

対 外 報 告

# 渇水対策・沙漠化防止に 向けた人工降雨法の推進



平成20年（2008年）1月24日

日 本 学 術 会 議

農学基礎委員会農業生産環境工学分科会

この対外報告は、日本学術会議農学基礎委員会農業生産環境工学分科会の審議結果を取りまとめ公表するものである。

# 日本学術会議農学基礎委員会農業生産環境工学分科会

|      | (氏名)          | (職名)                                  |
|------|---------------|---------------------------------------|
| 委員長  | 真木 太一 (第二部会員) | 琉球大学農学部教授、九州大学名誉教授、九州大学大学院農学研究院学術特任教員 |
| 副委員長 | 橋本 康 (連携会員)   | 愛媛大学名誉教授                              |
| 幹事   | 奥島 里美 (連携会員)  | (独) 農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所上席研究員       |
| 幹事   | 三野 徹 (連携会員)   | 京都大学名誉教授、岡山大学名誉教授                     |
|      | 野口 伸 (第二部会員)  | 北海道大学大学院農学研究院教授                       |
|      | 青木 正敏 (連携会員)  | 東京農工大学大学院共生科学研究院教授                    |
|      | 礪田 博子 (連携会員)  | 筑波大学大学院生命環境科学研究科北アフリカ研究センター教授         |
|      | 大政 謙次 (連携会員)  | 東京大学大学院農学生命科学研究科教授                    |
|      | 後藤 英司 (連携会員)  | 千葉大学園芸学部教授                            |
|      | 鈴木 義則 (連携会員)  | 九州大学名誉教授                              |
|      | 高辻 正基 (連携会員)  | 東海大学開発工学部教授                           |
|      | 野並 浩 (連携会員)   | 愛媛大学農学部教授                             |
|      | 橋口 公一 (連携会員)  | 第一工業大学教授、九州大学名誉教授                     |
|      | 早川 誠而 (連携会員)  | 山口大学農学部教授                             |
|      | 村瀬治比古 (連携会員)  | 大阪府立大学大学院農学生命科学研究科教授                  |
|      | 山形 俊男 (連携会員)  | 東京大学大学院理学系研究科教授                       |

分科会の審議において、以下の方々にご協力いただきました。

|       |                |
|-------|----------------|
| 脇水 健次 | 九州大学大学院農学研究院助教 |
| 西山 浩司 | 九州大学大学院工学研究院助教 |
| 鈴木 賢士 | 山口大学農学部准教授     |
| 川野 哲也 | 九州大学大学院理学研究院助教 |

## 要 旨

### 1. 作成の背景

人工降雨法は、我が国はもとより世界の多くの国々の干害・渇水対策、および世界の 1/3 を占める乾燥地における地球規模の沙漠化防止、沙漠緑化の実現に極めて有効な技術・方策であると考えられる。本報告は、幾つかの人工降雨法の広範囲な研究を推進し、実用化、普及に向けての種々の対応策について、提言を取りまとめたものである。

### 2. 現状及び問題点

近年、地球温暖化、異常気象が懸念される中で、2005 年に西日本では干害と風水害の両極端の気象災害が発生し、渇水対策に人工降雨実施が検討されたが、不測の大雨で中止となった。一方、世界的には干害・渇水対策と沙漠化防止・沙漠緑化が不可欠であり、その具体策として幾つかの人工降雨法が浮上する中で、技術的および社会・経済・政治的な制約で、普及し得ない問題がある。

### 3. 対外報告の内容

日本学術会議農学基礎委員会農業生産環境工学分科会は、我が国および世界の干害・渇水対策、沙漠化防止、沙漠緑化に向けて、研究・政策の方向性を検討してきた結果、人工降雨法の現段階におけるガイドラインの確立が緊急を要する、との結論に至った。

以下の 3 項目を中心に、早急に対策を構築すべきことを、内閣府・国土交通省・農林水産省・文部科学省・環境省・経済産業省・外務省および都道府県を中心とする国公立試験研究・行政機関、大学ならびに関連学協会に提言する。

- (1) 人工降雨法に関する国内外のデータベースを構築し、ヨウ化銀・ドライアイス・散水・液体炭酸法等の現状とその特性を理論的・実験的に比較検討して究明する。特にドライアイス法と液体炭酸法に対しては同条件下で比較実験を行い、国内外の実験結果との比較に基づいて最適人工降雨法を確立する必要がある。
- (2) 国内外の人工降雨法の実験結果を参考に、国内・国際共同実験によって人工的な降水に至る雲物理的反応を科学的・総合的に評価し、物理的降水形態・降水密度の評価法および費用対効果の評価法を確立し、実用・普及への技術手順に関する指導書（マニュアル）を作成する。
- (3) 上記の「人工降雨法の研究・実用化・普及」を推進するために、内閣府の主導の下に省庁横断型の連絡委員会等を緊急に設置する。

## 目 次

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| はじめに                              | 1  |
| 1 人工降雨法の特徴と現状                     | 3  |
| (1) ヨウ化銀法                         | 3  |
| (2) ドライアイス法                       | 4  |
| (3) 散水法                           | 6  |
| (4) 液体炭酸法                         | 7  |
| 2 人工降雨法のデータベース構築に関する提言            | 8  |
| 3 人工降雨法の比較実験に関する提言                | 9  |
| 4 人工降雨実験の評価法に関する提言                | 9  |
| (1) 人工降雨実験の評価法                    | 9  |
| (2) 人工降雨実験の降水量評価法                 | 10 |
| (3) 人工降雨実験の費用対効果評価法と大気環境評価法       | 10 |
| 5 人工降雨法の研究・実用化・普及の組織体制確立に関する提言    | 11 |
| おわりに                              | 11 |
| 参考文献                              | 12 |
| 参考資料                              | 14 |
| (参考資料 1)                          | 15 |
| (参考資料 2)                          | 16 |
| (参考資料 3)                          | 17 |
| (参考資料 4)                          | 19 |
| (報告書参考資料)                         | 20 |
| 1 人工降雨実験の失敗・成功事例                  | 20 |
| 2 1999 年 2 月 2 日の人工降雨実験 (事例 1)    | 20 |
| 3 2006 年 2 月 4 日の人工降雨実験 (事例 2)    | 21 |
| 4 2006 年 11 月 7 日の人工降雨実験 (事例 3)   | 21 |
| 5 2007 年 1 月 8 日の人工降雨実験 (事例 4)    | 22 |
| 6 降雨形態と貯水・利水・節水法                  | 22 |
| 7 人工降雨法の事業化と技術移転                  | 23 |
| その他の参考文献                          | 23 |
| 参考図                               |    |
| 図 1. ヨウ化銀人工降雨法の降水原理               |    |
| 図 2. ドライアイス人工降雨法の降水原理             |    |
| 図 3. 液体炭酸人工降雨法の降水原理               |    |
| 図 4. 人工降雨法の成功事例 (2006 年 2 月 4 日)  |    |
| 図 5. 人工降雨法の成功事例 (2006 年 11 月 7 日) |    |
| 図 6. 人工降雨法の成功事例 (2007 年 1 月 8 日)  |    |

## はじめに

国連環境計画 UNEP やノーベル平和賞を受賞した IPCC（気候変動に関する政府間パネル）は、地球温暖化が進む中で、21 世紀はさらに深刻な淡水不足が顕在化し、影響を受ける人口が数億人に達すると警告している。

さて、将来予測もさることながら、20 世紀にもアフリカ、中国を初め多くの地域で大干ばつが頻発した事実を忘れてはならない。被害は農作物の枯死や家畜の餓死にとどまらず、人間も数千万人が餓死するに至った。他方、人畜の住めない沙漠も拡大の一途を辿っている。我が国でも約 10 年に 1 度の頻度で干ばつを経験し、国民生活に深刻な影響を与えてきた。

そうした時代の中で、科学的気象制御法としての人工降雨研究が 1940 年代にアメリカで開始され、爾来各国で干ばつ・渇水対策を目指して、本研究に多大な努力がなされてきたが、これらには少なからず不合理な面が見られる。すなわち、原理的には後述のヨウ化銀・ドライアイス・散水法の人工降雨法をもとに、地上発煙、気球、航空機等と組み合わせた多様な方式が実験・研究された。しかし、端的に結論からいえば、莫大な研究費、膨大な研究者を参集したにもかかわらず、これらの方法からは期待に応え得る確たる成果は得られなかったため、1970 年代には人工降雨に関する研究は停滞局面に入った。しかし、最近になって、ドライアイス法や散水法の改良および液体炭酸法の開発があり、有望視はされるが、実用化・普及には至っていない。従って、効率評価や普及のために比較研究が急がれるところである。

ところで、近年の地球温暖化に伴う異常気象は、局地規模から地球規模に至るまで極めて発生頻度が高く、月・年平均気温の高温化が進行するとともに、豪雨の発生頻度と降水量、台風の来襲頻度と風速、干ばつの発現頻度と強度の増大等々、少雨と多雨あるいは逆に多雨と少雨が繰り返し連続して発生するなどの形で出現している。例えば、2005 年 6 月には西日本では梅雨時に干ばつとなり、特に福岡等の北部九州では空梅雨となり、7 月以降は豪雨・洪水・土砂崩れが各地で発生した。ついで翌 2006 年、および引き続く 2007 年にも、6 月の干ばつに対して 7 月の大雨のように、3 年連続して北部九州では両極端の異常気象が発生している。

すなわち、観測史上の記録を年ごとに更新する要素も多く、本来 30 年に 1 度程度の出現と定義されている異常気象とは、統計的にもそぐわない状況を迎えている。これは非常に警戒すべき事態であり、抜本的対策が必要であると考えられる。これらに関しては、2007 年 5 月 30 日に日本学術会議・地球規模の自然災害に対して安全・安心な社会基盤の構築委員会から答申「地球規模の自然災害の増大に対する安全・安心社会の構築」が政府・国土交通省に、また一般社会に対しても同名の対外報告が提出されている。その詳しい参考資料の中には、後述の液体炭酸人工降雨法の必要性について記述されている。

また、2007 年 1 月に「科学者コミュニティが描く未来の社会」が日本学術会議・イノベーション推進検討委員会から報告され、イノベーションと学術研究

の中での地球環境問題とエネルギー問題への対応として人工降雨技術開発が、また水・食料問題への対応でも地球温暖化等による深刻な水不足の問題解決に不可欠であることが指摘されている。さらには、2007年5月25日に、イノベーション25戦略会議から長期戦略指針「イノベーション25」が公表され、日本の優れた環境・エネルギー技術等の世界への発信・実証の中に、温暖化の影響研究および沙漠の緑化による食糧需給の安定等の記述が見られる。これらは水不足や水確保に関連する重要な検討課題である。

本報告が対象とするのは、少雨・干ばつ下での水資源確保へのアプローチである。特に淡水は、国内はもとより世界的に多くの国において、時期によって、あるいは慢性的に、水不足状態にある。文頭で示したように地球温暖化の進行でさらなる悪化も予測されており、水資源確保、渇水対策、沙漠化防止が重要な課題となっている。

以上のように、気象制御、水資源確保への人工降雨技術開発への挑戦は、いささかもその重要性が低下することはなく、新たな人工降雨法の登場が待たれている。そこに液体炭酸法が考えられるが、まだ十分評価された手法ではない。

さて、2005年6月の西日本の渇水に際して、当時の小泉内閣で人工降雨実施が閣議決定される予定であったが、7月を期して大雨が降ったため取り止めとなったが、研究の必要性は十分に認識され、閣議決定で研究費が予算化された。その研究は内閣府で論議され、文部科学省所管の科学技術振興機構で公募・審査された。その結果として、ドライアイス法のみが採択され、他の人工降雨法との比較実験は行われないうちに現在に至っている。

このような情勢下で、ヨウ化銀法は環境汚染問題から、また散水法は実験条件が大きく異なるために別にしても、ドライアイス法と液体炭酸法の有効性については、少なくとも同場所で同時に、つまり同一条件下での比較実験を実施する必要がある、両方法について客観的に、その有効性の比較結果を政府・一般社会に公開・提示する必要があると考えられる。たとえ、どの手法が比較実験によって、人工降雨・増雨をもたらす確実性が高いと判断されても、その技術は水不足に悩む人類、あるいは沙漠化地防止や沙漠緑化を望む人々に、地球規模で貢献できる人工降雨法として評価され普及可能となる。

なお、この対外報告をまとめるに当たって、また一方、人工降雨法研究の合理的展開を推進するための準備として、以下のことを進めてきた。2006年4月3日に日本学術会議で風水害・渇水対策に関するシンポジウム「最近の台風害と人工降雨法の特徴」を、ついで7月12日に九州大学で日本学術会議・九州大学大学院農学研究院主催シンポジウム「災害社会環境の中での安心・安全と癒し」の中で「人工降雨による安心・安全」を、さらに9月12日には北海道大学で農業環境工学関連7学会2006年合同大会オーガナイズドセッション「人工降雨」を開催し、人工降雨の過去・現在・将来について討議を行ってきた。

