

線スペクトル偏光分光装置 CCD dewar 開発・製作 吸着効果によるアウトガス抑制に関する考察

東北大学大学院理学研究科天文学専攻
博士課程後期 2 年
秋田谷 洋

2000 年 7 月 10 日

1 はじめに

定常的な気体放出がある封じ切りの真空容器に気体を吸着 (物理吸着) する物質 (吸着媒) を設置した場合、放出気体の一部は吸着媒に吸着し、見かけの内部圧力上昇は低下する。吸着の効果は、吸着媒の見かけの表面積および温度によって変化し、条件によっては内部圧力上昇をを劇的に低減することが可能となる。

ここでは、定常的なアウトガスを示す真空容器中での吸着現象について考察し、吸着効果によって効果的に内部圧力上昇を抑制するにはどのようにすれば良いかを考える。

2 吸着現象の表式

定常的な気体放出 q [Torr $\cdot\ell\cdot s^{-1}$] がある体積 V [ℓ] の真空容器中に、次のような吸着媒を設置する。

吸着媒	
温度	T [K]
見かけ表面積	S_a [cm ²]
凝縮係数	s
吸着/脱離エネルギー	E [J $\cdot\text{mol}^{-1}$]
平均吸着時間	τ [sec]
	$\tau = \tau_0 \exp(E/RT)$
	$R = 8.31$ [J $\cdot\text{mol}^{-1}$]: 気体定数
	$\tau_0 \sim 10^{-13}$ [sec]

このとき、吸着媒上での吸着・脱離、および気相における吸着媒への正味の吸着と容器からのアウトガスを考慮すると (図 1)、容器内圧力 $p(t)$ [Torr]、吸着媒に吸着した気体総量 $\sigma(t)$ [Torr $\cdot\ell$] について、以下の式が成り立つ。

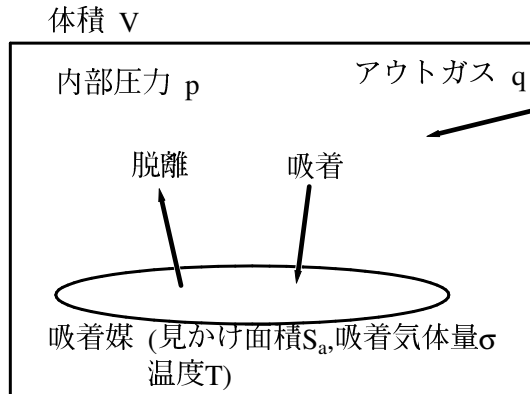


図 1: 吸着媒を含んだ容器内の吸着現象模式図

内部気体

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{V} \left\{ q - \frac{d\sigma}{dt} \right\} \quad (1)$$

– 単位時間あたりの正味の圧力上昇量 (右辺第 1 項: 単位時間あたりの容器からの放出気体量、右辺第 2 項: 単位時間あたりの吸着媒への正味の吸着気体)

吸着媒

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{1}{4} v s S_a p - \frac{1}{\tau} \sigma \quad (2)$$

– 単位時間あたりの正味の吸着気体量 (右辺第 1 項: 単位時間あたりの吸着媒への吸着気体量、右辺第 2 項: 単位時間あたりの吸着媒からの放出気体量)、 $v = \sqrt{8kT_{\text{gas}}/\pi m}$: 内部気体 (温度 T_{gas} 、分子質量 m) の平均速度 [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$]

これらの連立微分方程式を $p(t)$ 、 $\sigma(t)$ について以下の境界条件にて解く。

境界条件

時刻 $t = 0$ において容器内内部圧力が 0 (十分真空引きが行えている)、吸着媒への吸着気体量が 0 (吸着媒の脱ガスが十分行われている):

$$p(0) = 0, \quad \sigma(0) = 0 \quad (3)$$

このとき、

$$p'(0) = q/V, \quad \sigma'(0) = 0 \quad (4)$$

($'$ は時間微分 d/dt を表す)

微分方程式の解は以下ようになる。

$$p = \frac{1}{1+\xi} q' t + \frac{\xi}{(1+\xi)^2} \tau q' (1 - \exp[-(1+\xi) \frac{t}{\tau}]) \quad (5)$$

$$p' = \frac{1}{1+\xi} q' + \frac{\xi}{1+\xi} q' \exp[-(1+\xi) \frac{t}{\tau}] \quad (6)$$

$$\frac{\sigma}{V} = \frac{\xi}{1+\xi} q' t - \frac{\xi}{(1+\xi)^2} \tau q' (1 - \exp[-(1+\xi) \frac{t}{\tau}]) \quad (7)$$

$$\frac{\sigma'}{V} = \frac{\xi}{1+\xi} q' (1 - \exp[-(1+\xi) \frac{t}{\tau}]) \quad (8)$$

