

化学工学量論 2012 伊東

■4/10(火) 第1回 化学工学とは・単位と次元・単位換算法

4/17(火) 第2回 データの取り扱い・グラフ

4/24(火) 第3回 モデル解析の道具

5/1(火) 第4回 物質収支

5/8(火) 第5回 反応系の物質収支

5/15(火) 第6回 プロセスの物質収支

5/22(火) 第7回 理想気体と実在気体

5/29(火) 第8回 蒸気圧と湿度

6/5(火) 第9回 相平衡

6/12(火) 第10回 熱力学第一法則・気体のエンタルピー

6/19(火) 第11回 生成熱と分子の結合エネルギー

6/26(火) 第12回 反応熱・燃焼熱

7/3(火) 第13回 反応を伴う物質・エネルギー同時収支

7/10(火) 第14回 反応平衡

7/24(火) 第15回 非定常物質収支・エネルギー収支

7/31(火) 期末試験

火曜 3,4 限(10:45-12:15) 講義室 S323

演習:情報ネットワーク演習室第2(E)(S4 3F)

毎回演習レポート(筆記および Excel プリントアウト)を課します。講義時間内に提出のこと。

(講義時間内に提出できなかった場合の $\times$ 切は当日17:00, 提出は南1 421 伊東居室前の Box へ。)

演習・実習用の Excel シートテンプレートファイルは以下にあります。当日のフォルダ“bce_”をデスクトップにコピーして使ってください。

1. [エクスプローラ]
2. “¥¥nest2.g.gsic.titech.ac.jp¥home0”を入力
3. “usr2/ito-a-ac/”に入る

講義内容 物理化学の基礎事項を応用して、化学プロセスを定量的に取り扱うための諸手法の基礎を講義する。内容は大きく①数値・データの取り扱い、数値計算の利用、②物理化学を基礎とした気体・液体の物性値と平衡、③化学プロセスの物質収支・エネルギー収支に分けられる。

(科目の社会的意義) 物質・エネルギーの扱いは化学プロセス現場のみならず、日常生活の物質の出入り、エネルギーの定量的把握にも役立つ。

(工学的位置づけ) 物質収支・熱収支は単位操作・伝熱工学への入門、また物性値関係は物理化学と密接な関係にある。

教材：配布資料

参考書：アトキンス「物理化学（上）」(2001,東京化学同人)

用意するもの：演習レポート提出用A4レポート用紙(それ以外は支給の予定)、定規（グラフ用紙（支給）による演習あり）

成績評価 毎回の演習レポート（15回） 計25点満点 （提出期限当日午後5:00。誤答は減点。公欠を認めます。）

定期試験 75点 （資料持ち込み不可。出題範囲は配布資料中の指定事項+ α ）

はじめに 1 「化学工学量論」は工学部化学系学科の世界共通の基礎科目

代表的教科書 D.M.HIMMELBLAU (University of Texas)," BASIC PRINCIPLES AND CALCULATIONS IN CHEMICAL ENGINEERING",PRENTICE-HALL(1982) (日本語版:「化学工学の基礎と計算」, 大竹伝雄訳, 培風館) の目次

1. Introduction to Engineering Calculations	工学計算序論
Units and Dimensions	単位と次元
The Mole Unit	モル単位
Conventions in Methods of Analysis and Measurement	解析と測定の慣例
Basis	基準
Temperature	温度
Pressure	圧力
Physical and Chemical Properties of Compounds and Mixtures	物性値
Technique of Problem Solving	問題解法の方法
The Chemical Equation and Stoichiometry	化学方程式と量論式
Digital Computers in Problem Solving	計算機による解法
2 Material Balances	物質収支
The Material Balance	物質収支
Program of Analysis of Material Balance Problems	物質収支問題解析の手順
Material Balance Problems with Direct Solution	直接解ける物質収支問題
Material Balance Using Algebraic Techniques	代数的手法による物質収支
Problem Involving Tie Components	対応成分を含む問題
Recycle, Bypass, and Purge Calculation	リサイクル, バイパス, パージの計算
3 Gases, Vapors, Liquids, and Solids	気体, 蒸気, 液体, 固体
Ideal Gas Laws	理想気体法則
Real Gas Relationships	実在気体の関係
Vapor Pressure	蒸気圧
Saturation	飽和
Partial Saturation and Humidity	部分飽和と湿度
Material Balance Involving Condensation and Vaporization	凝縮と蒸発を含む物質収支
Phase Phenomena	相現象
4 Energy Balance	エネルギー収支
Concepts and Units	概念と単位
Heat Capacity	熱容量
Calculation of Enthalpy Changes	エンタルピー変化の計算
Enthalpy Changes for Phase Transitions	相変化のエンタルピー変化
The General Energy Balance	一般化エネルギー収支
Reversible Process and the Mechanical Energy Balance	可逆プロセスと機械的エネルギー収支
Energy Balances with Chemical Reaction	化学反応を伴うエネルギー収支
Heats of Solution and Mixing	溶解熱, 混合熱
5 Applications of Combined Material and Energy Balances	物質収支とエネルギー収支の組合せ
Simultaneous Material and Energy Balances	物質, エネルギー同時収支
Enthalpy-Concentration Charts	エンタルピー-濃度線図
Humidity Charts and Their Use	湿度図表
Complex Problems	複雑な問題
6 Unsteady-State Material and Energy Balances	非定常物質エネルギー収支
Unsteady-State Material and Energy Balance	非定常物質エネルギー収支

