同じ流域内の2つのシラス台地における 地下水汚染機構についての数値計算

NUMERICAL STUDY ON GROUNDWATER POLLUTION MECHANISM IN THE TWO SHIRASU PLATEAUS IN THE SAME CATCHMENT AREA

中川 啓¹・齋藤雅彦²・舩井和朗³

Kei NAKAGAWA, Masahiko SAITO and Kazuro MOMII

¹正会員 博(工) 鹿児島大学准教授 農学部生物環境学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-24)

²正会員 博(工) 神戸大学助教 自然科学系先端融合研究環 重点研究部 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³正会員 農博 鹿児島大学教授 農学部生物環境学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-24)

Groundwater pollution by nitrate due to agricultural activities has become serious environmental issues in the two shirasu plateaus of Kasanohara and Kanoyabaru of Osumi peninsula, Kagoshima prefecture. We developed a groundwater recharge model and examined the water budget characteristics. Furthermore, two-dimensional numerical simulations were carried out to evaluate the effects of countermeasures for the contaminated source. The results of water balance analysis showed that runoff is 10-15%, groundwater recharge is 65%, and evapotranspiration is 20-25% of precipitation in the catchment area. The numerical results indicate that it takes 50 years for Kasanohara and 80 years for Kanoyabaru to display the effects of countermeasure of 80% reduction in concentration of the source zone. The long-term numerical simulation suggested that detailed recharge rate fluctuation rather than constant recharge rate should be applied.

Key Words : *nitrate pollution, numerical simulation, shirasu plateau, groundwater recharge model*

1. はじめに

鹿児島県大隅半島は、我が国有数の食糧生産基地であるが、化学肥料や家畜糞尿が原因と考えられる硝酸性窒素による地下水汚染が問題になっている。周辺住民は飲料水の大部分をこの地下水に頼っているので、健康を害する危険性が懸念されているし、このシラス台地からの地下水や湧水は肝属川を通して志布志湾へと注いでいるため、河川や海域での水質悪化も懸念される。よって現状での汚染物質の動態を数値シミュレーションにより明らかにし、適切な対処法を確立することが求められている。

このように地下水汚染や土壌汚染では、汚染源位置や汚染拡散範囲、汚染物質濃度などの情報を得ることが重要で、その結果が対策期間やコストに影響するので、数値計算によって限られた情報を用いて汚染の実態解明や対策効果の検討を行うことが求められる¹⁾。例えば、有機ヒ素化合物による地下水汚染現場へ3次元数値計算を適用し、汚染メカニズムの解明を行った事例がある^{1), 2)}。

その他、地下水汚染を解析するための数値計算モデルの開発など多数報告されている^{3), 4)}。

現場を対象として解析する場合、地表面からの涵養をどのように扱うかが結果に影響する場合がある。解析を簡便化するため、平均的な降雨量や蒸発散量を与えることも考えられるが、物質濃度の季節的な変動を調べる場合や現場の水収支を正確に把握したい場合には、地下水涵養モデルと地下水流動解析を組み合わせる方法がとられる⁵⁾。地下水涵養量の変動を考慮した汚染解析の事例は、著者の知る限りそう多くないようである。本研究では、研究対象とした鹿児島県大隅半島のシラス台地において、地下水涵養量を評価して、それを考慮して地下水の汚染メカニズムを検討した。

研究対象とした肝属川流域では、これまでの地下水や湧水の観測により、2つのシラス台地において硝酸性窒素汚染が明らかにされている⁶⁾。両者のシラス台地は、地表面における窒素負荷量が異なっており、また地形地質条件が異なっている。しかしいずれの観測地点においても硝酸性窒素濃度が基準値を超えている地点があるので、それぞれの汚染メカニズムを比較することは、今後、

