

第16回 NMIJ流量計測クラブ会合 マスフローコントローラーの現状と今後の動向

2019/11/15

EZ-Japan 黒田 誠



Agenda

- 1.流量計と流体制御
- 2.マスフローコントローラとは？
- 3.マスフローの今後の動向



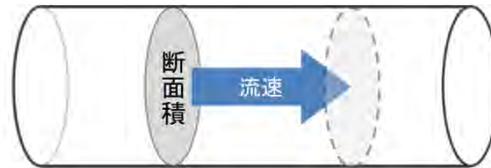
流量計と流体制御



流量を測るとは？

流量とは

読んで字のごとく「**流れの量**」のことです。
気体・液体等の流体が単位時間当たり、ある地点を通過する量のことである。
単純な流量を知る方法が発見されたのは、古代ローマに遡った以下の方法であり、
今日までその基本は変わっていません。



$$\begin{aligned} \text{体積流量 } Q_v(\text{m}^3/\text{s}) &= \text{流体の断面積 } A(\text{m}^2) \times \text{流体の流速 } v(\text{m}/\text{s}) \\ \text{質量流量 } Q_m(\text{kg}/\text{s}) &= \text{体積流量 } Q_v(\text{m}^3/\text{s}) \times \text{流体の密度 } \rho(\text{kg}/\text{m}^3) \end{aligned}$$

では、そんな古い時代から人類が**流量を測らなくてはならない理由**は何があったのでしょうか？

1. 使った流量に応じた料金を徴収するため→ 料金を算出する根拠



水道、ガス、石油類(ガソリン、灯油、重油等)・・・等、流量に応じて料金を算出
公的に認められた流量計しか使用できない。
重視される要素: 校正証明(国家基準とのトレーサビリティを証するもの)

2. 安定した歩留まりで生産するため→ 製造プロセスの再現性向上

半導体製造装置、バーナー、薬液等充填・・・等、製造装置の再現性向上
流量制御機能を付与したマスフローコントローラが好まれる。
重視される要素: コスト、繰り返し性能



流量計の代表的な方式

方式	詳細種別
面積式	テーパ管式、直管式
差圧式	絞り(オリフィス)式、層流(ラミナーフロー)式
超音波式	伝播時間差式
容積式	ギア式、ルーツ式、湿式、膜式
渦式	超音波式、歪みゲージ式
タービン式	羽根車式(軸流、接線流)
電磁式	
開水路式	堰式、フリューム式、流速・水位演算式
熱式	熱線式、バイパスキャピラリ式(巻線式)
コリオリ式	Mass Flow



出展: 日立オートモティブシステムズ & ナガノ(株)、ブロンコスト・ジャパン(株) HP

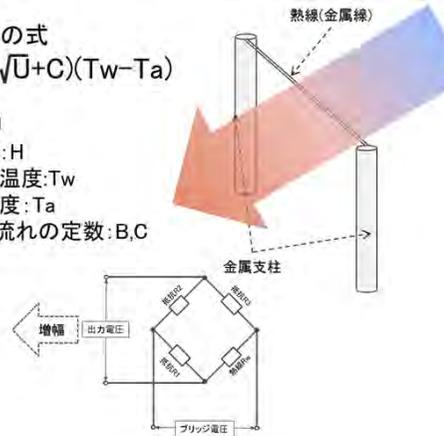
© 2019 EZ-Japan M.Kuroda

質量流量計～熱式流量計

オリジンは熱線式風速計

キングの式
 $H=(B\sqrt{U}+C)(T_w-T_a)$

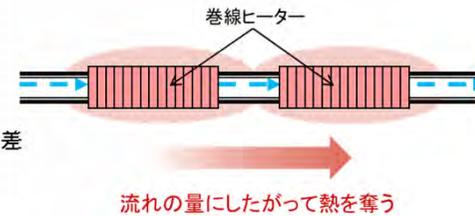
風速: U
放熱量: H
熱線の温度: T_w
周囲温度: T_a
熱線と流れの定数: B, C



流量式(熱式流量計)

$$Q_m = C \Delta T / C_p$$

Q_m : 質量流量
 C : 補正係数
 ΔT : ヒーター間の温度差
 C_p : 流体の比熱



流体固有の物性に左右される！
質量流量計としては不完全

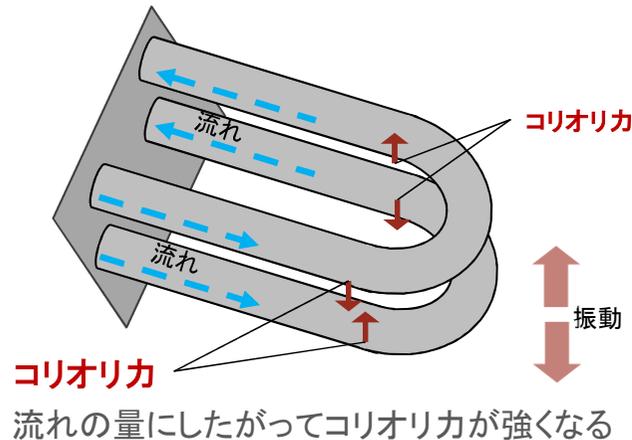
熱式流量計は、**マスフローコントローラ(MFC)**や**マスフローメータ(MFM)**に用いられており、主に半導体製造装置産業で採用されている方式です。

