3. シミュレーションの方法

3.1 放射性セシウムの移動評価方法

夢洲1区に埋立てられた災害廃棄物焼却灰に含まれる放射性セシウムの移動は下記の一次元移流分散反応方程式[a,b]によってシミュレーションを行った。

$$R\frac{\partial \mathrm{C}}{\partial \mathrm{t}} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v\frac{\partial \mathrm{C}}{\partial \mathrm{x}} - R\lambda C \qquad \cdots (3.1)$$

ここに、R は遅延係数[無次元]であり、

$$R = 1 + \frac{\rho_\mathrm{d} \cdot K_d}{\theta} \qquad \cdots (3.2)$$

によって求められる。ρ_d は乾燥密度（みかけ密度）[kg/m^3]、K_d は吸脱着を表す分配係数[m^3/kg = 10^3 mL/g]、θ は体積含水率[無次元]を表している。C は放射性セシウムの濃度[Bq/L = 10^3 Bq/m^3]、t は時間[y]、D は分散係数[m^2/y]、x は距離[m]、v は間隙内実流速[m/y]、λ は崩壊定数[1/y]であり、崩壊定数と半減期$T_{1/2}$との関係は、

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{\frac{1}{2}}} \qquad \cdots (3.3)$$

となる。間隙内実流速vは実際に放射性物質が移流によって移動する速度であり、ダルシー流速qとの関係は$v = q/\theta$となる。ダルシー流速は単位断面積当たりの水フラックスを表しているので、ダルシーフラックスとも呼ばれ、多孔質体を通過する流量を計算する際は、このダルシー流速を用いるが、その水に溶けている放射性物質等の移動速度は間隙内実流速によって評価する。図3.1にダルシー流速と間隙内実流速の概念図を示す。

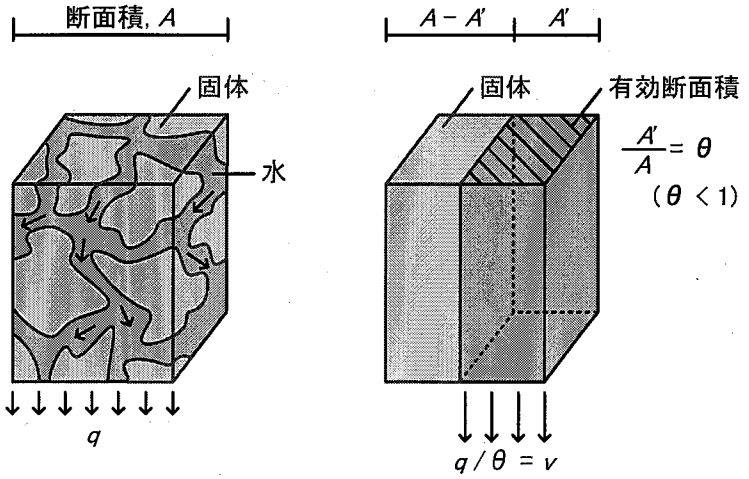

図3.1　ダルシー流速と間隙内実流速の関係

[a] Zheng, C. and Bennett, G.D. (2002): *Applied Contaminant Transport Modeling*, 2nd Ed., John Wiley and Sons, Ch. 4.
[b] 長崎晋也・中山真一（2011）：放射性廃棄物の工学，オーム社，p. 156.

分散係数Dは、下記の式によって与えられる。

$$D = \alpha_L \cdot v + D_0 \theta^{\frac{4}{3}} \qquad \cdots (3.4)$$

ここに、α_Lは縦分散長[m]、D_0は自由水中での分子拡散係数[m^2/y]である。右辺第2項は、土壌や廃棄物層等の多孔質体内を移動する際の屈曲率を表しており、飽和条件の場合、間隙率（＝体積含水率）を4/3乗するMillington-Quirkモデル[a]を採用した。

