



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	鉛直過冷却雲風洞による初期雪結晶併合実験（序）
Author(s)	高橋, 庸哉; TAKAHASHI, Tsuneya; 遠藤, 辰雄 他
Citation	低温科学. 物理篇, 51, 1-12
Issue Date	1993-03-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18608">https://hdl.handle.net/2115/18608</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	51_p1-12.pdf



## 鉛直過冷却雲風洞による初期雪結晶併合実験 (序) \*

高橋庸哉\*\*・遠藤辰雄

(低温科学研究所)

若濱五郎

(北海道大学名誉教授)

(平成4年11月受理)

**Abstract** : The characteristics of the aggregation of two snow crystals in the early growth stage were investigated in a supercooled cloud tunnel.

The results obtained are as follows : 1) when planar snow crystals were aggregated on the same plane, the centers of two crystals coincided or one center lied on the inside of the middle of another crystal branch. The angles between the neighboring branches ranged mostly from 0 to 15 degrees ; 2) the aggregation of snow crystals in the early growth stage caused malformed snow crystals and twelve-branched snow crystals ; 3) aggregated columnar crystals corresponded to natural snow crystals classified in the combination of columns or needle crystals. Two crystals made an angle varying mainly from 70 to 90 degrees ; 4) the fall velocity increased by more than 10 percent owing to the aggregation.

抄録：鉛直過冷却雲風洞を用いて、2個の雪結晶を成長初期に併合させる実験を行った。

次の結果が得られた： 1) 平面付着型の角板状結晶の場合には結晶の中心付近及び枝の中央より内側で主に併合し、隣接した枝がなす角度は15度以下が多かった； 2) 奇型雪結晶などには初期に併合でできたものがあると考えられる。また、十二花雪結晶は併合によって形成され得る； 3) 併合を起こした角柱状結晶は天然雪結晶の角柱組合せ・針状組合せに対応した。結晶相互のなす角度は70~90度が多かった； 4) 併合によって、落下速度は10%以上増加した。

keywords : aggregation, malformed snow crystals, snow crystals, supercooled cloud tunnel, twelve-branched snow crystals

キーワード：鉛直過冷却雲風洞，奇型雪結晶，十二花雪結晶，併合，雪結晶

---

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第3622号

\*\* 北海道教育大学附属教育実践研究指導センター

## I. 緒 言

雪片は最も頻繁に観測される降雪粒子であり、その形成すなわち雪結晶の併合は降水粒子の成長で最も基本的なプロセスの一つである。そのため、多くの研究者によって、雪片の大きさ・落下速度やその構成要素の種類・大きさ・数などに関する種々の関係が観測で求められている（まとめとして、たとえば文献<sup>1)</sup>参照）。しかし、そのプロセスを解明するためには十分制御された条件下での実験が不可欠であるにもかかわらず、ほとんど行われていない。形が複雑な雪結晶を浮遊成長させながら併合させることが著しく困難であるためである。Jayaweera and Mason<sup>2)</sup>などによって、模型雪を粘性液体中で落下させ併合させる実験が行われているに過ぎない。

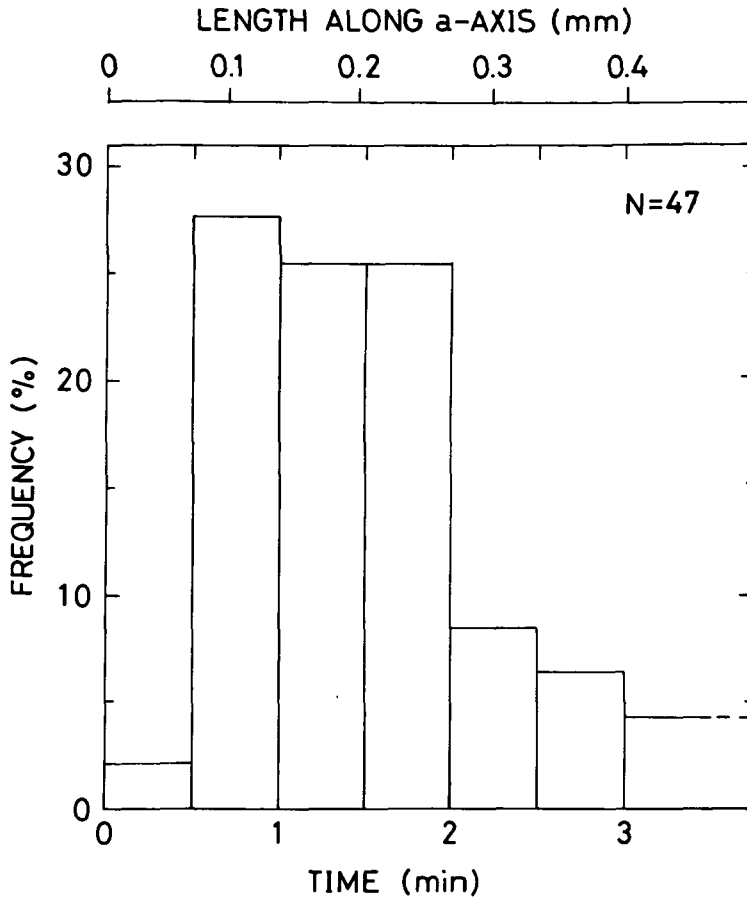
また、天然雪結晶の中には初期段階に併合を起こし成長したと考えられるものが多数ある。特に、十二花雪結晶の形成機構について従来有力とされてきた回転双晶説による証拠は認められず、ほとんどは併合によると考えられることが最近の観測から明らかにされている<sup>3)</sup>。雪結晶の形状という観点からも併合に関する室内実験からの知見が不可欠である。

