水田周辺地下水中の硝酸塩濃度—変動機構の解明—

川 島 博 之* 津 村 昭 人* 木 方 展 治**
山 崎 慎 一* 藤 井 國 博*

Mechanism of Nitrate Concentration Change in the Ground Water under the Paddy Field

Hiroyuki KAWASHIMA*, Akito TSUMURA*, Nobuharu KIHON**
Shinichi YAMASAKI* and Kunihiro FUJII*

* Institute of Agro-Environmental Sciences, 3-1-1, Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan

** Agriculture Research Center, 6644, Yokoichi-cho, Miyakomojo, Miyazaki 855 Japan

Abstract

Nitrate concentration in the ground water under the paddy field has a seasonal change and relatively high concentration was observed in the summer. There is a weak relationship between water level of the ground water and nitrate concentration. The concentration of dissolved oxygen in the ground water is nearly $0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ in summer but about $10 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ in winter. This means that denitrification is easier in summer. The change of denitrification rate could not explain why relatively high concentration of nitrate observed in summer.

A numerical model is presented. The model incorporates nitrification of fertilizer in the paddy field, penetration of nitrate into the soil and change of ground water quantity. The model is useful to interpret the mechanism of seasonal nitrate concentration change in the ground water under the paddy field.

Key word: ground water, paddy field, nitrate, seasonal change, numerical model

1. 緒 言

前報¹⁾において茨城県筑波郡谷和原村における水田周辺の地下水中の硝酸塩濃度について報告したが、硝酸塩が比較的高濃度で観測される井戸においては、その濃度に顕著な季節変動が認められた。本報は、特に顕著な変動が観測される井戸について、その変動要因を考察したものである。

2. 硝酸塩濃度季節変動

水田周辺の $\text{NO}_3\text{-N}$ が観測される井戸においては、その濃度は毎年夏期に高く、冬期に低下する傾向が認

められた。前報 St. 1 (Fig. 1 参照、この井戸は周囲をほぼ水田に囲まれた農家敷地内に存在する。)における観測期間中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の変動を Fig. 2 に示すが、1986, 1988年における夏期のピーク時では $10 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ を上回る濃度が観測されている。1987, 1989年においては $10 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ は上回らないものの、夏から秋にかけて高い濃度が観測されている。このような変動はなぜ生じるのであろうか。

まず水位との関連を考察した。Fig. 3a)には地下水位の変動を示す。ここで地下水位は地表より水面までの距離として示している。浅層井戸の場合水位の変動は雨量との関連が考えられる。Fig. 4 は茨城県水戸市

* 農業環境技術研究所 〒305 茨城県つくば市観音台3-1-1

** 九州農業試験場 〒855 都城市横市町6644

Fig. 2 Seasonal change of nitrate concentration in the well near the paddy field

Fig. 1 Map of the study area

における月別降雨量²⁾とその月の水位との関係を示したものである。弱い相関は伺われるが、良い相関は見られない。降雨が地下水位に影響するには時間を要すると思われることから、一月前の降水量と水位との関係も見したが、これは Fig. 4 に示す相関よりも悪いものであった。周辺住民によれば、この地域の地下水位は小貝川の水位と関係があるとのことであったが、本研究においては、そこまで明らかにすることはできなかった。

Fig. 3b)には水温の変動を示すが、これには比較的大きな季節変動があった。水温が季節変化に伴い比較的大きく変動していることは、この地域の浅層地下水が表層水の影響を強く受けていることを示唆するものとも考えられよう。Fig. 3b)、Fig. 4 に示される結果

は、複雑な要因が支配しているとはいえ、この地域の浅層地下水は降雨の影響を強く受けていることを示していよう。

次に水位と NO₃-N 濃度の相関を見た。結果を Fig. 5 に示すが、相関はあまり良くない。しかし、水位が上昇した際に NO₃-N の濃度が上昇する傾向が見て取れる。これは水位が上昇した際に、地表近くに存在する NO₃-N が雨水と共に浸透し、地下水脈と混入するためと説明されているが、Fig. 5 の相関を見るかぎり、この現象のみですべてを定量的に説明することは困難に思われた。

次に脱窒速度との関係について若干の考察を試みた。Fig. 6a), b)には井水の酸化還元状態を示す指標として、ORP と DO 濃度の変化を示す。これより、本井戸においては ORP, DO 濃度ともに季節変動が見られ、特に DO 濃度の変動には著しいものが在った。DO 濃度は NO₃-N 濃度とは逆に、夏期にほぼ 0 mg · l⁻¹ となり、冬期に 10 mg · l⁻¹ 前後となる傾向が見られた。DO 濃度は冬期においても急に 0 mg · l⁻¹ となることがあったが、これについては原因が解からなかった。

ORP は DO 濃度に比べれば変動が少なく、冬期に上昇する傾向が見られたものの、ほぼ 300 mV 前後で推移していた。

3. 数理モデル

地下水汚染の問題では、数限られた井戸を利用しその汚染を観測せざるを得ないため全体像の把握が極めて困難であり、また、前節で見たように個別の要因との関係においても十分な結論を見ることが難しい。このため、ここでは数理モデルを用い観測結果を統一的に解釈することを試みた。

