

新人工降雨法による干ばつ時の地域社会の安全・安心

Safety and security in regional society with drought prevention by new artificial rainfall method

脇水健次*, 西山浩司**, 遠峰菊郎***, 吉越 恆****, 真木太一*****, 鈴木義則*****, 福田矩彦*****
Kenji Wakimizu, Koji Nishiyama, Kikuro Tomine, Hisashi Yoshikoshi, Taichi Maki, Yoshinori Suzuki, Norihiko Fukuta

*博(農), 九州大学大学院助教, 農学研究院生産環境科学部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6丁目 10番 1号)

**博(工), 九州大学大学院助教, 工学研究院環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 (伊都キャンパス))

***理博, 防衛大学教授, 応用科学群地球海洋学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1丁目 10番 20号)

**** 博(農), 九州大学学術特定研究者, 農学研究院生産環境科学部門(〒812-8581 福岡市東区箱崎 6丁目 10番 1号)

***** 農博, 琉球大学教授(九大名誉教授), 農学部生産環境学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1番地)

***** 農博, 九州大学名誉教授, 農学研究院生産環境科学部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6丁目 10番 1号)

***** 理博, ユタ大学名誉教授, 気象学部 (816 Wm. Browning Bldg., Salt Lake City, Utah 84112, USA)

Under the influence of global warming, it is said that the generation frequency of an extreme large amount rainfall or extreme small amount rainfall will increase in the future. These symptoms begin to appear, so many droughts have broken out by extreme small amount rainfall in recent Japan. So far, in order to prevent these droughts, many artificial rainfall methods used AgI or dry ice have taken effect in Japan. However, these methods have a lot of problems. A large amount of overcooling liquid in the cumulous cloud was not able to be converted into precipitation efficiently by these methods. Then, new artificial rainfall method with a liquid carbonic acid was used to solve this problem. This method was proposed by Prof.N.Fukuta (University of Utah, U.S.A.) in 1999. And, this new artificial rainfall method succeeded for the first time in the world in cooperation with Kyushu University in winter of northern Kyushu. It turned out that the overcooling cumulous cloud generated in Japan Sea in winter was best cloud to secure a large amount of water resource from several-time experiment results afterwards. When seeming to become a drought, the method to save in the dam beforehand by new artificial rainfall method is proposed too.

Key Words: drought, water resource, artificial rainfall method

キーワード: 干ばつ, 水資源, 人工降雨

1. はじめに

地球温暖化の影響下では、極端な多雨か極端な少雨の発生頻度が増加すると言われている。最近の日本でもその兆候が現れ始めていて、その一例として、極端な少雨による干ばつ(渇水)である。

干ばつ状態とは、1)降水量が平年値の60%以下の状態が2ヶ月以上継続する場合。2)夏季に長期間、雨がほとんど降らず、晴天続きのために水不足になること。3)土壌水の枯渇と植物の障害を引き起こすに足る長期間の無降雨状態。4)干ばつの歴史的経緯から、干ばつ現象を、①一定期間、降水量が平年値より少なくなり、大気、地

表、地中といった水循環過程が影響を受ける自然状態。

②気候変動により、降水量が全体に少量であることによる乾燥状態。③需要量の増加により、自然の降水量だけでは応じきれなくなった状態すなわち渇水。①は、水循環サイクルの変化を示し、②と③は、干ばつ時の人間社会を含めた2次的影響を考慮した渇水状況を示している¹⁾。

従来、わが国では、干ばつ(渇水)防止のために、度々、ヨウ化銀(AgI)やドライアイスを用いた人工降雨法が、福岡県や東京都等で実施されてきた。しかし、これらの方法では問題点が多く、雲内の多量の過冷却液体雲水を効率良く降水に変換できなかった。そこで、この問題を

解決するために、1999年2月2日、第7著者発案の液体炭酸を用いた新人工降雨実験が、世界で初めて、九州大学と共同で、北部九州の冬季過冷却積雲で成功し、1個の冬季積雲から地上に50万トンの降水をもたらすことが出来た。その後の数回の実験結果からも、冬季に日本海で発生する過冷却積雲は、多量の水資源を確保するための最適な人工降雨対象であることも判明した^{2), 3), 4)}。

そこで、本稿では、1)我が国における干ばつ(渇水)の状況、2)新人工降雨法による実験結果、3)干ばつ(渇水)防止のため、干ばつ(渇水)になりそうな時に、前もって新人工降雨法により得られた降水をダムに貯めておく方法を提案する。

