



Title	高等学校における高分子の教育内容構成
Author(s)	西出, 雅成
Citation	教授学の探究, 15, 95-106
Issue Date	1998-03-05
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13608
Type	departmental bulletin paper
File Information	15_p95-106.pdf



高等学校における高分子の教育内容構成

西 出 雅 成

(北海道大学大学院教育学研究科修士課程)

0. はじめに

今日利用されている生活用品のほとんどが人工的に合成されたものである。機能が日常生活の便利さを生み、我々の生活を豊かにしてきた。しかし、これら生活用品もなかなか再利用されることなく、簡単に使い捨てる時代を築いてしまった。

このような背景をもとに、高等学校化学における高分子の取り扱う内容も、しだいにその範囲を広げている。たとえば東京書籍・実教出版などの高等学校化学IIの教科書では、数百倍もの水を吸収できる「高吸水性ポリマー」や光線によって変化する「感光性樹脂」および微生物によって分解されるプラスチックなどが取りあげられている。これら機能性高分子¹⁾と呼ばれるものや廃棄物としてのプラスチックを今後どう利用するかといった問題を含めて、取り扱う内容が広がっている。また、生命科学の発展とともに、教科書では参考などでタンパク質の構造について詳しく取り扱う傾向がみられる。

本稿は、これら日常生活と密接な関係にある高分子の教育内容を学習者(生徒)に正しく理解させるために整理したものである。

1. 現行の高分子の取り扱いと未整理な問題

現行の学習指導要領²⁾における高分子の扱いは、化学IAでは「生活の化学」の中でプラスチック・食品・衣料の成分として取り扱われている。また「化学の応用と人間生活」の中でも最近の技術の発展の例として取りあげられている。化学IBの内容では、有機化合物の章でエチレンなどにおける重合反応の例として取りあげられている。(図1)しかしその扱いは、高分子を単に分子量の大きい分子として定義し、断片的に取り扱っているのにすぎない。ま

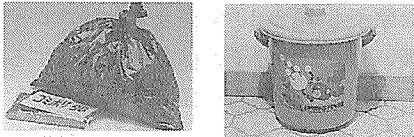
■ ポリエチレンとポリ塩化ビニル ■

エチレンを適当な条件下で反応させると、エチレン分子が次々と付加反応をくり返して、ポリエチレンを生じる。

$$n \begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ | & | \\ \text{C} = & \text{C} \\ | & | \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \longrightarrow \left[\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ | & | \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ | & | \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$$

エチレン ポリエチレン

ポリエチレンは、パケツのような容器や袋、シートなどの製品として用いられる。



エチレンの反応

CH_3CH_3 エタン	$\xrightarrow{\text{H}_2}$ 付加	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ エタノール	$\xrightarrow{\text{HCl}}$ 付加	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{Cl}$ クロロエタン	
$\text{CH}_2\text{BrCH}_2\text{Br}$ 1,2-ジブロモエタン	$\xrightarrow{\text{H}_2}$ 付加	$\text{CH}_2 = \text{CH}_2$ エチレン	$\xrightarrow{\text{H}_2\text{O}}$ 付加	重合	ポリエチレン $\left[\text{CH}_2 - \text{CH}_2 \right]_n$
$\text{CH}_2\text{ClCH}_2\text{Cl}$ 1,2-ジクロロエタン	$\xrightarrow{\text{H}_2}$ 付加	$\text{CH}_2 = \text{CHCl}$ 塩化ビニル	$\xrightarrow{\text{H}_2}$ 付加	重合	ポリ塩化ビニル $\left[\text{CH}_2 - \text{CH} \begin{array}{c} \\ \text{Cl} \end{array} \right]_n$

エチレンの反応

ポリエチレンのように分子量の大きい分子を高分子といい、多数の分子が結合して分子量の大きな分子をつくる反応を、重合という。付加反応で進む重合は、付加重合と呼ばれる。

ポリ塩化ビニルは、塩化ビニル $\text{CH}_2 = \text{CHCl}$ 分子が付加重合した高分子で、ビニルシート、パイプ、電気の絶縁材料などに使われている。

図1 化学IBにおける取り扱い例 (東京書籍 新編化学IB)

