

第3章

パルス管冷凍機の基本性能に関する 実験的検証

3.1 はじめに

第2章で理論的には冷凍能力が蓄冷器低温端からパルス管に流入するガスのPV仕事に等しいことを示した。また、蓄冷器低温端におけるガスの圧力と質量流速との位相差 ϕ および蓄冷器の熱交換が冷凍能力に与える影響を求めた。そこで本章では第一番目に蓄冷器低温端からパルス管に流入するガスのPV仕事および圧力とパルス管低温端のガス変位の位相差 θ と冷凍性能との関係および蓄冷器の熱交換が冷凍能力に与える影響を実機に近い実験機を用いて調べ、第2章で得られた結果の定性的な検証を行う。このため、まずパルス管内のガス変位を計測する方法について簡単に述べる。そしてこの計測法を用いてオリフィス型およびダブルインレット型パルス管冷凍機の低温端のPV仕事・位相差と冷凍性能との関係について調べる。

これまでのガスの動きに関する研究はCaiら⁽⁴⁷⁾、Rawlinsら⁽⁴⁸⁾、Inadaら⁽⁴⁹⁾が熱線流速計を用いて蓄冷器低温端におけるガスの圧力と質量流速との位相差 ϕ をオリフィス型、ダブルインレット型について調べている。さらにInadaら⁽⁴⁹⁾は位相差 ϕ および平均質量流速と冷凍性能との関係を求めている。しかしながらガスの変位そのものは計測からは求められないため本章で求めようとしているPV仕事との関係は言及されていない。また、熱線流速計の出力は圧力と温度に大きく影響を受け、これらの動的な校正が困難であるという問題も残している。

また、Kunitomoら⁽⁵⁰⁾はレーザドップラ流速計を用いて圧力と速度の位相分布を明らかにし、パルス管内ガスの大域的挙動を観察しているが微小圧力での計測でありPV仕事との関係は言及されていない。

さらに、Shiraishiら⁽⁵¹⁾はスモークワイヤ法を用いて低温端近傍のPV仕事を求めているがスモークワイヤを設置する位置が低温端から離れているためPV仕事そのものではない。

第2番目に第2章で理論的にCOPを求めた際、低温部を断熱モデルとして扱ったが、低温端近傍のガス温度の計測を行い比較検討することにより断熱モデルの正当性を確認する。さらに、圧力とガス変位の位相差 θ が冷凍性能に与える影響についても理論的な結果と比較検討する。そのため従来の研究ではほとんど行われていない運転中のパルス管内のガス温度を1周期に渡り精度良く計測する方法を提案するとともに、可視化画像として表現あるいはグラフ化し、温度変化についての検討を行う。

パルス管内の温度計測に関する従来の研究としてSeoら⁽⁵⁵⁾による熱線風速計のプロープに細い熱電対をつけパルス管内のガスの熱振動を確認した例などがあるが温度の計測法としては熱電対に限られている。しかしながら熱電対による計測法ではワンポイントの計測しかできないためパルス管の断面内の計測を行うためには1本の熱電対を複数回場所を変更して計測するか、複数本の熱電対を用いて計測するしかない。後者の計測法はパルス管内の流れの様子を変化させずに計測することが困難であり例をみない。前者の計測法は

現象の安定性を仮定すれば計測可能であるが、低温部の計測時は熱電対を通じて伝わる熱の影響を取り除くためプローブ付きの細い熱電対を高温部から挿入する必要があり、プローブもガスの流れに負けない構造とするため径の太いものが必要となりガスの流れを阻害することになる。

このように温度計測が充分行われていなかったことにより、本章にて明らかにしようとしていることに対する実験結果の吟味および考察はこれまで行われていない。

3.2 パルス管内のガス変位計測法

3.2.1 位相差 ϕ と θ の関係

これまでパルス管冷凍機で用いる位相差として圧力と質量流速との位相差 ϕ と圧力とパルス管低温端のガス変位の位相差 θ の両者を使ってきたがここで両者の関係を明らかにしておく。図3.1に圧力を $P = P_0 (1 + a \sin \omega t)$ 、質量流速を $\dot{m} = m_0 \sin (\omega t + \phi)$ とした場合の質量流量 m と低温側パルス管体積 V_{pc}/R つまりパルス管低温端のガス変位をガス定数 R で除したグラフを示す。ただし3者の位相関係を解りやすくするため $P_0=3$ 、 $a=0.2$ 、 $\omega=1$ 、 $m_0=1$ 、 $\phi=\pi/4$ 、 $T_c=1$ としている。この場合質量流量 m は質量流速を $-\phi$ から $2\pi - \phi$ まで積分し $m = m_0 (1 - \cos (\omega t + \phi)) / \omega$ となり、 V_{pc} は(2.8)式、(2.9)式から求まる。これらより質量流量とパルス管低温端のガス変位の値が0となる位相は等しく、質量流速との位相より 90° 遅れていることが解る。つまり ϕ と θ との間に次のような関係がある。

$$\theta = \pi/2 - \phi \quad (3.1)$$

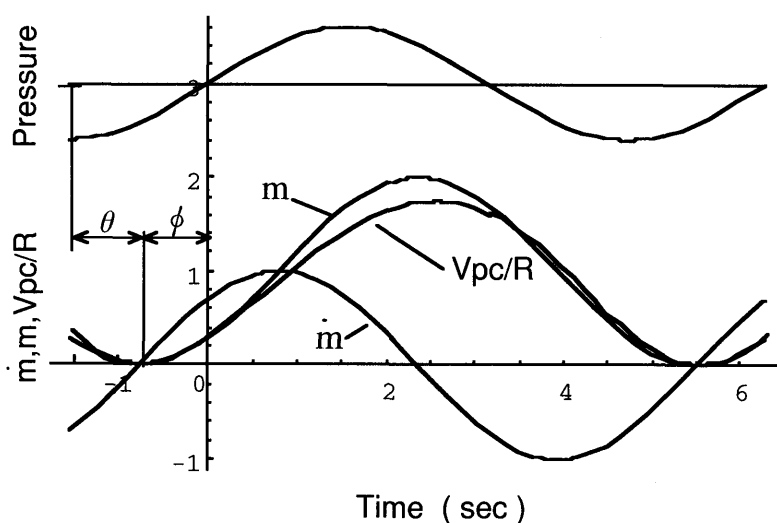


図3.1 P 、 \dot{m} 、 m 、 V_{pc}/R の位相関係

3.2.2 ガス変位計測方法の検討⁽⁵⁶⁾

パルス管低温端のガス変位を計測する方法として著者らが提案した方法を用いる。つまり、図3.2に示すようなパルス管をアクリルのような透明な物質で作製し、内部にパルス管の内径と微小隙間を有する軽い物体（以下、シャトルと呼ぶことにする）を入れガスの動きを観察する方法を採用した。

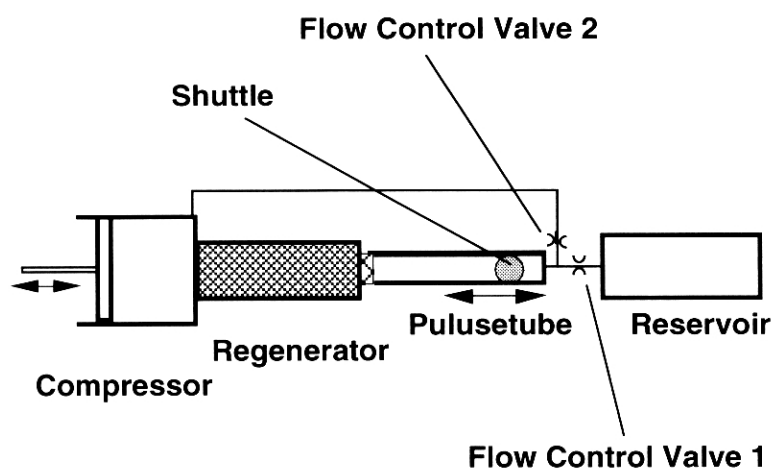


図3.2 パルス管内のガス変位を計測する方法

3.2.3 計測精度の確認

この項では図3.3に示すような作動ガスを空気とする簡単なパルス管冷凍機を用いて計測精度を確認する。このパルス管の寸法等を表3.1にまとめる。作動ガスが空気になったことによりシャトル外周からの漏れ量が変わることが予想されるが300K空気0.1MPaの粘性係数は7%程ヘリウム2MPaの値より小さくなるだけであるので測定精度にあまり大きな変化はないと思われる。

