



JAEA-Research

2016-020

DOI:10.11484/jaea-research-2016-020

放射性物質の環境動態に伴う被ばく経路を考慮した
コンパートメントモデルの構築

A Compartment Model of Radionuclide Migration
in Environment Based on Exposure Pathways

操上 広志 新里 忠史 鶴田 忠彦 加藤 智子
北村 哲浩 菅野 光大 黒澤 直弘

Hiroshi KURIKAMI, Tadafumi NIIZATO, Tadahiko TSURUTA, Tomoko KATO
Akihiro KITAMURA, Mitsuhiro KANNO and Naohiro KUROSAWA

福島研究開発部門
福島環境安全センター

Fukushima Environmental Safety Center
Sector of Fukushima Research and Development

January 2017

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2017

放射性物質の環境動態に伴う被ばく経路を考慮したコンパートメントモデルの構築

日本原子力研究開発機構
福島研究開発部門
福島環境安全センター

操上 広志、新里 忠史、鶴田 忠彦、加藤 智子、北村 哲浩、菅野 光大*、黒澤 直弘*

(2016年11月10日受理)

日本原子力研究開発機構では、福島長期環境動態研究 (F-TRACE) プロジェクトとして、福島第一原子力発電所の事故により環境中に放出された放射性物質の環境中における動態を調査することにより、被ばく線量への影響が大きい移動経路を明らかにし、移動抑制等の対策を提案することを目指した研究開発を行っている。本報告では、河川 (二級河川) 流域規模での放射性物質 (特に放射性セシウム) の動態に伴う被ばく経路を考慮したコンパートメントモデルを構築し、試行的な解析を行った結果を示す。試解析の結果、森林や河川の各コンパートメントのインベントリや濃度、コンパートメント間のフラックスはおおよそ現実的な値となった。一方で、堆積物や外洋への移行、農林水産物への移行について実測値との比較によるモデル検証は十分でなく、今後、実測値との比較を詳細に実施し、コンパートメント設定やパラメータの設定の妥当性を確認していく必要がある。

A Compartment Model of Radionuclide Migration in Environment Based on Exposure Pathways

Hiroshi KURIKAMI, Tadafumi NIIZATO, Tadahiko TSURUTA, Tomoko KATO, Akihiro KITAMURA,
Mitsuhiro KANNO* and Naohiro KUROSAWA *

Fukushima Environmental Safety Center
Sector of Fukushima Research and Development
Japan Atomic Energy Agency
Miharu-machi, Tamura-gun, Fukushima-ken

(Received November 10, 2016)

The Japan Atomic Energy Agency has performed F-TRACE project aiming at understanding fate of radionuclides released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. The main goal of the project is to clarify the important pathways for radiation exposure and to propose effective countermeasures to reduce exposure. In this report, we developed a compartment model of radionuclide migration in environment based on exposure pathways in a river basin scale and performed a preliminary calculation. The results showed good agreement with some measurement, although the comparison of bed sediment, transportation to outer sea and to agricultural products with the measurement was not enough. We continue to validate/improve the model.

Keywords: Fukushima Accident, Radiocesium Migration, Compartment Model, River Basin

* Visible Information Center, Inc.

目 次

1. はじめに.....	1
2. コンパートメントモデルの構築.....	2
2.1. 放射性セシウム環境中の主な移行プロセスと想定被ばく経路.....	2
2.2. コンパートメントモデルの構築.....	3
2.2.1. コンパートメント設定および接続.....	3
2.2.2. 数学モデル（動的コンパートメント）.....	7
2.2.3. 数学モデル（静的コンパートメント）.....	14
3. コンパートメントモデルを用いた試解析の実施.....	16
3.1. パラメータの設定.....	17
3.1.1. 森林、農地および都市域の面積と沈着量.....	17
3.1.2. 森林内のコンパートメント間の移行率.....	19
3.1.3. 森林内のコンパートメントの単位面積当たりの重量.....	25
3.1.4. 森林から水系への移行率.....	26
3.1.5. 河川、湖沼、近海の面積と沈着量.....	26
3.1.6. 河川、湖沼、近海の深度および下流側コンパートメントへの移行率.....	28
3.1.7. 河川、湖沼、近海の堆積物に関するパラメータ.....	29
3.1.8. 農地、都市域と他のコンパートメント間の移行率.....	30
3.1.9. 静的コンパートメントとそのパラメータ.....	30
3.2. 解析結果.....	32
4. おわりに.....	48
参考文献.....	49

Table of contents

1.	Introduction	1
2.	A compartment model.....	2
2.1.	Migration processes of radiocesium in environment.....	2
2.2.	A compartment model.....	3
2.2.1.	Compartment connection.....	3
2.2.2.	Mathematical description (dynamic compartments).....	7
2.2.3.	Mathematical description (static compartments).....	14
3.	A preliminary calculation.....	16
3.1.	Parameters	17
3.1.1.	Areas and initial radioactivity in forest, agricultural lands and urban areas	17
3.1.2.	Transfer rates between forest compartments	19
3.1.3.	Weights in forest compartments.....	25
3.1.4.	Transfer rate from forest to a river	26
3.1.5.	Areas and radioactivity in rivers, a lake and sea.....	26
3.1.6.	Transfer rates from rivers, a lake and sea to downstream	28
3.1.7.	Settlement and resuspention of bed sediment.....	29
3.1.8.	Transfer rates to and from agricultural lands and urban areas.....	30
3.1.9.	Static compartments	30
3.2.	Results	32
4.	Conclusions	48
	References.....	49

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）では、福島長期環境動態研究（F-TRACE）プロジェクトとして、福島第一原子力発電所の事故により環境中に放出された放射性物質の環境中における動態を調査することにより、被ばく線量への影響が大きい移動経路を明らかにし、移動抑制等の対策を提案することを目指した研究開発を行っている[1、2、3]。本プロジェクトでは、包括的な評価システムを構築することとしており、その中核的な解析モデルとして、コンパートメントモデルを位置付けている（図 1.1[4]）。

本報告では、河川（二級河川）流域規模での放射性物質（特に放射性セシウム）の動態に伴う被ばく経路を考慮したコンパートメントモデルを構築し、試行的な解析を行った結果について示す。

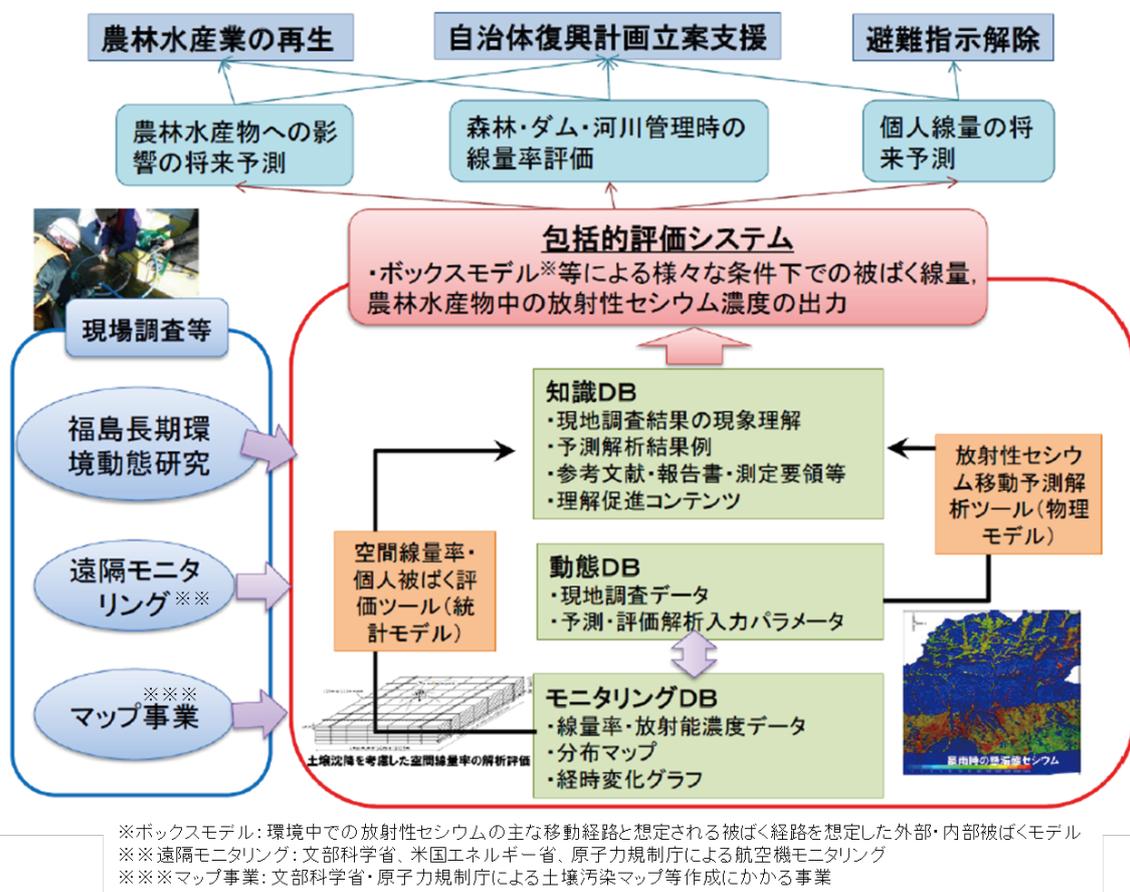


図 1.1 包括的評価システム概念図とコンパートメントモデル（図中ではボックスモデルと表記）の位置づけ（[4]に追記）

2. コンパートメントモデルの構築

2.1. 放射性セシウム環境中の主な移行プロセスと想定被ばく経路

これまで原子力機構では、福島県の主に避難区域を対象に森林、河川、湖沼、沿岸域における放射性セシウムの環境動態に対する調査研究を行っている[1、2、3]。これら調査研究では、森林から河川、河川から湖沼（農業用ため池を含む）、河川から海への放射性セシウムの流出を重要な移行プロセスとして設定している。

コンパートメントモデルの構築に先立ち、放射性セシウム環境中の主な移行プロセスおよびそれに伴い想定される主な被ばく経路を図 2.1 のように整理した。

森林内では、樹冠、落葉層、土壌層の間を放射性セシウムが循環することが想定され、その一部が建材、きのこ原木、野生動植物などに移行すると考えられる。森林から流出した放射性セシウムは河川や湖沼を通過して海洋に至る間に河床・河川敷、湖底に一部堆積し、また魚介類へ移行すると想定される。一方、被ばくを抑制するために、除染、食品の基準値設定など様々な対策が施行されており、図中にはそれらの対策例も示している。モデルによる解析は、将来の農林水産物濃度の予測などを可能とし、今後の更なる対策、あるいは対策終了の検討に利用されることが期待される。

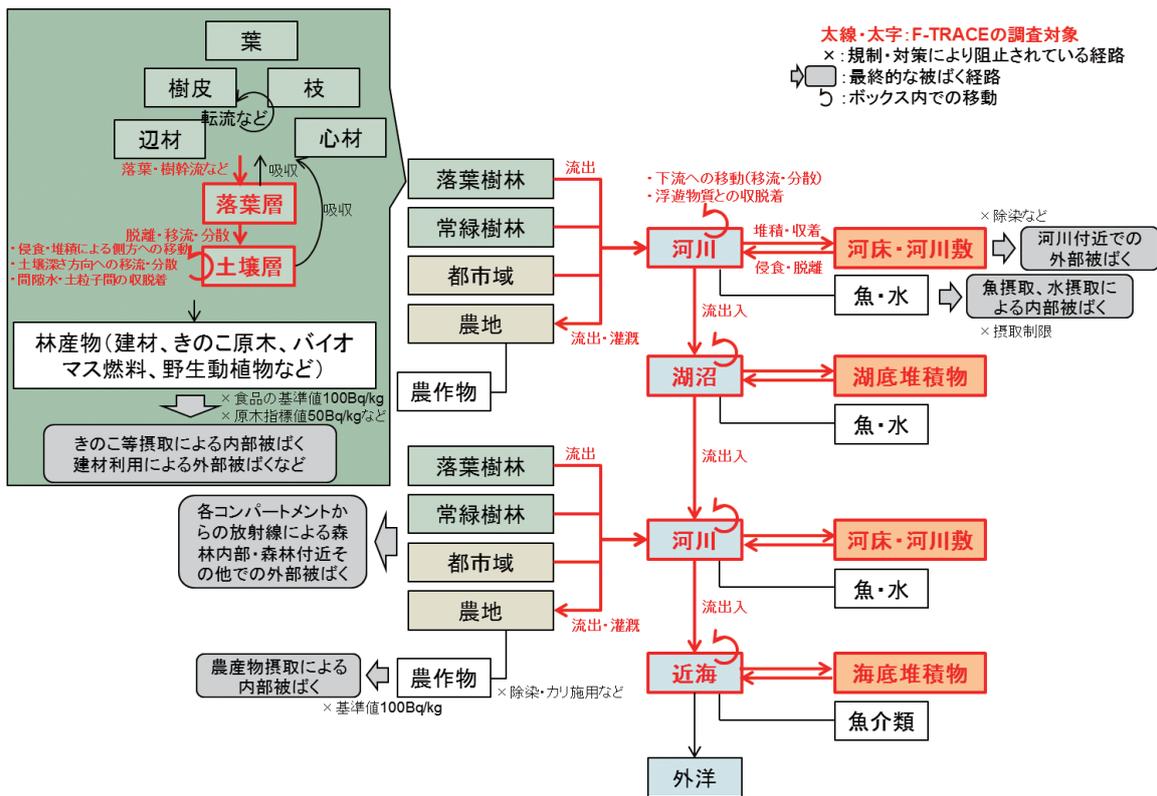


図 2.1 放射性セシウムの環境動態に伴い想定される被ばく経路

2.2. コンパートメントモデルの構築

2.2.1. コンパートメント設定および接続

コンパートメントモデルは、環境中の各部をいくつかのコンパートメントに区分し、各コンパートメント間の放射性セシウムの移動を、当該コンパートメント内の放射性セシウム濃度に移行率あるいは移行係数・濃縮係数を乗じることで算出する簡易なモデルである。

コンパートメントモデルの主な解析手順は以下のとおりである。

- 解析対象となる流域に対して、必要なコンパートメント構成と、その接続関係を構築する。
- 動的に解く必要があるコンパートメント（動的コンパートメント）と、他のコンパートメントと瞬時に平衡にあると仮定することができるコンパートメント（静的コンパートメント）に分類する。
- 動的コンパートメント間の移行率を与える。移行率は、「単位時間あたりの移行量」として定義する。本研究では、移行率そのもの、あるいは河川流量等の他の物理量を用いて定義する方法を選択する。
- 動的コンパートメントから静的コンパートメントへの移行は、元となる動的コンパートメントの濃度と静的コンパートメントの濃度の平衡状態を仮定した移行係数・濃縮係数により与える（移行係数と濃縮係数は数学的に同じものであるが、農作物等に対しては移行係数、魚介類等に対しては濃縮係数と呼ぶことがあり併記した）。
- 上記に対する連立方程式（数学モデル）を解く。

コンパートメントモデルは、森林モデルと水系モデルから構成される。

森林モデルのコンパートメント関係図を図 2.2 に示す。森林モデルは、林野庁のプレス発表[5]におけるインベントリ変化をモデルで表現する目的で、「葉」、「枝」、「樹皮」、「辺材」、「心材」、「落葉層」、「土壌層」の7つのコンパートメントで構成する。各モデルの接続は、IAEA-BIOMASS-1[6]を参考に図 2.2 に示す通りとする。

水系モデルは、図 2.3 に示す「上流河川」、「上流河川の河床、河川敷」、「湖沼」、「湖底堆積物」、「下流河川」、「下流河川の河床、河川敷」、「農地」、「近海」、「海底堆積物」、「外洋」の10種のコンパートメントとする。上流河川-湖沼-下流河川-近海-外洋という接続を基本構成とし、森林モデルおよび農地は、上流河川、湖沼または下流河川に任意の数が接続できる。なお、農地コンパートメントは都市域として設定も可能である。

各コンパートメントの初期量は、大気からのフォールアウトを仮定する。森林モデルにおいては、葉、枝、樹皮、落葉層に与えることが可能であり、水系モデルにおいては上流河川、湖沼、下流河川、農地、近海、海底堆積物に与えることが可能である。

支配方程式の記載のため、各コンパートメントに設定した略称の一覧を表 2.1 に示す。

また、静的コンパートメントとしては、表 2.2 に示すものを考慮する。プログラム上では任意の数を設定可能とする。

表 2.1 動的コンパートメント

No.	領域	略称	英語名	日本語名
1	森林	LF	leaf	葉
2		BR	branch	枝
3		BK	bark	樹皮
4		LW	sap wood	辺材
5		DW	living wood	心材
6		LT	litter	落葉層
7		SO	soil	土壌層 (有機物層、鉍物層含む)
8	水系	UR	upper river	上流河川
9		URS	upper river sediment	上流河川の河床、河川敷
10		LK	lake	湖沼
11		LKS	lake sediment	湖底堆積物
12		LR	lower river	下流河川
13		LRS	lower river sediment	下流河川の河床、河川敷
14		AG k	agricultural land	(k 番目の) 農地
15		AS	adjacent sea	近海
16		ASS	adjacent sea sediment	海底堆積物
17		OS	outer sea	外洋

表 2.2 静的コンパートメント

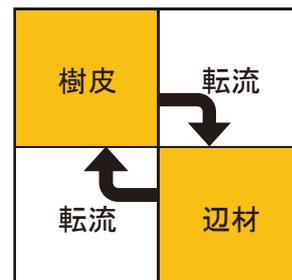
No.	静的コンパートメント	元とする動的コンパートメント
1	原木、材木	辺材、心材
2	バイオマス燃料	葉、枝、樹皮、辺材、心材
3	野生動植物	落葉層
4	浚渫土壌	河床・河川敷、湖底堆積物
5	魚介類	上流河川、湖沼、下流河川、近海
6	飲用水	上流河川、湖沼、下流河川
7	農作物	農地、灌漑水 (河川水と湖沼水から選択)

大気	捕捉(降雨、降雪)	捕捉(降雨、降雪)	捕捉(降雨、降雪)			捕捉(降雨、降雪)		
	葉	転流	ウェザリング			落葉、ウェザリング		
	転流	枝	ウェザリング	転流	転流	落枝、ウェザリング		
			樹皮	転流		ウェザリング		
		転流	転流	辺材	転流			
				転流	心材			
				経根吸収		落葉層	分解、浸透	流出
				経根吸収			土壌層	流出
								水系

図 2.2 コンパートメントの接続関係図 (森林モデル)

※ 左上から右下への対角線上の箱がコンパートメントを、非対角線上の箱がコンパートメント間の物質収支の関係を示す。時計周りに物質が移行する。ブランクは当該コンパートメント間のやり取りが無いことを意味する。

「樹皮」と「辺材」の例：矢印の方向に物質が移行する。



大気	沈着	沈着	沈着	沈着	沈着	沈着	沈着	沈着	沈着
森林	流入		流入		流入				
	上流河川	堆積	移行				灌漑、流入		
	再浮遊	上流河川の河床、河川敷							
			湖沼	堆積	移行		灌漑、流入		
			再浮遊	湖底堆積物					
					下流河川	堆積	灌漑、流入	移行	
					再浮遊	下流河川の河床、河川敷			
	流出		流出		流出		農地		
								近海	堆積
								再浮遊	海底堆積物
									外洋

