


 論説

# フルードパワーにおける圧縮性流体の計測と制御

## Measurement and Control in Fluid Power Systems



香川利春\*

### 1. まえがき

フルードパワーは産業界に限らず極めて広範囲に利用されている。フルードパワーシステム、すなわち油空圧に水圧を加えた技術領域をフルードパワーシステムと呼んでいる。著者は圧縮性流体を中心とした研究を40数年にわたり継続し、特に空気の圧縮性について工業的応用を主眼として行ってきた。

著者の圧縮性流体研究は偶然のきっかけで始まった。プロセス制御を志し、大学の制御工学科を卒業し、計装メーカーのソフトウェア技術部に配属された。仕事の内容はその頃実用に用いられ始めた計算機によるプラントの制御である。制御対象は鉄鉱石の供給量の制御や、脱硫のための水素製造である。いわゆるDDCのカスケード制御系が5、6つに及ぶ制御系のプログラム制御や、チューニングをおこなった。卒業後2年を経過した時点で、研究室から大学に戻らないかとの連絡が入った。当時の助手は吉田松陰のお兄さんのひ孫である吉田氏であったが、不幸にして病に倒れてしまった。お葬式は世田谷区若林の松陰神社で行われた。夏の大変暑い時期で、大汗をかいた記憶がある。もっと驚いたのは中曽根康弘氏や三木武夫氏が参列していた。現代においても幕末の吉田松陰の影響が残る神社において日本のキーマンが集まるのは驚くべきことと感じた。その吉田氏は同じ制御工学科の7年先輩で、流体論理素子、フルイディックスを研究テーマとしていて、著者にも多くの影響を与えた。

1976年5月に東工大制御工学科に助手に採用されたものの、弱小研究室でろくな実験設備もなく、翌年には研究室が無くなってしまった。学生実験で担当するプロセス制御、圧力計測の実験装置のみが利用できる機器であった。逆に圧力計測しかできないことでこの技術関連を深堀することができた。

### 2. 空気の圧縮性との出会い

圧力センサのみが実験装置として利用可能で、圧力容器はウイスキーの空瓶を用いて、ひたすらに充填と放出の実験を行った。従来では空気の質量流量を入力として圧力を出力とする場合、質量の連続の式のみでの利用で、空気の状態変化はポリトロープとして1から1.4の不確定性を持っていた。充填の場合は放出に比べてポリトロープ数は明らかに小さく実験データとして現れた。この原因を考えて行くうちに、容器内の流動と熱移動が圧力応答に関係する事が分かり、次の圧縮性流体システムの数学モデルの提案と等温化圧力容器の考案につながった。

空気は圧縮すると、空気の体積は容易に変化する。水の部分はその体積は殆ど変化しない。これが圧縮性流体の空気と非圧縮性流体の水の性質である。また、ゆっくり押した場合は定常状態であるため、温度の変化は無く、小学生の教科書の問題である。しかしながら、ある程度の速度で押した場合は空気の部分の温度が上昇し、周囲の水面やシリンダ内壁との熱移動が発生する。

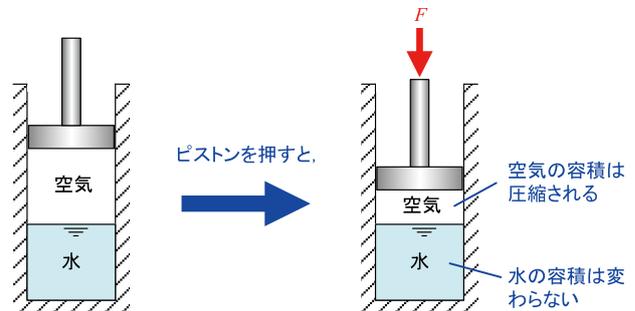


図1 空気の圧縮性

圧縮もしくは膨張した空気の非定常状態での平均温度の計測にも大きな研究の山が存在した。温度を計測するには熱電対を用いれば良いが、熱電対の非定常性は明確にはなっておらず、現在ではストップ法と呼ばれる弁を急閉鎖して室温まで待って、平衡

