

熊本・江津湖における硝酸性窒素濃度の挙動と湧水量の関係について

小島 智佳* 市川 勉**

On Relationship between Spring Rate and Concentration of Nitrate Nitrogen in EZU-Lake, KUMAMOTO

by

Tomoka KOJIMA Tsutomu ICHIKAWA

(Received: October 2010, Accepted: February 2011)

Abstract

The Kumamoto area is a region that all of drinking water is depending on ground water. Distal end of the groundwater circulation in this area, there are several groups of springs which are resting places for the citizens. Recently, the concentration of nitrate nitrogen of groundwater in the Kumamoto area is increased. The authors observed nitrate nitrogen concentrations of spring water in the EZU-Lake. Nitrate nitrogen concentrations of spring water in the lake show the annual changes pattern with over 5mg/L in high value and 2mg/L in low value. Groundwater in the Kumamoto area is divided into two aquifers. Spring water in the EZU-Lake is mixture water of two aquifers. The authors divide the spring water rate from each groundwater. Moreover each spring water rate from the shallow aquifer and the deep aquifer was tried to evaluate separately. As a result, the amount of spring water from deep aquifer is almost 75% of the all. In addition, nitrate nitrogen concentration in groundwater of the second aquifer is little annual variation. Then, in the short term, we can assume a constant value of this concentration for calculation of shallow groundwater nitrate nitrogen concentrations. As a result, shallow groundwater nitrate nitrogen concentrations are reduced during the paddy season showed the lowest value of the end of the paddy season, and then increased up to about 15mg/L. This is considered the influence of crop pattern in farmland.

1. はじめに

熊本地域では他の地域に比べ地下水の循環速度が速いため地下水利用も発達し、上水道水源の100%を地下水に依存している世界でも有数の地下水利用地域である。しかし、近年では地下涵養地の都市化や工場・上水道水源のための地下水くみ上げの影響で地下水位低下や肥料、畜産系の廃棄物、家庭・工場排水の地下への浸透により硝酸性窒素による地下汚染などの問題が懸念されている。熊本県が平成17年3月に出した熊本地域硝酸性窒素削減計画ではH6～H15まで定点監視調査を実施しその結果を表1と図1にまとめた¹⁾。表1から硝酸性窒素の検出率は80%以上であり、熊本地域全体で硝酸性窒素汚染が発生している。

表1 定点監視地点の地下水質調査結果 (硝酸性窒素濃度)

	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15
調査地点数	159	159	161	159	159	159	159	173	171	173
検出地点数	144	130	135	138	136	135	142	146	145	145
検出率 (%)	90.6	81.8	84.9	85.7	85.5	84.9	84.8	84.4	84.8	83.8
平均値 (mg/l)	2.32	2.83	2.62	2.55	2.5	2.41	2.5	2.43	2.43	2.64
最高検出値 (mg/l)	40	31	23	18	17	18	16	20	15	21
基準値地点数	2	6	5	3	4	5	5	2	3	3
超過率 (%)	1.26	3.77	3.14	1.86	2.52	3.14	3.14	1.16	1.75	1.84

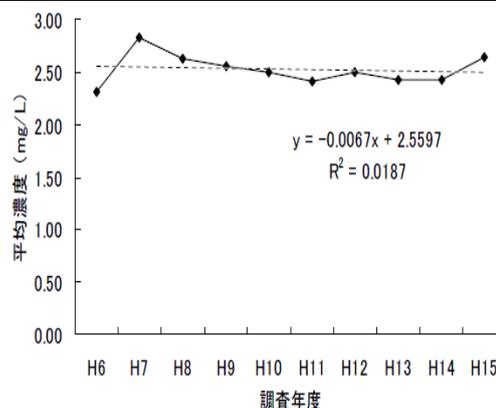


図1 定点観測地点の硝酸性窒素濃度の変化

* 東海大学大学院産業工学研究科社会開発工学専攻院生

** 東海大学産業工学部環境保全学科教授

このような状況を受けて策定された熊本県の硝酸性窒素削減計画によると熊本地域の地下水の硝酸性窒素の目標平均値は約 **2mg/L** であるのに対し、江津湖周辺の湧水は約 **4mg/L** とされている²⁾。これらの目標はあくまでも年間平均値ベースのものであり、最高値は実際にはもっと大きくなると考えられる。なぜなら、硝酸性窒素の供給源と考えられる農地の施肥の状況は農業カレンダーで実施しており、常に一定のものではない。熊本県保健科学研究所の研究成果報告書³⁾では、第一帯水層の硝酸性窒素濃度は施肥の影響で大きく上昇している。また、熊本県の観測井戸は、上水道水源に当たる第二帯水層の井戸が多く、第一帯水層の井戸の観測結果については、詳細な調査・公表はなされていない。

