

特集 記事

今、水は大丈夫か？—過去の大 渇水・大干ばつから学んだこと—

編集委員会

企画・総括 脇水 健次*

編集担当 澁谷 拓郎**・諏訪 浩**・寒川 典昭***・吉田 雅穂****

はじめに

脇水健次*

アフガニスタンをはじめ乾燥地域の国々では水不足のため食料が得られず貧困と飢餓に苦しんでいる。ユネスコの発表によると、21世紀は「水不足」と「食糧不足」が深刻となり、水と食料を求めて大きな戦争が起こるかもしれないと警告を発している。

21世紀がスタートしたばかりの昨年(2001年)夏、日本列島は典型的な北冷西暑型となった。その結果、太平洋岸に面した関東地方から四国地方まで、カラ梅雨とその後の少雨で大渇水となった。特に東京都や愛知県が厳しく、愛知県では断水一步手前までになり、東京都では、人工降雨も実施された。その後、幸いにも台風11号の到来により、大雨が降り、断水はまぬがれた。

そこでこの渇水を契機に初心にもどり、「今、水は大丈夫か?」というタイトルで特集を組むことにした。

本特集では、まず、日本列島全体で、現在、雨や雪の降る量はどのようになっているのかを、過去との比較により検証を行い、渇水や水管理対策等の利水計画では水文量の瞬時値による評価に頼るのではなく、過程における評価や解析手法を取るべきであることを示している。

次に、平成6(1994)年に西日本を中心に発生した大渇水・大干ばつの検証を農村部と都市部において行った。渇水時に福岡都市圏の住民にアンケートを行った。その結果、雨水利用、中水道利用、ダムの建設などの他に、住民の節水意識の高揚や人口増加抑制策などの意見が出た。これら住民のアンケート結果に添う形で、福岡市の節水型都市造りが進められている。加えて、大渇水に備えて海水淡水化事業も進められている。このように、昭和53(1978)年の287日間および平成6(1994)年の295日間の給水時間制限から得られた「教訓」および福岡市のその後の「渇水対策」の実施例および試みを紹介している。

最後には、中国やタイなど世界ではかなりの頻度で行われている人工降雨について、最近行った福岡県での実施例を紹介している。

この特集が、いつか必ずやってくる大渇水・大干ばつの回避および対策に少しでも役に立てば幸いである。

1. 渇水の発現と対応に関する一見解(福岡渇水を例として)

林 静夫[#]

1.1 はじめに

過去、一度「渇水」を体験した人々にとって、

* 九州大学大学院農学研究院

** 京都大学防災研究所

*** 信州大学工学部

**** 福井高等工業専門学校

九州大学熱帯農学研究中心

この言葉を耳にすると、イクオール「給水制限」あるいは「節水」という関係が思い出される。それほどに不便さあるいは不自由さを強いられた日常生活は脳裏から離れない。

昭和53年(1978年)5月から、287日間にも及ぶ都市・生活用水の制限を余儀なくした「福岡渇水」は、当時の都市型渇水の姿を露呈し、水環境に関する多くの問題を提起した。にも拘わらず、福岡は平成6年(1994年)には再び295日間という長期間の渇水に見舞われ、給水制限の事態を招いた。この年の渇水は全国的な広がりとなり、「列島渇水」と報道された。「福岡渇水」の教訓が生かされたのだろうか。

大都市やその周辺地域では、2~3年に1度の割合で渇水が頻発し、あらゆる方面に深刻な影響を与えている。産業構造の変化と拡大、あるいは都市への人口の集中、生活や経済のめざましい発展・向上に伴う水利用形態の変化と需要量の増大が進んでいる。このことによって、慢性的な水不足が顕在化し、渇水の発現が加速され、限りある水資源の有効利用がより重要な課題になってきている。

渇水あるいは干ばつという現象は、一義的に平年に比べて降水量が長期間にわたって少ないこと、すなわち少雨によってもたらされる。そして渇水発現までの期間や継続期間が長期に及ぶ特徴がある。したがって、少雨現象と給水制限など渇水対策の実施との間には時間的なズレがあるために、少雨の経緯を注意深く見守り、適切な水管理をすることが重要となる。少雨に端を発する渇水は何も気象要因のみでなく、他の環境要因とも複雑に重なり合って発現し、その定量化は容易ではない。幸いにも降水量データは長期間継続して記録され、統計量としてある程度検討することが可能であり、渇水の解析に利用される場合が多い。本稿では、降水量を用いた渇水現象を振り返ってみる。

1.2 渇水発現時および継続期間中における降水量の捉え方

少雨の出現の仕方には気象学的に考えていくつかの特徴があり、雨量の統計的な構造にも影響を

与えている。雨の降り方に関する長期的な物理モデルはいまだ確立されておらず、予測が困難な現状では、雨の降り方の統計的な構造を明らかにして、少雨について確率的に対処することが実用的にも重要となる。

過去、西日本地域で最大規模と言われた1939~40年の大干ばつを例に、雨の降り方の経緯を見る。1ヶ月雨量(月間降水量)では平年値を上回る月も見られたが、雨量期間を3ヶ月間あるいは6ヶ月間と長くとる。すると、その期間の降水量は同一期間で積算された平年値(積算平年値)を大きく下回り、しかも何ヶ月経過しても積算平年値まで回復しない状態が続いている。例えば、前6ヶ月間の雨量が同一期間の積算平年値の60%にも満たない少雨状態が数ヶ月間も続いている。

このように大規模な渇水は、1ヶ月程度雨が降らないからといって直ちに発現するのではなく、より長期間の少雨の状態が持続することによって現れてくる。すなわち、災害をもたらすような渇水年の雨は、ある特定の月あるいはある期間の降水量が少ないことによるのみならず、過去4ヶ月あるいは6ヶ月と言った長期間の降水量が平年の50~70%と言った降り方で推移していることに注目すべきである。同様に、水管理や運用についても必要なタイム・スケールで長い期間に及ぶ降水量の統計的性質を見だし、その特性に基づいてその後の雨の降り方を予測し、計画を立てるのが理にかなっている。

このように、渇水対策や計画においても長期間の降水量が主影響要因であり、後に述べるD-D(Depth-Duration)方式を用いるのが必然であろう。

1.3 基準渇水雨量の変動

我が国は、年間降水量が豊富で世界の平均降水量のおよそ2倍と言われる。降水量は豊富であるが、気象条件によって年ごとに大きな変動がある。年間を通して梅雨、台風、秋霖や降雪による降水量が占める割合が大きく、季節による偏りが大きい。

1年を多雨季(5-10月)と少雨季(11-4月)に分け、雨が降る割合を平年降水量(1931~90年,福岡)に対し比較すると、同一期間の平年降水量に対して7:3という全く一定の比率を示している。30年間という時系列(平年値)の中では、年間の季節的な偏りは平均化されている。一方、月々の平年降水量による比較では、5,6,9月および2,12月の月降水量の変動が大きい。したがって、渇水は夏季と冬季の少雨の影響を強く受けて発現する可能性が高いと言える。

表1-1に、1931~96年の間(福岡)における平年値および基準渇水雨量等を示す。水文計画の基準となる確率雨量の算定には、通常1~12月の年降水量が採用されている。平年値による降水量の変動を見ると、僅かながら下降(少雨)傾向を示し、1960年時と現在では約80mmの減少となっている。基準渇水雨量については、各平年値において顕著な減少傾向を示している。とくに、1960年時と1996年時(現在、採用されている平年値(1971~2000年)に相当)との差では約200mmもの大きな減少となっている。1970年時における10年に1度の基準渇水雨量(1432mm)は、現在では2-3年に1度の生起確率に相当しており、「渇水」が2-3年に一度の頻度で発現していることになる。さらに、都市および衛星都市の拡大に伴う人口の集中・増加によって利用用水量が増加すると共に、降水量はその変動の程度(変動係数,表1-1)が年々大きくなってきている。このような不安定な降水状況下において計画的な利水安定度が低下していること等にもより、最近の異常とも言える渇水発現の環境が一層増幅されていると

も言える。

1.4 「期間降水量」概念を利用した平成6~7年渇水の解釈とその対応

渇水に対する対策あるいは計画的な水管理を行うには、実時間に中心を置く雨の降り方に関する予測が必要である。すなわち、過去数ヶ月から現在までの降水量の経緯、そして現時点から将来数ヶ月先までの降水量の可能性をつぎに述べるdepth-duration解析によって推測しなくてはならない。その手法として、「期間降水量」の概念を導入することを試みる。

任意の月を起点として、連続した任意の期間(数ヶ月あるいは数十ヶ月間)の積算降水量を、「期間降水量(duration precipitation)」と定義する。過去数十年間の連続した月降水量に基づいて期間降水量を求め、その生起率(return period)を計算する。このようにして、過去から現在までの期間降水量、そして将来の任意の期間降水量の生起率に基づいて雨が降る可能性を判断し、渇水の発現を判断するという方法である。

任意の地点で、設定された任意期間における設計(計画)貯水量(あるいは、降水量)に対しては、その任意期間内で経過した期間の積算降水量は既知となり、そしてその積算降水量から残りの期間に必要なとされる降水量(期間降水量)とその生起率が求められる。この生起率に基づいて渇水発現の可能性と共に、渇水に対する水管理計画を同時に適宜行うことが出来る(Fig.1-1)

この方法によって、任意の月から任意の継続期間を必要に応じて選ぶことが出来、任意の時点で、過去-現在-将来と言った時系列上で降水量の推

表 1-1 10年非超過確率雨量の変動

期 間	1931-'60	1941-'70	1951-'80	1961-'90	1971-'96
平 年 値	1695	1709	1685	1604	1616
基 準 雨 量	1431	1432	1343	1292	1233
標 準 偏 差	301	312	413	395	437
変 動 係 数	0.178	0.182	0.245	0.246	0.270

基準雨量：10年非超過確率雨量，基準渇水雨量

移を判断できる利点がある。

さて、福岡において平成6年8月以降295日間という今までに例を見ない長期間の給水制限を強いた「列島渇水」の発現過程と継続期間の降水量を、期間降水量を用いて検討する。

