

溶存成分及び同位体に基づく佐賀平野の 地下水循環に関する調査結果と考察

八谷陽一郎¹・坂井晃²・三浦哲彦³・陶野郁雄⁴

¹正会員 工博 佐賀県環境センター (〒849-0932 佐賀市鍋島町八戸溝 119-1)

²正会員 工博 佐賀大学助教授 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

³正会員 工博 佐賀大学教授 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁴正会員 工博 国立環境研究所水圏環境部 (〒305-0053 茨城県つくば市小野川 16-2)

典型的な低平地環境を形成する佐賀平野においては、従来から地下水の利用が盛んであったため、地下水揚水に伴う地盤沈下や地下水の塩水化などの地盤環境に関する問題が生じている。地盤環境を保全・管理していくためには、健全な地下水環境を確保することが重要である。近年、天然の放射性物質、環境同位体などの地下水環境を調査することにより、地下水の履歴等に関する評価が可能となってきた。本研究では、地盤環境の管理に資することを目的として、各種の溶存成分及び同位体に基づく地下水環境に関する調査を行うとともに、佐賀平野の地下水循環等に関する考察を行った。その結果、佐賀平野の地下水は、三方を囲む山地部を起源として水平涵養され、地下での滞留時間は山麓部では数10年、有明海に近い平野部では最大10⁸年程度にも及ぶことが明らかになった。

Key Words : *geoenvironment, groundwater circulation, tracer method, radioactive isotopes, stable isotopes, dissolved gasses*

1. はじめに

脊振山系と有明海の中間に位置し、約440km²の広がりを持つ佐賀平野は、約45%が平均満潮面より低いレベルにあるために典型的な低平地環境となっている。表層部には含水比の高い軟弱な粘土層が10~30mの厚さで堆積している。平野部を流れる河川の多くは感潮域がその中流部にまで及ぶことから河川水の利用が難しく、1950年代中頃から地下水の利用が盛んになった。そのため、地下水揚水に伴う広域な地盤沈下や地下水塩水化などの地盤環境に関する問題が生じており、地域の社会基盤整備に与える影響は深刻なものとなっている¹⁾。これらの特有な地盤環境を管理していくための各種の取り組みが行われているが、地下水の管理はその柱の一つである。このため、被圧地下水を含めた三次元的な水の循環を把握することが必要であり、とりわけ、地下水の起源、循環速度、地下滞留時間等を知ることが重要である。

これまで、佐賀平野の地下水の化学組成をもとに地下水の起源や塩水化の問題が検討され、いくつかの成果が得られている^{2), 3), 4), 5), 6)}。これらは、地下水のイオ

ン成分等を天然のトレーサーとして、地下水の循環に関する情報を得ようとする取り組みである。近年、低線量の放射線測定技術の開発に伴い、地下水中の天然の放射性同位元素をトレーサーとした地下水環境調査が可能となってきた⁷⁾。放射性同位元素は、その半減期に従って減衰するので、これを調べることによって地下水の滞留時間や年代についての直接的情報を得ることができる⁸⁾。また、微量物質の質量分析装置の利用によっても、地下水の年代や起源を調査できる⁹⁾。佐賀平野においては、地下水の起源や年代などに関する調査はほとんど行われていない。本研究は、佐賀平野における地下水のイオン分析、放射性同位元素分析、溶存ヘリウム分析、安定同位体分析などの地下水環境に関する調査を行い、これらの結果に基づいて地下水の循環等について考察し、地盤環境の保全に役立てようとするものである。

2. 佐賀平野の堆積環境

佐賀平野は、北を中世代花崗岩と若干の変成岩で構成

される脊振山地、東を變成岩の筑紫山地、西を杵島山地、南を有明海に囲まれている。また、これらの山地の裾野には、洪積段丘及び沖積扇状地が広がっている¹⁰。

佐賀平野の地質構成については、有明海グループ¹¹が有明海沿岸各地の干潟及びその延長部の海底でのボーリング資料とコアを調査し、上から有明粘土層、島原海灣層、新期阿蘇溶岩、未区分洪積層という地下の層序を提示し、これと郷原等¹²の表層の層序と組み合わせて有明海沿岸の第四系の基本層序とした。下山等¹³は、最近のテフラ層序の確立や、新たに増大した試錐試料に基づいて、佐賀地区の地下地質について、完新統の細分化と阿蘇-3以降の地層区分を行い、各地層の堆積環境を明らかにした。これによると、第四系の地下層序は下から牛屋層、川副層（立石層）、中原層、高木瀬層、阿蘇-4火砕流堆積物、三田川層、蓮池層、有明粘土層、人工堆積物となっている。これらの層のうち、高木瀬層と有明粘土層は、それぞれ後期更新世と完新世の高海面期を代表する海成層である。

完新世粘土は、海成粘土である有明粘土層と非海成粘土である蓮池層に区分されており、平均的に10～30mの層厚で堆積している。透水性に乏しいため地下水に対しては加圧層となっている。また、更新統の上部（中原層）及び下部（川副層）に比較的良好な砂礫層が存在し、被圧帯水層を形成している。従って、佐賀平野においては、一般に、地下水の垂直涵養はほとんどなく三方を囲む山地部から水平涵養されているものと考えられている。

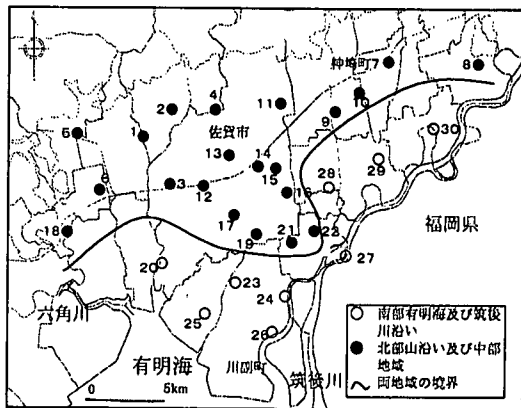


図-1 地下水質調査地点図（佐賀地区）

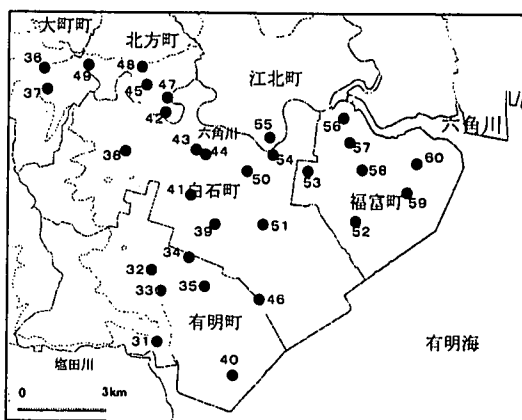


図-2 地下水質調査地点（白石地区）

3. 地下水質の調査

1995年に白石地区（佐賀平野の西部地区）30カ所、1996年に佐賀地区（佐賀平野の東部地区）30カ所の井戸において陽・陰イオン成分の水質調査を実施した（図-1、図-2参照）。水質分析試料は、汲み上げた地下水の水温が安定し、かつ濁りがなくなった時点で採取した。分析項目と分析方法を表-1に示す。なお、ここでは、採水時の地下水位については観測していない。

