

安全で安心な地下水資源の量的・質的保全に向けた熊本 地下水流における水・物質-三圏結合モデルの構築

熊本大学大学院自然科学研究科 准教授 川越保徳

概要:

本研究の目的は、熊本地下水流域をフィールドとして、地上圏と地表圏および地下圏での水収支と、硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) の挙動をシミュレート可能な「水・物質-三圏結合循環モデル」の構築である。初年度である今年度は、主として水量・水質データのデータベース化と水質の実態を把握するとともに、地下水への窒素負荷要因を解明した。地下水中溶存成分の測定結果によるクラスター分析の結果、対象地域の地下水水質は一般的な我が国の地下水水質に帰着するものの、溶性ケイ酸や硫酸濃度が高いことが特徴であることが分かった。

$\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が 10mg/L を超える地下水があり、濃度の経年的上昇が多く地下水でみられた。窒素安定同位体比分析および農林業センサデータに基づく窒素負荷の計算から、対象地域における地下水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 汚染は、畜産ふん尿あるいは堆肥などの有機態窒素が主たる窒素負荷源である可能性が高いと結論した。

キーワード: 硝酸対窒素, 窒素安定同位体比, GIS, 農林業センサ

1. はじめに

熊本市とその近隣 11 市町村は熊本地域と呼ばれており、地下水を唯一飲用水源としている。本地域でこれほど地下水が豊富な理由は、1) 難透水性の基盤岩が深く巨大な地下水盆が形成されている、2) 亀裂が多く透水性に優れる阿蘇火砕流堆積物の上に透水性の高い火山灰土が覆っている、3) 平野部でも約 $2,000\text{mm/年}$ 、涵養域である阿蘇山周辺では $3,000\text{mm/年}$ を超える降水がある、等である。また、阿蘇の西麓に広がる白川中流域となる地域は特に重要な地下水涵養域となっており、一級河川である白川から引き込まれた水が“ザル田”と呼ばれるほど水はけの良い地質を通じて帯水層にまで容易に達し、地下水の涵養に大きく貢献するとされる¹⁾。

熊本の地下水は豊富なだけでなく、古くから水質の良いおいしい水としても知られている^{2,3)}。しかし近年は、涵養域での市街地化や減反施策による水田面積の縮小などによって地下水水位の低下が認められ¹⁾、水質についても硝酸性窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 濃度が 5mg/l を超える水道水がみられるなど⁴⁾ 浅深に関わらず $\text{NO}_3\text{-N}$ による地下水汚染の深刻化が懸念されており、水収支、水質汚染の実態把握と問題の明確化および対策が喫緊の課題となっている。本研究の目的は、熊本地下水流域をにおける地上圏と地表圏および地下圏での水収支と $\text{NO}_3\text{-N}$ の挙動をシミュ

レート可能な「水・物質-三圏結合循環モデル」の構築である。初年度の今年度は、主として水量・水質データのデータベース化と水質の実態把握、および地下水への窒素負荷要因の解明を目的として調査研究を実施した。

2. 調査研究方法

(1) 熊本市近郊の地質と地下水流動

図-1 に、対象地域の主要地質と地下水の流れ、および採水地点を示す。本研究では、特に熊本市に流入する地下水の涵養域や上流域にあたる地域を対象とした。

熊本市へは、主として市の北に位置する植木台地と菊池台地、および阿蘇山の西麓から地下水が流入する。中でも、大津町から菊陽町に位置する白川中流域には約 1000ha に及ぶ水田地帯があり、重要な地下水涵養域となっている。図-1 に示すように、旧植木町や合志市、熊本市南部、益城町などには、花房層や布田層と呼ばれる難透水性の粘土層が第 1 帯水層と第 2 帯水層を隔てている一方で、白川中流域などにはこの様な難透水性層が無い場合、降雨や水田に湛水された水は 10cm/日 以上の高い速度で容易に第 2 帯水層に達する⁵⁾。しかし、このことは逆に地表からの汚染物質流入が容易であることを意味する。

