

技術で輝く氷

機械物理工学専攻 大河 誠司 研究室

大河 誠司 准教授 1956年北海道生まれ。東京工業大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程修了。1994年同理工学研究科機械工学専攻助教授。2007年より同理工学研究科機械物理工学専攻准教授。



私たちにとって身近な存在である氷も、その性質には未だ明らかになっていない部分がある。氷の性質を理解することは、環境に配慮した設備やより効率的な機構の開発につながる。大河研究室では、氷の性質の解明とそれを利用した装置の開発を行なっている。本稿では、先生の研究の中から過冷却の解消、ミクロスケールでの氷の性質、凍結濃縮法といった3つのテーマを取り上げる。

身の周りの氷

水の状態の一つである氷は私たちにとって身近なものであり、多くの場面で使われている。氷を用いた製品や設備にはさまざまなものがあるが、それらを開発する技術を発展させるためには氷の性質に関する深い理解が必要だ。

保冷剤を冷凍するとき、凝固点より温度を10℃以上下げないと凝固しない。このように水や水溶液の温度が凝固点を下回っても凝固しない現象を過冷却という。冷凍にかけられるコストや冷凍機の性能には限界があるため、より低温の保冷剤を作るには過冷却を解消する技術が求められる。

冬季オリンピックの代表的なスポーツにスピードスケートがある。氷の性質を考慮して作られたスケートリンクはスピードスケートの記録の向上に繋がっている。氷には方向によって摩擦係数が異なるなどの特徴があるため、それを考慮することにより、滑りやすいスケートリンクが生まれる。

氷の性質が競技の記録に影響を及ぼすのだ。

このように氷の性質は身の周りの技術に応用されており、大河研究室でも氷の性質とそれを活かした技術についての研究を行なっている。本稿では先生の数ある研究の中から過冷却の解消、ミクロスケールでの性質、凍結濃縮法をテーマにしたものを紹介する。

過冷却の解消

過冷却水に不純物の混入や氷との接触などの刺激を与えると過冷却が解消され、凝固が始まる。大河研究室ではこれを応用して、保冷剤に含まれている水溶液の過冷却を解消する再利用可能な装置を開発している。

先生はこれまでに水溶液に電場をかけたり、ヨウ化銀を水溶液に加えたりとさまざまな方法を考えた。しかし、これらの方法はコストや毒性の面で実用化には問題があった。

そこで、先生は水の特別な性質に目をつけた。ほとんどの物質は液体から固体に変化すると体積が減少する。しかし、水は液体から固体に変化すると逆に体積が増加する。この性質を利用した装置を水溶液の中に設置することを先生は考えた。

先生が考えた装置は水の入ったカプセルと膜からなり、膜の中心には閉じた細孔がある（図1）。この膜は特殊な高分子でできており、低温下でも伸縮性能を維持できる。冷却前はカプセル内部の水と周囲の水溶液は完全に遮断されており接触していない。ここで水溶液の温度をその凝固点以下に下げると、水溶液は過冷却状態になる。一方、カプセル内部の水は水溶液より凝固点が高いため凝固する。すると、カプセル内部の水の体積膨張により膜が押されて閉じていた細孔が開く。こうして、内部の凝固した水が水溶液と接触し、凝固の伝播が起ることで過冷却は解消される。これが先生の考えた過冷却解消装置の仕組みである。

しかし、理想的な細孔の作製は難しい。一般的な方法では膜にレーザーを当てて細孔を開けるが、この装置を作る場合には適さない。なぜなら膜にレーザーを当てる方法では、細孔が開いたままになってしまい、水と水溶液が混ざり合って装置が成り立たなくなってしまうからだ。

そこで、普段は閉じているが膨張時には開く細孔を実現するために、先生は加熱した銅線を用いて細孔を開ける方法を採用した。熱した銅線を膜に通すとその部分が融けて、引き抜くときに融けた部分が固まり、弁のような構造になる。このようにして通常時には閉じている細孔ができるのだ。

先生はこの装置のさらなる改良を考えて研究を続けている。この装置の細孔は膜を加工することによって作られるが、この膜は特殊な物質でできているため、加工は容易ではない。そのため、同じような形の弁を精度よく作れるとは限らないのが現状だ。先生は理想的な細孔を安定して作製できることを次なる課題としている。

また、凝固時に水と水溶液が接触する以上、カプセル内部にある程度水溶液は流れこむ。しかし、実用化に向けて再利用可能な装置にするためには、カプセル内部に流れ込む水溶液が少なくなければならない。そこで先生は、銅線の先端の鋭さ