原理のオリジンは、ピトー管式流速計の次に開発された**熱線式風速計**にあると、考えられています。

ヒーターを流体が通過する際に奪われる熱量は、その流体の**定圧比熱**に応じて変化し、質量流量と比例関係にあるというのが測定原理になっています。

その為、流体を特定できない場合や、複数のガス種の混合ガスで、混合比率が不明、もしくは不定な場合、正確な流量測定ができないという弱点を持っています。

質量流量計～コリオリ式流量計



流量式 (コリオリ式流量計)

$$Q_m = CK_s \Delta t (1 - \omega^2 / \omega_s^2) / (2W^2)$$

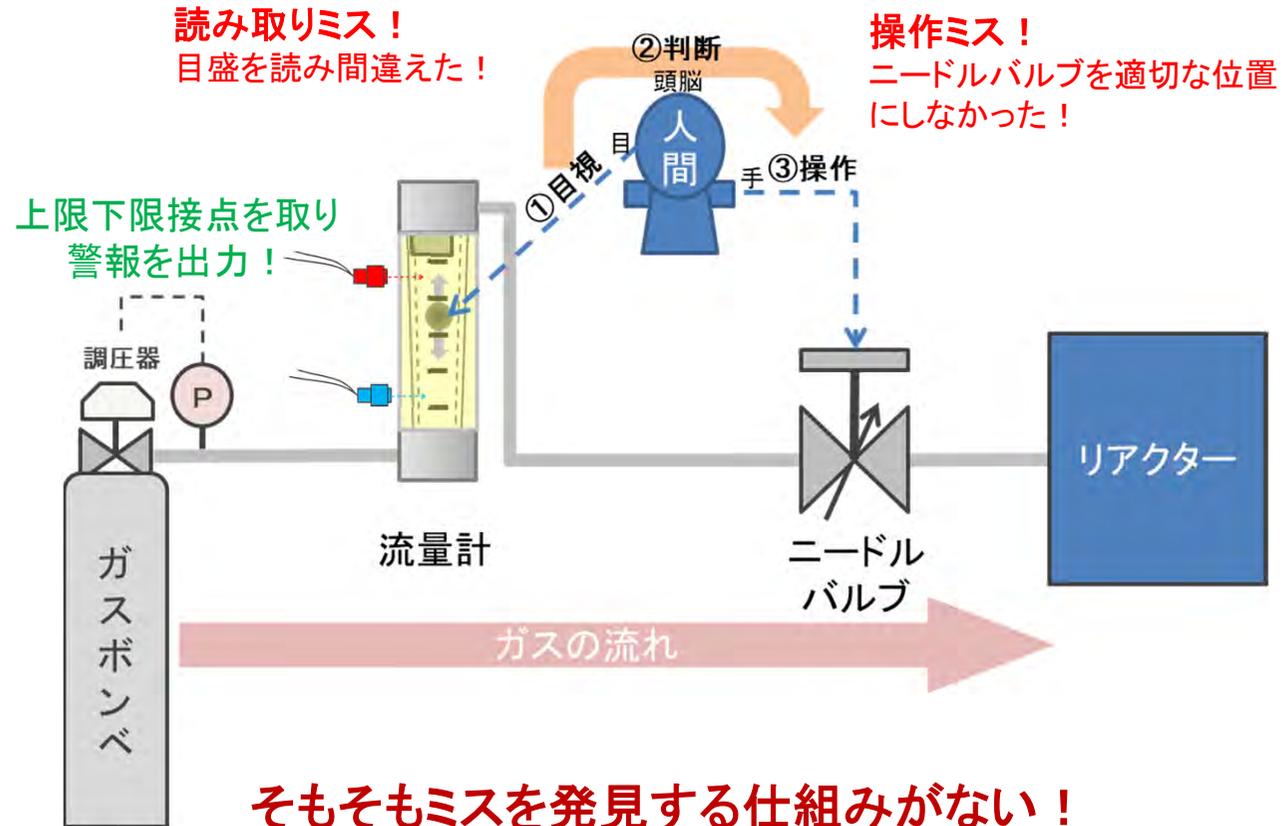
Q_m: 質量流量
C: 補正係数
K_s: チューブのバネ定数
Δt: 2本のチューブの基準点を通過する時の時間差
ω: チューブに加わる強制振動数
ω_s: 流れにより生じるチューブの捻れ振動数
W: U字管の幅

流体固有の物性に左右されない！
完全な質量流量計

フランスのガスパーール・コリオリは、回転運動下を移動する物体には、その移動する方向に直角に慣性力が働くことを発見しました。
この力はコリオリ力といわれ角速度と、物体の質量に比例した力が働きます。