そこで、成長初期に2個の雪結晶を併合させる実験を鉛直過冷却雲風洞を用いて行い、併合の特徴（併合様式・落下速度など）について調べた。

## II. 実験方法

実験に用いた鉛直過冷却雲風洞は Takahashi *et al.*<sup>4)</sup>と同一のものである。この装置の特色は雪結晶を空中に安定して浮遊させ、降雪雲内での自然浮遊状態における雪結晶の成長を再現できる点にある。浮遊する雪結晶は円錐型風洞のため鉛直方向に不安定で、雪結晶を観察しながら上昇流速を絶えず調整している。そのため、落下速度が上昇流速と等しくない雪結晶は上昇あるいは落下し、視野から消える。長時間安定して成長させ得るのは1個の結晶だけであるが、種結晶の供給から1個の結晶になるまでの間に結晶同士が併合を起こす場合がある。本研究では目視で併合が確認されたものに着目した。

実験は次のような手順で行う。種結晶を別の小チェンバーで断熱膨張/冷却によって生成する。それを直ちにポリエチレン容器に吸込み、風洞内に供給する。併合を目視で確認し、それを併合直後あるいは一定時間成長させた後に採取し、顕微鏡で形状を観察する。融解水滴径から質量を求める。雪結晶の落下速度（=上昇気流速度）と風洞内温度は浮遊位置の上部で熱線風速計及び白金抵抗温度計を用いて測定され、連続的に記録された。この実験では氷晶の供給を実験開始時の一回に限った。したがって、成長時間が等しく、併合した2個の結晶の大きさはほぼ等しかった。この場合に雪結晶同士の衝突は二つの結晶のわずかな落下速度差に依ると考えられる。天然でも同一結晶形の場合には大きさのほぼ等しい結晶が併合しやすいことが知られている<sup>5,6)</sup>。衝突後に再分裂することはなかった。付着させるメカニズムとしては疑似液体層・焼結・電気力などが考えられているが十分解明されていない。



第1図 併合が起こるまでの雪結晶成長時間の頻度分布。実験温度は $-14.0 \sim -15.2^{\circ}\text{C}$  (樹枝状結晶成長領域)。雪結晶の大きさは Takahashi *et al.*<sup>4)</sup>の実験式による

実験は針・角柱が成長する $-5 \sim -7^{\circ}\text{C}$ 及び角板・樹枝が成長する $-12 \sim -15^{\circ}\text{C}$ で、水飽和条件下で行った。それぞれc軸、a軸方向への成長が他の温度領域より速く<sup>4)</sup>、衝突の確率が高いと考えられる。尚、 $-5.5^{\circ}\text{C}$ ・ $-14.5^{\circ}\text{C}$ 近傍では結晶形が成長とともに変化し、最終的に針や樹枝が成長する<sup>4)</sup>。併合直後に採取した雪結晶の形状観察によると併合時の結晶形はそれぞれ角柱及び広幅六花であった。第1図は $-14.5^{\circ}\text{C}$ 近傍の樹枝状結晶成長領域での種結晶供給から併合までの時間と併合を起こした時点での大きさを示したものである。併合は成長時間0.5~3分程で起きる場合が多く、大きさは0.1~0.4 mm程であった。Fujiyoshi and Wakahama<sup>7)</sup>の観測によれば、樹枝状結晶などからなる雪片を構成する粒子の大きさは0.5~1.5 mm程であるが、Kajikawa and Heymsfield<sup>6)</sup>は $-30^{\circ}\text{C}$ 以下の低温領域で0.1~0.4 mm程度の厚角板や角柱が併合を起こすことを観測している。

