

研究の課題名

共鳴器列による衝撃波抑制技術を用いた音響式圧縮機の開発とそのジェット損失の低減に関する研究

大阪大学大学院 基礎工学研究科 招聘研究員

報告者 増田 光博

報告日 2007年（平成19年）8月3日

1. 本研究の意義・特色

共鳴周波数で管の一端を振動させると、容易に管内に圧力変動が得られる。そこで管壁に2種の弁を設置し、内部が低圧の瞬間に外気を吸入し、高圧となった瞬間に吐出させると、圧縮機が構成できる。この気柱共鳴式の圧縮機は、駆動変位が小さくても大容量の気体の送量が可能となる。加えて、本方式の圧縮機は無潤滑で動作するため、環境面で優位性を持つ。これまでの

研究で、大振幅圧力変動に伴い衝撃波が発生する問題があったが、管に共鳴器列を取付けることによる分散性効果でこれを抑制することに成功した。さらに最近、理論解析により各共鳴器付近に形成されるジェットを抑制するとより大振幅の圧力変動の発生が可能となることが明らかとなった。そこで本研究では、共鳴器形状を改良することによりジェットロスを低減して、大振幅の圧力変動を実現する。また、共鳴管に弁を設置し、実際に圧縮機を構成し、その性能評価により、ピストンの掃気容積よりも大きい吐出流量が実現できることを示す。

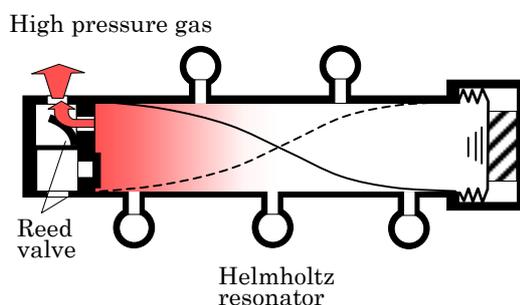


図.1 音響式コンプレッサ

2. 実施した研究の具体的内容, 結果

2.1 ジェット損失の低減

2.1.1 円錐状の共鳴器スロートの導入

ジェット損失は、スロート出口側で運動量を放出することにより生じる。共鳴器に出入りする質量流量が同じ場合を考えると、スロート断面積を出口側で広げることで流速が低減するので、円錐状のスロートを導入することにより、ジェット損失の低減を図った。但し、流れの剥離を避けるため、スロート断面積は緩

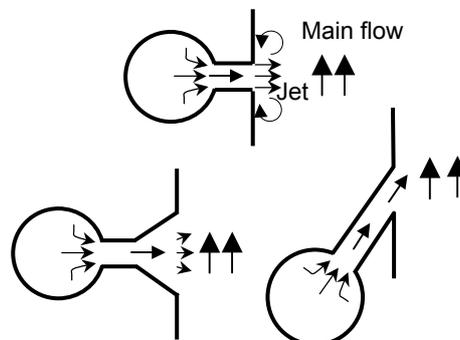


図2 ジェット損失低減方法 上: 通常の形状及び取付け; 下左: 円錐状スロート; 下右: 斜め方向からの取付け

やかな拡大とした。共鳴器スロートから噴出するジェットの流れの計測について、実験装置を図3に示す。管径 $D=38\text{mm}$ 、長さ 923mm の管に、衝撃波を抑制するためのヘルムホルツ共鳴器 5 個（各共鳴周波数 325 Hz ）を接続し、管全体の共鳴周波数でピストン（ダイアフラム）をリニアモータにより駆動する。そしてこの時の共鳴器スロートから管へ噴出するジェットの流速を熱線流速計により測定する。但し、管内主流速度も合成されるため、この影響が小さくなるよう、主流の速度が小さく、ジェットの流速が大きい、管端近くの共鳴器に対して測定する。このジェット流速の測定結果を図4に示す。縦軸は流速の最大値を表しており、1目盛は、音速の10分の1、横軸は、スロート中心から管軸に沿った距離を管端に向かう方向を正として表したものであり、1目盛は、管径 D である。上図(a)及び下図(b)はそれぞれ通常の円筒型スロートを持つ共鳴器及び円錐型スロートをもつ共鳴器の場合についてである。実線データは理論から予測される主流速度である。ジェットの最大流速値が、円錐型スロートの方が40%程度小さくなっており、その到達範囲も管中心軸まで到達しておらず、ジェットの抑制がみられる。

