

〈一般研究課題〉 核融合炉ダイバータのための
クヌーセン流れ圧力分布高速解法の開発
助成研究者 名古屋大学 岡本 敦



核融合炉ダイバータのための クヌーセン流れ圧力分布高速解法の開発

岡本 敦
(名古屋大学)

Development of pressure profile solver in Knudsen flow for divertor design in nuclear fusion reactor

Atsushi OKAMOTO
(Nagoya University)

Abstract :

Fast calculation method for gas pressure profile in divertor exhaust duct of nuclear fusion reactor is developed. The method is essentially linearization of nonlinear equations, which contain pressure-dependent conductances emerging in Knudsen flow ($0.01 < K_n = \lambda / D < 0.5$, where is K_n Knudsen number, λ is the mean free path, and D is a characteristic dimension of pipe) and the viscous flow ($0.01 < K_n$). Then it is applicable in a wide range of gas pressure from the molecular flow region to the viscous flow region. With the aid of a linear solver and a personal computer, gas pressure profile is instantaneously obtained. Actual measurement of gas pressure is performed in a linear plasma device NUMBER to validate the method. The device consists of a cylindrical vacuum vessel, the diameter and length of which are 0.2 m and 2 m. Gas pressure at some points in the vacuum vessel is measured while the injection gas flow rate is varied in Knudsen flow condition. The calculation result well reproduces the measurement in the range of $K_n \geq 0.05$. The validated range is significant for design activity on the divertor exhaust duct of nuclear fusion reactor. The method will become a powerful tool as a quick solver to select some significant designs from various designs of the exhaust duct.

1. はじめに

エネルギー問題・環境問題の根本的解決につながる技術の一つとして、核融合エネルギーの実用化があげられている。核融合炉では水素同位体を高温のプラズマ状態として閉じ込め、核融合反応により生じるエネルギーを発電などに利用する。プラズマを容器壁と接触させないための構造、プラズマ中の不純物を排気する構造としてダイバータが存在し、ダイバータ領域のプラズマは磁力線に沿って輸送され、高耐熱のターゲットで終端される。ダイバータ領域の後方には排気ダクトが存在し、プラズマから冷却及び再結合により中性に戻った気体が排気される。ターゲット近傍の中性気体の圧力は、プラズマの冷却・再結合およびターゲット保護の観点で適切に制御する必要がある。そのため、ターゲット近傍から排気ダクト、さらに、その下流のポンプに至る排気経路の中性ガス圧力分布を、核融合炉の設計段階で詳細に検討しなければならない。現在フランスに建設中の国際熱核融合実験炉ITERではターゲット後方の排気ダクト近傍の中性ガス圧力として $p \cong 2-10$ Paが想定されている。[1] また日本で設計が進められている原型炉では、炉心プラズマの設計値をもとにダイバータ領域でのプラズマの温度・密度が数値シミュレーションにより予測され、ターゲット近傍の中性ガス圧力が $p \cong 2-5$ Pa程度となることが示されている。[2] 原型炉の設計活動では、この要請を満たすような排気ダクトの形状・寸法、排気経路、真空ポンプの位置・性能・台数を、放射線や磁場などの環境も考慮しながら検討する作業が行われている。

既存装置の圧力分布は適切な圧力計で計測できるが、設計段階の核融合炉ではモデル計算が必要となる。これまでに体系を管で接続された容器の集合とみなして線型連立方程式で表現し求解する方法[3]や、詳細な三次元構造を計算機上に再現し多数の分子を追跡して圧力を求めるモンテカルロ法が計算に用いられてきた。モンテカルロ法は正確な解を得るために大量の計算機資源を必要とするため、設計の初期段階で様々な排気経路の案を逐一計算する用途には不向きであった。一方、線型連立方程式の求解は、管のコンダクタンスが圧力に依存しない定数であるという仮定が用いられており、これは圧力が低いために平均自由行程が管の特徴長さより長くなる分子流領域で適用可能であるが、高圧力の粘性流領域では適用できない。核融合炉ダイバータの排気経路は、ターゲット近傍や排気ダクト付近では粘性流もしくは粘性流に近いクヌーセン流れ(粘性流と分子流の中間領域)であり、排気経路に沿って圧力が減少しポンプ直前では分子流領域に至る特徴を有する。これまでの原型炉の設計活動では、非常に初期の検討として経路全体で分子流を仮定した圧力分布計算が行われており、詳細な設計のために様々な排気経路の案についてクヌーセン流れ領域の圧力分布計算を実用的な計算機コスト・時間で行うことが求められていた。

