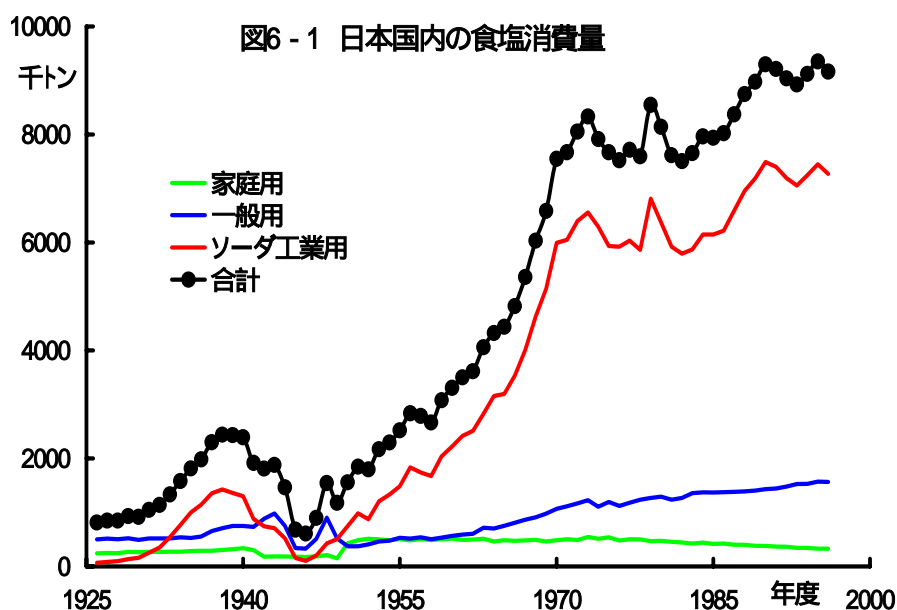


6. 苛性ソーダを浪費する贅沢

苛性ソーダと単体塩素

海水中に含まれる食塩は 4.0×10^{15} トン、岩塩などの形で地殻中に埋蔵されている食塩は 1.0×10^{13} トンと推定されています。このようにほとんど無尽蔵の食塩は世界の至る所で入手できる最も安い資源と考えられます。現在人類が世界で消費している食塩は 1 年間に 1.7×10^8 トン程度で、海水から 26%、岩塩や鹹水の形で地殻中から 70% 供給されています。1920 年代後半に日本国内で消費された食塩は食用に 2.5×10^5 トン、工業原料として 9.8×10^4 トンほどでした。財団法人塩事業センターがまとめたデータをもとにした図 6 - 1 に示すように、その後の約 70 年間にソーダ工業の原料としての消費量が飛躍的に増加し、最近 10 年間の平均消費量は食用の食塩が 3.8×10^5 トン、炭酸ナトリウム、水酸化ナトリウム(苛性ソーダ)、および塩素を含む物質などの工業製品の原料として 7.0×10^6 トンの食塩が消費されています。重工業生産の増加とともにこのように増加してきたソーダ工業用の食塩は、おもに炭酸ナトリウムの製造と食塩の電気分解の 2 つの化学工業の主原料に充てられています。



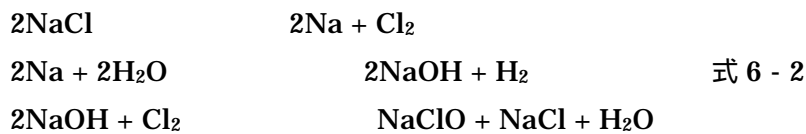
食塩と石灰石からアンモニアを触媒として用いて、大量に炭酸ナトリウムがソルベイ法により製造されています。この炭酸ナトリウムの製造過程は原料の石灰石の焼成や中間に生成する炭酸水素ナトリウムの焼成など複雑な多くの反応段階を巧みに組み上げたものですが、総括的には式 6 - 1 の反応にまとめられるもので大量のエネルギー消費を伴います。



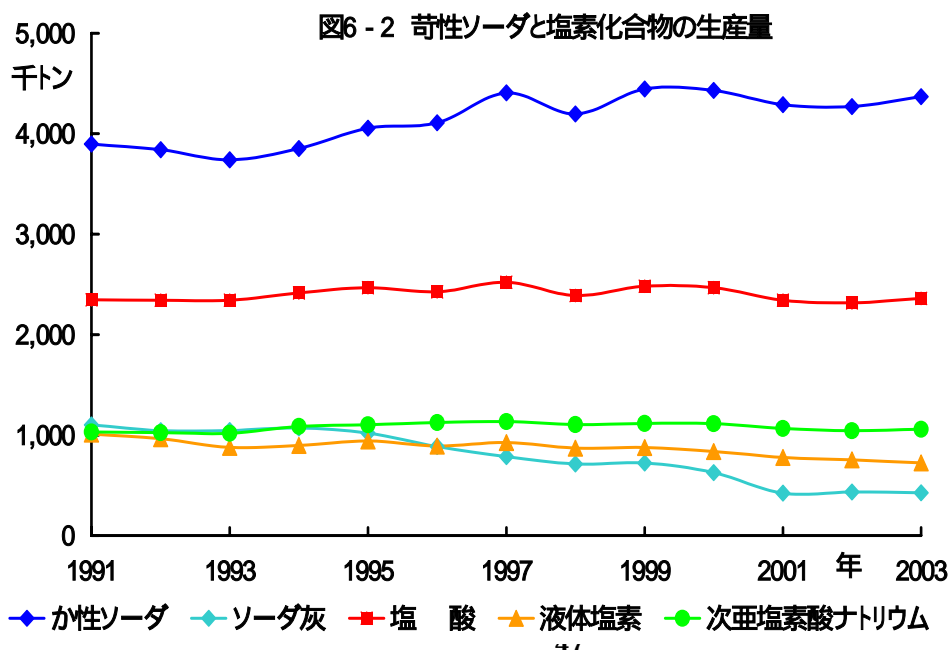
ここで製造される炭酸ナトリウムはソーダ灰と呼ばれ、ガラスの重要な原料になっています。しかし、複成する塩化カルシウムは極めて廉価で、豪雪地帯の道路の融雪剤などに用いられていますが、あまり有効な利用とは思えません。塩化カルシウムの有効な利用法を開発しない限

り、ガラスの需要に伴い塩化カルシウムは過剰に製造されてしまう結果になりますから、ガラスの浪費は無用の塩化カルシウムの製造と大量のエネルギーの消費となり、人類の贅沢になってしまいます。

工業原料として食塩は水酸化ナトリウムの製造において最も多量に消費されています。食塩水を電気分解すると、式 6 - 2 に示すように陰極に金属ナトリウム、陽極に単体塩素が遊離してきます。金属ナトリウムは溶媒の水と反応して水酸化ナトリウムと水素になりますから、食塩 58.5g の水溶液を電気分解すると、40g の水酸化ナトリウムと 35.5g の単体塩素と 1g の水素ガスが生成します。単体塩素は水に多量に溶け込んでしまい、水酸化ナトリウム水溶液と混合しますと次亜塩素酸ナトリウムに変化してしまいます。そのため、食塩水の単純な電気分解では水酸化ナトリウムも単体塩素も効率的に製造することが出来ません。



陽極と陰極の生成物の混合を避けるために、陽極に水銀を使い、電極の水銀と生成する金属ナトリウムを液状のナトリウムアマルガムとして反応槽から取り出し、別室に移動させてからナトリウムアマルガムに水を反応させることにより水酸化ナトリウムを生成する製造法が開発されました。このアマルガム法は単体塩素と水酸化ナトリウムの混合することが全くありませんから、両者を純粋に効率よく製造できるため、1960 年代には日本の水酸化ナトリウム製造を担う方法になりました。第 3 章で示した水銀触媒によるアセチレンの反応の副反応がもとで発生した水俣病公害が丁度この頃に社会問題になり、水銀の排出規準が極めて厳しくなってきました。アマルガム法による水酸化ナトリウムの合成は理想的には全く水銀の排出がないと思われませんが、実際には多少の副反応が起こり水銀化合物の漏洩は免れません。水銀の漏洩を皆無にするためには高性能な水銀の回収設備を必要とし、経済的に大きな負担になってきました。そのためアマルガム法は立ち行かなくなり新しい技術が要求されました。



現在ではナトリウムイオンと水だけが通り抜け出来るような隔膜で、食塩水の入った陽極槽と水酸化ナトリウムを生成する陰極槽を隔離する隔膜法で食塩の電気分解が行われています。これにより陽極槽に食塩水を供給して通電すると単体塩素が遊離してきます。隔膜を通り抜けてきたナトリウムイオンは陰極で水素ガスを発生しながら水酸化ナトリウムを生成します。この製造法は電解槽に隔膜で仕切りを作り生成してくる単体塩素と水酸化ナトリウムを混合することなく取り出す方法で、経済的にも効率の良いものです。