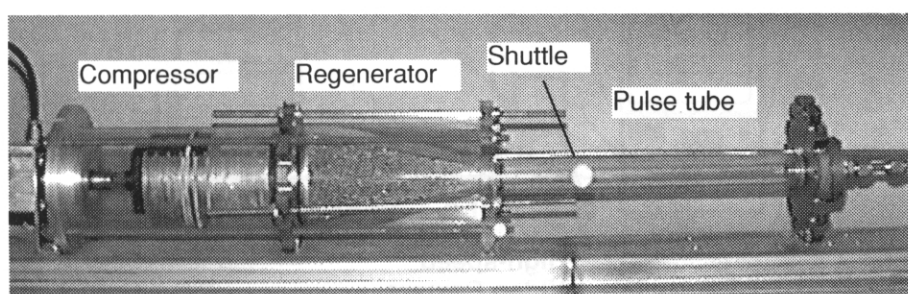


図3.3 簡易パルス管冷凍機

表3.1 簡易パルス管冷凍機の仕様

Pulse tube (Acrylic)	Reservoir(Acrylic)
Inner Diameter : $20 \times 10^{-3} \text{ m}$	Volume : $1000 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
Length : $250 \times 10^{-3} \text{ m}$	Gas (Air)
Regenerator	High Pressure : 0.119 MPa
Inner Materials : iron balls ($\phi 1 \times 10^{-3} \text{ m}$)	Low pressure : 0.077 MPa
Inner Diameter : $35 \times 10^{-3} \text{ m}$	Operating Condition
Length : $200 \times 10^{-3} \text{ m}$	Frequency : 3.4 Hz

装置全体の構成を図3.4に示す。圧縮機は空圧駆動のピストンを使用している。ピストンの動きはピストン後部におかれたレーザ変位計で計測する。蓄冷材には直径 1 mm のステンレス球を約 3 万個使用している。また、位相制御用の 2 つのバルブは流量調整範囲が Cv 値で 0~0.15 の市販のニードルバルブを用い、おのこの流量調整バルブ 1、流量調整バルブ 2 と呼ぶことにする。また、流量調整バルブ 1 の前後には歪みゲージ式圧力変換器を取り付けている。また、パルス管高温端付近にガス温度の測定用に熱電対を挿入している。この装置においては室内に露出した低温端部の温度は -5°C 程になるが実験中温度のモニターは行わない。

シャトルの動きは、最高 1 秒間に 3000 コマ撮影可能な高速ビデオカメラを用いて撮影し、シャトルの重心を自動的に数値データに変換できる市販ソフトウェアを用いて記録する。この際、アクリル製パルス管の裏に黒いスクリーンを置くなどの手間以外には特殊な照明等はない。このデータとピストンの変位データ、圧力のデータを計測用コンピュータに入力してデータ処理する。

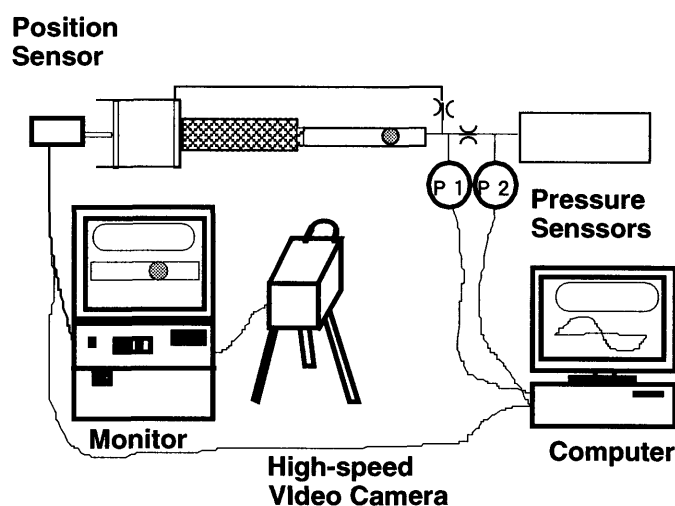


図3.4 簡易実験装置の装置構成

シャトルが高温端から流出入するガスの動きとほぼ同じ動きをしているかを概略的に確かめるためリザーバー内に煙草の煙を封入し、煙およびシャトルをビデオカメラで撮影した。数周期に渡る観察により、シャトルが煙とともに移動し、シャトル外周から漏れる煙はほとんどないことを確認した。

次に、流量調整バルブ 1 を適当に開いた状態 ($C_v = 0.055$) で実験シャトルをパルス管高温端に置き実験を行い、流量調整バルブを通過した流量をシャトルの変位に換算し、実験結果と比較した。この比較が可能となるのは本実験装置ではパルス管内にあまり温度勾配がつかないことおよび比較的単純な計算でシャトルの変位を求められるからである。

流量調整バルブを通過する流量とバルブ前後の圧力 P_1 、 P_2 の関係は(3.2)式に示す通りである。

$$V_v(t) = C_v C_g \int_0^t \sqrt{|P_1^2 - P_2^2|} / T \, dt \quad (3.2)$$

V_v は単位時間当たりバルブを流れる体積流量、 t は時間、 C_v はバルブ開度によって決まる流量係数、 C_g はガスによって決まる定数、 T はガス温度である。 C_v の値は市販メーカが指定していない方向については別途実験により求めた値を用いた。

また、高温端から流入したガスは圧縮機のピストンの動きにより生じた圧力変動に従って、圧縮、膨張するが駆動周波数も小さくパルス管が真空チャンバ内に設置されていないことから断熱圧縮、断熱膨張とは扱わず等温変化に従って体積変化するものとした。実験結果の一例を図3.5に示す。グラフ中の時間軸はパルス管内圧力が平均圧力以下になる点を0と定めることにし、シャトルの変位座標は図3.6に示す定義に従うものとする。

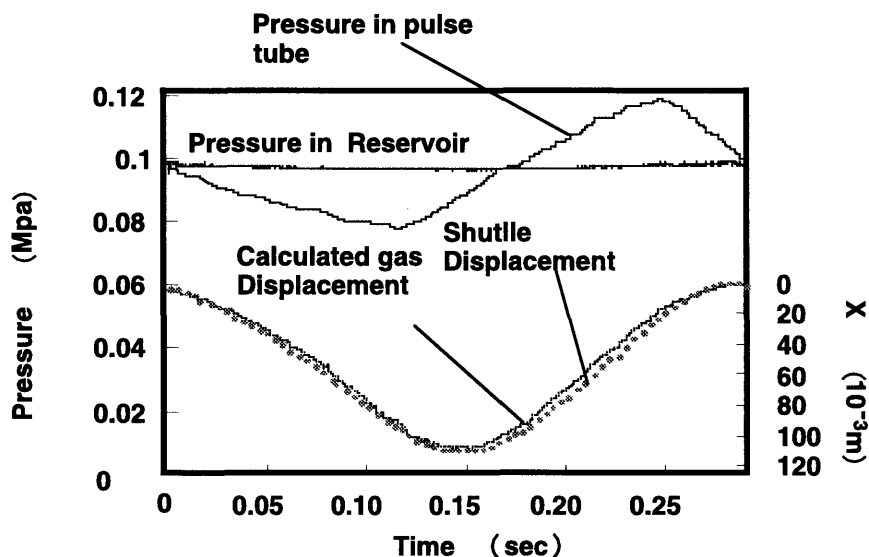


図3.5 簡易実験装置による実験結果

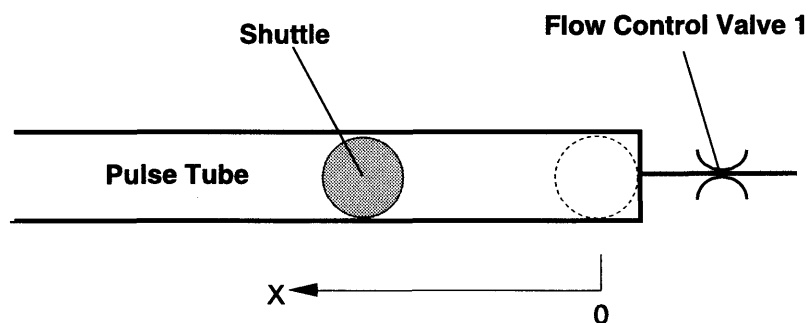


図3.6 座標

この結果、周波数 5 Hz以内であれば流量調整バルブから計算して求めたガスの変位とシャトルをビデオ撮影して求めた変位は最大約 4 %の誤差であることが解った。よって上記に示したしたパルス管内のガス変位の計測法が有効な手段であることが確かめられた。

3.3 オリフィス型およびダブルインレット型パルス管冷凍機の低温端の PV仕事・位相差と冷凍性能との関係⁽⁵⁷⁾

この節では実際にヘリウムを作動流体とするパルス管冷凍機の亚克力製パルス管の内部にシャトルを封入しパルス管低温端のガス変位・位相差と冷凍性能との関係を実験的に把握し第2章で行った動作解析結果と定性的な比較検証を行う。