ここに、人工降雨研究史を簡単に振り返りながら、今後の人工降雨研究の必要性和発展性を記述し、その重要性を対外報告として政府・一般社会に対して提言するものである。

## 1 人工降雨法の特徴と現状

### (1) ヨウ化銀法

ヨウ化銀法は、図1に示すように、沃（ヨウ）化銀を高温炉の火炎中で蒸発させて凝縮発生する微小粒子を、地上または上空から高層の雲に送り込んで、ヨウ化銀を氷晶核とする氷の結晶（氷晶）を形成させ、降雨、降雪として地上に落下させる方法である。

まず、地上からヨウ化銀粒子を撒布する地上発煙法について述べる。この方法は、ヨウ化銀煙自体の浮力および自然の上昇気流を利用して、ヨウ化銀を上空に持ち上げ、氷点下の空気中にまで達したところで、氷晶核として機能させることを目的としている。しかし、氷点下に至る高度に雲が存在する気象状況はむしろ少ない。また、ヨウ化銀粒子が仮に上昇気流で雲中に入っても、雲の下層部では氷晶の発生が不足し、潜熱の発生が抑えられるため、氷晶は上昇気流に乗るだけで周辺には拡散せず、氷晶成長に必要な水分が得られない。

一方、ヨウ化銀粒子が上層部に達すると、逆に過剰に多くの氷晶が発生するため、結果的に、氷晶の多くは雲の上層部の狭い範囲内で、互いに限られた水分を奪い合うオーバーシーディング（過剰種撒き）の状態に陥り、氷晶の成長が著しく制限される。従って、ヨウ化銀を核とした氷晶の多くは、小さく軽いために重力に逆らって落下することではなく、降水に寄与しない可能性が大きいと考えられる。すなわち、人工的に発生した氷晶のほとんどが無駄になって低効率化を示し、結果的には水資源を得るほどの増雨効果は望めない結果になると考えられる。

さて、本法では過去半世紀にわたり地上発煙法が採用され、統計法を用いて人工降雨の効果が評価されてきた。しかし、この評価法は、条件を整えて何度も同様に実験しなければ、いわゆる統計処理ができず、そのため多くの費用、労力、時間が掛かる割には、効果判定ができない事例が多かった。自然の変動が激しく、そもそも煙の拡散方向・濃度の予測が困難であるため、ヨウ化銀粒子の氷点下到達位置にある空気湿度や雲の形態・高度等の情報が得られないという根本的な問題を含んでいる。従って、効果が期待できない人工降雨法であるといえる。その問題を回避するため、航空機やロケットによって上空からヨウ化銀を燃焼させて撒布する方法が、我が国を初め世界各国で実施されたが、前述のヨウ化銀の温度依存性の問題が依然として残ることになり、人工降雨の低効率性は変わらないことになる。

次に、ヨウ化銀はそれ自体が弱い毒性を持ち、またヨウ素と銀の化合物であり、化学的環境汚染物質として多くの場合、動植物に好適な効果よりも害的影響の方が大きい問題がある。特に、ヨウ素は人間の甲状腺ホルモンの構成物質であり、人間には必須要素であり、また医薬品（消毒剤のヨ

ードチンキ)として有用な作用を及ぼすが、「毒物及び劇物取扱法」では医薬用外劇物に指定されており、「過ぎたるは及ばざるが如し」のたとえどおり、害の方が懸念される。一方、銀については重金属ではあるが、比較的酸化し難いこともあって、環境への悪影響は比較的少ないと考えられる。いずれにしてもヨウ化銀は自然に分解するが、無毒化するには長期間を要する問題がある。

また、国内のヨウ化銀法の実験では、ヨウ化銀の使用量は1回当たり0.3～2kgであった。拡散域は撒布方式や気象条件により異なり、点源の地上発煙法では風下距離60kmまでから150kmまで、最大幅は数kmまでから数十kmまでであった。一方、線源である気球法と航空機法ではあまり広がらず、例えば航空機法でのレーダーエコーは幅2km、風下距離20kmの棒状を呈した。これらの実験期間を通じて、人体や生態系への影響例は報告されなかった。この程度のヨウ化銀撒布では健康への影響は少ないと考えられるが、事業として実施する場合は使用量も使用回数も数十倍～数百倍となるため、健康への懸念が残る。

さらには、水棲生物や小魚に影響するとされており、環境ホルモンや重金属の食物連鎖による生物濃縮の問題もあり、ヨウ化銀使用に当たっては注意が必要である。基本的には、ヨウ化銀の毒性に指摘がある限り、微少なりといえども大気中への放出は避けるべきである。

従って、ヨウ化銀法は、中国等の一部の国々で依然として実験されているが、上述した低効率と環境問題(環境立国)から考えて、人工降雨事業への応用は不適であると判断される。

## (2) ドライアイス法

ドライアイス法は図2に示すように、数cmの大きさに砕いたドライアイスの欠片を航空機で雲頂よりも上空から雲に撒布する方法である。このため、航空機を後述の液体炭酸法の撒布高度より上空に上昇させる必要がある一方、乱れの大きい雲内部や山岳部よりも下層の高度を飛行する必要があることから、飛行の危険性は低いといえる。従って、航空機の運用・安全面ではメリットがあるが、水資源の獲得ではデメリットが大きい。その理由は、ドライアイス撒布後の雲物理・力学的相互作用の中で発生する。

すなわち、ドライアイスは雲頂付近に撒布された後、鉛直下方向に氷晶を発生させながら落下する。氷晶は、その成長による潜熱発生のため、上昇気流が誘起される。従って、鉛直方向に分布する氷晶群は、全体として上方へ移動する。この際、周囲との浮力が氷晶群を含む鉛直方向の雲気柱(上下に細長い柱状雲を含む空気容積)全体に作用するため、氷晶群は急激に上方に輸送される。

よって、氷晶群が周囲に拡散する効果が低くなり、強い上昇気流中で輸送されるため、氷晶同士で雲気柱内部にある限られた水滴を奪い合う、いわゆる競争成長が卓越して氷晶の成長は著しく制限される。また、上昇気

流が強過ぎて氷晶の成長に必要な時間も確保できないため、人工的に生成した大部分の氷晶は、落下可能な大きさに成長できないまま、雲頂付近まで輸送される。従って、その氷晶は降水に寄与する可能性は低くなり、実際に降水になる氷晶は、その雲気柱から離れて成長する氷晶だけとなる。

過去の観測例では、1958年の九州大学によるドライアイス実験や諸外国の多くの実験の報告のとおり、航空機撒布が線状になることから、その問題の共通性は降水域の狭さにある。中には、1回の撒布では降水域が狭いため、何度も撒布して降水域を拡大した実験もある。この狭い降水域は、上述したように、一部の氷晶が強い上昇気流のある人工雲の雲気柱から離れて成長・形成されたものと考えられる。

その他の大部分の氷晶は、通常の雲頂を貫いて上空に形成された塔状の雲の中に存在し、この場合も著しい競争成長が起こるため、その時間帯では全く降水にはならない。この塔状の雲は、ドライアイス撒布の結果として報告される観測例が多く、鉛直方向の浮力が大きく、上昇気流が強過ぎるために発生する。この特徴は、力学的な雲の形成であり、一見実験が成功したかのように錯覚するが、この現象を雲物理的にみると、塔状の雲内では十分に成長できない多くの氷晶が存在することを示している。すなわち、塔状の雲の存在は氷晶の拡散を阻害し、結果的に降水としての水資源獲得を妨害することになる。

上述の観測例と考察に基づくと、ドライアイス法は、大部分の氷晶の雲内での拡散が阻害され、降水に寄与しない点を考慮すると、水資源を得る効率的な方法ではないと考えられる。従って、本法は多額の費用を投資した割には、必要な水資源量が獲得できない可能性がある。これについては研究が必要である。

今後、実験・観測、数値実験やドライアイス法・液体炭酸法の客観的モデル構築を通して、注意深く比較検討する必要がある。特に、解明の要点である雲内への氷晶の拡散は、本法よりも後述の液体炭酸法の方が非常に多いとされる。従って、その拡散強度の客観的評価指標を提示する必要がある。その結果、拡散強度が解明できれば、ドライアイス法・液体炭酸法の効率差が明瞭になるため、早急に関連研究を推進する必要がある。

さて、夏季の積乱雲のように、上昇気流が強く雲が厚い場合には、本法により撒布されたドライアイスは直ぐ昇華し、ほとんどの氷晶は十分成長しないうちに、上昇気流に乗って雲頂に達してカナトコ雲（積乱雲上部の鉄床状の雲）の中に取り込まれ、落下しないで消散することが多くなる。

すなわち、本法は、特にヨウ化銀法や液体炭酸法より、特に塔状の雲が発生しやすいため、多量にドライアイスを撒布した場合には、風に流された氷晶が、その実験領域よりかなり離れた場所で、長時間後に有効に作用すると推測される。しかし、目的とする場所から掛け離れ、かつ時間的に遅れた発生であるため、多くの場合は判定できず、確率的にも利用価値の低い現象である。

### (3) 散水法

散水法は、雲頂の温度が氷点下の雲が存在し、その内部で、直径が約 30 ミクロン以上の比較的大きい雲粒が不足している場合に適用可能であり、航空機で水を撒布することで、水滴間の衝突・併合を促進し、比較的大きな雨粒子・雨滴に成長させることを目的としている。

日本では 1960 年代に実験を行っており、また最近、ブラジルでは積雲あるいは積乱雲に散水して、実験に成功したとの報告がある。

本法については、暖候期を中心に、特に我が国では高温・干ばつ時における真夏の積雲・積乱雲発生時に実験等を実施する必要がある、後述の寒候期に適した液体炭酸法の推進とともに、並行して実施することが望まれる。

本法の実験・応用面では、高湿の熱帯・亜熱帯地域や夏季に積乱雲の発生しやすい地域で有効であると考えられるため、特に夏季に沖縄や九州での実験研究が必要であり、期待される方法ではあるが、明らかにデータ不足である。

また、沙漠での急激な積雲の発生時にも可能性はある。しかし、下層空気が特に乾燥している場合には、空中で蒸発してしまい、地上に達しない現象も起こり得るが、今後の実験研究に期待したい方法である。

なお、本法は、降水効率が低いとの指摘もあり、航空機で上空から多量に散水しなければ、十分な水資源が得られない可能性もある。従って、費用や運用の面および・降水効率の面から十分な検討が必要である。

さらには、本法は主に“暖かい雨”からの降水を目的とした人工降雨法であるが、上空の雄大な積雲や積乱雲内では、上空に氷晶があり、激しい上昇気流に起因して形成される雹や霰も発生することで、当然それらが融けて人工降雨となる“冷たい雨”の場合も推測される。

さて、ここで専門用語の“暖かい雨”、“冷たい雨”について記述すると、冷たい雨は氷晶を経て降る雪や雨であるのに対して、暖かい雨は氷晶を経ないで降る雨である。このため、ヨウ化銀法、ドライアイス法、液体炭酸法は冷たい雨としての降水を期待、あるいは目的とした人工降雨法であるのに対して、散水法は繰り返しになるが、主として“暖かい雨”からの降水を期待した人工降雨法である。

一方、大量の水を空中に輸送する代わりに、ナトリウム塩、カルシウム塩、リチウム塩の凝結核に過塩素酸カリウム、マグネシウム粉末、有機結合剤などの燃料を加えて、航空機に取り付けた燃焼装置で燃焼させ、その凝結核を放出する新しい方法が考案されている。

この方法は、散水法と同様に自然の凝結核よりも大きい人工の凝結核(巨大粒子)を撒布して、初期の雲粒の粒径分布範囲を拡大し、衝突・併合過程の促進を目的としている。

最近、タイ、南アフリカ等では、本法によって実験された増雨効果例が

あるが、そのメカニズムや効率面での問題点など解決すべき課題が多い。しかしながら、これらの新しい人工降雨法に関しては、画期的な技術革新を目指して一層の研究を推進する必要があるとともに、かつまた期待される人工降雨法であるとも考えられる。

#### (4) 液体炭酸法

液体炭酸による過冷雲底種撒法（液体炭酸法）は、米国のユタ大学福田矩彦名誉教授の発案による方法で、最初、0℃以下の過冷却の霧を消散させるために適用された。アメリカ合衆国ユタ州ソルトレークシティで、冬季にしばしば発生する霧に対して、車から液体炭酸を撒布して、広範囲に霧を消散させることに成功した。この技術は、空港の滑走路上に存在する霧を晴らして、航空機の誘導を可能にする技術として実用化されている。この手法を適用した最初の人工降雨実験が、1999年2月2日に、北部九州で、西高東低の気圧配置の冬季積雲に対して実施され、後述のように顕著な効果が見られた。

