

【整番】FE-19-TM-010	垂直スラグ流のボイド変動周期と振動数	
分類：流れ(流体振動)／種別：技術メモ	作成年月：H16.1／改訂：Ver0.1 (H19.5)	作成者：N.Miyamoto

事例の追記 (H19.6.3)

全4枚

1. はじめに

気液2相流でフローパターンがスラグ流になると、気体スラグと液体スラグが周期的に反復して流れてボイド率変動や差圧変動が起きる。これらは同じ周期をもっており、いずれも加振力となって配管を揺らすので、サイズを調整してスラグ流を回避するのがよい。しかし運転状態の変化などでスラグ流が避けられないときは、どれほどの周期/周波数の振動が起きるのか当たりをつけて構造設計する必要がある。ボイド率変動自体は赤川のテキストなど⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾で述べられているが、もう少し判り難い。そこで本TSでは実務に利用できるように推算式を整理してみた。適用は上向き垂直管とする。下向き垂直管や水平管については参考扱いとする。

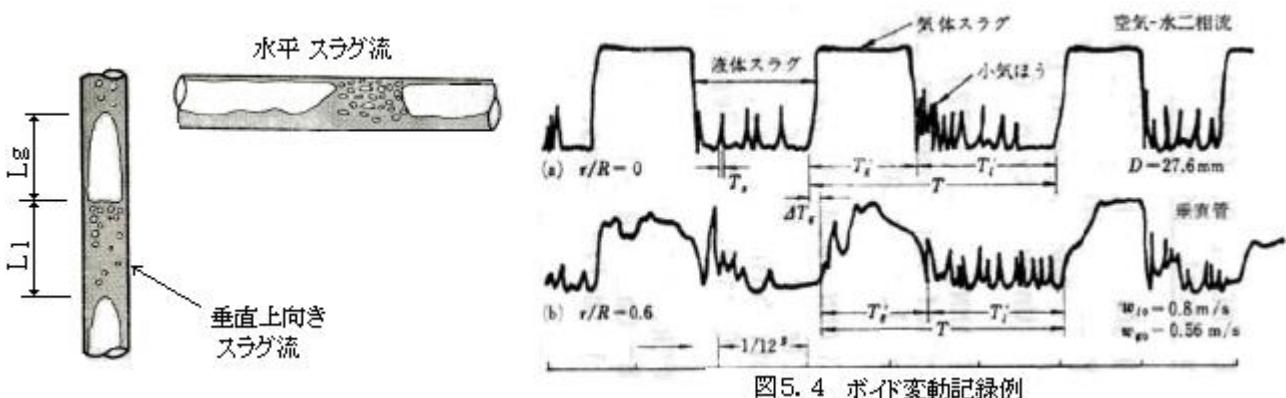
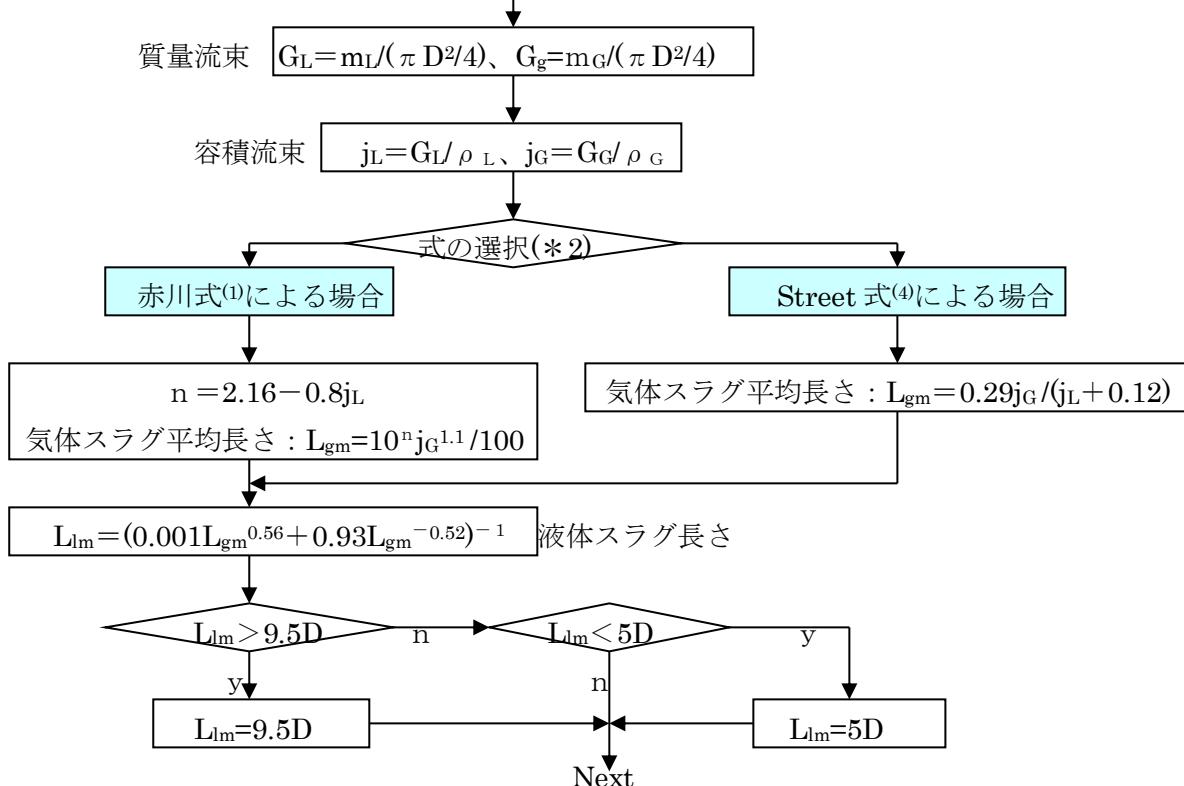
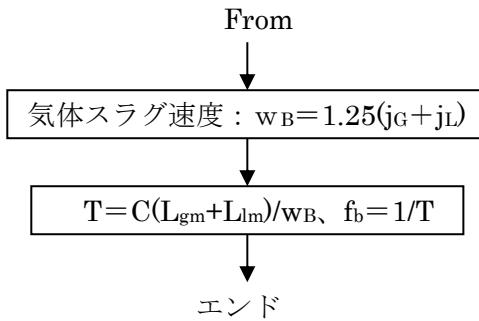


図5.4 ボイド変動記録例

2. ボイド変動周期の算定手順

液流量 m_L (kg/s)、気体流量 m_G (kg/s)、液密度 ρ_L (kg/m³)、気体密度 ρ_G (kg/m³)、管内径 D (m)、標準偏差範囲 $C=0.65 \sim 1.35$ (*1)





記号説明) G =質量流速($\text{kg}/\text{m}^2 \text{s}$)、 j =容量流束(見かけの単相流速)(m/s)、

L_{gm} =気体スラグ(大気泡)の平均長さ(m)、 L_{lm} =液体スラグの平均長さ(m)

w_B =気体スラグの速度(m/s)、 T =変動周期(sec.)、 $f_b=1$ 次流体振動数(Hz)

サフィックス : $L, G \rightarrow$ 液相, 気相の意味

(*1) 赤川テキスト⁽¹⁾によれば、実験で観察されるスラグ長さ(L_g, L_l)の標準偏差は 35%なので殆どの L_g と L_l はこの偏差内にあるものとして 0.65~1.35 に範囲を採った。もちろんこの範囲の外にくることもあるが、それは極くまれなケースと考える。

(*2) 赤川の式は液相流速(容積流束) j_L が 1.3m/s を越える辺りから、過度に減少してくる傾向があり、式に有効範囲があるようだ。故に、 $j_L > 1.2 \text{m/s}$ では Street 式の使用を勧める。

3. 例 題

液の単相流速 $j_L=0.5 \text{m/s}$ 、 $j_G=0.8 \text{m/s}$ のときの変動周期/振動数を求める。内径はΦ80 とする。

* * * * *

赤川式による場合 :

$$n = 2.16 - 0.8 \times 0.5 = 1.76$$

$$L_{gm} = 10^{1.76} 0.8^{1.1} / 100 = 0.45 \text{m}$$

$$L_{lm} = (0.001 \times 0.45^{0.56} + 0.93 \times 0.45^{-0.52})^{-1} = 0.71 \text{m}$$

