

秦野盆地 地下水の 水文環境*

梁海根**

Hydrological Environments of Groundwater in the Hadano Basin, Japan*

Hea-Kun Yang* **

요약 : 본 연구는 도시화에 수반되는 지하수의 수문환경 변화를 조사하기 위해, 일관 히다노 분지를 대상으로 수문 지질을 밝히고, 인위적인 요인에 의한 수문환경 변화와 수문특성을 종합적으로 분석하였다.

그 결과, 분지의 대수층은 퇴적환경에 의해 TP층을 경계로 신기 loam층과 고기 loam층으로 나눌 수 있으며, 전자를 천층지하수의 대수층, 후자를 심층지하수의 대수층으로 구분할 수 있다. 그리고 대수층의 기저기복은 지하수 수위의 공간적 차이를 유발하고, 지하수 유동계에 큰 영향을 미치고 있다. 분지의 심층지하수의 주요 공급원은 탄자와 산지의 지표수이고, 천층지하수는 분지 내에 내리는 빗물에 기인한 것으로 간주된다. 지하수의 과잉양수는 지하수 수지의 불균형을 유발함으로써 심층지하수가 매년 0.12~0.14m씩 저하되고 있다. 대체로 Cl⁻, NO₃⁻농도는 심층지하수보다 천층지하수에서 높으며, 전정부에서 전단부로 갈수록 높아지는 것으로 보아 분지의 지하수 수질형성에 인위적인 요인이 크게 작용하고 있는 것으로 사료된다. 지하수의 화학적 조성은 대체적으로 Ca(HCO₃)₂형에 속한다.

주요어 · 수문지질, 지하수의 유동계, 수질, 산소동위원소조성, 인위적 요인, 히다노 분지

Abstract : This study has purposed to probe the change of hydrological environments of groundwater followed by the urbanization, and in order to do the purpose, this study made clear the hydrogeology in the subject of the Hadano Basin in Japan, synthetically analyzed the change of hydrological environments and the properties of hydrology under artificial factors.

The results have revealed that depending on depositional environments the aquifer of the basin can be divided into the younger loam layer and the older loam layer in bordering on the TP layer, which can also be classified the former as the shallow groundwater aquifer, the latter as the deep groundwater aquifer. And the base level of aquifer caused spatial differences of the groundwater level, having great influences on the groundwater flow system. It is regarded that the major source of the deep groundwater is the surface water of the Tanzawa Mountains and the shallow groundwater recharge from rain water falling into the basin. Because the excess pumping of groundwater have created an imbalance of groundwater balance, the deep groundwater have been lowed on the average of 0.12~0.14m by year. Generally, the concentration of Cl⁻ and NO₃⁻ is higher in the shallow groundwater than the deep groundwater, and showing more concentration as goes along the upper to the lower. so it can be concluded that the formation of water quality in the groundwater of the basin have been effected greatly by the anthropogenic factors. The chemical composition of the groundwater is generally classified as Ca(HCO₃)₂ type

Key Words · hydrogeology, groundwater flow system, water quality, oxygen isotopic composition, anthropogenic factors, Hadano Basin

1. 序 論

1) 研究目的

도시지역의 급속한 인구증가와 외연적 확대는

지표공간을 집약화하고, 우수의 침투기능이 큰 농지나 산림지역을 택지나 공업용지, 도로 등과 같은 인공구조물로 대체하므로써 불침투성 지역으로 변형시켜 왔다(Yang, 1995). 한편, 생활수준의 향상과 대규모 공업단지의 조성은 물부족현상을

* 본稿는 박사학위논문的一部分을 발췌하고, 보완·재구성한 것임

** 전남대 지리학과 강사(Lecturer, Department of Geography, Chonnam National University)

더욱 심화시켰으며, 지하수는 수원·수질의 안정성과 이용의 편의성, 경제적 효율성이 강조되고, 무계획적으로 개발되어 지하수위의 저하와 지반침하, 용수(湧水)의 고갈, 지하수의 오염 등과 같은 지하수 장애를 초래하게 되었다.

이와 같은 지하수 장애는 특정 공업국에서만 일어나는 현상이 아니고, 대기오염과 산성우, 사막화 등과 같이 국제적인 환경문제로서 취급되기 이르렀다. 선진국에서는 1940년대부터 물에 관한 법령을 제정하고¹⁾, 유해화학물질의 종류와 그 양을 공개 관리하기 위한 행정적·법적 장치를 마련함으로써 토양과 지하수 등에 대한 오염물질을 규제하고 있다(梁海根, 1998).

우리 나라에서도 1980년대 이후 고도 경제성장과 더불어 생활·공업용수의 급증과 굴착장비의 개선으로 지하수 개발이 급속하게 이루어졌다. 1990년대에 이르러 지표수의 개발은 거의 한계에 달했으며, 급증하는 생활·공업용수량에 대처하기 위해 지하수 개발은 더욱 활발하게 이루어지고 있다. 반면, 무계획적인 지하수 개발과 지하수의 과잉 양수로 인하여 지하수위 저하와 지하수의 오염 등이 발생하여, 사회문제로 비화되기 이르렀다. 따라서, 지하수 자원을 합리적으로 이용하고, 체계적으로 관리 보전하기 위해 정부는 「지하수법(1993)」을 제정하였다(건설교통부, 1995).

일본 카나자와(神奈川)현 하다노(秦野) 분지는 지질구조적 특성과 지형적 요인 때문에 지하수가 풍부한 지역이다. 이런 이유로 하다노 분지에 관한 지질, 지형, 수문학적 연구가 한 동안 활발하게 이루어졌으며, 일부는 상당한 연구성과를 얻기도 했다. 그 외에도 분지의 취락형태와 농업특성, 도시화 과정 등에 관한 연구도 상당수 있다. 그러나, 분지의 퇴적물에 대한 층서 구분이 불분명하고, 지하수의 함양원에 관한 의문점이 여전히 남아 있다.

梁(1995)에서도 지적한 바와 같이 일본 명수백선으로 선정된 하다노 지하수는 유기염소화합물(TCE 등)에 오염되어 사회문제화하고 있다. 지하수의 오염원과 오염물질의 확산을 규명하고, 적절한 지하수 이용을 위한 지하수 저유량 파악에는 상기의 문제가 해결되어야 한다. 본 연구에서는 그러한 점을 고려하여 대수층을 이루는 퇴적물을

재검토 하고, 지하수의 함양원을 분석하여 수문지질학적 환경을 밝히고, 나아가 인위적인 요인이 지하수 환경에 미치는 영향을 조사하였다. 특히, 인간의 생산활동 과정에서 야기되는 수문환경 변화를 정량화하기 위해서는 장기간의 관측자료가 무엇보다도 중요하고, 제반 요소에 관한 종합적 분석이 필요하다. 따라서, 지질자료, 상수도와 하수도, 지하수위 등에 관한 장기관측 자료를 얻을 수 있다는 점도 하다노 분지를 연구대상 지역으로 선정한 이유 중의 하나이며, 지형·지질적으로 분수계가 분명한 하다노 분지는 지하수의 유동과 물수지를 연구하는데 적당한 장소라고 생각한다. 지하수의 물수지에 관한 논의는 본고에서 제외하고자 한다.

2) 地域概要

일본 칸도(關東)지방의 중서부에 위치한 하다노 분지는 서쪽에서 동쪽에 걸쳐 제3기 중신세의 탄자와(丹澤)층군에 속하는 탄자와 산지에 둘러싸여 있고, 남쪽으로는 오오이소(大磯) 구릉에 차단되어 있는 구조분지이다(Figure 1). 분지의 면적은 약 60.7km²이고, 도쿄(東京) 중심부와는 약 70km 떨어져 있으며, 토우메이(東名) 고속도로와 국도 246호선, 오다큐(小田急) 전철로 연결되어 있다.

1960년 무렵까지 하다노 분지는 일본 유수의 담배 재배지역으로서 알려졌다. 그러나, 하다노시는 분지의 풍부한 지하수를 기반으로 공장유치 정책 「하다노시 공장설치 등 장려에 관한 조례(秦野市工場設置等奨励に關する條例, 1956)」를 적극적으로 도입하여, 전자산업과 정밀기계산업을 중심으로 공장들이 분지에 입지 하였으며, 1964년에 정비된 국도 246호선과 토우메이 고속도로의 개통(1969)으로 공장유치는 더욱 활기를 띄게 되었다(Yang, 1995). 하다노시의 인구는 분지의 도시화와 공업화에 힘입어 1963년에 54,406명인 것이 1976년에는 약 2배 증가하여 108,608명에 달하였으며, 1980년 이후에도 인구증가율이 10%를 넘는 높은 인구성장을 보이고 있다. 1995년 현재 하다노 분지의 상주인구수는 하다노시 총인구의 약 72%를 차지하고 있다.

