

4. 2 用いる計算モデルの概要および基本方程式、用いるパラメータの説明

地下水解析や移流分散解析で用いられる主な解析法としては、差分法と有限要素法がある。

差分法は計算領域を直方体形の格子または面で区切り、隣り合う格子や面に入出入りする物質質量やエネルギー量の収支を計算する解析法である。一方有限要素法は、計算領域内に任意の点（節点）を設定し、節点で囲まれた範囲（要素という）内の物質質量およびその分布を計算する解析法である（図-4.2.1）。^{30),31)}

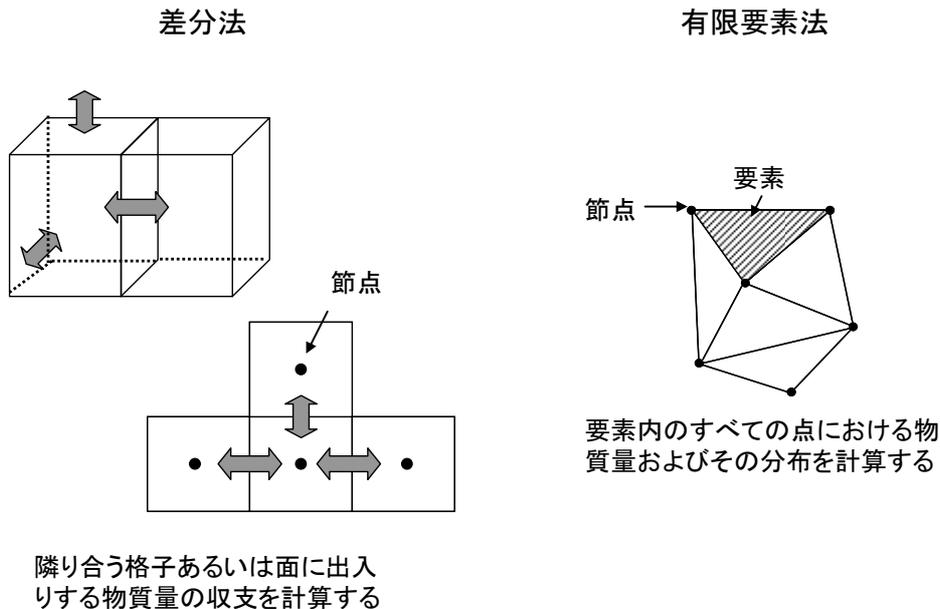


図-4.2.1 差分法および有限要素法の概念図

各解析法のメリット・デメリットとしては、次の点が挙げられる（表-4.2.1）。

表-4.2.1 差分法および有限要素法のメリットとデメリット

	メリット	デメリット
差分法	構造が比較的単純であり、プログラム化が容易である。	空間表現に柔軟性がないため、複雑な地形等の解析には向かない。
有限要素法	節点と要素によって構造を決定するため空間表現に柔軟性があり、複雑な地形の解析にも適用できる	計算量が多いため計算時間が長くなる上、データ容量も大きくなるためコンピュータへの負荷が大きい。

GETFLOWS では、表に示した各解析法の欠点を補うため、コーナーポイント型格子を取り入れた有限差分法を用いている。この方法は、8つのポイントにより構成される格子について差分法による解析を行うものである。ポイントにより格子を構成するため、地質等に応じて柔軟に格子を設定することができ、差分法の欠点である空間表現の柔軟性を改善している。

GETFLOWS では、基本方程式として、下記に示す質量保存則および熱エネルギー保存則を表す式を用いている^{27),32),33)}。

①水成分について

各相中の水成分

$$\nabla \left(\frac{Kkr_{cw}}{\mu_{cw} B_{cw}} \nabla \Psi_{cw} \right) + \nabla \left(\frac{Kkr_{cc}}{\mu_{cc} B_{cc}} \nabla \Psi_{cc} \right) - q_{ws}^{cw} - q_{ws}^{cc} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_{cw}}{B_{cw}} + \phi \frac{S_{cc}}{B_{cc}} \right)$$

↓ 単位体積あたりの固体中の地下水相から生産される標準状態での純水の体積
↑ 単位体積あたりの固体中の汚染相から生産される汚染原液の体積
↑ 単位体積あたりの液相(水相+汚染原液相)の体積変化(貯留項)

②空気成分について

空気成分の出入り

$$\nabla \left(\frac{Kkr_{ca}}{\mu_{ca} B_{ca}} \nabla \Psi_{ca} \right) - q_{cas} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_{ca}}{B_{ca}} \right)$$

↓ 単位体積の固体相から生産される標準状態での空気の体積
↑ 単位体積あたりの空気相の体積変化(貯留項)

③汚染相の汚染物質成分について

汚染相中の汚染物質の出入り

$$\nabla \left(\frac{Kkr_{cc} R_{cc}}{\mu_{cc} B_{cc}} \nabla \Psi_{cc} \right) - q_{cs}^{cc} - \underbrace{f_{cs}^{cc-cw} + f_{cs}^{ca-cc} + f_{cs}^{cc-r}}_{\text{汚染相から各相への汚染物質の移動}} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_{cc} R_{cc}}{B_{cc}} \right)$$

