

# イラスト作成



# 数式



# 数式

水1g蒸発での温度変化

$$\Delta T_1 = -\frac{\Delta H}{c_v(\text{air})\rho}$$

水 $y$ [g]蒸発させたときの温度変化 $\Delta T$

$$\Delta T = -y\frac{\Delta H}{c_v(\text{air})\rho}$$

温度を $\Delta T$  下げる水分の蒸発量

$$y = -\frac{\Delta T}{1.9}$$

$$\begin{aligned}\Delta H &= 2.25 \times 10^3 \text{ [J/g]} \\ c_v(\text{air}) &= 1.0 \times 10^3 \text{ [J/kg K]} \\ \rho &: \text{空気の重さ} \\ a(t) &: \text{飽和水蒸気量}\end{aligned}$$

計算  
空気の数密度  
 $\frac{6.0 \times 10^{23}}{22.4 \times (10^2+3)^3} = 2.7 \times 10^7 [\mu\text{m}^{-3}]$   
(10nm)<sup>3</sup>あたり27分子

# 引用

## くるくる回れ

新垣尚琉・渡邊昌剛著

この研究によれば、ほとんどの花が  
回りながら落ちる。

<https://www.shizecon.net/award/detail.html?id=361>

参考：(参照日2018年07月24日)

水蒸気の拡散係数 [松永直樹\(1991\) Taylor法による気体の相互拡散係数の測定\(第1報, 測定装置の開発\)日本機械学会論文集\(B編\) 57, 313-318.](#)

水の気化熱、比熱 [水の話～化学の鉄人小林映章が「水」を斬る！～/『1.2.3 水の注目すべき特性\(2\) —比熱容量、気化熱、融解熱、熱伝導率—』より](#)

空気の比熱 [HAKKO八光電気/Q&Aキット/『各種物質の性質：気体の性質』より](#)

飽和水蒸気量 [JIS Z 8806:2001 湿度-測定方法 - 日本工業規格の簡易閲覧](#)

空気の密度 [『空気』- Yahoo!辞書](#) 日本大百科全書(ニッポニカ)の解説より

拡散係数 [米沢富美子\(1986\).『ブラウン運動』共立出版](#)

酔歩モデル [土井正男・小貫明\(2000\).『現代物理学叢書 高分子物理・相転移ダイナミクス』岩波書店](#)

空気の粘性率 [機会用語集](#)>流体力学>[水・空気の物性](#)

水の蒸発速度 [上田政文 \(1956\).水蒸気圧勾配および拡散係数の測定 応用物理, 第25巻, 4, 144.](#)

サトイモの葉 [chappy氏](#)

フィックの法則 [フィックの法則 - Wikipedia](#)

水の成長速度 [黒田登志雄\(1984\)『結晶は生きている ～その成長と形の変化のしくみ～』サイエンス社](#)

1気圧-15°Cの水蒸気圧 [黒田登志雄\(1984\)『結晶は生きている ～その成長と形の変化のしくみ～』サイエンス社](#) p.87

凝縮係数 [黒田登志雄\(1984\)『結晶は生きている ～その成長と形の変化のしくみ～』サイエンス社](#) p.94

氷の密度 [The Engineering ToolBox - Ice - Thermal Properties](#)

水の密度 [The Engineering ToolBox - Water - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient](#)

水の密度 [理科年表プレミアム - 水の密度\(液相だけの単相\)](#)

ボルツマン定数 [Wikipedia - ボルツマン定数](#)

アボガドロ定数 [Wikipedia - アボガドロ定数](#)

水のモル質量 [モル質量 - Wikipedia](#)

氷の音速 [2019:固体中の音速 - 理科年表](#)

水の音速 [The Engineering ToolBox - Speed of Sound in Water](#)

積分 [森口繁一・宇田川銚久・一松信\(1987\).『岩波 数学公式 I 微分積分・平面曲線』岩波書店](#)

各サイトで値が違う。  
比較して値を選んだ。



# 説明

# 主張



渋川スカイランドパークにて

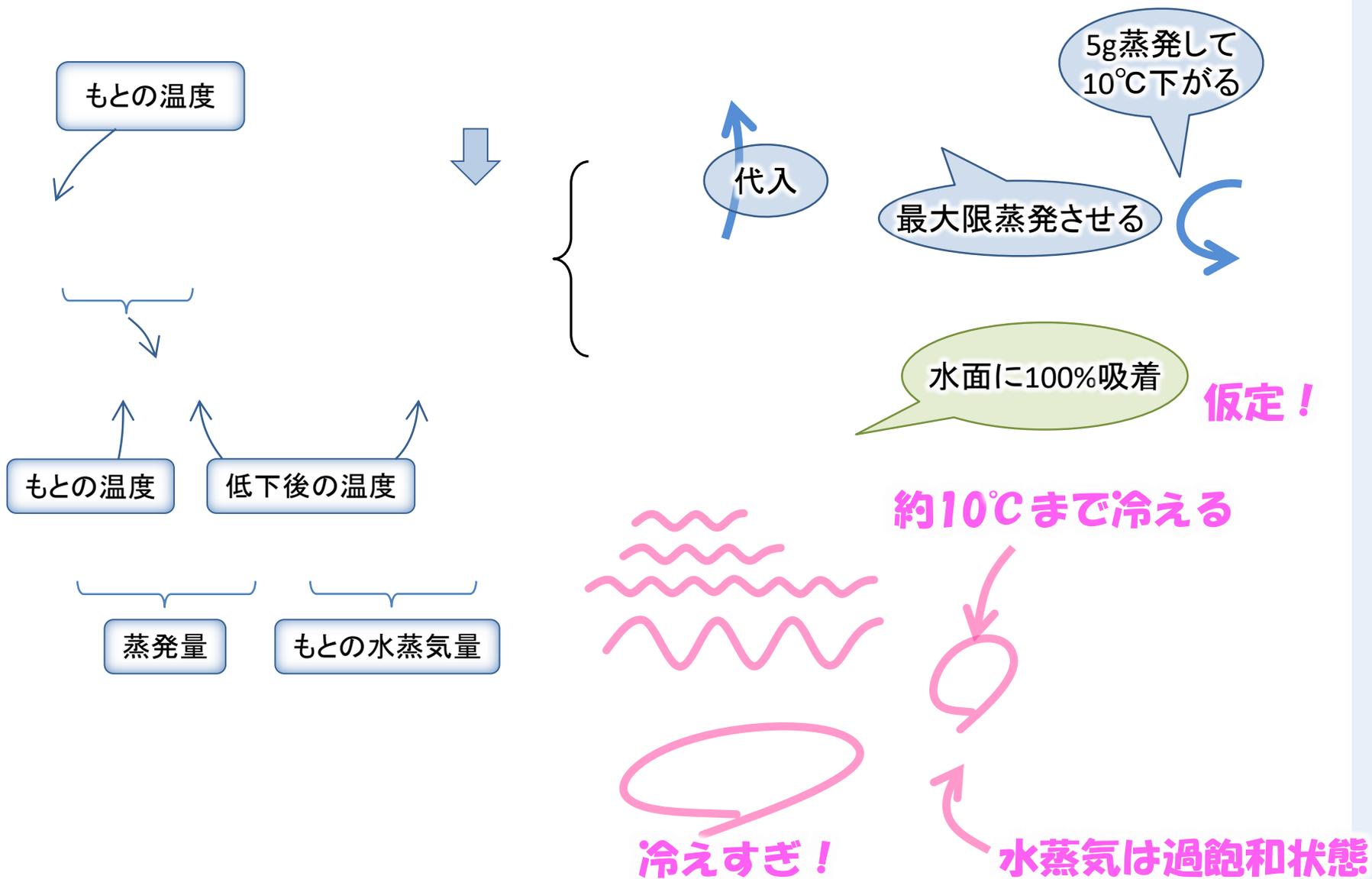
水の気化熱で  
どれだけ涼しく  
なるのか？

湿度[%]	温度[°C]
90	29
80	27
70	25
60	24
50	22
0	10

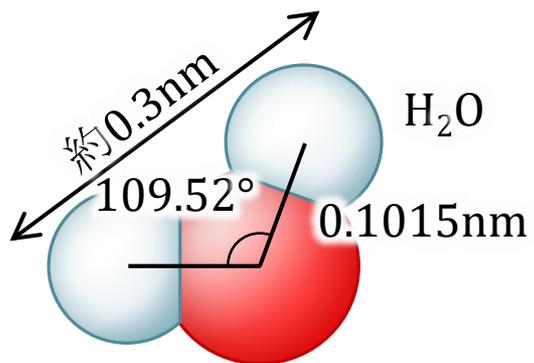
日本の夏の湿度

5°Cから8°Cは涼しくなる！

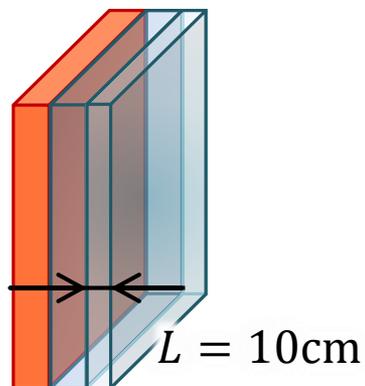
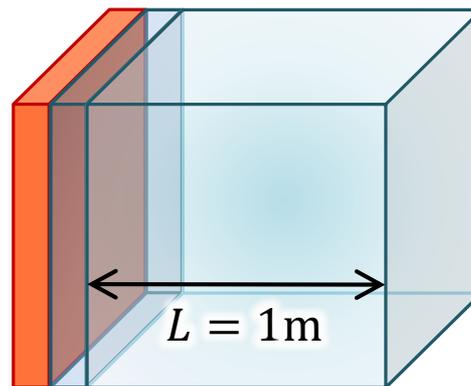
# ふきだし



# 矢印



1m

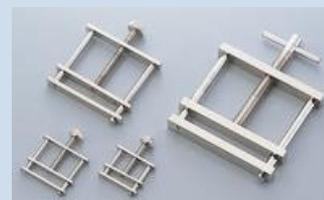


0°C 1気圧の空気の質量密度 :  $\rho_0 = 1.293 \text{ [kg m}^{-3}\text{]}$

実験で測定

$$\rho = \frac{M P}{R T} \propto \frac{1}{T} \quad \Rightarrow \quad \rho = \rho_0 \frac{273.15}{T}$$

空気のおよその重さを測るには、栓をしたフラスコにゴム管をピンチコックで取り付け、真空ポンプで空気を抜き、その減じた重さを秤量(ひょうりょう)する。[中原勝儼]



ピンチコック  
ホフマン式  
【ASKUL】ピンチコック 通販

0°C 1気圧の空気の質量密度から反比例の式で計算

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{1.293 \times 273.15}{273.15 + t} \\ &= \frac{353.18}{(273.15 + t)} \text{ [kg m}^{-3}\text{]} \end{aligned}$$



