

報 告

いわゆる「水の結晶」の検証について

油川 英明¹

要 旨

社会的に話題となっているいわゆる「水の結晶」について実験的に検証を行った。その結果、この結晶は過冷却水滴の凍結過程において形成され、それは、ある条件が満たされた水滴の凍結氷球上に雪結晶状の形態となって形成されるものである。そして、その条件から外れた水滴には結晶が形成されないか、あるいは歪んだ形状の、いわゆる「醜い結晶」ができる。その水滴に関わる条件とは、氷点下で比較的長い冷却時間を経過することであり、加えて、その粒径について適当な大きさのもの（本実験では0.15~0.52 mm）が選択されることである。このように、いわゆる「水の結晶」は当然ながら科学的な成因によるものであり、言葉をかけるとか音楽を聴かせるなどの呪術的な「根拠」は問題外としても、科学的見地から具体的に検証されるべきであり、今回は相応に検証され得たものと考える。

キーワード：過冷却水滴、雪結晶状形態、冷却時間、粒径、科学的見地

Key words: supercooled water droplets, figure like as a snow crystal, cooling time of droplet, size of droplet, scientific viewpoint

1. はじめに

水に話しかけたり、文字を見せたりして特別な結晶を作り出すという、いわゆる「水の結晶」（江本，2001；2003 など）が以前から話題になっており、今でもその写真集等が広く販売されている。そして、これが学校教育における教材として無批判的に使われたり、さらには、そのような結晶を生成すると称した水があたかも人体の健康に特別な効果があるかのごとく喧伝され高額で販売されてきている。このようなことは非科学的な問題としてだけでなく、教育的、社会的にも看過され得ないことである。

いわゆる「水の結晶」の非科学性に対しては、2006年の愛媛大学における日本物理学会のシンポジウムや種々の著作（左巻，2007 など）等によって厳しい批判がなされてきており、それは科学的良心の発現として十分に評価され得ることである。ただ、それらの批判は相応に論理的で啓蒙的

なものではあるが、日常において科学研究に接する機会が余り多くない人々には、その理解に少し具体性が求められるのではないかと考えられる。

このようなことから、雪や氷の研究に関わりを持つ者の責務として、いわゆる「水の結晶」なるものの非科学性については実験的・具体的に検証されることが必要ではないかと判断され、また、学兄諸氏から、著者が以前に著した「水の結晶」の批判論文「凍結する過冷却水滴の表面に形成される氷晶状結晶」（油川ら，2004）を一般にも紹介すべきではないかと促されたことから、ここにその論文の概要と若干の考察を述べるものである。

2. 過冷却水滴による氷晶状結晶の作製

2.1 結晶の作り方

いわゆる「水の結晶」の作製方法については詳細なことが公開されていないことから、主にはその著書（江本，2001 など）により推察せざるを得ないが、呪術的な部分はさておき、その大略は以下のようなものとみなされる。すなわち、1) 常温において、水の入ったスポイトによりシャーレに

¹ NPO 法人 雪氷ネットワーク

〒060-0042 札幌市中央区大通西 18 丁目北大通マンション 704 号

多数の水滴をつくる（粒径などは公表されていない）、2) このシャーレを -20°C 以下の冷凍庫で3時間ほど保存し、3) その後、 -5°C の部屋にこのシャーレを移して、凍結した氷球の盛り上がった部分に光を当て、顕微鏡でのぞく、4) 雪花状の結晶（氷晶状結晶）が成長しはじめ、その結晶は2分ほどで消滅する、というものである。

このようなことを考慮して、過冷却水滴から結晶を作るという方法を以下のように試みた。すなわち、図1は結晶を生成させる装置の概略を示したもので、この装置は、顕微鏡、多数の水滴が底面に付着したシャーレ、そのシャーレを冷却する電子冷却素子（ペルチェ素子；縦横の長さ各3cm）および冷却素子へ電流を供給する電源部から構成され、全体が -5°C に温度設定された低温室に入れられている。

この電子冷却素子の吸熱面は、 -5°C の室温において、1.5 A ほどの供給電流により -15°C の温度まで冷却させることができる。図1において、水滴を入れて結晶を生成させるシャーレは、直径が8.5cm、高さが2cmほどのプラスチック製のものである。ガラス製のシャーレでは水滴がすぐに凍結してしまい、過冷却の状態をあまり長く保つことができず、結晶を生成させることができなかった。シャーレのなかの水滴を常温から冷却し、過冷却度を相応に深化させる必要があると考えられるわけで、そのためには、シャーレの材質と水滴の大きさに留意する必要がある。