エンジニア教育認定基準 (JABEE) (化学・化学工学)

- (1) 基礎能力 a) 数学、物理学、化学など自然科学に関する基礎知識
 b) 有機化学、無機化学、物理化学、分析化学、材料化学、生化学などプログラムの目的に適切であるとみなされる化学に関する専門知識、およびそれらを問題解決に利用できる能力
 c) 経済性、安全性、信頼性、社会及び環境への影響などを考慮しながら、問題を解決できる能力
 (2) 専門能力
 a) 物質・エネルギー収支を含む化学工学量論、物理・化学平衡を含む熱力学、熱・物質・運動量の移動現象、反応工学、拡散・機械的分離を含む分離工学、プロセス制御を含むプロセスシステム工学、プロセス設計に関する専門知識、およびそれらを問題解決に利用できる能力 //

はじめに2「化学工学基礎」の内容と「物理化学」における学習事項との関連

参考書：アトキンス「物理化学（上）第一部」（2001,東京化学同人）との関連。

第I部 平衡

1. 気体の性質

完全気体

1. 1 気体の状態

1. 2 気体の諸法則

1. 3 気体の運動論モデル

実在気体

1. 4 分子間相互作用

1. 5 ファンデルワールスの式1. 6 対応状態の原理

2. 第一法則：概念

基本的な概念

2. 1 仕事・熱・エネルギー

2. 2 第一法則

仕事と熱

2. 3 膨張の仕事

2. 4 熱のやりとり

2. 5 エンタルピー

2. 6 断熱変化

熱化学

2. 7 標準エンタルピー変化2. 8 標準生成エンタルピー2. 9 反応エンタルピーの温度依存性

3. 第一法則：方法論

状態関数と完全微分

3. 1 状態関数

3. 2 エンタルピーの温度依存性

3. 3 CvとCpの関係

4. 第二法則：概念

(略)

5. 第二法則：方法論

(略)

6. 純物質の物理的な変態

(略)

7. 単純な混合物

(略)

8. 相図

相・成分・自由度

8. 1 定義

8. 2 相律

2成分系

8. 3 蒸気圧図8. 4 温度－組成図

8. 5 液体－液体の相図

8. 6 液体－固体の相図

9. 化学平衡

(略)

10. 平衡電気化学

(略)

はじめに3化学工学とは

科学技術において工学は「ものづくり」が目的である。（理学の目的は「真理の探究」である。言葉を変えれば、工学は実利指向、理学は真理指向か。）「ものづくり」といってもそれはひとの役に立つモノ、すなわち「売れる製品」でなくてはならない。市場で売れる製品であって初めて産業として成り立つ。工学はその産業の基礎・基盤を提供するものである。

一般に「産業」は「加工組立産業」と「プロセス産業」に大別され、各々様相が異なる。

加工組立産業は自動車や家電製品で代表される機械・機器を提供する産業である。加工組立産業では先ず素材を加工し、部品・パーツを作る。そして、それらを組合せて機能を持つ製品を製造する。その製造には多くの人手が必要である。そのような機械・機器は基本的には限りなく「人工的」に精密化・高度化が可能であり、設計、アイデアおよび製品の機能が競争力となる。加工組立産業での「設計（デザイン）」は製品そのものについてなされる。このような加工組立産業を支える工学が機械工学や電気工学である。

一方のプロセス産業は基本的にはプラスチックや無機物などの素材そのものを提供する産業である。天然原料から化学反応や分離混合操作を利用することで製品を作る。原油を分離精製してガソリンや灯油を作る、水素と窒素を反応させてアンモニアを作るなどである。

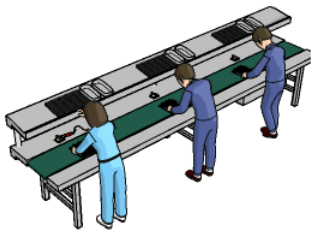
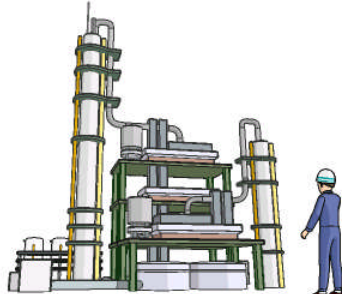
プロセス産業におけるものづくりの原理は「自然現象」であり、その域を出ない。高温・高圧で反応させるといってもそれはあくまで物理化学の範囲内の自然現象を利用しているだけである。加工組立産業のように製品そのものに直接手を加えるのではなく、原料が自然現象を起こす「場」を設定することで、原料を間接的に操作して製品をつくる点に特徴がある。「場の設定」といっても自然現象なのであまり設定できるものはなく、温度、圧力、および他の成分を混ぜることとその混合法程度であ