一般に地下水質のモデルでは、水の流れなど実測が困難な要因が多く、大胆な仮定が必要となる。しかし、変動要因をモデル化することにより、多くの要因間との関係を定量的に考察することが可能になり、問題点を明確化の上では有益であろう。

Fig. 3a, b) Seasonal change of a) the water level and b) temperature in the well

Fig. 4 Relationship between rainfall of this area and the water level in the well

水田周辺に存在する浅層地下水中の硝酸濃度は、水田への施肥量、灌漑水により水田地帯に運ばれる窒素量、作物への吸収量、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の土壌への吸着量、表層水の地下浸透速度、土壌中での脱窒量、地下水量の変動などによって決定されよう。変動機構の概念図をFig. 7に示す。本モデルでは、水質変動機構モデル化の端緒として、図中点線で囲った脱窒速度などに関する部分のモデル化は今後に譲り、地中浸透のみを扱うこととした。 $\text{NO}_3\text{-N}$ の地下浸透を次のようにモデル化した。

硝酸態窒素を含む田面水の地下浸透については、垂直方向の移動のみを考え、含水率を一定とし重力浸透（推進力として吸引圧を考えず、重力のみを考える）にて移動すると仮定した。ボックスモデルを用い物質収支を考えると、地表より i 番目カラムの時刻 $j+1$ に

Fig. 5 Relationship between the water level and nitrate concentration in the well

おける濃度は次式³⁾により記述できる。

$$C(i, j+1) = C(i, j) + fw \, dt (C(i-1, j) - C(i, j)) / (\rho w \, dz) \quad (1)$$

ここで、 $C(i, j)$ は i カラムの時刻 j における $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度、 fw は浸透水量 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]、 dt は時間刻 [s]、 ρ は土乾燥密度 [$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]、 w は含水率 [-]、 dz は刻み長さ [m] を示し、本モデルでは 0.1m とした。

近年、わが国における水田への施肥は、田植直前に直径数 mm のペレット状の肥料を鋤き込む方法による場合が多い。観測を行った井戸周辺地域の水田への施肥もこれに該当する。この場合肥料は土壌上層約 10cm 程度に存在し、灌水後徐々に溶解すると考えられる。本モデルでは数値モデル中第一層に窒素肥料が投入されるとしている。

浸透した硝酸態窒素は、ある深さに達した場合地下水脈と混合すると仮定した。ここで最も問題となるのは、地下水脈の水量である。この量は容易に推定できない。このため、本モデルでは地下 2m の所に、ある

Fig. 6a), b) Seasonal change of a) oxidation reduction potential and b) dissolved oxygen concentration in the well

Fig. 7 Schematic illustration of the numerical model

水量を蓄えるタンクが存在すると考えた。このタンクは、周辺地域より $\text{NO}_3\text{-N}$ を含まない水がタンクに流入した場合に水位が上昇し、タンクより $\text{NO}_3\text{-N}$ を含んだ水が周辺地域に流出した場合には、水位が低下する考えた。

4. 数理モデルによる変動機構の解析結果

毎年この地域においては4月25日頃に田面水を張り、8月5日頃に田面水を落とす。本モデルにおいて

は田面水を張っている間、飽和浸透による田面水の地下浸透が生じると仮定した。ここで、地下浸透はこの付近の水田減水深より $20\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ と定めた。これ以外の期間については降雨量の1/3が地中に浸透するとした。降水量は月間降雨量の値²⁾を利用し、フーリエ級数により近似してモデルに入力した。

本モデルにおいては、連続的な現象を離散化することにより、あたかも拡散が生じたかのような結果が計算される。この計算上の拡散係数の値は刻みの幅、流速、時間刻みにより次式³⁾のように推定される。

$$Ez = u(dz - u \, dt)/2 \quad (2)$$

ここで $Ez [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$ は見かけの拡散係数、 $dz [\text{m}]$ 、 $dt [\text{s}]$ は離散化に際して用いた深さ方向の刻みと時間刻み、 $u [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ は次式で与えられる水の間隙内流速である。

$$u = fw/(\rho w) \quad (3)$$

本計算において、見かけの拡散係数は $\text{NO}_3\text{-N}$ の水溶液中での拡散速度⁴⁾ とほぼ同程度であり、ほぼ現実を反映していると言えよう。

水田への窒素施肥量は $10\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 程度⁵⁾ と推定される。施肥中稲に吸収されず地下浸透する割合についてはライシメーターを用いた物質収支実験⁶⁾ より、通常施肥量の内およそ10～20%程度が浸透すると考えられる。本検討では灌漑水による窒素の持込み、脱窒の影響は無視している。

ここで問題となるのは溶脱の時期である。現在、わが国においては肥料は、そのほとんどはペレット状にて散布しているが、これは徐々に溶解する遅効性を狙ったものである。窒素は $\text{NH}_4\text{-N}$ として溶解する。

