

冰晶增长规律的定量研究

王 昂 生

(中国科学院大气物理研究所)

N. Fukuta

(美国犹他大学气象系)

提 要

在分析研究已获得的冰晶增长规律的基础上,指出流行的 Kobayashi-Pruppacher 模式的不足和改进的必要。采用一个具有稳定环境、可在广阔范围获取资料并能取得冰晶三维信息的楔形冰面热力扩散云室,获得了大量定量资料。提出一种冰晶增长定量研究方法,首次在低冰面过饱和度和区取得大量完整的定量结果,它们表明 Kobayashi-Pruppacher 推论不太合理,指出 Wulff 冰晶增长区、晶形突变区及低冰面过饱和区冰晶增长的新特征。

一、引 言

在成云降水物理过程中,冰相粒子的演变具有举足轻重的地位。这是因为地球上多数云体的重要组成部分是各种类型的冰相粒子;全球主要形成降雨降雪和降雪的云体也是由云中冰相粒子开始产生及迅速增长的;云中冰相粒子的形成、撞冻、粘联和破碎等是雷暴闪电的重要起源;在大气辐射和大气光学中,云中冰相粒子 also 具有重要意义。

正因为冰相粒子的增长规律有其特殊的重要性,它已成为大气物理的一个基本问题,很多科学家在这一领域里进行了研究。例如, W. A. Bentley 和 W. J. Humphreys (1931), U. Nakaya (1954) 等研究了降于地面的自然冰雪晶,并分别出版了专著。自五十年代以来, H. K. Weickmann 和 H. J. Aufm Kampe (1950, 1953), A. Ono (1970), A. H. Auer, Jr. 和 D. L. Veal (1970) 等观测了不同云型的自然冰晶并获得大量有益的资料。三十多年来,为了更好地了解冰晶增长规律,科学家们完成了许多有成效的实验室研究,比如 M. Hanajima (1949), V. Nakaya (1951), J. Hallett 和 B. J. Mason (1958), T. Kobayashi (1961), D. Lamb 和 P. V. Hobbs (1971), D. Rottner 和 G. Vali (1974), N. Fukuta, G. D. Swoboda 和王昂生 (1982) 等从事的静力实验研究;又如, N. Fukuta (1969), Akira Yamashita (1974), B. F. Ryan 等 (1974, 1976), N. Fukuta, M. W. Kowa 和龚乃虎 (1982) 等人从事的动力实验研究都大大加深了对冰晶增长规律的认识。

在有关研究工作中,特别值得一提的是 T. Kobayashi 的工作。1961 年,他在前人工作的基础上 [例如 U. Nakaya (1951), J. Hallett 和 B. J. Mason (1958) 等],又从事了

部分低冰面过饱和实验,从而提出了以温度和过饱和水汽密度确定冰晶增长形态的著名模式。二十年来,这一模式在 N. H. Fletcher (1962), P. V. Hobbs (1974), D. Rottner 和 Vali (1974), Gonda Takeniko (1974), R. R. Rogers (1976), R. Laemann (1977), H. R. Pruppacher 和 J. D. Klett (1978) 以及 T. Kuroda 和 R. Laemann (1980) 等的论文或专著中都得到了广泛的承认和应用。Pruppacher 等人 (1978, 1981) 还对这一模式作了一些修改,更完善了这一工作。

然而必须指出,这一多年来为人们公认的 Kobayashi-Pruppacher 模式尚有以下不足之处: T. Kobayashi 实验条件较差,所得资料比较粗糙,它是一个定性结果,确定冰晶形状主要依据实验者的主观判定,缺乏划一的客观标准;特别是在低的冰面过饱和度区里, T. Kobayashi 只取得很少资料; H. R. Pruppacher 改进模式虽然增加了别人取得的一些资料,但其数量和质量都是远远不够的。上述问题,不少人也试图改进过,但由于各种困难,一直没有得到令人满意的结果。