本法では、まず過冷雲の底部近くの氷点下の気層に航空機で液体炭酸を水平直線状に撒布する。その結果、液体炭酸の強い冷却効果（約-90℃）により、氷晶核を必要としない均質凝縮凍結ニュークリエーション現象（急冷によって発生した微水滴が凍結するプロセス）が起こり、氷晶が瞬時に発生し、その後の幾つかのフィードバック機構（雲物理過程と雲力学過程の相互作用）によって人工的に降水を起こさせる。本法は、雲底に液体炭酸を水平撒布するロレプシン（LOLEPSHIN: Low Level Penetration Seeding of Homogeneous Ice Nucleant）法と名付けられており、次の2段階の効果促進過程からなる。

①レシット（RETHIT: Role-up Expansion of Twin Horizontal Ice Thermal）  
効果：液体炭酸撒布によって形成された氷晶群を含む空気塊は、その昇華熱で自己誘発された上昇気流によって緩やかに上昇し、その氷晶が雲頂に達するまでに落下可能な大きさに成長される氷晶成長過程

②ファイラス（FILAS: Falling Growth Induced Lateral Air Spreading）  
効果：成長した氷晶を過冷却雲全体に拡散・成長させる氷晶拡散過程

そのレシット効果によって雲頂に達した氷晶は、落下の過程で周囲の過冷却雲粒を取り込みながら、雪の大きさまで成長する。その際、氷晶は潜熱を放出するため周囲の空気を暖め、雲底から新たな雲粒の形成を促す。そこまで成長すると、氷晶は新たに形成された雲粒を取り込みながら、さらに成長する。その氷晶、または融解時に氷晶が互いに接合して形成される雪粒子は、やがて雲底から外れ地上へと落下する。落下中の気温が0℃以上で高湿であると、氷晶は落下中に融解して雨滴、降雨となる。

なお、本法はヨウ化銀法のように燃焼させることがないので、車などで移動しながら地上からの撒布も可能である。もちろんヨウ化銀法でも自動車に燃焼装置を積載すれば、撒布する労力・時間は大差ないが、取り扱い

は本法が非常に簡単である。ただし、地上撒布に当たっては氷点下時の実施が不可欠である。

さらに、本法では炭酸ガスを液化した液体を利用しており、ドライアイスよりも製造にエネルギー・費用・時間ともに少なく、また貯蔵に当たっても多くの場合、安全性から有利であると判断される。

本法は、液体で貯蔵中の高圧のボンベよりバルブを通して、液体または直接、気体（炭酸ガス）になる状態で空気中に撒布する方法であり、氷点下で氷晶が形成される。このため、図3に示すように、本法の主要な撒布方法は、航空機より雲底付近で水平方向に液体炭酸を撒布する方法であり、特に氷点下（ $-8^{\circ}\text{C}$ 以下が適当）の雲に撒布することが重要である。従って、雲が下層まで氷点下になっている時期は冬季、あるいは寒候期であり、特に夏季の高温期、暖候期には氷点下の上空まで上昇させる必要があるため不利ではあるが、実施できない訳ではない。

雲底に撒布した液体炭酸は、前述のとおり瞬間的に気化するが、 $-90^{\circ}\text{C}$ まで冷却されるため、1gの液体炭酸当たり10兆個の氷晶が発生する。この氷晶を30分～1時間で降雪粒子まで成長させ、やがて降雪・降雨として地上に落下させる原理である。ここで、撒布域の空気塊は上昇気流で無限に上昇する訳ではなく、最大限上昇しても成層圏の下層、すなわち対流圏界面付近である。理想的には、雲頂の少し上空に安定気層（下層より上層の方が気温が高い空気層）が存在すれば、成長も早く、かつ無駄になる氷晶核、雪粒も少なくなるため、有効利用したい気層ではある。

一方、1000～3000mの厚さの比較的薄い雲の場合には、液体炭酸を撒布したことで、雲頂付近の安定気層が弱いと、本来の雲頂よりも高く盛り上がることもある。しかし、この盛り上がりの程度は、鉛直方向に浮力が積算される効果で形成されるドライアイス法の塔状雲の形成よりも相当弱く、無駄になる氷晶、雲水量は少なくなる。

なお、本法は雪粒子から雨滴となる“冷たい雨”を目的としているため、広範囲ではあるが、降雨強度が弱く、洪水を起こす恐れはない特徴がある。

さて、発達した積雲や積乱雲内で液体炭酸を撒布すると、液体状の雲粒が多くあるため、形成された氷晶は雲粒の捕捉過程を経て、霰・雹に成長する。ドライアイス法と同様、上昇気流のため氷晶は十分成長しないうちに雲頂に達し、カナトコ雲に取り込まれ、落下しないで消散する可能性が高い。従って、積乱雲内では強過ぎる上昇気流をどのように避けて撒布するか、また強い上昇気流内では雹も存在し、強風と雹からの航空機の安全性確保の課題では大型機を使用するなど、実用化には技術面のみならず運用面も十分検討する必要がある。

## 2 人工降雨法のデータベース構築に関する提言

人工降雨法に関しては、1940年代より各国で実験が行われ、多くの研究・

実験事例があるが、それらのデータは各国に散在しており、従来から同じ実験の繰り返し等々で無駄が多く、機能的でない場合が多かったと推測される。このため、それら実験データを組織的に収集し、データベースを構築して、情報の共有化を図り、有効利用する必要があると考えられる。

また、国内外の研究状況・実験データ等に関する情報交換を行い、研究・実験の現状、進行状況が把握できるように、国内外のネットワークを構築する必要がある。

### 3 人工降雨法の比較実験に関する提言

人工降雨法に関して、寒候期においては、ヨウ化銀法は環境への悪影響の問題から考えて除き、また散水法は手法が大きく異なるために除くとしても、ドライアイス法や液体炭酸法が如何なる人工降雨効果があるのか、早急に同時に同条件下で比較実験を行って、客観的に評価する必要がある。一方、暖候期においては、散水法を中心とした人工降雨法を科学的に評価・解明する必要がある。

また、これまでの研究成果や業績の評価においても、今後の資源配分・執行に対しても、従来の実験結果および新たに実施される実験・観測結果を十分考慮して科学的・専門的に一般公開する形態での公表、すなわち専門家を多く加えた査定方式によって客観的に、また公正に実施する必要がある。

さらには、過去および現在の人工降雨実験の費用対効果や人工降雨に対する今後の応用・普及あるいは一般国民に対する啓発や将来性等についての検討も必要であり、またそれらに関する追跡調査も必要であると考えられる。

### 4 人工降雨実験の評価法に関する提言

#### (1) 人工降雨実験の評価法

従来、人工降雨実験を行った場合には、同様の実験を繰り返し行い、統計処理して、その効果を評価していたが、短期間の実験・調査で実施できる方法ではない。また、費用も過大になり、過去の多くの場合には、実験が続かなくなって、効果評価自体ができなかった経緯があった。

人工降雨法による効果評価としては、雲に撒布後、GPS 計測による緯度、経度、高度、撒布前後の時間を航空機から地上基地に知らせれば、降雨観測レーダーによって、その雲域が追跡可能であり、降雨形態が解明できる。それは、雲の成長した降雨域の降水量評価、雲の密度が水平・垂直分布密度として画面上に表示されるため、それを光学的に評価算定する方法に従っている。また、国土交通省のレーダー（例えば、北部九州では背振山レーダー）によって、コンピューター上に画像表示されることでも評価される。次に、非常に有力な評価手段である人工衛星データの可視・赤外画像の利用も可能である。特に、レーダー画像では時間雨量が表示されるため、

実際の降水量との比較も可能となっている。なお、これらの技術は、多くの人工降雨法に共通的に利用可能であることはいうまでもない。

一方、最新の評価法には、航空機に種々の観測機器を搭載して雲物理的な観測を行い、雲モデルを組み合わせて評価する方法があるが、これには高額な雲物理的観測機器と十分な観測体制が必要であるため、実施は限定される。逆に、上述の方法では特別な雲物理的観測機器を必要としない必要最小限の観測法ではあるが、評価が十分可能であることを意味している。

## (2) 人工降雨実験の降水量評価法

人工降雨法では、時に大雨が降ることがある。それは人工降雨が成功したというより、本来降るべき雨が降ったと観察される事例が多くあり、実験自体が成功したかどうか正確には判定できなかった。従って、増雨に関する評価法には、今後、明確な判定評価法が必要である。

実際にどの地域に何 mm の降水量があったかの調査ではアンケート調査も実施する必要がある、また一般的に行われる画像解析結果と比較して、後日、降水に関するアンケート調査の実施も必要であろう。

なお、実際の降水量としては、例えば上空の風速が 15m/s であれば、降雨域もそのスピードで移動する。従って、雲の幅が 1km でも通過時間は 1～5 分であるため、面的に通過する時間は短時間となり、時間降水量としては 1mm 程度の事例が多いことになる。

さらには、実験段階では対象雲と比較させるために、数回程度実施するための雲を選定して、それぞれ区別して撒布する方法が一般的であるが、事業として実施する場合には、人工降雨の増雨効果が確率高く期待できれば、移動する雲に次々と撒布していけばよい訳であり、長時間の継続的降水が確保できることは、いうまでもないことである。

## (3) 人工降雨実験の費用対効果評価法と大気環境評価法

人工降雨実験を行えば当然費用が掛かり、それに対してどの程度の有益な効果があるかの金銭的な比率である、費用対効果が常に問題になってくる。従って、人工降雨実験ではこのような実験評価法の開発も充実させる必要がある。

真水を造水する費用は、例えば福岡市にある海水淡水化装置を利用する方法では、1 トン当たり 230 円 (230 円/t) である。一方、ドライアイス法では 20 円/t であり、液体炭酸法では 0.2 円/t であるとの試算結果がある。すなわち、ドライアイス法と液体炭酸法では 100 倍の、海水淡水化装置法では 1000 倍以上の価格差となる。淡水化装置建設費や人工降雨法による降水からの実利用水への有効利用率低下などの問題があつて、直接比較は難しいとはいえ、歴然とした価格差があると考えられる。

また、海水淡水化装置では、建設費が非常に高く、かつ運転費も高いにもかかわらず、運用上あまり運転を停止できない問題もあり、オイルマネ

一が潤沢な国、あるいは限定された地域で、主に飲料水などの都市生活用水の利用に限定されることになる。従って、多量の水を必要とする農業・工業用水の観点からすると、海水淡水化法は不適であり、実施費用の安い人工降雨法が産業用水確保には適していると判断される。

次に、ドライアイス法では比較的安価であるが、前述したとおり多量の水量確保には困難な問題がある。たとえ広範囲に撒布しても水量の面から解決が難しく、採算ベースは高くなるため、実施範囲は一部の事業に限定されると考えられる。

なお、液体炭酸、ドライアイスは、元は温室効果ガスである炭酸ガスであり、地球温暖化に悪影響を及ぼす心配があるかも知れないが、例えば液体炭酸法では1フライトで3回程度の撒布実験では約10kgの使用量であり、一般社会の現在のCO<sub>2</sub>の使用量から考えると微々たる量であるのに対して、この少ない量の割には、100～200万tの水量が得られることになり、非常に有益な技術である。

一方、地球温暖化の問題から考えると、逆に雲が多くなることで日射が遮られる一方、蒸発量が増加することで気温の低下に寄与することも考えられる。このため今後、炭酸ガス、雲量、日射等による温暖化軽減の可能性および、そのシミュレーション評価の研究も、現時点では極めて重要な課題であると考えられる。

## 5 人工降雨法の研究・実用化・普及の組織体制確立に関する提言

人工降雨法との関連からは、干ばつ・渇水発生時に対応策として、例えば農林水産省では農作物の干ばつ・干害対策本部を組織したり、国土交通省・経済産業省では渇水対策および生活・工場用水対策本部を組織したり、あるいは都道府県・地方自治体が、個別に対応することが多かった。

しかし、干ばつ・渇水対策を実施する場合にも、また特に、人工降雨を実施する場合には、干ばつ・人工降雨連絡委員会等の省庁横断型の対策委員会を組織して対応することは非常に効率的であり、有益であると考えられる。従って、機能的な活動を可能とするには、例えば内閣府に連絡委員会等を組織するなど、組織体制を確立する必要がある。

なお、21世紀は水の時代、あるいは水不足時代といわれる中では、国内はもとより諸外国においても、毎年各地で発生している干ばつに対して、常時、国連・世界気象機関等で、干ばつ・人工降雨による対応策を計画・構築しておくことが必須である。

## おわりに

本報告は渇水対策・沙漠化防止のための人工降雨の実用化、普及の契機になると考えられる。

これまでの実験結果によると、気象（気温、風速、風向）、雲の状況等の撒布条件を精選すれば、ほぼ間違いなく人工降雨は可能であると判断される。しかし、雲の形態、厚さ、密度等々、どのような気象状況、撒布条件下で実施するのが適切であるかについてのデータはまだまだ十分であるとはいえず、さらにデータ蓄積に努めて、正確な技術手順・指導書（マニュアル）作成に活かす必要があると考えられる。ただし、実験・実施に際しては種々の制約があり、十分な情報収集の実験が行えない状況にある。特に、資源配分面でのバックアップや研究体制の強化、実験環境条件の整備が必要であると考えられる。

