令和4年度

千葉市・大学等共同研究事業

成果報告書

千葉市南部浄化センターにおける 消化ガス活用の最適化について

千葉市南部浄化センター 千葉大学熱流体エネルギー学研究室

要約

目的:

消化ガス発生量を増大させようとすると維持管理コストが増加するなどの課題があり、 下水汚泥が持つポテンシャルを十分に活用しきれていない状況がある.

本研究では,温室効果ガスの削減をより重要な課題と位置づけ,維持管理コストとのバラ ンスを考慮しながらも,消化ガスをより有効的に活用することを検討し,地球温暖化対策を 推進していく.

研究調查方法:

南部浄化センターの現状分析を目的として,消化槽の仕様,各種測定データに基づく汚泥 消化槽内の数値流体解析(Computational Fluid Dynamics, CFD)を実施した.汚泥消化槽 内の CFD により流れ場及び温度場の可視化を行い,攪拌・加温方法の評価を行った.また, 加熱部の配置を消化槽の上面,下面,または側面として温度分布に与える影響を調査し,汚 泥の均一な温度制御による消化ガス活用の最適化について検討した. 結果:

流速及び温度分布の可視化結果より,消化槽内の汚泥はインペラの撹拌によって中央部 で下方へ,側壁に沿って上方へ流動を始め,数百秒オーダーでほぼ定常的な流速及び温度分 布が形成されることが確認された.消化槽内の汚泥に生じる温度差は概ね0.1℃以内と小さ く,インペラの撹拌によって汚泥の温度は均一に保たれていることが確認された. 考察:

加熱面の配置によっては,消化槽内の汚泥に局所的な温度上昇が確認された.温度上昇の 部位は,消化槽内に形成された流れの遅いよどみ領域と対応していると考えられた.また, 局所的な温度の上昇については,加熱面を下面加熱では環状面,側面加熱では下半面とする ことにより抑制されることも確認された.

政策提言:

本研究では,消化槽内の汚泥の攪拌・加温状態の評価のために CFD シミュレーションを 提案した.今後,消化槽内の流動攪拌状態のシミュレーションにとどまらず,消化ガス発 生,消化ガス発電,余剰ガス燃焼,焼却炉補助燃料,加温施設燃料など,消化ガスを無駄 なく効率的に利用するための各種プロセスへとシミュレーションの対象を拡張することに より,現状の消化ガス発電の稼働率,消化ガス発電設備増設の可能性などについて検証が 可能と考えられる.

Ħ	$\gamma \rightarrow$
日	1 ¹ 人

1 目的
2) 研究調査方法 ····································
2.1 数値流体解析(CFD)モデル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2
2.2 数值解析方法 •••••••• 3
2.2.1 流れの支配方程式 ······ 3
2.2.2 流動解析(Case A) •••••• 4
2.2.3 熱流動解析(Case B,C)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7
2.2.4 インターフェース ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7
2.2.5 解析条件 •••••• 8
2.2.6 境界条件 •••••• 8
3. 結果 ······ 10
3.1 加熱無し(Case A)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・10
3.2 加熱有り(Case B)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・17
3.2.1 上面加熱 ・・・・・・ 17
3.2.2 下面加熱 ・・・・・ 23
3.2.3 側面加熱 ・・・・・ 29
3.3 改善案の検討(Case C)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 35
3.3.1 下面加熱, 攪拌無し(自然対流) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 35
3.3.2 下面加熱(環状面)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 40
3.3.3 側面加熱(下半面)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 47
4. 考察 ···································
5. 政策提言
参考文献
共同研究者(執筆者)一覧 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・.56

行政課題として 2020 年 10 月に「2050 年カーボンニュートラルの実現」が国から施策と して打ち出され、同年 11 月に発出された「千葉市気候危機行動宣言」においても、2050 年 の二酸化炭素排出量実質ゼロを目指すとしている.

また,2021 年 6 月に示された「地域脱炭素ロードマップ」(国・地方脱炭素実現会議) においては,廃棄物処理や下水処理により得られる電気,熱,CO₂,バイオガス等の活用拡 大が記述されている.

千葉市南部浄化センターでは、下水処理場の運転操作条件の変更や間欠運転の実施、設備 や機器の更新等にあわせた省エネ型機器の導入などの電力使用量削減の取り組みに加え、 汚泥の処理過程で発生する消化ガスを重油の代替燃料や発電燃料として活用することによ り、温室効果ガス排出の削減に努めてきた.

