

# 高松地域の不圧地下水の水位・水質に 及ぼす灌漑の影響

## EFFECTS OF IRRIGATION ON LEVEL AND QUALITY OF UNCONFINED GROUNDWATER IN TAKAMATSU AREA

河原能久<sup>1</sup>・渡邊健一<sup>2</sup>・橋本美智子<sup>3</sup>

Yoshihisa KAWAHARA, Kenichi WATANABE and Michiko HASHIMOTO

<sup>1</sup> フェロー会員 工博 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)

<sup>2</sup> 学生会員 香川大学大学院工学研究科安全システム建設工学専攻 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)

<sup>3</sup> 学生会員 香川大学工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)

Extensive field measurement of groundwater level and quality was carried out three times in 2002 at sixty five stations in Takamatsu area to clarify the effects of irrigation on the unconfined groundwater. Continuous measurement of groundwater level has also been made at seven stations in addition to the continuous measurement by the public sectors. It is found that the water level gradually increases in the irrigation period with the contours of water level running nearly parallel to those of topography. The rainfall and the pumping up have influence of the change in water level. The pH of groundwater is found to slightly increase in the irrigation season while Stiff diagrams and the cluster analysis demonstrate that the water quality can be classified into four groups and that the groundwater quality mostly remains unchanged. Nitrate nitrogen of unconfined water at a few locations has exceeded the environmental standard, which may have come from the overuse of fertilizer. Some wells in the coastal region have shown the effects of seawater intrusion.

**Key Words :** *unconfined groundwater, water level, water quality, irrigation, field measurement, Takamatsu*

### 1. はじめに

香川県では、多数の溜池の造成に代表されるように、昔から水資源の有効利用が図られてきた。1974年に吉野川から香川用水を導入し水事情は画期的に改善された。しかし、その後における水利用の形態の変化や農地の宅地への転用などで水循環系は変化してきている。このような変化を背景にして、健全な水循環系の保全を図りながら水資源の確保や有効利用を進めることが、高松地域の緊急の課題となっている。

高松地域の不圧地下水の水位については、東京教育大学<sup>1)</sup>が平野部において大規模な調査を行っている。また、新見による湧水の分布と湧出量の調査<sup>2)</sup>、国土交通省や道路公団による高速道路の建設の影響を検討するための地下水位と水質の調査などが行われている。最近では河原原<sup>3)</sup>が不圧および被圧地下水の水位や水質の調査と既存のデータの整理を行っている。しかし、不圧地下水に影響を及ぼす

メカニズムにまで言及している研究は数少ない。

ところで、香川用水は早明浦ダムによって新たに開発された水量のうち、年間2億4,700万 $m^3$ を香川県内に導水している。その年間水量の内訳は農業用水が1億500万 $m^3$ 、水道用水が1億2,200万 $m^3$ 、工業用水が2,000万 $m^3$ である。農業用水としての導水量は、灌漑期に平均で8.0 $m^3/s$ 、最大11.3 $m^3/s$ 、非灌漑期に平均で1.0 $m^3/s$ 、最大1.5 $m^3/s$ となっている。香川用水の導入により農業が安定したことは言うまでもないが、地下水の水位や水質に与えた影響は明らかでなく、水循環系での役割を明らかにすることが必要であると考えられる。

本研究は、灌漑開始前後での地下水の水位、水質を観測し、灌漑の地下水に及ぼす影響を把握することを目的としている。また、香川用水の導水前と現在の地下水の水位を比較することで、香川用水の導入により地域の地下水がどのように変化したかを推測する。なお、地下水の水質に及ぼす施肥や土地利用の影響を調べた研究は多数あるが例えば<sup>4,5)</sup>、灌漑の影響を論じた研究は限られている<sup>6)</sup>。

