

報 文

周氷河営力としての霜柱

小 野 有 五

I はじめに

霜柱は、日本では、特に関東地方においては、初冬から早春にかけて非常に身近に見られる現象である。このため古くから注目され、後藤・稲垣(1899)、藤原(1923)、川野(1932)、福田(1935, 37, 48)、藤田ほか(1937, 40)、清野(1940)、中谷・孫野(1940)、中谷(1942)などの多くの研究が行なわれた。これらのうちで特に注目されるのは、中谷宇吉郎を中心として行なわれた凍上に関する一連の研究であろう。凍上のメカニズムそれ自体については、すでに Taber (1929, 30) などによって研究されていたが、中谷らの研究は、凍上現象と地表で見られる霜柱とを初めて結びつけ、凍上は地下に生じた霜柱によって起きていることを明らかにした点で、大きな意義がある。しかしながらこれらの研究は、主として霜柱の発生過程や、形成機構に関するものであった。

欧米では、霜柱そのものに関する報告は 19C. 前半からなされ (たとえば Herschel : 1833)*¹⁾、Schwalbe (1885)* などによって、その成長は毛管水の吸着に帰因することが明らかにされていた。その後も、Högbom (1914)*、Beskow (1947)* などによって多くの研究が行なわれ、Mohaupt (1932)*、Krumme (1935)* に至って、霜柱のもつ地形形成作用が初めて充分に認識されるようになった。しかし、霜柱を周氷河営力のなかに初めて明確に体系づけたのは Troll (1944, p. 575—

592) である。彼はそれまでに欧米で行なわれた霜柱に関する研究を総括し、霜柱の地理的分布や、霜柱のもたらす地形形成作用について論じた。最近では Outcalt (1970, a*, b, 1971, a, b, c) が霜柱についての詳しい研究を行ない、Washburn (1973, p. 81—83) も、その教科書の中で霜柱の作用についてまとめている。

これらを通じて言えることは、霜柱の発生過程や形成機構に関する研究が著しく進んだのに反して、霜柱のもたらす地形形成作用についての研究は、なお遅れているということである。そこで筆者は、筑波大学水理実験センターにおける研究の一環として、センターの位置する筑波台地での、霜柱にもとづく地形形成作用に関する研究を計画し、現在、種々の野外観測を行なっている。その結果については、いずれ稿を改めて発表する予定であるが、それに先立って、主として Troll (1944) の研究以後に行なわれた霜柱に関する諸研究を整理し、周氷河営力としての霜柱のもつ役割を明らかにするとともに、今後に残された問題点をいくつか指摘しようというのが、この小論の目的である。

なお、本論で霜柱と呼ぶのは、地表面上に発達した氷層、および霜柱状氷層(中谷・孫野 : 1940)のうち地表面の直下に生じたものである。

II 霜柱の呼称

霜柱は、国によってさまざまな名前では呼ばれて

いる。イギリスでは needle ice, ice filaments, アメリカでは mush frost, ドイツでは Haarfrost, Haareis, Nadeleis, Stengeleis, Effloreszenzeis, Barfrost, スウェーデンでは pipkrack, フィンランドでは rouste などの名前では呼ばれてきた (Troll : 1944)。また, フランスでは (fines) aiguilles de glace, hérissons de glace (Baulig : 1970, p. 56) などと呼ばれていた。Taber (1918)* は Needle ice の語を, Troll (1944) は Högbohm (1914)* の用いた Pipkrake, Kammeis を使っている。現在では, ヨーロッパ大陸では pipkrake と Kammeis, 英・米では needle ice の語が定着しているように思われる。

III 霜柱の地理的分布

霜柱は, 周氷河気候地域ならばどこでも形成されるとは限らない。Troll (1944) によれば, 極地域で霜柱のたつことは稀れである。しかし Washburn (1973, p. 82) は, アークティック・カナダ (Washburn : 1956), アラスカ (Everett : 1963)*, グリーンランド (Boyé : 1950, Washburn : 1969) などの例をあげて, 極地域周辺でも霜柱はかなり広く見られることを明らかにした。高緯度地域で霜柱の形成が活発なのはアイスランドである (Troll : 1944, 73)。これはアイスランドの火山灰土が霜柱のたちやすい土であることにもよるのであろう。スコットランドでも霜柱はよくみられる (Hay : 1936, 37, King : 1971 など)。ヨーロッパの大陸部では, アルプスやドイツの中山山地 (Troll : 1944) のほか, ビレネー (Soutadé : 1973) やカルパチア山地 (Gerlach : 1966) でも霜柱が報告されている。筆者自身の観察 (1976・77夏) によっても, アルプス南部や東部の周氷河帯には, 霜柱の形成に適した地域がかなり見られた。高山において霜柱が形成されるのは, 周氷河帯に, ある広がりをもった砂礫地 (強風砂礫地や残雪砂礫地) が存在する地域に限られている。これは霜柱の形成に必要な水分の供給を可能にする細粒物質が, それらの場所では地表面近くにあるためであろう。したがって霜柱の最もたちやすい

