

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23510228

研究課題名(和文) 冬季北部九州玄界灘を対象にした、非降水雲に対する人工降雨の基礎的技術の開発

研究課題名(英文) Research on the development of basic technique of artificial rainfall to non-precipitation clouds above the Genkai sea in the Northern Kyushu, Japan

研究代表者

脇水 健次 (WAKIMIZU, KENJI)

九州大学・(連合)農学研究科(研究院)・助教

研究者番号：00240903

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)： 頻りに干ばつ(渇水)が発生する北部九州に位置する九州大学では、1947年からドライアイスやヨウ化銀を用いた人工降雨実験を行っているが、これらの方法は効率が悪いことが知られている。そこで、1999年2月に新しい液体炭酸人工降雨法の実験が、福田矩彦ユタ大学名誉教授との共同で、北部九州玄界灘の冬季積雲に実施され、世界で初めて成功した。今回、数回の実験から、冬季積雲への液体炭酸撒布による地上への降水効果はかなり鮮明になった。そのうえ、冬季層雲への実験による地上への降水効果も鮮明になった(2013年12月26日)。これらのことから、今後の液体炭酸人工降雨法の実用化の可能性がかなり高まったと考えられる。

研究成果の概要(英文)： Because of the impact of global warming, many droughts have broken out by extreme small amount rainfall in recent Japan. So as to solve these problems, new artificial rainfall method using the liquid carbon dioxide (LCD) was proposed by Fukuta (1996). This new method consists of the generation of ice particles by homogeneous nucleation using LCD and the subsequent more effective growth for ice particles without competition process. In our study, the three LCD seeding experiments were applied to the super-cooled clouds (strata) formed over Karatsu City in the northern part of Kyushu, Japan on December 26, 2013. Each time of the experiments was 120 seconds, and each seeding rate of LCD was 11.1g/s. And, the seeding height was 2500m to 2650m. The thickness of cloud was about 2600m. About 45 min. after seeding the JM A radar echoes appeared. These echoes moved to from SW to NE for 35min.. We verified that it rained from these echoes. We could succeeded the stratus.

研究分野：複合領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム(自然災害科学・防災学)

キーワード：人工降雨 水資源 渇水 積雲 液体炭酸 氷晶

## 1. 研究開始当初の背景

頻繁に干ばつ(渇水)が発生する北部九州に位置する九州大学では、1947年からドライアイスやヨウ化銀を用いた人工降雨実験を行ってきた。しかし、これらの方法は効率が悪く、なかなか地上に降水をもたらすことが出来なかった。そこで、新しい液体炭酸人工降雨法が、福田矩彦ユタ大学名誉教授との共同実験で1999年2月2日に九州北部玄界灘の冬季積雲を対象に実施され、世界で初めて成功した。

## 2. 研究の目的

1999年2月からは、厚さが2000m以上の冬季積雲を対象に液体炭酸人工降雨実験を行っている。しかし、実験に成功するために重要な条件は、(1)「ある程度発達した冬季積雲(降りそうで降らない雲:シーダビリテイの高い雲)」を効率よく見つけ、その雲に液体炭酸を撒布すること。(2)冬季積雲だけでなく冬季層雲への液体炭酸撒布の可能性を見つけること。である。

## 3. 研究の方法

### 3.1 液体炭酸人工降雨法の原理

1)航空機につけたノズルから $-90^{\circ}\text{C}$ の液体炭酸を厚さ約2000m以上ある雲の底部( $-1^{\circ}\text{C}$ 以下)に水平に撒布する。撒布直後、その周辺の空気が急激に冷やされ、水蒸気が昇華し、液体炭酸1g当たり $10^{13}$ 個の氷晶が発生する。2)氷晶発生後、回転する一対の人工サーマルが形成される。3)サーマルは、氷晶の成長の際に発生する潜熱で回転上昇し、自身の体積を増加させながら徐々にそのスピードを増す。4)雲頂に近づくにつれ、サーマルは急激にスピードを落とし、氷晶を含んだ空気の上昇運動は雲頂で抑えられるため、水平に拡がり始める。氷晶はこの位置で十分に成長していて、雲の上部から落下を始める。5)氷晶の落下中、その成長で放出された潜熱により空気が暖められ、暖められた空気は弱い上昇を続ける。6)落下した氷晶はそのまま融けずに雪になるか、融解層を通過した氷晶は、融けて雨になるとともに融解潜熱吸収に基づく下降気流を誘起する。その結果、レーダの鉛直断面エコーが、キノコ型になる。キノコ型になると実験は成功したとする。