田面水が存在する期間は、水田土壌はごく表層においても還元的な状態にあり、容易に硝化は進まないと考えられる。このことは Fig. 6b) に示す地下水中の DO の挙動よりも推定できる。肥料が $\text{NH}_4\text{-N}$ である限りは土壌に吸着され易く、容易に地下浸透しない。

しかし 8 月初旬に田面水を落とした時点よりは、水田土壌の表層付近において酸化的雰囲気となる部分が増え、作物に吸収されず残留した $\text{NH}_4\text{-N}$ の硝化が促進されると考えられる。 $\text{NO}_3\text{-N}$ は土壌に吸着され難く、浸透水と共に溶脱する。本計算では 9 月 1 日に最上層のカラムに $\text{NO}_3\text{-N}$ が供給されると仮定した。

以上の仮定を用い計算した、土壌中を拡散しながら浸透する $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度分布を Fig. 8a), b), c) に示す。Fig. 8a) は翌年の 2 月 16 日における分布である。冬期においては比較的雨量が少ないこともあり、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は翌年までは、比較的土壌上層に留まる。Fig. 8b) は翌年における湛水の直後の 5 月 5 日の様子を示す。湛水に伴い $\text{NO}_3\text{-N}$ は急速に浸透する。減水深を $20\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ とした場合、降雨による浸透は年平均 $1\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 程度であるから、降雨による浸透より約 20 倍大きい。

一定深さに達した部分は地下水脈（地下タンク）と混合すると考えた。浅層地下水位は Fig. 3a) に示されるように、絶えず変動している。本計算では水位変動は、上昇する場合には $\text{NO}_3\text{-N}$ を全く含まない水が地下タンクに流入し、水位が低下する場合には $\text{NO}_3\text{-N}$ を含んだ水がタンクより流出すると仮定した。

浸透した $\text{NO}_3\text{-N}$ が地下水脈と混入する深さは厳密には、水位の変動により変化すると思われるが、ここでは計算を容易にするために地下 2 m に達した時に、一律に地下水脈に混入するとした。また、地下水脈の厚さは井戸底と地下水位との差に等しいと仮定し、地下水脈内は完全混合層であると仮定した。

地表よりの窒素の溶脱量を $1\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$ とした場合の計算結果を Fig. 9 中に示す。図中の数字は地下水脈

の空隙率を示す。通常土壌中の空隙率は 0.5 程度である。本モデルにより夏期における $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の上昇を説明することはできるが、地下水脈の空隙率 0.5 とした場合には、濃度上昇幅までは一致しなかった。Fig. 9 では、空隙率を 0.1~0.2 とした場合に、実測値との比較的良好一致を見ている。本モデルでは、水脈厚さは井戸水深と同様と仮定したが、実際には地下水脈の厚さは井戸水深より薄い可能性があることを、この計算結果は示唆しているとも考えられる。

地下水層内の構造と地下水位の変動機構について未知の部分が多いため、大胆な仮説を用いたモデルを使用せざるを得なかった。しかし、肥料の溶脱と浸透を本モデルのように考えれば、水田地帯における NO_3

Fig. 8a), b), c) Vertical distributions of the nitrate concentration in the soil under the paddy field. The distributions were calculated by the numerical model. a), b), c) mean the distribution on Feb. 16, May 5, and May 27 respectively

Fig. 9 Comparison with calculated nitrate concentration in the well and observed one. The volume of the under ground water was changed for the parameter sensitivity analysis. Nitrate flux from the paddy field is assumed to be $1.0\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$. The numbers in figure mean void fraction in the soil

-N 濃度の変動をある程度理解できると思われる。

5. 結 言

水田周辺の地下水においては、夏期に地下水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が上昇する傾向がある。この傾向を数理モデルを用いて定量的に検討したが、これは、1) 前年に施肥された窒素肥料の一部が $\text{NH}_4\text{-N}$ として土壌表層に残留する。2) 田面水が落とされた後に硝化され、冬期の雨量が少ないこともあり、翌年の田植えの時期まで上層の土壌中に残留する。3) これが田面水を張ることに伴い地下浸透し、地下水脈に混入する。以上のような機構を想定することにより解釈可能と思われた。

ここで用いた考え方は、他の水田地帯においても、窒素溶脱量と地下水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の変動との関係

を検討する上では有用であろう。

(原稿受付 1992年5月8日)

(原稿受理 1992年9月17日)

引 用 文 献

- 1) 川島博之, 津村昭人, 木方展治, 山崎慎一, 藤井國博(1992) 水田周辺地下水中硝酸濃度, 水環境学会誌, 15, 924-927.
- 2) 気象庁, 気象月報 (1986-1989).
- 3) ゲイロン S. キャンベル著 中野政誌・東山勇監訳 (1987) パソコンで学ぶ土の物理学, 鹿島出版会.
- 4) 化学工学協会編 (1978) 化学工学便覧改定第四版, 丸善.
- 5) 農林水産省農蚕園芸局肥料機械課監修(1991), ポケット肥料要覧1991, 農林統計協会.
- 6) 小川吉雄, 石川実, 吉原貢, 石川昌男 (1979) 畑地からの窒素流出に関する研究, 茨城県農試特別研報, No. 4, 1-70.