

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：17301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2017～2019

課題番号：16KK0014

研究課題名（和文）地域の地下水汚染の現状と対策効果を見える化する（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Visualization of present state and countermeasure effects of local groundwater pollution(Fostering Joint International Research)

研究代表者

中川 啓 (NAKAGAWA, Kei)

長崎大学・水産・環境科学総合研究科（環境）・教授

研究者番号：90315135

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,100,000円

渡航期間： 7ヶ月

研究成果の概要（和文）：硝酸性窒素による地下水汚染の効率的な対策と修復を講じるにあたって、数値計算モデルによるシミュレーションが有効である。そこで、本研究ではFREEWATソフトウェアを適用して、汚染が進展していく過程と、修復対策の効果について検討を加えた。定常状態の地下水流動シミュレーション結果は、観測された水頭データをよく再現した。硝酸性窒素の輸送シミュレーション（MT3DMSを使用して実行）によると、濃度変化の一般的な傾向は、過去44年間の観測値と概ね一致した。発生源の硝酸塩負荷を40%削減した場合の修復シミュレーションでは、硝酸性窒素の濃度が飲料水基準を下回るまでに約18年かかることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果は、環境省の「地下水保全のための硝酸性窒素等地域総合対策検討会」および長崎県の「島原半島窒素負荷低減対策会議」において公表していくことを考えており、対策効果の見える化を行い、実質的な地域における水環境改善に役立てることができる点に意義があると考えます。また本国際共同研究の活動を通じ、ルンド大学のポスドクや博士課程学生らと協働で、国際的な地下水汚染問題に関するプロジェクトに取り組むことなど、国際的な研究ネットワークの構築も進めることができました。

研究成果の概要（英文）：Nitrate pollution in groundwater is a serious environmental problem in the Shimabara Peninsula, Nagasaki Prefecture, Japan. For efficient countermeasures and remediation of the groundwater, numerical simulation may constitute a powerful tool. Along this line, we developed a numerical model to improve the understanding of transport processes in the nitrate pollution and we evaluated the effects of remediation countermeasures by using the FREEWAT software including MODFLOW as numerical engine. The steady state results of groundwater flow simulations reproduced observed hydraulic head data. According to the numerical transport simulation results (performed using MT3DMS), the general trend of concentration changes well agreed with observation during the past 44 years. Remediation simulations indicate that it will take about 18 years for groundwater concentrations to fall below Japanese drinking water standards. The pre-requisite is a 40% reduction in nitrate load of the source zone.

研究分野：環境地下水学

キーワード：硝酸性窒素 地下水汚染 数値シミュレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

本研究に対する基課題は、基盤研究(B)「地下水汚染フィールドを利用したトレーサー試験方法の提案と汚染メカニズムの解明(課題番号:24360194)」であった。地下水のトレーサー試験とは、地下水の動きや地下水中に溶存している物質の動きを知るためのものである。この研究(基課題)では、(1)地下水汚染フィールドを利用した新しいトレーサー試験方法を提案し、それをういた我が国固有のトレーサー試験サイトを構築、データの蓄積をはかること、(2)またこの新しい試験方法により、現場の硝酸性窒素汚染の実態解明と、その対策方法の検討に役立てることを目的とした。研究対象としたのは、深刻な地下水の硝酸性窒素汚染が報告され、いまだに解決されていない島原半島とした。環境負荷のない新しい試験方法を提案することと、汚染対策の糸口を見出すことは、清澄な水の確保・保全の観点からも社会的意義のある研究となると考えた。この基課題では、トレーサー試験を試み、単一の観測井戸を用いたポイント・ダイリユーション法によるトレーサー試験が最適であることを見出した。その後、多数のトレーサー試験を実施してデータを蓄積し、解析を行い、現場の透水性(地下水の通過しやすさ)や分散特性(地下水中の溶存物質の拡がりやすさ)の鉛直方向の分布を明らかにした。一方、トレーサー試験サイトを含む地域(島原市)における湧水地点、民家、水道水源のおよそ40地点を対象として、地下水位の測定や地下水のサンプリングと水質の測定を実施してきた。このことにより、現場の硝酸性窒素汚染の実態解明を行った(Nakagawa et al. 2016, 2017)。これに付随した別の論文の公表も行った(中川ほか, 2015, 天野ほか, 2016)。また基課題で設置した観測井戸における水質の鉛直分布特性についても調査を進めており、硝酸性窒素濃度の深度方向の拡がりについても明らかにした(Amano et al. 2016)。さらに、こうしてサンプリングされた地下水から、基課題で新規のトレーサー物質として提案したコプロスタノール(糞便汚染の指標とされる物質)の濃度を測定し、汚染源推定に役立てることを検討も行った。

