

# 中国東北部興安嶺地域における凍土研究

## 2. 小興安嶺南部における土の凍結状況の季節変化

艾 軍・裴 学研・張 海濤・竹内 典之

Studies on the Soil Freezing and Thawing in Xing An Ling  
2. The seasonal aspects of soil freezing and thawing  
in southern Xiao Xing An Ling

Jun AI, Xueyan PEI, Haitao ZHANG and Michiyuki TAKEUCHI

### 要 旨

植生や落葉堆積層などによる地表被覆が土の凍結に与える影響を調べるために、裸地（測定区 I）、カラマツ人工林（測定区 II）およびチョウセンゴヨウを主とする針広混交天然林（測定区 III）において、メチレンブルー式凍結深度計を用いて、土の凍結深度および凍土の融解深度の測定を行った。

測定は、小興安嶺南部（中国東北部）に所在する東北林業大学凉水自然保護区において、1990～91年および1991～92年の冬季に行った。

測定結果をまとめると次のようになる。

- 1) 小興安嶺南部における季節凍土期間は10月下旬から6月中旬あるいは下旬で、実に8ヶ月すなわち1年の2/3近くも連続して地中に凍土層が存在していたことになる。
- 2) 最大凍結深度は、1990～91年の冬季には裸地186cm、カラマツ人工林160cm、チョウセンゴヨウを主とする針広混交天然林146cmであり、1991～1992年の冬季にはそれぞれ184cm、140cm、130cmであった。
- 3) カラマツ人工林では26cmおよび44cm、また、チョウセンゴヨウを主とする針広混交天然林では40cmおよび54cmも裸地に比べると最大凍結深度が浅く、林地における最大凍結深度は裸地における最大凍結深度の70～85%程度であった。
- 4) 裸地における2冬季の測定結果から求めた当地方における凍結深度係数  $\alpha$  は、3.8で、北海道各地で求められた  $\alpha=1.5\sim 3.0$  に比べると極めて大きな値となった。
- 5) 裸地における凍結深度  $X_{r1}$  と林内における凍結深度  $X_{r2}$  との間には、

$$X_{r2} = -S_f + (S_f^2 + X_{r1}^2)^{1/2} \quad (S_f = 40)$$

ここで、 $X_{r2}$ ：地表を落葉堆積層で被覆された林内の凍結深度

$X_{r1}$ ：地表が露出した裸地での凍結深度

$S_f$ ：落葉堆積層の凍土等価層厚で、落葉堆積層および凍土の有効熱伝導率の比から落葉堆積層を凍土に置き換えた場合の凍土の厚さ

の関係があった。

## はじめに

興安嶺地域およびその周辺部は、冬季には厳寒なシベリア気団の影響を強く受けるため気温が極めて低く、他の同緯度地域に比べると凍結指数は $1,000\sim 1,500^{\circ}\text{C}\cdot\text{Day}$ も大きい。また、夏季には、比較的低緯度地域に位置するうえに、この地域に向かって太平洋高気圧から吹き込む温暖多湿な季節風の影響により比較的气温が上昇する。そのため、これらの地域においては、冬季には土が地下深くまで凍結し、夏季には凍土の融解が地下深くまで進み、永久凍土地域ではその活動層厚が、また、季節凍土地域では最大凍結深度が極めて大きいのが特徴である<sup>1)</sup>。このような地域において合理的な森林開発計画、林道網整備計画などを立てるうえで、土の凍結の実態を詳細に知り、更に土の凍結深度や凍土の融解深度の季節変化の予測や制御の方法を知ることは重要である。

林地においては、地表を被覆している植生や落葉堆積層などの影響によって、土の凍結深度、凍土の融解深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十分に明らかにされているとはいえない。そこで、筆者らは、中国東北部興安嶺地域において、種々の地被条件下での土の凍結、凍土の融解に関する観測・研究を進めている。今回は、1990～91年および1991～92年の冬季に、裸地、カラマツ人工林およびチョウセンゴヨウを主とする針広混交天然林において得た土の凍結状況の季節変化について報告する。

## 1. 測定地の概況と測定項目および測定方法

## 1) 測定地の概況

測定は、中国東北部小興安嶺南部達里帯嶺支脈の東斜面に位置する東北林業大学凉水自然保護区（東経128度53分、北緯47度11分）において行った。海拔高は約400 mである。

