

雪のパラダイム (II)

油川 英明¹⁾

1. はじめに

先の「雪のパラダイム (I)」においては、従来の人工雪の生成条件について、天然の現象と対比したときの差異を論じた。そして、その差異を説明すべく、著者の過冷却微水滴による氷晶化実験を紹介し、雪結晶の新たな生成過程を示した。

これを受けて今回は、雪結晶の液相による成長機構および人工雪と天然雪との間に成立すべき条件などについて述べる。

2. 雪結晶の気相成長と液相成長

2.1 雪結晶の液相成長機構について

雪結晶が液相成長する現象については先の I 篇に示したとおりであるが、その理論的な根拠とするとところは、氷晶面における液膜の存在とそのエネルギー的平衡厚さに関する理論である (Kuroda and Lacmann, 1982)。それによれば、氷結晶の固相はそのまま気相の水蒸気層と接するよりも、その間に液相の水膜を介した方がエネルギー的に有利であることから、氷晶表面にはある厚さの液膜が存在するというものである。そして、その液膜に関わるエネルギーは、膜の厚さの関数として表され、エネルギーの最小値およびそのときの液膜の厚さを解析的に求めることができる。そして、そのエネルギー最小の液膜は界面を構成する気相と液相に対して平衡にあるとみなされることから、エネルギー最小となる液膜の厚さを平衡の厚さと称している。

結晶表面の液膜が平衡の厚さ以上の状態になったときは、液膜のエネルギーが減少するように、液膜域における結晶面との界面で固相化し、結晶

面は前進する (結晶の成長)。また、液膜が平衡の厚さ以下の状態になったときは、液膜のエネルギーが最小になるまで固・液界面の結晶面が液化・後退し (結晶の衰退)、いずれも液膜が平衡の厚さを保つように結晶面での相転移が生じることになる。この場合の相転移は連続的・可逆的なものと考えられ、一般的な水・水の不連続的な相転移とは異なるものと、著者は推察する。また、液膜表面の飽和水蒸気圧も、その厚さにより変動するものであることが示されている (Lacmann and Stranski, 1972)。これらは、氷晶が融点近傍の結晶であることの特性でもあるとみなされる。そして、上記の Kuroda らの理論を基に、天然の現象に即して、雪結晶の液相成長を考察していくことが肝要なことであると考えられる。

2.2 氷晶を成長させる過冷却微水滴について

氷晶を成長させる液膜は、固相としての結晶面に十分に馴染んだもの (分子構造的に氷晶と類似) であることが必要であると考えられることから、氷晶表面の液膜が水蒸気の凝結により厚くなる場合は、その凝結速度が比較的緩慢であることが求められる。これに対して、急速な凝結速度による液相はバルクの氷として凍結することになる。このようなことから、従来の人工雪の作製は比較的長い時間を要するということが、また、対流型装置においてはいわゆる過飽和度の上限があり、拡散型装置においては相当程度の過飽和度まで氷晶が成長するということが、上述のような水蒸気の氷晶面上への輸送の程度、つまりは凝結速度に関係しているものと推察される。

また、氷晶表面が液膜で覆われていれば、同様の条件を有した過冷却微水滴が氷晶へ直接に付着し、

1) 元北海道教育大学教授

その液膜を増加させて結晶を成長させることが可能である (I 篇参照)。そして、氷晶を形成するような過冷却微水滴が水蒸気から生成されるときは、水蒸気が氷晶の液膜を直接に成長させる場合と同じように、緩慢な凝結速度が求められるわけである。そうでない過冷却微水滴は水球状に凍結することになる。それ故、同じ温度の過冷却微水滴であったとしても、その凝結過程によって固相化したときの形態が異なるということになり、それが水分子の固有性でもあったと考えられる。つまり、雪結晶の成長は、水分子の固有性と融点近傍における氷結晶の特性によるものと判断されるわけである。

