国頭マージ地帯における懸濁態窒素の形態と沈殿池での除去率

仲村渠将¹・吉永安俊²・酒井一人²・島袋理央³

Form of Particulate Nitrogen in a Kunigami Maaji Soil Area and its Trap Efficiency in an Ideal Tank

Tamotsu Nakandakari¹, Anshun Yoshinaga², Kazuhito Sakai², and Rio Shimabukuro³

Abstract: Deposition in a sedimentation tank may become important resource because it contains soil and nutrients. The purpose of this study was to examine the form characteristics of particulate nitrogen as related to its settling and particulate nitrogen trap efficiency in an ideal settling tank. For the purpose of this study, observing suspended soil particles with a digital microscope, measuring particulate nitrogen concentrations classified by the suspended soil particle size, and calculating trap efficiency based on the clarification theory of an ideal settling basin were conducted. As a result, it was found that the particulate nitrogen concentration of the suspended soil classified as fine sand was higher than that of silt and clay. It was also found that particulate nitrogen was nitrogen as a constituent of the organic matter in a micro aggregate, so that it was relatively easy to settle. The results show that particulate nitrogen is removed easier than suspended soil, so that its trap efficiency in sedimentation tanks is higher than that of suspended soil.

Keywords: Red soil runoff; Particulate nitrogen; Micro aggregate; Soil organic matter; Settling velocity distribution

1 はじめに

沖縄地方では、降雨時の畑地の土壌侵食に起因した水環境の汚濁を防ぐため沈砂池などの赤土等流出防止対策が実施されている(沖縄県農林水産部, 2005)。畑地周辺の水環境への赤土流出を防止することが赤土等流出防止対策の本来の目的である。しかしながら、たとえば仲村渠ら(2009)による沈砂池における懸濁態栄養成分の貯留を考慮すると、今後、沈砂池の貯留物は重要な資源になりうる。懸濁態栄養成分のような貯留資源の利用を考える場合、沈砂池の貯留機能は沈砂池の多面的機能として新たに評価される。そのためには沈砂池の貯留効果を把握することが重要になる。

懸濁態栄養成分としては懸濁態窒素と懸濁態リンが重要であるといえる。懸濁態リンの場合、土粒子に固定された形態、アルミニウムや鉄との化合物である難溶性沈殿物としての形態が主であると考えられ、沈砂池における懸濁態リンの貯留は浮遊土の動態に大きく依存すると思われることから、沈砂池での貯留に関する動態をある程度把握しやすい。一方、懸濁態窒素の形態は懸濁態リンほど明らかではない。おそらく有機物としての形態が主であると思われるが、水の密度より大きくないと沈砂池の貯水で沈降しないことから、有機物のみから形成された形態だけでは沈砂池における懸濁態窒素の貯留を説明しにくい。そのため、とくに懸濁態窒素の貯留を検討するためには、沈降しうるような形態的特徴を把握することが重要になる。

沈砂池の設計には理想沈殿池の理論(Camp, 1946)が用いられている(沖縄県農林水産部, 1995)。浮遊土の除去率の計算はその設計理論に従っている。設計業務が簡素になるように考慮すれば、理想沈殿池の理論を用いて懸濁態窒素の除去率を計算するほうがよい。懸濁態窒素の除去率は理想沈殿池の理論を用いて計算することができるが、これまでにそのような事例は報告されていない。これは懸濁態窒素の形態があまり明らかではないことに加えて、除去率の計算に必要な懸濁態窒素の粒径分布あるいは沈降速度分布が把握されていないためであると考えられる。

そこで本研究では、懸濁態窒素に対する沈砂池の貯留効果を把握するため、沈砂池に流入する浮遊土を顕微鏡で観察し、また懸濁態窒素濃度を粒径別に測定することによって懸濁態窒素の形態を調べた。また、懸濁態窒素の沈降速度分布を実験的に把握し、理想沈殿池の理論を用いて沈砂池の懸濁態窒素の除去率を調べた。さらに、懸濁態窒素の除去率と浮遊土の除去率を比較して、懸濁態窒素の形態がその除去率に与える影響を検討した。なお、沖縄地方の国頭マージ地帯を対象地域とした。

