

# 西日本地域の水資源特性に関する研究 (第2報)

— 九州における寒候期降水の水資源的役割 —

藤原輝男\*・塩月善晴\*\*

Study on Characteristics of Water Resources in Western Japan (2nd Report)

— Distribute Parts of Rainfall in Cold Season in Kyūshū to the Water Resources —

Teruo FUJIWARA and Yoshiharu SHIOTSUKI

## Abstract

From the annual variation of water budget for small basin in the upstream part of the Chikugo River, we pointed out the rainfall in cold season is important for water resources and also showed the mechanism of snow fall in Kyūshū.

We referred to the availability of man-made ice fog for the artificial increase of precipitation in cold season and described that the soft rime holds a pretty important position as the rainfall for the water resources.

We will go a step farther the theoretical and experimental basic research and also investigate economic problem about the scattering of Ag I over the basin.

## 1. 緒言

気候表を見ると九州地域の降水量はわが国の他地域にくらべて量的には断然多いが、また逆に干ばつに見舞われる回数も多い。このことは降水量の変動が著しく大であることを意味しており、最近日下部<sup>1)</sup>は香川県の干ばつ気候を調査した結果、非かんがい期(前年0月からその年の6月まで)の土壌水分過剰量が干ばつ被害の程度に対してかなり重要な要素であることを見出した。著者らもこのことに注目して九州の筑後川上流の小流域について若干の解析を試みたので報告する。また非かんがい期、特に11月から3月までの冬季降水は山地上流域では降雪であり、また気温が高くて雨の形であってもこれをもたらすのは雪雲であるので、著者らは数年来、福岡県英彦山で雪の観測ならびに天気解析、積雪の統計調査などを進めてきた。あわせてこれらの結果を述べるとともに冬季降水量増大のための人工調節などについても考察する。

## 2. 筑後川上流小流域の水収支解析

対象流域を筑後川上流の小平と小ヶ瀬(大分県日田市)の隣接した2つの小流域(流域面積はそれぞれ532.8km<sup>2</sup>, 540.5km<sup>2</sup>)に選び、水収支解析は正務<sup>2)</sup>の方法に準じて行なった。すなわち、河川上流域のある期間  $t: 0 \sim T_i$  の水収支式は次式で与えられる。

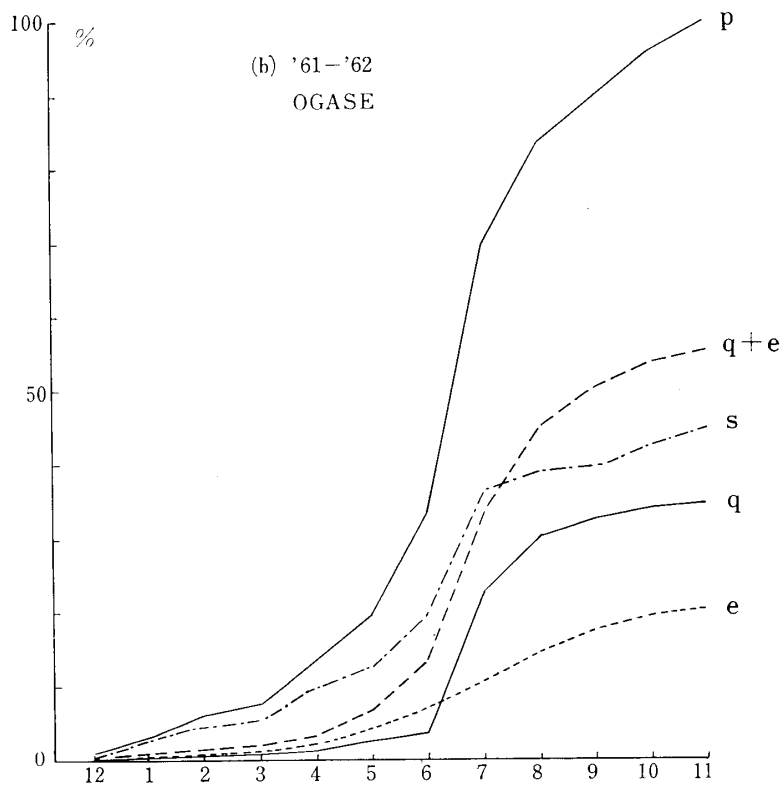
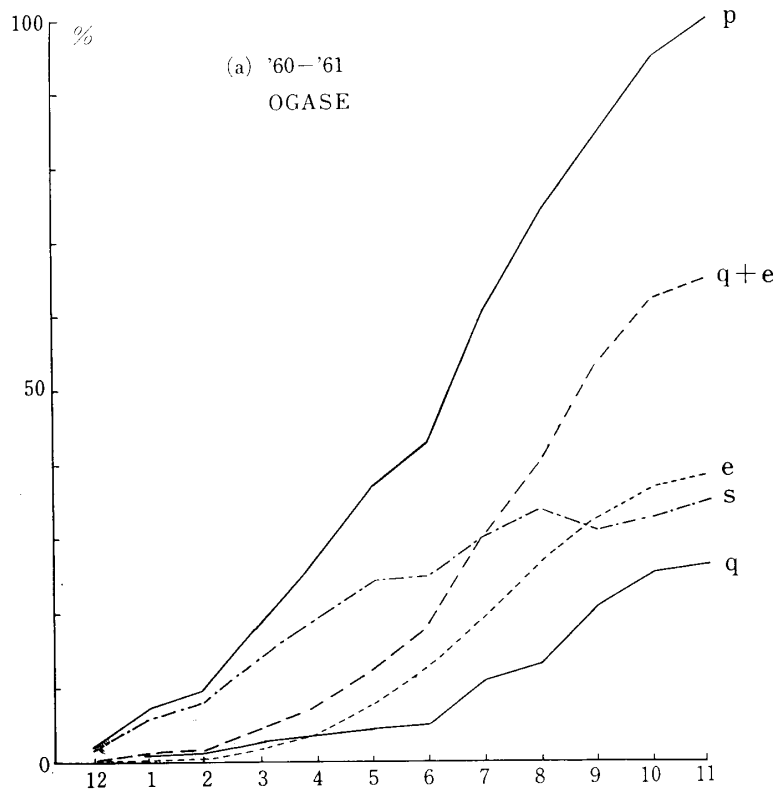
$$\int_0^{T_i} P dt = \int_0^{T_i} q dt + \int_0^{T_i} e dt + \int_0^{T_i} S dt \quad (1)$$