のは, 融雪期には滞水していて, 夏に干上がったのちも地下水面が極く浅い, 残雪凹地のような場所である。このような場所では融雪水によって周辺から流れ込んだ細粒物質が集積していることも, 霜柱の形成には都合がよい²⁾。

亜熱帯地域では, ギリシアの山地 (920m 付近), アペニン山地, スペインのシエラ・ガダラマ山地 (1,900m 付近), 小アジアの高タウルス山地などで霜柱が見られ, 北米のアブラチア山地では, まだ積雪がほとんどなく, 晴天が多いために冷え込みの強い秋に, 霜柱が盛んにつくられているという。アフリカでは南アフリカのドラケンスベルク山地, エチオピアのアビシニア高原など 2,000m 以上の山地で見られ (以上, Troll : 1944 の記載による), ニューゼaland・アルプスでも発達する (Gradwell : 1954, 55, Soons : 1967, Soons and Rainer : 1968, Soons and Greenland : 1970)。しかし霜柱の発達が最も良いのは亜熱帯モンスーン地域である。これは冬に乾燥し, かつ気温がかなり低下することによるのであろう。中国北部では地表から 20~30cm もの霜柱がたつことが Schmitthenner (1932)* によって報告されている。彼によれば, 霜柱の見られる範囲は揚子江中流部の南 (約 29°N) から遼東半島をへて朝鮮半島の山地に至る地域である。「亜熱帯」日本の霜柱もヨーロッパ人には早くから注目され, 明治10年には Wagner (1877)* によって紹介されている。Schwind (1935)* も日本各地の霜柱について報告している (Troll : 1944)。日本における霜柱の詳しい分布については, 現在各地の資料を収集中である。

ヒマラヤでは, はっきりとした観察報告をまだ知らないが, 岩田ら (1976) の調査したクンプ地域およびヒドン・バレーでは構造土の発達がみられ, ヒドン・バレーの礫質線条土における夏の活動層の厚さは約 110cm, 地表面付近は湿潤状態であると報告されていることから, おそらく冷え込みの強い夏の朝には霜柱の形成があるものと推定される。岩田らも, この小型線状土における小礫の移動 (0.4~0.8cm/day) を, 一部フロスト・ク

リーブによるものと考えている。

熱帯の高山地域では、アンデス（コルディエラ・レアル、コルディエラ・キムサクス、コルディエラ・ムニエカス、コルディエラ・ブランカなど）の高度4,600~5,000mの地域をはじめ、アフリカの Mt. Muhavura 山頂（4,100m）、Mt. Kenya（3,900m 付近）などで霜柱の形成が確認されている（Troll : 1944）。

霜柱の地理的分布は、おそらくここに述べた地域にとどまらず、さらに広範な地域にわたっていると思われる。しかしながら Troll（1944）も述べているように、霜柱の形成に最も適した地域は、第一に東アジアの亜熱帯モンスーン地域、第二に海洋性の亜極域、第三には熱帯の高山地域であり、いずれも日周期の凍結融解が卓越する地域であることに、霜柱の分布上の大きな特徴があると言えよう。

N 地形形成営力としての霜柱

地形形成営力としての霜柱の働きは、次の二つにまとめることができるであろう。

1. 霜柱による土壌粒子の粘着力の低下

接地気温の低下にともなって土壌表面に凍結が及ぶと、地表面近くの土壌には細かい割れ目が生じ、氷晶分離はこの割れ目の中で行なわれる（中谷・孫野：1942）。こうして地中に生じた割れ目と霜柱状氷層の発達によって、土壌の本来もっていた構造が破壊されるため、凍土が融解すると、土壌の粘着力（cohesive strength）は凍結前に比べて著しく低下することが知られている（Williams : 1959 など）。地表面近くに霜柱が生じると、それによって空気中にもちあげられた土壌粒子はその本来の構造をこわされ、さまざまな大きさをもつ団粒ないしは団塊（soil segregation）を形成する。個々の団粒・団塊の大きさを決めている要因としては、凍結時に入る割れ目（霜柱の太さはこれによって決められている場合もあると思われる）、霜柱が融解して土壌粒子が水分を含んだのちに再び乾燥する過程で生じる乾裂などが考えられよう。こうして団粒状になった土壌粒子が乾燥

