

在新的楔形冰面热力扩散云室里 冰晶性能演变的研究*

王 昂 生

N. Fukuta

(中国科学院大气物理研究所, 北京) (美国 Utah 大学气象系)

摘 要

本文在新的楔形冰面热力扩散云室里, 利用确定的冰面过饱和度和温度场, 研究了冰晶增长性能的演变过程. 在分析中, 使用了冰晶基面最大尺度与棱面最大尺度之间的定量比值. 发现: 当冰面过饱和度大约高于 6% 时, 无论棱晶或平面冰晶的增长性能都主要由温度决定. 反之, 当冰面过饱和度低于上述值, 且温度低于 -10°C 时, 其冰晶性能演变实际上不是由温度决定的. 最后, 估算了 Wulff 冰晶条件, 即

$$\sigma_P/\sigma_B \approx 1.3 \sim 1.4.$$

一、引 言

在云物理学和人工影响天气的研究中, 最基本和最重要的问题之一是在不同环境条件下, 冰晶的增长及其形状的变化. 冰晶增长过程既与云和降水过程密切相关, 同时它们也影响云和降水的光、电以及辐射等性质. 在过去的四十年里, 很多知名的云物理科学家从事了冰晶增长的实验室研究, 并且获得了相当大的成绩.

冰晶增长的早期研究包括了 Nakaya (1938)^[1], Hanajima (1949)^[2], Nakaya (1951)^[3] 和 Hallett 及 Mason (1958)^[4] 等工作. 他们发现冰晶形状主要由温度和过饱和度决定. 遗憾的是, 这些资料都是定性的, 因此不可能从这些资料中获得其尺度随时间的变化. 在六十年代及七十年代里, Kobayashi (1961)^[5], Fukuta (1969)^[6], Lamb 和 Hobbs (1971)^[7], Yamashita (1974)^[8], Rottner 和 Vali (1974)^[9], Ryan 等人 (1974^[10] 和 1976^[11]), 用实验确定了很多有益的特征, 而且他们的某些资料还是定量的. 不过, 由于冰晶增长实验的困难, 我们对冰晶的增长及其形状变化的了解仍然是不够的.

在上述工作中, Kobayashi^[5] 所获得的结果常被人们引用. 他对在不同温度和冰面过饱和度和下冰晶增长性能作了分类, 然而由于缺少资料, 他的结果在低于水面饱和区里却是有缺陷的, 在 Kobayashi 工作的基础上, Pruppacher 和 Klett^[12] 在 1978 年, Pruppacher^[13] 在 1981 年进一步描述了冰晶增长规律; 不过, 他们的冰晶增长的性能分类尚需更多的资料支持.

本文 1983 年 10 月 7 日收到.

* 本工作是王昂生应邀赴美国 Utah 大学与 Fukuta 合作, 接受美国科学基金会给予资助的“冰晶基本规律研究”的一个主要结果.

从 1981 年以来, 我们利用一个新的楔形冰面热力扩散云室 (Fukuta 等^[14]1982), 在不同的冰面过饱和度(从 0 到 25%) 和不同温度(从 0 到 -30°C) 条件下, 研究了冰晶长时间(长于 50 分钟) 的增长过程. 该云室提供了稳定的环境条件, 我们可以精确地在云室里测量冰晶的三维尺度. 利用这一云室, 我们已经获得大约 4,000 个资料. 现将冰晶形状和尺度的主要分析结果介绍如下.

二、冰晶形状和特征的观测

我们所使用的新楔形云室的特点是: (1) 在持续稳定的温度条件下, 云室维持着恒定的过饱和度区. 温度可控制于 0 到 -30°C 之间, 冰面过饱和度值从 0 到 25%. (2) 在云室中, 有一个显微滑动摄影机构, 它可以使冰晶转动. 由于冰晶可以在此机构中旋转约 160° , 所以容易精确地测定它的三维尺度.