ここで  $P$  は面積降水量、 $q$  は全流出量、 $e$  は地域蒸発散量、 $S$  は流域に残留する地域保水量である。一般に流出量  $q$  は考える期間内に流域が受けとった降水の流出成分とその期間の最初における地域保水量からの流出成分とからなるが、今回は水収支の全体的な傾向を見るのにとどめ、後者の成分は無視した。それぞれの収支項の計算は、 $P$  については大分県気象月報<sup>3)</sup>の等雨量線から求め、 $e$  はソーンスウェイト法を使用して日田の気温データより求めた。また、 $q$  は建設省河川局発行の流量年表<sup>4)</sup>を用いた。これらから  $S$  は収支式の残差として求まる。

\* 土木工学科

\*\* 工業短期大学部土木工学科

いま、1水年を前年12月からその年の11月までとして、1960~1961, '61~'62, '62~'63年の3水年について月毎の水収支を示したのが、Fig. 1, Fig. 2である。



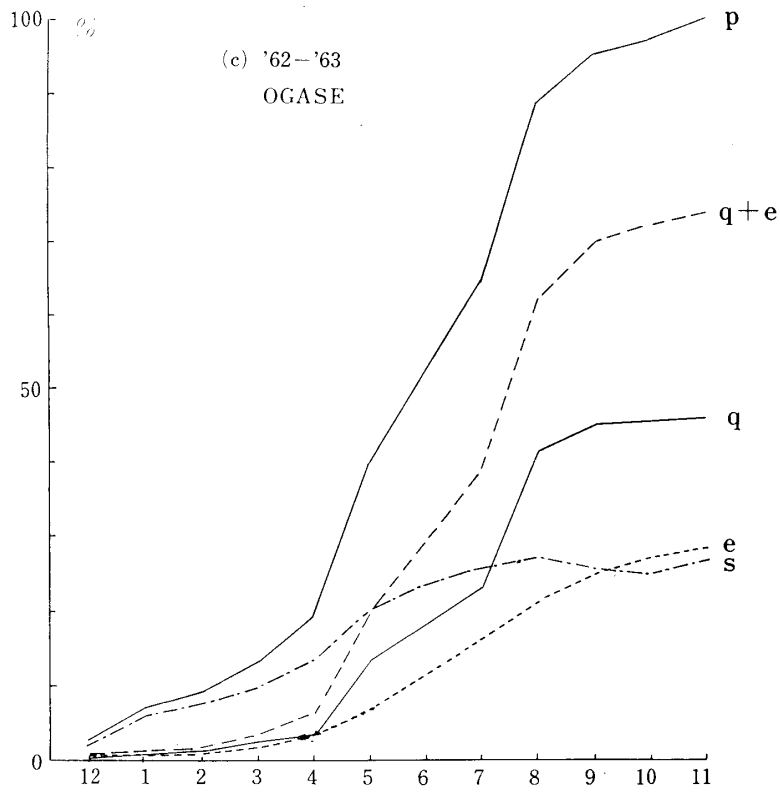
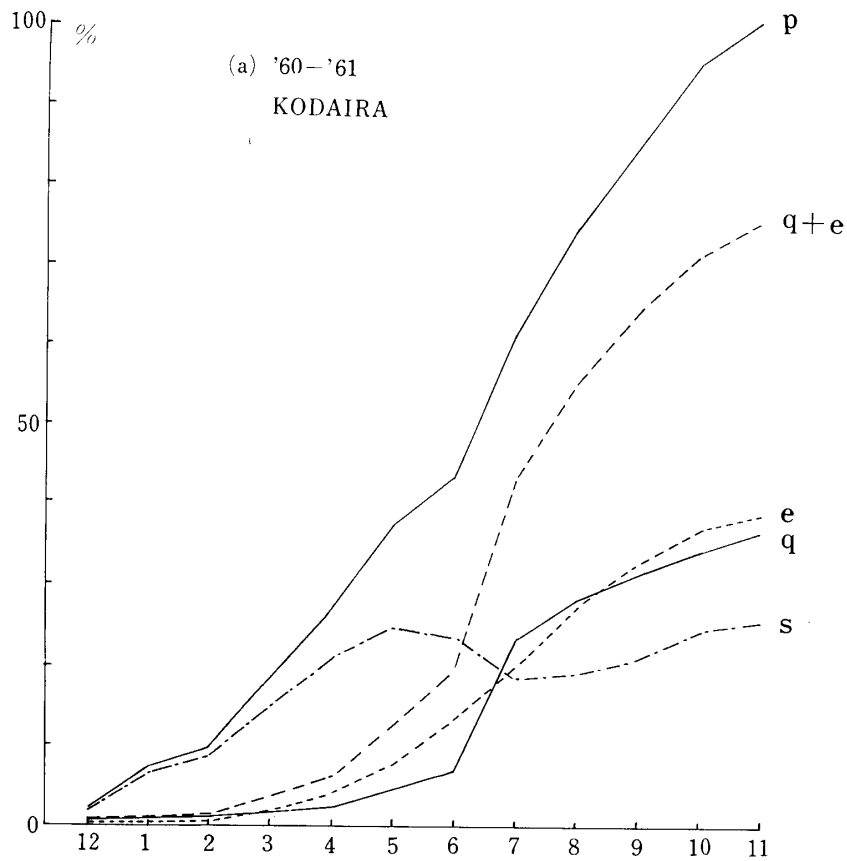