3.3.1 実験装置

図3.7に実験に用いた実験装置構成を示す。簡易実験装置と同様にシャトルの動きは最高1秒間に3000コマ撮影可能な高速度ビデオカメラを用いて撮影し、シャトルの重心位置の動きを記録する。シャトルの動きとパルス管高温側熱交換機部の圧力を圧縮機後部に取り付けたレーザ変位計からの信号に同期させ記録している。蓄冷器低温端熱交換器の温度を少なくとも室温より100K程度冷やし、パルス管に霜が着くことを避けるため図3.8に示すような亚克力製真空チャンバを有している。また、作動ガスであるヘリウムを0.5MPa以上充填するため簡易型より壁厚さを増している。さらに、測定誤差を5%以内に抑えるため圧縮機の駆動周波数を5Hz以下とし、パルス管の内径を 20×10^{-3} m、シャトル外径を 19.8×10^{-3} m、シャトル質量を 0.4×10^{-3} kgとした。

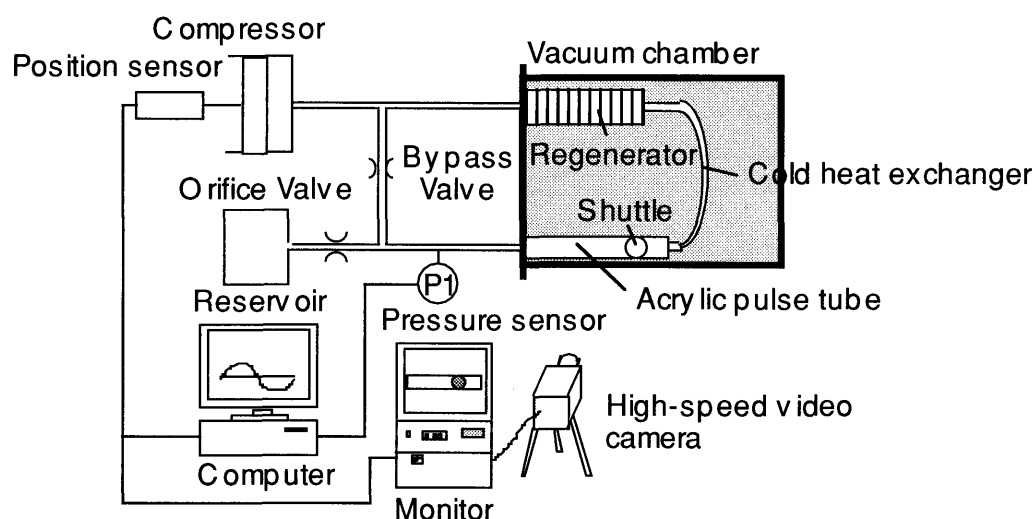


図3.7 実験装置構成

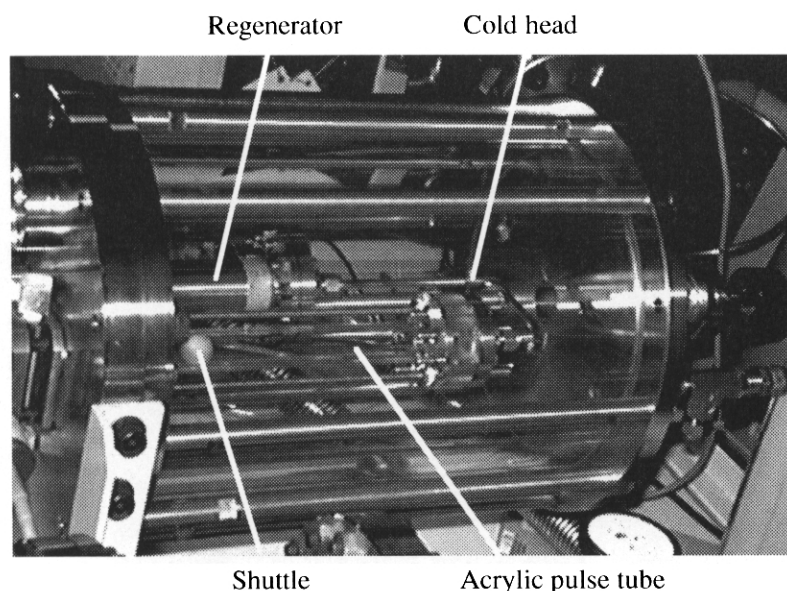


図3.8 真空チャンバ内に置かれたパルス管冷凍機

シャトルを蓄冷器低温端に置き、パルス管低温部の流体の挙動を計測する。シャトルの動きは蓄冷器低温端熱交換器をパルス管側に流入するガスの変位と概ね一致する。以後シャトルの変位振動 1 周期中の位置の最大値から最小値間を変位 X 、また圧力に対するシャトルの変位の位相差を位相差 θ で表すことにする。

また、本実験ではオリフィス型以外に位相差と冷凍性能の関連を検討する意味でダブルインレット型の実験を行う。オリフィス型は 図3.7に示すダブルインレット型パルス管冷凍機を用いて、ダブルインレット用流量調整バルブの開度を 0 にした状態で実験をした。

表3.2に実験用パルス管冷凍機の仕様を示す。オリフィスバルブ・バイパスバルブ・循環流量調整バルブは市販のニードルバルブを用いた。またチェック弁は市販のポペットチェックバルブを用いた。圧縮機は往復動型を用いており、圧力切り替えバルブは使用していない。

表3.2 実験用パルス管冷凍機の仕様

Compressor	Reservoir
Swept volume : $20 \times 10^{-3} \text{ m}^3$	Volume : $1.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
Pulse tube (Acrylic)	Gas (Helium)
Inner diameter : $20 \times 10^{-3} \text{ m}$	Mean pressure : 0.8 MPa
Length : $200 \times 10^{-3} \text{ m}$	Operating condition
Regenerator	Frequency : 3 Hz
Inner materials : SUS #200	Flow control valve
Inner diameter : $32 \times 10^{-3} \text{ m}$	Orifice valve : $C_v 0.03 \text{ (Max)}$
Length : $150 \times 10^{-3} \text{ m}$	Bypass valve : $C_v 0.03 \text{ (Max)}$
Cold heat exchanger	DC flow control valve : $C_v 0.03 \text{ (Max)}$
Inner diameter : $4 \times 10^{-3} \text{ m}$	
Length : $240 \times 10^{-3} \text{ m}$	

3.3.2 計測の準備

座標の定義はパルス管低温端にシャトルがある時のシャトルの重心位置を 0 とする。位相差は圧力、ガス変位ともに正確な正弦波でないため圧力とシャトルの変位を圧縮機の駆動周波数を基本周期としてフーリエ級数展開することにより求める。

また、蓄冷器低温端からパルスへ流入するガスのPV仕事 W_{pc} は

$$W_{pc} = f \oint P dV dt \quad (3.3)$$

$$dV = A_p dX \quad (3.4)$$

により求める。 f は駆動周波数、 A_p はパルス管内側の断面積、 dX はシャトルの微小時間内移動距離である。

圧力の計測に関してはパルス管長さが充分波長に対して短くかつパルス管内で生じる圧力損失が計測している圧力変動に対して非常に小さいと考え、パルス管内圧力はパルス管高温端熱交換器部で計測した値を用いる。

また、冷凍機の性能は決められた温度での冷凍能力や無負荷時の到達温度で評価されることが多いが、本実験では無負荷時の到達温度で評価する。なお、温度の測定は低温部に取り付けられたシース型熱電対により行った。

さらに、流量調整バルブの C_v 値は一方向の定常流れにおける圧力と流量の関係を表したものであり順方向と逆方向での C_v 値が異なる。しかし本実験ではバルブがどの程度開いたかを表すことができればよいので、流量調整バルブの開度は実験により求めた順方向の C_v 値で表す。

3.3.3 オリフィス型パルス管冷凍機における計測結果

オリフィス型の実験結果について述べる。実験は図3.7に示すバイパスバルブを完全に閉じた状態でオリフィスバルブを開けていくことにより行った。図3.9 に駆動周波数が 3Hz におけるオリフィス型のオリフィスバルブ開度別の圧力とガスの変位の関係を示す。図中性能が最も良い場合を太い線で表した。

