

結 晶 成 長 に お け る パ タ ー ン 形 成

円、六角及び樹枝状パターン

横山悦郎、黒田登志雄（北大低温研）

1. はじめに： 一定の条件下で成長する雪結晶（気相成長する氷結晶）の外形は、時間とともに変化し、最終的に雪結晶全体として一つの形態がつくられる。また、良く知られているように、雲の中の過飽和度、温度等の成長条件の僅かな変化に応じて様々な形態（パターン）がつくりだされる。この様な雪結晶のとり形態（成長形）と成長条件（過飽和度 σ 、温度 T ）の関係については、中谷（1951, 1954）以来数多くの実験的研究が行われ、小林（1961）¹⁾がそれらの結果を（ $T-\sigma$ ）ダイヤグラムとしてまとめている。これらの研究は、十分成長した雪結晶の形態と成長条件の関係を明かにしたが、ダイヤグラムに示される各々の成長条件に対応した特徴的な形態が、なぜ現れるかについては、全く議論されていない。言い替えれば、結晶の外形が時間とともにどの様に変化していくかという形態形成（パターン形成）の機構に関する議論は、全く行われていない。

一方、パターン形成を数理的観点から探るため、単純な成長法則を仮定し、雪結晶に似た形をシミュレートする研究が、Nittman and Stanley (1986)²⁾, Family et al. (1987)³⁾ によって行われている。しかしながら、これらの成長法則に使われているパラメータと実際の成長条件（過飽和度、拡散係数等）との対応関係が、極めて不明確である。この対応関係を明かにするためには、実際の雪結晶に関する複数の素過程を考慮したシミュレーションを行なう必要がある。

ところで、雪結晶の成長の素過程としては、次の二つが重要と考えられる。①結晶表面に水分子を補給するための拡散過程、②結晶表面に到達した水分子が表面拡散し、ステップのところで結晶格子に組み込まれるまでの過程（表面カイネティック過程）。これら①と②の過程が、互いに関連しあつた結果、雪結晶の複雑なパターンが現われると考えられる。特に②の過程は、雪結晶の多面体的特徴を理解する上で不可欠なものである。本研究の目的は、①と②の過程を同時に考慮し、雪結晶の成長形の経時変化をシミュレートすること⁴⁾。更に、その結果を解析し、雪結晶の様々なパターンが作り出されていく仕組みを明かにすることにある。ただし、取り扱いを簡単にするために、氷結晶の c 軸に垂直な断面に投影した二次元結晶を考え、初期結晶は、円形とした。また温度は、典型的な樹枝状結晶が発達する -15°C で全系均一とした。

2. 結果及び考察⁵⁾： シミュレーションの結果、形成されるパターンは、次の三つに分けることができる。（1）円形のパターン： カイネティック係数の過飽和度依存性を通じた速度論的な理由によって成長速度の異方性が消える結果（カイネティック・ラフニングが起きている状態）、結晶は円形のまま成長しプリズム面が発達しない。（2）六角形のパターン： 成長速度の強い異方性により円形から成長速度の遅い六つのプリズム面が発達し、六角形を形成する。その後、六角形を維持した

まま成長する。(3) 樹枝状のパターン: 円形から六角形が一旦形成されるが、六角形の角が、面の中央に比べて優先的に成長し、樹枝状結晶となって成長する。その場合、過飽和度の増大とともに樹枝の先端の幅が小さくなる。

これら三つのパターンの形成条件を理論的に解析した。その結果、それぞれのパターンの形成条件は、過飽和度 (σ) 及び、拡散係数と水分子の速さで無次元化された結晶サイズ ($\mathcal{L}$) によって与えられることが見出され、パターンと σ 、及び $\mathcal{L}$ の関係が (σ - $\mathcal{L}$) ダイアグラムとして示された (図1)。従来は、(T - σ) ダイアグラムで象徴される様に、成長する雪結晶のパターンは、過飽和度と温度のみ依存すると考えられてきた。しかしながら、本研究で明かにされたように、それはにも依存する。従って、雪結晶のパターンの変化を正しく記述するためには、三次元の (T, σ - $\mathcal{L}$) ダイアグラム (図2) が必要である。

