

真空実験レポート

05-242628 三田村彰大

January 9, 2026

Contents

1 課題 A	2
1.1 実験の目的	2
1.2 実験の手法	2
1.3 実験結果	2
1.4 レポート課題 1	3
1.5 レポート課題 2	3
1.6 レポート課題 3	5
2 課題 B	8
2.1 実験の目的	8
2.2 実験の手法	8
2.3 実験結果	8
2.4 レポート課題 1	9
2.5 レポート課題 2	9
2.6 レポート課題 3	18
3 課題 C	20
3.1 実験の目的	20
3.2 実験の手法	20
3.3 実験結果	20
3.4 レポート課題 1	21
3.5 レポート課題 2	21
3.6 レポート課題 3	23
3.7 レポート課題 4	24
3.8 レポート課題 5	26
4 References	28
5 Appendix	28

1 課題 A

1.1 実験の目的

本実験ではチェンバー内の空気を真空引きした際の圧力変化をポンプからの距離が異なる 2 点で計測する。これにより真空引きした際に気体がどのように振る舞うかを理解することを試みる。また長時間にわたって計測を行うことで気体漏れや気体放出など真空に特有の振る舞いを観察する。

1.2 実験の手法

本実験ではドライポンプとターボ分子ポンプの二種類のポンプを用いてチェンバー内空気の真空引きを行う。この際チェンバーでの圧力 p_1 とポンプ付近での圧力 p_2 をそれぞれ測定する。ただしこれらの間は細いパイプで繋がっている。また、実際の実験ではあらかじめ行われた実験の動画データを解析して圧力値を取得した。このとき作業 A では 24 時間程度の長時間にわたる圧力変化を、作業 B では数分程度の短い時間間隔における圧力変化を測定した。

1.3 実験結果

まず、解析で用いるチャンバー体積 V_1 を測定する為、円柱形チャンバーの直径および高さを計測した。その結果は以下のよう。

$$\text{高さ} = 118.0 \text{ [mm]} \quad (1)$$

$$\text{直径} = 260.0 \text{ [mm]} \quad (2)$$

またこの時体積は $V_1 = 6.26\text{L}$ となった。^{*1}

また、作業 A における実験結果は以下のようになった。

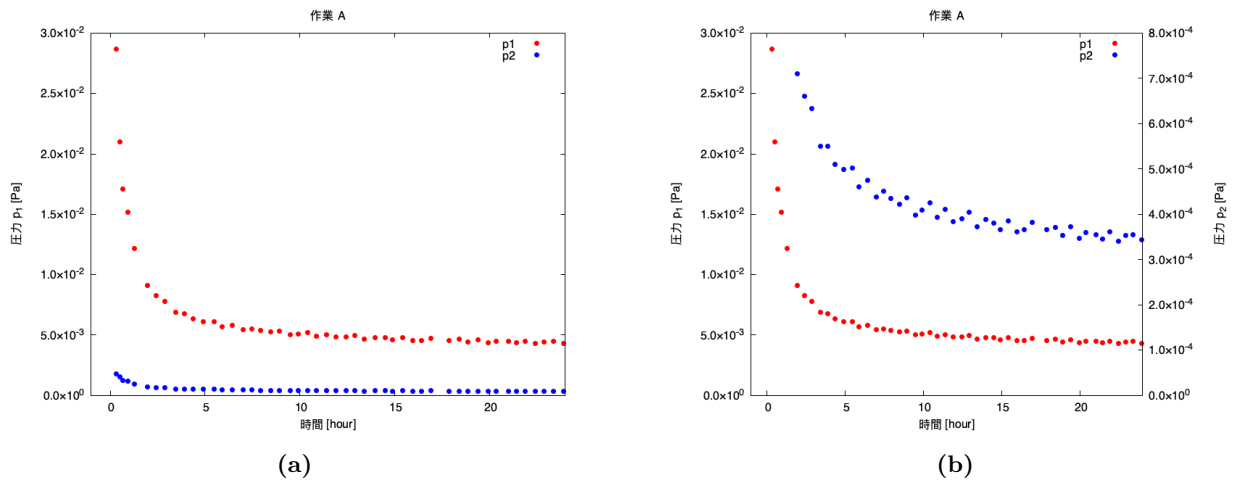
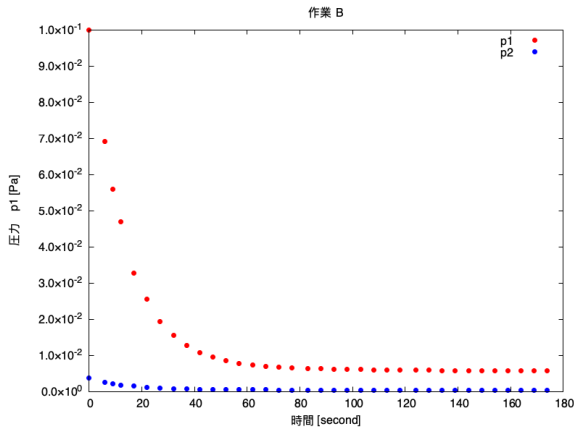


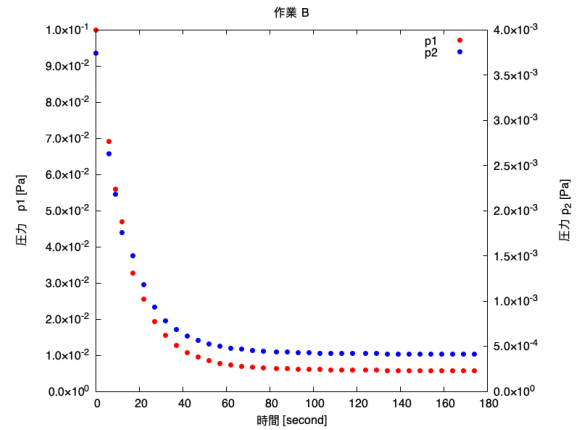
Figure1: 作業 A の実験結果。ただし、時刻 0 は動画の女性がターボ分子ポンプの start ボタンを押した瞬間。(a) がチェンバー及び TMP 近傍の圧力 p_1, p_2 の生データのプロットである。また (b) は p_1, p_2 をそれぞれ別軸スケールに取ってプロットしたものであり、この図を見ると圧力が指数関数的に減衰していることがわかる

また、作業 B における実験結果は以下のようになった。

^{*1} 教科書の 7L より少ないのは、チャンバー内の凸凹したパーツの影響があると考えられる。



(a)



(b)

Figure2: 作業 B の実験結果。(a) がチェンバー及び TMP 近傍の圧力 p_1, p_2 の生データのプロットである。また (b) は p_1, p_2 をそれぞれ別軸スケールに取ってプロットしたものである。

1.4 レポート課題 1

取得した実験データのプロットは Figure1 の通り。

1.5 レポート課題 2

問 (2a)

今、解くべき方程式は

$$V_1 \frac{dp_1}{dt} = C(p_2 - p_1) \quad (3)$$

$$Q p_2 = C(p_1 - p_2) \quad (4)$$

であり、(4) を用いて (3) 中の p_2 を消去すれば

$$\frac{dp_1}{dt} = -\frac{1}{V_1} \frac{CQ}{Q+C} p_1 \quad (5)$$

を得る。よってこれを解けば

$$p_1 = p_1(0) \exp\left(-\frac{1}{V_1} \frac{CQ}{Q+C} t\right) \quad (6)$$

となる。

問 (2b)

今、教科書中に与えられた方法を用いることで平均自由行程が

$$\lambda [\text{cm}] \approx \frac{6.6 \times 10^{-1}}{p [\text{Pa}]} \approx \frac{6.6 \times 10^{-1}}{10^{-3}} \approx 10^3 [\text{cm}] \quad (7)$$

とわかる。ただし実験結果から $p \sim 10^{-3}$ Pa と考えた。よって、系の代表的長さは長く見積もっても $D \sim 1$ m と考えられるので、今回の場合は $\lambda > D$ となり気体は分子流として振る舞う。よってコンダクタンスは教科書中に与えられた式を用いて

$$C \approx 10^3 \frac{a^3}{L} = 0.572 \times 10^{-3} [\text{m}^3 \text{s}^{-1}] \quad (8)$$

を得ることができる。

問 (2c)

今圧力は (4) に従い、よって $Q \times p_2 / (p_1 - p_2)$ の値から C を求めることができる。よって、観測データから $Q \times p_2 / (p_1 - p_2)$ の値を各観測時刻に対し計算し平均を取れば、

$$\hat{C} = 1.04(4) \times 10^{-3} [\text{m}^3 \text{s}^{-1}] \quad (9)$$

として推定値を得る。よって不確かさを考慮しても、実験値と理論値の間には大きな有意差がある。

問 (2d)

今、(3) を使って C の値を得ることを考える。そのためには p_1 の時間変化 dp/dt が必要であるが、これについては t が最も小さい 2 観測点を用いて求めることとする。^{*2} また、 p_1, p_2 については最も若い 2 つの観測点の平均を用いるものとする。この時、

$$C = \frac{V_1 p_1}{p_2 - p_1} = 0.395 \times 10^{-3} [\text{m}^3 \text{s}^{-1}] \quad (10)$$

となる。

問 (2e)

今、時定数の理論値は (6) に現れるとおりで、 V_1 や Q について与えられた値を用いれば

$$\tau = \left(\frac{1}{V_1} \frac{QC}{Q+C} \right)^{-1} = 12.8 [\text{s}] \quad (11)$$

となる。また、時定数の実験値は圧力 p_1 のデータが $1/e = 0.367 \dots$ になる点から推定できる。よって p_1 についてより詳細なデータを取り、最初の読み取り点 ($t=0$) の値の $1/e$ 倍の圧力を与える点を $t = \tau$ として読み取れば、

$$\tau = 4.8(1) \times 10^3 [\text{s}] \quad (12)$$

となる。これは理論値に比べると非常に大きな値である。

^{*2} q_{leak} 等の影響が最も小さいと考えられるため。

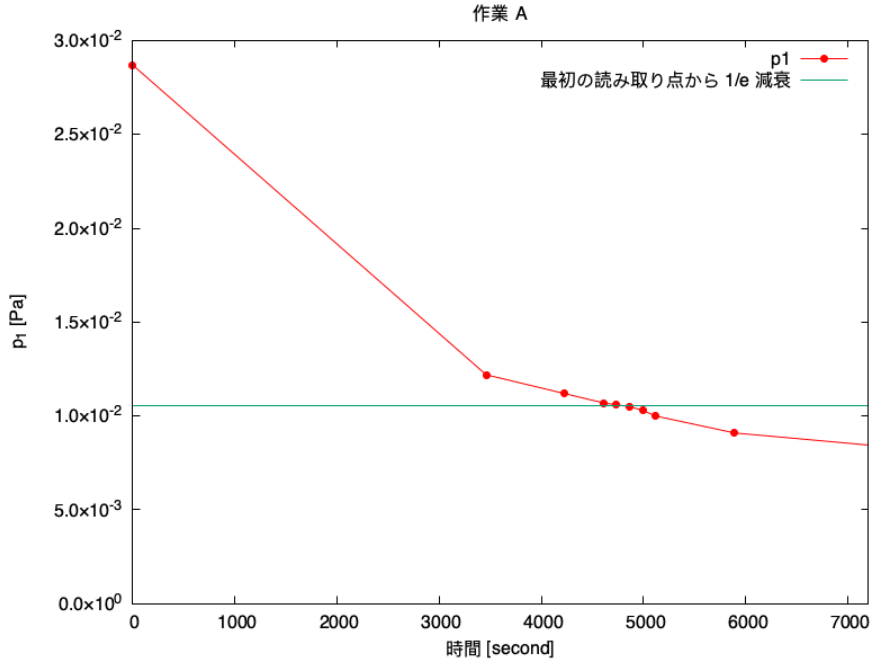


Figure3: 作業 A における p_1 プロットの拡大図。最初の二時間程度についてプロットしている。特に、 $p_1(t = 0)$ (初期読み取り値) の $1/e$ 倍の p_1 を与える点の近傍でより細かくデータを取得してる。

1.6 レポート課題3

問 (3a)