消化ガス発生量を増大させようとすると維持管理コストが増加するなどの課題があり, 下水汚泥が持つポテンシャルを十分に活用しきれていない状況がある.

本研究では、温室効果ガスの削減をより重要な課題と位置づけ、維持管理コストとのバラ ンスを考慮しながらも、消化ガスをより有効的に活用することを検討し、地球温暖化対策を 推進していく.

2. 研究調查方法

南部浄化センターや地域の特性を踏まえた,消化ガス活用の最適化による地球温暖化対 策への寄与に関する研究として,南部浄化センターの現状分析,改善点の抽出,改善提案, 適用可能な新技術等の調査,提案を行った.

南部浄化センターの現状分析を目的として,消化槽の仕様,各種測定データに基づく汚泥 消化槽内の数値流体解析(Computational Fluid Dynamics, CFD)を実施した.消化槽内で は汚泥を中温発酵温度(35℃前後)に加温しながら攪拌することで,嫌気性細菌の働きによ り汚泥中の有機分が水とガスに分解される.汚泥消化槽内のCFDにより,現状における流れ 場及び温度場の可視化を行い,攪拌・加温方法の評価を行った.

改善点の抽出,改善案の提案を目的として,消化槽内の加熱方法をパラメータとした CFD を行い,汚泥の均一な温度制御による消化ガス活用の最適化について検討した.改善案に基づき,新技術等導入について検討を行った.

2.1 数値流体解析 (CFD) モデル

消化槽及びインペラの3Dモデルは、千葉市南部浄化センターの資料を参考に、3D CAD ソフトウェア(Inventor, Autodesk)を用いて作製した. 消化槽の2D図面を図2.1, 3Dモデルの俯瞰図を図2.2, インペラ形状を図2.3 に示す. 消化槽は内径21 m×水深24 m, 容量6,200 m³である. インペラ枚数は、消化槽上部で2枚、中部及び下部で3枚とした.



図 2.1 消化槽の 2D 図面



図 2.2 消化槽の 3D モデル



2 权羽根 (b) 3 权名 図 2.3 インペラ形状

2.2 数值解析方法

2.2.1 流れの支配方程式

,××

消化槽内の流体の挙動を調査するため、3 次元レイノルズ平均ナヴィエ・ストークス (RANS)方程式を基に、商用熱流体解析コード STAR-CCM+ (Siemens PLM software)を使用して CFD シミュレーションを行った.

消化槽内の流れが層流か乱流かを検討するために,粘性力と慣性力の比で表される無次 元数である攪拌レイノルズ数 *Re*を計算した. *Re*は式(1)で定義され,一般に*Re* < 50では層 流, *Re* > 1,000では乱流とされる.

$$Re = \frac{\pi d^2 n}{\nu} \tag{1}$$

消化槽内のインペラの直径 d,回転数 n 及び汚泥の動粘度v とそれらより算出した Re を 表 2.1 に示す.表 2.1 より, Re は約 46,000 となることから,消化槽内の流れは乱流である と仮定した.

乱流をモデリングするために, RANS の Shear Stress Transport (SST) k-ω モデルを用 いた.

表 2.1 撹拌レイノルズ数

	Representative	$n [s^{-1}]$	d [m]	ν [m ² /s]	Re [-]
1	消化槽	0.187	3.3	0.00014	45697

本研究では、加熱を考慮せずインペラ攪拌による流動のみの解析(Case A),インペラ攪拌 とともに上面、下面、あるいは側面のいずれかより加熱する流動及び温度の解析(Case B) を行った.また、改善案の検討のために、インペラ攪拌無しで下面加熱のみ、さらにインペ ラ攪拌とともに加熱面形状を変更した場合の流動と温度の解析(Case C)を行った.