すると、それらは著しく不安定になり、強い風によって容易に飛ばされるようになる。斜面上では、こうした団粒状粒子の移動が引き金となって、乾燥岩屑流（松本ほか：1972）のようなマス・ムーヴメントが生じる。図1に示した土壌粒子の4→5への移動は、上述したような飛砂やマス・ムーヴメントによって生じている場合が少なくない。

2. 霜柱クリープ（Needle ice creep）

Washburn（1967）は、凍結融解にもとづく表層物質の移動様式をフロスト・クリープ（Frost creep）とジェリフラクション（Gelifluction）の二つに分類した。霜柱による土壌粒子の移動は、この分類に従えばフロスト・クリープによるものであるが、フロスト・クリープそのものは、必ずしも霜柱による移動だけを指しているわけではない（Washburn, 1973, p. 171, Fig. 5 参照³⁾）。そこで本論では霜柱による土壌粒子の移動を示す用語として、霜柱クリープ（Needle ice creep）の

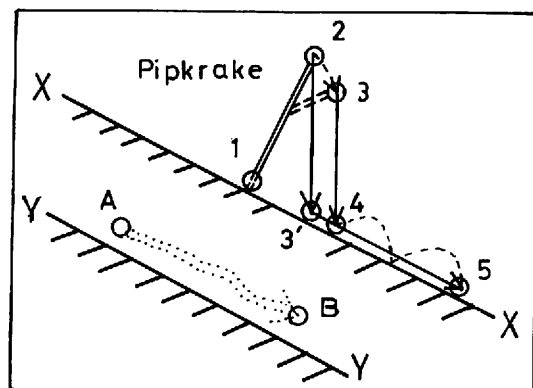


図1 凍結・融解にもとづく土壌粒子の移動過程

1→2→3'：フロスト・クリープ（ただし霜柱が存在せず、単に凍上だけによることもある）

1→2→3→4→5：霜柱クリープ（霜柱の成長、融解にともなう実際の移動過程）

A→B：ジェリフラクション

X-X：霜柱形成の際の凍結面（地表面にはほぼ一致している）

Y-Y：ジェリフラクションが生じる際の凍結面の上限（Y-Yより下では凍土が残り、X-XとY-Yの間では融解していることを示す）

語を使用する。フロスト・クリープ、霜柱クリープおよびジェリフラクションの基本的な違いは図1に示されている。

霜柱の形成をとまなう土壤凍結に際して、土壌粒子が地表面ないしは地下でどのように移動するかを量的に把握しようとする試みは、Higashi・Corte (1971)によって行なわれた。平均 $2\sim 5^\circ/\text{day}$ の温度低下率で行なわれた実験では、 15° の勾配をもつ斜面において、地表の粒子は3回の凍結融解で30mm以上の移動を示した。これに対して地下2cm以下の粒子にはほとんど運動が認められなかった。地表近くにだけ生じた粒子のこの移動プロセスを、彼らはフロスト・クリープと呼んでいる。いっぽう斜面の勾配を 3° にした実験では、このような地表からの深さの違いによる粒子の移動量の違いは認められず、全体の移動量も5~10mmにとどまった。この場合には、過剰な水分を含んだ土層全体が斜面下方に移動したために粒子の移動が生じたと考え、彼らはこのプロセスをジェリフラクションと呼んでいる。

フロスト・クリープによる粒子の移動量は地表面の勾配を θ とすると $\tan^2\theta$ に比例していた。移動量が $\tan\theta$ に比例しないのは、図1に示したように、霜柱によってもちあげられた粒子が、 $1\rightarrow 2\rightarrow 3'$ のようではなく、 $1\rightarrow 2\rightarrow 3\rightarrow 4\rightarrow 5$ のような運動をするからである。4 \rightarrow 5の運動について、筆者は風による移動を重視したが、Higashi・Corte (1971)は、ジェリフラクションによって地表面自体が下方に移動するために、地表の粒子がその上にとまなまま移動するプロセスを考えている。地表面の下方になお凍土が存在し(Y-Y)、地表面との間に過飽和の土層が存在する場合には、おそらく飛砂(gelideflation)よりもジェリフラクションが卓越するに違いない。また霜柱の融解直後に降雨などがあれば、Soons (1967)の言うように、rain washによる物質移動が生ずるであろう。