2.1.2 傾斜した共鳴器取り付け姿勢の導入

図2右下のように共鳴器の接続姿勢により、共鳴器から管への空気噴出角度を管に平行へ近づける。これにより、主流に対するジェットの相対速度を大きく低減することができ、ジェットによる損失の低減を期待することができる。図5に示すように、レーザシート光を管軸に沿って入射し、管

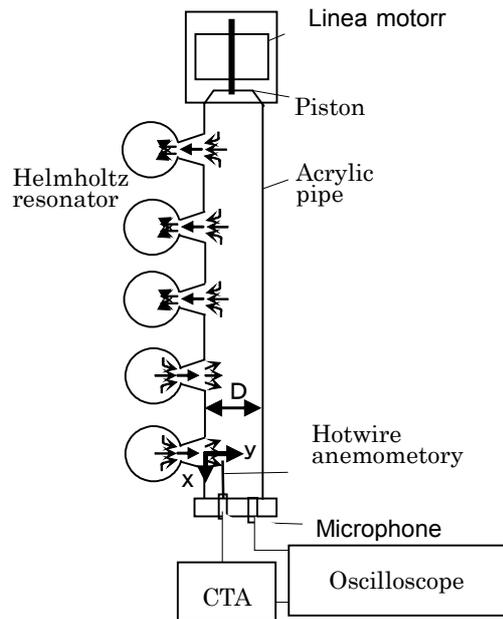


図3 共鳴器におけるジェット流速測定実験

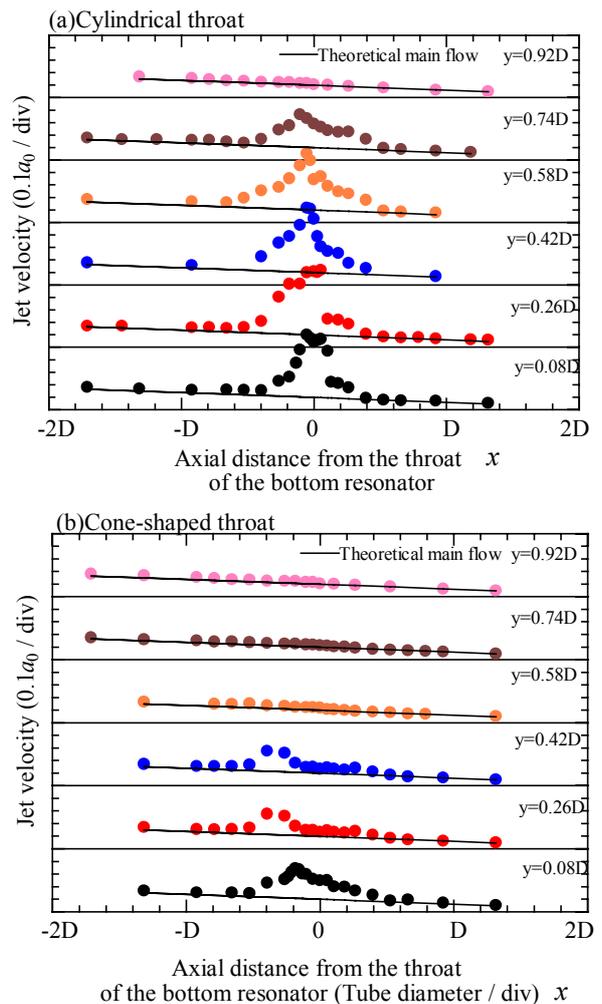


図4 共鳴器から管へ噴出するジェット流速分布

内部の空気を 2 次元的に可視化し、ジェット
の観察を行った。上の写真は、管軸に垂
直な取付けの場合を示したものである。図
では確認しにくいので、循環流の 패턴
を矢印で示した。ジェットの発生に伴いそ
の両側に強い循環流が生じる。このとき主
流の影響によりジェットが管中央方向（上
方向）に傾くため、管端側（下方向）にあ
る循環流は対面する壁面近くに位置する。
これに伴って、反対向きの循環流がその管
端側に形成されているのがわかる。下の写
真は、共鳴器を管軸に対して 22.5 度傾斜
して取り付けた場合を示したものである。
