



Title	路面凍結の検知と予測に関する研究
Author(s)	武市, 靖
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	乙第4407号
Issue Date	1993-12-24
DOI	https://doi.org/10.11501/3095206
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/51216
Type	doctoral thesis
File Information	000000272805.pdf



①

路面凍結の検知と予測に
関する研究

1993年9月

武市 靖

目次

第1章 序論－研究の目的と意義－	1
第2章 雪氷管理における路面凍結の検知と予測	3
2.1 既往の研究と最近の動向	3
2.1.1 欧米について	3
2.1.2 わが国について	7
2.2 本研究の位置づけ	10
2.3 まとめ	14
参考文献	16
第3章 道路雪氷の分類と工学的特性	21
3.1 道路雪氷の分類	21
3.2 現場観測による道路雪氷の圧密過程と構造	24
3.2.1 新雪の圧密過程	24
3.2.2 圧雪の構造と密度	26
3.2.3 道路雪氷の密度と熱伝導率	28
3.3 ホイールトラッキング試験による雪供試体の圧密過程	30
3.3.1 試験の概要	30
3.3.2 試験結果と考察	30
3.4 まとめ	33
参考文献	34

第4章 冬期間の路面状態	35
4.1 調査・観測の概要	35
4.2 路面状態の調査・観測結果と考察	37
4.2.1 北海学園大学工学部周辺の道路	37
4.2.2 札幌の市道	45
4.2.3 国道393号線の小樽市山地部区間	48
4.3 まとめ	52
参考文献	53
第5章 地温の周期変動と分布	55
5.1 概説	55
5.2 フーリエ級数展開による地温変動の解析	55
5.3 較差の減衰と位相遅れ	58
5.4 まとめ	60
参考文献	61
第6章 路面の凍結融解と路温の変動特性	62
6.1 凍結融解の形態と時間的変動	62
6.2 路温の計測位置による変動	63
6.2.1 計測深さと位相の遅れ	63
6.2.2 計測深さ及び断面の違いによる路温の変動	65
6.2.3 道路横断方向における路温の変動	67

6.3 凍結融解の回数と路温変動パターン	69
6.3.1 凍結融解の回数	69
6.3.2 路温の変動パターン	69
6.4 気温と路温との関係	71
6.4.1 各路面状態における気温と路温	71
6.4.2 日最低気温と日最低路面温度との関係	71
6.5 まとめ	74
参考文献	75
第7章 誘電式路面凍結検知器の開発と測定原理	76
7.1 既存の路面凍結検知器	76
7.2 誘電式路面凍結検知器(DPF)の測定原理	76
7.3 路面誘電率の測定と解析方法	78
7.4 測定周波数	79
7.5 まとめ	81
参考文献	82
第8章 路面凍結の検知	83
8.1 現場試験の概要	83
8.2 路面状態と路面誘電率との関係	84
8.3 路面状態の判別	86

8. 4	検知性能と判別アルゴリズムの改良に対する検討	89
8.4.1	DPFの検知性能	89
8.4.2	判別アルゴリズムへのファジー理論の適用	89
8. 5	まとめ	94
	参考文献	95
第9章	路面凍結の予測	96
9. 1	概説	96
9. 2	フーリエ解析による予測モデル	97
9.2.1	予測手法の手順と予測モデル	97
9.2.2	予測モデル曲線の選択	99
9.2.3	予測モデルの検証	102
9. 3	熱収支解析による予測モデル	106
9.3.1	予測モデルの概要	106
9.3.2	平衡地表面温度の算出理論	107
9.3.3	入力条件	108
9.3.4	予測モデルの検証	112
9. 4	路面凍結検知と予測モデルの適用に関する検討課題	115
9. 5	まとめ	117
	参考文献	118
第10章	結論	121
10. 1	諸外国における雪氷管理の取り組み方とわが国の現状	121
10. 2	道路雪氷の工学的特性	122

10. 3	冬期間の路面状態	123
10. 4	舗装体の温度及び路温の変動特性	123
10. 5	路面凍結の検知	124
10. 6	路面凍結の予測	125
	謝 辞	127
	付表・付図	128

第1章 序論

一 研究の目的と意義 一

積雪寒冷地において、スパイクタイヤ使用の禁止により、従来の交通確保のための除雪・排雪対策のみならず、交通の安全と円滑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である。また、社会・経済活動に係わる夏期交通と冬期交通との差が縮まり、冬期交通においても夏期交通と同様の量的・質的水準の維持が要求されるようになってきている。すなわち、除排雪を主とした管理 (Snow Removal) と同時に、氷結路面对策としての路面管理 (Ice Control) を含む雪氷管理 (Snow and Ice Control) が、社会的要請となってきたことを意味している。

車社会の成熟期が日本よりも数十年以上も早い欧米では、このような社会的要請に応えるために、従来から塩の散布を前提とした無雪氷路面の管理政策 (Bare Pavement Policy、以下B.P.政策と略称する) が基本となっている。その一方で、塩散布量の多い諸国では、道路施設、車両のみならず生態系に与える悪影響も深刻化し、大きな社会問題となっている。

これに対処するために、米国では1987年に発足したSHRP計画 (Strategic Highway Research Program) に見られるように、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塩害の少ない融氷剤の開発、除雪車・散布車両の改良、管理システムに至るまで広範囲な研究を行っている。欧州でも各国が独自にこの問題に取り組むと同時に、1986年に11ヶ国からなる共同研究プロジェクト "COST (European Cooperation in the field Science and Technology)" を発足させて、冬期における交通安全・交通の円滑化及び維持管理費と環境汚染の低減を主要課題とした調査・研究を進めている。これらの調査・研究報告書は、塩散布に代わる有効な路面管理方法が見いだされていない現状を認識した上で、散布量の最適化・低減を図るために各分野での研究、技術開発、道路管理者の教育等が重要であるとまとめている。

わが国において、塩散布による管理方法をそのまま適用することは、他国に例を見ないほど降雪量が多い気象条件、狭あいな国土における環境問題及び経済性等の点から難しい問題がある。最近の札幌の例をみると、交通量や道路の縦断勾配に応じて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、滑り止め材保管用の砂箱の設置等を行い、また、一部の道路では凍結抑止舗装の施工を実施している。このこのように、道路・交通条件を考慮した路面管理を実施または試行し、また、目標とすべき路面管理水準を定めているが、路線全体に対する路面管理には至っていない。欧米の諸外国では、日交通量を考慮した幹線、支線別の道路網全体の管理水準を具体的に明らかにし、管理に対する市民の協力も同時に求めている。

スタッドレスタイヤによる冬道走行が社会の趨勢になりつつある現在、雪氷管理に対する具体的な方策が社会から求められている。前述したように、塩散布を前提とした管理は難しいが、スポット的なあるいは限定的な塩害の少ない融氷剤、滑り止め材の散布、ロードヒーティングの整備等による管理方法がふえることが予想される。凍結抑止舗装は、B.P.政策を前提とした雪氷管理をしている欧米ではあまり高い評価を受けていないが、降雪量の多いわが国では、雪氷の路面付着や鏡面化を抑制し、“ざくざく路面”にして雪氷路面の摩擦係数を少しでも上げる効果を持つ凍結抑止舗装の施工も考えられる。

これらは、補助的な管理手段であるため、道路利用者の路面状況に対応した安全運転に依存する割合が依然として高いが、きめ細かな除・排雪対策と一体化した雪氷管理体制を整備することにより、路面管理水準の改善を図る必要がある。また、補助的管理とはいっても、ロードヒーティングの利用や低公害タイプの融氷剤の散布には、多額の資材・管理費用を要するので、ランニングコストの低減、散布の効率化・最適化を図ることは不可欠である。そのためには、リアルタイムでの路面情報、数時間先の路面凍結予測情報を道路管理者及び利用者に提供し、迅速かつ効率的な雪氷管理や路面状態に即した安全走行の励行を可能にする雪氷管理システムの構築は、今後の重要な課題である。

本研究は、上記した様々な検討課題をふまえ、道路雪氷の工学的特性や路面温度の変動特性を明らかにして、路面凍結の検知と予測手法についての提案を行い、近年の冬期道路交通や管理方法の変化に対応した雪氷管理の効率化・最適化に役立てようとするものである。

第2章 雪氷管理における路面凍結の検知と予測

2.1 既往の研究と最近の動向

2.1.1 欧米について

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、気象衛星の利用、道路気象観測点からの道路気象情報やThermal Mapping(以下、T.M.と略称する)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1,700、T.M.の路線延長が34,000kmである¹⁾。

なかでも、イギリスは雪氷管理のシステム化にいち早く取り組んだ国で、30州に320の道路気象観測点、45のMotorwayのT.M.延長が21,500kmに達している。特に、バーミンガム大学の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^{2),3)}。

アメリカでは、1971年にMinnesota州がスパイクタイヤの使用禁止⁴⁾を決定し、1974年には連邦道路局(FHWA)が各州に対しスパイクタイヤの使用規制の協力を要請する通達を出して以来⁵⁾、規制や禁止の措置をとる州が増加し、雪氷管理に対する関心が高まった。

このような措置と前後して、塩の散布量は1960年初期の200万tから1970年の1,000万tと急増し、1980年には1,200万tに達した⁶⁾。そのため、道路施設や自然環境への塩害が深刻化し、FHWAは、1970年代の半ばからCMA(Calcium Magnesium Acetate)に代表されるような塩害の少ない融氷剤の開発と現場試験を実施している。しかし、当時、塩に比較してCMAの価格は約20倍、融氷効果も低いという評価を受け^{7),8),9),10)}、十分に普及しなかった。

1980年にはいると、FHWAは、いながらにして冬期管理ができる(Stationary winter maintenance)凍結抑制舗装としてのVerglimit舗装について各州の協力を得て、室内・現場試験による耐久性と融氷効果及び経済性評価の調査・研究を実施している。Pennsylvania、Alaska、Colorado、Conneticut、New Jersey等、各州の調査・研究報告書^{11),12),13),14)}では、その使用に対して消

極的で、推奨できないと結論づけている。その理由として、Verglimit舗装は、在来舗装費用の3～4倍になり、融氷効果が小さいことから、従来のB.P.政策による管理方法に代替できない点を指摘している。

しかし、地形と気象条件により厳しい路面凍結が発生する箇所(White Spot)、早期の路面凍結により不均一な凍結現象(Differential Icing)が発生しやすい橋梁区間、管理体制が整うまでに時間かせぎをしなければならない遠隔地等に対しては、有効であろうと述べている。これは、Verglimit舗装がスポット管理であり、交通車両の道路雪氷攪乱による相乗効果を期待した”ざくざく路面”の提供では、従来の管理方法と費用効果の比較から、一般道路における適用が困難であると評価したものである。

また、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を行い、路面凍結発生頻度が高い橋梁区間の床板における実施例を報告しているが、検知精度について問題点が指摘されている^{15), 16), 17)}。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^{18), 19), 20)}。

最近では、塩害に対する危機感から1987年に開始されたSHRP計画の一環として、12の企業の参加による雪氷管理の研究プロジェクトが実施されている。主な研究内容は以下の通りである^{21), 22)}。

- 融氷剤の改良あるいはそれ以外の方法による路面と雪氷の付着破壊と防止に関する基礎研究
- 各種融氷剤の評価基準の策定
- 排雪板の改良設計と雪氷の破碎技術
- ロータリー除雪における投雪装置(スノーブロウ)の制御
- 道路気象情報と予測システムの利用指針の作成
- 路面状態の監視と凍結予防技術の開発

上記の研究において、路面と雪氷の付着破壊と防止に関する研究は、実用化が困難であるとの判断から途中で打ち切られたが、路面状態の監視技術と凍結予防技術の開発については、塩散布量の低減と雪氷管理の効率化への貢献が大きいとして、SHRP計画では9つの州で現場試験を実施している。研究プロジェクトは1993年で終了し、その研究成果はFHWAによって実施に移される

ことになっている。米国の1992年の時点での塩散布量は800万tで、1980年に比較して400万t減少しているが、きめ細かい雪氷管理の実施によりさらに塩散布量の低減をめざしている。

カナダのOntario州²³⁾、Quebec州²⁴⁾等では、道路規格別の道路気象条件を考慮した詳細な塩の散布と除・排雪に関する管理基準を設定し、道路のサービスレベルに対応した雪氷管理を行っている。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、T.M.の路線延長が500kmで、イギリスより低い水準にある。

欧州では、前述したように、道路気象条件に関するヨーロッパ研究プロジェクト(COST Project 309)の実施が、1986年に11ヶ国(オーストリア、デンマーク、フィンランド、フランス、オランダ、ノルウェー、ポルトガル、スペイン、スウェーデン、スイス、イギリス)で合意され、以下に示すように、各国が1987年～1990年にわたり、それぞれのテーマについて調査・研究が行われた²⁵⁾。

• スウェーデン

路面状態、氷点温度、塩分濃度等を検知する既存センサーの比較と新規センサーの開発、路面状態の短期予測手法の評価と交通量や道路気象情報等の各種の要因を考慮した予測モデルの開発

• イギリス

T.M.実施のための道路網における検知器の最適配置、道路気象情報の利用、路面凍結による交通事故のデータ整理等の雪氷管理総合システム

• フランス

視程測定の改良センサーと霧発生の予測手法の開発、各気象情報サービスにおける情報伝達手法の評価

• デンマーク

雪氷管理の手法と用いた資材の比較を合理化するための、冬期間の気象条件に関する情報を国家ベースで標準化した気象地図と冬期指標(Winter Index)の作成

• ノルウェー

雪氷管理に関する費用便益計算に必要な交通事故と道路気象、路面状態との関係をデータベース化する記録様式の標準化

• フィンランド

道路管理者と利用者の費用と便益、交通事故費用、社会環境費用を含む道路気象情報サービスの費用便益分析の研究と分析手法の開発

• オランダ

道路管理者に提供される気象サービス、地方観測所からの気象情報の有効利用及びそれに関する情報システム、教育プログラム・指針の評価

• スイス

道路気象情報や路面状態の表現の標準化による道路利用者に対する近隣諸国の道路情報を伝達するための技術的手法の評価

• オーストリア

異なる気象条件における塩散布の最適化と有効な融氷剤の決定をするための、適切な気象情報の利用方法に関する研究

上記のCOSTプロジェクトによる共同研究とは別に、ヨーロッパ諸国は独自の雪氷管理政策に基づき、調査・研究及び技術開発を行っている²⁶⁾。

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凍結警報装置によって気温、路面の温度及び湿度を観測して、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図っている。

オーストリアの研究事例²⁷⁾をみると、路面温度の測定とビデオカメラによる路面状況モニタリングの重要性を強調している。各国のロードセンサーを試験区間に埋設し、融雪剤散布前後の路面温度の日変化、氷点降下による路面凍結抑制効果を調べ、路面の凍結・融解過程における警報システムの性能評価をしている。また、ビデオカメラで車線毎の道路雪氷の分布、露出状態、塩散布の状態等を連続的に監視することはスポット的な路面情報のみならず、路線全体の路面管理をする上で貴重な情報を提供すると推奨している。

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)の利用や主要国道に設置した150の道路気象観測点(MILOS)等により、路面現況の把握と1~2時間後の路面凍結の予測をしている。ICECASTに組み込まれている路面センサは、路面温度や電気伝導度の測定値等から路面の霜、雪、氷、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²⁸⁾。

また、路面状態をすべり摩擦係数、路面積雪厚、轍の深さの3つの要因で5分類し、ADTと道路規格別の管理水準を設定している。各道路の管理水準を維持するために、日常、スキッドテスターによるすべり摩擦係数の測定、道路

パトロール、道路気象サービスからの情報解析等を行い、路面状態を監視する管理体制をとっている²⁹⁾。

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や、測定車による気温、路面温度、湿度等の観測を行い、T.M.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、予測モデルの修正について研究を行っている。特に、路面凍結の予測に関しては、T.M.により主要観測地点の路面温度の変動特性を予め調べておき、VVISからの道路気象情報や測定車からの測定データに基づいて数時間先の凍結予測を行うコンピューター予測モデルを開発している。

さらに、1985年~1991年にかけて塩散布量の低減を目的とした研究プロジェクト(MINSALT)³⁰⁾を実施し、散布しない地域の拡大、散布量の低減手法と雪氷管理の新規手法の開発について詳細な調査・研究を行い、その一部が実施されている。

ノルウェイでは、雪氷管理を民間委託にすべきか否かに対する明確な方針が示されておらず、各地域の道路局が適宜、雪氷管理を民間業者に委託し必要な機材や資材を提供する政策をとっている。除雪水準に対する道路区分はADTが1500以上とそれ以下の2分類、塩散布は気象条件と路面状態で5分類としており、常時交通開放が困難な道路では夜間や冬期休暇に交通止めの措置をとる場合もある。最近、スウェーデンのMINSALTプロジェクトやフィンランドの研究成果を参考にして、1994年までに管理政策の見直しを進めている³¹⁾。

このように、諸外国では管理基準の維持とそのレベルアップによる交通安全の確保、塩散布量の最適化・低減による環境保護を雪氷管理における重要課題としてとりあげ、路面状況の現状把握と予測、管理方法のシステム化等に関する調査・研究及び開発を積極的に進めていることが分かる。

2.1.2 わが国について

わが国の冬期間の路面状態は、地域の気象条件により大きく異なり、日平均の気温や路面温度がほぼ0℃前後の地域では濡れ雪氷状態になる場合が多いが、寒さの厳しい地域では凍結路面が発生しやすい。札幌や道内各地での観測結果によると^{32)、33)}、交通量の多い幹線・準幹線道路では、一般に、車両による雪氷の圧密(本文では、繰返し荷重による雪氷の圧縮量の時間的変化を圧密と総称する)、鏡面化及び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“ツルツル路面”や“アイスバーン”状態になりやすく、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。

生活道路や農道等の軽交通道路では、冬期間厚い圧雪で覆われるため、路面積雪の断熱効果を考慮した舗装構造の設計手法も検討されており³⁴⁾、路面管理より交通確保のための除・排雪が課題になっている場合が多い。また、郊外や山地部の道路では、峠、日陰になる切土区間や橋梁区間で危険な路面凍結箇所、いわゆるホワイトスポットが多く発生しやすい。

都市部では、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、平坦部より高い管理水準が必要となる箇所が多く存在する。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、交通容量の低下による交通渋滞を招き、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。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”をいかに行うかは、B.P.政策を雪氷管理の基調にできないわが国にとって重要な問題である³⁵⁾。

近年、わが国でも、降雪³⁶⁾、視程³⁷⁾、地吹雪³⁸⁾等の検知と予測による道路気象情報システムの開発が行われており、一部の国道・幹線道路では除雪対策や交通安全対策に用いられている。また、接触・非接触タイプの路面温度センサーや赤外線、光波、超音波、電極埋設等の方式による路面状態や凍結の検知・監視器が開発され実用化されている^{39), 40), 41)}。消雪・融雪システムとしては、北陸地方における散水消雪システムのように⁴²⁾、地域の気象条件に合致した路面管理として定着したものもある。地下水の枯渇問題に対しては節水タイプや循環式・熱交換式タイプのシステムの利用が図られている。

北海道のような寒さの厳しい地域では、融雪システムとして、従来の電熱線によるものから、省エネルギータイプのガス・石油ボイラによる温水、温排水、温泉水等の利用やヒートパイプによる地熱、地下水の保有熱を併用したもの等の融雪システム⁴³⁾が一般道路や街路等で用いられている。

最近では、凍結抑止舗装の施工箇所も増加している。高速道路では現地の気象データと気象庁の気象予測情報に基づき、警戒・出勤・非常の3つの管理体制を設けて管理作業や交通運用を行っているが^{44), 45), 46)}、路面状態の把握と予測に関する管理システムの整備とその運用については、検討すべき多くの問題点が残されている。

このように、道路気象情報や現地データを得るための検知器、測定器の開発・実用化、消雪・融雪システムの整備等は積極的に進められているが、スポット的な技術開発と管理が多く、国ないし地域全体としての雪氷管理政策とその体系化が要求されている。

明確な雪氷管理政策を確立できない背景を気象条件と交通条件で見ると、諸外国では例のない程の都市部における降雪量の多さ、地域により気象条件が大きく異なる、スパイクタイヤの急速な普及、冬期交通を考慮した道路幾何構造の対策が不十分である⁴⁷⁾等が要因として考えられる。管理技術面では、気象条件、環境や費用の点から塩散布を基本的な管理方法として位置づけられない点にある。

路面凍結の予測に関する欧米の取り組み方は、研究事例で述べたように、きめ細かな路面温度の測定を重視している。T.M.による路線延長の路面温度分布に地形・気象条件を考慮した予測モデルを作成し、リアルタイムの路面温度と気象情報・予報により予測モデルを随時修正して数時間先の凍結予測を行う手法を基本としている。

わが国で提案されている手法として、

- a)日最高・最低気温の予測式から凍結時刻を予測するもの、
- b)道路周辺の気象・地温観測データを用いた熱収支解析、
- 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の組合せによるもの等が提案されている^{48), 49), 50), 51)}。

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)は天候別に路面温度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⁵²⁾、天候と路面温度の変動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)は比較的良い予測結果が報告されているが、路面温度の変化を熱流によって予測する手法を用いている。その結果、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多くの説明変数を要して複雑なモデルになり、リアルタイムのデータ入力により随時、予測の修正を行うことが難しい点にある。

2. 2 本研究の位置づけ

欧米の路面凍結の検知と予測に関する研究と技術開発が、路温測定を重視した T.M. の考え方が中心になっているその背景には、前述したように、塩散布による B.P. 政策を管理の基本としている点にある。管理された幹線道路の路面は露出状態が多く、降雪、降雨 (Freezing Rain) により乾燥路面が凍結路面に急変したり、湿潤路面でも塩分濃度が低下して路面が凍結すると、ブラックアイスあるいはアイスバーンと呼ばれる氷膜、氷板が形成された極めて危険な路面状態になりやすい。

路面状態は乾燥、湿潤、氷結等の大まかな分類をしている場合が多く、最近では、路面情報と気象情報に基づいた凍結予防対策としての塩散布を重視している。塩分濃度により氷点に変化する路面の凍結検知と予測を行う場合、路温の変動と分布を明確にした上で気象情報、地形条件を取り込む手法が直接的であり、合理的であると評価されている。従って、道路周辺の気象観測データを用いた熱収支解析による凍結予測モデルにおいても、T.M. の情報を重要視している。

一方、わが国は降雪量が多くまた、B.P. 政策をとっていないため、気象条件、道路・交通条件あるいは除雪状況等により様々な路面状態が出現し、欧米における管理された路面状態とは異なる場合が多い。

そこで、本研究では、第2章の2.1で述べた欧米のT.M.に代表されるような路面凍結の検知と予測の考え方とわが国における路面状態をふまえ、以下に述べるような取り組み方をした。図-2.1は、本論文の全体の構成と各章の位置づけ・関連性を示したものである。

