

高頻度調査による地表／地下水流量と地下水中硝酸性窒素濃度の関係解明

川越 保徳

1. はじめに

現在、熊本市は上水道水源のほとんどを地下水に依存しており、我国において最大規模の供給量を誇る日本屈指の地下水都市である。しかし近年は、低下傾向にあるとされる地下水位や、水質汚染が懸念されている。水質汚染については特に硝酸性窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 濃度の上昇が喫緊の課題となっており、早急な汚染機構の解明と対策が必要である。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度については 10 mg/L 以下の水道水質基準値が規定されているが、これまでに、熊本市近隣地域の複数の井戸で水質基準値を上回る濃度が確認されている。この中で、地下水涵養域にあたる熊本市東部において 10 mg/L を超過する $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の高い地下水取水井 (A井) がある一方で、それに近接しており同一帯水層からの取水が推定される井戸では 5 mg/L 未満にとどまっているなどの状況が確認されている。しかしながら、これら水質の状況は年に 3 回程度の調査／測定結果によるもので、濃度の経時変化に関する情報はない。また、A井で認められる高濃度の $\text{NO}_3\text{-N}$ は井戸直上からの窒素負荷によるものと考えられるが、A井とその近傍の井戸で $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の違いがみられる理由は不明である。そこで本研究では、A井と近傍の井戸等を対象に、週 1 回程度の短期間隔で高頻度の水質調査／測定を実施し、水質の特徴と経時変化を明らかにした。また、A井と近傍井戸との $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の違いが井戸周辺の地下地質構造の違いに起因するのではないかと仮説を立て、その検証データの一助にすべく各井戸の地下水位の変動と $\text{NO}_3\text{-N}$ など水質変化の特徴を比較分析することにした。さらに、地下水位および $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の変化のシミュレーションについても検討し、本研究ではタンクモデルによるシミュレーションの可能性を検討した。

2. 硝酸性窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) による地下水汚染の現状と汚染機構

硝酸性窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) とは窒素化合物のうち硝酸性塩として含まれている窒素で、日本では 1970 年代後半から、地下水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の著しい上昇が認められるようになった。環境省が平成 14 年に実施した全国規模の調査では、調査した井戸 4207 箇所のうちおよそ 6% にあたる 207 箇所が水質基準値である 10 mg/L を上回っており、 $\text{NO}_3\text{-N}$ による地下水の汚染が全国的に進行していることが確認されている。熊本市においても近年は $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の上昇傾向が確認されており、喫緊の対策が必要な状況にある。

地下水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 汚染要因は一般的に複合していることが多いが、中でも農用地への過剰施肥や、家畜排泄物の不適正処理等が主要な汚染源とされている。 $\text{NO}_3\text{-N}$ は土壌に吸着されにくく、雨水などによって地下に浸透しやすいため、地下水など水環境での汚染が進行しやすい。

3. 研究方法

3.1 採水地点

図 1 に研究対象とした井戸の位置を示す。10 mg/L以上の高いNO₃-N濃度を示すA井，A井と約 800 mの距離で近接するC井および約 2 kmの距離にあるB井周辺，さらに地下水湧水域で熊本市の主要水源地にあるD井を調査対象井（地下水）とした。A～C井の周辺には畜産事業所が点在し畑地が広がっていることから，家畜排泄物や農作物肥料といった窒素の負荷源と考えられるものが多く存在する。一方，A井と同じ地下帯水層からの取水と考えられるB井C井のNO₃-N濃度はA井よりも低い値となっているが，その理由は不明である。



図 1 調査対象地下水採水（井戸）地点

3.2 水質測定項目と分析方法

(1) 測定項目

Na, Mg, K, Ca（以上，陽イオン成分），Cl, NO₃-N, SO₄, F（以上，陰イオン成分），アルカリ度，溶性ケイ酸，pHについて測定した。

(2) 分析方法

測定項目は上水試験方法に準じて分析した。陽イオンはフレイム原子吸光光度計，陰イオン成分はイオンクロマトグラフにて測定した。総アルカリ度は中和滴定法，溶性ケイ酸濃度はモリブデン青法，pHはpH計（ガラス電極）によって各々測定した。