二、实验云室及其特征

为改进这一工作,选用了—个楔形冰面热力扩散云室 (N. Fukuta, G. D. Swoboda 和 A. S. Wang, 1982) 进行实验研究。实验室由楔形云室、冰晶滑动机构、冷却系统、显微照相系统、温度监测及计算机等几大部分组成。楔形云室是这一实验装置的核心,它由上下两个长方形铜板构成楔形,两侧由透明有机玻璃密闭,另一楔形端亦为铜板,组成密闭楔形云室(见图 1)。进行实验时,上下铜板内侧附以冰层作为扩散源,楔形云室中央有一

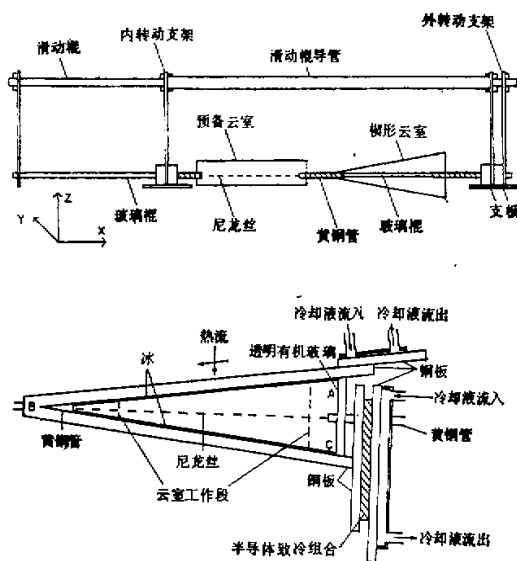


图 1 冰晶滑动装置(上)和楔形冰面热力扩散云室(下)示意图

尼龙细丝悬挂冰晶,云室右侧与冷却系统相连。这个系统的一个特点是装有一套冰晶滑动装置(见图1),它既可带动悬有冰晶的细尼龙丝左右移动,又可使尼龙丝旋转约 160° 。前者用来将播入预备云室的初始微小冰晶移入楔形云室在稳定条件下增长,后者也使增长的冰晶可以绕尼龙丝旋转,从而可拍摄到冰晶的三维尺度,这对定量研究十分重要。冷却系统由三个部分组成,一是楔形云室外的冷柜,它提供环境低温;二是液态冷却循环系统,它可提供 $+30^\circ\text{C}$ 到 -30°C 的恒温条件,它与楔形云室上下板面相联,使之温度可控;三是四对半导体致冷器,专与楔形云室下板面相联,以控制下板面低温,从而造成云室不同部位的温度不同及冰面过饱和度($S_i - 1$)不同,为冰晶增长提供有利条件。显微照相系统包括显微照相机、光源和照相机移动机构,它可以拍下楔形云室不同部位的冰晶增长情况。楔形云室上下板中心线上各布有三个热电偶温度计,它们的信息通过电转换器传入计算机,由计算机按程序给出楔形云室的温度场和冰面过饱和度场。

进行实验时,使系统运转,调试各冷却系统,直至获得稳定实验所需的温度-过饱和度条件时,才进行实验。首先在另一低温云室中用小塑料泡爆破法制造均一的小冰晶胚群,用吸管迅速引入图1上图的预备云室,再由滑动装置将落于尼龙丝上的冰晶移到楔形云室,由此计时并用显微照相系统观测摄影,获得冰晶增长的三维定量资料。实验要求冰晶是在周围没有其它冰晶的独立条件下增长。

这一云室具有以下特点而优于先前的装置:(1)具有稳定的环境场,连续工作1—2小时条件不变;(2)采用滑动装置和显微照相系统可以精确获得冰晶三维尺度,这是定量研究冰晶增长规律的重要基础;(3)在不同冰面过饱和度(从0到25%)和不同温度(从 0°C 到 -30°C)条件下,研究了冰晶长时间(多于50分钟)的增长过程。在上述条件下完成研究具有的特征是:在一广阔的温度-过饱和度场里,拥有随时间演变的冰晶定量增长资料,这就为改进 Kobayashi-Pruppacher 模式提供了基础。

三、在不同温度和冰面过饱和度条件下 $2a$ 的增长性能

众所周知,任何冰晶的基面最大尺度 $2a$ 和它棱面的高度 c 是决定冰晶形状的最基本参量。当 $2a \gg c$ 时,冰晶是很薄的平面冰晶;当 $2a \simeq c$ 时,它是一个棱柱状冰晶;而当 $2a \ll c$ 时,则它趋于冰针。下面我们对 $2a$ 和 c 的研究结果作些介绍。

首先给出在不同温度和冰面过饱和度条件下, $2a$ 随时间增长的特征。图2给出了冰面过饱和度为1%(上图)和3%(下图)条件下的研究结果。容易看出冰晶 $2a$ 值随时间是不不断变化的,尤以 -5°C 附近的峰值显著。如上图[($S_i - 1$) = 1%]时, $2a$ 值由播入时的20—30微米($t = 0$ 分时, $2a \simeq c$),到增长10分钟、30分和50分时,分别约为100,200和300微米。在低于 -10°C 以下的区域里 $2a$ 增长则不很突出,但 $2a$ 值也有倍增。就同一时刻 $2a$ 随温度的变化而言,可以在1%和3%的低过饱和度情况下看到,温度较高时, $2a$ 增长较快,其峰值分别出现在 -4°C 和 -6°C 。同时,可以看到在 -10°C 到 -30°C 区, $2a$ 值增长比较均一。

我们在图3和图4里,给出冰面过饱和度为5%,6%,9%和12%的类似结果。从图中不难看到, $2a$ 值随温度及时间的变化比较复杂。配合图2,我们先来看看同一温度

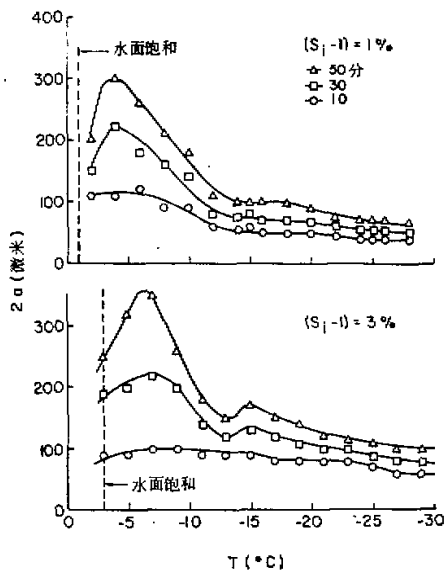


图2 在冰面过饱和度为1% (上) 和3% (下) 条件下, 冰晶基面最大尺度 $2a$ 在不同增长时间随温度的变化。

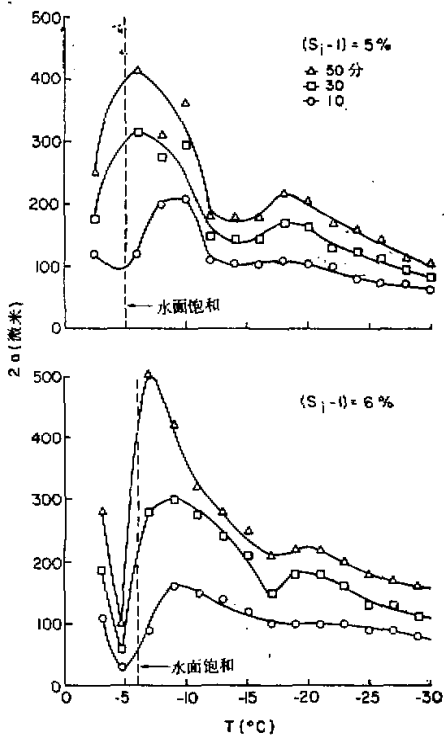


图3 在冰面过饱和度为5% (上图) 和6% (下图) 条件下, 冰晶基面最大尺度 $2a$ 在不同增长时间随温度的变化。

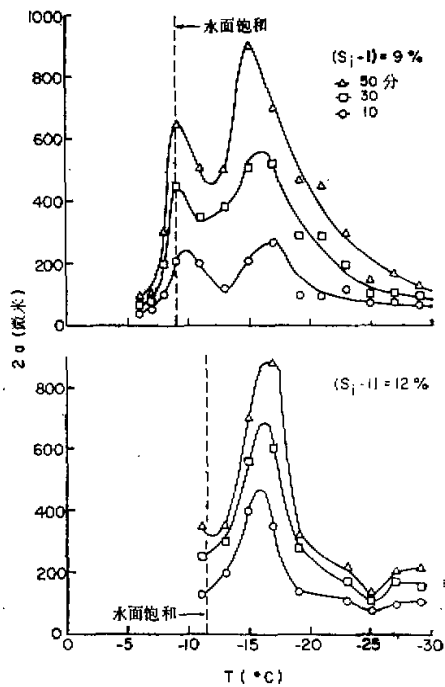


图4 在冰面过饱和度为9% (上图) 和12% (下图) 条件下, 冰晶基面最大尺度 $2a$ 在不同增长时间随温度的变化。

下,冰晶随时间及冰面过饱和度的变化。十分清楚,冰晶在各种条件下都随时间增长,但其增长值又随温度和过饱和度而异。从图2到图4,可以普遍看到, $2a$ 随时间而变化的增长率随冰面过饱和度值 $(S_i - 1)$ 的增大而加大。其次,可以发现温度对 $2a$ 增长的关系甚大,在不同 $(S_i - 1)$ 条件下, $2a$ 增长结果都有一个到两个峰值,且随 $(S_i - 1)$ 不同而变化。在 $(S_i - 1) = 1\%$ 时,峰值在 -4°C 处,随着 $(S_i - 1)$ 增大, $2a$ 峰值不断增大,并且出现峰值的温度区逐渐降至低温区;如 $(S_i - 1) = 6\%$ 时,峰值出现在 -7°C ,而 $(S_i - 1) = 9\%$,为 -16°C (主峰),及 -9°C (第二峰) 等等。此外还可以发现,在冰面过饱和度较低时,这个峰值出现在接近水面饱和温度的地方。由于当冰面过饱和度增大时,水面饱和温度也降低,所以对应 $2a$ 峰值出现的温度也降低。我们还可以注意到 $2a$ 随温度变化的双峰现象,如 $(S_i - 1) = 3\%$ 时,主峰在 -6°C ;在 -15°C 处还有一个很弱的次峰。随着 $(S_i - 1)$ 增大,双峰现象逐渐明显,在 $(S_i - 1) = 9\%$ 时就很明显了。以上表明,决定 $2a$ 增长中,温度、冰面过饱和度和时间起着重要作用,变化情况比较复杂。

四、在不同温度和冰面过饱和度条件下 c 的增长性能

对应于上一节的结果,我们在本节给出在不同温度和冰面过饱和度条件下 c 的增长

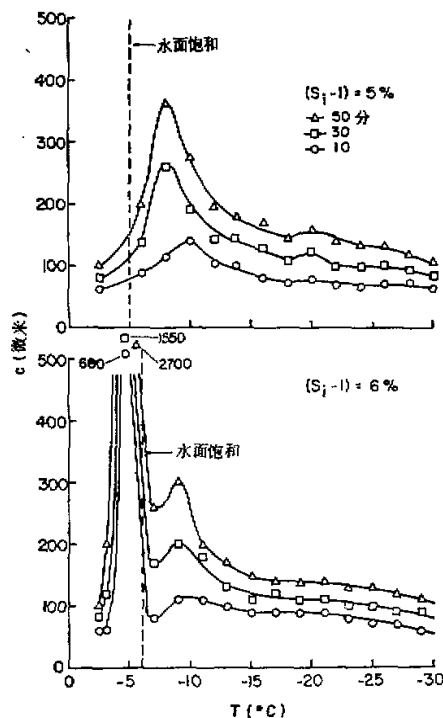


图5 在冰面过饱和度变为5% (见上图) 和6% (下图) 条件下, 冰晶表面高度 c 在不同增长时间随温度的变化。

性能。从冰面过饱和度为1%和3%条件下的研究结果(参见 Fukuta, N, G. D. Swoboda 和 A. S. Wang, 1982) 可见, c 值在各种温度下是比较均一的, 即随温度变化不大; 其次, 可以见到 c 值是随时间增长的, 但增值不大。然而, 这只是低冰面过饱和度的情况, 并不是 c 值的全貌。现在, 我们进一步给出冰面过饱和度 $(S_i - 1) = 5\%$ (图5, 上), 6% (图5, 下), 9% (图略) 以及 12% (图略) 的资料。由图可见, 在 $(S_i - 1)$ 值较高时, c 随温度、 $(S_i - 1)$ 以及时间而变化的情况也比较复杂了。首先, 在 $(S_i - 1) = 5\%$ 或 6% 时 (见图5), 温度低于 -10°C — -15°C 区, c 值仍然比较均一, 增长速度也较一致; 但在暖于 -10°C 的地方变化较大, $(S_i - 1) = 5\%$ 时, -8°C 处有一峰值, 在 50 分钟时仅为 350 微米; 但 $(S_i - 1) = 6\%$ 时有了突变, 在 -5°C 附近有一陡峭的峰区, 50 分钟峰值竟达 2700 微米, 可以认为此处具有有利于 c 值增长的条件, 可以导致 $c \gg 2a$, 产生冰针。当 $(S_i - 1)$ 继续增大时, 还可以看到 -5°C — -6°C 区附近的 c 值迅速增长区; 同时又在 -15°C 附近一带发现另一个 c 值增长的缓慢区, 这里 c 的最大值也约为 30—50 微米, 对比于 $2a$ 的峰值区, 则显然 $2a \gg c$, 是薄的平面冰晶。同时可以看到, 这个区域随着 $(S_i - 1)$ 值增大而有所扩大, $c \leq 100$ 微米的低值区就有约 15 度 (从 -10°C 至 -25°C) 宽, 而在 $(S_i - 1) = 9\%$ 则约为 10 度。上述资料表明, 较低冰面过饱和度区与较高冰面过饱和区内 c 值增长特点有所不同, 尤其是在 $(S_i - 1) = 6\%$ 附近开始的 -5°C 处 c 值增长的极大区及更高冰面过饱和度时, -15°C 附近的 c 值增长缓慢区更为突出。

五、冰晶增长的定量结果

基于上述研究, 我们有可能给出冰晶增长的定量结果。众所周知 $2a/c$ 可以作为确定晶形的重要参量, 所以我们在表 1 中给出定量确定冰晶形状的定义。由表可见这是一个客观判定晶形的标准, 只要确定了 $2a/c$ 就可以找到对应的冰晶, 但是枝状或空间平面冰晶是唯一例外, 它们除了要具备 $2a/c > 20$ 的定量条件外, 还应当根据其特有的枝状或空间平面冰晶分布来判别。

表 1 定量判定冰晶形状

名 称	$2a/c$	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	$5 \geq 2a/c > 2$	□
板状冰晶	$2 \geq 2a/c > 1$	△
长的板状冰晶	$1 \geq 2a/c > 0.1$	◇
针状冰晶	$0.1 \geq 2a/c$	!

现在我们将上述资料及更多的结果汇集于图 6。图中右侧纵坐标是 $\log(2a/c)$, 横坐标是温度, 右侧纵轴给出对应表 1 值的七种冰晶范围。图中给出七条曲线, 分别对应于冰面过饱和度 $(S_i - 1) = 1, 3, 6, 9, 12, 15$, 和 18%。该图对应于冰晶增长 50 分钟的结果。从这一定量研究资料, 我们可以得到以下结论:

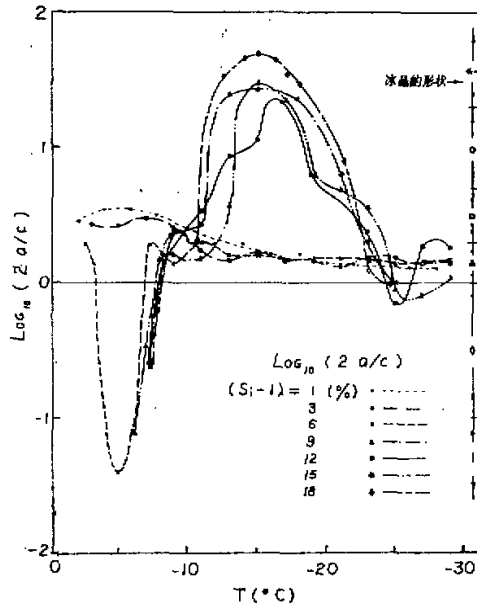


图 6 在不同冰面过饱和度条件下,冰晶增长的定量结果。

(1) 在低冰面过饱和度区 [($S_i - 1$) 低于 6%], 冰晶主要增大成棱晶或厚的面晶; 在低于 -10°C 的各种温度情况下, 基本长成棱晶, $2a/c$ 值介于 1 与 2 之间。

(2) 图中可见, 在低冰面过饱和度区, 温度低于 -10°C 或 -15°C 各种温度下的 $2a/c$ 值十分接近, 其值介于 1.2—1.6 之间, 这个数值接近于 Wulff 理论值(参见 Pruppacher 和 Klett, 1978)。也就是这里的冰晶是在接近准平衡态状况下增长的。

(3) 在冰面过饱和度 ($S_i - 1$) 为 6—8% 附近, 冰晶增长特征有了明显突变。如图 3 所示, ($S_i - 1$) = 6% 时, 在较暖温度区出现了 $2a/c$ 低值区; 在 ($S_i - 1$) 高于 6—8% 时, -12°C 到 -21°C 间的 $2a/c$ 极大值区也很突出, 这一突变对晶形变化影响甚大。

(4) 资料表明, 在 -5°C 附近的较高温度区里, 出现了一个 $2a/c$ 的极小值区。当 ($S_i - 1$) $\geq 6\%$ 时, 这里出现长的棱状冰晶和冰针。就我们的全部资料而言, 仅仅在这一条件下发现了冰针。

(5) 一个宽阔的峰值区出现在图 6 上部, 薄的平面冰晶, 非常薄的平面冰晶以及枝状或空间平面冰晶出现在这里。其温度范围为 -12°C 到 -21°C , 冰面过饱和度则高于 7—8%。而且当 ($S_i - 1$) 值越高时, $2a/c$ 值愈大, 温度域也略增大。

(6) 此外, 我们可以在图的右侧, -25°C 区附近, 发现另一个不大的长棱柱冰晶区, 其 ($S_i - 1$) 大于 6—7%。从图中 -15°C 的峰值向两侧变化时, 可以看到近乎对称的晶形变化。左侧高温部分从非常薄的平面冰晶等逐渐过渡到长棱晶及冰针; 而右侧低温部分则从非常薄的平面冰晶等逐渐过渡到棱晶及长的棱晶, 但没有发现冰针。

最后, 我们把冰晶增长到第 50 分钟的所有 $2a/c$ 结果置于与 Kobayashi-Pruppacher 模

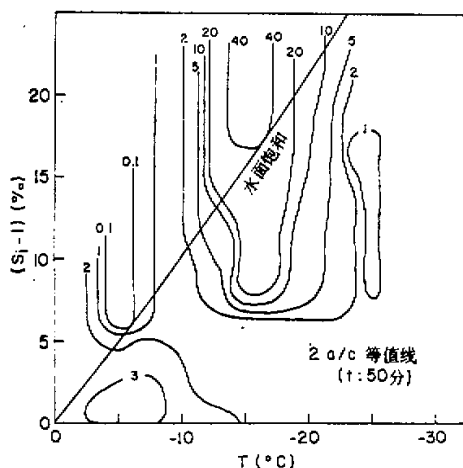


图7 在温度-冰面过饱和度场里的冰晶定量结果(冰晶增长时间为50分钟)。

式相类同的温度-冰面过饱和度场上, 获得图7所示的结果。作为一个比较, 以下我们将指出本研究与 Kobayashi-Pruppacher 模式的相同和不同之处, 可以看到我们研究的新进展。

