

## II-30 下水汚泥の土壌還元に関する基礎的研究(II)

室蘭工業大学 正会員 〇穂積 幸  
福島県庁 正会員 阿部 昌昭

### 1. はじめに.

下水処理場の普及に伴って余剰汚泥の発生量が急増しており、その処理・処分にあたっては処理の経済性、埋立地・投棄先の確保や環境汚染等の問題に直面している。地方、農業においては多年に渡る化学肥料の施用によって農地の有機資材や微量成分が不足し、地力の衰えが問題となっている。このような事情が相まって、有機資材や黒炭の肥料成分に富む下水汚泥の農業利用あるいは土壌改良材としての利用が注目されている。そのための研究が消化・脱水工程を経た汚泥を対象として数多くなされているが、沈降濃縮のみを行なった下水汚泥と直接利用できれば経済的では都合である。消化・脱水汚泥と濃縮汚泥と土壌還元する際の大きな相違点の1つとして、後者の場合には地下水汚染の可能性が高いことが挙げられる。濃縮汚泥は含水率が非常に高く、還元する汚泥量が多い場合には汚泥から分離した水が土壌へ浸透流出し、地下水面に達する可能性がある。したがって、濃縮汚泥と土壌還元する場合には、汚泥からの脱離水量と還元土壌の保水能力の算定が地下水の汚染防止の観点からは重要な問題となる。前報<sup>1)</sup>では還元土壌の保水能力と土粒子径および土層の間隙率との関係について検討した。本報では、濃縮汚泥からの脱離水量を求め、これと前報の結果から汚泥からの脱離水が地下水中へ浸透流出しない限界の追加汚泥量について検討を加えた。

### 2. 実験装置および実験方法

実験は樺前山産の火山灰と市内下水処理場から採取した余剰汚泥を用いて行なった。実験装置は内径10cmおよび2.5cm、高さ40~60cmのアクリル樹脂製の円筒の下部にゴム栓と付したものである。ゴム栓の中央には、先端にゴム管の取り付けられた内径6mmのガラス管が付き、ピンチクランプによって水の出し入れができるようになっている。実験の手順は次のようである。1)所定の汚泥濃度となるように静置濃縮した下水汚泥とふるい分けした均一粒径の火山灰と十分に練り混ぜて混合土と作製する。ただし、火山灰の含水比は実験直前に測定しておく。2)混合土を円筒に充填する。3)同様にして、混合土の添加重量のみが異なる土層とも本作製する。4)円筒の上面と密封して一昼夜放置した後、下部のピンチクランプを用いて、浸透流出してくる水を計量する。5)浸透流出完了後に混合土の含水比を測定する。なお、火山灰の飽和保水能力は前報に述べた実験手順にしたがって測定した。

### 3. 実験結果と考察

濃縮汚泥と1296 $\mu$ の均一粒径の火山灰と混合した混合土層から浸透流出してくる水量を測定し、次式によって算定した混合土層の飽和保水量を混合土の乾燥重量に対してプロットすると、図-1の図線のような関係となる。図中の実験は火山灰のみの場合の飽和保水量である。

$$g = \frac{W_0}{\gamma_w (1 + w)} (w + Q_1 - Q_2) \quad (1)$$

ここで、 $g$ : 飽和保水量(ml),  $W_0$ : 実験前の火山灰土の湿潤重量(g),  $w$ : 実験前の火山灰の含水比,  $Q_1$ : 実験時に添加した下水汚泥量または水量(ml),  $Q_2$ : 浸透流出水量(ml), 図-1から明らかのように、飽和保水量と土層乾燥重量との関係は直線で示される。この直線の勾配は単位乾燥重量当りの混合土の飽和保水量を表わす。したがって、一点、乾燥

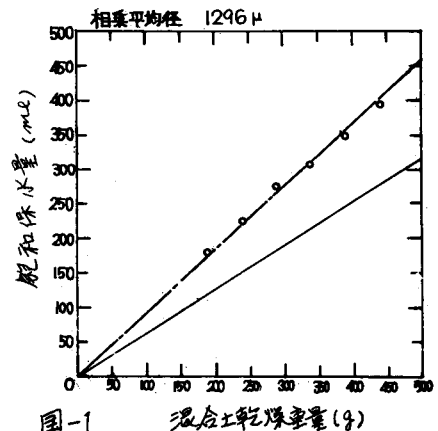


図-1 混合土乾燥重量(g)

