



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	「粒子取り込み競争」論の有効性をさぐる : 素反応の課程でみる酸・塩基反応と酸化・還元反応
Author(s)	梅津, 徹郎
Citation	教授学の探究, 10, 1-24
Issue Date	1992-03-17
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13572
Type	departmental bulletin paper
File Information	10_p1-24.pdf



「粒子取り込み競争」論の有効性をさぐる

— 素反応の過程でみる酸・塩基反応と酸化還元反応 —

梅 津 徹 郎

(北海道大学大学院教育学研究科修士課程)

0. はじめに

化学反応とは、原子どうしのももとの化学結合が切れて新たな結合ができ、その結果、もとは違った質をもった新しい物質が生成される過程をいう。

新たな結合ができるということは、原子・分子間の電子配置が変化することであり、これはミクロのレベルでみていくことができる。

化学反応で変化する物質の性質は何かというと、それは密度や融点、沸点、あるいは金属光沢、電気伝導性、磁氣的性質といった物理的性質のことであり、これらのことはマクロのレベルでみていくことができる。

小論では、「化学反応は電子を媒介とした原子・分子の相互作用によって起こる」という立場から、ミクロのレベルで化学反応の本質を検討し、代表的化学反応である「酸・塩基反応」と「酸化還元反応」の一般の形態を「粒子取り込み競争」という概念で理解させることの有効性について私見を述べることにする。

1. 化学反応を「粒子交換」による相互作用としてとらえる

1-1) 自然の階層構造と相互作用

「化学は物質における電子の科学である」⁽¹⁾と言われるほど、化学研究のあらゆる分野において電子の振る舞いをさぐるものが決定的である。それは、化学という学問が「諸原子が核外電子を媒介とする相互作用をすることによっておこる諸原子の結合と分離を研究する自然科学の一部門である」⁽²⁾という独自性によるものである。

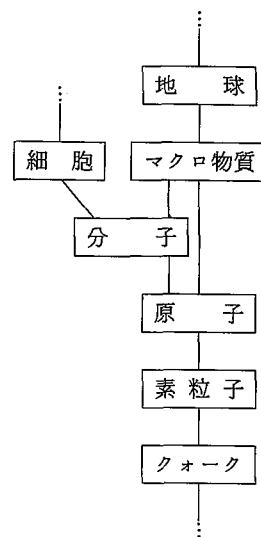
図1は自然の階層構造を表したものであるが、秩序に富んだ自然の階層構造が保たれるためには、各階層ごとに小さなものどうしを固有の方式でしっかり結びつける「力」が作用していなくてはならない。

その「力」とは「引力（結合力）」と「斥力（反発力）」であり、これを「相互作用」と呼ぶ。

1-2) 化学結合と「粒子交換」による相互作用

さて化学結合が形成されるのは、一般的には粒子（原子、分子、イオン）間の引力と斥力がほどよくつり合って、ポテンシャルエネルギーが一番安定したときである。

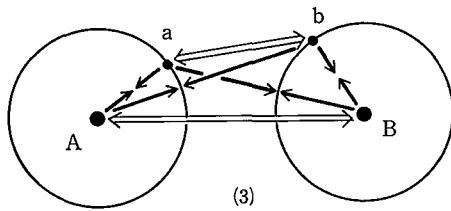
例として、水素原子2個が共有結合して水素分子 H_2 がつくられ



〔図1〕 自然の階層構造

るときのような様子を見てみよう。

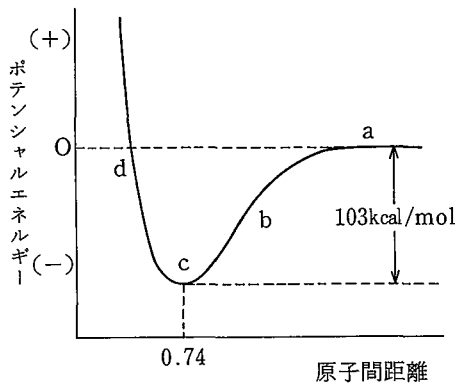
図2のように、2個のH原子が接近したとき、4種の引力と2種の斥力が相互作用する。



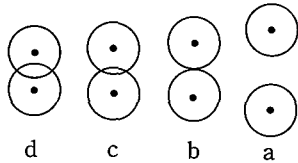
引力 A-a, B-a
A-b, B-b
斥力 A-B, a-b

(3)
[図2]

原子軌道が重なりはじめるにしたがって、エネルギーが低くなっていく。



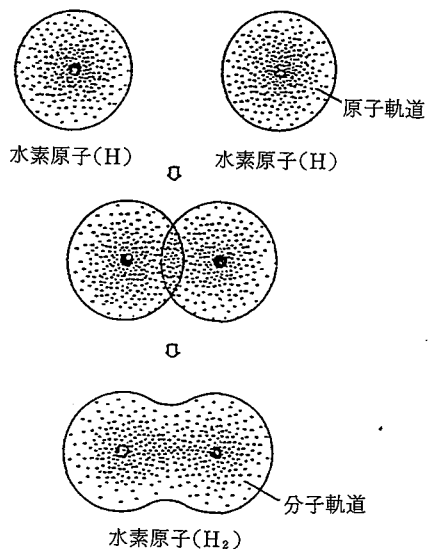
c点 軌道の重なりがすすみ、エネルギーが最低となっている。
ここでは原子核と電子の引力と原子核どうしの斥力がほどよくつり合っている。
d点 接近し過ぎるため、原子核どうしの斥力が強くなり、結合は不安定になる。



[図3] H原子相互間の距離とエネルギーとの関係

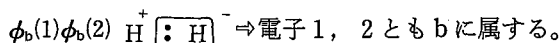
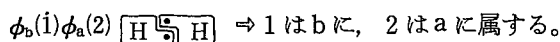
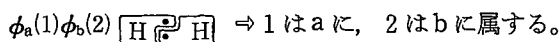
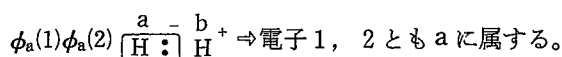
共有結合が形成される時、電子が占める領域は、もはや原子軌道の単なる寄せ集めではなく、「分子軌道」と呼ばれる新しいものに変化している。

2個の電子はたえず激しくその立場を転換し合い、そのことをつうじて一定の引力を生みだしているのであり、この段階では、2つの電子は一つひとつを区別することはできない状態にある。



[図4] 原子軌道の重なりと分子の生成

このようすは、波動関数とともに次のように表すことができる⁽⁴⁾



粒子間にはたらく引力は、それらの間で激しく交換される「第三の粒子」を通じて現れるということが、ミクロの世界では普遍的であるといつてよい⁽⁵⁾

たとえば、「強い相互作用」は原子核内にみられ、陽子—陽子、陽子—中性子、中性子—中性子間で「 π 中間子」という第三の粒子が引力の仲立ちをしている。これが核力と呼ばれるものである。

また、「電磁気相互作用」は原子・分子のレベルでみられ、電荷をもっている粒子どうしの間には、異種電荷どうしで引力（クローン引力）が、また同種電荷どうしで斥力（クローン斥力）がはたらいている。

このときの第三の粒子は「光子 (photon)」である。光子は量子論的な場の理論では質量 0、電荷 0 の粒子で、波動性と粒子性の両方をそなえている。光はもともと電磁的な振動（電磁波）であるから、光子の交換が電磁気相互作用を生み出すのは当然といえよう。

