

路面凍結の検知と推定手法に関する研究

武市 靖*・前野紀一**・久保 宏***

本研究は、路面凍結の検知と推定手法についてまとめたものである。経時観測により路面凍結に係わる道路雪氷の特性と変成過程を明らかにし、新たに開発した誘電式路面凍結検知器により路面の雪氷状態と凍結の有無を判別する手法を提案した。また、検知器より得られる路面情報や気象観測データ等を用いて、コンピュータ解析モデルによる路面温度の推定を行い、路面凍結予測の観点からも考察を加えた。

Keywords: snow/ice on pavements, detection and estimating method, freezing detector, snow/ice control

1. ま え が き

近年、積雪寒冷地の冬期間における道路の雪氷管理は、除雪・排雪による交通の確保のみならずきめ細かな路面管理が重要な課題となってきた。これは、社会・経済活動に係わる夏期交通と冬期交通との差がほとんどなくなってきたこと、また、スパイクタイヤの使用規制には、それと表裏一体の関係にある交通安全の確保が不可欠であること等の理由により、路面管理が重要な社会的要請となってきたためであると考えられる。このような社会的要請に応えるためには、路面情報を道路管理者および利用者に提供し、迅速かつ適切な路面管理や路面状態に即した安全走行の励行を可能にする路面管理システムの構築が必要である。

北米や北欧諸国では、塩の散布を前提とした除・排雪によって、路面を露出させる雪氷管理政策 (Bare Pavement Policy) を原則としている場合が多い。しかも、路面凍結の検知とその予測により道路管理要員の配置や滑り止め材・塩散布量の最適化を図ると同時に、路面凍結の危険性をドライバーに知らせる装置、システムの研究がすすめられている^{1), 2)}。最近では、路面凍結検知器、詳細な路面情報の収集を目的とした路面温度地図の作成 (Thermal Mapping) および、道路周辺の気象観測による道路気象情報と気象衛星による気象情報等に基づく路面凍結の検知・予測システムが開発され、実用化されている。日本でも、路面凍結検知や道路気象情報システムの開発が積極的に行われており、気象条件の影響を受けやすい高速道路や幹線道路で利用されているが、その運用方法、検知・予測性能および設置費用等、

検討すべき多くの問題点が残されている。

積雪寒冷地域の気象条件は地域によって異なり、冬期間の路面状態は必ずしも一律ではないが、寒さの厳しい地域では凍結路面が発生しやすい。札幌での観測結果によると³⁾、交通量の多い幹線・準幹線道路では、一般に、車面による雪氷の圧密や路面融解水の凍結によって、硬い圧雪、氷板・氷膜が形成されたいわゆる“ツルツル路面”や“アイスバーン”状態になったり、日中の湿潤路面が夜間に凍結路面に急変する頻度も高くなる傾向を示している。特に、峠、日陰になる区間や橋梁区間では他よりも路面凍結が発生しやすい。また、アンダーパス、橋梁のアプローチ部や縦断勾配が大きい坂道区間では、走行車両の駆動と制動の観点から、平坦部の管理水準よりも高い水準が要求される。一系統の路線で管理水準が著しく低い箇所が存在すると、その箇所が例えば、道路利用者にとってスパイクタイヤ使用の判断基準になり、また、交通事故の集中しやすい箇所ともなり、結果として、路線全体の管理水準は低く評価されることになる。従って、路面管理は路線全体の平均的な管理水準の維持のみならず、危険箇所の緩和ないし解消、いわゆる“ピークカット”をいかに行うかも重要な問題である。

そこで、本研究では、冬期間の路面状態の経時観測を行い、道路雪氷の種類別発生頻度・特性と変成過程および路面の露出割合等について調査し、路面凍結の検知とその推定の観点から検討を加えた。この検討結果に基づき、本研究で新たに開発した誘電式路面凍結検知器による道路雪氷の判別および路面凍結の検知手法を示した。更に、路面凍結の予測の観点から、熱収支解析による平衡地表面温度の推定値と実測値との検証を行い、路面状態の観測結果、検知器による路面情報、気象データおよび微気候モデル等の適用方法と推定手法の考え方を述べた。

以上のように、本論文は、諸外国の雪氷管理の取り組

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

** 理博 北海道大学教授 低温科学研究所

*** 正会員 工博 北海学園大学教授 工学部土木工学科

み方をふまえ、現場観測結果に基づく冬期間の路面状態の把握、路面凍結の検知、そして予測の観点から路面温度の推定手法についてまとめたものである。

2. 北米と北欧における道路雪氷管理システム

北米や北欧では、冬期間の道路管理に関する研究がかなり前から進められ、雪氷管理システムの整備に積極的に取り組んでいる。最近では、きめ細かくしかも信頼度の高い路面凍結の検知と予測を可能にするために、道路気象観測点の設置や Thermal Mapping による管理システムの導入が図られている。1989年の時点で、路面凍結が問題となる主要国全体の道路気象観測点の設置数は1700、Thermal Mappingの路線延長が34000 kmである。そのうち、イギリスでは30州に320の道路気象観測点、45のMotorwayのThermal Mapping延長が21500 kmに達しており、この管理システムを積極的にすすめている⁴⁾。特に、パーミンガム大学のThornesらと気象局との共同研究により開発された路面温度予測モデル式(TMI model IとII)の利用により、50以上の州や地域では、“Open Road service”いわゆる不凍結道路の提供と滑り止め材・塩散布量の最適化による経費の節減を図っている^{5),6)}。

アメリカでは、1970年前後から、アメリカ道路連邦局(FHWA)が中心となり五大湖周辺の各州で、路面温度と水分検知を主体とした検知器の開発が行われ、路面凍結発生頻度が高い橋梁区間の床板での実施例が多く報告されているが、検知精度について問題点が指摘されている⁷⁾⁻⁹⁾。また、実際の雪氷管理に関しては、道路パトロールや気象予報コンサルタントから提供される管理区域内の気象情報を管理事務所が集約して、気象条件や路面条件に対応した路面凍結の予防措置、除・排雪対策を実施している¹⁰⁾。最近では、SHRP計画の一環として、雪氷管理が研究プロジェクトに組み込まれており、路面と雪氷の付着破壊等の基礎的分野から管理システムに至るまで広範囲な研究を行っている¹¹⁾。カナダのオンタリオ州、ケベック州等では、道路規格別の管理基準を設定し、支線まで行き届いた雪氷管理を行っている¹²⁾。しかし、アメリカとカナダ両国を合わせた道路気象観測点の設置数は110、Thermal Mappingの路線延長が500 kmで、イギリスより低い水準にある。