以下の連立微分方程式を考える。

$$V_1 \dot{p}_1 = C(p_2 - p_1) + q_1 \quad (13)$$

$$Q \dot{p}_2 = C(p_1 - p_2) + q_2 \quad (14)$$

この時、(14) より

$$p_2 = \frac{C p_1 + q_2}{Q + C} \quad (15)$$

であるから、これを (13) に代入すれば、

$$V_1 \dot{p}_1 = C \left(\frac{C p_1 + q_2}{Q + C} - p_1 \right) + q_1 \quad (16)$$

$$\rightarrow V_1 \dot{p}_1 = - \left(\frac{1}{Q} + \frac{1}{C} \right)^{-1} p_1 + \left(\frac{C}{Q + C} q_2 + q_1 \right) \quad (17)$$

となる。よって、

$$q_3 = \frac{C}{Q + C} q_2 + q_1 \quad (18)$$

となる。

問 (3b)

混乱を避けるため、 q_{out} の時定数を τ_{out} と書くことにする。与えられた条件から、解くべき微分方程式は

$$\dot{p}_1 = -\frac{Q'}{V_1} p_1 + \frac{1}{V_1} \frac{s\sigma_0 k_B T}{\tau_{\text{out}}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{out}}}\right) + \frac{q_{\text{leak}}}{V_1} \quad (19)$$

となる。以下、わかりやすさのため $s\sigma_0 k_B T / \tau_{\text{out}} = A$ と置くことにすると、(19) は

$$\left(\frac{d}{dt} + \frac{Q'}{V_1}\right) p_1 = \frac{A}{V_1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{out}}}\right) + \frac{q_{\text{leak}}}{V_1} \quad (20)$$

となり、よって指数因子を用いれば

$$\exp\left(-\frac{Q'}{V_1} t\right) \frac{d}{dt} \left(\exp\left(\frac{Q'}{V_1} t\right) p_1\right) = \frac{A}{V_1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{out}}}\right) + \frac{q_{\text{leak}}}{V_1} \quad (21)$$

$$\rightarrow \frac{d}{dt} \left(\exp\left(\frac{Q'}{V_1} t\right) p_1\right) = \frac{A}{V_1} \exp\left(\left(\frac{Q'}{V_1} - \frac{1}{\tau_{\text{out}}}\right) t\right) + \frac{q_{\text{leak}}}{V_1} \exp\left(\frac{Q'}{V_1} t\right) \quad (22)$$

$$\rightarrow \exp\left(\frac{Q'}{V_1} t\right) p_1 = C + \frac{A}{V_1} \left(\frac{Q'}{V_1} - \frac{1}{\tau_{\text{out}}}\right)^{-1} \exp\left(\left(\frac{Q'}{V_1} - \frac{1}{\tau_{\text{out}}}\right) t\right) + \frac{q_{\text{leak}}}{V_1} \left(\frac{Q'}{V_1}\right)^{-1} \exp\left(\frac{Q'}{V_1} t\right) \quad (23)$$

$$\rightarrow p_1 = C \exp\left(-\frac{Q'}{V_1} t\right) + \frac{A}{V_1} \left(\frac{Q'}{V_1} - \frac{1}{\tau_{\text{out}}}\right)^{-1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{out}}}\right) + \frac{q_{\text{leak}}}{Q'} \quad (24)$$

となる。よって定数 A を明示的にかけば、

$$p_1 = C \exp\left(-\frac{Q'}{V_1} t\right) + \frac{1}{V_1} \frac{s\sigma_0 k_B T}{\tau_{\text{out}}} \left(\frac{Q'}{V_1} - \frac{1}{\tau_{\text{out}}}\right)^{-1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{out}}}\right) + \frac{q_{\text{leak}}}{Q'} \quad (25)$$

問 (3c)

(25) から

$$p_1(t \rightarrow \infty) = \frac{q_{\text{leak}}}{Q'} \quad (26)$$

が従うことがわかる。よって実験結果が (25) に従うと仮定すると、実際の実験で得られた圧力 p_1 でもって上から q_{leak}/Q' を抑えることが可能である。今、作業 A において 24 時間放置した後のチェンバーでの圧力は $p_1 = 4.33 \times 10^{-3}$ Pa であるから、

$$\frac{q_{\text{leak}}}{Q'} < 4.33 \times 10^{-3} \quad (27)$$

$$\rightarrow q_{\text{leak}} < 2.36 \times 10^{-6} [\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (28)$$

として上限が与えられる。^{*3}

^{*3} ただし C の値としては (2b) で求めた理論値を用いた。

問 (3d)

以下では、 q_{leak} が十分小さいと仮定し、 $q_{\text{leak}} = 0$ として考える。この時、 p_1 は

$$p_1 = C \exp\left(-\frac{Q'}{V_1} t\right) + \frac{1}{V_1} \frac{s\sigma_0 k_B T}{\tau_{\text{out}}} \left(\frac{Q'}{V_1} - \frac{1}{\tau_{\text{out}}}\right)^{-1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{out}}}\right) \quad (29)$$

となる。この時、第一項の時定数は (11) に現れるとおりであるから $\tau_1 = V_1/Q' \approx 12\text{s}$ であり、よって今回の観測の時間スケール (24 時間) においては速やかに減衰すると考えて良い。よって、

$$p_1(t) \approx \frac{1}{V_1} \frac{s\sigma_0 k_B T}{\tau_{\text{out}}} \left(\frac{Q'}{V_1} - \frac{1}{\tau_{\text{out}}}\right)^{-1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{out}}}\right) \quad (30)$$

と考え、 τ_{out} を様々に変化させながら $p_1(t)$ を描き観測データに最もよくフィットする τ_{out} を求めれば良い。これを行ったのが Figure4 である。

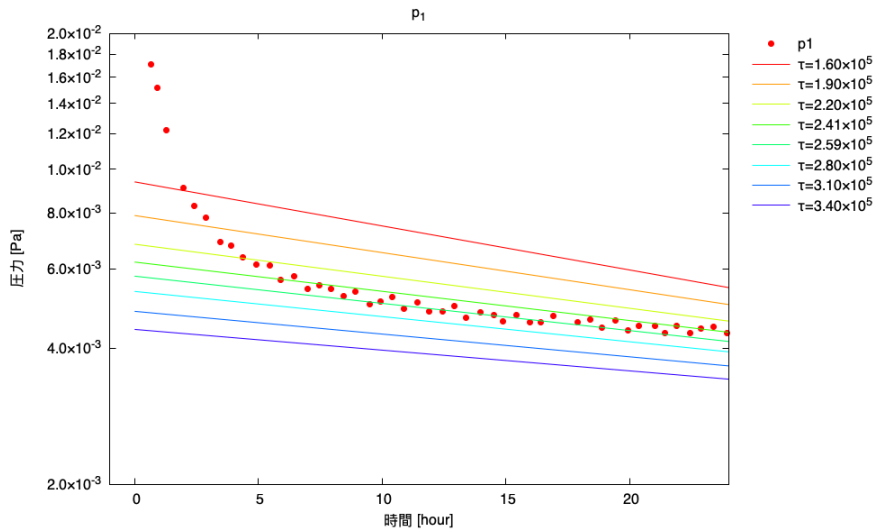


Figure4: τ_{out} を様々に変えた時の (30) の変化の様子。赤点は観測データ、縦は log。観測データの t 十分大でのプロットは、 $\tau_{\text{out}} = 2.41 \times 10^5 \sim 2.80 \times 10^5 \text{ s}$ の範囲によく収まっていることがわかる。

図を見れば、観測データの t 十分大でのプロットは、 $\tau_{\text{out}} = 2.41 \times 10^5 \sim 2.80 \times 10^5 \text{ s}$ の範囲によく収まっていることがわかり、よってこれが τ_{out} の推定値と考えることができる。よって

$$\tau_{\text{out}} \sim 2.60 \times 10^5 \text{ [s]} \quad (31)$$

と推定する。

2 課題 B

2.1 実験の目的

本実験ではチェンバー内のサーミスタの温度がチェンバー圧力とどのように関係しているかを、チェンバーを真空引きして圧力を様々に変化させることで観察する。これにより実際の真空計において圧力がどのように測定されているかを理解することができる。また、サーミスタの温度-圧力依存性から、気体熱伝導の圧力依存性を見ることも試みる。

2.2 実験の手法

本実験ではチェンバー内の空気をドライポンプとターボ分子ポンプを用いて真空引きしながらサーミスタ抵抗の温度変化を観察する。ただし実際に測定されるのはサーミスタ抵抗にかかる電圧であり、ここからサーミスタの抵抗値を求めサーミスタの抵抗値-温度依存性の式を用いて温度の情報に変換する。

また同時にチェンバー内の圧力の測定も行うが、これは高圧部においてはピラニ真空計を用い、低圧部ではイオンゲージを用いる。ただしピラニゲージは圧力の分解能が悪い（メモリが非常に離散的に存在している）ため、リークバルブを用いて真空度を調整し圧力値をピラニゲージのメモリに合わせに行く必要がある。

2.3 実験結果

実験開始時の室温は 22.1°C であった。また、事前準備として測定した定電流ダイオードの電流電圧関係は Figure5 のようになった。図を見ると、10 ~ 17V までの範囲で電流値が 0.256mA 付近で安定していることがわかる。実際、10 ~ 17V での値の平均を取ると $I = 0.2564(5)\text{mA}$ となっており、統計不確かさは電流計の解像度 0.001mA よりも小さい。よって以降の実験では電源電圧を 15V に固定して実験を行うことにし、解析に用いる電流値は 15V の時の電流の測定値である 0.256mA とした。

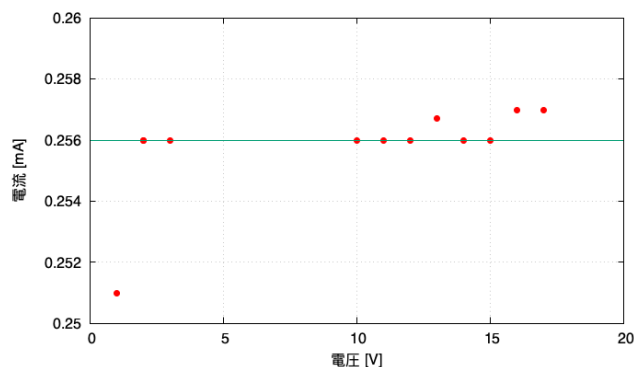


Figure5: 定電流ダイオードの電流電圧特性

次に、チェンバー内の圧力を変化させながらサーミスタにかかる電圧を測定しそこからサーミスタ表面の温度を測定した結果を Figure6に示す。

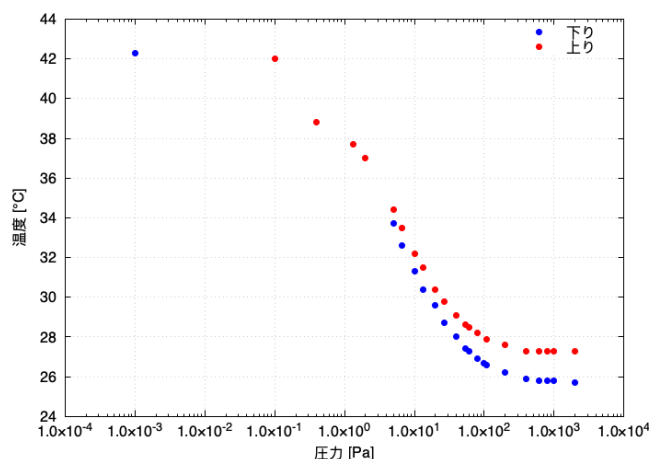


Figure6: 実験 B より得られたサーミスタの温度と周辺大気圧力の関係。横軸は実験におけるチェンバー内圧力を表し、縦軸は実験により測定された電圧値から求めたサーミスタの温度である。真空引きにより圧力を下げながら測定したデータが青の「下り」プロット、リークバルブを用いて圧力を上げながら測定したデータが赤の「上り」プロットに対応している。

今図を見ると 4.0×10^{-1} Pa のデータが一見トレンドから外れているように見えるが、これはピラニゲージが 0.003 Torr を示した時のデータの読み取り値であり、ピラニゲージは低圧で解像度が特に悪くなることからこの観測点は圧力方向に大きな不確かさを持つことに留意しなければならない。(Figure7参照。)