3.3 タンクモデルによる水位およびNO₃-Nのシミュレーション

(1) タンクモデルの概要

各井戸における地下水位は，井戸を管理している熊本市上下水道局よりデータの提供を受け，整理した。また地下水位およびNO₃-N濃度のシミュレーションについては，3タンクからなる直列型タンクモデルを用いた。本タンクモデルでは，第1タンクを表層，第2タンクを土壌層，第3タンクを地下帯水層と仮定した。地下水位は第3タンクの貯留高から換算，NO₃-N濃度は第3タンクでのNO₃-N濃度として計算した。実際の計算には，Fortran言語にてプログラムを作成して逐次計算を行い，実測値との比較により浸透高，流出高などのモデルパラメータの感度を調べ，値を調整した。

4. 結果と考察

4.1 水質測定結果

pHについては，水道水質基準値である5.8～8.6をいずれの井戸も満たしているが，A井は他の井戸に比べて低い傾向が見られ，特に雨季である6月～7月にかけてpHが低い傾向

が認められた。また、総アルカリ度については、A井とB井で80を超える値で推移し、高い傾向がみられた。

陽イオンについては、各井戸で特徴的な水質およびその変化に関する傾向などはみられなかったが、A井においては、調査開始直後の比較的降雨の激しい時期（6月下旬）にCa濃度が高いことが分かった。

陰イオンについて、図2にCl濃度、図3にNO₃-N濃度の経時変化を示す。

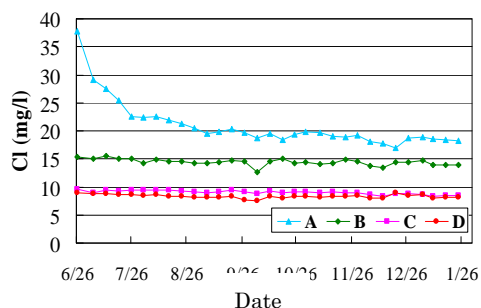


図2 各井水中Cl濃度の経時変化

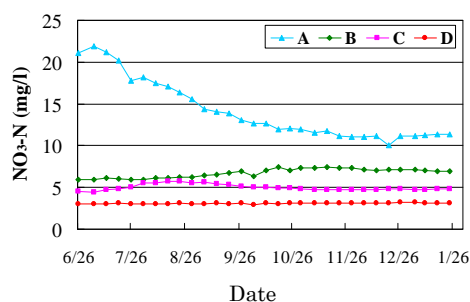


図3 各井水中NO₃-N濃度の経時変化

Clの濃度は測定開始当初、A井において突出して高い濃度であり、Cl濃度変化の傾向はいずれの井戸でもNO₃-Nと類似した。NO₃-Nと同様に人為的汚染の可能性が考えられる。

NO₃-NについてはA井 >> B井 > C井 > D井の順で濃度が高く、特にA井では常に水質基準値を超過する高濃度で推移していることが明らかとなった。

SO₄についてはA井が他井戸と比べて低いことが明らかとなり、近接するC井やB井とは異なる水質の特徴を有することが確認された。また、溶性ケイ酸やアルカリ度については、特筆すべき特徴は認められなかった。

4.2 タンクモデルによる地下水位のシミュレーション

図4に、2014年4月1日から2013年1月23日までの日降水量（益城町）と各井戸の観測水位を示す。雨季である6月半ばから7月にかけてD井を除き地下水位の上昇が確認された。本結果より、A～C井の地下水位に関しては、地下水位は降雨の影響を受けて比較的大きく変動していることが分かった。一方、D井の水位変動が他井に比べて小さいのは、D井の直下には砥川溶岩層と呼ばれる多数のクラックを有する巨大な地下水貯留層が存在することで地下水位変動が緩和されること、またD井には湧水湖である江津湖が近接しており流入水が即時的に江津湖に流出していること等が要因として考えられた。