### 3.2 人工降雨実験方法

毎回、地上天気図が冬型になると卓越する冬季積雲を人工降雨実験の対象雲とした。実験日には、佐賀空港(佐賀県佐賀市)から民間航空機を用い、航空機後部に取り付けたノズルから液体炭酸を対象雲に撒布した。対象雲としては、2012-2013年度前半は冬季積雲を、2013年度後半は冬季層雲とした。

実験中は、航空機からビデオカメラやデジタルカメラにて雲の挙動を観測記録し、同時に九州大学や国土交通省の気象レーダーでも人工的に発生した降水エコーも記録した。解析には、カメラやレーダーデータと、気象庁提供の高層や地上の気象データを使用した。

## 4. 研究成果

数回の実験から、冬季積雲への液体炭酸撒布による地上への降水効果はかなり鮮明になったが、冬季層雲への液体炭酸撒布による地上への降水効果は不明であった。そこで、2回冬季層雲への実験を試みた。その結果、2013年12月26日に初めて冬季層雲への液体炭酸撒布による地上への降水効果が鮮明になった。そこで、ここでは、「冬季層雲への液体炭酸撒布実験」結果について詳細を記す。

### 4.1 実験概要

実験当日は、朝鮮半島付近に弱い低気圧があり、日本列島は弱い冬型で、地上気温は $7.3^{\circ}\text{C}$ 、地上付近の風は弱い西南西の風、上空850hPa(地上約1500m)から700hPa(地上約3000m)にかけては西南西から南西の風が吹いていた(図1, 2, 3)。雲は下層、中層、高層と3層存在した。液体炭酸撒布実験の対象雲は、中層の層雲{雲底高度1500m(気温 $2.8^{\circ}\text{C}$ )、雲頂高度3200m(気温 $-7.0^{\circ}\text{C}$ )、厚さ1700m}で、この雲に3回液体炭酸を撒布した。1回目は、佐賀県唐津市沖を南南東から北北西へ、高度2480m( $-2.1^{\circ}\text{C}$ )付近で、13時35分20秒から13時37分20秒(120秒間)。2回目は、1回目とほぼ同じコースで唐津市沖を南南東から北北西へ、高度2650m( $-4.1^{\circ}\text{C}$ )付近で、13時38分37秒から13時40分37秒(120秒間)。3回目は、唐津市付近を西から東に、高度2596m( $-3.3^{\circ}\text{C}$ )付近で、13時42分15秒から13時44分15秒(120秒間)であった。撒布率は、各々11.1g/sであった(図4)。

### 4.2 実験結果および考察

3回の実験後、航空機からの観測、国土交通省レーダーによるレーダーエコーの追跡および地上の降水観測を実施した。その結果、次のような事柄が判明した。

- 1)航空機からの観察の結果、液体炭酸を撒布した領域での雲の盛り上がり確認できた。
- 2)地上での降水が確認された。
- 3)実験を実施した雲が中層の雲であったため、人工雲の変化は確認出来なかった。
- 4)実験後すぐには、レーダーエコーの追跡は、降雨強度が非常に弱く、困難であった。しかし、撒布後45分(1430JST)に弱いエコーが志賀島上空付近に発生、その後、南南西の風により、宗像市、北九州市へと面積を拡大させながら移動し、発生後約1時間(1520JST)で消滅したことが確認できた(図5a, b, c, d, e, f, g)。

