

目次

1. まえがき	3
人類を発展させた火を使いこなす文明	3
著名な化学の啓蒙書「ロウソクの科学」	4
燃焼は酸化反応	5
2. 火付けと火消しの理屈は同じ	9
火付けの工夫	9
燃焼の3要素	10
空気のない所でも煙が立つ	11
燃焼は出会いの反応	12
戦争の引金となった空気から火薬を作る技術	14
恋愛の成就を困難にする高い障壁	17
火熾しの極意	20
火消しはいなせな兄ィの仕事	22
火の本質は燃焼熱	27
水素は果たして環境に優しいか	31
3. 錆びるも燃えるもみな酸化と還元	36
原子内に電子を拘束している静電引力	36
周囲の電子の数で決まる原子の性質	38
電圧で表す酸化剤の能力	42
トタン板と使い捨てカイロ	45
王水は最も強力な酸化剤?	48
銀写真も青写真も光による酸化・還元反応	50
電子の遣り取りを利用した電池	52
電気分解は発電所の力を借りた酸化・還元反応	54
電気エネルギーを貯蔵する電池	57
4. 生体内の酸化と還元	62
元素の酸化の状態を示す酸化数	62
水の分解で作られるブドウ糖	65
酸素無しで棲息する太古の生物	68
ブドウ糖を酸化しても火傷しない生物の工夫	71
酵母から横領したお酒	74
排気ガスで膨らましたパン	76

お酢はお酒の失敗作.....	78
美味しさが増す青魚の干物.....	80
アミノ酸の一種チロシンの酸化を抑えて美白.....	82
5. 酸化・還元反応なくしては成り立たない日常生活.....	86
地球の酸化と生物の進化.....	86
文明を生み出した酸化・還元反応.....	88
原子間に電流が流れる酸化・還元反応.....	90
索引.....	94
別表 1.....	101
別表 2.....	130

1. まえがき

人類を發展させた火を使いこなす文明

約 38 億年前に地球上に誕生した生物は種々の変遷を経て数えきれない種類の動物や植物に進化してきました。それらの中で人類は象ほどには大きくありませんし、キリンほどには背が高くありません。虎は千里を走るといわれ、鯨は北極海から南氷洋まで泳いでゆきます。ハヤブサのように速く移動できませんし、猿ほどには木登りが得意ではありませんし、犬ほどには匂いを嗅ぎ分けられませんし、フクロウのように闇夜で見ることができません。ましてや人類は空を飛ぶ能力も、水の中に住むこともできません。このように多くの動物に比較しても、人類は特段に秀でた能力を備えたわけではありませんが、霊長類と名乗って最も高等に進化した生物と思いあがっています。

人類が言語や文字や道具や農耕などの文明を持っているために霊長類と名乗って威張っていますが、小鳥の四十雀が言語を使って情報交換をしていると聞いたことがありますし、猿は種々の道具を用います。しかし、多くの動物が山火事の折にはただ逃げ惑うのに対して、人類は火を熾して寒さを凌ぎ、襲ってくる動物の攻撃を防ぎ、山を焼いて農耕に利用してきました。焚火の火を利用して銅を精錬し、青銅製の精巧な道具を作ることができましたから、獰猛な獣も敏捷な鳥類も人類の餌食にすることができました。さらに、高温の火を利用することが工夫されて初めて鉄器が作られましたから、性能の高い道具や武器を利用できるようになりました。物を燃やして動力に変換する技術を Watt が開発して、産業革命を引き起こしました。Nobel が物を短時間に激しく燃やす技術の開発に成功しましたが、その強力な破壊力は土木技術の向上ばかりでなく武器弾薬の進歩に繋がりました。Siemens らの多くの発明は物を燃やすことにより電気を生み出し、あらゆる面で便利で豊かな日常生活を可能にしました。火を使いこなすことにより初めて人類は多くの動物から差別できる文明を供えたと思われまふ。物を燃やすことこそが人間を他の生物から優位に立つことのできた知識であり技術であり、文明の發展の基礎となるものです。

