

気化器の中の物理学

from 気象学 to 麻酔科学

東京慈恵会医科大学麻酔科学講座 気象予報士 木山秀哉

0. はじめに

日々当然のように「そこにある」物について深く考える機会意外に少ないものである。読者諸賢が医学生や研修医と一緒に麻酔を担当する時、「気化器」を話題とすることはあるだろうか？多くの場合、彼らの意識レベルが数分以内に低下することは必至である。これほどに気化器の「麻酔作用」は強いものである。

平然と「何も質問はありません」と答える彼らに「まだまだ知らないことがある」と思わせるには気化器は格好の材料を提供する。

1. 北緯 40 度線 (図 1)

秋田県の八郎潟には日本で唯一の場所がある。北緯 40 度線と東経 140 度線が交わる「経緯度交会点」である。日本領土で緯度、経度いずれも 10 の倍数で、海上ではなく陸地にある地点はここ八郎潟だけなのである。こことて大規模な干拓によって農地となる前は湖だったので交会点に自分の足で立つことは不可能だった。閑話休題、北緯 40 度線を秋田から東西に延ばすとニューヨ

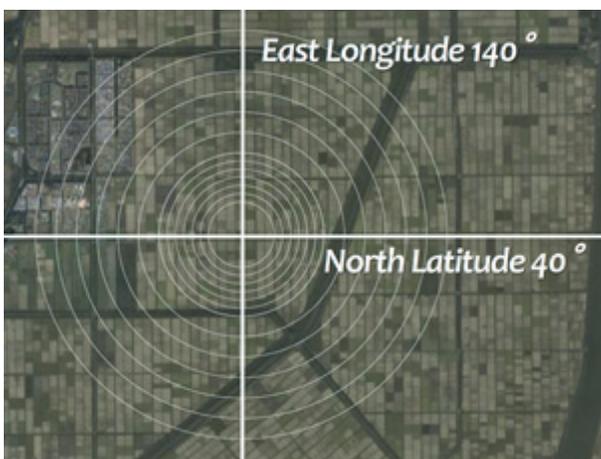


図 1 八郎潟 経緯度交会点

ク、北京、マドリード等を通る。これらの都市の中で冬季、秋田ほど豪雪に見舞われる街は無い。北緯 40 度は赤道から北極に至る道の半分の半分にも満たない緯度である。けっして高緯度地域ではない秋田から新潟にかけて、なぜあれほど多くの雪が降るのだろうか？

2. 日本海はお風呂？

2020 年 2 月上旬、日本近海の表面海水温図によれば北緯 40 度付近の日本海の温度は約 12 °C であった¹⁾ (図 2)。南から対馬暖流が流れこむ日本海は冬でも凍結することのない「温かい海」である。一方、日本の遙か北、ロシアのサハ共和国、北緯 63 度に位置するオイミヤコンは 1926 年に氷点下 71.2 °C を記録した「世界一寒い村」として知られる。シベリアの大地の上にある空気塊も十分に冷やされ水蒸気を僅かしか含まない乾燥した気団となる。冬季、典型的な西高東低の気圧配置になると日本には大陸から北西の季節風が吹く

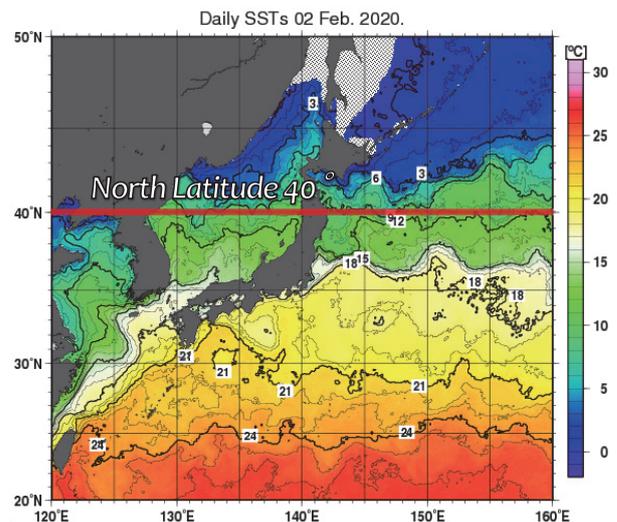


図 2 日本近海の海水表面温

ことは御承知のとおりである。八郎潟を通る東経140度線を赤道まで南下した場所の上空約36,000kmには静止気象衛星「ひまわり8号」があって日本とその周囲を常時観測している。大陸から吹き出す寒気が強まった日の画像には日本海上空を埋め尽くす雲が写っている(図3)²⁾。いわゆる「筋状の雲」であり、これらが日本海側の地域に大雪をもたらしている。