放射性セシウムは^{134}Csと^{137}Csがあるが、それぞれに対して式3.1を適用してシミュレーションを実施した。式3.1の左辺のRが吸着（遅延）を表し、右辺第1項が拡散項、第2項が移流項、第3項が減衰項を表している。土壌や廃棄物層等の多孔質体内の物質移動における各項の影響を図3.2に解説する。右辺第2項の移流のみを考慮した場合、時間t_1の時、初期の濃度分布のまま距離xまで実流速vにしたがって移動する。第1項の分散の影響を考慮すると、ピーク濃度を示す位置は移流項のみを考慮したときと同じであるが、分散の影響によって濃度分布が山型の形に変化する。左辺の吸着を表す遅延係数を考慮すると、距離xまで移動していたピーク濃度の位置が左側にずれ、同じ時間であっても移動する距離が短くなり、移動に対する時間遅れが生じる。そのため、Rは遅延係数と呼ばれており、ピーク濃度出現時期を遅らせる効果がある。分配係数で表現される遅延係数は、吸着と脱着を表現していることから、物質量自体に変化は無く（質量保存則により）、濃度分布の面積は、移流時と同じ面積である。次に、右辺第3項の減衰の効果を考慮すると、時定数である減衰定数にしたがって物質量自体が減少することになり、山型の濃度分布の高さが低くなっていく。放射性セシウムのように放射線の放出量が減衰する性質を有している場合、土壌等による吸着現象によって時間遅れが生じ、その結果、減衰の効果が働くことで放射性セシウムとしての濃度が減少することにつながる。

[a] Millington, R.J. and Quirk, J.M. (1961) Permeability of porous media, *Transaction of the Faraday Society*, Vol. 57, pp. 1200-1207.

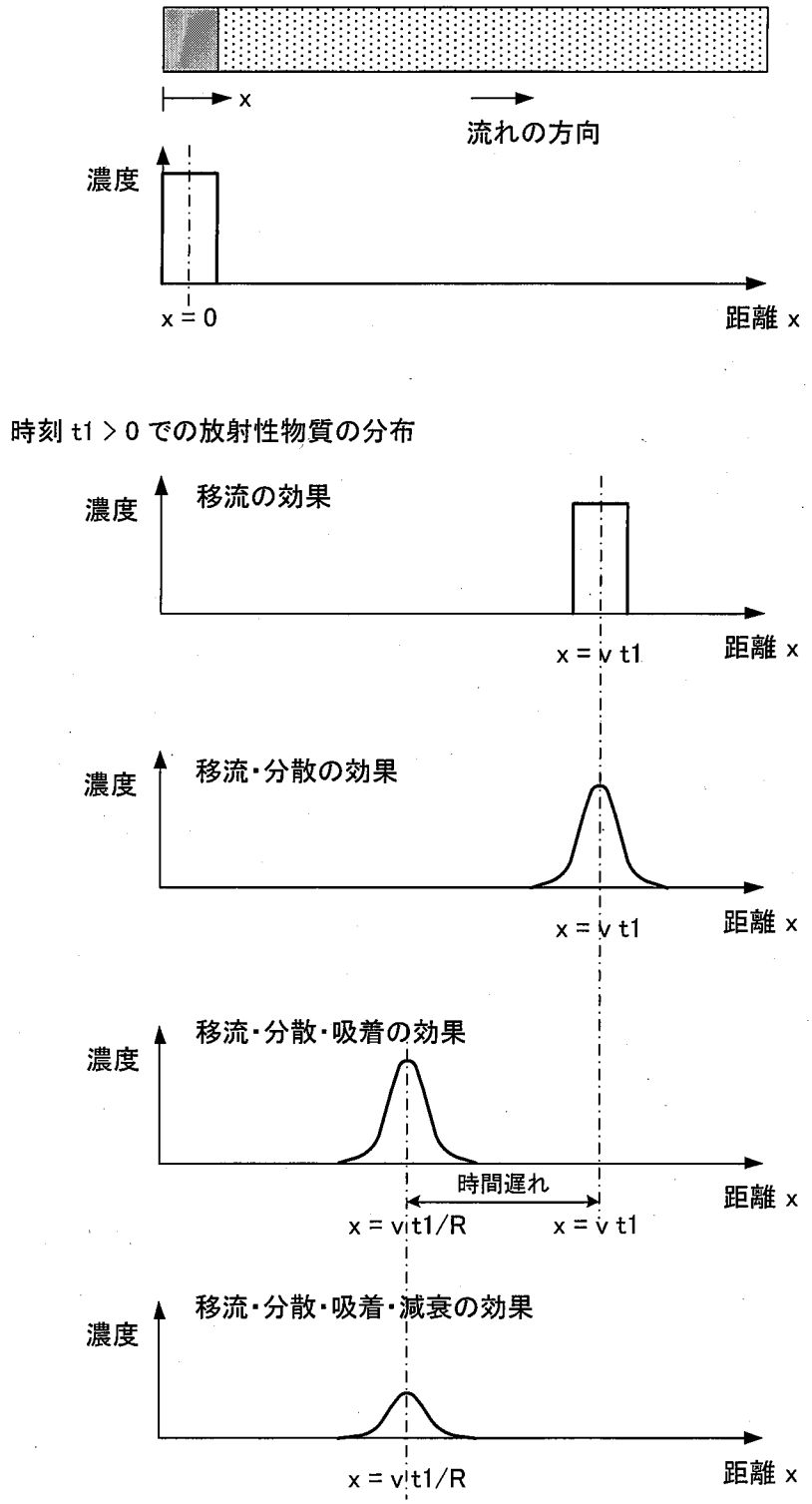

図 3.2　移流分散反応方程式における各項の効果[a]

