



解説

光ファイバを用いた希薄動圧計測

Rarefied Dynamic Pressure Measurement Using an Optical Fiber

中山 宜典

NAKAYAMA Yoshinori

防衛大学校システム工学群航空宇宙工学科

(原稿受付：2022年8月20日)

希薄弱電離プラズマ数値解析の解妥当性を向上させれば、研究開発コストや装置設計コストを大幅に削減できる“数値真空装置”や“数値プラズマ装置”の実現につながるが、その要となる中性粒子流れの評価は難しい。本稿で紹介する希薄動圧計測器は光ファイバによるLED光を小型カメラで撮像する仕組みであり、キャラメル菓子箱程度の大きさにもかかわらず約0.004 mPaの計測分解能をもち、真空槽内の作動ガス流れや排気流れの強さや角度を計測評価できる。本稿ではその実現に要した技術および計測事例を紹介し、今後の課題と展望について解説する。

Keywords:

rarefied gas flow, dynamic pressure, neutral particle, experimental measurement, vacuum chamber, validity evaluation

1. はじめに

真空槽内でプラズマ源を作動させると、作動ガス粒子(イオンを含む)は真空槽壁面で反射し真空ポンプで排気されるまで中性粒子として滞留し続け、プラズマ源への逆流も発生する。プラズマ源下流においては電荷交換反応も起きるため、プラズマ源周囲の中性粒子数密度および逆流はプラズマ源作動に影響を与える。

著者が専門とする電気推進機はプラズマ源を用いた宇宙用ロケットであり、研究開発用の試験装置として真空槽を用いるが、その推進性能が推進機の設置位置・方向、真空排気ポンプとの位置関係に影響を受けることが宇宙空間作動時の推進性能を推定および保証するうえで懸案となっている(Test facility Effect) [1-5]。同様の懸案は他のプラズマ源においても電離度によらず起こりうる。なぜならプラズマは生成(中性粒子→荷電粒子)と再結合(荷電粒子→中性粒子)の平衡で成立するからである。

しかし中性粒子は電荷をもたないため電磁界に不感であり、かつ希薄であるため計測が難しい。高真空～超高真空の圧力領域において真空計の計測精度は作動ガス流れを精緻に評価できるほどの精度はなく、特に1 mPa (10^{-3} Pa) オーダの圧力領域においては計測原理や個体差によって±30～50%の計測誤差がある[6-8]。分光を用いた非接触計測も多く行われているが、真空槽内流れを妥当に評価できる計測精度は現時点ではない[9-12]。

一方、DSMC法に代表される希薄流数値解析はとて有用であり、近年の計算性能向上を勘案すれば、作動ガス密度の均一性向上や真空排気の高効率化等にますます重用されると予想される。しかし希薄流に強い影響を与える真空

槽壁面はスパッタや付着・吸着等により理想的な清浄面ではなく、数値解析結果の妥当性向上のためにその壁面に対する作動ガス(希薄中性粒子)の反射現象を実計測する必要がある[13-17]。すなわち数値解析も少なからず計測を要する。

そこで“静圧ではなく動圧に着目したらどうか?”と発想した。“動圧は静圧差であるし、流れの角度もわかる!”と考えたからである。特に角度は計測感度に無頓着であり、数値解析結果においても流れのベクトル表示を多用する。つまり、動圧計測結果(強さ・角度)から真空計指示値である静圧も補完でき、数値解析結果とも妥当に比較評価できるはずである。そして“気流糸なら測れるのでは?”と思いついた。気流糸は航空機表面の流れを知るために設置する試験用の糸である。このアイデアを端緒として開発したのが本稿で紹介する希薄動圧計測器である[18-22]。

2. 希薄動圧計測器

2.1 計測原理

希薄動圧計測器の原理を図1に示す。本計測器は光ファイバの片端に設けた小型LEDからの光をもう一方の片端近傍において小型カメラによって捕捉するしくみであり、光ファイバを懸架し小型LEDを固定するための支持機構(梁および支柱)、小型カメラを収納し支持機構の基礎となる台から構成される。

円柱状の光ファイバ表面にはたらく希薄動圧概略を図2に示す。光ファイバ表面に均等に希薄流圧力が作用する場合(=動圧がない場合)は光ファイバに変位は発生しないが、不均等に作用する場合(=動圧が生じる場合)は光

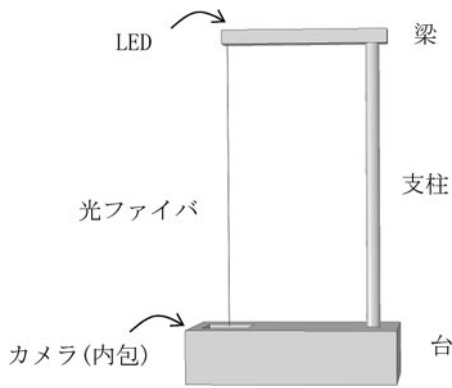


図1 希薄動圧計測器 (S型計測器) 計測原理.