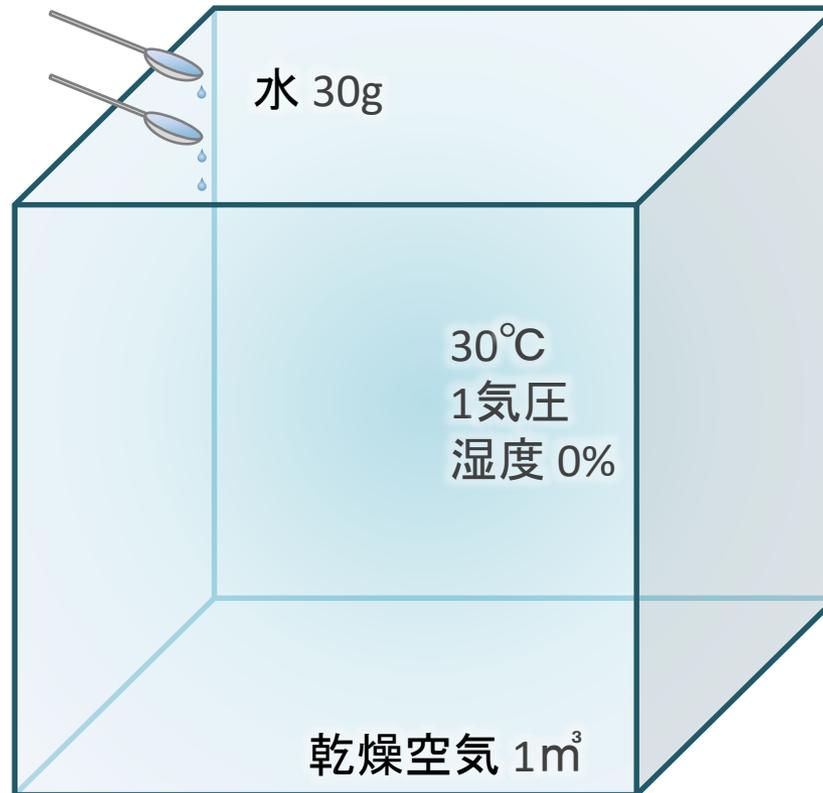
多分こんな感じ

参考: (参照日2018年09月5日)

イラスト

# 1 m<sup>3</sup>

1m<sup>3</sup>の乾燥空気を水の蒸発熱で冷却。  
水を最大限蒸発させる。

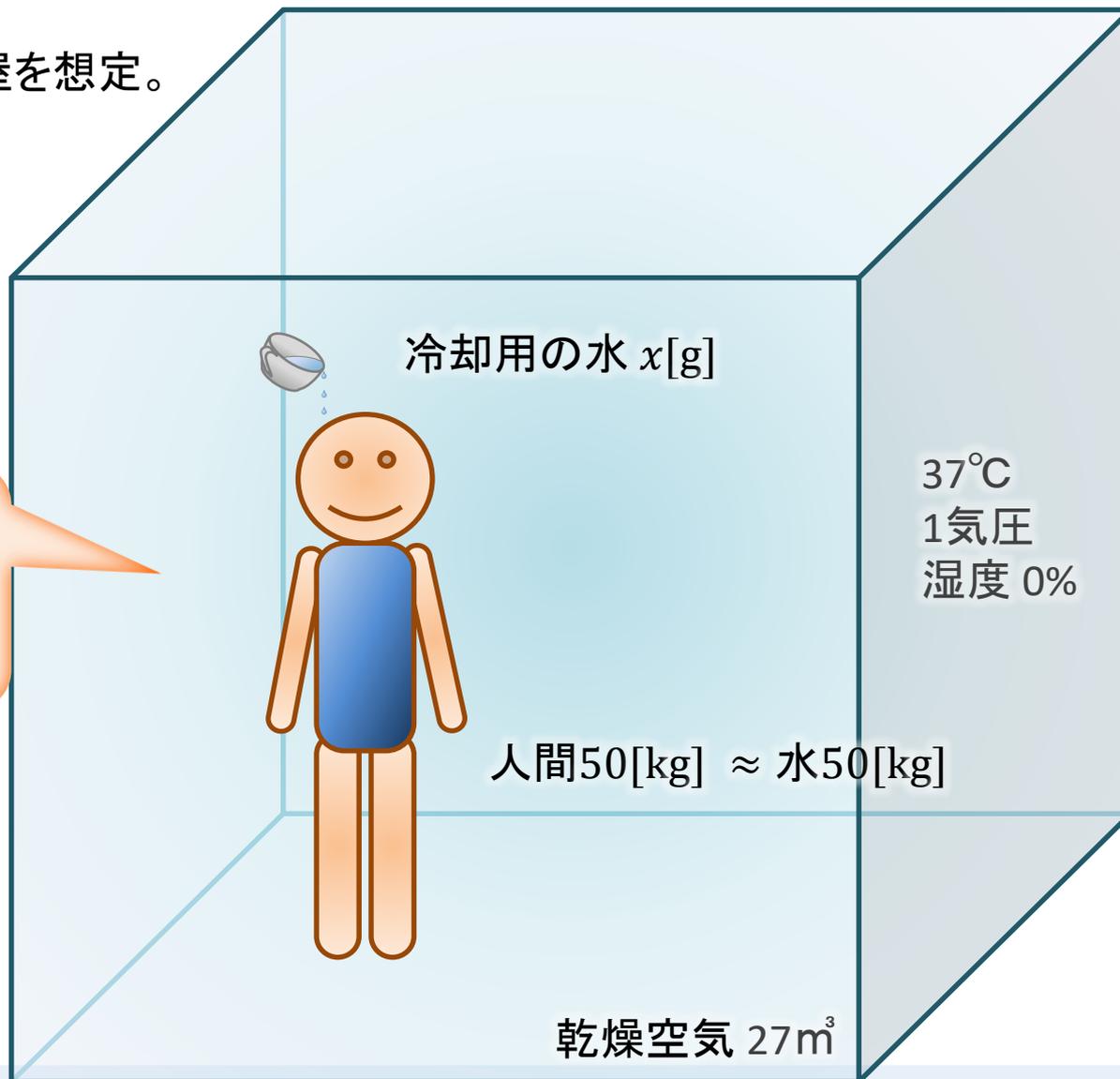


# 人間と空気を1°C冷やす

モデル2

50kgの水を、水の蒸発熱で1°C冷却。  
周辺空気も冷やす。  
4畳半くらいの小部屋を想定。

水の気化熱で  
1°C冷やすには？



# 人間を1°C冷やす

モデル1

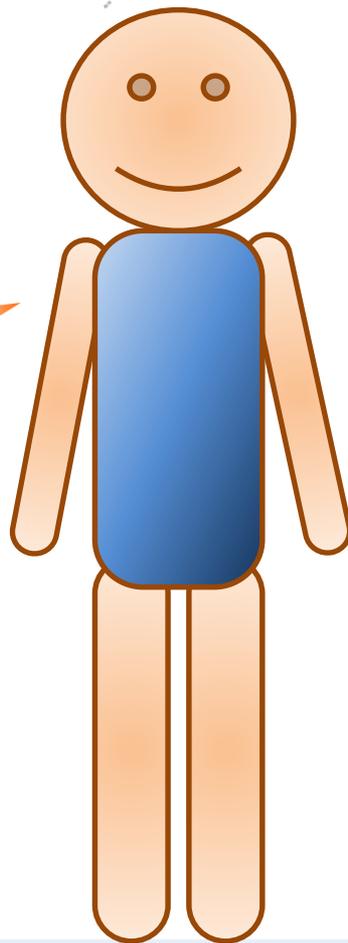
50kgの水を、水の蒸発熱で1°C冷却。  
空気は冷やさないとする。



冷却用の水  $x$ [g]

人間50[kg]  $\approx$  水50[kg]

