

(38) 炭酸ガスを利用した余剰汚泥の浮上濃縮に関する基礎的検討

A basic study on the floatation of waste activated sludge by use of carbon dioxide

藤崎一裕* 石田 昇*

Kazuhiro FUJISAKI Noboru ISHIDA

ABSTRACT ; The paper deals with dissolved-gas flotation of waste activated sludge in which carbon dioxide is used in place of air. The theoretical base of the present research is that the solubility of carbon dioxide is more than 20 times larger than that of the air. As the first step to develop the carbon dioxide flotation plant, laboratory experiments were executed. After the carbon dioxide is dissolved in the tap water under a pressure of 0.05 to 2 kgf/cm², the water is mixed to unpressurized waste activated sludge for flotation. To promote the micro bubbles generation, the flotation column is warmed in a water bath at a temperature 30 to 50 °C. It is shown that the flotation due to dissolved carbon dioxide gives almost the same or better efficiency compared with the usual dissolved air flotation.

KEYWORDS: Dissolved-gas flotation, Activated sludge, Carbon dioxide

1. まえがき

下水汚泥の効率的な処理処分は産業廃棄物処理上もっとも重要な課題の一つである。他方化石燃料の使用の増大にともなう大気中の炭酸ガスの増加は地球温暖化に影響する要因として懸念されており、排ガスからの炭酸ガスの回収や回収後の処分方法について検討が始められている。本研究は、回収炭酸ガスを有効利用するための基礎的な研究の一つとして、下水余剰汚泥を炭酸ガスを利用して浮上濃縮する手法について検討したものである。

この研究は炭酸ガスが窒素や酸素に比べて20～30倍も多量に水に溶解するという特性を利用したものである。そして、実験手法としては現在広く採用されている加圧浮上法を応用するものであり、溶存させる気体として空気の代わりに炭酸ガスを用いる。前述のように炭酸ガスは非常に水に溶けやすいため、加圧圧力の低減をはじめ装置全体の小型、軽量化が可能になると予想される。これらの研究の第1段階として、この論文では炭酸ガスによる浮上現象のの特色を調べ、実際への応用の可能性について検討することを目的としている。

2. 実験条件、装置及び方法

2.1 炭酸ガスの溶解度と温度圧力の影響

図1は種々の気体の水に溶解する量と温度との関係を示す。図中の縦軸は1atm=101kPaの気体が1m³の

* 九州工業大学 工学部 建設社会工学科

(Kyushu Institute of Technology, Civil Engineering Department)

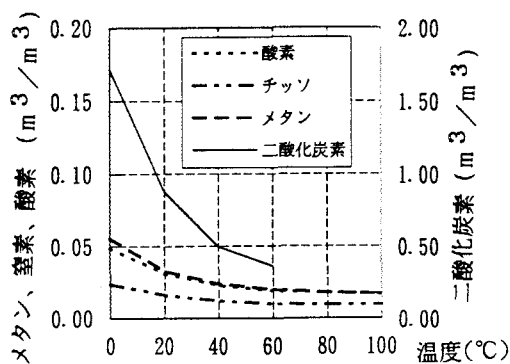


図1 水中に溶存するガス量

水に溶解するときの容積を0℃1atmの容積に換算した値である¹⁾。この図から炭酸ガスが窒素や酸素に比べて20～30倍も多く溶解すること、したがって温度変化に伴う溶存可能量の変化の度合いも他の気体に比べて非常に大きいことがわかる。たとえば20℃の炭酸ガス飽和水を60℃に加温すると、1気圧で1CCあたり0.52CCもの炭酸ガスが析出するのに対して、酸素の場合には同じ条件で0.012CCしか析出しない。

一方気体は圧力が高いほど多量に水に溶解する。この現象はHenryの法則として知られているが、炭酸ガスの溶解度と圧力との関係が図2に示されている。図1, 2より水中に溶存する気体を析出させる方法としては圧力を低下させる方法と、水温を上昇させる方法とがあり、図3のようにまとめられる。