前年、平成5年は全国的に多雨で経過した。福岡(管区气象台)では、年間降水量は平年値より約350mmも多く、2050mmであった。

平成6年、1~6月までの雨量(6ヶ月期間降水量)は599mmで、平年値の約78%(return period: 4 yrs)で経過した。7~8月にかけては、太平洋高気圧の勢力が強くなり、2ヶ月間に僅か50

mm(r.p.: 500 yrsをかなり超過)の雨量(2ヶ月期間降水量)しかもたらされず、厳しい渇水状況の下で、時間給水を余儀なくされた。

平成6年1月以降の雨量の状況を1, 3および6ヶ月間の期間降水量についてみる(Fig.1-2)。

給水制限前の3ヶ月および6ヶ月間の期間降水量の長期推移傾向が、昭和53年「福岡渇水」の際の給水制限前の長期推移傾向と酷似していることに注意をしなければならぬ。こういった長期間の期間降水量の推移によって、渇水発現時に給水制限に到るパターンがある程度把握できると思われる。

一方、4ヶ月期間降水量によって渇水発現の傾向を追跡する。その結果、4月と6月以降に渇水発現を伺わせる兆候が生起率に見受けられる(その1例; Fig1-3)。

したがって、4月あるいは6月上旬の時点で、その後における何らかの水運用あるいは管理計画や対策が立てられたのではないだろうか。

これらの分析の点のみからでも給水制限を実施する以前に、「列島渇水」発現を見抜くことが出来るキーが、降水量の中に潜んでいたと言える。

1.5 おわりに

渇水予測や対策に用いられる降水量等水文情報は、一般に確率的な性格を内在している。データの収集や蓄積、そしてそれらの統計解析では、その性格を明確にし、有効利用することに大きな意義がある。

渇水や水管理対策等の利水計画には、降水量等

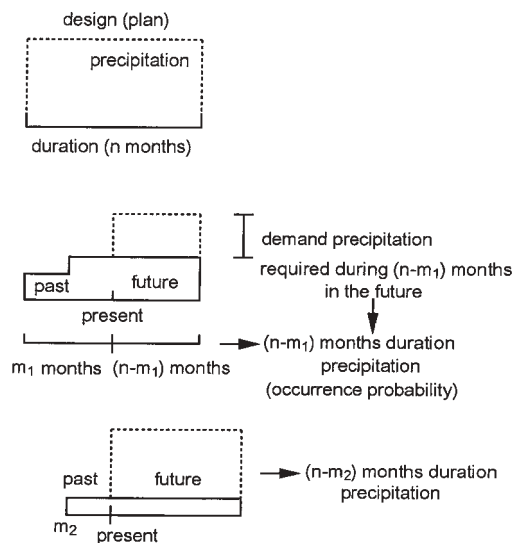


Fig.1-1 "Duration precipitation" model

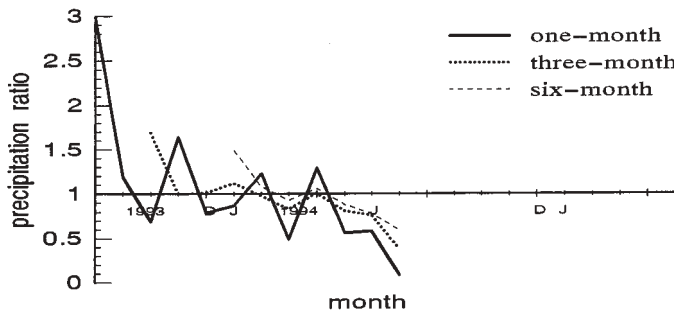


Fig.1-2 Variation of types "duration precipitation"

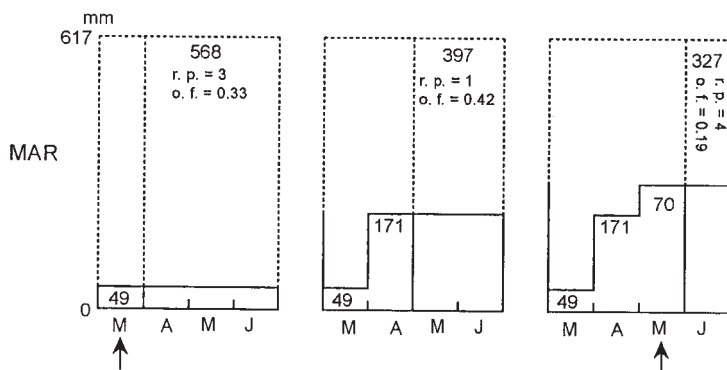


Fig1-3 Stochastic estimation of "duration precipitation"

水流量の瞬時値による評価に頼るのではなく、経時的な過程における評価や解析手法を採るべきである。その一手法として、「期間降水量」の概念を渇水の解析に適用し、経時的予測手法としての有効性を試みた。その結果、期間降水量の概念は利水計画等に十分適用でき、水管理・運用における対策に有効な方法であると推測される。このことは、水資源の時間的スムージングがある程度可能な場合には、渇水の厳しさの程度は、短時間の降水量よりも長期間の降水量に関わっていることでもある。

水不足時の対策と水運用計画への降水量の depth-duration 解析の利用は、期間降水量の生起率あるいは出現率がすでに判明しており、任意の適用期間内に設定した降水量をその期間の降水経時変化（降水履歴）によって、逐次修正することも出来る。

渇水の発現構造の解明に関する基本的な考えは、「期間降水量」の概念に基づく応用および少雨の depth-duration 解析結果の組み合わせである。

昭和 53 年「福岡渇水」と平成 6 年「列島渇水」を体験して感じられたことは、他の災害にも通じていることではあるが、得られた貴重な情報がその都市内域や近隣、あるいは類似した都市形態を有すところへ伝達されていなかったのではないかと。喉元を過ぎてしまえば、その場限りの尻切れトンボで、体験を共有することがなにより異常に少なく感じられる。被災体験をトレースして、その成果

を二度と繰り返さない、むしろ二重にも三重にも生かす努力が防災の宿題として残ったままであるように感じられる。さらには、救援活動における秩序とその意義深さ、そしてそのための系統化された体制作りも必要である、と思われる。

2. 西日本地域における干ばつ害と対策について

大場 和彦

2.1 はじめに

1994 年の西日本地域の天候は 1993 年の冷夏・長雨とは対照的に、梅雨明けの 7 月から 10 月までの約 4 ヶ月において、稀にみる少雨・多照、高温が長期間継続した。このため、西日本全域に水不足が広がり、農作物及び社会生活に甚大な被害を与えた。

このように、最近の異常気象による気象変動の中で、今後の地球温暖化に伴う降水分布形態の変化や降水強度の違いが予想される。少雨年には都市用水、工業用水の逼迫による農業用水への影響が現実のものとなりつつあり、水田・畑作、果樹等の農業生産安定向上のためには、水資源の有効利用技術等を含めた干ばつ対策技術の開発を推進する必要がある。

* 九州沖縄農業研究センター

本研究では、1994年における西日本九州地域の干ばつによる農作物被害の実態と今後における干ばつ対策に対応する基礎的資料を得ようと取りまとめたものである。

2.2 西日本地域における干ばつの出現頻度

わが国の干ばつの記録は、歴史的史料によると推古天皇（625年）時代が最初で、それ以降から1900年までに約500回の発生を記録している。九州の隣国である韓国における干ばつ発生頻度は魚による研究があり、同期間での早・大旱の干ばつ回数は490回で、わが国での回数とはそれほど大きな差はなかった。また中国の山西省・甘肅省・寧夏省・青海省を合計した干ばつ回数は371回である。その中で、7世紀以降から現在までの九州と韓国の干ばつ出現回数の変化を図2-1に示す。九州・沖縄地域に限定すると干ばつは約292回を記録している。1901年以降の現在（1997年）までの九州・沖縄地域での干ばつ現象は70回を記録しており、約3年に2回の回数で出現していることになり、かなり高い出現頻度である。また、干ばつは梅雨期の寡雨に始まり梅雨明け以降の7月と8月に出現回数が多い。これは現在も変わっていない。

2.3 1994年における西日本地域の気候乾湿指標の分布

干ばつの発生は耕土層内の水分状態で決定されるもので、供給成分（降水量）と放出成分（蒸発

散量）とのバランスによって決まる。この水分バランスを特徴づける指標として気候乾湿指標が広く用いられている。著者らは、次式で示されるMortonのCRAEモデルによる実蒸発散量から作物水分ストレス指標と放射乾燥度についての計算を行った。

$$CWSI = 1 - (AET/PET) \quad (1)$$

$$RI = Rn / \iota P \quad (2)$$

ここで、 AET はMortonモデルによる実蒸発散量、 PET は同モデルから求められる湿面蒸発量、 Rn は純放射量、 P は降水量、 ι は水蒸気の気化潜熱を示す。 $CWSI$ の算出を試みた結果、作物の生育状況と一致していることを認めた（大場ら、1997）。これらの指標を気象官署のデータを用いて計算した。その結果の一例、西日本地域における1994年の干ばつ年の7月～9月の3ヵ月平均値における指標状況を図2-2に示す。西日本地域における $CWSI$ の分布は、瀬戸内海沿岸部に近い松山、広島、岡山及び多度津が0.30以上の値を示し、九州西北沿岸部も0.3以上で、北部地域は0.20～0.30の範囲内である。また、放射乾燥度 RI は $CWSI$ と同様に松山、広島及び呉地域が4.0以上の値を示し、九州西部沿岸部が3.0以上の値を示した。これらの地域の干ばつ被害が極めて大きかった。

