

融雪出水に関する研究資料について

融雪出水に関する既往資料

1. 気候変動によるダム流入量の変化に関する研究 …… p 1
2. 冬期における降水量計の捕捉特性 …… p 3

気候変動によるダム流入量の変化に関する研究

国土技術政策総合研究所 正会員 土屋 修一
 国土技術政策総合研究所 正会員 服部 敦

1 .はじめに: IPCC の第 4 次評価報告書によると、地球温暖化は今後も進行し、その影響は避けることはできず、適応策の必要性が報告されている。また、水資源に与える影響として渇水被害が増大する可能性が指摘されている。渇水に対する適応策を実際に検討する上では、時空間的に詳細な流出過程、水運用を考慮できる流出モデルが必要となる。しかし、その前段階として全国の流域を対象に渇水に対しての脆弱性を評価し、適応策を施す必要性の高い地域を抽出することが不可欠である。そのためには、詳細なモデルである必要はなく、流域の流出特性を踏まえつつ、渇水を表現するのに十分な分解能を持ち、あらゆる流域において構築可能な流出モデルが必要となる。また、全国を同一の指標で評価するためにも、客観的に係数設定ができることが望まれる。本研究では、渇水が数ヶ月以上に及ぶ現象であることから月単位の流出計算法として、降水量、流量、気温の実測データの相関関係を用いた上記要件を満たす流出モデルを提案する。さらに、ダム流域を対象とした流出計算を行い、流出モデルの精度を検証した上で、気候変動による将来のダム流入量の変化について述べる。

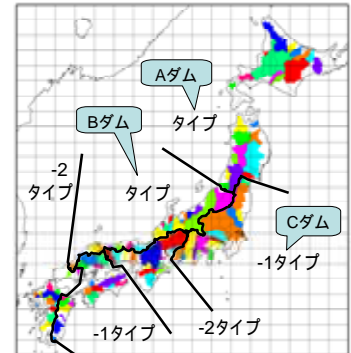


図-1 季別降水量変化率の増減傾向によるタイプ分け

表-1 各タイプの平均的な季別降水量変化率

タイプ	年	冬	春	夏	秋
	1.08	1.09	1.15	1.10	1.01
	1.00	1.02	0.99	1.07	0.90
-1	0.99	1.04	0.94	1.00	0.98
-2	0.98	1.02	0.96	1.01	0.91
-1	1.00	1.14	1.03	0.98	0.87
-2	1.07	1.22	1.03	1.14	0.84

2 対象ダム流域の概要: 気象研究所によって開発された気候モデル GCM20(A1B

シナリオ)のシミュレーションによる現在と将来の季別降水量の20年間平均値を用い、全国109水系について変化率(=将来値/現在値)を算定し、季別の増減傾向が類似する6タイプに分類した。各タイプの季別降水量変化率を表-1に、また各水系のタイプ分けの結果を図-1に示す。融雪出水の影響を受ける ~ -1タイプに属する地域内に位置するダムを各一つ選定し、本研究での対象流域とした。以下では、対象流域をA~Cダム流域と呼ぶ。

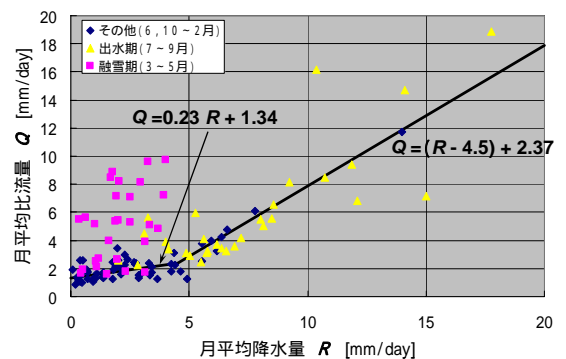


図-2 Cダム流域の降水量と比流量の関係

3 .流出モデル: Cダム流域における月平均の降水量とダム流入比流量の関係を図-2に示す。融雪期(3~5月)を除いて、図中に実線で示したように線形近似することが可能である。月平均降水量4.5[mm/day]を閾値として勾配を変化させたが、これは渇水に係する低水流量を算定する上では流量が小さい範囲での精度が特に重要となることを考慮したためである。本研究ではこれら近似式を用いて流量を算定するモデルとした。長期流出や低水流量についての流出モデルにタンクモデルが広く用いられているが、タンクの設定やパラメータ同定など流域に応じて、試行錯誤的に決定していかなければならない。それに比較すると図-2に示したように

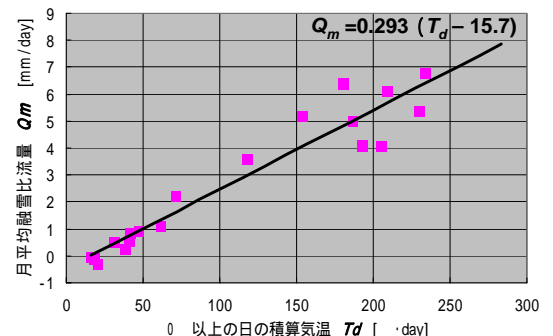


図-3 Cダム流域の積算気温と融雪比流量の関係

実測データから直接導かれる関係式を用いることにより、非常に簡易にデータのばらつきの範囲の精度で現況の流量を再現することが可能となる。なお、A,B流域においても勾配と閾値が異なるが、同様な関係式を導出できた。

4 .積雪・融雪計算: 冬期の積雪地域の降水量は、風による降雪の補足率の低下¹⁾や積雪分布の標高依存性²⁾と雨量

キーワード 気候変動, 融雪

連絡先 〒305-0804 茨城県つくば市旭1 国土技術政策総合研究所河川研究部水資源研究室 TEL 029-864-4969

計の配置の関係などにより、雨量計で観測される降水量はかなり過少となることが報告されている。A～C ダム流域でも同様であったため、冬期間の降水量を全体的に増加させ、降雪時の降水量に応じて各月に配分するという補正を行った。本研究では、降水の雨雪判別は日平均気温 0 とし、夏期(6～11月)と冬期(12～5月)の流出率が同一になるように冬期降水量を増加させた。積雪量は、上記補正後の降水量データのうち、日平均気温 0 以下の日降水量の積算値として算定した。C ダム流域における日平均気温 0 以上の積算気温と融雪比流量(=実測比流量 - 図 - 2 による降雨流出量)の関係を図 - 3 に示す。なお、積雪・融雪計算に用いた気温データは、対象流域に最近のアメダスデータにダムサイトとの標高差に応じた温度補正を加えたものである。積算気温は融雪比流量とほぼ線形関係にあることがわかる。ただし 180[・day]以上の範囲では、ばらつきがやや大きくなる傾向が認められる。この範囲では融雪末期の5月のデータが多くを占めていることから、180[・day]以下の範囲と異なり高標高部や北側斜面部などの残雪からの融雪が卓越したためと推察される。図 - 3 に示した線形式を用いて融雪流量を算定し、積雪量よりも融雪流量が多い場合には積雪量を融雪流量とした。この方法は Degree-Day 法と類似しているが、融雪量のみでなく、積雪層の貯留、浸透³⁾といった融雪から流出に到るまでの複雑な過程の影響まで含んだ流量実測データから導いた線形式となっているところが異なる。A,B ダム流域についても、勾配が異なるものの同様に線形関係式を導くことができた。

5. 流出の再現計算: 上記の流出モデルによる C ダム流域の再現計算結果について図 - 4 に示す。計算結果は、出水期の再現性が劣っているものの低水流量、融雪出水を精度よく再現できていることがわかる。

6. 気候変動による将来の低水流量変化: 気候変動による将来の気温は、GCM20 の計算結果による現在と将来の各月の 20 年平均値の差分を各月ごとに実測の日平均気温に加えることにより、また降水量は各月の降水量変化率を実測の月別降水量に乗じることにより設定した。将来の気温と降水量の変化を考慮した C ダム流域の月別平均ダム流入比流量と現在との比較を図 - 5 に示す。冬季は気温上昇により降雪が降雨に変わるため流量が増加する反面、春季は積雪量の減少および融雪の早期化のため流量が減少する傾向となった。この傾向は A～C ダム流域に共通した特徴であるが、その程度が流域ごとに異なった。各流域の将来の季別降水量と季別流量の変化率について整理した結果を表 - 2 に示す。A ダム流域では、C ダム流域と較べて冬～春季にかけて降水量の変化率が大きく増加するが、それにもかかわらず春季流量の変化率が減少する。また、A,C ダム流域では現在と同様に春季に融雪出水のピークが生じるが、B ダム流域では図 - 6 に示すように春季の融雪流量が大きく減少し、冬季に流量のピークが生じるようになる結果となった。

