

地下の遅い流体挙動 (Part II)

—フィールドと室内実験からみる— :

イントロダクション

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

Preface for the Special Issue on “The Slow Subsurface Fluid Flow Processes (Part II): Field Examples and Laboratory Experiments”

Tomochika TOKUNAGA¹⁾, Osam SANNO²⁾, Kazuyoshi HOSHI³⁾,
Hiromi HONDA⁴⁾, Tomio INAZAKI⁵⁾, Masao SORAI⁶⁾,
Toshifumi MATSUOKA⁴⁾, Masaya YASUHARA⁶⁾ and Hitoshi KOIDE⁶⁾

I. はじめに

地学雑誌 121 巻 1 号では、「地下の遅い流体挙動 (Part I) —理論・モデル・物性評価—」と題して、特集号をとりまとめた。本号は、その Part II である。ここでは、おもに実フィールドにおける事例と、室内実験に基づくケーススタディを中心にとりまとめている。

地下での流体挙動に関する考え方は、Part I のイントロダクションにおいても述べたが、帯水層中の地下水挙動と油ガス田における油層中の流体挙動を対象として発展してきたということができよう。一方、人間生活の時間スケールにお

いては「ほとんど動かない」といっても過言ではない地下の「遅い」流体挙動をできるだけ正確に理解することも重要になる場合がある。石油探鉱の分野においては、油ガス田の形成にはトラップ構造が不可欠であり、トラップ構造が機能するためには、地下環境において地層水よりも密度の小さい油・ガスがそれ以上上昇しないための構造と適切な物性をもった岩石の存在が必要とされる。また、高度な人間活動は、その発展に伴いさまざまな種類の廃棄物を発生させている。高レベル放射性廃棄物に代表される長期にわたって高い危険性を示す廃棄物は、しばしば地下に処分するという方式がとられるが、その場合にも、地下の隔離

¹⁾ 東京大学大学院新領域創成科学研究科

²⁾ 東京大学名誉教授

³⁾ 石油資源開発株式会社

⁴⁾ 京都大学大学院工学研究科

⁵⁾ 土木研究所地質・地盤研究グループ

⁶⁾ 産業技術総合研究所

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

²⁾ University of Tokyo, Professor Emeritus, Tokyo, 113-0032, Japan

³⁾ Japan Petroleum Exploration Co. Ltd., Tokyo, 100-0005, Japan

⁴⁾ Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto, 615-8530, Japan

⁵⁾ Geology and Geotechnical Engineering Research Group, Public Works Research Institute, Tsukuba, 305-8516, Japan

⁶⁾ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, 305-8567, Japan

機能（例えば、吉田, 2012）が強く期待される。これはとりもなおさず、地下には、「遅い」流れの場が存在し、その性質を積極的に利用しようという工学の考え方の現れである。

地質学的な事象の理解に関しても、「遅い」流れの理解は不可欠であろう。よく知られている事例として、大規模衝上断層の形成に与える過剰間隙水圧の議論があげられる（例えば、Rubey and Hubbert, 1959）。同様なアプローチとして付加ブリズムの形態に関する議論も行われている（例えば、Davis *et al.*, 1983）。本特集の Part I においては、沈み込み帯での地殻流体発生（岩森・中村, 2012）や、沈み込み帯の地震発生機構（長谷川ほか, 2012）に関して、地下深部での流体発生・移動と間隙水圧挙動に関して検討がなされ、それらとマグマ生成、地震発生に関する関連が議論されている。それ以外にも、低透水性の泥などが急激に堆積することによる過剰間隙水圧発生がミシシッピ川沖合等で認められ（例えば、Flemings *et al.*, 2008）、それに伴う興味深い地質現象も知られている。

Part II となる本特集では、これらの課題に対する実事例に基づく研究を紹介することにより、新しい考え方や課題が抽出され、また提示されていることを示していきたい。具体的には、石油探鉱活動ならびに長期の地質環境安定性評価という課題に関わる実フィールド事例、連成過程に関わる室内実験に基づく検討という観点からの研究成果である。