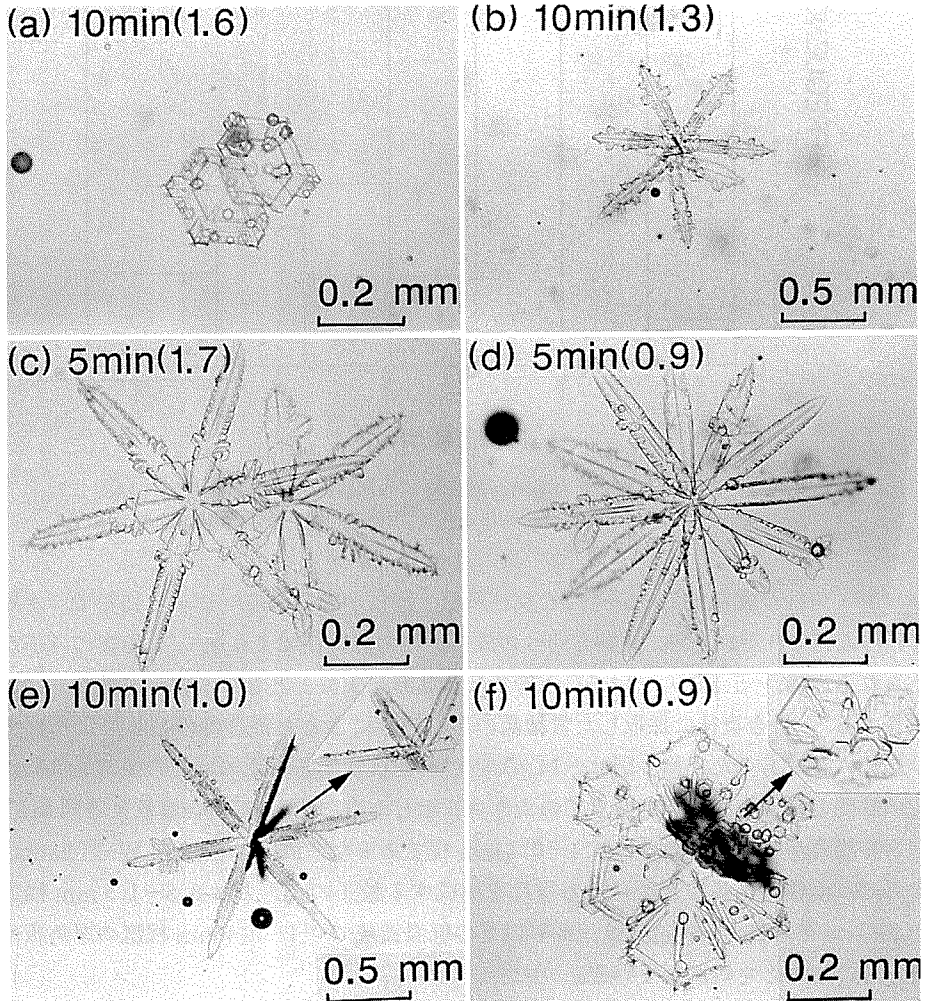
## III. 結 果

## 1. 角板状結晶の併合様式

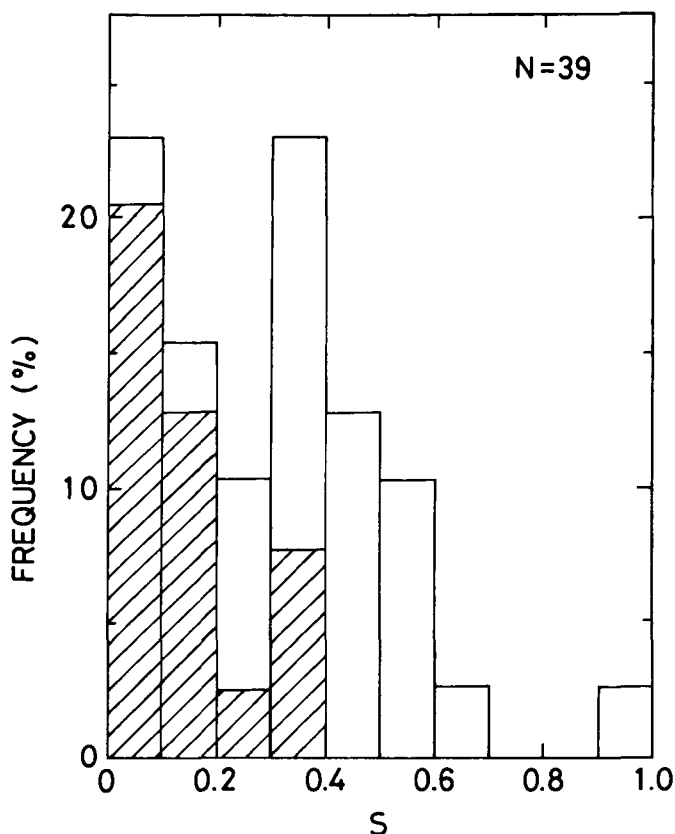
第2図は併合した角板・樹枝状結晶の例である。次の2つのタイプに分類することができた。