は直線で示される。この直線の勾配は単位乾燥重量当りの混合土の飽和保水量を表わす。したがって、一点、乾燥

と実線で示される直線の勾配の差を求め、火山灰単位乾燥重量当りに投入された下水汚泥乾燥重量で除すと、下水汚泥単位乾燥重量当りの残留保持水量が求まる。図-2は種々の粒径の火山灰と下水汚泥と混合させた場合の汚泥単位乾燥重量当りの残留保持水量と示したものである。いずれの粒径の場合も残留保持水量はほぼ一定の値を示している。図-2からその平均値を求めると、 $58.3 \text{ mg/g}$ となり、含水率で示すと  $98.3\%$  である。図-2は濃度  $6650 \text{ mg/l}$  の下水汚泥に対する結果であるが、他の濃度の下水汚泥の場合も同一の残留保持水量を有することが、沈降濃縮実験の結果から推察される。初期固形物濃度と種々変化させて界面沈降実験を行なって求めた最終沈降界面高と初期濃度の関係を示すと、図-3のようである。図-3の関係と初期界面高から、最終沈降状態の汚泥の含水率を求めると、 $98.3 \sim 98.4\%$  となり、図-2の混合土層中の汚泥の含水率と概略一致する。重力下での汚泥の圧縮沈降は汚泥層中の間ゲキ水と汚泥粒子自体が含有している内部水が自重によって押し出されてゆく二つの過程からなり、沈降初期においては間ゲキ水が押し出され、やがて間ゲキ水とともに内部水が押し出され、長時間経過後には間ゲキ水はすべて押し出されて内部水のみが押し出される状態となり、最終的にはある一定の含水率の状態に達する。一方、混合土層中の汚泥粒子は混合土作製の際に土層中に一様に分散・圧縮されるとともに、汚泥粒子の一部は破壊されて内部水が解放される。沈降濃縮の場合と混合土層中の汚泥粒子の場合では、圧縮現象の作用機構は異なるものの、汚泥粒子の残留保持水量は最終的には一致する。以上の結果から、下水汚泥を土壌還元した場合には還元前の汚泥の濃縮状態や土壌の粒度組成によらず、混合土層中の汚泥はほぼ一定の残留保持水量を有するものと考えられる。したがって、任意の濃縮状態の下水汚泥からの脱離水量はこの保持水量と汚泥濃度を用いて式-(2)によって求めることができる。

$$\alpha = 10^3 - \left( a + \frac{1}{\beta} \right) C_0 \times 10^{-3} \text{ ----- (2)}$$

ここで、 $\alpha$ : 下水汚泥1g当りの脱離水量 ( $\text{ml/g}$ )、 $C_0$ : 添加汚泥の濃度 ( $\text{mg/l}$ )、 $\beta$ : 汚泥固形物の単位重量 ( $\text{g/cm}^3$ )、 $a$ : 汚泥固形物単位乾燥重量当りの残留保持水量 ( $\text{mg/g}$ ) で、前記したように、 $a = 58.3 \text{ mg/g}$  である。

下水汚泥1g当りの脱離水量  $\alpha$  と  $\beta = 1.0 \text{ g/cm}^3$  と仮定して式-(2)から求め、汚泥濃度に対してプロットすると図-4のようである。濃度  $1.7 \times 10^3 \text{ mg/l}$  にまで沈降濃縮した汚泥と土壌還元すれど、脱離水量は0となる。 $C_0 < 1.7 \times 10^3 \text{ mg/l}$  の汚泥の場合には、水が一部脱離し土壌へ浸透する。この浸透水は土壌の保水能力に対して土層中に滞留されつつ下方へ移動し、ある土層深さにおいてその全て