2. 日本における干ばつ(渇水)

表-1に最近の少雨により発生した日本における代表的な干ばつ(渇水)および給水制限期間を占めず。表より首都圏、瀬戸内、九州北部地方で干ばつ(渇水)が頻繁に発生していることがわかる。とくに1994(平成6)年は、福岡で年降水量の最少値891.0mmを記録し、この年は、香川県高松市、広島県福山市、愛媛県松山市および福岡都市域で給水制限期間が4ヶ月から9ヶ月以上も続き、市民生活に多大な被害をもたらした。

表-1 全国で発生した少雨による干ばつ(渇水)および給水制限期間

発生年	地域	給水制限期間
1964(昭和39)年	東京オリンピック渇水(東京都)	84日間 (7月10日～10月1日)
1967(昭和42)年	長崎渇水(長崎県長崎市)	72日間 (9月25日～12月5日)
1973(昭和48)年	高松沙漠(香川県高松市)	58日間 (7月13日～9月8日)
1978(昭和53)年	福岡渇水(福岡県福岡市と周辺)	287日間 (5月20日～翌3月24日)
1987(昭和62)年	首都圏渇水(東京都ほか)	71日間 (6月16日～8月25日)
1994(平成6)年	列島渇水	
	香川県高松市	139日
	広島県福山市	285日
	福岡県福岡市	295日
	愛媛県松山市	296日

2.1 九州北部地方における干ばつ(渇水)

表-2に625年(干ばつ(渇水)の記録が残っている)から2005年までの北部九州各県における干ばつ(渇水)発生数を年代別に示す。表より1501年から1800年までの300年間では、福岡・佐賀・熊本県で約5～6年に1回の頻度で、1801年から1900年までの100年間では、福岡・佐賀県で約5年に1回、熊本県では約2年に1回の頻度で発生している。1900年以降は、福岡・大分・長崎・熊本県で約3～4年に1回の頻度に比べ、佐賀県では約2年に1回と発生頻度が増えていることもわかる。

表-2 九州北部地方で発生した年代別県別干ばつ(渇水)発生数(625～2005年)

年県	625 ～ 1000	1001 ～ 1500	1501 ～ 1800	1801 ～ 1900	1901 ～ 1940	1941 ～ 1960	1961 ～ 1980	1981 ～ 2005	計
福岡	8	2	49	21	12	3	4	7	106
佐賀	7	11	46	24	16	12	12	4	132
長崎	0	1	3	3	1	3	7	6	24
熊本	1	3	62	47	14	6	7	5	145
大分	1	8	8	5	12	7	10	7	58
計	17	25	168	100	55	31	40	29	465

2.2 福岡における少雨発生傾向

表-3に福岡(管区气象台)における1889年から2005年までの年降水量の少雨の順位を示す。表より1994(平成6)年に最少値891.0mmを、その後、2005年に1020.0mm(3位)を記録している。一方、1971年以降2005年までの35年間で発生した1200mm未満の異常少雨は5回記録されている。つまり、約7年に1回は異常少雨が発生していることになる。

表-3 福岡における年降水量の少雨の順位(1889～2005年)

順位	年	年降水量(mm)
1	1994	891.0
2	1939	999.8
3	2005	1020.0
4	1894	1025.1
5	1978	1138.0
6	1984	1170.0
7	1929	1188.3
8	1895	1195.2
9	1971	1196.0

次に、図-1に福岡における1889年から2005年までの年降水量の平均との偏差の経年変化を示す。年降水量の平均値は1619.0mmである。図より1951年以降、降水量が極端に多い年と極端に少ない年の発生数が増加傾向にあることがわかる。

次に、図-2に福岡における年降水量の10年ごとの30年間変動率を示す。図より1951年以降変動率が18%から25%に一気に増加している。1951年以降、図1で示したように多雨年と少雨年の値が極端に大きかったり小さかったりしていることを意味している。

