

静止空気中で燃焼させたよう化銀コンボジットの 有効氷晶核数の測定

八 木 鶴 平

国立防災科学技術センター第1研究部異常気候防災研究室

A Measurement of the Effectiveness-Temperature Relationship for the AgI Composite Developed by the NRCDP

By

Tsuruhei Yagi

National Research Center for Disaster Prevention, Tokyo

Abstract

The number of effective ice-nuclei per gram of AgI from the NRCDP silver iodide composite was measured by the sugar solution method. A small amount of the composite was burnt in a 1-m³ polyethylene bag, with a successive static dilution of a factor of 5,000 by a syringe. It was found that about 10¹² effective nuclei were produced at the temperature of -10°C, 10¹³ at -15°C and 5 × 10¹³ at -20°C, with a relatively weak dependency on temperature. This may suggest that the particles produced in a stagnant air are considerably larger in size than expected in the case of an in-flow combustion, which could prevent an effect of coagulation. The two-stage seeding rocket loading the composite with 200 g of AgI will, after the cutoff of the booster, introduce nuclei as exhaust into a cloud along its flight path. A higher efficiency could therefore be expected in case of actual cloud seeding than that obtained here in a calm state.

1. ま え が き

国立防災科学技術センター気象調節研究グループでは、降ひょう抑制実験の種まき手段として、よう化銀散布機を開発してきた。二段式ロケットで頭部に 400 g のよう化銀コンボジットを積載している。地上より発射され、ブースターを切離した後、頭部は弾道飛行をしながらよう化銀コンボジットを燃焼させ、排気として雲中によりよう化銀散布を行なう。最高到達高度は 85° で約 6,500 m である。

コンボジットの組成は、よう化銀 50%、硝酸カリウム 34% 及びほう素 16% である。

一般に有効氷晶核の計数は、実際の燃焼散布状態に近い条件で、コンボジットを燃焼させて測定するのが望ましいが、今回は予備的な計測として静止空気中で燃焼させたものについて

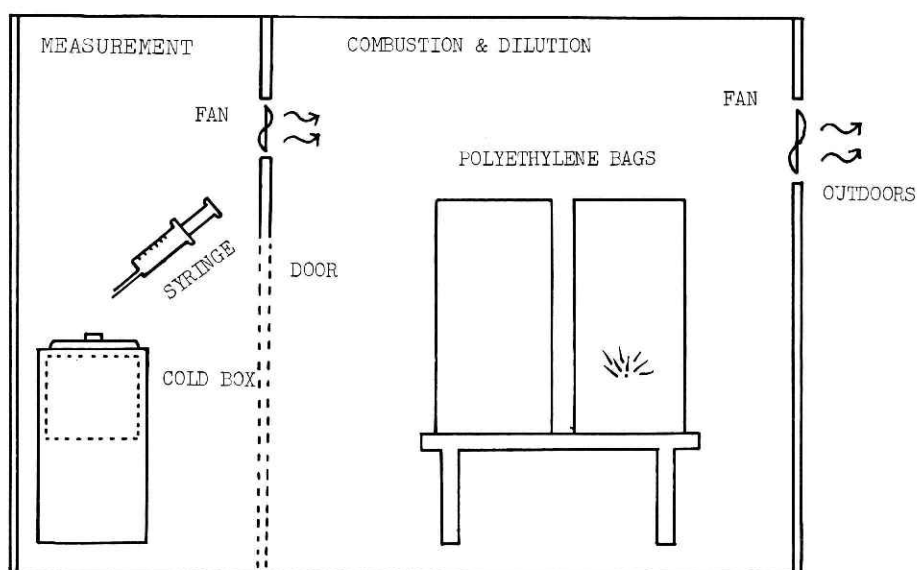


Fig. 1. The scheme of the experimental system. Combustion of the AgI composite was made in a 1-m³ polyethylene bag, and the smoke of 200 cc was diluted by injecting into a next bag. A sample of 200 cc from the second bag was introduced into a supercooled fog in a freezer so as to count the number of ice crystals fallen out by the sugar solution method.