[a] 上田年比古監訳(1990):パソコンによる地下水解析, W.キンツェルバッハ著, 森北出版、第 6 章より再描写

3.2 最終処分場の水収支

移流分散反応方程式である式 3.1 を用いて放射性セシウムの移動を評価する際、右辺第 2 項の流速を決定する必要がある。そのためには、夢洲 1 区の水収支を知っておく必要があり、本節では水収支計算によって埋立層内に浸入する雨水量（以下、涵養量とする）を計算する。図 3.3 に夢洲 1 区における水収支の概念図を示す。処分場に入ってくる水は降雨量のみであり、出ていく水は蒸発量と水処理量になる。蒸発量は水面部と陸域化部では異なるが、まずは、処分場全体としての水収支を考える。したがって、

$$\text{降雨水量} = \text{蒸発水量} + \text{水処理量} \tag{3.5}$$

について考える。保有水水位は一定条件とする。

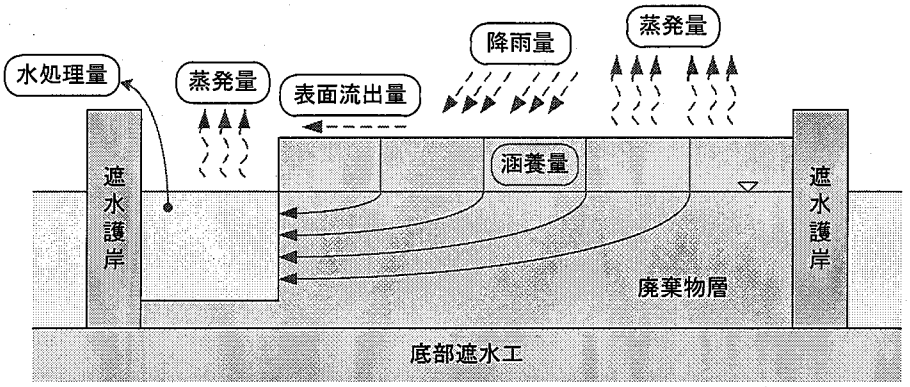

図 3.3　水収支の概念図

表 3.1　大阪市の過去 4 年間における月別降雨量（mm）

	2008	2009	2010	2011	平均
1 月	51	73	46	0.5	42.63
2 月	60.5	95	132	113.5	100.25
3 月	95	147.5	153.5	75.5	117.88
4 月	143.5	98.5	143	92	119.25
5 月	218.5	78.5	162	307.5	191.63
6 月	190.5	121.5	222.5	200.5	183.75
7 月	123.5	162	221.5	145	163
8 月	82	41.5	37.5	189	87.5
9 月	130.5	51	161	242	146.13
10 月	62	120	172	146.5	125.13
11 月	50	130.5	32.5	90	75.75
12 月	55.5	46	84.5	12	49.5
年間	1262.5	1165	1568	1614	1402.4

過去 4 年間の大阪市における月別降水量を表 3.1 に示す。年間平均降雨量は 1402.4 mm となっている。同様に、過去 4 年間の水処理量の実測値より、処分場全体の水収支を考え

ると表 3.2 となる。これより、夢洲 1 区全体における蒸発率は過去 4 年間平均で 38.13％と計算され、平均蒸発量は 535.51 mm/年となる。

表 3.2　夢洲 1 区処分場全体の水収支

年	水処理量の実績（トン）①	処分場の面積（m^2）②	年間降雨量（mm）③	年間の降雨水量（トン）④＝②×③	蒸発量（mm）⑤＝(④－①)÷②	蒸発率（％）⑤÷③
2008	620,471	730,000	1,262.5	921,625	415.54	32.68
2009	496,498	730,000	1,165	850,450	484.87	41.62
2010	704,289	730,000	1,568	1,144,640	603.22	38.47
2011	709,990	730,000	1,614	1,178,220	641.41	39.74
平均	632,812		1402.4	1,023,734	535.51	38.13

