首都圏の深層地下水

丸 井 敦 尚*

Deep Groundwater in the Tokyo Metropolitan Area, Japan

Atsunao MARUI*

[Received 1 March, 2012; Accepted 12 September, 2012]

Abstract

The Kanto Plain is the biggest and deepest groundwater basin on the Japanese Islands. The water in the basin has been used in various purposes, and the volume of use is estimated to be the greatest in the country. Consequently, severe problems have emerged in the history of water development and water environment protection.

The study shows two stories in the groundwater basin of the Kanto Plain, corresponding to depth. The deeper one emphasizes salt water containing natural gas, and the shallow one is characterized by the largest groundwater flow system in the country. The paper reviews the geological features of the basin. Groundwater condition, especially deep groundwater, is also reviewed to understand the next stage of activities to develop and protect the environment.

Key words : deep groundwater, variations of groundwater, Tokyo Metropolitan area, The Kanto groundwater basin, groundwater flow of a large region

キーワード：深層地下水、地下水の種類、首都圏、関東地下水盆、広域地下水流動

I. はじめに

関東平野はわが国最大の堆積盆であり、同時に最大の地下水利用がなされてきた。その結果、地盤沈下などの歴史的な地下水障害が広範囲で発生し、大きな社会問題となった。工業用水法などの施行により、現在では健全な地下水環境がとり戻されつつあるが、荒川区や北区に存在していたかつての湧水群などは姿を消し、復活が見込めない状況にある。今後、都心に住む人々の生活や社会活動は多様化すると見込まれ、水利用に関してもその環境を守りながら利用の範囲や用途は拡大していくと考えられる。「水」に関していえば、東京を中心に、関東平野を構成する地質・地下水

環境を正しく把握し、適正な地下水資源の利活用と深部まで含めた地下水環境の保護が求められている。

本報では、まず関東地下水盆を構成する関東平野堆積盆の地質学的な特徴を整理し、地下水盆の構造を把握する。次に東京を中心とした関東地下水盆におけるこれまでの地下水研究をレビューすることで、深部地下水利用がどのように行われ、どんな種類の地下水が存在し、そのうちのどの水を利用していったかを把握する。そのうえで、温泉研究や地熱研究に任せていた深層地下水のうち、天水起源の水を対象とした純粋（純水）な東京の深層地下水にフォーカスして、その流動状況や貯存環境をまとめたい。

* 産業技術総合研究所

* Geological Survey of Japan, AIST, Tsukuba, 305-8567, Japan

図 1 関東堆積盆（地下水盆）の深度分布（鈴木, 1996 より）.

Fig. 1 Distribution of bottom face of layers composing the Kanto Groundwater Basin (after Suzuki, 1996).

II. 地下水盆としての関東平野

関東平野の地質をまとめた越谷ほか（2011）や鈴木（1996）によれば、関東平野は大規模な盆状構造を呈し、その最大層厚は 3000 m を超える。このうち地下水が活発に流動すると考えられる下総層群の基底面は千葉市から江東区にかけての東京湾岸部であり、TP - 500 m を超えると考えられている（河井, 1965）。実際にこの地域は京葉工業地帯の中心部であり、これまでに活発な地下水利用がされてきたことでも有名である。また、この地域の深部地下水環境を報告した楡井（1981）によると、更新統中部～上部の下総層群下に存在する更新統中部以深の上総層群には着色水などと呼ばれる化石地下水が存在し、天然ガス開発も盛んに行われている。このように関東堆積盆は、規模が大きく堆積期間も長いことから、多様な地下水が存在する複雑な地下水盆となっている。

鈴木（1996）が示すように（図 1）、中部中新統～下部鮮新統に区分される三浦層群は木更津付近を中心とする大きな盆上構造を呈して堆積している。三浦層群は深海性の堆積層であり、間隙は海洋水で満たされていたと考えられる。その後、