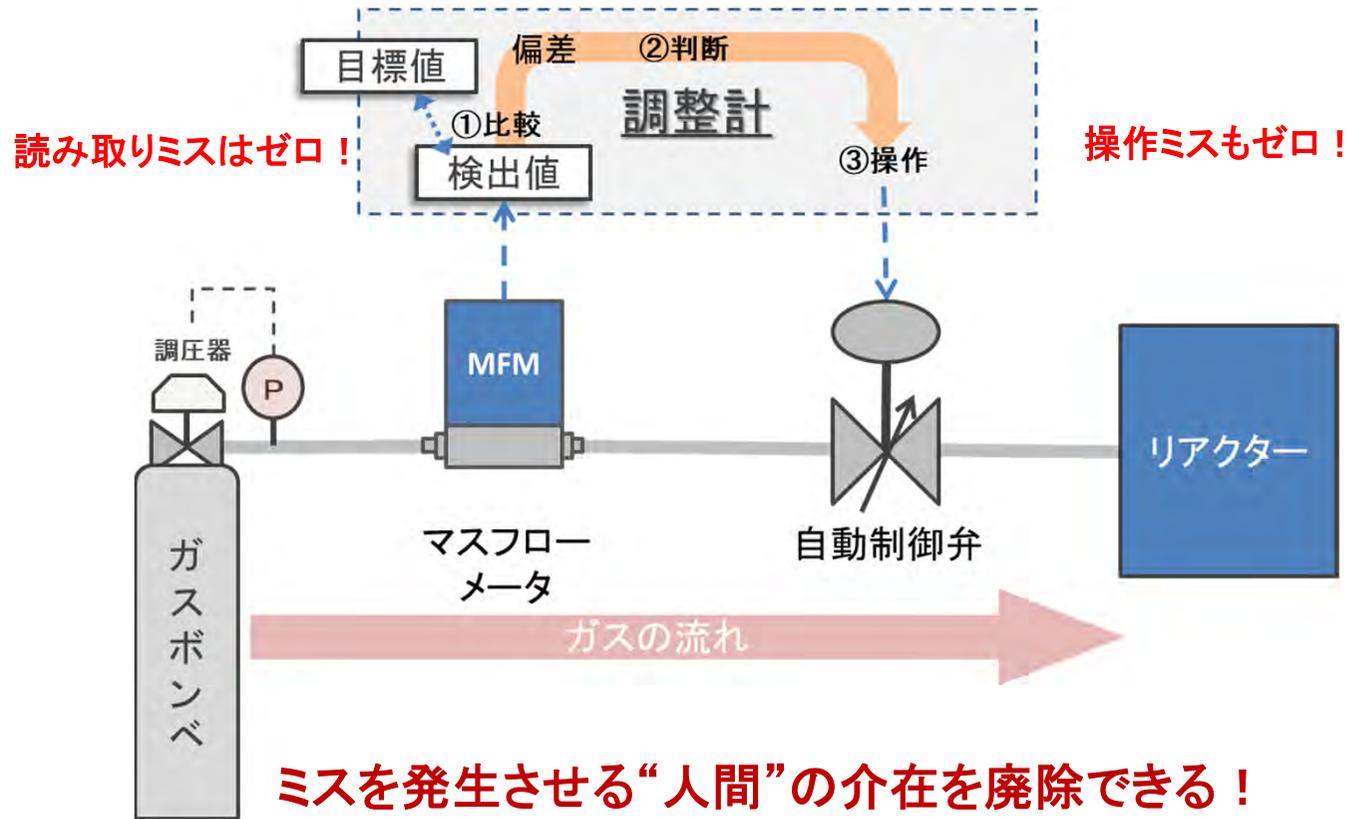
これを流量検出原理としたのがコリオリ式流量計で、現存する流量計の中で、唯一の完全な質量流量計です。
コリオリ式流量計のセンサーは、回転ではなく振動を用いています。
本来回転系に発生する慣性力であるコリオリ力を取り出す目的で作られた仮想回転系であると考えて下さい。

流量計を使った流体制御の進化

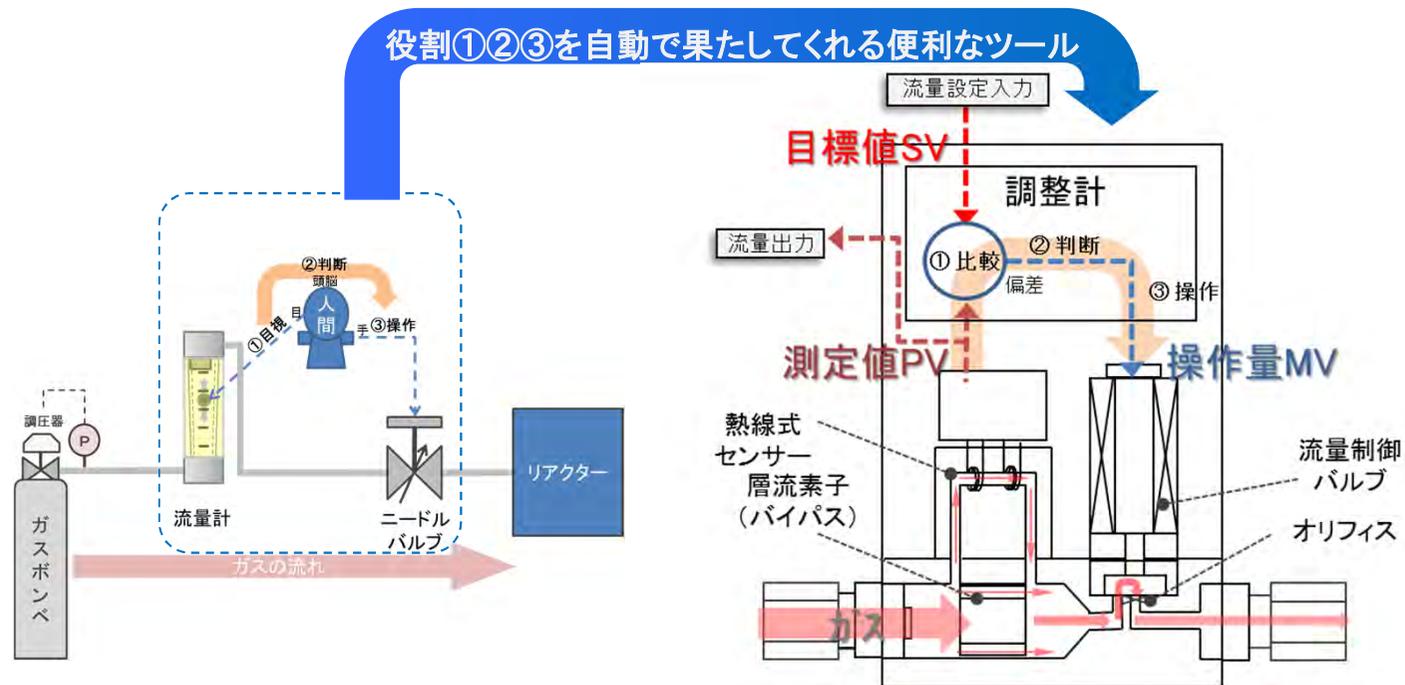


そもそもミスを発見する仕組みがない!
人に頼る要素が多すぎる!!