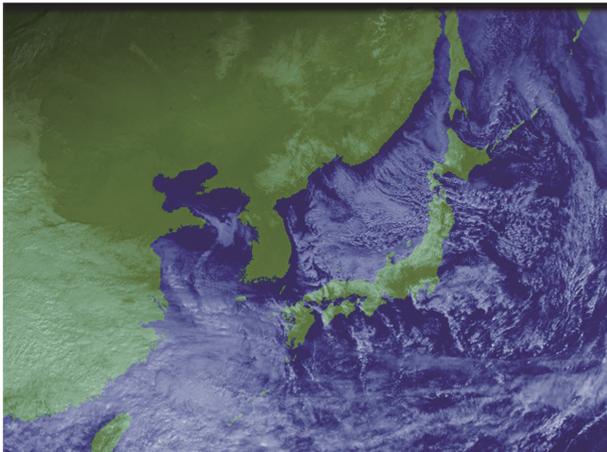


図3 気象衛星赤外画像

3. 気団変質

冬でも凍らない日本海の表面からは常に水が蒸発している。空気中に含まれる凝結核と呼ばれる海塩粒子などの周囲に水蒸気分子が付着することで小さな雲粒が形成される。シベリアから強い寒気が吹き込むと上空と海面の温度差が増大し、対流が活発になって積雲が発達する。ときどき気象情報で聞かれる「上空に強い寒気」が入ると、雲は対流圏界面まで発達して積乱雲になる。これが日本海側に降雪、発雷をもたらす「雪おこし」と言われる雲である。つまり大陸から吹き出した冷たい乾燥した空気は、日本海上空を渡ってくる間に大量の水蒸気を供給されて湿った空気になるわけである。このような気塊の性質の変化を「**気団変質**」と称する(図4)。強い寒気の供給源であるシベリアと日本列島の間に温かい海が存在することが、中緯度地域でありながら大雪が降る独特な気候の根本的原因である。

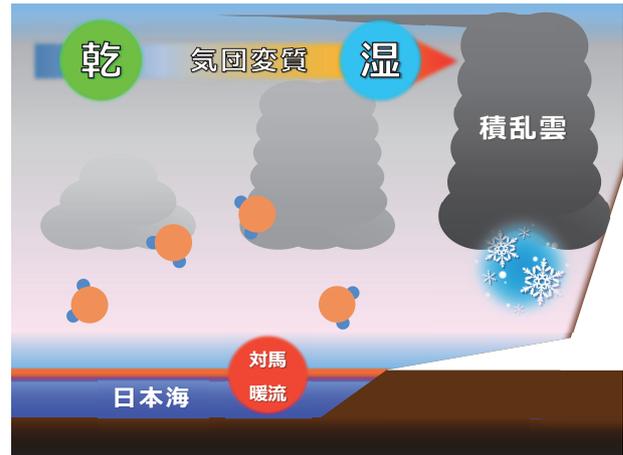


図4 気団変質

4. 蒸気圧

日本海の上に水蒸気が存在する様子をイメージしてみよう。海上の開放された空間にある水蒸気の絶対量を求めることは困難なので、質量ではなく圧、すなわち水蒸気圧に注目する。空間に存在する混合気体の全圧のうち、水蒸気が示す分圧を考えるわけである。蒸気圧は何によって決まるか、入浴時に考えてみる。適温の湯を湛えた湯船の蓋を外すと寒い浴室内は白く曇る。湯の表面から蒸発した水分子が冷たい空気に触れて水蒸気から水に戻ったものが白い曇りの本体で、雲や霧も本質は同じものである。水と水蒸気の間で蒸発・凝縮する分子の数が等しければ、すなわち蒸発平衡(気液平衡)の状態にあれば蒸気圧は一定でそれを**飽和蒸気圧**(saturated vapor pressure; SVP)と呼ぶ。湯の温度が高ければ、分子の運動エネルギーは低温の湯に比べてより大きいため周囲との分子間力を振り切って蒸発する分子が増える。空間に存在する分子の数が多くなれば、それらが示す分圧も大きくなるから「**飽和蒸気圧は温度によって決まる**」ことがわかる(図5)。換言すれば液体の飽和蒸気圧は温度の関数である。両者の関係を示すグラフは右肩上がりの単調に増加する曲線になるが、詳細は後述する。重要なことは、蒸気圧は**温度のみ**によって決定され、空間に存在する他の気体の影響を受けないことである。

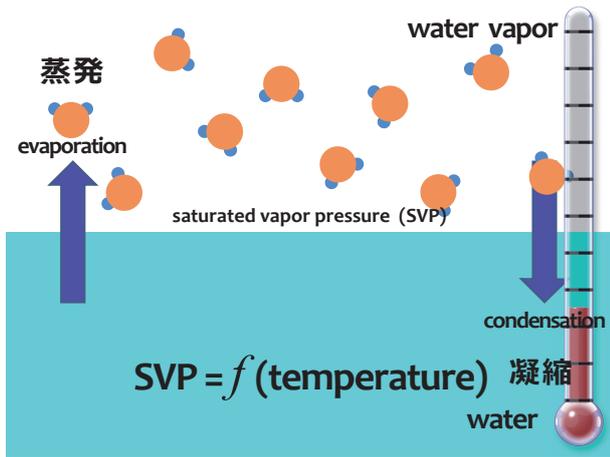


図5 水の蒸発平衡

5. 相対湿度

テレビの気象情報に登場する湿度は「相対湿度」のことである。前項で飽和蒸気圧が温度によって決まると述べたが、現実の空気では常に飽和蒸気圧に相当する水蒸気が存在するとは限らない。たとえば砂漠の上では気温が 50℃ を超えていても地表に一滴の水も無ければ、実際の水蒸気圧はきわめて低いだらうと想像できる。ある温度における飽和水蒸気圧と実際の水蒸気圧の比を相対湿度と定義する。たとえば 2018 年の夏、名古屋の気温は午前7時に 30℃、10時に 35℃ を記録し、14時には 40℃ に達した。各時刻における相対湿度はそれぞれ 54%、37%、27% であった。各気温における実際の蒸気圧を図上で求めると、この日の朝から昼過ぎまで水蒸気の絶対量はそれほど大きく変化していないことがわかる (図6)。