上総層群が堆積するが、もともと三浦層群は首都圏から九十九里にかけての大規模な谷底をもつ谷地形であった。上総層群は三浦層群と同様に深海性の堆積環境であるため、下位の三浦層群内の間隙水は淡水と入れ替わることなく圧密されていったと考えられる。この状態で堆積した上総層群は房総半島に尾根を形成し、首都圏（東京湾北部）に目をもつ南に開口した地形（海底地形）を形成した。この時、堆積環境は深海から浅海へと移行していたと考えられている（菊池, 1973）。このように開口方向を東から南へと変え、堆積環境も深海域から浅海性のものへと変化するなか、関東平野（首都圏）深部の盆上構造が形成されていった。この段階で、首都圏の堆積盆は、東京湾の東部に中心をもつ深部地下水盆と東京湾北部に中心をもつ下総層の堆積盆が形成されており、結果として地下水盆は二段構造を呈している。

深部堆積盆に対応した「南関東ガス田」は、わが国有数のガス田であり、丸井（2007）によればおもに上総層群の砂と泥の互層中にある地下水にガスが溶け込んだ状態で存在し、ガス層を形成していると考えられている。上総層群は今からおよそ 300 万年前から 70 万年前に深海底で堆積し

た地層であり、所により差はあるが、おおむね深度 2000 m までの広い範囲で堆積している。主成分はメタンガスであり、約 99% を占める。南関東ガス田のメタンガスは上総層群が堆積する際に植物等の有機物がとり込まれ腐敗して生成された。上総層群は深海底で堆積したため、メタンガスは塩分濃度の高い地下水（「かん水」と呼ばれる）に溶け込んでいる。南関東ガス田に限って言えば、塩分濃度がガス胚胎の一つの指標になる。また、天然ガスの溶解度は深度に伴って圧力に依存するものであり、上総層群内下部の梅ヶ瀬層から黄和田層にいたる範囲で多量に融解している。ガス開発などで減圧され遊離した場合に、梅ヶ瀬層と大田代層でとくにガス胚胎が大である。

一方、浅部堆積盆では、その間隙率も透水係数も大きいことに起因し、地下水流動が活発である。関東平野における地下水流動研究は、一部資源開発を目的としてはじまったが、その後地盤沈下などの地下水障害防止のための地下水環境研究、さらに広域流動研究へと展開されている。関東堆積盆全体を対象とした地下水流動研究には、宮越ほか（2003）の地下温度分布からみた関東平野全体の地下水流動研究がある。この研究で、宮越は関東平野全体をみると 2 つの大規模な流出域があることを示している（図 2）。1 つは東京都区部北部地域に存在するもので、利根川流域と鬼怒川流域の大規模流域に相当する地下水流出域である。もう一方は、東京湾北部に存在するもので、前者が関東山地のドライビングフォースによる反動性の上昇流に起因する地下水流域であると考えられるのに対し、後者は関東ガス田のせき止め効果に起因するものであると考えられる。また、林（2003）に代表されるような地下水の水質や同位体組成・地下水ポテンシャルなどからみた三次元的な堆積盆の地下水研究、丸井ほか（2001）の実施した深部地下水研究（流動系地下水と化石地下水）などがあげられる。これらの研究はいずれも、関東堆積盆の地下水はその地質や地形に規制されて大きな流動系が決定されるが、人間活動などにより部分的に地質や地形にそぐわない地下水環境ができあがっていることを説

図 2 地下温度分布からみた関東平野の大規模地下水流動、実線の部分は涵養域、三重線の部分は流出域を示している（宮越ほか, 2003 より）。

Fig. 2 The large scale groundwater flow system in the Kanto Plain; solid and threefold zones indicate recharge and discharge area, respectively (after Miyakoshi *et al.*, 2003).