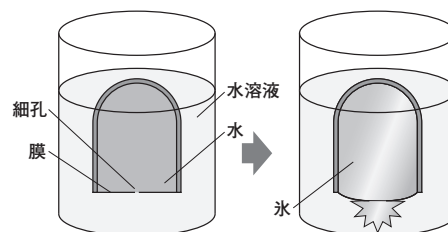


図1 過冷却解消装置

水が凝固し体積が膨張することで細孔が開く。すると、内部の水が露出して凝固が伝播し過冷却が解消される。

や膜の粘着性の有無を変化させて実験を繰り返し、改良を重ねている。300回使用しても凝固点から5℃以内で過冷却を解消する装置を作ることが目標だ。

大河研究室ではこのほかに気泡を用いた過冷却制御についても研究している。先生は水溶液に小さな気泡を作り、それに超音波を当てることで気泡の内外に圧力差を作ることによってそこから凝固を起こすことを考えている。過冷却水は中の小さい気泡のまわりに圧力差が生じると凝固するという性質を利用したものだ。しかし、凝固が起る気泡の大きさには条件がある。気泡が大きすぎると浮力で消えてしまい、小さすぎると凝固が起らないのだ。先生は10 μm程度の気泡が理想的であると考えている。

このように先生はさまざまな方法で過冷却を制御しようとしている。過冷却解消装置が生産できるようになれば、より低温の保冷剤が使用可能になり、食品管理技術も進むことであろう。

ミクロのスケールでみる水

自然界には雪や霜、つららなどさまざまな形で水が存在するが、これらができるメカニズムや異なる物質上でどのように生成するかはまだはっきりしていない。水の生成過程を解明するために、大河研究室では大量の分子の動きを研究している。大量の分子の動きを厳密に計算するのは難しく、その計算量も膨大で人間には不可能だ。そこで大河研究室ではコンピュータに近似と大量の計算を任せる分子動力学法（MD法）を採用している。このシミュレーションはナノメートル、ナノ

秒単位の非常に狭い範囲で行われる。通常行う実験をマクロスケールでの観察と考えれば、とても小さい範囲を非常に短い時間だけ計算するMD法はミクロスケールでの観察といえる。

氷の性質を解明するために、先生はまず単結晶の水がどのように成長するのかを調べた。単結晶とは結晶のどの部分であっても分子の向きが綺麗に整ったものを指す。MD法を用いたところ、単結晶でも向きによって成長する速さが違うことがわかった。氷の結晶の平たい面に平行な方向をa軸、垂直な方向をc軸とくと(図2)、c軸方向の成長はa軸方向の成長よりも遅いのである。

氷の成長をMD法でさらに詳しく追うと、氷がc軸方向に成長するとき、構造の違った二種類の氷が現れることがわかった(図3)。これらは、IhとIcと呼ばれ区別されている。Icの氷がIhの氷の上に生成すると、Ihの氷がその上に生成しにくくなる。この現象のためにc軸方向の成長が遅れることがわかった。氷の方向による性質の違いがここにも現れているのだ。

また、氷の成長しやすい温度についても解明された。0℃から-5℃の範囲でもっとも成長が進み、-5℃以下になると成長しにくいことがわかった。

なぜ温度が低すぎると氷はあまり成長しないのだろうか。これには分子の運動エネルギーが関係している。温度が低すぎると分子が振動する自由度が奪われて、結晶の形になりにくい。その一方で、成長に適正な温度では自由度を保ちつつも分子の運動エネルギーが大きくなりすぎないので結晶の形になりやすい。氷が成長するためには分子がある程度の自由度をもつことが重要だと先生は考えている。

先生はMD法を用いた研究を継続しており、現

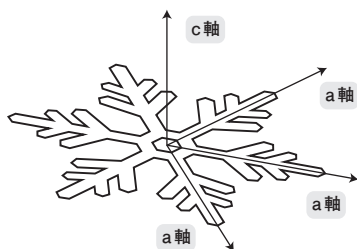


図2 氷の結晶軸

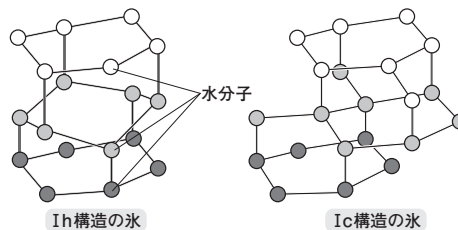


図3 氷の二種類の構造

同じ色の分子は同じ高さを表している。

行なっているのは氷の成長に伴う温度分布の変化の観察だ。このような細かい性質は、通常のスケールの実験では到底観察できない。ミクロの観点で見るMD法だからこそ、このようなことがわかるのである。

汚染水と凍結濃縮法

大河研究室ではMD法で解明した氷の性質を利用して凍結濃縮法を研究している。凍結濃縮法は濃縮法の一つであり、ジュースを輸送するときなどに用いられる。ジュースを濃縮することによって体積を小さくして運ぶのである。しかし、先生は凍結濃縮法を体積を小さくする方法としてではなく、溶媒と溶質を分離する方法として捉えている。水が氷に変化する過程で不純物を取り込まない性質を利用し、溶媒である水を氷として分離するという凍結濃縮法の原理に注目したのだ(図4)。

凍結濃縮法を利用すれば、海水から塩分を排除して淡水にすることもできる。しかし、海水を淡水化する作業においてはより効率的な浸透膜を使った方法があるため、凍結濃縮法は適さない。

では凍結濃縮法は一体どのような場面で求められるのだろうか。凍結濃縮法の特徴として、コストはかかるが濃縮の際に生じる氷の純度が高いことが挙げられる。つまり、多少コストがかかっても高い精度を必要とする状況ならば凍結濃縮法を利用する価値があるのだ。そこで、先生は放射能汚染物質の除去に凍結濃縮法を利用することを考えている。大量の放射能汚染水を高い精度で処理することは今の技術では非常に難しい。このような高い精度を求められる処理こそ凍結濃縮法が有効であるというのが先生の見解だ。

凍結濃縮法の精度を上げるため、大河研究室では氷に取り込まれる不純物の量、つまり取り込み量を少なくすることを目標に研究を進めている。

先生はMD法や他の実験の結果から単結晶の水は取り込み量が少ないことを見出していた。この特徴は特にc軸方向の成長では顕著であった。

そこで、先生は氷の単結晶としての形態の一つであるフラジルアイスに目をつけた。フラジルアイスとは円盤状の非常に小さな薄い氷であり、凝固点より少し低い温度で水溶液に弱い対流を与えることによって生成される。フラジルアイス在水溶液中で作ると浮力で水面上がってくるため、水面はフラジルアイスで埋め尽くされる。そこをベースに凝固させていくとフラジルアイスはc軸方向に成長し、取り込み量が少なくなるのである。

さらに、先生はこの方法の取り込み量をより一層減らすことも考えている。現在の方法では、フラジルアイスのc軸はすべて同じ方向を向いているが、a軸は揃っていない(図5)。そのため、水溶液の水面全体ではフラジルアイス一つひとつが違う方向を向いた状態になってしまうのだ。この状態では隣り合ったフラジルアイスの間に溶質が取り込まれ、結果として溶質を取り込んでしまう。これを解消するために、a軸の方向もすべて揃えようと先生は研究を続けている。

また、先生はフラジルアイスを利用した方法を実用化するために、規模を大きくすることを考えている。現在、この方法は手のひらサイズ程度の大きさでは成功している。将来的にはこの規模を

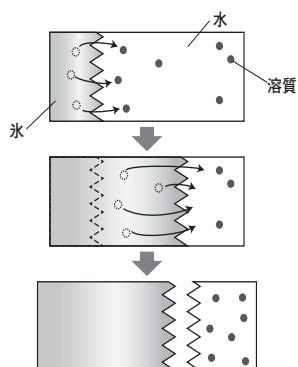


図4 凍結濃縮法

氷が成長する過程で水と溶質が分離される。

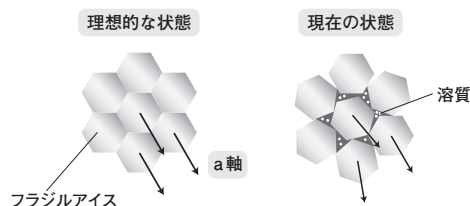


図5 c軸方向から見たフラジルアイス

a軸の向きが揃っていないと隙間が生まれ溶質が取り込まれる。

さらに拡大して、大量の汚染水を処理できるような規模の装置を作る構想を練っている。

水と人間

これまで見てきてわかる通り、大河研究室では水に対しての細かい調査から装置の開発まで多方面の研究が行われている。その方法もコンピュータシミュレーションから実験までさまざまだ。これらの多様な研究の根幹にはどのような理念があるのだろうか。

水は人にとって大切なものであり、水と仲良く生きていきたいと先生は言う。水は地球の魅力であり、水を汚すことはしたくないとのことだ。水資源は有限であり、現在地球上では多くの人が水不足に悩まされている。水不足は飲み水の問題はもちろん、農業にも影響を与え、それが原因で食糧危機を招き、ひいては紛争にも発展する可能性がある。人類の発展のためには水資源の利用法を見直さなくてはならないのである。先生は水を大切に扱うために再利用可能な過冷却解消装置や汚染水の浄化装置を開発し、氷の詳しい性質を分析しているのだ。これらの研究はまさに先生の信念の一部を表しているにすぎないのである。

執筆者より

先生の研究の物質の性質を解明し、それを活かした装置を作るという部分に感銘を受けました。今回の経験は他学科の私にとっても非常に価値あるものでした。お忙しい中、取材に快く応じてくださった大河先生に感謝申し上げます。

(矢口 孝幸)