

地下の遅い流体挙動 (Part I)—理論・モデル・物性評価—： イントロダクション

徳永 朋 祥¹⁾ 本田 博 巳²⁾ 佐野 修³⁾
徂 徠 正 夫⁴⁾ 松岡 俊 文⁵⁾ 星 一 良⁶⁾
安原 正 也⁴⁾ 稲崎 富 士⁷⁾ 三ヶ田 均⁵⁾
小 出 仁⁴⁾

Preface for the Special Issue on “The Slow Subsurface Fluid Flow Processes (Part I): Theory, Model, and Physical Properties Estimation”

Tomochika TOKUNAGA¹⁾, Hiromi HONDA²⁾, Osam SANŌ³⁾,
Masao SORAI⁴⁾, Toshifumi MATSUOKA⁵⁾, Kazuyoshi HOSHI⁶⁾,
Masaya YASUHARA⁴⁾, Tomio INAZAKI⁷⁾, Hitoshi MIKADA⁵⁾
and Hitoshi KOIDE⁴⁾

I. 地下の「遅い」流体流動現象の 現代的な重要性

地下における流体挙動の調査・研究は、内陸部での農業用水や飲料水の確保、食塩の確保（地下塩水からの食塩生産）の目的ではじまり、エネルギー資源としての石油開発、より大規模な水資源としての地下水開発にかかわる問題として、150年以上にわたる科学的な研究が継続されている課題である。Henry Darcy が 1856 年に発表したいわゆる Darcy の法則（Darcy, 1856）に基づく浸透流の考えが、これらの問題をとり扱う上での基

本になっている。この式のもつ意味については、Hubbert（1956）が包括的なレビューを行っており、Darcy の法則は、経験則として提示されたものであるが、物理的にはミクロな流れ場の運動方程式の解をマクロスケールに平均化したものとして位置づけられることが示されている。また、Darcy の法則が成立する条件は、流れのモードが層流であるだけでは不十分で、粘性抵抗が慣性抵抗に対して十分に支配的であることが必要と述べられている。多孔質材料中の流れでは、レイノルズ数が 600～700 程度未満では層流であることが実験的にわかっているが（Dudgeon, 1966;

¹⁾ 東京大学大学院新領域創成科学研究科

²⁾ 国際石油帝石株式会社

³⁾ 東京大学名誉教授

⁴⁾ 産業技術総合研究所

⁵⁾ 京都大学大学院工学研究科

⁶⁾ 石油資源開発株式会社

⁷⁾ 土木研究所地質・地盤研究グループ

¹⁾ Graduate School of Frontier Sciences, the University of Tokyo, Kashiwa, 277-8563, Japan

²⁾ INPEX Corporation, Tokyo, 107-6332, Japan

³⁾ University of Tokyo, Professor Emeritus, Tokyo, 113-0032, Japan

⁴⁾ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, 305-8567, Japan

⁵⁾ Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto, 615-8530, Japan

⁶⁾ Japan Petroleum Exploration Co. Ltd., Tokyo, 100-0005, Japan

⁷⁾ Geology and Geotechnical Engineering Research Group, Public Works Research Institute, Tsukuba, 305-8516, Japan

Kyle and Perrine, 1971), Hubbert (1956) の議論では、多孔質媒体を構成している固体粒子の平均径を代表寸法とした場合、レイノルズ数が1よりも大きな場合には、ダルシーの法則が成り立たないとされている。この値は、代表寸法が 10^{-2} cmである砂岩中を水が流れる場合、ダルシー流束の値が 1 ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}^2$) にほぼ対応する。また、Bear (1972) も同様な結果をまとめており、レイノルズ数が1ないし10よりも小さい場合には、ダルシーの法則が成り立つことを示している。

このように、地下においては、そもそも多くの場合、流体流動は「遅い」ことが知られてきている。一方、地下における流体挙動にかかわる問題は極めて広範になってきており、そのことが、「遅い」地下流体を考えるという観点をさらに重要なものとしている。

社会的に大きな問題となっている廃棄物処分対策として、地下環境がもつ機能への期待は極めて大きい。放射性廃棄物の地層処分や二酸化炭素(CO_2)の地中貯留などは、地下における流体挙動が「極めて遅い」場所が存在すること、もしくは、適切にデザインを行うことができれば、地下環境がもつ物質移行が「極めて遅い」という性質に期待することができるという点に基づいている。一方、石油・天然ガスといったエネルギー資源鉱床の存在やその破壊に関する議論は、地質時間にわたって石油・天然ガスが濃集し、保持されるという環境の存在が主要なテーマとなる。ここにも、「極めて遅い」もしくは、実質的には「動かない」流体の地下での存在がその主題となる。