先進諸国の国民総生産（GNP）と水酸化ナトリウム(苛性ソーダ)の生産量には相関性が認められ、GNPが10倍の国では水酸化ナトリウムを約10倍生産しています。このように国力の尺度と見なすことのできる水酸化ナトリウムの生産量をはじめ、図6-2にはソーダ工業会がまとめた炭酸ナトリウム(ソーダ灰)、塩酸、単体塩素および次亜塩素酸ナトリウムの生産量の変化を示しておきます。この統計資料によりますと、最近15年間の日本国内における水酸化ナトリウムの生産量は年率平均で1.3%増加していますが、次亜塩素酸ナトリウムは微増に留まり、単体塩素と炭酸ナトリウムはそれぞれ1.9%と8.3%減少しています。ソルベイ法によるソーダ灰の製造においては炭酸ナトリウムと塩化カルシウムの消費量の釣り合うことが望ましいことです。同じように食塩の電気分解においても、水酸化ナトリウムと単体塩素の消費量の釣り合うことが望まれます。近年、水酸化ナトリウムの消費量が増加し、単体塩素の消費量が減少していることは、日本の化学工業における大きな問題になりつつあります。

単体塩素の用途と需要

生産量が国力の尺度と見なすことのできるほどに水酸化ナトリウムは工業的に重要な化成品であり、食塩の電気分解により生産される水酸化ナトリウムと単体塩素の消費量は釣り合うことが望まれます。ソーダ工業会の集計によりますと、表6-1に示すように近年の日本国内の単体塩素の消費量の30%は塩化ビニルの製造に用いられています。また、ポリウレタンの原料となるトルエンジイソシアナート（TDI）およびメチレンジフェニルイソシアナート（MDI）、酸化プロピレンの調製にも単体塩素が用いられています。このようにプラスチック製造で消費されるほかに、調味料、無機薬品、染料などの合成中間体製造に広く単体塩素が用いられています。総需要の15%に相当する単体塩素が消費されてポリハロメタンやポリハロエタンなどが低分子量の炭化水素から合成されており、塩素系有機溶媒あるいは冷媒として広く用いられています。また、古くからDDT、BHC、パラジクロロベンゼンなどの塩素系の殺虫剤や農薬が広く用いられており、単体塩素が原料として消費されてきました。さらに、単体塩素が強い酸化作用を示すことから、漂白剤や殺菌剤として広く用いられており、紙やパルプの漂白、上水道の水質維持のために用いられています。

このように多種多様の用途に用いられているため、1990年代には水酸化ナトリウムの需要に対して約13%ほど単体塩素が不足しており、国外から輸入されていました。その後急激に単体塩素の需要が減少してきましたから、ソーダ工業としては大きな問題になりつつあります。

クスリとリスク

人類を含む全ての生物は極めて精巧に組織された一連の化学反応によりその生命活動を維持しています。あらゆる物質がそれらの化学反応に関与するときには、必ず大なり小なり影響を

与えます。この影響が生命活動に有利に働く物質をクスリと呼んでいます。反対に、この影響が生命活動

表 6 - 1 国内の単体塩素需給実績 (単位:1,000 トン)

会計年度(4～3月)	1988	1989	1990	1991	1992
単体塩素生産量	3,117	3,273	3,448	3,409	3,359
(か性ソーダ換算量)	(3,556)	(3,732)	(3,937)	(3,896)	(3,840)
回収単体塩素量	667	703	714	726	736
塩素誘導品の輸入	644	650	598	560	553
合計	4,428	4,426	4,760	4,695	4,638
紙・パルプ	273	273	252	226	212
塩化ビニル	1,323	1,390	1,468	1,424	1,469
調味料	38	35	30	32	31
塩素系溶剤	477	— 460	409	371	359
クロロメタン	260	281	289	296	305
酸化プロピレン	286	331	325	345	300
TDI・MDI	168	185	201	217	225
無機薬品	365	377	393	390	396
染料・中間物	156	175	195	182	179
その他	1,084	1,117	1,195	1,210	1,164
合計	4,430	4,624	4,757	4,693	4,640

に不利に働く物質を毒と呼んでいます。生命を維持する化学反応は種にかかわらずかなり共通性を持っていますが、動物と植物の違いあるいは昆虫と哺乳類や広葉の草と稲のような草など種類の違いにより、特異な生体内の化学反応も多種多様に含まれています。しかも、物質が生体内反応に関与するときには、物質の量に比例し生体の重量に反比例した影響を与えます。そのため、種類により影響の仕方が異なりますが、同じ種類の生物に対しては生体の小さいものほど大きな影響を受けます。生命活動を維持するための精巧に組織された多種多様な反応のうちで、ある反応の過程にはクスリとして作用する物質も、他の反応の過程には毒として作用することがあります。また、少量ではクスリとして作用する物質が限量を超すと毒として作用することもあります。言葉を替えれば、全ての物質はクスリの働きと毒の働きを持っており、クスリの使用にはリスクを伴います。

1998 年にロシア連邦共和国のウラジオストックで起こった韓国領事殺害事件で使用された毒薬はネオスティグミンプロミドという重症性筋無力症の治療薬でした。筋無力症を患う人にとってはこの物質は大切なクスリですが、韓国領事やその事件の犯人にとっては明らかに毒の物質です。このような極端な例でなくても、アルコールのように少量では人の精神を落ち着かせ、社会を平和にする働きをしますが、多量に飲めばアルコール中毒を起こし、短時間に 600ml

以上のアルコールを飲むと 50%以上の人が死に至る猛毒となります。

クスリには人体に直接作用して生命活動を改善する医薬品のほかに、人間生活を豊かにするための物質が化学薬品、工業用薬品、農業用薬品（農薬）などとしてあらゆる分野で用いられています。窒素や燐やカリウムを多量に含む土壌では農産物の収穫が向上するため、尿素などの肥料と呼ばれる農業用薬品を畑の土壌中に供給しています。農作物が環境からの悪影響を最小限にするように、農作物の成長を促進したり、殺菌剤や殺鼠剤や殺虫剤を散布したり、除草剤を使用して雑草を駆逐しています。これらの農薬は人類にとって有益な生物の生長を助ける役目をしていますから、クスリの作用をしていることになります。しかし、殺鼠剤や殺虫剤は人類にとってはクスリでも、鼠や昆虫にとっては毒の作用を持っています。鼠も昆虫も人類と同じように動物ですから、彼らの生命活動を維持するための化学反応と類似の化学反応を人類も持っています。それらの動物を殺傷するためのクスリは当然人類にとっても毒の作用をもっているに違いありません。亜ヒ酸は「石見銀山」あるいは「猫いらず」として古くから殺鼠剤として用いられてきましたが、その強い毒性のために殺人にも誤用されてきました。例えば、1998年に起こった和歌山カレー事件では殺鼠剤用の亜ヒ酸がお祭りのために用意されたカレーの中に混入され、2人の尊い命を奪いました。このようにクスリは使い方を誤ればかなり高いリスクを伴っています。

さらに生命活動を直接維持する化学反応ばかりでなく、地球上で進行するあらゆる化学反応に対しても、全ての物質は大なり小なり関与して影響を与えます。人類にとってはクスリであっても、他の生物を含めて全地球にとっては毒となっているかもしれません。クスリが自然の本来の釣り合いを壊すことになり、周り回って人間生活に芳しくない結果をもたらすことも多々あります。人類が動物の一種として生活するために必要な最小限を超えて物質を消費することは、全地球に対して必要以上の毒を撒き散らすことになり、これは自然の摂理に反するような人類の驕りであり贅沢と考えられます。

このようにクスリを必要以上に使用することは浪費であるばかりでなく、大きなリスクを伴います。そのため、クスリの効果があらわれる最少量を有効量（ ED_{50} ）として示し、クスリの必要量を知ることができるようにしています。しかし、クスリの効果を人類に対して直接試験することは安全性の点で問題がありますから、鼠や犬や猿などの哺乳動物を使って試験をしています。当然試験動物の体重が異なりますから、有効量はクスリの有効最小量を体重で割って1kg当たりの有効量として規格化しています。このようにして、クスリの効果が50%の人にあらわれる必要量は有効量（ ED_{50} ）に体重を掛け合わせて算出できるようにしています。同じようにアレルギーや種々の病気が50%の人に発症する最小量も有効量（ ED_{50} ）として物質の毒性を知ることができるようにしています。さらに、50%以上の人を死に至らしめる最小量を致死量（ LD_{50} ）とし、物質の究極の毒性を表しています。人類の持つ新陳代謝作用や解毒作用や自然治癒などの能力が物質に十分に働く場合には、短時間にはクスリの作用も毒の作用もあらわれますが、時間の経過とともに物質が浄化されてしまいそれらの作用は弱くなってしまいます。有効量と致死量は何れも短時間の間にあらわれる物質の性質であり、急性薬効あるいは急性毒性を示す非常に有用な指針となります。しかし、新陳代謝作用や解毒作用が充分には働かず体内に蓄積する物質については、時間の経過とともに物質の体内に蓄積する量が増加するために、当然生命活動を維持する化学反応に与える影響も次第に増加するものと思われます。クスリの

効果が次第に増加することはあまり問題になりませんが、物質の蓄積による毒の効果が増加することは人類にとって好ましいことではありません。このような物質に対しては耐容量という指数を用いるようになってきましたが、これは生命活動を維持する化学反応に与える影響を一生にわたって受けても全く毒性が観測されないと推定される量を意味します。

