

嶋田 純

熊本大学大学院自然科学研究科・教授

地域水循環を踏まえた地下水持続利用システムの構築

§ 1. 研究実施体制

(1)「水循環機構・構造の実態解明」グループ

- ① 研究分担グループ長: 嶋田 純 (熊本大学大学院自然科学研究科、教授) (研究代表者)
- ② 研究項目
 - ・地下水流動・地下水管理システムの統合と島嶼地域への適応
 - ・3次元高精度電気探査装置の開発と可視化技術の実用化
 - ・マルチ同位体法の開発と島嶼地域への適応
 - ・人工甘味料をトレーサーとした地下水流動機構の解明

(2)「水質浄化・負荷軽減技術の開発」グループ

- ① 研究分担グループ長: 古川 憲治 (熊本大学大学院自然科学研究科、教授) (主たる共同研究者)
- ② 研究項目
 - ・Anammox 法による窒素処理技術の開発と島嶼地域への適応
 - ・簡易水質浄化技術の開発と実用化の検討
 - ・原位置 NO₃-N 軽減システムの開発と島嶼地域への適応

(3)「淡水生物を利用した水質モニタリング手法の開発」グループ

- ① 研究分担グループ長: 北野 健 (熊本大学大学院自然科学研究科、准教授) (主たる共同研究者)
- ② 研究項目
 - ・遺伝子導入生物センサー等の開発と実用化の検討

§2. 研究実施内容

水循環機構・構造の実態解明

・3次元高精度電気探査装置の開発

地表から地下に電気を流し、比抵抗(物質固有の電氣的抵抗値)の分布を測定する電気探査は地下水調査で広く用いられているが、比抵抗分布の空間分解能が低く、水脈の位置の特定までは不可能である。また、一般に探査深度が浅く、深部の地下水の存在までは検知できない。このような問題点を解決し、比抵抗の空間分解能を向上させ、水脈の抽出が高精度に可能になるように、本研究では、周波数を変化させることのできる高分解能周波数可変型電気探査装置の開発とその測定手法開発を試みている^{1,2,3}。本年度はこの周波数効果を理論的に解明するとともに、大型水槽を用いた地層モデル実験により、水脈を精度良く抽出できるための周波数帯域、電極の設定法、およびデータの逆解析法(インバージョン)を明らかにすることを目的として、1Hz~100Hzの範囲において1Hz間隔で周波数を変化させ、各周波数で見掛比抵抗の測定を行った。その結果、地下水のみの場合は周波数依存性がないことが明らかにされ、地下水と黒ボクや砂礫など2種類以上の物質で構成される試料では、周波数が増加するにつれて比抵抗値は減少する傾向が認められ、周波数を変化させることによって帯水層の比抵抗値と地下水面の双方が把握できる可能性が確認された。

・マルチ同位体法の開発

今年度はマルチ同位体を構成する硝酸、硫酸、重炭酸、鉛同位体比に対し機器導入・分析システムの立ち上げを目指してきた。また、約50年未満の若い地下水に対して年代推定が可能な、 SF_6 および ^{85}Kr を用いた新しい年代トレーサー法のシステム開発およびサンプル水への適用を行った⁴。地下水年代は浅層地下水で若く(15年未満)、深層地下水で古い(20年~50年以上)傾向が見られた。また、熊本平野における硝酸汚染ならびに脱窒現象の分布特性の全貌を明らかにした。

・地下水流動把握と地下水管理システムの構築

熊本地域では過去30年以上の地下水モニタリングの実績があり⁵、本研究では地表水-地下水統合型の3次元地下水シミュレーションモデルを構築し、地下水管理システムを提案することを想定している。今年度は、地下水位や河川流量の観測データでモデルをチューニングし、長期的に測定されているトリチウムと $\delta^{18}\text{O}$ ⁶を用いて再現性を確認した。その上で、白川中流域低地実施されている休耕田水張事業による人工涵養効果について評価を試みた。歴史時代からの土地利用を反映した4つのシナリオ(加藤清正による白川中流域の新田開発前、1930年代の水田耕作最盛期、近年の休耕田水張事業前、水張事業に成果が出てきた最近)について第2帯水層への地下水涵養量等を評価した結果、白川中流域低地からの地下水涵養が40%以上を占めており、その内6%程度が水田からの涵養であることが示された。これらの結果により白川中流域低地が第2帯水層の涵養域として非常に高い潜在的涵養機能を持っており、加えて水田という土地利用がさらなる涵養効果をもたら

していたことが明確に示された。

また、植林による地下水涵養の効果を定量的に把握するために、第 2 帯水層の涵養域である阿蘇外輪山西麓台地斜面に、ほぼ同じ流域規模・標高にある隣接した森林流域と牧草流域を選定し観測研究を開始した。河川流出を直接流出と地下水流出に分化して流域水収支から地下水涵養量を求めた結果と、不飽和土壌水中に存在する酸素安定同位体比の鉛直プロファイルを用いた **Displacement Flow Model**（置き換え流モデル）で解析した結果とを比較して、森林流域と牧草流域における地下水涵養量の評価を試みた。その結果、観測を行った 2011 年度の地下水涵養量は、森林流域では 2,204mm/yr、牧草流域では 2,854mm/yr、浸透降下速度は森林流域では 2.5m/yr、牧草流域では 3.0m/yr と推定された。

