

II-462 埋立地集排水管内ガス流れの数値シミュレーション

北海道大学工学部

（正）松藤 敏彦

（正）田中 信寿

（正）柴田 清

（正）神山 桂一

1. はじめに

廃棄物埋立地に敷設される浸出水集排水管は、同時に発生ガスの排除、空気の供給管としての機能も持っている。特に、準好気性埋立構造において、集排水管が果たす役割は重要である。本研究では、管内のガス流れに関する数式モデルを作成し、設定条件を変えることでガス流れのメカニズムを調べる。また、実際の埋立地を想定したモデル計算も行なう。

2. 基礎方程式と流れのメカニズム

まず簡単のため、図1に示すような、管径 D が一様な長さ L の集排水管を考える。管の両端は大気解放されており（A1:仮定1の意）、最下部を基準高さ $Z=0$ にとる。集排水管の壁温 T_w は流れ方向に一樣かつ一定とし（A2）、下部から流入した空気は暖められながら地表面方向へと流れる。また、集排水管表面の有孔部を通してのガスの流入・流出は無視し（A3）、空気のみが定常に流れる（A4）と考えることにする。図1のように、入口、出口を添え字1,2で区別し、1,2間の平均を上付きーで表すことにすると、以下の式が立てられる。

$$\text{状態方程式 } \rho RT = pM \quad (1)$$

$$\text{外気圧力 } p_0 = p_0 \exp(-Mgz/RT_0) \quad (2)$$

$$\text{1,2間の質量収支 } \rho_1 v_1 = \rho_2 v_2 \quad (\because D \text{一定}) \quad (3)$$

$$\text{ベルヌーイ式 } 0 = \frac{v_2^2}{2} + gz_2 + \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{\bar{v}^2}{2} \left(\frac{L}{D} f + \xi_x \right) \quad (4)$$

$$\text{熱収支式 } (C \rho_2 v_2 T_2 - C \rho_1 v_1 T_1) \pi D^2 / 4 = h (\pi DL) \Delta T \quad (5)$$

$$\Delta T = T_w - (T_1 + T_2) / 2 \quad (\text{算術平均温度差}) \quad (6)$$

上式中、 f, h は円管に対する以下の式を用いる。

$$\text{層流 } f = 64 / \text{Re} \quad (7)$$

$$\text{乱流 } 1/\sqrt{f} = 1.14 - 2.0 \log(k_r / D + 9.35 / \text{Re} \sqrt{f}) \quad (8)$$

$$\text{層流 } hD/k = 1.62 (\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot D/L)^{1/3} \quad (9)$$

$$\text{乱流 } hD/k = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{1/3} \quad (10)$$

(4)式は管入口直前部で $v=0$ として導出され、 ξ_x は各種の圧力損失をまとめて表している。下線の部分が浮力による流れの推進力であり、これが負ならば空気は上向き（正ならば下向き）に流れる。 $\bar{\rho}$ は誤差を小さくするため、 $(\rho_1 + \rho_2)/2$ ではなく、 $\bar{T}$ を用いて(1)式より求める。 v が大きくなると、(4)式より損失が増し、また(5)式より T が小さくなって浮力が減少する、という2つの大きな負のフィードバックのあることがわかる。

図1の場合、 $p_1 = p_0$ 、 $p_2 = p_0|_{z=H}$ 、 $T_1 = T_0$ は既知であり、 v_1 、 v_2 、 T_2 を未知数として解くことになる。しかし、前記の式群が非線形のため、解析的に解くのは困難であり、数値計算によって解を求める。図2に計算結果を、横軸に T_2 、縦軸に $\bar{v}$ をとって示す。中心の◎が図下部に示した基本条件のときの値を表し、その他は式中のパラメータを一度に一個ずつ変えて計算している。

図より3本の曲線が見られるが、まず、 T_w が高いと管内温度が上昇して浮力が増し、 $\bar{v}$ が大きくなる。外気との温度差がわずかであっても $\bar{v}$ は比較的大きく、管内の空気流れは乱流になっている（ $T_w = 15.5^\circ\text{C}$ のとき $\text{Re} =$

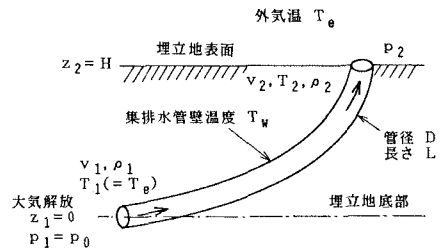


図1 単一管からなる集排水管

C : (空気)の定圧比熱($=10^3 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)

D : 集排水管径[m] f : 摩擦損失係数[-]

g : 重力加速度[m/s²] h : 熱伝達率[J/(m²s·K)]

H : 廃棄物層深さ[m] k : 熱伝導率[J/(m·s·K)]

k_r : 絶対粗度[m] L : 集排水管長[m]

M : (空気)の分子量($=0.029 \text{kg/mol}$)

p : 集排水管内圧力[Pa] p_0 : 外気圧力[Pa]

$p_0|_{z=0}$ における圧力($=1.013 \times 10^5 \text{Pa}$)

Pr : プラントル数($=0.71$: 空気)

R : ガス定数($=8.314 \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)

Re : レイノルズ数($=D\bar{v}/\nu$)

T : 管内空気温度[K] T_w : 集排水管壁温度[K]

T_0 : 外気温度[K] v : 集排水管内流速[m/s]

v_0 : 埋立地表面風速[m/s]

z : 基準面よりの高さ[m] ξ_x : 局所損失係数[-]

ν : 動粘性係数[m²/s] ρ : (空気)の密度[kg/m³]