Fig.1 Water budget (Ogase)



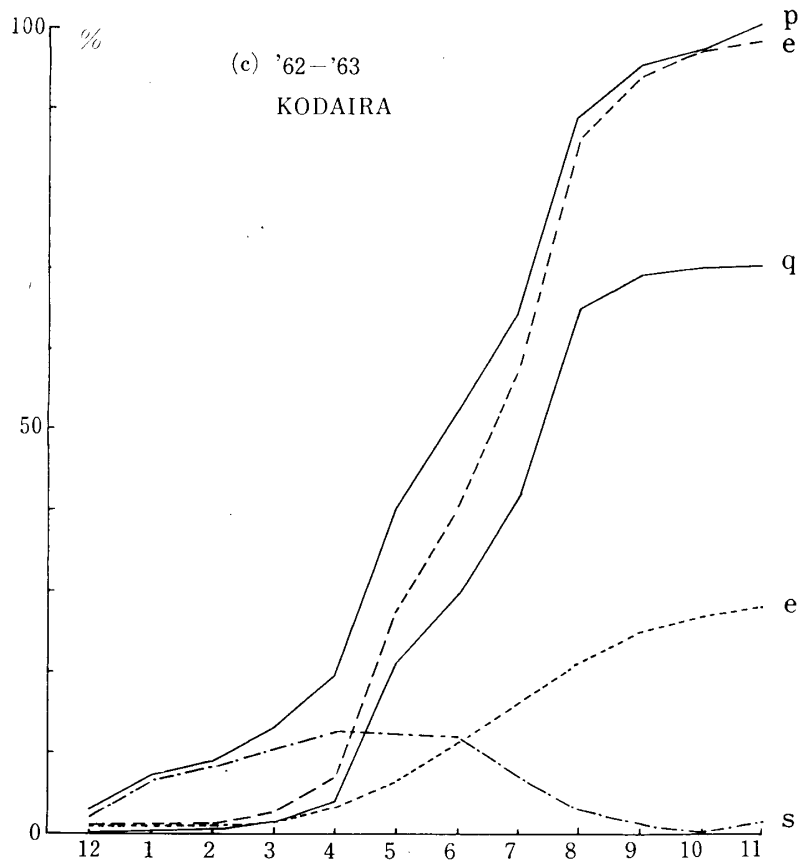
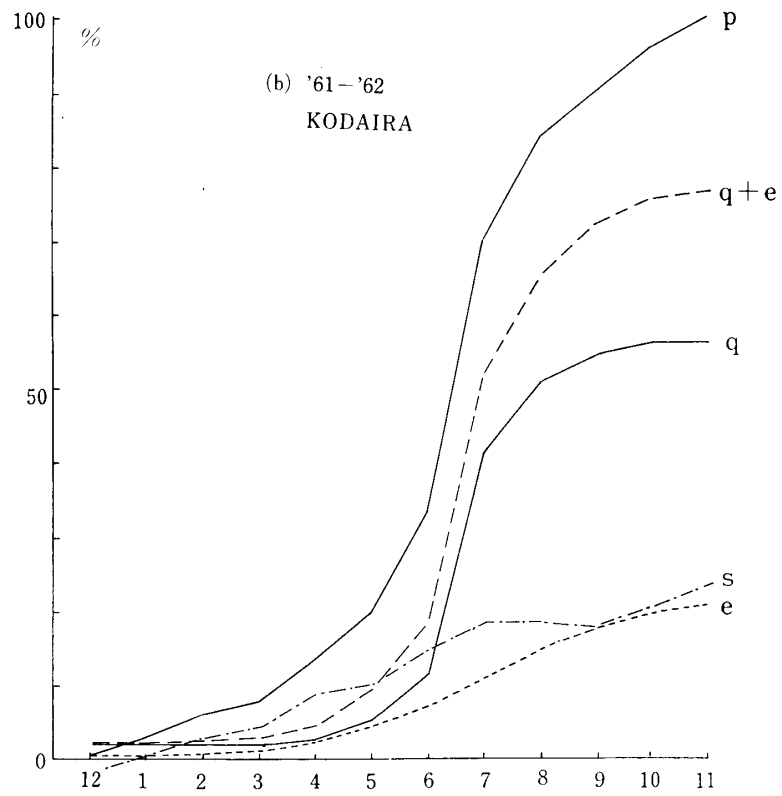


Fig.2 Water budget (Kodaira)

横軸に月をとり、縦軸には各要素のその月の月末までの積算値の全年の降水量に対する百分率をとっている。この水収支図は各期末現在、流域の取得した水がどのように消費と貯留に配分されたかを示し便利である。

Fig. 1 に小ヶ瀬流域, Fig. 2 に小平流域をそれぞれ示してある。小島<sup>5)</sup> その他の報告によれば、筑後川流域の流出率は70%程度であるとされているが、これに対してこの図では'60~'61, '61~'62年では両流域ともこれよりはるかに小さく、小平で35~55%, 小ヶ瀬で25~35%を示している。'62~'63年では小平で70%になっているが、小ヶ瀬では45%で両流域の差異が認められる。全年の降水量を見ると、'60~'61, '61~'62, '62~'63年でそれぞれ1930, 3280, 2440 mm (隣接した流域なので両流域とも同じ  $P$  で計算してある) で、上の  $q$  の傾向とは直接関係はないようである。

