

—夏季大学講座内容④—

雪の結晶の研究と最近の話題から

北海道大学低温科学研究所 古川 義 純

1. はじめに

雪の結晶は、0℃以下の雲の中で、水蒸気が直接固体の氷に結晶化したものである。その形は千差万別で同じものは二つと存在しない。その繊細な美しさは、昔から多くの人々に親しまれてきた。

雪の結晶の形には、図4-1に示すように六角板状のもの(a)、六角板の角が外へ突きだした樹枝状のもの(b)、六角柱状のもの(c)、針状のもの(d)などさまざまなものがあるが共通点は六角を基本としているということである。このような雪の結晶の形の特徴は、何に起因するのであろうか。雲の中の雪の結晶の成長過程をたどりながら考えてみよう。

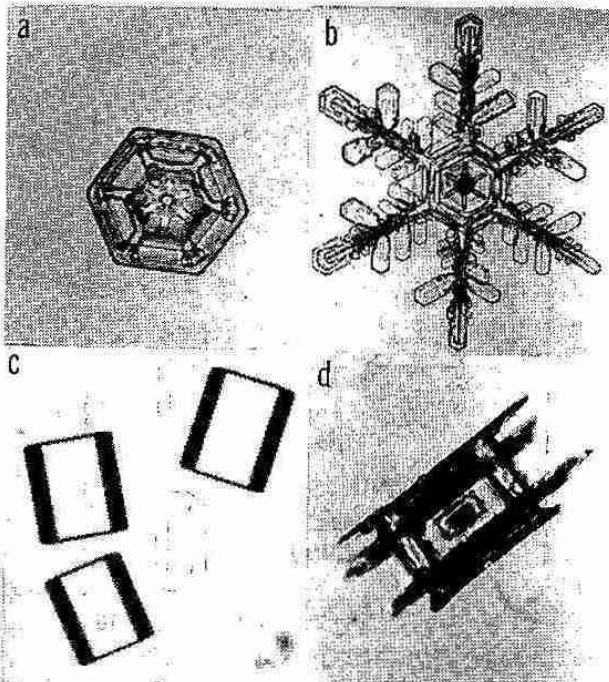


図4-1 天然の雪の結晶の写真。(a)角板、(b)樹枝、(c)角柱、(d)針

2. 雪の結晶の誕生

雲の温度が氷点下に下がっても、雲粒と呼ばれる水滴(直径が数μm—数10μm)は過冷却状態となって凍結せずに浮遊している。しかし、過冷却は不安定な状態であるため、水滴が大気中に浮遊する微細なチリ(氷晶核)と接触すると、水滴は直ちに凍結し、球形の氷の結晶となる。この球形の氷は、図4-2に示すように、周囲の水蒸気

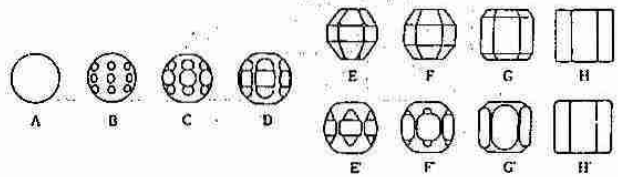


図4-2 雲粒が凍結してできた球状氷晶の成長過程の模式図(権田ら(J. Crystal Growth 45 (1978) 66)による)

を取り込んで成長し、やがて最も成長速度の遅い底面と柱面とで囲まれた六角柱状の結晶となる。

これを氷晶と呼び、さらに0.1mm以上の大きさに成長したものを通常雪の結晶と呼ぶ。この六角柱状の初期氷晶が、雲の中を落下しながら成長を続け、周囲の気象条件に応じてさまざまな形態へと変化するのである。

3. 雪の結晶の形態変化の特徴

雪の結晶の形態が、結晶が成長するときの温度と過飽和度によってさまざまに変化することは、有名な中谷宇吉郎博士の人工雪の実験により明らかにされた。図4-3は、この形態変化を図示し