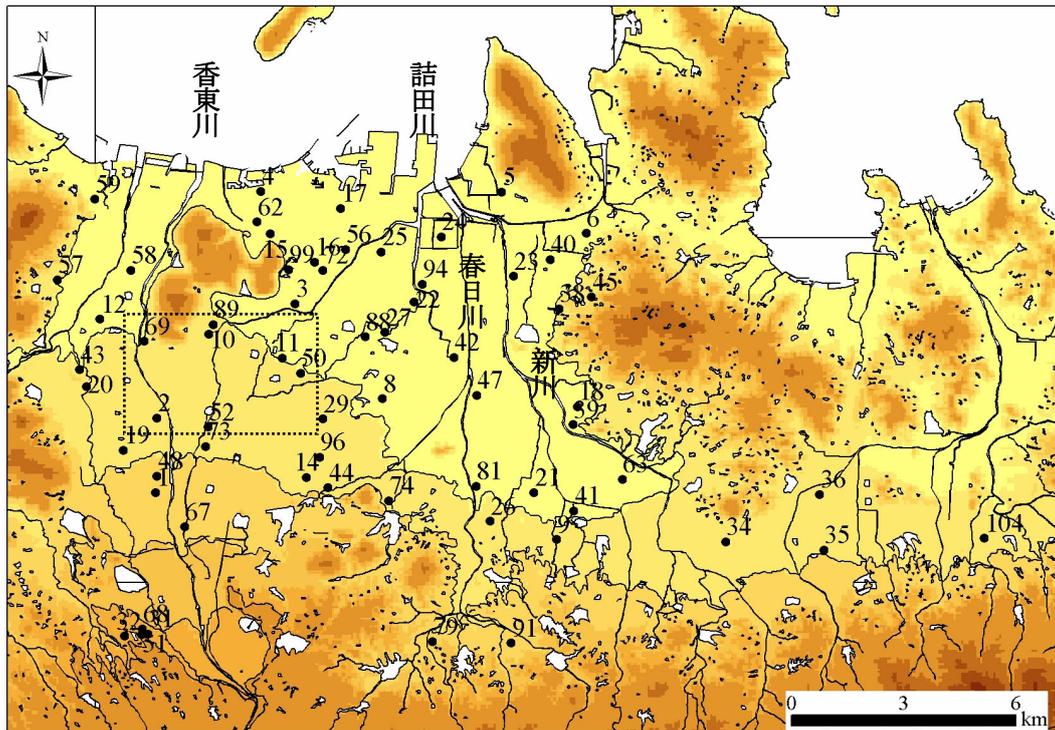


図-1 高松地域の地形と一斉観測を行った井戸の位置

以下では、まず、観測地域の地質の概要、観測内容を説明する。次に、地下水の水位の測定結果と考察、続いて水質分析の結果と考察を述べる。

## 2. 観測地域と観測項目

### (1) 高松地域の地形・地質の概要

高松平野は、西部を流れる香東川により形成された扇状地、東部の春日川、新川等による氾濫平野、および河口部の三角州からなる海岸平野から形成されている(図-1を参照)。香東川右岸の扇状地には多数の旧河道跡や湧水が存在している。

地質は、上位から沖積層(砂礫、砂層中に粘土・シルトが不規則に重なる)、三豊層、基盤(花崗岩類)に大別される。沖積層と三豊層との境界には細粒分が卓越した層が広く広がっており、難透水層となっている。上部の帯水層の厚さは地表から深度20m程度であり、そこに多数の浅井戸が設置されている。また、三豊層中の帯水層は深度40m~100m程度であり、その地下水は被圧状態となっている。

### (2) 観測の概要

観測は2つに大別できる。

1つめの観測は、不圧地下水の水位と水質の空間的な分布を把握することを目的とした一斉観測及び採水した地下水の水質分析である。民家や学校の管

理する浅井戸65箇所において行った。観測井戸の位置を図-1に示す。観測は、2001年3月から3ヶ月に1回の間隔で行っているが、本論文で使用するデータは2002年の①6月5、7日(灌漑前)、②6月26、28日(灌漑開始直後)、及び③9月18、19日(灌漑後半)に測定されたものである。観測項目と使用機器は以下のようなものである。