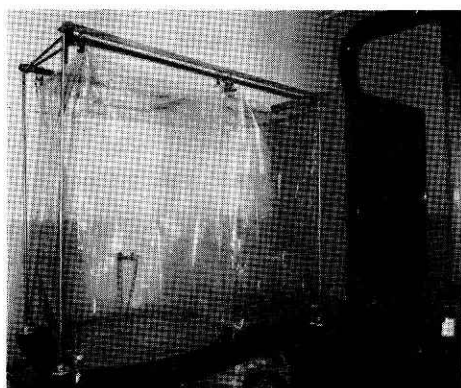


Photo 1. Polyethylene bags after an experiment.

て、おおまかな測定を行なった。

2. 測定方法

図1の燃焼希釈室の実験台上にやぐらを組み、容積約1m³ (82×82×150 cm) のポリ袋を2袋設け、一方を燃焼袋、他方を希釈袋とした。写真1は、実験終了後のポリ袋の様子を示す。戸を隔てた測定室には、容積約130 l (54×54×46 cm) の商用冷凍庫を設け、砂糖溶液法による測定そうとした、両室内の空気

は、測定中矢印の方向に換気された。また燃焼希釈室に試料採集後の残った燃焼気体、希釈気体を戸外高く捨てるため、ダクトを設けてある。実験室内の空気の汚染を少なくするためである。

よう化銀散布機に積載しているコンポジットは固形だが計測に用いた試薬は、固める前の粉末である。これを葉包紙に包みニクロム線を巻いて、燃焼袋の中で点火した。試薬は化学てんびんで計量し、測定温度により、十数 mg から百数十 mg まで加減した。燃焼に際しては、燃焼生成物が速やかに拡散し、袋の中で均一な濃度になるよう、袋はあらかじめ容積の

表 1 砂糖溶液濃度

測定温度	成 分 比	
- 5°C	砂糖 60 g,	水 100 g
-10°C	砂糖 80 g,	水 100 g
-15°C	砂糖 130 g,	水 100 g
-20°C	砂糖 130 g, グリセリン 16 g,	水 100 g
-25°C	砂糖 130 g, グリセリン 27 g,	水 100 g

200 cc の注射器に引き隣の希釈袋に注入した。同じく送風機で定容積とし、更に外部よりよくかきまぜた。3分たった希釈気体を 200 cc の注射器で採集し、有効氷晶核計数のための試料とした。

氷晶核の計数は砂糖溶液法によった。使用した砂糖濃度は温度により表 1 のとおりである。過冷却霧は呼気により供給した。3~4 回の吹込みで底まで充滿した。温度については、棒状温度計を図 2 のように底から 5, 17, 30 及び 40 cm の高さに置き、呼気を吹込む前の値と種まき後氷晶が降下した後の値、計 8 個の読取値を平均して、その計数に対する活性化温度とした。図に示すような位置に砂糖溶液を入れたシャーレを 4 個並べ、成長した氷晶を写真記録し、単位面積当りの数を出し、4 個の値を平均した。大体 $2\sim6$ 個/cm² ぐらいになるようよう化銀コンボジットの燃焼量を加減した。冷凍庫の内壁はビロード張りにしグリセリンを塗布して霜を防いだ。庫壁の冷却による

下降気流は 1~2 cm の薄い層に起こることが観察される。シャーレはこの層より離れたのでほとんど影響はなかった。むしろ種まきの時の注射器の噴射の方向にやや多く庫底の落

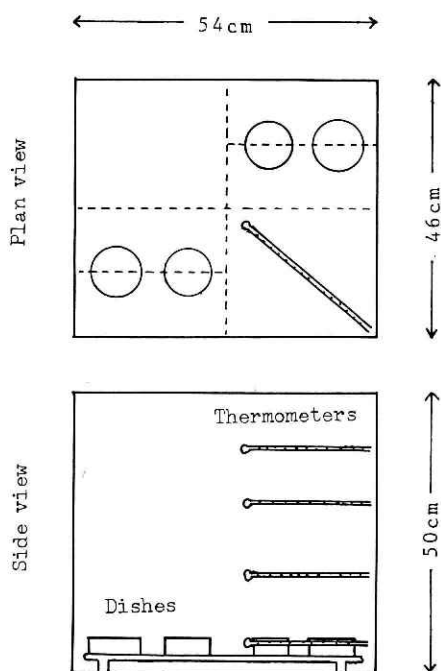


Fig. 2. Arrangement of sugar solution dishes and thermometers in the freezer.

