

2

物質とは何か

私たちは、あらゆる物質の性質、あるいは物質の変化の様子を巨視的（マクロ）な視点に立って認識している。しかし、いろいろな物質の織りなす現象がなぜ、どのような仕組みで起こるのかということを理解するためには、あらゆる物質を微視的（ミクロ）な視点から「見て」いかななくてはならない。このような見方によって初めて、物質の性質、さまざまな現象の本質が明らかになるのである。

まずこの章では、微視的に見たとき、物質というものはどのように構成されているのかということを考えてみたい。例として、身近な物質であるアルミニウム、食塩、水、エタノールを取り上げよう。

2-1 物質は何からできているか

微視的に見ると、どんな物質でも、ある微細な粒子の集まりである。しかし、その粒子の種類や粒子の集まる仕組みは、物質の種類によって異なっている。

水という物質をどんどん細かいところまで見ていくと、同じ形をした粒子がたくさん集まってできていることがわかる。この粒子が水分子という粒子であり、水という物質を構成する最小の単位となっている。水と同様、分子が最小単位である物質は数多くある。分子の形や大きさは、それぞれの物質の分子に特有なものである。

これに対し、塩化ナトリウム（食塩）という物質は、微視的に見れば正の電荷を持つナトリウムイオン (Na^+) と、負の電荷を持つ塩化物イオン (Cl^-) という2種類のイオンが同じ数だけ集まってできている。このよう

に、イオンという粒子から構成される物質もある。その構成単位であるイオンには、正のイオン（陽イオン）と負のイオン（陰イオン）があり、巨視的に見たとき全体では電氣的に中性となっている。

さらに、原子という粒子がその最小の構成単位になっている物質がある。たとえば、鉄、金、銀、銅のような金属は、それぞれ鉄原子、金原子、銀原子、銅原子という粒子が規則正しく並んで構成されている。

水 100 mL とエタノール 100 mL を混ぜ合わせると、この混合物の体積は両者の合計 200 mL より小さく、194 mL ほどにしかならない。これは、水とエタノールがともに分子という粒子からなっており、これら大きさと形の違う 2 種類の分子が、互いに隙間を埋め合うように混じり合う結果であると解釈できる。

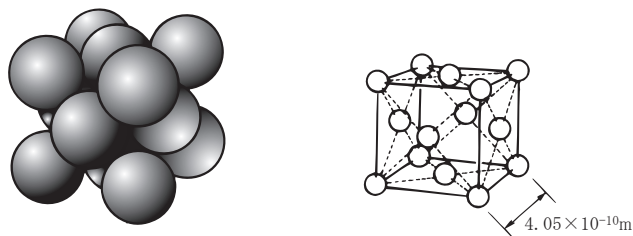
これまでの説明で、あらゆる物質はきわめて微細な粒子の集合体であることが明らかになった。これらは、その最小単位となっている粒子の種類の違いによって、次の 3 つのタイプに分けられる。それぞれの物質の性質は、それを構成する最小単位の粒子の性質を反映している。

- ① 分子が最小単位である物質
- ② イオンが最小単位である物質
- ③ 原子が最小単位である物質

これら 3 つのタイプの物質について、それぞれ、もう少し詳しく調べていこう。説明のために、原子が最小単位である物質、イオンが最小単位である物質、分子が最小単位である物質、の順に見ていくことにする。

2-2 原子が最小単位である物質

アルミ箔や一円玉などに使われているアルミニウムという金属は、巨視的に眺めれば銀白色の光沢を持つ物質である。そして、常温で比重 2.7、融点は 660°C で、塩酸などの酸と反応すると水素ガスを発生して溶ける、という性質をもっている。一方、微視的にこのアルミニウムを眺めてみると、固体の状態ではアルミニウム原子が図 2-1 のように規則正しく際限なく並んでできていることがわかる。アルミニウム原子は非常に小さな粒子