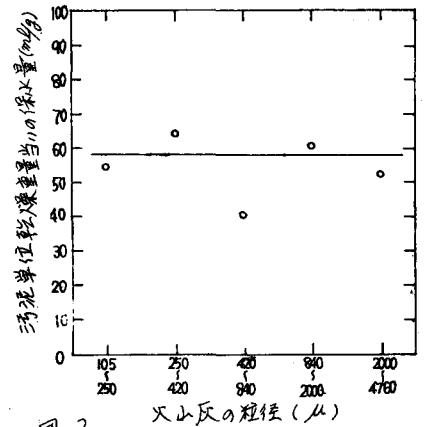


図-2

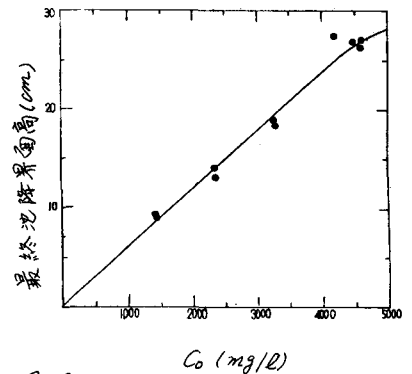


図-3

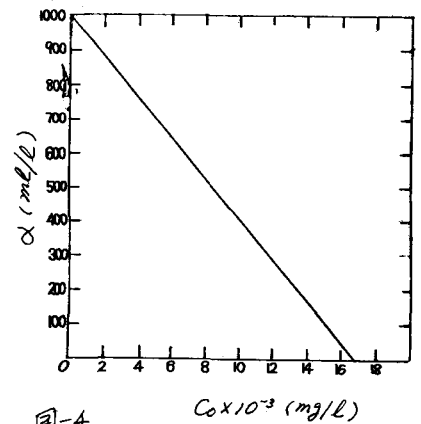


図-4

表-1

| 粒 径<br>(μ)  | 乾燥重量<br>W (g) | 単位乾燥重量<br>当りの保水量<br>n (cc/g) | 保水量<br>n × W (cc) |
|-------------|---------------|------------------------------|-------------------|
| 4760 ~ 2000 | 229.0         | 0.6                          | 139.4             |
| 2000 ~ 840  | 236.0         | 0.64                         | 151.0             |
| 840 ~ 420   | 236.2         | 0.708                        | 167.2             |
| 420 ~ 250   | 237.6         | 0.72                         | 171.1             |
| 250 ~ 105   | 238.3         | 0.81                         | 193.0             |
| 合 計         | 1177.1        | —                            | 819.9             |

が保水される。そこで、この点に関して検討してみる。

均一粒径の火山灰そのものの保水能力については前報で述べた。任意の粒度組成を持つ火山灰の保水能力を均一粒径の火山灰の保水能力から求められるか否かを検討するために、表-1に示す粒度組成の火山灰土層について保水量を求めた。実験によって得られた保水量は火山灰1g当り0.65mlで、一方、均一粒径の火山灰の保水量と粒度組成から計算によって求めた結果は表-1に示すように火山灰1g当り0.70mlで、両者は概略一致する。したがって、任意の粒度組成を有する火山灰土層の保水能力は均一粒径の火山灰の保水能力から求められる。任意の粒度組成、間ギャ比および含水比を有する火山灰土層の保水能力を算定しておけば、 $1.7 \times 10^{-3} \text{mg/l}$ 以下の濃度の下水汚泥を土壌還元したときの脱離水が地下水中へ流出しない限界の添加汚泥量が求まる。図-5に示す粒度組成の火山灰土層を例にとって、単位乾燥重量当りの保水能力と間ギャ比の関係と、火山灰の含水比とパラメータとしてプロットすると、図-6のようである。縦軸の $(n-w)$ は飽和保水量から火山灰自身の含水比と差し引いた火山灰単位乾燥重量当りの保水能力を表わす。したがって、還元土壌の間ギャ比と含水比とを規定すれば、汚泥濃度 $C_0$ のときの脱離水が地下水中に流出しない限界の添加汚泥量を式-(3)によって求める。