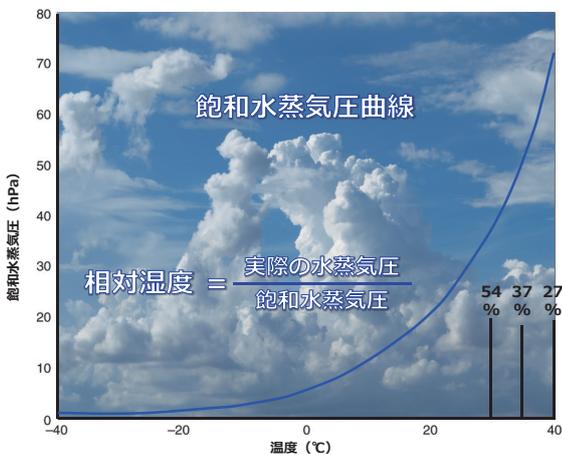


図6 飽和水蒸気圧曲線

6. セボフルランの海

ここまで読み進めて、一向に麻酔の「ま」の字も登場しないことに不安を覚え始めた読者もいるだろう。いよいよ本題に入る。これまで水と水蒸気が共存する状況を、日本海をイメージしながら考えてきたが、次はセボフルランの海を想定する。蒸発平衡にある時、気相に存在するセボフルランの示す圧は飽和蒸気圧に等しい。温度 20℃ ではセボフルランの飽和蒸気圧は 157 mmHg である。セボフルランの海の上に広がる空間の圧が 1 気圧 (760 mmHg) であれば、セボフルラン濃度は 20.6% と、致死的な高濃度になる (図7)。すなわち単純にセボフルランの海の上に酸素 (あるいは酸素・空気、酸素・亜酸化窒素) を吹送るだけでは臨床で安全に使用できる濃度のセボフルランを得ることはできない (図8)。



図7 セボフルランの海

このままでは高濃度過ぎる!!

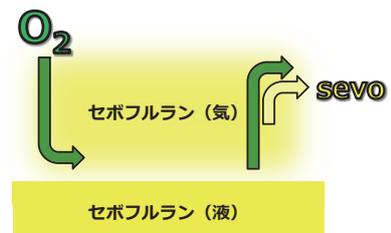


図8 気化室

7. 可変バイパス型気化器

セボフルランの蒸気圧が高いため（デスフルランはもっと高い！）、図8の構造だけでは臨床使用濃度の麻酔薬を調製できない。必要になるのは**致死的な高濃度のセボフルランを希釈する仕組み**である。そこで考案されたのが、気化室を通らない（セボフルラン蒸気と接触しない）ガス流路を作成して気化器出口で気化室からの酸素・セボフルラン混合気体と合流させる方法である（図9）。気化室を通らないバイパス流量と気化室に入る新鮮ガス（キャリアーガス）流量の比率を変えることで任意の麻酔薬濃度が得られる構造が可変バイパス型気化器（variable bypass vaporizer）の動作原理の礎である。別名 plenum vaporizer とも呼ばれ、plenum とは「物質（特に高圧の気体）が充満した空間」の意味のラテン語である。

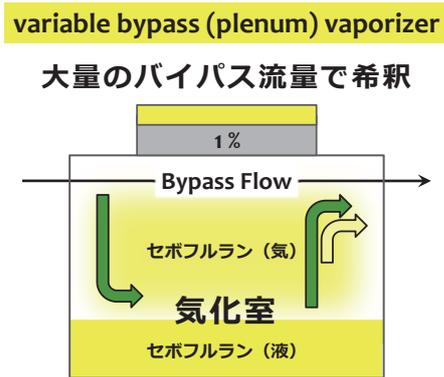


図9 可変バイパス型気化器

8. 液体の蒸気圧と温度の関係 (Clausius-Clapeyron の式)

第4項で液体の温度が上がるとその蒸気圧は単調に増加すると述べた。揮発性麻酔薬と水の蒸気圧曲線を示す（図10）。両者の定量的な関係を調べよう。セボフルランの温度と蒸気圧の関係は表1のようである。

絶対温度の逆数、蒸気圧の常用対数という見慣れない欄があるが、それぞれを x 軸、 y 軸にプロットするとデータは直線上に乗るので、1次式で表現できる（図11）。

$$\log_{10} SVP [\text{mmHg}] = 8.095 - \frac{1729}{T [\text{K}]}$$

独・仏の科学者の名をとって Clausius-Clapeyron

の式と呼ばれるものである。

この式を変形すれば明らかなように、単調増加する蒸気圧曲線は指数関数で表される。

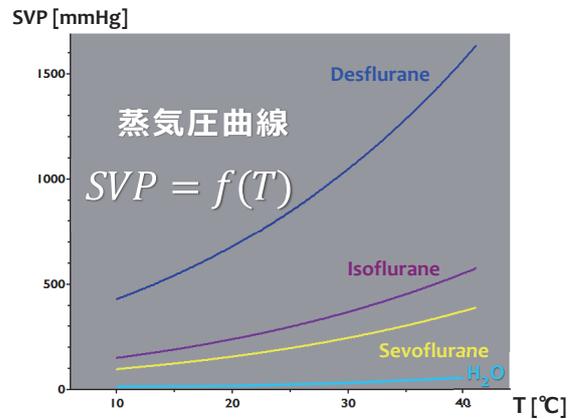


図10 揮発性麻酔薬の蒸気圧曲線

Sevoflurane

Temperature	Absolute Temperature	1/Abs. Temp	Vapour Pressure	log ₁₀ VP
°C	K		mmHg	
20	293.15	0.0034112	157	2.1958997
25	298.15	0.0033540	197	2.2944662
36	309.15	0.0032347	317	2.5010593