明している（関東平野の地盤沈下域の拡大や東京都における沈下の沈静化と関東平野全体の地下水流動状況が一致していることなど）。

その一例として、関ほか（2001）は関東ガス田による、地下水流動のせき止め効果を現した（図 3）。一般には、関東平野の地下水における高 Cl 濃度分布域は、大規模地下水流動の流出域にみられるが、東京湾北部地域では南関東ガス田のせき止め効果による地下水の上向き流動があり、Cl の高濃度域が観測されている。また、1960 年代からの地盤沈下域の拡大も好例といえよう（高村・丸井, 2014）。東京都区部東側にはじまった地下水位の低下と地盤沈下が 20 年を経て関東一円（下総層群の堆積域）に拡大していった様子は特筆すべきである。

III. 深層への水分供給

上総層以深の地層中の水分供給起源は大きく 3 つある。まずは地層が形成された時の水分（海

図 3 関東平野の地下水における高 Cl 濃度分布、高 Cl 分布域は大規模地下水流動の流出域にみられるが、東京湾北部地域では南関東ガス田のせき止め効果による高濃度域が観測されている（関ほか, 2001）。

Fig. 3 High Cl concentration area in the groundwater flow system of the Kanto Plain, the area corresponding to the discharge area of the groundwater flow system, and in the northern area of Tokyo bay where a dam-up effect in the flow system is observed (after Seki *et al.*, 2001).

水）であり、「かん水」として知られている。基本的にかん水は海水が濃縮されているため、その塩分濃度が海水を超えている（高村・丸井, 2006）。かつては海水の濃度の 10 倍を超えなくてはかん水と呼べないと定義していた時代もあったが（山本, 1986 など）、現在はその成因から定義されているため、濃度だけにとらわれることはない。もう 1 つは天水起源の浸透水であり、かなり大量に含まれていることがこれまでにわかってきた。後述するが、関東平野においては関東周辺の山地にもたらされた降水が平野縁部から浸透し、上総層群など深層の地下水を涵養していることがわかってきており（林, 2003 など）、水分の量からみても圧倒的に降水起源の地下水が占めている。最後のそれは処女水であり、これはマグマ

中の水分が移動してきたものである。丸井ほか（2001）はこれらを踏まえ、東京湾周辺部を中心に地下水の年代に関する研究を実施している（図 4, 図 5）。これによれば、深度 500 m 程度を境に一気に地下水年代が増していることがわかる。余談だが、この深度は地質を基準に設定した工業用水法などの示す“流動しやすい地層”の深度を大きく超えている。

大深度掘削による温泉水を利用して深層地下水に関する調査を行った結果、ベル（2004）によれば：

- ① 深層地下水は、Na-Cl 型地下水、Na-HCO₃ 型地下水、Ca-HCO₃ 型地下水の三種に大別された。さらに、Na-Cl 型地下水は、酸素素素安定同位体比、Cl⁻ 濃度、深度から、おもに地層水、変質海水、天水起源の大深度深層地下水、深層地下水、変質深層地下水に分類された。
- ② 変質海水および地層水は、海水と比較すると、Mg²⁺ と SO₄²⁻ が著しく減少していることから、珪酸塩鉱物とのイオン交換や硫酸還元バクテリアによる作用を受けていることが推定された。
- ③ Na-HCO₃ 型地下水に関して、着色が認められる地下水は、HCO₃⁻ 濃度が高く、¹³C に富み、¹⁴C 年代が高い値を示すことから、閉鎖的な地下環境でメタン起源のバクテリアによる酢酸発酵の影響を受けた地下水であることが推定された。
- ④ 天水起源の大深度深層地下水は、関東平野縁部、多摩地域、房総半島中央部などで多くみられた。断面図でみると、深度 1000 m 以深の地質境界付近で多くみられ、水質および同位体の分布状況からも 1000 m を超える大深度においても天水の浸入が起こっていることが示唆された。

これらを総合すると、関東平野の 1000 m を超える大深度深層地下水には、地層に封入された化石海水とそれに混入する天水起源の地下水が存在し、関東平野縁部および海岸部の深層地下水は、平野中央部に比べ、循環性の高い地下水が存在することが明らかとなった（図 6）。これは先に述べた林（2003）の研究と呼応している。

図 4 東京湾周辺の地下水質 (丸井ほか, 2001).