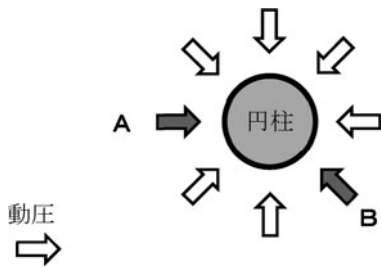


図2 円柱表面にはたらく希薄動圧の概略例.

ファイバに変位を生じさせる。たとえば図中 A の方向からの圧力が大きいと光ファイバは A から遠ざかるように変位し、図中 B の方向からの圧力が小さいと B に近づくように変位する。光ファイバの変位はこれらの希薄動圧のつり合いによって定まる。本計測器はこのつり合いによって生じる変位を計測しており、原理的にはガス種に依存しない。

小型カメラによる捕捉画像一例を図3に示す。直径 d 、長さ L 、密度 ρ の光ファイバが鉛直方向に力 F_{\perp} を受けたときの光ファイバ端面画像重心の変位を H とすると、光ファイバにはたらく動圧 p_d と H は次式の比例関係にある。

$$p_d = \frac{F_{\perp}}{C_d \cdot d \cdot L} = \alpha H \quad (1)$$

ここで C_d は光ファイバの抵抗係数であり、自由分子流における完全乱反射においては約 1.785 である。この比例係数 (動圧感度係数 α) をあらかじめ求めておくことにより、 H から p_d を推量できる。

2.2 必要技術

この計測原理をもとに妥当な計測器として成立させるに

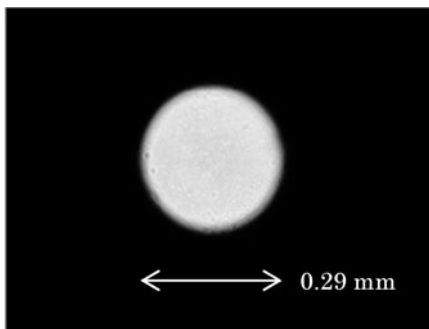


図3 S型計測器の捕捉画像例.

は、適用する光ファイバを棒振り子とみなせること、その変位を高精度に算出することが求められる。

光ファイバが棒振り子としてみなされるには、その直線性と柔軟性の両立が必要である。直線性 (剛性) は動圧感度の線形性 (計測器として使いやすさ) に直結し、柔軟性は感度の高さに直結し、相反関係にある。また水平方向だけでなく鉛直方向の動圧を妥当に計測するためには一つの計測器で取付姿勢によらず計測できるようにすることが望ましい。これは計測器には必ず個体差が生じるためである。これらを満たせるよう適度な直線性・柔軟性を持たせるファイバ加工技術が必要となる。

本計測は接触計測であるため、計測対象である希薄流の妨げにならないようにできるだけ影響を与えない形状、すなわち小型である必要がある。しかし真空槽内においては真空ポンプによる振動が多かれ少なかれ発生しているため、懸架される光ファイバがその振動を感受しにくい支持構造でもある必要がある。また光ファイバ端面とLEDとの位置関係が変動すると光量も変動するため、LEDの支持構造にも工夫が必要となる。

光ファイバと支持構造は連結しているため、光ファイバ加工に応じた支持構造とする必要もある。さらに光ファイバ端面画像重心を高精度で算出するにはできるだけファイバ端面を大きく撮像して画素点数を増やすことが望ましいが、光ファイバの変位を撮像可能範囲内に抑える必要がある。したがって小型カメラ光学系とファイバ端面の位置関係が重要となる。

取得撮像データの大きさが大きいと画像処理速度すなわち時間分解能を低下させるため、取得画像領域の設定や撮像データ処理アルゴリズムを要する。また撮像画像には背景光も映り込むため、背景光を適切に除去できるアルゴリズムを要する。また上述の振動を感受してもその影響を低減できるアルゴリズムが望ましい。

2.3 設計および製作

これらの3技術 (ファイバ加工技術・ファイバ支持構造設計・撮像データ処理アルゴリズム) は相互に関係するため、ファイバ長 400 mm の計測妥当性確認用計測器を端緒として3技術を向上させ、図4に示した計測器を設計・製作した。以下S型計測器と呼ぶこととする。

S型計測器の大きさは $20 \times 45 \times 75$ mm (一般的なカメラ用菓子箱程度) である。ファイバ-支柱間距離



図4 S型計測器の外観写真.

