

帯水層内の水質混合を抑止する 単孔式二重揚水装置の作製と取水試験

石田 聡* 白旗克志* 土原健雄* 吉本周平**

*地域資源工学研究領域地下水資源ユニット

**国際水管理研究所 (スリランカ)

要 旨

1本の井戸の任意の深度を空気パッカーで遮断し、パッカーの上下2深度から同時に揚水することで帯水層内の水質混合を抑止する単孔式二重揚水装置を作製した。この装置を用い、農村工学研究部門内の井戸の地下水面下2mにパッカーを設置して取水試験を行い、揚水中の水位、EC、pH、水温、DO、ORPをパッカー上段・下段それぞれについて測定した。その結果、揚水強度2L/minではパッカー上段の水位は時間とともに低下した。これに対しパッカー下段の水位は殆ど変化せず、上段の水位変化の影響を受けなかった。また、揚水前のパッカー上段の地下水とパッカー下段の地下水にはEC、pH、DO、ORPそれぞれについて差があったが、取水試験中もその差が保たれ、両者が同じ値に近づくことはなかった。これらの結果より、作製した装置により2深度の地下水を混合させずに別々に揚水できることが示された。

キーワード：二重揚水、パッカー、アップコーニング、塩淡水境界、淡水レンズ、地下水

1. 緒 言

沿岸域の不圧地下水は、海水を含む帯水層の上部に、密度差によって淡水域が存在し、塩淡水境界が形成されている。このような地域に設置された井戸から揚水すると、井戸周辺の圧力が低下するため、帯水層下部から井戸に向かって塩水が遡上し（アップコーニング、Fig.1 右）、単位時間あたりの揚水量（揚水強度）が過大であるとやがて井戸が使用不能となる（Presley, 2005）。帯水層の淡水域が一度塩水で汚染されると、揚水を停止して淡水の圧力を回復させても、粒子間の微小間隙に塩水が残留したり、塩水が浸入する水みちが形成されたりすることから地下水環境の復元は困難となる場合が多い（石田ら、2010 など）。

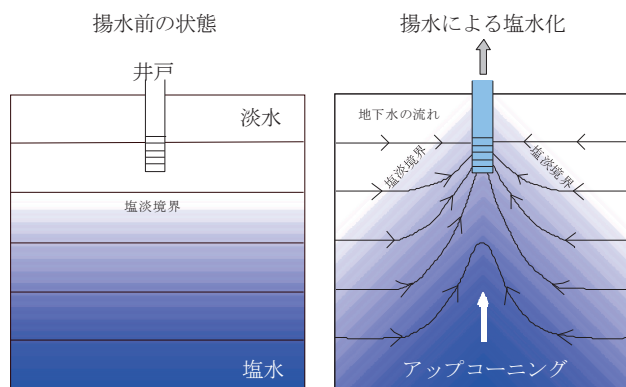


Fig.1 アップコーニング概念図
Conceptual figure of upconing

また、アップコーニングの度合いが小さくても、揚水により塩淡水境界が上昇すれば、塩水と淡水の混合域（汽水域）の塩分濃度も上昇する。人間が一般的に利用できる淡水の塩分濃度は電気伝導度2mS/m以下（白旗ら、2009）であり、僅かな塩分濃度の上昇でも水資源として不適になる。このため塩淡水境界を持つ帯水層においては揚水強度が制限される。

一方で、帯水層に水質の異なる地下水が存在する場合、それぞれの深度から同時に揚水する、二重揚水と呼ばれる揚水手法がある（Fig.2 左）。この手法は、水質の良い地下水と同時に、水質の良くない地下水も揚水するため、これを廃棄する手段が必要であるが、それぞれの水質領域の間に圧力差を発生させないので、両者の混合を抑止することができる。この考え方は古くからあり、例えばZack and Candelario (1983)は、プエルトリコの沿岸域において、近接する一対の井戸の一方の取水口（ストレーナ）を淡水域、他方のストレーナを塩水域に設置し、それぞれ取水することで水質混合を抑止し淡水と塩水を分離して揚水できることを現地試験によって示している。

しかしこれまでの研究は、塩水域と淡水域にそれぞれ専用の揚水井戸を設けるもので、塩水の揚水深度と淡水の揚水深度は固定されていた。しかし沿岸域の地下水位は潮位によって変化し、塩淡水境界深度も変化する。特に石灰岩からなる小島嶼は透水性が良好であり、島の規模が小さく海岸からの距離が短いとこの傾向は顕著である。揚水に2本の井戸を用いる場合、塩淡水境界の移動に合わせて取水深度を変化させることは難しい（石田ら、2014）。