Fig. 4 Groundwater quality from shallow to deep zone around Tokyo bay (after Marui *et al.*, 2001).

図 5 東京湾周辺の地下水滞留時間 (丸井ほか, 2001).

Fig. 5 Duration of groundwater in the Tokyo bay area (Marui *et al.*, 2001).

房総半島における天然ガス採取井の温度プロフィールを観測した宮越ほか (2003) によれば、その温度分布から、採取した天然ガスに伴うかん水を補うのは上位の地下水帯からの下方浸透であり (図 7)、雨水起源の地下水が深度 1100 m 付近まで浸透していることが観測されている。人為的な地下水頭の変動がもたらした地下水流動の局地的な変化であるが、上位の帯水層中の地下水が容易に浸透するポテンシャルをもつ証であり、天水起源の地下水が深層にまで入り込むことを裏付けている。しかし、通常の深層地下水はこの限りでないことから、このガス田開発が行われていなければ、この深度 (上総層群：とくに国本層以深) に存在している深部地下水は、現世の地下水流動から疎外された化石水であると判断できる。

林 (2003) は関東平野一円において地下水を採取・観測し下総層群中を流動する地下水の性状と下部への浸透の様子を報告している (図 8)。これによれば、下総層群中の地下水は宮越ほか (2003) にあるように下総層群中を流動しているが、地下水ポテンシャルからみても一般水質や同

図 6 関東平野の深層地下水 (ベル, 2004).

Fig. 6 Deep groundwater characteristics of the Kanto Plain (after Bell, 2004).

図 7 大深度観測井を用いた地下温度プロファイルの観測例：房総半島 K 観測井に関しては、深度 1100 m 付近まで天水性の地下水が流下している様子がみえる (宮越ほか, 2003)。

Fig. 7 Example of observation of subsurface temperature distribution obtained with a deep well: gap with pumped groundwater is filled by shallow groundwater originating from rainfall at K-site on the Boso peninsula (after Miyakoshi *et al.*, 2003).

図 8 関東平野の地下水，下総層群中の地下水と下部浸透（林，2003）。

Fig. 8 Groundwater features of the Kanto Plain, groundwater features of the Simousa formation and its infiltration into the Kazusa formation.

位体組成からみても，関東平野中心部の地下水流域では（堆積盆の底部では），下方浸透していないことが判明している。すなわち，上総層群への地下水浸透は平野縁部での涵養が主であると推定される。さらに，水質などから推定すると，深部地下水は極度に大きな滞留時間を有するか，あるいは現在の地下水流動から疎外されていると考えられ，これは温泉水まで含めて関東平野の深層地下水の同位体組成を研究した Marui and Seki (2003) にも一致する。すなわち，深層地下水の存在は浅層地下水の侵入を妨げる役割を果たしていることが判明してきた。

IV. 深層水のあり方

北海道天塩郡で実施した大深度ボーリングによれば（図 9），地質と地下水の境界が必ずしも一致せず，地下水が一定の順で賦存していることが報告されている（産業技術総合研究所，2012）。

調査地の地質は，深度 100 m までが第四紀の未固結砂層であり，それに続き深度 470 m までが鮮新統更別層，それ以深が勇知層である。掘削調査前は，表層（深度 100 m までが第四紀の未固結砂層）で地下水流動が活発であり，更別層内では地下水が流動するが，勇知層内で地下水の流動はほとんどないと考えられていた。これは既存資料による周辺の調査結果や水理定数を得てのことである（日本原子力研究開発機構，2007 ほか）。しかし，掘削に伴う地下水試料の分析結果（図 8 一般水質：CI 濃度や同位体組成： δD ）からみて，更別層内の地下水が深度 500 m 程度まで流動性の地下水であることがわかった。しかも，下位に存在する勇知層内の地下水質をみると，水質は深度につれて徐々に変化し，深度 800 m 以深でようやく安定していることが判明した。勇知層内の地下水に関しては，同位体組成からみても大きく 2 層に区分されることが判明した。これは深

