

京都盆地水系における地下水水質の空間特性の解析とその経年変化

バトル アブドレイム*・城戸由能・栗津進吾*・中北英一

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

京都盆地水系における将来的な水資源の利用可能性や水環境保全を検討する上では、表流水のみならず地下水の水量・水質特性を明らかにするとともに、その利用状況や汚染源の把握が重要となる。本研究では11年間の地下水水質観測データをもとに、ヘキサダイアグラムとトリリニアダイアグラムを用いて観測各地点の溶存イオン特性に基づいた水質類型の判定を行い、次いで他の水質項目を加えたデータについて主成分分析およびクラスター分析を行い、水質特性の類型化を行った。以上の結果から地下水水質の空間分布特性および経年的な類型変化について解析し、水質特性を形成する要因について考察した。

キーワード： 京都盆地，地下水質，時間空間分布特性

1. はじめに

京都盆地は南北約30km，東西約15kmの広さで，周辺山地は主に砂岩・泥岩・チャート・緑色岩などの丹波帯中・古生層と盆地北東方に分布する北白川花崗岩からなる。盆地縁の丘陵地は主に大阪層群からなり，東部の深草地域と西部の西山地域に分布する(新関西基盤，2007)。基盤構造調査によると，京都盆地の地下水帯は盆地南部の巨椋池干拓地以南で最大深度となり，盆地南西部の大山崎・男山付近で滞水層基盤深度が30～50m程度と浅く，この部分がダム堤体のような構造となっている(楠見，2007)。このため盆地内部の地下水は停滞性が強く，一旦汚染された地下水は容易には地下水盆からは流出せず，水質回復には多大な労力と非常に長い時間を要する。

本研究では，京都盆地水系において重要な域内水源である地下水の将来的な水質保全策の検討および地下水利用可能性を検討するための基本的な情報を得ることを最終的な目標と位置づけ，その第一段階として過去の観測データの水質解析を行うことで，京都盆地の地下水水質の時間・空間分布特性を明らかにするとともに，水量・水質の涵養特性と

地形・地質等の流域特性との関係性を考察することで，水質特性の要因を明らかにすることを目的とする。

2. 地下水水質に関する既往調査研究

(1) 地下水利用と地下水水質

地下水水質は，地形・地質の成り立ちや地下水の涵養源，流動特性，気候・生態系などの自然条件の影響を受け，その地域性や帯水層の深さによって大きく異なる(地下水水質の基礎，理工図書，2000)。自然界の地下水水質は本来多様な理化学的特性を持っており，地下水水質は主要な溶存イオンに加え，電気伝導度・水温・pHなどの水質項目を用い，必要に応じて用途や関係する水質基準項目を加味した上で評価される。

地下水利用の利点として以下の四項目が挙げられる(国土交通省，2007)。

- ①簡易性：帯水層まで井戸を掘削し，ポンプなどの揚水施設を設置すれば，容易に良質な水が得られること。
- ②経済性：地下水の取水のための経費として，井戸の掘削，ンプなどの揚水施設の設置などの初期費

用とポンプの電気代などのランニングコストが必要となるが、他の水資源利用に比べて一般に安価であること。

③良好な水質：地下水は、長期間かけて地層中に賦存しているものであり、帯水層に到達するまでに不純物質の多くは土壤に付着・ろ過されることから、一般的に水質は良好であり、適度にミネラル分を含有していること。

④恒温性：地下水の水温は地域によって差異はあるものの、年間を通じてほぼ一定で、表流水に比べて夏は冷たく、冬は暖かいこと。

地下水の利用にあたり大規模な貯水・取水・供給施設を必要としないため、その利便性から高度経済成長期には大量の地下水が揚水され、都市部を中心に地下水位の低下・井戸枯れ・地盤沈下などの問題が発生した。そのため、1970年代以降、揚水規制と地下水位および地盤沈下の監視が行われ、全国的には顕著な水位低下や地盤沈下の進行は鈍化しているが、いまだに地下構造物の建設工事やトンネル掘削によって周辺の地下水位の低下や井戸枯れが起こる例も見られる。また、近年一部の地域では規制以前の地下水位以上となったために建築物基礎部の浮上や地下構造物中への漏水などの問題が発生している(田中他, 2009)。現在の地下水年間使用量は全国で約124億 m^3 にのぼり、都市用水および農業用水全体の約13%を占めている(田中他, 2009)。多量の揚水の影響は顕在化しにくいことも考慮すると、地下水の水量面での問題も考慮する必要がある。

現在、京都盆地の西部を流れる桂川流域には、紡績・化学・製紙・製薬・酒造・電気器具および機械などの大小の工場が操業を営んでおり、種々の水利用を行っているが、そのほかにも水道水源・かんがい用水源・一般民生用水あるいは舟運用水としてきわめて、多量の水利用が行われている(楠見：京都の地下水)。これらのなかでとくに問題となるのは、京都盆地南部に立地する工場等による地下水揚水である。京都盆地には、桂川を水源とする工業用水が整備されているが、その利用は計画水量に及ばず、洛西・洛南に位置する多くの事業者が掘井戸あるいは打込井戸によって地下水を利用している。

一方、水質保全の観点から1989年より水質汚濁防止法に基づき地下水水質の汚染状況を常時監視するようになり、環境基準超過検体数などが公表されている。これまでも、有機塩素系溶剤等の化学物質による地下水汚染については汚染源の特定と曝気による汚染水処理と防止策が進められてきた(馬場, 2005)。また、農地および公園・ゴルフ場等

で使用された農薬による硝酸性窒素による地下水汚染についても、使用農薬の質と量の制御により汚染状況は改善されつつあるが、現在でも全国で汚染が確認されており、多くの調査報告事例がある。環境省の2001年度調査では、1975年度から2000年度末までの土壤汚染の総事例が1,903件、調査事例が1,097件、土壤環境基準の超過事例が574件であり、地下水汚染については1989年度から2001年度までに発見された事例数が3,401件となっている(環境省環境管理局水環境部, 2002)。つまり、多くの汚染土壌・地下水が未発見のまま放置されている可能性が高いといえる。ただし、地下水の汚染源は主に地表から混入する人間活動由来のものに加えて、地表あるいは地層土壌や火山活動などの自然由来のものもあるので、その汚染対策を考える上では、制御可能な人為影響による汚染を時空間的に把握する必要がある。

地下水水質の空間分布に関する既往研究では、主に塩水や温泉水の侵入、河川水との交流現象の解析を目的として、地下水の基本的な水質特性を示す溶存イオン成分を用いた解析がおこなわれている。藤原ら(藤原他, 2001)は2年間4回の観測データを用いて多変量解析を行い、地下水水質特性の解析を行い、海水侵入や施肥の影響を受けていることを明らかにしている。栃本ら(栃本他, 2005)も伊豆大島を対象として同様の手法を用いて海水侵入と火山活動の影響強く受けていることを明らかにしている。これらの研究では空間的に密度の高い観測を長期間実施することが困難なため、1~2年程度の限られた観測期間に実施された数回の限られた観測データに基づいた解析にとどまっている。

