

AMeDAS データを用いた凍結深さの経時変化の推定手法

(Estimating Procedures of Sequential Changes of Frost Penetration
Depth Using AMeDAS Data)

武 市 靖¹⁾ (Kiyoshi Takeichi)
久 保 宏¹⁾ (Hiroshi Kubo)

キーワード：事例／統計的解析／凍結／道路／熱／舗装 (IGC : E 9)

1. ま え が き

北海道のような積雪寒冷地において、道路や飛行場の舗装、トンネルの覆工および用水路側壁部等の設計・施工を行う場合、凍上対策は不可欠である。凍上対策工法として一般的に採用されている置換工法では、置換厚さの決定が重要となる。置換厚さは通常、対象地域の凍結深さの実測値ないし推定値に基づき、供用性と経済性を考慮して決定されているが、経験値をそのまま適用している例も少なくない。いずれの場合も、最大凍結深さを根拠にしているもので、適切な設計・施工がなされれば、大きな凍上被害を受ける確率は少ないことが過去の実績から確認されている。

しかし、実際の設計・施工や調査・解析において、最大凍結深さのみならず凍結期間中の任意の時点での凍結深さやその経時変化が必要となる場合も比較的多い。例えば、除雪が十分になされない軽交通道路、山岳道路や、堆雪帯ないし自然積雪の状態におかれる法面保護工、擁壁、用水路、水道・ガスの埋設管等に対する凍上対策は、長期積雪前後の凍結深さが問題となる。すなわち、積雪の無い時期までの凍結深さに長期積雪後の凍結深さの増分を加えたものとして最大凍結深さを推定する必要がある¹⁾。平地部の自然積雪の断熱効果を考慮した凍結深さの推定については、実験式が提案されているが²⁾、道路や土木構造物の構築に当たっては、長期積雪状態の凍結深さを考慮して経験的な置換厚さを適用している場合が多く、理論的に明確にされていないのが実態である。また、積雪の少ない寒冷地での排水路用トラフの破損に見られるように、凍結初期の時点で凍害を受ける場合には、凍上量と凍結深さの経時変化を調べて、そ

の対策を検討しなければならない³⁾。このように、土木施設や構造物のおかれている自然環境条件の変化並びにそれらの重要度と投資効果等を考慮して、きめ細かな凍上対策を検討する際には、凍結深さの経時変化を比較的精度よく推定する必要がある。

寒冷地の地盤の最大凍結深さを推定する方法としては、修正 Berggren 式 (Aldrich 式) が一般に用いられており、パーソナルコンピュータにより簡単に解が得られる。この推定式は最大凍結深さを比較的良い精度で求めることができるので、凍上対策に必要な置換厚を算定する場合には便利である⁴⁾。しかし、凍結開始から任意の日の凍結深さを従来の方法で算出すると、一般に過小に推定してしまい、凍結初期や積雪前に地盤に侵入する凍結深さを推定する場合には精度の点で問題がある。そこで、過去 10 年間の北海道における AMeDAS データを用いて凍結指数-熱比曲線を算出し、両者の関係を修正 Berggren 式に適用した結果、凍結深さの経時変化を簡便にしかも比較的精度良く求められることが分かった。本論文は、この解析手法の考え方と適用方法についてまとめたもので、AMeDAS データや観測データから凍結指数-熱比曲線を算出すれば、同様の解析が可能であることを示した。

2. 修正 Berggren 式の理論的背景^{5)~7)}

Aldrich と Paynter が導いた修正 Berggren 式 (Aldrich 式) は、F. Neumann と J. Stefan の理論を寒冷地における半無限等質な地盤と多層系地盤の凍結深さ問題に応用したものである。Neumann 理論に基づき、凍結した湖沼の水層部分を凍結土、水の部分を未凍結土と考えれば、式は未凍結部分と凍結部分の2つの熱伝導微分方程式 (1) と (2) からなっており、面倒であるが妥当な解が得られる。

a_f, a_u は、それぞれ凍結土と未凍結土の温度伝導率である。

$$a_f d^2 v_f / dx^2 = dv_f / dt \quad (1)$$

$$a_u d^2 v_u / dx^2 = dv_u / dt \quad (2)$$

i) 北海学園大学工学部 教授 (札幌市中央区南 26 条西 11 丁目)
ii) 同上
(1990. 6. 7 原稿受付・討議期限 1992. 1. 1. 要請があれば1か月の
期限延長可能)

k_f, k_u をそれぞれ凍結土と未凍結土の熱伝導率, L を融解潜熱とすると, 凍結深さ X における未凍結面と凍結面との境界条件式は (3) 式となる。

$$L dx/dt = k_f dv_f/dx - k_u dv_u/dt \quad (3)$$

Stefan 理論に基づくと, 未凍結部分からの熱補給を無視して凍結面より下方の温度は 0°C と仮定しているので, 地中の温度分布は (4) 式に簡略化でき, 凍結深さは (5) 式で表せるが, 比較的温暖な地域や排水性のよい地盤に対しては, 過大な値を与える。ここで, v_s は凍結時における地表面温度である。

$$k_f v_s / x = L dx/dt \quad (4)$$

$$x = \sqrt{48 k_f F / L} \quad (5)$$

一方, 修正 Berggren 式では, 展開が複雑な (1)~(3) 式の解の精度をほとんど犠牲にすることなく, 以下に示す 2 つの仮定の下で, 凍結深さを (6) 式として表わした。

- ・地盤は, 半無限等質でその初期温度は一様に v_0 である。
- ・地表面温度は, 初期温度 v_0 から突然低下して, v_s に変化する。

$$X = \lambda \sqrt{2 K_f v_s t / L} \quad (6)$$

(6) 式は, 簡単な Stefan 式 (5) にはほぼ匹敵するが, Stefan 式が無視した未凍結土が保有する熱容量を補正係数 λ で補正したもので, 次のような式の展開により求められる。