本研究は、分子流から粘性流までの広い圧力範囲で特徴づけられる体系に適用可能な、モンテカルロ法に比べて高速な圧力分布計算手法の開発を目的とした。このような計算手法が開発されれば、様々な形状の核融合炉ダイバータ排気経路の性能を迅速に評価することが可能となり、核融合炉原型炉の高性能化による核融合エネルギーの早期実現も期待される。

2. 計算手法

2.1 分子流領域における線形解法

平均自由行程が管の特徴長さより長くなる分子流領域では、コンダクタンスは圧力に依存しない定数となる。例えば半径 a で長さ $L \gg a$ の直管のコンダクタンスは $C = \frac{2\pi a^3 \langle v \rangle}{3L}$ で与えられる。[4] こ

で $\langle v \rangle = \int_0^\infty v f(v) dv$ は速度の絶対値の平均である。

そこで、排気経路の圧力分布を得るために、体系を N 個の容器が既知のコンダクタンス[5]の配管で相互に接続された系とみなし、 i 番目の容器の圧力を p_i とする。図1のような隣り合う容器 i と j の間に $Q_{ij} = C_{ij} (p_i - p_j)$ という関係が成り立つ。ここで C_{ij} は容器 i と j を接続する配管のコンダクタンス、 Q_{ij} はその配管を流れるガス流量である。この関係を全ての容器について整理すると、 $\{p_i\}$ に関する連立一次方程式となり、各場所の圧力 $\{p_i\}$ が得られる。容器の数として $N = 10 - 100$ 程度あればたいいていの体系は表現でき、この場合の計算時間は一般的なパーソナルコンピュータで一瞬である。排気経路の圧力分布 $\{p_i\}$ は、各場所の配管径および長さに依存するほか、真空ポンプの性能と上流からのガス供給量にも依存する。

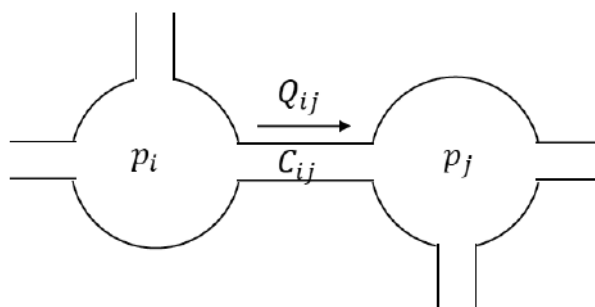


図1 圧力 p 、流量 C 、コンダクタンス Q の関係

2.2 粘性流領域におけるコンダクタンスと方程式の線形化

平均自由行程が管の特徴長さより短い粘性流領域では、コンダクタンス C は圧力 p に比例する。例えば半径 a で長さ $L \gg a$ の直管のコンダクタンスは $C = \frac{\pi a^4 p}{8 \eta L}$ で与えられる。ここで η は気体分子の粘性係数である。したがって、このまま体系を N 個の容器が既知のコンダクタンスの配管で相互に接続された系として分子流領域と同様に整理すると、 $\{p_i\}$ に関する方程式は非線形となり、そのまま高速な線形解法ルーチンが適用できない。

そこで、線形解法ルーチンが適用可能な求解法として、以下に示す線形化を考案した。コンダクタンスの式に現れる圧力 p は長さ L の管の平均圧力である。したがって、管の両端に接続された容器の圧力 p_i, p_j を用いて $C_{ij} = \frac{\pi a^4 (p_i + p_j)}{8 \eta L \cdot 2}$ と表すことができる。このとき $Q_{ij} = C_{ij} (p_i - p_j) = C'_{ij} (p_i^2 - p_j^2)$ となる。ここで C'_{ij} はコンダクタンス C_{ij} から $p_i + p_j$ を除いた残りの因子を表す。このことから粘性流領域では各場所の圧力 $\{p_i\}$ そのものではなく、二乗圧力 $\{p_i^2\}$ に関して線型方程式が得られる。得られた解 $\{p_i^2\}$ についてそれぞれ平方根を取ることで圧力分布 $\{p_i\}$ が得られる。線型方程式であるため、計算時間は分子流領域の時と同程度で、非常に高速である。