原子・分子を結びつけている力は「電磁気相互作用」である。化学反応に伴う新しい質の形成は、原子間・分子間の結合の開裂と生成によるが、これらはすべて電子を媒介とする原子・分子の相互作用に起因するものである。

化学反応のしくみを生徒に理解させるには、できるだけ単純化された、それでいて本質的な理解につながる実体的モデルの提示が必要である。この点を意識しつつ、現在作成中の授業書（案）『化学反応入門』では、化学反応の起こるしくみを「電子交換による原子・分子の相互作用」（広義には「粒子交換による原子・分子の相互作用」として、電子のレベルにおろした相互作用から根拠づけることをめざしている⁽⁶⁾

化学反応のすべてを「電子交換による相互作用」で説明できるわけではないが、近似的なとらえ方で化学反応の実体的イメージを形成することは、物質の質的变化や物質種の多様性を統一的に理解するうえで不可欠であろう。

2. 電荷移動理論の特徴と化学反応

2-1) 分子間相互作用と電荷移動力 (charge-transfer-force)

分子間にはたらく力（分子間相互作用）にはいろいろな種類がある。主なものを表 1 にしめそう⁽⁷⁾

分子間相互作用が大きくなると、化学結合の開裂や生成が、すなわち化学反応が起こるようになる。しかし、分子間相互作用が直接化学反応を引き起こすのではなく、むしろ分子と分子の「出会いを演出する」のが分子間相互作用であるととらえた方がよいであろう。

それでは、化学反応がおこるほど分子間に大きく作用する分子間相互作用とは何であろうか？ここでは「電荷移動力」に注目したいと思う。その理由は、第一に「電荷移動力」が他の分子間相互作用よりも比較的強い相互作用であること、第二に「電荷移動力」が異種の分子間への

〔状態Ⅰ〕と〔状態Ⅱ〕のどちらの状態にも転換できる状況を「共鳴 (resonance) している」というが、両状態の共鳴によって「より安定な状態」と「不安定な状態」を生じる。

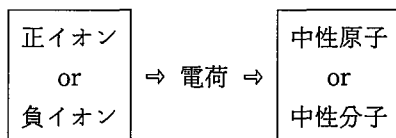
そして、「電荷移動が起きていない状態」と「より安定な状態」とのエネルギー差によって錯体は安定化し、分子Dと分子Aとの間に独特の引力（結合力）が生じることになる。この結合力を「電荷移動力」と呼んでいる。

「電荷移動力」は、電荷移動錯体における構成分子間の結合力の本質を説明するために Chicago 大学の R. S. Mulliken によって導入された分子間力の一種である。

Mulliken の電荷移動理論は Pauling の共鳴理論の流れをくむもので、電荷移動錯体を分子Dと分子Aとの相互作用としてそれを分子間に拡張したものである。

2-2) 電荷移動反応 (charge-transfer-reaction) について

溶液反応、とくに無機化学反応では「電荷移動反応」とよばれる反応が、普通に起こっている。この反応は正または負のイオンと中性の原子または分子との反応により、電荷がイオン側から中性粒子側へ移動するものである。



電荷移動反応には①電荷だけ移動する過程と、②電荷移動に伴って二次イオンが解離する過程の2種類があり、そのおのおのについて共鳴過程と非共鳴過程がある。

Mulliken の電荷移動理論をもとに酸-塩基反応を研究しているニューヨーク市立大学の Finsion と Lychtman は著書『酸-塩基の理論』（藤永太郎監訳，化学同人）のなかで、「すべての化学反応は電荷移動反応であり、水溶液中では、水分子の集合体が直接電荷移動の役割を果している」⁽¹⁰⁾と述べている。(A)

また、酸・塩基理論で業績をのこした Lewis の諸理論に従えば、「すべての物質は酸か塩基であり、その間での相互作用により化学反応が起こる。」ということになる。(B)

そこで(A)と(B)の核心的部分を生かすと次のように表現できる。

すべての物質は酸か塩基であり、その間の相互作用によって化学反応は進行する。
そして、多くの化学反応は電荷移動反応である。

このような視点に立つなら、酸・塩基反応を理解することがすなわち化学反応を理解することであり、酸と塩基との間で電荷をもったどのような粒子（イオン，極性分子，電子）が移動・交換したかを「素反応の過程」のレベルで見きわめることで、化学反応一般を理解できようと考えられる。

3. 酸・塩基概念の発展 — Lewis の理論を中心に

酸・塩基の概念の発展を化学史的に検討する余裕はないが、ただ一ついえることは、現在にいたってもなお「酸・塩基の定義は化学者の数ほどある」と言えるくらい多種多様だということである。

ここでは現行の中学校・高校教科書に登場している Arrhenius 理論と Brønsted-Lowry 理論および Lewis 理論の特徴を簡単にまとめ、そのうえで Lewis 理論の「有機電子論」への拡張に

ついて、検討してみる。

3-1) Arrhenius と Brønsted の定義の特徴

〔表2〕

	定 義	意 義・特 徴	問 題 点
アレニウス (1887)	酸：水溶液中で電離して H ⁺ を放出する物質。 塩基：水溶液中で電離して OH ⁻ を放出する物質。	「イオン」の存在という、まったく新しい概念を導入した。(電離説)	① 水溶性の物質のみに限定される。 ② OH ⁻ を含まない物質が塩基として働くという事実の説明がつかない。
ブレンステッド (1923)	酸：他の物質にH ⁺ (プロトン)を与えることができる物質。〔プロトン供与体〕 塩基：他の物質からH ⁺ (プロトン)を受け取ることができる物質。〔プロトン受容体〕	① 酸と塩基の関係がプロトンの授受で統一的にとらえられるようになった。 ② 塩基の表現が大きく変わりがつ、イオン自体が新たな酸塩基の対象になった。 ③ 非水溶液中における反応にも拡張された。 ④ 中和反応は酸、塩基の死滅ではなく、新たな酸、塩基の誕生としてとらえる考えができた。	H原子を含んでいない物質は、永久に酸とはみなされないことになってしまう。

3-2) Lewis の定義の特徴

〔表3〕

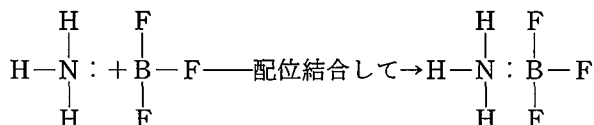
	定 義	意 義・特 徴
ルイス (1923)	<初期(古典的)ルイスの定義> 酸：溶媒中で、溶媒の+イオンを出すか、その-イオンと結合する物質。 塩基：溶媒中で、溶媒の-イオンを出すか、その+イオンと結合する物質。 *----- 酸：非共有電子対を受け取って共有する分子またはイオン。 〔電子対受容体〕 塩基：非共有電子対を与えて共有する分子またはイオン。 〔電子対供与体〕	* ブレンステッドの塩基(OH ⁻ , Cl ⁻ など)が、なぜプロトンを受け取ることができるかを、電子配置〔オクテット則〕から説明した。 配位共有結合を強調している。すなわち、酸・塩基反応は本質的には配位結合の生成反応であり、ルイス塩基は例外なく配位結合のリガンド(配位子)として振る舞うことができ、リガンドが配位する相手は必ずルイス酸でなければならない。 ⁽¹⁾