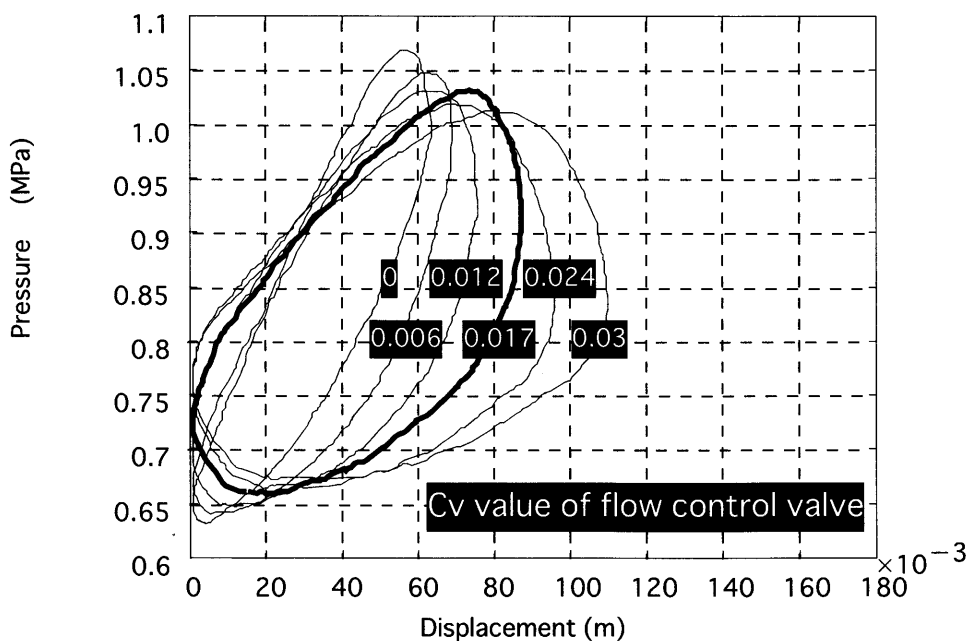


図3.9 オリフィス型パルス管冷凍機の圧力-変位図

オリフィスバルブを開いていくと変位が大きくなり、圧力振幅がやや小さくなっていくが1周期で囲む面積つまりPV仕事は大きくなっていることが解る。図3.9をより定量的に理解しやすくするため、オリフィスバルブ開度に対する到達温度・変位・位相差・仕事を図3.10に示す。黒く塗りつぶしたところは性能の最適点である。また、シャトルの振動の振幅中心がパルス管内にあることと、パルス管と蓄冷器の間には熱交換器が存在するが熱交換器の容積が約 $3 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ でありパルス管の容積約 $57 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ と比較しても非常に小さいことから実験データには修正を加えない。

図3.10からオリフィスバルブの開度を大きくするのに伴い変位・位相差・仕事とも大きくなっていくことが解り理想的には性能が単調に増加することになる。しかし、オリフィスバルブ開度の中間点で性能が最も良くなっている。

これは以下のように解釈できる。オリフィスバルブを開いていくと、変位と位相差が大きくなるためPV仕事が増加するため前章で示したように性能が良くなる。しかし変位が大きくなることは蓄冷器内を通過する質量流速が増加していることを示しており、蓄冷器内の熱交換が不完全になることも同時に引き起こしている。蓄冷器内の熱交換が不十分になると冷凍能力が低下することを前章で示したが、このことがオリフィスバルブを開きすぎると性能が悪くなる要因になっていると考えられる。

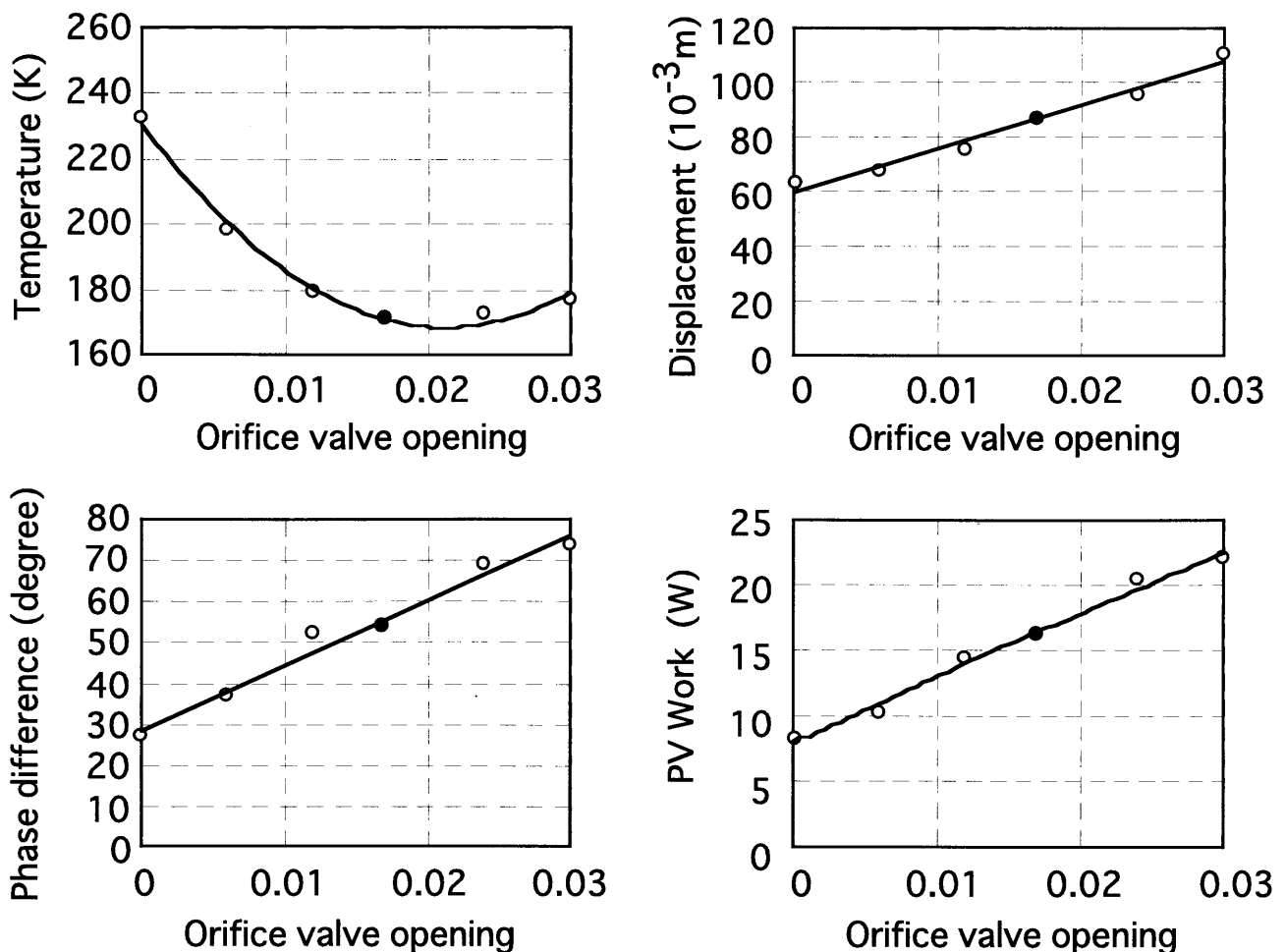


図3.10 オリフィス型パルス管冷凍機の温度、変位、位相差、PV仕事

3.3.4 ダブルインレット型パルス管冷凍機における計測結果

ダブルインレット型パルス管冷凍機の実験はオリフィスバルブの最適開度を調整した後バイパスバルブを開けることにより行った。駆動周波数は3Hzである。

計測したダブルインレット型の圧力とガスの変位の関係を図3.11に示す。図中の白抜きの数値はバイパスバルブの C_v 値であり、図中性能が最も良い場合を太い線で表した。

ダブルインレット用バルブを開いていくと蓄冷器に流れるガスが減少するために変位が小さくなり、圧力振幅が僅かに大きくなっていることが解る。

バイパスバルブ開度に対する到達温度・変位・位相差・PV仕事を図3.12に示す。バイパスバルブ開度を大きくするのに伴い変位は急激に減少するが、位相差は大きくなる。このため、変位の減少に比べPV仕事の減少は小さく抑えられていることが解る。つまり、ダブルインレット型ではバイパスバルブを適度に関くことによって変位が減少し冷凍能力に比例するPV仕事は減少するが、位相差が大きくなり圧力振幅が大きくなることによりPV仕事の減少が抑えられる。また、蓄冷器を通過するガスの質量流量が減少することにより蓄冷器内の熱交換を向上させていることが性能向上に繋がっていると考えられる。ただし、バイパスバルブを開きすぎるとPV仕事の低下が影響して冷凍能力が低下し性能が