30 mm, 支柱直径3.0 mmであり, ファイバから支柱を見込む角は±3°以内であり支柱が希薄流に与える影響を低減できている。梁は3.0×3.0 mmの角柱であり, 梁先端部に光ファイバ支持機構を内包し, 表面実装型の超小型青色LEDを取り付けている。

ファイバは熱処理による直線化加工を行ったポリエチレン製素線であり, 光学顕微鏡および電子天秤により直径0.289 mm, 密度900 kg/m³の円柱(断面がほぼ真円)であることが確かめられている。長さ65 mmの光ファイバを水平方向に懸架支持した場合, 重力によりやや弓形に変形し先端変位は約2 mmである。希薄動圧による光ファイバの先端変位は鉛直・水平どちらの懸架方向であっても最大約20 μmであり, 懸架時の形をほぼ維持したまま棒振り子として動く。

取付姿勢によらず光ファイバ先端を撮像するため, 画素面積6.4×4.6 mm²の小型カメラを採用した。このカメラはROI (Region of Interest) 機能を有しており総画素数3856×2764のうちの一部のみ撮像可能領域にできる。したがって光ファイバ先端位置に合わせてROIを設定することにより取付姿勢によらず計測できるとともに, データ量を削減できるため計測速度を高くできる。なお取付姿勢によらずに計測可能であることは, 水平用と鉛直用で別々に開発する必要がなく補正がしやすい利点も生む。

端面重心は, 次式で表されているように色域階調(輝度 c , 255段階)を用いて重心位置 \bar{r} を算出することにより, 画素数以下の分解能をもたせている。

$$\bar{r} = \frac{\sum (r \cdot c)}{\sum c} \tag{2}$$

この手法は典型的な画像処理手法である[23, 24]。図3に示されているように, 光ファイバ先端の導光強度が様ではなく, 中心から遠ざかるにつれて概ね輝度が低下しており, 色域を広くできるようカメラの露出時間およびLED発光強度を調整することにより分解能を向上できる。また背景光除去および振動影響抑制のため, バンドパスフィルタ, メディアンフィルタおよび指数フィルタを採用して輝度 c を補正している。指数フィルタは直前重心を中心とした半径に応じて指数的に重み付けをしており, 直前重心から遠ざかるほど重みづけを抑制する効果がある。これらを適正化することにより, 上述のROI機能と合わせ, 計測速度約50 Hz, 画素分解能約0.01 pixelを達成できる。ここで画素分解能は実計測の標準偏差から算出している。なおROIを小さくすると計測速度を高くできるが画素分解能は大きくなる(劣化する)。

撮像データはUSB2.0通信を介してPCに送信され, 自主開発したソフトウェアにてリアルタイムで描画および端面重心位置算出される。このソフトウェアはネットワークトリガにも対応しており, たとえばS型計測器複数台同時計測もでき, 長時間自動計測も可能である。

2.4 計測妥当性

S型計測器に微小傾斜角 θ を与えると, 質量 m の光ファイバにはたらく重力 F_g は次式で表される。

$$F_g = mg \cdot \sin \theta \approx \rho \frac{\pi}{4} d^2 L g \cdot \frac{h}{L} \tag{3}$$

F_g を(1)式の F_{\perp} とすると, 次式から動圧感度係数 α を取得できる。

$$\alpha = \frac{p_d}{H} = \frac{\pi}{4} \frac{g}{C_d} \rho \frac{d}{L} \times \frac{h}{H} \tag{4}$$

図5に端面画像重心変位 H に対する微小変位 h を示す。この図からわかるように, 光ファイバ先端は微小傾斜角にほぼ比例しており, 光ファイバは棒振り子として変位しているとみなせる。この関係から本計測器の動圧感度係数 α は約0.39 mPa/pixelと算出された。

図6にP型計測器(球殻付電離真空計, 3.3節にて詳述)による周方位に対する動圧分布の例を示す。灰色点線の円は静圧を意味しており, 動圧が無ければ計測結果はこの灰色点線と一致するが, 希薄動圧概略(図2)で示したように, 正の動圧を受けると中心側に, 負の動圧を受けると中心から遠ざかるようにベクトル表示される。図中左からガス管から流出された希薄動圧を検知しており, 図中右下からの排気流の影響を検知している。この排気流は真空ポン