図-1 研究対象地の概要

それぞれの台地で汚染対策を講じる上で重要と考えられる。これまでの施肥実態及び窒素収支調査により、2つのシラス台地のうち笠野原台地の窒素負荷量は、もう一つの鹿屋原台地に比べおよそ5倍多いことが推定されている。また流域内の観測地点における2004年からこれまでのモニタリング期間における期間平均硝酸性窒素濃度の観測地点平均値は、いずれの台地においても 7.5mg l^{-1} 程度と同程度であり、基準値超過地点が4地点づつあることが分かっている。なお、笠野原台地を対象とした水文地質特性の評価⁷⁾や水質タンクモデルを用いた解析⁸⁾が報告されており、長期的な水質変動傾向の再現はほぼ成功しているといえる。

図-2 地下水涵養モデル

本研究では、現状再現と汚染対策の効果を検討するための数値計算モデルの構築を試みた。まず、地表面からの涵養量を評価するためのモデル構築を行い、研究対象地における年間の水収支について調べた。そして2つのシラス台地における断面2次元の数値計算モデルを構築し、地下水涵養モデルにより評価された涵養量を用いて、汚染機構および汚染対策についてのシミュレーションを実施し、比較・検討した。

2. 研究対象地の概要

研究の対象とした肝属川流域における2つのシラス台地(図-1)は、鹿児島県大隅半島のほぼ中央部に位置し、笠野原台地は、肝属川と串良川に挟まれたテーブル状の孤立した高台であり、北から南へ緩やかに傾斜している(上端部で標高約170m、下端で20m程度)約6000ha(南北方向12km、東西方向9kmに広がる面積約59km²)のシラス台地である。また笠野原台地の南西部に位置する鹿屋原台地は、東西、南北ともに7~8 kmの広さを持ち、台地西部の標高60~70 mから東部の標高10 mまで西から

東に向かい緩やかに傾斜している。

これらのシラス台地は、表層は10m程度で、クロボクやアカホヤといった火山灰土に覆われ、その下部に15～80mのシラス層、その下に7m程度の大隅降下軽石層、垂水砂礫層が堆積しており、これら軽石・砂礫層がシラス台地上の主な帯水層として機能している。後のモデル化では、シラス層から表層まで、軽石層、砂礫層の3層（鹿屋原台地は砂礫層が無い）または4層（笠野原台地）として扱い、砂礫層下面の難透水層を不透水性境界とした。図中に、笠野原台地の観測地点KS5～7、KS9～13および鹿屋原台地の観測地点KN1～7を示す。また後の数値計算の際のモデル断面をそれぞれの台地上に点線で示した。

3. 地下水涵養モデル

(1) モデルの概要とモデルパラメータの決定方法

図-2に本研究で適用した地下水涵養モデルを示す^{5), 9)}。降雨 r は、蒸発散量 ET と表面流出成分 $F(r)r$ を除く、 $\{1-F(r)\}r-ET$ が地下浸透成分となり、タンク内へ貯留される。ここで $F(r)$ は、降雨 r の直接流出率である。タンク内の水位 h_w が初期損失高 R_0 を超えると、地下水への涵養が開始される。また流出係数 a を考慮した量が地下水涵養量 q_w となる。この涵養量 q_w は、地下水位の上昇に寄与する。以下に本モデルの基礎式を示す。なお蒸発散量の推定にはハモン式¹⁰⁾を用いた。まずタンク内の水位変化は次式で与えられる：

$$\frac{dh_w}{dt} = \{1 - F(r)\} \cdot r - q_w - ET \quad (1)$$

式(1)中の地下水涵養量は次式で与えられる：

$$q_w = a \cdot (h_w - R_0) \times Y(h_w - R_0) \quad (2)$$

ここで, $Y(h_w-R_0)$ は $h_w \geq R_0$ のとき 1, $h_w < R_0$ のとき 0 をとる

図-3 研究対象流域における年間水収支(2002～2005年の平均)