3-3) Lewis 理論の「有機電子論」への拡張

1927年 Sidgwick はルイスの概念を配位化学の分野に導入し、ルイス酸を電子受容体(electron acceptor), ルイス塩基を電子供与体 (electron donor) と呼んだ。

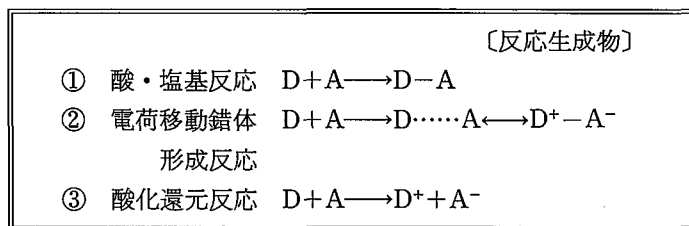
有機化学の分野では、ルイスの考えは Robinson の「有機電子論」によって広まり、1933年、Ingold により、さらに拡張された。⇒C原子から電子を受ける試薬＝求電子試薬 (ルイス酸), C原子に電子を与える試薬＝求核試薬 (ルイス塩基)。

これらによって、酸・塩基反応、置換反応、錯体形成反応は単純な概念に基づいて記述できるようになった⁽¹²⁾



Lewis ⇒ 塩基 酸
Sidgwick ⇒ ドナー アクセプター
Robinson
-Ingold ⇒ 求核試薬 求電子試薬

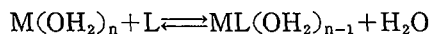
次に酸・塩基反応および酸化還元反応を電子論の立場から整理してみよう⁽¹³⁾



①ではDのもっている非共有電子対をAが取り込んで、配位した共有結合をつくっている。この場合は電子の部分的移動にともなう電子の共有である。＝〔配位結合〕

②は前述したとおりであるが、補足として金属イオンを含む水溶液中での錯体形成反応の一例を紹介しておこう。

金属イオンMを含む水溶液にリガンド (L, 配位子) が存在し、錯体を生成する反応は次のように表される。



この場合、水分子も配位子の一つであるから、錯体形成反応は一種の配位子置換反応と言ってもよい⁽¹⁴⁾

さて、③ではAがDのもつ電子を完全に取り込み(受け取り)、両者で電子を共有することがない。すなわち、電子はDからAへ完全に移動してしまっている。

このようにみえてくると、②は①と③の反応の中間に位置していることになる。電子が動くということは、電荷が動くことであるから、①も②も③もいずれもが「電荷移動反応」であるといってもよい。

なお、電荷移動エネルギーは、交換エネルギーや分極のエネルギーを含んでいると考えられ、別の表現として「交換一分極エネルギー」という言葉もしばしば用いられていることも付記しておく⁽¹⁵⁾

では電荷移動力によって形成される錯体（分子化合物という）は酸・塩基反応の生成物（塩）とどのように関連してくるのか？

錯体（分子化合物）が生じる時、移動する電子は非共有電子対とは限らない。しかし電子の移動にもとづいて分子間に結合が生まれるという類似点を考えれば、この錯体（分子化合物）も広義には Lewis の定義による酸・塩基反応の生成物（塩）とみなしてよいだろう⁽¹⁶⁾

ところで、「酸・塩基反応」と「酸化還元反応」は従来から異なるレベルの反応として扱われてきた。たとえば、酸・塩基反応では酸化数の増減は起こらないが、酸化還元反応では必ず酸化数の増減が起こることなどである。

だが、酸・塩基反応と酸化還元反応は別の反応なのだろうか？ 確かに膨大な数の化学反応を反応形式によって、酸・塩基反応、酸化還元反応、有機化学反応などに分類すれば便利ではあろう。だが、化学反応一般が結合の開裂と生成による「多様な質の形成」であるとするならば、酸・塩基反応、酸化還元反応、有機化学反応はすべて「多様な質の形成」の化学反応であり、かつ「電荷移動反応」であるから異なる反応として教えることは意味をもたない。

「電子（対）の部分的移動による共有か、あるいは電子の完全な移動か」という視点で「酸・塩基反応」と「酸化還元反応」をみれば、これらは「電子交換による相互作用」として説明することが可能となる。

4. Usanovich 理論の特徴と「粒子取り込み競争」論

——酸・塩基反応と酸化還元反応——

「酸化還元反応」を酸・塩基反応の中にも含めることを強調したのは、タンケントの中央アジア大学の Usanovich であった。(1936)

彼は酸・塩基反応と酸化還元反応との類似性および酸と酸化剤、塩基と還元剤との相関について、興味深い指摘をしている。以下に Usanovich 理論の特徴と、彼以降の理論的展開を概観してみることにする⁽¹⁷⁾

4-1) Usanovich 理論とはどのようなものか？

Finston, Lychtman は次のように述べている。

「現在 Brønsted-Lowry や Lewis の概念がもてはやされているが、最も包括的な理論は Usanovich の概念である。それによれば、酸化—還元過程は明らかに酸・塩基反応であり、また、プロトン理論と電子論を入念に検討すると、酸—塩基の化学と酸化—還元化学とは密接に関連づけられるものである」

「しかしながら、Usanovich 理論はこの考えを実証する実験的証拠を何も提供していない」⁽¹⁸⁾

この様に評される Usanovich 理論—酸・塩基概念とはどのようなものであるか、次表にまとめてみた⁽¹⁹⁾

〔表2〕の様に表現できれば、Usanovich 理論こそ、酸・塩基反応の中に酸化還元過程をはっきりと一つの亜類として含めている唯一の酸・塩基概念であるといえる⁽²⁰⁾

つまり、Brønsted, Lewis の酸・塩基によって説明される酸・塩基反応に限らず、すべての酸化還元反応が含まれることになるのである⁽²¹⁾

[表4] Usanovich の酸・塩基の定義

酸 と は	<p>* cation カチオン (陽性イオン) を分離 (放出) することができる物質。 anion アニオン (陰性イオン) または電子と結合できる物質。 塩基を中和して塩を生じる物質。</p> <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; display: inline-block;"> 電氣的陽性の粒子を放出する物質。 電氣的陰性の粒子と結合する物質。 </div> = <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px; display: inline-block;">酸化剤</div>
塩 基 と は	<p>* anion アニオン (陰性イオン) または電子を分離 (放出) することができる物質。 cation カチオン (陽性イオン) と結合できる物質。 酸を中和して塩を生じる物質。</p> <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; display: inline-block;"> 電氣的陰性の粒子を放出する物質。 電氣的陽性の粒子と結合する物質。 </div> = <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px; display: inline-block;">還元剤</div>

4-2) 「物質の定義」としての不適切さ

前述したように, Usanovich 理論ではほとんどの化学反応を酸・塩基反応として系統づけることができる。

しかし, これを「物質の定義」として検討した場合, 不適切な部分がいくつかある。

たとえば, 多くの物質は陽性部分と陰性部分とを合わせもっているため, 酸と塩基を同時に含んでいることになり, 酸・塩基の定義そのものが無意味になってしまう。

また, 「電子」そのものが一つの塩基とみなされてしまうことにもなっている。

このように, 「物質の定義」としての Usanovich 理論は, 酸・塩基の範囲が非常に広がるだけでなく, 中和という概念までも曖昧になってしまうのである。⁽²²⁾