Figure7: ピラニゲージのメモリ。0.003Torr 付近では針の「振れ」に対する圧力値の変化が大きく、正確な圧力値の読み取りに大きな不確かさが伴うと考えられる。

2.4 レポート課題 1

Figure6に示した通り。

2.5 レポート課題 2

※ 非常に長くなったので、先に最終的な考察結果へのリンク (67) (68) を残しておく。

Q_{tot} について

サーミスタの発熱量 Q_{tot} はジュール熱であると考えて良いから、各圧力について測定されたサーミスタ電圧 $V(p)$ について

$$Q_{\text{tot}}(p) = V(p)I \quad (32)$$

として与えられる。

F_{air} について

今、熱伝導方程式の定常解はサーミスタ中心からの距離を r として

$$T = \frac{a}{r} + b \quad (33)$$

の形で与えられる。この時、サーミスタ表面では実験で求めた温度 $T(p)$ になっていると考えられ、チェンバーの壁の温度 T_c が暫定的に室温 T_0 で平衡に至っていると考えれば^{*4}、サーミスタ半径を R 、サーミスタからチェンバー壁部までの距離を R_0 とすることで境界条件が

$$T=T(p) \quad (r = R) \quad (34)$$

$$T=T_0 \quad (r = R_0) \quad (35)$$

で与えられる。よってこれを用いれば (33) 式の a について解くことができ、特に

$$T = \left\{ (T(p) - T_0) \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right)^{-1} \right\} \frac{1}{r} + b \quad (36)$$

となるから温度勾配は以下ようになる。

$$\frac{\partial T}{\partial r} = - \left\{ (T(p) - T_0) \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right)^{-1} \right\} \frac{1}{r^2} \quad (37)$$

よって、フーリエの法則から距離 r における大気による熱流束 \vec{F}_{air} が

$$\vec{F}_{\text{air}} = -\kappa_{\text{air}} \nabla T \quad (38)$$

で与えられるから、 ∇T に (37) の $\partial T / \partial r$ を代入し球面の断面積をかけることで大気の熱伝導に伴う距離 r での外向きの熱輸送 F_{air} が

$$F_{\text{air}} = \kappa_{\text{air}} 4\pi r^2 \left\{ (T(p) - T_0) \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right)^{-1} \right\} \frac{1}{r^2} \quad (39)$$

と求まる。よって r が打ち消し合うのでこれは r によらない値となり、よってこれはサーミスタ表面において大気の熱伝導によって失われる熱に等しい。特に $R = 0.4\text{mm}$ ^{*5} で $R_0 \sim 100\text{mm}$ ^{*6} であるから $R \ll R_0$ であり、よって

^{*4} ここでは一旦 $T_c = T_0$ としているが、後ほど適切な T_c の推定を行う必要がある。

^{*5} 教科書 19p 参照

^{*6} 実験課題 A 参照

(39) は次のように近似できる。

$$F_{\text{air}} \approx \kappa_{\text{air}} 4\pi R (T(p) - T_0) \quad (40)$$

ここで κ_{air} もまた圧力 P に依存した値であるが、今回は教科書に与えられたヒントに従い圧力が大きい場合には $\kappa_{\text{air}} = 0.026 \text{ W/m/K}$ とし、平均自由行程がサーミスタの大きさを超えると $\kappa_{\text{air}} \propto P$ となると考えることにする。特に今平均自由行程は $\lambda[\text{cm}] \sim 6.6 \times 10^{-1}/P[\text{Pa}]$ で与えられ、またサーミスタの代表的な大きさは $\sim 1\text{mm}$ と考えて良いので、 κ_{air} の挙動が変わる圧力は暫定的に $P_c = 6.6\text{Pa}$ とすることにする。

具体的に式にすれば、

$$\kappa_{\text{air}} = 0.026 \times \frac{P}{P + P_c} \quad (41)$$

であり、模式的に図で表せば以下の Figure8 よう。^{*7}

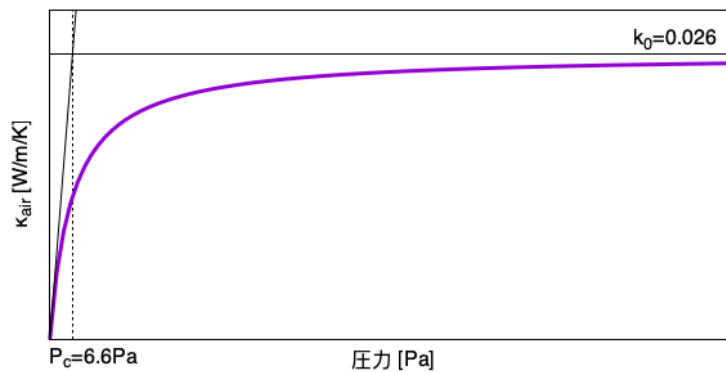


Figure8: κ_{air} の圧力依存性の模式図

F_{solid} について

今、サーミスタの導線に以下の Figure9 ような x 座標を入れる。この時、導線上の固体熱伝導は教科書に与えられ

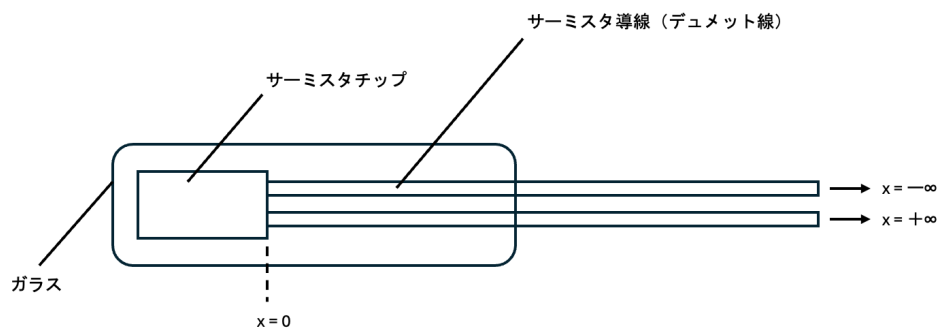


Figure9: サーミスタの導線に導入する x 座標の図。実際にサーミスタの発熱が起こっている場所を $x = 0$ とし、二本の導線上にそれぞれ $x < 0$ と $x > 0$ の方向を取る。

^{*7} 初めは P_c で折れ曲がるような直線で κ_{air} を表していた。(Figure22参照) しかし最終的に良い結果が得られず、Figure8のような関数に至った。

た通りで、

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q \delta(x) \quad (42)$$

であり、特に定常状態では

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = -\frac{Q}{\kappa} \delta(x) \quad (43)$$

である。よって今サーミスタ導線の長さを L とし、 $x = \pm L$ で温度が室温 $T = T_0$ となっているという境界条件の下で (43) のポアソン方程式を解くことを考える。今、 $x \neq 0$ では (43) は斉次であるから、対称性を考慮すれば

$$T(x) = \begin{cases} Ax + B & (x > 0) \\ -Ax + B & (x < 0) \end{cases} \quad (44a)$$

$$(44b)$$

とかける。よって $x = 0$ において (43) を満たすことを考えれば、式全体を $-\varepsilon \sim \varepsilon$ で積分して以下を得る。

$$\left[\frac{\partial T}{\partial x} \right]_{-\varepsilon}^{+\varepsilon} = -\frac{Q}{\kappa} \quad (45)$$

$$\rightarrow A = -\frac{Q}{2\kappa} \quad (46)$$

よって $x = L$ で $T = T_0$ となることなどを用いて B についても解けば

$$T(x) = -\frac{Q}{2\kappa} |x| + \left(\frac{Q}{2\kappa} L + T_0 \right) \quad (47)$$

を得る。ただし Q は式中で現れ方から $[\text{W}/\text{m}^2]$ の単位をもち、よってこれはサーミスタの発熱のうち固体熱伝導に効く分 P_{solid} を導線の断面積で割った値であるから未知数である。そこで、 $x = 0$ での温度 $T(0)$ が実験で測定される温度 $T(p)$ で与えられることを用いて Q を置き換えることを考える。今 (47) の関数の形状を考えれば、 $T(x)$ は以下の Figure10 ようになるはずである。

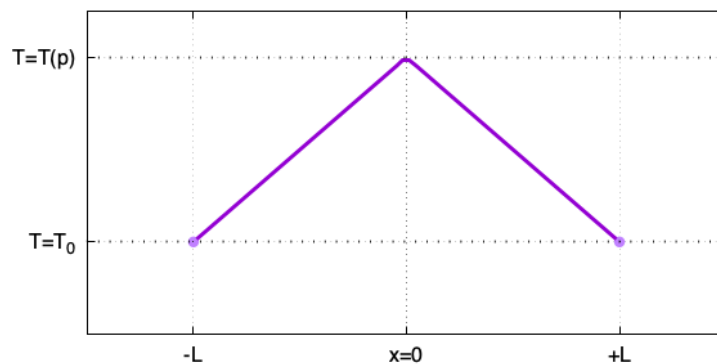


Figure10: サーミスタ導線上の温度分布の模式図

よって $T(x)$ は具体的に

$$T(x) = -\frac{T(p) - T_0}{L} |x| + T(p) \quad (48)$$

のようになる。よって今フーリエの法則より熱流束 \vec{F} が

$$\vec{F} = -\kappa_{\text{solid}} \nabla T \quad (49)$$

で与えられるから、 ∇T に $\partial T / \partial x$ を代入して導線の断面積をかければ適当な距離 $x > 0$ におけるサーミスタから離れる向きの熱輸送が

$$F = \kappa_{\text{solid}} S \times \frac{T(p) - T_0}{L} \quad (50)$$

で与えられる。特にこれは x によらない値であるから一本の導線によって固体熱伝導で失われるサーミスタの熱量に等しく、よって二つの導線を通じて失われる熱量は圧力の関数として

$$F_{\text{solid}}(p) = 2\kappa_{\text{solid}} S \times \frac{T(p) - T_0}{L} \quad (51)$$

で与えられる。ただし教科書 p19 図 13 より、ひとまずは $L = 65\text{mm}$ とする。

F_{rad} について

回路電流量が 0 の時サーミスタからの発熱は $Q = 0$ であり、また温度が周囲と均一となることから $F_{\text{air}} = F_{\text{solid}} = 0$ となる。よって $Q = F_{\text{air}} + F_{\text{solid}} + F_{\text{rad}}$ から $F_{\text{rad}} = 0$ という教科書のヒントが従う。本来はサーミスタ温度及び周囲温度が室温 T_0 であると考えれば、

$$F_{\text{rad}} = A \times \varepsilon \sigma T_0^4 \quad (52)$$

である。^{*8} ただし A はサーミスタの有効放射面積である。よってこれがゼロとなるという教科書のヒントは、「壁からサーミスタに向けて $-F_{\text{rad}}$ の放射が入ってきていることによって正味のサーミスタの放射が 0 に見える」ということを意味している。よってこの壁由来の放射を考慮して F_{rad} を正味のサーミスタからの放射と定義し直せば、測定されるサーミスタ温度 $T(p)$ に対して F_{rad} は

$$F_{\text{rad}} = A\varepsilon\sigma T(p)^4 - A\varepsilon\sigma T_0^4 \quad (53)$$

と考えるべきである。今、サーミスタ表面のガラスが $T(p)$ となっていると考えれば赤外放射率 ε として考えるべきはガラスの赤外放射率であり、[1]などを参照すれば今回の実験における温度帯では

$$\varepsilon = 0.91 \sim 0.94 \quad (54)$$

である。今回は特に間をとって $\varepsilon = 0.925$ とする。よって圧力の関数として F_{rad} を明示的に書けば

$$F_{\text{rad}}(p) = 0.925 \times A\sigma \left\{ T(p)^4 - T_0^4 \right\} \quad (55)$$

である。またサーミスタの有効放射面積 A については、教科書 19 ページ図 13 を参考にサーミスタを直径 0.8mm 高さ 1.4mm の円柱とみなすことで計算する。その模式図を Figure 11 に示す。