る。製造工程は原料や生成物を処理（プロセス）するための「場」を提供するものであり，基本的には容器である。しかし，普通は流体を連続処理するために配管と塔槽類で構成される特徴的外観をもつ。

プロセス産業の製品は普通は「素材」なので，製品自体での差別化はできず，産業としての競争力は大量に安定して生産できること，製品の純度，および製造コスト（主に使用エネルギー）に依存する。このようなプロセス産業では，設計（デザイン）の対象は製品そのものではなく，主にプロセス（処理法）となる。これが「プロセス設計」であるが，プロセス設計は個々のプロセス毎に1回限りであることも特徴である。

このような特徴を持つプロセス産業の基盤を提供するのが化学工学である。したがって，

- ①物質の変化・変換に関わる原理を示す物理化学，
 - ②反応を定量的に取り扱う反応工学，
 - ③原料や製品の混合や分離法を考える分離精製工学，
 - ④プロセスを設計・運転するためのプロセス工学
- などが化学工学の要素となる。

(ものづくり)	加工組立産業	プロセス産業
工場の様子	工場内で多くのひとが働く 	原料から最終製品まで物質が装置内を流れる 装置・機器は外から見える ひとはいない 
つくっているモノ	機能を持つもの， 機械， 電気製品 	素材 
設計の意味	製品機能の設計， 構造の設計 (生産工程の設計は副次的)	(モノ(分子)の設計は済んでいる)生産工程・プロセスの設計
工程の特徴	流れ作業	視認性が低い 反応・分離の場を提供しているだけなので， 計測と制御が主体 高温高圧なので高度な安全性が求められる 物質の循環(リサイクル)使用
原理	人工的機能化 精密化	自然現象(物理化学)
基礎学問	主に物理	化学， 物理化学
生産工程の学問	機械工学， 電気工学	化学工学
製品の競争力	アイデア 仕上げ	設備が高額なので大量生産が必要 価格(大量生産)， 純度の保証

第1章 単位と次元, 単位換算法

1.1 数値, 変数と単位

技術者の扱う物理量は数値と単位の積で表示される。数学とは異なり, 工学で使う数値は単位がついて意味を持つので, 計算過程でも常に単位を明記するよう注意しなくてはならない。数値そのもの, オーダー, 単位は等しく重要である。電卓を使用すると数値の桁数を必要以上に多く書きがちだが, (有効) 数字は3桁で良い。計算過程は4桁, 答は3桁をこの講義・演習・試験での原則とする。

数値と変数の記号を明確に区別するため, 数値には [] なしの単位 (例: 300 m/s), 変数の記号には [] つきの単位 (例: u [m/s]) をこの講義での約束とする。記号で示された変数は物理量ではなく, [] で指定された単位で計測したときの数値をあらわしている。(なお, この原則からは「 ρ [kg/m³]=1000」が正しいが, 「 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ 」のようにも使うことにする。)

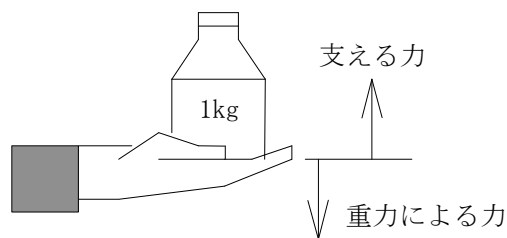
等式においては物理量と変数による数式では式の意味が異なり, 前者は実体のあるもの (例: 鉛筆の長さ) の関係が等しいことを, 数式は変数の「数値」間関係をあらわしている。このことの認識は単位換算で重要となる。

$$\begin{array}{c} 1 \text{ m} = 100 \text{ cm} \\ \updownarrow \\ L [\text{m}] = \frac{1}{100} l [\text{cm}] \end{array}$$

1.2 単位系

技術分野では伝統的に重量(Kg)を基準にした重力単位系が用いられてきた。これは不都合が多いので, 現在は分野を問わず国際単位系 (SI, Le Système International d'Unités) に移行しつつある。しかし旧単位系による過去の遺産は膨大なのでエンジニアは両方を理解しておく必要がある。

単位系の基本は質量と力の認識である。下表に各単位系によるこれらの定義の違いを示す。ポイントは「重量(重さ)」という語であり, これは力のことであるととらえることが肝心である。「瓶が1 kgの重さがある」とは瓶は1 kgの質量があり, $(1 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2) = 9.8 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 9.8 \text{ N}$ に等しい力 (重量 = 重力の力) で地表に引き付けられているとSI的に理解すべきである。



