

6)白川中流域における地下水の類型化と流動について

松本 尚己

要 旨

イオン成分等の水質を指標に、本流域における地下水の類型化と流動について解析を行った。解析の結果、第1帯水層は、火砕流堆積物Aso2が河川により浸食された地質構造を覆う河川堆積段丘砂礫層中の宙水により構成され、白川中流域に点在していると考えられ、これらの宙水の存在により、第2帯水層に属する井戸の一部では、期間により水質変動が生じると推測された。

キーワード：宙水，クラスター解析，濃度相関マトリックス法

はじめに

白川中流域一帯は、透水性の高い火山灰土の上にあることから、この浸透水は熊本都市圏の重要な地下水涵養源と考えられ、火山灰土は水質浄化の面でも評価されている。本地域では水理・水量に関する調査^{1)~3)}は多いものの、水質に関する調査¹⁾は少なく、熊本都市圏での硝酸性窒素濃度が近年上昇傾向にあることから、水質に関する基礎調査が必要と考えられる。2006年10月から2007年12月まで、大津・菊陽地区で地下水及び灌漑用水のイオン成分等の分析を行い、その結果を解析したところ、各井戸の類似等から本地域の地下水の流動等について若干の知見を得たので報告する。

実験方法

1 調査地点及び採水方法

表1に今回調査した井戸の諸元を示した。

迫井手については、白川から取水した表流水(以下、「迫井手」と略す)であり、湛水の影響を調べるため調査地点とした。

浅井戸、深井戸については、大津町岩坂に設置されている観測井戸の呼称であり、白川の左岸に位置する。

また、白川右岸の水田地帯にあり、白川から1km以内に位置する3カ所の井戸(井戸S、井戸H、井戸E)、右岸で白川から2.8~5km離れた菊池台地の畑地にある3カ所の井戸(井戸M、井戸T、井戸Y)、岩坂地区の下流に位置し畑地にある井戸1カ所(井戸F)を調査地点とした。

岩坂観測井2地点及び井戸Eでは、調査の都度、水中ポンプにより採水し、その他の井戸は、設置してある蛇口から採水した。また、迫井手については、取水口近くの流心から直接採水した。

なお、各井戸のストレーナー位置については不明であった。

2 測定項目及び測定方法

測定項目は、pH、導電率(EC)のほか、 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 及び Ca^{2+} のイオン成分を測定した。

pHはメトラー製セブンマルチ、ECはTOA製CM-60Gを用いて測定した。 HCO_3^- は、4.3アルカリ度から計算により求め、 PO_4^{3-} はモリブデン青吸光光度法により測定した。それ以外のイオン成分は、イオンクロマトグラフ法(Dionex製DX-500)を用いて分析した。

なお、以後、イオン成分の電荷は表示しない。

表1 調査井戸の緒元

調査地点名	標高	井戸深度	採水期間	周辺の土地利用状況	備考(白川からの距離)
迫井手	---	表流水	2006.10~2007.12	(白川から取水)	岩坂地区水田用水(0.0km)
浅井戸(岩坂地区観測井戸)	90.8m	20m	2006.10~2007.12	水田	観測井戸(0.4km)
深井戸(岩坂地区観測井戸)	90.2m	65m	2006.10~2007.12	水田	観測井戸(0.45km)
井戸F	約95m	150m	2007.4~2007.12	畑地	白川左岸(0.9km)
井戸S	約106m	100m以上	2007.4~2007.12	水田、畑地	白川右岸(0.3km)
井戸H	100~150m	148m	2007.5~2007.12	水田、畑地	白川右岸(0.6km)
井戸E	約90m	約10m	2007.5~2007.12	民家と水田	白川右岸(0.2km)
井戸M	163m	180m	2007.4~2007.12	林地、北東部は畑地	白川右岸(2.8km)
井戸T	157m	153.5m	2007.5、2008.1	宅地、北部は畑地	白川右岸(5km)
井戸Y	125m	116、143m	2007.5、2008.1	畑地	白川右岸(2.8km)

