

## 4. 水の特性を熟知すれば料理上手

### 圧力鍋は優れたもの

食べ物は水を溶媒とする生物組織が多く、人間も水を溶媒とする組織ですから、栄養として体内に吸収するときには食べ物を全て水に溶ける形に変化させています。料理は食べ物を食べ易く、消化し易くして美味しく食べることができるようにすることですから、化学的には食べ物を水と反応させ、水に溶かす技術と考えることも出来ます。そのため、水の性質を知ることは、料理を上手に作るうえで大切なことと思われまます。そこでこの章では水の特性がどのように料理に生かされ、どう工夫すればその特性を利用できるか考えてみようと思います。はじめに水の状態の変化が料理にどのように反映するか調べましょう。

テニスのボールが飛んできて身体にぶつかるとうれを受けて痛みを感じます。同じように、質量を持った分子が自由に動き回り、壁に衝突すると壁は何がしかの力を受けます。これを圧力といいます。地球の大気が地球の表面に衝突するときには生まれる圧力を大気圧といい、海拔 0m では  $1\text{cm}^2$  に約 1kg となります。衝突で受ける力は分子の数が少なければ少なく、分子の数が多ければ受ける力も大きくなります。言い換えれば、圧力は自由に動き回る分子の密度に比例するという事です。密度がある一定の体積中の分子の数を意味していますから、圧力はその体積に反比例し、分子の数に比例します。

また、ゆっくりしたテニスのボールにぶつかってもあまり痛くありませんが、強烈なスマッシュのボールにぶつかるとうれが出来るほど痛いものです。物質の衝突で生まれる力はその物質の速度が速ければ速いほど大きくなります。温度が高くなって分子の運動が激しくなると、壁に衝突する数も増加しますが同時に分子の速度も大きくなります。結果として温度が高くなれば圧力が高くなります。体積  $V$  の器の中に  $n$  個の分子を入れると、温度  $T$  のときに器の中の圧力  $p$  は温度と分子の数に比例し器の体積に反比例します。比例定数を  $R$  とすれば、式 4-1 は自由に動き回る分子同士の相互作用が全くない理想的な気体に対する温度と圧力と体積に関する関係式で、これを理想気体の状態方程式と呼び、比例定数  $R$  を気体定数と呼んでいます。

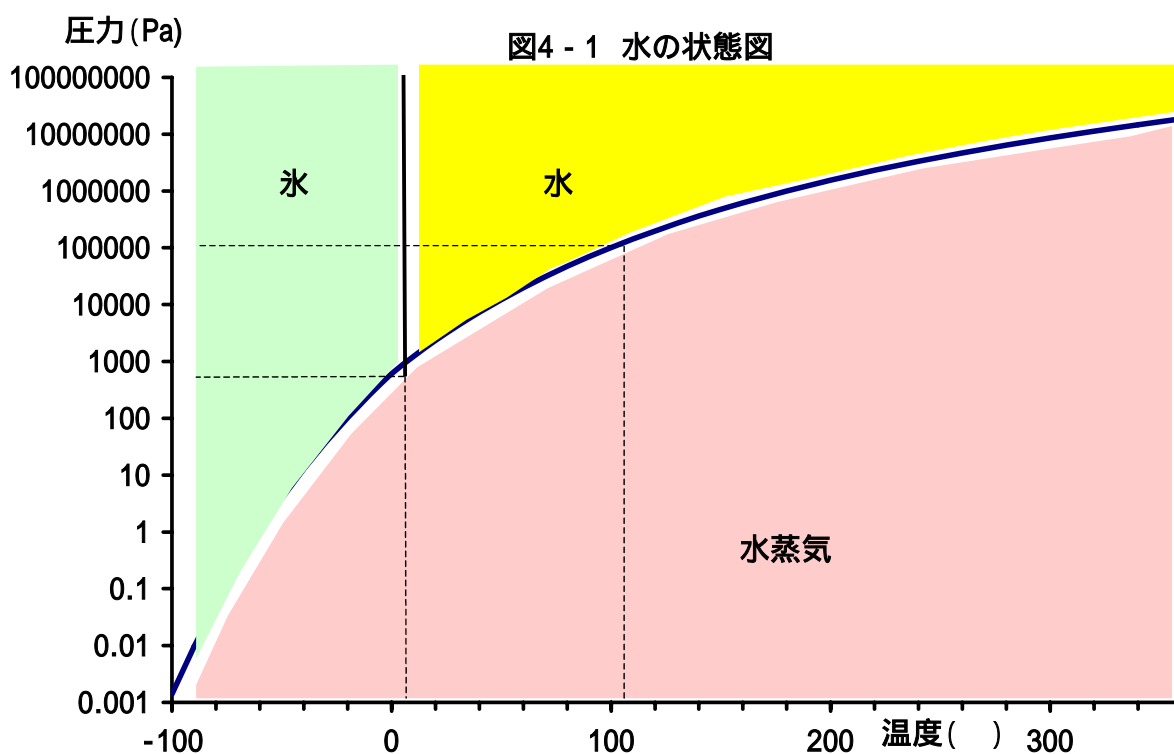
$$pV = nRT \quad \text{式 4-1}$$

実在する気体では一般に、分子と分子の間には相互に働く分子間力と呼ばれる弱い引力が働いています。分子間力は分子と分子の間の距離に反比例するように変化しますから、圧力が高くなり分子の密度が高くなると、分子の間の距離が小さくなるため分子間力が大きくなります。また、物質の中で分子は動き回りますが、そのときの運動エネルギーは低温では小さく温度が高くなるほど大きくなります。物質には固体、液体、気体の3態があり、分子と分子の間で相互に働く分子間力と運動エネルギーの大きさの大小により物質の状態は決

まってきます。しかも、運動エネルギーは温度により変化しますし、分子間力は圧力により変化しますから、物質の状態も温度と圧力により固体から液体へ、さらに液体から気体に変化します。

温度が低いために分子の運動エネルギーが分子間力よりはるかに小さいときには、固体の状態になり、分子は整然と規則的に並んでほとんど動くことが出来なくなります。この状態では分子はその配列を崩すほどには動くことが出来ません。温度が少し高くなり分子間力とほとんど同じ程度まで分子の運動エネルギーが大きくなると、分子は整然としたその配列を保つことが出来なくなり、液体となって物質の中を分子は自由に動き回るようになります。さらに温度が高くなり分子間力よりも分子の運動エネルギーがはるかに大きくなると、分子は物質の中の分子間力のしがらみから開放されて、自由な世界に飛び出してゆきます。この飛び出す現象を気化といい、分子が分子間力の影響をほとんど受けずに自由に運動できる状態を気体の状態といいます。