① 本研究采用了表1所示的定量化标准, 获得了全部定量化的冰晶增长结果, 从而使温度-冰面过饱和度场中确定冰晶形状研究客观化、定量化。

② 在水面饱和以上区域中, 根据我们定量值与以前定性资料作拟合比较, 表明在这些部分里, 我们与 Nakaya (1951), Hallatt-Mason (1958), Kobayashi (1961), Pruppacher (1978, 1981) 等人的结果是一致的。

③ 在以前很少获得资料的水面饱和以下低冰面过饱和区里, 我们获得上千个定量资料, 它们提供了揭示这里增长规律的基础。研究表明, 这里冰晶增长规律不是简单地由 Kobayashi-Pruppacher 模式所述, 由温度和过饱和和水汽密度所决定的。资料表明, 温度仍然是一个重要因素, 但决定晶形的因子较为复杂。

④ 在水面饱和以下区域中, 当 $(Si-1)$ 低于6%时, 基本为棱晶和厚的面晶, 多数区域接近于 Wulff 棱晶增长理论。当 $(Si-1) = 6-8\%$ 时, 晶形有个突变区, 其上晶形主要由温度确定, 如 -15°C 附近长成非常薄的平面冰晶, -25°C 周围为长的棱晶等等。

⑤ 综观图7, 可以得到以下结论, 在温度-冰面过饱和度场中, 冰晶增长稳定后, 可以在 $(Si-1) = 6-8\%$ 以上发现两个极值中心, 即 -5°C 周围为冰针极小值区及 -15°C 周围的非常薄平面冰晶(水面饱和以下)成枝状和空间平面冰晶(水面饱和以上)极大值区。从 -5°C 降温至 -15°C 时, 则晶形逐渐经历长棱晶、棱晶、厚面晶、薄面晶而分别达极大值区晶形。当温度继续降低时, 则又沿相反顺序出现不同晶形, 直至 -25°C 附近的长棱晶, 而没有再发现冰针。

综上所述, 这一研究工作在指出著名的 Kobayashi-Pruppacher 模式不足之后, 经过大量研究而获得了冰晶增长规律的定量结果。它们不但弥补了以往工作之不足, 还提出了

定量化、客观化的新成果,指出了若干新现象,使人们对冰晶增长规律有了更深入一步的认识。

参 考 文 献

- [1] Auer, A. H. Jr and D. A. Veal, The dimension of ice crystals in natural clouds, *J. Atmos. Sci.*, 27, 919—926, 1970.
- [2] Bentley, W. A. and W. J. Humphreys, 1931. Snow crystals. New edition, 1962, Dover Publications, Inc., New York, 226.
- [3] Fletcher, N. H., The Physics of Rainclouds, The Cambridge University Press, 386, 1962.
- [4] Fukuta, N., Experimental studies on the growth of small ice crystals, *J. Atmos. Sci.*, 26, 522—531, 1969.
- [5] Fukuta, N., G. D. Swoboda and A. S. Wang, 1982, Experimental and theoretical studies of ice crystal habit development, Conference on Cloud Physics, AMS. Nov. 15—18, 1982, Chicago 329—332.
- [6] Fukuta, N., M. W. Kowa and N. H. Gong, 1982, Determination of ice crystal growth parameters in a new supercooled cloud tunnel, Conference on Cloud Physics, AMS. Nov. 15—18, 1982, Chicago, 325—328.
- [7] Gold, L. W. and B. A. Power, Correlation of snow-crystal type with estimated temperature of formation, *J. Meteor.*, 9, 447, 1952.
- [8] Hallett, J. and B. J. Mason, The influence of temperature and super saturation on the habit of ice crystals grown from the vapour, *Roc. R. Soc.*, A247, 440—453, 1958.
- [9] Hanajima, M., On the growth conditions of man-made snow, *Low Tem. Sci.*, A2, 23—29, 1949.
- [10] Hobbs, P. V., Ice Physics, Oxford University Press, 827, 1974.
- [11] Kobayashi, T., The growth of snow crystals at low supersaturation, *Phil. Mag.*, 6, 1363—1370, 1961.
- [12] Kuroda, T. and R. Lacmann, Growth kinetics of ice from vapour phase and its growth forms. International Conference on Cloud Physics, France, July 15—19, 109—112, 1980.
- [13] Lacmann, R., Zur Deutung der wachstumsformen des Eises Zenschrift für Physikalische Chemie Neue Folge, *Z. Physik. Chem.*, (N. F.), Bd. 104, 1, S, 1—9, 1977.
- [14] Lamb, D. and P. V. Hobbs, Growth rates and habits of ice crystals grown from the vapor phase, *J. Atmos. Sci.*, 28, 1506—1509, 1971.
- [15] Mason, B. J., The Physics of Clouds, Oxford at the clarendon Press, 481, 1957.
- [16] Nakaya, U., The formation of ice crystals. Compendium of Meteorology, Amer. Met. Soc., Boston, 207, 1951.
- [17] Nakaya, U., Snow Crystals, Harvard University Press, 510, 1954.
- [18] Ono, A., Growth model of ice crystals in natural clouds, *J. Atmos. Sci.*, 27, 649—658, 1970.
- [19] Pruppacher, H. R., The microstructure of atmospheric clouds and precipitation. Cloud, Their Formation, Optical Properties and Effects, Academic Press, 93—186, 1981.
- [20] Pruppacher, H. R. and J. D. Klett, Microphysics of Clouds and Precipitation, D. Reidel, 714, 1978.
- [21] Rogers, R. R., A Short Course in Cloud Physics, Pergamon Press, 227, 1976.
- [22] Rottner, D. and G. Vali, Snow crystal habit at small excesses of vapor density over ice saturation, *J. Atmos. Sci.*, 31, 560—569, 1974.
- [23] Ryan, B. F., E. R. Wishart and E. Holroyd, III, The densities and growth rates of ice crystals between -5°C , and -9°C , *J. Atmos. Sci.*, 31, 2136—2141, 1974.

- [24] Ryan, B. F., E. R. Wishart and D. E. Shaw, The growth rates and densities of ice crystals between -3°C and -21°C , *J. Atmos. Sci.*, **33**, 842—850, 1976.
- [25] Takehiko, Gonda, Experimental studies on the growth of snow crystals, Kisho Kenkyn Note, **123**, 95—118, 1974.
- [26] Weickmann, H. K. and H. J. Aufm Kampe, Preliminary experimental results concerning charge generation in thunderstorms concurrent with the formation of hailstones, *J. Meteor.*, **6**, 404, 1950.
- [27] Weickmann, H. K., Physical properties of cumulus clouds, *J. Meteor.*, **10**, 204, 1953.

THE QUANTITATIVE STUDIES ON THE GROWTH LAW OF ICE CRYSTAL

Wang Angsheng

(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica*)

N. Fukuta

(*Department of Meteorology, The University of Utah, U. S. A.*)

Abstract

On the basis of analysis and study for growth law of ice crystal, the inadequacy of Kobayashi-Pruppacher model is pointed out in the paper; and we think that it is necessary to improve. A new wedge-shaped ice thermal diffusion chamber which has stable environmental conditions, can get data in wide range and can measure three-dimensional sizes of ice crystal has been used, and we got a great number of quantitative data. A quantitative research method of ice crystal growth is preseted and the complete and quantitative results in lower ice supersaturation region are obtained. Our works point out some new characteristics of ice crystal growth in Wulff ice crystal growth region, sharp changing region of ice crystal form and lower ice supersaturation region, in which the inadequacy of Kobayashi-pruppacher model is shown.