下がってきていることが解る。

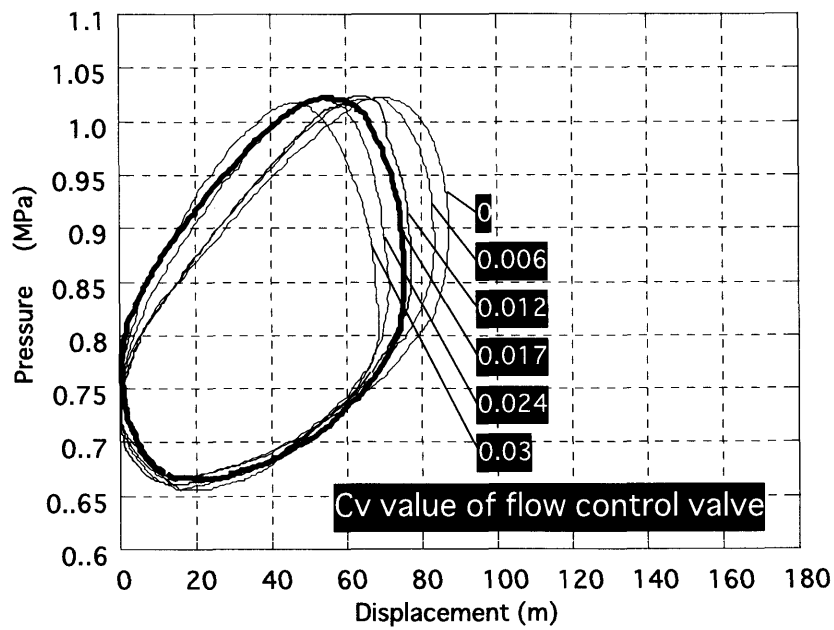


図3.11 ダブルインレット型パルス管冷凍機のPV線図

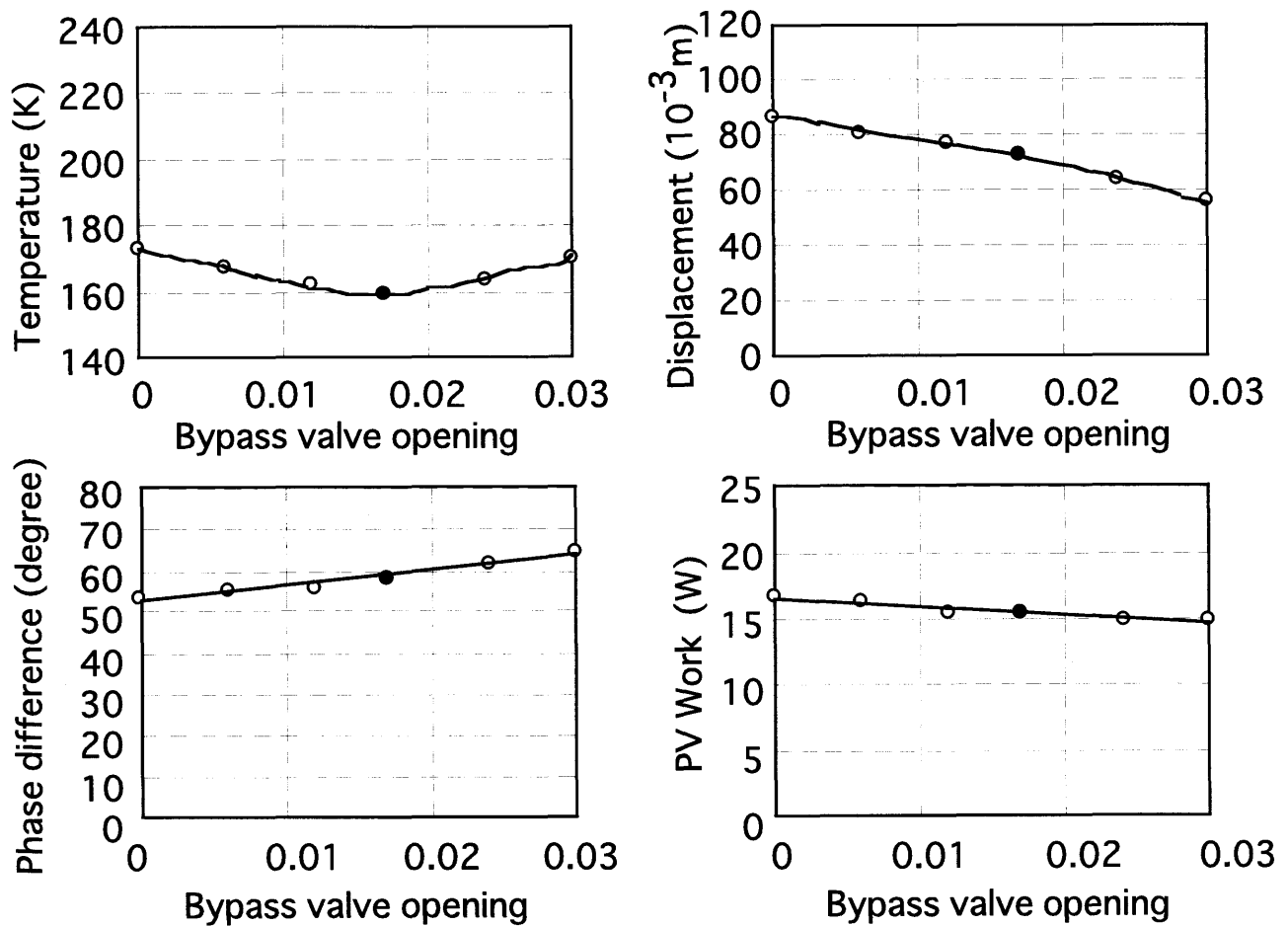


図3.12 ダブルインレット型パルス管冷凍機の温度、変位、位相差、PV仕事

3.4 パルス管内のガス温度計測方法

3.4.1 パルス管内の温度計測方法の検討⁽⁵⁸⁾

パルス管内のガス温度を計測する方法として理想的なのはパルス管冷凍機の実機運転中にガスの状態を乱さず瞬時に正確にかつ簡単に計測できることである。これらの条件を大方満たす計測法としてレイリー散乱法を用いた計測法を選択した。詳細については次項で述べるが、計測法としてのメリットとデメリットを計測機器および周辺の構成部品も考慮した上で挙げておく。

メリットとしては

- ①非接触で計測が可能。
- ②計測遅れがほとんど無い。
- ③2次元の計測が可能。
- ④温度分解能が比較的高い。
- ⑤空間分解能が比較的高い。
- ⑥サンプリングが比較的高速。

デメリットとしては

- ①迷光（散乱光以外の反射光や透過光）の影響を受け計測精度が低下する可能性がある。
- ②純粋なHeガスは使用できない。
- ③パルス管の材料が光学的に透明である必要があり、かつその形状が制限される。
- ④高価なエキシマレーザを必要とする。

以下計測の原理を述べるとともに、上記に示したメリット、デメリットについて説明を加えることにする。

3.4.2 レイリー散乱

まず、レイリー散乱について簡単に述べる。レイリー散乱とは「大きさが波長の約 $1/10$ 以下の粒子（ガス分子）によって起こる波長変化を伴わない弾性散乱」であり散乱光の計測は図3.13に示すような基本構成で行われる。

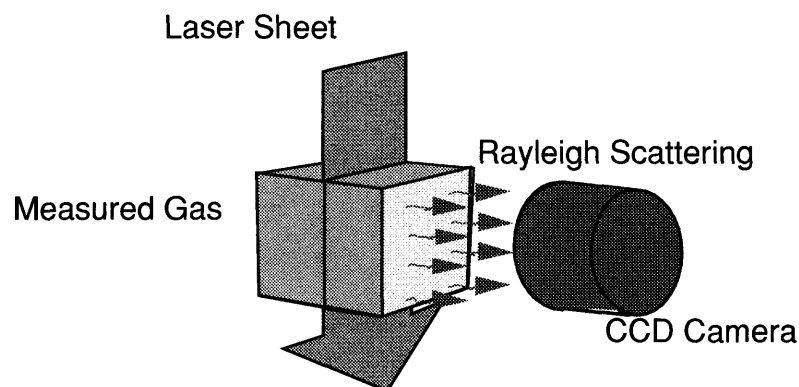


図3.13 レイリー散乱光計測の基本構成

また、散乱光強度 I は入射光強度 E 、散乱断面積 σ 、ガス密度 ρ_m に対して次のような関係がある。

$$I \propto E \cdot \sigma \cdot \rho_m \quad (3.5)$$

散乱断面積 σ の値（N₂を基準としその値と比較）は表3.3⁽⁵⁹⁾に示す通りガスの種類によって異なる値をとる。

表3.3 散乱断面積 σ

Species	σ @ 193nm
N ₂	1
He	0.01
Ne	0.04
90%N ₂ +10%He	0.11
Ar	0.16
H ₂	0.28
O ₂	1.37
CH ₄	2.5
CO ₂	3.0

この結果、純粋なHeガスは σ の値が小さすぎ計測精度を確保しにくいため使用できないことが解るが、これに10%程度のN₂をまぜたガスを用いれば計測可能となる。また、計測精度を上げるために散乱光強度をなるべく大きくするためには σ の値が大きいガスを選択する必要があるが、低温で液化、昇華しないことが大切である。低温部でガスの一部が液化、昇華すると波長と同程度の大きさの粒子に対して起こるミー散乱のため計測不能となる。