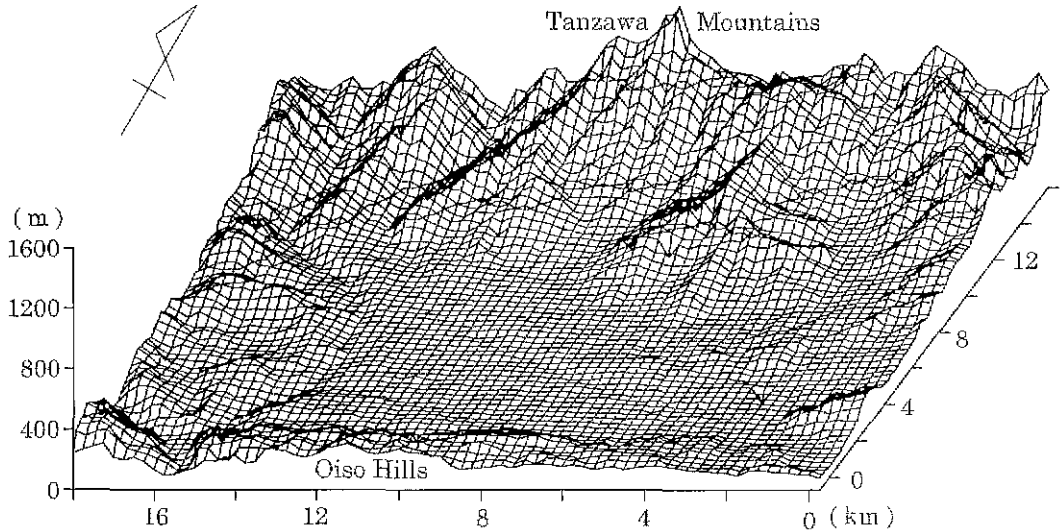


Figure 1. Study area

하다노 분지는 지형성 강우의 영향이 큰 지역으로서 태풍의 진로에 의해 연 강수량이 크게 좌우되는 경향이 있다. Yang(1995)의 기후학적 물수지 계산에 의하면, 연평균 유출량은 980mm이고, 유출계수는 약 0.57이다. 월평균 유출량은 81.7mm이며, 월평균 유출량은 9월에 가장 많은 118mm, 12월에 가장 적은 44.9mm이다. 1년을 통해 3~4월과 9~10월에 각각 100mm를 넘는 유출량이 나타난다.

3) 研究方法

(1) 지질조사

지질조사는, 분지의 지하수조사(1969~1974년)를 계기로 카나자와현 온천지화학연구소가 수집 정리한 시추자료(38개소)와 중력조사 및 탄성파조사에 관한 보고서가 있으며 (Hiraga et al., 1971, 1972), 하다노 수도국의 시추자료(26개소)와 전기탐사자료(25개소)가 있다. 그 외에도 하다노시는 분지의 지하수 오염을 규명하기 위해 미즈나시(水無)천 양안을 중심으로 31 지점에서 44개의 시추조사를 했다.

이들 자료에 대한 분석내용이나 분류형태는 굴착 기술자 또는 조사기관에 따라 각자 다르고, 설정 동일장소의 시추자료라 할지라도 조사자의 의

견이 꼭 일치한다고는 말할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 지질조사(Yamazaki, 1962, Oki et al., 1971, Nagase et al., 1972, Yokoyama et al., 1972, Nagase, 1992) 결과를 검토하고, 수집된 시추자료와 전기탐사 자료를 정리함과 동시에 현지 조사를 실시하여, 수문지질학적 관점에서 분지의 지질구조를 재분류하였으며, 수문지질구조와 지하수의 유동간의 관계를 살펴 보았다.

(2) 지하수의 조사

용수와 지하수 조사는 1995년 4월 29일~5월 4일과 1996년 7월 6일에 걸쳐 용수와 민가우물, 상수도의 취수관정을 대상으로 지하수위 및 용출량, 수온, EC, pH, RpH, Cl⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, 산소동위원소 조성비($\delta^{18}O$)를 분석하고, 그 결과를 토대로 지하수의 함양원과 지하수 환경에 미치는 인위적인 영향을 살펴 보았다. 지하수위의 경년변화는 하다노시 수도국의 장기 관측기록을 이용·분석하였다.

(3) 수질분석

수온과 EC, pH, RpH, NO₃⁻는 취수 직후 현장에서 측정하였으며, 그 외 수질항목은 실험실에서 분석하였다. 분석방법은 다음과 같다.

· EC : EC Meter(東亞電波; CM-11P)

- pH, RpH : 비색관
- Cl⁻ : 질산수은 적정법
- HCO₃⁻ : pH4.8 알칼리도
- NO₃⁻ : 비색법(HACH: Test Kit model)
- SO₄²⁻ : 흡광 광도법
- Ca²⁺, Mg²⁺ : EDTA 적정법
- Na⁺, K⁺ : 염광광도계(東京光電; ANA-10BL)
- 산소동위체 조성비(δ¹⁸O) : 카나자와현 온천지학연구소의 질량분석계(VG: PRISM model)를 이용하여 분석하였다. 이때 CO₂와 H₂O의 교환반응은 VG사 ISOPREPI8형의 자동장치를 이용하였고, 수조의 온도는 25°C로 설정하였다. 측정치는 표준시료(SMOW: Standard Mean Ocean Water)를 기준으로 천분을 편차(δ값)로 나타냈다. 즉, 동위체조성 식은

$$\delta^{18}\text{O} = ((R_{\text{sample}} / R_{\text{SMOW}}) - 1) \times 1,000$$

이다. 여기서, R은 ¹⁸O/¹⁶O를 나타낸다.

2. 水文地質

1) 地質에 관한 從來의 研究

분지의 퇴적물은 하코네(箱根) 화산에 기인한 화산 분출물과 경석류(TP: Tokyo pumice, 49,000y. B. P.), 탄자와 산지에서 운반된 사력들이 서로 호층을 이루고 있다. 그리고, 분지는 약 4만 년 전부터 활동하기 시작한 시부사와(滯澤) 단층과 하다노 역단층에 의해 분지의 서남쪽에서 함몰이 일어났고, 그 활동이 점차 동쪽으로 진행되어 하다노 분지가 형성되었다. 그 후, 후지(富士) 화산에서 분출한 화산 분출물과 탄자와 산지의 사력층이 미즈나시천을 중심으로 퇴적한 것으로 알려졌다(Machida and Moriyama, 1968, Nagase et al., 1982). 이들 퇴적물은 Hiraga 외(1971, 1972)가 실시한 전기탐사와 증력조사에 의하면, 분지의 중앙부에서 100~150m에 달한다고 보고 있으나, 최근 미발표된 조사에서는 퇴적물 두께가 150~200m라고 추정되고 있다.

분지의 퇴적물에 관한 연구로서는 Yamazaki

(1962)와 Oki 외(1971), Yokoyama 외 (1972), Nagase(1989) 등이 있다.

Yamazaki(1962)는 현지조사와 전기탐사의 비저항 값을 기준으로 분지의 퇴적층을 크게 현(現) 하상퇴적물, 상부 loam층, 구(舊) 하상퇴적물(I), 하부 loam층, 구 하상퇴적물(II)로 구분하고, 구 하상퇴적물(II)층에 피압지하수가 있다고 보았다.

Oki et al.(1971)은 화산 분출물의 성질에 착목하여 분지의 퇴적물을 2개의 층으로 분류하였다. 즉, 감람석을 다량으로 함유하고 있는 후기 화산의 차갈색 화산재층을 신기 loam층(U층)으로, 감람석은 적으나 휘석을 다량 함유하고 있는 담갈색 또는 갈색의 고결된 화산재층과 력층을 고기 loam층(L층)으로 간주하였다. 그리고, Yokoyama 외(1972)는 신기 loam층의 지하수를 천층지하수(淺層地下水), 고기 loam층의 지하수를 심층지하수(深層地下水)로 분류했다.

Nagase(1989)는 TP층을 경계로 그 이전에 퇴적된 퇴적층을 일괄해서 하다노(상기의 L층에 해당)층이라 부르고, 신기 loam층을 오이소 구릉의 지형면인 이마이즈미(今泉)면²⁾과 오시리(尾尻)면³⁾에 대비시켜 각각 미쯔가미(水神)력층과 미즈나시력층으로 구분하였다. 그러나, Nagase(1989)는 지하수의 순환장(循環場)으로서 미쯔가미력층으로 생각하고, 미쯔가미력층까지의 지하수를 천층지하수로, 그 하부층에 있는 지하수를 심층지하수로 구분하였다. 이는 Yokoyama et al.(1972)의 지하수 구분과 다르며, TP층과 미쯔가미력층사이에 있는 loam층과 시력층이 고기 loam층에 포함되어 버리는 모순점이 있다.

앞서 밝힌바와 같이 기반암을 두텁게 덮고 있는 분지의 퇴적물이 풍부한 대수층을 형성한다는 것은 밝혀졌지만, 퇴적층에 대한 층서가 아직 불분명하고, 대수층의 구분도 서로 다르다.