(1) と (2) 式の一般解 v_f, v_u は, 凍結土下面までの深さ X における温度で, 凍結と未凍結との境界面における (7) 式の境界条件より, v_s と v_0 はそれぞれ (8) と (9) 式で表せる。

$$v_f = v_u = 0 \quad (7)$$

$$v_s = A \cdot \text{erf}(x/2\sqrt{a_f t}) \quad (8)$$

$$-v_0 = B \cdot [1 - \text{erf}(x/2\sqrt{a_u t})] \quad (9)$$

Neumann と Stefan の解において, 氷層厚は \sqrt{t} (t は時間) に比例することが分かっているので, 凍結深さ X は (10) 式で表せる。

$$X = r \sqrt{t} \quad (r \text{ は定数}) \quad (10)$$

ここで, 定数 r は v_s, v_0 および熱定数に依存し, (3) 式の融解潜熱の必要条件を考慮することにより求められる。熱的連続性から, 凍結, 未凍結の両側の温度勾配とその境界面 (凍結面) の移動速度とは, 互いに関連するので, (3) 式に (7), (8) および (9) 式を代入し, (11)~(14) 式の置換をすることにより, (15) 式に単純化できる。

$$\text{熱比} : \tau = v_0 C_u / v_s C_f \quad (11)$$

ここで, 未凍結土と凍結土の熱容量 (容積比熱) を $C_u (c_u \rho_u), C_f (=c_f \rho_f)$ とすると, 一般に, $C_u = C_f$ と考えられることができるので, (11) 式は, 地表面温度のみに

よる (12) 式に簡略化できる。 c_u, c_f と ρ_u, ρ_f は, それぞれ未凍結土, 凍結土の比熱と乾燥密度である。

$$\tau = v_0 / v_s \quad (12)$$

$$\text{拡散比} : \delta = a_f / a_u \quad (13)$$

$$\text{融解パラメータ} : \mu = v_s C_f / L \quad (14)$$

$$\text{誤差関数の仮定値} : z = \gamma / 2\sqrt{a_f} \quad (15)$$

$$\mu [\exp(z^2) / \text{erf}(z) - \tau \exp(-\delta^2 z^2) / \delta (1 - \text{erf}(\delta z))] = \sqrt{\pi} z \quad (16)$$

(10) 式と (16) 式に, (17) 式で定義した補正係数 λ を適用することにより, (6) 式の半無限等質地盤における凍結深さの理論推定式が求められる。

$$\text{補正係数} : \lambda = \sqrt{2 Z^2 / \mu} \quad (17)$$

2.1 パラメータの物理的意義

—熱比—

熱比 τ は, 未凍結土中に貯えられた熱量に対する凍結土中の損失熱量の比で, (11) 式で与えられる。地表面温度は年周期変動をするが, Aldrich によると, 周期変動曲線と平均値 (ステップ変化) の温度を用いた場合の補正係数 λ に与える誤差は小さく, 実用上では無視できるとしている。従って, 図-1 の上段模式図に示すように, v_0 と v_s をそれぞれ年平均地表面温度 C_2 , 凍結期間中の平均地表面温度 C_1 と仮定し, (5) 式と同様に凍結日数を t (日) とすると, (17) 式は (18) 式に変換できる。

$$\tau = C_2 / |C_1| = C_2 \cdot t / F \quad (18)$$

(18) 式において, 地表面温度の観測データを得ることは実際には難しいので, 気温を用いている。地表面温度凍結指数と気温凍結指数との比である地表面補正係数は 1 以下であるが, 道路周辺の気温, 日射, 降雨, 降雪および風速等の局地的な気象の影響が大きく, 両者の普遍的関係を表す地表面補正係数は見いだされていない。一般に, 地表面補正係数は寒い地域で 1 に近づき, 暖かい地域では 1 より小さくなると言われているが, 積雪の多いわが国では, 更に小さくなると考えられる。この問題に関する研究は少ないが, 北米における研究事例をみると, 地表面補正係数を n -factor として表し, Eaton らは⁸⁾ 冬期間の月別の n -factor を示している。また, Cavanagh は⁹⁾ 各種路面状態や植生状況に対する n -factor を提案しており, 例えば, 雪氷のない路面で 0.9, 一般のアスファルトないしコンクリート路面で 0.8 としている。前者は詳細な観測データに基づいているが局地的な傾向が強く, 一方, 後者は普遍性を重視した提案をしているが, 道路周辺の気象条件が異なるわが国にそのまま適用できない点も多い。

表-1 は, 忠別¹⁰⁾, 恵庭, 追分¹¹⁾ および豊平峡トンネル¹²⁾ の現場計測データによる地表面補正係数の算出結果である。路面積雪は忠別において車道部分で平均 5cm, 路肩