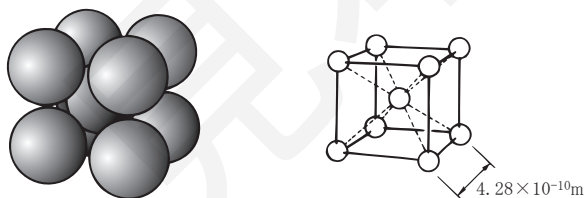


(a) アルミニウム原子が並んでいる様子 (b) 骨格模型で表したもの。原子の並び方が理解できる。

図 2-1 アルミニウム (Al) の結晶構造



図 2-2 アルミニウム原子の大きさ



(a) ナトリウム原子が並んでいる様子 (b) 骨格模型で表したもの

図 2-3 ナトリウム (Na) の結晶構造

で、約 2.2×10^{22} 個のアルミニウム原子が集まって、1 g (一円玉 1 個分) のアルミニウムができあがる (図 2-2)。

また、ナトリウムという金属は、ナトリウム原子が図 2-3 のような形で規則正しく限りなく並んでできている。一般に、金属は単一の原子が、ある一定の規則に従って集まってできた物質である。なお、原子が最小単位である物質を表すには、それを構成する原子の元素記号を使う。つまり、アルミニウムは Al と書き、ナトリウムは Na と書き表す。

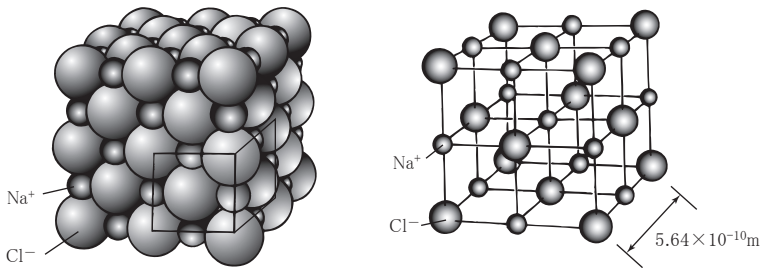
原子？ 元素？

前の文では、「アルミニウム」という言葉は、アルミニウムという金属の物質を指している。ところが、アルミニウム原子を指す場合にも、単に「アルミニウム」ということがある。さらに、「地中にはアルミニウムが多く含まれている」と言った場合は、「アルミニウム」という語は元素を示している。同様に、「骨を丈夫にするために、カルシウムをとらなければならない。」と言ったとき、「カルシウム」という語は元素を指している。したがって、アルミニウム原子や、元素としてのアルミニウムと区別するため、物質としてのアルミニウムを、特に「金属アルミニウム」とよぶことがある。

また、「水は酸素と水素からできている。」と言った場合、「水の分子（化合物）は、酸素原子と水素原子が結合して成り立っている。」「水という物質を作っている成分は、酸素という元素と水素という元素である。」という2つの解釈が成り立つ。このように、ある1つの言葉が、物質全体（そのもの）を意味したり、1粒の原子や分子を意味したり、元素を意味したりすることがある。それぞれの場合で、明確に区別することが重要である。

2-3 イオンが最小単位である物質

金属を作っている粒子の最小単位は原子であった。これに対し、原子そのものではなく、正の電荷をもつ陽イオンと負の電荷をもつ陰イオンが、物質を構成する粒子の最小単位となっているものがある。たとえば、塩化ナトリウム（食塩）の結晶は、同数のナトリウムイオン (Na^+) と塩化物イオン (Cl^-) が異種の電気間に働く吸引力で結びついて集まってできている。結晶状態では、これら2種類のイオンは、前後、左右、上下方向に交互に規則正しく限りなく並んでいる（図2-4）。



