

2 自然環境中における放射性物質の分布状況変化モデルの作成

2.1 放射性物質の分布状況変化モデルの概要

木名瀬 栄（原子力機構）

福島第一原発事故後、公衆の防護の目的のために特定されるべき地表面に沈着した放射性セシウムは、線源として適切な防護措置の選択に結び付けることが困難な状況である。福島第一原発事故前の経験から、地表面に沈着した放射性セシウムはその物理的減衰に加えて、風雨等の自然環境変化に影響されることが確認されている。今後の避難区域等の見直し、適切な除染対策の選択、住民の将来設計等に資する基礎情報を提供するため、福島第一原発事故により地表面に沈着した放射性セシウムやそれに伴う空間線量率の変化傾向を予測できる長期的影響把握手法の確立が必要である。

公衆の防護等の社会的なニーズに対応すべく、本調査では福島第一原発から80 km圏内を対象に、これまで文部科学省により実施された第1次分布状況等調査（平成23年6月から7月）、第2次分布状況等調査（平成23年11月から平成24年5月）及び第3次分布状況等調査等の結果を活用した信頼性の高い、放射性物質の長期的な影響把握が可能な放射性物質の分布状況変化モデルを作成することとした。

第3次分布状況等調査においては、この章で述べる分布状況変化モデルに加え、第3章で述べる放射性セシウムの移行モデルの開発を開始した。これらのモデルは、第1次分布状況等調査から第3次分布状況等調査で実施した環境調査等の結果に基づき開発を行なう。2種類のモデルならびに環境調査の関係を図2.1-1に示す。

モデル開発に関して2種類のアプローチを試みている。一つは統計解析に基づくアプローチであり、これまでに得られた大量の空間線量率分布データ、土壌への沈着量分布データ等の統計解析結果に基づき、将来の空間線量率等分布の予測を行なうものである。ここでは、空間線量率あるいは放射性セシウム沈着量が、2成分の指数関数の組合せで表現される関数に従って経時的に変化をすると仮定して解析を行なう。福島第一原発から80 km圏内を多数のコンパートメントに分割し、統計解析データに基づいて最適な経時変化パラメータを与え、コンパートメント毎に将来分布を予測するものである。

一方、放射性セシウムの移行メカニズムに注目した移行モデルの開発を平行して進めている。ここでは、森林、陸水、河川、湖沼、大気等の様々な環境媒体を含む試験サイトにおいて実施してきた放射性セシウムの分布及び移行状況に関する環境調査の結果を基に数種類のモデルを開発している。これまでの調査等により、環境中における放射性セシウムの移行に関しては、地表面水流や河川水流を通じた土壌の流出に伴う放射性セシウムの移動が重要な役割を果たすことが明らかになっており、水及び土砂の動きに注目したモデルを中心に開発している。

分布状況変化モデルは多くの測定結果に基づき予測を行なうため、現時点では最も信頼のおける予測が行なえる手法の一つであると考えられる。一方、放射性セシウムの移行メカニズムを考慮していないため、空間線量率分布等の変化傾向の解釈をメカニズム面から行なうことは難しく、またモデルで使用しているパラメータをメカニズムの観点から設定することもできない。移行モデルは原理的にこれらの情報を補うものであるが、現実的な将来予測を移行モデルのみで行なうことは現在の知見からは難しい。分布状況変化モデルと移行モデルはお互いに足りない部分を補い合う関係にある。

分布状況変化モデルで使用している2成分1コンパートメントモデルは、チェルノブイリ原発事故後の環境中放射性セシウム分布の経時変化の解析に用いられ、その変化を適切に表現することが確かめられている[1]。一方、環境中の放射性セシウムの移行を表現するのに用いられるモデルはAppendix 2.1に示すように多数存在するが、この中から今回の事故に適用できる適切なモデルを複数選択して用いている。