2) 盆地의 水文地質 區分

어느 지역의 지하수의 유동계와 수지를 분석하기 위해서는 대상지역의 지질구조와 지하수두(地下水頭)의 시·공간적 분포에 대한 조사가 이루어져야 한다. 일반적으로, 복잡한 지질구조를 갖는 선상지에서는 국지적인 지형·지질조건의 영향으

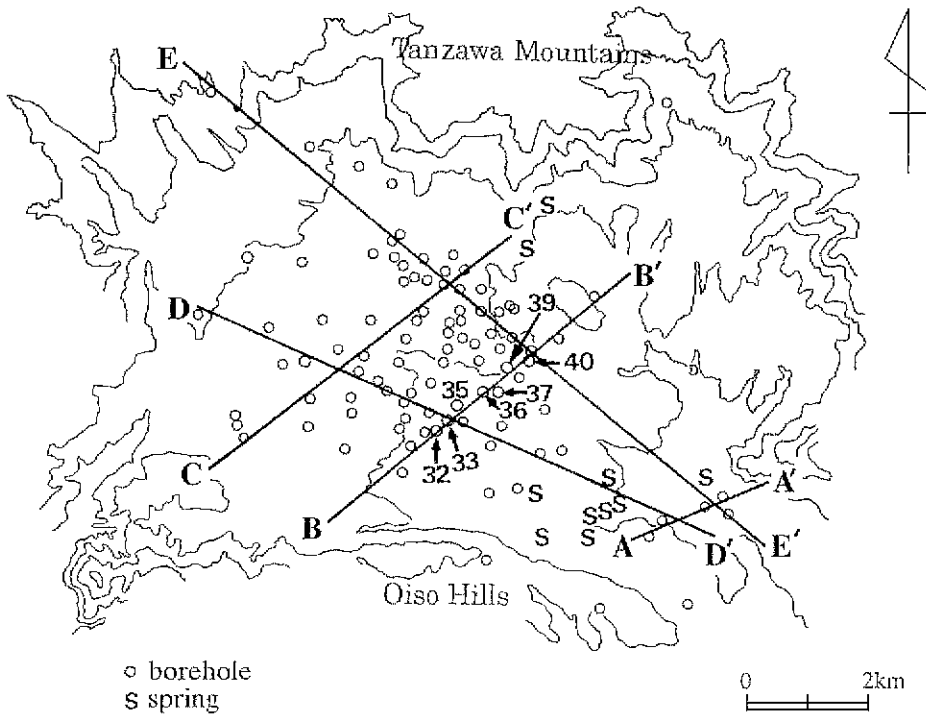


Figure 2 Location of boreholes

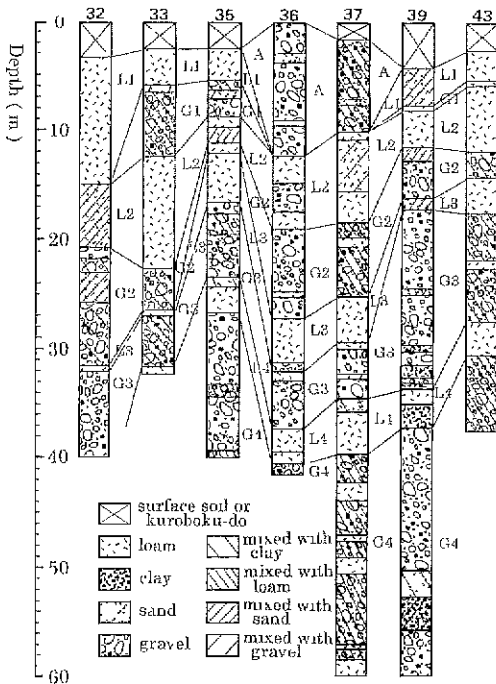


Figure 3 Geologic column section

로 복수의 대수층이 존재하므로 지하수의 유동계와 지하수 수지간의 관계를 정량적으로 분석한다는 것은 그리 간단하지는 않다(Miyaoka, 1995).

본 연구에서는 수문지질구조와 지하수 유동간의 관계를 살펴 보기 위해 시추자료와 전기탐사 기록을 수집하고, 현지조사를 통해 수문지질학적 관점에서 분지의 지질구조를 재분류하였다.

현재까지 수집한 지질자료의 지점을 Figure 2와 같고, B-B' 단면상에 위치한 주요 지점의 지질 주상도는 Figure 3과 같다.

화산재층은 광범위한 범위에 걸쳐 쌓이고, 명료한 시간정보를 제공하므로 층서를 조사하는데 중요한 실마리 즉, 건층(key layer)이 된다(Yoshikawa et al., 1996). 하다노 분지에서도 남부 큐슈(九州)의 아이라(始良) 화산에서 분출한 백색 유리질 화산재층(AT: Ara-Tn ashes, 22,000y. B. P.)과 하코네 화산의 대폭발로 흘러내린 TP층이 존재한다. AT층은 불과 수 cm의 두께로 퇴적하고 있어, 육안으로 인식할 수는 없으나, No. 35와 No. 43지점에서는 지표로부터 각각 11.1~11.2m와

8.05~8.25m 사이에 분포하고 있다. TP층은 AT층에 비해 두껍고, 분지 전역에 걸쳐 분포하고 있다. 특히, 국도 246호선의 하다노역단층 부근에서는 수 십 cm의 TP층을 관찰할 수 있으며, No. 36과 No. 37, No. 43에서는 39.4~40.5m, 34.15~35.7m, 27.4~27.9m 사이에서 각각 분포한다.

분지의 퇴적물은 대체적으로 loam층과 사력층이 서로 호층을 이루고 있어, 현 하천의 퇴적작용에 의한 충적층(A)과 4개의 loam층(L1, L2, L3, L4), 그리고 4개의 사력층(G1, G2, G3, G4)으로 구분할 수 있다.

A층은 현 하천의 하도 주변을 따라 분포하고 있으며, 입경 $\phi = 5 \sim 200\text{mm}$ 이하의 안산암과 응회암의 원력이 대부분이다. 그 외 약간의 loam과 암회색의 모래, 점토가 혼재되어 있다. L1층은 전체적으로 $\phi = 2 \sim 5\text{mm}$ 의 scoria와 pumice를 포함하는 차갈색의 조립질 loam층으로서 비교적 함수율이 높다. No. 36과 No. 37지점의 L1층은 하천침식에 의해 제거된 것으로 보인다. G1층은 입경 $\phi = 10 \sim 70\text{mm}$ 의 안산암과 응회암의 원력 그리고 사질의 loam 또는 모래가 섞여 있으며, 천층지하수의 대수층을 형성하고 있다. L2층은 scoria와 pumice를 포함하는 loam 또는 사질 loam층으로서 loam 사이에 AT층으로 간주되는 백색의 유리질 화산재가 수 cm의 두께로 존재하고 있다. 이는 신기 loam층을 구분하는 중요한 척도가 된다. G2층은 입경 $\phi = 50 \sim 200\text{mm}$ 정도의 안산암 원력층으로 함수율이 비교적 높다. 장소에 따라서는 $\phi = 10 \sim 20\text{mm}$ 정도의 자갈이 많으며, 미고결한 흑갈색 모래 또는 loam을 포함하는 곳도 있다. L3층은 갈색 또는 황갈색의 고결한 loam층이다. 부분적으로는 점토가 섞여 있으며, $\phi = 1 \sim 2\text{mm}$ 정도의 scoria와 pumice를 포함하고 있다. G3층은 입경 $\phi = 10 \sim 120\text{mm}$ 정도의 원력이 많고, 장소에 따라서는 pumice를 동반하는 loam층이 섞여 있다. 전체적으로 함수율이 대단히 높은 대수층을 이루고 있다. 중간에 TP층이 끼여 있는 L4층은 약간 점토질이고, 입경 $\phi = 2 \sim 5\text{mm}$ 정도의 pumice와 scoria 또는 $\phi = 50\text{mm}$ 이하의 안산암의 자갈이 혼재되어 있으며, 함수율은 높다. L4층의 하부에서 기반암까지의 퇴적층 역시 두꺼운 loam층과 사력층이 서로 호층을 이루고 있으나, 이를 일괄해서

G4층으로 구분하였다.