2.4 干ばつの被害形態

干ばつ被害の形態は、九州地域を例に干ばつ被害事例集と過去干ばつの歴史年表（大場ら、

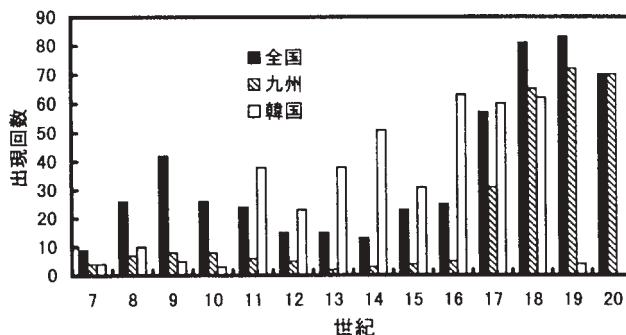


図2-1 西日本地域内における干ばつの出現回数

1999) を参照してみると、九州における降水量の分布形態から、以下のように分類される。

①梅雨期前後の降水量が少ないことによる作物の播種・植付適期の遅れによる干ばつ被害。

②夏季の少雨により、作物の生育遅延および葉の萎凋や枯死、飲料水の枯渇や電力需要等、生活に影響を及ぼす干ばつ被害。

③干ばつ期間が梅雨期から夏季・秋季へと長期間になったときの干ばつ被害。

最近の干ばつを例にとると、1934年の干ばつは①に、1978年は②に、1894年、1964年、1994年は③にそれぞれ分類される。

大場ら(1988)は、南九州地域での連続干天が起きやすい時期は5月と7～8月であることを指摘しており、これは上記の分類①、②に当てはまる。九州地域では5月の水不足は高冷地の水稲や畑地でのカンショの移植時期、平坦地での夏作における陸稲、露地野菜、トウモロコシ等飼料作物の播種時期で、発芽不良、植付不能による生育遅延を生ずる時期である。6月の水不足は普通期

水稲の代かき期、田植期の遅れにつながり、7～8月は水稲が生育遅延や不稔稲の発生、ミカンが果実肥大期、秋ダイズ播種時期の遅延、露地野菜の栄養器官の肥大不良、受精力低下による結実不良、奇形果の発生、トウモロコシでは下葉の枯れ上がり等の時期に相当する。

このように、作物の水分欠乏に敏感な時期は野菜・果樹の結球期、結果期、結莢期、開花期から登熟期、栄養生長期の順である。作物が水ストレスを回避したり耐えるための機構は、①短期間で生育を終わらせること、②干ばつ時に落葉すること、③長期の休眠に入ることである。一方、機能は、作物体内の水ポテンシャルを上下させて耐性を高めることである。これらの回避と機能を十分に活かした作物栽培計画と栽培技術の開発が必要である。

2.5 九州各県の実施した干ばつ対策

気象台から少雨に関する情報が流れると各県とも県独自の組織体制(干ばつ対策会議)を確立し、

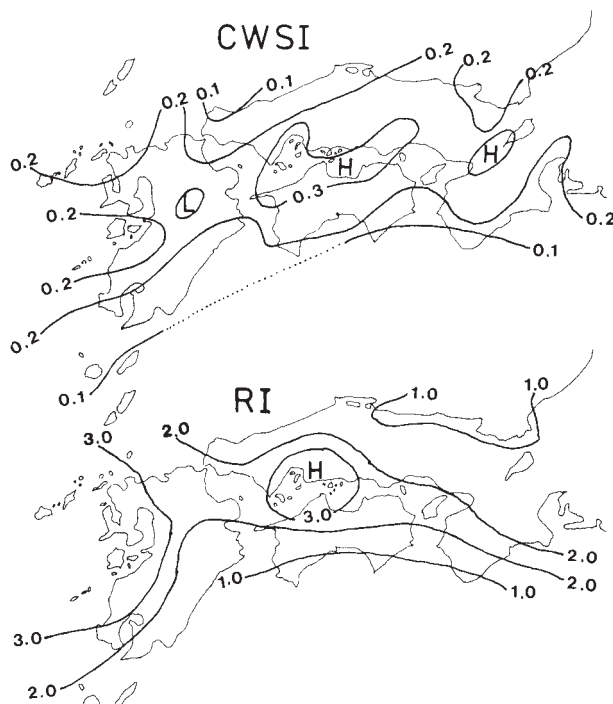


図 2-2 1994年の西日本地域内における

降水量予測など気象・ダム水量情報を収集し、農作物の生育現状と今後の影響等を想定し、各種の対策が行われた。各県が農作物・家畜への被害の回避・軽減対策を実施した報告（九州地域農業気象協議会資料，1995）を整理すると、共通的にかんがい用水量の確保と病害虫発生防止策が重点的に行われ、その他の詳細な対策は以下の通りである。

①水陸稲については、麦稈マルチによる土壌乾燥軽減、集落で犠牲田を設けての用水を確保し、共倒れ防止策、漏水防止や利用可能なかんがい用水量に応じた水管理または節水栽培、かんがい用水の水質調査による塩害防止、間断かん水による節水の徹底、掛け流しの防止、生育診断による出穂期、収穫時期の把握と適宜かん水など。

②野菜・花卉については、敷き藁、株元かん水、早朝かん水、被覆資材の利用でハウスやポット等の降温・遮光・通風を図ると共に、露地では敷き藁マルチ、畦間かんがい、水質の定期検査による生育障害回避、出荷方式の切り替えなど。

③果樹については、幼果の新聞被覆で日焼け発生防止および日焼け防止剤散布、マルチング等による水分・蒸発抑制対策、適正結果量の維持、貯水池の設置やボーリング等による用水確保、タンクでの用水運搬による局所かん水や井戸水のポンプアップによる樹体と果実品質低下防止策など。茶については茶摘採後のかん水、幼木園の敷き藁かん水とハダニ類の防除など。

④畜産については、大型扇風機、細霧システム、寒冷紗、飼育密度緩和による畜舎環境の改善、飼料作物の秋作への早期転換確保、飲料水確保と高カロリー給餌、給餌回数の増加で体力維持回復等である。

2.6 今後の問題と研究の展開

1994年の干ばつは、梅雨期間中の少雨傾向から始まり、連続している状況であるが、都市部及び島嶼部で生活用水が不足し、長期間の給水制限が行われた。今回の干ばつが農作物に与えた影響は、干ばつ状態が集中的に長期間にわたって発生しており、農作物被害が大きかった。今日、九州

地域における水田の用排水を含む基盤整備は30a以上の区画整備面積が18.4万haで、整備率が52.1%で全国平均54.1%より僅かに低い状況である。また、畑地かんがい施設整備面積は5.85万haで、整備率が21.8%で、全国平均（16.2%）を上廻っているが、全畑地の1/5程度である。しかし、拡大の余地があるけれど、山間・高冷地などの地形条件と気象条件により水利期間等が限定されるので畑地かんがい施設導入にも問題がある。現在の天水依存型農業を積極的に展開し、温度・養分確保と土壌表面蒸発を抑制するフィルムマルチ農法や深耕農法による下層の水利利用の拡大が必要である。また、九州の農業では水利型農業が展開されているが、干ばつ防止の補給水、凍霜害防止水が重点に行われ、多目的水利利用の発展までには至っていない。そのため、天水依存栽培と異なる水を活かした畑作栽培技術の確立とその研究推進が必要である。

今後、地球温暖化に伴う温度上昇により、九州地域も温暖気候区から亜熱帯気候区へ移行する可能性もあり、降雨形態の変化や降雨強度の変化等の問題が予想される。その中で、世界の気象に影響を与えたといわれる1997年のエルニーニョ現象は今世紀最大規模となり、インドネシアの干ばつ被害等が報道され、大きな社会問題に発展した。さらに、人口増加と生活水準の向上に伴う水需要の増加も懸念されている。ダム設置、森林の保全による水資源確保の観点から、河川流域内外での上流と下流域での生活者の意志疎通問題（所得保障等）や環境保全問題が重要となっている。

今後、研究すべき課題は干ばつ発生の予測である。しかし、干ばつ発生の早期予測技術、長期予報の精度向上が必要になる。これらの研究は太陽の黒点数と干ばつとの関係などが行われているが、経験的なものでしかないところがある。現在は大気循環モデルによる予測技術が開発され、精度も向上しているが、長期的な予測ではまだ難しい。また、気象変動とエルニーニョ・南方振動現象との関係解明やエルニーニョの地球規模での環境への影響評価を解明する必要がある。

一方、植物の生理生態分野の研究発展により水

分ストレス研究が進展しており、作物側からの研究も発展するものと考えられる。それに対応した研究は、作物の水分生理・消費特性の解明や耐干性遺伝子を組み込んだ作物の育種技術の開発である。また、地理情報システム (GIS) と土壌情報を利用した地域の特性を配慮した干ばつ発生の変動性、各種作物の干害発生評価の基準化および干ばつ軽減には地域気象を考慮した節水栽培法の技術研究も必要である。さらに、水資源確保と環境保全及び水の制御と利用等、防災営農研究の推進がもっと必要であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 大場和彦, 鈴木義則, 黒瀬義孝, 丸山篤志: 九州・沖縄地域における干ばつの農業気象学的解析, 九州農試研究資料, 86, 1999.
- 2) 大場和彦, 小林一雄: 南九州畑作地域における灌漑用水の需要構造に関する研究, 九州農試報告, 25 (2), 1988.
- 3) 大場和彦, 丸山篤志, 脇山恭行: 温暖地畑のかんがい用水量のデータ集 (I), 九州農試研究資料, 84, 1997.