	絶対単位系・国際単位系 (SI)	重力単位系
力の定義	ニュートンの法則の定義 ($F = mg$) による。 加速度が入るので直感的でない。	力と質量の数値が地上で同一になるようにした。直感的にわかりやすい。
質量	kg	$\text{Kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$
力	$\text{Kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2 = \text{N}$ (ニュートン)	Kg , kgf , kgw (キログラム重) (重量)

この両者を混用する工学単位系 (質量にkg, 力にKg) では重力換算係数 g_c が必要となる。特に圧力関係で, SIにおける圧力 P と重力単位系での圧力 P_f の関係:

$$P_f [\text{Kg/m}^2] = (1/g_c) P [\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)] = \text{Pa}$$

また, 例えば流体工学で円管内圧力損失の式 (ハーゲン・ポアズイユ式) が重力単位系の圧力で,

$$\Delta P_f = \frac{32\mu L \bar{u}}{D^2 g_c}$$

と書かれている場合がある。圧力が[Pa]単位であれば g_c は不要である。 g_c は技術計算におけるつまずきの石である。SIによる化学工学分野ではもう出てこないが, 機械工学分野では未だ使われている。もし g_c に直面したらこれが「定数」であることに注意し, 無条件に $9.807 \text{ kg} \cdot \text{m}/(\text{Kg} \cdot \text{s}^2)$ と書き換えるようにすること。

【例題1】力と圧力 密閉した注射器を引く力 F を考える。筒の断面積を 2 cm^2 とすると, (圧力) × (面積) が力

であるから, $F = PA = 1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \times 0.0002 \text{ m}^2 = 20.2 \text{ N}$ 。一方, 地上で 2.1 kg の物体を支える力は, $F = mg = 2.1 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 20.6 \text{ N}$ である。

【例題2】重量と圧力 空気圧 2.0 気圧 の4本のタイヤで質量 1000 kg の自動車を支えているとき, タイヤの接地面積を求めよ。

タイヤ1本当たり, (荷重重量(重力)) = (接地面積) $\times$ (タイヤ内圧力) より,
(接地面積) = $(250 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2) / (202.6 \text{ kPa}) = 0.0121 \text{ m}^2 = 121 \text{ cm}^2$ 。

・SI 基本単位 (国際単位系(SI)(Le Syst`eme International d'Unit`es))

物理量	SI単位の名称	SI単位の記号
長さ	メートル meter	m
質量	キログラム kilogram	kg
時間	秒 second	s
熱力学的温度	ケルビン Kelvin	K
物質の量	モル mole	mol

・SI誘導単位

物理量	SI単位の名称	SI単位の記号	SI単位の定義
面積			m^2
速度			$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
加速度			$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
力	ニュートン Newton	N	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = \text{J} \cdot \text{m}^{-1}$
仕事(エネルギー)	ジュール joule	J	$\text{N} \cdot \text{m} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
仕事率(パワー)	ワット watt	W	$\text{J} \cdot \text{s}^{-1} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$
圧力	パスカル pascal	Pa	$\text{N} \cdot \text{m}^{-2} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} = \text{J} \cdot \text{m}^{-3}$
熱容量			$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

・SI 補助単位

物理量	許容単位	単位の記号
時間	分, 時間, 日, 年	min, h, d, a
温度	セ氏度	$^{\circ}\text{C}$
体積	リットル	l
質量	トン, グラム	t, g
圧力	バー	bar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$)

・SI 接頭語 接頭語は「単位」ではなく「数値」であることに注意 ([kg]の[k]だけは例外)

倍数	名称	記号	倍数	名称	記号
10^{18}	エクサ exa	E	10^{-1}	デシ deci	d
10^{15}	ペタ penta	P	10^{-2}	センチ centi	c
10^{12}	テラ tera	T	10^{-3}	ミリ milli	m
10^9	ギガ giga	G	10^{-6}	マイクロ micro	μ
10^6	メガ mega	M	10^{-9}	ナノ nano	n
10^3	キロ kilo	k	10^{-12}	ピコ pico	p
10^2	ヘクト hecto	h	10^{-15}	フェムト femto	f

10 ¹	デカ deka	da	10 ⁻¹⁸	アト atto	a
-----------------	---------	----	-------------------	---------	---

1.3 分析と測定法の慣例

- ・今後「密度 (density) ρ [kg/m³]」と「比重 (specific gravity) d[-]」は区別し, 「比重」はなるべく使わない。
- ・温度の表記では温度の値も温度差も[K]を使う
- ・圧力については従来単位:[Kg/cm²](キロ), [mmHg], [atm], [torr], [mb] 等と各分野で勝手に使われて混乱のもととなっていた。今後はSI 単位:パスカル[Pa]=[N/m²]に統一される。1気圧は 101.3 kPa。気象では気圧を[hPa]単位であらわすが, 工学では[kPa]での使用を推奨する。