ヨーロッパ諸国の雪氷管理に対する取り組み方については次のようになっている¹³⁾。

フランスは道路局が気象レーダと気象衛星による道路気象の予測モデル(PERIDOT)と情報提供サービスシステム(METELOTTEL)を採用しており、更に、小規模地域の気象予測モデル開発を進めている。スイスでも同様に、気象レーダによる気象観測と同時に、凍結警報装置によって気温、路面の温度および湿度を観測して、

表—1 道路雪氷の分類¹⁶⁾

大分類	名 小 分類	別称・通称
新 雪	乾き新雪 DNS(dry new snow)	—
	濡れ新雪 WNS(wet new snow)	
圧 雪	乾き圧雪 DCS(dry compacted snow)	しまり
	乾き軟圧雪	
	濡れ圧雪 WCS(wet compacted snow)	
粉 雪	粉 雪 PS (powder snow)	—
粒 雪	乾き粒雪 DGS(dry grain snow)	ざらめ ざくれ ざくざく
	濡れ粒雪 WGS(wet grain snow)	
水べた雪	水べた雪 SL (slush)	シャーベット
氷 板	乾き氷板 DIC(dry ice crust)	アイスバーン 氷 盤
	濡れ氷板 WIC(wet ice crust)	
氷 膜	乾き氷膜 DIF(dry ice film)	アイスバーン つるつる
	濡れ氷膜 WIF(wet ice film)	

※ 乾燥露出 DB(dry bare)、湿潤露出 WB(wet bare)

散布薬剤の含有率をおおよそ推定し、薬剤散布の適正化を行っている。

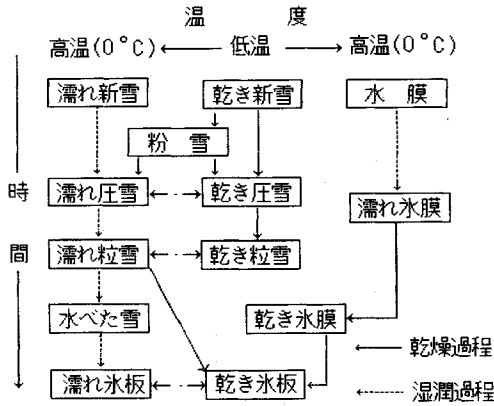
スカンジナビア諸国のうちフィンランドでは、路面監視システム(ICECAST)や道路気象観測点(MILOS)が一般に利用されており、路面現況の把握と1~2時間後の路面凍結の予測を行っている。ICECASTに組み込まれている路面センサ(DRS12)は、路面温度や電気伝導度の測定値等から路面の霜、雪、水、塩分、湿潤状況等を判別するもので、判別が困難な乾き雪やブラックアイスに対しては、電気容量の測定を行っている¹⁴⁾。また、路面状態を摩擦係数によるサービスレベルで分類し、路面管理対策や交通事故分析を行っている。スウェーデンはこの10年間に、道路気象情報システム(VVIS)と局地気象モデルの開発を行い、道路管理に用いている。更に、測定車による気温、路面温度、路面の凍結状況の観測を行い、Thermal Mappingの基礎データを収集して、地形別の気象と路面凍結との関係について研究を行っている。

このように、諸外国では路面管理システムやThermal Mappingの導入に代表されるようなきめ細かな路面情報に基づく路面の凍結検知と予測に積極的に取り組んでいる。

3. 冬期間における路面状態

(1) 道路雪氷の分類

冬期間の路面状態は、道路雪氷の変化の影響を大きく受ける。道路雪氷は道路周辺の気象変化による凍結・融解および走行車両による圧密、攪乱等の熱的・機械的作用により一日の間に様々な変化をするが、道路雪氷は表—1のように分類することができる。表中に本文中で用いている道路雪氷の種類の名称と略記号等を示した¹⁵⁾。なお、別称・通称を示していない粉雪は、路面上の新雪が車両により攪乱され風や車両によって舞い上がりやすいものである。また、乾燥露出と湿潤露出は、路面状態を



図一 道路雪水の変化系統図¹⁶⁾

示すものであるが、道路雪水そのものではないので欄外に付け加えた。この分類は、本研究の各観測現場における道路雪水の発生頻度の解析に用いたもので、複雑な道路雪水を目視観測により分類する場合に便利である。

図一は、道路雪水の変化系統図を示したものである。縦軸は、気象条件や走行車両の影響による道路雪水の時間的変化を、横軸は、気温ないし路面温度の状態とその変化を指標とし、同時に、道路雪水の凍結における乾燥過程と融解における湿潤過程を示した¹⁶⁾。

(2) 道路雪水の種類別発生頻度

a) 現場観測

1987年～1990年の3年度の冬にわたり道路雪水の種類別発生頻度の現場観測を実施した。観測地点は、北海学園大学工学部(札幌市中央区南26西11)周辺の国道230号線と生活道路で、観測の概要は以下の通りである。

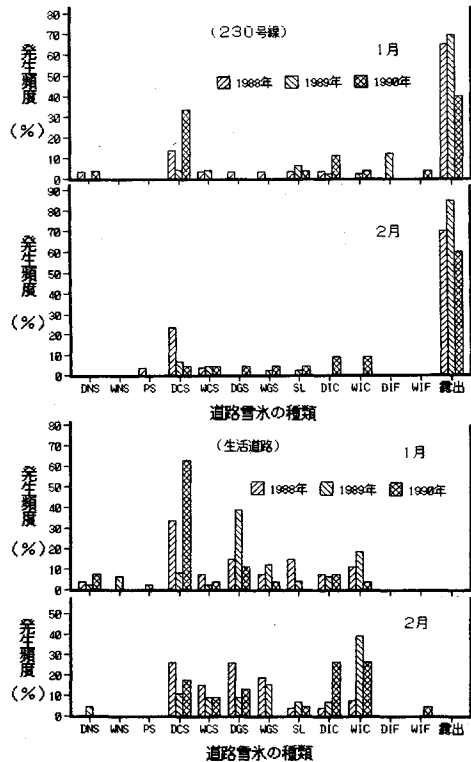
- ・観測期間：12月～3月の間、日曜を除く毎日午前10時頃観測を実施した。

- ・観測項目：道路中央、車道、路肩部別の道路雪水の種類、路面積雪厚さ(生活道路のみ)、路面の露出率、天候、気温、路面温度、風速、アルベド

- ・観測方法：延長約30mの両側縁石間の車道部を観測範囲として、道路雪水は目視による記録を行い、路面が露出している割合(露出率)は、10%きざみの算定を行った。同時に写真撮影とビデオカメラ撮影を行い、観測者による観測結果の食い違いを修正した。

b) 道路雪水の種類別発生頻度と路面の露出率

図二は、1月、2月の230号線と生活道路における道路雪水の種類別発生頻度を示したものである。また、交通量が道路雪水状態に与える影響が大きいため、表二には230号線と生活道路の11月～2月の冬期間における12時間交通量の観測結果を示した。230号線の路面は露出状態の発生頻度がかなり高いのに対し、生活道路では圧雪、粒雪、氷板等の各種類の道路雪水がまんべ