以上のように、従来からのドライアイス法、あるいは新しい散水法や降雨効率の非常に高い可能性のある液体炭酸法等の人工降雨法が、種々の制約条件下で実用化に至らない状況は、我が国はもとより、世界人類、特に乾燥地における人々にとって不幸な状況にあるといえる。この現状の早急な打開を目指して、対外報告書で提言するものである。

本対外報告は、政府・一般社会に向けての提言であり、主要な提言内容に関しては、政府関係機関と共同で進められるように、対処法、実施方法、研究経費等々の条件整備の基に、人工降雨法のガイドラインを作成し、研究・実用化・普及の組織体制を確立して、実現に向けて早急に取り組むことが緊要であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 福田矩彦、1988：気象工学－新しい気象制御の方法－、気象研究ノート、164、日本気象学会、pp. 213.
- 2) Fukuta, N., 2003: The principle of low level penetration seeding of homogeneous ice nucleant (LOLEPSHIN), the self-enhancing glaciogenic seeding of optimized feedbacks. *Preprints, 8th WMO Sci. Conf. on Weather Modification*, Casablanca, Morocco, 7-12 April 2003, *WMO Report*, 39, 75-78.
- 3) Fukuta, N., Wakimizu, K., Nishiyama, K., Suzuki, Y., Yoshikoshi, H., 2000: Large unique radar echoes in a new, self-enhancing cloud seeding. *Atmos. Res.*, 55, 271-273.
- 4) イノベーション 25 戦略会議、2007：長期戦略指針「イノベーション 25」、pp. 79.
- 5) 真木太一、2006：学術の今日と明日 渇水に対する人工降雨や風水害・異常気象研究の提言に向けて、学術の動向、2006(7)、64-66.
- 6) 真木太一、2006：干ばつ・渇水の中での人工降雨法による安心・安全、日本学術会議第二部生命科学農学基礎委員会・生産農学委員会・九州大学大学院農学研究院シンポジウム「災害社会環境の中での安心・安全と癒し」講演要旨集、2006年7月12日、九州大学創立五十周年記念講堂、5～6.
- 7) 真木太一・鈴木義則・脇水健次・高橋庸哉、2006：農業環境工学関連7学会2006年度合同大会オーガナイズドセッション「人工降雨」講演要旨集、2006年9月12日、北海道大学人文社会科学総合教育棟、pp. 22.

- 8) 日本学術会議第二部生命科学農学基礎委員会、2006：風水害・渇水対策に関するシンポジウム「最近の台風害と人工降雨法の特徴」講演要旨集、2006年4月3日、日本学術会議5階会議室、pp. 51.
- 9) 日本学術会議地球規模の自然災害に対して安全・安心な社会基盤の構築委員会、2007：「地球規模の自然災害の増大に対する安全・安心社会構築」、pp. 119.
- 10) 日本学術会議イノベーション推進検討委員会、2007：「科学者コミュニティが描く未来の社会」、pp. 232.

(参考資料)

## (参考資料1)

日本学術会議 第二部 生命科学 農学基礎委員会農業生産環境工学分科会審議経過

○平成18年4月3日 日本学術会議農学基礎委員会公開シンポジウム「最近の台風害と人工降雨法の特徴」の開催

○平成18年5月25日 幹事会

分科会委員名簿確定

野口伸（第二部会員）、真木太一（第二部会員）、橋本康（連携会員）、三野徹（連携会員）、山形俊男（連携会員）

○平成18年6月23日 第1回分科会

委員長：真木、副委員長：橋本、幹事：三野の選任

○平成18年7月2日 農学基礎・生産農学委員会・九州大学大学院農学研究院主催・公開シンポジウム「災害社会環境の中での安心・安全と癒し」の開催

○平成18年7月28日 第2回分科会

活動方針の検討：対外報告として最初は人工降雨を選定・検討開始

○平成18年9月12日 農業環境工学関連7学会合同大会オーガナイズドセッション「人工降雨」の開催

○平成18年11月9日 第3回分科会

幹事：奥島里美（連携会員）、委員：青木正敏（連携会員）・磯田博子（連携会員）・大政謙次（連携会員）・後藤英司（連携会員）・鈴木義則（連携会員）・高辻正基（連携会員）・野並浩（連携会員）・橋口公一（連携会員）・早川誠而（連携会員）・村瀬治比古（連携会員）、西山浩司（オブザーバー）、脇水健次（オブザーバー）の確定

対外報告（人工降雨）内容検討およびそれ以外の課題の検討開始

平成18年11月9日、日本学術会議農学基礎委員会農業と環境分科会・農業生産環境工学分科会共催、公開シンポジウム「魅力的都市構築のための都市・屋上緑化」開催

○平成19年1月11日 第4回分科会

川野哲也・鈴木賢士（オブザーバー）の追加、対外報告内容の検討

○平成19年4月26日 第5回分科会

対外報告内容検討

○平成19年6月20日 第6回分科会

対外報告（人工降雨）の確認、その他の対外報告項目・内容の検討

○平成19年8月31日 第7回分科会

対外報告（人工降雨）の提出確認、環境教育・環境調節関係の内容の検討

○平成19年10月15日 農学基礎委員会および第二部会へ提出

○平成19年11月22日 幹事会へ提出

○平成20年1月24日 幹事会へ再提出

(参考資料2)

日本学術会議第二部（生命科学）農学基礎委員会シンポジウム  
風水害・渇水対策に関するシンポジウム—最近の台風害と人工降雨法の特徴—

日 時：2006年4月3日（月） 11：00～16：40

場 所：日本学術会議5階会議室

〒106-8555 東京都港区六本木7-22-34

第1部： 11：00～13：00

開会挨拶：

日本学術会議会員（第二部生命科学・農学基礎委員長） 真木太一

話題提供：

（1）福岡襲来 2004 年 18 号・2005 年 14 号台風の九州での特性と風水害

九州大学大学院農学研究院 真木太一

（2）2005 年台風 14 号による九州北部地域の降雨特性

九州大学大学院農学研究院 脇水健次

（3）2005 年台風 14 号のレーダーから見た雨域および風の特徴

山口大学農学部 早川誠而

（4）2004・2005 年の西日本地域の台風害の特徴

山口大学農学部 山本晴彦

座 長：青木正敏（東京農工大学農学部）

第2部： 14：00～16：40

開会挨拶：

日本学術会議会員（第二部生命科学・農学基礎委員長） 真木太一

特別講演：

液体炭酸使用の新種撒法の特徴と人工降雨および豪雨・台風制御への応用

ユタ大学 福田矩彦

話題提供：

（1）九州における人工降雨の歴史

九州大学名誉教授 鈴木義則

（2）2005 年の福岡の渇水と人工降雨法について

九州大学大学院農学研究院 脇水健次

（3）平成 17 年度における液体炭酸法による人工降雨の実験例について

防衛大学校地球海洋学科 遠峰菊郎

（4）液体炭酸法による人工降雨の特徴について

九州大学大学院工学研究院 西山浩司

座長：真木太一（九州大学大学院農学研究院）

### (参考資料3)

日本学術会議農学基礎委員会・生産農学委員会合同委員会 シンポジウム  
「災害社会環境の中での安心・安全と癒し」開催趣旨

日本学術会議第20期は、2005年10月1日より大改革のもとに、3年間の会期で開始された。第19期では、大幅な改革をめざして検討が加えられ、一時は民営化も視野に入れて、論議されたとも言われるが、国の特別な機関として存続し、内閣府に移されてスタートしている。210名の会員に続く、約2000名の連携会員については、約半年間にわたって種々論議され選考されてきたところであるが、2006年3月に478名が任命され、残り約1500名は今秋に任命される状況である。またその中で、多くの分科会もスタートして概ね順調に進行している状況である。

この間、農学関係会員は第19期の30名から第20期の12名（第2希望を入れて15名）に激減した状況である中では、大いに活発に活動をして、国の内外にアピールするとともに、その存在意義を高め、特に日本学術会議の最大の任務である一般社会・政府への提言等を行う必要がある。

この中で、第20期では標記のようなシンポジウムを開催することとなった。農学分野の会員数が少なくなった中で、農学合同委員会および本シンポジウムの開催が可能となったことは、種々の事業が縮小されつつある中で、このようなシンポジウムを開催することは意義深く有益であると思っている。

そこで、第19期では京都大学開催の食の安全・安心を取り上げた課題に引き続き、九州大学では食以外の安心・安全、すなわち、農業災害の中での安心・安全と癒しを取り上げることとした。

まず、海・山からの環境保全として、山地・森林における災害の軽減による安心・安全面の話題を取り上げた。また海・水産面からの安心・安全としての貝類の環境指標（貝言葉・バイリンガル）の話題を取り上げた。次に、農業災害には、自然災害・人工的災害を含む気象災害（台風害・干害等）の軽減防止・制御の方面から、主として渇水対策に対する人工降雨法による安心・安全を取り上げた。また一方、最近では、農業機械は農業用の道具から発展して、大型化・複雑化・精密化・ロボット化する結果、特に、高齢者を主とする農業機械の事故が頻発している中で、労働災害に関する安心・安全とは如何なるものかを取り上げた。さらには、特に最近では政治・行政や国際問題においても社会全体が常軌を逸した社会不安を引き起こしている病んだ社会の中で、古から日本での造園・園芸・盆栽・庭園等からの癒しの気持としての精神的なケアを目指して農学方面からの提言として、日本が昔より持っている癒しの心を復活させるべき話題を取り上げた。すなわち、今回は多方面からの安心・安全の課題を選定した。

本シンポジウムは、日本学術会議および九州大学大学院農学研究院（農学部）主催のシンポジウムとして、一般社会との関連で社会貢献・国際貢献が叫ばれている中で、その一環として、一般公開シンポジウムとした。このことは、本来、日本学術会議が科学の発展・啓発において科学離れを若干でも解消する、意味合いも兼ねた話題提供としている。多くの方々の参加を期待している。

シンポジウム「災害社会環境の中での安心・安全と癒し」プログラム

日 時：2006 年 7 月 12 日（水）13:00～17:30

場 所：九州大学創立五十周年記念講堂（〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 九州大学）

総合司会：九州大学名誉教授 鈴木 義則氏

13:00～13:20

開会挨拶：日本学術会議会長 黒川 清氏

九州大学総長 梶山 千里氏

話題提供

13:20～14:05

（1）山地・森林災害の軽減と安心・安全

福岡工業大学教授（九州大学名誉教授）小川 滋氏

座長：九州大学大学院農学研究院 教授 大槻 恭一氏

14:05～14:50

（2）安心・安全な貝類養殖を貝リングルで

九州大学大学院農学研究院 教授 本城 凡夫氏

座長：北海道大学大学院水産科学研究院教授 山内 皓平氏

（日本学術会議会員、生産農学委員会委員）

14:50～15:10 休憩

15:10～15:55

（3）干ばつ・渇水の中での人工降雨法による安心・安全

九州大学大学院農学研究院 教授 真木 太一氏

（日本学術会議会員、農学基礎委員会委員長）

座長：山口大学 農学部 教授 早川 誠而氏

15:55～16:40

（4）農業機械による労働災害の中での安心・安全

（社）日本農業機械化協会 調査部長 石川 文武氏

座長：北海道大学大学院農学研究科 教授 野口 伸氏

（日本学術会議会員、農学基礎委員会委員）

16:40～17:25

（5）安全・安心の環境デザイン

東京農業大学地域環境科学部 教授 進士 五十八氏

（日本学術会議会員、環境学委員会委員長・生産農学委員会委員）

座長：九州大学大学院農学研究院 教授 井上 眞理氏

17:25～17:30

閉会挨拶：九州大学大学院農学研究院長 教授 今泉 勝己氏

18:00～19:30

交流会：九州大学ファカルティクラブ（箱崎地区・創立五十年記念講堂 2 階）

日本学術会議農学合同委員会シンポジウム・九州大学大学院農学研究院シンポジウム担当

九州大学大学院農学研究院 生産環境科学部門 気象環境学研究室 真木 太一

Tel・Fax:092-642-2923 E-mail : maki@bpes.kyushu-u.ac.jp

(参考資料4)

農業環境工学関連7学会 2006年合同大会  
オーガナイズドセッション「人工降雨」プログラム

日 時：2006年9月12日（火）15:45～17:30

場 所：北海道大学人文社会科学総合教育棟 講義室(1)

