

*山本博 (畜産草地研)・徳永英二 (中央大)・吉川省子 (近畿中国四国農研)

・吉田正則 (近畿中国四国農研)・石原暁 (元香川環境保健センター)

1. はじめに

農業用水は湧水や河川水を取水し水田・畑地に灌漑利用する水であり、地表面から浸透した水の一部は地下水となって再び下流の湧泉で湧出するか、また、河川へ浸出して再び湧水・河川水となって循環利用されている。湧水や河川水の水質はそうした繰り返しの間に汚濁負荷を受けることが推定される。

農業用水中の硝酸態窒素濃度について、このような地表水から地下水の間で用水が繰り返し利用されることを考慮した水質予測に関する検討は、今までのところ、なされていないようである。そこで、農業用水が反復利用されている場合の汚濁濃度の下流方向への変化を説明するためのモデルを考案し、モデルの実際の水質汚濁データへの適合性を検討する。

2. 基本的考え方

1) 浸透と湧出：湧水や河川水の水質を、土壌中を通過して汚濁負荷を受ける水の動きと関連づけるために、浸透水に着目する。灌漑のなされた水田から浸透する水 F は、湧泉や河川から供給された水で浸透水となるものの量 R とそれ以外の水とからなるとする (図 1)。後者で浸透する水となるものの量を Q とする。ここで水収支を扱う収支区域が、上下流に連なり、各収支域は域内の水流の平均的流動方向の直線距離で表された等間隔の区域長 l をもつとする。これらの区域に上流から番号 A を $0, 1, 2, 3, \dots, n$ とつけて、これらの添字を上記の量にも適用する。

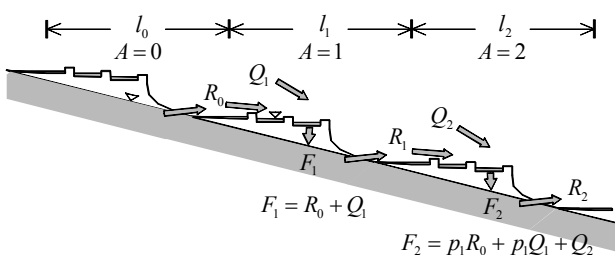


図 1 浸透と湧出の模式図

これらの区域では土地条件、および土地利用が同じ状態で、水収支項に時間変化がない定常的な状態を仮定する。水質汚濁は、区域 1 より下流で灌漑水が農地を浸透する毎に硝化による硝酸態窒素が一様に負荷され、脱窒などによる窒素の形態変化は生じないと仮定する。このような場合について各収支区域を移動する水と負荷の動きを順に検討する。

区域 1 の浸透水量 F_1 は、その上流側区域 0 からの R_0 と Q_1 の和からなるので

$$F_1 = R_0 + Q_1 \quad (1)$$

となる。区域 2 の浸透水量は、同じように R_1 と Q_2 の和からなる。このとき区域 1 からの R_1 が浸透水として再び利用されるから反復利用率 p_1 は、 $p_1 = R_1 / F_1$ である。そこで浸透水量 F_2 は反復利用率 p_1 をもちいて $F_2 = R_1 + Q_2 = p_1 F_1 + Q_2$ となる。さらに(1)を代入し

$$F_2 = p_1 R_0 + p_1 Q_1 + Q_2 \quad (2)$$

区域 3、区域 4 の浸透水量を順に求めていくと、下流の区域 n での浸透水量は

$$F_n = p_1 p_2 p_3 \cdots p_{n-1} R_0 + p_1 p_2 p_3 \cdots p_{n-1} Q_1 + p_2 p_3 \cdots p_{n-1} Q_2 + \cdots + p_{n-2} p_{n-1} Q_{n-2} + p_{n-1} Q_{n-1} + Q_n \quad (3)$$

となる。ここで、右辺の Q_n 以外の項の和は定義により湧出水項 R_{n-1} であるから

$$R_{n-1} = p_1 p_2 p_3 \cdots p_{n-1} R_0 + p_1 p_2 p_3 \cdots p_{n-1} Q_1 + p_2 p_3 \cdots p_{n-1} Q_2 + \cdots + p_{n-2} p_{n-1} Q_{n-2} + p_{n-1} Q_{n-1} \quad (4)$$