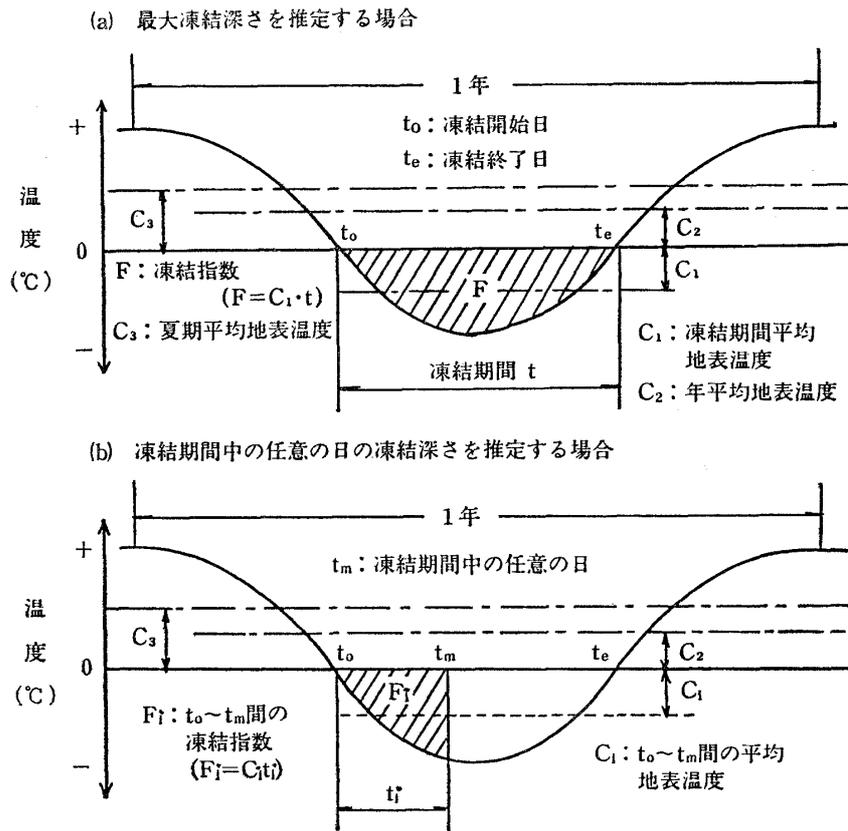


図-1 最大凍結深さと凍結期間中の任意の日の凍結深さを推定する場合の模式図

表-1 気温と路面（側壁）温度による凍結指数と n-factor

忠 別 地 区							
舗装断面		置 換 断 面			断 熱 断 面		
計測地点	気 温	道路中央	車線中央	路 肩	道路中央	車線中央	路 肩
凍結指数 (°C·days)	1083	797	678	249	976	794	271
	944	653	492	193	783	613	182
	846	686	*	*	793	*	*
n-factor	—	0.74	0.63	0.23	0.90	0.73	0.25
	—	0.69	0.52	0.20	0.83	0.65	0.19
	—	0.82	*	*	0.94	*	*
恵 庭 地 区		追 分 地 区		豊平峡トンネル			
計測地点	気 温	道路中央	気 温	道路中央	気 温	側壁表面	
凍結指数	520	465	568	456	875	802	
n-factor	—	0.89	—	0.80	—	0.92	

忠別：上段 1985.11～1986.4, 中段 1986.11～1987.4, 下段 1987.11～1988.4 恵庭, 追分：1987.11～1988.4 恵庭, 追分：1987.11～1988.4, 豊平峡トンネル：1987.12～1988.4, 路面（側壁）温度計測点深さ：忠別（4cm）, 恵庭・追分（2cm）, 豊平峡トンネル（2cm）

部で 50～80cm, 恵庭と追分の車道部分で 5～10cm である。また, 豊平峡トンネルの気温はトンネル内部の観測結果である。3箇所の道路中央での係数は, 0.69～0.94 の範囲で変動し, 忠別では同一箇所でも道路横断方向の路面積雪の状態や舗装構造により路面温度は影響を受け, かなり異なることが分かる。

— 拡散比 —

拡散比 δ は凍土, 未凍土の温度伝導率（熱拡散係数）の比である。含水量の小さい土に対しては一般に δ は 1 に近づき, 含水量が増加すると, δ は 1 との差が大きくなるが, その差異が凍結深さに与える影響は小さいとして無視し, 概算値として $\delta=1$ としている。従って, (12)

式は(18)式と同様に、(19)式に示される仮定が含まれる。

$$\delta = \sqrt{k_f C_u / k_u C_f} = 1 \quad (19)$$

(19)式において、 $C = C_u = C_f$ と仮定すると、 $k = k_u = k_f$ が必要条件となるが、実際の適用に際しては、熱容量 C と熱伝導率 k について凍土と未凍土の平均値を用いればよい。

—融解パラメータ—

融解パラメータ μ は、凍土において取り去られる熱量の、土壌水の潜熱に対する比で、(13)式から算出できる。 μ が0に近づけば、凍結深さに影響を与える土の性質としては、熱伝導率と融解潜熱が支配的となる。逆に大きくなれば、土中の保有熱が重要な意義をもつようになる。

—補正係数—

補正係数 λ は、前述したように、Stefan式の氷層厚の算出式に対する補正係数である。本プログラム中で λ を計算により求める場合には、(16)式の $\text{erf}(z)$ を(20)式に展開し、 τ と μ が与えられている中で z を仮定して、繰り返し演算により z を収束させることによって、(15)式および(20)式を満足させる λ を求めればよい。

$$\begin{aligned} \text{erf}(z) &= 2/\sqrt{\pi} \int \exp(-z^2) dz \\ &= 2/\sqrt{\pi} \{z - z^3/1 \cdot 3! + z^5/2 \cdot 5! + \dots \\ &\quad + (-1)^{n-1} z^{(2n-1)} / (n-1)(2n-1)! + \dots\} \end{aligned} \quad (20)$$

2.2 多層系における凍結深さ

道路や飛行場の舗装のような多層系地盤に対する厳密な解法はないので、修正 Berggren 式による半経験的手法が提案されている。この場合、凍結指数、凍結期間や年平均気温等の観測・気象データと舗装断面における各構成層の含水比と乾燥密度が与えられているものとする。

この解法の特徴は、計算過程において各層の含水比と乾燥密度から熱定数 k 、 C および L を決定して、凍結層の熱的性状を(21)～(25)式の簡便法で算出する点にある。

・熱定数

$$k = (k_f + k_u)/2, \quad C = (C_f + C_u)/2, \quad L = 80 \omega r_a \quad (21)$$

(ω : 含水比, r_a 乾燥密度)

・有効 $[L/k]$

$$\begin{aligned} [L/k]_{\text{eff}} &= 2/x^2 \{ (L_1 d_1 / 2 + L_2 d_2 + \dots + L_n d_n) d_1 / k_1 \\ &\quad + (L_2 d_2 / 2 + L_3 d_3 + \dots + L_n d_n) d_2 / k_2 + \dots \\ &\quad + (L_n k_n / 2) d_n / k_n \} \end{aligned} \quad (22)$$

ここで、 X は予想凍結深さであり、 d_i はその深さ内の各層の厚さである。

$$X = d_1 + d_2 + \dots + d_n \quad (23)$$

・予想凍結深さ内における重みづけした C と L の値

$$\left. \begin{aligned} C_{wt} &= (C_1 d_1 + C_2 d_2 + \dots + L_n d_n) / X \\ L_{wt} &= (L_1 d_1 + L_2 d_2 + \dots + L_n d_n) / X \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