II. 石油探鉱活動からみた地下の遅い流体挙動

地下での流体挙動に関して、エネルギー資源開発分野においては、多くの研究が行われてきている。とくに、石油や天然ガスの開発時の生産挙動評価等を対象として、Muskat (1937) によってとりまとめられて以来、きわめて多くの知見が得られている。油ガス田の形成過程に関しても、石油システム（例えば、Magoon and Dow, 1994）の概念的理解に基づき、油層工学や地下水学の知見を地質学的時間の現象に適用することにより、いわゆる堆積盆モデリング技術（Welte and

Yukler, 1981 をはじめとするさまざまな研究）を通して少なくとも形式的には定量的な議論が行われるようになってきている。例えば、油ガス田が成立するために不可欠な帽岩のシール能力に関しては、Leverett (1941) 等によって整理された油層を対象とした毛管圧の概念を Berg (1975) や Schowalter (1979) などが、帽岩の評価や地質学的な時間を対象とする油ガスの移動問題へと拡張し、一定の成功を取ってきていることはよく知られている。一方、油ガス田が地質学的な期間にわたって安定して存在する機構について、その詳細の理解や定量化に向けての検討には、いまだに多くの課題が残っており、事例研究もあわせてさらなる検討が必要であると考えられる。本特集では、このような観点から、まず、石油探鉱に関わる知見に基づいた検討を紹介する。

ここでは、海外の探鉱事例に基づき、油（ガス）と地層水の接触面の形状に着目した研究を2編紹介している（中山ほか, 2013; 本田, 2013）。どちらも、石油探鉱を主要な課題とした研究に基づくものであるが、地質学的なプロセスである構造運動、堆積過程の影響を受けた過剰間隙水圧の発生と地下環境での流体移動状況を油（ガス）の分布に基づき検討しているともみることができ。辻ほか (2013) は、珪質堆積物および珪質岩の続成過程に特徴的にみられる間隙構造の変化から、油（ガス）に対するトラップ構造が構築される過程に関して解説している。この過程には、地層水の流動とそれによる物質移行が寄与していることも述べられている。星 (2013) は、堆積物の圧密過程に着目しつつ、その結果に基づく堆積盆地形成過程や地質構造の発達に関する議論を行っており、流体が移動する場の変遷に関する理解の重要性を示しているものといえる。また、本特集号の最後に、Honda *et al.* (2013) が、石油地質学の分野において国内外で活躍をされた故眞柄欽次博士の功績について述べている。眞柄氏が確立した泥質岩の圧密解析手法と地下流体挙動に関する議論は、その後石油地質学分野で進められたいわゆる堆積盆解析や石油システムモデリングに強い影響を与えたものと評価される。

以下、これらの論説・総説の内容について個別に解説する。

中山ほか(2013)は、マレーシア・サバ州沖合のUフィールドを対象とし、複数の貯留層からなる油ガス分布、とくに貯留層の油(ガス)/水接触面の分布に関し、詳細な記載とその形成機構に関する議論を行っている。一般に、多層の油ガス層からなる油ガス田における油ガスカラムは、構成する油ガス層の深度が深くなるにつれて厚くなることが知られているが、Uフィールドにおいては、主要な3つの貯留層のうちの一つにおいて、下位の油層の油ガスカラムが上位のそれよりも薄く、油ガスが、入れ子状の分布になっていることが示されている。この現象について、本論では、背斜構造のシール機構のうち、トップシールの評価に関して、帽岩の毛管圧によるシール能力の考え方にに基づきつつも、対象地域に発生している過剰間隙水圧分布の貯留層ごとの違いの影響を含めた検討をすることによって、合理的な説明が可能であることを述べている。また、このような状況は、第四紀に入ってから構造運動によって発生したと思われる過剰間隙水圧差を解消しつつある状況の一時断面をみていると解釈している。この解釈からは、本論で検討を行ったものと同様の条件においては、油(ガス)/水接触面は、背斜軸部から翼部に向かってより深いところに位置する場合があります。予測され、その石油探鉱上の意義についても述べられている。

本田(2013)は、インドネシアに位置するマハカムデルタ地域のベチコガス田から得られたデータを用い、そこで認められる傾斜したガス/水接触面の形状と、ガス田探鉱によって得られた詳細な地質情報に基づき、地層中の流体挙動に関する議論を行っている。まず、本論では、油ガス田で認められる場合がある傾斜した油ガスと水の接触面の認定について議論をしたうえで、その形状に基づき、ダルシーの法則を援用することにより、地層内の流体の移動速度に関わる情報を得ることが可能であることを示している。そのうえで、ベチコガス田のデータから、ガスゾーンとしての連続性が高いと判断されるMF8-FS88ガスゾーン