2.3 クヌーセン流れ領域における求解法の開発

平均自由行程と管の特徴長さの比 $K_n = \lambda/D$ をクヌーセン数と呼び、先に述べた分子流領域は概ね $K_n > 0.5$ 、また粘性流領域は $K_n < 0.01$ とされる。[6] クヌーセン数がこれらの中間の領域はクヌーセン流れ領域と呼ばれる。この領域のコンダクタンスは分子流領域のコンダクタンスと粘性流領域のコンダクタンスの線形結合で近似的に表現できる。そこで、与えられた体系の幾何形状、真空ポンプの性能および上流からのガス供給量に対して、中間流領域にも適用可能な圧力分布の求解法を考案した。

クヌーセン流れ領域では各場所の圧力 $\{p_i\}$ について方程式を連立する。このとき圧力が未知であると係数に含まれる粘性流コンダクタンスが決まらないため、分子流領域および粘性流領域の解法で圧力分布をそれぞれ計算し、その平均圧力を粘性流コンダクタンスに定数として代入する。したがって、クヌーセン流れ領域では圧力 $\{p_i\}$ について線形方程式となる。以後、得られた圧力で粘性流コンダクタンスを更新し、線型方程式を求解する。この操作を繰り返して収束した解として、クヌーセン流れ領域の圧力分布 $\{p_i\}$ が得られる。

この手法を適用し、半径 $a = 0.1\text{m}$ 、長さ $L = 5\text{m}$ の直管にヘリウムガスを流した時の圧力の流量依存性を計算した結果を図2に示す。破線及び一点鎖線で示される直線は分子流および粘性流における解析解であり、計算結果は分子流(低ガス圧力)領域と粘性流(高ガス圧力)領域のいずれにおいても解析解に一致することが分かる。そして両者の中間に位置するクヌーセン流れ領域において計算結果はこれらの極限から滑らかに接続されている。任意の体系を N 個の容器が配管で相互に接続された系としてこのような計算実施する計算コードを開発し、実測との比較を実験装置NUMBERを用いて実施した。

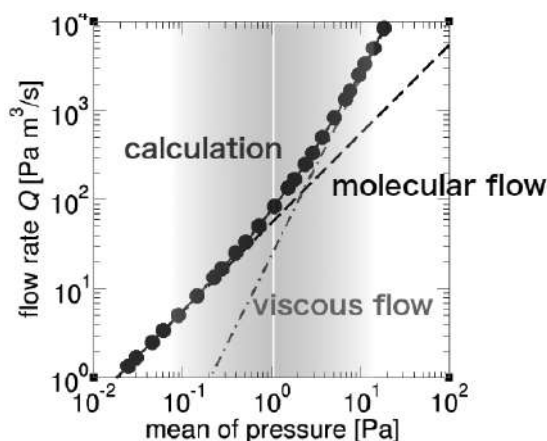


図2 計算により得られたヘリウムガス流量と管内平均圧力の関係。

3. ガス圧力の実測

開発した手法の検証のため、プラズマ実験装置NUMBER[7]の真空容器を利用してガス圧力を測定する実験を行った。NUMBERは図3に示す直径0.2m長さ2m程度のプラズマ生成・計測を行う真空容器とそこからターボ分子ポンプまでの排気ダクトから構成される。2台のターボ分子ポンプが装置中央と終端の二カ所の排気ポートにゲート弁を介してそれぞれ接続されている。装置中央の排気ポートにより真空容器はプラズマ生成領域と試験領域に分かれており、通常のプラズマ実験では生成領域にガスを注入し、生成領域側終端より石英窓を介してマイクロ波を入射しプラズマを生成する。真空容器の軸方向に印加された磁場によりプラズマは試験領域に流入し、終端板に到達する。[8] 生成領域と試験領域で適切な中性ガス圧力を維持するため中央の排気ポートとの間にそれぞれオリフィスが設置されている。本研究では、プラズマは生成せず、試験領域から流入するガス流量を変化させ、それぞれの排気ポートから排気したときの真空容器内のガス圧力を計測した。既存の冷陰極電離真空計に加え、クヌーセン流れから粘性流領域に相当する圧力で正確な圧力測定が可能なキャパシタンスゲージを主ゲート弁近傍と終端板近傍の2か所に設置した。

