

水田における有機質汚濁水の浄化機能(1)

誌名	千葉県農業試験場研究報告 = Bulletin of the Chiba-Ken Agricultural Experiment Station
ISSN	05776880
著者	白鳥, 孝治 松丸, 恒夫 森川, 昌記
巻/号	19号
掲載ページ	p. 101-107
発行年月	1978年3月

水田における有機質汚濁水の浄化機能

第1報 水田に流入した汚濁水の濃度変化を示す計算式

白鳥 孝治・松丸 恒夫・森川 昌記

I 緒 言

水田を対象とした有機質汚濁水の試験研究は、これまで米の生産に対する汚濁水の害作用を中心として行なわれてきた。これを環境保全の立場からみるならば、従来の研究方向とは別に、水質の変化を中心をおき、広い水環境の中の水質に関して水田の果たす役割を明らかにしようとする研究分野が期待される。

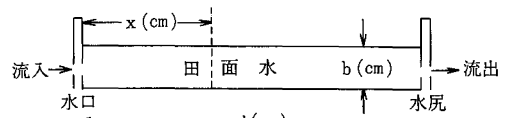
この研究方向は、有機質汚濁水に対して水田が浄化の方向に作用するか、汚濁の方向に作用するかを明らかにすることによって、自然環境の中で農業の長期的安定維持をはかるために、農業の内部に対して自からを戒めるとともに、農業の外部に対して環境保全的な農業の存在意義を主張する基礎となるものと考えられる。さらにこの種の研究方向は、農業生産の立場からみても、汚濁水田地帯における地理的、年次的な汚濁程度の変化に関する規則性を解明することによって、その地域における水稲の栽培技術的な改善にも寄与するものと考えられる。

本報では、このような研究方向の第1報として、主として水田に流入した有機質汚濁水が、田面でその濃度を変化させる過程について一つのモデルを提出し、これから得られた計算式が実際の水田内で成立するかどうかを検討しようとしたものである。

本報の一部は、日本住宅公団、日本下水道協会が、「下水処理水の稲作に及ぼす影響調査」として実施したものであり、研究の推進にあたり、東京農業大学、石丸園雄教授に、終始、適切にご指導をいただいた。ここに明記して、関係各位に心から感謝する次第である。

II 水田内における汚濁物質濃度変化の計算

水田に流入した有機質汚濁水は、水口から水尻まで流れる間に、溶解性の有機物は河川の自浄作用²⁾と類似の作用機能をもって分解し、浮遊物質はストークスの法則に従って沈降すると仮定し、別に田面水の流速を算出すれば田面水の汚濁物質濃度の変化は計算できる。



第1図 田面水の流れの模式図

1. 田面水の流速

田面水は第1図のような田面を流れ、次の条件をそなえていると仮定する。

①田面水の流れは定常状態であり、乱流はない。

②水深は常に一定に保たれる。すなわち、水田に流入する水量は、水尻から流出する水量と、水田内で、蒸散、作物による吸収、地下浸透などとして消費される水量の和に釣合って、たえず補給される。ただし、雨のような水口から流入する水以外の水はないものとする。

③圃場は均一である。

以上のように仮定すると、圃場内のある地点における田面水の流量は、その地点から水尻までの消耗水量と、水尻からの流出水量の和であるから、流速は次式で表わされる。

$$\frac{dx}{dt} = \frac{a(l-x) + D}{b}$$

ただし、

x : 水口から圃場内のある地点までの距離(cm)

l : 水口から水尻までの距離(圃場の長さ)(cm)

a : 水田内の面積当消費水量(減水深)($\text{cm}^3/\text{min}\cdot\text{cm}^2$)

b : 水深(cm)

