

# 雪圧による林木の雪害

四手井 綱 英<sup>(1)</sup>

## 目 次

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 緒 言 .....                     | 1  |
| 第Ⅰ章 総 説 .....                 | 3  |
| 第1節 多雪地の森林および林木 .....         | 3  |
| 第2節 樹木の機械的雪害（物理的） .....       | 7  |
| 総 括 .....                     | 10 |
| 第Ⅱ章 積雪の強さおよび力 .....           | 11 |
| 第1節 雪圧に関係ある積雪の物理的，力学的性質 ..... | 11 |
| 第2節 雪圧に関係する積雪の地理的，地形的分布 ..... | 25 |
| 第3節 雪圧に関係する気象気候の影響 .....      | 29 |
| 第4節 雪圧の分類 .....               | 31 |
| 総 括 .....                     | 31 |
| 第Ⅲ章 雪圧各論 .....                | 33 |
| 第1節 冠雪荷重 .....                | 33 |
| 第2節 沈降力 .....                 | 42 |
| 第3節 匍行力 .....                 | 59 |
| 総 括 .....                     | 64 |
| 第Ⅳ章 林木の雪圧被害防除方法 .....         | 65 |
| 第1節 機械的雪害防除の基礎 .....          | 65 |
| 第2節 育林方法による雪害防除 .....         | 65 |
| 第3節 造林個所の選定による雪害防除法 .....     | 72 |
| 第4節 多雪地の雪圧にたえる有用樹種 .....      | 73 |
| 総 括 .....                     | 75 |
| 結 言 .....                     | 76 |
| 総 括 .....                     | 77 |
| 引用参考文献 .....                  | 80 |
| Résumé .....                  | 83 |

(1) 防災部気象災害科長・雪害研究室長・農学博士

**Tsunahide SHIDEI: Studies on the Damages on Forest Tree  
by Snow Pressures**

*With 10 Plates*

**CONTENTS**

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction .....                                                                               | 1  |
| Chapter I. General Remarks. ....                                                                 | 3  |
| § 1. Forest and tree in snowy region. ....                                                       | 3  |
| § 2. Mechanical damages of tree by snow. ....                                                    | 7  |
| Summary .....                                                                                    | 10 |
| Chapter II. Strength and Force of Deposited Snow. ....                                           | 11 |
| § 1. Influences of physical characters of snow on snow pressure. ....                            | 11 |
| § 2. Influences of geographical and topographical distribution of<br>snow on snow pressure. .... | 25 |
| § 3. Influences of climate on snow pressure. ....                                                | 29 |
| § 4. Classification of snow pressure. ....                                                       | 31 |
| Summary .....                                                                                    | 31 |
| Chapter III. Special Treaties on Snow Pressures. ....                                            | 33 |
| § 1. Crowned snow weight. ....                                                                   | 33 |
| § 2. Settling force. ....                                                                        | 42 |
| § 3. Creeping pressure. ....                                                                     | 59 |
| Summary .....                                                                                    | 64 |
| Chapter IV. Prevention Methods of Mechanical Snow Damages on<br>Forest Trees. ....               | 65 |
| § 1. Fundamental principles of the prevention methods of forest<br>damages by snow. ....         | 65 |
| § 2. Prevention by planting and tending methods. ....                                            | 65 |
| § 3. Prevention by planting location. ....                                                       | 72 |
| § 4. Adaptable tree species against snow damages. ....                                           | 73 |
| Summary .....                                                                                    | 75 |
| Conclusion .....                                                                                 | 76 |
| References .....                                                                                 | 80 |
| Résumé .....                                                                                     | 83 |

## 緒 言

日本の国土は過半が積雪地帯にあり、僅かに、九州、四国、南海、東海、関東の一部の表日本が冬季積雪からまぬがれているだけである。それらの地帯でも年々多少の降積雪をみるのであつて、山岳林の多い本邦では、森林の大部分がそれら積雪地帯にあり、青森のヒバ、秋田のスギ、木曽のヒノキ等の美林も裏日本気候といわれる多雪地帯内あるいはその周辺にあり、近時奥地未開発林として世人の注目をひいている、北海道の針葉樹林、内地のブナ林の主要部は多雪地帯にあるのであるから、林業に従事し、林学の研究にたずさわるわれわれは、従前にまして立地因子としての積雪を重要視しなければならない段階に立ちいたつているといわざるをえない。また、裏日本地帯の多雪地方では、従来、積雪の影響をほとんど考慮することなく、暖地帯同様の伐採、更新、撫育等の作業を行い、あるいは樹種、品種等の積雪に対する適用を度外視して林業を行つてきた結果、各所に雪害による不成績林分やなだれ地等を生じていることも、積雪の森林、林木への影響の研究の必要性を示すものといえよう。

林学および林業技術的立場からいえば、森林および樹木を対象とした積雪の研究はつぎの三課題に大別できるであろう。

1. 積雪の森林および樹木への影響
2. 森林および樹木の積雪への影響
3. 水資源としての積雪の役割

本報告は三者中の「積雪の森林および樹木への影響」の一部をなしている。

「積雪の森林および樹木への影響」はさらにつぎのごとく区分しうるであろう。

- a. 積雪の森林および樹木に対する保護作用（生理的保護作用、物理的保護作用）
- b. 積雪の森林および樹木に対する害作用（生理的害作用、物理的害作用）

積雪の害作用中物理的害作用、すなわち「機械的雪害」は主として「雪圧」により起るものであつて、この報告は、「雪圧による材木の雪害」として、積雪の機械的、物理的な力による加害作用を取り扱つた。

本報告はまた現在まで筆者および筆者が共同研究者と共に発表してきた、下記研究報告の総括であるが、「雪圧」中「なだれ」は特に動力学的雪圧であるから本報告から除外し、稿を改めて発表することにしたので、本報告は静圧的雪害である「冠雪」および「沈降力」「匍行力」による雪害のみに限定する。

幼令林の雪害 林試集報 58 号 積雪の沈降力 林試報 44 号

冠雪の研究 林試報 54 号

林学における積雪の研究は僅々十数年前より開始されたものであつて、平田徳太郎博士を中心とする、林業試験場、森林測候所々員諸氏の研究が大半を占め、その研究の進歩にはめざましいものがあり、林学としての積雪の研究のみならず、基礎的な積雪学の研究は貴重な幾多の貢献をなしている。

しかしながら、積雪の理学的性質はすこぶる複雑で、粉体ないし塑性体として取り扱わねばならぬため、いまだ積雪の諸性質は充分に解明される段階にまでは到つていない。

林学の領域においても、従来は主として積雪の保護作用、利点が強調され、害作用については、造林学書や保護学書に常識的な記述があるにすぎず、雪圧の発生機構等の基礎的諸問題はほとんど解明されていなかったといつても過言ではなからう。

筆者は昭和22年(1947)以来現在まで6冬季、林業試験場における積雪研究を平田博士、玉手三葉寿技師、故 清野要博士、故 天野一郎技師等の跡を継いで担当し、研究室員とともに林学としての積雪研究のみならず、基礎的積雪学の研究をそのかたわら行ってきたのであるが、日なお浅いうえ、基礎的知識の不充分なため、本報告の主題である「雪圧」についても、まだ充分な知識をうるまでには到っており、今後さらに考究さるべき幾多のものを残しているが、前記のように積雪学自体も初期の段階を脱しておらぬのであるから、一応林業、林学として今後の研究の指針をあたえるため、林業としての積雪学の序論という意味で、この報告を草した。

もし多少でも林業並びに林学ならびに今後の積雪学の進歩に貢献することができれば筆者のこのうえない幸である。

現在林業試験場の雪害研究は、本場および新潟県十日町の試験地、山形県及位村の秋田支場釜淵分場に研究室をもち、この三者が密接に協力して研究を行つている。本研究はこれら各地に駐在する諸氏の一致した努力、援助に負うものであつて、特に十日町試験地主任高橋喜平技官、釜淵分場高橋敏男技官は私の共同研究者として共に深雪中で研究に従事してきたところである。

ここに、平田博士をはじめ多くの雪害研究の諸先輩に敬意を表し、これら直接にこの研究に助力せられた諸氏に謝意を表したい。

元林業試験場長太田勇次郎、吉田正雄、長谷川孝三、現場長大政正隆の諸氏、元防災部長飯塚肇、玉手三葉寿、内藤信行、現部長荻原貞夫の諸氏は筆者に本研究を遂行するに必要な予算、研究員をあたえられるとともに、研究の自由と適時適確な指導をあたえられたことに對し厚くお礼を申し上げたいと思う。

# 第 I 章 総 説

## 第 1 節 多雪地帯の森林および林木

### 1. 林内外の積雪

積雪地帯では冬季降雪がはじまり、気温が低下し降雪の頻度が増すと遂に「根雪」となり、以後数カ月間は「積雪」の形態で、地上および地物上に固形降水が残留することになる。

積雪は普通、地温により接地面より、気温、日射により雪表面より融解し、また蒸発昇華して徐々に消失するが、春季いわゆる融雪期になり気温が上昇し、日射量が増すまでは、その消失量はごく僅かであつて、厳冬季間の地温による接地面での融解は比較的温暖な地方でも日量 1.5 mm を越えない。また、雪表面からの蒸発、昇華による空中への消失量も一冬季を通じての積雪量を左右するほど大きな量にはならない。釜淵で測定した結果では一冬期間約 800 mm の総降水量に対し僅かに 15 mm 内外が蒸発昇華したにすぎなかつたり。すなわち、この場合消失量は総降水量の約 2% にすぎない。雪面蒸発は、接雪面の水蒸気張力が雪面の水蒸気張力よりも低い場合にのみ行われ、逆の場合はむしろ雪面へ水蒸気の凝縮が行われるから、一般に雪面温度が外気温より低いという条件にある積雪地帯では、雪面蒸発量は著しく少なく、特に融雪期には空中水分は雪面に凝縮して、積雪水量を増加する場合が多い。ゆえに 1000 mm 以上もの固形降水量をもつ多雪地帯では雪面よりの消失は、融解して雪中に流下し、地表に到達するもの以外は無視してもよいであろう。以前に多量の雪面蒸発量を報告したものもあるが<sup>2)</sup>、これははなはだ疑わしい。

要するに融雪期にはいるまでの冬期間は、雪の形態で降つた降水の主要部分は積雪という形で地表あるいは地物上に残留すると考えてもよいのである。

なお、一冬期間の降水量中の降雪量の割合は、場所によつて異なるが、新潟県十日町方面のいわゆる豪雪地帯では 83% で 1167 mm に達し<sup>3)</sup> (14 カ年平均)、同じ裏日本でも小雪地帯である秋田県鷹巣町では 66% で 336 mm にすぎない<sup>4)</sup> (9 カ年平均)。

降雪はこうにして地表あるいは地物上に残留するので、根雪になつて、ちくじ積雪が増加してゆくと地上にある樹木等の地物はだんだん積雪中に埋まつてゆくことになる。また、それらの地物は、その形態、大いさに応じて、降雪を捕捉し、いわゆる「着雪」あるいは「冠雪」といわれる形で、積雪におおわれるに到る。

積雪は後述するように、雪片が地上に到達すると同時に、あるいはその直前より昇華融解により、あるいは風等による機械的破壊により、さらに下層の積雪は自重により圧縮される等の作用をうけて、徐々にときには急激にその粒子形態および構造、組織をかえてゆくので、積雪の密度は大となる方向に移動してゆく。したがつて、積雪深は、積る後から減じてゆく。この現象を「沈降」といつているが、積雪は沈降により「沈降力」といわれる一種の雪圧を生じ、ある深さに埋没した樹木等の地物はこの力により下方に押し下げられる。傾斜地では積雪は斜面に沿つて下方に移動し、いわゆる「匍行」運動を行うため、これにより生ずる「匍行力」によつてもこれに抵抗する地物は引き下げられる方向に雪圧をうける。

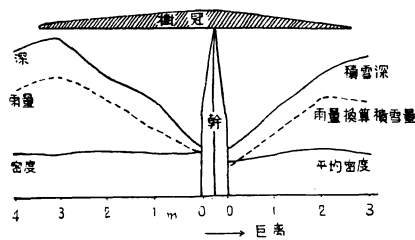
したがつて、積雪の増加とともに樹木等の埋雪した地物は、沈降、匍行による雪圧をうけ、この機械的な外力により、一そう埋雪を助長せられ、多雪地では、この外力に降伏して終には折損、破壊せられるに

たる。

また、上記の地物上の着冠雪は、地物に重力として作用し、その量が地物の強度を越えると、そのみでも地物が折損することとなり、樹木のような屈曲するものでは、冠雪重による樹幹の彎曲により、一層埋雪を早からしめられるのである。

積雪はこのように、地物に種々な雪圧を作用する一方、地表への落達を地物によりさえぎられ、不均一な積り方をするほか、地物の存在により、その後の変態経過をも変化せしめられるのであるが、次に二、三の例をひいてその状況を説明する。

樹冠の密なたとえば、常緑の針葉樹のような樹木の場合は樹冠への冠雪による降雪保留量が大きいため、樹冠下の積雪はほとんど全部遮断せられるから、幹を中心としたスリ鉢状の凹部が雪面にできる。そ



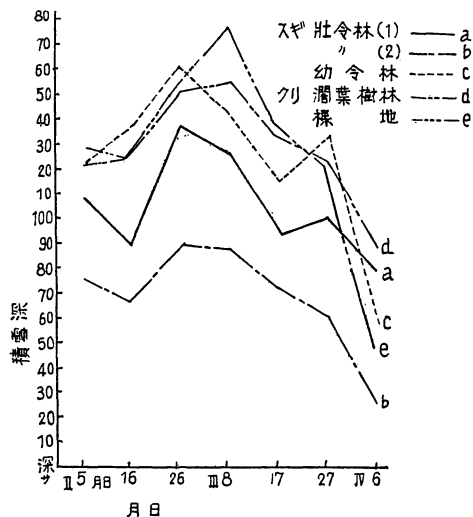
第1図 樹冠下の積雪の変化の一例  
(中野徳調査)

の結果、樹木が疎立するような所では、雪面は多数の起伏のあるきわめて複雑な形を呈してくる。これは降雪が続けば続くほど益々助長せられてゆく。

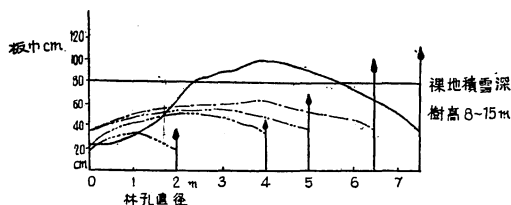
第1図はその一例であつて、樹冠縁の直下よりやや内側に積雪深、積雪水量ともに極大の個所ができるのは、樹冠が冠雪重量でたわみ、そのため冠雪がこの付近に最も多く落下するからで、それより幹に近い所では積雪深、積雪水量(雨量換算積雪量)ともに急減している。

この結果、林冠の密な林分では、林冠の密度に応じて、林冠の降雪捕捉度に応じて林内の積雪は裸地より減少することになる。

第2図<sup>6)</sup>は樹種や林令の差による林内積雪深の変化の一例である。スギ壮令林のごとき林冠の密な林分では冠雪量が大きくなり林内積雪量は減少するが、落葉広葉樹林のごとき林冠の疎なものでは冠雪がほとんど発達せず、裸地と林内の積雪量には差が生じない。本図では、スギ幼令林で、裸地よりも積雪量が多い場合があるが、これは樹高が低く、樹冠の大部分が積雪下に埋没するため、雪面上にできた林冠の凹凸が、地表附近の気流を乱し、吹溜りを作るためではないかと思われる。この現象は各所で見られ、幼令林の雪害を助長する一因となるようである。



第2図 林内の積雪深の変化 (釜淵)



第3図 林孔の大きさと積雪深の変化 (釜淵)

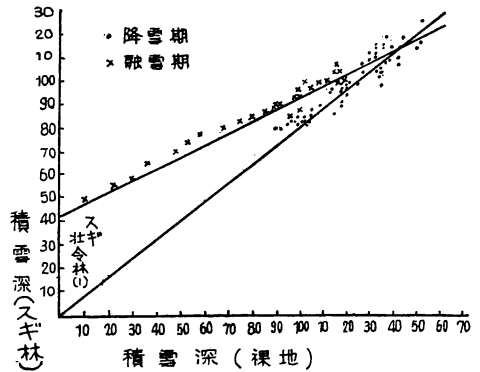
樹冠下の積雪は以上のごとく一般に裸地に比し、その量を減ずるが、林内孔隙あるいは空地は冠雪の落下および林冠の不齊による気流の乱れが作用するためか裸地より、積雪量を増加することがある。第3図<sup>7)</sup>はその一例であり、樹高に対し、孔隙の大きいがある範囲で大きくな

ると積雪深が増加してくる傾向がうかがえる。同様な吹溜りは、風下面の林縁、地形的な凹所にも起り、これもまた雪圧による樹木の雪害を増加する一因となる。

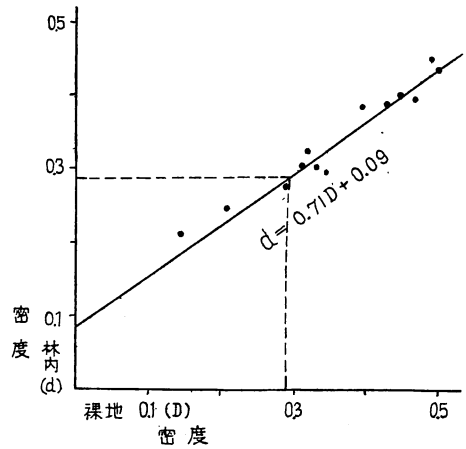
林内はまた気温および日射が裸地とは異なるため積雪の変態、融解に差を生じる。その結果、第4図のように融雪期の林内外の積雪深の変化を見ると林内の積雪は、裸地より長く残り、また雪の密度も、降雪の初期にはむしろ林内の方が大であるが、終雪期に近づいて、積雪密度が大となると、逆に林外の方が大となるのである。第5図はその例で、密度の小さい場合は林内の方が大で、密度が増すと林外の方が大となることを示している。

これらの現象も樹木の埋雪期間を長くし、また雪の強度に影響して森林の雪害を増加する一因子となる。

樹木や森林があることにより、積雪にはこのようないろいろな変化が生じるが、降雪量はこれらの地物の存在により左右されることがすくないから、ある広さ以上の地域では裸地も林地と同様の降雪量があることになる。ゆえに樹木や森林の積雪に関する影響は降雪量に変化を与えるのではなく、その積り方や性質を局所的に不齊にするということになり、ある広さの森林を考えた場合は、そこに積る雪の総量あるいは平均積雪量には変化がほとんどないはずである。第1表はA



第4図 林内外の積雪深の関係（釜淵）



第5図 林内外の積雪密度の関係（スギ・杉・林）（釜淵）

沢、針・広混交林、林令約40年の有林地3.2ha、B沢、皆伐跡地2.5haの両沢の平均積雪深、平均密度、平均積雪水量を10日ごとに測定した結果で、測定方法は地域内に多数の測点を取り、その資料より等積雪深線、等積雪密度線等を引き、それから算出したものであるが、森林の有無による平均積雪量の差はいずれの場合も僅少である。この事例によつても、森林等の地物は、積雪を局所的に不齊にし、ある

第1表 有、無林地の積雪（釜淵）

| 調査月日  | A 沢（有林） |      |      | B 沢（無林） |      |      |
|-------|---------|------|------|---------|------|------|
|       | 積雪深     | 密度   | 積雪水量 | 積雪深     | 密度   | 積雪水量 |
| 月 日   | cm      |      | mm   | cm      |      | mm   |
| I {   | 10      | 0.12 | 70   | 65      | 0.12 | 76   |
|       | 20      | 0.20 | 165  | 96      | 0.14 | 135  |
|       | 28      | 0.34 | 174  | 55      | 0.33 | 181  |
| II {  | 9       | 0.32 | 156  | 50      | 0.33 | 162  |
|       | 19      | 0.26 | 218  | 84      | 0.24 | 203  |
| III { | 1       | 0.34 | 227  | 70      | 0.33 | 230  |
|       | 11      | 0.33 | 176  | 47      | 0.37 | 176  |
|       | 18      | 0.33 | 174  | 58      | 0.33 | 189  |
|       | 31      | 0.33 | 181  | 44      | 0.39 | 170  |

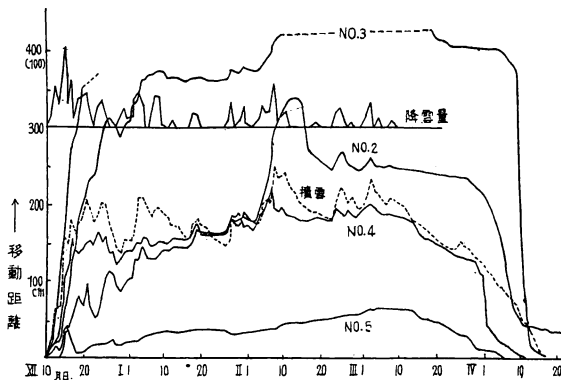
個所では減少しても他の個所では増加し、したがって、その増加地点において、機械的な雪害を増加することを示している。すなわち、この点から考えても森林のこの種の雪害は、森林全般に均等に起るものではなく、局所的に集中して起ることがわかるであろう。すなわち、樹冠のしや断量が多く林地の積雪が少ない個所では冠雪による被害が起り、吹き溜り地では沈降力、匍行力等による被害が起るというような結果にもなるわけである。

## 2. 樹木の埋雪過程

樹木は、その樹冠で積雪をささえて冠雪を作り、地上の積雪量を局所的に減少するが、冠雪は、日射、気温、風等の気象的变化により落下するので、多雪地の樹木は徐々に、また時には急激に積雪下に埋まってゆく。その埋雪過程は各個体により区々であるが、その個所の積雪深以下の樹高のものはもちろん、それ以上のものも埋雪する。その原因は、冠雪の重さによる、梢端の彎曲と埋雪した下枝の沈降力による下方への引下げ、傾斜地では埋雪した幹、枝にかかる匍行力による圧倒がおもなもので、このうち冠雪による

梢端の彎曲は最も大きな原因である。

第6図は傾斜地に立つ4本のスギ幼令木（樹高約4m）の地上高3mの幹部にヒモを附し、そのヒモの延びにより樹幹の傾斜を量的に記録したものであるが、樹幹が積雪深の増加にはほぼ比例して傾斜、倒伏してゆき、冠雪の増加が樹冠の倒伏の主原因であることがよく認められる。図中 No.5 のスギは幹のみ残して枝を全部打ち払つたもので、これは冠雪がつかず積雪の匍行力のみにより傾斜したため、他のものより著しく幹の倒伏度が小で、冠雪が樹木の埋雪の重大な因子であることをよく示している例である（幼令林の雪



注：No. 2 樹高 510cm 根周 40 林地傾斜 26°

No. 3 " 430 " 35 " "

No. 4 " 530 " 29 " 42°

No. 5 " 530 " 31 " (枝葉なし)

第6図 スギの埋雪経過（十日町）

害，林試集報 58 参照）。

なお、今まで<sup>8)</sup>の保護学書には、樹木は埋雪後、積雪が接地部から融解してゆく結果、下方へおし下げられ折損する、とかいたものがあり、一般にも融雪期に雪害が起ると信じられているが、これは誤解であつて、後述するように、埋雪した樹木の受ける積雪荷重が最大になるのは沈降力最大の時期、すなわち積雪水量最大の時期と考えられ、融雪期にはいると積雪の沈降は微少となり、それ以上屈曲しなくなるものである。第6図でもそのことがほぼわかり、融雪期にはいると樹幹は急激に立直つている。

埋雪の過程は樹冠の大小、幹の形態により異なり、スギでは形状比（樹高/直径）50～55 の木はほとんど彎曲せず直立のまま埋雪するが、樹高以上の積雪がある個所では直立したまま埋雪した樹冠が積雪の沈降力を受け、梢端部で極端に曲り、その部分で折損することが多い。それ以上の形状比のものではほとんどの木が根元から彎曲して埋雪する。また樹種により異なり、落葉樹は冠雪が少ないので彎曲せず直立したまま埋雪し、しかる後積雪の沈降とともに彎曲傾斜するものが多い。

樹高に関し、どの高さまで埋雪するかを調査した結果ではスギのように常緑のものでは、最深積雪の約2倍の樹高のものまで埋る危険がある。

第7図はスギの幼令林で調べたものであるが、埋雪率0%となるのは積雪深の約2倍の樹高で、それ以上のものも少数は埋雪している。落葉性のものでは多少その危険限界が下るが、ほぼ同様とみてよいようである。

同じ調査で、なんらかの機械的雪害を受けた本数をその樹高階の本数に対する比率で示すと、第8図のごとくなり、その危険性は積雪深前後の樹高の時に大となることがわかった。すなわち、多雪地の樹木にとつては、その個所の積雪深より、その深さの2倍くらいの樹高にまで生育する期間が最も雪害におかれやすい危険期である。さらにこの危険性は、積雪量が年々変化することより考えて、最多雪年に一層増大し、多雪年でも一降雪による積雪量が非常に多いような場合に最も雪害の危険率が高まることが推察せられるのである。

埋雪屈倒した樹木の立直りは急激であつて、被害のいかぎり、融雪期に入り雪表面から消雪して、幹が雪面に裸出し、枝葉が積雪の沈降力による引っぱりから開放されるとともに数日でほとんど原形に近い角度にまで立直り、その後、徐々に、生育開始とともに直立する。

第9図はスギ幼令木でその立直りを測定した例で、立直りはじめて1週間くらいで大体原形に復している。しかし、折損していないとも、幹がその弾性限界を越えて、永久歪を生じたようなものは、そのままの倒伏状態でのこるから、このような林木は、たとえば「雪起し」といわれるような人為的補助手段により引き起してやらぬと、生育期間中の偏心成長により一そう彎曲した幹形となるおそれが多い。

## 第2節 樹木の機械的雪害（物理的）

樹木の雪害は大別すると

(A) 機械的雪害（物理的、有形的、直接的）

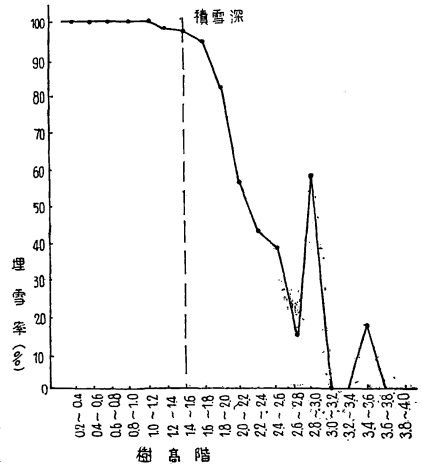
(B) 生理的雪害（無形的、間接的）

に区分できるであろう。後者（B）は、積雪が存在するという環境により、間接的にそれが気候、土壤等に影響

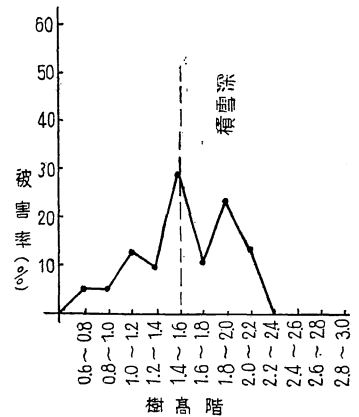
し、あるいは、菌類等の繁殖に関係して、植物生理に影響を及ぼし、樹形、生育等に無雪地より不利な結果の現われることであるが、本報告ではこれを取り扱わず、（A）の機械的雪害のみを扱うこととする。

機械的雪害は直接樹木に損傷を与える種類の雪害であつて、その原因から大別するとつぎのごとくなるであろう。

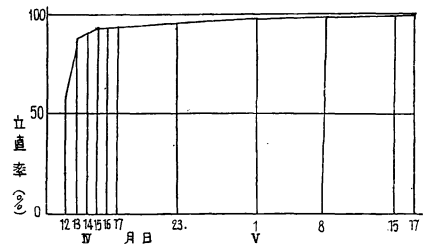
a. 積雪の荷重によるもの（冠雪、着雪の害）



第7図 樹高と埋雪率との関係（釜淵）



第8図 樹高と雪害率との関係（釜淵）



第9図 スギ幼令樹の融雪後の立直り経過の一例（十日町）

b. 雪圧によるもの { 沈降力の害  
匍行力の害

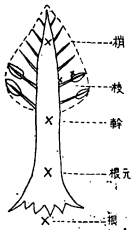
c. 雪崩によるもの

このうち (a) および (b) は静力学的な性質の力によるもので、(c) の雪崩は動力学的な力によるものである。樹木の被害の形態からみるとほぼ同様な結果として現われるが、原因には著しい差があり、雪崩は積雪のもつ特殊な現象であるので、本報告では言及せず、別に取り扱うことにする。

(a) は前節でものべた樹冠、すなわち樹木の枝葉上に積りあるいは附着する雪の重さによつて起る被害である。

| 被害の種類<br>被害の部分 | 抜け(倒れ) | 曲り | 割れ | 折れ |
|----------------|--------|----|----|----|
| 根              |        |    |    |    |
| 根元             |        |    |    |    |
| 幹              |        |    |    |    |
| 梢              |        |    |    |    |
| 枝              |        |    |    |    |

第10図 雪害木の分類



第11図 被害部位

(b) は積雪中に埋没した樹木が、積雪の沈降あるいは匍行により生ずる圧力により損傷を受けるものである。冠雪、着雪の被害には時として、寡雪地に起る暴風雪によつて生じるような急性的なものもあり<sup>10)</sup>、概して急性的な被害が多いが、沈降力、匍行力による雪害には慢性的なものが多い。しかも冠雪、着雪の荷重による樹冠や梢端の曲りは二次的に樹木の埋雪を早からしめ、沈降、匍行力の害を助長する。つぎにのべる樹木各部分の雪害には、折れ、割れのような回復不能に近い被害のほか、曲りのような被害は、年々同じ樹木の同じ個所で繰り返され、一層慢性的な様相を呈することが多い。割れのような被害も、一度うけると回復せず、年々その被害部が拡張することがある。

樹木の雪害の種類を、その被害部位により分類すると第10図のようになる。

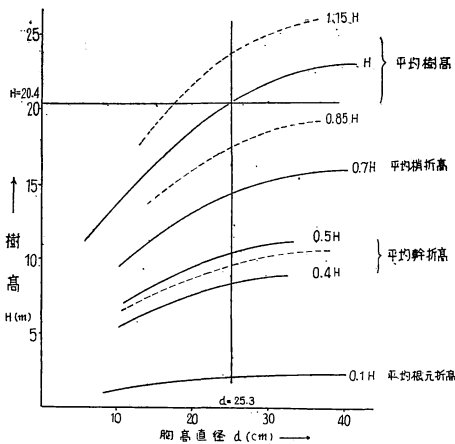
樹木の被害のあらわれる部位を、根および根元、幹、梢と枝の4部に区分し、被害種類を、抜け(倒れ)、曲り、割れ、折れの4種に区分したのであるが、これは雪害木を数多く調査した結果を取り括め分類したものである。

樹木の被害部位は大体集中して現われ、第11図の模式図のように、幹では上部より樹冠内部の数年生の部分で、まだ心材の発達していない個所(梢)、ついで樹冠の

直下附近から下部にかけて、折れる場合は特に樹冠直下が多い(幹)、さらに根張の直上部(根元)および根から引抜けあるいは側根が切断して倒れるものがある。

枝もほぼ幹と同様の個所、すなわち、第二次枝葉の附着下部と幹と枝の分岐部の個所が多い。

これらの個所は幹および枝の抗彎強に対する弱点ではないかと思われる。すなわち、梢の部分はいまだ組織が弱く強度が少ない部分と見られ、樹冠下部は、樹冠のような重量物を支持しているから、その支持点附近が力の弱点となり、根元および根は根張りの部分が応力が大であるため逆にその上部および下部が弱点と



第12図 山形県北村山郡楯岡の雪害林の一例

なるのであろう。

第 12 図は、雪害林の直径、樹高相関図の一例で、それに樹幹の平均雪害高を書き入れたもので、折損部位が樹高の 0.7 倍（梢）、0.4~0.5 倍（幹）、0.1 倍（根元）の 3 個所に集中しており、上記のことが明瞭にあらわれている。

被害の種類は、幹および枝がその基部より抜け落ちるもの、幹の場合は根倒れといわれているもののはかは、ほとんど幹も枝も雪圧あるいは雪の重さにより彎曲する結果起る被害であつて、幹、枝の弾性限界を越えて彎曲し、永久歪をうけた「曲り」であり、それが破壊点に達したものに、樹木の繊維が直角方向に切断された「折れ」と平行方向にはがれた「割れ」が起る。これらの被害は単独に起ることもまた複合して起ることもある。

木材の力学的諸性質は木材利用学では考究されてはいるが、樹木の生のままの材料力学的な諸性質はあまり研究されていないので、今後雪害のみならず、風害等に対しても生材の強度研究が並行して行われる必要がある。

以上の被害部位と種類とを組み合わせると、16 種の機械的な雪害の種類ができあがるが、このうち倒れ（抜け）は、幹、梢には起らず、割れは、梢や枝のような細い部分にはほとんど見られないので、これを除くと、12 種類の雪害分類ができあがる。このうち林業として、また樹木としても致命的な被害は根倒れおよび根元、幹の割れ、折れである。枝および梢の被害は時に樹形を著しく変形し、積雪深以下くらいの樹高しかない矮性な奇形樹を作ることがあるが、一般には、恢復して生育を続けるものである。また、根元曲りは多雪地に生育する樹木に一般に見られる現象で、むしろ雪害の分類から除去すべきものかも知れない。なぜならば、根元曲りは、その部分の強度を増し、雪圧にたえて他の雪害が起るものを防止するに役立ち、また根元曲りなしに多雪地で林木を育成することはほとんど不可能だからである。

これらの雪害の種類は、冠雪、着雪によつても、その他の雪圧によつてもほとんど同様にあらわれるが、冠雪、着雪の害は、前述した積雪深の 2 倍以上の樹高をもつ林木に多くあらわれるから、原因が冠着雪によると明瞭に認められる被害は、このような樹高の高い木についてであつて、積雪深の 2 倍以下の樹高の幼令木では、その区別は困難である。

冠雪（着雪）、雪圧による雪害は、樹木が前記のようにその力により彎曲する結果起るものが主であるから、樹木特に樹幹の抗彎曲度に支配される。それゆえ、形状比の高い細長な樹木では被害が大である。また、同一形状比のものでは、材質の抗彎強度が大で弾性限界の大なものほど良く、また弾性限界を越えても破壊点に到るまでの間隔の長いもの、いわゆるねばりの強い木は強いことになり、被害程度が弱くてすむことになる。この点から樹種による耐雪性の差が出てくる。

しかしながら、積雪下に完全に埋まるくらいの幼、壮令木では、この関係はそのままあてはまらない。というのは、後述するように、積雪の沈降、匍行等による雪圧は著しく大であり、樹木の抗彎強度がいくら大であつても、それに抗することができるほど大なものはないからで、むしろ弾性限界に到るまでの曲りの角度が大で、永久歪や破壊点に容易に達しない、換言すると、いくら曲つても折れないような樹種、樹形のものがよいことになる。一般には幼令時には形状比の大な細長な木、樹種的にいえばねばりのある木が良いことになるのである。

## 総 括

(1) 降雪は多雪地では根雪開始以後融雪期にはいるまでは、地、気温による融解により多少消失し、また雪面蒸発も多少は考えられるが、ほとんど全部が積雪として地上に残る。

(2) 積雪は地物により捕捉され、地物上に冠雪、着雪となる一方、地上に堆積して、樹木等の地物を埋雪する。また、地物は地表の積雪を不齊にし、ところどころ吹溜地のような、特に積雪量の多い個所、あるいは樹冠のしやだんにより積雪のすくない個所を作る。

(3) 樹冠の冠雪、着雪は荷重を樹木に加え、地表の積雪は沈降力、匍行力あるいは雪崩の形態で樹木に雪圧を加え、樹木の幹や枝を彎曲せしめて損傷する。

(4) 林木の雪害の最大の危険期間は樹高が積雪深の 2 倍以下の時期であつて、冠雪、着雪ではそれ以上の樹木をも損傷する。

(5) 雪圧（冠雪、着雪荷重を含む）の害は樹形特に幹形が関係し、細長なものは危険であるが、積雪深の約 2 倍以下の樹高の埋雪する可能性の大な樹木は、逆に細長なものほど被害が少なくなるようである。

(6) 機械的な雪害の種類は、倒れ（抜け）、曲り、割れ、折れの 4 種に大別でき、樹木での被害の発生部位は、梢、幹、根（根元）、枝の 4 種に大別できる。それを組み合わせると 12 種類の雪害に区分分類できる。

(7) 幹、根（根元）における割れ、折れの被害が最も危険である。

## 第 II 章 積雪の強さおよび力

### 第 1 節 雪圧に関係ある積雪の物理的、力学的性質

#### 1. 物理的性質による雪質の分類

降雪の物理的性質に関しては中谷博士<sup>11)</sup>等の研究で明らかで、その結晶は六華を基本とする各種の結晶およびその集合体あるいは無定形の氷片よりなっているが、それが積雪になると、昇華、融解、再凍結等の作用、いわゆる旧雪化作用により変質するとともに、それらの結晶の変態にもなう凝集、水分の吸収、積雪内水蒸気の昇華、重力の作用等により、堆積状態、構造にも変化が生じてくる。これら組成成分、構造の変化は積雪のもつ強度、応力に種々影響するので、積雪の物理的性質として組成成分、構造を分類系統だて、各因子を明らかにしておく必要がある。

積雪の成分としては氷の部分、水の部分および空けき（空気および水蒸気を含む）の3つに区分できる。

積雪の構造としては氷の部分の形（粒形）、大きさ（粒径）およびその粒子配列様式がある。前者は、積雪の密度（仮比重）と積雪の含水量を求めることにより積雪内の三者の比率が求められる。後者は雪粒の形と大きさを区分することにより雪粒の形態がわかるが、粒子間のつながり方は土の構造と同様に大略蜂か状の構造であることは写真1～4によつてもわかるのであるが、これを物理量として表わすことは困難である。その構造が粗であるか密であるかは、積雪の密度、含水率を求め、それを雪粒の形態別に表わすことにより大体判明する。

以上の積雪の物理的要素を総合すると、積雪の組成成分、構造はつぎのものを測定することにより一応は決定できることになるのである。

- a. 粒 形
- b. 粒 径（粒 度）....mm
- c. 密 度（仮比重）....g/cm<sup>3</sup>
- d. 含水量（含水率）....g/cm<sup>3</sup>（%）

積雪の分類はこれらの諸因子を組合わせて行われており、平田徳太郎博士<sup>12)</sup>、積雪地方農村経済調査所<sup>13)</sup>、雪氷協会<sup>14)</sup>等の各種の提案があり、最近は国際雪水会議による積雪の分類案が提示されている<sup>15)16)</sup>。それらを総合すると、積雪は粒形によりつぎのように大別される。

新雪（あらゆき）....雪華の結晶形の残つているもの

|              |                          |   |                    |
|--------------|--------------------------|---|--------------------|
| 旧雪（ふるゆき）.... | 雪華の結晶がこわれ、<br>別の結晶になつたもの | { | 締 雪（しまりゆき）         |
|              |                          |   | 粒 雪（ざらめゆき）         |
|              |                          |   | 霜粒雪（しもざらめ）・（このはゆき） |

（1年以上経過した旧雪は万年雪とする）

この分類における締雪（しまりゆき）は、雪の結晶が昇華によりこわれて皿鈴状の極微小な粒子になつたもの（写真2）、粒雪（ざらめゆき）は締雪や新雪が融解、降雨等による水分により凝集、再凍結し、丸味のある突起をもつた角のない粒子に変化したもの（写真3）、霜粒雪（しもざらめゆき）は、これに雪中あるいは空中の水蒸気が昇華して、霜状（リン片状、針状等）の結晶が附着し角のある結晶になつたもの

のである（写真 4）。これらの四者は肉眼的にも明らかに区別でき、また積雪の力学的な性質においても著しい差をあらわすものである。特に「ざらめゆき」と「しまりゆき」との差は顕著である。

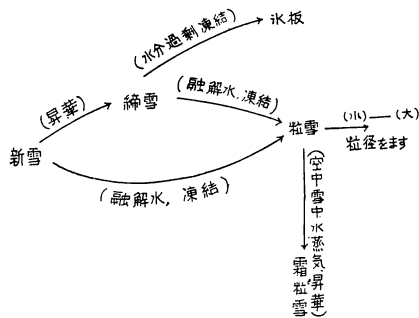
この分類に、粒径を加え、さらに含水量、密度、比重を加えると前記のように物理的性質による積雪の分類を一応表現することができる。

積雪の種類のうち霜粒雪（しもざらめ）は特異なもので極寒地以外にはそう多く認められない。一般にわが国で森林、樹木の雪害に関係する積雪は新雪、締雪、粒雪の 3 種である。

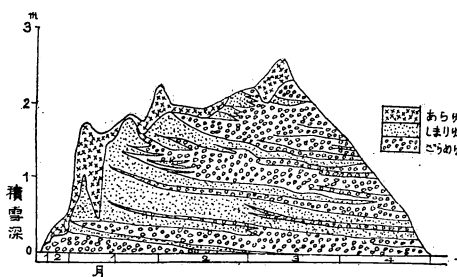
このほかに氷盤、粗氷といわれる組織があるが、これは、雪粒間の空けき水でほとんど満されたまま氷つたもので、内部に多数の気泡をもつ氷である。以下、雪質を表わす諸因子につき述べよう。

#### （a）雪粒の変態（粒形、粒径）の変化

積雪粒子は、地上に落達すると同時に前述のような、気温、日射、水、風等の気象因子の作用で、昇華、融解、再凍結が起り、変形してゆく。この変化は斎藤練一<sup>17)</sup>の研究で明らかであるが、一般に新雪→締雪→粒雪の経過で旧雪化し、時には新雪→粒雪の変化も行う。新雪→締雪の変化には主として昇華作用が働き（風による機械的な破壊もある）、新雪→粒雪あるいは締雪→粒雪は、融解による水分と再凍結が作用して行われるものである。



第 13 図 雪粒の変態過程



第 14 図 一冬季間の雪質の変化の一例  
(昭和 17~18 年) (十日町)

これらの関係を図示すると第 13 図のようになり、年変化の一例を示すと第 14 図のようになり、時間とともに新雪→締雪→粒雪の変化が行われることがわかる。積雪はこの雪粒の変態過程において凝集が起るので、密度は順次増大し、さらに積雪の自重による重力方向への圧縮が加わり同一粒子の積雪でも下部ほど逐次密度を増加する。これらの諸現象の総合により、積雪は積ると同時に重力方向に沈下してゆく。すなわち、新雪層は時間とともに締雪、粒雪に変態しつつ自重による圧縮も加わって密度を増し、その層の厚さを減じてゆくのである。これが積雪の沈降で、一般に「雪が落着く」といわれる現象である。