当地域は永久凍土地域から季節凍土地域への移行帯にあたり（図-1）、永久凍土が島状に存

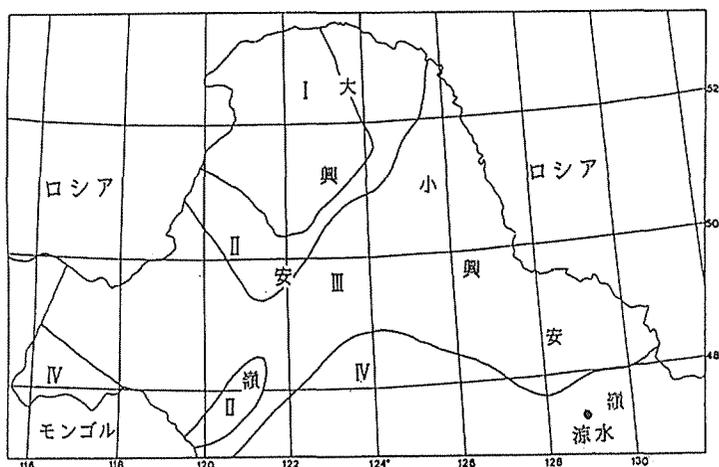


図-1 測定区の位置

- I : 連続永久凍土区
- II : 不連続永久凍土区
- III : 点在永久凍土区
- IV : 季節凍土区

在し、また、季節凍土と結合しない地下の永久凍土の存在も報告されている。気候は大陸性であり、冬季は寒さが厳しくその期間も長い。年平均気温は $-0.3^{\circ}\text{C}$ で、最低気温の記録は $-43.9^{\circ}\text{C}$ である。夏季は短く、9月末には降霜がみられ、無霜期間は3~4ヶ月で、降水の大半がこの期間にあり、年降水量は約676mmである<sup>2)</sup>。

測定は、次の3測定区において行った。

(a) 測定区I：裸地

(b) 測定区II：林齢70年のカラマツ人工林で、平均胸高直径45cm、平均樹高25mの比較的密な林分で、下層植生は極めて貧弱であり、林床は約7cmの厚い落葉堆積層に覆われている。

(c) 測定区III：チョウセンゴヨウを主とする針広混交天然林で、林冠が十分に閉鎖した林分で、下層植生は極めて貧弱であり、林床は約6cmの厚い落葉堆積層に覆われている。

## 2) 測定項目および測定方法

(a) 土の凍結深度および凍土の融解深度

各測定区にメチレンブルー式凍結深度計を3個づつ設置し、それらの測定値を平均して土の凍結深度および凍土の融解深度を求めた。

(b) 積雪深

凍結深度計の周囲4~5ヶ所で積雪深を測定し、それらの測定値を平均して積雪深を求めた。

なお、測定は10日毎に行った。

## 2. 測定結果および考察

測定区I（裸地）、測定区II（カラマツ人工林）および測定区III（チョウセンゴヨウを主とした針広混交天然林）における土の凍結深度・凍土の融解深度と積雪深の測定結果と涼水自然保護区気象観測露場の観測値を用いて計算した旬平均気温を図-2A（1990~1991年）とB（1991~1992年）に示した。

土の凍結深度に大きな影響を及ぼす気象要因としては、気温（積算寒度）と積雪深が考えられる。涼水自然保護区気象観測露場における観測値を用いて計算した2冬季の積算寒度は、 $2350^{\circ}\text{C}\cdot\text{Day}$ と $2380^{\circ}\text{C}\cdot\text{Day}$ でほぼ等しく、当地におけるほぼ平年値であった。また、積雪は2冬季とも極めて少なく、カラマツ人工林でやや多い傾向はあるが、積雪深が10cmを越えることはほとんど無く5cm前後であった。

### 1) 土の凍結状況の季節変化

2冬季とも10月下旬には日平均気温が氷点下の日が継続するようになり、夜間に形成された凍土層が日中にも融解しきらなくなり、凍結前線が徐々に地中に侵入を始め、凍土層厚が増大するようになった。その後の凍結侵入速度は、裸地と林地では異なり、また、寒さの度合いによって異なるようであるが、3月上旬あるいは下旬に最大凍結深度に達した。凍土層の融解は地熱によって凍土層の底面からも進んだが、融解速度は地表面からが格段に大きかった。地表面からの融解速度は、日射量や暖かさの度合いによって異なるようであるが、6月中旬あるいは下旬になってようやく地中の凍土層が完全に消失した。3測定区とも実に8ヶ月すなわち1年の2/3近くも連続して地中に凍土層が存在していたことになる。

表-1 3測定区においては2ヶ年の最大凍結深度 (cm)

測定地	年 度	
	1990~1991年	1991~1992年
裸 地	186 (100%)	184 (100%)
カ ラ マ ツ 人 工 林	160 ( 86%)	140 ( 76%)
チ ョ ウ セ ン ゴ ヨ ウ 天 然 林	146 ( 78%)	130 ( 71%)

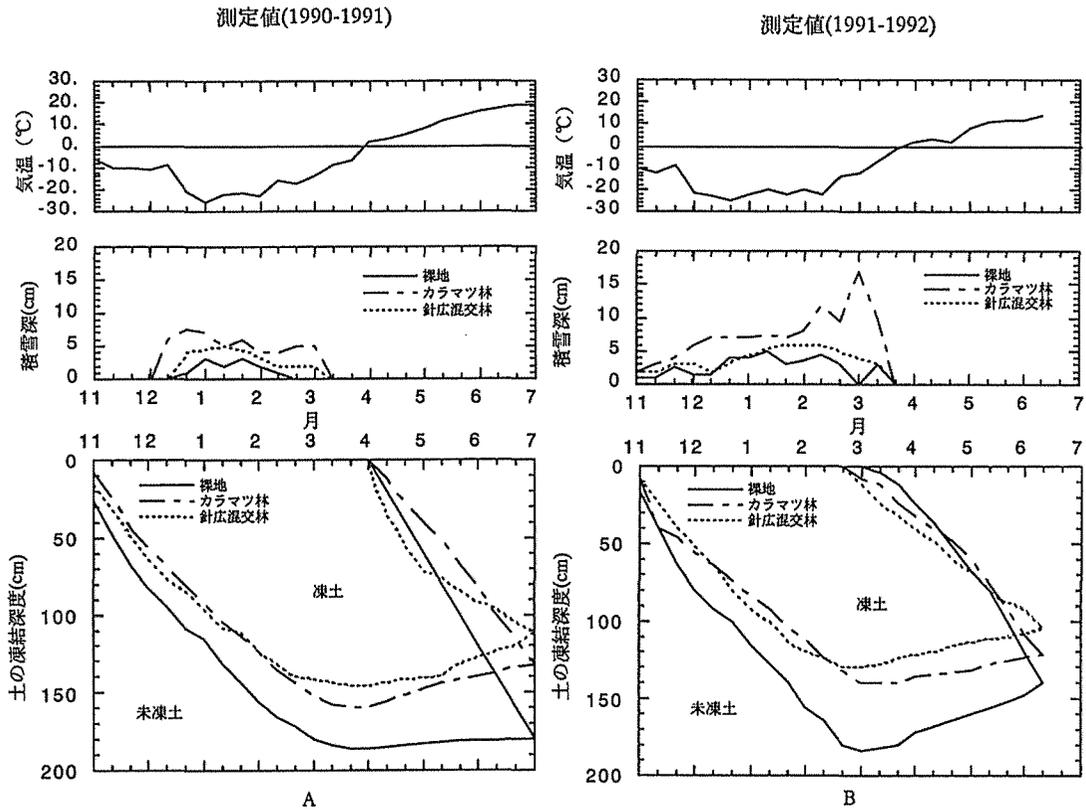


図-2 気温、積雪深、凍結深度の測定値

2) 最大凍結深度

表-1 に示したように、2 冬季の最大凍結深度は、裸地で最も深く186cmおよび184cmであり、カラマツ人工林では160cmおよび140cmであり、チョウセンゴヨウを主とする針広混交天然林で最も浅く146cmおよび130cmであった。林内の最大凍結深度は、いずれも裸地の最大凍結深度よりも浅く、裸地の最大凍結深度の71~86%であった。これは、林冠による遮放射の影響も考えられるが、落葉堆積層の断熱保温効果によるものであろう。

(a) 裸地における土の凍結深度

一般に季節凍土地域においては、土の凍結深度 Xcm の推定式として、

$$X = \alpha \cdot I^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで X：凍結深度

$\alpha$ ：凍結深度係数

I：積算寒度値で、日平均気温の結氷点以下の積算値の絶対値

の関係が使われている<sup>2)</sup>。凍結深度係数  $\alpha$  は気温の低下の緩急や土の熱的性質、水分状態など

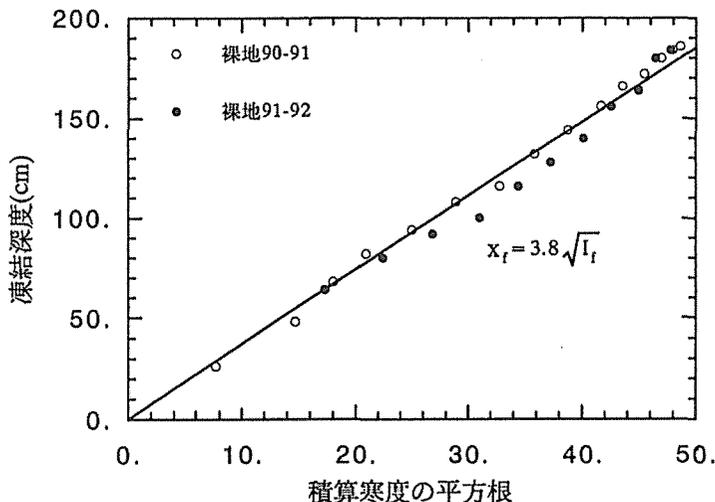


図-3 積算寒度と凍結深度との関係

で決まる常数で、それぞれの地域で固有の値をもつことが知られている。

積雪は熱伝導率が小さいため、地表面が積雪で覆われていると熱放散が妨げられ、積雪がある深さ以上になると土の凍結が進行しなくなる。したがって、自然積雪下では、(1)式をそのまま用いることはできない。しかし、東<sup>3)</sup>は、土の凍結停止限界積雪深を15cmとし、15cm以上の積雪になると土の凍結は進行しなくなるが、15cm以下の積雪は長期間の遮蔽効果がなく凍結の進行状態は裸地の場合と大差がないと報告している。2 冬季の積雪が極めて少なく、カラマツ人工林でやや多い傾向はあるが、積雪深が10cmを越えることはほとんど無く5 cm前後であったことから、ここでは積雪が土の凍結深度に与える影響はないものとした。

裸地における土の凍結深度と積算寒度の平方根の関係を示したものが図-3である。図中の直線は、

$$X = 3.8 \cdot I^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

を示したものであり、測定値に比較的良好に適合している。したがって、当地方における凍結深度係数は3.8ということになる。この値は、東<sup>4)</sup>や竹内<sup>5)</sup>らが北海道で求めた凍結深度係数  $\beta = 1.5 \sim 3.0$  に比べると極めて大きな値である。これは、土の含水量が  $0.2 \sim 0.3 \text{ g/cm}^3$  と極めて少ないため凍結時に放出される潜熱が少ないうえに当地方の冬季の気温低下が著しいことによるものであらうと考えられる。

(b) 林内における土の凍結深度

林内における地表面での熱収支は、林冠の遮放射や落葉堆積層の断熱保温効果によって、地表面が露出している裸地とは大いに異なるであろうということは容易に推察される。しかし、東北北海道における火山灰土の凍結に関する研究によると、土の凍結進行期には遮放射の影響は極めて小さいと報告されている<sup>6)</sup>。したがって、ここでは林冠による遮放射の影響は無視できるものとして、落葉堆積層の断熱保温効果が土の凍結に与える影響についてみることにする。

地表が断熱材で被覆されている場合の土の凍結深度は、

$$X_{f2} = -S_f + (S_f^2 + X_{f1}^2)^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

- ここで、 $X_{f2}$  : 地表を断熱材で被覆した場合の凍結深度
- $X_{f1}$  : 地表が露出した裸地での凍結深度
- $S_f$  : 断熱材の凍土等価層厚で、断熱材および凍土の有効熱伝導率の比から断