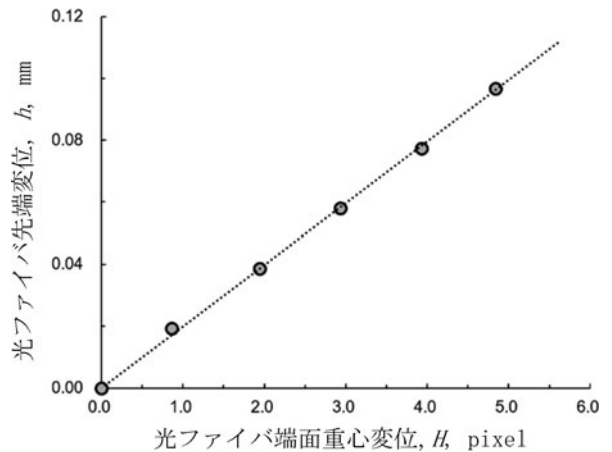


図5 S型計測器が検知する画面上変位と実変位。

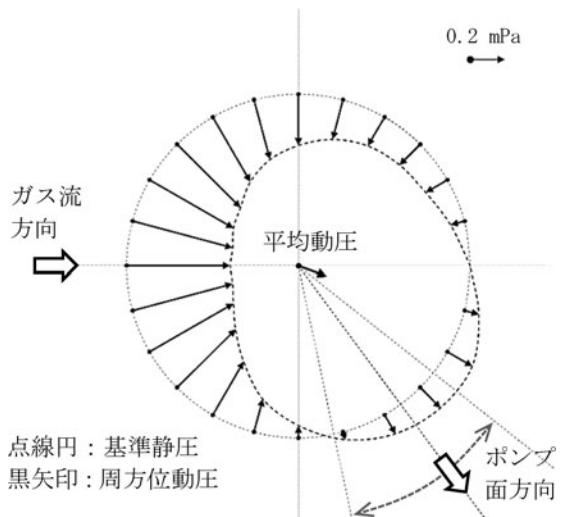


図6 周方位動圧分布一例 (P型計測器)。

プに向かう希薄流れと真空ポンプ面からの希薄流れの差から生じる流れである (3.1節参照)。この図の中心に示した黒色太線ベクトルは周方位動圧の平均を示している。S型計測器が導く動圧計測ベクトルはこのP型計測器から算出される平均ベクトルと一致するはずである。

壁面近傍を除く様々な計測点・条件において、S型計測器とP型計測器の動圧ベクトル角度はほぼ一致 ($\pm 3^\circ$ 以内、標準偏差約 1.2°) し、動圧ベクトルの大きさもどの点においてもほぼ比例し、その動圧相対比は約 1.6 ± 0.1 (標準偏差約 0.05) であった。既述のように、一般的な真空計において $\pm 30 \sim 50\%$ の計測誤差があることを考えると、計測動圧の絶対値においても十分な計測精度であると言える。なおこの計測比較を行った真空槽には製造メーカーが異なる電離真空計2種が近距離で設置しており、それらの指示値の相対比は上記相対比より大きい約 1.8 倍である。

また DSMC 法希薄流解析の計算結果ともよく一致しており、総じて S型計測器は計測妥当性を有すると考えられる。

2.5 計測手法および計測性能

上述の画素分解能および動圧感度係数から約 0.004 mPa が計測分解能となる。しかし S型計測器は、環境変動による振動を感受し、内包する小型カメラの発生熱による影響も受ける。そこで妥当な計測を行うための計測手法 (ノウハウ) をここで述べる。

S型計測器は振動感度が高く、真空ポンプが発する振動や建物が発する振動も検知する。しかし振動抑制のために剛性をもたせると大型化せざるを得ず、計測対象である希薄流を妨げることになる。こうした振動は周期的であり、計測対象としたい光ファイバの変位はこの周期振動に重畳する。そこで計測周期以上の時間幅で計測して周期振動による影響を除去することとした。上記計測速度 50 Hz に対しては 2~4 s の時間幅 (計測数 100~200 点) 以上で十分であった。なお瞬間的な振動は既述のメディアンフィルタで除去し、長周期的振動は下記手法によって排除する。

S型計測器における光ファイバは細い梁および支柱によって支持されており、熱によって温度変化すると、光ファイバ端面が希薄動圧による変位 (μm オーダ) を上回る変位を生じさせる。熱の影響を抑制するには冷却除去が一般的であるが、S型計測器は振動感度が高いため冷媒循環がもたらす振動を感受する。そこで発生熱を不可避とし、計測ごとに光ファイバ静止基準位置を計測することとした。各計測点における光ファイバ静止基準位置からの差を動圧として算出する手法である。たとえば後述する計測事例においては、各計測点において (a) ガス非流出、(b) ガス流出、(c) ガス非流出、の3つの計測を連続実施し、(a) と (c) の時間履歴値から導出される近似曲線を基準として (b) における変位を算出している。この手法により長周期的振動による影響も排除できる。しかし実質的な時間分解能 (計測に要する時間) は計測速度よりも大きく劣ることになる。