流量計を使った流体制御の進化



流量計を使った流体制御の進化



マスフローコントローラーは便利なツール

MFCはSV=PVとなるよう流量制御バルブの操作量MVを可変し、流量制御バルブ部の圧力損失を調整することで、流量制御を行っています。

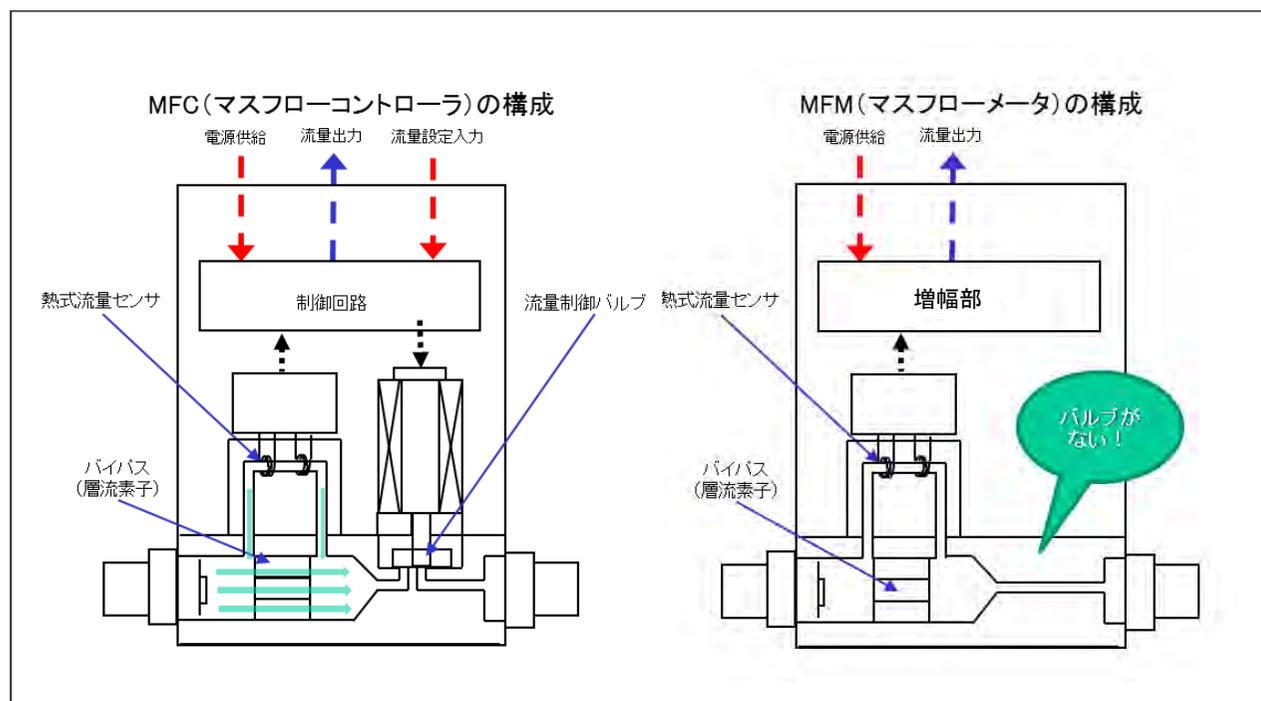
マスフローコントローラーとは？



マスフローの原理① MFCとMFM

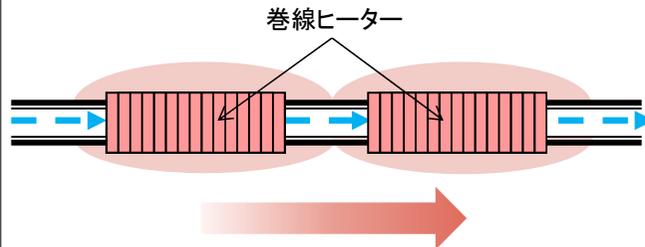
マスフローにはMass Flow Controller(MFC)とMass Flow Meter(MFM)があります。

- ・MFC=流量センサー+流量制御バルブ+制御回路 → 流量を制御する
- ・MFM=流量センサー+増幅部のみ → 流量を測定する



マスフローの原理② 流量センサー

気体/液体用
マスフローコントローラ(MFC)
マスフローメータ(MFM)



流れの量にしたがって熱を奪う
流量式(熱式流量計)

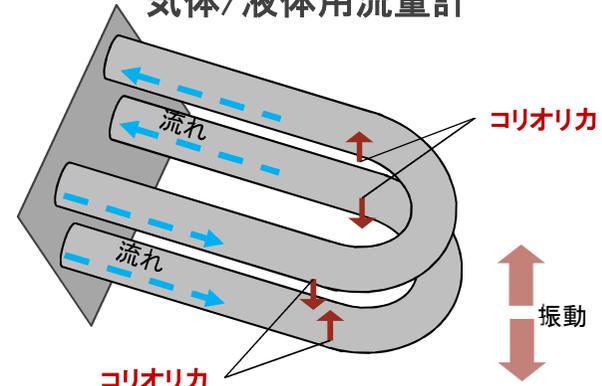
$$Q_m = C \Delta T / C_p$$

Q_m: 質量流量
C: 補正係数
ΔT: ヒーター間の温度差
C_p: 流体の比熱



流体固有の物性に左右される!
質量流量計としては不完全

気体/液体用流量計



流れの量にしたがってコリオリカが強くなる
流量式(コリオリ式流量計)

$$Q_m = CK_s \Delta t (1 - \omega^2 / \omega_s^2) / (2W^2)$$

Q_m: 質量流量
C: 補正係数
K_s: チューブのバネ定数
Δt: 2本のチューブの基準点を通過する時の時間差
ω: チューブに加わる強制振動数
ω_s: 流れにより生じるチューブの捻れ振動数
W: U字管の幅