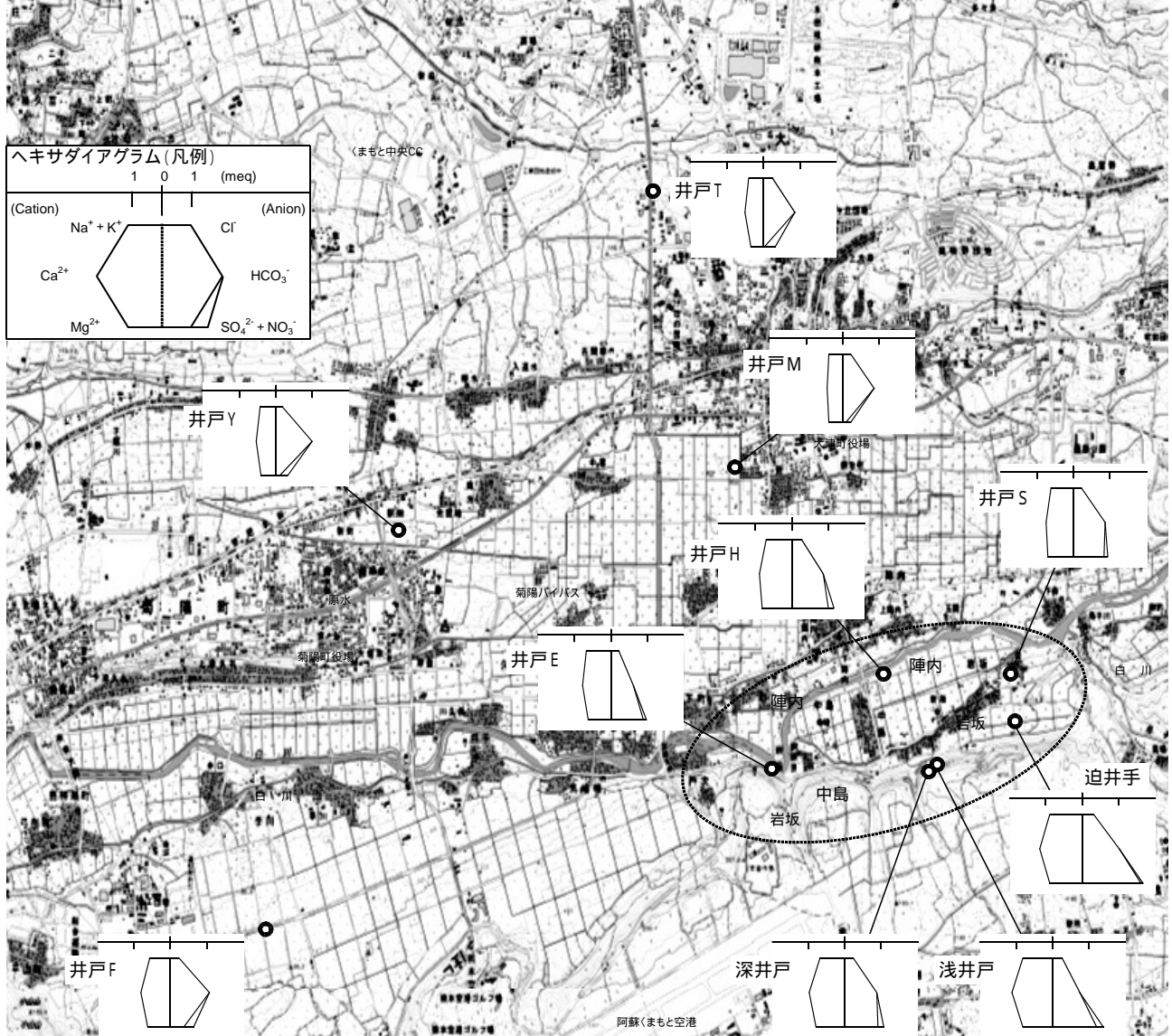


図1 調査地点のイオン成分(当量)のヘキサダイアグラム

結果及び考察

1 調査地点のイオン成分比較について

図1に調査地点のイオン成分(当量)のヘキサダイアグラムを示す。

なお、水質データは調査期間すべての平均値を使用した。

岩坂・中島・陣内地区の井戸(図中で囲んだ中の井戸)は迫井手で取水した表流水(以下、「迫井手」と略す)と同様のCa-SO₄型のヘキサダイアグラム、岩坂・中島・陣内地区以外の井戸F及び菊池台地に位置する井戸M、井戸T及び井戸Yにあっては、Ca-HCO₃型のヘキサダイアグラムであった。

なお、井戸Eに関しては、約10mの深さの掘抜き井戸であり日常的な井戸使用や管理が行われておらず、外部環境の影響を大きく受ける状況であったことから、以後、データ、解析結果等は示すものの、解析解釈の対象からは外した。

図2にF等を含めたイオン10成分を迫井手と各井戸を比較したレーダーチャートを示した。

なお、水質データは、調査期間すべての平均値

を当量計算し、微量成分については比較しやすくするため、Fは30倍、Clは3倍、NO₃は4倍、PO₄は150倍、Kは5倍し作図した(以後、同様に倍率を掛け作図した)。

浅井戸については、NO₃やPO₄、SO₄以外については、迫井手とほぼ同様の成分バランスを示しており、類似性が高いと考えられた。NO₃が迫井手に比べて高い濃度を示す理由については、浅井戸の周辺が畑地や水田であることから施肥等による影響と、NO₃とSO₄が共存する土壤溶液ではNO₃はほとんど土壤に吸着されないという報告^{10),11)}から、迫井手の水に含まれるSO₄の影響による溶出濃度の上昇により、高いNO₃濃度が浅井戸で観察されたものと推定された。PO₄やSO₄の減少については、土壤との相互作用により減少したのと考えられるが、PO₄については、実測値を150倍してプロットしており、小さな違いが大きく評価されている点もあり、今後、確認試験が必要と思われた。

また、深層地下水である深井戸、井戸H及び井戸Sにあっても、FとNO₃以外の成分においては、迫

井手と同様の成分バランスであり、これらの3つの井戸においても白川の影響があると考えられた。本地域は白川による洗掘及びカルデラ湖の決壊による洪水によってAso-4、-3及びAso-2の一部が欠如しており、熊本地域で第1帯水層に該当する帯水層が存在しない。このため、表流水である迫井手と深層地下水において何らかの関係性があることは、直接第2帯水層のかん養域となる地下水域であることを裏付ける結果と考えられた。