この原因の1つに地球温暖化に関連して、日本列島周辺における海水面温度の上昇が考えられるが、原因については、さらに詳細な解析が必要である。

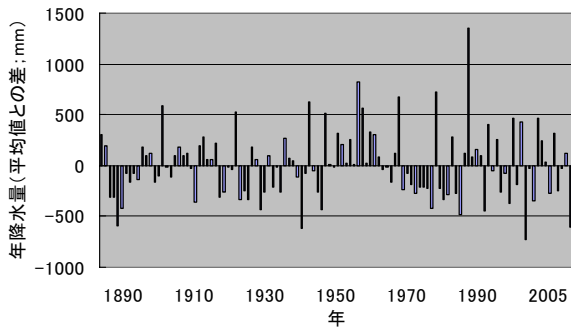


図-1 年降水量の偏差の経年変化(福岡)
(1889～2005年；平均年降水量=1619mm/y)

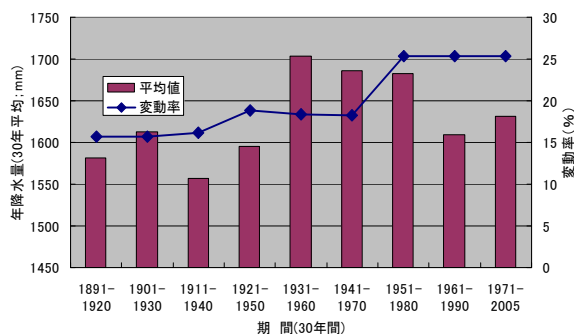


図-2 年降水量の30年間変動率の経年変化(福岡)
(1891～2005年)

2.3 九州北部地方における2005年の月・年降水量の特徴

表-4に2005年の九州北部地方の県庁所在地における6,7,8月の月降水量および年降水量を示す。表より、年降水量の平年比は、0.64から0.85の間にあり、特に福岡と熊本が少なかったことが判る。年降水量に大きく影響を与える6,7,8月の月降水量のうち、6月と8月が圧倒的に少なかったこともわかる。

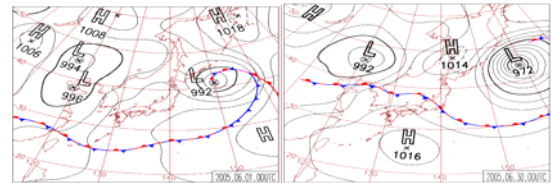
表-4 九州北部地方の県庁所在地における月降水量
(6,7,8月)および年降水量(2005年)
{()内の値は平年比}

	6月(mm)	7月(mm)	8月(MM)	年降水量(MM)
福岡	15.0 (0.06)	301.0 (1.13)	73.5 (0.39)	1020.0 (0.64)
佐賀	63.0 (0.17)	350.5 (1.06)	79.0 (0.39)	1356.5 (0.72)
長崎	54.5 (0.15)	309.5 (0.94)	186.5 (0.90)	1373.0 (0.70)
熊本	92.5 (0.21)	365.0 (0.97)	73.0 (0.40)	1324.5 (0.66)
大分	42.0 (0.14)	367.5 (1.55)	109.5 (0.59)	1419.0 (0.85)

2.4 2005年夏季の九州北部地方の気象概況

図-3に2005年の6月の地上天気図を示す。九州北部地方で夏季に降水量が少なかった気象原因は、次の通りである。1)6月は、梅雨前線が本州の南岸から日本の南海上に位置することが多く、梅雨入りが平年に比べ遅く、

しかも、梅雨入り後も移動性高気圧の影響で北部九州では晴れた日が多く、日照時間が平年の1.4倍になった観測点もあった。2)7月は、梅雨前線が北上し、活発化し、北部九州では平年値を越える観測点が多かったが、8月は再び太平洋高気圧の勢力が強く、晴れた日が多く少雨となった。



(a)2005年6月1日 (b)2005年6月30日
図-3 地上天気図

2.5 2005年の福岡県主要ダムの貯水率の変動

図-4に2005年1月から2006年3月までの福岡県内主要ダムの貯水率の変動を示す。図より、貯水率は、2005年1月から5月までは平年値を越えていたが、空梅雨のため、田植えが始まるころの6月から急に減少し、ついに貯水率が58.4%になった6月22日に渇水対策本部が設置された。その後、7月初めにまとまった雨が降り、貯水率が80.2%になった7月12日に渇水対策本部は解散された。しかし、11月以降も再び少雨傾向が続き、貯水率が53.1%となった翌2006年2月8日に再び渇水対策本部が設置された。