2 方法

2.1 懸濁態窒素の形態的特徴の把握方法

2.1.1 デジタルマイクロスコープによる浮遊土の形態観察
沈砂池の流入口で採水した懸濁試料水をスライドグラスに滴下し、デシケータ内で静かに乾燥させる。スライドグラス表面に乾固した浮遊土をデジタルマイクロスコープ(KEYENCE 製, VHX-1000)で観察する。別に、過酸化水素水を加えて加熱して有機物を分解させた懸濁試料水についても同様に観察する。

¹琉球大学農学部助教, Assistant Professor, Faculty of Agriculture, University of the Ryukyus, 1 Senbaru, Nishihara, Okinawa 903-0213, Japan (Corresponding Author) E-mail: zhunai@agr.u-ryukyu.ac.jp

²琉球大学農学部教授, Professor, Faculty of Agriculture, University of the Ryukyus, 1 Senbaru, Nishihara, Okinawa 903-0213, Japan

³琉球大学大学院農学研究科修士課程, Graduate Student, Graduate school of Agriculture, University of the Ryukyus, 1 Senbaru, Nishihara, Okinawa 903-0213, Japan

図 1: 粒径別懸濁態窒素濃度の測定方法

有機物非分解浮遊土と有機物分解浮遊土のデジタルマイクロスコープ画像を比較して懸濁態窒素の形態を調べる。

2.1.2 粒径別懸濁態窒素濃度の測定

図 1 に粒径別懸濁態窒素濃度の測定方法をフローチャートで示した。また、実験に用いる試料土の採土地点とその特徴を表 1 に示した。浮遊土は排水路内の流れで沈砂池まで輸送されてくる過程で水と接触するため、浮遊土の表面に付着した溶解性の窒素成分の一部は水中に溶出す

表 1: 試料土の採土地点とその特徴

試料名	採土地点	特徴
東村 1	N 26° 38' 0.6"	国頭マージ土壤
	E 128° 10' 12.0"	サトウキビ畑
	GL 44 m	土粒子密度 $\rho_{s1} = 2.621 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$
東村 2	N 26° 38' 15.7"	国頭マージ土壤
	E 128° 14' 19.0"	切土斜面
	GL 117 m	植生なし 土粒子密度 $\rho_{s2} = 2.585 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$
嵐山	N 26° 38' 17.2"	国頭マージ土壤
	E 127° 59' 26.3"	サトウキビ畑
	GL 111 m	土粒子密度 $\rho_{s3} = 2.725 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$

ると考えられる。このような現象を再現するため、懸濁調整水を作った後、150 rpm の回転攪拌翼を使って 1000 mL のメスシリンダー内で一様に攪拌する。

本研究では国際土壌学会の粒径区分を参考にして、浮遊土を粗砂分 (250 μm から 2 mm まで)、細砂分 (25 μm から 250 μm まで) およびシルト・粘土分 (25 μm 未満) に区分している。図 1 のフローチャートからわかるように、粗砂分と細砂分はそれぞれ 250 μm ふるいと 25 μm ふるいの残留分であるからこれらは固形試料として得られる。固形試料である粗砂分と細砂分に含まれる窒素成分は懸濁態窒素である。粗砂分と細砂分の全窒素濃度の測定には全窒素・全炭素測定装置 (住化分析センター製、SUMIGRAPH NC-220F) を用いる。粗砂分および細砂分の風乾試料を乳鉢ですりつぶし、その約 1 g を供試する。