【路面凍結の検知と予測に関する研究】

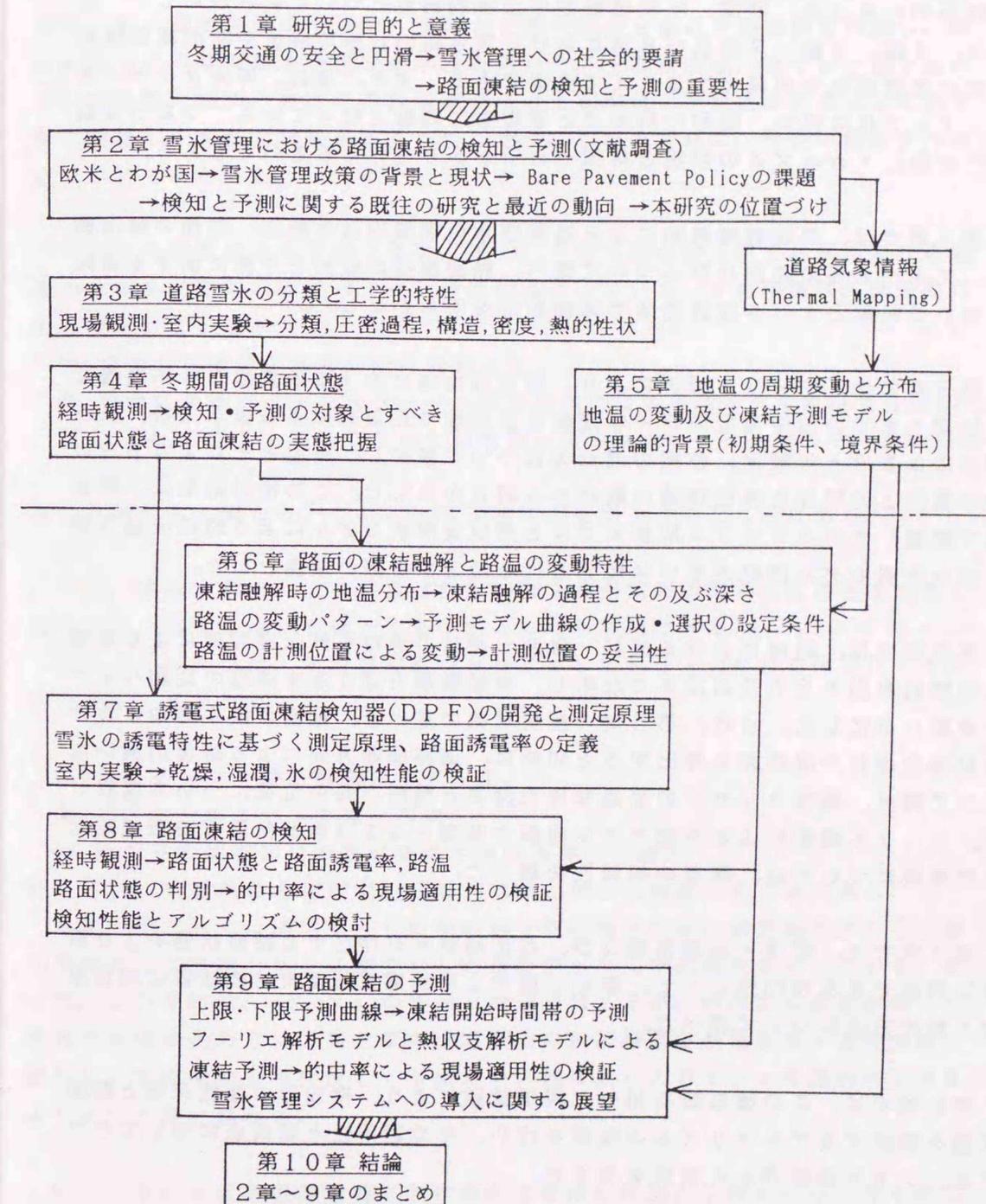


図-2.1 論文の構成と各章の位置づけ・関連性

先ず、第3章では、現場観測と室内実験により、道路雪氷の分類と変化過程を体系的にまとめ、密度、圧密過程等の工学的特性について明らかにした。これは、4章、6章、7章及び8章における雪氷路面状態の解析や路面凍結検知対象の道路雪氷を明確にするうえで重要である。また、最近、車両タイヤのスタッドレス化に伴い、道路の利用者と管理者で問題となっている”つるつる路面”の発生メカニズムの解明と対策への手がかりを与えるものでもある。

第4章では、現場経時観測による道路雪氷の種類別発生頻度、路面の露出割合、アルベド等の路面状態について調べ、路面凍結の検知と予測に関する研究において対象とすべき道路雪氷や路面状態を明らかにした。

第5章では、フーリエ解析により、積雪寒冷地における地表面から不易層に近い深さまでの地中温度の日・年変動の規則性や近似式による表示方法、及び深さによる日・年較差、位相の遅れ等について検討し、路温とそれより下方の地中温度との関係を熱伝導論の観点から明らかにした。この検討結果は、第9章で提案しているフーリエ解析モデルと熱収支解析モデルによる路面凍結予測手法の予測モデル曲線あるいは境界条件を設定する際の根拠とした。

第6章では、路面における凍結-融解-凍結の過程を熱伝導解析により地温の時間的変動とその及ぶ深さで説明し、凍結融解を繰り返す路温の変動パターンを明らかにした。また、第5章の解析結果に基づき、地温の深さ方向における位相の遅れや温度差を算出すると同時に、道路横断方向による路温の違いについて調べ、路温センサーの妥当な埋設深さと横断方向の位置について検討した。フーリエ解析による予測モデル曲線の基礎となる日最低気温と日最低路温との関係については、両者の相関性を調べた。

第7章では、乾燥・湿潤状態及び、各道路雪氷が存在する路面状態をより明確に判別できる検知器として、新たに開発した誘電式路面凍結検知器の測定原理と解析方法について述べた。

第8章では、この検知器を用いた現場試験により、検知器の性能評価と路面状態を判別するアルゴリズムの検証を行い、その適用性と改良点についてハードとソフトとの観点から検討を加えた。

第9章では、フーリエ解析と熱収支解析による路面凍結の予測手法の考え方や予測モデルの検証結果を示した。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・選択や入力条件の設定等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札幌、旭川、帯広の各現場観測による実測値と予測値から算出した的中率で検証し、良好な結果が得られた。また、これと同時に、今後の検討すべき点についてまとめた。

フーリエ解析による予測手法は、T.M.の考え方と第4章と5章における地温の分布及び路温の変動パターン分析に基づいている。その特徴は、前述のd)の手法と似ているが、

- ① 路温の日較差と温度勾配に着目した、
- ② 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た、
- ③ T.M.の考え方を取り入れて日較差と最高路温による予測モデル曲線の選択・修正ができるようにした

等の点で大きく異なり、これにより予測精度を向上させたことにある。

一方、熱収支解析による手法は気象情報と路面情報が得られた場合を想定したもので、前者の手法を補完する手法としても利用できる。

この手法の特徴は、熱収支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、

- ① 気象データや路面情報のモデル化、
- ② 気温の予測モデル曲線の作成、
- ③ 地温分布解析結果の初期条件や境界条件への適用

等を行い、気象現象を物理則と統計的な類似則から検討したことである。

気象情報としては過去4～5年間の地上気象観測結果の微気候モデルを、路面情報としては第3章と4章で示した道路雪氷の工学的特性を用いている。従って、この手法は、b),c),e)の手法と共通点はあるが、合理的な設定が難しい熱流予測値の代わりに、第5章の地温変動の解析結果を初期条件・境界条件に適用し、気象モデルを作成して予測時の天候により入力モデルの選択ができるようにした点で異なる。

以上、本研究は各観測現場における路面凍結の検知と予測についてまとめているが、今後、主要観測点での路面凍結検知器の設置、道路気象情報の観測、移動観測車による路温・路面状態の測定等が実施されれば、路線全体の雪氷管理のシステムを図る上で役立つと考えられる。

2. 3 まとめ

• アメリカでは、スパイクタイヤの使用規制の強化・禁止措置をとる州が増加した1970年代に入ると、塩散布量が1960年の200万tから1,000万tに急増している。これは、冬期間の道路管理において、除・排雪を主とした管理（Snow Removal）のみならず氷結路面对策としての路面管理（Ice Control）をも行う雪氷管理（Snow and Ice Control）が、安全で円滑な交通の確保のためには不可欠であることを示している。

• 北米や北欧では、塩散布による無雪氷路面の管理政策が、冬期間の道路管理の基本となり、道路区分に応じた雪氷管理水準の確立とそれによる管理を可能にしたといえる。

• 北米や北欧諸国では、1970年～1980年にかけて塩散布量の急増による道路施設や環境への塩害が顕在化し、1980年代に入ると深刻な社会問題へと発展した。その対策として、FHWAは1970年初期からCMAに代表される低塩害の融氷剤の開発、スイスやドイツでは凍結抑制舗装材料の開発等が行われたが、塩にとって代わるものとしては評価されなかった。

• 根本的な対策を講じるための調査・研究は、アメリカでは1987年に開始されたSHRP計画、ヨーロッパでは11カ国共同により1986年に発足したCOSTプロジェクトに見ることができる。両者のプロジェクトは多方面からの調査・研究を行っているが、雪氷管理については塩散布量の低減・最適化を図るための技術開発を第一の目標としている。

• 塩散布量の低減・最適化を図るための技術開発は、ソフト面ではT.M.と道路気象情報のシステム化と、それらに基づく路面凍結の検知と予測システムの開発、維持管理技術者の教育等、ハードの面からはロードセンサーの開発、道路気象観測点の設置、除排雪車両と散布装置の改良、ブライン（塩水溶液）の製造と利用等、多方面にわたっている。

• わが国では、1980年～1990年にかけてスパイクタイヤの使用規制の強化・禁止措置に対する社会的な合意が得られるようになり、現在では、禁止措置が社会的な趨勢となっている。その結果、近年、除排雪中心の管理から氷結路面对策としての路面管理が重要視されるようになった。

• わが国の路面管理政策の立ち後れの背景には、スパイクタイヤの急速な普及が、ある意味で路面管理の代替的な役割を果たしてきたこと、塩の散布が積雪の多い気象条件、狭い国土・環境条件、経済性の面から適用しづらいこと等、わが国特有の事情により路面管理に対する認識が十分に育たなかったことが考えられる。

• 北陸地方における散水消雪システムのように地域の気象条件に合致した路面管理として定着したものもある。高速道路では、路面管理のシステム化に取り組んできており、幹線道路の一部では路面凍結、降雪、視程、地吹雪の検知センサーの整備が進められている。しかし、路面管理水準を明確に設定して、路面管理システムとして運用されている例は少ない。

• 一般に、寒さの厳しい地域では、期間・区間を限定した塩散布、ロードヒーティングや凍結抑制舗装の施工等、危険箇所のピークカットを目的としたスポット管理が多い。スパイクタイヤの禁止に伴う”つるつる路面”の発生頻度の増加により、平坦な単路部や交差点等を含む路線全体における路面管理の重要性が高まってきたといえる。

参 考 文 献

- 1) Winter maintenance, Highways, Sep., pp.37~39, 1988
- 2) 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
- 3) Rayer, P.J.: The Meteorological office forecast road surface temperature model, Meteorological Magazine, Vol.116, pp.180~190, 1987
- 4) The Minnesota Department Highways: The Effects of Studded Tires, A Research Summary Report For the Minnesota Legislature, pp.1~39, March, 1971
- 5) Federal Highway Administration(FHWA): STUDED TIRES POLICY, FHWA Bulletin, pp.1~5, Aug., 1974
- 6) Illinois D.O.T. Bureau of Materials and Physical Research: A Study of the Use of Salt on Highways and Alternatives to Such Use, Report to The 81st General Assembly, pp.32~48, May, 1980
- 7) Stanley A. and Roy U. Schenk: Alternate Highway Deicing Chemicals, Report No. RD-79-108, pp.70~103, March, 1980
- 8) J.H.DeFoe: Evaluation of Calcium Magnesium Acetate as An Ice Control Agent, Research Report No. R-1248, pp.1~13, June, 1984
- 9) C.W.Marynowski, J.L.Jones and E.C.Gunderson: Production of Calcium Magnesium Acetate(CMA) for Field Trials, Report No. FHWA-RD-83-062, pp.1~42, April, 1984
- 10) Walaa S. Mogawer: An Evaluation of Effects of Deicing Additives on Properties of Asphalt Mixtures, University of Rhode Island, pp.229~233, 1989
- 11) John Kijan: VERGLIMIT EVALUATION, Report No. CDOH-DTD-R-89-4, Colorado Department of Highways, pp.16~19, 1989
- 12) Daniel E. Sheftick: Verglimit Deicing Chemical Asphalt Additive, Research Project 83-39D Construction Report, Pennsylvania Department of Transportation, pp.19~21, 1991
- 13) Frank Augeri: Placement of Experimental Bituminous Concrete Mixture Utilizing an Asphalt Additive—"VERGLIMIT", Report No.1085-2-87-6, State of Connecticut Department of Transportation, pp.12~16, 1987
- 14) John M. Rainero: Investigation of the Ice-Retardant Characteristics of Verglimit-Modified Asphalt, TRB, TRR 1157, pp.44~53, 1988
- 15) 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
- 16) Fox, N.K.: Development of a frost and ice detection system for highway bridges, TRR, 576, pp.17~19, 1976
- 17) Birnie, C.: Measurement and prediction of preferential icing potential of a bridge deck, TRR, 598, pp.47~53, 1976
- 18) Illinois DOT District 1 Bureau of maintenance: Snow control manual, pp. I-1~V-13, Oct., 1984
- 19) 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(五大湖周辺地域の实情), 開発論集, 第36号, pp.17~40, Sep., 1985.
- 20) 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
- 21) SHRP Executive Committee: Focus, TR News, pp.4~12, Nov., 1989

22) L.David Minsk: SHRP Research on Snow and Ice Control, Preprints of International Workshop on Winter Road Management(IWWRM), pp.1~8, Feb., 1993

23) Ministry of Transportation and Communication, Ontario: Management and control of winter operations, pp.126, Oct., 1984

24) Ville de Montreal: Snow Removal-The Need for a Comprehensive Plan and How to Gain Support for It, APWA Snow Conference, pp.1~24, 1981

25) Erkki Nysten: The European Project COST 309, Road Weather Conditions, Preprints of IWWRM, pp.1~5, Feb., 1993

26) 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.

27) H.Scharsching: Results of Fields Tests of Six Different Ice Warning Systems, Preprints of IWWRM, pp.1~16, Feb., 1993

28) Vaisara: ICECAST-Forecasting critical road conditions, Vaisara News, 113-114, pp.2~7, 1988

29) Kakevi katko: Goals and Methods of Maintenance in Finland, Preprints of IWWRM, pp.1~7, Feb., 1993

30) Lnaart Axelson: Weatherforecast and Information on Road Conditions MINSALT, Preprints of IWWRM, pp.1~5, Feb., 1993

31) Torgeir Leland: Winter Maintenance of National Roads in Norway Policies, Standards, Organization and Methods, Preprints of IWWRM, pp.1~7, Feb., 1993

32) 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

33) 北海道大学工学部交通工学研究室: 北海道における冬期路面状況とその管理について, pp.28~88, May, 1988

34) K.Takeichi, H.Kubo, A.Kasahara: A Pavement Design for Low-Volume Roads That Considers the Antifrost Effects of Thickly Packed Snow, TRR 1106/Vol.2, pp.237~243, 1987

35) 加来照俊: スパイクタイヤの使用規制に伴う冬期の交通安全と路面管理方策に関する研究, 平成2年度科学研究費補助研究成果報告書, pp.141~161, 1991

36) 札幌市建設局道路維持部 維持除雪課・土木技術センター: 札幌市の降雪予測システム, pp.1~11, Des., 1988

37) 石本敬志: 北海道の国道における吹雪対策とビデオカメラによる視程計測装置の開発, 雪氷, Vol.52, No.3, pp.195~202, Sep., 1990.

38) 福沢義文ら: 吹雪時の結氷路面における安全速度, 雪氷, Vol.52, No.3, pp.171~178, Sep., 1990

39) 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

40) (社)雪センター冬期路面对策資料検討会: 冬期路面对策資料集, pp.29~215, 1991

41) 上田敏: 道路気象情報収集機器, 雪と道路, No.9, pp.38~43, Jan., 1986

42) 桑原剛: 北陸地域における最近の消融雪施設の動向, 雪と道路, No.20, pp.50~56, July., 1989

43) 札幌市建設局道路維持部 維持除雪課・土木技術センター: 札幌市のロードヒーティング, pp.1~16, July, 1988

44) 水間雅昭, 池内徳彰: 気象予測と道路情報, 雪と道路, No.9, pp.29~37, Jan., 1986

45) 河島恒: 名神高速道路における雪氷対策の特色と問題点, 雪と道路, No. 4, pp. 82~92, July., 1987

46) 下村忠一: 積雪地の道路交通に関する工学的研究: 雪氷, 50巻2号, pp. 92~95, 1988

47) 加来照俊: 積雪時の交通事故(2)(峠区間の合成勾配と事故), 雪と道路, No. 20, pp. 7~10, July., 1989

48) 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

49) 鈴木克美, 平間照一: 路面凍結予測手法に関する研究, 第5回雪と道路の研究発表会, 調査・研究発表資料, pp. 38~42, 1993,

50) 増田芳太郎・青木茂: 降雪・凍結予測システム, 雪と道路, No8, pp. 59~69, 1986

51) 植木直之: 重回帰法を用いた路面温度予測システムについて, 雪と道路, No. 21, pp. 42~48, Oct., 1989

52) 武市靖: フーリエ解析による路面凍結の予測手法, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集 第5部, pp. 80~81, 1992

第3章 道路雪氷の分類と工学的特性

3. 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。特に、降雪量の多いわが国では、道路雪氷が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。

従来からある道路雪氷の分類としては、木下ら¹⁾によるものと、青木ら²⁾によるものの2通りがある。前者の分類はどちらかというとな北海道のような寒冷地に重点を置いており、道路雪氷は「新雪」「粉雪」「粒雪」「圧雪」「氷板」「氷膜」「水べた雪」の7種類に分類された。一方、後者の分類は暖地に適用するように工夫されたもので、暖地では稀にしか発生しない乾いた「新雪」や「粉雪」は分類から除かれた。その結果、道路雪氷は「乾き圧雪」「濡れ圧雪」「乾き粒雪」「濡れ粒雪」「水べた雪」「乾き氷板」「濡れ氷板」「氷膜」の8種類に分類された。

しかし、道路雪氷は、一般に暖地、寒冷地の区別は難しく、冬期間における多様な気象条件、道路・交通条件、除・排雪の状態等の自然及び人為的な要因によって大きく影響を受けて、多種多様に変化する。そのため、発生する道路雪氷の種類は平均的な気象条件では決まらない場合が多い。このような点を考慮して提案されたのが、前野による道路雪氷の新分類で表-3.1に示した。本研究における道路雪氷の観測データは”新分類”に基づきとりまとめた^{3), 4)}。

図-3.1は、新分類による道路雪氷の変化系統図である。縦軸は時間の経過を示し、横軸は環境温度の変化を示す。道路雪氷の変化は、通常、矢印のように進行するが、そうでない場合もある。実線は0°C以下の条件における乾燥過程、破線は融解・凍結を含む湿潤過程を示す。

分類した道路雪氷の特徴は次の通りである。

(1)新雪(New Snow)

降雪直後の雪で、一般に軟らかく軽い。寒冷な気象条件では、角板、六花、樹枝、角柱、針等の結晶形が見られる乾き新雪となるが、温暖積雪域では初めから濡れ新雪として降り、降雪後すぐに融解してしまうことが多い。

表-3.1 道路雪氷の分類⁴⁾

大分類	名 称		別称・通称
	小 分 類		
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)	乾き軟圧雪 乾き硬圧雪 濡れ圧雪 WCS(wet compacted snow)	しまり
粉 雪	粉 雪 PS (powder snow)		—
粒 雪	乾き粒雪 DGS(dry grain snow)	濡れ粒雪 WGS(wet grain snow)	ざらめ ざくれ ざくざく
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)	濡れ氷板 WIC(wet ice crust)	アイスバーン 氷 盤
氷 膜	乾き氷膜 DIF(dry ice film)	濡れ氷膜 WIF(wet ice film)	アイスバーン つるつる

※ 乾燥露出 DB(dry bare), 湿潤露出 WB(wet bare)

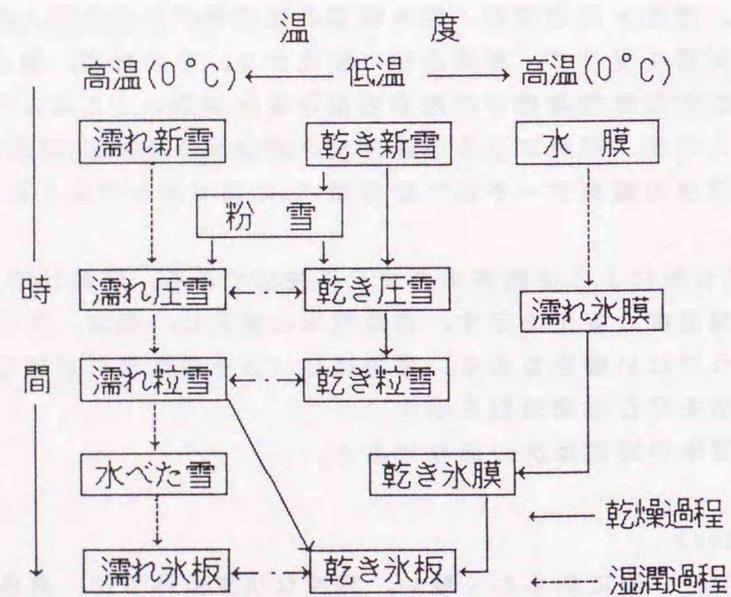


図-3.1 道路雪氷の変化系統図⁴⁾

(2) 粉雪 (Powder Snow)

寒冷地の道路上に積もった乾き新雪は、車両の走行によって破壊され、粉雪に変化することがある。平均粒径は約0.2mm以下で、風や車両の通行によって空中に舞い上がる。

(3) 圧雪 (Compacted Snow)

通常、新雪や粉雪は、車両の走行によって圧密され、次第に緻密で丈夫な圧雪に変わる。これは、雪粒子が機械的に充填され、同時に粒子間の結合が発達したためであり、物理的メカニズムは加圧焼結の現象として説明される。

圧雪は、自然積雪分類におけるしまり雪と似ている。違いは、圧雪の場合、車両による雪構造の破壊、再分布、及び充填が自然積雪の場合よりも極端に大きい点である。このため、圧雪の構造は、一般に不均質である。新分類では、乾き圧雪は乾き軟圧雪と乾き硬圧雪の2種類に細分した。両者の区分の臨界はそれほど厳密に考える必要はないが、おおよそ密度0.5g/cm³、硬度50kg/cm²と考えてよい。

