

大型スペースサイエンスチェンバー内における3次元希薄流計測

Three-dimensional Rarefied Flow Measurement in the JAXA's Space Science Chamber

○中山 宜典 (防衛大学校) ・伊藤 翼 (防衛大学校・院)

○Yoshinori Nakayama (National Defense Academy) ・Tsubasa Ito (National Defense Academy)

1. はじめに

スペースチェンバー内の粒子数はチェンバーに流入する粒子と流出する粒子の平衡によって定まる。流入粒子はフランジや扉のシール面から浸透・透過する大気、あるいは推進機やイオン源からの作動ガスであり、真空ポンプによる排気(=流出)に至るまで、チェンバー内に滞留し続ける。また、推進機やイオン源によって発生したイオンはチェンバー壁面に到達すると中性粒子に戻る。したがってチェンバー内では中性粒子の流れが支配的となる。それゆえ推進機やイオン源などの供試体の作動環境は供試体とチェンバー壁面や真空ポンプとの位置関係によって異なる、すなわちチェンバー内の供試体位置は供試体の評価に直結する。またこうした流れは宇宙空間では発生しない。したがってチェンバー内の中性粒子流れを知ることは供試体の妥当な評価につながる。しかしチェンバー内の中性粒子流れは希薄であり電磁界に無感であるので計測が極めて難しく、実在チェンバーの壁面反射現象も不明であるため妥当な数値解析も難しい。

特に、大型スペースサイエンスチェンバーは図1に示されているようにクライオポンプがチェンバー中心軸に対して偏芯しており、複雑な流れを形成していると推察される。

一方、著者らは希薄中性粒子流れ計測に約10年取組み、複数の計測器を独自に開発し、小型真空槽に対してその計測妥当性を確認してきたが、大型真空槽など他の真空槽での計測実績が無かった¹⁻⁵⁾。

そこで、自主開発してきた希薄流計測器を大型スペースサイエンスチェンバーにおいて計測作動させ、(1)自主開発の希薄流計測器が他の真空槽においても妥当に計測できるかどうかを確かめること、(2)大型スペースサイエンスチェンバー内における複雑な希薄流を確認評価すること、を本研究の目的とした。

2. 実験装置および実験手順

実験装置および計測装置を図2に示す。本研究では自主開発した希薄計測器のうち、P型希薄流計測器を採用することとした。この計測器は計測点における希薄静圧および周方位動圧を計測できるため、予想される大型スペースサイエンスチェンバー内における複雑な希薄流の発生要因を評価できると考えたからである。また取得できる希薄静圧の分布からチェンバー内の圧力不均一性も評価できるのではないかと考えたからである。