図 2.3 コンパートメントの接続関係図（水系モデル）

※ 左上から右下への対角線上の箱がコンパートメントを、非対角線上の箱がコンパートメント間の物質収支の関係を示す。時計周りに物質が移行する。空白は当該コンパートメント間のやり取りが無いことを意味する。

2.2.2. 数学モデル（動的コンパートメント）

ここでは、動的コンパートメントモデルの支配方程式（常微分方程式）を示す。

(1) 森林モデル

【葉】

$$\frac{d}{dt} A_{LF} = -(\lambda_{LF, BR} + \lambda_{LF, BK} + \lambda_{LF, LT} + \lambda_p) A_{LF} + \lambda_{BR, LF} A_{BR} \quad (1)$$

ここで、

A_{LF}	: 葉の放射エネルギー [Bq]
$\lambda_{LF, BR}$: 葉から枝への移行率 [y^{-1}]
$\lambda_{LF, BK}$: 葉から樹皮への移行率 [y^{-1}]
$\lambda_{LF, LT}$: 葉から落葉層への移行率 [y^{-1}]
λ_p	: 放射性セシウムの物理的減衰定数 [y^{-1}]
$\lambda_{BR, LF}$: 枝から葉への移行率 [y^{-1}]
A_{BR}	: 枝の放射エネルギー [Bq]

である。

【枝】

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} A_{BR} = & -(\lambda_{BR, LF} + \lambda_{BR, BK} + \lambda_{BR, LW} + \lambda_{BR, DW} + \lambda_{BR, LT} + \lambda_p) A_{BR} \\ & + \lambda_{LF, BR} A_{LF} + \lambda_{LW, BR} A_{LW} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、

A_{BR}	: 枝の放射エネルギー [Bq]
$\lambda_{BR, BK}$: 枝から樹皮への移行率 [y^{-1}]
$\lambda_{BR, LW}$: 枝から辺材への移行率 [y^{-1}]
$\lambda_{BR, DW}$: 枝から心材への移行率 [y^{-1}]
$\lambda_{BR, LT}$: 枝から落葉層への移行率 [y^{-1}]
$\lambda_{LW, BR}$: 辺材から枝への移行率 [y^{-1}]
A_{LW}	: 辺材の放射エネルギー [Bq]

であり、その他は既出の通りである。

【樹皮】

$$\frac{d}{dt} A_{BK} = -(\lambda_{BK, LW} + \lambda_{BK, LT} + \lambda_p) A_{BK} + \lambda_{LF, BK} A_{LF} + \lambda_{BR, BK} A_{BR} + \lambda_{LW, BK} A_{LW} \quad (3)$$

ここで、

- A_{BK} : 放射エネルギー [Bq]
- $\lambda_{BK,LW}$: 樹皮から辺材への移行率 [y^{-1}]
- $\lambda_{BK,LT}$: 樹皮から落葉層への移行率 [y^{-1}]
- $\lambda_{LW,BK}$: 辺材から樹皮への移行率 [y^{-1}]

であり、その他は既出の通りである。

【辺材】

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} A_{LW} = & -(\lambda_{LW,BR} + \lambda_{LW,BK} + \lambda_{LW,DW} + \lambda_p) A_{LW} \\ & + \lambda_{BR,LW} A_{BR} + \lambda_{BK,LW} A_{BK} + \lambda_{DW,LW} A_{DW} + \lambda_{LT,LW} A_{LT} + \lambda_{SO,LW} A_{SO} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、

- $\lambda_{LW,DW}$: 辺材から心材への移行率 [y^{-1}]
- $\lambda_{DW,LW}$: 心材から辺材への移行率 [y^{-1}]
- A_{DW} : 心材の放射エネルギー [Bq]
- $\lambda_{LT,LW}$: 落葉層から辺材への移行率 [y^{-1}]
- A_{LT} : 落葉層の放射エネルギー [Bq]
- $\lambda_{SO,LW}$: 土壌層から辺材への移行率 [y^{-1}]
- A_{SO} : 土壌層の放射エネルギー [Bq]

であり、その他は既出の通りである。

【心材】

$$\frac{d}{dt} A_{DW} = -(\lambda_{DW,LW} + \lambda_p) A_{DW} + \lambda_{BR,DW} A_{BR} + \lambda_{LW,DW} A_{LW} \quad (5)$$

【落葉層】

$$\frac{d}{dt} A_{LT} = -(\lambda_{LT,LW} + \lambda_{LT,SO} + \lambda_{LT,OUT} + \lambda_p) A_{LT} + \lambda_{LF,LT} A_{LF} + \lambda_{BR,LT} A_{BR} + \lambda_{BK,LT} A_{BK} \quad (6)$$

ここで、

- $\lambda_{LT,SO}$: 落葉層から土壌層への移行率 [y^{-1}]
- $\lambda_{LT,OUT}$: 落葉層から森林外部への移行率 [y^{-1}]

であり、その他は既出の通りである。

【土壌層】

$$\frac{d}{dt} A_{SO} = -(\lambda_{SO,LW} + \lambda_{SO,OUT} + \lambda_p) A_{SO} + \lambda_{LT,SO} A_{LT} \quad (7)$$

ここで、

$\lambda_{SO,OUT}$: 土壌層から森林外部への移行率 [y^{-1}]
であり、その他は既出の通りである。

(2) 森林から河川・湖沼への移行フラックス

森林から上流河川、湖沼、下流河川への移行フラックスは、各水系に属する森林（入力ファイルで森林毎に指定）からの移行率を積算することで計算する。森林の数は任意とする。

$$F_k = \sum_j (\lambda_{LT,OUT}^{j,k} A_{LT}^{j,k} + \lambda_{SO,OUT}^{j,k} A_{SO}^{j,k}) \quad (8)$$

ここで、

F_k : 森林から水系 k への移行フラックス [$Bq y^{-1}$] ($k = UR, LK, LR$)

$\lambda_{LT,OUT}^{j,k}$: 森林 j の落葉層から水系 k への移行率 [y^{-1}]

$A_{LT}^{j,k}$: 水系 k 、森林 j の落葉層の放射エネルギー [Bq]

$\lambda_{SO,OUT}^{j,k}$: 森林 j の土壌層から水系 k への移行率 [y^{-1}]

$A_{SO}^{j,k}$: 水系 k 、森林 j の土壌層の放射エネルギー [Bq]

である。

(3) 水系モデル

【上流河川】

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} A_{UR} = & - \left(\lambda_{UR,URS} + \lambda_{UR,LK} + \sum_k \lambda_{UR,AGk} + \lambda_p \right) A_{UR} \\ & + \lambda_{URS,UR} A_{URS} + \sum_k \lambda_{AGk,UR} A_{AGk} + F_{UR} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} A_{URS} = -(\lambda_{URS,UR} + \lambda_p) A_{URS} + \lambda_{UR,URS} A_{UR} \quad (10)$$

ここで、

A_{UR} : 上流河川の放射エネルギー [Bq]

$\lambda_{UR,URS}$: 上流河川から上流河川の河床・河川敷への移行率 [y^{-1}]

$\lambda_{UR,LK}$: 上流河川から湖沼への移行率 [y^{-1}]

$\lambda_{UR,AGk}$: 上流河川から農地 k への移行率 [y^{-1}]

- $\lambda_{URS,UR}$: 上流河川の河床、河川敷から上流河川への移行率 [y^{-1}]
 A_{URS} : 上流河川の河床、河川敷の放射エネルギー [Bq]
 $\lambda_{AGk,UR}$: 農地 k から上流河川への移行率 [y^{-1}]
 A_{AGk} : 農地 k の放射エネルギー [Bq]
 F_{UR} : 森林から上流河川への移行フラックス [$Bq y^{-1}$]

である。

【湖沼】

$$\frac{d}{dt} A_{LK} = -\left(\lambda_{LK,LKS} + \lambda_{LK,LR} + \sum_k \lambda_{LK,AGk} + \lambda_p\right) A_{LK} + \lambda_{UR,LK} A_{UR} + \lambda_{LKS,LK} A_{LKS} + \sum_k \lambda_{AGk,LK} A_{AGk} + F_{LK} \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} A_{LKS} = -(\lambda_{LKS,LK} + \lambda_p) A_{LKS} + \lambda_{LK,LKS} A_{LK} \quad (12)$$

ここで、

- A_{LK} : 湖沼の放射エネルギー [Bq]
 $\lambda_{LK,LKS}$: 湖沼から湖底堆積物への移行率 [y^{-1}]
 $\lambda_{LK,LR}$: 湖沼から下流河川への移行率 [y^{-1}]
 $\lambda_{LK,AGk}$: 湖沼から農地 k への移行率 [y^{-1}]
 $\lambda_{LKS,LK}$: 湖底堆積物から湖沼への移行率 [y^{-1}]
 A_{LKS} : 湖底堆積物の放射エネルギー [Bq]
 $\lambda_{AGk,LK}$: 農地 k から湖沼への移行率 [y^{-1}]
 F_{LK} : 森林から湖沼への移行フラックス [$Bq y^{-1}$]

であり、その他は既出の通りである。

【下流河川】

$$\frac{d}{dt} A_{LR} = -\left(\lambda_{LR,LRS} + \lambda_{LR,AS} + \sum_k \lambda_{LR,AGk} + \lambda_p\right) A_{LR} + \lambda_{LK,LR} A_{LK} + \lambda_{LRS,LR} A_{LRS} + \sum_k \lambda_{AGk,LR} A_{AGk} + F_{LR} \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} A_{LRS} = -(\lambda_{LRS,LR} + \lambda_p) A_{LRS} + \lambda_{LR,LRS} A_{LR} \quad (14)$$

ここで、

- A_{LR} : 下流河川の放射エネルギー [Bq]
 $\lambda_{LR,LRS}$: 下流河川から下流河川の河床・河川敷への移行率 [y^{-1}]
 $\lambda_{LR,AS}$: 下流河川から近海への移行率 [y^{-1}]

- $\lambda_{LR,AGk}$: 下流河川から農地 k への移行率 [y^{-1}]
 $\lambda_{LRS,LR}$: 下流河川の河床、河川敷から下流河川への移行率 [y^{-1}]
 A_{LRS} : 下流河川の河床、河川敷の放射エネルギー [Bq]
 $\lambda_{AGk,LR}$: 農地 k から下流河川への移行率 [y^{-1}]
 F_{LR} : 森林から下流河川への移行フラックス [$Bq y^{-1}$]

であり、その他は既出の通りである。

【農地】

農地は複数考慮し、各農地について、上流河川、湖沼、下流河川との接続を考慮しておき、接続しない場合は移行率を 0 とする。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} A_{AGk} = & -(\lambda_{AGk,UR} + \lambda_{AGk,LK} + \lambda_{AGk,LR} + \lambda_p) A_{AGk} \\ & + \lambda_{UR,AGk} A_{UR} + \lambda_{LK,AGk} A_{LK} + \lambda_{LR,AGk} A_{LR} \end{aligned} \quad (15)$$

【近海】

$$\frac{d}{dt} A_{AS} = -(\lambda_{AS,ASS} + \lambda_{AS,OS} + \lambda_p) A_{AS} + \lambda_{ASS,AS} A_{ASS} + \lambda_{LR,AS} A_{LR} \quad (16)$$

$$\frac{d}{dt} A_{ASS} = -(\lambda_{ASS,AS} + \lambda_p) A_{ASS} + \lambda_{AS,ASS} A_{AS} \quad (17)$$

ここで、

- A_{AS} : 近海の放射エネルギー [Bq]
 $\lambda_{AS,ASS}$: 近海から海底堆積物への移行率 [y^{-1}]
 $\lambda_{AS,OS}$: 近海から外洋への移行率 [y^{-1}]
 $\lambda_{ASS,AS}$: 海底堆積物から近海への移行率 [y^{-1}]
 A_{ASS} : 海底堆積物の放射エネルギー [Bq]

であり、その他は既出の通りである。

【外洋】

外洋は、全コンパートメントの最終シンクであり、系全体のマスバランスを確認するために使用されるものである。

$$\frac{d}{dt} A_{OS} = -\lambda_p A_{OS} + \lambda_{AS,OS} A_{AS} \quad (18)$$

ここで、

- A_{OS} : 外洋の放射エネルギー [Bq]

であり、その他は既出の通りである。

(4) コンパートメント間の移行率の計算式

コンパートメント間の移行率は、いくつかのものは以下に示す式により定義する。なお、移行率そのものを直接設定することも可能とする。

【地表水から堆積物】

地表水（河川、湖沼、近海）から堆積物（河床・河川敷、湖底堆積物、海底堆積物）への移行率は、以下の式で計算する[7]。

$$\lambda_{w,s} = \frac{S_g}{D_w} \cdot \frac{Kd_p \cdot C_p}{1 + Kd_p \cdot C_p} \quad (19)$$

ここで、

- $\lambda_{w,s}$: 地表水から堆積物への移行率 [y^{-1}]
- S_g : 沈降速度 [$m y^{-1}$]
- D_w : 水深 [m]
- Kd_p : 浮遊粒子状物質と水との分配係数 [$m^3 kg^{-1}$]
- C_p : 浮遊粒子状物質の水中濃度 [$kg m^{-3}$]

である。

【堆積物から地表水】

堆積物から地表水への移行率は、以下の式で計算する[7]。

$$\lambda_{s,w} = \frac{R_s}{D_s} \quad (20)$$

ここで、

- $\lambda_{s,w}$: 堆積物から地表水への移行率 [y^{-1}]
- R_s : 再浮遊速度 [$m y^{-1}$]
- D_s : 堆積物の厚さ [m]

である。

【地表水 a から地表水 b】

地表水 a から地表水 b への移行率は以下の式で計算する[7]。

$$\lambda_{a,b} = \frac{Q_{a,b}}{D_a \cdot S_a} \quad (21)$$

ここで、

- $\lambda_{a,b}$: 地表水 a から地表水 b への移行率 [y^{-1}]

$Q_{a,b}$: 地表水 a から地表水 b への移行水量 [$\text{m}^3 \text{y}^{-1}$]
 D_a : 地表水 a の水深 [m]
 S_a : 地表水 a の面積 [m^2]

である。

(5) コンパートメントの初期量

葉、枝および樹皮の初期量は以下の式で計算する。

$$A_{0,j,k} = Dep_j S_j R_{j,k} \quad (k = LF, BR, BK) \quad (22)$$

ここで、

$A_{0,j,k}$: 森林 j におけるコンパートメント k の初期量 [Bq]
 Dep_j : 森林 j への放射性核種の沈着量 [Bq m^{-2}]
 S_j : 森林 j の面積 [m^2]
 $R_{j,k}$: 森林 j におけるコンパートメント k の捕捉割合 [-]

である。

また、落葉層の初期量は以下の式で計算する。葉、枝および樹皮により遮られなかった成分が全て落葉層に沈着するとする。

$$A_{0,LT} = Dep_j S_j (1 - R_{j,LF} - R_{j,BR} - R_{j,BK}) \quad (23)$$

なお、その他の森林コンパートメントの初期量は0とする。

水系コンパートメントでは、上流河川、湖沼、下流河川、近海および農地において初期量を設定できるようにする。初期量は以下の式で計算する。

$$A_{0,k} = Dep_k S_k \quad (k = UR, LK, LR, AS, AGk, ASS) \quad (24)$$

ここで、

$A_{0,k}$: コンパートメント k の初期量 [Bq]
 Dep_k : コンパートメント k への放射性核種の沈着量 [Bq m^{-2}]
 S_k : コンパートメント k の面積 [m^2]

である。

堆積物に相当するコンパートメントの初期量は0とする。ただし、海底堆積物の初期量は与えることができることとした。

(6) コンパートメントの濃度

森林コンパートメントの濃度は以下の式で計算する。

$$C_{j,k} = \frac{A_{j,k}}{S_j \rho_{j,k}} \quad (25)$$

ここで、

- $C_{j,k}$: 森林 j におけるコンパートメント k の濃度 [Bq kg^{-1}]
- $A_{j,k}$: 森林 j におけるコンパートメント k の放射エネルギー [Bq]
- S_j : 森林 j の面積 [m^2]
- $\rho_{j,k}$: 森林 j におけるコンパートメント k の単位面積当たりの質量 [kg m^{-2}]

である。

水系コンパートメントのうち、地表水に相当するコンパートメントの濃度は以下の式で計算する。

$$C_k = \frac{A_k}{S_k D_k} \quad (26)$$

ここで、

- C_k : コンパートメント k の濃度 [Bq m^{-3}]
- A_k : コンパートメント k の放射エネルギー [Bq]
- S_k : コンパートメント k の面積 [m^2]
- D_k : コンパートメント k の水深 [m]

である。

なお、外洋の濃度は、無限量の海水で希釈されると仮定し、放射エネルギーに関わらず 0 とする。

水系コンパートメントのうち、堆積物および農地に相当するコンパートメントの濃度は以下の式で計算する。

$$C_k = \frac{A_k}{S_k D_k \rho_k} \quad (27)$$

ここで、

- C_k : コンパートメント k の濃度 [Bq kg^{-1}]
- A_k : コンパートメント k の放射エネルギー [Bq]
- S_k : コンパートメント k の面積 [m^2]
- D_k : コンパートメント k の深さ [m]
- ρ_k : コンパートメント k の真密度 [kg m^{-3}]

である。

2.2.3. 数学モデル（静的コンパートメント）

各静的コンパートメントの濃度は、基本的に、元とする動的コンパートメントの濃度に、移行係数や濃縮係数に相当する係数と、移行抑制や利用率等に相当する無次元の係数を乗じることで計算するものとする。

$$C_n = F_{k,n} T_{k,n} C_k \quad (28)$$

ここで、

- C_n : 静的コンパートメント n の濃度 [Bq kg^{-1}] or [Bq m^{-3}]

- $F_{k,n}$: 無次元係数 [-]
 $Tf_{k,n}$: 移行係数・濃縮係数 [Bq kg⁻¹ per Bq kg⁻¹], [Bq kg⁻¹ per Bq m⁻³], [Bq m⁻³ per Bq m⁻³]
 C_k : 動的コンパートメント k の濃度 [Bq kg⁻¹] or [Bq m⁻³]

である。

ただし、農作物を想定した場合、農地土壌からの移行と灌漑水の沈着による移行を想定した以下の式 (8) で計算する。

$$C_{crop} = \{CF_{crop} + (1 - F_{crop})S_{crop}\}C_{AGk} + \mu_{crop}I_{crop} \frac{F_{trans} + (1 - F_{crop})}{Y_{crop}W_{crop}} C_{w,k} \quad (29)$$