統計解析に基づくアプローチに関する調査からは、移行モデル開発に使用する基礎データ、すなわち初期条件のデータやモデル検証用のデータを提供することになる。一方、移行メカニズムの調査研究の結果は、分布状況変化モデルの傾向を解釈するのに役立つ情報を当面提供していくことが期待される。長期的には、分布状況変化モデルの経時変化パラメータについて、状況に応じた適切なパラメータの提供に移行モデルの知見を役立てることが目標となる。

本章では、分布状況変化モデルの作成について、第3章においては分布状況変化モデルを高度化するととの位置付けで移行モデルの作成についてそれぞれ記述する。

参考文献：

- [1] 高橋知之，本間俊充，“チェルノブイリ原子力発電所近傍の表層土壤中¹³⁷Cs濃度に関するモニタリングデータを用いた外部被ばく線量評価モデルの妥当性検証，“保健物理，365-374，(1999)

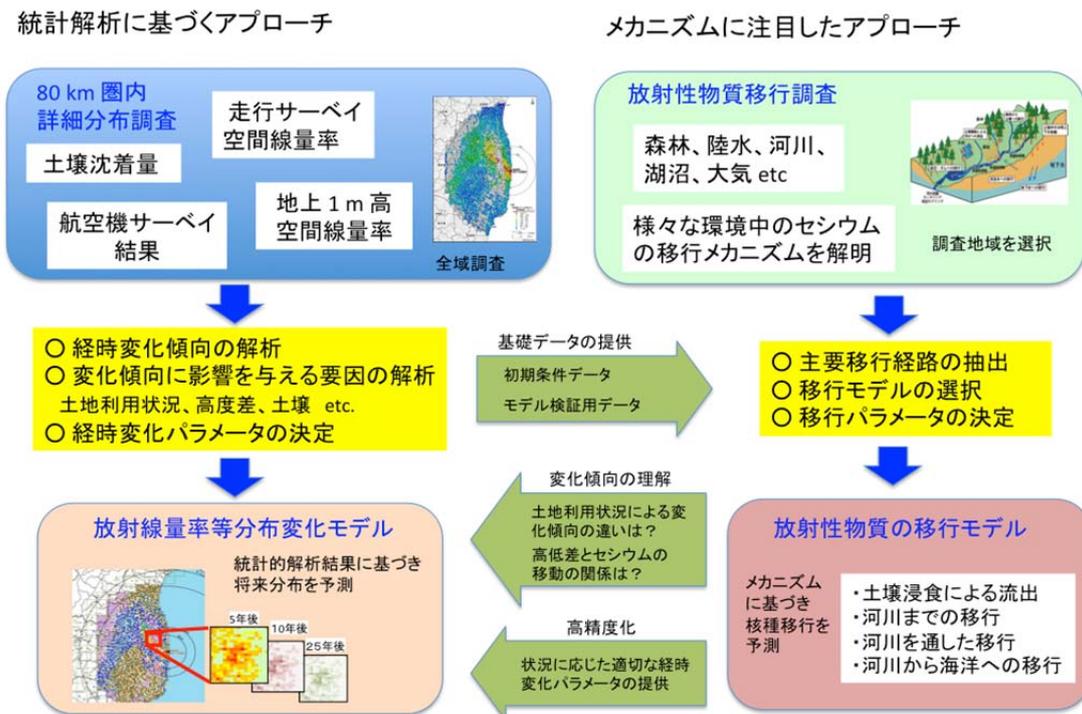


図 2.1-1 2種類のモデルならびに環境調査の関係

2.1.1 放射性物質の分布状況変化モデルの作成方針

放射性物質の分布状況変化モデルは、福島第一原発から 80 km 圏内の広域な範囲の土壤に沈着した放射性セシウムの放射能濃度及び空間線量率の状況の予測に役立てるよう、福島第一原発事故後に実施された放射性物質の分布状況等調査における空間線量率及び放射能量の測定データをもとに作成する。

