

多孔質体中での多相流

Multiphase Flow in Porous Media

遠藤和人 (えんどう かずと)

国土環境研究所 循環型社会・廃棄物研究センター

1. 多相流とは

地盤中の多相流は、非混合性の2つ以上の流体（空気、水、油など）が地盤中を同時に移動する現象であり、例えば間隙が空気と水で構成されている不飽和帯での空気・水の移動（気液二相流）や、不飽和帯に油が存在する場合の空気・水・油の移動（気液液三相流）が挙げられる。原油など、帯水層中に油が存在している場合は、液液二相の多相流となり、この種の研究は20世紀後半に原油産出国やその地域において精力的に研究されてきた。地下水汚染問題では、VOC (Volatile Organic Compounds) 原液のような非水溶性流体：NAPL (Non-Aqueous Phase Liquid) がどのように地盤中を浸透して拡散し、間隙にどの程度残るか（残留するか）、また、それをどのように浄化するかが課題となる。多相流の挙動は飽和度と毛管圧力の関係によって解かれることが多く、不飽和浸透で用いられる水分保持曲線によって説明される。多相流では、この曲線はS-P曲線 (S-P relation) と呼ばれている¹⁾。S-P曲線によって多相流挙動の多くを説明することができることから、以下では気液ならびに液液二相流の多相流の挙動をS-P曲線を用いて説明する。

2. フルヒステリシス S-P 曲線

S-P曲線のSは飽和度であり、Pは毛管圧力を示している。飽和度は通常、wetting相の飽和度 S_w が用いられる。毛管圧力Pは P_c で表現され、

$$P_c = P_n - P_w \quad \dots\dots\dots (1)$$

によって計算される。ここで、 P_n はnonwetting相の圧力、 P_w はwetting相の圧力を表している。表-1に二相流システムにおけるwetting相とnonwetting相の定義を示す。水・ガスの二相流の場合、一般に土が親水性であるため水相がwetting相、ガス相がnonwetting相となり、水・NAPLの場合はNAPL相がnonwetting相となる。wetting相の飽和度 S_w を横軸に取り、毛管圧力 P_c を縦軸に取った曲線がS-P曲線であり、図-1に示されるような形状をとる。ここで描いたS-P曲線はフルヒステリシスを考慮している。例えば、初期に水相によって飽和している多孔質体にNAPLが侵入してきたとすると、図中の点0を始点として、水相の飽和度が減少し、水相にメニスカスが生じるために負圧が発生する。また、それと同時にNAPL相の侵入圧が正であ

表-1 wetting相とnonwetting相の定義

二相流システム	wetting相	nonwetting相
水-ガス	水	ガス
水-NAPL	水	NAPL
NAPL-ガス	NAPL	ガス

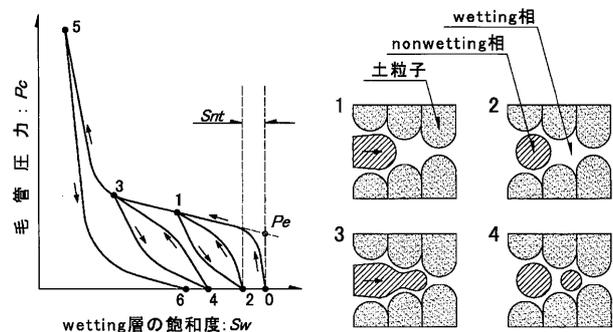


図-1 ヒステリシス S-P 曲線と間隙中での挙動

るため、毛管圧力が上昇することで点1へと移動する。点1に到達した時点でNAPLの侵入がとまり、再度、水相が侵入してきたとすると、点2へと移動する。この点2では、毛管圧力が再びゼロになっている。これは、NAPLの液滴の界面が閉じて非連続体となったことと、水相のメニスカスがなくなった結果である。間隙構造がストローのような極端に均一な場合を除いて、NAPLの液滴が間隙内に残留（トラップ）されてしまうため、 S_w は点0まで戻らず、点2へと移動することになる。

3. 侵入圧

ヒステリシスS-P曲線（図-1）の点0から1、3を通して点5まで移動する曲線はPrimary Drainage Curve (PDC) と呼ばれる²⁾。一般的に、点0から移動して直ぐに折れ点 P_e が存在するが、この点は、対象となる地盤の侵入圧を示している。仮に図-1がwetting相=水相、nonwetting相=空気とすると、この侵入圧 P_e は空気侵入圧を意味しており、水相によって間隙が飽和している対象の多孔質体に空気を侵入させようとしたとき、空気が入り始める圧力である。DNAPL（水よりも密度の大きいNAPL）の場合は臨界高さともいわれ、水との界面張力 σ 、地盤との接触角 ϕ 、最も大きな間隙径 r 、重力加速度 g 、DNAPLの密度 ρ_n 、水の密度 ρ_w より、

技術手帳

$$Pe = (2\sigma \cdot \cos \phi) / (r \cdot g(\rho n - \rho w)) \dots\dots\dots (2)$$

として求められる³⁾。式(2)より、界面張力や接触角が大きくなれば侵入させるのに必要な圧力が大きくなることがわかる。また、粘性土地盤に比較して間隙径の大きな砂地盤では、侵入圧が小さくなる。

4. 残留飽和度

フルヒステリシス $S-P$ 曲線では、点1を戻り点として S_w が増加する過程 (SIC: Scanning Imbibition Curve) において、点2が点0と一致しない。このようにトラップされた nonwetting 相の残留飽和度 S_{nt} が存在することは、地下水汚染で重要な問題となる。間隙内にトラップされた nonwetting 相は、再び nonwetting 相と遭遇