2.2.2 流動解析(Case A)

シミュレーションにおける流れの支配方程式を,式(2)~(6)に示す.式(2)は連続の式,式(3)はレイノルズ平均を施した Navier-Stokes 方程式,式(4)は渦粘性係数の式,式(5)は 乱流運動エネルギーkの輸送方程式,式(6)は散逸率 ω の輸送方程式である.

$$\nabla \cdot (\rho \overline{\nu}) = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial \overline{\boldsymbol{\nu}}}{\partial t} + (\overline{\boldsymbol{\nu}} \cdot \boldsymbol{\nabla})\overline{\boldsymbol{\nu}} = -\frac{1}{\rho} \boldsymbol{\nabla} \overline{\boldsymbol{p}} + (\boldsymbol{\nu} + \boldsymbol{\nu}_t) \Delta \overline{\boldsymbol{\nu}} + f_g$$
(3)

$$v_t = kT \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \overline{\nu}) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k] + P_k - \rho \beta^* f_{\beta^*}(\omega k - \omega_0 k_0)$$
(5)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \nabla \cdot (\rho\omega\overline{\nu}) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_{\omega}\mu_t)\nabla\omega] + P_{\omega} - \rho\beta f_{\beta}(\omega^2 - \omega_0^2)$$
(6)

ここで、Tは乱流の時間スケール、 ω は単位乱流運動エネルギーあたりの散逸率、 σ_k 及び σ_ω はモデル係数、 P_k 及び P_ω は生成項、 f_{β^*} は自由せん断修正係数、 f_{β} は渦伸縮修正係数、 ω_0 及

び k_0 は境界乱流値を示す. f_g は浮力項を示す.

また、(3)に現れる f_g は次の式で表される. ρ は密度、 ρ_{ref} は基準密度を示す.

$$f_g = (\rho - \rho_{ref}) * g \tag{7}$$

式(4)中に現れる Tは、以下の式で表される.

$$T = min\left(\frac{1}{\omega}, \frac{0.31}{SF_2}\right) \tag{8}$$

ここで、ブレンド関数F₂は、以下の式で表される.

$$F_{2} = tanh\left(\left(max\left(\frac{2\sqrt{k}}{0.09\omega d}, \frac{500\nu}{d^{2}\omega}\right)\right)^{2}\right)$$
(9)

ブレンド関数F2中の平均ひずみ速度テンソルの係数Sは、以下の式で表される.

$$S = |S| = \sqrt{2S} \cdot S^T = \sqrt{2S} \cdot S \tag{10}$$

ここで、平均ひずみテンソル Sは、以下の式である.

$$\boldsymbol{S} = \frac{1}{2} \left(\boldsymbol{\nabla} \overline{\boldsymbol{\nu}} + \boldsymbol{\nabla} \overline{\boldsymbol{\nu}}^T \right) \tag{11}$$

式(2)~(10)中に現れるモデル係数の一覧を表 2.2 に示す.

Modeling	Value
coefficient	
β	$F_1\beta_1 + (1-F_1)\beta_2$
eta_1	0.075
β_2	0.0828
eta^*	$F_1\beta_1^* + (1-F_1) \beta_2^*$
${eta_1}^*$	0.09
${eta_2}^*$	0.09
σ_k	$F_1\sigma_{k_1}+(1-F_1)\sigma_{k_2}$
σ_{k_1}	0.85
σ_{k_2}	1.0
σ_ω	$F_1\sigma_{\omega_1} + (1-F_1)\sigma_{\omega_2}$
σ_{ω_1}	0.5
σ_{ω_2}	0.856

表 2.2 SST k-ω 乱流モデルのモデル係数

表 2.2 中に現れるブレンド関数 F_1 は、係数の壁面近傍における寄与と、壁面から離れた 場所での値を組み合わせており、以下の式で表される.

$$F_{1} = tanh\left(\left[min\left(max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega d}, \frac{500\nu}{d^{2}\omega}\right), \frac{2k}{d^{2}CD_{k\omega}}\right)\right]^{4}\right)$$
(12)

ここで、 $CD_{k\omega}$ は相互拡散係数であり、以下の式で表される.また、式(11)の dは壁面までの距離である.

$$CD_{k\omega} = max \left(\frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega, 10^{-20}\right)$$
(13)

式(5), (6)の P_k 及び P_ω は生成項であり、以下の式で表される.

$$P_k = G_k + G_{nl} + G_b \tag{14}$$

$$P_{\omega} = G_{\omega} + D_{\omega} \tag{15}$$

ここで、 G_k は乱流生成項、 G_b は浮力生成項、 G_{nl} は非線形生成項、 G_{ω} は比散逸生成項、 D_{ω} は相互拡散項であり、それぞれ以下の式で表される.