ここで、

$$q' = \frac{q}{V} \quad [\text{Torr/s}] \quad (9)$$

$$\xi = \frac{\tau}{V} \frac{1}{4} v_s S_a \propto \tau \times S_a \quad (10)$$

である。(q' は、体積 V の容器における単位時間あたりの容器からの気体放出量である。)

p 、 σ について関数形を図 2 に示した。

式 (6) より、十分な時間を経過すると、

$$p' \sim q' \quad (\xi \ll 1) \quad (11)$$

$$p' \sim \frac{q'}{\xi} \quad (\xi \gg 1) \quad (12)$$

となる。

即ち、 $\xi \gg 1$ とすることで、吸着効果により実質の内部圧力上昇 p' [Torr/s] を、吸着が働かない場合の q' [Torr/s] から、 q'/ξ [Torr/s] に減ずることができる。

3 $\xi \gg 1$ の場合の吸着効果による圧力上昇抑制

式 (10) より、 $\xi \propto S_a \cdot \tau$ である。即ち、吸着媒の見かけ表面積 S_a 、平均吸着時間 τ を大きくすることで、 ξ を大きくすることができる。ここでは、 S_a 、 τ が充分大きく、 $\xi \gg 1$ が満たされているとき、それぞれが圧力上昇の抑制にどのように効くかを考える。

吸着媒見かけ表面積 S_a による ξ の変化

式 (12) および $\xi \propto S_a$ より、真空容器内の吸着媒の見かけ表面積 S_a を増加させると、それに反比例して圧力上昇 p' が減少する。真空容器内の吸着媒の見かけ表面積を大きくすることは圧力上昇の抑制に効果的である。

平均吸着時間 τ による ξ の変化

式 (12) および $\xi \propto \tau$ より、真空容器内の吸着媒の平均吸着時間 τ を増加させると、それに反比例して圧力上昇 p' が減少する。

ここで、平均吸着時間 τ は、吸着媒温度 T 、吸着媒の吸着/脱離エネルギー E の関数として、

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (13)$$

と書ける ($\tau_0 \sim 10^{-13}$ sec)。 τ は、温度 T に非常強く依存する。

例えば、 $E \sim 20 \times 10^3$ J/mol (\sim 活性炭など) について、いくつかの温度 T ごとの τ を求めると、表 1 のようになる。

温度 T [K]	平均吸着時間 τ [sec]
300	3×10^{-10}
250	2×10^{-9}
150	9×10^{-7}
120	5×10^{-5}
100	3×10^{-3}
90	4×10^{-2}
80	1×10^0

表 1: $E \sim 20$ kJ/mol の場合のさまざまな温度 T [K] における平均吸着時間。

表 1 によると、特に吸着媒が低温 (~ 100 K) の場合、 ~ 10 K 程度の僅かな温度低下に対して、平均吸着時間は 10 倍以上に増加する。これは、内部圧力上昇が $1/10$ 以下になることを意味している。

即ち、吸着媒を十分冷却することで、表面積を増加させるよりもより効果的に内部圧力上昇 p' を減少させることができる。

4 吸着効果を利用した圧力上昇量低減の具体例

開口面積 $S_a = 60$ cm² のケースに活性炭 ($E \sim 20 \times 10^3$ J \cdot mol⁻¹) を封入し、容積 $V \sim 1.2$ l の真空容器に設置した場合を考える。凝縮係数 $s \sim 1$ 、 $v \sim 415 \times 10^2$ cm \cdot s⁻¹ (@ $T_{\text{gas}} \sim 300$ K) とすると、様々な活性炭温度における ξ は表 2 のようになる。

T [K]	ξ
170	7×10^{-5}
150	5×10^{-4}
120	2×10^{-2} この温度までは $\xi \ll 1$ のため、吸着効果はほとんど圧力上昇抑制に効かない
100	1×10^0 $\xi \sim 1$ 吸着効果が効き始める
80	6×10^2 $\xi \gg 1$ 、圧力上昇は吸着効果が効かない場合の $1/600$

表 2: $S_a = 60$ cm²、 $E \sim 20 \times 10^3$ J \cdot mol⁻¹ の場合の様々な温度における ξ の値。

この場合、吸着媒を 100K 以下に冷却することではじめて $\xi > 1$ となり、吸着効果による内部圧力上昇の抑制が効き始める。更に冷却すると、僅かな温度低下で ξ が急激に大きくなるため、飛躍的な内部圧力上昇抑制が期待できる。

5 まとめ

定常的な放出気体がある真空容器内に吸着媒を設置すると、放出気体の吸着が生じる。吸着媒の見かけの表面積と平均吸着時間の積が充分大きい場合、吸着媒が放出気体のほとんどを吸着するようになり、容器内の内部圧力上昇はこれらの積に反比例する形で大幅に低減される。特に、平均吸着時間は吸着媒温度が低下するとに指数関数的に増加する。そのため、吸着媒を冷却することは内部圧力上昇の抑制に非常に有効である。

実際の真空容器中で、容器からのアウトガスによる内部圧力上昇を吸着効果によって抑制するには、適度な見かけの表面積をもったケースに吸着媒を封入し、それを冷凍器ヘッドなどの低温部付近に設置し、できるだけ効率良く冷却するのが効果的である。