・人工甘味料をトレーサーとした地下水流動機構の解明

熊本市内の排水処理施設から得られた原水と処理水をそれぞれ分析したところ、人工甘味料のアセスルファム、スクラロース、サッカリンおよび一部の天然甘味料が検出された。原水と処理水中のアセスルファムとスクラロース濃度に変化はなく、活性汚泥処理等で分解・除去されず、水環境中へ放出されることがわかった。また、熊本県内の地下水と河川水試料を分析したところ、アセスルファム、スクラロース、サッカリンが検出され、人工甘味料が河川から地下水へ移行している様子が伺えた。さらに分析試料数を増やし、人工甘味料の濃度分布から熊本地域の地下水流動機構や滞留年代の解明に資する情報を解析する予定である。

水質浄化・負荷軽減技術の開発

・Anammox 法による窒素処理技術の開発と島嶼地域への適応

今年度は、部分亜硝酸化処理とアナモックス処理を一つの槽で行う **Single Stage Nitrogen Removal Using Anammox and Partial Nitritation (SNAP)**法について検討した。80 L 容の大型 SNAP リアクタを建造し、この SNAP リアクタの立ち上げと、運転に及ぼす影響因子について検討した。アナモックス汚泥と硝化活性汚泥を種汚泥として、SNAP リアクタを 1 ヶ月で立ち上げることに成功した。SNAP リアクタは pH6.12-8.6、3-5mg/L の DO 濃度域で安定して運転することができた。リアクタの pH が 6.1 以下や低温域では処理能力が低下したが、正常域に戻すことで処理能力は回復した。しかし、pH 域が 8.6-8.9 に高まった場合にリアクタ内の NO₂-N 濃度が高まりアナモックス細菌やアンモニア酸化細菌が阻害を受けその処理能力の回復に時間を要することが明らかになった。

・簡易水質浄化技術の開発と実用化を検討

昨年度開発した硝酸イオンを高速で選択的に吸着する繊維 FTAA 約 30g を合成し、その 15 g を充填したカラム（内径 5.6 cm または 4.6 cm）による地下水中の硝酸態窒素の除去を検討した結果、硝酸態窒素 6.9 mg/L、塩化物イオン 15 mg/L、硫酸イオン 26 mg/L を含む地下水 18 L を 50 分で通液したところ硝酸態窒素をほぼ 100%除去できることを明らかにした。また、ヒ酸イオンを高速かつ選択的な除去を目的とした Zr (IV) を担持可能なホスホン酸とスルホン酸を有する二官能性繊維も合成した。

鉄を用いた簡易ヒ素除去技術の開発では、ヒ素 (As^{3+}) を比較的多く (10 ppm) 含んだ水溶液に、 Fe^{2+} ならびに Fe^{3+} をヒ素に対して 0.5~5 倍量添加し、鉄共沈法によるヒ素の除去効果を検討した。鉄イオンのみで酸化剤を添加しない場合は、 Fe^{3+} を添加した方が Fe^{2+} よりもヒ素の除去効果は大きかったが、 Fe^{3+} を As^{3+} に対して 5 倍量添加しても、ヒ素の除去率は 90%未満であった。酸化剤としては過酸化水素が最も効果的で、過酸化水素を添加すると、 Fe^{2+} を As^{3+} に対して 2 倍量添加したサンプルからのヒ素除去率が 99%以上になり、 Fe^{2+} と酸化剤の同時添加がヒ素の除去には効果的であることが判明した。

・原位置 $\text{NO}_3\text{-N}$ 軽減システムの開発と島嶼地域への適用

平成 22 年度に行った地下水中硝酸性窒素濃度の現状^{10, 11)}に基づいて、水田および畑サンプルは nirK 遺伝子を、比較のために解析した緑川河口干潟サンプルは nirS 遺伝子を標的としたプライマーセットを用いて、亜硝酸還元酵素をコードする nir 遺伝子の PCR 増幅を行った。得られた nir 遺伝子の塩基配列を解析し、ホモロジー検索および系統樹の作成を行うことで、各サンプル中に存在する主な脱窒菌を調べた。水田および畑では *Bradyrhizobium* 属に近縁な、干潟では *Azoarcus* 属に近縁な脱窒菌が多く存在することがわかった。*Bradyrhizobium* 属および *Azoarcus* 属ともに窒素固定に必要な遺伝子も有しており、環境に応じて脱窒反応と窒素固定反応を切り替えることが知られている。それぞれに異なる環境であるが、窒素が過剰ではないと判断した水田、畑、干潟においては、窒素固定と脱窒を切り替えて窒素代謝を制御できる性質を有する微生物種が主な脱窒菌であるという結果が得られた。

