

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)

② 研究項目

- ・地下水涵養・流動機構の解明とモデルの開発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
- ・持続的な地下水管理システムの構築

(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:川越 保徳 (熊本大学大学院自然科学研究科、教授)

② 研究項目

- ・Anammox 法による窒素処理技術の開発
- ・簡易水質浄化技術の開発
- ・微生物による原位置 $\text{NO}_3\text{-N}$ 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)

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

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

(1)「水循環機構・構造の実態解明」グループ

・地下水涵養・流動機構の解明とモデルの開発

H24年度は、白川中流域低地の転作水田を利用した人工地下水涵養効果について3次元地下水流動モデルによる検討を行い、2つの国際学会において口頭発表^{17,18)}を行うと共に関連の国内学会でも発表を行い、関連学会誌に論文投稿¹⁾を行った。また前年までにトリチウム濃度でその流動特性が検証された熊本地域を対象とした3次元地下水シミュレーションモデルを用いて土地利用に対応した地下水涵養量評価を行い、土壌水の安定同位体比プロファイルから得られた異なる土地利用に対する地下水涵養量推定結果との対比を行いその妥当性を検証した。また同モデルに降水の安定同位体比を入力とした涵養を与えた時の再現性を検証した結果、不飽和浸透過程における混合機能を反映する必要があることが判明したためモデル上での不飽和涵養機構に浸透過程での分散効果を取り入れることで対応するようモデルを改良した。その結果地下水の安定同位体比分布を再現することが可能となった¹⁹⁾。地下水温プロファイルのモデルによる再現については、H24年度に初期モデルが完成し実測値とほぼ整合する結果が得られたので、異なる観測時期に対応した検討をH25年度早々に実施しその成果を学会発表する。若い地下水年代トレーサーとして開発した⁸⁵Krに関してはH23年度の熊本地域での調査で有意な測定結果が得られたため、トリチウムと同様に降水濃度を入力値として地下水モデルに適用することでモデルの検証をH25年度に実施する。H23年度から開始した阿蘇西麓台地斜面における森林と草地の試験流域における水文観測データを基に、土地利用変化に伴う年間の地下水涵養量を評価し、地下水管理の一環として実施されている植林の効果を定量的に把握し成果を関連国際学会で発表²⁰⁾すると共に国内学会誌に投稿した。H24-25年度にかけて同試験流域の水文観測を継続すると共に比抵抗探査による地下水帯水層構造の把握を行って流出特性と対比する予定である。

・3次元高精度電気探査装置の開発

本実施項目では、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を目指す。H24年度では周波数可変型電気探査機器により、H23年度行ったサンプル測定と機器性能の実証実験とフィールドにおける測定との差異を確認するために、山岳域(阿蘇地域)と沿岸域(八代海沿岸)において現地テスト測定を実施した²⁾。両者ともボーリング等の他測定によって地下水の位置が分かっている場所である。測定結果に、H23年度開発した比抵抗値の周波数帯で標準偏差をとる手法と比抵抗比によって、地下水探査に有効な周波数帯を抽出した。その結果、地質の違いのためか有効な周波数帯が若干異なるものの、標準偏差において1~28Hz間の連続した20周波数、および比抵抗比の $\rho(9\text{Hz})/\rho(10\text{Hz})\sim\rho(14\text{Hz})$ 、

$\rho(8\text{Hz})/\rho(10\text{Hz})\sim\rho(14\text{Hz})$ で地下水の存在に対応する共通した周波数帯が抽出できた。H25年度は、沖縄県多良部島で地下水のレンズ構造推定を行うと共に、インバージョン解析法の開発を行う。インバージョン解析は、地下水に対する特性周波数が存在する理論を組み込む順計算と、2次元解析と補間法の組み合わせによる逆計算をアルゴリズムとする。