- a. 平面付着型…2つの結晶が平行して付着している場合
- b. 立体付着型…立体的に交差している場合

平面付着型の場合にはa軸方向の成長が止められ三花などに見えるもの(第2図(a), (b))と六花を維持して成長するもの(同(c))があった。後者の中には同(d)のように十二花雪結晶に分類されるものも含まれていた。立体付着型の割合は樹枝状結晶で17%, 角板・扇形で50%であった。後者で割合が高いのは軸比が小さい結晶ほど他方の雪結晶の動きに影響され、傾きやすいためと考えられる。また、採取されたオイル中でのわずかなシアアによって分離し、脆



第2図 併合した角板状結晶：(a)~(d)平面付着型；(e), (f)立体付着型(立体的に成長した部分を写真右上に示す)。写真中の数字は成長時間(括弧内は併合時間)を示す



第3図 平面付着型結晶の結晶間距離 ( $S$ ) の頻度分布。実験温度:  $-14.0 \sim -15.2^\circ\text{C}$  (樹枝状結晶成長領域)。斜線部は  $l < 35\mu\text{m}$  のものを示す。

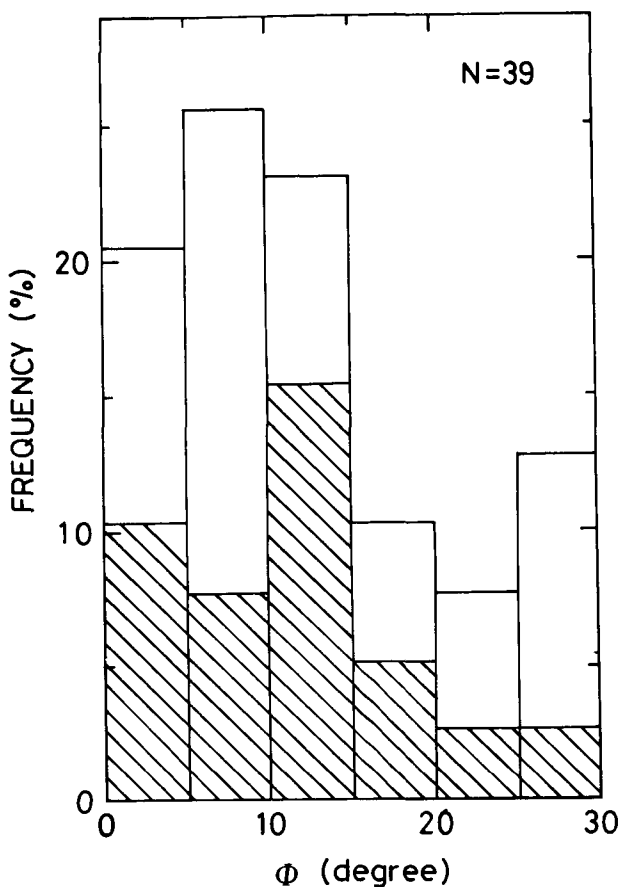
弱な構造であった。

第3図は $-14.5^\circ\text{C}$ 近傍の樹枝状結晶成長領域での平面付着型結晶の併合位置を示したものである。ここで、 $S$ は次のように定義される：

$$S = l/a,$$

ここで、 $l$ は結晶中心間の距離、 $a$ は結晶の大きさを示す。このパラメータは Higuchi<sup>8)</sup>や Kajikawa<sup>5)</sup>が天然雪結晶で用いたものと同じである。ここでは、2個の雪結晶の大きさが等しいので、分母は $a$ となる。 $a$ は雪結晶の大きさと成長時間の関係を表す実験式<sup>4)</sup>に併合までの成長時間を代入して求めた。 $S = 0$ であれば2個の雪結晶が中心で併合し、 $S = 1$ なら雪結晶の端同士が付着していることを示している。 $S = 0 \sim 0.1$ 及び $0.3 \sim 0.4$ で併合するケースが多かった。すなわち、雪結晶の中心同士及び枝の中心のやや内側で併合した。Kajikawa<sup>5)</sup>の天然雪の観測から得られているピーク ( $S = 0.2, 0.65$ )とはやや異なった。

第4図は樹枝状結晶成長温度領域における平面付着型結晶の隣接した枝のなす角度の頻度分



第4図 平面付着型結晶の隣接した枝のなす角度( $\Phi$ )の頻度分布。実験温度： $-14.0 \sim -15.2^\circ\text{C}$  (樹枝状結晶成長領域)。斜線部は  $l < 35\mu\text{m}$  のものを示す