$$G_k = \mu_t f_c S^2 - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \bar{\nu} - \frac{2}{3} \mu_t (\nabla \cdot \bar{\nu})^2$$
(16)

$$G_b = \beta \frac{\mu_t}{Pr_t} (\nabla \bar{T} \cdot g) \tag{17}$$

$$G_{nl} = (T_{RANS,NL}): \nabla \bar{\nu}$$
⁽¹⁸⁾

$$G_{\omega} = \rho \gamma \left[\left(S^2 - \frac{2}{3} \left(\nabla \cdot \bar{v} \right)^2 \right) - \frac{2}{3} \omega \nabla \cdot \bar{v} \right]$$
(19)

$$D_{\omega} = 2\rho(1 - F_1)\sigma_{\omega_2} \frac{1}{\omega}\nabla k \cdot \nabla \omega$$
⁽²⁰⁾

ここで、 f_c は曲率補正係数、 β は熱膨張係数、Prは乱流プラントル数、 T_{RANS} は非線形の構成関係である.

2.2.3 熱流動解析 (Case B,C)

加熱時の温度分布の解析を行うため,流体内のエネルギー方程式を追加する.加熱面にお ける壁面温度は汚泥の中温発酵温度を考慮して 37℃とした.温度変化による浮力の計算に は重力項の中でのみ密度を変数として扱うブシネスク近似を用い,自然対流のシミュレー ション結果の収束性を高めた.また,渦粘性モデルは,分子の勾配拡散プロセスと,乱流運 動間のアナロジーに基づいている.渦粘性µtの概念によって,応力テンソルは平均流の物理 量の関数としてモデル化され,以下の式(21)で表される.

$$T_{RANS} = 2\mu_t \ S - \frac{2}{3}(\mu_t \nabla \cdot \bar{\nu}) I$$
⁽²¹⁾

ここで、Sは平均ひずみ応力テンソル、 vは平均速度、Iは恒等テンソルである.

2.2.4 インターフェース

インペラの回転を模擬するため,消化槽内を回転領域と静止領域に分けて解析を行った. また,質量及びエネルギー量が適切に移動するように,回転領域と静止領域との間にインタ ーフェースを設定した.インターフェースの位置を図 2.4 に示す.



2.2.5 解析条件

空間の離散化には有限体積法を用い,対流項は2次精度風上差分,速度と圧力のカップリ ングには SIMPLE 法を用いた.時間項は1次精度オイラー陰解法とした.STAR-CCM+における 物理連続体の設定としては,3次元陰解法非定常解析,分離型流れ,液体,乱流とし,イタ レーションの最大回数は5回とした.作動流体は密度,粘度,比熱及び熱伝導率を33℃の 汚泥と同等のものとした.

解析に用いた計算メッシュは、ポリヘドラルメッシュとプリズムレイヤーメッシュである.メッシュの基準サイズは1m、プリズムレイヤーメッシュは基準サイズの三分の一で2 層とした.セル数は420,000 個である.また、インペラ近傍のメッシュの基準サイズは25 mm とした.

シミュレーションは, ワークステーション PC(HP Z2 Tower G5 Workstation, UNI-XW246mini)を用いて行った.

2.2.6 境界条件

本研究では、加熱無しと有りの境界条件で解析を行った.解析条件を表 2.3、境界条件を 2.4 に示す.

汚泥濃度	2.5 %
粘度	150 cP
密度	1050 kg/m^3
比熱	3927.48 J/(kg•K) *
熱伝導率	0.620271 W/(m·K) *
液高	24,430 mm (HWL)
初期温度	33 °C

表 2.3 解析条件

* 参考文献(1)(2)から引用

表 2.4 境界条件

インペラ回転数	11.2 rpm
消化槽壁面	滑りなし条件
インペラ壁面	滑りなし条件
加熱面温度	37 °C

本研究では、消化槽の上面、下面、または側面に温度差を与えることにより、加熱面の配置が温度分布に及ぼす影響を調べた.上面、下面、側面の位置は図 2.5 の赤で示した部分であり、温度は 37℃とした.また、灰色の部分は汚泥の初期温度に等しい 33℃とした.本解析では、図 2.6 に示す 15 点において流速及び温度の時系列変化の確認を行った.



, ×



図 2.6 流速・温度の経時変化の確認位置(1~15 箇所)

3.1 加熱無し (Case A)

図 3.1 に,図 2.6 に示す位置 1~15 における加熱無しの場合の流速の時系列変化を示す. 各位置の流速は,200 秒前後で時間によらず一定となる傾向が確認された.