25 μm ふるい通過分として得られるシルト・粘土分は懸濁した液体試料に含まれている。シルト・粘土分に含まれる窒素成分がシルト・粘土分としての懸濁態窒素になるが、その濃度を直接に定量するのは容易ではない。そこで図 1 に示すように、懸濁した液体試料の原液の全窒素濃度 TN からろ液の溶存態窒素濃度 DN を差し引いて懸濁態窒素濃度 PN を求め、さらに懸濁した液体試料の原液の浮遊土濃度 SS で PN を除してシルト・粘土分の全窒素濃度を求める。なお、本研究ではろ液の全窒素濃度を溶存態窒素濃度と呼んでいる。液体試料の原液とろ液の全窒素濃度の測定には多項目迅速水質分析計 (HACH 社製、DR2500) を用いる。懸濁物質濃度分析などでは公称孔径 1 μm のグラスファイバーフィルター (MILLIPORE 社製、AP40 タイプ) を使用して吸引ろ過 (JIS K 0102) を行う。

2.1.3 理想沈殿池を想定した懸濁態窒素の除去率

浄水場の沈殿池の設計 (たとえば、丹保憲仁・小笠原紘一、1985a; 土木学会、2004a) にも用いられている理想沈殿池の理論 (Camp, 1946) を適用して、表 1 に示した 3 つの試料土ごとに懸濁態窒素の除去率を計算する。計算に必要な資料は浮遊土の粒径分布、粒径別懸濁態窒素濃度、沈降速度式および理想沈殿池の水面面積と流量である。以下、これらの資料について説明する。

沖縄地方の畑地帯の場合、沈砂池に流入する浮遊土の粒径はおよそ 100 μm 未満の範囲に分布することが報告されている (仲村渠ら、2007)。このことは沈砂池で除去対象となる浮遊土は細砂分やシルト・粘土分であることを示

している。このような現場条件を考慮するため、 $106\mu\text{m}$ 以下の通過土の粒径分布をレーザー回折式粒度分布測定装置（島津製作所製、SALD-200V ER）で測定する。土の粒度試験方法（JIS A 1204）に従って供試試料を作成する。

浮遊土の粒径分布に前項での測定結果となる粒径別懸濁態窒素濃度を乗じて懸濁態窒素の粒径別質量を求め、各粒径の質量が全質量に占める割合として懸濁態窒素の粒径分布を求める。なお、ここでいう懸濁態窒素の粒径とはなんらかの形態の窒素成分が付着・結合した状態にある浮遊土の粒径である。

条件に応じた種々の沈降速度式が提案されているが、沖縄県の沈砂池の設計指針（沖縄県農林水産部、1995）に従い式 (1) に示したストークス式を用いる。

$$w = \frac{g(\rho_p - \rho_f)}{18\mu} d^2 \quad (1)$$

ここに、 w :沈降速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、 g :重力加速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)、 ρ_p :粒子の密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)、 ρ_f :流体の密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)、 μ :粘性係数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)、 d :球形粒子の直径 (m) である。

式 (1) の粒子密度には表 1 の土粒子密度、その他の各定数には表 2 の値を用いる。式 (1) を用いて粒径分布の粒径を沈降速度に変換して沈降速度分布を得る。

仲村渠ら (2009) の現地調査結果との比較を考慮して、その調査対象となった沈砂池（除去領域の水面面積 2154m^2 ）の条件に基づいて想定する理想沈殿池の水面面積を $A = 2000\text{m}^2$ 、流量を $Q = 1\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ に定める。したがって、表面負荷率は $w_0 = Q/A = 5 \times 10^{-4}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ になる。

懸濁態窒素の沈降速度分布と表面負荷率を用いて想定した理想沈殿池における懸濁態窒素の除去率を計算する。除去率の計算方法については土木学会 (2004b) および丹保・小笠原 (1985b) に従っている。

比較のため、浮遊土の除去率と表 1 の土粒子密度より小さい粒子密度 (2.0 , 1.5 および $1.0\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$) を用いた場合の懸濁態窒素の除去率を同様にして計算する。

表 2: 沈降速度式の各定数値

定数	値
g	$9.8\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
$\rho_f \dagger$	$998.2\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$\mu \dagger$	$1.002 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$
$\dagger$ 水温を 20°C とした。	