4-3) 「化学反応機構」の本質的理解につながる「粒子取り込み競争」論

化学反応とは電子を媒介とした相互作用によって起こり, 化学結合の開裂と生成による多様な質の形成であることは既に述べた。

「物質の定義」としては不適切な Usanovich 理論であるが, 化学反応機構の本質を理解する理論としては捨てがたいものがある。

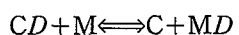
酸・塩基反応だ, 酸化還元反応だといっても, 所詮は物質を構成している粒子間での電子のやり取りのさまざまな振る舞いの表れである。

そうであれば「粒子交換による相互作用」として単純化することも可能である。

Charlot, Wolff, LaCroix は反応タイプの研究を通じて, Usanovich と同様の考えに至っている。

彼らの理論を仮に「粒子取り込み競争」論と呼ぶことにし, 以下に要約してみよう。⁽²³⁾

まず彼らは酸・塩基反応と酸化還元反応の類似性を認めたくえで, Brønsted-Lowry の理論の基礎であるプロトン交換も「粒子交換」に一般化できるとして次式を示した。



ここで, CとMは, 粒子Dの「取り込み競争」をするとして,

- 1) もし粒子Dが極性分子またはイオンならば、上式は Lewis 酸置換または Lewis 塩基置換である。
- 2) もし粒子Dが電子ならば、酸化還元反応である。

と述べている。

このように整理してみると、Charlot らの「粒子取り込み競争」論は、電荷をもった粒子の移動として化学反応をとらえていることから Usanovich の理論と等価であるといえる。しかし、「粒子取り込み競争」論の方がより実体的である。

さきにも紹介したように、Usanovich は酸・塩基をそれぞれ cation 放出体、anion 放出体と定義したが、これは一般化のしすぎである。なぜなら、ほとんどの化合物には極性があり、出会う相手によって cation も anion も放出する可能性をもっているからである。さらに彼が理論を裏付ける実験的証拠を示さなかった事も大きな欠陥である。

一方「粒子取り込み競争」論では、移動・交換される「粒子D」が具体的に指定されており、実験的裏付けをもっている点で、Usanovich の理論より実体的であると言える。

このように、「粒子取り込み競争」論は、化学反応のしくみを単純に、しかもイメージし易く揭示できる点で魅力的な理論であるといえよう。

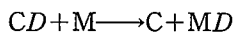
5. 「素反応の過程」から酸・塩基反応と酸化還元反応をみる

5-1) 化学反応を「素反応の過程」から見直す

一般的に化学反応は、いくつかの素反応（単一反応）が組み合わさっておこっている。

先に述べた $CD+M \rightleftharpoons C+MD$ は「素反応の過程」を表している。化学反応はこの反応が複数、連続的に起こっていると見ればよいわけである。

素反応の過程の一般的形態を次式で表わすことにする。



- C : 分子かイオンである。
 M : 分子かイオンである。
 D : 極性分子かイオン、または電子である。

- ① CとMとの間で、極性分子かイオンの移動があった場合、これを酸・塩基反応と呼ぶことにする。
- ② CとMとの間で、電子の移動があった場合、これを酸化還元反応と呼ぶことにする。

このように定義すると、化学反応を理解するうえでどのようなメリットが期待できるであろうか。いくつか列記してみよう。

- 1) 移動する「粒子」を指定さえすれば、酸・塩基反応か酸化還元反応かが判定でき、単純でわかりやすい。
- 2) 極性分子やイオンを「電子の団体を引き連れて移動する粒子」と見なせば化学反応一般は「電子を媒介とする相互作用」によって起こると説明できる。
- 3) 「酸化数」という形式的概念を導入する必要がなく、酸・塩基反応と酸化還元反応を統一的に「電子の移動・交換」=「電荷をもった粒子の取り込み競争」として化学反応の本質に

せまって教えることが可能となる。

粒子の奪い合い=競争という考えは、化学研究者からは大雑把すぎると批判されそうであるが、化学反応の本質的理解として、生徒にはイメージしやすいものではないかと思われる。

5-2) 授業書(案)『化学反応入門』の構成。

0. 大相撲と化学反応 プロローグにかえて ----- 0
1. これは化学反応なの? ----- 1~ 3
 - 化学反応って何だろう?
 - 化学結合は電子でつくられる
 - 相手がいなくては反応は起こらない!
2. ミクロの世界の住人たち ----- 4~13
 - 猛スピードで運動する電子
 - ミクロの世界の「電気力」
 - 相互作用
 - 「電子密度」という考え
 - ニュートン力学と量子力学 一位置と速度のはなし
 - 「相互作用」と「場」の考え
 - わが輩は電子である
 - 電子1gの電気量ってどのくらい?
 - 電子の交換と共有結合
 - 離れちゃダメ! くっついちゃイヤ!
3. 分子から原子へ、そして・・・ -----14~16
 - 水をどんどん加熱していくと・・・?
 - 水分子がバラバラになるとき
 - 原子がバラバラになるとき
4. 水分子のなかをのぞく -----17~25
 - 水と静電気
 - 純水にマイナスのエボナイト棒を近づけると
 - 純水にプラスのガラス棒を近づけると
 - 水はプラス? それともマイナス?
 - 分子は振動(のび・ちぢみ)している!
 - 水分子の分極と電気陰性度
 - 化合物は二重人格 一イオン結合と共有結合のはざまを行ったり来たり
 - 分子内の共鳴, 特別じゃない
 - 電子レンジでチン!
 - 空のコップも熱くなる
 - 電磁波と水の極性

5. 化学反応のしくみをさぐる (part I) -----26~32

- 金属ナトリウムに純水をかけると？
- 水は化学薬品だ！
- 反応熱で目玉焼き？
- 亜鉛粉末とヨウ素固体に水をかけると？
- やっぱり水は化学薬品だ！ —触媒のはなし—
- 角砂糖は燃えるか？ 角砂糖にタバコの灰
- タバコの灰の触媒作用
- 相手がいるのに反応が起こらない。！ —吸熱反応のはなし—

ここまでのまとめの話 -----33~35

6. 原子・分子からマクロ物質へ -----36~46

- ドライアイスを置いておくとどうなる？
- ドライアイスは電気を通すだろうか？
- ファンデルワールス力と分子性結晶
- 巨大分子をつくる共有結合
- 塩のはなし —イオン性結晶 — 食塩を融解してみよう。電気が通る。
- ナトリウムと塩素ガスから直接食塩をつくる
- 1円玉は電気を通すだろうか？
- 貨幣（硬貨）は何からできているか？
- 金属はすべて電気を通すのか？
- 金属の3つの特徴 —「電導性」「金属光沢」「延展性」
- 水銀は電気を通すか？
- 自由電子と電導性
- 自由電子とピカピカ光沢
- 自由電子と金属の曲げ・延ばし
- マクロ物質への2つの道
- 物質を電気伝導性で分類する —物質の三大分類—

7. 化学反応のしくみをさぐる (part II)

—酸のはなし— -----47~55

- 「すっぱい」を漢字で書いてみてください。
- 塩酸はすっぱいか？ みんなでなめてみよう。
- 塩酸はすっぱい☹
- 人が最初に知った「酸」は何だろう？
- 「酉」という漢字はもともと何だった？
- 果実のアルコール発酵と酢酸
- 「酢」にもいろいろありますが・・・
- 常温で固体の酸はあるだろうか？