(a) Na^+ と Cl^- が交互に並んでいる様子 (b) これらイオンの位置関係をわかりやすく示すため、(a)の四角で囲った部分を骨格模型で表したもの

図2-4 塩化ナトリウム (NaCl) の結晶構造

5

物質はどのように存在しているか

いままで、物質をきわめて小さな粒子としてとらえることについて学んできたが、私たちは実際には、物質を、固体や液体や気体といった人間の五感によって区別できるような巨視的（マクロ）な視点から認識している。では、微視的（ミクロ）に見たとき、固体や液体や気体とはどういう状態なのであろうか。また、物質は他の液体物質に溶けこんで、巨視的に見て均一な状態、すなわち溶液として存在している場合もある。この状態はどのようにとらえたらよいのであろうか。この章では、物質の存在状態を微視的な観点と巨視的な観点の両面から眺めていくことにしよう。

5-1 物質の三態

あらゆる物質は、基本的に固体か液体か気体かの三態のうちのいずれかの状態で存在している。これら物質の三態を、微視的な観点から眺めてみよう。図 5-1 は、それぞれの状態を模式的に示したものである。

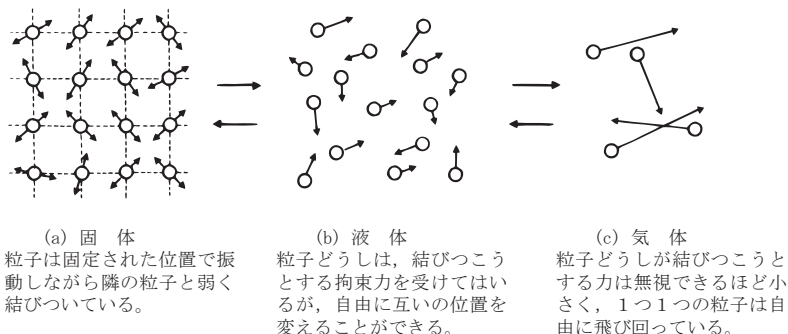


図 5-1 微視的にみた物質の三態

ここに示したような粒子運動は**熱運動**と呼ばれ、温度が高くなるほど激しく、温度が低くなると穏やかになる。したがって、温度をどんどん下げていくと、熱運動がまったく起こらなくなってしまうことになる。つまり、温度には下限がある。その温度は、すべての物質で同じで、 -273.15°C であり、これは**絶対零度**と呼ばれる。分子が熱運動をしていることは、部屋の片隅に置いた芳香剤の分子が部屋中に**拡散**することや（図5-2）、水の中に静かに落としたインクが拡がっていき、ついには均一な溶液になることからわかる。

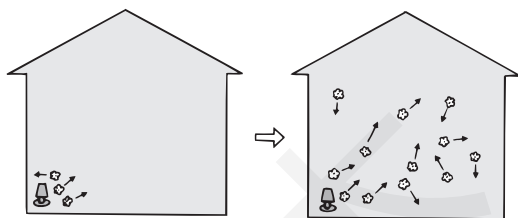


図5-2 芳香剤分子の拡散

分子間には互いに引き合う力^{*1}が働いており、そのために分子どうしバラバラにならずに、固体や液体としてまとまって存在することができる。しかし、温度が高くなって熱運動が激しくなり、この力に打ち勝つようになると、分子はバラバラになって気体の状態になる。つまりこのような分子どうしの結びつきは大変弱く、わずかの熱エネルギーで切れてしまう。分子内の原子どうしを結びつけている共有結合に比べ、はるかに弱い。

5-2 気 体

5-2-1 気体の状態方程式—巨視的な取り扱い

気体について巨視的にとらえるときまず考えなければならない要素は、圧力^{*2}、温度、体積、物質質量などの物理量である。これらの量の関係につ

*1 無極性分子間に働くファン・デル・ワールス力などの分子間力や、水素原子を介して結合する水素結合などがある。分子間に働く力の強さは物質によって異なり、そのため沸点や融点は物質によって違う。詳しくは後に述べる。