ここで、

- C_{crop} : 農作物中の濃度 [Bq kg⁻¹]
 CF_{crop} : 土壌から農作物への移行係数 [Bq kg⁻¹ (f. w.) per Bq kg⁻¹ (d. w.)]
 F_{crop} : 表面汚染の調理時ロス割合 [-]
 S_{crop} : 土壌の付着率 [kg (d.w.) per kg (f. w.)]
 C_{AGk} : 農地土壌の濃度 [Bq kg⁻¹ (d. w.)]
 μ_{crop} : 農作物による灌漑水の阻止率 [-]
 I_{crop} : 単位面積あたりの灌漑水量 [m y⁻¹]
 F_{trans} : 転流割合 [-]
 Y_{crop} : 農作物の栽培密度 [kg m⁻²]
 W_{crop} : ウェザリング率 [y⁻¹]
 $C_{w,k}$: 水系 k の濃度 [Bq m⁻³]

である。

3. コンパートメントモデルを用いた試解析の実施

前章において構築したコンパートメントモデルを用いて、福島県浜通りを流下する請戸川流域を想定した解析を実施した。設定したコンパートメントおよび接続関係を表 3.1、図 3.1 に示す。河川中腹に位置する湖沼（大柿ダム湖）を境として、河川を上流河川と下流河川にわけ、上流域および下流域にそれぞれ落葉樹林、常緑樹林を配置する。森林内は、図 2.2 に示すコンパートメントおよび接続関係で構成される。3.1.2 にて後述する森林 2 成分モデルでは、各森林を 2 つに分ける。プログラム上で都市域はコンパートメントとして存在しないが、接続関係は農地と同様であることから、農地コンパートメントを利用している。

なお、面積や沈着量は請戸川流域の値としたが、森林内コンパートメントの移行率や森林・都市域・農地からの流出率などは他地点での調査結果を参考にしている。

表 3.1 コンパートメントの接続関係

コンパートメント名称	上流 / 下流	土地利用形態	接続元	接続先
上流落葉樹林	上流	落葉樹	—	上流河川
上流常緑樹林	上流	常緑樹	—	上流河川
下流落葉樹林	下流	落葉樹	—	下流河川
下流常緑樹林	下流	常緑樹	—	下流河川
農地 1	上流	水田、畑	上流河川	上流河川
農地 2	下流	水田、畑	下流河川	下流河川
農地 3	下流	水田、畑	湖沼	下流河川
上流都市域	上流	都市、草地、裸地	—	上流河川
下流都市域	下流	都市、草地、裸地	—	下流河川

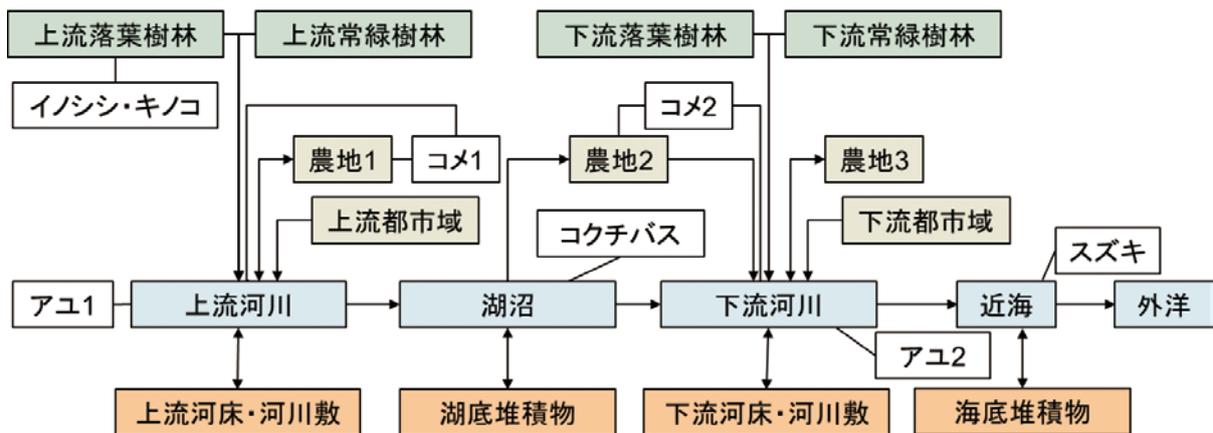


図 3.1 請戸川流域を想定したコンパートメント接続（森林 1 成分モデル、白抜きは静的コンパートメント）

3.1. パラメータの設定

3.1.1. 森林、農地および都市域の面積と沈着量

森林、農地および都市域の面積・沈着量は、以下の手順で計算した。

(1) データの選定

原子力機構は、宇宙航空研究開発機構による高解像度土地利用土地被覆図データを、約 100mメッシュ間隔のデータに加工し、公開している[9]。このデータには、森林、農地、都市域の属性に加えて、落葉樹と常緑樹の属性が含まれているため、落葉樹と常緑樹を分けて表現する今回の解析に適している。

このデータから、「国土交通省、国土数値情報ダウンロードサービス」[10]の「流域メッシュ」データを使用して、請戸川本流に該当するメッシュを抽出した（図 3.2）。

次に、「流域メッシュ」データの「単位流域コード^a」により上流および下流の2領域に分割した。単位流域コードが 11 以上のメッシュを上流とした（図 3.3）。

(2) 面積

各コンパートメントの面積は、上流/下流の分類と土地利用種別により、各メッシュの面積を合計して求めた（表 3.2、表 3.5）。

(3) 沈着量

各コンパートメントの沈着量は、「放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト」[9]で公開されている「放射性物質の分布状況等調査による航空機モニタリング（セシウム沈着量）」の第1次航空機モニタリングによる¹³⁷Csの沈着量データ（平成23年4月29日換算）に基づき（図 3.4）、上述した各コンパートメントが該当するメッシュの中心位置がある点の沈着量を求め、各コンパートメントについてその算術平均を計算し設定した（表 3.2、表 3.5）。

表 3.2 森林モデルのパラメータ設定（1）

Card	変数名	意味	単位	設定値				出典
				上流 落葉樹林	上流 常緑樹林	下流 落葉樹林	下流 常緑樹林	
2	s	森林の面積	m ²	4.9E+07	2.6E+07	1.7E+07	1.4E+07	※1
	dep	森林への沈着量	成分1	2.9E+06	3.3E+06	4.7E+06	3.4E+06	※1、※2
			成分2	7.3E+05	8.3E+05	1.2E+06	8.5E+05	※1、※2

※1 GIS データより計算。

※2 GIS データおよび第1次航空機モニタリングによるCs沈着量より計算。

^a 同一水系域の流域界を区別するための1から始まる通し番号。河川流路の下流側から付番する（国土数値情報ダウンロードサービスの説明より引用）。

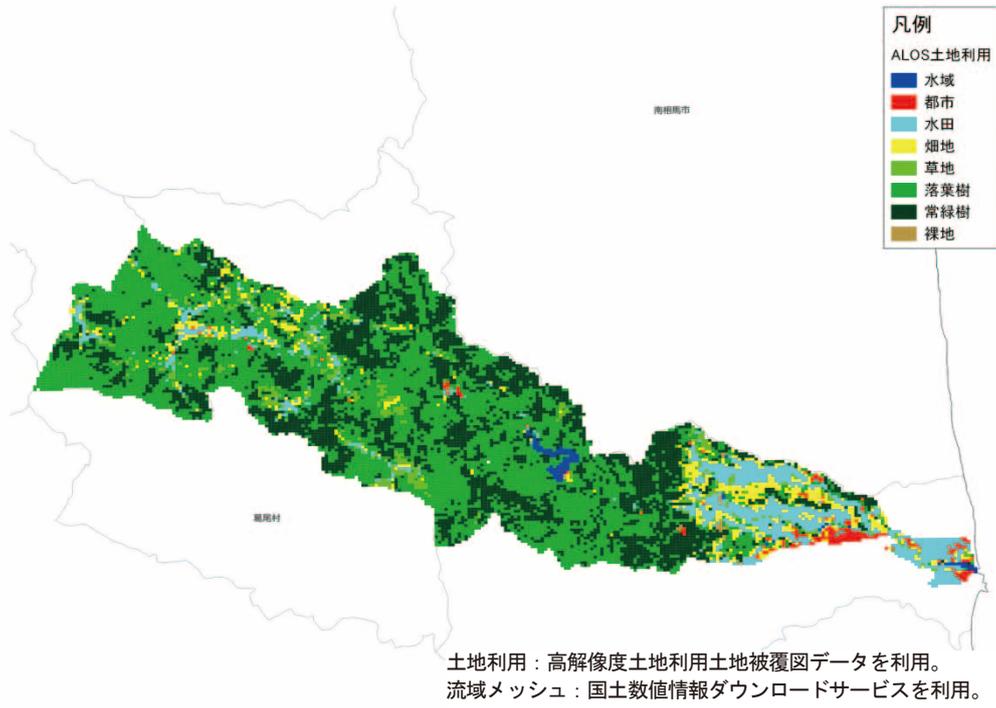


図 3.2 請戸川流域の土地利用形態

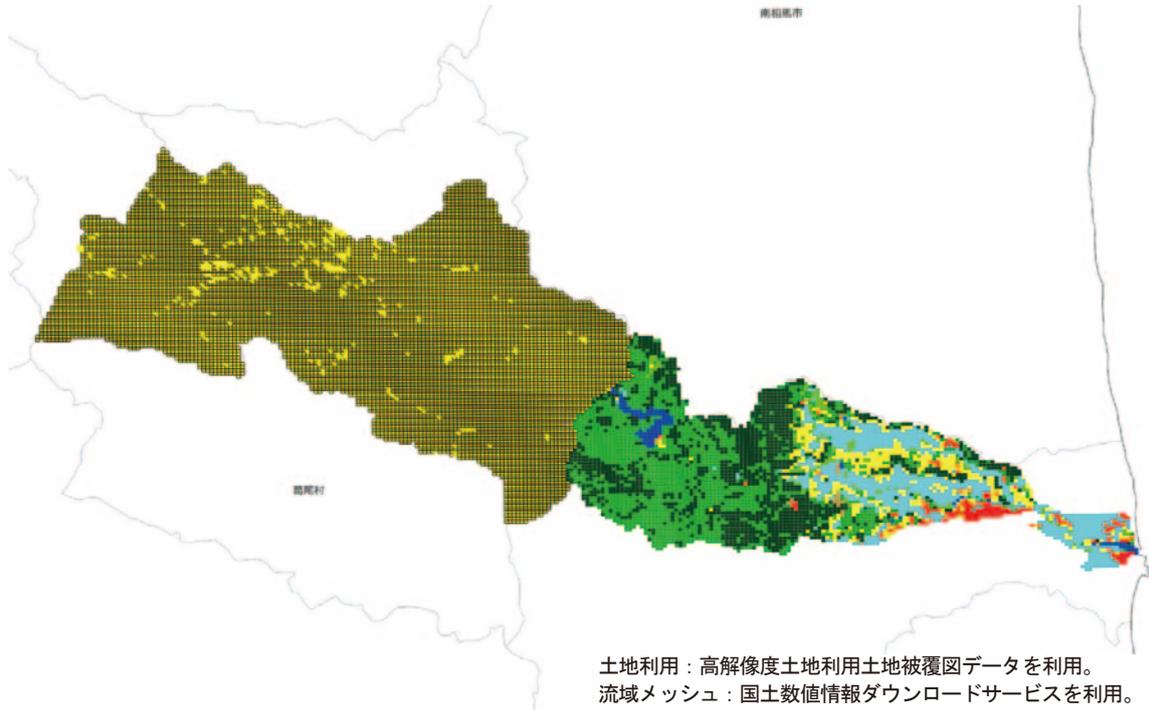


図 3.3 上流・下流の区別
(上流側を選択状態表示にしている。凡例は図 3.2 と同じ。)

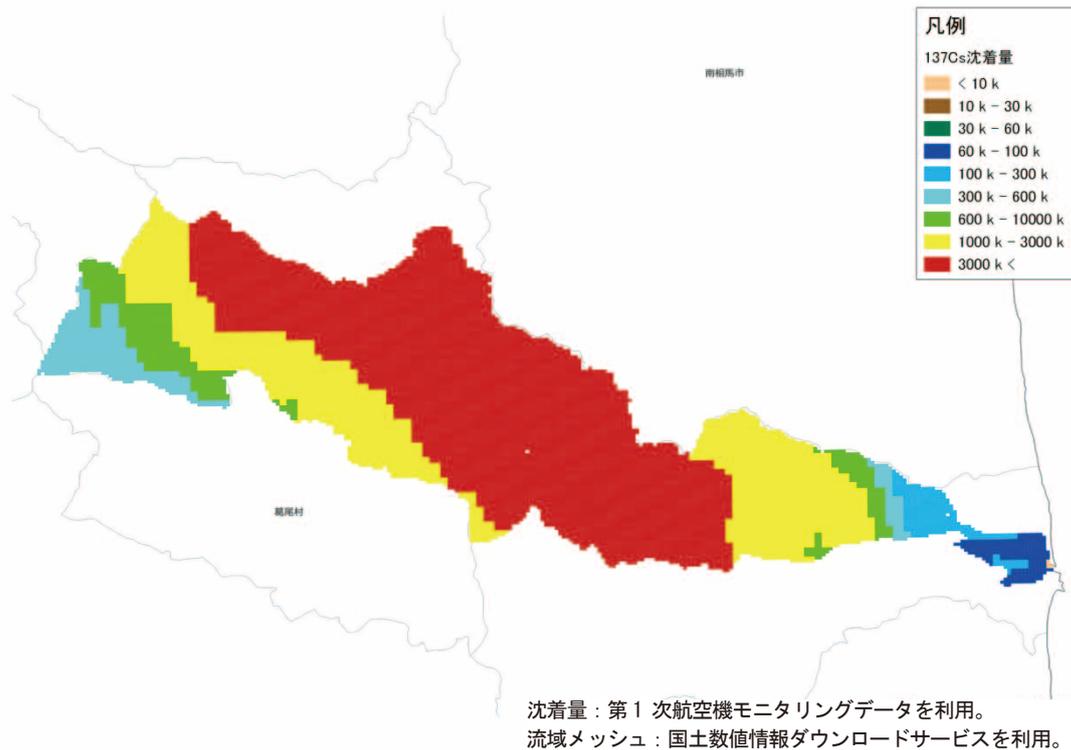


図 3.4 第1次航空機モニタリングによる ^{137}Cs 沈着量 (単位: Bq/m^2)

3.1.2. 森林内のコンパートメント間の移行率

森林内コンパートメントの初期インベントリおよびコンパートメント間の移行率は、それらパラメータを説明変数とした非線形最小二乗法によるパラメータフィッティングを行うプログラムを作成し、それを用いて導出することとした。

なお、フィッティング対象としたのは、参考文献[5]の図6に示された「2011-2014年における各調査地の放射性セシウムの部位別分布割合」であり、図3.5に示すような各コンパートメントの放射性セシウムのインベントリ(相対値、単位%)の時間変化である。

(1) フィッティングの手順について

事前に、全パラメータを対象としたフィッティングを実施したが、非線形最小二乗法は初期値依存性があるため、約20のパラメータに対するフィッティングは収束しないなど、非常に困難であった。そこで、以下の手順を用いたところ、実測値をよく再現する有効な結果が得られた。

- コンパートメントの中でも上流側のコンパートメントに関連するパラメータのみをターゲットにフィッティングを行う。フィッティングの初期値設定は結果を見ながら判断する。
- 対象とするコンパートメントを増やし、導出済みのパラメータについては前回のフィッティングで得られたパラメータを初期値とし、新たに対象となったパラメータについて初期値を調整しながらフィッティングを実施する。
- 上記の手順を繰り返しながら、対象とするコンパートメントを増やしていく。

(2) 2成分モデルの適用

まず、川内スギ林のデータを対象として、1成分のコンパートメント構成によるパラメータフィッティングを実施した。その結果、以下の問題点が明らかとなった。

- 土壌層は初期沈着を考慮していないため、2012年のインベントリの上昇は、落葉層から速やかに移行したことを示している。
- そのため、落葉層のインベントリはそのまま葉や枝のように単調に減少することが考えられ、本モデルによる解析結果もそのような結果（図 3.6）となった。
- しかし、観測値は2012年以降からフラットになる傾向を示す。
- 土壌から樹体内を通じて転流し再度落葉層に達する経路もモデル上は想定しているが、心材、辺材内のインベントリは他のコンパートメントに比べて非常に少なく、この経路は考えられない。

そこで、落葉層から土壌層への移行は、移行率の異なる2成分のモデルで表すこととした。その際、移行の遅い成分の移行率を求めるにはデータ数が少ないことを考慮し、遅い成分の移行率は 0 y^{-1} 、遅い成分の割合はフラットになった時点の値から類推し20%と設定した。

2成分モデルによるフィッティング結果を図 3.7 に示す。2成分モデルを適用することにより、良好な結果が得られた。

(3) 移行率の設定

同様の手順を大玉コナラ林についても実施した（フィッティング結果を図 3.8 に示す）。以上の結果から、常緑樹林の値として川内スギ林の値を、落葉樹林の値として大玉コナラ林の移行率を採用した（表 3.3）。

表 3.3 森林モデルのパラメータ設定 (2)

Card	変数名	意味	単位	設定値		出典	
				落葉樹	常緑樹		
3	rho(lf)	単位面積あたりの葉の重量	kg m ⁻²	0.13	1.2	※2	
	lam(lf,br)	葉から枝への移行率	y ⁻¹	0.010	0.0075	※1	
	lam(lf,bk)	葉から樹皮への移行率	y ⁻¹	0.0096	0.0023	※1	
	lam(lf,lt)	葉から落葉層への移行率	y ⁻¹	2.1	1.3	※1	
	rlf	葉への沈着割合	—	0.21	0.57	※1	
4	rho(br)	単位面積あたりの枝の重量	kg m ⁻²	0.62	0.72	※2	
	lam(br,lf)	枝から葉への移行率	y ⁻¹	0.012	0.024	※1	
	lam(br,bk)	枝から樹皮への移行率	y ⁻¹	0.0092	0.0052	※1	
	lam(br,lw)	枝から辺材への移行率	y ⁻¹	3.8E-04	0.0065	※1	
	lam(br,dw)	枝から心材への移行率	y ⁻¹	0.0013	0.0041	※1	
	lam(br,lt)	枝から落葉層への移行率	y ⁻¹	0.61	0.73	※1	
	rbr	枝への沈着割合	—	0.086	0.14	※1	
5	rho(bk)	単位面積あたりの樹皮の重量	kg m ⁻²	0.40	0.44	※2	
	lam(bk,lw)	樹皮から辺材への移行率	y ⁻¹	0.0045	0.0015	※1	
	lam(bk,lt)	樹皮から落葉層への移行率	y ⁻¹	0.17	0.22	※1	
	rbk	樹皮への沈着割合	—	0.014	0.040	※1	
6	rho(lw)	単位面積あたりの辺材の重量	kg m ⁻²	1.5	4.9	※2	
	lam(lw,br)	辺材から枝への移行率	y ⁻¹	0.012	1.0	※1	
	lam(lw,bk)	辺材から樹皮への移行率	y ⁻¹	0.011	1.0	※1	
	lam(lw,dw)	辺材から心材への移行率	y ⁻¹	11	1.1	※1	
7	rho(dw)	単位面積あたりの心材の重量	kg m ⁻²	2.8	2.0	※2	
	lam(dw,lw)	辺材から心材への移行率	y ⁻¹	39	0.92	※1	
8	rho(lt)	単位面積あたりの落葉層の重量	kg m ⁻²	0.58	0.58	※4	
	lam(lt,lw)	落葉層から心材への移行率	y ⁻¹	0.0011	0.015	※1	
	lam(lt,so)	落葉層から土壌層への移行率	成分1	y ⁻¹	2.0	3.0	※1
			成分2	y ⁻¹	0.0	0.0	設定
lamout(lt)	落葉層から水系への移行率	y ⁻¹	0.0	0.0	※5		
9	rho(so)	単位面積あたりの土壌層の重量	kg m ⁻²	15	15	※4	
	lam(so,lw)	土壌層から心材への移行率	y ⁻¹	1.0E-05	0.0011	※1	
	lamout(lt)	土壌層から水系への移行率	y ⁻¹	0.001	0.001	※3	