よって、有効放射面積は

$$A = 4.52 \times 10^{-6} \quad [\text{m}^2] \quad (56)$$

^{*8} 本来はチェンバー壁の温度を T_c として考えるべきであるが、ここでは近似的に $T_c = T_0$ とみなしていることになる。先と同様、 T_c の推定を後ほど行う必要がある。

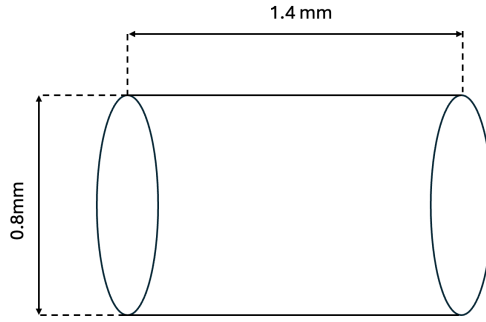


Figure11: サーミスタの近似的な概形

となる。

圧力に対する熱収支のプロット

以上の考察より $Q, F_{\text{air}}, F_{\text{solid}}, F_{\text{rad}}$ の圧力依存性が得られた。改めて書き下すと、

$$Q_{\text{tot}}(p) = V(p)I \quad (57)$$

$$F_{\text{air}}(p) = 0.026 \times \frac{p}{p + P_c} 4\pi R(T(p) - T_0) \quad (58)$$

$$F_{\text{solid}}(p) = 2\kappa_{\text{solid}}S \times \frac{T(p) - T_0}{L} \quad (59)$$

$$F_{\text{rad}}(p) = 0.925 \times A\sigma \{T(p)^4 - T_0^4\} \quad (60)$$

であった。よってこれをプロットすると以下の Figure12 のようになる。ただし Figure12 のプロットに際しては Figure6 の「上り」プロットのみを採用し、また圧力方向の不確かが大きい 0.003 Torr のデータは除外した。^{*9}

さて Figure12 を見ると、まず注目すべきなのは (b) 図において、サーミスタの発熱量と失われる熱量が一致していないことがわかる。(縦軸方向のずれ) また (a) の図を見ると高圧部でのジュール熱の増加を吸収するのは青線で表される大気熱伝導 F_{air} であることが容易に推察されるが、 F_{air} の立ち上がり・ピークの位置が Q に対してずれていることがわかる。(横軸方向のずれ)

(57)~(60) の関数の形を見ればこれらのズレの生じている原因は推察可能である。まず最初の縦軸方向のずれは、チェンバー内壁面温度 T_c を $T_c = T_0$ と室温に近似したことに起因していると推察される。また後者の横軸方向のずれは大気熱伝導率 κ_{air} の臨界圧力 P_c を大雑把に 6.6 Pa と見積もったことに起因していると推察される。その上でさらに、今回サーミスタ導線において室温との平衡が成立するまでにかかる距離を $L = 65\text{mm}$ と教科書に従いざっくり見積もったが、これも本来は未知数である。よってこれら T_c, P_c, L を改めて未知パラメータとして考え最小二乗フィッティングにより推定する。

^{*9} 今、各種熱流の算出に関してはチェンバー壁面の温度を一定とみなしているの、できるだけ条件が等しいプロットを採用すべきであると考えた。その場合、Figure6 の「下り」と「上り」のデータには明確にサーミスタの温度に系統的な誤差が発生しており、この二つの測定の実験条件の変化があったと思われる (より厳密には実験条件は時間に対して連続的に変化しているはずであるが今回はそこまでは考えない。) よってより測定点が多い「上り」のプロットを採用した。

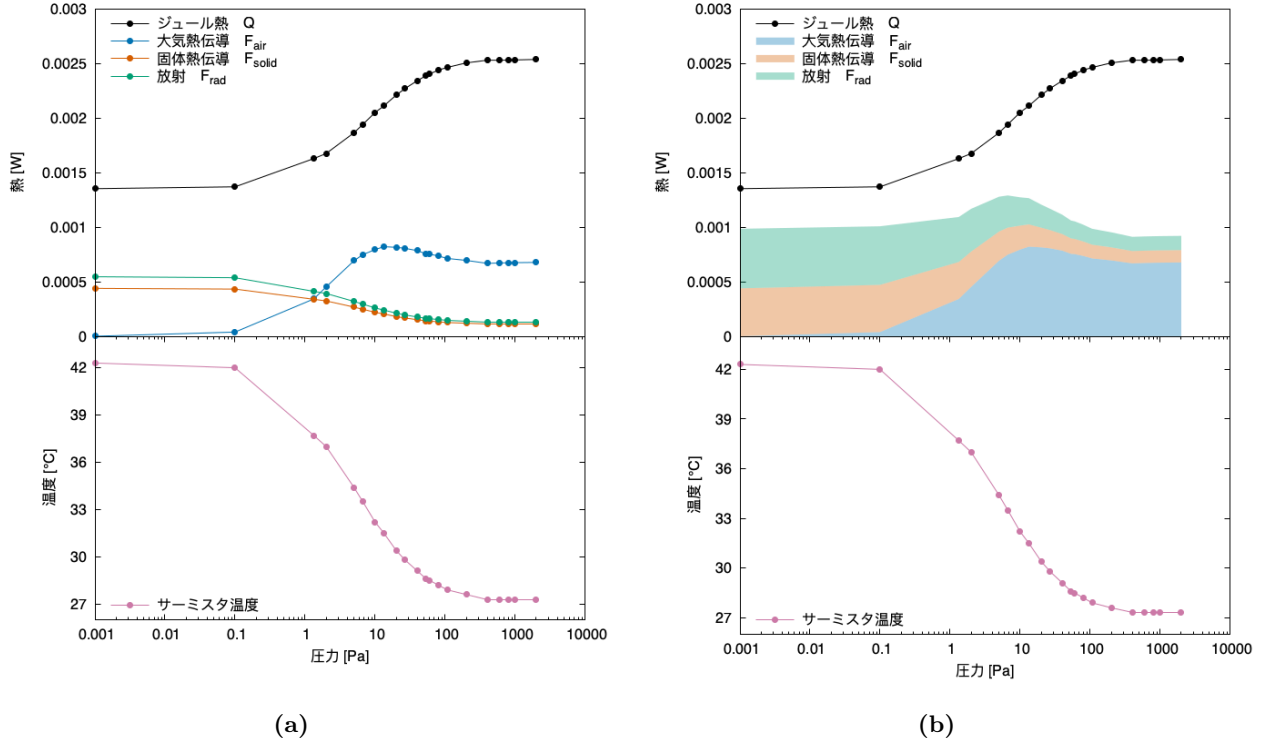


Figure12: 各圧力についての測定データから熱収支をプロットした図。(a) 上図： $Q, F_{\text{air}}, F_{\text{solid}}, F_{\text{rad}}$ のプロットであり、色分けは図に示した通り。(a) 下図：サーミスタの温度—圧力依存性。(b) 上図：サーミスタから失われる熱について、 $F_{\text{air}}, F_{\text{solid}}, F_{\text{rad}}$ の寄与を示した図。(a) 上図の $F_{\text{air}}, F_{\text{solid}}, F_{\text{rad}}$ を積み重ねた図になっている。

最小二乗推定による未知パラメタの推定

T_c, P_c, L を未知パラメタとして考え、 $Q, F_{\text{air}}, F_{\text{solid}}, F_{\text{rad}}$ の圧力依存性を新ためて以下のように書き直す。^{*10}

$$Q_{\text{tot}}(p) = V(p) I \quad (61)$$

$$F_{\text{air}}(p) = 0.026 \times \frac{p}{p + P_c} 4\pi R (T(p) - T_c) \quad (62)$$

$$F_{\text{solid}}(p) = 2\kappa_{\text{solid}} S \times \frac{T(p) - T_0}{L} \quad (63)$$

$$F_{\text{rad}}(p) = 0.925 \times A\sigma \left\{ T(p)^4 - T_c^4 \right\} \quad (64)$$

この場合目的関数 E は離散測定データ p_i に対して以下で表される。

$$E = \sum_{p_i} \left[Q_{\text{tot}}(p_i) - \left\{ F_{\text{air}}(p_i) + F_{\text{solid}}(p_i) + F_{\text{rad}}(p_i) \right\} \right]^2 \quad (65)$$

よってこれを最小化する T_c, P_c, L を求めると

$$T_c = 11.9 \text{ }^\circ\text{C} \quad , \quad P_c = 11.38 \text{ Pa} \quad , \quad L = 44.6 \text{ mm} \quad (66)$$

^{*10} $F_{\text{air}}, F_{\text{rad}}$ の T_0 を T_c と書き直した。今 F_{solid} については、サーミスタの導線は大気に接しているため T_0 はそのままが良い。

のようになる。^{*11} ただしこの時の目的関数の振る舞いは Figure13 のようになる。

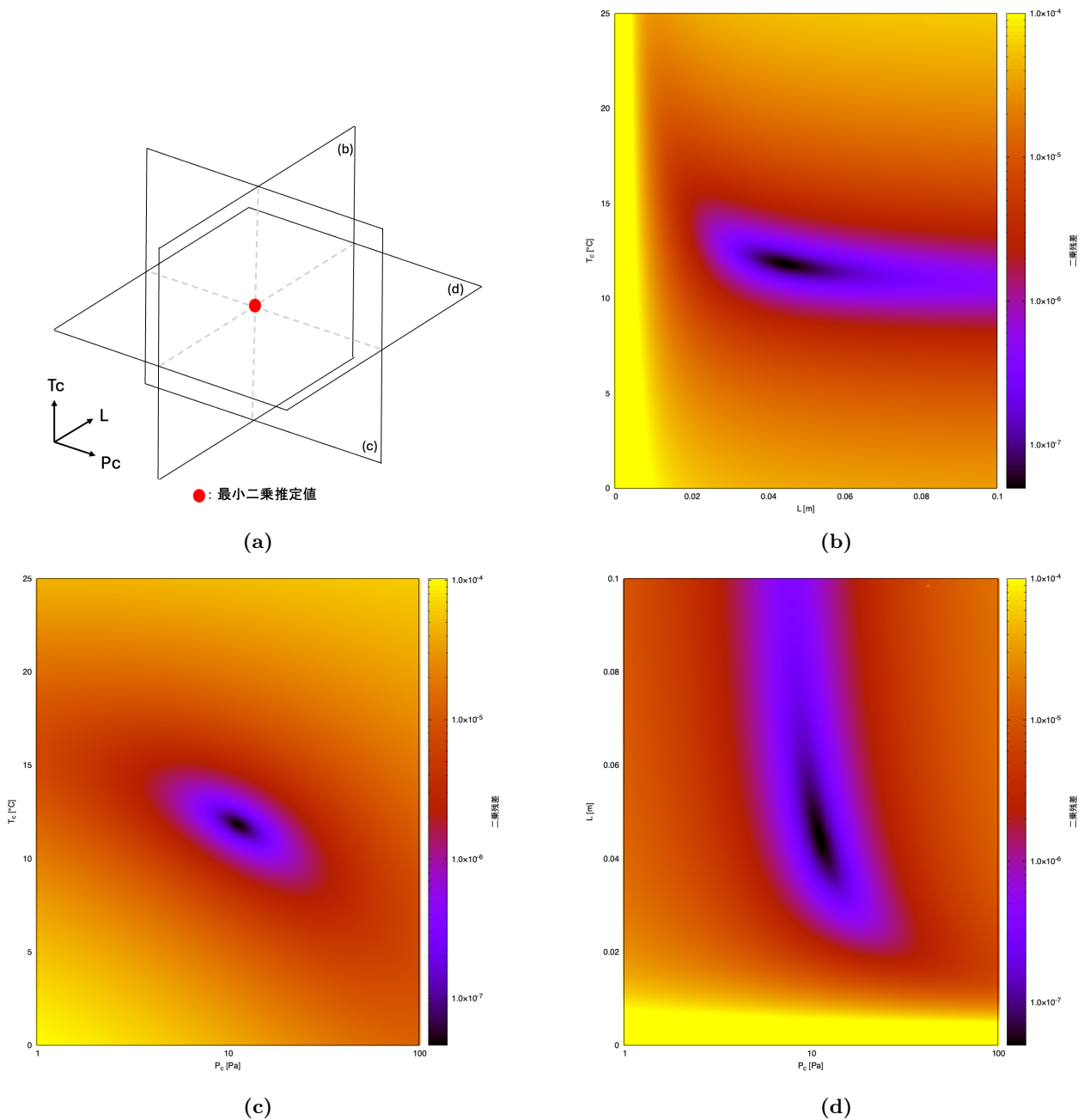


Figure13: 最小二乗推定における目的関数の振る舞い。 T_c, L, P_c の三方向について、最終的に得られた最小二乗推定値を含むような断面を見ている。図を見ると、どのパラメタについても最小二乗推定値で極小となるような綺麗な形をしており、これが唯一の推定点であるということがわかる。(極小が二つ以上存在するような形にはなっていない。)

