

『下水汚泥処理のための卵形消化タンク』とは SDGsを先見した古くて最先端のテクノロジ

開47 吉岡 民夫



著者略歴

1972年 オリエンタルコンクリート(株)(現オリエンタル白石(株))入社

1981年 ドイツ DYWIDAG社に卵形消化タンクの勉強のため企業研修

1995年 九州工業大学大学院設計生産工学専攻博士後期課程修了

学生時代は、学生運動や山登りに明け暮れ、ろくに勉強しませんでした。ドイツ語と云えば、Ich liebe dich. くらいしか覚えてなく、1980年7月末にベトナムから帰国すると、9月1日からドイツへ行けと言われ、

直ちにビザ申請をしましたが、ビザが出たのは12月末。それから約1年3カ月、ドイツのミュンヘン(最初の2カ月は近くのドイツ語学校)に滞在し、建設会社DYWIDAG社で技術研修しました。技術研修と言ってもほとんどはドイツ語の勉強で、当時「前」のドイツでは英語を話す人が少なく(ドイツ人はドイツ語に誇りを持っているので、当時は外国語を話したがる人が多かった)、ドイツ語ができないとドイツ人エンジニアとコミュニケーションができませんでした。たまたま日本びいきのドイツ人夫婦と知り合い、週末の多くは夫婦の家で過ごしました。それがとてもいいドイツ語の勉強になったと思います。ドイツ語と言っても、ミュンヘン周辺で話されているのはBairischで、ドイツ語の方です。標準語とはまるで違います。例えばFahren (Gehen) Wir. (英語のLet's go.)をパックマス(綴りは

分かりません)と言います。例の夫婦が面白半分にはBairischを私に教えたのですが、普通のドイツ語と違い会社で使うと、「そんな言葉どこで覚えたのだ」とドイツ人に驚かれ、「おらが国のドイツ語を話す初めての日本人」とあだ名され、みんなに覚えてもらい、大変得をしました。語学は弱いと思っていたのですが、必要に迫られると誰でもそれなりに習得できるようです。

1、卵(ら)形消化タンクとは？

写真1は鹿児島本線を福岡側から工大前に向かうとき、陣原駅を過



写真-1 北九州市皇后崎処理場卵形消化タンク

2、汚泥処理とは何か？

図1に示すように、下水処理で、いわゆる水処理と泥処理があります。処理場に入ってきた下水は、まず最初に沈殿池で静置され、汚れが沈殿し、その上澄み水が次の工程であるエアレーションタンク(曝気槽)に送られます。ここでは普通に河川や湖沼に存在する好気性のバクテリアを使い、下水に含まれている汚れ(有機物)を分解します(活性汚泥法と呼ばれます)。その後最終沈殿池に運ばれ、静置してその上澄み水を、多分最近ではさらに滅菌などの処理をして、自然環境に放出します。これが水処理工程です。最初沈殿池と最終沈殿池の残渣が、それぞれ最初沈殿池汚泥(初沈汚泥)、最終沈殿池汚泥(終沈汚泥、余剰汚

泥」と呼ばれ、泥処理工程に送られます。汚泥処理にはいろいろな方法があり、その一つが嫌気性消化です。汚泥と言っても98%は水で、まずは濃縮されます。濃縮には重力濃縮と機械濃縮があつて、汚泥の性質や使用する消化タンクのタイプに従って選択します。機械濃縮した場合、汚泥の粘性が上がるので、消化タンク

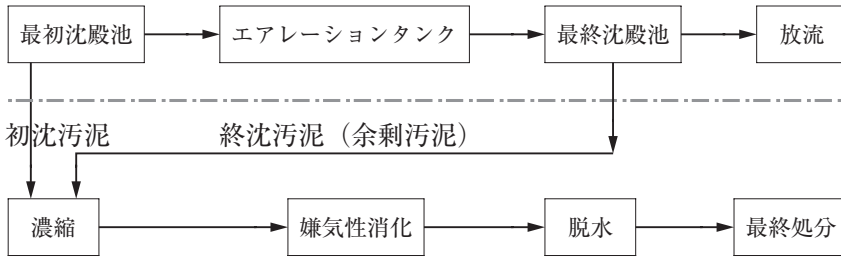


図-1 下水処理工程

嫌気性消化処理には多くの問題がありました。例えば図-2に示すような、ドーム屋根、シリンダー壁、底版で構成される従来型と呼ばれる消化タンクでは、消化タンクの運転中にタンク底に除去できない砂が溜まり、徐々に消化タンクの容量が減ってしまい、消化不良になると同時に、砂の除去に時間と費用が掛かります。