図二 国道230号線と生活道路の道路雪水の種類別発生頻度

表二 12時間交通量³⁾ (1987.11～1988.2)

観測日	11/25	12/26	1/22	2/26
230号線	20,349 (1,992)	21,143 (1,700)	18,205 (1,342)	19,781 (1,836)
生活道路	1,038 (47)	678 (30)	934 (37)	783 (50)

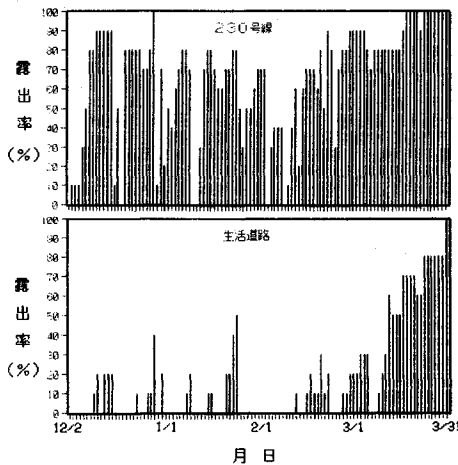
* ()内は大型車交通量

なく発生している路面は露出してない^{3),17)}。

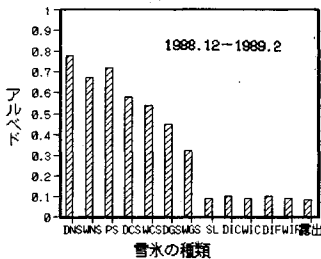
路面の露出状態については1987年～1988年の冬の観測結果を図三に示した。冬期間を通じて230号線では一般に、気温が低く路面積雪厚が2～3cm以上になる降雪のあった日を除いて露出率は平均して80%程度である。一方、生活道路では3月中旬以降になってはじめて路面の50%が露出する状態になり、路面は冬期間ほとんど雪水で被覆されていて大きな変化は見られない。この露出率の違いは、幹線道路である230号線の除雪水準が高いことと、表二に示すように冬期間の交通量が生活道路の約20倍で走行車両の熱的・機械的作用による道路雪水の消失が大きいため等が影響している。

c) アルベド

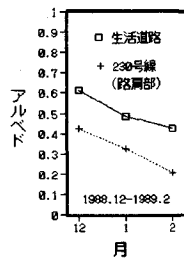
アルベドの測定はアルベドメータを用いて他の観測と同様に10時に行い、交通量の多い230号線は路肩部のみ、生活道路は道路中央部と両側路肩部を測定箇所とした。アルベドは、ある面に入射した日射に対する反射さ



図—3 国道 230 号線と生活道路の路面の露出率



図—4 道路雪氷のアルベド



図—5 アルベドの月平均値

れた日射の比率を示すものである。道路雪氷については表面の色、凹凸、湿り気等の他、雲の状態や周囲の反射・遮蔽物により微妙に変化するが、雪氷の汚れを定量的に評価する上での指標となる。一般に、部分的にでも道路雪氷が融解したり路面が露出すると、その周辺の積雪面や路面のアルベドが低下し、日射を吸収しやすくなり、路面の露出範囲が急激に拡大される。

図—4 は、生活道路で 12 月～2 月に測定した道路雪氷の種類別アルベドの平均値を、図—5 は生活道路中央部と 230 号線路肩部における各月の平均アルベドを示したものである。アルベドは、濡れ雪は乾き雪より低く、水べた雪や凍結融解を繰り返して生成された氷板等は汚れているためにかかなり低くなる^{18),19)}。また、生活道路の各月平均のアルベドは 0.4～0.6 であるが、230 号線の路肩部では 0.2～0.4 となり、雪氷の汚れや露出頻度の影響が大きく現れている。230 号線の走行車線部では日中、露出率は高く、路肩部等の雪氷の融解水により湿潤路面になりやすいのでアルベドは更に低下していると考えられる。

従って、交通量の多い幹線道路では日中、湿潤露出状態の路面の頻度が高くなり、その湿潤路面が夜間には氷膜・氷板の凍結路面に急変しやす。一方、降雪時には

車両による雪氷の圧密で短時間のうちに硬い圧雪が形成され、いわゆる“ツルツル路面”や“アイスバーン状態”になりやすいことが分かる。この点については、5. で述べている現場試験に用いた TV カメラによる路面状態の連続撮影記録からも明らかにされている。従って、幹線道路では特に、路面凍結の検知やその予測を含む雪氷管理システムの整備が必要とされる。

4. 誘電式路面凍結検知器の原理と雪氷検知手法

(1) 既存の路面凍結検知器

北米や北欧等では、凍結検知器を雪氷管理システムの一部に組み込んでおり、日本でも各種の路面凍結検知器が開発されている。本研究では、道路雪氷の観測結果に基づき、リアルタイムでの雪氷検知・路面凍結の判別と予測のためのきめ細かな路面情報の提供が可能な誘電式路面凍結検知器を開発した。

既存の路面凍結検知器は、おおよそ a) 気温計、b) 路面温度計、c) 路面水分検知器の単独使用、および d) 気温計、路面温度計、水分検知器の組合せ、e) 路面温度計、水分検知器の組合せの 5 タイプに分類できる。これらの検知器は、検知精度、設置工事、耐久性、外乱と称される車やごみ等の外的要因による障害、観測面積および維持管理等に関して、計測方式により一長一短があり、特に、路面水分検知器には問題が残されている²⁰⁾。