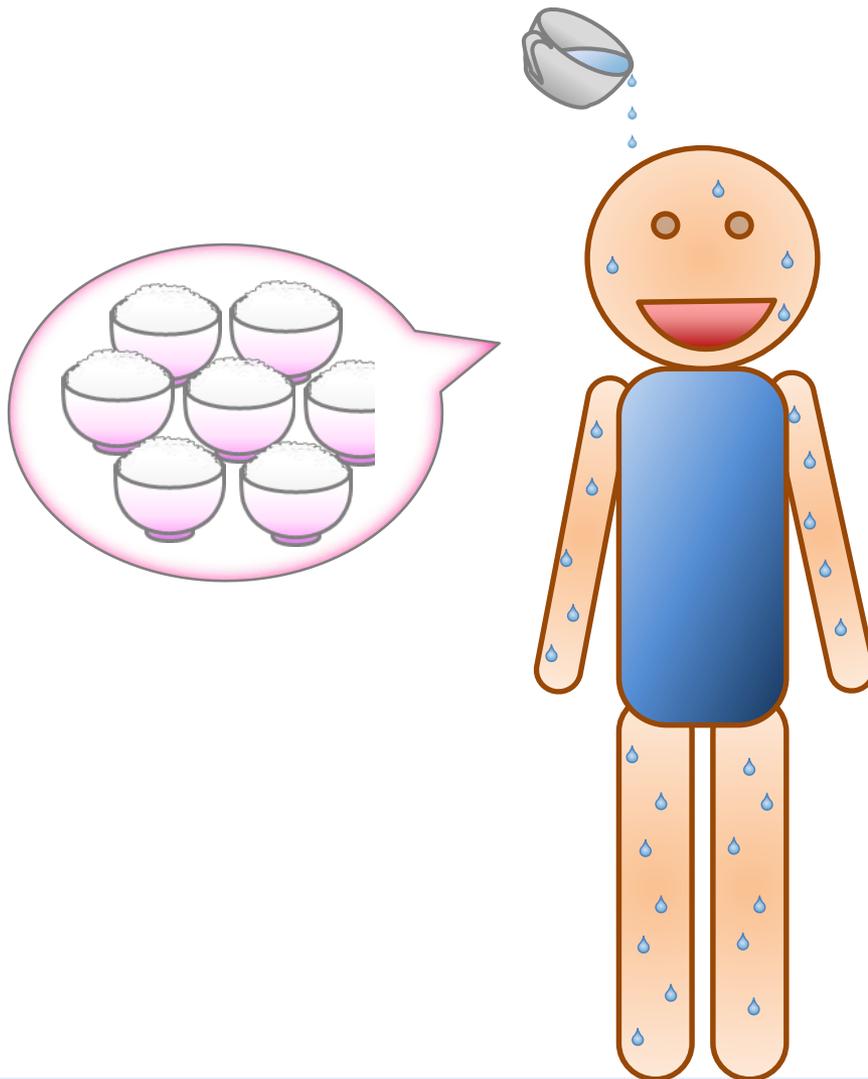
水の気化熱で  
1°C冷やすには？



# 食べたカロリー発熱を冷やすには

モデル

1日の食事を、水の蒸発熱で冷却。  
空冷はしない。



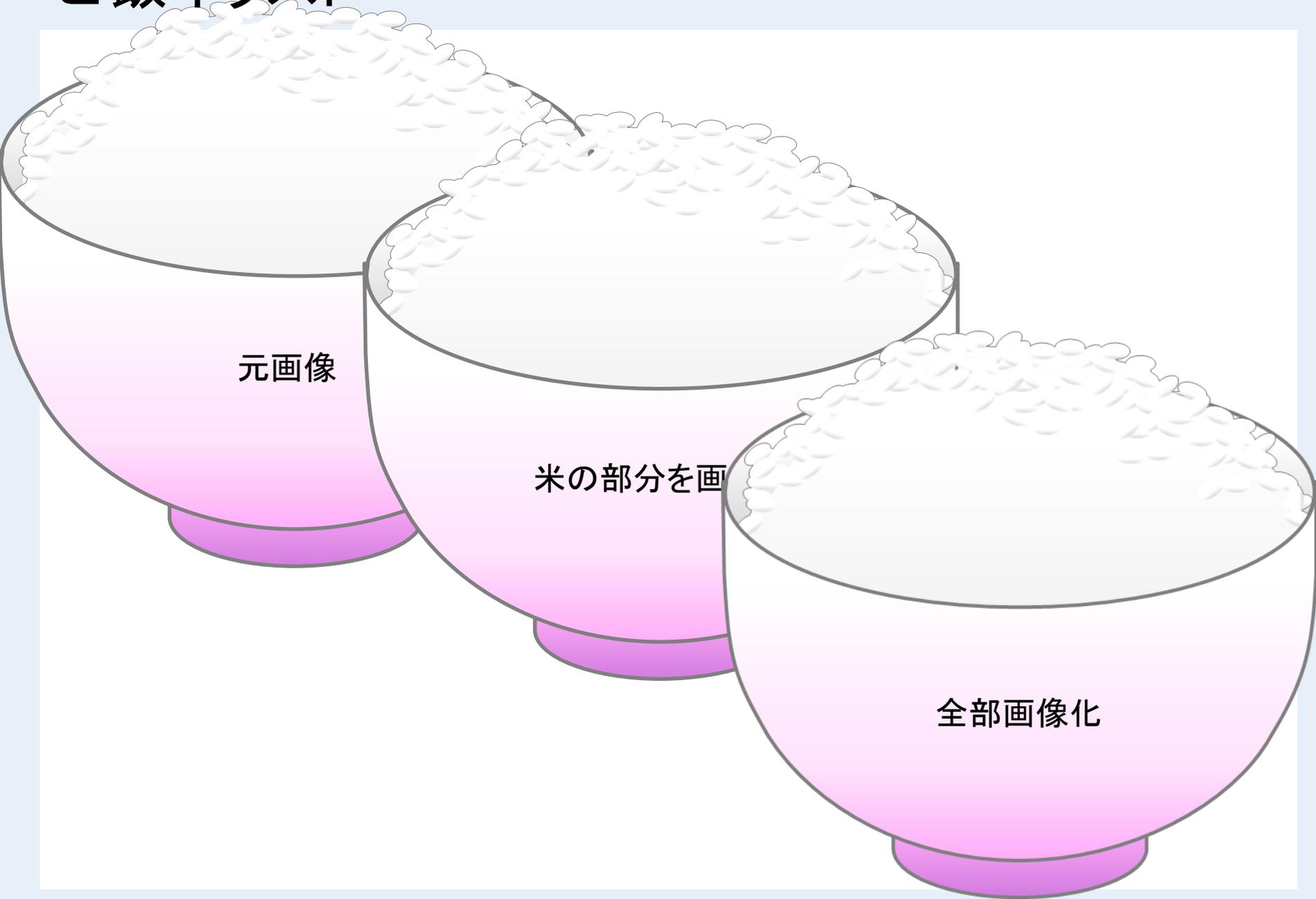
蒸発熱のみで  
体温を維持する

人間50kg

気温37°C

暑くて空気では  
冷えない

# ご飯イラスト

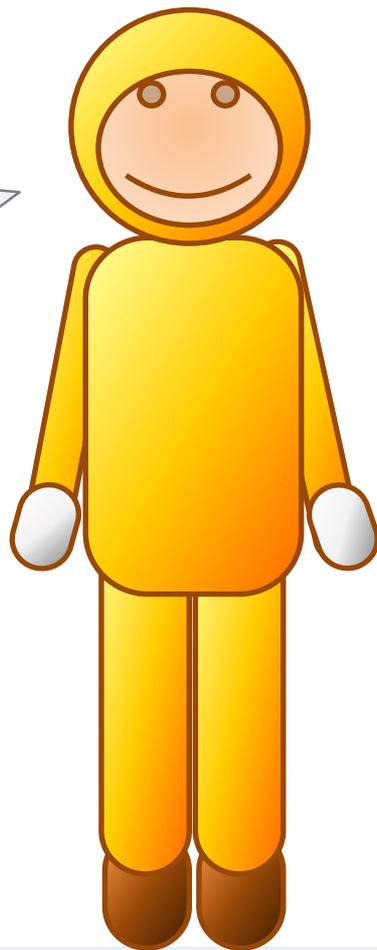


# 呼吸による蒸発熱

## 呼吸による蒸発熱で修正

呼吸による蒸発熱を考える。

呼吸 $12\text{m}^3$   
温度 $36^\circ\text{C}$   
湿度 $100\%$



汗の効果は  
考えない

気温 $20^\circ\text{C}$ 湿度 $50\%$

断熱服を着る

参考: (参照日2018年08月17日)

[空気の学校 | ダイキン工業株式会社](#)

[放射能の話～生きのびるための基礎知識](#)

[ヒトが呼吸する空気量 | クリップ | NHK for School](#)

