

路面凍結の予測に関する研究

武市 靖*

本研究は、地温の分布や周期変動、路面の凍結融解現象、路面温度と気温との関係等、路面凍結に係わる理論的背景を観測データにより明らかにし、フーリエ解析モデルと熱収支解析モデルにより路面凍結の予測手法について検討したものである。2つの予測手法の予測精度については、観測現場における実測値と予測値との比較からの中率を算出し、現場への適用性について検証した。

Key Words : snow/ice control, ground thermal regimes, fourier analysis, equilibrium surface temperature, pavement freezing prediction

1. ま え が き

積雪寒冷地において、スパイクタイヤ使用の規制強化ないし禁止にともない、従来の交通確保のための除雪・排雪対策のみならず、交通安全を主とした路面管理をいかに行うかが極めて重要な課題となってきた。欧米では^{1),2)}、主に凍結防止剤散布による路面管理を行っているが、わが国にこの管理方法をそのまま適用することは、寒さが厳しくまた積雪が多い気象条件、環境問題及び経済性等の点から難しい。

最近の札幌の例をみると、中心部ではロードヒーティングの整備、散布期間と区間を限定した凍結防止剤の使用、郊外の道路では凍結抑止舗装の施工、滑り止め材保管用の砂箱の設置等、道路・交通条件を考慮して多方面からの路面管理を実施または試行している。しかし、必ずしも十分ではなく今後、道路網全体の管理水準を向上させるには、路面管理のシステム化と路面凍結予測システムの導入により費用や労力の効率化を図る必要がある。欧米では、観測車による Thermal Mapping の導入、路面凍結検知器の設置、気象衛星の利用等により雪氷管理のシステム化を図り、路面凍結の予測や凍結防止剤散布の最適化等を積極的に進めており³⁾⁻⁵⁾、近年、わが国でも検討が行われ、一部で試行されている。

以上の観点から、既往の研究では路面凍結の検知と推定手法について述べたが⁶⁾、本研究では雪氷管理システムを構築する上で重要となる路面凍結の予測について述べるものである。

路面凍結の予測手法として、a) 日最高・最低気温の予測式から凍結時刻を予測をするもの、道路周辺の気象・地温観測データを用いた b) 熱収支解析や、c) 熱伝導解析による路面温度予知、d) 路面温度のパターン

解析、e) 熱伝導方程式と気象統計値を説明変数とした重回帰分析との組合せによるもの等が提案されている^{7),8)}。しかし、a) では気温が0℃になる予測時間を路面凍結開始時間と想定している、b) と c) では多くの気象データや地温データを必要とし、路面温度(以下、路温と略称する)予測には熱流推定値の合理的な設定方法が定まっていない等の検討課題が残されている。d) は天候別に路温の変動パターンをモデル化する手法で、本研究でも札幌と旭川のデータに基づき検討したところ、天候と路温変動のパターンの相関にバラツキが見られ、予測精度が低下する難点があった。e) は比較的良好な予測結果を与えるが、熱流の時間的変動を予測するために、多次元回帰式とその説明変数として多くの現地観測データや気象統計資料が必要となり、モデル作成とその運用にはかなりの労力と費用を要すると考えられる。これらの予測手法に共通していることは、簡略化したモデルでは予測精度に問題がおき、予測精度を向上させようとすると多くの説明変数を要して複雑なモデルになっていることである。

そこで、本研究では、路面の凍結融解現象に伴う地表面及び地中の温度(以下、地温と総称する)の変動特性や分布状態を把握し、路温の変動に対する寄与率の高い要因に着目して、予測精度をできるだけ犠牲にすることなく予測モデルの作成とその運用が簡便な予測手法について提案を行った。適用箇所の利用条件による予測手法の選択や予測精度の比較検討ができるように、解析理論や入力条件が異なるフーリエ解析モデルと熱収支解析モデルの2つの予測手法について検討した。前者の特徴は、前述の d) の手法と似ているが、路温の日較差(日最高温度-日最低温度)と温度勾配に着目して、路温の変動パターンをフーリエ級数展開による予測モデル曲線で分類し、日較差と最高路温による予測モデル曲線の選択・修正ができる点で大きく異なり、これにより予測精度を

* 正会員 工修 北海学園大学工学部教授 土木工学科
(〒064 札幌市中央区南26条西11丁目)

向上させた点にある。後者の特徴は、熱収支解析に基づいているが、予測に際し解析プログラムの煩雑な入力条件を体系化して利用しやすくするために、気象データや路面情報のモデル化、地温分布解析結果の初期条件や境界条件への適用等を行ったことである。従って、この手法は、b), c), e) の手法と共通点はあるが、かなりの計測設備と労力を要する熱流予測を入力データのモデル化により代替し、予測時の入力モデルの選択を合理化した点で異なる。

本文では、提案した2つの手法の理論的背景を明確にすると同時に、予測モデル曲線の作成や入力条件の設定等の基礎となる地温の変動について検討を行った。路面凍結の予測は、上限と下限予測の2本の予測曲線を作成し、路面凍結開始の時間帯を予測する手法を用いた。予測精度は、2つの予測手法について旭川鷹栖と札幌の観測現場における実測値と予測値から算出した的中率で検証した結果、両者とも良好な結果が得られた。

以上、本研究は、路面凍結に係わる地温変動特性を把握し、フーリエ解析と熱収支解析の理論による予測手法の提案及び現場への適用性等について述べるものである。

2. 地温の周期変動と分布

路面凍結には、道路周辺の気象条件、路面状態、舗装体ないし地盤の熱的性質、地形や交通条件等の要因が係わり、路面凍結の発生は時間的にも位置的にも様々に変化する。しかし、路面凍結に大きな影響を与える気温や地温も微視的には不規則な変動をするが、日周期や年周期で見ると規則性を見いだすことができる。また、日変動・年変動の及ぶ深さ、日較差・年較差(年最高温度-年最低温度)の深さによる減衰及び位相の遅れについても規則性があり、熱伝導論で説明することが可能である。

ここでは、後述する2つの路面凍結予測手法のうち、フーリエ解析モデルについては、地温の周期変動の近似法としてフーリエ級数展開式の適用の観点から、熱収支解析モデルについては、初期条件としての地温分布、境界条件としての不易層(年間の温度変化が0.1°C前後で温度変化がほとんどない層)の深さと温度の設定等の観点から述べる。また、日変動の及ぶ深さや位相の遅れを調べることで、路面の凍結・融解現象に係わる範囲は表層付近に限られ、短時間の内に凍結と融解が繰り返される状態を説明しようとするものである。

解析に用いたデータは、旭川鷹栖インターチェンジ横の試験ヤード(除雪はするが交通開放はしていない)、旭川忠別の農道試験舗装箇所及び札幌の3地区(伏見、発寒、24軒)のうち伏見地区の市道の現場において、1時間間隔の自動計測により収録されたものである。