ジェットが管軸方向に長く伸び、比較的大
きな循環流がジェットの両側に形成され
ているのが分かる。この様子から、より大
きなスケールの渦が形成されており、散逸
が比較的小さくなることが予想できる。

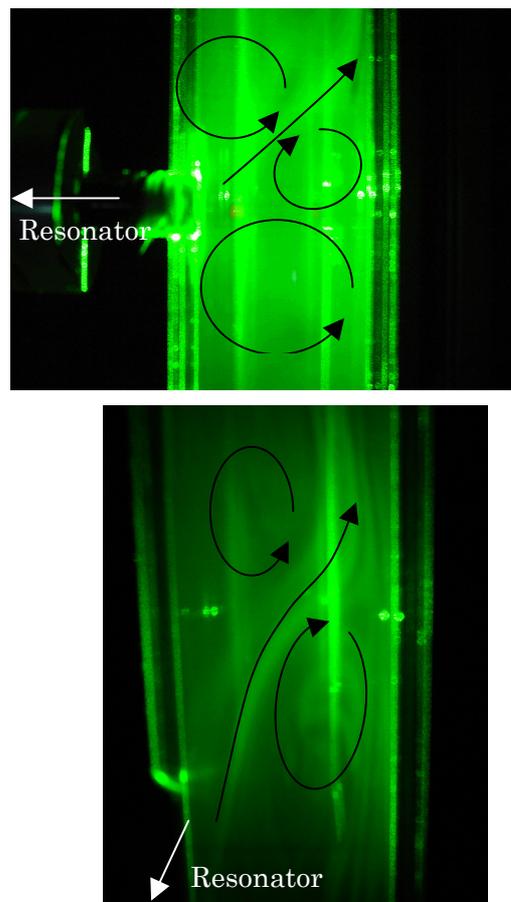


図 5 共鳴器接続角度による噴出するジェ
ットに伴い発生する循環流の pattern の相
違 上：管軸に垂直に接続（通常）； 下：
管軸に対し斜めに接続

2.1.3 ジェット損失低減効果の評価

ジェット損失の低減効果を、圧力変動振
幅に対するピストン変位を比較すること
により調べる。図 6 は、横軸に管長さ l で
規格化されたピストン変位をとり縦軸に
管端での圧力変動の基本周波数成分の振
幅を示したものである。また、それぞれの
データは、共鳴状態となるよう圧力変動と
ピストン変位の位相差を 90 度に調整して
いる。この図では、右に位置するほど、管
内の音響エネルギー（基本周波数成分）に
対する入力パワーが大きいことを示して
いる。円筒状のスロートと円錐状のスロ
ートを比較すると、管端での圧力変動が平衡
圧の 10% のときに、約 14% の入力パワーが
低減されている。また、共鳴器を斜めに
取付けた場合も、5% 程度の低減が見ら
れる。