过去大多数冰晶增长的研究资料只提供了冰晶形状、温度和过饱和度之间的定性关系, 故它们难以用于定量研究. 为此, 在我们的分析中, 特地引入了一个以轴向比值 $2a/c$ 为基础的定量描述冰晶形状的新方案. 这里 $2a$ 是冰晶基面的最大尺度, c 是晶棱轴向的最大尺度. 众所周知, $2a$ 和 c 是冰晶形状和尺度的两个最重要的参量, 通常冰晶的增长性能可以用 $2a/c$ 值来表示. 按此 $2a/c$ 值, 我们把冰晶分为七类, 分别称为: 枝状冰晶或空间平面冰晶, 非常薄的平面冰晶, 薄的平面冰晶, 厚的平面冰晶, 棱晶, 长的棱晶以及针状冰晶. 在图 1 中, 我们给出

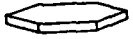
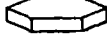
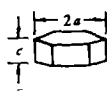
名 称	形 状	$2a/c$	代表符号
枝状或空间平面冰晶		$2a/c > 20$	*
非常薄的平面冰晶		$2a/c > 20$	—
薄的平面冰晶		$20 \geq 2a/c > 5$	○
厚的平面冰晶		$5 \geq 2a/c > 2$	□
棱 晶		$2 \geq 2a/c > 1$	△
长的棱晶		$1 \geq 2a/c > 0.1$	◇
针状冰晶		$0.1 \geq 2a/c$	!

图 1 定量描述冰晶的 $2a$ 与 c 比值、晶形、名称和代表符号

了七类冰晶的形状、名称、代表符号以及 $2a/c$ 值。十分清楚, $2a/c$ 比值是冰晶形状的指示值。当 $2a/c$ 值减少时, 冰晶就从非常薄的平面冰晶逐渐变向针状冰晶。在我们的定义里, 冰晶形状的确定仅仅决定于 $2a/c$ 值, 但是枝状或空间平面冰晶除外, 它们既取决于 $2a/c > 20$ 值, 也取决于它们的特殊形状。在冰晶增长研究中, 我们只需测量冰晶的 $2a$ 和 c 值, 并利用它们去客观地获得冰晶的形状和尺度, 从而避免了以前研究中的缺点。