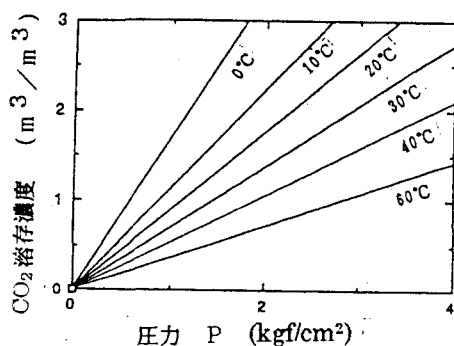


図2 炭酸ガス濃度と圧力との関係

温度 圧力	低温 (冷却)	常温	高温 (加温)
低压 (減圧)		⑤↑	
常圧	②→		①→
高压 (加圧)		③↑	④↗

①加温浮上 (a) ②加温浮上 (b)
③加圧浮上 ④加圧加温浮上 ⑤減圧浮上

図3 炭酸ガス気泡の発生方法

2. 2 炭酸ガスの溶解速度

予備実験として水中に炭酸ガスが溶解していく速度過程を調べた。恒温水槽通に1lのメスシリンダーを設置してこれに水道水を満たし炭酸ガスを吹き込み、時間の経過とともにpHの減少過程を測定した結果が図4に示されている。水中での炭酸ガスは水と反応して一部は炭酸として溶解し、その濃度が増すとpHが減少する。図4には時間の経過とともにpHの値が一定値に近づく様子が示されている。

図4のpHがほぼ一定となったときの炭酸ガス濃度を滴定法により測定した結果が図5に示されている。この

図によると炭酸ガス濃度は、それぞれの水温における飽和値として、図1から得られる値と近い。水中に種々のイオンが共存するときの溶存炭酸ガス濃度の測定は非常に困難とされているが、これらの図によると、pH値を測定する事により、水中の炭酸ガスの濃度の大きな値を推定することの可能性が考えられる。以上のことより、炭酸ガスを溶解させるに必要な時間は5分程度で十分であるとして実験を進めた。

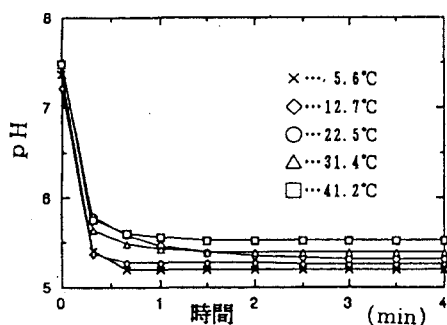


図4 pHの減少過程

2. 3 浮上濃縮実験

実験試料は、北九州市内のH浄化センターで採取した余剰汚泥で、初期水分率 99.4~99.7%、SVI250~350のものを用了。浮上実験は炭酸ガスを溶解した水を余剰汚泥と混合して浮上濃縮する方法を用了。

実験装置の概略が図6に示されている。加圧容器A内の水に一定圧力下で炭酸ガスを吹き込み5分間以上静置した後、この水と余剰汚泥とを大気圧下で混合し浮上濃縮した。浮上管としては主として500ccのメスシリンダーを用い、時間の経過に伴う界面高さの変化を目視により測定した。このとき温度、圧力などを種々変えて実験条件としたが、以下の番号①~⑤は図3のそれに対応する。

2. 3. 1 加温浮上

加温浮上①

大気圧下で、炭酸ガスを吹き込んだ水と余剰汚泥とを1:1に混合した後、恒温水槽内で間接加温して浮上濃縮した(初期温度はいずれも20℃)。図7中の横軸は経過時間、縦軸は初期高さ $H_0=25\text{cm}$ で無次元化した界面高さを示している。図中の実線より上部が浮上汚泥部、破線より下部が沈積部で、両者の間が分離液部を表している。この図によると加温温度40℃では汚泥は浮上していない。また、60℃でも底部に5%程度の沈積がみられる。

加温浮上 ②+① (低温→常温)

ドライアイスを入水中に投入して溶解させると、同時に水温も低下する。この低温の炭酸ガス溶解水と余剰汚泥とを混合して加温した。図8はその実験の結果で、ドライアイス投入の量、方法など検討すべき事項は多いが、図に示されているように非常に速い浮上速度が得られている。

2. 3. 2 加圧浮上③

加圧条件下で炭酸ガスを吹き込んだ水と余剰汚泥を1:1に混合し、大気圧下で静置し浮上濃縮した。図9によるとガス吹き込み容器内の圧力が 0.5kg/cm^2 の場合には浮上していない。