$$\beta = K \frac{(n-w)}{\alpha} \quad \text{----- (3)}$$

ここで、 $\beta$ ：火山灰単位乾燥重量当りに添加し得る下水汚泥量(g)  
 $n$ ：火山灰単位乾燥重量当りの飽和保水量(ml/g)  
 $w$ ：火山灰の含水比  
 $K$ ：実際に下水汚泥を土壌還元する場合の土壌の保水能力と飽和保水能力の比、前報に示したように、実際に汚泥を土壌還元したときには飽和保水状態に達する以前に水が下方へ移動するので、地下水中に水と流出させないためには飽和保水状態の1.16倍の土壌が必要である。 $K$ はその逆数に等しく、 $K \approx 0.85$ と考えてよい。図-7～図-9は $K=1.0$ としたときの $\beta$ と間ギャ比の関係を示したものである。また、土壌単位面積当りに添加し得る下水汚泥量は $\beta$ を用いて次式から求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} Q_s &= \beta W_{s0} \times 10^6 \\ W_{s0} &= \frac{W_s}{A} = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} H \end{aligned} \right\} \text{----- (4)}$$

ここで、 $Q_s$ ：土壌単位面積当りに添加し得る下水汚泥量( $\text{l/m}^2$ )  
 $W_{s0}$ ：単位面積当りの還元土壌の乾燥重量( $\text{t/m}^2$ )  
 $W_s$ ：還元土壌の乾燥重量(t)  
 $A$ ：還元土壌面積( $\text{m}^2$ )  
 $H$ ：土層の厚さ(m)  
 $e$ 、 $G_s$ ：それぞれ還元土壌の間ギャ比と土壌粒子の比重、 $\gamma_w$ ：水

