

液体炭酸散布法による九州北部での人工降雨・水資源の有効性

誌名	農業および園芸 = Agriculture and horticulture
ISSN	03695247
著者名	真木, 太一 西山, 浩司 守田, 治 鈴木, 義則 脇水, 健次
発行元	養賢堂
巻/号	93巻4号
掲載ページ	p. 309-319
発行年月	2018年4月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



液体炭酸散布法による九州北部での人工降雨・水資源の有効性

真木太一*・西山浩司**・守田 治***・鈴木義則****・脇水健次*****

[キーワード]: 液体炭酸散布法, 気象改良, 人工降雨, 水資源, レーダー画像

意図もあったが, 人工降雨には成功したが, 風向が適さなかった.

1. はじめに

科学的な人工降雨実験が始まって, すでに 70 年が経過している. これには, ヨウ化銀法, ドライアイス法, 散水法, 液体炭酸法 (Fukuta 1988) などがある. 前 3 者は実験がうまくいけば, ある程度の降水が得られるが, 大量の水資源が得られる方法ではなかった. 一方, 液体炭酸法は世界で初めて 1999 年 2 月に九州大学で実験され, 成果を挙げるとともに (Fukuta et al. 2000), 同年 10 月にも成功している (Wakimizu et al. 2002). その後, 明確な成功事例がない空白期間が続いたが, 2006 年 2 月より同年 11 月, 2007 年 1 月のように, 多くの実験で成功している (Maki et al. 2012). 最近では 2012 年 2 月, 2013 年 3 月, 5 月, 12 月 (4 地点, 8 回), 2014 年, 2015 年などである (Maki et al. 2013 ; 2014 ; 2015a, b ; 2016, 2018). ここでは 2013 年 12 月 26 日に佐賀県唐津市 (33.5°N, 130°E) の海上の上空で実施した液体炭酸散布実験について解説する.

なお, 人工降雨による増雨目的以外に, 湿潤で水資源の豊富な風上側から乾燥し渇水に見舞われる風下側へ, 水資源の一部を降水の形で空間輸送する技術が挙げられる. 世界的に見ても, 山岳領域の両側で降水特性 (風上湿潤・風下乾燥) が異なる地域が多くあり, 今後, このような地域で実用化される可能性が高いと考えられる. 我国では冬季, 日本海側で大量の降雪があり, 豪雪となることも頻繁である一方, 太平洋側では比較的乾燥している. もし, 日本海側の雪・雨の一部を太平洋側の流域に空間輸送することができれば, 日本海側の山間地では豪雪が緩和でき, 水使用量の多い太平洋側の地方で水資源として利用できれば, 一挙両得と期待される. 今回は福岡の日本海側の雨を瀬戸内海側に降らせる

2. 気象概況と実験方法

2.1 気象概況

2013 年 12 月 26 日 3:00 の地上天気図を図 1 に示す. アジア大陸には 1052hPa の強い高気圧がある一方, 大陸から本州を越えて太平洋側に出た 1026hPa の移動性高気圧および朝鮮半島東方の日本海には 1018hPa の小さい低気圧が東方に進んでいる. また, 沖縄付近には前線を伴った低気圧が発生しつつある頃の気圧配置である. したがって, 長崎・佐賀・福岡県付近では気圧傾度が小さくなっている. 26 日後半の天気予報では九州地域は西高東低の気圧配置になる予測であり, 液体炭酸散布時間およびその直後では, 気圧の谷の影響で冬型気圧配置への移行期, すなわち西高東低の気圧配置になる過渡期に相当する頃であり, 朝鮮半島南部から対馬海峡や玄界灘では筋状の雲が流れ込む前の時間帯に相当する. なお, 実験地域の雲型は層積雲の対流雲であり, 雲の厚さは比較的薄かった.

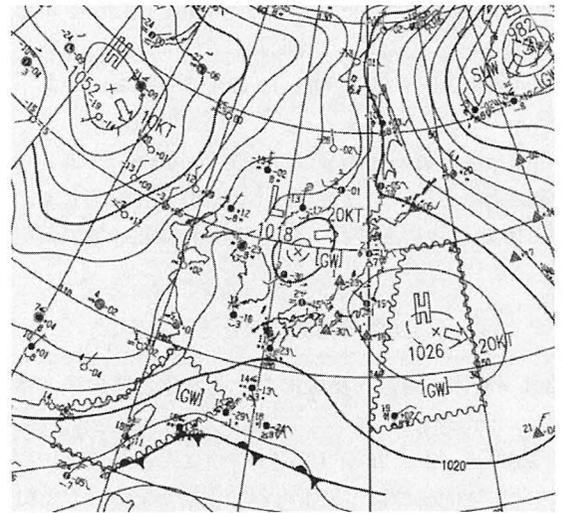


図 1 2013 年 12 月 26 日 3:00 における地上天気図

*九州大学名誉教授・日本学術会議連携会員 (Taichi Maki)

**九州大学工学研究院 (Koji Nishiyama)

***福岡大学水循環・生態系再生研究所 (Osamu Morita)

****九州大学名誉教授 (Yoshinori Suzuki)

*****九州大学農学研究院 (Kenji Wakimizu)

次に、福岡の26日9:00のエマグラム(断熱図)によると、グラフ上で乾燥断熱気温線と湿潤断熱気温線(2本線)の合致する高度に雲が形成される。したがって、上層の雲(1層目)は5200~5500m、下層の雲(2層目)は1500~3350m付近に存在する。高度1500m(850hPa)付近では風向は西南西、風速は6.2m/s、気温は1°C、相対湿度は94%、高度2500m(750hPa)では西南西、17.5m/s、-4°C、100%、3000m(700hPa)では南西~(南南西)、20.1m/s、-6.7°C、100%、5600m(500hPa)では西、27.8m/s、-19.1°C、89%である。なお、これらは実験地域から40km離れた福岡の約5時間前のデータであり、必ずしも観測値と一致する訳ではないが、参考になる。