本研究では1本の井戸の塩水域と淡水域の境界部に止水性のパッカーによる仕切りを設け、井戸内の地下水流を遮断することで、塩水域と淡水域からの同時揚水を実現するとともに、パッカーの位置や長さを調節することで、塩淡境界深度の変化にも対応する揚水手法を考案し(Fig.2 右, 特許出願中), 揚水装置を作製し, 取水試験によって手法の有効性について検討した。

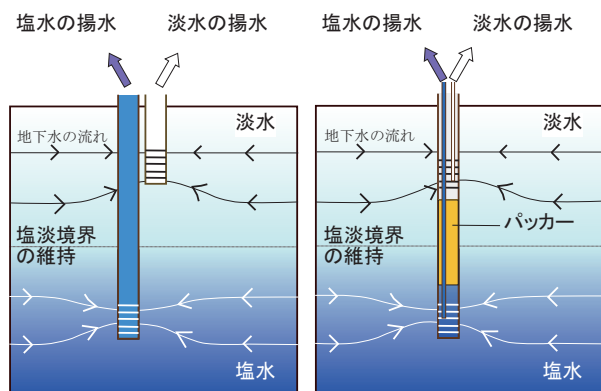


Fig.2 二重揚水手法 (左: 2孔式, 右: 単孔式)

Scavenger/production well coupling

2. 研究手法

2.1 揚水装置

本研究で作製する揚水装置が満たすべき条件については次のとおりとした。

- ①特定の深度のみから揚水することが可能なこと
- ②塩淡境界の移動に合わせて取水深度を変えられること
- ③揚水中の地下水圧を測定できること
- ④揚水強度を調整できること

この条件に基づいて作製した揚水装置の模式図, 系統図, 主な使用機材を Fig.3 に示す。

遮水部は長さ1mのゴム製の空気パッカーとした。パッカーは空気を抜いた状態で井戸内に挿入し, エアホースによって接続された地上のエアポンプによって膨張させ, 井戸内を止水する。

パッカー上下にはそれぞれDC12V駆動の水中モーターポンプが設置され, 地下水を揚水する。パッカー端部から水中モーターポンプ取水口までの距離は, パッカー上下ともに0.5mである。それぞれの揚水チューブ末端には流量計が接続され, 瞬時流量と積算流量を測定する。揚水強度はポンプの電源電圧を可変インバータ(電源AC100V)によって変化させることによって調整される。