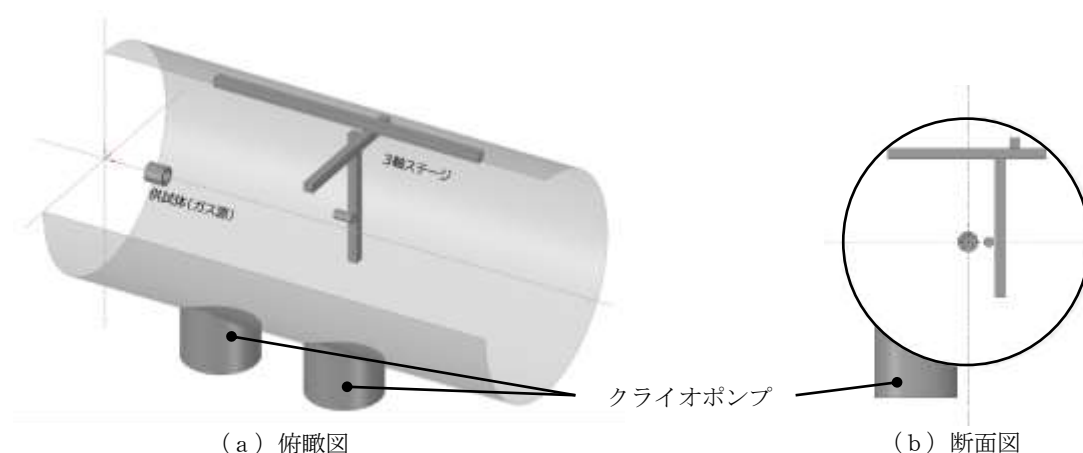
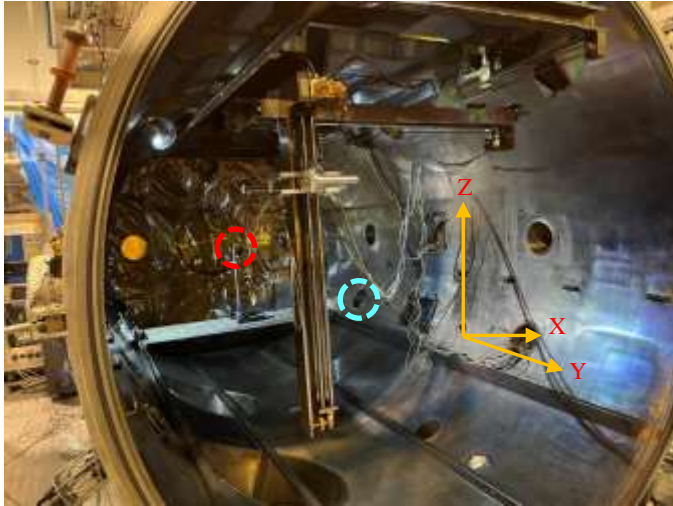


図1 大型スペースサイエンスチェンバーの俯瞰およびポンプ設置位置の特殊性(偏芯)
クライオポンプ2台の面がチェンバーの中心軸上を向いていない(非対称性)



(a) 実験装置 (チェンバおよび3軸ステージ)



(b) P型希薄流計測器

図2 実験装置 (推進剤供給系・参照用電離真空計) および計測装置 (希薄流計測器)

中心軸上に設けた推進剤供給管 (紙面赤色丸印) からキセノンを中心軸方向 (手前側・扉側) に流出させる。参照用電離真空計を推進剤供給管近くの壁面 (紙面水色丸印) に設置してチェンバ内の静圧をモニターする。P型希薄流計測器はX軸周りまたはY軸周りを計測できるように架台を介してZ軸ステージ上に設置した。P型希薄流計測器 (単孔付球殻を取付けた電離真空計) をその軸周りに回転させて周囲の全圧を計測することにより、全方位の全圧を平均して希薄静圧を、その静圧を減算して各方位の希薄動圧 (周方位動圧) を得る。

3. 実験結果および考察

3.1 希薄静圧 Z軸ステージ位置によるモニタ静圧値上昇を図3に示す。Z軸ステージが推進剤供給管 (-Y側) に近づくほどモニタ静圧値が上昇していることがわかる。これは推進剤供給管から流出させたキセノンがZ軸ステージに衝突・反射し、参照用電離真空計 (+Xおよび-Y側) によって検出されたものと考えられる。またクライオポンプがある側

(-X側) にZ軸ステージがある場合の方がその対面側 (+X側) にある場合よりもモニタ静圧値がやや高いことがわかる。これはZ軸ステージがクライオポンプ近傍に位置すると、クライオポンプへ入射する粒子 (排気される可能性のある粒子) が減少するためと考えられる。したがって、チェンバ内を掃引して計測する場合は、Z軸ステージの使用法を考慮 (例えばZ軸ステージを+X側にして計測器を-X方向に設置) した方がよいと推察する。

