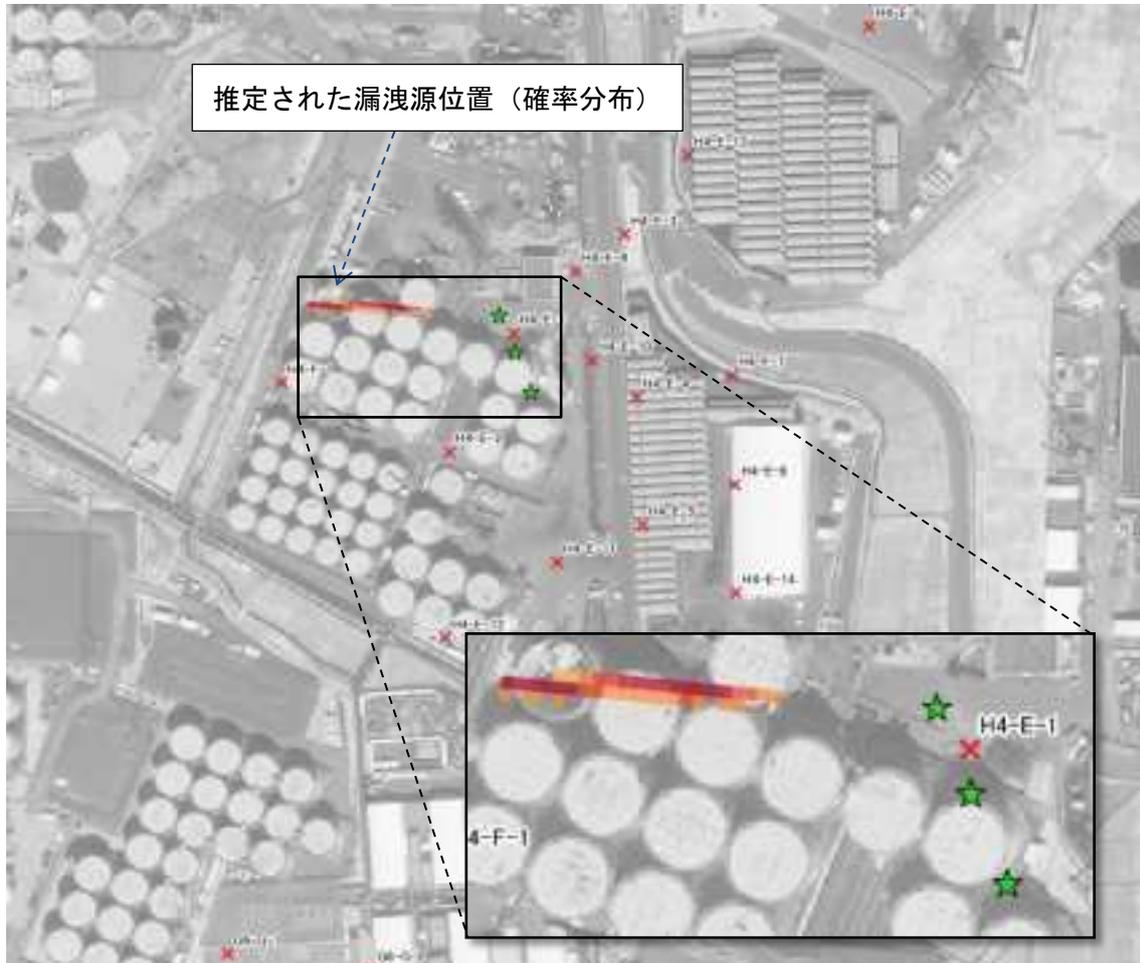
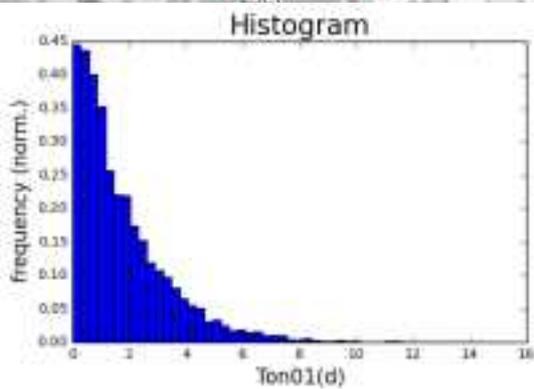
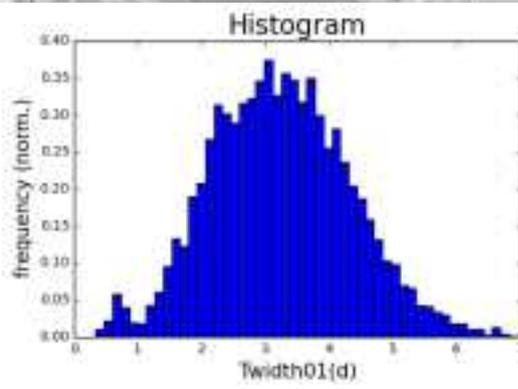