1.4 物理量, 物性値の次元と単位

長さ、質量、温度、などのような物理量の測定の基本概念を次元 (dimension) といい, 次元を表わす手段が単位(unit)である。物理量はその定義にもとずいて次元が一義的に決まるが, その数値および単位は単位系により異なってくる。

【例題3】5 kg + 3 J :これは各項の「次元」が異なるので計算できない。

10 pound + 3 kg :これは「次元」は同じだが「単位」が異なるので計算できない。

なお, 微分記号は単位, 次元に関係ない。 $\frac{dl}{dt} [\frac{m}{s}], \frac{d^2l}{dt^2} [\frac{m}{s^2}]$

物性値などの物理量はその由来する定義により次元と単位が決まる。定義式の左右の次元, 単位は同じであることを利用して式中の変数の単位が決められる。たとえば高分子膜を気体が膜表裏の圧力差により透過する現象を定量的にあらわすには「透過係数 P 」を用いる。単位膜面積あたりの気体透過速度

$J[\text{cm(STP)}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$ は圧力差 $\Delta p[\text{cmHg}]$ に比例し, 膜の厚み δ に反比例する。よって (気体透過速度) $\times$ (膜厚) / (圧力差) で定義される「透過係数 P 」は下表中のような単位と次元を持つ。

輸送物性	単位	由来する定義式
粘性係数 粘度 μ Viscosity	$\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$	ニュートンの法則 $\tau = \mu \frac{du}{dx}$ τ :せん断応力 [N/m ²](=Pa =kg/(m ² ·s ²)) du/dx :速度勾配
熱伝導度 λ	$\frac{\text{J}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}}$ or $\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$	フーリエの法則 $\frac{q}{A} = -\lambda \frac{dT}{dx}$
拡散係数 D_{AB}	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	フィックの法則 $J = -\rho D_{AB} \frac{d\omega_A}{dx}$
膜の気体透過係数 Q	$\frac{\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg}}$	$J = Q \frac{\Delta P}{A \delta}$

【例題4】オリフィス計により管内の流束を測定する場合, 管内の流体の流速 u とオリフィス前後の圧力降下 Δp は次式の関係にある。 $u = c \sqrt{\Delta p / \rho}$

ここで ρ は流体の密度, c は比例定数である。 c の単位はどうなるか。

(解) [Pa]=[N/m²]=[kg $\cdot$ m/s²] $\times$ [1/m²] より単位だけの等式: $\frac{\text{m}}{\text{s}} = ? \sqrt{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \frac{1}{\text{m}^2} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}$

から, $c[-]$ (無次元)。

1.5 単位換算表

単位換算表の同じ行の数値と上の単位をつけて「1 cm=0.01 m」のような等式ができる。

【1】長さ (次元)[L]

cm	m(SI)	ft	(参考)
1	0.01	0.03281	(1 Å(オングストローム)= 10^{-8} cm
100	1	3.281	1 μ(ミクロン)=1 μ m, 1yd(ヤード)=3 ft
2.54	0.0254	0.08333	1 mile=1760 yd=5280 ft=1609 m)
30.48	0.3048	1	

【2】質量 [M]

g	kg(SI)	lb(ポンド)
1	0.001	0.002205
1000	1	2.205
453.6	0.4536	1

【3】力および重量 [MLT⁻²], [F]

kgf, kgw, Kg	lbf	N=m·kg/s ² (SI)	(参考)
1	2.205	9.807	(1dyn=1g·cm/s ²)
0.4536	1	4.4482	
0.1020	0.2248	1	

【4】圧力 [ML⁻¹T⁻²], [FL⁻²]

atm	bar	kgf/cm ²	lbf/in ² =[psi]	mmHg (0°C)	mH ₂ O (4°C)	Pa=N/m ² (SI)
1	1.013	1.033	14.70	760.0	10.33	101300
0.9869	1	1.020	14.50	750.1	10.20	100000
0.9678	0.9807	1	14.22	735.6	10.00	98066
0.06805	0.06895	0.0703	1	51.72	0.7038	6895
0.001316	0.001333	0.00136	0.01934	1	0.01360	133.3
0.09678	0.09807	0.10000	1.422	73.56	1	9806.6
9.869×10^{-6}	1×10^{-5}	1.020×10^{-5}	1.450×10^{-4}	7.501×10^{-3}	10.20×10^{-4}	1

(参考) 1 bar=10⁶ dyn/cm², 1 mmHg=1 Torr(トル) 1 mmH₂O≐1 kgf/m²

【5】仕事, エネルギー, 熱量 [ML²T⁻²], [FL], [Q]