在图 2 里, 我们给出了在不同环境条件下获得的六个典型的冰晶照片。图中 1 和 2 是针

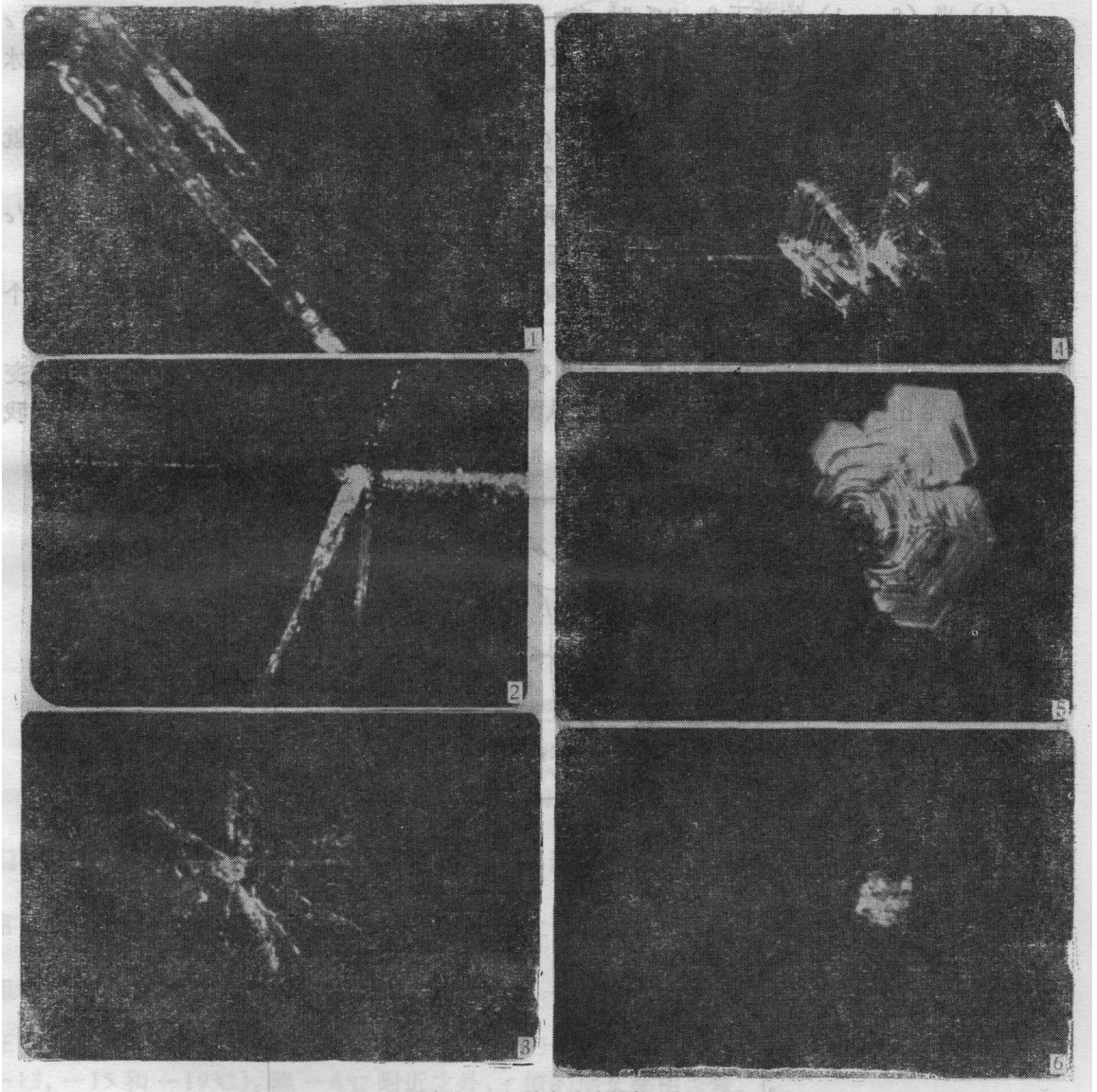


图 2 典型冰晶的照片

[增长时间为 50min. 1. 针状冰晶, $T = -6.1^{\circ}\text{C}$; $(S_i - 1) = 9.2\%$, $d_{\max} = 2,400\mu\text{m}$; 2. 针状冰晶, $T = -6.1^{\circ}\text{C}$, $(S_i - 1) = 9.3\%$, $d_{\max} = 4,000\mu\text{m}$; 3. 空间平面冰晶, $T = -16.8^{\circ}\text{C}$, $(S_i - 1) = 17.6\%$, $d_{\max} = 1,450\mu\text{m}$; 4. 非常薄的平面冰晶, $T = -16.5^{\circ}\text{C}$, $(S_i - 1) = 14.2\%$, $d_{\max} = 1,000\mu\text{m}$; 5. 薄的平面冰晶, $T = -13.1^{\circ}\text{C}$, $(S_i - 1) = 11.6\%$, $d_{\max} = 1,300\mu\text{m}$; 6. 棱晶, $T = -25.3^{\circ}\text{C}$, $(S_i - 1) = 19.3\%$, $d_{\max} = 260\mu\text{m}$]

状冰晶, 3 是一个空间平面冰晶, 4 是一个非常薄的平面冰晶, 5 是一个薄的平面冰晶, 最后, 6 给出的是一个空心棱晶。

三、冰晶尺度的演变和晶形分类

在图 3 里, 我们给出了在不同过饱和度条件下 $[(S_i - 1) = 1, 3, 6, 9, 12, 15 \text{ 和 } 18\%]$, 晶形随温度的变化。我们可以从图中发现冰晶形状和尺度有以下主要特征。