これらの結果から、北部九州での冬季層雲での液体炭酸人工降雨実験は初めてであったが、成功したと考えられる。

つまり、今まで、冬季積雲のみ液体炭酸人工降雨法が有効であると考えていたが、ある程度の厚みを持つ冬季層雲にも液体炭酸人工降雨法が可能であることが判明したことで、今後の液体炭酸人工降雨法の実用化の可能性がかなり高まったと考えられる。

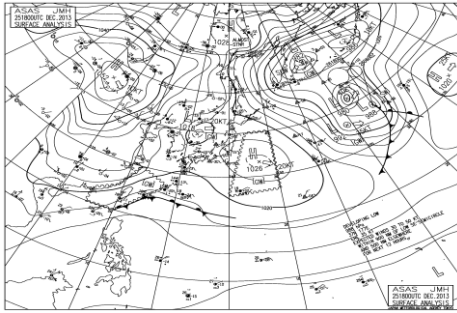


図1 地上天気図 (2013年12月26日0300JST)

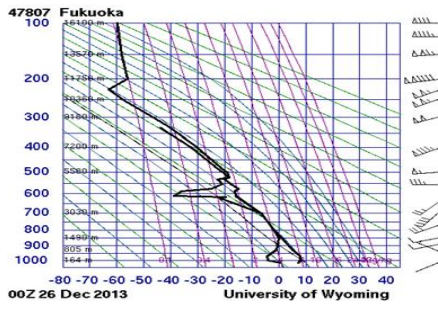


図2 人工降雨実験日のエマグラム  
(2013年12月26日0900JST)

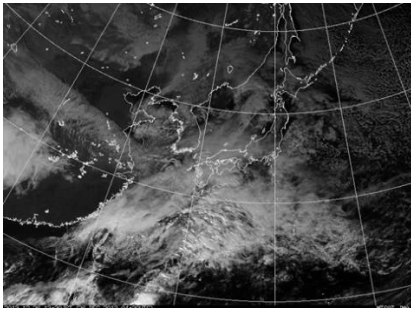


図3 液体炭酸撒布時の衛星可視画像  
(2013年12月26日1330JST)

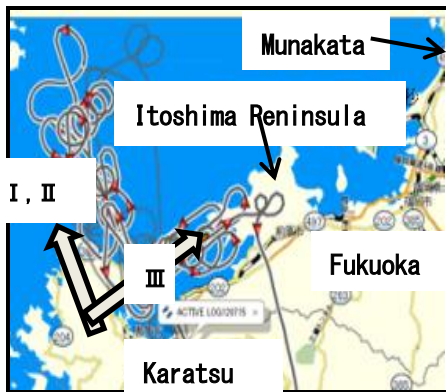
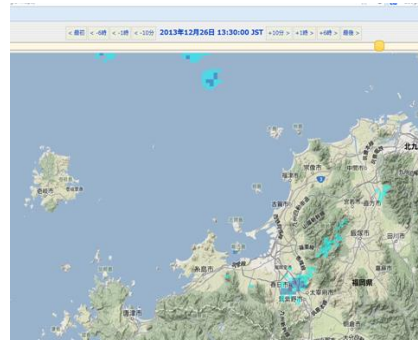
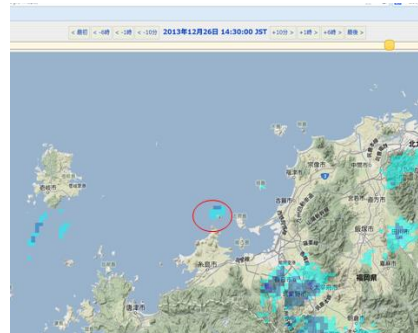


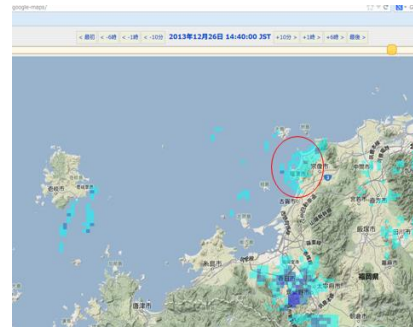
図4 液体炭酸撒布時の航空機の軌跡と  
実験対象空域 (太い矢印)