天然の雪結晶が千差万別の形態を有しているのは、多分に、上記のようなことが原因しているのではないかと推察される。

2.3 氷晶表面の液膜について

ところで、氷晶の結晶面に関する多様な成長について、Kuroda and Lacmann (1982) の述べるところでは、氷晶の温度に応じて、結晶表面の液膜による液相成長と、従来からの説としての気体分子の付着成長に因るとしている。このような氷晶の成長機構は、いわば気相成長と液相成長の折中的な説とみなされる。しかし、天然の雪結晶は、後に示すように、その表面において相応の厚さの水膜が関与していることがうかがわれること、また、 -100°C 以下での極めて低温にさらされた雪結晶の表面は、電子顕微鏡の試料作製における真空蒸着に耐えうるほどに堅固となることから (William and Eric, 1994)、そのような低温域では水膜はもはや存在しないものとみなされ、Kuroda らの折中的な説は温度のかなり低い領域へシフトされるべきではないかと考えられる。このことに関連して、Kuroda らの平衡液膜の厚さを算出する理論式には不確定の因子が示されており、それらの因子はさらにミクロな理論ないしは実験によって決定されるべきであるとしている。つまり、氷晶表面の平衡液膜の厚さ (温度に関して) は、必ずしも確定されたものにはなっていないのである。

2.4 天然雪に見られる液膜の痕跡について

天然の雪結晶において、過冷却微水滴 (雲粒) や結晶表面の液膜が直接的に関与しているとみなされる特徴的な形態の結晶を図 1~図 3 に示す。

図 1 は、樹枝状六花の枝の一本 (図 1 の左側水

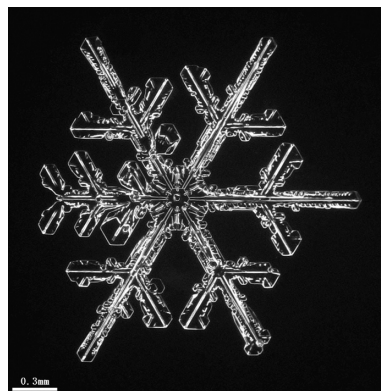


図 1 過冷却微水滴 (雲粒) が作用して成長したと見なされる六花の樹枝状結晶。左側の主枝が、他と比較して極めて側枝が成長している。スケール目盛りは 0.3 mm.

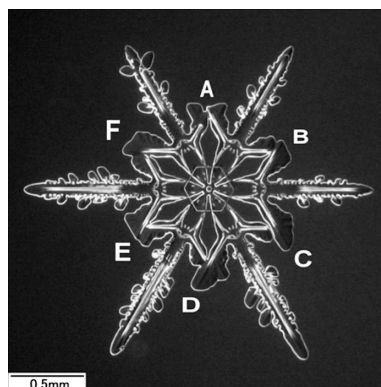


図 2 結晶表面の液膜が作用して形成したものと見なされる側枝の接合部分 (図の A, B, D, F)。なお、図の C のように、離反している箇所も見られる。スケール目盛りは 0.5 mm.

平) だけが側枝の成長において卓越している結晶である。この結晶が気相成長によるものであるとすれば、一本の枝だけに特別に多く水蒸気が供給されなければならないことになり (いわゆる水蒸気密度のゆらぎ)、しかもそれが一定時間続かなければならないわけで、極めて不自然で困難な成長過程を想定しなければならない。このような不規則型の結晶は中谷 (1949) においても多数示されている。これらについても本論で示すように、雪結晶は過冷却雲粒の捕捉により成長するものとすれば、その捕捉される雲粒の大小が水分補給量の違いとなって、不規則型の雪結晶を成長させ得るものと考えられる。



図3 結晶表面の液膜によりつくられたと見なされる結晶同士の連結. 大小二つの樹枝状六花が湾曲した連結部によりつながれている. スケール目盛りは 0.3 mm.