- ① 地下水位：井戸枠から地下水面までの深さ(YAMAYO ミリオン水位計)
- ② 地下水の水質(現場)：水温、pH、電気伝導度(堀場製作所 D-24)
- ③ 地下水の水質(持ち帰り分析)：各種イオン(島津製作所イオンクロマトグラフィーPIA-1000)

2つめの観測は、特定の地点における水位の時間的な変動を捉えることを目的とした連続観測である。7箇所の井戸にデータロガー付き水位計(光進電気工業 MC-1100W)を設置し1時間間隔で測定した。観測期間は2002年6月1日以降であり、現在も観測を継続している。また、国土交通省香川工事事務所による連続観測結果も入手させていただいた。本論文では取得したデータの一部を示すが、それらの観測地点の位置は図-2に記されている。図-2は、図-1の四角の枠について、土地分類図<sup>7)</sup>上に観測地点をプロットしたものである。多くの観測地点が旧河道周辺に位置している。

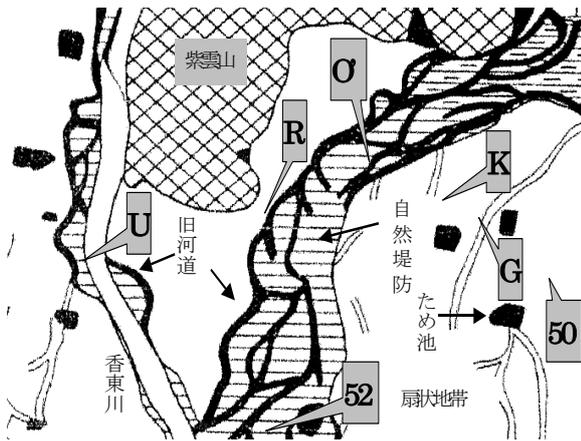


図-2 連続観測地点の位置と土地分類

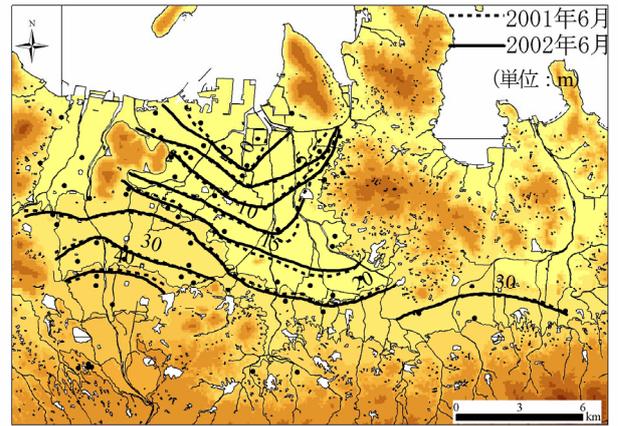


図-4 地下水分布の比較 (2001年6月と2002年6月)