具体的には、放射性物質の分布状況変化モデルの作成に用いる広域な範囲の空間線量率測定データの収集及び解析は、文部科学省の第 1 次分布状況等調査から第 3 次分布状況等調査の結果はもとより、航空機サーベイ、無人ヘリコプター等を用いた分布状況等調査により得られた測定結果や地方自治体による測定結果等、トレーサビリティのとれた放射線測定器等によって測定された公開データを対象にする。

また、福島第一原発事故前の大気圏内核実験やチェルノブイリ原発事故の経験から、各地域における空間線量率及び放射性セシウムの放射能量の分布状況は、放射性セシウムの物理的減衰や風化等の影響により、時間の経過とともに土地利用状況の特性に応じ変化することが確認されていることから、土地利用種別等に関する信頼性のある公開データも収集し調査する。

こうして得られる福島第一原発から 80 km 圏内の空間線量率測定データと土地利用種別に関するデータを用いた分布状況変化モデルは、ある初期状況から時間とともに解が変化し、未来予測のように将来の解が得られる初期値問題型とする。すなわち、土地利用状況の特性に応じた空間線量率の変化を調べることを基本とした、現象の本質を抽出したモデルとする。もちろん、分布状況変化モデルの進展には、必要な境界条件を与えれば均衡した解が得られる境界値問題型のモデルとの相補関係を適宜利用する。

分布状況変化モデルにおける空間線量率と放射性セシウムの放射能濃度の関係を図 2.1.1-1 に示す。図 2.1.1-1 に示すように、空間線量率と放射性セシウムの放射能濃度の関係は、in-situ 測定を軸とした 2 つの相関関係—in-situ 測定による空間線量率とサーベイメータによる空間線量率の相関関係、in-situ 測定による放射能濃度と土壤試料測定による放射能濃度の相関関係—to 立脚しており、空間線量率の変化傾向の解析より、放射性セシウムの放射能濃度を把握する。空間線量率及び放射性セシウムの放射能濃度の相関関係については、放射性物質の分布状況の詳細調査によって確認する。