また、スカム（汚泥から発生するガスを含んで軽くなり、水面に浮上

はよく攪拌できる形状でなくてはなりません。濃縮された汚泥は消化タンクに送られ、そこで数カ月かけて残渣を嫌気性菌を用いて処理します。通常、中温菌と呼ばれる35℃で活発に活動する菌が使われます。そこで消化された汚泥は消化タンクの底に沈殿してくるので、底から吸い上げて、脱水工程に送ります。現在は汚泥の海洋投棄が禁じられているので、大切なことはできる限り最終処分する汚泥の量を減らすことです。よって、脱水した汚泥をさらに焼却して量を減らし、最終処分地へ運びます。

3、なぜ卵(たまご)形タンクか？

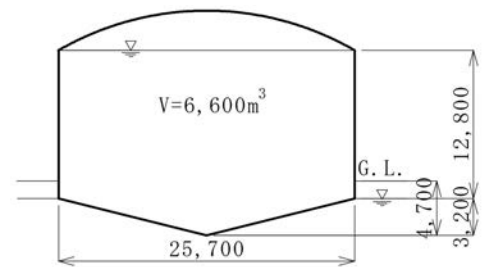


図-2 従来型消化タンクの例

したものの。時間がたつと硬化する)と呼ばれる堅い層が自由汚泥面になってしまい、消化効率が悪くなってしまう。

卵形消化タンクは、図-3に示すように、上下円錐と中間の曲線部からできており、砂は下部円錐の底まで落ちてくるので、そこに設置された排出管を通して、消化汚泥の排出

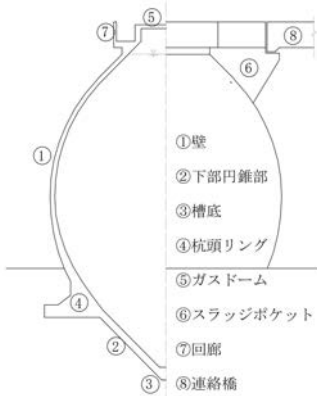


図-3 卵形消化タンクの形状

4、卵形消化タンクの形状決定

卵形消化タンクの形状は、全く自由決められます。通常は上下円錐部と中間の曲線部から成り、背の高い細身の物や、背の低いずんぐりむつくりの物も可能です。大切なことは、上述したように35℃の中温菌を用いるため、タンクの断熱が効率よくできることです。よって、容量に対してできるだけ表面積の小さな

時に槽外に排出されます。また、自由汚泥面が狭いので、スカムを簡単に除去できます。このように運転上の問題を解決できるだけでなく、その形状の特性から、汚泥消化で重要な攪拌を効率よく行うことができます。消化タンクで重要なことは、隅々まで攪拌して、汚泥とバクテリアをよく接触させることです。特に余剰汚泥は質が悪いので、機械濃縮することが重要ですが、そうすると汚泥の粘性が上がって、従来型のようなタンクではうまく攪拌できなくなります。その点、卵形消化タンクはその形状から、ガスドーム(図-3参照)に設置した攪拌機1台で、全体をよく攪拌することができます。

ものを選択すべきです。また、後述しますが我が国では軟弱地盤に建設することが多いので、杭基礎が必要になり、十分な数の杭を使えなくてはなりません。

卵形消化タンクの最適形状を決定するのに Popei は以下の式を示しました。

$$R = 0.881xV^{1/3}$$

$$D = 1.183xV^{1/3}$$

$$H = 1.721xV^{1/3}$$

ここに R：曲線部の曲率半径 (m)、D：タンク赤道直径 (m)、H：全高 (m)

今、 $H/D = 1.5$ として形状を決定すると、Popei の式で計算した結果と概ね一致します。

5、卵形消化タンクの基礎 (杭基礎)

卵形消化タンクはドイツで開発され、世界に普及しました。ドイツでは河川の流域に処理場が建設される場合が多いので、概して地盤は強固で、杭基礎を用いなくても良い場合が多くあります。また特に大きな地震も確認されていません。一方、我が国では海岸の埋立て地に処理場が

建設される場合が多く、一般に埋立て地は軟弱地盤で、大きな地震にも襲われるので、杭基礎を必要とします。十分な杭が使えるだけの基礎(杭頭リング、図-3参照④)が必要です。

卵形消化タンクは滑らかな曲線のシェル構造なので、一般に応力集中は発生しにくい構造です。しかし、杭頭リングを設置すると、その周辺で応力集中が発生し、大きな引張応力が発生します。そこでプレストレストコンクリートの技術を用いて、円周方向および経線方向に配置された高張力鋼を用いて、プレストレスを導入し、その引張応力に対抗します。

6、卵形消化タンクの設計 (軸対称構造)

卵形消化タンクは軸対称構造物なので、軸対称の荷重(水圧、自重など)が作用する範囲では、本来3次元構造ですが、2次元構造として解析することができます。円筒シェル構造が、弾性床上の梁に置き換えて2次元問題として解決できるのと同じです。図-4に示すように、卵形タンクを縦にある角度で切り出し、円周方向の剛性に相当するばねを設