7. まとめ: 気候変動による将来のダム流入量の変化について、冬季の流量は降水量の増加以上に増加しており、春季については、降水量が増加しようとも流量は減少し、降水量が減少であったとしてもそれ以上に減少した。積雪地域の河川流量については、降水量の単純な増減が流量にそのまま反映されるとは限らず、積雪・融雪を適切に考慮する必要がある。今後、このような流況変化予測を全国的に行い、渇水のリスクが高まる流域を明らかにする。

謝辞: 本研究は、環境省地球環境研究総合推進費 S-4 によって実施された。ここに記し、謝意を評する。

参考文献: 1) 横山宏太郎, 大野弘之, 小南靖弘, 井上聡, 川方俊和(2003): 冬期における降水量計の捕捉特性, 雪氷, 65, pp.303-316. 2) 塚本良則(1992): 森林水文学, 文永堂出版, pp.196-199. 3) 小林大二(1981): 融雪流出の遅れ I, 低温科学物理編, 40, pp.61-66.

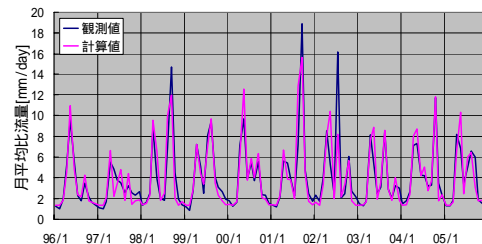


図 - 4 1996～2005年の月平均比流量の再現計算結果(Cダム流域)

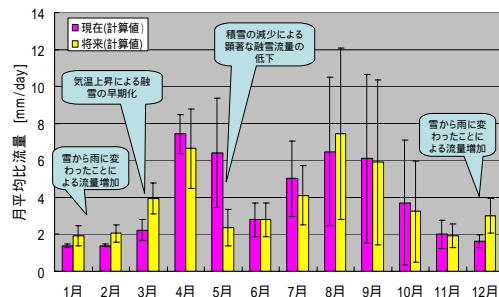


図 - 5 現在と将来の月別平均比流量の比較(Cダム流域)

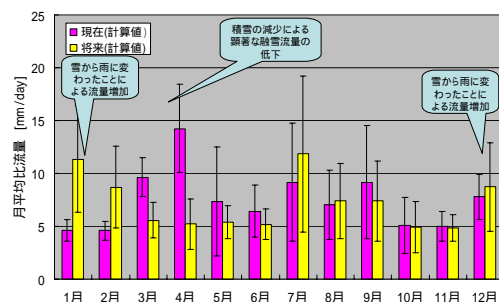


図 - 6 現在と将来の月別平均比流量の比較(Bダム流域)

表 - 2 降水量と流量の季別変化率

ダム名	種類	冬	春	夏	秋
Aダム	降雨量	1.10	1.14	1.05	1.04
	流量	2.30	0.79	1.01	1.03
Bダム	降雨量	1.06	0.99	1.01	0.90
	流量	1.68	0.52	1.08	0.89
Cダム	降雨量	1.02	0.93	0.98	0.94
	流量	1.64	0.81	1.01	0.94

られる事項について, 鋭意取り組んでいきたい。

文 献

- 竹内政夫, 2002: 吹雪とその対策(4) —吹雪災害の要因と構造—, 雪氷, 64, 97-105.
 竹内政夫・福澤義文, 1976: 吹雪時における光の減衰の視程, 雪氷, 38, 165-170.
 松沢勝・竹内政夫, 2002: 気象条件から視程を推定する手法の研究, 雪氷, 64, 77-85.

Forecast of the reduced visibility in blowing snow

Masaya OTSUKI¹⁾, Takuji HATAKEYAMA¹⁾ and Katsuyuki TAKITANI¹⁾

1) Japan Weather Association Hokkaido Regional Office North4 West23 Chuo-ku Sapporo 064-8555

(2003年2月18日受付, 2003年4月7日改稿受付, 2003年4月10日受理)

- 島山拓治・佐藤隆光, 2001: $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた一般極座標系における吹雪・吹きだまり数値シミュレーション, 2001年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, p. 136.
 Uematsu T., Nakata T., Takeuchi K., Arisawa Y., and Kaneda Y., 1991: Three-dimensional numerical simulation of snowdrift, Cold Regions Science and Technology, 20, 65-73.

論 文

冬期における降水量計の捕捉特性

横山宏太郎¹⁾, 大野宏之²⁾, 小南靖弘¹⁾,
 井上 聡²⁾, 川方俊和¹⁾

要 旨

冬期の降水量を正確に知るため, 新潟県上越市において, 国内で一般的に用いられている転倒ます式(ヒーター付き), 温水式, 溢水式の3種類の降水量計を対象とし, 捕捉特性を評価するための長期比較観測を行った。方法は世界気象機関が推奨する方法に準じることとし, 二重柵基準降水量計を一部改良して準器として用い, その値から風速の関数により真値を推定した。捕捉率は測定値/真値で表す。6冬期の観測結果を用いて, 雪と雨に分けて降水事象単位の解析を行った。雪, 雨いずれの場合も, 捕捉率は機種によって異なり, 高い方から順に溢水式>転倒ます式>温水式であった。機種による捕捉率の差は, その形状の違いが影響している。捕捉率は風速が大きくなるにつれて低下するが, その関係を簡単な式で表し, 式に含まれる機種ごとの係数を示した。雪に対する捕捉率は, 風速 2ms^{-1} においても溢水式では0.8, 転倒ます式では0.7, 温水式では0.6程度と計算され, 雨に対する捕捉率は, 雪に対するより大きい。風速 6ms^{-1} においてはそれぞれ0.9, 0.8, 0.7程度と計算される。冬期の降水量は多くの場合に補正する必要があると考えられる。雪の降水強度が大きい地域では, 加熱装置付きの測器を用いる必要がある。

キーワード: 捕捉率, 雪, 固体降水, 二重柵基準降水量計, WMO

Key words: catch ratio, snow, solid precipitation, Double Fence Intercomparison Reference, WMO

1. はじめに

本州日本海側ならびに北日本では冬期の降水量が多く, しかも降雪の割合が大きい。この地域にとっては, 利雪・克雪両面で冬期の降水量は重要な情報であり, 正確に把握することに大きな意義がある。降水量は, 固体降水も液体降水も, 通常は降水量計により, 一定面積の受水口に入った降水を集め, 固体の場合は融かして測定される。測器の外形はふつう円筒形であるが, これを大気中に置いた場合, 受水口付近の気流が乱されるため, 降水の一部は測器に捕捉されないという現象が生じる。この結果, 測定された降水量は真の降水量よりも少なくなる。真の降水量に対する測定降水

量の比を捕捉率と呼び, 捕捉されなかった降水量を捕捉損失と呼ぶ。

Sevruk (1985)によれば, 雪の捕捉損失は降水量の10~50%と見積もられ, 雨の捕捉損失(2~10%), 濡れ損失(2~10%), 蒸発損失(0~4%), 飛び込み・飛び出し(1~2%)に比べてはるかに大きく, 冬期の降水量計測にとっては大きな問題である。なお濡れ損失は降水の一部が測器内部を濡らすのに消費され降水量として計測されないこと, また蒸発損失は降水の一部が計測される前に蒸発により失われることを指す。

捕捉損失の対策は大きく分けて二通りが考えられる。一つは捕捉損失の小さい測器の開発である。この方向も重要ではあるが, たとえ理想的な測器が開発されて, 以後は正しいデータが得られたとしても, それ以前のデータは補正されずに残る点が問題である。もう一つは捕捉損失を定量的に評

1) 中央農業総合研究センター北陸研究センター
 〒943-0193 上越市稲田1-2-1

2) 農業環境技術研究所
 〒305-8604 つくば市観音台3-1-3

値し、測定値に補正することである。この方法は新たに観測されるデータはもちろん、必要な情報がそろえば過去のデータにも適用できるという利点がある。

前者の試みとしては井上・安斎 (1959) の倒立円錐形の受水器をもつ降水量計や、Wiesinger (1993) の浅い鉢の形の受水器をもつ降水量計が考案されたが、実用化には至っていない。