1960年代のベトナム戦争の折に、アメリカ軍は深いジャングルの中に潜むゲリラ兵に大いに悩まされました。そこでアメリカ軍はクロロフェノキシ系農薬と呼ばれる植物成長ホルモンの作用を攪乱する農薬を枯葉剤として大量に散布しましたが、不純物としてダイオキシン類が含まれていたためさらに大きな中毒事件に発展してしまいました。このダイオキシン類のなかでも、図 6-3 に示す 2,3,6,7-テトラクロロジベンゾダイオキシンが最も強い毒性を示すと考えられており、その致死量 (LD_{50}) は $6 \times 10^{-7} \text{g/kg}$ ですから、ふぐの毒より 10 倍ほど強い毒ではないかと思われます。しかし、この化合物の耐容量は 1kg の体重の動物に換算して 1 日に 10^{-12}g と見積もられており、この微少な耐容量は現実的な目安としては、耳搔きで 1~2 杯のダイオキシンでも日本人全員に何がしかの悪影響を与えるかもしれないということを意味しています。

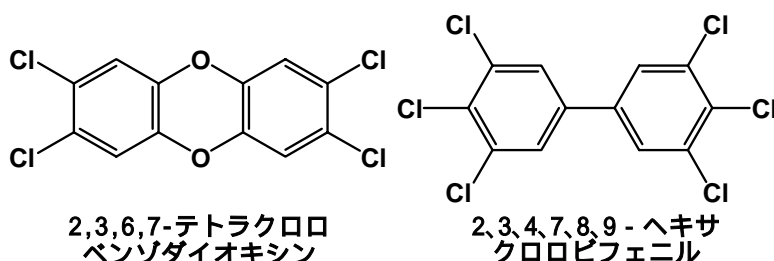


図 6-3 ダイオキシンと PCB の構造

現在では、ダイオキシン類の場合にはこの耐容量が社会的な許容量に採用されていますから、ほんの少しでもダイオキシン類が発生してしまうと大きな社会問題になってしまいます。埼玉県所沢でごみの焼却炉の灰とともにダイオキシン類が一緒に排出された事件が 1999 年に起こりましたが、原因は塩化ビニルを含むごみを比較的温度の低い焼却炉で焼却処理したときにダイオキシン類が発生してしまったものと考えられています。その後、公的機関が運営するごみ焼却炉は石油などの助燃剤により高温で焼却できるように改良され、塩化ビニルなどの塩素化合物を焼却してもダイオキシン類を発生する事故は起こらなくなりました。しかし、家庭や小規模の企業などでごみの焼却ができなくなってしまいましたから、公的機関は大量の助燃剤を浪費して大量のごみの処理をしなければならなくなりました。

PCB と呼ばれる塩素原子が多く結合したビフェニル化合物は融点が低く沸点が高い性質から揮発性が低く、広い温度範囲で液体の状態になる物質です。この PCB は長時間放置しても全く濃縮したり揮発したりせず熱的に極めて安定に存在する液体であったため、トランスのコイルやコンデンサーを保護する絶縁油や熱交換器の熱媒体やインクの溶剤などに広く使用されていました。しかし、熱交換器の故障が原因で PCB の食用油への混入事故が起こり、かねみ油症事件と呼ばれる中毒事件が 1968 年に発生しました。その後の研究で PCB の中でも 2,3,4,7,8,9-ヘキサクロロビフェニールは図 6-3 に示すようにダイオキシン類と類似の分子構造をしているため、致死量は 1.25g/Kg 、1 日当たりの耐容量は $3.5 \times 10^{-6} \text{g/Kg}$ と極めて毒性の強い物質であることが明らかにされました。1960 年代には工業的に約 60000 トンほど使用されており、しかも

PCB が熱的に極めて安定に存在する液体の性質を持つことから廃棄処理を困難にしたため、大きな社会問題に発展しました。

塩ビ工業・環境協会の資料によりますと、塩化ビニル樹脂は耐薬品性と耐久性に優れ、比較的高い軟化温度を持ちながら柔軟性に富んでいるため、水道管や床材や壁材などの建築資材、電線の絶縁材に多く利用されています。塩化ビニル樹脂はポリエチレン、ポリプロピレン、ポリスチレンと並んで大量に生産されており、表 6 - 1 に示すように近年では日本国内で消費される単体塩素の 30% は塩化ビニルの製造に用いられています。しかし、塩化ビニルの焼却がダイオキシンの発生の原因と考えられるようになり、不要になった塩化ビニル製品の廃棄が容易でなくなってきました。塩化ビニルも PCB も極めて優れた性質を持つ物質ですが、塩素原子を含むために廃棄処分が困難で多額の経費を必要とします。結果として、PCB の生産は禁止され、塩化ビニルの需要は減少する傾向になってきました。1990 年代には水酸化ナトリウムの需要に対して約 13% ほど単体塩素が不足していましたが、塩化ビニルの需要の減少により急激に単体塩素の需要が減少してきましたから、ソーダ工業としては大きな問題になりつつあります。

有機塩素系物質の毒性

クスリには人体に直接作用して生命活動を改善する医薬品のほかに、農業生産を豊かにするための農業用薬品（農薬）が広く用いられています。窒素やリンやカリウムを多量に含む土壌では農産物の収穫が向上するため、尿素などの肥料と呼ばれる農業用薬品を畑の土壌中に供給しています。農作物が環境からの悪影響を最小限にするように、農作物の成長を促進したり、殺菌剤や殺鼠剤や殺虫剤を散布したり、除草剤を使用して雑草を駆逐しています。これらの農薬は人類にとって有益な生物の生長を助ける役目をしていきますから、クスリの作用をしていることとなります。しかし、殺鼠剤や殺虫剤は人類にとってはクスリでも、鼠や昆虫にとっては毒の作用を持っています。鼠も昆虫も人類と同じように動物ですから、人類が生命活動を維持するための化学反応と類似の化学反応を彼らも持っています。それらの動物を殺傷するためのクスリは当然人類にとっても毒の作用をもっているに違いありません。

塩素を含む有機化合物は動物の生命活動を維持する化学反応において一般に毒の影響を示します。そのため近年多くの有機塩素系殺虫剤が開発されてきました。1945 年に太平洋戦争に敗戦した日本国内は、社会の秩序がほとんど崩壊してしまい、極めて衛生状態が悪くなり、種々の伝染病が蔓延しました。それらの伝染病の蔓延を防ぐために、ノミやシラミやだにを駆除する目的で、多量の DDT と BHC が散布されました。DDT も BHC も有機塩素系の物質でかなり有効な殺虫効果を示しました。長いこと入浴していない孤児たちには DDT の粉末を頭が白くなるほどに散布しました。年末の大掃除には必ず畳の下に白く DDT を撒いて蚤や虱の侵入を防いでいました。DDT は世界中で大量に使われてきましたが、中毒による死亡例はほとんど報告されていません。その後、ディルドリン、エンドリン、アルドリンなど種々の塩素系殺虫剤が開発されましたので、それらの化学構造式と致死量を図 6 - 4 に示しておきます。

しかし、これらの有機塩素系殺虫剤は神経細胞に起こる化学反応に影響を与えて、下、唇、顔などに知覚異常が現れ、運動神経の異常から震えが止まらないなどの多くの症状が現れました。しかも、これらの有機塩素系殺虫剤は脂肪に溶解易いために脳に蓄積し、新陳代謝し難く、運動失調、痙攣の症状が進行します。そのためこれらの有機塩素系殺虫剤の耐容量は約 5.0×10

7g/kg/日ほどと見積もられています。環境省 POPs 対策検討会資料によりますと、12 種類の有機塩素系化合物が 2004 年 2 月に 50 ケ国の加盟国によるストックホルム条約に基づき法的に残留性有機汚染物質(POPs)に指定され、地球環境汚染の防止のため製造・使用が禁止または制限されました。

有機塩素系殺虫剤の *p*-ジクロロベンゼンは現在でも家庭で広く使用されていますが、長時間にわたり接触していると頭痛、吐き気、幻聴など各種の症状があらわれ、マウスに対する致死量は 2.56 g/kg、ラットに対する致死量は 500 mg/kg、人類に対する致死量は 857 mg/kg と動物に対す