本研究では、江津湖の湧水量観測と同時に、湧水の硝酸性窒素濃度観測を行なうことによって、江津湖の湧水の第一帯水層と第二帯水層の比率や、第一帯水層の地下水の硝酸性窒素汚染がどの程度進行しているかについて検討を行なった。

2. 熊本地域の地下水と地下構造

熊本県は水道水源の 80%以上を地下水からの供給に依存し、特に熊本市を含む熊本地域では 100%地下水に依存している。

表-2 熊本県の地下水採取量⁴⁾

地域	用途	用途						計
		農業	水産養殖	工業	建築物	水道	家庭その他	
熊本 周辺	採取量	34416	10258	25384	17452	102546	4861	194917
	井戸数	2124	81	474	1085	372	318	4454
八代	採取量	12175	1846	18639	5475	8293	1617	48045
	井戸数	11831	11	119	326	80	43	2410
玉名 有明	採取量	6052	1203	4503	1721	16394	361	30234
	井戸数	822	104	78	115	96	138	1353
天草	採取量	199	120	225	340	2598	62	3545
	井戸数	24	7	5	26	35	3	100
計	採取量	52843	13428	48750	24988	129831	6901	276741
	井戸数	4801	203	676	1552	583	502	8317

表-2 に示しているように生活用水だけでなく工業用水にも利用され、熊本県上益城郡にあるサントリー九州工場、大津町のソニーセミコンダクタ九州、菊陽町の富士フィルムなどが代表である。

阿蘇山は4度の噴火をしたと言われている。水理地質基盤とする先阿蘇火山岩類のうえを層状に火砕流堆積物が覆い、古いものから ASO-1、-2、-3、-4 と呼ばれ、これらの地層は、亀裂が発達し、地下水を通しやすい地層である(図2 参照)。また、この間には阿蘇火山と

は別の火山の溶岩からなる砥川溶岩と呼ばれる地層も存在し、この地層の上下部も空隙に富んでおり非常に水を透しやすくなっている。この砥川溶岩の厚さは 100m あると言われており、この部分を含む帯水層を第二帯水層と呼ぶ。この上に布田層があり、この層は透水性が悪く、この層を境に地下水が二つに分離されている。この上部の

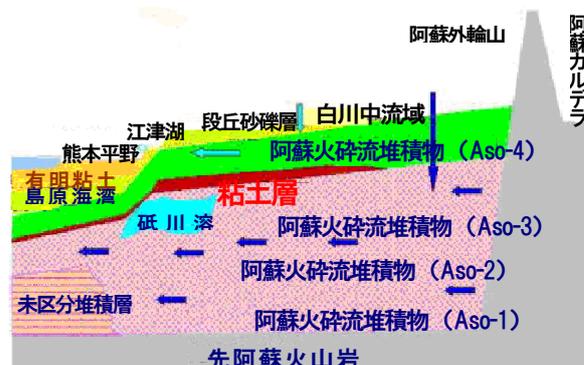


図-2 熊本地域の地質構造⁵⁾



図-3 熊本地域の地下水の動向⁶⁾

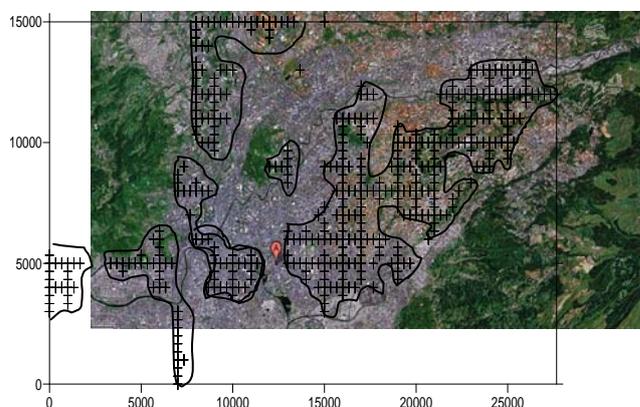


図4 布田帯水層の分布図 (江津湖周辺)

