

論文

長期観測に基づく積雪下の土の凍結融解特性

原田裕介^{1),2)*}, 土谷富士夫³⁾, 武田一夫³⁾, 宗岡寿美³⁾

要 旨

北海道東部地域の1定点(帯広畜産大学構内)で, 1981~2006年度冬期に土の凍結深と積雪深の観測を実施し, 積雪下の土の凍結融解特性を分析した。その結果, 年最大凍結深は, 26冬期に5~55 cmと年毎に大きく異なった。凍結深は, 積雪深に影響され, 積雪深が20 cmに達するまでの積算寒度の平方根に比例することを確認した。一方, 凍土の融解は, 地中からの熱流の影響もあるが, 根雪期間完了ごろに地表面から急速に進行する。そして, 3月下旬から5月上旬までに凍土は完全に消失した。この凍土が消失する深さは, 根雪期間完了日から凍土消失日までに降雨や表土の再凍結がなければ, その間の積算暖度の平方根に比例することが示された。これらの関係を用いて, 帯広測候所の気温と積雪深データから1961~1980年度の最大凍結深や凍土消失日の予測結果を加え, 46冬期の長期特性を考察した。初冬の積雪の増加, 最深積雪の増加, 1991年以降の凍結指数減少などにより, 最大凍結深は減少し, 凍土消失日は4月中旬から上旬へ早まる, この半世紀の傾向が明らかになった。

キーワード: 長期観測, 凍結深, 土の凍結, 積雪期間, 凍土の融解

Key words: long-term observation, frost depth, ground freezing, snow cover period, thawing of frozen soil

1. はじめに

北海道東部地域(以下, 道東地域)は, 冬期寒冷で積雪が比較的少なく, 土の季節凍結地帯に分類される。凍土の消失時期は, 冬期の気象条件や場所の差異により, 3月上旬から5月中旬以降にも及ぶ。

融雪期に土の凍結が残存する場合には, 凍土層は不透水層となり, 融雪水が地表面に滞留する。大規模農業が営まれているこの地域では, 大型機

械による春期の耕起・播種・移植などの作業は, 畑地での凍土の融解が完了し, 土の排水が終わり, 乾燥が進行してから開始される。このため, 農作業の開始に, 凍土の融解が完了する凍土消失日の推定が重要になる。

冬期における積雪時期や積雪深は, 凍結深や凍結期間だけでなく, 凍土消失日にも影響を与える。例えば, 図1に示す1990年度では, 土の凍結は積雪深が比較的小さい初期の段階で速く進行し, 積雪深が大きくなるのにしたがって, その進行が抑制され停滞する。また, 根雪期間の終了前後に, 地中からの熱流の影響により下面の融解もあるが, 凍土は地表面から融解が急速に始まる。このときを凍土の融解開始日とする。さらに, 融解が進み, ある深さで完全に消失する。この深さを, 凍土消失深さとする。

無積雪下における一冬の最大凍結深の予測には, 種々の式が示されてきた。一般に, 道路を設

1) 岩手大学大学院連合農学研究科

〒020-8550 盛岡市上田3丁目18番8号

2) 社団法人雪センター

〒103-0012 東京都中央区日本橋堀留町1丁目3番17号

* 現在の所属: (株)アルゴス北海道支店

〒063-0803 札幌市西区二十四軒3条4丁目 第三栄輪ビル4F

3) 帯広畜産大学

〒085-8555 帯広市稲田町西2線11番地

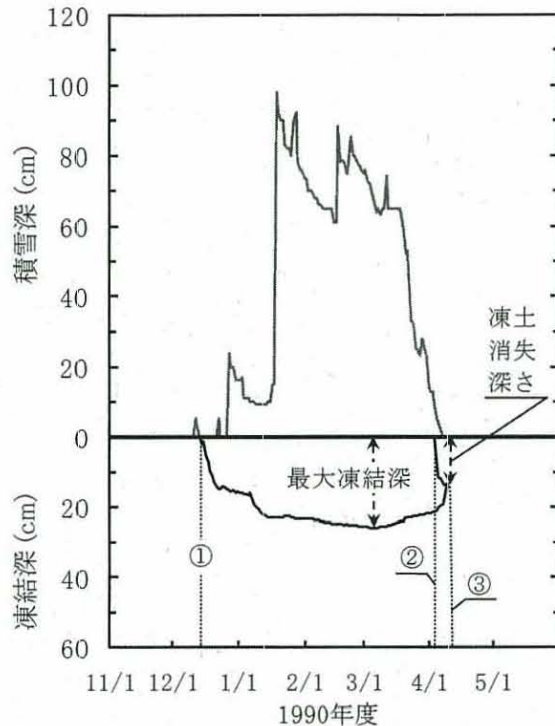


図 1 典型的な積雪深と土の凍結融解の季節変動。
 ①: 土の凍結開始日 ②: 凍土の融解開始日
 ③: 凍結消失日

計・施工するとき、下記に示す修正 Berggren 式がよく使用される (Aldrich, 1956)。

$$D_{\max} = \lambda \sqrt{(2k/L)F} \quad (1)$$

ここで、 D_{\max} は最大凍結深、 λ は補正係数、 k は未凍土および凍土の平均熱伝導率、 L は水の凍結潜熱、 F は冬の凍結期間内における氷点下の温度の大きさとその継続時間の積である凍結指数 (日本雪氷学会編, 1990) を示す。この式によると、無積雪下における最大凍結深は、凍結指数と土の熱伝導率の平方根に比例し、水の凍結潜熱の平方根に反比例する。すなわち、ある程度凍結が進んだ後、一定の積雪深下における凍結深の推定には、積雪深と雪の熱伝導率が重要な役割をもつことを示している (Andersson, 1964)。その後も、積雪深を考慮した凍結深の予測式がいくつか検討され、土の凍結の進行が止まる積雪深の目安に、北海道では 15cm (東, 1961) や 20cm (福田, 1982)、中国東北部では 20~50cm (山崎ら, 1998) が提案されてきた。また、道東地域では、アルファルファ栽培農地を対象とした 24 地点の調査結果をもとに、

最大凍結深 D_{\max} (cm) と、積雪深が 20 cm に達するまでの 0°C 以下の日平均気温を積算した値、積算寒度 F_{20} ($^{\circ}\text{C day}$) との関係が次式で表わされてきた (土谷, 2001)。

$$D_{\max} = \alpha \sqrt{F_{20}} \quad (2)$$

ここで、 α は土の種類や熱的性質などによって決まる係数であり (福田・石崎, 1980; 土質工学会編, 1994)、当該箇所では平均値 2.48 が示されている (土谷, 2001)。

一方、凍土の融解は、凍結に用いた式 (1) の修正 Berggren 式を用いて、凍結指数を積算暖度 (根雪期間完了日から凍土消失日までの日平均気温の正値を積算した値) に置き換えて扱われている (Johnston, 1981)。理論的に導き出されているが、実施例は凍結に比べて少ない (例えば、Nixon and McRoberts, 1973)。その理由として、土の凍結は熱伝導が主な支配因子であるのに対し、凍土の融解は熱伝導の他に融雪水の浸透による因子なども加わって均一になりにくいいため、予測が難しいことが挙げられる。