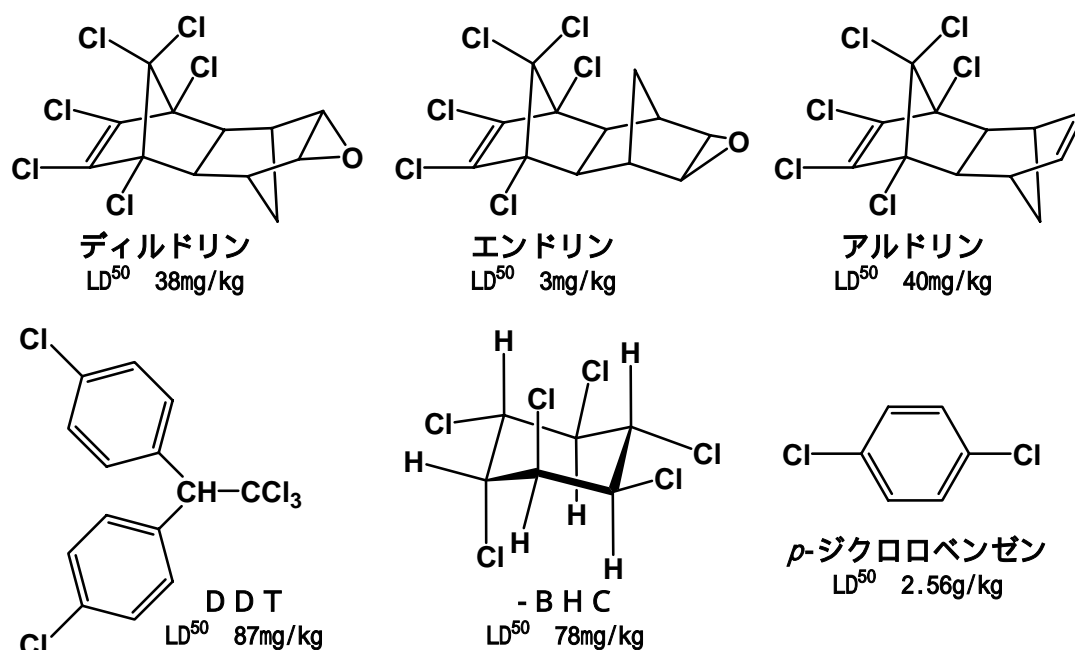


図 6 - 4 塩素系殺虫剤の化学構造式と致死量

る違いのあることも報告されています。人類は不利益を与える虫だけを選び分けることができず、全ての虫を駆除するように殺虫剤を使用しています。このように殺虫剤を大量に使い、

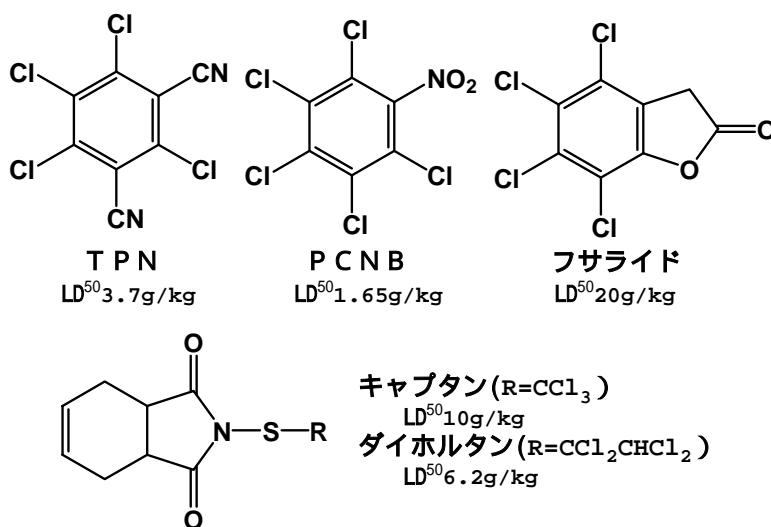


図 6 - 5 塩素系殺菌剤の化学構造式と致死量

毒の物質を撒き散らして無益の殺生をしています、これは殺虫剤の浪費であり、人類の驕りであり贅沢と考えられます。将来は必要以上に殺虫剤を散布することなく、必要最小限の虫を駆除する方法を確立するものと思います。

生物に対する作用の仕方は異なりますが、有機塩素系化合物は殺虫剤だけでなく殺菌剤としても有効に作用します。高い化学反応性を持つ有機塩素系化合物が SH 基や OH 基に作用して酵素の働きを阻害するために微生物の生命活動に影響を与えます。このような殺菌効果を持つ有機塩素系物質としては、図 6 - 5 に構造式で示すような農薬が使用されています。

これらの塩素系殺菌剤は致死量の値が大きく、急性の毒性は食塩や酢酸のような食品と同程度に弱いものです。しかし、ダイオキシンや PCB と同じように、塩素系殺菌剤はベンゼン環上に多くの塩素原子を持つ構造をしていますから、DNA などにも影響を与える可能性のある物質と考えられ、催奇形性や発がん性の危険があります。そのため、PCNB およびキャプタンの耐容量はそれぞれ $7 \times 10^{-6} \text{ g/kg}$ 、 $10 \times 10^{-4} \text{ g/kg}$ と見積もられています。

さらに、図 6 - 6 に構造式で示す 2 - メチル - 4 - クロロフェノキシ酢酸、2,4-ジクロロフェノキシ酢酸、2,4,5-トリクロロフェノキシ酢酸のエステルあるいは塩類はクロロフェノキシ系農薬と呼ばれています。この系統の農薬は植物成長ホルモンの作用を攪乱するため、植物の成長の調整剤や除草剤として用いられています。特にこのクロロフェノキシ系農薬は広葉の草木に顕著に作用しますから、米や麦の栽培の折に雑草となる広葉の草を除草することができます。しかし、これらの農薬は人類に対して悪性リンパ腫の発症などの発がん性、催奇形性、胎児毒性などが明らかになっています。

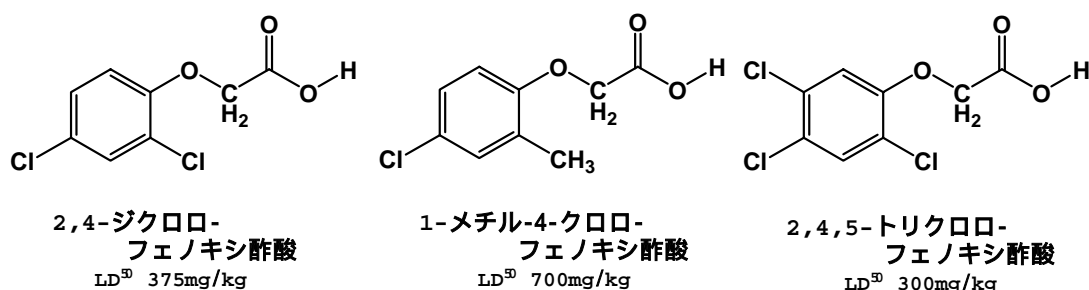


図 6 - 6 クロロフェノキシ系農薬の化学構造式と致死量

これらの多くの塩素系農薬は人類に対する強い毒性と土壤中への残留汚染が著しいため、既に製造や使用の禁止されているものもあり、現在使用されているものでも次第に規制されてゆく傾向にあります。この塩素系農薬の使用規制と使用量の減少も、単体塩素の需要の減少をもたらすため、ソーダ工業としては大きな問題になりつつあります。このように農薬を大量に使い、毒の物質を撒き散らして無益の殺生をしています、これは農薬の浪費であり、人類の驕りであり贅沢と考えられます。将来は必要以上に農薬を散布することなく、必要最小限の虫を駆除し、最小限の殺菌をし、最小限の除草をする方法が確立するものと期待します。

ハロメタンとハロエタン

塩化ビニル、酸化プロピレン、TDI、MDI などプラスチック関連の物質の製造のための単

体塩素の消費量に次いで、ハロメタンやハロエタンなどの塩素系溶剤と塩素系冷媒が単体塩素の需要の大きな部分を占めています。ハロメタンやハロエタンは図 6 - 7 に示すように、メタンやエタンなどの炭化水素と単体塩素を混合し紫外線照射あるいは高温加熱しますと、紫外線の吸収あるいは高温による結合の開裂で塩素分子から塩素ラジカルを生じる開始反応が始まります。生成した塩素ラジカルは炭化水素と反応してアルキルラジカルと塩化水素になり、さらにアルキルラジカルが塩素分子と反応して塩素ラジカルとハロメタンあるいはハロエタンになる連鎖反応が進行します。この反応系はラジカル同士が衝突して反応する停止反応が起こるまで継続しますから、触媒的な開始反応により反応系全体ではハロメタンあるいはハロエタンと塩化水素を生成します。