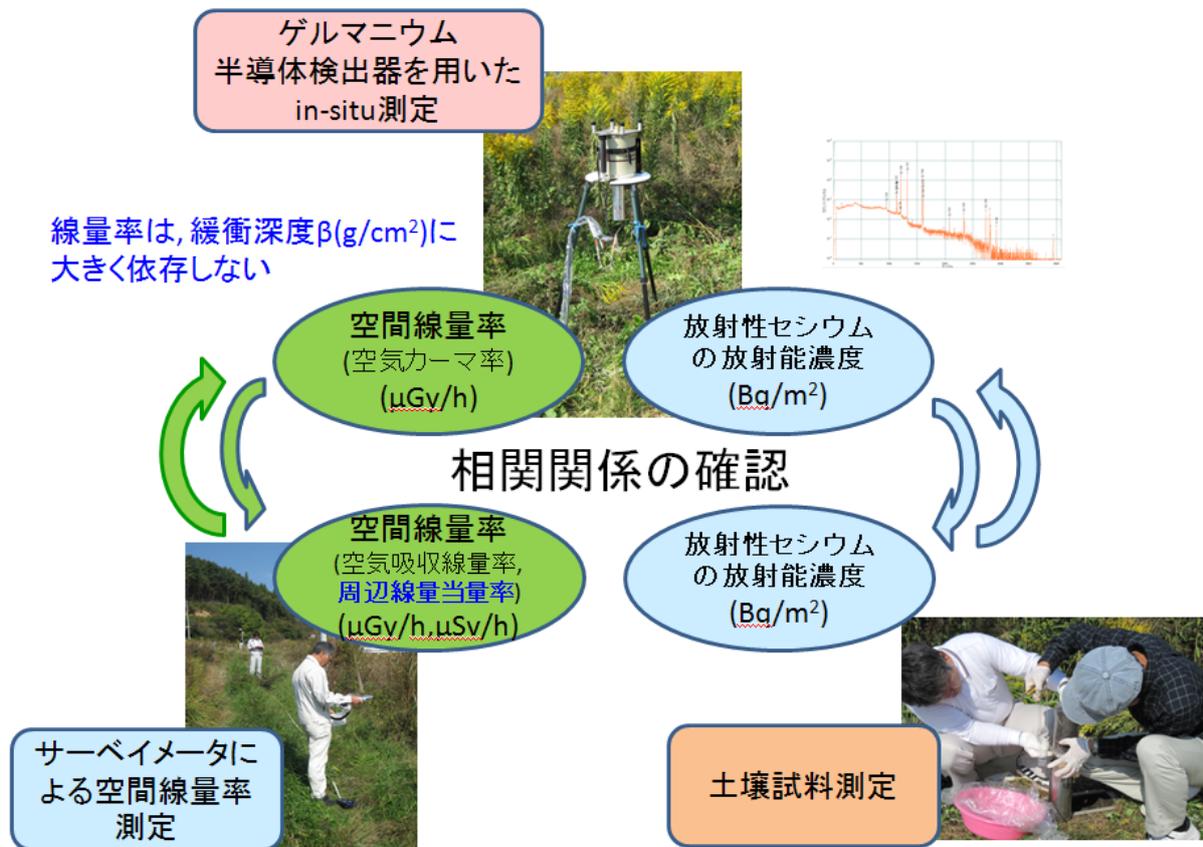


図 2. 1. 1-1 空間線量率と放射性セシウムの放射能濃度の関係

2.1.2 第3次分布状況等調査における放射性物質の分布状況変化モデルの作成

分布状況変化モデルの作成全体のフローチャートを図 2.1.2-1 に示す。平成 24 年度に実施した第 3 次分布状況等調査では、福島第一原発から 80 km 圏内を対象に、これまでの分布状況等調査で得られた空間線量率測定データや、測定地点の状況に関する土地関連データ等のモデル作成に用いるデータの調査・解析、分布状況変化モデルの作成及び検討を行った。

(1) 分布状況変化モデル作成のためのデータ収集

1) 空間線量率測定データの調査

本調査では、先に述べたように、空間線量率の時間変化傾向をもとに、分布状況変化モデルの検討を行った。

福島第一原発事故後に測定で得られた空間線量率は、モニタリングポスト等の定点における連続測定データ（時間連続データ）、走行サーベイ等に用いられた可搬型測定器による不定期な測定データ（時間離散データ）に大別される。時間連続データは、測定地点数が限定されているものの、継続的に測定された結果であり、空間線量率の変化傾向の把握が重要となる分布状況変化モデルの適用検討に適している。時間離散データは、測定頻度が多くなく、各測定時の測定地点が必ずしも一致しない場合もあるが、広い範囲において測定が実施されているためデータが多く蓄積されており、広域な範囲の分布状況変化モデルのパラメータ（各調査箇所の空間線量率の変化傾向をモデル化するうえで必要な設定値）の検討に適している。本分布状況変化モデルの作成では、表 2.1.2-1 及び表 2.1.2-2 に示す公開された時間連続データと時間離散データを収集し、空間線量率の時間変化の傾向把握に時間連続データと時間離散データを、広域な範囲の分布状況変化モデルのパラメータ検討に時間離散データを用いて解析した。

2) 土地関連データの調査

空間線量率の経時変化に関連が予想される分布状況変化モデルの環境パラメータとして、水域、都市、畑地等の土地利用種別に着目して整理された土地関連データを収集した。

3) その他（放射線線量測定関連データ）

本分布状況変化モデルの作成では、福島第一原発から 80 km 圏内の広域な範囲の空間線量率等の変化傾向の評価に用いられるよう、放射線線量測定関連データである緩衝深度（土壌表層の放射性セシウムの放射能濃度が $1/e$ になる深さ）に対応した線量換算係数、初期値（放射性セシウムの放射能濃度）等について、最新の知見を調査した。