3 結果および考察

3.1 懸濁態窒素の形態的特徴

3.1.1 デジタルマイクロスコープ画像による形態把握

図 2 に浮遊土のデジタルマイクロスコープ画像の一例を示した。上段の (a) 有機物非分解浮遊土の画像にはさまざまな粒径の粒子が写されている。この画像の場合、中央部には長径が約 $400\mu\text{m}$ の浮遊土が見られる。画像が幾分ぼやけているためわかりにくいだが、この浮遊土はより細かな一次粒子が集合して形成されている二次粒子である。本論文では示していないその他の画像でも同じ様子が観察された。

(a) 有機物非分解浮遊土

(b) 有機物分解浮遊土

図 2: 浮遊土のデジタルマイクロスコープ画像

画像 (a) に見られる二次粒子の形成には一次粒子間の集合作用が必要である。畑土壌の構成物を考慮すれば、そのような集合作用は腐植物質などの有機物が担うと考えられる。図 2 下段の (b) 有機物分解浮遊土の画像は二次粒子の形成に有機物が関与していることを示している。画像 (b) には一次粒子だけが写されている。つまり、画像 (b) は浮遊土に含まれる有機物が失われると一次粒子は二次粒子を形成できないことを示している。すなわち、有機物は二次粒子としての浮遊土の形成に必要な物質である。

土壌中における窒素成分の主な形態が有機物であることを考慮すれば、二次粒子を形成させている有機物には窒素成分が含まれているといえる。

以上のことから、懸濁態窒素の形態には植物残渣などの有機物としての形態は当然のこととして、画像 (a) に見られる二次粒子に含まれる有機物としての形態も存在することが認められる。

二次粒子の密度は二次粒子に占める有機物の量に左右されるから、二次粒子の密度は水の密度より小さいとこ

ろから大きいところまでの範囲に分布すると考えられる。例えば、画像(a)に見られる二次粒子は無機鉱物と思われる一次粒子が密に集合しているため、その二次粒子の密度は水の密度より大きいと考えられる。ゆえに、条件が整えばこの二次粒子は水中で沈降できる。このことは有機物の密度が水の密度より小さいとしても、画像(a)のように有機物が二次粒子の一部として存在する場合には、水中で沈降できる懸濁態窒素が存在することを示している。

画像(b)より、一次粒子の粒径は大きくても数十 μm であると思われる。したがって、とくに浮遊土の細砂分は二次粒子がその主体であることが推測され、少なくとも細砂分には懸濁態窒素成分が含まれていることが示唆される。

3.1.2 粒径別懸濁態窒素濃度による形態把握

粒径別懸濁態窒素濃度の測定結果を表3に示した。濃度は単位質量の浮遊土に含まれる窒素の総質量として示される。懸濁態窒素濃度を粒径区分別に比較すると、どの粒径区分の場合でも東村1と嵐山は東村2より大きかった。表1に示したとおり、東村2の試料土は切土斜面の土である。この切土斜面には植生がなく、また施肥もされないため窒素供給源はほとんど存在しない。一方、東村1と嵐山の試料土はサトウキビ畑の土壌であるため、作物残渣や施肥による窒素供給がある。このような窒素供給源の有無が試料土ごとの懸濁態窒素濃度に影響していると考えられる。

すべての試料土について、細砂分の懸濁態窒素濃度は粗砂分とシルト・粘土分より大きいことがわかった。懸濁態窒素は浮遊土の細砂分に比較的多く含まれているといえる。この結果は前項の考察を裏付ける結果である。

土壌の構成物は互いの接触を避けられないはずであるから、とくに二次粒子を形成させている有機物については、それだけが単独で土壌中に存在するような状況を考えにくい。二次粒子を形成させるような有機物は必然的に二次粒子の一部となり、細砂分や粗砂分に比較的多く含まれるようになると思われる。

3.2 理想沈殿池を想定した懸濁態窒素の除去率

3.2.1 懸濁態窒素の沈降速度分布

図3に試料土の106 μm ふるい通過分の粒度分布曲線を示した。東村2はシルト・粘土分を比較的多く含んでいた。図3の粒度分布曲線、表3の粒径別懸濁態窒素濃度および式(1)の沈降速度式を用いて懸濁態窒素の沈降速度分布を求めた結果を図4に破線で示した。比較のため、浮遊土の沈降速度分布を併せて実線で示した。