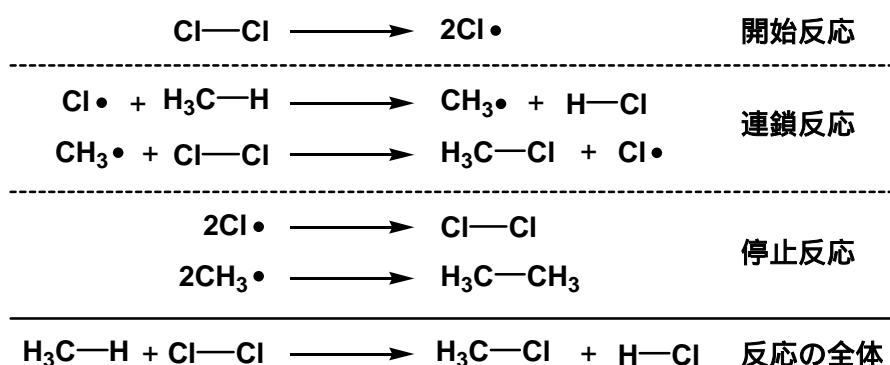


図 6 - 7 ハロメタンの生成反応

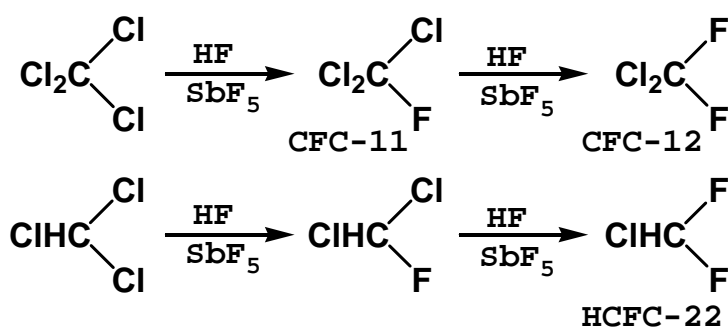


図 6 - 8 フロンの生成反応

このように合成されたハロメタンには塩素の数により塩化メチル、塩化メチレン、クロロホルム、四塩化炭素の 4 種類があり、ハロエタンには塩素の数およびその結合位置により 9 種類、2 重結合を含むハロエチレンには塩化ビニルなど 5 種類があります。これらの塩素原子を含むハロメタンあるいはハロエタンに五フッ化アンチモンなどの触媒存在下フッ化水素を作用させると、図 6 - 8 のように塩素原子がフッ素原子に置き換わるフッ素化反応が進行し、フロンと呼ばれる含フッ素ハロメタンあるいは含フッ素ハロエタンが生成します。

これらの有機ハロゲン化物のうちで工業的に広く用いられてきたハロメタンおよびハロエタンの熱的性質、引火性、溶解性、毒性を表 6 - 2、表 6 - 3 にまとめました。これらの有機ハロゲン化物は何れも比較的難燃性で、分子中のハロゲン原子の数が多くなるほど引火性はなくなります。特に四塩化炭素は古くは消火剤として用いられたこともありますが、消火後に残る四塩化炭素の蒸気が毒性を示すために近年では用いられなくなっていました。表 6 - 3 に示す

誘電率の値から

分かるように、これら有機ハロゲン化合物はメタンやエタンと同じように油の性質を持っていますから、親油性の物質を良く溶かします。炭素 フッ素結合は炭素 水素結合よりも大きな 110kcal/mol の結合エネルギーを持っており、炭素 - 塩素結合もかなり大きな 77kcal/mol の結合エネルギーを持っています。そのためハロメタンやハロエタンを構成する結合は簡単には開

表 6 - 2 ハロメタン、ハロエタン類の熱的性質

化合物名	分子式	融点	沸点	気体比重	比熱	融解熱	気化熱
メタン	CH ₄	-182.6	-161.4	0.57		14.30	122.50
塩化メチル	CH ₃ Cl	-97.0	-24.0	1.80			98.48
塩化メチレン	CH ₂ Cl ₂	-97.0	41.0	3.03	0.29	12.90	78.70
クロロホルム	CHCl ₃	-63.5	62.0	4.26	0.23	18.40	58.70
四塩化炭素	CCl ₄	-23.0	76.7	5.49	0.20	3.90	46.60
フロン (CFC-11)	CCl ₃ F	-111.0	24.0	4.91	0.21		43.10
フロン (CFC-12)	CCl ₂ F ₂	-158.0	-30.0	4.32	0.23		39.47
フロン (CFC-113)	CCl ₂ FCClF ₂	-35.0	48.0	6.69	0.22		35.07
フロン (CFC-114)	CClF ₂ CClF ₂	-94.0	38.0	6.10	0.24		32.51
フロン (CFC-115)	CClF ₂ CF ₃	-106.0	-39.0	5.52	0.29		30.11
フロン (HCFC-22)	CHClF ₂	-146.0	-41.0	3.09	0.30		55.81
フロン (HCFC-124)	CHClF ₂ CF ₃	-119.0	-12.1	4.88			
フロン (HCFC-141 b)	CH ₃ CCl ₂ F	-103.5	32.1	4.18			
フロン (HCFC-142 b)	CH ₃ CClF ₂	-131.1	-9.8	3.59			
フロン (HFC-134a)	CH ₂ FCF ₃	-101.0	-26.2	3.64			
エタン	CH ₃ CH ₃	-172.0	-88.0	1.08		22.50	116.90
塩化エチル	CH ₃ CH ₂ Cl	-138.7	12.3	2.30	0.43	16.40	91.40
1,1-二塩化エタン	CH ₃ CHCl ₂	-98.0	59.0	3.54			
塩化エチレン	CH ₂ ClCH ₂ Cl	-40.0	84.0	3.54	0.30	21.30	72.20
トリクロロエチレン	CHCl=CCl ₂	-73.0	86.7	4.69	0.22		
1,1,2-三塩化エタン	CH ₂ ClCHCl ₂	-35.0	114.0	4.76	0.27	20.68	
テトラクロロエタン	CHCl ₂ CHCl ₂	-44.0	146.5	6.00	0.27		
テトラクロロエチレン	CCl ₂ =CCl ₂	-22.0	121.0	5.93	0.22		

裂せず化学的に不活性で熱的にも安定な性質を示します。

ハロメタンもハロエタンも融点は極めて低く、沸点もあまり高くありませんから、液化し易い気体あるいは気化し易い液体の状態では地球上では存在しています。これらの性質を持つハロメタンとハロエタンは水にあまり溶けない油性の物質を溶かす溶媒として極めて適しています。油性物質に対してベンジンやリグロインなどの石油系の溶媒と類似の溶解度を持ちながら、引

火性が弱いので火気に対する安全性が高く、揮発性が高いので溶媒の除去が容易です。そのため、衣料品のドライクリーニングや電子部品の洗浄のための溶媒として広く用いられてきました。

フッ素を含むハロメタンは氷点下の沸点と融点示すため室温では気体ですが、わずかに圧力を

加えるだけで容易に液化し、メタンやエタンと異なり引火性を持ちません。そのため、化粧品や殺虫剤などの各種の薬剤や塗料を噴霧するためのスプレーガスとして近年広く用いられるようになってきました。

表 6 - 3 ハロメタン、ハロエタン類の溶解性と毒性

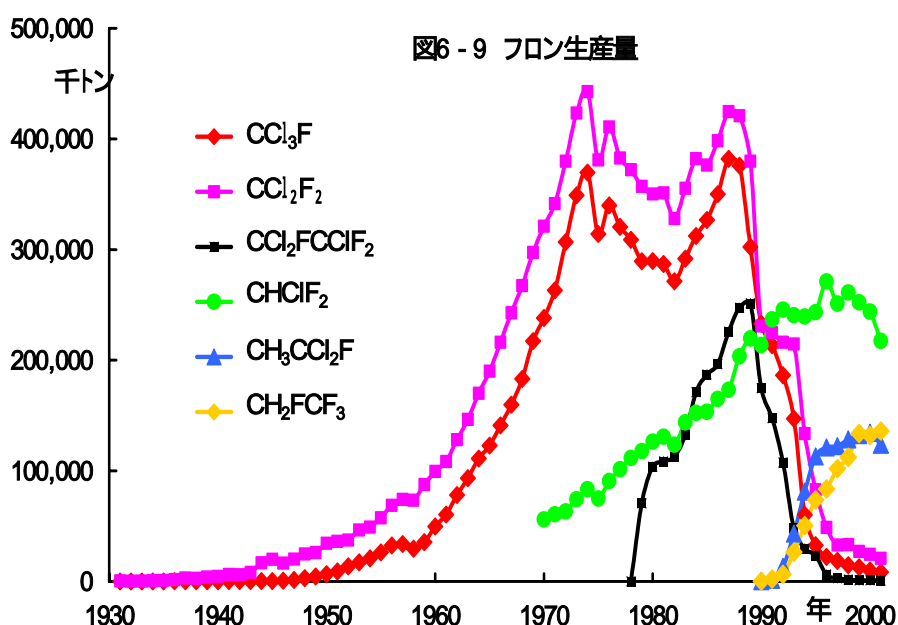
化合物名	分子式	比重	引火点	誘電率	水溶性 (g/m l)	毒性 (LD ⁵⁰)	毒性 (ppm)
メタン	CH ₄	0.55	536	1.70	0.019		
塩化メチル	CH ₃ Cl	1.00	631	12.60			3150
塩化メチレン	CH ₂ Cl ₂	1.33	なし	9.08	0.027	3.0g	
クロロホルム	CHCl ₃	1.48	なし	4.81	0.0074		
四塩化炭素	CCl ₄	1.59	なし	2.24	0.0008	7.9g	25
フロン (CFC-11)	CCl ₃ F	1.49	なし	2.28	1	1.74g	100000
フロン (CFC-12)	CCl ₂ F ₂	1.50	なし	2.13	0.28	3.38 g	800000
フロン (CFC-113)	CCl ₂ FCClF ₂	1.56	なし	2.41	0.2	43g	200000
フロン (CFC-114)	CClF ₂ CClF ₂	1.53	なし	2.26	0.13	2.25g	87000
フロン (CFC-115)	CClF ₂ CF ₃	1.30			0.058		800000
フロン (HCFC-22)	CHClF ₂	1.21		6.11	3		220000
フロン (HCFC-124)	CHClFCF ₃	1.40	なし				230000
フロン (HCFC-141 b)	CH ₃ CCl ₂ F	1.23			0.42	5.0g	62000
フロン (HCFC-142 b)	CH ₃ CClF ₂	1.11			0.19		128000
フロン (HFC-134a)	CH ₂ FCF ₃	1.21			0.15		50000
エタン	CH ₃ CH ₃	0.45			0.0047		
塩化エチル	CH ₃ CH ₂ Cl	0.92	-50		0.0057		
1,1-二塩化エタン	CH ₃ CHCl ₂	1.18			0.006	14.1g	
塩化エチレン	CH ₂ ClCH ₂ Cl	1.26	13		0.011	770mg	
トリクロロエチレン	CHCl=CCl ₂	1.46	なし	3.42	0	5.86g	7800
1,1,2-三塩化エタン	CH ₂ ClCHCl ₂	1.44			0		
テトラクロロエタン	CHCl ₂ CHCl ₂	1.59			0.003	8 0 mg	
テトラクロロエチレン	CCl ₂ =CCl ₂	1.63		2.30	0.0002	8.85g	6000