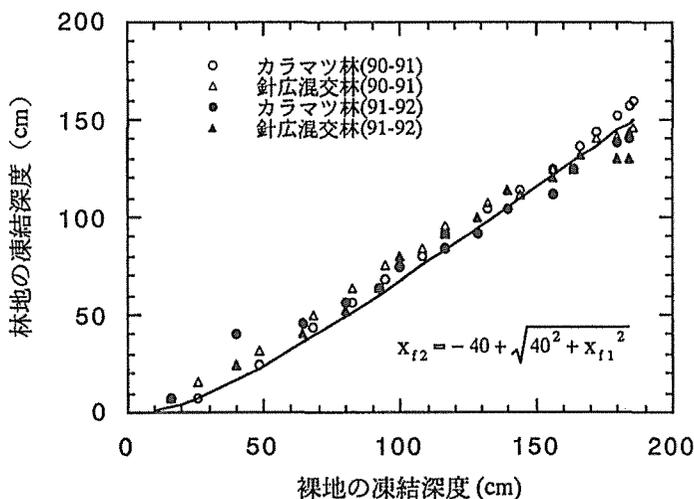


図-4 裸地の凍結深度と林地の凍結深度の関係

熱材を凍土に置き換えた場合の凍土の厚さ

によって与えられるとされている<sup>7)</sup>。

図-4は、林地における凍結深度の測定値  $X_{f2}$  と裸地における凍結深度の測定値  $X_{f1}$  の関係を示したものである。図中の曲線は、(3)式において  $S_f = 40$  とした場合の期待値を示したものであるが、図中の各点に比較的良好に適合している。

## おわりに

中国東北部小興安嶺南部に位置する東北林業大学涼水自然保護区において1990～91年および1991～92年の2冬季に得た測定結果から、土の凍結状況の季節変化と裸地および林内の凍結深度の推定法について報告した。

最大凍結深度が2 m 近くにも達する興安嶺地域においてもメチレンブルー式凍結深度計に若干の改良を加えることによって凍結深度、融解深度の測定が可能であることが検証された。今後は、さらに測定器具に改良を加え、測定の精度を高めることによって植生や落葉堆積層などによる地表被覆が土の凍結や凍土の融解に与える影響を明らかにしていきたいと考えている。

本研究を進めるにあたり助言をいただいた楊 潤田教授、劉 保仲教授、東北林業大学涼水自然保護区研究室の諸兄に、また、測定区の設定、測定などに多大な助力をいただいた東北林業大学涼水自然保護区の職員各位に感謝の意を表します。

## 引用文献

- 1) 竹内典之・酒井徹朗・楊 潤田 (1991) 中国東北部興安嶺地域における凍土研究(1)興安嶺地域における永久凍土の分布状況. 京大演報. 63
- 2) 東北林業大学 (1984) 涼水自然保護区基礎資料
- 3) 東 晃 (1954) 北海道の土壤凍結——積雪との関係——. 農業物理研究. 13
- 4) 東 晃 (1981) 寒地工学基礎論. 古今書院 (東京)
- 5) 竹内典之 (1980) 東北北海道における火山灰土の凍結と融解(1)畑地土壤の凍結状況の季節変化. 京大演報.

- 6) 竹内典之 (1984) 東北海道における火山灰土の凍結と融解(I)土の凍結深度および凍土の融解深度の推定. 京大演報. 56
- 7) 竹内典之 (1981) 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. 京大演報. 53

## 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 reduces soil freezing and thawing.

In this report, the authors deal with some investigation on the penetration of soil freezing and thawing in a bare ground, in a larch plantation and a natural mixed forest. This investigation was carried out in the Liang Shui Experimental Forest of Northeast Forestry University in southern Xiao Xing An Ling (lat. 47° 11', long. 128° 53', alt. 400m) during winters of 1990-91 and 1991-92.

The results obtained from this investigation were as follows;

- 1) The continuous frost began to penetrate in late October and emerged completely in mid or late June.
- 2) In both winters, the maximum depths of frost penetration were greater in a bare ground than in a larch plantation or a natural mixed forest.
- 3) In bare ground, the frost depth might be presumed from the following equation,

$$X = 3.8 \cdot I^{1/2}$$

where I is Freezing Index Value.