3. 1994 年大渇水中の福岡都市圏住民の意識調査に基づく今後の水資源政策の在り方

河村 明*・神野健二*

3.1 はじめに

1994 年は夏から継続する小雨のため全国的に渇水が頻発した。特に福岡市を中心とする福岡都市圏 (22 市町村) においては, 14 市町が給水制限を実施し, 1995 年 5 月まで給水制限を強いられた自治体の数は 7 つにのぼった。福岡市は, 今回全国で給水制限を実施した自治体の内で, 最も遅い 5 月 31 日まで給水制限を継続し, 給水制限日数は 1978 年の福岡大渇水時の 287 日を抜き 295 日を記録した。

福岡都市圏は域内に一級河川を持たず, 元々地勢的に水資源に恵まれていない。このため急増す

る人口に対し, 小規模な水資源開発を数多く行うことにより, 水需要増に対処してきた。特に, 1978 年の福岡大渇水以降, 福岡市をはじめとして各自治体や国・県では様々な水資源開発を行ってきたが, 福岡都市圏住民の間にはこの地域における抜本的な水資源対策を求める声が高い。一方, 福岡都市圏は流域外の筑後川からの域外導水におよそ 30 % 依存しているが, 今回の渇水では筑後川流域側からは域外導水に対する「都市の論理」, すなわち都市圏側の水受給体制に疑問が投げかけられた。

本報は, 1994 年大渇水中の福岡都市圏住民を対象に行ったアンケート結果を基に, 都市圏側の住民が現状の水資源対策に対してどのような考えを持っているかを調査したもので, 今後の福岡都市圏の水受給体制の在り方についてその方向を探ることを目的としている。

3.2 調査方法とアンケート質問内容

1994 年大渇水中の 1995 年 1 月から 2 月にかけて, 福岡都市圏 22 自治体の住民を対象に, 「水利用および水資源政策に関する住民アンケート調査」を実施した。アンケートの質問内容は表 3-1 に示す 20 問である。表には各問に対する選択肢の部分は紙面の都合上割愛している。総数 290 のアンケートを配布し 247 の回答を得た。回収率は 85.2 % であった。なお, 配布にあたっては, 当時の建設省九州地方建設局渇水対策本部, 福岡県渇水対策本部の御協力を得て, 各自治体水道担当部局を通じて行った。調査対象者は各自治体の町内会長としたが一部は当研究室において対象者を抽出した。

3.3 調査結果と考察

問 1 ~ 問 19 に対する集計結果を図 3-1 に示す。図 3-1 では, 福岡市と周辺自治体, 給水制限実施自治体と不実施自治体のようにカテゴリー分類を行わず, 福岡都市圏全体として集計している。本報ではこれに対し考察を加え, 福岡都市圏全体としての意見集約を行っている。なお誌面の都合上, 幾つかの問に対する考察は割愛している。

* 九州大学工学研究院環境システム科学研究センター

- 問1 水資源は、およそ10年に1度の渇水までしか耐えられないように、計画されていることを知っていますか。
 問2 各自治体毎に水道料金が異なっていることを知っていますか。(福岡都市圏ではおよそ3倍の料金格差があります)
 問3 大規模住宅開発への給水を拒否した自治体に対する訴訟問題である、志免町給水訴訟のことを知っていますか。
 問4 あなたの町では、将来も水が不足すると思いますか。
 問5 水の安定供給のため、ある程度の経済負担(水道料金の値上げ)をすることについて、あなたはどのようにお考えですか。
 問6 今回の福岡都市圏の水不足の原因は何だと思えますか。(複数回答)
 問7 海水の淡水化についてどう思いますか。
 問8 人工降雨についてどう思いますか。
 問9 下水処理水などの中水としての再利用についてどう思いますか。
 問10 下水処理水をダムや河川上流に戻し、それを再度上水道の水源として使用することについてどう思いますか。
 問11 ダムによる水資源開発についてどう思いますか。
 問12 雨水の直接的利用についてどう思いますか。
 問13 節水機器や節水意識の高揚についてどう思いますか。
 問14 都市人口の増加抑制策についてどう思いますか。
 問15 地下水の利用についてどう思いますか。
 問16 福岡都市圏の水の広域的利用(一元化)についてどう思いますか。
 問17 一元化を推進すべき理由は何ですか。(複数回答)
 問18 一元化を行う必要がない理由は何ですか。(複数回答)
 問19 今後の福岡都市圏の渇水対策としてどのような方法が効果的だと思いますか。(複数回答)
 問20 水資源政策および今回の渇水に関する御意見があれば以下にお書き下さい。

表 3-1 アンケートの質問事項(選択肢の部分は省略)

問1の「水資源はおよそ10年に一度の渇水までしか耐えられないように計画されていることを知っているか」に対しては、およそ70%の人が知らないと答えている。すなわち、福岡のような水資源逼迫地域においても利水安全度の意味はあまり理解されていないようである。しかし、問2の「各自治体毎に水道料金が異なっていることを知っているか」に対しては、いずれの町でもよく知られており、都市圏全体では図3-1に示すようにおよそ80%の人が知っている。また、問3の「志免町給水訴訟のことを知っているか」については、64%の人が知っており、志免町給水訴訟への関心が高いことが伺える。なお、当事者の志免町ではほとんど全員が知っていた。

問5の「水道料金の値上げについてどう思うか」については、多少の負担はやむを得ないと回答が圧倒的に多い。負担はやむを得ないと回答と合わせると、64%の人が、水の安定供給のため、ある程度水道料金の値上げをやむなしと考えている。また、問6の「今回の福岡都市圏の水不足の原因は何か」については、降雨量が少ないためと考えている人が圧倒的に多いが、次いで人口が増加しているため、水の使用量増加のためという項目が多い。その一方で、水資源開発の立ち遅れ、

都市圏に大きな河川がないからという意見を指摘する割合も多い。

問7の「海水淡水化についてどう思うか」については、およそ60%の人が導入を求めている。ただ、分からないとする割合も多い。その他として、水道料金への跳ね返りを懸念する声もあった。問10の「下水処理水をダムや河川上流に戻し、再度上水道の水源として使用すること」については、意見が分かれているが、推進反対の方が多くなっている。その他の意見として、水質的に上水と全く同じであればよいという意見と、水質的にはよくても精神的に絶対反対という意見があった。

問14の「都市人口の増加抑制策」については、推進すべきであるとの意見がほぼ半分を占めているが、分からないと答えた人も1/4程度占めている。特に、今回の渇水で給水制限を実施した自治体では、人口抑制策を推進すべきとの意見が圧倒的に多くなっていた。

問16の「福岡都市圏の水の広域的利用(一元化)」については、推進意見が圧倒的に多く60%以上の人が推進意見を持っている。行う必要がないと考える割合は4%程度となっている。問17の「一元化を推進すべき理由」については、その理由として一体となって水問題に取り組むべきと

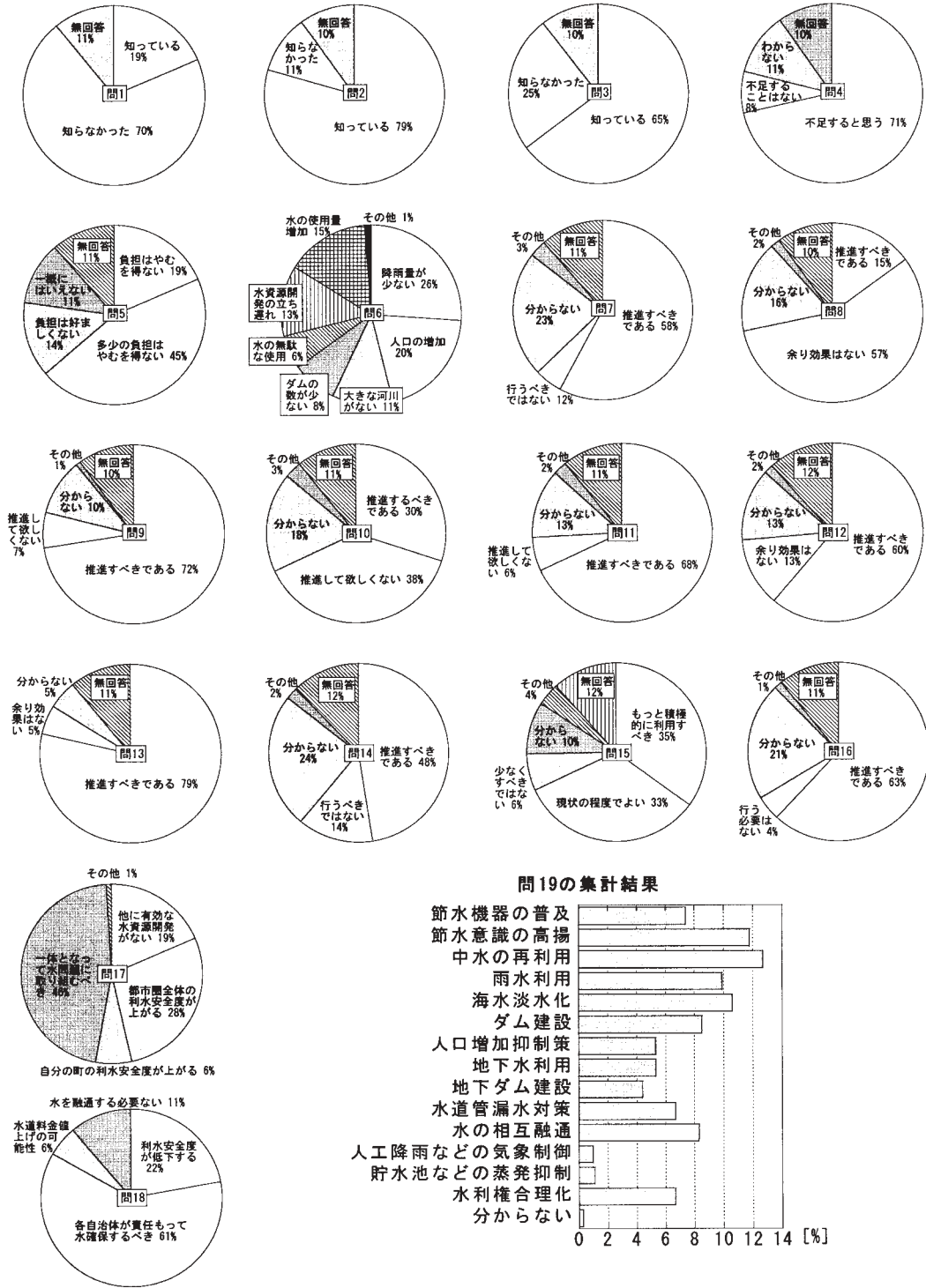


図 3-1 アンケートの集計結果

いう意見がもっとも多く、およそ50%を占めている。自分の町の利水安全度が上がるという意見は少ないが、都市圏全体の利水安全度が上がると考える人はかなり多い。なお、問18の「一元化を行う必要がない理由」については、一元化を行わなくてもよいという意見がきわめて少なかったので、余り参考にはならないが、各自治体が責任を持って水を確保すべきという意見が多くみられた。

問19の「今後の福岡都市圏の渇水対策に効果的な方法」については、可能性があればどの方法でもよいということであろうかどの方法も大体均等に挙げられている。多い順に①中水の利用、②節水意識の高揚、③海水淡水化、④雨水利用、⑤水の相互融通となっている。