地下に存在する流体に関連した公害である地盤沈下も、「遅い」動きを示す水に関する理解が不十分であったことによる問題という考え方も可能である。すなわち、帯水層と呼ばれる比較的流動性の高い地層から揚水をすることにより、その上下に存在する泥層からの地層水の排出とそれに伴う(弾)塑性的な地盤変形が、地盤沈下の主要な原因であり、「遅い」地下水挙動が重要な点となってくる。

地表から数100 km ぐらいのスケールの水の挙

動に関しても、多くの知見が得られ、議論が深められてきている。これは、マグマの発生に対する水相の寄与、地震発生に対する流体挙動と過剰間隙水圧発生、温泉水の挙動などに100 kmよりも深いところで放出された水が主要な役割を果たしているという研究が日本を舞台として多くなされているところに現れている(例えば、岩森・中村(2012)、長谷川ほか(2012)など)。とくに、沈み込み帯では、沈み込んだスラブ由来の水の排出とその後の挙動が、活発な火山活動・地震活動とその空間偏在性に重要な役割を果たしているようである。ここでも、浸透流的な水の移動がモデルとして考えられるが、その移動速度は、極めて遅いものであることが予想される。さらに、このような場では、固相側も容易に変形することが考えられ、古典的な浸透流の議論を超えて、固相液相両方の体積・形状変化を反映させた議論の展開を必要とする領域ともとらえられる。また、極めて広い圧力・温度条件での流れを議論することになるが、このような場における流体物性に関する丁寧な計測・評価も必要とされている。

「遅い」流れのレジームにおいては、流れに対して他の物理過程との連成現象が相対的に重要な意味をもつ場合が発生しうる。地震に伴う間隙流体圧の変化とその後の消散過程は、流れと変形の連成現象として適切に説明することができる場合がままある。また、前述の地盤沈下の問題も、変形と流動との連成現象の代表的なものである。さらに、ある種の岩石においては、濃度勾配に伴う化学的浸透(chemical osmosis)による水の移動が起こることも知られており(例えば、Neuzil(2000)など)、水理学的ポテンシャル勾配による水移動との連成過程としてとらえることが必要となってくる。このような現象は、条件がそろえば、淡水と塩水が接する沿岸域の地下で発生しているのかもしれない。

II. この特集の内容

「地下の遅い流体挙動」特集は、part 1とpart 2の2回に分けて構成されている。ここでは、前節で述べた問題意識に基づき、流体挙動に関する

概念的・理論的な理解に向けての試みやモデルに基づいた検討、流体が流れる場としての地質・亀裂系のとらえ方、実際の流動の状態やその起源を知るための年代測定や水の起源を検討するための方法論、地下の流体挙動を知るために欠かせない流体物性検討などに関する論説・総説をおもに part 1 としてとりまとめる。Part 2 においては、おもに実事例に基づくケーススタディ集とする予定である。なお、本特集では、流体物性評価に関しては、とくに、二相流体が存在する系を対象とした検討結果を掲載している(徂徠・古宇田, 2012; 國枝ほか, 2012)。水(もしくは水溶液)の広い圧力・温度条件における物性に関しては、別の機会に譲りたい。

以下、part 1 の論説・総説の内容についてその概要を述べる。

最近の工学的応用として重要とされている CO₂ 地中貯留や、エネルギー資源採取、地下空間高度利用にかかわる課題として、二相流体が地盤・岩盤中に存在する系における流れの問題があげられる。これらに関して、徂徠・古宇田(2012)、國枝ほか(2012)は、二相流体流動にかかわる物性評価の観点から、愛知・徳永(2012)は、二相流体の存在する系での流動・変形の連成過程の物理モデルに関する観点から、山邊・松岡(2012)は、二相流動に対する地震波の寄与に関する数値シミュレーションによる検討という立場から、おのおのとりまとめている。また、吉田(2012)は、地下における流体挙動の経路となりうる亀裂系の形成過程とその長期安定性評価という観点から、とくに活動的縁辺域である日本の花崗岩質岩体を対象とした検討を紹介している。

徂徠・古宇田(2012)は、CO₂ 地中貯留の実用化に向けて重要な課題であるキャップロックのシール性能評価に関してレビューを行っている。ここでは、毛管圧にかかわる用語や計測法の概要、既存モデルの説明にはじまり、シール性能評価を行う上で重要なパラメータである界面張力と接触角に関する理解の現状、パラメータ取得における課題について解説がなされている。とくに、今までに提唱されている実験法のメリット・デメ