3. 計測事例および展望

3.1 計測事例

S型計測器の計測事例を図7に示す。この事例は内寸 $380 \times 380 \times 1800 \text{ mm}$ の直方体型真空槽においてキセノンを1/4インチのステンレス管から流量 0.69 mg/s (6.9 sccm) にて流出させたケースにおける希薄動圧計測結果である。3台のS型計測器を水平面計測用、垂直面計測用、比較参照用として同時計測し、前者2台の結果から希薄動圧の3次元ベクトルを算出し、その計測妥当性を後者1台にて確認している。計測器の位置精度は1 mm 以下であり、真空槽壁面温度は空気調和装置にて $22 \pm 1^\circ \text{C}$ に維持している。真空槽内圧力はキセノン換算で約 4 mPa であり、クヌッセン数が約 5 の自由分子流れであった。ステンレス管指向角誤差は管内設置の小型レーザによりおよそ 1° 以内であること、流量精度はブローダウン法により 0.7% であることを確認している。

この図よりステンレス管近傍ではガス流出が等方的に拡散しているが、ステンレス管から離れ壁面近傍になると非等方的な流れになっていることがわかる。この非等方流れは、ステンレス管から軸方向に流出した流れと、軸方向に角をなして流出し壁面反射した流れが合わさったことが主因であると考えられる [18, 19]。また真空ポンプ近傍では排気流 (真空ポンプに向かう希薄流れと真空ポンプ面からの希薄流れの差、2.4節参照) が確認できる。この排気流の影響の強さは真空ポンプを見込む立体角に強い依存性があると考えられる [20]。これらは DSMC 法希薄流解析結果ともよく一致している (図7c)。

3.2 有用性および課題

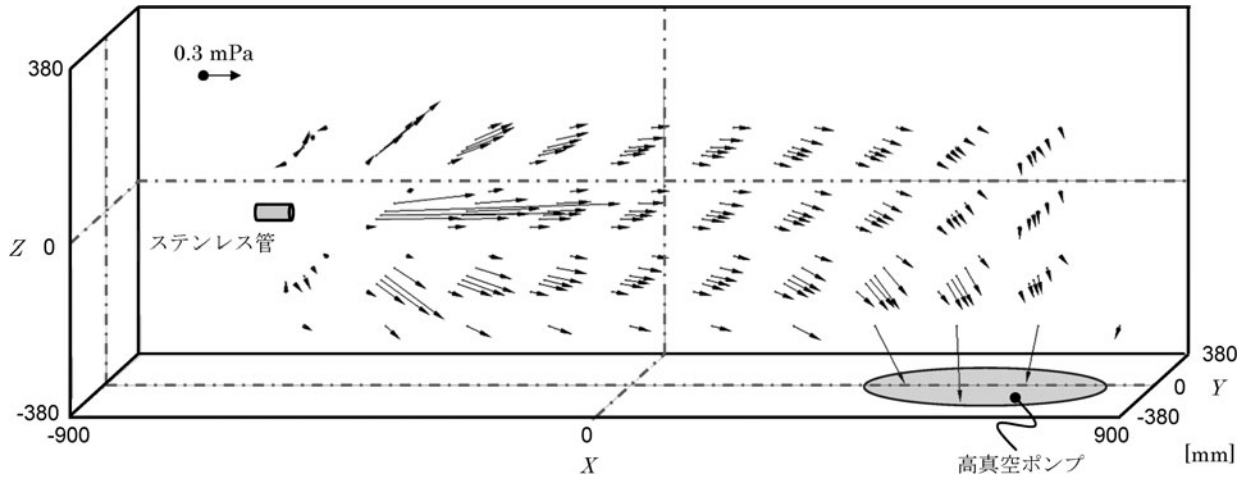
現時点におけるS型計測器の動圧計測性能は、1~10 μPa オーダの計測分解能、1~10 s オーダの時間分解能をもつ。空間分解能はファイバ長 65 mm である。電離真空計の静圧計測性能 ($\pm 30 \sim 50\%$ の計測誤差、1~10 s オーダの時間分解能) を考慮すると、希薄動圧を直接計測できる十分有意な計測器であると考えられる。