本研究では、道東地域の 1 地点における 1981~2006 年度冬期の長期観測データを用いて、積雪と土の凍結融解特性を明らかにして、凍土消失日の推定方法を示した。また、ここで導き出した手法を用いて、1961~1980 年度冬期の気象データから土の凍結融解を予測し、46 冬期の長期的な積雪、寒さ、土の凍結融解の変動傾向を明らかにした。

2. 観測の概要

観測は、道東地域の十勝地方に位置する帯広畜産大学構内の実験圃場 ($\text{N}42^{\circ}52'24''$, $\text{E}143^{\circ}10'16''$, 標高 76 m) で行った。この圃場では、積雪深と凍結深の季節変動を 1981 年度から同一箇所まで連続観測している。土は樽前系火山灰で、火山灰質粘性土に分類される土質であり、液性限界値は約 50% に相当する。地下水位は深さ約 5 m に位置する (土谷, 1979; 土質工学会編, 1990)。

観測項目は、凍結深、積雪深、気温、降水量の 4 つである。凍結深はメチレンブルー凍結深計 (日本雪氷学会北海道支部編, 1991) を、積雪深は雪尺を用いて冬期間毎日午前 9 時に観測した。気



図 2 帯広畜産大学構内の実験圃場。

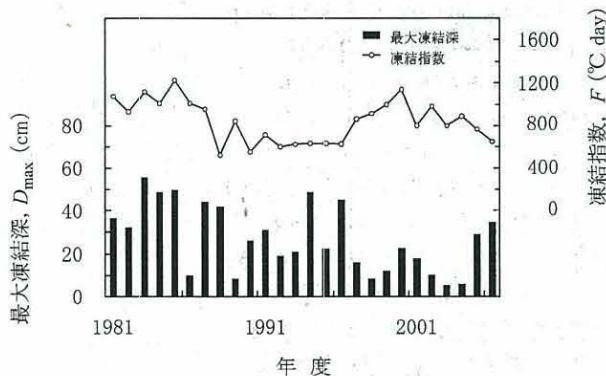


図 3 最大凍結深 D_{max} と凍結指数 F の経年変化。

温は、白金抵抗体センサーを用いて、構内百葉箱内で毎時自動計測した。降水量は、転倒ます型雨量計を用いて、毎時自動計測した(図2)。なお、冬期観測年度は当年11月1日から翌年5月31日を対象とした。

3. 観測結果

3.1 土の凍結の長期傾向

3.1.1 凍結指数と最大凍結深の経年変化

1981~2006年度に観測した、冬期における凍結指数 F ($^{\circ}\text{C day}$) と最大凍結深 D_{max} (cm) の経年変化を図3に示す。1981~1987年度の7冬期は、凍結指数の平均値 1046°C day で寒冷であった。このとき、最大凍結深の平均値は 39.2cm であり、寒冷な気候に伴って土の凍結も深くなった。つぎに、1988~1996年度までの9冬期は、概ね暖冬傾向であり、凍結指数の平均値も 639°C day であった。しかし、これら最大凍結深の平均値は 29.0cm であり、暖冬のわりには比較的深くまで凍結した。1997~2004年度までの8冬期は、再び寒冷であり、凍結指数の平均値は 922°C day であった。にもかか

わらず、最大凍結深は $4.8\sim 22.5\text{cm}$ の範囲にあり、この間の土の凍結は深く進行しなかった。2005~2006年度の2冬期を見ると、凍結指数の平均値は 707°C day で、1997~2004年度よりやや暖冬傾向になっているが、最大凍結深の平均値は 31.4cm と大きくなった。以上の結果から、最大凍結深 D_{max} と凍結指数 F との間には、相関係数 0.05 ($p > 0.9$) で相関性は認められなかった。

3.1.2 土の凍結期間と根雪期間の経年変化

最大凍結深は、凍結指数に依存しない一方、土の凍結期間は根雪期間に影響されることが予想される。特に、根雪期間の中でも凍結深を大きくする初冬の少積雪期間が長いほど、また積雪深が大きくなった後の積雪期間が長くなるほど、凍結期間は長くなる。土の凍結に影響を与えなくなる積雪深は、その場所の寒さにもよるが、経験的にまた3.2の解析で述べるように、道東地域では 20cm を採用した(福田, 1982; 土谷, 2001)。そこで、土の凍結期間、根雪期間、積雪深 20cm 到達日、および凍土の融解開始日の経年変化を図4に示した。これらの期間は、年毎に異なり、土の凍結開始から積雪深 20cm 到達日までの日数が長いほど、凍土の融解期間も長くなる傾向がある。積雪深 20cm 到達日は、1981~1996年度には12月と1月で約50%ずつの発生頻度であったが、1997~2005年度にはすべて12月末までに発生していた。凍土の融解開始日は、1988年を除くすべての年度で3月下旬から4月中旬までに観測され、その多くが根雪期間完了の前後5日間に発生している。凍土の融解期間は、1981~1996年度の平均は 10.7 日、1997~2005年度は 3.3 日であった。以上のことから、土の凍結は、寒さだけでなく初冬に積雪があれば抑制され、春期に積雪があれば凍土の融解を妨げる、いわば断熱効果をもたらす積雪の影響を受けやすいことになる。

3.1.3 土の凍結に影響する積雪の冬期特性

積雪の長期傾向をみるために、1981~2006年度の観測データと1961~1980年度の帯広測候所のデータを加え、積雪型を設定して積雪深の季節変動を分類した。積雪深 20cm の起日が、12月末日までと1月以降をそれぞれ早い、遅いと区別する。また、積雪深の多少は、根雪期間完了さらには凍土消失日にも影響するので、凍土の融解を特

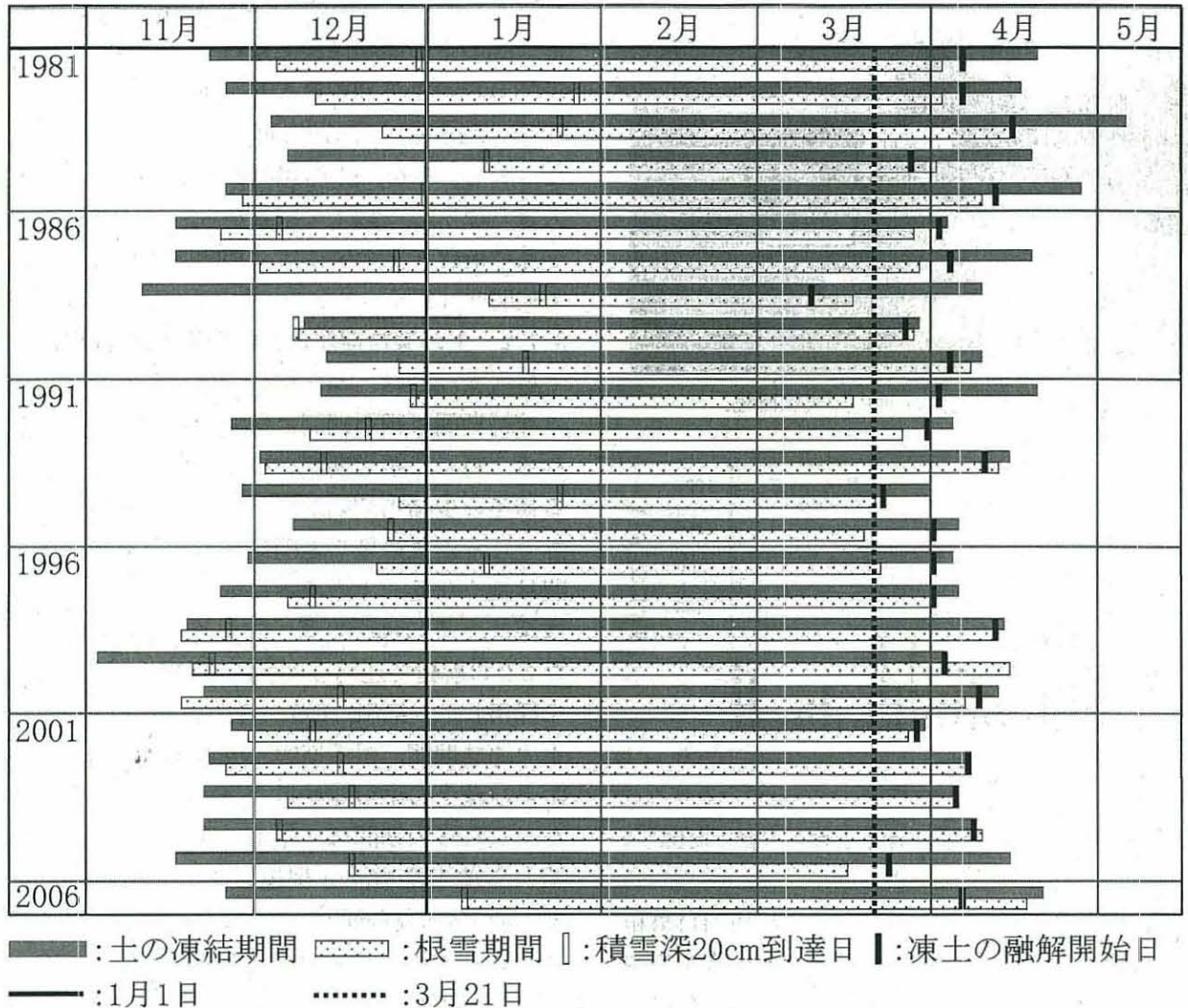


図 4 土の凍結期間と根雪期間の経年変化.

徴づける. 過去 46 冬期のデータを見ると, 最深積雪 50 cm を記録した冬の 94% が, 根雪期間完了日が 3 月 21 日以降になっている. このことから, 最深積雪 50 cm を境に, 50 cm 以上の冬を多雪, 50 cm 未満を少雪と呼ぶことにする. その結果, 積雪型を (a) 早少雪型, (b) 早多雪型, (c) 遅少雪型, (d) 遅多雪型の 4 つに分類した.

1961~2006 年度の積雪型を, 表 1 に示した. この内, 1981~2006 年度の観測データから, 積雪型の典型的な事例を積雪深と凍結深について図 5 に示したが, (c) 遅少雪型は該当年度がなかったため帯広測候所の 1964 年度のデータ (気象庁, 2007a) から積雪深のみを表した. (a) 早少雪型は, 1988 年度の例から, 12 月に最深積雪を記録し, 冬期全体が少雪であるため, 凍結深が大きい. (b) 早多雪型は, 2001 年度の例から, 12 月に積雪深 20 cm

を記録し, その後積雪深が増加するので, 凍結深も大きくなり冬期が終了する. 他の 3 種類と比較して, 凍結深が大きくなり難い型である. (c) 遅少雪型は, 1964 年度の例から, 12 月に積雪深が少なくまた冬期全体も少ないため, 仮に積算寒度が等しく推移するとき, 4 つの型の中で最大凍結深が最も大きくなる. (d) 遅多雪型は, 1982 年度の例から, 積算寒度や積雪深によっても異なるが, 凍結深が比較的大きくなる. この型は, 多雪で凍結深も大きく, 雪と凍土の融解に時間を要するので, 凍土消失日が遅くなりやすく, 農業分野では春期の農作業が遅れることから好ましくない.

3.2 土の凍結過程

土谷 (1986) は, 1982 年に多点観測により十勝地方の草地 24 ヶ所の凍結分布を調べたところ, 最大凍結深 D_{max} は積雪深 20 cm までの積算寒度

表 1 1961~2006 年度冬期の土の凍結融解に関わる観測値と計算値.

項目	積雪20cm 起日	F_{20} (°C day)	最大凍結深 D_{max} (cm)		最深 積雪 (cm)	凍土消失 深さ D_d (cm)	根雪期間 終了日	融解期間の 積算温度 T_i (°C day)		凍土消失日		積雪型
			観測値	計算値				観測値	計算値	観測値	計算値	
1961	1月2日	172	-	32.5	43	22.7	3月1日	39.1	-	4月6日	(c)	
1962	1月3日	264	-	40.3	65	29.3	3月27日	50.5	-	4月11日	(d)	
1963	1月1日	143	-	29.6	22	20.2	2月29日	34.9	-	4月4日	(c)	
1964	1月4日	244	-	38.7	41	28.0	3月28日	48.2	-	4月13日	(c)	
1965	12月15日	91	-	23.7	65	15.2	4月7日	26.2	-	4月17日	(b)	
1966	1月12日	469	-	53.7	21	40.7	2月6日	70.2	-	4月10日	(c)	
1967	1月4日	299	-	42.9	36	31.5	3月6日	54.3	-	4月1日	(c)	
1968	2月1日	555	-	58.4	118	44.7	3月23日	77.1	-	4月16日	(d)	
1969	11月25日	14	-	9.3	177	2.9	4月18日	5.0	-	4月18日	(b)	
1970	1月14日	453	-	52.8	88	39.9	3月27日	68.8	-	4月12日	(d)	
1971	12月12日	57	-	18.8	132	11.0	4月7日	19.0	-	4月14日	(b)	
1972	11月28日	8	-	7.2	76	1.2	3月21日	2.0	-	3月30日	(b)	
1973	-	639	-	62.7	11	48.3	1月11日	83.3	-	4月15日	(c)	
1974	12月14日	123	-	27.5	80	18.4	4月13日	31.8	-	4月19日	(b)	
1975	12月17日	100	-	24.8	27	16.1	2月13日	27.7	-	4月11日	(a)	
1976	12月17日	103	-	25.2	63	16.4	3月17日	28.3	-	4月6日	(b)	
1977	1月19日	296	-	42.7	99	31.3	3月30日	54.0	-	4月18日	(d)	
1978	1月31日	466	-	53.5	90	40.5	3月21日	69.9	-	4月22日	(d)	
1979	11月18日	248	-	39.0	49	28.2	3月25日	48.7	-	4月9日	(a)	
1980	12月10日	42	-	16.1	51	8.7	3月24日	15.0	-	4月3日	(b)	
1981	12月30日	234	36.1	37.9	66	27.3	4月2日	47.0	4月19日	4月21日	(b)	
1982	1月21日	149	31.9	30.3	65	20.8	4月2日	35.8	4月16日	4月9日	(d)	
1983	1月24日	517	55.3	56.4	78	43.0	4月14日	74.1	5月5日	5月7日	(d)	
1984	1月11日	393	48.6	49.2	60	36.8	4月1日	63.5	4月18日	4月22日	(d)	
1985	12月31日	325	49.5	44.7	78	33.0	4月9日	57.0	4月27日	4月24日	(b)	
1986	12月5日	60	9.5	19.2	74	11.4	3月28日	19.6	4月3日	4月6日	(b)	
1987	12月26日	212	43.7	36.1	38	25.7	3月20日	44.4	4月18日	4月15日	(a)	
1988	12月21日	280	41.8	41.5	46	30.3	2月17日	52.3	4月9日	4月10日	(a)	
1989	12月8日	9	8.0	7.4	75	1.4	3月28日	2.4	3月29日	3月29日	(b)	
1990	12月27日	135	25.7	28.8	98	19.5	4月7日	33.7	4月9日	4月12日	(b)	
1991	12月29日	110	30.5	26.0	52	17.1	3月17日	29.6	4月19日	4月4日	(b)	
1992	12月15日	97	18.8	24.4	67	15.8	3月26日	27.2	4月4日	4月4日	(b)	
1993	12月13日	45	20.6	16.6	86	9.2	4月10日	15.8	4月14日	4月12日	(b)	
1994	1月24日	334	48.5	45.3	85	33.6	3月21日	57.9	3月31日	4月14日	(d)	
1995	12月25日	66	22.1	20.1	98	12.2	3月28日	21.0	4月5日	4月4日	(b)	
1996	12月23日	112	44.8	26.2	73	17.3	3月22日	46.2	4月4日	4月4日	(b)	
1997	12月11日	33	15.8	14.2	78	7.1	4月1日	12.3	4月5日	4月5日	(b)	
1998	11月24日	29	8.0	13.4	69	6.4	4月10日	11.0	4月13日	4月12日	(b)	
1999	12月6日	47	11.7	17.0	100	9.5	4月14日	-	4月3日	-	(b)	
2000	12月16日	157	22.5	31.1	111	21.5	4月6日	37.0	4月13日	4月12日	(b)	
2001	12月14日	118	17.7	26.9	88	17.9	3月27日	30.9	3月31日	4月2日	(b)	
2002	11月27日	21	10.0	11.4	107	4.7	4月7日	-	4月7日	-	(b)	
2003	12月18日	119	4.8	27.1	132	18.0	4月5日	-	4月5日	-	(b)	
2004	12月5日	16	5.5	9.9	106	3.5	4月9日	-	4月8日	-	(b)	
2005	12月18日	123	28.5	27.5	54	18.4	3月16日	31.8	4月14日	4月15日	(b)	
2006	1月7日	173	34.3	32.6	63	22.8	4月5日	39.3	4月21日	4月20日	(d)	

注 1) 1961~1980 年度の観測値は帯広測候所でのデータ (気象業務支援センター, 2007a).

その間の F_{20} は, そのデータを 1.4 倍し, 帯広畜産大学の観測値相当に修正したもの.

注 2) 1981~2006 年度の観測値は帯広畜産大学でのデータ.

注 3) F_{20} は, 積雪深が 20cm に達するまでの積算寒度.

注 4) 積雪型, (a): 早少雪型, (b): 早多雪型, (c): 遅少雪型, (d): 遅多雪型.

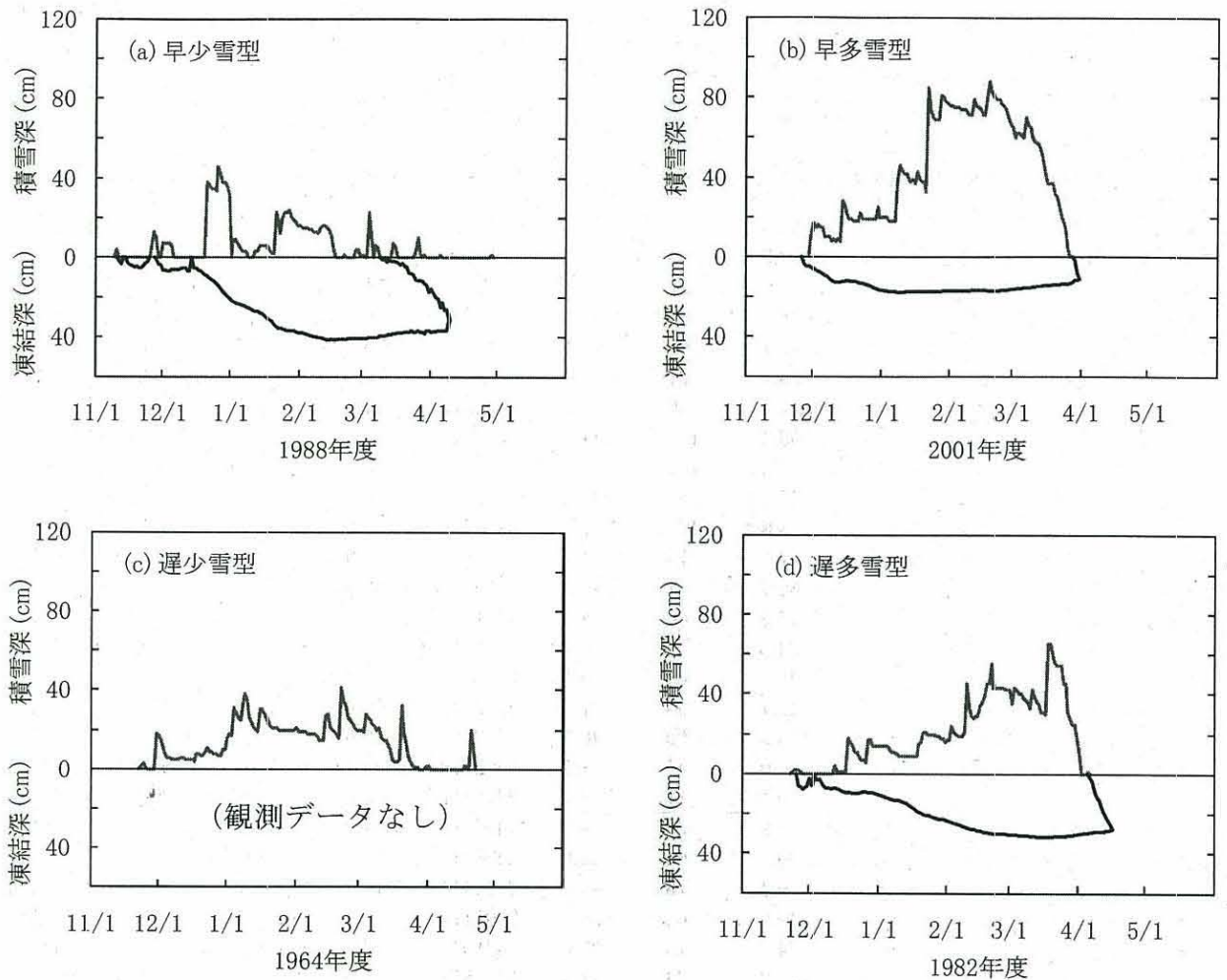


図 5 積雪深の季節変動の違いによる 4 種の積雪型.

(a) (b) (d) は帯広畜産大学観測値, (c) は帯広測候所観測値 (気象庁, 2007a).

F_{20} の平方根に比例することを示した. これに対して, 長期間に 1 定点で同様のことが成り立つか否かを確認するため, 最大凍結深 D_{max} と積算寒度 F_{20} との関係を図 6 に示した. なお, 2003 年度データは, 積雪深 20 cm 到達時の段階で土の凍結深が 0 cm であり, 積算寒度が凍結深に反映しないため除外した. 当該年度は, 根雪期間開始 3~5 日前に晴天が続き, それまでの凍結深 4.7 cm の凍土すべてが融解した. 以上の結果, 最大凍結深 D_{max} と積雪深 20 cm までの積算寒度 F_{20} の平方根との関係は, 式(2)で示されることが確認された. 係数 α は 2.48, 相関係数は 0.89 ($p < 0.01$) であった. なお, D_{max} と積雪深 depth (cm) までの積算寒度 F_{depth} との関係を以下に検討した. D_{max} と F_{15} (東 (1961)) との相関係数が 0.59 ($p < 0.01$), F_{25} との相関係数が 0.65 ($p < 0.01$) となり, それ以上の F_{30} , 最大積雪深

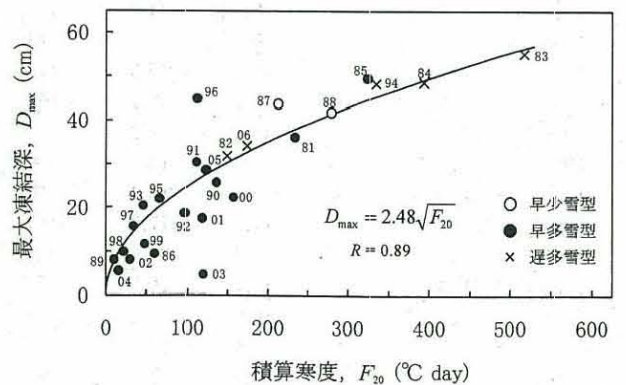


図 6 最大凍結深 D_{max} と積雪深 20 cm までの積算寒度 F_{20} との関係. 当該年度は下 2 桁の数字で表記.

までの積算寒度 F_{Smax} では相関係数はさらに小さくなった. このことは, 道東地域では相関係数の大きい F_{20} でまとめることの妥当性を示している.

3.1.3 で分類した積雪型を見ると, (c) 遅少雪型

を除く他の 3 種は, (b) 早多雪型の大半が F_{20} の約 160°C day より小さい範囲に, (a) 早少雪型は $200\sim 300^{\circ}\text{C day}$ に, (d) 遅多雪型は約 150°C day より大きい範囲に分布した. 少雪と積雪深 20 cm の到達が遅い場合に, 最大凍結深 D_{\max} が大きくなることを裏付けている.

3.3 凍土の融解過程

3.3.1 最大凍結深と凍土消失深さとの関係

一般に, 冬期の終わりには太陽高度が高くなり, 日射も強くなって, 凍土の融解の多くは地表面から下方へと進行する. そこで, 融解が進行し, 凍土が消失する深さ (凍土消失深さ D_d) を求めるため, 最大凍結深 D_{\max} との関係を図 7 に示した. なお, 凍結深が小さく根雪期間終了以前に凍土が消失した 1999, 2002~04 年度は対象外とした. 図 7 によると, D_{\max} と D_d との関係は, 次式で近似できる.

$$D_d = 0.85D_{\max} - 4.96 \quad (3)$$

相関係数は 0.95 ($p < 0.01$) であった. すなわち, 式 (2) で D_{\max} が決まれば, 式 (3) を用いて D_d を予測できることになる. また, (c) 遅少雪型を除く 3 種の積雪型による違いも, 概ね図 6 の傾向に一致している.

3.3.2 積算暖度と凍土消失深さとの関係

地表面からの融解は, 図 4 より根雪期間完了日前後に進行することが観測結果から確認されている. そこで, 根雪期間完了日から凍土消失日までの積算暖度 T_t ($^{\circ}\text{C day}$) と凍土消失深さ D_d との関係を図 8 に示した. ここでは, 根雪期間完了後に発生した積雪期間は T_t の値が変わらないとし, 積雪の融解が終わった後凍土の融解は進行するとして扱った. しかし, T_t と D_d との関係から大きく外れる 1991, 1994 年度のデータは, 後述 4.1 で原因を考察した. また, 根雪期間終了以前に凍土が消失した 1999, 2002~2004 年度を除外して, T_t と D_d との関係, 次式で表わした.

$$D_d = \beta\sqrt{T_t} \quad (4)$$

係数 β は 4.27, 相関係数は 0.83 ($p < 0.01$) であった. すなわち, D_d が式 (3) によって決まると, 式 (4)

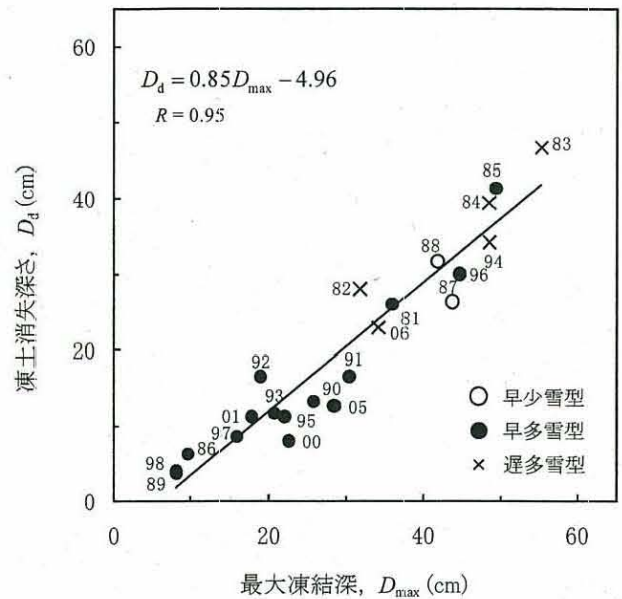


図 7 凍土消失深さ D_d と最大凍結深 D_{\max} との関係. 当該年度は下 2 桁の数字で表記.

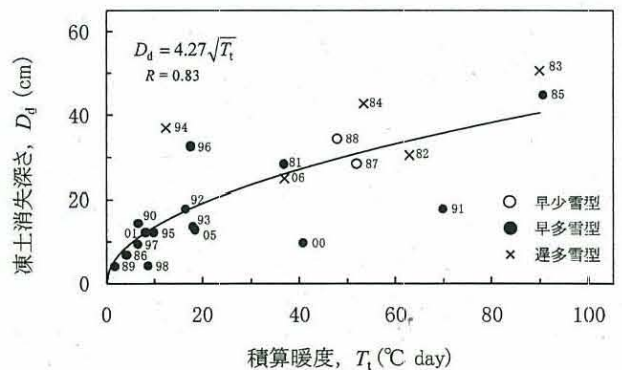


図 8 凍土消失深さ D_d と積算暖度 T_t との関係. 当該年度は下 2 桁の数字で表記.

を用いて凍土を融解するのに必要な T_t を求めることができる. 積雪型による分布の違いは, 図 6, 図 7 と同様の傾向になった.

4. 考察

4.1 凍土消失日の予測方法とその精度

帯広畜産大学での観測結果に基づいて, 凍土消失日の予測方法をまとめた.

冬期前半に発生する積雪深 20 cm までの積算寒度 F_{20} が示されると, 式 (2) から最大凍結深 D_{\max} を求めることができる. D_{\max} から式 (3) によって凍土消失深さ D_d が得られる. さらに, D_d から式 (4) によって, 根雪期間完了日から凍土の消失に必要な積算暖度 T_t を求めることができる. すなわち, 根雪期間完了日が観測で確定すれば, 過去の気温データを使って, 凍土消失日を予測することがで

きる。計算結果を表 1 に示す。

この方法で予測した計算値の精度を、観測 26 冬期の観測データと比較検討した。最大凍結深、凍土消失深さ、凍土消失日について観測値と計算値との差を求め、それぞれの平均二乗誤差の平方根を算出したところ、6.3 cm, 5.7 cm および 2.5 日になった。ただし、図 8 に示した適用できないものについて、その原因を検討した。1991 年度の計算値が実測値より 15 日早まったのは、根雪期間完了後 9 日間連続して日平均気温が 0°C 以下であったことが原因で表土の再凍結も考えられる。また、1994 年度の計算値が実測値より 14 日遅くなったのは、根雪期間完了直後に 12.0 mm の降雨があったためであると考えられる。このことから、新たな降雨や表土の再凍結がなければ、上述の精度で予測が可能になる。

4.2 凍土の融解に及ぼす影響因子

土の凍結過程、融解過程を、式(1)で与える修正 Berggren の式で考える。式(2)と式(4)の違いに着目すると、凍結過程の式(2)では式から外れるデータは少なかったが、融解過程の式(4)では外れるデータが多かった。土の凍結が熱的に比較的一様に起こることを考えると、凍土の融解は複雑で不均一に起こるといえるからである (Sharratt *et al.*, 1999; Iwata *et al.*, 2008)。例えば、融解過程は、根雪期間完了日以前の融雪水の停滞、完了日以降の降水や積雪・凍土融解水の凍土への浸透など、熱伝導以外の凍土の融解を促進する要因が多いことから、凍結過程の係数 $\alpha=2.48$ に比べて融解過程の係数 $\beta=4.27$ が大きくなる。このため、積算寒度 F_{20} と積算暖度 T_t を等価に扱ったとき、 β は α の 1.72 倍であるので、凍土消失深さ D_d の方が最大凍結深 D_{\max} より変化が大きいことになる。また、根雪期間完了日以降の新たな積雪による断熱、氷点下の日平均気温による表土の再凍結など、攪乱要因が加わるため融解過程が複雑になる。以上の結果、凍土消失日にバラツキが生じるものと思われる。

本来、Berggren の式は熱伝導による現象を表すものである。これらの係数は、土の種類の違いによる物理的性質、特に熱的性質の違いを反映したものであるとして扱われている (福田・石崎, 1980)。しかし、融解過程では、熱伝導に加えて上述した

融雪水の凍土への流入や融解水の凍土からの流出に伴う顕熱輸送があるため、熱伝導を扱う式(1)では本来扱うことはできない。現象を式(1)で近似的に扱うとしたら、係数 $\lambda\sqrt{k/L}$ の中の補正係数 λ か熱伝導率 k が見かけ上変わるとして扱うことになる。

4.3 土の凍結の長期特性

ここでは、自然積雪下における土の凍結の長期特性を調べた。4.1 に述べた手法が帯広測候所 (以下、測候所という) の気温・積雪深データ (気象庁, 2005a, 2005b, 2006, 2007a, 2007b, 2008) を用いて 1961~1980 年度にも適用できると仮定した場合、積雪深 20 cm までの積算寒度 F_{20} を計算し、最大凍結深 D_{\max} 、凍土消失深さ D_d を求めることができる。さらに、根雪期間完了日以降の積算暖度 T_t を計算すると、凍土消失日を求めることができる。ここで、帯広畜産大学 (以下、大学という) は、市街地にある測候所の南西約 6 km の郊外にあって気温が低い。このため、両者の 1981~2006 年度の凍結指数 F 、最深積雪、積雪深 20 cm までの積算寒度 F_{20} の相関を調べた。大学の F は、測候所に比べて 1.4 倍大きく、相関係数 0.96 の強い相関が得られた。大学の F_{20} は、測候所より早期に積雪深 20 cm に到達するため、測候所に比べて 0.84 倍小さく、相関係数は 0.74 になった。こうした違いを考慮して、測候所の値を大学の値に修正した。1961~2006 年度のすべての凍結指数と最大凍結深を図 9 に、これらと凍土消失日を合わせて表 1 にまとめた。

つぎに、1961~1980 年度は計算値、1981~2006 年度は観測値を使って、46 冬期間の長期特性を調

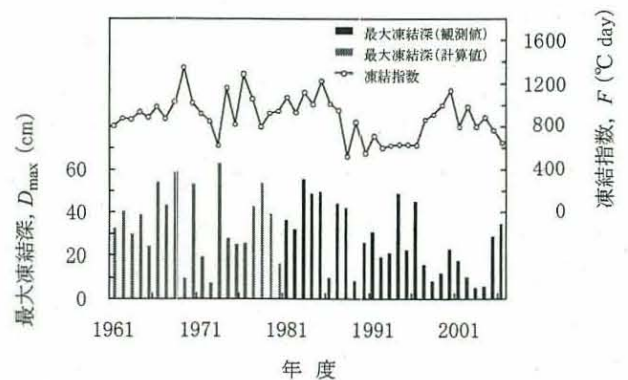


図 9 1961~2006 年度冬期の最大凍結深 D_{\max} と凍結指数 F の経年変化。

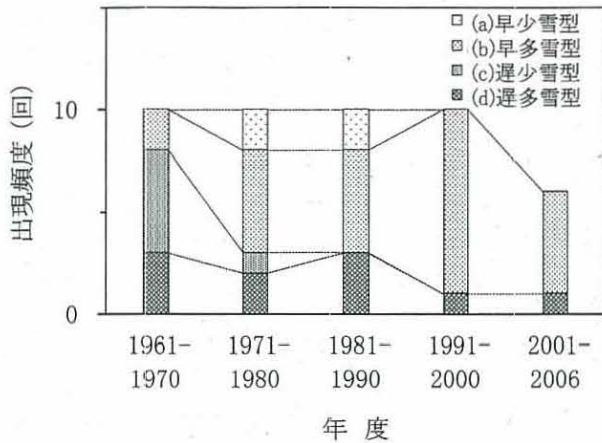


図 10 1961～2006 年度冬期の積雪型の出現頻度.

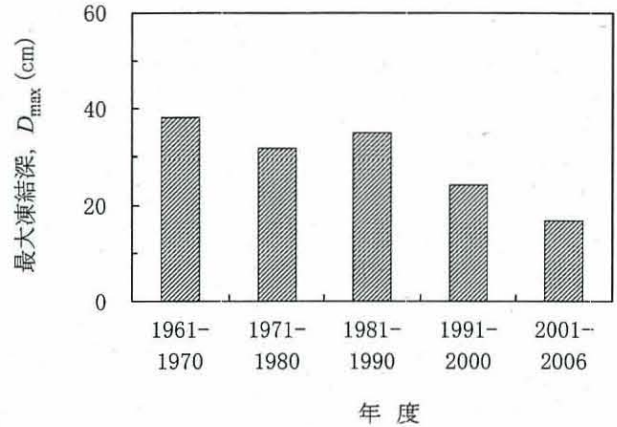


図 12 最大凍結深 D_{max} の 10 冬期毎の平均値.

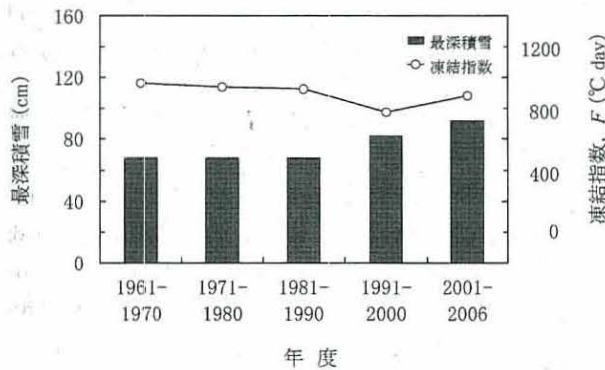


図 11 凍結指数 F と最深積雪の 10 冬期毎の平均値.

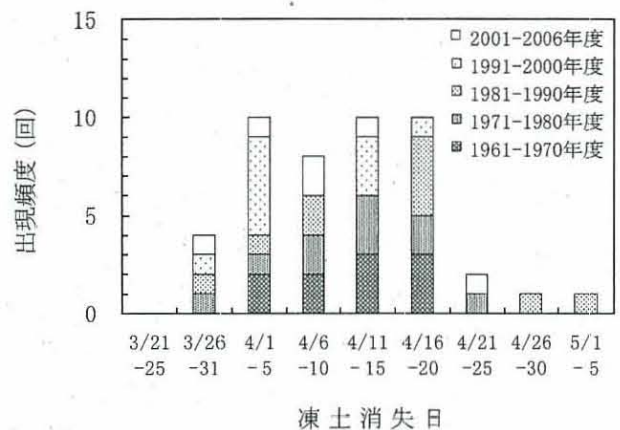


図 13 1961～2006 年度冬期の凍土消失日の出現頻度.

べた。雪氷データの長期特性を示す場合、年度ごとに変動の大きいことが示されている (本谷, 2008)。本論では、気象庁が発表する平年値が、10 年毎に更新されることを受け (朝倉ら, 1995)、1961 年度から 10 年毎の積雪型の出現頻度、平均凍結指数、平均最大凍結深、凍土消失日の出現頻度を求めた。ただし、2001～2006 年度は、6 冬期間とした。10 冬期毎の積雪型の出現頻度は、図 10 に示すように、(a) 早少雪型は 1970 年以前と 1990 年以降には確認されず、(b) 早多雪型は最も多く出現し、時間の経過とともに増加傾向にある。(c) 遅少雪型は 1981 年以降には確認されず、(d) 遅多雪型は減少傾向にある。次に 10 冬期毎の最深積雪を平均してみると、図 11 に示すように、1961～1970、1971～1980、1981～1990 年度がいずれも 68 cm になったのに対して、1991～2000 年度が 82 cm、2001～2006 年度が 92 cm と増加している。また、10 冬期の平均凍結指数は、1961～1990 年度が 924～962°C day であったが、1991～

2000 年度が 774°C day、2000～2006 年度が 879°C day と、寒さが和らぐ傾向にある。積雪深と凍結指数の 10 年変動に対して、10 冬期毎の平均凍結深は、図 12 に示すように、1961～1990 年度の 30 冬期が 31.7～38.2 cm であったのに対して、1991～2000 年度が 24.3 cm、2000～2006 年度が 16.8 cm と、減少傾向にある。同様の傾向は、同じ十勝地方の別の場所で凍結深を観測した例でも指摘されている (Hirota *et al.*, 2006)。凍土消失日は、46 冬期をまとめた図 13 のように、3 月 26 日以降に始まり、その多くが 4 月 1 日から 20 日の間に発生し、4 月 21 日以降は例外的に起こることが示された。4 月 1 日から 20 日までの中では、1961～1990 年度の 30 冬期は 4 月中旬に、1991～2006 年度の 16 冬期は 4 月上旬に多く出現した。

1970 年代の帯広は、測候所データから算出した凍結指数が 800°C day 台であり、北海道内でも寒い地域に属していた (福田・武田, 1976)。帯広は北海道内でも寒冷少雪地域の扱いではあるが、最

近の半世紀にその特徴が変わりつつあることが示された。

5. まとめ

道東地域の 1 定点で 1981~2006 年度冬期に積雪下の凍結深を観測し, 1961~1980 年度の計算値と合わせて土の凍結融解特性を分析し, 以下の結果が得られた。