先述したが、残余水面部と陸域化部の蒸発率は異なる。水面部と陸域化部の蒸発量の違いを考慮すると、水収支式は、

水処理量＝（水面部降雨水量－水面部蒸発量）＋（表面流出水量＋涵養水量）　(3.6)

となる。

残余水面部の面積 65,650 m^2 を用い[a]、陸域化部の蒸発率を求めて涵養量を推計する。残余水面部は水のみであるので、残余水面部からの蒸発率を降雨量の 75％とすると、残余水面部の降雨量の内、水処理側に移動するのは残りの 25％となる。よって、式 3.6 の（水面部降雨水量－水面部蒸発量）は面積×年間降雨量×25％となり、65,650 m^2×1402.4 mm×0.25＝23,017 m^3 と計算されるので、水処理量 632,812 m^3 よりからこの値を引けば、式 3.6 の（表面流出水量＋涵養水量）は 609,795 m^3 となる。陸域化部の面積は、処分場全体から残余水面部の面積を引けば算出できるので、730,000 m^2－65,650 m^2＝664,350 m^2 となり、(表面流出量＋涵養量）は 917.88 mm/年と算出される。このうち、半分の 1/2 が涵養量と仮定すると、458.94 mm/年が涵養量と求められる。この値は降水量 1402.4 mm/年に対して 32.7％であり、廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領[b]に記載されている大阪の年間平均浸出係数 34％に近い値となっている。

これより、陸域化部の平均涵養量を 459 mm/年として計算を行う。この涵養量は埋立地内に入るときの水の流速（水フラックス）であり、単位面積当たりの年間涵養水量は 0.459 m^3 となる。

---

[a] 平成 24 年 2 月 1 日時点の夢洲 1 区 CAD 図面の残余水面部より求積。

[b] 社団法人全国都市清掃会議（2001）：廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領，p. 338.

3.3 評価断面の設定

夢洲 1 区で予定されている受入予定地の形状はＬ字型であり、その形を反映した三次元のシミュレーションも可能であるが、本評価は埋立てに対する技術的な成立性を評価することが目的であるので、放射性セシウム濃度が最も高いと想定される二次元の評価断面を決定し、その断面について評価を行うこととする。夢洲 1 区の大局的な保有水の流れは、残留水面部に向かっていることを仮定し、下流側である残余水面部到達地点に濃度限度を守るべき評価対象点（POC：Point Of Compliance）を設定する。また、適合性評価の対象断面は、最も濃度が高くなると仮定される断面を設定することとし、残余水面部から受入予定地までの距離が最も短く、かつ、受入予定地の廃棄物量が最も多い（流線方向に対する埋立延長が長い）ラインとした。図 3.3 に平面図上にプロットした評価断面のラインを示す。図中の距離は、1/500 の平面図からスケールアップによって読み取った数値を記入している。

図中左側（南側）の遮水鋼矢板から、右側（北側）の鋼矢板までの距離は 1420 m であり、受入予定地から残留水面部までの水平距離は 130 m、第 2 層埋立部の法肩までの水平距離は 60 m、評価断面における受入予定地の延長は 180 m、受入予定地の右側にある既に埋立てられた領域は 1220 m となる。この評価断面における保有水は、降雨に伴って埋立地に入る涵養水によって図中左の残余水面部へと流れる