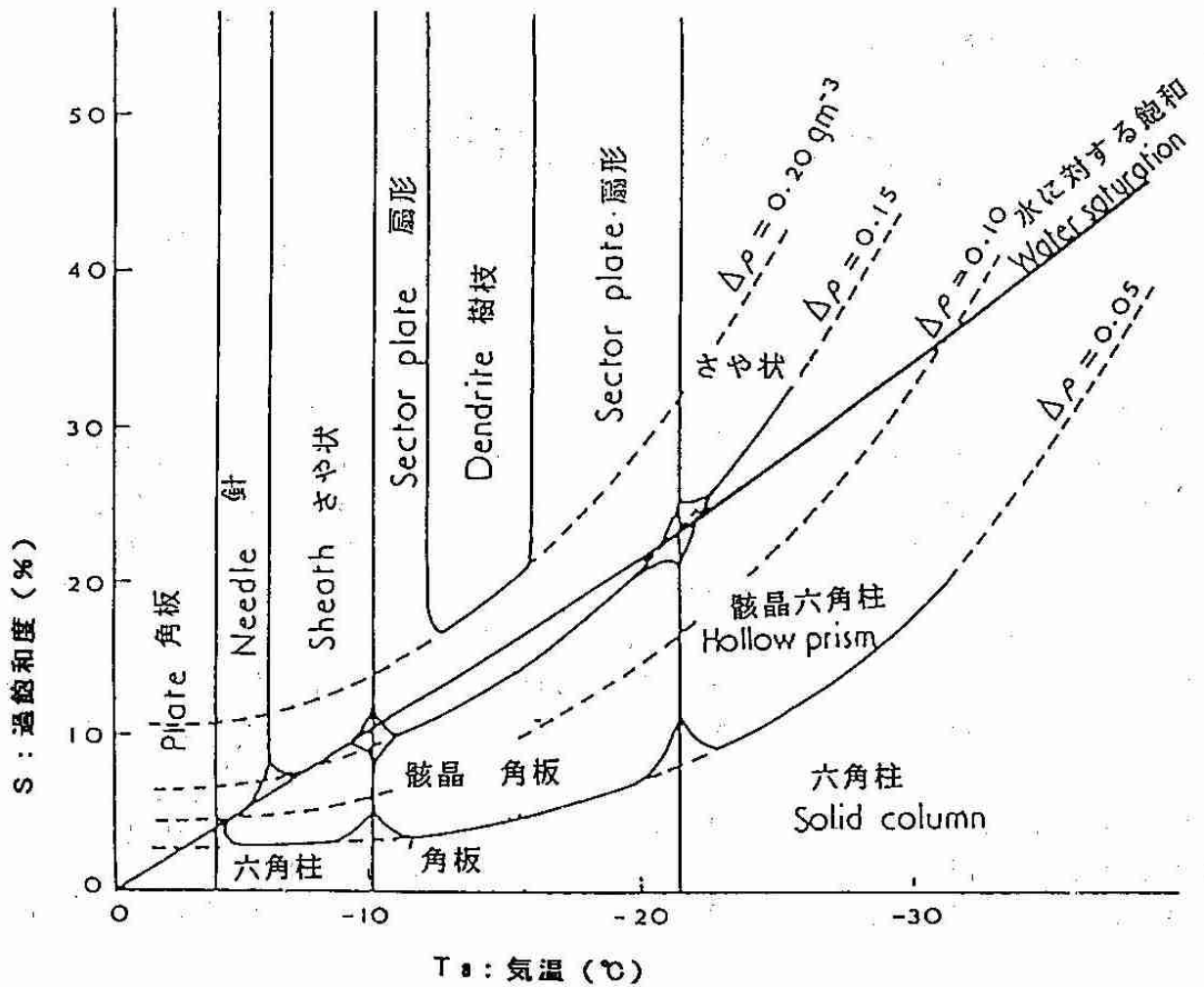


図4-3 中谷のTa-Sダイアグラム

たもので中谷ダイアグラムと呼ばれている。このダイアグラムをもとに雪の結晶の形態変化の特徴をわかり易く示したのが図4-4である。すなわち、雪の結晶の形態は二つの特徴的な変化を示す。第一の変化は結晶の成長温度によって結晶形が六角板になるか六角柱になるかの変化（横軸）で晶癖変化と呼ばれる。第二の変化は、過飽和度が高くなるにつれて結晶の形態が単純なものからより複雑なものへと変化（例えば、六角板→扇形→樹枝状）するもので、特に形態の不安定性に関する変化と呼ばれる。