第2編 高分子化合物	
I 天然高分子化合物48~77	実験4. 糖類の性質72
1. 高分子化合物.....48	実験5. タンパク質の性質74
高分子化合物の特徴 高分子化合物の構造	I章のまとめ75
2. 多 糖.....50	I章の問題77
糖類の分類 単糖 二糖 デンプン セルロース	II 合成高分子化合物78~98
セルロースの誘導体 レーヨン	1. 合 成 繊 維.....78
3. タンパク質.....59	縮合重合と付加重合 縮合重合による合成繊維
タンパク質を構成するアミノ酸 アミノ酸の構造と性質	付加重合による合成繊維
タンパク質の構造と種類 タンパク質の変性	2. 合 成 樹 脂.....83
タンパク質の呈色反応 酵素	熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂 縮合重合による合成樹脂
4. 天 然 ゴ ム.....68	付加重合による合成樹脂 イオン交換樹脂
生ゴム 加硫	3. 合 成 ゴ ム.....89
5. 無機高分子化合物.....70	ジエン系ゴム オレフィン系ゴム シリコンゴム
二酸化ケイ素 ケイ酸ナトリウムとケイ酸	4. 石油化学と合成高分子化合物.....91

図2 化学IIにおける取り扱い例 (数研出版 化学II)

りのある内容としては、化学I Bを履修したあとに選択させる化学IIの中に明示されている。(図2)

現行の問題として未整理な点がいくつか指摘できる。その一つが高分子そのものの定義である。化学I A・I B・IIに見られる多くは、「高分子は小さな分子が多数つながったもの」あるいは「多数の原子が共有結合によって結びついた分子」と定義され、分子量が1万以上のものとして結んでいる。次にこのような高分子からなる化合物として、デンプン・タンパク質・ナイロン・ポリエチレン・ゴムなど身近な例をあげている。これらはとくに間違っているというのではないが、実際に分子量が1万程度に達したものを学習者(生徒)は、どうイメージするのであろうか。予測されることは、当然身近に存在するプラスチックなど目に見える大きさの高分子(マクロな物質)を思い浮かべるであろう。しかし、分子量1万程度では決して肉眼では見えない。この点について定義は、適切さを欠いている。このままでは分子量1万程度の高分子とその高分子からなるマクロな物質(プラスチックなど)の違いを曖昧にしたまま学習を進める危険性がある。

また、高分子の用語には「ポリマー」という用語が比較的頻繁に用いられている。この定義は、「繰り返り返し単位のある重合体」である。化学IIに見られる分類からすると天然高分子よりも合成高分子に適した用語として解釈されやすい。そこで天然高分子も含めて「ポリマー」でよいのかという用語上の疑問が生じる。それに対して各教科書の記述には曖昧さがある。この点などは、学習者(生徒)が素朴にいただく疑問として指摘できるのではないか。

さらに高分子の登場は、化学I A・Bの中では漠然と出てきている。本来、高分子の性質からみれば分子コロイドにおける取り扱いからもっと明確にするべきである。しかし、現行のコロイドの取り扱いでは、高分子の定義を曖昧にしたまま、チンダル現象、ブラウン運動、電気泳動、透析、凝析、塩析などのコロイドとしての性質に主眼がおかれ、それ以上の発展性をもたらさない。本来コロイドの意味するところは、どんな原子も $10^3 \sim 10^9$ 個集合すればコロイド性状を示し、その適用範囲の広さにある。現行の取り扱いでは、高分子の存在を曖昧にするだけでなく、コロイド自体の内容にも単に暗記的・羅列的内容となる傾向が強いと感じる。

これらは、高分子の教育内容においてどこを焦点化して構成すべきか、いまだ未整理な問題が存在するためと考える。この点をふまえ、高分子の歴史においてStaudingerの高分子説で提

唱された巨大分子 (Makromolekül) の考え方について考察を加える。

2. 高分子の歴史

高分子の歴史をあらたまって考えるとそれは古くてかつ新しい。高分子は古代より食物・衣服・住居に利用し、また時代とともに人類が次々と新しい加工技術を開発し、今日の合成繊維・プラスチック・ゴムを生み出してきた。人類が天然のものを改質し、これらを合成する歴史は19世紀の半ばから顕著である。それについて主なものを列挙する³⁾

1493年：C. Columbus (It) ハイチ島でゴムの発見

1800年代：植民地時代 (価値のないものから価値のある新物質の生産)

例：ラック貝の虫の分泌物(シェラック)⇒ワニス、絶縁体、レコードとして使用の
ち A. V. Bayer (G) がフェノールとホルマリンから合成し、シェラックと命名

1819年：T. W. Hancock (E) ゴム工場をつくる

38年：V. Regnault (Fr) ポリ塩化ビニルの光による合成
(記録上から約百年忘れられ、のちに高分子と判明)

39年：E. Simom (G) ポリスチレンの合成
(天然バルサムからスチレンモノマーを重合、のちに高分子と判明)