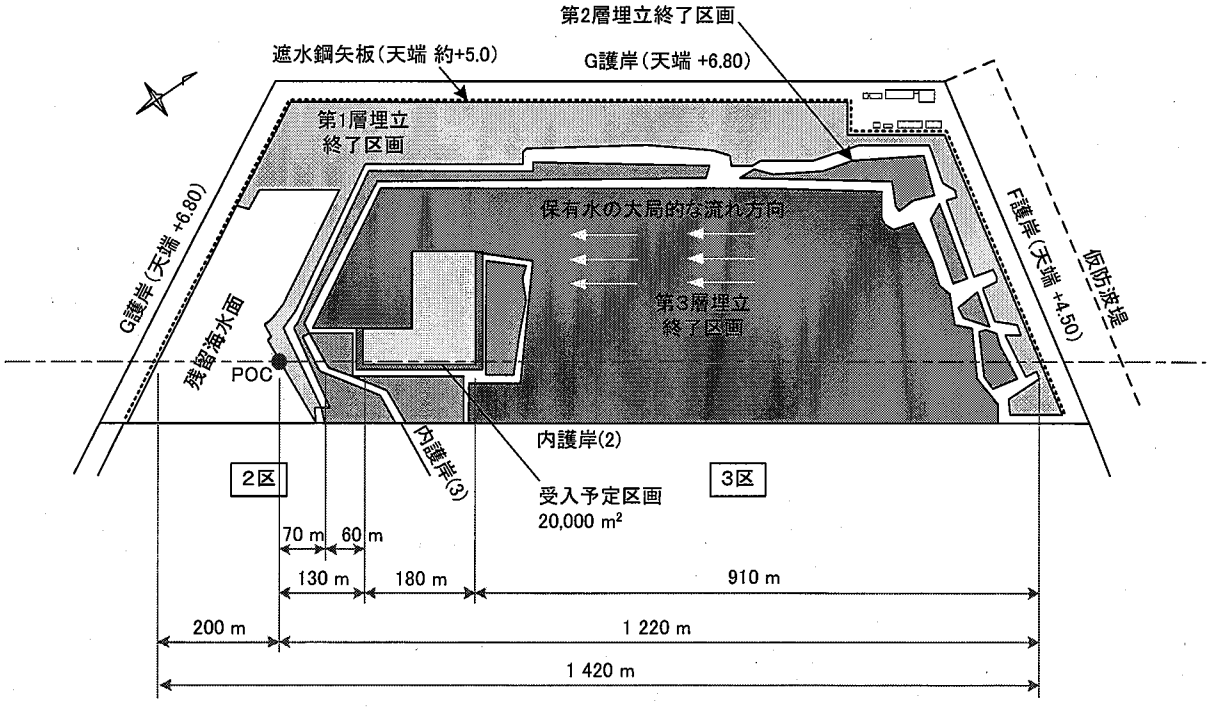

図 3.4　評価断面の設定

3.4 流速の設定

先に示した式 3.1 の移流分散反応方程式によって放射性セシウムの移動を評価する際、右辺第 2 項に示した間隙内実流速 v を決める必要がある。ある断面積 A m^2 を通過する流量 Q m^3 は、ダルシー流速 q m/y（ここで、y は年を表す）を用いて

$$Q = q \cdot A \qquad \cdots (3.7)$$

と与えられる。先ほど述べた涵養量 0.459 m/y はダルシー流速 q に相当する。よって、単位断面積を考えれば、その流量は 0.459 m^3/y となる。図 3.4 に示した標準断面図における鉛直断面模式図とその水の流れを図 3.5 に示す。