積雪は沈降により通常その強度を増すが、その増加は、雪粒の形態により著しく異なり、一般には後述するように、締雪>粒雪>新雪の順に強さが大で、変態の順序とは一致しない。

すなわち、新雪、締雪、粒雪の間には、前記のように肉眼的にも判然とした区別があるうえ、その物理的な性質にも、判然たる変化が認められるのである。

新雪→締雪の変化は結晶の破壊過程で、その粒子は新雪より締雪の方が一般に粒径が小さく、締雪の粒子の大きさには時間的経過が加わっても著しい変化がないが、粒雪は新雪または締雪が融解水や降雨による水により、数個以上凝集し再凍結したもので、旧雪化が進むと粒径は著しく大となるから、締雪と粒雪間には土における粘土と砂との差に近い性質の差がでてくるのである。

#### （b）密度（仮比重）

密度は前記のように積雪の組成および堆積状態、構造を現わすものであるから、積雪の物理的性質を表現する重要な因子となる。しかも密度は最も測定容易なものであるから、現在までに測定された例は非常に多い。

密度は積雪の粒子の形態により第2表に示したごとく、大略ある範囲の値を示し、積雪のある断面では下部ほど、すなわち地表に近いほど一般に大となり、時間的にも普通は古い雪ほど大となるものである。これは前記したように積雪の粒子形態が変化することと、個々の雪粒が凝集して大となることと、上部の積雪量の重量による圧縮が作用するからである。第15図は積雪の密度の年変化の一例で下層ほど、また旧雪ほど密度が大となつていて、その変化がよくわかる。また、第16図は時間的な積雪全層の平均密度の変化の一例で、第17図は積雪の一断面における密度変化と、その上部の積雪層の荷重との関係を示したものである。

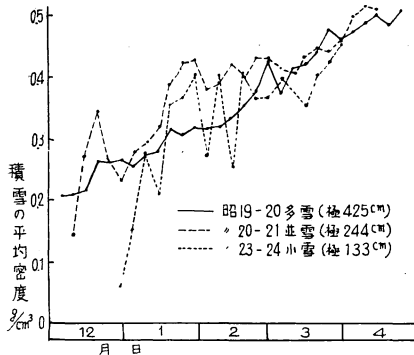
第17図(a)に示したものは、十日町における過去30年間の最大積雪量を記録した昭和20年2月の最深積雪時における積雪層中のある点の密度とその上部の積雪の重量(積雪水量)との関係を示したもので、この年は全層がほとんど締雪であつたので、この関係はすこぶるきれいでている。すなわち、実験式は

$$\rho = 0.2 \log(\text{HSW}) - 0.175$$

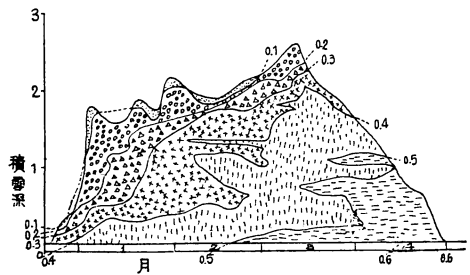
第17図(b)は昭和18年3月の最深積雪時における同様の関係を示したもので、この年は積雪深がほぼ平年で、当時は「ざらめゆき」が大部分であつたので第17図(a)の「しまりゆき」に比較する意味で示したもので、この結果では、点がかかなりばらついてはいるが、両者の関係はほぼ同様で、実験式を求

第2表 積雪の形態別密度範囲  
(十日町の測定結果)

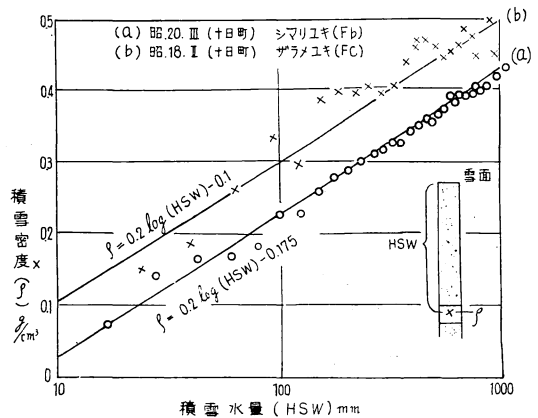
|     | 雪 質     | 密 度       |
|-----|---------|-----------|
| 新 雪 | かわきゆき   | 0.05~0.15 |
|     | ぬれゆき    | 0.10~0.25 |
| 締 雪 | しまりゆき   | 0.15~0.45 |
|     | ぬれしまりゆき | 0.15~0.50 |
| 粒 雪 | ざらめゆき   | 0.35~0.50 |



第16図 積雪の平均密度の変化(十日町)



第15図 一冬季間の積雪密度の変化の一例(十日町)  
(昭和17~18年)



第17図 上部の積雪重量と積雪密度との関係

めると

$$\rho = 0.2 \log(\text{HSW}) - 0.1$$

となり、常数項が異なっているだけである。すなわち「しまりゆき」に対し「ざらめゆき」は全体として比重が大であるが、上部の雪層の荷重による影響にはあまり変りがなく、積雪は自重により圧縮し、下層ほど密度が大となることを示している。

積雪の密度 ( $\rho$ ) は単位体積 ( $v$ ) の積雪中の氷の質量 ( $m_i$ ) と、それに含まれる水の質量 ( $m_w$ ) の合計、すなわち

$$\rho = \frac{m_i + m_w}{v} \dots \dots \dots (1)$$

であるから、密度  $\rho$  と含水量を測定すると、積雪の組成成分がわかり、またこの場合、含水量を差引いた密度、すなわち氷の部分の密度  $\rho_i = \frac{m_i}{v}$  を求めると、その積雪の構造の粗密がほぼ判明する。

すなわち、

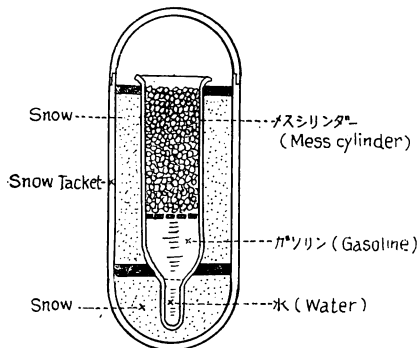
$$m_i = \rho v - m_w, \quad \rho_i = \frac{m_i}{v} = \rho - \frac{m_w}{v} \dots \dots \dots (2)$$

### (c) 含 水 量

積雪の含水量は土の場合と同様、積雪の強さに最も強く影響する因子であるが、従来、測定が困難であったため、あまり実測例がなかつた。

測定法として今までに用いられていたものは、熱量計法であるが<sup>18)19)</sup>、この方法は手数がかかるうえに容器の熱容量、その他の誤差がはげやすく、積雪の強度等との関係を求める因子として測定するには、測定精度も充分ではなかつた。したがって、今までは、積雪の物理的性質として記載されたものは、積雪の粒子形態(粒形、粒径)および密度とかんたんな手ざわりによる含水度区分、たとえば、かわき、しめり、ぬれ、みず等の区分であつた。最近、黒田・古川<sup>20)</sup>の発案にかかる遠心分離法を筆者等<sup>21)22)</sup>が改良した結果、比較的容易に測定しえ、精度も 2% 以内の誤差で落着くようになった。近時含水量測定法としてはこのほか、浮力差法、体積差法等が考えられているが、現在のところ遠心分離法が最も使いやすいようである。

積雪の粒子は、土ほど微粒子でなく、したがって吸着水も土のように密に粒子と結びついているものはいすくないようで、新雪、締雪では、手廻しの遠心分離機 1800/sec の回転で、約 2~8% の水分が分離不能なだけで(雪の種類により異なるが)、粒雪においてはほぼ完全に分離できるのであるが、雪中の氷



粒も水の一変態であるため、遠心分離機の回転中、外気温を吸収し氷粒が融解を起すこと、また回転速度をあまりあげると、圧力による融解水が生ずるおそれがあるが、この方法は外装をつけ、水雪で外気としやだんすることにより、防止することができた(左図)。含水率は現在まで測定した範囲では、積雪の粒子形態に対し大略次の範囲になる。

新雪・締雪 0~50%  
粒 雪 0~30%

ただし、含水率は

$$\frac{m_w}{m_t + m_w} \times 100 \dots \dots \dots (3)$$

すなわち、重量比で表わした場合である。

#### (d) 積雪の構造

積雪の構造については、まだほとんど明らかにされていないが、土の粒子と同様、蜂か状の構造をもっていることは明らかで、これは新雪の場合に最も粗であつて、締雪、粒雪と変化するにしたがつて雪粒は発達し、球形に近い丸味のある粒子になり粒径も著しく大となり構造も密になる。この変化中、構造の変化に最も強く作用するのは、上層の積雪の重力による圧縮と水分の表面張力による雪粒子の凝集作用による集合である。これらの作用により、積雪は順次蜂か状構造から、最も密な形にまで収縮してゆくのである。

この間の現象については黒田正夫<sup>27)</sup> がよく説明している。

積雪粒子間には互に接していると、その接点には、水分あるいは水蒸気が逐次昇華凝結して、あたかも氷の橋のごときものができる。これが、積雪粒子の結びつけをしているものであり、この橋の力が積雪の力を形成するものであると、斎藤練一<sup>27)</sup> は報告しているが、雪温 0°C で水分を含む雪ではすべての雪の粒子が氷の橋でつながっているのではなく、一部は雪粒子の表面にある水膜の表面張力も作用しているはずである。しかし雪をかくはん放置すると時間とともに硬化する現象があることをみると、雪粒子間が氷の橋で結ばれているということは、積雪の力学的性質上重要なことであろう。

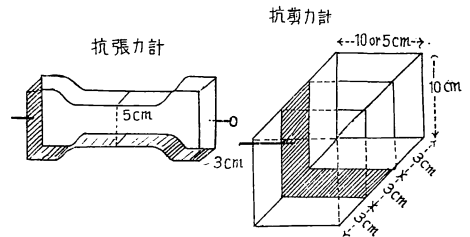
### 2. 積雪の強さ

#### (i) 従来の方法によるもの

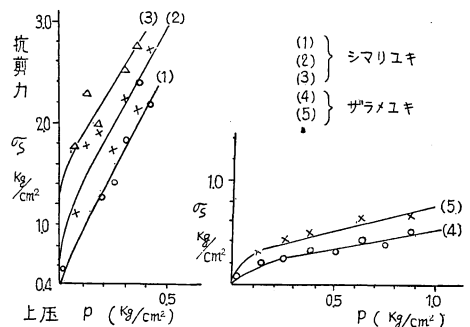
積雪の強さを表わす方法として、従来用いられていたものは、抗張力、抗剪力で、また工学的な単位としては硬度がある。これらの測定方法としては、土あるいは金属材料で用いられていたと同様の方法が採用され、第 18 図のような黒田<sup>27)</sup> により試作された装置が広く用いられていた。以下黒田式測定器で測定した結果について記そう。

#### (a) 抗剪力

積雪はその組成成分がすべて水の変態より成り立つており、温度および外力により水の液体と氷の個体とに可逆的に変化するため、特に抗剪力を求めるような場合は、剪断面の大きいと剪断速度により、剪断面の積雪が徐々に圧縮されると遂には氷化してしまい、抗剪力が著しく大きくなることがあるので、測定値の分散が大となつてしまう。さらに垂直応力を加えて、加圧剪断を行うと一層この傾向が大となつてくる。古川<sup>28)</sup> はこの欠点を除去するため、抗剪力測定の場合には、剪断面の長さを



第 18 図 積雪抗剪力および抗張力計の略図（黒田式）



第 19 図 積雪の加圧剪断試験の結果

3 cm 以下に行い、剪断速度を 20~50 cm/sec に規定した。

筆者も黒田式方法で、各種類の積雪について抗剪力を測定してみたが同一種の雪においても測定値がかなり分離して充分な結果がえられなかつた。筆者が土壌剪断試験器で行つた加圧剪断試験も<sup>20)</sup>、上記の諸条件を無視して行つたので、その結果には不備な点が多いが、第 19 図のごとく荷重の小さい間は多少曲るが、それ以上の荷重では、砂、土等と同様直接関係が認められた。すなわち、

$$\sigma_s = c + K \tan \theta \dots\dots\dots (4)$$

$\sigma_s$ ....抗剪力,  $c$ ....粘性係数(kg/cm<sup>2</sup>),  $\theta$ ....摩擦角,  $K$ ....垂直応力(kg/cm<sup>2</sup>)

となり、積雪の抗剪力もある範囲では積雪の粘性と雪粒子の摩擦角とより成り立つことが一応認められる。

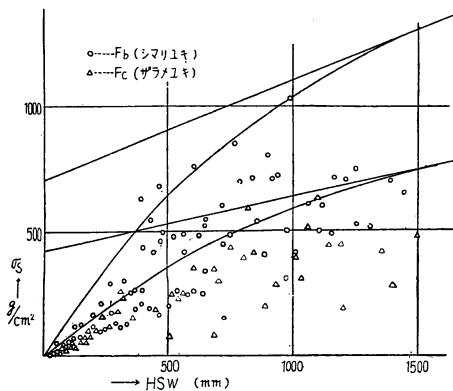
その測定結果では  $c$ ,  $\theta$ ,  $f$  (摩擦係数) は大略次のようになる。

|         |                                        |                                                                                 |
|---------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| あ ら ゆ き | $c = 0.700 \text{ kg/cm}^2$            | $\begin{cases} f = 2 \\ \theta = 60^\circ \end{cases}$                          |
| しまりゆき   | $c = 0.500 \sim 1.500 \text{ kg/cm}^2$ | $\begin{cases} f = 2 \sim 3 \\ \theta = 65^\circ \sim 75^\circ \end{cases}$     |
| ざらめゆき   | $c = 0.150 \sim 0.500 \text{ kg/cm}^2$ | $\begin{cases} f = 0.4 \sim 1.5 \\ \theta = 20^\circ \sim 55^\circ \end{cases}$ |

すなわち、締雪の方が強度が大であると認められる。

荷重の小さい間は直線関係が成り立たないのは、積雪の密度がこの間に加圧による圧縮とともに急激に変化するためと思われる。積雪の自然状態ではこの実験のような大きな上圧をうけていないから、われわれの取り扱う実在する積雪では積雪は圧縮されるにしたがつて、粘着力と摩擦角が密度変化に応じて変化するものと考えてよいであろう。

この結果では、圧縮にともなう積雪の変化すなわち氷化を無視したのであるが、剪断試験においては、剪断速度を落すほど氷化が進み、そのため抗剪力は著しく増大する。これは積雪の一特性で、現実の積雪においても、雪中にある地物により、前記した積雪の“沈降”が阻止されると、その地物の上面の雪圧をうけている個所の積雪は必ず氷化し、粗氷に近い層ができ、その氷層の上部には密度の大きな雪層が生ずる。そのため、沈降力の項で記すように、この圧縮部分の積雪の抗剪力が著しく大となり、上部の雪層の荷重を地物上面で保持しうにいたり大きな沈降力を地物に与えるものと考えられる。



第 20 図 抗剪力 ( $\sigma_s$ ) と積雪水量 (HSW) との関係 昭和 19~20 年(十日町)

黒田式抗剪力計により測定した記録により、第 17 図に示した積雪密度とその上部の積雪層の荷重の関係と同様に、或る層の抗剪力とその上の積雪層の荷重との関係を求めてみると、昭和 20 年 2 月の十日町の積雪では、第 20 図のようになる。この場合は各層の積雪は上部の雪の荷重により圧縮されているのであるから、上部の雪圧の荷重を normal stress (上圧) とした場合の加圧剪断を行つたと同様に考えられる。両者の関係は第 19 図に示したとほぼ同様であるが、上圧が小さいので、この

図では直線関係と認められる部分がほとんどでいてない。しかし、前例同様、上圧が大となり、積雪密度が大となり、密度変化が小となれば直線関係となるものとして図のように切線を引いてみると、

締雪  $c=700 \text{ g/cm}^2$   $\theta=76^\circ (f=4)$

粒雪  $c=400 \text{ g/cm}^2$   $\theta=65^\circ (f=2.1)$

となり、前例によく似た値となり、「ざらめゆき」の方が「しまりゆき」より、はるかに小さな抗剪力をもつことがわかる。

#### (b) 抗張力

抗張力の方は、圧縮をとまうことがないから、黒田式の方法でも測定可能であるが、この方法の欠点は、試料の採取が容易でなく、また試料を固定して引張るとその切れる個所が一定しないため、やはり測定は困難である。

抗張力の状態を知るため、抗張力同様、十日町の積雪断面調査の例を図示すると、上部の積雪荷重との間に第 21 図のような関係が求められる。

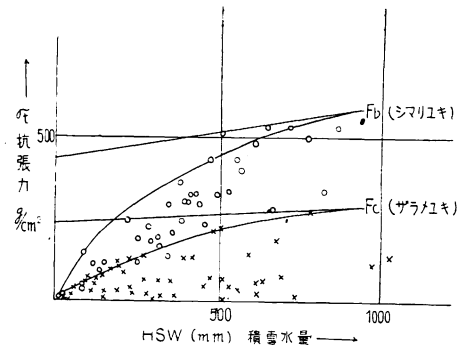
この関係も剪断力と非常によく似て、「ざらめゆき」が抗張力も小さい。抗張力も本図によると粘性と摩擦よりなると考えられるが、抗剪力よりも粘性の関係する度合が一層大きいようである。

#### (c) 抗剪力と抗張力

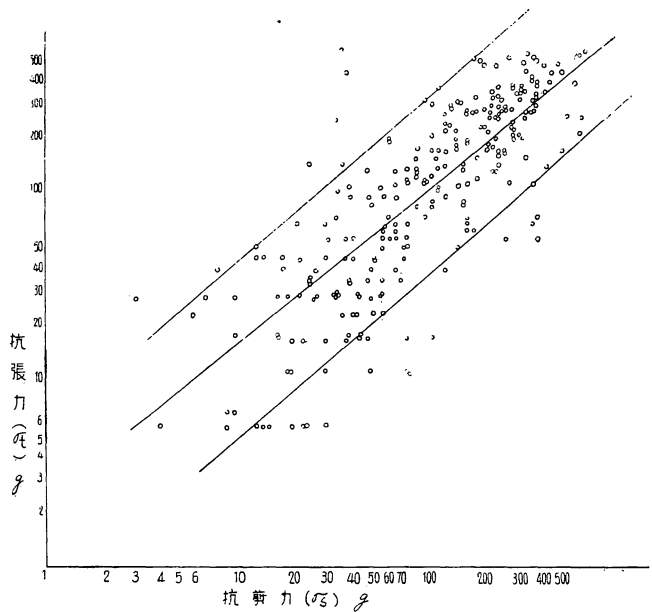
抗剪力、抗張力ともに雪粒間の粘性と摩擦とにより成り立つていとみられるのであるが、両者の関係は第 22 図に一例を示したようになる。本図によれば、抗剪力の方が抗張力より一般にやや大きい値を示している。

#### (d) 積雪の強さと含水量

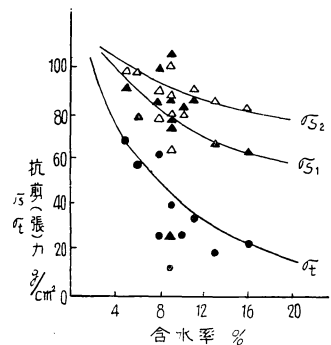
積雪も土砂と同様にその含水分により強度が最も著しく影響をうけることは想像できるが、含水量の項で記したように、積雪の含水量の測定は困難であつたため、強度と同時に含水量が測定せられた



第 21 図  $\sigma_t$  と HSW との関係  
昭和 17~18 年（十日町）



第 22 図 抗剪力 ( $\sigma_s$ ) と抗張力 ( $\sigma_t$ ) との関係  
昭和 17~18 年（十日町）



第 23 図 抗剪、張力と含水率との関係（平田）（ざらめゆき）

第 3 表

| $\rho$ | w% | $\sigma_t$<br>g/cm <sup>2</sup> | $\sigma_{s1}$<br>g/cm <sup>2</sup> | $\sigma_{s2}$<br>g/cm <sup>2</sup> |
|--------|----|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 0.40   | 5  | 67                              | 80                                 | 97                                 |
| 0.39   | 6  | 56                              | 78                                 | 97                                 |
| 0.39   | 8  | 61                              | 99                                 | 89                                 |
| 0.38   | 8  | 25                              | 85                                 | 77                                 |
| 0.40   | 9  | 25                              | 105                                | 79                                 |
| 0.39   | 9  | 25                              | 77                                 | 87                                 |
| 0.40   | 9  | 11                              | 86                                 | 63                                 |
| 0.40   | 9  | 39                              | 72                                 | 100                                |
| 0.41   | 10 | 25                              | 82                                 | 80                                 |
| 0.38   | 11 | 33                              | 86                                 | 90                                 |
| 0.36   | 13 | 18                              | 65                                 | 83                                 |
| 0.35   | 16 | 22                              | 69                                 | 82                                 |

注： $\sigma_t$  抗張力 $\sigma_{s1}$  水平方向の抗剪力 $\sigma_{s2}$  垂直 " " $\rho$  は水分を含む前の密度で示す

w は含水率

結果は今までにほとんどなかった。第 23 図に掲げたものは平田博士<sup>19)</sup> の報告より引用した第 3 表のデータを筆者が作図したものであるが、抗剪力は抗張力よりも含水分による強さの弱まり方が少ない。すなわち、抗張力の方が含水分の影響をより多く受けることを示している。これは上記の抗剪、抗張力における粘性の原因が、雪粒間の氷橋による附着力であるとするれば、積雪が水分を含むことにより、これらの雪粒のつながりが、水の粘性にかわり、ために乾燥した積雪より粘着力を減ずるので、力の組成として、粘着力が主として作用している抗張力は含水量が大となると急激に弱まるが、摩擦力が比較的強く作用している抗剪力では、その弱まり方が少ないのであろう。

以上のことをまとめてみると、つぎのことがいえるであらう。

a) 積雪の強さとしての、抗剪力、抗張力は、ともに雪の粒子間の粘着力と摩擦力とより成り立っていると考えることができるが、抗剪力は抗張力に比し、摩擦力が大きく影響し、逆に粘着力の影響は比較的少ない。

b) 両力ともに、雪質に影響せられる。すなわち、雪の密度、粒子の大きさ、形が影響する。

c) 上部からの圧力、すなわち、垂直応力が大きいほど、両力とも大となるから、一般に密度が大となるほど力は大きくなる。

d) 含水分の両力に対する影響は大であるが、抗剪力の方が比較的影響が少ない。

e) 積雪では抗剪力は抗張力より一般に大であるが、両者には比例的な相関があるから、いずれか一方より他を推定することができる。

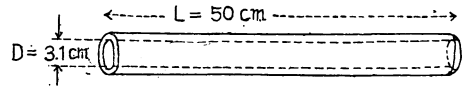
f) 従来の測定方法には、いろんな欠点があり、積雪の強さを測定するには不十分である。

積雪の強さを表わすには、他に硬度や、抗圧力があるが、硬度は物理量としては不適当であり、抗圧力は測定例が少ないからここには述べない。ただ、抗圧力は、抗剪力の項でのべたように、加圧速度が著しく影響し、徐々に加圧すると、氷化するので、一般の自然現象として行われるような、ゆるやかな、静的な加圧では、氷の強さにまで到達してしまうようである。「なだれ」のような、動的な力に対しては、そのような塑性変形を行う前に破壊が起きてしまう。

#### (ii) 積雪の曲げ強度

積雪の強度は従来の方法でも上記のように一応その性質が求められるが、種々不便な点があり、測定に手間どり、強度測定により積雪の表わす種々な現象を説明するには不十分である。特に野外における測定には不向なうえに、積雪の構造を測定中に破壊する危険が多分があるので、筆者は<sup>30) 31)</sup> 積雪を摩擦の少ないガラスあるいは金属の円筒、あるいは角筒で採雪し、その採雪された雪の柱を一方から徐々におしだし、積雪の片持梁を作り、それが自重で切れ落ちる時の応力を測定する方法を立案した。この方法によると、雪柱はおしだされて自重で、採取筒の切口で切れ落ちるので、積雪はほとんど外力により圧縮をと

もなうような大きな歪をうけないし、また切断も雪粒自体が切れ、あるいは割れるような力がかからないから雪粒間で切れるので、自然においてあらわれる現象に最も



第 24 図

近い強度がえられる。またこの方法では、今までの、各種強度測定方法より、より小さい密度の新雪まで採取、測定できるが、雪温が  $0^{\circ}\text{C}$  以下の低い積雪および降りたての密度 0.1 以下の新雪では採取筒により採雪が不能であるので測定できない。また、締雪の含水量のあるものでは、測定時、円筒からおしだした雪の柱がダレて、匍伏現象を表わすので強度の算定に困難をきたす欠点がある。

#### (a) 測定方法

測定に用いたのは第 24 図のような、内径  $D=3.1\text{ cm}$ 、長さ  $L=50\text{ cm}$ 、円形断面のガラス筒で、一方にナイフエッジを附したものであるが、円筒材料は雪の摩擦抵抗の少ない軽いものが良く、将来はプラスチック製を用いるとよいであろう。

この円筒で積雪の測定箇所より採雪し、雪の重さを秤量すると、試料の積雪密度はつぎの式で計算しうる。

$$\rho = \frac{W_{s+G} - W_G}{\pi \left(\frac{1}{2}D\right)^2 L} \dots\dots\dots (4)$$

$W_{s+G}$ ....ガラス筒の重さ+試料積雪片の重さ       $W_G$ ....ガラス筒の重さ

つぎにガラス筒を水平に保ちつつ一方からピストンで、試料積雪片が圧縮されないようにゆるやかにおすと、試料は棒状に他端からおしだされる。そして、ある長さになると、自重で切れ落ちる。その時の切れ落ちた長さ  $l$  を測定する。この場合おしだされた試料雪片はガラス筒の一端を支点とする雪でできた片持梁であるとみなされるから、この積雪の片持梁が自重で切断する時に作用する最大垂直応力、曲げ強度 ( $\sigma_b$ ) はつぎのごとくして求められる。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = \frac{W_s l}{2Z} = \frac{\pi \left(\frac{1}{2}D\right)^2 l \cdot \rho}{2Z} \dots\dots\dots (5)$$

$M$ ....曲げモーメント、 $Z$ ....断面係数、 $W_s$ ....折れた積雪梁の重さ

すなわち、

$$\sigma_b = K \rho l^2 \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 $K = \frac{\left(\pi \frac{1}{2}D\right)^2}{2Z}$  で、ガラス筒の直径により一定の常数である。

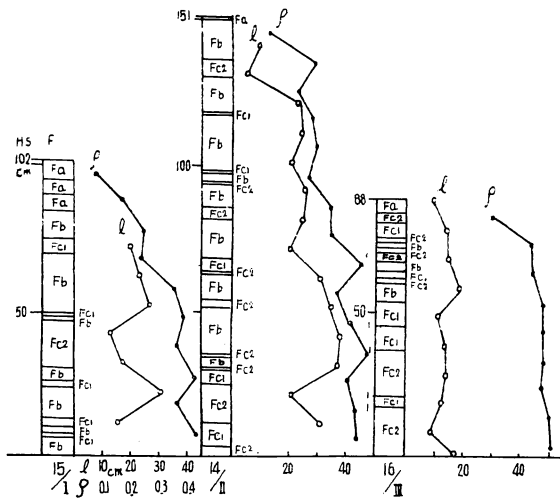
(6) 式により、試料雪片の密度 ( $\rho$ ) とおしだして折れた長さ ( $l$ ) とを測定することにより、積雪の曲げ強度が求められるのである。このような積雪の片持梁がおれる場合は切断面の上面では引張が、下面では圧縮が加わっているから、この力は積雪の抗張力と抗圧力の合成したものであるが、一般には積雪の抗張力が抗圧力よりやや小さいため、上面より割れ落ちるようで、この方法で測定した力は大体積雪の抗張力を測定したものと考えてよいであろう。

この測定方法では、採雪円筒（角筒でもよい）の太さは、常数項  $K$  に関係するのみであるから、異なる太さで測定しても、求めた積雪の強さには無関係なはずである。

この関係を検討するため、円筒の内径を 4.84 cm, 3.88 cm, 3.01 cm, 2.84 cm の 4 種に区分して、

第4表 ことなる内径の採雪円筒を用いて測定した積雪の抗彎強度実測値の比較

| 測定月日      | 雪の分類<br>(F) | 積雪密度<br>( $\rho$ ) | 円筒内径 (D)              |       |       |      |
|-----------|-------------|--------------------|-----------------------|-------|-------|------|
|           |             |                    | 4.84 cm               | 3.88  | 3.01  | 2.84 |
|           |             |                    | 円筒断面積 (S)             |       |       |      |
|           |             |                    | 18.47 cm <sup>2</sup> | 11.88 | 7.11  | 6.33 |
|           |             |                    | 0.82                  | 係     | 数 (K) |      |
|           |             |                    |                       | 1.03  | 1.33  | 1.41 |
| 1953 II 9 | F a         | 0.14               | g                     |       |       |      |
|           | F b         | 0.26               | 16                    | 17    | —     | 14   |
|           | F c         | 0.33               | 223                   | 210   | —     | 137  |
|           |             |                    | 144                   | 155   | —     | 165  |
|           | F a         | 0.14               | 24                    | 13    | —     | 16   |
|           | F b         | 0.30               | 356                   | 400   | 408   | 368  |
|           | F c         | 0.34               | 127                   | 123   | 108   | 73   |
|           | F b         | 0.20               | 111                   | —     | 117   | 113  |
|           | F b         | 0.21               | 99                    | —     | 90    | 96   |
|           | F b         | 0.35               | 139                   | —     | 92    | 59   |
|           | F b         | 0.36               | 746                   | —     | 621   | 658  |
|           | F b         | 0.41               | 775                   | —     | 787   | 834  |
| III 3     | F b         | 0.33               | 412                   | —     | —     | 490  |
|           | F c         | 0.39               | 200                   | —     | —     | 199  |



第25図 積雪の強度測定結果の一例(昭26釜淵) l および  $\rho$  の一例を第25図に示した。

つぎに含水量0の積雪では、一定の積雪断面における雪粒、すなわち氷の実質部分の断面積合計 ( $A_i$ ) と積雪の断面積 ( $A_s$ ) との間にはつぎの関係がなりたつ。

$$A_i \cdot \rho_i = A_s \cdot \rho \dots \dots \dots (7)$$

$\rho_i$  ... 氷の比重

(7) 式は

$$A_i = \frac{A_s \cdot \rho}{\rho_i} \dots \dots \dots (8)$$

となる。この式で、本測定法では、採取円筒の断面積が、積雪断面積 ( $A_s$ ) であつて一定であり、氷の比重 ( $\rho_i$ ) もまた約0.9で一定であるから雪粒の実質部分の断面積 ( $A_i$ ) は、その積雪密度 ( $\rho$ ) に比例することになる。

すなわち、

$$A_i = c\rho$$

積雪の種類別に積雪の強度を測定してみたところ第4表のような結果になつた。この測定結果の強度には二、三はなほだしい差のあるものがあるが、全体としては、1/10以下の誤差で、採取筒の太さに無関係である。積雪の不等質性を考えれば、このくらいの誤差は、他の測定法よりもよい精度と考えられ、またこの結果より片持梁として雪の強度を求める計算法にも大略あやまりがないこともわかるであらう。

(b) 積雪の曲げ強度と積雪の性質との関係  
この方法で測定した或る積雪層の深さ別の

ただし,

$$c = \frac{A_s}{\rho_i} \dots \dots \dots (9)$$

含水量 0 の積雪では、積雪の強さ ( $\sigma$ ) は積雪の断面に存在する雪粒 (氷) の部分のもつ応力の総合であると考えてよいから、この測定法における力の算出式  $\sigma_b = K\rho l^2 \dots (6)$  の両辺を (9) 式で除して、雪粒 (氷) の単位断面積に対する強度を求めると、

$$\frac{\sigma_b}{A_i} = \frac{K\rho l^2}{c\rho} = \frac{K}{c} l^2 \dots \dots \dots (10)$$

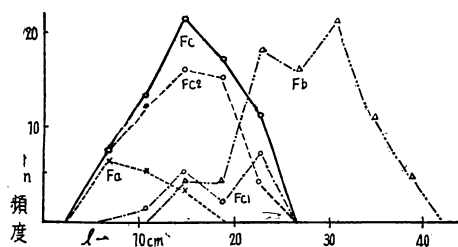
となる。すなわち、含水量 0 の積雪では、雪粒の単位断面積に対する強度は  $l^2$  に比例し、密度には無関係となる。

しかし、積雪では雪粒の総断面積は、多数の氷粒の集合からなりたつているのであるから、その強度は雪粒の大きさ、形に左右され、また雪粒の構造にも関係してくるはずである。

そこで、雪粒の形、大きさおよび構造がほぼ一定と認められる積雪では、密度に無関係に  $l$  がほぼ一定となるはずである。すなわち、雪質が同一と認められる積雪では、一定断面積の積雪の梁は長さがほぼ一定でおれることになり、この折れる長さ  $l$  で、積雪の組成成分、構造にともなう積雪の強さが測定できるはずである。

この関係は含水量のある積雪についても、ほぼ同様に説明できる。このような考え方により、第 25 図のように雪質別測定した ( $l$ ) を積雪の種類、すなわち新雪 (Fa)、締雪 (Fb)、粒雪 (Fc).... {大粒雪 (Fc<sub>2</sub>), 小粒雪 (Fc<sub>1</sub>)} に区分して、昭和 25~26 年冬に測定した約 200 例を統計的に集計してみると、第 5 表、第 26 図のようになる。

この場合積雪の種類は、肉眼的に明らかに差の認められるものを区分したもので、含水量に差があり、雪粒の大きさ、形にも、ある巾の変化があるから、この区分にしたがつて分けた ( $l$ ) にも変化はあるはずであるが、比較的巾のせまい分散をなし、積雪の種類に応じて  $l$  の平均値が明らかに区分できてよいはずであるが、第 5 表に



第 26 図 雪質別の  $l$  の頻度曲線

第 5 表

| $l$ の 長 さ |      | 頻 度 |    |                 |                 |                                        |
|-----------|------|-----|----|-----------------|-----------------|----------------------------------------|
| 範 囲       | 平 均  | Fa  | Fb | Fc <sub>1</sub> | Fc <sub>2</sub> | Fc <sub>1</sub> +Fc <sub>2</sub><br>Fc |
| cm        | cm   |     |    |                 |                 |                                        |
| 5~8       | 6.5  | 6   | —  | —               | 7               | 7                                      |
| 9~12      | 10.5 | 5   | —  | 1               | 12              | 13                                     |
| 13~16     | 14.5 | 3   | 4  | 5               | 16              | 21                                     |
| 17~20     | 18.5 | —   | 4  | 2               | 15              | 17                                     |
| 21~24     | 22.5 | —   | 18 | 7               | 4               | 11                                     |
| 25~28     | 26.5 | —   | 16 | —               | —               | —                                      |
| 29~32     | 30.5 | —   | 21 | —               | —               | —                                      |
| 33~36     | 34.5 | —   | 11 | —               | —               | —                                      |
| 37~40     | 38.5 | 1   | 5  | —               | —               | —                                      |
| 計         |      | 14  | 79 | 15              | 54              | 69                                     |
| 平 均       | cm   | 10  | 28 | 19              | 14              | 15                                     |
| 標準偏差      | cm   | ±4  | ±6 | ±5              | ±5              | ±5                                     |

示した  $l$  の長さ別の頻度によつて分散分析を行い、その平均値の差の有意性を検討してみると、つぎの結果がえられる。

$$Fb > Fc_1, Fc_2$$

$$Fc_1 \approx Fc_2 > Fa$$

$$Fa \approx Fc_2 < Fb, Fc_1 \text{ (危険率 } 0.05)$$

すなわち、新雪と締雪、粒雪と締雪との差は明瞭であるが、新雪と大粒雪とは差がない。新雪が締雪に変化すると  $l$  は著しく大となるが、締雪から粒雪に変化すると  $l$  は逆に小となり、 $l$  は雪の種類により明らかに区分できることがわかる。

この結果は積雪内の個々の雪粒が小で、しかもその組織の密な締雪が、組織の粗な新雪および個々の雪粒の大きな粒雪より積雪強度が大であることを示し、従来幾多の観察結果を裏書して、よく積雪の強さをいい表わしているものといえよう。

#### (密度との関係)

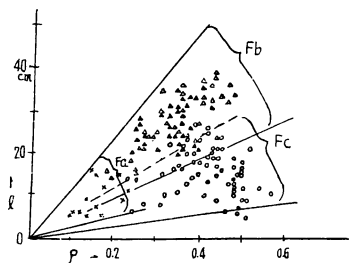
(10) 式によると、雪粒の大きさ、形、構造が一定で、含水量が等しいと、積雪の氷の実質部分の単位断面積に対する強さは  $l^2$  で代表できることになるが、同一分類に属する積雪では、雪粒の形、大きさはほぼ等しいが、密度が異なるとその構造が変つてくるはずであり、前掲のように積雪密度 ( $\rho$ ) は積雪の構造を代表するから、同一分類に属する雪でも密度により ( $l$ ) は変化するはずで、したがつて、積雪の梁の長さ  $l$  は、構造の粗密を代表する密度と、或る関係が認められてよいはずである。

そこで第5表に示したと同一の測定値  $l$  を、積雪の種類と密度 ( $\rho$ ) とにより図示すると第27図のような結果がえられる。

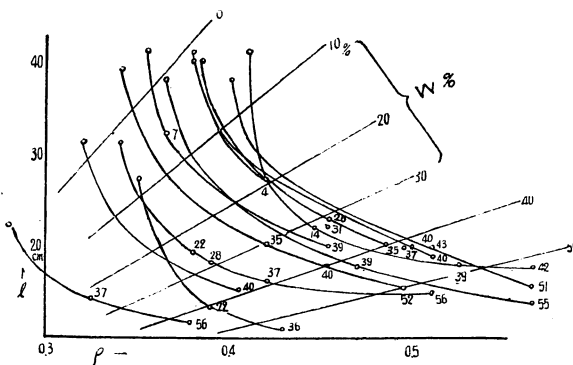
すなわち ( $l$ ) は、各雪質により明らかに区分できる原点を通る2線の間に分散し、密度 ( $\rho$ ) が大になるほど  $l$  が大となる関係が各雪の種類ともに認められる。各雪の種類について測定値が一定の角度の2線間に分散するのはつぎに記すように、含水量による変化があるためであると思われる。また新雪 (Fa)、締雪 (Fb) においては、密度に比例して  $l$  が著しく増大するに反し、粒雪 (Fc) ではそれほど増加しないのは、前者では雪粒の大きさ、形がさほど変化しないで、密度増加は主として積雪の構造が密になる結果であるに対し、粒雪では密度の変化が主として雪粒径の増加にともなつて起ること (粒雪になると構造はさほど変化しない) によるものと思われる。

#### (含水量との関係)

本測定法による  $l$  の長さの変化と含水率 (W%) との関係を示し、



第27図 新・締・粒雪と  $l$ ,  $\rho$  との関係



第28図 「しまりゆき」の含水率  $w\%$  と  $l$ ,  $\rho$  との関係

第 6 表 飽和した場合のしまりゆきの強さ

| Wa=0%                       |                               | Wc (飽水したもの)                 |    |                               |    |
|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----|-------------------------------|----|
| $\rho$<br>g/cm <sup>3</sup> | K<br>(a)<br>g/cm <sup>2</sup> | $\rho$<br>g/cm <sup>3</sup> | W% | K<br>(b)<br>g/cm <sup>2</sup> | ba |
| 0.16                        | 100                           | 0.36                        | 56 | 56                            | 56 |
| 0.24                        | 298                           | 0.41                        | 40 | 119                           | 40 |
| 0.28                        | 347                           | 0.62                        | 56 | 180                           | 52 |
| 0.28                        | 549                           | 0.59                        | 52 | 171                           | 31 |
| 0.33                        | 615                           | 0.72                        | 55 | 185                           | 30 |
| 0.36                        | 743                           | 0.72                        | 51 | 241                           | 32 |
| 0.36                        | 743                           | 0.60                        | 40 | 310                           | 42 |
| 0.37                        | 726                           | 0.62                        | 40 | 289                           | 46 |
| 平均                          |                               |                             |    |                               | 41 |

き」について測定した例が第 28 図である。これは 0°C の雪温で、含水率 0% の積雪に 0°C の水をふくませ、含水量を種々かえて行つた実験結果であるが、含水量の増加とこれにともなう  $l$  の変化、 $\rho$  の変化には一定の関係が認められる。すなわち、雪中の水分の増加により  $l$  の長さは初期急激に減少し、含水量がさらに増加し、飽和に近づくと、その減少度は少なくなる。すなわち、含水率と強度との関係は一定の曲線で示しうることがわかる。第 28 図から数例を取り出し、積雪の抗彎強度と含水率との関係と比較すると第 29 図のようになる。この関係は第 23 図とほぼ同じである。また、第 27 図の「しまりゆき」の変化の巾をこの結果と比較すると含水率 10~30% の範囲であつたことがわかる。

第 6 表は含水率 0% の雪温 0°C の雪と、これを飽水した雪との曲げ強度を比較した一例であるが、積雪の強度は、水を充分に含むと 50% 以下に減ずることがわかる。

この結果は「ざらめゆき」等についてもたしかめられた。

( $l$  と  $\rho$  と  $W$  との関係)

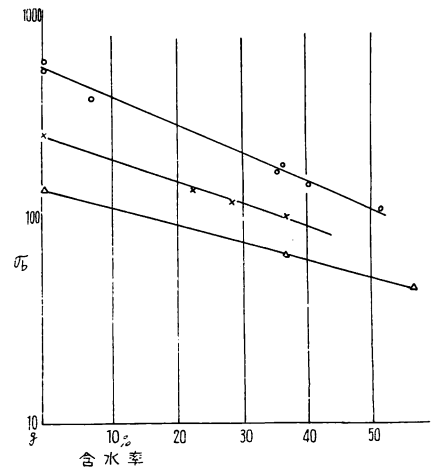
前述の密度  $\rho$  と  $l$  との関係、含水率  $W\%$  と  $l$  との関係を総括的に図示すると第 30 図のごとく、はなはだきれいな関係が三者間に認められ、積雪の強さを代表する値として、この曲げ強度が用いられることと、この 3 つの値のうち 2 つを知れば、力学的な積雪の性質が大略求められることがわかるであろう。