図 3.1 消化槽内各位置における流速の時系列変化(加熱無し)

図 3.2, 3.3, 3.4に、中心軸を通る断面内の流速分布のコンター図を 50 秒ごとに 200 秒 まで示す. それぞれの図でコンターの範囲は、0~0.1 m/s、0~0.3 m/s、0~0.7 m/s とした.



Solution Time 50 (s) Time Step 5 Iteration 25



(a) 50 秒



Solution Time 100 (s) Time Step 10 Iteration 50



(b) 100 秒



Solution Time 150 (s) Time Step 15 Iteration 75



(c) 150 秒



(d) 200 秒

図 3.2 流速分布(加熱無し, 0~0.1 m/s)



Solution Time 50 (s) Time Step 5 Iteration 25



(a) 50 秒



Solution Time 100 (s) Time Step 10 Iteration 50



(b) 100 秒



Solution Time 150 (s) Time Step 15 Iteration 75



0.3

(c) 150 秒



(d) 200 秒

図 3.3 流速分布(加熱無し, 0~0.3 m/s)



Solution Time 50 (s) Time Step 5 Iteration 25



(a) 50 秒



Solution Time 100 (s) Time Step 10 Iteration 50



(b) 100 秒



Solution Time 150 (s) Time Step 15 Iteration 75



(c) 150 秒



Solution Time 200 (s) Time Step 20 Iteration 100



(d) 200 秒

図 3.4 流速分布 (加熱無し, 0~0.7 m/s)

3.2 加熱有り (Case B)

3.2.1 上面加熱

図 3.5 に,図 2.6 に示す位置 1~15 における上面加熱の場合の流速及び温度の時系列変化を示す.各位置の流速及び温度は 300 秒前後で時間によらず一定となる傾向が確認されたが,上面中央部の位置 6 のみ局所的な温度の上昇が確認された.



図 3.5 消化槽内各位置における流速及び温度の時系列変化(上面加熱)

図 3.6, 3.7 に,中心軸を通る断面内の流速及び温度分布のコンター図を 60 秒ごとに 300 秒まで示す.流速及び温度のコンターの範囲は,それぞれ 0~0.3 m/s, 33~33.1 ℃とした.



(b) 120 秒



(c) 180 秒



Solution Time 240 (s) Time Step 24 Iteration 120



(d) 240 秒



(e) 300 秒

図 3.6 流速分布(上面加熱, 0~0.3 m/s)







図 3.7 温度分布(上面加熱, 33~33.1 ℃)

3.2.2 下面加熱

図 3.8 に,図 2.6 に示す位置 1~15 における下面加熱の場合の流速及び温度の時系列変化を示す.各位置の流速及び温度は、300秒前後で時間によらず一定となる傾向が確認された.また、下面中央付近の位置 15 などでは局所的な温度の上昇も確認された.



(b) 温度

図 3.8 消化槽内各位置における流速及び温度の時系列変化(下面加熱)

図 3.9, 3.10 に,中心軸を通る断面内の流速及び温度分布のコンター図を 60 秒ごとに 300 秒まで示す.流速及び温度のコンターの範囲は,それぞれ 0~0.3 m/s, 33~33.1 ℃とした.



(b) 120 秒



(c) 180 秒



Solution Time 240 (s) Time Step 24 Iteration 120



(d) 240 秒



(e) 300 秒

図 3.9 流速分布 (下面加熱, 0~0.3 m/s)







図 3.10 温度分布 (下面加熱, 33~33.1 ℃)

3.2.3 側面加熱

図 3.11 に,図 2.6 に示す位置 1~15 における側面加熱の場合の流速及び温度の時系列変化を示す.各位置の流速及び温度は、300秒前後で時間によらず一定となる傾向が確認された.また、消化槽の上部隅付近の位置 9 などで、局所的な温度の上昇が確認された.



(b) 温度

図 3.11 消化槽内各位置における流速及び温度の時系列変化(側面加熱)

図 3.12, 3.13 に、中心軸を通る断面内の流速及び温度分布のコンター図を 60 秒ごとに 300 秒まで示す. 流速及び温度のコンターの範囲は、それぞれ 0~0.3 m/s, 33~33.1 ℃と した.