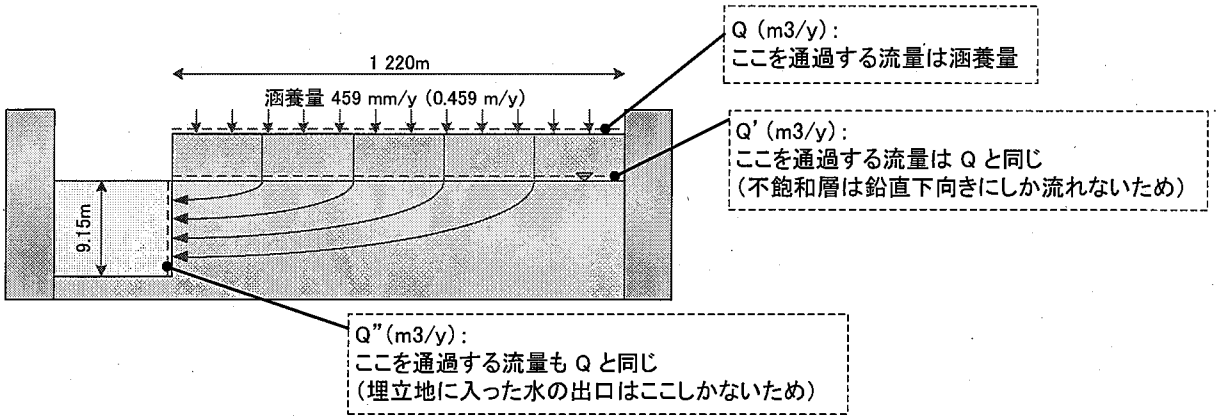

図 3.5　陸域化部埋立地における流量の考え方

夢洲 1 区の管理水位（残余水面部の水位）は D.L.+0.95 m であるが、埋立地内の水位は D.L.+2.00 m と推定されている。したがって、埋立地の鉛直断面を考えると、不飽和帯と飽和帯（水位より下）の 2 つの領域に分かれることになる。不飽和帯の水は鉛直下向きにしか流れないが、飽和帯に入った水は、唯一の出口である残留水面部へと向かって流れることになり、水平方向に動き出す。これは、海面処分場における一般的な水の流れである。図 3.5 における標準断面を単位奥行き 1 m で考えると、陸域化部埋立地における水の入口は涵養として入っていく地表面であり、幅 1220 m×奥行き 1 m の 1220 m^2 の面積となるが、出口は、残余水面部の側壁しかない。夢洲 1 区の水位以下の埋立深さ 10 m に対して、残余水面部の水深は 9.15 m と観測[a]されていることから、残余水面部の下面からは集水されないと仮定した（出口の面積が小さい方が流速が速いという評価となり、より安全側の評価が可能）。したがって、出口の面積は 9.15 m^2 であり、入口に比較して 0.0075 倍の面積となる。地表面から入ってくる総涵養量を Q m^3/y とすると、不飽和帯は単に鉛直下向きに流れるだけであることから、水面到達時点の水量 Q' も涵養量の Q と等しくなる。本計算では保有水水位の変動を考慮していないことから、出口である残余水面部の流量を Q'' とす

[a] 平成 17 年の残余水面部水深調査結果（大阪市）より引用。

ると、Q'' も Q と等しくなり、$Q = Q' = Q''$ の関係が保たれる。ただし、出口と入口の面積がことなることから、そのダルシー流速は大きく異なることになる。これは、式 3.7 の形からも想像できる。

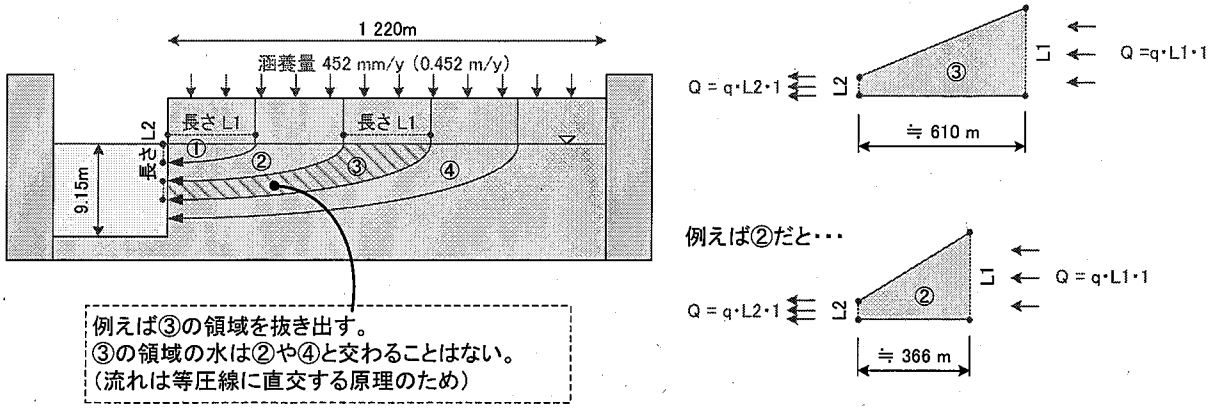

図 3.6　任意の流線束に対する流量と流速の考え方

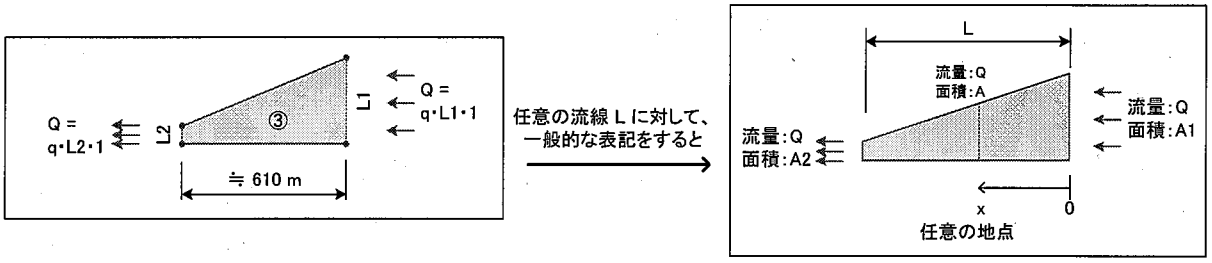

図 3.7　任意の流線束の一般的表記

入口である地表面を等間隔で分割したとする。入口側と同じ分割数で残余水面部の側壁を等間隔で分割する[a]と、図 3.6 に示した台形を抜き出すことができる。この台形内を流れる水は、隣の台形部分へと移動することは無い。これは、流れが等圧線に直交する原理[b]のためである。例えば、水平方向に中心である③を抜き出し、単位奥行きを考えたとき、L1 を 1 m とすると、L2 は 0.075 m となる。台形の幅は約 610 m という形状になる。この台形に入ってくる流量は 0.459 m^3/y であり、その流量は L1 部でも L2 部でも同じである。中心部の③ではなく、②等を抜き出したとしても、L1、L2、Q はどこでも同じであり、変化するのは、幅のみということになる。より一般的に表現すると、図 3.7 のように表される。上流側を起点として、任意の地点 x での断面積 A は、