(2) 地下水水質に関する既往調査研究

京都盆地の地下水は古来から清浄で豊富で、醸造業・染色業等の産業や茶道・華道などの文化を支える重要な水資源として利用されてきた。そのため、名水・名井として有名な井戸・湧水が多く存在するが、近代以降枯渇したものも多く、水質の悪化のために地下水利用を中止して水道水へ転換せざるを得ない場合も見られた(総合研究開発機構, 1986)。1980年代には大山崎町が管理する水源井戸の一部から水銀が検出されたため、その対策として大山崎町全域および長岡京市の一部を対象にした地下水水質についての調査が実施され、汚染源は過去の水銀含有の農薬であることが示唆されたが明確化されず、汚染井戸の採水深度の改良工事による対策が実施された(大山崎町・応用地学研究所, 1982)。平成19年度の水質調査においても砒素・水

Table 1 Groundwater environmental standards on water pollution excess points of Kyoto basin

汚染物質	地点数
砒素	京都市:3地点
水銀	宇治市、八幡市:各1地点
テトラクロロエチレン	京都市:3地点、宇治市:3地点、長岡京市:1地点
硝酸性・亜硝酸性窒素	京都市:5地点、宇治市:1地点
ほう素	八幡市の1地点

銀・窒素等の環境基準を超過している地点が存在している (Table 1) (環境省, 2008)。

斉藤ら (斉藤他, 2005) は桂川右岸域を対象とした 1991 年と 2004 年の 2 回の水質調査に基づき、電導度・陰イオン性界面活性濃度等の主として生活排水に関係する水質項目に関しては小畑川流域の地下水水質および小畑川の河川水質が改善していること、2 回の観測期間の間に水質分布が大きく変化していることを明らかにした。黒田ら (黒田, 2008) は京都盆地中央部の地下水位と Ca イオン、N/P 比等に基づいた水質の経年変化を解析している。向井ら (向井, 2009) は京都盆地中央部で一般に水利用が公開されている井戸の 1 回の採水試料の化学分析を行い、溶存化学成分の構成比率の特性について解析を行っている。

日本では農地での農薬利用は減少してきたが、1980 年代までに多用された農薬が現在も土壌残留されている。しかし、農地以外でも公園・ゴルフ場等で農薬は利用されており、NO₃-N 等が地下水に浸透して、地下水中で拡散されている。平成 20 年 3 月京都盆地地下水環境基準超過確認地点は表 1 で示す。砒素、水銀、窒素等が環境基準を超過した地点が多い。地下水中の NO₃-N と農業生産活動に関する報告は多い。日本では地下水汚染の自然的原因により基準を超過する可能性が高い物質は、ヒ素・鉛・フッ素およびホウ素の 4 種類の重金属等である。また、水銀・カドミウム・セレンおよび六価クロムについても、自然的原因により基準を超過する可能性がある (松坂, 2003)。

地球温暖化に伴う気候変動を考慮すると、渇水発生頻度の増大により、地表水取水量が制限され、これに伴う地下水への依存度が高まることによる地下水の水量・水質に及ぼす悪影響や地下水基盤沈下の増大が懸念される (宮下, 2007)。さらに、海水上昇より沿岸部地下水の塩分化が拡大し、飲料水等地下水利用への支障も懸念されている。日本を含む中緯度域においては渇水の発生頻度が高まるので、水資源の確保は重要であり、地下水への依存の拡

大により、地下水の量・質的管理は重要な課題となっている。

食料生産・消費は環境への窒素の流出を引き起こし、地下水や河川水の汚染の大きな原因となる。わが国の窒素流出についてのモデル推定結果によると、1980 年代後半までの人口の増加と一人当たりの食料需要の増大に伴って、肥料や食料輸入による国土への窒素流入量が増大し、同時に環境への窒素流出が増加したこと、1990 年以降は、窒素肥料の使用量が減少したことにより、流出量は減少傾向にあることが示された (新藤他, 2009)。一方で、環境へ流出した窒素による地下水や河川水中の窒素濃度の地域変動を推定した結果では、人口密度の高い大都市とその周辺や畜産の盛んな地域で高いことが示されている (新藤他, 2009)。日本では平成 11 年に地下水の硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素の濃度に環境基準が設定されたが、その後現在まで継続的に全国の約 5% の井戸で環境基準を超過している。

地下水質は、主要溶存化学成分 9 項目、陽イオン (ナトリウム Na⁺、カリウム K⁺、カルシウム Ca²⁺、マグネシウム Mg²⁺)、陰イオン (重炭酸 HCO₃⁻、塩素 Cl⁻、硫酸 SO₄²⁻、硝酸 NO₃⁻、シリカ SiO₂) に加え、電気伝導度、水温、pH などにより判断され、必要に応じて用途や関係する水質 (環境) 基準項目を加味した上で評価される自然の地下水質は、元来多様な理化学的特性を持つ。

一般に水質汚染とは、自然の地下水質が人為的に汚染された (= 水質基準に不適合の検査項目がある) 人為由来のものを指す。自然由来の汚染は主に深層の地下水で、人為由来の汚染は主に浅層の地下水で発生する。深層の地下水汚染は除去が困難であり、水資源として利用することができない。地下水中の NO₃-N と農業生産活動に関する報告は多い。中村らによれば (中村他, 2008)、窒素安定同位体比の測定により、甲府盆地東部の果樹栽培の盛んな地域における地下水中の NO₃-N の起源が、施肥によると報告している。また、地下水中濃度が 2mg/L を越える場合、人為的な影響があると指摘されている。四つの地点で SO₄²⁻ 濃度の高い、平均濃度が 30mg/L を超え、甲府盆地周辺井戸で濃度の高い傾向が観察される。特に濃度の高い地点は果樹地帯に隣接する。富士山北麓に位置する地点の地下水中の SO₄²⁻ イオンの起源は、岩石や地質、温泉水や工場排水の混入などが指摘されている。濃度の高い二つの地点の Cl⁻ の起源は地質などの自然要因や人為的要因が指摘されている。温泉地に近い地点の Na や Cl⁻ 濃度が高い (中村他,

2008)。島田允堯(2003)らの研究で、地下水から基準値を超えてヒ素が検出される事例は、最近になって日本の各地から数多く報告されるようになったが、そのほとんどが自然由来と考えられる。

現在京都盆地の西部を流れる桂川流域には、紡績・化学・製紙・製薬・酒造・電気器具および機械などの大小の工場が操業を営んでおり、種々の水利用を行っているが、そのほかにも水道水源・かんがい用水源・一般民生用水あるいは舟運用水としてきわめて、多量の水利用が行われている。これらのなかでとくに問題となるのは、京都盆地における工業用地下水の減少することだ。京都盆地のうち桂川の左岸の部には、京都市上水道が普及しているが、そのほかの大部分では自由面地下水を掘井戸あるいは打込井戸によって利用している。このほか桂川およびその支流鴨川の沿岸には、京都洛西および洛南の工場群が多量の地下水を揚水している。

ヒ素の慢性中毒症として、皮膚病変、鳥足症、末梢血管病変、皮膚がん等があげられます。水道水中の塩化物イオン(Cl^-)は天然由来のものが多く、特に海に近い場所では海水の浸透・風送塩の影響を受けやすく、海岸地帯では多くふくまれる。また、原水中に生活排水・工場排水が多量に混入すると塩化物イオンが増加することもある。また、水道水中の塩化物イオンは、浄水処理で凝集剤であるPACや消毒剤である次亜塩素酸ナトリウム、塩素の使用により増加する。