基課題の研究で実施したトレーサー試験結果を踏まえ、最終的にはフィールドスケールの地下水中の物質輸送シミュレーションを実施して、汚染対策シナリオ解析による評価を行うことにより、汚染対策の糸口を見出すことに繋がると考えた。そこで、本国際共同研究の目的は、基課題で得られた水理パラメータを反映した現場の数値計算モデルを構築することと、海外共同研究者の助言を受けながら、種々の対策シミュレーションを実行し、汚染の現状と対策効果を「見える化」することとした。こうして得られると予想された成果は、環境省の「地下水保全のための硝酸性窒素等地域総合対策検討会」および長崎県の「島原半島窒素負荷低減対策会議」において公表し、対策効果の見える化を行い、実質的な地域における水環境改善に役立てることができる点に意義があると考えた。また本研究では、海外共同研究者の助言を受けながら、モデル構築を行うことや、ドイツのヘルムホルツ環境科学センター(UFZ)の研究者らが、ソース公開ソフトウェア OpenGeoSys (OGS)の解説書(Sachse et al. 2015)を出版しているが、本書では、GISで生成した水文地質データを利用してモデル化へつなげるということを、具体的なモデル化手順に沿って詳述している。このOGSを利用したモデル化を検討することとした。こうした先進的な成果を挙げている研究機関をいくつか訪問し、モデリングのノウハウについて学び、かつ欧州での汚染事例について情報収集し、本研究に対するレビューも受けることを計画した。国内においても、数値計算モデルの妥当性検証のため、現場データの収集が重要と考えており、指導学生らと連携して本研究を進めることを計画した。

2. 研究の目的

上述したように本研究の目的は、基課題の研究で実施したトレーサー試験結果を踏まえ、最終的にはフィールドスケールの地下水中の物質輸送シミュレーションを実施して、汚染対策シナリオ解析による評価を行うことにより、汚染対策の糸口を見出すことであり、すなわち、基課題で得られた水理パラメータを反映した現場の数値計算モデルを構築することと、海外共同研究者の助言を受けながら、種々の対策シミュレーションを実行し、汚染の現状と対策効果を「見える化」することである。また、基課題で得られたデータを整理する過程で得られた新たな知見に関しても、海外共同研究者の助言を得ながら取りまとめ、口頭発表や論文として公表していくことも本課題の目的に加えた。

3. 研究の方法

(1)サンプリングと水質分析・データ整理

基課題によって得られているデータ整理を行い、本研究におけるモデル化に必要な水理パラメータの整理を行った。すなわち多深度で実施したポイント・ダイリユーション法によるトレーサー試験の結果整理による分散長や透水係数の同定を行った。また表層土壌における硝酸イオンの吸着特性についてモデル化を行った。こうしたデータ整理を通じて得られた新たな知見として、ステロール類を用いた地下水や河川水中における硝酸性窒素汚染の原因分離方法につ

いて取りまとめた。基課題では、主に島原市の地下水調査を行ったが、半島スケールのモデル構築も検討するため、雲仙市においても地下水のサンプリングと水質分析を進めた。さらにモデル領域における河川水中の汚染状況を調べるため、15 河川の 41 地点においてサンプリングを実施し、水質分析を行い、データを取りまとめた。

(2)モデル化

モデル化にあたっては、従前から進めてきた数値計算モデルに加え、フリーで利用可能なソフトウェアである OpenGeoSys, また当該分野で広く使われている MODFLOW と MT3DMS をベースとしたサンタナ大学大学院（イタリア）で開発された FREEWAT を適用し、様々な検討を加えたところ、運用の容易さなどの観点から、FREEWAT を適用することを決定した。モデル化は、半島スケールのモデルと汚染が深刻である島原市を対象とした市スケールのモデルを並行して構築することとした。境界条件の設定の容易さといった点から、半島スケールのモデルにより、本研究の目的である、汚染の現状と対策効果を「見える化」することを達成することとした。

