

第 2 回 2 限目

日本海側の降雪

講師 富山工業高等専門学校
電気工学科 教授
椎名 徹氏

1. はじめに

西高東低の冬型気圧配置になると、日本海側では冷え込みが訪れるとともに、大陸からの冷たい風が日本海で水蒸気を含み、山脈にぶつかることによって降雪となる。日本の積雪は、最も温暖な地域での積雪という特徴があり、雪氷の分野で研究が行われている。

私は画像処理計測や電磁波伝搬といった工学を専門としている。気象、雲物理等の、いわゆる雪の専門家ではないが、環境計測という視点で雪と深くかかわっている。今日は私の研究紹介を兼ねて、富山県を中心にした日本海側の雪のお話をしたい。



2. 日本海側の積雪～積雪分布

冬季のいずれかの月の最深積雪が 10cm 以上の所を積雪地域、10cm 未満の所を非積雪地域と分類すると、積雪地域は、九州・四国・中部地方の山岳部、中国地方の日本海側、北陸、東北、そして北海道のほぼ全域に分布している。日本は最も温暖な地域の積雪地帯であり、その中でも北海道の雪と北陸の雪は異なり、北陸の雪は湿っていて重く、北海道の雪はさらさらの雪質だと言われており、雪氷学ではその地方の積雪全体の質を表す規定が明確でなく、科学的な分類は興味あるテーマとなっている。

そこで、防災科学技術研究所雪氷防災研究センターの総括主任研究員、石坂雅昭氏は、気候値（いわゆる平均値）を用いて全国の雪質の分類を行った。それによると、積雪地域は、富山のように全期間を通して積雪のほぼ全層が水を含む湿った状態で経緯する「湿り雪地域」、北海道のように積雪の全層が厳冬期にほぼ乾いた状態で経緯する「乾き雪地域」、

気温によって湿り雪になったり乾き雪になったりする「中間地域」、乾き雪地域の一部で雪の中がしもざらめ雪という状態になっている「しもざらめ雪地域」とに分類されている。

地域積雪の質的特徴

(1)温暖な積雪地域



ざらめ雪(顕微鏡写真)

1 月の平均気温で 0.3°C
以上の値を持つ地域

・**湿り雪地域**

(2)寒冷な積雪地域



しもざらめ雪(接写写真)

1 月の平均気温で -1°C 未満値を
持つ地域、積雪量が少ないとき。

・**しもざらめ雪地域**(しもざらめ雪)

・**乾いた雪地域**(しまり雪)

では、実際に積雪層の中はどうかということ、湿り雪地域の雪質は、特に冷え込んだ日の表面付近以外は全層 0°C で推移し、日中の気温が高いため、上部は融雪水によるざらめ化が激しい。乾き雪地域は、雪温はマイナスのことが多く、いわゆるパウダースノーが固まったような「乾きこしまり雪」、さらに締まった「乾きしまり雪」の層が長く保存される。そして、しもざらめ雪地域では、乾き雪の層が少ないときに温度の勾配ができ、その中に霜状になった「しもざらめ雪」が発達している。そういう意味では、乾き雪地域としもざらめ雪地域は北海道に多く、湿り雪地域は北陸を中心とする、中国地方などの日本海側の方に多い。

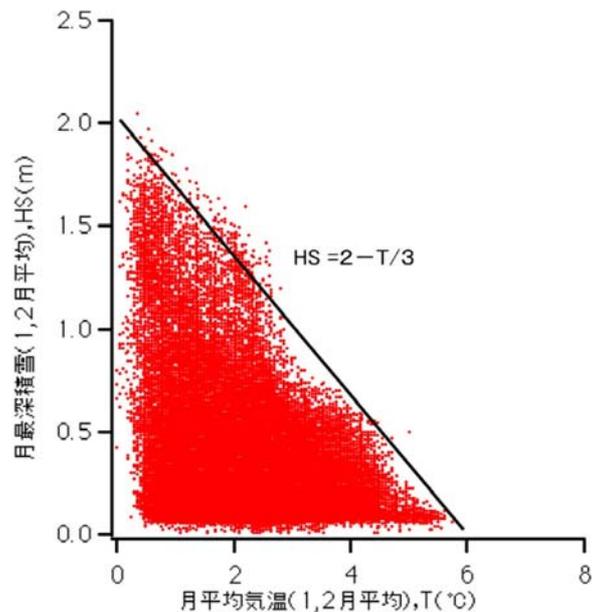
これらの分類をなるべく簡単な数値データだけで処理するため、石坂氏は、1月の平均気温と月最深積雪の二つのパラメータを使って分類を行った。実際に積雪層を詳細に調査した結果、月平均気温が 0.3°C 以上の所は湿り雪、 -1°C 以下の所は乾き雪、もしくはしもざらめ雪の状態になっている。その間に含まれるところが中間地域になる。そして、月最深積雪量の多少によって、乾き雪になったりしもざらめ雪になったりすることを見いだしている。

富山を中心とする北陸の温暖な積雪地域の積雪層の変化を見ると、最初は新雪が降ってくる。この後、降雪がなければ溶けてなくなるが、さらに雪が降り積もると圧雪され、日中の平均気温が 0°C 付近なので溶けてきて、徐々にざらめ雪状態になってくる。1～2月になると、ざらめ雪の上にさらに降るのだが、日中の気温が 0°C 以上になって太陽が差し込んでくると、上の方もざらめ雪状態になってくる。晴れたり降ったりすることによって、表面が溶けて「雪えくぼ」といわれるものが出てくる。また、中に溶け込んで水がしみ込み、「水みち」が形成されて、しまり雪とざらめ雪が交ざったような状態になってくる。これらが根雪となって、2～3月にはざらめ状態になり、最後は消失する。

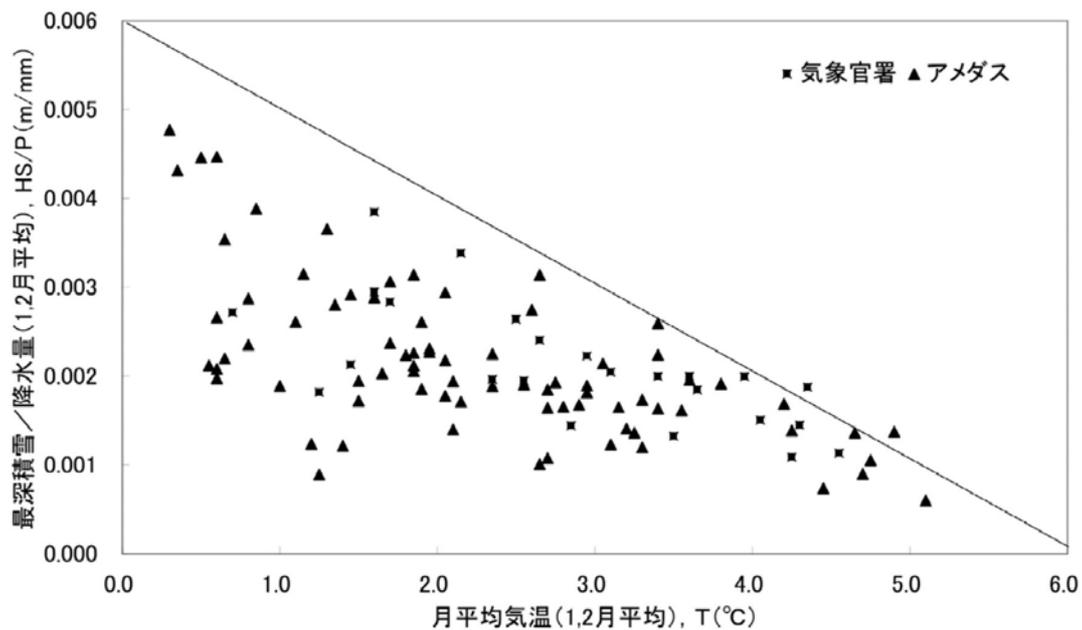
気候値から割り出した雪質の分布を見ると、北陸地方・中国地方は湿り雪地域、山間部に行くに従って乾き雪地域になり、しもざらめ雪地域は乾き雪地域の積雪の少ないところに現れてくるという形になっている。

3. 日本海側の積雪～湿り雪地域の特徴

横軸に 1～2 月の平均気温、縦軸に月最深積雪を取ったグラフに、湿り雪地域のメッシュ気候値（アメダスデータから 1 km 間隔で推定した気候値）をプロットすると、すべての点がある一つの直線以下に入っており、その直線と横軸との交点は約 6℃になっている。つまり、6℃を超える地域には積雪がない（最深積雪が 10cm を超えることはない）ということである。また、気温が上がるほど積雪量が減ることを表しているが、これは湿り雪地域だけで成り立つ特徴で、乾き雪地域はこの図には載らない。湿り雪地域は非常に面白い観測地域であることが分かる。



実際のアメダス観測点のデータを同様のグラフにプロットすると、やはり全部の観測点がある直線の中に入ってくる。この直線を具体的な数値的に計算してみると、降水量が 50mm 増加すると積雪上限は 25cm 増加し、気温が 1℃上がると積雪の上限は 30cm 減少することが分かる。例えば、地球温暖化で気温が 1℃上がると、富山の雪は最大で 30cm 減ってしまうことになる。そういう意味で、湿り雪地域である富山の降雪を調べることは非常に重要である。



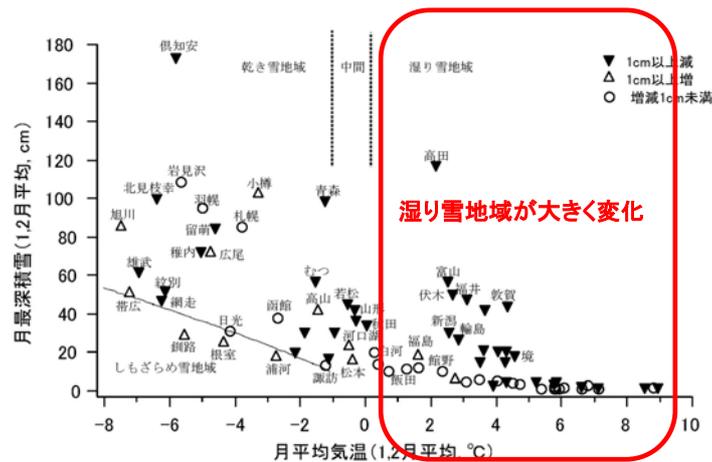
気象官署およびアメダスの月平均気温と月最深積雪・月降水量比の関係

次に、経年変化はどうだろうか。全地域の各アメダス点で、1971～2000 年の平年値と 1961～1990 年の平年値（旧平年値）の差を求めたところ、気温はすべての観測地点で上昇している。最深積雪量は、旧平年値よりも平年値の方が減少している地点が多く、そのほとんどが北陸地方であり、逆に増えているところは北海道であった。

各アメダス点における 1～2 月の平均気温と月最深積雪量との関係において、旧平年値

からの積雪の増減を重ねて見ると、乾き雪地域では積雪が減少しているところもあれば増加しているところもあるが、湿り雪地域ではほとんどの地点で積雪が減少している。しかも、湿り雪地域の積雪深減少の大きいところを挙げていくと、高田の-21.5cm を筆頭に、金沢、福井、伏木、敦賀、富山というように、北陸地方で大きく変化している。このようなことから、地球温暖化の影響を調べるには、湿り地域の、特に最も影響を受けている富山の降雪を調べるのが大切だろうと考えている。

近年の気候変化



対象地点(アメダス)の気温と積雪の平年値と旧平年値からの積雪深さの増減
(平年値:1971年~2000年、旧平年値:1961年~1990年)

次に、その積雪に影響を与える降雪をどうとらえるかという研究について、雲の状態から地上付近までの雪の様子を自動測定するシステムと、地上付近で降っている雪をとらえる画像解析に分けてご紹介したい。

(資料提供：防災科学技術研究所雪氷防災研究センター 総括主任研究員 石坂雅昭)

4. 環境自動計測・分析～雲から地上付近までの観測システム

環境自動計測システムは、局所的な予測等につながればということと、空間的にも時間的にも精度の高い測定、冬期間連続の自動計測を目指し、ネットワークを介して測定する。ひまわりやNOAA衛星画像を受信してグローバルな気象情報を得る衛星画像受信システム、雲の様子や降雪粒子の様子、地上付近での様子を測定するための三つのレーダー、実際の地上付近の雪の重さを量る電子天秤と、画像処理手法を用いた降雪粒子観測装置から成っている。

1 台目のレーダーはCeilometer と呼ばれるレーザーレーダーで、レーザー光を垂直に雲に当て、それが返ってくるまでの時間から雲の高さを測る。2 台目のマイクロレーンレーダーは発射したマイクロ波が雲や降水粒子等に反射されて戻ってくるのをとらえるもので、高度ごとの降水プロファイルを測定する。200m間隔で 30 ステップ、最大 6000mまで測れるが、雲は 1000~1500mにあるので、実際には 50m間隔で 1500mまで測定するように仕様設定している。最後が、地上付近に降ってきた雪の様子を調べるためのPOSSレーダーである。降雪粒子には、あられ、雪片、雪結晶などいろいろな種類があるが、それぞれ反射して戻ってくるマイクロ波の量が異なるので、それをPOSSレーダで測ることによ

って、雪の種類を同定することを目的としている。

では、電磁波からどのようにして降雪量を測定するのかというと、電磁波を放射し、空中にある雪粒子から跳ね返ってくる電磁波の量を測ることによって雪の量を推定するわけだが、この返ってくる電磁波の量を「レーダー反射因子 (Z)」と呼ぶ。そして、実際に降り積もった雪の量は「降水強度 (R)」というもので表される。一般に Z と R は比例関係にあり、Z を測ることによって R を推定する。

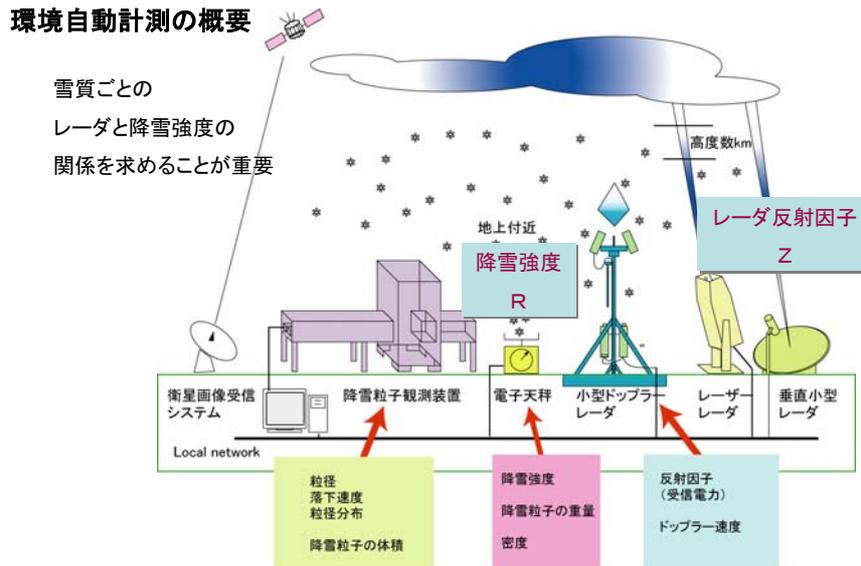


図 下層大気圏下における降雪プロファイル測定の概要

降水強度は単位時間に降り積もる水の高さ (mm/h) で表され、雨であれば「降雨強度」、雪であれば「降雪強度」と言う。降雪強度は、降雪粒子を融解して水に換算したときの高さで表すのだが、そのためには雪の密度を測る必要があり、それをわれわれは画像処理による解析で行っている。計算式としては、粒径から体積を出し、それに落下速度を掛けて全部足し合わせたものが降水強度で、雪の場合はそこに密度が入ってくる。従って、降雪強度を算出するには、密度と落下速度と粒径の三つを同時に測る必要がある。

従来、降雪強度は電子天秤を用いて行ってきた。電子天秤の受け皿の面積を予め求めておき、その上に降り積もる雪の重量変化から降雪量 (降雪強度) を測定するのである。この方法だと、電子天秤の精度を高くすると測定精度は向上するが、風の影響を受け、どんどん降り積もると受け皿から雪があふれてしまうので、人手により除雪する必要がある。それを画像処理手法により自動測定するのである。(後述)

レーダー反射因子 (Z) と降雪強度 (R) の関係は、一般に $Z = B R^\beta$ という式で表される。B と β は定数で、あらかじめ B と β を求めておけば、レーダーの Z から降雪強度を推定できることになる。ただし、雨は B と β が一定なのだが、雪の場合は雪質によって変わってくる。そこで、われわれの研究で、この B と β を雪質ごとに求めることを行っている。

実際に測定した例をお見せしたい。これらの図は横軸が時間である。(図 1) まず、一つ目は降雪強度 (降雪量) を電子天秤で量り、変化した量を表している。赤い高い所は、雪がたくさん降ったことを表している。二つ目はレーザーレーダー (Ceilometer) で測ったもので、赤い方がレーザーの反射強度が高い。レーザー光を照射しているので、雲とぶつくと反射がある。雪が降ってくると、一番近い雪にぶつかったところで強く反射する。

また、三つ目は、マイクロレインレーダーでの測定結果である。このように、実際に雪が
どんな量でどのように落ちてくるかをとらえている。

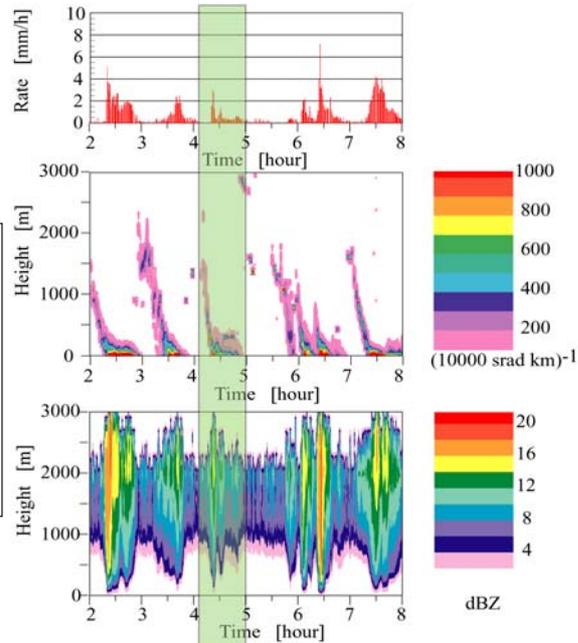
降雪強度

電子天秤法 風による影響

一降雪ごとの観測 Z-R関係の解明



- ・レーザーレーダーの導入
- ・MRRによる高度ごとの測定



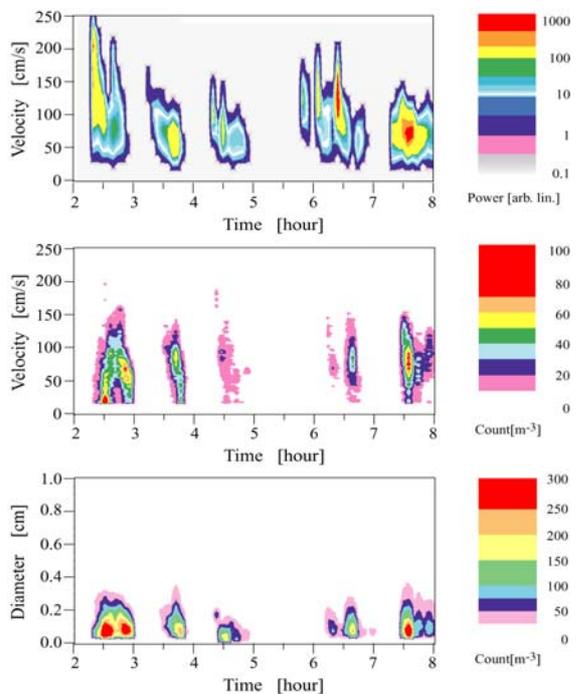
(図1)

・レーダーと画像解析

地上付近の観測 グランドトゥルス

電磁波特性の解明により

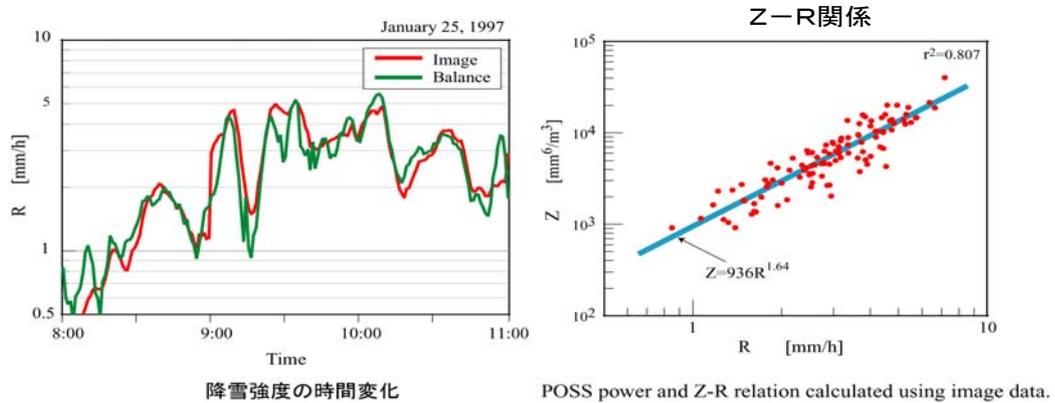
- ・ 粒径分布
- ・ 落下速度分布



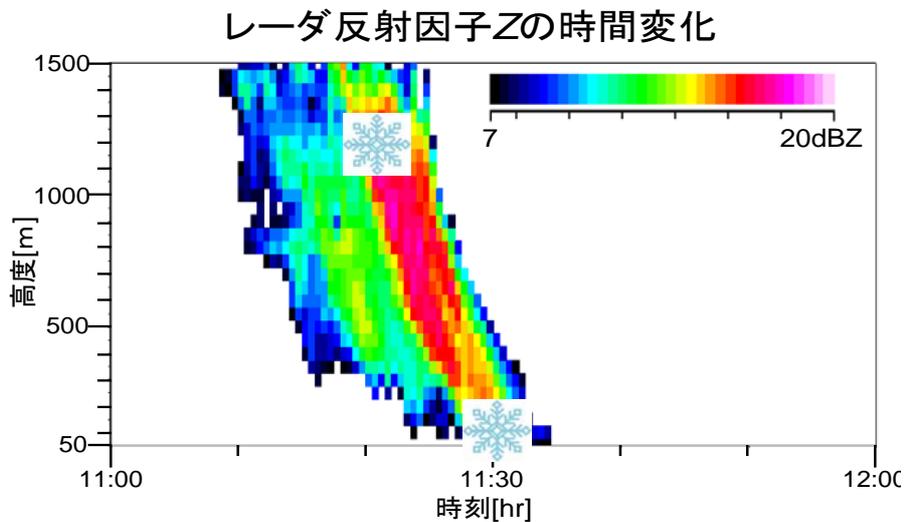
(図2)

POSS レーダーという地上付近のレーダーで測ったものもある。(図2) これはドップラーレーダーで、落下している雪の速度を測ることができる。雪の速度は主に 1 m/s 以下といわれているが、この例では 75cm/s で落下していることが分かる。ただ、レーダーでは速度分布を測ることはできるが、粒径分布を測ることはできないので、それを画像処理による降雪粒子観測装置により測定している。

▪ 画像処理手法による降雪強度計とレーダ解析



(図3)



(図4) 2006年1月5日 11:00~12:00

実際に測定した例をご覧くださいと、横軸が時間、縦軸が降雪強度（降雪量）で、緑色が電子天秤での測定値、赤色が画像処理による測定値である。(図3) 画像計測により正確に測れることが分かる。こちらはレーダーで測定した例で、横軸に時間、縦軸に高さを表している。マイクロレインレーダーで測ったもので、赤いほど電磁波が強いことを示している。(図4) このレーダーは雪の速度と電磁波の強さも分かるので、雪の種類が求められる。また、例えばある高度でできた雪が何秒後に降ってくるということが分かるので、どれくらい量でどんな雪がいつごろ降ってくるかという予測ができるのではないかと思います。以上、レーダーを使った降雪推定について測定の実例をご紹介します。

5. 映像情報の解析～降雪粒子画像解析

もともと私はコンピュータ、画像解析を専門としていたのだが、富山に根付いた研究テーマはないかということで、降雪粒子の落下映像解析を行ってきた。これには、雪が降っている間、長時間連続的に安定して自動解析する長期自動観測と、短期間ではあるが高解像度で正確に、雪の種類、動き振る舞いを測定する短期自動観測に分けられる。長期自動観測の方は 1986 年から続けており、これを長期間、データベース化している。

観測システムの概要を説明すると、長期観測装置は本校電気棟の屋上にあり、二重の防風ネットで覆われている。その防風ネット内を落下してくる降雪粒子をとらえて、落下速度と粒径を測定し、その付近に電子天秤を置いて降雪量も同時に量っている。実際に撮影されるのは、縦横 12cm、奥行き 21cm の立方体の空間で、その中の雪の様子を、5 秒間隔で連続的に映像としてとらえるという形である。

この測定による個々の降雪粒子の粒径と落下速度から摩擦係数等を計算して、密度を算出する。一個一個の雪の大きさと速度と密度が分かれば、降雪強度が求められる。この結果を電子天秤で測った降雪強度と比較すると、我々の考えた画像処理装置が十分電子天秤の代わりとなることが分かった。画像処理装置は冬の最初にスイッチオンにしておけばずっと測定できるので、逐一除雪しなければならない電子天秤よりも有利ということになる。

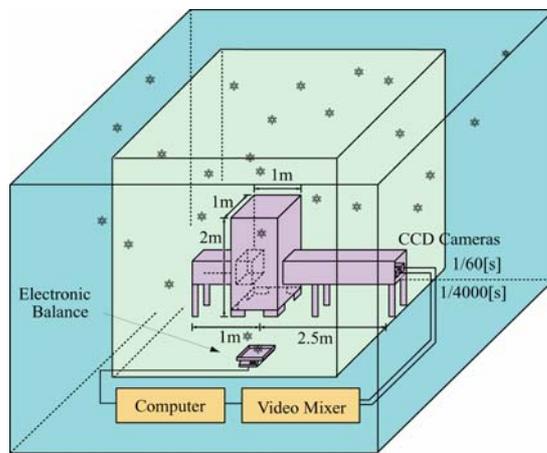
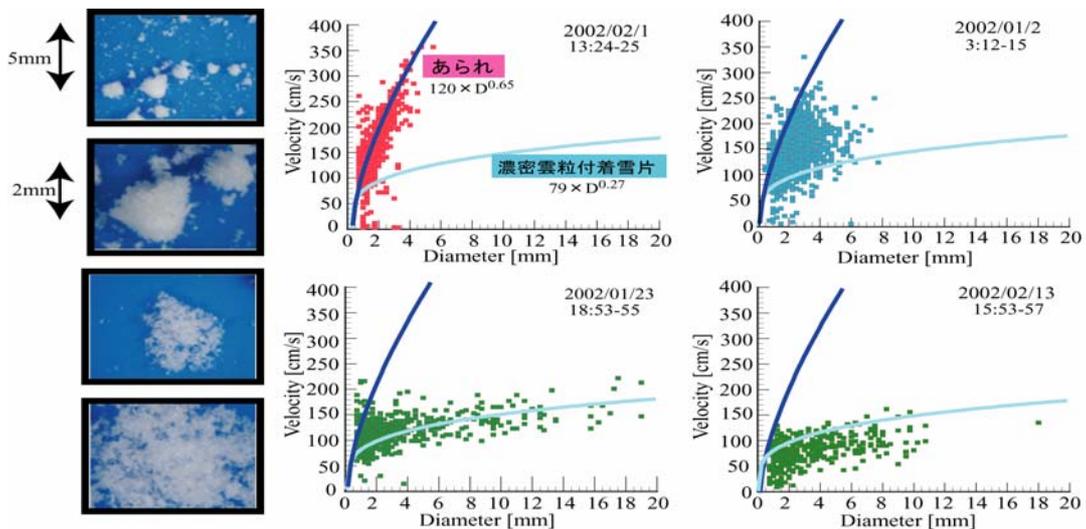
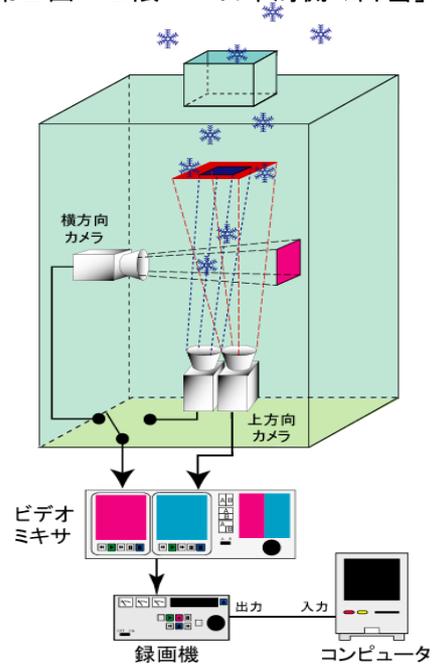


図 降雪粒子観測装置



更に、粒径と落下速度の関係から、雪の種類も同定できる。あられは粒径が小さくて落下速度が速く、雪片は大きい粒子で落下速度が比較的低くなっており、画像処理により、今どんな雪が降ってきているかが分かる。レーダーで降雪量を推定する際、雪片とあられではレーダーの反射量が大きく異なるので、雪片とあられを分類することがレーダ測定には非常に重要になるのだが、画像処理手法により、雪片が何パーセント、あられが何パーセント含まれるかを求めることが可能になった。

次に、短期計測装置は、高解像度・連続画像の解析をすることで雪片の生成メカニズムを解明することを目的とする。屋上から地上付近までの大きなタワーを作り、そこに落ちてくる雪を横からのカメラと真下からのカメラでとらえて、詳細に画像解析していく。例えば、ただ真っすぐ落ちる雪片、斜めに落ちてくる雪片、円弧を描きながら落ちてくる雪片などがあるのだが、最後にその雪片をキャッチして顕微鏡写真を撮り、重さ、密度、固まり具合を測定している。このようなデータを利用して、仮想空間内で雪片の落下運動のシミュレーションを試みことができる。(映像を上演)



別のテーマとして、受信した衛星画像の雲全体の様子と積雪の関係の画像解析を行っている。最近では地球温暖化の影響で植物や森林が重要視されているが、特に雪国では杉林などが被害を受けており、積雪と植生の関係を調べるということは大事である。そこで、われわれはNOAA衛星を使った画像解析を行っている。

NOAA衛星は、高度 850km という、気象衛星ひまわりの約 40 分の 1 の近さのところ地球を回っており、極を必ず通って約 100 分で地球を 1 周している。観測する幅が非常に広く、同じ場所を昼夜 1 回ずつ通ることが特徴で、そのデータを無料で受信でき、公開が自由というメリットがある。分解能は最大 1.1km で、積み込まれているセンサーは六つの波長帯の電磁波を測定することができる。これを利用して、植物の活性量を表すNDVIと積雪域の抽出を行うわけである。

NDVIとは、リモートセンシングで活用される植生の強さを表す値である。近赤外領域は植物の葉に当たると強く反射され、赤い色は吸収されるという特徴があり、これを利用すれば植物がどれくらい活性しているかが分かる。NDVIは-1~+1の値を取り、1に近いほど植物が活性していることになる。例えば、千葉と富山を比べると、夏の盛りは千葉よりも富山の方が高く、冬の間は、雪の降らない千葉の方が富山よりも高いことが分かる。また、富山県内を市町村に分けて解析した例では、富山市は低くて利賀村は高いという形になっている。

また、NOAAの画像は、可視光を観測するチャンネル1は雲と積雪域、チャンネル3が低層の雲、チャンネル4が高層の雲を抽出しているので、チャンネル1の画像からチャンネル3と4の雲を抜き取ってやると、雪の部分だけを取り出すことができる。この積雪域と先ほどの植生の関係を調べると、雪が降ったときは植生が低く、次の年の夏になると植生が高くなるのが分かる。雪がよく降れば植生がどうなるかを調べることによって、積雪の被害を調べるということを行っている。

6. 今後の展開

今後は、近年各地に設置されているネットワークカメラを基にした画像解析から雪の量を簡易に測り、詳細な雪の情報網を作ろうとしている。また、関連する大学や研究機関の先生方と共同で、路面の凍結状況や雪崩の状態を感知し、予知することができないかという検討もしているところである。