次に、この装置により結晶を作る手順を以下に述べる。まず、常温の室で蒸留水を用い、スポイト（大きめの水滴の場合）あるいは噴霧器（小さな水滴の場合）でシャーレに多数の水滴を付着させ（粒径が0.1~1.0mmのものを主として）、それらの水滴の蒸発を防ぐために合成樹脂のうすいフィルムでシャーレの上面を覆って密封し、それを断熱材で作られた箱に入れる。これを -5°C の低温室に入れ、3時間ほど冷却を行う。このような操作によって、シャーレの水滴は蒸発することなく、極めてゆっくりと過冷却が進行する。特に、この予備的な冷却は重要な点である。

このような事前の冷却を行わず、水滴の入ったシャーレを一気に -15°C ほどで急冷する等のことも試みたが、結果は余り期待したものにはならな

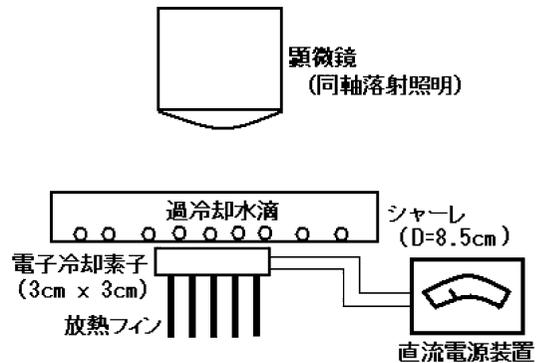


図1 結晶生成の実験装置。
(油川ら(2004)より転載)

かった。それで、種々の方法を試みた結果、このような穏やかな冷却の「前処理」を施すことにより水滴から結晶を生成させることができた。つまり、このことは過冷却水滴の凍結形態がその冷却過程に強く影響を受ける（油川, 1994; 2005）ということを示すものであった。

結果として、上記のような手順により結晶を生成することができたということから、「水の結晶」に示されているような結晶の製作に際しては、試料の水滴に対して、この製作者の意図的あるいは偶然的な「前処理」の冷却過程が存在しているのではないかと推察される。

さて、先ほどの -5°C に冷却されたシャーレを箱から取り出し、顕微鏡の載物台にある電子冷却素子の上に載せ、シャーレの底の一部を -15°C ほどの温度に冷却する。このとき、シャーレ上面のラップは観察部分だけカッターで穴を開け、顕微鏡の視野を鮮明に保つようにする。

電子冷却素子により冷却を始めてから5分ほど経過すると、シャーレの水滴が凍結し始め、凍結水滴の上部においてその一部が隆起してくる。そのまま隆起した部分の観察を続けると、そこに氷晶状の結晶が生成してくる。凍結水滴の上部が隆起してから10分くらい経過すると、結晶は角板状に成長する。今回はこのようにして角板や扇形などの結晶を作ることができた。

2.2 結晶が生成する過程

図2は、過冷却水滴が凍結し、その上部に角板状の結晶が生成するまでの連続画像を示したもの

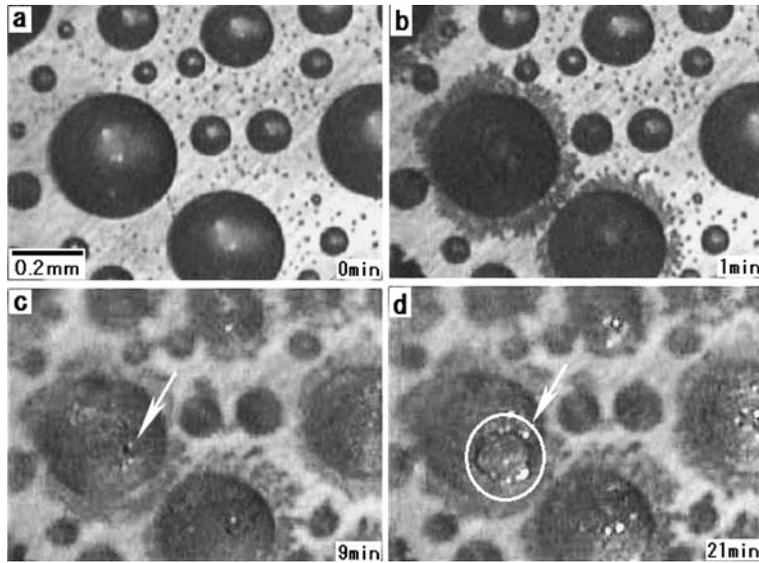


図 2 過冷却水滴の凍結と氷晶状結晶の生成過程 (矢印は氷晶状結晶).
(油川ら(2004)より転載)