※1 林野庁データ[5]にフィッティング。

※2 梶本ほか[11]より。

※3 F-TRACE プロジェクトの調査[13]から推定。

※4 林野庁プレスリリース[12]より。

※5 Iwagami et al.[14]から推定。

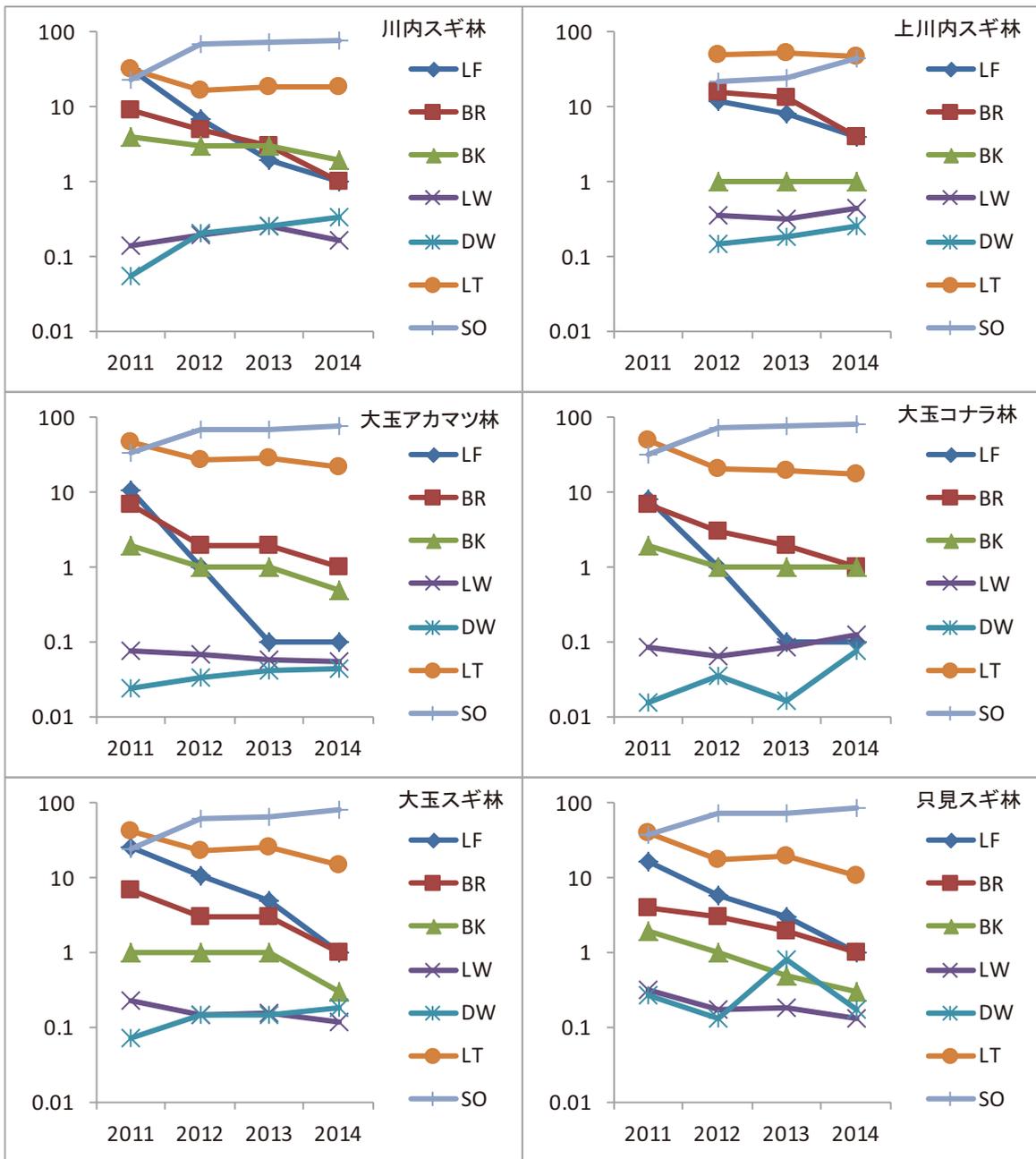


図 3.5 林内における放射性セシウムインベントリ相対値の時間変化 [5]

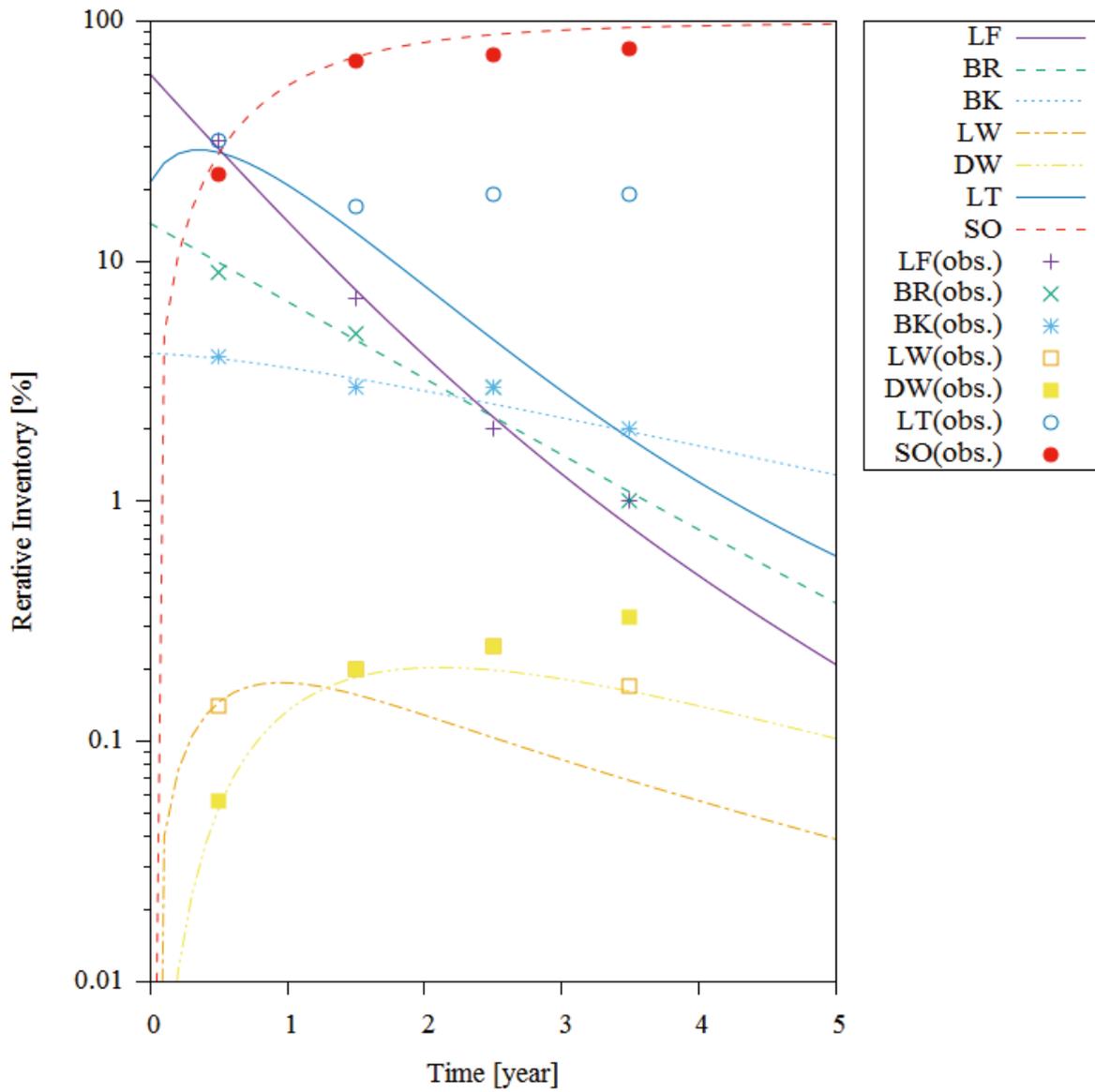


図 3.6 1成分モデルを使用したフィッティング結果（対象：川内スギ林）

※ 2年目以降フラットになる落葉層（LT）の値が再現できていない。

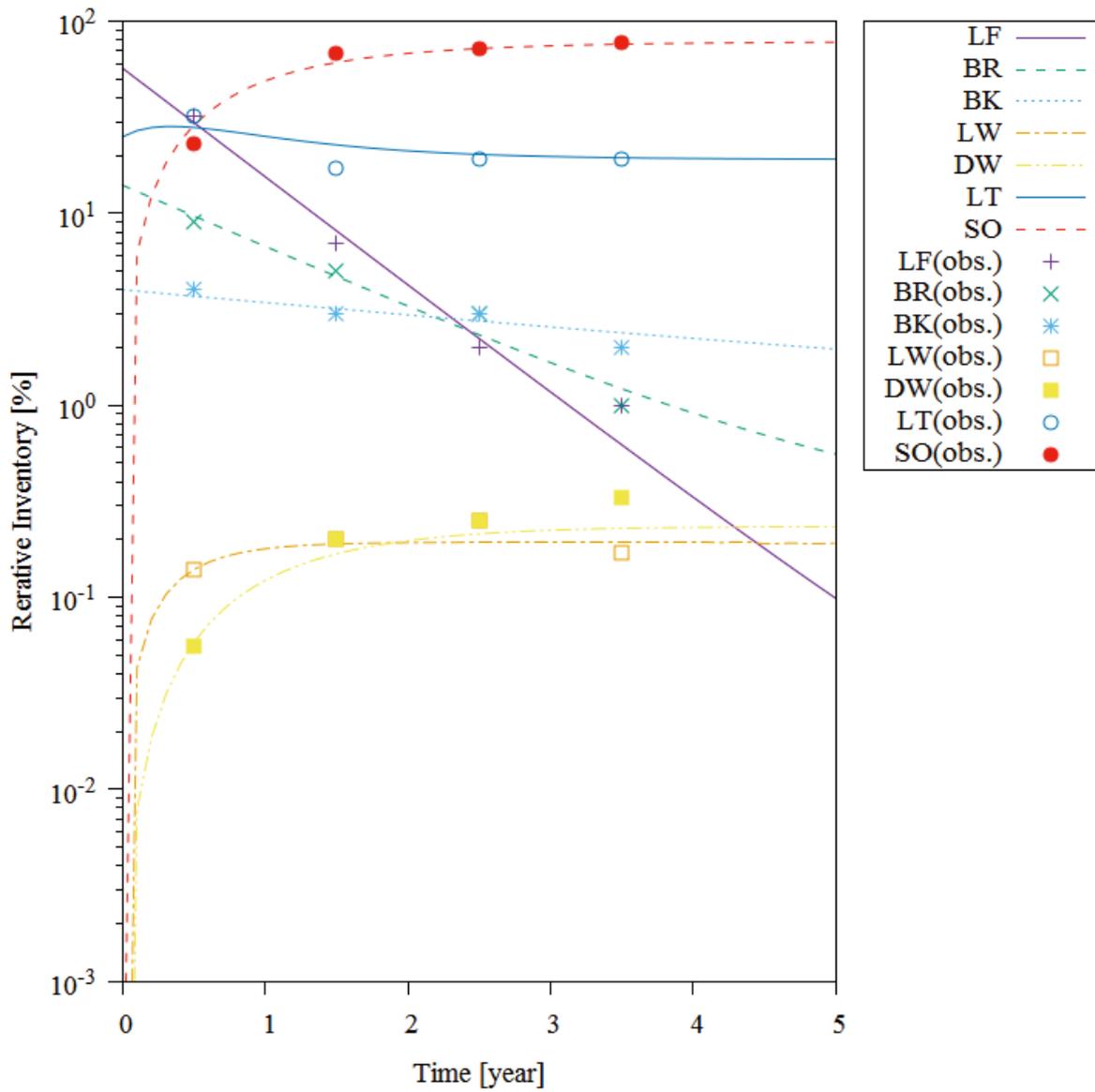


図 3.7 2成分モデルを使用したフィッティング結果 (対象: 川内スギ林)

※ 各コンパートメントの時間変化を良好に再現するようになった。

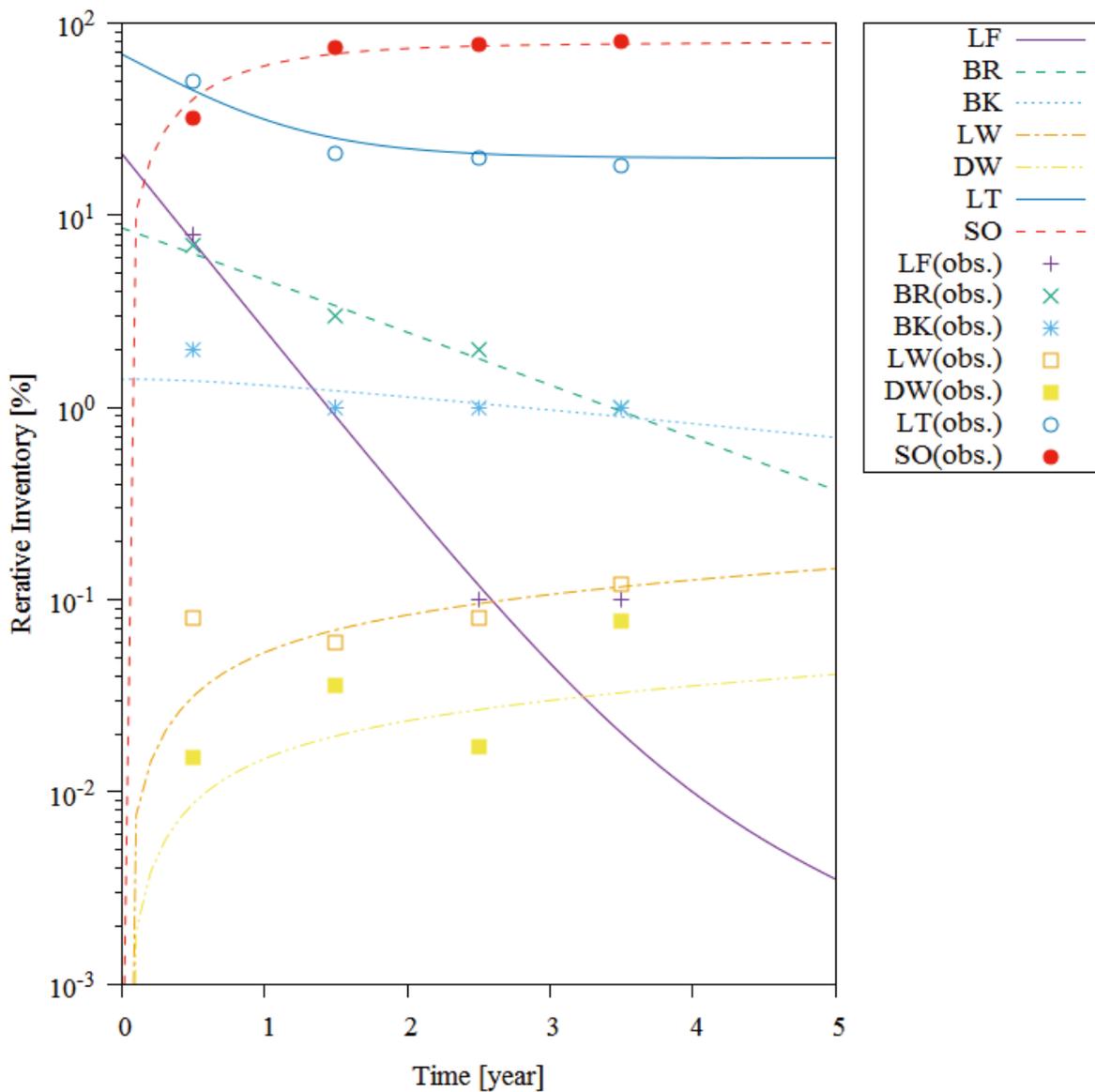


図 3.8 2成分モデルを使用したフィッティング結果 (対象：大玉コナラ林)

3.1.3. 森林内のコンパートメントの単位面積当たりの重量

樹体内のコンパートメント（葉、枝、樹皮、心材、辺材）の単位面積当たりの重量は、「森林生態系における樹木・木材の放射性セシウム分布と動態の調査法」[11]に記載された地上部現存量 (Mg ha^{-1}) から換算して求めた。常緑樹は同文献の表 5aのスギの値を、落葉樹は、同文献の表 5bのその他樹種の値を採用した (表 3.3)。

一方、落葉層および土壌層の単位面積当たりの重量は、林野庁プレスリリース[12]、別添3に示された、落葉層および土壌の単位重量あたりの放射能濃度と、単位面積あたりの放射能量 (いずれも ^{134}Cs + ^{137}Cs の値) から、各地点の単位面積当たりの重量を求め、その平均値を採用した (表 3.3)。

3.1.4. 森林から水系への移行率

森林の土壌層から水系への移行率は、F-TRACEプロジェクトの調査から推定された年間0.1% (0.001 y^{-1}) [13]を採用した。Iwagami et al.[14]の調査によると森林からの流出において粗大有機物の寄与はほとんどないことから、落葉層から水系への移行率はゼロとした (表 3.3)。

3.1.5. 河川、湖沼、近海の面積と沈着量

水系モデルに対するパラメーター一覧を表 3.4、表 3.5 に示す。

(1) 面積

「国土地理院、基盤地図情報ダウンロードサービス」[15]における、「基盤地図情報基本項目」より、請戸川付近の「水涯線」ポリゴンデータおよび河川ラインデータを使用し、請戸川本流に属するデータを抽出した後、次の加工を行った。

- 請戸川下流域は、標高データから堤防を視認し領域を拡張した。
- 請戸川上流域および小出谷川は、水涯線ポリゴンに含まれない線要素の部分を、幅 1m のポリゴンに変換して追加した。

その結果を図 3.9 に示す。その後、GIS の機能を使用して各ポリゴンの面積を計算した。面積の計算結果はそれぞれ以下の通りとなり、これを採用した (表 3.4)。

上流河川	: $1.9 \times 10^5 \text{ m}^2$
湖沼 (大柿ダム)	: $9.1 \times 10^5 \text{ m}^2$
下流河川	: $1.3 \times 10^6 \text{ m}^2$

近海的面積は、核燃料サイクル機構の「地層処分研究開発第2次取りまとめ」[8] (以下、「第2次取りまとめ」とする。) に記載された沿岸海域水の面積の設定 $2.0 \times 10^6 \text{ m}^2$ を採用した。