Fig. 3 は1958~1967年の干害による水稻の被害面積および被害量<sup>6)</sup>を示したものであるが、これを見ると、'63年は干害の被害の最少の年であり、両流域ともこの水年においてもっとも流出率が高いのは興味深い。もちろんFig. 3は全国計のもので、これがそのまま筑後川流域にあてはまるとはいえないが、従来干ばつは西日本を中心にして起こっていることから、ある程度の傾向は示されていると思われる。すなわち、下流域での水収支はその流域での降水量と上流域からの流出とからなるので、干ばつ時に上流域の流出が小さくなる傾向は一応注目するのに値する。

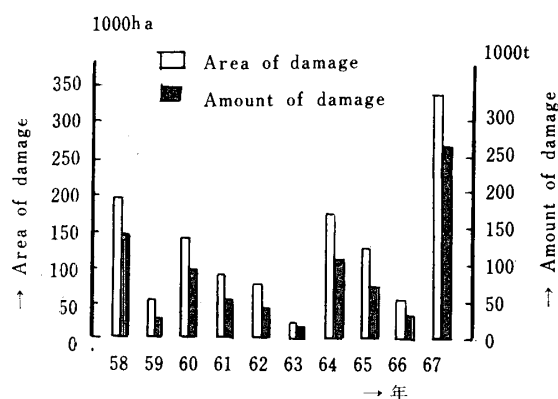


Fig.3 Amount and area of damage from a drought in Japan during '58-'67

これらのことを前提にして、さらに水収支図を見ると、小平では  $\sum_{12月}^{6月} P$  は '60~'61, '61~'62年でそれぞれ43%, 33%で、'62~'63年の52%と比べるとかなり少なく、 $\sum_{12月}^{6月} q$ を見ると '60~'61, '61~'62年でそれぞれ

6.5%, 11.5%で、'62~'63年の29.5%に比べると1/3以下である。前年10月から6月までを非かんがい期間とすると  $\sum_{12月}^{6月} P$  や  $q$  はほぼその期間の  $P$  と  $q$  の積算値を代表していると思われるが、このことから非かんがい期間の  $\sum P$ ,  $\sum q$  が豊富な程干害が少ないと言える。これは日下部の指摘する非かんがい期間の過剰水分量が大きいと干ばつにはなりにくいということに対応すると思われるが、日下部の土壤水分過剰量については、今回の水収支図では保水量  $S$  に相当するもので、この  $S$  の年変動を見ると、 $\sum_{12月}^{6月} S$  はそれぞれ23.5% ('60~'61), 15.0% ('61~'62), 12.0% ('62~'63) で非かんばつ時にむしろ小さくなり、この傾向は9月、10月でさらにはっきりとでる。このことはなんらかの原因で非かんがい時に保水量が下流域にとって流出量としてうまく働いていたことを意味する。以上の傾向は小ヶ瀬流域にもいえる。したがって、非かんばつ時には非かんがい期間の降水量、流出量が大きく、保水量の流出量への転換能率がいいことがわかる。この転換能率のメカニズムについては今後の詳細な検討が必要とされる。

### 3. 九州の寒候期の降水機構

以上述べたように今回の解析でも、非かんがい期の降水量が水資源上重要な地位を占めていることがわかった。従来人工降雨(雪)技術の成果では氷晶過程の雨(冷たい雨)については20%程度の増雨を見込むことができる<sup>7)</sup>といわれているので、この点を重要視して将来再び人工降雨実験の行なわれる際の基礎資料として非かんがい期、特に寒候期の降水(雪)機構についてこれまで調査研究したことについて述べてみよう。

九州の、特に平野部で顕著な大雪の降水機構についてはすでに報告した<sup>8)</sup>とおりであるが、この時の気象条件は日本海海岸豪雪機構のパターンと類似している。すなわち

(1) 大スケールの条件として大陸上空の寒冷域が沿海州から朝鮮半島にまで南下し、上層空気が著しく低温となっているところに、海面からの顕熱、水蒸気補給によって不安定が生じる。

(2) 地衡風と温度風が交さる場に加えて下層で著しい強風域があって、風速の垂直シアーにより対流場が形成される。

(3) 放射冷却でできた内陸の高圧部のために海岸付

近に不連続線が形成され、これに地形的要因が重なって降雨は平野部に集中する。

などであった。したがって平野部で多いか、山間部で多いかは別に種々の要因があると思うが、一応条件(3)で決まるとすれば、この条件が弱い時、条件(1)、(2)がそろっていれば降雨は山間部に集中することになり、山間部での大雪降水機構も同様に説明できる。また、山間部では地形性雲からの降水もあり、かつ平野部より低温なので積雪量も多い。

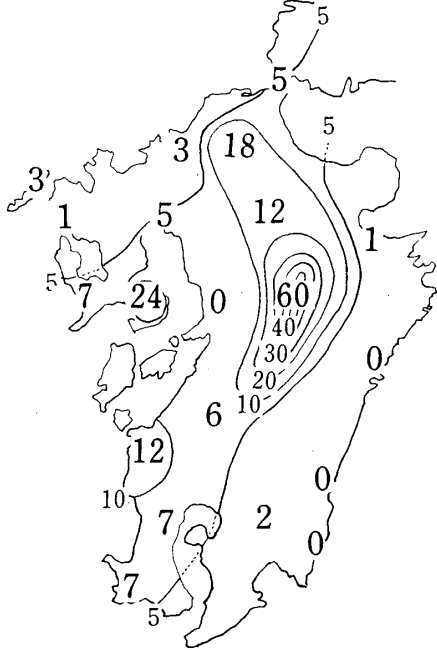


Fig. 4 Distribution of numbers of heavy snowfall occurred during 1957—1967 in Kyūshū

