

II-17 下水汚泥の土壌還元に関する基礎的研究(I)

室蘭工業大学 正会員 穂積 淳
室蘭工業大学 学生員 O 岡部 昌昭

1. はじめに.

近年下水処理場の普及に伴って未処理汚泥の発生量が急激に増大しており、その処理、処分にあたって、処理の経済性、埋立地あるいは投棄先の確保および環境汚染問題等数多くの困難に直面している。また、多年にわたる化学肥料の使用によって農地の有機物資材や微量成分が不足し、その地力が衰えている。そこで、有機資材および無機肥料成分を含有している下水汚泥を単に廃棄物として投棄せずに、農業利用あるいは土壌改良材として積極的に再利用を計ってこうとする機運が高まり、そのための研究が数多くなされている。^{1)~9)} 現在行なわれている農業利用のための研究の数多くは、消化・脱水工程を経て脱水汚泥を対象としたものである。しかしながら、消化・脱水工程のコスト、汚泥処理を含めた下水処理に要する全コストに占める割合が大きくなり、消化・脱水工程を経ることなく下水汚泥の再利用ができれば、はるかに経済的で好都合である。

このような観点から、筆者等は沈降濃縮のみを行なつた下水汚泥の土壌還元に関して基礎的な研究を行なっている。濃縮汚泥を土壌還元する場合の問題点は、1)、濃縮汚泥から供給される脱離液による地下水の汚染の有無、2)、雨天時に還元土壌中から地下水中に溶出する汚染物質の有無、3)、濃縮汚泥中に含まれる有害物質の有無による還元土壌の汚染、4)、還元土壌および地下水の細菌学的汚染、等である。本報告は、これらのうち1)の問題に関して、火山灰土壌の保水能力について検討を加えたものである。

2. 実験装置および実験方法

樽前山産出の火山灰と市内下水処理場から採取した逆送汚泥を用いて、次のような2通りの実験を行なった。1つは火山灰の飽和保水能力を求めるための実験で、105 μ 、250 μ 、420 μ 、840 μ 、2000 μ および4760 μ のフルイを用いて得られた一様粒径の火山灰を図-1に示すような粒度分布を持った火山灰を用いた。

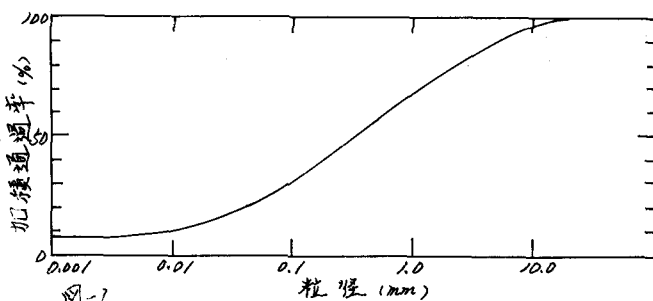


図-1

一様粒径の火山灰に対する実験装置は、図-2に示すように、内径2.5cm、高さ40cm、60cmおよび100cmのアクリル樹脂製の円筒の下部にゴム栓を付したものである。なお、ゴム管の中央には先端にゴム管の取り付けられた内径6mmのガラス管が付されており、ピンチコックによって水の出し入れができるようになっており、ゴム栓の上面には火山灰の流出を防ぐために粒径に応じた網目フィルターが付されている。粒度分布を有する火山灰に対しては、内径10cm、高さ50cmおよび100cmのアクリル樹脂製の円筒を用いた。この場合の円筒下部のゴム栓には、先端にゴム管の取り付けられた内径6mmのガラス管が9個付され

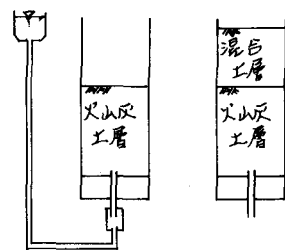


図-2 実験装置

おり、水の出し入れが全断面均等に行なえるようになっている。いま1つの実験は、逆送汚泥と火山灰を混合した場合の実験の保水能力を求めるためのもので、図-1に示すような粒度分布を有する火山灰を用いて行なった。この場合の実験装置は、図-2に示すように、内径10cm、高さ50cmおよび100cmの円筒の下部に、その中央にガラス管が取り付けられたゴム栓を付したものである。また、ゴム栓の上面には、火山灰の流出を防止するためのガーゼと、少量の清浄な砂が敷かれている。