粒子密度が小さくなると沈降速度が小さくなるため、図4下段側の小さい粒子密度が用いられた沈降速度分布曲線は上段側よりも左方へシフトしている。粒子密度を水の密度に最も近くした $\rho_p = 1.0\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ の場合、沈降速度分布曲線は表面負荷率 $w_0 = 5 \times 10^{-4}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ よりも小さい範囲にあり、多くの浮遊土が沈降除去しにくい状態で存在するようになっているといえる。

粒径がシルト・粘土分から細砂分に変化するところで懸濁態窒素と浮遊土の沈降速度分布曲線が交差し、その交点より沈降速度が大きい範囲、つまり細砂分の沈降速度範囲では懸濁態窒素の沈降速度分布曲線のほうが上側に位置する特徴が認められる。これは細砂分の懸濁態窒素濃度がシルト・粘土分より大きいことが原因である。ま

表3: 粒径別懸濁態窒素濃度 (単位: mg/kg)

試料	粗砂分	細砂分	シルト・粘土分
東村 1	46	376	318
東村 2	0	33	13
嵐山	1043	1323	236

図3: 試料土の106 μm ふるい通過分の粒度分布曲線

た、粒子密度 $\rho_p = 1.0\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ の場合を除いて、その交点の沈降速度が表面負荷率付近になっている特徴も認められる。これらの特徴から、懸濁態窒素にはその沈降速度が表面負荷率より大きいものが浮遊土よりも大きい割合で存在することがわかる。したがって、懸濁態窒素は浮遊土よりも沈降除去されやすい性質をしているといえる。

細砂分の沈降速度範囲における懸濁態窒素と浮遊土の沈降速度分布曲線の間隔には試料土ごとの違いがある。嵐山の場合、他よりも間隔が大きい。また、東村1と東村2を比較すると、粒径別懸濁態窒素濃度が小さい東村2のほうがその間隔は大きい。これらのような関係には細砂分とシルト・粘土分の懸濁態窒素濃度との比が関与しており、その比が大きいと懸濁態窒素と浮遊土の沈降速度分布曲線の間隔も大きくなり、懸濁態窒素が浮遊土よりも沈降除去されやすい性質がより顕著になる。

図2に示した浮遊土の形態からして異なる大きさの粒子密度が混在しているのは明らかである。たとえば二次粒子の場合、粒径が同じでも有機物含有量が異なればその粒子密度も異なる。本論文では除去効果を定性的に把握することに主眼を置き、浮遊土の形態によらず粒子密度を一樣とする場合のみを検討している。異なる大きさの粒子密度を混在させた場合については今後の課題とする。

3.2.2 懸濁態窒素の除去率

図4に示した嵐山の沈降速度分布を例にして、粒子密度 $\rho_p = \rho_s$ のときの除去率を求めた結果を図5に示した。沈降速度分布曲線を破線で、除去率曲線を破線で示している。見やすくするため、除去率曲線と沈降速度軸の間をグレーに着色した。なお、本研究では、沈降速度分布が表す頻度のうち、理想沈殿池で除去可能な頻度に相当する部分を表す曲線を除去率曲線と呼んでいる。除去率曲線が示す頻度(グレーの着色部分)を合計した値が除去率と

図 4: 沈降速度分布

図 5: 除去率曲線 (試料土: 嵐山, 粒子密度: $\rho_p = \rho_s$)

表 4: 浮遊土と懸濁態窒素の除去率 (単位: %)

ρ_d ($\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	東村 1		東村 2		嵐山	
	SS	PN	SS	PN	SS	PN
ρ_s	33.59	35.88	17.98	26.87	39.10	71.41
2.0	28.13	30.59	14.21	23.45	32.87	68.24
1.5	20.44	22.57	9.69	17.57	25.45	57.82
1.0	0.12	0.14	0.07	0.14	0.17	0.41

なり、図 5 に示した例の場合、浮遊土の除去率は 39.10%、懸濁態窒素の除去率は 71.41% であった。その他の試料土および粒子密度の場合についても図 5 と同じ解析を行い、その結果を表 4 にまとめた。