そして新雪——締雪と粒雪とは判然と 2 個の集団にわかちえられ、その力学的性質が著しく異なり、前者は後者より全般的に強度の強い積雪であることがわかる。

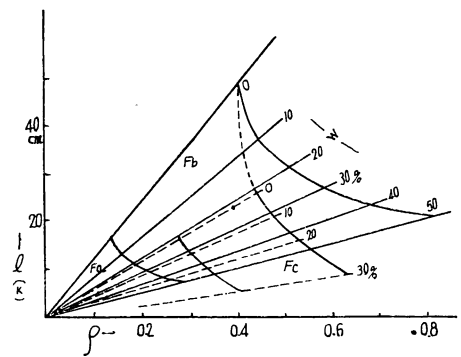
(上圧と強度との関係)

抗剪力のところで第 19 図に一例を示したように、積雪も土等と同様に、抗剪力は粘着力と摩擦とに区分できるのであるが、この抗彎強度についても、このことが実証される。

同一の種類の雪での密度の増加は、上圧と一定の関係があることを第 17 図に示したが、この関係を用



第 29 図  
積雪の抗彎強度  $\sigma_b$  と含水率  $W\%$  との関係



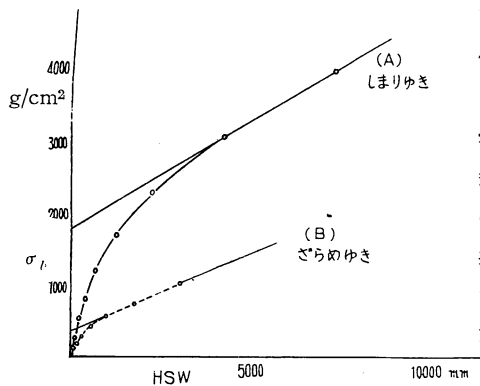
第 30 図  
 $l$ ,  $\rho$ ,  $W$  により区分した新・締・粒雪の範囲

第7表(a) しまりゆき W%0

| 密度( $\rho$ )                    | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 | 0.55 | 0.60 |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $l$ (cm)                        | 24   | 30   | 36   | 42   | 48   | 54   | 60   | 66   | 72   |
| $\sigma_b$ (g/cm <sup>2</sup> ) | 149  | 290  | 502  | 796  | 1189 | 1693 | 2322 | 3091 | 4012 |
| HSW(mm)                         | 74   | 130  | 230  | 420  | 740  | 1300 | 2300 | 4200 | 7400 |

第7表(b) ざらめゆき W%0

| 密度( $\rho$ )                    | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 | 0.55 | 0.60 |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $l$ (cm)                        | 12   | 15   | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   |
| $\sigma_b$ (g/cm <sup>2</sup> ) | 38   | 73   | 125  | 199  | 297  | 423  | 581  | 772  | 1003 |
| HSW(mm)                         | 31   | 55   | 100  | 180  | 310  | 560  | 1000 | 1800 | 3100 |



第31図 HSW と  $\sigma_b$  との関係

いて  $l$  と  $\rho$  との関係を  $l$  と HSW (積雪量) との関係に直して抗彎強度と上圧との関係を計算してみよう。

たとえば、含水量 0% の締雪の  $l$  値を第 30 図より密度別に求め、その密度を与える積雪量 (上部にある積雪の単位面積当りの重量) を第 17 図 (a) のしまりゆきの積雪量と密度との関係から求めてみると、第 7 表 (a) のようになる。本表を図示したのが第 31 図 (A) である。同様に含水量 0% の「ざらめゆき」について求めたのが第 7 表 (b) および第 31 図 (B) である。

この図でわかるとおり、積雪量 (HSW) で表わし

た上圧に対し積雪の強さは曲線的に変化することにな

り、前に例示した第19図、第20図とほぼ似た結果になる。いずれも上圧がある程度以上大となると、曲線はほぼ直線と見做しうるようになるから、第31図の締雪は (A) 線で示したような直線と考えてよく、

$$\sigma_b = C + K \tan \theta$$

の形で  $\sigma_b$  を求めてよいことになる。A 線では

$$C \approx 1700 \text{ kg} \quad \theta \approx 72^\circ (f=3)$$

で、前例の「しまりゆき」の値とほぼ一致し、「ざらめゆき」の (B) 線では

$$C \approx 300 \text{ kg} \quad \theta \approx 65^\circ (f=2)$$

で、これも前例の「ざらめゆき」の値とほぼ等しくなる。

これらの例でわかるとおり、第 19 図の加圧剪断試験で求めた結果は、土の場合と同様、積雪の構造を破壊して最も密な状態につめなおして上圧を加えても、それにとりなつて密度がほとんど変化しない状態にした場合の、上圧に対する積雪の強度変化の関係であつて、一般の積雪では、このように大きな上圧のもとに存在するものはなく、積雪はもつと粗な組織にあり、したがつて密度も小さいから、積雪の強さは上圧に比例して増大せず、積雪の密度が増加するとともに、強度を増すことになるから上圧と強度とは直線的な関係とならず、曲線的な関係として現われてくるのであろう。

ともあれ、一般に第 31 図でもわかるごとく、同一の上圧に対して積雪では、「しまりゆき」の方が「ざらめゆき」より、粘性も摩擦力も大であると考えられ、この点はすでに述べたところとよく一致するのである。

## 結 び

積雪の曲げ強度は、従来行われなかつた新しい方法として、筆者が提案したものであるが、この方法により、積雪の強度が従来の各種測定法より簡易にかつ良好な結果をもつて測定せられ、積雪の強さと積雪の各種物理的性質との関係が一層明らかになつてきたのである。

すなわち、

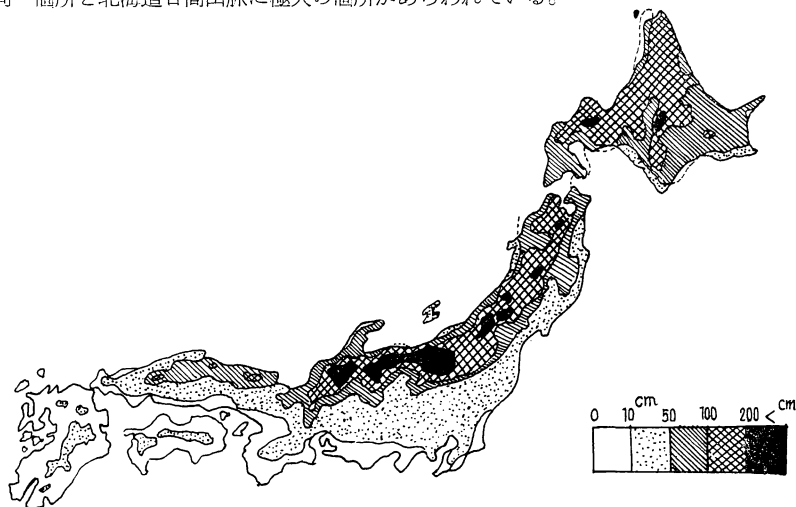
- (a) 積雪の強さは、積雪の形状および大きさにより明らかに差があり、昇華変態のみを受けた「締雪（しまりゆき）」は融解変態を受けた「粒雪（ざらめゆき）」より強度が大である。
- (b) 密度は積雪の構造を代表しうる物理量であり、密度が大なるほど、強度は著しく強くなる。
- (c) 積雪中の含水量は、強度を弱める方向に働く。
- (d) 積雪の強度、雪の種類、密度、含水量の間には一定の関係が認められ、決して不規則なものではない。

ただし、本節では、気温（特に  $0^{\circ}\text{C}$  以下の気温）の強さへの影響は除外して考えなかつた。これは筆者の行つた実験が比較的気温の高い東北地方で行われたこと、低温室の設備をもたなかつたため、 $0^{\circ}\text{C}$  以下の積雪についての実験が行いえなかつたことによる。したがつて、 $0^{\circ}\text{C}$  以下の雪温をもつ積雪の強度が、どのように変化するかはまだ明らかにされていない。

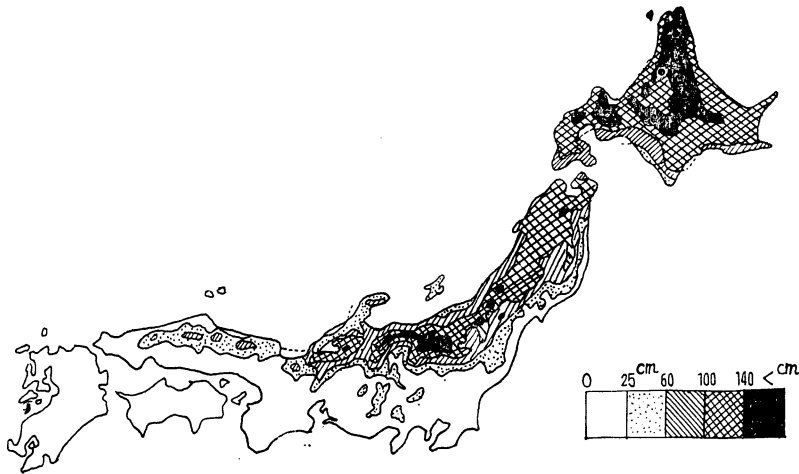
## 第2節 雪圧に関係する積雪の地理的、地形的分布

## 1. 積雪の地理的分布

積雪の地理的分布はすでに多くの調査があり、第 32 図に最深積雪の分布図、第 33 図に根雪期間の分布図<sup>35)</sup>を示したが、両図で明らかなように、わが国では全体として裏日本にかたよつた分布をしている。そして、奥羽地方から北海道にかけては、太平洋岸にも積雪をみるようになるが、奥羽南部以西では、確然とその分布が裏日本およびそれに続く内陸にかたよつている。積雪深で代表できる量においては、特に中部地方高山帯より、上越、出羽の山岳丘陵地帯の日本海に面した側に本邦の最深箇所があり、根雪期間も同一箇所と北海道日高山脈に極大の箇所があらわれている。



第 32 図 日本の最深積雪分布図（雪の気候図より）



第 33 図 日本の根雪期間分布図（雪の気候図より）

積雪量の多いことは、前記のように積雪の密度を増し、したがって積雪の強さを増加する一方、荷重としての雪圧を増大することになり、根雪期間の長いことは積雪荷重、雪圧を長期にわたって地物上に保つことになるほか、本報告ではふれないが、植物に対しては生育期間を短縮し、生育期の温度の低下を招来するのである<sup>36),37)</sup>。

裏日本が多雪であり、特に新潟、山形両県下が多雪であることは降雪が主として、大陸気団の発達による冬季の北西主風によりもたらされ、この地域が北西風に直角に面し、日本海を越えて吹く距離が最長であり、したがってより多くの水蒸気を含むことで説明されており、北西風は脊梁山脈により上昇気流となり、ここに多量の降雪をもたらすのである。

降雪は、このほか内陸にできた不連続線や北上する低気圧によつても、それが寒冷な気塊と混じることによりおこり、これらの方が水蒸気を含み方が多く、多量のはげしい降雪を起すこともある<sup>38)</sup>。

根雪期間の長短は、大体ある地点ではその積雪量に比例するが、個所が異なると、融雪期の気温が

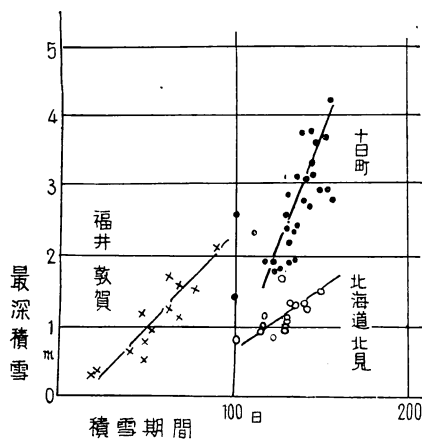
影響し、その結果積雪量が少なくとも長く残ることになる。北海道のごときは、積雪量は比較的少ないが気温が低いので、根雪期間は逆に長い。

第 34 図は積雪調査表<sup>39)</sup>より各地の根雪期間と最深積雪深との関係を比較したものである。

## 2. 地形的分布

### (i) 海拔高と積雪量

積雪量が海拔高とともに増加する傾向は、降水量に比べると同様に認められるが、山頂近くなると逆に減少する。これは風による吹き払いによるものであろう。また、その増加率は方位、地形および年により差があり、同一個所でも一定の傾向は認められぬようである。第35



第 34 図 本邦各地における積雪期間と最深積雪との関係

図41~44)は秋田営林局で測定した。高度と積雪量との関係を示す一例である。このような例は最近各地でかなり多く測定されている。

海拔高による積雪量の増加は積雪重量、強度を増すのみでなく、高所は気温も低下するので、積雪は融解変態をほとんどうけず、昇華変態が主として行われるため、積雪層中の「しまりゆき」の割合が多くなり、一層積雪の強さが増すことになり、機械的な雪害度を高める。

## (ii) 地形の変化の影響

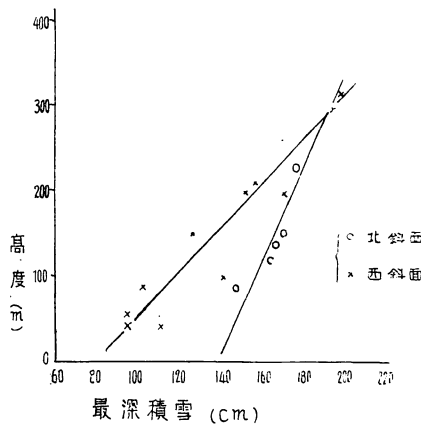
積雪量に影響する地形は、主として降雪地の風向に対する傾斜面の向きと地形の凹凸とである。

冬季主風の風上面の山頂近くは風衝地となり、積雪量は減少するが風下面上部では雪庇を形成し、その下部には吹溜りができる（第 36 図）。

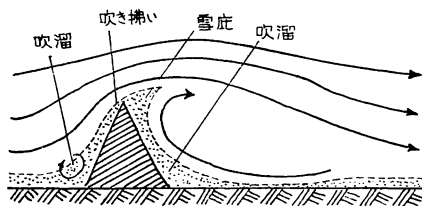
雪庇は山頂部の傾斜角により発達する場合としない場合があるが、いずれにしても風下面上部には積雪深の深い個所ができるのである。山腹の地形の凹凸による積雪量の変化は、積雪初期には、その積雪を作

つた降雪の仕方に左右されて種々変化するが、時とともに安定してきて、谷間には吹溜りができ、さらに上部からの雪崩や積雪の匍行、移動によって雪が集まり深くなり、山腹は吹き払われて一般に浅くなってくる、また、山腹傾斜面でも凹地は著しく深くなる。第 37 図はその一例である。

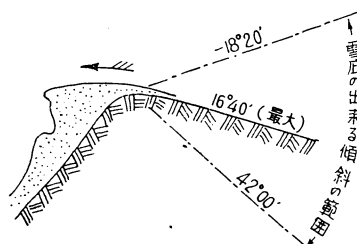
地形はまた、気候を局所的に変化する。気温、日射が斜面の向きにより異なるので、積雪粒子の変態過程を変化せしめる。また、融雪水が雪層に沿って下降して傾斜下部の雪質をかえる。その著しい例は、南面と北面、山頂と山腹との雪質の差であつて、北面は締雪の割合が多く、南面は粒雪の割合が多くなる。第 38 図はその一例である。雪質の差は前記のように積雪の強さに著しい影響を及ぼすから、積雪量の多寡とともに雪圧に關係する重要な因子となる。日射、気温の斜面の向きによる差は融雪量にも影響し、南面の日当地は一冬季を通じて積雪



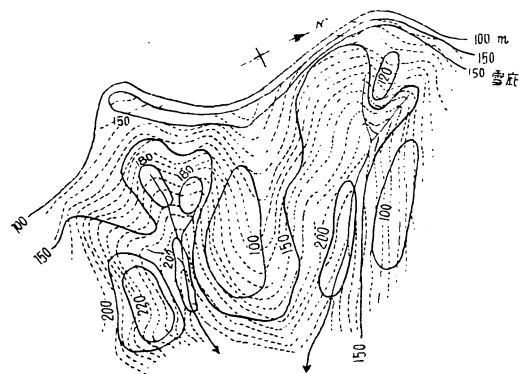
第 35 図 阿仁川の積雪深と海拔高（昭 26）



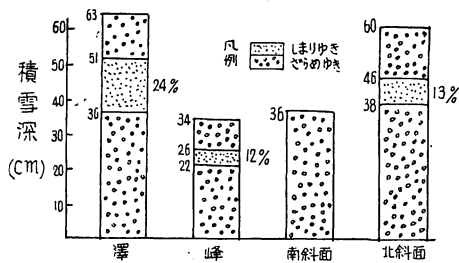
第 36 図 (a) 障害物と流線（模式図）  
（高橋原図）



第 36 図 (b) 雪庇と地形（高橋原図）



第 37 図 地形と積雪深との関係の一例  
（昭 23. III. 6）釜淵水源涵養試験林



第 38 図 (a) 方位および個所別の積雪の質および深さの変化の一例 (釜淵)

量が少なく、消雪も最も早く、谷間および平坦地、北面は長く残雪する。

要するに、地形による積雪の量および質の変化は、地形が風向、風力、気温、日射等の気候条件を変化せしめることにより起るもので、局部的に量および質が変化し雪圧を増大または減少せしめるものである。

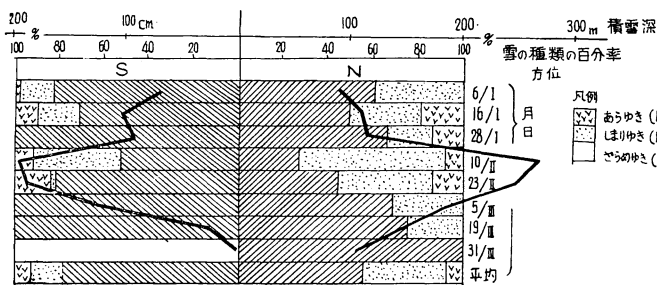
### (iii) 傾斜の影響

傾斜地の積雪には平地と異なつた特性がある。それは、同一の降雪量に対して平地より積雪深が大となること

と。いい換えると、密度が小となることである。

無風で雪片がほぼ垂直に落下し、傾斜面に落達した雪片が、その位置から転落しない場合は、積雪量は傾斜いかんにかかわらず、同一垂直投影面積に対しては同一

量であるべきであるが、積雪はこ



第 38 図 (b) N.S. 斜面の積雪深と雪質の割合の変化 (釜淵)

このような場合に、傾斜角とともに積雪深を増す。つまり、傾斜角に関して積雪の堆積状態が粗となるのである。

筆者の行つた実験<sup>32)</sup> は 3 尺×6 尺の荒けずりの板戸を傾斜別に並べ、これに対する積雪量、密度、積雪深を降雪の都度測定したものであるが、その結果、各傾斜別の積雪深はつぎのごとくとなつた。

$$h_1 = 1.08 h_0 \quad h_2 = 1.23 h_0 \quad h_3 = 1.33 h_0$$

$h_0, h_1, h_2, h_3 \dots 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$  の傾斜面の新雪深 cm

この結果は傾斜を増すにしたがつて、積雪深が増加することを示している。傾斜地の積雪深と平地の積雪深の間にはつぎの関係が成立する。

$$A\% = 100 + b\% \sin \theta \dots \dots \dots (11)$$

A%...平地に対する傾斜地の新雪深百分率 b%...傾斜角に対する増加率  $\theta$ ...斜面の傾斜角

さらに、これに降雪中風があると、風速が大なるほど積雪は吹払われて積雪深は減少する。その減少度は傾斜が増すほど大となり、積雪深、傾斜角と風速との関係はつぎのごとくなる。

$$B\% = c\theta^d V_w \dots \dots \dots (12)$$

B...風速による減少率 % c, d...常数  $\theta$ ...斜面の傾斜角  $V_w$ ...風速 m/sec

(11), (12) 式を総合すると

或る傾斜面に積つた積雪の傾斜角および風速による関係式が求められる。

すなわち、

$$\frac{h\theta}{h_0} 100 = a + b \sin \theta - c\theta^d V_w \dots \dots \dots (13)$$

$h\theta$ ...傾斜角  $\theta$  の新雪深  $h_0$ ...水平面上の積雪深

要するに傾斜面の積雪は平地の積雪に比べ、傾斜が大となるほど、深さを増すのであるが、これは、単位面積当たりの積雪重量が大となるためではなく、密度が小となることに起因しているのである。密度が小となる原因はまだはつきりしないが、この結果、積雪の強さが小さくなり、傾斜が大なるほど、積雪は動きやすく雪崩の危険が増大するほか、雪圧等もかえつて小となることになるのである。

傾斜面において積雪の密度が小となるのは、今までの調査では積雪の粒子の水平方面の連なり方が著しく粗になるためのようであるが、その原因は今のところはつきりしない。

### 第3節 雪圧に関する気象気候の影響

#### 1. 積雪の年による変化、場所による変化

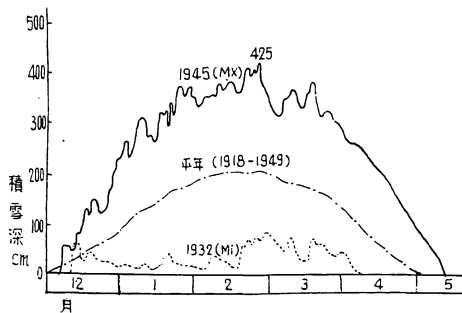
積雪量は年々の気象条件により著しく変動する。その変動量は低地ほど大で、また南へゆくほど大である。

たとえば、新潟県十日町 30 年の観測資料によると、最深積雪の極は昭和 20 年の 425 cm であるに對し、最低の最深積雪は昭和 7 年で僅かに 84 cm にしか達しなかつた。第 39 図は兩年の積雪深変化を図示したもので、年による変化の巾の大きさがよくわかる。

第 8 表は釜淵の 14 年の観測値から計算した危険率別の最深、最浅の積雪深であるが、これも同様に変動のはげしさを示しているものである。

年々の積雪深の増減には、週期性<sup>33) 34)</sup>があるともいわれているが、積雪の深い年は、それだけ積雪重量が大となるばかりでなく、積雪の種類も「しまりゆき」の割合が増大し、積雪の浅い年は、「ざらめゆき」の割合が多くなる。したがつて、多雪年は積雪の強度が増す結果、雪圧による被害も著しく増大する。第 40 図は十日町で測定した多雪年と寡雪年の「しまりゆき」「ざらめゆき」の比の年変化の一例である。

さらに多雪年は降雪の頻度が大で、降雪持続日数が長く 1 回の降雪量も著しく大きな、いわゆる「ばか雪」の降ることが多い。



第 39 図 積雪深（極大、極小）（十日町）

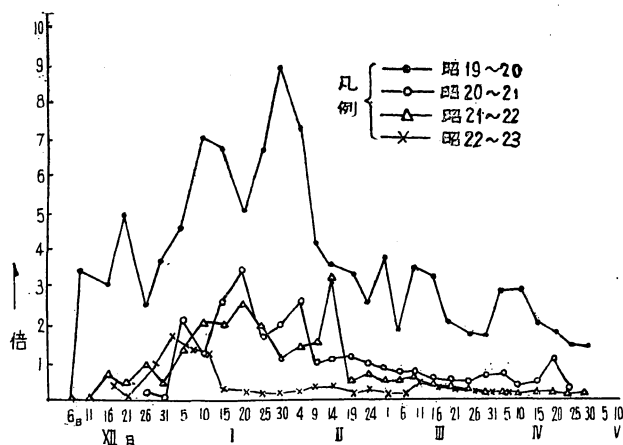
第 8 表 最深積雪の変化の巾（釜淵）

| 危険率 | 1/2 | 1/5 | 1/10 | 1/20 | 1/50 | 1/100 |
|-----|-----|-----|------|------|------|-------|
|     | cm  | cm  | cm   | cm   | cm   | cm    |
| 最 深 | 218 | 253 | 275  | 296  | 321  | 340   |
| 最 浅 | 146 | 113 | 89   | 69   | 43   | 24    |

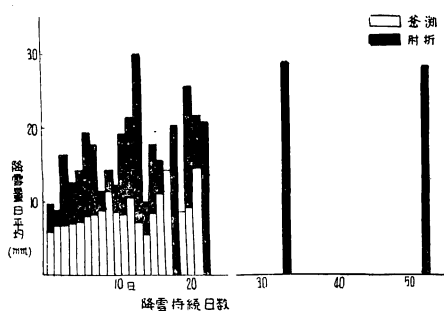
注：危険率とは発生の頻度で、1/2 とは 2 年に 1 回、1/5 とは 5 年に 1 回起きることを意味している。

第 9 表 十日町における多雪年と寡雪年との比較（昭 20. 多雪，昭 7. 寡雪）

| 区分<br>月 | 降 水 量             |                   | 降水最大日量             |                    | 降水最大時間量           |                    | 積雪深の極            |                   |
|---------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------------|
|         | 昭 7               | 昭 20              | 昭 7                | 昭 20               | 昭 7               | 昭 20               | 昭 7              | 昭 20              |
| 1       | 203 <sup>mm</sup> | 647 <sup>mm</sup> | 25.7 <sup>mm</sup> | 74.3 <sup>mm</sup> | 4.9 <sup>mm</sup> | 11.7 <sup>mm</sup> | 48 <sup>cm</sup> | 385 <sup>cm</sup> |
| 2       | 245               | 401               | 44.0               | 31.6               | 5.5               | 4.2                | 84               | 425               |
| 3       | 275               | 392               | 30.8               | 39.9               | 6.0               | 6.6                | 83               | 387               |



第40図 積雪中の「ざらめゆき」の深さに対する「しまりゆき」の深さの割合(十日町)

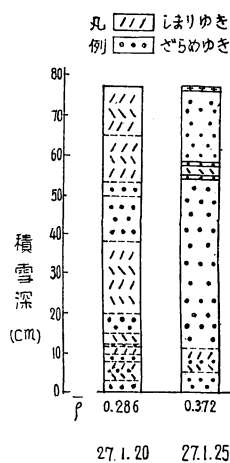


第41図 釜淵と肘折の積雪の比較

転をおこし、雪崩の原因を作る。

風は一般に地物への冠雪、着雪を少なくするが、ある風速までは降雪の落下線を垂直線から曲げて傾斜

させる結果、降雪落下線に対する物体の投影面積をますことになる。たとえば樹木等では、樹冠内への吹き込みを増す結果、冠雪量を逆に増すこともある。



第42図 (十日町)  
雨による雪の種類の変化

十日町の例を示すと第9表のとおりである。また、第41図は山形県最上郡大蔵村肘折と、及位村釜淵の2箇所の降雪持続日数と平均降雪日量との関係を示したものであるが、肘折は月山山麓にあり、本邦でも屈指の多雪地である。図で見るとおり、肘折では日平均降雪量が著しく大であるとともに、30日、50日の連続降雪(毎日降雪のある日が続くこと)があるのである。

このような個所では、樹木の雪圧による被害と、冠雪重量による被害が年々多量におこっている。

## 2. 風の影響

風の影響は、積雪の地物への堆雪、着雪を吹き払つたり、物体に動揺を与えて冠雪を落下せしめたりする作用、地形の影響と相まつて凹所に吹溜りを、凸所に吹き払いを作る作用のほか、積雪の結晶を機械的に破壊して微細化し、いわゆる、風成雪を作る作用がある。地物への冠雪、着雪を減少する作用は地物の雪害を少なくするが、吹溜りは積雪の荷重および力を大にし、風成雪は雪表面のみ非常にきん密な積雪を作るので、密度の逆

## 3. 降雨の影響

冬期、雪上の降雨は積雪の氷の粒子の凝集を早める。すなわち、積雪層に浸透した水分は積雪中の雪の粒子表面に水膜を作り、その表面張力により近接した雪粒子を集合する。その結果新雪、締雪の粒雪化を早める。また、降雨による雪中の水分は、雪粒子間の氷の橋による連絡を断つことにもなり、積雪の強度を弱める作用をもつ。第42図は十日町の積雪断面調査の一例で、昭和27年1月20日から25日の間に降雨が2日あつたために全積雪層の雪質が急激に変化して粒雪化してしまい、平均密度は0.29より0.37と飛躍的に増加した例である。

## 4. 気温、日射の影響

積雪は輻射熱により、また空中からの伝導熱により、熱を吸収して融解し、夜間は雪面からの逆輻射により凍結するから、雪表面は粒雪化する一方、日中融解して生じた水は雪層内を流下し、降雨同様、深部まで徐々に粒雪化してゆく。このため、積雪層は融雪期にはいり気温が昇り、日射が増すと、短時日のうちに全層がほとんど粒雪になってしまう。

ゆえに日射、気温も積雪の強さを弱める方向に作用することが多く、 $0^{\circ}\text{C}$  以下の低温で昇華変態が主として起るような年や場所では、おそくまで締雪が積雪層の主要部分となり積雪の強さが増すのである。

#### 第4節 雪 圧 の 分 類

林木の雪害に関係のある雪圧にはつぎの種類がある。

##### A. 冠雪, 着雪重量

- B. 雪 圧
- i) 沈 降 力
  - ii) 匍 行 力
  - iii) 雪 崩 力

A の冠雪着雪重量は単なる積雪の重さであつて、これは林木その他の地物上に積りまたは附着する積雪の重力作用であるが、林木等の地物の雪害原因としては前述のように有力なものであるから、便宜上雪圧の一部として取り扱うことにする。

B はいずれも積雪を形成する氷粒の積雪層内部における変態、密度を増加する方向への圧縮移動による塑性的な変形、歪により起る力に原因しており、

i) 沈降力は平坦地で、積雪の重量方向への沈下圧縮に起因する雪圧であり、

ii) 匍行力は傾斜地で、積雪の傾斜方向への移動圧縮に起因する雪圧である。

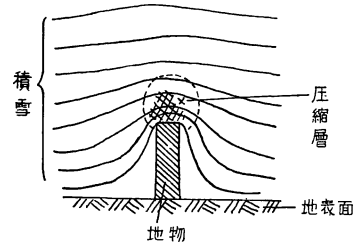
この二者はいずれも静力学的な力であるが、

iii) 雪崩は、傾斜面の積雪の崩落による動力学的な力であつて、

既述のように本報告ではふれない。

これらの積雪のもつ力は、平坦地の雪中に埋まつた地物や傾斜地にある地物に作用する。積雪は垂直方向あるいは傾斜方向へ積雪の重量により時間とともに「ずれ」るが、地物はその上面の受圧面で、この「ずれ」を阻止し、支持するから、地物の周辺で、積雪のずれ方に歪が起る。このことは相対的に地物が積雪に力を

及ぼし、積雪に歪を作つた結果起つたとも考えられるのである。この結果、第 43 図のように、いずれの種類積雪でも、密度を大にする方向に圧縮歪を生ずるから、地物の受圧面の上面附近には密度が特に大なる圧縮された積雪層ができる。この密度の大なる圧縮層では、前述のように積雪の強さが大となり、したがつて、その支持力は大きで、積雪は地物の周辺で切れ落ちることがほとんどなく、時間とともに積雪量が増すと、ある限界までは上部の積雪塊を地物上面でささえることとなり、これが雪圧として逆に地物に力を及ぼすものと考えてもよいであろう。



第 43 図

#### 総 括

(1) 積雪の組成分は、氷、水、空気よりなり、積雪の密度と含水量を測定することによりその組成分が

求められる。

- (2) 積雪の構造は、雪粒の形、大きさおよび密度と含水量の差により、概略は求められるが、その構造にはまだ不明の点が多い。
- (3) 積雪の種類は、氷粒の外観より新雪（あらゆき）、締雪（しまりゆき）、粒雪（ざらめゆき）に大別できる。このほかに氷板（ひようばん）、霜粒雪（しもざらめ）がある。これらは主として積雪の昇華および融解、再凍結により変化する。
- (4) 積雪の密度は積雪の変態と、雪粒間の凝集および上部の積雪層の荷重による圧縮および水分の含み方により変化する。特におのおのの雪の種類では積雪の自重による圧縮が関係する。
- (5) 積雪の含水量は筆者等の完成した遠心分離法で最も精度よく、かつ簡易に求められる。
- (6) 積雪の強さは、主として雪の種類と密度と含水量とに関係して変化し、雪の種類では「しまりゆき」が最も強く、密度が大なるほど、含水量が小なるほど積雪は強くなる。
- (7) 積雪の強度を測定するには、筆者の発案にかかる「曲げ強度」が最も良いようである。
- (8) 雪圧には冠雪着雪荷重、積雪の沈降、匍行力および雪崩がある。

## 第Ⅲ章 雪 圧 各 論

### 第1節 冠 雪 荷 重

地物への堆雪や着雪については、通信、鉄道方面で、電線、電柱への着雪、冠雪に関しての研究がかなりある<sup>46,47,48</sup>。特に電線への着雪、すなわち、いわゆる「筒雪」についてはその発生機構がほぼ判明してきている。電線への着雪は降雪初期の水分の多い雪片が電線上で融解し、電線の周囲に水膜を作ると、その後の雪片は水膜に吸着されて附着し、その上に雪が積り、徐々に高さを増してゆく。その量が増大すると不安定になり電線を中心にして附着した雪が回転し、さらにその上に着雪するというように筒状の着雪が回転しながら太つてゆく。そして遂に太い筒状の着雪を生ずるのである。これに外見上似た現象で地物への着氷現象があるが、この発生機構は全く別で、積雪の地物への附着、堆雪とは関係が少ない。

樹木等の地物への雪の附着堆積は冠雪といわれ、樹冠への冠雪は総説で記したように、その荷重により樹木は屈倒、折損し、さらに沈降、匍行等の雪圧を受ける誘因にもなるので、雪害の原因としては重要な因子の一つである。

樹木の冠雪は、降雪のつど常に多少は発生をみる現象であるが、冠雪について、その対象を樹木雪害と限定した場合問題になるのはつぎの諸項目である。

- i) 樹木の雪害を起すような冠雪はいかなる気象条件で起るか。
- ii) 樹木の雪害を起すような冠雪はどのようにして積るか。
- iii) どのような樹木が、また樹木のどこが冠雪荷重に弱いか。

また樹木の冠雪害にはどのような種類があるか。

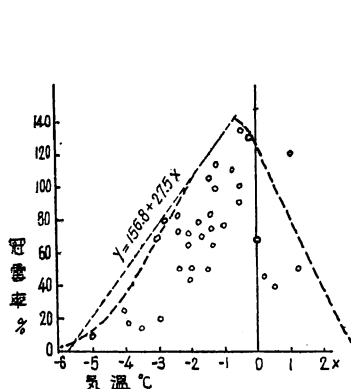
以下、これらについて述べることにする。

なお、上記の着雪に似た現象も、樹木の枝葉でもおこなことがあるが、ここでは省略する。

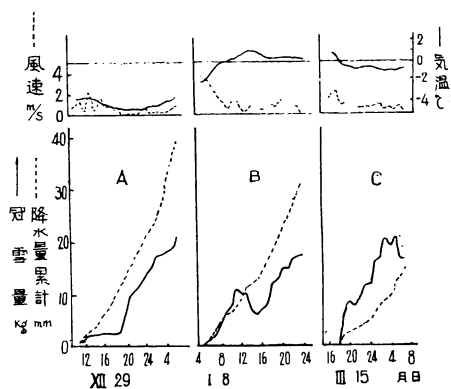
#### 1. 冠雪発生の気象的条件

##### (a) 気温、日射

電線の筒雪発生時の気温についていわれているのと同様、比較的気温の高い時、すなわち  $0^{\circ}\text{C}$  を中心



第44図 気温と冠雪率との関係(十日町)



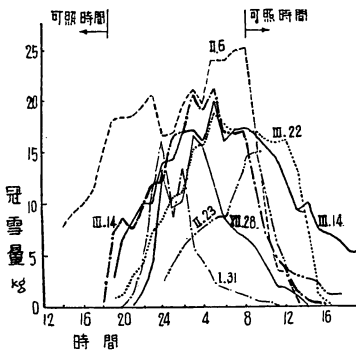
第45図 降雪中の気温別による冠雪の一例(十日町)

として  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  くらいの時に最も多量の冠雪が発達する。特に、高い気温から低い方へ移行する時に起りやすい。非常に低い温度でも冠雪はできるが、冠雪量の降雪量に対する比率は著しく小さくなる。第 44 図は昭和 24～25 年冬、十日町でスギを用いて実験した一例であるが、冠雪率とは同一投影面積への冠雪量と降雪量との比であり、本図では、 $0^{\circ}\text{C}$  よりやや低温の場合にその率が最大となり、それ以上またはそれ以下の気温では、いずれも冠雪率が急激に低下している。第 45 図は冠雪の増加経過と、気温の変化との関係を示したもので、やはり  $0^{\circ}\text{C}$  よりやや低い気温で、しかも気温が (+) より (-) に移行するような場合に、冠雪量が増加することが (C) 図によりわかる。(A) 図は気温がやや低すぎるので降雪量より冠雪量が著しく少なく、(B) 図は気温が高すぎて、冠雪量が少なくなつた例である。

このような気温条件は、雪片の粘性に関係があり、少量の水分を含んだような雪片の方が、樹冠への附着もよく、またその後の冠雪のだれによる着雪面の増大にも有効であるからで、低温の乾燥した雪片では、逆に附着力も少なく、安息角も小となつて冠雪量が増大しないようになる。これらについては、さらに後述しよう。

日射は地物の温度を上昇させるから、冠雪は積るとすぐその温度を吸収してつぎつぎととけるため、日中多少でも日射のある時は、冠雪は発達しがたい。また、いつたん発達した冠雪も日射を受けると、その直後つぎつぎと滑落してしまうことが多い。この場合は日射により暖められた地物がその表面に接した冠雪を融解し、それによつてできた水が滑剤として働くためであろう。したがつて、冠雪は夜間の日射のない時に起りやすい。夜間は逆に地物からの輻射により地物が冷却するから、それによる冠雪の地物表面への凍結も冠雪を助長する。

第 46 図は上述のスギで測定した冠雪量の増減と時刻との関係であるが、冠雪量の極大は夜半に、極小は正午以降に出現している。

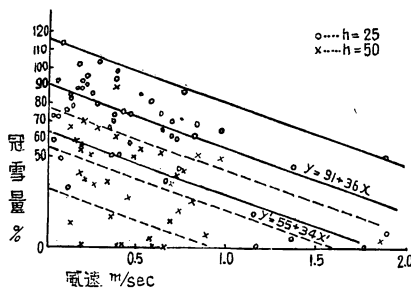


第 46 図 冠雪量の消長と時間(十日町)

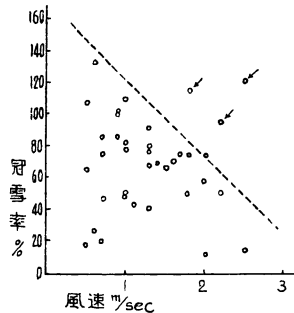
#### (b) 風

冠雪は地物が風で動揺すると落下する。また、風は冠雪を吹き払う作用をもつので、風速の大な時は冠雪は発達しない。

第 47 図は六角錐(底面積  $585\text{ cm}^2$ 、一辺  $15\text{ cm}$ 、高さ  $25\text{ cm}$  と  $50\text{ cm}$ ) の木製の樹冠模型への冠雪比率(同一形の平板上への冠雪量との比でしめたもの)と平均風速との関係を示したもので、また第 48 図はスギの冠雪比率と風速との関係を示したもので、いずれも風速  $2\sim 3$  米で冠雪量は 0 になつてしまう。



第 47 図 風速と冠雪率との関係  
(釜淵)



第 48 図 風速と冠雪率との関係  
(十日町)

しかし、風は他方、降雪の傾斜角を変え、第 10 表に記したように風速が少々増しても、降雪はほとんど水平に降ることになるので、樹木のように多数の枝葉が段状に発達したものでは、この降雪の傾

斜により枝葉間へ降雪の吹き込みを生じ、風速の増加とともにある範囲内の風速ではかえつて冠雪量を増す傾向も認められる。この現象についても後述することにする。

すなわち、風速には正反対の二作用があるが、通常は吹雪のおこるような風速では冠雪量を減少する作用の方が大である。したがつて、寒冷な北西季節風にともなう降雪では冠雪は発達せず、雨やまたは曇から雪に変わるような、偏南風の静穏な比較的温暖な気象条件の時の降雪によつて冠雪が増大する場合が多く、多雪地よりも南部の寡雪地に冠雪による雪害が多い<sup>10, 50, 51, 52, 53</sup>。

#### (c) 降水量

統計的にみると降水量で 30 mm, 新雪深で 20~30 cm 以上が連続してある場合に冠雪量は大きくなり、冠雪の害が起ることがしばしばある。

#### (d) その他

以上述べたことからわかるように、地形的には、風下面の風のあたらず所、日蔭の日射のない所、吹溜りになる凹地、林内の空地、林孔等の吹溜りでは冠雪が増大する危険が大で、林孔周辺の樹木がしばしば冠雪により林孔内へ倒れかかっているのが見受けられる。

### 2. 樹冠形と冠雪

樹冠の形を分解して考えてみると、下記のように分けられると思う。

- 枝葉の分岐と太さ：これは一種の網状の形と考えられるから一々の細い枝葉の集合体に分解できる。
- 枝葉の重り方：これは単純にすれば、平板が重っているものと考えられる。
- 樹冠全体の外形：これは一種の錘体と考えてよいであろう。

そこで、樹冠の冠雪を、つぎの 3 種について模型的に測定してみた。

- 太さに対する冠雪の仕方
- 平板の重なりに対する冠雪の仕方
- 錘体に対する冠雪の仕方

以下、これについて述べよう。

#### (a) 地物の太さと冠雪量

細長な板を用いて、その巾を 0.1, 0.3, 0.5, 0.6, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 15.0, 30.0cm の 10 種とし、その板の上に積つた冠雪の高さおよび量を測定してみたところ、1 回の降雪（24 時間以内のもの）に対しては、雪片の性質にもよるが、大略、各巾に応じて冠雪高の極限値があることがわかつた。それは冠雪は雪の粘性に応

第 10 表 風速と降雪の傾斜

| 風 速<br>m/sec | 降雪の<br>角 度 | 雪片落下速度<br>m/sec |
|--------------|------------|-----------------|
| 0            | 90         | —               |
| 1            | 45         | 1.00            |
| 2            | 30         | 1.15            |
| 3            | 22         | 1.21            |
| 4            | 17         | 1.23            |
| 5            | 13         | 1.16            |
| 6            | 9          | 0.95            |
| 7            | 6          | 0.77            |
| 8            | 3          | 0.42            |
| 9            | 2          | 0.32            |