火山灰の飽和保水能力を求めるための実験の手順は次のようである。①所定の湿潤重量の火山灰を所定の間ゲキ比となるように適当に締固めつつ円筒に充填する。②同様にして、同一の間ゲキ比となるように締固めつつ、火山灰の添加重量の異なる土層を3～6本作製する。③同時に火山灰を適量採取して含水比の測定に付す。④火山灰土層中の空気を排除するために、円筒下部のガラス管から水を静かに徐々に注入する。⑤水面が火山灰土層上面より数cmの位置に達したときに、ピンナックによってゴム管を閉じる。⑥この状態で円筒上面を密封して一昼夜放置する。⑦次いで、円筒上部より水を静かに加えつつ、下部のピンナックを開いて浸透流出してくる水をビーカーに受ける。⑧水が浸透排出し終わったことを確かめながら、集水を停止する。⑨火山灰土層の高さ、含水比および浸透水量を測定する。同様の手順で、各粒径の火山灰について実験を行なった。なお、火山灰土層に加えた水量は一樣粒径の火山灰に対しては、1ℓ、粒度分布を有する火山灰に対しては4ℓである。

次に、返送汚泥と火山灰土層を混合させた場合の実験手順について示すと次のようである。①火山灰土層が0、5、20、30および40cmとなるように、火山灰の湿潤重量を測定して円筒に充填する。②ポリ容器を用いて、火山灰と、固形物濃度が約300mg/lとなるように静置沈降した汚泥を十分混合する。③混合土の厚さが20cmとなるように、一定重量の混合土を円筒内の火山灰土層の上部に充填する。④同時に、火山灰および混合土を適量採取して含水比と湿潤密度の測定に付す。⑤円筒底部から浸透流出してくる水をビーカーに受ける。⑥浸透流出の終了後、火山灰土層と混合土層の含水比および浸透水量を測定する。本実験では、混合比を単位火山灰乾燥重量当りの下水汚泥乾燥重量で定義し、混合比を6段階に変化させた。

3. 実験結果と考察

まず始めに、次式で計算される火山灰土層の間ゲキ比を求めるために行なった火山灰の比重測定の結果について示す。

$$e = \frac{A \cdot \gamma_w \cdot (1+w)}{W} \cdot \gamma_w \cdot G_s - 1 \quad (1)$$

ここで、 e ：間ゲキ比、 A ：円筒の断面積 (cm^2)、 h ：火山灰土層の高さ (cm)、 w ：火山灰の含水比、 W ：火山灰土層の湿潤重量 (g)、 γ_w ：水の単位体積重量 (g/cm^3)、 G_s ：火山灰の比重である。火山灰の比重以外は、各実験毎によって異なる値となるので、その都度測定した。ただし、 A は一定である。火山灰の比重を測定するために、水の入った比重ビンに火山灰を静かに添加したところ、粒径の異なる火山灰では概略全体的30%程度が水表面に浮いた。したがって、大粒径の火山灰の30%前後が水よりも小さい比重を有している。水中に沈んだ成分について、比重測定法に基づいて比重ビン中で所定時間煮沸した場合と煮沸しない場合の比重を測定した。また、水よりも軽い成分については、20℃で比重0.7895のエチルアルコールを用いてその比重を測定した。これらと併せて火山灰をすりつぶした粉末状とした場合の比重を測定した。なお、エチルアルコールを用いた場合の比

表-1

相対平均径 (μ)	水より 比重①	水より 軽い成分②	(1)の比重 煮沸 した場合	(1)の比重 煮沸 しない場合	(2)の比重
3085	70.2%	27.8%	2.092	1.584	0.857
1296	70.3%	27.7%	2.251	1.605	0.851
594	100%	0%	2.444	1.92	—
324	—	—	2.384	2.01	—
162	—	—	2.139	2.070	—
粉砕 した場合	—	—	2.418	—	—