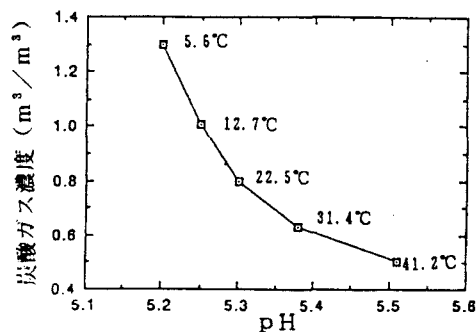


図5 炭酸ガス濃度とpHとの関係

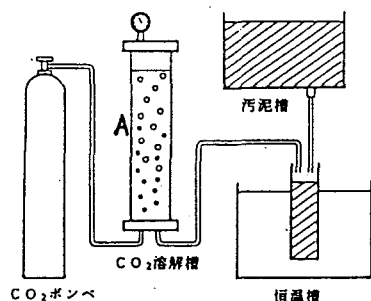


図6 実験装置概略図

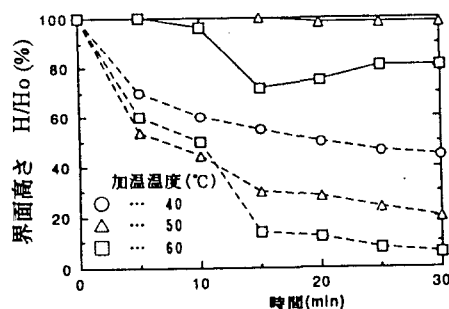


図7 加温浮上①

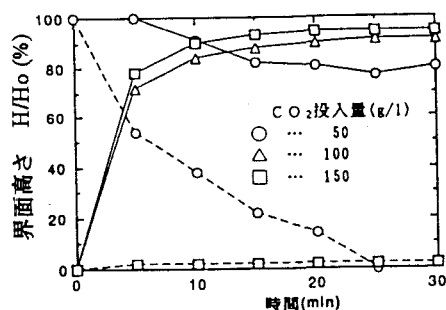


図8 加温浮上①+②

2. 3. 3 加温加圧浮上④

上記③の場合の汚泥と水の混合液をさらに加温したもので、その結果が図10に示されている。この場合には、圧力が 1.0 kg/cm^2 ($=9.8 \text{ KPa}$) より高いときには、加温開始後5分程度で浮上が進行している。図11には混合比の影響を示した。加圧水：余剰汚泥=1：2でも汚泥は浮上することがわかる。図12には加温温度の影響が示されていて、 30°C 以上の加温が浮上の促進に有効であることがわかる。

2. 3. 4 浮上管の長さの影響

上記2.3.1～2.3.3の実験はすべて500mlのメスシリンダーを用いたものであるが、図13には浮上管の高さの影響が示されている。一般に浮上高さ(分離液部高さ)が高いほど浮上による圧密も進行することが考えられ、通常の加圧浮上法でもで浮上高さは1m程度が推奨されている。この実験の場合も初期高さ $H_0=0.9\text{m}$ の場合には初期水分率 0.996 の余剰汚泥が 0.97 と約7倍に濃縮されている。またこのときの初期段階での浮上速度は $80\text{cm}/30\text{min}=38.4\text{m}/\text{day}$ で従来の加圧浮上法と比べても早いほうといえる。

3. 考察

3. 1 浮上速度課程

汚泥の浮上濃縮課程は流体、汚泥粒子、気泡についての保存則や運動方程式を用いて解析²⁾が試みられているが、浮上層内の汚泥の力学的特性の把握³⁾が困難等の理由から、まだ実用出来る段階に至っていない。ここでは現象の概略を知る意味で、従来発表されている凝集体の沈降に関する式を用いて検討を行う。

図14は図13に示されている浮上過程を初期高さ H_0 で無次元化したもので、Work-Kohlerの(1)式⁴⁾が現象の第一近似として利用できることがわかる。

$$\frac{H}{H_0} = f(t) \quad (1)$$

このことは浮上現象が、相似に近い形で進行しており、初期高さの影響を受けることが少なく、従って浮上層内の圧密効果も少ないことを意味している。

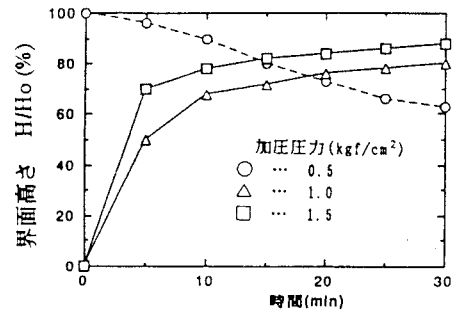


図9 加圧浮上③

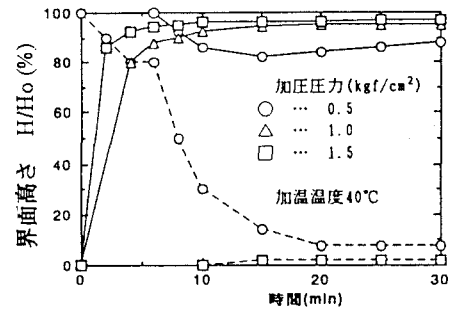


図10 加圧加温浮上④ (圧力の影響)