またこの時の熱収支は下の Figure14 のようになる。

まず Figure14 を見ると、熱収支は非常によく取れていることがわかる。すなわち $Q = F_{\text{air}} + F_{\text{solid}} + F_{\text{rad}}$ となっている。また低圧部では固体熱伝導と放射による熱流出が支配的だが平均自由行程がサーミスタのスケールを下回る

^{*11} 計算コードは code1 を参照。本来是最急降下などのアルゴリズムを用いるべきであるが、今回は高々三パラメタであることから愚直に do loop を三重に回して走査した。それでも一回コードを走らせるのに 2 分程度かかっていたので、FORTRAN でギリギリ許される手法であったのだと思う。

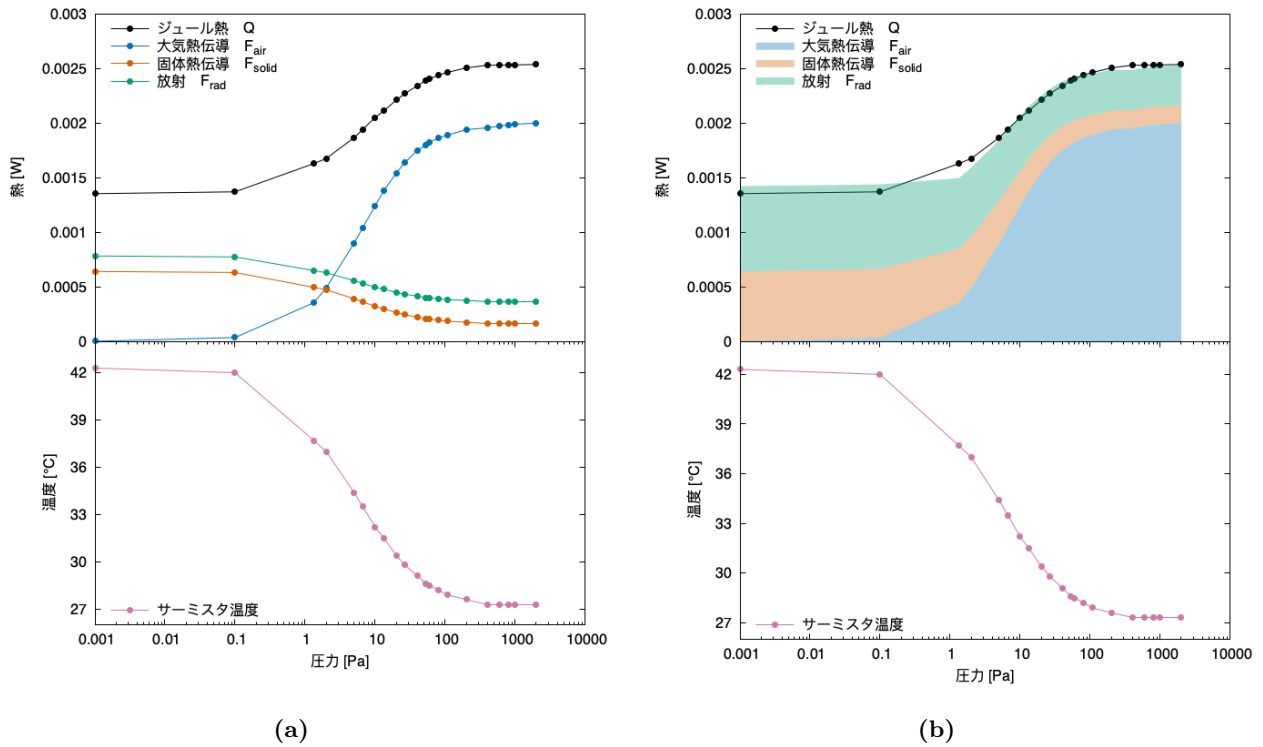


Figure14: 未知パラメタを最小二乗法により推定した上で各圧力についての測定データから熱収支をプロットした図。(a) 上図： $Q, F_{\text{air}}, F_{\text{solid}}, F_{\text{rad}}$ のプロットであり、色分けは図に示した通り。(a) 下図：サーミスタの温度—圧力依存性。(b) 上図：サーミスタから失われる熱について、 $F_{\text{air}}, F_{\text{solid}}, F_{\text{rad}}$ の寄与を示した図。(a) 上図の $F_{\text{air}}, F_{\text{solid}}, F_{\text{rad}}$ を積み重ねた図になっている。

程度の中程度の圧力からは大気による熱伝導が支配的になっていることがわかる。とくに Figure14の左の図 (a) を見ると、中圧以降では固体熱伝導と放射による熱流出は減少しており、サーミスタの特徴的な温度圧力特性は大気熱伝導によって生まれているということがわかる。また気体が十分高圧になると大気熱伝導が圧力によらない一定値となり同時にサーミスタの温度も変化しなくなることがわかる。すなわち、熱伝導が圧力依存性を持たないためにそれに釣り合うのに必要なジュール熱も変化しなくなり、よって回路として圧力変化を検知できなくなるのである。

以上をまとめると、以下のことが分かる。

サーミスタ真空計は大気熱伝導の圧力依存性を用いて圧力を熱（すなわち温度）に変換することで圧力を測定している

(67)

さらにここから、以下のように推察できる。

大気熱伝導が弱い低圧部と大気熱伝導が圧力依存性を持たない高圧部では気体の圧力の違いを感知できず、ひいては真空計として機能しなくなる

(68)

また Figure13の目的関数の振る舞いから、 T_c, P_c については不確かさの小さい推定となっているが、サーミスタの導線が室温と平衡になるまでにかかる長さ L については不確かさが大きいことがわかる。さらに $T_c = 11.9^\circ\text{C}$ よりチェンバー内部温度は室温より低くなっていることが推察されるが、これは状態方程式 $PV = nRT$ に従い、圧力 P の

低下に引きずられる形で温度が低下した場合や、気体放出に伴い気化熱が奪われて温度が下がった可能性などが考えられる。^{*12}

2.6 レポート課題3

まず、サーミスタ真空計で定電流回路が用いられている理由を考えるために、仮に定電圧回路を用いた場合について考察してみることにする。まず、サーミスタの抵抗値 R は温度上昇に伴って減少するので、微小な圧力変化によりサーミスタ抵抗の温度 T が増加した場合を考える、 R も当然に減少する。するとサーミスタからの発熱 $Q = V^2/R$ は増加し、サーミスタの温度はさらに上昇する。よってさらに R が減少し、 T が増加し…といった具合にサーミスタの温度が正のフィードバックを受け安定しないとわかる。

逆に今回の実験のように定電流回路を用いた場合では、サーミスタの温度が上昇すると抵抗値 R が減少しそれに伴いサーミスタからの発熱 $Q = RI^2$ が減少するので結果的にサーミスタの温度は減少し、よってサーミスタの温度に対し負のフィードバック回路が働くことになる。

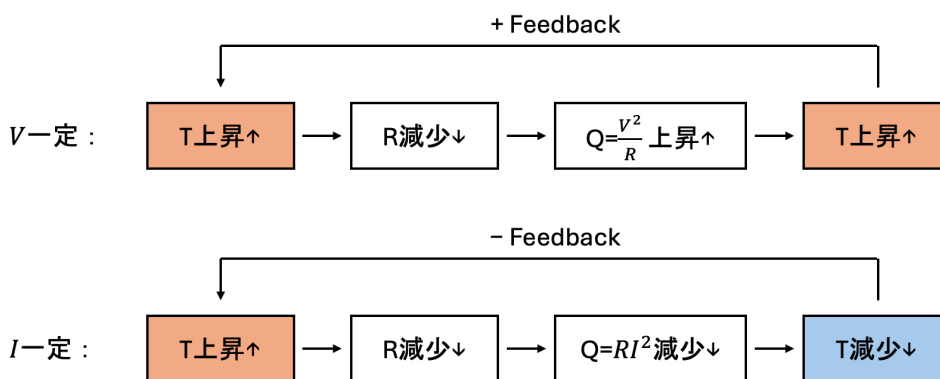


Figure15: サーミスタ真空計における抵抗温度のフィードバックの様子。上が定電圧回路を用いた場合、下が定電流回路を用いた場合。

同様にピラニ真空計においても同様に定電圧回路と定電流回路を用いた場合について考察することができる。

まず、白金抵抗の温度-抵抗値特性はサーミスタの抵抗と逆の振る舞いをし、温度上昇に伴ってその抵抗値が増加する。よって今定電圧回路を用いた場合を考えると、抵抗温度 T の増加に伴い抵抗値 R が増加し抵抗での発熱 $Q = V^2/R$ が減少するため、結果として抵抗の温度が減少する向きに負のフィードバックが働くことがわかる。

逆に、定電流回路を用いた場合を考えてみる。この時白金抵抗の温度 T を増加させると抵抗値 R が増加し抵抗での発熱 $Q = RI^2$ が増加するので抵抗温度はさらに増加する。よって定電流回路を用いると抵抗温度が正のフィードバックを受け安定しないことが予想される。

^{*12} ただし $T_c = 11.9^\circ\text{C}$ はあくまで最小二乗推定という数学的な操作（フィッティング）の結果得られた値であり、もしこの値に考察を付すならこういう理由を考えることができるというのみである。現実的には、チェンバー壁の金属部分は外部が室温に接しているのだから室温で平衡と考えることができるはずであり、 T_c の室温からのずれはなんらかの系統誤差の影響の可能性もある。また、圧力低下は分子数減少が支配的であると考えべきであり、温度低下が圧力低下に伴って起こるとは考えにくい。

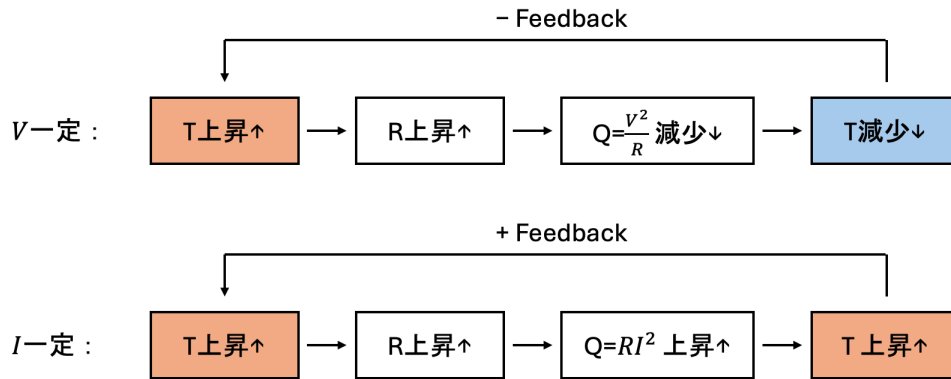


Figure16: ピラニ真空計における抵抗温度のフィードバックの様子。上が定電圧回路を用いた場合、下が定電流回路を用いた場合。

よってサーミスタ真空計で定電流回路を用いたのは抵抗温度をフィードバック的な振る舞いに対し安定させるためであったと考えられる。よってそのアナロジーから、ピラニ真空計においては定電圧回路を用いられていることが予想される。まとめると以下のよう。

温度に伴い抵抗が上昇する白金抵抗では抵抗温度に対するフィードバック的な振る舞いを考えると定電流回路よりも定電圧回路を用いた方がよく、よってピラニ真空計では定電圧回路が用いられていると予想される。

(69)