・マルチ同位体法の開発

マルチ同位体を構成する硝酸、硫酸、重炭酸、鉛の同位体比に対し、計画に沿って分析システムの立ち上げならびにマニュアルの作成を完了させた。これにより地下水試料に対するルーチン分析が可能となった。加えて、既に採水が完了していた地下水ならびに比較のための湧水、河川水に対し、硝酸、硫酸、重炭酸同位体比の全ての分析を完了させた。これらのデータのうち、硝酸同位体比のデータを基に解析を行い、H24年度の目標であった、熊本地域全域に対する地下水硝酸汚染の起源推定と地下水流動に沿った自然浄化プロセスについて明らかにし、その結果を国際誌 **Water Research** に公表した³⁾。

H23年度までの結果から、CFCs法には都市域での濃度付加や還元域での濃度減少に伴い、サンプルが本来有する濃度から増加もしくは減少してしまう問題がみられた。そこで、このような問題に強靱で近年にかけて濃度が上昇し続けている SF_6 法の適用可能性を検証するとともに、実際に滞留時間の推定を行った。熊本地域における SF_6 濃度の空間分布特性をみると、地下水の涵養域である白川中流域低地の上流側に工場地帯が分布していることや、火山性起源の SF_6 濃度付加により、地下水の流動過程で本来試料水が有する濃度よりも高い濃度となっていることが示唆された。よって、熊本地域での SF_6 を用いた滞留時間の推定には制約があることが判明したが、山地域では滞留時間が推定できたため、年代推定技術は確立し一定の成果を上げることができたといえる。また、人工甘味料と各種年代推定法との比較研究についても引き続き実施するほか、一部の医薬品をトレーサーにした病院排水の地下水漏出に関する調査研究も行う。

・持続的な地下水管理システムの構築

H24年度は熊本地域で実施されている、地下水管理システム(熊本地下水財団の設立、県地下水条例改定等)の現状を把握すると共に、そこで提案されている水量・水質に関する持続的な管理方法を検証し関連学会誌に論文投稿¹⁾した。また熊本地域での地下水管理システムが成功した背景について、3次元地下水流動シミュレーションを用いた歴史時代に遡るモデル解析を行い自然の地下水流動と人間活動の相互依存系の上に地域の地下水流動が成立していることを明らかにすると共に、地下水管理はこのような観点を踏まえて実施してゆくことが肝要であることを明示し、関連の国際学会にて発表^{17,18)}した。合わせて熊本市がこれまでに取り組んできた持続的な地下水利用法の構築に関する実績を評価すべく、国連による“UN-Best water practices award”に推挙した結果、2013年3月に水管理部門で熊本市が世界1位に表彰されるに至った(<http://www.un.org/waterforlifedecade/winners2013.shtml#Kumamoto>)。また水質に関してH24年度には、硝酸性窒素の挙動を再現できるような地下水流動モデルのサブモデ

ルを構築したので、H25年度はより詳細な地表からの窒素負荷データの変遷情報を入力し、また不飽和浸透過程での硝酸性窒素の変化の情報も踏まえたモデルに改良し、現実の帯水層での脱窒域の形成要因についてモデルの観点から検討する。合わせて都城地域においても同様の地下水流動モデルおよび硝酸変遷モデルを構築する。これらの成果を踏まえて最終年度までに地下水質に関するその持続的利用のための管理方法の提案を目指す。また、持続的地下水管理方策の作成について、これまでの地下水保全政策の有効性についてゲームの理論による政策分析を行い、具体的な施策の有効性や限界を検証するとともに、公共財供給問題のジレンマの観点を加味した新たな管理方策の可能性の検討を行った。

(2)「水質浄化・負荷軽減技術の開発」グループ

・ Anammox法による窒素処理技術の開発

本実施項目については、H23年度に淡水性Anammox細菌の集積培養系による窒素処理技術に関して一定の成果が得られたことから、H24年度は海洋性Anammox細菌（MAB: Marine Anammox Bacteria）培養系を用いる窒素除去に関する基礎的研究を実施した。主に温度特性と塩分特性に関する検討を行い、温度特性に関する知見が得られた。温度について、5～37℃までの範囲でMABの連続培養系における窒素除去能の変化を調べた結果、25℃にて最も高い窒素除去能を示すことが明らかとなった。20～32℃までは概ね良好な窒素除去能が維持されたが、35℃以上では急激な低下がみられ、15℃以下では温度低下に伴う除去能の低下が認められた。また、5～30℃の範囲における窒素除去能から計算された活性化エネルギーは54.6 kJ/molであった⁴⁾。