次に、結晶表面の液膜に関連しているのはいくつかと見られる形態を図2に示す。この図では、樹枝状結晶の中間部分にある側枝が隣りあったもの同士で接合している状態（図の A, B, D, F では接合、但し C は離反）である。このような形態がもしも結晶の融解によるものであれば、枝の先端が円く変形するなどの典型的な痕跡が見られるはずであるが、図から明らかなように、そのようにはなっていない。つまり、この接合は結晶の成長過程で生じたものと考えられるわけである。そしてまた、この接合が水蒸気からの成長であるとするには、その条件が余りにも特異的であり、不可能に近いものと考えられる。

また、図3は、大小二つの結晶が連結しているものであるが、その連結部は明らかに湾曲しており、このような連結の状態は、雪結晶表面の液膜が存在しなければ起こりえないものと推察される。

これらの結晶の形態は、光学顕微鏡による写真でも液膜の痕跡が推定できることから、雪結晶表面の液膜の厚さは、分子オーダー（Kuroda and Lacmann, 1982）というよりも、 μm のオーダーではないかと考えられるわけである。

さて、雪結晶が図1～図3のような形態を有していることについては、先にも述べたように、水蒸気による気相成長（昇華）として理解することは極めて困難であるということである。そして、雪結晶の落下運動に伴う水蒸気の過飽和状態を想定したベンチレーション効果（Pruppacher and

Klett, 1996）や、過飽和状態における結晶の異方成長についてのベルグ効果（Berg, 1938）は、天然の雪結晶の場合、余りにも仮定的であり、実際の解釈を得ることはできないものと考えられる。さらに、図1、図2に示されたような雪結晶の形態は、Bentley and Humphreys (1931) や中谷 (1949)、あるいは Libbrecht and Rasmussen (2003) においても数多く示されていることから、古今東西において広く見られるものであり、天然の雪雲で、上記のようなベンチレーション効果等を一般化・普遍化することは、相当に困難であるとみなされる。

ところで、雪結晶の成長に関する理論的な考察は、従来、コッセルの結晶成長機構、あるいはラセン転位を取り入れたフランクの成長機構により行われてきた（例えば、小林, 1980）。しかし、このような結晶成長の機構は、主には常温におけるヨウ素（融点が 113.6°C ）の気相成長などについて説かれたものであり（大川, 1977）、雪が融点近傍の結晶であって、かつ、これまで述べてきたような結晶表面の液膜の存在については余り考慮されていないように見受けられる。つまり、雪結晶の成長機構については、一般的な結晶成長の理論がそのまま適用され得るものではないように筆者は考える。

2.5 雪結晶の裏表形成についての推察

天然の雪結晶には裏と表のあることが知られているが（油川, 1992）、このことについても、結晶が気相成長するとした場合には矛盾が生じる。すなわち、中谷 (1949) と Frank (1982) の裏表成因説では、水蒸気の供給について全く正反対のことが述べられており、また、それらの説は実際の結晶の形態（例えば、裏表が交互に配列している結晶等）について、説明が困難なものとなっている。

雪結晶の裏表の形成については、やはり、結晶が液相成長するとした方が妥当なようである。すなわち、樹枝状などの板状結晶の形成は、過冷却微水滴が先ず柱状に結晶化し、その上下面から板状結晶が成長して、ついには中心部に角柱を挟んだ二重の結晶となる。これが板状結晶の原型のようで、六花の結晶などはどちらかの面が成長するか、あるいは上下面の選択された枝が成長して組合せ六花（油川, 1992）になっていく。

このとき、結晶中心の内側、つまり角柱と板状結晶の境界域は、二つの結晶面を取り囲まれているので、その箇所は液相の水分が溜まりやすくなる。そして、その溜まりが雪結晶の内側において水分の供給源となり、結晶面つまり裏の面では、水分の供給に応じた液膜の厚さが凹凸の文様を形づくることになる。一方、結晶の外側の面は液膜の溜まりをつくる箇所がないので、常に平坦な成長となる。