D : 水尻からの流出水量(cm^3/min)

t : 水が水口から x 地点に到達するまでの時間(min)とする。

上式を積分すると、

$$\ln \frac{al + D}{a(l-x) + D} = \frac{a}{b} t$$

ここで $\frac{D}{al} = \alpha, \frac{x}{l} = X$ とおき、

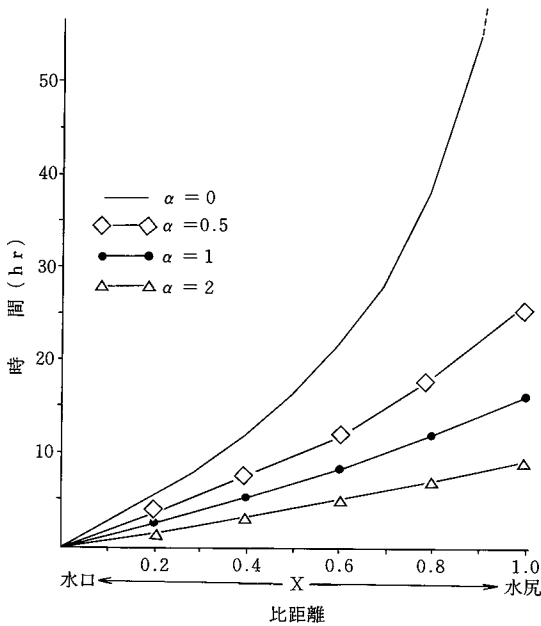
これらを、それぞれ流出率、比距離と呼ぶことにすれば、次式が得られる。

$$-\ln\left(1 - \frac{X}{1+\alpha}\right) = \frac{a}{b}t \dots\dots\dots(1)$$

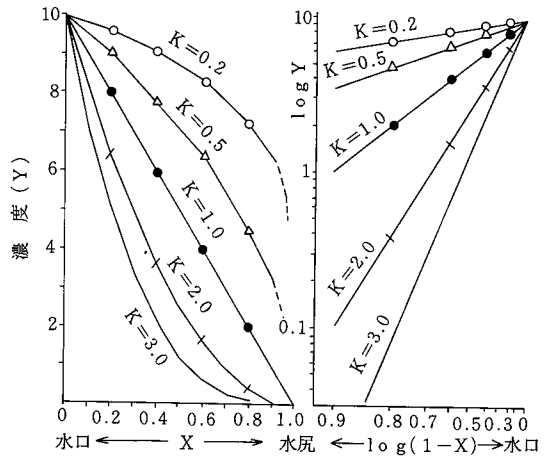
すなわち、水田の条件として、水深、減水深、流出率が定まれば、流入水が水田内のある地点に到達するに要する時間は求められる。

一例として、減水深5cm/日、水深5cm、長さ10の圃場について(1)式を作図すると、第2図のとおりであり、水口から遠くなるにしたがって、流速は次第に遅くなり、無流出型 ($\alpha=0$) のときの流入水は無限大時間を要して水尻に到達する。また、流出率 α が1以上のときは、田面水はほぼ一定の流速で圃場内を流れると考えてさしつかえない。

2. 溶解性汚濁物質の濃度変化



第2図 田面水の流れに要する時間〔計算式(1)〕
注) 条件: a = 5 cm/日, b = 5 cm, l = 10



第3図 水田内における汚濁物質濃度変化
〔計算式(4)〕

注 条件: $\alpha = 0$, 初濃度=10

次に、田面水中の溶解性汚濁物質が減少する化学反応は、一次反応であると仮定すれば、汚濁物質の減少速度はそのときの濃度に比例する²⁾ので、次式が得られる。

$$\frac{dy}{dt} = k(C - y)$$

ただし、y は消耗した汚濁物質濃度、C は汚濁物質初濃度、k は比例定数を示す。これを積分すると

$$\ln \frac{C}{C-y} = kt \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $k \cdot \log e$ は自浄係数²⁾と呼ばれている。

(1), (2)式を組合せて時間 t を消去し、x 地点における汚濁物質濃度 (C-y) を Y とおくと、

$$\log \frac{Y}{C} = \frac{bk}{a} \log \left(1 - \frac{X}{1+\alpha}\right) \dots\dots\dots(3)$$