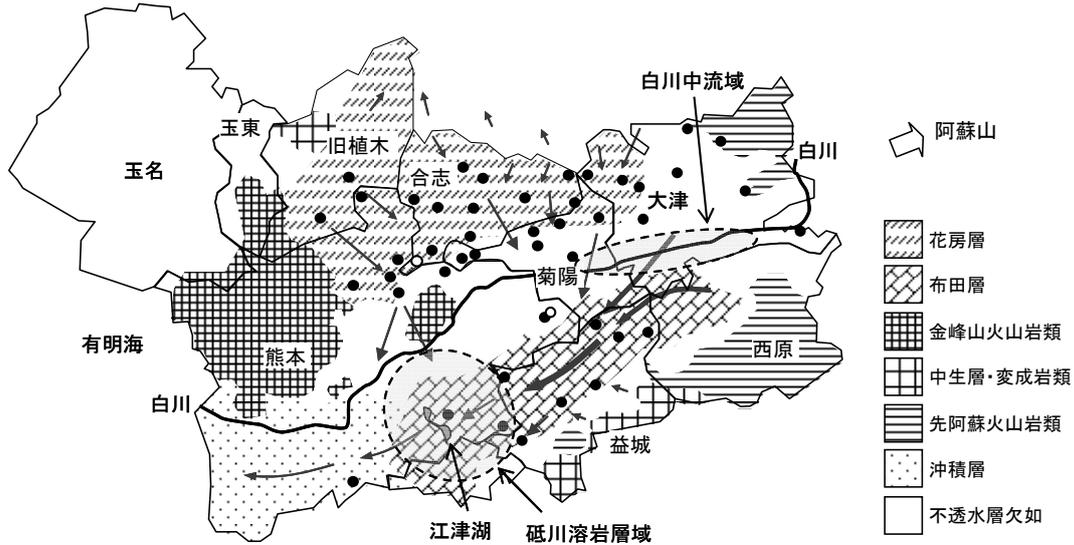


図-1 熊本市近郊の地質構造と地下水流動の概要と採水地点

白川中流域の地下水帯は地下水プールとも例えられており、これが南西に流動し、熊本市南東部の地下に存在する砥川溶岩層に蓄えられる。砥川溶岩層の西側は透水性の低い沖積層であることから地下水はここで湧水し、自噴井や江津湖などの湧水湖を形成する。砥川溶岩層は熊本市随一の巨大な地下水盆であり、飲用水の100%を地下水に依存する熊本市にとっての生命線である。採水地点(井戸)の位置を図-1中に黒丸と白丸で示した。採水井は全て深度40m以上の第2帯水層に達する深井戸であり、白丸で示した2地点は水質監視用井、残りは水道水源井である。

(2) 水質測定および窒素安定同位体分析

水質分析は上水道試験法に準じた。また、過去の水質データについては自治体の水道事業体および水環境関連部署から提供を受けた。窒素安定同位体比は、1.5mg以上のNO₃-Nを含む地下水試料をpH10~11に調整して濃縮、凍結乾燥し、燃焼ガス化および質量分析を行うことで測定した。

(3) 農業データ解析による窒素負荷量計算

施肥や畜産ふん尿による窒素負荷量の推定には農林業センサスデータを利用した。農林業センサスには1960年から5年ごとのデータが存在し、旧市町村範囲での作物毎の耕地面積や家畜頭数が集計されている。施肥によ

る窒素発生量は各農作物の基準施肥量(窒素換算値)に耕地面積を乗じて計算し、畜産ふん尿による窒素発生量は各家畜種の窒素原単位に頭数を乗じることで求めた。また、窒素溶脱率は水田で0.05(0.5%)、畑および畜産ふん尿で0.35(35%)として⁶⁾地下への窒素負荷量を算出した。降雨による地下浸透水量は、熊本市の過去30年間の平均降水量2,000mmに地下浸透率0.34(34%)を乗じて求めた。最終的に、窒素負荷量を地下浸透水量にて除することで地下浸透水中NO₃-N濃度を推定し、結果をGIS上に統合した。

