ポンプを大きくして効くかどうかは、平均自由行程と管の太さの比で入れ替わる

— 内径 **0.025** m・長さ **1.0** m の管と空気で、平均自由行程は大気圧で **65.673211** nm、**0.1** Pa で内径の **2.661735** 倍 — 分離子は、気体の分子が主に互いにぶつかるか、管の壁にぶつかるか — [論文755]

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)
Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan｜山岸勇輝ラボ
2026年9月

— From thinking to syncing. —

要旨

真空に引くとき、大きなポンプに替えれば速く引けると考えやすい。けれど、ポンプと容器のあいだには管がある。管がポンプの効きをどれだけ食うかを、平均自由行程と管の太さの比で分けて数える。新しい定理も法則も主張しない。 第一に、平均自由行程は圧力に反比例して伸びる——大気圧で **65.673211** nm、0.1 Pa で内径の **2.661735** 倍（第2節）。 第二に、分子流のコンダクタンスは圧力に依らない——この管で **1.893418** L/s。粘性流は平均圧力 **1** Pa あたり **0.529689** L/s（第3節）。 第三に、二つの式は遷移の領域で交わる——平均圧力 **3.574581** Pa、そのときの比は **0.074463**（第3節）。 第四に、これが本稿の芯である。ポンプを 10 倍にして効くかが、領域で入れ替わる——分子流では実効が **1.001704** 倍、粘性流では **1.452739** 倍（第4節）。 第五に、管の太さの効き方も入れ替わる——内径 **2** 倍で、分子流は **8.000000** 倍、粘性流は **16.000000** 倍（第4節）。 第六に、分離子は、気体の分子が主に互いにぶつかるか、管の壁にぶつかるかである——「大きいポンプに替えれば引ける」は、その比を言うまで真偽が決まらない（第5節）。 キーワード：平均自由行程、クヌーセン数、コンダクタンス、実効排気速度、分子流と粘性流、真空の配管。

本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない——平均自由行程の式、クヌーセン数による流れの領域の分け方、円管の分子流と粘性流のコンダクタンス、ポンプと管の直列の合成は、いずれも既知である（オハンロン 2003、ラファティ 1998）。遷移流の式を使わない——二つの式が等しくなる点は、領域の境の目安として示すだけで、そこでの正しいコンダクタンスは出さない。到達圧を扱わない——壁からのガス放出、漏れ、到達圧は扱わず、排気の速さだけを見る。気体を一つに置く——空気を一種の分子とし、直径 3.7×10^{-10} m を代表値として使う。領域の境を約束として置く——比 0.01 と 0.5 で三つの領域に分けるのは広く使われる目安である。実在の装置を主張しない——個別のポンプや配管は扱わない。既刊との関係：論文722 は、同じ水を止めながら通せるのは、液体と蒸気で孔の半径の効き方が違うからであることを示した——その射程注記は「クヌーセン拡散を扱わない」とし、半径が平均自由行程と同じ桁になると見積りが崩れると明記していた。ここはその崩れる先に入り、管の太さの効き方の冪が粘性流の 4 乗から分子流の 3 乗に変わり、ポンプの効きまで入れ替わることを数える。論文540 も引く——そこでは直列の剛性が調和平均になり、弱いほうが支配した。実効排気速度も同じ直列の合成で、コンダクタンスが小さい領域ではポンプが効かない。加えたのは、圧力ごとに平均自由行程と領域を並べたこと、二つの流れのコンダクタンスが等しくなる点が遷移の領域にあることを示したこと、ポンプを 10 倍にしたときの実効が 1.001704 倍と 1.452739 倍に分かれることを示したこと、分離子を「分子が互いにぶつかるか、壁にぶつかるか」に置いたことである。

1. 記法と問い

設定：温度 T、分子の直径 d_m、圧力 P での平均自由行程を λ とし、管の内径 D との比 λ/D（クヌーセン数）で流れを分ける。長さ L の円管のコンダクタンスは、分子流と粘性流で次の式になる。ポンプの排気速度 S と管のコンダクタンス C を直列につなぐと、容器から見た実効は S_{eff} になる。