一方後者では、1950年代から盛んに行われた水資源の賦存量評価を目的とする山地積雪の研究の中で、貯留式積算降水量計 (トータライザ) を対象とした研究がある。樋口 (1952)、菅谷 (1953) は現地に設置した貯留式積算降水量計の捕捉率を、1週間から2カ月程度の期間について求めた。また吉田・斉藤 (1956) および吉田 (1959) は5種類の貯留式積算降水量計の同時比較観測によってそれぞれの捕捉率を求め、風速の関数で表した。しかしそれらの結果を、形状の異なる最近の降水量計に適用することはできない。鈴木 (1996) は降水量計の解説の中で、フィンランドで行われた降水量計比較観測の結果を一部紹介しているが、捕捉率は7年にわたる長期間の平均的な値であり、取り上げられた測器に日本国内で用いられているものと同一形状のものはない。また Shiraki (1998) は女満別で行われた著者ら (後述) と類似の比較観測結果を報告しているが、期間は3冬期と短く、また月単位の集計と日単位の捕捉率の図示のみである。すなわち、近年国内で気象官署をはじめとして一般的に用いられている降水量計については、捕捉損失の補正を可能にするような報告は見られない。

以上のことから著者らは、冬期における降水量をより正しく評価するためには、測定値に補正を加えることが過去と将来の両方に適用できる点で有用であり、特に最大の誤差要因である捕捉損失の補正方式の確立がまず重要と考え、国内で一般的な降水量計の捕捉特性を明らかにするための比較観測を行うことにした。同じころ、固体降水量の正確な把握が重要と考える世界気象機関 (WMO) においても、固体降水量測定法相互比較 (WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison) が行われていたため、それに参加するかたちで観測を開始した。

著者らは1993, 1997両冬期の観測データから固体降水の捕捉率について暫定的な結果を Ohno *et al.* (1998) および大野ら (1998) として報告したが、得られた降水事象の数が最少の機種では8個と少なく、信頼性の低いデータも含まれており、真の固体降水量を推定するには不十分なものであった (大野, 1999)。また本州日本海側では冬期に雨が降ることもまれではなく、冬期の降水量評価には雨に対する捕捉特性も必要であるが、前記の2報文では雨は扱っていなかった。

そこで本稿では、さらに観測を継続して蓄積されたデータを加え、1993冬期および1997~2001冬期まで6冬期分の観測結果を用いて、降水量計の捕捉特性を雪、雨の両方について明らかにするとともに関連する問題点を検討して、捕捉損失補正の基礎とする。なお、ここで例えば1997冬期とは1996年から1997年にかけての冬期を意味する。

降水をその相により区分すると固体降水と液体降水にわけられる。前者は雪、霰、雹など、後者は雨とみぞれである。この観測では詳細な降水形態の分離はできなかったが、固体降水の大部分は雪、液体降水の大部分は雨と考えられるため、本稿ではそれぞれを雪、雨と表す。

2. 方法

2.1 観測地点と使用機器

観測は新潟県上越市の農林水産省北陸農業試験場 (現・農業技術研究機構中央農業総合研究センター北陸研究センター) の場内で、気象観測露場とその近傍において行った。観測地点の位置は北緯 $37^{\circ}06'45''$ 、東経 $138^{\circ}16'31''$ 、標高 11 m である。以下に述べる測器は図1のように配置した。図1の右半分が気象観測露場で、周囲は試験圃場であり、各方向とも 150 m 程度の範囲は平坦である。

方法は WMO (1985) の比較観測方法に準じた。捕捉特性を評価するためには基準として「真の降水量」が必要となる。これには図2に示す二重柵基準降水量計 (Double Fence Intercomparison Reference, DFIR) を準器として他の降水量計と同時に観測し、その値を用いて、2.2に述べる方法で推定する。DFIRは図3に示すように、降水量計を八角形の柵で二重に囲った構造になって

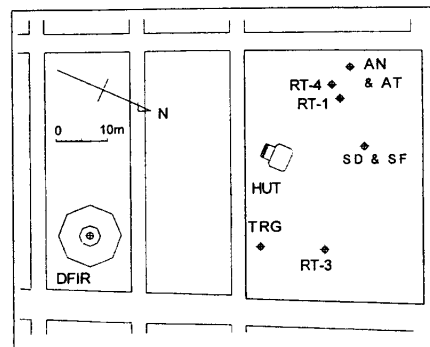


図1 北陸農業試験場 (当時) における測器の配置。DFIR: 二重柵基準降水量計, RT-1: 転倒ます式降水量計, RT-3: 温式降水量計, RT-4: 溢水式降水量計, TRG: トレチャコフ式降水量計, AN: 風向風速計, AT: 温度計, SD: 積雪深計, SF: 降雪検知器, HUT: 観測室。

Fig. 1 Instruments in the Observation Field. DFIR: Double Fence Intercomparison Reference, RT-1: Tipping Bucket Type Gauge, RT-3: Warm Water Type Gauge, RT-4: Overflow Type Gauge, TRG: Torteyakov Gauge, AN: Anemometer, AT: Air Temperature sensor, SD: Snow Depth Gauge, SF: Snowfall detector, HUT: Observation Hut.

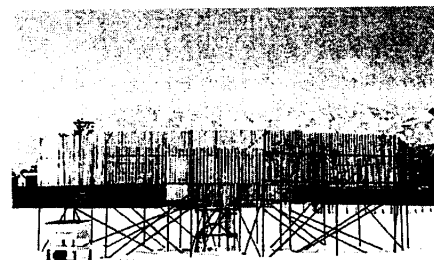


図2 比較の基準に用いた二重柵基準降水量計の外観。詳細は図3に示す。

Fig. 2 The Double Fence Intercomparison Reference gauge used as the reference. The details are shown in Fig. 3.

おり、柵の差し渡しは外側が 12 m、内側が 4 m である。これに以下の通り改良を加えた。上越市では積雪が多く、市内高田測候所の年最大積雪深の平均値は 1 m 以上であることを考慮して、全体の高さを WMO の仕様より 0.5 m 高くした。すなわち外側柵の上端が 4 m、内側柵の上端が 3.5 m である。降水量計の受水口の高さは内側柵上端に

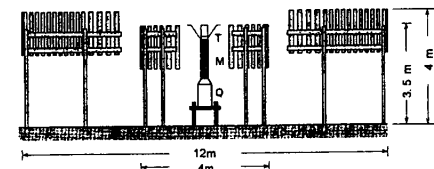


図3 二重柵基準降水量計の構造。細い板を並べた柵で降水量計を二重に囲ってある。柵は八角形をしており、差し渡しは外側が 12 m、内側が 4 m である。柵上端の高さは外側が 4 m、内側が 3.5 m。降水量計の受水口の高さは 3.5 m である。T: トレチャコフ式降水量計と風除け, M: 金属筒, Q: 水晶式降水量計

Fig. 3 The construction of the Double Fence Intercomparison Reference. A modified Torteyakov gauge is installed in the double octagonal fences inscribed to circles 4 m and 12 m in diameter respectively. The height of the gauge orifice and the inner fence is 3.5 m, while that of the outer fence is 4 m. T: Torteyakov Gauge, M: Metal Tube, Q: Automatic Gauge.

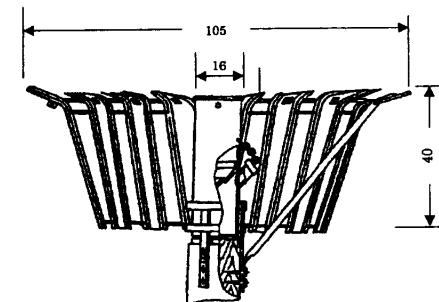


図4 トレチャコフ式降水量計。中央の集水容器は受水口面積 200 cm^2 、高さ 40 cm。風除けは短冊状で、下部は隣同士連結してあるが揺動する。単位: [cm]

Fig. 4 Torteyakov Gauge. The orifice area is 200 cm^2 . Unit = [cm].

そろえるため、3.5 m となった。後に述べる比較対象測器も、受水口の高さは同じ 3.5 m とした。

DFIR の中央に設置する測定部 (降水量計) としては、通常は図4のようなトレチャコフ式降水量計 (Torteyakov Gauge, 以後 TRG と略す) を用いる。しかし TRG は集水容器を通常半日ないし1日程度となり、降水の継続した時間だけを切り出す事象単位の解析はできない。そこで、TRG と自動測器を組み合わせて用いることにした。図5



図5 DFIRの改良された測定部。トレチャコフ式の集水容器から金属筒を経て水晶式雨量計に接続する。

Fig. 5 A modified Tretyakov gauge in the DFIR. A weighing type automatic gauge is connected to the collector bucket of the Tretyakov gauge through the metal tube.

に示すように TRG の円筒形集水容器 (内径 16 cm, 受水口の面積 200 cm^2 , 高さ 40 cm) と同形状で底のない円筒を、直径 20 cm の金属筒で自動測器に接合した。TRG の受水口に入った降水は金属筒を通過して自動測器で計測される。自動測器としては明星電気 (株) 製の水晶式雨量計 (QW-91 S) を用いた。これは自動排水式の貯水容器の重量を計測する方式のため降水量の分解能が 0.1 mm と高いこと、降水の雨雪判別の機能を持つという利点がある。またこの測器は集水皿に入った雪を融かすためのヒーターを備えている。ただし、水晶式の受水口の面積は 314 cm^2 であり、TRG のそれとの比から、組み合わせた場合の分解能は 0.157 mm となる。

観測を始めてみると DFIR 内の TRG への着雪が問題となった。DFIR は装置内の風速を低減して降水が受水口に捉えられやすくしているの、着雪しやすくなる。特に降雪強度が大きいときには着雪が発達し、測器形状を変える。甚だしいときには受水口をふさいでしまうこともあった。このため横山・小南 (2002) に報告したように、対策として受水口に電熱ヒーターを取り付け、着雪を防ぐことにした。形状の変化を最小限にする

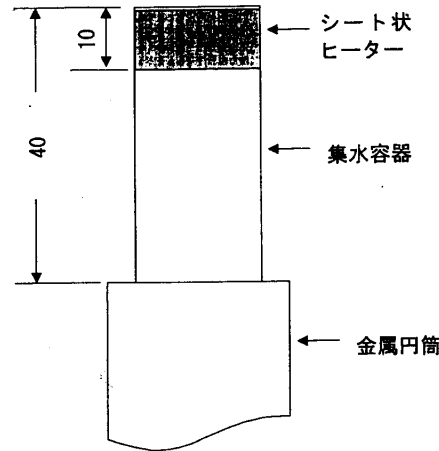


図6 DFIR内のトレチャコフ式に取り付けたヒーター。集水容器上端にシート状のヒーターを巻き付けた。

Fig. 6 The electric heater installation on the Tretyakov in the DFIR.

ためシート状のヒーターを用い、受水口直下に取り付けた (図6)。ヒーターの動作は受水口の温度により制御した。1999 冬期はヒーター出力を 9 W としたが、着雪する場合もあった。そこで 2000 冬期にはヒーター出力を 2 倍の 18 W としたところ、着雪はほとんど見られなくなり、しかも受水口付近以外の温度は低く保たれたので、蒸発損失は小さく抑えられていたものと考えられる。ただし風除け部は加熱していないため、そこへの着雪は避けられない。図7に 2000 冬期の状況の一例を示す。風除けまで加熱すると、局所的な上昇気流の発生など新たな問題が起こる可能性があるため、適宜除雪することで対応した。

比較対象測器としては国内で気象官署をはじめとして一般的に用いられている降水量計、すなわち転倒ます式降水量計 (ヒーター付き、RT-1)、温式降水量計 (RT-3) および溢水式降水量計 (RT-4) の 3 機種を設置した。気象官署の場合、冬期には北海道では RT-4 が、本州の広い範囲では RT-3 が使用されている。また降雪の可能性が低い地点では RT-1 が使用されている。

それらの外観と構造を図8と図9に示す。受水口はいずれも内径 20 cm, 面積 314 cm^2 であり、



図7 ヒーター設置後の DFIR (2000 年)。風除けには大量の着雪が見られるが、開口部には着雪はなく、ヒーターの効果が現れている。

Fig. 7 The heater on the DFIR orifice worked effectively (2000 Winter). No snow accretion was on the wind shield despite heavy snow accretion on the wind shield.

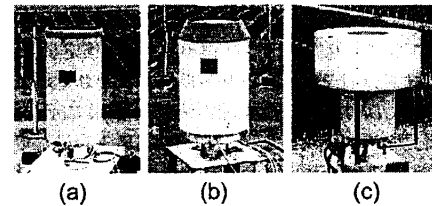


図8 比較した降水量計の外観。左から (a) 転倒ます式 (RT-1), (b) 温式 (RT-3), (c) 溢水式 (RT-4)。通常、RT-4 には図のように風除けを付けて用いる。口径はどれも同じく直径 20 cm である。詳細は図7に示す。

Fig. 8 The tested gauges, (a): RT-1, (b): RT-3 and (c): RT-4. The orifice diameter is 20 cm for all gauges. The details are shown in Fig. 7.

捕捉・融解した降水の計量には同じ転倒ます装置を用いている。それぞれの特徴を簡単に述べる。RT-1 は、降水は受水口から漏斗を伝って転倒ますに入る。内部のヒーターで漏斗部から受水口を温める。口金は 5 mm の厚さがあるが縁は刃状に加工してある。それ以外の部分では外筒の厚みは 1 mm 程度である。構造が単純なため、水平に見たときの投影面積は最も小さい。RT-3 は、外筒が二重構造で、中に満たした不凍液を約 5°C に保温し雪を融かす方式である。このため、外径は 26 cm である。外筒の厚みの 3 cm 分は、エッジ部の角度が約 30° の斜面になっている。受水口から転倒ますに至る内部の形状は RT-1 と同じで

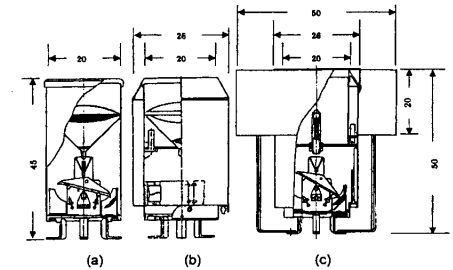


図9 降水量計 3 機種の構造。左から (a) 転倒ます式 (RT-1), (b) 温式 (RT-3), (c) 溢水式 (RT-4)。単位: [cm]。

Fig. 9 The construction of tested gauges, (a): RT-1 (Tipping bucket type with heated funnel), (b): RT-3 (Warm water type with water jacket) and (c): RT-4 (Overflow type with heated reservoir). Unit: [cm].

ある。RT-4 は、RT-3 と同様の外筒を持ち、本体の外形もほとんど同じであるが、直径 50 cm, 高さ 20 cm の筒状の風除けが取り付けられている。内部は一定深さの水と蒸発損失を防ぐオイルとを蓄えた受水器になっている。外筒内の不凍液は約 10°C に保温され、受水器も温める。降水は受水器に入り、雪の場合は融け、それと同量の水が導水管を通じて溢水し、転倒ますに導かれる。

DFIR, RT-1, RT-3, RT-4 の各降水量は自動計測により毎 10 分の計測間隔でデータを収録した。関連データとして気温、風速、積雪深、降雪時間は気象観測露場の定常観測用の装置を利用し、変換器の出力を分岐させて同じく 10 分間隔で収録した。降水量は 10 分間積算値を、気温は 10 分ごとの瞬時値を、風速は前 10 分間の平均風速を用いた。積雪時、気温センサの高さは積雪深の変化に応じて雪面上およそ 1.2 ~ 1.5 m となるように手動で調節した。

参考データとして雪尺による積雪深、雪板による日降雪深と日降雪相当水量ならびに神室型サンブラーによる積雪相当水量の観測を行った。また国際比較観測に参加している他の地点との比較のため単体の TRG を設置した。本稿ではこれらの結果にはふれない。

2.2 真の降水量の推定

現在、雪に対して真の降水量を直接測定する方法はないが、もっとも真の値に近い降水量が得ら

れるのはブッシュゲージ (BUSH Gauge) とされている。これは高さを一定に切りそろえた灌木林の中に、受水口の高さを林の上面にそろえて降水量計を設置したものである (Sevruk, 1987)。しかしその面積は例えば3ヘクタール (Yang *et al.*, 1993) と非常に大規模で、設置は容易ではない。そこでWMO (1985) の方式ではDFIRを準器として用い、その測定値をブッシュゲージの値 (BUSH) に変換 (adjust) した上で真の降水量と見なして基準にする。

DFIRからBUSHへの変換式としては、当初はYang *et al.* (1993) が示した式を用いることとされていた。これはロシアのパルダイ水文観測所において両者の比較観測を行った結果から導かれた回帰式であり、降水の種類を乾き雪 (Dry Snow), ぬれ雪 (Wet Snow), 風雪 (Blowing Snow), 雪混じりの雨 (Rain with Snow), 雨混じりの雪 (Snow with Rain), 雨 (Rain) の6通りに細分し、それぞれについてBUSHとDFIRの比を風速の関数で表している。著者らもこれまで (大野ら, 1998など) は以下に示すぬれ雪の式 (1) ならびに雨の式 (2) を用いていた。

ぬれ雪:

$$BUSH/DFIR (\%) = \exp(4.54 + 0.032 \times W_s) \quad (1)$$

雨:

$$BUSH/DFIR (\%) = 100.35 + 1.667 \times W_s - 2.40 \times 10^{-3} \times W_s^3 \quad (2)$$

ここでBUSH:ブッシュゲージの値 (真値と見なす), DFIR:DFIRの測定値, W_s [ms^{-1}]:降水量計受水口と同じ高さにおける風速である。

しかし北陸に多いと考えられる「ぬれ雪 (wet snow)」の場合 (式1) は、風速が小さい領域でDFIRが100%以上の降水を捕らえていることになっており、やや不自然であった。

WMOは固体降水量測定比較計画の最終報告 (Goodison *et al.*, 1998) では、さらにデータを蓄積した結果として新しい変換式を示した。それによると降水の種類が雪, 混合降水 (Mixed precipitation), 雨と3種類に単純化され、また変換

式の形も、風速がゼロの場合には降水の100%が測器に入ることになっている。雪と混合降水の場合の式を以下に示す。なお、雨については変換不要とされている。

雪:

$$BUSH/DFIR (\%) = 100 + 0.439 \times W_s + 0.246 \times W_s^2 \quad (3)$$

混合降水:

$$BUSH/DFIR (\%) = 100 + 0.194 \times W_s + 0.222 \times W_s^2 \quad (4)$$

ここでBUSH:ブッシュゲージの値, DFIR:DFIRの測定値, W_s [ms^{-1}]:降水量計受水口と同じ高さにおける風速である。

本稿では降水を雪と雨に区別したうえで、雪に対して式 (3) を適用して真の降水量を推定した。

式 (1) と式 (3) とから計算したそれぞれのBUSH/DFIR (%) と風速の関係を図10に示す。両式の違いは風速 0ms^{-1} では約6%, 1ms^{-1} では約4%とやや大きい。2 ms^{-1} 以上ではほぼ2%以内であり、違いは小さい。真の降水量がこのように変わるので、それを分母として計算される捕捉率にも同程度の変化があるが、降水量計の

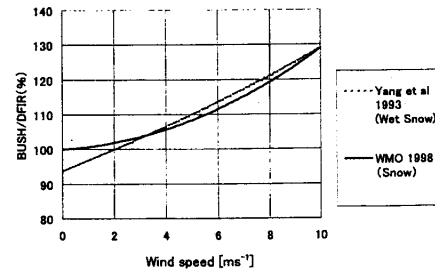


図10 DFIRから真の降水量を推定する式の新旧比較。BUSH/DFIRは、DFIRの値に乘ずる係数。Yang *et al.* 1993は式 (1), WMO1998は式 (3) に対応する。

Fig. 10 The adjustment equations for DFIR data to BUSH gauge value, which is regarded as the "True" precipitation. Yang *et al.* 1993 and WMO1998 were calculated from Eq.(1) and Eq.(3), respectively.

捕捉特性に関してこれまでに示された結論が大幅に変わることはないと考えられる。

2.3 降水量計受水口の高さにおける風速の推定

露場の風速は、6.25 mに設置されたプロベラ式風向風速計により常時観測されている。しかし前節で述べたように真の降水量を推定するには、降水量計受水口の高さにおける風速が必要となる。また、捕捉特性に影響を与える風速は、降水量計受水口の高さにおける風速で代表されると考えられるので、以後の解析ではその風速を用いることにする。

そこで、露場の風速から降水量計受水口の高さにおける風速、すなわちこの観測では3.5 m高の風速を以下の方法で推定した。まず1997年2月10日から3月20日までの39日間、3.5 m高でも三杯式風速計により同時に風速を観測した。また測器の特性の違いを補正するため、プロベラ式風向風速計と同じ6.25 m高に三杯式風速計を並べて設置し、同時観測を1997年4月7日から18日まで12日間行った。まず後者の結果からプロベラ式風向風速計の風速 Y [ms^{-1}] を目的変数、三杯式風速計の風速 X [ms^{-1}] を説明変数とする4次の回帰式 (5) を求めた。決定係数は0.989であった。

$$Y = 1.36X - 0.111X^2 + 0.0124X^3 - 0.00052X^4 \quad (5)$$

この式を用いて3.5 m高の三杯式風速計の値から同高度のプロベラ式風向風速計の値を推定し、それと6.25 m高のプロベラ式風向風速計の値とから、3.5 m高風速 U [ms^{-1}] を目的変数、6.25 m高風速 W [ms^{-1}] を説明変数とする4次の回帰式 (6) を求めた。決定係数は0.984であった。

$$U = 0.845W + 0.0254W^2 - 0.000497W^3 - 0.00009W^4 \quad (6)$$

この式 (6) により推定した3.5 m高風速を以後の解析に用いた。

一般には、風速計は降水量計よりも高い位置に設置される。そのような場合に捕捉率と風速の関

係を補正に適用するには、風速の高度分布に対してよく用いられる対数法則 (例えば気象の事典, 和達, 1993) などにより、降水量計受水口の高さの風速を推定するのが簡便である。

2.4 観測経過

1992年1月にDFIRを設置し観測を開始したが (大野ら, 1994), DFIRの降水量計として水晶式降水量計をそのまま用いていたのでここでは予備的な観測と位置づける。1993冬期から前述のようにTRGと水晶式を組み合わせた方式とした。比較対象測器ではRT-1とRT-4をまず設置した。1997冬期からはRT-3を加えた。1998冬期から単体のTRGを加えた。DFIRの着雪防止ヒーターは1999冬期から設置し、2000冬期から順調にその効果を発揮している。器械の故障、不調による観測の中断や、風速計やDFIRへの着雪があったため、データが使用できない期間も少なからずあった。ここでは1993冬期と1997冬期から2001冬期までの計6冬期のデータを用いるが、観測は検証データや春から秋のデータを得るため、現在も継続している。

冬期は毎日9時に、積雪深 (目視), 積雪相当水量, 日降雪深, 降雪相当水量など手動計測項目の観測と器械の点検を行った。DFIRのTRGの風除けへの着雪が多いときは、適宜除雪し、また写真撮影により状況を記録した。

降雪強度が大きいときには、風向風速計に着雪が発生し、風速を正しく測定できなかった場合がある。いわゆる里雪型の大雪の場合は風速が弱く降雪強度が大きい。特に着雪しやすかった。着雪に気づいた場合は人手により雪を取り除き復旧させたが、午後から夜にかけてなど、着雪が長時間にわたった場合もある。

3. 結果

3.1 データの処理

捕捉率の検討に当たっては、降水事象単位の解析を行うことにした。これは降水量と風速などの関係を検討する際に、降水発生中の値を対応させるためである。

降水事象としては、一連の降水で、DFIRの降水量がおおよそ10 mm以上となる事象を選んで切り出すことにした。これは、転倒すを計測部に

用いている降水量計では最小分解能が0.5 mmであるため、これに対して十分な大きさとするためである。「一連の降水」を厳密に定義するのは難しいが、およその目安としては、最後の降水量記録から1時間以内に再び降水が記録されることとした。

降水が雪か雨かの判定にはまず降雪時間と気温を参考にし、ついで水晶式降水量計の雨雪判別出力や、観測露場から西方約2 kmに位置する高田測候所の日原簿を必要に応じて参照しながら、雪または雨が連続していたと見られる場合を選んで切り出した。降水開始から測器の出力として現れるまでの遅れを考慮して、降水の開始直後と終了直前は事象に含めず、各測器がなるべくそろって連続的に降水を出力している範囲を降水事象とした。

降水が途中で雨から雪、または雪から雨に変わったと判断された場合は、そのうち雨の部分は雨の事象、雪の部分は雪の事象として扱った。降水量が多い場合は分割して複数の事象としたものもある。また、風速と捕捉率の関係が重要と思われるので、一連の降水中でも風速が大きく変化した場合は事象を分離した。

前述の通り風速計に着雪が見られたため、降水事象の風速を点検した。観測露場から西方約2 kmに気象庁高田測候所があり、両者の日平均風速を月単位で平均して比較すると、どの月も観測露場の方がおよそ0.5 ms⁻¹大きい(中川・横山, 2002)。そこで高田測候所の風速が一定程度の値(おおむね2 ms⁻¹以上)を示すが露場は無風という場合には、露場の風速計に着雪があったと見な

し、データを無効とした。また観測状況の写真記録によりDFIRへの着雪が確認された場合や、明らかに異常なデータなど観測に問題があったと見られる場合は無効とした。これらを除いた有効な事象の数は測器によって異なり、雪が33~44事象、雨が22~23事象であった。

降水量計の捕捉率は、測定値/真値で表される。有効とされた雪の事象について、毎10分のDFIRの降水量を式(3)に従って、3.5 m高風速を用いて変換し、真の降水量とした。雨の事象は変換が不要のため、DFIRの値をそのまま真の降水量とした。その結果から、各事象について降水量は積算値を、風速は平均値を求めた。降水量計3種類の捕捉率をそれぞれ測定値/真値で計算した。事象の継続時間、平均風速、降水量などの概要を表1に示す。

3.2 解析結果

3.1で得られた有効な降水事象の平均風速を横軸に、捕捉率を縦軸にとって図示すると、雪は図11、雨は図12のようになった。雪も雨も、捕捉率はいずれの測器でも風速が大きくなるにつれて低下する傾向を示した。測器による違いは、捕捉率の大きい方から順にRT-4 > RT-1 > RT-3であった。

これを雪、雨別々に、前報(大野ら, 1988)同様に吉田(1959)の式

$$CR = \frac{1}{1 + mU} \quad (7)$$

に回帰させた。ここでCRは捕捉率、U [ms⁻¹]は受水口の高さにおける降水事象の間の平均風速

表1 切り出した降水事象の概要。
Table 1 Summary of the precipitation events.

Precipitation Type		hh:mm	m/s	mm	mm	mm	mm	
		Period	WS	"True"	DFIR	RT-1	RT-3	RT-4
Snow	Average	14:49	3.10	19.72	18.89	12.2	11.2	14.0
	Maximum	36:10	7.90	48.57	46.94	28.5	31.6	32.5
	Minimum	04:50	0.62	9.83	9.73	5.0	3.5	6.5
Rain	Average	13:00	2.81	18.27	18.27	17.4	15.4	18.3
	Maximum	31:50	8.23	33.13	33.13	31.0	29.0	33.5
	Minimum	04:20	1.09	8.48	8.48	6.5	5.0	8.0

数字はそれぞれの項目の平均、最大、最小を示す。項目は左から、事象の継続時間、平均風速、真の降水量ならびにDFIR、RT-1、RT-3、RT-4それぞれの降水量。

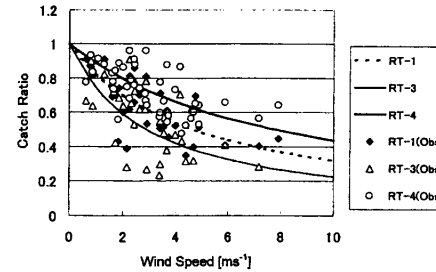


図11 雪の場合、風速に対する3種類の降水量計の捕捉率。それぞれの点は観測結果を示し、曲線はそれから得られた回帰曲線である。

Fig. 11 Relation between catch ratio of the gauge and wind speed at the orifice in case of snow. The curves result from regression analyses of the observed events (plots).

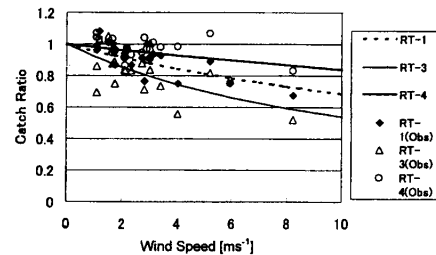


図12 雨の場合、風速に対する3種類の降水量計の捕捉率。それぞれの点は観測結果を示し、曲線はそれから得られた回帰曲線である。

Fig. 12 Relation between catch ratio of the gauge and wind speed at the orifice in case of rain. The curves result from regression analyses of the observed events (plots).

を示し、 m [sm⁻¹]は測器ごとの係数である。回帰の結果、係数 m は表2のようになった。大野ら(1998)と比較すると、係数 m の値はRT-1では約0.04、RT-3では約0.1大きく、すなわち捕捉率は低くなったが、RT-4では差は約0.01でほぼ同程度となった。回帰曲線から求めた捕捉率の測定値に対する平均二乗誤差は表2のとおり、0.1程度であった。式(7)と係数 m から、ある風速に対する捕捉率を計算することができ、観測された降水量に対し、捕捉損失分の補正に利用できる。ただし、観測データの範囲を考えると、この結果の適用範囲は風速8 ms⁻¹程度までであろう。

表2 回帰分析の結果。

Table 2 Result of the regression analysis.

Precipitation Type		Gauge Type		
		RT-1	RT-3	RT-4
Snow	"m"	0.213	0.346	0.128
	Events	34	33	43
	RMSE	0.130	0.164	0.107
Rain	"m"	0.0454	0.0856	0.0192
	Events	23	22	23
	RMSE	0.066	0.112	0.067

測器の種類と降水形態(雪、雨)それぞれに得られた式(7)の係数 m 、事象の数、平均二乗誤差を示す。The parameter "m" in Eq.(7), number of events and root mean square error for gauge models and precipitation types (Snow or Rain) by regression analysis.

4. 考察

4.1 測器形状と捕捉率

比較した3種類の捕捉率は、大きい方から順に、RT-4 > RT-1 > RT-3となった。RT-4とRT-3は、本体の形状は同じであるが、RT-4には本体の上半分にかかる円筒形の風除けが取り付けられている。気象庁の北海道女満別における比較観測(Shiraki, 1998)では、RT-4(風除け付き)、RT-3とともに、風除けを付けたRT-3も比較した。その結果では、風除け付きRT-3は同じ風除け付きのRT-4と集水部の構造に違いはあるが、同等の捕捉性能を示した。したがって、RT-4とRT-3の捕捉率の差は、主に風除けの有無によると考えられる。

図11に示したRT-3とRT-4の回帰曲線を比較すると、風速2 ms⁻¹以上では捕捉率に0.2(20%)程度の差がある。RT-3にRT-4と同じ風除けを取り付ければ、捕捉率をこの程度改善する効果があると考えられるので、測定値を真の値に近づけるためには有効な対策である。

RT-3とRT-1を比較すると、集水部は同じ構造・形状であり、違いは外形だけである。RT-3の外形的な特徴は、外筒に不凍液を満たして電熱ヒーターで保温するため、RT-1に比べて直径で6 cm 太くなっていること、またこのために受水口のエッジからのテーパ部分が広いことである。この構造は、Sevruk(1989)も指摘しているように風上側で上昇流を発生させやすく、捕捉率低下を招きやすい。この両者の捕捉率の差も、形

状によると考えられる。

以上から降水量計の捕捉率には風除けを含めた外形の違いが影響している。しかしその定量的な評価はまだ不十分であり、今後は室内実験や、数値シミュレーション (Nešpor, 1998; 横山ら, 2002b) を含めて検討する必要がある。

4.2 補正の必要性について

雪に対する捕捉率は式(7)から風速 2ms^{-1} の場合、RT-4で0.8、RT-3では0.6程度と計算される。一方、気象官署の平年値(気象庁, 2001)によれば、1月と2月の月平均風速が 2ms^{-1} に満たないのは、積雪地域では旭川と山形の2地点だけであった。したがって、大部分の地点では、真の降水量に対する雪の捕捉損失は、北海道の官署で主に用いられているRT-4では2割以上、その他の地域で用いられているRT-3では4割以上と無視できない割合になり、より信頼性の高い降水量を得るためには補正が必要と考えられる。

雨に対する捕捉率は各機種とも雪に比べれば大きいですが、雪の場合と同様に、風速が大きくなるほど捕捉率は低下する傾向を示した。冬期以外は降水量計を地上に設置するのが一般的であり、この場合は受水口における風速が小さくなるため、捕捉損失は小さいと考えられる。しかし降水量計の設置場所が高い場合には風速が大きいため、雨についてもこの問題を無視できない可能性がある。春から秋にかけての雨に対する降水量計の捕捉特性については比較観測データを集積しているところであり、別途報告する予定である。

4.3 結果の適用範囲

国内の積雪地域の中では上越は低緯度に位置し、降水量が非常に多く、気温が高い。このことは他地域との降雪粒子の形状や密度の違いをもたらす。降水量計の捕捉特性にも影響する可能性がある。著者の1人、大野は上野ら(2000)の中で北海道女満別(北緯 $43^{\circ}55'$ 、東経 $144^{\circ}12'E$ 、標高 39m)と上越(1993, 1997冬期)の結果を比較し、女満別の方が捕捉率は若干小さいとしている。ここでは上越のその後得られたデータを加えて再検討する。女満別のデータはWMOに提出されたデータセットである。これは日単位であるため、報告されている1990, 1991両冬期のデータから降水が雪であった日を選び出した。また本稿と

同様に降水量がおよそ 10mm 以上のものに限ったため、データは7個と少なくなった。上越では冬期に雨が降る場合もあり、日単位では比較に用いるデータが少なくなるため、3章と同じ事象のデータを用いた。ただし、女満別ではDFIRから真の降水量への変換がなされていないので、女満別、上越とも真値ではなくDFIRの値を基準として捕捉率を計算した。風速を横軸にとり、RT-3, RT-4それぞれの捕捉率を縦軸にとって図示すると図13のようになる。女満別では風速が 3ms^{-1} 以下のデータがなく、また風速が 7ms^{-1} 以上では捕捉率の極端に低い日が見られるが、そのあいだではRT-3, RT-4とも、両地点のデータはほぼ同じ範囲に分布する。この問題はデータの数や質の点で十分な比較ができたとは言えないので、今後さらに検討すべき課題であるが、本稿で示した捕捉率は、それが0.1程度の幅を持つことを理解した上で、現段階では国内に適用することは可能と考えられる。

4.4 その他の誤差要因の影響

風の影響による捕捉率低下の他には、濡れ損失と蒸発損失が考えられる。濡れ損失は、降水の一部が測器内部を濡らすのに消費され、降水量として計測されないことを指す。また蒸発損失は降水の一部が計測される前に蒸発により失われるものである。これらは一般に風の影響に比べて小さいとされている(Sevruk, 1985; 鈴木, 1996)。

計測に転倒ます機構を用いた降水量計では、最大で1転倒分の降水(通常は 0.5mm または

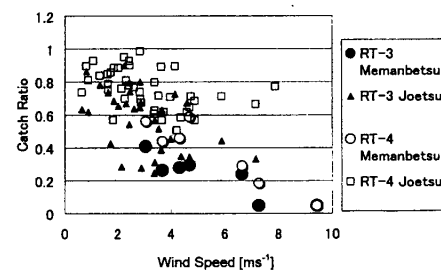


図13 女満別と上越におけるRT-3とRT-4それぞれの捕捉率の比較。

Fig. 13 Catch ratios of RT-3 and RT-4 at Memanbetsu ($43^{\circ}55'N$, $144^{\circ}12'E$, 39m asl) and Joetsu ($37^{\circ}06'45'N$, $138^{\circ}16'31'E$, 11m asl).

1mm)が、長期間降水がなくその間に蒸発して失われた場合には濡れ損失となる可能性がある。しかし降水の頻度が高ければ、これは集計の区切り(日, 事象など)ごとの不確定さとなる。

貯水容器内の水量を日単位で測定する測器に比べて、転倒ますを用いて自動計測する測器では、蒸発が起こる水面が外気に直接露出していないこと、またその面積は小さいことから蒸発損失は小さく考えられる。

測器の内壁を濡らした水量は降水終了から次の降水までの時間が長ければ蒸発して損失となる。この量はRT-1, RT-3で 0.07mm 、RT-4で 0.25mm であった(大野ら, 1998)。これによる損失を、気候と使用測器の異なる札幌と高田について平年値(気象庁, 2001)から見積もった。札幌では12月から2月の平均気温は -2.9°C 、降水量は 311.2mm でRT-4が用いられる。高田ではそれぞれ 3.1°C 、 1108.7mm 、RT-3である。まず、日降水量 1mm 未満の日にはこの損失が発生したものとす。つまり降水の後には必ず1日だけ無降水の日があると仮定したことになる。実際には無降水日が数日間続くことはよくあるので、この見積りは最大値と考えられる。12月から2月までの3ヶ月間(90日間)のうち、日降水量 1mm 未満の日は札幌が40.8日、高田が22.1日であった。それから計算すると、降水量合計に対する損失の割合は、札幌では3.3%、高田では0.1%となった。一方、捕捉損失を札幌の場合に推定すると、降水は全て雪で、風速 2ms^{-1} とすれば捕捉率は0.8、ここから捕捉損失は降水量の25%となり、先の濡れ損失が最大値であることを考慮すれば、そのほぼ10倍と考えられる。高田の場合に捕捉損失がはるかに大きいのは明らかである。

以上から、国内においては、冬期の降水量に対しては捕捉損失の割合が大きく、その補正が重要であることが確認された。

固体降水の融解のために測器を加熱すると蒸発損失は増加する可能性がある。しかしRT-3, RT-4ではその対策として保温水槽の水温がそれぞれ 5°C 、 10°C を越えないようにヒーターの動作を制御しており、国内の積雪地域のように寒候期の降水量が多ければ影響は小さいと考えられる。ただしこの定量的な評価は今後の課題である。

4.5 加熱装置付き測器の是非

ここで比較対象とした3種類の降水量計はいずれも固体降水を融解するための加熱装置をもっており、我が国では冬期の降水測定に一般的に用いられている。しかし、WMOは国際比較観測の結論の一つとして、加熱による蒸発損失が無視できない程度になるため固体降水の測定においては加熱装置付きの自動測器は推奨できないとしている(Goodison *et al.*, 1998)。国際比較観測に参加している地点の多くは高緯度・寒冷な地域にあり、固体降水が重要な意味を持つとはいえ、量はそれほど多くない。TRGの特性比較結果の表(Goodison *et al.*, 1998)に示された11地点のうち9地点で、雪の場合の降水事象単位あるいは日単位の降水量は平均 4mm 未満である。これに対し、本研究で得られた雪の事象の降水量は表2に示したとおり平均で約 20mm 、最大では約 50mm にも達することから明らかなように、上越など北陸地域では、固体降水の降水強度がきわめて大きい。さらに北陸地域では日降雪深が数十 cm に達する日もあるが、この場合は例えばTRGでは集水容器の深さ(40cm)を上回るため、明らかに観測不能になる。実際には着雪により受水口がふさがれる場合もあり、無加温の測器では観測不能となるケースはさらに多くなる。北陸のような地域では加熱装置付き測器以外では信頼性の高い観測は不可能といってよい。加熱装置付き測器の是非は、固体降水の降水強度などの気候的要素を考慮して論じられるべきものとする。

4.6 今後の課題

観測結果から計算した各事象の捕捉率にはかなり大きなばらつきが見られる。この原因は前述したように測器の分解能の問題をはじめとする観測誤差もあるが、風速以外の要素、例えば降水粒子の形状や、気温などの影響も含まれている可能性がある。しかしこの比較観測では降水粒子の形状などは観測していないので、それは検討できなかった。また雪の事象の平均気温と捕捉率を相関解析したが、関係は見られなかった。これは、大部分の事象は気温 $-1\sim 3^{\circ}\text{C}$ の範囲に入るというデータの幅の狭さによる可能性がある。

基準に用いたDFIRの性能についての詳細な検討は、日本よりも寒冷な地域で行われただけであ

るが (Yang *et al.*, 1993 ; Goodison *et al.*, 1998), 本研究では真値の推定にその結果を用いた。横山ら (2002 a) は DFIR を北陸で使用することに基本的な問題はないとしているが, 前述のブッシュゲージとの比較による真値推定法の評価を含めて, 日本国内でさらに検討する必要がある。

以上の二つの問題は, 北陸だけでなく例えば東北, 北海道など気候の違いがある複数の地点での観測を行って検討することが望まれる。それによって比較観測の信頼性が高まるとともに, 他の要素の影響が明らかになればそれを説明変数に加えることにより, 捕捉率推定の精度を高めることができる。また捕捉率の地域的な違いの有無についても明らかにすることができる。

加熱装置付き測器の蒸発損失についても, 定量的な評価と補正方式は今後の課題である。また, 雨に対する捕捉率も場合によっては無視できない問題となるので検討を要する。

捕捉損失に対する測器形状や気象条件など様々な要因の影響を定量的に評価するためには, 数値シミュレーションは一つの有望な手法である。それは, 捕捉特性に優れた降水量計の開発にも利用できる。Nešpor (1998) は降水粒子の形状や降水強度の影響を示した。横山ら (2002 b) は本稿で比較対象とした3機種の降水量計に対する予備的なシミュレーションにより観測結果とよい一致を見ており, さらに検討を進める予定である。

5. まとめ

DFIR を準器とし, 国内で一般的に使用されている3種類の降水量計を比較対象とした冬期の長期比較観測により, 捕捉率は風速が大きくなるほど低くなること, また降水量計の捕捉特性が風除けを含めた測器の形状によって異なることを明らかにした。測器による違いは, 捕捉率の高いほうから順に, RT-4, RT-1, RT-3 であった。

風速と捕捉率の関係を, 測器の特性を示す係数を含む式 (7) によって表した。この式により, 風速が 8 ms^{-1} 程度までは, 各測器の捕捉率を降水が雪の場合, 雨の場合それぞれについて風速から推定できる。またその値を用いて降水量計の測定値に捕捉損失分の補正を施すことができ, それによってより精度の高い降水量データを得ること

ができる。

雪の捕捉損失は, RT-4 で2割以上, RT-3 では4割以上にもなる場合が多いと推定されるので, 冬期の降水量に対しては補正が必要と考えられる。ここで明らかにした降水量計の捕捉特性に基づく降水量補正方式の提案と, 気象官署などの降水量データの補正計算を今後行う予定である。

降水量計の捕捉特性には, 風速以外にも降水粒子の特性や降水時の気象条件が影響している可能性があるが, それについては今後の課題である。また, 捕捉特性に優れた降水量計の開発も必要である。

地球環境変動が現実のものとなりつつある今日, 温暖化による雪水圏の変動, 降水の変動と偏在化による水不足や水災害の頻発など多くの問題が指摘されている。雪だけでなく雨も含めて降水量を正確に把握することは, それらの問題を考える上で, また雪水資源, 水資源の賦存量評価と利用, 雪・水関連の防災対策, 気候変動予測等を進める上で基礎資料として重要である。本稿をそのための一歩と考え, 残された課題を含めて今後も検討を進める予定である。

謝 辞

気象庁からは女満別における固体降水量比較観測のデータを提供していただいた。気象庁高田測候所からは日観測原簿の写しを提供していただき, 降水形態の判別に使用した。また高田測候所の風速は, 気象庁から提供されたデータを, 農林水産省農学情報資源システム共通基礎データベースからダウンロードして用いた。

本研究を進めるなかで, 滋賀県立大学の山上健一博士, 北海道大学教授の大畑哲夫博士には有益な議論に加え, 測器の手配についてもご協力いただいた。八久保晶弘博士 (北見工業大学), 杉浦幸之助博士 (地球観測フロンティア) ならびに佐藤篤司博士 (長岡雪水防災研究所長) には有益な議論をいただいた。

近畿大学教授・高見晋一博士には, 本研究を開始した当時の北陸農業試験場気象資源研究室長として, 一貫してご指導, ご協力いただいた。またスイス国立雪・雪崩研究所のトーマス=ヴィンガー (Thomas WIESINGER) 博士には STA F

エラーとして 1990 ~ 1992 年の北陸農業試験場滞在中, 議論と観測に参加していただいた。

また, DFIR の建設や測器の維持, 修理ならびに観測においては北陸農業試験場 (現・北陸研究センター) 業務科職員の皆さんに多大なご尽力をいただいた。

以上, 記して深く感謝申し上げます。

文 献

- Goodison B. E., Louie P. Y.T. and Yang D., 1998: WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison Final Report, WMO, 299pp.
- 樋口敬二, 1952: 積算雪量計の試験 (予報). 北海道大学地球物理学研究報告, 2, 13-16.
- 井上力太・安斎正直, 1959: 雪量計の試作. 雪水, 21, 178-181.
- 気象庁, 2001: 気象庁観測平年値 (CD-ROM 版), 気象庁.
- 中川隆隆・横山宏太郎, 2002: 第2章 気候. 『上越市史』資料編1 自然, 上越市, 206-266.
- Nešpor V., 1998: Investigation of wind-induced error of snow measurements using numerical simulation. WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison Final Report, WMO, Annex, 11-15.
- 大野宏之・トーマス=ヴィンガー・高見晋一, 1994: 冬期降水量測定法の改良. 北陸農業試験場報告, 36, 57-70.
- Ohno, H., Yokoyama, K., Kominami, Y. and Inoue, S., 1998: Country Reports, Hokuriku Japan. WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison Final Report, WMO, Annex, 157-161.
- 大野宏之・横山宏太郎・小南靖弘・井上 聡・高見晋一・Thomas Wiesinger, 1998: 北陸地方における降水量計の固体降水捕捉率. 雪水, 60, 225-231.
- 大野宏之, 1999: 「北陸地方における降水量計の固体降水捕捉率 (大野ら, 1998)」に寄せられた質問に対する回答. 雪水, 61, 42-44.
- Sevruk, B., 1985: Summary report. Correction of Precipitation Measurements, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 13-23.
- Sevruk, B., 1987: Point precipitation measurements: Why

- are they not corrected? IAHS Publ. no.164, 477-486.
- Sevruk, B., 1989: Reliability of precipitation measurement. Precipitation Measurement, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 13-19.
- Shiraki, M., 1998: Country Reports, Memambetsu, Japan. WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison Final Report, WMO, Annex, 162-163.
- 菅谷重二, 1953: 八甲田十和田湖周辺地域の水資源 (第1報 降水量及び積雪水量調査). 青森県・青森営林局, 70 pp.
- 鈴木宣直, 1996: 雨量計, 雪量計. 気象研究ノート, 185, 53-64.
- 上野健一・大野宏之・横山宏太郎・小南靖弘・八久保晶弘・杉浦幸之助・佐藤篤司・大畑哲夫, 2000: 「固体降水量評価に関する研究会」の報告. 雪水, 62, 375-383.
- 和達清夫 (監修), 1993: 気象の事典, 東京, 東京堂出版, p. 309.
- Wiesinger, T., 1993: Accurate measurement of snowfall—Development of two innovative precipitation gages based on the analysis of existing errors. Doctor Thesis, Wien University, 229pp.
- WMO, 1985: International Organizing Committee for the WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison, Final Report of the First Session. Naskoping, Sweden, WMO, Geneva, 31pp.
- Yang, D., Metcalfe, J. R., Goodison, B. E. and Mekis, E., 1993: An evaluation of double fence intercomparison reference (DFIR) gauge. Proc. Eastern Snow Conference, 50th Meeting, Quebec City, 105-111.
- 横山宏太郎・小南靖弘, 2002: 二重橋基準降水量計に取り付けた着雪防止ヒーターについて. 寒地技術論文・報告集, 18, 401-406.
- 横山宏太郎・小南靖弘・川方俊和・大野宏之, 2002 a: 北陸地域における二重橋基準降水量計の性能評価. 寒地技術論文・報告集, 18, 407-412.
- 横山宏太郎・西村 寛・中沢秀一, 2002 b: 降水量計の捕捉特性シミュレーション (1). 2002年度日本雪水学会全国大会講演予稿集, p. 123.
- 吉田作松・斎藤邦雄, 1956: 積算雪量計に関する二・三の試験について. 雪水, 17, 8-13.
- 吉田作松, 1959: 積算雪量計の研究 (第二報) 主として型別の捕集率ならびに積算雪量計実用化のための吟味. 研究時報, 11, 507-524.