パッカー上下にはまた, それぞれ水圧・電気伝導度(EC)・

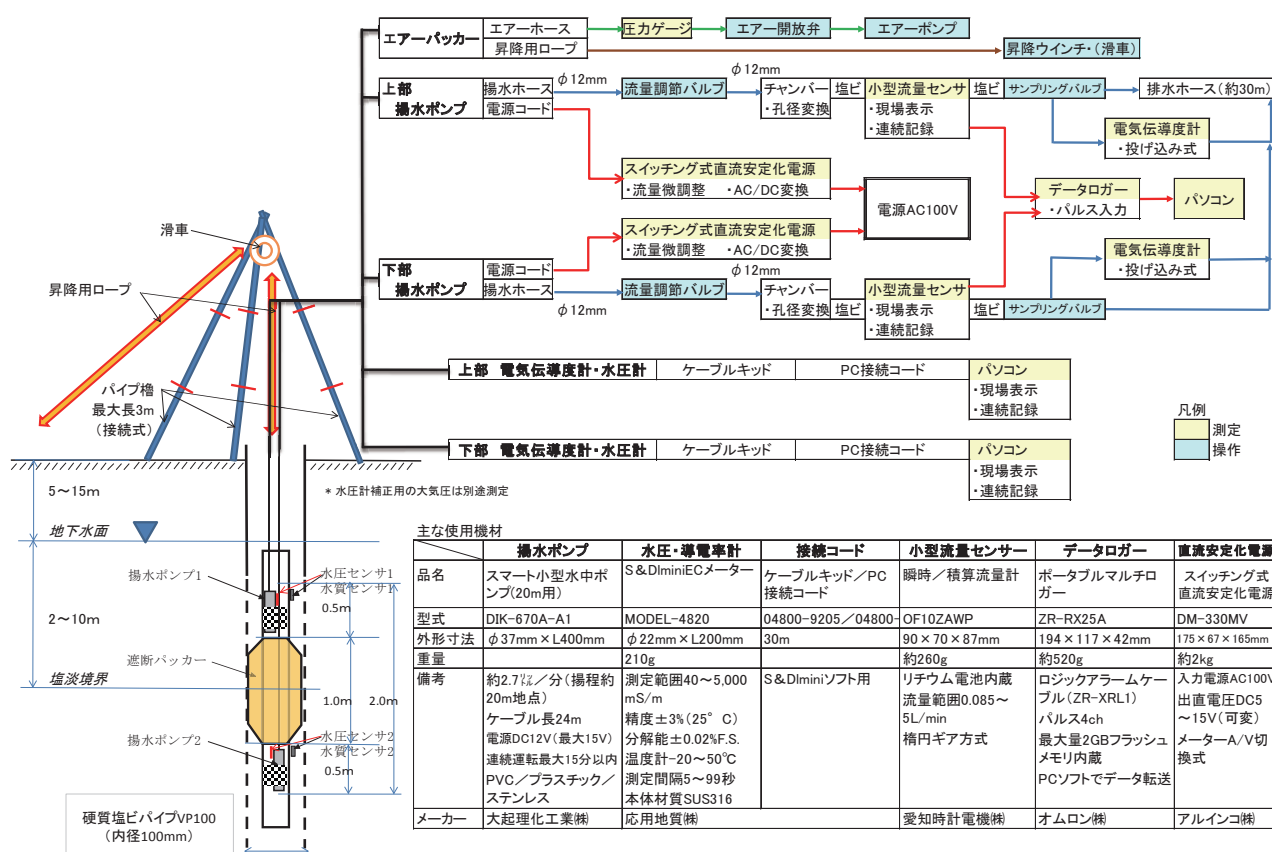


Fig.3 揚水装置の模式図, 系統図, 主な使用機材

Structure of pumping device

水温センサーが接続され、揚水中のデータが指定した時間間隔ごとに記録されるとともに、接続ケーブルを介して地上のパソコンでリアルタイムに確認することができる。パッカー、ポンプ、センサー、保護管等を含めた揚水装置の全長は約 3m、外径は約 73mm である。

本研究ではパッカーのゴムチューブを空気で膨らませて止水しているため、井戸の内側は滑らかな材質である必要がある。本研究で作製したような装置は一般的な管井に応用が可能であり、その口径範囲は 100 ~ 400mm 程度と考えられる。また塩淡水境界深度は既知であるか、井戸中の地下水の EC を深度毎に測定することによって特定できることを想定している。

2.2 試験地概要

取水試験の実施場所は茨城県つくば市の洪積台地に位置する農村工学研究部門の敷地内に設置されたオールストレーナ井戸である。井戸の内径は 100mm であり、保孔管の材質は硬質塩化ビニル管 (VP-100) である。また、試験に使用した井戸は設置後 20 年以上が経過している。

地質は上位より表土 (層厚 0.9m)、ローム (層厚 2.6m)、凝灰質シルト (層厚 2.0m)、第四紀更新世の砂質土である (Fig.4)。砂質土には一部シルトが挟在するが、このシルトは被圧層とはなっていない。

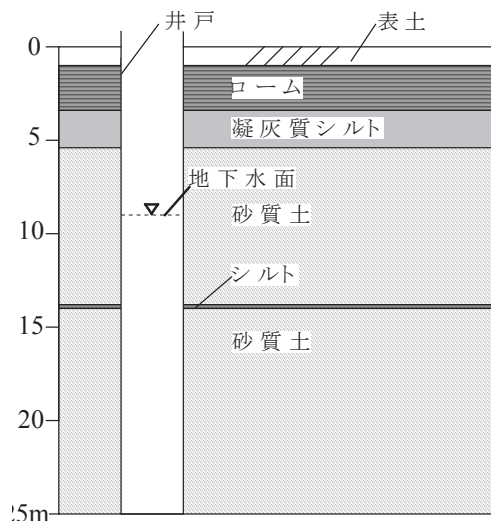


Fig.4 井戸周囲の地質断面図
Geological section around observation well

本試験地の地下水面は砂質土中にあるが、ローム層および凝灰質シルト層内にはより浅い地下水 (宙水) 面が存在している。井戸内に浸出した宙水は保孔管を伝って砂質土内の地下水面に流下している。このため、井戸内をパッカーで遮断するとパッカー上部に宙水が溜まり、水位が上昇する。宙水と砂質土内の地下水は EC などの水質に差があるので、パッカー上部 (以下上段と呼ぶ) とパッカー下部 (以下下段と呼ぶ) の水質にも差が生じる。本研究ではこの水質の差を利用し、上段の水質を淡水に、