・熱比 τ と融解パラメータ μ の有効値

$$\tau = V_0 t / F, \quad \mu = C_{wt} F / L_{wt} t \quad (25)$$

τ と μ が決定されると、 λ は図式から求められるが、本プログラムでは収束計算で求められる。以上の入力条件に基づき、凍結深さは(26)式に $X=Z$ の仮定値を与え、繰返し演算によって求められる。

$$X = \lambda \sqrt{48 F / (L/k)_{\text{eff}}} \quad (26)$$

3. 凍結深さの推定における熱比の考え方

凍結深さの推定値の精度を支配する λ については、上記の通り、Aldrichが提案している τ と λ 、 μ との関係を表すノモグラフから、または本プログラムのように、収束計算から求める方法がある。

神崎らは、熱比 τ と凍結指数 F との関係を求め、 F が与えられれば τ が推定できるようにした¹³⁾。この関係式は各地域の最大凍結指数 F_{max} に対する τ をプロットしたものである。最大凍結深さを推定する場合には便利で、図-3に τ_0 曲線として示した。 τ_0 曲線は本論文の解析結果とほぼ同じであるが、凍結深さの経時変化を求める場合にこの関係式を用いると、以下に述べる理由から凍結深さを過小に推定することになる。

通常、利用できる気象データは気温であるから、図-1(上段)において、 C_1 、 C_2 に凍結期間中の平均気温、年平均気温とすると、 τ は(18)式から求められる。しかし、道内での解析例では C_2 に夏期平均気温 C_3 を用いた方が実測値に良く近似する^{14),15)}。これは、年平均気温を用いると未凍結層からの熱補給量が低くなりすぎ、凍結深さを過大に推定すると考えられる。従って、 τ は(27)と(28)式より(29)式で与えられる。

$$C_3 = (C_2 \cdot 365 + F) / (365 - t) \quad (27)$$

$$C_1 = F / t \quad (28)$$

$$\tau = C_3 / |C_1| = C_3 \cdot t / F \quad (29)$$

ここで、例えば、 $F_{\text{max}} = 1000$ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$)の地域で、初冬期の $F = 200$ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$)における τ は、4.2で述べているように経時変化を考慮した $F_t - \tau_t$ 曲線から求める必要があり、図-7の $F = 1000$ の曲線によると1.9になる。しかし、各地域の最大凍結指数と熱比との関係を示す図-3の $F_{\text{max}} - \tau_0$ 曲線より求めると $\tau = 6.1$ となり、前者の場合の約3倍になる。これは、 $F_{\text{max}} = 1000$ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$)の地域における $F = 200$ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$)の時点と比べて、 F_{max} が200 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$)の地域の凍結日数 t はかなり長く、また夏期平均気温 C_3 も高いため、凍結指数 F が同じでも $(C_3 \cdot t)$ が実際よりも大きくなり、 τ が大きく算出されてしまうからである。このように τ が過大に算出されると、結果として凍結深さは過小に推定され

るので、任意の凍結期間中の凍結深さを推定する場合の τ は、 $F_i-\tau_i$ 曲線から求めなければならないことが分かる。

4. AMeDAS データによる熱比の比較検討

前述した熱比の考え方にに基づき、 C_2 、 C_3 、 t および F のパラメータの違いによる熱比の変動および凍結指数と熱比との関係について検討を加えた。使用した気象データは、1977~1987 年間の道内における AMeDAS データのうち、欠測が少ない 146 地点のデータをパーソナルコンピュータで数値処理したものである。熱比は、日平均気温から求めた各地点・各年度毎の凍結指数、凍結日数および年平均気温（夏期平均気温）をパラメータとして算出し、最大凍結深さと凍結深さの経時変化を推定する場合について解析した^{16),17)}。

4.1 最大凍結深さを推定する場合

寒冷地の地盤の最大凍結深さを推定する場合には、 F_{max} に対する τ の関係が分かればよいが、 C_2 、 C_3 、 t および F のパラメータのとり方により τ の値はかなり異なる。そこで、熱比 $\tau_1 \sim \tau_5$ を (30) 式~(34) 式を用いて、以下のような条件で算出し比較検討をした。