このように、雪結晶の成長は、結晶表面の液膜の厚さによってなされることから、その成長跡が凹凸のレリーフ文様(裏)、ないしは平坦な結晶面(表)となって見えるのではないかと想像されるわけである。

2.6 雪と霜との論議について

最近、人工雪の装置あるいは類似の装置により作製された結晶について、それが雪であるか霜であるかの議論がみられる。これについて端的に私見を述べるならば、雪結晶と同様の形態を有した霜は雪と同様のものではないかということである。その理由は以下のとおりである。

一般に、事物に付着して成長した水の結晶(いわゆる霜)は、潜熱の放出が事物を通して行われることから、空気中で成長する雪とは潜熱の放出機構が異なり、よって結晶の成長形態も異なると考えられている。しかし、霜の結晶には種々の形態のものがあるが、なかには雪結晶と同じような形態の霜(hoar)もある(中谷, 1949)。つまり、そのような霜の結晶が成長する場合には、雪の成長時と同様の潜熱放出が行われているということになるわけである。しかし、熱伝達の観点からすれば、それは事物と空気中とでは大いに異なるわけであるが、にもかかわらず結晶の形態が同じであるということは、明らかに矛盾したことになる。この矛盾の根源は、霜も雪も水蒸気から氷結晶へ昇華成長したもので、その際に、気相から固相への転移は一般的な潜熱を伴う、とアプリアリにとらえているところにあるものと考えられる。

それ故ここでは、先に述べたように、氷晶の表面が液膜で覆われていると考え、そして液膜と結晶の界面では相転移が連続的・可逆的に生じているものとすれば、一般的な潜熱の放出を伴うということにはならず、熱の伝達機構は作用しないこ

とになる。よって、雪類似の霜(hoar)は雪と同様に液膜を介して成長し、それらの形態も同じものになると解されるわけである。一方、霜も雪も、それを成長させるための液膜あるいは過冷却微水滴が、前述のように氷晶化しない状態であれば、その液膜等は水球状になったり、霧氷状になったりと、水蒸気の凝結過程を反映して、多様な形態を示すことになるかと推察される。

さらに、上記のことに関連して、降水の種類の連続性について触れるならば、従来の人工雪の作製実験から、天然においては雪結晶のみが水蒸気による気相成長で、雪粒付雪結晶(の水球)、霰、雹、雨滴は雪粒から形成されるものとみなされてきた。しかし、雪結晶から雨滴までの全ては、雪粒から成る雲のなかで形成されるということから考えて、雪結晶だけを特異な条件で成長する別個のものとはみなすことは極めて不自然なことになる。ここにおいて、これまで述べてきたように、雪結晶もまた相応の条件下で凝結形成された雪粒により成長するものである(「雪のパラダイム(I)」参照)とすれば、降水の全ての種類が雪粒から生成されるということになり、雪結晶から雨滴までの降水は、自然の連続的な現象として理解できることになる。

2.7 新雪の結晶変態について

降雪からは少し外れるが、積雪に関わることで、新雪の結晶変態が以前から問題となっていた。Nakaya (1954) は、雪結晶が同様の結晶霜で囲まれ、水蒸気圧が平衡状態であっても、その形態は変化していくと述べている。また、吉田・小島(1950)および小島(1952a, 1952b)により、氷点下で飽和水蒸気の雰囲気中に保たれた雪結晶が、時間とともに形態的に変化することが報告され、吉田(1954)はこれを定量的・理論的に示そうとしたが、結晶の変態時間は、実験値に比して理論値があまりにも大きなものとなった。このようなことから、雪結晶の変態過程は一般的な水蒸気の拡散現象とは異なるものではないかと考えられるわけである。