問20の「水資源政策および今回の渇水に関する意見」の主だったものを列挙すれば以下のようである。

- ・九州は一つを合言葉に九州全体の水道を一つにする（九州全体の一元化）。さらに、国の強力な指導の下に日本全国の水を融通しあう。
- ・受水槽のあるマンションとない自宅の場合で、事実上節水時間に差がある。平等な給水制限を行わない限り、節水意識は高まらず。
- ・町にマンションが乱立し人口が増加している。水資源を考えない乱開発を止めるべき。
- ・もっと利水安全度の高い水道施設を望む。行政の水資源開発を積極的に望む。渇水のない都市を望む。

3.4 おわりに

今回の調査では標本数が十分ではないが、一応次の点が指摘されよう。水行政に対して、水の総合融通、中水利用、海水淡水化、雨水利用、水利権の合理化、ダム建設など多面的な水資源開発が求められ、そのためには、多少の負担はやむを得ないというように受け取れる。また、節水意識の高揚、節水機器の普及、水道管漏水対策以外に、人口抑制策による水需要抑制策についても推進意見が多かった。

4. 渇水防止のための節水法について —福岡市の場合—

藤井 利治*

4.1 はじめに

福岡市は、大川がなく、ダムも集水面積が小さいなど地理的条件から水資源に恵まれず、また近年の少雨傾向により昭和53年及び平成6年には長期的な給水制限を伴う渇水を経験したのをはじめ、たびたび水不足に悩まされている。

特に昭和53年の渇水は、給水制限が287日にも及び、また給水制限時間も最大19時間と非常に厳しいもので、断水や出水不良世帯も相次ぎ市民生活に大きな影響を与えた。このことは、福岡市ではもちろん、日本の大都市において、いまだかつて経験したことのないもので「福岡砂漠」とさえいわれた。福岡市では、この歴史に残る大渇水を教訓として、昭和54年に「福岡市節水型水利用等に関する措置要綱」を定め、総合的な水資源開発の促進を図るとともに、市、市民及び事業所が一体となって限りある水資源を有効かつ合理的に利用する「節水型都市づくり」を進めている。

4.2 節水型都市づくり

(1) 節水施策の体系

福岡市では、昭和53年の渇水以降、様々な節水施策に取り組んできた。配水コントロールや漏水防止対策事業などのパイプからの漏水を極力抑える水道有効率の向上策、雑用水利用や雨水利用など今まで利用していなかった水の有効利用策、節水蛇口や節水型便器などの使用により水使用量を減ずる節水型機器の普及策ならびに節水意識の高揚により市民の水使用量を節約してもらう節水策である。これらの節水施策を体系的にまとめると表4-1に示すようになる。

以下に主な施策について述べる。

(2) 水道有効率の向上

1) 配水コントロール

* 福岡市水道事業管理者

表4-1 福岡市の節水施策の体系

節水施策	水道有効率の向上…配水コントロール, 配水管整備事業, 漏水防止対策事業
	水の有効利用 …雑用水利用, 下水再生水利用, 雨水利用, 地下水利用等
	節水型機器の普及…節水蛇口, 節水型便器, 奨励する節水機器等
	節水意識の高揚 …水を大切にキャンペーン, パンフレット, ビデオ等

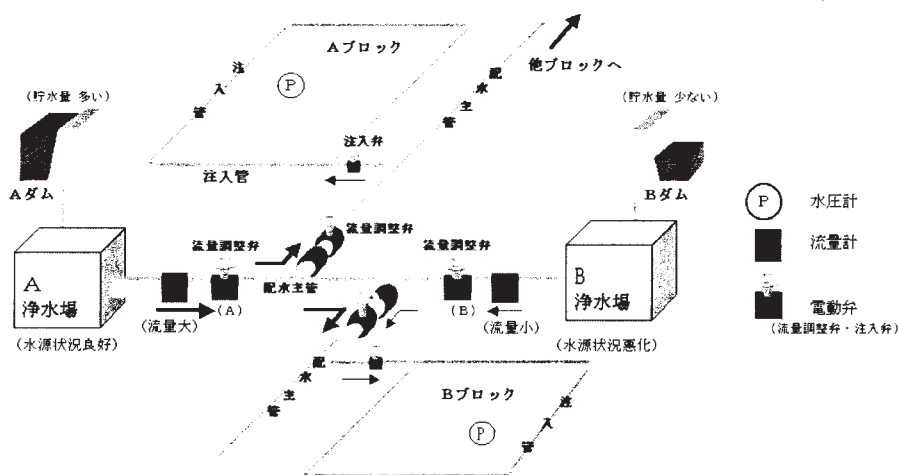


図 4-1 配水調整概略図

福岡市では昭和 53 年の渇水を教訓に、地形的な高低差に影響されない市内全域に対する公平で円滑な蛇口からの給水と、水源の多系統化、さらに各浄水場ごとに異なった水源状況に対応した配水を行うため、昭和 56 年に全国に先駆けて、浄水場から蛇口に至る水の流れ、水圧等を「水管理センター」により集中管理する配水調整システムを導入した。

この配水調整システムは、市内の給水区域を 21 の配水ブロックに区分し、水管理センターにて、配水管に取り付けられた水圧計 (120 個) 及び流量計 (68 個) を監視しながら、電動弁 (150 個) を遠隔操作することにより、各浄水場間の流量調整や適正な水圧調整など効率的な水運用を行うもので、余剰水圧や夜間の水圧を制御することで漏水量の削減にも大きな効果をあげている¹⁾。これにより年間約 7,600 千 m³ の漏水量が抑制されて

いる。水圧調整の例を図 4-2 に示す。

2) 配水管整備事業・漏水防止事業

福岡市の配水管の総延長は 3,500 km に達している。人口の増加や開発による新たな水需要に対応する配水管の新設とともに、赤水、出水不良の解消および漏水防止等を目的として老朽管の改良を行っており、現在、第 11 次配水管整備事業 (平成 13~16 年度) を進めている。特に、無ライニング管および昭和 39 年以前に布設された管を重点的に改良しているが、年間約 23 km が老朽管の布設替えとなっている。

また、昭和 31 年度から計画的な漏水調査を行っており、漏水個所の早期発見及び修理に努め、水の有効利用を図るとともに、道路陥没等の二次災害なども未然に防止している。現在、第 13 次漏水防止事業に着手しており、年間に 2,766 km の

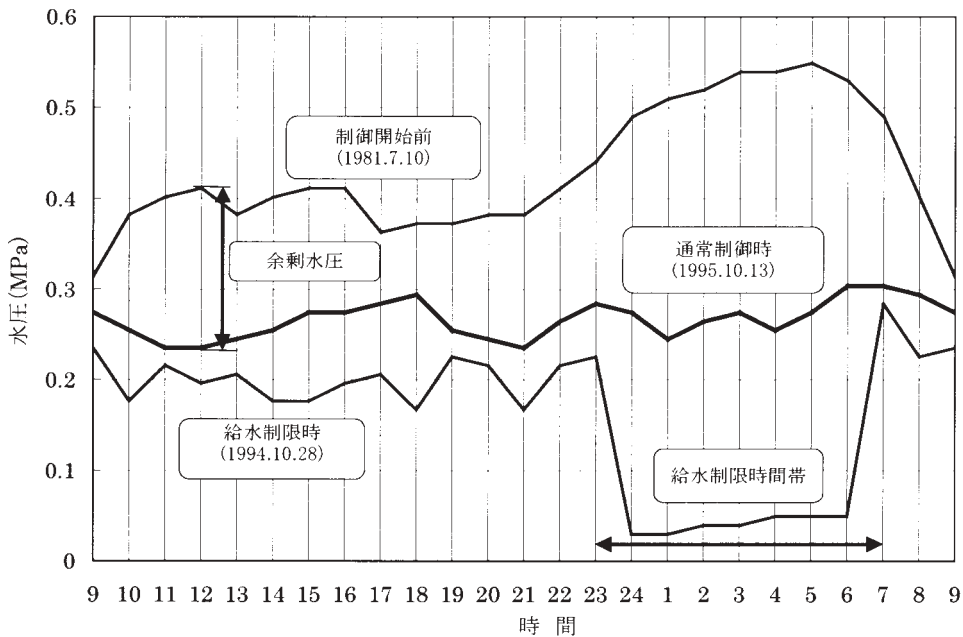


図 4-3 福岡市水道有効率の推移

漏水調査を実施し、発見された漏水箇所の修理、改善を進めている。

3) 福岡市水道有効率の推移

上記の施策により福岡市水道の有効率（配水量から漏水量を差し引いた有効水量の率）は、平成 12 年度は 97.8 % で、日本の都市の中でも最も高水準となっている。図 4-3 にその経年的推移を示すが、漏水防止事業、配水管整備事業、配水コントロールが相まって高い有効率を示している。

(3) 水の有効利用

1) 雑用水道の普及促進

福岡市では、「福岡市節水型水利用等に関する措置要綱」に基づき、口径 50 mm 以上の給水装置または延べ床面積 5,000 m²（再生水利用下水道事業区域内の場合は 3,000 m²）以上の大型建築物および市の施設については、雑用水道を導入することとし、下水道局と協力して、下水処理場の処理水を利用した再生水利用下水道事業の推進など、雑用水の普及促進に努めている。

雑用水利用の方法としては、個別循環方式、地区循環方式、広域循環方式がある。福岡市における、平成 12 年度末の各方式の導入実績は次に示すとおりである。

○雑用水道の普及状況（平成 12 年度末）

- ・個別循環型：264 件，4,460 m³/日（推定）
- ・地区循環型：1 地区，344 m³/日
- ・広域循環型：再生水利用下水道事業
770ha，204 件，約 4,000 m³/日（施設能力 8,000 m³/日）