2.2 液体炭酸の散布

実験対象航空機は、エス・ジー・シー佐賀航空株式会社のセスナ機T303型航空機(クルセイダ)で、サイホン式炭酸ガスポンベ(内容量10kg)を国土交通省から認可を受けた方式で航空機内に搭載・固定した。2013年12月26日12:30に佐賀空港を離陸し、目標とする九州北部の佐賀県唐津市付近上空に到達し、その飛行中の12:32~12:38に風向・風速・気温を観測するとともに、唐津市北部海域の上空で、後述の図5(A)13:40に散布状況(3方向の矢印)を示すように、液体炭酸(液体での直接散布が不可欠)を13:35~13:45の内の各2分間ずつ3回散布した。1回目の散布高度は2440m、散布時間は13:35:24~13:37:24、2回目は2590m、13:38:38~13:40:38、3回目は2590m、13:42:11~13:44:11であった。

散布後は雲の発達および雲からの降水(雨脚)を観測するために付近を旋回し、約30分間滞空して、14:16頃に現場を離れて帰途につき、14:28に佐賀空港に着陸した。

3. 実験・観測結果とその考察

3.1 液体炭酸散布実験における気象と雲の観測状況

2013年12月26日13~15時頃における液体炭酸の散布時間帯では、気圧の谷の影響があり、冬型気圧配置への移行段階の頃であった。背振山付近の高度2400mでの航空機観測によると雲は2層(5000m、2000~3000m付近)で構成されていることが確認さ

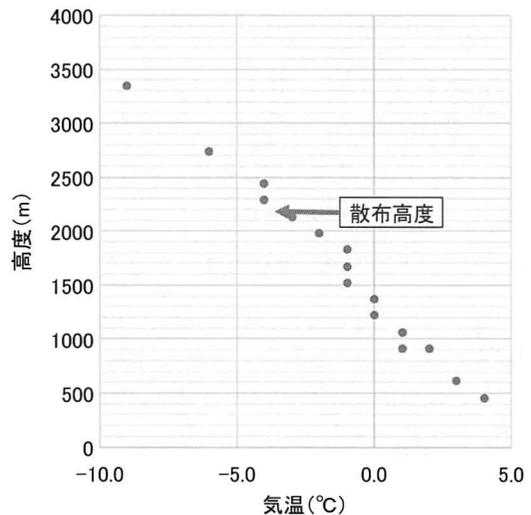


図2 佐賀県唐津市付近における航空機観測による気温の垂直分布

れた。2層の内の下層(2層目)の雲は散布前に航空機から観測ができて、雲頂は2750~3350m(平均3050m)であったが、雲底は航空機からは観測できなかった。

12月26日の航空機観測による唐津市付近の上空の気象状況として、気温の垂直分布を図2に示す。気温は12:33に高度460mで4°C、12:40に高度2440mで-4°Cであり、直線的に低下している。

風関係では、12:48に高度10000ft(3050m)付近の風向は248度(西南西)、風速は27kt(秒速13.9m/s、時速50.0km/s)であり、気温は-6°Cであった。福岡の9:00のエマグラムの値と風向、気温はほぼ一致するが、風速は相当小さくなっている。散布前12:58の雲頂3350mの気温は-9°Cで、13:15、13:27の散布雲付近の雲頂は2750mであり、気温はそれぞれ-6、-5°Cであった。そしてこの雲の上層には1層目の雲が確認できた(図3左図)。なお、航空機からの雨脚観測は2100mで行い、雨脚を確認できたことから、下層(2層目)の雲は3350~2100mに分布すると推測された。ただし、雲頂は層積雲で変化が大きく、2750~3350mの範囲であった。なお、雨脚観測時には、さらに下層に3層目の雲(図3右図の下層の雲)があり、1500~2000mと推定された。

3.2 散布後の雲の発達と気象レーダーによる簡易

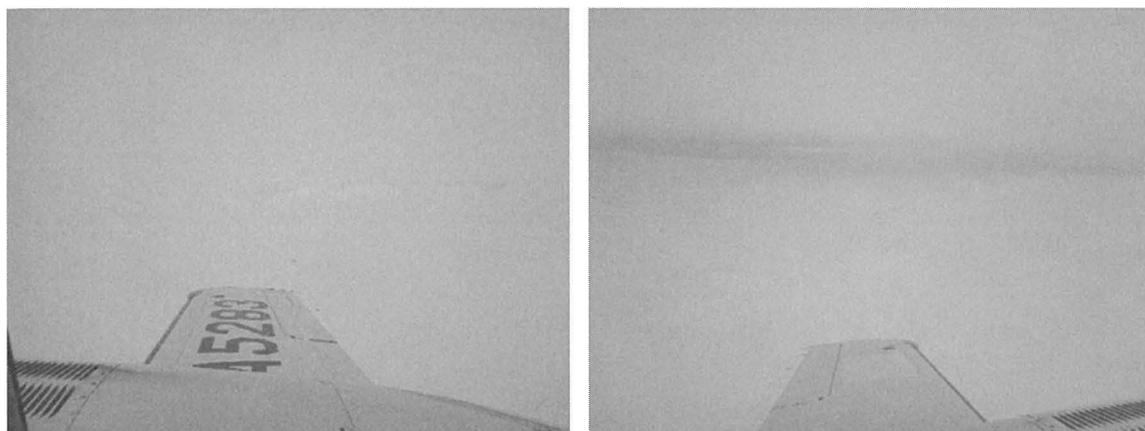


図3 液体炭酸散布 20 分後における発達中の中層雲の雲頂（中央部右寄り）（左）と散布 30 分後の中層雲の雲底およびそれからの雨脚（中央部）と下層雲（右）

評価

実験では、唐津市北方の呼子の東側で糸島半島の南西側の領域を液体炭酸散布地域として、13:35～13:45 の 10 分間、2440m 高度で 1 回と 2590m 高度で 2 回、気温 -4°C の雲に対して液体炭酸を合計 3 回、6 分間散布しており、散布率は 11.1g/s 、総散布量は 4.0kg であった。1 回目は南南東から北北西に向かって散布し、続けて 2 回目は、北側で航空機を旋回させた後、少しずれるが北北西から南南東に向かって散布した。そして 3 回目は西南西から東北東の方向に散布した（図 5 (A)）。

散布時（13:35～13:45）には、下層の雲（2 層目）の最高雲頂は 3350m であるが、雲底は前述の雨脚の観測時の高度から約 2100m と推定された。よって、散布時の雲の厚さ（雲厚）は 1250m であった。