路面水分検知器には、光電式と埋設電極式が一般に用いられている。前者は、非接触法により、路面に照射した光の乱反射光量を測定して、積雪、凍結、水等を判別する方式で、路面の測定面積が広く埋設工事が不要であるが、水銀ランプの交換を要し(寿命 1 年)、車両等の外乱を受けやすい。また、路面状態が不均一な場合の判別に問題がある。後者は、路面に埋設した電極間の電気抵抗を測定し、水分の有無を判定する。雪氷は内蔵ヒータにより融解して検出するため、乾燥、水、氷、雪の判定の基準は必ずしも明確ではない。特に、氷と雪の区別は原理的に難しいと考えられる。

(2) 誘電式路面凍結検知器の測定原理

路面凍結の判別には、路面温度計測と水分検知が大きな役割を果たすが、これまでの検知方式では、水分が検知されたとしてもそれが水なのか氷なのか、あるいは雪なのかの判別は難しかった。

誘電式路面凍結検知器 (Dielectric Pavement Freezing-detector, 以下、DPF と呼ぶ) は、上記の問題点を解決するために開発したもので、雪氷の誘電特性とコンデンサー原理を応用したものである。DPF は、路面の電気容量(誘電率)と検知器に内蔵されている温度センサーによる路面温度の測定を行い、路面の状況(乾燥、濡れ、水膜、雪、圧雪、氷板等)を判別するものである。特に、誘電率に関する判別の原理は、空気の誘電率の値

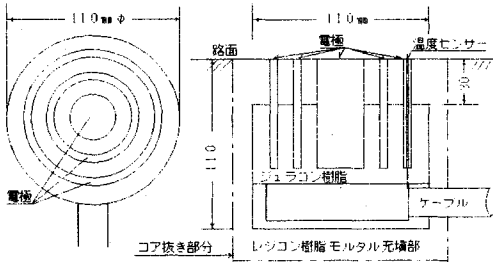


図-6 誘電式路面凍結検知器の構造

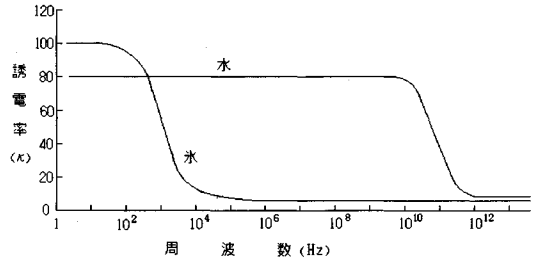


図-8 水と氷の周波数の違いによる誘電特性

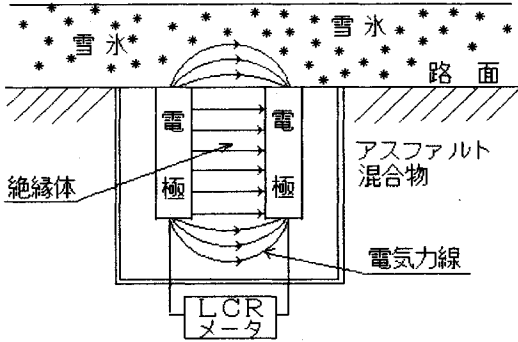


図-7 検知器の測定原理の模式図

が1であるのに対し、氷は約3、水は約80となり、乾燥、水、氷の区別が容易にできることに基づいている。

DPFの形状は図-6に示すように、電極の素材にブロンズを用い、3重リングにして電気容量を増加させ、各雪氷状態の測定精度を上げるようにした。また、当初、検知器表面と路面との雪氷状態に多少相違が見られたが、改良した検知器ではその表面がアスファルト舗装面と同様の肌理(きめ)となるように、電極間の絶縁体としてアクリルと砂の混合物による樹脂モルタルを用いてその問題点を解決することができた^{21), 22)}。

図-7はDPFの原理の模式図である。図には、1組の平行電極の場合を示したが、DPFではリング状の平行電極をその端部が路面に露出するように埋設し、平行電極間の電気容量を測定する。路面の電気容量は、路面に入り込んだ電気力線によって検知される。路面上の電気容量は、各路面状態(空気、水、雪氷等)によって異なるので、路面状況の判別が可能となる。

(3) 路面誘電率の測定と解析方法

路面の誘電率 κ は、ある路面状態における路面の電気容量 C_x と路面に何も無い時の路面の電気容量、すなわち、式(1)による空気の電気容量 C_a との比で定義される。しかし、DPFの構造上、電極上端に載る水や雪氷等の厚さによりその誘電率が異なるので、物質固有の誘電率と区別する意味から、以下、 κ を路面誘電率と呼ぶ。

$$\kappa = C_x / C_a \dots\dots\dots (1)$$

式(1)における C_x と C_a は直接測定できないので、式(2)と式(3)から算出する必要がある。すなわち、ある路面状態で測定される電気容量 C_m は、路面に入り込んだ電気力線で測定された路面の電気容量 C_x 、平行電極の電気容量 C_0 、および電極の下方端部や配線の状態等の原因による浮遊電気容量 C_s の並列接続として、式(2)で表される。

$$C_m = C_x + C_0 + C_s \dots\dots\dots (2)$$

また、路面に何もついていない場合に測定される電気容量 C_1 は、式(3)で表される。

$$C_1 = C_a + C_0 + C_s \dots\dots\dots (3)$$

C_a は、路面上の空気の電気容量である。結局、求める路面の誘電率は、式(1)と式(2)より、式(4)となる。

$$\kappa = C_x / C_a = (C_m - (C_0 + C_s)) / C_a \dots\dots\dots (4)$$

C_a と $(C_0 + C_s)$ は、使用する平行電極の形状、絶縁体の材質、配線等で決まる定数であり、実際の測定前にあらかじめ決めておく必要がある。電気容量の測定には市販のLCRメータを用いればよい。

DPFに用いる平行電極に関して大きさや形に特別の制約は無いので、用途に応じた形状を選択できる。試作実験では、同心円状および平板状の平行電極、いずれについても良好な結果を得た。また、それぞれの電極を多数の対として電気的に並列に接続し、より大きな信号を得ることも可能である。実際にDPFを用いて路面凍結検知を行う場合、式(4)における2つの定数、 C_a と $(C_0 + C_s)$ を決定しておく必要があるが、これについては他の文献^{21), 22)}で示している。