その他、雨水利用としては、福岡市内にあるドーム型野球場において、下水処理水と併用して水洗トイレや樹木の散水用として利用されるなど、64 の施設で導入されている。

(4) 節水型機器の普及

水の使用においてできるだけ使用量を減ずるため、節水蛇口（節水コマ入りなど）や節水型便器等の節水効果の高い機器の指定及び奨励を行っている。

特に、台所や洗面所などの蛇口の開閉時の水の

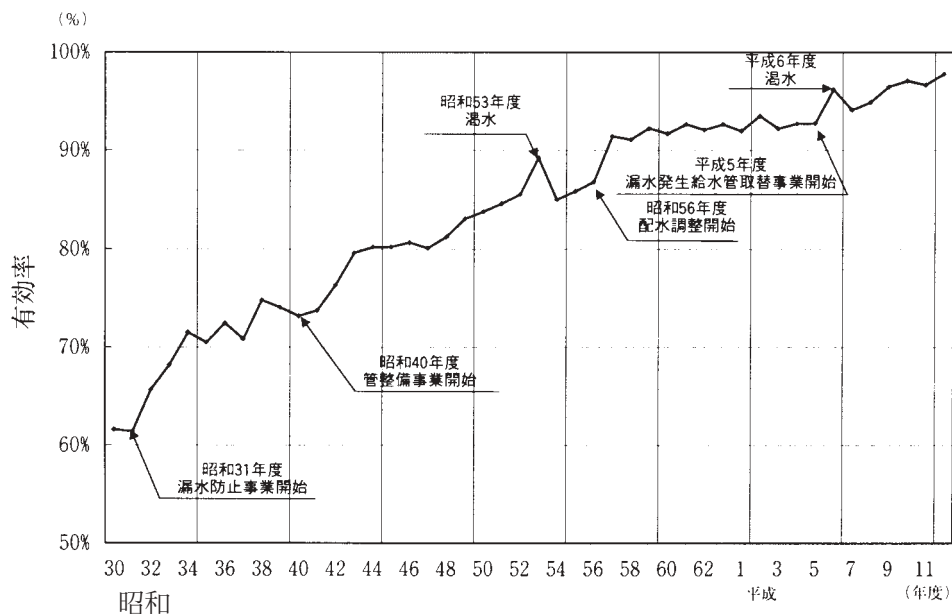


図 4-2 水圧調整時系列グラフ

無駄を少なくする節水コマを含む節水蛇口の取り付けに関しては、普及率95.1%（平成12年度末）となっており、これは4人家族で1ヶ月あたり10リットル入りバケツ約100杯分もの水が節約されるといった大きな効果をもたらす。その他、1回当たりの洗浄水量を10リットル以下（通常12リットル）に抑える節水型便器についても、平成12年度末で約57万個の設置がなされている。

(5) 節水意識の高揚

市民の節水に対する意識の高さが節水行動に結びつき、節水型都市づくりの大きな柱となっている。渇水時だけではなく平常時においても高い節水意識を保持するため、行政側から積極的な働きかけを行っている。水を大切にキャンペーン、インターネットホームページでの広報、水道モニター制度の実施による広報活動を行うなど1年を通じて節水PRを行い、節水意識の高揚を図っている。

その結果、ここ5年間、市民の節水意識は72~73%と高い値となっている。

(6) 節水施策の効果と平成6年大渇水

1) 一人一日平均給水量

以上のような節水施策を進めてきた結果、使用水量は、給水人口の増加や下水道の普及、都市機能の発展など増大する要因が増えているにもかかわらず、一人一日平均給水量は363リットル（昭和52年度）から300リットル（平成12年度）へと大幅に減少しており（表4-2）、節水施策の効果の高さを示している。また、この一人一日平均給水量は他の政令市（300~550リットル）と比較しても、最少水準となっている。

2) 平成6年大渇水での効果

平成6年には、降水量が年平均降水量の56%（891mm）という福岡市観測史上最低の異常少雨により、295日という昭和53年の渇水をもしのぐ長期間の給水制限を余儀なくされたが、昭和53年のような大きな混乱もなく、給水時間中の蛇口給水を確保することができた。これは、昭和53年以降渇水に強いまちづくりを目指して取り組んできたことによる大きな成果である。

表 4-2 福岡市における給水量の渇水前と現在の比較

	単 位	渇水前 昭和 52 年度	現 在 平成 12 年度	増加率 (%)
給 水 人 口	千人	985	1,323.8	34.4
施 設 能 力	千 m ³ /日	478	704.8	47.4
日 最 大 給 水 量	m ³ /日	443,050	442,900	△ 0.03
日 平 均 給 水 量	m ³ /日	357,072	397,630	11.4
一人一日最大給水量	リットル/人日	450	335	△ 25.6
一人一日平均給水量	リットル/人日	363	300	△ 17.4
下 水 道 普 及 率	%	36.1	98.8	62.7

特に、昭和 53 年の大渇水の教訓から生まれた水管理センターは、リアルタイムで管内流量・水圧の監視や電動弁の開度調整ができることにより、水源の有効利用、迅速かつ的確な弁操作など大きな効果を上げた。

(7) おわりに

以上述べてきたように、節水型都市づくりを進めるためさまざまな施策を展開してきた。その結果、市民の節水意識も高く、一人一日平均給水量や有効率等は政令市では最高の水準を誇っているが、水資源に恵まれない福岡市がこれからも安定給水を図っていくためには、高い節水レベルを維持していくことが必要である。そのためには、行政、市民および事業所が一体となった取り組みが重要であることから、各種施策を一層推進するとともに、市民にあらゆる機会を通じて節水への取り組みに対する情報提供を行い、理解と協力を得ていくことが必要である。

また、地球環境問題が叫ばれる中、これからの事業展開は、環境への負荷軽減も必要であり、この意味からも、なお一層節水型都市づくりを推進していく必要がある。

4.3 海水淡水化事業

(1) 海水淡水化の動向

地球上の約 97.5% が海水であることから、水資源のひとつとして海水淡水化が考えられる。現

在、海水淡水化方式として実用化されているのは、多段フラッシュ法、電気透析法、逆浸透膜法である。

近年では、相対的にエネルギー消費が少なく、運転管理が容易であることから逆浸透膜法が主流となっている。この逆浸透膜法は、1970 年アメリカデュボン社が開発したポリアミド系中空糸膜や、その後開発されたスパイラル膜とともに普及し、歴史の浅いなか、既に世界中で 100 ヶ所以上使用されている。

(2) 海水淡水化事業

1) 事業の目的

人口や産業が集中する福岡都市圏では、近年の水需要の増加や不安定な気象状況などから新しい水資源の開発は、福岡都市圏共通の課題となっている。

昭和 53 年には、極端な少雨による空梅雨で、時間制限による給水が 287 日間に及び、社会生活に大きなダメージを与えた。

さらに平成 6 年から翌年にかけても 295 日間にわたり給水制限を行ったことは記憶に新しいところである。

福岡都市圏は地域内に一級河川を持たないことから、これまで筑後川からの広域利水を積極的に進め安定供給の確保に努めてきた。また、域内のダム建設を始め水資源の開発にも積極的に取り組んできたが、近年の少雨傾向もあり渇水が頻発し

ている。

このような状況の中、福岡県において平成 22 年度を目標年度とする福岡地域広域的水道整備計画が策定され、その中で海水淡水化事業が位置づけられた。

福岡地域広域的水道整備計画では、目標年度の平成 22 年度で 1 日最大需要量を 98 万 1 千 m^3 と見込んでおり、それに対する供給水量は、猪野ダムや鳴淵ダム等の供用開始により、日量 87 万 9 千 m^3 になり、差し引きの不足水量が 11 万 2 千 m^3 となる。この不足分を計画中の大山ダム、五ヶ山ダム、それと海水淡水化で補っていくという計画になっている。

水源開発は、ダム等の河川開発が基本であるが、ダム開発が自然環境への影響や、水源地域対策等により地元の理解を得るのに長期間を要しているのが現状である。

また、福岡都市圏においては、急増する水需要に十分対処できず、現在でも一定規模以上の宅地開発に対して給水規制を実施している自治体があるなど、極めて厳しい水事情であり、水資源の早期確保は緊急の課題である。

更に、筑後川から流域外導水を行う都市圏にとっては、筑後川流域関係者に対し自助努力を示す必要がある。

平成 6 年度のような大規模の渇水の危険性に早急に対処するためには、天候に左右されず安定した水源となる海水淡水化は最も効果的であり、ダムに比べ比較的工期も短くて済むことから、地理的に水資源に恵まれない福岡都市圏の補完的な自助努力として進めている。

2) 事業の概要

平成 9 年に福岡県が策定した「福岡地域広域的水道整備計画」において、福岡地区水道企業団を事業主体とし、施設規模を日量 5 万 m^3 にすることが定められた。

次いで平成 11 年に厚生大臣から事業認可を受け、海水淡水化事業が本格的にスタート。プラント施設及び取水施設は、公募型技術提案評価方式によって決定された。

同施設は平成 12 年から建設が進められているが、平成 17 年度の供給開始を目指し、現在、取水井・放流水槽等の築造工事や建築の鉄骨・屋根・外装工事等、さらには口径 800 mm のダクタイル鋳鉄管の布設工事が行われている。

なお、今回の海水淡水化事業には次のような特徴がある。

- 浸透取水方式の採用により清澄な海水を安定的に取水できる。
- 前処理に UF 膜を採用することにより微生物や極細微粒子まで除去できる。
- 逆浸透膜方式では、高圧一段方式に部分低圧方式を加えることで、より良質な水を生産できる。
- 淡水回収率 60 % を達成することにより、低コストで水を生産することを目指す。

(事業概要)

- 事業主体 福岡地区水道企業団
- 建設地 福岡市東区大字奈多地内
- 敷地面積 約 46,000 m^2
(福岡ドームの約 1.3 倍)
- 生産水量 1 日最大 50,000 m^3
- 取水方式 浸透取水方式
- 淡水化方式 逆浸透法 (淡水回収率 60 %)
- 放流方式 和白水処理センターの処理水と混合して博多湾内へ放流
- 導水施設 導水管 ϕ 800 mm
延長約 20 km
プラント施設～多々良浄水場
延長約 12 km
多々良浄水場～下原配水池
延長約 8 km
- 事業費 約 440 億円

(3) 海水淡水化の課題とその対応策

1) 逆浸透膜法の課題

現在、福岡市の水資源開発コストは、近郊水源開発の多々良取水事業の場合、開発水量 74,800 m^3 /日、ダム・取水・導水・浄水設備の事業費は 724 億円で、1 m^3 /秒当たりの浄水単価は 836 億円になる。

また、沖縄県北谷海水淡水化事業 (逆浸透膜法)