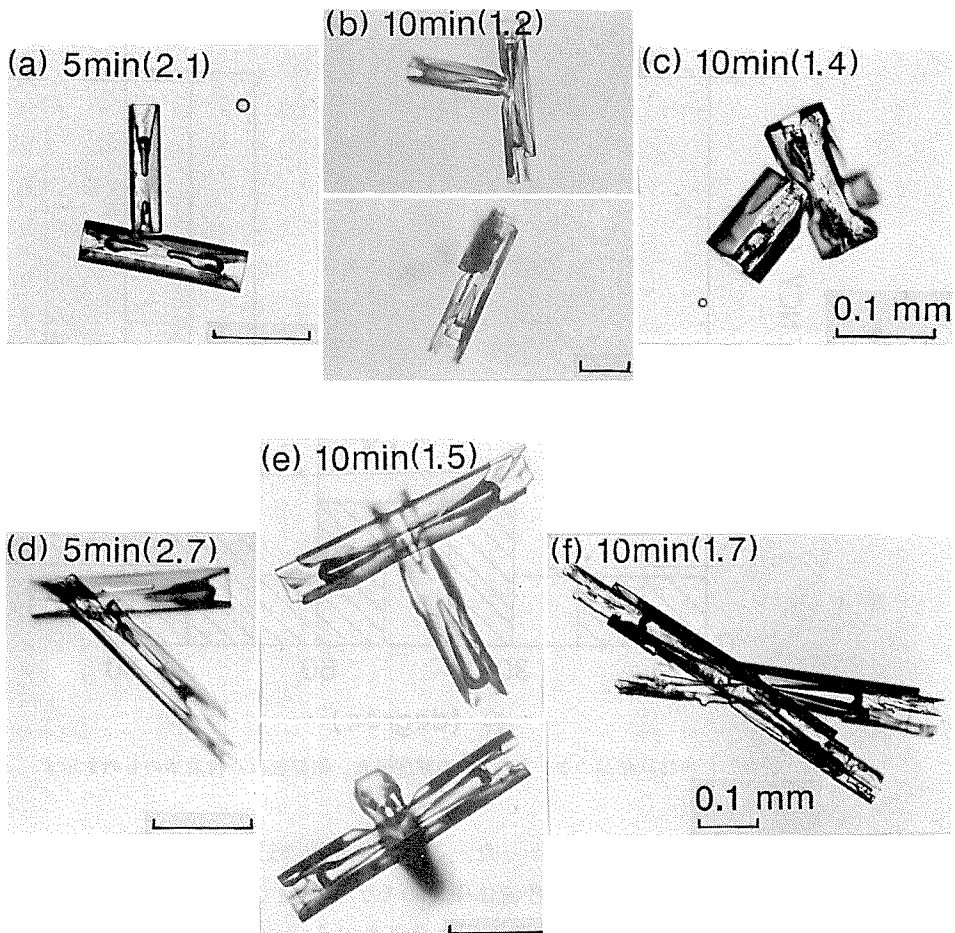
布を示したものである。隣接した枝のなす角度( $\Phi$ )はこれまでの研究者と同じ方法で決定した<sup>3,9)</sup>。次の式による。

$$\Phi = \sum \phi_i / 6$$

$\phi_i$  は隣同士の枝がなす角度の  $i$  番目の値で、30度より大きい時には  $60 - \phi_i$  とする。15度以下の場合が多かった。即ち、二つの結晶の枝は上下に重なるようにして併合する傾向がある。

尚、第3図及び第4図の斜線部は  $l < 35\mu\text{m}$  のもので、 $l = 35\mu\text{m}$  は Uyeda and Kikuchi<sup>3)</sup> が十二花と明らかな雪片を区別する目安とした値である。 $l < 35\mu\text{m}$  のものは全体の45%であったが、隣接した枝のなす角度は15度より小さい場合が多かった。

## 2. 角柱状結晶の併合様式



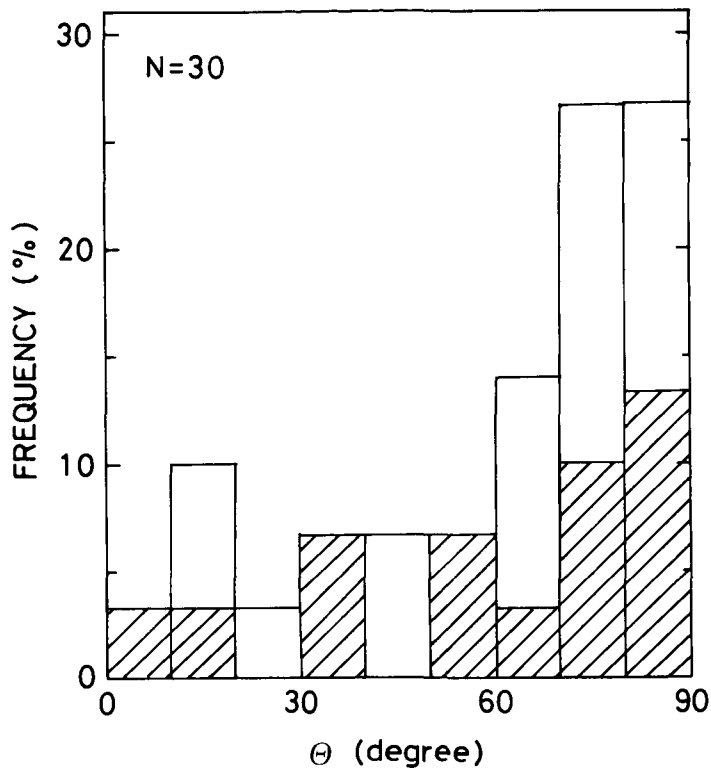
第5図 併合した角柱状結晶：(a)～(c)点付着型；(d)～(f)交差付着型。(b)，(e)の上下の写真は同一雪結晶を違った角度から撮影したもの。写真中の数字は成長時間（括弧内は併合時間）を示す。