これは 0.4~0.76m(即ち 5D~9.5D)内にあるのでこのまま。

$$T = (0.65 \sim 1.35) \times (0.45 + 0.71) / (1.25 \times 0.5 + 1.25 \times 0.8) = 0.464 \sim 0.964 \text{ sec.}$$

$$f_b = 1.04 \sim 2.16 \text{ Hz (一次)}$$

Street 式などに因る場合 :

$$L_{gm} = 0.29 \times 0.8 / (0.5 + 0.12) = 0.37 \text{m}$$

$$L_{lm} = (0.001 \times 0.37^{0.56} + 0.93 \times 0.37^{-0.52})^{-1} = 0.64 \text{ m (これも 5D~9D 内にある)}$$

$$T = (0.65 \sim 1.35) \times (0.37 + 0.64) / (1.25 \times 0.5 + 1.25 \times 0.8) = 0.40 \sim 0.84 \text{ sec.}$$

$$f_b = 1.19 \sim 2.5 \text{Hz (一次)}$$

赤川式のほうが 15%ほど周期が長い。ここではまとめて 1 ~ 2.5Hz を 1 次振動数と考える。

共振チェックではこの 3 次成分 7.5Hz までを考え、共振しないように、支持スパンを調整して配管の固有振動数を 7.5Hz 以上にする。

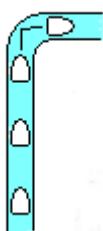
【 解 説 】

1. 波状流やスラグ流では、周期的に内部を通過する流れの質量が変化したり 2つの位置の差圧が変化するので、例えば支持荷重の変動によって配管支持構造物/接続機器が振動したり、ターンエンド(エルボやティなど)間のスラスト変動によって配管/接続機器が揺れたりする。しかし流体振動を駆動している流体力の変化は左程大きくはないので、これらは強制振動というより共振によるものであることが多い。この場合、もし波状流やスラグ流の流体振動数がわかっているなら配管やそのサポート/支持架構類の固有振動数をチェックして振動を抑制することができる。

しかし、2相流のフローパターンは管の形状(水平/垂直管)や流れ方向(上向き/下向き)で随分違っており流体振動数は一率ではない。本 TS は上向き垂直管に関するデータに基づいている。上向き垂直管では下図のような水平移行部分で質量/差圧の変動による振動が発生して問題になることがある(*)。

本 TS は下向き垂直管や水平管をカバーしていないが、振動数のオーダーを推定するうえでは参考になると思う。但し波状流に近いスラグ流では大分様相が違ってくる(?) 水平管については別途 [【FE-19-TM-011 水平スラグ流のボイド変動周期と振動数】](#) を発行する積もりである。

反復衝突



2. ボイド率(気相の占める容積割合)変動の周期は、スラグ全長(気体スラグ長さ+液体スラグ長さ)を気泡スラグの速度で割って得られる。この長さについては

- ・ 気体スラグの場合、気液流量に依存するが、液流量の影響は小さく気体流量に比例して増加傾向
- ・ 液体スラグの場合、気液流量の影響が少なく、管径に比例して増加傾向
- ・ 統計的に長さ分布はいずれも正規分布になる。

赤川のテキスト⁽¹⁾では気体/液体スラグのそれについて平均長さ式と標準/最大偏差が与えられているので、本 TS ではこれをそのまま採った。しかし液体流速が大きくなるとかなり小さくなり疑問が残るので、気体スラグについては Street の式⁽⁴⁾も使えるようにした。

また液体スラグ長さは Griffith のスタディ⁽⁵⁾では、 $5D \leq L_{lm} \leq 9.5D$ とされているので、どの場合でも平均液体スラグ長さはこの範囲に収まるようにした。ただ Griffith のスタディは限定的であり、一般性がないようにも思える。

(*) 垂直上向き 2相流による振動事例

文献 “Sizing Piping for Process Plant” (Chemical Engineering June 17, 1968) で以下のことが記されている。