이와 같이 4개의 사력층은 4개의 대수층으로 간주할 수 있다. 제4 대수력층(G4)은 L4층과 제3기 중신세 탄자와 층군의 기반암 사이를 메우고 있는 퇴적물로서 탄자와 산지에서 운반된 사력과 하코네·고 후지화산의 화산재층이 호층을 이루는 피압대수층이다. 제3 대수력층(G3)은 TP층의 퇴적에 의해 하도가 변경된 고 시주하찌세(四十八瀬)천과 고 미즈나시천이 분지의 남쪽 즉, 오이소 구릉으로 각각 남하하면서 퇴적된 하천퇴적물로서 비교적 그 범위는 넓다. 제2 대수력층(G2)은 시부사와 단층의 활동으로 고 시주하찌세천과 고 미즈나시천의 하도가 점차 동쪽으로 변경되고, 합류하여 오이소 구릉 쪽으로 남하하면서 형성된 하천퇴적물이다. 형성시기는 약 30,000~40,000년전으로 생각된다. 제1 대수력층(G1)은 시부사와 단층의 활동이 지속되면서 오이소 구릉의 융기가 점차 진행되어 합류하던 고 시주하찌세천과 고 미즈나시천은 다시 분리되어, 고 시주하찌세천의 하도는 현 하천 하도로 복귀하고, 고 미즈나시천의 하도는 더욱 동쪽으로 이동하면서 현 하천 주변에 퇴적한 사력층이다. 형성시기는 약 20,000~30,000년전으로 생각된다. 제1 대수력층의 퇴적범위는 제2 대수력층보다 좁게 나타나고 있다. 그리고, 제3 대수력층은 고 시주하찌세천과 고 미즈나시천에 의해 공급된 퇴적물로서 거의 분지전역에 걸쳐 평균 10~40m의 깊이에 분포하고 있다. 국지적인 지형요인에 의해 제3 대수력층의 지하수가 피압되는 가능성이 있으며, 분지의 전체 지하수분(地下水盆)에 있어서 지하수량이 비교적 안정되어 있다.

이상과 같은 결과에 의해서 분지의 퇴적물은 퇴적환경에 따라 크게 TP층(L4)을 경계로 그 하부를 고기 loam층, 그 상부를 신기 loam층이라고 하고, 지하수의 구분 역시 대수층의 퇴적환경 차이를 근거로 TP층을 경계로 상층부를 천층지하수, 하층부를 심층지하수로 구분하는 것이 타당하다고 생각한다(Figure 4).

Figure 5는 천층지하수와 심층지하수간의 순환장인 제3 대수층의 기저기반이다. 미즈나시천 우안을 중심으로 고 미즈나시천 하도로 보이는 골이 형성되어 있고, 골은 선양부에서 깊고, 선정부에서

얕다. 미쯔나시천 좌안에서는 하다노 역단층의 영향으로 선정부를 향해 완만한 사면을 이루고 있으나, 선단부를 향해 급격한 사면을 이루는 구릉이 나타난다. 그리고, 현 하천 하도를 중심으로 선단부

에서 비교적 넓고, 선양부에서 급격하게 좁아지는 골이 형성되어 있다. 이와 같이 복잡한 지질구조는 지하수의 유동을 결정하는 중요한 요인으로 볼 수 있다(Freeze and Witherspoon, 1967, 1968).

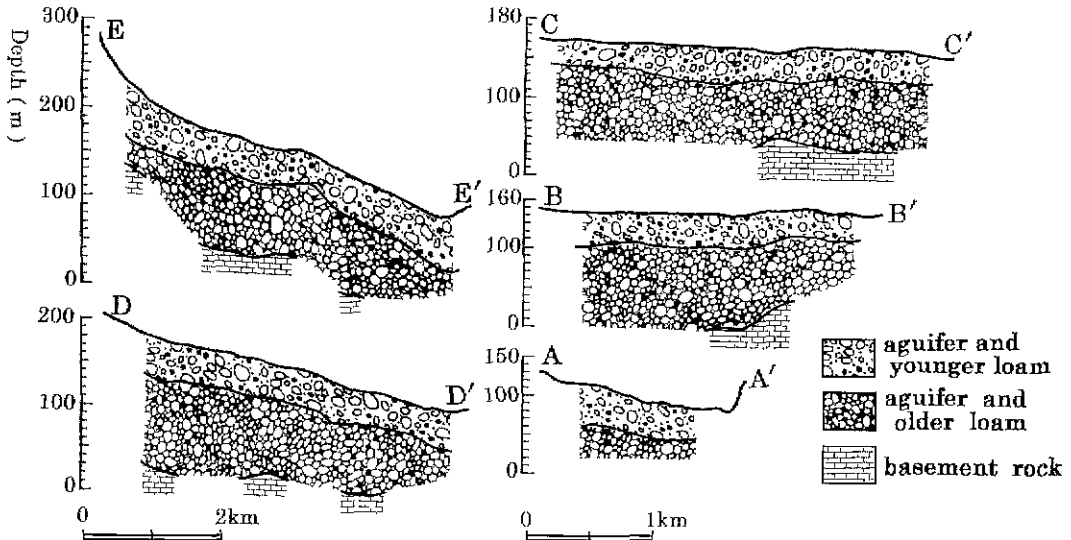


Figure 4. Cross-section profiles of geology

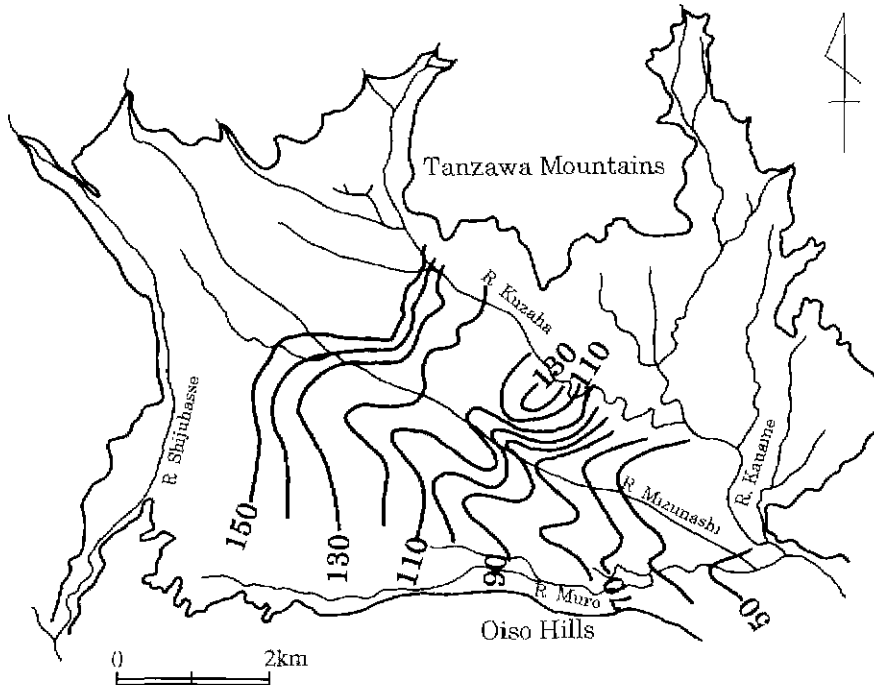


Figure 5. Contour map of basal level of shallow groundwater aquifer and younger loam formation(m)

3. 地下水位の變化

1) 地下水の 利用

하다노 분지의 지하수 이용은 역사가 길고, 현 영수도(縣營水道)¹⁾의 도입 이전에는 분지의 지하수가 상수도의 주요 수원으로서 큰 역할을 담당하였으며, 1995년 현재 수원별 급수량의 60% 이상을 지하수가 차지하고 있다. 대체적으로 일반 민가 우물은 천층지하수이고, 지하수면(地下水面)이 얇은 선단부와 분지 주변에 분포하고 있다. 하다노 분지는 1890년부터 상수도가 보급되기 시작한 탓에 현재 민가 우물에서 양수는 극히 미비한 정도이다. 그러나, 상수도와 공업용수 취수관정의 케이싱(casing) 심도는 80~90m에 달하여, 심층지하수를 양수하고 있다. 상수도의 취수관정은 분지의 전역에 걸쳐 분포하고 있는 반면, 공업용 취수관정은 분지의 중앙부에 집중되어 있다.

하다노시는 1970년 이후 급속히 증가하는 물 수요에 대처하고, 지하수의 과잉양수로 인한 지하수위 저하를 방지하기 위해 공업용 양수량의 증가를 억제하고, 현영수도의 도입량을 점차 증가시켜왔다²⁾. 그 결과, 1975년 상수도 전 급수량 중 지하수가 차지하는 비율은 약 84.8%였으나, 1994년에는 약 65%까지 감소했다. 그러나, 인구증가와 함께 상수도 취수관정으로부터 지하수 양수량은 점진적으로 증가하여, 1975년에는 $13.53 \times 10^6 \text{m}^3 \cdot \text{y}^{-1}$ 이

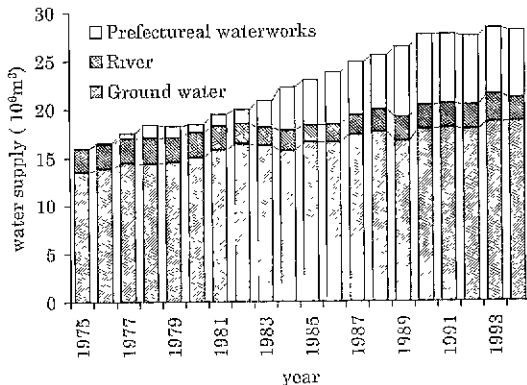


Figure 6. The source of municipal water supply in the Hadano Basin

였던 것이 1994년에는 약 1.4배 많은 $18.65 \times 10^6 \text{m}^3 \cdot \text{y}^{-1}$ 이었다. 또한, 1981년 이후 하수 처리용수로써 지하수가 양수되고 있어 하수 처리시설의 확대에 따라 지하수 양수량은 해마다 증가될 것으로 보인다(Figure 6).

