

雪の結晶は“環状水”によってつくられる

Snow crystals are created from "cyclo-water"

油川 英明^{1,2}

Hideaki Aburakawa^{1,2}

Corresponding author: abu440407@yahoo.ne.jp (H. Aburakawa)

¹ 日本雪氷学会 北海道支部, ² NPO 法人 雪氷ネットワーク

¹ Hokkaido Branch, the Japanese Society of Snow and Ice, ² NPO Network of Snow and Ice Specialists

雪の結晶は、従来、水蒸気の昇華作用により生成する（中谷，1949）と言われてきたが、昇華成長説は天然の現象に対して根本的な矛盾を抱えている。雪の結晶が水蒸気からではなく、過冷却微水滴（雲粒）から生成するものとするれば、この矛盾は解消されることになり、このことは実験的にも確かめられてきた（油川，2023）。雪の結晶を生成する過冷却微水滴は、一般的な液相の水とは異なり、水分子が六員環のクラスターを形成した、いわゆる“環状水”（シクロウォーター、cyclo-water）と仮称する液相の水であると推察される。さらに、雪の結晶の形状は“環状水”の分子配座によって決められるものとみなされる。

1. はじめに

中谷の「雪の研究」¹⁾において述べられている雪結晶の昇華成長説は天然の現象とは相いれない内容を含んでいる。このことから、雪結晶は過冷却微水滴（雲粒）により液相から直接に成長することをこれまで実験的に示してきた²⁾。

雪結晶が過冷却微水滴から生成する過程は比較的スムーズであることから、その液相には結晶化のための水分子の構造が「準備」されているのではないかと考えられる。それは氷結晶の主要な結晶面である底面及び柱面を構成する六員環の構造とみなされ、ここではその構造水を“環状水”（シクロウォーター、cyclo-water）と仮称する。

天然において過冷却雲粒がこの“環状水”を形成するのは、地表面から蒸発した水蒸気が比較的緩慢に上昇し、氷点下のもとで緩やかに凝結して過冷却の状態となり、雪雲を形成することによるものとみなされる。他方、水蒸気の凝結が急激であったり、常温の微水滴が過冷却した場合、その液相は“環状水”が形成され難く、従ってそのような過冷却雲粒は雪結晶とはなれず、霰などの氷球を形成することになる。

2. 過冷却微雲粒から雪結晶の生成へ

図1は、過冷却微水滴の凍結実験³⁾による氷晶への成長過程を示したものである。過冷却微水滴は、図の②ではすでに六角形状となっているが、その中心部は図の①と変わらないので、この部分は液相のままであると推察される。そして、そ

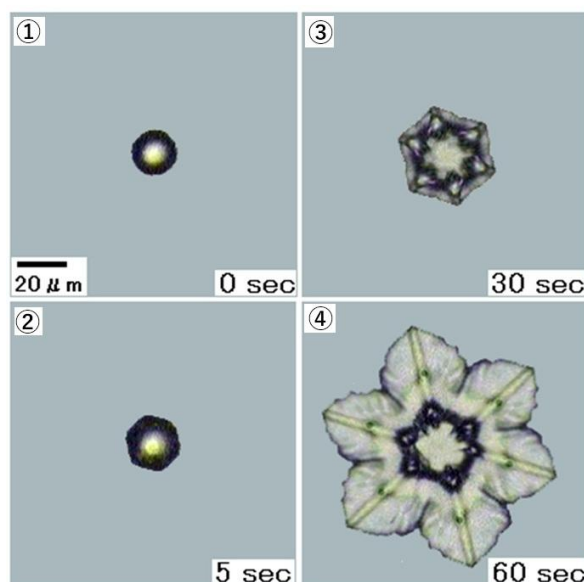


図1 過冷却微水滴の凍結実験。実験温度は－15℃。各図右下の数は経過時間（秒）

の後は氷晶として成長を示し、60秒後の図の④では六花状に発達している。この結晶は、近傍に過冷却微水滴があれば、それを捕捉して六花の枝を成長させて樹枝状結晶などになっていく²⁾。この成長は、従来の人工雪では30分ほどかかるが、この図のようにかなり短い時間で進行している。