下段の水質を塩水に見立て、取水試験中の水質の変化によって、本揚水手法の有効性を検討した。

2.3 取水試験

取水試験は 2013 年 12 月 6 日に行われた。Fig.5 に作製した揚水装置と試験時に井戸に挿入する様子および試験状況を示す。

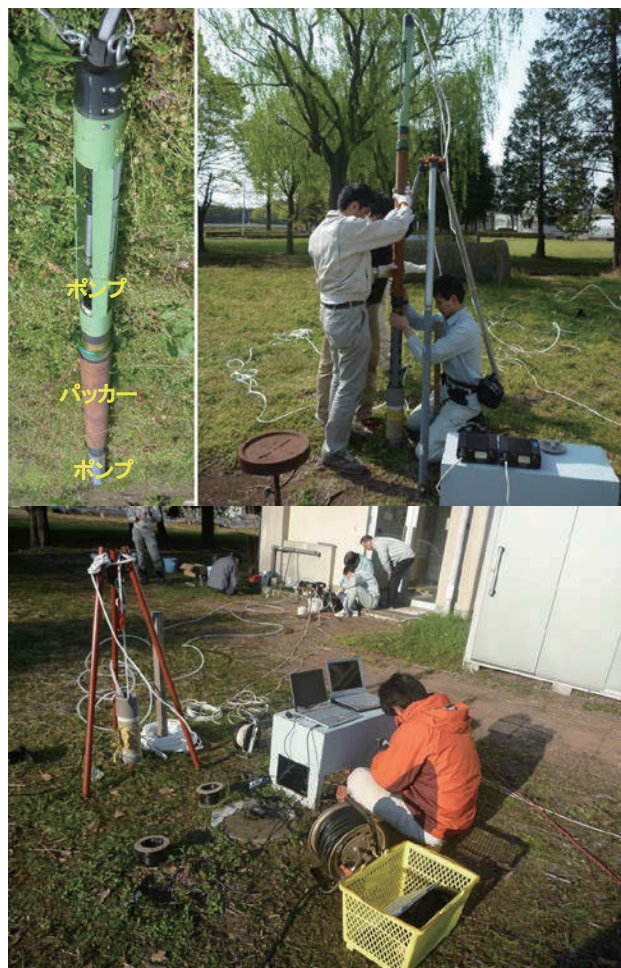


Fig.5 作製した揚水装置 (上左)、井戸に挿入する様子 (上右)、試験状況 (下)

Experimental device, insertion in well, scenery of pumping test

試験前の地下水位は概ね GL-8.4m であった。パッカー設置深度はパッカー中心を GL-10.4m (地下水面下 2m) とした。パッカー長は 1m であるため、上段の地下水深は挿入直後 1.5m となる。パッカー設置深度をこのように設定したのは、ポンプ上端の水深を 1m 確保するためである。パッカー設置後、宙水の影響による、上段の水位上昇を待った。その後、上段および下段より、2L/min の揚水強度で 15 分間揚水を行い、その後 1L/min の強度で 45 分間揚水を行った。揚水強度の調整は流量計に表示される瞬時流量を目視で確認しながら、ポンプ電源の電圧を変化させることで行った。揚水中は上段・下段の水圧をそれぞれ自記計で 5 秒毎に測定した。また、上段・下段それぞれから揚水された地下水について、EC, pH, 水温, 溶存酸素 (DO), 酸化還元電位 (ORP) の測定を 10 分毎

に行った。EC, pH, 水温の測定は TOA-DKK 社製 WM-32EP, DO は HACH 社製 HQ30d, ORP は TOA-DKK 社製 RM-30P をそれぞれ使用した。揚水した地下水は前記した水質測定後、再度地下浸透しないように所内の排水口に導水した。

また、上段と下段が独立して揚水されていることを確認するため、上段のみ、および下段のみの取水試験も行い、揚水中の水圧を自記計で測定した。上段のみの揚水では 2L/min の揚水強度で 18 分間揚水を行い、その後 1L/min の揚水強度で 42 分間揚水を行った。下段のみの揚水では 1L/min の揚水強度で 2 分間揚水を行い、その後 2L/min の揚水強度で 1 分間、3L/min の揚水強度で 1 分間、4L/min の揚水強度で 1 分間揚水を行った。揚水装置への給電は所内に配電されている AC100V 商用電源を用いた。試験中は大気厚を別途測定し、測定した水圧を水位（地表面からの深さ）に換算した。