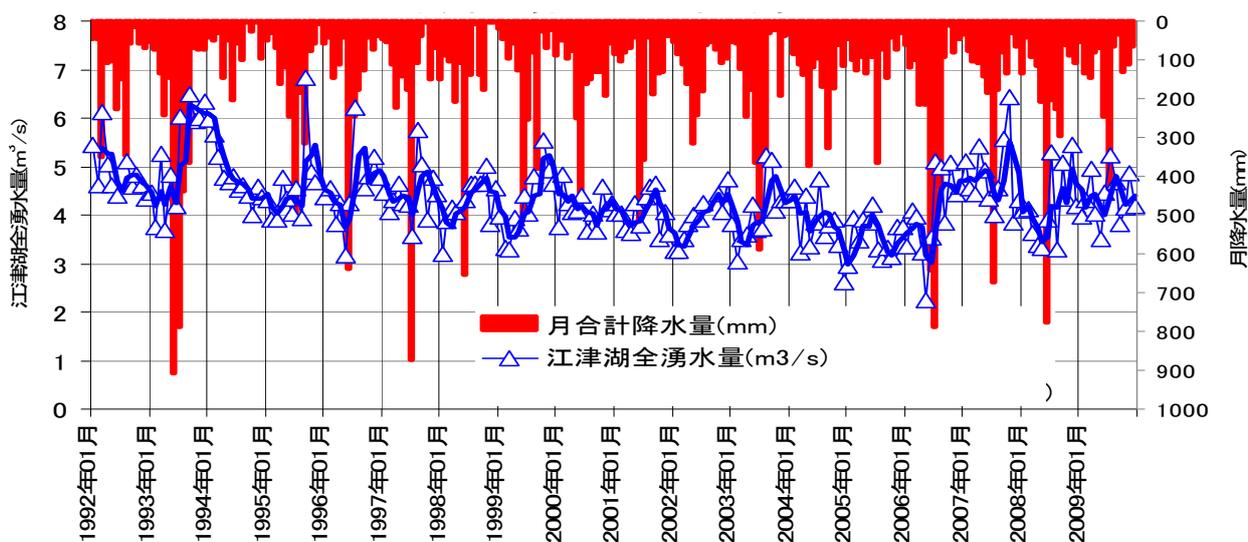


図-6 江津湖全湧水量の経年変化

帯水層を第一帯水層と言う。これらの帯水層中の地下水の流れは、図-3 に示すように、高遊原台地北部に位置する白川中流域付近の水田地帯で涵養された地下水が南西方向に流下し、江津湖、嘉島地区の湧水群で湧出すると考えられている。

第一帯水層と第二帯水層を区分する布田層は、全体的に分布するのではなく、一部欠落しているといわれていた。東海大学中山のグループが、熊本地域の地質構造を解析し、布田層の分布が図-4 のように分布していることを示した⁷⁾。その結果、江津湖のすぐ上流で布田層が欠落し、江津湖に流出する湧水が、第一帯水層の地下水と第二帯水層の地下水の混合であると考えられる。



図-5 江津湖流量観測ポイント

3. 江津湖の湧水量観測

熊本市にある江津湖の湧水量を求めるために図-5 に示した 14 地点で流量観測を行なった。その結果、図-6

のような結果となった。この図は、観測を開始した 1992 年 1 月から 2009 年の江津湖全湧水量と降水量の経年変化である。1992 年から 2005 年までに約 14 万 m^3 /日もの湧水量が減少している。これは都市化の影響や減反などで地下水の涵養地となる農地や水田が減少したためと考えられる。しかし、2005 年から湛水事業が始まり、2006 年から増加傾向を示しているのがわかる。観測当初までの値までは達してはいないが、1995 年前後の水準まで回復しているのがわかる。