$\alpha=0$ のときは、

$$\log Y = \frac{bk}{a} \log (1 - X) + \log C \dots\dots\dots(4)$$

(4)式から、圃場内の汚濁物質濃度 Y とその位置(1-X)とは対数で直線関係にあることがわかる。この性質を利用すれば、この計算式が実際の水田で成立するかどうかを判定することができる。

(4)式を用いて水田内の汚濁物質濃度変化を計算して図示すると、第3図のとおりである。同図からわかるように、田面の自浄作用が強いとき (k が大きいとき) は、水口附近で汚濁物質濃度は急激に低下し、逆に弱いときは水尻附近で急激に低下する。まな、水尻から水が流出

するときは、圃場内における汚濁水の浄化機能は低下する。

3. 浮遊物質の沈殿

浮遊物質の沈降速度はストークスの法則¹⁾に従って、田面水の水深bを沈降するのに時間tを要するとすれば、

$$\frac{b}{t} = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2(d-d_1)g}{\eta} \dots\dots\dots(5)$$

ここで、rは浮遊物質の粒径(cm)、dは同比重、d₁は水の比重、gは重力の加速度(cm/sec²)、ηは水の粘性係数である。

(5)式と(1)式を組合せて、時間tを消去すれば、

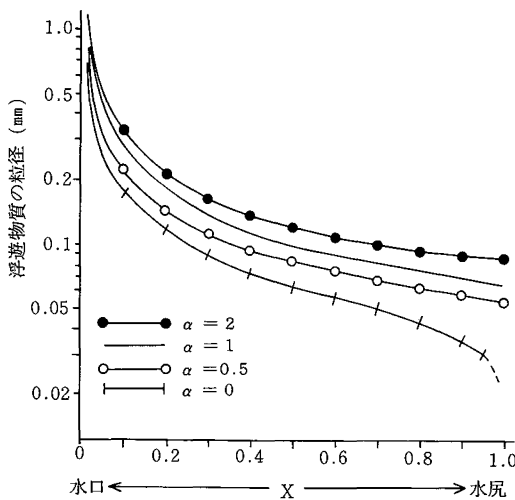
$$-\log\left(1 - \frac{X}{1+\alpha}\right) = \frac{0.434 \times 9}{2} \cdot \frac{a\eta}{r^2(d-d_1)g} \dots\dots\dots(6)$$

都市下水から生じる活性汚泥の比重の近似値³⁾として、1.005を与え、水温を25℃とすれば、(6)式は次のように書きかえられる。

$$-r^2 \log\left(1 - \frac{X}{1+\alpha}\right) = 2.58 \times 10^{-6} a \dots\dots\dots(7)$$

ただし、aの単位はcm/日とする。

(7)式を図示すると、第4図のとおりであり、粒径の大きな浮遊物質はほとんど水口附近に沈殿する。また、活性汚泥の粒径は0.2mm以上のものが約95%をしめとされているので、無流出型(α=0)のときは圃場の長さの約1割を流れる間に、浮遊物質の大部分は沈殿するものと考えられる。ただし、微生物作用などによって、



第4図 水田内における浮遊物質の沈殿
〔計算式(7)〕

注 条件：温度25℃、減水深5cm/日

田面を流れる途中で浮遊物質が生長する場合はこの限りではない。

4. 土壌に残留する汚濁物質量

土壌にとり込まれる汚濁物質量(汚濁負荷量)は、田面水中の汚濁物質が減少した量に等しく、浮遊物質は水溶性汚濁物質に対して無視し得る量であると仮定する。すなわち、ある地点における土壌の汚濁負荷量Pは、田面水の汚濁濃度勾配と田面水流量の積に相当すると仮定する。