散布の結果、散布された高度における雲域は西南西の風に流されて東北東の方向に進むとともに、13:50 には雲頂が盛り上がり、約 3500m まで発達したことを航空機から確認した。すなわち、散布約 30 分後の雲頂は 3500m で、雲が顕著に発達したことが判った。雲厚は散布時の 1250m から散布後の 1400m に発達したことで、短時間に 150m 増加したことになる。ただし、平均の雲頂からすると 450m もの増加になり、顕著な発達に相当する。

なお、散布を終了して約 30 分後の 14:09 に雨脚（雪の落下）を初めて確認するとともに、14:13 には糸島半島上空の高度 2100m 付近で雨脚を確認したが、その時の気温は -2°C であった。そして、エマ

グラム上では湿度分布は連続しているが、実際の観測領域では雲は 2 層と 3 層に区分でき、その 3 層目の雲の高度は、雨脚発生高度とエマグラムの垂直分布の類推から $1500\sim 2000\text{m}$ と推測された。

次に、気象庁の気象レーダーによる九州地域を中心とする降水画像（エコー）を図 4 (A) - (D) に示す。降水強度は $1, 5, 10\text{mm/h}$ の区分である。図からは北九州地域の雲の変化概況は把握できるが、細かい部分は解像度から十分ではないため、主要部分の概況について解析する。詳しくは次節の気象レーダーで解析する。

散布中（図 4 (A)）から約 40 分後までは変化が見られないが、50 分後では変化の兆しが認められる。そして発達中の雲域は糸島半島を通過後、1 時間後の 14:40（図 4 (B)）に宗像市付近に人工効果と考えられる降水域が確認でき、その後 14:50 には領域を広げながら北九州市を通過したことが確認できた。さらに、15:00（図 4 (C)）では雲の発達した状況が確認できた。そして、降水域は 15:10（図 4 (D)）までは十分観測されたことから判断して、散布から 1 時間 30 分以上も雲内部で人工の氷晶が成長できる環境にあり、降水を多く発生させる結果になった。このような降水持続時間は、これまでの実験（Maki et al. 2013 ; 2014 ; 2015a, b ; 2016）で観測され、継続時間の範囲内にある。

なお、15:10 以降、15:20 には雲底（ 2100m ）付近では急速に雲域が減少し、一部を除いてほとんど消散したことが確認できた。この理由については、上

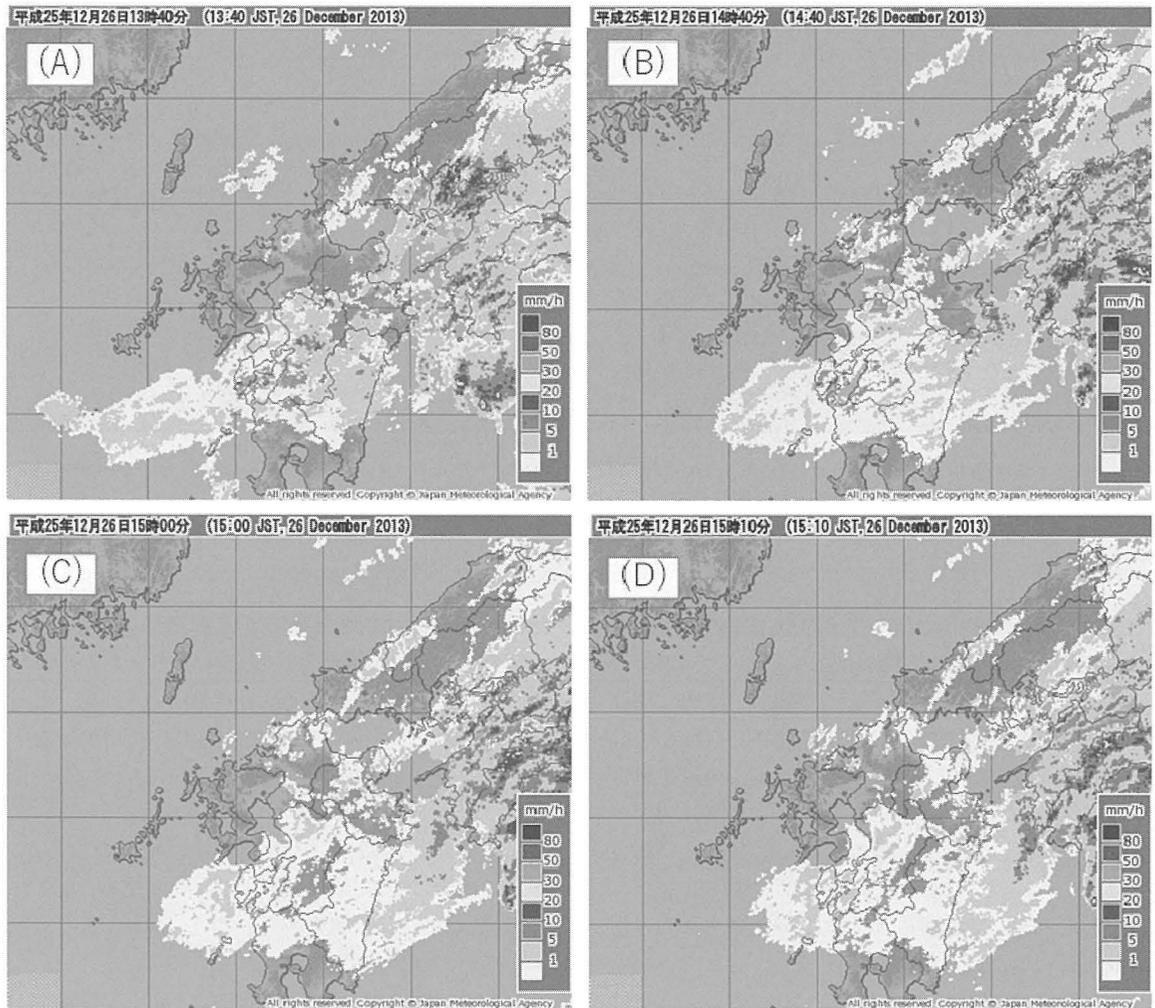


図4 気象レーダーによる降水画像の変化
(A) 13:40, (B) 14:40, (C) 15:00, (D) 15:10.