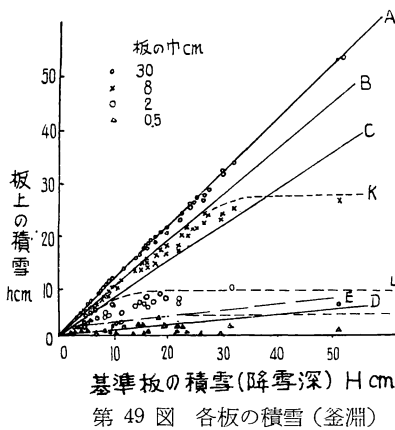
注：第 10 表から風速を  $W_r$ 、雪片の落下速度を  $S_r$  とし、水平との傾斜を  $\theta$  とすると、

$$W_r = S_r \tan \theta$$

となり、これから計算した  $W_r$  を記すと、第 10 表のようになる。すなわち、風速 6 m/sec までくらいは大略 1 m/sec の落下速度であるが、それ以上では風速が増すと雪片の落下速度は小となる。これはこのくらいの風速になると風により雪片がこわれて小となるからであろう。

第 11 表 板の巾の冠雪高との関係

| 板の巾   |       | h <sub>M</sub> (cm) |     |                               | h <sub>M</sub> /b |
|-------|-------|---------------------|-----|-------------------------------|-------------------|
| b cm  | 実 測 値 |                     | 計算値 |                               |                   |
|       |       |                     |     | h <sub>M</sub> h <sub>M</sub> |                   |
| 100.0 |       |                     |     | 140—130                       | 1.4               |
| 50.0  |       |                     |     | 89—77                         | 1.8               |
| 30.0  | 52    |                     |     | 64—52                         | 2.1               |
| 15.0  | 41    | 37                  |     | 41—31                         | 2.7               |
| 8.0   | 26    | 23                  | 23  | 27—19                         | 3.8               |
| 4.0   | 16    | 15                  | 11  | 17—11                         | 4.2               |
| 2.0   | 8.5   | 7.0                 | 6.5 | 11.0—6.5                      | 5.5               |
| 1.0   | 6.5   | 3.6                 | 3.5 | 7.0—6.0                       | 7.0               |
| 0.5   | 4.5   | 2.5                 | 2.3 | 4.5—2.3                       | 9.0               |



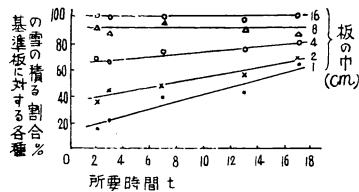
第49図 各板の積雪(釜淵)

じて、ある巾の地物の上にはだいたい拋物線形に積るからで、第11表はその測定結果であつて、板の巾をbとし、冠雪高の極限值を $h_M$ とすると、両者の関係は次式で表わしうる。

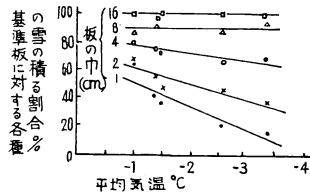
$$h_M = K b^\alpha \dots\dots\dots (13)$$

ただし、 $K=7\sim 6$ ,  $\alpha=0.95\sim 0.66$

すなわち、冠雪高は板の巾に対し拋物線的に変ることを意味している。なお、第49図に釜淵における板の巾別の冠雪高とその時の降雪深との関係を示したが、板の巾が広くなるほど、測点の分散が少なくなり、安定してくることがわかる。換言すると、巾の狭いものへの冠雪は不安定で落ちやすいことがわかり、板の巾が小さなものは極限值をもつことも認められる。



第50図 所要時間と各板の積雪割合 (十日町)



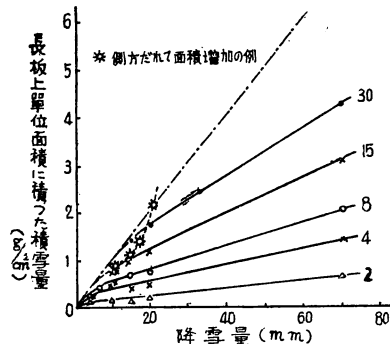
第51図 平均気温と各板の積雪割合 (十日町)

この図は、新雪が短時間に積つた場合で、積雪は積るとともに変態して、各雪の粒子が変形凝集し、また自重で沈下する結果、側方へ“だれ”て板の巾より冠雪の底面巾の方が広くなる

傾向をもっているから、長時間降り積つた場合は、この値より冠雪深が大となる傾向もある。また、前述のように、気温が高いと粘性が大となる。この場合も、板の巾より冠雪の底部の巾の方が大となる結果、冠雪高は高くなる。

第50図は冠雪の経過時間とその増加率を示したもので、第51図は平均気温と冠雪の増加率を示したもので、上記の現象が認められる例である。

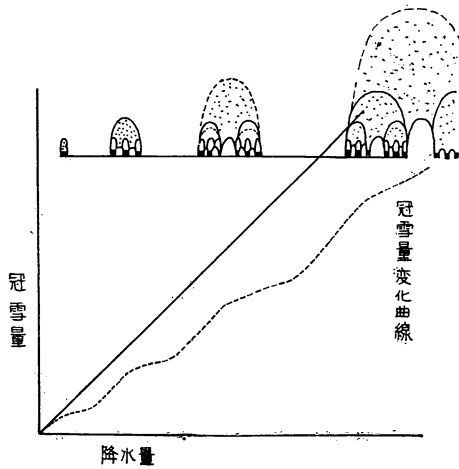
以上は板の巾に対する冠雪高であるが、冠雪の重量は、積つた雪の密度が時間とともに増加するため、冠雪高のように極限值を示さず、時間とともに徐々にその重さを増してゆく。第52図はその測定値であるが、巾の広いものほどその増加率は大きく、すなわち、冠雪はその堆積する物体の巾、面積に対して、高さは極限值をもち、ある高さ以上には積らないが、重さは時間とともに降雪が続くかぎり徐々に増加してゆく傾向を示すものである。特に粘性の強い附着しやすい、側方への“だれ”の大きな降雪では、



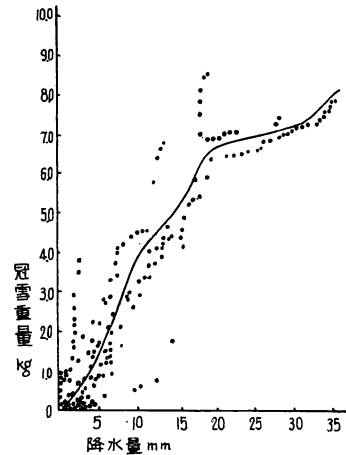
第52図 最も大きく積つた2例(釜淵)

増加の割合が大であることは想像にかたくない。

以上の結果から実際の樹木の冠雪を考えてみると、常緑針葉樹類でも、落葉広葉樹類でも、枝も葉も巾が細いためこの実験におけるごく巾のせまい板と同様に、個々の末端の枝葉には冠雪は容易に発達しないことになる。この場合、どうして冠雪が発達するかというと、降雪はまず細小な枝、葉に捕捉され、冠雪はその巾に応じた極限值までには増加する。そうすると、その後或る時間の間は降雪が続いても冠雪高の増加はほとんどないが、細小の枝、葉上の小冠雪は時間とともに



第 53 図 冠雪量増加曲線の模式図



第 54 図 降水量と冠雪量との関係(釜淵)

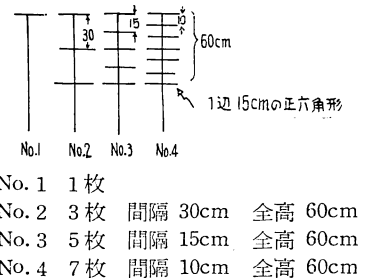
凝集，沈下し，枝，葉の巾より外へ徐々にだれてはみだしてくる。そして遂には隣接した枝葉間の冠雪が接着してしまう。隣接した枝葉間の冠雪が接着すると，冠雪の底部の巾が増大し，さらにその上に冠雪が，その増加した巾に対して極大になるまで発達する。そして一時発達が停止し，横に“だれ”て，より間隔の広いつぎの枝葉群間の冠雪が接着して，冠雪底部面積を増加するというような変化をくりかえし，遂には一枝葉群が一個の冠雪でおおわれ，さらに降雪が続くと，樹冠全体の冠雪が一個の冠雪になつて増大することになるのである。ゆえに冠雪の増加と降雪量の間は第 53 図のように上昇，休止，上昇，休止と波形の曲線で示しうる関係が基本的には存在するはずである。第 54 図はスギの一枝の冠雪重量の変化と降雪量との関係を図示したものであるが，実際の樹木の枝ではこれらの経過が同時にいろいろな程度で出現するため判然としないが，数回の波状の変化があらわれていることが認められる。

#### b. 平板の重なりと冠雪量

製作の便宜上，正六角形（一辺 15 cm）の平板を一定の距離で重ねて第 55 図のような塔状の模型を作つた。これに積つた冠雪量を測定して，平板が重なつた場合，冠雪量の変化を測定してみると，無風の場合でも平板が何枚が重なつていると，平板 1 枚の場合（No. 1）よりも冠雪の総量が増加することがわかつた。

この原因は雪片は無風の場合にも，垂直に落下することではなく，いろいろな傾斜角で分散落下するので，同一面積，形の平板がある間隔で重なっている場合は雪片は下部の平板にも，その間隔に応じて分散落下して堆積する。その結果，投影面外に落下した雪片をも捕捉することになるのである。雪片の落下が必ずしも垂直でないのは，雪の結晶に平面結晶，立体結晶があり，角板，針状，角柱，立体樹枝等種々の形ができ，その集合体である雪片にもいろいろな形があるから，落下時廻転横すべり等いろいろな曲線を描くからである<sup>54)</sup>。

この実験の結果では，下部にある 1 枚の平板に積る冠雪重量  $s_n$  を最上部の板に積る冠雪重量，すなわち，重なりのない 1 枚の板



第 55 図 模型の形

の冠雪重量  $Sn$  の百分率であらわすと、板と板の間隔  $d$  との間につきの関係があることがわかった。

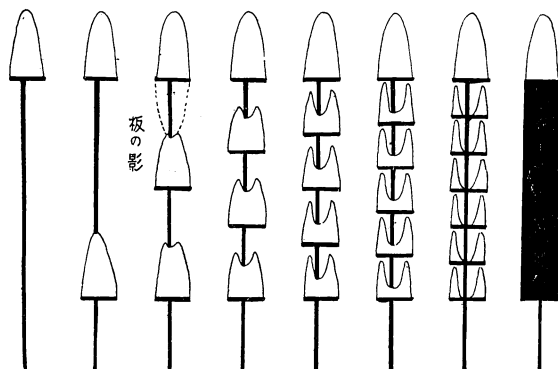
$$\frac{sn}{Sn} 100 = K d^\alpha \dots\dots\dots (14)$$

ただし、 $K=0.235$ ,  $\alpha=1.45$

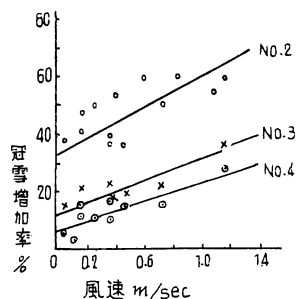
この式では、 $d$  がある大きさになると、 $sn/Sn=1$  すなわち下部の板にも最上部の板と同量の冠雪が積りうることになる。そして上下板の距離がそれ以下に短縮してゆくと、下の板に積る雪は徐々に少なくなつてゆくことがわかる。

このことはいいかえると降雪の落下時の水平面に対する分散に対して上の板の影が下の板にとどこぬ距離にある時は、下の板にも上の板と同量の冠雪が積りうる。上下板の距離がそれより短くなると下の板に積る冠雪量は上板の影により少なくなるが、いずれにしても、上下に重なつた塔状の地物では冠雪量は、同一投影面の降雪量より多くなる可能性のあることを示している。

この測定値から計算した冠雪量 % と、板の枚数  $n$ 、板の距離  $d$  との関係を算出してみると第 12 表のようになる。この結果から降雪の落下の分散角を  $30^\circ$  と仮定して、この関係を図示すると第 56 図<sup>55, 59</sup>のようになる。



第 56 図 板の重なりと冠雪の関係 (模式図)



第 57 図 冠雪増加率と風速との関係

第 12 表

| 枚 数<br>(n) | 距 離<br>(d) | 冠 雪 率<br>(%) |
|------------|------------|--------------|
|            | cm         |              |
| 1          | 65.1       | 200          |
| 2          | 32.6       | 172          |
| 4          | 16.3       | 154          |
| 6          | 10.9       | 145          |
| 8          | 8.1        | 139          |
| 10         | 6.5        | 135          |
| 20         | 3.3        | 126          |
| 40         | 1.6        | 119          |
| 80         | 0.8        | 114          |
| 160        | 0.4        | 110          |
| 320        | 0.2        | 108          |

つぎに風のある場合のこの関係の変化であるが、ある程度の風速まで、すなわちこのような樹木あるいは地物には動揺を与え、あるいは冠雪を吹き払うような強さの風でない間は、風速が増すほど降雪の落下方向の分散は大となり上の板の影が少なくなることになり、冠雪量は一層増加することになる。

この模型実験からは、風速と冠雪増加率との関係は第 57 図のように表わした。すなわち、板と板との間隔  $d$  が大なほど、風速  $V_w$  による冠雪量増加率  $sn$  は大となるので、この結果から実験式を導くと、

$$\frac{sn}{Sn} 100 = a' d^\alpha V_w \dots\dots\dots (15)$$

$V_w$ ....風速 m/sec,  $d$ ....板の距離

となる。

以上の結果を現実の樹木に適用して考察してみると、樹木の樹冠のように垂直方向に枝葉が何重にも重なった形態のものでは、その重なり方と密度および風速等の関係から、樹冠投影面積上に降る雪の量、すなわち降雪量以上に雪を捕捉し、冠雪総量が著しく多くなる危険があるということで、この原因は前記のように降雪の落下方向がある範囲に分散し、風速が弱く樹木が動揺したり、冠雪が吹きとばされたりしない範囲では一層その分散が大となり、投影面以外の降雪も捕捉しうることになるからである。

また、樹木では冠雪により樹冠が梢端部から屈曲することがしばしばあるので、このような場合には冠雪をうける樹冠面が樹冠の彎曲により一層大となり、さらに冠雪量を増すことになるので予想外の大冠雪がつき雪害を起すおそれがあるのである。

### （c） 錐体と冠雪量

樹冠の形を一応錐体と考え、同一底面積の錐体の高さを変え、冠雪重量を測定した。これは、樹冠が密な場合その外形により冠雪量がどのように変わるかを測定してみたのである。

錐体のような傾斜面に対する積雪については、積雪の地理的地形的分布の節でのべたように、傾斜角に比例して高く積るが、その単位面積当りの重量は多くならない。この場合も冠雪重量は傾斜角が増すほど減少している。これは傾斜が大となると、冠雪は落下しやすく、また降雪片の粘性が少ないものでは一層この傾向を助長すること（逆に粘性の大なものでは雪片が互に附着しあつて錐の傾斜面に無関係に高く積ることもある）、および風による冠雪の飛散落下が原因しているのであろう。

風速と冠雪量との関係はすでに記したが、この測定結果から、各高さに応じた冠雪重量を、平板に対する冠雪重量率で、雪質、風速を考慮せずに統計的に平均値を求めてみると第 13 表のようになる。また、第 58 図はこの平均線（A）および各錐に最も多く積つた例（Mx）、少なく積つた例（Mi）最も多くあらわれる例（B）を、錐高と冠雪重量率（同一形の平板に対する冠雪重量比）で表わした。その結果はいずれも直線関係を示している。すなわち、錐体の冠雪重量は、錐高  $h$  に比例することになり、いいかえると、錐体の面と底面との角  $\theta$  の正切に比例することを表わしているのである。実験式は

$$\frac{sn}{Sn} 100 = 100 - b'h$$

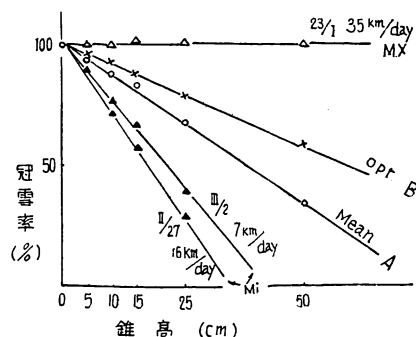
あるいは、

$$\frac{sn}{Sn} 100 = 100 - b' \tan \theta \quad \dots \dots \dots (16)$$

となる。これらのことは傾斜面の積雪と同様であつて、冠雪深は傾斜が大なほど一般に高くなるが、冠雪

第 13 表

| 角錐高<br>cm | 角 度<br>° | 平均冠雪率<br>% | 標準偏差<br>% |
|-----------|----------|------------|-----------|
| 0         | 0        | 100        | ± 0       |
| 5         | 21.0     | 94         | ± 4       |
| 10        | 37.5     | 88         | ± 7       |
| 15        | 48.5     | 83         | ± 10      |
| 25        | 62.5     | 67         | ± 17      |
| 50        | 75.5     | 33         | ± 29      |



第 58 図 錐体の高さ と 冠雪率 と の 関 係

重量は逆に傾斜が大なほど急激に減少する。とくに面の傾斜角  $50\sim 60^\circ$  を境にして急減するのである。

これを現実の樹木にあてはめて考えると、細長な樹冠をもつ木ほど、冠雪重量が少なく軽くつもるから、細長な樹冠の木ほど冠雪の害に対し抵抗が大であるということになる。

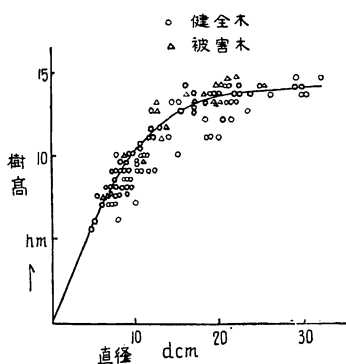
なお、平板および錐体につもる冠雪の外形を、多数の写真により測定してみると、いかなる形の地物に対しても冠雪が最大についた場合は、その冠雪の外形は拋物線体に最も近いことを知った。このことは、地物に積る冠雪は、その外形を拋物線体に近づける方向に積ることを現わしており、一般の樹木の樹冠形（特に針葉樹類）が拋物線形に近いことは、冠雪に対し比較的安全な形であることになるのである。逆に樹冠形の不齊な樹木は冠雪が積りやすく、一層雪害により樹冠形がわるくなることにもなる。また、樹冠形の不齊な樹は、冠雪が一方にかたよりやすく、これまた冠雪荷重によりその方向へ彎曲、屈倒しやすいため危険である。

以上の諸実験の結果よりわかることは

- 枝葉の冠雪深はその投影面積に応じ限度があり、冠雪量はある限度までは急激に、その後は徐々に増加してゆく。
- 枝葉の冠雪は細い部分からつぎつぎと埋められていつて、冠雪の側方への“だれ”によりだんだん拡大して遂には一団の枝葉が1箇の冠雪につつまれてしまう。
- 枝葉が重なっていると、その重なり方により樹冠の投影面積への降雪量以上に冠雪重量が大になる。すなわち、降雪が捕拵されることがある。
- 樹冠形は細長なほど冠雪がつきににくい。
- 風は降雪の落角を広く分散することにより、冠雪量を増すことがあるが、逆に冠雪を吹き払うことによつて冠雪量を減ずる働きもする。
- 雪質により冠雪が著しく減少、逆に増加する場合がある。

### 3. 樹形と冠雪害

樹冠形と冠雪との関係については前記した各種の実験ではぼわかと思うが、樹形については、現実の冠雪の害の調査によらねば判らない。今まで筆者等が調査した冠雪による森林の被害は7例あつて、それも直後調査しえなかつたものも含まれているから、くわしいことは判明しないが、これらの例からえた結果ではつぎのことがいえると思う。



第 59 図 No. 7 酒田のクロマツの  
樹高直径曲線

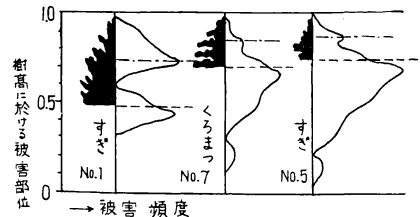
第 14 表は上記の調査した冠雪による被害状況の総括表である。この表によると、形状比の大な樹木、すなわち、太さに比し樹高の高い木は被害が多い傾向が認められる。これは第 59 図に本表の No. 7 の例を图示したものでもよく認められ、上層林冠をなす樹木では樹冠の高いものに被害があらわれている。このことは、総説でものべたところであるが、積雪深をぬき出た樹木では形状比の大なものは冠雪荷重以外の他の雪圧被害に対してもはなはだ危険である。

つぎに被害部位と種類であるが、総説でもふれたように、梢、幹の被害には折れ、割れ、曲りが多く、その被害部位が大体一定していることは注目すべきである。

第 14 表 冠 雪 に よ る 被 害 例

| No.               | 1                                          | 2                                          | 3                                     | 4                                     | 5                                     | 6                                     | 7                                     |
|-------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 所 在 地             | 山形・北村<br>山形・東郷<br>山形・北村<br>142—ら<br>緩斜(押出) | 山形・北村<br>山形・東郷<br>山形・北村<br>140—へ<br>緩斜(押出) | 山形・北村<br>山形・東郷<br>山形・北村<br>34—ろ<br>傾斜 | 山形・北村<br>山形・東郷<br>山形・北村<br>28—ぬ<br>緩斜 | 山形・北村<br>山形・東郷<br>山形・北村<br>28—ぬ<br>緩斜 | 山形・北村<br>山形・東郷<br>山形・北村<br>28—ぬ<br>緩斜 | 山形・北村<br>山形・東郷<br>山形・北村<br>28—ぬ<br>緩斜 |
| 備 考               | 一 斉<br>生育良・稍<br>密                          | 一 斉<br>生育不良・稍<br>疎                         | 一 斉<br>生育弱                            | 一 斉<br>良・被害大<br>地点                    | 一 斉<br>細長・過密                          | 一 斉<br>細長・過密                          | 略 同<br>被害甚大区                          |
| 調 査 面 積           | 0.35ha                                     | 0.30                                       | 0.25                                  | 0.10                                  | 0.13                                  | 0.04                                  | 0.11                                  |
| 林 種               | スギ 8%<br>カラマツ 19%                          | ヒノキ 98%<br>スギ 2%<br>カラマツ 1%                | スギ 100%                               | スギ 100%                               | スギ 100%                               | スギ 100%                               | クロマツ 100%                             |
| 林 密 度             | 37<br>794                                  | 41<br>708                                  | 35<br>1392                            | 30<br>770                             | 25<br>1944                            | 28<br>2725                            | 10~40<br>1080                         |
| 樹 高 { 範 囲<br>平 均  | 6~26<br>20.4                               | 5~20<br>14.8                               | 5~17<br>13.0                          | 11~18<br>15.5                         | 7~24<br>15.4                          | 8~20<br>14.2                          | 6~14<br>10.7                          |
| 胸高直径 { 範 囲<br>平 均 | 7~38<br>25.3                               | 6~35<br>20.0                               | 7~32<br>17.0                          | 13~30<br>21.9                         | 8~25<br>15.2                          | 5~23<br>14.7                          | 5~32<br>14.3                          |
| 形 状 比 平 均         | 81                                         | 74                                         | 76                                    | 71                                    | 101                                   | 97                                    | 75                                    |
| 平 均 枝 下 高 m       | 9.6                                        | 7.0                                        | 7.0                                   | 9.2                                   | 11.5                                  | —                                     | 7.5                                   |
| 平 均 比 枝 下 高       | 0.47                                       | 0.47                                       | 0.54                                  | 0.59                                  | 0.75                                  | —                                     | 0.70                                  |
| 枝折れ抜け             | 0                                          | 0                                          | 0                                     | 0                                     | —                                     | —                                     | 6                                     |
| 梢折れ               | 14                                         | 10                                         | 0.3                                   | 1.3                                   | —                                     | —                                     | 3                                     |
| 幹折れ割れ             | 11                                         | 13                                         | 2.6                                   | 9.1                                   | 64.1                                  | 60                                    | 22                                    |
| 幹曲り               | 3                                          | 5                                          | 1.2                                   | 0                                     | 12.6                                  | 24                                    | 28                                    |
| 根元折れ              | 1                                          | 1                                          | 0.3                                   | 1.3                                   | 17.0                                  | 3                                     | 2                                     |
| 計                 | 29                                         | 29                                         | 4.4                                   | 11.7                                  | 93.7                                  | 87                                    | 61                                    |
| 健 全 木             | 71                                         | 71                                         | 75.6                                  | 88.3                                  | 6.3                                   | 13                                    | 39                                    |
| 降 水 量 mm          | 100                                        | 100                                        | —                                     | —                                     | 50~60                                 | 50~60                                 | 40                                    |
| 積 雪 深 cm          | 70                                         | 70                                         | 20~30                                 | 20~30                                 | 40~45                                 | 40~45                                 | 25                                    |

第 60 図に例示したように、樹冠内部、樹冠下部、根元直上（根張りの上）の 3 カ所に折損の頻度が集中してあらわれている。この力学的な解釈はまだ明らかでないが、樹冠中央部附近は木化の充分に進んだ部分と然らざる部分の境目附近、樹冠下部は樹冠の重量の支持点であつて冠雪の荷重が加わつた場合の弱点、根元は根張りとならざる部分の交換点とみられる。



第 60 図 被害部位と被害頻度

第 14 表の山口県川上の例 (No. 5) のように細長で、樹冠の上部に偏奇したものでは、特に幹（樹冠下部）の折損率が多くなつてゐるのを、山形県、北村山の例 (No. 1) と比較すると、枝打ちを急激に極度に行い、樹冠を極度に小にすると、冠雪重量が少なくなる点では有意義であるが、樹冠および冠雪の

重量の支持点が急変する結果、かえつて冠雪による樹冠下部での折損を増す危険があり、一考を要する。枝打ちと雪害の問題は慎重に考慮する必要がある。梢折れ、すなわち、樹冠内の折損は恢復の望みがあるが、幹折れは樹冠を全く失うにいたるので、その望みはないのである。

## 第2節 沈 降 力

沈降力が雪圧として問題になったのは、昭和11年山形地方に大雪が降り、積雪下になった桜桃の枝が多数折れて、大害を起した時からである。その時小学校の鉄棒が同様雪中に埋まり、屈曲した例などがあった<sup>57)</sup>。これらの現象が、当時の研究者の注意を引き、研究の対象として取り上げられるに到った。

これと相前後して、鉄道、通信、電気関係でも、多雪地の電柱の支線が曲り、送電線の鉄塔の下部が曲る等の被害に当面し<sup>58,59,60)</sup>、積雪の沈降力が注意をひきだしたのである。

沈降力の最初の研究報告は平田<sup>61)</sup>によつてなされた。平田は十日町(新潟)角館(秋田)で地上高を異にする水平に渡した鉄棒、木棒の曲り方、折れ方より、沈降力を測定し、鉄棒上に積つた積雪層が積雪の沈降により、鉄棒の周辺で抗剪力を發揮し、この抗剪力の総計が、鉄棒の抗彎強度より大となるから、棒は曲、折するのだとし、雪層の沈下量は地表面高さから高いほど大であるから、雪層の抗剪力総計が、鉄棒の抗彎強度より大であれば、地上高が高い棒ほど曲ることとなり、被害が増大すると説明した。

ついで天野は十日町で横木にかかる沈降力を力量計で測定し、僅か一冬季間ではあるがはじめて沈降力を量的に求めた。沈降力の日変化から各種の気象因子、積雪因子との関係を求め、沈降力が沈降速度とは関係が少くないこと、積雪深、積雪重量、積雪の抗剪力と関係のあることを見いだした。

このほか、古川・荘田等<sup>65,66,67,68,69,70,71)</sup>の沈降力に関する研究が近年発表されている。

筆者は天野の研究<sup>68)</sup>を継承したので、引続き十日町、釜淵で沈降力の研究を行つて現在に到つている<sup>72,73,74)</sup>。

積雪の沈降力という名は、前にもちよつとふれたが、最初にこの種の雪圧を認めた時から積雪が重力方向へ沈下し、密度が増加する現象にともなつてあらわれる積雪の力であると思われたからで、研究の初期では沈降の速度等も影響した、動的な力であるとの考え方もあつたが、現在では一般に積雪のあらわす力中雪崩の衝撃力以外のいわゆる雪圧は静的な力と解した方が良いと認められている。この意味から、沈降力を沈降圧<sup>59)</sup>あるいは沈降荷重<sup>67)</sup>といっている人もある。

樹木の機械的雪害としては沈降力によるものが最も重大であるので、ここに今までの研究の成果をかなりくわしくのべることにしたい。

筆者等の行つた研究を区別すると、つぎの各種類になる。

- |                     |                     |
|---------------------|---------------------|
| i) 沈降力の消長経過         | v) 雪質による沈降力の変化      |
| ii) 受圧面の大小による沈降力変化  | vi) 受圧面による積雪層の褶曲、経過 |
| iii) 受圧面高による沈降力の変化  | vii) 模型実験           |
| iv) 受圧面の形状による沈降力の変化 |                     |

筆者等の沈降力研究は天野の開始した昭和17～18年より、本年の昭和27～28年の冬までの11冬季であつて、その間行つた実験は第15表の各種類がある。

樹木の沈降力のかかる部分は、枝葉あるいは曲つて雪中に埋没した幹であつて、大体二次元的な力と考えられるが、筆者等は測定の便宜もあつて正方形、正三角形、矩形、長方形、円形等の受圧面に三次元的

第 15 表

| 年 度                 | 沈降力測定装置（力量計による）                                                                                                                                              | 沈降力測定装置（鉛コーンによる）                                                                                                                                                        | 最深積雪（最大積雪水量）        |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1942~43<br>(昭17~18) | 受圧面辺長 (b) { 10×50 cm<br>受圧面高 (Z <sub>H</sub> ) { 150                                                                                                         |                                                                                                                                                                         | 280 cm<br>(1063 mm) |
| 43~44               | b { 10×50                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                         | 296                 |
| (昭18~19)            | Z <sub>H</sub> { 100                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                         | (1079)              |
| 44~45               | b { 10×50                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                         | 425                 |
| (昭19~20)            | Z <sub>H</sub> { 100                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                         | (1382)              |
| 45~46               | b { 10×50 { 10×10                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                         | 244                 |
| (昭20~21)            | Z <sub>H</sub> { 100 { 100                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                         | ( 851)              |
| 46~47               | b { 50×50 { 10×10 { 3.2×3.2                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                         | 319                 |
| (昭21~22)            | Z <sub>H</sub> { 100, 150 { 50, 100, 150, 200 { 50, 100, 150, 200                                                                                            |                                                                                                                                                                         | ( 935)              |
| 47~48               | b { 50×50 { 22×22 { 5×5 { 3.2×3.2                                                                                                                            |                                                                                                                                                                         | 252                 |
| (昭22~23)            | Z <sub>H</sub> { 50, 100 { 50, 100 { 50, 100, 150 { 50, 100, 150                                                                                             |                                                                                                                                                                         | ( 837)              |
| 48~49               | b { 50×50 { 22×22 { 5×5 { 3.2×3.2                                                                                                                            |                                                                                                                                                                         | 133                 |
| (昭23~24)            | Z <sub>H</sub> { 50, 100 { 50, 100 { 50, 100, 150 { 50, 100, 150                                                                                             |                                                                                                                                                                         | ( 319)              |
| 49~50               | b { 50×50 { 22×22 { 5×5 { 3.2×3.2                                                                                                                            |                                                                                                                                                                         | 172                 |
| (昭24~25)            | Z <sub>H</sub> { 50, 100 { 50, 100 { 50, 100, 150 { 100                                                                                                      | { b <sup>2</sup> 400 { b <sup>2</sup> 900<br>{ Z <sub>H</sub> 100 { Z <sub>H</sub> 50                                                                                   | ( 487)              |
| 50~51               | b { 20×20 { 10×10 { 5×5 { 3.2×3.2                                                                                                                            | { b <sup>2</sup> 400                                                                                                                                                    | 199                 |
| (昭25~26)            | Z <sub>H</sub> { 50, 100 { 100, 150 { 100, 150 { 25, 50, 75, 100                                                                                             | { Z <sub>H</sub> 100, 50                                                                                                                                                | ( 624)              |
| 51~52               | b { 60×60 { 30×30 { 30×30 { 3.2×3.2                                                                                                                          | { b <sup>2</sup> 400                                                                                                                                                    | 184                 |
| (昭26~27)            | Z <sub>H</sub> { 50, 100 { 50, 100 { 50, 100 { 25, 50, 75                                                                                                    | { Z <sub>H</sub> 100, 50                                                                                                                                                | ( 554)              |
| 52~53               | b { 20×20 { r = 15 { 3.2×3.2                                                                                                                                 | { b <sup>2</sup> 400                                                                                                                                                    | 232                 |
| (昭27~28)            | Z <sub>H</sub> { 75, 100, 125 { 50, 50 { 50, 75, 100                                                                                                         | { Z <sub>H</sub> 100, 50                                                                                                                                                | ( 806)              |
| 備 考                 | <p>地下室よりダイヤルゲージ附力量計を用い測定。<br/>                     スプリングバランスを一部併用。<br/>                     主として三次元の沈降力を測定。<br/>                     沈降力観測は1日1回の定時観測を行う。</p> |                                                                                                                                                                         |                     |
|                     |                                                                                                                                                              | <p>はじめの3カ年は最大積雪重量は<br/>                     受圧面の形、辺長5日ごとの観測<br/>                     を変化して測定、結果。<br/>                     4年目は受圧面高<br/>                     をかえて測定。</p> |                     |

に力のかかる場合を主として実験した。

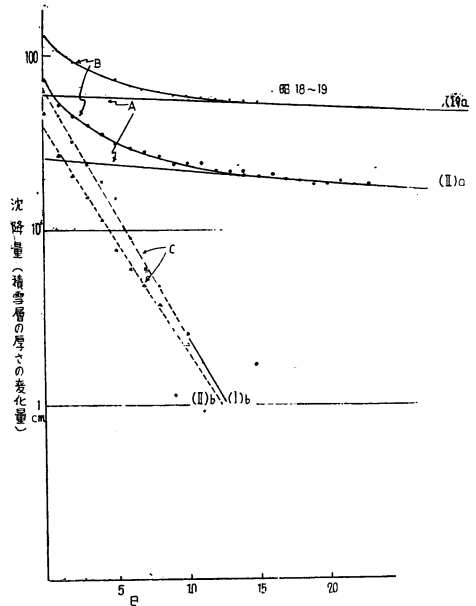
二次元的な沈降力も三次元的な沈降力の発生機構およびその大きさ等がわかればおのずから解決できる  
 とも思い行つたのである。

#### 1. 積雪の沈降力の消長経過

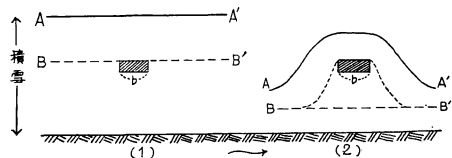
##### (a) 沈降現象

積雪の沈降現象とは、積雪の密度のところどころでよ  
 つと記したように、降雪直後の積雪が雪の粒子の変  
 態にともない互に雪粒が集まつてかたまること、す  
 なわち積雪の凝集と同時に起こる積雪の自重による  
 重力方向への圧縮により密度が増加し、時間とともに  
 積雪深が減少してゆく現象である。第 61 図はある  
 積雪層が沈降してゆく経過の一例であつて、本図  
 によると、ある新雪層の厚さが時間とともに減少し  
 ていく度合は或る時間後は減衰曲線 (A) 線として  
 あらわしうるが、積雪直後のある時間内は、その度  
 合が一層はげしく、この減衰曲線 (A) 線上にはの  
 らない。

しかし (A) 線と (B) 線の差をとると、これは



第 61 図 積雪層の沈降経過(十日町)

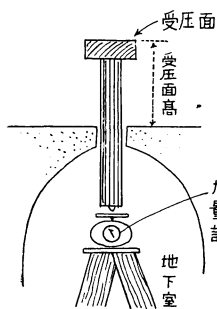


第 62 図 沈降力の模式図

ほかに、積雪粒子の変態による雪粒子の凝集が、積雪の体積減少に作用すること、この雪粒子の凝集は一定時間後はほぼ完了し、その後は上部の積雪重量のみにより沈降していくことを示しているのであろう。すなわち、積雪は雪粒子の凝集による体積の減少と重力による圧縮とにより沈降し、積雪深を減ずるものであるといえるのであろう。ただし、これは融解あるいは水による変態、すなわちザラメ化をうけない以前で、ザラメ化する場合はさらに凝集が加わるものと考えられる。

### (b) 沈降力の発生

沈降力は、上記の積雪の沈降がその発生の初因をなしていることから明らかである。すなわち、積雪中に地物が埋まると、その地物の上面の積雪の沈降は、その地物の上面（受圧面）で支えられるため、地物の周辺でさまたげられる。地物のない個所では、積雪は自由に沈降するので、積雪層が地物の周辺で切れないかぎり、第 62 図に示したように、地物の周辺に積雪の褶曲ができあがる。この褶曲が沈降力を起す原因で、その結果あたかもフトンをかけたように、積雪のある広さ部分の重量が地物でさええられ、もし



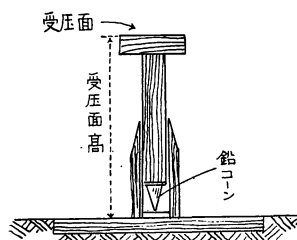
第 63 図

地物がなかつたならば、地表面に均等にかかる積雪重量が、地物に沈降力としてかかるのである。この場合、積雪の応力が弱くて、地物の周辺で、積雪層が切れて落ちるとすると、地物の受圧面にはその受圧面積上の積雪重量だけがかかるにすぎないが、積雪は前述のように圧縮されると応力は大となるから特殊の場合でない（たとえば、雨水により雪粒間のつながりが切れるような場合）切れておちることはないので、受圧面の周辺で褶曲を起し、そのため受圧面上にある積雪の重量よりはるかに大きな積雪重量が受圧面にかかるのである。

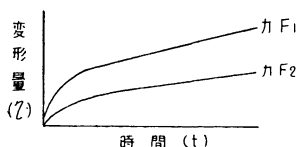
沈降力はまた逆に他方からみると、上記の積雪の褶曲層が、地物の受圧面で切れずに支えられるために必要な積雪の応力であるとも考えられるのである。

### (c) 測定法

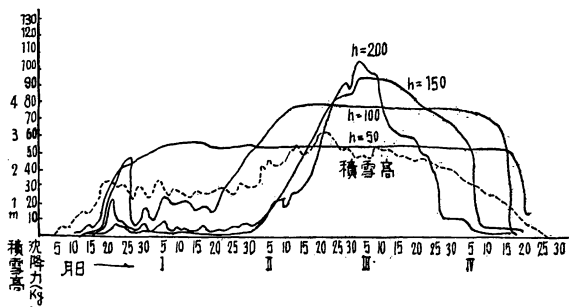
筆者の行つた沈降力測定方法には 2 種類ある。第 1 の方法は、第 63 図



第 64 図



第 65 図



第 66 図 (その I) 昭和 21~22 年の沈降力消長経過(十日町)  
受圧面 3.3 cm×3.3 cm

のように木製の受圧面を露場に設置し、これを木柱で露場下の地下室に導き環状力量計で支え、ダイヤルゲージでその歪の大きさを読みとる方法である。第2の方法は第64図のように受圧面の木柱の下に鉛のコーンをつけ、それを露場に設置して鉛のコーンが沈降力で変形する変形量を測定する方法である。第2の方法では、鉛のコーンがある荷重に対し、一定の歪を示さず時間とともにクリープを起すので、真の沈降力の大きさを測定することは不可能であるが、鉛コーンの変形量は第65図のように温度が一定だと荷重に対し、時間とともに一定のクリープを続けるから、かかった力相互間の大きさを比較することができるので、これは、後で記すように、受圧面積、受圧面高が同一で周辺長の異なる地物にかかる沈降力の大きさの比較に用いた。

#### (d) 沈降力の消長

力量計で測定した沈降力の一冬季間の変化の一例を図示すると、第66図のようになる。この変化曲線の2例は今まで測定した多くの沈降力の消長経過の代表的曲線であつて、図でみられるとおり、はつきり4の段階に区分できる。すなわち、

第Ⅰ期 消長期：沈降力発生

第1段階で或る期間増減をくりかえしている期間。

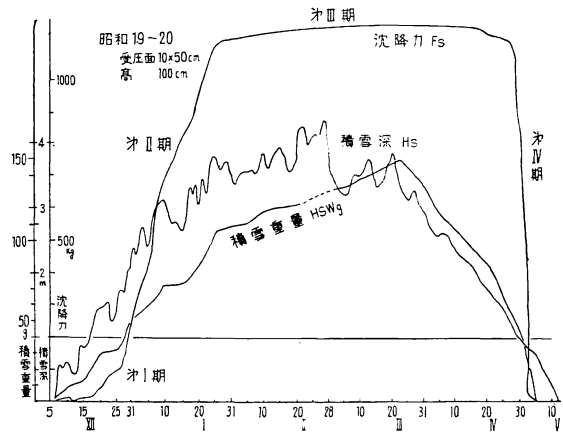
第Ⅱ期 上昇期：沈降力が時間

とともに急激に上昇する時期。

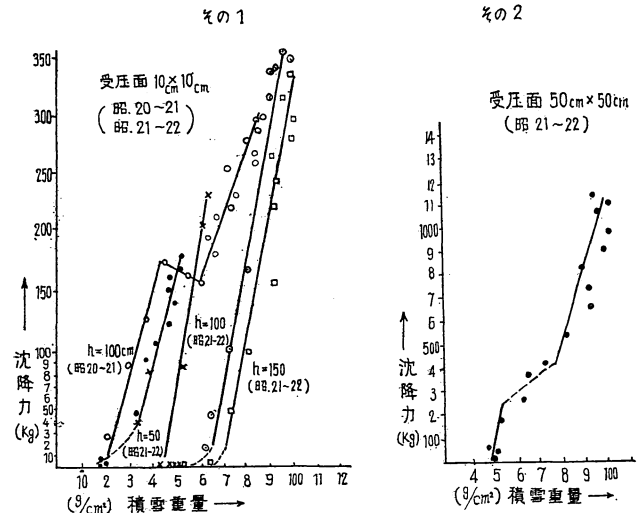
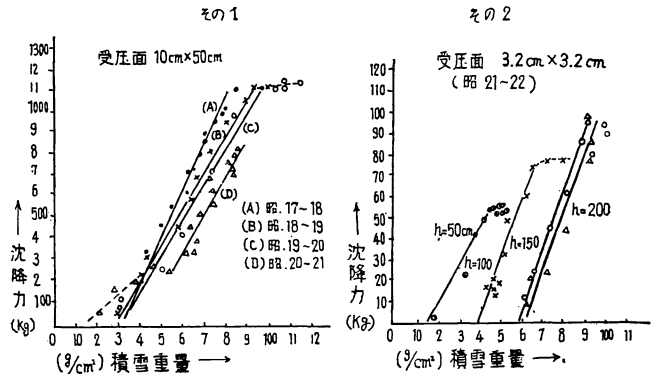
第Ⅲ期 極限期：今まで増加を