*2 圧力の単位には atm（気圧）、mmHg、Pa（パスカル）などがある。気象情報では、hPa（ヘクトパスカル）という単位が用いられる。1 atm = 760 mmHg = 101325 Pa = 1013.25 hPa

いては、「気体の体積は圧力に反比例する」（ボイルの法則）、「気体の圧力は絶対温度に比例する」（シャルルの法則）という法則があるが、これらをまとめて**気体の状態方程式**（5-1 式）で表すことができる。

$$PV = nRT \quad (5-1)$$

ここで、 P は気体の圧力、 V は気体の体積、 T は気体の絶対温度、 n は気体分子の物質量を表す。 R は気体定数と呼ばれ、その値は $0.082 \text{ atm} \cdot \text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ である。

気体の状態方程式は、気体の種類に無関係に近似的に成立する。これは、気体の分子が飛び回っている空間が、分子自身の体積に比べて非常に大きいため、分子の種類が異なっても、同じ物質量の気体分子の占める体積がほとんど同じであるからである。しかし、厳密には分子自身の体積の影響を無視することはできないので、実在の気体は上の状態方程式にあてはまらない^{*1}。そこで実在の気体にあてはまるように近似を高めた式としてファン・デル・ワールスの式（実在気体の状態方程式）が使われる。

$$(P + n^2a/V^2)(V - nb) = nRT \quad (5-2)$$

(5-2) 式は (5-1) 式の P と V のかわりに補正した項が使われている。その中の a や b は気体の種類に特有の定数である。

5-2-2 気体の分子運動論—微視的な取り扱い

気体の温度、圧力などの巨視的な性質は、すべて気体分子の微視的な運動の集積として解釈することができる。気体の持つ熱エネルギーは、分子の運動エネルギーの総和であるとみなせる。つまり、気体の分子は温度が高いほど激しく分子運動をしている。また、気体の圧力は分子が運動して壁面に衝突するとき、壁面に与える力の集積である。このような気体分子の巨視的な物理量の関係は、前節で見たように気体の状態方程式で表されるが、これを分子運動論によって解釈してみたらどのようなになるであろうか。図 5-3 を見てみよう。状態方程式によれば気体の圧力は絶対温度に比例するが、このことは気体の分子運動が、温度が高くなるほど激しくなる

*1 (5-1) 式を満足する仮想的な気体は**理想気体**と呼ばれる。

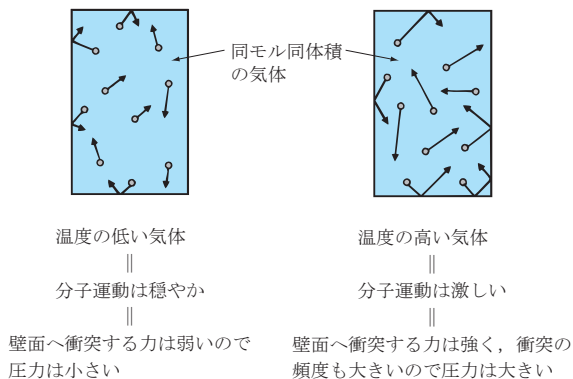


図 5-3 気体の圧力と温度の関数の分子運動論的解釈

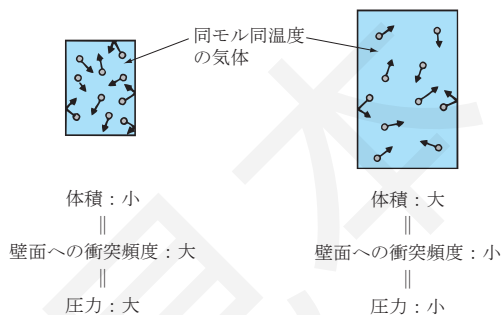


図 5-4 気体の圧力と体積の関数の分子運動論的解釈

ということで理解できる。また、気体の圧力が体積に反比例することも、図 5-4 のように分子運動論で解釈できる。すなわち、温度が一定で気体分子の動きは変わらなくても、体積が、たとえば 2 倍になれば壁面への衝突の頻度は $1/2$ になるので圧力は $1/2$ になる。