空 4000m 付近に大陸からの乾燥した気団の空気があり、対馬海峡および玄界灘の海面からの水蒸気の発生によって形成された雲は、その雲自体の高度が低く、かつ人工降雨をもたらす雲、すなわち降水可能雲の厚さも薄いため、同高度の雲からほぼ同時に降水として落下したことで、北九州市付近で雲が急激に衰退したものと推測される。次に、この状況を気象レーダーで詳しく解析・確認する。

3.3 気象レーダー画像による人工降雨の詳細評価
グーグルマップに重ねた気象庁の気象レーダーによる雲の画像を図5 (A) - (D) (降水強度 1, 5, 10mm/h) に示す。図5 (A) には 13:40 の唐津市付

近での液体炭酸散布時の状況を示すように、この時間帯ではレーダーに映る雲は観測されていない。すなわち、雲の高さが低く、密度の低い雲はレーダーには映らないためであるが、前述したとおり、もちろん高度 2100~3350m (航空機からの目視) には雲があり、その雲に散布している。その結果、最初は雲の発達が生じたのはあるが、レーダーに映る状況ではなかった。しかし、人工の雲の急激な発達に起因して散布約 30 分後の 14:08 および 14:12 に糸島半島上空付近で雲底の下方に雨脚を観測したとおりである。

次に、散布中央時 (13:40) より約 40 分後の 14:20 (散布中央域から風下 33km の領域、志賀島西部付

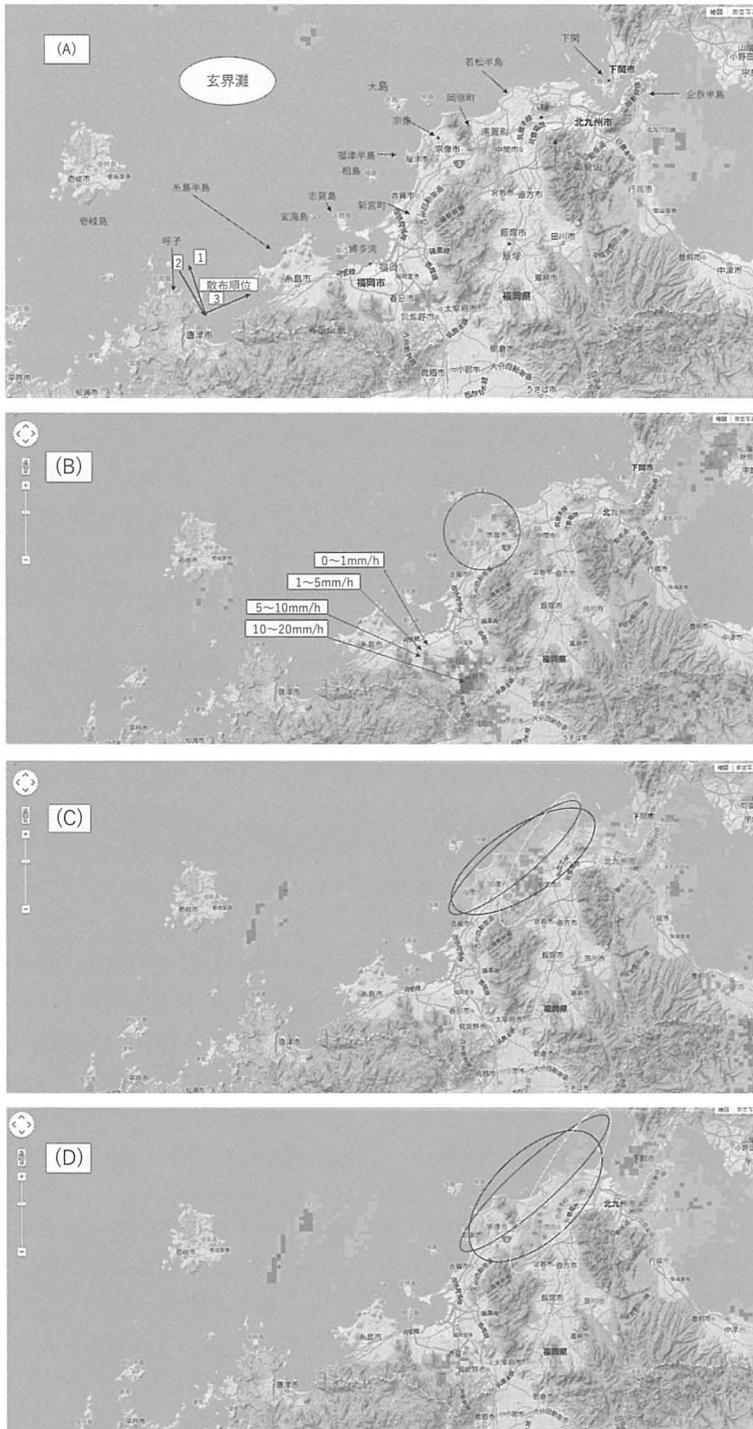


図5 グーグル地図上に重ねた北九州地域の気象レーダー画像
 (A) 13:40, (B) 14:40, (C) 15:00, (D) 15:10.

近)までは、散布域から風下の東北東域には散布時と同様、レーダーに映る雲域は全く認められなかった。14:30 (42km, 志賀島東部)には博多湾北方(玄海島と相島)で極一部レーダーに映る雲が確認できる。この雲は人工による発達中の雲の影響もあるが、主に真西より移動してきた自然由来の雲と考えられる。

その後14:40(図5(B))(50km, 新宮付近, 図中の黒丸領域)には福津市から宗像市付近で明確に、かつ範囲も広く雲域が確認できる。すなわち、風向・風速、時間・距離・高度の評価から、この雲域は人工降雨域であると推測され、降水強度は大部分が0~1mm/hの範囲である。そして14:50(58km)には顕著に幅広く、かつ内陸まで達している。さらに、15:00(図5(C))(67km)には14:50よりもかなり広がっている(黒色楕円領域)。そして15:10(図5(D))(75km, 中間市・直方市付近)には中間市から北九州市に降雨域が移動している。しかし、最後の画像の15:20(83km, 北九州市南部域, 図省略)には、この気象レーダーによる解析ではほとんど雲域は消滅しているが、北九州市の北方海上の雲、すなわち人工降雨域の影響範囲は約90kmに及んでいる。

さて、15:00(図5(C))の画像に戻ると、特に興味深い雲域が観測されている。すなわち、液体炭酸散布は唐津市北方海上であり、散布高度付近の風向は西南西である。したがって、人工的に発達した雲域(雨雲, 中・下層雲)が観測されるのは西南西-東北東方向である(赤色(灰色)楕円域)。一方、自然由来の雲(黄色(白色)楕円域)は、14:30に壱岐島の南側を、そして15:00には壱岐島の東側に通過してきた2列の細長い雲域に示されるように、雲列(上層雲)は南西-北東または南南西-北北東方向である。また同時に、2列の雲自体の移動方向もおおむね南西-北東方向である。