(4) 粒雪 (Grain Snow)

粒雪は、平均粒径がおおよそ0.2mm以上で、比較的大きな粒子をも含む。粒子間にはほとんど結合がないので、砂浜のように歩行や車両の走行が難しい。粒子間に結合が発達しないのは、粒子の表面に氷以外の不純物が付着しているために粒子間の氷の実質的接触が阻害され、加圧焼結が進行しないためと考えられる。不純物としては、車両が運んできた土砂や舗装材料の粉塵あるいは凍結防止の薬剤等が考えられる。

粒雪は、粉雪の凝集によって、また圧雪の破壊によっても生じる。しかし、いずれの場合も日射、車両の熱、薬剤散布等による融解・凍結過程が介在する。地域によっては、ざらめ、ざくれ、ざくざく雪と呼ばれることもある。

(5) 水べた雪 (Slush)

水べた雪は、融解の進んだ雪である。一般に粒径は大きく(通常1mm以上)、粒子間に結合はない。いわゆる、シャーベット状の雪がこれに属する。

(6) 氷板 (Ice Crust)

水を含んだ濡れ粒雪や濡れ圧雪が、寒気のために凍ると氷板になる。氷板は、多くの場合、融解水の流下が下の氷板や舗装面で遮断された所に層状に成長する。氷板は、しばしば氷盤という呼称でも使われ、通常、アイスバーン (Eis Bahnというドイツ語) は、氷板を指す。

(7)氷膜 (Ice Film)

氷膜は、約1mm以下の薄い氷の膜で、その発生形態には大別して二つの場合がある。第一は、路面等に広がった薄い水膜が凍結した場合である。第二は、乾き硬圧雪表面に生じる薄い氷膜である。熱源は、タイヤが硬圧雪表面を滑った時に発生する摩擦熱の場合が多い。この場合、圧雪の表面は、摩擦熱で発生した極少量の水膜がすぐ凍結して、極めて滑りやすい鏡面のような氷膜となるいわゆるつるつるの圧雪である。通称アイスバーンは、氷膜を指すこともある。

圧雪表面の氷膜の形成に関し、本研究の現場調査や室内実験では、上記した第二の発生形態の他に、濡れ新雪が車両の繰返し走行により短時間のうちに濡れ氷膜を形成した圧雪路面に変化することが確認された。本文では、氷膜が形成された圧雪路面を”鏡面化圧雪路面(compact and polished snow surface)”と呼び、凍雨や雪氷の融解水が凍結して氷膜・氷板が形成され、通称”ブラックアイス”、”アイスバーン”と呼ばれる凍結路面と区別した。最近、一般用語になっている”ツルツル路面”は、両者を総称したものであると考えられる。

3. 2 現場観測による道路雪氷の圧密過程と構造

3.2.1 新雪の圧密過程

土質工学における”圧密”という用語は、「載荷重に対する圧縮変形が時間とともに増大していく現象」を意味するが、道路雪氷の場合は、繰返し荷重による圧縮量の累積ないしその時間的変化を総称するものとして、以下、用いる。

道路上に積もった新雪は、車の走行によって短時間のうちに圧雪に変化する。同時に、新雪は車によって粉雪となって空中に舞ったり、軟らかい圧雪は削剝されたりして別の地点に再堆積する。交通量の多い道路では軟らかい圧雪は硬圧雪になり、更に圧密が進むと圧雪の上に氷膜や氷板が形成される。気温や雪温が比較的高い場合には、日中、融解が起こり水べた雪やザクザク状の濡れ雪氷に変化して消雪が進み、それが凍結すると氷板が形成されやすい。

これらの道路雪氷の変成過程を調べるために、札幌市郊外の篠路町で1987年2月28日～3月4日において道路雪氷の現場観測を実施した⁵⁾。図-3.2は、道路横断方向4mの観測区間における新雪の圧密過程と交通量、雪面温度及びアルベドとの関係を示したものである。2月27日の夜半から28日早朝にかけて平均4.2cmの圧雪の上に平均14.5cmの新雪が積もった。密度の変化は、周辺圧雪の観測結果から、28日15時における密度を0.55g/cm³とし、圧密過程で質量が保存されると仮定して計算で求められる。新雪が積もってから1時間30分後の7時30分

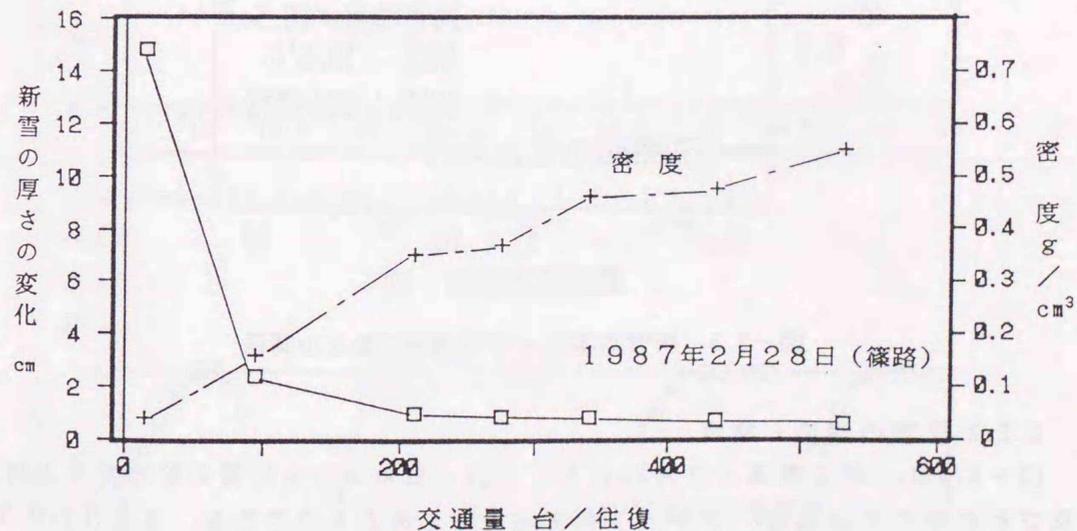
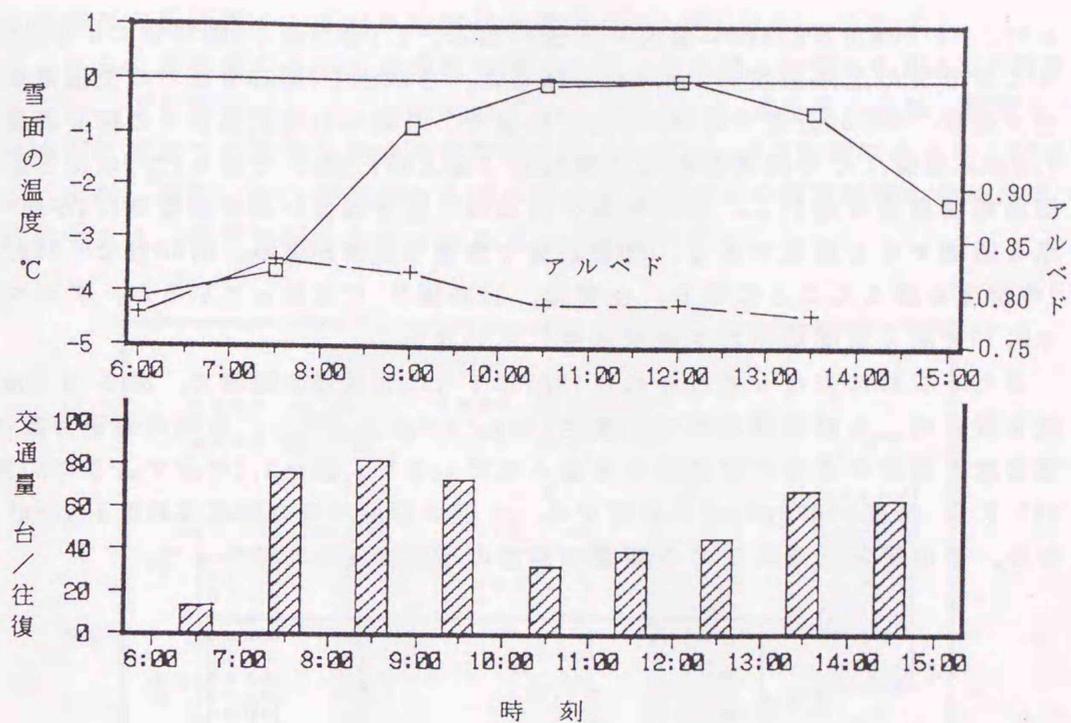


図-3.2 新雪の圧密過程と交通量、雪温、アルベドとの関係

には、14.5cmから2.4cmに急速に圧密が進み、3.5時間後の9時30分には平地の乾きしまり雪の上限密度 0.35g/cm^3 を越えた。6時から7時30分までの交通量は94台/往復、9時30分までには247台/往復で、6時~14時30分までの総交通量は499台/往復、その内大型車交通量32台(混入率7.4%)であった。車は5mの道路幅を自由に走行し、走行軌跡の分布は一定ではないが交通量の1/4が同一地点を通過すると仮定すると、20台前後で急速な圧密が進み、約50台で 0.35g/cm^3 の密度を越えたことになる。圧雪は、12時頃 0°C になっているが、アルベドは0.77で高く雪面の汚れや融解は生じていない。

また、これに先だて行われた1987年1月の同現場の観測で、深さ10.5cmの乾き新雪の上を普通乗用車で速度約 20km/h で往復走行し、車両の通過台数と圧雪密度とのおおよその関係がまとめられている⁴⁾。図-3.3に示すように、気温 -10.3°C 、密度 0.069g/cm^3 の新雪では、1回の通過で雪の密度は約 0.40g/cm^3 となり、その後50回走行しても顕著な密度の増加は見られなかった。

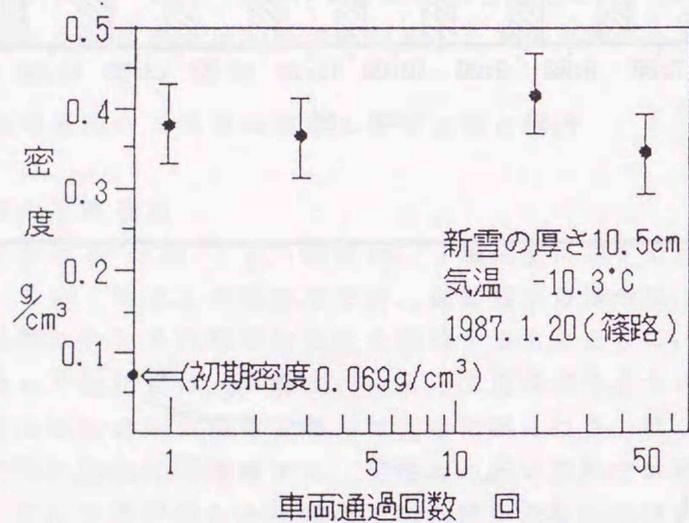


図-3.3 新雪の密度と車両通過回数との関係

3.2.2 圧雪の構造と密度

図-3.4は、同じ現場の2月28日から3月4日における圧雪の平均密度と構造及びその時の雪面温度、アルベドの変化をまとめたものである。3月3日の午前中迄は雪温は 0°C 以下、アルベドは0.66~0.82の範囲で融解は起きていないが、3日の正午からと4日の午後には雪温が 0°C で、アルベドが低下し、融雪が進行している。観測期間中、降雪があるため連続的な変化を示していないが、圧雪の構造のうち、a)~c)は融解現象が関与していない乾き圧雪の圧密過程、d)からやや融解現象が関与して硬い圧雪が含まれ、e)では融解浸透水の凍結に

よる高密度の硬圧雪の上に濡れ粒雪が形成されている。

以上から、北海道のような寒冷地の乾き新雪の密度は、一般に 0.05g/cm^3 前後であるが、走行車両によって短時間のうちに圧密され、雪粒子の破壊や再配列で機械的に圧密される乾き圧雪の密度は $0.50\sim 0.60\text{g/cm}^3$ の範囲にあることが分かる。また、採取コア-観察例から濡れ雪や融解浸透水の再凍結等の熱的作用が関与すると、硬圧雪層が形成されることが確認された。

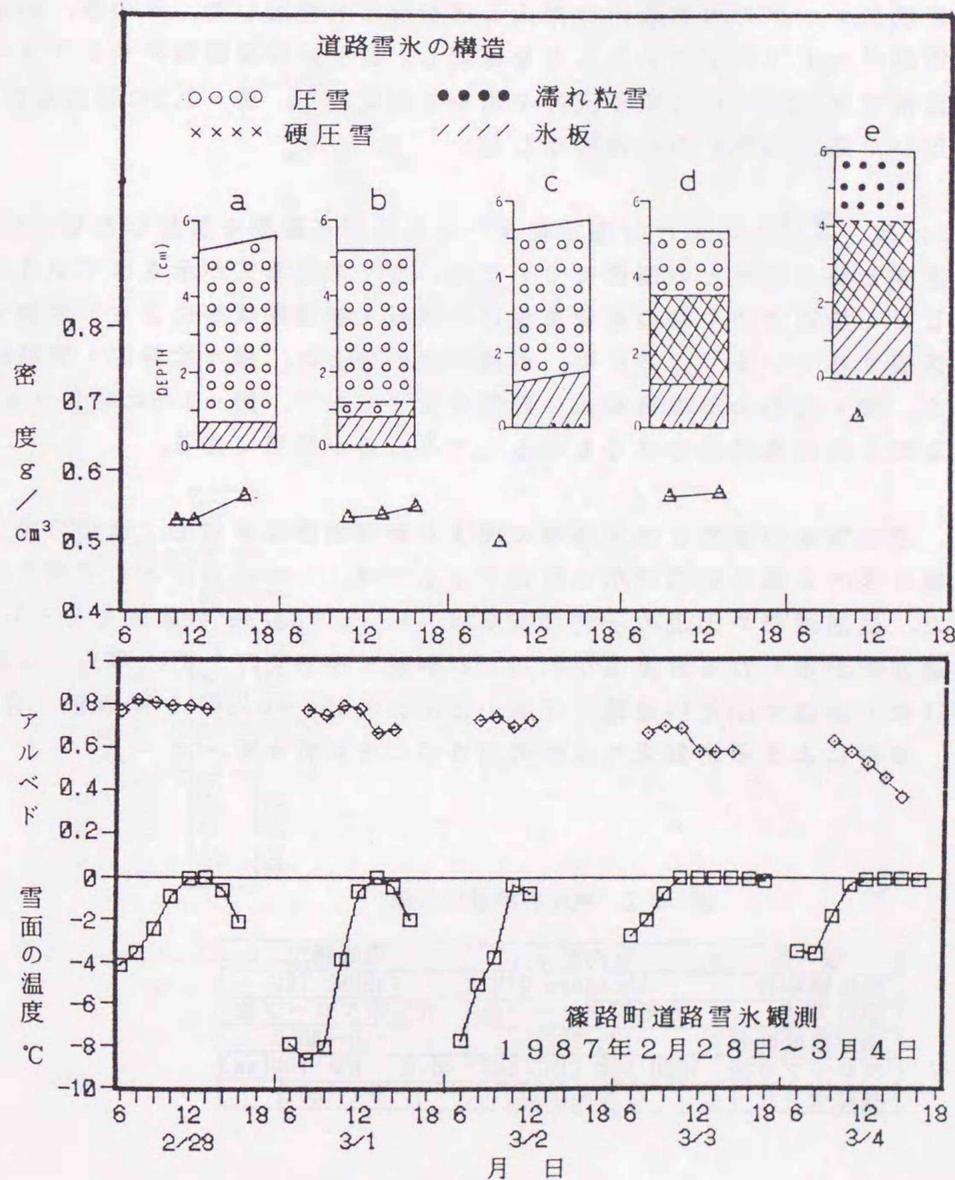


図-3.4 圧雪の密度、構造、アルベド及び雪温の経時変化

3.2.3 道路雪氷の密度と熱伝導率

1988年1月～2月にかけて、北海学園大学工学部周辺の国道230号線、生活道路、団地内道路、歩道、構内の駐車場、道路端部の堆雪層等、約80箇所の現場調査を行い、61箇所の道路雪氷について密度と熱伝導率を測定した。密度が比較的大きい道路雪氷は、雪氷塊を断熱箱に入れて実験室に持ち帰り-10°Cの恒温室内で一日養生後、密度と熱伝導率を測定した。

密度が小さく輸送中に乱れやすい堆雪層の積雪塊は、雪面を整形し日射を遮りながら針状プローブを堆雪層内に挿入し熱伝導率を測定した。その際、測定終了時の雪温が-1°C以下であることを確認し、密度は堆積既知のサンプラーで採取した積雪塊をその場で電子天秤を用いて測定した。表-3.2に室内及び現場測定に用いた熱伝導率計の仕様を示した。

図-3.5には、本研究における測定結果⁶⁾と他の測定結果を併記したものである。雪の密度と熱伝導率との関係については、多くの提案式が示されているが、密度が同じでも測定方法や雪の変成を受けた履歴・物理性状等によって変動することが指摘されている⁷⁾。さらに、道路雪氷の場合は、様々な熱的・機械的作用や薬剤、塵・泥等の不純物混入の影響を受けており、図-3.5に示した測定結果はある限られた条件におけるものとしてみるのが妥当である。

しかし、道路雪氷の密度と熱伝導率に関する研究事例は少なく、道路の凍上や路面凍結に係わる雪の熱的性状を評価する上では、一つの目安として考えられる。また、生活道路や国道の圧雪の密度は0.55～0.70g/cm³の範囲に分布し、車両の通過回数が限られる駐車場の0.4g/cm³前後で小さい。一方、車両の圧密作用を受けない歩道や団地内道路の圧雪の密度は0.45g～0.55g/cm³の範囲に分布しており、歩行による圧密効果も比較的大きいことが分かる。

表-3.2 熱伝導率計の仕様

項目	室内測定	現場測定
熱伝導率計	Shotherm QTM	THERMO TEC
測定方法	非定常プローブ法	非定常プローブ法
測定温度範囲	-10～200°C	-20～80°C
プローブ寸法	100H・50W・110L(mm)	針状 1.6φ・100(mm)
温度センサー	CA熱伝対	Pt 100Ω

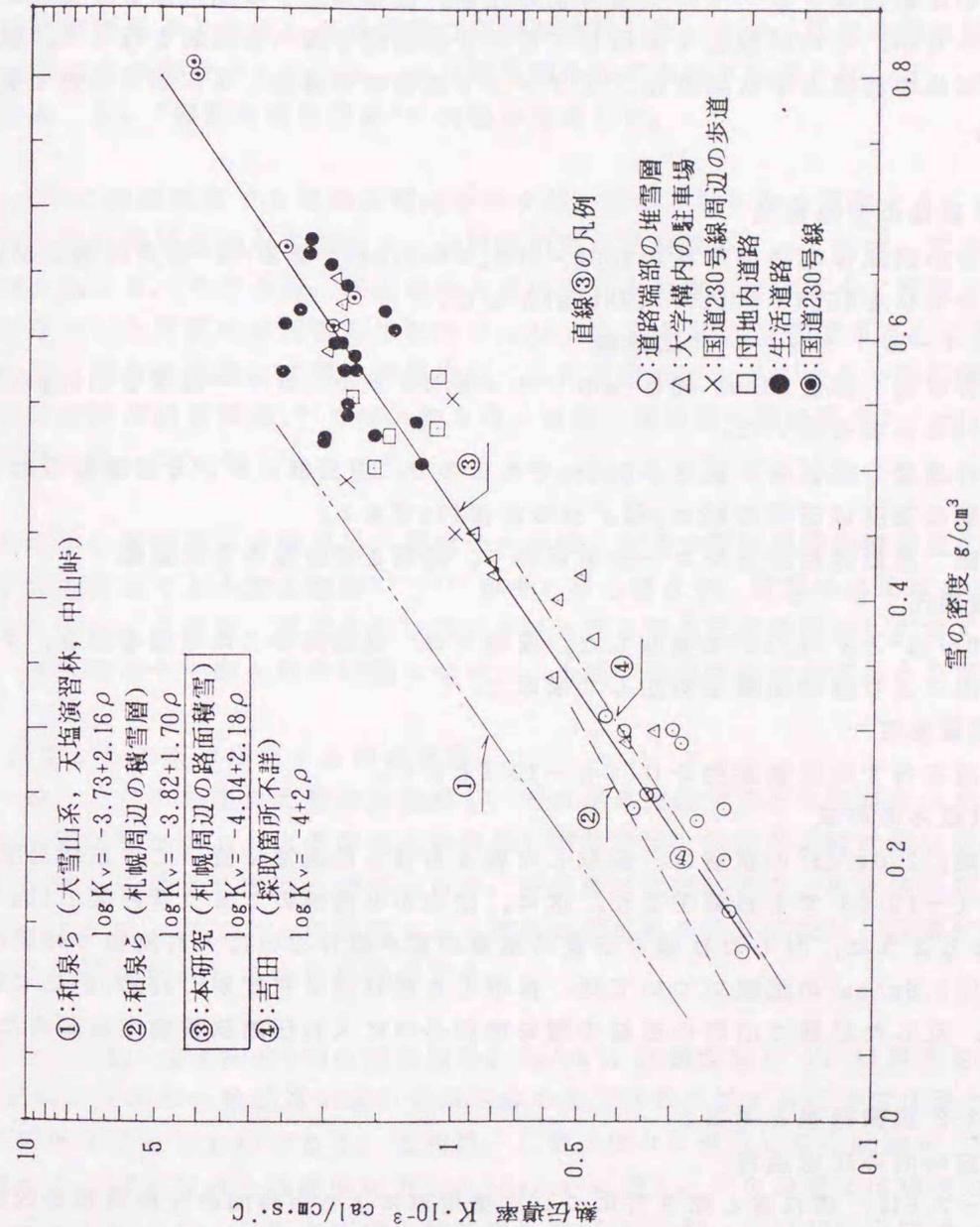


図-3.5 道路雪氷の密度と熱伝導率との関係

3. 3 ホイールトラッキング試験による雪供試体の圧密過程

3.3.1 試験の概要

この試験法はアスファルト混合物の圧密、流動に対する抵抗性を評価するものであるが、この試験法を準用して雪の圧密過程を調べる試験を行った。試験は供試体の温度と形状以外はアスファルト混合物の場合とほぼ同じ条件で実施した。

(1) 供試体の型枠形状

標準の供試体型枠の形状は300W×300L×50H(mm)であるが、雪の圧密量が大きいので形状を300W×600L×100H(mm)とした。

(2) ホイールトラッキング試験機

- 走行車輪：直径20cm、幅5cmのソリッドタイヤで、タイヤは厚さ1.5cmのJIS硬度78のものを用いた。
- 走行速度：供試体の長さが600mmであるので、中央部における試験輪の水平前後運動の速度は基準の42±1回/分のほぼ1/2である。
- 記録：差動変位計とレコーダを用いて、時間と変位量を自記記録