14:45～14:50

開会挨拶 九州大学大学院農学研究院 真木 太一

話題提供

座長：九州大学大学院農学研究院 脇水 健次

14:50～15:20

(1) 人工降雨に関する最近の話題

九州大学大学院農学研究院 真木 太一

15:20～15:50

(2) 日本における人工降雨研究の歴史

九州大学名誉教授 鈴木 義則

座長：九州大学大学院農学研究院 真木 太一

15:50～16:20

(3) 液体炭酸を用いた新人工降雨法

九州大学大学院農学研究院 脇水 健次・真木 太一

・九州大学名誉教授 鈴木 義則

・九州大学新キャンパス推進室 吉越 恆

・九州大学大学院工学研究院 西山 浩司

・防衛大学校地球海洋学科 遠峰 菊郎

・九州大学大学院生物資源環境科学府 太田 友美・児玉 なみ希

・ユタ大学 福田 矩彦

16:20～16:50

(4) 大気中での雪結晶の成長～鉛直過冷却雲による浮遊成長実験

北海道教育大学 高橋 庸哉

座長：九州大学大学院農学研究院 真木 太一・脇水 健次

16:50～17:30

(5) 総合討論

## (報告書参考資料)

### 1 人工降雨実験の失敗・成功事例

北部九州での人工降雨実験については、参考資料のように、1999年2月2日、10月27日、2006年2月4日、11月7日、2007年1月8日の成功が挙げられる。一方、その他の年次にも九州大学および防衛大学校・海上自衛隊(厚木基地)で共同実験が行われている。

しかし、実験を計画しても年間で1回程度であるため、人工降雨実験実施の気象条件に合わない、または遭遇しない場合には失敗と評価される。このように年1回程度の実験では、約半年前に自衛隊との打ち合わせで計画を立てるため、実験予定日に福岡・玄界灘付近で全く雲がなければ失敗すると判断され、航空機自体のフライトが中止される。

また、北九州・福岡地域に人工降雨に適した雲がある場合、または厚さ2000m以上の雲の発生が予測される場合には、自衛隊の航空機は厚木基地から約2時間掛けて飛来することになる。しかし、その場合でも雲や気温などの気象条件が変われば実験は成功しないことになる。以上のような種々の事情によって、1999年の実験開始以降では、2000～2005年の長期間にわたり、実質的な成果は得られなかった。

さて、後述するように、2006年2月4日の実験においても、福岡に飛行機が飛来した時には、すでに降雨帯は大分、山口、広島の方に移動しており、液体炭酸を撒布しても本来であれば降らない条件で、かつまた雲の厚さも1000mと実験には不適とされる雲厚であった。しかし、これらの雲は九州北部の背振山地に当たったことで、山岳効果、すなわち山地に吹き寄せる風の上昇気流効果も加わって、液体炭酸を撒布した雲は、微妙な雲物理学的作用、すなわちロレプシン法が効を奏して、人工降雨域を形成するに至った。結果的には予想よりも多い降水量として20～30万tの水量が得られた。

山による上昇気流の効果は空気塊の上昇によって持ち上げ凝結高度(空気中の水蒸気が飽和に達する高度)での雲の形成を促進するため、特に北部九州では、地形的に山地への吹き当て効果の利用価値が高い。上述のような効果・利点は、雲物理学的にシミュレートして評価する必要があるが、実験事例として、貴重な情報をもたらした意味は大きい。従って、地形との関係は重要であり、撒布に当たっては重視すべき要素である。

### 2 1999年2月2日の人工降雨実験(事例1)

実験は北部九州の玄界灘上空で民間航空機を利用して実施された。西高東低の冬型の気圧配置に伴う寒気の吹き出し時に、筋状の積雲列を目標に-90℃の液体炭酸が撒布された。本法は、核を必要としない均質核形成(Homogeneous Nucleation)によって氷晶を形成させる方法である。

液体炭酸は3回撒布された。各々の撒布時間は、①壱岐島の上空から北東方向に約3分間、②壱岐島の西方を北から南に約2.5分間、③壱岐島の南側を南南東に約1分間である。その結果、②、③の2回の撒布によりレーダーエコーが発生し、九州北部の陸上に達しない海域で、次に背振北部でエコーが観測され、次第に山に差し掛かって雨域を拡大していった。②では37分後にエコー幅が水平距離で直径10kmに拡大し、51分後には17kmに達

するとともにエコー高度も約 4000m に達し、降雨密度も増加して、約 1 時間半後に衰退した。一方、③では 44 分後にエコー幅が直径 10km を越え、54 分後には水平距離で直径 12km、1 時間 39 分後には最大で 17km に達したが、その後、レーダーエコーの雲頂高度はやや低く約 3000m になり、やがて衰退していった。

この 2 つの雨域により降った降水量は総計約 100 万 t になり、降水量は多い所で 1～2mm 観測された。この結果、一つの積雲で約 50 万 t の水量になり、水資源として十分利用可能な水量確保が確認された。なお、降雨域の移動を考慮すれば、降水域直径 10km で 1mm の降水量が 1 時間降ると降水量は約 8 万トン ( $\pi \times 5\text{km} \times 5\text{km} \times 1\text{mm} / 1\text{hr} \div 80000\text{t}$ ) となる。

実験では 3 回の撒布であるが、事業として実施するには、それぞれの列状の積雲に次々と撒布すれば、積雲は続けて大陸方面から移動して来るので、人工降雨は量的に十分可能であると判断される。なお、今回の実験は、液体炭酸法による本格的な実験の成功として、日本および世界でも初めてであるといえる。

### 3 2006 年 2 月 4 日の人工降雨実験（事例 2）

実験は北部九州の玄界灘上空で自衛隊機を利用して 3 回実施された（図 4）。糸島半島の北約 15～20km にあった薄い雲が対象とされ、西高東低の冬型気圧配置で、厚さは薄い約 1000m の積雲であったが、9 時 17～19 分の約 2 分間に南から北北西に撒布された。図 4 の写真のように、液体炭酸撒布の 25 分後には周辺の雲より幾分盛り上がる状況が観測され、約 1 時間後には背振山地に明確な降雪・降雨域が観測された。

佐賀県では実際に地上で少量の雪が、福岡県と佐賀県では霰が観測された。降水量は 1 時間当たり 1mm であった。その周辺には降雨域は観測されていないにも関わらず、人工降雨域では顕著であり降雨密度も高かった。特に、この時の降雨の特徴は、撒布雲の厚さが従来、降雨が期待できる最低とされていた雲厚 2000m の半分程度であり、まさに背振山地の斜面上昇気流に起因する凝結の効果が加わったためと判断される。

このように、自然の山による斜面上昇気流の利用は有効であり、地形的な効果の加算は大いに利用可能である。特に冬季、寒候期では氷点下の低温が大きい影響を及ぼし、実験は有望と判断される。今回の 3 回の実験では 1 回当たりの降水は 20～100 万 t の降水量に相当し、多くの水量が確保できることが確認されている。

### 4 2006 年 11 月 7 日の人工降雨実験（事例 3）

実験は玄海灘・壱岐島上空で民間航空機を利用して、雲厚 1000m 以下の積雲に液体炭酸撒布は計 4 回、約 10 分間にわたって実施された（図 5）。このうち、2 回はほぼ同じ雲に撒布したことで、雲が発達し、降雨域は広くはないが、九州大学付近から福岡空港付近にかけて、地上で少量の降水が確認された。どちらも、雨量計がある場所から幾分離れていたため降水量は観測されなかった。

なお、この実験で特に注目すべきことは、目視で厚い雲に散布することを試された結果、偶然にも同じ雲に 2 度撒きした結果となり、それが降水につながった可能性がある。この点はまだメカニズム的に明瞭ではないが有望であり、今後、多方面からの検討が必要であ

る。

また、晩秋期の高温期間における幾分低温日の実験であり、撒布雲は1000m以下の約600mと推定される程の薄い積雲であって、この薄い雲からでも幾分なりとも降水が観測されたことは非常に有効とされる。降水は30分～1時間にわたって、国土交通省のレーダー画像にも降雨域が観測された。総降水量は多くはないが、それでも人工降水域で数十万tと推測されている。

## 5 2007年1月8日の人工降雨実験（事例4）

実験は前回と同様、玄海灘・壱岐島上空で民間航空機を利用して実施され、液体炭酸は高度1800～2000m付近で約5、10、10分の3回撒布された（図6）。これらの実験の結果、降雨域は西北西の風に乗って福岡市から東部域、すなわち福津市、宗像市、古賀市、直方市、若宮市、福岡市、みやこ町、嘉麻市、田川市付近の、距離的には60～120km風下まで観測された。降雨時間は1～3時間にわたり雨量強度としては1～5mm/hrで比較的多かった。

一方、雲の厚さは約400mで非常に薄く、従来ではまず降らない雲厚であったが、気温が-7～-9℃の低温であったことと、内陸に幾つかの山地があることなどが関与して、非常に有利に働いたものと判断されている。これらの降水域は国土交通省のレーダー画像、レーダーアメダス合成図、人工衛星画像でも確認され、降雨域が明らかに観測されている。

## 6 降雨形態と貯水・利水・節水法

干ばつは、渇水や干害を引き起こし、その解決のための有効な手段として、人工降雨法が考えられる。人工降雨法の原理は、液体炭酸、ヨウ化銀、ドライアイスなどの撒布によって発生させた微細な雪の結晶を成長させて多数の大きな雪片とし、地上に降下させる方法である。

これらの雪片が地上付近に達した場合に、地上気温が氷点下であれば降雪となるが、気温が氷点下でない場合には、雨・雪－相対湿度関係図から判定できる。地上で雪か雨になるかの限界温度は、例えば石川県輪島では相対湿度が100%の場合、地上気温が0～2℃であるが、相対湿度が50～60%では4～5℃であり、空気が乾燥していると、このような高い気温でも地上に雪が降ることになる。なお、雪として降らす意義は、貯水・貯雪法として少しでも長期間保存する手法の意味で記述したものである。

さて、長期の天気予報で雨が降らないことが予測される場合には、事前に人工降雨によって雨を降らせ、河川に流れ込んだ水をダムに貯水する方法が考えられる。また、ダムに直接貯蔵できない場合には、地上気温が低い状態で、前述のとおり雪として降らせ、山地に積雪として保存させることができるが、蒸発、昇華による減少や山地等での蒸発散による減少、特に蒸発散は高温の夏季に著しいことなどを考慮しておく必要がある。なお、実施に当たっては、併せて長期予報の精度向上の研究も必要である。

一方、夏季の干ばつで上空に雲がほとんどない状態では、現在の人工降雨法では対処できない場合が多い。また逆に、雄大積雲の発達した積乱雲の場合には、前述のとおり撒布方法を変える必要があるなど、この両方面の研究も急ぐ必要がある。

さらに、人工降雨を実施するに当たっては、種々の気象条件の観測・予測が不可欠であり、また水の損失と節水に関するシミュレーションも不可欠である。このシミュレーションは水利用・節水の意味で非常に重要であり、多くの学問分野との関連が考えられるため、多方面からの共同研究を勢力的に推進する必要がある。

## 7 人工降雨法の事業化と技術移転

人工降雨による降水域は、やはり山脈などの森林地域や農地付近の農山村であると考えられる。さらには、降雨確率、実験成功・失敗等々の状況で、降雨保険や農業共済のような事業化の対策、保険制度の充実も考慮する必要があると考えられる。雨を降らせることは、いわゆる天気を悪くすることで、野外の作業ができなくなるなどの影響・被害への対策、保険的な対処も考慮しておく必要がある。また、降雨の確率予測も不可欠である。

なお、液体炭酸法に関しては、米国ユタ大学福田矩彦名誉教授が、米国、日本、オーストラリアで特許を取得していることで、使用に当たっては、特許法の一般的な取り扱いに従う必要があるとともに、特に事業化に当たっては特許料を考慮する必要がある。この特許が応用・普及に当たってのネックになる問題もあるが、今後検討を要するとはいえ、ドライアイス・ヨウ化銀法に比べ高効率の可能性が大きいことで、採算面を考慮すれば十分普及が可能であると判断される。

さらには、今後は乾燥地域の多い諸外国として、チュニジア、サウジアラビア、中国、オーストラリア等が、共同研究や実施の可能性が高い国と判断される。そして、早急に日本国内で人工降雨法の技術化・マニュアル化を行い、諸外国に技術移転を行う。逆に遅れば、諸外国で本手法のマニュアル化が行われ、今後イノベーションを誇り、技術革新を目指している日本にとっては、技術面の信頼性からも大きい損失になると判断される。

## その他の参考文献

- 1) Baddour, O., Nbou, M., Mokhtari, M.E., Rasmussen, R.M., Johnson, D.B. and Mathews, D.A., 1989: Seedability of Moroccan clouds. In *Proc. of 5th WMO Scientific Conf. on Weather Modification and Applied Cloud Physics*, Beijing, China, WMO, 77-80.
- 2) English, M. and Marwitz, J.D., 1981: A comparison of AgI and CO<sub>2</sub> seeding effects in Alberta cumulus clouds. *J. of Appl. Met.*, 20, 483-495.
- 3) Fukuta, N., Smith, C. and Nishiyama, K., 2003: LOLEPSHIN seeding test in western Kansas hail suppression project-possible hail fallout by air flux. *Preprint, 8th WMO Scientific Conf. on Weather Modification*, Casablanca, Morocco, 87-90.
- 4) Gagin, A. and Neumann, J., 1981: The second Israeli randomized cloud seeding experiment: Evaluation of results. *J. of Appl. Met.*, 20, 1301-1311.
- 5) Garvey, D.M., 1975: Testing of cloud seeding materials at the Cloud Simulation and Aerosol Laboratory. *J. of Appl. Met.*, 14, 883-890.
- 6) 飯田睦治郎、1972: 「気象の未来像—理想の姿を求めて」、日本放送出版協会、東京、pp. 222.