(1) 地下水の塩水化に関する指標

地下水の揚水に伴って、周辺の地域から陸水あるいは海水が流入してくる。したがって、地下水の塩水化の状況を調べることによって、地下水の供給源を推測することができる。また、塩水化の現状を把握しておくことは、地下水利用の上からも重要である。

地下水の塩水化の代表的指標として考えられるCl⁻イオンと井戸のストレーナー深度の関係を図-3に示す。佐賀地区では、浅層で濃度が高く、深くなるに従い濃度が低くなる傾向を示している。一般に、Cl⁻イオンは

表-1 地下水質の分析項目と分析法

分析項目	分析法
気温	水銀棒温度計（簡易現地測定）
水温	サーミスター温度計（現地測定）
pH	ガラス電極法（現地測定）
電気伝導度	電気伝導度計（現地測定）
溶存酸素	ウインクラー法
ナトリウムイオン	フレイム原子吸光法
カリウムイオン	イオンクロマトグラフ法
カルシウムイオン	イオンクロマトグラフ法
マグネシウムイオン	イオンクロマトグラフ法
塩化物イオン	イオンクロマトグラフ法
炭酸水素イオン	混合指示薬による滴定法
硫酸イオン	イオンクロマトグラフ法

地下水の塩水化の最も直接的な指標と考えられており、上水道については200mg/l以下¹⁰、農業用水については500mg/l以下¹⁰が、それぞれの水利用上の目安とされている。図-3を見てわかるように浅層の一部の地下水はこれらの目安を上回っており、いわゆる地下水障害が生じている。

また、塩水（海水）の影響の度合いを示すパラメータ

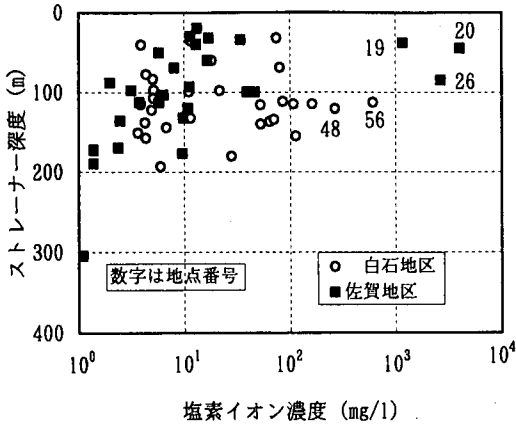


図-3 地下水のCl⁻イオン濃度の鉛直分布

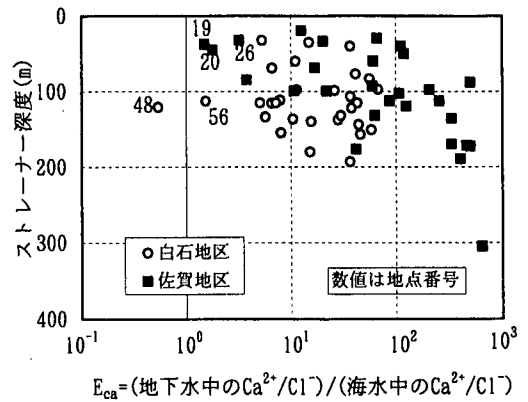


図-5 地下水のE_{ca}の鉛直分布

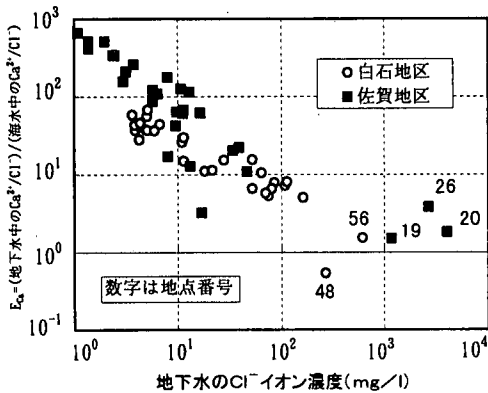


図-4 地下水のCl⁻イオン濃度とE_{ca}の関係

として $E_{ca} (= \text{【地下水中の } Ca^{2+}/Cl^{-} \text{】} / \text{【海水中の } Ca^{2+}/Cl^{-} \text{】})$ がしばしば用いられる^{3), 4), 6), 16), 17)}。 E_{ca} が1に近いほど海水に近いことを意味している。図-4は、この値をCl⁻イオン濃度に対してプロットしたものである。 E_{ca} はCl⁻イオン濃度増加に伴って1に近づくことから、Cl⁻イオンは海水に起因することを示唆している。また、図-5に E_{ca} と井戸のストレーナー深度との関係を示した。佐賀地区については、完新統の粘土層直下の地下水で、白石地区については、深度100m程の地下水で、 E_{ca} が1に近づいている。従って、白石地区については、深度100m前後の帯水層の一部で、佐賀地区については、それ以浅の帯水層の一部で、地下水の塩水化が進んでいる。それ以深の帯水層では塩水の影響が現れていない。平面的には、佐賀地区では川副町などの南部(地点19, 20, 26)、白石地区では福富町(地点56)と六角川の流域(地点48)で塩水化が進んでいる。なお、三浦・飯盛³⁾は、1979~1980年と1987年に佐賀平野の地下