リットに加え、シール圧の計測法および求められた値が統一的に整理・議論されていないという問題点が指摘されている。また、石油探鉱と CO₂ 地中貯留という 2 つの課題の比較から、界面張力データの整備は CO₂ 地中貯留を対象とした問題でより進んでいるが、シール圧や接触角の議論については検討事例が少ないことを述べている。CO₂ 貯留が検討されている深度から地表にかけての温度条件における CO₂ の相状態変化の重要性や、そのなかに臨界点が存在することによる問題の難しさ、CO₂ が水に溶解しやすい物質であることによる問題の複雑さなどがあることも述べられている。本総説の最後には、シール圧のモデル化の可能性に関する著者たちの試みの紹介がなされており、その成果が期待されることである。

國枝ほか(2012)は、多相流体・固体相互作用の検討の一つとして濡れ性についての実験的検討を行っている。とくに、接触角について、ミクロな視点からのアプローチを試みている。ここでは、マイクロメートルオーダー以下のスケールを対象とした接触角測定法の検討とその適用を試み、デカン-蒸留水系の流体の白雲母表面での接触角の液滴サイズ依存性について、測定法の妥当性評価と結果の議論を行っている。その結果、液滴サイズが小さくなると接触角が小さくなることから、液滴サイズが小さくなるとデカン溶液中の水液滴が白雲母基盤に対しより濡れやすくなることを示している結論づけている。また、一般に界面張力とマクロな接触角の関係を表すヤングの式は、液滴サイズ依存性を表現しておらず、修正ヤングの式を用いることにより、液滴サイズ依存性を表現することができ、この式は、今回の実験結果をよく説明することも示されている。この結果は、マクロスケールで測定されてきた接触角を用いた地層内の石油や地層流体の挙動が、ミクロスケールで起こっている現象を適切に表現していない可能性を示唆しており、今後、ミクロな視点からの地層内の多相流動に関するメカニズムの詳細な検討が必要であるとしている。

愛知・徳永(2012)は、多相流体流動と変形

の連成過程の定式化検討の現状についてとりまとめている。ここでは、地盤・岩盤挙動をコントロールしながら地下を高度に利用する場合に重要となる弾性変形領域に着目した検討となっている。本総説では、単相流体挙動と変形との連成過程に関するとりまとめから、多相流体の場合へと問題を拡張しながら説明を行っている。多相流体が存在する場合には、個々の流体圧が異なるということ、界面張力の考慮が必要であること、各相が占める間隙空間おのおの変形挙動を考慮しないとけないことが指摘されており、今まで一般的に行われていたいわゆる「等価間隙圧」の考え方に問題が存在することを指摘している。その上で、ラグランジアン間隙率およびラグランジアン飽和率を導入することにより、熱力学と弾性ポテンシャル理論に基づいた構成関係を記述できることが示されている。さらに、その関係を記述するパラメータを実験的に求めることが可能な形で表現することが可能であることも示されている。本総説で述べられているアプローチの展開として、弾塑性問題への適用可能性についても述べられている。

山邊・松岡（2012）は、地震波が流体挙動にもたらす影響評価の一事例として、ポアスロート部にトラップされている非濡れ相流体のドロップレットが、地震波による振動によって押し出されるメカニズムについて検討を行っている。ここでは、格子ボルツマン法を用いた数値解析的なアプローチにより、一つのポアスロートにおける現象の表現を試みている。とくに、低周波の地震波が与える影響を評価することを目的とし、体積力を与えることにより、その現象を表現することとしている。その結果、設定された条件によっては、非濡れ相流体のドロップレットが、振動によって押し出されることが表現されることが示されている。

吉田（2012）は、流体が挙動する経路となる亀裂の形成プロセスやその状態変化に関する議論を行っている。ここでは、まず、今までに国内外で行われてきた亀裂性岩盤に関する研究の整理が行われており、これらの研究の多くは、現在の透

水性亀裂の性状に関する特徴の把握にとどまっているという実態を明らかにしている。その上で、長期的な流体挙動把握のためには、亀裂の構造的性状の理解に加え、水-岩石反応に伴う地球化学的プロセスの理解が重要であり、それらの結果としての亀裂形状変化を評価することが必要であるとしている。本論説では、国内において、形成年代の違ういくつかの花崗岩質岩体の比較研究に基づく亀裂形成プロセスの議論を行い、冷却～上昇に伴う岩体形成の初期段階で亀裂とその基本的ネットワークが形成されていることが示された。本論説から得られた結果は、現在みられている亀裂ネットワークの長期的な安定性を示唆しているともとらえられる。なお、このような岩体を対象とした工学的利用を行う場合、今回得られた知見に加え、人間活動に伴う水理学的・地球化学的変化の考慮もさらに必要となることが述べられている。

