

気候変動が土の凍結深さ及びその特性に及ぼす影響

土谷富士夫 帯広畜産大学畜産環境科学科

1. はじめに

北海道のような寒冷地域では、冬期間に気温がマイナスになると、土の凍結が始まる。寒さが増加するにつれて土の凍結は進行するが、その深さは地域や年次によって大きく異なる。地域的気候の違いが土の凍結深さや凍上に大きな影響を及ぼしているからである。また、年次によっても冬の寒さが大きく異なることから、気候変動も多大な影響を与えると考える。このことから土木技術者等にとって、厳しい寒さの到来した年次は、地域変動以上にその対策に悩まされることがしばしば生じる。そして、数年に一度は道路建設などに凍結・凍上災害が発令されている。

寒冷地域では土の凍上は土木構造物などに大きな破壊力をもたらすことは良く知られている¹⁾。さらに、春期の融解期は、下方の凍結層によって排水が遅れ、地盤支持力が極度に低下する²⁾。このように、季節的凍結地帯では地域変動として土の凍結対策が捉られているが、年次変動に対する考慮が少ないのが現状である。近年の地球規模での気候変動のなかで年次変動を捉えるためには、多年にわたる観測結果が不可欠である。帯広畜産大学構内で20年間にわたり、同一地点での凍結深さの年次変化を観測してきたので、その結果を報告するとともに気候変動による特徴を分析することにする。

2. 土の凍結に影響を与える変動要因

凍結深さに影響を与える3要因は、マイナスの温度、土質、水分供給とされているが、さらにこれらの要因を詳細に記述すると、次のようになる³⁾。①凍結指数およびそのもとになる気温などの気象因子、②地被状態と地形(積雪、植生、地下水位)③土性および粒度組成(細粒分、有機質量、鉱物の種類)④土と水の熱的性質(鉱物粒子の比熱、体積割合、潜熱、熱伝導率)⑤間隙水の性質(不凍水量、溶解塩)である。この中で最も影響力が大きいものは、①と②の要因と考えられる。したがって、気象要因の冬期気温と積雪の問題を取扱うことにする。

凍結深さの推定は、熱伝導理論によって熱平衡に至る深さを凍結深さと想定して、計算から最大凍結深さを求める方法が一般的である⁴⁾。拡散方程式を用いた手法はBerggren(1943)によって開発され、AldrichとPaynter(1953)によって修正された下記の式を用いる⁵⁾。

$$D = \lambda \sqrt{\frac{2 \times 24 \times 60 \times 60 \times k \times F}{L}} \quad (1)$$

ここに、D: 最大凍結深さ (m)

F: 凍結指数 (°C・days)

k: 凍土と未凍土の平均熱伝導率 (W/m・°C)

L: 融解潜熱(MJ/m³) $L = 333.7 \times w \times \rho_d \times 10^6$ w: 含水比(%) ρ_d : 土の乾燥密度(Mg/m³)

$$\tau = \frac{v_0}{v_s} = \frac{v_0 t}{F} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{c_v}{L} v_s = \frac{c_v}{L t} F$$

ここに、熱比 τ と融解パラメータ μ の関数で飢え式から求まり、補正係数 λ は一般にはグラフから計算される⁶⁾。

Effect of Climate Change on frost penetration depth and feature of soil freezing

Fujio Tsuchiya (Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine)

KEY WORDS: frost penetration depth, climate change, frost action, snow cover

v_0 :年平均気温(°C)、 v_s :凍結期間中の平均気温(°C)、 c_v :土の体積熱容量(kJ/m³・°C)、L:潜熱(MJ/m³)、
t:凍結期間(days)

3. 凍結指数の変動と都市化影響

凍結指数はひとつ冬の凍結期間に対し、加積温度-時間曲線の秋期最高点と春期最低点との間の積算温度で表現される。計算が大変な時代や月平均気温しかデータが得られない時代の産物である。凍結指数は、日平均気温と0°C線との面積であるので、単純に日平均気温のマイナス値だけを積算しても問題はない。設計に用いる凍結指数は、過去30年間の最も寒い冬から3番目の冬に対する凍結指数を設計値とする。もし、30年の記録がない場合、最近10年の最も寒い冬の凍結指数を採用する。わが国では地表面温度の代わりに気温を用いるが⁷⁾、北米では、気温凍結指数と地面凍結指数とに分けられおり⁸⁾、両者の比は、*n-factor*と呼ばれ、設計には地面凍結指数が使用されている⁹⁾。