$$\tau_1 = C_2 \cdot t_{ave} / F_{ave} \quad (30)$$

$$\tau_2 = C_2' \cdot t_{Fmax} / F_{max} \quad (31)$$

$$\tau_3 = C_3 \cdot t_{ave} / F_{ave} \quad (32)$$

$$\tau_4 = C_3' \cdot t_{Fmax} / F_{max} \quad (33)$$

$$\tau_5 = C_3'' \cdot t_{Fmax} / F_{max} \quad (34)$$

ここで、各パラメータは以下の通りである。

F_{max} 、 t_{max} : 10 年間最大の凍結指数、凍結日数

F_{ave} 、 t_{ave} 、 C_2 、 C_3 : 10 年間平均の凍結指数、凍結日数、年平均気温、夏期平均気温

t_{Fmax} 、 C_2' 、 C_3' : 最大凍結指数が発生した年度の凍結日数、年平均気温、夏期平均気温

また、 C_3 、 C_3' および C_3'' は、(35)~(37) から求められる。

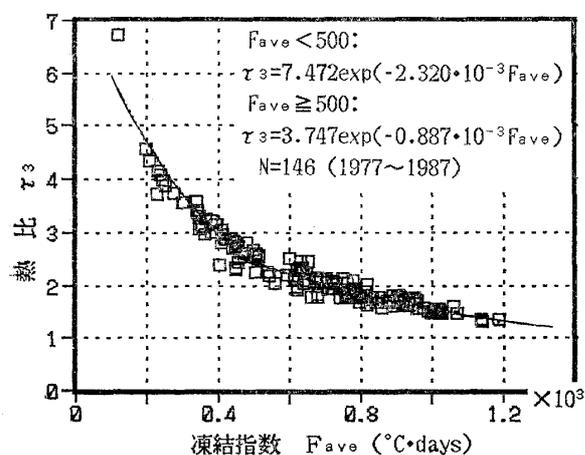


図-2 凍結指数と熱比との関係

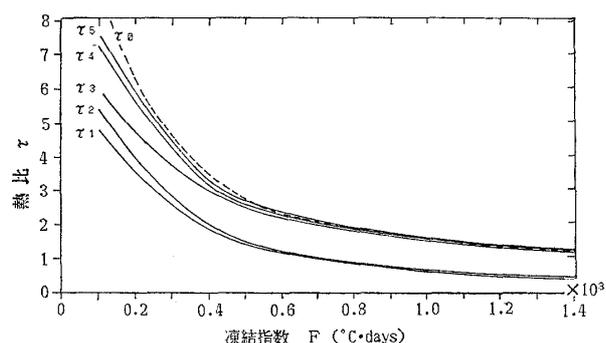


図-3 各パラメータにおける凍結指数と熱比との関係

$$C_3 = (C_2 \cdot 365 + F_{ave}) / (365 - t_{ave}) \quad (35)$$

$$C_3' = (C_2' \cdot 365 + F_{max}) / (365 - t_{Fmax}) \quad (36)$$

$$C_3'' = (C_2 \cdot 365 + F_{max}) / (365 - t_{Fmax}) \quad (37)$$

図-2 は、 τ_3 の場合における F と τ との関係プロットし回帰曲線で示したものである。 τ_1 、 τ_2 、 τ_4 、 τ_5 についても同様の解析を行い、図-3 に $\tau_1 \sim \tau_5$ と神崎らによる τ_0 曲線との関係をまとめた。年平均気温を用いた τ_1 と τ_2 は、夏期平均気温を用いた τ_3 、 τ_4 および τ_5 より全体に 1 前後小さくなる。後述する旭川忠別地区の例 (1986~1987 年の冬) をとると、凍結指数 943 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$) で τ_1 と τ_2 の熱比は 0.6、 τ_3 の熱比は 1.6 となり、最大凍結深さの観測値約 120 cm に対し、推定値は各々 152 cm、129 cm と算出され、 τ_1 と τ_2 の熱比を用いると過大に推定することが分かる。 τ_0 、 τ_3 、 τ_4 および τ_5 は、凍結指数の小さい地域で多少異なるが、ほぼ同じ傾向を示す。従って、それらの中でどれを用いても最大凍結深さの推定値に大きな違いはでないが、各パラメータに 10 年間の平均値を用いた τ_3 は全体に下限側で特に凍結指数の小さい地域では設計上安全側である。

図-4 は、各地点における 10 年間平均の凍結指数 F_{ave} と凍結日数 t_{ave} との関係を示したもので、比較的よい相関が得られた。比較検討の観点から、図-5 には各地点における 10 年間最大の F_{max} と t_{Fmax} との関係を示す。

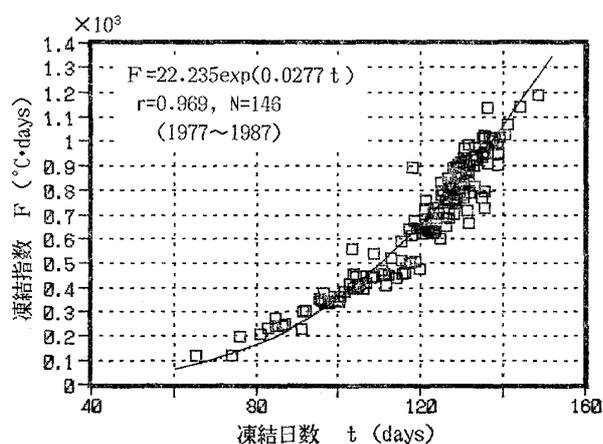


図-4 10年間平均の凍結指数と凍結日数との関係

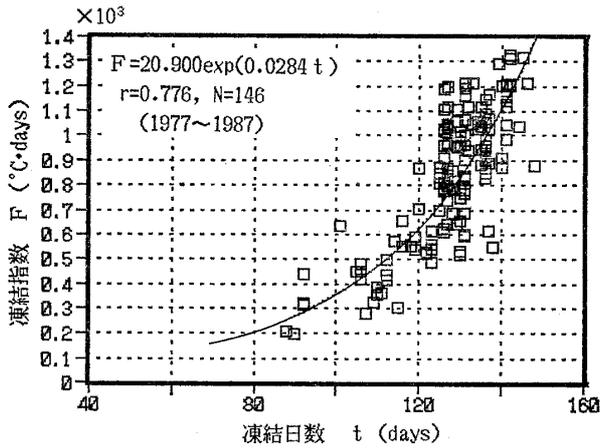


図-5 10 年間の最大の凍結指数と凍結日数との関係

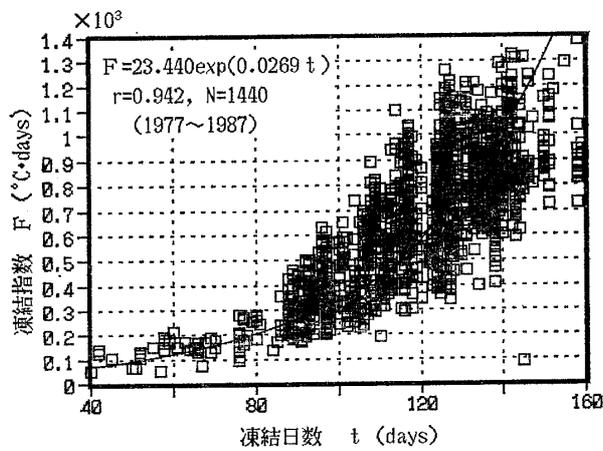


図-6 10 年間における凍結指数と凍結日数との関係

図-6 には各地点の 10 年間の全データについて凍結指数と凍結日数との関係を示し、回帰曲線とその相関係数を求めた。図-4, 5 および 6 に示した各回帰式により、 F (300~1200°C·days) に対する t の推定値を比較すると、最大でも 3 日程度の違いで、 F と t との関係についても 10 年間平均のデータによるもので問題はないことが分かった。従って、凍結指数から最大凍結深さを推定する場合の熱比と凍結日数の設定は、図-3 の $F-\tau_s(\tau_0)$ と図-4 の $F-t$ の関係を用いればよい。