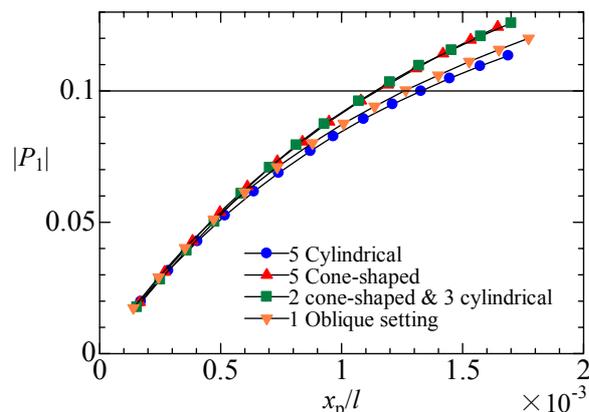


図 6 ジェットロスの低減効果比較

2.2 コンプレッサ実用可能性評価

2.2.1 高圧力比の実現

管内径を 20mm と小さくし，内径 30mm 及び外径 50mm のベローズを使用，これによりピストン掃気容積を大きくした．また，管とベローズ部の間には，断面積の急変化による剥離を抑えるため，テーパ部を設けた．管長は 785mm のものを使用した．ベローズのストロークが 5mm のとき（掃気容積が管容積の 2%），管端および共鳴器内でのそれぞれの最大圧力，最小圧力及びその比を表 1 に示す．管端において圧力比が 2.0 に達した．また，最下部の共鳴器内部においては，さらに大きい圧力比 2.23 を得ることができた．

表 1 管端と共鳴器内における圧力の最大・最小値

	Tube's end	Bottom resonator
p_{\min}/p_0	0.63	0.64
p_{\max}/p_0	1.26	1.43
p_{\max}/p_{\min}	2.00	2.23

2.2.2 大容量の吐出流量の実現

掃気容積よりも大きな吐出量の発生は，音響式コンプレッサの特長である．さらに適切な吐出弁について，その材質及び配置の影響を調べる．内径 37mm，長さ 941mm のステンレス管の一端を閉じ，もう一端からピストン（ダイアフラム）により，気柱を共鳴振動させる（共鳴周波数:172Hz）．管壁には衝撃波抑制のため共鳴器（共振周波数 325Hz）を 5 個管軸方向に取付けている．管端または管壁に設けたリード弁により，空気の吐出を