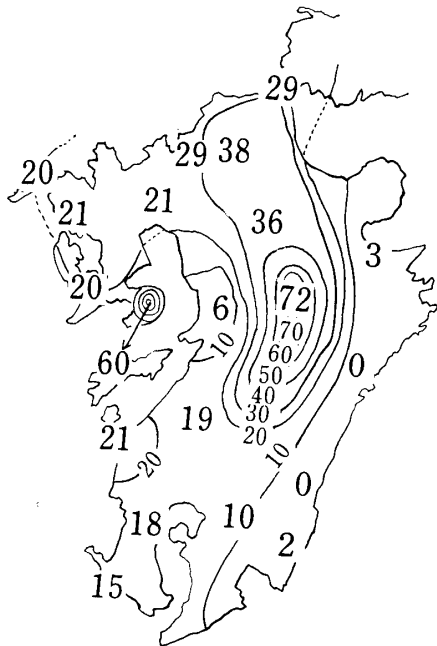


Fig. 5 Distribution of numbers of days of continuous snow cover in Kyūshū, 1963

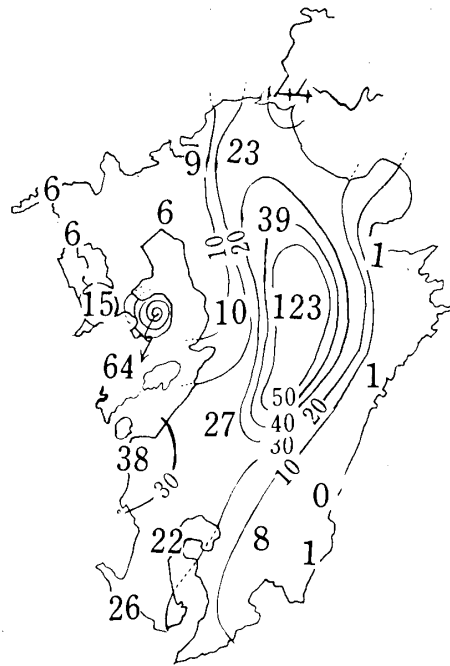


Fig. 6 Distribution of the maximum depth of snow cover in Kyūshū, 1963 (cm)

Fig. 4～6は西日本でも記録破りの降雪量のあった1963年1月の最深積雪の分布を示しているが、上に述べたように何回かの降雪が重なればやはり山間部の方が多いことがわかる。

いずれにしても冬期降水とくに降雪については、台湾坊主などの勢力の大きな低気圧が東進したあとに形成される季節風パターンにおいて、先述の条件1、2が重なれば大きな降水量がもたらされることになる。

#### 4. 冬季降水の水資源としての役割の向上のための人工調節

寒候期降水量の水資源としての役割の重要性を理解できるとしても、それらはさらに大きなスケールの大気循環に支配されている<sup>9)</sup>ため、その年にいくら降ってくれるかは現在のところ予測はかなり困難で、年間の水利用計画を立てる場合にはあまり都合がよくない。小島<sup>5)</sup>の指摘するように、現在の九州・山口県の年間の水資源利用率は平年の場合で10%、渇水年で16%とされているが、もしこの利用率を少しでも上げてやれば干害は防げるものと思われる。これらの問題については別に論ずるとして、ここでは気象学的に考えられる水資源の増大、すなわち普通これには蒸発損失の抑止や人工降雨(雪)などがあるが、このうちの後者の人工降雨の問題について若干の考察を行なってみる。これまで行なわれた主な人工降雨技術は氷晶核数の増加、あるいは氷晶核能力の増大を図るための飛行

機からのドライアイスや AgI の撒布、あるいは地上にセットした AgI 発煙装置により空气中に種まきするものであったが、これは比較的広い区域を対象とするもので、上流の小流域にとっていつ、どの程度の降雨があるかはむしろ自然降雨の場合と同じで、仮に人工降雨実験が成功したとしても量的な把握はむづかしい。そこで今回のような小さな上流域で人工降雨を実施するのに、冬期山地頂上付近を覆う過冷却雲を対象に地上から種まきをして対象流域内に人工降雪を与えたい訳であるが、このためには現在平野部付近にセットされている AgI 発煙装置<sup>10)</sup>を上流域にもってこることが必要である。

Fig. 7 は雲仙において坂上<sup>11)</sup>らの行なった人工霧氷の実験において、AgI 撒布によりもたらされたと思われる霧氷量の等値線図である。撒布時の気象条件は気温 $-8.0^{\circ}\text{C}$ 、湿度99%、風向NW、平均風速7.3m/sで AgI 撒布量は50分間に連続して70.5gであった。いまこのデータをもとにして有効 AgI の拡散状況を調べてみるとFig. 8となる。

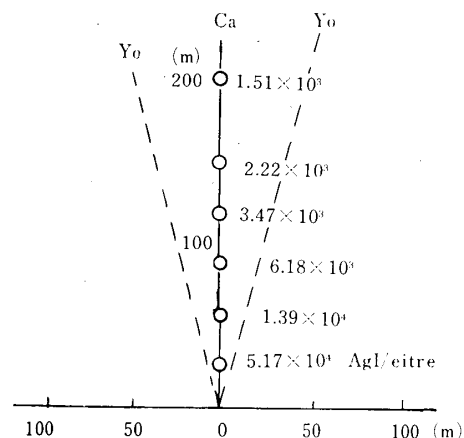


Fig. 8 Scattering of AgI  $Q=2.33 \times 10^{11}$  AgI/sec  $u=6.5\text{m/sec}$  Stability D