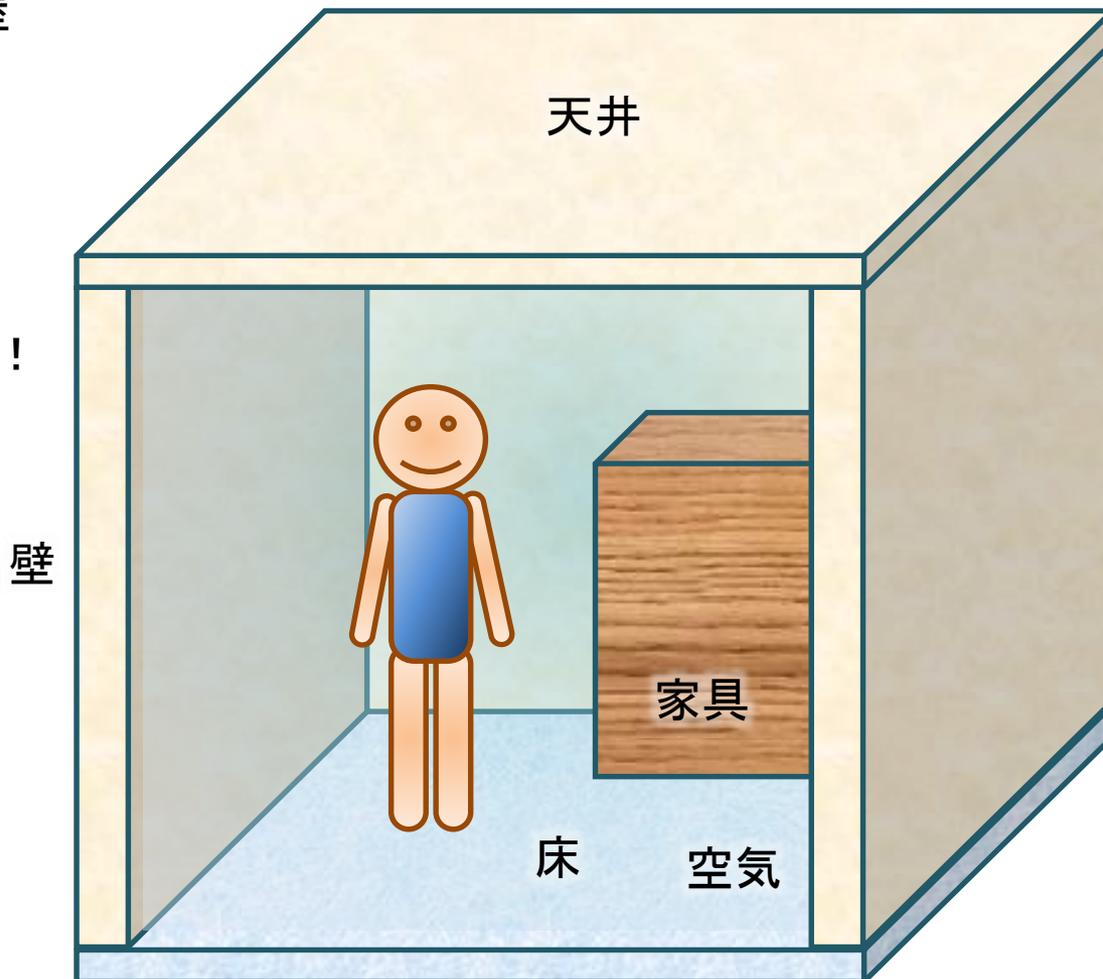
# 考察

食べた食事の発熱を修正

実際の20°Cの涼しい部屋



空気以外にも熱を  
吸収するものがいっぱい！



# ぬれた服は冷たい

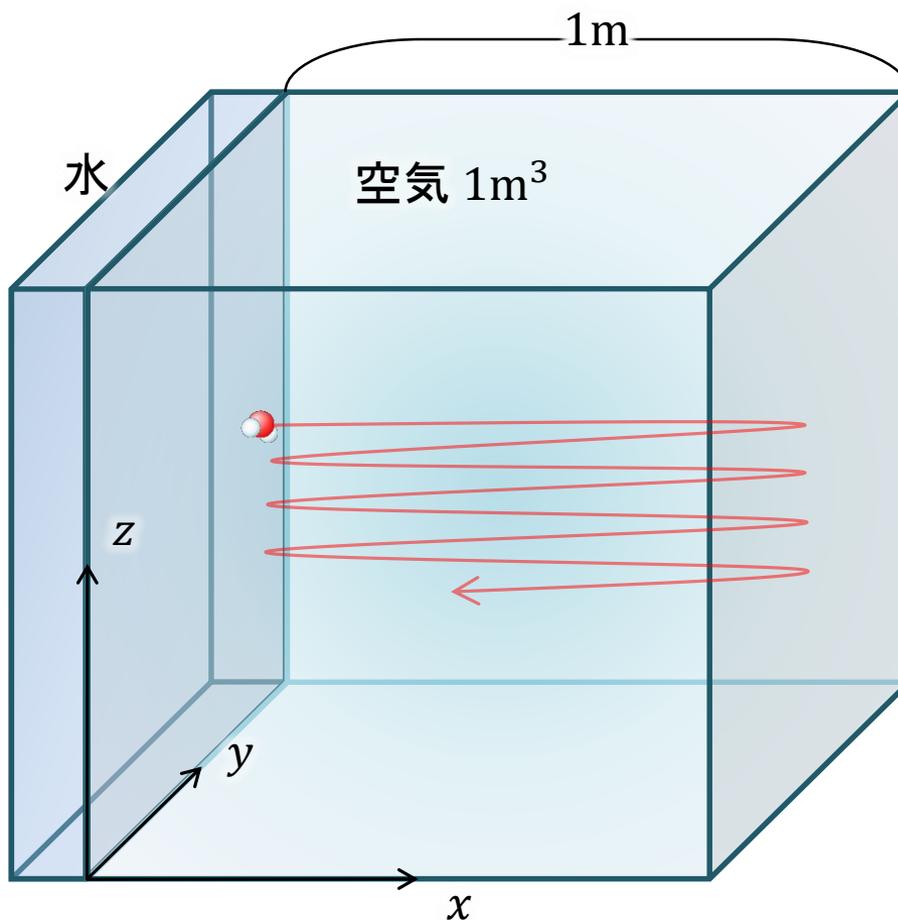
水が蒸発して服を冷やす。



# 水分子が水面に飛び込む数

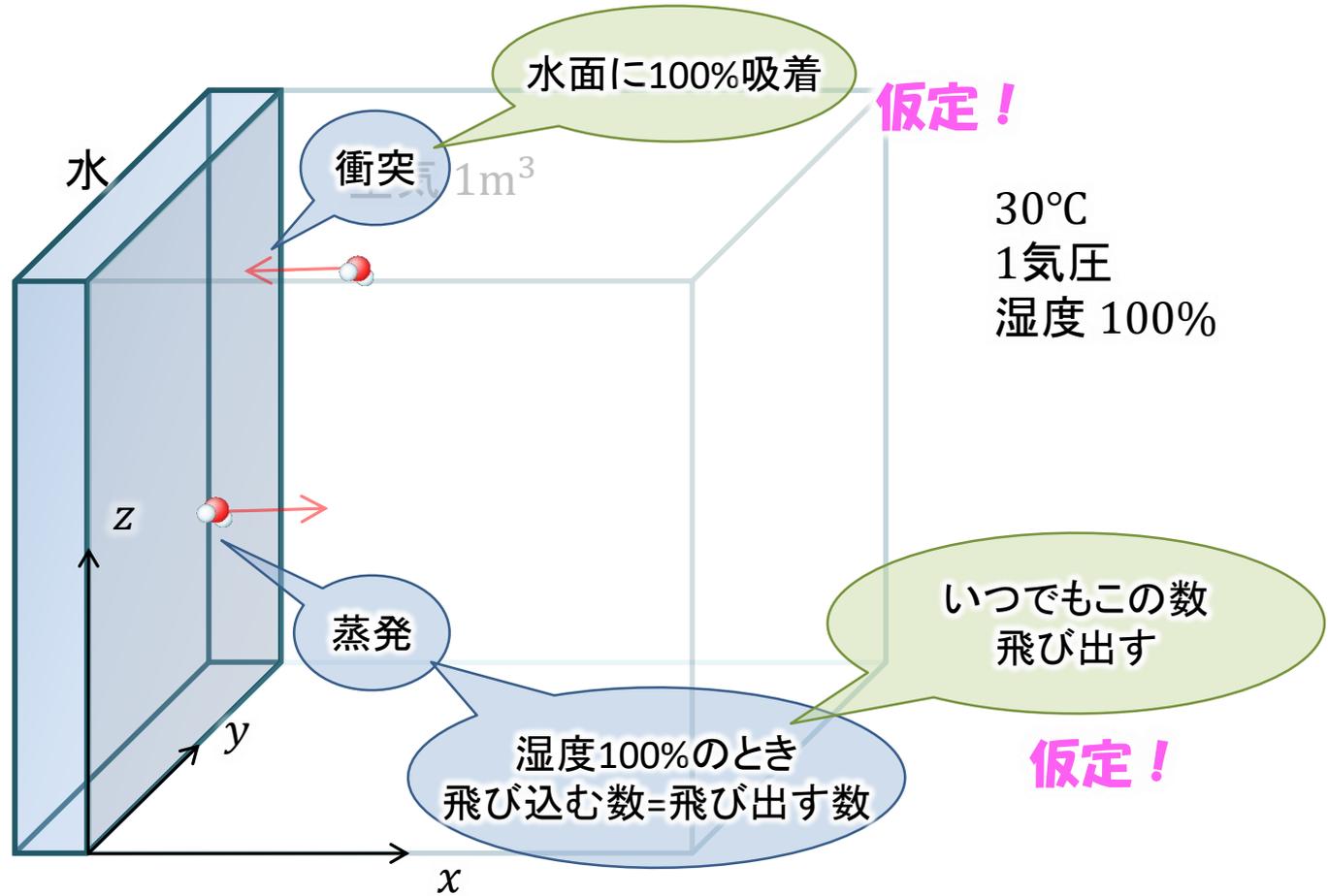
蒸発速度

1分子が1秒間に $x$ 方向に187往復



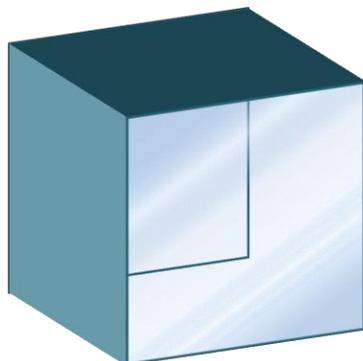
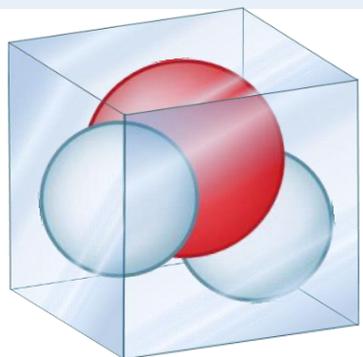
30°C  
1気圧  
湿度 100%  
水分子 30.40g  
 $\overline{v_x} = 374$  [m/s]

## 水面での水分子

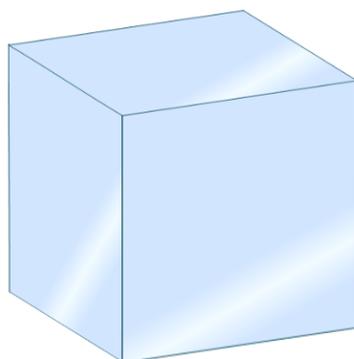
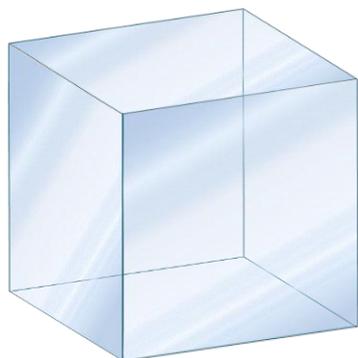


# 凝縮係数 $\alpha$ を昇華熱から予測

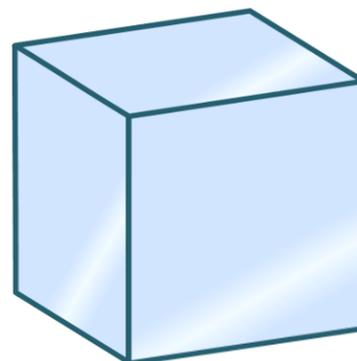
氷の凝縮係数



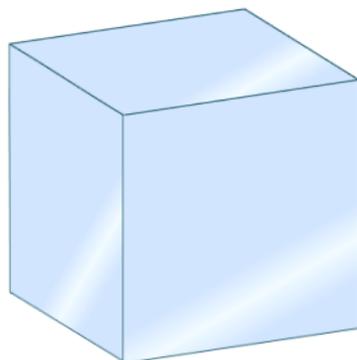
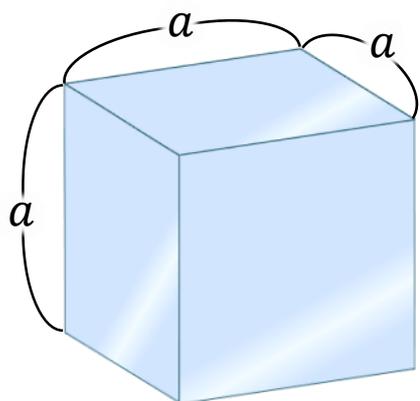
水分子



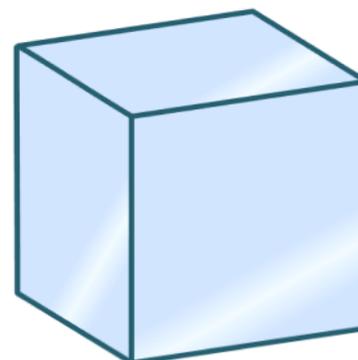
箱だけ



画像表示

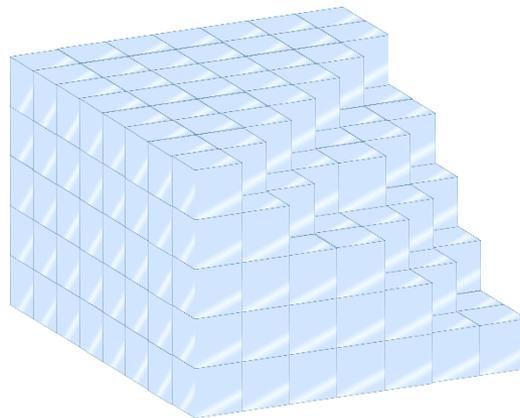
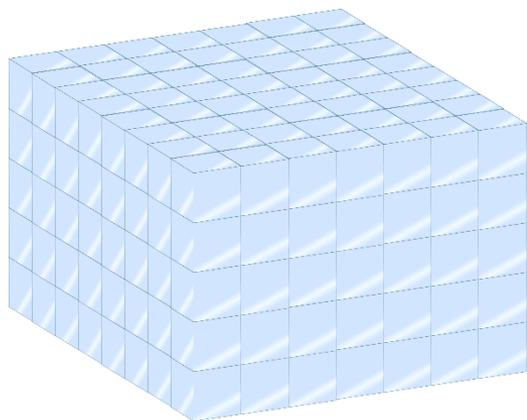


20%縮小



# 凝縮係数 $\alpha$ を昇華熱から予測

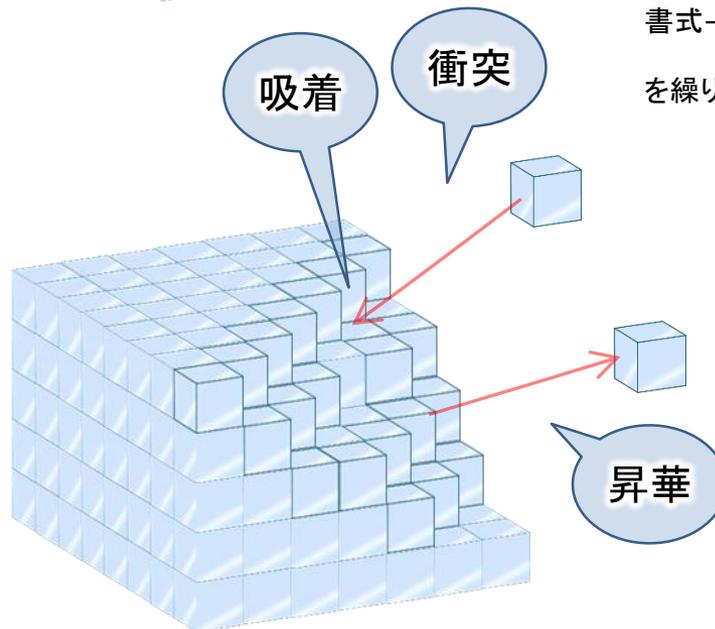
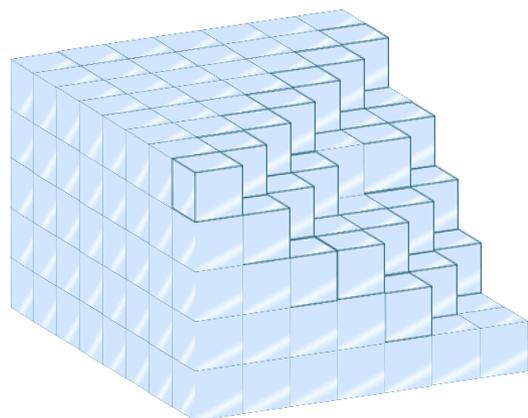
氷の凝縮係数



配置

書式→配置→上下に整列  
書式→配置→左右に整列

を繰り返すと、きれいに並べられる

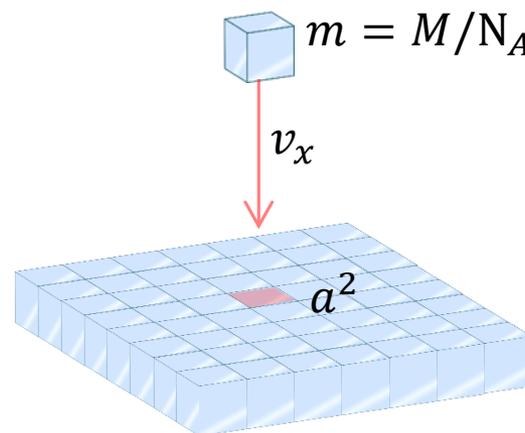
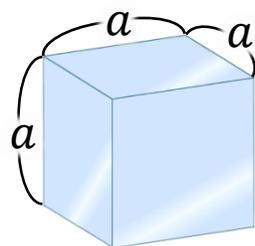
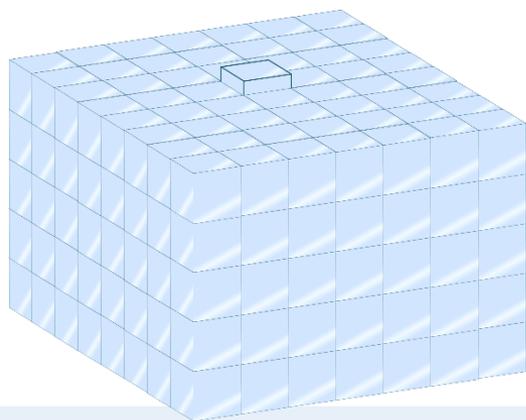
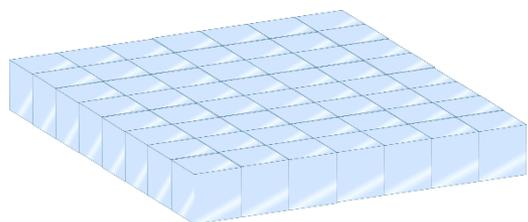
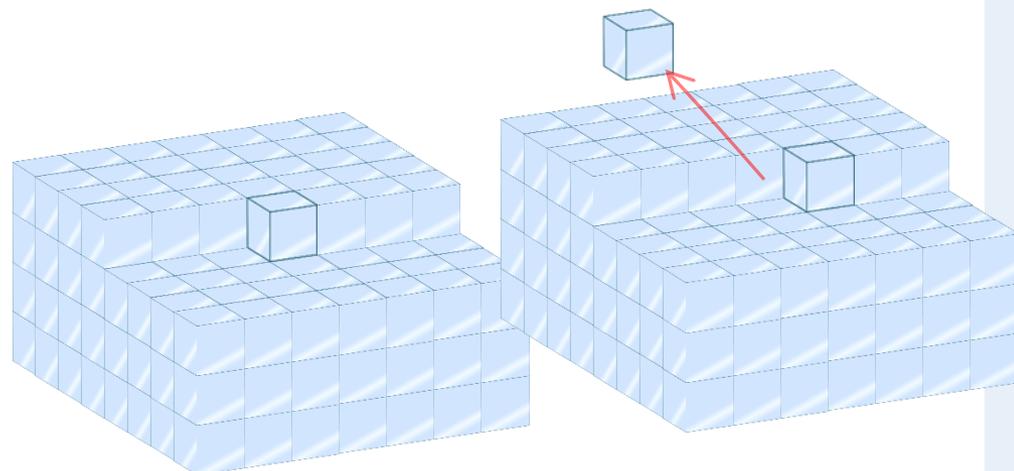
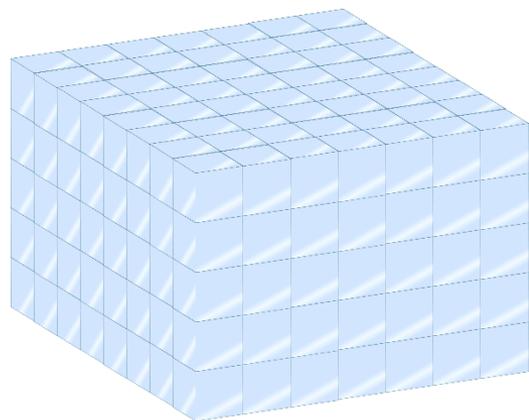