2) 地下水位の 經年變化

지하수위의 변화는, 빗물에 의한 함양과 용출, 양수간의 상호관계에서 발생하지만, 하다노 분지와 같이 지형적으로 독립된 유역에서는 1년을 수년(水年)으로 할 경우, 지하수위의 변화는 거의 제로에 가깝다. 그러나, 분지의 도시화에 수반되어 빗물의 침투량은 크게 줄고, 지하수의 양수량은 매년 증가하는 한편, 근년에 연평균 강수량을 밑도는 소우년이 지속되어 지금까지 고갈된 적이 없었던 우물까지 고갈되는 현상이 일어나고 있다.

Figure 7은 지하수의 관측지점을 나타낸 것이고, Figure 8은 1973년부터 1995년까지의 심층지하수의 수위변화이다.

Figure 8에서의 수위는 월평균 정수위(靜水位)를 나타낸 것이다. D7, D11, D14지점은 선단부에 위치한 상수도와 공업용수의 취수관정이고, 분지의 지하수 양수량이 증가함에 따라 해마다 점차 저하되는 경향을 보이고 있다. 즉, D7지점에서는 연평균 약 -0.14m, D11지점과 D14지점에서는 -0.12m씩 저하되고 있다. 그러나, 선단부에 위치한 D3지점에서는 선단부와는 다르게 수위변동폭은 적고, 연평균 수위저하는 거의 일어나지 않고 있다. 이는 탄자와 산지에서 함양된 심층지하수가 구 하천의 하도를 따라 분지의 북서부에서 동남부를 향하여 유동하고, 그 대부분이 선단부에서 저유되는 수문지질학적 구조에 기인한 것이라 볼 수 있다.

그 외 각 관측지점의 지하수위 특성은 1~6월과 8~10월에 걸쳐 내리는 강수량에 대하여 지하수위가 상승하며, 1년 중 봄에 지하수위가 가장 낮고, 가을에서 겨울에 걸쳐 가장 수위가 높은 1년 주기를 가지고 있다. 그리고, 천층지하수의 수위는 강우와 거의 동시에 급격하게 상승하는 반면 심층지하수의 수위는 비교적 완만하게 변화하고, 강우 후 약 15일에서 1개월 후에 그 침투가 나타난다.

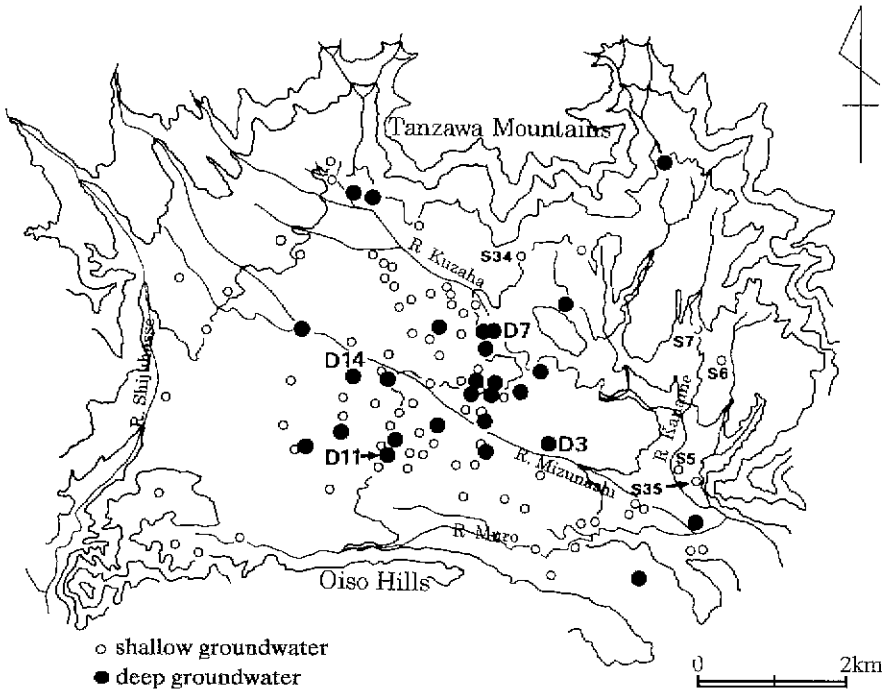


Figure 7. Distribution of observation well

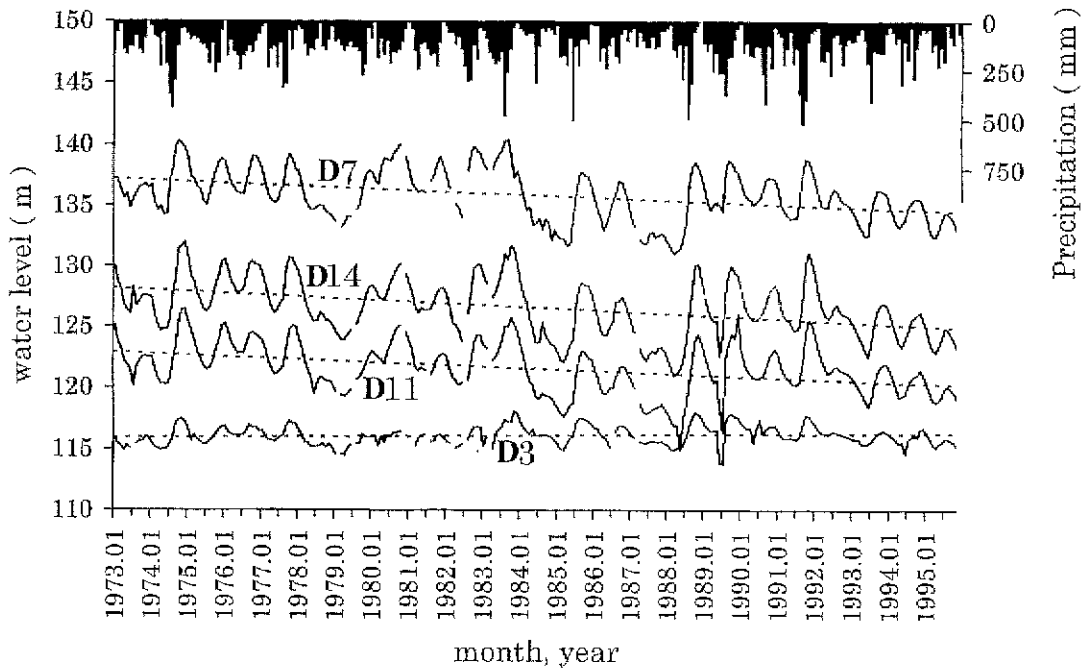


Figure 8. Change in deep groundwater level(m)

3) 地下水位 季節變動量의 空間分布

Figure 9는 1994년 1~12월 사이의 천층지하수 위와 심층지하수위의 계절별 변동량을 나타낸 것이다. 지하수위의 변동량은 하다노시 상수도국의 관측정(천층지하수: 6개소, 심층지하수: 16개소)과 하다노시 환경부의 관측정(천층지하수: 49개소, 심층지하수: 9개소)을 대상으로 월별 최저수위와 최고수위간의 차를 구한 것이며, 물이 고갈된 지점은 대상에서 제외했다. 특히, A층과 G1층, G2층에 위치한 관측정에서는 2~4월 사이에 고갈되는 곳이 많이 나타난다.

먼저, 천층지하수의 변동량은 분지의 북부에 속하는 그쯔하(葛葉)천의 중상류지역에서 5m 이상이었고, 시주하찌세천과 미쯔나시천 사이와 카나메(金目)천 상류, 선단부 등의 분지 주변지역에서 가장 적은 0.5m였다. 다시 말해서, 분지의 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 그리고 북서부에서 동남쪽으로 갈수록 천층지하수위의 변동폭이 작아지는 경향을 나타낸다. 특히 미쯔나시천을 중심으로 나타

난 변동량의 공간분포는 Figure 5에서 제시된 대수층의 기저 기복량과 일치한다.

심층지하수위의 변동량도 천층지하수와 거의 같은 경향을 나타내며, 천층지하수에 비해 완만하게 변화한다. 선단부에서 3~4m, 선암부에서 3~5m, 선단부에서는 0.5m의 지하수위 변동량이 나타난다.

4. 地下水 流動系의 推定

지하수의 유동계에 대한 연구는 Hubbert(1940)가 지하수 유동을 위치에너지에 지배되는 것으로 간주하고, 지하수면의 기록을 들어 지하수의 유동을 모델화하였다. 그 후 Hubbert(1940)의 연구를 기초로 지하수의 광역적 유동에 관한 연구가 시작되었으며, 전자계산기의 발달과 함께 Toth(1962, 1963)와 Freese and Witherspoon(1967, 1968) 등에 의해 다양한 지형·지질분포 조건 하에서 광역지하수의 유동에 관한 검토가 이루어졌다.