(2) 分布状況変化モデルの作成

1) 適用モデルの検討（空間線量率データの解析）

分布状況変化モデルは、広域な範囲において測定により得られ、かつ、土壌中放射性セシウムの実態をよく反映すると考えられる空間線量率測定データを利用して作成することとした。そこで、原子力機構において原子炉施設の事故時に環境に放出された放射性物質による施設外への影響を定量化するために開発した原子炉事故時の環境影響評価（レベル 3PSA）手法の知見 [1] を踏まえ、表層土壌中セシウム濃度の経時変化（放射性セシウムの放射能濃度と空間線量率には相関関係があることから、空間線量率の経時変化も含む）に対して 2 成分 1 コンパートメントモデル [2]（地表面からある深さまでの土壌層を 1 つのコンパートメントとみなし、放射性物質の移行の速さが異なる 2 つの成分に分けて評価する）を適用した（図 2.1.2-2 参照）。

具体的には、空間線量率に関する時間連続データから空間線量率の時間変化の傾向を把握し、以下の(式 1)を用いて各成分の空間線量率の変化を表現することとした。なお、コンパートメントの成分毎に最適なパラメータの組合せ (α, T) を設定するために、環境半減期 T に影響を与える要因等を考慮した解析を行なった。

$$Y(t) = A_0 \left[\underbrace{\alpha_{fast} \exp\left(\frac{-\ln 2}{T_{fast}} \cdot t\right)}_{\text{減衰が早い成分}} + \underbrace{(1 - \alpha_{fast}) \exp\left(\frac{-\ln 2}{T_{slow}} \cdot t\right)}_{\text{減衰が遅い成分}} \right] \cdot \exp(-\lambda t) \quad (\text{式 1})$$

$Y(t)$:	評価時点 t における空間線量率 (μ Sv/年)
A_0	:	初期空間線量率 (μ Sv/年)
α_{fast}	:	減衰が早い成分の割合 (-)
t	:	評価時点までの期間(年)
T_{fast}	:	減衰が早い成分の環境半減期(年) *6
T_{slow}	:	減衰が遅い成分の環境半減期(年) *6
λ	:	核種の壊変定数(1/年)

2) 環境半減期に影響を与える種々の要因の検討

福島第一原発から 80 km 圏内の広い範囲にわたって得られた空間線量率に関する時間離散データを用いて、土地利用種別に応じた放射性セシウムの環境半減期を評価した。環境半減期は、環境減衰の理解の手助けのみならず現象の基礎にある原因の発見に役立てるため、以下の環境減衰に影響すると考えられる要因について累積頻度分布 ($(\ln 2 / \text{環境半減期})$ の累積分布関数) を調査し、各要因における環境半減期の分布状況を評価することとした。

- 土地利用
- 初期空間線量率階層
- 周囲の空間線量率差
- 標高
- 周辺との標高差

3) モデルパラメータに相関のある項目の検討 (環境半減期の有意性検定)

各要因における環境半減期は、統計的に一定の分布 (分布の中心は中央値) を有している。第 3 次分布状況等調査では、土地利用種別に応じた放射性セシウムの環境半減期について、環境半減期が土地利用種別により有意に異なるかどうかを調べるために、統計的仮説の有意性の検定を行った。すなわち、帰無仮説 (異なる土地利用種別の放射性セシウムについて、環境半

*6 環境半減期は人為的な影響を含む自然環境における移行挙動の影響をひとまとめにして評価した空間線量率の半減期とする (放射性物質の物理的減衰による影響を除く)。

減期の中央値が等しい)の下で期待する結果(有意水準)が生じなかったことを根拠として、仮説を棄却、否定する検討を行った。また、2)の土地利用以外の環境半減期に影響を与えると考えられる要因についても、環境半減期の有意性検定を行った。

4) モデルパラメータの導出(今後実施予定)