いろいろな温度と圧力で水が氷、水、水蒸気の3態の何れの状態にあるかは、図4-1に示す水の状態図で表すことができます。101000Pa (1010hPa、1気圧)の時に水は0°Cで固体の氷から液体の水に変化し、100°Cで水蒸気の圧力が101000Paになりますから、沸騰しどんどん気化が進みます。沸騰している水は液体が完全に水蒸気として気化するまでその温度を100°Cに維持します。図4-1からも分かるように、101000Paよりも高い圧力の下では水は100°Cよりも高い温度の沸点を示します。



電気炊飯器の普及する以前にはお釜でご飯を炊いていましたが、お釜には重い木の蓋が使われていました。このしっかりした蓋によりお釜が良く密閉され、内部は比較的高い圧力になりますから、水温が高くなってご飯を美味しく炊くことが出来るように工夫されていました。我が家で現在使用している電気炊飯器も、美味しいご飯が炊けるように内部の圧力が若干高くなるように工夫されています。

地表の気圧は海拔 0m の所で最も高く約 101000Pa ですが、高い山や高原では次第に気圧は下がって行きます。海拔 3000m を超すと気圧が 70000Pa まで低くなり、酸素不足から高山病に罹ることもあります。軽井沢や富士五湖地方のような高原では、強い台風の中心気圧ほどの 90000Pa しか気圧がありませんから、水は約 96°C で沸騰してしまい、いくら火を強くして煮ても、それ以上に温度が上がりません。しっかりした蓋をすると爆発の危険はありますが、圧力鍋は安全弁や気圧の調節弁を付けて爆発の危険のないように工夫されています。この圧力鍋を使いますと、どんなに気圧の低い土地でも、100°C 以上の高い温度で食べ物を煮たり蒸したりすることが出来ますから、食べ易く消化し易い食べ物に変化させるための調理法の幅を広げることが出来ます。圧力鍋は料理をするうえで優れものの道具と思われる。

## 凍らせたまま煮詰めてつくるインスタントコーヒー

水を 100°C に煮立てますと沸騰して水蒸気になりますが、この水蒸気が冷やされると再び液状の水に戻ります。このように液体から気体の状態を経て再び液体に戻る現象を蒸留といいます。でんぷんや糖分の醗酵により醸造されたお酒は約 10% のエタノール水溶液ですが、水よりもエタノールは沸点が低いために、エタノールの方が気化し易く、蒸留によりエタノールの濃度を高くすることが出来ます。ぶどう酒を蒸留するとエタノールの濃度の高いブランデーになりますし、お酒を蒸留すれば焼酎になります。食塩や砂糖の沸点は水に比較して極端に高温ですから、食塩水や砂糖水を熱すると、水だけが蒸留してゆき、鍋の底に食塩や砂糖が煮詰まってきます。

図4-1に示した水の状態図から分かるように、室温では水の蒸気圧は 3000Pa ですから、水は沸騰することなく僅かづつ水蒸気になります。しかし、気圧を 3000Pa まで減圧にしますと、水は室温でも沸騰をはじめて水蒸気に気化します。電気冷蔵庫の冷凍室は約 -10°C に設定されていますが、その温度では水は氷の状態に固化していますが、250Pa の蒸気圧を持っています。このように氷が僅かながら蒸気圧を持っていることは、氷の状態の水が徐々に水蒸気として蒸発してゆくことを意味しています。揮発した水蒸気はさらに冷たい所に氷として凝縮しますが、この固体から気体の状態を経て再び固体となる現象を昇華といいます。昇華は蒸留と同じように相変化による現象で、ドライアイスが液体になることなく二酸化炭素に気化してゆくときに見ることが出来ます。冷凍庫の中では水の昇華の現象が起こりますから、食べ物の水分が蒸発して乾燥してゆき、揮発した水分は冷却装置の部分に凍り付きます。

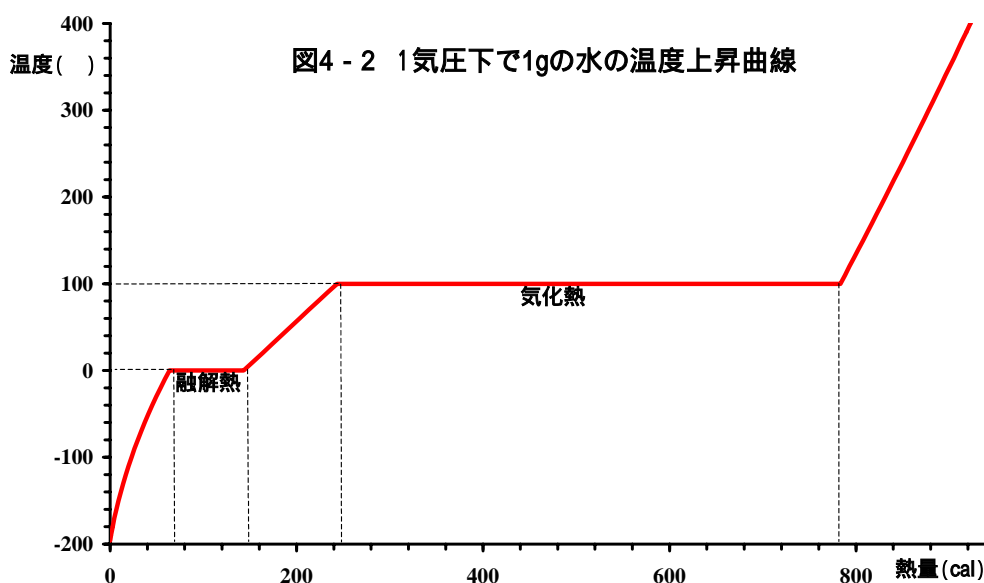
酸化や重合などの食べ物の変性を伴う化学反応は高温で比較的早く進行します。特に、

通常の蛋白質の変性点は約 70℃ですから、水の温度を上げて濃縮すると蛋白質の変性が起こってしまいます。このような食べ物の反応は低温では比較的ゆっくりと進行しますから、低い温度では味や風味があまり損なわれません。水を含む物質を凍結した後に、昇華により低温で水分を取り除き乾燥させる凍結乾燥という技術が開発されています。この技術では匂い成分などの揮発性の物質は多少失われますが、食べ物に含まれる殆どの物質を変性することなく、その味や風味を保ったまま乾燥することが出来ます。

コーヒー豆から抽出して淹れたコーヒーの液を凍らせて、凍結乾燥により水分を取り除きますと、コーヒーの苦味や風味が余り失われることなく乾燥した粉末になります。この粉末は水を加えるだけで容易に溶けて元のコーヒーに戻りますから、インスタントコーヒーとして忙しい現代生活では愛好されています。さらに、ネギや海老や油揚げなどの乾燥にもこの技術が用いられ、具や薬味として即席ラーメンや各種のカップ麺に加えられています。