第5図は針や角柱が併合を起こした雪結晶の例である。次の2つのタイプに分類することができる：

- a. 点付着型…結晶の端が他の結晶の側面に付着したもの
- b. 交差付着型…二つの結晶が交差して付着したもの。

交差付着型の場合でも結晶の端が他方の結晶に付着し交差するが多かった。これらは天然雪結晶では角柱組合せ・針状組合せと呼ばれているものである。また、第5図(b)は砲弾集合に類似した結晶形をしており、一方の結晶に貫入したようになっていた。これは併合後に結晶が成長したためである。

第6図は二つの結晶のc軸間のなす角度( $\theta$ )の頻度分布を示したものである。点付着型・交差



第6図 併合した角柱状結晶のなす角度( $\theta$ )の頻度分布。斜線部は点付着型のものを示す

付着型ともに70度から90度の割合が高かった。これは梶川<sup>10)</sup>の針状結晶の観測結果と一致する。また、Jayaweera and Mason<sup>2)</sup>の粘性流体中でのモデル実験でも、大きさの等しい二個の円柱を垂直方向に直径の50倍まで離して非平行に落下させると直交して併合することが示されている。

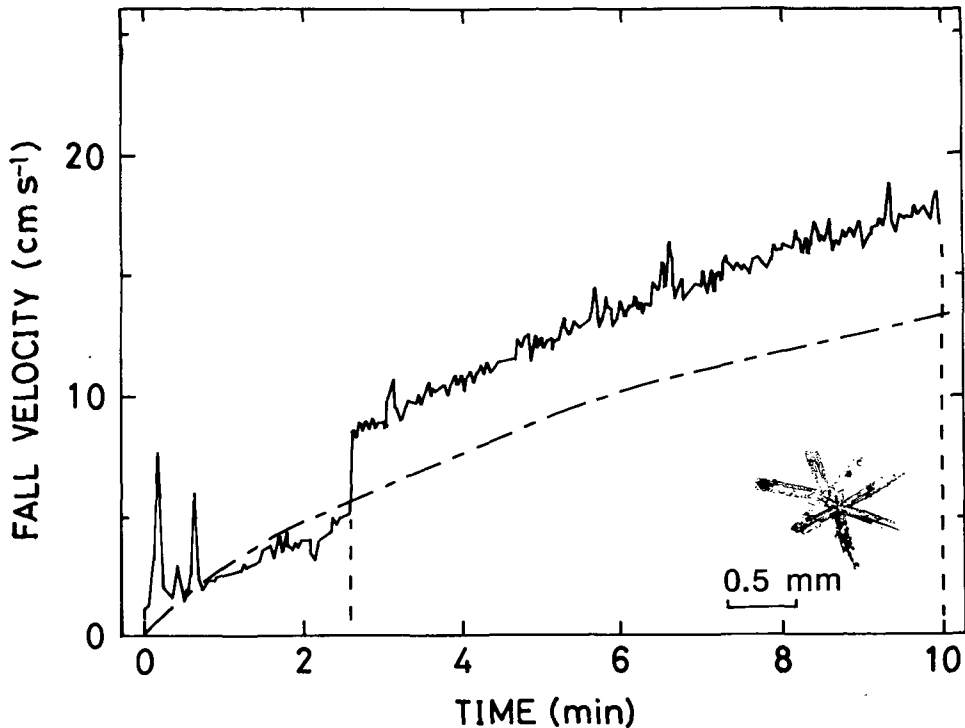
### 3. 併合による落下速度の変化

第7図は併合による落下速度の変化を示した例である。併合時に落下速度は急激に増加した。これは併合による質量増加のためである。第1表は併合による落下速度の増加を示したものである。初期に併合した結晶は単一の結晶に比べ、10%以上速く落下する。天然では、この落下速度の増加によって併合が