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\,\pi d_m^2 P}, \qquad C_{\text{mol}} = \frac{\pi}{12}\,\bar{v}\,\frac{D^3}{L}, \qquad C_{\text{vis}} = \frac{\pi D^4 \bar{P}}{128\,\eta L}, \qquad \frac{1}{S_{\text{eff}}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{C}$$

$T = 293.15$ K、$d_m = 3.7 \times 10^{-10}$ m、$D = 0.025$ m、$L = 1.0$ m、空気の粘度 $\eta = 1.81 \times 10^{-5}$ Pa s と置く。平均の速さ $\bar{v}$ は 462.868739 m/s である。比が 0.01 未満を粘性流、0.5 以上を分子流、そのあいだを遷移流とする。

問い：大きなポンプに替えれば、容器は速く引けるのか。

2. 平均自由行程は、圧力に反比例して伸びる

計算 2.1：圧力ごとに平均自由行程と、内径との比を出した。

圧力	平均自由行程	内径との比	領域
101325 Pa	**6.567321** × 10^{-8} m	**2.626928** × 10^{-6}	粘性流
1000 Pa	**6.654338** × 10^{-6} m	**2.661735** × 10^{-4}	粘性流
10 Pa	**6.654338** × 10^{-4} m	**2.661735** × 10^{-2}	遷移流
0.1 Pa	**6.654338** × 10^{-2} m	**2.661735**	分子流
10^{-3} Pa	**6.654338** m	**2.661735** × 10^{2}	分子流
10^{-8} Pa	**6.654338** × 10^{5} m	**2.661735** × 10^{7}	分子流

> **観察 2.2**
>
> 「真空」の一語が、分子どうしがぶつかる領域から、壁にしかぶつからない領域までをまたいでいる。大気圧では **65.673211 nm** だが、**0.1 Pa** で内径の **2.661735** 倍になる——同じ管の中で、流れの型が圧力で入れ替わる。

3. 二つの流れの、二つのコンダクタンス

計算 3.1：この管のコンダクタンスを二つの式で出し、等しくなる平均圧力を求めた。

量	値
分子流のコンダクタンス	**1.893418** L/s
粘性流のコンダクタンス（平均圧力 **1** Pa あたり）	**0.529689** L/s
等しくなる平均圧力	**3.574581** Pa
そのときの比	**0.074463**（遷移流）
平均圧力 **1000** Pa の粘性流	**529.689499** L/s

> **観察 3.2**
>
> 分子流のコンダクタンスは圧力に依らず、粘性流は圧力に比例する。二つの式は比 **0.074463** の遷移流の中で等しくなる——どちらの式も正しく使えない場所で交わるので、交点は境の目安にとどまる。

4. ポンプを大きくして効くかが、入れ替わる

計算 **4.1**：ポンプの排気速度を三通りにして、分子流と、平均圧力 **1000 Pa** の粘性流で、実効排気速度を出した。

ポンプ	分子流の実効	粘性流（1000 Pa）の実効
100 L/s	**1.858234** L/s	**84.119157** L/s
1000 L/s	**1.889840** L/s	**346.272560** L/s
10000 L/s	**1.893060** L/s	**503.043797** L/s

> **観察 4.2**
>
> これが本稿の芯である。ポンプを **10** 倍にして効くかが、領域で入れ替わる。**1000** から **10000 L/s** にすると、分子流では実効が **1.001704** 倍、粘性流では **1.452739** 倍——分子流では管が **1.893418 L/s** で頭を押さえ、ポンプをいくら大きくしてもそこを超えない。

> **観察 4.3**
>
> 管の太さの効き方も入れ替わる。内径を **2** 倍にすると、分子流のコンダクタンスは **8.000000** 倍、粘性流は **16.000000** 倍——太さの冪が **3** と **4** で違い、効かせるなら分子流ではポンプより管を太くするほうが効く。

5. 分離子

観察 5.1

分離子は、気体の分子が主に互いにぶつかるか、管の壁にぶつかるか——平均自由行程と管の内径の比（クヌーセン数）である。互いにぶつかる粘性流ではポンプを大きくすると効き、壁にぶつかる分子流では管が決める——「大きいポンプに替えれば引ける」は、その比を言うまで真偽が決まらない。