### 料理の温度を操る気化熱の魔法

スープも味噌汁も澄まし汁もみな食べ物が入った水溶液あるいは懸濁液ですから、水を暖めたときにどのように温度が上がるか知ることは、料理を上手に作るうえで大切なことと思われます。図 4-2 は 1 気圧 (101000Pa) の下で 1g の水を暖めたときに加えられる熱量とそのときの温度の上昇をグラフに表したものです。この図で分かるように、水には相の変化に伴う大きな熱の収支がありますが、特に大きな気化熱を持っています。0℃の水 500g を薬缶に入れて台所のガスレンジで温めたときに、融けるまでの時間、水が沸騰するまでの時間、沸騰してから完全に水蒸気になって薬缶が干上がるまでの時間はそれぞれ 50



秒、1分、5分25秒と換算することが出来ます。ただし、ガスレンジの発熱量は1分間に100kcalで、熱効率50%でガスレンジの熱が水を暖めるとします。この概算した時間から、水が沸騰を始めてから完全に蒸発し終わるまでの時間の極端に長いことが分かります。このことは100℃の水蒸気が100℃の水に凝縮するときには、非常に大きな熱量を放出することを意味しています。シュウマイや饅頭を上手く蒸すことが出来るのはここで放出する大きな熱量によると思われます。料理の間に100℃の水蒸気が皮膚に当たりますと凝縮して水になりますが、同時にその部分の皮膚に短時間に多量の熱が集中しますから、非常に危険な火傷を引き起こすことがあります。

油の浮いた中国料理のスープやラーメンの汁が非常に冷めにくく湯気も立っていないのに、口に入れると火傷するほどに熱いと感じた経験があると思います。沸騰点以下でも高温の水は大量の水蒸気を蒸発しますから、大量の熱量を失い水の部分は冷えて行きます。しかし、水面を油の膜で覆われていますと、水面からの水蒸気の蒸発は極度に抑えられてしまいます。そのために気化による熱量の放出が抑えられ冷え難くなっていますから、高温の水が冷えてゆく通常の時間感覚で推測する温度よりも高い温度に保たれていることになり、口の中を火傷することになります。水面が多く露出するように油の膜を壊して掻き回せば、水蒸気の蒸発が起こり温度は急激に降下するでしょう。

アンコールワットへの観光旅行の折に、レストランでは大型の扇風機を回していましたが、その風の流れに霧状の水を撒いていました。小さな水滴は風の流れの中で即座に気化しますが、そのとき多くの気化熱を流れる風から奪いますから、風の湿度は高くなりますが温度は下がります。熱帯にあるカンボジアで利用できる簡易型の冷房装置です。電気冷蔵庫の普及していなかった時代には日本でも同じような原理を利用して、夏になると濡れた布巾で器を包み風通しのよい所に置いておきました。布巾に含まれた水は風に当たって気化しますが、そのとき多くの気化熱を器から奪いますから、器の中まで良く冷えます。

多くの気体はポンプで電氣的に加圧しますと発熱を伴って液化し、圧力の低いところで霧として拡散しますと気化すると共に、気化熱を奪いながら急激に温度が下がります。気化した気体は再びポンプで加圧して冷却しながら液化して循環しますから、電氣的にポンプを働かせることにより温度を下げる事が出来ます。水の大きな気化熱には及びませんが、アンモニアやフロンガスなども気化するとき熱を奪います。水は電気器具に利用することが難しいために、アンモニアやフロンガスなどを使った冷却装置が電気冷蔵庫に用いられています。しかしフロンガスも公害物質として規制されていますから、ブタンガスなどが次第に使われるようになって来ました。

## 食材を変える水の体積変化

前の説で述べたように、気体の状態では分子と分子の間に相互に働く分子間力が極めて弱いために、式4-1に示す理想気体の状態方程式は現実に存在する気体の関係を比較的良く表しており、実際の化学の研究に便利に用いられています。この式4-1を用いて計算

すると、1gの水の体積は室温で約1mLですが、100℃まで加熱して完全に気化すると約1700倍の体積の水蒸気に膨張します。気化した水は式3-3の関係式のように温度上昇と共に体積をさらに増大しますが、その様子は図4-3(A)に示すとおりです。水を入れた容器を密閉して加熱すると、水が気化して膨張しますから内部の圧力が高くなり、内部の水の温度は100℃よりも高くなります。この高い圧力を利用すれば蒸気機関を動かすことも出来ますが、容器の耐圧強度を越すと容器が壊れて爆発をすることもあります。

逆に、液状の水は温度が下がると共に次第に体積も小さくなり、4℃のときに1gの体積が1mLまで小さくなります。さらに温度が下がりますと、若干体積を増しますが、図4-3(B)のように0℃で体積を約10%増加して固化します。水は地球上では極めてありふれた物質ですから、全ての液体がこのように複雑な体積の増減をするように思われますが、現在までに性質の知られている全ての物質は固体、液体、気体の3態を通して温度の上昇と共に体積が増加します。4℃の水は最も小さな体積で密度がもっとも大きいために水の底に沈み、対流現象を起こさなくなってしまう。また、氷は水よりも体積が大きく密度が小さいために、水面に浮かぶようになります。器に入っている水が冷やされると、次第に体積が小さくなりますが、4℃からは体積が大きくなります。0℃で表面から凍り始め、内部が体積の小さな液体の状態に器に蓋をするように凍ります。さらに温度が下がりますと、内部の液体が約10%の体積の増加を伴って凍ります。しかし、既に氷の蓋が出来ていますから内部に非常な圧力がかかり、器を破壊してしまいます。

豆腐は豆乳の中の蛋白質を苦汁(MgCl<sub>2</sub>)で凝固させた食べ物ですから、蛋白質の網目の中に多くの水を含んでいます。このようにして作られた豆腐を冬の寒い夜に外に置いて凍らせると、含まれている水が氷になりますが、そのとき体積が約10%ほど膨張しますから、豆腐の中に小さな穴が開きます。昼間は豆腐の中の氷も融けて水になりますが、夜