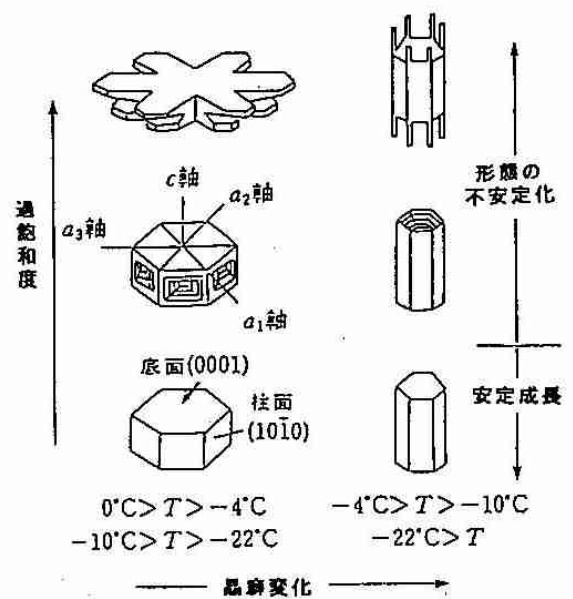


図4-4 雪の結晶の形態変化の特徴を示す模式図

#### 4. 氷結晶の構造と氷の成長速度

雪の結晶がなぜ六角かを考えるためにまず、氷の結晶構造を見てみよう。図4-5(a)は、氷の結晶構造を示す図で水分子を作る酸素原子(白丸)どうしが水素結合(水素は黒丸)で互いに固く結

びあい、規則正しく配列している。この構造をよく見ると1個の酸素原子の近くに2個の水素原子が必ずあって $H_2O$ という水分子の構造をとり、各水素結合の上には1個の水素しか存在しないことがわかる。