V 霜柱にもとづく地形形成作用

前章では、霜柱が地表面の物質に対してどのよ

うな変化や運動をもたらすかを概観した。そこで次に、こうした霜柱の営力によってどのような地形形成作用が生じているかを、世界各地での研究と、筆者自身の観察とから述べてみよう。

1. 構造土の形成に霜柱が果たす役割

Troll (1944) はドラケンスベルク山地の高度3,100m付近において、霜柱によってもちあげられた表土が風蝕を受け、線状土をつくっている例を報告している。この線状土の方向は、一般の線状土が斜面の最大傾斜方向に配列するのに対して、この地域で霜柱の形成される季節(6月頃)に卓越する、強い寒風の方向と一致しているという。しかし風蝕による表土や霜柱の剝削がなぜ全般的に生ぜず、線状に生ずるかという説明はなされていない。Mackay・Mathewsによれば、カナダやニュージーランドでの観察と実験結果から、こうした線状土の成因は風蝕でなく、むしろ日射の影響によるものであるという(Washburn: 1973, p. 81)が、いずれにしても今後さらに研究が必要であろう。

同じドラケンスベルク山地の高度3,200m付近では、平坦な玄武岩台地の上に礫質構造土の発達が見られ、礫質構造土の中心を占める湿った細粒土層の部分に、霜柱が観察された(Troll: 1944)。霜柱は表面のバラバラになった土粒子の層と、直下の未凍土との間に発達して、3~4cmの長さをもっていた。Trollによれば、礫質構造土にみられる礫や細粒物質の整然としたソーティングは、凍上によって地表に露出した礫(Vilborg: 1955, Corte: 1966など)が霜柱によってさらにもちあげられ、それが凍上によって中心部ほど高くもり上がった地表面の上を、霜柱クリープによって構造土の周縁部に移動していった結果生じたものである。Pissart (1964, 72, 73)も、フランス・アルプス南部の高山帯に見られる礫質構造土の形成機構を、こうした考えにたって説明している。しかし礫質構造土の成因、とくにその周縁部への礫の集積に関しては、野外における礫の移動についての観測や、実験的研究がなお必要であろう。

Washburn (1973, p. 82) はまた、グリーンラ

ンド北東部などで見られる Nubbins と呼ばれる、直径 1~数 cm の円型ないしやや細長い形をした土のマウンド(Washburn:1969)も、霜柱によって形成された構造土の一種であると考えている。

2. Rasenabschälung (植被剝奪作用)

主として禾本科の高山性芝草に覆われた緩斜面にジュリフラクションなどが働き、小さな滑落崖(平面形は直線的のこともあり、弧状を呈することもある)を生じると、裸地となった滑落崖に霜柱がたち、前節で述べたような土壌粒子の粘着力の低下による風蝕と、霜柱クリープによって滑落崖が徐々に後退し、植被が次第に剝奪されていく作用を、Troll(1944)は Rasenabschälung と呼んだ。アビシニア高原の高度 3,000~3,300m 付近や、ドラケンスベルク山地の高度 2,000~2,500m の斜面、ホーエ・タウエルン山地などで見られるほか、アイスランドにおける実例は Troll(1973)に詳しい。芝草に覆われたアース・ハンモック基部の植被が風蝕などを受けていったん剝がされると、そこに霜柱がたつて同様の剝削が進む。剝削は最初に裸地となった部分で優先的に進むから、結果的にはアース・ハンモックの基部が大きくなぐれて、上部の植被を残した部分はヒサシ状にたれ下がることが多い。またアース・ハンモックの頂部が削られて、植被をもつ周囲より一段えぐれた、小凹部ができていくことがある。Igout(1971)によるフランス・アルプス南部(2770m)での観察によれば、6月にはアース・ハンモックの頂部には氷塊が一部露出していたが、2ヶ月後にはその部分が、周囲より 1~2cm ほど深く削られていたという。おそらく氷塊が地表面から融解するにつれて夜間に霜柱の形成を許すだけの水分の供給があり、霜柱とそれにもとづく風蝕によって、植被が少しずつまわりに向かって剝がされていったのであろう。

小崎(1965)は、アース・ハンモックの頂部に見られるこのような小凹部を Billings・Mooney(1959)の frost scar, frost boil に相当するものとして凍結ハゲと呼んだ。小崎はまた、この語を植被構造土の中心部に見られる小裸地に対しても