3. 結果および考察

3.1 パッカー挿入後の水位変化

試験中パッカーからの空気漏れは検出されず、空気圧の調整は行われなかった。

Fig.6 に井戸内にパッカーを挿入し止水してから、上段および下段の水圧センサーで測定した水位変化を示す。

Fig.6 に示す期間中、パッカー挿入 8 分後から 4 分間ポンプの試運転を行っている。上段の水位はパッカー挿入後、ポンプ試運転中を除いて上がり続け、挿入後 1 時間以上経過した段階でほぼ一定値 (GL.-6.5m) となり、水位は 1.9m 上昇した。これに対して下段の水位はほぼ一定であり、上段の水位変化の影響を受けなかった。

本揚水手法の懸案事項の一つとして、パッカー止水区間における、孔壁と保孔管の間の鉛直流がある。

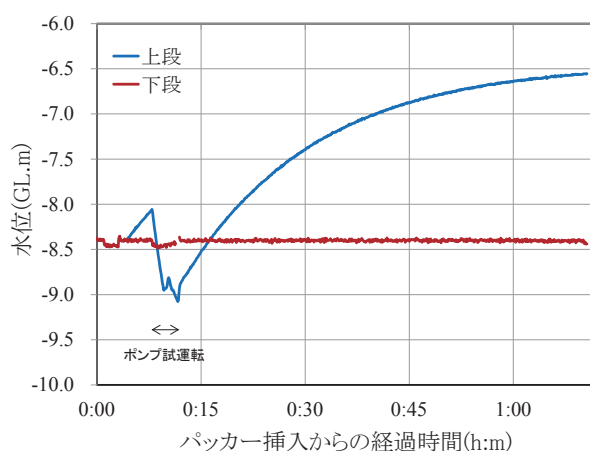


Fig.6 パッカー挿入後の水位変化
Fluctuation of groundwater potential after insertion of packing

今回試験に用いたような管井では、ボーリングマシンによる掘削径は保孔管の径より大きく、掘削孔の孔壁と保孔管の間は砂などの透水性が高い物質で充填されるのが一般的である。そのため井戸内の一部区間をパッカーで止水しても、地下水が孔壁と保孔管の間を通過してパッカー上下間で流れてしまうと止水の効果がなくなる。本取水試験装置でパッカー長を 1m と比較的長く設定したのも、止水区間が長くなるほど、止水区間を縦断する孔壁と保孔管の間の流路が存在する確率が小さくなると考えたためである。実際の井戸では、設置後地盤が徐々に保孔管に密着していくので、井戸の施工から時間が経過するほど、孔壁と保孔管の間の透水性は地盤の透水性に近づくと考えられる。今回の試験では Fig.6 に示すように上段と下段の水位は独立に変動していることから、今回の試験条件ではパッカーによる止水が機能していると考えられる。

3.2 取水試験中の水位変化

Fig.7 に取水試験中の、上段および下段の水圧センサーで測定した水位変化、および流量計で記録した上段および下段の地下水揚水強度（瞬時流量）の変化を示す。

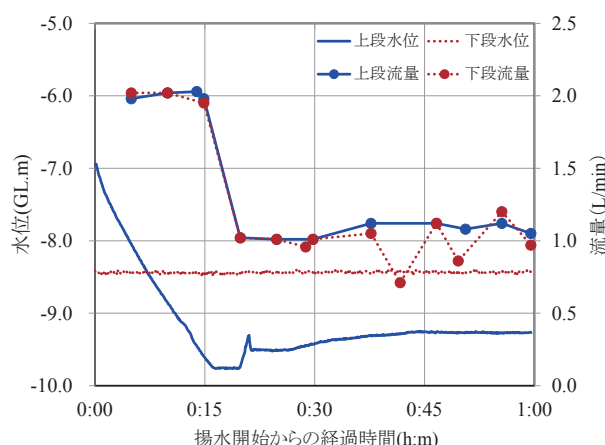


Fig.7 取水試験中の水位と揚水強度変化
Fluctuation of groundwater potential and pumping rate during pumping test

揚水開始から 15 分間は上段、下段とも地下水揚水強度は 2.0L/min であったが、上段の水位が急激に低下し、揚水開始 15 分後には 2.0L/min での揚水が継続できなくなった。このため揚水強度を 1.0L/min に変更して試験を継続した。揚水強度変更後、上段の水位は最終的に GL.-9.2 ~ -9.3m で安定した。これに対して下段の水位は揚水強度によらずほぼ一定であった。