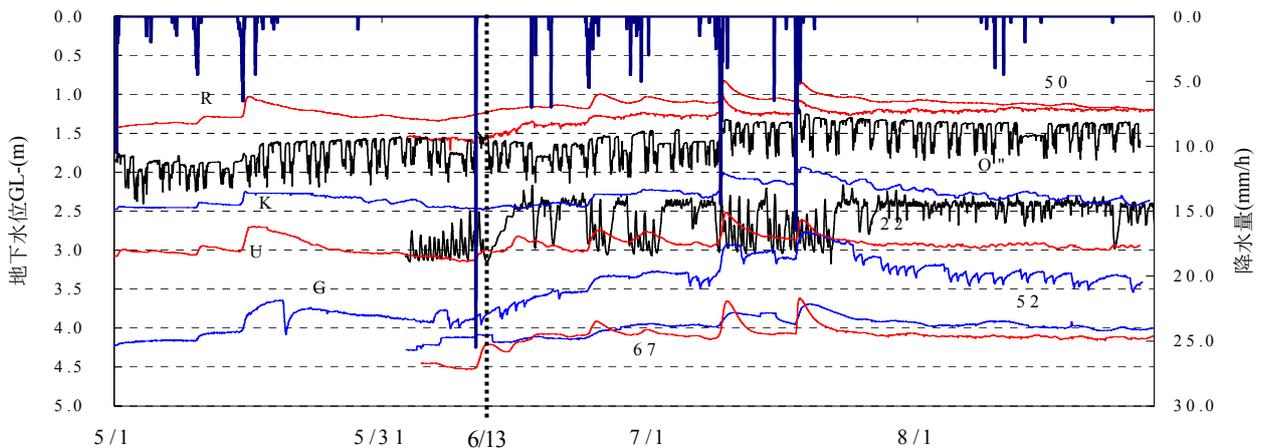


図-3 地下水位の連続観測結果

### 3. 観測結果と考察

#### (1) 地下水の水位

高松地域の地下水位の時間的な変動を知るために、2002年5月はじめから9月上旬にかけての水位の連続観測結果と降水量を図-3に示している。図中の左の縦軸は地表面から地下水面までの深さを示している。この図より、次のことがわかる。

- ① 当該地域の多くの地点では6月13日から灌漑用水が配水されたが、それ以降地下水位はゆるやかに上昇した。
- ② 井戸あるいはその周辺で地下水の揚水が行われている地点がある。図中の曲線に見られる細かい変動は揚水による水位の低下とその後の回復を表している。
- ③ 地下水位の上昇は降雨とよく対応している。灌漑期では降雨による水位の上昇も顕著である。

図-4は、灌漑開始前の水位(標高で表示)について、2001年6月(破線)と2002年6月上旬(実線)の結果を比較したものである。この図より、2002年6月の結果は前年度の同時期のものとほぼ一致して

いること、したがって、2002年度の水位分布は特異なものではないことがわかる。なお、水位の等高線はほぼ地形の等高線に沿う形になっていること、水位が平均海面よりも低い地域が詰田川河口周辺に形成されていることは、この時期に限らず年間を通して確認される現象である。

図-5は、6月上旬の水位に較べて6月下旬の水位がどの程度上昇したかを示したものである。1m程度の水位上昇を示す地点が多いが、図中の黒丸で示すように水位が低下した地点も存在する。水位低下は揚水が盛んに行われていることを表している。

前述のように、灌漑期には農業用水として香川用水から多量の導水が行われている。香川用水の導入により地下水の水位がどのように変化したかを検討する。図-6は1962年5月下旬の水位<sup>1)</sup>と今回の灌漑開始直前の水位とを比較したものである。図中の実線は1962年での地表面から地下水面までの深さの等値線であり、沿岸部では1m以下、春日川・新川周辺では1~2m程度、香東川右岸の扇状地では2~6m程度となっている。特に、扇状部での水位が低く、多量の揚水が行われていたことを示唆している。一方、現状での地下水面までの深さは丸印の大

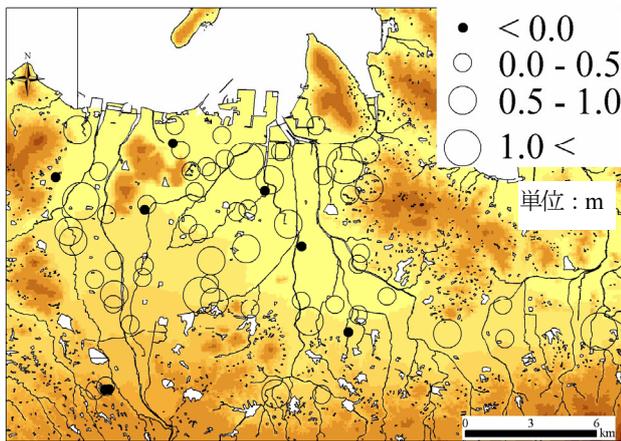


図-5 地下水位の変動量 (2002年6月)