この際使用した拡散式は英国気象局実用式 (Pasquill)<sup>12)</sup>であるが、著者らが最近行なった起伏の多い局地での拡散調査<sup>13)</sup>でもこの式が比較的妥当なものであったので今回もこれを適用した。また、撒布された AgI はその時の温度条件によって氷晶化能力が著し

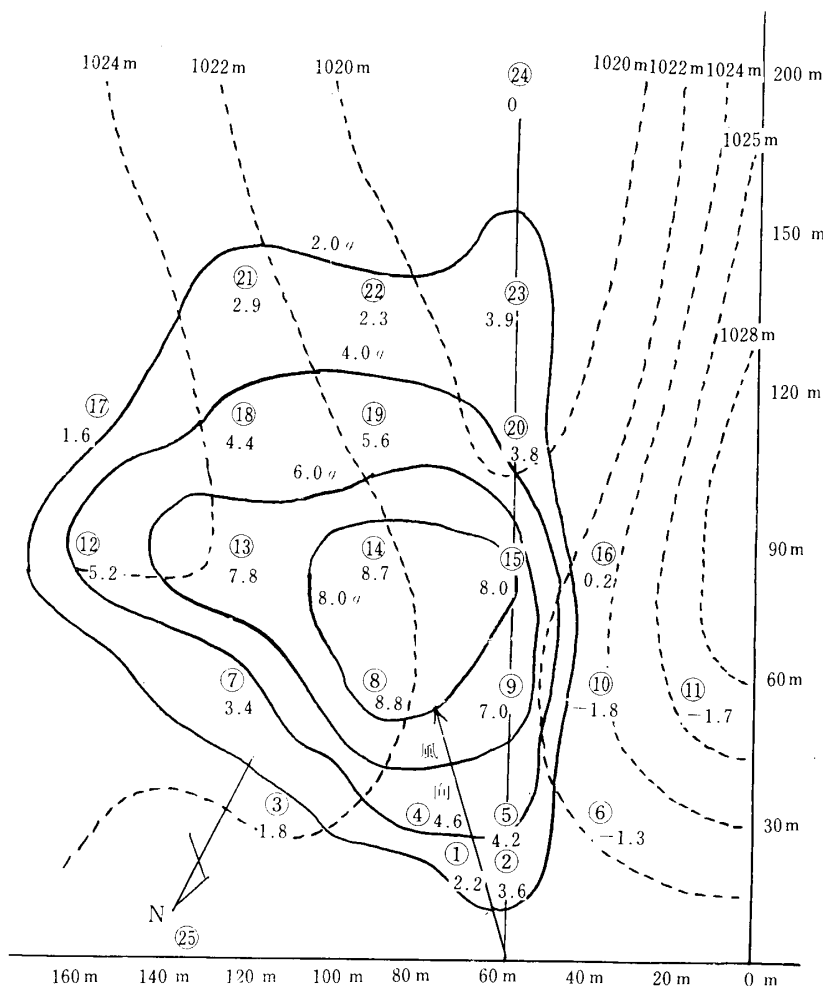


Fig. 7 An isopleth of amount of frost flower at Mt. Unzen

く影響されることはよく知られていることであるが、ここでは GH-Milly<sup>14)</sup> らにならって  $-10^{\circ}\text{C}$  の時の Ag I の有効個数を 1gあたり  $10^{13}$ 個として計算した。Fig. 8 には風向に沿った各点における軸濃度(最大濃度)とその点を通して風向に直角な方向で軸濃度の 1/10濃度をとる点を結んだ線を示してあるが、これによると地上発煙のため濃度は風下に行くにつれて減少しており、実験区約  $200\text{m} \times 160\text{m}$  の範囲では  $5 \times 10^4 \sim 10^3$ 個/l である。これに対して人工霧氷実験では風下  $60 \sim 90\text{m}$  の所に極大域が見られる。Shaefer<sup>15)</sup> によれば、過冷却雲に Ag I を撒布して降水過程のきっかけを作るとするには Ag I 濃度が  $100 \sim 200$ 個/l が適当とされているが、これに比べて雲仙の実験の場合では  $10 \sim 10^2$  だけ多いことになる。しかし霧氷の場合では粒子 1 個の成長はそれ程問題ではなく、あとで述べるようにいかに過飽和水蒸気を獲得するかが問題なので、この場合 over seeding は問題にはならないと思われる。

つぎに、Ag I 撒布により実際どれくらいの降水量に相当するものが期待できるかについて若干検討して見る。雲仙の実験では実験区内(以後の計算では大ざっぱに  $200\text{m} \times 200\text{m}$  とする)に置かれた約  $300\text{cm}^2$  の金網に 2 時間で平均  $3.6\text{g}$  の付着量となっている。これを 1 秒間あたりの成長量にすると  $5 \times 10^{-4}\text{g}/\text{sec}$  と