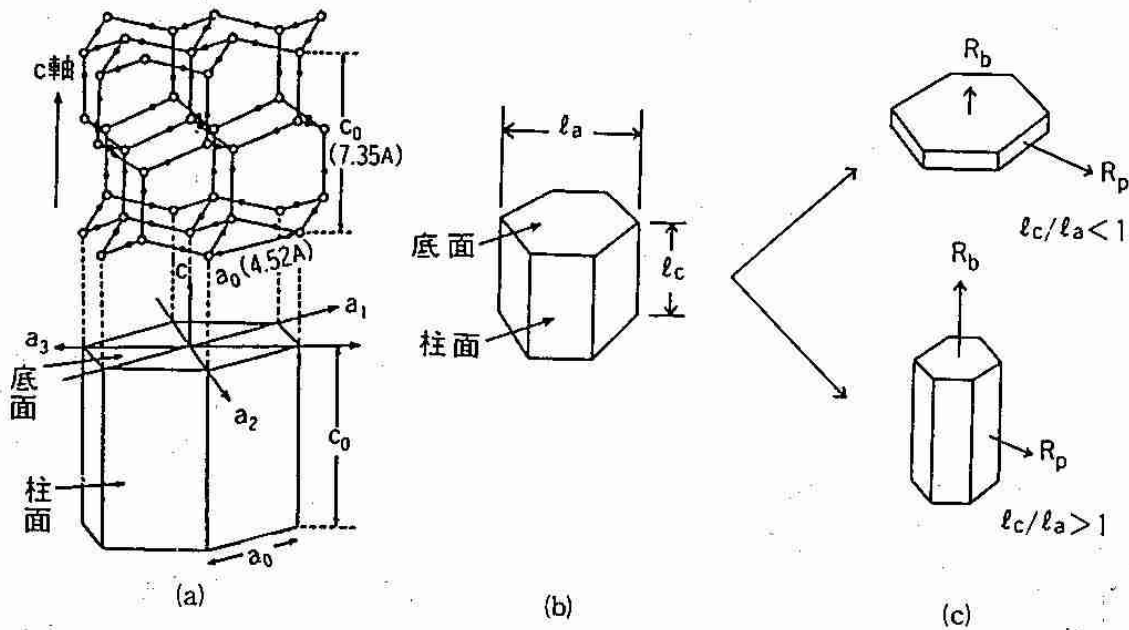


図4-5 (a)氷結晶の構造、(b)雪の結晶の基本形、(c)雪の結晶の晶癖変化

氷の構造をc軸方向から見ると図4-6に示すよう正六角形をすき間なく敷きつめた六方対称構造となっている。ここでは水素が省略されて酸素原子の位置と水素結合のみが示されている。この図では、紙面に平行な面が底面であり、これに直交する柱面は、それぞれ $b_1$ 軸、 $b_2$ 軸に直交する面となる。この柱面と $a_1$ 軸に直交する面の表面の構造を比べてみると水分子の配列のしかたが異なっている。すなわち、結晶表面の構造はその表面がどの方向を向いているかで異なる。氷結晶の場合は $60^\circ$ おきに全く同じ構造の表面が現れることに注意されたい。

さて、a軸に直交する面は、六角形の環が1つおきに欠けた凸凹の多い面となっているのに対し、b軸に垂直な面はいろいろな向きの表面の中でも最も密に分子が並んだ面で非常に平らな構造となっ

ている。すなわち両面で単位面積あたりの切断された水素結合の数を比較するとa軸に垂直な面の方が多くなることになる。

この様な結晶表面に水蒸気から飛び込んできた水分子は、まず表面に吸着されて、その表面上を動き回るうちに、やがて水素結合の切断された手を見つけて結合の手を回復することで結晶に組み込まれる。この過程をつぎつぎと繰り返すことで結晶は成長することになる。このとき、切断された水素結合の数が多きほど水分子が結晶に取り込まれる速度が速くなり、その結果面の成長速度も速くなる。従って、a軸に垂直な面の方がb軸に直交する面よりも成長速度が大きいと予想される。