図-4 4年間(2002～2005年)の地下水涵養量

図-5 計算領域の概要 (左)笠野原台地, (右)鹿屋原台地

ステップ関数とする。また式(1)中の直接流出率は次式で与えられる：

$$F(r) = \frac{r}{r + r_{1/2}} \cdot F_{\infty} \quad (3)$$

ここで、 F_{∞} は $r=\infty$ に対応する $F(r)$ の極限值、 $r_{1/2}$ は、 $F(r)=F_{\infty}/2$ に対応する r の値を表すパラメータである。

未定のパラメータは初期損失高 R_0 、直接流出率に係わる係数 $r_{1/2}$ 、浸透係数 a の3つである。それぞれ、 R_0 は一雨の積算降雨量と土壤水分増加量の関係から土壤水分増加に寄与しない積算降雨量として決定し、 $r_{1/2}$ は流域末端の河川流量の増分と流出量の合計が一致するように求め、 a は、笠野原台地上の圃場における年間の水収支解析¹¹⁾を参考に、涵養量が降雨量の65%となるように決定した。この様な評価方法であると、水収支解析結果に大きな影響が出ることが懸念される。しかし別に行った検討によると、本モデルにより評価された日流出量は、一雨毎に評価されている流出率とも大きく相違せず、水収支の各構成成分について、ほぼ妥当な値が導かれていることを確認している。

(2) 研究対象地における水収支の検討

ここでは、地下水涵養モデルを用いて、流域内の水収支について以下のように検討した。計算は日雨量などにより日毎に行った。図-3に、月あたりの降雨量とモデルにより評価された涵養量、流出量、蒸発散量を、2002～2005年の平均値で示す。降雨量と涵養量は6月と9月に2つのピークを持つ分布となった。流出量もほぼそれらと

同様であったが、9月のピークの方が大きかった。蒸発散量に関しては6月にピークを持つ分布を示した。年あたりで流域全体の水収支を見てみると、9月以外の月あたりの評価と同様に、降雨量の65%程度が地下水涵養量であり、20～25%が蒸発散量、10～15%が流出量と評価された。鹿児島県のシラス台地の水文調査から降雨に対する直接流出率を10%以下と評価した事例¹²⁾があることから、ほぼ妥当な評価がなされたと考えられる。図-4に、後の数値計算で用いる2002～2005年の涵養モデルで評価された地下水涵養量を示す。2002年と2003年は6月にピークを持つ分布であったが、2004年は5、8、10月にほぼ同程度の最大値を持つような分布を示した。2005年は9月に大きなピークを持つ分布となった。

4. 地下水汚染機構と対策効果の検討

(1) HYDRUS2D/3Dによる数値計算の概要

本研究では、米国農務省塩類研究所において開発された土中水分・溶質移動予測汎用プログラムであるHYDRUS2D/3D¹³⁾を用いて数値計算を実施した。本汎用プログラムは、欧米を中心に農学分野、特に土壌物理分野で精力的に用いられており、様々な現象への適用事例も多く広く用いられている。HYDRUS2D/3Dは、水の流れはRichards式、溶質移動は移流分散方程式に基づき、それぞれガラーキン有限要素法によって計算される。

(2) 計算条件および計算に用いた諸条件

図-1に示したそれぞれのシラス台地におけるモデル断面における計算領域を、図-5に示す。笠野原台地をKSモデル、鹿屋原台地をKNモデルとする。図-1中の観測井戸を断面上に投影し、計算結果の観測点とし図-5に示した。KSモデルでは、KS7をobs8、KS6をobs7、KS9をobs6、KS5をobs5、KS11をobs4、KS10をobs3、KS13をobs2、KS12をobs1とした。またKNモデルでは、KN5をobn5、KN4をobn4、KN2、3をobn1、KN1、7をobn3、KN6をobn2とした。KSモデルでは、砂礫層、軽石層、シラス層、表層(クロボク)の4層とし、KNモデルでは、軽石層、シ