このように人類の歴史の過程において、有効にしかも大量に火を使うことが天下を制し、生活の向上に繋がりましたから、人類は競って火遊びをするようになりました。結果として地球を征服したと思いがっている人類はその本来の身体能力を補うように、石油をどンドン燃やして地球狭しと動き回り、生活環境を快適にすべく夏は冷房を冬は暖房をし、昼間のように煌々と灯りを点して昼夜の別なく活動しています。自然の摂理に反するようなこの人類の驕りと贅沢が気温の上昇をもたらし、ひいては度重なる天変地異を引き起こす原因となっているのかもしれない。もし人類の贅沢が気温の上昇、大気汚染、自然の破壊などを引き起こし、これらの変化を原因とする天変地異が地球環境の破壊に繋がるものであれば、由々しき問題と考えなければなりません。自然の摂理に従えば、火を使いこなすことにより霊長類と名乗って最も高等に進化した生物と思いあがっていますが、その火を使う技術と知見が人類を滅ぼす最も強力な仇として働くと考えられます。

著名な化学の啓蒙書「ロウソクの科学」

父親が「蝋燭の科学」なる本を買ってくれましたが、小学生時代の著者にとって岩波文庫の本を持つことは大人になったように感じて大変うれしかったと記憶しています。しかし、内容がチンプンカンプンで結局初めの数頁を読んだだけで、その後は本棚に飾っていました。このように科学に対して無知であり興味もなかった著者がヒョンなことから大学で化学を専攻することになり、その後約半世紀にわたり化学を勉強し研究し教えることになりました。最近、本屋で暇つぶしをしている折に偶然にも、東京大学の竹内教授の訳された図 1-1 に示すような「ロウソクの科学」が目にとまり読み返すことになりました。

「ロウソクの科学」は 1860 年のクリスマスから 1861 年の新年にわたり、Faraday がイギリスの子供たちに対して行った 6 回のクリスマスレクチャーの内容を出版したものです。この講義を行った Faraday は電池や電気分解などの電気化学の他に電磁誘導や反磁性などの電磁気学の分野における多大な功績により、英国王立研究所の所長を永年にわたり務めました。彼の功績を称えて規定されたファラデー定数は 1 モルの電子が持つ電気量 ($F \doteq 96485.33289 \text{ C/mol}$) を意味し、電磁気学と化学の分野を橋渡しする電気化学の最も基礎となる物理定数です。

このクリスマスレクチャーの第 1 回はロウソクの製法や点火による形態の変化や炎の構造や上昇気流など、第 2 回はロウの燃焼に伴う物質変化と加熱された炭素固体、第 3 回は燃焼で生成する水と水素、第 4 回は燃焼に必要な酸素、第 5 回は燃焼で生成すると二酸化炭素、第 6 回は栄養と呼吸に基づく生命活動における活力などの内容だったようで「ロウソクの科学」も 6 講に分かれています。これらの講義では空気や温度変化に伴う物質の挙動、炭素や水素や酸素や二酸化炭素などの物質の性質とそれらの化学反応による変化、生物と科学の関係などの化学の本質が巧みにまとめられています。

Faraday は実験の上手な研究者だったようで、非常に洗練され、良く工夫された多くの演示実験が各講義に取り入れられていました。しかしながら、化学をはじめ多くの自然科学は 19 世紀初めに体系化され、その後の 200 年間に実験器具や技術が飛躍的に進歩し、膨大な知見が蓄積されましたから、150 年前に行われたこの講義と実験は古典化学ともいべきもので、現代ではすでに手にすることのできない実験器具や手法や薬品が多く含まれています。永年にわたって化学を勉強し研究してきた著者には講義や実験の趣旨は理解で

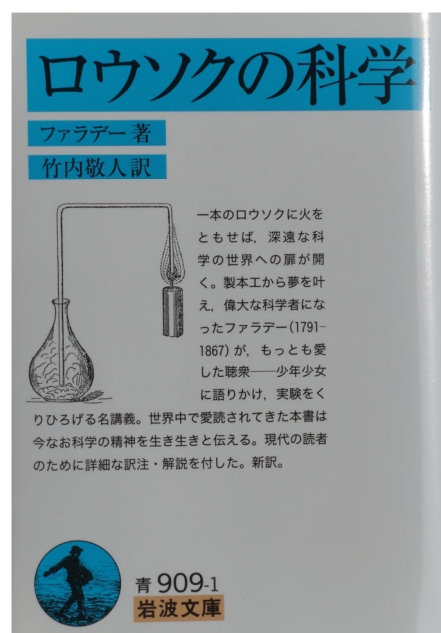


図1-1 岩波文庫の「ロウソクの科学」

きましたが、現代の子供たちにとってはチンプンカンプンで理解することが難しく感じられ、啓蒙書としての価値はかなり減じたものと思われました。この書が出版された 1861 年は日本ではまさに明治維新直前の混沌とした時代で、イギリスでは子供相手にこのような啓蒙的な公開講座が催されていたことに敬服するばかりです。