(1) フーリエ級数展開

一般に、日周期変動あるいは年周期変動する気温や地温を、周期が $P (=2\pi/\omega)$ である任意の関数 $F(t) = F(t+P)$ とおくと、フーリエ級数展開することにより、式(1)で表すことができる。式(1)は、式(2)に変換することができ、位相遅れを示す位相角 ϵ は式(3)で与えられる。

$$F(t) = A_0 + A_1 \cos(2\pi t/P) + A_2 \cos(4\pi t/P) + \dots + B_1 \sin(2\pi t/P) + B_2 \sin(4\pi t/P) + \dots = A_0 + \sum A_n \cos(2n\pi t/P) + \sum B_n \sin(2n\pi t/P) \dots \dots \dots (1)$$

$$F(t) = C_0 + \sum C_n \cos(2n\pi t/P - \epsilon), (C_0 = A_0/2) \dots \dots \dots (2)$$

$$\epsilon = \tan^{-1}(B_n/A_n) \dots \dots \dots (3)$$

すなわち、 $F(t)$ は、周期 P の基本波と周期 $P/2, P/3, \dots$ の高周波との代数和である。地表面温度の周期変化が $F(t)$ で与えられると、周期の小さい高次の波ほど早く減衰するので、表面ではかなり不規則な周期的変化をしていても地中内部に入るにしたがい、基本周期 P をもつ正弦波、余弦波だけになる。

図-1は、鷹栖地区⁹⁾と忠別地区¹⁰⁾の舗装断面と地温計測位置を示したものである。図-2(a)と(b)は、鷹栖地区の断面について、式(1)のフーリエ級数で近似した地温の日変動、年変動の理論曲線と実測値との関係を各深さごとに示した。式(1)では、 n の項数が多いほど実測値に近づくが、第3項($n=3$)まで求めたフーリエ解析値と実測値とを比較すると両者は近似している。この点については、忠別地区における1985年~1988年の4年間にわたる観測データの解析結果¹⁰⁾でも明らかにされており、実用上は第3項までの展開で日変動と年変動を表現できると考えられる。

(2) 較差の減衰と位相遅れ

周期的熱伝導理論によれば^{11), 12)}、地温の日較差や年較差は、地中深く入るにしたがい指数関数的に減衰し、 R_0, R_x を地表面、深さ x cmでの較差、 β を較差の減衰率とすると、式(4)のようにかける。較差の減衰率 β は温度伝導率を α とすると式(5)で表され、日周期と年周期の変動の減衰率は周期 P の平方根に逆比例する。位相の遅れ Δt は、深さの異なる2地点 x_1, x_2 における最高、最低温度の起時を t_1, t_2 とすると式(6)からも算出できる。位相遅れは、 t_1 と t_2 との最高(最低)温度起時の差 Δt で表され、深さに比例し周期の平方根に比例する。

$$R_x = R_0 \exp(-\beta x) \dots \dots \dots (4)$$

$$\beta = \sqrt{\omega/2\alpha} = \sqrt{\pi/(\alpha P)}, \omega = 2\pi/P \dots \dots \dots (5)$$

$$\Delta t = (t_2 - t_1) = (x_2 - x_1) \cdot \sqrt{P/(4\pi\alpha)} \dots \dots \dots (6)$$

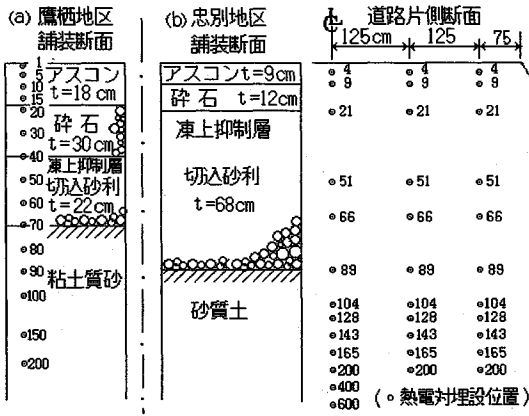


図-1 鷹栖と忠別地区の舗装断面と熱電対の埋設位置

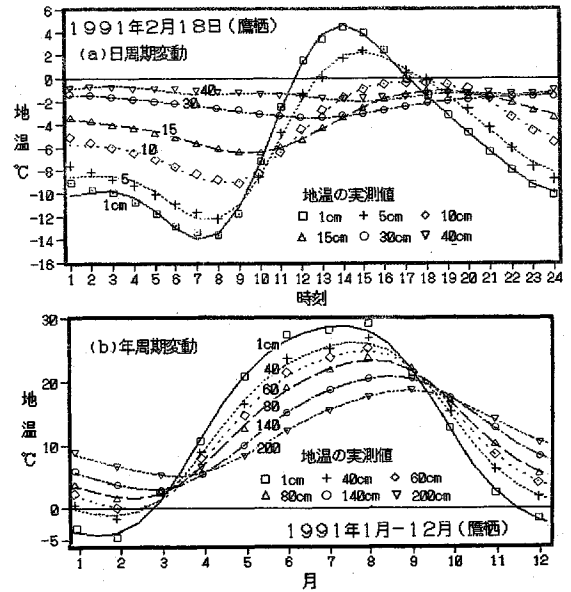


図-2 地温の日周期と年周期変動

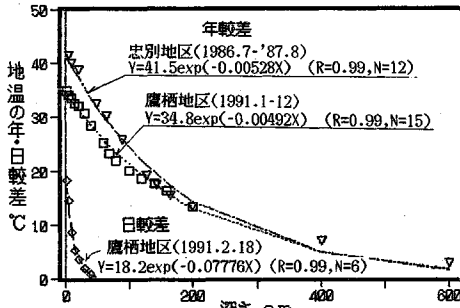


図-3 地温の年較差と日較差

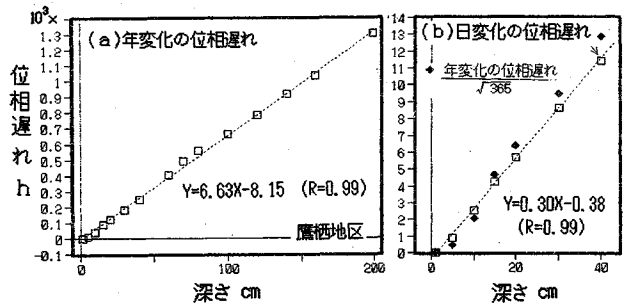


図-4 地温の年変化と日変化の位相遅れ

図-3は、鷹栖地区と忠別地区の計測データに基づき、地温の日・年較差と深さとの関係をプロットしたもので、回帰分析により日較差と年較差の減衰率 β_D と β_Y を求めた。 α が一定ならば理論的には $\beta_D/\beta_Y = \sqrt{365}/\sqrt{1} = 19.1$ となるが、鷹栖地区の解析結果では $\beta_D = 0.07776$ 、 $\beta_Y = 0.00492$ 、 $\beta_D/\beta_Y = 15.8$ で、理論値より小さめになっている。これは、日較差と年較差における解析の深さの違いにより、地盤の熱的性質の違いや季節変動等¹³⁾等が β に影響していると考えられる。

また、鷹栖と忠別地区の年較差の β_Y はやや異なるが3mより深くなるとほぼ同じになり、両地点とも年較差が1°Cになる深さは約7m、不易層である年較差0.1°Cの深さは約11.5mと算出される。日較差が1°C、0.1°Cの深さはそれぞれ37cm、67cmと推定され、地温の日変動の及ぶ深さはおよそ50cm程度になる。

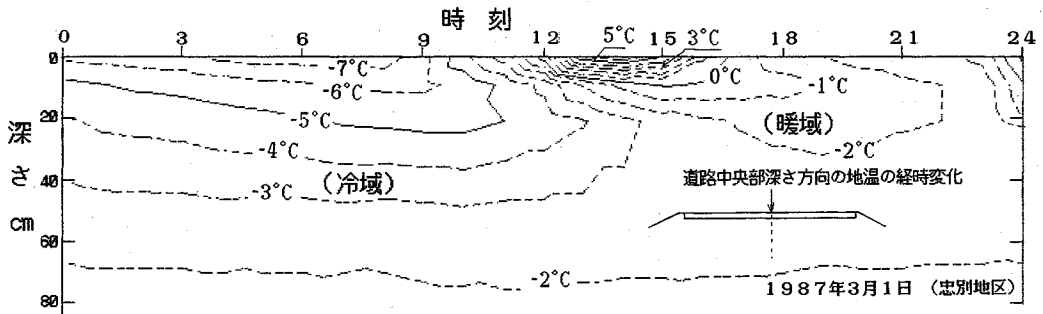
位相遅れは、鷹栖地区の計測データをフーリエ級数展開し、式(3)から算出した日変化と年変化の位相遅れを図-4(a)と(b)に示した。日変化の起時の遅れは、

10cm深くなるごとに3時間、同様に年変化では66時間になり、両者の比は $66/3 = 22$ で周期の比 $\sqrt{365}/\sqrt{1} = 19.1$ よりやや大きくなっている。しかし、図-4(b)に示すように、解析範囲を日変動の及ぶ40cmの深さにそろえて、年変化の位相遅れを $\sqrt{365}$ で除した値と比較するとほぼ一致しており、位相の遅れが深さと周期の平方根に比例することを実証している。

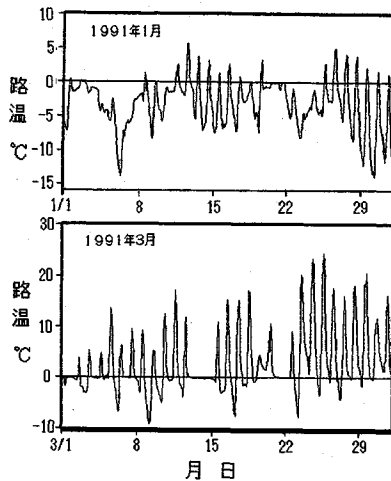
3. 路面の凍結と融解

(1) 凍結融解の形態と時間的変動

冬期間においても日中の日射量が比較的多い日には、露出している路面の温度は最高5~10°C近くまで上昇する。そのため、路面に残っている雪水や路肩部に堆積された雪水の一部が融解し、路面が日中、湿潤状態になり、夕方以降また凍結するという路面の凍結と融解が繰り返されやすい。このような路面状態は、札幌の観測現場での自動撮影写真や各現場の計測データから確認されており、図-5に忠別地区における道路中央深さ方向の



図—5 道路中央部深さ方向の地温分布の時間的変動



図—6 凍結融解をともなう路温変動

地温分布の時間的変動を等地温線で示した。

図—5の等地温線は、毎正時の道路中央深さ方向の計測データをすべて入力し、各地温計測点の間を有限要素法による定常熱伝導解析プログラムで補完してプロットしたものである¹⁰⁾。路面は12時前後を境にして凍結から融解状態になり、16時以降、再び凍結が始まっている。地温の日変動が及ぶ深さは40～50 cmで、夜半から早朝の冷域がその深さまで遅れて進入し卓越しているため、日中の暖域が進入しても0℃以上になる部分は10 cm程度で浅い。このことから、2章で述べた地温の日変動の及ぶ深さや位相の遅れが路面の凍結・融解現象に影響していることが分かる。

(2) 凍結融解の回数と路温の変動特性

道路の一冬における凍結融解回数は、一般に40～50回程度といわれているが、この目安は舗装やコンクリート製品等の凍結融解作用に対する耐久性の検討を行う際に用いられている。そこで、路面凍結の観点から表—1に1985年～1992年における旭川と札幌での凍結融解回数をまとめた¹¹⁾。温度データは1時間間隔で自動計測したものを、一例として、図—6に鷹栖地区の1月と3月の凍結融解の発生状態を示した。凍結融解の発生頻

表—1 旭川と札幌における凍結融解回数

(*は欠測または未計測)

地区	旭川忠別地区				旭川鷹栖地区				札幌伏見地区	
年	1985～'86	1986～'87	1987～'88	'90～'91	'91～'92	'89～'90	'90～'91			
地点	中央	路肩	中央	路肩	中央	路肩	試験舗装ヤード	車線中央	車線中央	
計測深	4cm	4cm	4, 9	4	4, 9	4	1, 5	1, 5	0.5, 5	0.5, 5
11	7	8	7, 4	3	*, *	*, *	*, *	2, 1	*, *	8, 4
12	0	0	4, 0	1	8, 0	3	*, *	6, 5	*, *	14, 11
月	1	0	0	2, 1	1	0, 0	0	18, 12	0, 0	1, 0
2	0	0	5, 0	0	0, 0	0	20, 19	9, 8	22, 10	11, 2
3	27	27, 21	10	19, 16	13	21, 16	21, 19	27, 19	27, 19	28, 27
4	5	7	8, 2	7	5, 0	5	2, 0	2, 1	0, 0	0, 0
合計	39	17	53, 28	22	32, 16	21	61, 47	40, 34	50, 29	71, 44

度は、気象の地域差や年変動、道路の除雪状態、道路横断・深さ方向の位置等により異なるが、表—1の解析結果から、初冬期の11～12月と融解期の2月下旬～3月に多く集中していることが分かる。また、交通開放していない鷹栖地区を除けば、車線中央の凍結融解回数は路肩付近の約2倍、路面から浅い地点ほど、走行軌跡が集中する箇所ほど凍結融解回数は増加する。

図—6を見ると、融解期では日最低路温が0℃以下になる頻度、厳冬期では日最高路温が0℃以上になる頻度が路面の凍結融解回数と大きく関係しており、路温については、日較差は異なるがほぼ周期的な変動をしている。このことから、路温の日最低、日最高及び日較差は、路面凍結の予測モデルの変動パターンや予測に必要な入力条件を検討する際の重要な要素となることが分かる。

(3) 道路雪氷状態による気温と路温との関係

冬期間の路温は道路雪氷の影響を受けるので、路面凍結の予測において、路面状態により気温と路温とがおおよそどのような関係にあるかを知ることは重要である。

図—7(a)と(b)は、それぞれ、湿潤露出/乾燥露出状態と濡れ雪氷/乾き雪氷状態における路温と気温との関係を示したものである。解析に用いたデータは、札幌の3地区の観測地点で計測したデータのうち、路面状態が自動間隔撮影カメラにより撮影されたものである。なお、路温データは、地表面下0.5 cmに埋設した熱電対により1990年と1991年の冬期間、1時間間隔で計測され、データロガーに収納されたものである。

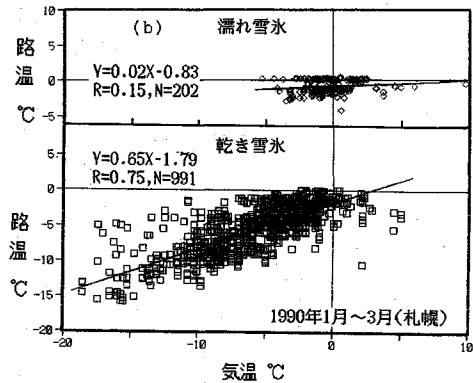
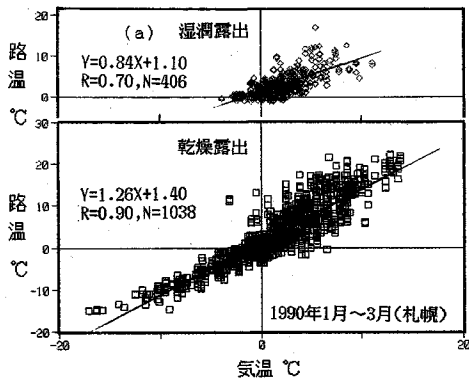


図-7 乾燥と濡れ路面状態での路温と気温との関係

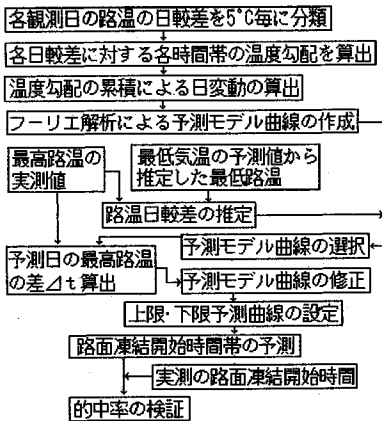


図-8 フーリエ解析モデルのフローチャート

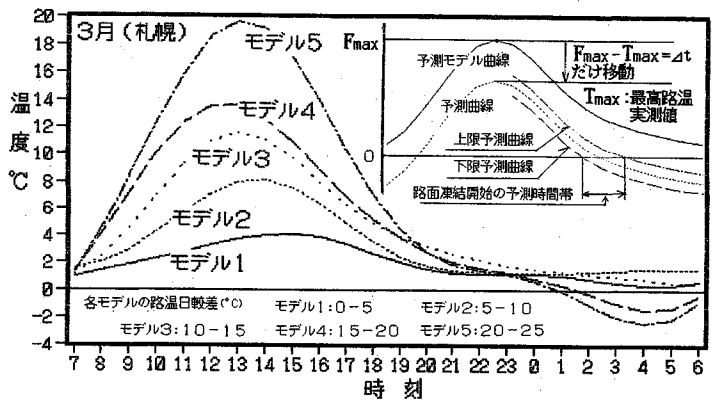


図-9 3月の路温日較差による予測モデル曲線

乾燥露出状態は湿潤露出状態に比べ、路温の出現範囲が広く気温との相関も良い。一方、路面に雪水があると両者の相関は低くなり、特に、熱的平衡状態に近い凍結ないし融解過程にある濡れ雪水状態では、路温の出現範囲は狭い、時間に対する温度勾配は小さい、気温との相関もほとんどない等の温度特性が現れる。このことから、路温の時間的変動を見ることにより、路面状態をおおよそ推定することも可能である。

4. 路面凍結の予測手法

(1) 概要

路面凍結の予測手法として、解析理論と入力条件の与え方が異なるフーリエ解析と熱収支解析による2つの予測手法を考えた。解析モデルの作成、入力条件の設定及びモデルの適用は、2章と3章で明らかにした地温の変動・分布特性、路面状況による凍結融解や路温の変動パターンの違い等の解析結果に基づいている。

2つのモデルはともに、14時頃までの気象条件ないし路面状況等を入力条件として与え、夕方以降の路面凍結の時間帯を予測するものである。予測は、算出された路温の日変動の予測曲線より全体に1°C高く設定した

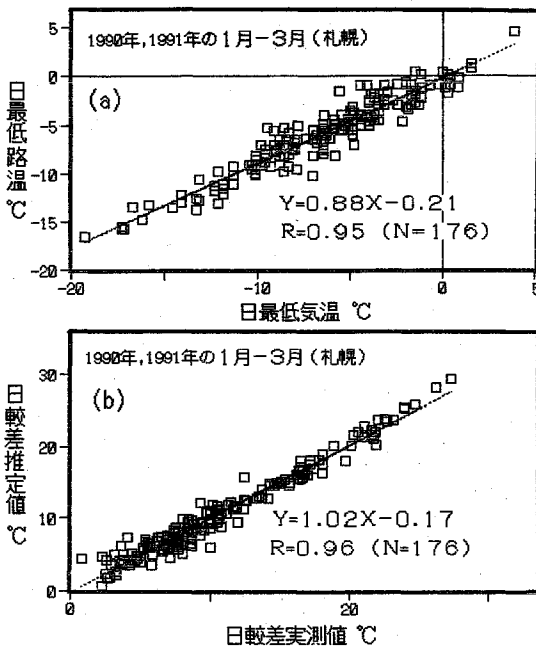
上限予測曲線と1°C低く設定した下限予測曲線を用い、2本の予測曲線が0°C線を挟む時間帯で路面凍結が発生するものとした。これは、凍結過程で路面に水と氷が混在する温度範囲を-0.5~0.5°C、熱電対の測定精度を±0.5°Cと仮定したことに基づいていると同時に、時間帯の予測手法により、入力条件の誤差や路面状態が一樣でない場合の横断・延長方向の路温の不均一性をも考慮するためである。英国の予測システムでも、楽観的(Opt. Prediction)と悲観的(Pes. Prediction)の2本の予測曲線により路面凍結の予測を行っている⁵⁾。

このモデルの適用性を調べるために、鷹栖試験ヤードと札幌の市道で計測したデータを用いて、実測値との比較から現場における予測精度の検証を行った。

(2) フーリエ解析による予測モデル

a) 予測手法の手順と予測モデル

予測手法の手順は、図-8に示す通りである。先ず、各月の観測日を路温の日較差(最高路温-最低路温)で5°C毎に分類し、各分類に対する7時~翌朝の6時迄の1時間毎の温度勾配の平均値を求め、それらの累積値による日変動を算出した。この日変動をフーリエ解析により理論曲線を作成し、これを各路温の日較差に対する