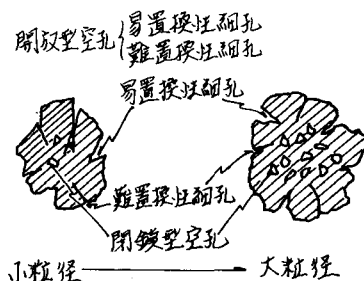


図-3 火山灰粒子の模式図

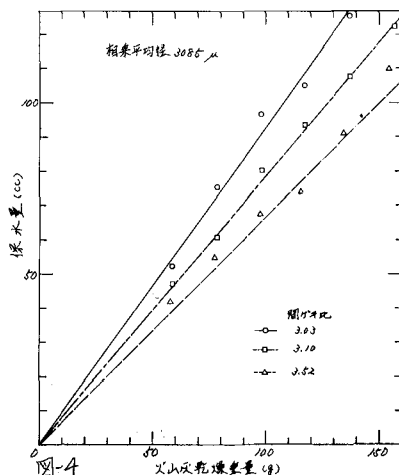


図-4

重測定に際しても若干の火山灰が液表面に浮んだ。表-1は、その結果を示したものである。水より重い成分のみについて比較すると、煮沸した場合の比重は煮沸しない場合の比重に較べて大きく、この傾向は火山灰の粒径が小さくなるほど顕著となっている。このことは、火山灰が通常の状態では水によって置換しにくい細い空孔を有していることを示すもので、大粒径になる程、保水に無効な体積部分を持っていることを示している。また、粉末状の比重は煮沸した場合のそれに比べて大きいことから、火山灰は煮沸によっても水と置換し得ない細孔あるいは肉じた形の空孔を有しているものと考えられる。大粒径になる程両者の差が大きいことから、大粒径の火山灰は小粒径のものに比べてより多くの閉鎖型および置換しにくい開放型の細孔を有しているものと考えられる。エタールアルコールを用い煮沸せずに行なった比重測定の結果でも、大粒径の火山灰の比重は小粒径の火山灰のそれよりも小さい。以上の結果から、本実験で用いた火山灰を模式的に描くと、図-3のようである。

図-4～図-8は、それぞれ各粒径の火山灰土層の飽和保水量と火山灰重量の関係を示したものである。ただし、縦軸の保水量 g は、次式によって求めたものである。

$$g = \frac{W_0}{1+W_0} w_0 + (Q_0 - Q) \quad (2)$$

ここで、 W_0 ：実験前の火山灰土層の湿潤重量 w_0 ；実験前の火山灰土層の含水比、 Q_0 ：実験時に添加した水量(cc)、 Q ：浸透流出水量(cc)である。また、パラメーターの間ゲキ比は真比重を用いて式-(1)から求めたものである。保水量と火山灰土層の重量の関係はいずれも直線で示されるので、その勾配は火山灰単位乾燥重量当りの飽和保水量を表わす。図-4の相乗平均径 3.05μ の場合には、間ゲキ比によって直線の勾配が異なっており、火山灰土層の保水能力が間ゲキ比によっても影響されることを示している。これに対して、図-5～図-8の相乗平均径 $12.96\mu \sim 162\mu$ の小粒径の火山灰では、保水される水量の間ゲキ比による変化は小さく、各粒径の火山灰ともほぼ一平の直線が示される。図-9は、最大粒径が 19.1 mm で図-1の粒度分布を有する火山灰土層の飽和保水量と土層の乾燥重量との関係を、間ゲキ比をパラメーターとして描いたものである。図-4～図-8の一樣粒径の火山灰土層の場合と同様に、保水量と土層重量の関係は直線で示される。また、その直線の勾配は、間ゲキ比によって異なり、その保水量は大粒径の一樣粒径の火山灰の場合と同様に間ゲキ比によっても影響されることを示している。

図-10は、図-4～図-8の直線の勾配を求め、その勾配と火山灰の粒径との関係も片対数プロットしたものである。図-10から明らかのように、火山灰単位乾燥重量当りの飽和保水量は粒径の増大とともに片対数グラフ上で直線的に減少してゆく。ただし、間ゲキ比の影響の大きい相乗平均径 3.05μ の火山灰の場合には、大きな変動を示している。この現象の理由について後述する。