用い、この凍結ハゲは、アース・ハンモックの頂部に見られるものとは違って、植被の剝奪によって生じたのではなく、本来、植被構造土全体に広がっていた裸地が、周囲から植生に覆われることによって中心部に取り残されて生じたものと考えた。しかし小崎自身も指摘しているように、植被構造土の中心部の凍結ハゲもまた、植生をもつ周囲から 3~5cm ほど深くえぐられており、風蝕の影響を無視することはできない。したがってこのような凍結ハゲは、小崎の言うように、本来は植生によって周囲から埋め残された裸地として生じたものであるとしても、気候条件によっては、植被剝奪作用によって、再び新たな裸地の拡大を生じることもあり得ると考えられる。アース・ハンモック頂部の凍結ハゲはまさにこの場合であり、Igout(1971)の報告した例は、アース・ハンモックの頂部を覆っていた植生が、気候条件の何らかの変化に対応してさらに膨張した、アース・ハンモック内部の水によって部分的に破壊され、わずかな裸地が生じたことによって、凍結ハゲの形成が始まったものとも考えられる。

植被剝奪作用はまた、風蝕ノッチ(田淵:1975)の形成にも大きな役割を果たしているであろう。木曾駒ヶ岳周辺での筆者自身の観察(1972年5月)によっても、小さな礫質構造土が分布する植被階状土の平坦面上では、背後の風蝕ノッチにかけて顕著な霜柱がみられ、風蝕ノッチによって植被階状土の崖の基部がえぐられたために、階状土の縁を覆う植生がたれ下がっているのが見られた。同様の現象は、スコットランド(King:1971)やニュージーランドの南アルプス(Gradwell:1960)でも知られており、またカナダでも Brink et al.(1967)の報告がある。

3. 霜柱にもとづく斜面物質の移動

構造土の形成に霜柱が果たす作用も、植被剝奪作用も、基本的には霜柱にもとづく斜面物質の移動に他ならない。それらを区分したのは、結果として生ずる地形が非常に特徴的な地形であったからにすぎない。ここでは最後に、裸地斜面に霜柱が働いて生じた、斜面物質の移動に関するそのほ

かの研究について述べることにしよう。

Gerlach (1966) によれば、ポーランド領カルパチア山地での霜柱による地表面の低下量は、数 mm/年のオーダーであった。また厚さ数ミリの土壌層の斜面上での移動量は、70cm/年と報告されている。Gradwell (1954, 57), Soons (1967), Soons・Rainer (1968) らは、ニュージーランドの南アルプスで、霜柱による斜面物質の移動量を数多く測定している。それによると、移動量は霜柱が長いほど、また斜面勾配が大きいほど大きいが、たとえば勾配が29°の斜面では、約2cmの長さの霜柱によっておし上げられた斜面物質は、霜柱の融解にともなって、斜面下方に約1cm移動したという。また同じ斜面で、直径1.25~6.5cmの粒子は、11回の凍結・融解の繰返しのために5~63.5cmの移動を示した。

日本では福尾(1969)が、滋賀県、信楽川流域の小起伏の谷壁斜面において、霜柱にもとづく土砂移動を観測しており、1~3月にかけて平均約4cmの厚さの斜面物質の侵食が行なわれたとしている。また小疇ら(1974)は、白馬岳周辺の高山帯で、残雪砂礫地にビニールチューブを埋め込むことにより斜面物質の移動量を測定した。3年間にわたる移動量の年平均値は0.5~5.5cm/年であり、その大部分は融雪水・融凍水にもとづくジェリフラクションによるものと考えられている。しかし表層物質中には秋に霜柱の形成がみられるので、フロスト・クリープによる物質移動も推定されている。

高(1976)は、中津川営林署内の国有林(標高1,005m)で、西向き、および西北西向きの裸地斜面(勾配28°)と、南南西向きの植被斜面(勾配23°)を選び、それぞれの斜面から一冬に崩落する土砂量を調べた。裸地斜面では霜柱や凍土が発生し、12月11日~3月25日の間に西向き斜面で57.1kg、西北西向き斜面で30.2kgの土砂生産があった。植被斜面では霜柱も見られず、土砂生産もほとんど皆無であった。崩落土砂をもたらした営力についての分析は充分になされていないが、霜柱が主要な役割を果たしていることは確実である。