(2) 沈着量

一方、上流河川、湖沼、下流河川の沈着量は、10 m 間隔の点群を生成した後、各コンパートメントを表現するポリゴンに含まれる点を抽出した上で、それらの点群が該当する地点の沈着量データ (前述の航空機モニタリングデータ) をコンパートメント毎に算術平均することにより求めた。

海底堆積物への沈着については、Otosaka and Kato [16]による調査結果から 200m深度までの沈着量の平均値を下記のように算出した。

$$\{(1.6+0.26) \times 10^{14}\} \div \{(7.9+6.6) \times 10^3\} \text{ Bq km}^{-2} = 13 \text{ kBq m}^{-2}$$

表 3.4 水系モデルのパラメータ設定 (1)

Card	変数名	意味	単位	設定値	出典
10	s	上流河川の面積	m ²	1.9E+05	※1
	dep	上流河川への沈着量	Bq m ⁻²	6.5E+06	※2
	d	上流河川の水深	m	0.4	※3
	lam(ur,urs)	上流河川から上流河川の河床・河川敷への移行率	y ⁻¹	4.2E+01	設定
	lam(ur,lk)	上流河川から湖沼への移行率	y ⁻¹	4.2E+03	※4
	lam(ur,agk)	上流河川から農地kへの移行率	y ⁻¹	表3.5	
11	ds	上流河川の河床・河川敷の深さ	m	0.1	※5
	rho	上流河川の河床・河川敷の土壌密度	kg m ⁻³	2650	※5
	lam(urs,ur)	上流河川の河床・河川敷から上流河川への移行率	y ⁻¹	0.0E+00	設定
12	s	湖沼の面積	m ²	9.1E+05	※1
	dep	湖沼への沈着量	Bq m ⁻²	6.3E+06	※2
	d	湖沼の水深	m	38	※6
	lam(lk,lrs)	湖沼から湖底堆積物への移行率	y ⁻¹	7.2E+01	※7
	lam(lk,lr)	湖沼から下流河川への移行率	y ⁻¹	9.1	※4
	lam(lk,agk)	湖沼から農地kへの移行率	y ⁻¹	表3.5	
13	ds	湖底堆積物の深さ	m	0.1	※5
	rho	湖底堆積物の密度	kg m ⁻³	2650	※5
	lam(urs,ur)	湖底堆積物から湖沼への移行率	y ⁻¹	0.0E+00	設定
14	s	下流河川の面積	m ²	1.3E+06	※1
	dep	下流河川への沈着量	Bq m ⁻²	9.7E+05	※2
	d	下流河川の水深	m	0.4	設定
	lam(lr,lrs)	下流河川から下流河川の河床・河川敷への移行率	y ⁻¹	9.1E+00	設定
	lam(lr,as)	下流河川から近海への移行率	y ⁻¹	9.1E+02	※4
	lam(lr,agk)	下流河川から農地kへの移行率	y ⁻¹	表3.5	
15	ds	下流河川の河床・河川敷の深さ	m	0.1	※5
	rho	下流河川の河床・河川敷の土壌密度	kg m ⁻³	2650	※5
	lam(lrs,lr)	下流河川の河床・河川敷から下流河川への移行率	y ⁻¹	0.0E+00	設定
16	s	近海の面積	m ²	2.0E+06	※5
	dep	近海への沈着量	Bq m ⁻²	0	設定
	d	近海の水深	m	100.0	※8
	lam(as,ass)	近海から海底堆積物への移行率	y ⁻¹	2.5E-02	※7
	lam(as,os)	近海から外洋への移行率	y ⁻¹	2.4E+00	※4
17	ds	海底堆積物の深さ	m	0.5	※5
	rho	海底堆積物の密度	kg m ⁻³	2650	※5
	lam(ass,as)	海底堆積物から近海への移行率	y ⁻¹	0.0E+00	設定
	dep	海底堆積物への沈着量	Bq m ⁻²	1.3E+04	※8

※1 GIS データより計算。

※2 GIS データおよび第1次航空機モニタリングによるCs沈着量より計算。

※3 水産庁資料[17]より。

※4 式(21)から算出。

※5 第2次取りまとめ[8]より。

※6 東北農政局整備部 [18]より。

※7 式(19)から算出。

※8 Ootosaka and Kato [16]より。

表 3.5 水系モデルのパラメータ設定 (2)

Card	変数名	意味	単位	設定値					出典
				農地1 (上流)	農地2 (下流)	農地3 (下流)	上流 都市域	下流 都市域	
18	s	農地kの面積	m ²	5.8E+06	7.0E+06	7.0E+06	4.4E+06	3.7E+06	※1
	dep	農地kへの沈着量	Bq m ⁻²	3.4E+06	1.1E+06	1.1E+06	3.4E+06	1.1E+06	※1、※2
	d	農地kの深さ	m	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	※3
	rho	農地kの土壌密度	kg m ⁻³	2650	2650	2650	2650	2650	※3
	lam(agk,ur)	農地kから上流河川への移行率	y ⁻¹	1.9E-03	-	-	2.0E-03	-	農地※5 都市域※6
	lam(agk,lk)	農地kから湖沼への移行率	y ⁻¹	-	-	-	-	-	
	lam(agk,lr)	農地kから下流河川への移行率	y ⁻¹	-	1.9E-03	1.9E-03	-	2.0E-03	
10	lam(ur,agk)	上流河川から農地kへの移行率	y ⁻¹	5.3E+01	-	-	-	-	※4
12	lam(lk,agk)	湖沼から農地kへの移行率	y ⁻¹	-	3.8E-01	-	-	-	
14	lam(lr,agk)	下流河川から農地kへの移行率	y ⁻¹	-	-	2.6E+01	-	-	

※1 GIS データより計算。

※2 GIS データおよび第1次航空機モニタリングによるCs沈着量より計算。

※3 第2次取りまとめ[8]より。

※4 第2次取りまとめ[8]の値から計算。

※5 恩田他[21]より。

※6 Koibuchi et al.[22]より。



図 3.9 請戸川の領域ポリゴン

3.1.6. 河川、湖沼、近海の深度および下流側コンパートメントへの移行率

(1) 上流河川

上流河川の深度は、水産庁資料[17]、表 2-1 に示された請戸川上流、塩浸（しおびて）の水深の平均

値から 0.4 m と設定した。

上流河川から湖沼への移行率は、流量を後述の湖沼の放流量の半分である $10 \text{ m}^3/\text{s}$ と同じであるとし、これを体積で割ることにより求めた (式(21))。

$$10 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365.2422 \div (0.4 \times 1.9 \times 10^5) = 4.2 \times 10^3 \text{ y}^{-1}$$

(2) 湖沼 (大柿ダム)

湖沼 (大柿ダム) の深度は、東北農政局整備部の資料[18]より 38m とした。

湖沼から下流河川への移行率は、請戸川土地改良区のホームページ[19]に記載された放流工の最大放流量 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ の半分である $10 \text{ m}^3/\text{s}$ と、体積から式(21)に基づき計算した。

$$10 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365.2422 \div (38 \times 9.1 \times 10^5) = 9.1 \text{ y}^{-1}$$

(3) 下流河川

下流河川の深度は、上流と同じ 0.4 m と仮定した。下流河川から近海への移行水量は、上流河川の流量に対して支流の影響があることから流量 $15 \text{ m}^3/\text{s}$ を仮定した。下流河川から近海への移行率は式(21)に基づき求めた。

$$15 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365.2422 \div (0.4 \times 1.3 \times 10^6) = 9.1 \times 10^2 \text{ y}^{-1}$$

(4) 近海

近海は、Otosaka and Kato [16]において放射性セシウムの初期沈着が 90%以上となる深度である 200m までを想定した。深度は、外洋に向かってほぼ一様な海床勾配であることから平均の 100m を採用した。外洋への移行水量は河川から近海への移行水量と同じとし、外洋への移行率は式(21)に基づき以下のように求めた。

$$15 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365.2422 \div (100 \times 2.0 \times 10^6) = 2.4 \text{ y}^{-1}$$

3.1.7. 河川、湖沼、近海の堆積物に関するパラメータ

湖沼および近海における水から堆積物への移行率については、式(19)に基づき算出した。パラメータおよび設定根拠を表 3.6 に示した。

河川における水から堆積物への移行率については、式(19)を使わず、下流へ流出する量の 1% が河床に堆積すると仮定した。また、本解析では、侵食は考慮しないこととした。

表 3.6 水系モデルのパラメータ設定 (3)

パラメータ	単位	湖沼	近海
浮遊粒子状物質と水との分配係数 K_d	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$	500 ^{※1}	3.5 ^{※5}
浮遊粒子状物質の水中濃度 C_p	kg m^{-3}	0.05 ^{※2}	1×10^{-3} ^{※2}
水深 D_w	m	38 ^{※3}	100 ^{※6}
沈降速度 S_g	m y^{-1}	2.8×10^3 ^{※4}	7.1×10^2 ^{※7}

※1 実測から推定

※2 第2次取りまとめ[8]より。

※3 請戸川土地改良区のホームページ[19]より。

※4 粒径 $10 \mu\text{m}$ を仮定し、Stokes 式から算出。

※5 Otsuka et al. [20]より。

※6 Otsuka and Kato [16]より。

※7 粒径 $5 \mu\text{m}$ を仮定し、Stokes 式から算出。

3.1.8. 農地、都市域と他のコンパートメント間の移行率

(1) 農地への移行率

上流側に位置している農地1は、土地利用データから畑地が多いことを考慮し、第2次取りまとめ[8]における畑地の灌漑水量 0.7 m y^{-1} と、農地1の面積、取水元である上流河川の体積から計算した。

農地2および3は、土地利用データから水田が多いことを想定し、第2次取りまとめ[8]における水田の灌漑水量 1.9 m y^{-1} と、各農地の面積、取水元の体積からそれぞれ計算して設定した。

$$\text{農地1} : 0.7 \text{ m y}^{-1} \times 5.8 \times 10^6 \text{ m}^2 \div (1.9 \times 10^5 \text{ m}^2 \times 0.4 \text{ m}) = 53 \text{ y}^{-1}$$

$$\text{農地2} : 1.9 \text{ m y}^{-1} \times 7.0 \times 10^6 \text{ m}^2 \div (9.1 \times 10^5 \text{ m}^2 \times 38 \text{ m}) = 0.38 \text{ y}^{-1}$$

$$\text{農地3} : 1.9 \text{ m y}^{-1} \times 7.0 \times 10^6 \text{ m}^2 \div (1.3 \times 10^6 \text{ m}^2 \times 0.4 \text{ m}) = 26 \text{ y}^{-1}$$

(2) 農地からの移行率

各農地からの移行率は、恩田他[21]、「図-41 川俣町の試験水田における年間のセシウム137の収支」に示された初期沈着量 308 kBq m^{-2} と、流出量 0.58 kBq m^{-2} から求めた値 ($0.58/308=0.19\% \text{ y}^{-1}$) とした(表 3.5)。

(3) 都市域からの移行率

都市域からの移行率は、Koibuchi et al.[22]、Table 1 に示された2012年の大堀川流域への初期沈着量 $1,900,000 \text{ MBq}$ と、大堀川の放射性セシウムのフラックス $3,800 \text{ MBq y}^{-1}$ から設定した ($3.8/1900=0.2\% \text{ y}^{-1}$) (表 3.5)。

3.1.9. 静的コンパートメントとそのパラメータ

本作業では、静的コンパートメントとして表 3.7 に示すものを想定し、それらのパラメータは表 3.8 に示す通りに設定した。各パラメータは、以下の方針で設定した。

(1) コメ

第2次取りまとめ[8]のパラメータ設定に準拠した。

なお、農作物による灌漑水の阻止率は、第2次取りまとめの数値である0.05に対して、灌漑水に含まれる溶存態の割合0.12[23]を考慮して設定した。

(2) 魚類

第2次取りまとめ[8]における、Csの淡水魚類への濃縮係数および海水魚類への濃縮係数を単位換算の上設定した。

(3) イノシシ

IAEA TRS No. 472[24]、TABLE 44には、土壌からWildboarへのCsの移行係数が幅で示されている ($5 \times 10^{-4} \sim 0.2 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$)。その幾何平均値である $0.01 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ を設定した。

なお、元とするコンパートメントが落葉層の場合、質量濃度（単位：Bq kg⁻¹）を元にして計算するプログラムの仕様であるため、係数1として、単位面積当たりの放射エネルギーに換算するための数値である 0.58 kg m^{-2} （表 3.8 参照）を設定した。

(4) キノコ

IAEA TRS No. 472、TABLE40（土壌からきのこ類へのCsの移行係数）から、落葉層における腐生菌であり、サンプル数も比較的多い3である *Lepista (nuda, saeva)*（ムラサキシメジ）の幾何平均値である $0.01 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ を採用した。

なお、キノコについても、係数1としてイノシシの場合と同様の理由から 0.58 kg m^{-2} を設定した。

表 3.7 評価する静的コンパートメント

No.	名称	元とする動的 コンパートメント
1	コメ	農地 1、上流河川
2	コメ	農地 2、下流河川
3	魚介類（アユ）	上流河川
4	魚介類（アユ）	下流河川
5	ため池の魚（コクチバス）	湖沼
6	海域の魚（スズキ）	近海
7	野生動物（イノシシ）	上流落葉樹林の落葉層
8	野生きのこ	上流落葉樹林の落葉層

表 3.8 静的コンパートメントのパラメータ設定

No.	コンパートメント	変数名	意味	単位	設定	出典
1	コメ	cfc	土壌から農作物への移行係数	-	0.02	※1
2		fc	表面汚染の調理時ロス割合	-	0.5	※1
3		sc	土壌の付着率	-	9E-05	※1
4		myuc	農作物による灌漑水の阻止率	-	0.006	※2
5		ic	単位面積あたりの灌漑水量	m y ⁻¹	1.9	※1
6		ft	転流割合	-	0.088	※1
7		yc	農作物の栽培密度	kg m ⁻²	0.5	※1
8		wc	ウェザリング率	y ⁻¹	8.4	※1
9	淡水魚	f1	希釈係数	-	1	考慮しない
10	(アユ, コクチバス)	f2	濃縮係数	m ³ kg ⁻¹	2	※1
11	海水魚	f1	希釈係数	-	1	考慮しない
12	(スズキ)	f2	濃縮係数	m ³ kg ⁻¹	0.1	※1
13	野生動物	f1	単位面積あたりの落葉層の重量	kg m ⁻²	0.58	※3
14	(イノシシ)	f2	移行係数	m ² kg ⁻¹	0.01	※4
15	野生きのこ	f1	単位面積あたりの落葉層の重量	kg m ⁻²	0.58	※3
16	(腐生菌類)	f2	移行係数	m ² kg ⁻¹	0.01	※4

※1 第2次取りまとめ[8]より。

※2 第2次取りまとめ[8]農作物による灌漑水の阻止率 0.05 に、溶存態セシウムの割合 0.12[23]を考慮して設定

※3 単位換算のため設定（林野庁プレスリリース[12]）。

※4 IAEA TRS No. 472[24]より。

3.2. 解析結果

開発したモデルを使用して、前節で示した設定値による解析を実施した。なお、対象核種は Cs-137、解析期間は沈着から 100 年間とした。

解析結果から作成した時間変化図を以下に示す。

- 動的コンパートメントのインベントリ : 図 3.10～図 3.12
- 動的コンパートメントの濃度 : 図 3.13～図 3.16
- 動的コンパートメントの単位面積あたりの放射エネルギー : 図 3.17～図 3.19
- 静的コンパートメントの濃度 : 図 3.20
- 樹冠から落葉層への移動累積量 : 図 3.21

対象領域における総インベントリおよび水系への流出量は、事故直後、事故から 1 年後および事故から 5 年後で表 3.9 に示す通りとなった。また、事故から 5 年後のマスバランス（フロー・ストック）を図 3.22 に示す。

森林のインベントリ合計値の時間変化（図 3.10、図 3.11）および農地、都市域のインベントリの時間変化（図 3.12）は、緩やかに低下していることがわかる。いずれの森林においてもインベントリ低下率はおよそ 2.4% y⁻¹ 程度となっており、これは河川への流出による影響よりもほとんどが ¹³⁷Cs の物理減衰（半減期を 30 年と仮定。この時の物理減衰による寄与は ln(2)/30=2.3% y⁻¹）によるものである。

河川への流出は1年後0.06%、5年後0.08%であり、土壌からの流出率の設定値 $0.1\% \text{ y}^{-1}$ に対しやや低い値となった。これは、森林内の土壌以外のコンパートメントが流出に寄与しないためである。農地、都市域でのインベントリの低下率は共に約 $2.5\% \text{ y}^{-1}$ であり、物理減衰を除いた数値は、河川への流出率の設定値である $0.19\% \text{ y}^{-1}$ 、 $0.20\% \text{ y}^{-1}$ をほぼそのまま反映したものであり、河川から農地への流入の影響は認められない結果となった。

森林内の各コンパートメントのインベントリ（あるいは濃度）変化をみると、葉、枝、樹皮において事故後10年程度に掛けて急激に低下する一方で、落葉層や土壌は物理減衰の影響を無視するとほぼ横ばいであり、辺材、心材は上昇する傾向が認められる。樹木内で濃度のピークが遅れることについてはMahara et al.[25]の報告と整合的である。樹冠から落葉層へのフラックス累積量（図 3.21）を見ると、フォールアウト後1、2年程度ではほぼ落葉層への移動が落ち着いていることがわかる。また、樹皮からよりも葉・枝からの移行が卓越している。この傾向は、Kato et al.[26]の調査結果と整合している。

水系コンパートメントのインベントリ変化、濃度変化（図 3.12 上図、図 3.15 上図）を見ると、湖および下流河川でフォールアウト後0.1年（1か月程度）の間に急激に低下している。初期の高い値は、直接湖沼にフォールアウトした放射性セシウムがしばらく水中で滞留した影響を反映しており、1か月程度ではほぼ洗い流されたあるいは湖底堆積物に沈着したためと考えることができる。対照的に湖底堆積物中のインベントリは上昇しており、およそ6~7TBq程度で推移している。河川水、湖水の濃度は初期の0.1年程度を除き数 $10\sim 1000 \text{ Bq m}^{-3}$ 程度となっており、国による観測値 [9]とおおよそ整合的である。

また、湖沼の流入フラックスと流出フラックスを見ると（図 3.22）、流入フラックスに対し流出フラックスはおおよそ10%となっており、残りは湖底に堆積している。この割合はKurikami et al[27]と整合的である。

静的コンパートメント濃度（図 3.20）を見ると、キノコ・イノシシが 1000 Bq kg^{-1} を超える結果となっている。イノシシの濃度は福島県による野生鳥獣の放射線モニタリング調査結果[28]とも整合的である。一方、キノコについては実測と比べ解析結果は高い。アユの濃度は 1000 Bq kg^{-1} 程度となっており、福島県による調査結果[29]と概ね整合的である。

上記のように、各コンパートメントの濃度やコンパートメント間のフラックスはおおよそ現実的な値となった。一方で、堆積物への移行や外洋への移行についての実測との比較が不足しており、また、静的コンパートメントに係る移行係数や濃縮係数など重要なパラメータが福島のデータに基づいていないなどの課題もある。今後、実測値との比較を詳細に実施し、コンパートメント設定やパラメータの設定の妥当性を確認していく必要がある。