一方、台地部の井戸M、井戸T及び井戸Yは、迫井手のレーダーチャートとは異なった形を示した。台地部の3つの井戸に関しては、白川と位置的にも離れており、周囲にも白川の水を引き込んだ水田

等も存在しないことから、鉛直方向の影響は、ほぼ降水等に限られると考えられ、白川の影響はないものと考えられた。

井戸Fについては、迫井手よりも、台地部の井戸に近いレーダーチャートを示し、白川に多く含まれるFやSO₄は少ない。井戸F周辺では湛水事業等が行われておらず、周辺の土地利用形態も畑地であることから、鉛直方向での白川の直接的な影響は少ないと考えられる。また、井戸Fは地下水水頭等値線図から判断すると、上流部に位置する深井戸や井戸H、S等の影響を少なからず受ける印象があるが、単純にレーダーチャートの形から考えた場合、影響は受けていないと考えられた。

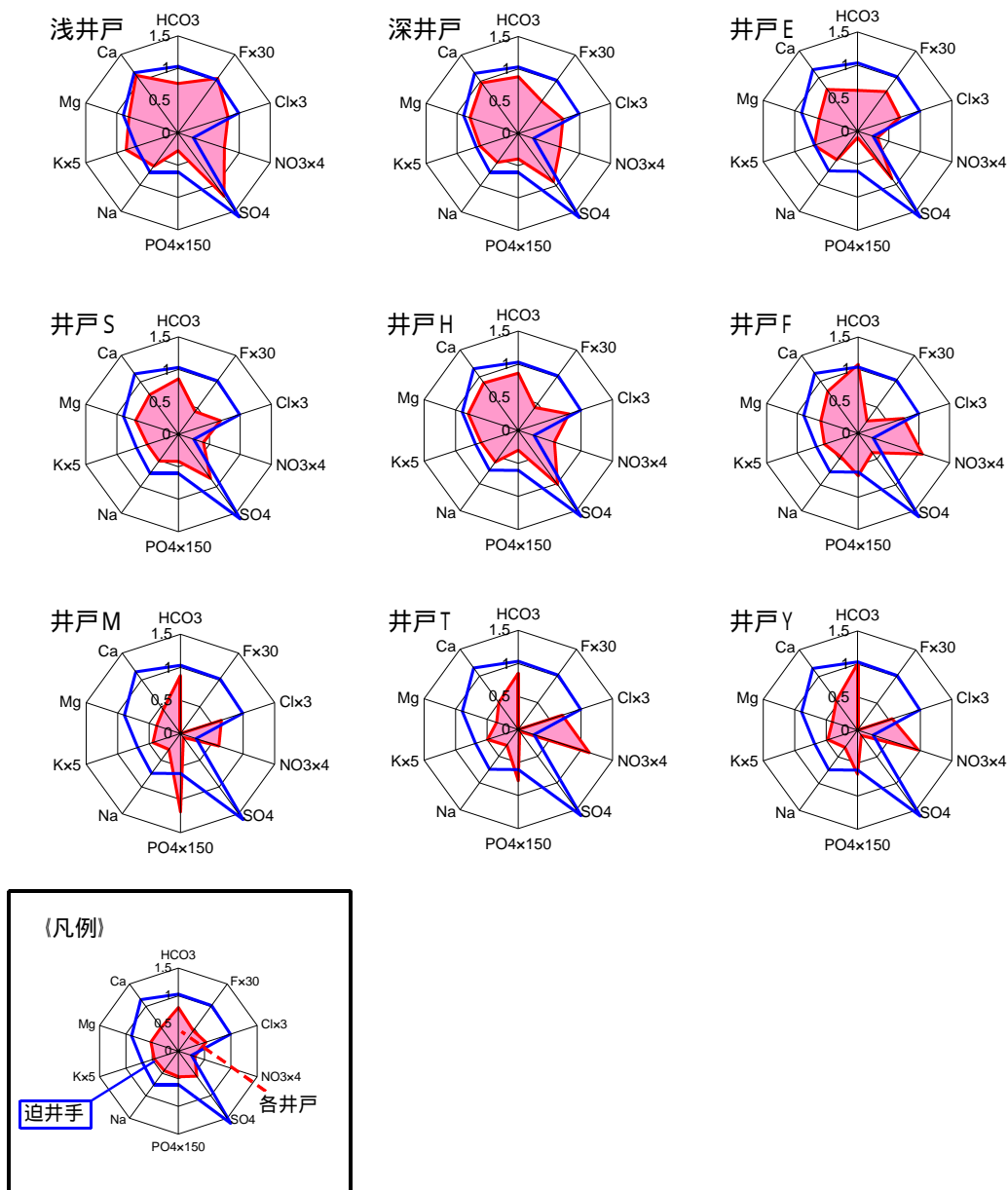


図2 迫井手と各井戸を比較したレーダーチャート

2 期間別による地下水の類型化

図3に深井戸の水位変化(2001年~2007年)を示す。

深井戸は、6月に最低水位標高25m前後となり、その後上昇し10月に最大水位35m前後となるカーブを毎年、同様に描くことは、前の報文5)で報告しているとおりであるが、水位の変化に合わせたタイミングで水質も変化していることが観察された。