観察 5.2

論文722 と並べる。722 は、液体と蒸気で孔の半径の効き方の冪が違うことを示し、半径が平均自由行程と同じ桁になると見積りが崩れると明記した——ここはその崩れる先で、管の太さの冪が 4 から 3 に変わり、ポンプの効きまで入れ替わる。

観察 5.3

論文540 とも並べる。540 は、直列の剛性が調和平均になり、弱いほうが支配することを示した——実効排気速度も同じ直列の合成で、ポンプ 1000 L/s と管 10 L/s をつなぐと 9.900990 L/s になる。弱いほうが決めるのは同じで、どちらが弱いかを流れの領域が決める。

観察 5.4

言わないこと。遷移流の正しい式も、ガス放出も、到達圧も、実在の装置も扱わない——示したのは、ポンプと管のどちらが効くかが、平均自由行程と管の太さの比で入れ替わることである。

6. 点呼と結び

1. 大気圧で **65.673211 nm**（観察 2.2）：分子どうしがぶつかる。
2. **0.1 Pa** で内径の **2.661735** 倍（計算 2.1）：壁にぶつかる。
3. 分子流 **1.893418 L/s**（計算 3.1）：圧力に依らない。
4. 粘性流 **1 Pa** あたり **0.529689 L/s**（計算 3.1）：圧力に比例。
5. 交点 **3.574581 Pa**（計算 3.1）：遷移流の中。

6. 分子流で **1.001704** 倍（観察 4.2）：ポンプが効かない。
7. 粘性流で **1.452739** 倍（観察 4.2）：本稿の芯。
8. 内径 **2** 倍で **8.000000** 倍（観察 4.3）：分子流。
9. **16.000000** 倍（観察 4.3）：粘性流。
10. 互いにぶつかるか、壁にぶつかるか（観察 5.1）：**分離子・論文722・540**。

結び：ポンプを大きくして効くかどうかは、平均自由行程と管の太さの比で入れ替わる。内径 **0.025 m** の管で、平均自由行程は大気圧の **65.673211 nm** から **0.1 Pa** では内径の **2.661735** 倍に伸び、分子どうしがぶつかる流れから壁にしかぶつからない流れに変わる——分子流のコンダクタンスは **1.893418 L/s** で圧力に依らず、粘性流は平均圧力 **1 Pa** あたり **0.529689 L/s** で、二つの式は **3.574581 Pa** の遷移流の中で交わる。ポンプを **1000** から **10000 L/s** にすると、分子流では実効が **1.001704** 倍にしかならず、平均圧力 **1000 Pa** の粘性流では **1.452739** 倍になる——分子流では管が頭を押さえ、内径 **2** 倍が **8.000000** 倍、粘性流では **16.000000** 倍と、太さの効き方まで違う。分離子は、気体の分子が主に互いにぶつかるか、管の壁にぶつかるかである——「大きいポンプに替えれば引ける」は、その比を言うまで真偽が決まらない。既刊との位置——論文722 は平均自由行程の桁で見積りが崩れると明記し、ここはその先を数えた。論文540 の直列の合成で、どちらが弱いかを流れの領域が決める。正直に言えば——遷移流の正しい式もガス放出も到達圧も扱わず、空気を一種の分子と置いた。

参考文献

1. Lafferty, J. M. (Ed.). (1998). *Foundations of Vacuum Science and Technology*. Wiley.
2. O’Hanlon, J. F. (2003). *A User’s Guide to Vacuum Technology* (3rd ed.). Wiley.
3. 山岸勇輝 (2026).『複合材の上限と下限は、算術平均と調和平均そのものである』[論文540]. Zenodo. 10.5281/zenodo.23014138
4. 山岸勇輝 (2026).『同じ水を止めながら通せるのは、液体と蒸気で孔の半径の効き方が違うからである』[論文722]. Zenodo. 10.5281/zenodo.23015005

— *From thinking to syncing.* —

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

© 2026 Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan · Licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)