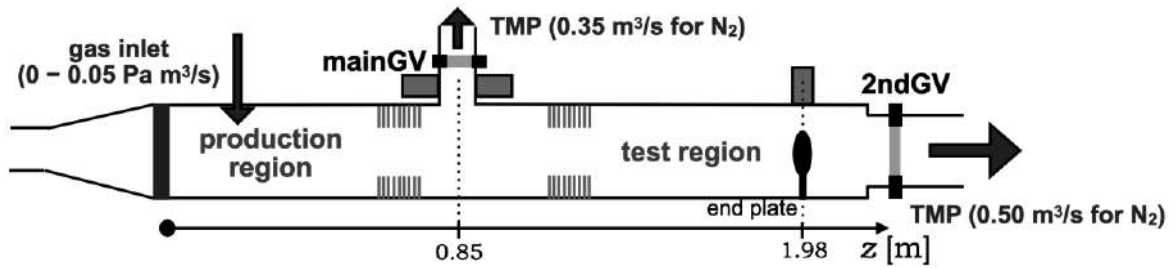


図3 実験装置NUMBERの概念図。主ゲート弁(main GV)近傍の二つの四角と終端板(end plate)近傍の四角は、それぞれ圧力計を表す。

計算コードでは実験装置NUMBERの真空容器を軸方向に分割し、短い円筒管が直列に接続された体系とみなした。プラズマ計測用に真空容器側面に0.1–0.15 m間隔でポートが設けられているため、主な軸方向の分割はポート位置に一致させた。その他にオリフィスの前後や排気ポートで管径が変化する箇所を分割位置とした。短い円筒管のコンダクタンスについては前述の長い($L \gg a$)円筒のコンダクタンスとオリフィスのコンダクタンスの合成で表現した。

典型的な実験条件における真空容器内の軸方向のガス圧力分布について、計算と実験を比較し図4に示す。主ゲート弁は閉止し、試験領域側終端の第2ゲート弁から排気することで、2か所のオリフィスを介して圧力が2段階に減少している様子が計算により得られた。圧力が最大となるのはガス注入位置の付近であり、ガス流量 $Q = 0.05 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ の条件で $p = 0.3 \text{ Pa}$ に達する。このときクヌーセン数 $K_n = 0.3$ となり、クヌーセン流れ領域に相当する。従来用いられてきた分子流領域のガス圧力分布計算コードでは正確な計算ができない体系である。本研究において初めて、実測と比較し得る圧力分布の計算結果を得た。生成領域側のオリフィスの下流端に主ゲート弁へ至る排気ポートが設置されており、そこでの実測値と計算がよく一致していることが分かる。試験領域の終端板近傍では実測よりやや低めに計算値が得られていることが分かる。後者について、よりガス流量の少ない分子流領域の条件で計算と実測を比較したところ、やはり計算が過小評価となっていることが明らかとなった。このことは、計算と実測の相違の原因が開発した求解法ではなく、複雑に真空配管部品を組み合わせている第2ゲート弁周りの幾何形状が計算コード上で適切ではなかった可能性を示唆する。幾何形状の精査については圧力に依らず幾何形状のみでコンダクタンスが決定される分子流領域が望ましく、今後、精査していく。

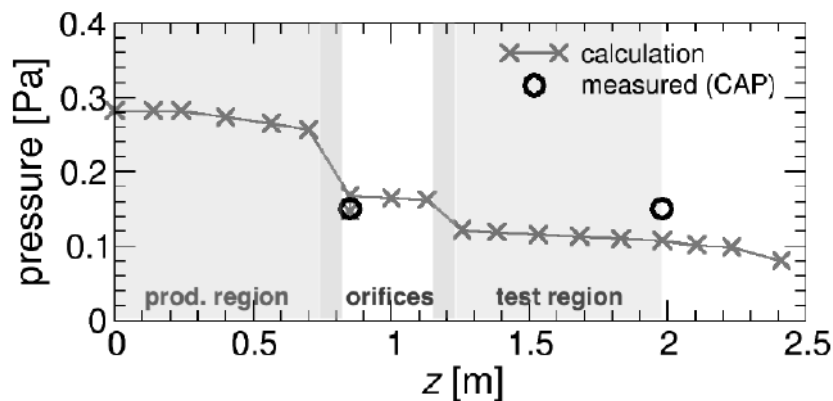


図4 真空容器内の軸方向ガス圧力分布の計算及び実測。ヘリウムガス流量 $Q = 0.05 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 、第2ゲート弁からの排気条件。クヌーセン数 $0.3 < K_n < 1$ に相当。