続けていた沈降力が増加を停止しほぼ一定値を持続する期間。

第Ⅳ期 下降期：沈降力が時間とともに急減する期間。



第66図（そのⅡ）沈降力消長経過の一例（十日町）



第67図 積雪の重さと沈降力との関係（注：実線が第2期）

以下、各期の沈降力について解析を試みよう。

第Ⅰ期にあらわれる沈降力は受圧面が積雪面下に埋没する以前に受圧面上積る冠雪の重さであるから、真の意味の沈降力とはいえない。積雪が増えて受圧面が埋まりはじめると、沈降力は急に増大して第Ⅱ期にはいる。第Ⅱ期になつて沈降力が急増しはじめると著しい融雪か降雨がないかぎり、沈降力増加はその後の積雪水量 (HSW) (mm)≡積雪重量(g/cm<sup>2</sup>)、あるいは降雪量 (mm) に比例して増加し続けることが認められる。第 67 図は第Ⅱ期の沈降力と積雪重量との関係を示した数例である。

本図によると、第Ⅱ期の沈降力 ( $F_s$ ) は積雪重量 (あるいは積雪水量、総降雪量) HSW と正比例することがわかる。

すなわち、

$$F_s = a(HSW) \dots \dots \dots (17)$$

しかるに、

$$(HSW) = \bar{\rho}(H_s)$$

$\bar{\rho}$  積雪平均密度,  $H_s$  積雪深

$$\therefore F_s = a\bar{\rho}(H_s)$$

ゆえに第Ⅱ期の沈降力は積雪の平均密度  $\bar{\rho}$ 、深さ ( $H_s$ ) cm で面積  $a$  cm<sup>2</sup> の積雪塊の重さと考えてよい。いいかえると常数  $a$  は沈降力を生ずる受圧面を中心とした、積雪の面積的広がりをあらわしていることになる。

そこで各実測値から受圧面の大きさおよび高さに対する  $a$  の値を求めてみると第 16 表のようになる。

第 16 表  $a$  の 値

| 受圧面高<br>受圧面の一辺 | 3.2cm                     | 5.0 | 10  | 20  | 22  | 30  | 50  | 60  |
|----------------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 50 cm          | m <sup>2</sup><br>0.2~0.4 | 0.7 | —   | 1.2 | 1.6 | 1.7 | 2.0 | —   |
| 100~150        | 0.3~0.4                   | 0.8 | 1.0 | 1.4 | 1.8 | 2.1 | 2.3 | 2.9 |

第 16 表によると、 $a$  の

値は受圧面の一辺が大になるとそれにつれて大きくなり、また受圧面が高いほど大となる傾向が認められる。

第 17 表  $l, l-b, (l-b)/2$  の値 (受圧面高 1m の場合)

| 受圧面の一辺<br>(b) | 3.2 cm      | 5.0 | 10  | 20  | 22  | 30  | 50  | 60  |
|---------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ( $l$ の 値)    | cm<br>50~60 | 90  | 200 | 120 | 130 | 140 | 150 | 170 |
| ( $l-b$ )     | 50~60       | 85  | 90  | 100 | 110 | 110 | 100 | 110 |
| ( $l-b)/2$    | 25~30       | 40  | 45  | 50  | 55  | 55  | 50  | 55  |

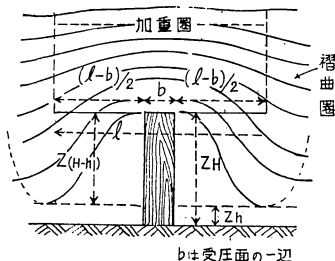
ここにあげた例は皆正方形の受圧面の場合であるから、 $a$  の沈降力を及ぼす積雪の広がりもまた正方形と見做することができるであろう。ゆえに

$$a = l^2$$

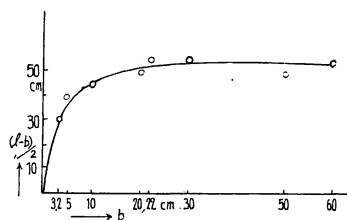
$l$ ....沈降力を及ぼす積雪面の辺長

と考えてよい。

今  $a$  を沈降力加重圏、 $l$  を沈降力加重圏の一辺と名づけると、第 16 表から、 $l$  の値が計算できる。



第 68 図



第 69 図 ( $l-b)/2$  と  $b$  との関係

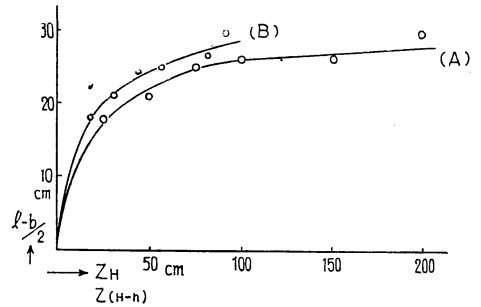
この結果を受圧面高 1 m のものにつき表示したものが第 17 表である。本表に記した  $(l-b)/2$  の値は第 68 図に模式図で示したように、受圧面から外方へはみだした沈降力の加重圏の巾を示すものである。第 II 期の沈降力を示す沈降力加重圏の受圧面外へはみだした巾は、受圧面の辺長が約 20 cm 以上になると、同一受圧面高の場合にはほぼ一定の値を示していることになる。第 69 図はこの関係を図示したものである。また受圧面積がさほど大とならぬ間は、沈降力加重圏の面積および一辺は受圧面積および辺長と一定の関係が認められるがこれは後述する。

これと同様な関係は受圧面が同一の大ききで、受圧面高の異なる場合にも認められる。今、最も測定値の多い一辺 3.2 cm の受圧面のものにつき、受圧面高  $Z_H$  と、 $l^2 (l-b)/2$  との関係を求めてみると第 18 表および第 70 図 A 線のようになる。

第 18 表  $Z_H$  と  $l^2$  および  $(l-b)/2$  との関係

| 受圧面高      | 25 cm                  | 50   | 75   | 100     | 150       | 200       |
|-----------|------------------------|------|------|---------|-----------|-----------|
| $l^2$     | m <sup>2</sup><br>0.15 | 0.20 | 0.27 | 0.3~0.4 | 0.3~0.4   | 0.3~0.4   |
| $(l-b)/2$ | cm<br>0.18             | 0.21 | 0.25 | 0.26    | 0.26~0.30 | 0.26~0.30 |

本図表では受圧面高は受圧面の地上高  $Z_H$  をそのまま使用したが沈降力に關係する真の受圧面高はこれより低くなる。それは沈降のところで説明したように、受圧面が埋まる直前の積雪深、すなわち積雪深  $Z_h$  の積雪は受圧面では支えられぬから沈降力には關係せず、そのまま沈下して、 $Z_h$  の積雪深となり、ほぼ安定することになり、その上に積つた雪が褶曲し沈降力を現出するからである。すなわち、沈降力に対する有効受圧面高は  $Z_H - Z_h = Z(H-h)$  であることになる。



第 70 図  $(l-b)/2$  と  $Z(H-h)$ ,  $Z_H$  との関係

そこで十日町における積雪

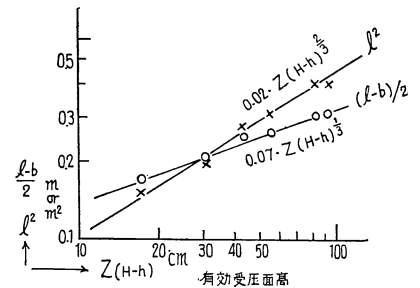
第 19 表 有効受圧面高  $Z(H-h)$

| 密度資料 <sup>70)</sup> より、積雪深 $H_s$ と平均密度 $\bar{\rho}$ との関係<br>を求め、その平均値の密度<br>の積雪が沈降し最後の密度 | 受 圧 面 高 $Z_H$ | 25 cm | 50   | 75   | 100  | 150  | 200  |
|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------|------|------|------|------|------|
| 有効受圧面高率 %                                                                                |               | 70    | 63   | 58   | 56   | 55   | 54   |
| 有効受圧面高 $Z(H-h)$                                                                          |               | 17.5  | 31.5 | 43.5 | 56.0 | 82.5 | 10.8 |
| 沈降前の平均密度 $\bar{\rho}$                                                                    |               | 0.12  | 0.16 | 0.18 | 0.19 | 0.21 | 0.22 |

になつた時に、有効受圧面高がどのくらいになるかを求めてみると第 19 表のようになる。

この場合最終密度は 0.43 とした。最終密度を 0.43 としたのは第 17 図および荘田の報告<sup>70)</sup>でもわかるように、積雪の今までの資料では、水分を含む融雪期の積雪でなければ、0.43 以上の密度は一般にはほとんど起らないからである。

この表により有効受圧面高  $Z(H-h)$  と  $(l-b)/2$  との關係を書き直したのが第 70 図の (B) 線である。この (B) 線を両対数で書き直すと第 71 図のようになる。この図には  $l^2$  と



第 71 図  $(l-b)/2$ ,  $l^2$  と  $Z(H-h)$  との關係

$Z_{(H-h)}$ ,  $(l-b)/2$  と  $Z_{(H-h)}$  の両線を書き込んだが、両者の関係は次式で表わしうる。

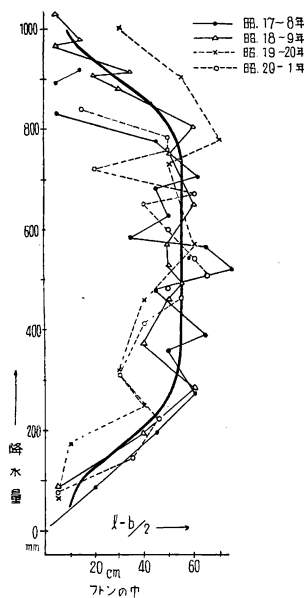
$$\frac{l-b}{2} \doteq 0.07 Z_{(H-h)}^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (18-1)$$

$$l^2 \doteq 0.02 Z_{(H-h)}^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots (18-2)$$

以上の諸項より、第Ⅱ期にあらわれる沈降力は、積雪重量に比例して増加し、その増加率はまた沈降力加重圏の面積と仮想できるが、実際に積雪が埋雪した地物に及ぼしている沈降力は、地物直上面で最大で、受圧面から遠ざかるに従い徐々に減ずる力と考えられ、このように均等に集中した力ではないであろう。むしろ褶曲をおこしている積雪層すなわち褶曲圏全部が、沈降力を及ぼしているものと考えた方がよい。沈降力の加重圏は、受圧面から受圧面の辺長に比例したある一定の巾はみだした広さの積雪面であり、受圧面の大きさに関係して変化し、また受圧面高にも関係して変化する。加重圏の受圧面からはみだした巾が受圧面の辺長に關係するということは、後述するように、沈降力加重圏が受圧面の周辺に作用する、積雪の応力により支持されている結果ともみられるのである。また、受圧面が一定の大きさ以下に小となると加重圏が急激にせまくなるのは、受圧面積がせまくなると、むしろ尖頭、すなわち杭の頭のような働きをしてくるからであろう。

第Ⅰ期、第Ⅱ期の変換点では、この加重圏の大きさは漸次広がり、遂にほぼ一定の広さを示すにいたるが、この原因はこの変曲点の生ずる時点で、受圧面高以下の積雪層が沈降の大部分を完了し、その結果、受圧面上にいわば“フトン状の積雪層”が積雪の塑性変形によりできて、その上に積る積雪の重量が沈降力となつてあらわれるからだと解することもできる。

第Ⅰ期、第Ⅱ期を通じての5日ごとの積算降水量に対する沈降力増加量より、上記の方法で沈降力加重圏の受圧面よりはみだした巾を求めて、その巾の変化図を画いてみると第72図のようになる。この図か



第72図

半旬ごとの降水量と沈降力との関係より算出したフトン状積雪の形 (十日町)

ら受圧面に沈降力を作用する積雪の加重圏の形が大体は想像できる。各期の変換点を無視すると、沈降力の加重圏は前記のように沈降力加重圏の一辺を一辺とし、積雪重量を他辺とする矩形断面を有するものと考えてよいことがわかる。

第Ⅲ期は第Ⅱ期に積雪重量に比例して増加していた沈降力が急に増加を停止し、ほぼ一定の沈降力極限值を示す期間である。

今まで観測した木柱にかかる沈降力の測定結果 70 例中、第Ⅲ期をあらわしたものは次の僅か 14 例があつた。

|                     |                      |                          |
|---------------------|----------------------|--------------------------|
| 昭和 17~18            | 受圧面 10cm×50cm        | 受圧面高 150cm               |
| 昭和 { 18~19<br>19~20 | 10×50                | 100                      |
| 昭和 21~22            | 3.2×3.2              | 50, 100                  |
| 昭和 { 22~23<br>23~24 | "                    | 50                       |
| 昭和 25~26            | { 3.2×3.2<br>5.0×5.0 | { 25, 50, 75, 100<br>100 |
| 昭和 26~27            | 3.2×3.2              | 25, 50                   |
| 昭和 27~28            | 3.2×3.2              | 50, 75                   |

この他の測定値では第Ⅲ期をほとんど示さないか、また全くあらず、第Ⅱ期よりただちに第Ⅳ期にはいり下降曲線を示している。これだけでの少数例では第Ⅲ期の存在がうたがわれるが、上記の第Ⅲ期の沈降力極限值を示した 14 例を分類してみると、第 15 表でわかるように昭和 17～18 年～19～20 年の 3 カ年はいずれも最大積雪水量 1000 mm を越えており、積雪水量が著しく多く、その他の年は受圧面が小であるか、または受圧面高の低いものが第Ⅲ期を示していることがわかる。この事実から推すと、沈降力は積雪量が受圧面の大きさおよび高さに比し、充分多ければ第Ⅲ期の極限值を示すものと解されるのである。このことはまたつぎのような理由からも想像できるのである。

受圧面上で積雪の沈降が阻止され、その周辺で積雪層が褶曲するということは、逆に考えると受圧面が有効受圧面高だけ、積雪層中へ侵入して積雪層に褶曲を与えたと解してもよい。この場合、受圧面が積雪層に侵入するとその附近の積雪層はその侵入高に応じ圧縮、剪断力による歪を生じ塑性変形をする。積雪では一般に層は褶曲変形して、受圧面上で切れずに支えられるから、褶曲をおこさぬ上部の積雪層は受圧面の作用をうけていない。したがって、沈降力として作用しないと考えられるのである。

ゆえに積雪さえ充分あれば、それぞれの受圧面の大きさおよびその高さに応じて上部に褶曲のおこらぬ層ができ、沈降力は極限值に達するはずだということになる。

受圧面が小で高さの低いものは加重圏も小さく、積雪深の浅い年でも容易に第Ⅲ期の極限值に達するが、受圧面の大きな高さの高いものでは、加重圏が大きく、大雪の年のみにしか第Ⅲ期があらわれぬから、少雪年には極限值に達せず、第Ⅱ期から直ちに第Ⅳ期にはいるのであろう。

第Ⅳ期は沈降力の減少期で、この減少は主として、雪面からの融雪による積雪水量の減少と、浸透水による積雪の強さの減少が原因して積雪の褶曲層が受圧面周辺で次第に切れおちて急激に沈降力を減ずるのであり、降雨がはげしい場合等には、積雪の支持力が減少して受圧面周辺で急激に切れおちることもある。

以上、沈降力消長経過を各期に区分し説明したが、このうち第Ⅱ期および第Ⅲ期が雪害上重要であつて、この結果では、沈降力は受圧面を中心とした受圧面の大きさおよび有効地上高に関し一定の広さをもつた沈降力加重圏の積雪重量とみてよい。また積雪さえ充分にあれば、沈降力は受圧面の大きさ(周辺長)および受圧面高に関して、有限の大きさをもつものであることが認められたのである。

## 2. 受圧面の大小による沈降力変化

第Ⅱ期の沈降力から、沈降力は受圧面の周辺から外へある巾だけはみだした雪面上に積つた積雪の重さに等しいことを知り、受圧面高が等しい場合は、その加重圏の受圧面からはみだした巾は、受圧面の辺長と関係のあることを知つたが、ここでは第Ⅲ期の沈降力極限值につき、沈降力極限值と受圧面の大きさの関係を考案してみよう。

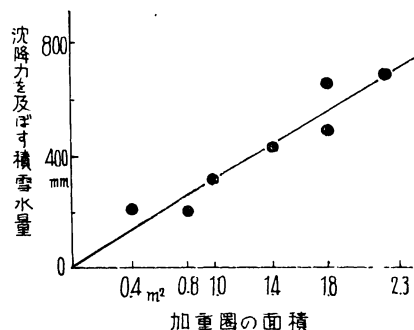
前記のような沈降力が極限值を示した例はあまりないが、その他にほぼ極限值を示したと思われる例を測定値からひろつて、受圧面高 1 m のものについて表示したのが第 20 表である。本表には沈降力加重圏の面積と沈降力極限值から、沈降力を及ぼす積雪水量を求めてある\*。

すなわち、受圧面にどれくらいの積雪水量の雪が積れば沈降力は極限值を示すかということを求めたのである。そこで第 20 表から沈降力極限值を示す積雪水量と加重圏との関係を図示してみると第 73 図のようになり、両者の関係はほぼ直線で示されるから実験式を求めてみると、

$$* \text{沈降力を及ぼす積雪水量} = \frac{\text{沈降力極限值}}{\text{加重圏面積}}$$

第 20 表 沈降力極限值と受圧面の辺長との関係

| 受圧面の一边      | 3.2cm             | 5.0 | 10  | 20  | 22  | 50   |
|-------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|------|
| 加重圈面積       | 0.4m <sup>2</sup> | 0.8 | 1.0 | 1.4 | 1.8 | 2.3  |
| 沈降力極限值      | 78kg              | 160 | 312 | 588 | 860 | 1570 |
| 沈降力を及ぼす積雪水量 | 195mm             | 200 | 310 | 420 | 480 | 680  |



第 73 図 積雪水量と加重圈面積との関係

$$(\text{HSW})_{\text{max}} = k_1 a = k_1 l^2 = 300(\text{mm})/l^2 = 0.03(\text{kg})/l^2$$

.....(19)

(HSW)<sub>max</sub>....沈降力を及ぼす積雪水量

a....加重圈面積, l....その一边

すなわち、各受圧面の加重圈の面積に比例して、極限値を示す積雪水量は大となる。ゆえに受圧面が大きくなると、極限値を示す受圧面上の積雪水量は著しく大となり、よほどの積雪量のある場所あるいは年度でないと、極限値の沈降力は現出しないことになる。

### 3. 受圧面高と沈降力との関係

前記したように、沈降力は受圧面高にも比例して増加するから、積雪量さえ充分にあれば、受圧面高の高いものほど沈降は大となるが、積雪量は必ずしも受圧面高に対し充分でないから、一般にある個所、ある年のある深さの積雪に対しては、受圧面高の高いものほど沈降力が大であるとはかぎらず、その積雪量に従つてある受圧面高のものが最大となる。第 21 表は受圧面の大きさ、高さ別の各年の沈降力の測定結果の数例であり沈降力の最大値のあらわれる受圧面高は積雪深により変わることを示している。

第 21 表 受圧面積、受圧面高別沈降力実測値

| 受圧面              | 年 度    | 最深積雪<br>(積雪水量)     | 受 圧 面 高 |     |    |     |     |     |
|------------------|--------|--------------------|---------|-----|----|-----|-----|-----|
|                  |        |                    | 25 cm   | 50  | 75 | 100 | 150 | 200 |
| cm cm<br>3.2×3.2 | 昭21~22 | 319 cm<br>(935) mm | —kg     | 54  | —  | 78  | 95  | 104 |
|                  | 昭22~23 | 252<br>(837)       | —       | 90  | —  | 102 | 102 | —   |
|                  | 昭25~26 | 199<br>(624)       | 26      | 61  | 51 | 87  | —   | —   |
|                  | 昭26~27 | 184<br>(554)       | 26      | 33  | 33 | —   | —   | —   |
| 5.0×5.0          | 昭22~23 | 252<br>(837)       | —       | 167 | —  | 167 | 140 | —   |
|                  | 昭23~24 | 133<br>(319)       | —       | 64  | —  | 12  | 2   | —   |
|                  | 昭24~25 | 172<br>(487)       | —       | —   | —  | 147 | 56  | —   |

第 22 表 受圧面の一边 3.2 cm の受圧面高と沈降力極限値との関係

| 受 圧 面 高     | 25 cm               | 50   | 75   | 100  | 150  |
|-------------|---------------------|------|------|------|------|
| 有効受圧面高      | 17.5cm              | 31.5 | 43.5 | 56.0 | 82.5 |
| 加重圈の面積      | 0.15 m <sup>2</sup> | 0.20 | 0.27 | 0.30 | 0.40 |
| 沈降力極限値      | 24 kg               | 45   | 65   | 85   | 120  |
| 沈降力を及ぼす積雪水量 | 170 mm              | 230  | 240  | 280  | 300  |

つぎに極限値をあらわした沈降力について、受圧面高との関係を調べてみよう。第 22 表は受圧面の 1 辺 3.2cm のものについて、受圧面高と沈降力極限値との関係を示したものである。本表に記した沈降力を及ぼす積雪水量は、沈降力極限値を加重圏の面積で除したもので、受圧面にかかる沈降力が極限値を示すに必要な積雪水量を示したものである。この積雪水量と受圧面高との関係を図示してみると第 74 図のようになり、実験式は

$$\begin{aligned} (\text{HSW})_{\max} &= k_2 Z_{(H-h)}^{1/3} \\ &= 70 \text{ mm } Z_{(H-h)}^{1/3} = 0.007 \text{ kg } Z_{(H-h)}^{1/3} \dots (20) \end{aligned}$$

となる。

すなわち、沈降力極限値を示す積雪水量は有効受圧面高の 3 乗根に比例して増すことになる。

この (20) 式と (18~2) 式とより一辺 3.2cm 受圧面に対する沈降力の極限値  $F_S \max$  はつぎの式で求められる。

$$\begin{aligned} F_S \max &= l^2 (\text{HSW})_{\max} \\ &= (200 \cdot Z_{(H-h)}^{2/3}) \times (0.007 \cdot Z_{(H-h)}^{1/3}) \\ &= 1.4 (\text{kg}) \cdot Z_{(H-h)} \dots \dots \dots (21-1) \end{aligned}$$

この式は、一般に或る大きさの受圧面では

$$F_S \max = k \cdot Z_{(H-h)} \dots \dots \dots (21-2)$$

なる関係があることを示している。

そこで、次に同一受圧面高で受圧面の大きさの異なる場合の極限値について  $k$  の値を計算してみると第 23 表のようになる。

この表の  $k$  の値は同一受圧面高に対するものであるから、加重圏の大きさに関係しているはずである。 $k$  の値と加重圏の面積 ( $l^2$ ) との関係を図示すると第 75 図のようになる。

この実験式は

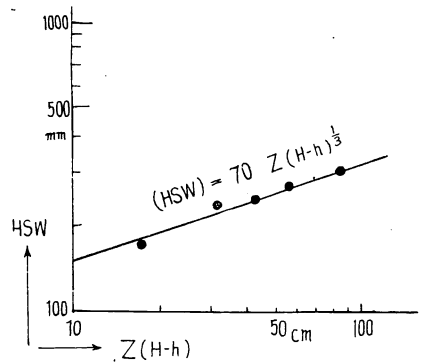
$$k = 5.5 \cdot l^2 \dots \dots \dots (22)$$

となる。

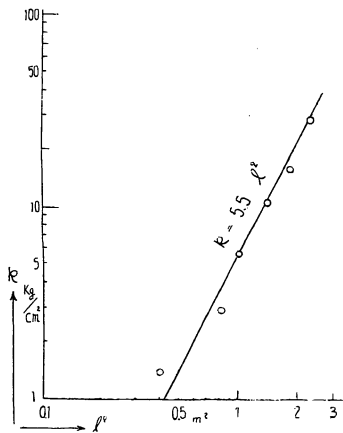
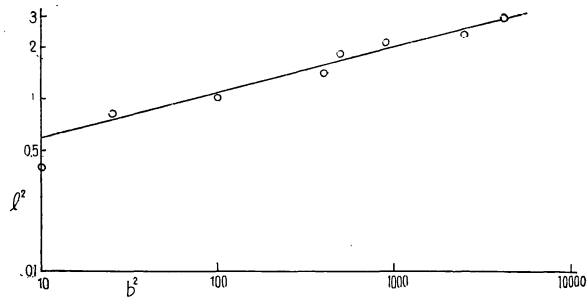
さらに加重圏の大きさと受圧面の大きさとの関係を求めると、 $k$  の値と受圧面の大きさとの関係が求められるのであるが、この関係は第 76 図のようになり、実験式は

第 23 表 受圧面高 100 cm の場合の  $k$  の値

| 受圧面の一辺 (b)                       | 3.2 cm             | 5.0 | 10  | 20   | 22   | 50   |
|----------------------------------|--------------------|-----|-----|------|------|------|
| 加重圏の面積 ( $l^2$ )                 | 0.4 m <sup>2</sup> | 0.8 | 1.0 | 1.4  | 1.8  | 2.3  |
| 有効受圧面高 $Z_{(H-h)}$               | 56 cm              | 56  | "   | "    | "    | "    |
| 沈降力極限値 $F_S \max$                | 78 kg              | 160 | 312 | 588  | 860  | 1570 |
| $k = \frac{F_S \max}{Z_{(H-h)}}$ | 1.4                | 2.9 | 5.6 | 10.5 | 15.4 | 28.0 |



第 74 図 HSW と  $Z_{(H-h)}$  との関係

第75図 k と  $l^2$  との関係第76図  $l^2$  と  $b^2$  との関係

$$l^2 = 0.33(b^2)^{\frac{1}{2}} = 0.33b^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (23)$$

$l$ ...沈降力加重面面積       $b$ ...受圧面一辺の長さ  
(22), (23) 式を (21-2) 式に代入すると

$$F_S \max = 5.5 \cdot (0.33 b^{\frac{1}{2}})^2 \cdot Z_{(H-h)} \div 0.6 \cdot b \cdot Z_{(H-h)} \dots \dots \dots (24-1)$$

この式は次のようにも書きかえられる。

$$F_S \max = 0.150 \text{ kg/cm}^2 \times 4b \times Z_{(H-h)} \dots \dots \dots (24-2)$$

$$= 0.150 \times p \times Z_{(H-h)}$$

$p$ ...受圧面周辺長

この式は受圧面が正方形の場合の実測値から求めたものであるから、 $4b$  は受圧面の全周辺長である。ゆえに (24-2) 式は、沈降力の極限值は受圧面の周辺長と有効受圧面高の函数としてあらわしうることを示していることになる。そうすると常数項は受圧面が積雪の沈降により積雪層内へ有効受圧面高だけ侵入し、そのために積雪層が圧縮褶曲をうけ生じた圧縮積雪層の平均剪断応力であるとみてよいことになる。換言すれば、これは受圧面周辺で作用し、褶曲層を受圧面上に保持する積雪の平均抗剪力と見てよいであろう。

以上、本式によつて沈降力の消長経過より順を追つてのべてきたように、沈降力を受圧面に作用する積雪の荷重として考えてきた結果は、逆に受圧面上に積雪を保持する積雪の応力と考えてもよいという結果をえ、この両者の考え方が等しいことがわかつたのである。

(24-2) 式では、受圧面上の積雪の重量が加算されていないが、これは実験に用いた受圧面にあまり大きなものがなかつたので、(23) 式を求める場合に無視されたからであり、大きな受圧面では受圧面上の積雪重量も加算しなければならないであろう。しかし本報告であつかう樹木の沈降力による被害については受圧面の巾、すなわち、樹冠や枝の太さはさほど大きくないから、本式で充分満足できるものと思われる。

#### 4. 受圧面の形状による沈降力変化

前項により沈降力には、受圧面の面積よりも、周辺長が影響し、その周辺長に作用する積雪の剪断応力によりささえられた積雪層の荷重、もしくは周辺に作用する積雪の剪断応力が、沈降力の主因子になつてゐることを認めたので、沈降力に対する受圧面の周辺長の影響を知るため、同一受圧面積で、周辺長の異なる受圧面につきその沈降力の差を測定した。

この測定には前記のように鉛のコーンの変形量を利用したから、沈降力の真の値は求められておらぬ

が、相互間の沈降力の大きさについては相対的に比較できる。

第 24 表はその実測値である。本表より、周辺長と鉛コーンの変形量との関係を図示すると第 77 図のようになる。本図では各年ともに測定値が多少ばらつくが、周辺長が長くなると鉛コーンの変形量が大きくなり、両者間にはほぼ密接な関係がみとめられる。

すなわち、

$$\sigma^n = ap \dots\dots\dots (25)$$

$\sigma$ ....鉛コーンの歪高  $p$ ....受圧面周辺長 ( $\sigma^n$ ....変形量)

この結果沈降力が受圧面の周辺長に比例していることを示すものである。すなわち、同一面積、同一高さの受圧面に対しても周辺長がことなるとそれに応じ、積雪の沈降力が変わることがわかる。この測定からも (24-2) 式にせしめすように、沈降力は受圧面積ではなく受圧面周辺長の函数であることが証明できたわけである。すなわち、(24-2) 式は正方形等の三次元的沈降力のみならず、矩形、長方形等の二次元に近い形のものにも適合すること。これから推論すると線状の二次元的な沈降力極限值をもあらわし得、二次元の場合は次式で表わしうであろう。

$$F_s = k \cdot 2p \cdot Z(H-h) \dots\dots\dots (24.3)$$

$p$ ....受圧面の一边の長さ

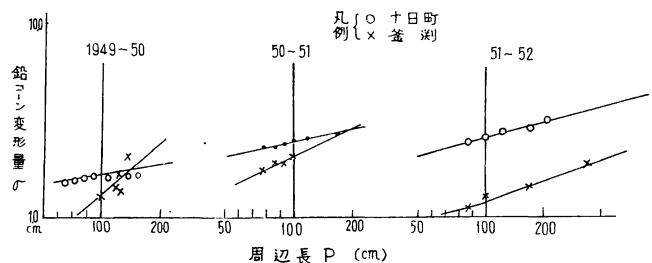
第 24 表 沈降力による鉛コーンの歪高

| 地 方     | 年 度     | 十 日 町               |             |           |            |       | 釜 淵   |             |            |           |              |       |
|---------|---------|---------------------|-------------|-----------|------------|-------|-------|-------------|------------|-----------|--------------|-------|
| 地 上 高   |         | 100cm               |             |           |            |       | 50 cm |             |            |           |              |       |
| 形       |         | 円形                  | 正方形         | 正三角<br>形  | 矩形         | 長方形   | 円形    | 正方形         | 正三角<br>形   | 矩形        | 平 行<br>四 辺 形 | 長方形   |
| 受 圧 面 積 | 1949～50 | 400 cm <sup>2</sup> | 〃           | 〃         | 〃          | 〃     | 900   | 〃           | 〃          | 〃         | 〃            | 〃     |
| 周 辺 長   |         | 71 cm               | 80          | 90        | 100        | 170   | 107   | 120         | 137        | 130       | 140          | 150   |
| 周 積 比   |         | 0.178               | 0.200       | 0.225     | 0.250      | 0.425 | 0.119 | 0.133       | 0.152      | 0.144     | 0.156        | 0.167 |
| 鉛コーンの歪  |         | 15.8 mm             | 16.0        | 16.2      | 17.0       | 17.1  | 13.6  | 16.7        | 17.5       | 15.0      | 14.4         | 21.5  |
| 形       |         | 円形                  | 正方形         | 正三角<br>形  | 矩形         | 長方形   | 円形    | 正方形         | 正三角<br>形   | 矩形        |              |       |
| 受 圧 面 積 | 1950～51 | 400                 | 〃           | 〃         | 〃          | 〃     | 400   | 〃           | 〃          | 〃         |              |       |
| 周 辺 長   |         | 71                  | 80          | 90        | 100        | 170   | 71    | 80          | 90         | 100       |              |       |
| 周 積 比   |         | 0.178               | 0.200       | 0.225     | 0.250      | 0.425 | 0.178 | 0.200       | 0.225      | 0.250     |              |       |
| 鉛コーンの歪  |         | 23.1                | 23.7        | 24.3      | 25.1       | 27.5  | 17.9  | 19.1        | 19.1       | 21.0      |              |       |
| 形       |         | 正方形                 | 矩形<br>10×40 | 〃<br>5×80 | 25×<br>160 |       | 正方形   | 矩形<br>10×40 | 〃<br>67×60 | 〃<br>5×80 | 〃<br>4×100   |       |
| 受 圧 面 積 | 1951～52 | 400                 | 〃           | 〃         | 〃          |       | 400   | 〃           | 〃          | 〃         | 〃            |       |
| 周 辺 長   |         | 80                  | 100         | 170       | 325        |       | 80    | 100         | 123        | 170       | 208          |       |
| 周 積 比   |         | 0.200               | 0.250       | 0.425     | 0.813      |       | 0.200 | 0.250       | 0.334      | 0.425     | 0.520        |       |
| 鉛コーンの歪  |         | 11.5                | 13.1        | 14.9      | 20.2       |       | 25.2  | 26.6        | 28.4       | 30.0      | 31.5         |       |

### 5. 雪質による沈降力の変化

雪質と沈降力との関係は2つに分けて考えなければならない。

その1は受圧面が積雪面下へ埋没するまでに積つた雪の密度である。いいかえると受圧面高に等しい積雪深の平均密度  $\bar{p}$ 、すなわち、受圧



第 77 図 鉛コーンの変形量と受圧面周辺長との関係

面が埋まるまでの積雪深の平均密度が問題であるが、その理由はこの層の  $\bar{\rho}$  が大であると、この積雪層の沈降が少なくなり、有効受圧面高  $Z(H-h)$  が低くなる。(24-2, 3) 式で  $Z(H-h)$  が小となると、沈降力が小となるからである。

ゆえに、受圧面高の積雪深の  $\bar{\rho}$  が小さいほど、沈降力は大となるから初期の降雪がはげしく、新積雪の軽い雪で早く受圧面が埋まるような年の方が有効受圧面高は高くなり、沈降力は同一大、同一周辺長、同一高の受圧面でも大となることになり、逆に初期の降雪が少なく、徐々に受圧面が埋まつたような年は有効受圧面高は低くなり、したがって沈降力は小となるのである。

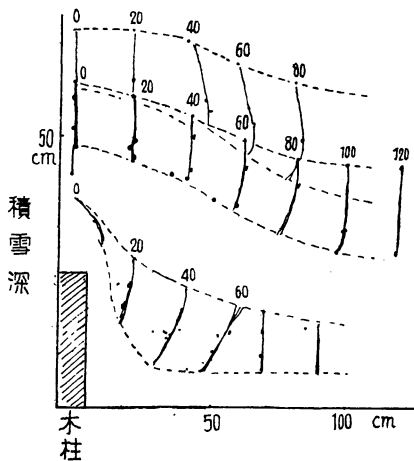
すなわち、沈降力の大きさは受圧面が埋まるまでの降雪、積雪の仕方に関係してくることになり、一般に大雪の年は沈降力が小雪の年より大となることになる。

その2は受圧面が埋まつてからの雪質の沈降力への影響であつて、これは(24-2)式でもわかるように、常数項すなわち、積雪の応力が雪質により差を生ずることにより沈降力に影響してくる。雪質の項で記したように、「しまりゆき」は「ざらめゆき」より抗剪、抗張等の雪のもつ応力が大であるから、「しまりゆき」で褶曲層ができている場合の方が積雪の支持力が大になり、したがって沈降力も大となるべきであろう。しかし、ある個所の積雪中に「しまりゆき」の占める割合が多い年というのは寒冷で多雪の年に起り、そのような年は初期の積雪頻度も多く、降雪量も多いから有効受圧面高も大になることになり、雪質の影響としてあげた二因子が同時に作用するので、この分離は今までの実験では困難である。

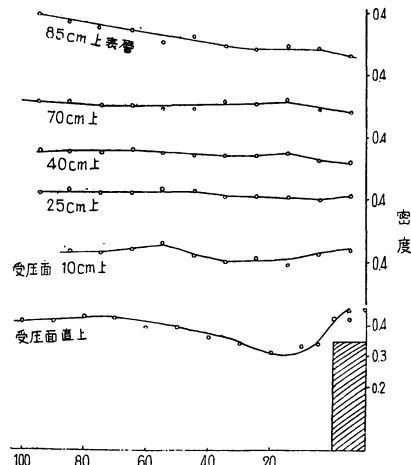
以上、要するに、沈降力は同一受圧面および受圧面高でも、その個所または年により、積雪の仕方、質により差を生ずるものであるということとどめておこう。

## 6. 受圧面による積雪の褶曲

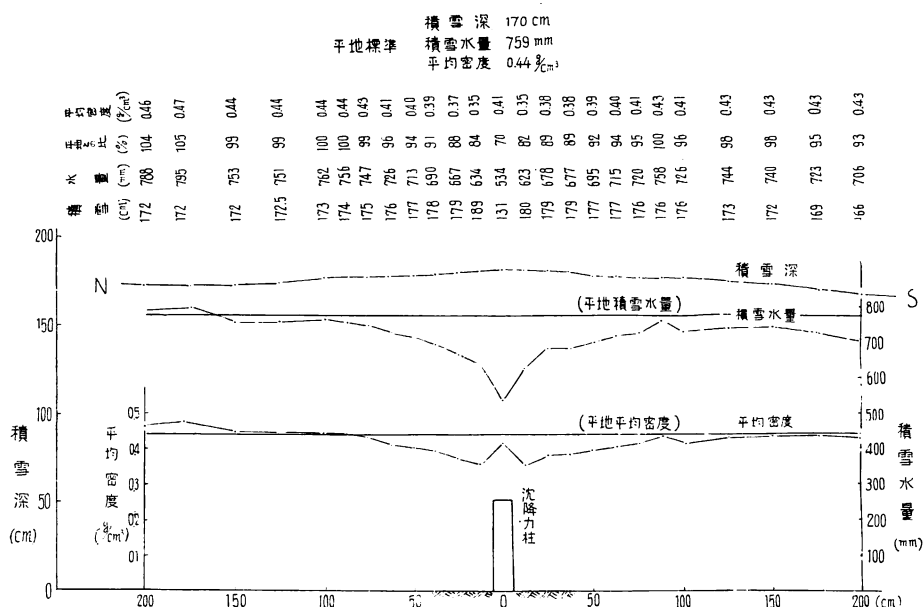
雪中に埋没した地物の存在による積雪層の褶曲は、写真および図に示したように受圧面を中心として一定の曲線をなし、その曲線の彎曲は上部ほど少なくなり多雪の場合は遂に褶曲を起さないようになる。受圧面による雪層の褶曲により、積雪層内の各点がどのように移動するかを調査するため、受圧面高 50cm、受圧面巾 10 cm、長さ 3 m の横木を作り、一降雪ごとに横木に平行に、横木中央を中心として等間隔に雪面に紙テープをはり、その位置の移動を横木に直角な積雪層の Profil によつて求めてみたところ第 78



第 78 図 積雪層の移動軌跡  
昭和 26~7 年 (釜淵)



第 79 図 雪層の密度変化  
昭 26 (釜淵)



第 80 図 埋雪柱周辺の積雪水量と平均密度の変化  
昭和 28 年 3 月 5 日 十日町試験地露場

図に数例を画いたような軌跡が求められた。この図によると、受圧面から一定の距離はなれた箇所はそのまま垂直に沈降するが、その箇所と受圧面の間では、下層のものは内側へ曲り、上層のものは外側へはみだしてゆくことがわかる。積雪のこのような沈降は、逐次雪面へ積雪が加わつて起るのであるが、結果的にみると、あるあつきの弾性体に外力が加わつてできた彎曲と大略似た形態をとっているものとみられるのである。すなわち、彎曲の内側では圧縮が起り、外側では伸張が起つているとみられるのである。

このことは各層の密度を受圧面上から外側へ順次追跡するとよくわかる。

第 79 図はその一例で、下層の雪層では受圧面から外へ出たところに密度の小さな、すなわち引きのぼされた個所ができ、受圧面附近は圧縮を受け密度が大になっているが、上層へいくほどこの形が変つてゆき、最上層では受圧面直上が最も引きのぼされて密度が小となつている。雪層全部の平均密度にもこの傾向は同様にうかがえる。

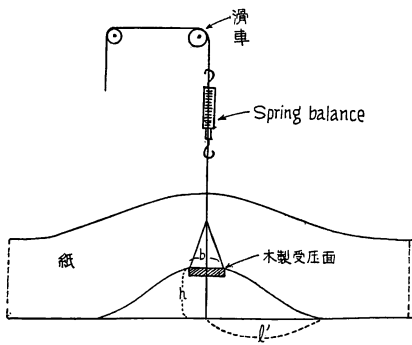
第 80 図がその一例であつて、受圧面上面で密度が大となり、それから一度減少して、受圧面からある距離に達するとふたたび密度が増加する。受圧面による積雪層の褶曲については、さらに褶曲曲線の解析等も必要であるがここでは、この積雪層の受圧面による彎曲が結果的には一般の弾性体の外力による彎曲に近い性質をあらわしていることを述べるにとどめる。

## 7. 模型実験

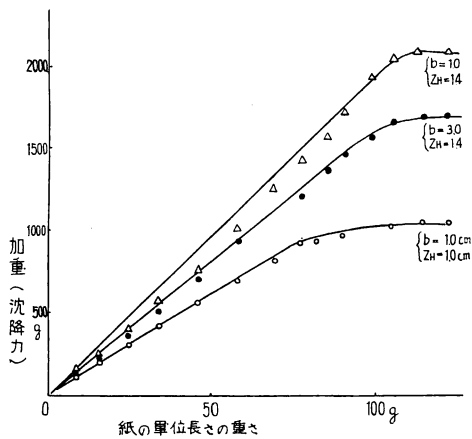
積雪の沈降力は以上のように、積雪は塑性体であるが、どの試験結果から、結果的には弾性体の弾性限界内の変形により生ずる力に近い関係が認められるので、下記のごとき模型実験を行い、そのあらわれる力につき、積雪との定性的な相似性を検してみた。