となる。これは、湧出水の水にはそれまでの上流の区域の水を一定の割合で含むことを示している。

また、仮定から区域ごとの水収支項はすべて等しから、各区域の湧出水量も

$$R_0 = R_1 = R_2 = \cdots = R_n \quad (5)$$

で等しい。

2) 汚濁負荷：灌漑水が土壌中を浸透したとき浸透水中に溶出する負荷量を L とし、この量に上流からの排出負荷をあわせた負荷総量を N とする。区域 1 からの負荷総量 N_1 は、仮定からこの区域からの負荷量 L_1 のみからなるので、

$$N_1 = L_1 \quad (6)$$

となる。区域 2 の負荷総量 N_2 は、区域 1 からの反復利用にともなう負荷量とその区域からの負荷量 L_2 の和からなる。このとき区域 1 からの負荷量は反復利用率 p_1 と負荷総量 N_1 の積で表せるので、区域 2 からの負荷総量は、(6)を用いて

$$N_2 = p_1 N_1 + L_2 = p_1 L_1 + L_2$$

となる。区域 3、区域 4 の負荷総量を順に求めていくと、下流の区域 n での負荷総量は

$$N_n = p_1 p_2 p_3 \cdots p_{n-1} L_1 + p_2 p_3 \cdots p_{n-1} L_2 + \cdots + p_{n-2} p_{n-1} L_{n-2} + p_{n-1} L_{n-1} + L_n \quad .$$

仮定より、区域ごとの土地条件に差異がなく、また地域の水利利用や施肥管理が均一であることから、区域ごとの灌漑水の反復利用割合と灌漑による負荷量は等しいので、反復利用率は $p_1 = p_2 = \dots = p_n$ で、かつ負荷量は $L_1 = L_2 = \dots = L_n$ である。したがって、それぞれを p 、 L とおくと $N_n = (1 + p + p^2 + \dots + p^{n-1})L$ となり、() 内は等比数列の和になるから負荷総量は、

$$N_n = ((1 - p^n) / (1 - p))L \quad (7)$$

3) 負荷濃度：湧出水の汚濁負荷濃度は湧出水量に対する負荷総量であるから、各区域について

$$C_1 = N_1 / R_1, C_2 = N_2 / R_2, \dots, C_n = N_n / R_n \quad (8)$$

となる。ここで区域ごとの湧出水量は(5)でみたように等しいから、 R で表すこととする。従って、区域内での湧出水量、反復利用率、および負荷量が等しい場合には区域 n の負荷濃度は(7)を用いて

$$C_n = N_n / R = ((1 - p^n) / (1 - p))(L / R) \quad (9)$$

で表される。この L / R は各区域で発生する負荷濃度であるので単位濃度 U とおくと、これは上流から負荷流入のない区域1の負荷濃度 C_1 に等しいから、

$$C_n = ((1 - p^n) / (1 - p))(U) = ((1 - p^n) / (1 - p))(C_1) \quad (10)$$

この式から、土地条件および管理条件の等質な灌漑区域では、下流の区域 n における負荷濃度 C_n が収支区域長 l 、単位濃度 U または区域1の負荷濃度 C_1 、および反復利用率 p を用いて推定される。

(10)について、対象区域の数を無限大とした極限、すなわち、 $n \rightarrow \infty$ の場合の負荷濃度 C_n を検討する。反復利用率 p の大きさにより2つのタイプに分けると、 $0 < p < 1$ では、(10)の分子は1になるので、一定値に収束する。 $1 < p$ では、(10)の分子は $n \rightarrow \infty$ で無限大に増加して、 $C_n \rightarrow \infty$ に発散する。

(10)では、 C_n が U と p にともなって変動することを示すが、ここでは U を 1 mg L^{-1} 、また l を 1000 m とした場合の負荷濃度 C_n の下流方向への変化を、 p を0から2まで0.25ずつ変化させて図2に示す。