きさで表現されている。扇中央部での水位は現在地表面下 2m 程度の地点が多く、かつてより水位がかなり上昇していることがわかる。一方、沿岸部での水位を比較すると、地下水面までの深さが增大していることが知られる。すなわち、現在の高松地域全体では、上下流部間での地下水面の差が以前より大きくなり、地下水が流れやすい状況にあると判断される。水位変化の原因として、扇中央部では香川用水によって地下水を揚水する必要性が低下し、揚水量が抑制されたためであると推測される。沿岸部では不浸透域の増大により雨水浸透が抑制された可能性がある。ただし、上流部では早場米の作付けを行うために水田に水を張る時期がかつてより早くなっている地域もあり、それによって6月上旬の水位が上昇する可能性については検討が必要である。なお、9月下旬の水位を比較すると、香川用水導入以前と現在との差異は小さいことがわかっている。

図-7は6月上旬から7月中旬までの水位の連続観測結果（地表面からの深さで表示）を示したものである。灌漑期はじめにおいて水位は緩やかに増加している。また、まとまった降雨を受けて段階的に水位が上昇していく。なお、降雨に対する水位応答は特徴がある。河川に近接していたり斜面の下に位置する地点 67 (図-1)、R、U (図-2) では水位の立ち上がりや逡減が明瞭である。扇状地の水ミチ上に位置すると考えられる地点 50、52、K、G (図-2) では変化が穏やかであるが、まとまった降雨に対する応答は早い。

### (1) 地下水の水質

#### a) pH

6月上旬、6月下旬および9月中旬における地下水の pH の測定結果を図-8 に示す。6月から9月にならにつれて、pH の分布特性はあまり変化しないが、酸性から中性に変化する傾向が確認できる。

#### b) ヘキサダイアグラムとクラスター分析

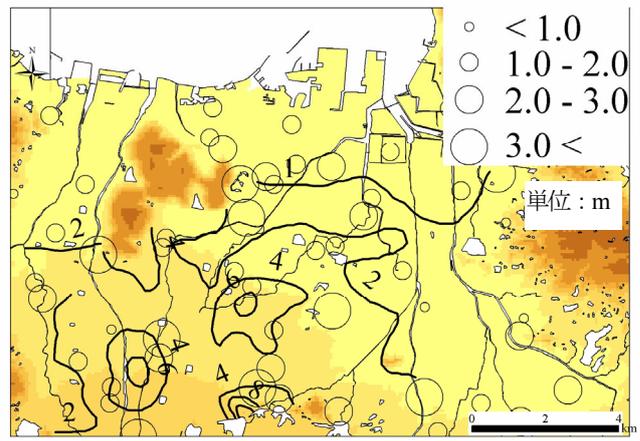


図-6 香川用水導入以前と現在の灌漑前の地下水位の比較

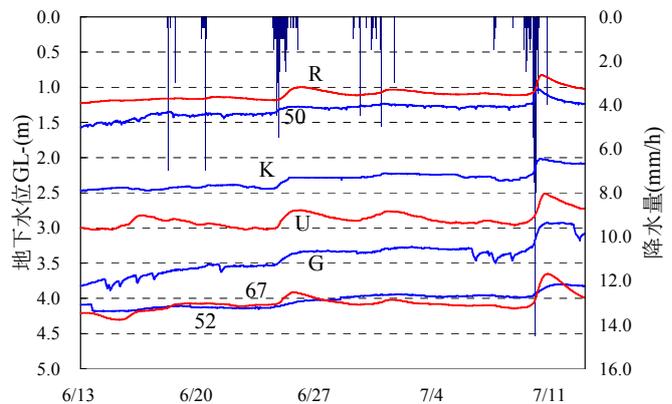


図-7 灌漑期における地下水位変動

図-9は6月上旬と下旬における地下水中の各種イオンの分析結果を基に作成したヘキサダイアグラムである。ヘキサダイアグラムの下の数字は井戸番号である。図より、殆どの地点において、その形、大きさは安定しており、経時的な変化は小さいことがわかる。

ヘキサダイアグラムの作成に用いた各種イオン濃度を変数として6月上旬、下旬、9月の分析結果についてクラスター分析（距離の計算：ウォード法）を行い、水質を4つのグループに分類した。その結果を図-10(a)、(b)、(c)に示す。また、表-1には各群の平均的なイオン組成を示している。それぞれの群の特徴は次のように要約できる。