4.2 凍結深さの経時変化を推定する場合

凍結開始から終了までの凍結深さの経時変化を推定する場合、熱比は前述したように、(29) 式を (38) 式に置き換えて算出する必要がある。

$$\tau_i = C_s \cdot t_i / F_i \quad (38)$$

(30) 式より、凍結開始日から任意の日までの t_i に対する F_i が分かれば、 τ_i を経時的に算出した $F_i-\tau_i$ 曲線を求めることができ、凍結深さの経時変化を精度よく推定できる。これらの関係を模式図で示したのが、図-1 (下段) である。しかし、この方法では $F_i-\tau_i$ の関係をあらかじめ求める必要がある。そこで、各地点の 10 年

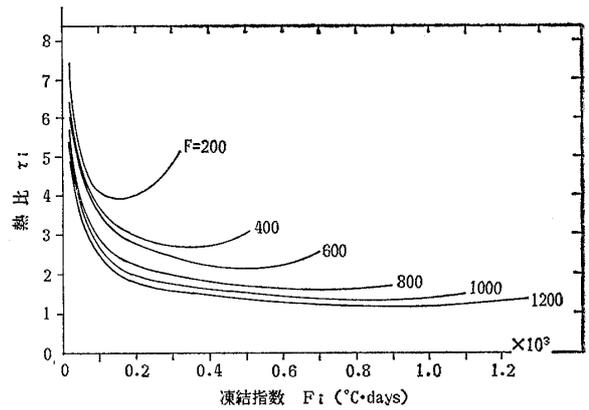


図-7 各凍結指数分類に対する τ_i-F_i 曲線

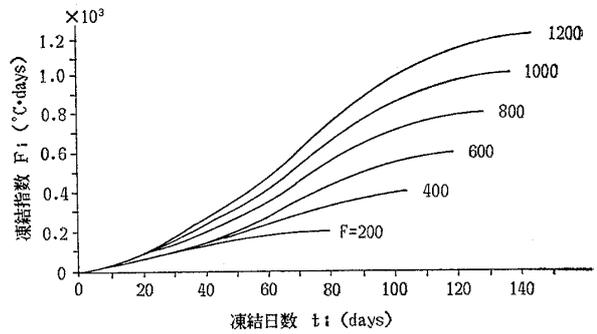


図-8 各凍結指数分類における経時的な凍結指数と凍結日数との関係

間の最大凍結指数を次のような範囲に設定して、道内 146 地点を I ~ VI に分類した。

- I : $200 \leq F < 300$ II : $300 \leq F < 500$
- III : $500 \leq F < 700$ IV : $700 \leq F < 900$
- V : $900 \leq F < 1100$ VI : $1100 \leq F < 1300$

上記した凍結指数分類毎の平均的な $F_i-\tau_i$ の関係を 200 毎に示したのが図-7 で、 τ_0, τ_s-F_{max} 曲線と異なることが分かる。同様に、図-8 は 200 毎の各凍結指数分類に対する F_i-t_i 曲線を示したものである。

上記の $F_i-\tau_i$ と F_i-t_i 曲線に基づき、凍結開始日からの凍結深さの経時変化を II ~ VI の凍結指数分類毎に示したものが図-9 で、同じ時期でも各凍結指数分類により凍結深さはかなり異なることが分かる。ただし、凍結開始日は各分類に対する AMeDAS データの 10 年平均を用いており、分類 I はデータ数が少ないので解析から除いた。また、この凍結深さの推定において、地盤の土質は含水比が 15%、乾燥密度が 1.8 g/cm³ (熱伝導率: 0.00620 cal/cm·s·°C, 熱容量: 0.509 cal/cm³·°C, 融解潜熱: 21.60 cal/cm³) である。これは、アスファルト舗装要綱で示す理論最大凍結深さの算出に用いられている凍上を起こしにくい均一な粒状材料である¹⁸⁾。

また、各観測地点を I ~ VI に分類する際に用いた 10 年

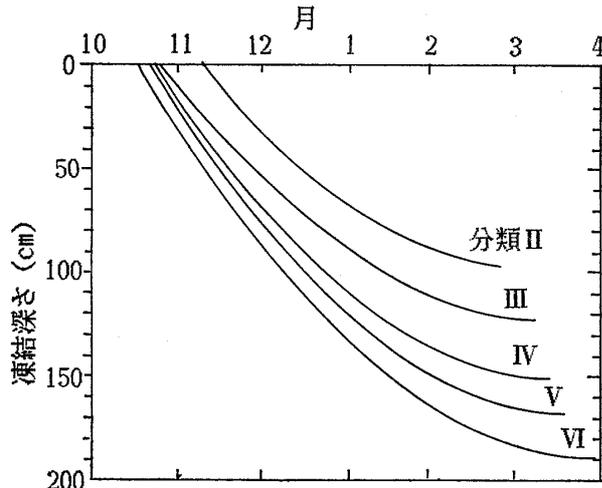


図-9 分類II～VIにおける凍結開始日からの凍結深さの経時変化

間最大凍結指数の再現期間が、各地点毎に大きな違いが生じていないかどうか調べるために、 n 年超過確率を算出してみた。水文統計の一般的手法である岩井法、対数正規分布法を用いて各地点の10年超過確率凍結指数(F_p)を算出した結果、図-10に示すように各地点の10年間の最大凍結指数(F_m)は、全体的に10年超過確率をやや越える程度で両者の相関性はよいことが分かった。

5. 実測値と推定値との比較検討

凍結指数で分類した $F_i-\tau_i$ 曲線の適用に関する検証を行うために、凍結深さの経時変化推定値と観測値との近似度を旭川^{10),16)}と恵庭¹¹⁾について、比較検討を行った。

(1) 旭川(忠別)の比較検討例

忠別は平年の凍結指数が $1000^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$ 前後となる寒さの厳しい地域で、凍上対策に関する試験舗装箇所での観測データを用いて以下の検討を行った。凍結深さの観測は、舗装体に埋設した横断方向と深さ方向の熱電対による地温の計測値とメチレンブルー凍結深度計とで行い、凍結深さの推定値との比較には地温の計測値を用いた。図-11は、①:図-3の τ_0 曲線、②:図-7の $F=1000$ の $F_i-\tau_i$ 曲線および、③:現場での気温観測データ(1986~1987年)による $F_i-\tau_i$ 曲線をそれぞれ用いた場合の各凍結深さの推定値に対する観測値の比較結果である。各推定に用いた舗装材料の熱定数を表-2に示した。