3. 結果および考察

(1) 熊本市近郊の地下水水質の特徴

a) 溶存成分による地下水水質の特徴づけ

本地域の地下水と国内産の市販ボトル水に関し、Na, Ca, Mg, HCO₃, Cl, SO₄, NO₃, F, SiO₂の濃度をもとにクラスター分析を行ない、水質の差異に基づきグループ化した。図-2に得られた樹形図を示す。本地域の地下水と市販ボトル水2点のみ(図-2で×印で示した試料)で一つのクラスターが形成され、他のボトル水と区別された。さらに本地域の地下水は4つにグループ化できた(図-2中で示したGr.1~Gr.4)。

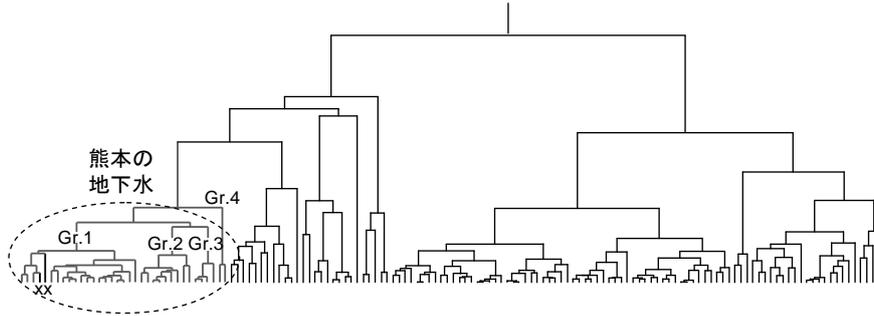


図-2 熊本の地下水と国内産ボトル水の溶存水質成分によるクラスター分析

b) 熊本市近郊の地下水中 NO₃-N 濃度の現状

図-3 に、いくつかの採水地点における近年の NO₃-N 濃度変化を例として示す。地点 A と B を除く地下水にて NO₃-N 濃度の上昇傾向が認められている。たとえば地点 A では、2002 年から激しい濃度変動がみられるものの総じて濃度は高く、年によっては基準値の 10mg/l を超えていた。また地点 B は、上昇傾向は明確ではないものの 5mg/l

を超える高い濃度で推移している。筆者らはこれまでに熊本市内の地下水に関して同様の調査を行い、殆どの地下水で NO₃-N 濃度が上昇傾向にあることを明らかにし、地下水涵養域や上流域での汚染の可能性を指摘してきた¹⁰⁾が、本結果はそれを裏付けた。