(b) 120 秒



Solution Time 180 (s) Time Step 18 Iteration 90



(c) 180 秒



Solution Time 240 (s) Time Step 24 Iteration 120

Velocity: Magnitude (m/s) 0.15

0.3

(d) 240 秒



(e) 300 秒

図 3.12 流速分布 (側面加熱, 0~0.3 m/s)







図 3.13 温度分布 (側面加熱, 33~33.1 ℃)

3.3 改善案の検討 (Case C)

3.3.1 下面加熱, 攪拌無し(自然対流)

図 3.14 に,浮力により発生する自然対流の影響について検討するため,下面加熱,攪拌 無しの条件で解析を行った場合の流速及び温度の時系列変化を示す.各位置の流速及び温 度の時間変化は攪拌有りの場合と比較して遅く,20日前後で安定する傾向が確認された. また,温度変化には安定後に直線的な上昇が観察された.



図 3.14 消化槽内各位置における流速及び温度の時系列変化(下面加熱, 攪拌無し)

図 3.15, 3.16 に,中心軸を通る断面内の流速及び温度分布のコンター図を 20 日まで 5 日 ごとに示す. 流速及び温度のコンターの範囲は,それぞれ 0~0.05 m/s, 33~33.1 ℃とし た.



Solution Time 432000 (s) Time Step 5 Iteration 25







(b) 10 日



0.05



(d) 20 日

図 3.15 流速分布(下面加熱, 攪拌無し, 0~0.05 m/s)





図 3.16 温度分布 (下面加熱, 攪拌無し, 33~33.1 ℃)

3.3.2 下面加熱(環状面)

下面加熱時の局所的な温度上昇を防ぐための対策として,図 3.17 に赤色で示す環状面で 加熱を行った.



図 3.17 加熱面の位置

図 3.18 に、下面加熱(環状面)の場合の流速及び温度の時系列変化を示す.各位置の流 速及び温度は、300秒前後で時間によらず一定となる傾向が確認された.また、局所的な温 度上昇はほとんど確認されず、比較的均一な温度分布となっていることが確認された.





(b) 温度



図 3.19, 3.20 に、断面内の流速及び温度分布のコンター図を 60 秒ごとに 300 秒まで示 す. 流速及び温度のコンターの範囲は、それぞれ 0~0.3 m/s, 33~33.1 ℃とした.



(b) 120 秒



Solution Time 180 (s) Time Step 18 Iteration 90



(c) 180 秒



Solution Time 240 (s) Time Step 24 Iteration 120



(d) 240 秒



(e) 300 秒

図 3.19 流速分布(下面加熱(環状面), 0~0.3 m/s)







図 3.20 温度分布 (下面加熱 (環状面), 33~33.1 ℃)

3.3.3 側面加熱(下半面)

側面加熱時の局所的な温度上昇を防ぐための対策として,図 3.21 に赤色で示す下反面で 加熱を行った.



z x

図 3.21 加熱面の位置

図 3.22 に,側面加熱(下半面)の場合の流速及び温度の時系列変化を示す.各位置の流 速及び温度は,300秒前後で時間によらず一定となる傾向が確認された.また,局所的な温 度上昇はほとんど確認されず,比較的均一な温度分布となっていることが確認された.



(b) 温度



図 3.23, 3.24 に、断面内の流速及び温度分布のコンター図を 60 秒ごとに 300 秒まで示 す. 流速及び温度のコンターの範囲は、それぞれ 0~0.3 m/s、33~33.1 ℃とした.



(b) 120 秒



Solution Time 180 (s) Time Step 18 Iteration 90



(c) 180 秒



Solution Time 240 (s) Time Step 24 Iteration 120

0	Velocity: Magnitude (m/s) 0.15		

(d) 240 秒



(e) 300 秒









図 3.24 温度分布 (側面加熱 (下半面), 33~33.1 ℃)

4. 考察

流速及び温度分布の可視化結果(図3-6)より,消化槽内の汚泥はインペラの撹拌に よって中央部で下方へ,側壁に沿って上方へ流動を始め,数百秒オーダーでほぼ定常的な流 速及び温度分布が形成されることが確認された.このとき,消化槽内の汚泥に生じる温度差 は概ね0.1℃以内と小さく,インペラの撹拌によって汚泥の温度は均一に保たれていること が確認された.

加熱面の配置によっては,消化槽内の汚泥に局所的な温度上昇が確認された.温度上昇の 部位は,上面加熱では上面の中央付近,下面加熱では下面の中央付近,側面加熱では上面の 周辺付近であり,消化槽内に形成された流れの遅いよどみ領域と対応していると考えられ た.また,局所的な温度上昇については,加熱面を下面加熱では環状面,側面加熱では下半 面とすることにより抑制されることも確認された(図7).