図 9 幌延における大深度掘削の結果による地下水境界と地質境界のちがい（産業技術総合研究所, 2012）。

Fig. 9 Different interfaces between groundwater and geology obtained by deep drilling at Horonobe, Hokkaido.

度 800 m までの上位層が更別層内を流れる地下水流動の影響を受けて、水質が変化していると判断された。混合と拡散の可能性があったが、当該研究では、深部のエンドメンバーとの比較により、300 m の区間にわたって水質が一様に変化するには 130 万年程度かけた拡散が必要であると解析している（産業技術総合研究所, 2012）。すなわち、上位の更別層内の活発な地下水流動の結果、下位の勇知層には 30 m 程度の流動域が形成され、同時に 300 m 程度の拡散域が形成されていたことになる。

既往研究のように地下水の流動が地質で規制されると考えた場合、これらのことはイレギュラーと判断するかもしれないが、大深度地下の資源や環境をとり扱うときには、考慮すべき重要な要素

であることに違いない。これらの研究成果から、上位に帯水層がある場合の地質や地下水の水理境界の順は、上位より：

- ①帯水層と下位の透水性に劣る地層の地質学的境界面
- ②流動性地下水の水理学的境界面
- ③さらに停滞性地下水の拡散域境界面
- ④最深部に安定的な化石地下水体が存在する

と判明した。二酸化炭素の地中貯留や天然ガスの地下備蓄など地下環境を使ったプロジェクトがはじまりつつある今、より安定した地下環境を探るためには地質だけで判断できない要素、上述のようにターゲットとする地層の上位を流れる地下水の流速が安定性を評価する項目となるため、深層地下水の情報収集や調査・研究はより重

表 1 さまざまな地下水.

Table 1 Variations of Groundwater.

用語	定義	出典
浅層地下水	地表に最も近接した地層または帯水層内に賦存する不圧地下水.	Matthess (1986)
不圧地下水 (自由地下水)	帯水層内の水分(地下水体)が大気圧以上に加圧されていない地下水.	山本 (1986) 一部改
被圧地下水	帯水層内の水分(地下水体)が大気圧以上に加圧されている地下水.	山本 (1986) 一部改
深層地下水	不圧地下水の下位に存在する(第2帯水層以深の)被圧帯水層内の地下水.	Marui (2009)
深部地下水	通常(農業用水や雑用水)の利用範囲を超える深度の地下水.	Marui (2009)
化石水	地下水流動に関与していない地下水.	高村・丸井 (2006)
かん水	海水の塩分濃度をを超える塩化した地下水, かつては海水の5倍以上の塩分濃度をもつ地下水と山本が定義していた.	高村・丸井 (2006)
化石海水 (古海水)	化石水であり, かつ塩分濃度が海水と同程度以上の地下水.	丸井ほか (2001)
地層水	地層が形成されたときにとり込まれた水分が間隙中に残ったもの.	高村・丸井 (2006)
処女水	マグマ中の水分が上昇して帯水層に移動し, 地下水となったもの.	山本 (1986)
鉱水	普通の水とは物理的, 化学的性質を異にする天然の特殊な地下水. 日本では温泉水の定義に満たない深部地質や鉱山起源の地下水.	榎根 (1980), 日本大百科事典を簡略化
硬水	WHO では, 以下のアメリカ硬度換算法で 120 mg/L 以上の水を硬水と定義している. 硬度 (mg/L) $\div$ Ca 濃度 (mg/L) $\times$ 2.5 + Mg 濃度 (mg/L) $\times$ 4.1.	WHO HP ¹⁾
温泉水	温泉法により, 水温が摂氏 25℃以上か, あるいは 19 種類の特成成分を含む地中から湧出する温水, 鉱水及び水蒸気その他のガス(炭化水素を主成分とする天然ガスを除く)と定義される.	温泉法 (1948)