すなわち、

$$P = -\frac{dY}{dx} \cdot [a(l-x) + D] t \dots\dots\dots(8)$$

また、(3)式をxで微分すれば、

$$\frac{dY}{dx} = \frac{-bkY}{a[l(1+\alpha) - x]}$$

これを(8)式に代入すれば、

$$P = bktY \dots\dots\dots(9)$$

すなわち、土壌の汚濁負荷量は、その地点の田面水汚濁濃度に比例する。

III 圃場における有機質汚濁水の濃度変化

上述の計算式が実際にあてはまるかどうかを確かめるために、現地の水田に有機質汚濁水を直接送水して、田面水の汚濁濃度変化を実測した。

1 実験方法

1辺の長さ48m、面積10aの水田に活性汚泥法による住宅排水処理場の処理水を送水した。この水田は5月11日に水稻ツキモチを植えつけ、かんがい水として同処理水だけを使用し、無施肥条件で水稻栽培を行なっている。供試水田の土壌型はグライ土壤壊土型である。田面水汚濁濃度の測定実験は次の2回実施した。両実験とも、実験期間中の降雨はなかった。

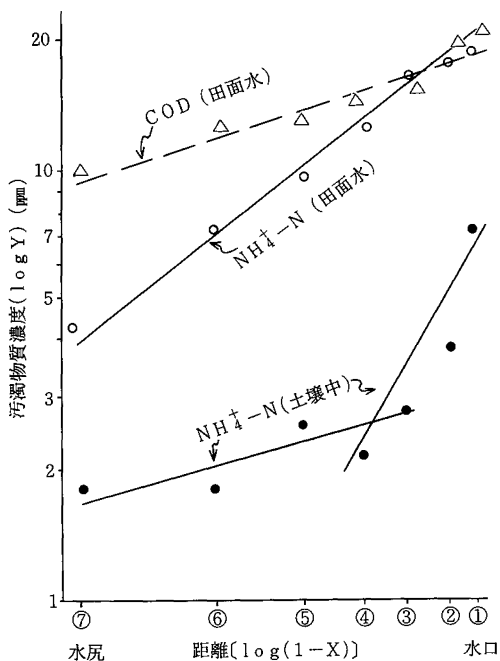
第1回の実験は1975年5月26日に開始し、田面水のほとんどない状態の圃場に処理水を送水して水深3.2cmとし、そのまま処理水の送水を中止して、5月29日に水口からの距離を異にする8ヶ所から田面水を採水して、アンモニア態窒素、CODを常法によって測定した。なお、採水は3連制で行なった。

第2回の実験は同年7月7日に開始し、常に田面の水深を2~3cmに調節しながら処理水の送水を継続し、7月11日に前記同様の方法で田面水を採水して、アンモニア態窒素、CODを測定した。また、送水量の実測値から圃場の減水深を算出した。

また、この実験の終了直後に採水地点の表面土壌を採

第1表 田面水、表面土壌の汚濁物質濃度

地 点 NO.		1	2	3	4	5	6	7	8	処 理 水
水口からの距離(m)		2	6.5	12.0	17.5	23.0	30.0	37.0	44.0	
田 面 水	第1回 NH ₄ ⁺ -N(ppm)	8.8	9.2	7.1	6.4	5.6	5.0	4.2	4.6	25.5
	実 験 COD(ppm)	25.6	23.3	20.2	19.2	18.7	17.6	18.9	19.2	18.2
	第2回 NH ₄ ⁺ -N(ppm)	19.2	18.4	15.9	12.3	9.4	7.1	4.1	3.9	
	実 験 COD(ppm)	19.4	18.4	14.0	13.6	13.6	12.4	10.5	11.9	
表面土壌中NH ₄ ⁺ -N (mg/100g 乾土)		7.2	4.0	2.8	2.1	2.6	2.2	1.8	1.9	



第5図 水口、水尻間距離と汚濁物質濃度との関係 (第2回実験)
注) ○内番号は採取地点番号を示す。

この実験では田面水は静止しているため、水口、水尻とも、ほぼ近似の時間だけ滞留している。このために、田面水中アンモニア態窒素は、一様に浄化作用を受けたものと思われる。また、田面水のCODは処理水中濃度より高いところがあり、とくに水口付近でこの傾向が強い。この理由は不明であるが、後に述べるように、土壌からの溶出、あるいは藻菌類の増殖などによって、田面水は、ある種の還元性物質の供給を受けることが予想される。