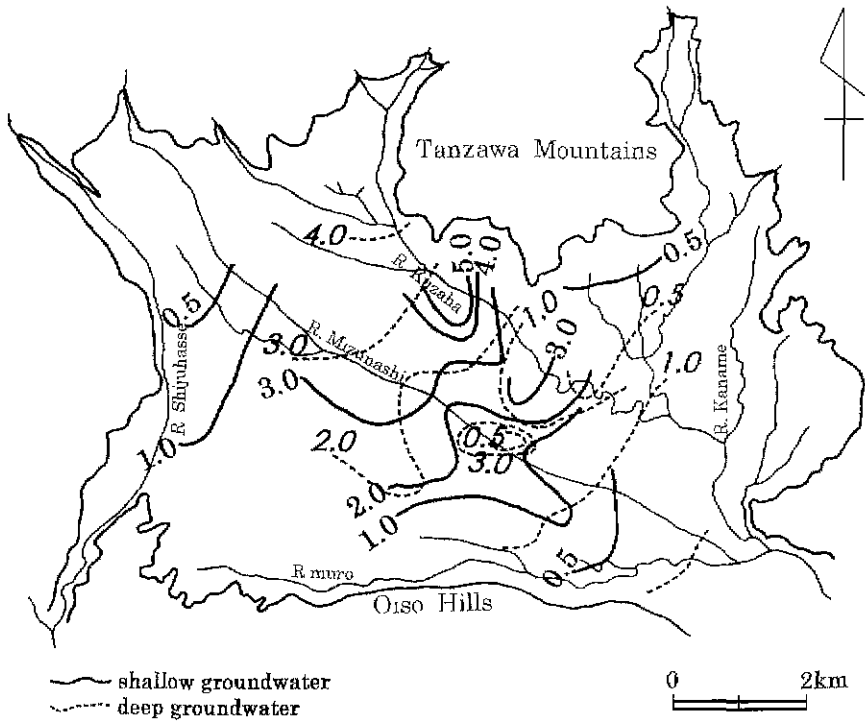


Figure 9 Spatial distribution of seasonal variation in groundwater level(m)

그 외에도 지하수의 추적자(tracer)로서 지하수 온을 이용한 연구(Yuhara et al., 1983)와 지하수의 화학적 조성으로부터 수계를 구분하는 연구(Ikeda, 1982), 그리고 안정동위원체를 이용한 지하수의 유동계 분석(Vogel and Van Urk, 1975, Ahn et al., 1981, Mizutani and Oda, 1983) 등이 최근에 유효한 수단으로서 인식되고 있으며, 특히 안정동위원체 분석은 지하수 유동구조를 밝히는 새로운 전기를 마련하였다고 볼 수 있다.

1) 水質特性

하천수를 포함하는 분지의 자연수는 전체적으로 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형이다. 그 중에서도 선암·선단부의 심층지하수가 가장 탁월한 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형이고, 분지내 천층지하수와 용수도 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형을 나타내지만, 분지의 동북부에 위치한 천층지하수(t5, t6)는 약간 CaSO_4 형에 속한다(Figure 10, Figure 7). 그리고 수질의 화학적 조성을 보자면, 용수는

선단 부의 심층지하수 보다 Mg^{2+} 의 농도가 높고, 심층지하수에 있어서는 선정부보다도 선단부에서 Cl^- 과 SO_4^{2-} 의 농도가 높게 나타난다. 선암부에서는 심층지하수의 Cl^- 과 SO_4^{2-} 농도보다도 천층지하수의 Cl^- 과 SO_4^{2-} 농도가 높게 나타나는 경향을 보이지만, 선단부로 갈수록 이러한 현상은 역전된다. 이상의 결과로부터 각 대수층의 성질 또는 지하수와외의 접촉면적과 접촉시간 등의 수문지질적 조건을 반영하고 있음은 물론이고, 상대적으로 수질농도가 높은 천층지하수가 선암부에서 선단부에 걸쳐 누수가 있음을 알 수 있다. 또한, 수질조성의 특성에 따라 분지의 지하수를 크게 심층지하수와 용수, 동북부의 천층지하수, 그 외 천층지하수로 구분할 수 있다.

2) 酸素同位體 組成에 의한 地下水 涵養源

1950년대초, 구각(具穀)의 산소동위원체 조성으로부터 고 해수온을 추정하는 방법이 고안되어, 수

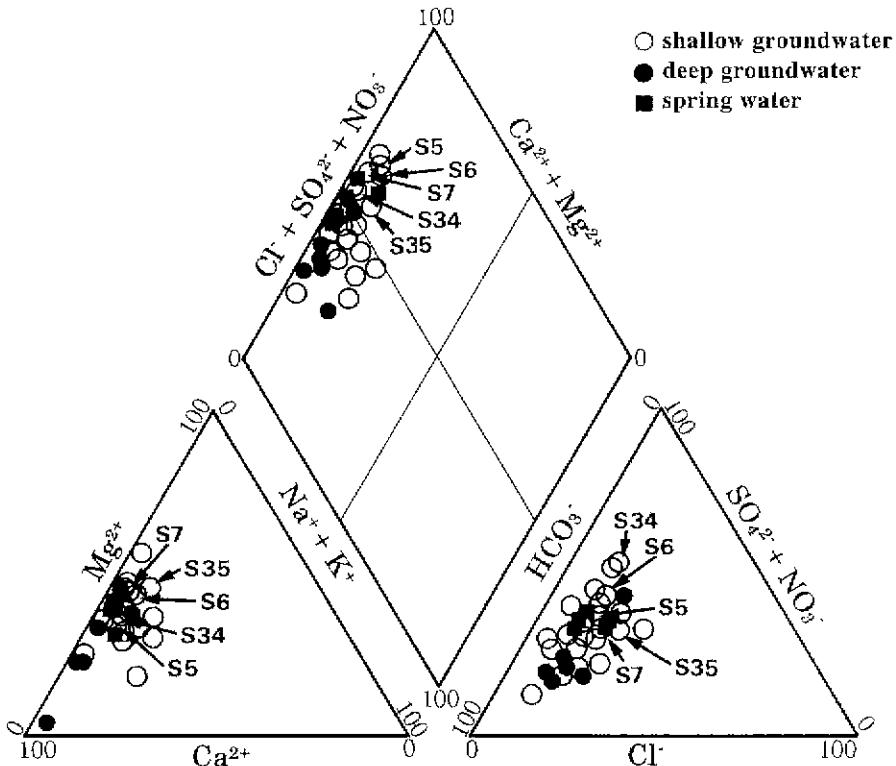


Figure 10. Trilinear diagram of groundwater

문학 분야에서도 지하수 유동계를 추정하는 유용한 방법으로 동위체 분석이 널리 이용되어 왔다. 즉, 물의 동위체 조성은 증발과 응축과정 속에서 변화하지만, 다른 수계와 혼합되지 않는 한 지하에 침투하기 이전에 형성된 조성을 갖는 특성을 이용하여 안정동위체는 지하수의 함양원 또는 유동계를 파악하는 하나의 수단으로서 간주되고 있다(Vogel and Van Urk, 1975, Kato et al, 1987).

Waseda와 Nakai(1983)가 후지산(富士山) 산록에서 용수를 포함하는 지하수의 산소동위체 조성을 연속 관측한 연구결과에 의하면, 용수량과 지하수위는 강수량과 상관관계를 가지고 크게 변하는데 비하여, 산소동위체 조성은 계절적 변화를 보이지 않고, 1년 중 거의 일정한 값을 나타낸다. 또한 하천수의 대부분은 지하수의 용출에 의해 형성된 것으로 일반적으로 하천수의 산소동위체 조성은 연간 일정하며, 집중수에 내리는 강수의 연평균 값을 나타낸다고 간주되고 있다(Kusakabe et al, 1970, Kato et al, 1987).

하다노 분지의 산소동위체 조성비($\delta^{18}O$)는, 천층 지하수(○)에서 $-7.1 \sim -7.5\text{‰}$, 심층지하수(●)에서 $-7.7 \sim -7.9\text{‰}$ (단, 오차가 큰 선단부의 -7.2 를 제외하자면), 용수(■)에서 $-7.7 \sim -7.8\text{‰}$, 하천(□)상류에서 $-7.8 \sim -7.9\text{‰}$, 하천하류에서 $-7.3 \sim -7.6\text{‰}$ 를 나타냈다. 그리고, 산소동위체 조성비의 평면분포는 Figure 11과 같이 나타낼 수 있으며, 다음과 같이 결론을 내릴 수 있다.