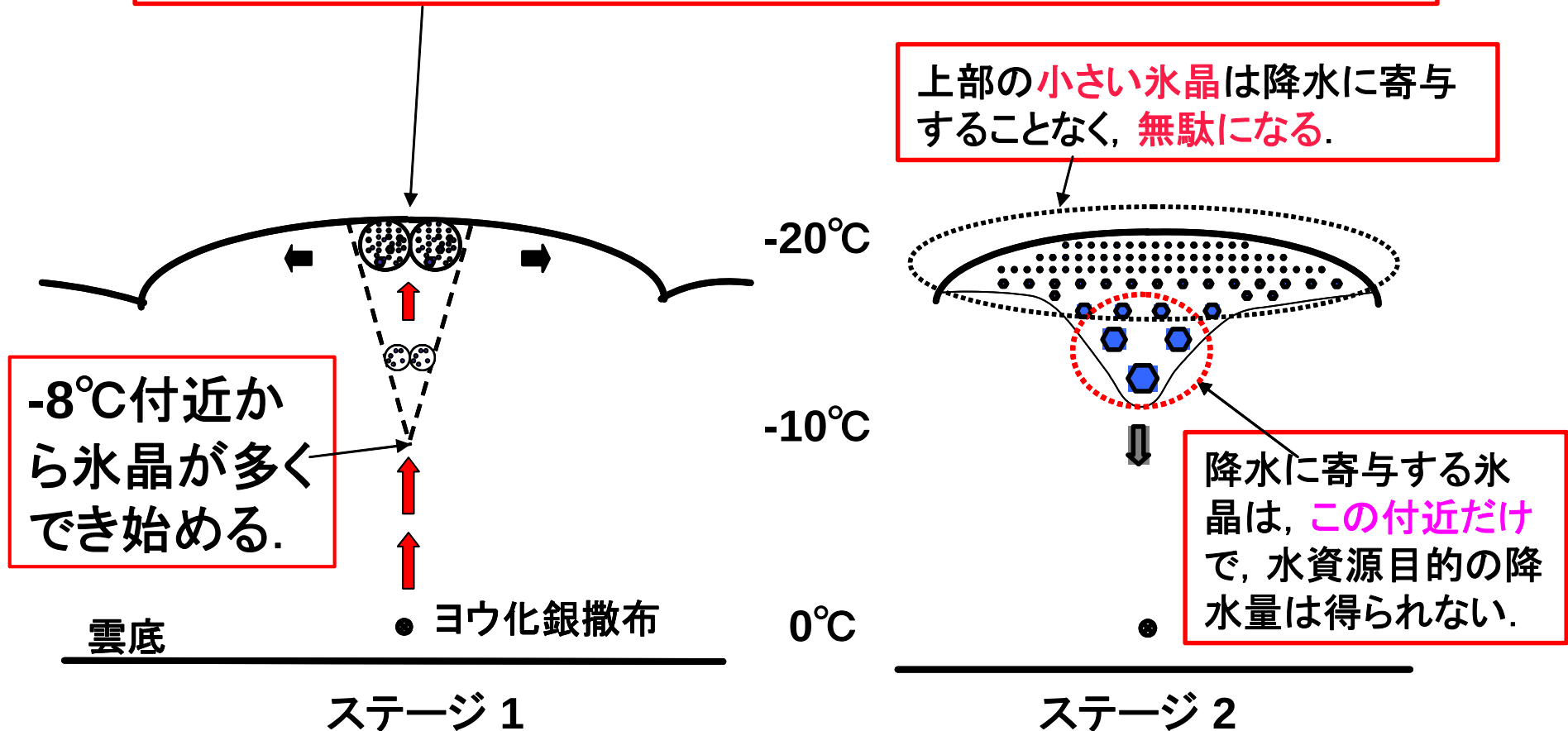
- 7) Hobbs, P.V. and Politovich, M.K., 1980: The structure of summer convective clouds in eastern Montana II: Effects of artificial seeding. *J. of Appl. Met.*, 19, 664-675.
- 8) Javanmard, S., Nishiyama, K., Fukuta, N., Wakimizu, K. and Suzuki, Y., 1998: Numerical modeling for Roll-Up Expansion of Twin Horizontal Ice crystal Thermals (RETHIT) in liquid carbon dioxide seeding. *Proc. of Conf. on Cloud Physics and 14th Conf. on Planned & Inadvertent Weather Modification, Amer. Met. Soc.*, 622-625.
- 9) Javanmard, S., Fukuta, N., Nishiyama, K., Suzuki, Y. and Wakimizu, K., 1998: Numerical modeling of low level horizontal penetration seeding of supercooled cloud with liquid carbon dioxide. *J. Fac. Agric., Kyushu Univ.*, 43, 239-255.
- 10) Javanmard, S., Fukuta, N., Suzuki, Y., Nishiyama, K. and Wakimizu, K., 1999: Numerical modeling for falling-growth induced lateral air spreading of ice crystals thermal in liquid carbon dioxide seeding. Preprints, 7, *WMO Scientific Conf on Weather Modification*, Chiang Mai, 367-370.
- 11) 人工降雨研究会、2001：人工降雨に関する調査研究報告書(福岡県)、pp. 53.
- 12) 九州電力株式会社、1979：人工降雨実施成果報告書－福岡県を対象とした地上発煙による人工降雨(昭和53年11月～54年4月)。pp. 55.
- 13) 真木太一・西山浩司・脇水健次、2006：人工降雨の実用化に向けた新しい「液体炭酸法」の特徴、OHM(Originality Humanity Mobility)、オーム社、2006(6)、93、4-5.
- 14) Nagata, M., Wakimizu, K., Nishiyama, K. and Fukuta, N., 2004: Microphysical analysis of artificially induced radar echoes by liquid carbon dioxide seeding. *6th Inter. Symp. on Hydrological Applications of Weather Radar*, CD-ROM version, Melbourne, Australia.
- 15) Nagata, M., Wakimizu, K., Nishiyama, K., Fukuta, N. and Maki, T., 2005: Numerical simulation for optimum seeding operation using liquid carbon. *J. of Agric. Met.*, 60(5), 901-904.
- 16) Nishiyama, K., Fukuta, N., Wakimizu, K., Jinno, K., Kawamura, A. and Suzuki, Y., 2001: Features of unique radar echoes induced artificially by cloud seeding experiment using liquid carbon dioxide. *Proc. of 5th Inter. Symp. on Hydrological Applications of Weather Radar*, 165-170.
- 17) Nishiyama, K., Jinno, K., Kawamura, A., Wakimizu, K., Koreeda, N. and Nakashima, T., 2002: Important meteorological index as a precursor of heavy rainfall in a BAIU front. *Proc. of the Inter. Symp. on Lowland Technology*, Saga Univ., 293-297.
- 18) Nishiyama, K., Wakimizu, K., Suzuki, Y., Yoshikoshi, H. and Fukuta, N., 2002: Enhancement of precipitation by liquid carbon dioxide seeding. *2nd European Conf. on Radar Meteorology (ERAD)*, Delft, Netherlands, 150-154.
- 19) Nishiyama, K., Fukuta, N. and Wakimizu, K., 2003: Microphysical and dynamical evaluation of radar reflectivity in LOLEPSHIN seeded cloud. *Preprint, 8th WMO Scientific Conf. on Weather Modification*, Casablanca, Morocco, 79-81.
- 20) Nishiyama, K., Fukuta, N., Tomine, K., Wakimizu, K. and Suzuki, Y., 2003: LOLEPSHIN seeding reactions observed in fall convective clouds. *Preprint, 8th WMO Scientific Conf. on Weather Modification*, Casablanca, Morocco, 91-93.
- 21) Nishiyama, K., Fukuta, N. and Wakimizu, K., 2005: Theoretical approach for optimum seeding operation using liquid carbon dioxide seeding. *J. of Agric. Met.*, 60(5), 721-724.

- 22) Ota, Y., Wakimizu, K., Nishiyama, K., Fukuta, N. and Maki, T., 2005: LC seeding test in western Kansas hail suppression possible hail fallout by air flux choking. *J. of Agric. Met.*, 60(5), 905-908.
- 23) Takeda, K., 1964: An evidence of effects of dry-ice seeding on artificial precipitation. *J. Appl. Met.*, 3, 111.
- 24) Takeda, K., 1965: A quantitative determination of the amount of artificial precipitation in the case of dry-ice seeding. *International Conference on Cloud Physics*, Tokyo and Sapporo, 441-445.
- 25) Takeda, K., 1968: Some recent results of weather modification activities in Japan. *Proc. 1<sup>st</sup> National Conference on Weather Modification, Amer. Met. Soc.*, 8-15.
- 26) 武田京一・坂上 務・他、1954～1960：人工降雨の研究(昭和 28～34 年度)、九州電力研究技報、2、4、6、9～14.
- 27) 武田京一・元田雄四郎、1969: 降雨機構とその応用－人工制御、天気、16(9)、384-388.
- 28) 東京電力技術部給電課、1962：東京電力における人工降雨十年史、pp. 169.
- 29) Vonnegut, B., 1947: Nucleation of ice formation by silver iodide. *J. of Appl. Phys.*, 18, 593-595.
- 30) Wakimizu, K., Suzuki, Y., Nishiyama, K., Yoshikoshi, H. and Fukuta, N., 2000: Precipitation augmentation by a new method of cloud seeding in northern Kyushu. *Proc. of the Inter. Symp. on Lowland Technology*, Saga Univ., 323-330.
- 31) Wakimizu, K., Nishiyama, K., Suzuki, Y. and Yoshikoshi, H. and Fukuta, N., 2001: Precipitation augmentation by a new method of cloud seeding in northern Kyushu (2). *J. Fac. Agric., Kyushu Univ.*, 45(2), 565-575.
- 32) Wakimizu, K., Nishiyama, K., Suzuki, Y. and Jinno, K., 2001: Notable features of the radar echo observed in the heavy rainfall system involving tornadoes in Fukuoka, Japan, on June 29, 1999. *Proc. of Fifth Inter. Symp. on Hydrological Applications of Weather Radar*, 365-370.
- 33) Wakimizu, K., Nishiyama, K., Suzuki, Y., Tomine, K., Yamazaki, M., Ishimaru, A., Ozaki, M., Itano, T., Naito, G. and Fukuta, N., 2002: A low level penetration seeding experiment of liquid carbon dioxide in a convective cloud. *Hydrological Processes*, 16, 2239-2253.
- 34) 脇水健次・西山浩司・鈴木義則・遠峰菊郎・神野健二・河村 明・福田矩彦、2002：水資源確保のための液体炭酸航空噴射法による新人工降雨実験、第 6 回水資源に関するシンポジウム、687-692.
- 35) Wakimizu, K., Yoshikoshi, H., Suzuki, Y., Nishiyama, K. Fukuta, N., 2002: Optimum seeding operation by liquid carbon dioxide for enhancing winter-time precipitation in JAPAN. *Proc. of the Inter. Symp. on Lowland Technology*, Saga Univ., 299-303.
- 36) Wakimizu, K., Fukuta, N., Nishiyama, K., Yoshikoshi, H. and Suzuki, Y., 2003: Evolution of radar echoes in LOLEPSHIN winter convective cloud seeding. *Preprint, 8th WMO Scientific Conf. on Weather Modification*, Casablanca, Morocco, 83-86.
- 37) Westcott, N.E., Changnon, S.A., Czys, R.R., Scott, R.W. and Petersen, M.S., 1993: Results of the 1989 exploratory cloud seeding experiment in Illinois based on synoptic weather conditions. *J. of Weather Modification*, 25, 26-49.