### (a) 実験方法

市販の美濃紙（長 33.5 cm×巾 24.4 cm），重さ 1 ㊦2,000 枚 1930 g，1 枚の重さは長 1 cm につき



第81図 実験装置



第82図 紙の重さと加重との関係

0.029 g/cm のもの、およびグランドパルプ紙 (長 36.6 cm × 巾 25.5 cm) 重さ 1 枚 1000 枚 3700 g、1 枚の重さは長さ 1 cm につき 0.1 g/cm の 2 種類を積雪の代用とし、第 81 図のように 7 kg 秤のスプリング・バランスに種々の巾の横木を受圧面として、つりさげ、この横木の高さを滑車にて変換できるように装置し、受圧面上に紙をいろいろな厚さにつみ上げて、スプリング・バランスにあらわれる重量を測定した。スプリング・バランスの最少目盛は 100 g であったが、これ以上精度の良い

ものが求められなかつたのでやむをえず用いた。これがため、測定誤差がかなり大であることはやむをえない。

#### (b) 紙による沈降力のあらわれ方

受圧面巾 1 cm および 3 cm の横木を用い、受圧面高 1 cm, 1.4 cm, 1.6 cm (あまり高くすると紙の巾が狭いのでその影響があるから低くした) として、紙をある枚数づつつみ重ねていつて、そのあらわれる荷重 (沈降力) と単位長当りの紙の重さ (積雪重量) との関係を求めてみると、第 82 図に二、三例示したようになる。紙の場合は受圧面下の積雪の沈降による第 I 期の曲線は求められぬから直

ちに第 II 期にはいるが、それ以降第 III 期の極限值までは全く積雪の場合と同様の沈降力増加曲線が求められる。グランド・パルプ (硬紙) は、紙をつみ重ねてもその厚さの圧縮が起らぬのでかなりの厚さになれば第 III 期の極限值はあらわれないが、美濃紙 (軟紙) では、比較的厚さがうすくても、紙の下部のみ圧縮されて上面は横木の受圧面の影響がなく、褶曲を起さなくなり、極限值が判然とあらわれてくる。この観察からしても、受圧面に沈降力が及ぶ範囲の限界は積雪の褶曲のあらわれる範囲であるとみてよいようである。

第 25 表 模型実験の加重圈

| 受圧面高<br>cm | 受圧面巾<br>cm | 沈降力加重圈の巾 (l) |      |      |      | 受圧面外にはみ出した加重圈の一辺<br>(l-b)/2 |      |      |     |
|------------|------------|--------------|------|------|------|-----------------------------|------|------|-----|
|            |            | 0.5 cm       | 1.0  | 2.0  | 3.0  | 0.5                         | 1.0  | 2.0  | 3.0 |
| 2          | 15.5       | 16.5         | 17.9 | 19.1 | 7.5  | 7.8                         | 8.0  | 8.1  |     |
| 3          | 18.2       | 18.9         | 19.4 | 22.0 | 8.9  | 9.0                         | 8.7  | 9.5  |     |
| 4          | 20.5       | 20.8         | 21.7 | 22.7 | 10.0 | 9.9                         | 9.9  | 9.9  |     |
| 5          | 22.6       | 22.9         | 24.0 | 25.7 | 11.1 | 11.0                        | 11.0 | 11.4 |     |
| 6          | 23.4       | 24.3         | 25.0 | 26.4 | 11.5 | 11.7                        | 11.5 | 11.7 |     |
| 7          | 24.7       | 25.0         | 26.2 | 28.0 | 12.1 | 12.0                        | 12.1 | 12.5 |     |
| 8          | 26.0       | 26.7         | 28.3 | 29.2 | 12.8 | 12.9                        | 13.2 | 13.1 |     |

(c) 第Ⅱ期の沈降力増加率と受圧面の大きさ、受圧面高との関係

前記の実験装置で、一定重量の紙を、受圧面巾  $b$  と受圧面高  $Z_H$  とをかえて、スプリング・バランスにあらわれる沈降力を測定した。紙の総重量は 1930 g で長さ 33.5 cm であるから、長さ 1 cm 当りの重さは 57.6 g になる。測定した沈降力を単位長当りの紙の重量で除すると、沈降力加重圏の辺長  $l$  がでる。これを表示したのが第 25 表である。

受圧面の巾  $b$  と加重圏の受圧面よりはみだした巾  $(l-b)/2$  との関係は  $b$  が大となると少しは大きくなるようでもあるが、この表に示した  $b=0.5$  cm 以上では大体  $b$  には無関係である。このことは沈降力が受圧面積よりも受圧面の辺長に関係することを示している。積雪の場合は、受圧面 第 83 図  $Z_H$  と  $(l-b)/2$  との関係の一辺が著しく小となると、加重圏の受圧面よりはみだした巾  $(l-b)/2$  も著しく小となることが認められるが、この実験装置では、 $b=0.5$  cm はそれほど小さな受圧面ではないのであろう。 $b$  をさらにせまくすればおそらく  $(l-b)/2$  も小となると思うが、この実験装置ではこれ以上狭い受圧面は作りえなかつた。

受圧面高  $Z_H$  と  $(l-b)/2$  との関係は、積雪では (18-1) 式で示すように、有効受圧面高  $Z_{(H-h)}$  の  $1/3$  乗に比例するが、この場合も両者の関係を図示してみると第 83 図のようになり、同様の実験式

$$\frac{l-b}{2} = 6.5 \cdot Z_{(H)}^{1/3} \dots\dots\dots (26)$$

をうる。模型実験の場合は有効受圧面高と受圧面高とは等しいから、本式は積雪の場合と全く等しい関係を示したというのであろう。

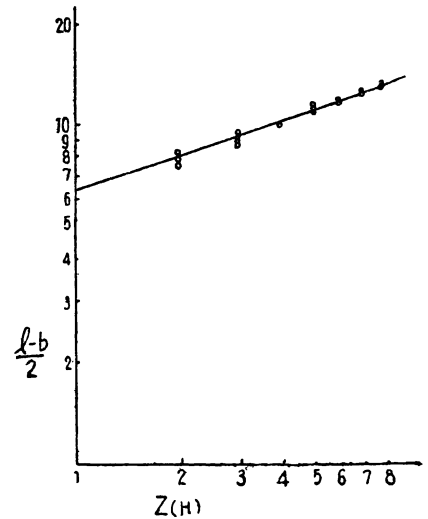
第Ⅲ期の沈降力極限值について、さらに受圧面の巾および高さの影響を求めてみると、この模型実験と積雪との間の相似性がさらにはつきりするのであるが、前記のとおり、紙では外力に対する圧縮性が少ないため受圧面高が大となると、かなり大量の紙を必要とするのでこの装置では実験ができなかつた。

(d) 褶曲巾と沈降力加重圏の巾との関係

沈降力加重圏は沈降力を、それを作用している積雪の重量で除して求めた、仮定の沈降力を及ぼす面積であると定義して用いてきたが、この加重圏が受圧面によりできた褶曲圏の面積と、どのような関係にあるかを求めてみた。

模型実験の場合は、加重圏の巾は、沈降力を紙の単位巾当りの重量で除した商に等しい。これと、受圧面の高さおよび巾によりもち上つた紙の巾との関係を求めることになる。第 26 表は第 81 図に示した紙のもち上つた巾  $l'$  と計算より算出した加重圏の巾の受圧面よりはみだした一辺  $(l-b)/2$  とを比較実験した一例である。

第 26 表でわかるようにもち上つた紙の巾  $l'$  とは受圧面からはみ出した加重圏の巾とはほぼ等しい。すなわち、この程度の測定誤差では、加重圏の大きさはもち上つた紙の巾に等しいといえよう。いい換え



第26表 もち上つた紙の巾  $l'$  と  $(l-b)/2$  との比較

| 受圧面高<br>$Z(H)$ | 紙のもち<br>上つた巾<br>$l'$ | 単位長当りの紙の重さ<br>24.8g |           | " 34g |           | " 44.5g |           |
|----------------|----------------------|---------------------|-----------|-------|-----------|---------|-----------|
|                |                      | 沈降力<br>$F_s$        | $(l-b)/2$ | $F_s$ | $(l-b)/2$ | $F_s$   | $(l-b)/2$ |
| 1.3            | 6                    | 280                 | 5.7       | 410   | 6.1       | 560     | 6.3       |
| 1.9            | 7                    | 330                 | 6.7       | 490   | 7.2       | 630     | 7.1       |
| 2.8            | 8                    | 390                 | 7.9       | 550   | 8.1       | 710     | 8.0       |
| 3.6            | 9                    | 460                 | 9.3       | 590   | 8.7       | 800     | 9.0       |
| 5.0            | 10                   | 480                 | 9.7       | 680   | 10.0      | 890     | 10.0      |
| 6.8            | 11                   | —                   | —         | 740   | 10.9      | 990     | 11.1      |
| 8.8            | 12                   | —                   | —         | 840   | 12.4      | 1090    | 12.3      |
| 10.7           | 13                   | —                   | —         | 930   | 13.7      | —       | —         |

れば沈降力を及ぼしている紙の広さはもち上つた紙の広さにほぼ等しい。沈降力としては持ち上つた紙の重量のほぼ全量がかかっているといふことができる。

この結果からみると、沈降力加重圏は積雪の場合でも、受圧面により褶曲している部分、すなわち沈降力影響圏とほぼ等しいといえるようである。しかし、紙による模型実験では、紙と基盤との接しよく面が判然としないので、紙のもち上つた巾を正確に測定できないから、この程度の精度では、沈降力が受圧面より褶曲した部分の重さであるということになるが、実際には両者が全く同一であるといえないであろう。

以上、この模型実験はまだ不充分であるが、積雪の沈降力のあらわれ方が、紙のような材料を同様に受圧面でもち上げた場合の受圧面にかかる力に定性的にはほぼ等しく、その力は、受圧面により褶曲をうけて支持されている部分の重量とほぼ等しいことがわかつたのである。

この実験は紙を使つたので、雪とは全く物性が違うので、結果が定性的に一致することは一見奇異に感ずるが、この結果を信頼すると、積雪層が埋雪した地物の受圧面で褶曲するような塑性変形は時間の経過を考慮した場合で、時間を考慮せず褶曲した結果あらわす力のみを取り上げると、紙のような弾性体が褶曲した結果と同一の力になるということになる。すなわち結果的には、積雪のこの種の力を弾性体のあらわす力と同一にとりあつかえそうだということを示している。

この実験により積雪のこの種の力の実験が、簡単な模型実験でも定性的には研究しようという足掛りができたことは今後の研究に有効な結果である。

## 結 び

以上述べた積雪の沈降力は充分解明しつくされたとはいえないが、筆者の研究によりわかつた、林学上必要な沈降力の性質にはつぎのものがある。

- 沈降力はその力を受ける受圧面の周辺長と受圧面の高さの函数としてあらわしうるものである。
- 沈降力は受圧面の大きさおよび高さに関係して、必要にして充分な積雪量のある場合は極限值が存在する。

その極限值は受圧面積が大で周辺長が長いほど、また受圧面高が高いほど大となるが、一般にはそれだけの積雪量がないから、ある受圧面高で最大となる。

- 有効受圧面高は、受圧面が埋雪するまでの積雪の沈降度に関係する。いい換えると、受圧面が埋雪する時の積雪の平均密度が小なるほど有効受圧面高は大になるので、積雪の仕方も沈降力には関係するから、急激に、大量に降雪するような地方あるいは年には沈降力は大となる。

d) 沈降力は積雪重量に比例するから、沈降力最大期は積雪重量すなわち、積雪水量最大期と一致し、決して融雪期になつてから最大になるのではない。

e) 沈降力は受圧面により褶曲を受けた部分の積雪重量にほぼ等しいと考えられるから、その大きさは受圧面上に積つた雪の重量より著しく大である。

f) このような性質と大きさの力をもつ沈降力は、樹木のごとき細長な幹や周辺長が複雑で長い枝葉には著しく大きな力を加えることになり、埋雪した樹木は樹木自体の抗力ではとうていこの力に抗しえない。

その大きさを知る目安として筆者等の求めえた受圧面の大きさと高さに対する最大の沈降力量を第 27 表に列挙しておこう。

第 27 表

| 受 圧 面             |                 |     | 受 圧 面 高 |       |     |       |     |       |     |
|-------------------|-----------------|-----|---------|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
| 一辺の<br>長さ         | 面積              | 周辺長 | 25 cm   | 50    | 75  | 100   | 125 | 150   | 200 |
| cm                | cm <sup>2</sup> | cm  | kg      |       |     |       |     |       |     |
| 3.2 <sup>2</sup>  | 10              | 13  | 26      | 90    | 96  | 102   | —   | 102   | 103 |
| 5.0 <sup>2</sup>  | 25              | 20  | —       | 167   | —   | 167   | —   | 139   | —   |
| 10.0 <sup>2</sup> | 100             | 40  | —       | 343   | —   | 312   | —   | 372   | —   |
| 20.2 <sup>2</sup> | 400             | 80  | —       | 856   | 676 | 588   | 290 | —     | —   |
| 22.0 <sup>2</sup> | 484             | 88  | —       | 949   | —   | 867   | —   | —     | —   |
| 30.0 <sup>2</sup> | 900             | 120 | —       | 469   | —   | 225   | —   | —     | —   |
| 50.0 <sup>2</sup> | 2,500           | 200 | —       | 1,566 | —   | 1,566 | —   | —     | —   |
| 10×50             | 500             | 120 | —       | —     | —   | 1,169 | —   | 1,122 | —   |
| 30×60             | 1,800           | 180 | —       | 588   | —   | 314   | —   | —     | —   |
| r = 10            | 707             | 94  | —       | 1,136 | —   | —     | —   | —     | —   |
| 60.0 <sup>2</sup> | 3,600           | 240 | —       | 797   | —   | 473   | —   | —     | —   |

### 第3節 匍 行 力

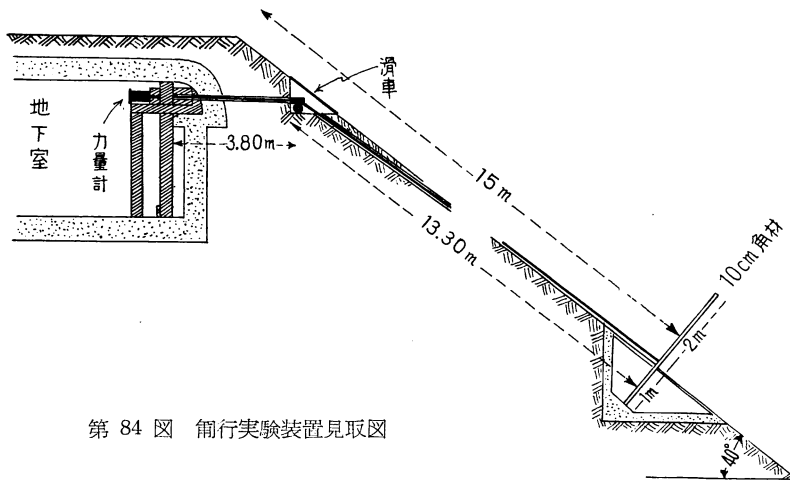
積雪の匍行力は移動圧なる名称でもよばれており、前記したように傾斜地の積雪の下方への移動により起る雪圧であつて、これが問題になつたのは、林学では、多雪地の樹木の根元曲りである。また、鉄道、通信電気関係では、傾斜面に立つ電柱、鉄塔が側圧により屈曲、破損することである。しかし、この積雪圧の発生機構、あるいは大きさについての測定や研究はまだほとんど行われていない。

ヘーフエリーの著書<sup>77)</sup>の一部および古川巖等<sup>78)</sup>の発表があるのみである。

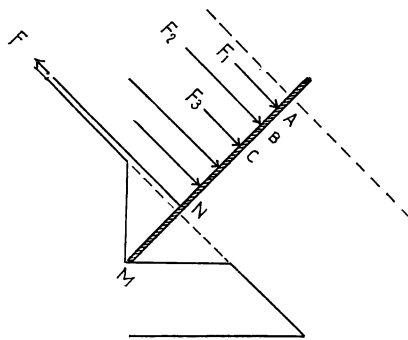
筆者は十日町試験地内の傾斜面を利用し、昭和 23~24 年冬以来、現在まで引続きその力の測定を行っているが、この数年積雪不足のため充分な資料をうるにいたつていない。最近 5 冬季の結果より、匍行力の概要を記すことにしよう。

#### 1. 測定設備

設備箇所は十日町試験地内北面 40° の傾斜面で、斜面は法切した平滑な草生地である。草は毎年刈払つているから、芝生状であり、積雪と地表面との摩擦はさほど大きくない。斜面下部には僅かに階段状の出張つた箇所があるが、この測定には影響はない。測定装置は第 84 図のように斜面に直角に、斜面上の高さ 2 m の 10 cm 角材を立て、斜面下 1 m はいつたところに支点を設け、斜面に平行な箇所で、鉄筋



第 84 図 簡行実験装置見取図



第 85 図

により支持し、この鉄筋を斜面上部の地下室に設備した力量計に滑車を介して連絡したものである。

この木柱に雪圧がかかると、支点を中心にして木柱が微動し、それにより鉄棒が引かれ力量計が働くことになる。力量計は 10 噸計で、この動きは約 1cm であるから、雪圧による木柱の動きは無視してよい程度である。この装置で測定した雪圧 (F) は第 85 図のように、木柱の各点 A, B, C, ... にかかる積雪の移動圧  $F_1, F_2, F_3, \dots$  との間、につぎの関係があるはずである。

$$F \cdot l = F_1 l_1 + F_2 l_2 + F_3 l_3 + \dots$$

$$= \sum (F_n l_n)$$

ただし、

$$MN = l, \quad AM = l_1, \quad BM = l_2, \quad CM = l_3, \dots$$

すなわち、

$$F = \frac{\sum (F_n \cdot l_n)}{l} \dots \dots \dots (27)$$

ところが、この装置では各点にかかる簡行力は観測できないので簡降力は積雪の重心に集中してかかり、積雪の重心位置は積雪量の変動に関係せず、ほぼ一定であると仮定すると、この装置で測定した雪圧 F は積雪の総合的な簡行力  $F_c$  との間につぎの関係があるとみてよいことになる。

$$F = k \cdot F_c \dots \dots \dots (28)$$

k... 常数

ゆえに測定した F で一応移動圧の性質を代表せしめてもよいと考えられる。

注：この仮定は大胆であるが積雪の密度測定結果からみると、重心位置はそう広い範囲では動かない。

また、杭の抗力等を考えると、この装置ではかつた力をそのまま使用できそうである。

## 2. 匍行力の性質

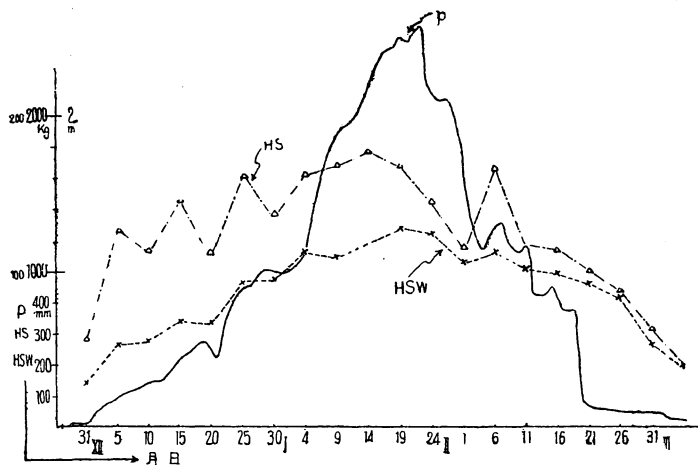
匍行力が傾斜面に積つた雪にあらわれる理由は大体沈降力と同様であつて、沈降力が積雪の沈降に原因する、受圧面周辺の積雪の褶曲によつて起るように、匍行力は傾斜面の積雪が雪層内部および地表面との間で滑り、徐々に下降していくのが、斜面に立つた受圧面で阻止され、そこで褶曲ができ、やはり「ふとん」状の積雪が引掛るからであると考えてよいようである。沈降力の場合は、地表面という基盤があり、有限にしか積雪は動かぬが、匍行力の場合は、斜面が長ければ積雪のあるかぎり、積雪は徐々に匍行をつづけるから、匍行距離はかなり大となる点がことなつてゐる。しかし、匍行力の場合も褶曲面が積雪の支持力に関係があるので、そう無限に大きくなるものとは考えられない。

## 3. 測定結果

第 28 表は前記の装置による匍行力の測定結果を 5 日ごとに表示したもので、第 86 図はその変化の一例である。

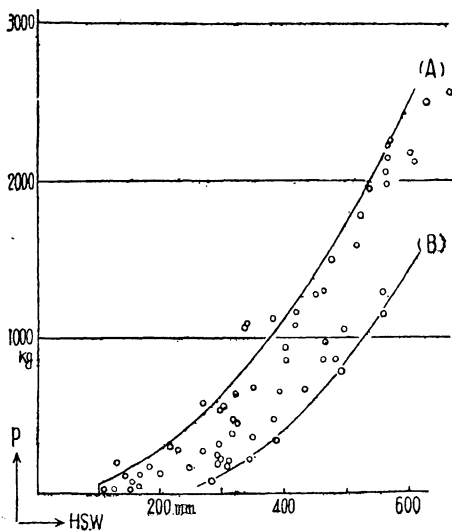
第 28 表 匍 行 力 の 変 化 の 一 例

| 昭 25~26 |                |     |                | 昭 27   |                |     |                | 昭 27~28 |                |       |                |
|---------|----------------|-----|----------------|--------|----------------|-----|----------------|---------|----------------|-------|----------------|
| 月日      | F <sub>C</sub> | HSW | H <sub>S</sub> | 月日     | F <sub>C</sub> | HSW | H <sub>S</sub> | 月日      | F <sub>C</sub> | HSW   | H <sub>S</sub> |
| XII 26  | —              | —   | —              | XII 26 | —              | —   | —              | XII 26  | 22             | —     | —              |
| 31      | 6              | 144 | 56             | I 31   | —              | —   | —              | 31      | 121            | —     | —              |
| I 5     | 170            | 253 | 125            | 5      | —              | —   | —              | I 5     | 275            | —     | —              |
| 10      | 264            | 269 | 112            | 10     | 6              | 72  | 47             | (6)     | (280)          | (236) | (82)           |
| 15      | 434            | 332 | 145            | 15     | 88             | 148 | 82             | 10      | 407            | —     | —              |
| 20      | 473            | 323 | 110            | 20     | 275            | 229 | 77             | 15      | 511            | —     | —              |
| 25      | 885            | 459 | 160            | 25     | 297            | 298 | 77             | (16)    | (588)          | (345) | (119)          |
| 30      | 985            | 465 | 135            | 30     | 511            | 297 | 81             | 20      | 780            | —     | —              |
| II 4    | 1159           | 552 | 160            | II 4   | 604            | 322 | 93             | 25      | 1063           | —     | —              |
| 9       | 1895           | 531 | 165            | 9      | 1132           | 380 | 110            | (28)    | (1138)         | (420) | (117)          |
| 14      | 2198           | 586 | 175            | 14     | 1481           | 473 | 159            | 30      | 1376           | —     | —              |
| 19      | 2505           | 624 | 166            | 19     | 1788           | 515 | 147            | II 4    | 2104           | —     | —              |
| 24      | 2126           | 603 | 143            | 24     | 2140           | 553 | 187            | 9       | 2515           | —     | —              |
| III 1   | 1599           | 511 | 113            | III 1  | 2230           | 562 | 151            | (10)    | (2546)         | (666) | (228)          |
| 6       | 1269           | 552 | 165            | 6      | 1974           | 537 | 140            | 14      | 2520           | —     | —              |
| 11      | 1044           | 498 | 116            | 11     | 2093           | 560 | 139            | 19      | 2678           | —     | —              |
| 16      | 824            | 481 | 111            | 16     | 1979           | 567 | 130            | (23)    | (2731)         | (806) | (223)          |
| 21      | 143            | 451 | 98             | 21     | 1286           | 453 | 111            | 24      | 2731           | —     | —              |
| 26      | 104            | 403 | 84             | 26     | 934            | 403 | 93             | II 1    | 2715           | —     | —              |
| 31      | 99             | 265 | 60             | 31     | 374            | 321 | 72             | (5)     | (2594)         | (759) | (164)          |
| IV 5    | 77             | 185 | 36             | IV 5   | 137            | 321 | 67             | 6       | 2599           | —     | —              |
| 10      | —              | —   | —              | 10     | 132            | 143 | 32             | 11      | 2583           | —     | —              |
|         |                |     |                |        |                |     |                | 16      | 1783           | —     | —              |
|         |                |     |                |        |                |     |                | (19)    | (1672)         | (715) | (123)          |
|         |                |     |                |        |                |     |                | 21      | 1593           | —     | —              |
|         |                |     |                |        |                |     |                | 26      | 494            | —     | —              |
|         |                |     |                |        |                |     |                | 31      | —              | —     | —              |
|         |                |     |                |        |                |     |                | IV 5    | —              | —     | —              |
|         |                |     |                |        |                |     |                | 10      | —              | —     | —              |

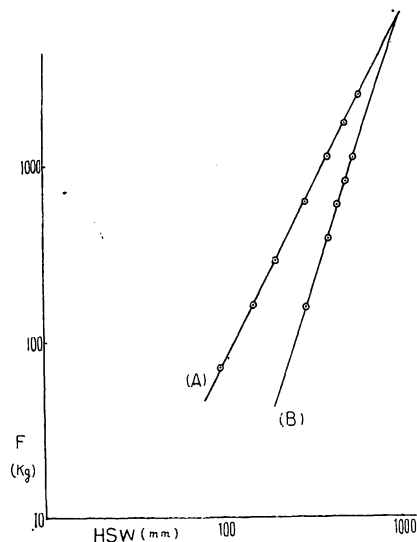


第 86 図 簡行力の一冬季の変化の一例 (昭和 25~26 年 十日町)

この図表でわかるように簡行力も沈降力同様、積雪水量最大時に極大値をあらわしている。このことは簡行力もまた積雪水量と密な関係があることを示していると解してよいであろう。そこで、各年の各日の簡行力測定値とその日の積雪水量との関係を図示してみると第 87 の 1 図のように、各測点はかなり分散するが



第 87 の 1 図 HSW と F との関係



第 87 の 2 図 HSW と F との関係

その上、下限はかなりきれいな曲線を示すことがわかる。実験式を求めるため、この図を両対数グラフに書き直してみると第 87 の 2 図のように直線になり、その関係は

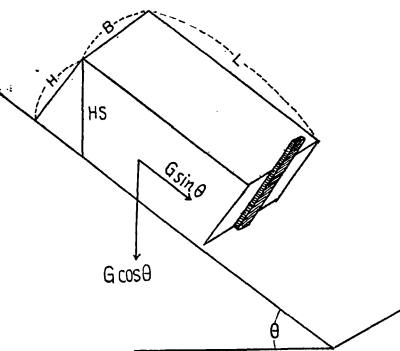
$$F = a(HSW)^n \dots\dots\dots (29)$$

上限の曲線では

$$a = 0.007 \text{ kg} \quad n = 2$$

となる。

この実験式で、常数項  $a$  は (27) 式で示したように杭のある点にかかる真の簡行力ではこれより小となるが、簡行力が積



第 88 図

雪水量の平方に比例することは、測定値  $F$  についてでも、簡行力  $F_0$  についてでも変りはないはずである。すなわち、斜面の簡行力は積雪水量の自乗にはほぼ比例するものとみてよいであろう。

第 87 の 1 図で、各点が上限線以下に分散するのは、匍行速度の差による積雪の褶曲層の広さ、いいかえると、加重圏の広さの変化、あるいは雪質の変化によるものであろうが、これだけの資料ではわからない。実用的には、匍行力の極限值がわかればよいのであるから、ここではこの程度で満足しておこう。

つぎに、沈降力と同様、匍行力も傾斜面の積雪のある範囲の積雪重量が、柱にかかるために生ずるものと考えたと第 88 図のように、高さ  $H$ 、巾  $B$ 、長さ  $L$ 、平均密度  $\bar{\rho}$  の立方体の加重圏が考えられる。

そうすると、この加重圏を作る雪塊の体積  $V_S$  は

$$V_S = H \cdot B \cdot L \dots\dots\dots (30)$$

総重量  $G_S$  は

$$G_S = \bar{\rho} H \cdot B \cdot L \dots\dots\dots (31)$$

斜面の傾斜角を  $\theta$  とし、積雪深を  $H_S$  とすると

$$G_S = \bar{\rho} \cdot H_S \cos \theta \cdot B \cdot L \dots\dots\dots (32)$$

しかるに  $\bar{\rho} \cdot H_S = \text{HSW} \dots \dots$  積雪水量 であるから

$$G_S = (\text{HSW}) \cdot \cos \theta \cdot B \cdot L \dots\dots\dots (33)$$

地面と雪面との摩擦係数を  $\mu$  とし積雪層内の滑りを無視し、積雪下面と地表面のみで滑るものとする  
と、この雪塊の傾斜面に直角に立つ杭あるいは樹木にかかる力、すなわち匍行力  $F_C$  はつぎのごとくなる。

$$F_C = B \cdot L (\text{HSW}) \cos \theta (\sin \theta - \mu \cos \theta) \dots\dots\dots (34)$$

しかるに前記の (29) 式から  $F_C = a(\text{HSW})^2$  がえられるから

$$a \text{ HSW} = B \cdot L \cos \theta (\sin \theta - \mu \cos \theta) \dots\dots\dots (35)$$

すなわち、

$$B \cdot L = \frac{a \cdot (\text{HSW})}{\cos \theta (\sin \theta - \mu \cos \theta)} \dots\dots\dots (36)$$

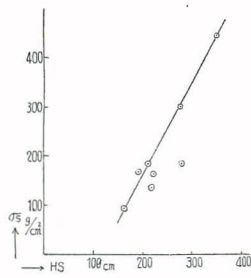
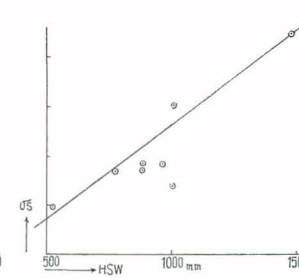
(36) 式は、加重圏の面積  $B \cdot L$  は、積雪水量  $\text{HSW}$  に比例して増大し、摩擦係数  $\mu$  がある範囲 ( $\mu < \tan \theta$ ) では大なるほど大となり、傾斜角  $\theta$  はある範囲までは  $\theta$  が大なるほど加重圏は減少することを示している。

これに対し匍行力は (34) 式により、 $\text{HSW}$  に比例して増加し、 $\mu$  が大きなほど小となり、 $\theta$  に対しては一定範囲では大きなほど大となるから、両式からつぎのことがわかる。

傾斜面に立つ杭、樹木等にかかる匍行力は、積雪水量の多いほど、すなわち積雪量が大であるほど大となり、その匍行力を及ぼす雪面も広がる。地表面と積雪との摩擦が大になると匍行力は小さくなるが、匍行力を及ぼす雪面は広くなり、傾斜角に対しては、逆にある範囲の角度では急斜地ほど匍行力は大きくなり、その力を及ぼす雪面は小となる。

このことは、傾斜面の匍行を阻止するには、積雪量が大なほど杭や樹木は太くなくてはならぬが、その距離間隔は広くなつてよく、接地摩擦を大にすると、杭や樹木は細くまたその距離間隔も広くともよくなり、傾斜が大なほど、杭や樹木は太くなければ支えられず、その間隔もせまくなければならぬことを意味しているのである。

(36) 式で、匍行力の加重圏が、積雪水量に比例して大となるのは、この実験のみでははつきりせぬが、第 89 図に一例を示したように、積雪の平均抗剪力は、積雪に比例して増加する傾向が認められる。平均抗剪力が大となれば、傾斜面に立つ地物の受圧面で支持される積雪面は広くなり、受圧面周辺で切れるこ

 $\sigma_s$  と  $H_s$  との関係 $\sigma_s$  と HSW との関係(十日町)

第 89 図

となしに、より大きな積雪重量が支持されるためではないかと思う。

以上匍行力に関しては、まだ測定があまり進んでいないので不明の点が多い。この実験では、傾斜角は一定で、したがって摩擦係数もほぼ一定な同一斜面における数カ年の実験値しかないので、匍行力が積雪水量の自乗に

ほぼ比例する。したがって、積雪量が多いほど匍行力が著しく大となることだけは認めら

れたのである。また、その力のあらわれ方より考えて、沈降力によく似た性質をもち、沈降力が積雪の沈降による褶曲層の発生に原因しているのに対し、匍行力は匍行による褶曲層に起因しているのが違うのみで、その発生機構は大略同一であろう。

樹木に作用する沈降力、匍行力を考察すると、前者が埋雪した幹全体に作用し、後者が主として根元に作用するから、第6図に示したように作用点までの腕の長さが沈降力の方が大である。したがって、雪害という点からいえば沈降力の方が匍行力より影響が大なものといえよう。

## 総 括

1. 冠雪は気象条件、特に気温の作用による降雪の粘性の変化および風速により変化する。
2. 冠雪は樹木の樹冠外形、枝葉の密度により増減する。
3. 冠雪により樹幹の被害は、梢端部、樹冠下部、樹幹下部に集中しておこる傾向が大である。
4. 沈降力は、その力を受ける受圧面の周辺長とその高さに関係して変化する。一般にある積雪深の場合は地上から一定の高さの受圧面で沈降力が最大となり、同一面積の受圧面では周辺長の長いほど沈降力は大となる。この力は著しく大であるので埋雪するくらいの大きさの樹木ではこれに抵抗することはできない。
5. 匍行力は積雪水量の2乗に比例して増加し、傾斜角および積雪と地面との摩擦係数等に関係して変化し、沈降力に類似した性質をもつが、樹木に対しては、その作用点が低く、沈降力の方が雪害に対する影響が大である。
6. 冠(着)雪、沈降力、匍行力等は大雪の年および場所、また降雪強度が大で沈降量、匍行量が大なる場合に著しく大となる。したがって、多雪地、多雪年にはこれらの雪圧による雪害が極端に多くなる結果をもたらす。

## 第Ⅳ章 林木の雪圧被害防除方法

### 第1節 機械的雪害防除の基礎

第Ⅲ章までに章をおつてのべたことで雪圧の発生に関する地理的、地形的、気象的条件、積雪の力学的性状および雪圧の性質の概要はほぼ判明したのであるが、これらの各因子から導き出される、森林および樹木の雪害すなわち機械的な被害の防除法としては、大別して2方法がある。

すなわち、

1. 積極的に雪圧発生各種原因を除去する方法
2. 消極的に雪圧を受けてもその結果生ずる被害を軽減する方法

である。

しかし、現段階では積極的防止法はほとんど不可能に近く、消極的に雪害を軽減するのが唯一の方法といわねばならない。しかも、雪圧の測定結果ではその力が従来常識的に考えられていたものより意外に大であつて、樹木が到底これに抗し、この力に耐えるとは思われないのであるから、雪圧による機械的被害防除法として残されている方法は、なるべく雪圧を受けぬようにするか、受けても軽度の被害で終るようになる以外に良法がない。

たとえば、従来のべられていたように、肥大成長を促進して、沈降力、簡行力等の雪圧に耐えるようにするというような考え方は、雪圧の大きさについての知識が充分でなかつたからで、むしろ埋雪するくらいの高さの樹木では雪圧により素直に倒伏しても、折損しないような細長、柔軟な幹に育てた方が被害は軽減するのであつて、十分に肥大した雪圧に抵抗するような樹木はかえつて折損をまぬがれないのである。しかし、樹高が高くなり、雪面をはるかにぬけ出た樹木に起る雪害は主として冠雪の害であり、この場合は、逆に、冠雪荷重に耐えるような抵抗の大きな樹形でなければいけない。

この例でもわかるように雪圧被害（冠雪荷重をも含めて）防除は、樹木の大きさ（主として樹高）により、つぎのごとく2期に区分して考察しなければならない。

- (1) 積雪下に埋まる期間（積雪深の約2倍以下の樹高）
- (2) 積雪に埋まらぬ期間（積雪深の約2倍以上の樹高）

前者の時期には雪圧に抗しないようにする。後者の時期に入れば雪圧に耐えるようにするという全く相反した方法が要求されることになるのである。

### 第2節 育林方法による雪害防除

#### 1. 稚苗時代

〔実生苗の場合〕 スギ、カラマツ等の針葉樹病では苗畑時代の1～3年生の場合は比較的柔軟で、初雪により容易に倒伏するので稚樹時代は機械的な折損はすくない。融雪直後の稚樹は倒伏して惨状を呈するが、これは大部分のものが直ぐ立直り恢復する。この時代はむしろ融雪期の多湿による雪腐等の病菌被害が多く、菌害の方が保護上も重要である<sup>79,80)</sup>。雪腐は積雪下の稚樹の衰弱に加えて、雪圧による倒伏により、梢端、枝葉が接地し、そこから罹病することにより起るもので、主として梢端部が加害される。また、

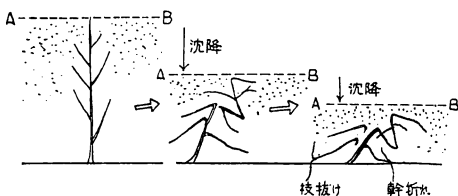
それとともに多年生苗になるほど、雪圧による梢端部の折損、枝葉の抜け落ちの被害が多くなるが、これらの被害を防除するには雪圧を他の地物で支えることが必要であり、低い杭を苗間に植立するとか、日覆式の低い木枠で支える方法は望ましいが<sup>(81)</sup>、経費の点で望むべくもない。

また、いわゆる窒素過多苗に雪に原因する罹病苗が多く、加里過多と称せられるいわゆるかたい苗に雪圧被害が多いのは注意を要する点である。

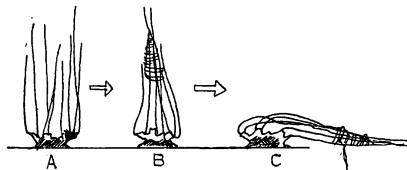
苗木の倒伏方向は平坦地では主として降雪初期の風向に支配され風下へ倒伏するので、後述する斜植にそなえて、苗畑の床替も斜植を行い、倒伏角をなるべく少なくする試験を行つているが、その成果はまだあきらかではない。

生長のよい落葉広葉樹稚樹では、この時代にも雪圧の害をうけやすい。これは、落葉した後の広葉樹は一般に分枝が細長で粗であり、枝への着雪が少ないため、初雪で倒伏することが少なく、平坦な苗畑では直立したまま埋雪し、その後、積雪の沈降により枝、幹が曲折するからであつて、枝ぬけ、幹折れの害を起しやすい。

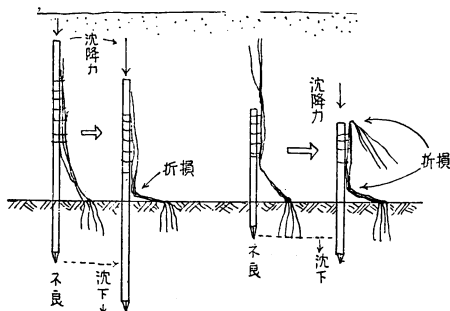
第90図はその模式図である。この場合、枝抜けを起すのは幹の倒伏した反対側の枝であることは注意を要する。この被害の防除法は民間の桑園で行われている桑の萌芽の雪害防除法のごとく、数本を寄せ集めて第91図Bのように結束して直立せしめ雪圧のかかるのを防ぐか、Cのようにはじめから地表面に結束しておし倒してこれにかかる雪圧の大きさを最小にするかが合理的である。なぜならば、沈降力は積雪の沈降方向に直角にある面に最も強く作用し、また地面よりの高さが低いほど小さいからである。しかし直立せしめる場合は苗高が最深積雪を抜きでる場合以外はやはりその上部に沈降力をうけるので危険である。



第90図 広葉樹の雪害



第91図 結束法



第92図 副木の不良例

苗木の雪圧被害防除法として、降雪前に掘取斜仮植を行うのは、雪中の病害さえ防げれば、倒伏角を小にする点より望ましいことである。

貴重樹の稚苗等に副木をして直立せしめるのは雪害防除の一手段であるが、この場合も第92図のように副木の頂点が雪面下にならぬようにしないと、副木がその頂点にかかる沈降力で沈下し、それとともに苗木も屈曲して折損する危険が多い。副木が苗木より低い場合も同様である。

〔挿木苗の場合〕挿木苗は一般に硬化した枝を挿すため、苗畑における雪圧の被害は大であり<sup>(83)</sup>、幹折れ、枝抜けを起しやすい。また特異な現象として第93図のように切口の皮部がはげ落ちることが多い。これは切口が細いので支えられた積雪層が徐々に切口の周辺で切れて落ちるためであろう。

挿木の場合も発根等に支障がなければ、斜挿しが適当である。この場合も冬季の主風方向と逆の方向にねかせる注意が必要であろう。また、できるだけ若い、軟い部分を挿す方が雪害の面からは有利である。

## 2. 山地植栽以後

## 〔植栽本数〕

従来は肥大生長を増大せしめるため多雪地では疎植することが奨励されているが、埋雪するくらいの大きさの樹木は、いくら肥大生長を促進せしめても雪圧に耐えることはできないと考えられる。また、生育期間が無雪地に比し短縮されるから、疎植による肥大生長増進も困難である。こう考えると、今までたびたび記したように、むしろ密植して成林を早め肥大生長をおさえて樹木を柔軟に育て、雪圧で倒伏しても折損せぬようにした方が得策である。このためスギにより疎密度試験を現在行っているが、まだその成果はえられていない<sup>82)</sup>。なお、植栽本数をまですことは単木的に雪圧にたえて残存しうる個体の選択の自由度をまです点からも有利である。

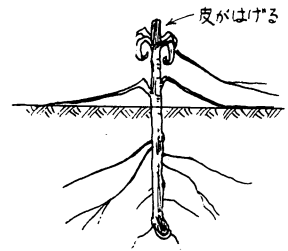
また第2図に一例を示したように幼令林は壮令林より積雪深がまですことが認められ、沈降力による雪害が、積雪深の約2倍までの間に多いことは、この期間には、肥大生長に比して、伸長生長をまですような施業が行わるべきで、その点からも、密植が推奨せらるべきで、また幼時の林地施肥による生長促進も一手段として考慮されるべきであろう。