(3) 接地圧

2.0g/cm²と3.6g/cm²で実施した。接地圧は、供試体の上に車輪を置き、プリント法により接地面積を測定して求めた。

(4) 試験温度

恒温室内での試験温度を0°Cと-10°Cとした。

(5) 供試体の作成

接地圧2.0g/cm²の試験は、採取した乾き新雪を低温室に置いて、試験温度の0°C(-10°C)で1日養生した。次に、密度が平地部のしまり雪密度0.30g/cm³になるように、乱した状態で所要の重量の雪を型枠の中に入れ鋼板で締固めた。接地圧3.6g/cm²の試験については、採取した濡れ雪を密度が0.45g/cm³になるように、乱した状態で所要の重量の雪を型枠の中に入れ圧縮試験機で締固めた。

3.3.2 試験結果と考察

(1) 短時間の圧密過程

図-3.6は、濡れ雪と乾き雪について乗用車による短時間の圧密過程を仮定した場合の試験結果をまとめたもので、初期密度0.30g/cm³の雪供試体の載荷回数に対する圧密量と密度との関係を示した。圧密過程の密度は、初期密度と100回走行後の採取コアの測定値に基づき、圧密量に対する比例配分で算出した。

水分の少ない濡れ雪を想定した0°Cの試験温度では、10回前後の走行で多少側方ないし前後への雪の移動が見られるが、急速に圧密が進み^{8),9)}、その後も圧密が徐々に進行し100回で0.48g/cm³になった。走行軌跡が一定しているため現場観測結果より少ない走行回数で圧密が進行しているが、圧密過程は観測結果と同様の傾向を示している。走行面は磨かれて氷膜が形成され、3.1の(7)で定義した、“鏡面化圧雪路面”の状態が発生した。

-10°Cの試験温度でも同様の傾向を示すが、雪温が低いため雪粒どうしの付着が弱く走行開始直後から数回は、供試体の雪は試験輪によって前後、側方への移動が起こる。そのため、圧密量は大きい密度の増加は小さく、密度の増加を基準にした実質的な圧密の進行度は、0°Cの試験の1/2程度である。これについては、側方を拘束して雪の流動をなくした円筒モールドによる一軸圧縮の回復載荷試験の研究事例¹⁰⁾では、乾き雪の体積圧縮係数は濡れ雪の1/2~1/3という結果を示している。

その後の短時間の走行では、雪粒子の破壊、充填や再配列等の構造変化や雪粒子間の結合による加圧焼結^{11),12)}がそれ以上進まず、密度の増加はほとんど見られない。これは、気温の低い時における乾き雪の圧密過程として考えられる。走行面はやや磨かれた状態になるが、氷膜の形成はほとんど見られない。

(2) 圧雪から氷板に変化する圧密過程

一般に、日中の暖気で雪氷が融解し、それが再凍結すると氷板が形成されやすい。交通量が多く、大型車混入率の高い道路では、気温が比較的高い状態で、濡れ圧雪が圧密され表面が磨かれると、硬圧雪に変化しその上に氷膜が形成される。さらに、タイヤとの摩擦による熱的作用が繰り返して加わり圧密が進むと氷膜が成長して氷板に変化する。

図-3.7は、接地圧が(1)の約2倍の3.6g/cm²、試験温度0°C、初期密度0.45g/cm³の含水率が比較的高い濡れ雪供試体の走行回数に対する圧密変化量と密度との関係を示したものである。載荷後、圧密は徐々に進行し走行回数が1,000回を越えると硬圧雪の上限密度に近い0.75g/cm³に達し、その表面には鱗状の氷板が形成されていた。氷板のほぼ上限密度0.85g/cm³になった1500回以降は、密度の増加はほとんど見られなくなり、走行面の氷板の上には水が浸出していた。

氷板の生成は、融解した道路雪氷の再凍結の場合のみならず、轍が形成された圧雪路面に走行軌跡が集中して圧密が進むと、圧雪~硬圧雪~(氷膜を伴う硬圧雪)~氷板の変成過程でも生成されることを示している。

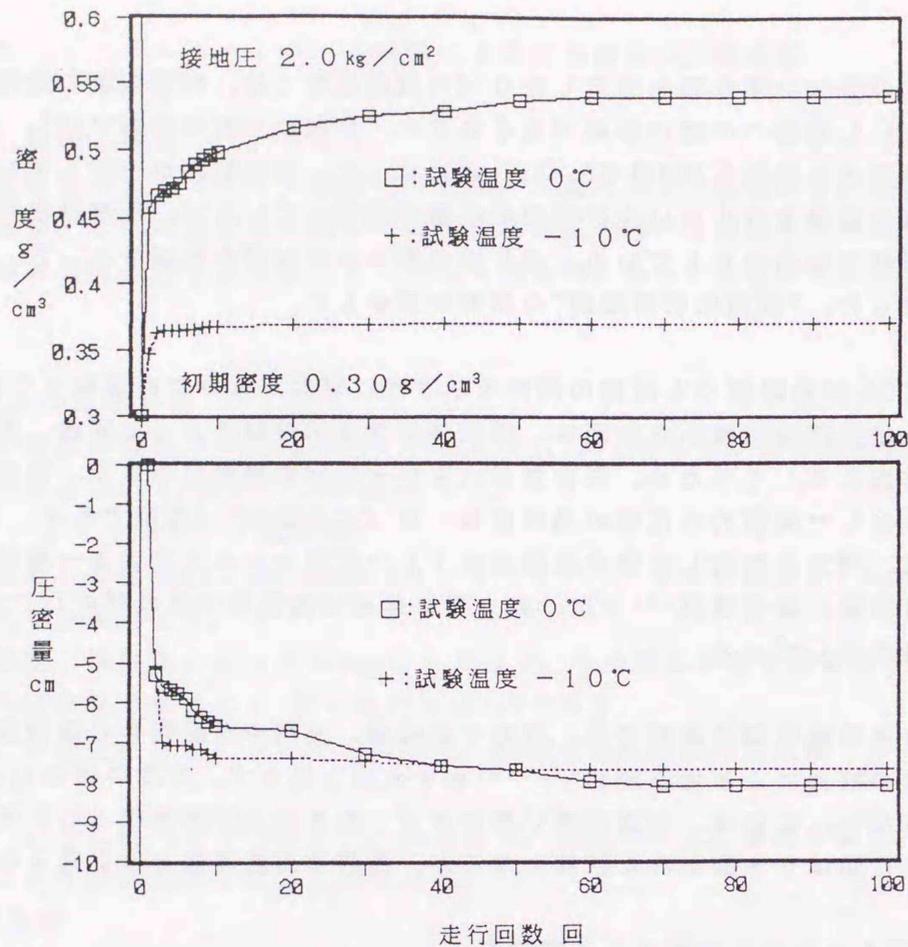


図-3.6 圧雪生成過程の走行回数と密度と圧密度との関係

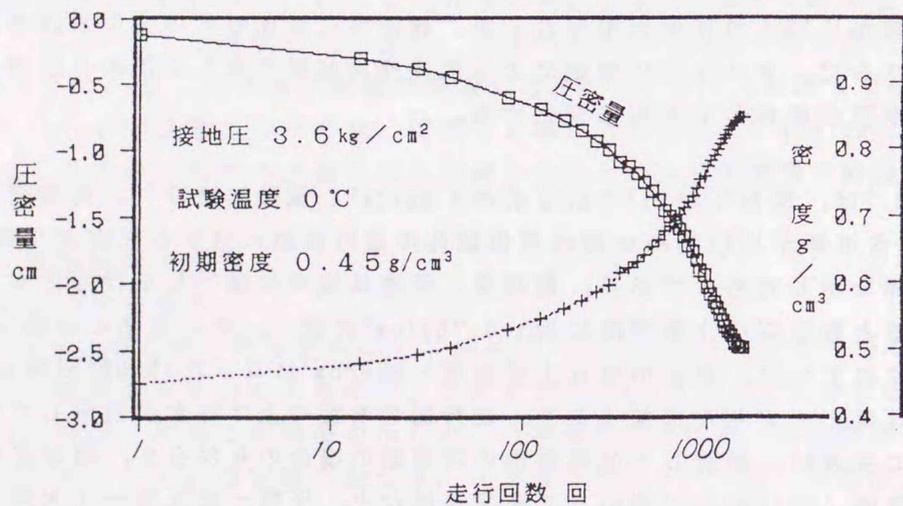


図-3.7 氷板生成過程の走行回数と密度と圧密度との関係

3.4 まとめ

- 道路雪氷を分類し、縦軸を時間の経過、横軸を環境温度の変化とした系統図に基づくと、車の走行による圧密を伴う道路雪氷の乾燥過程と湿潤過程の変化の状態が理解しやすい。

- 現場観測により乾き新雪の圧密過程を調べた結果、短時間の内に圧密され、その密度は0.35~0.40 g/cm^3 に達した。

- 交通条件の異なる道路雪氷の密度と熱伝導率との関係を示した。しかし、道路雪氷は、様々な熱的・機械的作用や薬剤、塵・泥等の不純物混入の影響を受けており、各要因別の検討が必要である。

- ホイールトラッキング試験機により雪供試体の圧密過程を調べたところ、最初の数回の走行で急速に圧密が進んでほぼ限界密度に達し、それ以降の圧密はごくわずかであることが確認され、現場観測と同様の結果を得た。

- 濡れ雪(0°C)は乾き雪(-10°C)より変形しやすく圧密されやすいが、乾き雪の実験では走行輪による実験開始直後、側方・前後への流動が起きて見かけの圧密進行の度合は濡れ雪とほぼ同じになった。しかし、これは実際の走行車両によって起きる現象に近いと状態を再現しているとも考えられる。

- 濡れ圧雪の走行試験により、圧雪~硬圧雪~(氷膜を伴う硬圧雪)~氷板に変化する過程を室内実験でおおよそ示すことができた。濡れ圧雪は、含水率や接地圧によりその圧密特性が異なるので、今後、これらについての詳細な実験を行う必要がある。

- 現場観測及び室内実験結果から、走行輪により新雪は短時間で圧密されて表面が磨かれ、気温が高い状態で圧密が進行すると、氷膜が形成されて鏡面化した圧雪路面になりやすいことが分かった。

- 本文では、氷膜が形成された圧雪路面を"鏡面化圧雪路面 (compacted and polished snow surface)"と呼び、凍雨や雪氷の融解水が凍結して氷膜・氷板が形成される、通称"ブラックアイス"、"アイスバーン"と呼ばれる凍結路面と区別した。最近、一般的な用語となっている"ツルツル路面"は、両者を総称したものであると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 木下誠一, 秋田谷英次: 北海道における路面積雪調査 I, 低温科学, 物理篇第 27号, pp. 163~179, 1969
- 2) 青木忠男, 下村忠一, 石平貞夫, 金子英雄: 雪寒対策調査(1), 建設省土木研究所資料, 1306号, pp. 1~64, 1970
- 3) 前野紀一: 道路雪氷の名称と分類, 雪と道路, No. 16, July, 1988
- 4) 前野紀一, 成田英器, 西村浩一, 成瀬康二: 道路雪氷の構造と新分類, 低温科学, 物理篇第 46号, pp. 119~131, 1987
- 5) 成瀬康二, 石川信敬, 武市靖, 前野紀一: 道路雪氷の消耗過程の特性, 低温科学, 物理篇第 46号, pp. 135~149, 1987
- 6) 武市靖, 久保宏: 路面積雪の熱伝導率と密度に関する研究, 土木学会第 43 回 年次学術講演会講演概要集 第 5 部, pp. 104~105, 1988
- 7) 和泉薫, 藤岡敏夫: 積雪の変態と熱伝導率の研究 I, 低温科学, 物理篇第 33号, pp. 91~97, 1975
- 8) 前野紀一, 福田正巳: 雪氷の構造と物性, 古今書院, pp. 186~194, 1986
- 9) Samuel C. Colbek: The Compaction of Wet Snow on Highways, Snow Removal and ice Control Research, TRB special report 185, pp. 14~17, 1979
- 10) 対馬勝年: 積雪の反復荷重試験, 低温科学, 物理篇第 31号, pp. 57~66, 1973
- 11) 海老沼孝郎, 前野紀一: 加圧焼結現象としての雪の圧密の研究 (I), 雪氷第 46 卷, 4 号, 1984
- 12) 前野紀一: 雪の氷化過程, 数理科学, No. 319, pp. 54~59, 1990

第 4 章 冬期間の路面状態

4. 1 調査・観測の概要

北海学園大学工学部周辺の国道 230 号線と生活道路、札幌市内の 3 箇所（伏見地区、24 軒地区、発寒地区）の市道、および小樽市周辺の国道 393 号線の山地部において、気象条件、地形条件、道路・交通条件等の異なる幹線道路、準幹線道路及び生活道路を観測地点に選び、冬期間を通じて路面状態の経時観測を行った^{1), 2), 3)}。各観測地点の調査・観測の詳細は、(1)~(3)に示す通りで、表-4.1はそれらをまとめたものである。

(1) 北海学園大学工学部周辺の道路

・観測地点

国道 230 号（中央区南 27 条西 11 丁目）、生活道路（中央区南 26 条西 11 丁目）

・観測期間

1987 年~1990 年における 12 月~3 月の 3 冬にわたり、10 時頃に観測を実施した。1989 年~1990 年の 12 月~3 月は、10 時と 16 時の観測を実施した。

・調査・観測項目

各路面状態の発生頻度、道路雪氷によって路面が被覆されていない割合（露出率）、路面積雪厚さの調査（生活道路のみ）、路面のアルベド、密度と熱伝導率測定用の雪氷塊のサンプリング（月 1 回）、交通量調査（毎月 1 回 12 時間交通量を調査）

・調査・観測の方法

路面状態は、目視、写真撮影及びビデオカメラ撮影により記録し、客観的評価とその修正ができるようにした。アルベドの測定には、アルベドメータを用いた。

(2) 札幌の市道

・観測地点

伏見地区（中央区南 17 条西 18 丁目）、24 軒地区（西区 24 軒 2 条 2 丁目）、発寒地区（手稲区発寒 5 条 7 丁目）

・観測期間と観測項目

1989 年~1991 年における 12 月~3 月の 2 冬について、自動撮影カメラを設置し、4 時間毎に走行車線部分の路面状態を撮影した。また、熱電対を路面下方 0.5、5.0、10cm に埋設し、路面温度を 1 時間毎にデータログに自動収録した。

(3) 国道393号線の小樽市山地部区間

この区間は、凍結抑制舗装（ベルグリミット舗装）の凍結抑止効果の経年変化を調査する目的で1989年、1990年及び1991年に施工されたものである。在来舗装との路面状態の比較ができるように同区間内に1991年に施工された在来舗装箇所を含め、4箇所を1991年12月～1992年3月にわたり調査を実施した。ここでは、1991年に施工された凍結抑制舗装と在来舗装区間を解析の対象とした。

・観測方法と観測項目

毎週1回の定期観測と月1回の12時間(7am～7pm)集中観測により、各観測地点の道路雪氷の種類、路面の露出率、路面のアルベド、採取した雪氷の塩分濃度、気温、路面温度、風速等の調査・観測を行った。定期観測は、各観測地点で各調査・観測項目について1回実施し、集中観測ではその調査・観測を3時間毎に4回実施した。路面には熱電対を深さ0.5cmに埋設し、後述する路面凍結検知器を設置して、1時間間隔で路面温度、気温と電気容量を自動計測した。更に、道路雪氷と路面露出率の経時変化を調べるために、8時～16時の間、2時間毎に観測小屋横に設置した自動撮影カメラで路面状態と撮影した。

表-4.1 各観測地点の調査・観測の概要

観測現場	国道230号	生活道路	札幌市道 伏見, 24軒, 発寒	国道393号 在来舗装, 凍結抑制舗装
観測期間	1987.12～1990.3	1987.12～1990.3	1989.12～1991.3	1991.12～1992.3
観測時間	10時	10時	1日中4時間毎	8～16時の2時間毎
路面状態	目視, ビデオ・写真	目視, ビデオ・写真	自動撮影カメラ	自動撮影カメラ
路面露出率	同上	同上	測定せず	同上
アルベド	10時	10時	測定せず	毎週1回
路面積雪厚	測定せず	10時	測定せず	毎週1回
雪面温度	測定せず	10時	測定せず	毎週1回
路面温度 (計測深さ)	測定せず	10時	毎時間自動計測 0.5, 5, 10cm	毎時間自動計測 0.5cm
交通量	毎月1回	毎月1回	パラス調査結果参考	1992年2月に実施
その他	雪氷の熱伝導率と密度の測定		週1回目視観測	週1回目視観測 月1回12時間集中観測

4. 2 路面状態の調査・観測結果と考察

4.2.1 北海学園大学工学部周辺の道路

(1) 道路雪氷の種類別発生頻度と路面の露出率

図-4.1は、1987年～1990年の3冬の日中における国道230号線と生活道路の観測結果を道路雪氷の分類に基づいてまとめたものである。12月～2月において、生活道路では、圧雪、粒雪、氷板等の各種の道路雪氷がまんべんなく発生し、12月の初旬を除いて路面が露出することはない。これに対し、230号線では冬期間を通じて、日中の露出状態が平均で80%程度を占め、圧雪、氷板・氷膜等の発生頻度を大きく上回っている。

このような道路雪氷の発生頻度の違いは、図-4.2に示した路面の露出率で比較するとより明確に現れている。生活道路では、12月中旬～2月下旬まで路面はほとんど露出しておらず、露出する時期は3月以降である。

国道230号線では冬期間を通じて日中の露出率は高いので、露出率が断続的に低下したり、0%になる日は降水量の大小と密接な関係がある。乾き新雪の密度を $0.06g/cm^3$ 、降雨量計の新雪捕捉率を0.8とすると、降水量1mmが新雪2cmにほぼ相当する。この仮定に基づき、露出率と降水量との関係を見ると、除雪状態や時期も関係するが、図-4.3の降雨量が5mm(降雪が10cm)前後になる日は路面の露出率は50%以下に低下し、20cm以上では0%近くになっている。降雪が2～3日続けば、圧雪路面状態の日も連続しており、路面には2～3cmの圧雪層が形成されていると考えられる。

2月下旬以降は降雪による露出率の大きな低下は見られない。幹線道路は除雪水準、交通量及び局地的気象条件等の影響を受けるため路面状態は一様ではないが、2～3日の短期間については降雪量から路面状態をある程度評価できると考えられる。