なり、一方 Ag I が働いてこの時の過飽和水蒸気量がすべて霧氷になったとした時、断面積  $300\text{cm}^2$ 、風速  $7\text{m}/\text{s}$ 、気温  $-10^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度  $100\%$  の時  $2.4 \times 10^{-2}\text{g}/\text{sec}$  となって、前述のように Shaefer のいう適当な Ag I 数より  $10 \sim 10^2$  多い Ag I 数を与えても人工的に得る霧氷は過冷却水分の 1% 程度のものである。また、坂上は Houghton の式<sup>16)</sup> からこの時の氷晶粒子の成長速度  $2 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{g}/\text{sec}$  を得ているが、いま実験区域上の空気の厚さを  $2\text{m}$  とし、その中の Ag I  $10^8$  個/l がすべてこの成長速度をもつとした時、空気中で成長した霧氷を降水量になおせば 2 時間で  $36\text{mm}$  になる。さらに実験結果から実験区域内の 1 個の金網の成長霧氷量は  $3.5\text{g}$  で、これがいま断面積  $300\text{cm}^2$ 、厚さ  $1\text{cm}$  の空間に出来たものとするれば、実験区域中 ( $200\text{cm} \times 200\text{cm} \times 2\text{cm}$ ) にはこの金網が約  $6.7 \times 10^7$  個入り、これらがすべて  $3.5\text{g}$  の霧氷を作ったとすれば、同様に降水量になおすと  $23\text{mm}$  となる。従ってこれらの簡単な計算から、 $10^8$ 個/l 程度の Ag I 種まきでは過飽和度を 1% 程度しか減少させることはできないが、しかしこの程度による種まきでも数  $10\text{mm}$  の降水をもたらすことが可能であることがわかる。

5. 雲仙, 阿蘇における霧氷出現時の気象特性

以上人工霧氷について述べたが、温暖な九州におい

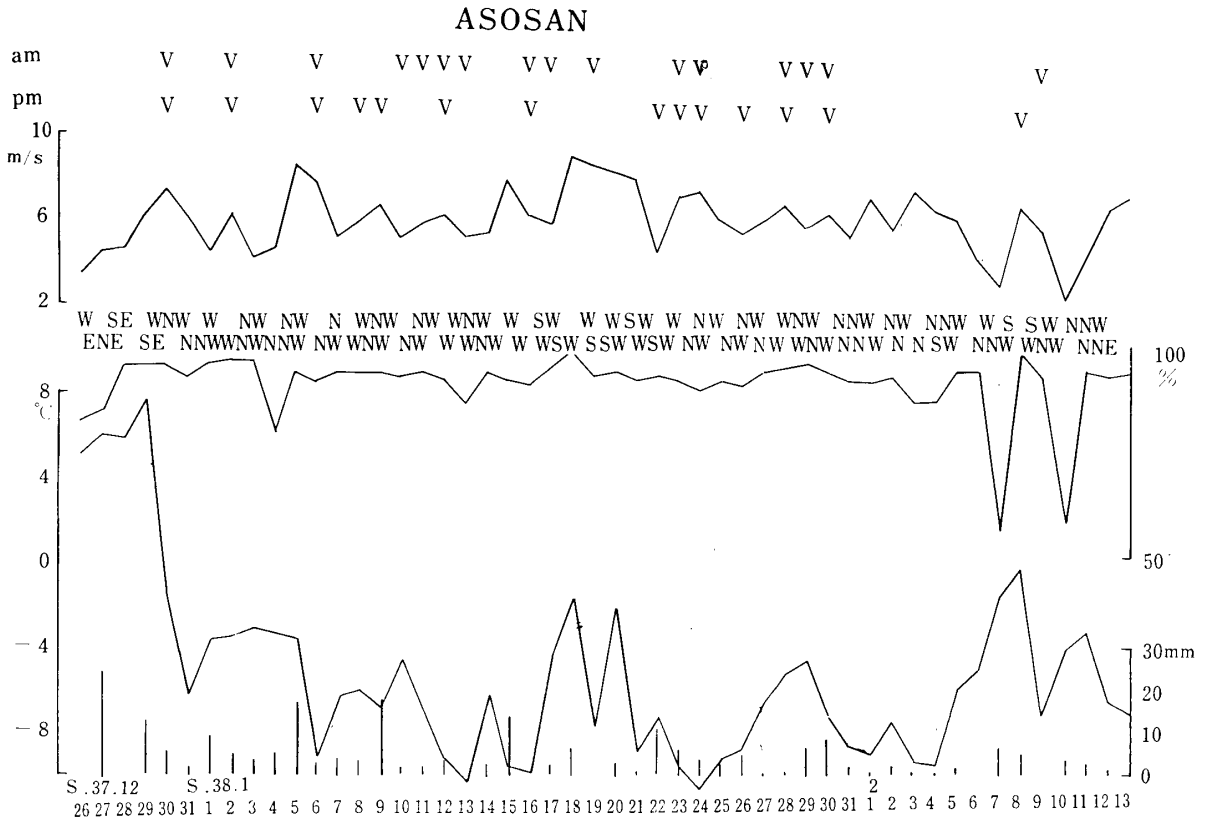


Fig.9 Meteorological condition at the time when soft rime appears (Mt. Unzen)