浮力の影響について検討するため、インペラによる攪拌無し、下面加熱の条件で解析を行った結果、下面で温められた流体が側壁に沿って上方へ流動する自然対流の発生が確認された(図8).自然対流の流速はインペラ攪拌による流れより一桁小さく、消化槽内の攪拌に及ぼす影響は小さいと考えられる.自然対流のみの場合、定常的な温度分布が形成されるのに数十日オーダーの時間を要し、また下面付近の汚泥に温度差が形成されることが確認された.

5. 政策提言

消化ガス活用の最適化には、消化槽内の温度分布を中温発酵温度(35℃前後)に均一に保 つ必要がある.しかしながら、消化槽内の汚泥の流れや温度の測定方法は技術的に限られて おり、内部の流動攪拌状態を詳細に把握するのは困難であった.本研究では、消化槽の仕様 に基づく CFD シミュレーションを提案し、流れ場及び温度場の可視化により汚泥の攪拌・加 温状態の評価を行った.また、これらのシミュレーションモデルをベースにして、上面、下 面、側面加熱など消化槽の加熱方法についての基礎的検討を行った.加熱部の配置によって は消化槽内の攪拌状態に応じて温度差が生じる可能性があるため、加熱面を下面加熱では 環状面、側面加熱では下半面とするなど、温度差の形成を抑制するための改善案について検 討した.

今後は、流速、消化温度等、実機の測定データだけでは不足する情報を CFD シミュレーションの予測結果で、またシミュレーションの予測だけでは不足する情報を測定データでそれぞれ補完して、消化槽内の流動攪拌の特性や挙動を詳細に把握することが可能と考えられる.また、消化槽内の流動攪拌状態のシミュレーションにとどまらず、消化ガス発生、消化ガス発電、余剰ガス燃焼、焼却炉補助燃料、加温施設燃料など、消化ガスを無駄なく効率

的に利用するための各種プロセスへとシミュレーションの対象を拡張することにより,現 状の消化ガス発電の稼働率,消化ガス発電設備増設の可能性などについて検証が可能と考 えられる.

CFD シミュレーションの展開としては、配管及び消化槽内汚泥スラリーのレオロジー特性、 pH,供給パターン、滞留時間、内部の微生物群衆の分布を考慮にいれた流れと熱・物質輸送 解析により、タンクの形状及び容積、インペラー形状、その他の流体デバイスの設計レベル の向上が可能と考えられる.また、発酵における生化学反応のモデルを構築して CFD シミュ レーションに実装することにより、消化ガス収率の最大化を検討することが可能と考えら れる.さらに、CFD シミュレーションは、廃水処理、スラッジ処理、バイオ水素生産にも応 用が可能であり、固・液・気体の三相アプローチにより各種プロセス設計の改善が期待され る.

参考文献

- 林国郎,吉田俊治,福井雅男,西川友三,「下水汚泥の熱伝導率」,材料28巻312号, p. 841-846,(1979)
- 2. 諸橋由昭,山根亮輔,波岡知昭,吉川邦夫,「水蒸気加熱処理による下水汚泥の脱水性向 上に関する研究」,日本機械学会論文集 B 編,74 巻 744 号, p. 1814-1820, (2008)
- 3. 川嶋淳,三浦雅彦,榎本周一,「鉄鋼製消化タンクによる下水汚泥エネルギー化」,神鋼 環境ソリューション技報, Vol. 10 No. 2, (2014)
- 4. 社団法人 化学工学会,「改訂六版 化学工学便覧」,7章 攪拌,(2001)

共同研究者 (執筆者) 一覧

鈴木 隆裕 千葉市南部浄化センター・所長補佐 (目的,研究調査方法,考察,政策提言)
古橋 究都 千葉市南部浄化センター・主任技師 (目的,研究調査方法,考察,政策提言)
林 知樹 千葉市南部浄化センター・主任技師 (目的,研究調査方法,考察,政策提言)
原田いずみ 千葉市南部浄化センター・技師 (目的,研究調査方法,考察,政策提言)
田中 学 千葉大学大学院工学研究院・教授 (研究調査方法,結果,考察,政策提言)
松原 秀真 千葉大学大学院融合理工学府・大学院生(研究調査方法,結果,考察)
高谷 遼太 千葉大学大学院融合理工学府・大学院生(研究調査方法,結果,考察)
小澤 祥 千葉大学大学院融合理工学府・大学院生(研究調査方法,結果,考察)