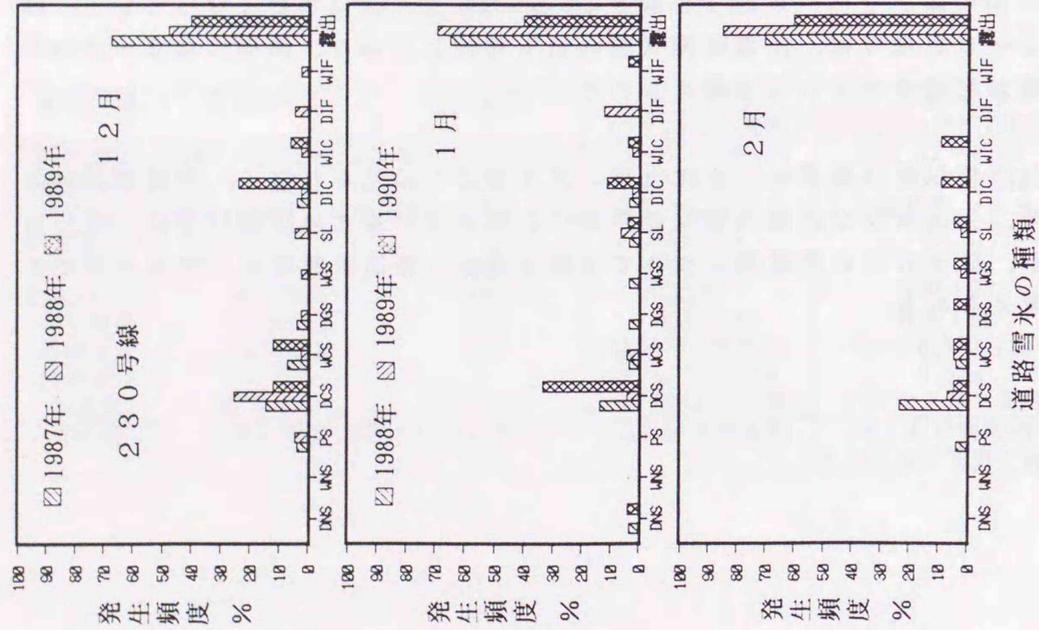


図-4.1 国道230号線と生活道路の道路雪水の種類別発生頻度

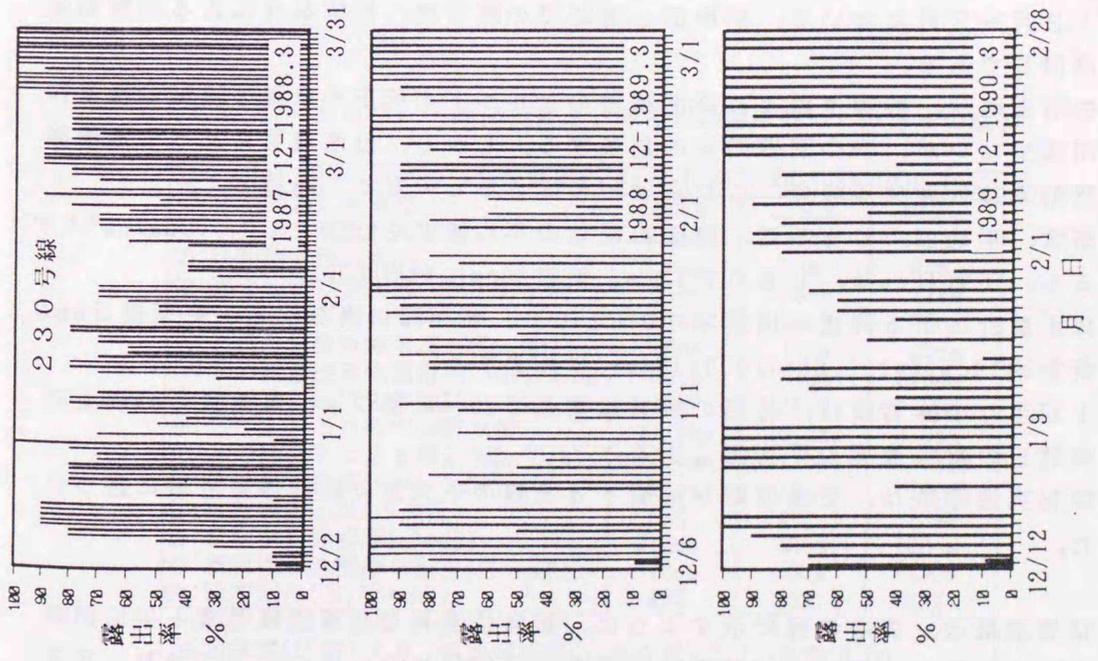
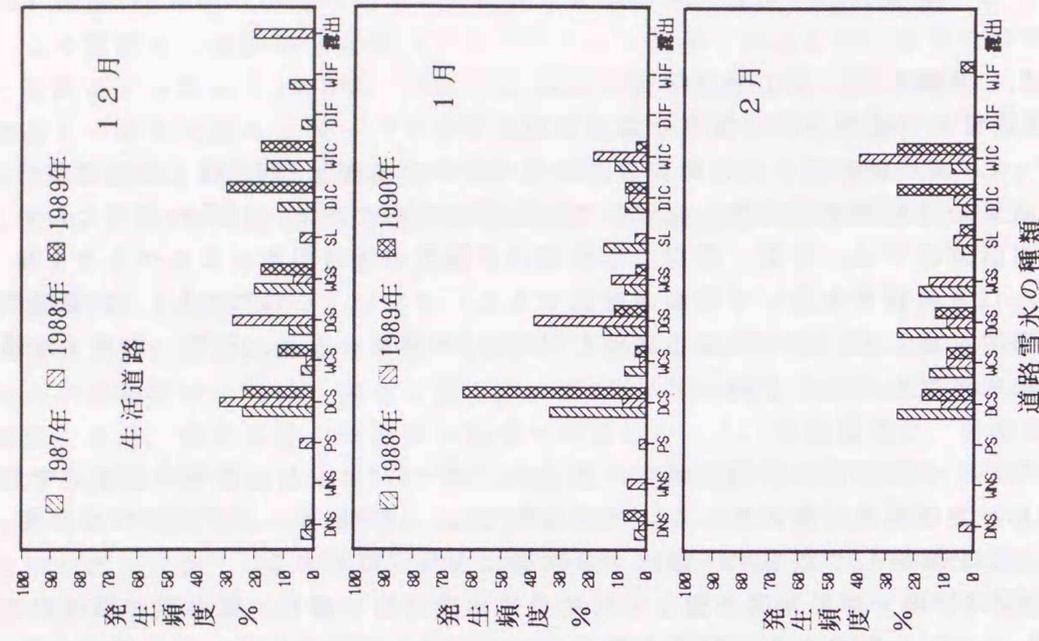
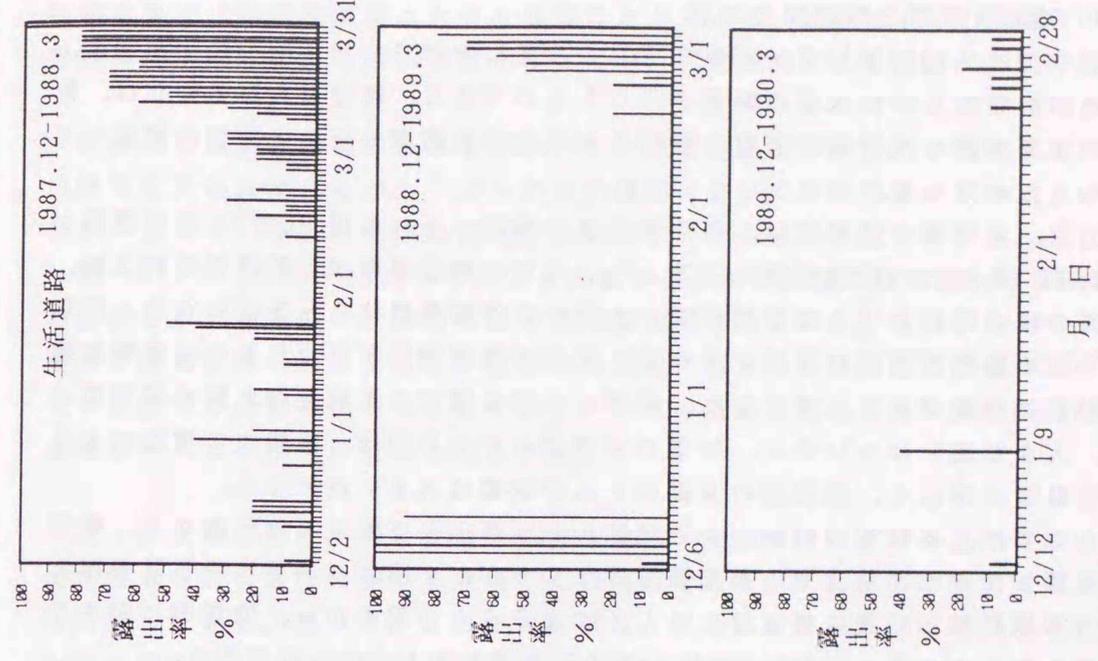


図-4.2 国道230号線と生活道路の路面の露出率



(2) 路面積雪厚と除雪厚の試算

図-4.3は、1987年12月～1990年2月の3冬における生活道路の路面積雪厚、平地部積雪深及び降水量の関係を示したものである。路面積雪厚の変化は、除雪や交通車両の攪乱等の影響を受けるが平地部積雪深の変化と比較的対応していることが分かる。

通常、非除雪の状態では、自然積雪より締固められた雪(圧雪)の方が消雪が遅れる。札幌での観測事例によると⁵⁾、圧雪の熱伝導率が自然積雪の約3倍、寒気の侵入時における積雪層内部の上方への移動熱量は2～5倍になり、圧雪層下面の地盤表層部は凍結するため、圧雪の地面融雪が行われるのは凍結地盤が融解した後である。すなわち、両者における積雪表面層融解水量や蒸発量には、大きな違いはないので、圧雪の消雪遅れの主要因は、熱損失の増加による地盤融雪が遅れる、融雪期の末期ほどこの影響は大きい点にある。

ここでは、本研究の観測結果と既往の観測事例及び除雪実施回数から、新雪に換算した平地部積雪厚と路面積雪厚との差が、1回当たりの平均新雪除雪厚と除雪実施回数との積にほぼ等しくなるであろうとの観点から、除雪厚に関する試算を行った。表-4.2は、それらの試算過程をまとめたものである。

表-4.2における①～⑭の試算は、次のような仮定を設けて行った。

- 12月～2月において、平地部と道路での降雪量、気象条件による消雪効果は同じである。
- 生活道路は、幹線道路より路面積雪のアルベドの低下や車両の機械的攪乱作用は少ないが、多少消雪効果を助長する。しかし、自然積雪に比べて地盤融雪効果は低減するので、これらは相殺されるものとして無視した。
- 新雪、平地部のしまり雪、路面の圧雪の平均密度を0.06、0.3、0.6g/cm³とすると、圧雪6cmは、しまり雪12cm、新雪30cmに相当する。
- 降雨量計による降雪の捕捉率を0.8として、新雪厚に換算すると降雨量5mmが新雪約10cm(5*1/0.06*1/0.8=104mm)に相当する。
- 1回当たりの除雪厚は、札幌の新雪除雪基準10cmに基づき、降雨量5mm以上の降雪日の新雪換算の平均値とする。
- 除雪実施回数は、生活道路が位置する札幌市中央区の除雪作業月報に基づいた。

試算結果は、表中の⑬に示すように、新雪に換算した路面積雪厚と平地部積雪厚との差⑬が、期間中の新雪除雪厚の推定値⑭に近い値になっており、3冬における両者の収支は、新雪換算で-3cm～16cm、圧雪換算で-0.3～1.6cmである。また、1988-1989年の冬のように除雪回数がかかなり少ないと、生活道路の

観測結果では路面積雪厚は大きくなる事が分かる。試算による1回当たりの新雪換算の平均除雪厚は20cm程度となったが、現場観測による検証が必要である。

札幌市では新雪除雪の基準を10cmとした最近の除雪予算に、1路線1冬18回の除雪を見込んでいるが、12～2月の期間において日降雪量が10cm以上の日は13～17回で、予算計上の除雪回数は観測データとほぼ一致している。

図-4.4に1987年～1993年における札幌市各区の冬期間の降雪量と除雪回数との関係を示したもので、両者にはある程度相関が見られる。札幌市全体の平均を表す回帰直線と比較すると、北区は降雪量に対する除雪回数は多めで、中央区や東区はその逆の傾向を示しており、各区の道路・交通条件や気象条件等の地域特性による相関の乱れも見られる。

以上の試算結果は、様々な気象条件や道路・交通条件における道路雪氷と平地部雪氷の消雪過程の違いを無視した概略値であるが、札幌市の除雪実績とほぼ対応している。従って、この試算結果は、平地部積雪深と平均路面積雪厚から各地域における生活道路の除雪水準を検討する際の日安として、また、表-4.3に示したカナダのトロント市の雪氷管理水準のように、道路種別や交通量区分による管理水準の見直しの検討データとして利用できると思われる。

表-4.2 路面積雪厚、平地部積雪深、除雪回数等に基づく除雪厚の試算

①～⑭は12月～2月についての項目	1987-1988	1988-1989	1989-1990
冬期間累計降雪量	530cm	323cm	405cm
①: 12～2月累計降雪量	442cm	295cm	343cm
②: 路面積雪厚の平均	5.5cm	9cm	6cm
③: ②のしまり雪換算(②*0.6/0.3)	11cm	18cm	12cm
④: 平地部積雪深の平均	51cm	35cm	55cm
⑤: しまり雪換算除雪厚(④-③)	40cm	17cm	43cm
⑥: ⑤の新雪換算除雪厚(⑤*0.3/0.06)	200cm	85cm	215cm
⑦: 降雨量5mm以上の回数	13回	15回	17回
⑧: ⑦の1回当たりの平均降水量	11.5mm	10.2mm	9.0mm
⑨: ⑧の捕捉率による補正(⑧/0.8)	14.4mm	12.8mm	11.3mm
⑩: ⑨の新雪換算(⑨*1/0.06)	24cm	21cm	19cm
⑪: 除雪実施回数(中央区)	9回	4回	10回
⑫: 新雪換算除雪厚(⑩*⑪)	216cm	88cm	190cm
⑬: 新雪換算除雪厚の収支(⑥-⑫)	-16cm	-3cm	+15cm
⑭: 除雪割合(⑥/①*100)	45%	29%	63%
-仮定した雪の密度 g/cm ³ -			
路面積雪(圧雪):0.6, 平地部積雪(しまり雪):0.3, 新雪:0.06			
*補足率:降雨量計による降雪の捕捉割合≒0.8			

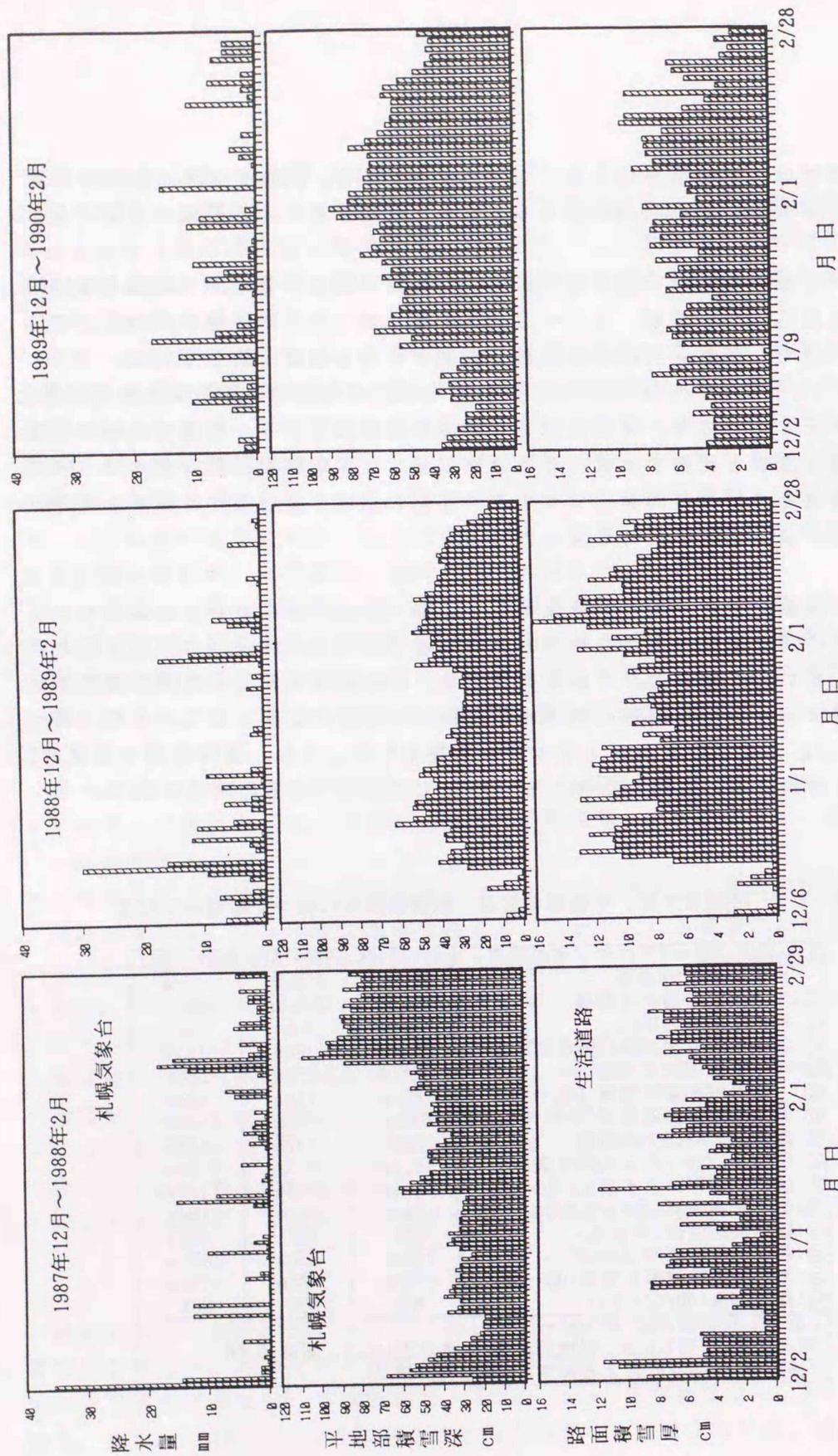


図-4.3 降水量、平地部積雪深及び路面積雪厚の関係

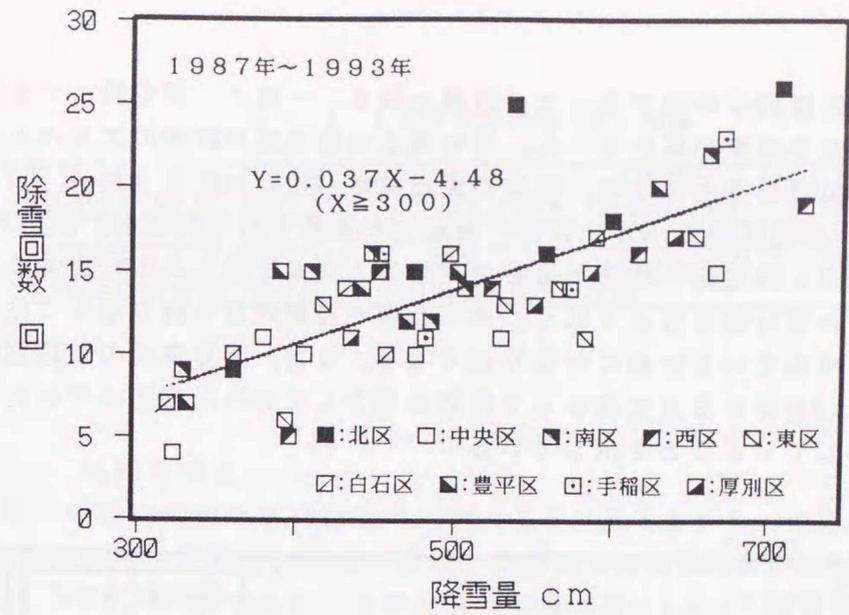


図-4.4 札幌市各区の降雪量と除雪回数との関係

表-4.3 トロント市の道路雪氷管理水準

サービスレベル クラス	種別	道路の種類と 冬期平均日交通量(WADT)	M.A.A. cm	P.S.S. %
1 A	Bare Pavement (無雪氷路面)	多車線道路 WADT ≧ 10,000	2.5	98
1 B	Bare Pavement	カナダ横断道路 2,000 ≧ WADT ≧ 9,900 (南部) 1,500 ≧ WADT ≧ 9,900 (北部)	2.5	95
2	Bare Pavement	1,000 ≧ WADT ≧ 1,999 (南部) 800 ≧ WADT ≧ 1,499 (北部)	4.0	95
3	Center Bare Pavement	500 ≧ WADT ≧ 999 (南部) 400 ≧ WADT ≧ 799 (北部)	5.0	90
4	Snow Packed (圧雪路面)	WADT ≧ 500 (南部) WADT ≧ 400 (北部)	7.0	75

M.A.A. (Max. Allowable Snow Accumulation): 最大許容積雪深
P.S.S. (Percentage Storms Serviced): 降雪時のサービスレベル
P.S.S. = (M.A.A. / 降雪時の積雪深) × 100
クラス1、2、3は、降雪終了後、24時間以内に各レベルを達成する。
クラス3は、車道中央2.5mを露出させ、晴天時は全幅露出させる。
クラス4は、新積雪深が7.0cmを越えないように除雪する。

(3) アルベド

路面のアルベドの測定は他の観測と同様に10時に行い、主に生活道路の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-4.5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平均の95%信頼限界と測定値の範囲と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かなり低くなる。また、各月平均の道路雪氷のアルベドは、12月から2月に向かって次第に低下しており、雪面が汚れたり濡れ雪氷が増加していることを示している^{6), 7), 8)}。

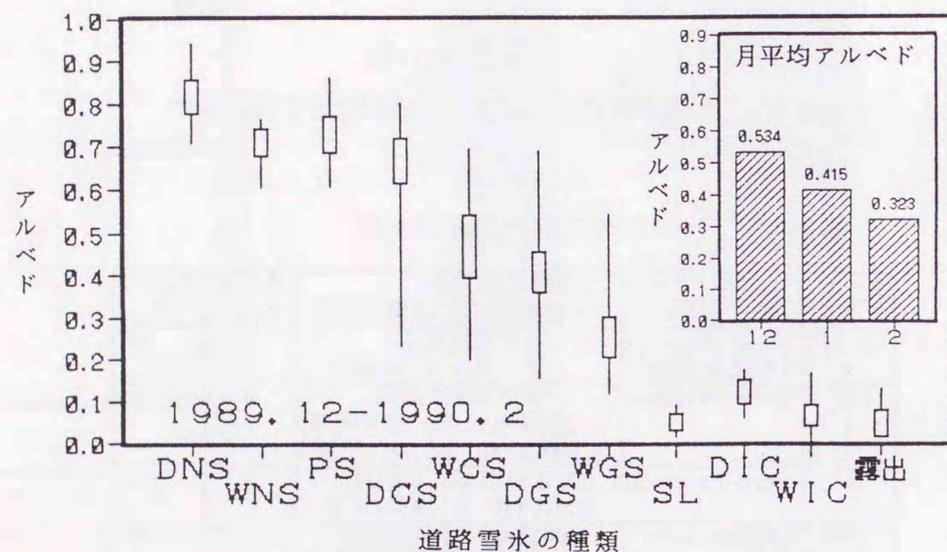


図-4.5 道路雪氷の種類別アルベドと月平均のアルベド

(4) 交通量調査結果

各道路について毎月1回12時間交通量の調査を実施し、上りと下り別に各時間帯毎の普通車と大型車の累計を、表-4.4にまとめた。冬期間の12時間交通量の平均は幹線道路の国道230号が約2万台、準幹線道路のバイパスは約1.1万台及び生活道路は約900台である。一般に12時間交通量を約1.3倍すると、日交通量に換算できる。なお、本学裏のバイパスの交通量は伏見地区を通過する交通量の80%程度で、残りは屈折交通量である。今後、これらの交通量調査データに基づき、交通量と路面雪氷状態との関係や(2)の除雪厚の試算結果と合わせて、交通量による道路区分と路面管理水準についての検討を行う必要がある。

表-4.4 12時間交通量(台/往復)

	11月25日	12月26日	1月22日	2月26日
国道230号線	20,349(1,992)	21,143(1,700)	18,205(1,342)	19,781(1,836)
バイパス	12,131(1,310)	12,261(997)	10,751(703)	9,218(906)
生活道路	1,038(47)	678(37)	934(37)	783(50)

1987年11月～1988年2月 ()内は大型車の台数

4.2.2 札幌の市道

3箇所を観測地点の日交通量は、次のように見込まれる。伏見地区は、表-4.1の調査結果から約18,000台/往復、24軒地区は伏見地区の80%程度の交通量で約15,000台/往復である。発寒地区は支線で表-4.4の生活道路の交通量のほぼ2～3倍に相当するが、路面状態は生活道路とほぼ同様なので1990年1月～3月の観測から除いた。大学周辺の道路については、道路雪氷分類に基づいて路面状態を細かく分類したが、時間帯による各路面状態の発生頻度とその日変動の様子が分かるように、次のように大まかにまとめた。すなわち、乾き新雪、圧雪、粒雪、氷膜・氷板を乾き雪氷、濡れたそれらを濡れ雪氷、水べた雪、湿潤及び乾燥の5分類である。

図-4.6は、1990年12～1991年3月の冬期間、4時間間隔で撮影した写真に基づいて、各時間帯における伏見と24軒地区の路面状態の発生割合をまとめたものである。両地区とも12時～16時において、水べた雪、湿潤、乾燥露出の発生割合が増加し、滑りやすい圧雪路面や氷膜・氷板路面等のいわゆる“ツルツル路面”からやや緩和される状態になることが分かる。しかし、緩和される度合は、厳寒期の1月～2月は小さく、早朝や夜半に向かってツルツル路面の発生割合が増加し、その変化が比較的短時間の内に起こる傾向を示している。この傾向は、特に24軒地区の観測結果に顕著に現れている。

図-4.7は、朝8時～翌朝までの路面状態の日変動をA～Eに分類して、その発生頻度を各月についてまとめたものである。この図を見ると、日中の湿潤・乾燥露出路面から夕方以降凍結路面に変化するBとCの発生頻度が多いことがよく分かる。従って、交通量の多い道路では、日中、路面が露出したり水べた雪状態の路面が出現しても、夕方以降、凍結路面に急変しやすいので、路面管理や冬道走行のあり方についての検討が必要であることを示している。