近年、暖冬化や気候変動の影響が懸念されるが、図-1に、最近20年間の帯広畜産大学と帯広測候所の気温から求めた凍結指数を示す。1998年度の冬から突然に暖冬化が始まり9年ほど続いたが、1997年度から次第に平年値に戻り始め、昨年の2000年度は、85年度に次ぐ寒冬になったことがわかる。暖冬化は必ずしも地球温暖化の影響とは考えられず、長い期間の単なる周期的変動によるものと思われる。他方、測候所のデータによる凍結指数は現地の観測値と著しい差があることが判明した。気象台や測候所の観測データは、都市化の影響を受けるために凍結指数は30%近く過小に評価される傾向にあった⁹⁾。したがって、凍結深さを推定しようとする地域は、現地実測値を基に、比例関係から設計凍結指数を求めることが望ましい。近年、道路の凍上被害が顕著になりはじめた理由のひとつに、凍結指数の過小評価が考えられる。

凍結指数と最も関係が深いものは、図-2に示すように、真冬日の日数であることが分かった。したがって、現地で日平均気温が得られない場合でも日最低気温が得られるならば、凍結指数の推定が可能である。ちなみに観測中、真冬日最小は1998年度の33日に対し、最大は1986年度の81日であった。

4. 最大凍結深さの実測値と推定値の比較

大学構内の火山性粘り土からなる実験圃場において、裸地状態で降雪を去除した条件で、メチレンブルー凍結深度計で測定した最大凍結深さを図-3に示した。実測は1988年度から13年間の最大凍結深さを示すものであるが、これに先に示したAldrichとPaynterの推定式で計算した結果を図-3に加えた。実測凍結深さは年次的に変動するが、最小値は1990年度の60.1cmで、最大は2000年度の81.1cmであった。土質条件は各深さの平均値を使用し、水分条件は同一と仮定し、熱伝導率は便宜上Kersten(1949)の式¹⁰⁾を用いた。推定値と実測値との比較をすると、推定値はいずれも実測値を平均12%程度上回り安全側に計算され、両者の相関を調べると決定係数0.787の比較的高い関係が得られることが判明した。実測値と推定値との違いは、主として土の水分状態の違いによるものと考えられるが、毎年凍結前の土の含水量の違いが熱的性質に影響を与えたものと推測される。

(2)式の熱比 τ は0.66から0.89の値を、融解パラメ

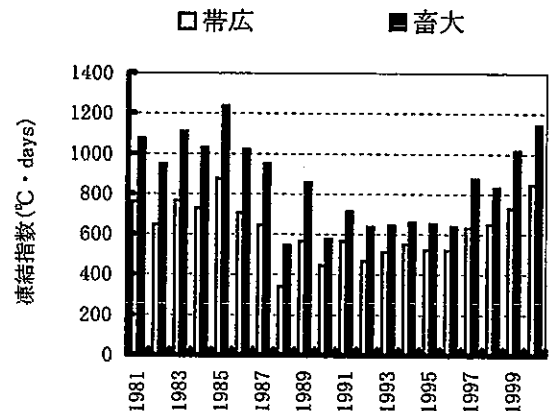


図-1 凍結指数の比較

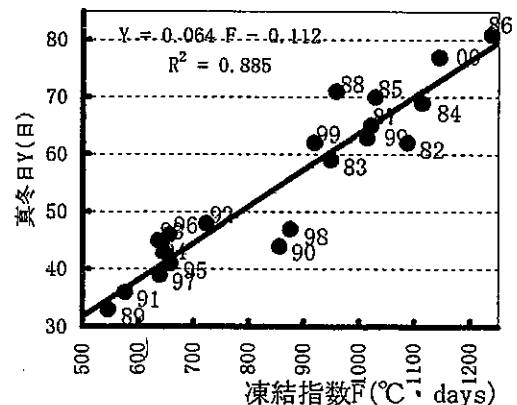


図-2 真冬日と凍結指数の関係

ータμは0.073~0.122の値となり、その結果(1)式の補正係数λは0.83~0.89の範囲の値となった。したがって推定値から求まる平均凍結係数は2.80になった。

実測最大凍結深さは年次によって変動し、今期2000年度が最大で81.1cmに達した。最も影響を与える要因は凍結指数であり、図-4に示すように13年間の測定値から計算される。凍結深さは凍結指数の平方根に比例することから、この平均凍結係数は2.4993となった。この数値から分かるように明らかに推定凍結深さの方が実測値より大きくなるのがわかる。

5. 日平均凍結速度と凍結特性日の変化

土の凍結進行は初期は急速に行われ、やがて緩やかに進行し最大値に達した後、春季に上部から急速に下部から徐々に融解する。この形状を凍結ウエッジと呼んでいるがその形状は各年異なった変化を示す。この初期の凍結進行は比較的直線的であるので、平均凍結速度を近似的に求めることができる。この速度の最小は1990年度の0.68cm/day、最大値は1989年度の1.186cm/dayであった。平均すると、日凍結速度は0.926cm/dayとなるが、この速度と最良の相関を示す気象要素を調べたが、ほとんどみつからなかった。が、多少1月の平均気温との良い関係が得られた。

次に、凍結開始日は年次によって変動するが、図-5に示すように平均すると12月2日になったが、1997年度以降凍結開始日が早くなる傾向がみられた。凍結開始日は日平均気温がマイナスになる日が数日続くかどうかで決定されるが、その期日の予測は難しい。他方、融解開始日であるが、図-6に示すようにほとんど傾向はみられないが、平均すると3月17日になる。融解開始は日中の気温がプラスになると発生するが、夜間また凍結する傾向にあるから、日平均気温がプラスになつてから融解は開始すると解釈するのが妥当と思われる。図-7に示すように、最大凍結深さに達する期日であるが、平均すると2月25日になるが、1995年以降は3月5日付近の遅めに発生する傾向がみられた。地上と地中の熱平衡によって生じるから、その期日予測は極めて難しいと思われる。

凍結が消失する深さは最大凍結深さより浅い位置にあることがわかるが¹¹⁾、その消失深さは年次によって異なる。平均すると凍結が消失する深さは最大凍結深さの約80%の位置に相当することが判明した。次に、凍結消失期日を

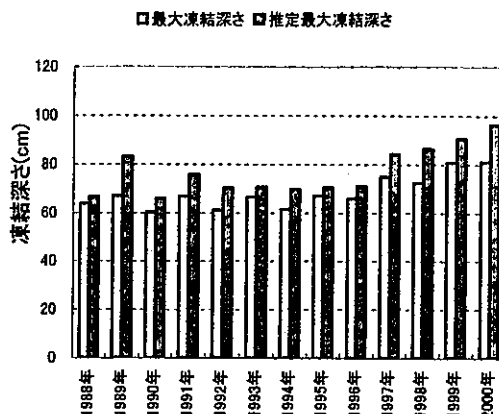


図-3 最大凍結深さの実測値と推定値

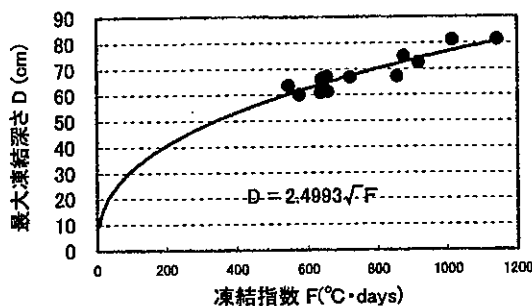


図-4 凍結深さと凍結指数の関係

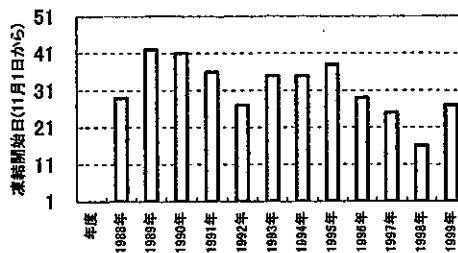


図-5 凍結開始日の比較

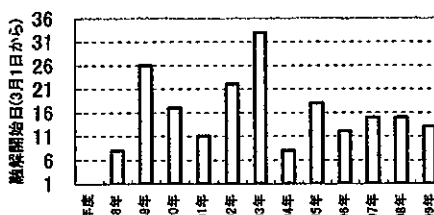


図-6 融解開始日の比較

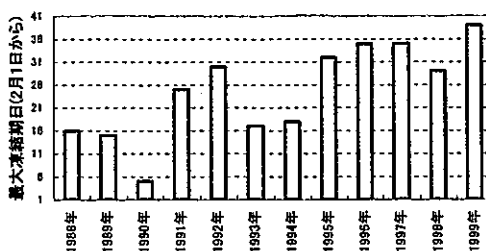


図-7 最大凍結深さの発生日

みると最も早い年は、1988年の4月4日、最も遅い年は2000年の5月7日であった。両者に約33日もの差がみられ、一般に深く凍結するほど凍結消失日が遅くなる傾向にある。凍結の消失は春季の温度上昇と降雨に大きく影響されると考える。融解開始日から消失日までのプラス日平均気温を加算したものを融解指数と呼び、凍結消失日との関係を求めたものを図-8に示した。凍結消失日は融解指数に強く影響され、両者の間に直線的傾向がみられることは興味深い。図-9に示すように融解指数は年次によってかなり異なるが平均値は、 $149^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$ であった。図-10に示すように土の凍結日数は平均149日であり、融解日数は平均38日であり、凍結日数が大きいほど融解日数も大きくなることは明白である。

6. 積雪の深さの気候変動

積雪の変動をみるため、寒候期の平均積雪深で表現してみると一定の傾向はみられなかった。気温のような暖冬傾向と結びつく積雪深の変化は見られなかった。ただ3月に発生したドカ雪と呼ばれる豪雪は1月に発生し易くなっていることがいえる。長期積雪の開始日は、平均的には12月13日になるが、年次による変動は極めて大きい。20年間で最も早い積雪は1998年の11月11日であった。最も遅かつ根雪は1985年の1月11日であるが、必ずしも凍結深さが最大であった年度ではない。十勝地方は平均の積雪深が最大な年でも、必ずしも最大積雪深の年とは限らない。図-11に最新積雪深の変動を示す。その年の最深積雪が発生する日は、年によって異なるが、1月に発生した場合は7回、3月に発生した場合は6回、2月が4回となっている。今期2001年は最も最新積雪深が大きく、しかも3月に発生した意外な特色を示している。20cm以上の積雪が早期に発生するとその断熱効果によって、土の凍結は大きく抑制され、その年度の最大凍結深さを決定することが知られている。

7. 積雪条件下の土の凍結深さ

実験圃場で1981年11月から20年間連続で自然積雪状態にある土の凍結推移をメチレンブルー凍結深度計で計測してきた。その結果、凍結開始日は平均すると11月29日になるが、最も早い年度は1988年11月11日で、

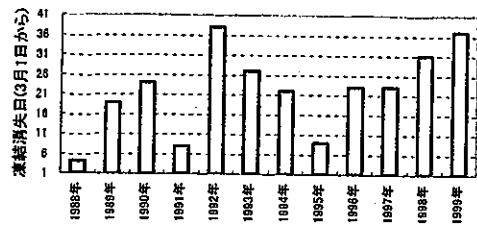


図-8 凍結消失日の比較

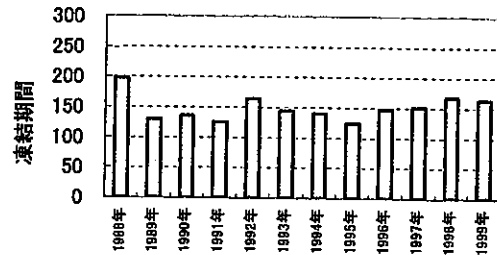


図-9 土壌の凍結期間日の比較

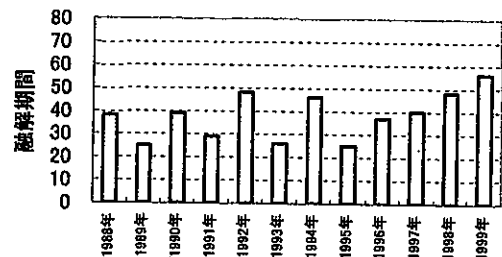


図-10 融解期間の比較

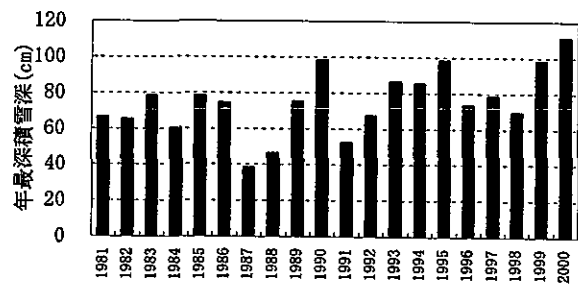


図-11 年最深積雪深

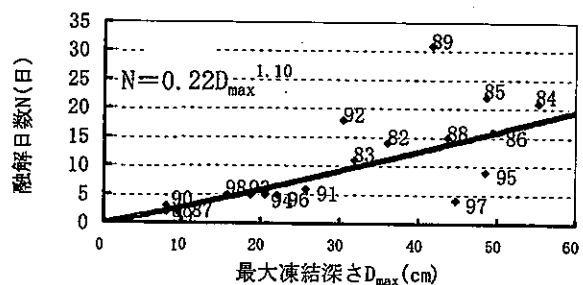


図-12 融解日数と最大凍結深さの関係

最も遅い凍結開始日は12月14日と、1ヶ月以上の差異があることが分つた。積雪の影響を受けるため、年度によつて最大凍結深さは異なるが、平均31.1cmで発生日は2月27日ごろとなった。しかし、最大凍結深さは年度によつて大きく異なり起日も早い年では、1999年1月26日に最大になった。3月27日に最大深さになる最も遅い1984年であり、2ヶ月程度の差異が生じた。凍結深さが大きいほど発生日は遅い傾向が見られるが、例外も二、三見られた。融解の完了する期日は平均すると4月11日になるが、最も早い年は1990年の3月29日で、最も遅くて1984年の5月5日であった。図-12に、最大凍結深さと融解日数との関係を示すと、凍結深さが大きいほど、融解日数は大きくなり、完了日は遅くなり傾向が明白にみられる。例えば、凍結深さが30cmであるなら、約9日かかる計算になる。しかし、先に述べたように、3月下旬から4月の積雪の有無や気温上昇程度によつても異なることから、気候変動によつて大きな影響を受ける可能もある。

積雪下の最大凍結深さを推定することは、極めて難しく従来のAldrichとPaynterら式を適用することはできない。従来の凍結指数が使用できないので長年の経験から、積雪深が20cmに到達するまでの積算寒度 F_{20} を提案してきた¹¹⁾。これらは、積雪20cmに達すると凍結が進行しない意味ではないが、便宜上有効であることから使用することとする。

よつて修正された下記の式を用いる⁵⁾。図-13は積雪深20cmに達する積算寒度 F_{20} の20年間の変動を示す。年次変動は極めて大きく、近年は根雪が早く積雪深も大きいため F_{20} の値は小さい傾向にあった。過去20年間の計測結果を図-14に示すと、最大凍結深さと積雪深20cmに達する積算寒度 F_{20} の平方根とは直線関係にあることがわかる。ここに、凍結係数を求めると、ほぼ2.48の値が得られた。積雪のない状態で得られた凍結係数2.4993の値に近いことがわかり、非常に興味深い。この係数は理論上、土の熱的性質から推測されるものであるから、積雪が有る無しに関係がない係数と推測される。この係数が同一地点では、ほぼ一定であることが長期間の観測で分かったが、地域が異なると変化すると考えられる。特に、平坦地と異なる傾斜値やのり面の向きによつても変化することが想定される。