(1) 当 $(S_i - 1)$ 约高于 8—9% 时, 在 -15 到 -16°C 区里有 $2a/c$ 的极大值。在 $2a \gg c$ 的 -12 至 -21°C 温度区间里, 我们发现了枝状、空间平面、非常薄的平面及薄的平面冰晶。

(2) 当 $(S_i - 1)$ 约高于 6% 时, $2a \ll c$ 值的冰晶出现在 -2 和 -8°C 温度区间。这就意味着针状和长棱柱冰晶出现在这里。其中 $2a/c$ 的极小值是在 -5°C 时出现的。

(3) 在 $(S_i - 1)$ 值低于约 6—7% 时, 可以发现: 在 -15 到 -30°C 温度区间里, $2a/c$ 值约为 1.2 到 1.6 之间。这里冰晶增长的特征接近于 Wulff 理论^[12]。

(4) 在温度低于 -23°C , 而 $(S_i - 1)$ 高于 6% 时, 在 -25°C 附近, 我们发现了另一个不大的长棱柱冰晶区。

作为冰晶随时间增长的定量结果, 在图 4 里给出了不同温度情况下, $2a$ 随增长时间的变化; 图 5 则给出了 c 值随增长时间的变化。从图 4 里, 我们可以看到 $2a$ 值逐渐随时间增大。我

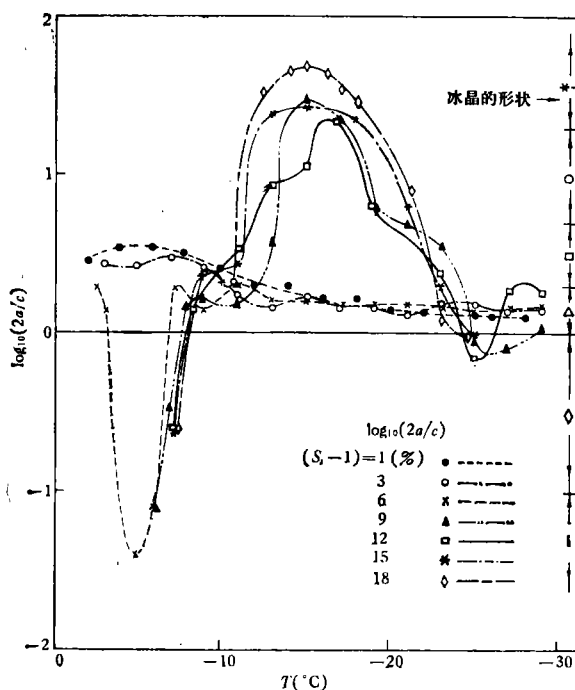


图 3 在不同冰面过饱和度 $[(S_i - 1) = 1, 3, 6, 9, 12, 15 \text{ 和 } 18\%]$ 条件下, 冰晶形状随温度的变化
(增长时间为 50 分钟)