\*東京工業大学 名誉教授

状態となる圧力から容器内空気の平均温度を求める方法を新たに提案した。この手法によって空気の比熱比を求める方法はクレマンデゾルメ法として有名な方法で、圧力センサのみで空気の比熱の比を求めるもので、当時大学1年生の基礎物理学の実験テーマであった。空気の比熱比を求めるのではなく、比熱比は既知として、空気の非定常状態の平均温度を求める方法で、4章の等温化圧力容器と通常の容器の温度変化の比較はこのストップ法によっている。

### 3. ラディアルスリット機構

図2にラディアルスリット機構を示す。上図は概略、下図は断面図を示す。この場合では隙間高さをシムによって40マイクロンとしている。直径50mmのラディアルスリットでは供給圧力を600kPaと設定した場合には約300l/minの流量が流れるが、騒音値は極めて低く、同一の流量を単純な絞りで放出した場合にくらべ35-40dBの騒音値差が発生し、大変に低騒音の減圧が可能である。上部から入った600kPaの空気は狭い隙間で剪断力を受け、膨張をしながら円周の外側に向かって高速に流れる。

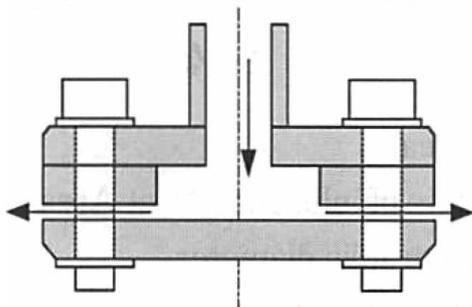


図2 ラディアルスリット弁の構造

Osborne Reynolds (1842-1912年) は水を用いた円管内流れを利用していわゆるレイノルズ数を提示した。このラディアルスリットのながれでは膨張と熱移動を受けている高速流れの状況でもレイノルズ数が利用できることが明らかになった。600kPaの高圧空気を断熱的に膨張させた場合には50℃の温度降下をもたらすが、実際には2-3℃の温度降下しかもたらさない。これは剪断発熱と熱伝導の影響であるが、まだ十分な解明はされていない。

図3にシュリーレン可視化法によって放出後の流体ジェットの様子の可視化を示す。ラディアルスリットの場合は出た空気流れが僅かな密度変化を示しているのみであるが、下側の通常のオリフィスの場合はオリフィスの後流のかなりの距離まで衝撃波が発生していることが確認される。

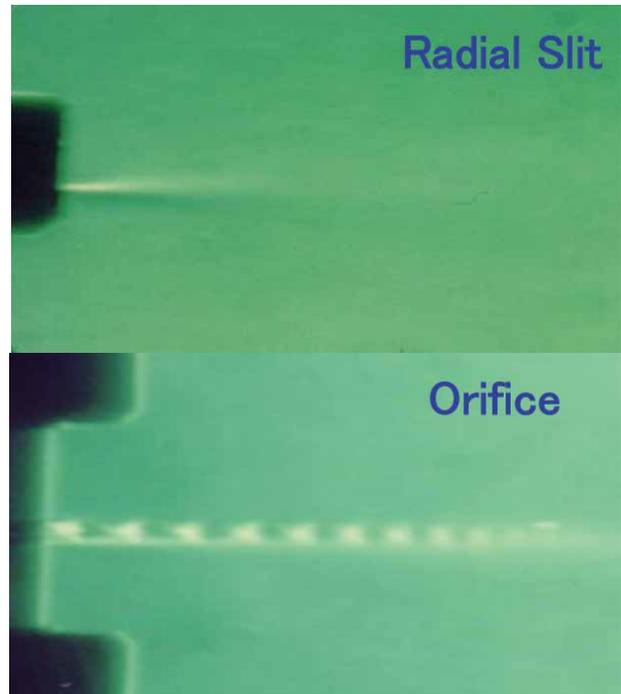
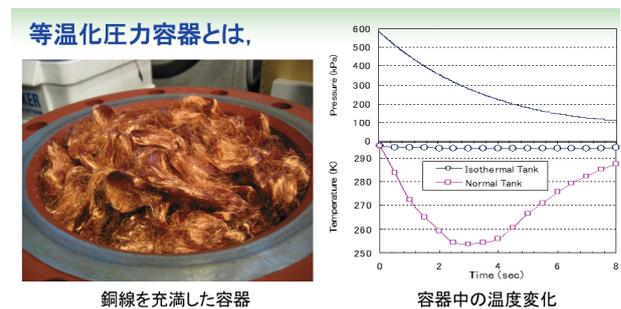