淡水生物を利用した水質モニタリング手法の開発

我が国に広く生息する代表的な淡水生物であるメダカとイモリに加えて、全世界で広く発生生物学研究のモデル動物として使用されているゼブラフィッシュを用いて、地下水質を継続的にモニタリングするための生物センサーの開発及びその特性の把握、さらにはその生物を用いた硝酸性窒素等の評価手法の開発を行っている。^{12,13)}

メダカにおいて、ヒートショックプロテインプロモーターと赤色蛍光遺伝子を連結したプラスミドをメダカ受精卵に顕微注入し、水質悪化にตอบสนองして体色が赤くなる遺伝子導入メダカ系統の作製に成功した。また、この系統の仔魚は、高温ストレスだけでなく、10mg/L の硝酸性窒素暴露においても体色が赤くなることが判明した。ゼブラフィッシュにおいて、硝酸性窒素がドーパミン神経初期発生にどのような影響を及ぼすかを検討した結果、硝酸性窒素がドーパミン神経の発達に影響を及ぼすことが示唆され、これらの指標を用いたモニタリングシステムの確立が可能と考えられる。また、イモリ精巣の器官培養系を用いて、精原細胞の増殖や生存率に対する硝酸性窒素化合物 (KNO_3) の濃度依存性を調べたが、10mg/L でも影響がなかった。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

- 1) 御園生敏治・小池克明・嶋田 純・吉永 徹・井上 誠・高岡秀朋・麻植久史 (2011) 海底電気探査による沿岸域表層地質構造のイメージング, 情報地質, 18(2), 98-99.
- 2) 麻植久史, 御園生敏治, 梅田尚宏, 吉永 徹, 小池克明 (2011) 電気探査法による沿岸域塩淡水境界面の時間的変動解明, 情報地質, 22 (2), 78-80.
- 3) PARVIN, M., TADAKUMA, N., ASAE, H., KOIKE, K. (2011) Characterizing the regional pattern and temporal change of groundwater levels by analyses of a well log data set, *Front. Earth Sci.*, 5, 294-304.
- 4) Tokunaga T, Shimada J, Kimura Y, Inoue D, Mogi K, Asai K (2011) Multiple isotope ($\delta^{37}\text{Cl}$, ^{14}C , ^3H) approach to reveal coastal hydrogeological system and its change at western Kyushu, Japan. *Hydrogeological Jour.*, 19, 249-258.
- 5) 利部 慎, 嶋田 純, 島野安雄, 樋口 寛, 野田尚子 (2011) 阿蘇カルデラ内における地下水の流動機構. *日本水文科学会誌*, 41(1), 1-17.
- 6) Masahiro Tanoue, Kimpei Ichiyanagi, Jun Shimada, and Naoki Kabeya (2011) Factors Controlling the Spatial Distribution of Stable Isotopes in Precipitation over Kumamoto, Japan. *Advances in Geosciences*, accepted.
- 7) Yamanaka T, Mikita, M, Lorphensriand O, Shimada J, Kagabu M, Ikawa R, Nakamura T, Tsujimura M (2011) Anthropogenic changes in a confined groundwater flow system in the Bangkok Basin, Thailand, part II: how much water has been renewed? *Hydrological Processes*, 25, 2734-2741, DOI: 10.1002/hyp.8014.
- 8) R. Ikawa, T. Yamamoto, J. Shimada, T. Shimizu (2011) Temporal variations of isotopic compositions in gross rainfall, throughfall, and stemflow under a Japanese cedar forest during a typhoon event. *Hydrological Research Letters*, Volume 5, 32-36.
- 9) 小野昌彦, 嶋田 純, 市川 勉, 徳永貴大 (2011) 熊本市江津湖における水中 ^{222}Rn 濃度を用いた地下水湧水量の評価. *陸水学雑誌*, 72(3), 193-210.
- 10) 川越保徳, 柿本竜治, 糸満尚貴, 富家和男 (2011) 窒素安定同位体と GIS を用いた行政データの調査解析による地下水中硝酸態窒素の負荷要因解明, 水と廃水, 53, 951-960.
- 11) 富家和男, 糸満尚貴, 松山賢司, 柿本竜治, 川越保徳 (2011) 熊本都市域における地下水中硝酸態窒素濃度の現状と地理情報システムおよび窒素安定同位体分析による窒素負荷要因の解明, *日本水環境学会誌*, 34, 1-9.
- 12) Toshiya Yamaguchi and Takeshi Kitano (2012) High temperature induces

cyp26b1 mRNA expression and delays meiotic initiation of germ cells by increasing cortisol levels during gonadal sex differentiation in Japanese flounder. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 419, 287-292.

- 13) Ko Eto, Syota Goto, Wakana Nakashima, Yuichiro Ura and Shin-ichi Abe (2012) Loss of programmed cell death 4 induces apoptosis by promoting the translation of procaspase-3 mRNA. *Cell Death and Differentiation*, in press.