44年：C. Goodyear (Am) 加硫法の特許

47年：J. J. Berzelius (Swe) 酒石酸とグリセリンの縮合物(ポリエステル)から紡糸能
をもつことを報告

68年：J. W. Hyatt (Am) セルロイドの合成
(象牙以外のものでも玉突きの玉をつける懸賞に応募)

72年：A. V. Bayer (G) シェラック(フェノール樹脂)の発見
(しかしてきた樹脂に注目せず)

88年：J. B. Dunlop 空気入りタイヤの発明

1901年：O. Rohn (G) アクリルモノマーの重合法発見

07年：L. H. Baekeland (Am) ベークライト(フェノール樹脂)を発明
～08 (おがくず・木綿くずを利用)

10年：S. V. Lebedev (Ru) ブタジエンより重合物をつくる
(低分子物質からゴムをつくれることを暗示)

13年：F. Klatte (G) ポリ酢酸ビニル、ビニル化合物の重合法の発見

1914年：日本でベークライト製造・アセチレンから塩ビモノマー合成 (IG社)

28年：ブタシエンとスチレンの共重合

(タイヤ用ブナSの製造) (I. G. Farben 社)

29年：ポリスチレンの量産 (I. G. Farben 社)

30年：乳化重合によるポリ塩化ビニルの工業化 (IG 社)

31年：W. H. Carothers (Am) ネオプレンの合成 (DuPont 社)

W. H. Carothers (Am) ナイロンの系統的縮合重合

以上のことから19世紀半ばから20世紀初頭にかけては、まさに「合成の歴史」であり、彼らの関心は各々の合成過程でできたものの存在よりも、合成ゴムの成功にみられるように天然産物の不足分を賄う目的で、類似した機能・性能をもつ材料をいかに人工的につくるかに注がれていたと考える。その証拠に産業界では、今だに「高分子」とか「巨大分子」という言い方より、「樹脂 (resin)」という方が愛着があるとされている⁴⁾

一方、高分子科学の発達の歴史では Staudinger の高分子説が中心である。その回顧録⁵⁾ の中では、コロイド性状をもつものに対して、ミセル説 (粒子の小集合) を提唱する科学者等との見解の相違を述べている。そこで、これらコロイド性状をもつものの中に、非常に大きな分子が存在することをゴムの水素添加に関する研究より証明し、はじめて巨大分子 (Makromolekül) の考え方を提唱している。(1922年)

それまでの経緯についてコロイド科学との比較から主なものを列挙する⁶⁾

1831年：T. Graham (E) 溶液中の物質の拡散速度の違いから結晶質・非晶質 (にかわ状物質を区別、はじめてコロイドの名称を用いる

33年：J. J. Berzelius (Swe) 分子の元素組成が同じで分子量の異なるものに対して「ポリマー：polymer」を命名

39年：M. Berthelot (Fr) 有機合成に対して「重合：polymerization」のことばを使用

58年：K. W. Nageli (G) セルロースのミセル説を提唱

94年：E. Fischer (G) セルロース、デンプンの高分子性を説いていたが何万という分子量の可能性は否定 (簡単なグルコシドと複雑な炭水化物との間に根本的な相違はなしとした)

1907年：W. Ostwal (G) T. Graham (E) が区別したクリスタロイド (結晶質)・コロイド (非晶質) は「物質自身の相違ではなく、状態の相違に基づくもの」という考えを示す。さらに今日の高分子である分子量の大きい真性コロイド (Eukolloid：オイコロイド：分子1個でコロイドを形成するもの) の存在を認めた。(オイコロイドは分子コロイドに相当)

1926年：H. Staudinger (G) デュセルドルフの学会で高分子説提唱

28年：K. H. Meyer, H. Mark (G) 新ミセル説提唱

30年：フランクフルトの学会でK. H. Meyer, H. Mark, R. O. Herzogらは、H. Staudingerの高分子説を認め論争に決着

このように Staudinger によって提唱された高分子説は、K. H. Meyer, H. Mark の提唱する新ミセル説 {比較的長い鎖 (糸状分子の存在を認める) によるミセルの形成} と見解の相違を生み、再び論争へと発展している⁹⁾。しかしここでの論点は、「ミセル」か「鎖状高分子」かの違いであり、両者ともコロイド性状をもつことは認めている。それとは別にいわゆる「合成」の技術は発展し、その後さまざまな合成樹脂・合成繊維が開発された。これらから高分子科学と合成技術の歴史は、互いに並行しながらも別々の目的をもって進行しそれぞれの研究は社会の要求に答えるという形で一致し、今日の高分子の存在を築いたと考える。