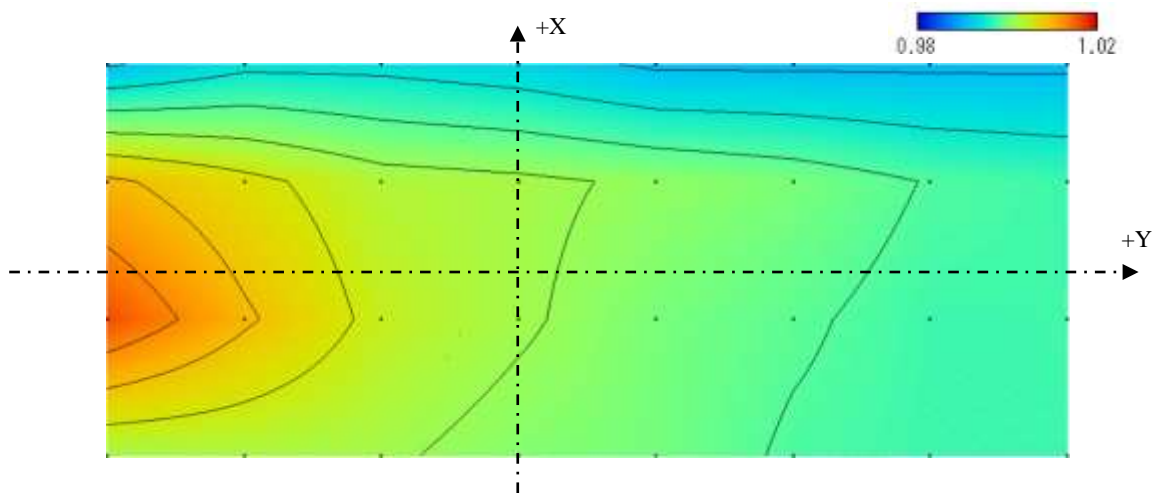


図3 Z軸ステージ位置によるモニタ静圧値上昇 (参照用電離真空計指示値上昇)

図中の黒点はZ軸ステージの中心位置を示す。Z軸ステージはチェンバ内で大きく動く構造体である。全計測点に対する参照用電離真空計の平均値を1としたとき、ステージ位置によって0.98~1.02倍となる

円周囲の矢印は周方位希薄動圧を示す。円中心の矢印は平均希薄動圧（周方位動圧の平均）を示す。円中心は計測点。
円外の矢印の大きさは0.1 mPaを示す。円外の矢印が大きいほど周方位希薄動圧の絶対値が小さくなることを意味する