水位変化を参考に、A期間(1~5月:水位下降期)とB期間(7~10月:水位上昇期)の2期に分け、以後、水質について解析を行った。

図4に各井戸の期間変化をレーダーチャートで示した。

なお、水質データは、調査期間すべての平均値を当量計算し作図した。

また、井戸T及び井戸Yにおいては、調査時期がA期間しかないため、比較対象から除外した。

基本的に地下水は、外的要因を受けにくく、通年安定した水質を示すとされている。調査井戸のうち、深井戸、井戸S以外の井戸は、期間変化は見られなかったのに対し、深井戸及び井戸Sでは、期間による

水質変化が観察された。

さらに、一般に水位が高くなるB期間においては、水量も多くなることから、溶存成分は希釈効果により少なくなる傾向が見られるのに対し、深井戸と井戸Sにおいては、逆に溶存成分が多くなる現象も観察された。

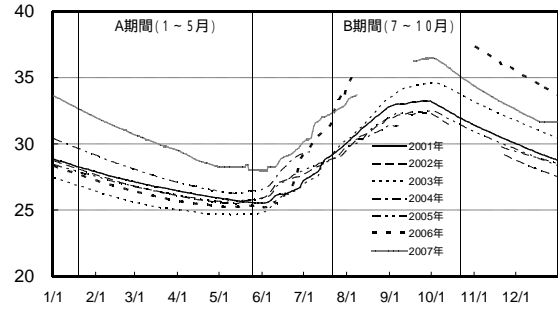


図3 深井戸の水位変化(2001~2007年)

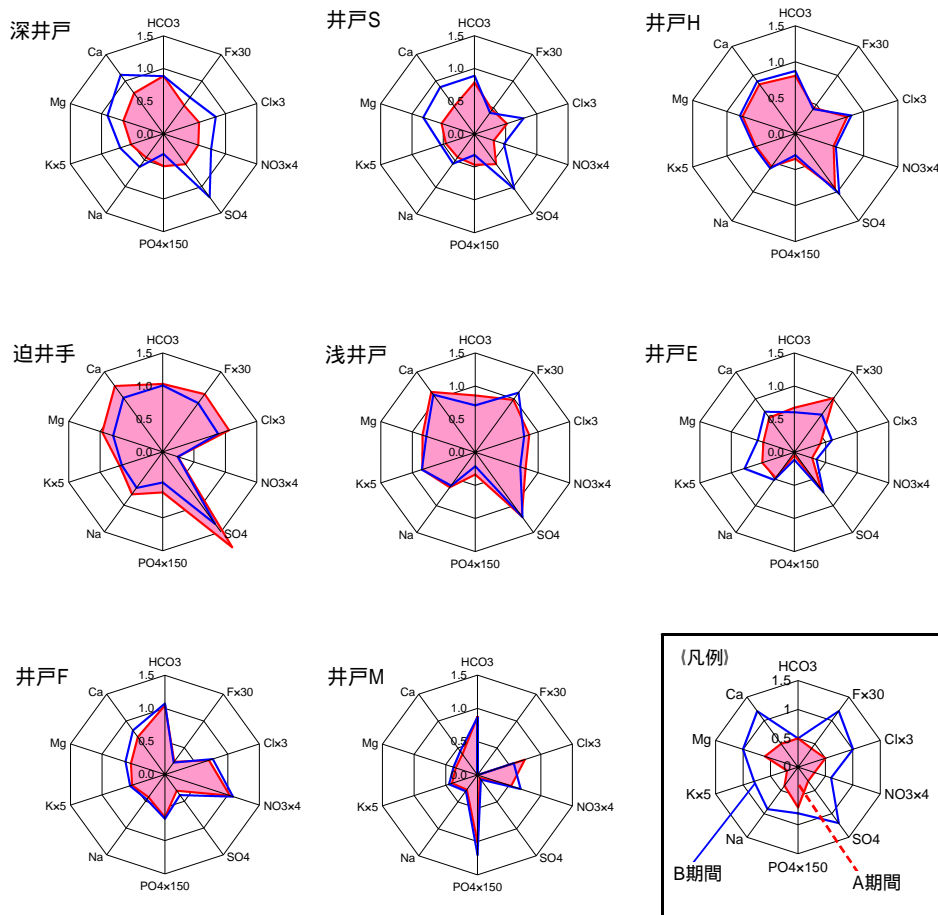


図4 各井戸の期間変化

深井戸と井戸Sについて、期間別に特徴を挙げた。

(A期間)

- ・水量の減少に伴い、溶存成分も減少。白川に特徴的な成分(主成分分析における第1主成分の成分)の減少が見られた。
- ・レーダーチャートの成分バランスから、他の調査地点との類似性はほとんどなかった。
- ・深井戸と井戸Sのレーダーチャートの成分バランスは類似しており、主として深層帯水層の水質を反映したものと考えられた。

(B期間)

- ・水量が増えると同時に溶存成分が増え、レーダーチャートの成分バランスから、深井戸は浅井戸に、井戸Sは井戸Hと類似していた。
- ・白川に特徴的な成分(主成分分析における第1主成分の成分)の増加が見られた。
- ・A期間、B期間での変化は、徐々に変化するというよりも、約1ヶ月間で速やかに変化しており、水位の変化と連動していた。