図-7 江津湖の湧水の水質観測ポイント

4. 江津湖における水質観測

江津湖に湧出する水質を観測するために図-7 に示したような 9 地点で湧水量観測と同日に水質をデジタルパックテストで観測した。これらのうちで、湧水は 6 地点である。表-3、図-8 にその観測結果を示す。

Table 3(a) 江津湖各地点の水質調査結果

鵜渡橋 水前寺公園横(湧水)							
日付/項	pH	EC μS/cm	NH4-N ppm	NO2-N ppm	NO3-N ppm	T-N ppm	PO4-P ppm
2009年4月	6.94	250	1.0	0.025	5.6	6.6	0.08
2009年5月	6.95	199	<0.2	<0.001	4.5	4.5	0.08
2009年6月	7.02	210	0.3	<0.001	3.1	3.4	3.72
2009年7月	6.75	240	0.2	<0.001	4.9	5.1	0.4
2009年8月	6.69	220	<0.2	<0.001	3.7	3.7	0.15
2009年9月	6.58	230	0.2	<0.001	2.1	2.3	<0.03
2009年10月	6.92	240	<0.2	<0.001	2.0	2.0	0.11
2009年11月	7.01	250	0.2	0.13	2.7	3.0	0.11
2009年12月	6.9	210	<0.2	<0.02	4.7	4.7	<0.03
2010年1月	6.5	210	<0.2	0.04	7.3	7.3	0.06
2010年2月	6.58	200	<0.2	<0.001	5.6	5.6	0.1
2010年3月	6.39	200	0.2	<0.001	5.6	5.8	0.06
2010年4月	6.77	220	0.9	0.01	5.3	6.2	0.17
2010年5月	7.18	220	<0.2	0.015	4.2	4.2	0.08

Table 3(b) 江津湖各地点の水質調査結果

芭蕉園(湧水)							
日付/項	pH	EC μS/cm	NH4-N ppm	NO2-N ppm	NO3-N ppm	T-N ppm	PO4-P ppm
2009年4月	6.72	250	1.0	<0.001	5.5	6.5	0.06
2009年5月	7.02	199	0.8	<0.001	4.2	5.0	0.07
2009年6月	7.42	230	0.7	<0.001	2.6	3.3	0.08
2009年7月	6.84	230	0.2	<0.001	4.7	4.9	0.13
2009年8月	6.85	210	<0.2	0.025	3.5	3.5	0.07
2009年9月	6.87	230	<0.2	<0.001	2.2	2.2	0.16
2009年10月	7.21	240	<0.2	<0.001	3.4	3.4	0.04
2009年11月	7.37	240	0.2	<0.001	2.6	2.8	0.09
2009年12月	7.23	210	<0.2	<0.02	5.0	5.0	<0.03
2010年1月	6.73	210	<0.2	0.2	2.4	2.6	0.09
2010年2月	6.67	210	1.5	0.01	5.1	6.6	0.06
2010年3月	7.04	210	<0.2	0.03	3.7	3.7	0.08
2010年4月	6.99	210	<0.2	<0.001	5.7	5.7	0.07
2010年5月	7.36	210	0.3	<0.001	4.9	5.2	0.07

Table 3(c) 江津湖各地点の水質調査結果

ぞうさんプール周辺(湧水)							
日付/項目	pH	EC μS/cm	NH4-N ppm	NO2-N ppm	NO3-N ppm	T-N ppm	PO4-P ppm
2009年4月	6.71	230	1.0	<0.001	5.2	6.2	0.11
2009年5月	7.13	199	<0.2	<0.001	5.0	5.0	0.08
2009年6月	7.25	230	0.8	<0.001	3.4	4.2	0.11
2009年7月	6.87	230	0.2	<0.001	3.7	3.9	0.1
2009年8月	6.94	230	<0.2	<0.001	3.0	3.0	0.17
2009年9月	6.92	230	<0.2	0.015	2.3	2.3	0.2
2009年10月	7.3	240	0.2	0.065	1.8	2.0	<0.03
2009年11月	6.94	210	1	0.03	3.2	4.2	0.07
2009年12月	6.96	210	<0.2	0.06	2.2	2.3	<0.03
2010年1月	6.73	220	0.6	0.05	3.8	4.5	<0.03
2010年2月	6.8	210	1.6	0.01	5.4	7.0	0.06
2010年3月	7.16	210	<0.2	0.015	5.0	5.0	0.08
2010年4月	6.83	210	<0.2	<0.001	4.4	4.4	0.03
2010年5月	7.47	220	0.3	<0.001	5.8	6.1	0.11