を対象とし、ガス/水接触面の空間分布を明らかにしている。その結果、このガスゾーンでは、ガス/水接触面が概して南北方向に傾斜していることが示され、その傾斜に基づき、そこでの地層流体の平均的な移動速度の推定がなされている。また、対象地域で掘削された坑井間の平均動水勾配を推定し、動水勾配の大小とその方向性について、デルタにおける砂泥の堆積様式との比較を行っている。そこからは、デルタ形成過程において、河川チャネルに沿って堆積した砂層の伸びの方向では動水勾配が小さく、それに直交する方向では動水勾配が大きくなっており、おのおの水理的な連続性の大小と対応していると議論されている。

辻ほか(2013)は、珪質岩の埋没続成過程に伴う孔隙性状および物性変化と、それが炭化水素の移動・集積に与える影響について述べている。まず、国内の新第三系珪質岩と米国の中新統モンテレー層珪質岩のデータに基づき、埋没続成に伴う鉱物相の転移と内部組織の変化の詳細が解説されている。珪質堆積物は埋没続成に伴い、オパールAからオパールCT、さらには石英へと相転移をする。その過程での溶解再沈殿により、孔隙率、孔隙構造が変化するが、流体挙動には孔隙の孔口半径の変化が重要な観点となる。本論では、とくに重要な過程と考えられるオパールCTから石英への続成転移について詳細な議論がなされている。粘土鉱物の少ない珪質岩では続成転移に伴い孔口半径の大きな孔隙の割合が増加し、結果として浸透率も高くなることが示されているが、議論はそれほど単純ではなく、粘土鉱物の含有量によっては浸透率の増加がみられない場合があることも指摘されている。粘土鉱物の存在は鉱物転移温度の違いにも影響を与えている。また、続成作用に与える間隙水組成の影響や、岩石に発生する亀裂の生じやすさに対する続成作用の影響も述べられている。これらの議論に基づき、珪質岩中での埋没続成過程と炭化水素の移動・集積について実事例に基づいた検討がなされ、続成作用に伴う物性変化に支配されたトラップ構造形成について述べられている。その結果は、地化学データから

もその妥当性が示されている。

星 (2013) は、堆積盆地内における深度方向への孔隙率 (間隙率ともいう) の減少トレンドに基づき、圧密過程および地域の構造運動に関わる議論を試みている。対象地域として国内最大の産油産ガス地帯である新潟堆積盆地を選び、石油業界で普遍的に用いられている音波検層データから得られる圧密カーブに基づき、深度に対して圧密の進行が遅いもの、中間的なもの、圧密進行が速いものの3つの区分を行い、その地域性を明らかにした。ここでは、圧密進行の地域的な違いは、一般に想定される透水性の低い地層からの間隙水の排出の遅れに伴う過剰間隙水圧 (異常高圧ともいう) 発生では説明できず、現在および過去に経験した地温勾配の違いによる鉱物の続成や溶脱・再結晶による効果と堆積速度の違いの効果が主体であると解釈された。さらに、個々の地域において設定された標準圧密トレンドと各坑井の音波検層柱状図を比較することにより、削剥量と最大埋没深度の見積もりが行われている。とくに、中越地震震源近傍の荒谷背斜周辺のデータに基づき、削剥量の空間変化を示し、中越地震を引き起こした構造運動の累積と坑井で観測される削剥量の関連を述べている。このような議論は、地域の地史の解明、圧密過程に伴う排水・流体移動に関わる詳細な検討を可能にするものであり、エネルギー資源開発分野に限らず地圏環境評価に有益な手法となることが期待される。

III. 長期にわたる地下環境安定性に関わる アプローチからみえるもの

放射性廃棄物の地層処分等、長期にわたる地下環境の安定性を適切に評価することが求められる場合が発生してきている。この種の問題への対応においては、とくに長期の地下水挙動とそれに伴う物質移行の検討が必要となってくる。海外においては、実際の放射性廃棄物処分場のサイト選定等が行われており、そのために行われた評価の内容等が明らかにされてきている (例えば、SKB, 2011)。そのような活動からは、今まで以上に地下の状態に関する理解が深まってくるとともに、