最大圧力 $p = 0.3 \text{ Pa}$ は実験装置NUMBERではクヌーセン数 $K_n = 0.3$ となり、クヌーセン流れ領域の中では分子流に近い側に相当する。一方、核融合原型炉では、より粘性流に近い領域(クヌーセン数 K_n が小さい領域)が存在する。このような領域での本手法の妥当性を検証するためには、実験装置NUMBERに既存のガス流量制御器(最大ガス流量 $Q = 0.05 \text{ Pa m}^3/\text{s}$)では実験が困難であり、大流量の制御器を用意してデータを取得した。図5はガス流量 $Q = 0.3 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ における結果である。ガス注入位置の付近で最大圧力 $p = 1.8 \text{ Pa}$ に達し(クヌーセン数 $K_n = 0.05$)、終端板近傍の実測点においても $p > 1 \text{ Pa}$ の圧力が維持された。真空容器全体でクヌーセン数は、 $K_n < 0.1$ となり、より粘性流に近いクヌーセン流れが実現できた。生成領域側のオリフィス近傍では実測値と計算がよく一致していることが分かる。試験領域の終端板近傍では実測よりやや低めに計算値が得られている。これらの結果は図4に示す分子流に近いクヌーセン流れ領域の結果と矛盾しない。

以上の結果から、本研究で開発した圧力分布計算手法はクヌーセン数 $K_n \geq 0.05$ の領域で実測値を十分再現できることが示された。

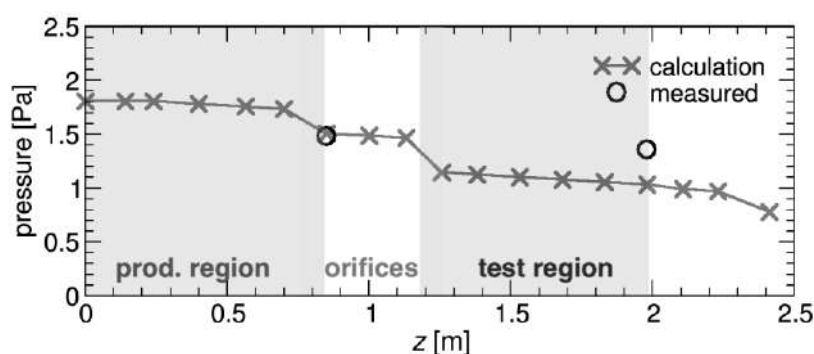


図5 真空容器内の軸方向ガス圧力分布の計算及び実測。ヘリウムガス流量 $Q = 0.3 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 、第2ゲート弁からの排気の場合。クヌーセン数 $0.05 < K_n < 0.1$ に相当。

4. まとめと今後の展望

本研究では、分子流(クヌーセン数 $K_n > 0.5$)から粘性流($K_n < 0.01$)までの広い圧力範囲で特徴づけられる体系に適用可能な、モンテカルロ法に比べて高速な圧力分布計算手法を開発した。計算手法の本質は圧力に関する非線形方程式を線形方程式に帰着させることであり、これにより、従来の分子流領域の圧力分布計算と同様に、パーソナルコンピュータで実用的な体系の圧力分布が即座に求められる。支配方程式の係数行列は配管のコンダクタンスで表現されるため、円管以外の多様な断面形状の体系にも適用可能である。妥当性検証のため、直径0.2mの真空容器を有するプラズマ実験装置NUMBERの圧力計・ガス流量制御器をクヌーセン流れ領域に対応させ、ガス流量と圧力の関係を実測した。計算結果との比較により手法の妥当性がクヌーセン数 $K_n \geq 0.05$ までの領域で示された。これは核融合炉ダイバータの排気経路におけるガス圧力分布の計算に必要な範囲をほぼカバーする。

今後、様々な形状の核融合炉ダイバータ排気経路を計算の対象とすることで、それらの経路上の圧力分布を迅速に評価することが可能となり、より精密なモンテカルロ計算や詳細寸法を含む設計活動の対象を絞り込むことができる。このことは核融合炉原型炉の高性能化による核融合エネルギーの早期実現に貢献する重要な設計手法の転換となるといえる。

参考文献

- 1) X. Bonnin, *et al.* Nuclear Materials and Energy **12**, 1100 (2017).
- 2) N. Asakura, *et al.* Processes **10**, 872 (2022).
- 3) A. Okamoto, *et al.* Plasma and Fusion Research **7**, 2401018 (2012).
- 4) 堀越源一, 真空技術[第3版] (東京大学出版会, 1994).
- 5) 株式会社アルバック編, 新版 真空ハンドブック(オーム社, 2002).
- 6) 日本真空学会 編, 真空化学ハンドブック(コロナ社, 2018).
- 7) D. Hamada, *et al.* Plasma and Fusion Research **13**, 3401044 (2018).
- 8) A. Okamoto, *et al.* Plasma and Fusion Research **14**, 2401005 (2019).