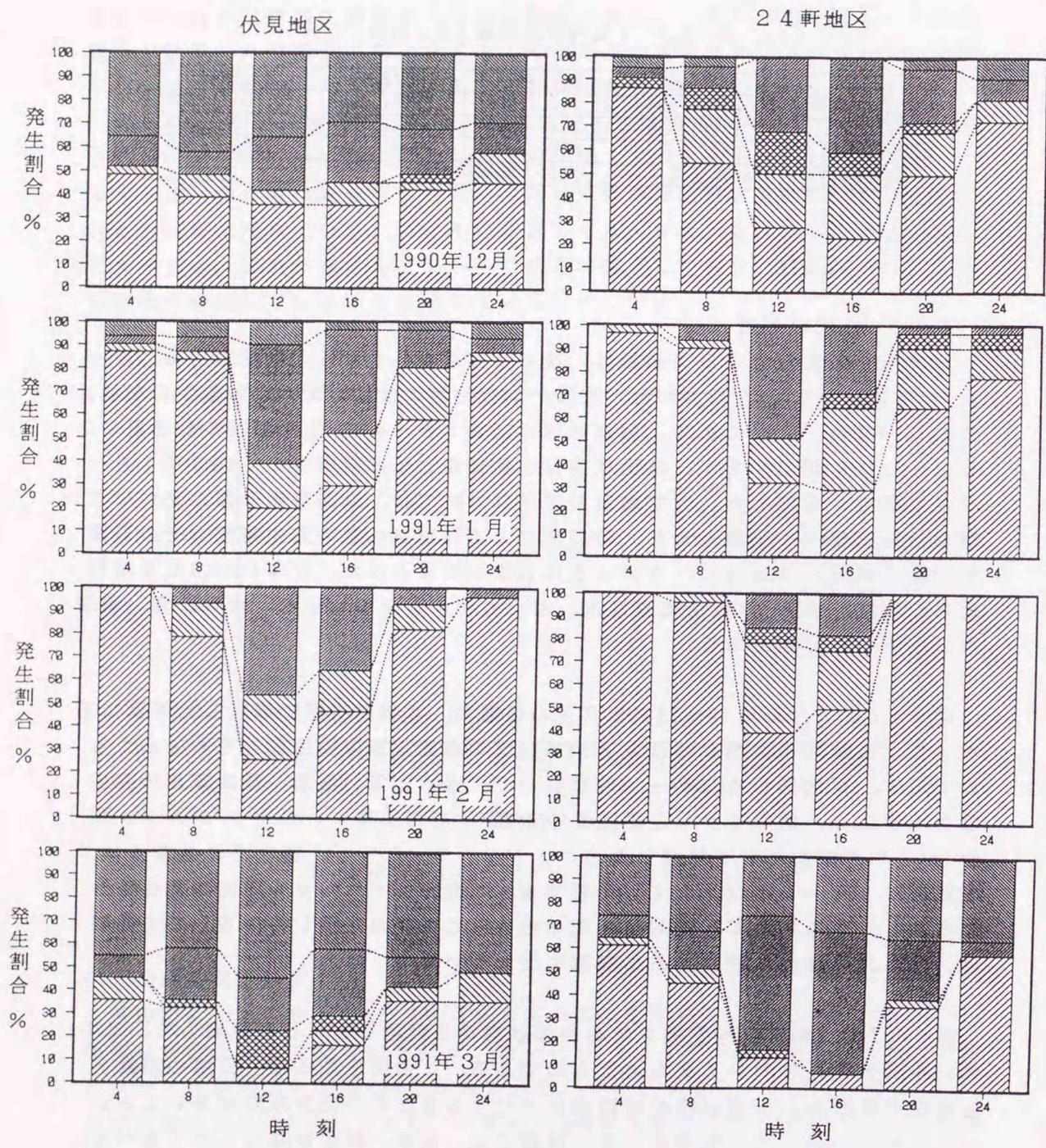


図-4.6 時間帯による各路面状態の発生頻度 (24軒, 伏見地区)

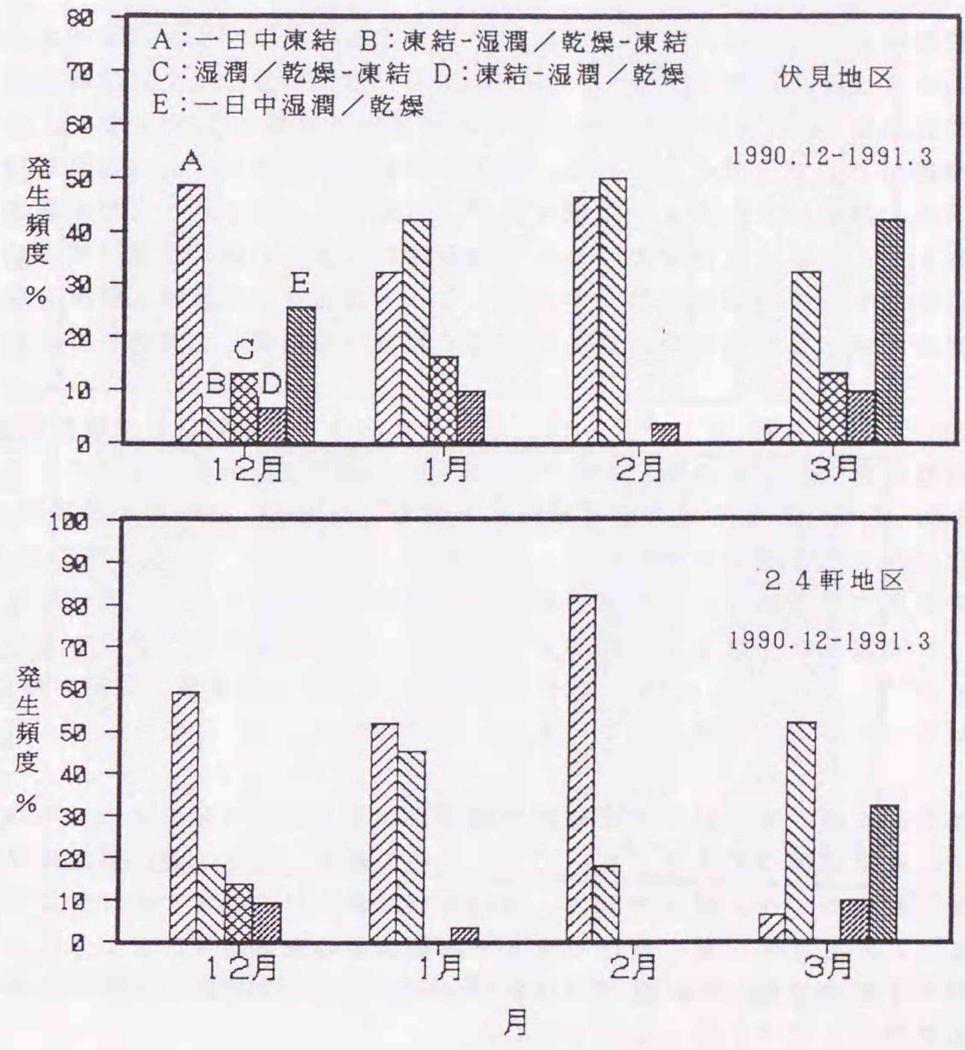


図-4.7 各月における路面状態の日変動パターンの発生頻度

4.2.3 国道393号線の小樽市山地部区間

(1) 路面状態の発生割合

観測地点とした在来舗装と凍結抑制舗装の2箇所は、小樽市天神から朝里川へ向かう区間に位置している。1992年1月14日に実施した交通量調査では、12時間交通量が、1,939台/往復（その内大型車交通量は253台）で、山地部の準幹線道路として位置づけられる。観測地点前後の区間は、山地部道路特有の曲線区間、縦断勾配の大きい尾根・沢部、日陰になりやすい切土断面箇所が多く存在して、交通安全確保のための雪氷管理には多くの検討課題が残されている。この区間では凍結抑制舗装（ベルグリミット舗装）の試験舗装箇所を設け、凍結抑制効果と効果発現の持続性の調査・観測⁹⁾を継続して実施してきた。

図-4.8は、1991年12月～1992年3月における在来舗装と凍結抑制舗装の路面状態の発生割合を日中、8時から16時の時間帯別に示したものである。図-4.9は、それらを各月毎に示した。路面状態の種類は、凍結抑制舗装面における塩化カルシウム成分の溶出によって圧雪が“ザクザク”状の粒雪に変成する効果を評価できるように、札幌市道の5分類から粒雪を区別して6分類とした。ザクザク路面については、轍ができやすくハンドル操作がしづらいとの評価もあるが¹⁰⁾、本研究では“鏡面化圧雪路面”と比較すると制動・駆動力は改善されているという考えに基づいている^{11), 12), 13)}。

冬期間を通じて、日中の凍結抑制舗装における粒雪の発生割合の平均は約20%で、在来舗装の約4倍になっている。その結果、乾き・濡れ雪氷のツルツル路面の割合が、在来舗装で65%、凍結抑制舗装では約45%で20%少なくなっている。これを月別の発生割合で見ると凍結抑制の発現効果がよく分かるが、厳冬の1月では約60%、2月では約50%が日中でも凍結路面状態であるので、路面管理の上では十分とは言えない。

(2) 露出率

図-4.10は、両地点の露出率とその近くの赤井川気象観測地点の降水量を示したものである。冬期間全体の露出率で見ると、凍結抑制舗装路面が在来舗装路面より10%高い程度である。また、10mm以上の降水量、すなわち、ほぼ20cm以上の降雪があると、凍結抑制舗装でも露出率は0～20%になってそれが数日間継続する。従って、北海道のような寒冷地での凍結抑制舗装は、路面の露出効果のみならず、スタッドレスタイヤの走行に有効な圧雪をザクザク雪にする効果をも考慮すべきで、その効果発現にはある程度きめ細かな除雪が必要である。

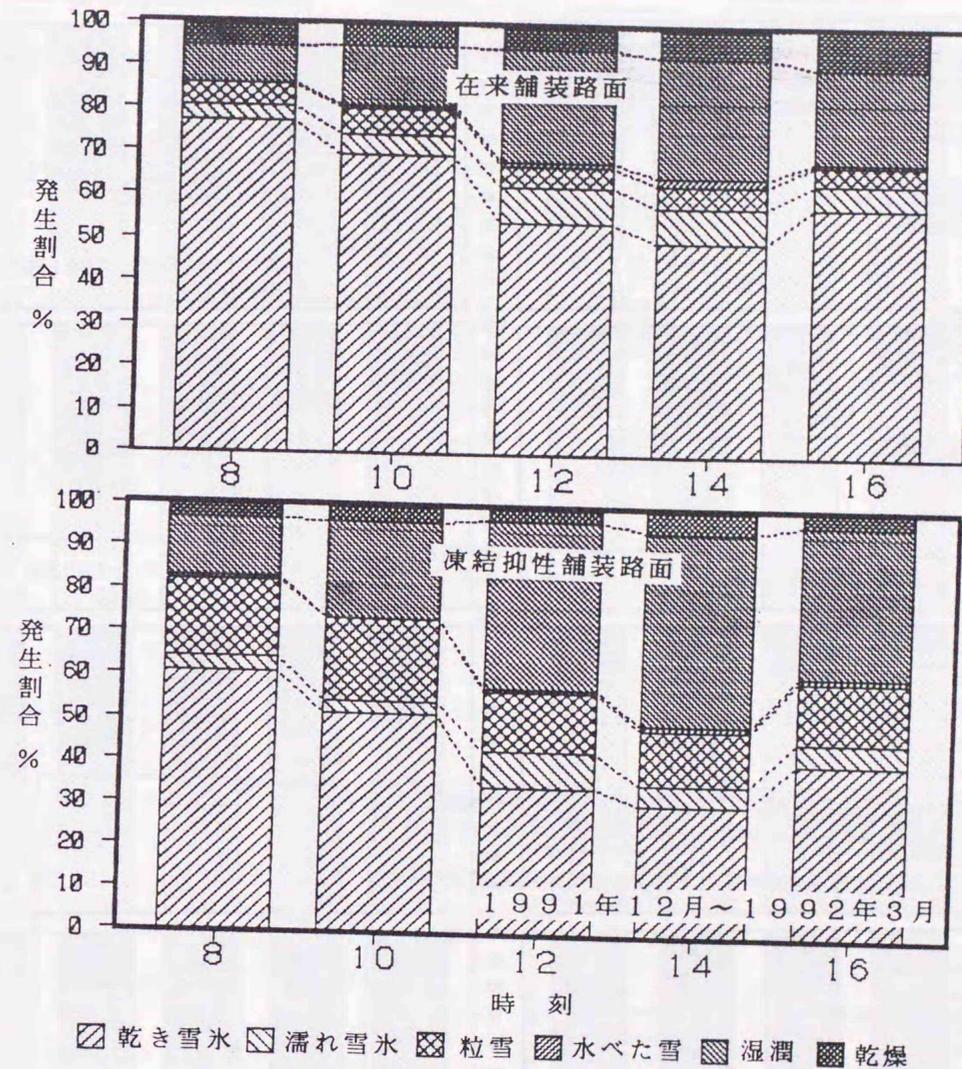


図-4.8 在来舗装路面と凍結抑制舗装路面における時間帯別の路面状態の比較

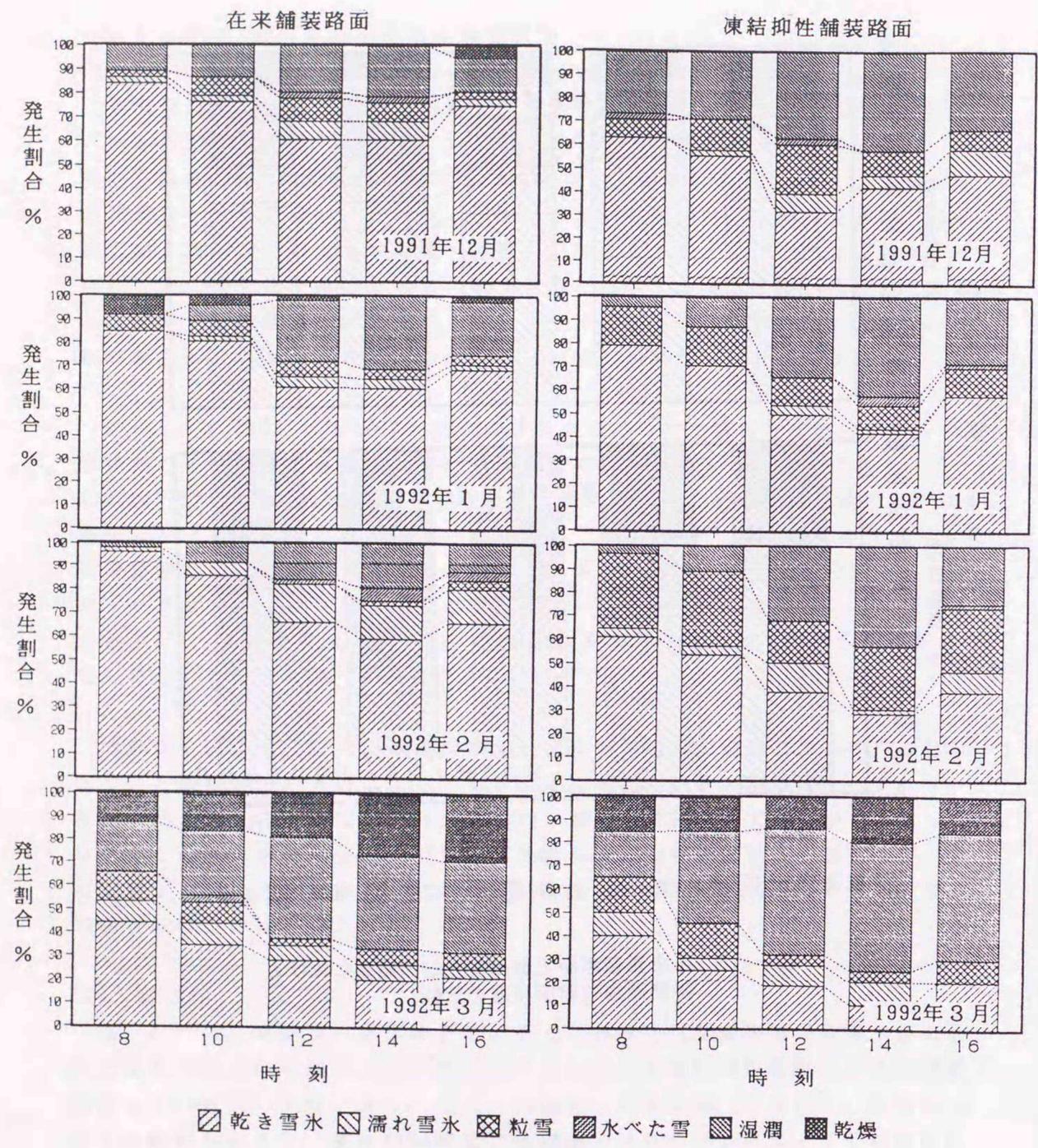


図-4.9 在来舗装路面と凍結抑止舗装路面における各月の路面状態の発生頻度

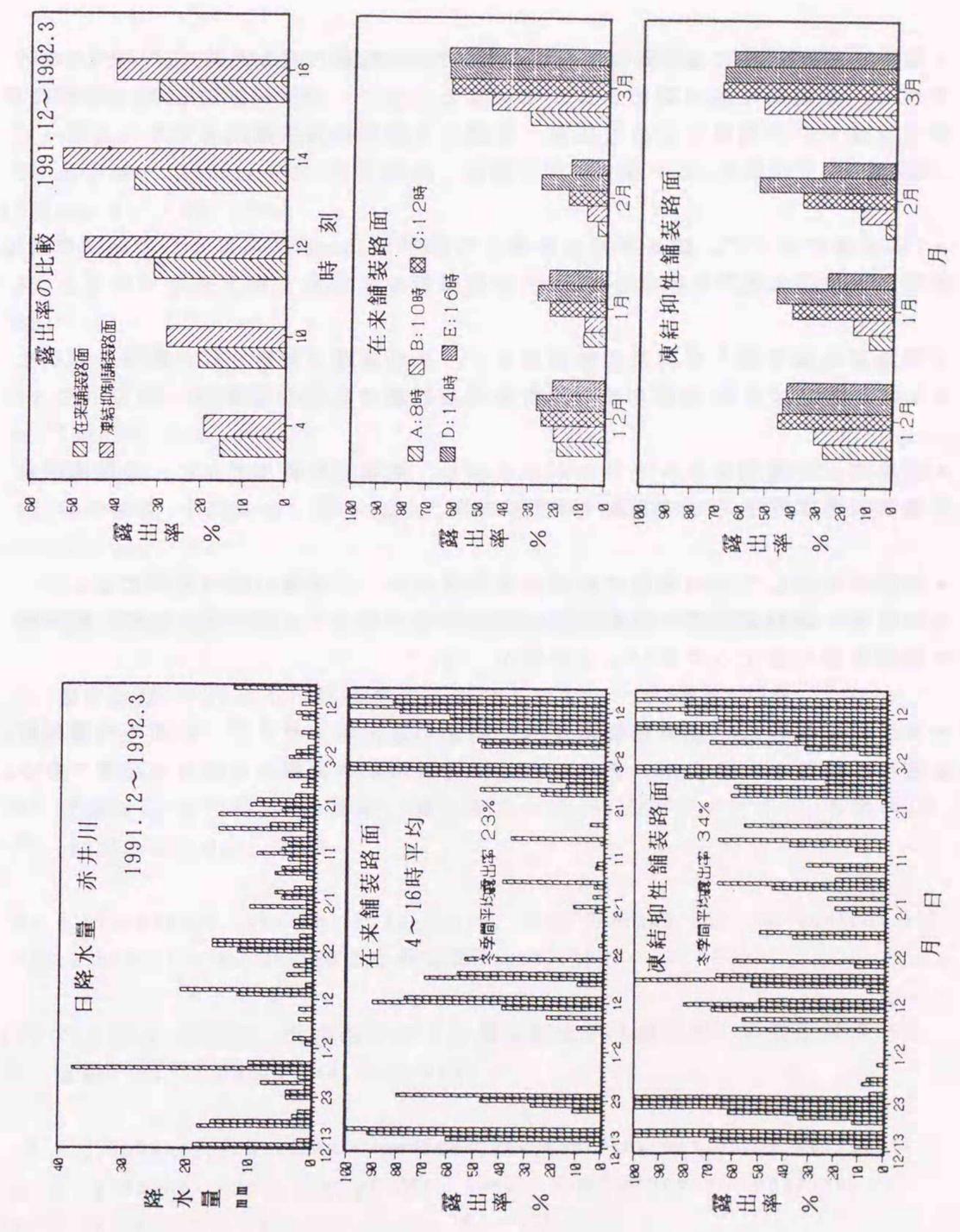


図-4.10 赤井川における降水量と路面露出率との関係

4. 3 まとめ

- 日中の観測結果に基づくと、生活道路では各種類の道路雪氷がまんべんなく発生し、冬期間路面が露出することはほとんどないが、幹線道路の230号線では、露出状態が80%程度を占めて圧雪、氷膜・氷板等の発生頻度を大きく上回っている。
- 230号線において、乾き新雪に換算して降雪が10cm前後になる日の路面の露出率は50%以下に低下し、20cm以上では0%近くなる。
- 平地部の積雪深と平均路面積雪厚から、生活道路で実施された除雪の回数をおおよそ推定することができ、除雪水準を検討する際の目安となる。
- 道路雪氷の種類別アルベドの平均を示し、熱収支解析モデルによる路面凍結予測の入力データとして利用できるようにした。
- 冬期間を通じた4時間毎の路面撮影写真から、交通量の多い道路では日中、水べた雪、湿潤露出等の路面状態の発生頻度は高くなるが、夕方以降、短時間で凍結路面に変化しやすいことが分かった。
- 凍結抑止舗装は、在来舗装に比べて路面の露出率やザクザク路面の出現頻度を高める効果を有するが、それらの効果発現にはきめ細かな除雪が必要である。

参 考 文 献

- 1) 木下誠一, 秋田谷英次: 北海道における路面積雪調査 I, 低温科学, 物理篇第27号, pp. 163~179, 1969
- 2) 木下誠一, 秋田谷英次, 田沼邦夫: 道路上の雪氷調査 II, 低温科学, 物理篇第28号, pp. 311~323, 1970
- 3) 日本雪氷学会北海道支部: 雪氷調査法, 北海道大学図書刊行会, pp. 63~77, 1991
- 4) 梶川正弘: 新積雪の密度と降雪粒子の結晶形との関係, 雪氷, Vol. 51, No. 3, pp. 178~182, Sep., 1989
- 5) 藤井俊茂, 小島賢治: 踏み固めた雪の消雪遅れ, 低温科学, 物理篇第32号, pp. 129~139, 1974
- 6) 石川信敬: 融雪熱収支について, 北海道の農業気象, 第43号, pp. 1~9, 1991.
- 7) 鎌田新悦, 竹内政夫: 舗装路面におけるアルベド, 雪氷, 35巻, 12号, pp. 1~3, 1973
- 8) 近藤純正・沼田洋一・山崎剛: 積雪面アルベドのパラメータ化, 雪氷, 50巻4号, pp. 216-224, Dec., 1988
- 9) H. Ninomiya, K. Takeichi, K. Kawamura: Snow Removal and Ice Control, TRB, Vol. 2, Preprint No. 36 (TRRに今期掲載), Jan., 1993
- 10) 門山保彦, 林延泰: 北海道における凍結防止剤(融雪剤)の効果について, 雪と道路, No. 12, pp. 44~48, June, 1987
- 11) W. J. Dohaney, J. D. Innes: Ice Free Pavement-Evaluation of Verglimit as A De-icing Agent, Pro. of 24th Annual Conference of Canadian Technical Asphalt Association, pp. 101~109, 1979