図 5-40 漏洩源の同定結果 (C1\_E1, グループ 1)



2013/06/01



2013/06/16

図 5-41 漏洩源の同定結果 (C1\_E2, グループ 2)

## 5.4 選定手法の適用性評価

本事業では、文献調査により選定した MCMC 法の一つである DREAM を導入した。本手法は、漏洩源の位置や漏洩フラックスなど、未知変数と設定したパラメータの確率分布を提示できる点が特徴である

簡易モデルおよび実フィールドデータを用いて、導入した手法の適用性を確認し、概ね良い再現性を得ることができた。尤度関数の重みの設定方法にもよるが、観測ノイズに対して影響はあまり受けず、堅牢であり、実フィールド問題に対しても問題なく逆解析を適用出来ることが分かった。

実フィールドデータを用いた予察的な検討では、流動場や観測データに不整合・矛盾があると、適切な解が得られない場合があった。この場合、データを分析し、選別するなど逆問題を適切に設定することが重要である。また、数万回程度の順計算が必要であり、メッシュ数が多くなるような系（3次元問題）などでは計算時間の制限を受けするため、実用的な時間で終了させるための工夫が必要となる場合がある。また、今回は UCODE2014 により逆解析手法を導入したが、ユーザーインターフェースがテキストベースであり、ユーザビリティはあまり良くなく、改善が必要である。

今回は、導入した逆解析手法について、簡易モデルによる検証や実フィールド問題に対する予察的な検討を行うため、簡略化した点も多い。今後、漏洩源、移行経路、逆解析手法に関して、以下点の高度化を図る必要がある。

- 漏洩源
  - 漏洩フラックスの時間変化の詳細化（自由な時間変化形状を推定）
  - 漏洩位置の先見情報の組み込み
  
- 移行経路
  - 不飽和帯や不均質性の考慮
  - サロゲートモデルの導入
  - 観測
  - 観測網の最適配置
  
- 逆解析手法
  - リアルタイム・ブラインドテスト
  - MCMC の収斂性の改善(DRAM, HMC, tempered MCMC, ...)
  - 重み最適化(observation selection, adaptive error)
  - ユーザビリティの向上

## 6. まとめ

本事業では、地下水中の核種濃度の有意な上昇が検知された場合を想定し、核種濃度等の観測結果に基づき、汚染源として可能性が高いと考えられる箇所や漏えい期間、核種移行パラメータの取り得る範囲（分布・ばらつき等）といった地下水中の概略的な核種移行状況を類推するための逆解析法に関する知見の整理を行った。

まず、逆解析法に関する既往の主な研究・検討事例やフィールドへの適用事例を収集し、それぞれの逆解析法の特徴をふまえた分類・整理を行った。文献調査結果によると、現状の逆解析では、2次元モデルが主流であることが分かった。これは、逆解析において、多数の順解析を実施するの必要があり、順解析の演算時間がボトルネックとなるためである。また、逆解析手法には従来から検討されている決定論的手法のほかに、近年では計算機の高性能化とともにマルコフ過程モンテカルロ計算（MCMC）などに代表される確率論的手法の研究も多く報告されてきていることも分かった。確率論的手法は、観測データが少ない場合や誤差が多く含まれている場合、逆問題が Ill-posed となることや安定な解が存在しないことが想定される。そのため、未知数の確率分布を得ることができる確率論的手法の整備が有用であると考えられる。