↓ 単位体積の固体相から生産される標準状態での汚染成分体積
↑ 単位体積あたりの汚染原液相の体積変化(貯留項)

④地下水相における汚染物質(溶存種)について

地下水相中の汚染物質の出入り

$$\nabla \left(\frac{Kkr_{cw} R_{cw}}{\mu_{cw} B_{cw}} \nabla \Psi_{cw} \right) + \nabla \left(D_{cw} \nabla \frac{R_{cw}}{\alpha_{cw}} \right) - q_{cs}^{cw} + \underbrace{f_{cs}^{cc-cw} + f_{cs}^{ca-cw} - f_{cs}^{cw-r}}_{\text{地下水相から各相への汚染物質の移動}} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_{cw} R_{cw}}{B_{cw}} \right)$$

↑ 地下水相中の分散拡散による汚染物質の移動
↓ 単位体積の地下水相から生成される標準状態での汚染物質の体積
↑ 単位体積あたりの地下水相中の汚染物質の体積変化

⑤空気相における汚染物質(揮発種)について

空気相中の汚染物質の出入り

$$\nabla \left(\frac{Kkr_{ca} R_{ca}}{\mu_{ca} B_{ca}} \nabla \Psi_{ca} \right) + \nabla \left(D_{ca} \nabla \frac{R_{ca}}{\alpha_{ca}} \right) - q_{cs}^{ca} + \underbrace{f_{cs}^{ca-cc} + f_{cs}^{ca-cw}}_{\text{空気相から各相への汚染物質の移動}} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_{ca} R_{ca}}{B_{ca}} \right)$$

↑ 空気相中の分散拡散による汚染物質の移動
↓ 単位体積の空気相から生成される標準状態での汚染物質の体積
↑ 単位体積あたりの空気相中の汚染物質の体積変化

⑥ 流体相が輸送する熱エネルギーについて

$$\underbrace{\nabla \left(\rho_{cw} \frac{Kkr_{cw}H_{cw}}{\mu_{cw}} \nabla \Psi_{cw} \right) + \nabla \left(\rho_{ca} \frac{Kkr_{ca}H_{ca}}{\mu_{ca}} \nabla \Psi_{ca} \right) + \nabla \left(\rho_{cc} \frac{Kkr_{cc}H_{cc}}{\mu_{cc}} \nabla \Psi_{cc} \right)}_{\text{孔隙内の流体が輸送する熱エネルギー(各流体相の流速によって輸送:熱移流項)}}$$

$$- \underbrace{\rho_{ws}q_{ws}H_{cw} - \rho_{cas}q_{gs}H_{ca} - \rho_{ccs}q_{cs}H_{cc}}_{\text{熱の生産・消滅項}} + \underbrace{\nabla(\lambda_f \nabla T_f)}_{\text{熱伝導項}} - \underbrace{f_{f \rightarrow r}}_{\text{固相(岩石等)と液相間の熱交換項}}$$

$$= \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \phi S_{cw} U_{cw} + \rho_{ca} \phi S_{ca} U_{ca} + \rho_{cc} \phi S_{cc} U_{cc})$$

↑ 流体が貯留する熱エネルギー(貯留項)

⑦ 固相が伝導・貯留する熱エネルギーについて

$$\underbrace{\nabla(\lambda_f \nabla T_f)}_{\text{固相(岩石等)}} - \underbrace{f_{r \rightarrow f}}_{\text{固相と液相間の熱交換項}} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_r (1 - \phi) U_r)$$

↑ 固相が貯留する熱エネルギー(貯留項)

K	: 絶対浸透率	(m^2)
kr_p	: p相の相対浸透率 (p=水相cw, 気相ca, 汚染物質相cc)	(-)
ϕ	: 有効空隙率	(-)
S_p	: p相の飽和度 (p=水相cw, 気相ca, 汚染物質相cc)	(-)
Ψ_p	: p相のポテンシャル (p=水相cw, 気相ca, 汚染物質相cc)	(Pa)
ρ_p	: p相の密度 (p=水相cw, 気相ca, 汚染物質相cc)	(kg/m^3)
μ_p	: p相の粘性係数 (p=水相cw, 気相ca, 汚染物質相cc)	(Pa · s)
H_p	: p相のエントルピー	(J/kg)
U_r	: 固相の内部エネルギー	(J/kg)
U_p	: p相の内部エネルギー	(J/kg)
T_r	: 固相の温度	($^{\circ}C$)
T_f	: 流体相の温度	($^{\circ}C$)
λ_r	: 固相の熱伝道率	(J/K/m/sec)
λ_f	: 流体相の熱伝道率	(J/K/m/sec)
$f_{r \rightarrow f}$: 固相と流体相間の熱交換量	($J/m^3/sec$)
q_{ps}	: p相の生産・消滅に伴う熱の出入り	($J/m^3/sec$)
B_p	: p相の容積係数	(m^3/m^3)
R_p	: p相の汚染物質溶存比	(-)
D_p	: p相の濃度拡散係数	(m^2/sec)
α_p	: p相の溶液体積変化係数	(m^3/m^3)