図3 シュリーレン可視化法

### 4. 等温化圧力容器の提案

等温化圧力容器とは、空気の状態変化を銅などの細線を容器に封入して、圧力変化時の温度変化を抑制するものである。



$$\text{流量の計算: } PV = WR\theta \implies G = \frac{dW}{dt} = \frac{V}{R\theta_a} \frac{dP}{dt} \propto \frac{dP}{dt}$$

図4 等温化圧力容器

図4に等温化圧力容器と右図に温度変化を示す。温度変化では空の容器と等温化圧力容器では大きな相違が確認できる。通常の空タンクの場合では約45℃の温度低下が発生して氷点下の温度となっている。等温化圧力容器の場合では空気の状態変化を等

温とする事で、数度の温度変化のみである。圧力変化のみの計測で容器内空気の質量変化を求めることができるため、様々な応用が期待できる。

### 5. 空気圧機器の流量特性の測定

JFPA日本フルードパワー工業会がまとめ役となり、JFPS日本フルードパワーシステム学会が協力してISOTC131の空気圧委員会において空気圧機器の表示方法と測定方法を提案して、多くの活動の結果、認められた。産学連携の良い例と言える。従来米国では主に空気圧機器の流量特性は非圧縮性流体のCv値を使っていた。それに対して、英国バース大学の研究結果を参考にして、空気圧機器に良く合致する表示法を作成した。



ソレノイドバルブ

チョークの場合

$$G = C\rho_0 P_0 \sqrt{\frac{\theta_0}{\theta}}$$

亜音速の場合

$$G = C\rho_0 P_0 \sqrt{\frac{\theta_0}{\theta}} \sqrt{1 - \left(\frac{P}{P_0} - b\right)^2}$$

**b: 臨界圧力比(Critical Pressure Ratio)**

この値より小さいとチョーク流れになる圧力比(下流圧力/上流圧力)。

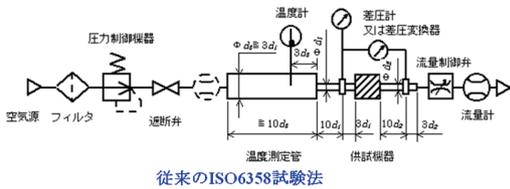
**C: 音速コンダクタンス(Sonic Conductance)**

チョーク流れ状態の機器の通過質量流量、上流絶対圧力と標準状態の密度の積で割った値。

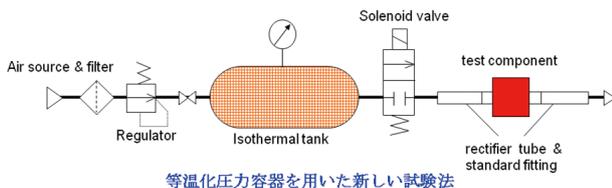
図5 圧縮性流体用制御弁と流量式

### 6. 等温化圧力容器を用いた新しい試験方法

5. で示した流量特性の表示にはソニックコンダクタンスCと臨界圧力比bが必要である。どれだけの流量が流れるかであるので、基本的には流量計が必要である。しかしながら、一点一点計測するのは膨大な時間と労力とエネルギーが必要となる。従来のISO6358 JIS 8390-2の測定法と代換測定法を図6上図に示す。圧力条件を変えて流量計によって計測