- 固体の酸はすっぱいか？ • 水がなければ「酸性」を示さない
- 牛乳・コーヒー・・・，酢酸は電気を通すだろうか？
- 酸は「分子性物質」だよ！
- えっ！ 酢酸は電気を通さないの？ —オストワルトの希釈律—
- 気体の酸ってあるの？
- 二酸化炭素，二酸化イオウ，二酸化窒素を水に通すと？
- 花王の「バブ」をお風呂に入れると出る気体は？
- 非金属元素の酸化物＝酸性酸化物

8. 化学反応のしくみをさぐる (Part III)

—化学反応の仕掛け人たちを探せ！— -----56～65

- 亜鉛に純水を注ぐと反応は？ • 亜鉛に濃硫酸を注ぐと反応は？
- 亜鉛に希硫酸を注ぐと反応は？
- 希硫酸と濃硫酸は性質がちがうヨ！
- 化学反応は「粒子取り込み競争」だ！ • 「粒子」とは何をさすか？
- 「粒子取り込み競争」を反応過程で観よう
- 濃硫酸は「分子性物質」 • 硫酸 敗れて イオンあり！
- H^+ の取り込み競争
- 別れは突然やってきた！ —サヨナラ，いとしの電子たちよ—
- オキシニウムイオンが電子を取り込んだ。
- 金属と酸水溶液の反応はこれだ！ —反応過程を「粒子取り込み競争」で
- 鉄と希塩酸の反応も粒子取り込み競争で 演習問題

9. 化学反応のしくみをさぐる (part IV)

—「粒子取り込み競争」で「酸・塩基反応，酸化還元反応」をみる— -----66～77

- 素反応の過程を「粒子取り込み競争」でみる
- 粒子取り込み競争に基づく酸・塩基反応，酸化還元反応の定義
- 亜鉛と希硫酸は何反応？
- マグネシウムリボンを空気中で燃やす
- 燃焼のときの光の色と温度
- 燃焼しているマグネシウムリボンを CO_2 の中に入れると消える？
- CO_2 が燃焼を支える • 反応過程をみてみよう！
- 「 Mg vs CO_2 」は酸・塩基反応？ それとも酸化還元反応？
- リターンマッチ！再び・・・「亜鉛 vs 水」「亜鉛 vs 濃硫酸」の反応
- 熱水だと反応する • 熱濃硫酸だと反応する
- 活性化すると反応が起こる
- 亜鉛と熱濃硫酸の反応を粒子取り込み競争でみると何反応？
- 粒子取り込み競争の相手は誰だ？ — H^+ は熱濃硫酸の『誘い水』—
- 固体の $NaOH$ を知っていますか？
- フェノールフタレイン溶液が固体を溶かす

- 固体の NaOH に希塩酸を加えると、中和反応は起こるか？
- やっぱり中和反応が起こった。
- 宇宙空間の分子
- 宇宙の王と地球女の王 溶液内の反応における水溶媒の役割

化学反応のしくみをさぐる (part III, IV) まとめ -----78~79

10. 自然の中の化学反応 -----80~91

- 「空中鬼」って何のこと？
- 酵性雨は「空中の死に神」
- 「acid rain」の登場！
- 酸性の強さを表す pH
- 身近な物質の pH
- pH 5.6 以下が酸性雨
- 酸性雨のしくみ
- 硫酸，硝酸の雨が降る！
- ♪びちびち ちゃぶちゃぶ らんらんらん♪ アカシア並木に酸性雨
- 「酸性雨つらら」
- 酸性の雨が，霧が，雪が・・・
- 地球レベルの環境破壊 発生源でくいとめよう
- 湖の酸性雨 「レインアウト」と「レインウオッシュ」
- 土壌の酸性化による影響
- 大気と海の壮大な化学反応
- 屈斜路湖にはどうして魚がいないの？ クッシーが食べた？
- 硫黄泉で酸性雨
- 魚は酸性湖で生きられない！
- 鳥類に歯はあるか？
- ハクチョウの鉛中毒はどうして？ 砂のうに散弾粒
- 体の中で粒子取り込み競争

11. 結局，化学反応って何なのサ！？

5-3) 「粒子取り込み競争」による硫酸と金属の反応の解明

現在作成中の授業書(案)『化学反応入門』の内容の一部を紹介しよう。

問題 6-1) 亜鉛の粒に純水を注ぎました。さてどんな変化が起こると思いますか？

予想) (ア) 特に変化はない。

(イ) 亜鉛はわずかに溶け，水素ガスが発生する。

(ウ) 亜鉛ははげしく溶け，水素ガスが発生する。

予想

どうしてそう思ったか、理由があればだしてください。

実験で確かめる。

問題 6-2) 亜鉛の粒に「濃硫酸」を注ぎました。さてどんな変化が起こると思いますか？

予想) (ア) 特に変化はない。

(イ) 亜鉛はわずかに溶け、水素ガスが発生する。

(ウ) 亜鉛ははげしく溶け、水素ガスが発生する。

予想

どうしてそう思ったか、理由があればだしてください。

実験で確かめる。

実験の結果、亜鉛は「純水」にも「濃硫酸」にも溶けず、水素ガスも発生せず、ほとんど変化は起こりませんでした。〔答えはいずれも(ア)〕

それでは・・・

問題 6-3) 亜鉛の粒に「希硫酸」を注ぎました。さてどんな変化が起こると思いますか？

予想) (ア) 特に変化はない。

(イ) 亜鉛はわずかに溶け、水素ガスが発生する。

(ウ) 亜鉛ははげしく溶け、水素ガスが発生する。

予想

どうしてそう思ったか、理由があればだしてください。

実験で確かめる。〔答は(ウ)〕

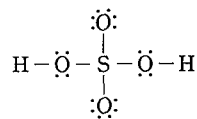
濃硫酸は「分子性物質」

亜鉛は濃硫酸とは反応しなかったのに、希硫酸とは激しく反応して水素ガスが発生しました。なぜこのような違いが起こるのでしょうか？ その秘密を教えましょう。

濃硫酸は H_2SO_4 という分子がたくさん集まっている物質で、ほとんどイオンには分かれていません。つまり、「分子性物質」のままだというわけです。

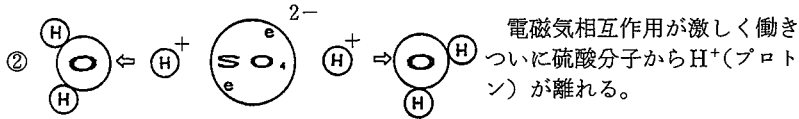
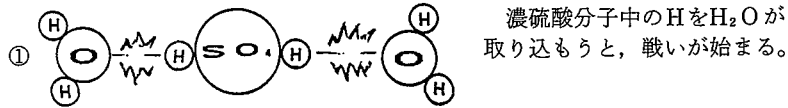
濃硫酸は非金属元素の H, O, S が共有結合してできている分子で、O—H間にわずかに極性がある程度です。