表 4 より、解析条件下における懸濁態窒素の除去率は 0.14% から 71.41% までの幅広い範囲に分布し、粒子密度および試料土の違いに応じて変化した。懸濁態窒素の除去率の大小関係はどの粒子密度の場合でも嵐山 > 東村 1 > 東村 2 となった。この除去率の大小関係は粒径別懸濁態窒素濃度の大小関係と同じであり、粒径別懸濁態窒素濃度の大きさは懸濁態窒素の除去率に影響しているといえる。

粒子密度 $\rho_p = 1.0 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ の場合、懸濁態窒素の除去率は極端に小さく、ほとんど除去されないといえる。

懸濁態窒素と浮遊土の除去率を試料土別に比較すると、どの試料土の場合でも懸濁態窒素の除去率は浮遊土の除去率よりも大きいことがわかる。前節で考察したとおり、細砂分の懸濁態窒素濃度が比較的大きいことなどにより、懸濁態窒素が浮遊土よりも沈降除去されやすい性質をしているためであると考えられる。

仲村渠ら (2009) はひとつの現地観測の結果、懸濁態窒素の除去率 93%、浮遊土の除去率 70% であったと報告し、本研究と同様に懸濁態窒素の除去率は浮遊土の除去率よりも大きかったとする結果を示している。本研究の考察からすると、その現地観測結果についても懸濁態窒素の形態と粒径別懸濁態窒素濃度が関与したためではないかと推察される。

4 おわりに

本研究では沖縄地方の国頭マージ地帯を対象地域として、懸濁態窒素に対する沈砂池の貯留効果を把握するため、沈砂池に流入する浮遊土を顕微鏡で観察し、また懸濁態窒素濃度を粒径別に測定することによって懸濁態窒素の形態

を調べた。さらに、懸濁態窒素の沈降速度分布を実験的に把握し、理想沈殿池を想定した懸濁態窒素の除去率を計算した。

その結果、懸濁態窒素は浮遊土の二次粒子の構成成分として存在することによって、沈降できる形態をしていることがわかった。また、細砂分の懸濁態窒素濃度がシルト・粘土分のそれよりも大きいため、懸濁態窒素は浮遊土よりも沈降除去されやすい性質をしていると考えられた。理想沈殿池を想定した場合、懸濁態窒素の除去率は浮遊土の除去率よりも大きくなり、既往の研究結果と一致する結果が得られた。

今後の課題は沈降速度の計算において異なる大きさの粒子密度を混在させた場合を検討することである。

引用文献

- [1] Camp, T. R. (1946): Sedimentation and the design of settling tanks, *Trans. ASCE*, 111, pp. 895–958.
- [2] 土木学会 (2004a): 環境工学公式・モデル・数値集, pp. 19–20.
- [3] 土木学会 (2004b): 環境工学公式・モデル・数値集, p. 18.
- [4] 仲村渠将・吉永安俊・酒井一人・秋吉康弘・大澤和敏 (2007): 沈砂池における浮遊土砂流出に関する現地観測, 農業土木学会論文集, 249, pp. 47–53.
- [5] 仲村渠将・吉永安俊・酒井一人 (2009): 沈砂池での浮遊土砂と富栄養化成分の流入出と削減に関する現地調査, 日本雨水資源化システム学会誌, 15(1), pp. 1–7.
- [6] 沖縄県農林水産部 (1995): 土地改良事業における赤土流出防止対策指針, pp. 32–34.
- [7] 沖縄県農林水産部 (2005): 水質保全対策事業 (耕土流出防止型) 計画設計の手引き, p. 40.
- [8] 丹保憲仁・小笠原紘一 (1985a): 浄水の技術——安全な飲み水をつくるために——, 技報堂, pp. 60–74.
- [9] 丹保憲仁・小笠原紘一 (1985b): 浄水の技術——安全な飲み水をつくるために——, 技報堂, pp. 286–288.

この論文の公開の質疑または討議は 2012 年 12 月 31 日まで受付ます。