第1表 併合による雪結晶落下速度の増加

雪結晶成長温度 (°C)	成長時間5分での落下速度 <sup>a)</sup>	成長時間10分での落下速度 <sup>a)</sup>
-5.3~-6.1	9.6 (11)/8.5	16.2 (7)/14.0
-14.0~-15.2	9.9 (28)/8.9	15.7 (8)/13.3

a) 併合雪結晶の平均落下速度(データ数)/単一雪結晶の落下速度を示す。落下速度の単位は  $\text{cm s}^{-1}$ 。単一雪結晶の落下速度は Takahashi *et al.*<sup>4)</sup>の実験式に依る



第7図 2個の氷晶の併合による落下速度の変化例。風洞内への氷晶供給2.6分後に併合。写真は成長時間10分で採取された雪結晶。一点鎖線は単一雪結晶が成長する場合<sup>4)</sup>

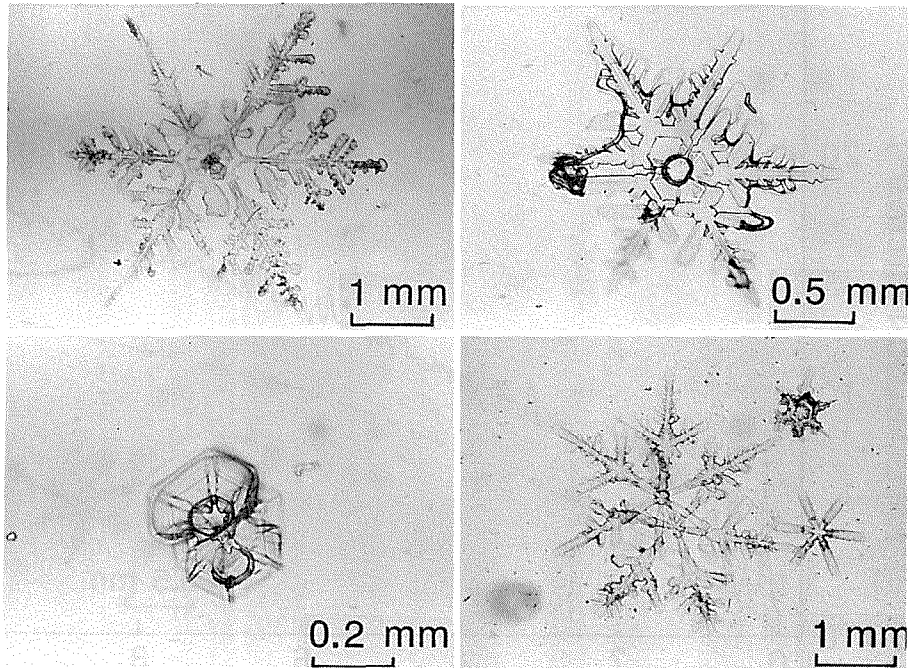
促進され雪片となると考えられる。

#### IV. 考 察

##### 1. 併合による天然雪結晶

併合の起こる確率は雪結晶が大きい程、また、雪結晶濃度が高いほど高い。したがって、大きさが小さくとも濃度が十分高ければ併合を起し得る。第8図は成長初期に併合したと考えられる天然雪結晶の例である。本実験の平面付着型に相当する。それぞれの結晶で成長が非対称となっていることから、初期に併合し、重なり合った部分で成長が抑制されたものと考えられる。Nakaya<sup>11)</sup>が奇型雪結晶に分類し、核の付着によるものとしたものがこれに相当する。Nakayaの文献中、Fig. 83, 84やPlate 87のNos. 484, 同88の491, 492, 493, 同91の510, 同92の517や同94の536などがその典型である。

‘三花、四花など’に分離する可能性がある雪結晶<sup>11)</sup>とされているものの中にもこの種の結晶が含まれている。Plate 72のNos. 390, 391, 392がそれで、中心がずれており、対をなす結晶が一直線となっていない。天然雪の場合の同様の例を第9図に示す。その他、‘立体枝付き雪結晶’の中にも立体付着型の併合によってできたと考えられるものがある (Fig. 108, 109及び



第8図 平面附着型に対応する天然雪結晶 (レプリカ)

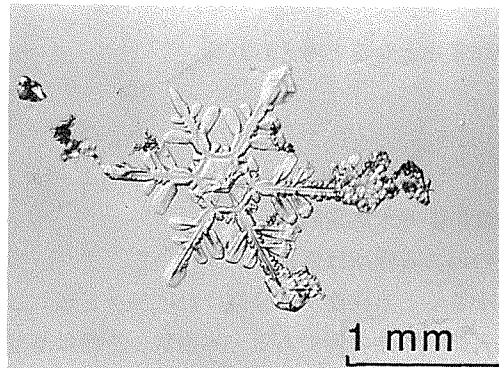
Plate 102 の Nos. 598, 600 など)。

また、砲弾集合の場合にも双晶説<sup>12)</sup>で説明されているが、併合によってできたものも含まれている可能性がある。

## 2. 十二花雪結晶

Kobayashi and Furukawa<sup>9)</sup>は多結晶雪に関する一連の研究の中で、共在点格子 (Coincidence-Site Lattice) の概念を導入し、回転双晶理論を展開した。これを十二花雪結晶にも適用し、隣同士の枝がなす角度の測定値の出現