これにより、深井戸及び井戸Sは、期間別に水質を構成する水源が異なるものと推定された。また、B期間は、希釈効果を受けていないことから、この時期のみの多量の流れ込みがあることが推定され、水質的特徴から迫井手や浅層帯水層からの流入と考えられた。

一方、A期間は、鉛直方向の流動は少なく、深層帯水層による流動が主たる要因の水質を示すものと考えられた。

3 クラスタ解析による期間別地下水の類型化

レーダーチャートにより推測した事象について、主成分分析及びクラスタ解析による分析を試みた。

主成分分析は、多くの変数の値をできるだけ情報の損失なしに、一つ又は少数の合成変量(主成分)で表す方法であり、多くの変数をまとめて現象を要約する解析する方法である。なお、解析は宇佐美らの「地下水水質への多変量解析法の適用」(愛公セ所報No.15)¹²⁾を参考に行った。

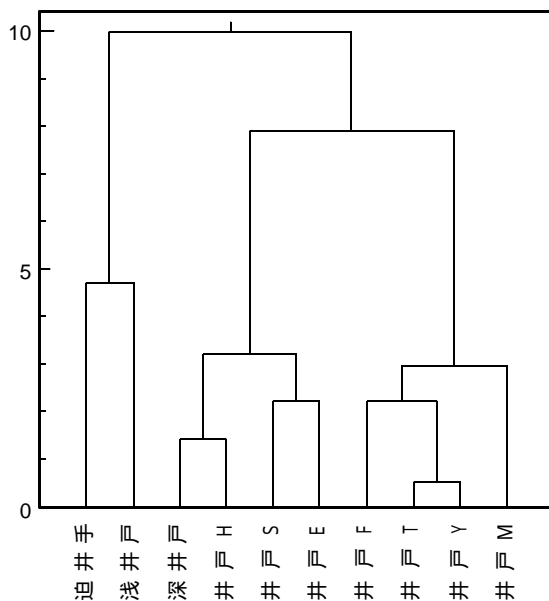
水質データは、イオン成分等の13成分(pH, EC, HCO₃, SiO₂, F, Cl, NO₃, SO₄, PO₄, Na, K, Mg及びCa)の期間別平均値を使用し、まず主成分分析を行い、得られた主成分得点表を元に、比類似度計算をユークリッド平方距離、クラスタ結合手法にウォード法を用いてクラスタ解析を行った。

なお、統計ソフトは、神田公生氏製作の「多変量解析ソフト」及び早狩進氏製作による「クラスタ解析アドイン(エクセルアドインソフト)」を使用した。

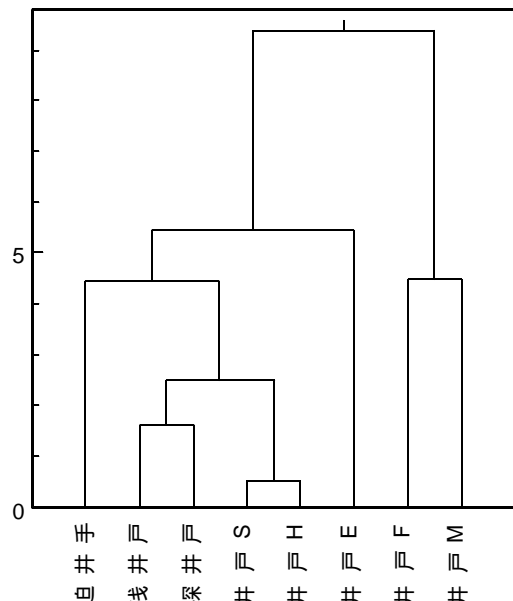
図5に解析の結果得られた、期間別のデンドログラムを示した。

図5 期間別のデンドログラム

A期間(1~5月)



B期間(7~10月)



A期間のデンドログラムから、クラスター相対距離5でグループ分けを行い、以下の3つのグループに分類できた。

(迫井手・浅井戸), (深井戸・井戸H・井戸S),
(井戸F・井戸T・井戸Y・井戸M)

同様に、B期間のデンドログラムから2つのグループに分類できた。

(迫井手・浅井戸・深井戸・井戸H・井戸S), (井戸F・井戸M)

湛水事業や水田活用が始まる前後(A期間・B期間)であっても、迫井手と浅井戸には同程度の類似性が見られ、年間通して、浅層地下水には鉛直方向の影響があることが推測された。

また、深層地下水にあたる深井戸、井戸H及び井戸Sにおいては、期間により各井戸の類似性が異なる傾向が見られ、A期間では深層地下水にあたる井戸のみで類似性が見られるのに対し、B期間では迫井手、浅井戸含め類似性が強くなることが分かった。迫井手との類似性から、深層地下水に対する鉛直方向の影響は、A期間ではほとんどないものの、B期間では浅井戸と同程度あるものと推測される。

また、深層地下水に属する3つ井戸間の類似性においても、井戸Hにおいて深井戸及び井戸Sの各々に対する類似性が変化しており、B期間では井戸Sとかなり高い類似性を示した。井戸Hのレーダーチャートから迫井手の影響がある程度あるものと考え