図 1

# ヨウ化銀法

サーマル(空気塊)が上昇して、温度が下がると多くの氷晶ができる。  
雲頂付近で非常に多くの氷晶が狭い空間内に存在する。



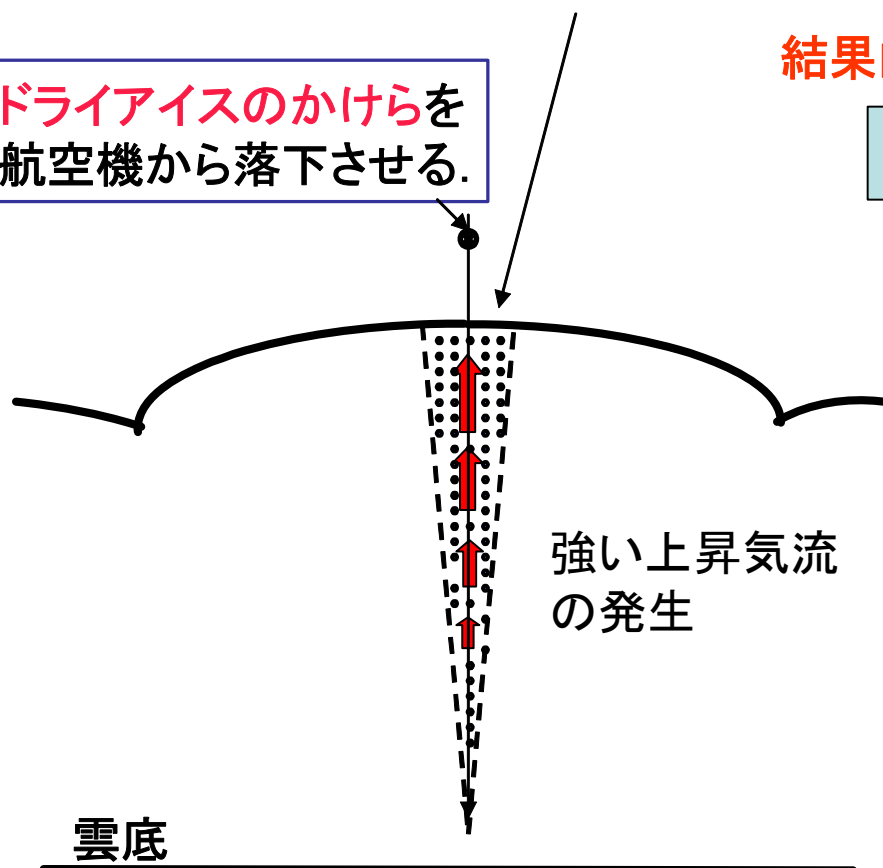
環境への悪影響が予測される. 使用しない方が無難

## 図2

# ドライアイス法

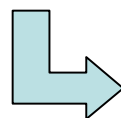
ドライアイスの落下に伴って熱が発生し、鉛直方向に浮力が加算する。  
そのため、強い上昇気流ができて、氷晶が吹き上がる。  
そうすると、重力で落下する大きさの氷晶にまで成長する時間がない。

ドライアイスのかけらを  
航空機から落下させる。

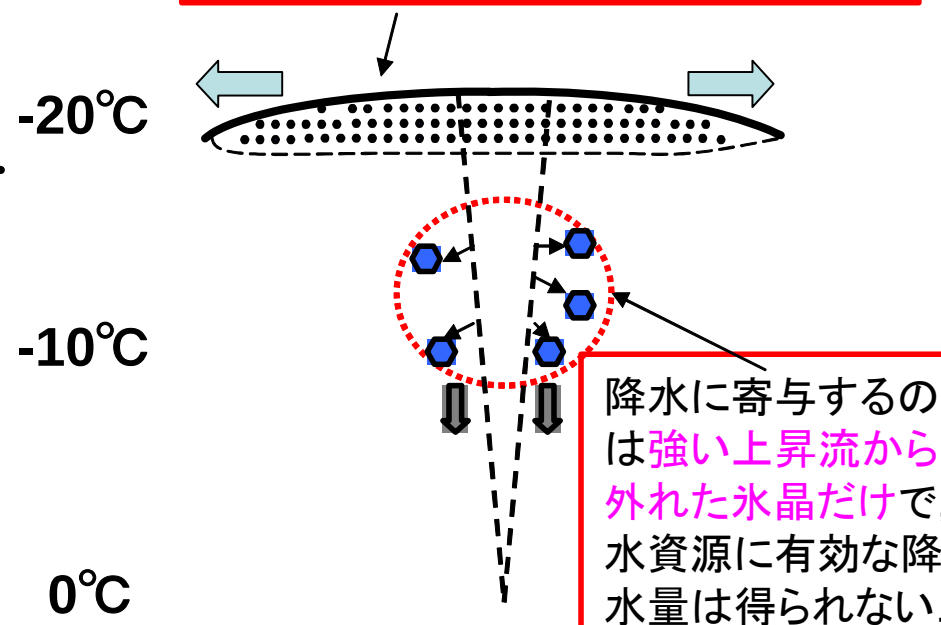


ステージ 1

結果的に



上部の小さい氷晶は降水に寄与  
することなく、無駄になる。



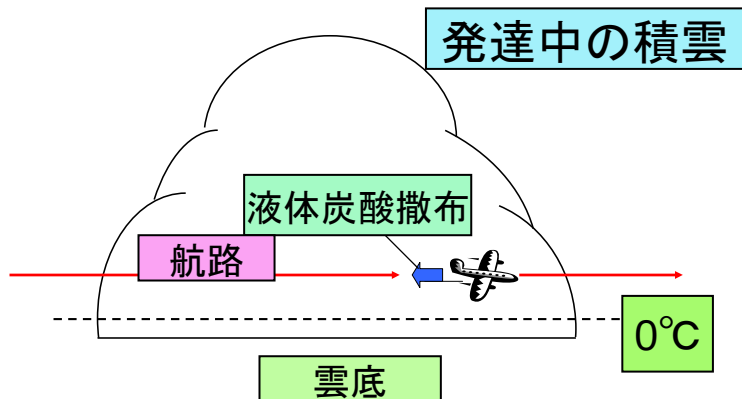
降水に寄与するの  
は強い上昇流から  
外れた氷晶だけで、  
水資源に有効な降  
水量は得られない。

ステージ 2

# 図3

## 液体炭酸法

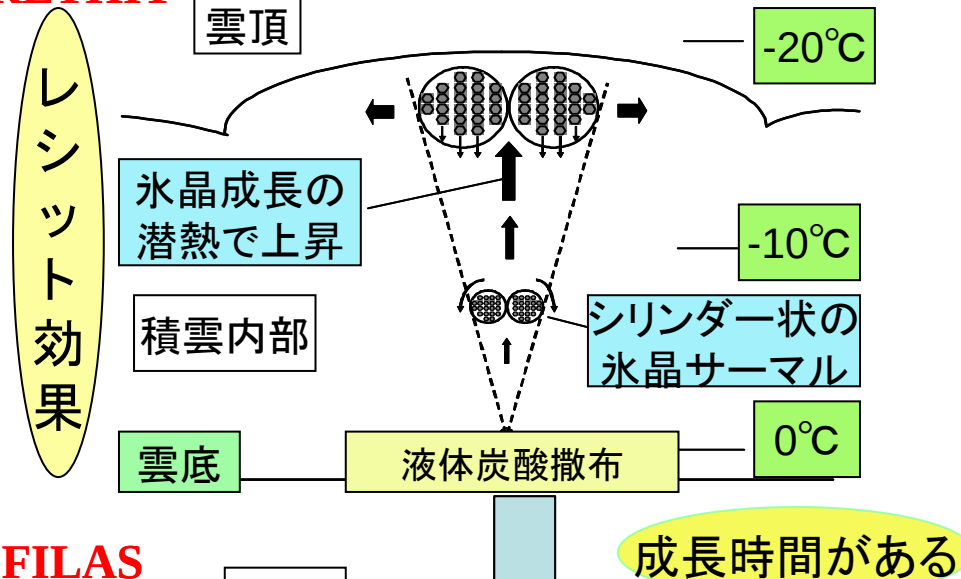
### 液体炭酸撒布 (LOLEPSHIN) 法



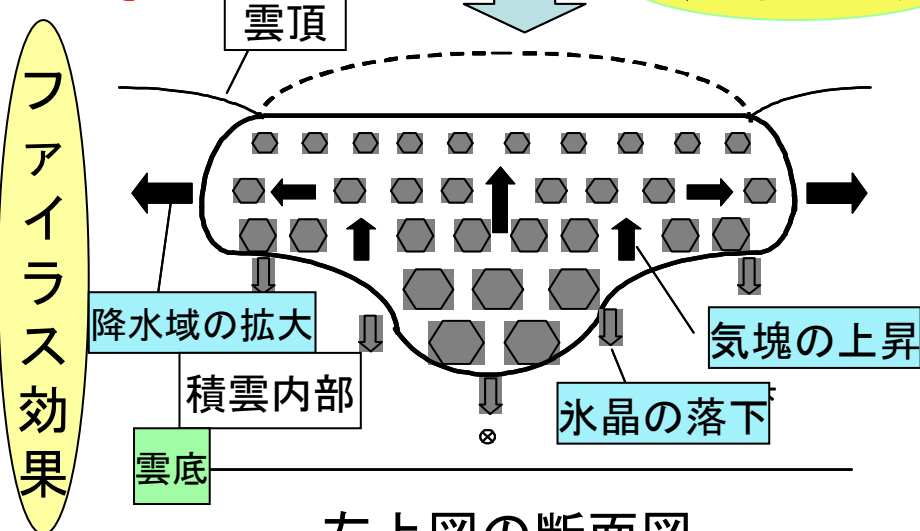
十分大きくなった氷晶は、側方に広がり、落下しながら成長を続ける（右下図のプロセス）

水資源確保に極めて重要な広い降雨域が造成可能

### RETHIT



### FILAS

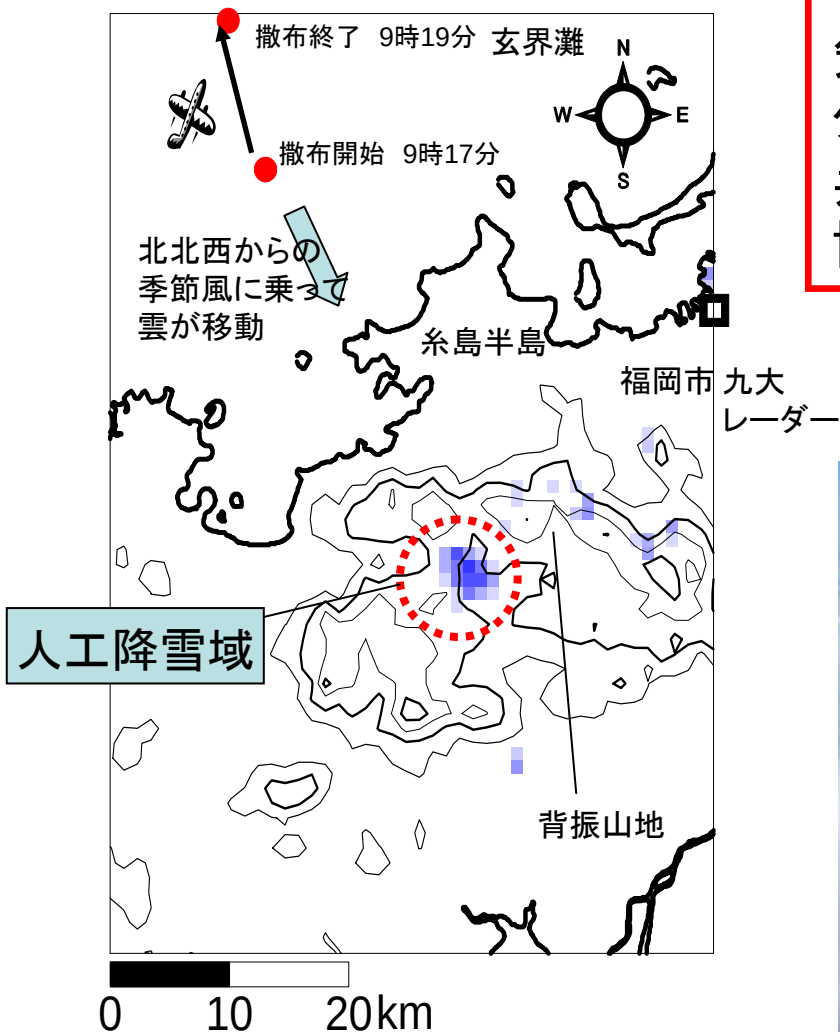


左上図の断面図

## 図4

# 人工降雨実験（事例2）

2006年2月4日10時25分



日時場所 : 2006年2月4日, 北部九州  
気象状態 : 西高東低気圧配置  
ターゲット : 厚さ1km程度の積雲  
共同研究 : 九州大・防衛大・ユタ大学  
協力 : 海上自衛隊 P3C機