頻度のピーク (22, 27 及び 30 度) がエネルギー論的に双晶となりやすい角度と対応していることを示した。すなわち、十二花雪結晶は核形成時に双晶の角柱として生まれ、それぞれの角柱の a 軸方向に 6 本ずつの枝が対等に成長してできると考えた。しかし、Uyeda and Kikuchi<sup>3)</sup>は十二花雪結晶を採取し、顕微鏡観察を注意深く行い、ほとんどの十二花雪結晶は 2 個のダブル



第9図 天然雪結晶。上下3本ずつの枝があり、分離して‘三花’となり得る。中心がずれており、初期に併合したものと考えられる

プレート (Double Plate) からなっており、併合によって生じたものとして説明した。

本実験によって、併合により十二花雪結晶ができ得ることが証明された。天然の十二花雪結晶の多くで各枝はほぼ同型で成長しており、同一環境で成長している。すなわち、併合は成長初期に起こると考えられる。しかし、併合による場合に隣接した枝のなす角度が30度をなすのが流体力学的に必ずしも有利ではないことがわかった。十二花結晶が併合によって成長するとすれば隣接した枝の角度が15度以下のものも相当数観察されなければならない。天然で十二花雪結晶が降る場合に2個の結晶からなる雪片の併合様式を観測する必要がある。

## V. 結 論

鉛直過冷却雲風洞を用いて、初期雪結晶2個を併合させる実験を行った。併合は成長時間0.5~3分程で起きた。次のことがわかった：

1) 角板状結晶の併合は平面付着型と立体付着型に分けられ、十二花雪結晶に分類されるものが成長することがあった。樹枝状結晶の成長温度領域では平面付着型が多く、結晶の中心付近及び枝の中央よりやや内側で併合する割合が高かった。隣接した枝がなす角度は15度以下が多く、30度をなすのが流体力学的に有利とは限らないことがわかった。奇型雪結晶などには初期に併合を起こし成長したものが含まれていると考えられる。

2) 角柱状結晶の併合は点付着型と交差付着型に分けられ、天然の角柱組合せや針状組合せに対応した。砲弾集合は併合によっても形成される可能性がある。結晶相互のなす角度は70~90度である場合が多かった。この結果は天然の観測<sup>10)</sup>と一致した。

3) 併合雪結晶の落下速度は同じ成長時間の単一結晶に比べて、10%以上速かった。

雪結晶の併合は雪片の形成だけでなく、天然の雪結晶の多様性を説明するのに重要であることが示唆された。

## 文 献

- 1) Pruppacher, H.R. and Klett, J.D. 1978 Microphysics of clouds and precipitation. D. Reidel Publishing Company, 714 pp.
- 2) Jayaweera, K.O.L.F. and Mason, B.J. 1965 The behaviour of freely falling cylinders and cones in a viscous fluid. *J. Fluid Mech.*, **22**, 709-720.
- 3) Uyeda, H. and Kikuchi, K. 1990 Formation mechanisms of twelve-branched snow crystals. *J. Meteor. Soc. Japan*, **68**, 549-556.
- 4) Takahashi, T., Endoh, T., Wakahama, G. and Fukuta, N. 1991 Vapor diffusional growth of free-falling snow crystals between -3 and -23°C. *ibid.*, **69**, 15-30.
- 5) Kajikawa, M. 1985 Structure and falling motion of early snowflakes. *Annals of Glaciology*, **6**, 269-271.
- 6) Kajikawa, M. and Heymsfield, A.J. 1989 Aggregation of ice crystals in cirrus. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3108-3121.
- 7) Fujiyoshi, Y. and Wakahama, G. 1985 On snow particles comprising an aggregate. *ibid.*, **42**, 1667-1674.
- 8) Higuchi, K. 1960 On the coalescence between plane snow crystals. *J. Meteor.*, **17**, 239-243.

- 9) Kobayashi, T. and Furukawa, Y. 1975 On twelve-branched snow crystals. *J. Crystal Growth*, **28**, 21-28.
- 10) 梶川正弘 1990 降雪粒子の観測. 第6回雪氷防災研究発表会講演予稿集, 13-19.
- 11) Nakaya, U. 1954 Snow Crystals. Harvard Univ. Press, 510 pp.
- 12) Kobayashi, T., Furukawa, Y., Kikuchi, K. and Uyeda, H. 1976 On twinned structures in snow crystals. *J. Crys. Growth*, **32**, 233-249.