水中のカルシウム塩及びマグネシウム塩は主とし

て石灰岩・チョーク等の堆積岩からくるものであるが、海水・工場排水・下水などの混入によることもある。

3. 解析対象データと解析手法

京都盆地内には、国土交通省による地下水観測が行われており、時間水位および年数回の採水水質分析が行われている(Fig.1)。このうち 1992～2002 年の水質データについて解析を行った(田中他, 2009)。観測は年4回(2・5・8・11 月)、毎年8月に主要な溶存イオン類を含む 26 項目の水質分析が行われ、他の3回は電気伝導度等の 17 項目に限定されている。そのため、今回の分析には8月の分析結果のみを用い、欠測等により 22 地点について解析を行う。時空間密度が高いことが本解析の特徴のひとつである。まず、各地点の8月の全観測期間平均値を用いて、地下水水質特性を解析する基本的な手法であるヘキサダイアグラム・トリリニアダイアグラムによる水質空間分布特性を解析した。次に、溶存イオン成分に窒素・リン等の他の観測項目を加えたデータの期間平均値について主成分分析をおこない、主成分得点を対象としたクラスター分析を行い水質特性の類似する観測地点の空間分布を解析した。これらの結果をもとに、地層・地質特性との関係性について検討した。さらに、各年度の観測値について、ヘキサダイアグラム・トリリニアダイアグラムによる水質類型の経年変化について考察した。

4. 京都盆地地質特性

第四紀(200 万年前以降)、数回にわたって大阪湾を通じて京都盆地内にも海水が浸入して海域になり、海成層が堆積した。この時代の地層は大阪層群に相当する。京都盆地丘陵地で 150～200mある。

地下構造調査で基盤岩堆積層は、主に段丘堆積層や大阪層群に属する砂礫、砂、粘土などよりなり、堆積物の形成年代を特定するために重要な指標となる火山灰層や、海域に堆積した海成粘土層(Ma3～Ma6, Ma9)などが確認された。これにより、京都盆地では、過去において大阪湾が盆地にも拡大していた時期が少なくとも5回あったことが確認された(新関西基盤, 2002)。

京都盆地は琵琶湖の南西、大阪平野の北東に位置する東・西・北方を山地に囲まれた小規模な盆地であり、京都府の南東端にあたる。盆地の大部分を占める京都市の人口は、京都府全体の半数以上にのぼる。

山地ほとんどは、砂岩・泥岩・チャート・緑色岩な

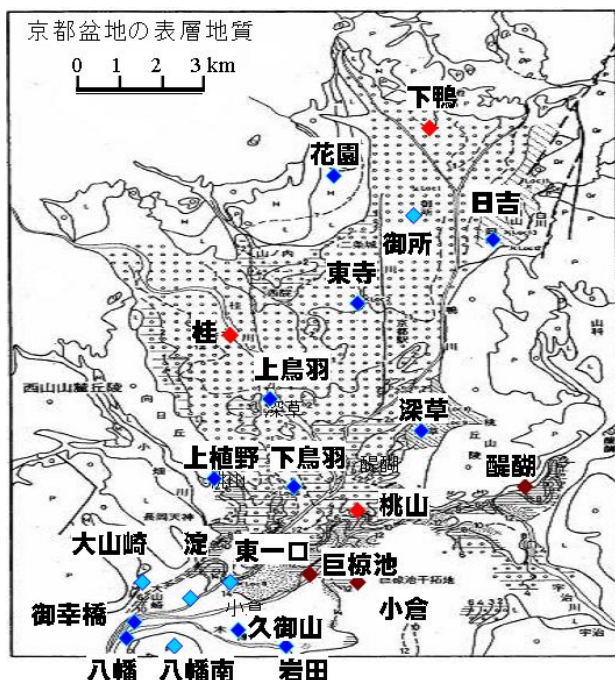


Fig.1 Groundwater observation well spot of analysis area

どから構成される丹波帯の中・古生層からなる。

丘陵地の大阪層群は、主に半固結の粘土・シルト・砂・礫から構成された。その層厚は、京都盆地の丘陵部で 150～200m あり、大阪の丘陵部で 400m や地下での 1500m に比べると、全般に薄い。

深草地域の丘陵に露出する大阪層群は、層厚 130m で砂礫層を主とし、4 枚の海成粘土層、ピンク、山田、アズキ、深草、八町池など 5 枚火山灰層を挟んでいる。挟まれる海成粘土層の準は、火山灰層との層位関係から、Ma3、Ma4、Ma4、Ma6 層に対比されている。Ma3 層の下位には、連続の良い粘土層が挟まれるが、いずれも淡水成層である。

京都盆地の段丘は北部発達するほか、西山丘陵の東麓や東山の西麓にみられる。河川成あるいは扇状地成の段丘構成層であり、礫層を主体とする。

扇状地・沖積低地とその地下：京都盆地内の低地部は、南部で標高 10～20m であり、巨椋池干拓地付近が最も低くなる。ここを中心にして、沼沢地や後背湿地で堆積したとみられる軟弱な粘土・シルト層が分布する。沖積層厚は北から南へ増加しているが、東西方向ではほぼ同様である。そして南部地域地下水中で有機物が多い。

京都盆地東方にある東山山地に境されて、標高 20～50m の山科盆地が位置している。これらの低地部には、扇状地成の砂礫層を主とする堆積物が分布する。

堆積層は、主に段丘堆積層や大阪層群に属する砂礫、砂、粘土などよりなり、堆積物の形成年代を特定するために重要な指標となる火山灰層や、海域に堆積した海成粘土層(Ma3～Ma6、Ma9)などが確認された。地質粒子に分類：礫の粒径 2mm 以上、砂の粒径は 2mm～1/16mm、シルトの粒径は 1/16mm～1/256mm、粘土粒径は 1/256 mm 下になっている。桂川小畑川沿いは未固結堆積物である「泥がち堆積物」により、構成されている。

丘陵部には、一部半固結堆積物の「粘土・砂互層が見られる」。礫がち堆積物は、桂川ならびに中小支流河川の現河川と、その流域平地の大部分は細

砂と粘土の細互層である。「泥がち堆積物」は 沖積平地のかんりの部にみられるものであえい、深さ 10m 前後までは砂を挟むが、主として池沼性粘土と泥炭よりなっている。粘土・砂互層大阪層群下部層の上に連続的に堆積した、大阪層群上部層で、主に花崗岩質砂と粘土の互層である。

京都盆地は内陸性の盆地であり、東、西及び北の三方を山地または丘陵地によって囲まれ、南に開いている。盆地内では北縁、北大路付近の基盤標高が最も高く地表の勾配も急である。盆地南に向かうにつれて基盤標高は低くなり、地表勾配も緩やかになる。三川合流地点は基盤標高は低くなって、地表とほぼ水平になる。

京都盆地周辺部とは京都盆地を取り囲む山地及び丘陵地と京都盆地の境界部分であり、この地域の基盤は、ほとんどの場所に大阪層群が出現することが特徴である。盆地内側北部は地形的みれば段丘と扇状地で、粘土層は薄い、礫層は地表近くから堆積している。盆地南部は地形的みれば、桂川、宇治川及び木津川の氾濫原であり、緩い砂及び軟らかい粘土が互層もしくは単独で表層部を厚く覆っている。盆地南部の支持層も礫が主体であるが、盆地北部に比べて粘土や砂をかなり大きく割合で含んでいる。特に木津川沿いでは砂層の比率が高くなっている。