表 3.9 解析結果の概要

	インベントリ (TBq)			河川への年間 流出量 (TBq y ⁻¹) ※1			近海への 年間流出量 (TBq y ⁻¹) ※1
	森林	森林 以外	合計	森林	森林 以外	合計	
事故直後	450	62	510				
1年後	440	61	500	0.24	0.10	0.34	0.14
5年後	400	57	450	0.31	0.093	0.40	0.17
(参考) 原子力機構 [13]※2	190	54	244	0.19	1.1	1.2	0.2

注) 有効数字2桁表示。

※1 「年間流出量」は、各時点のインベントリに対して移行率をかけて求めた。

※2 請戸川本流に対する値。

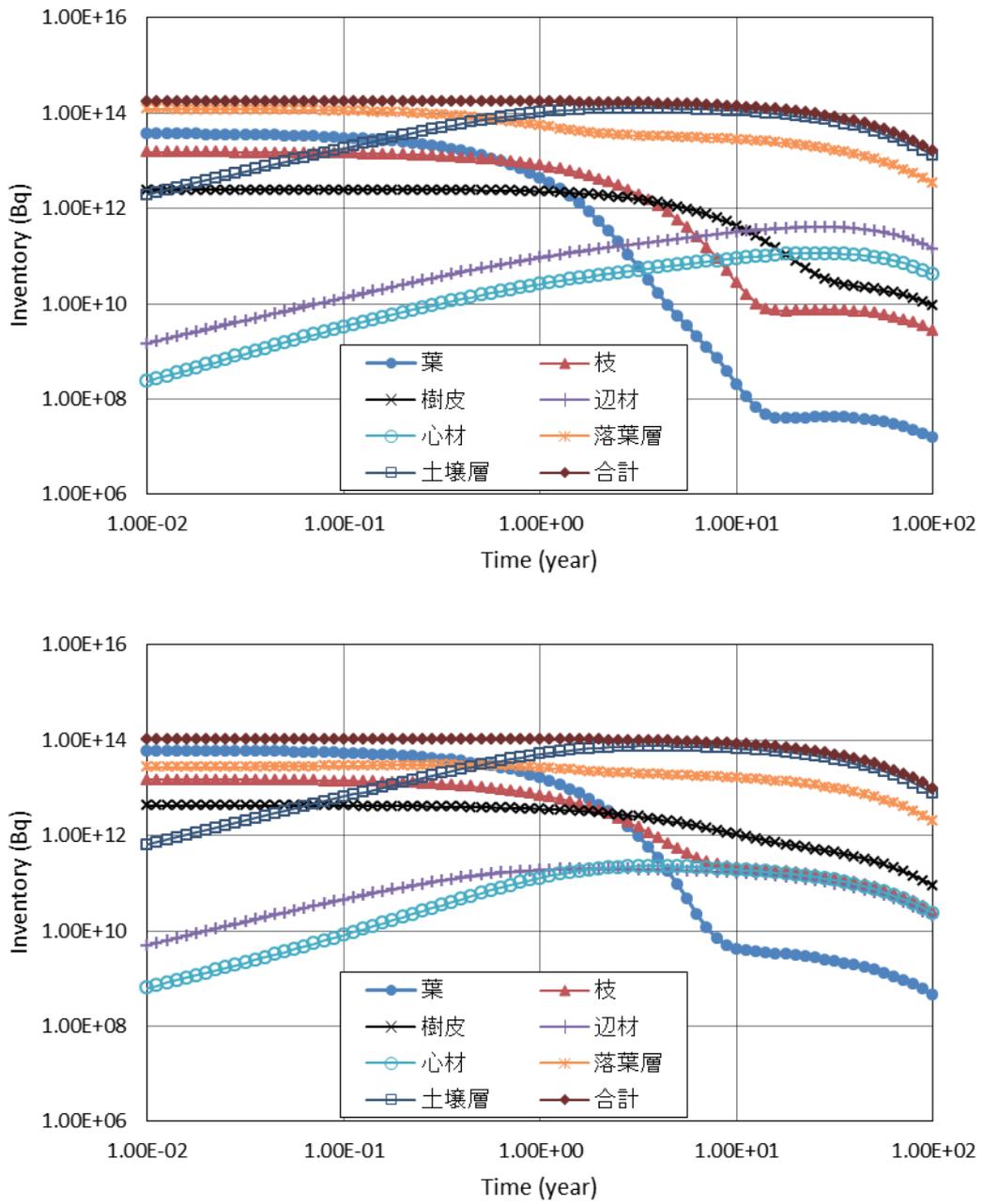


図 3.10 各コンパートメントのインベントリ (1)
 (上：上流落葉樹林、下：上流常緑樹林)

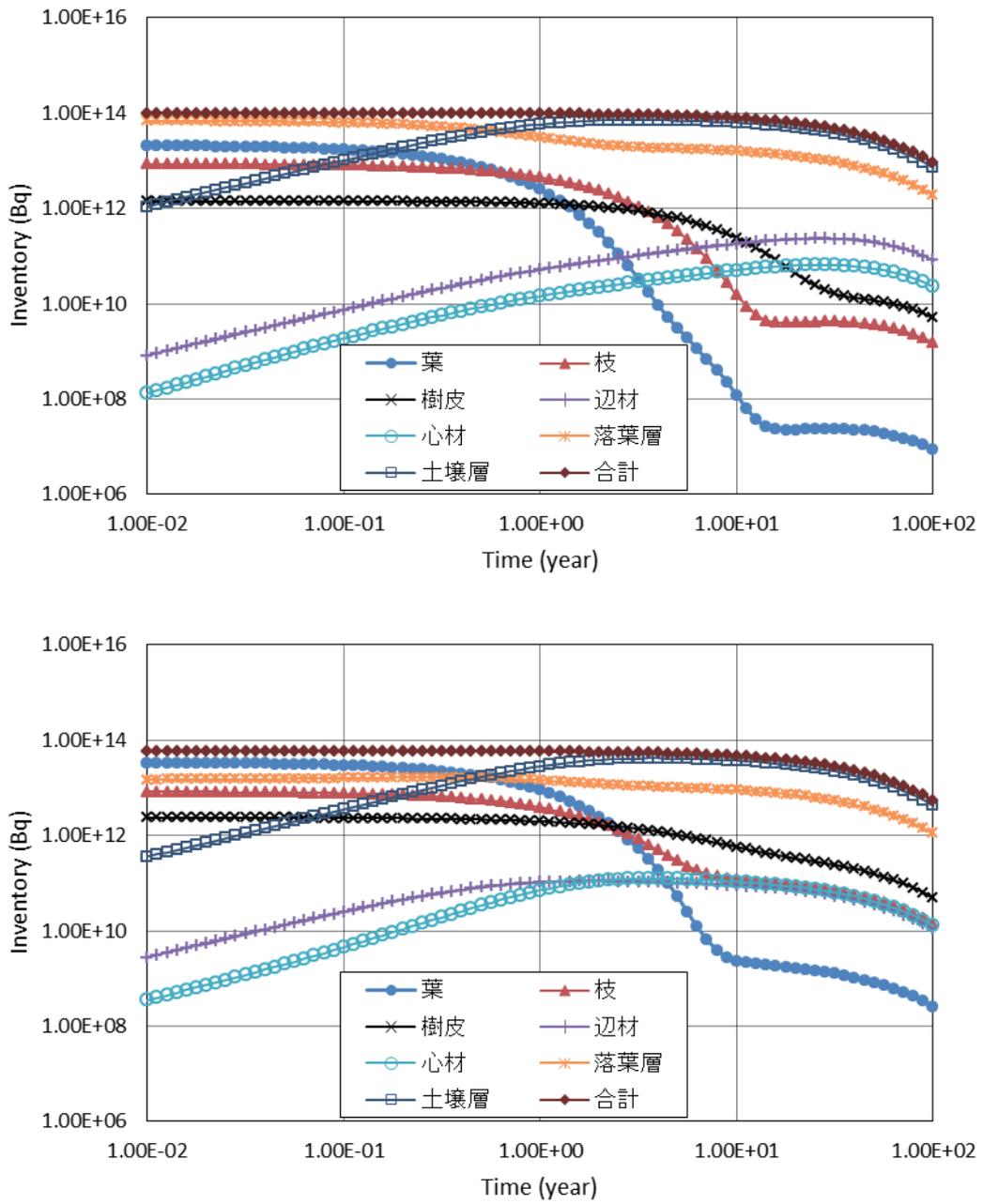


図 3.11 各コンパートメントのインベントリ (2)
 (上：下流落葉樹林、下：下流常緑樹林)

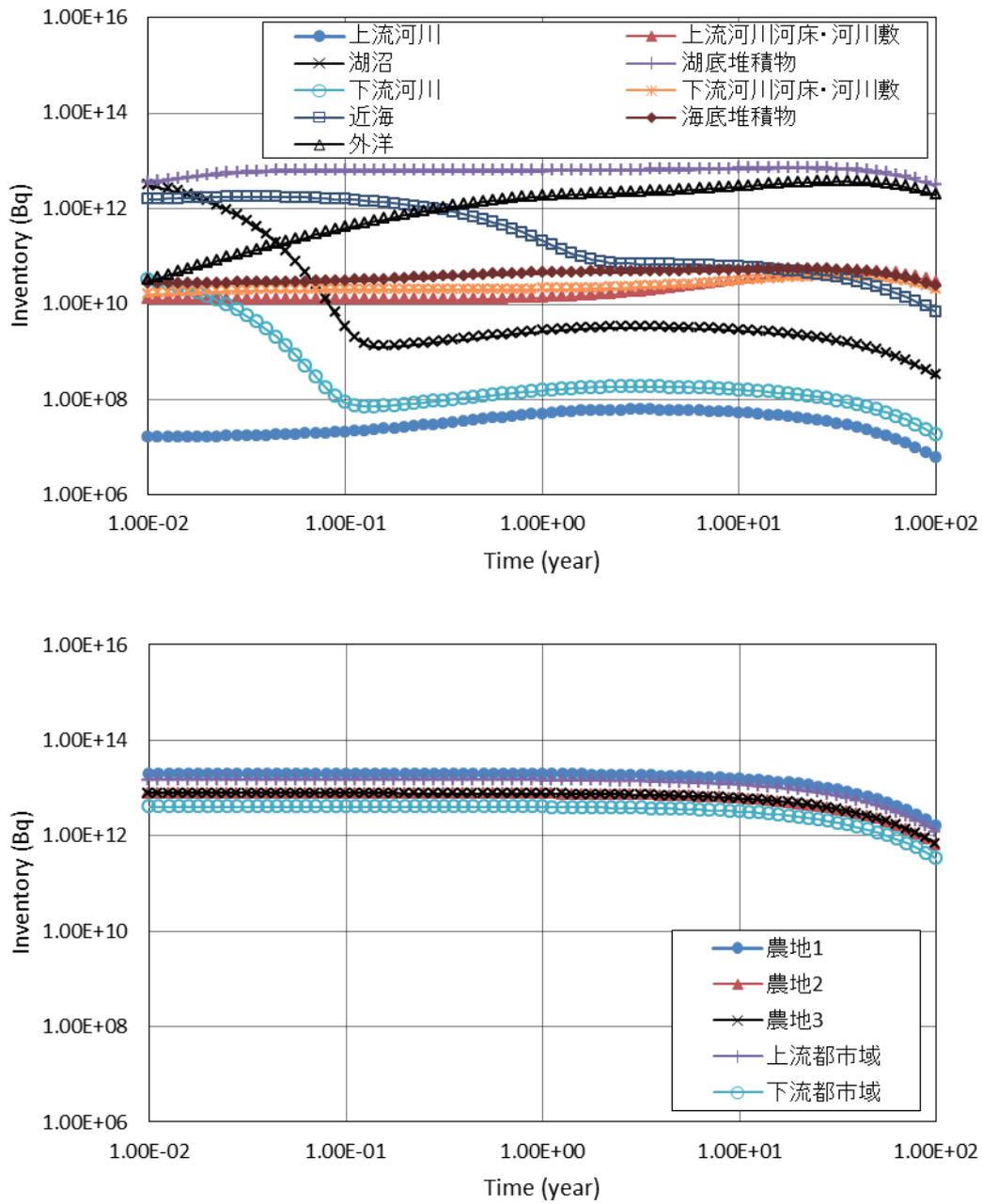


図 3.12 各コンパートメントのインベントリ (3)
 (上：農地・都市域以外の水系コンパートメント、下：農地および都市域)

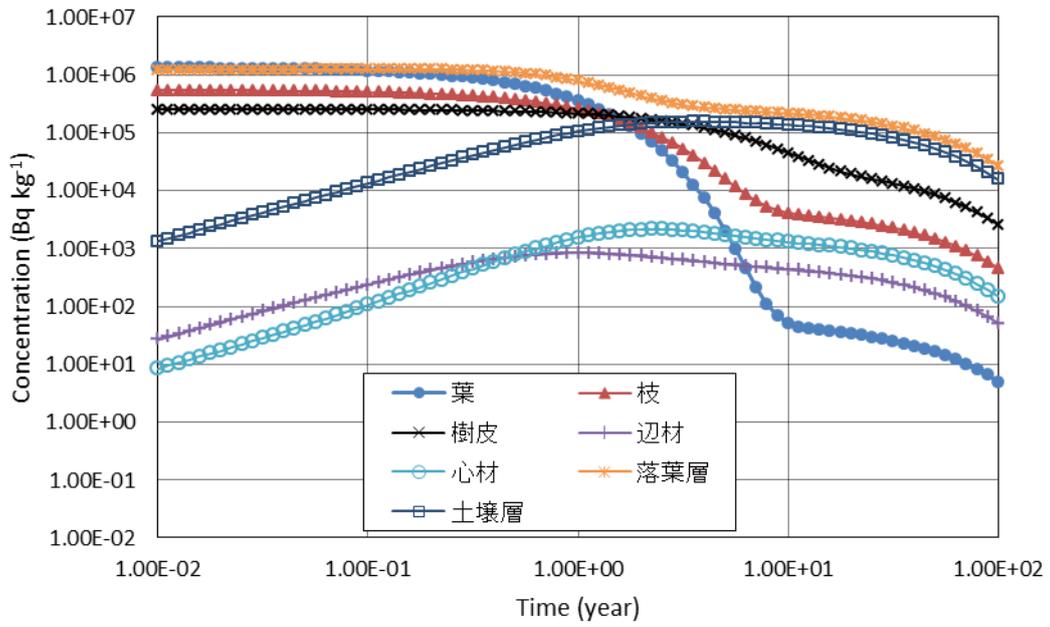
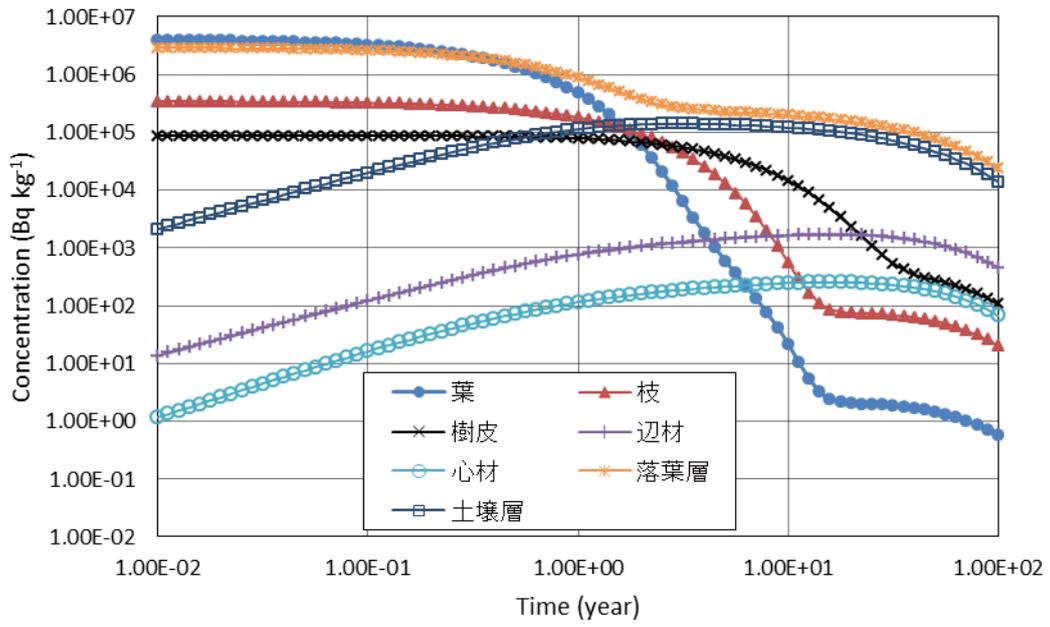


図 3.13 各コンパートメントの濃度 (1)
(上：上流落葉樹林、下：上流常緑樹林)

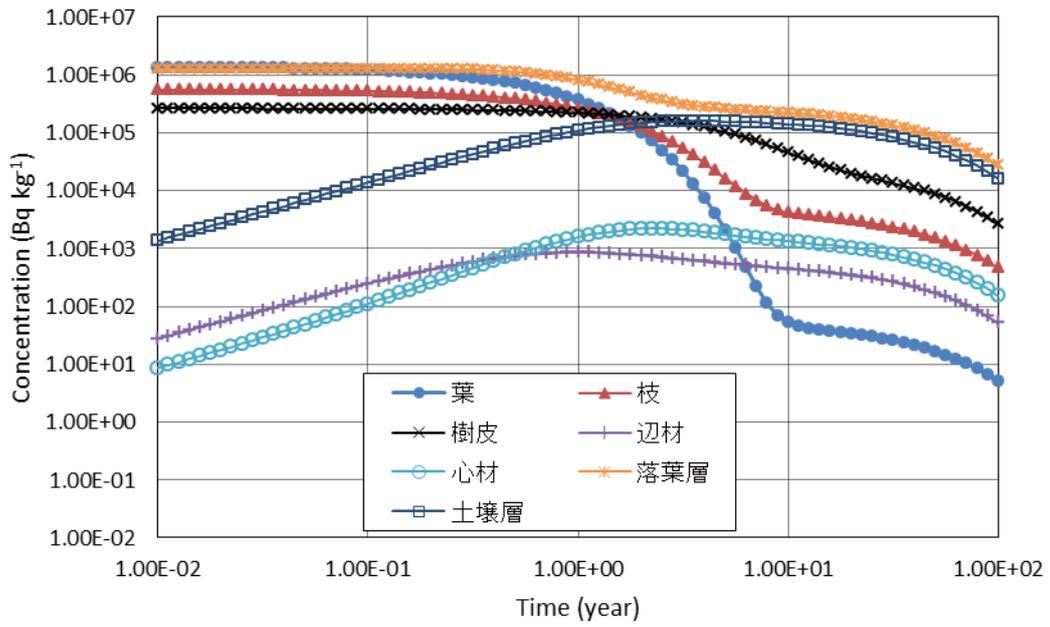
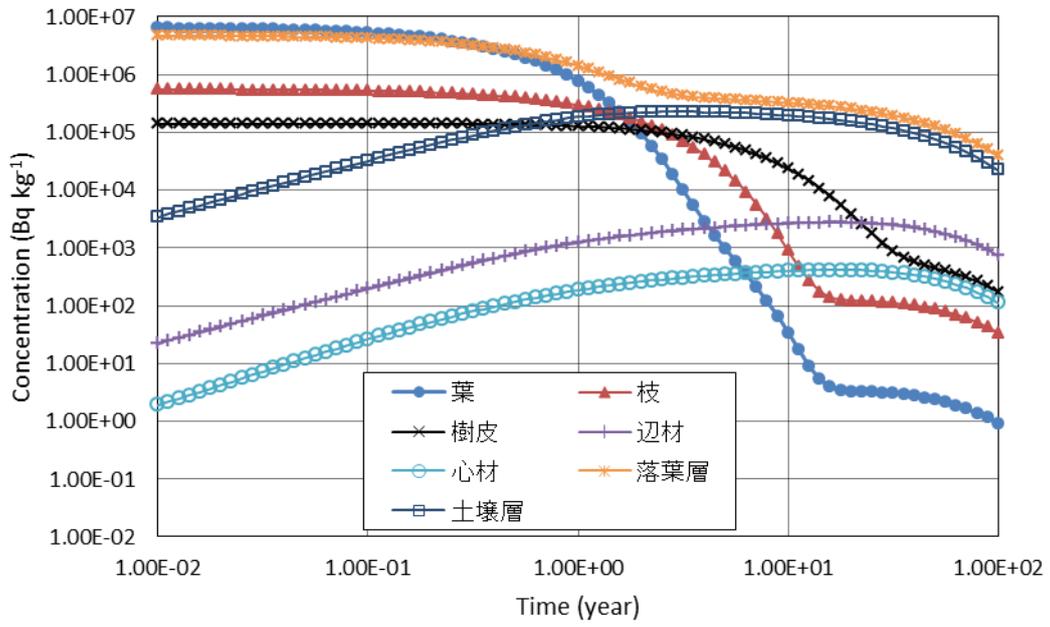