図-11から分かるように、提案式の熱比を用いた②と③の曲線は凍結開始直後から凍結期間を通じて、実測値に近似している。これに対し、①曲線は2月中旬以降になって観測値に近似してくるが、それまでは観測値と大きく異なり、凍結開始から12月中旬まではプログラム計算による推定値が収束せず、凍結深さが求まらない。これは①の推定に用いた図-3の τ_0 曲線と②の推定に用

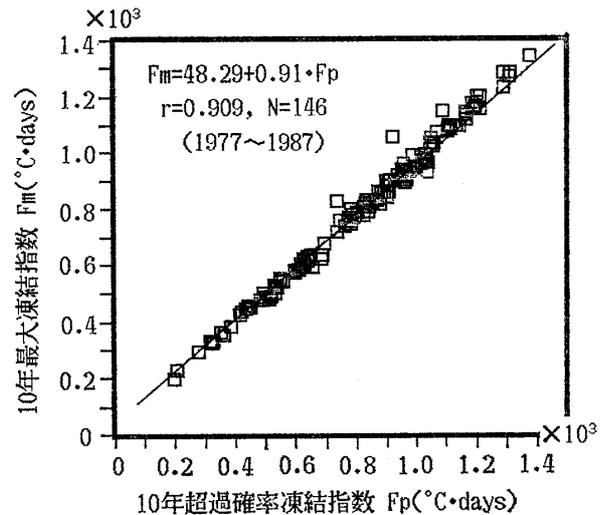


図-10 10年最大凍結指数と10年超過確率凍結指数との関係

いた図-7の $F_i-\tau_i$ 曲線 ($F=1000$) における熱比の変化を比較すると分かるように、 τ_0 曲線の熱比は F が500以下から序々に大きくなり、200以下で急激に増大するためである。また、現場観測データから求めた $F_i-\tau_i$ 曲線による③の推定値は②のそれとほぼ同じで、平均的な $F_i-\tau_i$ 曲線をそのまま適用しても比較的精度よく凍結深さの経時変化を推定できると考えられる。

(2) 恵庭地区の比較検討例

凍結指数がそれほど大きくない地域での $F_i-\tau_i$ 曲線の適用性を調べるために、平年の凍結指数が $500\sim 600^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$ の恵庭の観測現場における観測データを用いて比較検討を行った。凍結深さの観測はメチレンブルー凍結深度計で行い、外気温と路面の温度を毎時計測して気温凍結指数と地表面温度凍結指数との違いについても調べた。また、1988年4月の融解期に現場の開削を実施し、舗装構成の確認、アイスレンズの観察および採取試料の含水比、密度等を求めた。

図-12は、①: τ_0 曲線と②: $F_i-\tau_i$ 曲線による推定値に対する観測値の比較結果を示したものである。観測値は12月末以降からであるが、忠別の比較結果と同様

表-2 忠別および恵庭における舗装材料の熱定数

		熱伝導率 cal/s·cm·°C	熱容量 cal/cm ³ ·°C	融解潜熱 cal/cm ³
忠別	アスコン	0.00346	0.448	0.
	40, 80mm 級砂利	0.00672	0.452	10.08
	シルトを含む砂利	0.00698	0.727	47.04
恵庭	アスコン	0.00346	0.448	0.
	40 mm 級砂利	0.00598	0.445	11.20
	砂	0.00375	0.404	13.20
	切込み砂利	0.00542	0.453	14.80
	火山灰 黒色土	0.00289 0.00375	0.519 0.673	33.60 50.54