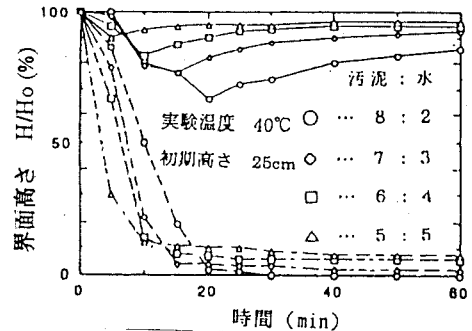


図11 加圧加温浮上④ (混合比の影響)

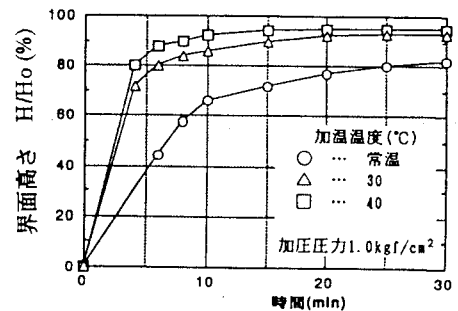


図12 加圧加温浮上④ (加温温度の影響)

図15は同様にRobertsの式⁴⁾(2)の適合性を調べたものである。

$$\frac{(H - H_{\infty})}{(H_0 - H_{\infty})} = \exp(-kt), \quad k = 0.087 \text{ min}^{-1} \quad (2)$$

ここに H_{∞} は時間 $t \rightarrow \infty$ のときの分離液部の高さである。この場合も実験値はほぼ(2)式で再現できる。このことは、本報告で検討した浮上濃縮過程が凝集体の干渉沈降と類似しており、いずれも相対密度差による粒子の移動現象と考えられる。実験開始時に与えられた(気泡発生のための)刺激により、微細気泡は浮上管内全域で、ほぼ同時に汚泥粒子周辺に発生して、浮上を進行させるものと予想される

図14, 15に示されていることは、今後浮上過程をより詳細に解析するときにもまず留意すべきことと考えられる。

3.2 浮上濃縮効果

以上の実験結果からまず余剰汚泥は炭酸ガスを溶存する水と混合することにより浮上濃縮が可能であり、その浮上効果を促進するためには、加圧状態で炭酸ガスを溶解させることや、浮上時に汚泥と水との混合液を加温することの有効性が確認された。そして、実用的条件としては、加温温度30～40℃、炭酸ガス溶解時の加圧圧力1.0kg/cm²程度が妥当と考えられる。

浮上に要する気体量について推算するため、濃度4000mg/lの余剰汚泥を1kgf/cm²の加圧水と1:1の比で混合し、20→30℃に加温する場合を考える。このとき、水1l中から溶存不能となって析出する炭酸ガス175mlすべてが、1l中の汚泥4000mgの浮上にすべて関与すると仮定すると、汚泥単位重量あたりの炭酸ガス量(気固比)は

$$175\text{ml}/4000\text{mg} = 0.044\text{ml}/\text{mg} = 0.089\text{g}(\text{CO}_2)/\text{g}(\text{SS})$$

となり、1gの汚泥を浮上させるのに約0.09gの炭酸ガス

が使用されることになる。仮にこのガス量の8割程度^{6), 6)}が実際の浮上に関与してとしても、通常の空気を用いた加圧浮上法の場合0.02～0.03g/gであることを考えると、2倍以上のガスを用いていることになる。今後は、より少量の発生ガスで浮上濃縮を行う方法やより高速の浮上方法の開発などを検討すべきであろう。

浮上した汚泥の水分率は、浮上開始前後の汚泥層の厚さと試料汚泥の初期濃度から推算が可能であり、初期高さ90cmの場合、初期濃度の約7倍(4000→28000mg/l)にまで濃縮された。この加温浮上汚泥は時間の経過とともに表面から水分が蒸発してさらに濃縮される。浮上分離液の固形分濃度(SS)は、浮上が順

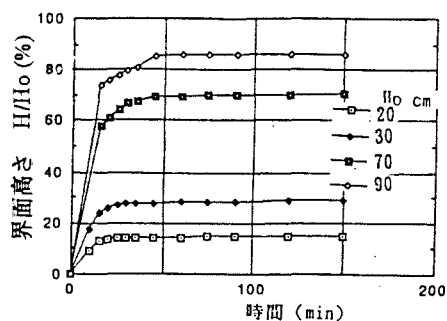


図13 加圧加温浮上④(初期高さの影響)