図一〇 日最低の気温と路温及び日較差と実測値と推定値との関係

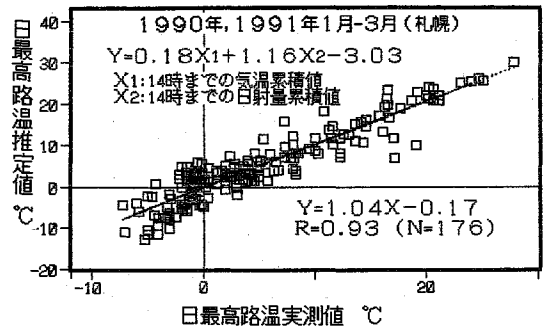
予測モデル曲線とした。図一〇は、伏見地区の市道において計測した路温データによる予測モデル曲線で、路面の凍結融解により路温の日変動が大きい3月について示し、予測曲線の設定方法の説明を加えたものである。

予測モデル曲線のあてはめには、予測地点の14時までの路温の実測値から得られる最高路温と、14時～翌朝6時における最低気温の予測値が与えられることを前提としている。最低気温と最低路温とは良い相関を示すので^{10),15)}、最低気温の予測値から推定した最低路温と実測の最高路温から日較差が推定され、それに対応する予測モデル曲線が決定される。予測モデル曲線は、温度勾配の累積値で路温の時間的変動を示しているにすぎないので、その最大値 F_{max} が実測の最高路温 T_{max} になるように、両者の差 ($F_{max} - T_{max}$) = ΔT だけ上下に平行移動させて実際の路温の日変動に近似させる必要がある。

これは、予測モデル曲線を与えるフーリエ曲線の式(1)において、 $F(t)$ の平均値を示す項の A_0 に ($A_0 + \Delta T$) を代入して予測曲線を作成し、次に、凍結開始時間帯の予測を行うために、予測曲線をそれぞれ $\pm 1^\circ\text{C}$ 上下に平行移動させた上限予測と下限予測の曲線を作成することにある。路面凍結開始時間の的中については、予測日の実測路温が 0°C になる時間が上限・下限予測の2本の曲線により挟まれる時間帯の中に入っていればOKである。

b) 予測モデル曲線の選択

モデル曲線を選択するためには、予測日の路温の日較差を予測する必要がある。図一〇(a)は、札幌におけ



図一〇 日最高路温の実測値と推定値との関係

る日最低気温と日最低路温との関係を示したもので、気象予報等により14時～翌日の早朝にかけての最低気温が与えられれば、最低路温はかなり良い精度で推定できる。最高路温は、14時迄の路温の実測値から得られるので、路温の日較差が推定できる。この推定路温日較差と実測路温日較差とを比較すると、図一〇(b)に示すように、両者には高い相関があり、かなり良い精度でモデル曲線の選択ができることが分かる。選択された予測モデルを最高路温の実測値に基づき修正すれば、路面凍結開始時間帯を推定する予測曲線が求められる。

路温を測定せずに気象データのみを用いる場合は、7時～14時迄の気温と日射量の累積値 x_1, x_2 を説明変数として、最高路温 Y は式(7)より推定することも可能である。 b_1, b_2, a の係数は重回帰分析により決定する。

$$Y = b_1x_1 + b_2x_2 + a \dots\dots\dots(7)$$

図一〇は、式(7)により算出した札幌における最高路温と実測の最高路温との相関を示したものである。一般に、最高路温と気温との相関は良くないが、式(7)による推定方法を用いると比較的良好な相関が得られた。しかし、気象測地点と予測地点との諸条件の違いによる誤差がでやすいので、最高路温を式(7)から求める方法は、主要予測地点以外の地点を補完する場合や、大まかな予測を行う場合等に適していると考えられる。

c) 予測モデルの検証

実測の路面凍結開始時間と予測した路面凍結開始時間帯との比較から、予測モデルの検証を行った。図一〇は、3月の札幌における曇りと快晴の日における予測モデルの適用例を示したものである。表一は、1991年1月～3月における旭川と札幌の観測地点での予測的中率をまとめたものである。両地点とも完全に的中した割合は80%以上、1時間以内のずれを許容すると90%以上に達した。予測がはずれた場合を路面撮影写真や予測日較差と選択した予測曲線との対応等により札幌の現場で検証すると、路面融解水の長時間の滞留のため凍結開始が予測より遅れる場合、予測曲線の選択は正しいが、14時以降の路温低下に伴う温度勾配が急(緩やか)なため凍結開始が予測より早く(遅く)なる場合等が主に見ら

表-2 路面凍結開始時間帯的中率

地点	フーリエ解析モデル					熱収支解析モデル					
	月	Y	YN	N	的中率1	的中率2	Y	YN	N	的中率1	的中率2
旭川	1月	27	2	2	87%	94%	29	2	0	94%	100%
	2月	23	4	1	82%	96%	25	3	0	89%	100%
	3月	26	2	3	84%	90%	25	3	3	81%	90%
合計	77	8	5	84%	93%	79	8	3	88%	97%	
札幌	1月	29	0	0	100%	100%	28	0	1	96%	96%
	2月	24	3	0	89%	100%	24	2	1	89%	96%
	3月	26	3	2	84%	94%	28	2	1	90%	97%
合計	79	6	2	91%	98%	80	4	3	92%	97%	

Y: 的中の日数, N: 非的中の日数, YN: 1時間以内の進み又は遅れ予測の日数の中率1: $\{Y/(Y+YN+N)\} \times 100$, 的中率2: $\{(Y+YN)/(Y+YN+N)\} \times 100$
 札幌は1/25, 1/30, 2/20欠測

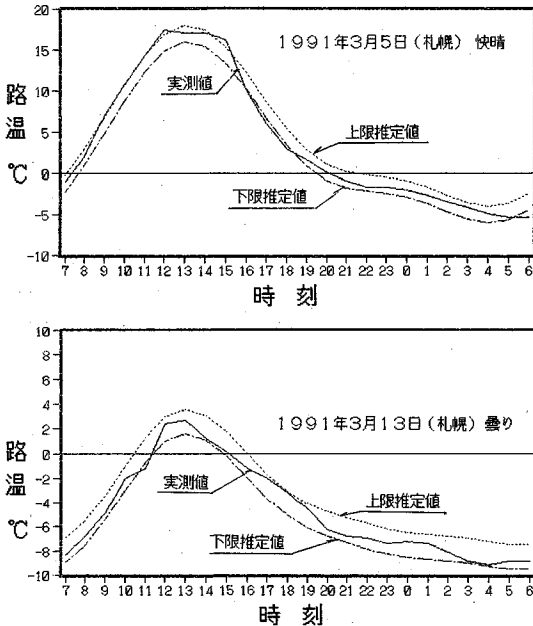


図-12 フーリエ解析モデルによる路面凍結の予測結果

れた。この問題は、2、3時間前の短時間予測や路面凍結検知器の利用等によりリアルタイムデータをより多く取り込むことによってかなり改善でき、現状においても、1時間以内のずれを許容した的中率が90%以上であるので現場への適用が可能であると考えられる。

(3) 熱収支解析による予測モデル

a) 予測モデルの概要

熱収支解析プログラム (MICRO) は、Smithら¹⁶⁾が永久凍土地域で夏期に融解する表層部、いわゆる活動層の侵入過程を解析するために開発した一次元モデルで、本研究では、舗装体に適用できるように修正を加えてパソコンで簡便に処理できるようにした。また、このプログラムの適用性については、既往の研究で述べた⁶⁾。

解析プログラムの概要は、図-13のフローチャートに示すとおりである。平衡地表面温度は、気温、日射量、風速等の道路周辺の気象情報、アルベド、路面積雪、表層ラフネス等の路面情報を入力データとして、ある時刻における地表面での熱収支を成立させる繰返し計算によ

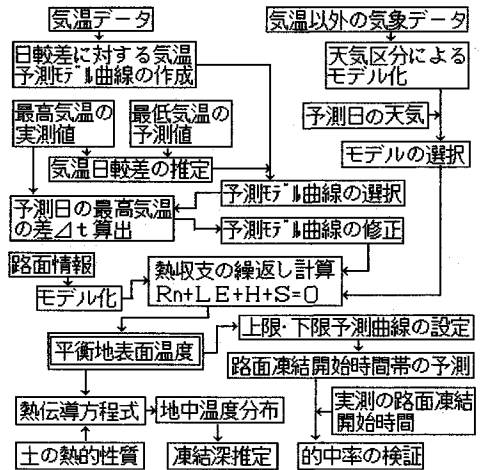


図-13 熱収支解析モデルのフローチャート

り求められる。平衡地表面温度の日変動が、路面凍結時間の予測曲線になる。路面凍結開始時間帯の予測は、フーリエ解析による予測モデルと同様の方法を用いた。

b) 平衡地表面温度の算出理論

地表面を介して、大気ないし地中への熱伝達は、式(8)により表される。

$$R_n + LE + H + S = 0 \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 R_n 、 LE 、 H 及び S は、それぞれ放射収支量、地表面からの水蒸気輸送による潜熱伝達量、大気と地表面との温度差による顕熱交換量、地中伝導熱流量である。放射収支 R_n は、式(9)に示すように短波放射収支 $(1-A) \cdot R_s$ と長波放射収支 ΔR とに分けられる。

$$R_n = (1-A)R_s + \Delta R \dots\dots\dots (9)$$

A は地表面のアルベドで、 R_s は全天日射量である。長波放射による分 ΔR は、式(10)から求められる。

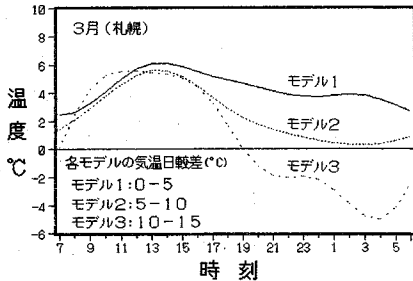
$$\Delta R = (1-n^2 \cdot K) [\sigma T_e^4 - \sigma T_a^4 \{1 - 0.26 \exp(-7.77 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta T)\}] \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 T_e は地表面温度、 T_a は気温、 σ はステファンボルツマン定数、雲量 n 、雲のタイプによる係数 K 、 ΔT は 0°C からの気温のずれである。

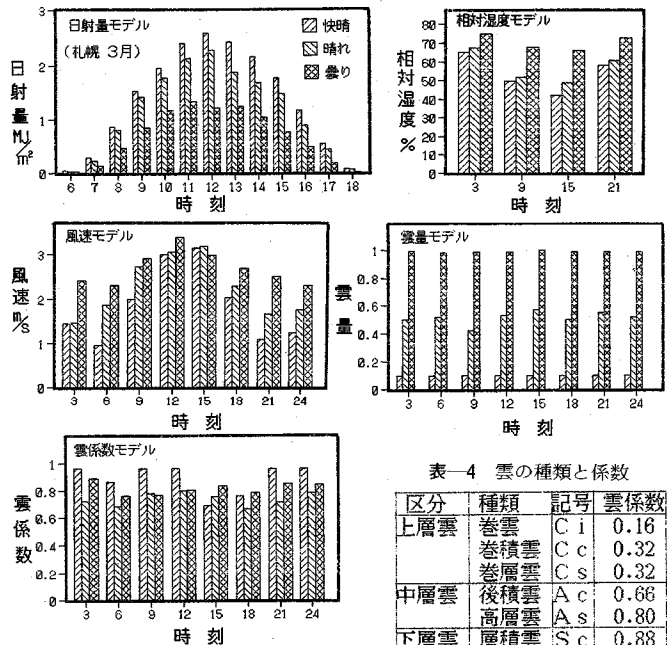
地表面からの潜熱伝達 LE は、路面や雪氷面が低温の場合には無視できるが、 0°C 以上では日射が潜熱伝達に変換される割合が増加する。 LE は式(11)で示され、 α は地表面の湿潤度ファクターで、ポーエン比(顕熱と潜熱の比)等を用いて推定できるが、Smithらは近似値として湿地帯で1.26、その他の地域で1.00を用いている。このモデルでは路面状態により $\alpha=0-1$ に分類したが、感度分析等により、更に検討を加えたい。 β は飽和水蒸気圧 vs 温度曲線の勾配で、乾湿計の定数 γ は式(12)から求められるが、 $\beta/(\beta+\gamma)$ は気温の関数で与えられる。

表—3 入力条件の内容

(気象要素)	(路面状態)	(土の熱的性質)
日射量 1y/h	アルベド 0~1	体積含水比 %
雲量 0~1	湿度度7アッー0~1	熱伝導率 cal
雲のカタ0~1	路面積雪厚さcm	cm・s・°C
気温 °C		熱容量 cal
風速 cm/sec	路面凍結検知器 Thermal Mapping が整備	cm ³ ・°C
気圧 hPa	されれば正確な路面情報が得られる。	



図—14 3月の気温日較差によるモデル曲線



図—15 札幌の3月の気象モデル

表—4 雲の種類と係数

区分	種類	記号	雲係数
上層雲	巻雲	Ci	0.16
	巻積雲	Cc	0.32
	巻層雲	Cs	0.32
中層雲	後積雲	Ac	0.66
	高層雲	As	0.80
下層雲	層積雲	Sc	0.88
	層雲	St	0.96
	乱層雲	Ns	0.99
垂直の発達雲	積雲	Cu	0.96
	積乱雲	Cb	0.96

$$LE = \alpha(R_n - S) \cdot \beta / (\beta + \gamma) \dots\dots\dots (11)$$

$$\gamma = C_p p / 0.622L \dots\dots\dots (12)$$

(C_p : 空気 の 定 圧 比 熱, p : 大 気 圧, L : 水 の 気 化 熱)