① 하천상류와 용수, 심층지하수의 산소동위체 조성비는 거의 동일하므로, 심층지하수와 용수의 주요 함양원은 탄자와 산지의 계류수입을 암시하고 있다. ② Waseda와 Nakai(1983)에 따르면, 일본 중부지역에서 강우의 산소동위체 조성비에 대한 고도효과는 $-0.25/100\text{m}$ 이다. 따라서, 빗물의 직접적인 영향을 받고 있는 선정부의 천층지하수 채수지점을 제외한다면, 선정부의 천층지하수의 산소동위체 조성비가 선양 또는 선단부의 천층지하수에 비해 약 $-0.1 \sim -0.2\text{‰}$ 낮다는 것은 고도효과에 의한 것으로 보인다. ③ 심층지하수와 천층

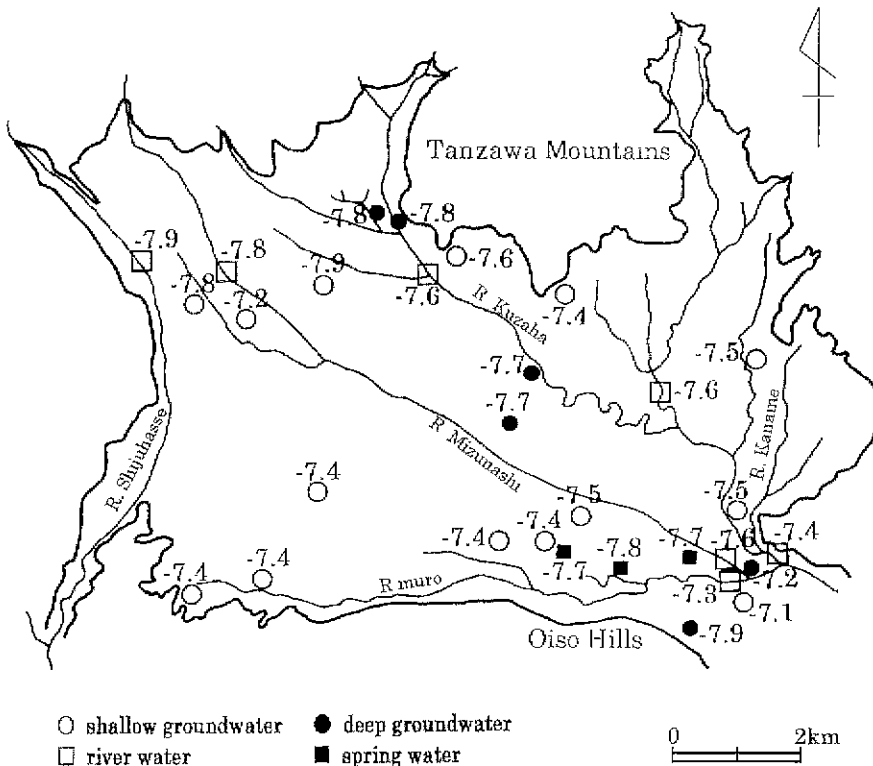


Figure 11 Distribution of $\delta^{18}O$ value(‰) of river water, spring water and groundwater

지하수의 산소동위원체 조성비의 차이는 평균 $-0.4 \sim -0.2\%$ 이다. 이는 산소동위원체의 고도효과 즉, 높은 지역에서 공급된 물일수록 낮은 값을 갖게 되므로, 심층지하수와 천층지하수의 함양원은 다르다고 보여진다.

이상의 결과로, 하다노 분지의 천층지하수의 공급원은 분지내에 내리는 강우이고, 심층지하수와 용수는 천층지하수의 누수에 의한 것이라기 보다는 주요 공급원은 탄자와 산지에서 흘러내리는 계류수 즉, 산지의 지표수라 판단된다.

5. 地下水環境에 미치는 人爲的 影響

지하수의 고갈과 오염 등과 같은 지하수 장애가 심각한 환경문제로서 주목받게 된 것은 최근의 일이다. 특히 일본의 경우에는 1982년에 실시된 환경청 지하수 오염조사가 세상에 알려지면서부터 지하수의 오염에 대한 사회적 관심이 높아져 왔다.

하다노 분지에서도 지하수의 오염문제가 이미 사회문제화한 것은 주지의 사실이고, 최근 가장 심각한 문제로 대두되고 있는 것은 유기염소계에 의한 오염이다. 그 대책으로서 하다노시는 1993년에 「하다노시 지하수의 오염방지 및 정화에 관한 조례(秦野市地下水汚染の防止及び浄化に關する條例)」를 제정하였다.

여기에서는 인위적인 요인에 의한 지하수 오염의 지표로서 Cl^- 과 NO_3^- 을 대상으로 지하수의 수

질형성에 미치는 영향을 검토하였다. Fig. 12는 Cl^- 농도와 고도간의 관계를 나타낸 것으로 채수지점이 낮을수록 Cl^- 농도는 높아지는 경향이 있다. 이러한 경향은 천층지하수(○)와 심층지하수(●) 모두 현저하게 나타난다. 특히, 심층지하수의 경우에는 채수지점의 수가 적기 때문에 분지 전체에 대해 단정적으로 논할 수는 없으나, 선정부와 선양부 그리고 선단부에 대한 각각의 대표지점에서는 선정부에서 $8.2 \sim 7.2 mg \cdot l^{-1}$ 이었던 것이 선양부에서 $16.8 \sim 10.6 mg \cdot l^{-1}$ 로 증가하여, 선단부에서는 가장 높은 $25.4 \sim 28.0 mg \cdot l^{-1}$ 을 나타낸다. NO_3^- 농도와 고도간의 관계에서도 마찬가지로 Cl^- 와 동일한 결과를 얻었다. 이는 선정부와 선양부에서 함양된 천층지하수의 일부가 심층지하수에 누수된 결과로 볼 수 있다. 다시 말해서, 비교적 인위적인 영향을 크게 받는 천층지하수가 분지의 수문지질 구조적 요인에 지배를 받아 선단부에 오염물을 집적시키고, 그 영향은 선단부의 심층지하수에서 더욱 크게 나타났다.

6. 結 論

1960년대 이후 도시화와 공업화가 급속하게 진행되고 있는 하다노 분지를 대상으로 분지의 수문 지질학적 환경을 명확히 고찰하고, 수문환경 변화에 미치는 인위적인 요인을 시계열적·종합적 관점으로 분석했다. 그 결과를 요약하면, 다음과 같다.

1) 분지의 대수층은 퇴적환경에 따라 TP를 경계로 크게 신기 loam층과 고기 loam층으로 분류할 수 있으며, 전자의 지하수를 천층지하수, 후자의 지하수를 심층지하수로 분류할 수 있다.

2) 그리고, 지하수의 순환장으로 간주되는 제3력층(TP층의 상부)의 기반은 미쯔나시천 우안을 중심으로 고 미쯔나시천 하도로 보이는 골이 선양부에서는 깊게, 선정부에서는 얕게 형성되어 있다. 미쯔나시천 좌안에서는 하다노 역단층의 영향으로 선정부쪽으로는 완만한 사면을 이루고, 선단부쪽으로는 급사면을 갖는 구릉을 형성하고 있다.

3) 지하수의 계절적 변동량은 분지의 북서부에서 남동부로 향할수록 크고, 천층지하수보다도 심

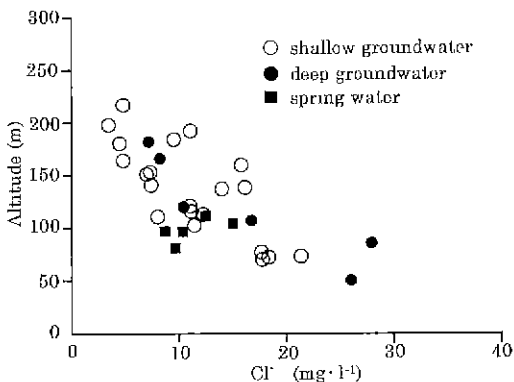


Figure 12. Distribution of $\delta^{18}O$ value(‰) of river water, spring water and groundwater

층지하수에서 그 변화량은 작게 나타났다. 그리고, 천층지하수의 공간적 변화량은 제3 력층의 기저고와 일치하는 것으로 보아 대수층의 기저기복이 지하수의 수위변동 또는 유동에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 사료된다.

4) 지하수의 과잉양수로 인한 지하수 수지의 불균형으로 선양부의 심층지하수가 연평균 0.12~0.14m씩 저하되는 경향을 보이고 있다.

5) 지하수의 화학적 조성은 전반적으로 Ca(HCO₃)₂형이지만, 분지의 동북부 천층지하수는 CaSO₄형에 가깝고, 동남부의 용수군은 Ca(HCO₃)₂-CaSO₄형의 중간형이다.

6) 심층지하수와 동남부 용수군은 천층지하수로부터의 누수이기보다는 탄자와 산지의 지표수가 함양한 것이며, 천층지하수는 분지내에 내린 강수에 기인한 것으로 보인다.

7) Cl⁻, NO₃⁻농도가 고도와 높은 상관성을 갖는 것은 분지의 지하수 수질형성에 인위적인 영향이 크게 미치는 결과이다. Cl⁻, NO₃⁻농도는 심층지하수보다 천층지하수에서 높은 경향을 나타내지만, 선단부의 심층지하수에서 가장 높게 나타난다. 이는 선양부에서 함양한 천층지하수의 일부가 심층지하수에 침투함에 따라 선단부의 심층지하수에서 집적되어 야기된 것이다.