液体炭酸散布25分後(9時41分)  
周辺の雲より頂上が盛り上がる状態



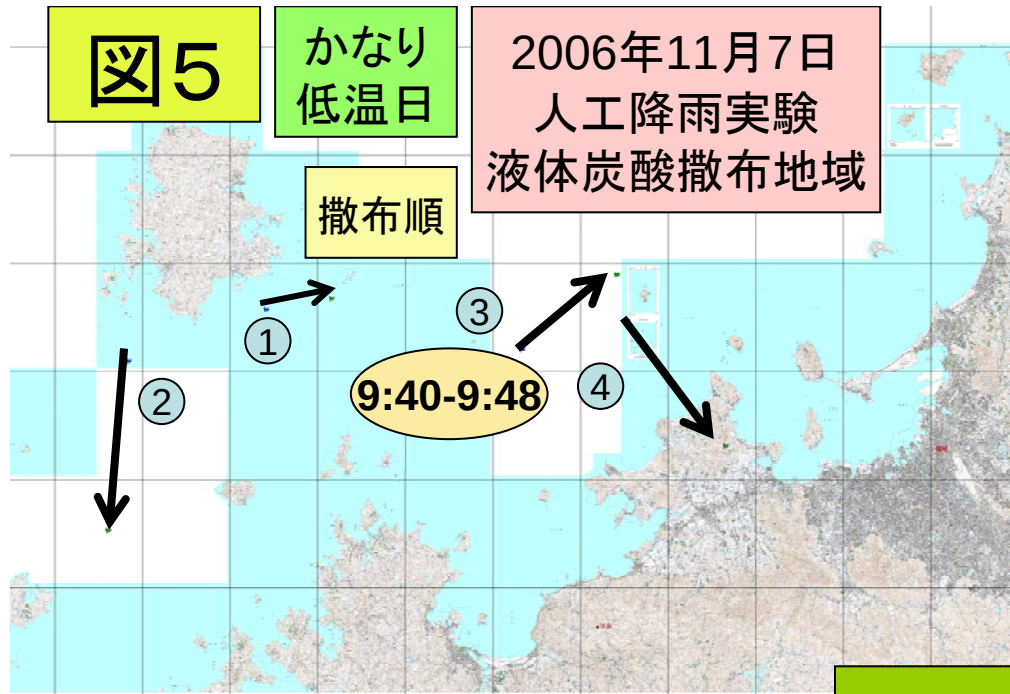
図5

かなり  
低温日

2006年11月7日  
人工降雨実験  
液体炭酸撒布地域

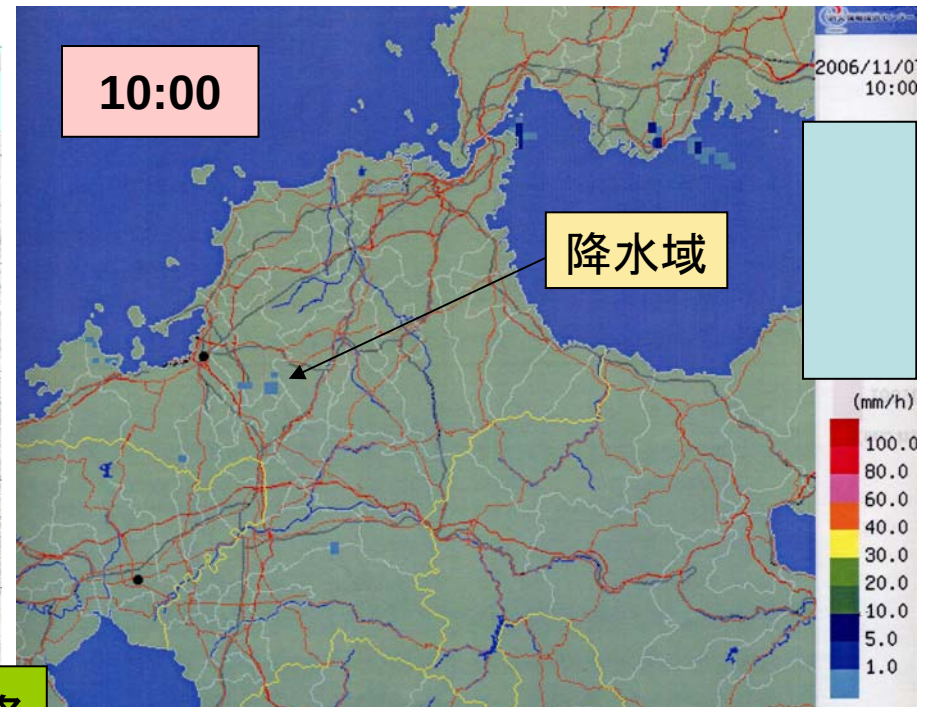
撒布順

9:40-9:48



10:00

降水域



10:30

降雨域

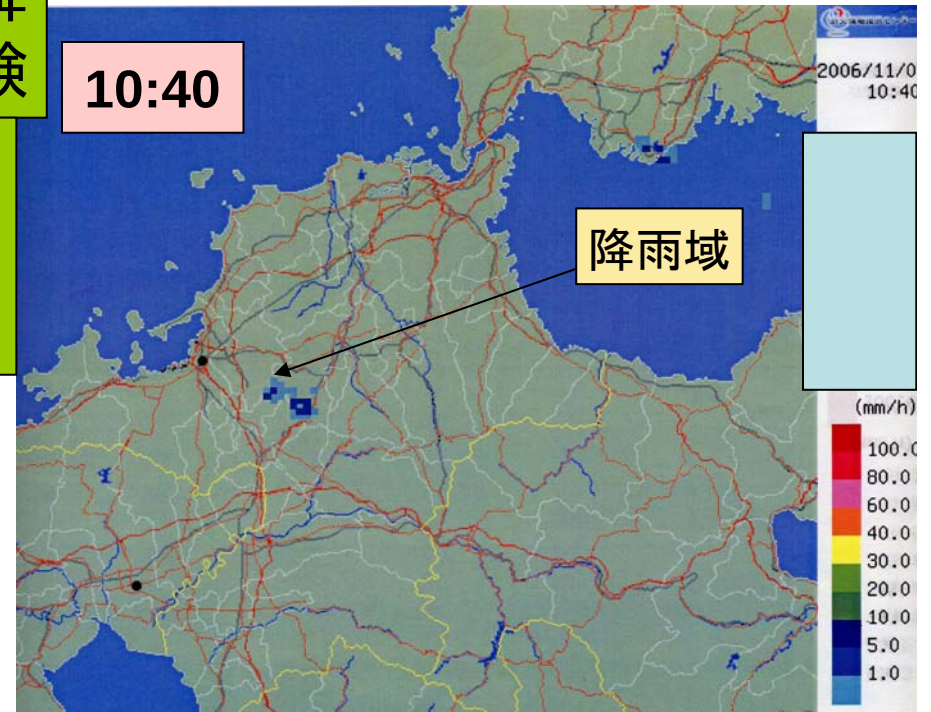


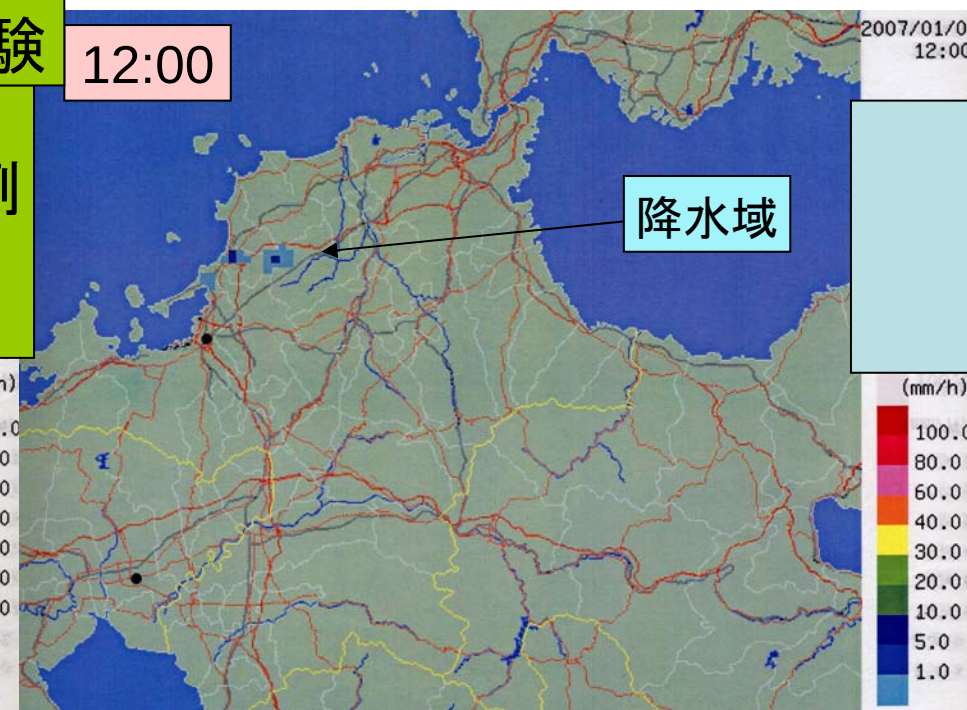
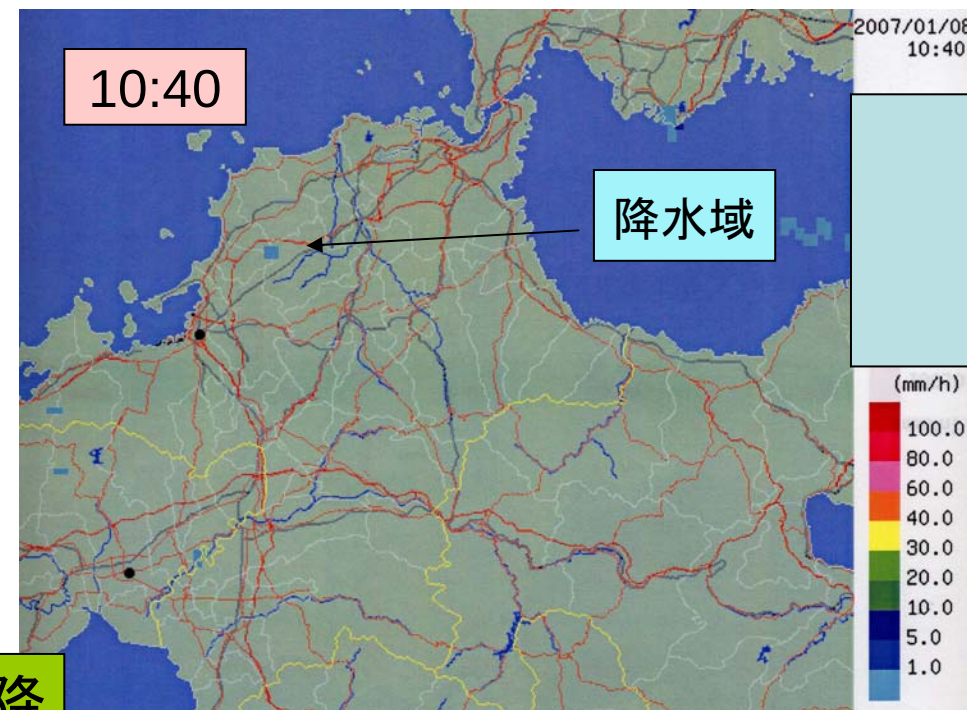
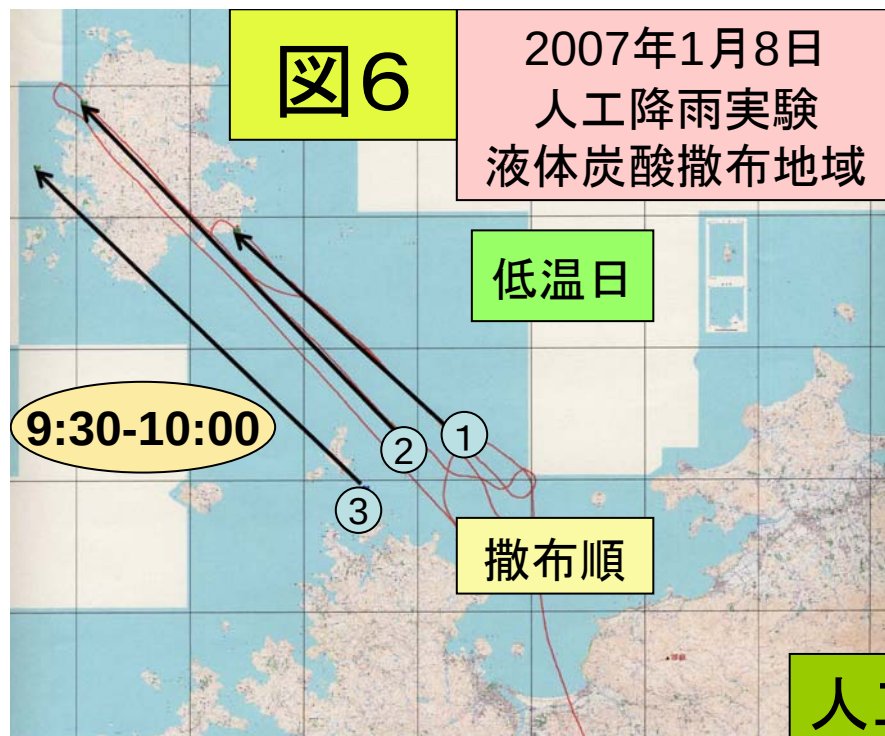
人工降  
雨実験

事例  
3

10:40

降雨域





人工降雨実験

事例  
4