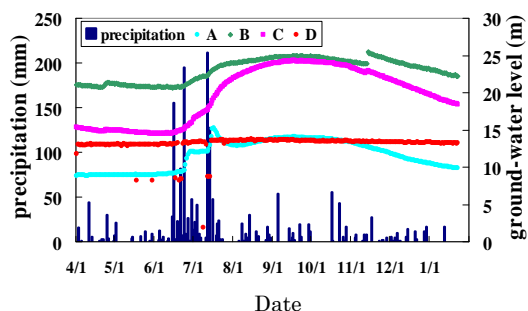


図4 降水量と各井戸の地下水位

図5、図6にA井とC井の地下水水位のシミュレーション結果を示す。

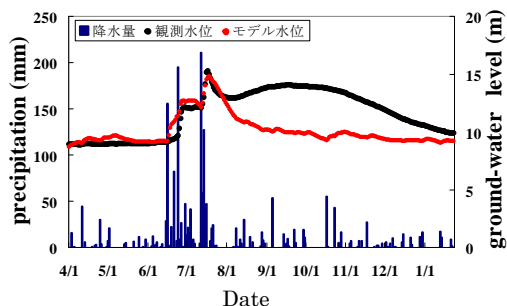


図5 A井の水位シミュレーション結果

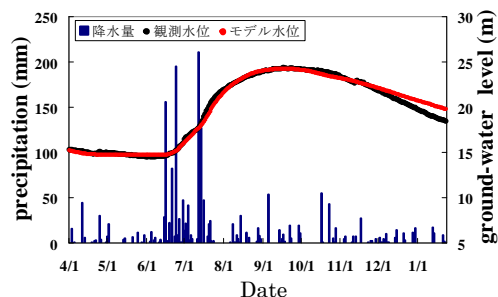


図6 C井の水位シミュレーション結果

図5, 6に示すように, C井では概ね良好なシミュレーション結果が得られた. 一方, A井については, はじめに他井戸と同様のパラメータ値を設定して計算を行ったが, この場合6月下旬および7月中旬にみられる地下水水位の急激な上昇(ピーク)を表すことができなかつたため, 帯水層(第3タンク)への浸透を大きく仮定した場合の結果が図5である. これにより水位のピークは表せたが, 8月以降の水位の緩やかな上昇と11月にかけての低下を近似することはできなかつた. これらの結果から, 本研究で最初に仮定したように, A井は近接するB井, C井とは水質が異なるだけではなく水位変動についても異なる挙動を示し, 比較的降雨など水の入力変化に鋭敏に応答する傾向が特徴的であることが明らかとなり, A井の地下水水位シミュレーションにはさらなる検討が必要であることが分かった.

4.3 タンクモデルによるNO₃-N濃度のシミュレーション

結果の一例として図7にNO₃-N濃度の実測値とシミュレーションによる計算値を示す. 図中aの時期には実測値と推定値との間に差異があるが, 全体的には概ね良好な結果が得られた. また, aの時期は灌漑期にあたり水の流入に伴うNO₃-Nの流入が推察される.

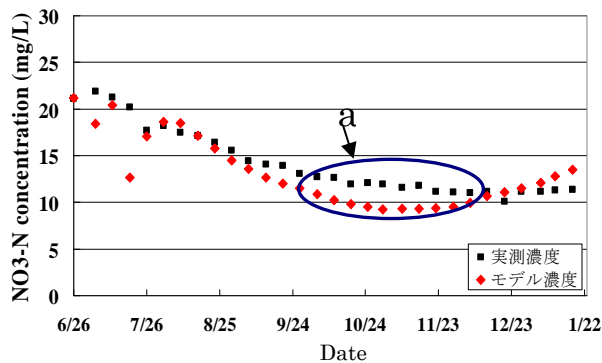


図7 A井NO₃-N濃度のシミュレーション結果

以上, 本研究で実施したような高頻度・短期間隔での水質調査/測定を行って水質変化を詳細に把握し水位変化と比較検討することで, 地下水のNO₃-N汚染の機構解明と対策につながる可能性が示され, 本研究で目指した成果を十分に得ることができたものとする.

最後に, 本研究の遂行にあたって研究助成をいただいた貴社団法人九州地方計画協会, および地下水試料および地下水水位データを提供いただいた熊本市上下水道局と関係各位に深く感謝いたします.