冷却水戻り 30 インチ上向き垂直配管の水平移行部分がスラグパターンによって低い振動数で強烈に揺れたので、次の 3 つの対策が採られた。

- ① 垂直立ち上がり部分とその直後の水平管部分を 30 インチから 24 インチに変えた。
- ② 勾配を設けて垂直一水平の変化を滑らかにした。

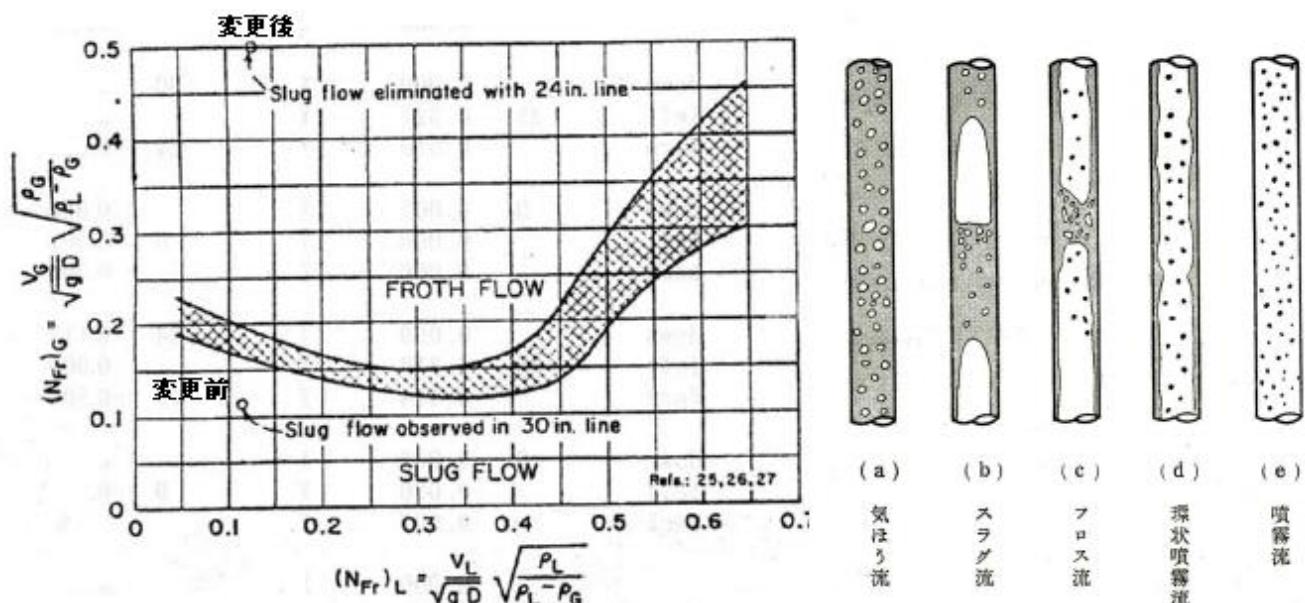
③ 水平移行部分に気体注入用ノズルを設けた。

①はフローパターンをスラグ流からフロス流(チャーン流)に変更する意図がある。下図参照。

③は、移行中に液によって失われる慣性力を補給する意図があったが、後で不必要であることがわかった。結果的には①②の対策が功を奏し、目に見えるような振動はおきず、従来より高いベーパー量をパスできた。

[フロス流は環状噴霧流に近く液体スラグが短く気泡が多いので、衝突時のショックは減少する。

また振動数が変わるので、共振状態が解消したのではないかと思われる 一筆者注]



垂直管のフローパターン

赤川「気液2相流」

"The Upward Vertical Flow of Air-Water Mixtures" by Govier G.W et.al

Part I Can J chemical Eng., Aug. 1957 p58-70

Part II Can J chemical Eng., Oct. 1958 p195-202

Part III Can J chemical Eng., Apr. 1960 p62-66

引用文献 :

- (1) 赤川浩爾「気液2相流」5.2 及び 5.3
- (2) 植田辰洋「気液2相流(流れと熱伝達)」6.3
- (3) JSME「気液2相流技術ハンドブック」8.3.3
- (4) Street,J.R et al "Dynamics of Bullet Shaped Bubbles encountered in Vertical Gas Liquid Flow " AICh E.J.,11-4(1955) 644-650
- (5) Griffith and Wallis "Two-phase Slug Flow " Trans. ASME Ser. C, 83-3(1961) 307~320