またS型計測器によって取得できる動圧はベクトル (大きさ・角度) であり、希薄流数値解析の新たな妥当性評価比較データとして有用であると考えられる。

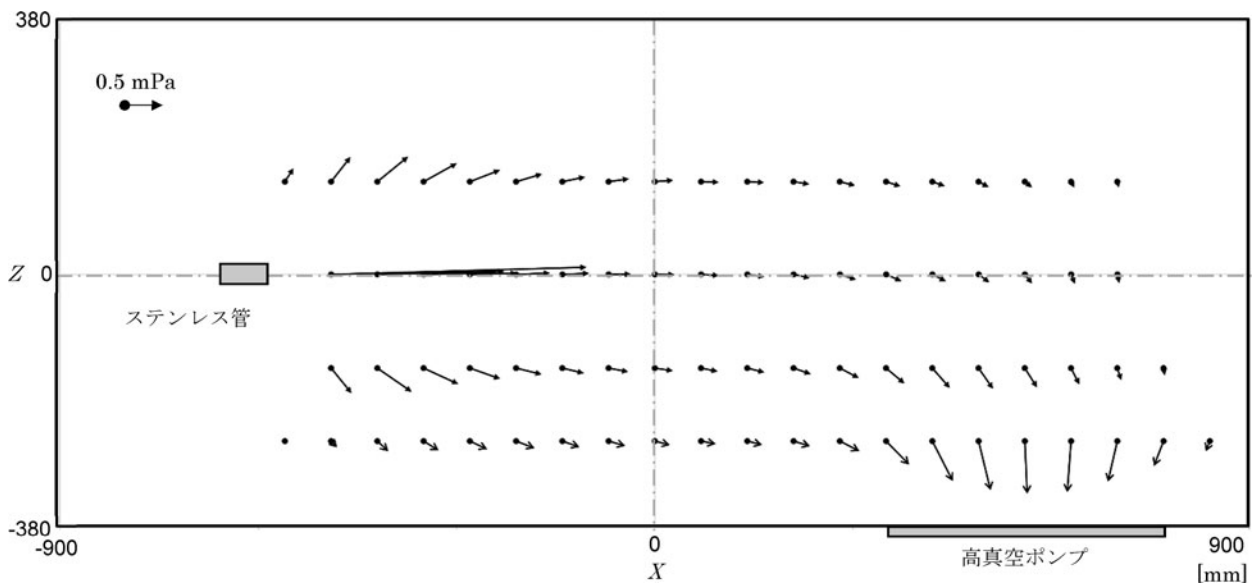
しかしS型計測器は現時点において3つの課題がある。(1) 計測器の台底方向からの希薄流を妥当に計測できないこと、(2) 静圧を計測できないこと、(3) 荷電粒子を含んだ希薄流を計測できないこと、である。

S型計測器の台底方向から見ると光ファイバは台底の後方 (裏側) にある。自由分子流においては連続流のような回り込みはないため、台底方向からの流れは光ファイバにほとんど入射しない (検知されない)。また台底との衝突により計測対象である希薄流に影響を与える。したがってS型計測器は取付姿勢によらず計測できるが、計測対象に対する設置姿勢には制限 (台底方向と主流を一致させない等) がある。これに対応するためにはさらなる小型化が求められる。

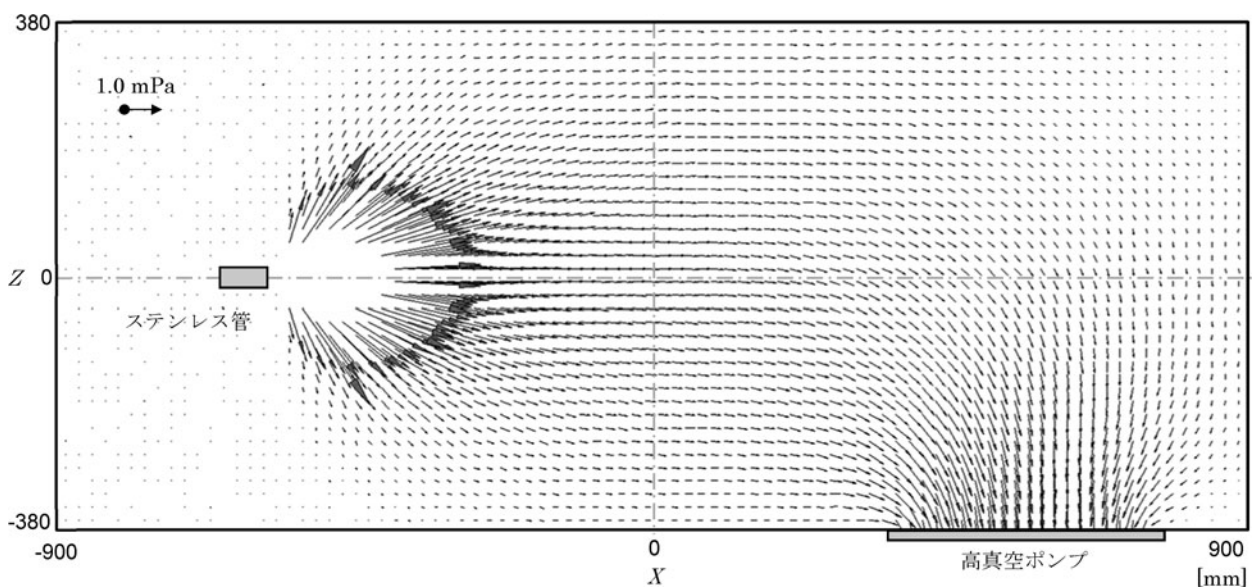
S型計測器はその計測原理上静圧を計測できない。また動圧の平均を検知する原理であるため動圧の複数要因を分



(a) 3次元ベクトル俯瞰図 (S型計測器計測結果抜粋)



(b) 鉛直方向ベクトル図 (真空槽中央断面, S型計測器計測結果)



(c) 鉛直方向ベクトル図 (真空槽中央断面, DSMC法希薄流解析結果)

図7 計測事例 (直方体真空槽内の希薄流れ).