これまでの調査結果を用いて、土地利用種別の放射性セシウムの環境半減期を評価(($\ln 2$ /環境半減期)の累積分布関数から中央値等を求め、各土地利用種別の環境半減期を決定)するとともに、適用モデルの検討を行う。また、環境半減期に加え、モデルに用いる初期条件となる空間線量率等、モデルパラメータの導出を行う。これらの検討結果をもとに、分布状況変化モデルを作成する。

5) 将来予測(今後実施予定)

放射性物質の分布状況等調査等の福島第一原発から80 km圏内の最新の空間線量率分布データ等を用いて、4)で作成する分布状況変化モデルを随時検証し、福島第一原発の事故後の30年程度までの空間線量率及び放射性セシウムの放射能濃度の変化状況の評価する。なお、広域な範囲(80 km圏内)の放射性物質の分布状況変化モデルの妥当性検証を行うため、生活圏の特性に応じた土地利用形態が明らかな狭い範囲における放射性物質の分布状況調査を行う。

参考文献:

- [1] 本間俊充, 石川淳, 富田賢一, 村松健: “軽水炉モデルプラントの広範な事故シナリオに対する環境影響評価” JAERI-Research 2000-060(2000)
- [2] 高橋知之: “原子力施設の環境影響評価における不確実性に関する研究” 京都大学博士学位論文(2001)

表 2.1.2-1 時間連続な空間線量率測定データ

データ	測定間隔・測定期間	測定範囲
東京電力株式会社福島第一原子力発電所 20 km 圏内の測定結果	測定間隔：継続的（約 1 週間単位） 測定期間：平成 23 年 5 月 13 日～	福島第一原発の 20 km 圏内で 55 地点
福島県による緊急時環境放射線等モニタリング実施結果	測定間隔：継続的（数日単位） 測定期間：平成 23 年 3 月 18 日～	福島第一原発の約 80 km 圏内、全部で約 90 地点

表 2.1.2-2 時間離散な空間線量率測定データ

データ	測定間隔・測定期間	測定範囲
放射性物質の分布状況等調査(地上 1 m 高さの空間線量率測定結果)	離散的 第 1 次分布状況等調査： 平成 23 年 6 月～7 月 第 2 次分布状況等調査： 平成 23 年 11 月～平成 24 年 5 月	離散的(福島県及び隣接県で測定) 第 1 次：約 2,200 地点 第 2 次：約 1,000 地点 第 1 次と第 2 次共通地点:210 地点
走行サーベイで測定された道路上の空間線量率の測定結果	離散的 第 1 次走行サーベイ：平成 23 年 6 月 第 2 次走行サーベイ：平成 23 年 11 月 第 3 次走行サーベイ：平成 24 年 3 月	広域 第 1 次、第 2 次走行サーベイでは軌跡が異なる。 データ数 第 1 次：約 140,000 第 2 次：約 650,000 第 3 次：約 3,500,000
航空機モニタリングで測定された空間線量率の測定結果	離散的 第 1 次：平成 23 年 4 月 29 日換算 第 2 次：平成 23 年 5 月 26 日換算 第 3 次：平成 23 年 7 月 2 日換算 第 4 次：平成 23 年 11 月 5 日換算 警戒区域と計画的避難区域：平成 24 年 2 月 10 日換算 県別：(換算日県別)	広域 第 1 次、第 2 次、第 3 次航空機モニタリングでは軌跡が異なる。 データ数 第 1 次：約 150,000 第 2 次：約 300,000 第 3 次：約 160,000 第 4 次：約 160,000 警戒区域と計画的避難区域： 23,000 県別 (計)：4,700,000