従来のISO6358試験法



等温化圧力容器を用いた新しい試験法

消費流量 → 約1/10低減      試験時間 → 約1/5~1/3短縮

図6 ISO6358 JIS 8390-2測定法

する方法でデータ測定点の数にもよるがかなりの時間を要する。下図は2018年に制定された新JISによる方法である。圧力応答を計るだけで多くの時間とエネルギーの節約ができる。

### 7. 流量発生装置の開発

等温化圧力容器を用いて圧縮性流体の非定常流量発生装置が構成できる。上流側を閉塞状態として、下流側に空気圧サーボ弁を設置すると等温タンクの圧力変化より出入りする空気の質量が分かるため、サーボ弁を制御すれば任意の非定常流量の発生が可能となる。



流量計の動特性試験が可能となった。

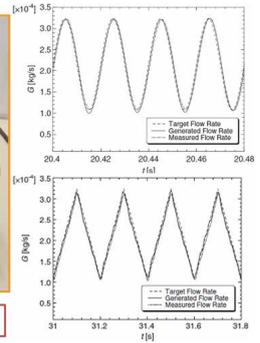
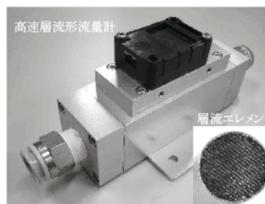
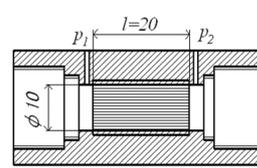


図7 非定常流量発生器

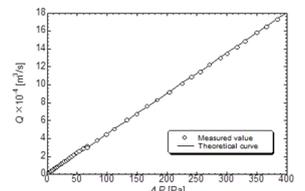
図7に試作した非定常流量発生装置を示す。左に装置写真、右に実験結果を示す。実験結果の周波数波形では50Hzのサイン波の発生が実現していることが分かる。下図は鋸歯状波を作成した場合で6Hzの鋸歯状波が作成できていることが確認される。

### 8. 高応答性を有する流量計の開発

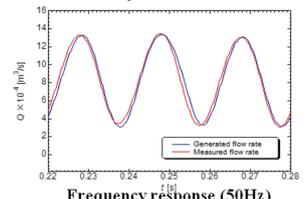
空気圧システムでは非定常な流量の計測の必要性な場合が多々ある。これらの必要性に対して、微細パイプを用いた層流型非定常流量計を提案した。その動特性は非定常流量発生器を用いた。直線性は極めて良く、50Hzまで追従している様子が示されている。



Quick Flow Sensor (QFS)



Steady Characteristics



Frequency response (50Hz)

図8 非定常流量センサ: QFS

### 9. エアパワーメータの開発

空気圧の省エネが求められて久しいが、エネルギーの評価方法が確定していなかった。そこで熱力学法則を用いて、エアパワーメータを提案した。初期型のモデルを示す。流量、圧力、エネルギー値の表示が可能で積算機能も有している。



1. エアパワー 2. 流量 3. 圧力を同時に計測することが可能.