したがって、数値計算領域を島原半島全体とし、200 m x 200 m の格子により分割した。半島と諫早市側は有川を境界として、定水位の条件を与えた。また標高 300 m 以上の山側を計算領域から除外し、地下水位観測値と標高の関係式から山側の境界条件を定水位として与えた。海側は圧力水頭ゼロの条件を与えた。降水量の平均値と気温から推定した蒸発散量の平均値を与えて、地下水流れの計算を実行し、観測井戸や水道水源の井戸で得られている定常地下水位を概ね再現することを確認した。

(3)シミュレーション

構築したモデルを用いて実施するシミュレーションは、①汚染が進展してきて現状を再現するまでの過程と、②種々の対策により汚染源における濃度を低減された場合について、それぞれを実施した。なお、地表面に与える負荷量は、農林業センサスに基づいて、集落ごとに集計した飼養家畜頭羽数と家畜ごとの負荷原単位や耕地面積と施肥基準平均値により作成したポテンシャル分布を用いた。

4. 研究成果

本研究では、研究対象とした島原半島の地下水汚染に対して、効率的な対策と修復を講ずるためには、数値シミュレーションが強力なツールとなると考えた。ここでは、MODFLOW と MT3DMS をベースとした FREEWAT ソフトウェアを使用し、修復対策の効果を評価した。地下水流動計算の結果は、観測された地下水位分布を高い精度で再現した（図-1）。

ここで得られた定常の地下水位分布に基づき、地表面に負荷ポテンシャル分布を与え、汚染が進展する過程をシミュレーションしたところ、水道水源の井戸において観測されてきた濃度変化の平均値を概ね再現できた（図-2）。すなわち、濃度変化の一般的傾向と、過去 44 年間にわたって概ね一致したと言える。また、汚染源負荷量を直ちに 40 %削減できるという前提条件で修復シミュレーションを実施したところ、およそ 18 年で飲料水基準を満たすことが分かった（図-3）。

以上は、本研究における主要な部分であるが、これを実施する過程で、単孔式の多深度希釈試験と数値計算による分散長や透水係数といった水理パラメータの分布を求める方法、土壌に対する主要イオンの吸着特性に関するモデルについての検討も行った。また、データ整理の過程では、ステロール類を用いた地下水や河川水中における硝酸性窒素汚染の原因分離方法について取りまとめることができた。

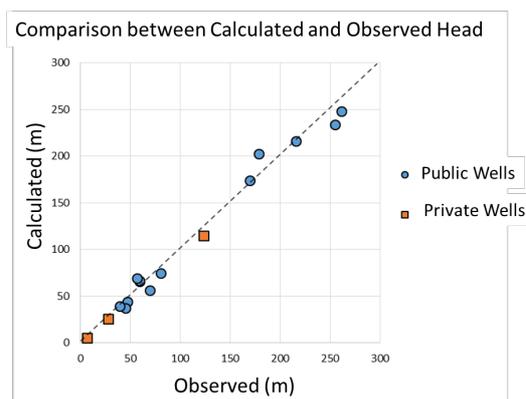
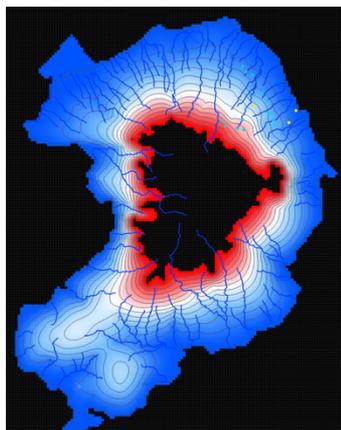


図-1 定常地下水位の分布(左)と実測値と計算値の比較(右)

