

ISO 5167(差圧流量計)の紹介と 湿り気体(Wet Gas)の初歩 — Reader-Harris/Gallagherの式(R/G式)など —

気体流量標準研究G

石橋雅裕

内容

1. 差圧流量計の歴史
2. R/G式 (Reader-Harris/Gallagherの式)
3. 湿り気体 (Wet Gas) の流量測定

差圧流量計に関しては・・・



ISO 5167の成り立ちの根拠、適用方法、規定外使用の影響、今後の改定のための資料
(2015)

ISO 5167-1~6

INTERNATIONAL
STANDARD

ISO
5167-1

Second edition
2003-03-01

**Measurement of fluid flow by means of
pressure differential devices inserted in
circular cross-section conduits running
full —**

Part 1:
General principles and requirements

Part 2:
Orifice plates

Part 3:
Nozzles and Venturi nozzles

Part 4:
Venturi tubes

流体が充満して流れる円断面管路に取
付けた差圧流量計による流量の測定

- 第1部(2003): 一般
- 第2部(2003): オリフィス板
- 第3部(2003): ノズルとベンチュリノズル
- 第4部(2003): ベンチュリ管
- 第5部(2016): コーンメーター
- 第6部(ほぼ完成): ウェッジメーター

ISO/TR 3318(1998) 脈動、廃止されたが改定中

ISO/TR 15377(2007) 5167の範囲外での使用

(ドレンホール付き、50mm未満、逆オリフィス、等々)

ISO/TR 12767(2007) 5167の規定の一つが外れた
場合の影響

ISO/TR 9464(2008) 5167のガイドライン

ISO/TR 11583(2012) 差圧流量計による湿り気体
流量測定

差圧流量計の(規格の)歴史

1890年頃 オハイオで天然ガスの流量測定にオリフィス使用
1930年代 ドイツの規格、オハイオ大学での測定



1943年 BS 1042(流量測定)
1964年 BS 1042-1(オリフィス板、ノズル、ベンチュリ管)、多数のパートがあり
ISO の基礎となった
1967年 ISO/R 541(オリフィス板とノズル)
1968年 ISO/R 781(ベンチュリ)

1980年 ISO 5167(オリフィス板、ノズル、ベンチュリ管、Stolzの式)
1991年 ISO 5167-1(オリフィス板、ノズル、ベンチュリ管、Stolzの式の修正)
(-2はパルプ?)
1998年 ISO 5167-1改正(R/G式(1998)を導入)

2003年 ISO 5167-1~4(現在に至る、改訂準備(マイナーな修正、誤植など)始まる)
2016年 ISO 5167-5(コーン)
2018年? ISO 5167-6(ウェッジ)、出版準備中

オリフィス板の流出係数の式の変遷

バックinghamの式

(1930年代のデータ(OSUオハイオ大学)に基づく、精度はよい、水のみ、フランジタップのみ)

$$C_{backingham} = K_e \sqrt{1 - \beta^4} \frac{1 + \frac{E_b}{R_{eD}}}{1 + \frac{15E_b}{10^6 d_{in}}}$$

$$K_e = 0.5993 + \frac{0.007}{D_{in}} + \dots \quad (\text{かなり複雑な式})$$

$$E_b = d_{in} (830 - \dots)$$

シュトルツの式

(1978、OSUデータから303点とISO 1967のデータ、次元的に正しい、B式との食い違いが問題)

$$C_{stoltz} = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5} \left(\frac{10^6}{R_{eD}} \right)^{0.75} + \min(0.090L_1, 0.039) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0.0337L'_2 \beta^3$$

1980～1991、アメリカでのデータ取得(食い違いの解消のため)

1988、APIとEEC(現EU)がReader-Harris/Sattary(NEL)の式を導入(11346点のデータに基づく)

1990、小口径の補正項(Gallagherの式)の追加(R/G式ver.1の完成)