燃焼は酸化反応

森の中で木と木が擦れ合い摩擦熱により高温に達しますと木が煙を出して燻ります。さらに燃え易い木の枝や枯葉が近くにありますと炎を挙げて燃え始めます。このようにして自然界では山火事がしばしば発生しますが、人類はこの山火事の原因となる摩擦熱から人為的に火を熾す技術を習得しました。さらに、青々とした葉や生木が燃え難く、枯れ葉や乾燥した芝草が燃え易いことも体得していました。このように永年の経験から人類は火を使い熟すことができるようになりました。この人為的に物を燃やすことこそは人間が他の多くの生物から優位に立つことのできた知識であり技術であり、文明の発展の基礎となるものです。

掃き集めた落ち葉の山の中にサツマイモを埋め込み、火を点けて焚火をすることは子供の頃の秋の楽しみの一つでした。枯葉に火を点けますと、灰色の煙を出して燃え始めますが、火が大きくなりますと次第に煙が無色になってゆきます。風がなければ煙は上に昇ってゆきますが、風が吹くと風上に面した部分では激しく燃えますが、風下に面した部分は煙が被い火は比較的穏やかにしか燃えません。焚火が燃え続きますと次第に落ち葉の山は小さくなり、小さな灰色の灰の山が残ります。木枯らしの吹く寒い時でも焚火の周りは暖かく、焼きあがったサツマイモに釣られて手の空いた人たちが自然と集まってきます。灰は燃えませんがサツマイモを食べ終わるころには枯葉がなくなり、火の勢いが小さくなって焚火は終わります。このように焚火では、落ち葉の大きな山が煙と熱を出しながら次第に小さな灰の山に変わります。

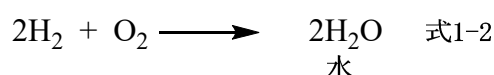
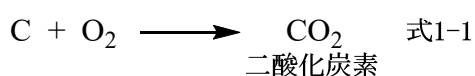
図 1-2 には暖炉の中で燃え盛る薪の写真を掲げましたが、薪に含まれる燃える成分が高温により気体になって噴き出しているために、薪からは盛んに青色や赤色の炎が上がっています。燃え続けますと発生する気体は尽きますから、炭のように橙色の高温の塊となって燃焼を続けます。最後には白色の少量の灰が燃え残ります。

化学の本質について子供たちを啓



図1-2 暖炉で燃え盛る薪

蒙るために Faraday が英国王立研究所で開催したクリスマスレクチャーに取り上げたように、ロウソクの灯や焚火のように物を燃やすことは最も身近に起こり、しかも最も日常生活に役立つ基本的な化学変化です。Faraday はできるだけ化学用語を使わないように説明していますが、現代の小学生や中学生は理科の時間にかかなり多くの化学用語をすでに勉強していますから、著者は基本的な化学用語を使わせてもらいます。主に炭素(C)と水素(H)と酸素(O)の元素でできている枯葉がそれぞれ式 1-1 と式 1-2 に示すように空気中の酸素(O₂)と反応して、炭素は二酸化炭素に、水素は水に変化して気体となって空気中に拡散します。このとき大量の熱エネルギーを短時間に発散しますから焚火の周りを温かくし、サツマイモを美味しく焼き上げます。



農作業において施される肥料の窒素化合物とリン酸とカリウムは植物に必要な栄養素で、当然枯葉の中には窒素とリンとカリウムの元素が含まれています。わずかながら枯葉の中に含まれるこれらの元素の中で窒素は焚火の間に二酸化窒素に変化して気体となって拡散しますが、リンとカリウムはそれぞれリン酸と酸化カリウムなどのカリウム塩として灰の中に残ります。この灰を水に溶かして上澄み液を壺に入れておきますと乾燥して白い粉が残りますが、この粉は壺を意味する Pot と灰を意味する Ash に由来する Potash と呼ばれていますが、主に炭酸カリウムを含んでいますからカリウム元素を英語では Potassium と呼んでいます。因みにカリウム元素はドイツ語では Kalium と呼ばれていますから、元素記号には K を用い、日本語でもドイツ語を音訳してカリウムと呼んでいます。