J	kgf·m	l·atm	Btu	kcal _{IT}	kW·h
1	0.1020	0.009869	9.478×10^{-4}	2.388×10^{-4}	2.778×10^{-7}
9.807	1	0.09678	0.009295	0.002342	2.724×10^{-6}
101.3	10.33	1	0.0960	0.02420	2.815×10^{-5}
1055	107.6	10.41	1	0.2520	2.930×10^{-4}
4187	426.9	41.32	3.968	1	0.001163
3.6×10^6	3.671×10^5	3.553×10^4	3412	859.8	1

(参考) 1 erg=1 dyn·cm= 10^{-7} J, 1 W·s=1 V·A·s=1 J

熱化学カロリー: 1 cal_{th}=4.1840 J, 国際カロリー: 1 cal_{IT}=4.1868 J

【6】粘度, 粘性率 $[\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}]$, $[\text{FTL}^{-1}]$

$\text{P}=\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s})$	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{h})$	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$	$\text{lb}/(\text{ft}\cdot\text{s})$	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2=\text{Pa}\cdot\text{s}(\text{SI})$
1	360	0.1	0.06720	0.1
0.002778	1	0.0002778	0.0001867	0.0002778
10	3600	1	0.6720	1
14.881	5357	1.4881	1	1.4881

(参考) $\text{P}=\text{poise}$ (ポアズ, ポイズ)=100 cP(センチポアズ)。 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ は(パスカル秒)と読む。

【7】動力, 工率 $[\text{FLT}^{-1}]$, $[\text{QT}^{-1}]$

kW	$\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{s}$	HP(馬力, 英馬力)	PS(仏馬力)	$\text{kcal}_\text{T}/\text{h}$
1	102.0	1.341	1.360	859.8
0.009807	1	0.01315	0.01333	8.432
0.7457	76.04	1	1.014	641.1
0.7355	75	0.9863	1	632.4
0.001163	0.1186	0.001559	0.001581	1

(参考) $1\text{ W}=1\text{ J}/\text{s}=1\text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$, $1\text{ HP}(=\text{horse power})=550\text{ lbf}\cdot\text{ft}/\text{s}$

【8】温度 (温度の換算は「単位換算」ではなく「目盛り」の変換なので, 単位はつけず数値だけで計算する。)

・絶対温度とセ氏温度: $(^\circ\text{Cで表した温度}) = (\text{Kで表した温度}) - 273.15$

・セ氏(Celsius)温度 $^\circ\text{C}$ とカ氏(Fahrenheit)温度 $^\circ\text{F}$: $(^\circ\text{Cで表した温度}) = ((\text{Fで表した温度}) + 40) \div 1.8 - 40$
 $(^\circ\text{Fで表した温度}) = 1.8 \times (^\circ\text{Cで表した温度}) + 32$

1.6 数値の単位換算法

数値 (数字+単位) の単位換算は「1を作って挿入する」でおこなう。

【例題5】水の粘度1 cP (=0.01) を $[\text{mPa}\cdot\text{s}]$ 単位に換算せよ。($[\text{P}=\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s})]$, $[\text{Pa}\cdot\text{s}=\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})]$, また, c, mは接頭語である。(単位ではない。))

(解)

【例題6】気体定数 R の換算

「高校化学」での気体定数 R の値は, ボイル・シャルルの法則と「1 atm, 0°C (273K)で, 理想気体 1molの体積は

$$22.4\text{ l}」より, \quad R = \frac{pV}{nT} = \frac{1\text{ atm} \cdot 22.4\text{ l}}{1\text{ mol} \cdot 273\text{ K}} = 0.0821 \frac{\text{l} \cdot \text{atm}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

であった. これをSIに換算しなさい。

(解) 単位換算表より, $1\text{ l}=0.001\text{ m}^3$, および $1\text{ atm}=1.013 \times 10^5\text{ Pa}$. これらより「1を作って数値と単位の間」に挿入する。

なお、 $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 = (\text{N}/\text{m}^2) \text{m}^3 = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$ なので、この単位は熱容量 C_p と同じである。気体の体積から導かれる気体定数がなぜエネルギーの次元を持つのであろうか。これは熱力学の基本に関係することであり、講義の後半で取り上げる。

【参考】気体定数のいろいろ・

8.314 $\text{m}^3 \cdot \text{Pa}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	0.7302 $\text{ft}^3 \cdot \text{atm}/(\text{lb-mole} \cdot ^\circ\text{R})$	8.314 $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
0.08314 $\text{l} \cdot \text{bar}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	10.73 $\text{ft}^3 \cdot \text{psia}/(\text{lb-mole} \cdot ^\circ\text{R})$	1.987 $\text{cal}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
0.08206 $\text{l} \cdot \text{atm}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	1.987 $\text{Btu}/(\text{lb-mole} \cdot ^\circ\text{R})$	
62.36 $\text{l} \cdot \text{mmHg}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ($^\circ\text{R}: \Delta ^\circ\text{F} = \Delta ^\circ\text{R}$ とした絶対温度)		