地下環境とその変遷についての検討を行うための技術開発がなされている。Part Iにおいても、例えば馬原・太田 (2012) による解説があったが、同位体を用いた地下水年代測定は、有力な手法の一つとなりつつある。本特集においても、長谷川ほか (2013) において、その適用事例について報告がなされている。一方、地下での流体挙動の理解には、亀裂系の分布とその透水特性の把握が不可欠である。単一亀裂中の流れについては、いわゆる三乗則 (cubic law) によって評価が可能であることが知られており (例えば、Witherspoon *et al.*, 1980)、遅い流れの領域においては、Darcy 則と同様にいわゆる動水勾配に比例する流れとしてとり扱うことができるとされている。一方、その亀裂がどのように連続し、広域での流動に寄与しているかを知ることはそれほど簡単ではない。久保ほか (2013) は、その課題に対して、国内での事例の紹介を行っている。

長期の地下環境安定性に対しては、地震等のイベントの影響も重要となる場合がある。日本においては、地震に関連する地下水変動に関する研究が多く行われてきているが、本特集においても、小泉 (2013) によって、その現状についてまとめがなされている。

このような観点から本特集に掲載された論説・総説の内容は以下のとおりである。

長谷川ほか (2013) は、長期にわたる地下水挙動を評価することを目的とし、沿岸域において複数の地下水年代測定法を用いた地下水の流動性評価を試みた結果を紹介している。ここでは、約 500 m 程度のボーリング掘削が実施され、地下地質・地下水理特性の調査がなされた。さらに、天然に存在する放射性物質の壊変ならびに壊変に伴い生成する物質に着目した地下水年代測定が実施された。具体的には、放射性炭素 (^{14}C)、放射性塩素 (^{36}Cl)、ヘリウム同位体 (^4He) 計測がなされた。さらに、塩素安定同位体比 ($\delta^{37}\text{Cl}$) を用いた物質移動過程の評価、すなわち拡散が卓越するのかもしれないか移流が卓越するののかに関する検討も行われている。その結果、調査地点の深部に分布する地層である葉山層群中の地下水は、長期

にわたり地層中に滞留しており、一方、その上位に分布する地層である三浦層群中の地下水は、相対的に流動性に富んでいることが示唆された。塩素安定同位体比のデータからは、三浦層群中では移流が、葉山層群中では拡散が主要な物質移動過程であることが示唆され、その結果は地下水年代測定法から示された地下水の流動性の違いとも調和的であるとされた。この研究に示されるように、複数の方法を組み合わせた地下水流動性評価からは、その結果の妥当性や信頼性を含めて検討することが可能であり、地下水挙動の理解に有効な手法であることが示されている。

久保ほか(2013)は、広域地下水流動過程評価を目的として、亀裂性岩盤に対して地球統計学と亀裂分布シミュレーションを組み合わせたことにより、透水係数分布の設定手法に関する検討を行っている。地下水流動過程の検討においては、数値シミュレーションを用いた評価が必要となる場合が多く、そこで重要となる水理パラメータである透水係数分布を適切に求めることは現在においても主要な課題の一つとなっている。本研究では、岐阜県東濃地域を研究対象として検討がなされている。まず、対象地域で掘削されたボーリング孔の亀裂データを用い、地球統計学的手法を採用することにより三次元亀裂分布モデルが構築されている。次に、構築された亀裂モデルにおいて連続性のよいとされる亀裂群を抽出し、その亀裂群とボーリング孔で得られた透水試験結果を関連づけることにより、モデル中の亀裂の面積と透水係数の関係を求めている。ここで求められた関係にはばらつきが大きく、このことを念頭に置いて、本研究では、さらに統計的な検討を行ったうえで、対象領域の透水係数空間分布を最終的に設定するという手順がとられている。このようにして構築された三次元透水係数分布モデルを用いた等価多孔質媒体近似による地下水流動シミュレーションが実施され、その結果と既存研究成果、地域の地質・地下水挙動に関する知見との比較検討を通して、シミュレーション結果の妥当性に関して議論がなされている。