大学時代に著者が煙草を燻らせながら友人とバーでお酒を飲んでいるときに、座興で友人が角砂糖に火を点けてみよと持ち掛けてきました。当時のバーには必ず角砂糖が置いてありましたから、マッチ 10 本ほどで試してみましたが全く燃え付きませんでした。友人は少量の煙草の灰を擦り付けてマッチ 1 本で見事に点火させ、薄暗いバーの中でユラユラと赤い炎を上げながら角砂糖を燃やしてみせました。お酒を飲みながらの座興とはかくの如きものかと大いに感心しつつ、少しのおまじないで炭素と水素と酸素の元素からなる純粹の砂糖もよく燃えることを知りました。本書を書くに当たり、2 つの銘柄の角砂糖の点火



図1-3 角砂糖を燃やす実験

を再実験しましたところ、一つの銘柄の角砂糖の点火にはマッチを数本要しましたが、他の銘柄の角砂糖はマッチ 1 本で簡単に点火し図 1-3 に示すように赤い炎を挙げて燃え続けました。このようにロウソクも枯葉も角砂糖も燃焼すると発熱して炭素と水素の元素は二酸化炭素と水にそれぞれ変化してゆきます。二酸化炭素は炭素原子に 2 つの酸素原子が結合した化合物ですし、水は 2 つの水素原子が酸素原子に結合した化合物ですから、これらの変化は種々の元素が酸素原子との結合を作る変化で酸化反応と呼ばれています。

小麦粉と砂糖と酵母（イースト）に水を加えてよく混ぜ、よく練り合わせたパン生地を約 40°C に約 3 時間温めておきますと、生きていたイーストは砂糖を食べて盛んに泡を出しながら生命維持の活動をしますからパン生地は大きく膨れてきます。膨れたパン生地を約 200°C で焼けばパンの出来上がりですが、この過程でイーストが出す泡は実は二酸化炭素ですから、イーストは炭素と水素と酸素の元素からなる砂糖を二酸化炭素と水に変化させたこととなります。この変化は発酵と呼ばれるイーストの生命維持活動で、高い温度を発生しませんから燃焼とは言えませんが、本質的には角砂糖を燃やすのと同じ酸化反応と呼ばれる式 1-1 と式 1-2 のような化学変化です。

鉄道の線路も日本刀の刃も銀色に光る鉄の金属ですが、廃線になって使われなくなった線路も、古墳から出土される鉄の刀も赤褐色に錆びています。この鉄錆は鉄の原子が酸素原子と結合した酸化鉄ですから、鉄が錆びる変化は燃焼や発酵と同じように酸化反応と考えることができます。鉄に限らず多くの金属も皆錆びて酸素原子と結合した酸化物に変化しますから、これらの変化も酸化反応と考えることができます。例外的に金と白金はほとんど酸化反応をしませんから、錆びることなく常に金属固有の光沢を保つことができ、貴金属として女性を飾り立てます。このように物が燃える燃焼やパンを膨らませる発酵や鉄の道具が赤褐色に錆びることなど身の回りには多くの酸化反応が起こっています。多くの場合に酸化反応は酸素原子と結合を作る反応で、酸素原子との結合を切断してゆく酸化反応とは逆の方向の変化を還元反応と呼んでいます。

木と木を擦り合わせて火を熾していた人類は火打石を利用することを知って格段に火を使いこなすようになりましたが、文明開化とともにマッチが普及し、各種の技術の進歩により圧電素子のライターへと発展し変遷してゆきました。このように火を熾すことは人類以外の動物には真似のできない極めて難しい知識と技術ですが、マッチやライターの発明により全く苦勞することなく火を熾せるようになりました。逆に現代の多くの人々は火を取り扱う基本的な知識や技術を体得する機会がなく、設備のない野外や被災による非常時などに火を使うことができなくなっています。人類を霊長類として差別してきた火を使いこなす知恵と技術を失うような文明の進歩で良いのでしょうか。

人類の将来にも関わりのあるこれらの酸化反応と還元反応は互いに密接な関係にある最も基本的な化学反応ですから、本書では化学の知識や過去の成果を基にして燃焼などの変化を含めて酸化反応と還元反応を独善的に考えてゆこうと思います。人類以外の動物には真似のできない極めて難しい火を熾す知識と技術を化学の知識で考え、火熾しの技術を

理論に基づいて考えてゆこうと思います。身の回りの種々の物質の酸化反応や還元反応が関わる種々の影響を考え、何か一つでも化学の研究や教育に役立つものが見つけ出せれば良いと思っております。また、酸化反応や還元反応の特性を考えることで日常生活を豊かにする助けになれば、本書はさらなる意義を持つことになると思われま