5. 解析結果

(1) ヘキサダイアグラム分析結果

ヘキサダイアグラムは陽・陰イオンの当量濃度 (meq/L) のバランスから陽・陰それぞれのイオンの主要成分から水質特性を分類する方法である。22 地下水観測点 1992～2002 年 8 の月の地下水陰、陽イオン濃度当量イオン濃度 (meq/l) に変換してヘキサダイアグラム分析した。形状あるいは記入した点の位置により水質の特性を視覚的に比較することができる。主要 7 成分 (ナトリウムイオン、カリウムイオン、マグネシウムイオン、カルシウムイオン、炭酸水素イ

Table 2 Classification result by the hexadiagram

類型	CaHCO3型	NaHCO3型	CaSO4型	中間型
代表地点のダイアグラム形状				
分類地点名	淀, 大山崎, 八幡南, 御所, 東一口	上鳥羽, 下鳥羽, 東寺, 岩田, 八幡, 日吉, 深草, 花園, 上植野, 久御山, 御幸橋	醍醐, 小倉, 巨椋池	桂, 桃山, 下鴨

オン、硫酸イオン及び塩化物イオン)に硝酸イオンを加えた8成分を用いて、水質の特性を視覚的に比較することができる。分類結果をTable 2に示す。全22地点中11地点が NaHCO_3 型に分類され、多くが盆地中央部の沖積層堆積地域に存在する、これらの地下水水質が河川水と類似した特性を示しており、河川からの涵養が主要な地下水特性を表している、盆地周辺丘陵部に位置する日吉・上植野・深草等の地点では、河川水の影響と丘陵部浸透水の影響が混在する。盆地中央の沖積層堆積物と丘陵部の洪積層堆積物の影響も混在する。盆地南部の醍醐・巨椋池・小倉の3地点は CaSO_4 型を示しており、表層地質図からこの付近には丘陵部や宇治川断層付近の粘土・砂層が堆積していることが確認できたので、地質の影響を示していると推定した。

(2) トリリニアダイアグラム分析

トリリニアダイアグラムもヘキサダイアグラムと同様に主要な陽・陰イオンの当量濃度のバランスからキーダイアグラムと呼ばれる菱形グラフのプロット位置から水質特性进行分类する方法である。 $\text{Na} \cdot \text{K} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Ca} \cdot \text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{NO}_3$ の8つのイオン成分を用いてトリリニアダイアグラムを作成し(Fig.2), 基本的な5つの類型に分類した。

I型は $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 型(重炭酸カルシウム型)とよばれ、日本の循環性地下水の大半がこの型に属し、特に石灰岩地域の地下水は典型的にこの型を示すといわれているが、観測地点でこれに属するものは見られなかった。II型は NaHCO_3 型(重炭酸ナトリウム型)とよばれ、河川水・浅層地下水の特徴を示し、盆地中央部の11地点(桃山・大山崎・御所・上鳥羽・淀・岩田・八幡南・下鳥羽・東寺・東一

口・桂)がこの型に属する。III型は CaSO_4 あるいは CaCl_2 型(非重炭酸カルシウム型)とよばれ、停滞的な環境にある地下水、特に温泉水・鉱泉水および化石塩水等がこの型に属する。一般的な河川水・地下水ではまれで、温泉水や工業排水等の混入が考えられる。対象領域ではストレーナー深度が最も深い八幡のみがこの型に属している。IV型は NaSO_4 あるいは NaCl 型(非重炭酸ナトリウム型)で、海水および海水が混入した地下水・温泉水等がこの型に属する。地形的に東山山麓部に位置する日吉・深草の2地点がこの型に属する。この2地点を結ぶように花折断層・桃山断層が通っており、深層地下水あるいは温泉水の影響を受けている可能性がある。V型は中間型とよばれ、I~Vの中間的な型で、河川水・伏流水および循環性地下水の多くがこの型に属する。8地点がこの型に属するが、久御山のみがIII型に近く、醍醐・小倉・巨椋池はI型、下鴨・上植野・御幸橋・花園はII型とIV型の中間に位置する。

盆地中央部の多くの地点は河川水の影響を強く受けており、周辺丘陵部の地点は地層や地質等の影響を受けて、多様な水質特性を示している。

(3) 多変量解析を用いた水質特性の分析

多変量解析の手法のうち主成分分析とクラスター分析は水質特性を解析するために用いられることが多い。主成分分析とは多数の変数を少数の情報(主成分)に要約する分析手法であり、多種多様な水質指標で表される水質特性を集約し、主成分を総合指標あるいは合成指標として用いることで水質特性を明らかにできる。さらに、各地点の主成分得点に対してクラスター分析を行うことで、水質特性が類似する地点を階層的に分類できる。本研究で分析に用いた水質項目は、上記の溶存イオンにpH・電気伝導度・溶存酸素量・COD・総窒素・総リンを加えた13項目について11年間の8月期観測データ平均値を対象として主成分分析を行った。巨椋池地点はデータの欠測により分析から除外している。第4主成分までの累積寄与率は84.4%であり、京都盆地の地下水水質はこれらの主成分でその特性を集約できることが明らかになった。第1・第2主成分の主成分負荷量をFig.3に示す。第1主成分はDO以外の溶存成分全てが正の負荷量となることから総合的な水質特性を示す軸と解釈した。第2主成分は2価のイオンが負の負荷量、正の負荷量をもつ水質項目はリン・窒素等の地表負荷となる肥料成分や表流水を特徴付ける炭酸イオン等なので、正は肥料等表面負荷を負は停滞性の強い地下水の影響の強さを示していると解釈した。第3・第4主成分については明確

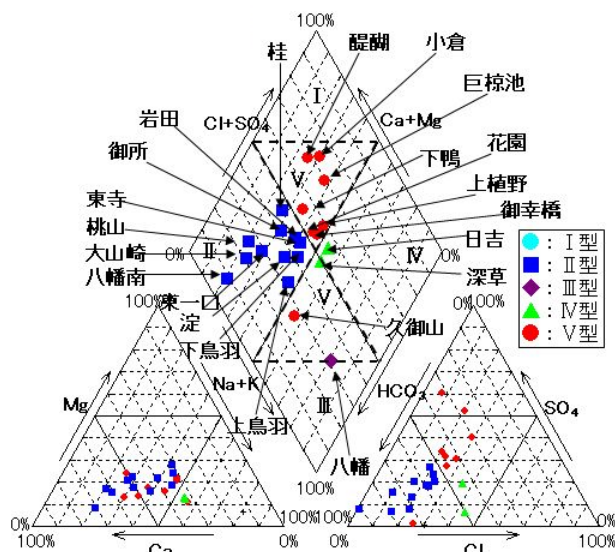


Fig.2 The result of Trilinear diagram

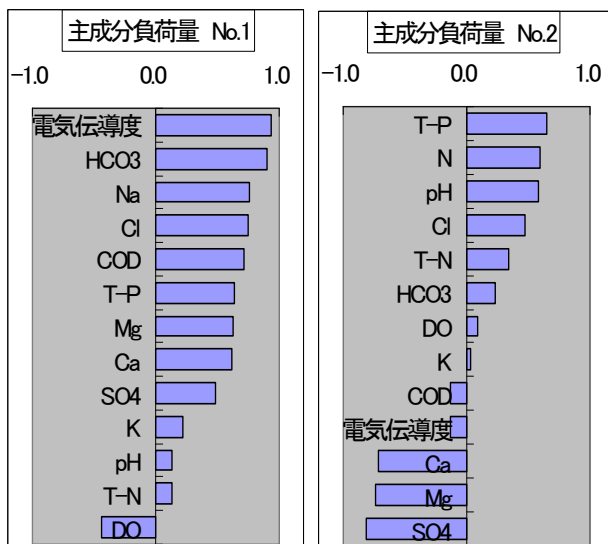


Fig.3 The result of quantity load by principal component(1)