である。図 2a は冷却素子に載せられたばかりのシャーレ底面の水滴で、画面の中央左に見られる水滴に着目して、その粒径は 0.4 mm ほどである。この状態から 1 分ほど経過したものが図 2b で、左側の水滴が凍結し始めている。つまり、この水滴の周りに火炎状に広がっている文様は、水滴の過冷却状態が破れて凍結が開始し、その潜熱によって凍結水滴の温度が上昇することにより、それから蒸発した水分が瞬時に広がって氷膜状に凍結したもので、過冷却水滴が凍結した証である。

図 2c は、初めの状態から 9 分ほど経過したもので、顕微鏡の焦点を凍結水滴の頂点部分に合わせたものである。この図の矢印で示したように、凍結した水滴の上には、頂点の少し外れた箇所に微小な円形状のものが周りを少し盛り上がり、中央部には特徴的な形態が輝いて見えている。そして、これから 21 分ほど経過した図 2d では、矢印により示された円の中に角板状の結晶が成長している様子が確認できる。この結晶の基底面は水平で、シャーレの面にほぼ平行となっており、その中心部分は図 2c における矢印とほぼ一致する。つまり、この角板は、図 2c に見られる凍結水滴の盛り上がった箇所を中心に、ほぼ対称的な六角形

状に成長したものであることが分かる。

この場合、このような雪花状の結晶の成長は、従来の説 (中谷, 1949) では、ある特別な核に周囲の水蒸気が昇華したものとされてきたわけであるが、これは、そのような成長機構とは少し異なっているように考えられる。すなわち、ここにおいて、氷晶の核となるべきものの存在は考え難く、図 2c における凍結水滴上端の一部が角板を形成するように凍結し、それが成長したものではないかと推測される。詳細については、油川ら (2004)、油川 (2005) を参照されたい。

このようなことから、図 2 に示された結晶は、いわゆる「水の結晶」状のものであるが、従来言われてきたような氷晶の気相成長とは少し異なる仕組みによるものと考えざるを得ない。このように、これまでの成長説では理解が困難な結晶の生成が見られたということから、江本 (2001; 2003) は、それを心霊的なもの、科学的には解き明かせないものとして、「水に良い言葉をかければ綺麗な結晶ができる」など、恣意的に呪術性を持ち込んできたわけである。

2.3 生成した結晶の例

図 3 は、本装置により作製された結晶のなかから、扇形状や角板状の結晶を示したものである。

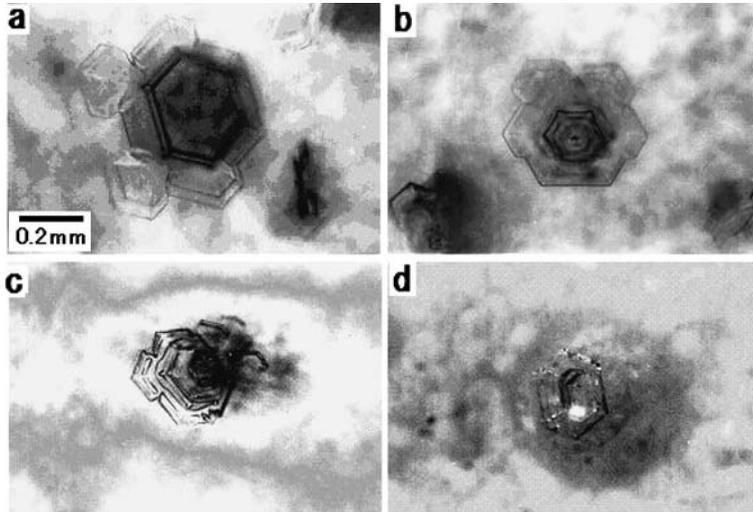


図 3 凍結水滴の上に生成した種々の氷晶状結晶。
(油川ら(2004)より転載)

図 3a は扇形状のものが比較的大きく成長しており、結晶の左側には枝が広く伸びていることが分かる。これに対して、この結晶の右側はほとんど枝の成長が見られないが、これは、右側に他の結晶が成長している（図の黒い部分）ためであるとみなされる。