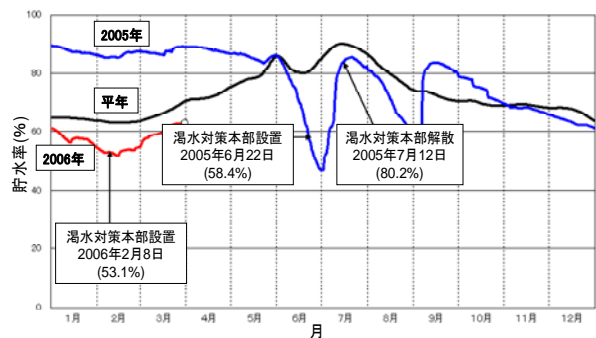


図-4 福岡県内主要ダムの貯水率の変動
(2005年1月～2006年3月)

3. 液体炭酸を用いた新人工降雨法

図-5に福田理論に基づく液体炭酸撒布効果の模式図を示す。

(1) 航空機につけたノズルから -90°C の液体炭酸を、厚さが約2,000m以上ある積雲の底部(温度 -1°C 以下)に水平に撒布する(図-5a)。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} 個の水晶が発生する(図-5b)。

(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。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(RETHIT 過程: Roll-up Expansion of Twin Horizontal Ice Crystal Thermals; 図-5c).

(3)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押さえられるため、水平に拡がり始める。氷晶はこの位置で十分に成長して、雲の上部から落下を始める (FILAS 過程: Falling-growth Induced Lateral Air Spreading; 図-5d, 図-5e)。

(4)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 (図-5e)。

(5)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、キノコ型エコーが発生する (図-5f, 図-5g)。

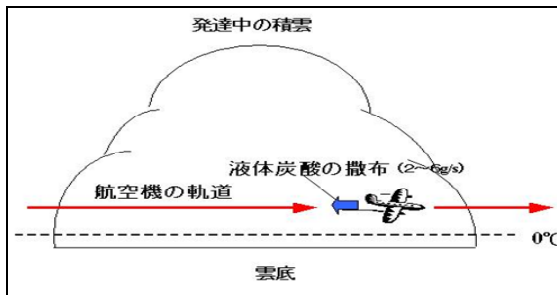


図-5a

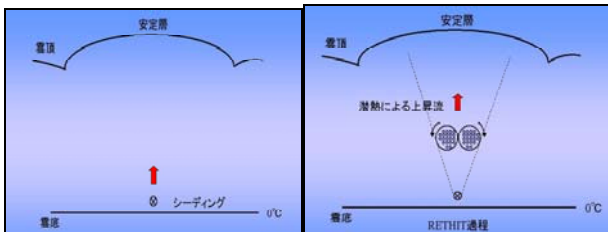


図-5b

図-5c

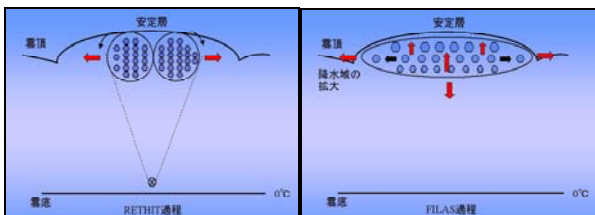


図-5d

図-5e

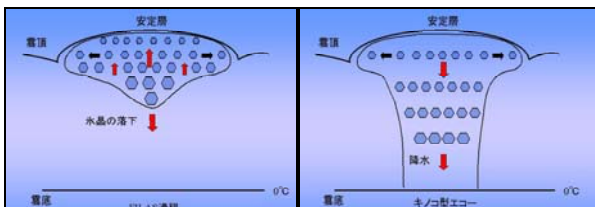


図-5f

図-5g

図-5 福田理論に基づく液体炭酸撒布効果の模式図^{2), 3), 4)}

3.1 2006年2月4日の人工降雨実験

九州北部地方では、2005年夏から冬にかけて少雨傾向

が続き、福岡では、2005年の年降水量が、1020mm (平年比 0.64) と観測史上3番目の少雨を記録した。そこで、2006年2月4日に防衛大学校および海上自衛隊厚木基地の協力の下、長崎県壱岐島付近で「航空機による雲底液体炭酸撒布法による新人工降雨実験」を実施し、普段は不可能とされる非常に薄い積雲から降水をもたらすことに成功した(写真-1, 図-6)。



写真-1 実験前の福岡市上空の雲の状況 (九大農学部2号館屋上のレーダーサイトから)