この方向にある自然の雲域は、14:50には西南西-東北東の人工降雨域とやや内陸(東側)に移動している南西-北東または南南西-北北東方向の自然の雲域との合体で相乗作用によって範囲が広く、顕著になっていると考えられる。そして15:00(図5(C))には合体の状況が明確に区別でき(両楕円域の違い)、主に東側の雲域の方が概して降水が強い状況となっているように、自然の雲域に人工の雲

域が加算的に作用して強化された結果と推測される。ただし、中・下層雲では混合が起こっているが、この雲域は画像の重ね合わせであり、雲の混合ではない。すなわち、14:50~15:00では人工の雲域は上方(上向き)の上昇流として発達しながらレーダーに映る状況となるとともに、雲域の下方ではすでに雨脚としての降雨が観測されていたと解釈される。なお、この雲の発達原理は、多くの場合、本来ある雲中の上昇気流および液体炭酸散布に起因する凝結潜熱の発散熱に基づく自己上昇気流との加算効果である。

次の15:10(図5(D)、楕円の色分けは図5(C)と同様)には、遠賀町・中間市付近から北九州市に降雨域が移動しており、10分後の15:20(図省略)には急激にほとんど消滅している。この現象は、上述した雲高の低さと雲厚の薄さのほかに、宗像市の北東側と岡垣町の西側に北西-南東に連なる約500m高の山地(孔大寺山499m, 湯川山471m)による吹き下ろし風、すなわち雨陰気象(雨陰沙漠気候)的作用と北九州市の西方(遠賀町)の平野部における盆地的作用によって下降気流となる晴天化のために雨雲・雲域はレーダーに映らなくなったと推測され、興味深い現象である。なお、地形性の雲の発達および消滅状況については、Seto et al. (2011)やMaki et al. (2013; 2014)と類似している。

また、散布直前の高度3000m付近では風速は13.9m/s, 時速50.0km/hであり、移動距離は1時間30分で75km, 1時間40分で83kmに相当するため、上記のとおり時間的・距離的に確かに一致する移動方向・移動速度および雲の発達・降水状況であると結論付けられた。なお、自然の雲域は高度(5000m)が高いため風速が大きく、長崎県の壱岐島から玄界灘に移動する自然の雲域の移動方向は南西-北東方向で、移動速度は約60km/hと算定され、人工の雲よりも高い雲(上層雲)であると推測された。

降水域では、図4, 5から降水の弱い周辺域は1mm/h, 強い領域は2mm/h程度と推定され、また主要な降水範囲は50×20kmと算定されるため、1mm/hでは約20万トン, 1.5mm/hでは30万トンに達すると推定される。この内、雲の領域から人工の雲域から人工降雨・降水量は約15万トンと推定され、自然と人工の降水量は約30万トンと推定された。なお、次のXバンドMPレーダーによる降水量

評価では、より多量になるが、従来観測のレーダー画像との比較のため、この程度の評価に留めた。

3.4 XバンドMPレーダー画像による人工降雨の詳細評価

XバンドMPレーダー(XRAIN)による画像(国土交通省, 当時試験運用中)を図6(A)-(D)(降水強度1, 5, 10mm/h)に示す。北九州地域の4カ所のレーダーに基づいた画像であり, 局地的な降雨域がより詳細に把握できるレーダー画像である。なお, この画像はより低い薄い雨雲域も観測できるものと判断される。

散布時の13:40(図6(A))には散布域には雲は映っていないが, また14:20にも同様に散布域から東北東域には雲域は認められない。14:30(参考として図6(B)を参照)には, 糸島半島先端部から博

多湾北部の玄界灘上空に, 2列の雲域が映っている。ただし, この2列の雲域は自然の雲に人工の雲も影響した両方の雲域と推測される。すなわち, 西側の南西-北東または南南西-北北東方向の雲列および東側北部の雲域は自然由来の雲域であり, 一方, 東側南部の西南西-東北東方向の雲域は人工の雲域であると推測される。そして, 志賀島北部から福津市西部の2つの小さい半島(福津半島の南・北半島)付近を結ぶ西南西-東北東線上にある雲域は人工雲域の可能性が大である。

次に, 14:40(図6(B))には雨雲による降雨域は広くなり, かつ降雨強度も増して1~5mm/hの雨域が相当広くなっている。福津市海岸より北北東約12kmの大島から南東方向にある雲域は南西-北東方向であるため自然の雲域であると判断される。これに対して, 福津市の西側海岸域を中心とする雲域

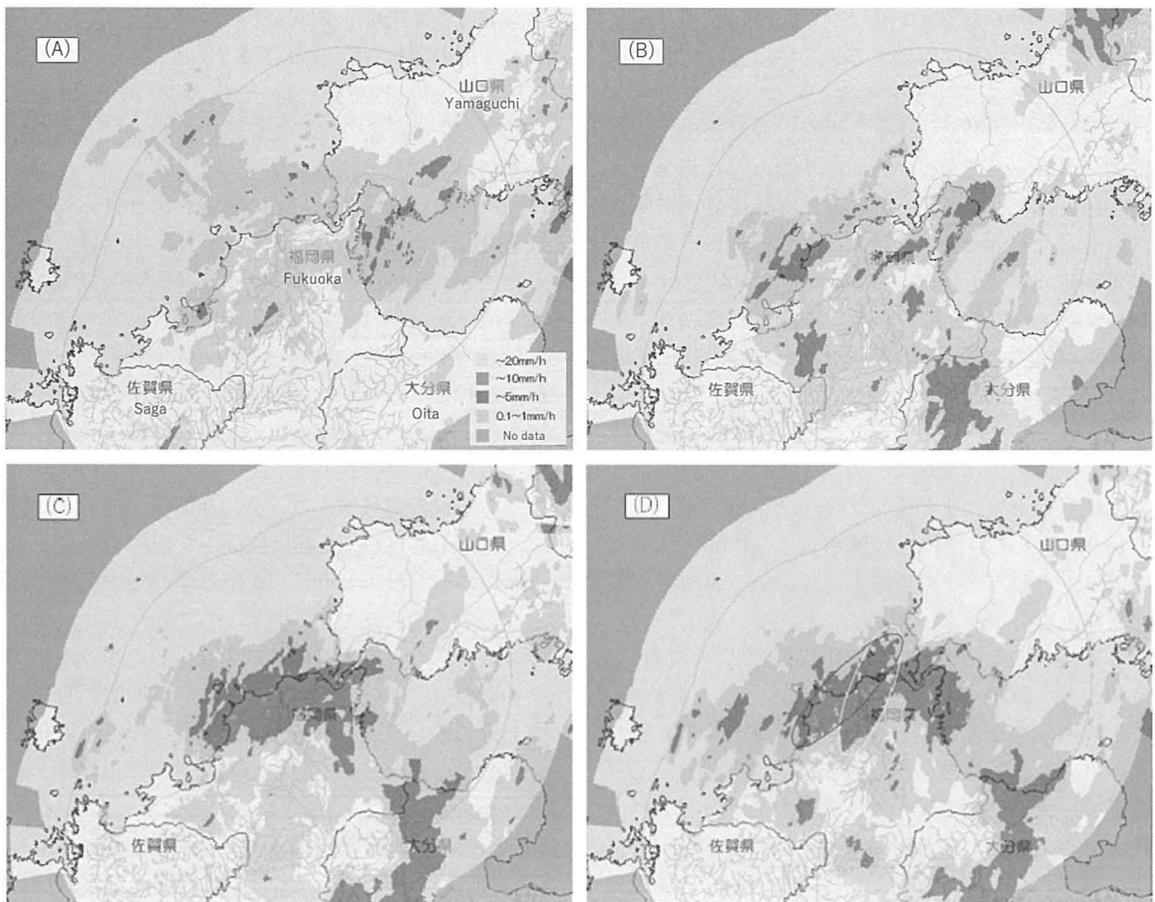


図6 XバンドMPレーダーによるレーダー画像の変化
(A) 13:40, (B) 14:40, (C) 15:00, (D) 15:10.

および海上と陸域の雲域も含めてかなり広い範囲に存在するが、この雲域は方向および時間・距離的に算定した結果、また西南西-東北東方向であるため、人工の雲域であると判断される(図5(D)参照)。なお、志賀島北方の雲域は自然と人工による雲域の合体であると推測される。

14:50(図省略)には、雲の発達およびその雲域からの降雨が評価され、全体的に一層広がっている。特に、西南西-東北東方向の一連の雲域は、方向および時間・距離との関係から前述のとおり人工の雲域であると判断される。すなわち、志賀島北部から若松半島(若松区)の北西端付近および海上までの降雨域は人工の雲域である。なお、雲域の分布範囲はかなりの距離(約40km)に及ぶが、時空間的移動および降水状況に関しては、これまでの観測事例(Maki et al. 2013, 2014, 2015, 2016)の範囲内の現象である。

上空に上昇した雲からの雪片・雨粒が次第に落下するまでには、時間を要する。逆に言えば時間を稼いで大粒化して落下させるためである。各高度によってそれぞれ時差のある、異なる成長過程を辿った結果の降水であり、いわゆる時間の遅れが発生する現象と解釈される。このことは液体炭酸人工降雨法の有利な特性であり、降水量・水資源量が多量になる利点である。なお、岡垣町の海岸域には5~10mm/h域がかなり広い範囲に観測されており、その効果が出ている。その雲域より東側の内陸に形成されている北九州市八幡西区付近の皿倉山(622m)付近の丸い雲域(図は省略)は、山地による地形性の上昇気流による雲域で、方向・時間的に評価して自然地形の影響による雲域であると判断された。

15:00(図6(C))では雲域はさらに全体的に広がっており、そして人工の雲域も広く、かつ西南西-東北東にも幾分長くなっている。ただし、人工の雲域より東側の内陸の雲域は14:50からの引き続きで、自然由来の雲域であると推測される。したがって、①自然のみの上層の雲(自然上層雲域)、②下層の雲の上方にある自然の雲と人工の雲(自然・人工中層雲域)および③下層の人工雲(人工下層雲域)が評価できたと考えられ、①は高度が高く、南-北または南南西-北北東方向、②は高度が低く、南西-北東方向、③はさらに高度が低く、西南西-東北東方向(下層の雲)に区分される。

ここで、明確にしておきたいことは航空機による目視観測で2層の雲が観測された雲域は、図5(C, D)にあるとおり、雲の移動方向が異なっている。これが自然と人工の雲域の明確な区分につながっており、興味深く有益な情報である。したがって、液体炭酸散布による人工降雨雲は雲底が約2100m、雲頂が約3350mであり、さらにその上層に、たとえば壱岐島南方に見られる5200~5500mの雲域(自然雲)、すなわち衛星画像に映っている雲(図5)があるが、その差異を評価していることになる。

15:10(図6(D))には、北九州市付近の海岸寄りから内陸部に多く雲域が存在するが、その内、海岸寄りの西南西-東北東方向の雲域が人工の雲域(赤色(灰色)楕円内の雲)と推測され、それより内陸の雲域(黄色(白色)楕円内の雲)は人工と自然の雲域と推測され、さらに内陸の企救(きく)半島の雲域は自然の雲域である。ただし、15:20には人工の雲域はより東北東方向に移動するとともに、楕円域の南部の雲域は自然の雲域である。さらに内陸の自然の雲域は衰退しつつあるが、同時刻15:20ではMPレーダー画像の方が長く続いており、降水評価効率が高いことを示している。しかし、それでも15:30には、ようやく人工の雲域および自然の雲域は全般に衰退しており、降水は終りに近づいている。

ここで、将来の研究目標である日本海側の雪を太平洋側への期待があり、今回の場合は玄界灘の雪を瀬戸内海への空中輸送である。気象レーダーでは15:20までであるが、XバンドMPレーダーでは15:30までのデータがあり、人工の影響を受けた雲が本州近くにまで達しており、すなわち、100km先まである程度雲域があり、かなり期待が持てる状況ではある。ただし、今回は風向が北西風でないことで瀬戸内海には達しなく、また冬型の気圧配置になりつつある前段階であるため、雲の幅・長さ・厚さともに小さく、降水評価量は少なかったが、本格的な冬型の気圧配置であれば、さらなる増雨の可能性は十分あると考えられる。なお今後、これらの研究を推進する必要があるとともに、さらには豪雨・豪雪の軽減に役立てたいと考えている。