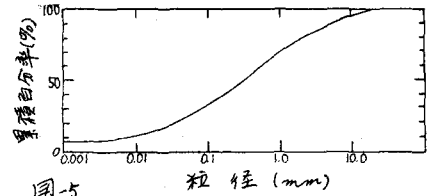


図-5

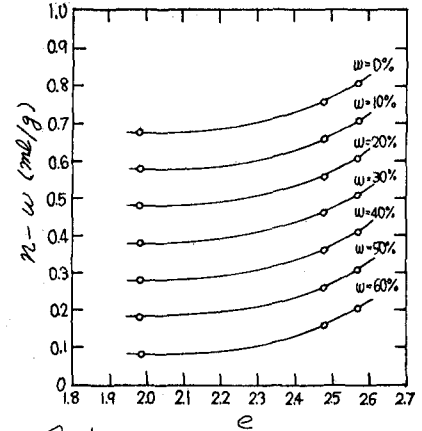


図-6

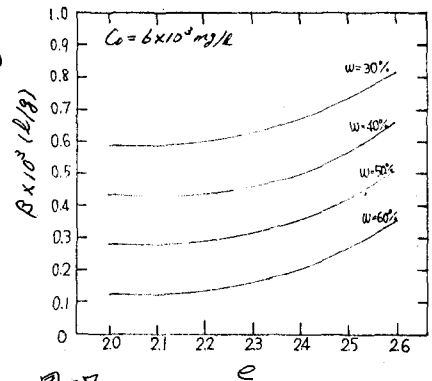


図-7

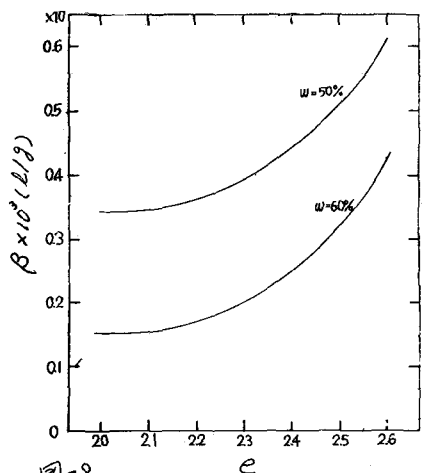


図-8

の単位重量 ( $\text{g}/\text{m}^3$ ),

ところで、下水汚泥と有機資材あるいは肥料として利用する場合、農地としての利用深さは表層の15~20cm程度であるから、下水汚泥の還元深さは高さ数十cmの表層部分に限られる。そこで、下水汚泥と表層20cmの土壌に還元した場合に、この20cm厚の混合土層から脱離水が下部に浸透してやがたない限界の添加汚泥量と、図-5に示す粒度組成の火山灰土壌と例にとって求めてみた。図-10~図-12はその結果を示したもので、添加する下水汚泥濃度 $C_0$ と $6 \times 10^3 \sim 10 \times 10^3 \text{ mg/l}$ 、火山灰の含水比 $W$ と10%~60%、土層の間隙比 $e$ と2.0~2.6にそれぞれ変化させた場合の添加限界汚泥量 $Q_s$ と、含水比とパラメーターとして間隙比に対してプロットしたものである。なお、 $C_0 = 10000 \text{ mg/l}$ の場合の図-12の一点鎖線は還元土壌体積0.2 $\text{m}^3$ から土壌中の土の体積とすめ土壌に含まれている水の体積と差し引いて求めた空気の全容積と参考のために示したものである。図-10~図-12の添加限界汚泥量は式-(3)中の係数 $k$ と1.0として求めたものであるから、実際に添加し得る汚泥量はその85%となる。図-10~図-12の添加限界汚泥量を上回る下水汚泥を添加した場合に、汚泥から脱離した水が混合土層下部の土壌へ浸透流出することになる。この浸透流出水を保水するために必要な下部の土層厚は次のようにして求めることができる。①実際に添加する汚泥量と添加限界汚泥量との差を求める。この差し引き汚泥量が混合土層下部に浸透流出することになる。②図-6より還元土壌の単位乾燥重量当りの保水能力 $(n-w)$ と求める。③浸透

流出水量と $(n-w)$ で除すと、必要な土層の乾燥重量が求まる。④この乾燥重量と式-(4)から土層厚 $H$ を計算し、さらに $k$ で除すと、所要土層厚が得られる。

#### 4. あとがき

均一粒度の土層単位

乾燥重量当りの飽和保水量と求めておけば、任意の粒度組成の土層の保水量が求まり、任意の濃度の下水汚泥と土壌還元したときの脱離水量が混合土層下部へ浸透流出しない限界の添加汚泥量が算定でき、さらに、それと上回る下水汚泥と土壌還元したときの脱離水量が地下水中に流出しないための混合土層下部の所要土層厚が求まることが示し、その年順について述べた。今後は、濃縮汚泥と土壌還元する場合の問題となる点について検討することとしたい。

#### <参考文献>

1) 穂積 準・阿部昌昭: 下水汚泥の土壌還元に関する基礎的研究(1)

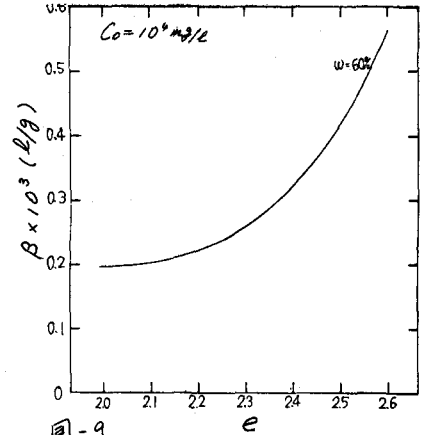


図-9

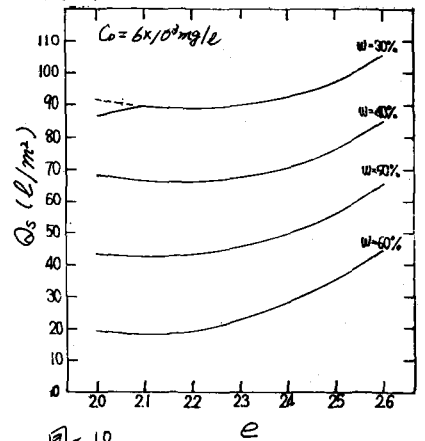


図-10

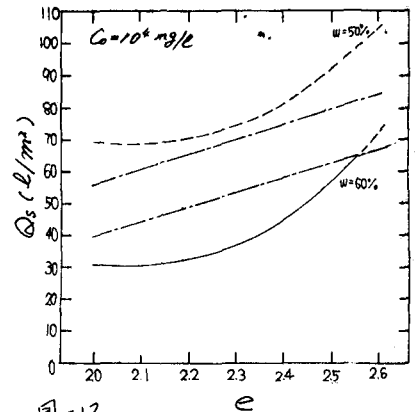


図-12

図-11

e

e