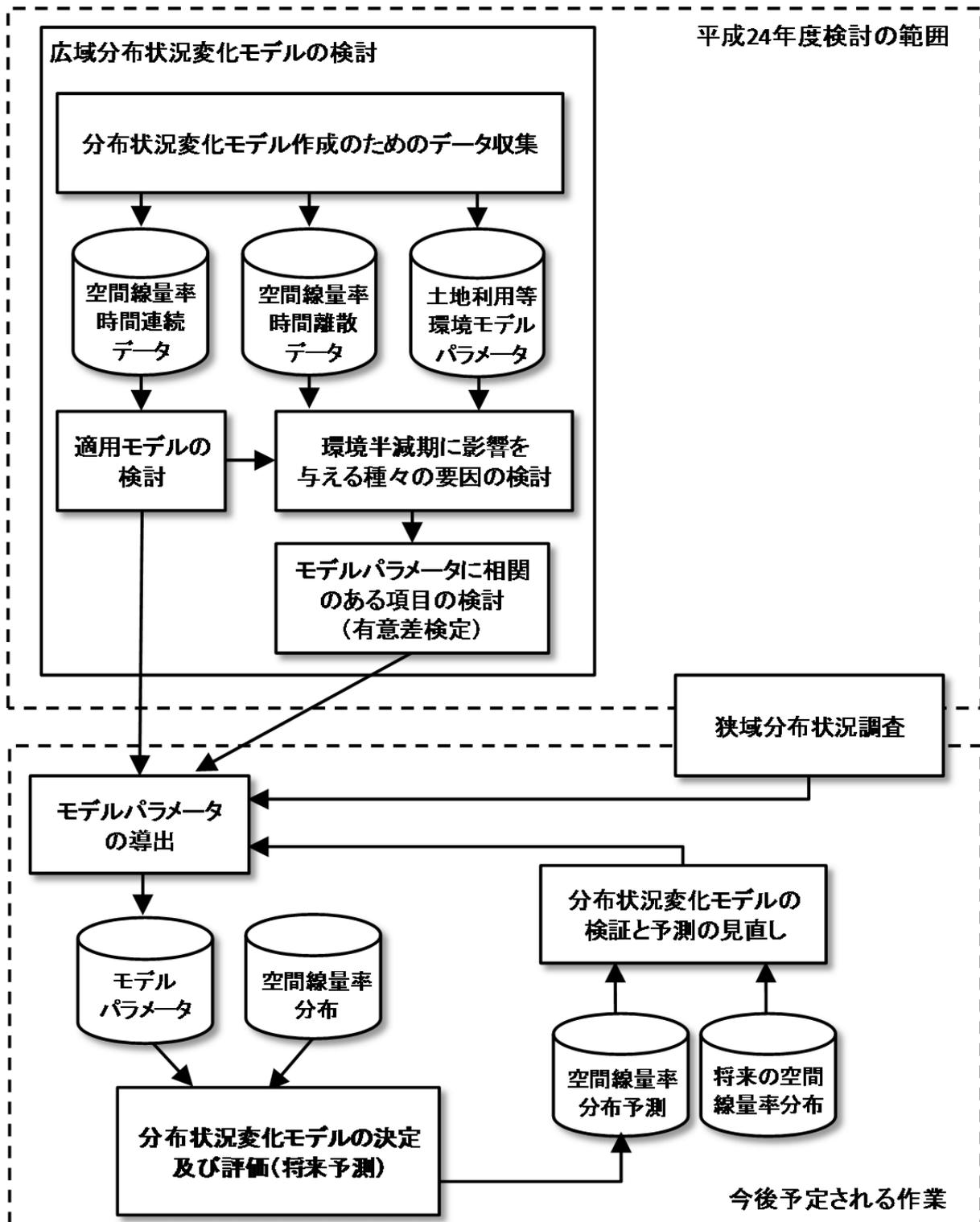


図 2. 1. 2-1 分布状況変化モデル作成の流れ

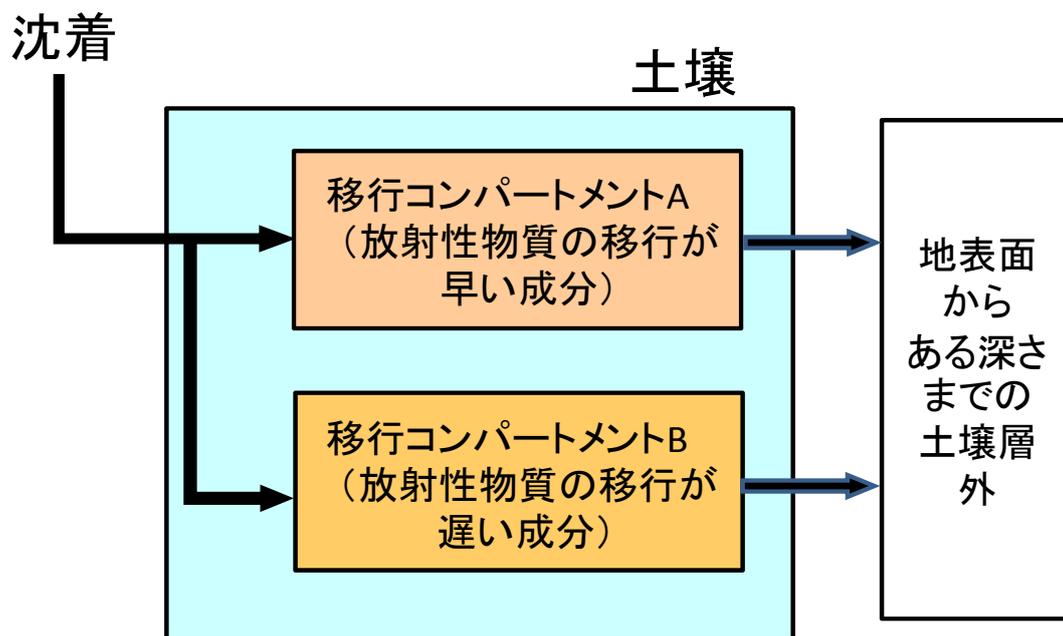