強調

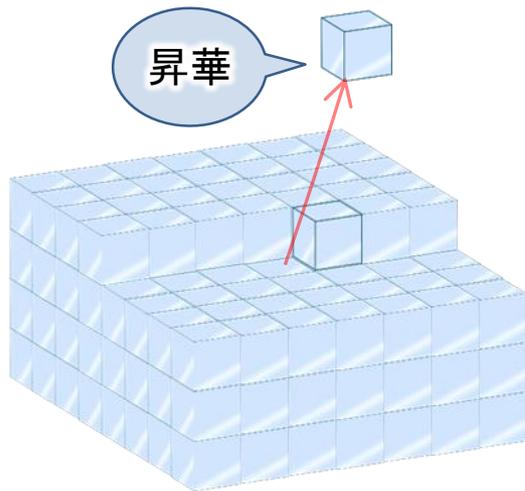
昇華

# 凝集係数 $\alpha$ を昇華熱から予測

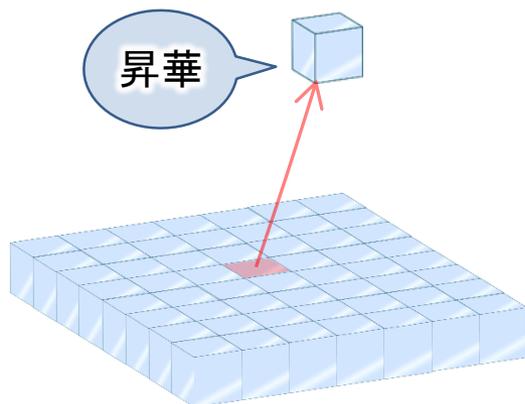
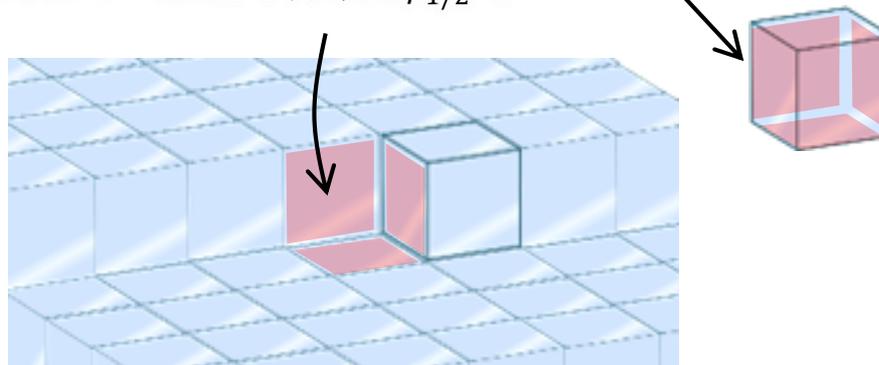
氷の凝縮係数



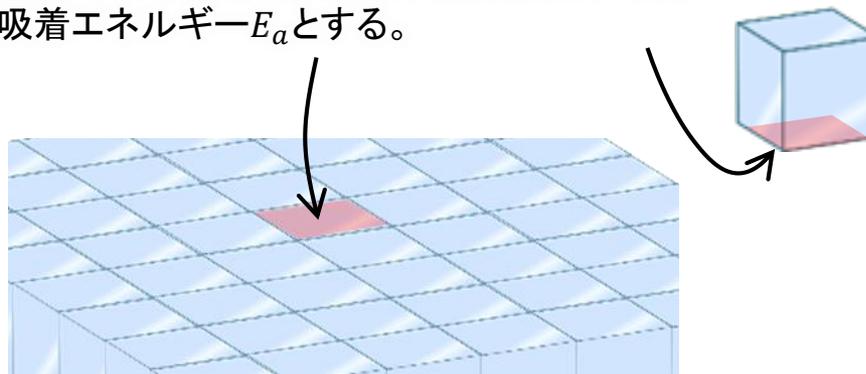
# 蒸発頻度の計算法を評価



キंकでは3面くっついている。  
はがれた分子の裏面を含めると、結合部位は6面。  
ちょうど1分子全面分の、切れた結合手ができる。  
このエネルギーは1分子昇華熱 $\phi_{1/2}$ 。



表面では1面くっついている。  
はがれた分子の裏面を含めると、結合部位は2面。  
これを吸着エネルギー $E_a$ とする。



参考: (参照日2019年07月8日)

氷表面での水分子の滞在時間 黒田登志雄(1984)『結晶は生きている ~ その成長と形の変化のしくみ ~』サイエンス社 p.100

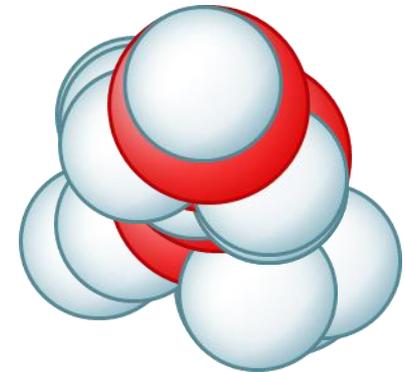
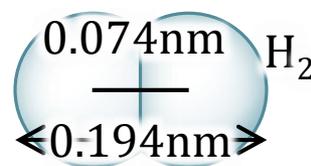
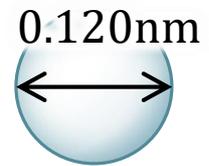
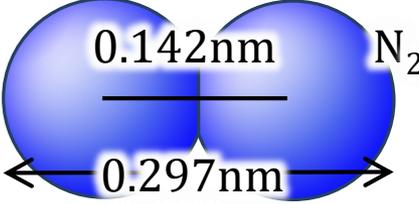
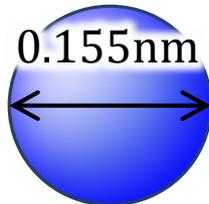
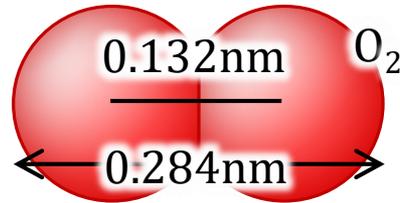
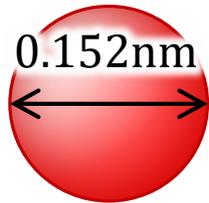
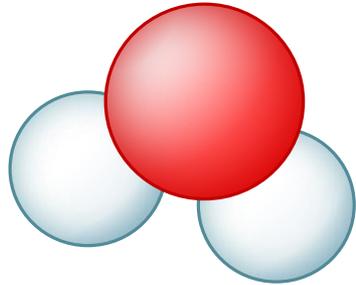
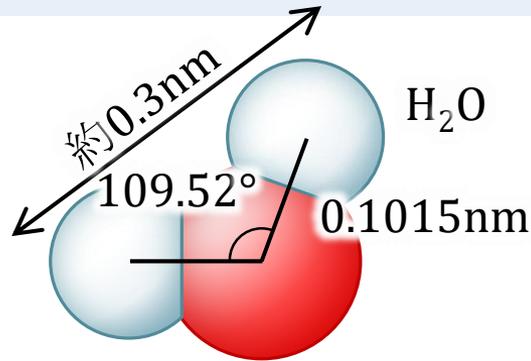
※このイラストは結晶構造が不正確

作図

# 空気分子

30°C

$x$ 方向の平均の速さ  $\overline{v_x}$



参考: (参照日2018年12月13日)

窒素原子の大きさ [窒素 - Wikipedia](#)

酸素原子の大きさ [酸素 - Wikipedia](#)

水素原子の大きさ [水素 - Wikipedia](#)