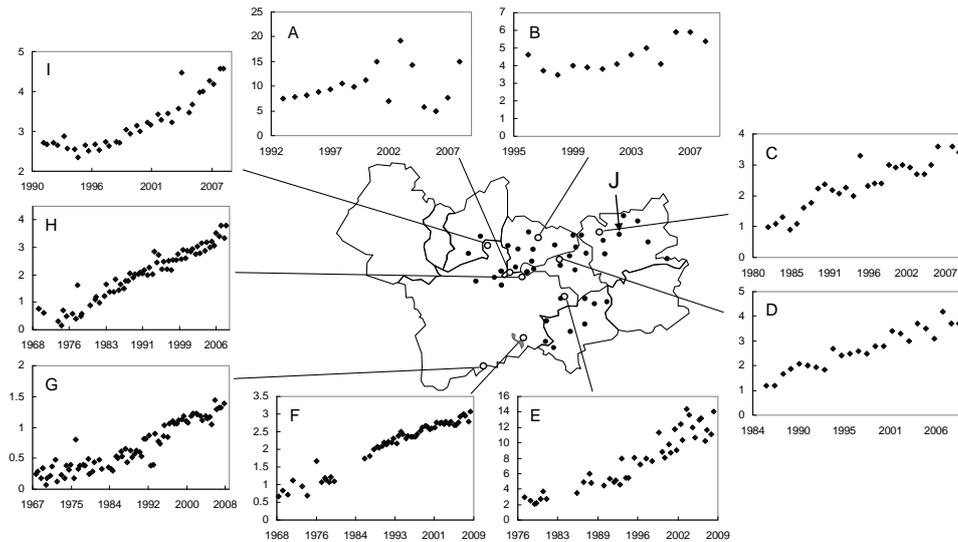


図-3 熊本の地下水における近年の NO₃-N 濃度変化 (横軸：年、縦軸：NO₃-N 濃度 (mg/l))

ただし、地点 A と E の NO₃-N 濃度は特に高く、これらは例外的な地下水である可能性も推定された。これを検討するため、筆者らは地点 E の過去の水質データに着目した。現在、地点の井戸は E は水質監視用井となっているが、かつては水道水源井であった。そこで、熊本市水道局に保管されていた約 20 年前の水質データからレーザーチャートを作成した。図-4 に、現在 (2009 年) と 1987 年当時の地点 E、地点 A、対照試料として地点 J (図-3 の矢印で示した地点) の地下水のレーザーチャートを示す。地点 A と現在の地点 E のチャートは極めて類似し、同じ水質であるとの印象を受ける。ところが、1987 年当

時の地点 E のチャートは、現在の地点 E よりもむしろ地点 J のチャートに類似した。このことは、地点 E の地下水はかつては地点 J に近い水質であったことを示唆する。すなわち、地点 E の地下水は、元々は地点 J と同様の水質であったが、“近年の何らかの影響”によって著しく変化してしまった可能性がある。しかも、この水質の変化は NO₃-N 濃度の急激な上昇を伴うものである。この仮説が正しいならば、現在の地点 A の地下水水質も将来的には地点 E と同様の状況になる可能性がある。ここで重要なのは、地下水水質に及ぼした“近年の何らかの影響”であるが、これは同時に NO₃-N の汚染要因の一つと考え

られる。

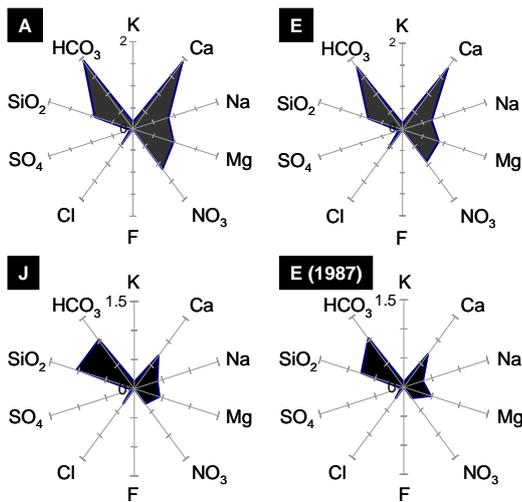


図-4 高濃度のNO₃-Nが検出された地下水のレーザーチャートによる水質比較 (単位: meq/l)

一般にNO₃-Nによる地下水汚染の原因は、大きく農業由来とし尿など生活排水由来に分けられ、さらに農業については肥料や家畜ふん尿が主な窒素源となる。熊本県は他の九州各県と同様、日本でも有数の農業県であり、特にスイカやメロン、柑橘類などの栽培が盛んである。また畜産も盛んで、合志市や熊本市東部などの地下水流域においても酪農や養豚業が盛んである。以上から、熊本市およびその近郊地域の地下水におけるNO₃-N汚染は、施肥や畜産ふん尿といった農業活動が主な原因となっている可能性が高い。そこでNO₃-N汚染要因の解明を目的として、農林業センサスデータから地下浸透水中のNO₃-N濃度を推定してNO₃-N汚染への寄与を検討するとともに、窒素安定同位体比(δ¹⁵N)の測定、解析を行うこととした。