上段の水位が急激に低下した理由は、パッカーによる止水により、揚水対象となる帯水層の厚さが制限されたことによると考えられる。地下水の揚水においては、帯水層の厚さと透水係数の積である透水量係数が指標となる。揚水強度が同じであっても帯水層厚が小さくなれば、揚水可能量が小さくなるとともに、水位低下が大きくな

る。この現象は単孔式二重揚水に限らず、2孔式二重揚水でも同様に発生すると考えられるが、いずれにせよ塩淡水境界深度が浅い（淡水域の厚さが薄い）場合には二重揚水手法を用いても、帯水層の性状によっては十分な揚水量が得られない可能性がある。

一方で上段の水位変動の影響を下段の水位が受けなかったことは3.1と同様であった。

3.3 取水試験中の水質変化

Fig.8 に取水試験中の上段および下段のポンプから揚水された地下水の EC 変化を示す。

取水試験中上段の EC は 14.9 ~ 15.7mS/m、下段の EC は 16.7 ~ 16.9mS/m の範囲で推移した。上段と下段の EC の差は 1.2 ~ 1.8mS/m であり、その差は取水試験中保たれていた。

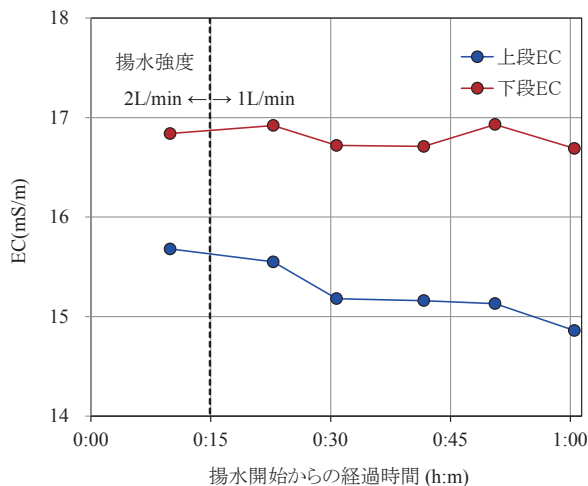


Fig.8 取水試験中の EC 変化
Fluctuation of EC of groundwater during pumping test

Fig.9 に取水試験中の上段および下段のポンプから揚水された地下水の pH および水温の変化を、Fig.10 に取水試験中の上段および下段のポンプから揚水された地下水の DO および ORP の変化を示す。

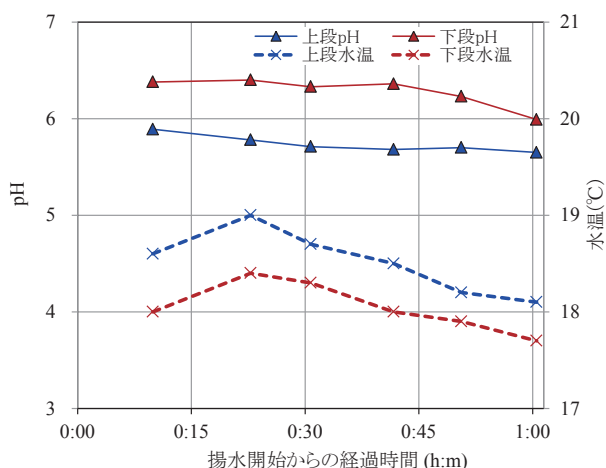


Fig.9 取水試験中の pH および水温変化
Fluctuation of pH and temperature of groundwater during pumping test

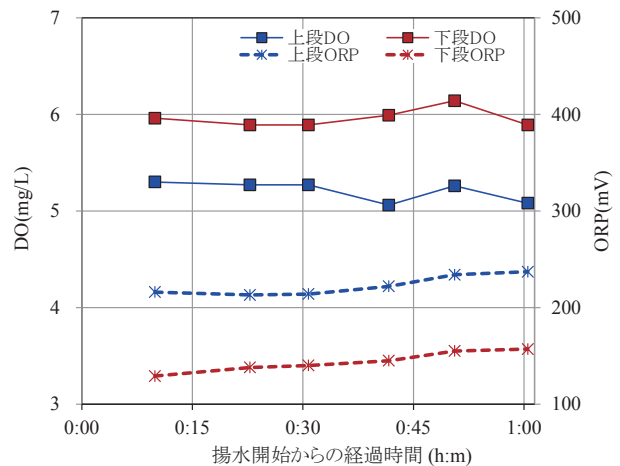


Fig.10 取水試験中の DO および ORP
Fluctuation of DO and ORP of groundwater during pumping test