3 課題 C

3.1 実験の目的

本実験では様々な空気塊の組成を QMS を用いて分析する。これにより実際の研究で用いられている手法を体感することを試みる。

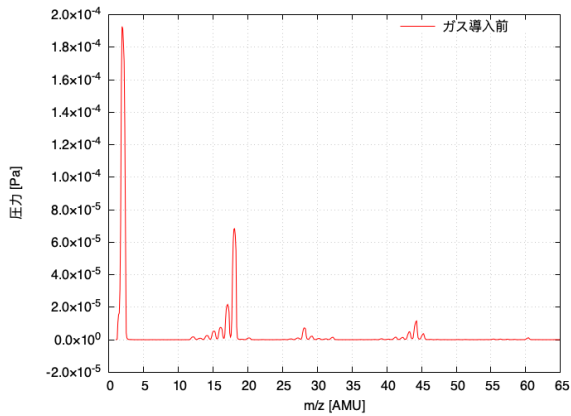
3.2 実験の手法

本実験では、一旦真空引きした後のチェンバー大気、 N_2 ガスを導入したチェンバー大気、未知のガスを導入したチェンバー大気それぞれに対して QMS を用いて質量分析を行う。初めあらかじめ真空引きされたチェンバー大気に対し QMS で質量分析を行いその後順次ガスを導入していくが、この時余分な空気が混入しないよう細心の注意を払って行う必要がある。実際の実験においては、チェンバーの前室に当たる部分である真空槽を目的のガスを流し込みながら真空引きすることで共洗い処理を行った。こうして真空槽から余分な大気が無くなりかつ槽自体の圧力が低くなるよう調整しその上で圧力差を利用してガスを一気に流し込むことで真空槽に純粋なガスを導入でき、これにより前室である真空槽とチェンバー間のバリアブルリークバルブを開くことで純粋なガスをチェンバーに導入することができる。

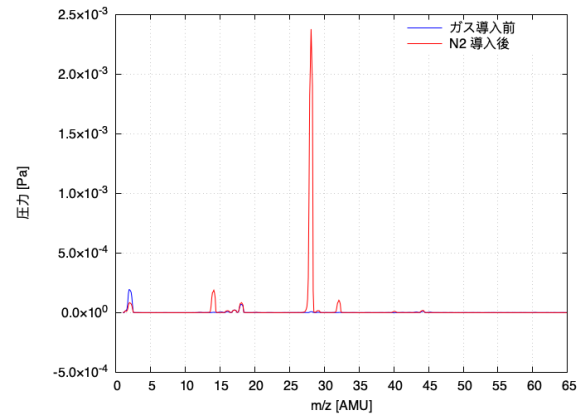
また本実験では空気漏れが結果にどのように影響するかを理解するために追加で教室大気を導入して質量分析を行った。

3.3 実験結果

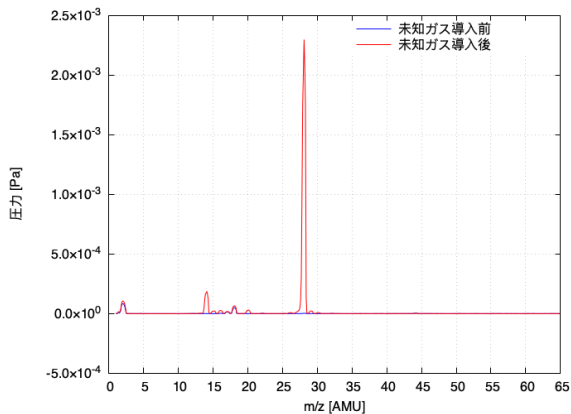
実験で得られた質量スペクトルは以下のよう。



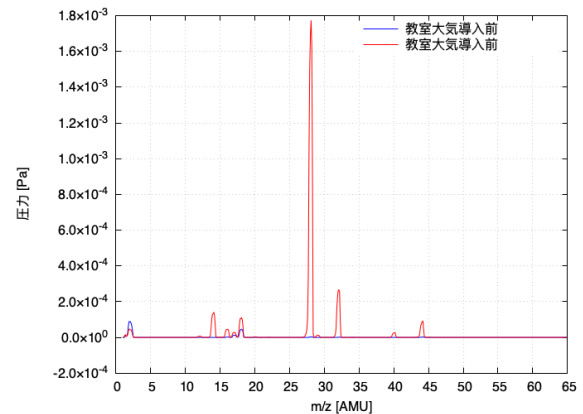
(a) ガス導入前



(b) N₂ ガス導入前後



(c) 未知ガス導入前後



(d) 教室大気導入前後

Figure17: 実験で得られた質量スペクトル。(a) はガス導入前のチェンバー内空気に対する質量スペクトル。(b) はN₂ ガス導入前後での質量スペクトルの変化の様子。(c) は未知ガス導入前後での質量スペクトルの変化の様子。(d) は教室大気導入前後での質量スペクトルの変化の様子。

3.4 レポート課題1

実験データは Figure17 のよう。

3.5 レポート課題2

N₂ 導入前のガス成分

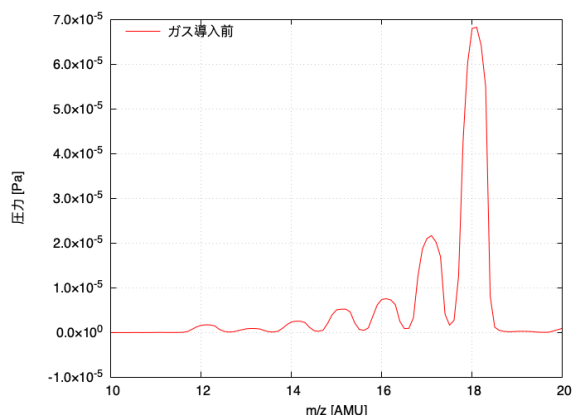
Figure17(a) のガス導入前のスペクトルを見ると、 $m/z = 2, 18, 28, 32, 44$ 付近にピークがあることがわかる。よってまずはこの情報とフラグメントパターンを参考にガス成分を同定する。^{*13}

まず、 $m/z = 2$ の位置にピークがあることがわかるが、[2] のフラグメントパターンを参考にすれば、このスペクトルを与える可能性があるのはH₂のみである。よって空気中にはH₂が存在していることが確定する。

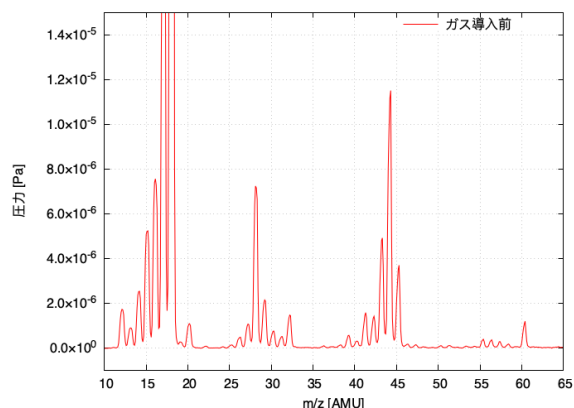
次に、 $m/z = 18$ 近傍のスペクトルに着目する。(Figure18(a) 参照。) 今、 $m/z = 18$ にピークを与えるのはH₂Oの主ピークと、CH₃OH およびC₂H₅OH のフラグメントパターンによるピークである。特に、[2] によればH₂O のフラグメントパターンは $m/z = 17$ に $m/z = 18$ のピークの 0.23 倍のピークを作ることが予想されるが、実際に得られ

*13 フラグメントパターンについては [2] を参考にした。

たスペクトルを見ると確かに $m/z = 17$ に $m/z = 18$ の 0.2 ~ 0.3 倍のピークが現れている。^{*14} よって今回のガスには H_2O が含まれていることが分かる。



(a) ガス導入前のスペクトルの、特に $m/z = 18$ 近傍の拡大図。



(b) ガス導入前スペクトルの、 $m/z = 10 \sim 65$ 近傍の縦軸拡大図。

Figure18: チェンバー大気のスเปクトルの部分拡大図。

次に、 $m/z = 15, 16$ のピークについて考察する。^[2] によると、 $m/z = 15$ の位置にピークを与えるものとして考えられるのは CH_4 かあるいは一部の炭化水素によるフラグメントである。この時特に、 $m/z = 16$ に同程度の高さのピークが観測されるという事実と整合するためには CH_4 が存在している必要がある。^{*15} よって今回のガスには CH_4 が存在していることがわかる。

次に、 $m/z = 28$ の強いピークについて考察する。これは CO, N_2, C_2H_4, C_2H_6 の主スペクトルのいずれかであると予想される。^{*16} 仮に $m/z = 28$ のピークが C_2H_4 や C_2H_6 由来であった場合、^[2] のフラグメントパターンから $m/z = 26 \sim 28$ に広がってある程度の強さを持つスペクトルが観測されるはずであり実際にそのような広がりは見られるが、それ以上に実際に得られたスペクトルは $m/z = 28$ に強く集中したピークを持っている。よってこのピークは CO ないし N_2 由来でなくてはならない。今回の実験においては、 CO が大気中で微量にしか存在しないこと、 N_2 が大気で主要な成分であることなどから、 $m/z = 28$ は N_2 主に由来のピークであると予測した。

この時、 $m/z = 28$ が N_2 「のみ」に由来するピークであると仮定すると、 $m/z = 28$ 以外でスペクトルは強度を持たないはずであるが実際のスペクトルは $m/z = 15 \sim 31$ に広がりを持っている。よって (N_2 ほど存在量は多くないが) C_2H_4 や C_2H_6 、さらに $m/z = 28$ 付近にフラグメントを持つ C_3H_8 や C_2H_5OH などの存在も示唆される。しかし、これら炭化水素のうちどれが存在しているかを同定するのは困難である。

次に $m/z = 32$ のピークについて考える。これは O_2 の主要スペクトルか、 CH_3OH あるいは C_2H_5OH のフラグメントであるが、Figure18(b)を見ると、 $m/z = 31$ のスペクトルは $m/z = 32$ のそれに比して弱く、 CH_3OH あるいは C_2H_5OH のフラグメントだけでは説明できない。^{*17} よってこのガスには O_2 が存在していることがわかる。

最後に、 $m/z = 44$ 近傍のピークについて考える。今 $m/z = 43, 45$ にピークが確認されているが、^[2] のフラグメントパターンによればこれを与え得るのは C_3H_8 と C_2H_5OH のみである。よってこれら有機化合物が確定的に存在していることがわかる。また、仮に CO_2 が存在しないとすると $m/z = 43$ と $m/z = 44$ のピークの強さは同程度となるはずだが、現実には $m/z = 44$ に強いピークが確認されている。よって CO_2 も存在していることがわかる。

^{*14} $m/z = 17$ には NH_3 由来のピークも現れることが予想されるが、今回の実験においてはその条件から NH_3 成分の存在する可能性はないものと仮定して考えた。

^{*15} CH_4 以外は $m/z = 16$ に大きなピークを与えない。

^{*16} $m/z = 28$ がフラグメント由来のピークと仮定すると、主スペクトルとしてより強いピークが $m/z = 28$ 以外に観測されなければならないが、現実にはそうならないため、これは主スペクトル由来のピークでなければならない。

^{*17} $m/z = 32$ が CH_3OH あるいは C_2H_5OH のフラグメントだった場合、^[2] から $m/z = 31$ に強いピークが予想される。

以上より、N₂ 導入前のチェンバー内大気には以下の成分が存在していることがわかる。

$$\text{H}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{N}_2, \text{O}_2, \text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}, \text{その他炭化水素} \quad (70)$$

今課題 A を思い出すと、真空引きされた大気の圧力成分は気体放出由来のものと空気漏れ由来のものに分けられるはずである。特に (70) を見れば、N₂, O₂, CO₂ は大気中に存在する分子であり、よってこれらは空気漏れ由来の物であると予想される。また H₂ や H₂O は金属内部に保持されやすい分子であると考えられるから、チェンバー内で確認されたこれらの物質は気体放出由来の物と予想される。

よって CH₄, C₃H₈, C₂H₅OH などの有機物は気体放出由来でも空気漏れ由来でもない物質であると予想される。実際には、O-ring などの樹脂部分由来のものや、チェンバー内部についた皮脂汚れ由来であることが予想される。

さらに今 Figure4 を思い出すと、課題 A では真空引きされ十分時間が経っている空気の圧力は気体放出に依存し、空気漏れ成分は小さく無視して良いと近似したのであった。そこで実際今回の実験で得られたスペクトルの縦軸の値(気体成分の分圧に対応) から空気漏れ成分と気体放出成分それぞれの分圧比を求めて見ると、

$$\frac{p_{\text{out}}}{p_{\text{leak}}} \approx \frac{p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{H}_2}}{p_{\text{air}}} \approx 3.7 \times 10^1 \quad (71)$$

となっている。(ただし上の式では気体放出 p_{out} への寄与は H₂O と H₂ のみであると考え、それらの分圧を近似的に $m/z = 2$ 及び $m/z = 18$ から与えた。また空気漏れ p_{leak} については大気ガスと同様の組成であると考え、 $m/z = 32$ から読み取れる酸素分圧に酸素の大気存在比から求まる係数をかけて求めた。^{*18}) よって確かに $p_{\text{out}} \gg p_{\text{leak}}$ となっていることが分かり、課題 A の近似の正当性が確認できる。

3.6 レポート課題3

N₂ ガス導入前後のスペクトル

次に N₂ ガス導入後のスペクトルの変化について考察する。Figure19 は N₂ 導入後の質量スペクトルから、N₂ 導入前の質量スペクトルを引いたものである。これについて先と同様に各ピークについて考察すると、N₂ 導入によってチェンバーに流入した大気の組成について Table1 のようにまとめることができる。^{*19}

まず特筆すべき事項として、N₂ 以外にも O₂ や CO₂ などの大気成分が混入していることが挙げられる。後の未知ガスの流入実験ではこの大気混入が見られなかったため他の実験班に確認したところ、同様に N₂ の導入実験でのみ大気の混入が見られたとのことであった。よってここから、N₂ のタンク接続部周りやチューブに何かしらの問題が生じていたと推察される。

また、N₂ ガスの導入により H₂ と H₂O 分圧が上昇している。これは、N₂ を導入した際バリアブルリークバルブを開けたことによりチェンバーの体積が実質的に増え、よってチェンバーの表面積(金属面)も増加し気体放出が増加したためであると考えられる。

^{*18} N₂ や CO₂ については他の成分の混入によりスペクトルから読み取れる分圧をそのまま大気分圧に換算することが難しいと考えた。

^{*19} 詳しい手順を述べると冗長になるので割愛するが、基本的にはチェンバー大気の組成を求めた時と同様の考え方で組成を推定することができる。

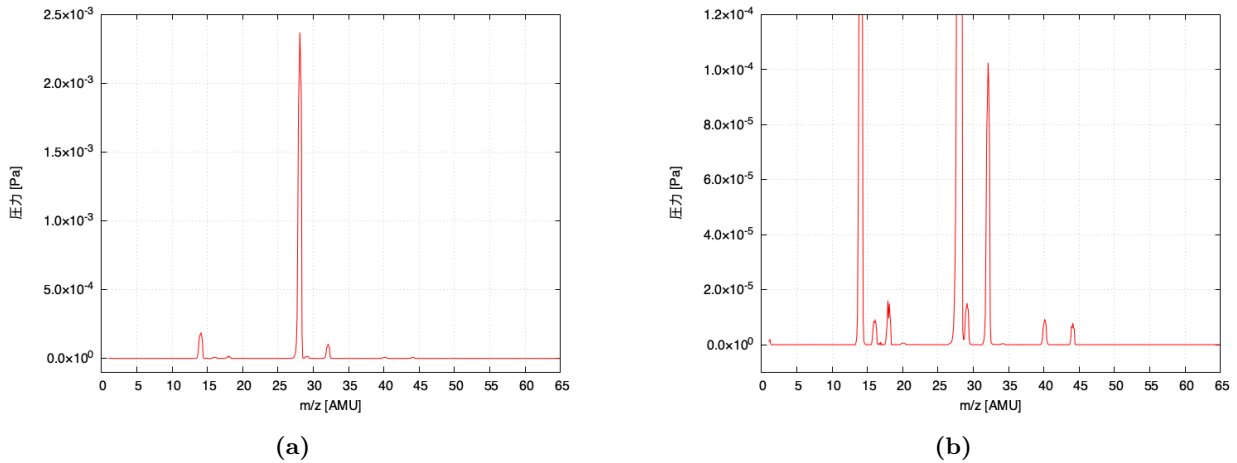


Figure19: (a) N_2 ガス導入後のスペクトルから、 N_2 ガス導入前のスペクトルをバックグラウンド引きしたものの。(b) は a 図の縦軸を拡大して見やすくしたもの。 $m/z = 14, 28$ のピークが見切れていることに注意。

ピーク m/z	ピークを与える物質	備考
14, 28	N_2	$m/z = 28$ が主ピーク、14 はフラグメント
29	N_2 同位体	$m/z = 28$ のピークに対して $m/z = 29$ でのピークの大きさが大体 1/100 くらいで、これは N の同位体比とオーダーでおおよそ一致している。
16, 32	O_2	
20, 40	Ar	チェンバー大気のスpectrumでは $m/z = 40$ のピークが弱く、他の有機分子由来のピークに紛れていてこれを見ることができなかった。
44	CO_2	
2, 18	H_2, H_2O	H_2 のピークは非常に弱い

Table1: N_2 ガス導入に伴い流入する大気成分とそのスペクトルとの対応

3.7 レポート課題4

未知ガスのスペクトル

次に、未知ガス導入後のスペクトルについて考察する。Figure20は未知ガス導入後の質量スペクトルから未知ガス導入前の質量スペクトルを引いたものである。これについてチェンバー大気について求めた時と同様に各ピークについて考察すると、未知ガス導入によってチェンバーに流入した大気の組成について Table2のようにまとめることができる。

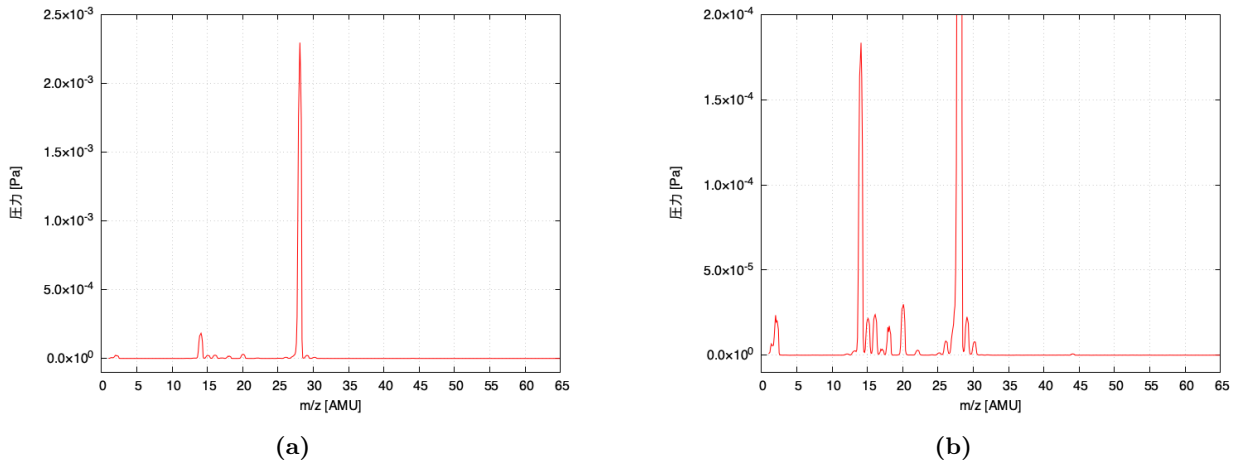


Figure20: (a) 未知ガス導入後のスペクトルから、未知ガス導入前のスペクトルをバックグラウンド引きしたものの。(b) は a 図の縦軸を拡大して見やすくしたもの。 $m/z = 28$ のピークが見切れていることに注意。

ピーク m/z	ピークを与える物質	備考
14, 28	N_2	$m/z = 28$ が主ピーク、14 はフラグメント
29	N_2 同位体	
15, 16	CH_4	
20, 22	^{20}Ne 、 ^{22}Ne 同位体	$m/z = 20, 22$ のピーク高さの比はおおよそ 10 : 1 で、これは Ne の同位体比 9 : 1 とおおよそ一致。
25 ~ 30	C_2H_6	この範囲にピークを持つ有機分子はいくつかあるが、 $m/z = 30$ までフラグメントが生じていることから C_2H_6 と推定できる。
2, 18	H_2, H_2O	気体放出由来

Table2: 未知ガス導入に伴い流入する大気成分とそのスペクトルとの対応

特に、チェンバーの気体放出由来と思われる H_2 と H_2O を除けば、顕著なスペクトルは N_2, CH_4, Ne, C_2H_6 である。そこでそれぞれの分圧値から存在比を求めてやると、

$$N_2 : C_2H_6 : Ne : CH_4 = 93 : 4.5 : 1.4 : 1 \quad (72)$$

となる。^{*20} 今回の実験においては成分 A, B, C, D の順にそれぞれおおよそ 90%, 5%, 1%, 1% 程度含有されているとこのことであったから、 N_2 が成分 A に、 C_2H_6 が成分 B に、Ne と CH_4 が成分 C と D にそれぞれ対応していることがわかる。

^{*20} ただし $m/z = 28$ のピークは N_2 と C_2H_6 が混在していることに注意し、特に C_2H_6 の分圧についてはフラグメント由来のピークにフラグメント係数から求まる適切な比率を掛け合わせて求める必要がある。今回は $m/z = 29$ のピークを用いた。

3.8 レポート課題5

(5a)

これらの未知ガスを含むような太陽系天体として、(少なくとも調べた限りでは) 以下の Table3に挙げられる3天体が見つかった。^{*21}

天体	大気組成
冥王星	N ₂ ・CH ₄ ・C ₂ H ₆ を含む氷を持ち、太陽に近づくと蒸発し大気を形成する。
タイタン	N ₂ が主成分、CH ₄ は5%程度、微量の炭化水素 (C ₂ H ₆ 含む) および希ガス (ただしNe は議論の余地あり)
トリトン	N ₂ が主成分、CH ₄ ・CO あり、Ar,Ne 存在する可能性あり、大気上層にH ₂ 存在

Table3: 天体とその大気組成

Table3に挙げられたいずれの天体も、今回検出されたガス成分のうち3つの成分を含んでいる。しかし、N₂、CH₄、C₂H₆、Ne の4つ全てを含む天体については(少なくとも調べた範囲では) 見つけることができなかった。

その上で、一番未知ガスに近い組成を与えうるのはタイタンではないかと考えた。トリトンや冥王星の大気においては不足している4つ目のガス成分の存在が確認されていないが、タイタンにおいては不足している4つ目の大気成分であるNe は議論こそ続いているものの、過去に観測された事例が存在しているためである。

よって今回の課題(5a)の回答としてはひとまずタイタンを挙げることにする。

(5b)

実際の探査において天体大気成分を分析する手法としては、大雑把に二種の手法が考えられる。

リモートセンシングを用いた観測手法

まず一つ目に、分光などのリモートセンシングを用いた手法が考えられる。これは天体大気を挟んで太陽光を観測することで吸収スペクトルを観測しそこから組成を求めるような手法である。一例としてはタイタンにおけるカッシーニのフライバイ赤外分光観測などが挙げられる。^{*22}

実際に大気を取り込んで観測する手法

もう一つ、今回の実験のように実際の天体大気を分析器に取り込んで組成を調べる手法が考えられる。具体的には探査衛星を用いて天体大気上層を通過する手法や、分析器を積んだ探査機を地面に降ろしてしまう手法などが考えられる。実際の研究の例としては、火星のキュリオシティローバー(正式名称:Mars Science Laboratory)を用いた火星大気成分の分析などが挙げられる。^{*23 *24} [4]によれば、キュリオシティには今回の実験で用いたQMSやガスクロマトグラフ、レーザーガス分析計などが搭載されており、大気ガス成分の詳しい分析が可能となっているとのことである。

^{*21} タイタンの大気組成におけるNeについての議論については [3] を参考。これによると、カッシーニの探査により暫定的にNeが検出されたが、測定限界に近かったことやCO₂との干渉の問題があり議論の余地が残るとのことである。

^{*22} 参考:[5]

^{*23} 参考:[4]

^{*24} てっきりキュリオシティが正式名称だと思っていた。

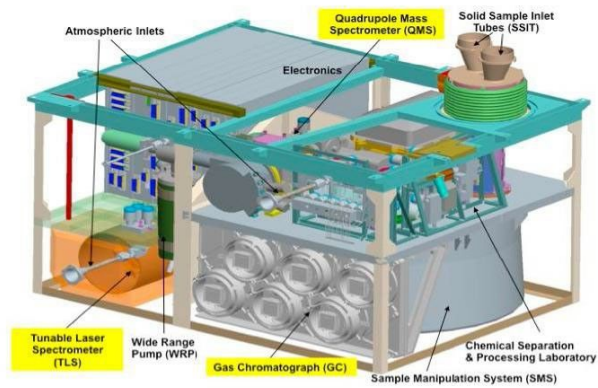


Figure21: キュリオシティに搭載されているガス分析装置系 (SAM)。

(5c)

質量分析機器搭載において困難になると予想されるのは次のような点である。

- 搭載可能重量と観測精度のトレードオフ
- 宇宙の極限環境下に耐えるような設計の必要性
- 特に長期間のミッションの場合に必要な装置の経年安定性
- 限られたスペース・重量にどのような装置を搭載するか
- etc.