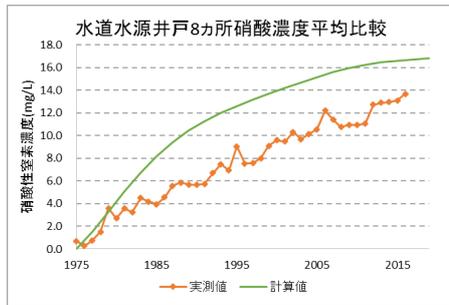


図-2 汚染過程のシミュレーション結果

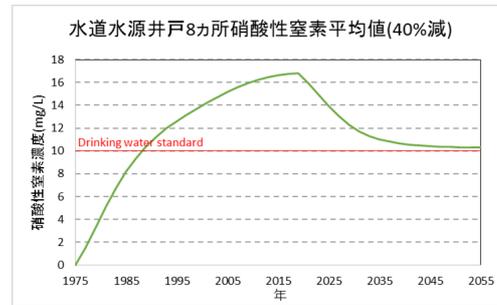


図-3 修復過程のシミュレーション結果

<引用文献>

- ① Nakagawa, K., H. Amano, H. Asakura and R. Berndtsson. Spatial trends of nitrate pollution and groundwater chemistry in Shimabara, Nagasaki, Japan, *Environmental Earth Sciences*, **75**:234, 2016.
- ② Nakagawa, K., H. Amano, A. Kawamura and R. Berndtsson. Classification of groundwater chemistry in Shimabara, using self -organizing maps, *Hydrology Research*, **48**(3), pp.840-850, 2017.
- ③ 中川 啓, 渡辺貴史, 天野弘基. 長崎県島原市を対象とした地下水に対する農業由来の窒素負荷ポテンシャルマップの妥当性について, *地下水学会誌*, **57**(4), pp.483-493, 2015.
- ④ 天野弘基, 中川 啓, 河村 明. 多変量解析による地下水水質の分類特性-島原市における事例-, *土木学会論文集 G(環境)*, **72**(5), pp.I_127-I_135, 2016.
- ⑤ Amano, H., Nakagawa, K. and Berndtsson, R. Groundwater geochemistry of a nitrate contaminated agricultural site, *Environmental Earth Sciences*, **75**:1145, 2016.
- ⑥ Sachse, S., Rink, K., He, W., Kolditz, O. *OpenGeoSys-Tutorial Computational Hydrology I: Groundwater Flow Modeling*, SPRINGER BRIEFS IN EARTH SYSTEM SCIENCES, Springer, 2015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kei Nakagawa, Hiroki Amano, Ronny Berndtsson, Yuji Takao, Takahiro Hosono	4. 巻 107
2. 論文標題 Use of sterols to monitor surface water quality change and nitrate pollution source	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Ecological Indicators	6. 最初と最後の頁 105534
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105534	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 中川 啓, 河村 明	4. 巻 114
2. 論文標題 自己組織化マップによる地下水水質の分類	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 水循環 貯留と浸透	6. 最初と最後の頁 25-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Amano H, Nakagawa K and Berndtsson R	4. 巻 77
2. 論文標題 Surface water chemistry and nitrate pollution in Shimabara, Nagasaki, Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Environmental Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 354
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s12665-018-7529-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 中川 啓, 天野弘基, 齋藤雅彦	4. 巻 74
2. 論文標題 単孔式の多深度希釈試験と数値計算による水理パラメータ分布の推定	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_19-I_24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakagawa Kei, Amano Hiroki, Takao Yuji, Hosono Takahiro, Berndtsson Ronny	4. 巻 550
2. 論文標題 On the use of coprostanol to identify source of nitrate pollution in groundwater	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 663 ~ 668
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.038	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakagawa, K., S.-I. Wada, R. Kitamura and R. Berndtsson	4. 巻 48
2. 論文標題 Modeling of salt sorption in volcanic ash soil	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Communications in Soil Science and Plant Analysis	6. 最初と最後の頁 2594-2600
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1416139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計23件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 竹盛匠吾, 中川 啓
2. 発表標題 硝酸性窒素による地下水汚染地域の土壌を用いたカラム実験
3. 学会等名 日本地下水学会春季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 倉本菜摘, 中川 啓
2. 発表標題 農用地近くの観測井戸における地下水位変動についての基礎的研究
3. 学会等名 日本地下水学会春季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kei Nakagawa, Zhi Qiang Yu, Hiroki Amano, Ronny Berndtsson
2. 発表標題 Spatial Characteristics of Groundwater Chemistry in Unzen, Nagasaki, Japan
3. 学会等名 16th Annual Meeting AOGS 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kei Nakagawa, Hiroki Amano, Magnus Persson, Ronny Berndtsson