では、開発水量 40,000 m³/日、事業費（送・配水施設除く）は 347 億円で、1 m³/秒当たりの造水浄水単価は 750 億円となり、福岡市の現在の水源開発に比べ 1 割程度安くなっている。とはいえ、逆浸透膜の維持コスト高は否めない。そのため、海水淡水化逆浸透膜のさらなるコスト低減策を考える必要がある。コスト低減策としては、逆浸透膜法の高効率化や膜単価の低廉策が考えられるが、取水施設においてもその有効策を見出すことができる。

2) 取水施設における課題

海水取水施設は、施工・管理時ともに潮汐・台風・漂砂・海難事故・赤潮等の海象の影響に配慮し、海水取水地点は直接波浪等の影響を受けにくい箇所に設けるのが通例である。大型発電所の冷却水取水の場合では、密度成層水域からの下層取水として理論実験解に基づいて水深 10~15 m で取水されている。また、海水取水口流速は、0.2 m/sec を標準としているが、稚魚の浮遊速度はこれよりはるかに小さいため、できるだけ取水流速を低く抑えるべきである。さらに、取水地点は太陽光が届く水深にあるため、取水施設に貝・藻類が付着するし、くらげ等による閉塞も考慮する必要がある。

取水された海水には砂粒子やプランクトン等を多く含んでいて、FI 値（汚れ指数=fouling index）が高い。逆浸透膜への供給水の水质は、FI

値 4 以下が望ましいとされている。このため図 4-4 の海水淡水化逆浸透膜プラントのフローシートに示すように前処理施設（ろ過）と、逆洗配水施設が必要となる。そのうえ、汚泥処理では、汚泥から海水を脱水するための分離槽や濃縮槽、前処理・逆洗排水施設に付随する薬品注入設備がある。このような理由で、前処理・逆洗排水施設の占有面積は、全海水淡水化プラント面積の半分以上を占めている。これに加えて、電気代・薬品代・人件費などの維持管理費も加算されるため、これらを削減する方法の考案が求められている。

3) 海底浸透取水方式の概要

以上のような条件を満たす海底浸透取水施設としては、図 4-5 に示すような、取水井と取水管の取水部と導水部から成るものを構想した。この取水部には透水性のある管を使用し、浸透してきた海水をポンプにて取水することとしている。

この方式は、海底砂層の浸透水を取水するため、海象の影響を受けることなく、取水流速も低く抑えられ稚魚などの生態系に優しいと考えられる。また、清浄な海水が得られることから前処理・逆洗排水施設の削減等をもたらす可能性が高い。

(4) 今後の取り組み

前述のように、海水淡水化導入に当たっては、コストをいかに削減するかが大きな課題となっている。本市としては、今後、あらゆる面からコス

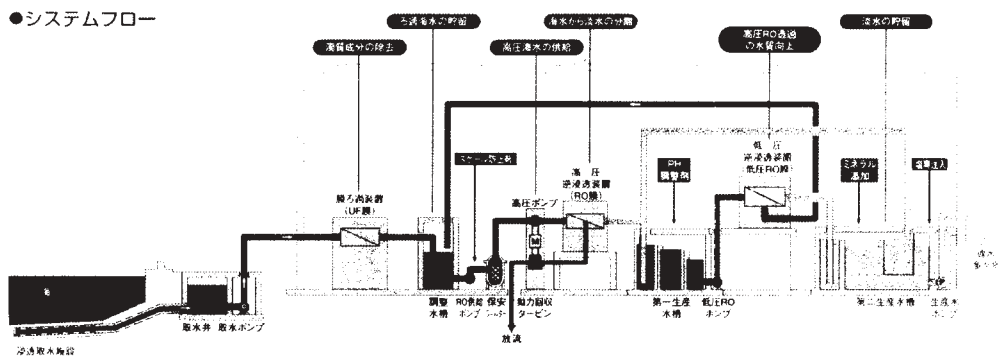


図 4-4 海水淡水化逆浸透膜プラントのフローシート

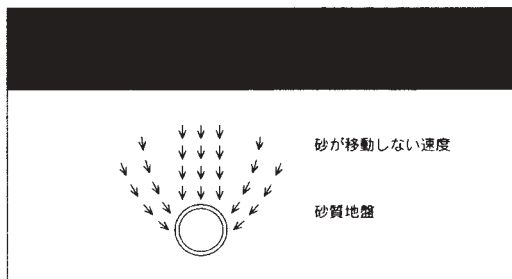
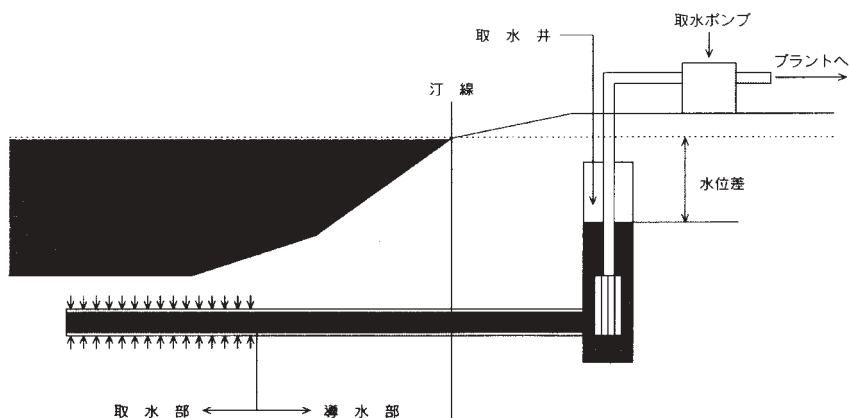


図 4-5 取水井と取水管の取水部と導水部

ト低減を図り、水道料金への影響を極力抑制するための努力を行っていく。

また、いつ起こるとも限らない渇水に対応できる有効策としての海水淡水化事業の早期完成を期待している。

参 考 文 献

- 1) 節水意識・節水施策による水補給量を伴う総合水需給計画の評価に関する研究 p99 平成 13 年 7 月 藤井利治

5. 渇水防止のための人工降雨について

脇水 健次*・西山 浩司**

5.1 はじめに

昨年(2001年)の夏は、関東地方から四国地方の太平洋岸では異常渇水となり、東京都ではヨウ化銀(AgI)を用いた人工降雨を行い、関東地方の水がめであるダム周辺に多くの降雨をもたらすことに成功した。

このように気象調節(または気象制御)により、水資源の確保と激しい気象の緩和は人類の太古からの願いであった。

気象制御には大きく分けて、意図的なものと非意図的なものの2種類があり、1つは人工降雨の

* 九州大学大学院農学研究院

** 九州大学大学院工学研究院

ように意図的な気象制御であり、もう一つは、人口増加や二酸化炭素増加により発生する地球温暖化のような、非意図的な気象制御である¹⁾。

本稿では、意図的な気象制御について説明する。

表 5-1 は、世界の各国における気象制御の実施例について説明したものである。圧倒的に「降水量増加」と「ひょう制御」に関する気象制御が多い。世界の多くの国では、水資源不足のために切実に気象制御（人工降雨）により水資源を増加させようとしていることがわかる。しかし、大気は非常に大きな空間であり、気象を制御することは容易ではない。

日本では、古くは、「平安時代の京都で、護摩祈禱により雨を降らせた」という内容の古文書も多く残っている。海をへだてたアメリカでは、「南北戦争のとき、たくさん大砲を撃ったら雨が降り出

した」とか、「インディアンたちが太鼓を叩いて雨乞いをしたら、雨が降った」という記録も残っている。しかし、これらは、科学知識の乏しい時代の人工降雨の例にすぎない。

ここで紹介するのは、科学的方法に基づいた人工降雨についてである。つまり、1946年11月13日、米国マサチューセッツ州西部の過冷層積雲に対し、ゼネラルエレクトリック（G.E.）社の Vincent. J. Schaefer が小型機からドライアイス を撒布し、雲が雪片に変化し、落下消滅し、はっきり人工降雨の効果を示した後からのことである。この翌年、ヨウ化銀（AgI）の有効性も G.E. 社 Bernard Vonnegut により発見された。これらの人工降雨により、人類が初めて科学的に気象/降雨を支配できる方法として、近代的気象制御法が大きな期待を集めるようになった²⁾。

表 5-1 世界の国々における気象調節プロジェクト実施状況（1993年、1994年）

国名	目的	国名	目的
アルゼンチン	H	マレーシア	P
アルメニア	H	モンゴル	H
オーストラリア	P	モロッコ	P
オーストリア	H	ノルウェー	F
ブルガリア	P、H	ペルー	P
中国	P、H	ロシア	P、H、S
クロアチア	H	スロベニア	H
フランス	H	南アフリカ	P
ドイツ	H	スペイン	H
ギリシャ	H	シリア	P
イスラエル	P	タイ	P
イタリア	P	ウクライナ	P、H
日本	P	米国	P、F、H
ヨルダン	P		
リビア	P	ウズベキスタン	H
マケドニア	H	ユーゴスラビア	H

H：ひょう制御、P：降水増加、F：霧の消散、S：なだれ防止

5.2 暖かい雨の人工降雨法と冷たい雨の人工降雨法

さて、雨の成因には、大きく分けて2つある。

1つは、氷粒子が関係しない過程で形成される雨（暖かい雨）、もう1つは、氷粒子が関係する過程を経て形成される雨（冷たい雨）である。

暖かい雨の人工降雨法は、大きな雲粒が小さな雲粒と衝突・併合してより大きな雲粒となる過程を利用するため、水滴そのものを撒布する方法や塩化ナトリウムなどの吸湿性粒子を撒布する方法がある。

一方、冷たい雨での人工降雨法は、降水の始まっていない過冷却水滴を含む雲の中で人工的に氷晶を発生させる方法と氷晶が昇華成長する際の潜熱によって雲内の上昇流を強化し、降水を増加させる方法である^{1)、2)}。