なお、H25年度より本研究テーマについては、次項に示すテーマ「微生物によるNO₃-N脱窒メカニズムの解明」と連携し、地下地質・地下水環境における脱窒メカニズムへのAnammox反応の関与に関する研究にシフトする予定であることから、その予備的研究として特にNO₃-N汚染の著しい地区の地下水を中心としてその実態把握調査を行い、家畜廃棄物とNO₃-N濃度上昇との関係を明らかにした²¹⁾。

・ 簡易水質浄化技術の開発

東南アジアを中心に、地下水（井戸水）のヒ素汚染が深刻化している。そこで、淡水中のヒ素の簡易除去法の開発を目的として、H23年度までにヒ素のヒ酸鉄としての沈殿生成における諸因子の影響の調査を行った。H24年度は酸化鉄への吸着によるヒ素の除去について検討し、酸化鉄の種類、粒度、添加量、処理時間がヒ素の除去率に及ぼす影響を明らかにした。また、酸化鉄を焼結させて作成したヒ素吸着剤を用いたカラム法により、淡水中のヒ素の除去ができることを明らかにした。並行して、ヒ酸イオンなどに高選択性をもつジルコニウム(IV)を担持させた配位子交換型の繊維状ヒ素吸着剤を合成した。この吸着剤を充填したカラムを用いたヒ素の吸脱着の検討を進め、ヒ素の高選択吸着・溶離・再生が行える、すなわち反復使用が可能であることを明らかにした。また、硝酸イオンを高速で高選択的に吸着する繊維については、繊維充填カラムの改良を行って繊維体積 72.6 mL のカラムを作製した。この繊維

充填カラムを用いて、硝酸態窒素 8.4 mg/L、塩化物イオン 9.2 mg/L、硫酸イオン 27 mg/L を含む地下水 20 L から、30 分でほぼ 100%硝酸態窒素を除去できた。

・微生物による原位置NO₃-N脱窒メカニズムの解明

地下水中の硝酸イオンについては、脱窒細菌が機能して除去しているものと考えられるが、微生物反応まで含めた詳細な脱窒機構に関しては未解明の部分が多い。H24年度は、硝酸イオン汚染が懸念される畑地2か所の表層と深部（15 m –20 m）土壌の硝化菌および脱窒菌の解析を行った。硝化菌が有する機能性遺伝子 *amoA* と脱窒菌が有する機能性遺伝子 *nirK* を標的として P C R を行った結果、*amoA* 遺伝子の増幅は見られたが *nirK* 遺伝子についてはすべてのサンプルで増幅が認められなかった。したがって、サンプリングを行った畑地においては硝化菌数と比較して脱窒菌数は少なく、硝酸イオンは生成するが脱窒による除去活性は弱いために硝酸イオン汚染が起こりうることを示唆された。全バクテリアを対象とした 16S rRNA 遺伝子を標的とした解析も行ったが、*Bacillus* 属や *Lactobacillus* 属などの Firmicutes 門に属する微生物が多く検出され、無機窒素肥料よりも有機肥料が多く施肥されている場所であると推測された。なお、16S rRNA 遺伝子の解析では、硝化菌も脱窒菌も検出されなかった。