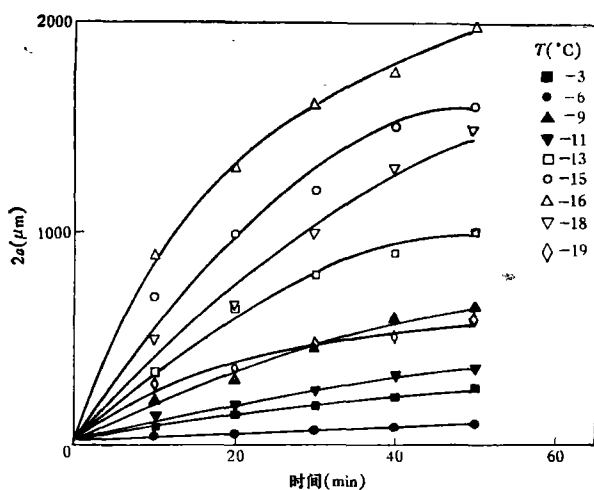


图 4 在水面饱和及不同温度 ($T(^{\circ}\text{C})$) 条件下, 冰晶 $2a$ 值随增长时间的变化

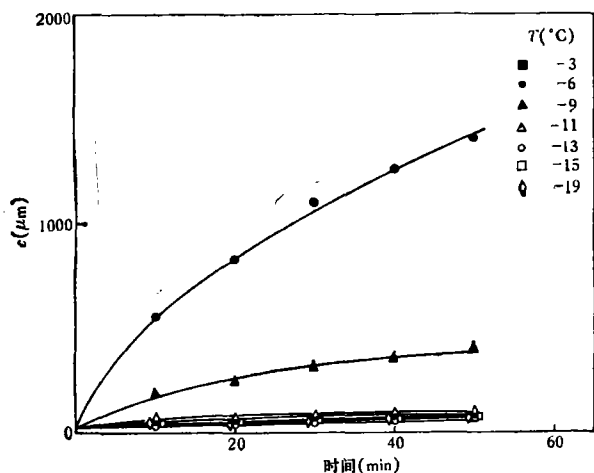


图 5 在水面饱和及不同温度 ($T(^{\circ}\text{C})$) 条件下, 冰晶 c 值随增长时间的变化

们在 -15 到 -16°C 附近发现 $\frac{d(2a)}{dt}$ 的极大值, 而在 -5 到 -6°C 附近看到它的极小值。通常, 冰晶增长的第一个 10 min 里, $\frac{d(2a)}{dt}$ 值是大于以后 10 min 的相应值的。类似地, 从图 5 里我们发现了 c 随时间增长的特征, 这就是: 在 -5 到 -6°C 附近发现了 $\frac{dc}{dt}$ 的极大值; 而在 -13 到 -19°C 区间里出现极小值。在图 5 的七个温度条件下 (即 -3 , -6 , -9 , -11 , -13 , -15 和 -19°C), 除 -6°C 附近之外, c 值的生长都相当慢。

四、若干定性观测

将图 1 的分类办法应用于实验资料, 在图 6 和图 7 里给出了所获得的冰晶增长的性能变化。从图 6 里, 我们发现在水面过饱和区里针状冰晶增长于 -4 和 -6°C 之间; 在水面过饱和

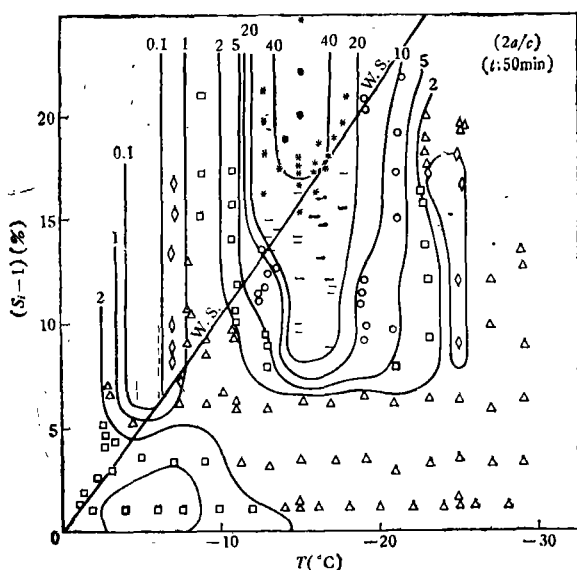


图 6 在温度-冰面过饱和度场里,冰晶形状的变化
(增长时间为 50min)