(4) 測定周波数

DPFで使用する周波数は、約1kHzから10MHzの周波数範囲ならば、特に問題はない。しかし、1kHz以下では、図-8に示すように、氷の誘電率の値が水の値に近づき両者の区別が困難になる。また、マイクロウェーブ域の高周波数では路面状態以外の外的要因による影響が大きくなる可能性がある。路面雪氷状態をきめ細かく検知したい場合には、測定周波数は上記の範囲内で低いほどよい。これは、低周波数ほど氷の誘電率は大きいから、氷と空気の混合誘電体である雪の誘電特性の違い

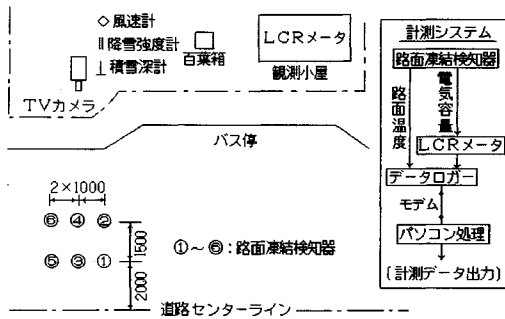


図-9 試験現場の概要と計測システム

を判別しやすいからである^{23)~25)}。周波数 1 kHz と 10 kHz で予備実験をした後、低温実験室において 1 kHz で氷厚を 1 mm と 3 mm にした状態、湿潤状態および乾燥状態の DPF による誘電率の測定値と凍結融解過程におけるその変化を調べた。その結果、乾燥、水および氷の存在と誘電率との間には明確な関係があり、氷厚との関係においても、1 mm, 3 mm で誘電率がそれぞれ 40, 100 程度となり、DPF は路面凍結検知器として十分利用できることが分かった^{21), 22)}。

5. DPFの現場試験による路面状態の判定⁴⁾

(1) 現場試験の概要

札幌市の市道に DPF を埋設して、現場試験を実施した。観測現場は、日交通量は約 10 000 (台/往復) で、大型車混入率は 5 % である。現場に埋設した 6 個の検知器は図-9 に示すように、道路中央側と路肩側にそれぞれ 3 個設置した。DPF 検知器には温度センサーが内蔵されており、路面温度も計測できる。観測小屋に LCR メータを設置し、路面状態により異なる DPF の電気容量を周波数 1 KHz で測定した。測定データは、モデムで転送しパーソナルコンピュータのフロッピーディスクへ 10 分間隔で収納した。観測現場では、路面状態と路面誘電率との関係を調べるために、ビデオカメラを設置し 1990 年 1 月 1 日~3 月 31 日の冬期間、路面状態を連続撮影した。

(2) 路面状態と路面誘電率との関係

道路雪氷の分類と検知器の測定結果に基づき、路面誘電率による路面状態の判別性能と変化に対する追従性について検討を行った。図-10 の (a)~(d) は、代表的な路面状態について車道の中央側 DPF (C) と路肩側 DPF (S) の路面誘電率の計測結果を示したものである。路面状態と路面誘電率 κ との関係において、(a) は気温 T_{air} 、路面温度 T_{pav} 、とも終日 0°C 以下で圧雪路面の状態である。(b) と (d) は、日中路面温度が 5°C 程度まで上昇した後、夜間 0°C 以下となったため、水べた雪、湿潤路面がそれぞれ氷板ないし氷膜の凍結路

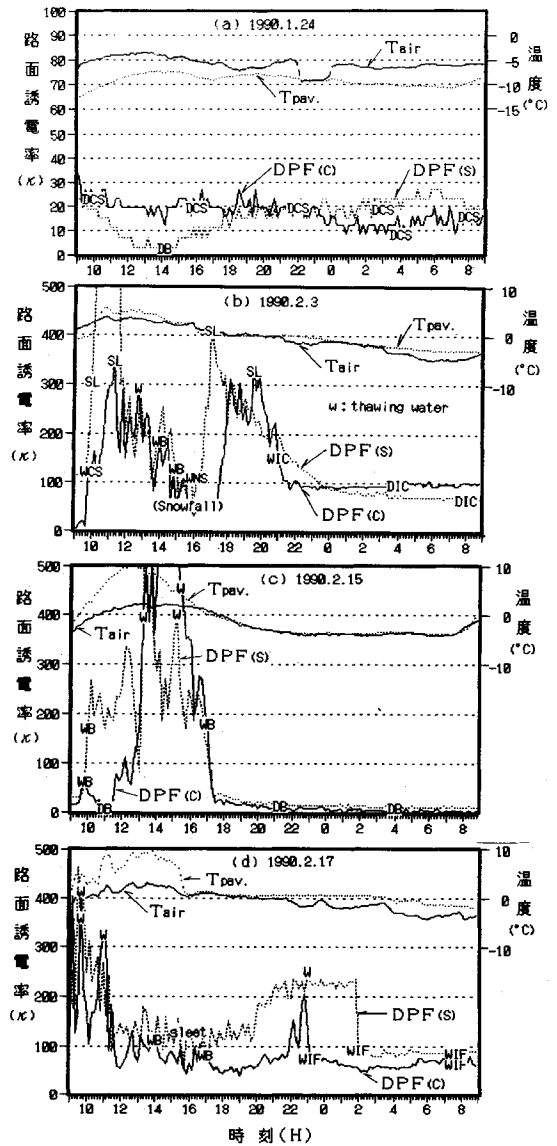


図-10 (a)~(d) 路面誘電率と路面状態との関係

面に变化した状態である。一方、(c) は、日中、路面温度が 10°C 以上に上昇し、路面の水分がほとんど消失したために、0°C 以下になった夜間でも路面は乾燥露出状態である。

(3) 路面状態の判別

図-10 から分かるように、 κ が 200 以上では、路面は湿潤ないし水べた雪の状態凍結路面ではない。 κ が 150 以下、路温が 0°C 以下では、氷板、氷膜および圧雪状態となる滑りやすい凍結路面が出現する。 κ が 150~200 で、路面温度が 0.5~0.5°C の範囲は湿潤から凍結状態に変化する過程で、水と氷が混在している場合に多く見られる。これについては、図-10 における各

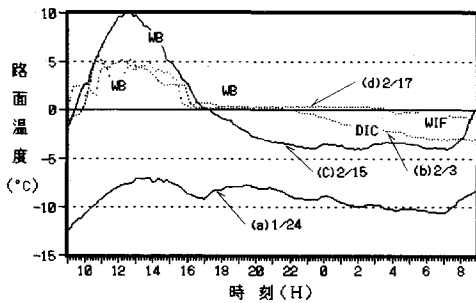


図-11 路面温度と路面状態との関係

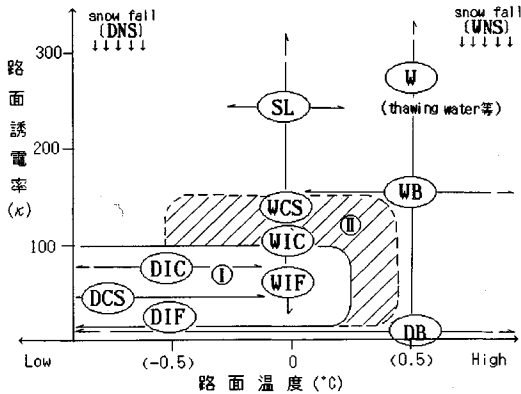


図-12 路面誘電率、路面温度と路面状態との関係を示す模式図

測定値のうち路面温度のみをまとめた図-11の(a)~(d)に示すように、路面温度と路面状態の変化からも推定できる。(b)と(d)は湿潤から氷板・氷膜に変化する過程で、路面温度は0°C付近でしばらく平衡状態を保ち、時間に対する温度勾配はほぼ0になっている。一方、湿潤から乾燥路面となった(c)の路面温度では0°C付近の平衡状態は見られない。

乾燥路面におけるκは10以下が多いが、車両が運ぶ泥や水分によって多少変動する。そのため、κが小さい薄い乾き圧雪や氷膜等と判別しづらくなる場合がある。この問題は、その後の試作実験で検知器を多層極板タイプの構造に改良することにより解決することができた。

以上の点から、図-12は路面状態と路面誘電率、路面温度との関係を模式図として示したもので、おおよそⅠの領域は凍結路面、Ⅱの領域は凍結路面に変化する過程、または、その逆の過程、そして、それ以外の領域は乾燥ないし湿潤路面の状態に分類できる。この模式図に基づいて作成したのが、図-13の路面状態の判別フローチャートである。これによりDPFの検知精度を的中率の点から検証してみた。路面状態の日変動が大きい4日間の測定結果(402データ)を例としてとりあげ、フローチャートによる判別結果とTVカメラの撮影結果とを比較した。両者の結果が一致した割合は84%で、

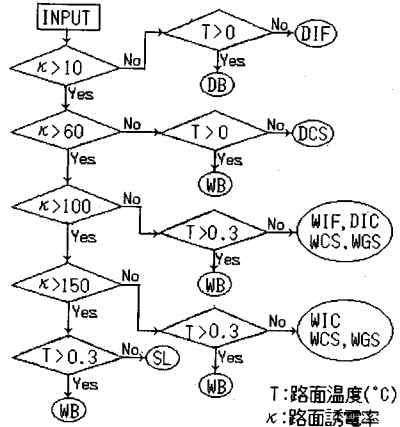


図-13 誘電率と路面温度による判別フローチャート

不一致の大部分は次のような理由によるものである。それは、フローチャートで乾燥と薄層雪氷の判別に関して、安全側に考えて路面温度が0°C以下、κが10未満では氷膜としているが、乾燥路面が出現する場合があると、各路面状態におけるDPFの“検知の目”とTVカメラの撮影結果を見る“人の目”の違いによるものであると考えられる。

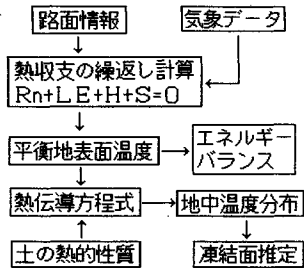
前者の問題は、微小電気容量の検知精度を向上させるための改良をすればよい。一方、後者については、DPFは検知器面の雪氷を忠実に測定するが、撮影結果を見る人の目はDPFを含めた周辺の雪氷状態を見る傾向があり、ある意味では両者とも正しいと言えるかもしれない。しかし、実際の路面状態の判別には、道路管理者やドライバーの目に近い判別を要する場合と人の目には露出路面のように見えるブラックアイス等の氷膜に対して検知器の目を重視しなければならない場合がある。

以上の検証結果から、DPFの性能、設置箇所と個数および判別アルゴリズム等、検討を要する点は残されているが、DPFは路面凍結検知器として位置づけることができ、ロードヒーティングの制御センサーとしても利用が可能であると考えられる²⁹⁾。また、融雪剤散布の現場実験を行った結果、路面誘電率の変化が明確に現れ、薬剤散布の効果発現状態の判別が容易にできるので、DPFは危険箇所の薬剤散布管理への利用方法も考えられる。

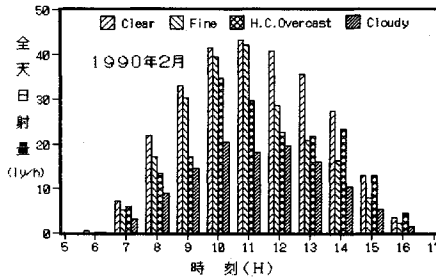
6. 路面温度の推定

(1) 概要

路面温度の推定は、路面凍結の検知または予測において重要である。路面温度の推定手法として、道路周辺の気象データを説明変数とした重回帰分析やフーリエ解析によるもの、日最高・最低気温の予測式から路面凍結の



図—14 解析モデルのフローチャート



図—15 2月の日射量モデル

表—3 入力条件の内容

項目	単位
〈気象要素〉	
日射量	ly/h
雲のタイプ	0~1
気温	°C
風速	cm/sec
風圧	mb
〈路面状態〉	
アルベド	0~1.0
湿潤度ファクター	1.0
路面積雪厚さ	cm
〈土の熱的性質〉	
体積含水比	%
熱伝導率	cal/cm·°C
熱容量	cal/cm³·°C

時刻を予測するもの、地表面の熱収支解析によるもの等がある。本研究では、各気象条件・路面状態における気温と路面温度との相関関係や地表面熱収支解析による路面温度の推定について検討を加えたが、ここでは後者の解析結果について述べ、気象モデル、DPFによる路面情報やAMeDASデータ等の路面凍結予測への利用という観点から考察を加えた。

Thermal Mappingの考え方をふまえ、更に札幌市内3箇所(伏見, 24軒, 発寒地区)の観測現場を設け、1990年1月~3月にわたり、前述の測定現場とはほぼ同様の測定を実施した。特に、地表面付近の熱伝導解析ができるように深さ0.5, 5, 10cmの路面温度を1時間間隔で測定した。3箇所とも大気観測所の近くに観測現場を設定したので、気温、風速等の気象データの提供を受けた。