## 〔植栽方法〕

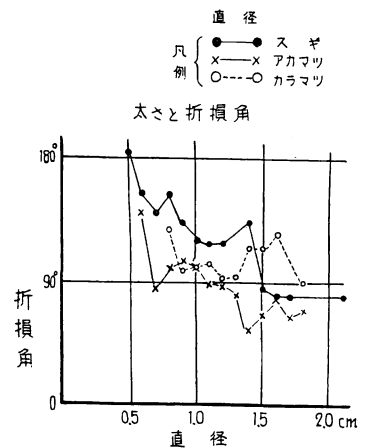
山地に植栽された稚苗は、平地では積雪の沈降力により、傾斜地では沈降力と匍行力により倒伏せしめられる。その倒伏方向は平地では主として、主風方向に倒れるが、その方向は根張その他の原因で一定しない。傾斜地では下方谷側に一様に倒伏する。これを倒伏せしめないようにすることは既述のようにほとんど不可能であるから、むしろ倒伏しても折れないようにする必要があることはしばしばのべた。このためには、倒伏角をできるだけ小さくするのが合理的である。すなわち、地表面と植栽木の幹との角度を小さくすればよい。

第94図はスギ、アカマツ、カラマツについて、根元直径と折損角との関係を調査した例<sup>84)</sup>であつて、いずれも根元直径1~1.5 cmになると、約90°の彎曲角で折れることを示している。そこで、苗畑同様、山地でも斜植が良いことになる。アカマツの3年生苗によつて傾斜地に第95図のような、3種の植栽を行つてみた結果、第1年度の冬季だけで第29表のような結果をえた<sup>87)</sup>。

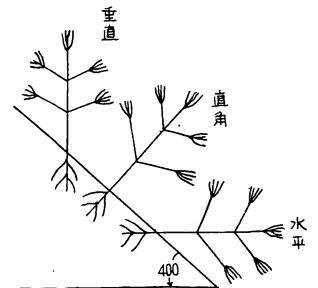
すなわち、斜面に直角以下の角度に斜植すると雪害率は著しく減じるのである。斜植した樹木は生育期間に排地性により根元曲りを生じ頂芽を垂直方向に向けて生長するが、垂直に植栽したもので、折損しな



第93図 挿木の被害



第94図 スギ、カラマツ、アカマツの太さと折損角



第95図

第29表 傾斜地のアカマツ幼令木についての信頼度95%の折、曲健全木の出現率

| 植栽角 | 折 曲 健 全   |           |            |
|-----|-----------|-----------|------------|
|     | %         | %         | %          |
| 垂 直 | 43.4~22.0 | 36.3~34.5 | 44.6~19.4  |
| 直 角 | 4.2~ 0.0  | 21.6~19.0 | 89.8~66.0  |
| 水 平 | 2.8~ 0.0  | 2.3~ 0.0  | 100.0~96.8 |

かつたものも 1, 2 冬季のうちに同様に根元曲りを生ずる。この点よりみれば、雪国の樹木の根元曲りは、雪害というよりもむしろ、雪圧への適応であるといえそうである。第 2 冬以降も被害木は漸増するが、第 1 年目の冬ほど多くはない。これは残存したものが根元曲りを生じて、雪圧に適応するからであろう。同様のアカマツを平地に垂直に植栽した場合の雪害の一例を挙げると第 30 表のようになり、同年生では、樹高がある程度高いもの、すなわち、形状比の大なものおよび被圧下である樹高の低いものは雪害

第 30 表 平地のアカマツ幼令木の雪害率

| 樹 高    | 健全  | 折れ  | 合計  | 折損率<br>(A)<br>% | 折損率<br>(B)<br>% | 折損率<br>(C)<br>% |
|--------|-----|-----|-----|-----------------|-----------------|-----------------|
| cm     |     |     |     |                 |                 |                 |
| 20~30  | 5   | 2   | 7   | —               |                 |                 |
| 30~40  | 26  | 9   | 35  | 26              |                 |                 |
| 40~50  | 95  | 50  | 145 | 34              |                 |                 |
| 50~60  | 175 | 98  | 273 | 36              | 35              |                 |
| 60~70  | 123 | 34  | 157 | 22              |                 |                 |
| 70~80  | 70  | 16  | 86  | 19              |                 |                 |
| 80~90  | 7   | 3   | 10  | —               |                 |                 |
| 90~100 | 1   | 0   | 1   | —               | 20              |                 |
| 本数合計   | 502 | 212 | 714 | 30              |                 | 30              |
| 平均樹高   | 58  | 55  | 56  |                 |                 |                 |

が少ない傾向を示している。この原因は樹高の低いものはかかる沈降力が小であるため、樹高の大きなものは形状比が大で柔軟であるためだと思われる。

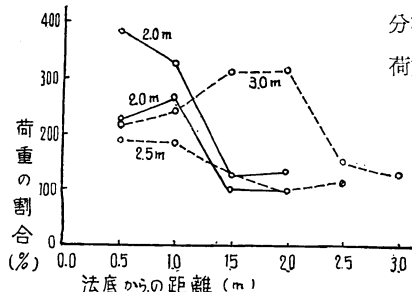
これらの結果から斜植が雪害を減少することを知つたので、むしろ、稚樹時代に根元曲りの苗木に仕立て、すなわち、苗畑で斜め床替をして根元を曲げてから山地へ出した方が良くであろうと推論して、一回床替時斜植したスギ苗を 2 年生の春山行せしめ、傾斜角 30~50° の山地に第 96 図のような植栽の比較を行つてみた結果は第 31 表のごとくなり、明らかに根元曲りの苗木の方が雪害が少なくないことがわかつた。なお、平均樹高には差がみとめられなかつた。これも初年度のみで結果であつて今後の生育状態を調査しなければ、伐期までの影響は不明であることをことわつておく。

第 31 表 根元曲りと普通苗の被害率

| 苗の種類    | 根元曲り斜植                 | 普通苗垂直植 |
|---------|------------------------|--------|
| 被害率(平均) | 14.8%                  | 23.5   |
| 備 考 (1) | 被害率平均は信頼度 99% で有意の差がある |        |
| 備 考 (2) | 被害中には折、曲のほか枯損も入れた      |        |



第 96 図



第 97 図 階段上の積雪荷重の割合  
(数字は階段巾員を示す)  
最小荷重を 100 とす

明であることをことわつておく。

以上多雪地の植栽方法としては斜植あるいは根元曲り苗の植栽が良いようであり、ここには記さなかつたが挿木苗では一層このことが望ましい。

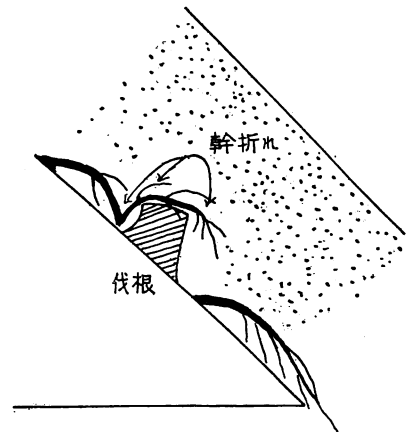
さらに、雪崩の危険のある急斜地では通行力を防ぐために階段造林が、雪崩をとめ樹木の雪害を減ずるうえに有効であるが<sup>86)</sup>、この場合植栽はむしろ階段の前縁か、そのすぐ前の傾斜面がよく、階段の中央部より後方は雪圧によりかえつて被害をうける。第 97 図は、切取階段面の雪の荷重の

分布を階段の巾員別に示したもので<sup>87)</sup>各巾員とも、階段の前縁の荷重が少ない。したがつて雪圧も小さいことがわかる。また、伐根により積雪の通行をとめて、そのうえ、下部へ植栽するのも一案であるが、この場合伐根上部の植栽木は第 98 図のように倒伏して伐根の上に倒れ、かえつて沈降力により折損した例があるから、伐根の下部に植栽した方が良くであろう。

〔撫育手入〕

幼時は、目的樹種の生長をそく進するため、手入刈はいいねいにやり、また成林を早めるため、目的以外の形質のよい

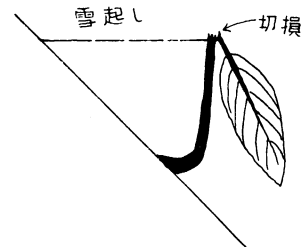
樹種で早く空間を埋めることも一案であろう。植栽木の雪害、枯損等で林孔ができた場合は林孔は雪害を拡大することになるから、なるべく他樹種、たとえば広葉樹等で埋めるよう注意すべきであろう。また、急斜地では間行力を阻止するため適な間隔で保残木を残すこと、手入撫育がおくれた林分では、むしろ植栽木の周囲をていねいに刈払い、植栽木の生長をさまたげぬようにする必要はあるが、全面的に目的以外の樹種を一時に取り去ると、かえつて雪害を起す危険がある。これは雪圧をお互いに分担していたのが、刈払いにより一時に残存木のみにかかるからで、この場合、陽陰になるおそれがあれば、目的樹種以外は芽刈等を行うのが適当であろう。また、刈り払った広葉樹等も伐根を高くすれば、沈降、間行力を阻止するのに有効である。



第 98 図

植栽木の枝葉の拡張が過大であると、そのため受圧面周辺長をまし、沈降力等のかかり方が大となり、冠雪もまた大となるから、過大な枝葉は剪定して、なるべく樹冠を細長にするよう心がくべきである。

谷側の枝を打ち上げると、雪圧の害を少なくするといわれているが、埋雪する程度の樹木の枝は山側の枝でも倒伏すると雪中ではほとんど、下方の谷側へ曲つておし下げられており、落葉広葉樹やカラマ



第 99 図

ツのように冬落葉する木は、前記のようにはじめは立つまま埋まるが積雪の沈降とともに屈曲して、山側の枝はその屈曲に一時は抵抗するが、枝の抵抗力は沈降力より弱く、ほとんど枝抜けの状態となり、また、かえつて無理な形で屈曲倒伏するため逆に被害をますこともある。

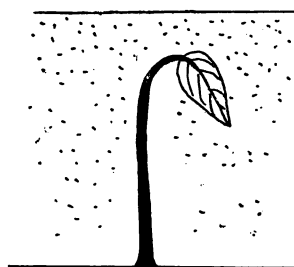
「雪起し」は融雪後直立しないような歪をうけた木に行くことは有効である。スギ等では、「雪起し」の必要な木は一見してよくわかる。それは生育期にも幹が傾斜しているばかりでなく、樹冠が下方谷側へ偏倚して、山側の枝も下垂しているからである。一応このような傾斜木になつた木は、年々傾斜したまま生育し、遂には雪害木になってしまうから、生育期間にはいるとすぐ直立せしめ、樹冠の偏倚はできれば剪定して直してやるべきである。

「雪起し」は生育期間、幹を直立せしめ、偏心成長による幹の彎曲を修正するのが目的で、これにより冬季間幹を直立させるためではない。ハリガネ等で引起すと第 99 図のように、かえつて、その支持点で折損するから、一生育期間だけでもつ、縄の類で引起してやるのが理想的で、これは、樹高が積雪深の 2 倍くらいになるまで注意して行えば充分であろう。

#### 〔枝打ち、除間伐〕

「枝打ち」は冠雪を減少することと、下枝にかかる沈降力を防止する効果がある<sup>88,89)</sup>。

冠雪の害に特に危険なのは樹冠が過強であること、偏倚していることであつて、これを整枝する必要がある。そして、なるべく、せん鋭な形に誘導するとよいことは明らかである。必ず埋雪するくらいの高さの樹木、すなわち積雪深以下の樹高の樹木には枝打ちの効果はすくないが、なるべく早期から力枝以下の下枝および偏倚した片枝、過強なる枝を打ち落すことは雪圧の害を減少することになる。この場合あまり



第 100 図  
過強に枝打ちした木の埋雪図

強く打ちあげると第 100 図のように、幹のまだ強度の弱い部分のみが、枝葉にかかる沈降力をはなはだしくうけ、不規則な屈曲をなし、かえつて梢折れを起すことがある。積雪深をぬけ出た積雪深の 2 倍くらいの樹高の樹木には、積雪深以下の下枝は少なくとも速やかに打つ必要がある。このような樹木の下枝の埋雪高は第 32 表に測定例を示したように、大体その個所の積雪深に等しい。樹冠の下部には樹冠の降雪しや断により雪面に幹を中心にした凹穴ができるが、下枝は尖端が下垂埋雪するので、埋雪する最高下枝は積雪深とほぼ等しくなるのである。この埋雪枝中の枝長の長いものは、沈降力により引おろされ、それにつれ幹が傾斜

第 32 表 積雪深と埋雪枝高

| 林 令 分 | 樹 高       |           |           | 最高埋雪枝高    |           |           | 平 均<br>積雪深 | 備 考    |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|--------|
|       | 平 均       | 最 高       | 最 低       | 平 均       | 最 高       | 最 低       |            |        |
| 幼 令 林 | cm<br>416 | cm<br>590 | cm<br>320 | cm<br>161 | cm<br>180 | cm<br>140 | 160        | 20 本平均 |
| 壮 令 林 | 662       | 800       | 450       | 168       | 225       | 140       |            | 28 本平均 |

し、傾斜した幹は冠雪によりさらに屈曲し、冠雪が増大すると、折損することがある。幹がこのような原因で傾斜しているものは、過長の埋雪枝を切りさると 70~80% ぐらいいは立ち直ることがわかつた。

第 33 表は枝打ちをした場合の雪害率および埋雪率の減少の一例<sup>39)</sup>である。

第 33 表 打 枝 の 効 果 の 一 例

| 樹 高 階       | 非 枝 打 区 |      |       |      |      | 枝 打 区 |      |       |      |      |
|-------------|---------|------|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|
|             | 本 数     | 埋雪本数 | 埋雪率   | 被害本数 | 被害率  | 本 数   | 埋雪本数 | 埋雪率   | 被害本数 | 被害率  |
| 1.5~2.4     | 本 9     | 本 9  | % 100 | 本 3  | % 33 | 本 3   | 本 3  | % 100 | 本 1  | % 33 |
| 積雪深 2.5~3.4 | 18      | 18   | 100   | 9    | 50   | 8     | 8    | 100   | 1    | 13   |
| 3.5~4.4     | 18      | 16   | 89    | 11   | 61   | 33    | 24   | 73    | 10   | 30   |
| 4.5~5.4     | 11      | 9    | 82    | 3    | 27   | 56    | 2    | 4     | 4    | 7    |
| 5.5~6.4     | 20      | 9    | 45    | 4    | 20   | 34    | —    | —     | 1    | 3    |
| 6.5~7.4     | 15      | 1    | 7     | —    | —    | 9     | —    | —     | —    | —    |
| 7.5~8.4     | 11      | —    | —     | —    | —    | 5     | —    | —     | —    | —    |
| 8.5~9.4     | 8       | —    | —     | —    | —    | 1     | —    | —     | —    | —    |
| 9.5~10.4    | 3       | —    | —     | —    | —    | —     | —    | —     | —    | —    |
| 計           | 113     | 62   | 55    | 30   | 27   | 149   | 37   | 25    | 17   | 11   |

〔除間伐〕

多雪地の造林木は、必ず積雪に埋る高さ、すなわち積雪深の 2 倍ぐらいの樹高まではなるべく密植して要すれば施肥を行い、細長に育て、柔軟にして雪圧で倒伏しても折れないようにし、また残存せしめる木の選択の自由度をますことが必要であることはしばしばのべたが、この樹高を抜き出た後は全く逆に肥大生長を促進して、形状比を小にし冠雪の害やそれにより引きおこされる沈降力の害を減少しなければならぬ。そのためには除間伐の方法が重要な課題になつてくる。

樹木の地上部の生長は、各個体の枝葉がふれあうくらいになる、すなわち成林してくると、相互間に光に対する競争あるいはその他の相互干渉が生じ、互に他の個体の自由な生育を制限する。特に直径生長を制限し合うので、林木は孤立木よりも肥大生長がおさえられることは明らかであるから、埋雪しがたいくらいの樹高になつてからは、徐々に林分を解体して必要な範囲で個体間の干渉をやわらげて直径生長を促進してやらねばならない<sup>90)</sup>。

樹冠の細長度を形状比、樹高 $= (H)/$ 直径 $(D)$  で表現すると、今までの結果では  $H/D \leq 60$  では諸雪害に安全であり、 $H/D \geq 90$  では著しく危険である。特に  $H/D$  が 100 以上では全く危険である。であるからなるべく早くこれくらいの形状比になるよう除間伐を進めねばならない。

このような除間伐を進めるうえの要件の第一は当該林分の林木の生育度合（樹高および直径）に対する立木粗密度の調整である。

すなわち、林分の粗密度を各個体の生育に対し必要な状態にあるようその林分を疎開することである。

このためには、多雪地の主要樹種に対し、林分の樹高すなわち大きさに対する樹冠の大きさの相関を求め、これに対し形状比を雪害をうけない程度に維持する林分疎密度すなわち、本数表を作成し、除間伐の基準とする必要がある。

つぎの要件は、この基準により除間伐する場合の選木に必要な各林木の生育状態の判定であつて、冠雪による樹冠の彎曲、折損をうけない林木を残存木として選定することである。冠雪荷重に対し危険な樹冠形は、既述のように、上方にかたよつたもの、一方へ片よつたもの、過強なものであり、幹形としては、細長なものが危険であるが、これは幼時なるべく細長になるように育てた以上、除間伐の初期には、選木の対象とはなりえないが、年がたち、林木が生育していつても、なお、細長な幹形を保つものは逐次伐採していくべきである。

そのつぎの要件は林分の疎開が均等に行われることで、林孔を作ることは既述のように、降雪を集める結果、林孔周辺に雪害木を生ずる危険が大となるから、できるだけ均等に林木が分散するように除間伐を続けることである。

さらに除間伐の進行はなるべくゆるやかでなければいけない。特に手入れ不十分な林分、あるいは目的以外の樹種が多量に侵入した林分等を急激に疎開し、またケツベキに除伐したりすると、細長なままで孤立した林木はたちまち大雪害をうける。

ゆえに積雪深をぬぎでた林分に対しては最初は弱度の除間伐をしばしばくりかえし、徐々に疎開度を加え、遂には多雪地ほど、各個体あるいは小群団が独立して冠雪荷重に耐えうる樹形、林形に導く必要がある。なお、多雪地であり手が加わらない造林地の林分の特徴は、林分が雪害より解体され、点々と、完全な林套をもつ 1 本ないし数 10 本の集団により形成されるようになることで、筆者等の調査した山形県北村山郡の御所山国有林の造林地では、この小群よりなる林分の特徴が明らかにでていた。そのうえ、この林分の直径対樹高の相関を求めてみると第 101 図のように、両者間には、大体比例的な相関々係が認められる。すなわち、直径が樹高に比例して増大していることで、これは単木あるいは小群団が互にほとんど干渉せずに疎開して立っていることを示している。普通のウツベイした林分では林木相互の干渉がはげしいために主林木で上層林冠をなすものは直径と樹高との相関は著しく低く、第 59 図の例のように直径にかかわらず樹高はほぼ一定になるはずである。すなわち、多雪地の森林を構成する林木は各個体、もしくは小群が独立して冠雪荷重あるいは雪圧に対抗しようにならねばならないことを示すものである。



雪圧が変化するため、多雪地の造林には植栽個所の選定も必要要件となる。すなわち、

- a. 積雪量の少ない個所、吹溜りならぬ個所
- b. 冠雪の発達しない個所
- c. 粒雪化しやすい個所
- d. 雪崩、匍行の少ない個所
- e. 消雪の早い個所

等を選定すべきである。しかし、

風上斜面、蜂筋は積雪量は少ないが、風衝地になりやすい。また、谷間は吹溜りとなり積雪量が多いが、肥沃なことが多い。急斜面ほど積雪量は少ないが、雪崩ないし匍行が大で雪害が多い等のむじゆんがある。冠雪は風の少ない吹溜り地に大で、風のあたる所に少ない。また、吹溜り地は日射もすくなくなることが多い。積雪の特に粒化しやすい南面はまた消雪も早い、南面は多雪地特有の春季の乾燥により土湿が過少になりやすい。

等々、積雪に関する条件は、他の条件となかなか一致しないので、個所の選定はすこぶる困難になるが、特ににはなほだしい吹溜りと急斜面はいずれからしてもさけるべきであり、なしうれば、林地の積雪分布図を作成して造林地を決定すべきであつて、これができないとしても造林個所は残雪期の4月下旬より5月中旬ころ踏査し、残雪のある個所を調査すべきである。この時季になお残雪のある個所は、造林不能地と解してさしつかえがない。

また、植生上、残雪多量個所、雪崩地を判断するには、つぎの群落の存否をたしかめるのも一方法で、これらの種は残雪の多い個所、雪崩地に大体特有のものである<sup>91)</sup>。

灌木 タニウツギ、ヒメヤシヤブシ、ヤシヤブシ、ミネヤナギ、マンサク、ヤマハンノキ、

ミネカエデ、その他のカエデ属

草本 スゲ類、ススキ、シシウド、トリアシシヨウマ等

#### 第4節 多雪地の雪圧による有用樹種

雪圧（冠雪荷重を加えて）の点からいえば、多雪地の造林に適する樹種はつぎの性質をもっているものということになる。

- a) 樹冠外形が鋭角で、枝葉が疎で、枝長の剛直で短いもの
- b) 樹冠が弾性にとみ折損しにくいもの
- c) 特に幼時の生長良好のもの
- d) 冬季落葉するもの
- e) 生育期間が短いもの

これらの点から一般的にいえば落葉広葉樹は他のものよりすぐれていることがわかる。事実、多雪地には落葉広葉樹が優占しており、亜寒体の常緑針葉樹は、本邦の最多雪地である新潟、山形の裏日本側の山脈、すなわち上越国境より飯豊山塊、出羽丘陵、鳥海山等から姿を消し、少雪地の奥羽山脈に後退している<sup>92)</sup>。

しかし、これらの事実は決して雪害によつてのみ左右された分布ではないかもしれない。

材の利用度からいつて、針葉樹が造林樹種として首位を占めている以上、耐雪性樹種としての針葉樹を考慮しなければならない。

針葉樹として問題になるものは次のものである。

スギ、カラマツ、モミ属、トウヒ属、マツ属、ヒノキ、ヒバ

「スギ」は多雪地の裏日本では郷土樹種であつて広く天然分布し、また人工造林地も最も多い。

しかし枝葉が密な点で、幼時の雪圧の害、壮令時の冠雪の害をうけやすい。ウラ杉、オモテ杉の品種区分が行われ<sup>93)</sup>、ウラ杉は多雪地に適した諸性質をもつといわれているが、両者は多雪地の種子でも区別できないほど混合しているので、将来品種の淘汰が行われないうえ、雪害をまぬがれることはできない。現状では前記の種々の手段で一応防除するとしてもなお奥地の 3~4 m 以上の積雪深の所では成林不能である。

「カラマツ」は多雪地には天然分布せず、むしろ中部内陸地方の少雪地に分布するものであるが、落葉性のため冠雪荷重の害が少なく、幼時の生育が早いので雪圧の害をうける期間も短かく、近時、多雪地の造林樹種として注目されているが、前記したように、やはり雪圧に弱い。また、スギよりもろく折れやすいが、積雪深をぬけてからは冠雪の量が少なく、比較的安全である。ゆえに、特に吹溜地のように積雪深の異状に大なる個所に注意すれば有望な樹種であろう。

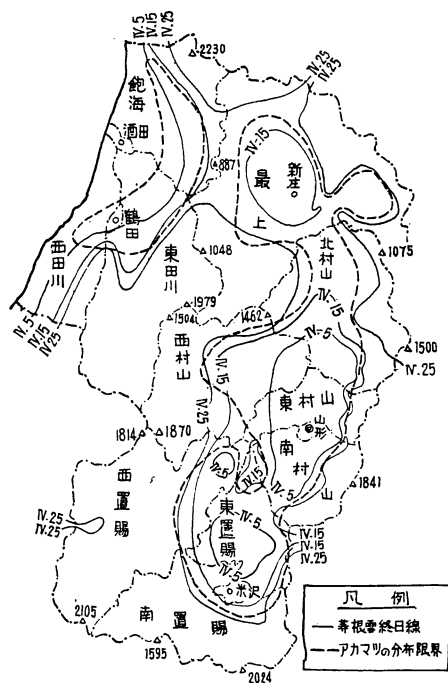
「モミ、トウヒ属」は上記のごとく、深積雪地には分布しないが、やはり積雪地には広く分布している属である。

これらの属のものは、一般に樹冠形に均齊がとれており、枝葉幹ももろくなく、この点からは多雪地の適樹ではあるが、内地産のものはほとんどすべて生長速度がおそく、現在は造林の対象にはなっていない。

近年、北海道産のトドマツが、青森、秋田にところどころ移入されているが、その生育は所<sup>94)</sup>によつては北海道よりよいといわれる。筆者<sup>95)</sup>の調査では最暖季の平均気温がトドマツの郷土に近い所ほど生育がよ

いと認められるから、トドマツの内地多雪地の移入は一応有望で、多雪地の高山林に利用できるかもしれない。調査結果ではトドマツはスギより耐陰度高く、広葉樹樹冠下でもかなりの生育を示し、雪害が著しく少ない。

「マツ」属ではアカマツ、ヒメコマツが多雪地にも分布し、アカマツは造林もされているが、その成績は不良な所が多い<sup>97)</sup>。多雪地に天然に分布した二次的に天然更新した。アカマツあるいは天然分布のヒメコマツも、山腹より下部にはほとんどなく、峰通りにのみ存在しているのは、他に原因があるとしても、積雪の面からみれば、峰通りの小雪地に雪害をさけて残存したものとみられる。新潟、山形地方でも、アカマツ林を見かけるのは比較的小雪地で平均最深積雪 1m50 以下、根雪終日 4 月 15 日以前の個所である（第 102 図参照）。この原因はやはり積雪深以下の幼時の雪圧の害が考えられる。アカマツは枝や幹がスギ等よりもろく容易に折損するのである。これらのことを考えると、マツ属は多雪地の適樹とは考えられない。しかし、幼時の生長を盛んにし、雪害



第 102 図  
山形県等根雪終日線とアカマツの分布

防除に努力すれば、壮令時以降は比較的安全に生育するであろう。

「ヒノキ」は一時、多雪地に多量に植栽されたが、いわゆる漏脂病にかかり幹形が不良になりほとんど失敗している。漏脂病はまだ原因が確定していないが、一般に雪害により一次的に枝のつけね、幹等に外傷をうけ、それが二次的に漏脂病の原因となるものといわれている。また接雪面の夜間輻射による気温低下が原因した、凍害も考えられる。漏脂病発生個所が、大体積雪深以下の所に多いことからみても、一応これら雪害に初因をもつものと考えられよう。このことからしても、多雪地の適樹とは考えられない。

「ヒバ」も多雪地に分布する樹種であるが、まだ東北の多雪地にはあまり造林した例がない。能登のアテ造林より考えて一応有望な樹種であろう。近年これらのアテの品種を東北に移入しようという企て<sup>90</sup>がある。筆者もその造林経過を見ているが、まだその結果は不明である。とにかく考慮を要する樹種であろう。

以上、樹種別に一応多雪地への適応性についてのべたのであるが多積地は奥地に多く、交通不便の場合が多い結果、雪害防除上の諸種の施策も集約に行われぬことが多い。奥地林分では雪害のみならず、撫育不良による、他樹種による被圧や多雪地に特有である大形のネマガリザサのような地被植物による圧倒、ツル類の繁茂による幹の彎曲等が一層雪害を助長するおそれがある。ゆえに耐雪性の樹種を選定することはもちろん、地形等他の立地条件の精査が必要であるうに、ないうるかぎり撫育の励行に努力しなければ、成林はおぼつかない場合が多い。奥地多雪地の森林は、その撫育が集約に行えぬならば、いたずらに有用樹種に改良することをあせらず、むしろ現存樹種による更新、あるいは現存林分の林相改良に意を用いた方が得策であろう。

なお、耐雪品種の選抜については、まだほとんど着手されていないが、筆者もはなはだしい雪害林地に雪害をうけず残存し、生育良好なスギ\*を選抜、一応精英樹として挿木により増殖し、その経過を見ているが、まだ全くその良否は判定しえない。耐雪性品種は将来の重要な課題の一であろう。

## 総 括

1. 多雪地の林木の雪圧による雪害防除方法は、林木の生長経過より2分して考えるべきである。
  - 1) 積雪下に埋まる期間
  - 2) 積雪に埋まらぬ期間
2. 積雪下に埋まる期間は、雪圧に抵抗しないよう。雪圧に圧倒されても折れないような樹形に育てる。
3. 積雪に埋まらぬ期間は主として冠雪荷重に耐えて曲折しないような樹形に誘導する。
4. そのため、幼時は柔軟細長に育て、それ以降は徐々に肥大生長を増加し、形状此の小さな樹形に導く必要がある。
5. 撫育方法は、幼時林を密に保ち徐々に疎開し、最後には単木または小数群団で雪害に対抗しようように導く。
6. 地形的に積雪量、質、強さ等にはなはだしい変化があるから、適地選定には、これらに意を用いねばならない。
7. 樹種間に耐雪性に差が認められるので、植栽個所により樹種の選定を行わねばならない。

しかし、有用針葉樹には十分に積雪に耐えるものはないので、特に奥地多雪地では撫育の精粗を考慮しないと、はなはだしい失敗をする。むしろ、現存林分の林相改良に意を用い、樹種改良をさしひかえた方が得策の場合が多い。

\* 昭和24年春、山形県最上郡大蔵村肘折にある造林地に残存したスギの枝条より挿木し、台木を作ったが、山地造林を行うまでに到っていない。また、昭和28年山形県北村山郡常盤村御所山とヒバラ沢造林地内に特に良好なスギ個体を発見し挿木を行つた。

## 結 言

本報告は、戦後筆者および筆者が主任をしている雪害研究室員との共同研究の結果から、主として、積雪のもつ力学的性質中、特に静力学的な雪圧に原因して起る、樹木の雪害について取りまとめたものであるが、積雪のもつ力学的な性質に関しては、まだ充分な研究方法も確立しておらず、全く暗中模さくの状態であるから、筆者等部外者には一層この種の研究は困難をきわめている。

ただ従来、積雪の力と樹木の雪害との関係については、みるべき研究がなかつたので、多雪地の森林の雪害防除、森林保護、造林等に関しては、常識以上にでたものはなかつた。この結果、多雪地の林業に無雪地に見られぬ大きな危険があつたのである。このことについて、本書が注意を喚起するに役立てば幸であり、固形降水としての積雪が、水以外に直接樹木に与える作用の全貌が、いくらかでもつかみえられたとしたら、本報告の目的は達したものと思う。今後雪害の理論および実地への応用研究が一層進められ、一層体系だつた応用積雪学が確立されんことを望んでやまない。

筆者等の研究もこれで終つたのではなく、さらに、積雪のもつ動力学的な雪崩の発生機構および力とその防除法、生理的雪害より水としての積雪の働きへと進んで、森林への積雪の影響、積雪への森林の影響の解明に努力することをちかうものである。

## 総 括

この報告は従来断片的にしか取り扱われておらず、大部分常識により判断せられていた森林および樹木の雪害中、雪圧による機械的な雪害およびその防除についての基礎的、応用的研究の成果を体系だて、林業技術上必要な積雪の力学的性質および雪圧の発生機構とその大きさ等について実験的な解析を行い、その結果より、森林および樹木の機械的な雪害防除法に論及したものである。

1) わが国の森林の過半は積雪地内にあり、特に裏日本方面はまれに見る多雪である。多雪地では、冬季の降雪は一部地温により融解し、また雪表面から昇華蒸発して失われることもあるが、大部分は冬季間積雪の状態で地上に堆積し、森林、樹木はこの積雪中に全部または下半部を埋めて越冬し、また樹冠に一時積雪を冠(着)雪として保留する。

このため、森林や樹木は積雪により直接、間接に影響され、はなはだしい場合には雪害を生じる。また積雪は森林や樹木により影響されて、その量および質に変化をうけ、積雪状態がみだされる。

積雪の森林および樹木への影響として重要なものの一つに積雪の機械的な力すなわち雪圧による機械的な被害がある。

雪圧(冠雪、着雪の荷重の作用をも含める)には冠雪(着雪)荷重、積雪の沈降力、匍行力がある。

2) 森林および樹木の雪害の発生機構を究明し、これが防除法を確立するためにはまず積雪の力学的性質を知る必要がある。このためには、積雪の物理的性質としての組成成分と構造を知らねばならない。

積雪の組成成分と構造を規定する因子は多いが、なかんずく、積雪の種類(粒形、粒径による)、密度(比重)および含水量が一番必要な因子であり、これをまず求めねばならない。

粒形、粒径による積雪の種類は、アラユキ(新雪)、シマリユキ(締雪)、ザラメユキ(粒雪)の3種に大別でき、容易に判別し得、積雪密度(比重)はまた測定容易であるが、積雪の含水量(率)の測定は従来最も困難であつた。筆者は遠心分離法に改良を加え比較的容易にまた精度よく測定しうるようにした。その改良点は、積雪を分離管内の  $0^{\circ}\text{C}$  のガソリン中に浸漬して含水分の分離を容易にし、遠心分離中の外気による雪の融解をしや断するため、分離管外に雪套をもつた外套管をつけて遠心分離する方法である。

ついで、以上の諸因子より求めた積雪の物理的性質(雪質)と積雪の強さを測定することによつて積雪の力学的性質がほぼ判明する。

積雪の強さは従来土等の力学的性質の測定と同様の方法で測定されていたが、積雪では外力により構造が破壊され、氷化する方向に変態するため、測定は困難であつた。筆者は積雪中から小口径の採雪円筒で円筒状の積雪試料を取り出し、その試料の曲げ強度を測定し、積雪の強さを求める方法を発案し、積雪の強さをほぼ自然のままの堆積状態で求めることに成功した。

この結果、積雪の密度、含水量、積雪の強さの三者間に一定の関係があることを見いだした(第30図)。

すなわち、含水量が小なるほど、密度が大なるほど、積雪の強さは増加し、積雪の種類による強さの差が明らかに区分でき、「ざらめゆき」と「あらゆき——しまりゆき」とは力学的性質に著しい差のあることがわかつた。

積雪は雪粒子の変態による凝集と自重による圧縮とによる沈降現象により粘弾性的に密度を増加し、ま

た多雪であるほど「しまりゆき」が多くなるので、多雪の場合は深部の積雪層の強さが著しく大となり、そのため雪圧が大となり雪害が増加する。この密度増加と積雪水量との間にも一定の関係のあることがわかった（第 17 図）。

3) 積雪は気候、地形、地物、傾斜角、方位等の諸因子に影響され、堆積状態、雪質を異にするため、局所的に積雪の強さがことなり、したがって雪害も極所的に著しく増加することが多い。

4) 冠雪は樹木等の形態によりまた気候によつて、その成生状態をことにする。冠雪は気温が  $0^{\circ}\text{C}$  前後で風速の弱い、日射のない夜によく発達し、降雪強度が大で、長時間連続するほど発達することがわかった。

冠雪深は地物の降雪を受ける面の巾により規定せられた極限值をもち、樹冠のような細い枝葉の集合体では単一の枝葉上に極限值の深さまで積つた雪が徐々に側方へだれ、間隔のせまい隣接した枝葉から相互間の空間がうずまつてゆき、降雪が続くと遂には樹冠の全枝葉が一塊の大きな冠雪にまで発達する。樹木のごとき塔状に枝葉の重なつたものでは、降雪片の落下線が真に垂直でなく、ある広さに分離落下するので、その枝葉の重なり距離により、投影面に対する降雪量以上に雪を捕捉することがあり、著しく冠雪の発達する場合がある。特に弱風があつて、枝葉内への吹込みを生じるとこの傾向は一層助長される。

地物の外形と冠雪量はその尖鋭度に関係し、尖鋭なほど冠雪は少なくなる。これらの現象は模型実験および実際の樹冠の冠雪の測定によりたしかめられた。

以上の原因の総合により、樹木の冠雪は時により著しく増大することがあり、雪害を起す原因になる。

また、これらの諸条件は一般に暖地にまれに見る大降雪時によくあてはまるので、大面積の林木の冠雪害は本邦の積雪地の外縁部に多い。

5) 積雪の沈降力は、積雪の沈降が初因となり、埋雪した地物の受圧面により沈降が阻止されると、その周辺の積雪層が褶曲して地物で支えられるので、その地物で支えられた褶曲層の積雪重量が力として地物に作用するものであると考えられる。この現象は逆に見ると地物の受圧面がその高さだけ積雪層中に侵入するのを、積雪が受圧面の上面および周辺で応力をあらわしてささえている力にも等しいと考えられる。積雪の沈降力はある限度までは積雪重量に比例する。積雪が受圧面の周辺長、大きさ、高さに比し充分に深い場合、沈降力はその受圧面に対し極限值をもつにいたるが、この極限値の大きさは、上記のように地物の受圧面周辺に働く積雪の圧縮層の抗剪力合計と地物の雪中に侵入した高さの函数としてあらわしうる。

$$F_s = \sigma_s \cdot p \cdot Z_{(H-h)}$$

$F_s$ ....沈降力 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )                       $\sigma_s$ ....圧縮層の単位面積当りの抗剪力 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )

$p$ ....受圧面の周辺長 ( $\text{cm}$ )               $Z_{(H-h)}$ ....有効受圧面高 ( $\text{cm}$ )

この式によると沈降力の極限値は積雪の強さ、地物の周辺長、地上高、地物が埋雪するまでの積雪の沈降量（これにより地物の受圧面の有効地上高がきまる）に関係して変化する。すなわち、「しまりゆき」の多い場合、初期の降雪強度が大で、密度の小さな場合、地物の受圧面の周辺長が面積に比し長い場合、地上高が積雪深に対しある範囲で高い場合に沈降力が大となることがわかった。

故に、埋雪した樹木のごとく樹冠の周辺長の複雑なものでは、積雪のあり方により著しく大な沈降力を受け、一般の林業用樹種の材質強度では、それにかかる沈降力に打ち勝つことはほとんどできないことが知られた。

6) 匍行力は傾斜面の積雪の傾斜に沿つた下向への移動に原因し、その性質は沈降力にはほぼ似ているが、ことなる点は沈降力が積雪重量に比例するのに対し、匍行力は積雪重量の自乗にはほぼ比例して増大すると認められることで、その大きさは沈降力より大であるが、樹木の場合は力の作用点が沈降力は主として樹冠に作用するのに対し、匍行力は下部の根元であるため、樹幹に及ぼすモーメントは沈降力の方が大である。

ゆえに、匍行力は樹木の生長とともに案外早期に抗しうるに到るようである。

匍行力はまた沈降力同様、積雪量および強さに関係するほか、斜面上の積雪の移動量、傾斜角に関係する。

7) 樹木の機械的の雪害の種類を多数の積雪実例より分類すると、発生部位で梢、幹、根および根元、枝の4種、被害の形態で、曲り、折れ、割れ、抜け（倒れ）の4種に区分でき、両者の組合わせで12種類の標準形を認めた。これらの雪害は上記の各種雪圧により起るものである（第10図）。

8) 樹木は積雪深の2倍の樹高までは埋雪する危険が大で、それまでの樹高の樹木、特に積雪深附近の樹高の樹木は沈降、匍行力特に沈降力による雪害に危険であり、それ以上の樹高になると冠雪荷重の害およびそれに誘因をもつ沈降力の害に危険である。

この結果、森林および樹木の取扱いは積雪深の2倍前後をさかいにして変えねばならないことがわかつた。

積雪深の2倍以下の樹高で、必然的に埋雪する樹木は冠雪に全く抗することができぬから、むしろ柔軟で強じんように育てる。すなわち、形状比を大にして、雪圧になるべく早く降伏し、降伏しても折れないような形に育てる。それ以上の樹高になれば、逆に埋雪あるいは冠雪荷重による屈倒を少なくするため、肥大生長を促し、形状比の小な形に導く必要がある。

これが多雪地の育林法、雪害防止法の主導方針になり、これにより種々の多雪地帯に特有の育林、防災作業法が生れてくる。

たとえば、植栽法では斜植を行い、雪圧による屈倒角を小とし、できるだけ密植を行い、うつべいを早くし、林木相互の干渉により、形状比を高めること。除間伐は幼時、積雪深の約2倍以下の樹高までは過度に行わず、形状比を適度に大きく保つために、林分密度を均一に保持せしめることに主眼をおく、林分を対象にした撫育を行い、それ以後は逐次林分を解体し、単木あるいは小群の直径生長を大ならしめ、形状比を雪圧に耐えるほど、小ならしめるような単木を対象とした撫育法をとる必要がある。

したがつて、また、多雪地の適地、適木の選定にも、積雪の量および質の地理的、地形的分布を知り、雪圧に対する適地を求めるとともに、適木の選定には雪圧の害を防除するために必要な幼時の生育度、樹冠の状態、形状、幹の力学的性質が考慮せらるべきであり、雪害防除のための当該林地の撫育の精粗、集約度を地理的位置等より予見して、造林が行わねばならないことを主張した。

## 引 用 参 考 文 献

### 第 I 章

- 1) 四手井, 児玉: 積雪表面からの蒸発, 雪 6 号, 昭 25
- 2) 吉田重助: 昭和 11 年冬期に於ける融雪並びに融雪促進に就いて, 森林治水報 16 号, 昭 12
- 3) 根津誠一: 冬季間の降雪及び降雨量の割合について, 雪 1 号, 昭 23
- 4) 成田治蔵: 冬季間の降雪量及び降雨量の割合について, 雪 2 号, 昭 24
- 5) 中野 徳: 積雪と造林木, 雪氷 8 卷 34 号, 10 卷, 1 号, 昭 22, 24
- 6) 四手井, 片岡: 林相による積雪深の変化 1, 2 報, 資料 7 号 (雪連), 昭 25
- 7) 四手井, 高橋: 積雪と森林, 林業技術シリーズ 23, (林野), 昭 26
- 8) 土井藤平: 森林保護学
- 9) 四手井, 高橋, 塩田: 幼令林の雪害, 林試集報 58, 昭 25
- 10) 塩田, 高橋: 昭和 22 年 2 月 14 日山口県阿武郡川上村で発生した造林地の風雪害調査報告  
林試集報 62, 昭 27