12) H.J.Fromm: Anti-Icing Compound for Bridge Decks and Surfaces, Ministry of Transportation and Communication, Ontario Progress Report, pp. 1~12, 1979

13) 加来照俊: 車をとりまく道路環境について—冬期路面の滑り抵抗予測—, 自動車技術, Vol.41, No.11, pp.1241~1247, 1987

第5章 地温の周期変動と分布

5.1 概説

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、日周期ないし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^{1), 2)}で説明することが可能である。

ここでは、路面の凍結・融解現象や路面凍結予測の解析モデルに係わる地温の変動と分布特性について検討を加えた。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は、路面の凍結・融解現象に関連した地温の変動や分布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³⁾、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)のうち伏見の市道において、1時間間隔の自動計測により収録したものである。

5.2 フーリエ級数展開による地温変動の解析

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、(1)式で表すことができる⁴⁾。(1)式は、(2)式に変換することができ、位相の遅れを示す位相角 ε は(3)式で与えられる。

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

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

$$\varepsilon = \tan^{-1}(B_n/A_n) \quad [\text{radian}] \quad (3)$$

すなわち、 $F(t)$ は、周期 P の基本波と周期 $P/2$ 、 $P/3$ 、...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、年変動としてとらえると表面では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。また、地表面の温度も日変動としてとらえると周期変動をしており、フーリエ級数の展開式 $F(t)$ で表すことができる。 $F(t)$ は、各時間帯の温度勾配の変化の割合、日較差等によりいくつかのパターンに分類できる。

図-5.1は、鷹栖地区と忠別地区の舗装断面と地温計測位置を示したものである。図-5.2(a)と(b)は、鷹栖地区の断面について、(1)式のフーリエ級数で近似し、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^{5),6)}。

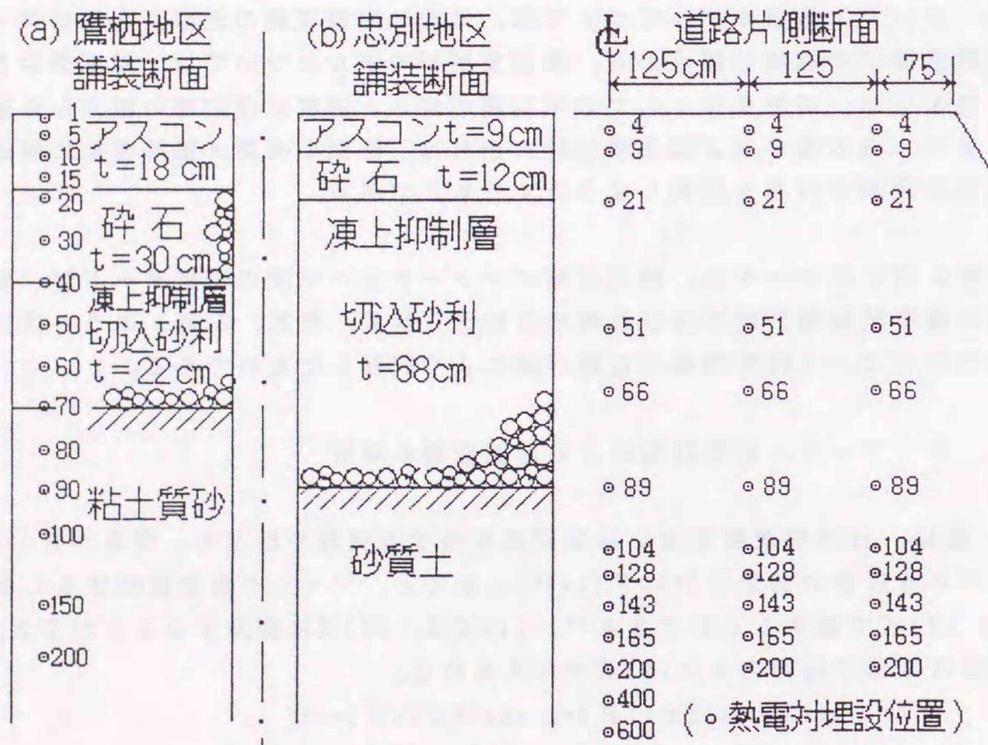


図-5.1 旭川の鷹栖と忠別地区の舗装断面と熱電対埋設位置

(1)式では、 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、忠別地区における計測データ(1985~1988年)^{7),8)}や豊平峡トンネルの側壁背部地盤の地温計測データ(1987~1989年)^{9),10)}に基づく地温変動の解析結果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。

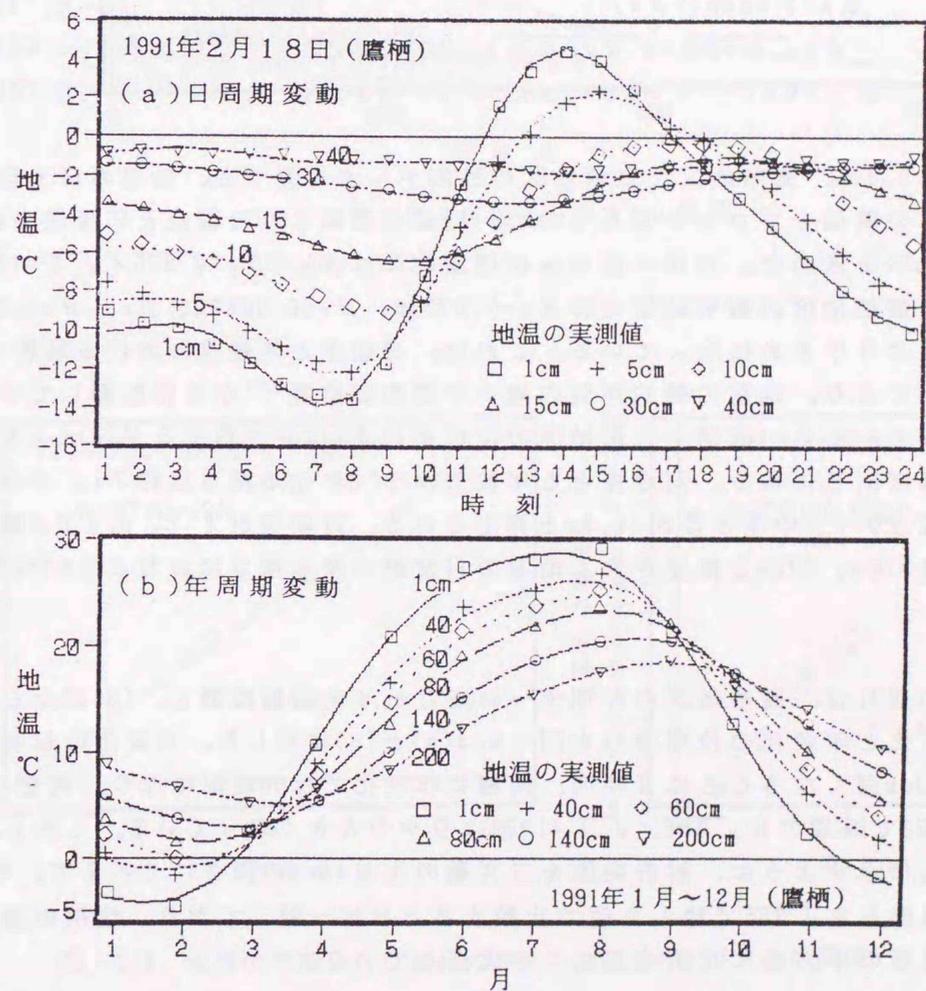


図-5.2 地温の日・年周期変動の実測値と理論値との比較

5. 3 較差の減衰と位相遅れ

周期的熱伝導理論によれば、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_a 、 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、(4)式のようにかける。較差の減衰率 β は温度伝導率を α とすると(5)式で表され、日周期、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(6)式から算出できる。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。

$$R_x = R_a \exp(-\beta x) \quad (4)$$

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

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

図-5.3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¹¹⁾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、(3)式から算出した日変化と年変化の位相遅れを図-5.4(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-5.4(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 $\sqrt{365}$ で徐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。

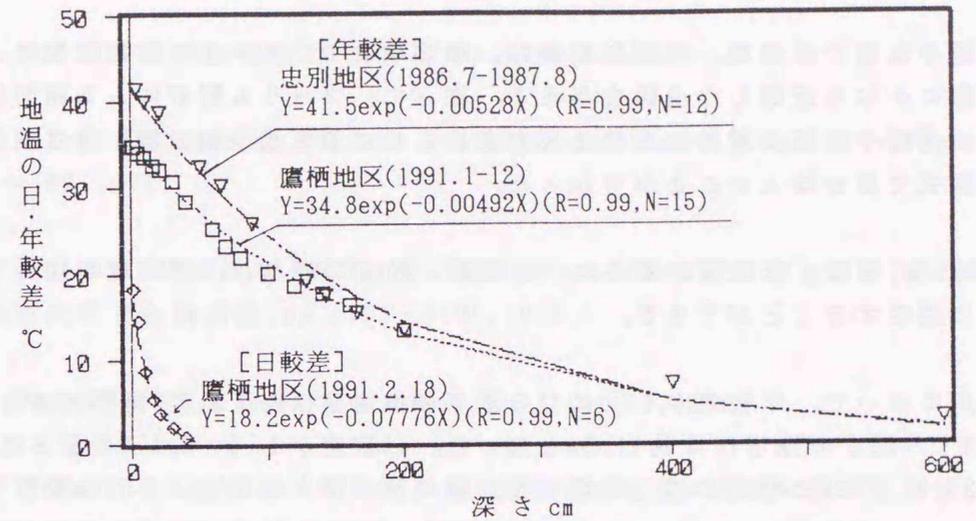


図-5.3 地温の日・年較差と深さとの関係

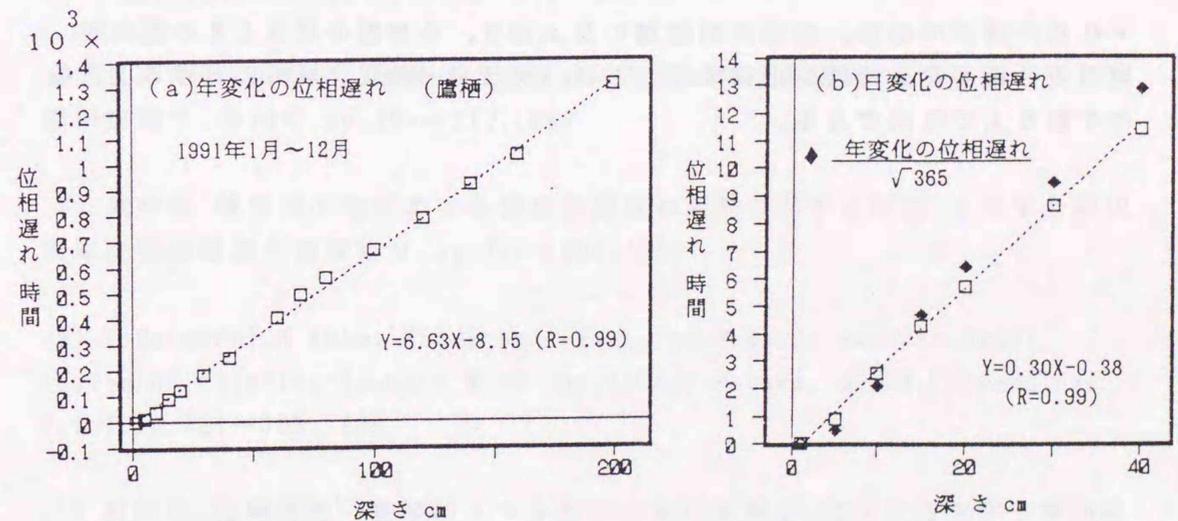


図-5.4 地温の年変化と日変化における位相遅れと深さとの関係

5. 4 まとめ

• 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面温度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。

• 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。

• 旭川において、年較差が 1°C になる深さの推定値は約7m、不易層である年較差 0.1°C の深さの推定値は約11.5mとなった。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およそ50cm程度である。

• 位相遅れによる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時間と算出された。

• 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、熱伝導・熱収支解析における境界条件を知る上で有用である。

参 考 文 献

- 1) 川下研介：熱伝導論，オーム社，pp.65~79,1971
- 2) Alfred R.Jumikis: Thermal Geotechnics,Rutgers University Press,pp.147~169,1977
- 3) 問谷邦利,村橋敏孝,横田聖哉：道路盛土における現場凍上試験,第27回土質工学研究発表会講演集,pp.1193~1196,1992
- 4) 鈴木栄一：気象統計学,地人書館,pp.121~168,1983
- 5) 近藤佳宏,三浦裕二：アスファルト舗装体内温度の推定に関する研究,土木学会論文報告集,第250号,pp129~132,1976
- 6) J.Thomlinson: Temperature Variation and Cosequent Stresses Produced by Daily and Seasonal Temperature Cycles in Concrete slabs,concrete and consruction engineering 35,June,1940
- 7) 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
- 8) 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
- 9) K.Takeichi,H.Kubo: Study on Preventing Measure Against Frost Action of Existing Tunnels With Insulation Method,ISSMFE,Proceedings Vol.1,pp.721~730,1989
- 10) 武市靖,長南道雄：豊平峡トンネルの凍害対策解析,北海学園大学工学部研究報告,第16号,pp.225~242,1990
- 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

第6章 路面の凍結融解と路温の変動特性

6.1 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 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 近くまで上昇する。そのため、路面に残っている雪氷や路肩部に堆積された雪氷の一部が融解し、路面が湿潤状態になり、夕方以降また凍結するという路面の凍結・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旭川、帯広の現場計測データから確認されている。

図-6.1は、忠別地区における路面の凍結融解状態を地温分布の時間的変動で示したものである。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¹⁾。

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 $40\sim 50\text{cm}$ 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°C 以上になる部分は 10cm 程度で浅い。すなわち、 10cm 以下では常時、凍結状態であるため、地中熱の補給がほとんどなく、地表面が冷却されると路面凍結が起こりやすいことが分かる。

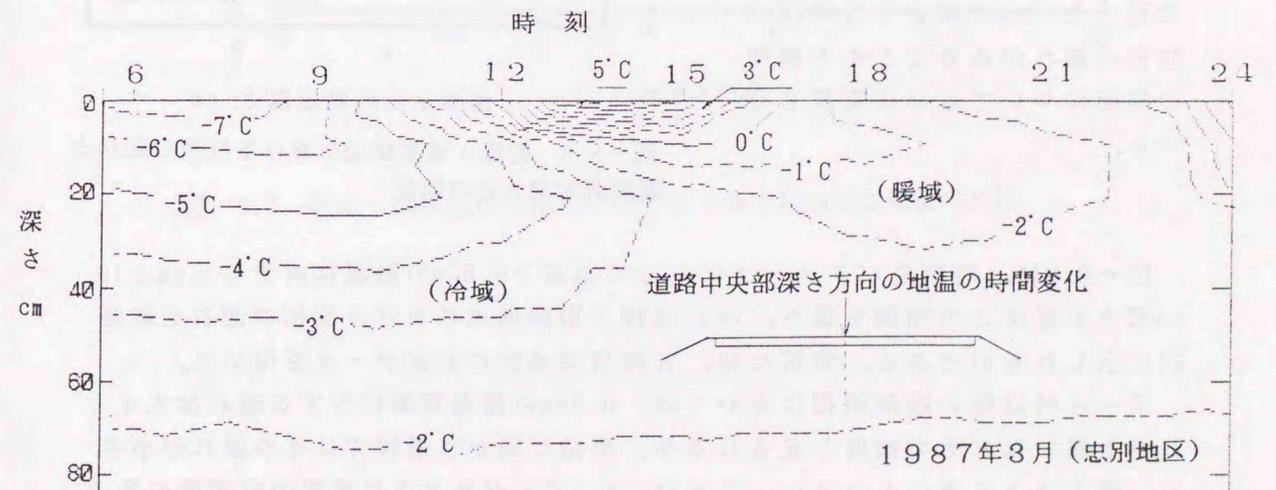


図-6.1 道路中央部深さ方向の地温分布の時間的変動

6.2 路温の計測位置による変動

6.2.1 計測深さと位相の遅れ

図-6.2は、冬期間の路面下深さ方向における路温の位相の遅れについて示したものである。解析には、札幌の幌平橋付近の観測現場（8章で述べる）において1988年12月～1989年3月に測定した路面下0.5、2.0、10cmの計測データを用いた。

路温データのフーリエ解析により、(3)式で示した日変動における位相角 ϵ を各深さ毎に算出し、深さ0.5cmの位置を基準にした場合の2.0と10cmにおける位相の遅れを調べた。同じ深さでの測定データでも、路面状態により位相角は様々に変化するので、日中、路面が乾燥と湿潤の状態になっている場合について解析し、その平均値を図にプロットした。

0.5cmの深さに対して乾燥露出では2.0cmで25分、10cmで2時間10分、同様に、湿潤路面ではそれぞれ36分、3時間17分の位相の遅れとなり、乾燥路面は湿潤路面より地中への熱伝達が早い。また、10cmの深さでは0.5cmの深さに対して2～3時間程度の位相の遅れがあり、4章で述べた10cmの深さで3時間の位相の遅れがあることを冬期間の路面についてもほぼ実証している。

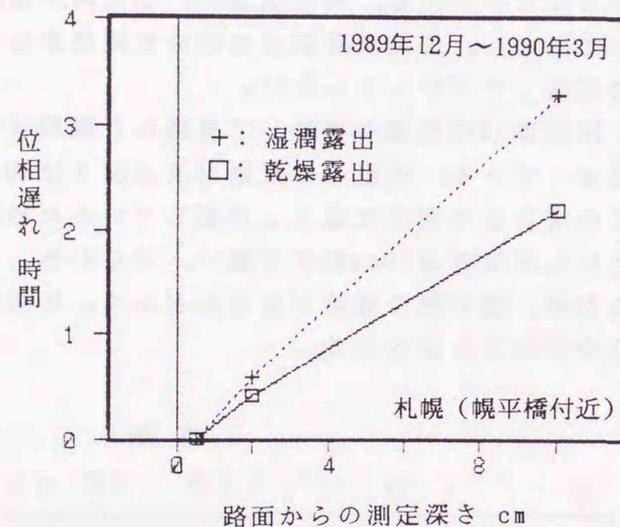


図-6.2 乾燥・湿潤路面における位相の遅れと温度測定深さとの関係

図-6.3は、時刻をパラメータにとって路面下0.5cmの路温に対する5cmと10cm深さの温度との相関を調べ、凍結過程と融解過程における位相の遅れを経時的に示したものである。解析には、札幌伏見地区の計測データを用いた。

7～8時以降の融解過程においては、0.5cmの路温変動に対する遅れは大きくしかも深いほどその傾向が見られるが、凍結に向かう過程ではその遅れが小さく、深さによる違いも小さい。これは、5.1で述べたように地温の日変動の及ぶ範囲が浅く、そのすぐ下層部は常時凍結しているためであると考えられる。

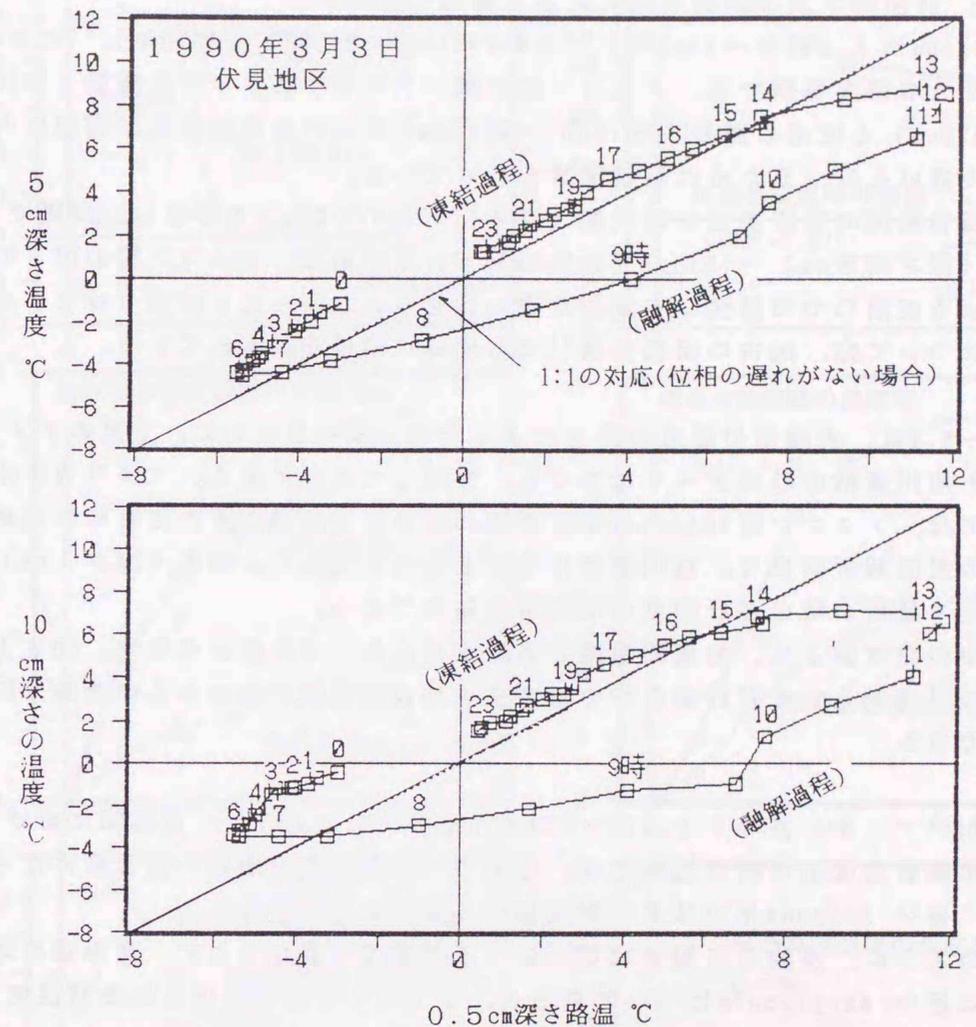


図-6.3 凍結・融解過程の路温に対する5cmと10cm深さ地温の変化

6.2.2 計測深さ及び断面の違いによる路温の変動

Arizona州 (1964年~1965年)²⁾とMaryland州 (1969年~1970年)³⁾におけるアメリカの研究事例では、アスコン層の厚いフルデプスタイプの舗装 (12inch...約30cm)と従来の舗装 (6inch...約15cm)における地表面及び舗装体内の温度の違いを調べるために現場実験を行っている。