また、理論的には散乱断面積 σ の値は入射光波長の1/4乗に反比例するため入射光波長はなるべく短い方が望ましい。さらに、散乱光強度は入射光強度に比例するので単位面積当たりのエネルギーが大きい光源が必要となり、ArFエキシマレーザ（波長193nm）あるいはKrFエキシマレーザ（波長248nm）を使用するのが適当である。

3.4.3 温度への変換方法

レイリー散乱法によるガス温度の算出方法は比較的簡単である。(3.5)式と理想気体の状態方程式を組み合わせると、圧力分布が無視できる場においてはガス温度 T は圧力 P と散乱光強度 I と次のような関係がある。

$$T \propto P/I \quad (3.6)$$

(3.6)式より温度 T_s 、圧力 P_s の基準状態で散乱光強度 I_s の値を測定しておけば、

ガス温度は

$$T/T_s = (P/P_s) / (I/I_s) \quad (3.7)$$

より次のように求めることができる。

$$T = (I_s / I) \cdot (P / P_s) \cdot T_s \quad (3.8)$$

さらに、前述した迷光の影響とレーザ光のショットごとの時間的強度ばらつきを考慮する必要がある。迷光の影響を取り除くために被測定部を真空状態にした散乱光強度 I_v を測定する必要があり、レーザの時間的強度ばらつきの影響を取り除くためには次の3つのモニタ強度を測定する必要がある。3つのモニタ強度とは、各ショットごとの入射光に対するモニタ強度 I_m と I_s 、測定時のモニタ強度 I_{ms} 、 I_v 、測定時のモニタ強度 I_{mv} である。 I_v 、 I_{ms} 、 I_{mv} が入射光強度に比例すると考えると最終的にガス温度 T は次のように算出される。

$$T = \frac{\frac{I_s}{I_{ms}} - \frac{I_v}{I_{mv}}}{\frac{I}{I_m} - \frac{I_v}{I_{mv}}} (P / P_s) T_s \quad (3.9)$$

3.4.4 計測精度確認用実験装置

計測精度確認用実験装置の概要を図3.14に示す。さらに、これに対応した装置外観を図3.15に示す。

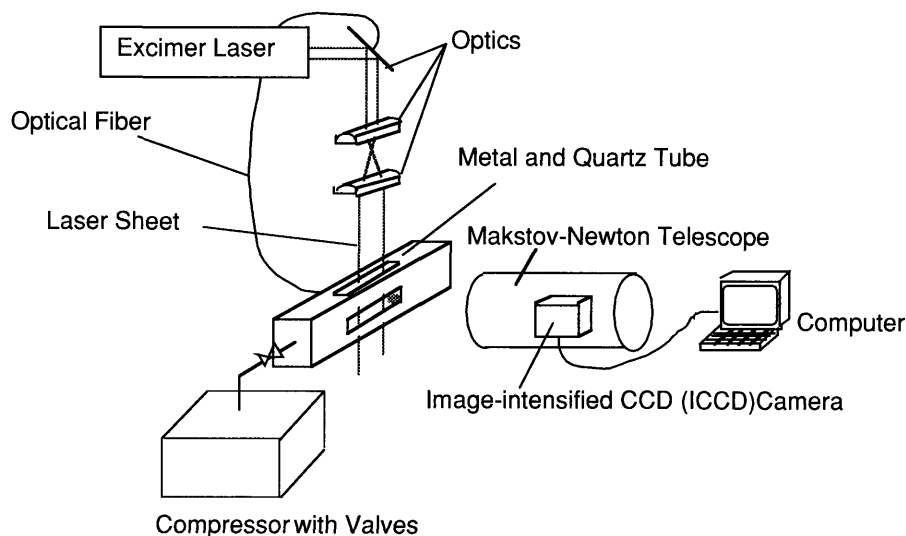


図3.14 計測精度確認用実験装置

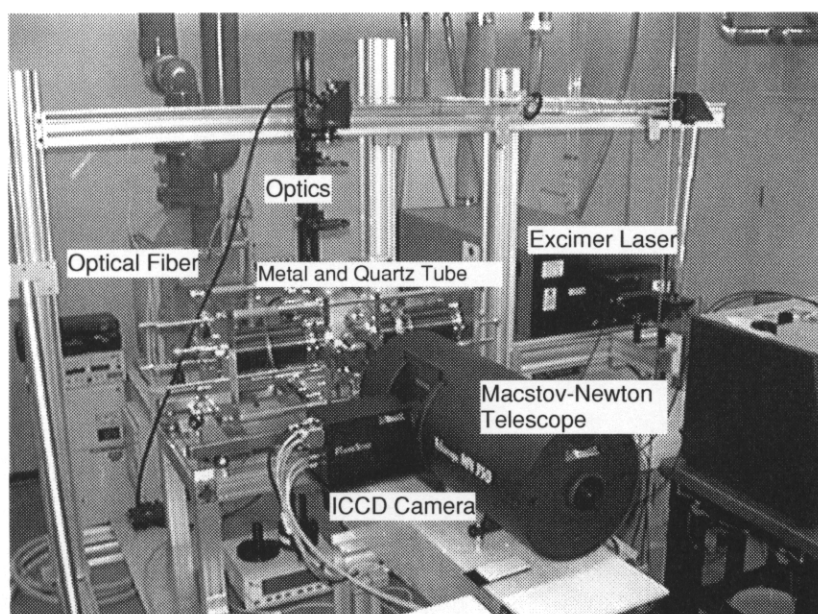


図3.15 装置外観

入射光としては波長193nmであるArFエキシマレーザを用いている。レーザ光は2つのシリンドリカルレンズを用いて平面レーザに成形され被測定部に入射される。被測定部の外殻材料はこの波長域で吸収バンドのない合成石英材（一部金属材料）を用いる。合成石英材にNa,Kなどの不純物を含んでいると蛍光を発しノイズ源となるので注意を要する。散乱光はマクスツフ・ニュートンテレスコープと呼ばれる集光器を通し、イメージインテンシファイア付きCCDカメラで撮像される。この計測装置の測定視野、サンプリングレート、空間分解能を表3.4に示す。

表3.4 測定視野、サンプリングレート、空間分解能

Image area	max $36 \cdot 10^{-3}\text{m} \times 27 \cdot 10^{-3}\text{m}$
Sampling rate	14Hz ($36 \cdot 10^{-3}\text{m} \times 27 \cdot 10^{-3}\text{m}$)
	100Hz ($36 \cdot 10^{-3}\text{m} \times 2.7 \cdot 10^{-3}\text{m}$)
	144Hz ($36 \cdot 10^{-3}\text{m} \times 1.9 \cdot 10^{-3}\text{m}$)
Spacial resolution	$188 \cdot 10^{-6}\text{m}$

散乱光強度のデータとともに圧力データを制御用パソコンに入力する必要があるが両者間の時間的なずれは1msec以下になるように構成され、数ヘルツの振動状態を計測するのであれば両者の位相角誤差は1度程度に抑えられている。

先に述べたようにレイリー散乱光は入射光と同じ波長であり、非常に微弱であるために迷光と呼ばれる被測定部からの透過光や反射光が極力集光器に入らないようにしなくてはならない。対策としては石英材の平面度を極力確保すること、反射光を遮断するための

マスク材、反射材を適所に付けることである。また、パルス管は通常耐圧や加工性を考慮し中空円筒型であるが本計測に用いる被測定部あるいはパルス管の形状は迷光低減のため中空の矩形とならざるを得ない。この時4枚の平板ガラスをインジウムをシール材として使用し組み合わせて形成することが大切である。これはインジウムがガラス内を反射しながら通過してくる光を遮断してくれるからである。さらに、平板ガラスの表面には反射防止膜を施こしている。反射防止膜がないとガラスの内部で反射した光が新たな散乱光を発生し計測誤差となるおそれがあるからである。

3.4.5 測定精度の確認と精度の向上

測定精度の確認のため図3.16に示したような金属の枠に石英ガラスの窓をはめ込んで作製した被測定部にN₂ 100%ガスを充填しその圧力を一定の温度で静的に変化させた場合の散乱光強度を計測した。(以下に示す実験ではすべてN₂ 100%ガスを用いて行っている。)