3.5 推定降水量と実降水量の比較および水資源の評価

各地の実際の降水量(雨量)を比較・検討する。

液体炭酸散布後のアメダスのデータによると、福岡（散布域からの距離 37km）の降水量は 2.0mm、宗像（62km）2.5mm、飯塚（68km）2.0mm、八幡（90km）2.0mm、下関（103km）0.5mm であった。地点別の時間降水量は福岡と飯塚は 16:00（降水時間 15:00～16:00 を計測）に 1.0mm と 17:00 に 0.5mm、宗像は 15:00 に 0.5mm、16:00 に 1.5mm、18:00 に 0.5mm、八幡は 16:00 に 2.0mm、下関は 17:00 に 0.5mm であった。

液体炭酸の散布は 13:40 であり、降水のピークは約 1 時間半後の 15:00～15:20 である。図 4～6（C, D）は正にこの状況を示している。レーダーでの雲は 15:20（図省略）にはほとんど消えているが、水蒸気画像（MP レーダー）では 15:20 や 15:30 にも評価されている。すなわち丁度、雨として降っている状況（雲が消えた後の降雨時）を示している。時間・場所（移動距離）・風向（WSW）・風速（13.9m/s, 50km/h）から評価して 15:00～17:00 の降水量は人工降雨であると推測された。全降水量の内、自然降水量と人工降水量があったとして、最低でも半分程度は人工降雨と推定される。すなわち宗像（62km, 18 時まで）の 1.0～2.0mm、八幡（90km）の 1.0～2.0mm および下関（103km）の 0.5mm（散布後 2 時間半後、降雨時間 16:00～17:00）は人工降雨であると推測された。なお、下関では最も遠い地点であり、時間的に 17:00（降水時間 16:00～17:00）の 0.5mm の観測であり、かつ 26 日はこの降水のみであり、間違いなく人工降雨と考えられる。一方、福岡と飯塚は風向 WSW を考慮すると 16:00 の 1.0mm はレーダーによる主要な人工雲の動きから推測して、人工降雨の可能性は低いと考えられる。このように、地上の実際の降水量とレーダー等の上空の気象状況との一致が確認できたのは、貴重な実験結果となった。このような地上降水量観測の事例には、過去に御蔵島や西条での 2 例の観測報告（Maki et al. 2013, 2015a ; 真木ら 2014, 2015）がある。なお、人工降雨が 100km 以上に達した実験結果は三宅島・御蔵島での事例（Maki et al. 2013, 2014）であり、100km に近いのは愛媛県西条市や三宅島・新島での事例（Maki et al. 2015a, 2016）である。

実際の降水量とレーダーエコーによる人工降雨は一致したが、降雨域での人工降水量は 15 万トン、自然降水量を合わせて 30 万トンと推測された。レー

ダーでの解像度は 1mm で、250m のオーダーであり、地表での降水量の評価は 0.5mm で、範囲は 10km のオーダーである。ここでの降雨範囲は 100km であり、評価は十分可能であった。したがって、レーダーのデータと実降水量が一致した結果となった。よって、目的地域での人工降水量が評価され、自然降水量に人工降雨量の加算が評価された。

人工降雨による推定降水量は、三宅島・御蔵島（3 例）では 2012 年 2 月 26 日には多く 5000 万トン（Maki et al. 2013）、2013 年 3 月 14 日に 180 万トン（Maki et al. 2014）、2013 年 12 月 16 日に 10 万トン（Maki et al. 2016）であった。また、2013 年 12 月 27 日の西条では 130 万トン（Maki et al. 2015a）であった。今回は 15 万トンであり、雲の量と厚さは大きくなく、かつ 3 層に分かれており、しかも最下層の雲は層雲状で、顕著な対流雲ではなく、また逆転層は観測されなく、地形的には高標高の山地もなかったことなどが、降水量が少なかった理由と推測される。

3.6 人工衛星（可視・赤外・水蒸気）画像による評価

可視画像による評価として、液体炭酸散布前の 13:30、散布時から約 50 分後の 14:30、散布時から 1 時間 20 分後の 15:00 の可視画像について解析する。なお、人工衛星画像は主として高高度の雲域（上層雲）を評価している。まず 13:30（図 7（A））には散布地域には雲が映ってなく、それより東側には、薄い雲が上層に見られる状況である。14:30（図 7（B））は博多湾の北東方に筋雲が見られる。この影響で 14:30 に一部発達した雲を評価している可能性があるが、この雲については自然の雲の影響が大きいと評価される。次の 15:00（図 7（C））には北九州市付近に南南西－北北東または南－北方向の筋雲が見られるが、これら高層の筋雲は南－北、南南西－北北東方向の風によって形成されたのではなく、偏西風の波動で形成されたか筋状の収束雲と推測される。これらの筋雲は 15:00（図 5（C））のように自然由来の雲（南南西－北北東）である。一方、標高の低い人工の雲（西南西－東北東）は存在することは確かであるが、上層の雲に隠れて図からは明確でない。なお、雲列の方向判定は、レーダーでは南西－北東または南南西－北北東であるが、主に高高度の雲を評価している人工衛星画像では南－北

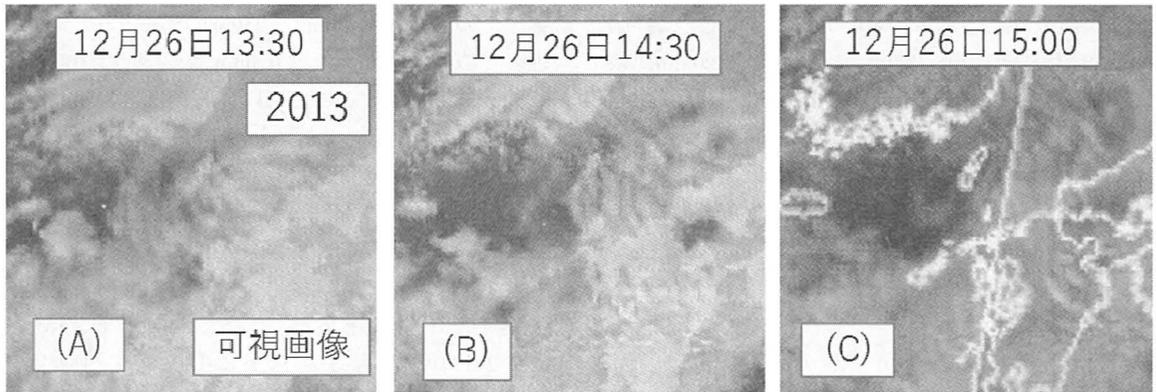


図6 人工衛星の可視画像による雲域の変化
(A) 13:30, (B) 14:30, (C) 15:00.