離して評価できない。これに対応するには異なる計測原理の計測器と併用して計測する必要がある。

またS型計測器の光ファイバはポリエチレン製であり、荷電粒子と衝突すると帯電する。したがって荷電粒子を含んだ希薄流を妥当に計測できない。これに対応するには光ファイバの除電、あるいはS型計測器に荷電粒子を入射させない構造体(筐体)が必要である。なおS型計測器設置時には極性溶媒であるエタノールまたはイソプロピルアルコールを光ファイバに塗布して除電している。

3.3 課題に対する取組み

現在、課題(1)に対してS型計測器のLED位置を変更したC型計測器を、課題(2)に対して電離真空計を用いたP型計測器を開発している[21, 22]。また課題(3)に対しては被覆付光ファイバへの転換、または金属網の電位障壁筐体の設置に取り組んでおり、概要を本節で紹介する。

C型計測器の概略を図8に示す。S型計測器のLEDおよびファイバ支持部をカメラ側に配置した構造であり、梁および支柱を廃することにより小型化と後流影響の抑制を図っている。大きさはファイバを除き一辺30mmの立方体であり、S型計測器に対し体積比約1/2.5の小型化を達成している。ファイバ先端から漏れる光を撮像しており、焦点距離が長くなるため計測分解能は現時点で約0.1mPaである。計測分解能0.01mPaオーダーをめざし、光ファイバおよび撮像データ処理アルゴリズムの改良を行っている。S型計測器と同様、原理的にはガス種に依存しない。

P型計測器の概略を図9に示す。P型計測器は球殻を電離真空計に取り付けた構造である。球殻には単孔が開いており、この孔を通して流入した作動ガスがこの孔から流出するまで球殻内で反射し続ける、すなわち推進剤の動圧を静圧に変換し全圧として電離真空計に計測させるしくみである。なおこの静圧は同じ電離真空計(球殻無)で計測した圧力とほぼ一致しており、孔のコンダクタンスの影響は見られなかった。この計測器をその軸周りに回転させることにより計測器周囲の圧力を計測する。静圧は計測器後流となる箇所(方位)の圧力を静圧とみなせば、周方位に対する動圧分布も算出できる。P型計測器球殻および単孔の直径はそれぞれ100mm, 8mmであり、時間分解能は回転速度に依存する(現時点では144s/回転にて計測)。計測分解能は電離真空計の測定精度に依存しており、原理的にガス種(主としてイオン化ポテンシャル)に依存する。安定した希薄流に対して静圧と動圧が同時計測できることが特長である(2.4節参照)。

またアルミ被覆の光ファイバを適用すべくファイバ加工の適正化(S型計測器やC型計測器に適した剛性をもつような加工手法および条件)について試行錯誤を行っている。アルミ被覆によりファイバ表面に触れた荷電粒子が光ファイバに帯電しないことを確認中である。また金属網の電位障壁筐体を開発中であるが、荷電粒子を排除しつつ中性粒子の流れを妨げないような網の大きさや電位設計について試行錯誤を繰り返している。