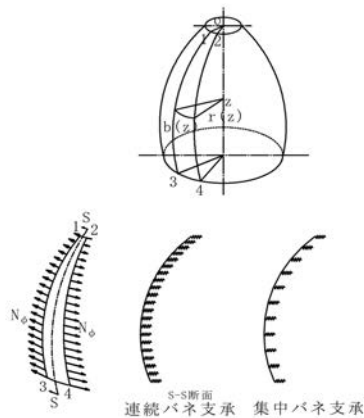


図-4 構造モデル

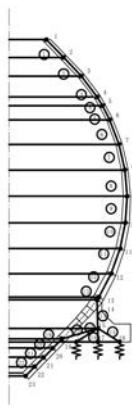


図-5 平面骨組みモデル

けてやれば、平面骨組み問題として解析できます。経線方向の部材剛性は、切り出した部材の剛性を用います。具体的な解析モデルとしては、図-5に示すような平面骨組みモデルで解析できます。ばねの代わりに、それに相当する水平部材を設けます。ただし、地震時の荷重のように軸対称ではない荷重、即ち逆対称の荷重が作用する場合には、有限要素法などをを用い、円周方向に荷重と変位をフリー展開して、地震時応力を求める必要があります。

7、卵形消化タンクの耐震設計 (動液圧算定法)

卵形消化タンクを我が国に導入する場合、最大の問題は耐震性でした。一見、地震に対して卵形タンクは不安定そうに見えます。この問題を解決するためには、地震時どのような力(慣性力)がタンクにかかるかを知ることでした。そのためには、いわゆる地震時動液圧を知る必要があります。そこで、当時開発土木工学科の高西先生に相談して、卵形消化タンクの地震時動液圧を計算する方法の研究と、その結果を検証するために、小さな模型で振動台を用いて実験を行いました。地震時動液圧には、地震の短周期成分に応答する衝撃圧(バルジング)と長周期成分に応答する振動圧(スロッシング)があります。後者は自由表面の波立ちに起因するもので、直径の大きな石油タンク等では問題になりますが、卵形タンクは自由液面が小さいので、実務設計上問題となることはありません。地震時動液圧の計算は、当時九州工大の卒業生である上智大学・

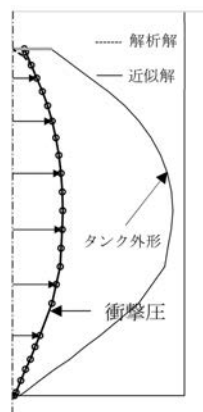


図-6 地震時衝撃圧

曾我部潔先生の博士論文を参照させていただきました。伝達マトリックスを用いる方法で、その数値計算結果の一例を図-6に示します。破線の解析解では理論通り自由表面で0になっています。図中の実線(近似解)は以下の式で計算したものです。

$$p = \gamma \cdot K_H \cdot R_i$$

γ: 汚泥の短体積重量、 K_H : 設計深度、 R_i : 半径

自由表面近傍の僅かな部分で理論値と異なるだけです。そこで、実務設計としては近似解を用いて設計しても問題ないと判断しました。

8、卵形消化タンクの施工 (RSB)

一見、コンクリート卵形消化タンクの施工は困難なように見えます。我が国に導入した当時は、長さ

1.5m程度ずつコンクリートを打設して行く、ドイツで初期に行われていたのと同じ方法で施工していました。この場合、足場を別に設置しなくてはなりません。横浜市北部汚泥処理センターには、6,800 m³の卵形消化タンクが12基あります。ここでは特殊な自走式足場を用いましたが、通常このような大規模な工事はめつたにないので、小規模の工事でも経済性のある簡便な足場が必要でした。そこで、専門雑誌に卵形消化タンク用の型枠(足場込み)が紹介されていたので、連絡を取り、我が国で実用化できるかを検討しました。RSB (Rund Stahl Bau) というオーストリアの会社で、写真1-2に示すように、卵形タンクの地上部を2回に分けて打設する方法です。卵形タンクは、容量も形状もその都度異なるので、このような方法ではコストがかさむのではと危惧されましたが、I型鋼を上手に繰り返し使い、それぞれの容量や形状に合った型枠を提供してくれました。材料費はやはり他の型枠より高いのですが、工期が短縮されるので、結果経済的と考えられ、実用的であると判断しました。