図 3b は、中心の小角板から外側に角板が二重に成長している。この結晶の場合は図の上方に向かって小さな扇形状の結晶が成長している。

図 3c は、結晶の左半分が角板状に成長しているが、右半分はほとんど成長しておらず、六角形の対称性を大きく欠いている。このような非対称の成長は、先の図 3a の場合と同様、他の結晶が近くに存在しているため、その方向には成長が抑制されているのではないかとみなされる。このことについては、従来の気相成長説とは異なる視点から検討が必要であるように考えられる。

図 3d は、中心部が特有の形をした角板状の結晶であるが、これも完全な対称性は保たれておらず、図の左側に偏った成長を示している。つまり、この角板状結晶はその母体となっている凍結水滴（下方に薄く見える）のやや左側に位置しており、結晶はその水滴の斜面下方に向かって非対称的に成長している。この結晶が水蒸気の供給により成長したものであれば、その供給は結晶に対して非等方的な状態にあったということになる。しか

し、そのような水蒸気分布に関しては、シャーレ内の空気が成層していると見なされることから、極めて想定が難しいことであろう。これも、今後の検討課題であると考えられる。

次に、一つのシャーレの中に多数の結晶の成長が見られるものを図 4 に示す。この図に見られる各々の結晶はそれぞれ別々の水滴から成長したもので、ほとんどが角板状で、水平に成長しているが（結晶主軸はほとんどが垂直）、結晶方位（a 軸方位）や結晶の径、形状が各々異なっている。凍結水滴上に成長する結晶は、このように水平に成長するという特徴があるが、時として図の矢印により示されたような、垂直に成長するものも見られる。

いわゆる「水の結晶」の場合は 50 個ほどの水滴から数個の結晶だけが成長するとされており、しかもこの種の操作が不慣れな者には検証実験が困難であるといわれてきている。しかし、本装置による実験では、図 4 に示したようにほとんどの水滴から結晶が成長し、しかもこれらは、後述のような実験の初心者により得られたものである。

このように、凍結水滴から結晶が多数生成する場合もあれば、ほとんど成長しない場合もあるが、これは、先に述べたような水滴の冷却についての「前処理」や、後述する水滴の粒径に関係しており、過冷却水滴の物性的な現象であって、決して「水

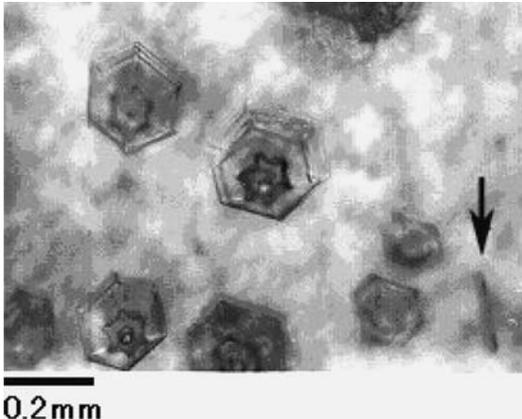


図 4 群集状に成長した結晶. ほとんどの結晶の基底面は水平であるが, 矢印の結晶は垂直.
(油川ら(2004)より転載)

の結晶」において語られているような神秘的なことではないのである。

補足的なことではあるが, 本論の図に掲載されている結晶は, 卒業を控えた, 低温室での実験は全く初めてという大学生によるものである。つまり, この種の結晶は相応の理科的な手順で行えば誰にでも作製ができ, 特段の熟練を必要とするものではないということである。ましてや「良い言葉をかける」などの呪術的なことは一切必要がなく, 当然ながら, 氷晶状の結晶(雪花状の結晶)としてのいわゆる「水の結晶」なるものは, 今回のように一般的な科学実験により作製することができる。

2.4 結晶をつくる水滴・つくらない水滴

凍結水滴上に氷晶状の結晶を成長させる場合, 結晶が生成する過冷却水滴には粒径の範囲があり, また成長する結晶の大きさは, その水滴の粒径と一定の関係にあることが見いだされた。

図5は, 本実験において結晶の生成が見られた水滴について粒径を計測し, その結果を簡略に示したものである。この図から, 氷晶状の結晶が生成する水滴の粒径は, 今回の方法では 0.15 mm~0.52 mm の範囲で, これよりも小さなものは単なる氷球に凍結し, またこれよりも大きなものには, 歪んだ結晶ができたり, 液相の水が氷球の表面に滲出するなどして, 氷晶状の結晶の生成は見られなかった。後者の方は, 「水の結晶」(江