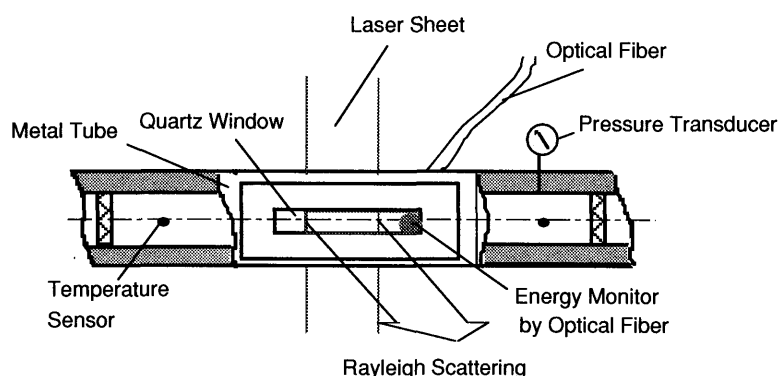


図3.16 被測定部

モニタ光は図3.15、図3.16に示したように入射光の一部を透過させるミラーから取り出しグラスファイバで導く方法で行った。グラスファイバの先端を被測定部裏側に置き被測定部を通過した光をモニタしている。N₂ ガスを使用した場合入射光の吸収は1%以下であり、かつ圧力や温度の変化に対して吸収率がほとんど変化しないため、被測定部を通過した光の吸収率の変動に伴う計測誤差は無視できる。また、この方法はレイリー散乱を燃焼ガスの観察などに用いる場合に従来から一般的に用いられている方法である。等温の条件では(3.9)式より次式が成り立つ。

$$I / I_m - I_v / I_{mv} = A \cdot P \quad (3.10)$$

つまり $I / I_m - I_v / I_{mv} = R$ と書くとRが圧力Pに関して傾きAの一次関数で表されるかをチェックすれば、測定されるガスの性状が理想ガスの状態から離れていない範囲であれば静的な精度確認ができることになる。実験の結果を図3.17に示す。グラフには圧力をお

よそ0.1から0.7MPaまで4段階に変化させ、各々レーザを10ショット入射した時の各Rの値と10ショット分を平均したRの値をプロットした。レーザは幅 $20 \times 10^{-3}\text{m}$ 、厚み $1 \times 10^{-3}\text{m}$ のシート状にして入射し、散乱光強度は被測定部中心部分の幅 $2 \times 10^{-3}\text{m}$ 、高さ $2 \times 10^{-3}\text{m}$ のデータを平均化して求めた。さらに上記40個のデータを用いて回帰直線を求め、各圧力の値に対して得られたRの回帰直線からのずれ量を求めた結果、最大で15.4%ものずれがあることが解った。これは計測目的に対して大きな値である。10ショットの平均値でのずれ量の最大値は1.3%であった。パルス管内での周期的現象が時間的、空間的に再現性が高いのであれば同じ位相のデータを平均すれば良いが、現段階ではその保証もないため、時間平均したデータを用いることには問題があると考え、1ショットごとのばらつきを抑える改善を行った。

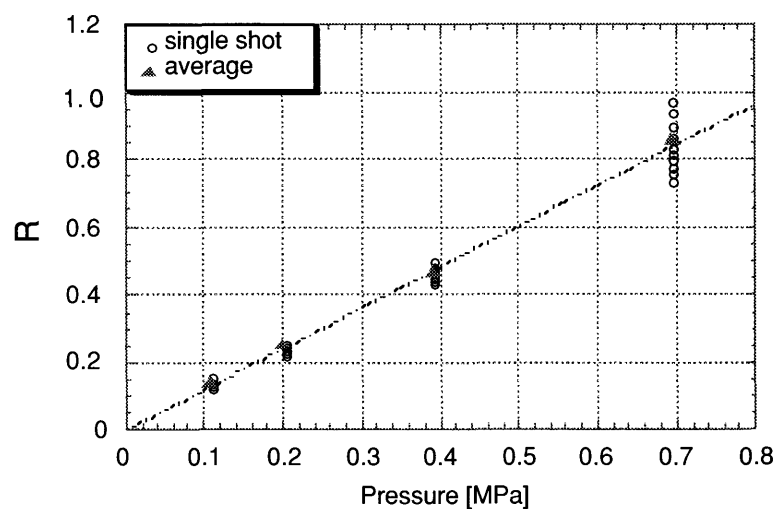


図3.17 静圧状態における計測精度（改善前）

ばらつきの原因としては、入射レーザ光強度の空間的ばらつきが挙げられる。エキシマレーザは時間的にも空間的にもショットごとにその強度がばらつくことが知られているが、グラスファイバでモニタする方法では入射光の一部しかモニタできないことと、ファイバ内を通過中に強度が変化する可能性があることから入射レーザ光の空間的ばらつきを補償が難しいと推測した。そこで、図3.18に示すように被測定部へ入射する直前の空間で生じる大気のレイリー散乱光をモニタすることにした。

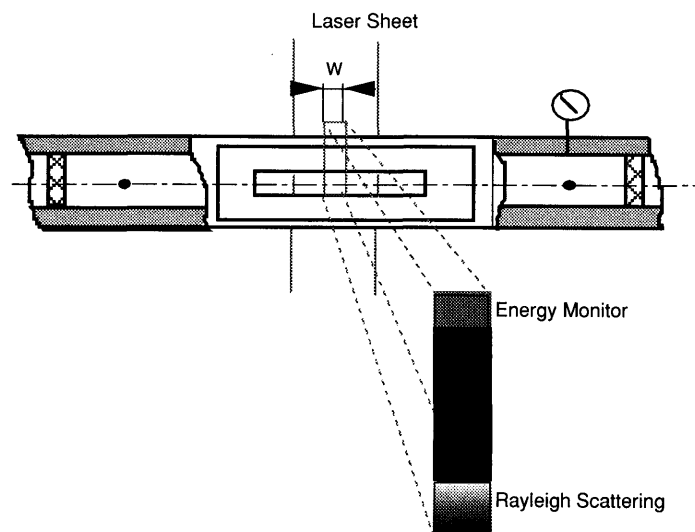


図3.18 散乱光モニタ方法

図中Wの方向つまり入射光の幅方向に空間分布が存在しても幅方向にいくつかの分割を行えば、その強度ごとに被測定部からの散乱光を補償することが可能となる。尚、モニタとなる大気の温湿度変化や塵埃の程度がモニタ散乱光のノイズ源になると思われるが、この装置はクリーンルームに置かれているためノイズは少ない。ただし、このような場所が確保できない場合は石英ガラス製の密閉容器内に基準となるガスを充填してレーザが入射する適当な場所に設置すれば良い。

図3.19にモニタの変更後の結果を示す。

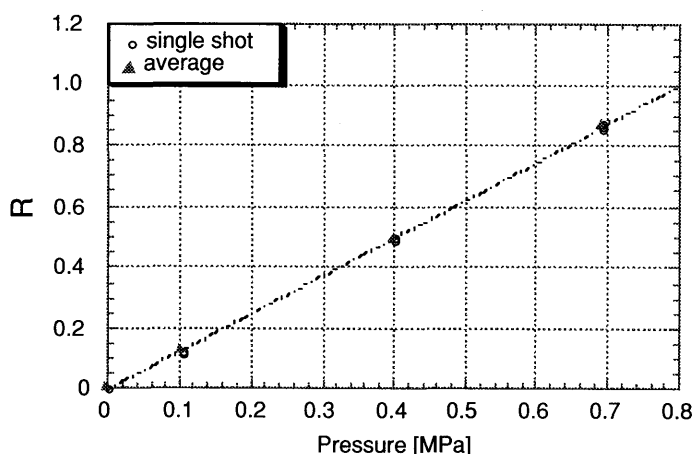


図3.19 静圧状態における計測精度（改善後）

シングルショットにおいてRの回帰直線からのずれ量の最大値は0.89%に減少し、10ショットの平均値では0.56%となった。さらに圧力1.5MPaまで範囲を広げ測定を行った結果、ずれ量は1%未満であった。尚、モニタの散乱光の幅方向の分割は処理時間短縮のため1とした。

3.4.6 静圧時の2次元温度分布計測

静圧時における2次元温度分布を計測した結果を図3.20に示す。圧力は0.7MPaであり、レーザは幅 $20 \times 10^{-3}\text{m}$ 、厚み $1 \times 10^{-3}\text{m}$ のシート状にして入射した。つまり散乱光は厚み $1 \times 10^{-3}\text{m}$ 内に存在するガスからの合計として2次的に計測される。また、ガスを被測定部に所定の圧力まで充填し、温度が均一になるまで充分時間をおいてから計測した。さらにガス内に $\pm 0.5\text{K}$ の測定精度を保証している白金・コバルト測温抵抗体を挿入し温度のモニタをした。図3.20に示したグラフは図中H方向の温度を平均して求めたものであり、ガス温度298Kに対して計測した温度のばらつきは標準偏差で2.5Kである。また、ガス温度298Kに対する平面内全体での標準偏差は5Kであった。この結果は平面内の温度ばらつきが標準偏差で1.7%程度であることを示すが、低温での計測ではガス密度が増加し、散乱光強度が増すため計測精度は向上するものと思われる。