写真-2 RSB 型枠

最初の使用は、京都府洛南処理場で、その後は多用されています。

9、卵形消化タンクの 長期的経済性

卵形消化タンクは、その形状の特性から、どうしても初期建設費が

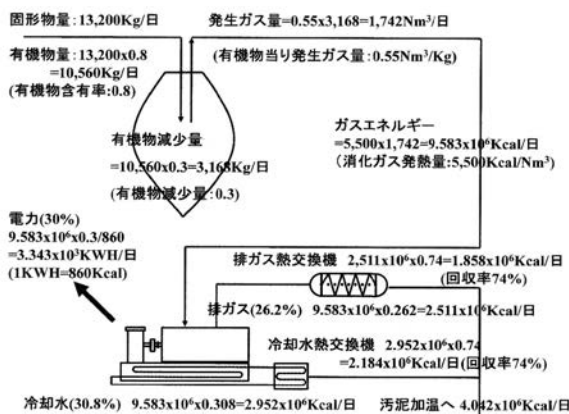


図-7 コージェネレーション

上昇してしまいます。確かに、運送上のメリットもありますが、我が国ではなかなか初期建設コストが高いものを選択することはできません。そこで、運転コストや消化ガス発電で得られる電力などを総合的に判断して、長期的な経済性を検討してみました。図-7に消化ガス発電のエネルギー収支の一例を示します。消化タンクから得られる消化ガスをガス発電タービンに投入して発電し、その電力は処理場内で用いたり売電したりできます。ガス発電タービンから出る排気ガスからもエネルギー

を回収し、さらには発電タービンを冷却した冷却水からもエネルギーを回収し、35℃に汚泥の温度を上昇させるために利用します。

図-8は、3つのシステムで長期的経済性を比較したため、SYS1は従来型の消化タンクを用いた場合、SYS2は卵形消化タンクを用いるが濃縮をすべて重力濃縮によるもので、SYS3は卵形消化タンク+余剰汚泥の機械濃縮を行うものです。考慮した費用は、(a)濃縮プロセスの土木建設費、機械設備費および運転維持費、(b)消化プロセスの土木建設費、攪拌動力費、エネルギー費および浚渫費（従来型で底に溜まった砂の除去

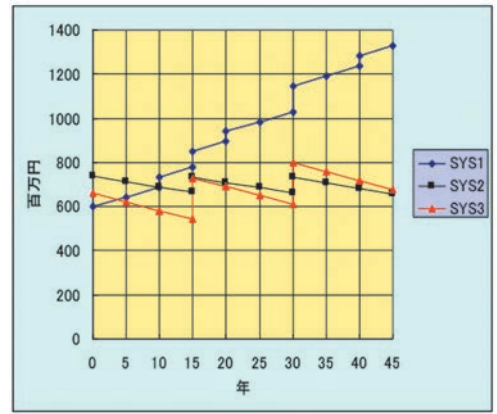


図-8 長期的経済性の比較

表-1 コスト比較

	SYS1	SYS2	SYS3
消化タンクの初期建設費	1.00	1.34	0.97
濃縮プロセスの初期建設費	1.00	1.00	1.38
濃縮および消化プロセスの建設コスト	1.00	1.23	1.11
45年間の土木工事および機械設備費	1.00	1.19	1.41
45年間の運転・維持管理費	1.00	-0.37	-0.59
45年間の総投入資金	1.00	0.50	0.52

費)です。表-1にそれぞれ従来型のタンクのコストを1.0とした場合の比率を示しています。45年間の運転・維持管理費が卵形タンクでマイナスになっているのは、消化ガス発電により得られた利益です。汚泥の量は濃縮によって減じることができ、初期タンク建設費は機械濃縮を導入して容量を小さくしたSYS3(卵形消化タンク容量=4,160 m³)が1番安く、SYS1(従来型タンク容量=6,600 m³)が2番で、重力濃縮だけのSYS2(卵形タンク容量=6,600 m³)が一番高くなっています。濃縮および消化プロセス初期建設コ



写真-3 横浜市北部汚泥処理センター

10、おわりに

我が国では、例えば、構造は構造

ストの合計は、SYS1が最も安く、SYS3が2番です。
 図-8では45年間の費用の変動を見ることが出来ます。ただし、この計算に用いた単価は相当古いものなので、このまま現時点に適用することとはできません。SYS3では、15年ごとに機械濃縮設備費が大きくかかっています。最終的には、卵形消化タンクを用いたSYS2とSYS3は45年後にほぼ同じで、従来型タンクを用いたSYS1と比べて、相当経済的になっています。

屋、施工は施工屋、処理は処理屋と縦割りになってしまうことが多々あります。これからの工学は、分野を超えたトータルエンジニアリングが重要になると思われまますので、ひとつの例として示しました。
 春山哲也先生編著の「SDGsと化学元素循環からのアプローチ」(丸善)に、「下水汚泥の嫌気消化」がSDGsの一つの可能性として示されています。卵形消化タンクを用いた下水汚泥の嫌気消化がSDGsの一翼となり得ることを期待します。