表1 セボフルランの温度と蒸気圧

$$\log_{10} SVP [\text{mmHg}] = 8.095 - \frac{1729}{T [\text{K}]}$$

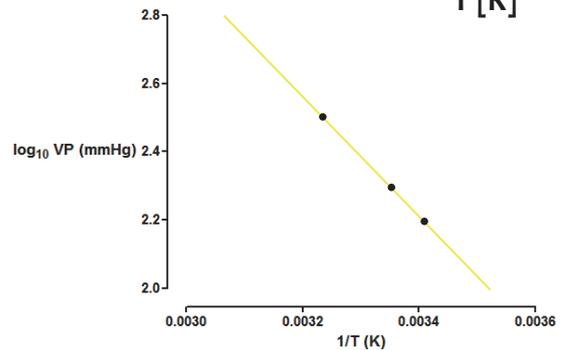


図11 Clausius-Clapeyron の式 (セボフルラン)

9. 気化室内を流れる新鮮ガス流量を求める

可変バイパス型気化器の中を分流する新鮮ガスの流量を求めよう。新鮮ガス流量を 3 [L/分]、セボフルラン濃度 1%（温度 20 °C）で投与する場

合を考える (図 12). 気化器に流入する新鮮ガス (fresh gas flow; FGF) のうち, 気化室に入る流量を x とする. 気化室から流出するセボフルラン蒸気流量を SEVO として次式が成り立つ:

$$\frac{\text{SEVO}}{\text{FGF} + \text{SEVO}} = 0.01$$

FGF に 3,000 [mL/分] を代入して SEVO = 30.3 [mL/分] と求まる.

20 °C におけるセボフルランの飽和蒸気圧は 157 [mmHg], 平地 (大気圧はおよそ 1 気圧) の医療機関であれば気化室内の全圧は 760 [mmHg] である. 気化室内の新鮮ガスとセボフルランの流量比はそれぞれの分圧比に等しいから

$$\frac{30.3}{x} = \frac{157}{760 - 157}$$

$$\therefore x = 116.4 \text{ [mL/分]}$$

気化器に入る新鮮ガス 3,000 [mL/分] の約 3.8% が気化室を流れ, 残りの 96.2% はバイパス流路を通っている (図 13). 気化室を流れる FGF と, バイパス流路を通る FGF の比が分流比 (splitting ratio) である.

FGF = 3 L/min のとき, 気化室に入る流量 x は?

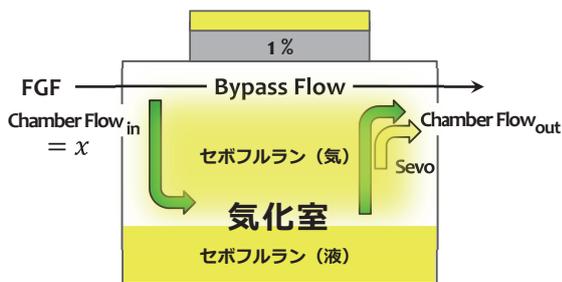


図 12 気化室に流れる新鮮ガス流

大量のバイパス流量で希釈

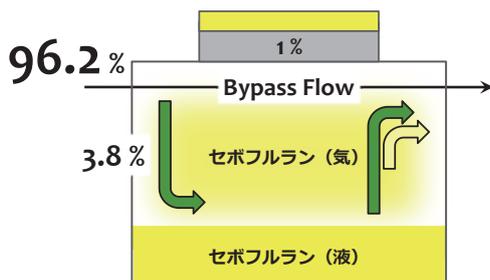


図 13 大量のバイパス流量

10. 液体の蒸発に伴う温度変化 (統計力学的考察)

吸入麻酔を維持するために, 液体の揮発性麻酔薬は常に蒸発を続けている. この時, 気化室の内部で何が起きているのだろうか? 図 14 は 27 °C の針の先端に付いた小さな水滴で, その体積は 0.03 mL である.

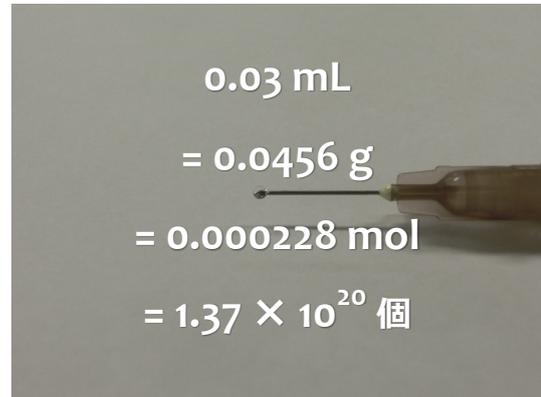


図 14 0.03 mL のセボフルラン

もしこれが水ではなく, セボフルラン (液) とすると比重 1.52, 分子量 200 ($\text{C}_4\text{H}_9\text{F}_7\text{O}$) からこの一滴は 0.000228 モルである. Avogadro 数を掛けて, この小さな滴に含まれる分子は 1.37×10^{20} という膨大な数である. 地球の総人口が 70 億人として, これはたかだか 7×10^9 に過ぎない. わずか一滴のセボフルランにどれほど多くの分子が含まれているかがわかると思う. 絶対零度の環境でない限り, あらゆる物質を構成する分子は運動エネルギーを有している. 10^{20} というオーダーの数の分子が全て同じエネルギーを持つと考えるのは不自然である. 統計力学では運動エネルギーが小さな分子から大きな分子まで正規分布すると考える (図 15).