られたが、クラスター解析では、B期間のみで影響があるという結果となった。井戸Fは、台地部の3つの井戸と類似性があり、A期間においてその傾向が強かった。

4 濃度相関マトリックス法による流動解析

2つの試料間の成因が同じであれば、分析項目の濃度は同じ比率で増減するという地質学的考えに基づいた解析法である濃度相関マトリックス法を使い流動解析を行った。

なお、解析については、主成分分析同様に、宇佐美らの「地下水水質への多変量解析法の適用」(愛公セ所報No.15)¹²⁾及び金沢工大の水村らの特許公開平11-264879「地下水の流動方向の判定方法」¹³⁾を参考に行った。水村らによると、本方法は、同一地層内及び他層への地下水の微妙な流動方向が解明でき、簡単に精度よく行えるとしている。今回、地質的な調査及び各井戸の水位等に関する情報が限定的な調査地点について、水村らの考えを適用し、本地域における流動の解析を試みた。解析には、12成分(EC, HCO₃, SiO₂, F, Cl, NO₃, SO₄, PO₄, Na, K, Mg及びCa)の各期間別の平均値を利用し、各井戸の濃度比行列を算出した。濃度比行列から各井戸間の比率マトリックスを算出し、得られた比率マトリックスから判定基準をM=1.5として、表2に示す期間別の相関数表を得た。

表2 期間別の相関数表

A期間	M=1.5	迫井手	浅井戸	深井戸	井戸F	井戸S	井戸H	井戸E	井戸M	井戸T	井戸Y
迫井手	1.00										
浅井戸	0.83	1.00									
深井戸	0.52	0.65	1.00								
井戸F	0.33	0.35	0.56	1.00							
井戸S	0.50	0.53	0.86	0.56	1.00						
井戸H	0.65	0.71	0.80	0.41	0.68	1.00					
井戸E	0.45	0.53	0.52	0.32	0.65	0.53	1.00				
井戸M	0.17	0.18	0.27	0.36	0.26	0.23	0.23	1.00			
井戸T	0.15	0.17	0.29	0.45	0.27	0.21	0.20	0.53	1.00		
井戸Y	0.23	0.21	0.35	0.59	0.41	0.29	0.20	0.42	0.64	1.00	

B期間	M=1.5	迫井手	浅井戸	深井戸	井戸F	井戸S	井戸H	井戸E	井戸M
迫井手	1.00								
浅井戸	0.80	1.00							
深井戸	0.76	0.68	1.00						
井戸F	0.45	0.33	0.38	1.00					
井戸S	0.65	0.62	0.85	0.44	1.00				
井戸H	0.68	0.70	0.92	0.47	1.00	1.00			
井戸E	0.56	0.70	0.61	0.29	0.56	0.56	1.00		
井戸M	0.24	0.21	0.24	0.42	0.23	0.26	0.23	1.00	

(A期間)

相関数0.75を基準に類似性を判断すると、A期間では、(迫井手・浅井戸)、(深井戸・井戸S)、(深井戸・井戸H)とグループ分けできた。先に行ったクラスター解析と特に矛盾する点はなかったが、井戸Fと台地部の3井戸との類似性があまり強くないという結果であった。

金沢工大の水村らによると地下水の流動方向については、サンプルに同一性があり測定量に大小関係がある場合には、大から小の方向に希釈効果が生じていると考え、分量の大きい地点から小さい地点へ地下水が移動すると判断できるという見解に基づき、流動方向について検討した。

図6に濃度相関マトリックス法によりグループ分けした各井戸の比較レーダーチャートを示す。なお、水質データは、イオン成分10成分を当量計算し、作図した。

迫井手と浅井戸において、NO₃とKにおいて大小関係が崩れているが、肥料成分による増減と考え、相関数も0.83であることから同一性があると判断した。分量の大小から、迫井手から浅井戸への流動があると判断した。

次に、深井戸と井戸Sにおいては、レーダーチャートのずれが少ないことや相関数が0.86であることから同一性があると判断し、分量の大小から、深井戸から井戸Sへの流動があると考えた。

深井戸と井戸Hについては、成分によっては大小関係が大きく崩れており、同一性がないと判断されたので、深井戸から井戸Hへの流動はないと推測した。

(B期間)

B期間でもA期間同様に相関数0.75を基準にグループ分けを行うと、(迫井手・浅井戸)、(迫井手・深井戸)、(深井戸・井戸S)、(深井戸・井戸H)、

(井戸S、井戸H)と区分できた。相関数が1を示す井戸Sと井戸Hについては、この期間においては、ほぼ同一であるという結果となった。

先のクラスター解析の結果と比較すると、浅井戸と深井戸で相関数が小さいものの、岩坂・中島・陣内地区の井戸に関しては、ほぼ同様の結果であった。また、井戸Fと井戸Mにおいては、クラスター解析で得られた結果ほど類似性はなかった。

図7に濃度相関マトリックス法によりグループ分けした各井戸の比較レーダーチャートを示す。なお、水質データは、イオン成分10成分を当量計算し作図した。

同一性と分量の大小から流動を推測すると、迫井手と浅井戸においては、F、NO₃及びKにおいて大小関係が崩れているが、肥料成分による増減や多量の表流水の流入により土壤に吸着できなかったFの溶出によるものと考えられ、相関数も0.80あることから、同一性があるものと判断した。分量の大小から、迫井手から浅井戸への流動があると判断した。