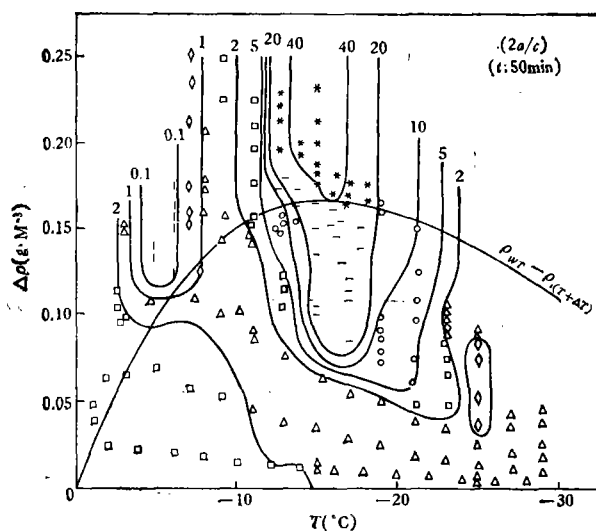


图 7 在温度-过饱和和水汽密度 ($\Delta\rho$) 场里,冰晶形状的变化
(增长时间为 50min)

区,枝状和空间平面冰晶主要出现于 -12 到 -19°C 区间;而非常薄的冰晶则在 $(S_i - 1) > 6\%$ 的较低过饱和区和相近温度区间出现。当温度从 -5 变到 -15°C 时,冰晶的形状则逐渐由针状转变为长棱晶,棱晶,厚的面晶及薄的面晶,并在低于水面饱和区里最后转化为非常薄的平面冰晶;或在 $(S_i - 1)$ 高于水面饱和区时,转变为枝状或空间平面冰晶。不过,当温度低于 -19°C 时,冰晶形状又向相反方向转换了。在我们的实验中,晶形是从薄的平面冰晶转变至

厚的平面冰晶,至棱晶直至长的棱晶,最后温度已接近 -25°C 。然而,我们没有再次发现针状冰晶。此外,除了在 0 到 -10°C 的 $(S_i - 1) = 4\%$ 区到 $(S_i - 1) = 0\%$ 的 -15°C 点范围内为厚的面晶外,当 $(S_i - 1)$ 低于 6% 时,各种温度下长成的冰晶均为棱晶。

我们在冰面过饱和度-温度场中发现的冰晶形状的变化,类似于其他研究者(例如 Nakaya^[3], Kobayashi^[5] 等)所获得的结果。不过,我们在低冰面过饱和区有大量的定量资料,而且拥有它们的时间演变定量资料。必须指出的是,由于使用的标准不同,将我们的结果与其他著者的资料比较时应考虑到这一点。

在低于水面饱和的冰面过饱和区里,我们的实验结果与其他著者的少量资料及推论是有所不同的。把资料置于温度-过饱和水汽密度场时(参见图 7),这是易于看出的。在 Hallett 及 Mason^[4], Kobayashi^[5], Pruppacher 及 Klett^[12] 以及 Pruppacher^[13] 的研究结果中,较低冰面过饱和区的资料是很少的。

五、定 量 结 果

我们的测量指出了 $2a/c$ 值随时间的变化,因此给出了 $\frac{d(2a)}{dt}$ 及 $\frac{dc}{dt}$ 随时间的变化。当然,它们是确定冰晶形状的因子。我们发现在云室里,冰晶形状的变化随着时间的增加而逐渐减缓。在 $(S_i - 1)-T$ 场里,冰晶初始增长时,任何地方的 $2a/c$ 值都接近于 1。但在增长的第一个 10 min 里, $2a/c$ 发生了显著的变化。大于 $2a/c = 20$ 的最大值,小于 $2a/c = 0.1$ 的最小值都出现了。此后, $2a/c$ 值继续演变。在图 6 里,我们给出了开始增长以后 50 分钟的 $2a/c$ 值。由图 6 可以看到, $2a/c$ 的极大值已大于 60 了,而且大于 20 的 $2a/c$ 值区也变得更宽。同时, $2a/c$ 的极小值也继续减少,但是其面积区只有少许变化。