図9 エアパワーメータ

### 10. 旋回流を用いた非接触搬送装置

旋回流を発生させると中心部に負圧が発生し、物体の非接触搬送が可能となる。これをボルテックス浮揚と呼ぶ。安定平衡点が存在する。

回転した流体の中心部で遠心力によって低い圧力が発生する。

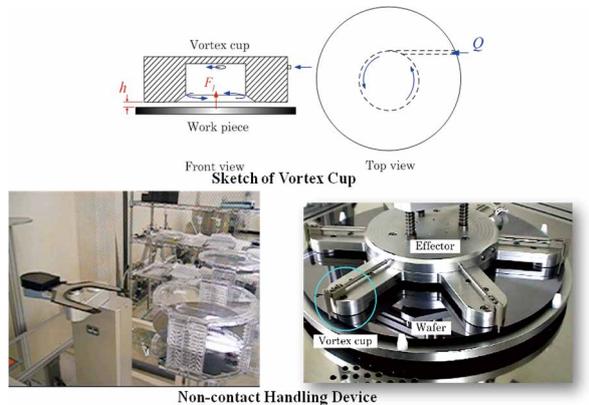


図10 ボルテックスカップ

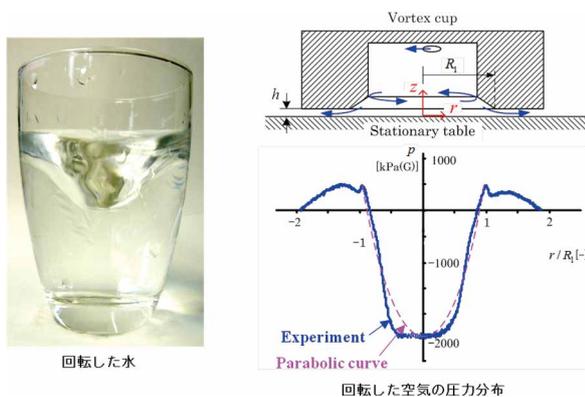


図11 Vortex flow phenomena

### 11. まとめ

圧縮性流体の計測制御として行った研究を紹介する依頼を得て本寄稿文を用意したが、大変に良い機会であったと考える。

空気圧容器の充填、放出時の圧力応答の差異から空気の状態変化の考察を行い、単なる計算のみならず、等温化圧力容器の提案、ISO化、JIS化に立ち合わせていただいた。さらに社会のエネルギー評価に対する取り組みから、ISOにおいても同様の動きがあり、40年間の学生、留学生との共同研究が幸運にもそのベースとなった。

#### 参考文献

- 1) 新版 油空圧便覧 社日本油空圧学会 オーム社 1989
- 2) Kenji Kawashima, Chongho Youn and Toshiharu Kagawa, Development of a Nozzle-Flapper-Type Servo Valve Using a Slit Structure, Journal of Fluids Engineering, Transaction of the ASME, May 2007, Vol. 129, 573/578
- 3) 川嶋健嗣, 藤田壽憲, 香川利春: 容器内圧力変化による圧縮性流体の流量計測法, 計測自動制御学会論文集 32 (11), 1485-1492, 1996
- 4) 空気圧—圧縮性流体用機器の流量特性試験方法—第2部: 代替試験方法 JIS B 8390-2 2018
- 5) 船木達也, 仙石謙治, 川嶋健嗣, 香川利春: 等温化圧力容器を用いた空気圧機器消費流量測定装置の開発, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 36, No. 3, 39/44 (2005)
- 6) 川嶋健嗣, 五十嵐康一, 小玉亮太, 加藤友規, 香川利春: 微細加工技術によるスリット型流路を用いた圧力微分計の開発, 計測自動制御学会論文集, Vol. 41, No. 5, 405/410 (2005)
- 7) Kenji Kawashima, Tomonori Kato, Yosuke Yamazaki, Michio Yanagisawa and Toshiharu Kagawa: Development of slit type pressure differentiator using an isothermal chamber, Measurement Science and Technology, Vol. 16, 1150/1156 (2005)
- 8) Tao Wang, Maolin Cai, Kenji Kawashima and Toshiharu Kagawa: Model of a Nozzle/Flapper Type Pneumatic Servo Valve Including The Influence of Flow Force, International Journal on Fluid Power, Vol. 6, No. 3, 33/43 (2005)
- 9) 船木達也, 川嶋健嗣, 香川利春: 気体用連続非定常流量発生装置の開発, 計測自動制御学会論文集, Vol. 42, No. 5, 461-466 (2006)
- 10) 蔡茂林, 藤田壽憲, 香川利春: 空気圧シリンダの作動における有効エネルギー取支, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 33, No. 4 (2002)