- 1) T. Kobayashi, Phil. Mag. 6, 1363 (1961)
- 2) J. Nittmann and H. E. Stanley, Nature 321, 663 (1986)
- 3) F. Family, D. E. Platt and T. Vicsek, J. Phys. A 20, L1177 (1987)
- 4) E. Yokoyama and T. Kuroda, Dynamics of Ordering Processes in Condensed Matter, ed. S. Komura and H. Furukawa, Plenum, (1988)
- 5) E. Yokoyama and T. Kuroda, Submitted to Phys. Rev. A

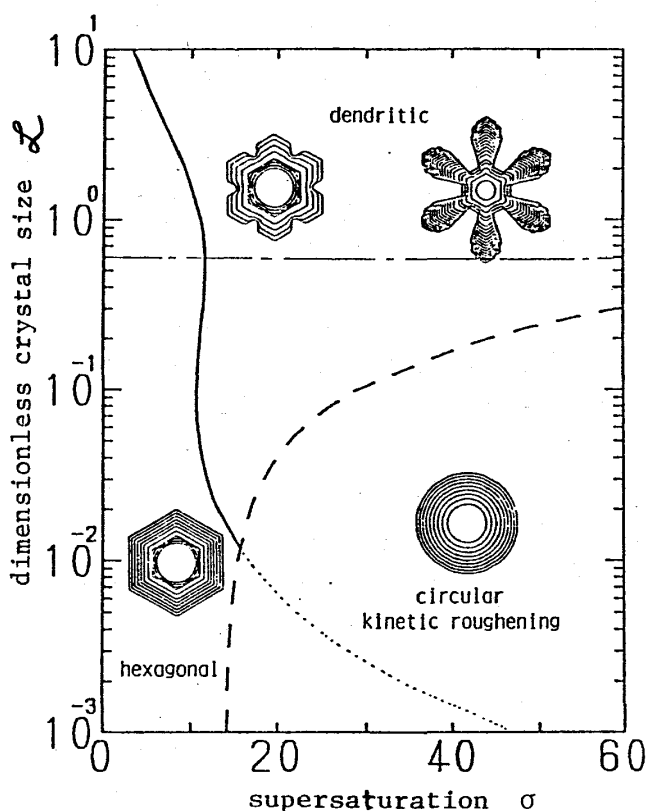


図 1

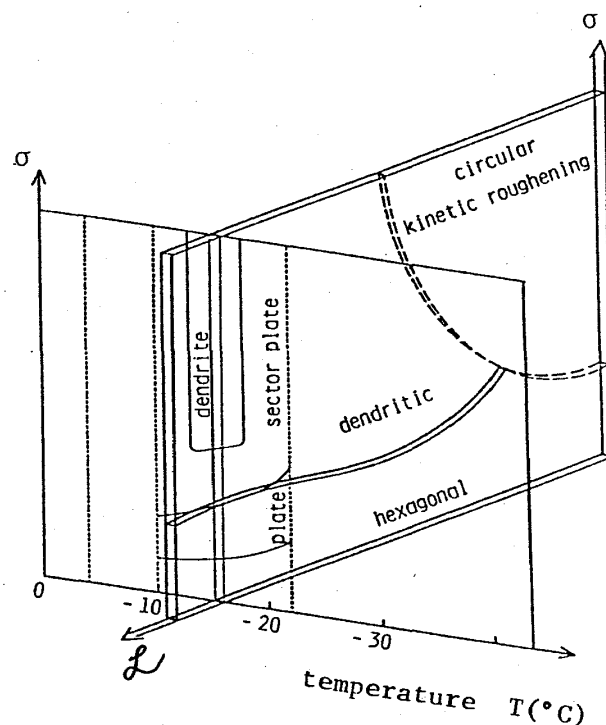


図 2