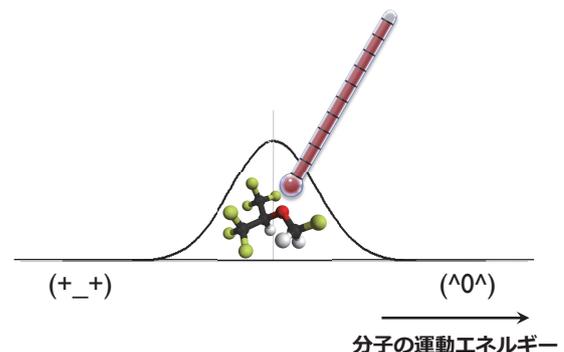


図 15 分子の運動エネルギー

蒸発とは液体表面の分子が周囲との分子間力を振り切って気相に移行する現象であり、蒸発するのは運動エネルギーの大きい分子である。したがって蒸発せずに残った液体の平均運動エネルギーは小さくなる、すなわち液体の温度が低下する。しかし前述のように液体の蒸気圧は温度によって変化するため、蒸発が続いて気化室に残る液体の麻醉薬温度が低下すると、第9項で解説した数式における飽和蒸気圧は小さくなり、分流比が不変であれば気化室から流出する麻醉薬蒸気は減少する。このままでは当然「麻醉深度」に影響が及ぶため、気化室内の温度をできるだけ変化させないよう気化器には種々の工夫が施されている。

11. 比熱と熱容量 (焼け石に鍋)

冒頭で紹介した八郎湯がある秋田県男鹿半島には焼いた石を鍋に入れて具材を調理する郷土料理がある。物理学や熱力学を学ばなくても、できるだけ熱く、できるだけ大きい石を入れるほうが具材は早く温まることは容易に想像できる。**質量1グラムの物体の温度を1℃上げるために必要な熱量を比熱 c と呼び、その単位は $[\text{cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})]$ である。質量 m [g] の物体の温度を ΔT [°C] 上げるのに必要な熱量 Q [cal] は次式で与えられる：**

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

質量 m と比熱 c の積が熱容量である。上式を変形して

$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot c}$$

なので、熱容量の大きな物体は、熱容量が小さな物体と比較して同じ熱量を加えられた場合の温度変化が小さいことがわかる。

12. 蒸発で麻醉薬の温度はどれだけ下がるか？

第9項で計算したように FGF 3 [L/分]、セボフルラン濃度 1% (温度 20 °C) で麻醉を維持する時、1分間に蒸発するセボフルランは 30.3 [mL] である。

これが何モルに相当するかを求めるには気体の

状態方程式 $pV = nRT$ に数値を代入して

$$1 [\text{atm}] \cdot 30.3 [\text{mL}] = n \cdot 0.082 [(\text{L} \cdot \text{atm}) / (\text{K} \cdot \text{mol})] \cdot (20 + 273.15) [\text{K}]$$

$$\therefore n = 0.00126 [\text{mol}]$$

セボフルランの分子量 200 から、これは 0.252 [g] である。液体のセボフルランを気体に変えるに必要な熱量、すなわち蒸発熱は 39.5 [cal/g] なのでセボフルラン 0.252 [g] の蒸発によって奪われる熱量 ΔH は

$$\Delta H = 39.5 [\text{cal/g}] \cdot 0.252 [\text{g}] = 9.95 [\text{cal}]$$

気化室にセボフルラン 1 瓶、240 mL が充填されているとすればその質量は

$$1.52 [\text{g}/\text{cm}^3] \cdot 240 [\text{mL}] = 364.8 [\text{g}]$$

したがって蒸発によるセボフルラン (液) の温度低下 ΔT は

$$9.95 [\text{cal}] = 364.8 [\text{g}] \cdot 0.30 [\text{cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})] \cdot \Delta T$$

$$\therefore \Delta T = 0.091 [^\circ\text{C}]$$

これは僅かな温度低下かもしれないが、セボフルランの蒸気圧は有意に低下する (図 10)。セボフルランの物性に関する数値を図 16 にまとめる。

セボフルランの物性	
比重	1.52
分子量	200
蒸発熱	39.5 [cal/g]
比熱	0.30 [cal/(g · °C)]

図 16 セボフルランの物性

13. なぜ気化器は重いのか？ (ヒートシンク)

ここまで述べたことから、揮発性麻醉薬の蒸気を安定供給するには気化室内部の温度変化を如何

に小さく抑えるかがカギとなる。幾つかの方策の一つが、周囲の環境から内部の麻酔薬へ速やかに熱を伝えることである。この目的を果たす部品をヒートシンク (heat sink) と呼ぶ。ヒートシンクには 1) 熱を伝えやすく 2) それ自体の温度変化が小さい物質が選ばれる。すなわち熱伝導率が大きく、熱容量が大きな物質であり、実際には真鍮 (銅と亜鉛の合金) が利用されている。第 11 項で解説したように熱容量は比熱と質量の積であるから、質量を大きくすることで気化器の熱容量を大きくしている。メーカーによるが気化器の質量は約 7 kg である。このように気化器が重いのは筐体にヒートシンクの機能を持たせているからである。