Table 3(d) 江津湖各地点の水質調査結果

スイゼンジノリ発生地(湧水)							
日付/項目	pH	EC μS/cm	NH4-N ppm	NO2-N ppm	NO3-N ppm	T-N ppm	PO4-P ppm
2009年4月	6.78	200	0.3	<0.001	5.8	6.1	0.14
2009年5月	7.15	199	0.2	<0.001	3.8	4.0	0.11
2009年6月	7.19	210	0.2	0.01	2.5	2.7	0.11
2009年7月	6.73	220	0.2	<0.001	2.6	2.8	0.03
2009年8月	6.97	230	0.3	<0.001	2.7	3.0	0.16
2009年9月	6.89	230	<0.2	0.01	1.3	1.3	0.09
2009年10月	7.24	250	<0.2	<0.001	2.0	2.0	0.1
2009年11月	7.32	210	<0.2	0.02	3.0	3.1	0.08
2009年12月	7.21	210	<0.2	0.04	3.0	3.0	<0.03
2010年1月	6.75	200	<0.2	0.02	4.1	4.2	0.1
2010年2月	7.06	200	0.2	0.025	3.8	4.0	0.06
2010年3月	7.42	200	<0.2	0.06	2.8	2.9	0.1
2010年4月	7.38	210	<0.2	<0.001	4.4	4.4	0.07
2010年5月	7.48	210	1.2	<0.001	4.8	6.0	0.07

Table 3(e) 江津湖各地点の水質調査結果

東駐車場横(湧水)							
日付/項目	pH	EC μS/cm	NH4-N ppm	NO2-N ppm	NO3-N ppm	T-N ppm	PO4-P ppm
2009年4月	6.78	230	2.6	<0.001	4.7	7.3	0.26
2009年5月	6.82	199	0.5	<0.001	3.7	4.2	0.14
2009年6月	7.03	230	0.4	<0.001	2.9	3.3	0.3
2009年7月	6.89	230	0.7	<0.001	3.6	4.3	0.41
2009年8月	7.04	220	<0.2	<0.001	1.4	1.4	<0.03
2009年9月	6.86	230	<0.2	0.01	2.3	2.3	0.13
2009年10月	7.15	240	<0.2	<0.001	3.5	3.5	0.19
2009年11月	7.11	230	0.3	<0.001	2.9	3.2	0.12
2009年12月	7.17	200	<0.2	0.04	3.1	3.1	0.1
2010年1月	6.9	210	0.2	0.02	4.1	4.4	0.1
2010年2月	6.97	200	0.4	0.015	5.5	5.9	0.06
2010年3月	7.06	200	0.3	<0.001	4.3	4.6	0.07
2010年4月	7.29	210	0.2	<0.001	4.5	4.7	0.08
2010年5月	7.27	210	<0.2	<0.001	2.7	2.7	0.09

Table 3(f) 江津湖各地点の水質調査結果

健軍川(湧水)							
日付/項目	pH	EC μS/cm	NH4-N ppm	NO2-N ppm	NO3-N ppm	T-N ppm	PO4-P ppm
2009年4月	7.33	199	0.6	<0.001	4.1	4.7	0.07
2009年5月	6.8	199	1.2	0.001	3.8	5.0	0.08
2009年6月	7.14	220	0.3	<0.001	3.3	3.6	0.09
2009年7月	7.08	240	0.6	0.075	2.9	3.6	0.17
2009年8月	7.14	220	0.4	0.03	1.8	2.2	0.09
2009年9月	7.14	220	<0.2	0.025	1.7	1.7	0.07
2009年10月	7.3	230	<0.2	<0.001	2.7	2.7	0.09
2009年11月	6.92	250	0.6	0.1	4.7	5.4	0.22
2009年12月	7.17	210	<0.2	0.02	2.5	2.6	0.08
2010年1月	6.88	200	1.4	<0.02	3.8	5.2	0.07
2010年2月	6.97	200	0.4	0.015	5.5	5.9	0.06
2010年3月	6.99	210	0.2	<0.001	2.7	2.9	0.57
2010年4月	7.28	210	<0.2	<0.001	3.7	3.7	0.08
2010年5月	7.6	210	0.3	<0.001	3.5	3.8	0.09