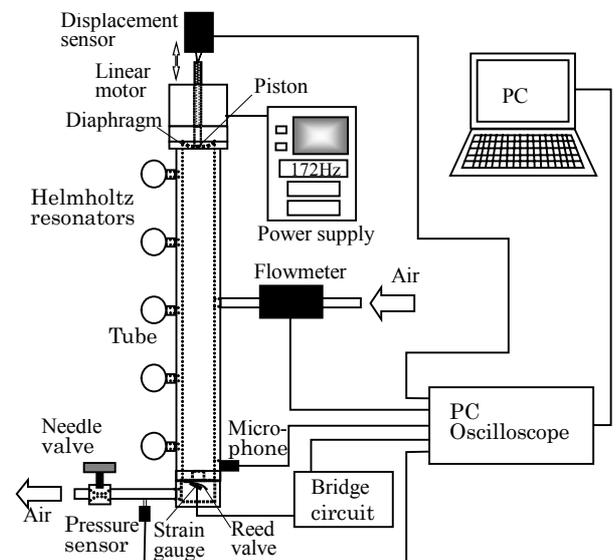


図 7 音響式コンプレッサの特性評価試験

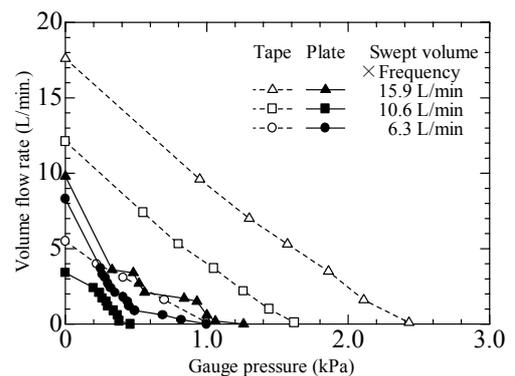


図 8 吐出流量－吐出圧力の特性

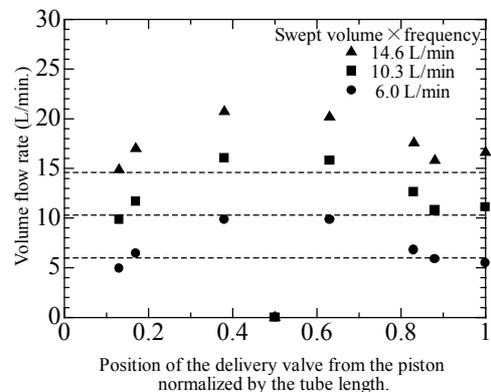


図 9 吐出流量に対する弁取付け位置の影響

行うが、本報では吸入弁は使用せず代わりに、定常的に負圧となる管中央部に吸入孔（Φ7.1mm）を設け、そこに流量計を接続して、定常的な流入量を計測する。図8に、吐出弁のリードとして、それぞれ金属板（SUS304,厚み0.1mm）と薄いフィルム状テープを用いた場合について各々、黒塗り及び白抜きのシンボルで示す（吐出孔：16mm×10mm）。金属板は最も流量が出るよう長さを調整している（長さ20mm,固有周波数156Hz）。テープ状リードを用いた場合の方が2倍近い流量が得られており掃気容積を超える流量が得られていることが分かる。さらに、テープ状リードを用いた場合に、その弁の位置を管軸方向に変化させたときの吐出流量の変化について図9に示す。吐出弁の設置位置を管中央に近づけると、この弁による気柱振動への影響が小さくなるため、大きな吐出流量が得られる。また、破線はそれぞれ3種類の掃気容積の値を示しており、最大でこの値の1.6倍の吐出流量が得られた。

3. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

増田 光博	大阪大学大学院基礎工学研究科	招聘研究員
川島 慎太郎	大阪大学基礎工学部	B4 学生
杉本 信正	大阪大学大学院基礎工学研究科	教授

4. 研究実施時期

2006年（平成18年3月1日から2007年（平成19年）5月31日

5. 本研究に関連して発表した主な論文等

- (1)増田 光博：管内気柱振動において共鳴器配置に伴い発生するジェットロスの低減化，非線形音響研究会(2006)
- (2)増田 光博，川島 慎太郎：音響式コンプレッサの吸排気弁に関する研究，日本機械学会関西支部第72期定時総会講演会(2007)
- (3)増田 光博：音響現象の理論解析とその応用について，日本伝熱学会関西支部講演討論会(2007)
- (4)M. Masuda, S. Kawashima: A study on effects of the valves of acoustic compressors on their delivery flow rate, The 19th International Congress on acoustics, Spain (2007), 発表予定
- (5)増田 光博，川島 慎太郎：音響式コンプレッサの最適な構成に関する研究，日本機械学会年次大会(2007) 発表予定

6. 内外における関連研究の状況

管内気柱振動の衝撃波を抑制する方法として、本研究のように共鳴器列を接続する他に、管断面積を管軸方向に変化させる方法があり、共鳴管小端部で非常に大振幅の圧力変動が得られている。しかしながら、吸排気弁を取り付け、コンプレッサを構成した場合には、吐出流量がほとんど得られない問題がある。また最近、熱音響エンジンと呼ばれる、共鳴管の管軸方向に温度勾配を与えたときに生じる自励振動を利用した熱機関が注目されてい

るが、この装置に対して、以上の衝撃波抑制技術が導入され、高効率化が図られている。

7. 今後の発展に対する希望

共鳴器スロートから共鳴管に噴出するジェットの影響により、ジェット損失の低減効果が示されたが、共鳴器空洞内でもジェットが発生しており、さらなる共鳴器形状の改良を検討している。また管内部の詳細な流れはまだ捉えられておらず、PIVなどの導入が必要と考えている。さらに、より汎用的なコンプレッサとしての実現可能性を考えた場合、圧力比および吐出流量をさらに大きくする必要がある。まず、圧力比については、大きな推力をもつリアモータを導入し、より大きな圧力比の場合でも、適切な形状の共鳴器列により、衝撃波の発生およびジェット損失の抑制が可能であるか確認する予定である。また、吐出流量については、吸気弁あるいは吐出弁の影響は複雑である。そのため容易に最適化が図れるよう、比較的簡単なモデルを導入し解析を行う予定である。