地下における流体挙動の実態を滞留時間という観点から明らかにし、また、地下水の起源を溶存物質からとらえていくという観点も強力な手法となりうる。

馬原・太田（2012）は、地下水の循環速度と地下水の起源の評価に関して、地下水中に溶存する希ガス・長半減期核種をトレーサーとしたアプローチに関してレビューを行っている。とくに、溶存ヘリウム（He）を用いたアプローチを主にしつつ、若い地下水から古い年代を示す地下水の年代測定法の測定原理と適用例について、個々の方法に関する丁寧な説明と事例の紹介を行っている。ここで示されている方法論は、地下水の滞留年代を知るという目的に加え、極めて緩やかな流動性を示す地下水の存在を直接的に明らかにすることにもつながるものである。また、適切な用い方をすることにより、地下水の流動域の区分ができることや、水の起源についての詳細な検討ができることも示されている。さらに、溶存希ガスデータを用いることによる涵養温度推定と、それを応用した古気候情報取得に関しても解説がなされている。これらの方法は、いわゆる地下水挙動評価としての適用に加え、地殻流体の輸送過程の

研究にも有効な手法となりうることも述べられている。

沈み込み帯における大規模な水の挙動は、火山・地震活動の理解にとって、その根源を理解することにつながると期待される。本特集において、岩森・中村（2012）および長谷川ほか（2012）は、スラブ起源の流体の発生、マントルウエッジから地殻への移動に関する現状の理解と、地震発生機構との関連について述べている。

岩森・中村（2012）は、沈み込むプレートに含まれる水が地下深部にもち込まれた後の挙動に関して、理論・モデルおよび観測に基づいて解説している。沈み込み帯では、含水鉱物として100 km以深まで水がもち込まれていると考えられること、それが、脱水反応により液体相を発生させ、地下深部に水を供給することが述べられている。マントルウエッジの温度構造によっては、より深い深度で流体相の発生が想定されることも述べられている。水の移動の機構に関しては、地震波速度構造等の観測から制約が与えられている。流体の体積分率の推定と流体移動に関するモデルからは、東北日本弧や中部日本において、スラブ由来の流体はほぼ垂直にマントルウエッジ内を上昇していると考えられることが示されており、その結果は、同位体組成の空間分布等の地球化学的観察とも整合的であるとしている。このように、マントルウエッジ内の流体の挙動に関しては、理論・地震学的観測・地球化学的データを整合的に説明できる段階に至っていることが述べられたが、解像度、確度に課題が残っていることも指摘されている。その問題の解決に向けた新しい観測の意義や、モデル等の高度化、総合的な解釈の重要性が述べられている。

長谷川ほか（2012）は、おもに地震観測データに基づいた地震発生機構に関する最近の研究成果について、とくに、流体との関係に焦点をあてて紹介している。ここでは、沈み込み帯で発生する主要な地震である、スラブ内地震、プレート境界地震、内陸地震のおおのこの発生機構について、議論がなされている。スラブ内地震（とくに梢深発地震）に関しては、スラブ内の脱水現象に

伴う過剰間隙流体圧の発生による有効法線応力の低下が想定され、実際に、二重深発地震面と脱水反応境界の位置の対応がよいことが示されている。プレート境界地震に関しては、アスペリティの急激すべりにより地震が発生することが説明されている。アスペリティ域と非アスペリティ領域では、その直上のマントルウエッジの地震波速度が違ふことが示され、スラブで発生した水のウエッジマントルへの移行の有無や、プレート境界での過剰間隙水圧の空間的分布がアスペリティの形状に関係することが示唆されている。内陸地震の発生に関しても、マグマやスラブ起源の水の供給との関連が説明されている。マントルウエッジから上昇してきた流体の集中的な供給がなされる領域では、下部地殻の強度が小さくなり、内陸地震発生の原因になっていると考えられることが述べられている。なお、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震からは、アスペリティが同時にすべることや、安定すべり域も動的にすべることがあることが示され、アスペリティモデルの高度化が必要とされることも言及されている。