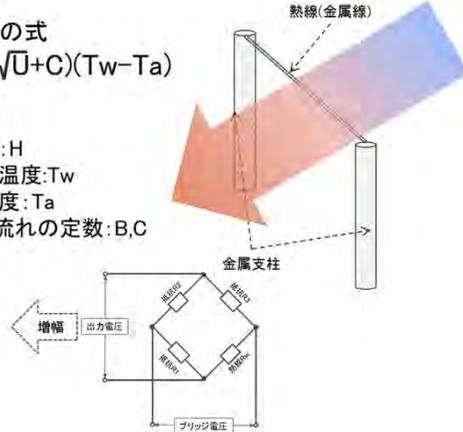
流体固有の物性に左右されない!
完全な質量流量計

マスフローの原理② 流量センサー

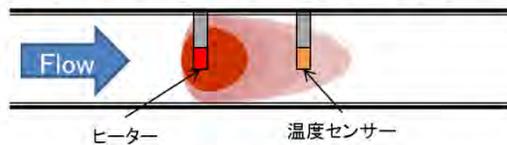
オリジンは熱線式風速計

キングの式
 $H = (B\sqrt{U} + C)(T_w - T_a)$

風速: U
 放熱量: H
 熱線の温度: T_w
 周囲温度: T_a
 熱線と流れの定数: B, C



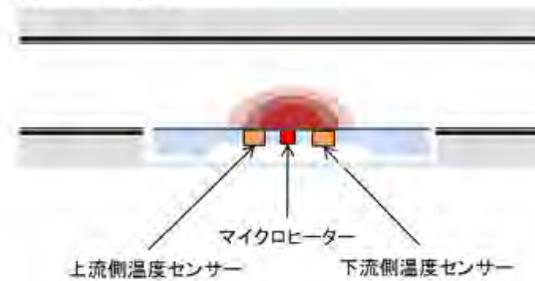
インサクションタイプ熱式流量センサー



定温度方式: ヒーター温度と下流の温度センサーの測定した流体温度との差 ΔT が一定になるようにヒーター温度を制御する。

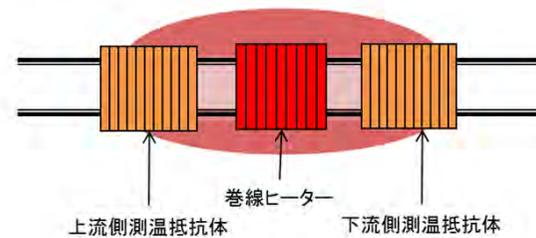
分流構造をとらない全量測定

チップ(MEMS)型



全量測定もしくは
 層流素子(バイパス)を使った分流測定

巻線型(三線式)



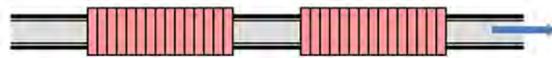
層流素子(バイパス)を使った分流測定

マスフローの原理③ 層流素子(バイパス)

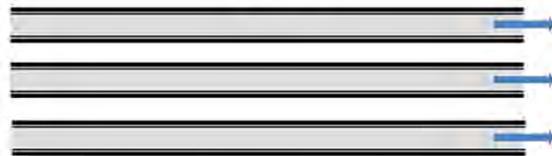
層流素子(バイパス)

センサー管の差圧対流量特性と同じ層流素子をn本配置することで、分流比を一定にする

センサー



層流素子



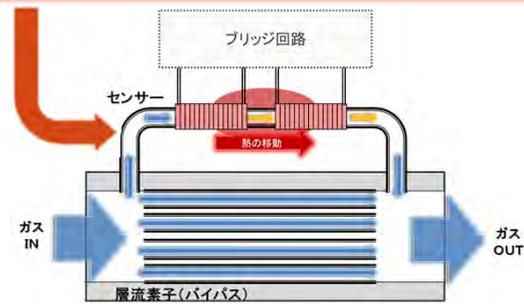
例)

センサー管に流れる流量	5mL/min
+	
層流素子に流れる流量	5mL/min × 3本
総流量	20mL/min

$$\text{レイノルズ数}(Re) = \frac{\text{断面平均流速}(v) \times \text{円筒の直径}(d)}{\text{動粘性係数}(\nu)}$$