そのため、亜鉛の表面にいる自由電子を取り込めるほどのプラスの電荷を持ち合わせていないのです。

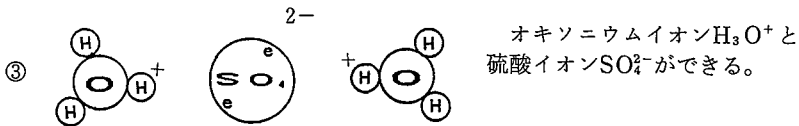


硫酸 敗れて イオンあり！

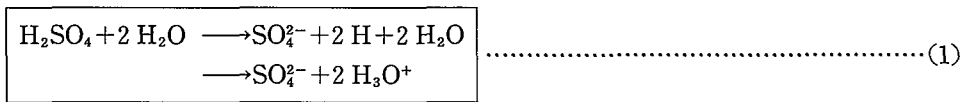
おっとり型の濃硫酸に対して極性の強い水分子は、小さいながらもパワー全開、闘志むき出しで戦いを挑みます。さあ、その戦いぶりをじっくり見てみましょう。



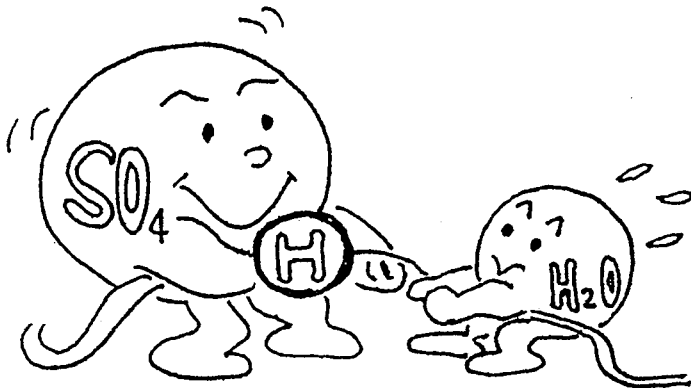
H⁺(プロトン)は普通のイオンよりはるかに小さく、10⁻¹³cmです。したがってプラスの電荷密度が高く、極性の強い水中では単独では存在できず、H₂O分子のO原子と結合してオキソニウムイオンH₃O⁺になるのです。



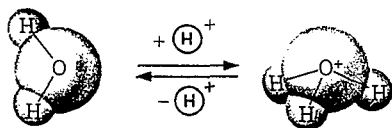
濃硫酸と水との反応を式で表すと、次のようになります。



この対戦はH₂SO₄分子からH⁺を取り込んだH₂O分子の勝ちということになります。この反応は「濃硫酸と水が反応して希硫酸が生成した」という反応で、希硫酸中ではH₂SO₄分子のほとんどがオキソニウムイオンH₃O⁺と硫酸イオンSO₄²⁻に電離しています。



H⁺の取り込み競争があった



オキソニウムイオン

別れは突然やってきた!

——サヨウナラ、いとしの電子たちよ——

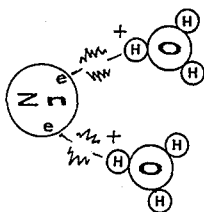
金属の亜鉛の表面には「自由電子」がたくさん動きまわっています。

しかし「亜鉛 VS 水」のときも、「亜鉛 VS 濃硫酸」のときも電子の取り込み競争は起こりませんでした。つまり水分子にも濃硫酸にも亜鉛と争ってまで電子を取り込もうというパワーがなかったわけです。

強敵=オキソニウムイオン現わる!

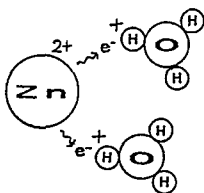
金属が金属であるゆえんは「自由電子」の存在そのものです。ところが、溶液中にオキソニウムイオン H_3O^+ が現れると、亜鉛や鉄の表面から電子がどんどん取り込まれ、ついには金属の性質そのものを失ってしまふという事態になります。

このときの様子を図でみましょう。

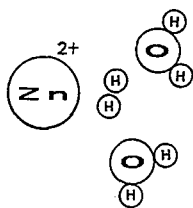


オキソニウムイオン H_3O^+ が亜鉛の表面の自由電子を発見!

猛烈に亜鉛 Zn にアタックを開始!



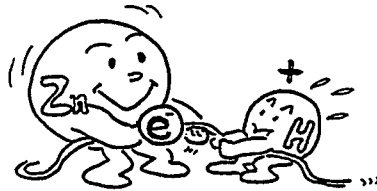
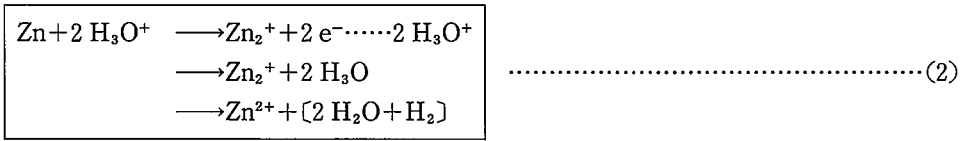
アッという間に亜鉛の電子 e がオキソニウムイオンに取り込まれてしまった。



その結果……

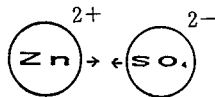
- ① 亜鉛は亜鉛イオン Zn^{2+} になる。
- ② H_3O^+ は電子 e を取り込んで H_2O 分子になる。
- ③ さらに H_2O 分子から H が解離し、2個結合して H_2 ガスとなる。

亜鉛とオキソニウムイオンの戦いの経過を式で表すと次のようになります。

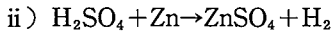
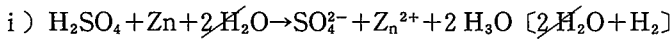
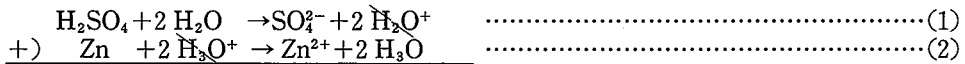


オキソニウムイオンが亜鉛 Zn から電子 e を取り込んだ

亜鉛イオンと硫酸イオンは互いに引き合い、硫酸亜鉛 ZnSO_4 になります。



演習問題 1 反応過程の(1)式と(2)式の辺々を加えて整理してみましょう。



「対戦相手」と「対戦結果」が表れました。

金属と酸水溶液の反応はこれだ!

——反応過程を「粒子取り込み競争」でもう一度——

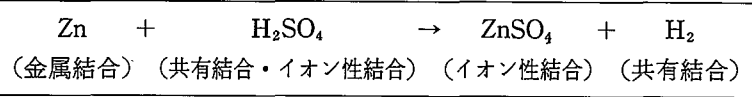
「金属と酸水溶液が反応して水素を発生する」という反応過程は「粒子取り込み競争」で説明できます。反応の手順を次に整理してみましょう。

- ① 酸分子と水分子との間で、酸分子中の H^+ をめぐって取り込み競争が起こる。
その結果、水分子が H^+ を取り込んで、オキソニウムイオン H_3O^+ になる。
- ② 金属の表面にいる自由電子 e をめぐって、金属と H_3O^+ が電子 e の取り込み競争をする。
オキソニウムイオン H_3O^+ が電子 e を取り込んで $[\text{H}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ になる。
- ③ プラスの金属イオンとマイナスの酸分子イオンが電気力で結合し、新しい物質をつくる。



化学結合が変わったヨ!

亜鉛と希硫酸の化学反応で、化学結合がどう変化したか見てみましょう。



原子の組み換えが起こり、新しい化学結合、新しい物質がつけられました。

化学反応のしくみをさぐる<まとめ>

part III 化学反応の仕掛け人たちを探せ!