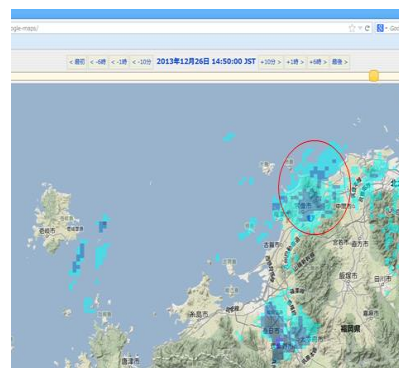
5a 1330JST (撒布前)



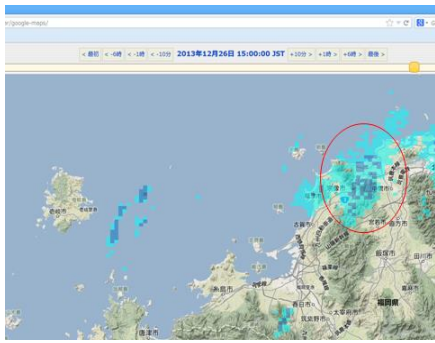
5b 1430JST (撒布後45分)



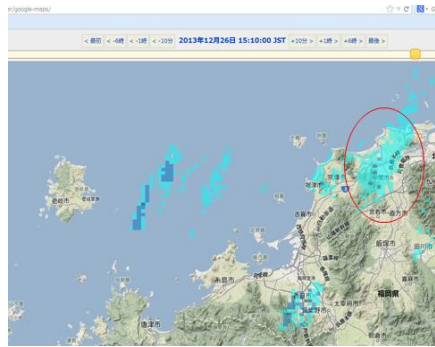
5c 1440JST (撒布後55分)



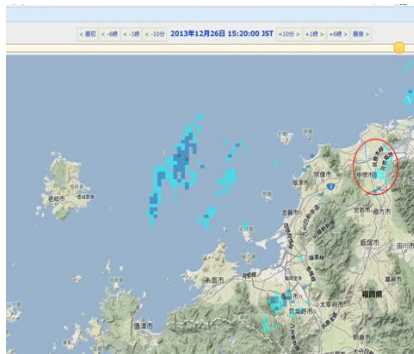
5d 1450JST (撒布後65分)



5e 1500JST (撒布後 75 分)



5f 1510JST (撒布後 85 分)



5g 1520JST (撒布後 95 分 : 消滅直前)

図 5 液体炭酸撒布後のレーダーエコーの経時変化 (国土交通省レーダー)

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

1) Jinichiro Seto, Kikuro Tomine, Kenji Wakimizu and Koji Nishiyama, Artificial cloud seeding using liquid carbon dioxide: comparisons of experimental data and numerical analyses. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **50**, pp.1417-1431, 2011

2) 松村直紀・脇水健次・西山浩司・遠峰菊郎・真木太一・鈴木義則, 寒候期における亜熱帯地

域での液体炭酸人工降雨法の可能性について, 九州の農業気象, **II**, **20**, 26-27, 2011

3) 松村直紀・脇水健次・真木太一・鈴木義則・守田治・西山浩司, 三宅島付近における液体炭酸人工降雨実験, 九州の農業気象, **II**, **21**, 30~31, 2012

4) Taichi Maki, Osamu Morita, Yoshinori Suzuki and Kenji Wakimizu, Artificial Rainfall Produced by Seeding with Liquid Carbon Dioxide at Miyake and Mikura Islands, Japan. *J. Developments in Sustainable Agriculture, Agricultural and Forestry Research Center, University of Tsukuba*, **8**(1), 13-24, 2013

5) Taichi Maki, Osamu Morita, Yoshinori Suzuki and Kenji Wakimizu, Artificial Rainfall Technique Based on the Aircraft Seeding of Liquid Carbon Dioxide near Miyake and Mikura Islands, Tokyo, Japan. *J. Agric. Meteorol. (J-stage)*, **69**(3), 147-157, 2013

6) 真木太一・守田治・鈴木義則・脇水健次, 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, 2014

[学会発表] (計 23 件)

1) Kenji Wakimizu, Koji Nishiyama, Kikuro Tomine, Yoshinori Suzuki and Taichi Maki, Enhancement of Precipitation by Liquid Carbon Dioxide Seeding in Northern Kyushu, Japan. CIGR International Symposium on "Sustainable Bioproduction - Water, Energy, and Food", Sep. 22, 2011.