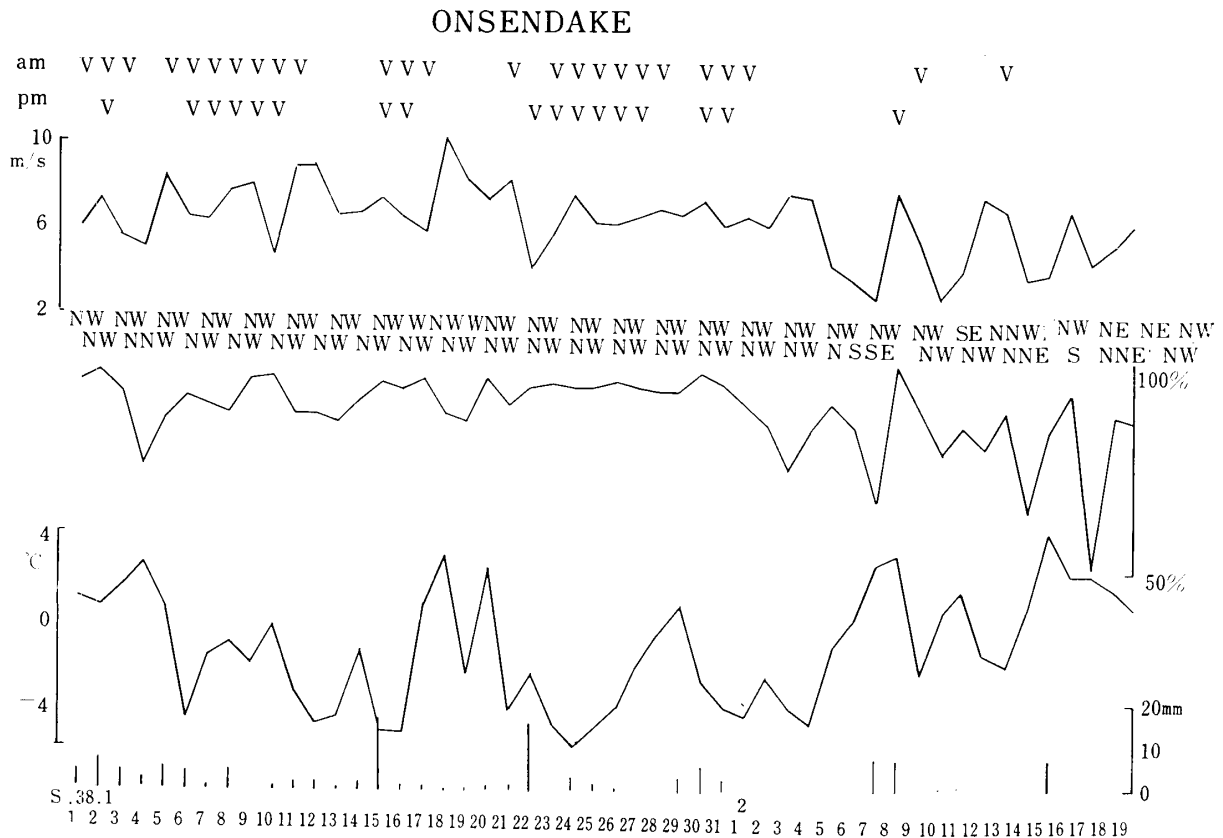


Fig.10 Meteorological condition at the time when soft rime appears (Mt. Aso)

でも冬季では1000mクラスの山ではひんぱんに自然の樹氷を見ることができる。これらは樹雨<sup>16)</sup>と同じく雨量計には入ってこない降水量で水資源として重要な役割を持つであろう。

Fig. 9, Fig.10は1963年1月における雲仙(温泉岳)と阿蘇の樹氷出現時の気象を示すものである。

これを見ると、大体平均風速5m/s以上、平均相対湿度80%以上、平均気温-1.0°C以下が霧氷出現の限界条件となっている。また、気温が多少高くても風速と湿度が比較的大なるとき、すなわち水分輸送量が大きい時、樹氷になっていることがわかる。これらの樹氷がどの程度の規模のものであるかについては今後調査するつもりであるが、いま、樹氷の厚さが1cm、高さ3mの樹木の枝の直径1cm、総延長1300cm(長さ50cmの枝が20本あるとする。)として付着樹氷量を降水量になおすと3.6mmになるが、これと雲仙、阿蘇の雨量計による降水量を比較すれば、ほぼ同程度のものであり、樹氷の水資源としての重要性がうかがえる。

## 6. 結 言

筑後川上流の小流域の水収支の年変動から寒候期の

降水量の水資源としての重要な役割を指摘し、寒候期の降水機構としての九州の降雪機構について述べた。さらに冬季降水量の人工増大のための人工霧氷の有用性を述べ、自然霧氷の実態と併わせて、霧氷が水資源のための降水量としてかなり重要な地位を占めていることを述べた。今後はさらにこれら種々の問題について理論的、実験的な基礎研究をすすめていきたいと思っている。また、実用的な面でも上流域全体に $10^3 \sim 10^4$ 個/lのAgIを撒布することが果して経済的に成り立つかどうかの検討なども行なって見たい。

## 参 考 文 献

- 1) 日下部正雄: 農業気象, 22, 2, 71 (1966)
- 2) 正務章: 気象研究ノート, 16, 2, 358 (1965)
- 3) 大分地方気象台: 大分県気象月報 (1960~1963)
- 4) 建設省河川局: 流量年表 (1960~1963)
- 5) 小島隆義: 天気, 16, 1, 25 (1969)
- 6) 気象庁: 農業気象年報, (1968)
- 7) 水資源ハンドブック, 朝倉書店 (1966) p. 555
- 8) 武田京一, 塩月善晴: 農業気象, 25, 4, 247 (1970)
- 9) 気象庁: 気象庁技術報告, 33, 25 (1964)
- 10) 九州大学農学部気象学教室研究報告, 3~4, 1 (1959~60)
- 11) 坂上務: 農業気象, 11, 4, 143 (1955)

- 12) F. Pasquill : Atmospheric Diffusion, 241 (1962)
- 13) 藤原輝男, 元田雄四郎, 塩月善晴 : 山口大学工学部研究報告, 22-1, 43-53 (1971)
- 14) G. H. Milly : Jour. of Appl. Met., 18, 83 (1969)
- 15) V. J. Shaefer : 14) による (1966)
- 16) H. G. Houghton : Jour. of Met., 7, 363 (1950)
- 17) 鈴木清太郎 : 応用気象学大系-農業気象, 156 (1961)

(昭和46年9月14日受理)