이상의 결과를 통해, 그 동안 불분명한 분지의 퇴적물에 대한 층서와 대수층의 구분을 밝힐 수 있었으며, 산소동위원체를 이용한 지하수의 함양원의 추정, 분지의 물수지 분석과 오염물 확산 및 정화에 대한 중요한 자료를 제공하였을 뿐만 아니라, 도시화 과정에서 나타나는 수문환경을 정량화하였다는 점에서 그 가치가 있으리라 생각한다.

謝辭

본 연구를 진행하는데 있어 立正大學 지구환경과학부 환경시스템학과 新井正 교수와 高村弘毅 교수를 비롯한 교수님들의 지도가 있었으며, 神奈川縣溫泉地學研究所의 大山正雄 박사와 板寺一洋 씨, 長瀬和雄 박사의 배려와 협조가 있었습니다. 그리고, 귀중한 자료를 제공해 주신 秦野市 관계자와 地質工學(株)의 小川久 사장님께 감사를 드립니다.

註

- 1) 미국과 일본에서는 각각 「RCRA: The U.S. Resources Conservation and Recovery(1976)」, 「수질오탁방지법 시행령(1970)」을 제정하여 토양과 지하수 등에 대한 오염물질을 규제하고 있으며, OECD에서는 가맹국간의 「PRTR: Pollutant Release and Transfer Register」의 협정을 맺고 있다.
- 2) 이마이쯔미면은 시부사와 단층의 활동으로 하도가 변경된 구 미쯔나시천과 구 시주하찌세천이 합류하여 형성된 지형면으로서 형성시기는 약 3만년 전후로 추정되고 있다(A.K.Q.R., 1987).
- 3) 오시리면은 이마이쯔미면 형성 후 시부사와 단층활동이 점차 서쪽에서 동쪽으로 걸쳐 일어남으로써 오이소 구릉을 상승시켰고, 구 시주하찌세천은 다시 현재의 하도로 회복하게 되었다. 시부사와 단층운동으로 형성된 무로(室)천과 미쯔나시천이 합류하여 그 유로가 점차 동쪽으로 이동하는 과정에서 형성된 지형면을 오시리면이라 한다. A.K.Q.R.(1987)에 따르면 약 15만년전에서 1만년 전 사이에 오시리면이 형성된 것으로 보인다.
- 4) 광역자치단체 즉, 카나자와현이 개발·관리하는 상수도를 의미한다.
- 5) 하다노시는 1975년에 「하다노시 지하수의 보존 및 이용의 적정화에 관한 요망(秦野市地下水の保全及び利用の適正化に關する要綱)」을 제정하고, 지하수 보호사업을 실시하고 있다.

文獻

건설교통부, 1995, 지하수조사연보, 9-38.

梁海根, 1995, "인위적인 요인이 하천의 유량과 수질 변화에 미친 영향 : 일본 하다노(秦野) 분지를 사례로", 대한지리학회지, 30, 242-254.

_____, 1998, "光州地域의 地下水 利用과 保存 對策", 광주·전남비전 21, 16, 47-60.

Ahn, J. S., Kim, J. S. and Kim, Y. S., 1981, Environmental isotope-aided studies on river water and groundwater interaction in the region of Seoul, *Jour. Korean Nuclear Soc.*, 13, 85-96.

- Association for Kanto Quaternary Research, 1987, Stratigraphy and geologic structure of Oiso Hills, *Bull. Assoc. Kanto Quat. Res.*, 13, 3-46(in Japanese).
- Freeze, R. A. and Witherspoon, P. A., 1967, Theoretical analysis of regional groundwater flow: 2. Effect of water-table configuration and subsurface permeability variation, *Water Resour. Res.*, 3, 623-634.
- , 1968, Theoretical analysis of regional groundwater flow: 3. Quantitative interpretation, *Water Resour. Res.*, 4, 581-590.
- Hiraga, S., Hirota S. and Kasai, M., 1971, Gravity survey of Hadano Basin, *Bull. Hot Spring Res. Inst. Kanagawa Pref. Japan*, 2, 83-87(in Japanese with English abstract).
- Hiraga, S., Odaka, S., Hirota, S., Oyama, M. and Ito, H., 1972, Seismic survey in Hadano Basin, *Bull. Hot Spring Res. Inst. Kanagawa Pref. Japan*, 3, 65-72(in Japanese with English abstract).
- Hubbert, M. K., 1940, The theory of groundwater motion, *Journal Geology*, 48, 785-944.
- Ikeda, K., 1982, A study on chemical characteristics of groundwater in Fuji Area, *Jour. Jap. Assoc. Hydrol. Sci.*, 24, 77-93(in Japanese with English abstract).
- Kato, T., Nakai, N. and Nishiyama, T., 1987, Isotopic compositions and sources of natural water in Tibetan Plateau, *Geochemical Journal*, 21, 13-20(in Japanese with English abstract).
- Kusakabe, M., Wada, H. and Matsuo, S., 1970, Oxygen and hydrogen isotope ratios of monthly collected waters from Nasudake Volcanic Area, Japan, *Journal of Geophysical Research*, 75, 5941-5951.
- Machida, H. and Moriyama, A. 1968, The development of Mt. Fuji and Mt. Hakone volcanoes analysed from the tephrochronology study in the Oiso Hills, *Geographical Review of Japan*, 41-A, 241-257(in Japanese with English abstract).
- Miyaoka, K., 1995, Relationship between hydrogeology and groundwater flow system in the Imaichi Alluvial Fan, Tochigi Prefecture, Japan, *Geographical Review of Japan*, 68-A, 285-302(in Japanese with English abstract).
- Mizutani, Y. and Oda, M., 1983, Stable isotope study of groundwater recharge and movement in the Shogawa Fan, Toyama, *Geochemical Journal*, 17, 1-9(in Japanese with English abstract).
- Nagase, K., Oki, Y., Ogino, K., Ykoyama, T. and Ozawa, K., 1972, Geology of Hadano Basin, *Bull. Hot Spring Res. Inst. Kanagawa Pref. Japan*, 3, 57-64(in Japanese with English abstract).
- Nagase, K., Kimura, M., Aihara, M., Kobayashi, T., Shimada, T. and Yamaya, H., 1982, The separation of the Hadano reverse fault, *Jour. Geol. Soc. Japan*, 88, 401-403(in Japanese).
- Nagase, K. and Oki., Y., 1989, Groundwater and these use of the Hadano Basin, *Groundwater, Well and Pumping*, 31(4), 11-27(in Japanese).
- , 1992, Kobo Spring in Hadano Springs-a visit to valuable water spring(20)-, *Jour. Groundwater Hydrol.*, 34, 293-302(in Japanese).
- Oki Y., Odaka, S., Ozawa, K., Yokohama, T. and Nagase, K., 1971, Hydrogeology of Hadano Basin, *Bull. Hot Spring Res. Inst. Kanagawa Pref. Japan*, 2, 31-55(in Japanese with English abstract).
- Toth, J., 1962, A theory of groundwater motion in small basins in central Alberta, Canada, *Jour. Geophys. Res.*, 67, 4375-4387.
- , 1963, A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins, *Jour. Geophys. Res.*, 68, 4795-4812.
- Yamazaki, H., 1962, On the water sources in Hadano Basin, *Ann. Tohoku. Geogr. Assoc.*, 14, 93-102(in Japanese with English abstract).

- Yang, H. K., 1995, Changes in runoff source and runoff pattern due to urbanization in the Hadano Basin, *Jour. Jap. Assoc. Hydrol. Sci.*, 25, 105-114(in Japanese with English abstract).
- Yokoyama, T., Ogino, K., Oki, Y., Nagase, K. and Ozawa, K., 1972, Hydrological study of groundwater in Hadano Basin, *Bull. Hot Spring Res. Inst. Kanagawa Pref. Japan*, 3, 41-56(in Japanese with English abstract).
- Yoshikawa, S., Satoguchi, Y. and Nagahashi, Y., 1996, A widespread volcanic ash bed in the horizon close to the Pliocene-Pleistocene boundary: Fukuda-Tsujiatagawa-Kd38 volcanic ash bed occurring in central Japan, *Jour. Geol. Soc. Japan*, 102, 258-270(in Japanese with English abstract).
- Yuhara, K., Takeuch, A., Kitaoka, K., Ushima, K. and Yamamoto, T., 1983, Flow system of shallow groundwater in Hohu Plain, *Jour. Groundwater Hydrol.*, 15, 17-70(in Japanese with English abstract).
- Vogel, J. C. and Van, U. H., 1975, Isotopic composition of groundwater in semi-arid regions of Southern Africa, *Journal of Hydrology*, 25, 23-36.
- Waseda, A. and Nakai, N., 1983, Isotopic compositions of meteoric and surface waters in Central and Northeast Japan, *Geochemical Journal*, 17, 83-91(in Japanese with English abstract).