表-1 数値計算に用いた諸定数

		KSモデル					KNモデル				
		θ_r	θ_s	α	n	k_s	θ_r	θ_s	α	n	k_s
				(1/m)		(m/day)			(1/m)		(m/day)
VGモデル パラメータ	表層	0.33	0.6	2.41	1.713	25.92	0.33	0.6	3.07	1.871	8.64
	シラス層	0.126	0.6	1.67	3.116	0.864	0.126	0.6	1.67	3.116	0.864
	軽石層	0.000365	0.365	5.74	1.629	345.6	0.000365	0.365	5.74	1.629	345.6
	砂礫層	0.065	0.41	7.5	1.89	1.061	-	-	-	-	-
輸送パラメータ		縦方向分散長				横方向分散長	縦方向分散長				横方向分散長
		5m				0.5m	5m				0.5m
吸着パラメータ (Freundlich型)		K_d				β	K_d				β
		0.845				0.68	4.79				0.55

ラス層、表層（アカホヤ）の3層とした。表層の地質は、幾つかの火山灰土が重なった多層構造であるが、笠野原では、主なものがクロボクで、鹿屋原では、主なものがアカホヤであると仮定し、それぞれのパラメータを用いている。

表-1に数値計算に用いたパラメータを示す。軽石層とシラス層については共通の値を用いた。これらの値については、文献¹⁴⁾や過去の実測値⁷⁾に基づいて決定した。なお、表層の火山灰土における硝酸性窒素の吸着については、バッチ試験により評価された結果に基づき、Freundlich型吸着等温式のパラメータ¹⁵⁾を与えた。また不飽和浸透特性の計算は、van Genuchtenモデル（VGモデル）¹⁶⁾による。分散長については、有限要素メッシュ生成の際のターゲットセルの大きさをKSモデルで5 m、KNモデルで7 mとしたので、ここでは両モデル全層共通で、縦方向分散長を5 mとし、横方向はその1/10とした。

境界条件は、両モデルとも両サイドを平均地下水位に基づく静水圧分布、下部は不透水条件、上部の地表面には、3章で評価された4年間の月ベースの地下水涵養量を繰り返し用いた。また比較のため、平均涵養量を用いた計算も実施した。物質輸送の境界条件は、現場で評価された負荷量分布を参考にして、地表面で最も負荷強度の高い部分にのみ、 $C/C_0=1.0$ として与えた。他は濃度勾配無しとした。また、任意の圧力水頭値を領域全体に与え、平均涵養量と両サイドの境界条件による計算を実施し、ほぼ定常状態になったものを圧力水頭の初期条件として与えた。濃度の初期条件は、定常濃度分布を求める計算においては、表層の汚染源部分以外は全て $C/C_0=0.0$ とした。本研究で検討しているようなことと同様の計算を行うために、窒素の形態変化や土地利用サブモデルなどを導入し、より詳細なモデル化をしている事例も報告されている¹⁷⁾が、ここでは地表面に直接与えられる負荷が観測点ではどの程度現れてくるのかといった点に着目して検討を行っている。

(3) 汚染機構のシミュレーション

数値計算は、まず平均涵養量を与える場合（KS-constおよびKN-constとする）と図-4に基づく変動涵養量を与える場合（KS-transおよびKN-transとする）の比較を行った。図-6にそれぞれのモデルにおける結果を示す。