ただし3月上旬には、急激な気温の上昇によってジェリフラクションも生じている。石井(1976)も、足尾山地北部の山地斜面で、凍結・融解にもとづく斜面物質の移動量の測定を行なったが、斜面物質の移動プロセスについては、ジェリフラクションが主なものであろうと推定している。しかしいくつかの地点で、注3に述べた斜面上方への運動成分(Retrograde displacement)が観測されている点は興味深い。また凍結・融解にもとづく斜面物質の移動は、斜面の傾斜角が32°~37°のときに最も有効に生ずるとした点も、Higashi・Corte (1971) や Soons・Rainer (1968) などの研究結果と比べて興味深いところである。

VI 結 語

以上述べたように、霜柱にもとづく地形形成作用は、斜面勾配を小さくさせるように働いていると言えるであろう。したがって、もし斜面の向きによって霜柱の形成される度合が異なるならば、そして霜柱による斜面プロセスが他の斜面プロセスよりも斜面形の変化に大きな役割を演じているような所であるならば、霜柱の地形形成作用によって、非対称谷がつくられる可能性があると言えよう。たとえば先に述べた Soons・Rainer (1968) らの調査地域では、最大限の日射を受ける西向き斜面にのみ霜柱がたち、日影になることの多い南南東向き斜面では、一日中凍結が続くために霜柱の形成が見られなかった。これに対応して、斜面物質の生産は霜柱のたった西向き斜面でのみ生じている。また高(1976)の研究でも、斜面の方向による斜面物質生産量の差が見られる。

貝塚(1964, p.63-66)は関東平野の台地面を刻む河谷に、南向き斜面が急で北向き斜面がゆるやかな非対称性が見られることの成因を、霜柱の地形形成作用にもとづくものと考えているが、これらの問題を明らかにするためにも、霜柱にもとづく地形形成作用、とくに霜柱による斜面物質の移動について、さらに基礎的なデータを蓄積する必要があると思われる。

本論を書くにあたり、いくつかの文献について御教示をいただいた、大阪教育大学地理学教室の石井孝行助教授に謝意を表します。

注

- 1) *印は、原文が入手できなかったため、他の論文からその内容を知った論文を示す。
- 2) たとえば藤田ほか (1937, 40), Gradwell (1954) などの研究によって、霜柱はローム質など細粒物質によく発達することが明らかにされている。
- 3) Washburn (1967, 73), Benedict (1970, 76) によれば、フロスト・クリープは斜面下方に向かう運動成分 (Potential frost creep) と、斜面上方への運動成分 (Retrograde displacement) の二つの要素からなっている。しかし霜柱による土壌粒子の移動においては、斜面上方への運動成分は全く無視することができるであろう。

文 献

- 藤田ミチほか (1937) : 霜柱の研究, その1, 自由学園新聞出版部, 44p.
- 藤田ミチほか (1940) : 霜柱の研究, その2, 自由学園新聞出版部, 17p.
- 藤原咲平 (1923) : 霜柱に就いて, 気象集誌, 第2輯, 2, 55—58.
- 福田仁志 (1935) : 霜柱の生長に関する二・三の考察, 農業土木研究, 7, (2).
- 福田仁志 (1937) : 霜柱について, 東大農学部紀要, No. 13.
- 福田仁志 (1948) : 霜柱の生成と熱輻射について, 応用物理, 17.
- 福尾義昭 (1969) : 山地斜面の昇降と土砂移動の観測, 土砂流出・流送による河川災害の基礎的総合研究, 30—35.
- 後藤収太・稲垣乙丙 (1899) : 霜柱研究の報告, 気象集誌, 18, (5), (6), (7).
- 石井孝行 (1977) : 足尾山地北部の山地斜面における凍結・融解による斜面物質の移動, 地理評, 49, 523—537.
- 岩田修二・藤井理行・樋口敬二 (1976) : ネパールヒマラヤの構造土, 地学雑, 85, 21—39.
- 川野昌美 (1932) : 霜柱の生長の速度に就いて, 気象集誌, 第二輯, 10, 221—225.
- 貝塚夾平 (1964) : 『東京の自然史』, 紀伊国屋書店, 186p.
- 小崎 尚 (1965) : 大雪火山群の構造土, 地理評, 38, 179—199.
- 小崎 尚ほか5名 (1974) : 白馬岳の地形学的研究, 駿台史学, 35, 1—86.
- 高 泰明 (1976) : 霜柱・凍上による山地斜面の破壊と侵食に関する実験, 日林誌, 58, 23—27.
- 松本栄次・東京教育大学地形営力研究グループ (1972) : 足尾鉱山付近の崖錐の構成物質とその堆積過程, 地理予, 2, 1—2.
- 中谷宇吉郎・孫野長治 (1940) : 凍上の機構について, I, 現場調査, 気象集誌, 第二輯, 18, 1—9.
- 中谷宇吉郎 (1942) : 凍上の機構について, II, 第二年度現場調査, 気象集誌, 第二輯, 20, (4), 27—38.
- 中谷宇吉郎・孫野長治 (1942) : 凍上の実験的研究, 気象集誌, 20, (5), 6—21.
- 清野 斐 (1940) : 霜柱の発生機構並に文献の紹介, 雪氷, 2, 11.
- 田淵 洋 (1975) : 亜高山帯の周水河地形——霧ヶ峰を例にとつて——, 地理, 20, (10) 40—50.
- Baulig, H. (1970) : Vocabulaire franco-anglo-allemand de Géomorphologie. Ed. Ophrys, Paris. 230 p.
- Billings, W. D. and Mooney, H. A. (1959) : An apparent frost hummock-sorted polygon cycle in the alpine tundra of Wyoming. Ecology, 40, 16—20.
- Benedict, J. B. (1970) : Downslope soil movement in Colorado alpine region : Rates, processes, and climatic significance. Arctic and Alpine Res., 2, 165—226.
- Benedict, J. B. (1976) : Frost creep and gelifluction : A review. Quat. Res., 6, 55—76.
- Beskow, G. (1947) : Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads. (Translated by J. O. Osterberg). Northwestern Univ. Technol. Inst., 145p.
- Boyé, M. (1950) : Glaciaire et périglaciaire de l'Ata Sund nord-oriental, Groenlande ; Expéditions Polaires Françaises I. Paris, Hermann & Cie, Actualités Scientifiques et Industrielles IV. 176p.