要性を増すと考えられる。また、丸井 (2012) が示した地下水の種類を表 1 に掲載する。通常は意識せずに使う地下水の種別だが、温泉も含めて再生利用可能かどうかなど地下水環境を意識せずには使えない時代に突入していると考えられる。

V. おわりに

これまでの水文学や地下水学において、深層地下水が対象となった研究事例は少なく、地震波探査などによる地質構造のモデリングが深層地下水の流動や環境までも把握するための数少ない論拠となっていたことが多かった。また、温泉や地熱調査だけが深部地下水のための調査であったことも否定できない。しかし、近年その数を増している大深度ボーリングにより、次第に深層地下水の性状がわかってきたが、これにより地下水の水理

境界が必ずしも地質境界と一致しないことが明らかになってきた。さらには深層地下水のほとんどが天水起源であることも知られるようになってきた。本報でこれらを紹介したことにより、今後需要が増すと考えられる深層地下水の効率的な利用とその環境の維持にむけて議論をはじめの糸口になれば幸いと考える。

注

- 1) WHO: <http://www.who.int/en/> [Cited 2012/3/1].

文 献

ベル朝哉 (2004): 関東平野第三系以深における深層地下水の特徴. 筑波大学大学院環境科学研究科修士論文, 54p. [Bell, T. (2004): *Characteristics of Deep Groundwater in the Kanto Plain Deeper than the Tertiary*. Master's Thesis of the University of Tsukuba Graduate School of Environmental Sciences, 54p. (in Japanese)*]