小泉(2013)は、地震時および地震後に観測さ

れることが多い地下水圧の変化に関し、おもに被圧帯水層を対象として解説している。ここでは、観測のために設置される井戸の影響として well bore storage effect が紹介されており、その理解が必要であることが示されている。そのうえで、地殻変動によって引き起こされる地下水圧の変化について、多孔質弾性論に基づく理論的背景が解説されている。また、鉛直方向への地殻変動に伴う地下水位変化の可能性についても言及されている。一方、地震による動的な変動が与える影響についても議論がなされている。具体的には、動的な体積歪がもたらす変動、動的な変動により透水性などの水理パラメータが変化することによる変動、さらには、液状化によって地下水圧変動の解釈がなされた事例が紹介されている。興味深い事例として、地震に伴って増加した地表地震断層付近の透水性の変化が示されており、そこでは、地震によって変化した透水性が回復する過程とその期間について実例が示されている。地震時および地震後の地下水圧変動は、本総説でも述べられているように多様な条件や要因で変化するものであり、単純には法則性を見いだすことは困難であろうが、日本を含め地震活動が盛んな地域における地下水の長期安定性の検討には引き続き調査研究が必要な課題であろう。

IV. 室内実験からのアプローチ

Part I のオーバービューにおいても議論したことであるが、「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。小泉(2013)に述べられているように、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説明することができる場合がままある。一方、地震波等の動的な変形に伴っては、いわゆる準静的な問題としての流れと変形の連成現象とは違った現象が発生する。本特集においては、西山ほか(2013)が、動的な変形に伴う岩石の挙動について室内実験に基づく詳細な検討を行っている。また、岩石の動的な挙動から、流動に関わる物性を評価することの可能性について

も述べている。

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いる。このような場合は、水移動と物質移動を連成過程としてとらえることが必要となってくる。竹田ほか (2013) は、この問題に関する理解の現状について整理するとともに、室内実験により実際の化学的浸透現象の発生を明らかにしている。さらに、その整理に基づき、仮想的な地質学的事象による水挙動・物質移行に対する化学的浸透の重要性を述べている。

以下、2編の論説の内容を述べる。

西山ほか (2013) は、岩石中を伝播する弾性波が示す位相速度の周波数依存性に関して、岩石中の間隙流体の挙動が分散現象を生じさせるといういわゆる Biot-Squirt モデルの適用可能性について、室内実験と理論的検討に基づき議論を行っている。この考え方は、弾性波の分散現象の観測から流体挙動に関わる透水係数などの水理特性推定を可能にするものであり、地下の流体挙動に関する検討をするうえで有意義な情報を与える可能性が期待されるものである。本論では、まず、実験条件がこの種の議論を行うのに適当な結果が得られるものであるかどうかの検討を行ったうえで、堆積岩および花崗岩というさまざまな種類の岩石を用い、飽和岩石・乾燥岩石の両者において位相速度の周波数依存性を求めている。その結果から、観測された周波数依存性が、間隙流体の挙動に大きく影響を受けていることを示している。実験結果は、標準線形固体モデル、一次元モデルである Biot モデル、微小領域の間隙流体挙動に関して多次元への拡張がなされた Biot-Squirt モデルを適用しながら検討され、試料の代表間隙径から求められた Squirt flow length を用いたモデルによって、弾性波の分散特性がよく説明できることが示されている。さらに、分散特性と岩石の透水性に関する関係を議論し、少なくとも透水性の高い岩石と透水性の低い岩石との区別は可能であり、今後の検討により、定量的な評価につながる可能性が述べられている。

竹田ほか (2013) は、化学的浸透現象 (chemi-

cal osmosis) に関わる議論の現状について整理し、岩石の化学的浸透現象の理解および定量的評価に必要なパラメータを効率よく取得する手法について提案を行っている。岩石は、一般に不完全な半透膜として挙動するため、必要となるパラメータは、化学的浸透現象・拡散現象・水理挙動のおおのに関わるものとなる。提案に基づいて作成された装置を用い、国内の珪質泥岩を用いた実験を行い、必要なパラメータを同一試料から得られることに成功している。さらに、解析モデルを用い、無次元化をしたうえでパラメータスタディを行うことにより、地下で想定されうるいくつかの境界条件における化学的浸透現象の影響とその意義について議論を行っている。その結果からは、不完全な半透膜としての特性をもつ岩石が化学的浸透の影響を受ける状態、すなわち間隙水に塩濃度分布がみられる状態の場合、いわゆる水理ポテンシャル分布のみに基づいた解釈では流量を過大に評価したり、流向を逆向きに推定したりすることが起こりうることが示されている。少なくとも国内において、化学的浸透現象を念頭に置いた地下水流動系の評価が行われていないことに鑑みると、とくに沿岸域等での現象の評価には、本研究の成果が反映されることが必要であろう。