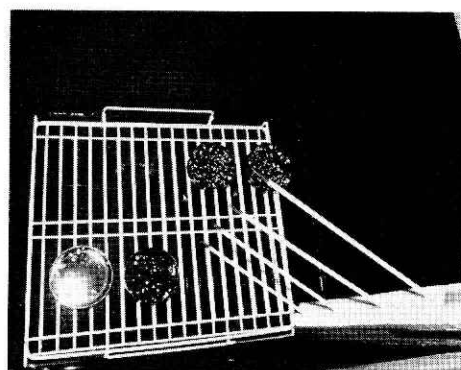


Photo 2. An example of ice crystals grown in the solution. 1.4×10^{13} particles per g of AgI was produced at a temperature of -12.8°C from a 20.0-mg pinch of the composite.

下水晶密度のかたよりが見られた。庫内温度の設定は、予定した測定温度以下にいったん下げて冷却を止め、再びその温度に自然上昇させた。砂糖溶液の冷却の遅れを補うためである。溶液の温度はサーミスタ温度計で測定した。

測定順序は、庫内温度及び溶液温度がおおむね測定予定温度に近くなった時、あらかじめ準備しておいた燃焼袋内の試薬に点火し、前述の手順で 200 cc の試料を作る。この間約 6 分で、その後庫内温度を検温し、過冷却霧を作る。次に試料をまく。この間 1 分強、したがって試料の希釈気体は、1 分と少しの間 200 cc 注射器の中に貯留されている訳である。試料を注入すると、高い温度で数十秒後、低い温度で数分後には落下した氷晶がシャーレ中で成長を始め、1~2 分から 5~6 分で写真に撮れて数えられる大きさになる。種まき後しばらくして再度 4 本の温度計を読み取る。最下部と最上部の温度の差は 1.5°C 以内、過冷却霧を作る前と種まき後の温度差は 1.0°C 以内であった。

写真 2 はシャーレ内の氷晶成長例を示す。燃焼させたよう化銀コンボジットは 20.0 mg、測定温度は -12.8°C である。種まき後 1 分弱の状態である。有効氷晶核数は 1.4×10^{13} 個/g AgI であった。最も左のシャーレの器壁に大きな樹枝状結晶がみられる。これは落下氷晶が溶液表面で成長する以前に発生していたもので、計数の際、あまり広い面積にわたり発達していない限り、コロノメーターで補正してそのシャーレも有効とした。やや中央よりのハレーションはこの写真撮影のためのストロボである。計数のための撮影記録は各シャーレ別々に庫外で行なった。

3. 測定結果

このような方法で -5°C から -23°C までの間で約 60 回の測定を行なった。このうち、試薬の燃焼希釈中に砂糖溶液の温度が下がりすぎて結氷してしまったりあるいは燃焼試薬の量が多すぎて過剰に種まきして数えられなかったり等実験操作上うまく機能が發揮できなかった場合を除いて、20 例をプロットしたのが図 3 の白丸印である。横軸は測定温度で -4° ~ -24°C 、縦軸はよう化銀 1 g 当りの有効氷晶核発生数で $10^9 \sim 10^{15}$ 個を目盛ってある。10 度核はよう化銀 1 g 当り 10^{12} 個、15 度核で 10^{13} 個、20 度核で 5×10^{13} 個程度であった。参照のため図 4 に J. Simpson *et al.* (1970) の測定結果を示す。これらはパイロテクニクス型の氷晶核発生試薬を風洞で燃焼希釈させて計数した値であり、計数方法も異なる。したがって厳密な比較評価は意味をなさないが、おおむねの傾向として、(i) -10°C より高い温度ではだいたい同じ氷晶核発生数を示し、(ii) -12°C でわれわれの試薬は Simpson *et al.* より 1 オーダー低く、(iii) それより開きは大きくなり -20°C では 2 オーダー近く低くなっているということがいえる。これは計数方法の違いもあるが、主として Sano *et al.* (1956) の実験あるいは Fletcher (1959) の理論から、われわれの計数に準備した燃焼希釈試料が比較的大きな燃焼生成粒子で構成されていたといえるだろう。実際われわれのよう化銀コンボジッ

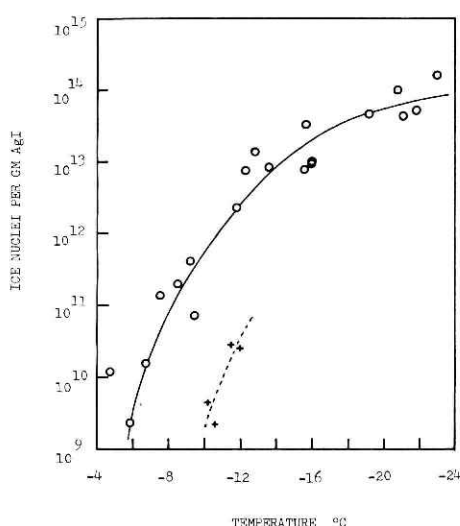


Fig. 3. Solid line indicates the measured effectiveness against temperature with a static dilution. Dotted line shows the case without any dilution.

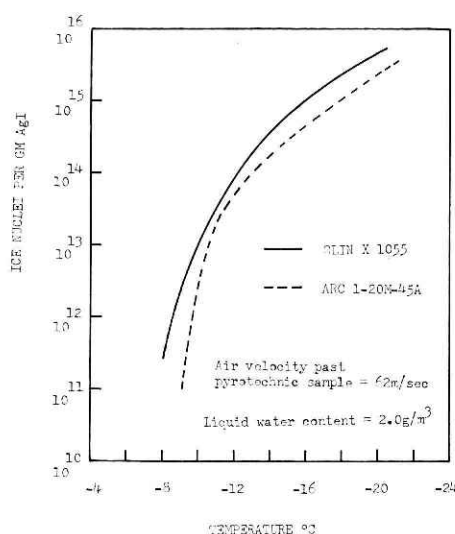


Fig. 4. A measured value of J. Simpson *et al.* (1970) by dynamic dilution (compare with the author's).

トを静止空气中で点火すると、その煙はよう化銀特有の黄色を呈するのがわかる。これは煙を構成する粒子群が可視光線の波長あるいはそれ以上の大きさのよう化銀粒子を多量に含むということで、静止空气中ではあまり効率の良くないこと、すなわち図3白丸印程度の効率であることを示している。ちなみに図3プラス印は、希釈をしないで、燃焼袋から直接過冷却霧に種まきした場合の例である。希釈を経た白丸印の測定結果と比べて約2オーダー低い値で、主として濃度の高い状態で注射器内に貯留したための凝集によると考えられる。このように燃焼及び希釈の方法がみかけの効率に大きく影響を与えることがわかる。しかしよう化銀散布機で天然の雲中に散布する場合は、よう化銀を積載した頭部は空気と相対的な速度を持ちその飛跡にまくので、気流中の燃焼散布になる。この場合、冷却拡散が速やかに行なわれれば、凝集が極端に避けられ生成粒子の粒径分布は、今回静止空气中で燃焼希釈した粒子のそれより、かなり小さい方へ寄るはずであると考えられる。その結果有効氷晶核の効率曲線は、全体として上がり、その傾きは立ってくるだろう。このことを実証するには、固形核種の効率測定用の燃焼希釈風洞で計測を行なわなければならない。とまれ、今回の測定値より、気流中で燃焼させた場合に期待される効率の方が下まわることはないと考えられ、図3はわれわれの開発したよう化銀コンボジットがかなりの効率を期待できるであろうことを示すものと考えてよい。

今後、気流中での燃焼による発生氷晶核の計測、及びより有効な固形核種の開発が望まれる。

最後に、この測定にあたっては、国立防災科学技術センター第2研究部の方々に様々な実験上の便宜を図っていただいた。記して謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) Fletcher, N. H. (1959): On ice-crystal production by aerosol particles. *J. Meteor.*, **6**, 173—180.
- 2) Sano, I., Y. Fujitani and Y. Maeno (1956): An experimental investigation on ice nucleating properties of some chemical substances. *J. Meteor. Soc. Japan*, II, **34**, 104—110.
- 3) Simpson, J., W. L. Woodley, H. A. Friedman, T. W. Slusher, R. S. Scheffee and R. L. Steele (1970): An airborne pyrotechnic cloud seeding system and its use. *J. Appl. Meteor.*, **9**, 109—122.

(1972年10月2日原稿受理)