- 林 武司 (2003): 関東平野中央部に見られる低酸素水素同位体比・高 Cl 濃度地下水帯の三次元的分布と成因. 日本水文科学会誌, **33**(2), 53-70. [Hayashi, T. (2003): Three dimensional distribution and origin of groundwater with low isotopic ratio of oxygen and hydrogen and high Cl concentration in the central part of the Kanto Plains. *Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences*, **33**(2), 53-70. (in Japanese with English abstract)]
- 河井興三 (1965): 石油鉱床と地温. 石油技術協会誌, **30**, 209. [Kawai, K. (1965): Petroleum deposits and Geothermal. *Journal of the Japanese Association of Petroleum Technologists*, **30**, 209. (in Japanese)*]
- 梶根 勇 (1980): 水文学. 大明堂, 282p. [Kayane, I. (1980): *Hydrology*. Taimeido, 282p. (in Japanese)]
- 菊池隆男 (1973): 房総半島の更新統にみられる埋谷性堆積物の層相について (演旨). 日本地質学会第 80 年学術大会講演要旨, 16. [Kikuchi, T. (1973): On the facies of buried valley sediments found in the Pleistocene of the Boso Peninsula. *Abstracts for the Annual Meeting of the Geological Society of Japan 80 Academic Year*, 16 (in Japanese)*]
- 越谷 賢・丸井敦尚・伊藤成輝・吉澤拓也 (2011): 日本列島における 3 次元水文地質モデルの構築と地下水賦存量の試算. 日本地下水学会誌, **53**, 357-377. [Koshigai, K., Marui, A., Ito, N. and Yoshizawa, T. (2011): Development of three dimensional hydrogeological model and estimation of groundwater storage in Japanese islands. *Journal of Groundwater Hydrology*, **53**, 357-377. (in Japanese with English abstract)]
- 丸井敦尚 (2007): 南関東ガス田に関する情報周知. 経済産業省プレス発表 2007/12/26. [Marui, A. (2007): Information about the South Kanto gas field. *Ministry of Economy, Trade and Industry News Release*, 2007/12/26. (in Japanese)*]
- Marui, A. (2009): *Groundwater Assessment and Control in the CCOP Region*. Geological Survey of Japan, AIST. 62p.
- 丸井敦尚 (2012): 水循環における深層地下水の役割. 日本水文科学会誌, **42**(2), 61-68. [Marui, A. (2012): The role of deep groundwater in water cycle. *Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences*, **42**(2), 61-68. (in Japanese with English abstract)]
- Marui, A. and H. Seki, H. (2003): Deep Ggroundwater in the Kanto Plain. *Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences*, **33**(3), 149-160.
- 丸井敦尚・安原正也・林 武司・樋口宏之 (2001): 東京湾岸の深層地下水. 日本水文科学会誌, **31**(3), 1-9. [Marui, A., Yasuhara, M., Hayashi, T. and Higuchi, H. (2001): Deep groundwater around the Tokyo Bay, Japan. *Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences*, **31**(3), 1-9. (in Japanese with English abstract)]
- Matthess, G. (1986): *Groundwater Hydrology*. Univ. Kiel Press, 260p. (in Germany)
- 宮越昭暢・内田洋平・佐倉保夫・林 武司 (2003): 地下温度分布からみた関東平野の地下水流動. 日本水文科学会誌, **33**(3), 137-148. [Miyakoshi, A., Uchida, Y., Sakura, Y. and Hayashi, T. (2003): Groundwater flow in the Kanto Plain estimated by distribution of subsurface temperature. *Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences*, **33**(3), 137-148. (in Japanese with English abstract)]
- 日本原子力研究開発機構 (2007): 深地層研究所報告. [Japan Atomic Energy Agency (2007): *Report of Underground Research Center*. (in Japanese)]
- 楢井 久 (1981): 関東における堆積盆と地下流体資源の変遷. 地学団体研究会総会シンポジウム資料集, **35**, 28-35. [Nirei, H. (1981): Evolution of sedimentary basins and underground fluid resources in Kanto. *Reports of the Annual Meeting of the Symposium of the Association for the Geological Collaboration in Japan*, **35**, 28-35. (in Japanese)*]
- 産業技術総合研究所 (2012): 沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発 成果報告書. 産業技術総合研究所, 322p. [National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (2012): *The Report of Advanced Technology Development on Seawater/Freshwater Boundary and Fault Evaluation*. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 322p. (in Japanese)*]
- 関 寿子・林 武司・丸井敦尚 (2001): 関東平野における深層地下水の性状. 日本水文科学会誌, **31**(3), 11-24. [Seki, H., Hayashi, T. and Marui, A. (2001): Deep groundwater quality in the Kanto Plain. *Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences*, **31**(3), 11-24. (in Japanese with English abstract)]
- 鈴木宏芳 (1996): 関東平野の地下構造. 防災科学技術研究所ニュース, **111**, 3-6. [Suzuki, H. (1996): Subsurface structure of the Kanto Plain. *News of National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*, **111**, 3-6. (in Japanese)*]
- 高村弘毅・丸井敦尚 (2006): 地下かん水の定義と事例. 日本海学会誌, **60**(2), 86-90. [Takamura, H. and Marui, A. (2006): Definition and example of underground brine water. *Japan Atomic Energy Agency*, **60**(2), 86-90. (in Japanese with English abstract)]
- 高村弘毅・丸井敦尚 (2014): 東京の水環境. 地学雑誌, **123**, 182-188. [Takamura, H. and Marui, A. (2014): Water environment of the Tokyo city. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **123**, 182-188. (in Japanese with English abstract)]
- 山本莊毅 (1986): 地下水用語辞典. 古今書院, 141p. [Yamamoto, S. (1986): *Dictionary of Groundwater*. Kokon Shoin, 141p. (in Japanese)*]

* Title etc. translated by A.M.