これらのうち、Fig.9 に示す揚水開始 23 分後の水温が上昇しているのは、揚水量の調整に伴い一時的にポンプを停止したことにより、揚水チューブの地上部が日射で暖められた影響による可能性があり、検討の対象外とする。

Fig.9, Fig.10 に示すいずれの指標とも、上段と下段の差は取水試験中保たれていた。

これらの結果は、上段の地下水と下段の地下水が混合せず独立に揚水されていることを示しており、二重揚水の目的である帯水層中の 2 深度からの同時揚水が、本装置によって実現可能であると考えられる。

3.4 上段のみおよび下段のみで揚水した場合の水位変化

Fig.11 に上段のみで揚水を行ったときの、上段および下段の水圧センサーで測定した水位変化を示す。

上段のみで揚水を行った場合、上段の水位は揚水強度に応じて低下したが、下段の水位は殆ど変化せず、上段の水位変化の影響を受けなかった。

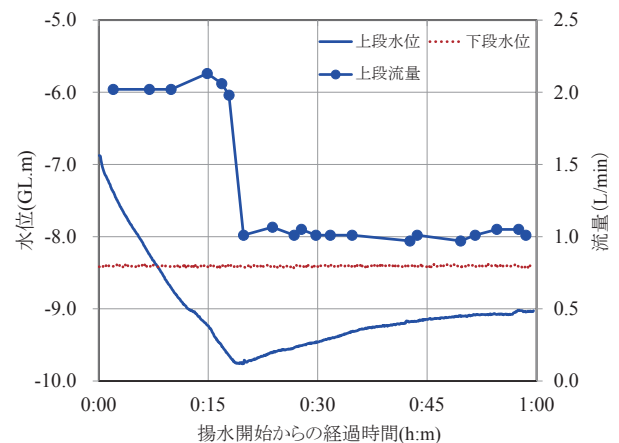


Fig.11 上段のみ揚水時の水位と揚水強度変化
Fluctuation of groundwater potential and pumping rate during pumping of upper pump

Fig.12 に下段のみ揚水を行ったときの、上段および下段の水圧センサーで測定した水位変化を示す。

下段のみで揚水を行った場合、上段の水位も下段の水位も揚水によって変化しなかった。上段の水位が上昇傾向にあるのは、その前に行われた取水試験によって低下した水位の回復過程にあったからである。また下段の水位に変化が無いことは、今回の揚水強度（最高 4L/min）が下段の透水量係数に対して非常に小さく、検出できるだけの水位低下が生じなかったことを示している。

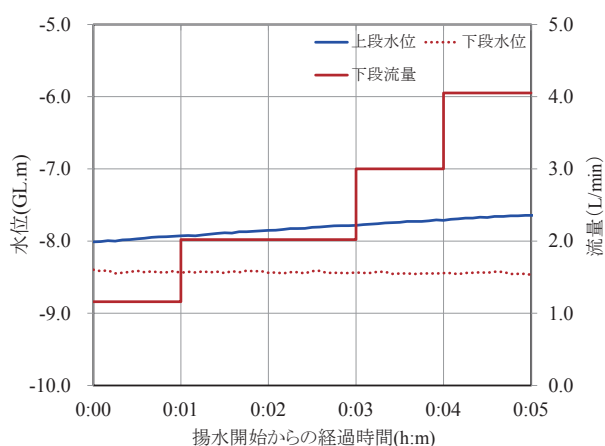


Fig.12 下段のみ揚水時の水位と揚水強度変化

Fluctuation of groundwater potential and pumping rate during pumping of lower pump

今回の取水試験ではパッカー挿入後の水位変化、上段・下段同時揚水、上段のみ揚水、下段のみ揚水のいずれの場合でも、上段と下段の水位は反対側の水位変動や揚水の影響を受けておらず、パッカー止水の有効性（孔壁と保孔管との間の鉛直流が発生していないこと）を示している。しかしこのことは、今回用いた試験井戸について言えることであり、本研究で用いた手法を現地に適用する際は、本研究で示した方法などでパッカー止水の有効性を確認することが必要である。

