

光硬化樹脂を用いた雪結晶レプリカの作成と光造形法による再構築

北見工業大学 ○青木 祐弥, 柳 敏, 久保 明彦, 田牧 純一, ウラ シヤリフ

要 旨

雪結晶の形態は多様であり, これまで写真撮影により分類されてきた. しかし, 雪結晶の3次元構造の詳細は, 写真の2Dイメージから得られる情報からは正確に把握できない. そこで, 本研究では室温における雪結晶の3次元計測を可能とするために, 光硬化樹脂を用いた雪結晶のレプリカ作成法を開発し, 使用した樹脂の硬化特性を詳細に調査している. さらに, 光造形法によって雪結晶の3次元形状を再構築する手法を提案している.

1. はじめに

顕微鏡あるいは写真撮影による雪結晶の観察は古くから行われており, 針状, 六角板状, 樹枝状などに代表される雪結晶は, 生成時の温度と湿度によって体系化されることが明らかとなっている¹⁾. しかし, 雪顕微鏡写真によって得られる情報が2次元であるため, 結晶の厚み方向の形状を含めた3次元形状については, 視覚的イメージをCG等で立体的に表現することにとどまっている. 本研究では, 室温における雪結晶の3次元計測を可能とするために, 光硬化樹脂を用いた雪結晶のレプリカ作成法を開発している. また, 顕微鏡を使用せずとも雪結晶の形状の特徴を理解することを可能とするため, 光造形法によって雪結晶の3次元形状を任意の倍率で再構築する手法を提案している.

2. 実験方法

2.1 雪結晶の採集

雪結晶のレプリカを作成する方法として, これまでに, 接着剤などの液状樹脂を用いる方法はあったが, 溶媒風乾により硬化終了するまでに6時間以上の時間を要した. この間に, 採集した雪結晶が吹き飛ばすことや, 2次の結晶が付着する問題があった. そこで, 本研究では硬化時間を短縮する方法として, 光照射により硬化する樹脂を用いている²⁾. 図1に雪結晶レプリカ作成手順を示す. まず初めに, (a)透明アクリル板あるいはガラス板の上に光硬化樹脂を塗布し, (b)大気中に暴露することによって降雪を採集する. その後, (c)可視光線あるいは紫外線を照射することによって雪結晶が溶解するまえに光硬化反応を終了させる. 硬化後の光硬化樹脂は透明体となる.

2.2 光硬化樹脂の硬化特性

光硬化樹脂は, 硬化する際に発熱を伴う. 発熱量は光硬化樹脂の種類と照射光の強度の影響を強く受ける. 雪結晶レプリカを作成する場合, 樹脂温度が雪の溶解温度である0°Cを超えないように, 照射強度を選定する必要がある. 本実験では紫外線照射で硬化する光硬化樹脂NOA81を用い, 硬化にともなう温度上昇を熱電対によって測定した. 図2に実験方法を示す. スライドガラス板の上に光硬化樹脂を20 μ l塗布した. 実際に雪を採集する際には光硬化樹脂上に雪結晶を採集するので, 光硬化樹脂表面の温度をK型熱電対で測定した. 表1に実験条件を示す.

表1 実験条件

光硬化樹脂	紫外線硬化樹脂 NOA81, Norland 社 ポリエン/ポリチオール系 粘度: 300 cps (25°C) 20 μ l
UV 照射密度	0.05 – 1.0 mW/cm ²
照射時間	50 min
熱電対	K型, ϕ 50 μ m

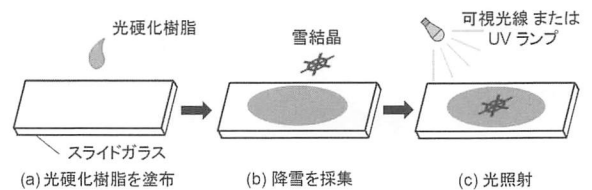


図1 雪結晶レプリカ法

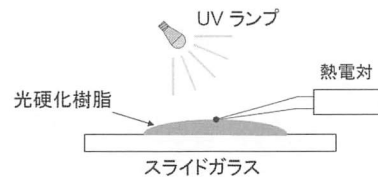


図2 光硬化樹脂の硬化特性実験

2.3 雪結晶の再構築

雪結晶の再構築に光造形装置 (UNIRAPID II, SP-1502) を使用した. 光造形装置は, 紫外線ビームを水平面 (X-Y平面) 上で走査する機構としてビームのXY方向位置をNC制御するXYプロッタ方式を採用しており, 硬化した樹脂を垂直方向 (Z方向) に積層する機構として光硬化した樹脂を搭載したZ軸テーブルを下降させる自由液面法を採用している. 紫外線ビームスポット径は0.7mm, 制御可能な最小液膜厚さは0.1mmである. 光硬化樹脂にはポリエチレンに似た機械的性質を有するエポキシ系樹脂 (SOMOS8110) を使用した.