2) Taichi Maki and Kenji Wakimizu, Experiments of Artificial Precipitation at Fukuoka and Saga Region, CIGR International Symposium on "Sustainable Bioproduction - Water, Energy, and Food", Sep. 22, 2011.

3) 脇水健次・西村祐一郎・西山浩司・真木太一・鈴木義則, 寒候期における降りそうで降らない雲からの人工降水実験, 2011年11月5日, 日本雨水資源化システム学会第19回研究発表会.

4) 松村直紀・脇水健次・西山浩司・遠峰菊郎・

真木太一・鈴木義則，寒候期における亜熱帯地域での液体炭酸人工降雨法の可能性について，日本農業気象学会九州支部会，2011年11月11日。

5) 脇水健次・松村直紀・西山浩司・遠峰菊郎・真木太一・鈴木義則，亜熱帯地域における液体炭酸人工降雨法の可能性(1)，日本農業気象学会2012年全国大会，2012年3月16日。

6) 松村直紀・脇水健次・西山浩司・遠峰菊郎・真木太一・鈴木義則，亜熱帯地域における液体炭酸人工降雨法の可能性(2)，日本農業気象学会2012年全国大会，2012年3月16日。

7) 真木太一・守田 治・鈴木義則・脇水健次・西山浩司，三宅島上空での航空機液体炭酸散布による人工降雨実験の成功，農業環境工学関連学会2012年合同大会，2012年9月14日。

8) 西山浩司・脇水健次・鈴木義則・真木太一・守田 治・遠峰菊郎，人工降雨の評価に適した冬季の雲の条件，水文・水資源学会2012年度総会・研究発表会，2012年9月27日。

9) 真木太一・守田 治・鈴木義則・脇水健次・西山浩司，三宅島・御蔵島上空での液体炭酸航空機散布法による人工降雨の成功，日本気象学会2012年度秋季大会，2012年10月4日。

10) 松村直紀・脇水健次・真木太一・鈴木義則・守田 治・西山浩司，三宅島付近における液体炭酸人工降雨実験，日本農業気象学会九州支部大会，2012年11月9日。

11) Koji Nishiyama, Kenji Wakimizu, Taichi Maki, Yoshinori Suzuki, Osamu Morita, Kikuro Tomine, The application of time-dependent ice crystal trajectory and growth model for the evaluation of cloud seeding experiment using liquid carbon dioxide, American Geophysical Union Fall Meeting, December 3, 2012, Moscone Convention Center in San Francisco, USA

12) Kenji Wakimizu, Koji Nishiyama, Kikuro Tomine, Taichi Maki, Yoshinori Suzuki, Osamu Morita, Seeding Experiment of Liquid Carbon Dioxide for Enhancing Winter-time Precipitation in

Saga Prefecture, Northern Kyushu, Japan, American Geophysical Union Fall Meeting, December 3, 2012, Moscone Convention Center in San Francisco, USA

13) Taichi Maki, Osamu Morita, Yoshinori Suzuki and Kenji Wakimizu, Artificial Rainfall Technique Based on the Aircraft Seeding of Liquid Carbon Dioxide near Miyake and Mikura Islands, Tokyo, Japan. International Symposium on Agricultural Meteorology 2013, March 28, 2013.