第2回実験の結果をみると、田面水のアンモニア態窒素濃度は、水口から水尻に向かって大きく濃度勾配をもって減少し、CODも類似の傾向を示している。この実験条件は、処理水をたえず補給し、田面水の流れる状態においてある。このために、水口から遠ざかるにしたがって、田面水の圃場内滞留時間は長くなり、田面水は、それだけ浄化作用を強く受けているものと考えられる。

次に汚濁物質の土壌残留の一例として、土壌中アンモニア態窒素を測定した結果は第1表に示すとおりである。これを見るとわかるように、土壌中アンモニア態窒素含量は水口から水尻に向かって減少し、その減少する程度は田面水よりさらに強いものとみられる。

IV 考 察

前述の水田における汚濁物質濃度変化の計算に設定した田面水の状態は、水深を一定に保つように、たえずかんがい水の補給される状態にあり、第2回実験の条件はほぼこれを満足している。この実験では流出率αは零であるので、計算が正しければ、水口、水尻間の汚濁物質濃度変化は(4)式によって示されよう。このことを確かめるために、田面水の汚濁物質濃度Y、水田内位置(1-X)両対数の直線関係について検討したところ、第5図に示すように、ほぼ満足する結果が得られた。ただし、水尻に接近した⑧地点はこの直線から大きく離れていた。水

取し、土壌中アンモニア態窒素を塩化カリウム浸出法によって測定した。

2. 実験結果

水田の水口、水尻間における田面水のアンモニア態窒素、COD濃度変化は第1表に示すとおりである。

第1回実験の結果をみると、田面水のアンモニア態窒素は送水した処理水中濃度よりかなり低下しているけれども、水口から水尻に至るまでの濃度勾配は小さかった。

第2表 水田内の汚濁物質濃度と水口からの距離の
回帰直線式 (第2回実験)

	A	B	r	n
田面水NH ₄ ⁺ -N	1.11	1.32	0.997	7
田面水 COD	0.388	1.25	0.913	7
土壌中NH ₄ ⁺ -N	0.726	0.646	0.778	7

回帰直線式 $\log Y = A \log(1-X) + B$
注 上記直線式は(4)式と対応する。

尻の田面水は、理論的には水口から無限大時間を要して到達するけれども、実際には水尻に到達した水が乱流となって滞留する可能性が大きい。このために水尻附近の汚濁物質濃度は計算式(4)と一致しないものと考えられる。

水尻附近の⑧地点を除いて、第2回実験における田面水の汚濁物質濃度Yと位置(1-X)の対数について、回帰直線を計算し、その信頼度を検討したところ、第2表のように、両者はほとんど直線関係にあった。したがって、田面水のアンモニア態窒素、CODは(4)式に従って浄化され、その浄化機構の背景には計算式に導入した仮定が、ほぼ許容されるものと考えられる。

第2表における田面水の汚濁物質-距離回帰直線の勾配Aは計算式(4)の $b \cdot k/a$ に相当するから、a、bの実測値2.8cm/日、2cmを代入して、自浄係数($k \cdot \log e$)を計算することができる。これを(2)式に代入すれば田面水として1日経過したときの汚濁物質残存率(Y_0/C)が計算できる。これらを計算すると、第3表の値が得られる。すなわち、水田に流入した有機質汚濁水はかなり速やかに浄化され、1日経過すると、アンモニア態窒素は約1/2に、CODは約1/3に減少する。このことから、水田のもつ水質浄化機能は大きく、水田は水質浄化の場として環境保全に役立つ可能性があると考えられる。ただし、第1回実験における田面水のCODは、流入水より大きく低下していないので、COD浄化に関する結論は保留したい。また、本実験条件は水稻栽培に支障をきたすほどの高濃度汚濁状態である。農業の立場からみるならば、正常な水稻栽培を行ないうる程度の汚濁状態で再度実験を行ない、農業と水質浄化が両立しうるかどうかを充分検討する必要がある。