水質調査を行い、両者のデータの間で大きな違いが認められなかったことから、この地域の地下水の塩水化は1970年代以前に進行したものとしている。

(2) トリリニア・ダイアグラム

図-6は、佐賀地区の地下水のトリリニア・ダイアグラムを示したものである。図中の菱形座標の領域I~IVは、I:アルカリ土類非炭酸塩、II:アルカリ土類炭酸塩、III:アルカリ炭酸塩、IV:アルカリ非炭酸塩に区別される。地下水は領域IIを中心として分布することが多く、滞留時間が長くなるとともに領域IIIに移動していく。これは滞留時間とともに地層から溶出してくる各種のイオンが増加する中で、地層からの溶出が多いナトリウムイオンや重炭酸イオンが増加することによるものである。海水は領域IVの右隅に位置するので、地下水が塩水化すると領域IVに向かって変化することになる。図中の黒丸は佐賀地区の北部山地沿い及び中部地域の地点について示したものであるが、これらの水質組成は主に領域IIに分類される。白丸で示した佐賀地区の南部有明海及び筑後川沿いの地下水はそのほとんどが領域IIIに属している。従って、南部有明海及び筑後川沿いの地下水が北部山沿及び中部地域のそれより滞留時間が長いものと推測される。領域IVに3地点のデータが位置しており、これらの地下水が塩水化していることを示している。また、同図左下の陽イオンの三角ダイアグラムではカルシウムイオン組成比20%の線を挟んで2つのグループに分けられることから、佐賀地区の地下水は2つの陽イオン組成のグループ系列に分けることができる。カルシウム組成比の低いグループは南部有明海及び筑後川沿いに位置し、カルシウム組成比の高いグループは北部山沿い及び中部地域に位置する。なお、佐賀地区の地下水調査地点図(図-1)においても、南部有明海及び筑後川沿いの地点(カルシウム組成比の低いグループ)を黒丸で示し、北部山

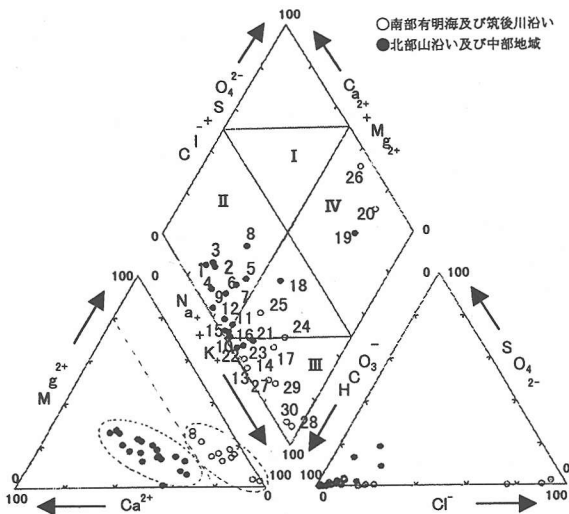


図-6 地下水のトリニャ・ダイアグラム(佐賀地区)

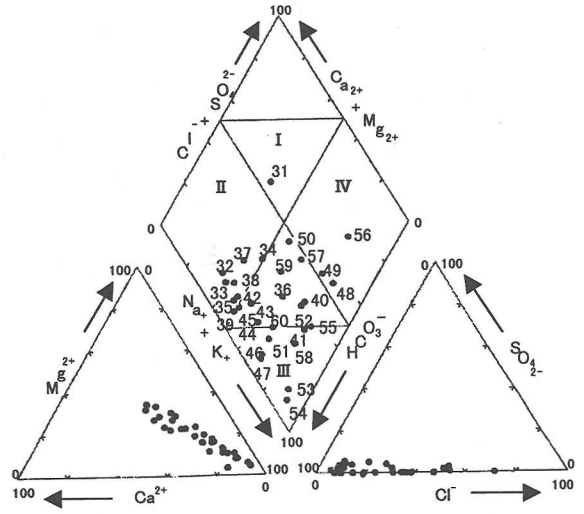


図-7 地下水のトリニャ・ダイアグラム(白石地区)

沿い及び中部地域の地点(カルシウム組成比の高いグループ)を白丸で示した。この2つのグループは、図-1に示す1つの曲線を境に分布している。

一方、図-7は白石地区の地下水のトリニャ・ダイアグラムである。白石地区の地下水は、領域IIの下部から中間領域を経て領域IIIの範囲に分布している。領域IIに属する地下水は主に白石地区西部の山地沿いに位置するのに対して、中間領域及び領域IIIに属するのは有明海沿岸及び六角川流域の地下水である。したがって、有明海沿岸及び六角川流域の地下水は、白石地区西部の山地沿いの地下水よりも滞留時間が長いものと推測される。また、有明海沿岸域もしくは六角川流域のデータは領域IVの方向に分布しており、塩水化傾向を示している。さらに、同図下の陽イオン及び陰イオンの三角ダイアグラムでは、いずれも全てのデータがほぼ一直線上に配列している。

4. 地下水の年代測定

(1) トリチウム法及び溶存ヘリウム法

トリチウム($^3\text{H-T}$)は、半減期約12年の放射性同位元素であり、大気中で主に窒素原子核と宇宙線の相互作用によって生成される。大気中で生成されたほとんどのトリチウムは、直ちに酸化されHTOの形態($\text{HTO} = \text{H}_2\text{O}$ 中の1つのHがTに置き換わったもの)となり、降雨となって水循環系に取り込まれる。地下水中に取り込まれたトリチウムは、 β 崩壊しその濃度は減衰することから、過去の降雨中トリチウムの減衰状態から地下水の年代評価を行うことができる。

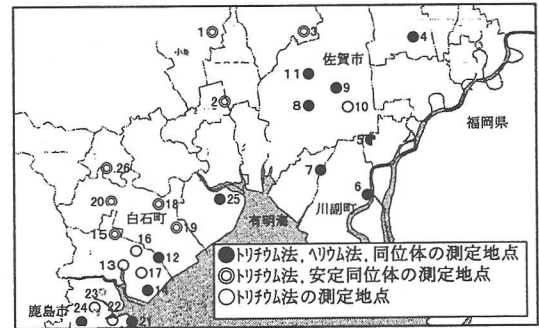


図-8 地下水の採取地点図

最近、地下水中の溶存ヘリウム蓄積量を把握することにより、比較的古い地下水の年代測定が行われていることから、溶存ヘリウム法の適用も合わせて試みた。地下水に含まれるヘリウム成分の起源は次の3つに分けることができる。

- a) 大気ヘリウム成分：大気中に含まれるヘリウムが降雨中に溶解し地下水に供給されたもの。
- b) 放射壊変ヘリウム成分：地下水の周辺地層、岩石中に微量含まれるウラン(U)やトリウム(Th)系列核種の α 崩壊に伴ってヘリウムが地下水中に供給されたもの。
- c) マントル・ヘリウム成分：地殻の断層沿いに地下深部のマグマより上昇してくるマントルガスによってヘリウムが供給されるもの。