次に、迫井手と深井戸においては、NO₃以外では同一性があるものと判断され、分量の大小から、迫井手から深井戸への流動が考えられた。また相関数から迫井手から深井戸への流動の他に、期間に関係なく浅井戸から深井戸へも流動があると考えられた。また、深井戸と井戸S、深井戸と井戸Hでは、レーダーチャート及び相関数からある程度同一性があるものと考えられたが、深井戸は分量の多い迫井手との相関数が大きく、分量の大小による流動予測は難しいと考えられた。

井戸H、井戸Sの井戸詳細が不明であり、ストレーナー位置や水位等不明であるため、今後さらに詳細調査を行い検証していく必要があると思われる。

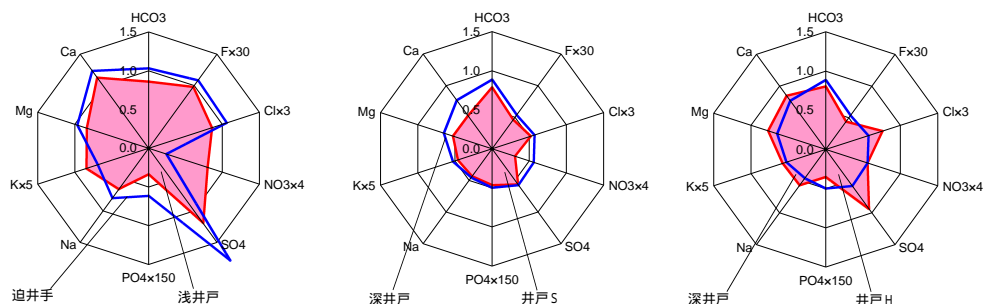


図6 A期間における各井戸の比較レーダーチャート

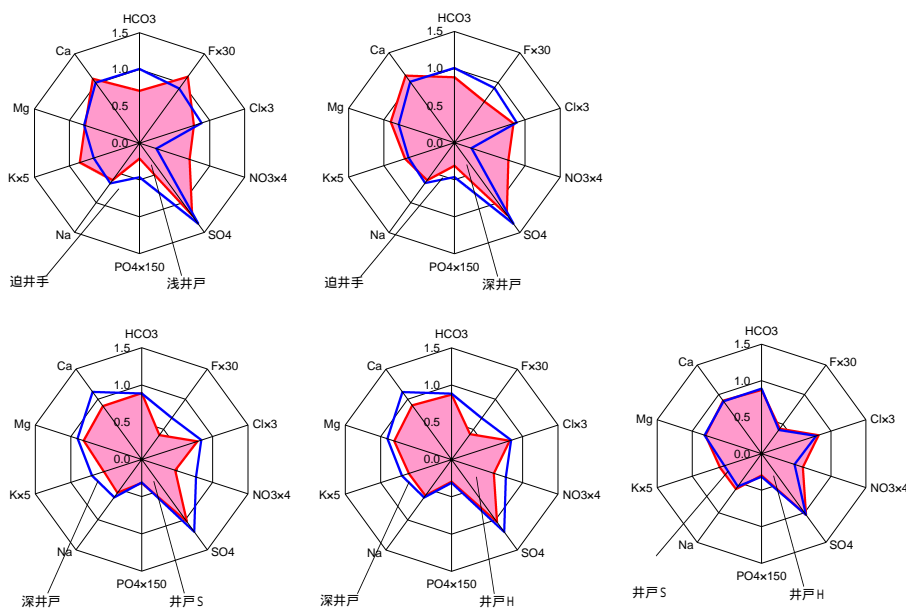


図7 B期間における各井戸の比較レーダーチャート

表3に期間別に比較した相関数表を示した。

クラスター解析等による類型化の部分で、深井戸と井戸Sにおいては、周辺地下に浅層地下水の存在があり、そのことが要因となり鉛直方向の流動量が変化し、水質変化が起こっていると結論づけたが、濃度相関マトリックス法による相関数を見ると、それぞれの井戸の鉛直方向の影響の度合いがある程度推測できた。

深井戸は、A期間においても鉛直方向からの浸透が認められるが、井戸Sや井戸Hとの相関数が大きいことから、深層地下水の流動が主な要因と考えられる。

表3 期間別に比較した相関数表

深井戸

	迫井手	浅井戸	井戸S	井戸H
A期間	0.52	0.65	0.86	0.80
B期間	0.76	0.68	0.85	0.92

井戸S

	迫井手	浅井戸	深井戸	井戸H
A期間	0.50	0.53	0.86	0.68
B期間	0.65	0.62	0.85	1.00

井戸H

	迫井手	浅井戸	深井戸	井戸S
A期間	0.65	0.71	0.80	0.68
B期間	0.68	0.70	0.92	1.00

一方、B期間においては、迫井手との相関数が大きく変化しており、鉛直方向の流動が大きくなっていることが分かった。

先のクラスター解析等による類型化の部分では、漏れ等による浅層帯水層からの流入が大きくなったと考えたが、迫井手との相関数が大きいことから、浅層帯水層を介さず直接流入する経路もあるものと推測された。