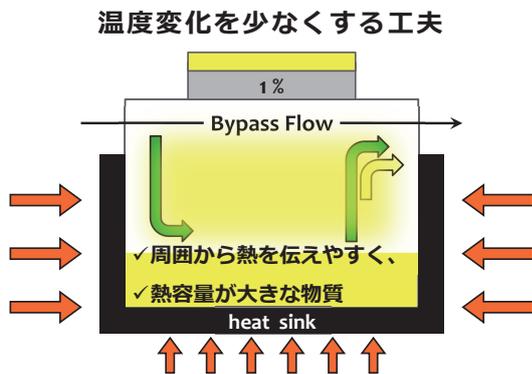


図 17 ヒートシンク

14. 熱伝導率

前項に登場した熱伝導率は「単位面積を単位時間に通過する熱量 $[J/(m^2 \cdot s)]$ と温度勾配 $[K/m]$ の比」と定義され、ギリシャ文字ラムダ λ で表すことが多い。その単位は次式のように整理される：

$$[\lambda] = \frac{[J / (m^2 \cdot s)]}{[K/m]} = [W/(m \cdot K)]$$

錫製のビヤグラスにビールを注いだ途端にグラスの外側も冷たくなるのは錫 Sn の熱伝導率が大きいことによる。Sn の熱伝導率は $64 [W/(m \cdot K)]$ であるのに対して真鍮の熱伝導率は $112 [W/(m \cdot K)]$ である。

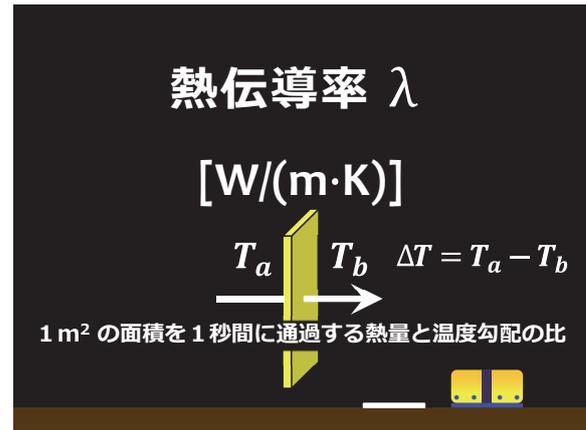


図 18 熱伝導率

15. 温度補償とバイメタル

神戸にある日本麻酔学会の麻酔博物館には二昔以上も前時代の気化器が展示されている。エンフルラン、ペントレン (メトキシフルラン) 専用の気化器はそれぞれ Enflutec, Pentec と呼ばれる (図 19)。両者の名称に共通する語尾 tec は温度補償 (temperature compensation) の英語の頭を組み合わせた造語である。可変バイパス型気化器において、揮発性麻酔薬の蒸発に伴い液体温度が若干でも低下すると蒸気圧も減少するので、麻酔薬濃度を一定に、換言すれば麻酔薬蒸気の時間当たり供給量を一定値に維持するためには気化室に流入する新鮮ガスを増やす必要がある。気化器内部にあるバイメタル (熱膨張率の異なる 2 種の金属板を貼り合わせたもの) が温度変化に応じて伸縮することで、バイパス流路の抵抗を変える仕組みである。バイメタルの組成の詳細に関わる資料は少ないが、おそらくニッケル、クロム、鉄

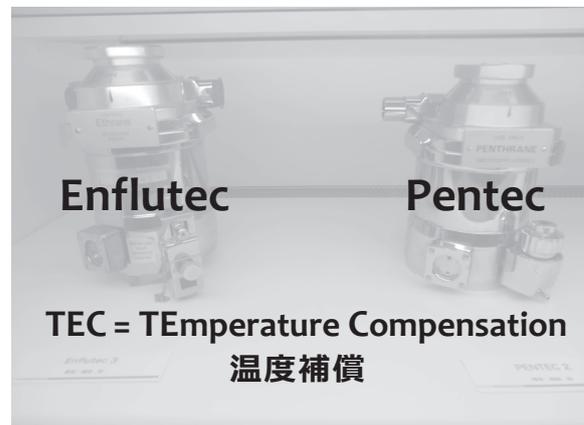


図 19 温度補償型気化器

の割合を変えた2種類の合金で作られているようである。第 13 項のヒートシンクが気化器の温度変化自体を小さくする目的であるのに対して、バイメタルは温度変化が麻酔薬蒸気供給に及ぼす影響を小さくすることを目的としている。

16. 揮発性麻酔薬の沸点

蒸発が液体表面において分子が液相から気相に移行する現象を指すのに対して、**液体の内部（深部）からも気化が起きる現象**を沸騰という。液体内部で生じた気泡には大気圧と液体の深さに応じた静水圧の和が加わるので、気泡内の圧力が大気圧未満の場合は生じた泡は直ぐに潰されてしまう。液体温度が上昇して蒸気圧が大気圧と等しくなると、気泡は潰れることなく液体深部から表面に上昇してくる。したがって、沸騰が始まるのは蒸気圧が大気圧と等しくなった時点であり、この時の温度を沸点という。特に大気圧が1気圧(760 mmHg)に等しい場合、標準沸点と称する。セボフルランの標準沸点は 58 °C、デスフルランのそれは 23 °C である (図 20, 21, 22)。