図1のような氷晶の生成過程は、水蒸気の過飽和条件などの昇華成長説が再検討されるべき可能性を示している。また、図の雪結晶を生成する過冷却微水滴は、一般的なチリなどの凝結核により形成されることから、雪結晶の生成には氷晶核

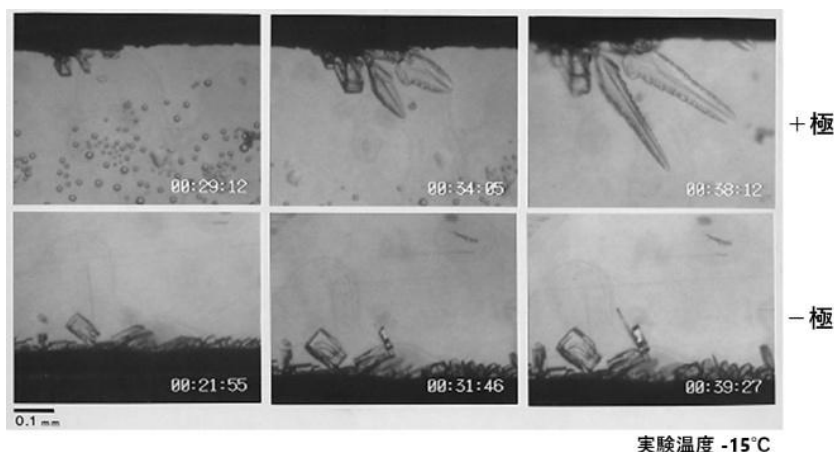


図2 電場を付加したときの氷晶の成長. 上方の写真は正(+)極側, 下方は負(-)極側. 時間の経過は左から右で, 上方は9秒間, 下方は18秒間の映像

などの特別な物質は必要としないと言える.

ところで, 図1の過冷却微水滴は, 液相から固相へと相変化が進行しているが, 一般的な過冷却微水滴の凍結とは異なり, 図の②以降, その表面には急激な凍結による亀裂などが認められず, また, その周りには潜熱の放出・昇温による霜の生成も見られない. このようなことから, 図1の相変化は一般的な潜熱が伴っていないのではないかと推察される. つまり, この相変化は, 水から氷への通常の凍結現象とは異なるものとみなされる. なお, このことについては後に触れる.

図1の過冷却微水滴が①から②への相変化をさせるためには, ①の微水滴が比較的安定な過冷却の状態にあることから, 何らかの刺激を与えることが必要である. 今の場合はこの微水滴に少し急激に水蒸気を凝結させることであった. このようなトリガー効果は, 過冷却微水滴の粒径やそれに含まれる凝結核の径が大きいものほど顕著で, 雪雲のなかで氷晶と雲粒が混在する現象もこのような効果が作用していると考えられる.

冬の朝, 景色が一変するほどの積雪を経験することがあるが, これは夜間の気温の低下により上空の雪雲が冷却され, 雲粒への水蒸気の凝結が盛んとなり, 上記のような効果によって雪結晶の生成が促進されるためであると推察される.

3. 電場の影響による氷晶の成長

図2は, 過冷却微水滴による氷晶の成長実験²⁾で, 電場を付加(1 cm 間に 20V)したときの+極と-極の側における結晶の成長を示している.

この図には二つの興味あることが見られる. 第一には, +極と-極において成長している結晶の形態が異なることで, 前者は板状結晶が, 後者は柱状結晶が成長している. このようなことは従来の人工雪においても若干見られ, 例えば, 中谷ダ

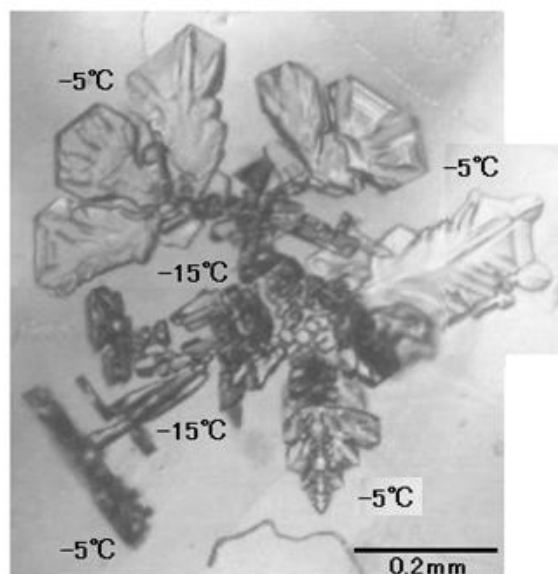


図3 負に帯電した薄膜(ポリ塩化ビニリデン)上での氷晶の成長. 図中に実験温度を示す.

イヤグラム³⁾において板状結晶の成長領域に角柱が2個ほど記載されているなどがあげられる. これは人工雪の装置が負極に帯電したことによる静電気の影響ではないかとみなされる.

興味ある第二は, +極の側には過冷却微水滴が多く付着し, -極ではほとんど見られないことである. これは過冷却微水滴が電氣的に負に帯電するため, +極の側に集中するものと考えられる.

図3は, 負に帯電した薄膜上における氷晶の成長実験による結果を示したものである. 図の写真に示されたように, -15°Cでは柱状結晶が成長し, それを-5°Cに温度を高めると樹枝状結晶の成長が見られる. このような現象は, 従来の人工雪の実験では見られないことである.

なお, 実験に使用した薄膜はポリ塩化ビニリデン製の調理用ラップであるが, 同様の実験を正に

帯電したポリエチレンラップにより行った場合は、従来の人工雪の成長と同じように、 -15°C では樹枝状結晶が、 -5°C では角柱の結晶が成長することが確かめられている。このような現象については以下において考察を行う。

4. “環状水”としての過冷却微水滴

先の図1のように微水滴が結晶化するのには過冷却による現象であるが、常温の微水滴を過冷却させるとか、水蒸気の急激な凝結により形成された過冷却微水滴は氷晶へと結晶化せず、一般的な氷球に凍結する。このような過冷却微水滴の現象は、液相から固相へと相変化するときの水の分子構造に起因しているものと考えられる。

雪結晶の形態は、基本的には板状結晶と柱状結晶の二種である。これらは、氷結晶の底面及び柱面が特別に卓越した形態であることから、上記のように雪結晶へ相変化する過冷却微水滴（雲粒）は、これらの結晶面の構造が液相として形成され、準備されているものと推察される。

氷結晶の底面及び柱面は、図4に示すように、6個の水分子を単位として構成された六員環の特有な立体構造となっている。ここで、六員環の典型としてのシクロヘキサン(C_6H_{12})の構造⁴⁾を援用して、水分子の六員環について検討を試みることにする。

図4において、赤で示された六員環は「いす形」と呼ばれ、水分子（下図の黒丸）が氷結晶の底面を構成している配座である。また、青で示された六員環は「舟形」と呼ばれ、氷結晶の柱面の配座となっている。このような水分子の構造が過冷却微水滴（雲粒）において形成されていれば、それが相変化したとき、「いす型」が卓越している場合は板状結晶へ、「舟形」が卓越している場合は柱状結晶へ成長することになるとみなされる。

この「いす形」及び「舟形」のパターンは以下のようにして導かれる。すなわち、六員環を真横に見て、4個の質点が連なった一本の弦と仮定する。そして、両端の質点が固定され、その間にある二個の質点による弦の二次元振動を考えると、質点の運動が均等であれば、この弦の運動は二つの基準振動により表され、先の二つのパターンである「いす形」と「舟形」が得られる⁵⁾。

過冷却雲粒の水分子の配列が上記の二つのパターンによるものであるとすれば、天然の雪結晶が板状結晶と柱状結晶及びそれらの組み合わせ

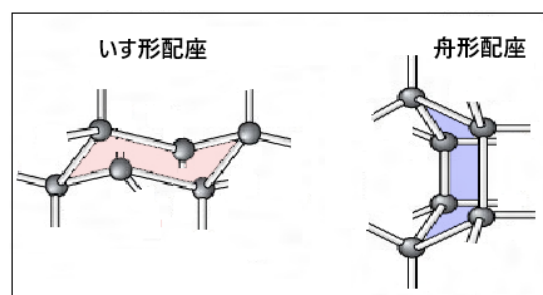
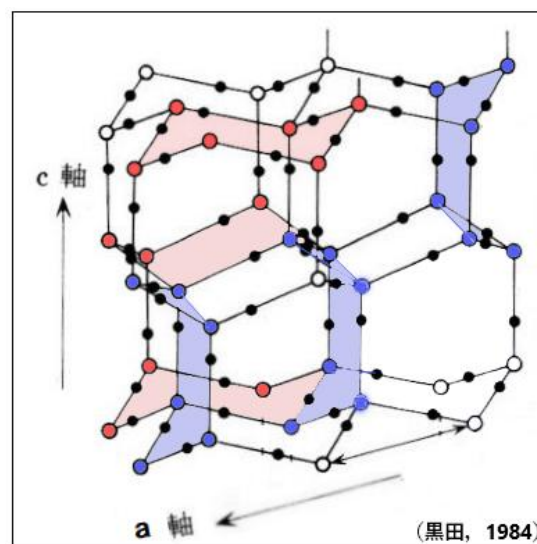


図4 氷の結晶格子⁶⁾ (上)と分子の立体配座 (下). 図上下の赤と青は各々符合となることは理解ができる。

このような水分子の六員環による液相の水について、ここでは(H_2O)₆と表示することとし、その液相の水を“環状水”（シクロウォーター、cyclo-water）と呼称することにする。

過冷却微水滴がこのような氷結晶状の分子結合により形成されているならば、一般的な過冷却水とは異なり、固相への相転移に伴う潜熱は、氷結晶状の分子結合の相当分だけ液相の時に「先払い」が行われ、発熱はそれだけ少なくなるとみなされる。先の図1の場合がその例である。

5. 六員環の水分子配座と成長結晶の形態

電場の付加により成長した結晶の形態をまとめて図5の上図に示す。従来の人工雪の実験は、正(+)極に帯電したポリエチレン膜上の成長と同じであるが、負(-)極に帯電したポリ塩化ビニリデン膜上では、結晶の成長形態が正反対になっている。このような現象は、“環状水”（シクロウォーター）の特性に因るものと考えられる。

水分子の六員環に関わってシクロヘキサンの分子配座をさらに援用すれば、“環状水”には「い

す形」と「舟形」の他にその異種があり、それらは「半いす形」と「ねじれ舟形」である。そして、これら4種の配座は、構成分子の形成エネルギーに関係している。六員環の分子配座とエネルギーレベルの関係を概念的に図5の下図に示す。

この図において、エネルギーレベルの低い方から順に、いす形(A)、ねじれ舟形(B'), 舟形(B)、半いす形(A')となっている。六員環の結合様式は、シクロヘキサンが炭素原子の共有結合で、水分子の場合は水素結合によるものであるが、ここでは水分子へ類推的に援用するものである。

ところで、先の図2において述べたように、結晶を生成する過冷却微水滴は負に帯電しているものとして、これが正に帯電したポリエチレン膜上では微水滴の電荷が中和される。そして、温度が -15°C の低温においては“環状水”の六員環はエネルギーレベルの最も低い、図5の下図に示されたようないす形(A)の分子配座になるとみなされ、それが結晶化して板状結晶が形成されると考えられる。また、ポリエチレン膜上の過冷却微水滴の温度が -5°C と高められれば、エネルギーのレベルがそれだけ上昇し、六員環の分子配座は舟形(B)あるいはねじれ舟形(B')になり(BとB'はエネルギーレベルが近いのでいずれか)、そして柱状結晶が生成されることになる。

他方、負に帯電したポリ塩化ビニリデン膜上に凝結した負の電荷の過冷却微水滴は、電気的な反発・励起作用により、温度が -15°C と低くてもエネルギーレベルが比較的高く、分子配座は舟形(あるいはねじれ舟形)となり、結果として柱状結晶が形成されることになる。そして、この温度を上げて -5°C としたとき、過冷却微水滴のエネルギーレベルがさらに上昇することによって分子配座がその上位の半いす形(A')となり、これにより図3のようにやや表面が不規則な板状結晶が生成されることになると考えられる。

6. おわりに

雪結晶は“環状水”(シクロウォーター, cyclo-water)の過冷却雲粒から生成する。このとき、緩やかに凝結した過冷却雲粒(環状水)は雪結晶となり、余り潜熱を伴わないものとみなされ、急激に凝結した過冷却雲粒(非環状水)は霰などを形成する氷球となり、一般的な潜熱を伴う。

常温の水や海水が緩やかに過冷却したときにも“環状水”が形成され、円盤状氷、角板状氷、

	ポリエチレン(+)	ポリ塩化ビニリデン(-)
-5°C	柱状結晶 (舟形)	板状結晶 (いす形)
-15°C	板状結晶 (いす形)	柱状結晶 (舟形)

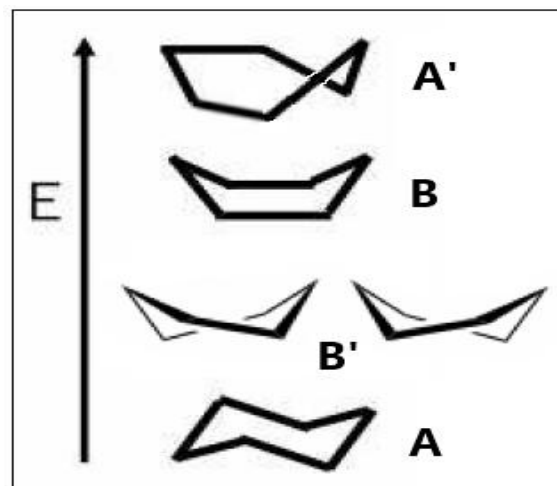


図5 温度と電場による結晶の成長形態(上)及び種々の六員環の分子配座とエネルギーの関係⁴⁾(下)。

樹枝状氷、フラジライスなどが生成される。

雪結晶の形態は、主に板状と柱状の二種であるが、これは“環状水”の水分子配座が大略、二種であることに起因していると考えられる。そして、この結晶形態は電場が付加されたとき正極と負極では異なり、各々の側で成長した結晶は、見かけ上、正反対の形態となる。

結晶の形状は“環状水”の水分子配座により決まるとみなされるが、この配座の形態は水分子のエネルギーレベルにより定まり、温度や電場などによるエネルギーの増減で変遷する。

【参考文献】

- 1) 中谷宇吉郎, (1949): 雪の研究, 岩波書店, pp.161
- 2) 油川英明, (2023): 雪の結晶は氷晶核の必要なく生成する, 北海道の雪氷, **42**, 65-68
- 3) Nakaya, U., (1954): Snow Crystals, Harvard Univ., pp.510
- 4) <https://ja.wikipedia.org/wiki/シクロヘキサンの立体配座> (2025年5月1日閲覧)
- 5) 坪井忠二, (1946): 振動論, 河出書房, pp.512
- 6) 黒田登志雄, (1984): 結晶は生きている, サイエンス社, pp.265