- 1群:4つの群の中で最も所属する個体数が多く、高松平野全体に分布している。平野南部の井戸のほとんどがこの群に属する。卓越イオンがあるのではなく、どれも量的に少ない。
- 2群:1群の次に属する個体数が多い。高松平野北部に多く見られる。Ca<sup>2+</sup>とHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>が多い。経時的に1群と2群の間で変化する地下水が7地点存在する。
- 3群:この群に属する地点は少なく、沿岸部に位置する井戸(4番、94番)が属している。成

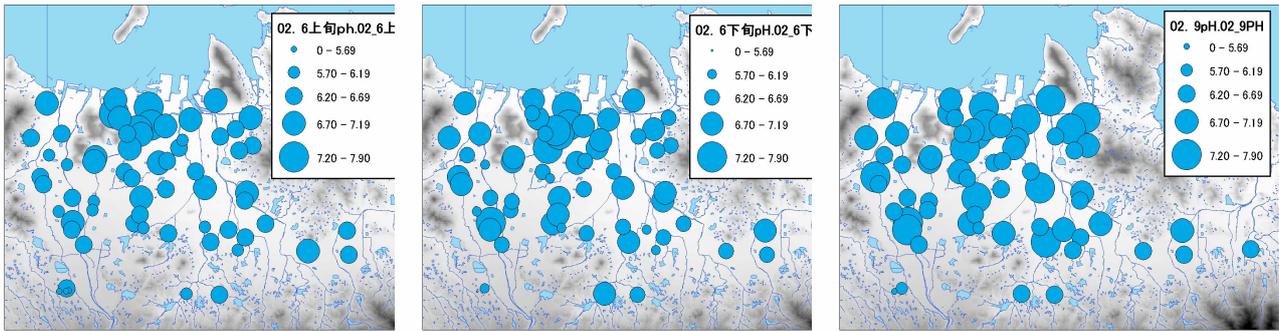


図-8 pH (左から6月上旬, 6月下旬, 9月中旬)

分には  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ が多い. ヘキサダイアグラムと照らし合わせてみると, この群には海水の混入がある地下水が属している.

- 4群: ヘキサダイアグラムで見ると, イオン量が比較的多く, 硝酸イオン濃度が高い地下水が属している. まれに1, 2群に属した地下水が一時的に4群に属することがある.

実際に4群に属する井戸では, 硝酸性窒素が環境基準である  $10\text{mg/l}$  を超えている. 周辺の土地利用から48番の井戸では施肥と畜産が汚染原因となっており, また他の地点でも人為的影響により一時的に硝酸イオン濃度が高くなっているものと考えられる.

図-10より, 3時期において属する群が変化する地点はあるが, その原因としては地下水位の変化の影響というよりも海水浸入や施肥などの影響と判断される. なお, 5群に分類した場合には上記の4群がさらに2つに細分される.

属性分類の要因となっているイオン成分を調べるために, 主要イオン成分でなくクラスター分析の結果を用いて判別分析(変数増減法)を行った. 表-2に判別分析の主たる結果を示す. イオンの横に表示されている数字は判別係数である. この表よりほとんどのグループ分けで陰イオン