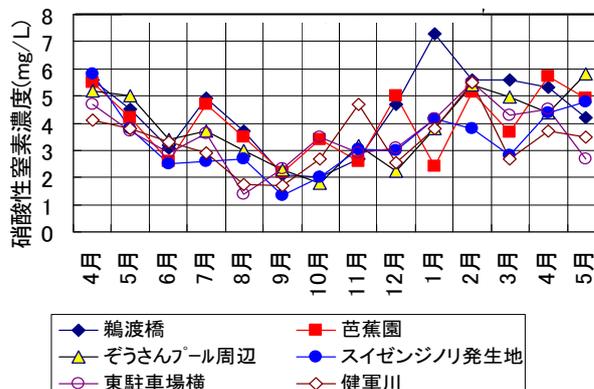


図-8 江津湖の湧水の硝酸性窒素濃度の経年変化

図-8に示しているように、湧水中の硝酸性窒素濃度は、年間を通じて変化しているのがわかる。年間で最も高い濃度は3月から5月の地下水位が低い時期（湧水量が最も少ない時期）で、5mg/Lを上回る値であり、最も低いのが、9月ごろの地下水位が高い時期（湧水量が最も多い時期）で、およそ2mg/Lであることがわかる。

5. 第一、第二帯水層の地下水の湧水と硝酸性窒素濃度とのかかわり

第一帯水層と第二帯水層の地下水からどの程度地下水が湧出しているかを推定する。

第一、第二帯水層を区切る布田層の分布は、図-4に示したように、白川中流域から江津湖にかけて分布しているが、熊本市内では、欠落している部分が多いが、連続して地下水を区分している。本来ならば、江津湖の上流側である東側の地点で、第一、第二帯水層の地下水位観測データを使用すべきであるが、図-



図-9 定点観測井戸の配置(赤丸が使用する井戸)

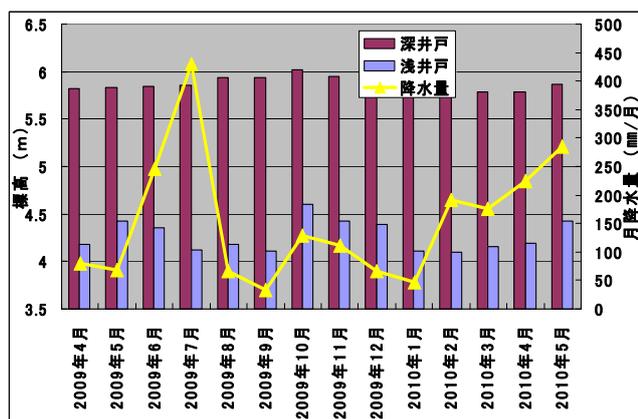


図-10 御幸笛田地点の深井戸と浅井戸の降水量

9に示しているように、熊本市の地下水位観測データでは、江津湖の上流側で第一、第二帯水層の地下水位を同じ位置で観測している地点はない。そこで、江津湖に近い位置で、両方の地下水位を観測している御幸笛田地点(図-9の赤丸地点)の地下水位を使用することとした。

図-10は江津湖近くの御幸笛田にある深井戸(第二帯水層)・浅井戸(第一帯水層)の2009年4月から2010年5月までの地下水位標高と熊本地方気象台の月降水量の変化である。これを見ると降水量の多い7月から水位が上昇し9、10月ごろに最高水位となり、3、4月ごろで最低の水位となる。