そして、ここでもやはり、雪結晶の表面は一定の厚さの液膜で覆われ、それが雪の変態の原因になっているのではないかと考えられるのである。

雪結晶は、先に述べたように、表面の液膜は平

平衡厚さを超えれば固相へと成長し、平衡厚さを下回れば結晶は液相へと相転移が生じて結晶が縮小する。そして、雪結晶が積雪となった場合、今、その中に温度勾配がないと仮定して、結晶が平衡厚さの液膜で覆われ、周囲がそれと平衡した水蒸気の状態にあるとしても、液膜はその表面エネルギーを最小とするような方向へ移行しようとするため、結晶自体も球形状へと変化させられることになるであろう。つまり雪結晶は、成長するか衰退（変態や蒸発）するかのいずれかで、融解がなくても、結晶の形態をそのまま保持することは、液膜がその表面に存在する限りにおいて、原理的に困難であるということになる。

以上のようなことから、雪の新たなパラダイムとして、先の中谷 (1949) に倣うならば、「雪は氷点下において水蒸気が塵などの核に緩慢に凝結して生成した過冷却微水滴（雲粒）が直接に氷晶化した氷の結晶である」ということになる。

3. 天地を師として

3.1 三浦梅園に学ぶ

次の話題は少し唐突なものではあるが、本論に多少とも関わりのあることとしてご容赦をいただきたい。

鎖国政策がなされていた江戸時代の中期・八代将軍徳川吉宗の時代、大分・国東半島の寒村に当時としては極めてユニークな自然思想家としての三浦梅園が誕生し、生涯をその地で過ごした。日月星辰、地球、自然の根源を独自に追求し、それを「梅園三語」の大著三部作にまとめ、おおよそのものが今日まで遺されている（尾形・島田、1998）。代々が村の医者であった梅園は、古代中国の道家、儒家、あるいは仏教等の書物や西洋天文学説に学び、独自の思索を積み重ねて、近・現代西洋の合理主義に比肩する自然思想を打ち立て、条理学と呼ばれる体系を築いた。

梅園の説くところは、自然を観察するときは、先入観を捨てて（習気 [じっけ] を去り）ありのままに見つめ、そこに生じた疑問に対して素直に向き合い、天地を師として、釈迦・孔子をも議論の友とし、自然に合うものは採り、合わないものは捨て、森羅万象・宇宙の仕組みを自得するというものであった。

さて、雪の生成について「天地を師として」ということからすれば、やはり天然の雪雲の組成を前提としなければならないことになる。すなわち、天然の雪雲の初期は過冷却雲粒、飽和（水に対して）ないしは未飽和の水蒸気や各種物質の塵・ガスなどを含んだ空気から成っており、雪結晶はその組成をもとにして生成・成長されるべきものということになる。一方、人工雪（従来の対流型、拡散型の装置により作製された人工雪を総称して）は、それとは異なる過飽和の水蒸気量など、先の I 篇で人工雪の謎として述べたような、天然では起こりえない条件下において生成・成長がなされる。しかし、人工雪と天然雪は、その形態が詳細に比較され、ほとんど変わらないものであることが確かめられているわけである（中谷、1949）。

3.2 人工雪と天然雪と間に必要十分条件は成り立つか

それでは、人工雪と天然雪との間にはどのような関係が成り立つと言えるであろうか。それは以下のように考えられる。すなわち、人工雪は天然雪の十分条件ではあるが必要条件にはなりえないということである。つまり、人工雪装置（温度・湿度等の条件）で作製された雪は天然雪と同じものではあるが、天然の雪は人工雪装置（条件）で生成されるものではないということである。人工雪は天然雪と詳細に比較検討がなされてきたが、一方、天然雪の降雪条件は、中谷ダイヤグラム（人工雪の生成条件）との比較において、温度に関しては精力的に行われてきた（村井、1956 など）けれども、過飽和度に関してはほとんど報告が見られないのである。つまり、天然雪から人工雪を検証することは、完全には行われていないということから、上述したように、人工雪と天然雪との間には必要十分条件が確立されていないということになるわけである。

上述のことについて例えを述べるならば、「薔薇」は「花」であるが、「花」は「薔薇」であるということにはならないのである。また、般若心経の有名な一節に、「色即是空 空即是色」とあるのは、色と空とは完全に一致するというもので、そのための必要十分条件が示されていると受けとめられる。