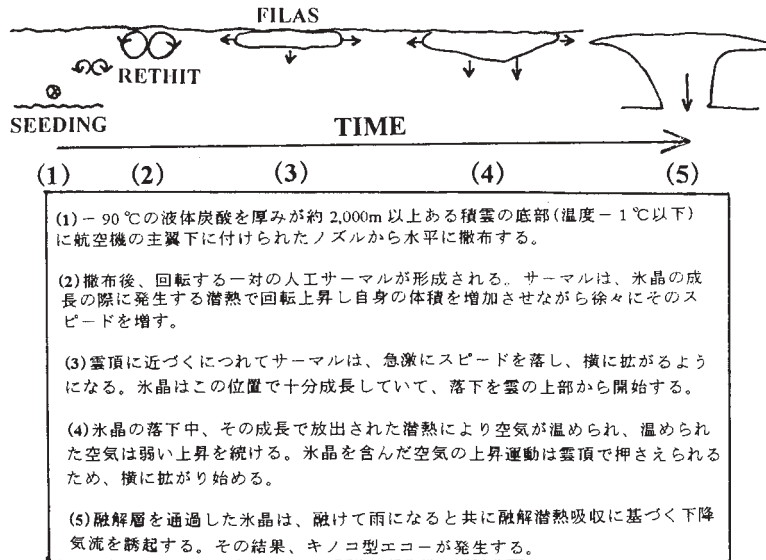
ここでは、後者の冷たい雨について人工降雨実験を行ったので説明する。

5.3 北部九州での人工降雨の実施例の紹介

冷たい雨に用いる人工降雨法には、従来、ヨウ化銀（AgI）法やドライアイス法があった。しかし、この2つの方法とも増雨効果はきわめてあまいであった。これに対し、今回用いた人工降雨

法は、Fukuta (1998) が確立した、物理過程に基礎をおく全く新しい理論的方法、すなわち、対

流雲（積雲）底への航空機液体炭酸撒布法である（図 5-1）。



* RETHIT: Roll-up Expansion of Twin Horizontal Ice Crystal Thermals.

* FILAS: Falling-growth Induced Lateral Air Spreading.

図 5-1 種撒き効果模式図 (福田理論)

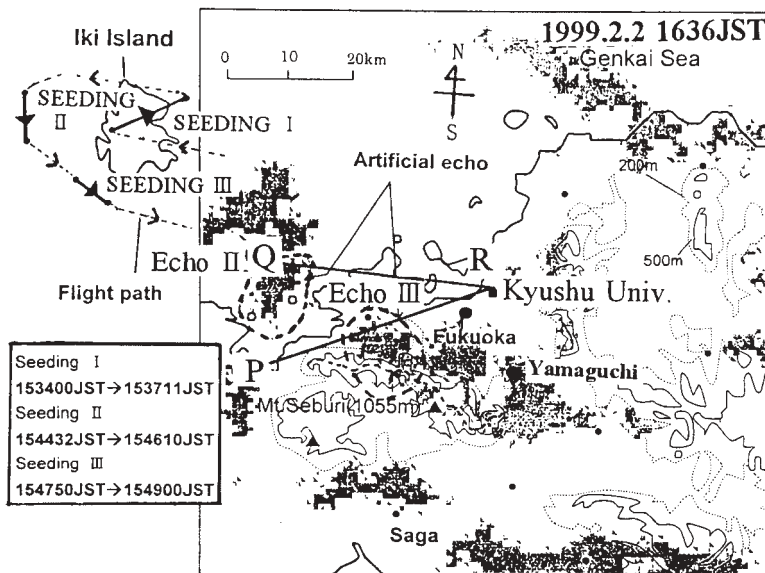


図 5-2 種撒き飛行経路およびエコー-II, IIIが最も発達した頃のレーダーエコー (PPI) (九大レーダー)

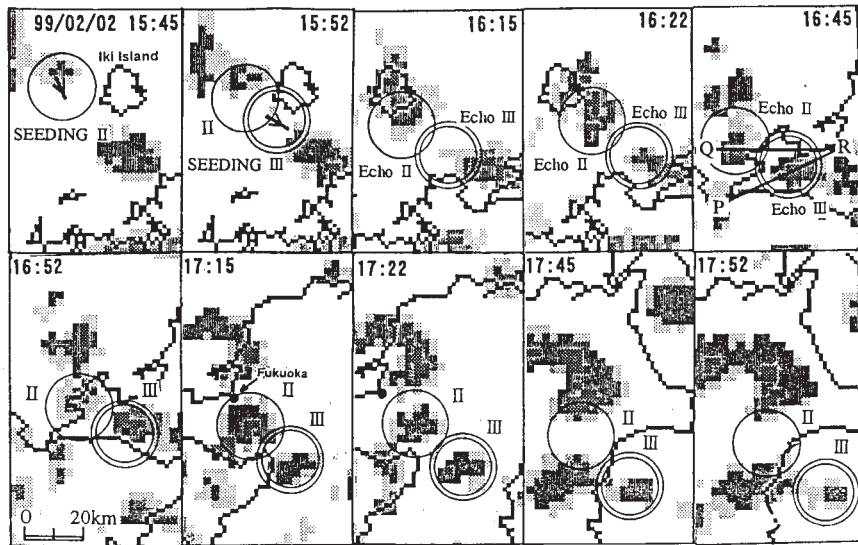


図 5-3 エコー-II, IIIの水平断面エコー (PPI) の時間変化 (気象庁レーダー)

そのメカニズムは、RETHIT 効果と FIRAS 効果から成っている。

ここでは、九州北部で 1999 年冬季および秋季に、積雲底への航空機液体炭酸水平撒布法の人工降雨実験を行い、レーダーによる物理的解析を行った。液体炭酸の撒布強度は 6 gs^{-1} である。

実験結果は次のようになった。

- 1) 人工エコーは、種撒き 20–30 分後に発現し、その後、水平方向へ広がるとともに降雨強度を増大させつつ、風下側に時速約 60 km で移動、福岡県西・南部上空で最も発達し、最大面積約 300 km^2 に達した後、約 30 分で消滅した。エコー消滅は雲の水分がすべて降雨に変化したことを示唆する。1 つの積雲への種撒きの結果、地上雨量としては 1 mm を観測し、そのエコーからの直接総推定降水量は 100 万トンに達した (図 5-2, 図 5-3)。
- 2) その雲の鉛直断面エコー (RHI) の画像解析により、福田理論が予想するキノコ型エコーの発達が発見された。これは、自然の降雨では起らないものである (図 5-4, 図 5-5)。
- 3) さらにこの人工エコーは、降雨に伴う下降気流をもつため、周辺に新しく上昇気流を起すの

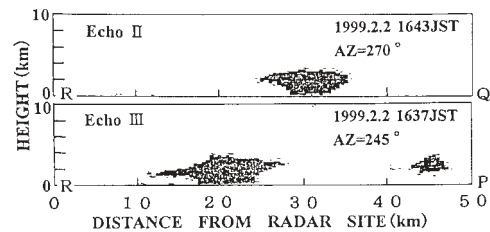


図 5-4 エコー-II, IIIのキノコ型エコー (RHI) (九大レーダー)

で、2 次エコーを誘起させ、人工降雨効果を増幅させる現象も発見された。

- 4) 秋季の実験では、機上の観測も行い、雲頂高度は、種撒き雲 7.2 km、種撒きしない雲 3.6 km を確認した (写真 5-1)。
- 5) ただし、この種撒き反応は雲の厚みに依存し、約 2000 m 以下の薄いものではエコーも降水も起らなかった。

以上より、福田理論に基づく航空機液体炭酸撒布法は有効であることが証明されたわけである。

実用化に際しては、図 5-6 のように次から次にやって来る対流雲 (積雲) に種撒きを施すことにより、1 つの積雲で地上に 100 万トンの降水をも

たらすことが出来るので、実際には100万トン×積雲の個数だけの降水が期待できる。その上、飛行機さえあれば、ヨウ化銀法に比べ、低コストでしかも地球に優しい方法であることも付け加えておく。

最後に、今回の人工降雨実験には福岡県水資源

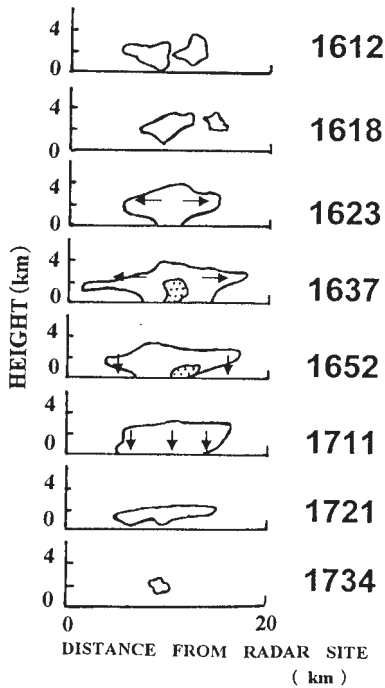


図 5-5 エコーIIIの鉛直断面エコーの発達および衰弱の過程 (九大レーダー)

対策局および海上自衛隊厚木基地 511 飛行隊の多くの方々にお世話になりました。ここに、記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 水野量, 2000: 雲と雨の気象学, 朝倉書店, 196pp.
- 2) 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, 213pp.
- 3) Fukuta, N., 1988: Cloud seeding clears the air, Physics World, 11, 25-26.



写真 1 種撒き後 40 分頃の発達した雲 (秋季実験より)

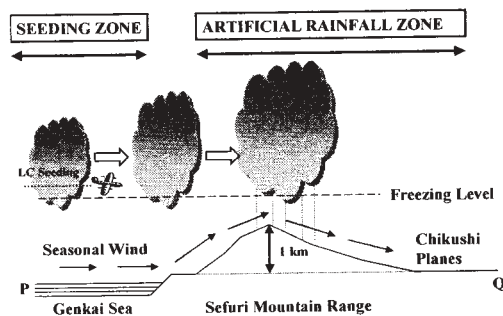
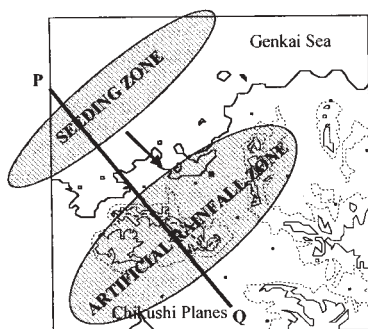


図 5-6 北部九州における人工増雨法の計画模式図