よってこれらの点に留意しながら最適な観測手法を探る必要があると想像できる。

以上

4 References

- [1] <https://www.avio.co.jp/products/infrared/support/thermo/technical/emissivity.html>
- [2] <https://www.escoltd.co.jp/qms-2.html>
- [3] <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2022/pdf/2358.pdf>
- [4] <https://science.gsfc.nasa.gov/699/marsSAM.shtml>
- [5] <https://ntrs.nasa.gov/citations/20190033271>

5 Appendix

実験 B レポート課題 2 : k_{air} の圧力依存性の別の表し方

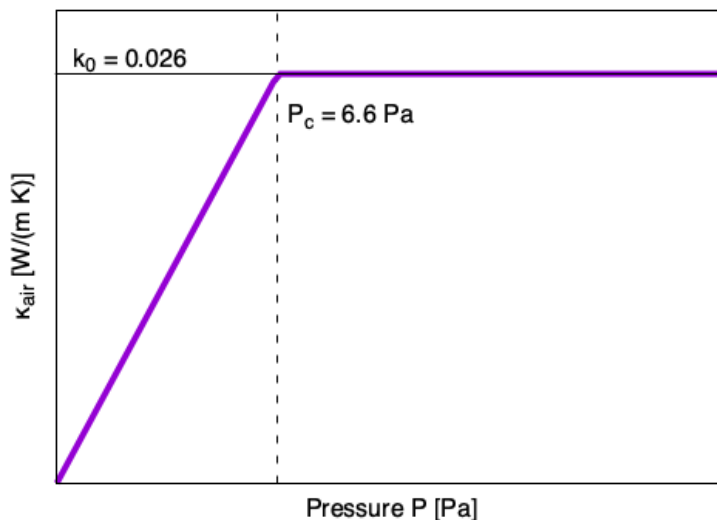


Figure22: k_{air} の圧力依存性の別の表し方の一例。

実験 B の熱収支プロット及び最小二乗推定に用いたコード

FORTRAN : 課題 B 最小二乗推定

```
1 program main
2   implicit none
3
4   real(8),allocatable :: Qtot(:),Fair(:),Fsolid(:),Frad(:)
5
6   integer::io, filesize, i, j, k, l
7   real(8),allocatable::pressure(:), temperature(:), voltage(:)
8
9   real(8) :: I_current , T_chamber, R_therm, kappa_solid, S_area, L_therm
10  real(8) :: A_therm, sigma_stef_boltz, eps_emissivity, P_crit
11
12  real(8) , parameter :: pi = 3.14159265359
13
14  real(8) :: T_chamber_adj, P_crit_adj_power
15  integer :: meshsize
```

```

16 real(8) :: T_min,T_max,P_pow_min,P_pow_max,L_therm_min,L_therm_max
17 real(8) :: square_diff,best_Troom,best_Pcrit,best_square_diff,best_L_therm
18
19 !=====file読み込み=====
20
21 open(10,file='./raw_data/raw_better.dat',status='old',action='read')
22
23 !ファイルサイズを取得する
24 filesize=0
25 read(10,'(A)')
26 do
27   read(10,'(A)',iostat=io)
28   if(is_iostat_end(io)) then
29     exit
30   end if
31   filesize=filesize+1
32 end do
33
34 !filesizeを取得したら、data_inにallocateして、読み込みを開始する。
35 allocate(pressure(filesize),temperature(filesize),voltage(filesize))
36 rewind(10)
37 read(10,'(A)')
38 do i = 1,filesize
39   !単位: Pa,celcius,V
40   read(10,*) pressure(i),temperature(i),voltage(i)
41 end do
42
43 close(10)
44
45 !=====
46
47 !=====定数など=====
48
49 I_current = 0.256e-3 !実験において電流値は0.256mAで一定
50 T_chamber = 22.1+273.15 !チェンバー内部温度。初めは室温に等しいと仮定する。
51 R_therm = 0.4e-3 !サーミスタ半径: 0.4mm
52 kappa_solid = 40.0 !デュメット熱伝導率: W/m/K
53 S_area = pi*((0.15e-3/2.0)**2.0) !導線断面積[m^2]: 導線の直径が0.15mm
54 L_therm = 65.0e-3 !室温で平衡に至っている部分までの導線ながさ: 65mmと仮定する。
55 sigma_stef_boltz = 5.67e-8 !シュテファンボルツマン定数、SI単位
56 eps_emissivity = 0.925 !ガラスの放射率
57 A_therm = 4.52e-6 !サーミスタの有効放射面積
58 P_crit = 6.6 !熱伝導率の関数形の切り替わりを与える圧力
59
60 !=====
61
62 !=====計算部分=====
63
64 do i = 1,size(pressure)
65   temperature(i) = temperature(i) + 273.15
66 end do
67
68 allocate(Qtot(size(pressure)),Fair(size(pressure)),Fsolid(size(pressure)),Frad(size(pressure)))
69
70 do i = 1,size(pressure)
71   Qtot(i) = voltage(i)*I_current !単位はワット
72 end do
73
74 do i = 1,size(pressure)
75   Fair(i) = kappa_air_2(pressure(i),P_crit)*4.0*pi*R_therm*(temperature(i)-T_chamber)
76 end do
77
78 do i = 1,size(pressure)
79   Fsolid(i) = 2.0*kappa_solid*S_area*(temperature(i)-(22.1+273.15))/L_therm
80 end do
81
82 do i = 1,size(pressure)
83   Frad(i) = eps_emissivity*A_therm*sigma_stef_boltz*(temperature(i)**4.0 - T_chamber**4.0)
84 end do
85
86 !=====
87
88 !=====書き出し=====
89
90 open(10,file='./data_out/therm_calc.dat',status='replace',action='write')
91 write(10,*) 'pressure [Pa],Qtot [W],Fair [W],Fsolid [W],Frad [W],temperature [celcius]'
92 do i = 1,size(pressure)
93   write(10,*) pressure(i),Qtot(i),Fair(i),Fsolid(i),Frad(i),temperature(i)-273.15
94 end do
95 close(10)
96
97 !=====
98
99 !=====最小二乗フィッティング=====
100
101 meshsize = 500
102 T_min = -22.1

```

```

103 T_max = 25.0-22.1
104 P_pow_min = 0.0
105 P_pow_max = 2.0
106 L_therm_min = 0.0e-3
107 L_therm_max = 100.0e-3
108 open(20,file='./data_out/sq_visual.dat',status='replace',action='write')
109 do i = 1,meshsize
110     write(*,*) real(i,8)*100.0/meshsize
111     do j = 1,meshsize
112         do l = 1,meshsize
113
114             T_chamber_adj = T_min + (T_max-T_min)*real(i,8)/real(meshsize,8)
115             T_chamber = 22.1+273.15 + T_chamber_adj
116
117             P_crit_adj_power = P_pow_min + (P_pow_max-P_pow_min)*real(j,8)/real(meshsize,8)
118             P_crit = 10.0**P_crit_adj_power
119
120             L_therm = L_therm_min + (L_therm_max-L_therm_min)*real(l,8)/real(meshsize,8)
121
122             square_diff = 0.0
123             do k = 1,size(pressure)
124
125                 Qtot(k) = voltage(k)*I_current
126                 Fair(k) = kappa_air_2(pressure(k),P_crit)*4.0*pi*R_therm*(temperature(k)-T_chamber)
127                 Fsolid(k) = 2.0*kappa_solid*S_area*(temperature(k)-(22.1+273.15))/L_therm
128                 Frad(k) = eps_emissivity*A_therm*sigma_stef_boltz*(temperature(k)**4.0 - T_chamber**4.0)
129
130                 square_diff = square_diff + (Qtot(k)-(Fair(k)+Fsolid(k)+Frad(k)))**2.0
131             end do
132             if (i==1 .and. j==1 .and. l==1) then
133                 best_square_diff = square_diff
134                 best_Pcrit = P_crit
135                 best_Troom = T_chamber
136                 best_L_therm = L_therm
137             end if
138             if (square_diff < best_square_diff) then
139                 best_square_diff = square_diff
140                 best_Pcrit = P_crit
141                 best_Troom = T_chamber
142                 best_L_therm = L_therm
143             end if
144             write(20,*) T_chamber-273.15,P_crit,L_therm,square_diff
145         end do
146     end do
147 end do
148 close(20)
149 write(*,*) best_Troom-273.15,best_Pcrit,best_L_therm
150 ! >> 11.900005722045876      11.376272858234310      4.4600000664591792E-002
151
152 !最適解の書き出し
153 P_crit = best_Pcrit
154 T_chamber = best_Troom
155 L_therm = best_L_therm
156 do i = 1,size(pressure)
157     Qtot(i) = voltage(i)*I_current
158 end do
159 do i = 1,size(pressure)
160     Fair(i) = kappa_air_2(pressure(i),P_crit)*4.0*pi*R_therm*(temperature(i)-T_chamber)
161 end do
162 do i = 1,size(pressure)
163     Fsolid(i) = 2.0*kappa_solid*S_area*(temperature(i)-(22.1+273.15))/L_therm
164 end do
165 do i = 1,size(pressure)
166     Frad(i) = eps_emissivity*A_therm*sigma_stef_boltz*(temperature(i)**4.0 - T_chamber**4.0)
167 end do
168 open(10,file='./data_out/therm_best.dat',status='replace',action='write')
169 write(10,*) 'pressure [Pa],Qtot [W],Fair [W],Fsolid [W],Frad [W],temperature [celcius] '
170 do i = 1,size(pressure)
171     write(10,*) pressure(i),Qtot(i),Fair(i),Fsolid(i),Frad(i),temperature(i)-273.15
172 end do
173 close(10)
174
175 !=====
176
177
178 stop
179 contains
180
181 real(8) function kappa_air(p)
182     implicit none
183     real(8),intent(in):: p
184     real(8) :: ans,P_crit,kappa0
185
186     P_crit = 12.0 !熱伝導率が比例し始める圧力
187     ans = 0.0
188     kappa0 = 0.026 !単位：W/m/k
189

```

```

190     if(p>=P_crit) then
191         ans = kappa0
192     else
193         ans = kappa0 * (p/P_crit)
194     end if
195
196     kappa_air = ans
197
198 end function kappa_air
199
200 real(8) function kappa_air_2(p,P_crit)
201     implicit none
202     real(8),intent(in):: p,P_crit
203     real(8) :: ans,kappa0
204
205     ans = 0.0
206     kappa0 = 0.026 !単位：W/m/k
207
208     ans = kappa0*p/(p+P_crit)
209
210     kappa_air_2 = ans
211
212 end function kappa_air_2
213
214 end program

```