文献調査の結果を踏まえ、地下水中の概略的な核種移行状況を類推するための逆解析法として、確率論的手法であるマルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）法の一種である DREAM を採用することとした。ここでは、順解析モデル、逆解・最適化解析法、感度解析、不確実性解析から構成されるフレームワーク及びツールを UCODE\_2014 を利用して逆解析が実施できる環境を導入した。核種漏洩を想定した 1次元及び 2次元の核種移行問題を設定し、逆解析手法、漏洩源の数、観測点数、観測誤差、次元の違いを考慮した逆解析を実施し、構築ツールの基本的な動作が適切であることを確認した。特に、2地点の漏洩源による観測井における破過曲線を検証データとした場合、その中間地点の 1地点から漏洩する場合の確率分布も高く推定され、確率論的手法の優位性を確認することができた。

また、1Fモニタリングデータに基づく実事例を 2つ選定し、導入した逆解析法の適用性に関する予察的検討を行った。1つの事例に対しては、概ね良い再現性を得ることが出来たが、一方の事例に対しては、逆問題の定義によっては、適切な解を得ることが困難な場合があった。これは、観測データ含まれる外乱や、流動場の不確実性によるものと考えられる。逆解析の実施者がデータを分析し、使用する観測情報を選別するなど逆問題を適切に設定することが重要であることが分かった。

付録

付録1 収集論文一覧

No.	著者	発行年	文献名
1	Amirabdollahian, M., & Datta, B.	2013	Identification of contaminant source characteristics and monitoring network design in groundwater aquifers: an overview
2	Aral, M. M., Guan, J., & Maslia, M. L.	2001	Identification of contaminant source location and release history in aquifers
3	Atmadja, J., & Bagtzoglou, A. C.	2001	Pollution source identification in heterogeneous porous media
4	Atmadja, J., & Bagtzoglou, A. C.	2001	State of the art report on mathematical methods for groundwater pollution source identification
5	Ayvaz, M. T.	2010	A linked simulation-optimization model for solving the unknown groundwater pollution source identification problems
6	Ayvaz, M. T.	2016	A hybrid simulation-optimization approach for solving the areal groundwater pollution source identification problems
7	Bagtzoglou, A. C., Atmadja, J.	2005	Mathematical methods for hydrologic inversion: The case of pollution source identification
8	Bagtzoglou, A. C., Dougherty, D. E., & Tompson, A. F.	1992	Application of particle methods to reliable identification of groundwater pollution sources
9	Butera, I., Boano, F., Revelli, R., & Ridolfi, L.	2013	Recovering the Release History of a Pollutant Intrusion into a Water Supply System through a Geostatistical Approach
10	Butera, I., Tanda, M. G., & Zanini, A.	2013	Simultaneous identification of the pollutant release history and the source location in groundwater by means of a geostatistical approach
11	Chadalavada, S., Datta, B., & Naidu, R.	2011	Optimisation approach for pollution source identification in groundwater: an overview
12	Chadalavada, S., Datta, B., & Naidu, R.	2012	Optimal identification of groundwater pollution sources using feedback monitoring information: a case study
13	Choi, W. J., Lee, S. M., & Ro, H. M.	2003	Evaluation of contamination sources of groundwater NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> using nitrogen isotope data: A review
14	Cole, C. R., Bergeron, M. P., Wurstner, S. K., Thorne, P. D., Orr, S., & Mckinley, M. I.	2001	Transient Inverse Calibration of Hanford Site-Wide Groundwater Model to Hanford Operational Impacts-1943 to 1996.
15	Cristo, C. D., & Leopardi, A.	2008	Pollution source identification of accidental contamination in water distribution networks
16	Cupola, F., Tanda, M. G., & Zanini, A.	2015	Laboratory sandbox validation of pollutant source location methods
17	Dai Z., Samper J.	2006	Inverse modeling of water flow and multicomponent reactive transport in coastal aquifer systems
18	Datta, B., & Kourakos, G.	2015	Preface: Optimization for groundwater characterization and management
19	Datta, B., Chakrabarty, D., & Dhar, A.	2009	Simultaneous identification of unknown groundwater pollution sources and estimation of aquifer parameters
20	Datta, B., Chakrabarty, D., & Dhar, A.	2011	Identification of unknown groundwater pollution sources using classical optimization with linked simulation
21	Datta, B., Prakash, O., Cassou, P., & Valetaud, M.	2014	Optimal Unknown Pollution Source Characterization in a Contaminated Groundwater Aquifer-Evaluation of a Developed Dedicated Software Tool
22	Duffy, C. J., & Brandes, D.	2001	Dimension reduction and source identification for multispecies groundwater contamination
23	Efstratiadis, A., & Koutsoyiannis, D.	2010	One decade of multi-objective calibration approaches in hydrological modelling: a review
24	Ertel, T [Ed.]	2011	FOKS Handbook for Integral Groundwater Investigation. Toolbox for the identification of key sources of groundwater contamination
25	Gorelick, S. M.	1983	A review of distributed parameter groundwater management modeling methods
26	Gorelick, S. M., Evans, B., & Remson, I.	1983	Identifying sources of groundwater pollution: an optimization approach
27	Guan, J., Aral, M. M., Maslia, M. L., & Grayman, W. M.	2006	Identification of contaminant sources in water distribution systems using simulation-optimization method: case study
28	Gzyl, G., Zanini, A., Fraczek, R., Kura, K.	2014	Contaminant source and release history identification in groundwater: a multi-step approach