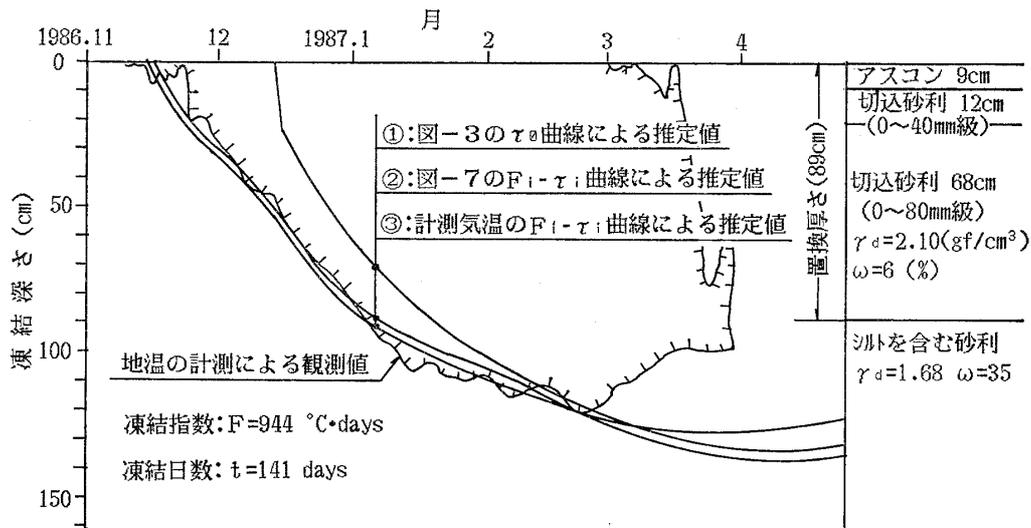


図-11 忠別における凍結深さの推定値と観測値との比較

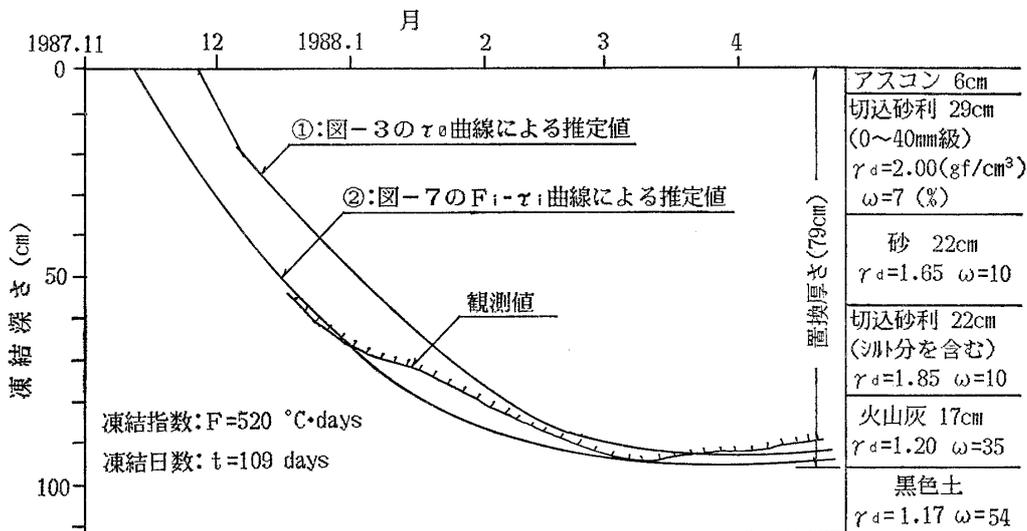


図-12 恵庭における凍結深さの推定値と観測値との比較

に、②曲線は凍結期間を通じて観測値に近似する。①曲線は2月から凍結末期にかけて観測値に近似するが、それ以前では観測値より小さめの推定値となる傾向を示す。

以上の比較検討例から分かるように、 τ_0 曲線は最大凍結深さを推定する場合には観測値によく近似するが、凍結初期から中期にかけての凍結深さを過小に推定する。従って、凍結初期から凍結深さの経時変化を推定する場合には、 $F_i - \tau_i$ 曲線による τ を用いる必要がある。

6. 結 論

積雪寒冷地における地盤の凍結深さの経時的な推定方法に関する検討で、次のような結論が得られた。

(1) 最大凍結深さの推定における凍結指数—凍結日数の関係および凍結指数—熱比の関係は、年変動を考慮しても10年平均の観測データによる回帰式で示すこと

ができる。

(2) 従来の凍結指数—熱比の関係曲線は、最大凍結深さを推定する場合には比較的良い近似が得られるが、凍結深さの経時変化を推定する場合、凍結初期から中期にかけて過小の推定値を与える。

(3) 気温凍結指数と地表面温度凍結指数との比である地表面補正係数は、その地域の気象条件、路面積雪状態および舗装構造等により異なり、普遍的な関係が求められていない。道路の観測現場における地表面補正係数を算出すると、路面積雪が平均約5cmの車道中央で0.69~0.94の範囲で変動している。この係数の普遍的な推定式を求めることは、凍上対策と関連する凍結深さの推定において重要な検討課題であるので、今後、各地域、各機関での観測並びに既存の観測データのとりまとめが必要である。

(4) 凍結深さの経時変化を精度良く、しかも簡便に

推定できるように、AMeDAS データの解析に基づき、凍結指数で分類した $F_i-\tau_i$ 曲線と F_i-t_i 曲線を作成した。また、これらの曲線に関する検証をするために、気象・地盤条件と舗装構造が異なる各地点について凍結深さの観測値と推定値との比較検討を行った結果、良く近似することが分かった。

謝 辞

本研究において、北海道大学工学部の上島壮氏には大型計算機による AMeDAS データの検策・転送処理に際し、また、舗装事業協会の舗装研究委員会の各委員には恵庭、追分等での現場観測データのとりまとめで大変お世話になった。深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Takeichi, K., Kubo, H. and Kasahara, A. (1987): "A pavement design for low-volume roads that considers the antifrost effects of thickly packed snow", Fourth International Conference on Low-Volume Roads, TRR 1106/Vol.2, pp.237-243.
- 2) 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, 学位論文, pp.100~113.
- 3) 鈴木輝之 (1989): コンクリート製U-トラフに加わる横方向凍上力, 「第24回土質工学研究発表会講演集」, pp.1061~1062.
- 4) 熊谷茂樹・有田政博 (1985): マイクロコンピュータによる凍結深さの推定について, 「土木試験所月報」 No.380, pp.25~37.
- 5) Aldrich, H. P. (1976): "Frost penetration below highway and airfield", H. R. B. Bulletin, 135, pp.124~149.
- 6) 北海道土木技術会舗装研究委員会 (1982): 「伊福部宗夫博士論文集」, pp.107~116.
- 7) Jumikis, A. R. (1977): THERMAL GEOTECHNICS, Rutgers Uni. Press, pp.185~224.
- 8) Eaton, R. A. and Payne, J. O. (1982): "Full-depth and granular base course design for frost areas", Pro. Am. Soc. Civil Eng. Transp. Eng. J. ASCE, pp.27-38.
- 9) Cavanagh, P. C. (1985): Frost Penetration in Dry Gravel, The Univ. of Alberta, pp.16-17.
- 10) 武市 靖・佐川淳一 (1986): 舗装体の温度分布に関する研究 (その2), 「北海学園大学工学部研究報告」第14号, pp.193~198.
- 11) 北海道舗装事業協会 (1987): 「江別恵庭線道路事業調査外1実施報告書」.
- 12) Takeichi, K. and Kubo, H. (1989): "Study on preventing measure against frost action of existing road tunnels with insulation method", ISSMFE, Pro. Vol.2, pp.721-730.
- 13) 神崎紘郎 (1974): 道路の凍結深さの近似計算について, 「第11回日本道路会議論文集」, pp.363~364.
- 14) 有田政博・久保 宏・熊谷茂樹・田口史雄 (1982): 舗装体温度の推定について, 「第25回北海道開発局技術研究発表会資料」, pp.9~25.
- 15) 有田政博 (1986): 凍結指数の特性に関する2・3の考察, 「土木試験所月報」 No.397, pp.42.
- 16) 武市 靖・久保 宏 (1989): AMeDAS データを利用した凍結深さの推定, 「第24回土質工学研究発表講演集」, pp.1063~1066.
- 17) 武市 靖・新田邦宏・久保 宏 (1988): 凍結深さの推定に関する研究, 「第23回土質工学研究発表講演集」, pp.1051~1052.
- 18) 日本道路協会(1987): 「アスファルト舗装要綱」, pp.16~17.