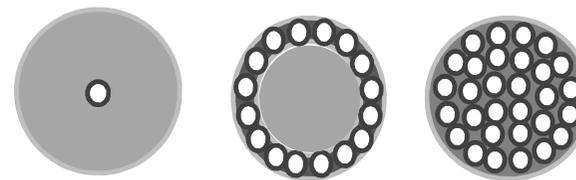
Re<2100 で層流、Re>40000 では乱流に遷移

熱式センサーは管内が層流でないと正しく測定できない



“層流素子”とは、センサー管を層流に保つために、過剰な流れをバイパスさせる役割を持つ素子

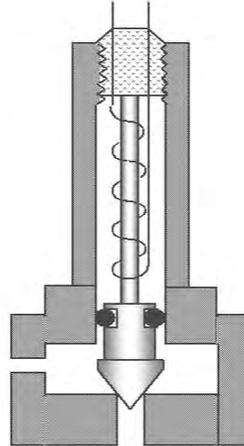
層流素子(バイパス)を正面から見た図



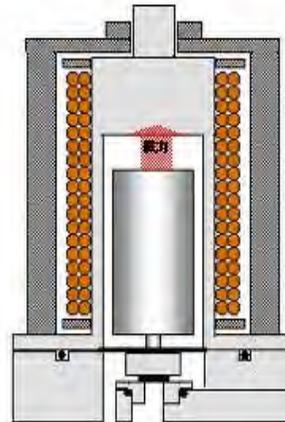
F.S.流量小 → F.S.流量大

マスフローの原理④ 流量制御バルブ

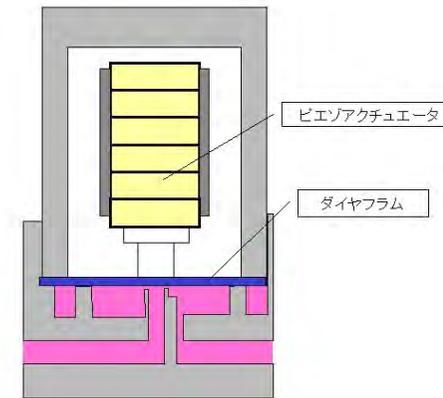
第1世代MFC
サーマルタイプ



第2世代以降MFC
ソレノイドタイプ



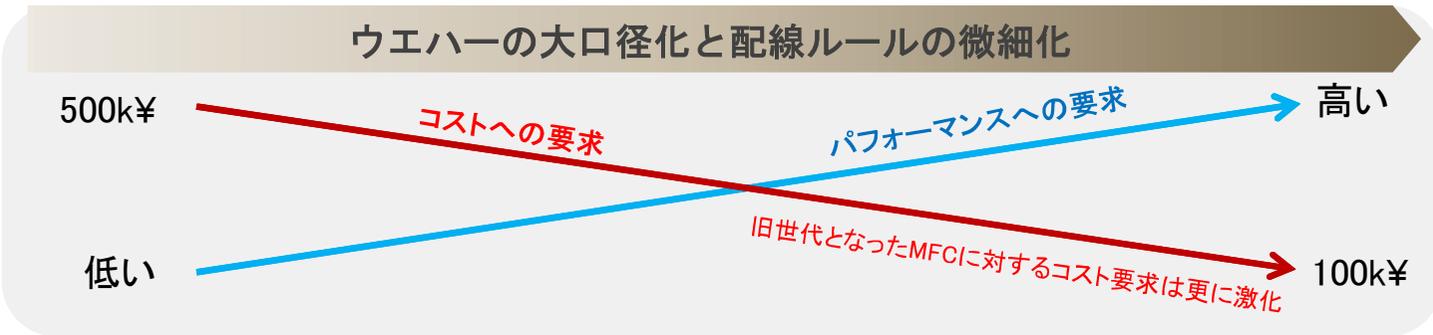
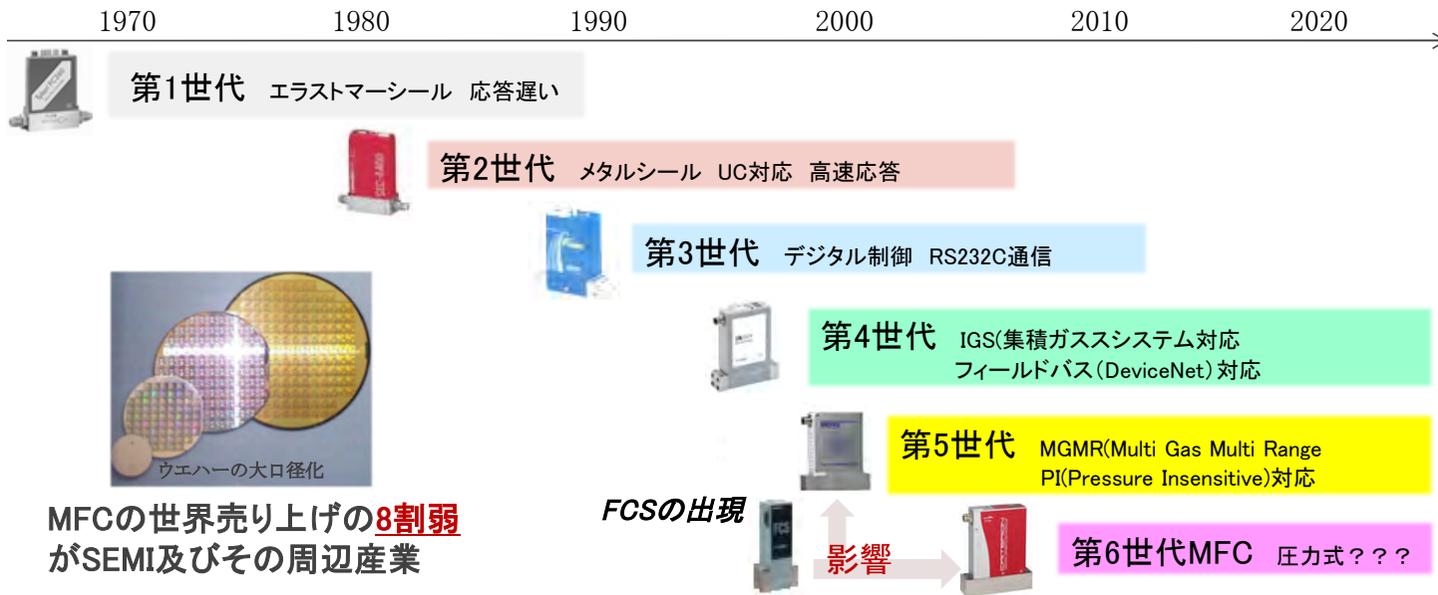
第2.5世代以降MFC
ピエゾタイプ



方式	サーマル	ソレノイド	ピエゾ
原理	熱膨張	電磁石	磁歪素子
長所	組み立てが簡単	ストロークが長い	発生力が強い
短所	応答が遅い	発生力が弱い	ストロークが短い
	流路が高温化	発熱による性能低下	湿度に弱い