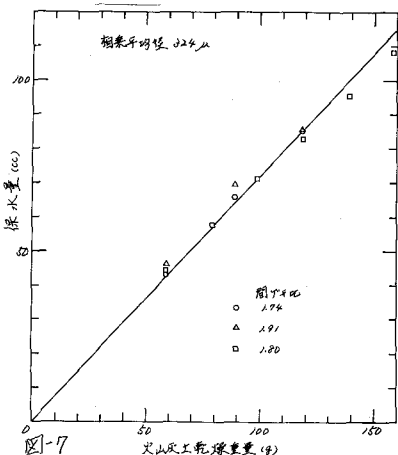
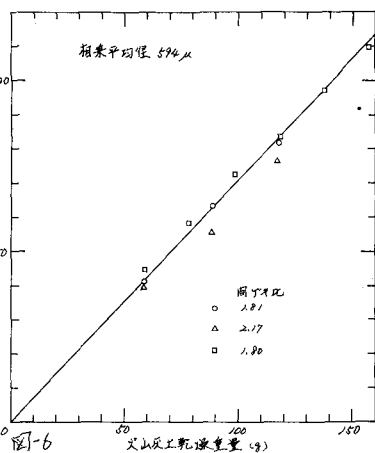
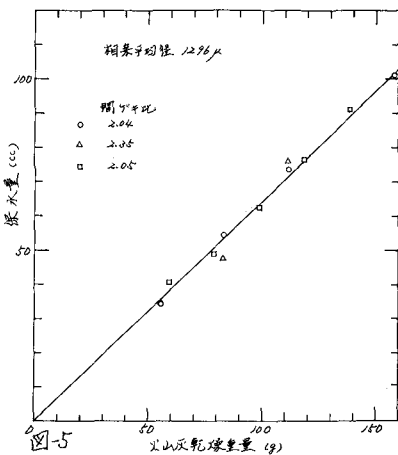
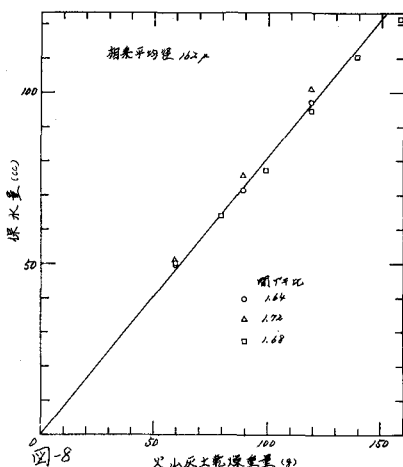
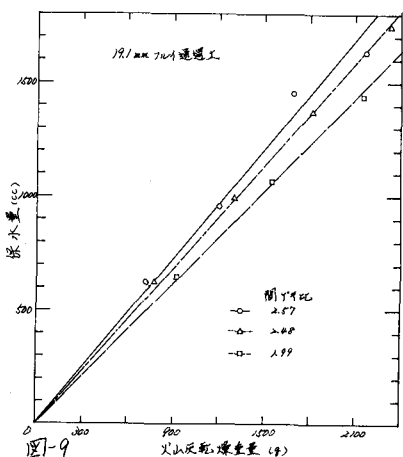


図-11の実線は、図-9の直線の勾配とものしとの間ゲキ比の関係を示したものである。この場合の間ゲキ比の範囲では、火山灰単位乾燥重量当りの飽和保水量は間ゲキ比の増加とともに、曲線的に増加している。しかしながら、その増加割合は小さい。また、図-11の破線は、図-4の大粒径の一樣火山灰土層に対する直線の勾配と間ゲキ比の関係を示したものである。一樣粒径の火山灰の場合には、火山灰単位乾燥重量当りの保水量は間ゲキ比の増加とともに減少しており、粒度分布を有する火山灰の場合と全く逆の結果を示している。したがって、間ゲキ比を大幅に変化させた場合に、火山灰単位乾燥重量当りの保水量がある間ゲキ比において極大値を持つ上方に凸の曲線となるか否かについて検討する必要がある。図-11の直線は、このような曲線の一部であることが推測される。この点に関しては、現在なお検討中である。