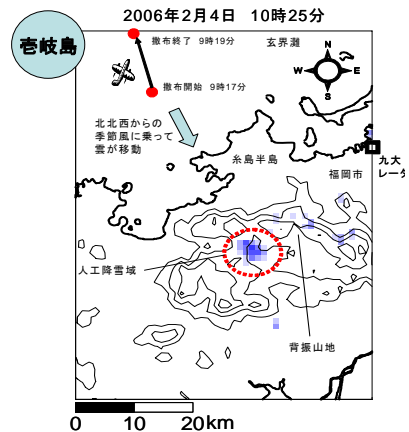


図-6 液体炭酸撒布場所および人工降雪域のレーダーエコー (PPI画像; 2006年2月4日10時25分)

3.2 実験日の気象状況

実験日の気象状況は、図-7の地上天気図からもわかるように、冬型の気圧配置で、地上の風は、実験開始(8時30分)前まではおもに北北東の風(平均4.2m/s)で、実験開始後12時までは、おもに北北西の風(平均5.6m/s)であった。図-8の高層気象観測データから上空1534m(850hPa)の風は、北北西の風15ノット(7.5m/s)で、1534mより上空は非常に乾燥状態で大気は安定であった。

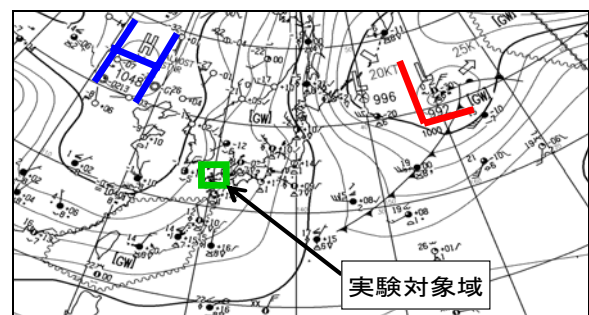


図-7 地上天気図 (2006年2月4日0900時)

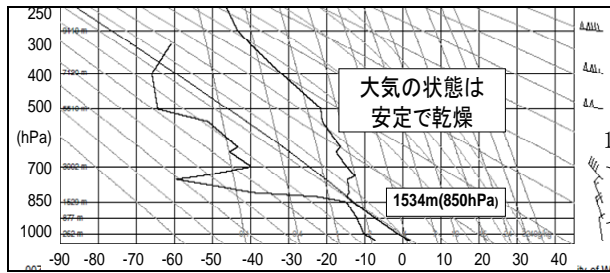


図-8 高層気象観測データ(福岡)
(2006年2月4日0900時)

航空機からの観測でも、実験対象の積雲の厚さは、500mから1000mと非常に薄く、実験には非常に不利な状況であった(写真1)。一般に、自然ではこの程度の厚さの積雲からの降水は起こらず、人工でも、降水を引き起こすことは難しい。過去の実験やシミュレーションの結果から、実験対象の積雲の厚さは少なくとも2000mから3000m必要である^{3),4)}。

3.3 実験方法および結果

実験は2回実施された。

(1) 1回目の実験

1回目の実験は、撒布時間25秒間(8時41分30秒~8時41分55秒)で、壱岐島の東側の雲頂高度7000ft(2134m)、雲底高度3500ft(1067m)、雲の厚さ3500ft(1067m)の積雲の雲底付近に、撒布高度4000ft(1219m、-9°C)、撒布率10g/sで液体炭酸を撒布した。しかし、実験後、雲が点在したため、9時07分(実験後25分後)に観測不能となった。

(2) 2回目の実験

2回目の実験は、比較的規模のある積雲の雲底付近に、撒布時間115秒間(9時17分19秒~9時19分14秒)で、1回目と同様、壱岐島の東側の雲頂高度7000ft(2134m)、雲底高度3500ft(1067m、-9°C)、雲の厚さ3500ft(1067m)、撒布高度4500ft(1372m、-9°C)、撒布率10g/sで液体炭酸を撒布した。航空機の対地速度は、1回目、2回目の実験とも、200kt(370km/h)であった(図-9)。