4. 結言

本研究ではこれまで2本の井戸で実施されてきた二重揚水手法を改良し、塩淡水境界深度が変化する沿岸域で利用するための新たな手法を考案した。具体的には、1本の井戸の塩水域と淡水域の境界部に止水性の空気パッカーによる仕切りを設け、井戸内の地下水流を遮断することで、塩水域と淡水域からの同時揚水を実現するとともに、仕切りの位置や長さを調節することで、塩淡水境界深度の変化にも対応するものである。また、考案した手法による揚水装置を作製するとともに、農村工学研究部門内の井戸において取水試験を実施した。

試験の結果、パッカー挿入後の水位変化、上段・下段同時揚水、上段のみ揚水、下段のみ揚水のいずれの場合でも、上段と下段の水位は反対側の水位変動や揚水の影響を受けなかった。

パッカーの上段・下段から同時に揚水した試験において、上段から揚水した地下水のECは、下段から揚水した地下水のECよりやや低く、その差は取水試験終了時まで保たれた。またpH、水温、DO、ORPについても、上段と下段の差は試験終了時まで保たれた。

これらの結果より、上段の地下水と下段の地下水が混合せず独立に揚水されていること、パッカーによる止水は有効で孔壁と保孔管の間の鉛直流も発生していないことが示された。

一方で、取水試験開始時のパッカー上段の地下水深は約3mであったが、揚水開始後水位が急激に低下し、2L/minの揚水強度を維持できなかった。このことは、宙水の存在と、パッカーによる止水によって上段の帯水層厚が減少したことによる影響であると考えられた。

以上より、二重揚水の目的である帯水層中の2深度からの同時揚水が、本装置によって実現可能であると考えられた。また留意点として、①現地で用いる井戸について孔壁と保孔管の間の鉛直流が発生しないことを確認する必要があること、②帯水層厚の減少により揚水強度が制限されることを考慮に入れる必要があること、が挙げられた。

謝辞：本研究の一部は、本研究の一部は科研費（15K07659 および 24580362）、住友財団環境研究助成の支援を受けて実施した。また取水試験の実施にあたっては（株）フジヤマ（当時）の久保昌明氏にご協力頂いた。ここに感謝の意を表する。

引用文献

- 石田 聡, 吉本周平, 小林 勤, 幸田和久, 土原健雄, 万福裕造 (2010): マーシャル諸島共和国マジュロ環礁における地下水の塩水化について, 地盤工学会誌, **58**(5), 22-25.
- 石田 聡, 白旗克志, 土原健雄, 吉本周平 (2014): 帯水層の塩水化を抑止する深度別揚水手法, 地盤工学会誌, **62**(11/12), 36-37.
- Presley K.T. (2005): Effects of the 1998 Drought on the Freshwater Lens in the Laura Area, Majuro Atoll, Republic of the Marshall Islands, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, **2005-5098**, 1-40.
- 白旗克志, 長田実也 (2009): 淡水レンズからの水源開発を目指して—多良間島における調査—, 地盤工学会誌, **57**(9), 42.
- Zack, A. and Candelario R. M. (1984): A Hydraulic Technique For Designing Scavenger-Production Well Couples To Withdraw Freshwater From Aquifers Containing Saline Water: Final Technical Report To U.S. Department Of The Interior Washington, D.C. 20240, 1-50.

受理年月日 平成28年11月1日

A pumping test of single scavenger/production well system to prevent saltwater upconing

ISHIDA Satoshi*, SHIRAHATA Katsushi*, TSUCHIHARA Takeo* and YOSHIMOTO Shuhei**

* Groundwater Resources Unit, Division of Regional Resources Engineering

**International Water Management Institute (IWMI)

Abstract

We proposed a device made of air packing and installed as a partition in a borehole. The device had two pumps; one was set above the air packing and the other under it. The use of this air packing made possible the groundwater pumping from two horizons. The device was set in a borehole with a 100-mm diameter drilled into a field in our laboratory, and then the groundwater was pumped into it. The length of the packing was 1 m, and the packing was set at 2 m below the groundwater table. The groundwater pumping rates of both pumps were 1-2 L/min. EC, pH, temperature, DO and ORP of the pumped groundwater were measured during the pumping. The groundwater level which was measured by a hydraulic pressure sensor at a pumping rate of 2 L/min was found to decrease with time at the upper side of the packing, but it was almost stable at the lower side. The EC of the groundwater drawn above the packing did not fluctuate so much. The difference between the EC of the groundwater above and below the packing remained unchanged; the same tendency was observed in other water quality parameters. These results showed that the groundwater from two horizons could be separately pumped by using this device without negatively affecting water quality.

Key words: *Scavenger/production well, Packing, Upconing, Freshwater/saltwater boundary, Freshwater lens, Groundwater*