- (1) 年最大凍結深は, 26 冬期に 5~55 cm と年毎に大きく異なり, 積雪深 20 cm までの積算寒度の平方根に比例することが確認された。また, 凍土の融解は 3 月下旬~5 月上旬に完了し, このときの凍土消失深さは最大凍結深から式(3)で求めることができる。この凍土消失深さは, 根雪期間完了日~凍土消失日の積算暖度の平方根に比例することが示された。
- (2) 冬期前半に発生する積雪深 20 cm までの積算寒度が計算されると, 最大凍結深が求まり, 凍土消失深さが得られるので, 根雪期間完了日が確定すれば, 積算暖度を計算して凍土消失日を予測できることが示された。
- (3) (2)の方法により, 1961~1980 年の帯広測候所の気象データ(気象庁, 2007a)を使って, 最大凍結深と凍土消失日を算出した。この計算値と(1)の観測値を 46 冬期まとめて, 凍結融解に関わる長期特性を 10 年単位で分析したところ, 冬期初期の積雪の増加, 最深積雪の増加, 1991 年以降凍結指数の減少などにより, 最大凍結深は減少し, 凍土消失日も 4 月中旬から月上旬に早まる傾向にあった。

季節凍土が確認される他地域でも, 土の凍結深の経年変化に同様の傾向があるのか, 興味をもたれるところである。

謝 辞

本稿を執筆するにあたり, 帯広畜産大学学生各位(当時)には, 現地観測等の実施に際して多大なご協力を頂いた。ここに記して感謝申し上げる。

文 献

Aldrich, H.P., 1956: Frost permanent below highway and airfield pavement. Highway Res. Bd. Bull., **135**, 124-149.

- Andersson, S., 1964: Physical studies in cultivated soil. IV. Studies of freezing frost depth and thawing in different arable soils with and without natural snow cover. Grundforbattering, **17**, 187-214.
- 朝倉 正・新田 尚・関口理郎編, 1995: 新版気象ハンドブック. 朝倉書店, 628pp.
- 土質工学会編, 1990: 土質試験の方法と解説. 土質工学会, 615pp.
- 土質工学会編, 1994: 土の凍結—その理論と実際—. 土質基礎工学ライブラリー **23**, 土質工学会, 310pp.
- 福田正己, 1982: 自然積雪下の土の凍結の深さの推定法について. 昭和 54-56 年度北海道大学特定研究経費研究成果報告書, 55-74.
- 福田正己・石崎武志, 1980: 平衡地表面温度による土壌凍結深推定モデル. 雪氷, **42**, 71-80.
- 福田正己・武田一夫, 1976: 北海道における昭和 49-50 年冬の積算寒度値の分布. 低温科学・物理篇, **33**, 資料集, 85-91.
- 東 晃, 1961: 北海道の土壌凍結, 積雪との関係. 農業物理研究所報告, 145-157.
- Hirota, T., Iwata, Y., Hayashi, M. Suzuki, S., Hamasaki, T., Sameshima R and Takayabu, I., 2006: Decreasing soil-frost depth and its relation to climate change in Tokachi, Hokkaido, Japan. J. Meteor. Soc. Jpn., **84**, 821-833.
- Iwata, Y., Hayashi, M. and Hirota, T., 2008: Comparison of snowmelt infiltration under different soil-freezing conditions influenced by snow cover. Vadose Zone Journal, **7**, 79-86.
- Johnston, G.H. (ed.), 1981: Freezing and thawing problems, permafrost-engineering design and construction. John Wiley & Sons, 164-169.
- 気象業務支援センター, 2005a: 地上気象観測再統計値 (CD-ROM).
- 気象業務支援センター, 2005b: 平成 16 年気象庁月報 (CD-ROM).
- 気象業務支援センター, 2006: 平成 17 年気象庁月報 (CD-ROM).
- 気象業務支援センター, 2007a: 地上気象観測統計値 (第 2 版) (CD-ROM).
- 気象業務支援センター, 2007b: 平成 18 年気象庁月報 (CD-ROM).
- 気象業務支援センター, 2008: 平成 19 年気象庁月報 (CD-ROM).
- 本谷 研, 2008: 東北地方における積雪水量の 27 年平均値と豪雪・寡雪. 雪氷, **70**, 561-570.
- 日本雪氷学会編, 1990: 雪氷事典, 古今書院, 196pp.
- 日本雪氷学会北海道支部編, 1991: 雪氷調査法, 北海道大学図書刊行会, 244pp.
- Nixon, J.F., and McRoberts E.C., 1973: A study of

- some factors affecting the thawing of frozen soils. *Can. Geotech. J.*, **12**, 429-439.
- Sharratt, B., Benoit, G., Daniel, J. and Staricka, J., 1999: Snow cover, frost depth, and soil water across a prairie pothole landscape. *Soil Science*, **164**, 483-492.
- 土谷富士夫, 1979: 熱伝導プローブ法によるホ場地温の推定, 帯広畜産大学研究報告, **11**, 529-539.
- 土谷富士夫, 1986: 十勝地方における火山灰土壌の凍結, 凍上が農地に及ぼす影響に関する研究. 北海道大学学位論文, 166pp.
- 土谷富士夫, 2001: 気象変動が土の凍結深さ及びその特性に及ぼす影響. 土の凍結と室内凍上試験方法に関するシンポジウム, 地盤工学会, 131-136.
- 山崎 剛・西田昭伸・近藤純正, 1998: 裸地・積雪地・植生地での凍土凍結深. 雪氷, **60**, 213-224.

Characteristics of ground freezing and thawing under snow cover based on long-term observation

Yusuke HARADA^{1),2)*}, Fujio TSUCHIYA³⁾, Kazuo TAKEDA³⁾ and Toshimi MUNEOKA³⁾

1) *The United Graduate School of Agricultural Sciences, Iwate University, 18-8, Ueda 3 chome, Morioka, Iwate 020-8550*

2) *Snow Research Center, 1-3-17, Nihonbashi-horidome-cho, Chuo-ku, Tokyo 103-0012*

* *Present affiliation: Hokkaido Branch, ARGOS Inc., Daisan-eiwa Building 4F, 6-7, 24ken-3jo-4chome, Nishi-ku, Sapporo 063-0803*

3) *Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine Nishi 2-11, Inada-cho, Obihiro Hokkaido 080-8555*

Abstract: Observations of frost and snow depths were conducted at the Obihiro University site located in eastern Hokkaido, Japan, from November 1981 to April 2007, and the characteristics of ground freezing and thawing under snow cover were analyzed. The results indicated that the annual maximum frost depth ranged from 5 to 55 cm during the 26 winters. Frost depth is influenced by seasonal changes in snow depth, and it was confirmed that it is proportional to the square root of the freezing index when snow depth reaches 20 cm. The thawing of frozen ground starts from the surface at the seasonal end of snow cover and finishes from late March to early May (last frost day). A linear relationship was found between the vanishing frost depth and the maximum frost depth. Further, the vanishing frost depth was found to be proportional to the square root of the thawing index. Based on these findings, the seasonal maximum frost depth, vanishing frost depth, and last frost day were calculated using meteorological data from 1961 to 1980 obtained from Obihiro Meteorological Observatory. Taken together, we can conclude that the annual maximum frost depth has decreased in the last half century and that the last frost day has shifted from mid to early April.

(2008年10月21日受付, 2009年1月24日改稿受付, 2009年4月3日最終改稿受付, 2009年4月14日受理, 討論期限2010年1月15日)