$k = (0.335 + 0.0076T) \times 10^{-2} \text{J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$

$\nu = (0.00978T - 1.348) \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$

29800)。また、 L または D のみを変えたとき、両者はほぼ同一の曲線上にのる。これは、温度による密度変化を考えず $\rho v = \text{一定}$ として(5)式を解くと、出口温度が $T_2 = T_0 + (T_w - T_0) \times (1 - \exp(-(L/D)/(C\rho v/4h)))$ のように L/D の関数になることから推察できる結果である。 $C\rho v/4h$ は一次おくれ系の時定数に相当し、50~200程度の値をとり、 L/D がこれより小さいと管内温度が上がらず、また、大きいと温度上昇よりも摩擦損失の増大が卓越して、いずれも v が減少する。

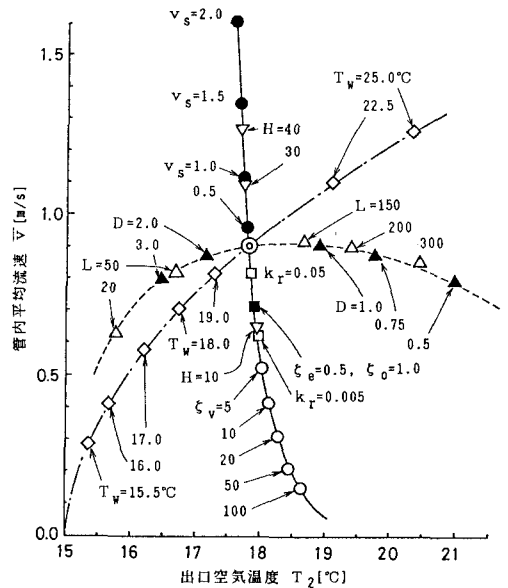
管内の流れには各種の圧力損失が伴うが、集排水管の場合、最も大きなものは管の閉塞によるものと思われる。そこで、閉塞状況を模擬するためスルースバルブの損失係数を引用し、 ξ_v で表した。 $\xi_v = 5, 10, 100$ は、断面積比でほぼ 5, 6, 9 割の閉塞を表し、 $\bar{v}$ が 0 に近づいていく。入口、出口損失($\xi_e = 0.5$, $\xi_o = 1.0$)を考えたとき、絶対粗度 k_r を大きくしたときの結果も図に示したが、 ξ_v に較べれば影響は小さく、(4)式のように ξ_x で局所損失を総括してよいと思われる。一方、埋立地表面に風があると、陰圧となって吸出し効果が期待できる。そこで、 $p_2 = p_e|_{z=H} - \rho v_s^2/2$ として計算したところ、かなりの効果が見られた。また、(T_w が同一ならば)埋立地深さ H が増すと、 $\bar{v}$ が大きくなる。

3. 埋立地のモデル計算

最後にモデルの応用として、図3のような実際の埋立地に近い状況を想定し、計算を行った。図中、各管路には番号をつけ、①~③が底部、⑦が竪型、残りが法面集排水管にあたる。計算条件は図3に示すとおりで、底部集排水管を中心として④と⑤、⑥と⑦、⑧と⑨はそれぞれ T_w 、 L 、 ξ_v が違っている。各管路について前述の式(3)~(10)が立てられるが、複数の管路からなる集排水管の場合、各管路の入口温度がそこに接続する管の出口温度により定まること、大気解放されていない内部の節点圧力が未知数となること、図1の場合と異なる。また、各節点において質量収支を満足しなければならない。紙面の都合上、計算方法の詳細は省略するが、これらの式を解くには多重の収束計算が必要である。計算の結果を、図3下部に示す。 T_w の低い⑤と、竪型集排水管⑦から外気が吸い込まれ、管の半分が閉塞した⑨では⑧に較べて $\bar{v}$ が小さくなっている。ここでは一つの例しか示さなかったが、わずかな条件の違いで流れのパターンはさまざまに異なる。

4. おわりに

いくつかの仮定の下での計算により、興味ある結果を得た。浮力がガス流れを引き起こす主たる要因であるが、埋立地内の温度は水分、ガス、有機汚濁質の移動、微生物反応などのダイナミックスにより定まり、 T_w 一定の仮定がどの程度現実に近いかはまだわからない。熱伝達も、層内熱抵抗(今回はゼロと考えた)が律速かもしれない。今後、実測、実験により現象を把握し、その知見に基づいたモデルの改良が必要である。



(基本条件: $H = 20\text{m}$, $L = 100\text{m}$, $D = 1.5\text{m}$, $k_r = 0.0005\text{m}$, $T_0 = 288\text{K}(=15^\circ\text{C})$, $T_w = 293\text{K}(=20^\circ\text{C})$)

図2 パラメータ値の影響

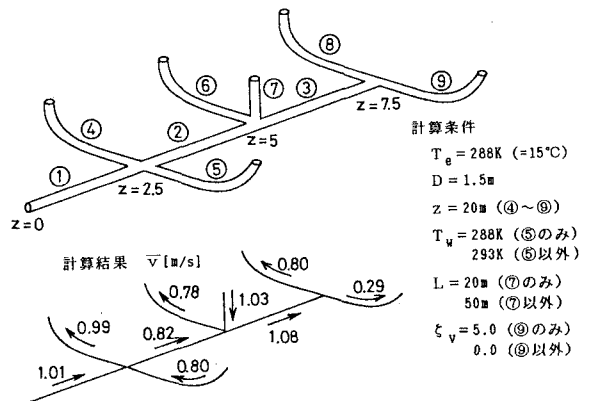


図3 埋立地のモデル計算