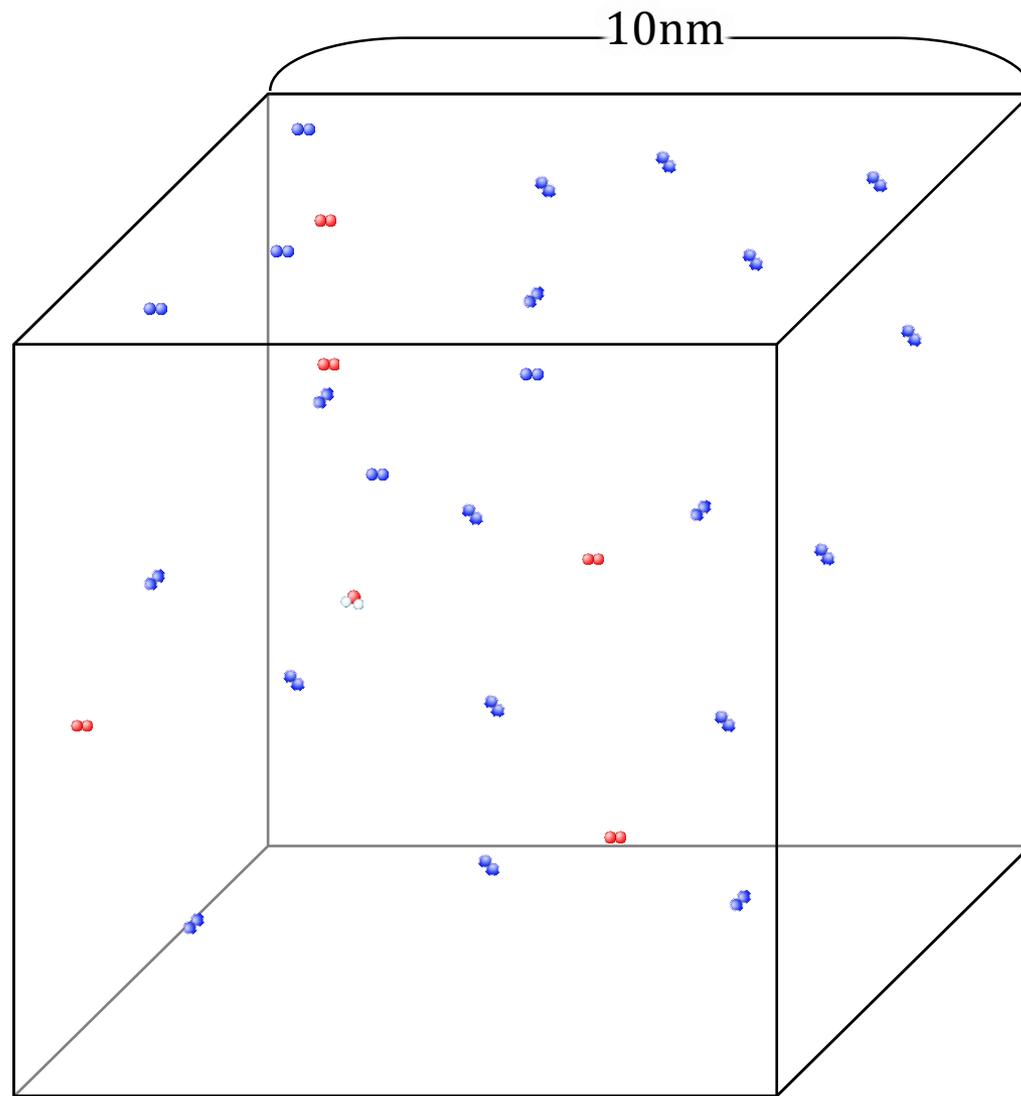
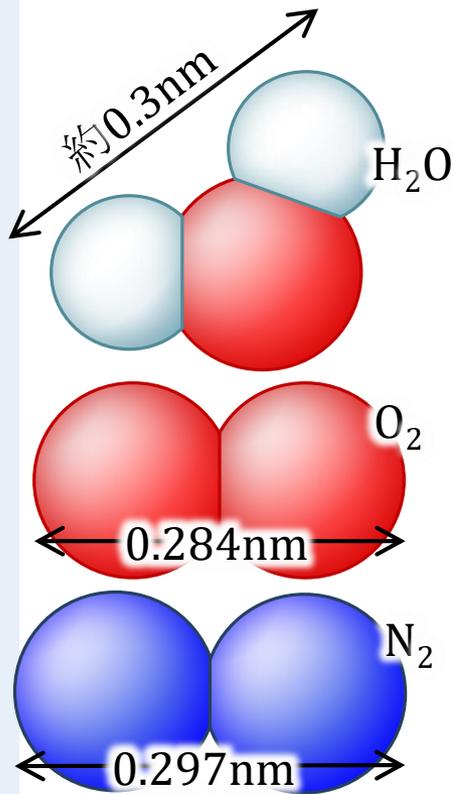
水分子の形 『基礎雪氷学講座①雪氷の構造と物性』 前野紀一、福田正己 編、古今書院(1986)p.32

# 空気の密度

空気の数密度

$$\frac{6.0 \times 10^{23}}{22.4 \times (10^{2+3})^3} = 2.7 \times 10^7 [\mu\text{m}^{-3}]$$

(10nm)<sup>3</sup>あたり27分子



参考: (参照日2018年12月13日)

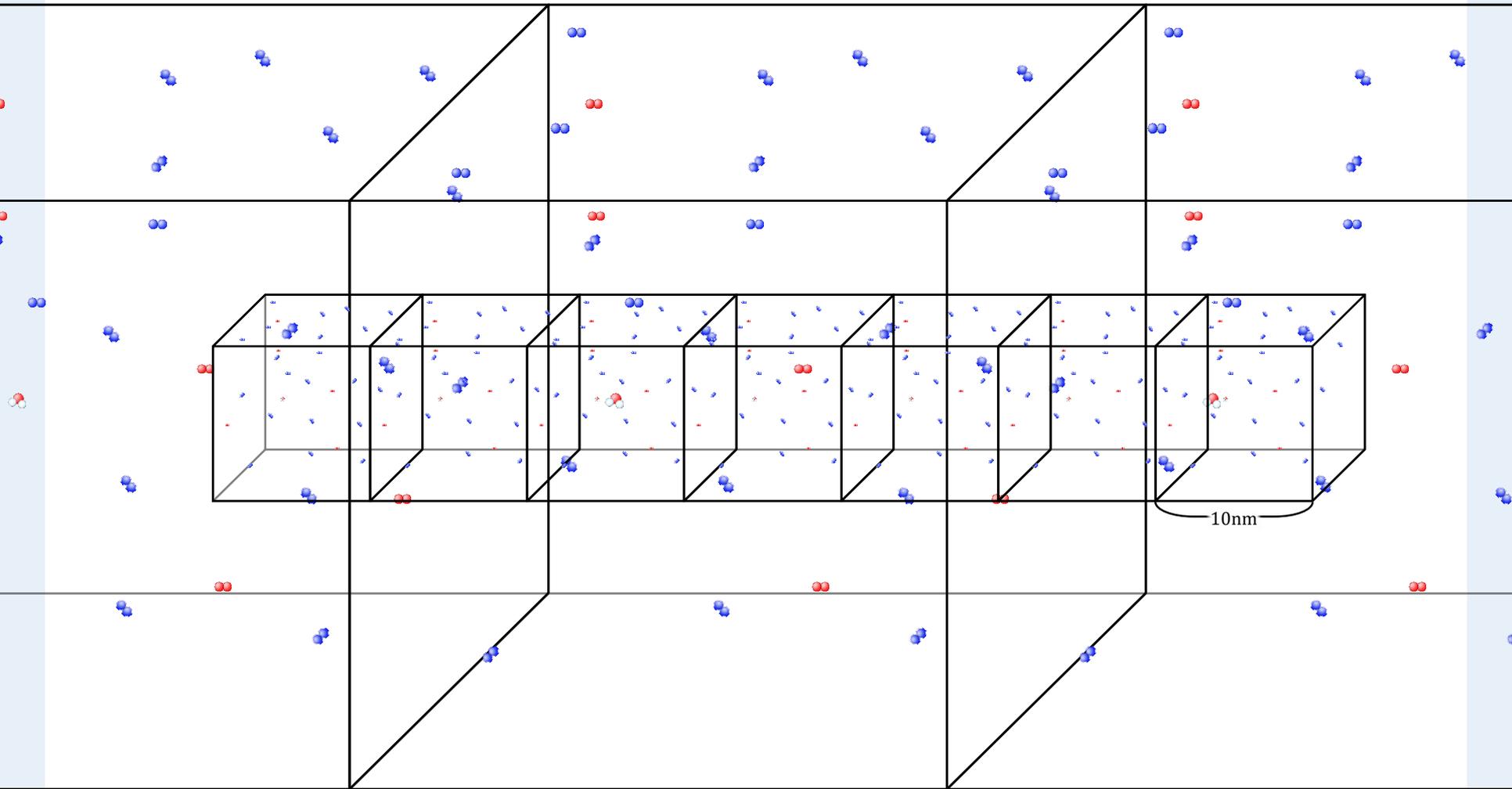
窒素原子の大きさ [窒素 - Wikipedia](#)

酸素原子の大きさ [酸素 - Wikipedia](#)

水素原子の大きさ [水素 - Wikipedia](#)

水分子の形 『基礎雪氷学講座①雪氷の構造と物性』 前野紀一、福田正己 編、古今書院(1986)p.32

# 平均自由行程

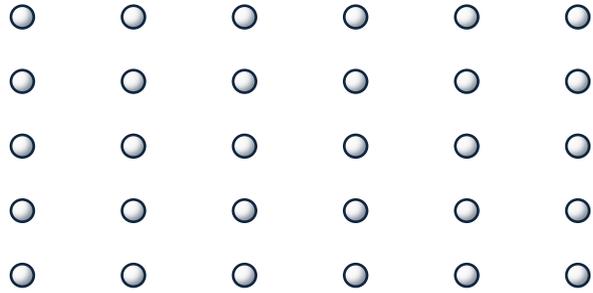


# サトイモの葉



参考: (参照日2019年04月30日)

サトイモの葉 [chappy氏](#)



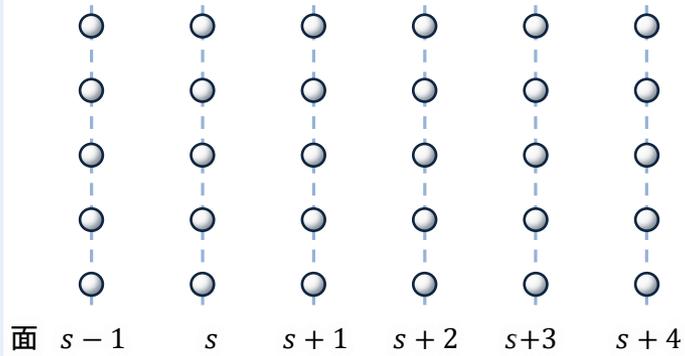
結晶の格子振動の  
周波数を概算する

分子の振動



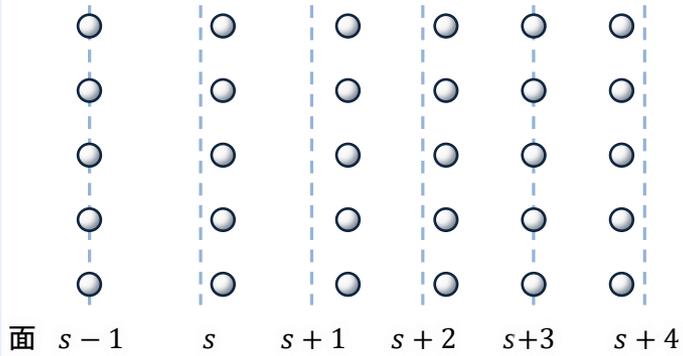
音速から求めたい

# 結晶を面の集合と考える



参考:

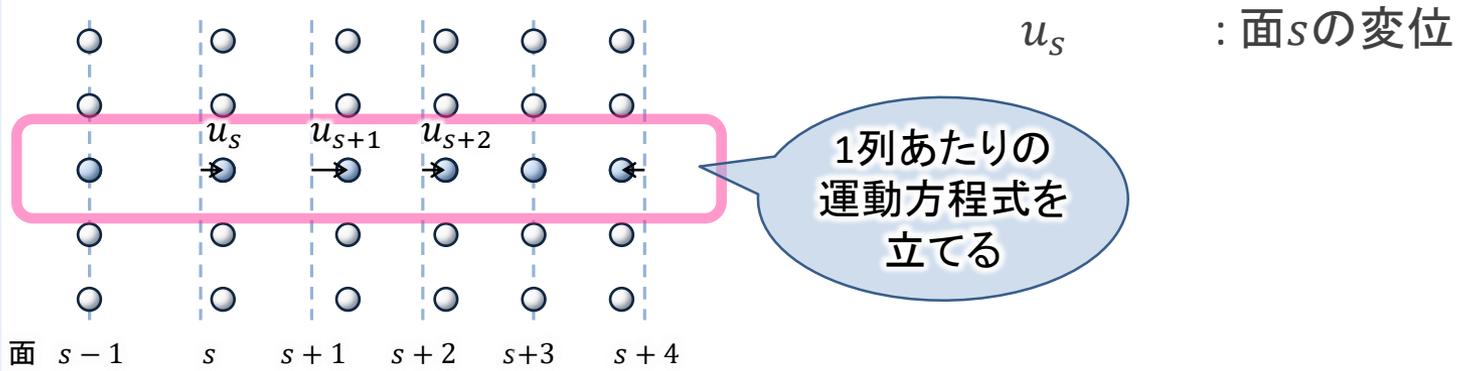
# 結晶を面の集合と考える



面内の分子が  
すべて同じ  
動きをする場合

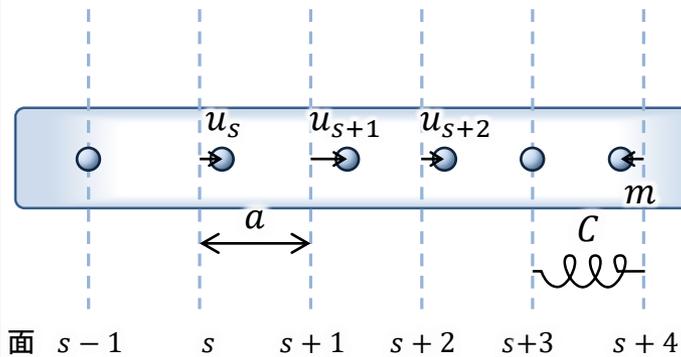
参考:

# 結晶面の変位 (1列あたり)



面内の分子が  
すべて同じ  
動きをする場合

参考:



1列あたりの  
運動方程式を  
立てる

$u_s$   
 $m$

- : 面  $s$  の変位
- : 1分子の質量
- : 結合のばね定数
- : 格子定数

各面、1分子あたりの運動方程式

$$m \frac{d^2 u_s}{dt^2} = C(u_{s+1} - u_s) + C(u_{s-1} - u_s)$$

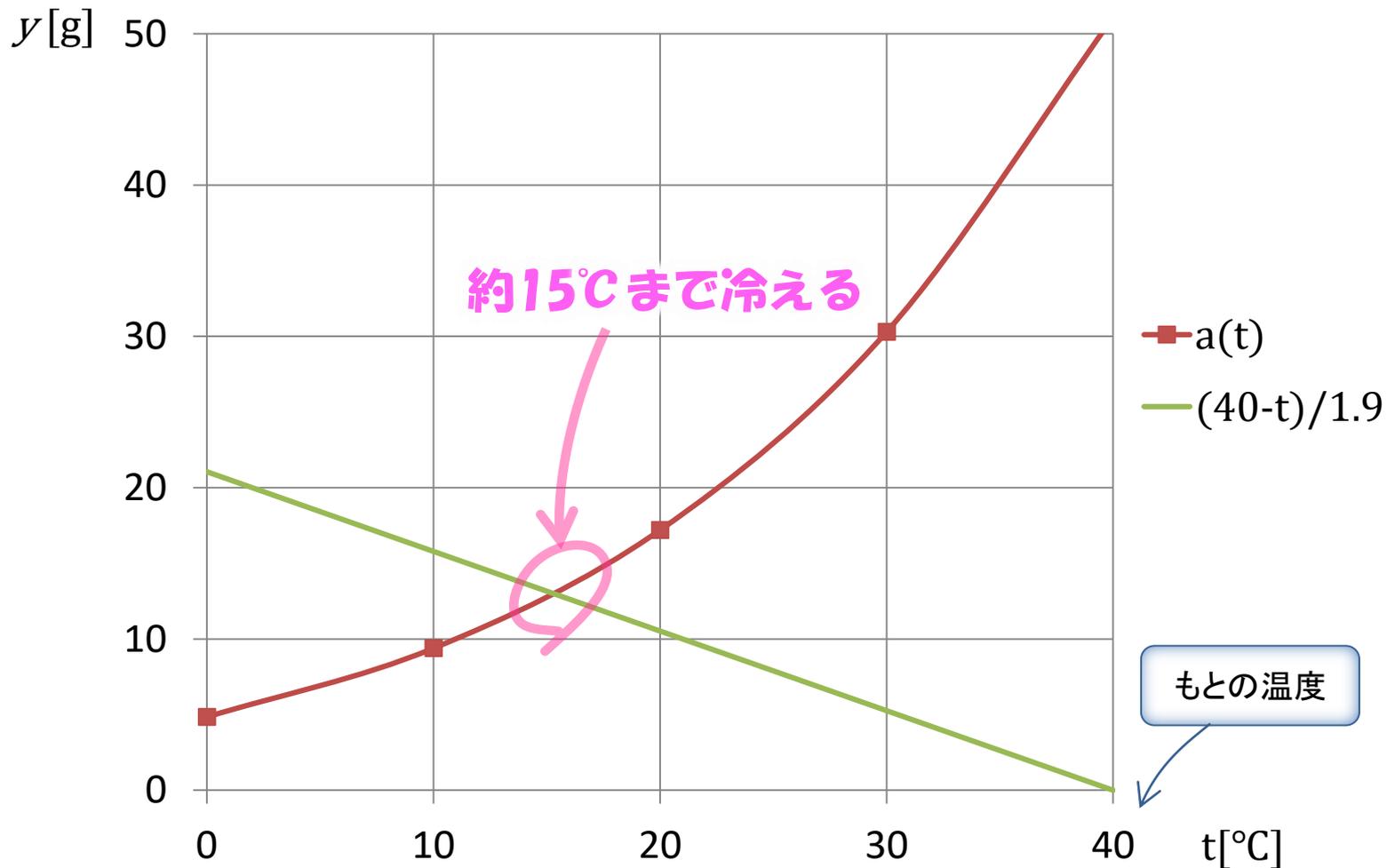
参考:

グラフ、表

# グラフ

低下後の温度  $t$ 、空気中の水蒸気量  $y$

$$y = \frac{1}{1.9}(40 - t), \quad y = a(t)$$



# 表

## 1気圧での飽和水蒸気量と密度

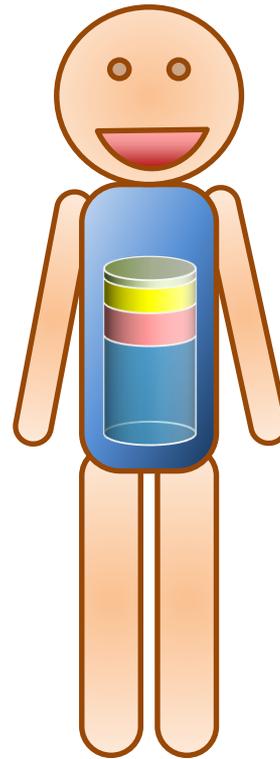
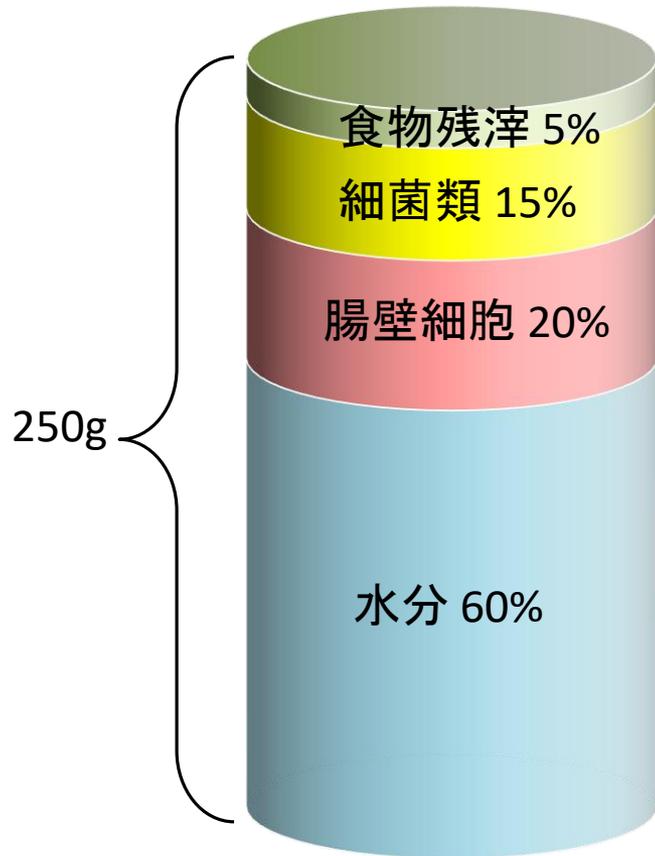
$t$ [°C]	$a$ [g/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
40	51.1	1.128
30	30.3	1.165
20	17.2	1.205
10	9.39	1.247
0	4.85	1.293

各サイトで値が違う。  
比較して値を選んだ。



# グラフ

吸収されない熱量で修正

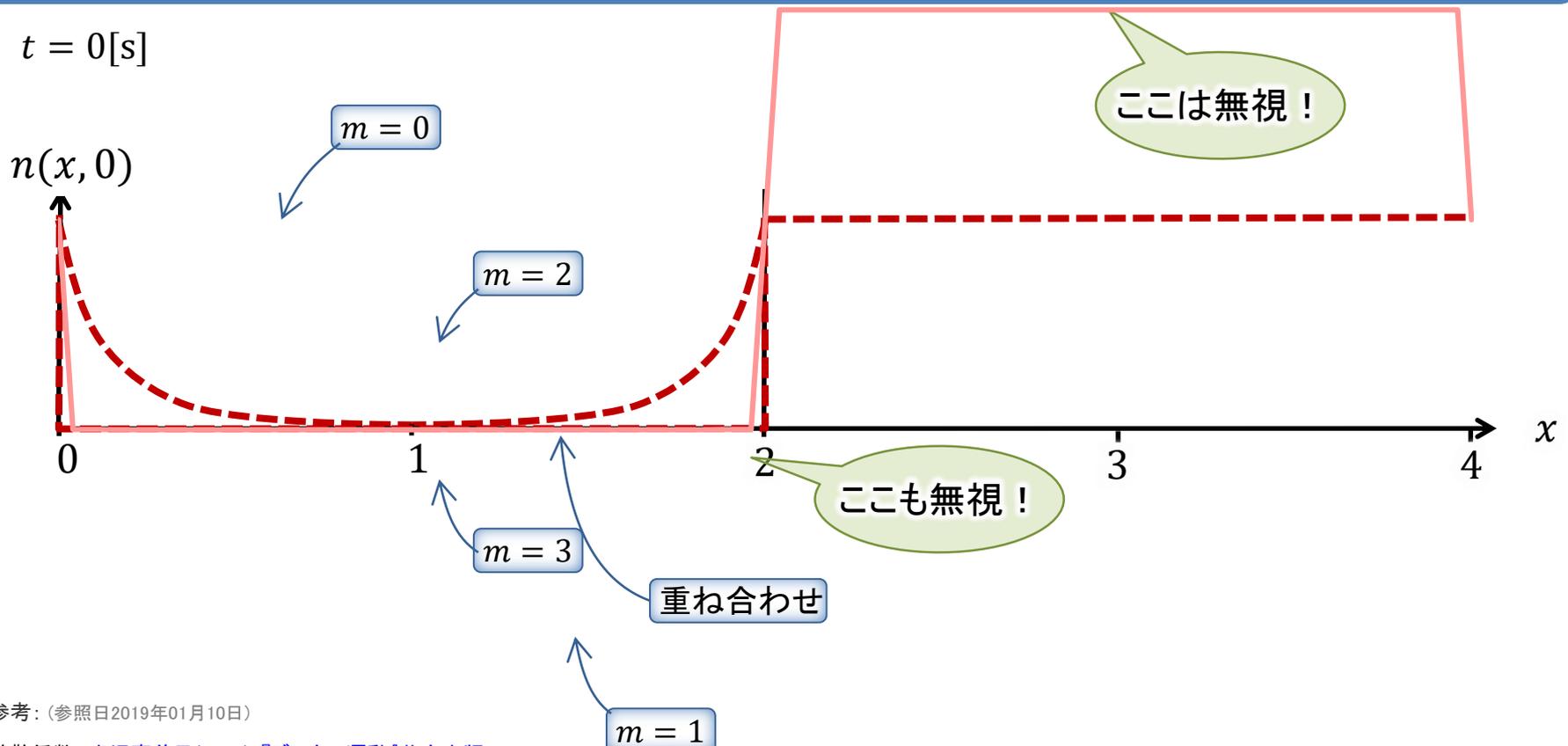


# フーリエ級数展開

## 矩形のフーリエ級数展開

$$n(x, t) = a_0 + \frac{4a_0}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2m+1} \sin\left(2\pi(2m+1)\frac{x}{L}\right) \exp(-t/\tau_m)$$

$$L = 4[\text{m}], \quad 1/\tau_m = 4\pi^2(2m+1)^2 D_x/L^2, \quad D_x = 7.3 \times 10^{-6}[\text{m}^2/\text{s}]$$