図4-7は球状の初期氷晶が成長する過程を描いた模式図である。球状の結晶の表面には、いろいろな方向を向いた無数の微小表面が存在すると

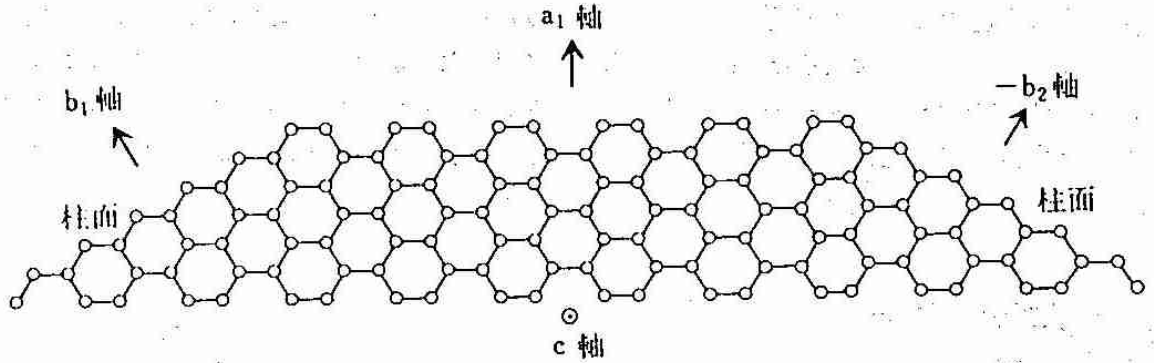


図4-6 氷結晶構造のc軸方向からの投影図。○：酸素原子、—水素結合。  
 $b_1$ 、 $b_2$  軸に直交する面が柱面 ( $\{10\bar{1}0\}$  面)、  
 $a_1$  軸に直交する面は  $\{11\bar{2}0\}$  面。

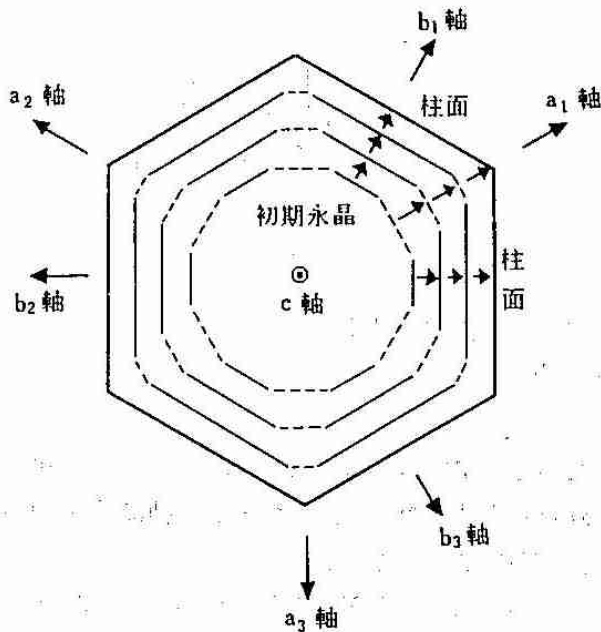


図4-7 球状の初期氷晶が成長し、六角形の基本形となるまでの過程を示す模式図。最終的に最も成長速度の小さい面だけで囲まれる。

考えられる。ここでは、簡単のために成長速度が極端に小さい面(実線)と成長速度の大きい面(破線)について試みる。この図でわかるように、成長速度の大きい面は、となりの成長速度の小さい面によって次第に削り取られやがて消滅し、最終的に成長速度の小さな面だけで囲まれた六角形となる。

氷結晶には、この成長速度の極端に小さな面としてb軸に直交する6つの柱面と2つの底面を考慮することができる。従って、氷晶の基本形は六角柱状となる(図4-5(b))。

### 5. 雪の結晶の晶癖変化のしくみ

雪の結晶の基本形が成長するに従い、さまざまな晶癖をもつ結晶に変化するの、底面の成長速度  $V_b$  と柱面の成長速度  $V_p$  との大小関係が成長温度により逆転を起こすということに帰結することができる。すなわち、板状結晶では  $V_p > V_b$  であり、柱状結晶では  $V_p < V_b$  となる(図4-5(c))。

結晶の表面の成長速度は、結晶の表面構造に大きく依存する。この表面構造の変化は、面の方位による異方性によるものに加え、同一の面方位の表面でも温度によって大きく変化する。

氷結晶の表面は、低温度のときには、水分子の配列が規則正しい非常に平らな構造をとるのに対し、高温度になると凹凸の多い荒れた構造となる。さらに温度が上昇し  $0^\circ\text{C}$  近くになると表面はもはや結晶構造をとらず、水分子の配列が乱れた液体と同じような構造となる。このような現象を表面融解と呼び、水分子の配列の乱れた層は擬似液体層と呼ばれている。このような表面構造の変化に応じて面の成長速度は大幅に変化する。すなわち、荒れた表面の成長速度は極端に大きく、平らな表