3. 実験結果

3.1 光硬化樹脂の硬化特性

図3は, 紫外線照射密度をパラメータとして照射時間に対する硬化樹脂の温度変化を測定した結果である. いずれの照射密度の場合にも, 紫外線照射開始後しばらく時間が経過して

から硬化反応が開始され、反応熱による温度上昇が起こる。光硬化反応の終了とともに樹脂温度は低下し、徐々に室温に戻っていく。

図4は、紫外線照射密度に対して最大上昇温度をプロットした結果である。紫外線を照射しない場合、光硬化反応は発生せず温度上昇は0となるので、最大上昇温度は紫外線照射密度とともに比例的に増加するが、紫外線照射密度が大きくなると、徐々にその勾配は緩くなっていく。

図5は、図3において1分間当たりの温度変化が0.1℃以下となる時間を光硬化終了時間と定義し、紫外線照射密度に対してプロットした結果である。紫外線強度が小さい領域では、光硬化終了時間は紫外線照射密度に対して反比例の関係を有するが、紫外線強度の増加とともに減少率が安定する。雪結晶レプリカの作成を行うためには、光硬化樹脂の硬化が終了する紫外線照射時間が短くかつ一定であることが望ましい。したがって、図5の結果より紫外線照射密度は0.2 mW/cm²以上という値が与えられる。また、図4の結果から紫外線強度0.2 mW/cm²における最大上昇温度は5℃であるから、紫外線強度0.2 mW/cm²を用いて雪結晶レプリカを作成する場合、雪の溶解を避けるためにはスライドガラス上に塗布する光硬化樹脂の温度を少なくとも-5℃以下に保たなければならない。

3.2 光造形による雪結晶の再構築

雪結晶レプリカの3次元形状はレーザマイクロスコープ(LSM)(榑キーエンス, VK-9700/9710)で測定した。レプリカ材であるNOA81の硬化後の色彩は透明体であるため、表面形状の測定精度の向上を期待して、雪結晶レプリカの表面を白金でコーティングした。

図6は、白金コーティング後の雪結晶レプリカを光学顕微鏡で観察した写真の1例である。雪結晶は典型的な形態である六角形をベースとした樹枝状結晶である。この雪結晶の3次元形状をLSMにより測定した。

LSMにより測定した図6の3次元形状データの反転とエッジ部に発生する高周波ノイズの除去を行い、CSV形式のファイルとして保存し、さらにDXF形式のCADデータに変換した。また、DXF形式のCADデータをSTL形式のCAMデータに変換し、光造形による再構築を行った。図7は、図6に示す雪結晶のXY方向を50倍、Z方向を50倍に拡大し複製した雪結晶の光造形品の写真である。再構築した雪結晶は、図6から得られる形状の特徴を忠実に表現していることがわかる。

4. まとめ

- (1)雪結晶のレプリカ材料として、紫外線硬化樹脂(NOA81)を使用する場合、短時間で硬化反応を終了させるために、紫外線照射密度を0.2 mW/cm²以上にすることが必要である。
- (2)光硬化反応に伴うレプリカ材の温度上昇は紫外線照射時間とともに増加する。
- (3)CSV形式で記録された雪結晶レプリカの3次元形状データをSTL形式に変換し、光造形によって雪結晶の再構築を行った。

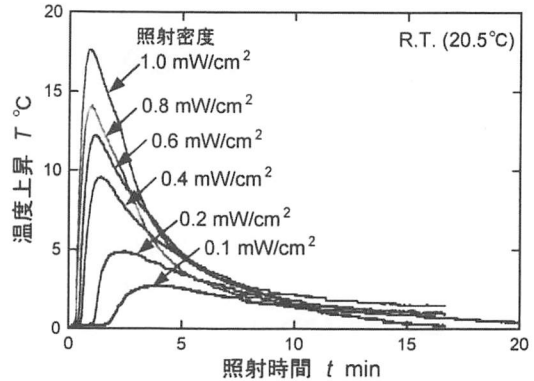


図3 光硬化樹脂の温度上昇

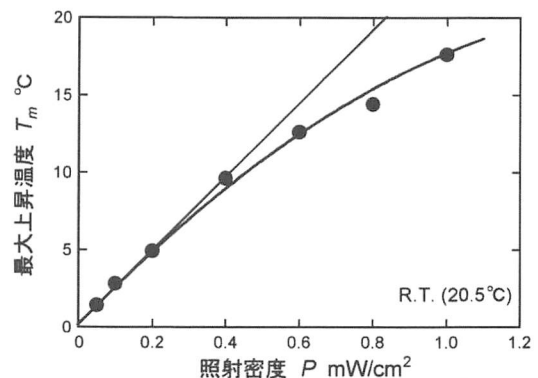


図4 紫外線照射密度と最大上昇温度

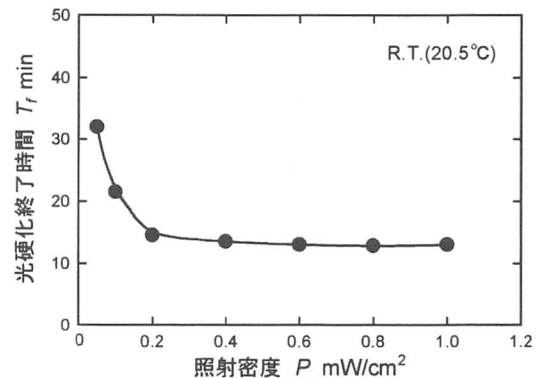


図5 紫外線照射密度と硬化終了時間

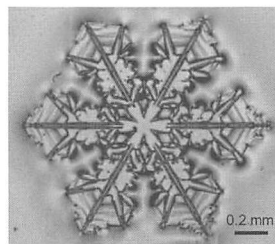


図6 雪結晶の光学写真

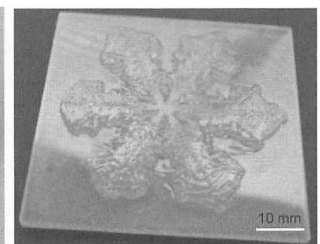


図7 光造形による雪結晶

5. 参考文献

- 1) U. Nakaya, Snow crystals, Natural and Artificial, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, USA, pp.1-510, 1954.
- 2) 柳敏, 「光硬化性樹脂を用いた雪と霜のプレバート作り」, 物理教育, 53,1, pp56-59,2005.