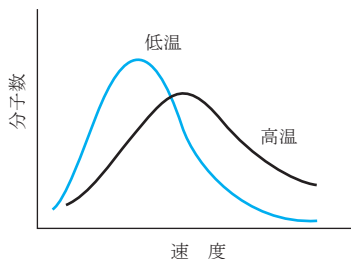


図 5-5 気体の分子運動の速度分布

8

酸化と還元

基本的な化学反応の1つである酸化と還元は、私たちの身近な所でひんぱんに起こっており、私たちの生活にさまざまな影響を与えている。たとえば、ものが燃えるという現象はすべて酸化であるし、動物が食物を摂取して、それが体内で代謝される過程にも酸化・還元が関与している。家庭や工場で使われる漂白剤は、酸化や還元により、色を持つ物質を色を持たない物質に化学変化させる薬品である。また、油が酸化するとか食品に酸化防止剤が入っているとか、酸化という言葉は身近によく聞かれる。このように重要な役割を果たしている酸化・還元とはどのような反応であろうか。

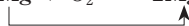
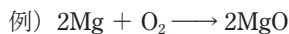
8-1 酸化とは、還元とは

酸化とは、古くは酸素と化合することとされていたが、水素を失うことや電子を失うことも、物質が酸素と化合することと類似の変化であるので、これらの変化もすべて酸化というようになった。すなわち、酸化とは狭い意味では次の①の反応のことであるが、広い意味では①～③の変化のことである。

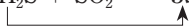
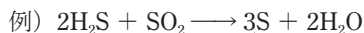
酸化とは分子や原子やイオンなどが

① 酸素と化合すること

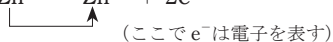
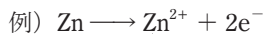
(酸素原子を得ること)



② 水素原子を失うこと



③ 電子を失うこと

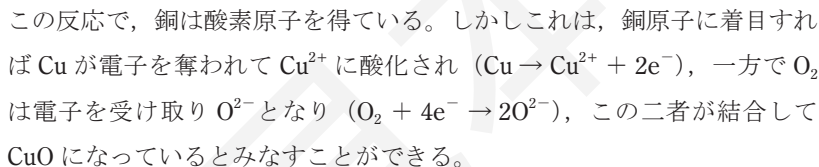


① 酸素原子を失うこと 例) $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} \longrightarrow 2\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$

② 水素原子と結合すること 例)
$$\begin{array}{c} \text{N}_2 + 3\text{H}_2 \longrightarrow 2\text{NH}_3 \\ | \qquad \qquad \qquad \uparrow \end{array}$$

③ 電子を得ること 例) $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \longrightarrow \underset{\uparrow}{\text{Cu}}$

上で酸化・還元は、①酸素の授受，②水素の授受，または，③電子の授受を伴う反応であることを述べたが，①と②の場合は③の場合の中に入れて説明することができる。銅 (Cu) の酸素 (O_2) による酸化銅 (Ⅱ) (CuO) への酸化を考えてみよう。


$$\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{S} \longrightarrow 2\text{HCl} + \text{S}$$
$$\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{Cl}^-$$

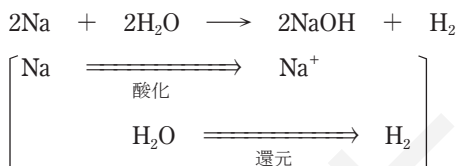

このように、一般に酸化と還元はすべて電子の移動を伴う変化である。もう少し具体的にいうと、ある分子やイオンや原子が電子を失う場合、それは酸化されたことになり、ある分子やイオンや原子が電子を得た場合、それは還元されたことになる^{*1}。

<https://www.sankyoshuppan.co.jp/>

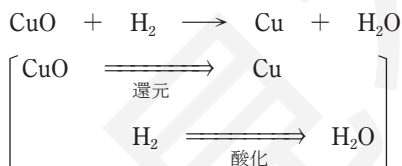
8-3 酸化と還元は同時に起こる

酸化反応や還元反応は、電子の授受を伴う反応である。したがって、電子を放出するものと、その電子を受け取るものが必ず同時に存在する。つまり、酸化反応が起これば同時に還元反応も起こる。具体的な反応例を取り上げて詳しく述べてみよう。

金属ナトリウム (Na) と水 (H₂O) との反応においては、Na は電子を放出して Na⁺ に酸化される一方で、H₂O は酸素を失い水素ガス (H₂) に還元されている (H₂O の H⁺ が電子を受け取っていると考えてもよい)。



また、次の反応でも、CuO の Cu への還元と H₂ の H₂O への酸化が同時に起こっている。



酸化数

酸化還元反応において、着目したある原子が酸化されたか還元されたかを簡単に判定するために、**酸化数**を利用する方法がある。酸化数とは、原子がどれだけの酸化状態にあるかを示した数で、+の側にいくほど高い酸化状態にあることを示す。ある原子の酸化数が増えたとき、その原子またはその原子を含む化合物は酸化されたことになり、酸化数が減少すれば還元されたことになる。酸化と還元は同時に起こるので、1つの酸化還元反応において酸化数の増加数と減少数は等しい。

(酸化数の決め方) ~次の順序で決めていく

- ① 単体の原子 : 0
- ② イオン : そのイオンの価数
- ③ 化合物中の酸素原子 : -2(ただし、H₂O₂ などの過酸化物の場合は-1)
- ④ 化合物中の水素原子 : +1(ただし、NaH, CaH₂ などの金属水素化物の場合は-1)

9

生活と化学物質

私たちの身のまわりには、近年の化学工業で産み出されている物質だけでなく、食品や天然繊維など、もともと自然界に存在している物質も含め、多くの物質が存在する。これらの物質は、さまざまな形で私たちの生活に貢献している。日頃なにげなく接しているこれらの物質を、今まで学んできたような分子・原子のレベルにまで立ち入った微視的な視点でとらえ、化学的な理解をすることは、物質を知り、使っていく上でたいへん重要なことである。前章までで説明してきた知識や考え方をもとに、身近な物質と、それらが織り成す現象や変化の本質について考えてみることにしよう。

9-1 界面活性剤

まず、**界面活性剤**という物質を取りあげてみよう。この物質はセッケンや合成洗剤の成分として汚れを落とす役割を果たしたり、普通は混じりあわない油と水を、細かいつぶ状に**分散**して混じり合った状態（このような状態にすることを**乳化**という）にさせることができる。市販のフレンチドレッシングは油と水が分離しているものもあるが、界面活性剤が入って乳化しているタイプのものもある。また、卵黄の中にはレシチンという界面活性剤が含まれているので油脂と卵は混じりあうことができ、マヨネーズとなるのである。このように生活になくてはならない界面活性剤とはどんな物質なのだろうか。また、なぜこのような働きをするのだろうか。

9-1-1 界面活性剤とは

水滴は、同体積なら最も表面積の小さい形、すなわち球形になろうとす

る傾向を持っている。このことからわかるように、液体の表面（液体と気体の界面）では、その表面積をできるだけ小さくしようとする力（表面張力）が働く。ところが、分子内に親水性部分と疎水性部分を同時に持つような物質を加えると、水の表面張力は著しく低下する。このような物質は界面活性剤と呼ばれ、洗剤、乳化剤、起泡剤等のさまざまな用途に使われる。