- Brink, V.C. et al. (1967) : Needle ice and seedling establishment in Southwestern British Columbia. *Canadian J. Plant Sci.*, **47**, 135-139.
- Corte, A.E. (1966) : Particle sorting by repeated freezing and thawing. *Biul. Perygl.*, **15**, 175-240.
- Everett, K.R. (1963) : Slope movment in contrasting environment. Ohio State Univ. Ph. D. Thesis. 251p.
- Gradwell, M.W. (1954) : Soil frost studies at a high country station -1. *New Zealand J. Sci. and Technol.*, Sect. B, **36**, 240-257.
- Gradwell, M.W. (1955) : Soil frost studies at a high country station -2. *New Zealand J. Sci. and Technol.*, Sect. B, **37**, 267-275.
- Gradwell, M.W. (1957) : Patterned ground at a high country station. *New Zealand J. Sci. and Technol.*, Sect. B, **38**, 793-806.
- Gradwell, M.W. (1960) : Soil frost action in tussock grassland. *New Zealand J. Sci.*, **3**, 580-590.
- Hay, T. (1936) : Stone stripes. *Geogr. Jour.*, **87**, 47-50.
- Hay, T. (1937) : Physiographic notes on the Ullswater area. *Geogr. Jour.*, **90**, 426-445.
- Herschel, J.F.W. (1833) : Notice of remarkable deposition of ice round the decaying stems of vegetables during frost. *Philos. Mag.*, **2**.
- Higashi, A. and Corte, A.E. (1971) : Solifluction : A model experiment. *Science*, **171**, 480-482.
- Högbom, B. (1914) : Über die geographische Bedeutung des Frostes. *Uppsala Univ. Geol. Inst. Bull.*, **12**, 3-115, 257-389.
- Igout, M. (1971) : Le Massif de Chambeyron méridional (Alpes de Haute Provence), Etudes morphologiques. *Mem. du Métrise*. 130p.
- King, B. (1971) : Vegetation destruction in the sub-alpine and alpine zones of the Cairngorm Mountains. *Scott. Geogr. Mag.*, **87**, 103-115.
- Krumme, O. (1935) : Frost und Schnee in ihrer Wirkung auf den Boden im Hochtaunus. *Rhein-Mainische Forsch.*, **13**, 73p.
- Mohaupt, W. (1932) : Beobachtungen über Bodenversetzungen und Kammeisbildungen aus dem Stubai und dem Grödener Tal. Univ. Hamburg Thesis. Hamburg Hans Christians Druckeres und Verlag. 54p.
- Outcult, S.I. (1970, a) : A study of needle ice events at Vancouver, Canada, 1961-1968. Univ. British Columbia, Ph. D. Thesis., 135p.
- Outcult, S.I. (1970, b) : A study of time dependence during serial needle ice events at Vancouver, Canada. *Arch. Met. Geoph. Biokl. Wein, Ser. A*, **19**, 329-337.
- Outcult, S.I. (1971, a) : The climatology of a needle ice event. *Arch. Met. Geoph. Biokl. Wein, Ser B*, **19**, 325-338.
- Outcult, S.I. (1971, b) : Field observation of soil temperature and water tension feedback effects on needle ice nights. *Arch. Met. Geoph. Biokl. Wein, Ser. A*, **20**, 43-53.
- Outcult S.I. (1971, c) : An algorithm for needle ice growth. *Water Resources Res.*, **7**, 394-400.
- Pissart, A. (1964) : Vitesse des mouvements du sol au Chambeyron (Basses Alpes) *Biul. Perygl.*, **14**, 303-309.
- Pissat, A. (1972) : Vitesse des mouvements de pierres dans des sol et sur des versants périglaciaires au Chambeyron (Basses Alpes). *In* "Processus périglaciaires étudiés sur le terrain". *Le Congrès et Colloques de Univ. Liège*, **67**, 251-268.
- Pissart, A. (1973) : L'origine des sol polygonaux et striés du Chambeyron (Basses Alpes). *Bull. de la Soc. Géogr. de Liège*, **9**, 33-53.
- Schmitthenner, H. (1932) : Landformen im ausser-tropischen Monsungebiet. *Beobachtungen und Untersuchungen in China. Wiss. Vcröff. Mus. f. Länderk. zu Leipzig, N.F.*, **1**.
- Schwalbe, B. (1885) : Über Eisfilamente. *Meteor. Zeitsch.*, **2**, 185/6.
- Schwind, M. (1935) : Eiszeitforschung in Japan. *Geogr. Zeitsch.*, **41**, Jg., Leipzig.
- Soons, J.M. (1967) : Erosion by needle ice in the Southern Alps, New Zealand. 217-229p. *In* Wright, H.E.JR. and Osburn W.H. (ed.) :

- "Arctic and Alpine Environments, 10", Proc. VII Congress INQUA Boulder-Denver. Colorado Univ. Press, Bloomington. 308p.
- Soons, J.M. and Rainer, J.N. (1968) : Micro-climate and erosion processes in the Southern Alps, New Zealand. *Geogr. Ann.*, **50**, (A), 1-15.
- Soons, J.M. and Greenland, D.E. (1970) : Observations on the growth of needle ice. *Water Resources Res.*, **6**, 579-93.
- Soutadé, G. (1973) : Aspects du modelé périglaciaire supra-forestier des Pyrénées Orientales. *Bull. de l'A. F. E. Q.*, 1973/74, 239-254.
- Taber, S. (1918) : Ice forming in clay soils will lift surface weights. *Eng. New-Rec.*, **80**, 262-263.
- Taber, S. (1929) : Frost heaving. *Jour. Geol.*, **37**, 428-317.
- Taber, S. (1930) : The mechanics of frost heaving. *Jour. Geol.*, **38**, 303-317.
- Troll, K. (1944) : Strukturboden, Solifluktion und Frostklimate der Erde. *Geol. Rundsch.*, **34**, (7/8), 545-694.
- Troll, K. (1973) : Rasenabschälung (Turf Exfoliation) als periglaziales Phänomen der subpolaren Zonen und der Hochgebirge. *Zeitsch. f. Geomorph., N. F., Suppl.*, Bd. **17**, 1-32.
- Vilborg, L. (1955) : The uplift of stones by frost. *Geogr. Ann.*, **37**, (A), 164-169.
- Wagner, G. (1877) : Über Shimobashira. *Mitt. Deutsch. Ges. f. Natur u. Volkerkunde Ostasien (O. A. G.)* **11**, 12.
- Washburn, A. (1956) : Classification of patterned ground and review of suggested origins. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **67**, 823-865.
- Washburn, A. (1967) : Instrumental observation of mass-wasting in the Mesters Vig district, Northeast Greenland. *Meddelester om Grønland*, **166**, (4), 318p.
- Washburn, A. (1969) : Weathering, frost action, and patterned ground in the Mesters Vig district, Northeast Greenland. *Meddelester om Grønland*, **176**, (4), 303p.
- Washburn, A. (1973) : "Periglacial processes and environments". Edward Arnold. London. 320p.
- Williams R. J. (1959) : An investigation into processes occurring in solifluction. *Amer. Jour. Sci.*, **257**, 481-490.