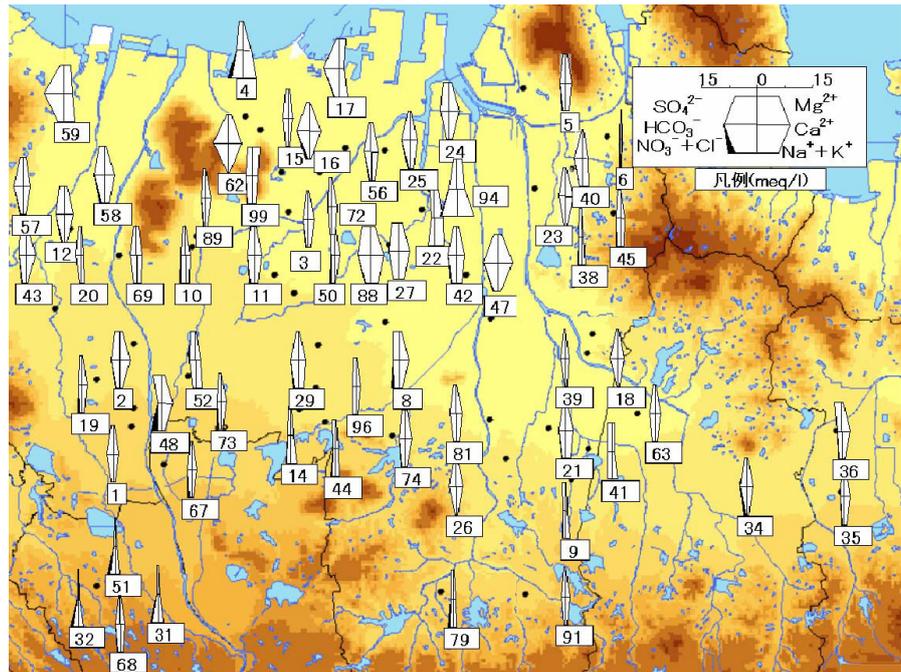


図-9(a) ヘキサダイアグラム (6月上旬)

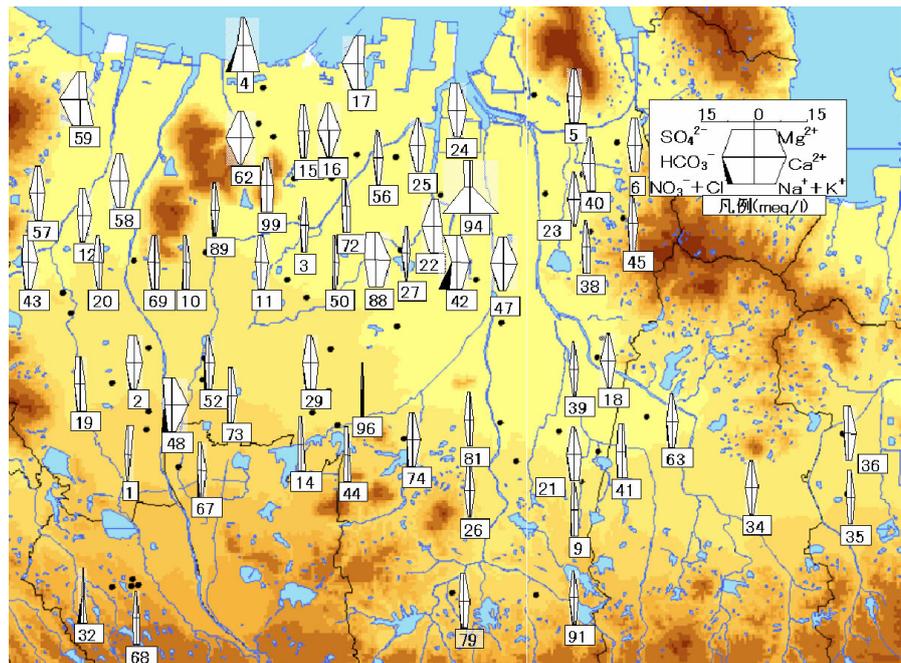


図-9(b) ヘキサダイアグラム (6月下旬)

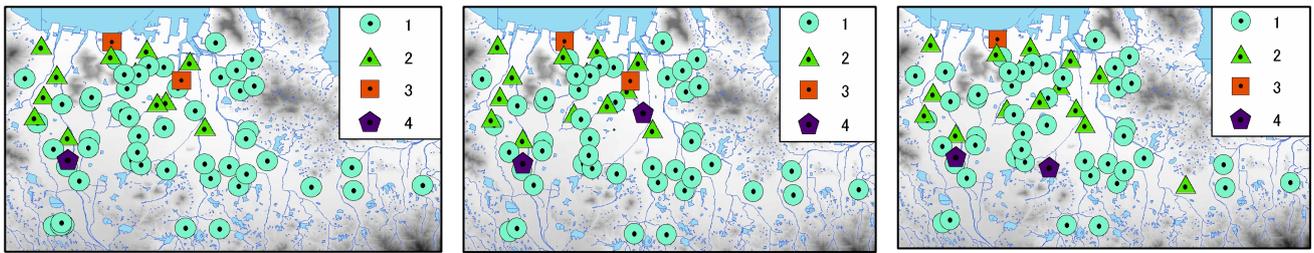


図-10 クラスタ分析による水質からみた分類（左から6月上旬，6月下旬，9月中旬）

表-1 各群のイオン組成（平均値）(meq/l)