3.3 雪の研究のターニングポイント

一般に、ある現象を解明するために仮説を立て、その実証として実験を試みるとき、実験結果とその現象との間に必要十分条件が成立しないならば、その仮説は実証されたことにはならない。中谷の人工雪作製の実験も、やはり仮説の実証にあった。すなわち、1) 雪は霜（が空間的に成長したもの）である、2) 霜は水蒸気が昇華成長したものである、3) よって、雪は水蒸気が昇華成長したものである、という三段論法的な仮説から実験を試みたわけである。

中谷 (1949) は実験の成功から、はじめの仮説が実証されたとして、雪結晶の気相（水蒸気）成長説を確かなものと、そのときは考え、公表したわけである。しかし、過飽和（水に対して）の現象は、天然において一般的に存在するものではないことから、Nakaya (1954) は、極めて微小な過冷却水滴（径が $1\sim 2\mu\text{m}$ ）が液相のまま、直接に氷結晶を成長させる現象や、I 篇で述べた花島 (1944)、Kumai (1952) の結果を重要視し、将来の研究方向として、雪結晶の液相成長に関する究明を課題として示唆していた。

顧みて、これが雪結晶研究のいわゆるターニングポイントではなかったかと推察される。しかし、雪結晶の生成について、その後は拡散型装置により気相成長が徹底して「実証」された (Hallett and Mason, 1958; Kobayashi, 1961) ということから、Nakaya (1954) の意向とは異なった方向に進み、今日に至っているのではないかと思われる。

従来の人工雪装置など、天然とは相当に異なる条件の下で天然と同様の雪結晶が作り得るということは、おそらくは水分子の固有性と物質の融点近傍における特性の相乗作用によるものではないかと考えられる。

しかし、その詳細は今後の研究に待たなければならないが、人工雪の天然への検証は、その生成条件が天然と同等なものであるか、あるいはその条件が天然に適応され得るものであるかについて、ことさら厳密に検討されなければならないことであると考えられる。

このことは研究方法の問題でもあるように思われる。このことに関連して、ある著名な科学者の

言を引用すれば、プロの科学者とは、1) 研究を実践している人、2) 自分の仮説をもっている人、とされているが (井尻, 1983)、今回、人工雪の研究過程を垣間見たところでは、これに加えて、3) 研究方法を研究している人、というようなことも必要なのではないかと考えられる。

4. おわりに

本稿内容の一部については、以前、ある学会誌に投稿したことがあるが、そのとき、「信じられない」というコメントが一言返ってきただけであった。ほとんどのことは容認できるとしても、消し去りがたく残念なことは以下のようなことである。

すなわち、学会の会員が、学術研究を旨とする学会活動を信頼し、実験内容を収録したビデオなど、オリジナルデータをそのまま提供して議論の場を設けようと努めたことに対し、結局、意見交換は皆無のまま、当初のようなコメントによる結論が下されたことである。

それ故、今回、拙子にこのような弁明の機会を与えて頂いた関係各位のご高配には感謝の念が禁じ得ず、また、本学会においては、学術的な議論が健全闊達に展開されることを切望して止まない。

本研究を進めるにあたり、多くの先達ならびに学兄の諸氏に教示・激励を受け、どうにか研究の枠組みを整えることができたように思われる。ここに改めて感謝の意を表する次第である。また、本研究は殆どが未達成であることから、それは志ある後世にその解明を託するものである。

文 献

- 油川英明, 1992: 雪結晶の「裏」と「表」について. 雪氷 **54**, 123-130.
- 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), 第 **55** 巻, 第 2 号, 1-12.
- Bentley, W. A. and W.J., Humphreys, 1931: Snow Crystals. McGrawHill Book Co., New York, 226pp.
- Berg, W.F., 1938: Crystal Growth from solution. Proc. Roy. Soc., A. **164**, 79-95.
- Frank, F.C., 1982: Snow Crystal. Contemporary Physics, **23**, 3-22.
- Hallett, J. and Mason, B.J., 1958: The influence of temperature and super-saturation on the habit of ice crystals grown from the vapour. Proc. Roy.