このような背景をもとに、高分子の教育内容には分子1個でコロイド性状をもつオイコロイド (分子コロイド) から定義される巨大分子 (Makromolekül) の考えが必要である。

3. 高分子の階層性

自然の階層性については、物理学⁹⁾ および生物学の分野では自明なこととして扱われている。また、教育内容の構成に階層性を用いる例も多く見られる¹⁰⁾。この階層性については、さまざま解釈がなされ、それぞれの区切りの違いによって数多く定義される。自然の構造について、階層性をもつことはとくに過った解釈ではない。そこで重視すべきことは、各階層を規定する属性が何によって定められ、また階層間の関係がどうなっているかである。田中一は、その著書「未来への仮説」の中で、累層性を述べている¹⁰⁾。各階層が単に大きさのスケールだけでその属性が規定されるのではなく、下位の階層の属性が上位の階層の属性を規定し、まさに累 (かさな) っている意味で、自然の階層性 (累層性) を定義している。(文中では累層構造としている。)

このことを教育内容で整理すると、単に階層性によって区切るということが重要ではない。階層性に基づく属性の定義とそれによる各階層間の関係をいかに定義し、教育内容に盛り込むかと言うことが重要である。ここで、化学全体について教育内容をとらえたときすでに階層性である程度整理されていると言える。それは、物質について個々に起きる化学反応 (変化) の法則性を見いだすときなど、マクロなものからマイクロなものへ分析し、さらにマイクロなもの属性からマクロなもの属性を考察するという手法が使われているからである¹¹⁾。これらは一般的に分析・総合の過程であり、今までの化学の学問的立場がそれを推進してきたのである。以上のことから化学は、物理や生物と同様に階層的な取り扱いが可能である。さらに高分子の教育内容においても、その取り扱いの中に階層性が存在することは自明なことである。

4. 用語整理の必要性

高分子の教育内容において用語の整理が必要となるのは、階層性でその属性を定義したとき、それに見合う適切な表現がなければならないからである。そこで、高分子の定義について多くの文献では、polymer と macromolecule の違いを述べておらず、その厳密な区別はないとしている¹²⁾。むしろ macromolecule は、天然物を含む広義の言い方ともとれるとしている¹³⁾。ここで、教育内容において階層性に基づく高分子の定義をするならば明らかな区別が必要である。用語の整理がされないまま教育内容を構成すれば、学習者 (生徒) に混乱を生じさせる。また、最近の先端的な研究では、超分子・メゾスコピックといった高分子とマクロな物質との間に大き

さのスケールで位置する物質の性状が着目されている。このようなことから、高等学校の化学における高分子の取り扱いにおいては、少なくともコロイド性状の高分子と高分子からなるマクロな物質とを用語上区別する必要がある。

以下、高分子に関する用語を次のように整理することを提案する。

コロイド性状の高分子……マクロモレキュール (macromolecule)
繰り返し単位の存在するもの $(-A-)_n$ ……ポリマー (polymer)
Aに相当するもの……モノマー (monomer)

* マクロモレキュール (macromolecule) は、ポリマー (polymer) を含み繰り返し単位がなくてもコロイド性状を示す物質として定義する。(例：DNA 相補的塩基配列は存在するが、 $(-A-)_n$ にしめす繰り返し単位は存在しない。)

また、デンプンやセルロースなどは、明らかに繰り返し単位が存在し、その意味からポリマーの言い方でもよいとする。

これまでの教育内容では、マクロモレキュール及びポリマーから構成されるマクロな物質(目に見えるもの)まで、従来「ポリマー」と称されることが多かった。これからは、学習者(生徒)の混乱を避けるため、マクロモレキュールの階層に位置するポリマーとマクロな物質の総称としてのポリマーを区別する必要がある。

5. 教育内容の構成について

1) 教育内容構成

高分子の教育内容は、概略(図3)に示すように①～④によって構成される。

①単量体の教育内容においては、無機物(オルトケイ酸イオン 炭素イオウなど)と有機物(エチレン スチレン アミノ酸 グルコースなど)にわけ、各々属性が非コロイド性をしめす範囲の物質として取り扱われる。(コロイドの定義：原子数 $10^3 \sim 10^9$ 個の集合)具体的にはチンダル現象・粘性・凝集・電気泳動などの性質をしめさない物質としてまとめられる。