笠野原台地に関しては、涵養量変動の影響を受けやすい観測点の細かい変動を除けば、ほぼ同様の結果が得られた。観測点における定常濃度もほぼ同じで、obs2における定常値は、汚染源濃度の70%に達した。一方、鹿屋原台地の場合には、濃度上昇傾向や定常値に到達する時間は同じであるが、涵養量変動する場合は濃度が高くなった。この理由を調べるため、KNモデルにおいて表層の不飽和及び吸着パラメータをKSモデルと同じクロボクとした場合もシミュレーションを行った（KNIIモデルとする）。その結果、KNIIモデルでは、濃度が定常値に到達する時間は、KNモデルよりも短くなり、KSモデルと同程度のおよそ50年となったが、定涵養量条件と変動涵養量条件の結果の相違傾向は同じであった（図-6）。つまり表層の透水性や吸着による遅延が影響しているわけではない。KSモデルでの結果を詳細に見てみると、変動涵養量条件の方が、定常到達の時の濃度は高くなっており、平均的な強度よりも、不連続でも大きい強度の涵養量によって表層からの物質輸送がより促進されることが原因であると考えられる。またKNモデルは、シラス層がKSモデルのおよそ半分と薄く、表層から観測点までの距離が近いこと、涵養量条件の変化の影響が出やすかったと考えられる。このように計算が長期に渡る場合、平均化された涵養量を一定で与えると安全側に評価してしまう恐れがあるので、できるだけ現実に沿った条件で計算が行われることが望ましいと言える。変動涵養量の場合のobs2における定常値は、汚染源濃度の45%に達した。

図-7には、KS-transとKN-transの定常濃度分布を示す。濃度急変部において若干のアンダーシュートおよびオーバーシュートが発生しているため、比濃度に負の部分と1.0を越えている部分が生じているが、いずれのモデルにおいても、主要な帯水層である軽石層まで、表層の汚染源からほぼ鉛直に移動し、軽石層の地下水流れによって下流側へ運ばれる様子が示された。この軽石層は透水係数が大きく、流速が大きいこと、希釈がすすんでいること、濃度の高い部分は汚染源直下のシラス層中位くらいに留まっていることが分かる。

(4) 汚染対策のシミュレーション

続いて汚染源対策の数値計算を行った。実際の汚染源

図-6 平均涵養量モデルと変動涵養量モデルの結果 (a)KS-const, (b)KS-trans, (c)KN-const, (d)KN-trans, (e)KNII-const, (f)KNII-trans

図-7 定常濃度分布 (a) KS-model, (c) KN-model

対策は、家畜糞尿の処理を十分実施することや、緩効性の化学肥料を用いることなどであるが、ここではそれらの対策によって、汚染源が100%, 80%, 50%削減できた場合の効果を数値計算によって評価した。図-8にそれらの結果を示す。笠野原台地の場合、100%削減の場合は、50年でほぼ完全に濃度がゼロに近づく。80%削減の場合でも30年後にはかなり低減し、地表面濃度の10%まで低下するが、50%削減の場合は、obs2では36%までにしか低下しない。一方、鹿屋原台地の場合、80年後には、80%削減の対策により14%以下には低下するが、50%の対策では26%以下までにしか低下せず、十分とは言えない。いずれのシラス台地においても地表面負荷量が80%削減に近づく程度の対策が行われれば、浄化が進むと考えられる。また笠野原台地は50年程度で効果が出てくるが、鹿屋原台地では表層をアカホヤとした場合、効果を見いだすのに80年程度はかかることが予想される。

5. おわりに

本研究では、硝酸性窒素による地下水汚染が問題となっている2つのシラス台地を対象として、水収支について検討を加え、さらに断面2次元の数値計算により定常濃度分布に達するまでの計算と、汚染対策効果について検討した。その結果、流域全体における流出量は、降雨量の10～15%、地下水涵養量は65%程度、蒸発散量が20～25%であった。また数値計算によれば、一定の涵養量を与える場合と変動する涵養量を与える場合とでは、結果が異なる場合があるので、できるだけ現実に即した涵養量を与えることが望ましいと考えられる。今回の計算結果のみに基づくと、いずれの台地においても汚染源を現状の80%程度削減できるような対策がとられると浄化が進むが、表層をクロボクとした場合の笠野原で50年程度、表層をアカホヤとした場合の鹿屋原で80年程度経

図-8 汚染対策シミュレーションの結果 (a) KS-100%, (b) KS-80%, (c) KS-50%, (d) KN-100%, (e) KN-80%, (f) KN-50%