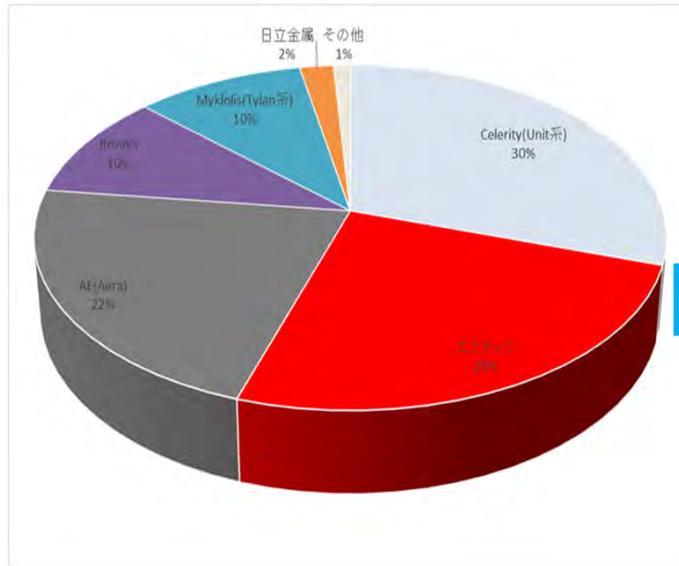
チェックポイント MFCの応答性は「ピエゾだから速い！」は迷信です

SEMI向けMFCの世代分類

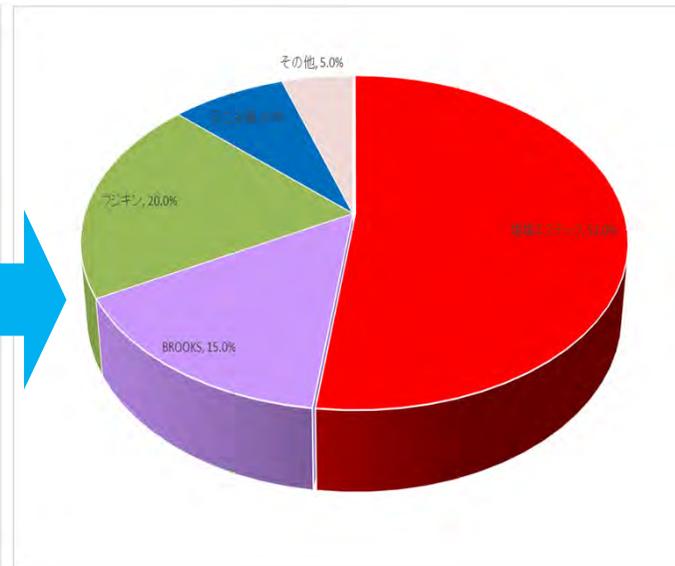


MFCメーカーの世界シェア推移<SEMIのみ>

MFCメーカーの世界シェア 2001年



MFCメーカーの世界シェア 2018年



USAのMFCメーカーは、相次ぐM&Aによる統合を経て、シェアトップメーカーがリーマンショック後にまさかの破綻！
競争相手の脱落に助けられた形で、国内メーカーである堀場エステックが2012年に世界シェア50%を超えた

マスフローの今後の動向



マスフローの今後の動向① 実ガス流量とマルチCF

$$Q_m = C \Delta T / C_p$$

Q_m: 質量流量

C: 補正係数

ΔT: ヒーター間の温度差

C_p: 流体の定圧比熱

熱式センサーは**比熱**という流体固有の物性に左右される！

= 流体によりセンサー感度が異なる！

つまり流体種を固定できないと正しい流量を表示できない！

流体種(定圧比熱)が特定できれば、その差を係数として校正流体との感度比(=流量比)を補正すればいい。

これを **コンバージョンファクター(CF)** といいます。

かつてマスフローメーカーではCF表という形で、ユーザーに配布していました。

ガス種	C.F	ガス種	C.F
窒素(N ₂)	1.00	空気(Air)	1.00
ヘリウム(He)	1.40	一酸化炭素(CO)	1.00
水素(H ₂)	1.00	二酸化炭素(CO ₂)	0.74
酸素(O ₂)	0.99	一酸化窒素(NO)	0.99
アルゴン(Ar)	1.40	アセチレン(C ₂ H ₂)	0.70

CF表の一例 出展: 堀場エステック(株)HP

マスフローの今後の動向① 実ガス流量とマルチCF

ところが……

基準ガスに対する各流体の感度比を表すCFは、一つの流体につき必ず一つとは限らない事がわかってきたのです。

例えば流体固有の特性であり、熱式流量センサーの肝である比熱一つとっても……

窒素(N₂)の定圧比熱は1気圧=1013hPa(A)条件の場合、0°Cで1043J/kg°Cであり、50°Cでも同値である。

それに対して

水素(H₂) 0°C: 14193J/kg°C → 50°C: 14403 J/kg°C

アンモニア(NH₃) 0°C: 2144J/kg°C → 50°C: 2181 J/kg°C

メタン(CH₄) 0°C: 2181J/kg°C → 50°C: 2303 J/kg°C



マスフローユーザー

これは流体の温度、圧力による物性の変化だけではありません！

分流構造を採るMFCのセンサー管と層流素子(バイパス)との分流比が流量レンジと圧力条件の組み合わせで変動する影響と思われるものも確認されており、

もはや一つの流体でも**複数のCF(マルチCF)**で管理せざるを得ないのが現状です。

要注意！フッ化水素(HF)

流体温度の変化に伴いCFが**約3倍**変化するという試験結果があります。

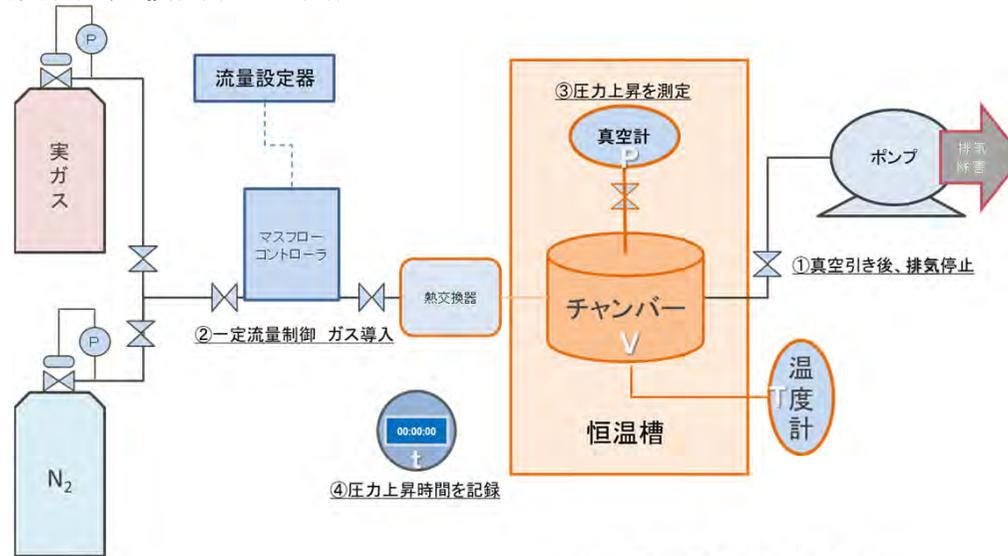
100°C近い温度にするとCFはほぼ1で安定しますが、常温近辺では0.3~0.4程度であり、100°Cまでの間は重合状態に応じて、CFはどんどん1に近づくカーブを描いて変化。