②反応(合成・重合)の教育内容は、反応過程における活性化エネルギーの大小と触媒、反応条件(温度・圧力など)の内容を中心に取り扱い、次のマクロモレキュール(高分子)の階層を規定する。ここで高等学校の内容として構造安定性の問題。つまりギブスの自由エネルギーやエントロピーの取り扱いをどうするかという課題が今後残るが、現行の内容から判断して触媒作用および活性化エネルギーの取り扱いにとどめる。また、ここでは④の教育内容である機能性に関係することとして、生物でも取り扱う酵素をより深く教育内容に取り入れる考えである。

③オイコロイド(分子コロイド)の教育内容では、マクロモレキュール(高分子)がコロイド性状をもつことを明らかにする。その上で他のコロイド性状をもつミセルや金属ゾルなどとの構造のちがいに触れる。さらに、マクロモレキュール(高分子)の階層がもつ性質は、下の階層である単量体(モノマー)から反応過程によってつくられることを示す必要がある。

④機能(性能)・用途の教育内容は、先の②反応(合成・重合)の教育内容から再び規定され³⁾、具体的にはコンフィギュレーション configuration (立体配置)・コンホメーション conformation (立体配座)(図4, 5参照)に大別され整理される。

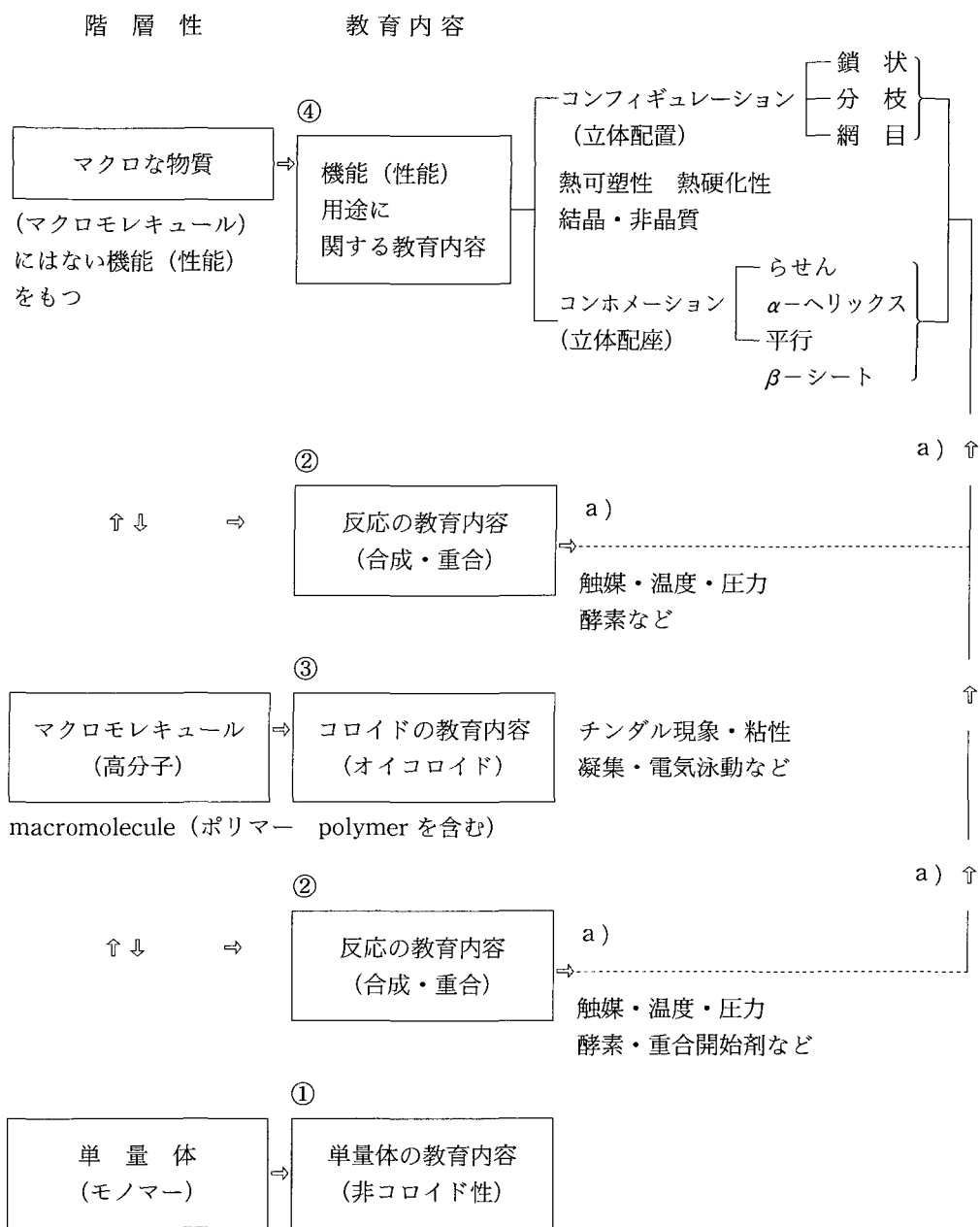


図3 高分子の教育内容構成の概略

機能の定義：外部刺激に対する応答¹³⁾