V. まとめ

Part II に整理した地下の「遅い」流体挙動に関わる実フィールド・室内実験による検討からは、丁寧なデータ取得とその解釈、既存の概念に縛られない発想が問題解決に必要なことがみてとれると思う。一方で、目の前にしている事象の理解に向け、これまでの多くの研究成果の蓄積から得られてきた知見の適用と、基礎的な理論的検討に基づくアプローチは不可欠なものである。地下での「遅い」流れの研究に関わる分野は幅が広く、個々の分野の成果は他の分野の問題解決のヒントともなりうる。今回企画した「地下の遅い流体挙動」特集の Part I, Part II を通して、その興味の幅の広さを知ることができたであろうし、そのなかにみられる考え方や研究手法の類似性等も認められたものと思う。今後、この種の分野に

関わる研究はさらに進展することが期待され、その成果が新たな特集号として本誌にとりまとめられることを期待したい。

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。また、最終的な発行に到達するまでに長い期間がかかったために、何名かの著者の方には不自由をおかけしましたことをお詫びさせていただくとともに、本特集作成にご協力いただきましたすべての方々に今一度深く感謝いたします。

文 献

- Berg, R.R. (1975): Capillary pressures in stratigraphic traps. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **59**, 939-956.
- Davis, D., Suppe, J. and Dahlen, F.A. (1983): Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges. *Journal of Geophysical Research*, **88**, 1153-1172.
- Flemings, P.B., Long, H., Dugan, B., Germaine, J., John, C.M., Behrmann, J.H., Sawyer, D. and IODP Expedition 308 Scientists (2008): Erratum to "Pore pressure penetrometers document high overpressure near the seafloor where multiple submarine landslides have occurred on the continental slope, offshore Louisiana, Gulf of Mexico" [*Earth and Planetary Science Letters* 269/3-4 (2008) 309-32]. *Earth and Planetary Science Letters*, **274**, 269-283.
- 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. (in Japanese with English abstract)]
- 長谷川琢磨・中田弘太郎・近藤浩文・五嶋慶一郎・村元茂則・富岡祐一・後藤和幸・柏谷公希 (2013): 沿岸域における地下水の流動性の年代測定による評価—三浦半島西部沿岸域でのボーリング調査—. *地学雑誌*, **122**, 116-138. [Hasegawa, T., Nakata, K., Kondo, H., Goto, K., Muramoto, S., Tomioka, Y., Goto, K. and Kashiwaya, K. (2013): Evaluation of groundwater mobility in a coastal area using groundwater dating: Borehole investigation in the west coastal area of the Miura Peninsular. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **122**, 116-138. (in Japanese with English abstract)]
- 本田博巳 (2013): マハカムデルタ地域・ベチコガス田での傾斜ガス/水接触面に基づく地下流体流動の平均的流速評価. *地学雑誌*, **122**, 34-68. [Honda, H. (2013): Evaluation of average flow rate of subsurface fluid based on an inclined gas/water contact in the Peciko gas field, Mahakam Delta Province, East Kalimantan, Indonesia. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **122**, 34-68. (in Japanese with English abstract)]
- Honda, H., Nakayama, K., Hoshi, K., Tokunaga, T., Kouda, R. and Matsuoka, T. (2013): Dr. Kinji Magara: A practical petroleum geologist and a critic of international engineering projects and practices. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **122**, 214-225.
- 星 一良 (2013): 音波検層を用いた新潟堆積盆の圧密トレンドの検討とその構造発達史解析への応用—削剥量の推定, 荒谷背斜の隆起と中越地震—. *地学雑誌*, **122**, 90-115. [Hoshi, K. (2013): Compaction trends of the Niigata Sedimentary Basin derived from sonic log data and application to tectonic history analysis: Erosion estimates, folding and earthquakes. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **122**, 90-115. (in Japanese with English abstract)]
- 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. (in Japanese with English abstract)]
- 小泉尚嗣 (2013): 地震時および地震後の地下水圧変化. *地学雑誌*, **122**, 159-169. [Koizumi, N. (2013): Co-seismic and postseismic groundwater pressure changes. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **122**, 159-169. (in Japanese with English abstract)]