$$A = \frac{A2 - A1}{L} \cdot x + A1 \qquad \cdots (3.8)$$

[a] 残余水面部の側壁部における流出速度が一様であると仮定。
[b] 石原研而（2001）：土質力学，第 2 版，丸善株式会社，pp. 84-93.

となり、任意の流線 L における台形部の体積 V は、

$$V = \int_0^L A\,dx = \left[\frac{A2 - A1}{2L}x^2 + A1 \cdot x\right]_0^L = \frac{A2 + A1}{2}L \qquad \cdots (3.9)$$

となる。断面 $A1$ を通過して断面 $A2$ まで到達するトラベルタイム t（y）は、体積 V m^3 の容器に一定流量 Q m^3/y で水を満たす時間と同じなので、

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{A1 + A2}{2Q}L \qquad \cdots (3.10)$$

として求めることができる。

流入側の $L1$ を単位長さの 1 m、奥行きも単位長さとすれば、$A1$ は 1 m^2 となり、$A2$ は 0.0075 m^2 となる。Q は涵養量より 0.459 m^3/y で一定のため、式 3.10 を用いてトラベルタイムを求めると表 3.3 のようになる。距離 L = 130 m は受入予定地と残余水面部の最短距離、310 m はその最長距離を表している。参考として、610m、1000 m の場合も記載した。T' はダルシー流速 q から求められた見かけの時間であり、実際の物質移動は、体積含水率θで除した間隙内実流速 v であることから、実効トラベルタイム Te は T' のθ倍となる（間隙水の実容積 Ve が V×θより求められるため）。これより、最短距離である 130 m 地点での物質移動時間は、吸着も分散も無く、移流のみであれば 57.1 年必要と計算される。これより、^{137}Cs であれば、埋立予定地から POC である残留水面部まで移動するまでには、半減期を約 2 回程度迎えることになる。

また、式 3.1 の全体を遅延係数 R で除すると、右辺第 2 項の移流項の係数が、v/R となることが分かる。実効トラベルタイムは間隙内実流速 v によって求めたものであるから、吸着を考慮し、固相の見かけ密度（乾燥密度）、分配係数が分かっているのであれば、実効トラベルタイム×遅延係数が、吸着を考慮した際の実効トラベルタイムになる。

表 3.3　トラベルタイム（物質の移動時間）の計算結果

位置	$A1$ (m^2)	$A2$ (m^2)	Q (m^3/y)	L (m)	V (m^3)	T' years	θ -	Te years
130m	1.0	0.0075	0.459	130	65.5	143	0.4	57.1
310m	1.0	0.0075	0.459	310	156	340	0.4	136
610m	1.0	0.0075	0.459	610	307	669	0.4	268
1000m	1.0	0.0075	0.459	1000	504	1,098	0.4	439

実効トラベルタイムにより物質移動時間のおおよそを知ることができるが、放射性セシウムの移動を評価する場合、時間と同様に速度分布が重要である。式 3.7 より、流速 q は、

$$q = Q / A \qquad \cdots (3.11)$$

と書き換えられる。図 3.6 ならびに式 3.8 で示したように、面積の変化が線形であると仮定すると、流速 q は流入口である保有水水面部からの距離 x の一次関数である A の逆数の

変化となる。最短距離である 130 m 地点からの保有水内の物質の速度分布は、図 3.8 に示されるように、徐々に増加し、80 m 移動時に約 2 倍の速度となり、130 m 地点の残余水面部に近づくと急激に流速が上昇し、最終的には流入口での流速 0.459 m/y の 133.3 倍の 61.2 m/y の流速となる。