1.7 実験式の単位換算

変数により構成される「式」は、本来左右の次元が同じであり、単位が統一されていれば、単位系によらず成立するものである。しかし、実験式のように係数が式中にあるとその式の単位系により係数が異なる問題が生じる。このような実験式の単位換算(係数の変更)はかなり面倒であり、以下の例で示すが、かなりむづかしい。式ではなく一度数値に直して、数値そのもの(数字+単位)で換算するとまちがいが少ないであろう。

【例題7】水平円柱の外表面からの自然対流伝熱速度が実験式： $\frac{q}{A} = 0.27 \frac{(\Delta t)^{1.25}}{D_o^{0.25}}$

で表わされている。ここで q は単位時間当りの伝熱速度[Btu/h]、 A は円柱の外表面積[ft²]、 D_o は円柱の外径[ft]、 Δt は円柱の表面温度と大気温度との差[°F]である。本式中の各変数をSI単位で表わした新しい実験式を作成せよ。

$$\text{(解)} \quad 1 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} = 1 \left| \frac{1 \text{ J}}{9.478 \times 10^{-4} \text{ Btu}} \right| \left| \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right| \frac{\text{Btu}}{\text{h}} = \frac{1}{3.412} \frac{\text{J}}{\text{s}} \text{ より, } q[\text{Btu/h}] = 3.412 q'[\text{J/s}].$$

$$1 \text{ ft}^2 = 1 \left| \frac{1 \text{ m}}{3.281 \text{ ft}} \right|^2 \text{ ft}^2 = \frac{1}{10.355} \text{ m}^2 \text{ より, } A[\text{ft}^2] = 10.355 A'[\text{m}^2]$$

同様に、 $D_o[\text{ft}] = 3.281 D_o'[\text{m}]$ 、 $\Delta t[^\circ\text{F}] = 1.8 \Delta t'[\text{K}]$ 。よって、実験式にこれらを代入して、

$$\frac{3.412 q'}{10.76 A'} = 0.27 \frac{(1.8 \Delta t')^{1.25}}{(3.281 D_o')^{0.25}} \text{ すなわち, } \frac{q'[\text{J/s}]}{A'[\text{m}^2]} = 1.32 \frac{(\Delta t'[\text{K}])^{1.25}}{(D_o'[\text{m}])^{0.25}}$$

第1章演習問題

【1】「k(キロ)」は1000の意味の接頭語であり、単位ではないのだが、単位を省略して「キロ」で数値を言われることが多い。以下のキロにつき単位を正しく書け。

「東京まで500キロ」、 「200キロは出し過ぎ」、 「80キロ越えた」、 「2.5キロは高すぎ」
「50キロとは強い」

【2】天気予報など気象ではミリ、センチ、メートル、キロが決まった意味で出てくるが、以下を正しく書け。

「雨は6ミリ」、 「雪は6センチ」、 「風は39.1メートル」、 「台風は25キロ」

【3】質量400 t ($m = 400 \times 10^3 \text{ kg}$) のジャンボジェット機は離陸時に $\Delta t = 16$ 秒で $L = 640 \text{ m}$ を走り、時速300 km ($v = 80 \text{ m/s}$) まで加速する。(1) 加速度 a [m/s^2] ($a = v / \Delta t$) を求めよ。(2) この離陸時の力(推力) $F (=ma)$ [N] を求めよ。(3) 離陸に要したエネルギー $E (=FL)$ [J]、(4) パワー $W (=E / \Delta t)$ [W] を求めなさい。

【4】ひとが10 kgの荷物を0.5秒間に1.5 m持ち上げて肩に担ぐ。この動作の力、エネルギー、パワーを求めなさい。

加速度は重力加速度のみと近似する。(力)= $9.8 \times 10 = 98 \text{ N}$, (エネルギー)= $98 \times 1.5 = 147 \text{ J} = 0.035 \text{ kcal}$, (パワー)= $147/0.5 = 274 \text{ W} = 0.27 \text{ kW}$

【5】.管内を流れる流体の摩擦による圧力損失の式は $\Delta p = 2fL\rho v^2 / D$

である。ここで Δp =圧力損失(単位は圧力), L =管長さ, ρ =流体密度, v =流速, D =管径である。SI単位系では摩擦係数 f の単位は何か。

【6】電子の荷電を1Vの電位差で加速したときのエネルギーが1 eV(電子ボルト)である。化学反応の例として炭素C(β)の燃焼反応を取り上げると、炭素C(β)の燃焼熱は1モルの炭素あたり $\Delta H_C = -393.1 \text{ kJ/mol-C}$ である。