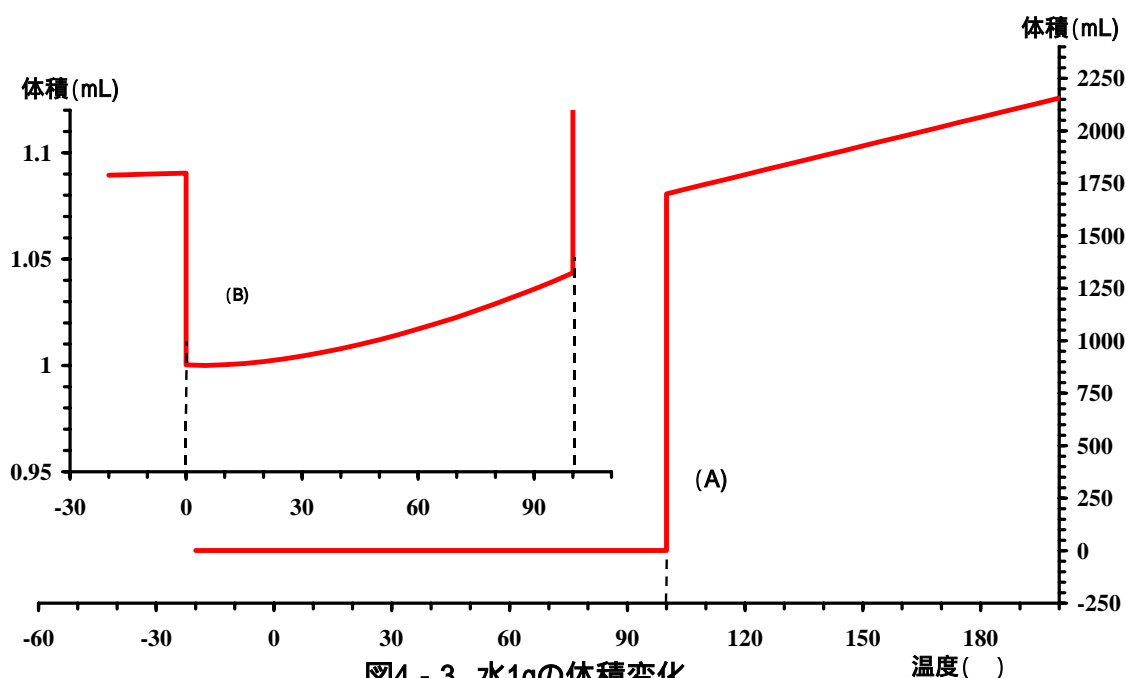


図4-3 水1gの体積変化

になると再び凍りますから豆腐の中の小さな穴はまた少し大きくなります。豆腐に含まれる水の凍結と融解が繰り返されるうちに、次第に小さな穴は成長しますから豆腐は海綿状になり、含まれる水が次第に凍結乾燥されて、凍み豆腐あるいは高野豆腐と呼ばれる日本料理や中国料理の重要な食材になります。

テングサから抽出したアガロースと呼ばれる食物繊維を水に溶かしますとトコロテンを作ることが出来ますが、豆腐と同じようにトコロテンもアガロースの網目の中に水を含んでいます。このトコロテンを冬の寒い夜に外に置いて凍らせると、大きな穴の開いたトコロテンが出来上がります。海綿状になっているためにお湯に容易に溶けてトコロテンを再生することができ、古くから寒天と呼んで愛用されてきました。乾燥していて寒さの厳しい土地が凍み豆腐や寒天の製造に適していますから、東北地方や長野県の名物になっています。

大部分の食材は植物や動物の細胞を含んでいますが、細胞は種々の栄養や構成成分と共に水を細胞膜で包み込んでいます。近年、保存のために食べ物の冷凍の技術が進歩しましたが、この冷凍食品は細胞の中の水まで凍らせてしまいます。当然、細胞に含まれる水は膨張しますから、細胞膜は破壊されます。解凍されると共に内部の栄養や構成成分も漏れ出してしまいますから、すぐに食用に供さなければ味も食感も極端に低下してしまいます。食べ物を冷凍し解凍するためには、出来る限り細胞膜の破壊されないようにしなければなりません。高温で解凍したり、度々冷凍と解凍を繰り返すことは細胞膜の破壊を進行させますから、味や食感を劣化させることになると思われます。水が凍るときに体積が 10%ほど膨張する性質が食材の味や食感をしばしば変化させる原因になります。

## 0℃では凍らない肉や野菜

一般に、分子と分子の間には相互に働く分子間力と呼ばれる弱い引力が働いています。分子間力は分子と分子の間の距離に反比例するように変化しますから、圧力が高くなり分子の密度が高くなると、分子の間の距離が小さくなるため分子間力が大きくなります。また、物質の中で分子は動き回りますが、そのときの運動エネルギーは低温では小さく温度が高くなるほど大きくなります。物質には固体、液体、気体の3態があり、分子と分子の間で相互に働く分子間力と運動エネルギーの大きさの大小により物質の状態は決まってきます。温度が低いために分子の運動エネルギーが分子間力よりはるかに小さいときには固体の状態になり、分子は整然と規則的に並び、その配列を崩すほどには動くことが出来ません。温度が少し高くなり分子間力とほとんど同じ程度まで分子の運動エネルギーが大きくなると、分子は整然としたその配列を保つことが出来なくなり、液体となって物質の中を分子は自由に動き回るようになります。さらに温度が高くなり分子間力よりも分子の運動エネルギーが大きくなると、分子は物質の中の分子間力のしがらみから開放されますから、沸騰して自由な世界に飛び出してゆきます。この飛び出す現象を気化といい、分子が分子間力の影響をほとんど受けずに自由に運動できる状態を気体の状態といいます。

食塩や砂糖のような物質を溶かした溶液においても、分子間力よりも分子の運動エネルギーが大きくなると分子の間に働く分子間力のしがらみから開放されて、溶媒分子が自由な世界に飛び出してゆきます。しかし、溶媒分子が飛び出せば溶液が濃縮しますから、溶けている物質の分子間力は大きくなり、系全体としても分子間力が大きくなります。そのため、溶媒分子は気化し難く、その溶液の沸点は溶媒の沸点よりも高くなります。同じような分子間力の変化により、溶液の凝固点は溶媒の凝固点よりも低くなります。これらの現象をそれぞれ沸点上昇および凝固点降下と呼んでおり、溶けている物質の濃度と沸点あるいは凝固点の変化の大きさ ( $\Delta T$ ) の間には式 4-2 の関係が成り立っています。ただし、 $w^1$  を物質の重量、 $w^2$  を溶けている溶媒の重量、 $M$  を溶けている物質の分子量とするときに、比例定数  $K_b$  を沸点上昇度、比例定数  $K_f$  を凝固点降下度と呼んでいます。なお、参考のために表 4-1 には各種の溶媒の沸点上昇度 ( $K_b$ ) と凝固点降下度 ( $K_f$ ) の値をまとめておきます。

$$\Delta T = K_b \frac{1000w^1}{Mw^2} \quad \Delta T = K_f \frac{1000w^1}{Mw^2} \quad \text{式 4-2}$$