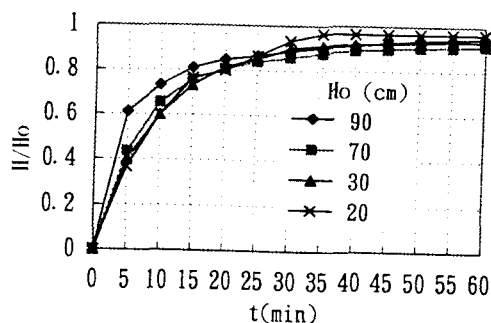


図14 浮上濃縮過程

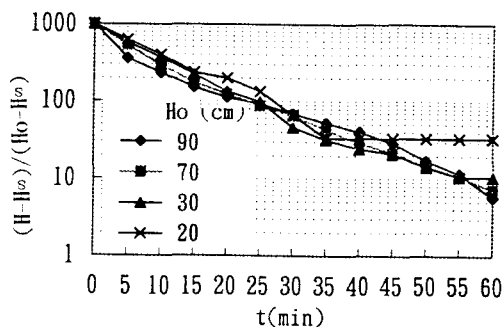


図15 浮上濃縮過程

調に進み浮上層の破壊などがない場合には、濁度計で感知できないほど非常に薄く肉眼でほぼ透明に見える状態であった。

汚泥の浮上速度を前述のように $80\text{cm}/30\text{min}=38.4\text{m}/\text{day}$ とすると、汚泥表面負荷は汚泥を炭酸ガス溶解水で倍に希釈していることを考慮すると $19.2\text{m}/\text{day}$ 、固形分負荷は初期汚泥濃度 $4000\text{mg}/\text{l}$ の場合

$$38.4 \times 0.004 \times 5 \times 1000 = 76.8\text{kg}/\text{m}^2/\text{day}$$

となる。この値は通常の加圧浮上の値 ($48 \sim 144\text{kg}/\text{m}^2/\text{day}^{41}$) と近い値である。

3. あとがき

炭酸ガスを水中に吹き込んで溶解させ、この水と余剰汚泥とを混合して浮上濃縮する方法について室内実験により検討した。本研究は、今日広く利用されている加圧浮上法の改良を目的としており、水中に溶存させる気体として空気の代わりに炭酸ガスを用いることを検討したものである。本研究で得られた結果としては

- (1) 炭酸ガス吹き込み水と余剰汚泥を混合して加温すると汚泥は浮上濃縮される。
- (2) 炭酸ガス吹き込み圧力は $1\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、加温温度としては $30 \sim 40^\circ\text{C}$ 程度が実用的な条件と考えられる。
- (3) 浮上速度は最高 $19.2\text{m}/\text{day}$ 、固形物表面負 $76.8\text{kg}/\text{m}^2/\text{day}$ 、汚泥濃縮率約7倍程度であった。

今回は、炭酸ガスによる浮上濃縮の可能性を調べ、現象の基本的な特性を明らかにすることが研究の目的であったが、今後はより効率的なガスの析出方法、装置のスケールアップ、浮上による分離液や濃縮汚泥の性状の測定、この操作の経済性の評価など実用化の面から検討を進める予定である。

なお、本研究の炭酸ガス分析には北九州市環境科学研究所アクア研究センターの協力を得ており、本研究の一部は同研究センターとの共同研究として行われたものである。また、九州工業大学技術補佐員香月亮、4年次生犬塚尚秀（現在：福岡県庁）、永見真二（現在：九工大院）の三君は実験に協力された。これらの方々に心からお礼を申し上げる。

参考文献

- (1) たとえば 理科年表、国立天文台編、PP.453-454,1997
- (2) 楠田哲也、平井孝明：浮上濃縮機構におけるシミュレーションモデル検討、第33回下水道研究発表会講演集、pp.778-780,1996
- (3) 楠田哲也、張 満良、平井孝明：フロス内気泡の形状から見た浮力の有効性、下水道協会誌論文集、Vol.28、No.334、pp.54-60、1991
- (4) 下水道ハンドブック、建設産業調査会、p.664,1982
- (5) 古賀誠司、楠田哲也、平井孝明：余剰汚泥の浮上濃縮に関する実験的研究、土木学会第44回年次学術講演会講演概要集、II-461、pp.992-993
- (6) 小池壮一郎：加圧浮上法による下水汚泥の濃縮、環境創造、'81年、12号、pp.121-125,1981