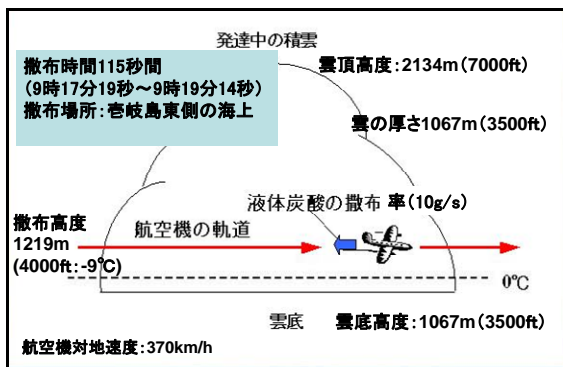


図-9 2回目の実験実施概況図

実験結果は次のようになった。

図-10, 11に人工エコー(PPI)の経時変化, 図-12に人工エコーAおよびBの鉛直断面(RHI)の経時変化, 図-13に人工エコーAおよびBの水平面の面積の経時変化を示す。

1)撒布後35分(9時55分)、液体炭酸を撒布した雲は、やや発達し、雲頂が7400ft(2256m)と撒布前に比べ400ft(122m)高くなった。さらに、雲は、上空の北北西の風に流され、発達しながら南南東に移動した。

2)撒布後46分(10時06分)、九大レーダーの画面上に薄くて小さい人工降雨により発生したエコー(以後、人工エコーと呼ぶ)が出現した。人工エコーの出現場所は、福岡県と佐賀県の県境の雷山付近である。

3)撒布後50分(10時10分)、国交省レーダーでも人工エコーを確認することができた。この人工エコーの大きさは、水平規模5000m、厚さ1000mであった(図-10a)。

4)撒布後68分(10時28分)、人工エコーはさらに発達し大きくなった。このことは、航空機からも確認された(図-11b)。

5)撒布後73分、76分(10時33分、36分)には、人工エコーの面積が最大となった(図-11c)。最大面積は、エコーAが24km²、エコーBが22km²であった(図-12)。雲頂高度も3000mを超え、エコー断面(RHI)がキノコ型になった(図-12a, 図-12b)。

6)撒布後82分(10時42分)、人工エコーが背振山地(最高点1055m)の後方になったため、九大レーダーでの追跡が困難となったが、撒布後120分(11時20分)、佐賀市南方上空でエコーの消滅が国交省レーダーにて確認された。佐賀県で降水現象も確認された(図-10d)。

4. 新人工降雨法を用いた干ばつ(渇水)防止法の提案

北部九州の場合を例にとる。最近の北部九州では、晩秋から初夏にかけて少雨が頻発する傾向がある。その結果、「農作物が枯れる」、「田植えが出来ない」、「都市地域で給水制限が行われる」など干ばつ(渇水)害が生じる。これらの干ばつ(渇水)害を防止する1方法として、干ばつ(渇水)害が発生する前、つまり、1)2ヶ月以上、降水量が平年値の60%以下になったときとか、2)ダム平均貯水率が60%を切った状態が継続したときに、前もって新人工降雨法を用いて人工的に降水をもたらす、常にダムを満水にしておく方法を提案する。

著者等の過去の実験から、気象条件さえ合えば、1つの積雲から50万トンの降水を地上にもたらす事が出来る。北部九州では、冬季の場合、冬型の気圧配置になりやすく、その結果、北西の季節風に乗って、積雲が次から次にやって来る。これらの積雲に人工降雨を施せば、数100万トンの降水の確保も可能である。その結果、干ばつ(渇水)防止になり地域社会の安全・安心に貢献できると考えられる。

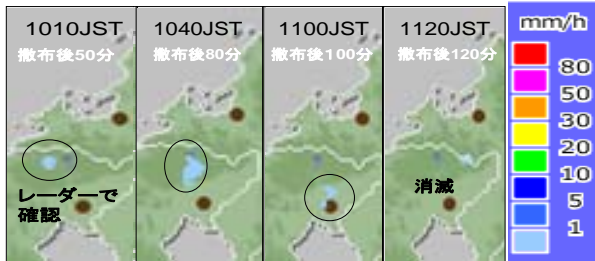
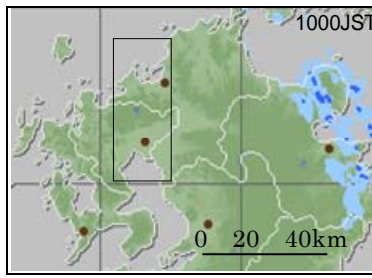


図-10a 図-10b 図-10c 図-10d
 撒布後 50分 80分 100分 120分
 図-10 人工エコー(PPI)の経時変化
 (国土交通省レーダー)