ある物質にインプットがあたえられたとき、そのインプットの質と量あるいはそのいずれかを変化させアウトプットする働きに相当する応答と定義する。{この例として酵素と基質との関係があげられる。インプットされた基質（デンプンなど）が、酵素による働きにより質と量の変化を生み、アウトプット（多数のブドウ糖に分解）される。}

性能も機能同様に外部刺激に対する応答として定義され、その違いは、応答が物理的（光・熱・電磁気・圧力など）あるいは化学的（薬品）刺激に対する抵抗に相当するという点にある。

一般に機能には、分離・吸着（例：触媒の作用）・感光などがあげられ、性能には、強度・耐熱性・透明度・耐薬品性などがあげられる。

用途の定義：日常生活の中で具体的にどのようなものとして利用されるかを示す。

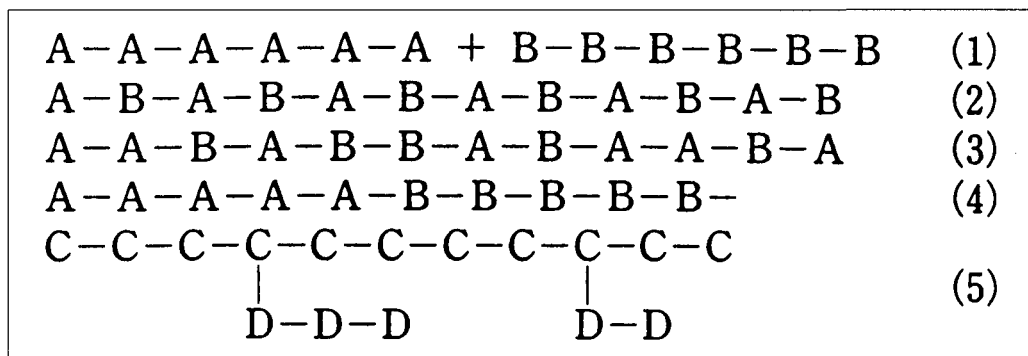


図4 コンフィギュレーション configuration (立体配置) の例 (モノマー A, B, C, D による結合様式の違い) 藤重昇永著『身のまわりの高分子』9p 東京化学同人

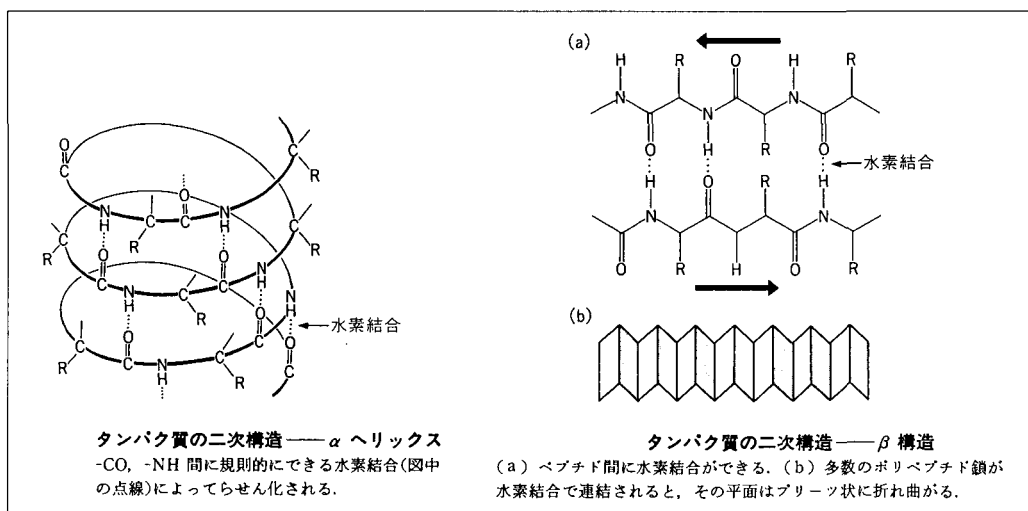




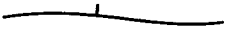

図5 コンホメーション conformation (立体配座) の例 (タンパク質の2次構造 αヘリックス, βシートの違い) 中村 運著『生命科学』25p 化学同人