過しないと大きな効果は現れてこないと考えられる。

謝 辞：八千代エンジニアリング(株)の高橋 努氏と金子のぞみ氏には、データの提供及び助言をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 江種伸之：第6章 汚染の挙動解析法，はじめて学ぶ土壌・地下水汚染，地盤工学会，pp.121-160, 2010.
- Watanabe, S., Egusa, N., Jiang, X., Hirata, T., Yokoyama, N., Yamamoto, Y. and Morita, M.: Numerical Estimation on Diffusion Mechanism of Groundwater Contamination by Organic Compounds in Kamisu City, Japan., *Proceedings of the 7th International Conference on Calibration and Reliability in Groundwater Modeling, ModelCARE2009*, pp.413-416, 2009.
- 黒羽陽子，古市 徹：微生物反応を考慮した地下水汚染数値解析-構造モデルの開発-，日本地下水学会誌，Vol.28, No.3, pp.89-102, 1986.
- 登坂博行，伊藤一誠，蛭原雅之，稲葉 薫，伊藤 章，小島圭二：多成分多相型移流拡散モデルによる包括的な地下水汚染解析，日本地下水学会誌，Vol.38, No.3, pp.167-180, 1996.
- Tsutsumi, A., Jinno, K. and Berndtsson, R.: Surface and subsurface water balance estimation by the groundwater recharge model and a 3-D two-phase flow model, *Hydrological Sciences Journal*, Vol.49, No.2, pp.205-226, 2004.
- 鹿児島県農業開発総合センター大隅支場環境研究室：平成18年度春夏作試験成績書（土壌肥料），pp.1-11, 2007.
- 久保田富次郎，増本隆夫，松田 周，古江広治：水質環境と水循環からみた笠野原地帯の水文地質特性，農業工学研究所技報，Vol.203, pp.81-100, 2005.
- 久保田富次郎，増本隆夫，松田 周，森田重則，古江広治，松元 順：笠野原大地における水文観測とモデル解析-流域

レベルの水・物質循環の解明に向けて-，応用水文，Vol.15, pp.21-27, 2002.

- 9) 神野健二，茹 瑛，中川 啓，細川士佐男，田尻 要，西山浩司：塩水侵入阻止型地下ダムによる水資源開発可能量の評価について，水工学論文集，Vol.40, pp.51-56, 1996.
- 10) 登坂博行：地圏水循環の数理-流域水環境の解析法，東京大学出版会，p.35, 2006.
- 11) 田中正一，古江広治，脇門英美：南九州シラス台地上の多腐植質厚層黒ボク土畑における年間浸透水量，九州沖縄農業研究成果情報，Vol.23, pp.325-326, 2008.
- 12) 塚田公彦：日本の水収支，市川正巳，榎根 勇編，日本の水収支，古今書院，pp.88-103, 1978.
- 13) Simunek, J., van Genuchten, Th. and Sejna, M.: *The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media Technical Manual Version 1.0*, 2006.
- 14) 日本地下水学会地下水流動解析基礎理論のとりまとめに関する研究グループ編：地下水シミュレーション-これだけは知っておきたい基礎理論，技報堂出版，pp.82-86, 2010.
- 15) 田中正一，古江広治，前田守弘：鹿児島県の主な畑土壌における硝酸態窒素の吸着特性，九州沖縄農業研究成果情報，Vol.23, pp.327-328, 2008.
- 16) van Genuchten, M.Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, No.5, pp.892-898, 1980.
- 17) 久保田富治郎，松森堅治，吉永育生，加藤英孝，板橋 直，吉永秀一郎，坪山良夫，加藤正樹，森 康二，多田和広：流域管理を目的とした農業環境対策シミュレーターの開発-三次元水・物質モデルの恋瀬川流域への適用-，農林水産省農林水産技術会議事務局「自然共生」プロ研究推進事務局編，「農」における自然との共生III，pp.23-42, 2007.

(2010. 9. 30受付)