顕熱伝達量 H は式 (13) で示され, ここで, C は空気 の 熱 容 量, Γ は 乾 燥 気 温 低 減 率 (乾 燥 断 熱 減 率 と も 呼 ば れ, 乾 燥 空 気 塊 が 断 熱 上 昇 す る 場 合 の 温 度 の 減 少 率, $\approx 0.98 \times 10^{-2} \text{C/m}$), T_2 は 高 さ Z_2 で の 気 温 で 是 れ 熱 伝 達 係 数 K_h は, 空 気 の 密 度 ρ , カ ル マ ン 定 数 K , Z_2 で の 風 速 U_2 及 び 地 表 面 粗 度 を Z_0 と す る と 式 (14) か ら 算 出 さ れ る.

$$H = K_h \cdot C (T_2 - \Gamma Z_2 - T_0) \dots\dots\dots (13)$$

$$K_h = K^2 U_2 \rho / \{\ln(Z_2/Z_0)\}^2 \dots\dots\dots (14)$$

地中伝導熱流量 S は式 (15) で示され, ここで, λ は土の熱伝導率, T_0 は深さ D_z における地温である.

$$S = \lambda (T_0 - T_\phi) / D_z \dots\dots\dots (15)$$

c) 入力条件

熱収支解析モデルにおける入力条件の項目数は多く, 平衡地表面温度を予測するための入力条件の設定が煩雑である. そこで, 入力条件をモデル化して, 予測日の14時頃までの路面状態, 天気, 気温及び翌朝にかけての最低気温予測値が与えられれば, 客観的に予測入力モデルの選択ができるようにした. 気象モデルの作成は旭川と札幌の観測現場の気温データと気象台の観測日原簿に基づき行った. 表—3は, 入力条件の内容をまとめたものである. 気象モデルの選択の目安となる天気は, 観測日原簿に3時間毎に示されている天気区分が, 14時以降の天気予報として与えられると仮定した.

交通車両による外乱, 例えば, 車輪走行による強制乱流, タイヤと路面の摩擦熱等は定量化が困難であるので無視した. また, 道路周辺の地形や建物の影響を受けやすい日射量や風速等は, 路温の予測値と実測値との感度分析により, 作成した気象モデルを修正できる.

• 気温

フーリエ解析による路面温度の予測モデルと同様の方法を用いて, 気温の日較差を5°C毎に分類した温度勾配累積値による気温モデル曲線を作成した. これを気温の予測曲線にするには, モデル曲線が与える最高温度を14時までの最高気温の実測値に一致させるように上下に平行移動させればよい. モデルの選択は, 14時までの最高気温実測値と翌朝6時まで最低気温予報値から気温の日較差を求めればよい. 図—14は3月の札幌における気温モデル曲線を示したものである.

• 気温以外の気象条件

日射量, 雲量, 雲係数, 風速及び相対湿度は, 旭川と札幌気象台の1987年~1991年の4年度における11月~3月の地上気象観測日原簿に基づき, 各月における天気別の時間帯気象モデルの作成を行った. 各気象要素の時間帯の間隔は1989年以前の観測日原簿に基づいており, 天気は気象庁の分類を準用して雲量により, おおまかに快晴, 晴れ, 曇りの3区分とした¹⁷⁾. この天気区分により各時間帯の気象要素観測値を日単位で整理し, 月平均値を算出した. 図—15に札幌の3月における各気

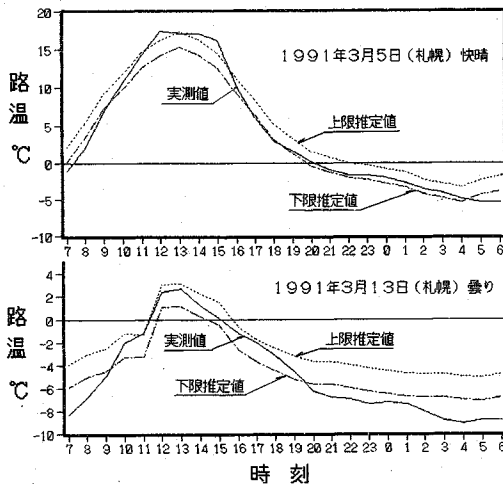


図-16 熱収支解析モデルによる路面凍結の予測結果

要素のモデルを示した。

ここで、天気区分と雲量の関係は次の通りである。
 快晴：全天空に対する雲に覆われた部分の見かけ上の割合を10分数で表した時、その雲量が1以下の時
 晴れ：同様に、2以上8以下の時
 曇り：同様に、9以上の時

雲係数は、表-4の区分¹⁶⁾に基づきある時間帯に出現した雲の種類と量を整理し加重平均して算出した。なお、気圧については日変動が小さいので省略したが、札幌の3月における4年間平均は、1011~1013 hPaである。

・路面状態

アルベドは、道路雪氷の種類別発生頻度の経時観測の際に計測したデータを用いてモデル化した^{18), 19)}、湿潤露出~濡れ雪氷~乾き雪氷~新雪に対応するアルベドは、おおよそ0.1~0.3~0.5~0.8である。本研究では14時の路面状態が既知で、14時以降の天気予報が与えられると仮定し、凍結過程における一般的な路面状態の変動パターンや観測日原簿の天気区分に基づきアルベドを設定した。路面状態は、既往の研究で述べた路面凍結検知器等を設置することによりきめ細かな路面情報が得られる⁶⁾。

・土の熱的性質と地中熱伝導の境界条件

舗装材料と土の熱的性質は、乾燥密度と含水比の一般値を用いて設定し、熱伝導率はJohansenの計算式²⁰⁾により算出した。地中熱伝導に係わる境界条件は、2章の解析結果に基づき、ほぼ不易層として考えられる深さとその地点の地温を入力した。

d) 予測モデルの検証

予測モデルの適用性を検証するために、フーリエ解析によるモデルと同様の方法で旭川と札幌の現場における中率を算出し、表-2にまとめた。

図-16は、図-12と同じ日の札幌に対し熱収支解析

によるモデルを適用し、路面凍結の開始時間帯を予測した結果である。予測が完全に的中した割合は80%以上、1時間以内のずれを含めると90%以上で、フーリエ解析による予測モデルとほぼ同様の結果を得た。

非的中は、天気区分により選択した日射量のモデル値や路面状態によるアルベドの設定値と実際とのずれが放射収支量に影響を与えた場合、天気の急変による気温の予測値や風速のモデル値と実際とのずれが、大気と路面との顕熱交換量に影響を与えた場合に発生していると考えられる。また、フーリエ解析モデルによる予測と同様に、堆雪帯からの路面融解水の存在も予測精度に影響を与えていた。このように入力条件が実際と大きく違っていると、平衡地表面温度の算出結果と実際の路温とに食い違いが生じ、凍結開始時間を実際より早くあるいは遅く予測する結果となっている。これらの問題は、客観性と簡便性を重視した予測入力データの選択ときめ細かさの程度に起因しているが、現状でも現場へ適用できる予測精度をほぼ有していると考えられる。