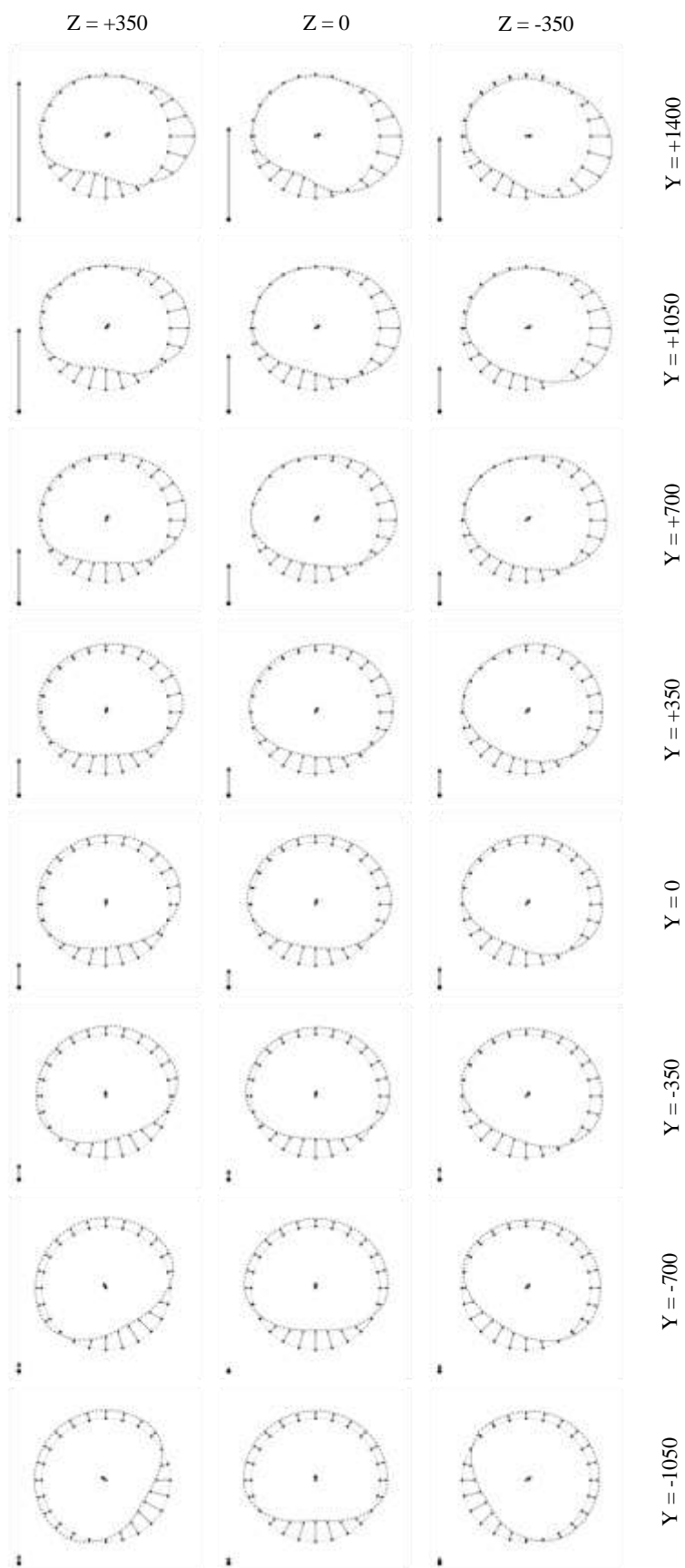


図4 中心軸を含む面の鉛直中央断面（Y-Z方向）における周方位希薄動圧および平均希薄動圧

推進剤供給管（X=Y=0, Y=-1400）から流出した希薄流を計測。中心軸（Z=0）に対称になっっておらず-Z側（クライオポンプ側）に偏向していることがわかる

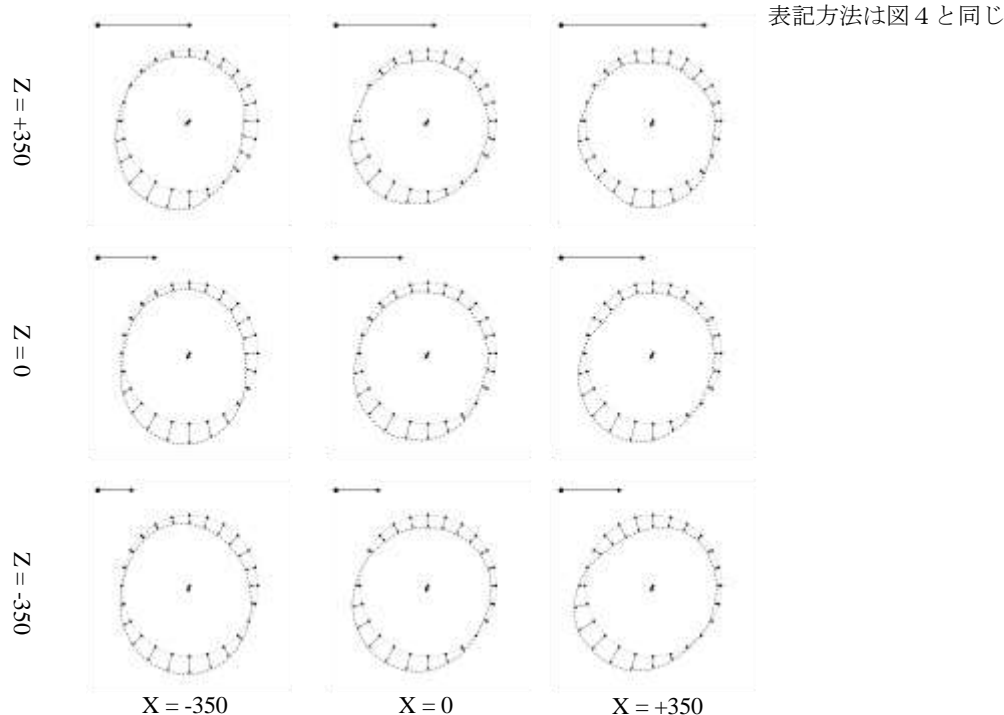


図5 中心軸に対して垂直面の鉛直中央断面 (X-Z 方向) における周方位動圧および平均動圧

どの計測点においても中心軸対称ではなくクライオポンプ方向 (-X および -Z 方向) に偏向していることがわかる

3.2 希薄動圧 鉛直中央断面における周方位希薄動圧および平均希薄動圧を図4および図5に示す。どの計測点においても推進剤供給管からの流出による希薄動圧を検知していることがわかる。またどの計測点においてもチェンバー中心軸に対称になっておらず、クライオポンプがある方向 (-X および -Z 側) に偏向していることがわかる。特にクライオポンプに近いほどその影響は大きいことがわかる。一方、下流側 (+Y 側, チェンバー扉側) に近くなるほど希薄動圧が小さくなるとともに、下流側の希薄動圧分布が非常に小さくなっていることもわかる。これは推進剤供給管から流出した粒子による希薄動圧とチェンバー扉によって反射された粒子による希薄動圧が均衡していると推察される。

3.3 計測妥当性 これらの計測において、約 1 割の計測点に対して再計測を行った結果、よい再現性がみられた。また推進剤供給管近傍においては、防衛大における真空槽と同等の計測結果であった。これらより著者らが開発してきた P 型希薄流計測器には計測妥当性があると考えられる。