一般に低い沸点を持つ物質は気体の状態で加圧しますと液化し温度が上がります。空気や水でその液体を冷やし、適度に冷えた液体を減圧にして気化させると、このとき気化熱を奪いま

すから、気体になった物質は温度が下がります。この操作を繰り返しますと、加圧部分を水や空気で冷やすだけで、減圧部分では氷点下まで冷却されます。このようにして冷却装置は加圧するためのエネルギーで冷却するもので、このように液化と気化を繰り返す物質は熱の移動をする冷媒として働きます。

す。フロンと呼ばれるフッ素を含むハロメタンやハロエタンはメタンやエタンと同程度の沸点と気化熱を持っており、しかも火気に対する安全性と化学反応に対する不活性を兼ね備えています。このため冷蔵庫や冷房装置の冷媒として各種のフロンが広く用いられるようになっていきます。

ハロメタンやハロエタンはこのように溶媒としてもスプレーガスとしても冷房装置の冷媒と



しても極めて優れた性質を示すために、大量に生産され、これに伴い単体塩素も大量に消費されるようになりました。特にフッ素原子を含むフロンは火気に対する安全性と化学反応に対する不活性を兼ね備えているため、図 6 - 9 に示すように 1960 年以後急激に生産量を伸ばしてゆきました。ハロメタンやハロエタンなどの塩素系溶剤と塩素系冷媒が単体塩素の需要の大きな部分を占めるようになり、水酸化ナトリウムの需要との釣り合いの点でソーダ工業にとっては重要な工業製品と考えられます。

塩素漂白と塩素殺菌

単体塩素は種々の物質と反応して塩素陰イオンになりますが、この反応で単体塩素は塩素イオンまで還元され、相手となる物質を酸化しますから、強力な酸化剤として働きます。この酸化する能力を利用して、染料の合成、紙やパルプの漂白、水道水の殺菌がなされており、単体塩素のそのための消費量は全消費量の 20%にも及んでいます。このときの塩素の物質収支を考えると、食塩の電気分解による塩素イオンの酸化で単体塩素を製造し、物質の漂白や殺菌の過程で単体塩素を還元して塩素イオンに戻しています。しかし、酢酸やアセトアルデヒドやエタノールなど限られた種類の物質は単体塩素と反応して、図 6 - 10 に示すようにクロロホルムを副生しながら酸化分解してゆきます。このようにクロロホルムを副生する物質は種類としては

限られていますが、生命活動に密接に関係する物質が多く、広く地球上に分布しています。

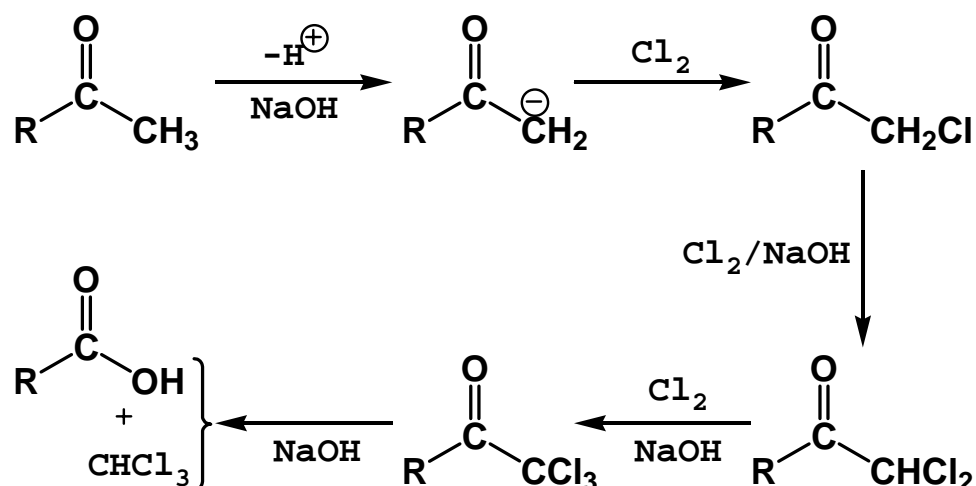


図 6 - 10 クロロホルムを副生する反応の機構

木材にはリグニンと呼ばれる黄色の色素が 20～30%も含まれていますから、木材からパルプや紙に加工しても、日焼けしたような黄色の紙にしかありません。そのためパルプや紙に加工する工程の中で、この色素を酸化し無色の物質に漂白するために単体塩素が大量に使用されています。単体塩素はリグニンなどの大部分の有機化合物と反応して塩素イオンに還元されますが、同時にリグニンは酸化されて塩素原子を含む芳香族化合物に変化します。このときの塩素の物質収支を考えると、食塩の電気分解による塩素イオンの酸化で単体塩素を製造し、リグニンの漂白の過程で単体塩素を還元して塩素イオンに戻すと共に、リグニンを酸化しています。結局、副産物に水酸化ナトリウムを生産しますが、紙やパルプを白く漂白することは多量のエネルギーを消費するものであり、白い紙を無駄に使うことは人類の贅沢ではないでしょうか。

日本国内には水道法という法律が施行されており、上水道に供給する水の水質基準が箇条書 6-1 に掲げるように詳細に規定されています。これにより、供給される水は種々の毒性物質や病原生物、異常な味や臭いから汚染されていないことが義務付けられています。さらに、第 2 項では衛生上の措置として給水の残留塩素を遊離残留塩素として 0.1mg/L 以上保持するよう規定しています。このことは水道水を単体塩素あるいは単体塩素を発生する薬品で殺菌せねばならず、しかも、水道の各末端まで供給される水道水には単体塩素が過剰に残らなければならないと規定しています。当然供給元から近い末端と遠い末端では単体塩素の消費される量が異なりますから、必要量以上に単体塩素が注入され、残留することになります。このようにして残留した単体塩素は水道水の特異な悪臭の原因になるばかりでなく、大気中に拡散してゆきます。

種々の物質が溶け込んでいる水を殺菌するときには、当然それらの不純物も単体塩素で酸化されます。この不純物の酸化反応において単体塩素が塩素イオンに変化する場合には、あまり憂慮すべきことはないように思います。しかし、生命活動に密接に関係する酢酸やアセトアルデヒドやエタノールなどの物質は広く地球上に分布しており、クロロホルムを副生します。このクロロホルムは若干の毒性を持ち、極めて厳しい排出基準で規制された物質です。水道のための水、特に有機物質の多く含む水を単体塩素で殺菌することはクロロホルムを副生する問題を含んでいますから、必要以上に水道水の塩素殺菌はすべきでないように思います。

箇条書 6-1 水道法（水質基準）

第4条 水道により供給される水は、次の各号に掲げる要件を備えるものでなければならない。

- 1 病原生物に汚染され、又は病原生物に汚染されたことを疑わせるような生物若しくは物質を含むものでないこと。
- 2 シアン、水銀その他の有毒物質を含まないこと。
- 3 銅、鉄、弗素、フェノールその他の物質をその許容量をこえて含まないこと。
- 4 異常な酸性又はアルカリ性を呈しないこと。
- 5 異常な臭味がないこと。ただし、消毒による臭味を除く。
- 6 外観は、ほとんど無色透明であること。

2 前項各号の基準に関して必要な事項は、厚生労働省令で定める。

水中に単体塩素を注入することによって水中に残留した有効塩素をいい、次亜塩素酸などの遊離有効塩素（遊離残留塩素）とクロラミンのような結合有効塩素（結合残留塩素）に区分される。残留塩素の測定にはオルトトリジン法とDPD法がある（水道整備課長通知）。衛生上の措置として給水の残留塩素を遊離残留塩素として0.1mg/L（結合残留塩素の場合は0.4 mg/L）以上保持するよう規定している（水道法施行規則16条）。なお、オルトトリジン法は平成12年12月26日付け通知により平成14年4月1日より検査方法から削除され、新たにDPDによる吸光度法が採用されている。