食べ物を食べ易くするための刻んだり煮たり焼いたりする操作と共に、塩や砂糖による味付けも料理の本質を形作る大切な作業と考えられます。日本では料理をするときに最も

表 4-1 各種溶媒の沸点上昇度と凝固点降下

溶媒	分子量	沸点 (°C)	$K_b$	凝固点 (°C)	$K_f$
水	18.02	100.0	0.52	0.0	1.86
メタノール	32.04	65.0	0.88		
エタノール	46.07	78.3	1.20		
アセトン	58.08	56.5	1.73		
蟻酸	46.02	100.6	2.40	8.6	2.77
ベンゼン	78.11	80.2	2.57	5.5	5.12
酢酸エチル	88.10	77.1	2.79		
酢酸	60.05	118.1	3.07	16.7	3.90
クロロホルム	119.50	61.2	3.88		
ニトロベンゼン	123.11	210.9	5.27	5.7	6.90
ナフタリン	128.16	218.0	5.80	80.2	6.90
樟腦	152.23	209.0	6.09	178.0	40.00



大切なものはさ、し、す、せ、その5つの味とされてきました。多少語呂合わせもありますが、さは砂糖、しは塩、すは酢、せは醤油（旧仮名遣いではせうゆと書く）、そは味噌を指し、酸っぱい、甘い、苦い、塩っぱい、旨いの5つの味を主に感じます。これらの種々の味は味覚物質が水溶液となって口の中に入り、舌の味覚を感知する部分に接触したときに味覚として感じられます。水に溶け込んでいる味覚物質の濃度が高いほど、舌の上の味覚を感じる部分と接触する確率が高くなりますから、味を強く感じるようになります。

水に溶けた味覚物質は式4-2に従って、水の沸点を上昇させ、凝固点を降下させます。野菜や乾燥したスパゲッティは出来るだけ高温に保つために、塩水で茹でる工夫がされています。また、種々の味覚物質を溶け込ませたスープはかなり高い沸点を示すと思われます。さらに、カレーや葛湯では多くのでんぷんを溶かし込んだ粘性の高い水溶液になっていますから、高い沸点を示し、しかも高い粘性により対流が抑えられますから放熱も抑えられます。結果としてカレーも葛湯も長時間にわたり高温を保ちます。

氷に塩を混ぜると塩による凝固点降下により、急激に氷が融けますから混合物の温度が下がります。塩の混ぜ具合で氷から $-15^{\circ}\text{C}$ 程度まで冷やすことが出来ますから、砂糖を加えて甘くした牛乳と卵をこの方法で冷やしながら攪拌しますと、アイスクリームを作ることが出来ます。同じ現象によりウイスキーや焼酎のオンザロックも $0^{\circ}\text{C}$ より温度が下がりますからグラスの外側に霜の凍り付くことがあります。

$0^{\circ}\text{C}$ に水を置いておくと次第に氷が成長して行きます。しかし、食べ物の大部分を構成する動物や植物の細胞の中に包み込まれている水の中には種々の物質が溶け込んでいますから、凝固点降下現象により $0^{\circ}\text{C}$ では凍りません。日本の国内ばかりでなく海外からも冷凍食品ばかりでなく鮮度の高い種々の食材が我が家に供給されていますが、これには $0^{\circ}\text{C}$ に保冷して運搬する方法が開発されたためと思われます。我が家の台所には $0^{\circ}\text{C}$ に温度を保つ氷冷室がありますから、肉も魚も野菜も霜げたり凍ったりしないで新鮮さを保つことが出来ます。

## 水が一方通行する細胞膜

ろ過もふるいも物質の形態的な大きさの違いにより分離する技術で、固体の大きさより小さな目の網やふるいやざるを用いれば大きな固体だけ分離することが出来ます。固体と違い液体は非常に小さな穴でも流れ出ますから、固体の大きさより小さな目の網やふるいを用いれば固体を液体から分離することが出来ます。紙は細い植物の繊維を絡み合った状態で薄く並べた物ですから、繊維の間に小さな隙間のあるふるいのような物です。化学ではろ紙と呼ばれる紙をふるいにして固体と液体を分離しています。このように懸濁液は固体の浮遊した状態ですからそれ以上に目の細かいふるいを通せば取り除くことが出来ますが、溶液に溶けている物質は幾ら細かいふるいを使っても濾し取ることができません。

ろ紙よりもさらに小さな隙間しかないフィルターが開発され、ヴィールスのような極めて小さな固体まで濾し取ることが出来るようになっていますが、化学の進歩はさらに小さ

な隙間しかない半透膜と呼ばれる膜をつくる  
 ことが出来るようになりました。この半透膜  
 を間に挿んで砂糖や食塩などの物質の溶けた  
 溶液とその溶媒だけを隣り合わせに置くと、  
 溶媒は膜を通して両方の液体の相を往き来し  
 ますが、溶液の中に溶けている物質の分子は  
 通り抜けることが出来ません。

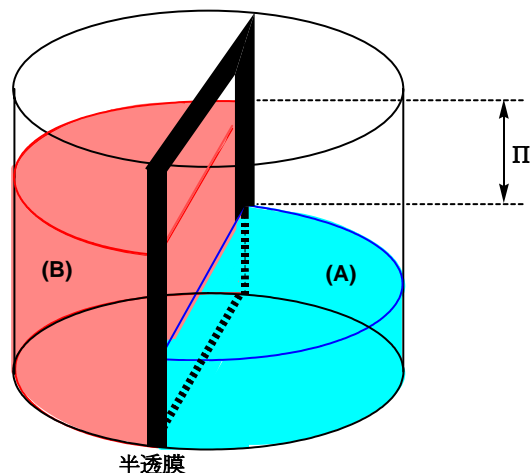


図4-4 浸透圧の現象

一般に、物質が溶媒に溶ける現象は物質  
 の溶ける前後における平衡の変化ですから、  
 式 2-1 の平衡定数Kの値が物質の溶け易さ  
 を意味します。物質が溶媒の液体の中に入り  
 込んで拡散するときには、物質のエントロピ