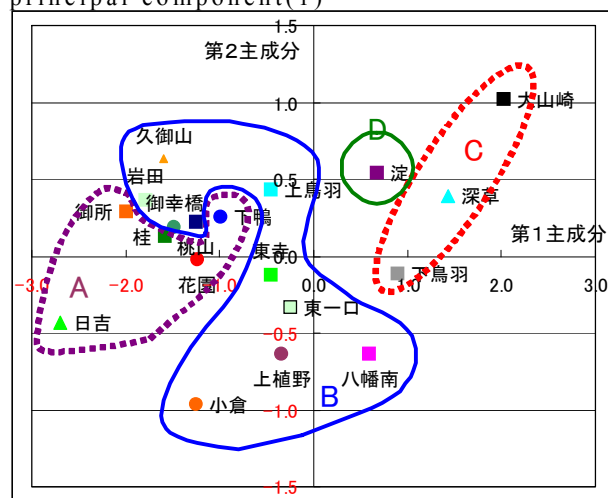


Fig.4 Result by cluster analysis(1)

な意味を解釈するのは困難であった。

第4主成分までの主成分得点を対象としてクラスター分析の結果を Fig.4 に示す。図は第1・第2主成分得点を両軸に配置したプロット図であり、おおよそ上位2つの主成分軸で水質特性が分類されている。クラスターB については第3・第4主成分が反映されて、図では入り組んだグループとなっている。なお、醍醐と八幡については主成分得点が極端に大きく、図の範囲外にあり、それぞれ独立したクラスター(E・F)として分類されている。クラスターA は盆地北部の丘陵地に近い平地に位置し、扇状地形上に位置しているのが特徴である。クラスターC は桃山丘陵部付近から南西の大山崎まではほぼ直線上に並んでいる。多くの地点が属するクラスターB は盆地中央部から宇治川を越えて南部域まで広がっている。

主成分の意味をより明確にし、観測地点の地下水水質の特性を解析するために、分析対象とする水質項目の取捨選択を行った。まず、溶解性鉄と溶解性Mnの相関係数が高く、 SO_4^{2-} とMgの相関係数も高いので、これらの物質については汚染源が同じと考

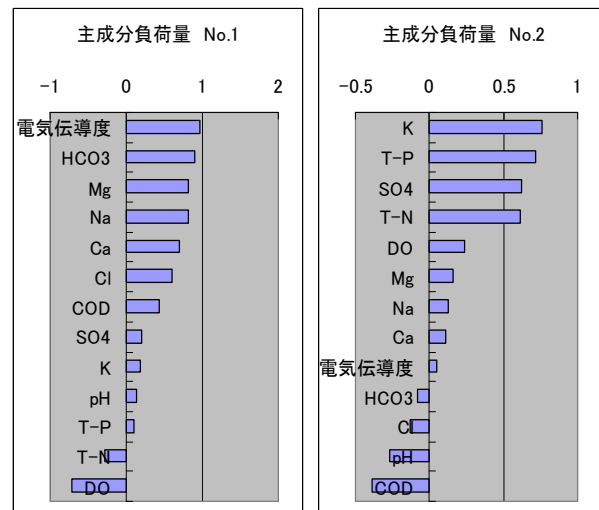


Fig.5 Result of quantity load by principal component(2)

えられ、分析から除外した。また、NaイオンとT-Pも相関係数が高いが、両項目の汚染源は通常異なり、リンは肥料汚染来源、Naは自然界に存在する地質由来と考えられるので、この影響が反映されるようにここでは両項目を分析対象としている。

醍醐と八幡を含んだ21地点の主成分およびクラスター分析では項目の増減にかかわらず、醍醐と八幡は独立のグループに分類されたので、これら二地点を除いた19地点について主成分分析を行った。相関係数が高い項目を一つずつ除いた計10ケースの主成分クラスター分析のうち、特徴的な5ケースについての結果を以下に示す。

ケース1は15項目に対して主成分分析を行ったものであり、第一主成分は地質影響を受け、かつ比較的長期間、帯水層内でイオン交換が進んでいる状態の特徴を示す。第二主成分は、河川水の影響影響を受けている主成分である(Fig.5)。クラスター分析より分類結果はFig.6に示す。グループ1:花園、下鴨、小倉、上植野、日吉、御所、桂、桃山、御幸橋、久御山、岩田、グループ2:大山崎、八幡南、上鳥羽、東一口、東寺、下鳥羽、グループ3:淀、グループ4:深草となった。

ケース2は溶解性鉄と溶解性Mnを除いた分析結果である。Mg、電気伝導度、 SO_4 が正の主成分負荷量をもっており、地質の影響が考えられる。また、 HCO_3 とCODも正になっており、それは地下水の影響と考えられ、第一主成分は地下水と地質の総合影響を受けていると解釈する。第二主成分負荷量はK、T-P、T-N等が正になっているため、第二主成分が肥料の影響を受けていると解釈する(Fig.7)。

クラスター分析結果をFig.8に示す。グループ1:花園、下鴨、小倉、日吉、御所、桂、グループ2:桃山、御幸橋、久御山、岩田、グループ3:上植野、上鳥羽、八幡南、東一口、東寺、下鳥羽、グループ4:大山崎、深草、グループ5:淀となった。

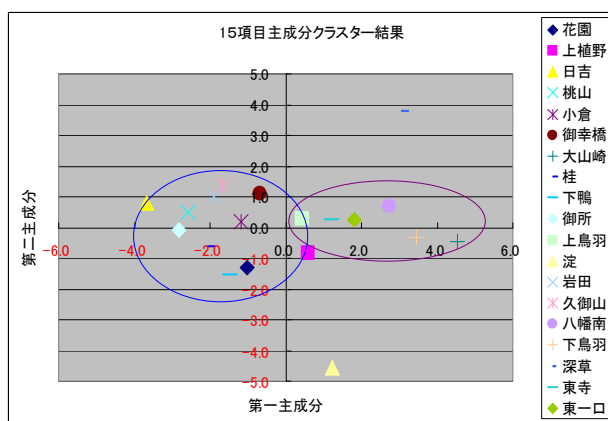


Fig.6 Results of cluster analysis(2)

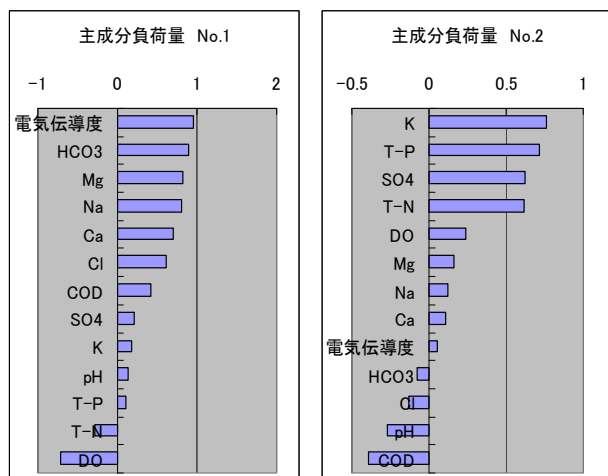


Fig.7 Results of quantity load by principal component (3)