参考: (参照日2019年01月10日)

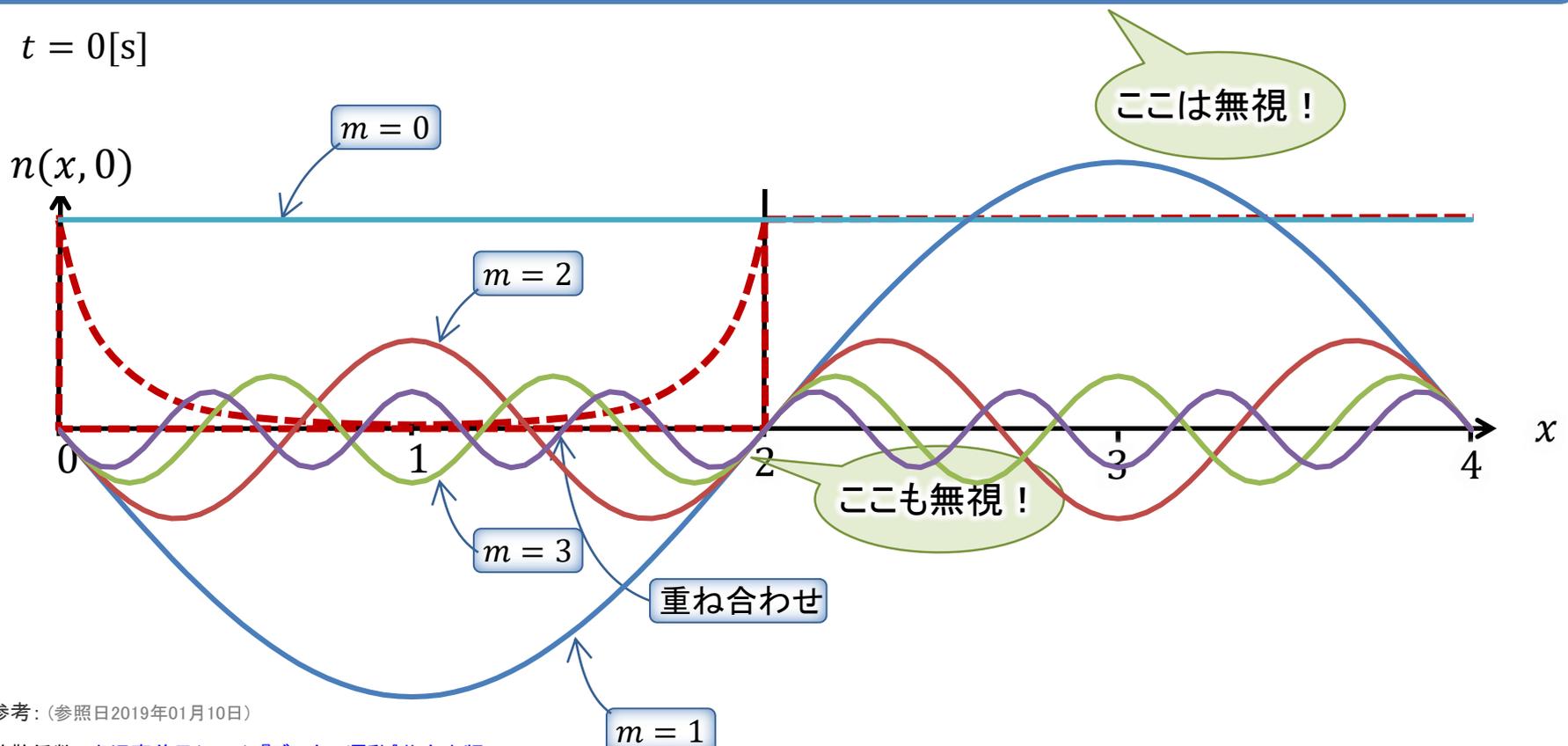
拡散係数 米沢富美子(1986).『ブラウン運動』共立出版  
フーリエ展開 大石進一(1989)『フーリエ解析』岩波書店

# フーリエ級数展開

## 矩形のフーリエ級数展開

$$n(x, t) = a_0 + \frac{4a_0}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2m+1} \sin\left(2\pi(2m+1)\frac{x}{L}\right) \exp(-t/\tau_m)$$

$$L = 4[\text{m}], \quad 1/\tau_m = 4\pi^2(2m+1)^2 D_x/L^2, \quad D_x = 7.3 \times 10^{-6}[\text{m}^2/\text{s}]$$



参考: (参照日2019年01月10日)

拡散係数 米沢富美子(1986).『ブラウン運動』共立出版  
フーリエ展開 大石進一(1989)『フーリエ解析』岩波書店

# 拡散方程式を解く

# 拡散方程式を解く

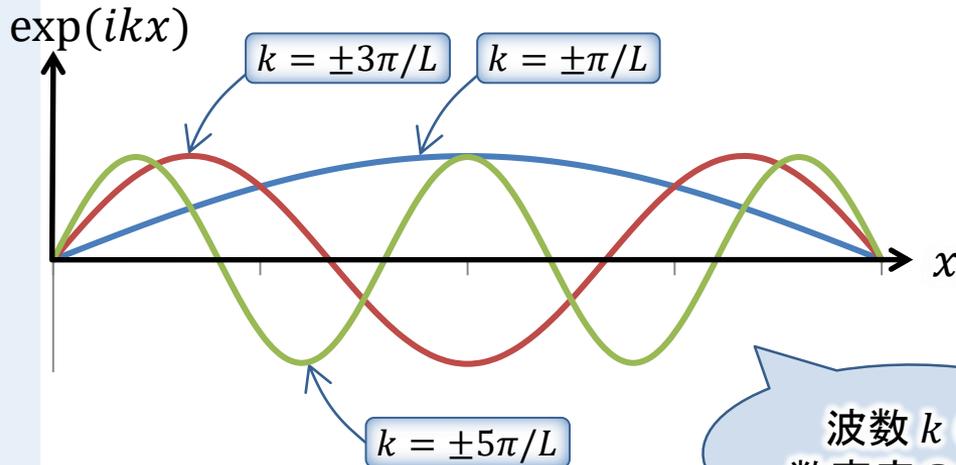
x方向への拡散方程式

$$\frac{\partial n(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n(x, t)}{\partial x^2}$$

フーリエ級数展開

$$n(x, t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \exp(ikx - t/\tau_k)$$

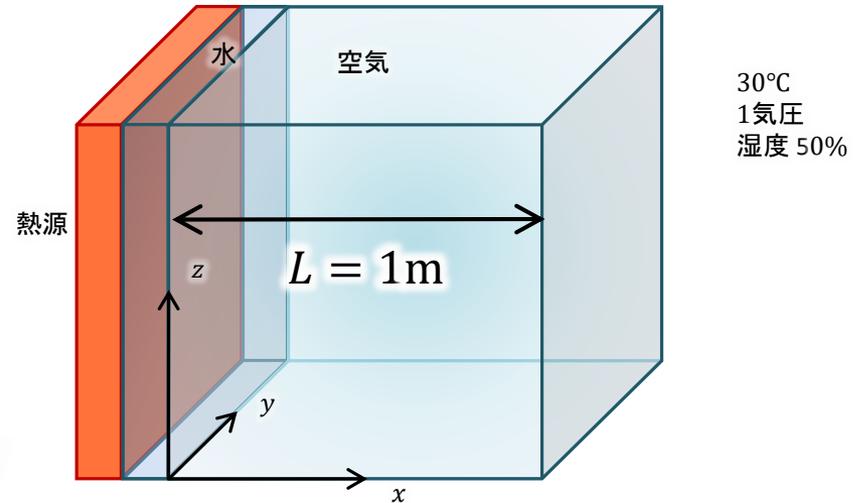
$(k = \dots, -2\pi/L, -\pi/L, 0, \pi/L, 2\pi/L, 3\pi/L, \dots)$



波数  $k$  の  
数密度のむら

- $n(x, t)$  : 水蒸気の数密度分布
- $D = 2.2 \times 10^{-5} [\text{m}^2/\text{s}]$   
(30°C常圧の水分子)
- $L$  : 箱の大きさ
- $\tau_k$  : 緩和時間

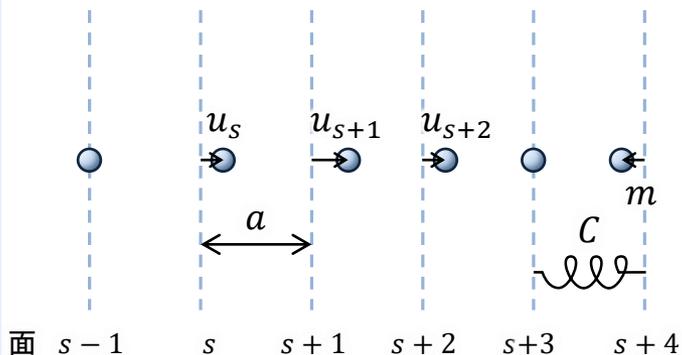
時間  $\tau_k$  で  
水蒸気のむらは  
無くなる



参考: (参照日2019年01月10日)

拡散係数 米沢富美子(1986).『ブラウン運動』共立出版  
フーリエ級数展開 大石進一(1989)『フーリエ解析』岩波書店

# 運動方程式の解



- $u_s$  : 面  $s$  の変位
- $m$  : 1分子の質量
- $C$  : 結合のばね定数
- $a$  : 格子定数
- $K$  : 波数
- $\omega$  : 振動数

各面、1分子あたりの運動方程式

$$m \frac{d^2 u_s}{dt^2} = C(u_{s+1} - u_s) + C(u_{s-1} - u_s)$$

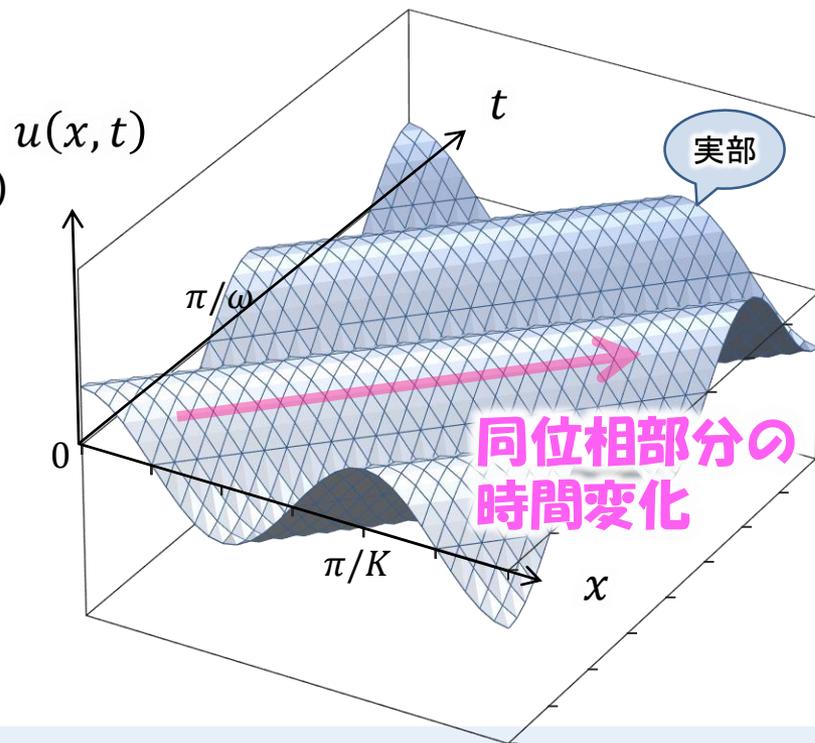
波数  $K$ 、振動数  $\omega$  の解

$$u_s(t) = u_{K,\omega} \exp(iKsa) \exp(-i\omega t)$$

$$= u_0 \exp(i(Kx - \omega t))$$

$$x = sa$$

一定のとき同位相



参考: