

東北海道における火山灰土の凍結と融解 (II)

—皆伐跡ササ地およびカラマツ新植造林地
における土壌の凍結と融解—

竹内典之

Studies on the freezing and thawing of the volcanic ash soils
in eastern Hokkaido (II)

—Soil freezing and thawing in a grassland (*Sasa nipponica*)
and a brush cutting area—

Michiyuki TAKEUCHI

要 旨

林床植生やリター層などによる地表被覆が土壌の凍結にあたる影響を調べるために、裸地（観測点 p_1 ）、皆伐跡ササ地（観測点 p_2 ）およびカラマツ新植造林地（観測点 p_3 ）において、メチレンブルー式凍結深度計を用いて、土壌の凍結深度および融解深度の観測を行った。

観測は、根釧内陸部（東北海道）に所在する京都大学農学部附属北海道演習林（標茶区）第9林班内において、1977～1978年および1978～1979年の冬季に行った。

観測結果をまとめると次のようになる。

- 1) 季節凍土の初日は、第1年度には3観測点でほぼ同時であったが、第2年度では皆伐跡ササ地で他の2観測点よりも1週間程度おくれた。
- 2) 凍結の侵入速度は、裸地・カラマツ新植造林地・皆伐跡ササ地の順に小さくなり、凍結侵入の停止は、2ヶ年とも3観測点でほぼ同時であった。
- 3) 各観測点での最大凍結深度は、第1年度には、裸地で44.0 cm、皆伐跡ササ地で24.0 cm およびカラマツ新植造林地で37.5 cm であり、第2年度には、それぞれ54.5 cm、31.5 cm および46.0 cm であった。
- 4) 裸地と比較すると、皆伐跡ササ地では20.0 cm および23.0 cm も最大凍結深度が浅く、カラマツ新植造林地においても6.5 cm および8.5 cm 程度は最大凍結深度が浅かった。
- 5) 凍土層の融解は、3観測点とも、まず積雪下で凍土層の底部から始まり、根雪の消失後は地表面からも進んだ。
- 6) 凍土層底部からの融解は地熱によるものであるが、その速度は全融解期間を通じてほぼ一定で1～2 mm/day 程度であり観測点間の差は認められなかった。
- 7) 地表面からの融解速度は、裸地・カラマツ新植造林地・皆伐跡ササ地の順に小さくなり、季節凍土の終日は、同一の順序でおそくなった。
- 8) 裸地における凍結深度 $X_{1,f}$ と皆伐跡ササ地における凍結深度 $X_{2,f}$ およびカラマツ新植造林地における凍結深度 $X_{3,f}$ との間には、それぞれ、

$$X_{2,f} = -30 + \sqrt{30^2 + X_{1,f}^2}$$

$$X_{3,f} = -8 + \sqrt{8^2 + X_{1,f}^2}$$

の関係があり、また、裸地における融解深度 $X_{1,i}$ と皆伐跡ササ地における融解深度 $X_{2,i}$ およびカラマツ新植造林地における融解深度 $X_{3,i}$ との間には、それぞれ

$$X_{2,i} = -45 + \sqrt{45^2 + X_{1,i}^2}$$

$$X_{3,i} = -12 + \sqrt{12^2 + X_{1,i}^2}$$

の関係があった。

はじめに

北海道の東部地方、とくにその内陸部は、冬季間寒気が厳しいうえに根雪がおそく積雪も少ないため、道路や玄関先など絶えず除雪されているところばかりでなく、畑地や草地・林地などの土壌も地下深くまで凍結し、春季融雪後もおそくまで地中に凍土層が残存する。そのため、農林業などにおいては、温暖地域にはみられないさまざまな作業上の制約をうける。

草地や林地においては、地表を被覆している植生やリター層などの断熱保温効果によって、凍結速度、融解速度や最大凍結深度などが裸地とは異なるであろうということは容易に推察されるが、その数量的な関係は明らかにされていない。

筆者は、根釧内陸部（東北海道）の火山灰地帯において、種々の地被条件下での土壌の凍結に関する観測・研究をすすめている。本報告は、1977～1978年および1978～1979年の冬季に、裸地・皆伐跡ササ地（ミヤコザサ）およびカラマツ新植造林地において得た凍結深度および融解深度の観測結果を報告し、裸地での凍結深度・融解深度と皆伐跡ササ地およびカラマツ新植造林地での凍結深度・融解深度との関係について述べる。

I 観測地の概要と観測方法

京都大学農学部附属北海道演習林（標茶区）は、釧路川の支流タワ川の左岸流域に展開する丘陵地で、その標高は 35～140m である。地形は、(イ) 標高がほぼ 110m 以上で比較的よく平坦面が保持され起伏にとぼしい上部平坦面、(ロ) 標高が 60m 以下でタワ川およびその支流に沿って発達した河岸沖積地で起伏にとぼしい下部平坦面、(ハ) 標高が 60～110m で比較的急斜地でやや起伏も多い傾斜部、とからなる。上部平坦面は、標茶区全面積の50%強を占め、今後造林対象地となる面積も最も多い。

森林は、蓄積の少ない落葉広葉樹林で、林床は、全域にわたってミヤコザサが優占している。

観測地は、上記の上部平坦面に属する標茶区第9林班内のカラマツ新植造林地およびそれに隣接した皆伐跡ササ地に、1977年9月に設定した。観測地の標高は約120m で、やや凹地形でわずかに北西に傾斜している。

観測地には、下記の3条件の観測点を設けた。

- ①観測点 p_1 (裸地): カラマツ新植造林地内の平坦地に設定し、植生やリター層などの影響を除去するために 4m×4m の範囲で土壌表面を露出させた。
- ②観測点 p_2 (皆伐跡ササ地): 冬季間も比較的密なミヤコザサにおおわれ、リター層も厚い。ミヤコザサの平均高は 85cm、平均密度は 132本/m²、地上部乾重量は 465g/m² である。また、リター層の厚さは約 7cm、その乾重量は 815g/m² である。

③観測点 b_3 (カラマツ新植造林地): 1976年9月に全刈火入れ地拵えがなされ、1977年5月に3000本/haの密度でカラマツが植栽された造林地である。毎年7月中旬に下刈が実施されているため冬季間の地表被覆は貧弱である(地表堆積物の厚さは約3cm, 乾重量は255g/m²程度である)。下刈時における植生は、バイケイソウ・アキタブキ・コウゾリナ・ハンゴンソウなどの大型草本が主で、ミヤコザサの回復は非常に少なかった。

第1図は、観測地内(皆伐跡ササ地)で1977年11月17日に調査した土壤断面および土壤水分の分布状態を示したものである。この地方の地表は、摩周岳起源の火山灰を主とした多層の火山噴出物にくまなくおおわれていて、その厚さは1m以上にも及び、林内全域にわたってほぼ第1図のような土壤断面を示す。土壤水分の分布は、季節凍土の始まる直前の状態で、地表近くから地下1m近くまで0.45~0.50g/cm³程度でほぼ一定であった。

観測地における観測項目および観測方法は次のとおりである。

- (イ) 土壤の凍結深度および融解深度: 各観測点にメチレンブルー式凍結深度計^{1,2,3)}を3本ずつ埋設し、それらの観測値を平均して凍結深度および融解深度を得た。凍結深度は凍上量をも含み、融解深度は最大凍上地表面からの深さである。
- (ロ) 積雪深: 凍結深度計の周囲4~5ヶ所で、スチール製積雪深棒を用いて測定し、それらを平均して積雪深を求めた。

なお、観測は、1週間間隔の定期観測を実行した。

II 観測期間の気温と積雪

自然積雪条件下での土壤の凍結深度は、日平均気温の結氷点以下の積算値である積雪寒度値(凍結指数)と積雪状態とによってきまり、その冬の最大凍結深度は、積雪が15cm以上に達した日(積雪15cm深日)までの積算寒度値によってほぼきまる^{3,4)}。

観測を行った京都大学農学部附属北海道演習林標茶区は、広大な根釧原野(東北海道)の内陸部に位置するため、やや内陸性の気候を呈し、冬季は晴天が多く乾燥した北西季節風が卓越し、根雪はおそく積雪も少なく寒気が厳しい。そのため、道路や玄関先など絶えず除雪されている場所ばかりでなく、畑地や草地・林地などの土壤も地下深くまで凍結が進み、春季おそくまで凍土層が地中に残存する。

一般に、道東内陸部では、11月下旬または12月上旬には日平均気温が氷点下の日がほぼ継続するようになり(第2図)、夜間に凍結した土壤層が日中に融解しきらなくなり、凍結前線が徐々

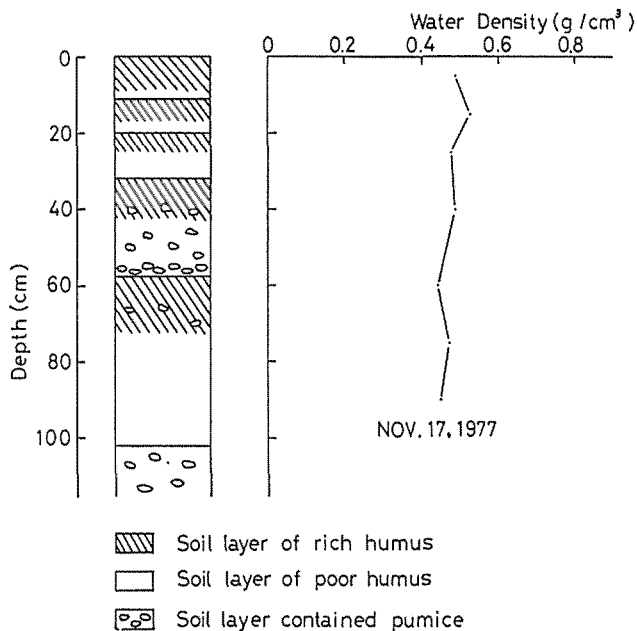


Fig. 1. Soil profile and water density (Nov. 17, 1977)

に地中へ侵入を始める。その後の凍結侵入速度は、寒さの度合や根雪の時期、積雪状態などによって異なるが、3月上旬には、まだ日平均気温が氷点下の日が多いが日射が強くなり、融雪・融氷が始まり、凍結の侵入はほぼ停止する。

観測を行った2ケ年の凍結進行期（11月下旬から3月上旬）の気温についてみると（第2図）、第1年度は、前半は暖冬傾向で経過

したが、後半は寒気が厳しくなり、積算寒度値は1965～1979年の平均値 820°C・day をうわまわり 930°C・day に達した（第3図）。第2年度は、ほぼ全凍結進行期間を通じて週平均気温が平年よりも高く、非常に暖かな冬で、積算寒度値は 680°C・dayにとどまった。

3月下旬から5月上・中旬の融雪・凍土融解期の気温は、両年度とも平年よりも低く、融雪および凍土融解の進度に影響を与えているものと考えられる。

積雪については、演習林事務所構内の気象観測露場（海拔 25m）での観測結果から、第1表に根雪の初日・自然積雪 15cm 深日・根雪の終日および根雪期間を、第2表に月別最深積雪深を示した。月別最深積雪深の平年値は、中央气象台編「雪の気候図」⁶⁾の標茶の記録を示した。

第1年度は、根雪の初日・根雪の終日・根雪期間・月別最深積雪深はいずれもほぼ平年並で、積雪 15cm 深日は、1月20日（1965～1979年の平均では1月10日）であり、自然積雪条件下で

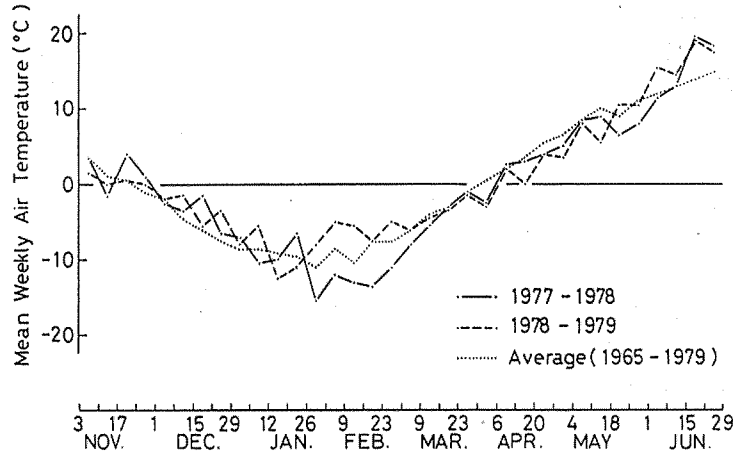


Fig. 2. Mean weekly air temperature in Shibecha.

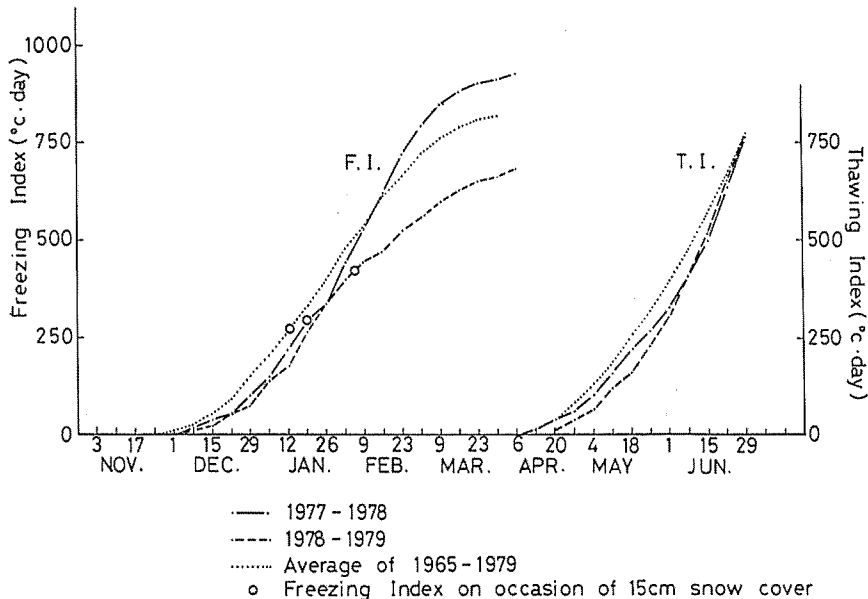


Fig. 3. Accumulated air temperature in Shibecha.

Table 1. First day, last day and duration of continuous snow cover.

	1977-78	1978-79
First day of continuous snow cover*	Dec. 25	Jan. 19
Date of 15cm snow cover occurrence**	Jan. 20	Feb. 6
Last day of continuous snow cover***	Apr. 6	Apr. 9
Duration of continuous snow cover	103	81

Note * average: late December
 ** average: mid January
 *** average: late March or early April

Table 2. Monthly maximum depth of snow in cm.

	1977-78	1978-79	average*
December	6	0	10
January	42	4	41
February	37	42	45
March	52	25	51
April	15	31	17

* The Climatology of Snow in Japan(5)

の最大凍結深度をほぼ決定する積雪 15cm 深日までの積算寒度値は $293^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ (1965~1979年の平均値: $277^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$) であった (第3図)。第2年度は、12月および1月にほとんど降雪がなく、積雪 15cm 深日は2月6日で、この日までの積算寒度値は、この冬が暖冬であったにもかかわらず、 $421^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ にも達した。

III 観測結果および考察

観測点 p_1 (裸地), 観測点 p_2 (皆伐跡ササ地) および観測点 p_3 (カラマツ新植造林地) における土壌の凍結深度・融解深度と積雪深の観測結果を第4図(a) (1977~1978年), (b) (1978~1979年) に示した。

(1) 季節凍土の初日

第1年度は、12月1日の観測では3観測点とも凍土は全く認められなかったが、12月8日には、裸地では 12.0cm, 皆伐跡ササ地では 3.0cm, カラマツ新植造林地では 7.5cm の凍土層が観測された。この冬は、11月中旬に始まった高温が12月1日まで続いたが (第2図), 12月2日早朝には急激に気温が低下し (-10.2°C), その後は日平均気温が氷点下の日が続くようになったため、3観測点とも12月2日が季節凍土の初日であったと考えられる。

第2年度は、11月下旬から日平均気温が氷点下の日がほぼ継続するようになり、11月24日には、裸地では 4.0cm、カラマツ新植造林地では 1.0cm の表層土が凍結していた。しかし、皆伐跡ササ地では、地表をおおった比較的密なササおよび多量のリター層の断熱保温効果によって、地表面温度が氷点下まで冷却されるのがおくれ、季節凍土の初日は最低気温が -11.9°C まで下がった11月26日であろうと考えられる。

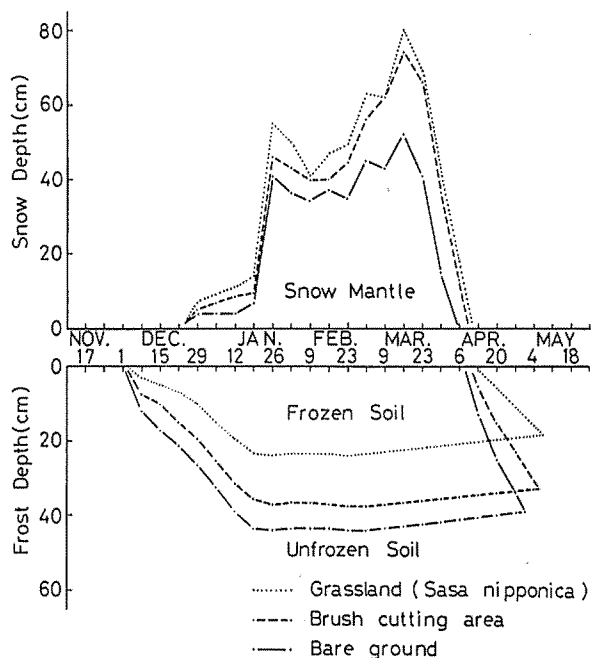


Fig. 4.(a). Snow and frost depth for 1977-1978 season.

(2) 凍結侵入速度および最大凍結深度

凍結侵入速度は、地表面をおおったササやリター層などの断熱効果の差によって、2ヶ年とも、裸地、カラマツ新植造林地、皆伐跡ササ地の順に小さくなった。また、3観測点とも、15 cm 未満の積雪は凍結侵入にほとんど影響をあたえず、積雪が30 cm 以上になると一斉に凍結侵入は停止し、ほぼ同時に最大凍結深度に達した。

第3表にとりまとめたように、第1年度および第2年度の最大凍結深度は、裸地で最も深く44.0 cm および54.5 cm であり、皆伐跡ササ地で最も浅く24.0 cm および31.5 cm であった。また、カラマツ新植造林地では、それぞれ37.5 cm および46.0 cm であった。裸地での最大凍結深度と他の2観測点での最大凍結深度とを比較すると、皆伐跡ササ地では20.0 cm および23.0 cm も浅く、カラマツ新植造林地でも6.5 cm および8.5 cm 浅かった。

また、気温および積雪の項でも述べたように、第2年度は暖冬であったにもかかわらず降雪が少なく、積雪が凍結侵入停止限界積雪深に達した日(積雪15 cm 深日)までの積算寒度値が、第2年度には第1年度よりも128°C·day も大きくなった。そのため、最大凍結深度は、3観測点とも、第2年度が第1年度よりも深くなった。

(3) 凍土層の融解

凍土層の融解は、3観測点とも、最大凍結深度到達の直後から、積雪下で、まず凍土層の底部から始まった。凍土層底部からの融解は地熱によるものであるが、その融解速度は全融解期間を通じてほぼ一定で1~2 mm/day 程度であり、観測点間の差は認められなかった。

根雪の終日以後は地表面からの融解も始まり、その融解速度は、凍結侵入速度と同様に、地表面をおおったササやリター層などの断熱効果の差によって異なり、2ヶ年とも、裸地、カラマツ新植造林地、皆伐跡ササ地の順に小さくなった。

地中の凍土層の消失(季節凍土の終日)は裸地、カラマツ新植造林地、皆伐跡ササ地の順におそくなったが、その差は1週間から10日程度であった。

(4) 裸地での凍結深度 $X_{1,f}$ と皆伐跡ササ地での凍結深度 $X_{2,f}$ およびカラマツ新植造林地での凍結深度 $X_{3,f}$ との関係

土の凍結の過程は、凍土・未凍土の境界すなわち凍結前線において氷の生成を伴う熱伝導問題

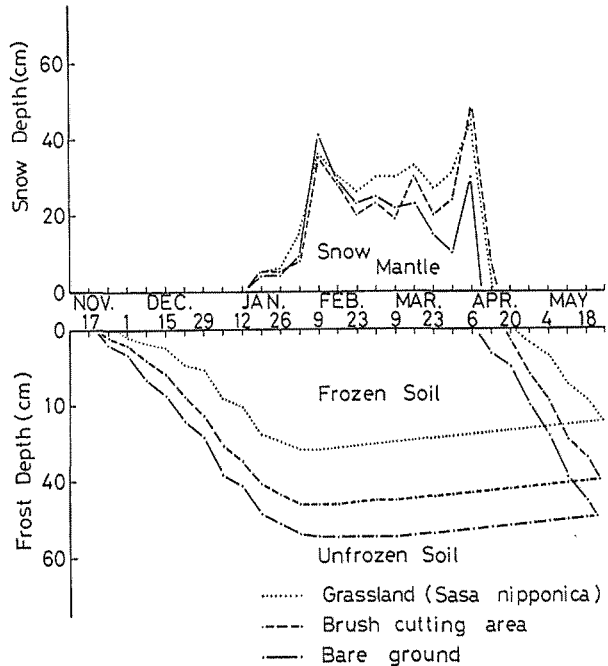
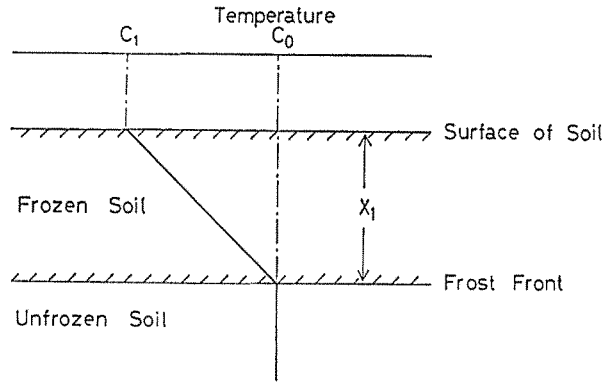


Fig. 4(b). Snow and frost depth for 1978-1979 season.

Table 3. Maximum frost depth in cm.

	First season	Second season
Grassland (Sasa nipponica)	24.0	31.5
Brush cutting area	37.5	46.0
Bare ground	44.0	54.5



C_0 : Freezing Point (0°C)

C_1 : Temperature of Soil Surface

X_1 : Depth of Frozen Soil

Fig. 5. Stefan's model of temperature distribution.

である。土中への凍結侵入の推定に対する最も単純な仮定は、地表面から凍結前線までの温度変化が一定であること、凍結前線以下の温度が 0°C で一定であることである（第5図）。

このような条件の下では、時間 dt で、厚さ dX の土中の間げき水が凍結するときに放出される潜熱は、凍結前線から地表面へ伝導される熱量に等しい。すなわち、

$$L \cdot \rho \cdot \frac{dX}{dt} = -\lambda_f \frac{C_1}{X_1} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 L : 氷の融解潜熱 Cal/g

ρ : 凍土の含水量 g/cm^3

λ_f : 凍土の熱伝導率 $\text{Cal}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}$

C_1 : 地表面温度 $^{\circ}\text{C}$

X_1 : 凍結深度 cm

これから

$$X_1^2 = -\frac{2\lambda}{L \cdot \rho} \int C_1 dt \quad \dots\dots(2)$$

これが Stefan の解と呼ばれているものである⁶⁾。

次に、地表面が、熱伝導率 λ_a 、厚さ H_a の断熱材で被覆されている場合の土中への凍結侵入について考える。断熱材中に熱源（氷の生成に伴う潜熱の放出など）がなく、断熱材中および地表面から凍結前線までの温度変化がそれぞれ一定で、凍結前線以下の温度が 0°C で一定であると仮定し、断熱材の表面温度を C_3 、地表面温度を C_2 とすると（第6図）、

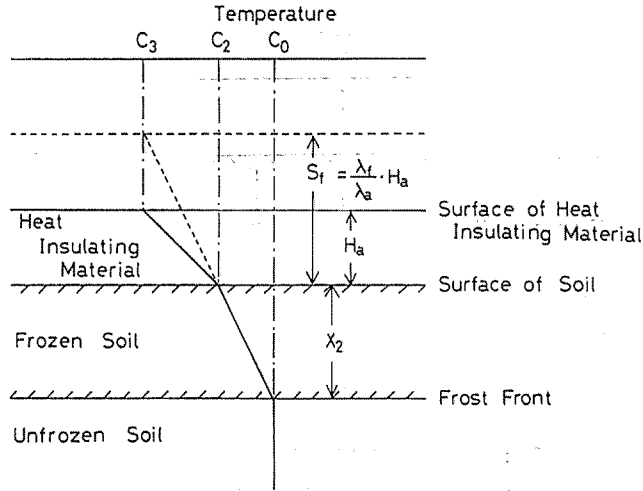
$$\lambda_a \frac{C_3 - C_2}{H_a} = \lambda_f \frac{C_2}{X_2} \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 λ_a : 断熱材の熱伝導率 $\text{Cal}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}$

λ_f : 凍土の熱伝導率 $\text{Cal}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}$

H_a : 断熱材の厚さ cm

X_2 : 凍結深度 cm



- C_0 : Freezing Point (0°C)
- C_2 : Temperature of Soil Surface
- C_3 : Temperature of Surface of Heat Insulating Material
- S_f : Equivalent Depth of Frozen Soil to H_a in Heat Conduction
- λ_f : Heat Conductivity of Frozen Soil
- λ_a : Heat Conductivity of Heat Insulating Material
- H_a : Thickness of Heat Insulating Material
- X_2 : Depth of Frozen Soil

Fig. 6. Temperature distribution model covered with heat insulating material.

- C_3 : 断熱材の表面温度 $^{\circ}\text{C}$
- C_2 : 地表面温度 $^{\circ}\text{C}$

ここで,

$$S = \frac{\lambda_f H_a}{\lambda_a} \quad \dots\dots(4)$$

S : 断熱材の凍土等価層厚すなわち、凍土および断熱材の有効熱伝導率の比から断熱材を凍土に置き換えた場合の凍土の厚さ

とすると,

$$C_2 = \frac{X_2}{X_2 + S} C_3 \quad \dots\dots(5)$$

である。また(1)式から

$$L \cdot \rho \cdot dX = -\lambda_f \frac{C_2}{X_2} dt \quad \dots\dots(6)$$

(5)式, (6)式から

$$L \cdot \rho \cdot dX = -\lambda_f \frac{C_3}{X_2 + S} dt \quad \dots\dots(7)$$

これから

$$X_2^2 + 2SX_2 = -\frac{2\lambda_f}{L \cdot \rho} \int C_3 dt \quad \dots\dots(8)$$

ここで、 $C_3 = C_1$ 、すなわち、断熱材の表面温度が裸地の地表面温度に等しいとすると、(8)式の右辺は裸地での凍結深度 X_1 の2乗になる (2)式)。したがって、

$$X_2^2 + 2SX_2 = X_1^2 \quad \dots\dots(9)$$

これから

$$X_2 = -S + \sqrt{S^2 + X_1^2} \quad \dots\dots(10)$$

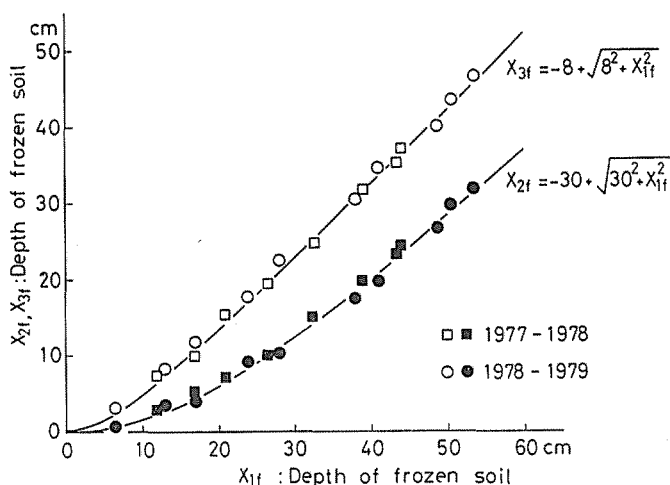


Fig. 7. Relation of $X_{1,f}$ - $X_{2,f}$ and $X_{1,f}$ - $X_{3,f}$
 $X_{1,f}$: Depth of frozen soil in bare ground
 $X_{2,f}$: Depth of frozen soil in grassland (Sasa nipponica)
 $X_{3,f}$: Depth of frozen soil in brush cutting area

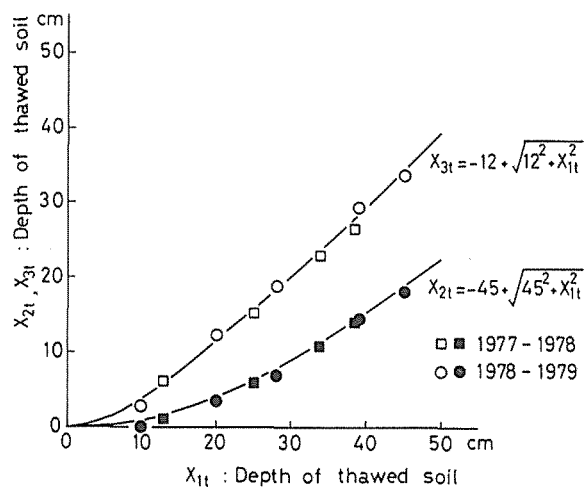


Fig. 8. Relation of $X_{1,t}$ - $X_{2,t}$ and $X_{1,t}$ - $X_{3,t}$
 $X_{1,t}$: Depth of thawed soil in bare ground
 $X_{2,t}$: Depth of thawed soil in grassland (Sasa nipponica)
 $X_{3,t}$: Depth of thawed soil in brush cutting area

の関係が導かれる。すなわち、断熱材の凍土等価層厚 S が分かれば、断熱材に被覆された土の凍結深度は、裸地での凍結深度から推定できる。

第7図は、裸地における凍結深度 $X_{1,f}$ と皆伐跡ササ地における凍結深度 $X_{2,f}$ およびカラマツ新植造林地における凍結深度 $X_{3,f}$ の関係を示したものである。この図で(10)式に適合するように皆伐跡ササ地およびカラマツ新植造林地における地表被覆物(ササやリター層など)の凍土等価層厚を求めると、それぞれ、30 cm および 8 cm となり、図中の実線で示した曲線となる。つまり、皆伐跡ササ地における凍結深度 $X_{2,f}$ およびカラマツ新植造林地における凍結深度 $X_{3,f}$ と裸地における凍結深度 $X_{1,f}$ との間には、それぞれ、

$$X_{2,f} = -30 + \sqrt{30^2 + X_{1,f}^2} \quad \dots\dots(11)$$

$$X_{3,f} = -8 + \sqrt{8^2 + X_{1,f}^2} \quad \dots\dots(12)$$

の関係があった。

同様に、裸地における融解深度 $X_{1,r}$ と皆伐跡ササ地における融解深度 $X_{2,r}$ およびカラマツ新植造林地における融解深度 $X_{3,r}$ の関係を示した第8図から、皆伐跡ササ地およびカラマツ新植造林地における地表被覆物の未凍土(融解土)等価層厚 S を求めると、それぞれ 45 cm および 12 cm となり、図中の実線で示した曲線となる。したがって、皆伐跡ササ地における融解深度 $X_{2,r}$ およびカラマツ新植造林地における融解深度 $X_{3,r}$ は、それぞれ、次式によって、裸地における融解深度 $X_{1,r}$ から推定することができる。

$$X_{2,r} = -45 + \sqrt{45^2 + X_{1,r}^2} \quad \dots\dots(13)$$

$$X_{3,r} = -12 + \sqrt{12^2 + X_{1,r}^2} \quad \dots\dots(14)$$

おわりに

下層植生(ミヤコザサ)やリター層などによる地表被覆下での凍結深度や融解深度は、それら地表被覆物の凍土あるいは未凍土(融解土)等価層厚を求めることによって、裸地での凍結深度や融解深度から推定できることが明らかになった。

今後は、立木による遮放射が、凍結深度や融解深度にあたる影響を量的に把握することによって、種々の林相のもとでの凍結深度や融解深度の推定も可能となるであろう。

文 献

- 1) 木下誠一：紋別における凍土観測，低温科学物理篇，26，363，(1968)
- 2) 矢作裕：凍結深計および相対凍上計について，釧路論集，8，77～88，(1976)
- 3) 竹内典之：東北海道における火山灰土の凍結と融解(I)，畑地土壌の凍結状況の季節変化，京大演報，52，117～129，(1980)
- 4) 東晃：北海道の土壌凍結—積雪との関係—，農業物理研究，13，145～157，(1954)
- 5) 中央気象台：雪の気候図，15 p.p. 日本積雪連合，東京，(1949)
- 6) Aldrich, H. P.: Frost Penetration below Highway and Airfield Pavements. Highway Res. Board, Bull. 135 (1956)

Résumé

It is wellknown that any type of ground cover reduces the depth of frost penetration. However, very few studies have been made to determine the actual extent by which a

ground cover soil freezing and thawing.

In this report, the author deal with some investigations on the penetration of soil freezing and thawing in a bare ground, in a grassland (*Sasa nipponica*) and in a brushcutting area. This investigation was carried out in Kyoto University forest in eastern Hokkaido (lat. 43°01', long. 143°58', alt. 35-140m) during winters of 1977-78 and 1978-79.

The results obtained from this investigation were as follows;

- 1) In both winters, the maximum depths of frost penetration were extremely greater in a bare ground than in a grassland (*Sasa nipponica*) and the defferences were more than 20cm.
- 2) The maximum frost depths did not vary a great deal between the bare ground and the brush cutting plots.
- 3) The depth of frost penetration (X_2) into the soil covered with a heat insulating material might be presumed from the following equation,

$$X_2 = -S + \sqrt{S^2 + X_1^2}$$

$S=30$ cm : in a grassland (*Sasa nipponica*)

$S=8$ cm : in a brush cutting area

where X_1 is the depth of frost penetration in a bare ground and S is a equivalent depth of frozen soil to a thickness of a heat insulating material in heat conduction.