ケース3は溶解性鉄と溶解性Mnに加えて、これらとの相関が比較的高いMg, Na, Caを除いた。第一主成分ではHCO₃の主成分得点が正、DOが負になっていることから、地下水中のイオン交換が進んだ状態を示していると解釈した。第二主成分はK, T-P, T-Nが正になっていることから、肥料汚染の影響を受けていると解釈した。クラスター分析結果はFig.9に示す。グループ1: 花園, 下鴨, 日吉, 御所, 桂, グループ2: 桃山, 久御山, 岩田, グループ3: 上植野, 上鳥羽, 小倉, 御幸橋, 東一口, 東寺, 八幡南, 下鳥羽, グループ4: 大山崎, 深草, グループ5: 淀となった。

ケース4はヘキサダイアグラム・トリリダイアグラム分析の分析対象と同じ7イオンについての結果である。第一主成分は全項目の負荷量が正であり、総合的な地下水の水質特性を示していると考えられ。第二主成分負荷量はSO₄, Mgが正になっており、これは温泉等地質の影響、またNa, Clも正になっているので塩水の影響を受けていると解釈できる。クラスター分析結果をFig.10で示す。グループ1: 花園, 御幸橋, 下鴨, 小倉, 桂, 上鳥羽, 日吉, 桃山, 久

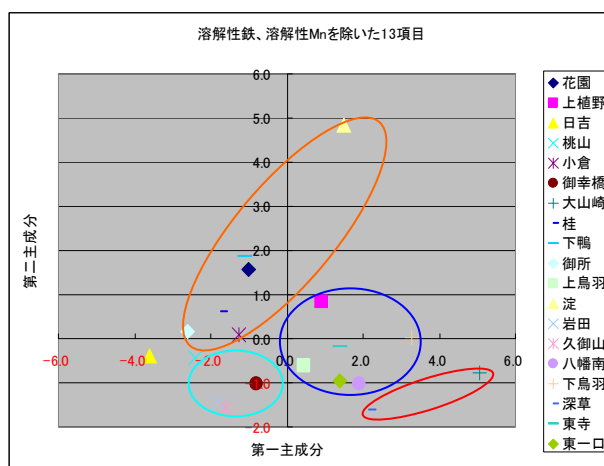


Fig.8 Result of cluster analysis (3)

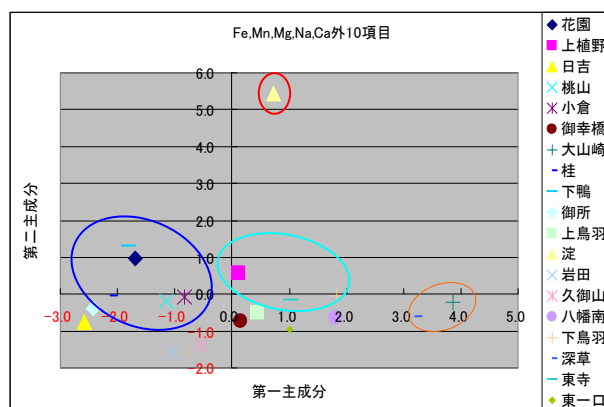


Fig.9 Result of cluster analysis (4)

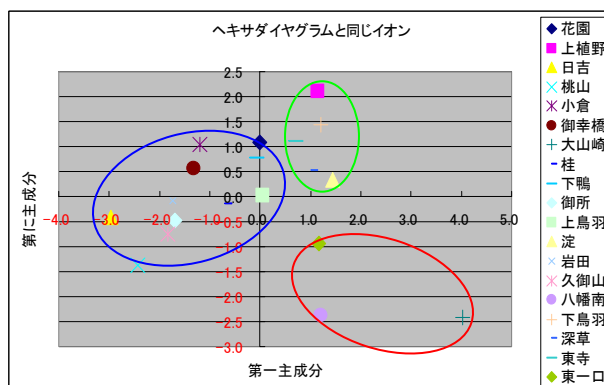


Fig.10 Result of cluster analysis (4)

御山, 御所, 岩田, グループ2: 上植野, 東寺, 下鳥羽, 深草, 淀, グループ3: 大山崎, 八幡南, 東一口となった。

(4) 地下水水質の空間分布特性の考察

以上、3つの解析方法で分類された結果を、ヘキサダイアグラム・トリリニアダイアグラムによる分類の順番で整理し Table 3 にまとめる。当然ではあるが、分析データや分析の視点が共通する両ダイアグラムの分類結果は同じ組み合わせになる地点が多い。ヘキサダイアグラムで炭酸型、トリリニアダイアグラムでⅡ型に分類された地点は盆地中央部に位置し、

基本的に河川と類似した水質特性を示すタイプに分類されている。しかし、ヘキサダイアグラムで NaHCO_3 型に分類された観測地点のうち、トリニアダイアグラムでは河川水に近いと分類されたⅡ型（上鳥羽・下鳥羽・東寺・岩田）と停滞的な地下水であるⅢ型（八幡）、温泉水や海水などに近いと分類されたⅣ型（日吉・深草）も存在する。主成分分析＋クラスター分析では、イオン項目以外の水質分析値も解析に加えているので、さらに細かい分類となっている。この内、下鳥羽地点は多変量解析の結果は丘陵部の深草や盆地南西部の大山崎などと同じクラスターに分類されている。下鳥羽の観測井戸のストレーナー深度は地表から約 50m と深く、この付近のボーリングデータでは地表から約 60m 以深に洪積世の火山灰層と粘土層が堆積している（新関西基盤，2002），その影響で溶存イオン類以外の水質指標を加えた総合指標（主成分）により丘陵部の河岸段丘や大阪層群の地質の影響が強く表れている深草などと類似した水質特性を示している。クラスター F に分類された八幡地点も同様で、比較的深い地下水を採水していると考えられる井戸の場合、周囲の地層・地質の影響とともに表層から鉛直方向に連続した帯水層が存在することで河川水の影響も強く表れていると推定される。

3つの解析手法の結果を複合して考察することで、帯水層の構造や負荷源となりうる地層・地質などを推定することが可能である。

6. 地質の地下水質に与える影響

京都盆地北部地域は、丹後半島を北端とし、地質は花崗岩が発達し、新第三紀層・三畳紀層等からなる。淀川流域（南部地域）は、淀川の3支川である桂川・宇治川・木津川の流域に京都盆地・亀岡盆地など比較的広大な平坦地を形成し、地質は秩父古生層・花崗岩・洪積層からなっている。花崗岩中の降水起源の地下水は基本的に、浅部では弱酸性・中性の $\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{HCO}_3$ 型であり、深部では弱アルカリ性の $\text{Na}\cdot\text{HCO}_3$ 型である。盆地中心と南干拓地の地下水質は $\text{Na}\cdot\text{HCO}_3$ 型と $\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{HCO}_3$ 型になっている。

京都盆地地下水質観測データから、花園1999年8月の SO_4^{2-} 濃度は 64.4 mg/L。醍醐の11年間平均 SO_4^{2-} 濃度は 204.24 mg/L で、最高値は1995年8月 SO_4^{2-} 543 mg/L。上植野11年間平均 SO_4^{2-} 濃度は 32.5 mg/L。小倉11年間平均 SO_4^{2-} 濃度は 44.24 mg/L、最高値は1993年8月の SO_4^{2-} 濃度は 210 mg/L。巨椋池2002年8月の SO_4^{2-} 濃度は 35.7