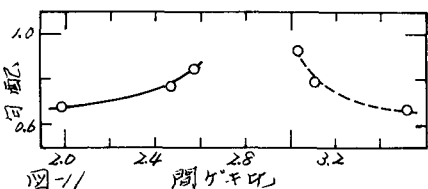
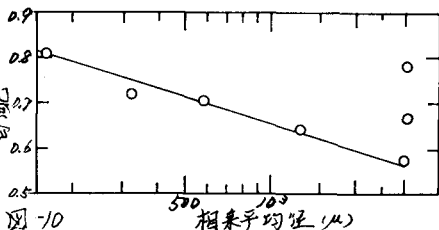
ここで、図-4～図-11中の間ゲキ比の値について述べておく。本実験の間ゲキ比は、火山灰の比重として粒子をすりつぶして測定した真比重を用いて、式-11から求めたものである。球形粒子の場合の最終沈時の間ゲキ率は49.64%、間ゲキ比で表わすと0.99程度であり、通常の土層の間ゲキ比がほぼ1.0以下であるのに対して、図-4～図-11に示した間ゲキ比は著しく大きい。前述したように、本実験の火山灰は難置炭酸の細孔と閉鎖型空孔を有しており、これらを考慮した火山灰粒子の比重と真比重は大きく相違している。このため、真比重を用いて間ゲキ比を求めると、通常の値より著しく大きくなる。例えば、粒径 0.075μ の火山灰を例にとって示すと次のようである。いま、真比重 2.418 を用いて求めた間ゲキ比が 2.0 とすると、仮りに水を煮沸して測定した比重 1.564 を細孔を考慮した火山灰の平均の比重とみなして、間ゲキ比を計算しなおすと 0.94 となり、通常の場合の間ゲキ比に近くなる。したがって、目的に応じた比重測定法を解説し、いかなる比重を用いるかについて検討しなければならないが、種々層の困難な問題を悩んでいるので、本報では真比重を用いて間ゲキ比を計算するだけに留めた。



次に、火山灰の飽和保水能力に関して得られた結果について考図-10察する。火山灰土層が保水し得る水分は、火山灰粒子に付着する水分と間ゲキ中に滞留される水分の二つに大別することができる。火山灰粒子に付着する水分は、粒子の表面積の増大に伴って増加するものと考えられる。火山灰単位重量当りの表面積は次のように求められる。いま、火山灰土層の湿潤重量を W 、含水比を w 、比重を G_s 、水の単位体積重量を γ_w とし、土層中の粒子個数を N とすると、火山灰粒子が占める全体積 V は式で与えられる。

$$V = \frac{W}{(1+w)G_s\gamma_w} = \frac{\pi}{6} d^3 N$$

火山灰土の全表面積は、



$$\pi d^2 N = \frac{W}{(1+w) G_s \gamma_w} \cdot \frac{6}{d}$$

となる。したがって、火山灰の単位乾燥重量当りの表面積は、粒子形状が球形でないことを考慮すると、次のように与えられる。

$$S_r = \frac{1}{G_s \gamma_w} \cdot \frac{\phi}{d}$$

ここで S_r 、乾燥重量基準の比表面積、 ϕ 、比表面積形状係数

で、球形の場合には $\phi = 6$ である。したがって、火山灰の粒径が小さくなると、単位重量当りの保水量は小さくなる。言葉換えると図-12 水の滞留パターンの模式図