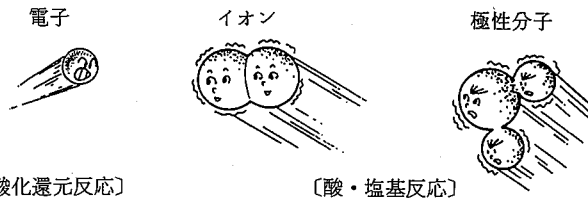
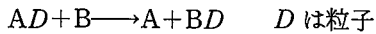
part IV 「粒子取り込み競争」で「酸・塩基反応、酸化還元反応」をみる

① 化学反応が進行している過程では、必ず「粒子取り込み競争」が起きている。

② 「粒子」とは極性分子・イオン・電子のことをさす。

(P 66)

③ 取り込まれる粒子が「極性分子・イオン」ならば「酸・塩基反応」であり、取り込まれる粒子が「電子」ならば「酸化還元反応」である。



極性分子やイオンはたくさんの電子をもっています。ですから、極性分子・イオンを取り込むということは、電子をまとめて団体で取り込むということにほかなりません。

電子の取り込まれ方に着目して、③を別の表現でいうなら次のようになります。

「多数の電子が核と一緒に取り込まれた場合、酸・塩基反応である。」
 「電子だけが取り込まれた場合、酸化還元反応である。」

③*

酸・塩基反応だ、酸化還元反応だといっても、要するに電子の取り込まれ方の違いだけなのである。

- ④ 水は化学薬品である。
水溶媒は反応物質の一つである。

- ⑤ 酸分子と水の反応では酸分子中の H^+ をめぐって粒子取り込み競争が起こり、その結果オキソニウムイオン H_3O^+ が生成される。

- ⑥ 酸分子と水の反応では H^+ の取り込み競争が起こっているのが、酸・塩基反応である。

- ⑦ 金属と酸水溶液が反応して水素 H_2 を発生する反応では、電子の取り込み競争が起こっているのが、酸化還元反応である。

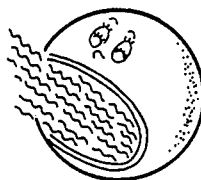
- ⑧ 活性化すると反応が起こる

パワー不足の反応物質も、外からエネルギーを加えてやるとエネルギーを吸収して活性化し、粒子取り込み競争ができるようになります。

「亜鉛 VS 沸騰水」、「亜鉛 VS 熱濃硫酸」の戦いがそうでした。(P 72)

吸収するエネルギーは「熱エネルギー」の場合がほとんどですが、その他には「光エネルギー」や「電磁波」などのエネルギーを吸収しても活性化できます。

熱エネルギー→
光エネルギー→



6. 生徒の評価（感想文）中間報告

授業書『化学反応入門』は札幌新川高校において、2年生4クラス、184名の生徒を対象に授業を行っており、12月5日現在継続中である。

『化学反応入門』の全体的評価はここでは示せないが、以下「肯定的評価」のみを紹介することにする。

<テーマ1 これは化学反応なの？ テーマ2 ミクロの世界の住人たちの感想>

1. 電子の力に感動した……多数！
2. 自分の身近なところに、いろいろな化学反応があることがよくわかった。
電子や原子の原型は何だったんですか。(10組竹山)
3. ミクロの世界の「電気力」やわが輩は電子であるは興味深い内容だった。(金子)
4. 電子について多くの話を聞いて、少し電子というものがわかるようになった。
今まで化学というものは身近に感じなかったけど、なんとなく、少しは近づけたかなと思う。(11組深井)

5. 電子18の電気量など、具体的な例で説明されていてよくわかった。
電子の速度には驚かされた。(11組菅野)

<テーマ3 分子から原子へ、そして…テーマ4 水分子のなかをのぞく の感想>

6. 温度を上げていく過程での分子の様子がよくわかった。温度が高すぎて、想像がつかないほどの高温までバラバラにならないのが、すごいと思った。(9組岩本)
7. 「水をどんどん加熱していくと」のところが楽しかった。1000℃やら10000万℃や途方もない温度が登場してきて、予想するのがおもしろかった。(9組西川)
8. 水を加熱していくと水蒸気(気体)になるのは、常識だからわかるけど、水蒸気を加熱するというのは日常にないので、不思議に思ったというか、おもしろく感じた。
1万～5万℃くらいになると原子が輝きだすというけど、実際に見たいと思った。そのときのHの時速が126000 km。O原子の時速が32000 kmにもなっているのには驚いたけれど、こういうことを知れてよかった。(9組増子)
9. 「水と静電気」のところが楽しかった。水が極性分子だということが思い出せてよかった。(9組西川)
10. エボナイト棒とガラス棒に純水が引き寄せられる実験は、興味深いものがあった。
電子レンジの実験は楽しかったが、自分の予想がことごとくはずれて、残念。でも、その分電子レンジのマイクロ波のことが良くわかりました。(9組稲村)
[注 電子レンジでチン! は多数の生徒が歓迎の感想をだしている。]

<テーマ5 化学反応のしくみをさぐる (part I) の感想>

11. 金属ナトリウムに純水をかける実験は楽しかった。ふつうは火を消すための水が、化学反応で燃焼のもとになることがわかった。(8組柏熊)
12. 「純水とナトリウムの反応」「亜鉛粉末とヨウ素と水の反応」は実験がすごくてびっくりしました。水が化学薬品ということを知り初めてしました。(8組大井)
13. 金属ナトリウムに純水を入れた実験は、とてもびっくりした。また、亜鉛粉末とヨウ素と水での実験で、水の役目も理解できた。
角砂糖に火をつける実験もおもしろかった。
反応熱で目玉焼きの実験、やりたかったなあ。(8組山中)
14. 爆発が最高。[ナトリウムと水の実験で爆発が起こったこと。一梅津]あれがもっと多量の金属ナトリウムだったら怖いけど。
角砂糖の実験は予想が全部はずれてしまった。タバコの灰をつけた角砂糖だけど、タバコの灰でなくてはだめなんじゃないか。(8組沼田)

<テーマ6 原子・分子からマクロ物質へ の感想>

15. 「ドライアイス」の実験がおもしろかった。……多数!
「ドライアイス」が電気を通さないことを初めて知った。……多数。(8組渋谷)
16. ドライアイスで遊んだのが一番楽しかった。水銀の入った入れ物がかわいかった。
17. 金属の3つの特徴の説明が、身近にあるお金を例にしているのが、わかりやすかった。実験もわかりやすかった。(8組宮川)

18. 塩が「融けたら」本当に透明なんて、初めて知ったので、新鮮な気持ちでした。
水銀の実験のときも、水銀を見たのは初めてでした。おもしろい液体、コロコロした液体だと思った。(8組柿本)
19. 物質の三大分類は、よく理解できた。(8組吉田)

<テーマ7 化学反応のしくみをさぐる (partII) 一酸のはなし の感想>

20. 実験がたくさんあって楽しかった。
水が化学薬品だということがよく分かりました。
濃硫酸と希硫酸がちがう物質というのに驚いた。(10組上野)
21. 牛乳とコーヒーが電気を通すなんて意外でした。……多数!
22. 「酸」という字の起源などが楽しかった。牛乳やコーヒーが電気を通るのも楽しかった。(10組長田)
23. 「酸っぱい」という字をいざ書こうと思ったら書けなかった。果実のアルコール発酵と酢酸のところがおもしろかった。クエン酸をなめたら、レモンの味がして、おもしろかった。(10組駒村)
24. 簡易テスターを酢酸の中に入れてそのまま、純水でどんどん薄めていく実験「オストワルトの希釈律の実験」で、電球の明かりがだんだん明るくなっていくのがたのしかった。(10組岡村)