(2) 解析モデル

熱収支解析プログラム(MICRO)は、Smithら²⁷⁾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、更に、パソコンで簡単に処理できるようにした。ただし、交通車両の熱的影響は定量評価が困難なのでこのモデルでは無視している。解析モデルは、図—14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演算により求められ、融解による積雪層の消耗過程も求められる。また、地表面温度と年変動のほとんどない不易層の地温を境界条件として、潜熱発生を考慮した熱伝導方程式を差分式に置換して解くことにより、地中の温度分布と凍結深さが求められる。不易層は、旭川忠別²⁸⁾と本学構内(札幌)での計測結果に基づき6mとし、入力条件としての舗装材料と土の熱的性質は一般値を用いた。

(3) 熱収支解析による平衡地表面温度の算出^{29), 30)}

地表面を介して、大気ないし地中への熱伝達は、式(5)

により表される。

$$R_n + LE + H + S = 0 \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 R_n , LE , H および 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(6)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。

$$R_n = (1-A)R_s + \Delta R \dots\dots\dots (6)$$

A は地表面のアルベドで、図—4に示した道路雪氷の発生頻度観測において測定した各雪氷状態におけるアルベドを用いた。 R_s は、全日射量で、札幌気象台観測の1990年の各月の日射量を天候別に4分類してモデル化したものを用い、図—15には2月の日射量モデルを示した。

長波放射による分 ΔR は、式(7)から求められる。

$$\Delta R = (1 - n^2 \cdot K) [\sigma T_e^4 - \sigma T_a^4 \{1 - 0.26 \exp(-7.77 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta T^2)\}] \dots\dots\dots (7)$$

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。雲量と雲のタイプは気象台で観測されているが、天気の種類と季節ないし月毎に分類した係数を用いることができる。

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(8)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²⁷⁾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 $\alpha=0\sim 1$ 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(9)から求められるが、 $\beta/(\beta+\gamma)$ は気温の関数で与えられる。

$$LE = \alpha(R_n - S) \cdot \beta / (\beta + \gamma) \dots\dots\dots (8)$$

$$\gamma = C_p p / 0.622 L \dots\dots\dots (9)$$

(C_p : 空気の定圧比熱, p : 大気圧, L : 水の汽化熱)

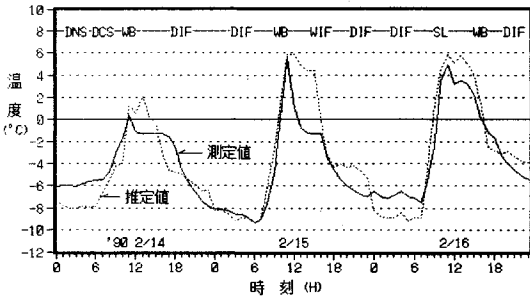


図-16 路面温度の推定値と測定値の比較

顕熱伝達量 H は式 (10) で示され、ここで、 C は空気の熱容量、 Γ は乾燥気温低減率、 T_2 は高さ Z_2 での気温である。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 および地表面の粗度を Z_0 とすると式 (11) から算出される。

$$H = K_h \cdot C(T_2 - \Gamma Z_2 - T_e) \dots\dots\dots (10)$$

$$K_h = K^2 U_2 \rho / (\ln(Z_2/Z_0))^2 \dots\dots\dots (11)$$

地中伝導熱流量 S は式 (12) で示され、ここで、 λ は土の熱伝導率、 T_g は深さ D_g における地温である。

$$S = \lambda(T_e - T_g) / D_g \dots\dots\dots (12)$$

この解析プログラムでは、式 (5) を成立させる地表面温度 T_e を求めるために、まず、式 (5) の右辺を BAL と置き、初期値として T_e に気温 T_a を入力する。式 (6)~式 (12) から演算された BAL 値の正、負に応じて、初期値 T_e と $(T_a - \Delta T)$ または $(T_a + \Delta T)$ との平均値を T_e として再度入力し、 $|\text{BAL}| \leq 1$ になるまで T_e の入力を繰り返す収束計算を行う。ただし、 ΔT は温度の増分ないし減分である。

(4) 解析モデルによる路面温度の推定

図-16 は、路面状態が大きく変化した2月14日~16日における発寒地区の路面温度の測定値と推定値を比較したもので、同時に路面状態の変化を表-1の略称記号で示した。入力データの内容は表-3にまとめた。

推定値は測定値の凍結と融解を繰り返す路面温度の日変動にほぼ追従しており、この解析モデルは路面温度の推定に利用できることが分かった。しかし、推定値は測定値と比較して12時~16時の路面温度が高くなっている。これは、道路に面した建物のために12時以降、観測現場の路面は日陰になるが、推定値は図-15の平均的な日射量を用いていることに原因しているので、Thermal Mapping の考え方である観測地点周辺の微気候の特性を明確にする、すなわちこの観測地点の場合、日射量の入力モデルの修正により解決できる。

DPF データの解析モデルへの適用に関しては、現時点での路面温度と路面が乾いているか、濡れているか、雪水があるかないか、どのような雪氷状態か等の路面情

報によるアルベドが初期入力条件の一部となる。また、英国の予測システムのように⁶⁾、路面凍結の開始(終了)時点を楽観的 (Opt.) と悲観的 (Pes.) 推定結果から、ある範囲の時間帯で評価する場合には、小規模地域の気象情報・予測情報に基づき、Opt. 側と Pes. 側の入力条件の設定をする際に路面凍結検知器によるリアルタイムでの路面情報が補完的な役割を果たすと考えられる。

以上の考察から、本研究で用いた解析モデルと入力条件は、路面温度の推定に利用できることが分かった。今後、路面凍結予測へと研究を展開させるために、AMEDAS データによる大規模地域の気象情報の他、観測点の微気候モデル、気象用マルチセンサーの設置や Thermal Mapping の導入による小規模地域の気象情報・路面情報の整備と予測システムの構築について検討を加えたい。

7. 結 論

本研究により得られた結論を要約すると、以下の通りである。

(1) 道路雪氷は道路周辺の気象条件による熱的作用や車両による機械的作用等により時間的に多種多様に变化するが、道路雪氷の分類と系統変化図に基づいてまとめることにより、路面凍結に係わる道路雪氷の発生頻度や変成過程を明らかにすることができる。