	全体	群1	群2	群3	群4
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.75	0.64	1.11	0.95	2.61
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1.69	1.28	3.03	1.69	2.20
Cl <sup>-</sup>	0.69	0.62	0.92	4.29	1.45
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.17	0.19	0.11	0.64	1.54
Mg <sup>2+</sup>	0.52	0.39	0.96	0.76	1.28
Ca <sup>2+</sup>	1.83	1.48	2.97	1.97	4.75
Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	0.97	0.88	1.28	4.66	1.23

表-2 判別分析結果

	群1	群2	群3
群2	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (-7.08)		
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (-4.27)		
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (-3.92)		
群3	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (-24.31)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (-34.31)	
	Cl <sup>-</sup> (-16.8)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (15.79)	
	—	Cl <sup>-</sup> (-12.37)	
群4	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (43.99)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (-25.2)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (22.89)
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (-12.52)	Ca <sup>2+</sup> (-6.77)	Ca <sup>2+</sup> (-14.45)
	Ca <sup>2+</sup> (-10.3)	—	Mg <sup>2+</sup> (-13.28)

が関与していることがわかる。

## 5. まとめ

高松地域における65箇所の井戸の一斉測水、水質分析、および水位の連続観測から、灌漑用水の導入が不圧地下水の水位や水質に及ぼす影響を考察した。その結果、次のことが明らかとなった。

1. 灌漑期には水位はしだいに上昇するが、その変化のパターンは降水や立地地点、揚水に依る。
2. 香川用水の導入以前と現在を地下水位について比較すると、灌漑開始前より現在の方が扇央部で高く、沿岸部で低くなっている。その原因として扇央部では揚水量の減少が、沿岸部では降雨による涵養量の減少が考えられる。
3. 灌漑期には地下水の酸性側のpHが中性に近づく。
4. ヘキサダイアグラムに基づき判断すると、灌漑の前後で水質が変化する地点は限られている。また、変化の要因として施肥などの人為的な要因と潮汐のような自然的な要因が考えられる。
5. ヘキサダイアグラムで用いたイオン濃度を使用したクラスタ分析によると、高松地域の不圧地下水は4群に分類できる。

**謝辞：**本研究の実施に際して、(財)香川県科学技術振興財団の産学官共同研究開発事業（代表者：吉野文雄）および科学研究費補助金基盤研究(C)(2)（代表者：河原能久）の援助を受けた。ここに記して謝意を表します。また、データを提供いただいた国土交通省香川工事事務所に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 東京教育大学地理学教室：高松平野および綾川流域における水の賦存量に関する地理学的研究，p.229，1965。
- 2) 新見 治：泉と地下水，地学雑誌，Vol. 98，No.2，pp. 111-127，1989。
- 3) 河原能久，渡邊健一，森長和雄：高松地域における地下水環境の観測，水工学論文集，第46巻，pp.211-216，2002。
- 4) 井伊博行，平田健正，加々美久夫：松本市周辺の水質と土地利用について，水工学論文集，42巻，pp.373-378，1998。
- 5) 藤原 拓，大年邦雄，唐 心強，山辺敬介：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，第24巻，724-732，2001。
- 6) 谷川晋一：無機水質組成を用いた扇状地地下水の流動分析について，水文・水資源学会 2002 年研究発表会要旨集，60-61，2002。
- 7) 高橋 学：高松平野の地形環境—弘福寺領山田郡田図比定地付近の微地形環境を中心に—，「讃岐国弘福寺領の調査—興福寺領讃岐国山田郡田図調査報告書—」，pp.149-192，高松市教育委員会，1992。

(2002. 9. 30受付)