(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

H24 年度は、すでに作製した水質悪化にตอบสนองして体色が赤くなる遺伝子導入(Tg)メダカシステムを用いて、環境ストレス応答性及び硝酸性窒素応答性を調査した。その結果、高温、酸性、アルカリ性、硝酸性窒素(10mg/L 以上)により Tg メダカの体色が赤くなることが確認され、実際の地下水においても同様の傾向が観察された。これらのことから、この Tg メダカシステムは、地下水の水質モニタリングに大変有用であると考えられた。次に、硝酸性窒素に対して特異的にตอบสนองする Tg メダカシステムの作製を目指して、DNA マイクロアレイ解析により硝酸性窒素応答遺伝子の網羅的探索を行った。その結果、44 遺伝子が選別され、その中の 1 遺伝子がリアルタイム PCR により硝酸性窒素応答遺伝子であることが確認された。今後は、この遺伝子の特徴を把握しつつ、この遺伝子を用いた硝酸性窒素応答 Tg メダカシステムの作製を試みる予定である。一方、ゼブラフィッシュの受精卵を硝酸性窒素および亜硝酸性窒素に曝露し、ドーパミン神経に及ぼす影響を調べた。その結果、免疫染色により、ドーパミン産生を制御するチロシン水酸化酵素の発現が硝酸性窒素(10, 100mg/L)により減少し、その減少がエストロゲン受容体(ER)阻害剤により抑えられることから、その作用が ER を介していることが示された。稚魚の運動性に関しては、触覚刺激に対する反応については有意な影響はなかったが、遊泳活動に対しては減少させることが示され、その作用が ER を介していることが明らかとなった。亜硝酸性窒素についても同様の結果が得られたが、硝酸性窒素よりも活性が強く、より低い濃度で影響がみられ、触覚刺激に対する反応も 1mg/L から減少がみられた。以上のことから、硝酸性窒素および亜硝酸性窒素はドーパミン神経に対し、エストロゲン様の作用を及ぼし、内分泌攪乱物質として作用することが示された。また、アフリカツメガエル初期発生過

程に対する KNO₃ の効果を調べるために、1, 10, 100ppm KNO₃ に桑実胚を各 50 個入れて観察した。Control では、4 時間 30 分で全部が後期胞胚に、18 時間 50 分で 96% が神経胚に、24 時間 10 分で 96% が初期尾芽胚に、41 時間 30 分で 90% がおたまじゃくしに到達したが、1~100ppm KNO₃ のいずれにおいても control とほぼ同じ発生率であった。また、K+イオンの影響を見るために、100ppm KNO₃ と同じ濃度の KCl の効果も調べたが異常は見られなかった。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. 嶋田純(2012) モンスーンアジア地域における可能地下水涵養量を考慮した地下水資源管理, 日本水文科学会誌, **42**(2), 33-42.
2. 御園生敏治, 麻植久史, 小池克明, 嶋田 純, 吉永徹, 井上 誠 (2012) 電気探査法による有明・八代海の海底下浅部の地質構造のイメージングと地下水湧出経路推定への応用, 応用地質, **53**(5), 235-244.
3. Hosono, T., Tokunaga, T., Kagabu, M., Nakata, H., Orishikida, T., Lin, I-T., Shimada, J. (2013) The use of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ tracers with an understanding of groundwater flow dynamics for evaluating the origins and attenuation mechanisms of nitrate pollution, *Water Research*, doi:10.1016/j.watres.2013.02.020.
4. Kawagoshi, Y., Fujisaki, K., Tomoshige, Y., Yamashiro, K. and Wei, Q. (2012) Temperature effect on nitrogen removal performance and bacterial community in culture of marine anammox bacteria derived from sea-based waste disposal site, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **113**(4), 515-520.
5. 佐藤透, 山宮和智, 小野昌彦, 丸山篤志, 一柳錦平, 嶋田純(2012) 比抵抗探査法と水の安定同位体比を用いた温暖湿潤気候におけるトウモロコシの吸水深度に関する研究, 日本水文科学会誌, **42**(4), 147-165.
6. 麻植久史, 高倉伸一, 吉永 徹, 小池克明(2012) MT 法と AMT 法の組み合わせによる広域 3次元比抵抗モデリングと水理地質構造解明への応用, 情報地質, **23**(3), 121-129.
7. Asaue, H., Kubo, T., Sasahara, M., Yoshinaga, T., and Koike, K. (2012) Application of Magnetotelluric (MT) Resistivity to Imaging of Three-dimensional Geologic Structure and Groundwater System over a Wide Area, *Natural Resources Research*, **21**(3), 383-393, doi:10.1007/s11053-012-9184-2.
8. Moukana, J.A., Asaue, H., and Koike, K.: Cokriging for Spatio-temporal Variability of Shallow Groundwater Levels Accompanying Land Use/Land Cover Changes,

Environmental Earth Sciences, in press.