- Soc., **247**, 440-453.
- 花島政人, 1944: 人工雪の生成条件について一補遺. 低温科学, 物理篇, **2**, 23-29.
- 井尻正二, 1983: 独創の方法. 井尻正二選集 (8), 大月書店, 7-182.
- Kobayashi, T., 1960: Experimental Researches on the Snow Crystals Habit and Growth Using a Convection-Mixing Chamber. J. Meteor. Soc., Japan, **38**, 231-238.
- Kobayashi, T., 1961: The growth of snow crystals at low supersaturations. Phil. Mag., **6**, 1363-1370.
- 小林禎作, 1980: 六花の美. サイエンス社, 249pp.
- 小島賢治, 1952a: 雪結晶の変態Ⅱ. 低温科学, 物理篇, **9**, 205-214.
- 小島賢治, 1952b: 雪結晶の変態Ⅲ. 低温科学, 物理篇, **9**, 205-214.
- Kumai, M., 1951: Electron-Microscope Study of Snow-Crystal Nuclei. J. Meteor., **8**, 151-156.
- 熊井 基, 1996: 雪氷質問箱 (「人工雪生成に使われた兎の毛がどうして氷晶核になるのですか」への回答). 雪氷, **38**, 61-62.
- Kuroda T. and Lacmann R., 1982: Growth kinetic of ice from vapour phase and its growth forms. J. Crystal. Growth, **56**, 189-205.
- 黒田登志雄, 1984: 結晶は生きている. サイエンス社, 265pp.
- Lacmann, R. and Stranski, I.N., 1972: The Growth of Snow Crystals. J. Crystal Growth, **13/14**, 236-240.
- Libbrecht, K. and Rasmussen, P., 2003: The Snowflake — Winter's Secret Beauty — Voyageur Press, Inc. Stillwater, Minnesota, 112pp.
- 村井五郎, 1956: 降雪粒子の結晶形と上層大気状態の關係. 低温科学, 物理, **15**, 13-32.
- 中谷宇吉郎, 1949: 雪の研究—結晶の形態とその生成—. 岩波書店, 161pp.
- Nakaya, U., 1954: Snow Crystals — Natural and Artificial —. Harvard University, Press, Cambridge. 510 pp.
- 尾形純男, 島田虔次, 1998: 三浦梅園・自然哲学論集. 岩波文庫, 336pp.
- 大川章哉, 1977: 結晶成長. 裳華房, 245pp.
- Pruppacher, H.R. and Klett, J.D., 1996: Microphysics of Clouds and Precipitation (2nd edition). Kluwer Academic Publishers, Boston, 954pp.
- 佐藤晋介, 若浜五郎, 1991: 2 台のドップラーレーダーによる 3 次元風速場の測定. 低温科学, 物理篇, **50**, 23-35.
- 高橋 勲, 1987: 雲の物理, 東京堂出版, 172pp.
- Tazawa, S. and Magono, C., 1973: The Vertical Structure of Snow Clouds, as Revealed by "Snow Crystal Sondes", Part I, J. Meteor. Soc. Japan, **51**, 168-175.
- Warner, J., 1968: The Supersaturation in Natural Clouds. J. de Rech. Atmos., **3**, 233-237.
- William P. Wergin, and Eric F. Erbe, 1994: Can you image a snowflake with an SEM? Certainly!, Proceedings of the Royal Microscopical Society, Vol. **29**, 138-140.
- 吉田順五, 小島賢治, 1950: 雪の結晶の変態Ⅰ. 低温科学, 物理篇, **5**, 75-84.
- 吉田順五, 1954: 雪の結晶の昇華変態についての定量的考察. 低温科学, 物理篇, **A. 13**, 11-28.

(2011 年 11 月 29 日受付)