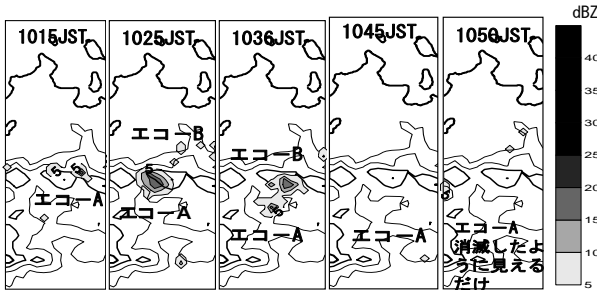


図-11a 図-11b 図-11c 図-11d 図-11e
 撒布後 55分 65分 75分 85分 100分
 図-11 人工エコー(PPI)の経時変化
 (九州大学レーダー)

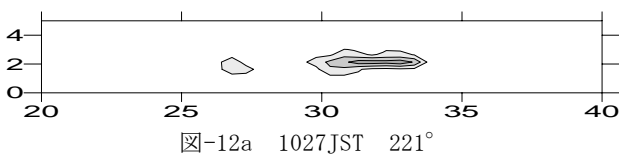


図-12a 1027JST 221°
 図-12b 1035JST 220°
 レーダーサイトからの距離 (km)

図-12 人工エコーAおよびBの鉛直断面(RHI)の経時変化 (九州大学レーダー)

5. おわりに

本稿では、「新人工降雨法による干ばつ時の地域社会の安全・安心」についてまとめてみた。今後、地球温暖化に伴い、発生頻度が増加すると予想される少雨による干ばつ(渇水)害を少しでも防止する方法として、液体炭酸を用いた新人工降雨法を提案し、実験を実施した。その

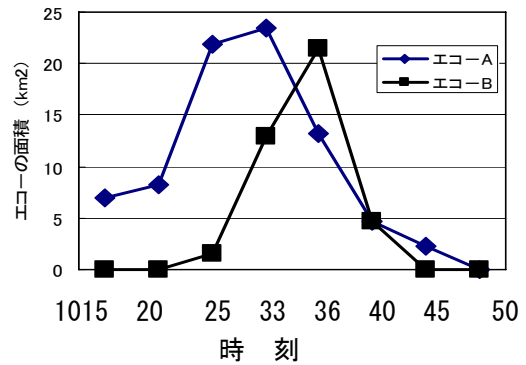


図-13 人工エコーAおよびBの水平面の面積の経時変化
 (九州大学レーダー)

結果、実験前は、実験対象の積雲およびその周辺の積雲の厚さが薄くて、レーダーにてエコーが確認できない状況下であったが、撒布後、人工降雨により発達した積雲のみが、レーダーエコーとして確認され、地上に降水をもたらすことに成功した。実用化の目途がかなりたったとも言える。

そこで、干ばつ(渇水)害を防止する1方法として、干ばつ(渇水)害が発生する前に、前もって新人工降雨法を用いて人工的に降水をもたらす、常にダムを満水しておく方法の提案も行った。

最後に、1 トンの水を作るのにかかるコストは、海水淡水化法では220 から500 円に対して、新人工降雨法(航空機のチャーター代等をもとに計算して)では0.2 円であることも加筆しておく。

謝辞：人工降雨実験を行うに当たり、防衛大学校および海上自衛隊厚木基地の全面的な協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 林 静夫:少雨の時空間特性に関する統計的研究,九州大学農学研究科博士論文,pp.110,1988.
- 2) 福田矩彦:気象工学,気象研究ノート,第164号,pp.213,1988.
- 3) Wakimizu,K.,Nishiyama,K.,Fukuta,N.,Yoshikoshi, H., and Suzuki, Y.,: Evolution of radar echoes in LOLEPSHIN winter convective cloud seeding, Preprint,8th WMO Scientific Conference on Weather Modification, Casablanca, Morocco, pp.83-86,2003.
- 4) Wakimizu,K.,Nishiyama,K.,Suzuki,Y.,Tomine,K.,Yamazaki,M.,Ishimaru,M.,Ozaki,M.,Itano,T.,Naito,G.,and Fukuta, N.: Low-level Penetration Seeding Experiment of Liquid Carbon Dioxide in a Convective Cloud., Hydrological Processes,Vol.16, pp.2239-2253,2002.
- 5) 福岡県水資源対策局ホームページ.
- 6) AMeDAS 資料, 電子閲覧室, 気象庁.

(2007年8月17日受付)