一般に、放射壊変ヘリウム成分は大気ヘリウム成分と比較して($^3\text{He}/^4\text{He}$)比が小さく、マントル・ヘリウム成分は($^3\text{He}/^4\text{He}$)が大きいが知られている⁸⁾。

表-2 地下水のトリチウム濃度測定結果

番号	市町村	ストレー深度 (m)	トリチウム濃度 【1996年測定】 (TR)	トリチウム濃度 【1997年測定】 (TR)
1	小坂町	94-146	—	4.8±0.2
2	牛津町	89-116	—	ND
3	大和町	85-141	—	0.2±0.1
4	神埼町	103-169	—	ND
5	諸富町	117-147	—	ND
6	川副町	76-84	—	ND
7	東与賀町	110-115	—	ND
8	佐賀市	42-153	—	ND
9	"	300-310	—	ND
10	"	154-192	—	ND
11	"	133-210	—	ND
12	有明町	180-205	ND	ND
13	"	117-150	ND	ND
14	"	53-85	ND	ND
15	"	82-131	ND	ND
16	"	79-150	ND	ND
17	"	42-163	ND	ND
18	白石町	134-153	ND	ND
19	"	57-136	ND	ND
20	"	39-115	ND	ND
21	鹿島市	14-289	ND	1.7±0.2
22	"	68-120	1.1±0.3	2.6±0.2
23	"	110	5.4±0.3	4.7±0.2
24	"	49-176	ND	0.8±0.2
25	福富町	75-150	—	ND
26	大町町	91-151	—	ND
検出限界値			0.6	0.2

(2) トリチウム及び溶存ヘリウムの測定と結果

a) トリチウム濃度

トリチウムは、主に大気中において宇宙線によって生成されることから、地下においては、新たなトリチウムの付加はほとんどなく、トレーサーとして有用である。

佐賀地区及び白石地区全体を対象に1996年から1997年にかけて調査を実施した。試料の採取を行った揚水施設の位置を図-8に、ストレーナー深度を表-2に示す。トリチウムの測定は、科学技術庁が定めた原子炉施設から排出されるトリチウムの分析マニュアル¹⁰⁾に準じて行った。ただし、本研究のように、自然環境レベルよりもかなり低い濃度のトリチウムの検出を目的とする場合は、検出限界値の向上を図る必要がある。本調査では、同マニュアルに定める前処理に加え、電解法によるトリチウム濃度の濃縮処理を実施した。

佐賀平野における地下水のトリチウム濃度の測定については、1996年に鹿島地区を含む白石地区13地点を選んで予備的に実施した¹⁰⁾。1997年には、その13地点を含んだ佐賀平野全域(佐賀地区:11地点、白石地区:15地点)を対象に測定を実施した。1996年の測定では、トリチウムの検出限界値0.6TR(1TR=0.12Bq/l)が得られたが、1997年の測定では、地下水から化石水へのバックグラウンド水の変更、濃縮率の向上等を行なった結果、検出限界値0.2TRが得られた。

表-2に1996年と1997年に実施したトリチウム濃度

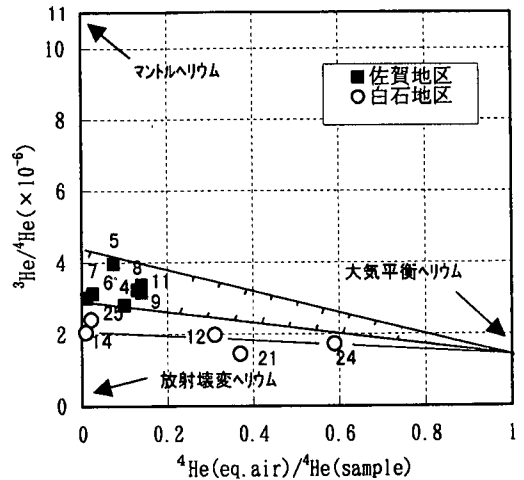


図-9 溶存ヘリウム同位体比(³He/⁴He)と⁴He(eq. air)/⁴He(sample)比の関係

の測定結果を示す。1997年測定では、検出限界値が約1/3に減少し、1996年測定では検出限界以下であった地点の一部でトリチウムを検出することができた。また、1997年測定では26地点のうち6地点で0.2~4.8TR程度のトリチウムが検出され、残りの20地点では検出限界値以下であった。トリチウムが検出された地点は、佐賀地区では北部山地沿い、及び白石地区では鹿島市となっている。

b) 溶存ヘリウム濃度

溶存ヘリウム法適用の対象とした地下水は、図-8に示す地点のうち12地点である。地下水の採水は、1997年のトリチウム濃度測定のための採水と同時に実施し、地下水は鋼管に封入した。この地下水から溶存ガスを高真空系の中で抽出し、次にGetterポンプ及び液体窒素で冷やした活性炭を用い不要ガス成分の除去を行った。その後、分析系統に残ったHe及びNeの混合ガスを質量分析器に導入し分析を行った。

この分析結果をもとに、大気平衡ヘリウム濃度と試料中のヘリウム濃度の比(⁴He(eq. air)/⁴He(sample))とヘリウム同位体比(³He/⁴He)の関係を図-9に示す。同図において、横軸の右から左に向けて、過剰He(地中において新たに付加されたHe(マンタルヘリウムまたは放射壊変ヘリウム))の増加を示し、即ち地下水の滞留時間の増加を意味する。縦軸は、放射壊変ヘリウム成分が100%の場合に³He/⁴He=1.5×10⁻⁸(下端に近い点)、マンタルヘリウム成分が100%の場合に³He/⁴He=1.1×10⁻⁵(上端)である⁸⁾。同図中○は、白石地区の地下水を示しており、概ね左肩上がりの直線上にプロットされている。比較的滞留時間の短いものから長いものまで分布していることを示している。図中の■は、佐賀地区の地

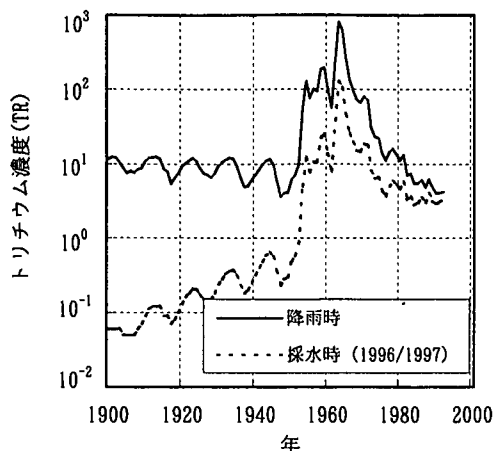


図-10 降雨中のトリチウム濃度変化及びその1996/1997年時点での減衰値

下水を示しており、比較的滞留時間が長い領域のみに分布しているのが特徴である。白石地区及び佐賀地区ともに、地下水の滞留時間の増加とともに、 $(^3\text{He}/^4\text{He})$ 比の高いマントルヘリウム成分が増加していることを意味している。

(3) トリチウム法及び溶存ヘリウム法による年代評価

a) トリチウム法による年代評価

トリチウム濃度から地下水の年代評価を行うためには、その初期濃度が必要である。降雨中のトリチウム濃度は、熱核実験の影響が認められた 1953 年以降世界各地で測定されている。我が国では、島田等²⁰⁾が東京及び筑波における降雨中トリチウム濃度の 1953 年以降の継続的な測定結果を取りまとめている。1952 年以前についてはほとんど実測されていないが、自然由来の降雨中のトリチウム濃度は、太陽の黒点活動との関係について種々研究が行われている。本研究では、1952 年以降については島田等の測定結果を用い、それ以前は Ravoire²¹⁾の南極万年雪のトリチウム濃度と該当年の太陽黒点数の測定結果から導かれた経験式により木村²²⁾が計算した値を用いた。

これらの関係から降雨中の年平均トリチウム濃度を求めると図-10の実線のとおりとなる。1952 年以前の降雨中のトリチウム濃度は、約 10TR 程度であるが²²⁾、1952 年以降の熱核実験によって降雨中のトリチウム濃度は増加し、1963~4 年頃をピークに 1,000TR 程度までに達している。同図の各年の降雨中トリチウム濃度を地下水の採取年である 1996/1997 年時点まで物理的半減期に基づいて減衰させたものが破線で示す曲線である。したがって、異なる年代の地下水や河川浸透水等との混合効果は考慮していない。

表-3 ヘリウム法に用いたパラメータ

パラメータ	単位	値	備考
滞水層中のウラン濃度	$\mu\text{g/g}$	1.8	白石地区の主要滞水層の $\delta^{235}\text{U}$ の実際値
滞水層中のトリウム濃度	$\mu\text{g/g}$	10.0	"
滞水層土壌の真密度	g/cm^3	2.7	"
水の密度	g/cm^3	1.0	
滞水層の空隙率	—	0.4	
マントルヘリウム・フラックス	$\text{ccSTP}/\text{cm}^2\cdot\text{y}$	3.2×10^{-6}	Wasserburg による ²⁴⁾
対象地層の厚さ	cm	1.5×10^4	

表-4 地下水の年代評価結果

地区	番号	トリチウム濃度測定による滞留時間	溶存ヘリウム測定による滞留時間
	1	約 45 年又は約 25 年	—
	2	約 70 年以上	—
	3	約 70~80 年	—
	4	約 70 年以上	約 800 年
佐賀地区	5	"	約 1,000 年
	6	"	約 3,000 年
	7	"	約 6,000 年
	8	"	約 500 年
	9	"	"
	10	"	—
	11	"	約 600 年
	12	約 70 年以上	約 200 年
	13	"	—
	14	"	約 8,000 年
	15	"	—
	16	"	—
白石地区	17	"	—
	18	"	—
	19	"	—
	20	"	—
	21	約 45 年	約 100 年
	22	"	—
	23	約 45 年又は 25 年	—
	24	約 45 年	約 60 年
	25	約 70 年以上	約 4,000 年
	26	"	—

表-2 のトリチウム濃度の測定結果と図-10 の過去の降雨中トリチウム濃度の減衰状態から推定された地下水の年代評価結果は、表-4 に示すとおりである。まず、佐賀地区(番号 1~11)において検出限界以上の濃度が検出されたもののうち、番号 1 の地下水はトリチウム濃度 4.8TR であった。これは、世界的に核実験が開始された 1953 年直前、若しくは、1970 年代の降雨中のトリチウムが減衰したものに相当する。番号 3 の地下水は、0.2TR の検出限界ぎりぎりのトリチウムが検出されており、1920 年代から 1930 年代にかけての降雨を起源とする

るものと考えられる。佐賀地区のその他の地下水については、検出限界 0.2TR 以下のトリチウム濃度であり、1920 年代以前の降雨を起源とするものである。したがって、滞留時間は少なくとも約 70 年程度以上であると推定される。また、白石地区(番号 12~26)においては、鹿島市の地下水 4 試料(番号 21, 22, 23, 24)で検出限界以上となっており、番号 21, 22, 24 の地下水はいずれも滞留時間 45 年程度と推定される。また、白石地区のその他の地下水はいずれも検出限界以下のトリチウム濃度であり、地下水の滞留時間は少なくとも約 70 年を上回るものと考えられる。

b) 溶存ヘリウム法による年代評価

(2)b)で述べたように、佐賀平野の地下水中のヘリウムは、比較的マントルヘリウム成分を多く含むことから、Stute et al. (1992)²³⁾が提案したヘリウム蓄積法により地下水の年代評価を行った。表-3 は年代評価に必要なパラメータの値を示し、その計算結果を表-4 に示した。佐賀地区(番号 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11)については、地下水の滞留時間は概ね $10^2 \sim 10^3$ 年のオーダーにあり、北部山地沿いで滞留時間が小さく、南部有明海又は筑後川沿いで滞留時間が大きくなる傾向を示している。鹿島市を含む白石地区全体(番号 12, 14, 21, 24, 25)では、地下水の滞留時間は数 10 年~ 10^3 年の広範囲な値を示している。そのうち鹿島市地域(番号 21, 24)では数 10 年~ 10^2 年程度で比較的滞留時間が短い。白石地区の中央部については、地下水の採取深度が特に大きな地点番号 12 の地下水を除けば概ね 10^3 年のオーダーの滞留時間である。番号 12 の井戸は、他の主な井戸が取水層としている川副層の下位に位置する牛屋層を取水層としていると推定され、地下水の滞留時間は 10^2 年のオーダーで比較的短い滞留時間を有している。

また、番号 21 と 24 の地下水については、トリチウム法による年代評価も行っている。その結果によれば、これらの地下水の滞留時間は概ね 45 年程度となっており、ヘリウム法による滞留時間の評価は含まれる誤差が比較的大きいものの、オーダー的には適当な評価を与えるものと言える。

5. 地下水の循環に関する考察

(1) 佐賀平野の地下水の地域区分

従来、佐賀平野の地下水や地盤沈下を論ずるに当たって、その東部の佐賀地区と西部の白石地区に分けて議論されてきた。ここでは、従来から慣例的に行われてきたこのような地域区分が、地下水の循環の観点から適当かどうかを考察した。

まず、図-9 の溶存ヘリウムの分析から、白石地区の

表-5 安定同位体 (δD , $\delta^{18}O$) の測定結果

地区	地点番号	δD (%)	$\delta^{18}O$ (%)	地区	地点番号	δD (%)	$\delta^{18}O$ (%)
佐賀地区	1	-43.4	-6.9	白石地区	12	-47.0	-7.5
	2	-45.2	-7.2		14	-49.5	-7.8
	3	-43.0	-6.9		15	-45.7	-7.3
	4	-46.2	-7.1		18	-45.4	-7.3
	5	-48.7	-7.3		19	-47.3	-7.4
	6	-42.7	-6.4		20	-45.3	-7.2
	7	-51.6	-7.7		21	-47.0	-7.3
	8	-44.1	-6.9		24	-46.5	-7.3
	9	-46.4	-7.3		25	-47.7	-7.3
	11	-48.3	-7.4		26	-47.8	-7.5

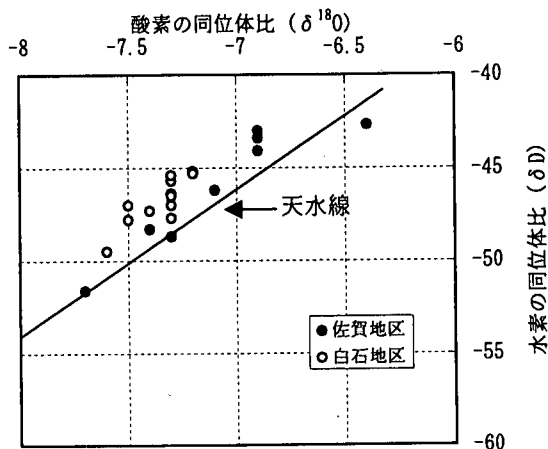


図-11 地下水の同位体比 (δD , $\delta^{18}O$) 分布

地下水は、ヘリウム同位体比 $^3\text{He}/^4\text{He} = 2.2 \times 10^{-6}$ 程度のヘリウム成分と大気平衡ヘリウム成分の混合線の直線状に並んでいる。一方、佐賀地区の地下水は、白石地区よりも大きなヘリウム同位体比を有したヘリウム成分と大気平衡ヘリウム成分の混合を表す 2 つの線の間に存在しており、佐賀地区と白石地区の地下水に差が認められる。

また、地下水の起源を調べる手法として、一般に、水の安定同位体比に基づく指標 (δD , $\delta^{18}O$) が使われている^{7), 8), 23)}。 δD , $\delta^{18}O$ は、標準物質(標準的表面海水)の同位体比からのずれを千分率で表す方法が用いられている。したがって、この δD , $\delta^{18}O$ の値が正の大きな値になるほど重い同位体に富み、負になると軽い同位体に富むことを意味する。本研究においても、図-8 に示す 20 地点の地下水を対象に質量分析を行い、表-5 に示す測定結果を得た。図-11 はこの結果を δD - $\delta^{18}O$ の関係として示したものである。図中の直線は世界の平均的な天水線⁹⁾(降雨直後の水の δD , $\delta^{18}O$ の分布直線)である。図-11 にみられるように、天水線とほぼ平行にプロットされていることから、a) 降水をその起源とし降雨後に湖沼等で蒸発作用等を長時間経験することなく地下に浸透したこと、b) その後、熱水系での岩石等との相

相互作用による同位体比の変化等を受けていないこと、が推測される。白石地区の地下水は、限られた範囲に分布しており、溶存ヘリウム分析結果からも、その起源は単一の地域と考えるのが妥当である。一方、佐賀地区の地下水は、幅広く分布しており、溶存ヘリウム分析結果とも合せると、いくつかの起源（涵養域）の地下水が混合されたものであることを示唆している。

(2) 地下水の起源

3. (2)で述べたように、佐賀地区の地下水は2つの系列、即ち、南部有明海及び筑後川沿いに分布するものと、北部山地沿い及び中部地域に分布するものに分けられ、その区分を図-1に示した。このことから、佐賀地区の地下水はその起源を2つに分けることができると考えた。その1つは、筑後川以東の地域を起源とし、東の方から西に向かって佐賀平野に流入するもの、他の1つは佐賀地区北部の背後山地を起源とするもので北から南に向かって佐賀平野に流入するものである。

白石地区の地下水の起源は、図-7に示すように、陽イオン及び陰イオン組成ともに一つの直線状に分布していること、また、水の安定同位体比に基づく指標(δD , $\delta^{18}O$)は、 δD - $\delta^{18}O$ 図(図-11)上で、限られた範囲に分布していることから、佐賀地区とは異なり、単一の地域と考えるのが妥当である。

(3) 地下水の履歴

図-6のトリリニア・ダイアグラムから、カルシウムイオン組成比が大きい佐賀地区の北部山地沿い及び中部地域の内、北方の山地沿いの地下水は、アルカリ土類炭酸塩型(領域Ⅱ)に属し、南の方へに行くに従ってアルカリ炭酸塩型(領域Ⅲ)に属する。この領域Ⅱから領域Ⅲへの水質組成の移行は、この水質組成の移行に従って地下水の滞留時間が増加することを意味している。一方、カルシウムイオン組成比が小さい南部有明海及び筑後川沿いの地点は、ほとんどがアルカリ炭酸塩型(領域Ⅲ)に属しており、筑後川以東から佐賀地区に流入する時点で、既に滞留時間が比較的大きなものとなっていると推測される。

トリチウム法による地下水の年代評価の結果から、佐賀地区の北部山地沿いにある小城町、大和町の地下水の年代は、約25年~80年程度(表-4参照)であり、また、溶存ヘリウム法による地下水の年代評価の結果から、佐賀市の中心部周辺でその年代が 10^2 年程度、南部有明海及び筑後川沿いの地下水の年代が 10^3 年程度であり、前述のトリリニア・ダイアグラムでの考察を定量的にほぼ裏付けるものとなっている。

以上の考察から、佐賀地区の地下水は、北部の背後山地から南に向かう流れと筑後川以東の地域から西に向か

う流れの2つが平野部で合流する地下水系となっていることが推測される。佐賀地区北部の背後山地から南に流れる地下水系は山麓部で数十年程度の年代を有し、佐賀市の中心部で 10^2 年程度となり、佐賀地区南部で、 10^3 年程度の年代を有する筑後川以東からの西向きの流れの地下水と合流しているものと考えられる。

次に図-7のトリリニア・ダイアグラムから、白石地区の地下水は、概ねアルカリ土類炭酸塩型(領域Ⅱ)から中間型組成を経てアルカリ炭酸塩型(領域Ⅲ)に位置し、領域Ⅱに属しているものは主に白石地区の西部山地沿いの地点であり、中間型組成および領域Ⅲに属しているものは有明海沿岸および六角川流域のものとなっている。この領域Ⅱから中間型組成を経て領域Ⅲへの水質組成の移行は、この水質組成の移行に従って地下水の滞留時間が増加することを意味している。

トリチウム法による地下水の年代評価の結果から、鹿島市周辺の地下水の年代は約45年程度であり、また、白石平野部の川副層の地下水は、溶存ヘリウム法による地下水の年代評価の結果から、その年代が 10^3 年程度である。

以上のこと及び5.(2)で述べたことから、白石地区の地下水は、鹿島市の背後山地から六角川もしくは白石地区南部の有明海に向かう流れを有し、その地下水としての滞留時間は鹿島市付近で数十年程度で、その流れに沿って滞留時間は大きくなり、白石平野の中心部で 10^3 年程度となっている。

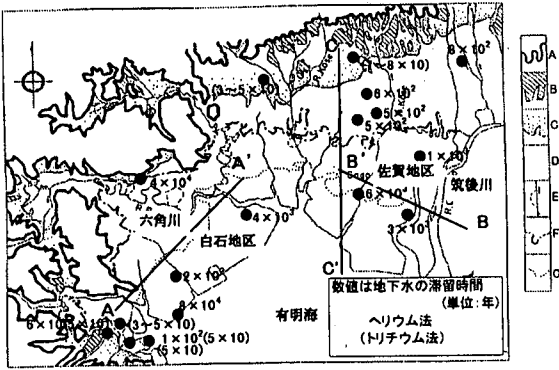
以上の考察を総合して佐賀平野の地下水の年代と流れを図12~15に模式的に示した。

6. まとめ

本研究は、地盤環境の管理に資することを目的に、溶存する陽・陰イオン、天然の放射性物質、希ガス、安定同位体に基づく地下水環境に関する調査を行うとともに、これらの結果を総合的に評価し、地下水の起源や滞留時間等に関する考察を行った。以下にその結果をまとめた。

(1) 陽・陰イオン分析に基づき、佐賀平野の地下水は有明海沿岸部及び六角川などの感潮河川流域で塩水化が進行していることがわかった。佐賀地区では、完新統の粘土層に近い浅層地下水で、白石地区では、それよりやや深い層の地下水で、塩水化が認められる。

(2) 溶存ヘリウム分析及び水の安定同位体分析に基づき、佐賀平野の地下水の起源は、大きく佐賀地区と白石地区に分けられることがわかった。また、陽・陰イオン分析及びトリチウム分析結果も合わせて、白石地区の地下水は、鹿島市の背後山地を起源とし、平野部に流入し



A: 山地 B: 洪積段丘 C: 沖積扇状地 D: 沖積三角州
E: 感潮域上限と旧河道 F: 平均満潮面 G: 1600年の海岸線

図-12 地下水の年代測定結果と断面位置図

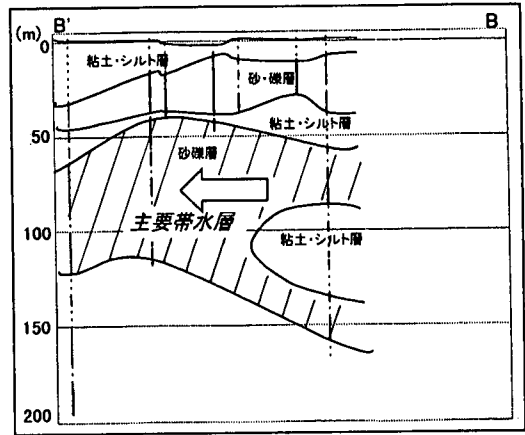


図-14 地下水の流れ (B-B' 断面)

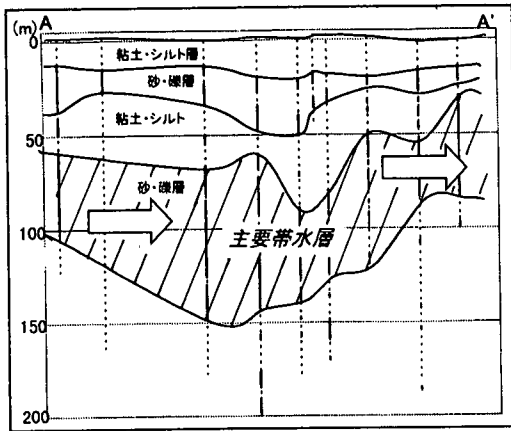


図-13 地下水の流れ (A-A' 断面)

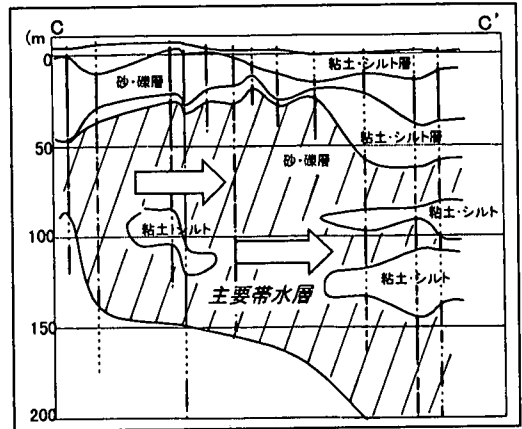


図-15 地下水の流れ (C-C' 断面)

有明海沿岸部又は六角川流域へ流れていることがわかった。同じく、佐賀地区の地下水は、その起源を2つに分けることができ、その1つは筑後川流域以東を起源とし、東の方から西に向かって佐賀平野に流入し佐賀地区南部に流れるものであり、もう1つが佐賀地区北部の背後山地を起源とし、佐賀地区中南部に向かって流動するものである。