1990年代、APIとEEC(現EU)のデータ取得、必要直管長、整流装置

1996、R/G式ver.1を修正(大口徑を含める)、R/G式ver.2が完成、現在に至る

R/G式(1998)

以来20年以上にわたり、修正なしで使用されている。問題提起も無い。

R/G式 (Reader-Harris/Gallagher式) (ver.2、1998) の概観

R/G式 (オリフィス板の流出係数C)

$$\begin{aligned}
 C = & 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.216\beta^8 + 0.000521 \left(\frac{10^6 \beta}{R_{eD}} \right)^{0.7} \\
 & + (0.0188 + 0.0063A) \beta^{3.5} \left(\frac{10^6 \beta}{R_{eD}} \right)^{0.3} \\
 & + (0.043 + 0.080e^{-10L_1} - 0.123e^{-7L_1}) (1 - 0.11A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} \\
 & - 0.031 (M'_2 - 0.8M'_2{}^{1.1}) \beta^{1.3}
 \end{aligned}$$

$D < 71.12 \text{ mm}$ であれば次を加える

$$+ 0.011(0.75 - \beta) \left(2.8 - \frac{D}{25.4} \right)$$

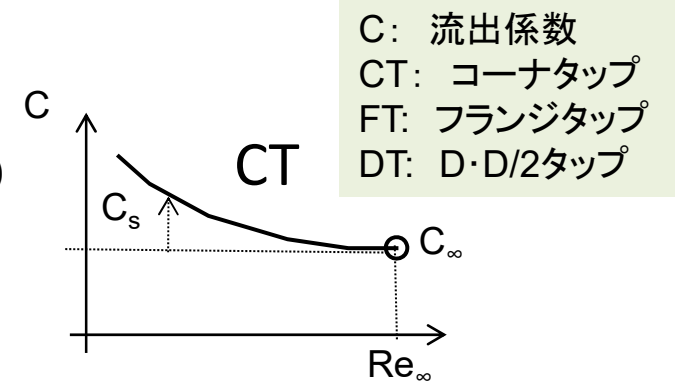
$$\text{ここで、 } A = \left(\frac{19000\beta}{R_{eD}} \right)^{0.8} \text{、 } M'_2 = \frac{2L'_2}{1 - \beta}$$

R/G式 (Reader-Harris/Gallagher式)

流出係数Cの式は、次の4項で構成される。

コーナータップCTを基礎とする。

(CT: 両圧力タップがオリフィス板に接する)



➤ **漸近項 C_∞** : CTでの、無限大 Re でのC

➤ **スロープ項 C_s** : CTでの、 Re におけるCの、 C_∞ からの増分

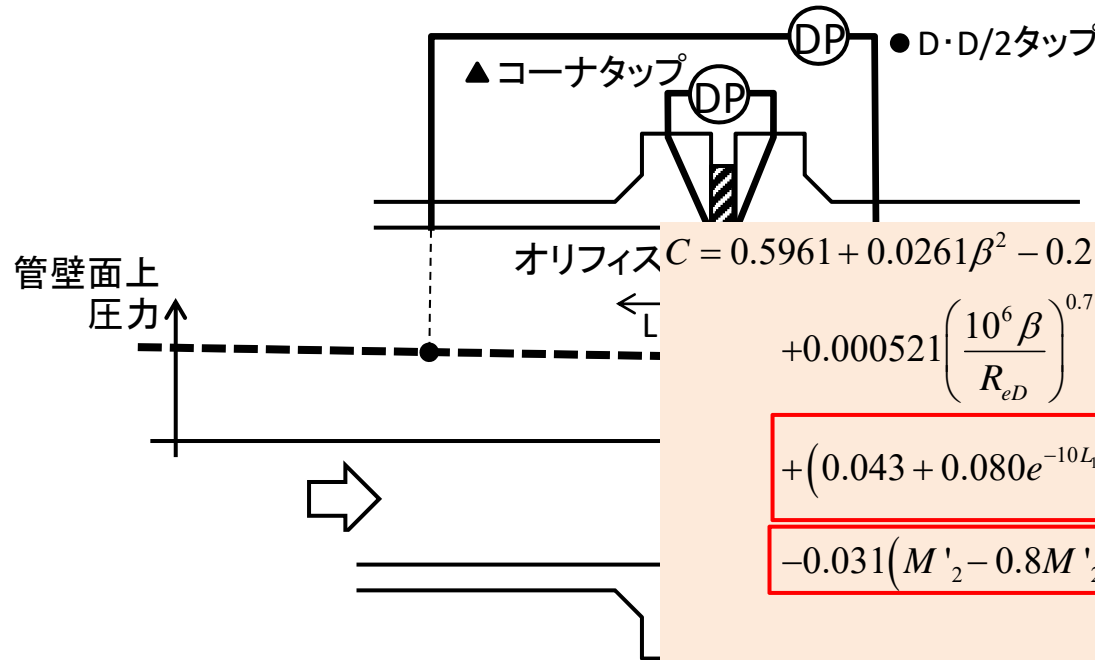
(これにより、CTのCは $(C_\infty + C_s)$ で与えられる。)