- 久保大樹・小池克明・劉 春学・栗原 新・松岡稔幸 (2013): 地球統計学的手法による亀裂性花崗岩体の3次元透水係数モデリングと広域地下水流動解析への応用. *地学雑誌*, **122**, 139-158. [Kubo, T., Koike, K., Liu, C., Kurihara, A. and Matsuoka, T. (2013): 3D hydraulic conductivity modeling of fractured granitic body using geostatistical techniques and its application to regional groundwater flow analysis. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **122**, 139-158. (in Japanese with English abstract)]
- Leverett, M.C. (1941): Capillary behavior in porous solids. *AIME Petroleum Transactions*, **142**, 152-169.
- Magoon, L.B. and Dow, W.G. (1994): *Petroleum System: From Source to Trap*. *American Association of Petroleum Geologists Memoirs*, **60**, 655p.
- 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. (in Japanese with English abstract)]
- Muskat, M. (1937): *The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media*. McGraw-Hill, 763p.
- 中山一夫・高橋利宏・加藤 新 (2013): 異常圧力下における石油の特異な集積. 地学雑誌, **122**, 16-33. [Nakayama, K., Takahashi, T. and Katoh, A. (2013): Unexpected form of oil accumulation under abnormally high pressure condition. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **122**, 16-33. (in Japanese with English abstract)]
- 西山 哲・佐野 修・伊藤久男・高橋 学 (2013): 間隙流体の挙動と縦波弾性波の分散特性に関する研究. 地学雑誌, **122**, 170-191. [Nishiyama, S., Sano, O., Ito, H. and Takahashi, M. (2013): Study on the relation between pore fluid behavior and longitudinal wave dispersion. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **122**, 170-191. (in Japanese with English abstract)]
- Rubey, W.W. and Hubbert, M.K. (1959): Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting II. Overthrust belt in geocynclinal area of western Wyoming in light of fluid-pressure hypothesis. *Bulletin of the Geological Society of America*, **70**, 167-206.
- Schowalter, T.T. (1979): Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **63**, 723-760.
- SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) (2011): *Long-term Safety for the Final Repository for Spent Nuclear Fuel at Forsmark: Main Report of the SR-Site Project*. TR-11-01, 893p.
- 竹田幹郎・間中光雄・平塚 剛・三好 悟・徳永朋祥・伊藤一誠 (2013): 堆積岩地域における化学的浸透現象の地下水流動への影響. 地学雑誌, **122**, 192-213. [Takeda, M., Manaka, M., Hiratsuka, T., Miyoshi, S., Tokunaga, T. and Ito, K. (2013): Effects of chemical osmosis on groundwater flow in sedimentary formations. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **122**, 192-213. (in Japanese with English abstract)]
- 辻 隆司・早稲田 周・横井 悟 (2013): 珪質岩 (珪藻質堆積物) の続成作用と炭化水素の移動・集積. 地学雑誌, **122**, 69-89. [Tsuji, T., Waseda, A. and Yokoi, S. (2013): Burial diagenesis of diatomaceous deposits and its effects on hydrocarbon accumulation. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **122**, 69-89. (in Japanese with English abstract)]
- Welte, D.H. and Yukler, M.A. (1981): Petroleum origin and accumulation in basin evolution—a quantitative model. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **65**, 1387-1396.
- Witherspoon, P.A., Wang, J.S.Y., Iwai, K. and Gale, J.E. (1980): Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. *Water Resources Research*, **16**, 1016-1024.
- 吉田英一 (2012): 地層処分—脱原発後に残される科学課題. 近未来社, 168p. [Yoshida, H. (2012): *Geological Disposal of High Level Radioactive Waste: Issue after abandoning Nuclear Energy*. Kinmirai-sha, 168p. (in Japanese)]