8. 終わりに

同一圃場で長期に観測を行つてきた土の凍結深さの年次変動をまとめてみた。特に、近年地球温暖化の危惧が叫ばれる中、気候変動が起こり土の凍結深さやその特性に顕著な影響があるか検討してみた。1987年から今までにみられない冬期の暖冬化が続き、今後も続き凍結指数を小さくする傾向が懸念された。しかし、この3年で暖冬化は終わり、むしろ今年2001年の寒さは寒冬と呼ばれる部類に属する。この9年間の暖冬化は、むしろ気候変動の単なる周期的変化の一部と考えられる。しかし、土の凍結深さに最も大きく影響を与える凍結指数は、都市化の影響を受けるため気象官署のデータをもとに計算すると過小評価を示す危険が生じている。したがって、現地での気温の観測が不可欠であることを提唱する。また、従来から使用されてきた推定式の使用は、多少過大気味であるが十分実測値を反映することも判明した。しかし、凍結の開始日、最大凍結の期日、凍結消失日などの特性を予測することはかなり難しいことが分かる。これは、長期的観測値を蓄え、統計的手法に委ねるのも一方法と考える。

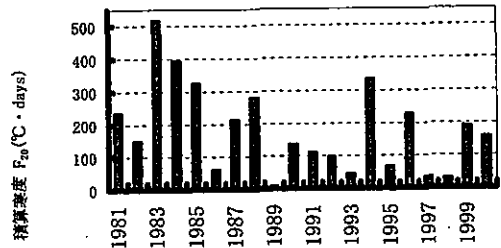


図-13 積雪深20cmまでの積算寒度

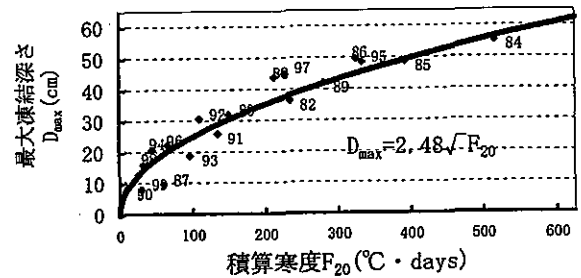


図-14 最大凍結深さと積算寒度 F_{20} の関係

積雪下の土の最大凍結深さの推定はかなり難しいが、20年間の実測値から F_{20} 、すなわち積雪20cmに到達するまでの積算寒度から予測できることが判明した。まだ、凍結係数の推定に問題は残るが、凍結・凍上対策の設計・施工計画に有効に利用されること期待する。

引用文献

- 1) 土質工学会編:土の凍結-その理論と実際(土質基礎ライブラリ-23), 地盤工学会, (1994)
- 2) 土谷富士夫:土の凍上災害と寒さ利用、地盤工学会北海道支部技術報告集、第38号、pp.75-82(1998)
- 3) Yong, R. N. and Warkentin, B. P.: Soil Properties and Behavior, Elsevier Sci. Pub. Co. pp.388-397 (1975)
- 4) Jumikis, A. R.: Thermal Geotechnics, Rutgers Univ. Press, pp.24-37(1977)
- 5) Aldrich, H. P. Jr. and Paynter, H. M.:Depth of frost penetration in non-uniform soil. U.S. Army CREEL special rep.104 (1966)
- 6) Phunka, A.: Frozen ground engineering, Prentice-hall Inc. pp.106-114(1985)
- 7) Andersland O. B. and Ladany B.:An Introduction to Frozen Ground Engineering, Chapman & Hall, (1994)
- 8) 日本道路協会: 道路土工排水工指針, 昭和62年版, pp.158-174(1987)
- 9) 土谷富士夫: 冬期の気候が農地の土壌凍結に与える影響、日本農業気象学会北海道支部講演会、pp.44-45(1999)
- 10) Farouki, O. T.: Thermal properties of soils, Trans Tech Publication, 102-119(1986)
- 11) 土谷富士夫: 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 (1986)