c) 農林業センサスデータおよびδ¹⁵NによるNO₃-N汚染要因の解明

図-5に、1960年と2000年の農林業センサスデータから推定される施肥および畜産ふん尿由来の地下浸透水中NO₃-N濃度を示す。NO₃-N濃度は、熊本市の北西部を除く多くの地域で1960年よりも2000年時点での推定値が低く、実際の地下水中NO₃-N濃度の変化とは逆の傾向となった。一方、畜産ふん尿由来の推定NO₃-N濃度については、1960年時点では殆どの地域が3.0mg/lであったのに対し、2000年には10mg/lを超える地域が多くなった。さらにこれらの地域は、合志市をはじめ大津町や熊本市東部など実際の地下水中NO₃-N濃度が高い地域に集中していることが明らかになった。これらの結果から、本地域の地下水におけるNO₃-N濃度の上昇は、主に畜産ふん尿による窒素負荷が原因であると推定された。

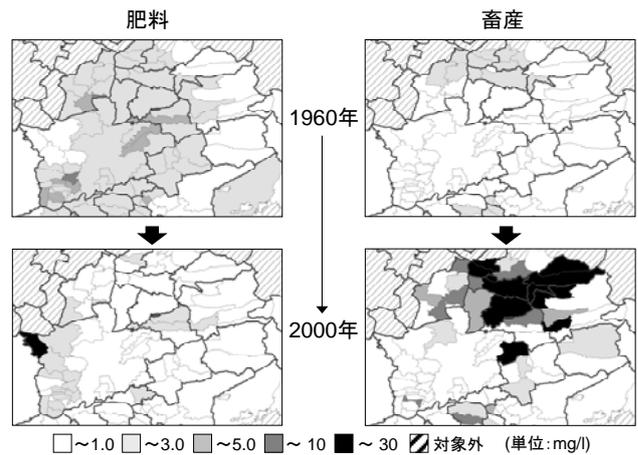


図-5 肥料および畜産ふん尿由来の地下浸透水中NO₃-N推定濃度

前項で、地点AとEの地下水水質の類似性が“近年の何らかの影響”による急激な水質変化の結果であるとの仮説を述べたが、図-5で明らかのようにこれらの地点はともに家畜ふん尿に由来する高いNO₃-N濃度が推定される地域内に位置する。さらに地点Eについては、熊本市の中でも特に高いNO₃-N濃度が推定される場所にあった。

以上から、これらの地下水水質に与えた“近年の何らかの影響”とは、“家畜ふん尿を起源とする地表からの窒素負荷による影響”であると考えるのが妥当である。すなわち、地点AとEの地下水については、地表からの家畜ふん尿に由来する窒素負荷の影響を強く受けたことで、図-4に示すような特徴の似通った水質に変化した可能性が高いと考えられる。

図-6に、地下水中NO₃-N濃度と窒素安定同位体比(δ¹⁵N)との関係を示す。δ¹⁵Nとは、大気中の¹⁴Nと¹⁵Nの存在比に対する試料中の同位体存在比の偏差であり、窒素成分の起源を特定する上で有用な知見となる¹¹⁾。図-6には、窒素起源とδ¹⁵Nとの関係について一般的な目安を示したが、例えば降雨であればδ¹⁵Nは-8.0~+2.0の範囲、化学肥料なら-7.4~+6.8などとされている¹¹⁾。図-6から明らかなように、全ての地下水についてδ¹⁵Nは7.0以上となり、図-3で示した地点Aと地点Eを含め、NO₃-N濃度の高い3点のいずれの試料もδ¹⁵Nが10以上と高いことが分かった。δ¹⁵Nは環境中での窒素代謝に伴う同位体分別効果などによって変化し、δ¹⁵Nの値のみで窒素起源を特定することは危険ではある。しかし、少なくとも図-6の結果はNO₃-Nの起源が化成肥料などの化学物質ではなく、下排水や畜産ふん尿などの有機態窒素であることを強く示唆する。