Table 3 Result of three classification analysis

地点名	ヘキサダイアグラム	トリリダイアグラム	多変量解析
上鳥羽	NaHCO_3 型	Ⅱ	B
岩田	NaHCO_3 型	Ⅱ	B
東寺	NaHCO_3 型	Ⅱ	B
下鳥羽	NaHCO_3 型	Ⅱ	C
八幡	NaHCO_3 型	Ⅲ	F
日吉	NaHCO_3 型	Ⅳ	A
深草	NaHCO_3 型	Ⅳ	C
花園	NaHCO_3 型	V	A
上植野	NaHCO_3 型	V	B
御幸橋	NaHCO_3 型	V	B
久御山	NaHCO_3 型	V	B
桂	中間型	Ⅱ	A
桃山	中間型	Ⅱ	B
下鴨	中間型	V	A
御所	CaHCO_3 型	Ⅱ	A
八幡南	CaHCO_3 型	Ⅱ	B
東一口	CaHCO_3 型	Ⅱ	B
大山崎	CaHCO_3 型	Ⅱ	C
淀	CaHCO_3 型	Ⅱ	D
小倉	CaSO_4 型	V	B
醍醐	CaSO_4 型	V	E
巨椋池	CaSO_4 型	V	

mg/L。下鴨1996年 SO_4^{2-} 濃度 41.2 g/L、1997年 37.1 g/L。淀2000年 SO_4^{2-} 濃度は 30.7 g/L。長岡京11年間平均 SO_4^{2-} 濃度は 57.97 mg/L、全時期 30 mg/L 以上。下鳥羽1993年 SO_4^{2-} 濃度は 30.4 mg/L で、1994年 SO_4^{2-} 濃度は 32.9 mg/L。深草1993年 SO_4^{2-} 濃度は 32.2 mg/L。東寺1993年 30.6 mg/L、1994年 33.4 mg/L になっている、これらの地点では、特に地下水質は地質の影響を強く受けていると推定した。

醍醐地点は山科東部から発達した扇状地にあたる。大阪層群が地表面近くに出現しており、洪積層である礫層と粘土層が繰り返す互層が見られる。醍醐以南～六地蔵までは、宇治川の蛇行の外側にあたるため、山科川は宇治川に流れ込むことができず、この地域で河川が停滞し、氾濫を繰り返していたと考えられる。

八幡付近の表層は沖積層粘土・砂で非常に厚い。井戸の深度は非常に深く、洪積層礫層から水を取っている。このため近隣の御幸橋より採水深度が大きく異なり、その結果クラスター分析の結果、異なるグループに分類された。これは採水帯水層の地層が異なる影響だと考えられる。

桂川、宇治川、木津川合流する三川合流点周辺は、河川がつくった氾濫原と自然堤防の裏側にできる排水不良の湿地からなる低平地である。

御幸橋付近の表層は沖積層粘土・砂で、非常に厚い。井戸の採水深度は八幡と異なる層から水を取っている。木津川が花崗岩地帯を流れるために花崗岩質の砂が広く堆積している。

上鳥羽観測点付近はボーリングデータで地表から 75m 下に火山灰層があることが確認されている。

井戸のストレナナの位置は非常に深く、井戸深度は58mと非常に深い。しかし、トリリダグラムと主成分分析の結果では河川型になっており、河川水の影響が火山灰層よりも強くなっていると判断する。

桃山地点の井戸水深は浅く、沖積層に位置する。ストレナ位置も浅いが、礫・砂・粘土が混在している洪積層にあたり、洪積層が比較的表層近くに現れている。水質特性は河川の影響が強い。桃山付近で粘土・砂互層が顕著に見られるので、桃山西縁互層と呼ばれる。粘土層・砂層・礫層が数mごとに互層状に堆積している。

日吉付近の地質は大阪層群の粘土層に位置している。日吉は山科盆地の西に位置して、西側の丘陵地に花山断層があり、これに対して、西側の東山が上昇し、山科盆地が沈降していることも起因すると考えられる。西側に見られる粘土優勢な地層は市原編(1993)では、大阪層群の粘土層であることが明らかになった。水質特性分類の結果では温泉水に分類されており、このことから地質と断層の影響が強いと推定できる。

深草付近の地質は洪積層粘土層が主であり、礫層もすこし混在している。深草地点の井戸採水深は洪積層礫層に位置し、深いところは粘土層である。ボーリング図から見ると日吉のボーリング図と類似しており、水質特性分類の結果ではグループで、地質の影響が河川より強いと推定できる。小倉付近の地質は表層は沖積相当層の細粒層で、下層は洪積層の分布深度が最も深い。

淀地点は沖積層粘土層から水を取っているため、特に河川の影響が強く現れている。また、下鴨観測点の井戸取水層も礫層であり、同様に河川水の影響が強い。

岩田地点の取水帯水層は非常に深く、大阪層群に当たるが、水質特性分類の結果からは河川型になっており、河川水の影響が強い。同様に、御所地点の取水帯水層も洪積層砂礫層にあたるが、やはり河川水の影響が強い特性を示している。

上植野付近の地質は洪積層で、取水帯水層は礫

層に位置している。また花園付近は地形的に見れば段丘であり、粘土層及びシルト層が比較的厚く分布している。

7. 各地点のイオン濃度の経年変化の特徴

観測データの経年変化を分析すると、特定の年だけ各イオン濃度が変化する地点が見られたが、その傾向や原因を個別に明らかにしても、その地点の水質特性の時間変動特性を説明することは困難であった。そこで、まず毎年8月期データについてヘキサダイアグラムを用いた類型分類を行い、その経年変化を確認した。盆地中央部の地点は全期間を通じてほぼ NaHCO_3 型と CaHCO_3 型の類型に属して経年変化は見られず、盆地周辺丘陵部の地点で期間内に類型が変化する地点(醍醐・日吉・深草・上植野)が見られた。これらの地点と比較のために全期間を通じて同一類型と判定された淀地点について、11年間の8月期データのトリリニアダイアグラムにもとづく水質類型を確認した(Table 4)。

醍醐地点は山科盆地に属し、京都盆地中央部とは地形・地質的に異なる特性を持つ。1994年まではⅡ型と CaHCO_3 型に分類される年もあるが、96～97年にはⅣ型や $\text{NaSO}_4 \cdot \text{MgSO}_4$ という特殊な類型が見られ、その後はⅠ型と CaSO_4 型で安定している。時間の経過とともに河川水影響から停滞性地下水あるいは土壌土質の影響が強くなってきたと考えられる。1996～1997年には醍醐付近では地下鉄工事が行われており、その影響で水質特性が一時的に攪乱された可能性が高い。

日吉・深草・上植野は盆地周辺丘陵部に位置し、河川水と丘陵部浸透水が涵養源であり、盆地中央の沖積層堆積物と丘陵部の洪積層堆積物の影響が混在すると考えられる。日吉は全期間中でⅤ型に属する年が多く、 NaHCO_3 型と NaHCO_3 型なので、基本的には河川水の影響が強いと考えられるが、Ⅰ・Ⅱ・Ⅳ型や MgCl 型など海水由来を思わせる類型も現れる、日吉観測井戸の深度は地表から約16

Table 4 Temporal variation of the diagram classification at five observation points