面では逆に極端に小さくなる。擬似液体層で覆われた表面は、水蒸気からとびこんだ水分子がいったん擬似液体層に取り込まれてから、結晶化するので、この面の成長速度は、荒れた面と平らな面との中間の値となる。さらにこの表面構造の変化

が起こる温度は、結晶構造の異方性のため底面と柱面とで異なる。このことから、底面と柱面の成長速度の大小関係に温度によって逆転が生じ、晶癖の変化を引き起こすと考えられる(図4-8)。

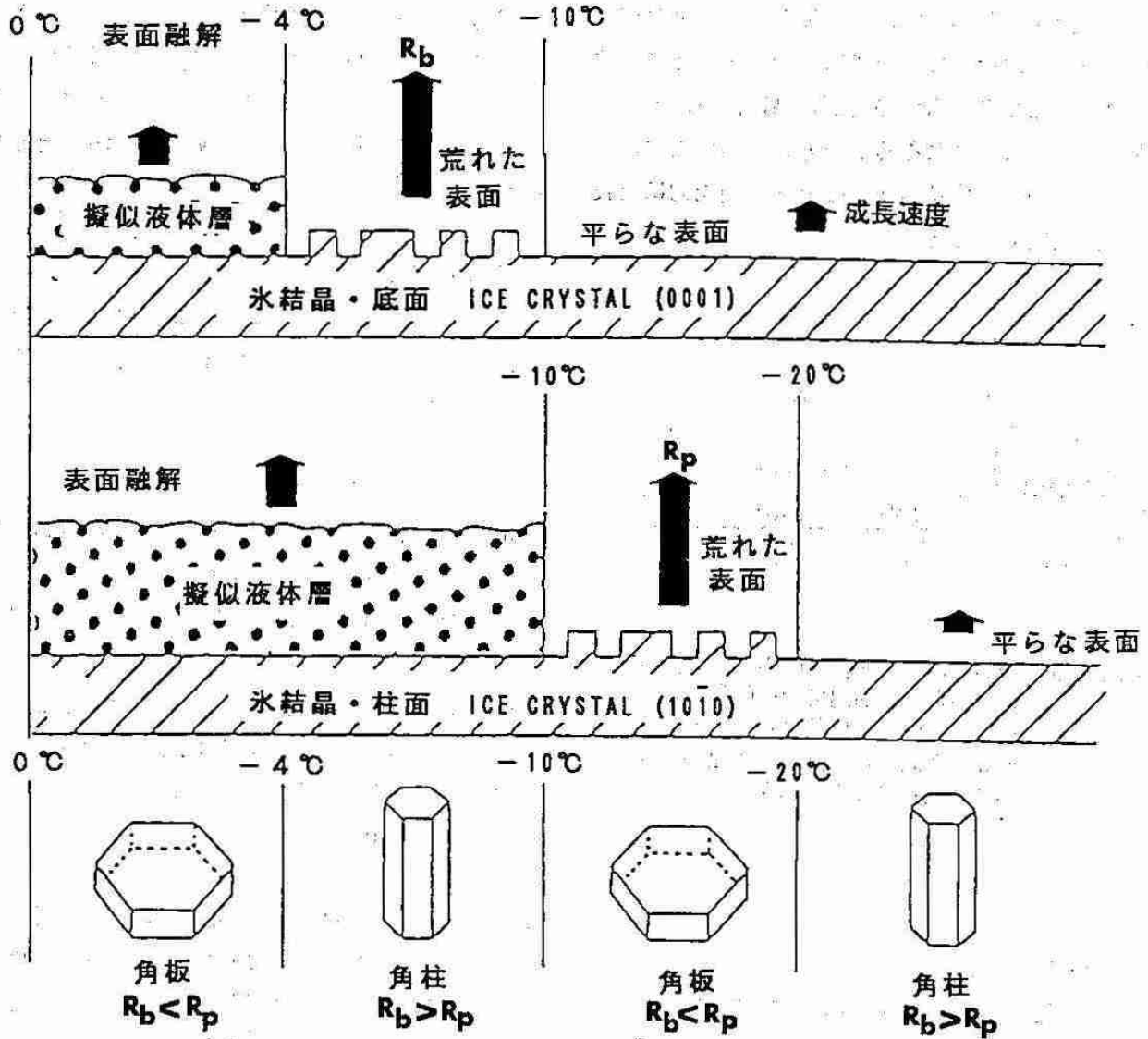


図4-8 氷結晶の表面構造の温度変化と成長速度の変化を示す図。  
底面と柱面とで成長速度の大小関係が-4°C、-10°C及び-20°Cで逆転を生じる。このため、雪結晶の晶癖変化が起こる。

## 6. 結晶の形態の不安定性の原因

過飽和度が大きくなると、結晶の形は角柱や角板の単純なものからより複雑なものへと変化する。これは、水蒸気量が増大すると結晶の角や稜が、より過飽和度の高い領域へとび出すため、この部分が優先的に成長するようになり(図4-9)、六角柱(板)の形態が維持できなくなるためである。すなわち、六角板については、隣あった2つの柱面の交差部である六つの稜がa軸に沿った方向に成長し樹枝状結晶となる。一方、六角柱では、底面と柱面の交差する角がc軸方向に優先的に成長し、針状結晶となる。

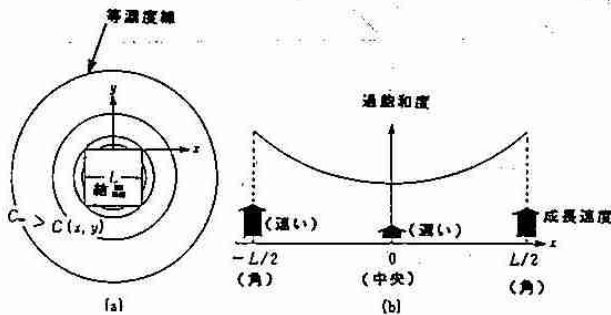