No.	著者	発行年	文献名
29	Hart, W. E., & Murray, R.	2010	Review of sensor placement strategies for contamination warning systems in drinking water distribution systems
30	Hazart, A., Giovannelli, J. F., Dubost, S., & Chatellier, L.	2014	Inverse transport problem of estimating point-like source using a Bayesian parametric method with MCMC
31	Hu, C., Zhao, J., Yan, X., Zeng, D., & Guo, S.	2015	A MapReduce based Parallel Niche Genetic Algorithm for contaminant source identification in water distribution network
32	Jha, M., & Datta, B.	2012	Application of simulated annealing in water resources management: optional solution of groundwater contamination source characterization problem and monitoring network design problems
33	Jha, M., & Datta, B.	2013	Three-dimensional groundwater contamination source identification using adaptive simulated annealing
34	Jha, M., & Datta, B.	2014	Linked simulation-optimization based dedicated monitoring network design for unknown pollutant source identification using dynamic time warping distance
35	Khorsandi, M., Haddad, O. B., & Mariño, M. A.	2015	Application of Data-Driven and Optimization Methods in Identification of Location and Quantity of Pollutants
36	Li, Z., & Mao, X. Z.	2011	Global multiquadric collocation method for groundwater contaminant source identification
37	Li, Z., Mao, X. Z., Li, T. S., & Zhang, S.	2016	Estimation of river pollution source using the space-time radial basis collocation method
38	Liu, L., Sankarasubramanian, A., & Ranjithan, S. R.	2011	Logistic regression analysis to estimate contaminant sources in water distribution systems
39	Liu, L., Zechman, E. M., Mahinthakumar, G., & Ranji Ranjithan, S.	2012	Identifying contaminant sources for water distribution systems using a hybrid method
40	Liu, Z.	2013	Colloid and Colloid-Facilitated Radionuclide Transport at the Semi-Arid Hanford Site
41	Long, Y. Q., Li, W., & Huang, J.	2012	Advance of Optimization Methods for Identifying Groundwater Pollution Source Properties
42	Maalej, T., Maillet, D., & Fontaine, J. R.	2012	Estimation of position and intensity of a pollutant source in channel flow using transmittance functions
43	Mazaheri, M., Samani, J. M. V., & Samani, H. M. V.	2015	Mathematical Model for Pollution Source Identification in Rivers
44	Meyer, P. D., Ye, M., Neuman, S. P., Rockhold, M. L., Cantrell, K. J., & Nicholson, T. J.	2007	Combined Estimation of Hydrogeologic Conceptual Model, Parameter, and Scenario Uncertainty with Application to Uranium Transport at the Hanford Site 300 Area
45	Michalak, A. M., & Kitanidis, P. K.	2002	Application of Bayesian inference methods to inverse modelling for contaminants source identification at Gloucester Landfill, Canada
46	Michalak, A. M., & Kitanidis, P. K.	2004	Application of geostatistical inverse modeling to contaminant source identification at Dover AFB, Delaware
47	Mirghani, B. Y., Zechman, E. M., Ranjithan, R. S., & Mahinthakumar, G.	2012	Enhanced simulation-optimization approach using surrogate modeling for solving inverse problems
48	Morelande, M., Ristic, B., & Gunatilaka, A.	2007	Detection and parameter estimation of multiple radioactive sources
49	Neupauer, R. M., Borchers B., and Wilson, J. L.	2000	Comparison of inverse methods for reconstructing the release history of a groundwater contamination source
50	Neupauer, R. M., Records, M. K., and Ashwood, W. H.	2010	Backward Probabilistic Modeling to Identify Contaminant Sources in Water Distribution Systems
51	Pang, L., Zhang, Y., Qu, H., Hu, T., & Wang, W.	2013	Approach to identifying pollutant source and matching flow field
52	Pang, L., Zhang, Y., Qu, H., Hu, T., & Zhao, J.	2013	Impact of gravitation on gaseous pollutant source identification
53	Poeter, E. P., Hill, M. C., Lu, D., Tiedeman, C. R., & Mehl, S.	2014	UCODE_2014, with new capabilities to define parameters unique to predictions, calculate weights using simulated values, estimate parameters with SVD, evaluate uncertainty with MCMC, and more.
54	Prakash, O., & Datta, B.	2014	Characterization of groundwater pollution sources with unknown release time history