ー変化 ( $\Delta S$ ) が増大するため溶液が薄くなるほど安定化が進みます。逆に溶液の濃度が  
 高くなるときにはエントロピー変化が減少しますから不安定になります。溶液の濃度が小  
 さくなる変化がエントロピー的に安定ですから、半透膜を通して往き来する溶媒の量には  
 多少の差が生じます。2つの液層が半透膜で仕切られた図 4-4 のような装置を使い、van't  
 Hoff はこの現象を研究し、半透膜を通過する溶媒の量の違いから物質の溶けていない溶媒  
 相 (A) の液面より物質の溶けた溶液相 (B) の液面が高くなることを見出しました。さら  
 に、その結果を理想気体の状態方程式と類似の式 4-3 の法則にまとめました。

$$\Pi V = n_b RT \quad \text{式 4-3}$$

ただし、 $\Pi$ は浸透圧といい、半透膜を通り抜けるために必要な溶媒の圧力の差を意味し  
 ます。また、 $V$ は溶液の体積、 $n_b$ は溶液に溶けている物質のモル数、 $T$ はこの系の絶対温  
 度、 $R$ は気体定数を表しています。さらに、溶液のモル濃度を  $c_b$ 、 $\rho_b$ を溶けている物質の  
 質量、 $M_b$ をその物質の分子量とすれば、式 4-4 と書き換えることが出来ますから、この  
 関係式を利用すれば、物質の分子量を測定することも出来ます。

$$\Pi = c_b RT = \frac{\rho_b RT}{M_b} \quad \text{式 4-4}$$

食べ物の大部分は植物質と動物質でそれぞれ細胞膜を持っていますが、細胞膜はリン脂  
 質と呼ばれる界面活性剤でできており、細胞の内外を区別しています。細胞膜は半透膜  
 の性質を持っていますから、浸透圧の現象が観測されます。青菜に食塩を振り掛けると、  
 葉の上で濃い食塩水ができますが、このとき細胞膜が食塩水と細胞の内部を区切ってい  
 ますから、浸透圧の現象が進み、細胞の中の水分が滲み出して食塩水の濃度を下げます。そ  
 の結果、昔からの格言どおり、「青菜に塩」のように生気を失い萎びてきます。

著者は 20 年ほど以前にイスラエルとヨルダンの間にある死海を観光したことがあります。死海は世界で最も塩分濃度の高い湖ですから、泳がなくても沈むことなく浮いていることが出来ます。しかし、湖岸には 1 時間以上死海に入っているのは危険と注意書きが立てられていました。高い塩分濃度の水の中では体内の水分が浸透圧の現象により吸いだされてしまい、脱水症状を起こしてしまいます。

この浸透圧の現象は食塩に限らず、苦汁、砂糖、酢酸、エタノールなど水に溶けるあらゆる物質に起こります。水以外のあらゆる溶媒に対しても高い溶解度を持つ物質であれば、観測できる一般的な現象です。エタノール濃度の高い焼酎に青梅と氷砂糖を入れて数ヶ月放置しますと、梅の匂いや味の成分がエタノールに抽出されて、美味しい梅酒が出来上がります。梅酒の中には高い濃度の砂糖やエタノールが溶けていますから、その数ヶ月の間に、浸透圧の現象により青梅の内部の水が滲み出してしまい、萎びて皺が寄ってきます。このように、浸透圧の現象は食材の中から、水分を吸い出してしまいますから、食感を変えるだけでなく保存などの点でも、料理に色々と役に立ちます。

## 水が動き回ると熱くなる

電磁波にはその波長により  $\gamma$  線のような放射線や目に見える可視光線、テレビやラジオで情報を送る極超短波や長波など種々の性質の違いがあります。これらの電磁波のエネルギーは式 4-5 に示すようにその波長に反比例するため、短い波長の光ほど高いエネルギーを持っています。ただし、 $E$  は光エネルギー(kcal/mol)、 $h$  はプランク定数、 $\lambda$  は波長 (m)、 $c$  は光の速さ(m/s)、 $\nu$  は振動数 (Hz) を表しています。表 4-2 には電磁波の種類、波長、振動数、その電磁波が持つ光エネルギーをまとめておきました。

$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \quad \text{式 4-5}$$

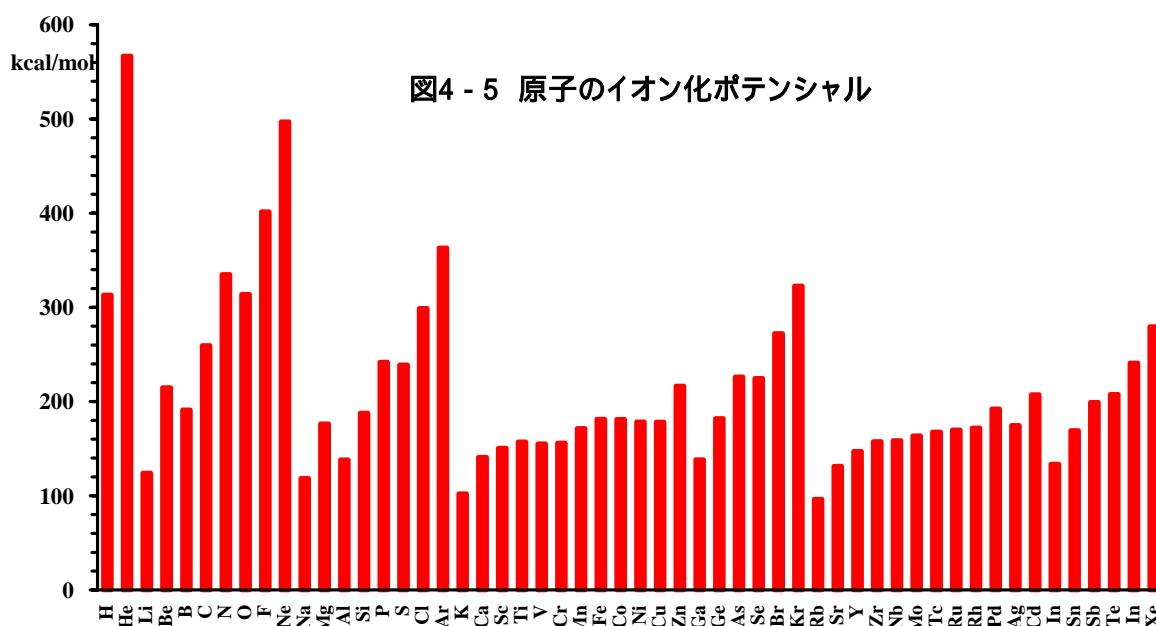
核分裂など原子核の変化に伴って発生する  $\gamma$  線はきわめて短い波長の電磁波ですから、種々の物質を通り抜けてしまい遮蔽することが極めて困難です。しかも、非常に高い光エネルギーを持っていますから、生物の細胞を破壊するような危険な電磁波です。原子核の内部の変化は極めて高いエネルギーの収支が伴いますが、原子核の周囲に存在する電子の変化もそれに次ぐ高いエネルギーの収支を伴います。原子核には電子が種々の環境で取り巻いていますが、原子の中心付近に存在する電子は原子核との相互作用が強いために、叩き出すために高いエネルギーを要します。最も容易に電子を叩き出して原子をイオン化するために要するエネルギーをイオン化ポテンシャルといいます。このイオン化ポテンシャルは原子により違いがありますが、図 4-5 に示すように 1 モル当たり 100~600kcal で、比較的波長の長い X 線から波長の短い紫外線の電磁波のエネルギーに相当します。X 線のエネルギーがこのように中心に近い電子に影響を与えますから、物質を構成している原子は大きな影響を受け、生物にとっても危険な電磁波と考えられます。このように X 線は危