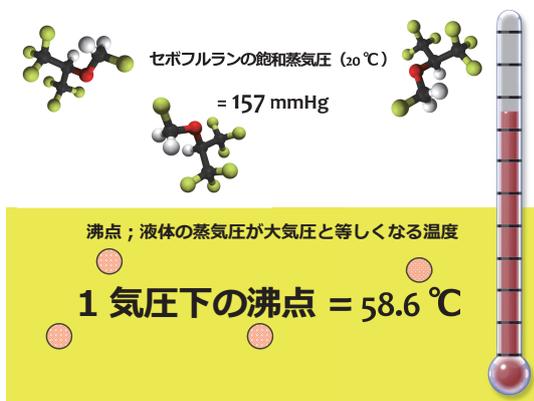


図 20 セボフルランの沸点

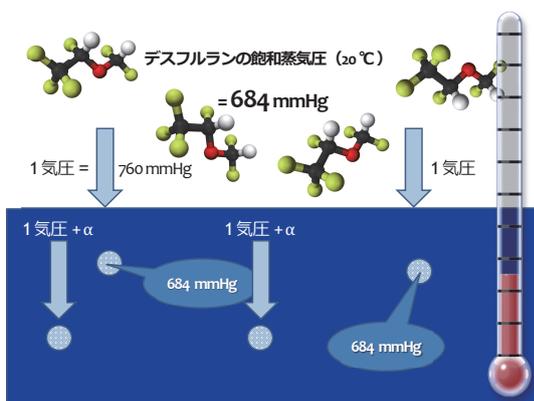


図 21 デスフルランの飽和蒸気圧 (20 °C)

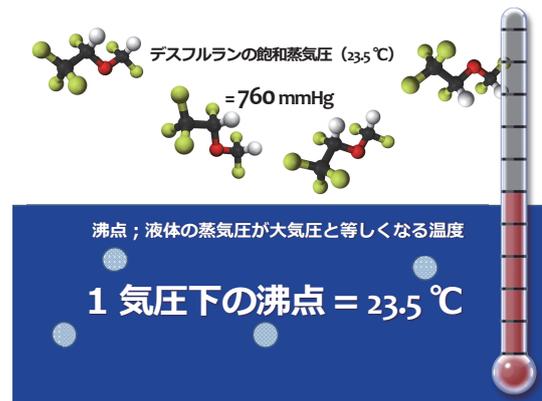


図 22 デスフルランの沸点

17. 夏の熊谷でデスフルランを投与できるか？

平成 30 年 (2018) 7 月 23 日、埼玉県熊谷は 41.1 °C の暑さとなり、日本の最高気温記録が更新された。常温 23 °C で沸騰するデスフルランは熊谷でも安全に投与できるのだろうか？デスフルランの化学構造はセボフルランと同じフッ化アルキルエーテルであるが、その物理的性質は大きく異なる。デスフルランの蒸気圧曲線は他の麻酔薬と比べて傾きが大きい特徴がある (図 23)。温度変化 ΔT に対する蒸気圧変化 ΔSVP が大きいいため、僅かな温度低下によって蒸気圧も有意に減少する。したがってセボフルランの可変バイパス型気化器と同様の原理でデスフルラン用の気化器を作ることは難しい。

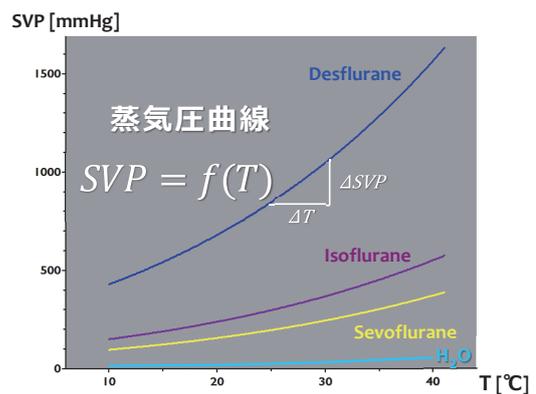


図 23 デスフルランの蒸気圧曲線

18. デスフルランの物性(Clausius-Clapeyron の式 再び)

第 8 項で述べた Clausius-Clapeyron の式がデスフルランに対しても当てはまることを確認しよ

う。温度と蒸気圧の関係（表2）をグラフにしたものが図 24 である。セボフルランと同じく、蒸気圧の常用対数と絶対温度の逆数の間に 1 次式で表される関係が成り立つ。

Desflurane

Temperature	Absolute Temperature	1/Abs. Temp	Vapour Pressure	log ₁₀ VP
°C	K		mmHg	
20	293.15	0.0034112	681	2.8331471
22	295.15	0.0033881	743	2.8709888
24	297.15	0.0033653	811	2.9090209
26	299.15	0.0033428	885	2.9469433

表 2 セボフルランの温度と蒸気圧

Clausius-Clapeyron equation for Desflurane

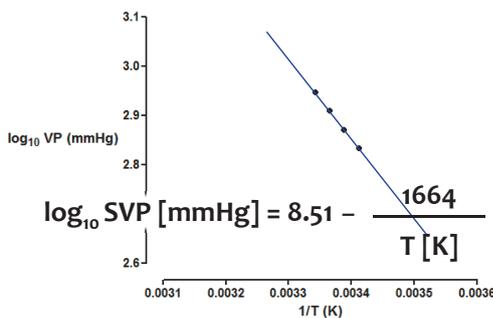


図 24 Clausius-Clapeyron の式（デスフルラン）

19. なぜデスフルランの気化器は熱いのか？

Tec 6 Plus (GE Healthcare, Helsinki, Finland) や D-Vapor (Dräger, Lübeck, Germany) など、デスフルラン専用気化器は電源と接続して使用する。そして使用中、気化器本体を触ると火傷するほどではないが、温かく感じる。セボフルランの気化器と大きく異なるこれらの特徴は何に起因するのだろうか？