3.4 展望

これらの取組みに成功すれば、より有意な希薄流計測が

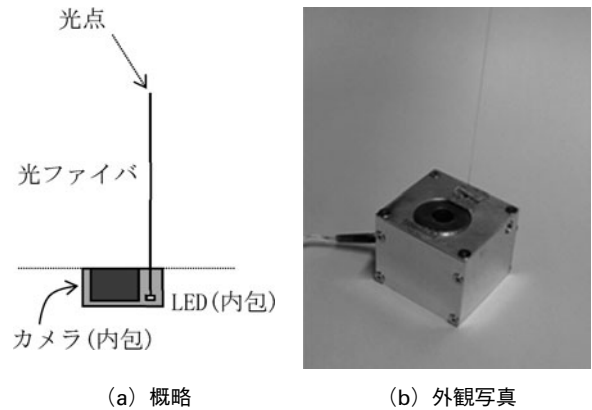


図8 小型希薄動圧計測器(C型計測器)概略。

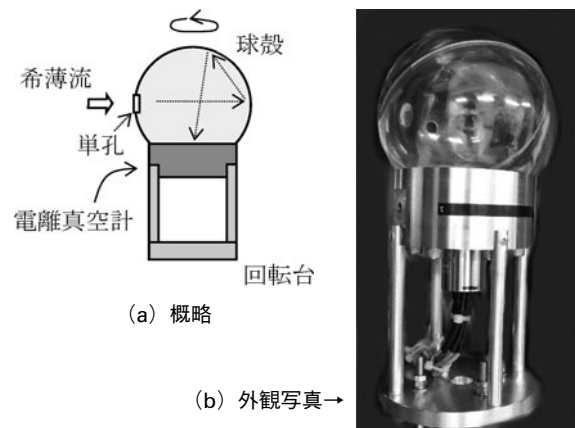


図9 球殻付希薄流計測器(P型計測器)概略。

行えると考えて鋭意進めている。動圧は静圧差であることを考えれば、P型計測器による静圧および動圧計測によりS型計測器やC型計測器の計測妥当性向上に寄与でき、S型計測器やC型計測器による妥当な動圧計測は静圧計測の妥当性向上に寄与できる。計測した動圧ベクトルの角度もまた妥当性評価に有用である。これらの計測器によって希薄流を高精度に計測できれば、希薄流を礎とする弱電離プラズマの数値解析や壁面反射モデルの評価を妥当に行えることになり、結果としてプラズマ理工学全体に貢献できるものと考えている。またこの取組みが“数値真空装置”や“数値プラズマ装置”の実現につながれば、研究開発コストや装置設計コストを大幅に削減できるものと考えている。

謝辞

著者の思いつきを端緒とした本計測器の開発には4年以上の歳月を費やした。関わってくれた多くの学生の地道な努力に対しここに謝意を示したい。また研究開発の一部費用としてJSPS科研費18K04573, 22K04547の助成を受けたことにも謝意を表したい。

参考文献

- [1] 國中 均 他: イオンエンジンによる動力航行(コロナ社, 2006)。
- [2] D. Byers and J. Dankanich, 31st Intl. Electric Prop. Conf.,

- IEPC-2009-076 (2006).
- [3] 張 科寅 他：平成26年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2014-031 (2015).
- [4] A. Fabris, *et al.*, 35th Intl. Electric Prop. Conf., IEPC-2017-250 (2017).
- [5] A. Piragino, *et al.*, 37th Intl. Electric Prop. Conf., IEPC-2022-320 (2022).
- [6] アルバック社：新版真空ハンドブック (オーム社, 2002).
- [7] 山科俊郎, 広畑優子：真空工学 (共立出版, 1991).
- [8] 堀越源一：真空技術 [第3版] (東京大学出版会, 1994).
- [9] M. Iwamoto *et al.*, Trans. JSASS **60**, 327 (2017).
- [10] R. Tsukizaki *et al.*, Vacuum **190**, 110269 (2021).
- [11] 井澤壯太 他：日本航空宇宙学会論文集 **69**, 219 (2021).
- [12] C. Eichhorn *et al.*, 37th Intl. Electric Prop. Conf., IEPC-2022-261 (2022).
- [13] 熊谷寛夫 他：真空の物理と応用 (裳華房, 1970).
- [14] 堀越源一：真空排気とガス放出 (共立出版, 1995).
- [15] 日本機械学会：原子・分子の流れ-希薄気体力学とその応用- (共立出版, 1996).
- [16] 中山宜典, 竹ヶ原春貴：日本機械学会論文集 B 編 **65**, 633 (1999).
- [17] L. Brieda, 34th Intl. Electric Prop. Conf., IEPC-2015-361 (2015).
- [18] 中山宜典：日本航空宇宙学会論文集 **65**, 200 (2017).
- [19] 中山宜典：日本航空宇宙学会論文集 **68**, 204 (2020).
- [20] 中山宜典：日本機械学会論文集 **86**, 889 (2020).
- [21] 東 滯 他：令和3年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2021-010 (2022).
- [22] Y. Nakayama, 37th Intl. Electric Prop. Conf., IEPC-2022-158 (2022).
- [23] 酒井幸市：デジタル画像処理の基礎と応用-基本概念から顔画像認識まで (CQ 出版, 2007).
- [24] 吉澤康和：新しい誤差論 実験データ解析法 (共立出版, 1989).



なか やま よし のり
中山 宜典

防衛大学校システム工学群航空宇宙工学科教授, 博士 (工学), 宇宙推進工学 (ロケット工学) が専門. 特にイオンエンジンは学生のと時から30年以上で, 小惑星探査機は

やぶさにも従事. 朝はコーヒーカップを, 昼はハンダごてを持ち, 夜はプログラムを打つのが理想の休日. サッカーサポーター歴20余年, 仕事よりも優先 (でありたい……). 座右の銘は「できないこともいつかはできる」「止まること少なしと書いて“歩”く」.