各年観測値に基づくダイアグラム分類の経年変化(上段:トリリニアダイアグラム, 下段:ヘキサダイアグラム)											
	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
日吉	V	V	II	IV	V	V	II	II	V	V	I
	ND	NaHCO3型	NaHCO3型	NaHCO3型	NaHCO3型	CaHCO3型	CaHCO3型	CaHCO3型	NaHCO3型	NaHCO3型	MgCl
深草	IV	IV	IV	V	IV	V	IV	V	IV	IV	IV
	NaCl	NaHCO3型	NaCl	NaHCO3型	NaHCO3型	NaHCO3型	NaCl	NaHCO3型	NaHCO3型	NaHCO3型	ND
上植野	V	V	V	V	V	IV	V	V	IV	V	V
	NaHCO3型	NaHCO3型	NaHCO3型	NaHCO3型	NaSO4	NaSO4	NaSO4	NaHCO3型	NaSO4	NaHCO3型	ND
淀	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
	CaHCO3型	CaHCO3型	CaHCO3型	CaHCO3型	NaHCO3型	NaHCO3型	CaHCO3型	CaHCO3型	CaHCO3型	CaHCO3型	ND
醍醐	II	I	II	I	IV	I	I	V	V	I	I
	CaHCO3型	CaSO4型	CaHCO3型	CaSO4型	NaSO4	MgSO4	CaSO4型	CaSO4型	CaSO4型	ND	CaSO4型

mとそれほど深い井戸ではないが、地層・地質データから洪積世海成堆積層が地表付近に存在しており、これが塩分供給源となっている可能性が高い。

深草地点はヘキサダイアグラムによる分類では主にⅣ型が現れ、1995～1999年の間に1年おきにⅤ型に分類される。トリリニアダイアグラムでは1998年まではNaCl型が現れる年もあるが、多くの年でNaHCO₃型に分類される。丘陵部の海生堆積層の影響と河川水の影響が数年間隔で変動していることが考えられる。上植野は中間型のⅤ型から地下水の特性を表すⅣ型へ、河川影響を示すNaHCO₃型からNaSO₄型へ経年的に移行しており、河川の影響が経年的に小さくなっている可能性がある。

淀地点は11年の全期間でトリリニアダイアグラムのⅡ型に属しており、河川水の影響を強く受け、水質の経年的変化は小さい。淀地点と同様に桃山・桂・御所・下鳥羽・八幡南・上鳥羽・岩田・東一口・東寺の9地点でもは全期間を通して8年以上Ⅱ型と分類された。

8. 結論

京都盆地水系の地下水水質観測データを用いて、ヘキサダイアグラムとトリリニアダイアグラム、および多変量解析を用いた水質特性の類型分類をおこなう、その時空間分布特性と地層・地質等の要因との関係について考察を行った。その結果、盆地中央部の平地部の地下水帯は河川表流水の影響を強く受けており、また深度の深い井戸においても河川水の影響がみられ、帯水層が表層から比較的深い層まで連続している場所があることが明らかとなった。また、盆地周辺の丘陵部では、段丘堆積物や洪積層堆積層の影響を受け、温泉水や停滞性の強い地下水の特性が見られた。さらに、10年程度の期間では、多くの観測地点の水質特性はほぼ同類型であるが、地下構造物建設等により一時的に水質特性が変動する場合も明らかとなった。以上の解析結果をもとに、水質特性から見た地下水帯水層の構造をモデル化したり、涵養源・汚染源を特定するなどを利用して、地下水の持続的な利用可能性や汚染対策を検討・評価するための地下水水質モデル解析を行う上で、涵養源や負荷源のパラメータを時空間的に与えるための有効な情報となりうる。

参考文献

関西地盤情報活用協議会(2007):新関西地盤一

京都盆地。

楠見晴重:城陽市の地質と地下水流動特性について、第6回城陽市環境フォーラム講演資料、2007。

日本地下水学会編(2000):地下水水質の基礎、理工図書。

田中幸夫・城戸由能・中北英一(2009):京都盆地を対象とした地下水流動および水質解析、京都大学防災研究所年報、Vol.52, pp.607-624。

馬場俊幸・江頭和彦(2005):化学工場等における土壌・地下水汚染の発生原因と防止対策、九大農学芸誌、Vol.60, No.1, pp.35-47。

環境省環境管理局水環境部(2002):平成12年度土壌汚染調査・対策事例及び対応状況に関する調査結果。

藤原拓・大年邦雄・唐心強・山辺敬介(2001):沿岸施設園芸地帯における地下水水質の多変量解析による類型化に関する研究、水環境学会誌、Vol.24, No.11, pp.724-732。

栃本博・関山登・矢口久美子・瀬戸博(2005):多変量解析による伊豆大島水源地下水の水質特性の解明、水環境学会誌、Vol.28, No.12, pp.759-767。

総合研究開発機構(1986):地下水管理における「京都方式」の研究、(社)システム科学研究所報告書。

大山崎町・応用地学研究所(1982):地下水汚染に関する調査委託報告書。

環境省(2008):中央環境審議会総合政策部会公害防止計画小委員会第18回会合、環境省中央環境審議会、<https://www.env.go.jp/council/02policy/y022-18a.html>(参照2010/02/15)。

斉藤卓弥・米田稔・森澤真輔(2005):桂川右岸地下水の水質分布変化に関する研究、環境工学研究論文集、Vol.42, pp.81-90。

黒田和男(2008):地下水位・地下水水質年表から見る地下水動態の変遷と課題--京都盆地中央部の事例、地下水技術、Vol.50, No.10, pp.9-22。

向井浩・治田隆宏・田中里志(2009):井水の化学成分に基づく京都盆地北部市街域の地下水系の解析、地球化学、Vol.43, pp.45-57。

国土交通省河川局監修:地下水年表、地下水技術協会、1994～2004。

宮下規(2007):地下水利用及び基盤沈下対策の現状と課題、水環境学会誌、Vol.30, pp.2-6。

新藤純子、岡本勝男、佐藤洋平(2009)、農業環

環境技術研究所，食料生産・消費に伴う環境への窒素流出と水質汚染の変化を推定するモデルを開発－将来の食料需給や農業生産の変化が環境に与える影響の予測への利用が期待－，農業環境技術研究所，発表日：2009年8月18日，<http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/presentation/090818/press090818.html>。

島田 允堯(2003):ヒ素に汚染された地下水の起源と問題点，資源地質，Vol.53，No.2，pp.161-172。

国土交通省(2007):今後の地下水利用のあり方に関する懇談会」報告 2007.3。

楠見晴重:京都の地下水，NHKスペシャル『アジア古都物語/京都-千年の水脈』，p.84。

松坂総一郎(2003):土壌・地下水汚染調査と浄化事例，資源地質，53(2)，pp.153～160。

中村高志，長田淑美，風間ふたば(2008):水素・酸素および窒素安定同位体組成からみた甲府盆地東部地下水の涵養源と硝酸イオン濃度分布特性，水環境学会誌，Vol.31，pp.87～92。

Analysis of Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Groundwater Quality in Kyoto Basin

Batuer Abudoureyimu*, Yoshinobu KIDO, Shingo AWADSU* and Eiichi NAKAKITA

*Graduate school of Engineering, Kyoto University

Synopsis

It is important to investigate and analyze the water budget and the material balance in comprehensive basin-wide for conservation and utilization of the water resources. Especially, it refers to water resource management for the future and emergency water supply, too. In this study, groundwater quality in Kyoto basin is analyzed in order to classify water quality characteristics with concentration of some anion, kation and other pollutants. These results show spatial and temporal distribution characteristics of groundwater quality and they can be used for identification of aquifer and calibration and verification of hydrodynamics of groundwater flow model and water quality model in Kyoto Basin.

Keywords : Kyoto basin, groundwater quality, spatial and temporal distribution characteristics