図-4～図-9の直線の勾配 n と S_r の間には、

$$n \propto S_r^\alpha$$

なる関数が存在する。また、火山灰土層中の個々の間ゲキの大きさは、粒子径が小さくなるとともに小さくなり、粒子表面に付着する水分によって残りの間ゲキ部分が減少し、水分を滞留し得る間ゲキの容積部分が小さくなる。極端な場合には粒子表面に付着する水分によって個々の間ゲキ容積が占められてしまう。このため、図-5～図-8 に示されるように、粒径の小さい火山灰では、間ゲキが増減しても水分を保持し得る残余の間ゲキ容積がそれほど大きく変化せず、単位重量当りの保水量は、大粒径の火山灰に比してそれほど大きく変化しないものと考えられる。これを模式的に示すと、図-12 のようである。火山灰土層中の個々の間ゲキが比較的大きな容積を有する場合には、水を滞留し得る間ゲキ部分は間ゲキ比の増大とともに大きくなるので、図-11 の実線に示されるように、単位重量当りの保水量は間ゲキ比の増大とともに増加する。個々の間ゲキの大きさが大きくなると、図-12 に示す模式図における隣接粒子間の距離が小さくなり、水を保持しておくための毛管現象による付着力および水の表面張力による付着力が小さくなる。¹⁰⁾ さらに、隣接粒子間の距離が大きくなってある限界値と比べると、水を保持することができなくなり、保持される水は粒子表面に付着した水分のみとなる。このため、図-11 の破線にみられるように、間ゲキ比の大きい場合には単位重量当りの保水量は、間ゲキ比の増大とともに小さくなるものと考えられる。前述したようにこの点に關しては検討中である。

最後に、返送汚泥と火山灰を混合した場合の保水能力について示すと、次のようである。本実験の場合には、混合土層中の返送汚泥に含まれる水分の一部が脱離し、脱離液の一部は火山灰土層によって付着・滞留され、一部は火山灰土層を浸透して流出する。図-13 は、混合比 0.0142、

火山灰土層の間ゲキ比 2.05 の場合を例にとりて、その結果を、縦軸に火山灰土層の平均の名水比、横軸に土層の厚さとして示したものである。図-13 の平均の名水比から各土層厚における保水量を求めて、各土層の乾燥重量に対してプロットすると、図-14 の実線のようなものである。この場合も、両者の関係は、直線で示される。また、図-14 の破線は、同一の粒度分布を有する火山灰土層について示した図-11 から、間ゲキ比 2.05 のときの勾配を求め、これを用いて描いた直線である。図-14 の実線と破線は一致しない。これは、次のような理由によるものと考えられる。図-14 の破線の場合には、水を添加後一直位設置した後、浸透流出実験を行なっている。火山灰土層にわたって水が十分行き渡ることに加えて、図-3 に示した火山灰粒子の模式図において水と置換可能な大きな細孔内に水が十分に浸入する。これに対して図-14 の実線の場合には、火山灰土層上に混合土を充填し直ちに浸透流出実験を行なっている。図-14 の破線の場合

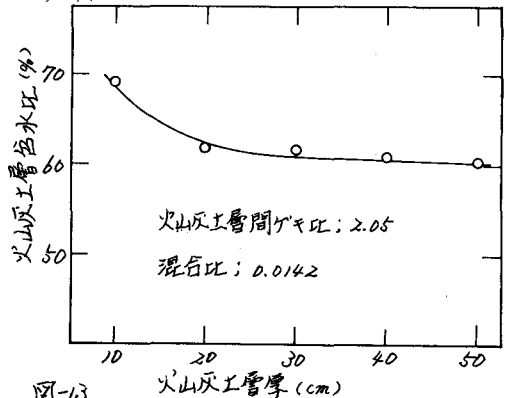
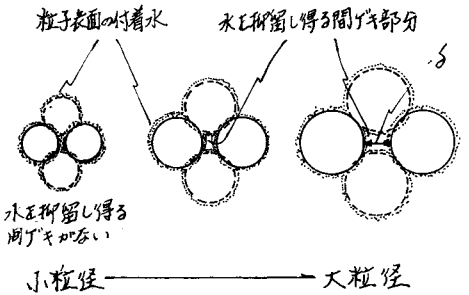


図-13

火山灰土層厚 (cm)

合に較べて、水が土層全体にわたって浸透流下し難く、若干の死空間が存在することが考えられ、また、水が火山灰粒子細孔内へ完全に浸入する以前に浸透流出する。このため、図-14に示すような差異が生ずる。

図-14 から明らかなように、実際に下水汚泥を工壌還元する場合の工壌の保水能力は飽和保水能力とは異なる。両者の差異について計算例を示しておく。次のようである。混合比0.0142、火山灰工層の間げキ比2.05の場合の浸透流出水量と火山灰工層の乾燥重量との関係を示すと、図-14の一点鎖線のようなのである。両者の関係は、概略直線で示されるので、この直線を外挿して浸透水量が0となる火山灰工層重量を求めると3240gである。これに対応する飽和保水状態の工層重量は、図-14に示すよう