人類は本来病原生物に対してかなり抵抗力を持っていますから、水道水も完全に滅菌する必要はないように思います。自然災害や生活環境の悪化などにより病原生物による伝染病の蔓延の危険が増加する場合に限り、水道水の単体塩素濃度を上げるよう注入量を変化させる弾力的な運用が可能と思われます。このような運用により多量のエネルギーを使って製造した単体塩素を無駄に消費することを避けられるのではないのでしょうか。さらに、特異な悪臭を持つ水道水を本来の水に近い香りに改善することができるでしょう。1000mm/年以上も平均降水量のある日本の各地には美味しい水が多く湧き出していますから、わざわざヨーロッパアルプスの水をビンに詰めてミネラルウォーターを輸入する必要がなくなるのではないのでしょうか。無益な単体塩素の大気への拡散ばかりでなく、ミネラルウォーターのためのビンの原料や詰める手間や輸送の経費など、水道水への単体塩素注入量を調節する運用で簡単に節約できる浪費は、人類の贅沢ではないのでしょうか。

オゾンホール

オゾンは分子式 O_3 、結合距離は 1.28Å、結合角は 127 度を持つ酸素同素体であり、地上の大気中に約 0.05ppm 含まれ、空気(酸素)あるいは水の電気分解により製造することができます。オゾンは青色で特異臭を持つ有毒な気体で、-111 で青色の液体に、-193 で固体になります。高濃度では不安定で爆発的に酸素に分解します。水には極く少ししか溶けませんが、低温でメタノールあるいは塩化メチレンに多少（約 $4 \times 10^{-2}M$ ）溶け青色の溶液になります。オゾンは強い酸化性を示すため、古くから酸化剤として各種の化合物の合成に用いられてきました。近年はその酸化性を利用してプールの水の浄化殺菌などにも用いられています。

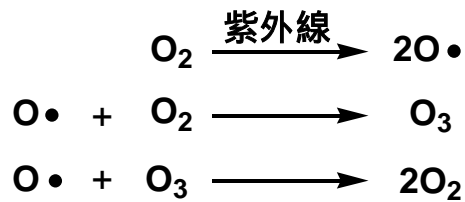
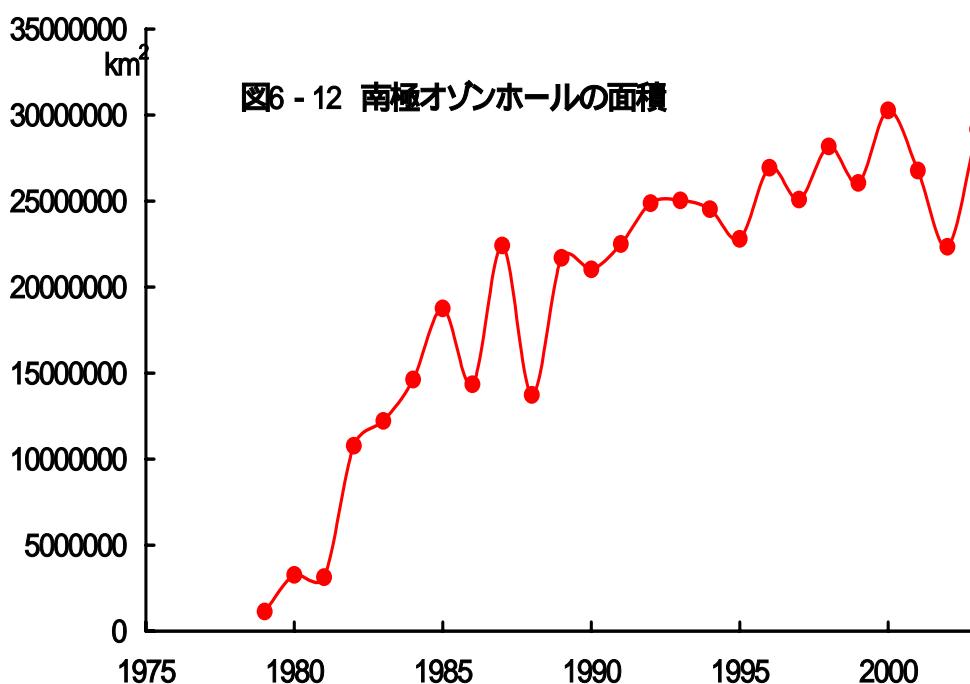


図 6 - 11 紫外線によりオゾンの生成する機構

大気の約 1/5 を占める酸素分子が紫外線を吸収すると、図 6 - 11 に示すような反応が進行してオゾンが生成します。紫外線の強い夏の季節に自動車の排気ガスの濃度が高くなりますと、排気ガスに含まれる窒素酸化物が触媒の働きをして、酸素からオゾンが生成します。ここで生成したオゾンは光化学オキシダントの主成分であり、目に沁みたり、咳や喉痛の原因になります。地球のはるか上空では太陽から降り注ぐ強い紫外線を直接酸素分子が吸収してオゾンの生成を続けており、長い年月の間に地球を包むようにオゾンを多く含む層が形成されました。

紫外線は高いエネルギーを持った光ですから、オゾンの生成だけでなく生物にとっては有害な作用をします。人類は多少の紫外線に対しては、皮膚の中にメラニンという黒い色素を作り防御の体制を作りますが、太陽からの強い紫外線を直接浴びていると、ほとんど全ての生物は絶滅すると思われます。幸い、地球を包むオゾン層が紫外線を吸収して、地表を太陽の強い紫外線から遮蔽する働きをしています。

1970 年代に南極の上空でこのオゾンの多く含む層に穴の開いていることが発見されました。そのオゾン層の薄くなったところをオゾンホールと呼んでいます。図 6 - 12 に示すようにこのオゾンホールが年々成長し、南極大陸より大きくなってしまいました。このままの勢いで拡大成長してゆきますと、地球を包んでいるオゾン層がなくなり、太陽からの強い紫外線が地表に届いてしまうのではないかと危惧されました。多くの地球科学者がその原因について考えま



したが、その中でオゾンホールの破壊は人類の使い捨てたハロメタンやハロエタンが引き起こしているという説が多く、多くの研究者の支持を得ました。図 6 - 13 に示すような化学変化により、大気中に拡散したハロメタンやハロエタンの炭素 - 塩素結合は上空で太陽からの強い紫外線を吸収し、開裂して塩素ラジカルを生成します。この塩素ラジカルが反応してオゾンが分解して酸素と酸化塩素を生成しますが、酸化塩素は反応性が高くさらにオゾンと反応して塩素ラジカルを再生してしまいます。この反応はラジカル同士が反応する停止反応が起こるまで続く連鎖反応ですから、1 つの塩素ラジカルが生成しますと多くのオゾンが酸素に分解してゆきます。実験室でフラスコの中にオゾンとハロメタンを入れて紫外線を照射して調べて見ますと、確かにオゾンが分解されることからこの一連の化学反応は検証されました。

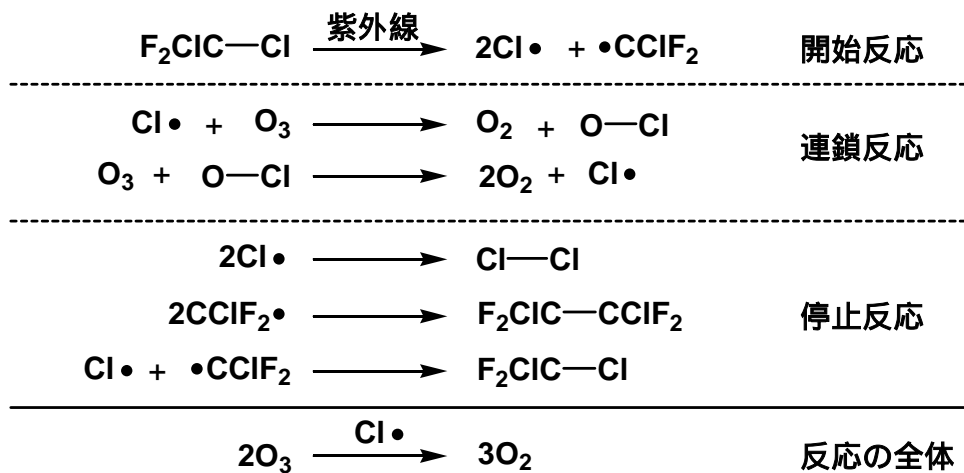


図 6 - 13 ハロメタンやハロエタンによりオゾンの分解する機構

オゾン層が上空になくなってしまうと、人類も紫外線に直接曝されることになり非常に危険ですから、あわてた環境省などの関係機関は急いでハロメタンやハロエタンの製造、使用、排出を規制するようにしました。しかし、 CCl_3F や CCl_2F_2 などのハロメタンやハロエタンは有機溶媒や冷媒として広く使われるようになっていましたから、簡単に製造禁止や使用禁止にすることができません。やむを得ず、代替え品としてオゾンの分解する速さが遅く、溶媒や冷媒としての用途に合った CHClF_2 や $\text{CH}_3\text{CCl}_2\text{F}$ などの水素原子を含むハロメタンやハロエタンを選び許可するようにしました。1990 年代に為されたそれらの製造や使用の規制と指導によるハロメタンやハロエタンの生産量の変化は図 6 - 9 にはっきりと現れています。これらの規制の効果がある程度顕れているかのように、図 6 - 12 で分かるようにオゾンホールの拡大の速度は鈍ってきています。