No.	著者	発行年	文献名
55	Prakash, O., & Datta, B.	2014	Encapsulating the Role of Solution Response Space Roughness on Global Optimal Solution: Application in Identification of Unknown Groundwater Pollution Sources
56	Prakash, O., & Datta, B.	2014	Optimal monitoring network design for efficient identification of unknown groundwater pollution sources
57	Preis, A., & Ostfeld, A.	2006	Contamination source identification in water systems: a hybrid model trees-linear programming scheme
58	Qu, H., Liu, S., Pang, L., & Hu, T.	2014	Identifiability and Identification of Trace Continuous Pollutant Source
59	Singh, R. M., & Srivastava, D.	2013	Groundwater System Modeling for Pollution Source Identification Using Artificial Neural Network In Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing
60	Srivastava, D., & Singh, R. M.	2015	Groundwater System Modeling for Simultaneous Identification of Pollution Sources and Parameters with Uncertainty Characterization
61	Sun, A. Y.	2007	A robust geostatistical approach to contaminant source identification
62	Tariq, S. R., Shah, M. H., Shaheen, N., Jaffar, M., & Khalique, A.	2008	Statistical source identification of metals in groundwater exposed to industrial contamination
63	Tong, Y., & Deng, Z.	2015	Moment-based method for identification of pollution source in rivers
64	Tuan, N. H., Trong, D. D., Thong, T. H., & Minh, N. D.	2014	Identification of the pollution source of a parabolic equation with the time-dependent heat conduction
65	Vesselinov, V. V., & Harp, D. R.	2010	Contaminant source identification using adaptive hybrid optimization of inverse groundwater transport model
66	Vrugt, J. A., Stauffer, P. H., Wöhling, T., Robinson, B. A., & Vesselinov, V. V.	2007	Inverse modeling of subsurface flow and transport properties using recent advances in global optimization, parallel computing, and sequential data assimilation
67	Wang, J., & Zabarvas, N.	2006	A Markov random field model of contamination source identification in porous media flow.
68	Yang, H., Shao, D., Liu, B., Huang, J., & Ye, X.	2016	Multi-point source identification of sudden water pollution accidents in surface waters based on differential evolution and Metropolis-Hastings-Markov Chain Monte Carlo
69	Yee, E.	2007	Bayesian inversion of concentration data for an unknown number of contaminant sources
70	Yeh, H. D., Lin, C. C., & Chen, C. F.	2015	Reconstructing the release history of a groundwater contaminant based on AT123D
71	Yeh, H. D., Lin, C. C., & Yang, B. J.	2014	Applying Hybrid Heuristic Approach to Identify Contaminant Source Information in Transient Groundwater Flow Systems
72	Yin, Y., Sykes, J. F., & Normani, S. D.	2015	Impacts of spatial and temporal recharge on field-scale contaminant transport model calibration
73	Zanini, A., & Woodbury, A. D.	2016	Contaminant source reconstruction by empirical Bayes and Akaike's Bayesian Information Criterion
74	Zeng, L., Shi, L., Zhang, D., & Wu, L.	2012	A sparse grid based Bayesian method for contaminant source identification
75	Zhang, J., Zeng, L., Chen, C., Chen, D., & Wu, L.	2015	Efficient Bayesian experimental design for contaminant source identification
76	Zhang, T., & Chen, Q.	2007	Identification of contaminant sources in enclosed environments by inverse CFD modeling
77	Zhang, T., & Chen, Q.	2007	Identification of contaminant sources in enclosed spaces by a single sensor
78	Zhang, T., Li, H., Wang, S.	2012	Inversely tracking indoor airborne particles to locate their release sources
79	Zhang, T., Yin, S., & Wang, S.	2013	An inverse method based on CFD to quantify the temporal release rate of a continuously released pollutant source
80	Zhang, Y., Meerschaert, M. M., & Neupauer, R. M.	2016	Backward fractional advection dispersion model for contaminant source prediction
81	Zhao, Y., Lu, W., & An, Y.	2015	Surrogate Model-Based Simulation-Optimization Approach for Groundwater Source Identification Problems