図4-9 多面体の氷結晶の周囲の水蒸気濃度の分布と結晶面内での過飽和度分布を示す。面の中央部より角の方が過飽和度が高く、成長速度も速い。従って、成長とともに角がせりだしてくる。

## 7. おわりに

雪の結晶の形の変化のしくみについての理解は、最近になり新しい展開を迎えている。この解説に

示したような基本となる結晶成長のしくみを取り入れながら、理論や実験の立場から現在もお盛んに研究が行なわれている。また、最近の計算機の発展にともない、結晶の形を計算機シミュレーションにより理解しようとの動きも活発である。雪の結晶の形を完全に理解するにはまだまだ多くの努力がなされなければならない。この努力が実ったあかつきには、中谷先生の有名な言葉にあるように雪の結晶を「天からの手紙」として、上空の雲の情報をより詳細に解読することが可能となる。

## 【参考文献】

- 小林 禎作：「六花の美」サイエンス社 1982年
- 小林 禎作：「雪はなぜ六角か」ちくま書房 1984年
- 黒田 登志雄：「結晶は生きている」サイエンス社 1984年
- 古川義純・小林禎作：「雪の結晶」旭川雪の美術館図録 1991年
- 木下 誠一 編：「雪と氷のはなし」技報堂出版 1988年
- 数理科学 No 319 特集「雪・結晶の物理とファンタジー」数理科学社 1990年
- 光田 寧 編：「気象のはなしⅡ」技報堂出版 1988年
- 日本雪氷学会編：「雪氷辞典」古今書院 1990年
- 古川 義純：「ハロー 多面体氷晶が関連する光学現象」数理科学 No 319 1990年
- 古川 義純：「大気光学現象と色彩」数理科学 No 331 1991年