<テーマ8 化学反応のしくみをさぐる (part III) 化学反応の仕掛けた人たちを探せ>

これは「粒子取り込み競争」に関する感想である。(11組のみ)

25. 図で説明してくれたので、よくわかった。その図も電子とかきちんと区別されて、そしてすぐ式にも表されていて、理解しやすかったです。
オキソニウムイオンができる過程や、そのイオンからの反応がていねいに書かれていたので、よくわかった。P 64で反応過程の手順をまとめているところで、はっきりとよくわかった。(11組片山)
26. 濃硫酸と希硫酸はたいしてちがいはないと思っていたけど、本当は違うんですね。
「粒子取り込み競争」の考え方は単純でわかりいいと思う。
「粒子取り込み競争」はなかなかおもしろかった。(11組亀田)
27. 化学反応が起こる理由をわかりやすく説明しているので理解しやすい。(11組太田)
P 64の「粒子取り込み競争」の反応過程の手順がうまく整理してあってよかった。
28. 「対戦相手」とか「対戦結果」とかという言葉を使っているので、興味をもって授業を受けることができる。
細かいことまでていねいに書いてあっていい。例えば、水分子がオキソニウムイオンに変わるところなど。
電荷の変化の仕方がわかると、化学〔反応〕式をおぼえなくても、たいいていのものがわかるので、「粒子取り込み競争」は]とても良いと思う。
反応の途中の経過が「手順」として書いてあるので、ただ暗記するのではなく、自分で考えながらできるので、応用範囲が広くて良いと思う。
亜鉛が濃硫酸と反応しなかったのに、希硫酸とよく反応したという理由が「粒子取り込み

競争で] とてもよくわかった。(11組大徳)

29. P 64~65 「粒子取り込み競争」の手順が1目見てわかるようにまとめられていたので、理解ができて、たのしくなった。(11組小島)

<テーマ9 化学反応のしくみをさぐる (part IV)

「粒子取り込み競争」で「酸・塩基反応、酸化還元反応」をみる>

「粒子取り込み競争」の考え方に関する評価、感想である。

30. すべての化学反応で粒子取り込み競争が起こっていると考えると、はっきり言って単純で、イオン・極性分子・電子を考えるだけでいいので良いと思う。(8組山中)
31. 化学式を見て、すぐに酸・塩基反応が酸化還元反応なのか分かるのがよい。完全とはいかないが、よく理解できた。(8組植松)
32. 反応過程がわかりやすく、どうしてそのような反応が起こったのかが理解できてよいと思う。(8組西脇)
33. ただばく然と反応の過程を覚えるよりは、理屈があっていいと思う。応用もきくと思う。(8組沖田)
34. 粒子の取り込みさえ覚えておけば、様々な化学反応を理解しやすくなると思う。(8組熊谷)

粒子取り込み競争論の有効性に関するアンケート集計 (12/5 現在)

質問1) 化学反応が起こるとき、「粒子(イオン・極性分子・電子)」の取り込み競争が必ず起こっている——という見方・考え方をどう思いますか?

- | | |
|---------------------|----------------|
| ① 単純でわかりいいと思う。 | ⇒ 131名 (72.4%) |
| ② このような考え方では理解しにくい。 | ⇒ 27名 (14.9%) |
| ③ その他の意見。 | ⇒ 23名 (12.7%) |

質問2) どうしてそのように思った(感じた)のか、君の率直な意見・理由を書いて下さい。

35. 反応式だけを書いて、それを暗記するより、「どうしてそんな反応式になるのか」ということが詳しくわかるところがいいと思う。

「酸・塩基反応」と「酸化還元反応」をいっぺんに理解できた。(11組大徳)

この実験授業全体にかかわる評価、分析、および課題等は次号以降で「第二報」として報告する。

文献および註

- (1) 喜多, 市川『大学の基礎化学』P 34:1985 学術図書出版
 - (2) 田中 実「化学教育論序説」, 大竹三郎編『化学教育の体系と方法』P 13:1967 明治図書。
 - (3) 『図説ガッゲン・エリア教科事典 第11巻 化学』P 142:1982 学習研究社を参考に作成。
 - (4) 喜多, 市川 前掲書
 - (5) 泉 邦彦『化学結合と物質のしくみ』P 27:1985 大月書店
 - (6) 倉賀野志郎氏は「層子・相互作用」の教育の可能性について提起している。
「授業書『電磁気学』」, 高村泰雄編著『物理教授法の研究』P 218-P 220, P 376-P 380:1987 北大図書
刊行会
 - (7) 米澤, 永田他『三訂量子化学入門(下)』P 589:1983 化学同人
 - (8) 泉 邦彦 前掲書 P 185
 - (9) 「電荷移動力」に関する主な文献を挙げておく。
 - ① 長倉三郎「電荷移動力と水素結合」(岩波講座現代化学2, 化学結合の量子論)
 - ② “ 「化学反応の電子論」(岩波講座現代化学3, 反応の電子論)
 - ③ 守永健一「酸塩基反応と酸化還元」(岩波講座現代化学9, 酸塩基と酸化還元)
 - ④ Finston, Lychtman『酸・塩基の理論』(藤永太郎監訳 化学同人)
 - ⑤ 分子科学研究振興会『分子の世界』(化学同人)
 - (10) Finston, Lychtman 前掲書 序文
 - (11) 泉 邦彦 前掲書 P 142
 - (12) Gutmann『ドナーとアクセプター』p. 1-2, 1983, 学会出版センター
 - (13) 守永健一 前掲書
 - (14) 日本分析化学会北海道支部『分析化学反応の基礎』P 59:1980 培風館
 - (15) マレル, バーチャ『液体と溶液』P 39:1984 ワイリー・ジャパン・啓学出版
相互作用のエネルギーは、静電的相互作用, 交換相互作用, 分極相互作用, 電荷移動に基づく相互作用
などに分解される点に特徴がある。
これについては米澤貞次郎「化学環境を含めた電子論」(岩波講座現代化学3)を参照。
 - (16) 泉 邦彦『化学のことば』P 143:1985 講談社
 - (17) Usanovich J. Gen. Chem. USSR, 9, 182:1939年
残念ながら現時点で彼のOriginalの諸文献を入手していない。
 - (18) Finston, Lychtman 前掲書 序文
 - (19) Usanovichによる酸, 塩基の定義に関しては, 以下の文献を参考にまとめた。
 - ① Finston, Lychtman 前掲書
 - ② 守永健一 前掲書
 - ③ 曾根興三『酸化と還元』:1978 培風館
 - ④ 高橋金三郎『化学入門』:1977 新生出版
 - (20) Finston Lychtman 前掲書 P 165
 - (21) 守永健一 前掲書 P 166
 - (22) 高橋金三郎 前掲書 P 185
 - (23) Charlot, Wolff, La Croix Anal. Chim. Acta, 1, 73 (1947)
“ ibid, h, 285 (1949)
- 本稿における「粒子取り組み競争」論は, Finston. Rychtman『酸・塩基の理論』に拠った。