ここまでみてきてわかるように、地下の「遅い」流体挙動にかかわる課題は、その空間・時間スケールもさまざまであり、一つの軸でみるのが難しいのはその通りである。一方、主要な流動がいわゆる浸透流で理解されるような系であるとするならば、それを記述するためのいわゆる浸透特性（浸透率、透水係数など）の空間分布とその時間変遷、流体がもつ物性、駆動力、を丁寧にかつ関連する分野の研究者・技術者が相互に理解できるような段階にまで整理できれば、互いの分野が特有に進展させてきた成果を共有することが可能になることが期待できるのではないだろうか。また、現象を的確に理解するための観測手法としての物理探査・地球化学的アプローチや地質学的検討、モデリングに基づく検討、場の変数としての温度・流体圧力・化学組成・応力の計測とそれらの統合が、今後進むことを期待したい。

最後になりましたが、本特集の編集にあたっては、多くの方々に査読をしていただきました。査

読の労をとってくださった方々に深く感謝します。

文 献

- 愛知正温・徳永朋祥 (2012): 多孔質弾性体中の二相流・変形連成過程の定式化—現状と今後の課題・展望—。地学雑誌, **121**, 39-52. [Aichi, M. and Tokunaga, T. (2012): Formulations of the coupled processes of two-phase fluid flow and deformation in geomaterials: The state of the art and future perspectives. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **121**, 39-52.]
- Bear, J. (1972): *Dynamics of Fluids in Porous Media*. American Elsevier Pub., New York, 764p.
- Darcy, H. (1856): *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Victor Dalmont, Paris, 647p.
- Dudgeon, C.R. (1966): An experimental study of the flow of water through coarse granular media. *La Houille Blanche*, **7**, 785-801.
- 長谷川 昭・中島淳一・内田直希・梁田高広・岡田知己・趙 大鵬・松澤 暢・海野徳仁 (2012): 沈み込み帯の地震の発生機構—地殻流体に規定されて発生する沈み込み帯の地震—。地学雑誌, **121**, 128-160. [Hasegawa, A., Nakajima, J., Uchida, N., Yanada, T., Okada, T., Zhao, D., Matsuzawa, T. and Umino, N. (2012): Mechanism generating earthquakes in subduction zones: Vital role of geofluids in earthquake generation. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **121**, 128-160.]
- Hubbert, M.K. (1956): Darcy's law and the field equations of the flow of underground fluids. *Petroleum Transactions, AIME*, **207**, 222-239.
- 岩森 光・中村仁美 (2012): 沈み込み帯での地殻流体の発生と移動のダイナミクス。地学雑誌, **121**, 118-127. [Iwamori, H. and Nakamura, H. (2012): Dynamics of geofluid generation and migration in subduction zones. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **121**, 118-127.]
- 國枝 真・上田 晃・松岡俊文・岡津弘明・福中康博 (2012): 油-鉱物-水システムにおける濡れ性に関する研究—ミクロスケールでの接触角の測定—。地学雑誌, **121**, 31-38. [Kunieda, M., Ueda, A., Ma-
- tsuoka, T., Okatsu, K. and Fukunaka, Y. (2012): Contact angle measurement for oil-mineral-water system on a micro scale. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **121**, 31-38.]
- Kyle, C.R. and Perrine, R.C. (1971): An experimental study of the flow of water through coarse granular media. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, **40**, 19-24.
- 馬原保典・太田朋子 (2012): 溶存希ガスと長半減期核種を地球化学的トレーサーとした地下水の滞留時間の推定と地下水起源の検討。地学雑誌, **121**, 96-117. [Mahara, Y. and Ohta, T. (2012): Estimation of groundwater residence time and evaluation of the origin of groundwater using dissolved noble gases and natural radionuclides with a long half-life as geochemical tracers. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **121**, 96-117.]
- Neuzil, C.E. (2000): Osmotic generation of 'anomalous' fluid pressures in geological environments. *Nature*, **403**, 182-184.
- 徂徠正夫・古宇田亮一 (2012): シール性能パラメータとしての毛管圧—石油探鉱から CO₂ 地中貯留への展開—。地学雑誌, **121**, 13-30. [Sorai, M. and Kouda, R. (2012): Capillary pressure as a seal performance assessment parameter: Expanding applications from petroleum exploration to CO₂ geological sequestration. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **121**, 13-30.]
- 山邊浩立・松岡俊文 (2012): 格子ボルツマン法による地震波の水油 2 相流体に及ぼす影響の検討。地学雑誌, **121**, 53-67. [Yamabe, H. and Matsuoka, T. (2012): Lattice boltzmann simulation of seismic stimulation for mobilization of a water-oil two-phase flow. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **121**, 53-67.]
- 吉田英一 (2012): 岩盤中の透水性亀裂とその長期的挙動—現状と今後の課題—。地学雑誌, **121**, 68-95. [Yoshida, H. (2012): Fluid conducting fractures and their long-term behavior in crystalline rocks: Present understanding and future perspectives. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **121**, 68-95.]