水田におけるアンモニア態窒素、CODの浄化速度は、前述のように前者の方が速い。活性汚泥法などの生物的下水処理施設は、逆に窒素の除去効率が低いと言われていたので、この性質は水田の浄化機能の特性として興味深いものがある。多分、アンモニア態窒素は田面で酸化消失するばかりでなく、土壌、植物によって吸収除去さ

第3表 水田の有機汚濁物質浄化機能
(第2回実験)

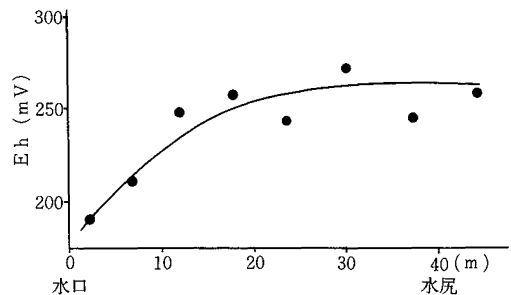
	NH ₄ ⁺ -N	COD
白浄係数($k \cdot \log e$)	0.675	0.236
1日後の残存率(%)	21	58

れるのに対して、田面水CODは有機汚濁物質の分解消失する一方で、藻類、菌類など光合成を営む生物の繁殖、土壌からの還元物質の供給などによって、CODとして測定される還元性物質が負荷されるためではなかろうか。

第1回、第2回の実験の、田面水濃度測定結果を比較すると、前者は水口から水尻までの汚濁濃度勾配が小さいのに対して、後者は大きい。この理由は前述のように、位置による汚濁水の滞留時間の相異として説明できる。この現象を農業技術としてみるならば、水田内における汚濁程度のバラツキは前者の方が小さいので、水稻の生育を均一に管理しやすいのに対して、後者はこれが困難である。したがって、汚濁水をかんがい水として使用するときは、前者のような間断かんがい方式をとるべきと考える。

次に土壌の汚濁負荷について、水口、水尻間の傾向をみると第5図のとおりである。すなわち、土壌汚濁物質の一種と考えられる土壌中アンモニア態窒素は、水口付近でとくに高濃度に存在し、同濃度と水口からの位置の対数とは、水口から2~3割の位置で折れた二つの直線関係を示している。この傾向は前述の田面水中アンモニア態窒素の傾向と異なる。したがって、土壌の汚濁負荷量として示した(9)式は実際には成立しない。

この理由はなお不明であるが、次の二つのことが考えられる。第一に、さきに述べた計算式(9)の論拠は水溶性有機物に由来する土壌の汚濁負荷のみを考えているが、



第6図 水口、水尻間の土壌Eh

実際には浮遊物質に由来する負荷が加算されることによる誤差と考えられる。土壌中アンモニアの著しく蓄積する位置は第4図に示した浮遊物質の沈殿する位置と符合する。第二に、この圃場は汚濁水をかんがいしてから2年目にあたるので、今回の測定値はこの期間における汚濁負荷総量と土壌中で分解または消耗する量(浄化総量)との差と考えられる。(9)式の誤差は浄化総量を加味しないことによると考えられる。土壌 Eh の圃場内分布は、第6図のように水口付近で著しく低いので、有機物分解過程、硝酸化成能などは、水口からの距離によって大幅に異なることが予想される。以上の2点は計算式に組みにくいのが、近似値として表わし、(9)式を修正することが必要と考えられる。

以上のように、水田に流入した有機質汚濁水の濃度変化は、およそ(3)式に従うことが確認されたが、現実の圃場における現象を説明するには、なお若干の修正を要することが推定された。また、(3)式は圃場を水口から水尻に至る線として考えて流速を計算しているが、実際の水の流れは面としての広がりをもっている。沈殿、藻菌類の繁殖などに由来する誤差修正と同時に、田面水の流速の修正を加えれば、圃場における現象を、さらに適確に表現した計算式が得られると考えられる。