以上、農林業センサスデータによる窒素負荷量解析、および窒素安定同位体分析の結果から、本地域地下水におけるNO₃-N汚染要因は、家畜ふん尿や堆肥などの有機

態窒素である可能性が極めて高いと結論する。

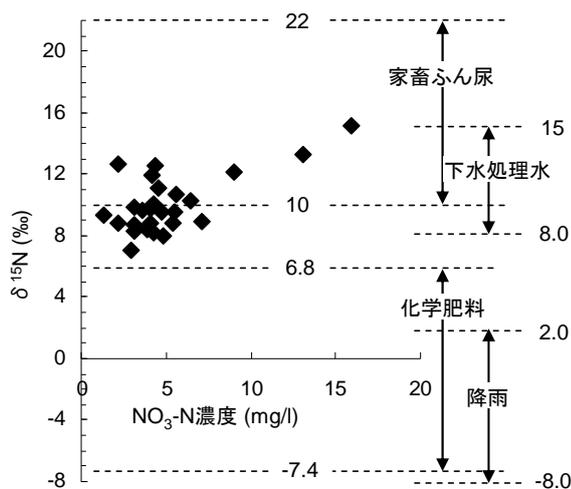


図-6 熊本市近郊地下水におけるNO₃-N濃度とδ¹⁵N値の関係

4. 結論

熊本市近郊の地下水流域を対象とした水収支および窒素を指標とする物質循環モデルの構築を最終目的として、本年度は研究対象地域の地下水水質の特徴を明らかにするとともに、NO₃-N汚染の現況把握とその要因解明について検討し以下の結論が得られた。

- 1) 溶存成分にもとづくクラスター分析の結果、熊本市近郊の地下水は国内産の市販ボトル水と水質的に区別され、溶性ケイ酸が多く、Ca, Na, およびMgイオンが等量的に同程度含まれるといった水質の特徴を有することが分かった。
- 2) NO₃-N濃度が10mg/lを超える地下水がみられ、多くの地下水でNO₃-N濃度の上昇傾向が認められた。

- 3) 熊本市近郊における地下水のNO₃-N汚染は、畜産ふん尿あるいは堆肥などの有機態窒素が主たる窒素負荷源である可能性が極めて高い。

5. 参考文献

- 1) 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，1995
- 2) 小島貞夫：おいしい水の探求，日本放送出版協会，pp. 60-61，1985
- 3) おいしい水研究会：おいしい水について，水道協会雑誌，54，pp. 76-81，1985
- 4) 熊本市水道局：平成20年度水質試験年報（第2集），2009
- 5) Ichikawa, T. et al. :Observation and water balance of flow rate in springs of an urban area, Bull. School Eng., Kyushu Tokai Univ., 21, pp. 143-151, 1995
- 6) 徐開欽 他：畜舎廃水の性状と原単位，用水と廃水，39(12)，pp. 13-21，1997
- 7) 川越保徳 他；熊本市飲用地下水水質の特徴とおいしい水としての評価に関する考察，水環境学会誌，32(7)，pp. 383-388，2009
- 8) 津留靖尚 他：熊本市における地下水中の硝酸性窒素について，熊本市環境総合研究所報，14，pp. 59-68，2006
- 9) 廣畑正章 他：熊本県にみられた硝酸性窒素による地下水汚染，用水と廃水，42，pp.19-28，2000
- 10) Tomiie, K. et al. ; Contamination by nitrate-nitrogen in Kumamoto City, J. Water Enviro. Technol., 7, pp.19-28, 2009
- 11) 近藤洋正 他；沖縄県宮古島における地下水中の硝酸性窒素の窒素安定同位体比について，地下水学会誌，39，pp. 1-15，1997