著者らが観測している値は、江津湖の全湧水量 Q 、湧水の水質である硝酸性窒素濃度 C (硝酸性窒素濃度は湧水の値の平均値を取った) である。未知量は、第一帯水層からの湧出量 Q_s 、第二帯水層からの湧出量 Q_d 、第一帯水層の硝酸性窒素濃度 C_s 、第二帯水層の硝酸性窒素濃度 C_d である。江津湖の水位の標高は、湧水量観測時に測っているため、この江津湖の水位標高と地下水位標高の差が湧出圧力になる。この湧出圧力を第一帯水層で h_s 、第二帯水層で h_d とすると、湧水量は湧出圧力に比例する (Darcy 則より)。比例定数を K とすると、関係式は以下ようになる。

$$Q = Q_s + Q_d \quad (1)$$

$$Q_s C_s + Q_d C_d = QC \quad (2)$$

$$K = \frac{Q}{h_s + h_d} \quad (3)$$

$$Q_s = Kh_s \quad (4)$$

$$Q_d = Kh_d$$

これらの式を用い第一帯水層、第二帯水層からの湧出量を求めた。ただし、上記の式だけでは、 Q_s 、 Q_d 、 C_s 、 C_d を求めることはできない。そこで、 C_d は熊本県保険環境科学研所が発行した研究報告書より得られた硝酸イオン濃度平均が約 10mg/L と年間を通じて、ほぼ一定であったので硝酸性窒素を 2.26mg/L の固定値を用いることとした (図-11 参照)。

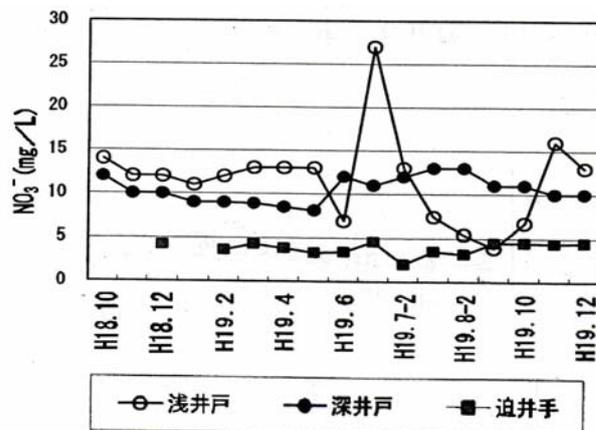


図-11 井戸別硝酸イオン濃度

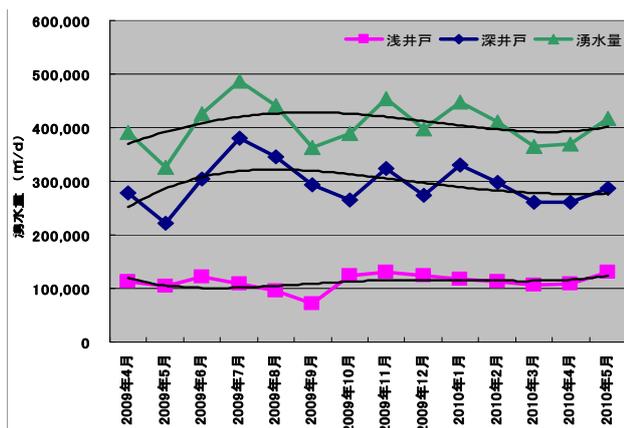


図-12 湧水量の経年変化

図-12 は第一帯水層と第二帯水層からの湧水量を計算し図に示したものである。この図から第一帯水層からの湧出は年間を通じて大きく変化せず、ほぼ日量 10 万 m³ 程度を推移していることがわかる。しかし、第二帯水層からの湧出は、全湧水量と同様な変化を表し、日量 30 万 m³ 前後を推移しており、全湧水量の約 75%と、江津湖に湧出している湧水は第二帯水層からの湧出が主であることがわかる。