6 参考文献

- 理工学実験 4 真空技術 [第 3 版] 堀越 源一 著 東京大学出版会
- 実験物理学講座 4 真空技術 林 主税 編 共立出版
- 物理学選書 11 真空の物理と応用 熊谷 寛夫、富永五 郎 編著 裳華房
- オックスフォード物理学シリーズ 11 表面の物理 Prutton, M 川路 伸治 訳 丸善
- 真空技術とその物理 Delchar, T.A 石川 和雄 訳 丸善

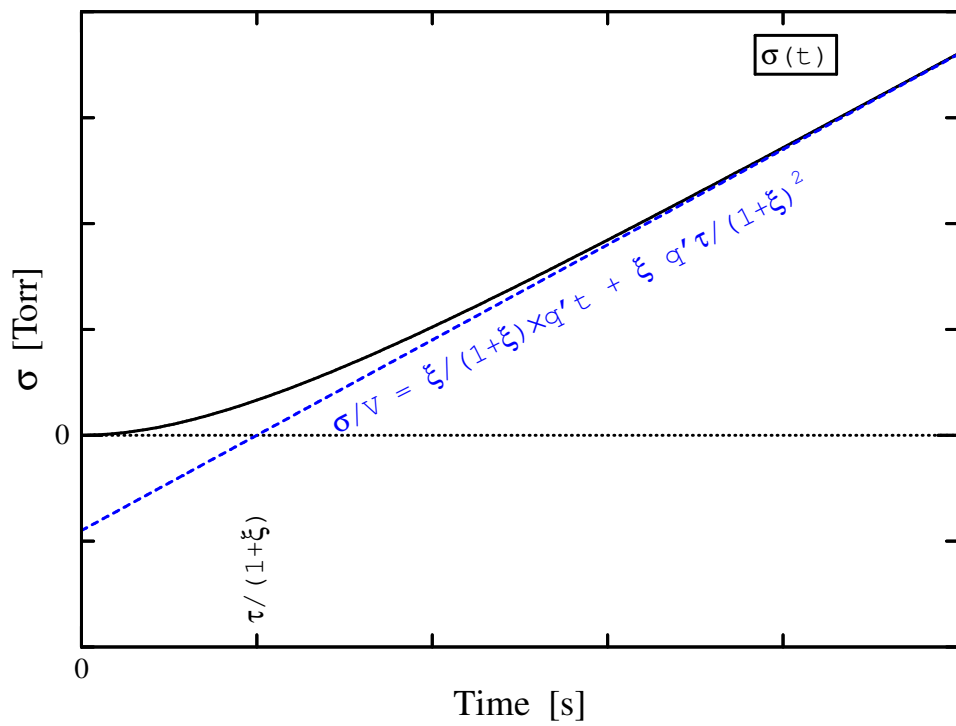
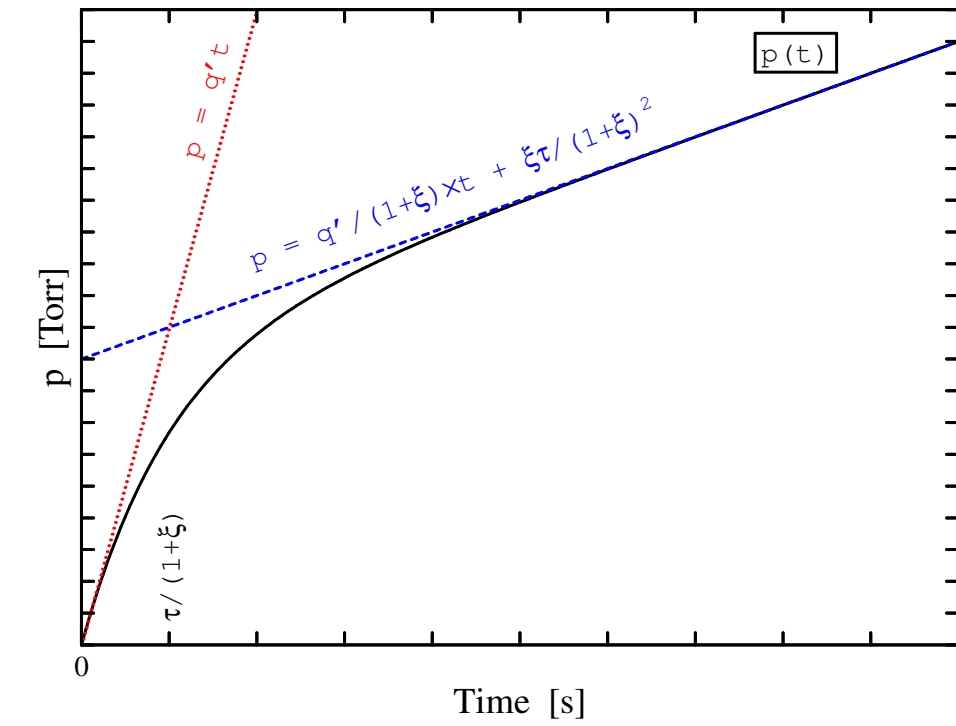


図 2: $p(t)$ 、および $\sigma(t)/V$ の関数形。それぞれ、十分な時間 $\tau/(1+\xi)$ sec 経過後、傾きが $q'/(1+\xi)$ Torr/s、 $\xi/(1+\xi) \cdot q'$ Torr/s となる