9-1-2 界面活性剤の化学構造

代表的な界面活性剤であるセッケンを例にとって、界面活性剤の化学構造を考えてみよう。図9-1にセッケンの分子模型^{*1}を示した。この分子の左側は、炭素原子と水素原子のみからなる炭化水素の骨格から成り立っており、その端（図では右）に COO^- が結合している。炭化水素骨格の部分は疎水性であり、 COO^- の部分はイオンであるので親水性である。このように界面活性剤の分子は、**疎水性部分**と**親水性部分**をあわせもつ構造をしており、模式的に図9-1の下図のように表すことができる。一般に界面活性剤の疎水性部分は主に長鎖の炭化水素の骨格から成っており、親水性部分は、イオン性の官能基や極性の高い部分から成っている（5-5-2節, p.73

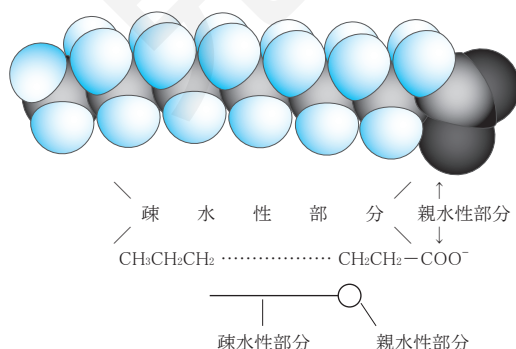


図9-1 界面活性剤の一種、セッケンの分子模型（上）、化学式（中）と一般的な界面活性剤の化学構造の模式図（下）

*1 非イオン界面活性剤以外は、水中で電離するので、厳密には分子ではなくイオンというべきである。

参照)。炭化水素部分が疎水性であることは、炭素原子と水素原子のみからできている物質である、ろうそくのろうやガソリンなどが、水とは混じらないことからわかる。

9-1-3 水中における界面活性剤

界面活性剤を水に加えていった場合を考えてみよう。界面活性剤の分子は水中にも散らばって行くが、その疎水性部分は水分子からなるべく遠ざかろうとするため、疎水性部分を水の外側（空気の側）に向け、親水性部分を水の方に向けて、表面に集まろうとする（図 9-2 (a)）。水の表面張力は表面の水分子間に働く力によるものであり、水の表面に界面活性剤の分子が並ぶことによって、この力が部分的に断ち切られるため、界面活性剤の溶けた水溶液の表面張力は低下する。さらに、界面活性剤の濃度を高めていくと水中にバラバラに散らばっていた界面活性剤の分子は、その疎水性部分が直接水分子と接するのを避けようとするため、疎水基が内側になるように寄り合い、親水基を外側（水の側）に向けた、図 9-2 (b) のような形の**ミセル**という集合体を作るようになる。ミセルの内部は疎水性の油性物質を取り込むことができるので、界面活性剤は可溶化作用を示す。

さらに、界面活性剤分子は、図 9-2 (c) のように、油滴を取り囲んで、水中に分散（O/W 型，oil in water 型の分散）させることができるので、乳化や洗浄の作用を持つ。また、図 9-2 (d) のように疎水性溶媒の中で、水滴を取り囲んで分散（W/O 型，water in oil 型の分散）させることもできる。

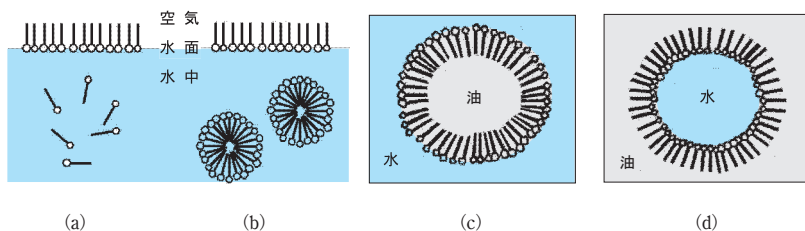


図 9-2 界面活性剤分子の振る舞い