2. 発表標題 Nitrate Concentration Characteristics in an Intensely Polluted Area in Japan
3. 学会等名 GQ 2019 (10th International Groundwater Quality Conference) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kei Nakagawa, Hiroki Amano, Ronny Berndtsson, Rudy Rossetto
2. 発表標題 Preliminary evaluation of nitrate groundwater pollution and remediation in Shimabara Peninsula, Nagasaki, Japan
3. 学会等名 46th IAH Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井村友美, 中川 啓
2. 発表標題 長崎県島原市内における土壌中の重金属濃度調査
3. 学会等名 日本地下水学会秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kei Nakagawa
2. 発表標題 Groundwater Nitrate Pollution of an Agricultural Area in Japan: a Case Study in Shimabara Peninsula
3. 学会等名 2019 4th Asia Conference on Environmental and Sustainable Development (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nakagawa K, Amano H and Berndtsson R
2. 発表標題 Surface Water Chemistry and Nitrate Pollution in Shimabara, Nagasaki, Japan
3. 学会等名 15th Annual Meeting AOGS (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nakagawa K, Amano H and Berndtsson R
2. 発表標題 Relationship Between Coprostanol and Nitrate Pollution in Surface Water
3. 学会等名 15th Annual Meeting AOGS (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 天野弘基, 中川 啓, 赤山紗也果, 久原瞳子, 孔 月波, 陳 立九, 濱崎宏則
2. 発表標題 長崎県島原市における窒素負荷指数による地下水汚染リスクの評価
3. 学会等名 第26回地球環境シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中川 啓
2. 発表標題 長崎大学環境科学部の取り組み-重点領域研究の紹介
3. 学会等名 第26回地球環境シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nakagawa K
2. 発表標題 Status of Nitrate Pollution and Groundwater Chemistry in Shimabara, Nagasaki, Japan
3. 学会等名 SMHI Seminar, SMHI (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nakagawa K
2. 発表標題 Determination of the sources of nitrate pollution -the use of coprostanol concentration
3. 学会等名 TVRL Seminar, Lund University
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nakagawa K, Amano H and Berndtsson R
2. 発表標題 Spatial and temporal distribution of nitrate concentration in groundwater and soils in an intensively polluted area
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nakagawa, K. and H. Amano
2. 発表標題 Nitrate pollution and surface water chemistry in Shimabara, Nagasaki Prefecture, Japan
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nakagawa, K. and H. Amano
2. 発表標題 Hydrogeochemical assessment of groundwater quality in Shimabara, Nagasaki, Japan
3. 学会等名 44th IAH Congress -Groundwater Heritage and Sustainability (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 天野弘基, 中川 啓
2. 発表標題 コプロスタノールによる河川水の硝酸性窒素汚染源の推定
3. 学会等名 水文・水資源学会 2017年度研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中川 啓, 天野弘基
2. 発表標題 島原市における河川水の水質特性について
3. 学会等名 水文・水資源学会 2017年度研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nakagawa, K., H. Amano, and R. Berndtsson
2. 発表標題 Status of Nitrate Pollution and Groundwater Chemistry in Shimabara, Nagasaki, Japan
3. 学会等名 14th Annual Meeting AOGS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中川 啓, 天野弘基
2. 発表標題 島原市内の河川水質および硝酸性窒素汚染の状況について
3. 学会等名 第18回地下環境水文学に関する研究集会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中川 啓, 天野弘基, 齋藤雅彦
2. 発表標題 ポイントダイリユーション法による透水係数と分散長の推定
3. 学会等名 日本地下水学会2017年春季講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中川 啓
2. 発表標題 島原市における地下水汚染の現状
3. 学会等名 第111回ジオラボ(地盤工学会九州支部長崎地盤研究会) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中川 啓, 天野弘基, 齋藤雅彦
2. 発表標題 単孔式の多深度希釈試験と数値計算による水理パラメータ分布の推定
3. 学会等名 第62回水工学講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ベンソン ロニー (Berndtsson Ronny)	ルンド大学・工学部・教授	