当 $(S_i - 1)$ 低于 6% 时,约在 -12 到 -30°C 范围内有一个棱晶区 ($2 \geq 2a/c > 1$),其 $2a/c$ 值看来集中在 $1.3-1.4$ 附近。在低的过饱和度下的冰晶增长,可以认为是处于平衡态中增长的。因此, $2a/c \approx 1.3-1.4$ 的集中值应当是接近于平衡值的。对于平衡态冰晶而言,众所周知的 Wulff 理论是适用的^[12],即:

$$\frac{\sigma_P}{\sigma_B} = \frac{2a}{c}. \quad (1)$$

这里 σ_P 和 σ_B 分别为冰晶棱面和基面的表面自由能。因此可以得到:

$$\frac{\sigma_P}{\sigma_B} \approx 1.3-1.4.$$

我们必须特别指出的是: 从 -10 到 -25°C 的低冰面过饱和区里,我们的资料与其他著者的资料之间是有某些不同的。正如图 6 所示,我们看到在水面饱和区(W. S)和 6% 冰面过饱和度之间的区域里,冰晶形状主要由温度决定,这与以前的研究工作是一致的,如 -10 到 -20°C 之间为平面冰晶(包括非常薄的,薄的和厚的平面冰晶,即 $2a/c > 2$),而 -4 与 -8°C 间为棱晶。然而,当冰面过饱和度低于 6% ,且温度在 -10 到 -25°C 之间时,其晶形就不是由温度确定的了。我们十分有兴趣地注意到这个在 6% 的冰面过饱和度的转折,它是发生在低于或接近于水面饱和度时。这似乎意味着易逝的液水层的形成,会对改变冰晶形状发展的机制起作用。

六、结 论

从我们在新的楔形冰面热力扩散云室里所进行的冰晶定量增长的研究,可以得到以下的结果:

- (1) 为进行冰晶增长性能的定量分类,引入了 $2a/c$ 的定量值。
- (2) 当冰面过饱和度约高于 6% 时,冰晶增长性能基本上由温度决定;但低于此值且温度低于 -10°C 时,其增长性能实际上很少依赖于温度。
- (3) 对棱晶和平面冰晶而言,冰晶增长性能的演变都起始于 6% 的冰面过饱和度区附近。
- (4) 在低冰面过饱和度条件下, Wulff 冰晶增长条件为

$$\sigma_P/\sigma_B \approx 1.3-1.4.$$

致谢: 本工作是在美国国家科学基金会大气科学分部 (ATM 8004108) 资助下进行的研究的。

参 考 文 献

- [1] Nakaya, U. et al., *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, 2(1938), Ser. II, 1—11.
- [2] Hanajima, M., *Low Temp. Sci.*, A2(1949), 23—29.
- [3] Nakaya, U. et al., *Compendium of Meteorology*, AMS, Boston, 207.
- [4] Hallett, J. and Mason, B. J., *Proc. Roy. Soc.*, A247(1958), 440—453.
- [5] Kobayashi, T., *Phil. Mag.*, 6(1961), 1363—1370.
- [6] Fukuta, N., *J. Atmos. Sci.*, 26(1969), 522—531.
- [7] Lamb, D. and Hobbs, P. V., *ibid.*, 28(1971), 1506—1509.
- [8] Yamashita, A., *Kisho Kenkyu Note*, 123(1974), 47—94.
- [9] Rottner, D. and Vali, G., *J. Atmos. Sci.*, 31(1974), 560—569.
- [10] Ryan, B. F. et al., *ibid.*, 31(1974), 2126—2141.
- [11] ———, *ibid.*, 33(1976), 842—850.
- [12] Pruppacher, H. R. and Klett, J. D., *Microphysics of Cloud and Precipitation*, D. Reidel, Boston, 1978, 714.
- [13] ———, *Clouds, Their Formation, Optical Properties, and Effects*. Academic Press, N. Y., 93—186.
- [14] Fukuta, N. et al., Conference on Cloud Physics, AMS. November 15—18, 1982, Chicago, 329—332 (Pre-prints).