現行の取り扱い、合成技術の発展にともない多くの物質が開発され、それを単に高分子の教育内容に羅列的に持ち込んでいる。そこで、本来あるべき高分子の教育内容の構成は、単量体 (モノマー) からマクロモレキュール (高分子) をへて、上層の機能 (性能)・用途の内容へと広げていくことである。また従来の天然高分子化合物と合成高分子化合物の分類は、教育内容上不要と考え、それらはむしろ、教育内容①～④の教材として位置すべきものとする。

2) コンフィギュレーション (立体配置) による教育内容の整理

configuration

(ポリエチレンの例)

	低圧ポリエチレン	高圧ポリエチレン
マクロな物質		
構造性能	高密度 結晶化 硬い 不透明 (屈折率の違い)	低密度 非結晶化 柔らかい 透明
用途	ポリ容器 (バケツ・チリトリなど)	袋 (ゴミ袋など)
反応条件	低圧法 60°C・1 atm 触媒を必要とする (トリエチルアルミニウム +塩化チタン)	高圧法 175°C・2000 atm 酸素の微量添加 (重合開始剤の役割)
マクロモレキュール (高分子)	分岐の少ない線状高分子	分岐の多い高分子
macromolecule		
反応条件	低圧法 60°C・1 atm 触媒を必要とする (トリエチルアルミニウム +塩化チタン) 付加重合	高圧法 175°C・2000 atm 酸素の微量添加 (重合開始剤の役割) 付加重合
単量体 (モノマー)	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$ エチレン (エテン)	

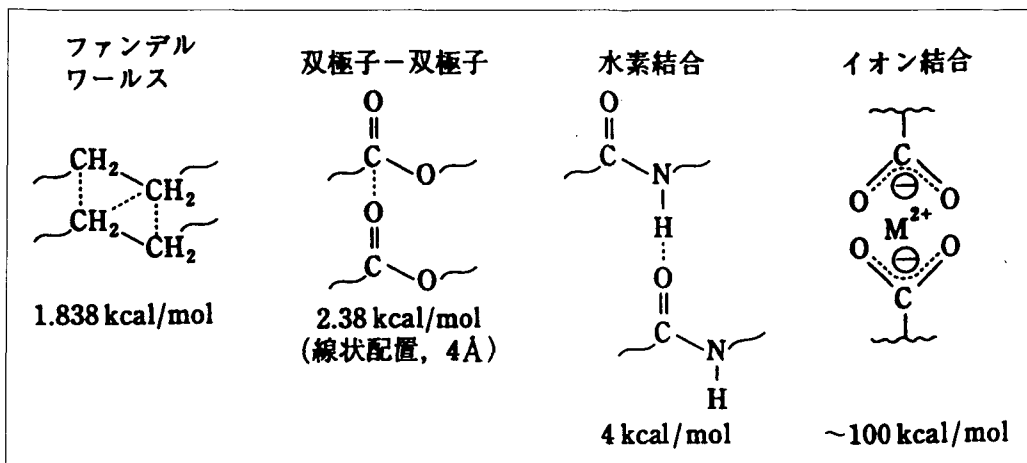


図7 いろいろな分子間力の例 藤重昇永著『身のまわりの高分子』27 p

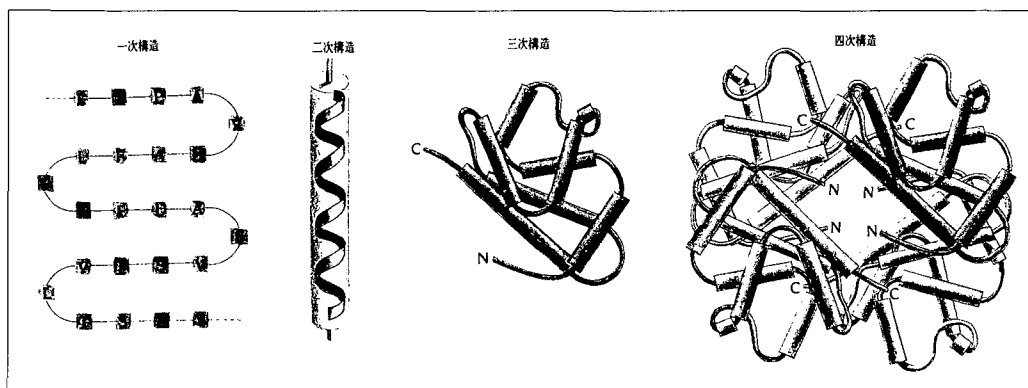


図8 タンパク質の高次構造
C. Branden, J. Tooze 著 勝部幸輝他訳『タンパク質の構造入門』(1991)