しかし、オゾンホールがハロメタンやハロエタンによって拡大するという説にもいくつかの疑問点が残っており、ハロメタンやハロエタンだけ規制すれば全て解決できるとは思えません。第 1 の疑問点は現在の水道法では水質保全のために塩素殺菌を義務付けており、しかも、全ての水道末端まで単体塩素が残留するほどの過剰の単体塩素を注入するように規制しています。前節で述べたように、病原生物の塩素殺菌においてはハロメタンを副生することが考えられます。ここで副生するハロメタンが当然オゾン層の破壊の原因になることも考えられます。さらに、残留した単体塩素は大気中に拡散してゆきます。オゾン層の破壊が塩素ラジカルの発生に

起因すると考えられていますから、図 6 - 7 に説明しました塩素分子が紫外線を吸収して塩素ラジカルに分解する反応もオゾン層を破壊する原因になると思われます。現在考えられているオゾン層破壊の機構に基づけば、水質保全のための塩素殺菌はハロメタンやハロエタンの排出と同じ程度に多くの問題を含んでいることになります。

近年、水質保全のためにオゾン酸化による殺菌の技術がプールなどの閉鎖系の水に対して導入されています。オゾンは酢酸やアセトアルデヒドやエタノールなどに対してもハロメタンを生成することはありませんし、大気中に拡散しても塩素ラジカルを発生することはありません。水道水の水質保全のために塩素殺菌からオゾン殺菌に切り替えることはオゾン層の破壊を防ぐ有効な方策と思われます。しかし、大気中に拡散したオゾンは光化学オキシダントと同じ毒性を人類にもたらします。単体塩素と若干異なってはいますが、オゾンも芳しくない臭い匂いを持っていますから、残留するほどに過剰に使用してオゾン殺菌することは適当でないと思われます。さらに、単体塩素の消費量が減少する結果になりますから、水酸化ナトリウムの需要との釣り合いにおいて、ソーダ工業にとっては大問題になると思われます。

第 2 の疑問点としてはハロメタンやハロエタンが先進工業国で主に排出されており、そのハロメタンやハロエタンが大気中に拡散しても南極に集中するとは考えられません。北半球に多くの先進工業国が点在していることから北極にもハロメタンやハロエタンは当然拡散していると思われます。にもかかわらず、何故、南極上空だけにオゾンホールが生まれ、北極上空にはオゾンホールはほとんど観察されないのでしょうか。東京やニューヨークの上空など地球の至る所にオゾンホールが生まれても不思議はないのではないのでしょうか。世界中の研究者が協力して、1990 年以降は北極上空のオゾン層の観測を続けていますが、その結果北極上空のオゾン層でもオゾンの減少が観測されています。しかも、北極上空のオゾンの濃度変化と北極地方の気温の変化の間に関連性が見出されてきました。北極地方の成層圏の低温域が広いときにオゾン層のオゾンの濃度が減少しています。この温度との相関性の現象とハロメタンやハロエタンがオゾンを分解する化学反応とはあまり結びつかないように思われます。これからのさらなる研究が必要と思われます。

さらに、第 3 の疑問点は表 6 - 1 に纏めたようにハロメタンやハロエタンの気体の比重が 4 倍以上も空気の比重より重いことです。一般に比重の重い気体は下の方に沈み、軽い気体は上の方に昇ってゆきます。空気の温度を気温より 100 高くすると空気の比重は 25%軽くなりますが、空気がこのようにわずかに軽くなっただけで熱気球を上空に浮き上がらせることができます。同じように地表の空気が夏の陽に暖められて軽くなると、地上 10000m 以上にも上昇気流が起こり入道雲が発達します。このようなわずかな気体の比重の違いでも、重い気体は下の方に沈み、軽い気体は上の方に昇ってゆきます。気体の拡散運動や大気の大気対流現象が活発に起こっても、比重が 4 倍以上も違う気体は容易に上空に拡散して行くとは思えません。その上、南極や北極のように気温の低い地域では、下降気流が起こりますから、地球規模の大気対流を考えても極地の上空には重い気体が局在し難いと考えられます。比重の重いハロメタンやハロエタンが高い高度にあるオゾン層にまで達するためには、地表ではかなり高いハロメタンやハロエタンの濃度を保たねばならないことになってしまいます。実際に 2000 年 8 月に岩手県三陸の上空で東京大学の研究者が気球を用いて観測した結果、上空の希薄な大気の中に約 10^{10} 分の 1 しかハロメタンやハロエタンが含まれていないことを報告しています。このような希薄な濃度の

状態で生成した塩素ラジカルとオゾンが衝突する確立は極めて低く、オゾンの分解反応が観測できるほどに早くなることは考え難く思います。

このように幾つかの疑問は残りますが、環境省や関係機関はハロメタンやハロエタンの排出がオゾン層の破壊の原因であると結論し、その製造、使用、排出に厳しい規制をしています。この規制は単体塩素の需要に大きく影響を与えており、水酸化ナトリウムの需要との釣り合いの点でソーダ工業にとっては大きな問題になっています。

ソーダ工業の将来

ほとんど無尽蔵の食塩は世界の至る所で入手できる最も安い資源と考えられます。この無尽蔵の食塩はおもに炭酸ナトリウムの製造と食塩の電気分解の 2 つの化学工業の主原料に充てられています。これらの 2 つの化学工業はソーダ工業と呼ばれ、膨大なエネルギーを費やして炭酸ナトリウムと水酸化ナトリウムを製造していますが、同時に炭酸ナトリウムの製造では塩化カルシウム、食塩の電気分解では単体塩素が副生してきます。食塩の電気分解においては水酸化ナトリウムと単体塩素はほぼ 1 : 1 の割合で生成してきますが、単体塩素は海水中や大気中への廃棄や長年にわたる貯蔵などのできない極めて毒性の強い危険な工業製品ですから、両者の消費量も釣り合うことが望まれます。近年、水酸化ナトリウムの消費量は増加する傾向にありますから、単体塩素の消費量の増加も望まれます。

現在、表 6 - 1 に示すように、塩化ビニルなどのプラスチックの製造、医薬や農薬など種々の化学薬品の合成、紙やパルプの漂白、水道水の殺菌、ハロメタンなどの溶媒や冷媒の製造などに単体塩素は使われています。しかし、医薬や農薬は強い毒性のために使用が制限される傾向にあります。塩化ビニルは廃棄処理の折に PCB の発生の危険があり、利用が敬遠されつつあります。オゾン層の破壊の原因がハロメタンやハロエタンと考えられていることから製造も利用も極端に制限されるようになっていきます。さらに、水道水の殺菌もオゾン層の破壊などに関連して、近い将来オゾン殺菌に変更されるのではないかと考えられます。このように種々の問題から、単体塩素の消費量が減少する傾向にあり、益々その傾向は顕著になってくると思われ、日本の化学工業における大きな問題になりつつあります。

この大問題の解決策としては、多少効率が悪く経済的に不利ではあっても、食塩の電気分解によらず、炭酸ナトリウムの熱分解など別途の方法により水酸化ナトリウムを製造してゆくことが考えられます。例えば、ソルベイ法により炭酸ナトリウムを合成し、その後熱分解などで水酸化ナトリウムを製造すると、2.5 倍以上の経費が掛かり極めて経済的に不利になりますが、極めて毒性の強い危険な工業製品の単体塩素を副生しませんから、塩素化合物の使用に伴う問題は回避されます。現在、水酸化ナトリウムは最も安価で利用しやすい塩基性の薬品として使われていますが、入手し難い高価な塩基性の薬品になり、代替品として水酸化カルシウムが最も安価で利用しやすい塩基性の薬品となる可能性があります。

他の解決策としては水酸化ナトリウムの消費量を減少させる方法です。水酸化ナトリウムの主な用途は強い塩基性の薬品およびナトリウムイオンの供給源の 2 つに大別することができます。水酸化ナトリウムが高価な塩基性の薬品になるとときには、水道水や排水の中和などの用途は代替の水酸化カルシウムで置き換えることが可能と思われます。しかし、木材からのパルプの製造、アルミニウム原料の調製、石鹼や洗剤の製造、化学繊維や工業薬品の製造にはナト

リウムイオンの高い水溶性が利用されており、水酸化カルシウムでは代替できません。石鹼や洗剤は油分を洗浄するのに極めて有効な物質ですが、現在はかなり過剰に使用されています。そのため、排水は高いBOD（生化学的酸素要求量）の値を示して、石鹼や洗剤が拡散していますから、地球環境を汚染するばかりでなく、無用の水酸化ナトリウムの浪費になり、意味のない贅沢となります。使用量を必要最小限になるように、食器の洗浄や洗濯の洗剤の使用法を工夫すべきではないでしょうか。さらに、第3章で述べたアルミニウム金属の無用の浪費は水酸化ナトリウムの無用の浪費にもなり、過剰の単体塩素を生み出すことになりますから、大きな贅沢といえるでしょう。