アボガドロ数 6.023×10^{23} 個/mol と下の単位換算表を用いて、炭素C(β)1分子あたりの燃焼熱 [J] をeV単位に換算しなさい。

J	eV
1	6.25×10^{18}
1.6×10^{-19}	1

核反応を実験室的におこすには天然の放射性元素の出す α 線を用いる。 α 線1粒子は数100万eVのエネルギーを持つ。上の答えと比較すれば核反応は化学反応の100万倍の規模のエネルギーを持つことがわかる。

【7】. ヒトが食物から摂取する栄養の熱量は一日あたり3000 kcalである。この熱は人体の発する熱として外部に出るが、それは100 W電球何個分か。

【9】 ある気体の膜透過係数 $1.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg})$ を $[\text{mol} \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kPa})]$ 単位に換算しなさい。1 mol=22400 $\text{cm}^3(\text{STP})$

【10】 あるガス井戸の天然ガス生産量が 5 Mscfd と記載されている。このガス生産量(ガス流量)をモル流量 $[\text{mol/s}]$ に換算せよ。ここで, s: standard (標準状態(0°C, 1気圧)でのガスの体積の意味), c: cubic, f: feet, d: day, cfd: $[\text{ft}^3/\text{day}]$ である。1 ft= 0.305 m。本講義の方法でおこなうこと。

【11】多孔質膜の水透過流束 J ($=(\text{透過水量})/(\text{膜面積})/(\text{時間})$)は差圧 Δp に比例し、水の粘性係数 μ に反比例する。ある膜の透過流束が(a)式であらわせたとき、各変数の単位を変更した(b)式の係数 k を求めよ。

$$J \left[\frac{\text{mL}}{\text{cm}^2 \cdot \text{min}} \right] = 50.0 \frac{\Delta p [\text{atm}]}{\mu [\text{cP}]} \quad (\text{a}), \quad J' \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right] = k \frac{\Delta p' [\text{MPa}]}{\mu' [\text{Pa} \cdot \text{s}]} \quad (\text{b})$$

(接頭語 m, c, Mに注意)(粘性係数の単位は $[\text{P}] \equiv [\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s})]$, $[\text{Pa} \cdot \text{s}] \equiv [\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})]$)

【12】CO₂のモル容積 $V_m[\text{dm}^3/\text{mol}]$ と圧力 $p[\text{atm}]$, 温度 $T[\text{K}]$ の関係をこれらの単位でのファンデルワールズ式で表すと

$$\left(p + \frac{3.61}{V_m^2} \right) (V_m - 4.29 \times 10^{-2}) = 0.08206 T$$

である。(アトキンス, p. A37) 変数の単位をモル容積 $V'_m[\text{m}^3/\text{mol}]$, 圧力 $p[\text{MPa}]$ としたときはこの式はどうなるか。

【筆記演習レポート1】(A4 レポート用紙で提出)

演習問題【1】と【2】と【3】を解答せよ。

【Excel 演習レポート 1】(Excel シートをプリントして提出)

テンプレートファイル<bce01_temp.xls>をもとに, 下の単位換算シートを完成して, 1 ページ目をプリントして提出せよ。

	A	B	C	D	E	F	G
1	エネルギーの単位換算表						換算係数
2	1	cal	=	4.187	J	=A2*G2	4.187
3	1	J	=	0.2388	cal		0.2388
4	1	Btu	=	1055	J		1055
5	1	kWh	=	3.60E+06	J		3.60E+06
6	1	eV	=	1.6E-19	J		1.60E-19
7							
8	温度の換算						
9	77	° F (力氏温度)	→	25	°C	=1.8*A10+32	
10	25	°C (セ氏温度)	→	77	° F		
11							

演習解答

【11】

$1\text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}) = 600\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ より $J = (1/600)J'$ 。 $1\text{ atm} = 0.1013\text{ MPa}$ より $\Delta p = (1/0.1013)\Delta p'$ 。
 $1\text{ cP} = 0.001\text{ Pa} \cdot \text{s}$ より $\mu = (1/0.001)\mu'$ 。これらより $k = 296$ 。

【12】

係数の単位は $3.61\text{ atm} \cdot \text{dm}^3/\text{mol}^2$, $4.29 \times 10^{-2}\text{ dm}^3/\text{mol}$, $0.08206\text{ atm} \cdot \text{dm}^3/(\text{mol} \cdot \text{K})$ である。これらを個々に単位換算すると, $3.61 \times 10^{-7}\text{ MPa} \cdot \text{m}^3/\text{mol}^2$, $4.29 \times 10^{-5}\text{ m}^3/\text{mol}$, $8.31 \times 10^{-6}\text{ MPa} \cdot \text{m}^3/(\text{mol} \cdot \text{K})$

なので, $(p' + \frac{3.61 \times 10^{-7}}{V_m'^2})(V_m' - 4.29 \times 10^{-5}) = 8.31 \times 10^{-6} T$