図 5 氷晶状結晶の生成が観察された過冷却水滴の粒径範囲。(油川ら(2004)より転載)

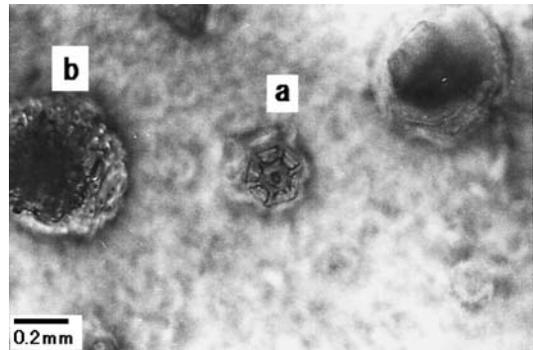


図 6 いわゆる「綺麗な結晶」(a)と「醜い形」(b)とが混成した例。

本, 2003)では「醜い形に凍結」したものということになる。

上述のような例を図6に示す。図6のaは0.3 mmほどの過冷却水滴から成長したいわゆる「綺麗な結晶」であり, 図6のbは0.6 mmほどの粒径の水滴で, 「醜い形」の結晶に凍結したものである。このように, 同一の水の試料によって「綺麗な結晶」と「醜い形」のものが混在して生成することはしばしば見られることで, いわゆる「水の結晶」において語られている「原理」(水は与えた言葉や文字に応じて美・醜の結晶をつくる)が通用しないという証である。つまり, 美醜の結晶の混在現象は, 「水の結晶」の作製原理なるものがあるか否かは意味を有しないことを示している。

図7は, これまでとは少し異なる大きさの水滴であるが, 図6のbの形状に関してより明確に示されたものである。すなわち, 粒径が0.9 mmほどとやや大きめの過冷却水滴が凍結したときは, その内部から未凍結水が滲出し, それが凍結して, いわゆる「醜い」形が形成されている。

これまで示してきた水滴は, 結晶ができたものもできなかったものも全て同じ蒸留水であって,

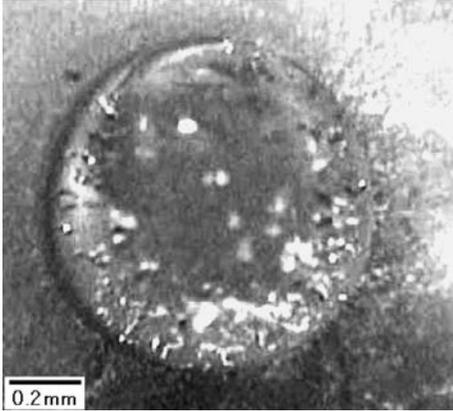


図 7 氷球から滲出した水の凍結。
(油川ら(2004)より転載)

試料としての水には違いがない。このようなことから、氷晶状結晶が生成する現象は、先に述べたような水滴の過冷却過程に加え、その粒径にも依存しているとみなされる。

図 8 は、結晶が生成した過冷却水滴について、その粒径と生成した結晶の大きさの関係を示したものである。結晶の成長は時間とともに進行するので、その大きさの比較は時間を区切って行われなければならない。それ故、この図において結晶の大きさとは、水滴が顕微鏡下に置かれて凍結実験が開始された時点から同程度の経過時間(30分程度)の結晶を抽出し、その最大径を計測したものである。

この図 8 から、成長する結晶の大きさは、その母体となっている水滴の粒径とほぼ比例の関係にあることが分かる。もし、これらの結晶がほとんど同じ水蒸気場によって成長したものであれば(ラップで覆われたシャーレ内であることから、そのように判断されるが)、結晶は全体的に同じ大きさに成長するはずで、母体としての水滴の粒径には直接的には関係しないはずである。

つまり、このような結晶の成長には、水滴の粒径に関わる量的なもの、今の場合は、先の図 2 や図 7 で示したような凍結水滴の内部から滲出してくる未凍結の液相が関与しているのではないかと推察されるが、液相の水による結晶成長の可能性については、油川(1994; 2005)を参照されたい。ただ、過冷却水滴に関わる物性的なことについて

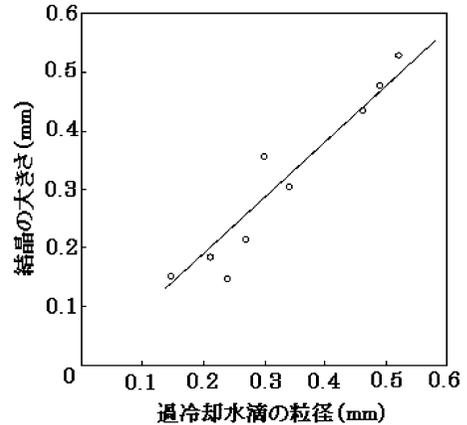


図 8 生成した結晶の大きさと過冷却水滴の粒径との関係。(油川ら(2004)より転載)

は未解明な点が多く、その詳細は今後の研究に待たなければならない。

3. おわりに

いわゆる「水の結晶」のような氷晶状結晶を凍結水滴上に生成させるには、母体となる水滴について以下のような条件を満たすことが必要である。つまり、1) 不純物を含まない蒸留水などの純水を用いること、2) 比較的長い時間をかけてゆっくりと過冷却させること、3) 適当な温度で過冷却が破れ、自発的に凍結すること、4) 粒径はある範囲の大きさのもの(今回のような実験では 0.15 mm~0.52 mm)を選択すること、である。このような条件が全体的に満たされないときは、凍結水滴上には氷晶状の「綺麗な」結晶は生成せず、水滴は氷球として凍結するか、未凍結水が氷球の表面で不規則な形となって「醜い形」に凍結する。

このように、凍結水滴上に氷晶状の結晶が生成するか否かということは、純粋に科学的な条件によるものであり、当然のことではあるが、いわゆる「水の結晶」で語られているような水に「言葉をかける」「文字を見せる」などの心霊的・呪術的なことは全く無縁のことである。このことは、今回の実験により具体的に検証されたことである。

水滴の凍結により氷晶状結晶が生成することは、水の相変化に伴う自然現象であって、専門領域の研究対象ともなり得ることである。つまり、

いわゆる「水の結晶」について、結晶が生成するという現象は客観的・科学的な事実であるが、心霊的・呪術的なことは作為的なこととして否定されるべきものであると断定される。いわゆる「水の結晶」の意図は、結晶が生成したことを証拠、つまりはその呪術性を説得する根拠として、水の過冷却、相変化に関わる物理現象を神秘的な現象にすり替えただけのことである。

それ故、いわゆる「水の結晶」は、科学的な論証を徹底して避け、また、非科学との批判に対しては、その結晶の生成が神秘の現象として、決して正対しようとはしてこなかったわけである。さらに、呪術的な内容が奇想天外なものであればあるほど、世間の耳目は一層集結させられることになる。

つまり、いわゆる「水の結晶」は、氷晶状結晶の生成という自然的、客観的な現象を神秘化することにより世間的な命脈を得ているということ、結晶生成という事実が徹底して科学的に検証されるならば、その心霊的・呪術的な内容は自ずと崩壊・消滅していくことになる。本論の「水の結晶」への批判はこのことを企図したものである。

文 献

- 油川英明, 1994: 過冷却微水滴から生成する雪結晶について (2). 1994 年度日本雪氷学会講演予稿集, 101
- 油川英明・田代智昭・尾関俊浩, 2004: 凍結する過冷却水滴の表面に形成される氷晶状結晶. 北海道教育大学紀要, 自然科学編, 55, 1, 9-22.
- 油川英明, 2005: 過冷却水滴の結晶化による雪結晶の生成. 北海道教育大学紀要, 自然科学編, 55, 2, 1-12.
- 江本 勝, 2001: 水は答えを知っている. サンマーク出版, 206 pp.
- 江本 勝, 2003: 水は答えを知っている②. サンマーク出版, 238 pp.
- 左巻建男, 2007: 水はなんにも知らないよ. ディスカヴァー・テュエンティワン社, 182 pp.
- 中谷宇吉郎, 1949: 雪の研究—結晶の形態とその生成—. 岩波書店, 161 pp.

「水の結晶」の授業例は,
http://www.1ness.net/1ness_bn/y2003/190/190.htm
 (2012年7月現在)

「水の結晶」に関係した販売は,
<http://www.tsuki-shizu.jp/cat41/kessyou.html>,
 (同上)

On the verification of the so-called “Water Crystals”

Hideaki ABURAKAWA¹

¹ (NPO) Network of Snow and Ice Specialists
 704, Kita-odori mansion,
 Odori-nishi 18, Cyuo-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0042

(2012年7月30日受付, 2012年8月23日改稿受付, 2012年8月24日受理)