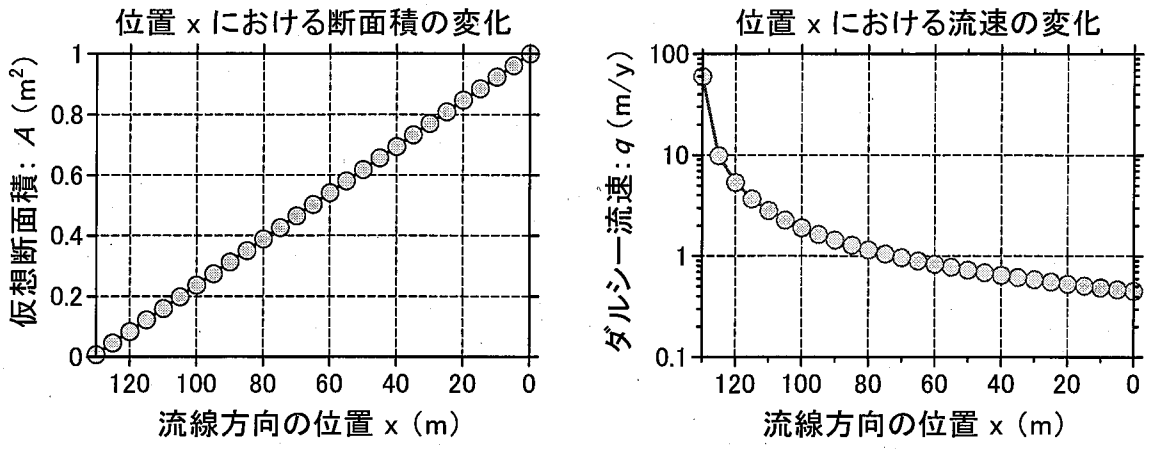

図 3.8　流線方向の位置 x に対する流線束断面積と流速の変化

3.5 飽和解析による疑似シミュレーションの妥当性

夢洲 1 区の災害廃棄物焼却灰の受入区域は、陸域化部への埋立てとなり、埋立てられた焼却灰からの放射性物質の移動は不飽和帯を経由して保有水水位以下の飽和帯へと移動する。この際、不飽和帯を通過するので、本来であれば不飽和帯の計算を実施するべきであるが、その場合、日降雨量等の降雨強度によって涵養量を変え、涵養量の違いによって変化する含水率によって位置毎の流速 v を不飽和浸透方程式によって解く必要がある。本評価のシミュレーションは、シミュレーション期間が百年単位となり、年間涵養量が決まっている条件下(年間の水フラックスが決まっており、流下する放射性セシウムの量も一定)で、不飽和浸透解析を実施し、分単位で変化する流速 v を評価しても最終的な濃度評価に対する影響は極めて小さいと考えられる。

不飽和浸透によって含水率が変化するので、遅延係数 R に関する式 3.2 の体積含水率 θ が変化することになる。体積含水率 θ は、間隙率×飽和度によって求められる値である。水で飽和されている場合、間隙率×100％となるので、θ = 間隙率となる。

式 3.1 全体を R で除すると、

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{R}\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{v}{R}\frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C \qquad \cdots (3.12)$$

と書き換えられる。遅延係数 R は式 3.2 に示される通りであることから、体積含水率 θ が

変化すると表 3.4 に示される通り遅延係数 R も変化する。式 3.12 の右辺第 2 項の移流項の実流速 v も体積含水率によって変化する。また、移流項の実流速 v は R で除することになるので、Kd が大きくなると v/R の実質的な時間遅れの値は変化が極めて小さくなる。Kd = 0.5 mL/g のように分配係数が小さい場合、間隙率の違いによって 1.3 倍程度の違いが生じるが、分配係数の小さい材料中を通過する距離が短い場合、解析結果に及ぼす影響は微少であると判断される。以上の理由により、本安全評価で不飽和浸透解析を行ったとしても、解析結果である濃度に及ぼす影響は極めて小さいと判断されることから、飽和浸透流を仮定したシミュレーションを実施した。

表 3.4 体積含水率による遅延係数と実流速との関係

θ	−	0.4	0.3	0.2	0.1	0.4	0.3	0.2	0.1
ρ_d	kg/m^3	1600							
Kd	mL/g	300				0.5			
Kd	m^3/kg	0.3				0.0005			
R	−	1201	1601	2401	4801	3	3.7	5	9
v	m/y	25*	33	50	100	25*	33	50	100
v/R	m/y	0.0208	0.0208	0.0208	0.0208	8.33	9.09	10.0	11.1

* 間隙内実流速 v = 25 m/y は仮定の値として入力し、この値を間隙率 0.4 の多孔質体の飽和時の基準流速として各体積含水率の流速を計算。