表 4-2 電磁波の波長とエネルギーと物質に対する現象

波長 (λ)		振動数 (ν)	電磁波の 種類	光エネルギー	物質に対する 物理現象
(m)		(Hz)		(kcal/mol)	
10 <sup>-16</sup>		3 x 10 <sup>24</sup>	γ線	2.86 x 10 <sup>11</sup>	原子核の変化
10 <sup>-15</sup>		3 x 10 <sup>23</sup>		2.86 x 10 <sup>10</sup>	
10 <sup>-14</sup>		3 x 10 <sup>22</sup>		2.86 x 10 <sup>9</sup>	
10 <sup>-13</sup>		3 x 10 <sup>21</sup>		2.86 x 10 <sup>8</sup>	
10 <sup>-12</sup>	1pm	3 x 10 <sup>20</sup>		2.86 x 10 <sup>7</sup>	
10 <sup>-11</sup>		3 x 10 <sup>19</sup>		2.86 x 10 <sup>6</sup>	
10 <sup>-10</sup>	1Å	3 x 10 <sup>18</sup>	X線	2.86 x 10 <sup>5</sup>	電子の励起
10 <sup>-9</sup>	1nm	3 x 10 <sup>17</sup>		2.86 x 10 <sup>4</sup>	
10 <sup>-8</sup>		3 x 10 <sup>16</sup>		2.86 x 10 <sup>3</sup>	
10 <sup>-7</sup>		3 x 10 <sup>15</sup>	紫外線	2.86 x 10 <sup>2</sup>	共有結合の励起
10 <sup>-6</sup>	1μm	3 x 10 <sup>14</sup>	可視光線	2.86 x 10	
10 <sup>-5</sup>		3 x 10 <sup>13</sup>	赤外線	2.86	共有結合の運動
10 <sup>-4</sup>		3 x 10 <sup>12</sup>		2.86 x 10 <sup>-1</sup>	
10 <sup>-3</sup>	1mm	3 x 10 <sup>11</sup>	マイクロ波	2.86 x 10 <sup>-2</sup>	分子の運動
10 <sup>-2</sup>	1cm	3 x 10 <sup>10</sup>		2.86 x 10 <sup>-3</sup>	
10 <sup>-1</sup>		3 x 10 <sup>9</sup>	極超短波	2.86 x 10 <sup>-4</sup>	
1	1m	3 x 10 <sup>8</sup>		2.86 x 10 <sup>-5</sup>	
10		3 x 10 <sup>7</sup>			
10 <sup>2</sup>		3 x 10 <sup>6</sup>	短波	2.86 x 10 <sup>-6</sup>	
10 <sup>3</sup>	1km	3 x 10 <sup>5</sup>		2.86 x 10 <sup>-7</sup>	
10 <sup>4</sup>		3 x 10 <sup>4</sup>	長波	2.86 x 10 <sup>-8</sup>	
10 <sup>5</sup>		3 x 10 <sup>3</sup>		2.86 x 10 <sup>-9</sup>	
				2.86 x 10 <sup>-10</sup>	

険な電磁波ですが非常に波長が短いために、骨などの密度の高い部分以外は人間の身体を通り抜けてしまいます。そのため「大きく息をすって、そのまま止めて……」に用いられて健康診断に役立っています。

炭素、水素、窒素、酸素などの原子はその電子が関与して共有結合で結ばれますが、結合の形成によりエネルギー的な安定化が起こります。ここで生ずる安定化エネルギーを結合エネルギーと呼んでおり、種々の結合の平均的な結合エネルギーを表 4-3 にまとめました。2重結合に4個の電子が関与していますが、そのうちの2個の電子が関与しなくな



って、単結合に変化するときには、2重結合の結合エネルギーから単結合のエネルギーに安定化エネルギーが減少します。この2重結合と単結合の結合エネルギーの差は $\pi$ 結合の結合エネルギーと考えることが出来ます。炭素=炭素2重結合の平均的な結合エネルギーが146 kcal/mol、炭素-炭素単結合が平均的に83 kcal/molですから、炭素=炭素2重結合のうちで $\pi$ 結合の結合エネルギーは約63 kcal/molと見積もることができ、 $\sigma$ 結合の83 kcal/molよりはかなり小さな値と考えられます。これらの結合エネルギーに相当するエネルギーを外部から与えられると、結合が切断され、励起状態と呼ばれる状態になります。

共有結合は構成する元素によりその結合エネルギーが異なりますが、50~200 kcal/molですから表3-2からも分かるように紫外線あるいは可視光線の光エネルギーに相当します。そのような光を吸収して共有結合は励起状態に変化しますが、励起状態は不安定で、吸収した光と同じ波長の光を発光して元の共有結合の状態に大部分は戻ります。このような共有結合の吸収と発光の過程で、熱輻射などによるエネルギーの損失で僅かながらも光の発光量よりも吸収量が多くなりますから、共有結合は特有の波長の光を吸収する結果になります。水は酸素-水素結合を持っていますから、120nmの光を吸収します。大気中には水蒸気のほかに共有結合を持つ酸素分子や窒素分子が大量に存在しますから、太陽から来る種々の電磁波のうちで、200nm以下の紫外線はみな吸収されてしまい、地表には全く到達しません。

目に見える可視光線よりも波長の長い赤外線は結合エネルギーに相当するエネルギーより低いエネルギーしか与えませんから、結合の切断も励起状態への移項も出来ません。原子同士を結び付けている共有結合は巻きバネのように伸び縮みをしますし、結合同士の角度も変化します。分子の中で原子の間に起こるこれらの相対的な位置の変化は原子の重

表 4-3 共有結合の結合エネルギーと光吸収波長

結合	化合物	結合エネルギー kcal/mol	吸収波長 nm	結合	化合物	結合エネルギー kcal/mol	吸収波長 nm
C-H	CH <sub>3</sub> -H	104	138	C-O	CH <sub>3</sub> -OH	91	157
C-H	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> -H	98	146	C-O	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> -OH	112	128
C-H	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> -H	112	128	C-O	CH <sub>3</sub> O-CH <sub>3</sub>	80	179
C-H	HOCH <sub>2</sub> -H	92	155	C=O	CH <sub>3</sub> CH=O	176	81
C-H	CH <sub>3</sub> CO-H	86	166		( $\pi$ 結合)	85	168
C-H	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CO-H	74	193	C=O	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> C=O	179	80
N-H	NH <sub>2</sub> -H	94	152		( $\pi$ 結合)	88	163
N-H	CH <sub>3</sub> NH-H	92	155	C=O	OC=O	128	112
N-H	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NH-H	80	179	C-N	CH <sub>3</sub> -NH <sub>2</sub>	79	181
O-H	HO-H	119	120	C-N	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> -NH <sub>2</sub>	100	143
O-H	CH <sub>3</sub> O-H	102	140	C-F	CH <sub>3</sub> -F	108	132
O-H	CH <sub>3</sub> COO-H	112	128	C-Cl	CH <sub>3</sub> -Cl	84	170
C-C	CH <sub>3</sub> -CH <sub>3</sub>	88	163	C-Cl	CCl <sub>3</sub> -Cl	73	196
C-C	CH <sub>2</sub> =CH-CH=CH <sub>2</sub>	112	128	C-Br	CH <sub>3</sub> -Br	70	204
C-C	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> -CH <sub>3</sub>	100	143	C-I	CH <sub>3</sub> -I	56	255
C-C	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	138	104	N-N	H <sub>2</sub> N-NH <sub>2</sub>	59	242
	( $\pi$ 結合)	55	260	N=N	HN=NH	100	143
C=C	CH <sub>2</sub> =CH <sub>2</sub>	172	83		( $\pi$ 結合)	41	349
	( $\pi$ 結合)	74	193	N≡N	N <sub>2</sub>	227	63
C≡C	CH≡CH	200	72		( $\pi$ 結合)	127	113
	( $\pi$ 結合)	54	265	O-O	HO-OH	50	286
C=C	CH <sub>2</sub> =CHCH=CH <sub>2</sub>	143	100	O=O	O <sub>2</sub>	119	120
	( $\pi$ 結合)	66	217		( $\pi$ 結合)	69	207

さ（原子量）により、また変化の種類により異なりますが、赤外線を持つ光エネルギーに相当します。水に 2.75 $\mu$ m の赤外線を照射しますと、その光によるエネルギーにより酸素-水素間の結合が伸び縮みの運動を起こしますし、7~9  $\mu$ m の赤外線の光エネルギーにより酸素-水素間の 2 本の結合の角度を変化させる運動を始めます。ちなみにほとんど共有結合性がなくイオン結合で結び付けられている食塩の結晶では、赤外線を照射しても全く吸

収することなく透過してしまいます。

赤外線よりもさらに長波長のマイクロ波は十分なエネルギーを持っていませんから、分子の結合を切断したり、伸縮したりするような分子の中の原子の位置の変化は起こりません。物質は多くの分子が集まって出来ていますが、分子同士は弱い分子間力によってお互いに結ばれています。固体では分子間力が運動エネルギーよりもはるかに大きく、分子同士はお互いに自由に動きまわることが出来ません。気体は逆に分子運動が大きいため分子間力が殆ど影響しません。液体では分子間力と分子の運動エネルギーの大きさが余り違いませんから、分子が集合した液体の状態にわずかなエネルギーを与えると分子は激しく運動することが出来るようになります。

水は水素と酸素の原子で出来ておりその原子の性質の違いにより、酸素原子が陰イオン性に水素原子が陽イオン性に結合電子が多少偏っています。このように結合電子に偏りがあり、陰イオン性部分と陽イオン性部分を持つ分子を極性分子と呼んでいます。電氣的に負に帯電した陰イオンは正の電場に引き寄せられ、正に帯電した陽イオンは負の電場に引き寄せられます。水は極性分子であり弱いイオンの偏りを持っているから、電場のベクトルと分子の極性の方向が反対方向になるように分子が向きを替えて移動します。

電磁波は進行方向に対して直行する面内に電気ベクトルと磁気ベクトルを持つ横波で、1周期ごとに電場が正負に交互に変化します。紫外線や可視光線や赤外線は高い周波数を持っているから、電場が交互に変化しても分子の運動がその早い変化に追従することが出来ません。しかし、マイクロ波は1mm~1mの波長の電磁波ですから、その周波数に相当する1秒間に $10^{10}$ ~ $10^{11}$ 回( $10^{10}$ ~ $10^{11}$ Hz)ほど電場が交互に変化します。短時間に電場が交互に変化するたび毎に水の分子の方向も変化しますから、マイクロ波を照射するとその周波数の数だけ水の分子は非常に激しく運動します。結果として、水の分子が動き回ると互いに衝突したり、強く摩擦し熱くなりますから、マイクロ波の光エネルギーは熱エネルギーに効率よく変換されます。このエネルギー変換をマイクロ波加熱と呼んでいます。食べ物をはじめ地球上の殆ど全ての物質は水を含んでいますから、マイクロ波を照射すればその水分子が高温に加熱されます。しかし、分子間力で分子の動きが制限されている氷の場合には、マイクロ波の照射にもかかわらず、水の分子の運動が十分に追従できないために、マイクロ波の光エネルギーを熱エネルギーに変換できません。また、分子の中にイオン性の部分が無いような無極性の物質の場合には、このマイクロ波加熱の機構は機能しません。

1947年に商品化された電子レンジは日本では一般的にISMバンドと呼ばれる $2.45 \times 10^9$  Hzの周波数を持つマイクロ波を用いて水分子を加熱しています。アメリカなどでは $9.15 \times 10^{11}$  Hzの周波数を持つマイクロ波も使用されています。汁物や牛乳は水の中に食材が含まれた物ですから、水が加熱されれば全体に効率よく加熱されます。内部に多量に含まれる水がマイクロ波により加熱されますから、水の中に入れなくても野菜を茹でることが出来ます。水や極性物質を含まない陶磁器やプラスチックはマイクロ波により加熱されませ

んから、ご飯や残り物の料理も鍋や釜を使うことなく、茶碗や皿にいれたままでマイクロ波により加熱することが出来ます。物質が極性であるか無極性であるかによりマイクロ波による加熱の効率が著しく異なる性質を利用して、あらかじめ調理した冷凍食品をプラスチックの袋にいれたまま解凍、加熱することが出来ますから、インスタント食品を料理することなく食べることのできるようになりました。

電磁波は波長により種々の性質を持っていますが、水に対しても特有の作用をします。X線は水の分子を壊してしまい、紫外線は水に吸収され、赤外線は水の結合を変化させます。マイクロ波は分子の変化は起こしませんが、水の分子を激しく揺り動かします。水が激しく動き回ると熱くなりますから、電子レンジに応用され食べ物の加熱のために便利に使われています。