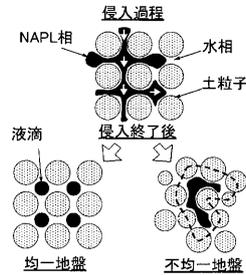


図-2 トラップされた nonwetting 相の存在形態

して連続性のある流体となるか、界面張力や接触角が減少するまで移動することができず、トラップされたその場から wetting 相へと徐々に溶解し始める⁴⁾。図-2 (文献⁵⁾に加筆修正) に均一系と不均一系地盤におけるトラップされた nonwetting 相の存在形態を示す。均一系であると液滴 (blob) としてトラップされ、不均一であると、図中に示される破線部の侵入圧が高いために ganglion と呼ばれるいびつな形でトラップされる。NAPL による地下水汚染問題では、このようにトラップされた nonwetting 相 (NAPL) からの溶解が継続するため、長期にわたる広域地下水汚染を引き起こすことになる。砂質土におけるベンゼンの残留飽和度は0.24、トリクロロエチレンは0.20程度と報告³⁾されており、nonwetting 相の地盤内浸透挙動を解析する際には、この残留飽和度を取り扱ったフルヒステリシス $S-P$ 曲線を考慮するかどうか重要となる⁵⁾。図-3 に鉛直断面二次元におけるヒステリシスモデルによる浸透挙動の違いを示す。幅20 m、高さ31 mの断面を想定して、初期水飽和条件の断面上側中心から DNAPL が水頭0.4 mにて10日間注入され、注入終了から30日経過した DNAPL 飽和度 (S_n) の分布について数値解析を行った結果である。残留飽和度を考慮した (c2) では、注入された DNAPL の多くは注入点近くに留まる計算結果になるが、残留飽和度をゼロとした二つの計算結果 (a2), (b2) では、DNAPL の汚染は深部を中心とした分布となっており異なる結果が得られる。地盤内での適切な DNAPL 分布を把握するためには、残留飽和度を考慮することが重要である。

5. おわりに

ここでは多相流の中で最も単純な二相流を例にとって説明を行った。気液二相流の不飽和帯に NAPL が侵入

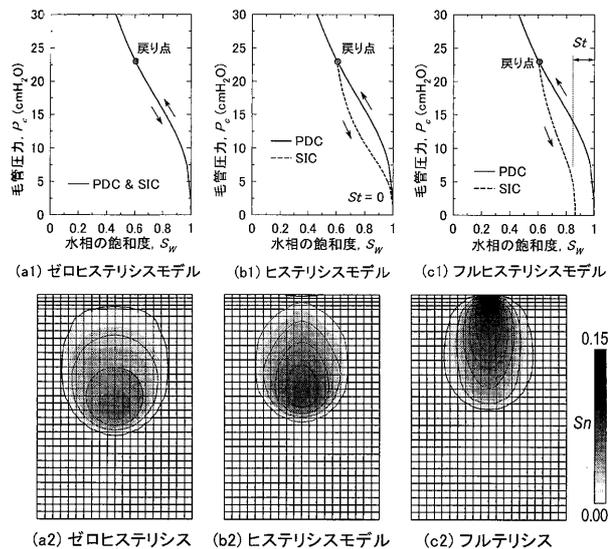


図-3 ヒステリシスモデル (上段) の違いによる解析結果 (下段: 上段のモデルに対応)

するような気液液三相流については詳述できないが、気相と液相 (水相と NAPL 相の合計) の疑似二相流として $S-P$ 曲線を描く手法など多くの提案がなされているので文献⁶⁾を参照していただきたい。多相流問題の研究成果は、必要とされる多孔質体のパラメーターが多いためか、土壌地下水汚染の実務ではあまり用いられてこなかったといえる。しかしながら、メタンハイドレードの回収や二酸化炭素の地層処分、廃棄物処分場のバイオフィクター化など、今後、エネルギーや環境分野において多相流の概念が必要とされる状況が増えると思われる。

参考文献

- 1) Parker, J. C. and Lenhard, R. J.: A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow. 1. Saturation—pressure relations, Water Resour. Res., Vol. 23, No. 12, pp. 2187~2196, 1987.
- 2) Essaid, H. I., Herkelrath, W. N. and Hess, K. M.: Simulation of fluid distributions observed at a crude oil spill site incorporating hysteresis, oil entrapment, and spatial variability of hydraulic properties, Water Resour. Res., Vol. 29, No. 6, pp. 1753~1770, 1993.
- 3) Mercer, J. W. and Cohen, R. M.: A review of immiscible fluids in the subsurface: properties, models, characterization and remediation, J. Contam. Hydrol., Vol. 6, pp. 107~163, 1990.
- 4) Wilson, D. J., Mutch Jr., R. D., and Scott, J. I.: Matrix diffusion effects in the cleanup of heterogeneous aquifer, Environ. Monitor. Assess., Vol. 26, No. 1, pp. 49~64., 1993.
- 5) 遠藤和人・嘉門雅史: ヒステリシス曲線が残留 DNAPL に及ぼす影響, 第38回地盤工学研究発表会発表講演集, in CD-ROM, 2002.
- 6) たとえば, Parker, J. C. (1989): Multiphase flow and transport in porous media, Rev. Geophy., Vol. 27, No. 3, pp. 311~328, 1989.

(原稿受理 2008.1.22)