5. 結 論

本研究で得られた結論を要約すると、以下の通りである。

(1) 地温や気温の日周期、年周期変動は、第3項までのフーリエ級数展開により、実測値にかなり近似した曲線を与える。従って、フーリエ解析による路温の予測曲線や熱収支解析における入力条件としての気温予測曲線は第3項までの展開式で表せばよいことが分かった。

(2) 地温の日較差、年較差の深さによる減衰、位相の遅れは、実測値を用いて理論的に説明することができる。任意の深さの地温、地温の日変動の及ぶ深さ、不易層の深さとその温度等、地温の分布・変動特性を把握することは、熱収支解析モデルの簡略化や初期条件・環境条件の設定において有用である。

3) 道路において凍結融解が頻繁に繰り返される深さは、表層のアスファルト混合物層に集中しており、日変動の及ぶ深さの約1/5で浅い。その時の路温の変動には規則性があり、日最低路温と日最高路温は変動パターンを検討する際の重要な目安となる。また、一冬の路面の凍結融解回数は、気象条件や道路・交通条件により変動するが、平均すると車線中央で50回程度である。

(4) 路面が乾燥露出や乾き雪氷の状態では、路面温度と気温との相関は比較的良好だが、熱的平衡状態に近い凍結・融解過程にある湿潤露出や濡れ雪氷の状態では、路面温度の範囲は狭く、気温との相関は低い。これらの関係は、リアルタイムの路温データから現時点の路面状態を予測する上で有用である。

(5) 日最低気温から推定した日最低路温と日最高路温の実測値から算出した路温の日較差は、実測の日較差

とかなり良い相関を示す。路温の温度勾配累積値による予測モデル曲線を日較差で分類することにより、路温の変動パターンをよく表現することができ、フーリエ解析による路面凍結予測モデルは、予測手法の一つとして位置づけられる。日最高路温は、気温と日射量の累積値の重回帰分析によっても求められるが、推定精度はやや低下するので、主要予測地点を補完する場合に適している。

(6) 熱収支解析による路面凍結予測モデルは、入力条件をモデル化することにより、現場でも利用しやすい予測手法に改良することができた。道路雪氷観測結果による路面状態の分類、最近4年間における気象台の観測日原簿に基づく天気別、時間帯別の気象条件及び気温の予測曲線は、予測精度の点から入力条件として適用できることを明らかにした。

(7) フーリエ解析モデルおよび熱収支解析モデルによる路面凍結予測に関して、上限予測と下限予測の2本の曲線で凍結開始時間帯を予測する方法は、路面状態が一樣でない場合の横断ないし延長方向の路温の不均一性を考慮する上で有効であると考えられる。両者の予測手法を旭川の試験現場および札幌の市道に適用し、1~3月の的中率による検証を行った結果、的中率は80%以上、一時間以内のずれを許容した的中率は90%以上になり、現場への適用が可能であることが分かった。

的中率の向上には、Thermal Mappingの導入、路面凍結検知器の利用、短時間予測等、適用箇所に応じた雪氷管理システムの観点から、今後、路面凍結予測システムの検討を加えたい。

謝辞：本研究の遂行に当たっては、日本道路公団札幌建設局の問谷邦利氏、札幌総合情報センター(株)の石井昭七氏に、また、論文のとりまとめに際しては、北海道大学工学部、加来照俊教授、北海道大学低温科学研究所、前野紀一教授に大変お世話になった。ここに、心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Illinois DOT District 1 Bureau of maintenance : Snow control manual, pp. I-1~V-13, Oct., 1984.
- 2) Ministry of Transportation and Communication, Ontario : Management and control of winter operations, pp.126, Oct., 1984.

- 3) 武市靖：道路の雪氷管理に関する調査研究，開発論集，第38号，pp.23~53，Oct.，1986.
- 4) Rayer, P.J. : The Meteorological office forecast road surface temperature model, Meteorological Magazine, Vol.116, pp.180~190, 1987.
- 5) Thornes, J.E. : A preliminary performance and benefit analysis of the UK national road ice prediction system, Meteorological Magazine, Vol.118, pp.93~99, May, 1989.
- 6) 武市靖・前野紀一・久保宏：路面凍結の検知と推定手法に関する研究，土木学会論文報告集，No. 440/IV-16, pp. 155~164, Jan., 1992.
- 7) 増田芳太郎・青木茂：降雪・凍結予測システム，雪と道路，No. 8, pp. 59~69, 1986.
- 8) 井上元哉・高田吉治：路面凍結の予測システム，雪氷，33巻4号，pp. 35~53, 1971.
- 9) 川下研介：熱伝導論，オーム社，pp. 65~79, 1971.
- 10) Alfred R. Jumikis : Thermal Geotechnics, Rutgers University Press, pp.147~169, 1977.
- 11) 秋山政敬：アスファルト舗装体の温度に関する調査研究，土木学会論文報告集，第246号，pp. 105~115, 1976.
- 12) 村橋敏孝・問谷邦利・横田聖哉：道路盛土における凍上試験，第27回土質工学研究発表会講演集，pp. 1193~1198, 1992.
- 13) 武市靖・佐川淳一：舗装体の温度分布特性に関する研究，北海学園大学工学部研究報告，第14号，pp. 169~212, 1987.
- 14) 武市靖・久保宏：AMeDAS データを用いた凍結深さの経時変化の推定手法，土質学会論文報告集，Vol. 31, No. 2, pp. 217~225, June, 1991.
- 15) 姫野賢治・渡辺隆・勝呂太：アスファルト舗装の内部温度の推定に関する研究，土木学会論文報告集，第366号/V-4, pp. 123~132, 1986.
- 16) Smith, M.W. : Numerical simulation of microclimatic and active layer regimes in a high arctic environment, ALUR 74-75-72, Dept. of Geography, Carleton Univ., pp.1~56, 1975.
- 17) 和達清夫：気象の事典，東京堂出版，pp. 376~377 & pp. 153~156, 1986.
- 18) 武市靖・前野紀一：道路雪氷の種類別発生頻度とその特性，開発論集，第42号，pp. 7~30, Oct., 1988.
- 19) 近藤純正・沼田洋一・山崎剛：積雪面アルベードのパラメータ化，雪氷，50巻4号，pp. 216~224, Dec., 1988.
- 20) Omar T. Faraouki : THERMAL PROPERTIES OF SOILS, TRANS TECH PUBLICATIONS, pp.102~119, 1986.

(1992.9.21 受付)

STUDIES ON PAVEMENT FREEZING PREDICTIONS

Kiyoshi TAKEICHI

This paper clarified ground thermal regime properties such as periodical fluctuations, pavement freezing/thawing phenomena, relationships between surface temperature and air temperature related to a pavement freezing, and proposed pavement freezing prediction methods based on Fourier analysis model and Energy balance analysis model. The precision and availability of two prediction methods are verified by prediction ratio calculated from in-situ observed data and predicted results.