(2) 道路雪氷の種類別発生頻度や路面の露出率等の観測結果およびTVカメラによる路面状態の連続撮影記録から、幹線道路では日中、路面が露出する頻度が高いが、夕方以降、湿潤路面が凍結路面に変化する頻度も高くなることが分かった。従って、道路利用者にとって、路面状態の日変動が大きい幹線道路では路面凍結の発生形態からすると危険な路面状態が発生しやすく、路面管理が交通安全上重要である。

(3) 本研究の一環として開発した誘電式路面凍結検知器 (DPF) は、広範囲の道路雪氷状態を比較的精度良く判別でき、特に、凍結路面の状態、凍結路面に変化する過程、またはその逆の過程および、路面が凍結していない乾燥ないし湿潤路面の状態の判別が可能である。検知精度を的中率の点から検証した結果、その的中率は84%となり、リアルタイムでの路面状態の判別に利用できることが分かった。従って、この検知器は日変動の大きい幹線道路の路面状態の監視、路面管理のための詳細な路面情報の提供等において有用である他、薬剤散布の管理やロードヒーティングの制御等にも利用できる利点を有している。

(4) 熱収支解析モデルにより路面温度の推定を行い測定値との比較をした結果、良い近似が得られた。今後、本研究の検討結果に基づき、路面凍結予測へと研究を展開するために、きめ細かな気象情報や路面情報等の整備

と予測システムの構築について検討を加えたい。

謝辞：本研究の遂行に当り、札幌市建設局土木技術センターの志部谷一男氏、札幌総合情報センター（株）の田原迫孝一氏、大澤 猛氏と石井昭七氏、日本制御機設備工業（株）の木村洋一氏に大変お世話になった。また、北海道大学工学部、加来照俊教授には本論文について御指導を頂いた。ここに、心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 武市 靖：北米におけるスパイクタイヤ使用規制状況調査報告（五大湖周辺地域の実情），開発論集，第36号，pp.17~40, Sep., 1985.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Winter maintenance, Highways, Sept., pp.37~39.
- 5) Rayer, P.J.: The Meteorological office forecast road surface temperature model, Meteorological Magazine, Vol.116, pp.180~190, 1987.
- 6) 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.
- 7) Leifer, J.C.: Present status of the bridge ice detection program at FHWA, Snow removal ice control research special report, 185, TRB, pp.215~219, 1979.
- 8) Fox, N.K.: Development of a frost and ice detection system for highway bridges, TRR, 576, pp.17~19, 1976.
- 9) Birnie, C.: Measurement and prediction of preferential icing potential of a bridge deck, TRR, 598, pp.47~53, 1976.
- 10) Illinois DOT District 1 Bureau of maintenance: Snow control manual, pp. I-1~V-13, Oct., 1984.
- 11) SHRP Executive Committee: Focus, TR News, pp.4~12, Nov., 1989.
- 12) Ministry of Transportation and Communication, Ontario: Management and control of winter operations, pp.126, Oct., 1984.
- 13) 和田 享：ヨーロッパにおける路面凍結対策，雪と道路，No 13, pp.37~43, Oct., 1987.
- 14) Vaisara: ICECAST-Forecasting critical road conditions, Vaisara News, 113-114, pp.2~7, 1988.
- 15) Maeno, N. et al: New classification of snow and ice on roads, Proc. of IAHR Ice Symposium 1988, pp.304~313, 1988.
- 16) 前野紀一ほか：道路雪氷の構造と分類，低温科学，物理篇-46, pp.119~131, 1987.
- 17) 加来照俊：車をとりまく道路環境について，自動車技術，Vol.41, No 11, pp.1241~1248, 1987.
- 18) 竹内清秀・近藤純正：大気科学講座1（地表に近い大気），東京大学出版会，pp.81~83, 1981.
- 19) 鎌田新悦・竹内政夫：舗装路面におけるアルベード，雪氷，35巻，12号，pp.1~3, 1973.
- 20) 建設省近畿地方建設局，（社）建設電気技術協会：道路管理用情報収集センサー調査設計業務報告書，pp.3.1~3.45, May, 1986.
- 21) Takeichi, K., Maeno, N. and Kubo, H.: Snow and ice detection by a Dielectric Pavement Freezing-detector, Proc. of the 4th Workshop on Paving in Cold Areas, Vol.1, pp.319~337, Sep., 1990.
- 22) 武市 靖・前野紀一：誘電式路面凍結検知器（DPF）による路面凍結検知（その2），開発論集，第46号，pp.15~35, Oct., 1990.
- 23) Peter, S.R.: Broadband complex refractive indices, Applied Optics, Vol.11, No.8, pp.1936~1844, Aug., 1972.
- 24) 前野紀一・福田正巳：雪氷の構造と物性，古今書院，pp.98~104, 1986.
- 25) 黒岩大助：積雪の誘電的性質，低温科学，第8号，pp.1~25, 1951.
- 26) 札幌市建設局道路維持部：札幌市のロードヒーティング，pp.1~16, 1988.
- 27) 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.
- 28) 武市 靖：積雪寒冷地における舗装体温度の変動に関する研究，土木学会第42回年次学術講演会概要集V，pp.108~109, 1987.
- 29) Outcalt, S.I. et al: A digital computation of the annual snow and soil thermal regimes at Barow, Alaska, CRREL, Research report 331, pp.1~12, 1975.
- 30) 福田正巳・石崎武志：平衡地表面温度による土壌凍結深推定モデル，雪氷，42巻2号，pp.11~19, 1980.

(1991.6.24 受付)

STUDY ON A DETECTION AND ESTIMATING METHOD OF PAVEMENT FREEZING

Kiyoshi TAKEICHI, Norikazu MAENO and Hiroshi KUBO

This paper describes the detection and estimating method of pavement freezing. In order to clarify the actual states and problems to solve regarding the pavement freezing, properties and changing process of snow/ice on pavements are investigated. As a part of this study, Dielectric Pavement Freezing-detector (DPF) is newly developed to distinguish various snow/ice conditions on pavements which is found to be an effective instrument to detect the pavement freezing and to obtain the information of pavement conditions. On the basis of insitu survey results and data measured by DPF, the pavement temperature is estimated using a computer simulation model, and a methodology of pavement freezing prediction is proposed from the viewpoint of a further study of snow/ice control system.