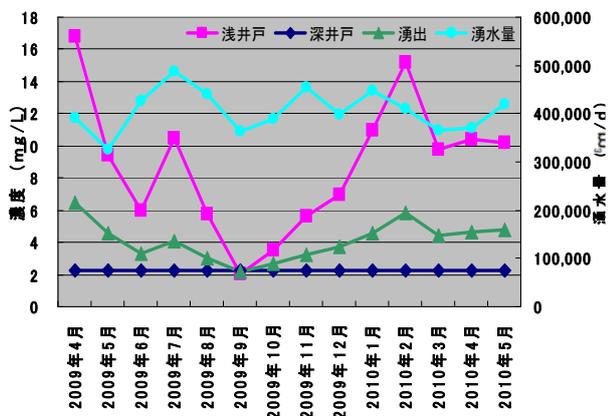


図-13 硝酸性窒素濃度の経年変化

図-13 は計算により得られた第一帯水層の硝酸性窒素濃度の図である。第一帯水層の濃度の変化が激しい事がわかる。特に、第一帯水層（図-13 の中で浅井戸と表示している）の硝酸性窒素濃度は水稲作付け期（6月頃から9月頃）に大幅に低下し、10月以降上昇する。これは、白川中流域周辺にある農業地帯からの肥料などの影響を第一帯水層が受けやすいと考えられる。しかし全体の濃度を見るとだいたい 5mg/L 以下であり深井戸からの湧水が多いため希釈され、良好な濃度に保たれていると考える事ができる。

図-14 は湧水量と湧水中に含まれる窒素の量の推移である。年間の変動の状況がわかる。

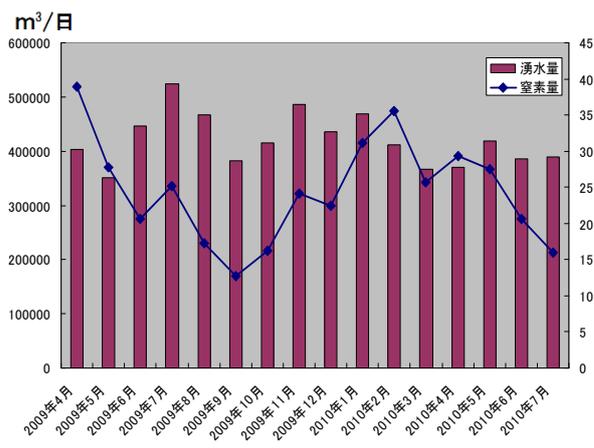


図-14 湧水量と窒素量の経年変化

6. まとめ

熊本地域地下水循環の末端部に位置する江津湖の湧水と湧水中の硝酸性窒素濃度を観測した結果、全湧水量は 2005 年以降増加傾向にあることが分かった。湧水の硝酸性窒素濃度は、春先の水田が始まる前の 6mg/L の最高値から秋口の水田終了直前の 2mg/L の最低値まで年変動を示すことがわかった。また、熊本の地下水を構成する上下二つの帯水層の地下水位と江津湖の水位差に各帯水層からの湧水量が比例するとの仮定を用いて各帯水層からの湧水量を評価した結果、浅い第一帯水層からの湧水量は全湧水量の約 25%、深い第二帯水層からの湧水は全湧水量の約 75%を占めていることがわかった。また、硝酸性窒素濃度を深い第二帯水層の濃度を一定として、第一帯水層の硝酸性窒素の濃度を計算すると、水稲作付け期（6月頃から9月頃）に 15mg/L の値から 2mg/L へ大幅に低下し、10月以降上昇する。これは、白川中流域周辺にある農業地帯からの肥料などの影響を第一帯水層が受けやすいと考えられる。しかし全体の濃度を見るとだいたい 5mg/L 以下であり深井戸からの湧水が多いため希釈され、良好な濃度に保たれていると考える事ができる。

今回の解析では、未知量が多いため、幾つかの仮定条件を用いたが、今後は、観測条項を増やして諸量の間の関係を更に詳しく明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) 今辻銀二、東海大学大学院修士論文、水前寺・江津湖における湧水メカニズムとその変動に関する研究 p. 5、10、12 (2008)
- 2) 熊本県、熊本地域硝酸性窒素削減計画、p 2 5 (2005)
- 3) 熊本県保健環境科学研究所水質科学部地下水科学室、火山性河川水に由来する化学成分の地下水における

挙動研究成果報告書、p.34、2009.

4) 熊本県、地下水採取資料、2006.

5) 熊本市ホームページ、熊本の地下水情報、地下水を育む地層

http://www.city.kumamoto.kumamoto.jp/kankyo/sougo_center/chikasui/chisou.htm

6) 熊本市ホームページ、地下水物語、地下の動き

http://www.city.kumamoto.kumamoto.jp/mizu_midori/contents02_2.htm

7) 熊本地盤研究会、熊本周辺の地質断面図 (2010)