マスフローの今後の動向① 実ガス流量とマルチCF

CF測定方法

方式	基準に用いるガス	方式説明	算出根拠
実ガス法	実ガス	マスフローに直接実ガスを流し流量調整を行う方法	実ガス
コンバージョンファクター法(CF法)	単一ガス	単一の流体(N ₂)を基準として、対象流体との流量比の係数(CF)を適用して流量調整を行う方法	計算式or実ガス測定データ
	複数ガス	ガス種に応じ複数ガス(N ₂ , SF ₆ , H ₂)から1種を選択し、それを基準として、対象流体との流量比の係数(CF)を適用して流量調整を行う方法	
マルチ・コンバージョンファクター法	単一ガス	あらかじめ実ガスと基準ガスとの流量比を測定してデータベース化、流体、流量レンジに応じて複数の値をマスフローに記憶させ、随時適用することで実ガスに近い流量特性を持たせる方法	実ガスデータベース

実ガス測定法 定積法(PVTt法)



* パージライン等の補器類は省略

© 2019 EZ-Japan M.Kuroda

マスフローの今後の動向① 実ガス流量とマルチCF

2013年よりマスフロー各社（堀場エステック、フジキン、日立金属、コフロック他）、装置メーカー（東京エレクトロン）、産総研（NMIJ）、その他マスフローに関わる業界の人材が集い、コンバージョンファクターの信憑性の議論から始まり、各社ラウンドロビンテストを実施、最終的に**業界の実ガス流量測定方法標準化**を目指す業界活動が行われています。

SEMI Standardization of Live Gas Flow Rate Study Group

2014年7月 EZ-Japan創業当初から参加

SEMI Standardization of Live Gas Flow Rate Task Force

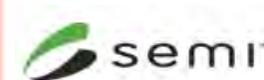
2018年3月で解散

計測クラブ傘下で
WG化を提案

半導体製造ガス流量ワーキンググループ
(Semiconductor Gas Flowrate Working Group)

2019年1月に発足説明会

SEMI時代のメンバーが再集結して2019年4月発足



産総研
計量標準総合センター
National Metrology Institute of Japan

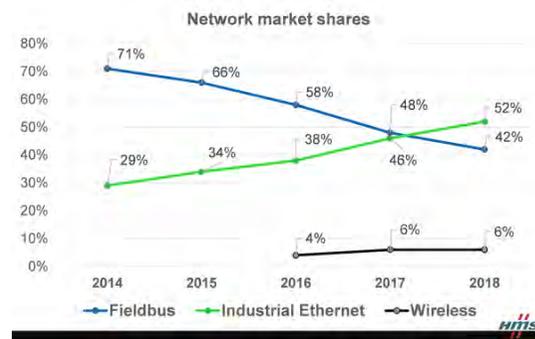
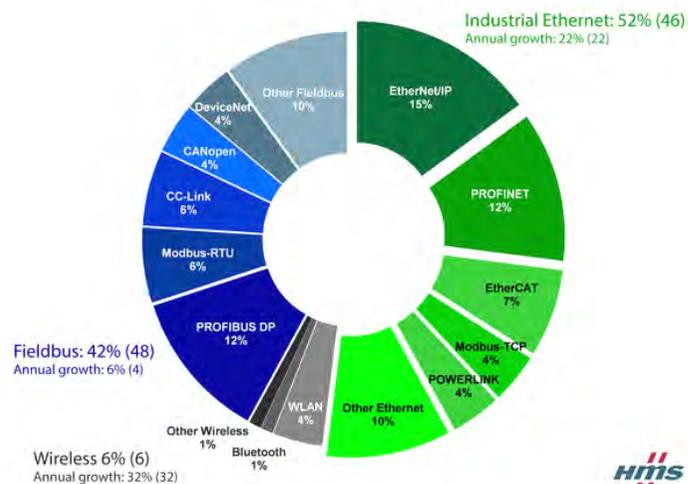


マスマフローの今後の動向② デジタル通信規格

アナログI/O SEMIでは0-5VDCが基本（計装の世界では4-20mA）

日本では根強いが・・・EUでは既にデジタルが主力

デジタルI/O RS232C → RS485 → フィールドバス → 産業用イーサネット



出典：HMSインダストリアルネットワークス 産業用ネットワーク市場シェア2018

© 2019 EZ-Japan M.Kuroda

マスフローの今後の動向③ 流量単位の整合

流量計(特にマスフロー)で使用される流量単位は複雑です。
質量流量計を謳いながら、質量流量単位g/minを使用する事は希です。

体積流量単位を使用する場合は校正温度 圧力で定義が必要です。

SCCM=Standard CC/Min SLM= Standard Litter /Min

NCCM=Normal CC/Min NLM= Normal Litter /Min

真空業界ではPa・m³/secを使用する事もあります。

メモ)換算 1L/min= 1.667 Pa・m³/sec

温度条件	圧力=1atm(1013hPa)	適用
0°C	SCCM/NCCM/SLM/NLM	半導体業界Standard/一般工業Normal
15°C		
20°C	(SCCM/SLM)	一般工業でStandardを使う業界あり
21.1°C(70F)		USA
25°C	CCM	エステック初期



Q:校正温度を間違えてMFCを製作するとどうなりますか？

A:本来の温度基準ではない為、誤差が発生します。

例えば20°C校正で手配すべきMFCを0°C校正で手配した場合

表示値の $(273+20)/273=1.073$ 倍 つまり**7%も流量が多く流れてしまう**