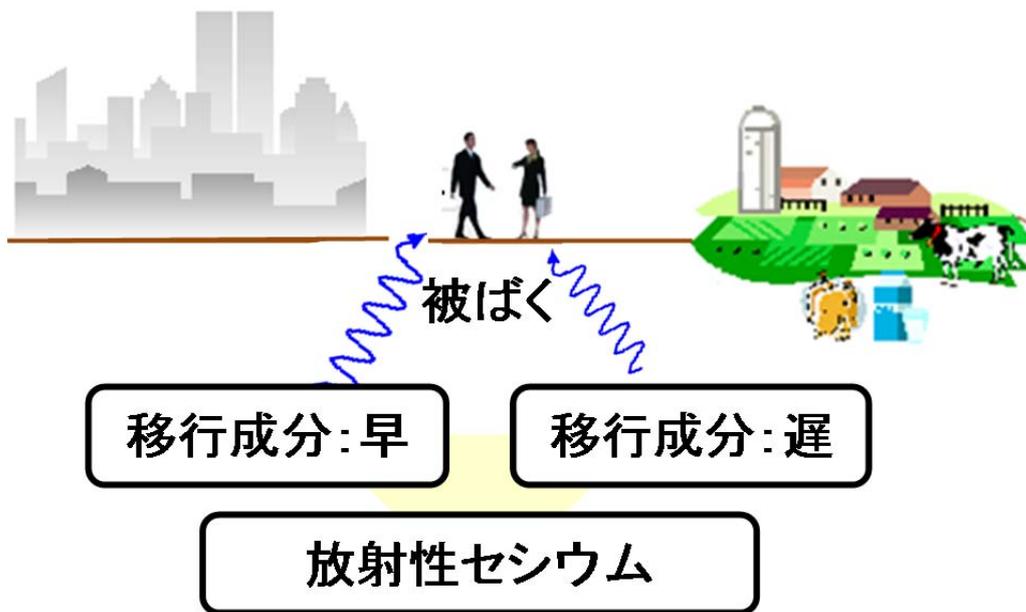


図 2.1.2-2 2成分1コンパートメントモデルのイメージ