➤ **タッピング項**: CTからの、FTまたはDTにおけるCの差

➤ **小口径項**: 小口径での補正項

R/G式

➤ **タッピング項**: CTからの、FTまたはDTにおけるCの差



C: 流出係数
 CT: コーナタップ
 FT: フランジタップ
 DT: D・D/2タップ

オリフィス $C = 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.216\beta^8$

$$+ 0.000521 \left(\frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0.7} + (0.0188 + 0.0063A) \beta^{3.5} \left(\frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0.3}$$

$$+ (0.043 + 0.080e^{-10L_1} - 0.123e^{-7L_1})(1 - 0.11A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4}$$

$$- 0.031(M'_2 - 0.8M'_2{}^{1.1})\beta^{1.3}$$

ΔC_{up}

$D < 71.12 \text{ mm}$ であれば次を加える

$$+ 0.011(0.75 - \beta) \left(2.8 - \frac{D}{25.4} \right)$$

上流項と下流項に分けられる。

一方をCTとし、他方をずらしたときのCd差

$$\Delta C_{up} = (0.043 + 0.080e^{-10L_1} - 0.123e^{-7L_1})(1 - 0.11A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4}$$

下流側がコーナタップ
上流側が上流面より L_1 上流

$$\Delta C_{dwn} = -0.031(M'_2 - 0.8M'_2{}^{1.1})(1 - bA) \beta^{1.3}$$

$\left(M'_2 = \frac{2L'_2}{1 - \beta} \right)$ 上流側がコーナタップ
下流側が下流面より L'_2 下流

R/G式

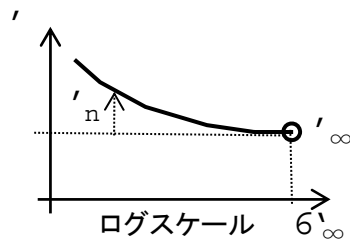
- 漸近項 C_∞ : CTにおける無限大 Re での C

$$C_\infty = 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.216\beta^8$$

C: 流出係数
 CT: コーナタップ
 FT: フランジタップ
 DT: D・D/2タップ

- スロープ項 C_s : CTでの Re における C の、 C_∞ からの増加分

$$C_s = 0.000521 \left(\frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0.7} + (0.0188 + 0.0063A) \beta^{3.5} \left(\frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0.3}$$



$$C = 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.216\beta^8 \quad C_\infty$$

$$C_s + 0.000521 \left(\frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0.7} + (0.0188 + 0.0063A) \beta^{3.5} \left(\frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0.3}$$

$$+ (0.043 + 0.080e^{-10L_1} - 0.123e^{-7L_1})(1 - 0.11A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4}$$

$$- 0.031(M'_2 - 0.8M'_2{}^{1.1}) \beta^{1.3} \quad \Delta C_{dwn} \quad \Delta C_{up}$$

$D < 71.12 \text{ mm}$ であれば次を加える

$$+ 0.011(0.75 - \beta) \left(2.8 - \frac{D}{25.4} \right)$$

R/G式

➤ 小口径項: 小口径での補正項

$$\Delta C_D = 0.011(0.75 - \beta) \left(2.8 - \frac{D}{25.4} \right) \quad D < 71.12 \text{ mm}$$

Gallagherの式

$$C = 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.216\beta^8 C_\infty C_s$$

$$+ 0.000521 \left(\frac{10^6 \beta}{R_{eD}} \right)^{0.7} + (0.0188 + 0.0063A) \beta^{3.5} \left(\frac{10^6 \beta}{R_{eD}} \right)^{0.3}$$

$$+ (0.043 + 0.080e^{-10L_1} - 0.123e^{-7L_1}) (1 - 0.11A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4}$$

$$- 0.031 (M'_2 - 0.8M'_2{}^{1.1}) \beta^{1.3} \Delta C_{dwn} \Delta C_{up}$$

$D < 71.12 \text{ mm}$ であれば次を加える

$$+ 0.011(0.75 - \beta) \left(2.8 - \frac{D}{25.4} \right) \Delta C_D$$

流量計測の現状とこれから

ISO TC 30(閉管路内流量測定)では、43の規格が出版されている

- SC 2: 差圧流量計
 - SC 5: 速度及び質量法
(超音波、電磁、渦、コリオリ、ピトー管、トレーサ、熱式など)
 - SC 7: 容積法及び水用流量計
(ほとんどが水用流量計)
- その昔はSC 12まで(よりも?)あった。

- ✓ 個々の流量計に関する規格はほぼ完成している。
- ✓ ただし、ほとんどが整った環境での測定に限る。
- ✓ これから開発する必要がある技術／規格は、、、

極限状態、劣悪環境での測定方法

その中の大きな一つとして、

湿り気体Wet Gasの流量測定がある。

湿り気体Wet Gasの流量測定

- ✓ Wet Gasmeter (湿式ガスメーター) のことではない。
- ✓ 液体が少量混じった気体の流れで、気体だけの流量を測定したい。

天然ガスの採掘現場

水、石油、石ころなどが混じる中、天然ガスだけの流量を知りたい。

熱源用蒸気流

供給ラインからの放熱により水が混じるが、蒸気だけの流量を知りたい。

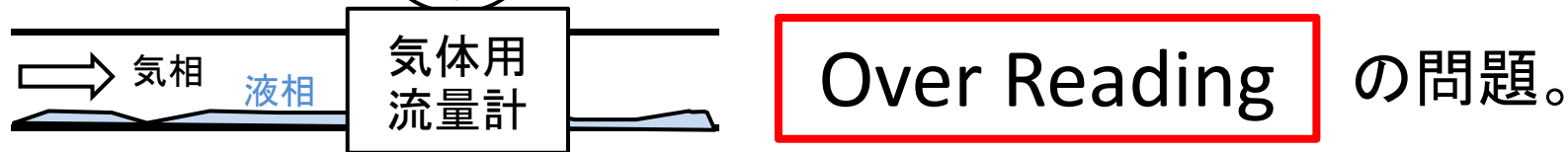
★蒸気だけの流れは湿り気体ではない。その流量は通常の流量計で測定可能。

★蒸気流で冷却により水分が混じると湿り気体になる。

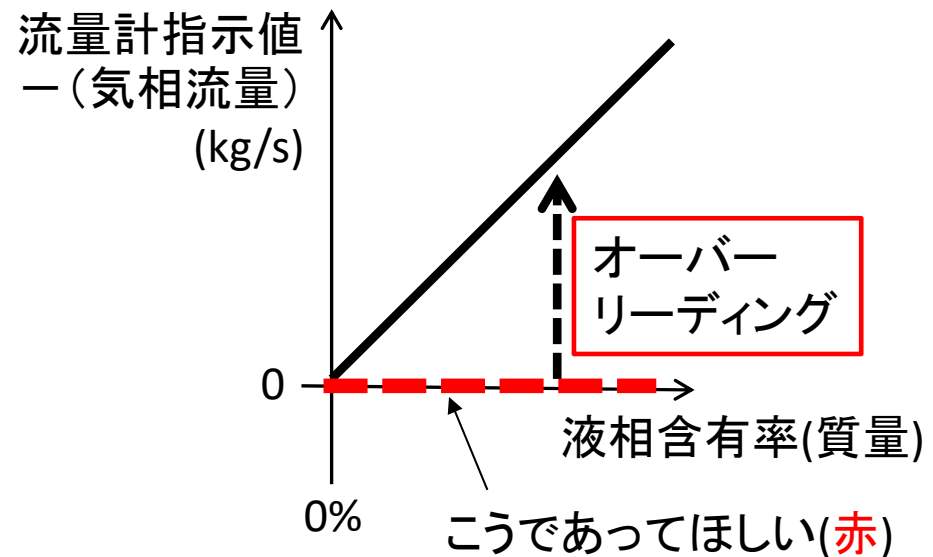
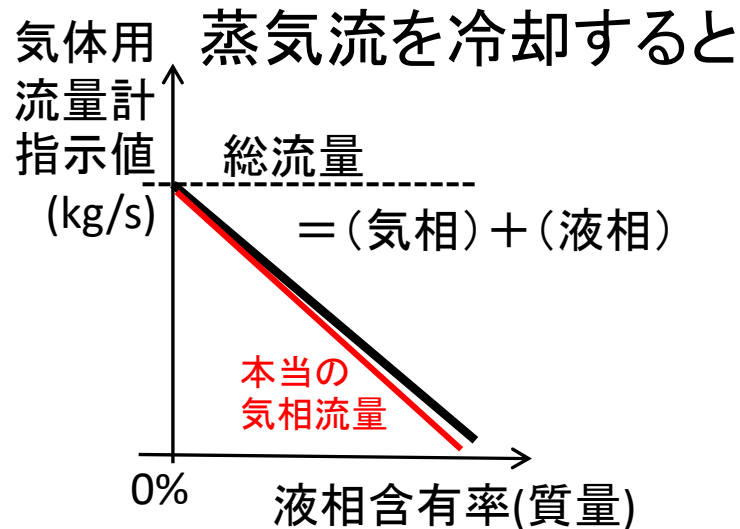
★水蒸気を含む空気は湿り気体ではない(流量の世界では?)が、水~~蒸気~~を含む空気は湿り気体。

湿り気体 **Wet Gas** の流量測定

本当に気相流量？  大半が気体なので、**気体用流量計**が用いられる。



- 気体用流量計の指示値は、実際の気相分流量値より大きい場合が多い。
- 気相流れが液相を移動させ、これにより圧損が生じ、差圧流量計では差圧が大きくなって、流量指示値が大きくなる。



湿り気体 **Wet Gas** の流量測定

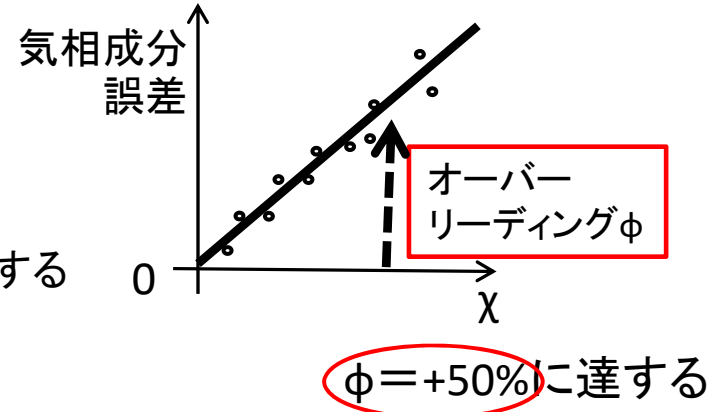
様々な流れのパターンがあり、非常に複雑。
研究の歴史は非常に長い。

- ✓ Lockhart-Martinelliのパラメータ(1949)

$$\chi = \frac{m_L}{m_G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}$$

だいたい液相含有率に比例する

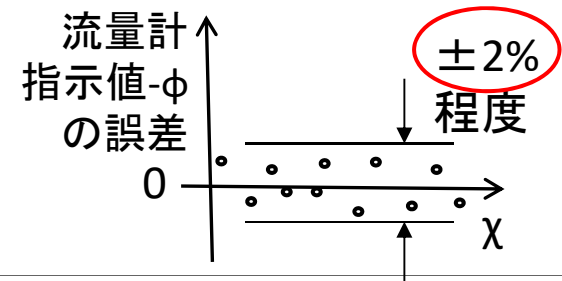
- ✓ Murdockの補正法(1961)
- ✓ Chisholmチザムの補正法(1967)
- ✓ de Leeuwの補正法(1997) (チザムの式の修正)
 (未だにこれらの補正方法をベースとする)
- ✓ NELの補正法、CEESIの補正法(2000年以降)→ISO/TR



オーバーリーディング phi を chi の関数として表す試み

$$\phi = f(\chi, Fr, C_{ch}, \dots)$$

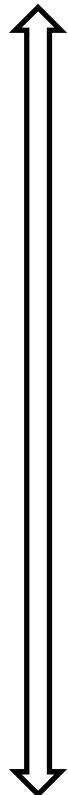
(気相成分流量) = (流量計指示値) / phi として求める。
 ターゲット **±2%** レベル



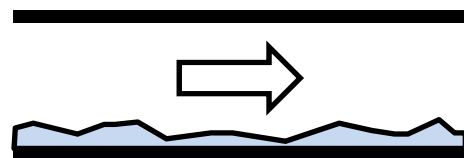
湿り気体 **Wet Gas** の流量測定

代表的な流れのパターン

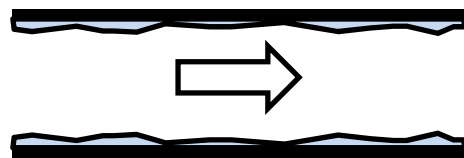
流速小



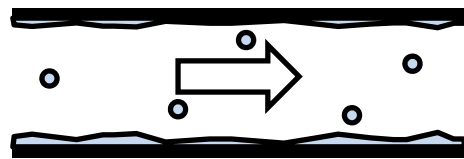
流速大



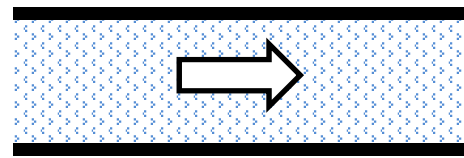
層状流れ



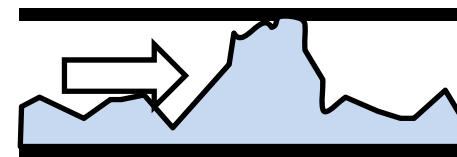
環状流れ



環状流れ+液滴



噴霧状



スラグ状流れ

圧力、流速、湿り度によって
複雑に絡み合う。

湿り気体Wet Gasの流量測定

NELの方法(ベンチュリ)

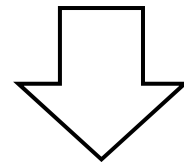
1. ロックハートマルティネリパラメータ χ の計算
2. 気体密度フルード数 Fr の計算
3. χ と Fr を使って流出係数の計算
4. チザムのパラメータ C_{Ch} の計算
5. オーバーリーディング補正係数 ϕ の計算

ISO/TR 11583(2012) 差圧流量計による湿り気体流量測定



リーダーハリスさんご講演 (題目変更)

The current status and futher of flow measurement



Flow measurement:
some problems to solve and some surprises