急峻な蒸気圧曲線を持つデスフルランを安全に臨床使用するため、エンジニア達が考案した気化器の原理を示す（図 25）。セボフルランの可変バイパス型気化器と異なりデスフルラン用気化器では新鮮ガスは気化室の中を流れない。気化室の温度はヒーターで 39 °C に保たれている。よって揮発性の高いデスフルランが急速大量に気化しても液体デスフルランの温度は不変である。

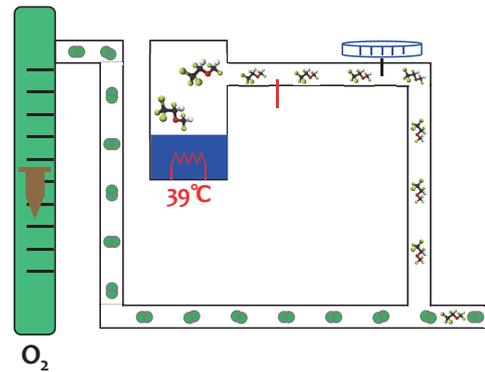


図 25 デスフルラン専用気化器

第 18 項の図 24 中の式に $T = 39\text{ °C}$ (312.15 K) を代入すると飽和蒸気圧は 1513 mmHg, 約 2 気圧となる（図 26）。つまり気化室内には 2 気圧のデスフルラン蒸気が文字通り「充満」しており、気化器上部のダイヤルを回すと気化室の「門」が開いて、密閉されていたデスフルランが流出する。

気化室内温度 = 39 °C = 312.15 K では…

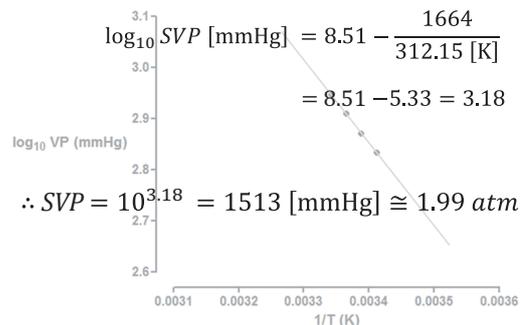


図 26 デスフルラン気化室の温度

20. Dual circuit gas/vapour blender

図 25 はデスフルランの物性を勘案して作られた構造であるが、このままでは新鮮ガス（図中では酸素）流量を変えた場合、気化器のダイヤル設定が不変でもデスフルランと新鮮ガスの混合（希釈）割合が変動する欠点がある。そこで新鮮ガス、デスフルラン双方の流路の圧較差を測定する差圧トランスデューサーと気化室開閉ゲートを連動させることで、FGF の増減に応じてデスフルランの流出量も増減する仕組みを備えた気化器が現在、私達が日々使用している製品である（図 27）。デスフルランの気化器の本質は dual circuit gas/vapour blender の名称に的確に表現されている。

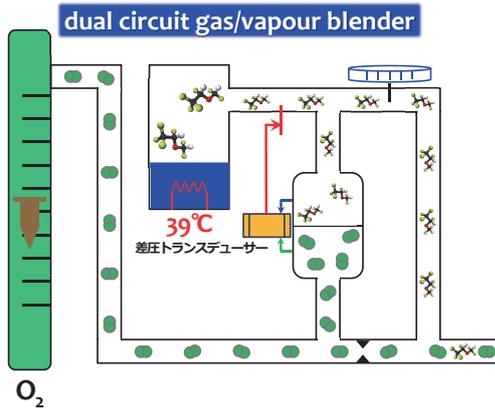


図 27 dual circuit gas/vapour blender

21. おわりに

麻酔科医が日々何気なく使っている気化器の中には揮発性麻酔薬と同じくらい、「物理学」が充満している。特にデスフルランは常温で沸騰するという特異な物性がゆえ、気化器の内部構造を工夫しなければ実用化には至らなかった。小さな気化器の中にちりばめられた物理を種々の側面から考えてみた。筆者の誤謬により、数式や論理の展開に正しくない点多々あろうかと思われる。是非とも読者は鵜呑みにせず、疑いの目を持って自ら計算、確認していただくことを強く望むものである。なお、本稿の内容は令和 2 年 2 月 22 日、

昭和大学（東京）における第 35 回体液・代謝管理研究会の麻酔科専門医講習として行った講演に基づく。

謝辞

本稿執筆に際し気象研究所 荒木健太郎氏、気象予報士 佐々木恭子氏から貴重なご意見を頂戴しました。ここに記して深く御礼申し上げます。

参考ウェブサイト・図書

- 1) 気象庁ウェブサイト (<http://www.jma.go.jp/>)
ホーム > 各種データ・資料 > 海洋の健康診断表 > 海面水温に関する診断表, データ > 日別海面水温
- 2) 気象庁ウェブサイト (<http://www.jma.go.jp/>)
ホーム > 防災情報 > 気象衛星
- 3) Pisano A: Physics in a Vaporizer: Saturated Vapor Pressure, Heat of Vaporization, and Thermal Expansion. *Physics for Anesthesiologists*. Springer International 2017, 105-13
- 4) Middleton B, Phillips J, Thomas R, et al: Vaporizers. *Physics in Anaesthesia*. Scion Publishing Limited 2012, 150-7