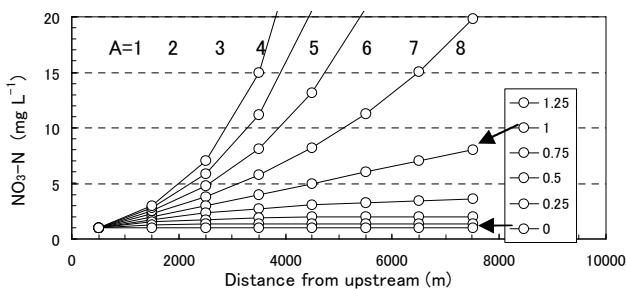


図2 上流からの距離に伴う硝酸態窒素濃度予測値の分布。(設定条件は本文参照)

負荷濃度は、 $p = 0.25, 0.5, 0.75$ の場合では区域2~8の距離までに $n \rightarrow \infty$ 時の負荷濃度 C_∞ (U のそれぞれ1.33, 2, 4倍)の90%に達する。一方、 $1 < p$ では、負荷濃度は下流方向に増加し続ける。

3. 結果および考察

丸亀平野に分布する湧泉の水質測定値に対して、上記、予測モデルの適用を試みる。湧泉の分布域には、地表下1m以内の浅い位置に砂礫層が存在し、その透水係数は、 $5.3 \times 10^{-5} \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ で透水性が大きい。この地域では水田湛水による窒素の浄化は少なく、施肥窒素の多くは溶脱されることが推定されている(吉川ら2008)。

用水や湧水の水量が安定し降雨の少ない夏季における硝酸態窒素濃度の測定値と予測値とを、図3に示す。予測値は区域1での反復利用率 p と負荷濃度 C_1 を用いて計算し、横軸に扇頂からの距離をとった。 $p = 0.54$ の場合では、測定値は下流方向へ大きな増加を示さない。予測値は区域2から3にかけて増加率が低下し、区域4までの測定値とほぼ合う。

$p = 0.96$ の場合では、測定値はかなり大きくばらつきながら、全体として下流方向に増加する傾向が認められる。 $p \approx 1$ であるので、区域6までの範囲では予測値は距離にともなって直線的に増加しており、測定値分布のほぼ中央に分布する。従って、予測値は測定値がばらつく中で、測定値の平均と概略で一致する。

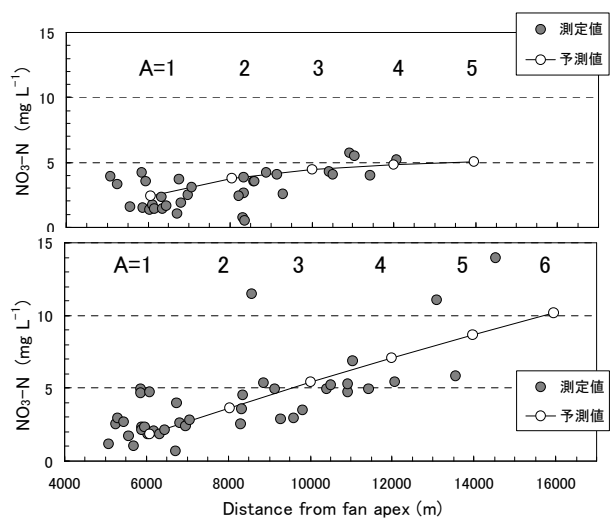


図3 硝酸態窒素濃度の測定値と予測値の分布。

上:1994年9月湧水, $l = 1975 \text{ m}$, $p = 0.54$, $C_1 = 2.44 \text{ mg L}^{-1}$, $C_\infty = 5.30 \text{ mg L}^{-1}$. 下:1995年8月湧水, $l = 1975 \text{ m}$, $p = 0.96$, $C_1 = 1.88 \text{ mg L}^{-1}$, $C_\infty = 46.91 \text{ mg L}^{-1}$.

文献:吉川省子・山本博・吉田正則・石原暁(2008) 日土肥誌, 79, 461-471.