図 3.14 各コンパートメントの濃度 (2)
 (上：下流河川の落葉樹、下：下流河川の常緑樹)

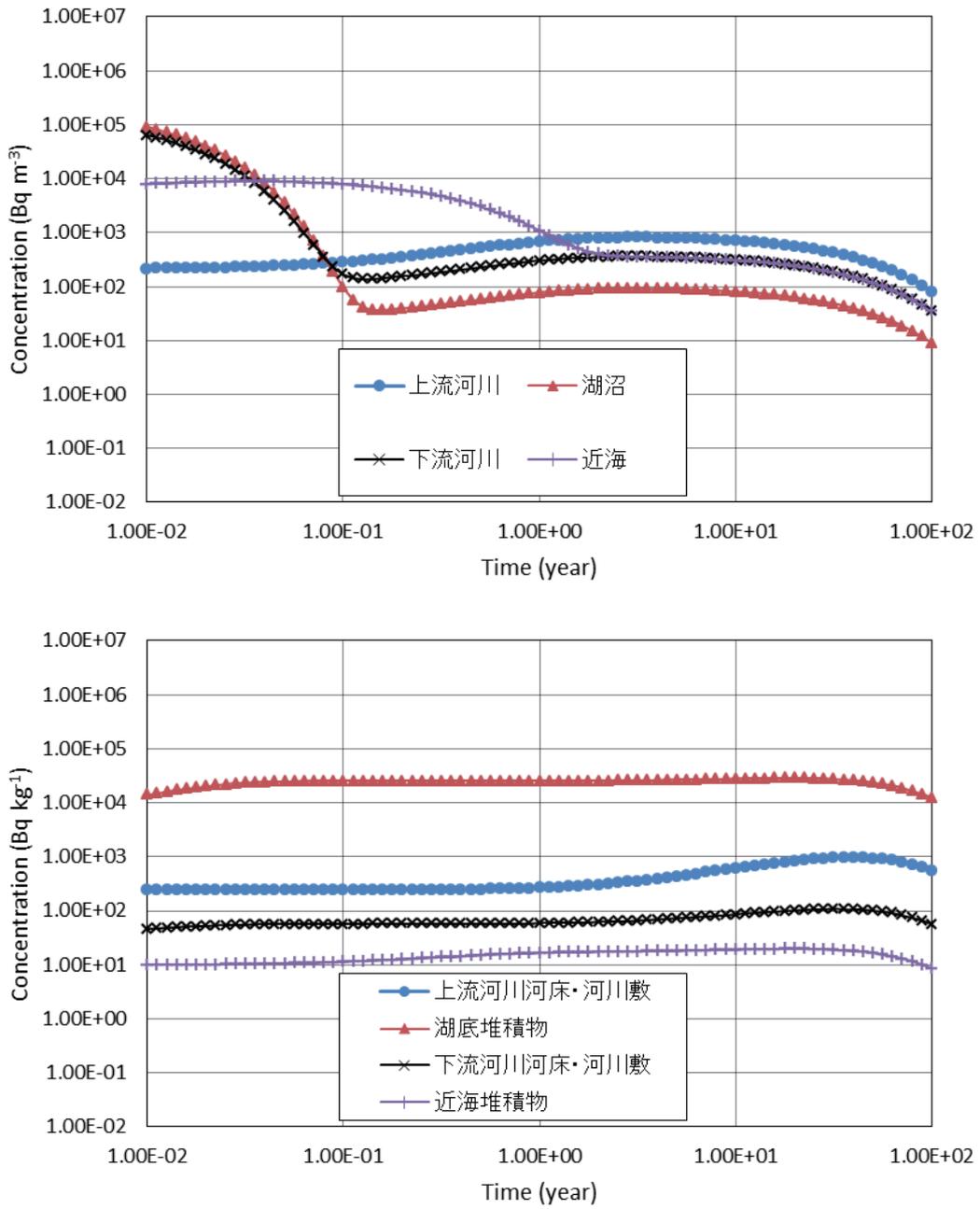


図 3.15 各コンパートメントの濃度 (3)
 (上：地表水中の濃度、下：堆積物中の濃度)

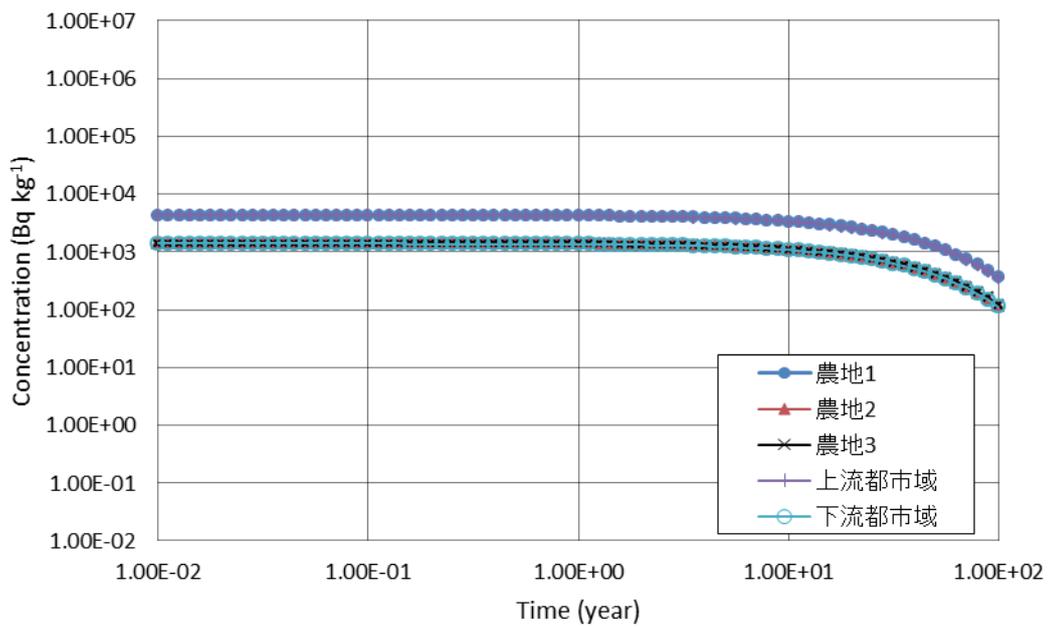


図 3.16 各コンパートメントの濃度 (4)
(農地および都市域)

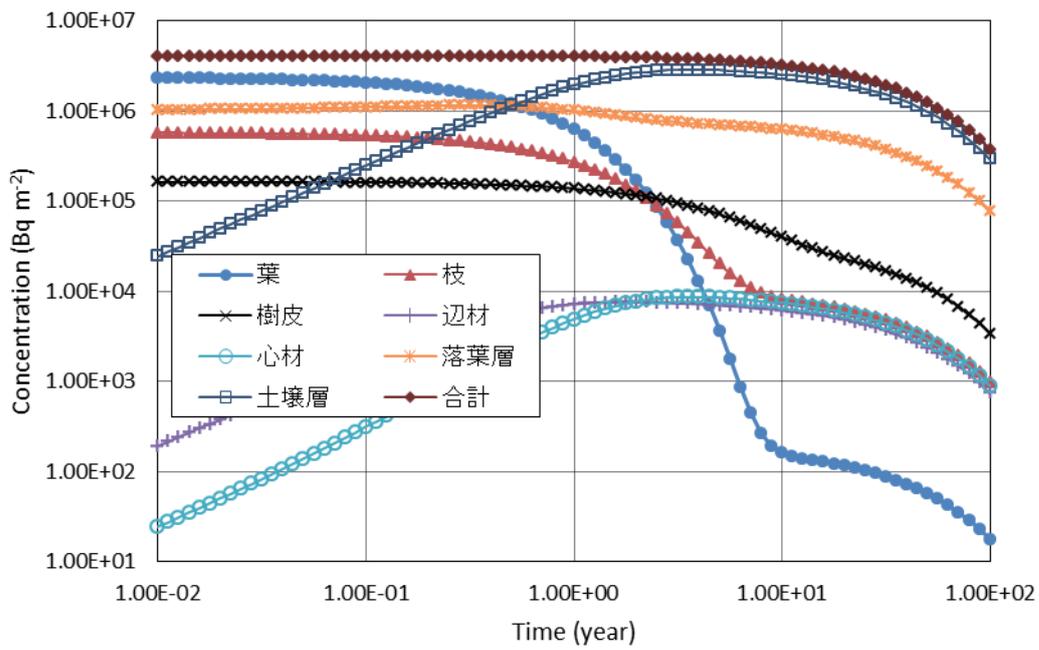
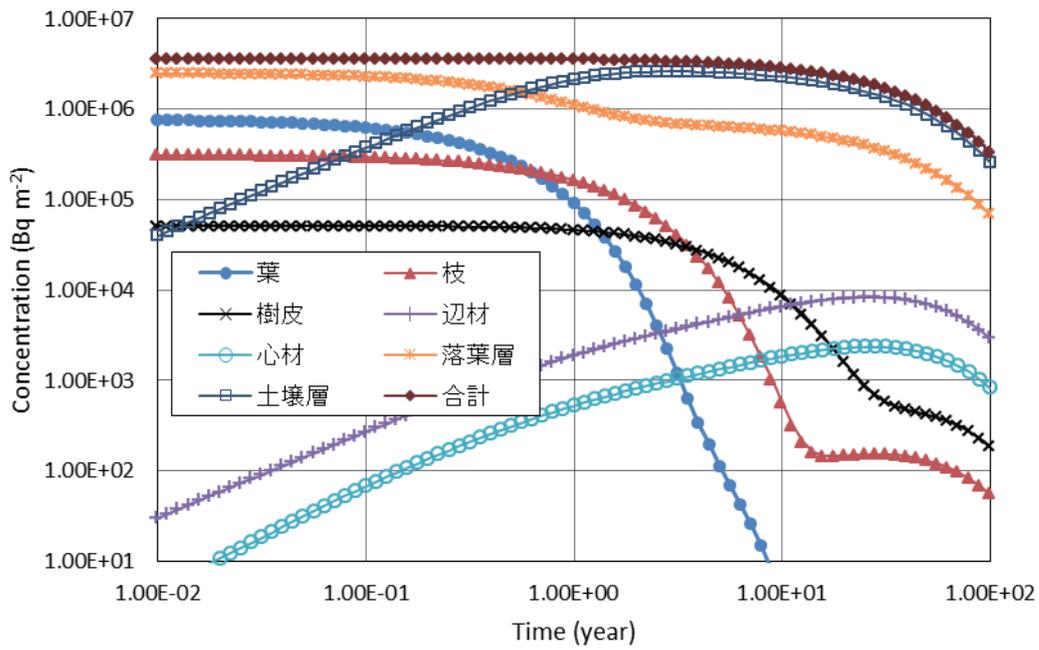


図 3.17 各コンパートメントの単位面積あたりの放射エネルギー (1)
 (上: 上流落葉樹林、下: 上流常緑樹林)

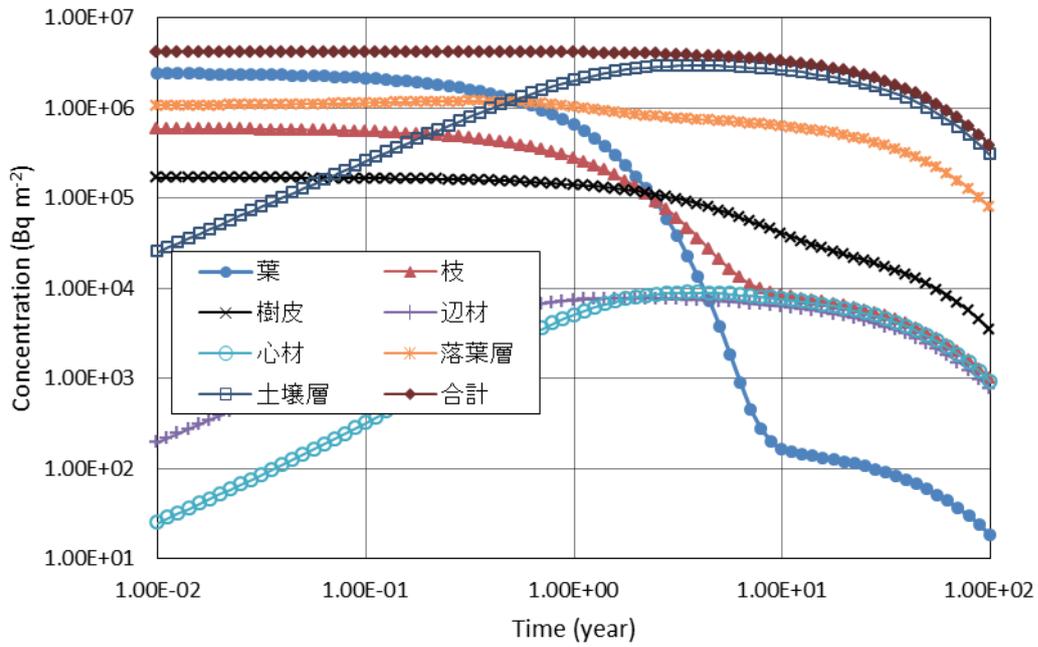
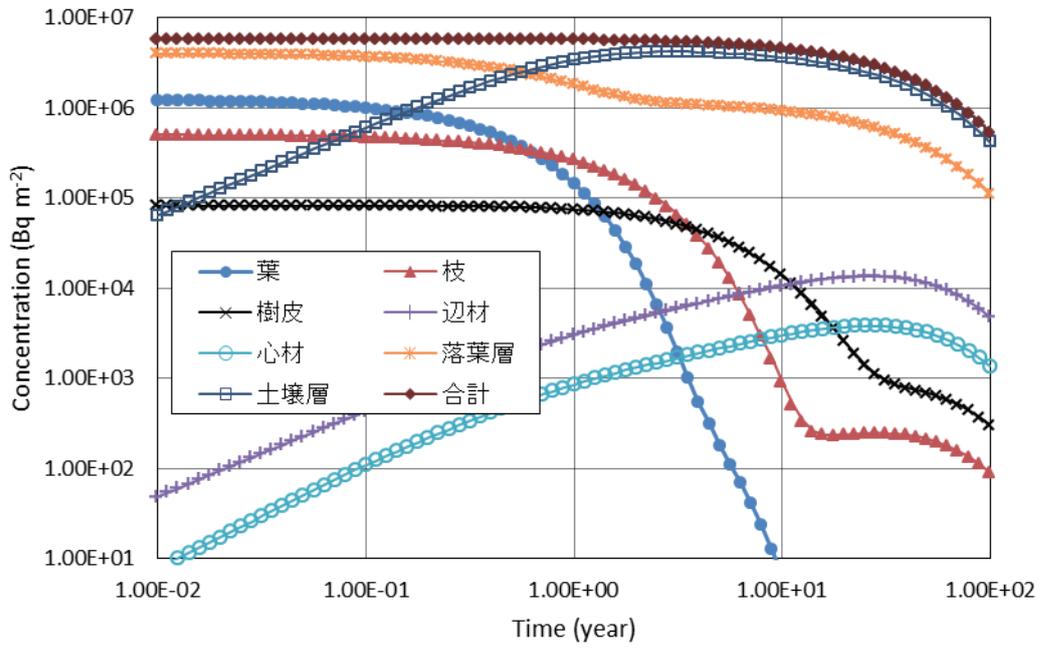


図 3.18 各コンパートメントの単位面積あたりの放射エネルギー (2)
 (上：下流落葉樹林、下：下流常緑樹林)