### 第 II 章

- 11) 中谷宇吉郎: 雪の研究, 岩波
- 12) 平田徳太郎: 雪質に関する研究, 雪氷論文集 1, 昭 15, 森林治水報 18, 昭 15
- 13) 積雪地方農村経済調査所: 積雪分類委員会報告, 昭 12
- 14) 雪氷協会: 積雪分類調査委員会報告, 雪氷 11 卷 1 号, 昭 25
- 15) Committee on Snow Classification: Draft of an International Snow Classification. (1951)
- 16) Committee on Snow Classification: -International Snow Classification. (1952)
- 17) 斎藤鍊一: 積雪の粒子の構造と力学的性質, 気象集誌 23 卷 1~12 号, 昭 20
- 18) 吉田順吾: 熱量計による積雪の含水量測定, 体温科学, 昭 16, 雪氷 3 卷 6 号, 昭 16
- 19) 平田徳太郎: 積雪の含水量に就いて, 雪氷論文集 1, 昭 15
- 20) 黒田, 古川: 遠心分離法による積雪の含水量の測定, 雪氷 13 卷 5 号, 昭 27
- 21) 四手井綱英: 遠心分離法による積雪の含水量, 雪 9 号, 昭 27
- 22) 四手井, 菊谷: 遠心分離法による積雪の含水量, 雪氷 15 卷 6 号, 昭 29
- 23) 荏田幹夫: 雪の含水量測定法, 雪氷 13 卷 4 号, 昭 27
- 24) 四手井綱英: 積雪の含水量測定法, 日林誌 34 卷 3 号, 昭 27
- 25) 黒田正夫: 積雪の構造と変形, 雪氷 10 年 (雪氷), 昭 24
- 26) 斎藤鍊一: 積雪粒子の構造と力学的性質, 雪氷 12 卷 6 号, 昭 19
- 27) 黒田正夫: 積雪の力学的性質, 雪氷 10 年 (雪氷), 昭 24
- 28) 古川 巖: 積雪の剪断抵抗の研究, 雪氷 13 卷 1 号, 昭 26
- 29) 四手井綱英: 雪質に関する調査報告 (2), 積雪の加圧剪断試験, 雪氷 12 卷 1 号, 昭 25
- 30) " : 雪質に関する調査 (1), 雪氷 11 卷 5 号, 昭 24
- 31) " : " (3), " 14 卷 1 号, 昭 27
- 32) 四手井, 外: 冠雪の研究, 林試報 54, 昭 27
- 33) 土佐林忠夫: 雪の長期予報, 天文と気象 16, 昭 25
- 34) 山形測候所: 山形の累年積雪図に就て, 雪氷 12 卷 1 号, 昭 25
- 35) 日本積雪連合: 雪の気候図, 中央气象台, 昭 23
- 36) 四手井綱英: 樹木の生活に及ぼす積雪の影響, 日林誌 61 回講演集, 昭 27
- 37) " : 奥羽地方の森林帯 (予報), 東北日林誌 2 卷 2 号, 昭 27
- 38) " : 表層雪崩の一特異例, 雪氷 14 卷 4 号, 昭 28

- 39) 農綜研積雪地方支所：積雪調査（昭 9～23 年）農綜研，昭 25
- 40) 秋田営林局：秋田県積雪調査報告概要（昭 25～26），昭 26
- 41) 山形県庁秋田営林局：山形県積雪調査報告（昭 26，27，28），昭 26，27，28
- 42) 東，樋口：調査コースによる忠別川流域の積雪水量調査，北大地球物理報 2 号，昭 27
- 43) 東電福島測候所：吾妻山系裏磐梯山水量調査報告，昭 28
- 44) 農綜研積雪地方支所：十和田湖，田沢湖積雪水量調査速報，昭 28
- 45) 大沼匡之：積雪量調査の概要，雪氷の研究（雪氷）1，昭 28

### 第 III 章

- 46) 荘田幹夫：電線の着雪の研究とその雪害対策，雪氷 12 巻 3 号，昭 26
- 47) 古川 巖：絵とき積雪学，雪氷及雪と生活，昭 23～26
- 48) 荘田幹夫：着雪の研究，「雪氷の研究」1，雪氷，昭 28
- 49) 伊藤 博：着雪の予報 “ 1， “ “
- 50) 大内 力：アカマツ林の雪害について，青森林友 No. 7，昭 27
- 51) 平田種男，塚田雄次：千葉演習林の風雪害について，演習林 8 号（東大），昭 26
- 52) 玉手三葉樹，山田昌一：昭和 7 年 11 月 14，15 日の台風による風雪害調査報告，東京営林局，昭 8
- 53) 福岡県：雪害状況について，県林務部通報，昭 28
- 54) 孫野長治：雪片の落下速度，「雪氷の研究」1，雪氷，昭 28
- 55) 高橋敏男：冠雪の研究 “ “ “
- 56) “ ：冠雪による林木の雪害，資料 27（雪連），“
- 57) 積雪地方農村経済調査所：積雪視察報告，雪調科学報告 1 輯 2 号，昭 13
- 58) 吉田喜之助：積雪の電柱支線に及ぼす影響について，雪氷論文集 1（雪氷），昭 15
- 59) 久保正気：積雪の沈降圧試験報告，鉄研雪害防止委員会報告，昭 17
- 60) “ ：積雪の雪崩（10. 積雪の沈降，11. 積雪の沈降圧力），陸運科学 2 巻 1 号，昭 19
- 61) 平田徳太郎：積雪の沈降及び積雪内に於ける鉄棒の曲に就て，雪氷 3 巻 5 号，林試治水報，昭 15
- 62) “ ：積雪の科学，地人書院，昭 23
- 63) 天野一郎：積雪の沈降力（第一報），雪氷 5 巻 1 号，昭 18， 森林治水報 20 号，昭 19
- 64) 古川 巖：絵とき積雪学（積雪の力の巻），雪と生活（雪連），1 巻 5 号，昭 24
- 65) 古川 巖，花島政人：電線路の雪害対策研究報告（Ⅱ）第 4 章積雪の沈降力，電線路対策委員会，昭 25，26
- 66) 古川 巖：枝折れ荷重の研究，雪と生活，3 巻 9，10 号，昭 26
- 67) “ ：沈降荷重の研究，雪氷の研究（1），（雪氷），昭 28
- 68) 荘田幹夫：雪圧と電線路，電気鉄道（6 巻 11 号），昭 27
- 69) “ ：支線の積雪による雪害対策の研究，電線路対策委員会，昭 25，26
- 70) “ ：電柱支線及び送電鉄塔に対する積雪，沈降力の研究，雪氷の研究 1（雪氷），昭 28
- 71) 古市，島田：鉄塔脚部に加わる積雪の沈降力，雪氷の研究 1（雪氷），昭 28
- 72) 四手井綱英，高橋喜平：積雪の沈降力（第Ⅱ報），林試報 44，昭 25
- 73) 四手井綱英，高橋喜平： “ （第Ⅲ報），雪氷 12 巻 2 号，昭 25
- 74) 四手井綱英： “ 雪氷の研究 1，昭 28
- 75) 吉田順吾：雪の粘弾性及び雪の破壊抵抗，体温科学 10 輯，昭 28
- 76) 雪害研究室編：積雪の密度資料，林試集報 63，昭 27
- 77) Haefely：Schnee Mechanik
- 78) 古川 巖：斜面積雪圧の研究，雪氷の研究 1（雪氷），昭 28

第 IV 章

- 79) 伊藤一雄, 保坂義行: スギ苗の灰色カビ病及び菌核病—いわゆる雪腐病—, 林試報 51, 昭 26
- 80) 伊藤一雄, 保坂義行: カラマツ苗の灰色カビ病菌 " 59, 昭 28
- 81) 四手井綱英: 木柱で沈降力を支持した場合にスギ幼令木に及ぼす影響, 雪 5, 昭 25
- 82) 四手井, 高橋, 坂: 三沢スギ植栽密度試験中間報告, 未刊
- 83) 四手井綱英: スギ挿木養成苗の雪害に関する一考察, 雪 3, 昭 24
- 84) " : アカマツの雪害, 第 1 報, 資料 9 号 (雪連), 昭 26
- 85) " : 斜植について, 雪と生活, 4 巻 9 号, 昭 27
- 86) 高橋喜平: 雪崩防止林, 前橋営林局, 昭 25
- 87) 四手井, 高橋: 階段上の積雪の荷重と移動について, 雪と生活 4 巻 8 号, 昭 27
- 88) 小野茂夫: スギ幼令林の雪害と枝打ち, 蒼林 4 巻 8 号, 昭 28
- 89) 穴見 清: 雪害に対する枝打ちの効果, 東北日林誌 2 巻 2 号, 昭 27
- 90) 四手井綱英: 植栽密度がスギ幼苗の生育に及ぼす影響について, 青森林友 45 号, 昭 27
- 91) 木村武松, 村井三郎, 細井喜兵衛: 水沢経営区山岳地帯の植生について, 第 4 回研究発表会 (青林友), 青森支場報, 昭 27
- 92) 四手井綱英: 奥羽の森林帯 (予報), 東北日林誌 2 巻 2 号, 昭 27
- 93) 村井三郎: 青森営林局管内森林植生の研究, 日林誌 59 回講演集, 昭 26
- 94) 櫻村大助: ブナ林地帯針葉樹造林地の成績調査 (第 1 報), 青森林友 45 号, 昭 27
- 95) 四手井綱英: トドマツの生育温度, 東北日林誌, 第 3 巻 1 号, 昭 28
- 96) 秋田営林局: 改訂造林計画表, 昭 27
- 97) 伊藤陳重: 酒田地方海岸林に於けるクロマツの雪害, 日林誌講演集 63 号, 昭 28
- 98) 高橋宏治: スギの品種による雪害の抵抗性について, 雪氷, 13 巻 3 号, 昭 27

そ の 他

- 99) 小出 博: 魚野川流域の災害とその対策, 新潟県, 昭 28
- 100) 田中竜男: 雪, 古今書院, 昭 15
- 101) 平田徳太郎: 積雪の科学, 地人書院, 昭 23
- 102) 斎藤鍊一: 地上の雪, 北方林業, 昭 24
- 103) 平田徳太郎: 雪質に関する研究, 森林治水報 18 号, 昭 15
- 104) 山林局: 第 I, II, III 回雪害に関する打合せ復命書, 昭 9
- 105) 四手井綱英: 積雪と森林, 秋田営林局, 昭 24
- 106) 高橋喜平: 森林の雪害, 北方林業, 昭 26

## Résumé

This report deals with fundamental as well as practical studies on the snow damages on forest trees, caused by snow pressures.

## Introduction

In our country there have been many fragmentary reports on the studies of snow damages in the past, but they have not been systematized, so the writer tried to systematize the studies on the mechanical characters of snow and the mechanism of snow pressure based upon many investigations and observations for the sake of better forestry techniques, and also tried some discussions on the application of these fundamental studies for practical methods of prevention against mechanical snow damages.

The greater part of forests in Japan is situated in snowy districts. Especially the central mountain ranges and the regions on the coast of the Japan Sea are the districts of heavy snow in winter.

The forests in these regions are covered by deep snow of more than two meters every winter.

But in the summer vegetation period, most of all these districts are in temperate climatic zone, so the forest trees distributed there are not adapted to the pressures of snow and a large number of trees are damaged by snow every winter.

In these snowy districts a very small portion of deposited snow thaws by air and earth temperature, a still smaller portion sublimates from snow surface throughout the winter, and thus the greater part of snow remains on the earth until the next spring comes.

So the forest trees there pass the winter buried totally or partially under the snow and when it snows every tree in the forest catches the fallen snow by its crown and is totally covered with snow frequently.

Owing to these phenomena, forest trees are influenced by snow directly or indirectly and damaged by snow occasionally. The deposited snow is also influenced by forests and trees, and its properties, quantities and conditions are subject to various changes.

The mechanical damages of forest trees by the snow pressure are the most important of all snow influences.

## Strength and Force of Deposited Snow

The static snow pressure can be classified into three sorts; the weight of

crowned snow on the object, the settling force and the creeping pressure.

The force of avalanche is a dynamic force, so from this paper the avalanche is excluded.

It is most necessary to make clear the static characters of snow for the studies of mechanical damages on forests and trees by snow pressures.

For this purpose, we must have full knowledge in the composition and the construction of deposited snow as physical properties, first of all.

There are many factors in deciding the composition and the construction of snow, but the specific gravity (or density), the free water content (or humidity), the grain shape, the grain size and the strength of snow are the important factors among them.

By the shape and size, deposited snow can easily be divided into three main types; new snow, settled snow and granular snow.

Measurement of the specific gravity of snow is easy too, but measurement of the free water content of snow was very difficult, as the snow is very changeable by pressure and by heat. The writer improved the measuring method of free water content of snow with a hand-driving centrifugal separator, and made this method easier and more accurate.

The improved points are as follows:

a. Gasoline kept at 0°C is used as medium for separating free water from ice grains.

By this medium the water content in snow is easily separated.

b. Each of glass separators is covered with snow jacket for the purpose of isolating the test snow piece from air temperature, and keep it at 0°C constantly.

The measuring method of strength of snow was also difficult, as the snow is changeable in its character and structure by external force.

The writer discovered a new simple measuring method of strength.

This method is as follows:

Taking out a sample from snow profile by cylindrical glass tube with three to five centimeter in diameter, the bending strength is measured of it. (Fig. 24)

This method is easier than other methods for all types of snow.

Between the above-mentioned four physical factors of snow, namely, specific gravity, free water content, snow types and snow strength, the writer found very close relations, which are shown in Fig. 30.

It was made clear from these relations that the snow strength becomes very large, when the snow has little water content and high density, and the difference of strength between the snow types can be distinguished clearly; namely new and settled snow type and granular type are in different series of types with each other, and strength of settled snow is the strongest. The specific gravity of snow increases naturally by the weight of the over-lying snow and

by aggregation of ice grains with the lapse of time, and generally the proportion of settled snow becomes large according to the depth of snow deposit, so in a heavy snow winter or location the specific gravity becomes high and its strength becomes also large in its deeper layer. As result of this, snow damages increase severely in a heavy snowed winter and location.

Between the water equivalent, specific gravity and strength of snow the writer also found constant relations (see Fig. 17, Fig. 31).

The mass, character and strength of deposited snow are influenced by climatic factors, geographical features of the ground, obstacles on the ground, angle of slope, direction of slope and other factors, so the strength of deposited snow is changeable by location with the consequence that damages by the snow pressure increase remarkably in specific localities.

### On Snow Pressure

#### a. Weight of Snow Crown

The mass and weight of snow crown on trees are changeable by the form of the tree crown, climate—mainly air temperature and wind—and conditions of the fallen snow.

The snow crown of the tree grows large and heavy at night, when the air temperature falls to about 0°C and the air is calm, with no radiation. Beside these, when the intensity and duration of snow-fall become heavy and long, it grows remarkably.

Depth of snow crown on an object grows according to the width of the object, so each of the fine branches and leaves can catch a small amount of the fallen snow, but after they have caught the snow, it creeps to both sides and then adjacent snow cap draws close to each other, and as the result, the base of snow cap become wider and the depth deeper. In this way when the snow-fall continues, the crowns of trees become covered with one large and deep snow crown at last. Such object as a tree crown, which is constructed with pilings of many branches and leaves and has many spaces in it, can catch a lot of the fallen snow in the crown.

Especially when the snow is shifted through the tree crown spaces by weak wind, the snow crown unusually grows large and heavy. The mass of the crowned snow also has a relation with the form of the object. The sharper the external form of the objects, the less the mass of snow crown.

These phenomena the writer studied by model tests and by actual observations of the snow crown on the tree.

Putting the above-mentioned phenomena together, under some bad conditions forest tree can catch a great mass of snow on its crown, and with this crowned snow weight the tree stem is broken or bent frequently.

And as all these bad conditions apply to a heavy snow-fall which occa-

sionally occurs in warm districts, the forest snow damages by the weight of crowned snow sometimes happen in districts which are on the front line of the snow drifts region in Japan.

#### b. Settling Force

The writer studied the settling force of deposited snow mainly by model test and has found the below-mentioned mechanism of its origin.

The settling force of snow originates in the settling of snow. Immediately after it has fallen, the snow changes its crystal form and begins settling by sublimation and by the pressure of overlying snow to vertical direction, and the thickness of the newly deposited snow layer decreases with the time.

When the settling of snow is intercepted by some object buried under the snow, snow layers lying on this object are supported, deformed and compressed by it. This deformed and compressed snow layers on the object exercise the settling force on it.

It was found that this force is nearly equivalent to the weight of deformed snow layers, or this force can be considered as the sum of internal stresses of deformed snow layers over the object.

The settling force increases in proportion to the water equivalent of snow, (HSW) within some limit, immediately after the object is buried under the snow. The dimension of settling force changes in proportion to the height, perimeter and form of the force-receiving surface of the object. In such case that the snow is deep enough regarding the height, perimeter and form of the force-receiving surface of the object, the settling force reaches a maximum value.

From a large number of tests the writer has concluded that the maximum settling force of snow ( $F_s$ ) can be expressed with the function of average shearing stress ( $\sigma_s$ ) of deformed and compressed snow layer, which acts on the perimeter of the object, (P) and the actual height of the object ( $Z_{(H-h)}$ ) (see Fig. 68).

This formula is as follows:

$$F_s = \sigma_s \cdot P \cdot Z_{(H-h)}$$

$F_s$ ....Max. settling force (g).

$\sigma_s$ ....Average shearing stress of deformed and compressed layers, (g/cm<sup>2</sup>), generally 150 g/cm<sup>2</sup>.

P....Perimeter of force-receiving surface of the object (cm).

$Z_{(H-h)} = Z_H - Z_h$ ....real height of the object (cm)  
= height of the object from the ground ( $Z_H$ )—depth of the base snow ( $Z_h$ .)

In this formula, the maximum settling force grows with the shearing stress, actual height and perimeter of the object, so in heavy snowy districts or winters, with the object which has a long perimeter in comparison with its force-receiving area, or with the object which stands high under the snow, the settling force becomes very large.

But generally the depth of snow is not so deep as the settling force of

snow acting on the object reaches the maximum.

Actually, the settling force becomes largest at a certain height of the object in relation to snow depth.

By the above-mentioned fundamental researches it was made clear that such a tree crown as has a long and complex perimeter suffers a remarkable settling force in a heavy snow region or winter, when it is buried under the snow.

But the stress of stem of general tree species which are used in forestry is not so strong as to bear the force of settling, and they are often damaged by it.

#### c. Creeping Pressure

Creeping pressure of snow is originated in the creeping of snow along the inclination of slope.

When some object like a tree stand on the slope, the creeping of snow is disturbed by it and some area of snow around it remains without creeps. This remaining area of snow around the object produces the creeping pressure.

This pressure is quite similar to the settling force in its character, but it is concluded that the creeping pressure is proportional to the square of water equivalent of snow (HSW), while the settling force is in proportional to HSW.

The creeping pressure is more powerful than that of the settling force, but for the tree the settling force chiefly acts upon the crown of tree, while the creeping pressure acts on the lower parts of stem or root side, so the efficiency affecting the tree is different and the efficiency of the settling force is larger than that of the creeping pressure.

Therefore the strength of trees becomes strong enough to stand against the creeping pressure in an early stage.

The creeping pressure is also influenced by the quantity and strength of snow, as well as by other factors, such as the amount of creeping length of the snow and inclination angle of the slope, etc.

### **Forest Tree Damages and their Prevention Methods**

The writer classified the damages by snow pressures into 12 standard sorts (see Fig. 10).

From the type of damages they can be divided into 4 types; bending, breaking (normal to tree fibers), splitting (parallel to tree fibers) and falling down or pulling out.

From the damaged parts of tree, they can be divided also into 4 types; tops, stems, branches, and roots or root sides.

By the combination of both classifications 12 sorts of tree damages are composed.

In these damages the stem and root breaking or splitting are most dangerous.

The trees in forest are subject to the danger of being buried under the snow

until they grow up to the height about twice the deposited snow depth, so the trees in this stage are very susceptible to snow damages caused by the settling force and the creeping pressure, especially to the former. On the other hand, the trees that have grown to the height over twice the snow depth are in danger of stem bending or breaking by the snow crown weight.

As a result of the above-mentioned relations, we must change the method of treatment of forest and tree at the time when the forest has grown to twice the height of snow depth.

Young short trees, which are inevitably buried under the snow cannot stand against the snow pressures, must be treated to grow flexible and tough, and to have stems with a large form coefficient for the purpose of standing against the breaking by snow pressures.

After the trees have grown up to the height that cannot be buried under the snow any more, the method of treatment must be changed and the thickness growth must be accelerated, and the stem must have a small form coefficient to stand against the weight of snow crown and not to be buried under the snow.

These are the writer's principles and conclusions about treating method of forests and trees in snowy districts.

From these principles, different methods of forest breeding and numerous methods of damage prevention which are characteristic in snowy regions will come into existence.

For instance, inclined planting is safe from snow damages, because the bending angle of tree stem by snow pressures become small, and damages decreased by this method.

Dense planting is good against snow damages, too.

The reasons for this planting method is that, by close planting forest crown becomes closed early and the interference between individuals begins accordingly.

In consequence, the form coefficients of individuals become large and the stems gain elasticity and damages by snow pressures are reduced.

In the early stage when the height of trees are under twice the snow depth, cleaning and thinning must be carefully practised and it is necessary for the prevention of snow damages to keep moderate density and uniformity of forest and large form coefficient.

Tending at this stage may be said a stand tending.

After this stage, forest stand must be gradually dismantled and the thickening growth of individuals must be promoted by thinning, until stems of individuals gain a small form coefficient enough to stand against the crowned snow weight.

Tending at this stage may be said an individual tending.

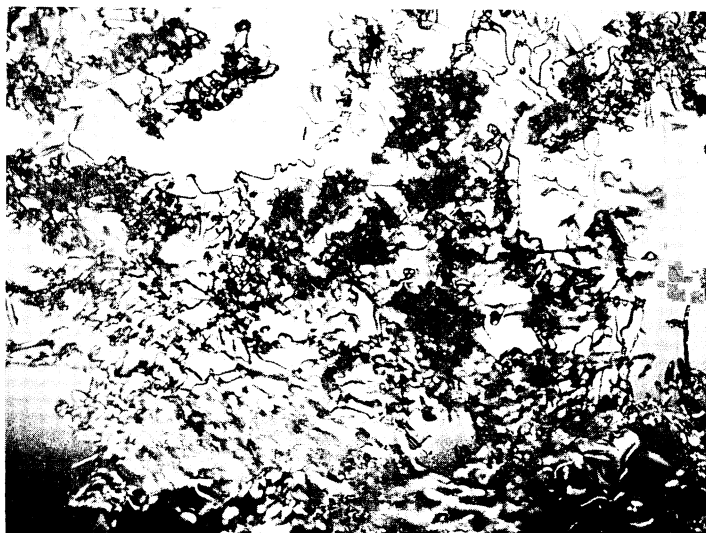
To find out a suitable location for planting is also necessary to reduce the snow damage.

For this purpose, we must know the place where the snow pressures are low by the survey of the distribution of depth and qualities of deposited snow geographically and topographically.

Finding of adaptable tree species against snow pressures is necessary, too.

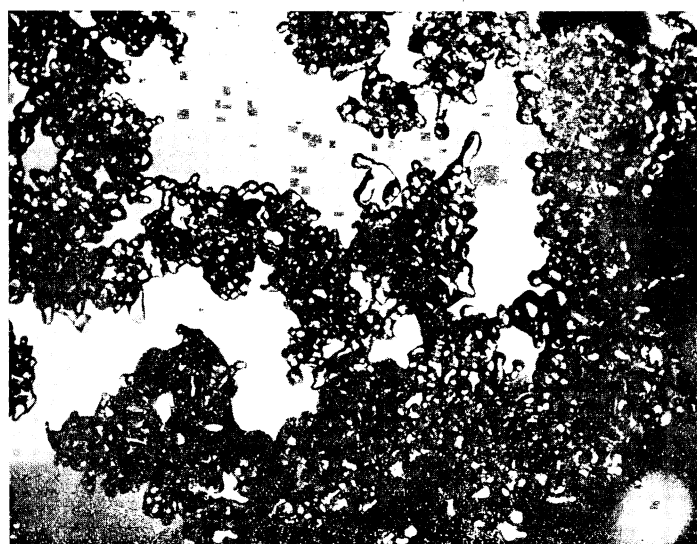
As properties of adaptable tree species, quick growing in young stage, small, sharp and uniform tree crown, strong and elastic stem, short and thin leaves and branches, etc., are to be considered.

The intensiveness of all these above-mentioned planting and tending methods generally depends upon the geographical distance and the facilities of transportation to the stands, so the artificial reforestation in snowy region must be planned in consideration with the distance and transportation of the stand. Forests which have an unfavorable transportation at far-away location are always in the mountain regions having deepest snow. And treatment of stands in these regions are very difficult, so that the damages by snow are difficult to eliminate in this case.



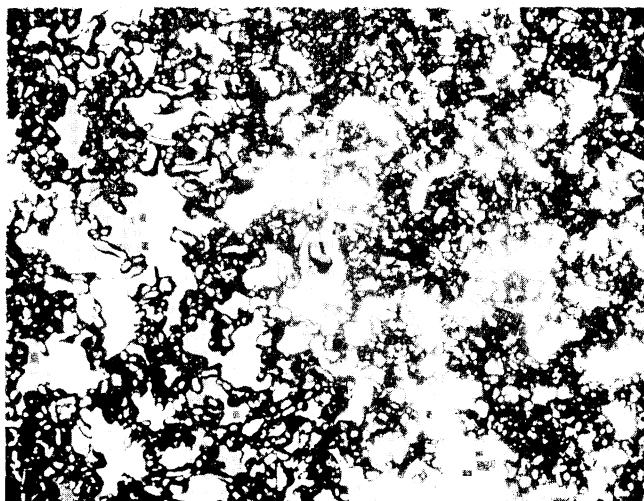
Phot. 1—1 新雪（表面部）（密度  $0.06 \text{ g/cm}^3$ ）

$\times 20$

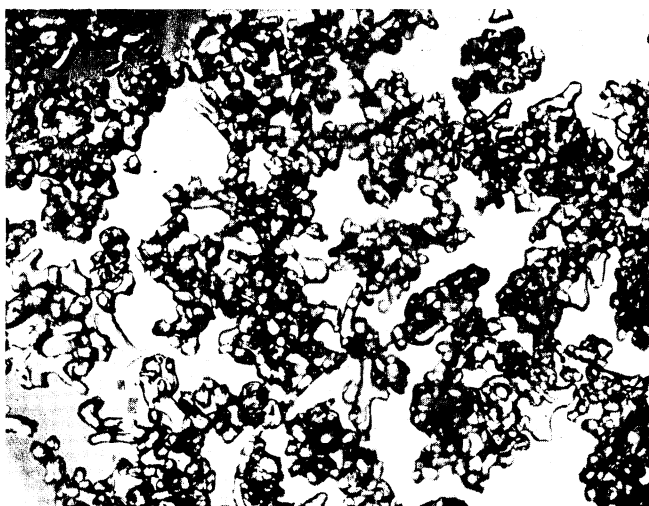


Phot. 1—2 新雪（内部）（密度  $0.13 \text{ g/cm}^3$ ）

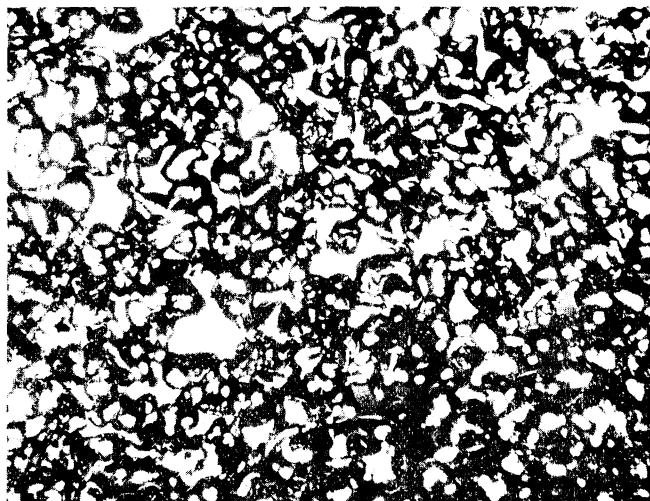
$\times 20$



Phot. 2—1  
締雪（こしまり）  
密度  $0.21 \text{ g/cm}^3$   
 $\times 20$



Phot. 2—2  
締雪（こしまり）  
密度  $0.30 \text{ g/cm}^3$   
 $\times 20$

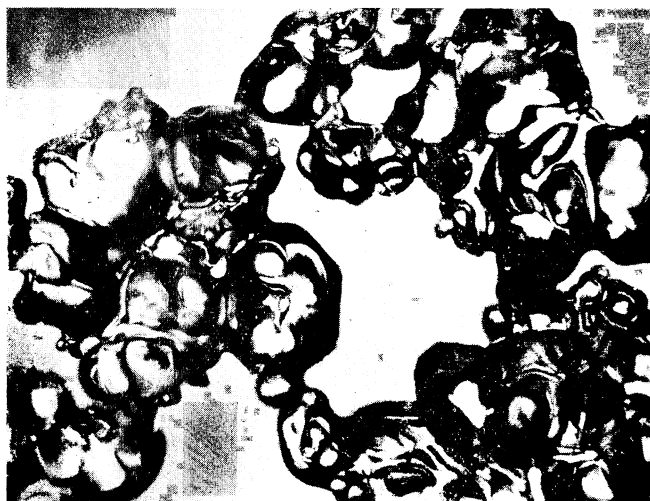
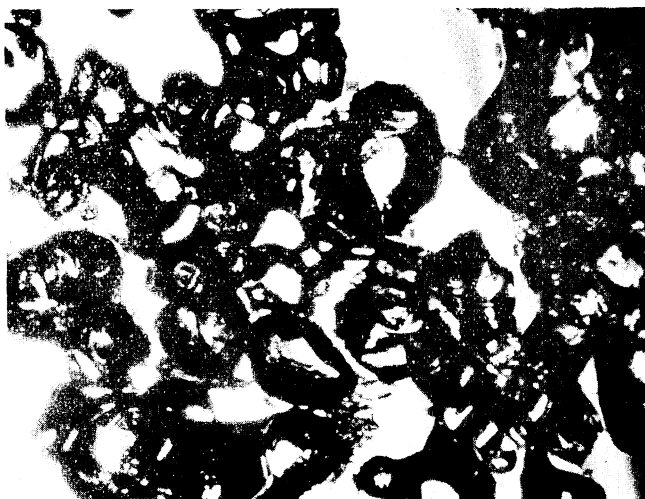


Phot. 2—3  
締雪（かたしまり）  
密度  $0.42 \text{ g/cm}^3$   
 $\times 20$

Phot. 3—1

粒雪 密度  $0.42 \text{ g/cm}^3$

$\times 20$



Phot. 3—2

粒雪 密度  $0.38 \text{ g/cm}^3$

$\times 20$

Phot. 4

霜粒雪  $\times 20$





} 粒雪層 (Fc)

} 綿雪層 (Fb)

Phot. 5

積雪層断面の一例 (断面は着色してある)  
(平地 昭 28 年 1 月 28 日) 十日町

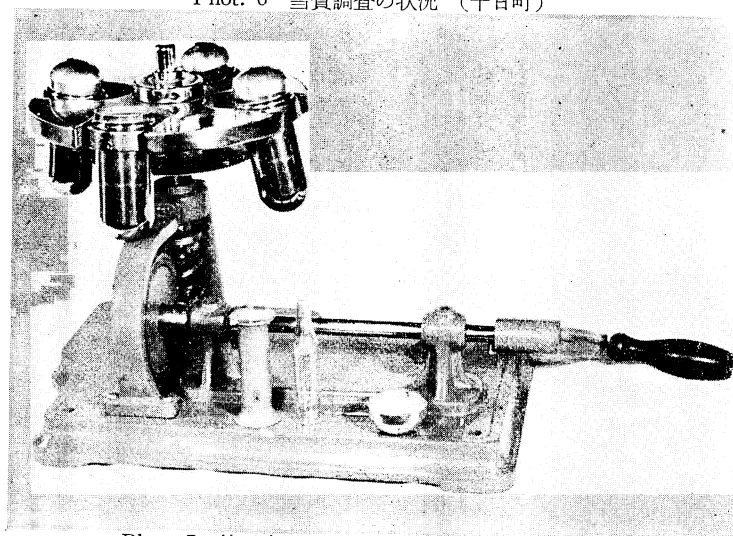


密度測定→

← 硬度測定

黒田式  
← 抗剪力測定

Phot. 6 雪質調査の状況 (十日町)



Phot. 7 積雪含水量測定用遠心分離機 (試作品)



Phot. 8 ガラス円筒による積雪の曲げ強度測定



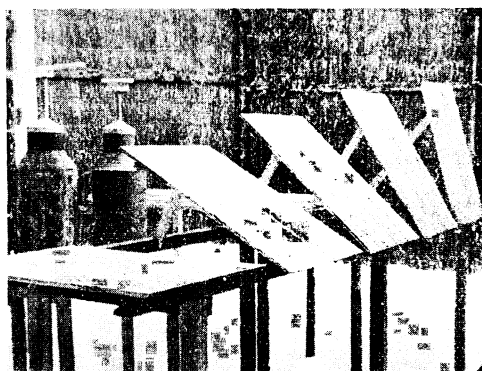
Phot. 9 幼令林（スギ）の埋雪状況



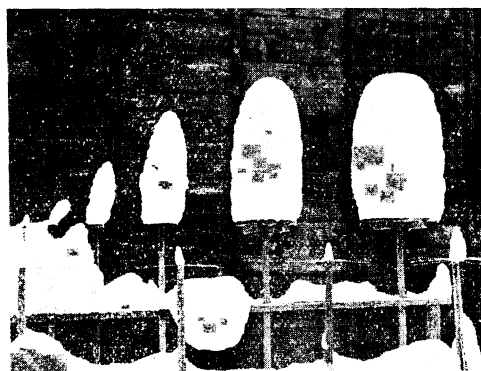
Phot. 10 林内樹冠下の積雪状況（スギ幼）  
（樹冠下にスリ鉢状の穴ができる）



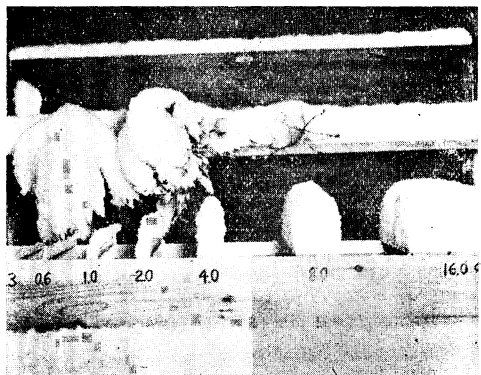
Phot. 11 冠雪模形実験装置



Phot. 12 傾斜板による積雪量の変化測定装置



Phot. 13 直径の異なる円板への冠雪深の変化例



Phot. 14 巾の異なる場合の冠雪深の変化例  
(後方左よりスギ, アカマツ, コナラの枝葉への冠雪)



Phot. 17 冠雪被害 (梢折れ)



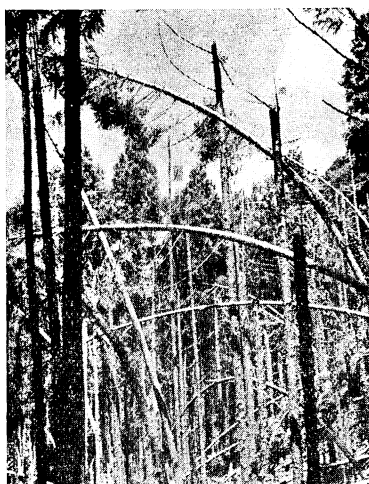
Phot. 15 アカマツの特異な冠雪  
(樹冠鈍)



Phot. 18 冠雪被害 (幹折れ)



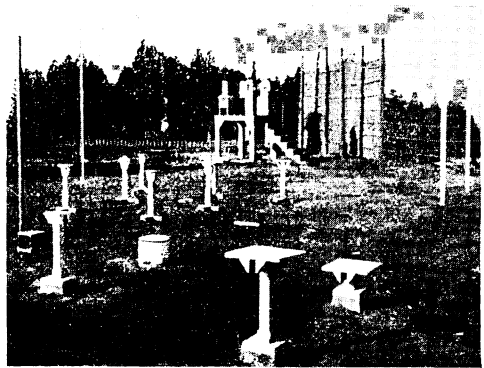
Phot. 16 冠雪被害 (幹曲り)



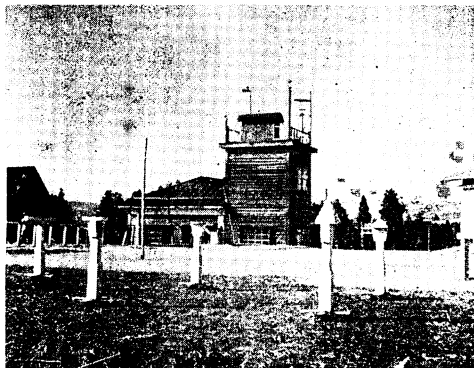
Phot. 19 冠雪被害  
(幹折れ, 曲り, 梢折れ)



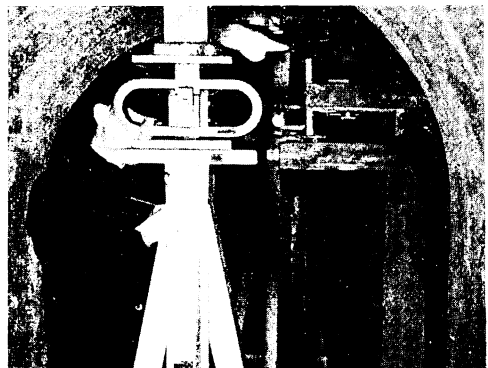
Phot. 20 冠雪被害（根倒れ）



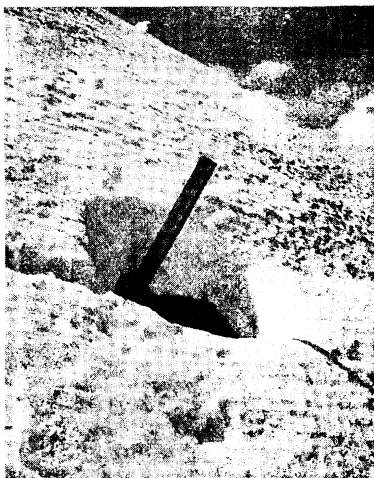
Phot. 21 沈降力測定装置（地上部）



Phot. 22 沈降力測定装置（地上部）



Phot. 23 沈降力測定装置（地下室）



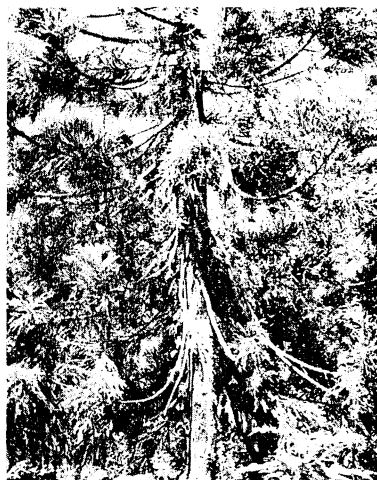
Phot. 24 簡行力測定装置（融雪期）



Phot. 25 地物に支持せられた積雪層の断面 (1)  
(この褶曲が沈降力を現わす)



Phot. 26 地物に支持せられた積雪層の断面 (2)  
(この褶曲が沈降力を現わす)



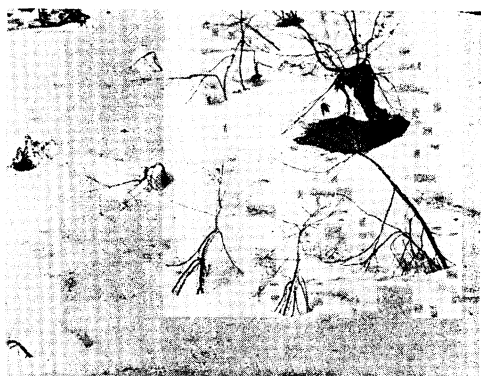
Phot. 27 積雪沈降力被害 (枝曲り)  
(スギ)



Phot. 28 積雪沈降力被害 (枝抜け)  
(カラマツ)



Phot. 29 積雪沈降力被害 (枝抜け)  
(カラマツ)  
(傾斜上部がヌケている)



Phot. 30 積雪沈降力被害 (幹曲り) (コナラ)



Phot. 31 積雪簡行被害 (根元曲り) (スギ)



Phot. 32 積雪匍行，沈降力被害(幹割れ)  
(スギ)



Phot. 33 幹割れの巻込み(スギ)



Phot. 34 積雪匍行力被害(根元曲り)(コナラ)



Phot. 35 雪崩被害(根倒れ)(カラマツ)



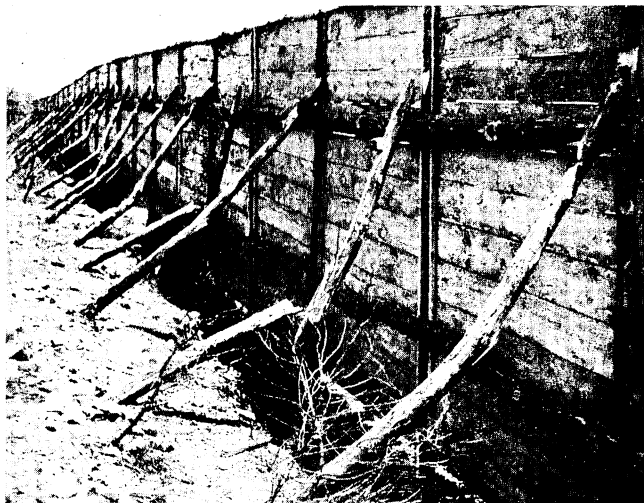
Phot. 36 雪崩被害(根元折れ)  
(ニセアカシヤ)



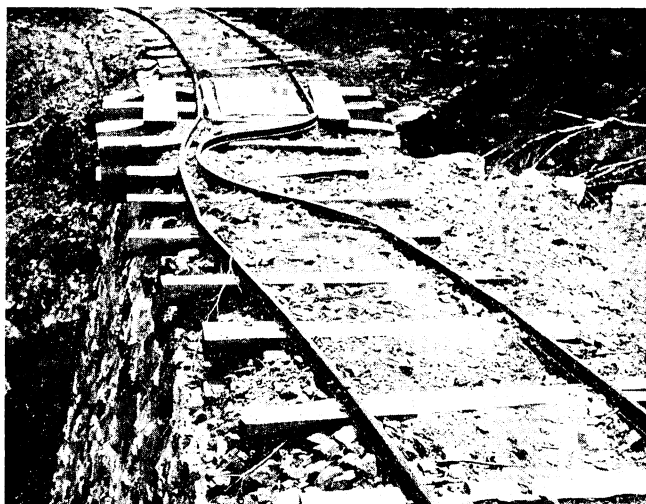
Phot. 37 雪崩被害(幹割れ，折れ)(スギ)



Phot. 38  
雪崩被害(幹曲り, 割れ, 折れ)  
(ブナ) (サワグルミ)



Phot. 39  
沈降力による防雪柵の支柱の折れ



Phot. 40  
匍行力による森林軌道の曲り