3.4 今後の課題 自主開発してきた他の希薄流計測器についても計測妥当性を評価すること、そして他の真空槽においても計測可能であるかを確認することが今後の課題である。

真空槽壁面における反射現象は真空槽内の希薄流れに強い影響を与えるため、真空槽内に設置計測できる壁面反射現象評価装置を開発し、大型スペースサイエンスチェンバーの実在壁面における反射現象を計測評価することにより、本研究で実施した計測評価と合わせてより詳細な評価検討が行えるものと推察する。

4. ま と め

自主開発してきた希薄流計測器を用いて大型スペースサイエンスチェンバー内を計測評価したところ、その希薄流計測器の計測妥当性を確認するとともに、クライオポンプが偏芯設置された大型スペースサイエンスチェンバー内において複雑な 3 次元流れを確認評価できた。今後の課題として他の希薄流計測器の妥当性評価、および大型スペースサイエンスチェンバー内のより詳細な多角的評価、が挙げられる。

謝 辞

本研究の一部には JSPS 科研費 22K04547 の助成を受けた。

参 考 文 献

- 1) 中山宜典：電気推進機推進剤流れの希薄動圧ベクトル計測，日本航空宇宙学会論文集，65(5) 200-207, 2017.
- 2) 中山宜典：真空排気装置内における電気推進機推進剤流れの 3 次元計測，日本航空宇宙学会論文集，68(5) 204-211, 2020.
- 3) 中山宜典：真空ポンプ近傍の希薄動圧分布計測，日本機械学会論文集，86(889) 20-00167, 2020.
- 4) 伊藤翼，中山宜典：電気推進機評価用希薄流計測装置 — 小型化および荷電粒子対策 —，第 67 回宇宙科学技術連合講演会，2023.
- 5) 中山宜典，伊藤翼：真空槽内における電気推進機推進剤の 3 次元希薄流計測，第 63 回航空原動機・宇宙推進講演会，2024.