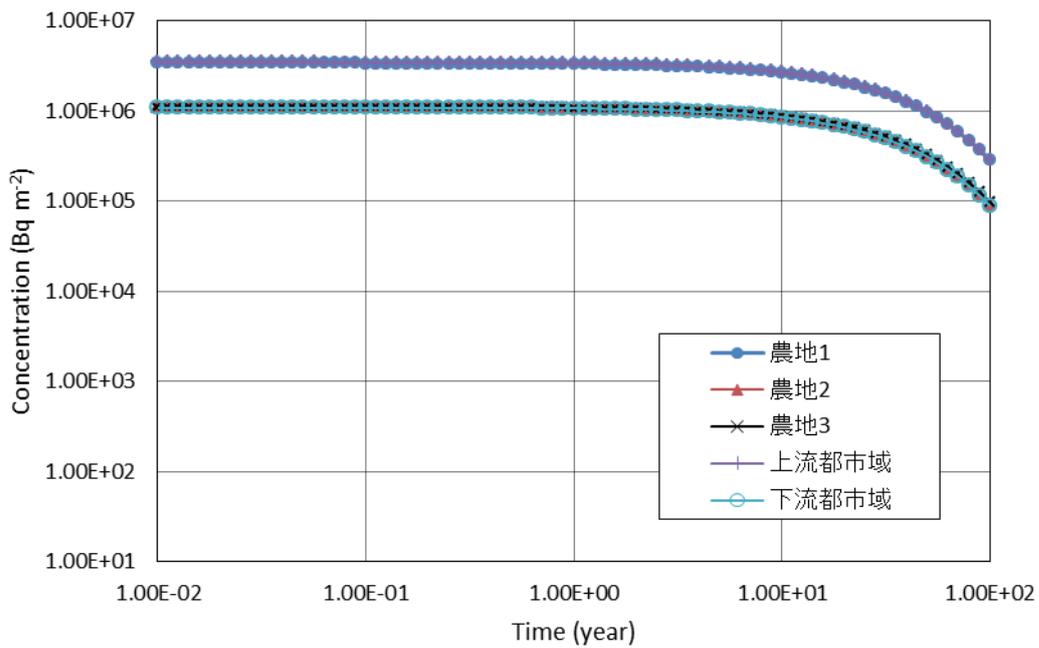
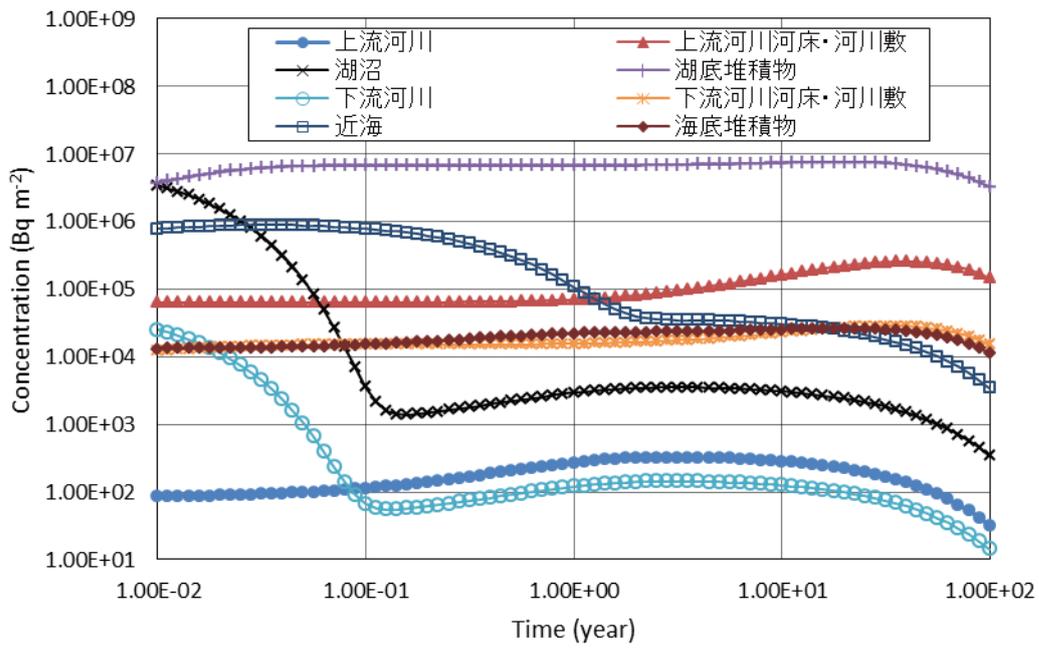


図 3.19 各コンパートメントの単位面積あたりの放射能量 (3)
(上：地表水および堆積物、下：農地および都市域)

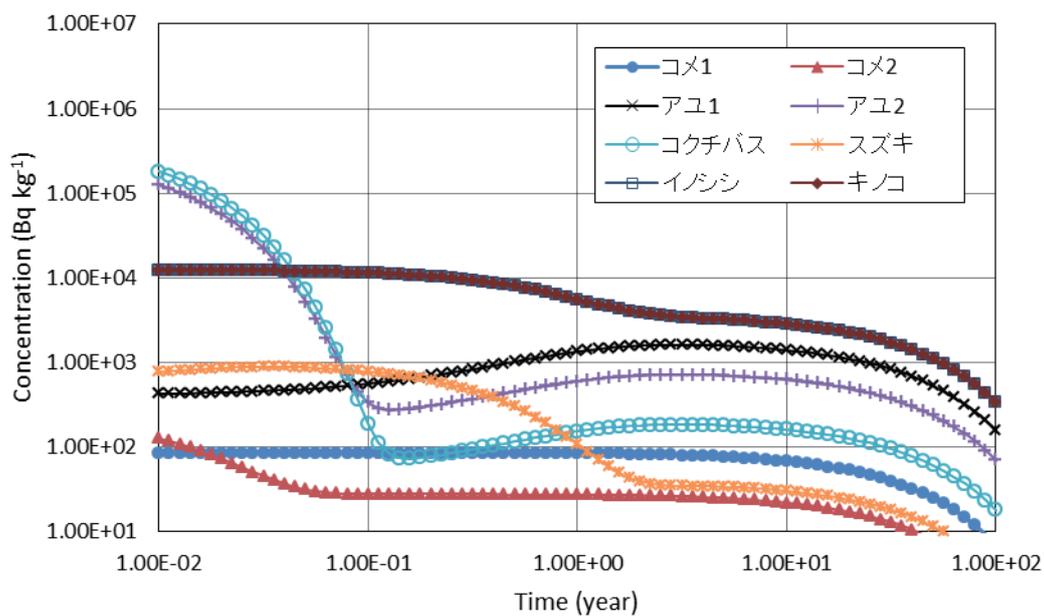


図 3.20 静的コンパートメントの濃度

注) イノシシとキノコはグラフが重なっている。

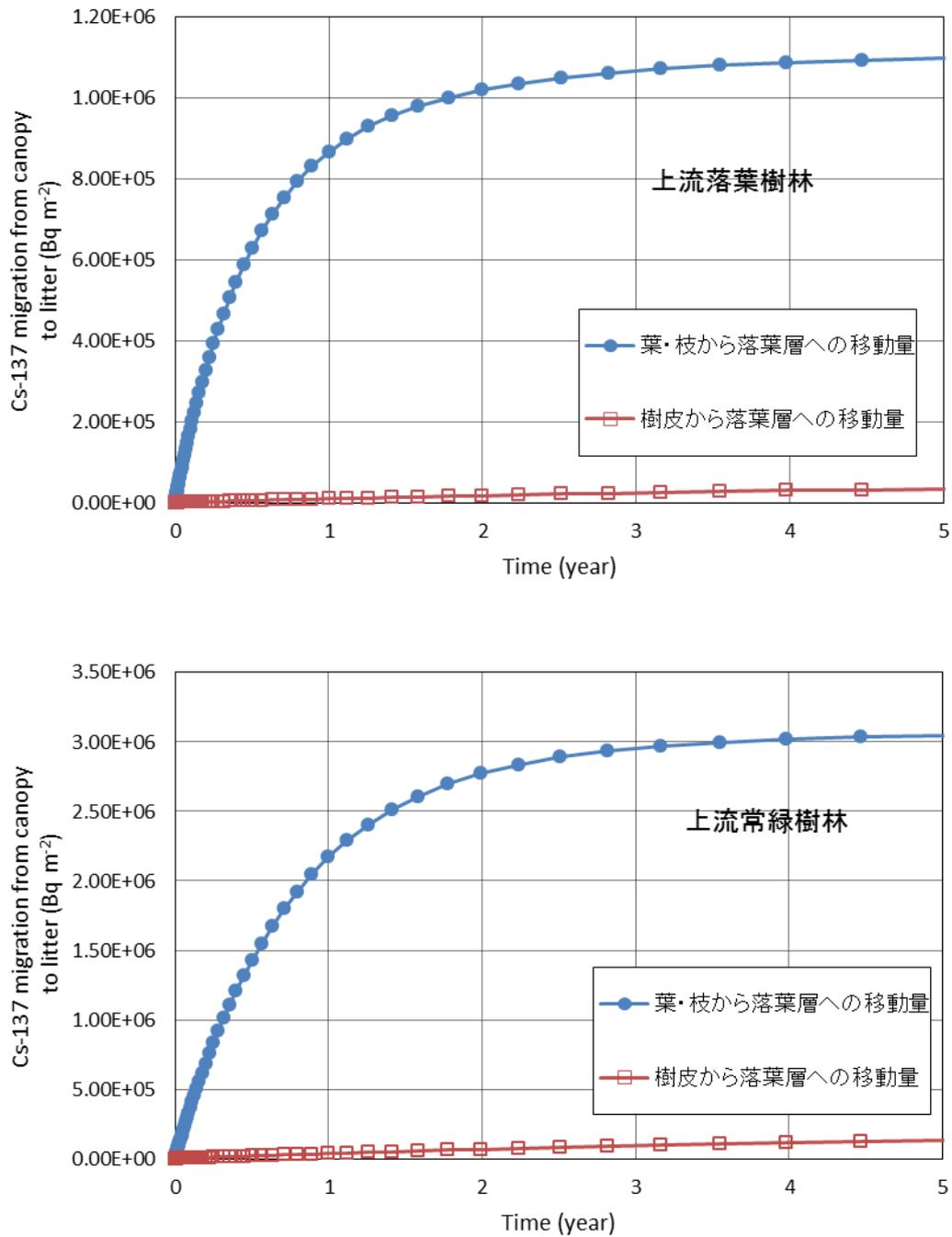


図 3.21 樹冠から落葉層への移動累積量
 (上：上流落葉樹林、下：上流常緑樹林)

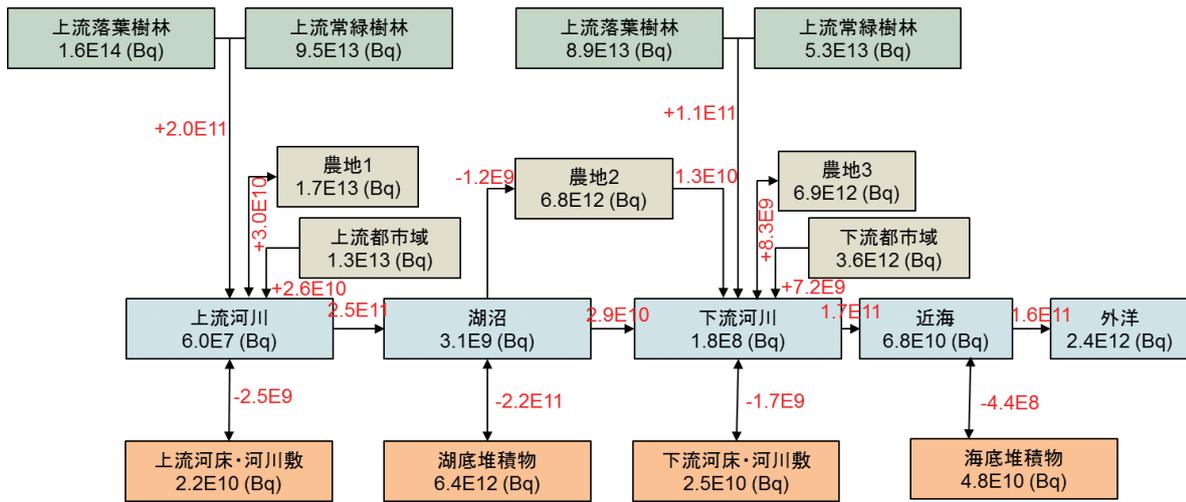


図 3.22 事故から5年後のマスバランス (フロー・ストック)
 枠内の数値はインベントリ(Bq)、枠外の数値はフラックス(Bq y⁻¹)

4. おわりに

本報告では、河川（二級河川）流域規模での放射性物質（特に放射性セシウム）の動態に伴う被ばく経路を考慮したコンパートメントモデルを構築し、試行的な解析を行った結果について示した。コンパートメントモデルを利用することにより、システム全体のマスバランスをつかむことができ、また、どこにどのような対策を施したらフロー・ストックがどのように変化するかを大まかに推定することができる。解析が簡便であり感覚的に理解しやすいこともメリットである。

試解析の結果、森林や河川の各コンパートメントのインベントリや濃度、コンパートメント間のフラックスはおおよそ現実的な値となった。一方で、堆積物や外洋への移行、農林水産物への移行について実測値との比較によるモデル検証は十分でない。また、現時点でのモデルは放射性物質の陸域からの流出や水系での移動において溶存態と浮遊砂付着態を分けていないが、魚介類への移行を考慮する場合には溶存態（および交換態）に着目すべきとされるが（例えばIAEA[24], Smith et al.[30]）、十分な考察に至っていない。さらに、本モデルで静的コンパートメントと設定した農林水産物に対して、より詳細に評価する場合にはTateda et al.[31]のように動的にモデル化する必要があるかもしれない。

今後、実測値との比較を詳細に実施し、コンパートメント設定やパラメータの設定の妥当性を確認していくとともに、他河川への適用も可能となるように改良していく必要がある。

参考文献

- 1 原子力機構, "福島県における放射性核種の環境中移動調査・研究 ～福島長期環境動態研究 (F-TRACE) プロジェクト～", (<http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/pdf/project.pdf>, 閲覧: 2016年8月) .
- 2 飯島・新里・佐藤・油井, "福島長期環境動態研究 (F-TRACE) における現地調査の現状", 原子力バックエンド研究, 20(2), 83-86, 2013.
- 3 Miyahara, K., McKinley, I., Saito, K., Hardie, S. and Iijima, K., "Use of Knowledge and Experience Gained from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident to Establish the Technical Basis for Strategic Off-site Response", JAEA-Review 2015-001, 2015, 90p.
- 4 北村・操上・佐久間, "福島長期環境動態研究開発(3) 土壌流亡と河川水系全体での放射性セシウム移動挙動の解析", (<http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/pdf1511/3-5.pdf>, 閲覧: 2016年8月) .
- 5 林野庁, "平成26年度 森林内の放射性物質の分布状況調査結果について (別添)", (<http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/kaihatu/150327.html>, 閲覧: 2015年9月) .
- 6 IAEA, "Modelling the migration and accumulation of radionuclides in forest ecosystems, Report of the Forest Working Group of the Biosphere Modelling and Assessment (BIOMASS) Programme, Theme 3", IAEA-BIOMASS-1, 2002.
- 7 Hayashi, H., Matsuoka, S., Takahashi, T. and Amano, H., "Construction of river transfer models for MOGRA", JAERI-Conf 2003-010, pp.122-130, 2003.
- 8 核燃料サイクル開発機構, 「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 ―地層処分研究開発第2次取りまとめ、分冊3 地層処分システムの安全評価」, JNC-TN1400 99-023, 1999, 526p.
- 9 原子力機構, 放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト, (<http://emdb.jaea.go.jp/emdb/>, 閲覧: 2016年8月) .
- 10 国土交通省国土政策局, 国土数値情報ダウンロードサービス, (<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>, 閲覧: 2016年8月) .
- 11 梶本・高野・齊藤・黒田・藤原・小松・川崎・大橋・清野, 「森林生態系における樹木・木材の放射性セシウム分布と動態の調査法」, 森林総合研究所報告, Vol.13, No.3 (No.432), 113-136, September 2014.
- 12 林野庁プレスリリース, 「福島県の森林における土壌等に含まれる放射性セシウムの濃度の測定結果について」, (<http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/hozen/120301.html>, 閲覧: 2015年12月) .
- 13 原子力機構, "環境動態研究で得られた知見", (<http://fukushima.jaea.go.jp/QA/ftrace/QA3-2f.html>, 閲覧: 2016年8月) .
- 14 Iwagami, S., Onda, Y., Tsujimura, M., Abe, Y., "Contribution of radioactive ¹³⁷Cs discharge by suspended sediment, coarse organic matter, and dissolved fraction from a headwater catchment in Fukushima after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident", J Env Radioact, 166(3), pp.466-474, 2017.
- 15 国土地理院, 基盤地図情報ダウンロードサービス, (<http://fgd.gsi.go.jp/download/>, 2016年8月閲覧)
- 16 Otosaka, S. and Kato, Y., "Radiocesium derived from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident in seabed sediments: initial deposition and inventories", Environmental Science Processes & Impacts, 16, pp.978-990, 2014.
- 17 水産庁, 「良好なアユ漁場を維持するための河川環境調査の指針 ～漁場環境調査指針作成事業報告書～」, 4-2-2 阿賀川・木戸川・伊南川・請戸川・鮫川におけるアユ漁業実態および漁場環境調査, 平成23年3月
- 18 東北農政局整備部, 「大柵ダムの放射性セシウム調査結果の概要 (～H25年度)」
- 19 請戸川土地改良区, 水土里ネット請戸川, 大柵ダムの紹介, (<http://www.ukedogawa.jp/about/oogakidam/>, 閲覧: 2015年12月) .
- 20 Otosaka, S., Nakanishi, T., Suzuki, T., Satoh, Y., Narita, H., "Vertical and Lateral Transport of Particulate Radiocesium off Fukushima", Environmental Science and Technology, 48, pp.12595-12602, 2014.
- 21 恩田・高橋・加藤・ロフレド・岩上・脇山・山本・横山・坂口, 「土壌に蓄積した放射性セシウムの移行状況調査」, 原子力規制庁委託事業「平成25年度東京電力(株)福島第一原子力発電所事

- 故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立 事業成果報告書」
 (http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/pdf06/2-2.pdf, 閲覧：2015年12月)。
- 22 Koibuchi, Y., Murakami, M., Sueki, K., Onda, Y., "Sediment-Associated Radiocesium Originated Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Flowing from Ohori River to Lake Teganuma", *Journal of Water and Environment Technology*, 13(3), pp.249-261, 2015.
 - 23 日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島環境安全センター, "環境動態研究で得られた知見 -平成26年度の成果概要-", 平成27年6月30日,
 (http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/pdf/20150701_01.pdf, 閲覧：2016年8月)。
 - 24 IAEA, "Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments", IAEA Technical Reports Series No. 472, 2010.
 - 25 Mahara Y., Ohta, T., Ogawa, H. and Kumata, A., "Atmospheric direct uptake and long-term fate of radiocesium in trees after the Fukushima Nuclear accident", *Sci Rep*, 4, 7121, 2014.
 - 26 Kato, H., Onda, Y., Hisadome, K., Loffredo, N. and Kawamori, A.: "Temporal changes in radiocesium deposition in various forest stands following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident", *J Env Radioact*, 166(3), pp.449-457, 2017.
 - 27 Kurikami, H., Kitamura, A., Yokuda, S.T. and Onishi, Y.: "Sediment and ¹³⁷Cs behaviors in the Ogaki Dam Reservoir during a heavy rainfall event", *J Env Radioact*, 137, pp.10-17, 2014.
 - 28 福島県, "野生鳥獣の放射線モニタリング調査結果",
 (http://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/wildlife-radiationmonitoring1.html, 閲覧：2016年1月)。
 - 29 福島県内水面水産試験場, "アユの ¹³⁷Cs 濃度の経年変化と放流種苗の ¹³⁷Cs 取込",
 (http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/109911.pdf, 閲覧：2016年8月)。
 - 30 Smith, J.T., Konoplev, A., Bulgakov, A.A., Comans, R.N.J., Cross, M.A., Kaminski, S., Khristuk, B., Klemm, E., de Koning, A., Kudelsky, A.V., Laptev, G., Madruga, M.J., Voitsekhovitch, O. and Zibold, G.: "AQUASCOPE Technical Deliverable. Simplified Models for Predicting 89Sr, 90Sr, 134Cs, 137Cs, 131I in Water and Fish of Rivers, Lakes and Reservoirs", CEH Centre for Ecology and Hydrology. Natural Environment Research Council, 2002.
 - 31 Tateda, Y., Tsunome, D. and Tsubono, T. "Simulation of radioactive cesium transfer in the southern Fukushima coastal biota using a dynamic food chain transfer model", *J Env Radioact*, 124, pp.1-12, 2013.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