または南南西-北北東方向であるため、高度により区別ができそうであるが、図からは判別できない。また、下層の雲は発達が顕著であったが、それでも5000m以上の雲には発達できない内に、降水として落下したため、雲が高高度で広範囲に消滅することはなかったことで、レーダーでは評価できたが、衛星画像では区別できなかった。

赤外画像と水蒸気画像の13:30(以降図省略)では図7(A)同様、唐津付近および博多湾北部付近には雲がほとんど認められなく、14:30では玄界灘上空にかなり多く雲が認められた。この雲は、上層の雲が主として映っているため自然の雲であるが、中・下層の雲では人工の雲の発達が推測される。15:00では玄界灘の広い範囲で雲が認められる。この雲の内、北九州付近から内陸にかけての筋雲は標高の高い自然の雲が見られる。下層の雲では人工の雲の発達および降雨による雲の衰退の変化が起こっており、自然と人工の雲が区別できそうであるが、可視画像で記述したとおり区別できなかった。

4. まとめ

2013年12月26日に佐賀県唐津市付近で気温-4℃、高度約2500mの雲域に航空機で液体炭酸を散布強度11.1g/sで6分間散布した実験結果をまとめた。

(1) 液体炭酸散布後、約30分で散布雲は発達し、高度が顕著に増加するとともに、高度2100mの雲底から雨脚が観測された。

(2) 散布雲の雲頂は3350m、雲底は2100m、雲厚は1250mであり、散布約30分後には雲頂は3500m

に達したため、雲厚は1400mとなり150m増加した。なお、高度1500~2000mには最下層の雲が推測された。

(3) 自然上層雲域は高度が高く南-北方向または南南西-北北東方向、自然・人工中層雲域は高度が低く南西-北東方向または南南西-北北東方向、人工下層雲域は高度が低く西南西-東北東方向で、的確に区分できた。

(4) 散布時(13:40)の高度3050mの風向は西南西、風速は13.9m/s(50.0km/h)であり、散布後約1時間後に福津市、宗像市付近で人工の雨雲域が明確に観測され、1時間30分後には北九州市付近で観測された。そして、散布域からの人工降雨域は100km以上に及んだ。

(5) 宗像と八幡の1.0~2.0mmの降水量および下関の0.5mmの降水量は人工降雨と推定され、レーダー画像と一致した。

(6) 散布約3時間後までの人工による降水量は約15万トン、自然由来と人工の降水量は合計約30万トンと推定された。

(7) 人工衛星の可視・赤外・水蒸気画像から南-北方向寄りの自然の雲は評価されたが、下層の雲である西南西-東北東方向の人工降雨雲は上層の雲に隠れて識別できなかった。

引用文献

- 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, pp.213.
Fukuta, N., Wakimizum K., Nishiyama, K., Suzuki, Y. and Yoshikoshi, H., 2000: Large unique radar echoes in a new,

- self-enhancing cloud seeding. *Atmospheric Research*, 55, 271-273.
- 真木太一・鈴木義則・脇水健次・西山浩司, 2012: 『人工降雨－渇水対策から水資源まで－』, 技報堂出版, pp.176.
- Maki, T., Morita, O., Suzuki, Y. and Wakimizu, K., 2013: Artificial rainfall technique based on the aircraft seeding of liquid carbon dioxide near Miyake and Mikura Islands, Tokyo, Japan. *J. Agric. Met.*, 69(3), 147-157.
- Maki, T., Morita, O., Suzuki, Y., Wakimizu K. and Nishiyama, K., 2014: Artificial rainfall experiment by seeding liquid carbon dioxide above the Izu Islands of Tokyo on March 14 in 2013, *J. Agric. Met.*, 70(4), 199-211.
- 真木太一・守田 治・鈴木義則・脇水健次, 2014: 三宅島・御蔵島での航空機散布による液体炭酸人工降雨実験, *農業および園芸*, 89 (1), 9-22.
- 真木太一・西山浩司・守田 治・脇水健次・鈴木義則, 2015: 2013年12月における愛媛県西条市付近での液体炭酸散布による人工降雨実験, *沙漠研究*, 25 (1), 1-10.
- Maki, T., Morita, O., Nishiyama, K., Suzuki, Y. and Wakimizu K., 2015a: An artificial rainfall experiment based on the seeding of liquid carbon dioxide by aircraft on December 27, 2013, at Saijo, Ehime, in the Inland Sea of Japan. *J. Agric. Met.*, 71(4), 245-255.
- Maki, T., Morita, O., Suzuki, Y., Nishiyama, K. and Wakimizu, K., 2015b: Application of artificial rainfall by the aircraft seeding of liquid carbon dioxide for utilization of water resources and prevention of desertification. *J. Arid Land Studies*, 25(3), 73-76.
- Maki, T., Morita, O., Suzuki, Y., Wakimizu K. and Nishiyama, K., 2016: Artificial rainfall experiment by seeding of liquid carbon dioxide above the Izu Islands of Tokyo on December 15-16 in 2013. *J. Agric. Met.*, 72 (3-4), 1-12.
- Maki, T., Nishiyama, K., Morita, O., Suzuki, Y. and Wakimizu K., 2018: Artificial rainfall experiment involving seeding of liquid carbon dioxide at Karatsu in Saga. *J. Agric. Met.*, 74 (1), 45-53.
- Seto, J., Tomine, K., Wakimizu, K. and Nishiyama, K., 2011: Artificial cloud seeding using liquid carbon dioxide: Comparisons of experimental data and numerical analyses. *J. Applied Meteorology and Climatology*, 50, 1417-1431.
- Wakimizu, K., Nishiyama, K., Suzuki, Y., Tomine, K., Yamazaki, M., Ishimaru, A., Ozaki, M., Itano, T., Naito, G. and Fukuta, N., 2002: Low level penetration seeding experiment of liquid carbon dioxide in a convective cloud. *Hydrological Processes*, 16, 2239-2253.