6. ま と め

コロイド性状をもつオイコロイド(分子コロイド)から高分子を定義し、階層性に照らし合わせて教育内容を整理した。さらに近年注目されている機能性をコンフィギュレーション(立体配置)・コンホメーション(立体配座)の2つに分けて整理した。これら2つの観点から高分子の教育内容を構成することは、学習者(生徒)に高分子概念を正しく理解させられるものとする。今後は、この教育内容に基づく具体的な授業プランの作成が望まれる。

[注]

1) 緒方直哉『機能性高分子』大日本図書 35 p (1987) によれば、機能性高分子とは、外界からの熱・光・電気・圧力などの刺激に対して選択的、特異的に応答し、ある動作・作業することのできる材料と定義されている。

また、緒方直哉『化学と教育』44巻427(1996)では以下の様に述べている。

「1972年以降高付加価値材料の開発が盛んに行われ、それまでの安価に供給できる材料ではなく、特殊な性質をもち高度な性能を有する機能性高分子の言葉が用いられている。従来高分子材料が主に形をつくることを目的とした構造材料であったのに対して、機能性高分子はシステムを作るための重要な部分として

の役割を担っている。例として、ICを作るためのフォトレジスタ(感光性樹脂)があげられる。1990年代に入り、産学官の共同研究のもと、さらに応答機能を高度化したインテリジェント高分子という言葉が使われ、ますます新しい展開を見せている。」

- 2) 学習指導要領(平成元年3月)によれば、化学I Bでは有機化合物において、「反応及び構造に関連して該当する箇所、ポリエチレン・ポリ塩化ビニル・ポリエステル・ナイロンにも触れること。」としている。また、化学IIでは高分子を天然・合成高分子化合物に大別し、「天然高分子化合物では分子量の小さい物質との違いを構造・性質の面から触れ、合成高分子化合物に関しては、代表的なものについて構造と用途との関係にも触れること。」としている。そのほか化学IIにおける特徴的なことは、化学的事象に関する応用的・発展的な観察・実験を通して行う探究活動の重要性をあげている。さらに化学I Aにおいては、日常生活と関係の深い事物を取り上げ、高分子に関しては、食品の化学の中で糖類・タンパク質、衣料の化学で天然繊維・合成繊維、身近な材料でプラスチックをあげ、性質・用途およびプラスチックにおいては燃焼の安全性について触れることとしている。
- 3) 中浜清一他『エッセンシャル 高分子科学』講談社 1~5 p, 199~205 p (1988)
- 4) 藤重昇永『身のまわりの高分子』東京化学同人 33 p (1992)
- 5) H. Staudinger 小林義郎訳『スタウディングー研究回顧』岩波書店 80~90 p (1966)
- 6) K. H. Meyer, H. Mark, R. O. Herzog 等
- 7) H. Staudinger 小林義郎訳『スタウディングー研究回顧』岩波書店 91~95 p (1966)
- 8) 日本物理学会誌(1995 Vol. 50 No. 4)特集『階層のある系の物理学』では以下のように巻頭で述べられている。「すべての科学、いや科学ばかりではなく、知性のあらゆる方面にわたる努力のすべては階層の関連を見抜こうとするものです。~中略~今日この階層構造を下から上まで貫く経糸を引くことはできません。それができると言挙げしてもしかたない。このような階層構造のあることが今ようやく見えはじめたばかりであります。」
- 9) 高村泰雄『物理教授法の研究』序論 第2章(第2節)
- 10) 田中一『未来への仮説』培風館 102~104 p (1985)
- 11) 化学変化について反応式を用いて考察するときなど、原子・分子・イオンのミクロなレベルで分析している点をさす。例えば、中和反応における酸・塩基の量的関係の考察において、水素イオン・水酸化物イオンのミクロなレベルで考え、そこから等量関係を法則として得る。
- 12) 小林四郎『応用化学講座7 高分子材料化学』朝倉書店 2 p (1991)
- 13) 藤重昇永『化学と教育』44巻 530 (1996)

(付 記)

本稿執筆中、大野栄三(北海道大学教育学部)、及び教育方法学研究室から有益な助言をいただいた。この場を借りて謝意を表したい。