No.	著者	発行年	文献名
101	Cronin, P., Ryan, F., & Coughlan, M.	2008	Undertaking a literature review: a step-by-step approach
102	Vrugt, J. A.	2016	Markov chain Monte Carlo simulation using the DREAM software package: Theory, concepts, and MATLAB implementation
103	Vrugt, J. A. & C. J. F. Ter Braak	2011	DREAM (D) : an adaptive Markov Chain Monte Carlo simulation algorithm to solve discrete, noncontinuous, and combinatorial posterior parameter estimation problems
104	Liu, C. & Ball, W. P	1999	Application of inverse methods to contaminant source identification from aquitard diffusion profiles at Dover AFB, Delaware
105	Snodgrass, M. F. & Kitanidis, P. K.	1997	A geostatistical approach to contaminant source identification
106	Sadegh, M. & Vrugt, J.A.	2014	Approximate Bayesian Computation using Markov Chain Monte Carlo simulation: DREAM (ABC)
107	Lu, D., Ye, M., Hill, M. C., Poeter, E. P., & Curtis, G. P.	2014	A computer program for uncertainty analysis integrating regression and Bayesian methods

付録2 文献調査票





a. No.	27	28	30	31	32	33	34	35	36	37	
b. 著者	Guan, J. et al.	Gzyl, G et al.	Hazart, A. et al.	Hu C. et al.	Jha, M. et al.	Jha, M. et al.	Jha, M. K. et al.	Khorsandi M. et al.	Li, Zi. et al.	Li, Zi. et al.	
c. 発行年	2006	2014	2014	2015	2012	2013	2014	2015	2011	2016	
d. 汚染源の種類	位置・漏洩量・漏洩時間	既知	未知	既知 & 未知	既知	既知	既知	既知	既知	既知, 未知	
	種類	点源	面源	点源	点源	点源	点源	点源	点源, 線源	点源, 線源	
	数	複数	複数	単独	単独	複数	複数	単独	単独	単独	
	汚染物質名	-	HCH (hexachloro cyclohexane)	-	-	-	-	-	-	-	
e. 順解析手法	(理論解) 理論解 / シミュレーション(使用したシミュレータ名)	シミュレーション (EPANET)	シミュレーション (MODFLOW, MT3D)	シミュレーション (-)	シミュレーション (EPANET)	シミュレーション (MODFLOW, MT3DMS)	シミュレーション (MODFLOW, MT3DMS)	シミュレーション (MT3DMS)	シミュレーション (CE-QUBL-W2)	シミュレーション (MATLAB)	シミュレーション (MATLAB)
	次元	0次元 (ネットワークモデル)	2次元	2次元	0次元 (ネットワークモデル)	3次元	3次元	2次元	1次元	1次元, 2次元	2次元
	対象領域	その他 (水道管)	地下のみ	地下のみ	その他 (水道管)	地下のみ	地下のみ	地下のみ	地上のみ	地上・地下	地上のみ
	モデルの空間スケール	about 15 x 15 [km]	about 2400 x 1600 [m]	600 x 150 [m] (既知) 500 x 250 [m] (未知)	-	2100 x 1500 x 30 [m]	2100 x 1500 x 30 [m]	1920 x 1340 [m]	6 [km]	-	6 [km] 120 [km] (未知)
	対象とした時間スケール	48 [hour]	20 [year]	180-1000 [day]	12 [hour]	16 [year]	day	12 [year]	-	-	20000 [s] (既知) 210 [hour] (未知)
	解析に要する時間	-	-	-	-	4 [s]	4 [s]	-	-	-	-