(3) 地下水の地下滞留時間を把握することを目的に、トリチウム分析及びヘリウム分析に基づき、地下水の年代評価を行った。その結果、地下水の年代評価は、両手法を組み合わせることで、10年から10⁴年の範囲で可能であることがわかった。白石地区の地下水の年代は、鹿島市周辺で数10年から10²年程度、白石平野部の川副層で10³年程度である。佐賀地区の地下水の年代は、北部山地沿いの平野部で数10年から10²年程度、佐賀市の中心部周辺で10²年程度、筑後川流域及び有明海沿岸部で10³年程度である。

(4) 以上の考察から、佐賀平野の地下水は、三方を

囲む山地部から水平涵養され、地下での滞留時間は最大10³年程度にも及んでいる。従って、その地下水環境の管理は、広域的かつ長期的な観点から行う必要がある。

謝辞: 本研究の試料として使用した地下水の採取に当たっては、地元市町担当職員の皆様のお世話になりました。試料の分析に当たっては(財)九州環境管理協会、(財)電力中央研究所我孫子研究所に多大な御協力を賜りました。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 八谷陽一郎, 北島淳二, 神野健二: 佐賀平野における平成6年異常湧水と地盤沈下, 地下水学会誌, 第38巻, 第3号, pp. 181-191, 1996.
- 2) 大島恒彦, 飯盛喜代春: 佐賀平野の地盤沈下と地下水, 佐賀大学教育学部研究論文集, 34, pp. 335-344, 1982.

- 3) 三浦哲彦, 飯盛喜代春: 佐賀平野の地盤沈下と地下水質, 地下水学会誌, 30 巻, pp. 29-34, 1988.
- 4) 三浦哲彦, 飯盛喜代春: 佐賀平野における揚水に伴う地盤沈下と地下水質への影響, 土と基礎, 34 巻, pp. 13-18, 1986.
- 5) 三浦哲彦, 飯盛喜代春, 坂井晃: 佐賀平野の地盤沈下と地下水の塩水化について, 地質と調査, pp. 28-34, 1987.
- 6) 田端正明: 低平地における地下水の化学組成と年代に関する研究, 低平地研究(5), pp. 98-106, 1996.
- 7) 馬原保典: 最近の地下水調査方法と計測技術, 地下水学会誌, 第 36 巻第 4 号, pp. 473-485, 1994.
- 8) 馬原保典: 地下水年代測定法の検討, 電力中央研究所報告, U94027, pp. 1993, 1993.
- 9) 綿貫邦彦: 地下水問題への環境同位体手法を用いたアプローチ, 地下水学会誌, 第 35 巻, 第 4 号, pp. 307-311, 1993.
- 10) Oshima, T.: Geological structure of Saga Plain, *Proceeding of the International Symposium on Shallow Sea and Low Land*, pp. 123-127, 1988.
- 11) 有明海グループ: 有明・不知火海域の第四系, 地団研専報, (11), pp. 89, 1965.
- 12) 郷原保美, 新堀知行, 鈴木康司, 野村哲, 小森長生: 北九州の第四紀層に関する諸問題, 資源研彙報, (62), pp. 83-108, 1964.
- 13) 下山正一, 松本直久, 湯村弘志, 竹村恵二, 岩尾雄四郎, 三浦哲彦, 陶野郁雄: 有明海北岸低地の第四系, 九大理学部研究報告(地球惑星), 18 (2), pp. 103-129, 1994.
- 14) 水質基準に関する省令(平成 4 年 12 月 21 日厚生省令 69 号)
- 15) 清水昭邦: 地下水障害, 地下水ハンドブック, 建設産業調査会, 1979.
- 16) 東海三県地盤沈下調査会編: 濃尾平野の地盤沈下と地下水, 1985.
- 17) 山本壯毅: 地下水水文学, 共立出版, 1992.
- 18) 科学技術庁: 放射能測定シリーズ 9 トリチウム分析法, 1997.
- 19) 八谷陽一郎, 三浦哲彦, 坂井晃, 田端正明, 岩尾雄四郎, 川副康博, 深川玲子: 放射性同位元素による佐賀平野の地下水年代測定, 佐賀大学理工学部集報, 第 26 巻, 第 1 号, pp. 79-97, 1997.
- 20) Shimada, J., Matsutani, J., Dapaah-Siakwan, S., Oshida, M., Miyaoka, K. and Higuchi, A.: Recent trend of tritium concentration in precipitation at Tsukuba, Japan. *Annual Report of Institute of Geoscience, University of Tsukuba*, 20, 1994.
- 21) Revoire, I.: Tritium content in a firm core from Ant Arctica, *J. Geophys. Res.*, 75, pp. 2331-2335, 1970.
- 22) 木村重彦: 水に含まれる放射性同位元素による地中水の挙動解析, 農業土木試験場報告, (25), pp. 1-91, 1986.
- 23) Sute, M., Sonntag, C., Deak, J. and Schlosser, P.: Helium in deep circulating groundwater in the Great Hungarian Plain, *Geochemica Cosmochemica Acta*, Vol. 56, pp. 2051-2067, 1992.
- 24) Wassenburg, G T., Mazor, E. and Zartman, R. E.: Isotopic chemical composition of some natural gases, *In Earth Science and Meteoritics*, North Holland, Amsterdam, pp. 219-240, 1963.
- 25) 北岡豪一, 由佐悠紀, 山孝吉, 大沢信二: 水素と酸素の安定同位体比からみた別府温泉における地熱流体の移動過程, 地下水学会誌, 第 35 巻, 第 4 号, pp. 287-305, 1993.

(2000.1.20 受付)

STUDY AND DISCUSSION ON GROUNDWATER CIRCULATION IN SAGA PLAIN BY MEASURING DISSOLVED ELEMENTS AND ISOTOPES

Yoichiro HACHIYA, Akira SAKAI, Norihiko MIURA and Ikuo TOHNO

Land subsidence and saltwater intrusion into groundwater due to pumping up of the same are examples of the serious problems in this region. It is important to study on the characteristics of groundwater environment for conservation of geoenvironment. Recently, the tracer methods using such dissolved elements as cations/anions and gases, natural radioactive or stable isotopes have been used widely for study on groundwater circulation. This paper describes the applicability of these tracer methods in Saga Plain. The results show that the groundwater in Saga Plain has been supplied from the surrounding mountainous districts. This study also shows that the age of groundwater at the foot of mountains is several decades, and that of the plain near Ariake Sea is about 10^3 years long.