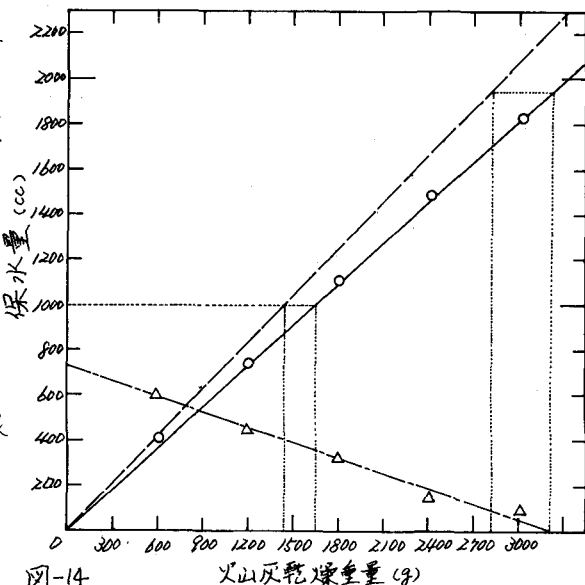


図-14

火山灰乾燥重量 (g)

に2790gである。したがって、飽和保水状態の場合に較べて、実際の工壌還元の場合には1.16倍の工量が必要である。逆に、注意の濃縮状態の下水汚泥を注意の混合比で混ぜたときの混合工層から下部の工層に流入してくる水量が判れば、その水量に相当する縦軸の点から横軸に平行な線を引いて図-14の実線と破線との交点を求め、その交点に対応する工量の比を求めれば、飽和保水状態と実際の工壌還元の場合の必要工量を求める。

4. あとがき

下水汚泥の工壌還元を目的とし工壌の保水性に関して実験を行ない、その保水能力と、工粒子の粒径、比表面積および工層の間げキ比との関係を求め、これについて考察した。また、工壌の飽和保水量と、下水汚泥を実際に工壌還元した場合の保水量の差異を求め、これについて考察した。今後、更に検討を重ねて行きたい。

最後に、本研究は、室蘭工大工部工学科学生、新名秀幸君の協力を得て行なったものであることを付記する。

参考文献

- 1) 鈴木達彦：“下水汚泥の緑農地利用の可能性と問題点”，下水道協会誌，Vol. 13, No. 142, 1976, p52~60
- 2) 寺島皇雄：“下水汚泥の農業利用と問題点”，下水道協会誌，Vol. 13, No. 142, 1976, p2~9
- 3) 田中英至：“下水汚泥の堆肥化とその利用計画の検討”，下水道協会誌，Vol. 13, No. 142, 1976, p61~76
- 4) 香川尚徳，白石忠男，栗原康：“水田土壌における下水汚泥の分解”，用水と廃水，Vol. 20, No. 12, p5~8
- 5) 三木伸天，森忠洋，成田愛生：“下水汚泥の農業利用に関する研究(1)”，下水道協会誌，Vol. 15, No. 170, p50~60
- 6) E. EPSTEIN, D. B. KEANE, J. J. MEISINGER, J. O. LEGG：“Mineralization of nitrogen from Sewage Sludge and Sludge Compost”，J. Environ. Qual., Vol. 7, No. 2, 1978, p217~221
- 7) K. A. Kelling, A. E. Peterson, L. M. Walsh：“Effect of wastewater sludge on soil moisture relationships and surface runoff”，Journal WPCF, July, 1977, p1698~1703
- 8) Robert J. Manson, Clifford A. Merritt：“Land application of liquid municipal wastewater sludges”，Journal WPCF, Vol. 47, No. 1, 1975, p20~28
- 9) J. C. Lance：“Phosphate Removal from Sewage Water by Soil Columns”，J. Environ. Qual., Vol. 6, No. 3, 1977, p279~284
- 10) 三輪茂雄：“粒径工学”，朝倉書店出版，p351~362