次に井戸Sにおいては、基本的には深井戸の流動と同じと考えられるが、迫井手との相関数の変化は、深井戸ほど小さくなく、B期間においてある程度、鉛直方向の流動が増えるものの、井戸Hとの相関数から、井戸Hからの流入による寄与が大きいものと考えられた。

井戸Hにおいては、通年鉛直方向の流動は変わらないと推定でき、B期間において深井戸や井戸Sとの相関数が大きくなっていることから、深層地下水における流動は、井戸Hを起点にしたものと考えられた。

まとめ

これまでの解析から、この地域でいう第1帯水層に属する浅井戸については、迫井手の影響、言い換えると白川の影響を受けていると考えられた。この鉛直方向の影響割合は、通年変化しないものと推測され、浅井戸の水位が標高77~83mの範囲で変化し、白川の水位がほぼ80m前後と似たような標

高を示し、横から浅井戸に流入する可能性もあるが、白川の水位との連動性はなく、湛水事業や水田活用の時期と連動して水位の上昇や水温の変化など観察されていることから、浅井戸への供給は鉛直方向がメインと考えられた。

また、この第1帯水層は、火砕流堆積物Aso2が河川により浸食された地質構造を覆う河川堆積段丘砂礫層中の宙水により構成され、白川中流域に点在しているものと考えられる。これらの宙水の存在から、深層地下水に属する井戸の一部では、期間により鉛直方向の影響により変動が生じると考えられた。

深井戸については、A期間においては、第2帯水層の流動と、第1帯水層からの少量の流動により構成され、B期間においては、A期間の流動プラス多量の鉛直方向からの流動があるものと考えられた。これらの変化は、水温や水質の変化からも速いことが予想された。

井戸Sは深井戸同様の挙動を示すことから、周辺地下の地形的な情報がないため、類推の域を脱し得ないが、深井戸と浅井戸の関係のように、井戸S周辺地下にも宙水が存在すると考えられる。しかし、B期間において深井戸ほど鉛直方向の影響が大きくないことから、井戸Hからの流動により、水質が変化するものと考えられた。

井戸Hは、通年、安定した水質であり、期間別の流動変化はなかった。鉛直方向の流動と第2帯水層の流動により構成され、B期間において深井戸や井戸Sとの相関数が大きくなっていることから、第2帯水層における流動は、井戸Hを起点にしたものと考えられた。

第2帯水層の流動については、水質データに基づく解析のみに頼っているため、水位や地質及び経年変化等の情報を加え、今後も引き続き検証が必要と思われた。

菊池台地部に属する井戸M、井戸T及び井戸Yは、白川の影響は受けておらず、少なくとも台地部から岩坂・中島・陣内地区への流入はないものと考えられた。

井戸Fについては、地下水水頭等値線図からは、岩坂・中島・陣内地区が上流に位置すると考えられるが、今回の水質からの解析では、井戸Fと岩坂・中島・陣内地区の井戸との関係は見出せなかった。

今後、詳細調査を行い、本地域の流動が熊本都市圏へ及ぼす影響等について調査していきたい。

謝 辞

本調査では、熊本市水保全課、大津町環境保全室、大津菊陽水道企業団、水土里ネット大菊、株式会社協和計器、アジアリサーチ株式会社には調査に関連するデータの提供や採水の便宜を図っていただきました。

また、地下水の採水、農地の土壌調査には白川保育園、FF草葉、大津町の江藤様、緒方様、林様等の方々にもご協力いただきました。

報告書作成にあたり、多大なるアドバイスを頂きました熊本大学大学院自然科学研究科川越准教授にも深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 馬場正寛, 岩男明良, 新屋拓郎, 村上睦子, 津留靖尚, 廣野岩男, 田島幸治: 熊本市環境総合研究所報, 50(1997).
- 2) 熊本県, 熊本市: 熊本地域地下水保全対策調査報告書(2005). 熊本県環境生活部環境保全課, 熊本市環境保全部
- 3) 古閑美津久: 日本地下水学会2004年秋季熊本大会公開シンポジウム要旨集(2004).
- 4) 熊本県, 国際航業株式会社: 平成11年度熊本地域における水循環検討調査報告書(2000).
- 5) 嶋田純: 日本水文科学会誌, 34, 81(2004).
- 6) 市川勉: Let's不思議講演会要旨「熊本地域の地下水保全」, (2006).
- 7) 熊本地域地下水研究会: トヨタ財団2000年助成研究報告書「地域の歴史的遺産を活用した地下水保全システムの研究」(2001).
- 8) 環境保全部水保全課, アジアプランニング株式会社: 平成10年度熊本地域地下水かん養水質調査事業業務委託報告書(1999).
- 9) 熊本県, 熊本市: 平成6年度熊本地域地下水総合調査報告書(2003).
- 10) Kamewada, K.: Soil Sci. Plant Nutr, 42, 801-808. (1996).
- 11) 中島伴, 石黒宗秀, 牧野智之, 中石克也: 平成10年度農業土木学会講演会講演要旨集, 648-649(1998).
- 12) 宇佐美義博: 愛公セ所報, 15, 62(1987).
- 13) 水村 和正: 特許公開平11-264879「地下水の流動方向の判定方法」(1999).