V 摘 要

水田に流入した水溶性有機汚濁物質は、一次反応によって分解し、浮遊物質はストークスの法則に従って沈降すると仮定して、田面水の汚濁物質濃度の変化を計算し、(3)式および(6)式を得た。また、土壌の汚濁負荷量は田面

水の汚濁浄化量に等しいと考えて、水田土壌の汚濁程度を示す計算式として(9)式を得た。

実際に下水処理水を水田に送水して、圃場内におけるアンモニア態窒素、CODの濃度変化を測定したところ、水が常時送水されている状態では、田面水中濃度の実測値は計算式とよく一致した。ここに得られた実験式から水田内における自浄作用の強さを計算したところ、1日にアンモニア態窒素が約 $\frac{1}{6}$ 、CODが約 $\frac{1}{2}$ に減少する程度であり、水田の自浄作用の強いことを知った。

土壌汚濁負荷の一例として、土壌中アンモニア態窒素の圃場内濃度分布を測定して、計算式にあてはめたとこ、両者は性格を異にしていた。多分、沈殿物による汚濁負荷、土壌中の汚濁物質分解能などによる修正が必要であろう。

以上のように、水田に流入した有機質汚濁水の濃度変化を表わす計算式は、およそ(3)式に従うと思われるが、有機質汚濁水田の実態を表わすには、さらに数種の修正項を加えることが必要であると推察された。

なお、水田内の汚濁濃度分布から考えて、有機質汚濁水をかんがいはすときは、間断かんがいが有利であることを知った。

引用文献

1. 土壌物理性測定法委員会：土壌物理性測定法。初版、66、養賢堂、東京(1972)。
2. 半谷高久・安部喜也：水質汚濁研究法。初版3刷、46-48、丸善、東京(1972)。
3. 高橋俊三・加藤三千夫・才木孝：活性汚泥の生物学 (1) 水処理技術 10(1)、5-12(1969)。

Faculty of Paddy Fields to Clean the Organic Pollutant Irrigation Water

I. Equations indicating the change of the pollutant concentration in the irrigation water flowed into paddy fields

Koji SHIRATORI, Tsuneo MATSUMARU and Masaki MORIKAWA

Summary

The equations were derived to estimate the rates of the decomposition and vanishment of the soluble organic pollutants in the irrigation water flowed into paddy fields. The equations were derived from the assumption that "the pollutants are decomposed due to the first-order reaction and the suspended solids precipitate by following the Stokes' laws." The equations derived are as follows:

$$\log \frac{Y}{C} = \frac{bk_1}{a} \log \left(1 - \frac{X}{1+\alpha} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$-r^2 \log \left(1 - \frac{X}{1+\alpha} \right) = 2.58 \times 10^{-6} a \dots\dots\dots (2)$$

$$P = bk_2 t Y \dots\dots\dots (3)$$

where:

C= initial pollutant concentration (ppm)

Y= pollutant concentration of the surface water in certain spots in paddy field (ppm)

X= ratio between the distance from the irrigation water inlet and the length of paddy field

a= percolation loss of paddy fields (cm/min)

b= depth of water in paddy field (cm)

k_1, k_2 = proportional constant

α = ratio of outflowed water volume to consumption water volume in paddy field

r= diameter of the suspended solid (cm)

P= pollutant load capacity in the soil

t= flowing time (min)

Then it was discussed whether the above mentioned equations were realized or not when the pollutant water was flowed into the paddy fields.

In the results, the values calculated from the equation (1) were in approximate agreement with the values obtained from the field experiment. But the values calculated from the equation (3) were not agreement with them.

According to the results of the field experiment, it was found that if the pollutant water stayed in paddy fields for one day, the concentration of ammonium nitrogen and COD value in the irrigation water decreased by about 1/5 and 1/2, respectively.