15) 脇水健次・西山浩司・遠峰菊郎・守田治・真木太一・鈴木義則，寒候期の薄い積雲を対象にした航空機による雲底液体炭酸撒布人工降雨実験，日本気象学会2013年度春季大会，専門分科会，2013年5月15日。

16) 西山浩司・脇水健次・鈴木義則・真木太一・守田治・遠峰菊郎，氷晶の成長及び軌跡推定モデルを用いた人工降雨実験の評価，日本気象学会2013年度春季大会，専門分科会2013年5月15日。

17) 松村直紀・脇水健次・西山浩司・守田治・真木太一・鈴木義則，液体炭酸人工降雨実験により孤島後方に発生した雨雲の検証，日本気象学会2013年度春季大会，2013年5月17日。

18) Koji Nishiyama, Kenji Wakimizu, Taichi Maki, Yoshinori Suzuki, Osamu Morita and Kikuro Tomine, Evaluation of cloud seeding results using time-dependent ice crystal growth and trajectory model, July 8, 2013, Davos Atmosphere and Cryosphere Assembly, Davos, Switzerland

19) 島田正樹・遠峰菊郎・真木太一・脇水健次・西山浩司・松村直紀，2013：人工降雨による豪雨（豪雪）軽減実験，日本気象学会2013年度秋季大会，2013年11月21日。

20) Taichi Maki, Osamu Morita, Yoshinori Suzuki and Kenji Wakimizu, Artificial Rainfall by the Seeding of Liquid Carbon Dioxide near Miyake and Mikura Islands on February in 2012 and March in 2013, Desert Technology 11 International Conference, Nov. 19, 2013, Hilton Palacio Del Rio,

San Antonio, Texas, USA

21) K. Wakimizu, K. Nishiyama, N. Matsumura, T. Maki, Y. Suzuki and O. Morita, Frequency analysis on suitable convective clouds for artificially increasing rainfall in the northern part of Kyushu, Japan, using meteorological satellite (GMS-5), 94th American Meteorological Society Annual Meeting, Feb. 5, 2014, Atlanta, USA

22) 真木太一・西山浩司・守田治・鈴木義則・脇水健次, 暖候期(2013年5月28日)の志摩半島南方空域での液体炭酸人工降雨実験, 日本農業気象学会2014年全国大会, 2014年3月20日.

23) Taichi Maki, Osamu Morita, Yoshinori Suzuki, Kenji Wakimizu and Koji Nishiyama, Artificial rainfall experiment by seeding liquid carbon dioxide at Miyake and Mikura Islands in the Izu Islands of Tokyo on March 14 in 2013. Extended Abstracts of International Symposium on Agricultural Meteorology 2014, March 20, 2014, Conference Hall, Hokkaido University, Sapporo

[図書] (計7件)

1) 真木太一・鈴木義則・脇水健次・遠峰菊郎・西山浩司, 人工降雨 人工的に雨を降らせる, 『風の事典』, 丸善出版, 134~135, 2011.

2) 真木太一・鈴木義則・脇水健次, 種々の人工降雨法, 『人工降雨ー渇水対策から水資源までー』, 技報堂出版, 25~38, 2012.

3) 西山浩司・脇水健次・鈴木義則・遠峰菊郎・真木太一・守田治, 新しい液体炭酸人工降雨法の適用シナリオ, 『人工降雨ー渇水対策から水資源までー』, 技報堂出版, 39~76, 2012.

4) 鈴木義則・真木太一・脇水健次・遠峰菊郎・西山浩司, 人工降雨実験ドキュメント: 成功事例, 『人工降雨ー渇水対策から水資源までー』, 技報堂出版, 91~116, 2012.

5) 真木太一・鈴木義則・西山浩司, 人工降雨実験ドキュメント: 失敗事例, 『人工降雨ー渇水対策から水資源までー』, 技報堂出版, 117~126, 2012.

6) 真木太一・西山浩司・鈴木義則・脇水健次, 人工降雨の今後の課題, 『人工降雨ー渇水対策から水資源までー』, 技報堂出版, 149~164, 2012.

7) 真木太一・鈴木義則・脇水健次・西山浩司 (編著), 『人工降雨ー渇水対策から水資源までー』, 技報堂出版, pp.176, 2012.

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者  
脇水健次

(Wakimizu Kenji)

研究者番号: 00240903

(2) 研究分担者  
西山浩司

(Nishiyama Kouji)

研究者番号: 20264070

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: