

航空写真による積雪分布および積雪量の 解析方法に関する研究

ANALYSIS OF SNOW DEPTH DISTRIBUTION ON AERIAL PHOTOGRAPHS

丸 安 隆 和*・内 田 正 人**・田 浦 秀 春***

By Takakazu Maruyasu, Masato Uchida and Hideharu Taura

1. まえがき

深い山岳地帯に積る雪は、わが国ではとくに重要なエネルギー資源である。この雪が集水域に、どのように、またどれだけの量が分布しているか、またそれがいつ、どのような早さで融け出るか、は洪水対策、水資源の利用計画、発電計画などに非常に重要な要素である。

これらの問題を解決するために、今までいろいろな方法が提案され、実行されてきたが、それぞれの方法には避けられないいくつかの欠点があって、全積雪量を推定するには、かなりの困難があった。

すでに、明らかにされているように、とくにわが国の最多雪地域である北アルプス山岳地帯では、積雪は卓越した季節風の下に生ずるので、積雪分布は地形の影響を大きく受け、わずか離れただけで、積雪深が非常に大きく変わることも珍らしくない。しかも、直接積雪深を測定しようとしても、非常に限られた特定のルートに沿う場所以外は、近づくことすら容易でない。

小笠原博士は、これを解決する方法として、高山地帯では、植生の種類と状況が積雪深と積雪期間に非常に密接な関係のあることを確かめ、これによって積雪状況を推定することを提案した¹⁾。

同博士が述べているように、植生分布は積雪と深い関係のあることは確かであるが、消雪時期との関係もあり、また植生は相当長年月にわたる平均積雪との関連において変化するものであるから、年ごとの積雪がどのように分布しているかを、これだけから推定することは多少の難点も生ずるであろう。

この研究は、飛行機のもつ機動性と航空写真のもつ記録性とを全面的に利用し、航空写真を実体写真測量として用いることによって、数量的な情報を取り入れ、また判読に用いて専門的な情報を読み取り、これらを基礎として、黒部川流域の積雪分布を推定する方法を提案したものである。そのため、黒部川流域における積雪分布は、

地形要因に支配されるという考えのもとに、全流域の地形分析を行ない、そのうちのいくつかのモデル地域について、航空写真を用いて積雪深を測定し、地形と積雪深との相関を求め、植生その他の要因を考えに入れて全流域の積雪量を求める方式を確立することにした。

この方法が十分実用的な結果を与えることが立証されれば、適当に選ばれた積雪測定点の資料をもとにして、任意の点の積雪深が推定でき、したがって全積雪量が推定できることになる。なお、その推定精度を高めるためには、積雪の実測点をどの位置に配置するのがよいかを決定するにも利用できるであろう。

この研究は、航空写真で測定した積雪深の実測値を基礎データとし、それに地形その他の要因を考慮して、統計的処理を行なって積雪量を求める方法をとっている。したがって、得られた積雪深はただ雪の深さだけを示すに過ぎず、雪の密度すなわち等水量についての資料は求められない。そのため、この研究結果を用いて得られた積雪量に関する資料が、いっそ有効に水資源として利用されるためには、別途この点についての解明を進めることが必要であると考えられる。

2. 航空写真による積雪測定の基礎実験

(1) 概 要

航空写真によって積雪深を測定しようとする試みは最近ようやくその緒についたばかりで、まだまとまった報告も数少ない。航空写真の利用の仕方には2種ある。その1つは、適当なターゲットを立てておいて、斜写真などからその地点の積雪深を読みとったり、平地では畦や構築物を参照して推定する、などの方法である。他の1つは無雪時にとった航空写真と最大積雪時の航空写真から、同じ地点についての高さの差を求め、積雪深を測定しようとする方法である。

この研究では後者の方法について検討することにした。前節にも述べたように、積雪深と地形、植生、風向などの相関関係を得るためにには、できるだけ多くの基礎資料が必要であり、資料を得る方法としては、航空写真による方法が、いくつかの問題点はあるにしても、現段

* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所

** 正会員 関西電力KK 建設部長

*** 正会員 理修 国際航業KK 電算課長、東京大学生産技術研究所 嘴託

階では最も適当な方法であると考えられるからである。これは航空写真による Area Method とよぶことができる。

この方法によると、航空写真測量のもつ利点、たとえば、

(1) 写真撮影と一部現地作業を除いて、すべて室内で作業が可能であり、とくに中部山岳地帯のような険峻で危険な地域においてさえ、きわめて容易に測定が可能であること。

(2) 写真是すべての事象と同じ正確さで記録しているから、多くの点の測定が一様な精度で行なうことができる。

(3) 写真に残された記録は、そのまま長く保存できること。

などが含まれるが、つぎのような難点もある。すなわち

(1) 積雪時の写真と無雪時の写真とで、同じ点を正確に確認し、その点の標高測定を行なうが、点の位置確認にどうしても誤差が伴うこと。

(2) 実体写真測量法による標高測定の精度には一定の限度があり、たとえば撮影高度との関連については、その約 1/5 000 ぐらいの誤差範囲の測定を考えていなければならぬこと。

(3) 密に繁っている森林地帯の測定は無雪期においてとくに困難であること。

(4) 測定された積雪深は、雪の表面の位置で測定された値であり、密度、等価水量について別に検討しなければならない。

この研究では航空写真によるデータが基礎となるため、まず前半では、航空写真測定法とともに各種の欠点をいかにして改善するか、そして、どの程度の正確さで積雪深を測定することができるか、に焦点をおいて検討した。

(2) 測定方法

a) 代表地区の選定

測定された積雪深とこれに関連する諸要素との相関をできるだけ正確に求めるためには、測定に選ぶ代表地区は、できるだけ流域全域を代表できるものであること、写真による測定ができるだけ正確な結果を与えるような地域であること、が必要である。このため流域を数個のブロックに分け、その中で測定に最も都合のよい写真を選んで、その中から標本値をとることにした。

b) 使用した写真

1963年10月24日撮影(無雪時)

1964年3月30日撮影(最深積雪時)

以上の写真はいずれも RC8 (レンズ Aviogon $f=152.19\text{ cm}$) を用いて撮影されたもので、写真縮尺は約 1/15 000 である。

撮影に先立って、相当数の対空標識を設置したが、積

雪期の写真上ではその大部分は発見できなかった。

c) 測定用機械

オートグラフ A7 機械縮尺 1/10 000

図化縮尺 1/10 000

d) 標定作業

2組の写真が、できるだけ同じ条件で標定できる地点を含む写真を選んだ。

標定は、平面位置に関しては同じ地点に対応させること、および高さに関しては標高差を測定することが主眼であるから、標定に当たっては、2組の写真上に明瞭に確認できるパスポイントを利用したが、これらの点は既設の三角点を用いて増設したものであり、パスポイント自身の精度についてはそれほど重視しなかった。

e) 積雪深の測定

上記の写真を用いて 500 m の方眼をとり、積雪時と無雪時との対応点の標高差から積雪深を測定する。

測定と同時にその地点の植生をも読みとり、積雪深と植生との関連を検討する資料とした。

(3) 測定精度の検討

a) 実験 1

条件がよくて測定しやすい点を 97 点えらび、おのおのの積雪深を日をかえて 2 回測定した。

第1回、第2回の測定値をそれぞれ x_i, x'_i ($i=1, 2, \dots, 97$) とし x_i, x'_i は正規分布 $N(X'_i, \sigma^2)$ にしたがうものとすると $(x_i - x'_i)$ は $N(0, 2\sigma^2)$ となる。

実測値にもとづいて、 $(x_i - x'_i)$ の平均値 (m) と分散 ($2\sigma^2$) を計算すると、

$$m = \bar{x} - \bar{x}' = 1.8$$

$$2\sigma^2 = 3460$$

が得られた。そこで $m=0$ の仮説を、 t 検定により検定すると、有意水準 0.05 で棄却されなかった。すなわち、これら 2組の測定値は、平均値を異にした 2 個の母集団に分かれるということはできなかった。

しかし、測定値と真値との関係については、精度の高い実測値が得られなかつたので、この段階では、何ともいうことはできなかつた。

b) 実験 2

積雪時の写真と無雪時の写真について、測定の難易を検討するために、つぎの 3通りの場合の分散ならびに標準偏差を求めた。

1. 積雪時の写真を使って、グリッド上で 6 点を選び、各点の標高を順次に測定し、20 回くり返した。

2. 無雪時の写真で 1. と同じようにくり返し測定した。

3. 無雪時の写真で著名な 5 点を選び、各点の標高を順次に測定して、20 回くり返した。

以上の測定の結果、つぎの値が得られた。

| | 測定点 | 測回 | 標準偏差(分散) | | | | | |
|---------|-------|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 地 上 | 著名な点① | 5 | 20 | 18.68 (349) | 22.00 (484) | 17.72 (314) | 18.79 (353) | 11.44 (131) |
| | 格子点② | 5 | 20 | 22.23 (493) | 21.49 (461) | 23.64 (559) | 17.40 (303) | 22.56 (509) |
| 雪面上の格子③ | 6 | 20 | 18.70 (350) | 15.84 (251) | 23.51 (553) | 20.95 (439) | 22.60 (511) | 18.52 (343) |

この結果にもとづいて、①、②、③の各グループごとに、Bartlett の方法により、各点の分散が等しいかどうかを検定したところ、差異があるとはいえたかった。そこでつぎにはグループごとにプールして、各グループ間の分散が等しいかどうかを検定した。その結果これまた差異があるとはいえたかった。これから航空写真によって標高を測定する場合には、一般地上の点と雪面上の点との間には、精度(Precision) 上差異がないと、いうことができよう。

ただし、正確さ(Accuracy)については、雪面上に精度の高い実測点を得ることができなかったので、何ともいいうことができなかった。

ただ Cooper³⁾ の実験で、航空写真測量においては、雪面上の点と地上の点との間に、標高測定の精度(Precision と Accuracy)に差異がないということが認められ、積雪深の実測値と、航空写真による測定値とを比較して、その誤差をつぎのようにあらわしている。

| 写真縮尺 | カメラ | 図化機 | 標準偏差 |
|---------|-----------|--------------|-------|
| 1/6 000 | Fairchild | Kelshplotter | 24 cm |

そこで、これらを総合して、この研究の場合における積雪深測定の誤差も、地上の点に対する測定の場合と同じと考えた。そうするとこの場合には、写真縮尺 1/15 000(撮影高度約 2 250 m) であるから、誤差は撮影高度の 1/5 000 で表わされ、約 45 cm となる。

3. 植生と積雪深との関連について

(1) 植生と積雪深

前章すでに述べたように、高山地域における植生は、積雪深と融雪時期とに、密接な関係であることは確かである。しかし植生の種類が、積雪深を一的にきめるものでないことは明らかで、同じ植生でも、年ごとに、また場所によって、積雪深に相当開きのあることも確かである。

これらの点を明らかにするために、時期をかえ、場所をかえた航空写真を用いて測定した積雪深と植生別との関係を調べた。

この測定では植生をつぎの 8 種類としてまとめた。すなわち、

1. 荒地 2. 草地 3. かん木地 4. はい松
5. はい松と針葉樹の混合 6. 針葉樹林
7. 針葉樹と広葉樹の混合林 8. 広葉樹

写真 T は薬師沢上流から太郎小屋付近で、標高 2 000 ~ 2 400 m、針葉樹が多く、広葉樹はほとんど見られない。写真 K は刈安峠を中心とした地域で、標高 1 400 ~ 2 400 m であり、灌木地帯が多く、はい松地帯が少ない。いずれも 1963 年 4 月 30 日撮影のものであり、写真 S はサンプル地域で 1964 年 3 月 30 日撮影のものである。

測定結果をまとめると、つぎのようである。

写真 T (測定点 2 353)

| 植生別 | 荒地 | かん木 | 広葉樹 | 針葉樹 | はい松 針葉樹 | 草地 | はい松 |
|----------|------|------|------|------|------------|------|------|
| 平均積雪深(m) | 4.64 | 3.82 | 3.54 | 3.31 | 2.39 | 2.29 | 1.92 |
| 標準偏差 | 2.24 | 1.66 | 2.22 | 1.39 | 1.37 | 1.53 | 1.41 |

写真 K (1 257 点)

| 植生別 | 荒地 | 広葉樹 | 広+針 | かん木 | 針葉樹 | 草地 | はい松 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|
| 平均積雪深(m) | 5.07 | 2.81 | 2.76 | 2.02 | 1.86 | 1.38 | 0.41 |
| 標準偏差 | 5.35 | 2.58 | 4.08 | 2.68 | 3.12 | 2.86 | 3.77 |

写真 S (1 125 点)

| 植生別 | 針葉樹 | 広葉樹 | かん木 | はい松 | 草地 | 荒地 |
|----------|------|------|------|------|------|------|
| 平均積雪深(m) | 4.59 | 4.01 | 4.24 | 3.67 | 5.42 | 5.46 |
| 標準偏差 | 2.10 | 2.67 | 2.39 | 2.56 | 2.70 | 2.49 |

これらの結果をみると、平均積雪深にくらべ標準偏差が非常に大きい。これは測定誤差(これは前章にのべた程度)のほか、同じ植生のところでも積雪深に非常に大きい変動のあることを示している。荒地のように残雪荒地(6 月以降にお残雪があるため、植物が生育しない)強風荒地(冬期強風のため雪が吹飛ばされ積雪を見ないが、植物も生育しない)の両極端な場合は別としても、他の植生に対しても、実測の結果から、植生だけから平均積雪深を推定することは無理のようである。

たとえば、はい松地帯では、たしかに積雪深ははい松の樹高を超えて積むことはないようであるが、はい松自体の樹高にも相当開きがある。小笠原博士の資料¹⁾によると、植生と平均積雪深の関係はつぎのようである。

雷鳥平東斜面(2 400 m)(1964.3.19)

| 基点からの水平距離 | 0 | 4 | 10 | 13 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 45 | 55 | 75 | 80 | 85 | 90 | 95 |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|
| 積雪深 | 625 | 390 | 203 | 127 | 155 | 140 | 143 | 306 | 657 | 637 | 710 | 364 | 107 | 121 | 74 | 69 |
| 植生 | 草地 | 灌木 | はい松 | 灌木 | 草付 | ガラ場 | 灌木 | | | | | | | | | |

(2) 植生と融雪

写真 T の方眼点を各植生別に写真 C(5 月 30 日撮影)を用いて残雪部と露出部に分けた結果は次表のようである。

| | | 個所数 | 写真 B で測定した平均積雪深(m) | 全測定個所数に対する百分率 |
|-----|-----|-----|--------------------|---------------|
| 荒地 | 残雪部 | 138 | 5.33 | 71.2 |
| | 露出部 | 56 | 1.32 | 28.2 |
| かん木 | 残雪部 | 154 | 4.58 | 54.1 |
| | 露出部 | 131 | 2.93 | 45.9 |
| 広葉樹 | 残雪部 | 33 | 4.58 | 61.1 |
| | 露出部 | 21 | 2.93 | 38.9 |

| | | | | |
|-------------|------------|------------|--------------|--------------|
| 針葉樹 | 残雪部 露出部 | 304 427 | 3.85 2.87 | 41.6 58.4 |
| はい松 +針葉樹 | 残雪部 露出部 | 50 153 | 2.85 2.24 | 24.6 75.4 |
| 草 地 | 残雪部 露出部 | 102 208 | 3.58 1.89 | 32.9 67.1 |
| は い 松 | 残雪部 露出部 | 21 137 | 3.55 1.68 | 13.3 86.7 |

残雪個所の調査については、積雪深と異なり、測定誤差を伴わないが残雪個所のうち、撮影直後に消雪するところ、また長期に残雪するところ、針葉樹林の中のように特別な条件で積雪は少なくとも融雪のおそいところ、など多くの問題点があり、植生生態と雪との関係については、なお多くの観測、測定の結果をまたねばならないようである。小笠原博士の資料¹⁾によるとつぎのような関係がある。

立山、剣の植生と平均消雪期

| 平均 消 雪 期 | 植 生 |
|----------------------|--------------------------------|
| 5月下旬～6月上旬 | (1) ハイマツ、コケモモ群叢 (2200～3000 m) |
| 6月中旬～6月下旬 | (2) オーシラビツ、ダケカンバ、ミヤマハンノキ、ナナカマド |
| 7月上旬～7月中旬 (梅雨の大雪) | (3) スゲ型高山草原および湿性お花畠 |
| 7月下旬～8月上旬 | (4) 硬性好雪植物社会 |

4. 積雪深の分布の分析方法

(1) 概 説

前節に述べたように、北アルプスのような山岳地帯における積雪の分布は、非常に多くの要素と関係し、非常に複雑である。ただ、冬期卓越した季節風があり、これが地形とからみ合って積雪分布を支配することは確かである。

この章では、地形、植生、風向などの要素と積雪深とを統計的な関連で処理したものである。流域全体の積雪、融雪の機構を知るには、個々の要因について調べるより、これらの要因を統計的な観点から処理する方がより妥当であると考えたからである。

そこで、この場合、つぎのような手順によって研究を進めた。

① 適当な標定点が選べること、基準点のあること、地理的な配置も考慮して全流域から図-6に示すように、A, C, F, H, J, K, M, Y の8地区を選び、このうちJ, H, K, M, Y の5地区を積雪深解析のために使い、残り A, C, F, 3地区をチェック用にした。

② 各地区ごとに20～30点を選び、前章の方法に準拠して、航空写真から積雪深と地形要素とを測定する。

③ ②の標本の中、H, J, K, M, Y に属するものに基づいて、積雪深と地形各要素との関係を定量的に解析する。

④ この解析結果を A, C, F の標本によりチェックする。

⑤ 全流域を500m間隔の方眼でおおい、各方眼点の地形要素を測定する。

⑥ ③の結果にもとづいて、⑤から各積雪深を推定する。

⑦ 積雪の水当量を仮定し、積雪深を積雪水量に換算する。

⑧ 各方眼点の積雪水量から全流域の積雪水量を算出する。

また、これに基づいて積雪分布図を作成する。

以上の方法にもとづいて解析を進めたが、積雪の水当量は航空写真からは測定することができないので、これに関しては別の研究題目とし、この論文では文献を参照してその値をきめた。

いうまでもなく、今度の解析はただ2カ年の測定結果だけにもとづいているので、結果の信ぴょう性を確かめるにはさらに多くの年次にわたって測定をくり返さなければならない。ここでは解析の基本的な進め方が問題の中心となっている。

(2) 降雪機構と積雪分布

黒部川上流域における積雪分布を考えるには、まず北アルプスにおける降雪機構について考究しなければならない。

福田博士によれば⁴⁾、北アルプスに豪雪をもたらす原因として“ジェット気流が発達して季節風が強まり、高層寒冷気流が浸入する”ことを指摘している。通俗的に考えると、モンスーンによって雪が運ばれるといつてよいであろう。また、同博士は山地の雪は地形による気流の上昇効果の外に偏向効果が顕著で、季節風の流れが、地形によって偏向効果を受けることを指摘し、北アルプスの積雪分布を地形解析する場合には、上述の卓越風向の知識を無視してはならない、ことを強調している。

また、四手井氏外⁵⁾の13カ年間にわたる山形県下における積雪調査の結果“大地形的にも局地形的にも、また、微地形的にも積雪分布は地形分布である”という結論に達した。とくに高山地帯では大暴風が吹きつるるので、積雪は微地形にきわめて敏感に支配され、細かにいえば小さい山小屋、一本の立木にさえ影響される。稜線の風上側は烈しい暴風に吹きはらわれて雪ではなく、露岩がみえるのに、風背面にはものすごい雪庇がかかるのも普通に見られる情景である。要するに、積雪分布を考えるに当っては、大地形、局地地形、微地形へと、測定の精度に応じて、配慮を進めることが必要となる。重要なことははげしい暴風のために分布が変わっているとはいっても、吹きはられた雪はどこかに偏在しているのであって、平均的にみれば必ず自然の法則にしたがうものである、ということである。

この研究ではモンスーンによって運ばれる雪と、上昇気流による降雪を主体に、これに卓越風による雪の移動

の影響、斜面勾配、植生による積雪の影響を修正量として、これらの要素の積雪量との関係を定量化することを試みた。そのため、

- (i) 航空写真上から雪面上にのこされた卓越風の痕跡を読みとり平均的な風の流線(流れる方向)を求めた。
- (ii) 流線に沿う地形を、3種の異なる波長をもつ地形の波によって表現し、それぞれの地形の波が積雪分布に与える影響を数量化した。

(3) 地形の分析

流域を間隔 d の方眼で区切り、各交点の標高を H とすると、つぎの関係が成り立つ。

$$H = (H - \bar{H}) + (\bar{H} - \bar{\bar{H}}) + (\bar{\bar{H}} - \bar{\bar{\bar{H}}}) + \bar{\bar{\bar{H}}} \quad \dots(4.1)$$

ただし、 \bar{H} は図-1 のように、間隔 d だけ離れた周囲の4格子点における H の平均値

\bar{H} は、同様に間隔 $2d$ の H の平均値
 $\bar{\bar{H}}$ は、同様に間隔 $4d$ の H の平均値

d を流域の地形で卓越している波長の最小のものの $1/4$ の長さにとれば、式(4.1)の第1項は、波長 $4d$ の地形、第2項は波長 $8d$ の地形、第3項は波長 $16d$ の地形、第4項は $4d, 8d, 16d$ の波長の地形が消去された地形で長波長の地形とみなすことができる。

(4) 上昇気流による降水量

(地形性降水強度の計算)⁶⁾

空気密度を ρ 、重力の加速度を g とすると、高度の増分 dz と気圧の増分 dP の間には、つぎの関係がある。

$$\rho dz = -\frac{dp}{g} \quad \dots(4.2)$$

いま気柱の質量が $d\rho/g \times 10^{-3}$ (kg) で比湿 q とするとき、この気柱のもつ水蒸気量 r (単位 g) は、

$$r = q \times \frac{dp}{g} \times 10^{-3} \quad \dots(4.3)$$

r の時間的变化は

$$\frac{dr}{dt} = \frac{dq}{dt} \times \frac{dp}{g} \times 10^{-3} \quad \dots(4.4)$$

気塊が水蒸気で飽和しているとき、温度が変われば飽和水蒸気量も変わる。いま温度が下って水蒸気が凝結し、これが降水量 dR_1 (mm) になると

$$dR_1 = -\frac{dq}{dt} \times \frac{dp}{g} \times 10^{-2} \quad \dots(4.5)$$

これは飽和比湿 q^* の時間的変化を知って、微少気圧 dP の気柱から遊離する水分 dR_1 を、mm 単位で求めめる式である。この際空気の水平移流については、流入量と流出量がほぼ等しいので、その影響が省略できると考えた。

気圧 P_1 (mb) から P_2 (mb) までの気柱からの降水量 R_1 は

$$R_1 = \int_{P_1}^{P_2} dR_1 = \int_{P_1}^{P_2} \frac{dq}{dt} \cdot \frac{dp}{g} \times 10^{-2} \quad \dots(4.6)$$

ところで湿潤断熱変化を考えた場合の、飽和比湿の変化量、すなわち水蒸気の凝結率を F^* とし、気塊の上昇の垂直速度を ω とすれば、

$$dq/dt = F^* \omega \quad \dots(4.7)$$

したがって式(4.6)は

$$R_1 = \frac{10^{-2}}{g} \int_{P_1}^{P_2} F^* \omega \, dP \quad \dots(4.8)$$

また任意の地点の高度を H 、地表風速を V 、大気の安定度を示すパラメーターを A とすると、地上における地形性上昇速度 ω_s は、つぎのように示されるであろう。

$$\omega_s = AV \cdot \nabla H \quad \dots(4.9)$$

気圧 P_1 (mb) の面と、 P_2 (mb) の面との間の上昇速度を考えると、式(4.1)を導入して、

$$\begin{aligned} \omega' = & V[a' \cdot \nabla (H - \bar{H}) + b' \cdot \nabla (\bar{H} - \bar{\bar{H}}) \\ & + c' \cdot \nabla (\bar{\bar{H}} - \bar{\bar{\bar{H}}}) + d' \cdot \nabla \bar{\bar{\bar{H}}}] \end{aligned} \quad \dots(4.10)$$

ただし、 a', b', c', d' は係数

したがって降水量 R_1 は、式(4.8)、(4.10)から、つぎのように表わされる。

$$\begin{aligned} R_1 = & \bar{F}^* V [a' \cdot \nabla (H - \bar{H}) b' \cdot \nabla (\bar{H} - \bar{\bar{H}}) \\ & + c' \cdot \nabla (\bar{\bar{H}} - \bar{\bar{\bar{H}}}) + d' \cdot \nabla \bar{\bar{\bar{H}}}] \\ = & a \cdot \nabla (H - \bar{H}) + b \cdot \nabla (\bar{H} - \bar{\bar{H}}) \\ & + c \cdot \nabla (\bar{\bar{H}} - \bar{\bar{\bar{H}}}) + d \cdot \nabla \bar{\bar{\bar{H}}} \end{aligned} \quad \dots(4.11)$$

ただし、 \bar{F}^* は気圧 P_1 から P_2 までの凝結率の平均値

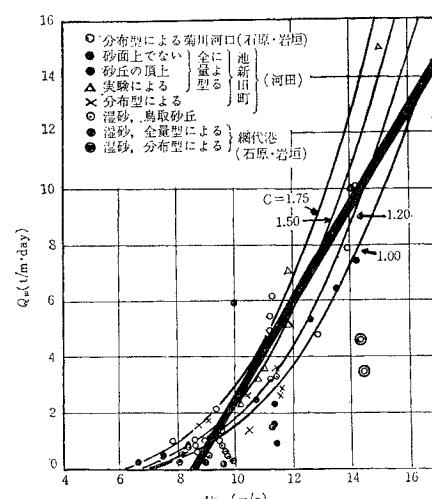
$$a = a' \bar{F}^* V, b, c, d$$
 についても同様

雪の場合には、降水量 R_1 を降雪量と考えればよい。

(5) 風による雪の移動

a) 積雪が風によって移動するときの、風速と飛雪量

図-2 飛雪量と風速との関係



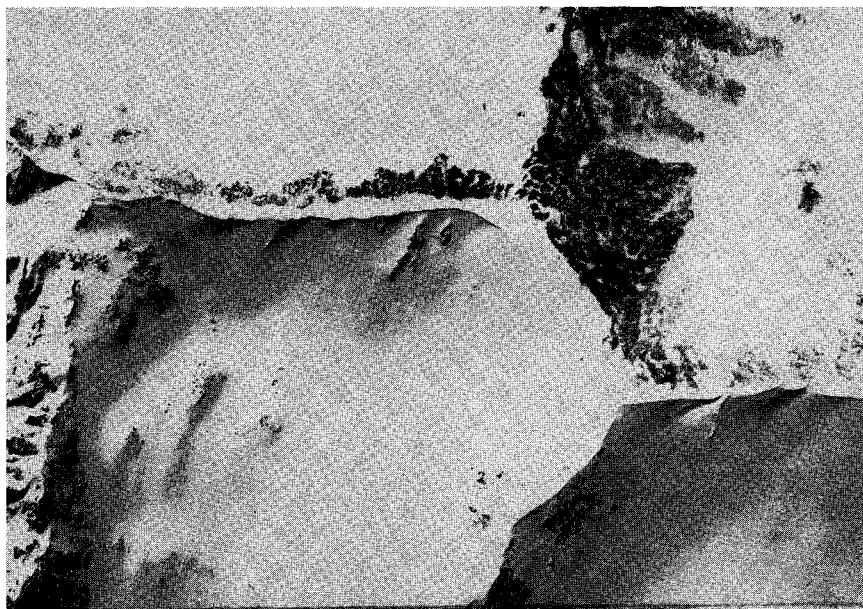


写真-1 航空写真から判読される雪庇

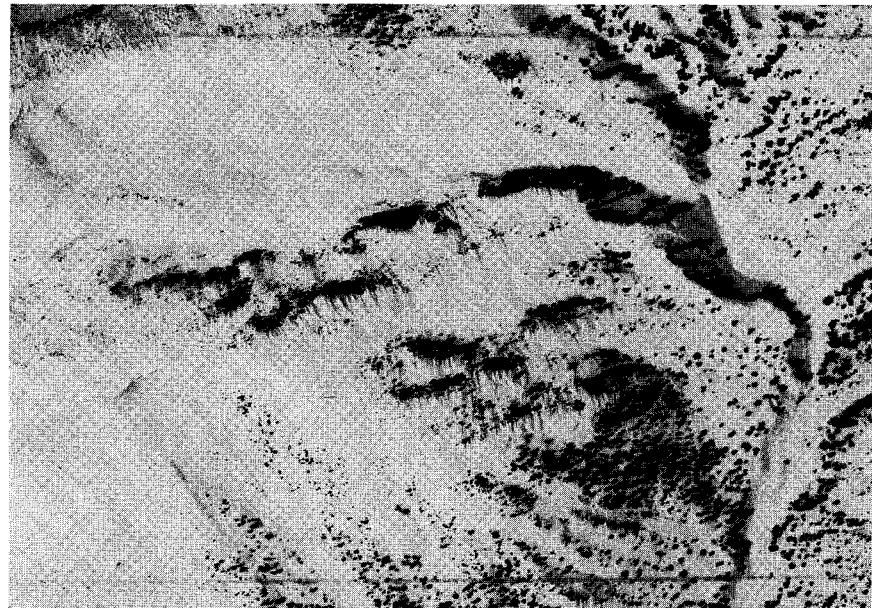
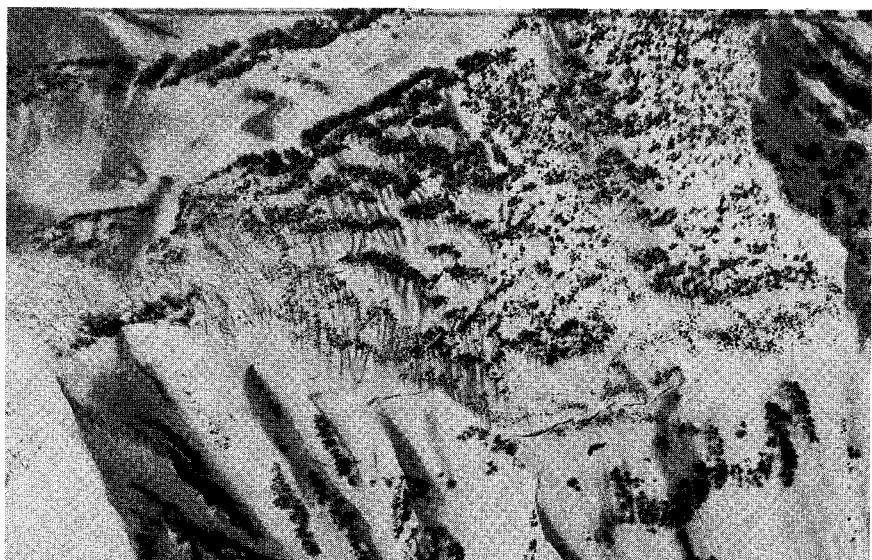


写真-2 雪面に残された風の痕跡

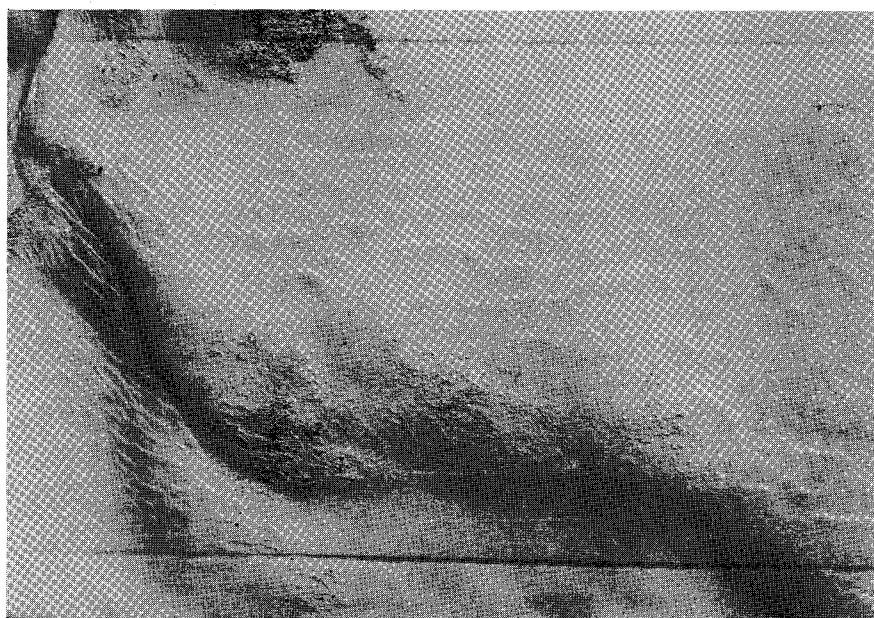


航空写真
(縮尺 1/50 000)

写真-3 雪面に残された雪紋 (地上の写真)



航 空 写 真 (縮尺 1/50 000)



筒をたいて研究されたことがあるが、その方法では狭い範囲の風向がわかるに過ぎない。これに反して航空写真を使用すると、広い地域の風向図が容易に作成される。

また山岳地帯における地形と局地風との関係について、いろいろな法則が述べられているが、今度の航空写真の解析から、つぎの点を確認することができた。

- イ. 谷筋に沿って進んだ風は、谷頭部の半漏斗形地形では、放射状に吹きあげる。
- ロ. 風が稜線をこえる時は、稜線と直角になる。
- ハ. 稜線をこえた風は、反対側の谷を吹きおりる。
- ニ. 高い稜線の風下側に渦乱流の影響がみられる。

b) 解析

- ① 各要因と積雪深との関係
- ② 一次計算に使用した要因

一次計算には、上昇気流に関係のある要因として、 $(H - \bar{H})_W, \dots, (\bar{H})_W$ 、日本海から運搬されてくる雪の状態をあらわす要因として平面座標 X, Y ほかに標高 H の計 7 個の要因を用い、式 (5.1) によって計算した。積雪深とこれら要因間の単相関係数は、表-1 であらわされる。

この表を見ると、積雪深との相関係数の絶対値が非常

図-6 標本抽出の概要

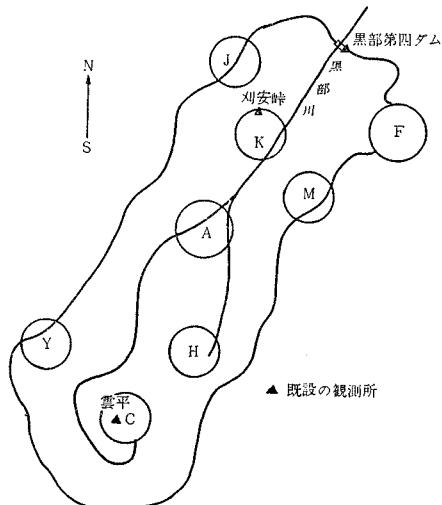


図-7 風向図

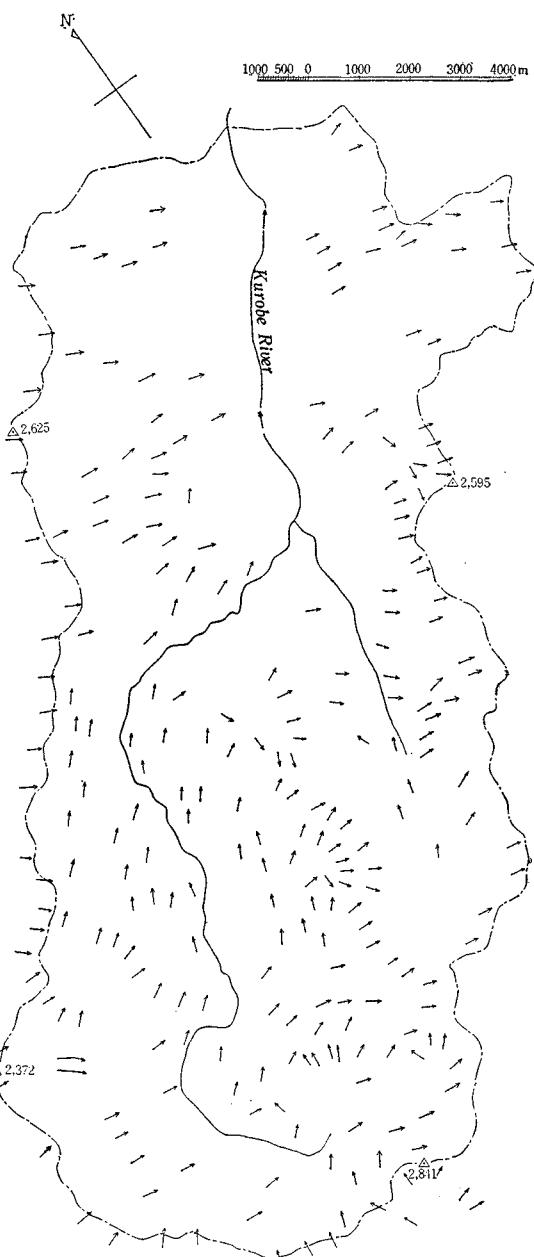


表-1 相関係数表 (1)

| | x | Y | H | $(H - \bar{H})_W$ | $(\bar{H} - \bar{\bar{H}})_W$ | $(\bar{\bar{H}} - \bar{\bar{\bar{H}}})_W$ | $\bar{\bar{H}}$ |
|---|---------|---------|---------|-------------------|-------------------------------|---|-----------------|
| Y | 0.5698 | | | | | | |
| H | -0.2839 | -0.3389 | | | | | |
| $(H - \bar{H})_W$ | -0.0948 | -0.3684 | 0.5824 | | | | |
| $(\bar{H} - \bar{\bar{H}})_W$ | -0.7122 | 0.0768 | 0.0612 | -0.1657 | | | |
| $(\bar{\bar{H}} - \bar{\bar{\bar{H}}})_W$ | 0.0534 | 0.0588 | 0.3564 | -0.0218 | -0.0811 | | |
| $\bar{\bar{H}}_W$ | 0.9669 | 0.5248 | -0.3872 | -0.1525 | -0.7101 | 0.0539 | |
| R | -0.0563 | -0.1758 | 0.0483 | 0.1371 | 0.0044 | -0.0710 | -0.0079 |

に小さいので、降雪の分布と積雪の分布は、ほとんど関連性がないということができよう。

⑥ 二次計算に使用した要因

二次計算は、斜面の南向きの勾配 θ 、風の流線に沿って分析した地形の波 λ_1 (波長 1000 m), λ_2 (波長 2000 m), λ_3 (波長 4000 m) の計4個の要因を使用して、式(5.2)により植生別に行なった。一次計算の残差と、これら要因相互の単相関係数は、表-2～表-7 のとおりである。

これらの表の中で、相関係数の絶対値の最も大きいの

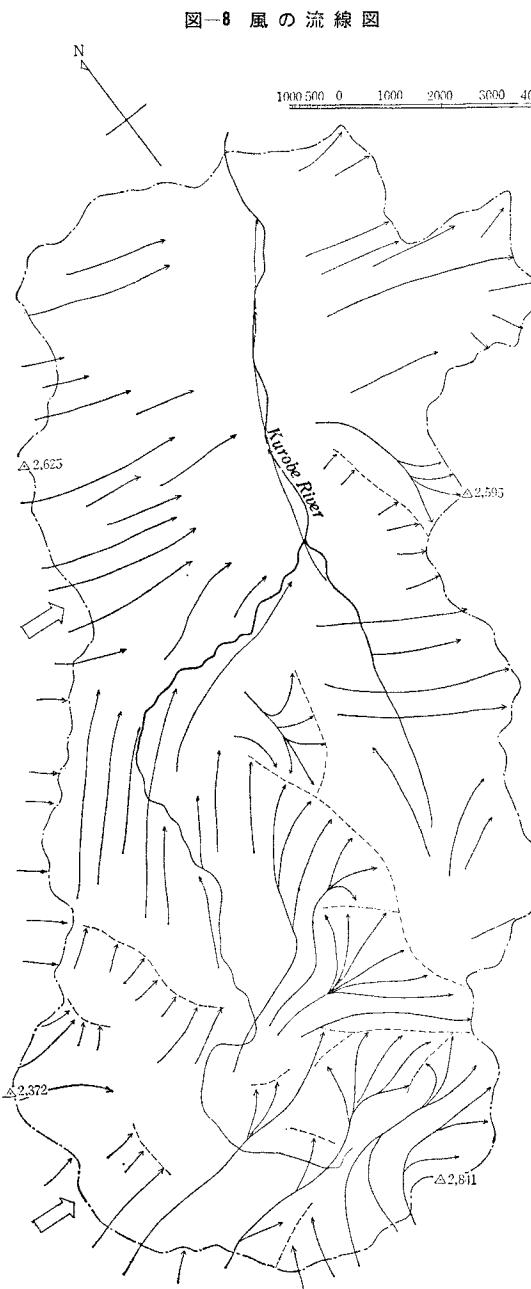


図-8 風の流線図

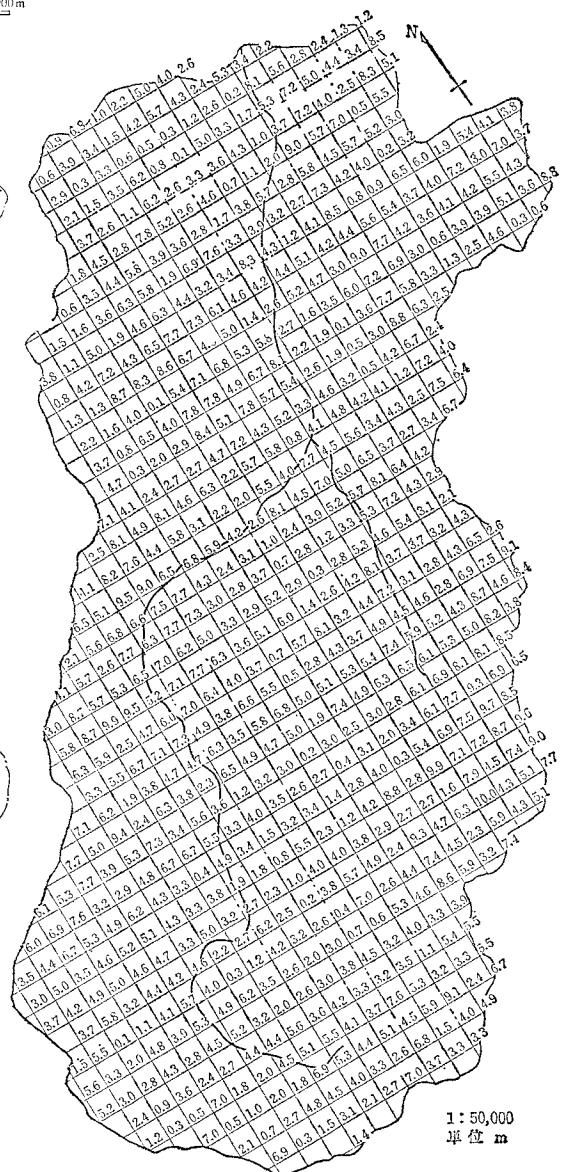
表-2 相関係数(2)(針葉樹)

| | θ | λ_1 | λ_2 | λ_3 |
|-------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| λ_1 | 0.0992 | | | |
| λ_2 | -0.3023 | 0.2451 | | |
| λ_3 | -0.4576 | 0.3115 | 0.2400 | |
| ΔR | 0.3047 | -0.1722 | -0.5847 | -0.2950 |

表-3 相関係数(3)(広葉樹)

| | θ | λ_1 | λ_2 | λ_3 |
|-------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| λ_1 | -0.2434 | | | |
| λ_2 | -0.3631 | 0.3037 | | |
| λ_3 | -0.2417 | 0.3420 | 0.4769 | |
| ΔR | 0.3839 | -0.1738 | -0.5908 | 0.1126 |

図-9 積雪深一覧図



1:50,000
単位 m

表-4 相関係数(4)(かん木)

| | θ | λ_1 | λ_2 | λ_3 |
|-------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| λ_1 | -0.1554 | | | |
| λ_2 | 0.0563 | 0.1265 | | |
| λ_3 | 0.2084 | 0.0399 | 0.7510 | |
| ΔR | -0.0656 | 0.0262 | -0.8488 | -0.3880 |

表-5 相関係数(5)(はい松)

| | θ | λ_1 | λ_2 | λ_3 |
|-------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| λ_1 | -0.2193 | | | |
| λ_2 | -0.2320 | 0.2237 | | |
| λ_3 | 0.2144 | -0.0786 | 0.5267 | |
| ΔR | 0.2277 | 0.7041 | 0.1555 | -0.0688 |

図-10 等積雪深図

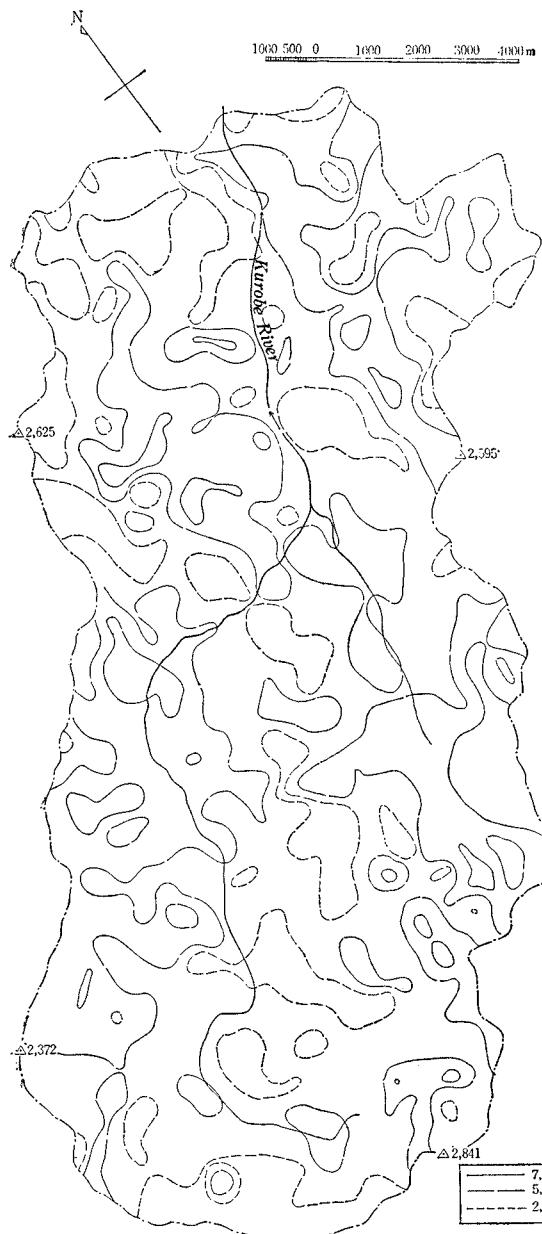


表-6 相関係数(6)(荒地)

| | θ | λ_1 | λ_2 | λ_3 |
|-------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| λ_1 | -0.7294 | | | |
| λ_2 | -0.6516 | 0.7512 | | |
| λ_3 | -0.5506 | 0.6715 | | |
| ΔR | 0.6129 | -0.7182 | -0.9219 | -0.6955 |

表-7 相関係数(7)(草地)

| | θ | λ_1 | λ_2 | λ_3 |
|-------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| λ_1 | -0.4311 | | | |
| λ_2 | -0.5829 | 0.3821 | | |
| λ_3 | 0.0937 | 0.5330 | 0.5372 | |
| ΔR | 0.7810 | -0.2508 | -0.8899 | -0.1927 |

表-8

| 点名 | 積雪深 | | 誤差 | 植生 |
|-----|------|-----|------|------|
| | 測定値 | 推定値 | | |
| A 3 | (m) | (m) | (m) | 葉樹 |
| 7 | 3.0 | 4.1 | 1.1 | ク |
| 8 | 4.6 | 3.3 | -1.3 | ク |
| 9 | 3.4 | 2.9 | -0.5 | ク |
| 14 | 2.8 | 3.9 | 1.1 | 葉樹 |
| 19 | 6.0 | 5.2 | -0.8 | 広葉樹 |
| 26 | 2.5 | 2.4 | -0.1 | 葉樹 |
| 30 | 4.0 | 4.0 | 0 | ク |
| 39 | 1.8 | 2.9 | -1.1 | ク |
| 40 | 4.2 | 3.2 | -1.0 | ク |
| 45 | 2.5 | 2.0 | 0.5 | ク |
| 46 | 1.9 | 2.8 | 0.9 | はい松 |
| 55 | 5.9 | 7.6 | 1.7 | ク |
| 58 | 2.0 | 2.6 | 0.6 | 葉樹 |
| 60 | 2.1 | 2.5 | 0.4 | 針葉樹 |
| C 1 | 4.9 | 4.0 | -0.9 | はい松 |
| 3 | 2.8 | 2.7 | -0.1 | はい松 |
| 4 | 2.8 | 2.7 | 0 | ク |
| 6 | 2.5 | 2.6 | 0.1 | ク |
| 8 | 3.2 | 4.2 | 1.0 | ク |
| 10 | 3.4 | 4.0 | 0.6 | ク |
| 11 | 3.3 | 3.1 | -0.2 | ク |
| 21 | 4.7 | 4.6 | -0.1 | ク |
| 23 | 2.2 | 2.7 | 0.5 | ク |
| 26 | 1.8 | 2.3 | 0.5 | ク |
| 27 | 3.2 | 3.3 | 0.1 | ク |
| 30 | 4.6 | 3.8 | -0.8 | 葉樹 |
| 29 | 4.0 | 3.1 | -0.9 | 広葉樹 |
| F 2 | 2.1 | 2.6 | 0.5 | 樹木 |
| 8 | 2.2 | 2.8 | 0.6 | 樹木 |
| 15 | 2.4 | 2.6 | 0.2 | はい葉樹 |
| 18 | 3.5 | 4.5 | 1.0 | 樹木 |
| 19 | 3.7 | 2.9 | -0.8 | 樹木 |
| 21 | 2.7 | 2.8 | 0.1 | 草 |
| 24 | 4.8 | 4.7 | -0.1 | 樹木 |
| 27 | 6.9 | 8.8 | 1.9 | 樹木 |
| 28 | 5.2 | 7.1 | 1.9 | 樹木 |
| 35 | 3.2 | 3.5 | 0.3 | 草 |
| 39 | 3.4 | 4.7 | 1.3 | 広葉樹 |
| 40 | 10.4 | 8.0 | -2.4 | はい葉樹 |
| | 6.3 | 5.5 | -0.8 | ク |

は λ_2 である。このことから、黒部川流域での局地風に対する卓越した地形の波長は 2 km であるということができよう。

② 積雪深推定の精度

図-6 に示す F,A,C 3 個のブロックから、計 40 個の標本を抽出して、本研究の方式で推定した積雪深と、

直接航空写真から測定した積雪深とを比較した。その状況は表-8 のとおりである。表-8 を積雪深の階級別に精度を分析すると、表-9 が得られる。まだダム サイト、刈安峠 2 個の観測所における実測値と、本研究の方式で求めた推定値を比較すると、表-10 のようになつた。

表-9 精度分析表

| 積雪深 | 0~2.5 m | 2.5~5.0 m | 5.0 m~ | 全区間 |
|------------------|---------|-----------|--------|--------|
| σ | 0.57 m | 0.75 m | 1.68 m | 0.91 m |
| \bar{R} | 2.56 | 3.65 | 7.20 | 3.85 |
| σ/\bar{R} | 22% | 21% | 23% | 23% |
| σ' | 0.71 | 0.86 | 1.73 | 1.00 |

ただし、 σ は誤差の標準偏差、 \bar{R} は平均積雪深、 σ' は航空写真的誤差を意味した。

表-10 推定値と実測値との比較対照表

| | 実測値 | 推定値 | 誤差 |
|--------|-----------------|---------------|-----------------|
| ダム サイト | 2.11m (5.06) | 2.46m 4.08 | +0.36m -0.98 |
| 刈安峠 | | | |

ただし、刈安峠の積雪深は積雪水量から水当量を 0.32 として換算した。

(3) 全流域における積雪量の推定

全流域を 500 m 間隔の方眼でおおい、その交点における積雪深を計算すると、図-9 のようになつた。これから 2.5 m 間隔の等積雪深曲線を画いたのが、図-10 である。

これらの数値を使って、流域の全積雪量を計算すると、 $7805 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、水等量を 0.32 とすると $2498 \times 10^8 \text{トン}$ となつた。

(2) 1967 年に行なつた実験

a) 解析の基礎

最大積雪時の写真として、1967 年 3 月 30 日（カメラ R.M.K. 15/23）撮影の航空写真を使用するほか、1964 年の場合と同じ方法によって、解析を行なつた。

b) 解析

1964 年の実験では、要因として「南向き斜面の勾配」を考えたが、この実験ではこれにかわって、風の流線上にある 250 m 離れた 2 地点間の勾配を取り入れた。

各要因と積雪深との相関関係については、両実験とも

表-11 積雪深推定値と実測値の比較対照表

| | 実測値 | 推定値 | 誤差 |
|--------|-----------------|---------------|-----------------|
| ダム サイト | 1.63m (5.43) | 1.25m 4.61 | -0.38m -0.82 |
| 刈安峠 | | | |
| 雲平 | (4.77) | 4.83 | +0.06 |

ただし () 内の数値は水当量を 0.3 として積雪水量から換算した。

大体同じ値を示した。その結果にもとづいて、積雪観測所における実測値と推定値を比較すると、表-11 のようになつた。推定値の精度は、1964 年の場合とよく一致している。

(3) 集水域における平均積雪深の推定方法

現在集水域内には、ダム サイト、刈安峠、雲平の 3 カ所に、積雪深測定のための観測所が、設けられてい

る。これらを代表点として使用するためには、6.(2) の条件が満足されなければならないが、刈安峠は特殊な地形であり、表-11 のように、積雪深推定の精度がおちている。このように特殊な地形のところに、代表点がある場合には、とくに地形の波を修正することが必要である。表-12、式 (7.1) には、このようにして修正した値を使用した。

6.(2), 6.(3) の理論にもとづいて、3 個の観測所の積雪深と、集水域の平均積雪深との関係を求める式 (7.1) で表わされる。

$$\begin{aligned}\bar{R} &= 0.42 \times R_1 + 0.16 \times R_2 + 0.35 \times R_3 \\ \bar{R} &= 0.40 \times R_1 + 0.66 \times R_2 \\ \bar{R} &= 0.48 \times R_1 + 0.72 \times R_3\end{aligned}\quad \left. \right\} \quad (7.1)$$

ただし、 \bar{R} , R_1 , R_2 , R_3 はそれぞれ平均積雪深、ダム サイト、刈安峠、雲平観測所の観測値 各観測所の積雪深と平均積雪深との要因間の相関は、表-2 のようになり、高い相関関係が得られた。

表-12 観測所の積雪深と平均積雪深との要因間の相関係数

| ダム サイト | 刈安峠 | 雲平 |
|--------|--------|--------|
| 0.9620 | 0.9702 | 0.9587 |

式 (7.1) を使用して、各観測所の観測値から求めた値と、各格子点の積雪深を平均して求めた値とを比較すると、表-13 のようになり、年次による変動も少なく、精度も一応満足できる状態である。

表-13 平均積雪深推定値の比較表

| | 代表点による法 | | 格子点による法 |
|--------|---------------|-------|---------|
| | 使用した観測所 | 平均積雪深 | |
| 1967 年 | ダム サイト、刈安峠、雲平 | 4.18m | 4.06m |
| | ダム サイト、刈安峠 | 4.24 | |
| | ダム サイト、雲平 | 4.22 | |
| 1964 年 | ダム サイト、刈安峠 | 4.22 | 4.27 |

謝辞 この研究は、文部省科学試験研究費によって、行なつたものである。なお関西電力 KK、国際航業 KK に多大の援助を受けた。また、東京大学大学院 松長紘君にはいろいろ手伝って貰った。ここに厚く謝意を表する。

参考文献

- Ogasahara, K.: Snow Survey of Mt Tateyama and Mt. Tsurugi of Japanese North Alps The Synthetic Science Research Organization Toyama University, 1964.
- Zinny, Th : "Die Bestimmung der Schnee hohe verteilung auf photogrammetrischem Wege" Publication No. 39 of International Association of Scientific Hydrology, 1954.
- Cooper, F. : "Snow Cover Measurement" Photogrammetric Engineering, July 1965.
- 福田: 雪水 22, No. 4 24, No. 2.
- 四手井他: 山形県の雪に関する気候地理学的研究.
- 斎藤直輔: 雨量予報序論(気象協会), 1957.

(1967.8.16 受付)