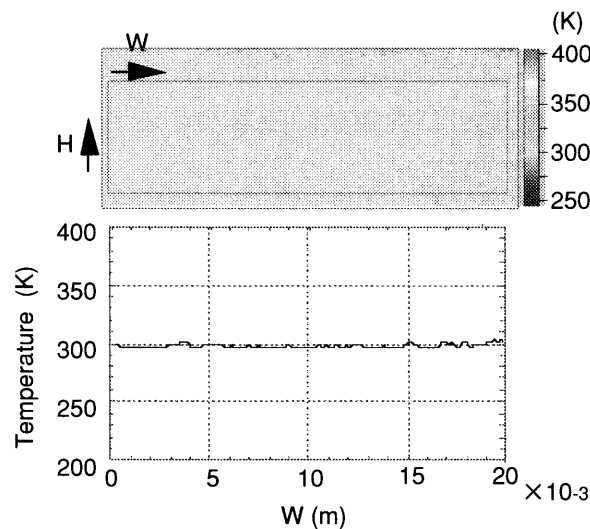


図3.20 静圧時2次元温度分布の計測結果

3.4.7 定常流れ場における温度計測

次に定常流れ場における温度計測の結果について述べる。温度計測は図3.21に示したように、壁温を253Kに保った幅 $8.5 \times 10^{-3}\text{m}$ 長さ $40 \times 10^{-3}\text{m}$ の銅製ブロックを幅 $16.5 \times 10^{-3}\text{m}$ のチャンバ内の中央に置き、上流から整流格子を通過し層流化したガスを毎秒2mの速度で流し、銅製ブロックの上流側先端から $18 \times 10^{-3}\text{m}$ における表面垂直方向の温度分布を計測することにより行った。尚、重力の向きは紙面表から裏にかけての向きであり、圧力は大気圧であった。

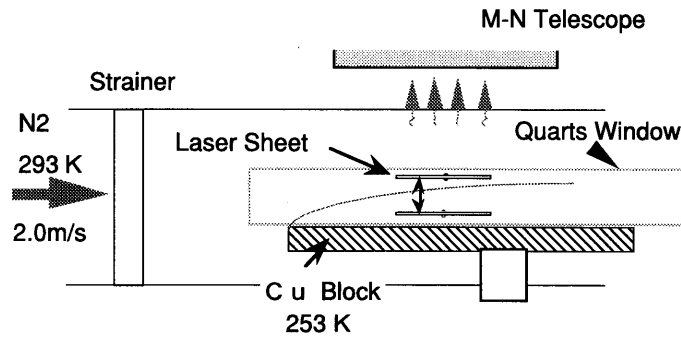


図3.21 定常流れ場

図3.22にレイリー散乱法で計測した結果と線形 $0.5 \times 10^{-3}\text{m}$ 熱電対で計測した結果および実験条件を市販の流体解析用ソフトウェア(STAR CD)に入力し数値計算した結果を示す。3者とも壁との距離 $1 \times 10^{-3}\text{m}$ 以上においてはほぼ良い一致を示しているのが解る。レイリー散乱法で計測した結果が壁との距離 $1 \times 10^{-3}\text{m}$ 未満で小さく出るのは壁からの反射光が大きくなりS/Nが悪くなり測定の精度を低下させているからであると思われる。この点からレイリー散乱法の壁近傍の計測には限界があることが解る。

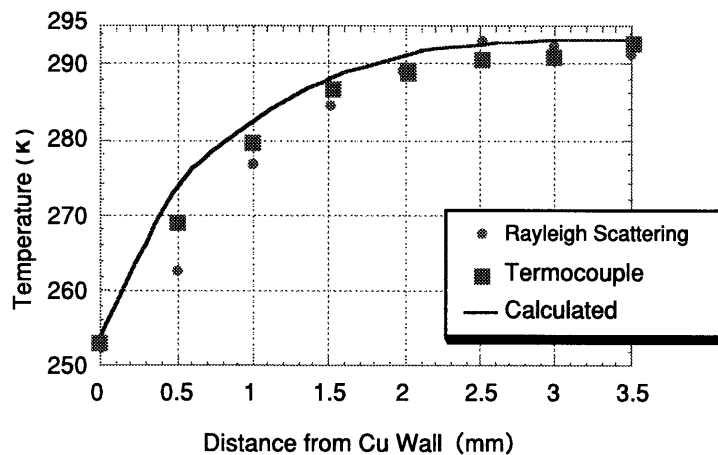


図3.22 定常流れ場における計測結果

3.4.8 周期的圧力変動場における温度計測

パルス管内のガスの温度計測をするためには周期的圧力変動場における計測が精度よくできないといけない。しかしながら今の所、圧力変動場において計測した結果がどの程度定量的な精度を持っているのかを検証する手段がない。しかし、これまでの検討で静的な計測の精度は求められており、以下の計測でもこの精度が確保できているものと考えことにする。これは計測原理および計測する現象の速度が充分音速に比べて小さいことを考慮すると大きな誤りは含んでいないと思われる。実験において周期的圧力変動は測定する容器の一端を閉じ他の一端から圧力の切り替え弁を通じて圧縮機のガスを出し入れすることにより与えた。図3.23に温度計測した1例を示す。

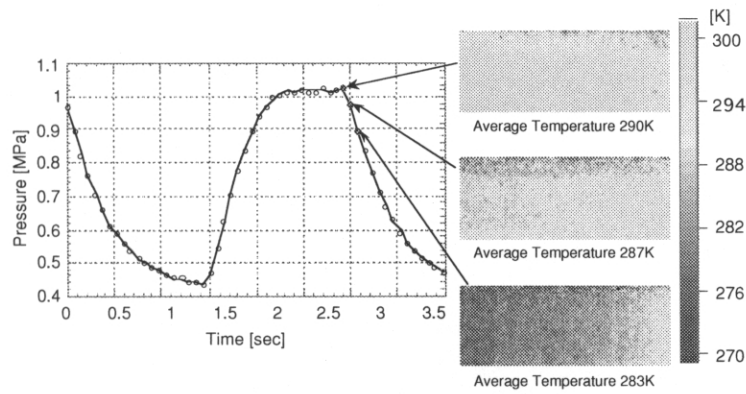


図3.23 周期的圧力変動場における2次元温度計測

測定視野は幅 $20 \times 10^{-3}\text{m}$ 、高さ $9 \times 10^{-3}\text{m}$ である。図には圧力が下がり始める時点での温度分布を濃淡図で示したが、上下左右に温度勾配があることが解り蓄冷器やオリフィスなどの位相調整器がない単純な状態でも温度が複雑に分布していることが解る。

図3.24に被測定部の中心部 $1 \times 10^{-3}\text{m}$ 四方を視野として温度を計測した例を示す。

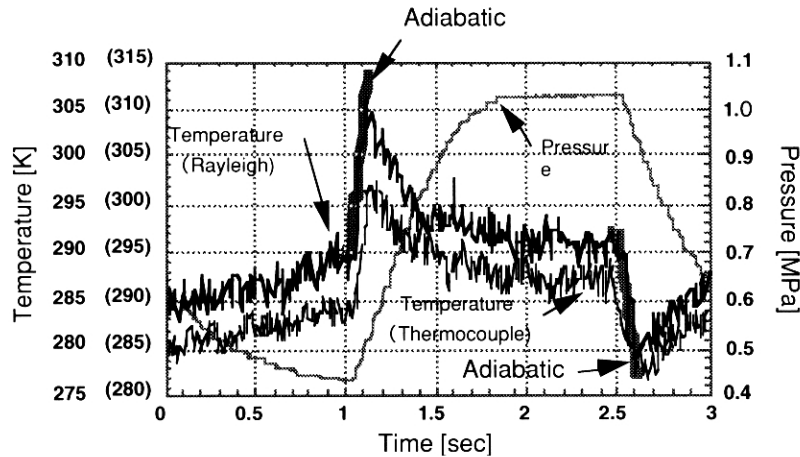


図3.24 周期的圧力変動場における温度測定（ワンポイント）

この計測では同じ計測部位に外径 $13 \times 10^{-6}\text{m}$ の熱電対を入れ温度を計測した結果と比較している。図ではレイリー散乱法による計測結果と熱電対による計測結果が類似しているため両者の温度軸をずらして表示している。ただし、熱電対を入れた状態ではレイリー散乱光が取れないため、ほぼ同じ条件の異なった時間のデータである。両者を比較すると圧力変化が緩やかな部分においてはほぼ一致しているが圧力の立ち上がり立ち下がりにおいてその応答性に差が出ていることが解る。熱電対を用いた計測結果では温度の立ち上がり立ち下がりがやや緩慢になっており、ピーク値にもわずかながら差がみられる。これは熱電対の熱容量の影響が出ているものと思われる。また、レイリー散乱法で計測した圧力の立ち上がり立ち下がり直後の温度変化はこの部位のガスが断熱的に圧縮、膨張したと仮定して算出した値と良い一致がみられる。これは本計測法の高応答性を示す結果であると考えられる。