9. 河原正泰, 小森慎太郎 (2013) 銅製錬スラグからの重金属の溶出性, *J. of MMIJ.*, **129** (3), 印刷中.
10. 野本卓也, 藤井光, 内田洋平, 利部慎, 嶋田純 (2012) 地球温暖化対策効果から見た温暖地方における地中熱利用可能性, *日本地熱学会誌*, **34**(4), 185-197.
11. Kagabu, M., Shimada, J., Delinom, R., Nakamura, T. and Taniguchi, M. (2012) Groundwater age rejuvenation caused by excessive urban pumping in Jakarta area, Indonesia, *Hydrol. Process.*, doi:10.1002/hyp.9380.
12. Tanoue, M., Ichiyangi, K., Shimada, J. and Naoki Kabeya (2012) Spatial Distribution of Stable Isotopes in Precipitation around Kumamoto, Southern Japan, *Advances in Geosciences*, **28**, 29-39.
13. Eto K., Goto S., Nakashima W., Ura Y., Abe S. (2012) Loss of programmed cell death 4 induces apoptosis by promoting the translation of procaspase-3 mRNA, *Cell Death Differ.*, **19**(4), 573-581, doi:10.1038/cdd.2011.126.
14. Eto K., Iwama T., Tajima T., Abe S. (2012) The RNA-binding protein xCIRP2 is involved in apoptotic tail regression during metamorphosis in *Xenopus laevis* tadpoles, *Gen. Comp. Endocrinol.*, **179** (1), 14-21, doi:10.1016/j.ygcen.2012.07.017.
15. Kitano T., Hayashi Y., Shiraishi E. and Kamei Y., (2012) Estrogen rescues masculinization of genetically female medaka by exposure to cortisol or high temperature, *Mol. Reprod. Dev.*, **79**(10), 719-726, doi:10.1002/mrd.22080.
16. 松永緑, 嶋田純, 三上久美子, 細野高啓, 利部慎, 岩佐耕次 (2013) 宮崎県都城盆地における地下水流動を踏まえた 地下水中の硝酸性窒素の 起源とその挙動, *Get 九州*, 応用地質学会九州支部会報, **34**, 2-11.
17. Shimada, J., Ichiyangi, K., Kagabu, M., Saita, S. and Mori, K. (2012) Effect of artificial recharge using abandoned rice paddies for the sustainable groundwater management in Kumamoto, Japan, World Environmental & Water Resources Congress, Albuquerque, New Mexico, USA., May 2012, 59-69.
18. Shimada, J., Ichiyangi, K., Kagabu, M., Saita, S. and Mori, K. (2012) Evaluation of long-term artificial groundwater recharge through leaky rice paddies with a 500 year history, IAH2012 congress, Niagarafalls, Canada extended abstract, 232. 6p.
19. Ichiyangi, K., Shimada, J., Kagabu, M., Saita, S. and Mori K. (2012) Simulations of Tritium age and $\delta^{18}\text{O}$ distributions in groundwater by using surface-subsurface coupling full-3D distribution model (GETFLOWS) in Kumamoto, Japan, In Extended Abstract of the 39th Congress of the International Association of Hydrogeologists (IAH), Sherton on the Falls Conference Centre, Ontario, Canada. Abstract ID, 280, 8p.

20. Kudo, K., Shimada, J. and Tanaka, N. (2012) The estimation of groundwater recharge rate for different land use – observation study at paired forest and grassland watersheds, IAHS2012 congress, Niagarafalls, Canada extended abstractID 419, 10p.
21. Murakami, Y., , Itomitu, N., Tomiie, K., Kakimoto, R. and Kawagoshi, Y. (2012) Investigation of contributory factors to NO₃-N contamination of the ground water in kumamoto area by nitrogen isotope ratio and administrative data, SETAC Asia/Pacific 2012, SETAC Asia Pacific 2012 Abstracts Plenary Lecture, 169.