両舗装断面の温度測定を地表面 (深さ1/8inch...3mm)及び2inch間隔で2inch (深さ約5cm)~12inch (約30cm)で行った結果、アスコン層の厚さの違いによる表層部での温度に本質的な違いは見られなかったと結論づけている。これについては、国内の研究事例⁴⁾でも同様の結果が示されている。

図-6.4は、表層部の温度の深さによる変化を調べるために、上記のアメリカ2州と旭川鷹栖の計測データに基づき、整理したものである。アメリカ2州については、アスコン厚12inchの舗装断面における各計測点それぞれの年最高・最低の温度解析結果で、旭川鷹栖は地表面温度と見なした路温 (深さ1cm)が年最高・最低の時の各計測点の温度解析結果である。

図中の温度差とは、地表面温度と各計測点における温度との差で、深さ1cm当りの温度変化とは各計測点での温度差を地表面温度計測点からの距離で除した値である。

2州のデータに基づくと、図-6.4 (左側)に示すように、表層部における夏期の年最高温度出現時の温度差は、冬期の年最低温度出現時の約3倍になっている。暑いArizona州ではその温度差はさらに大きくなる。

このように、夏期と冬期では深さによる温度差が異なるため、北海道の気象条件に近いMaryland州について見ると、1cm当りの温度変化も年最高温度出現時で約1.8°C、年最低温度出現時で約0.6°Cとなり、冬期は表層部の深さによる温度変化が夏期のほぼ1/3に低減することが分かる。これについては、図-6.4 (右側)に示した旭川においても、同様の傾向が見られる。

路温の計測深さは旭川と帯広が1cm、札幌が0.5cmであるので、上記の結果に基づくと、冬期における地表面との温度差は0.6°C、0.3°C程度になると推定されるが、これは年最低温度出現時であるので、通常温度差は更に低減すると考えられる。

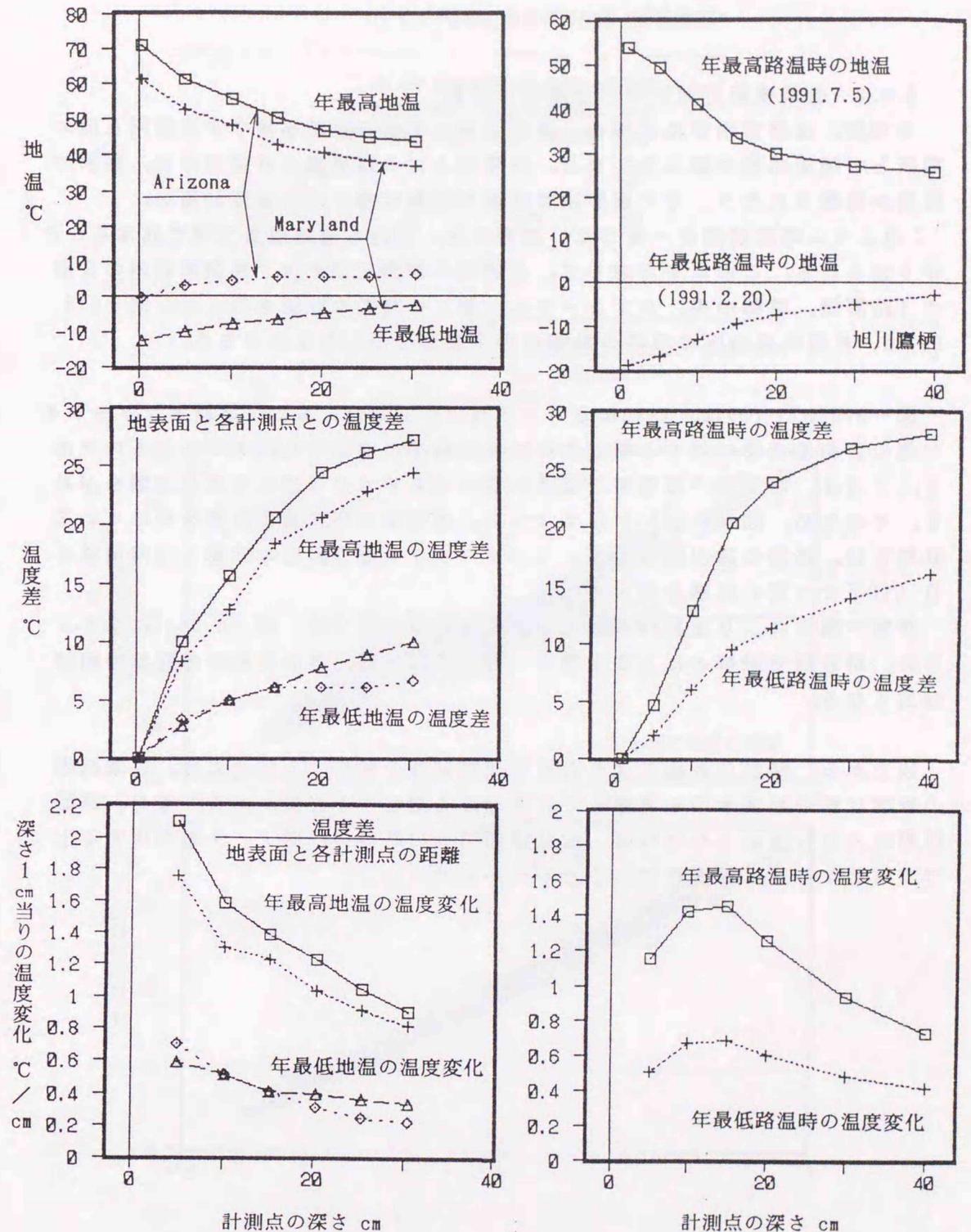


図-6.4 アメリカの2州と旭川鷹栖の現場観測における年最高・年最低地温の計測深さによる変動

6.2.3 道路横断方向における路温の変動

冬期間、道路雪氷がある場合、車道において走行軌跡が集中する箇所と他の箇所とで路面状態が異なる。また、堆雪帯となる路肩側の車道部分は、雪氷で路面が被覆されたり、その融解水で路面が湿潤状態になる頻度が高い。

このように路面状態が一様でない場合には、路温も道路横断方向で異なることが予想される。この点を考慮して、各道路の観測現場では、外側車線内の3地点（路肩側、車線中央、センターライン側）の路温の計測を行った。図-6.5(a)は、札幌伏見地区の現場の計測点の位置図を示したものである。

図-6.5(b)と(c)は、1990年2月と3月の伏見地区における道路センターライン側の計測地点③に対する路肩側の計測地点①の路温の相関を示したものである。2月は、路肩側で堆雪帯の高さが高くなりそれが車道にまで及ぶ場合がある。そのため、図-6.5(b)に示すように、堆雪帯や圧雪層の影響を受けている状態では、路面の露出頻度の高いセンターライン側の路温の変動とは無関係に0℃以下で一定の状態を保っている。

排雪や融雪により道路内の雪氷が少なくなる3月では、図-6.5(c)に示すように、路肩側で融解水による影響が一部見られるが、各計測地点の路温の相関は良くなる。

以上から、路温の計測により路面の凍結状態を検知する場合には、対象路線の除雪状況や除雪水準を考慮して計測地点を選定する必要がある。また、路面状態に大きな違いがなければ、道路横断方向の路温の計測データを利用する上で支障となる差は見られないことが分かった⁴⁾。

(a)路温、地温の計測点(伏見地区)

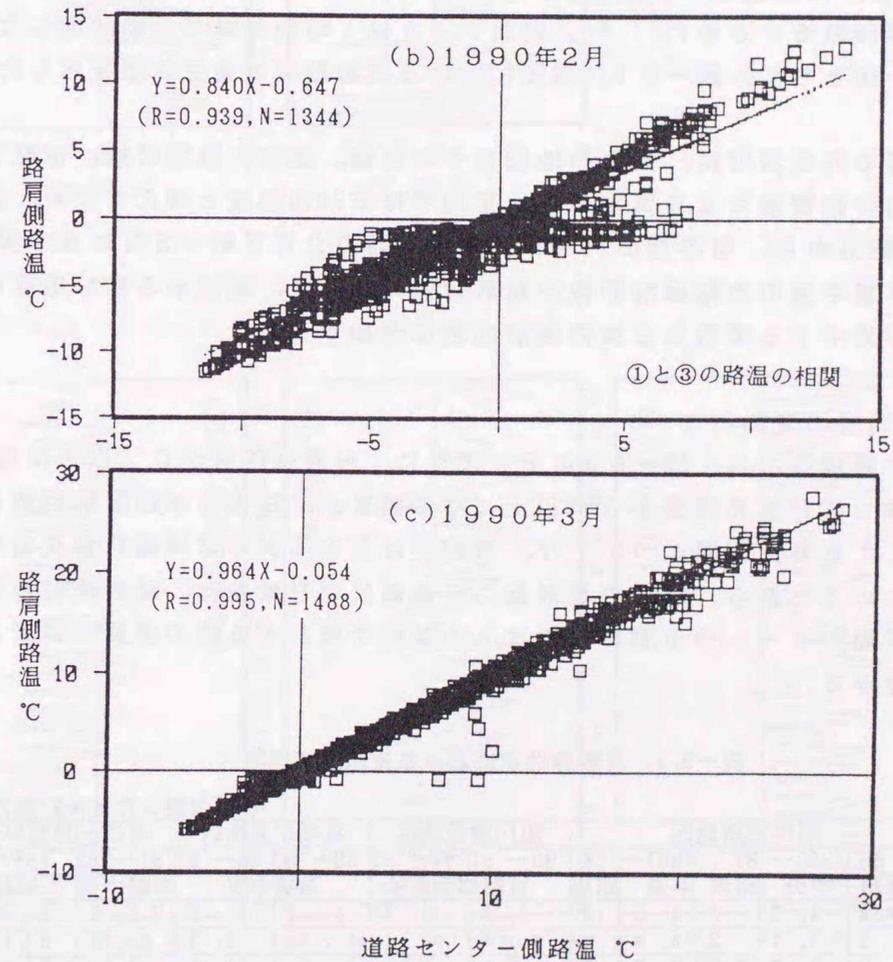
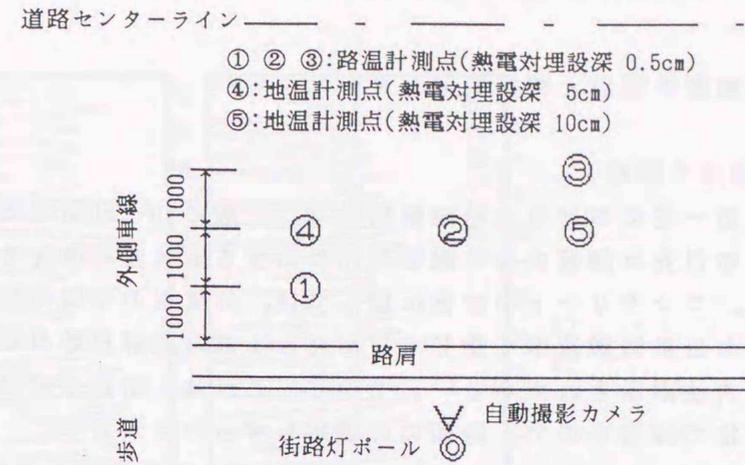


図-6.5 観測現場の概要、道路センター側路温③と路肩側路温①との相関

6. 3 凍結融解の回数と路温変動パターン

6.3.1 凍結融解の回数

北海道の道路の一冬における凍結融解回数は、一般に40~50回程度⁵⁾といわれているが、この目安は舗装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。コンクリートの凍害に関しては、外気温の年間凍結融解日数と凍結したままの日数に融解率を乗じて日射による凍結融解日数の増加日数を考慮して求める方法が示されている⁶⁾。しかし、これは、路温の観測データに基づいた推定方法ではないので、路面には適用しづらい点がある。

表-6.1は、路面凍結の観点から、1985年~1992年における道内各観測現場での凍結融解回数をまとめた^{7), 8)}。路温データは1時間間隔で自動計測したものを、一例として、図-6.6に帯広における凍結融解の発生状態を示した。

凍結融解の発生頻度は、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、平均では年50回程度と考えてよい。表-6.1の解析結果から、初冬期の11~12月と融解期の2月下旬~3月に多く集中しており、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。

6.3.2 路温の変動パターン

初冬期や融解期では、図-6.6に示すように、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。

表-6.1 各観測地点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				帯広		恵庭早来追分			
年	1985~'86		1986~'87		1987~'88		'90~'91		'91~'92		'89~'90		'90~'91		'91~'92		1987~'88	
地点	中央	路肩	中央	路肩	中央	路肩	試験舗装箇所	車線中央	車線中央	車線中央	車線中央	車線中央	車線中央	車線中央	車線中央	車線中央	車線中央	車線中央
計測深	4cm	4cm	4, 9	4, 9	4, 9	4, 9	1, 5	1, 5	1, 5	1, 5	1, 5	1, 5	0.5, 5	1	1	1	1	1
11	7	8	7, 4	3	*	*	*	*	*	2, 1	*	*	8, 4	20, 18	8	17	17	
12	0	0	4, 0	1	8, 0	3	*	*	6, 5	*	*	14, 11	17, 11	7	0	5		
1	0	0	2, 1	1	0, 0	0	18, 12	0, 0	1, 0	10, 0	9, 1	0, 0	0	0	0	0		
2	0	0	5, 0	0	0, 0	0	20, 19	9, 8	22, 10	11, 2	24, 21	3	2	8				
3	27	2	27, 21	10	19, 16	13	21, 16	21, 19	27, 19	28, 27	24, 21	8	17	27				
4	5	7	8, 2	7	5, 0	5	2, 0	2, 1	0, 0	0, 0	0, 0	0	0	0	0	0		
合計	39	17	53, 28	22	32, 16	21	61, 47	40, 34	50, 29	71, 44	94, 76	26	36	57				

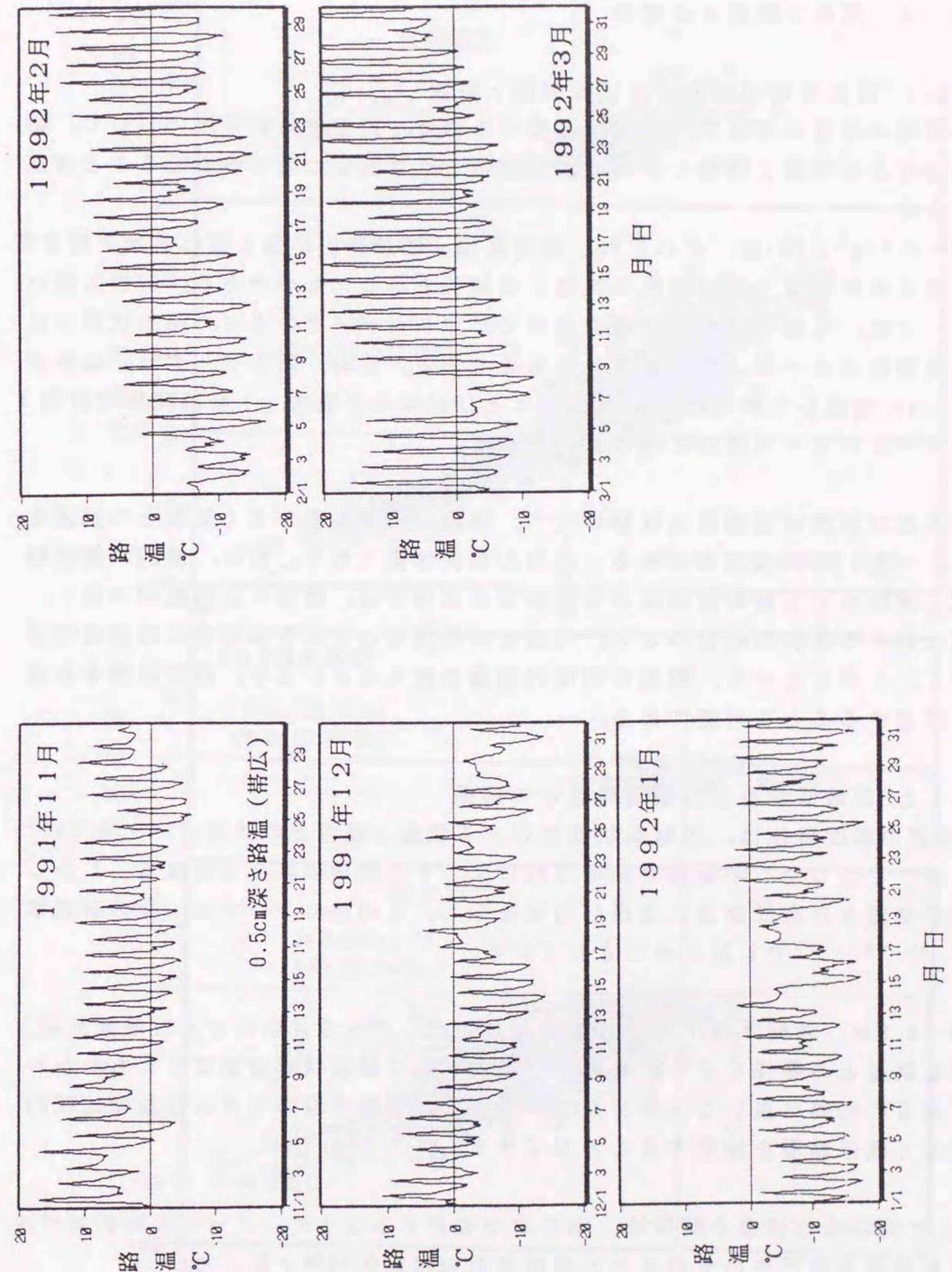


図-6.6 凍結融解を繰り返す路温変動

6. 4 気温と路温との関係

6.4 1 異なる路面状態における気温と路温

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-6.7(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毎正時の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0.5cm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。

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、路面に雪氷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氷状態では、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。

6.4 2 日最低気温と日最低路温との関係

前述の温度特性は、各路面状態に対する気温と路温との計測データ全てについて調べたもので、時間帯や路面状態によりその相関の度合は異なる。しかし、日最低気温と日最低路温とは良い相関を示し、この点については、他の研究事例^{4), 9), 10), 11)}でも明らかにされている。

図-6.8は、札幌、旭川、帯広の観測現場の1月~3月における日最低気温と日最低路温との関係を示したもので、各月により路面状態が異なるにもかかわらず両者の相関は良いことが分かる。従って、最低気温が与えられれば比較的精度良く最低路温を推定することができる。

ここで得られた両者の関係は、第9章で後述するように、フーリエ解析モデルによる凍結予測手法の予測モデル曲線選択の理論的根拠となった。

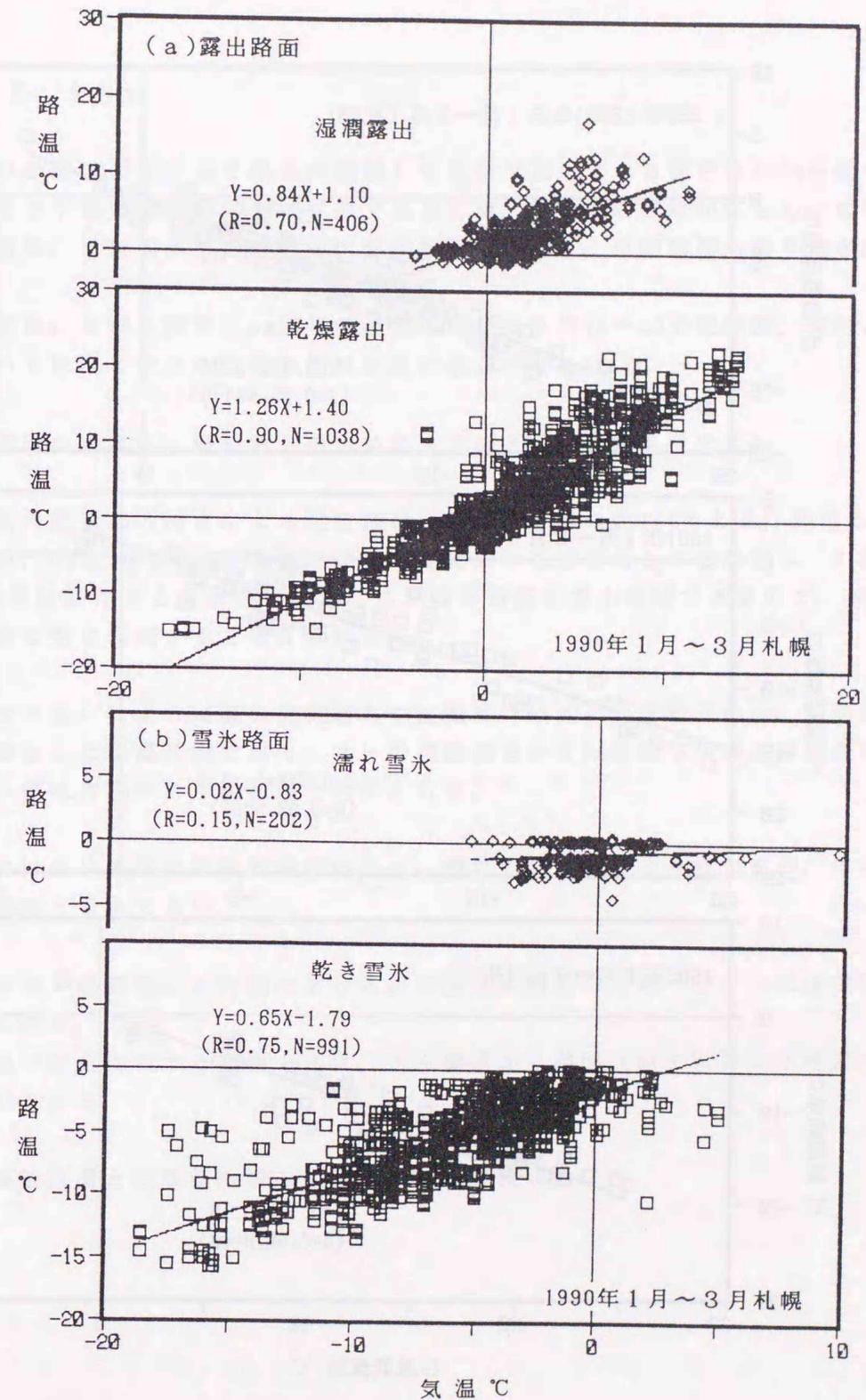


図-6.7 異なる路面状態における気温と路温との関係

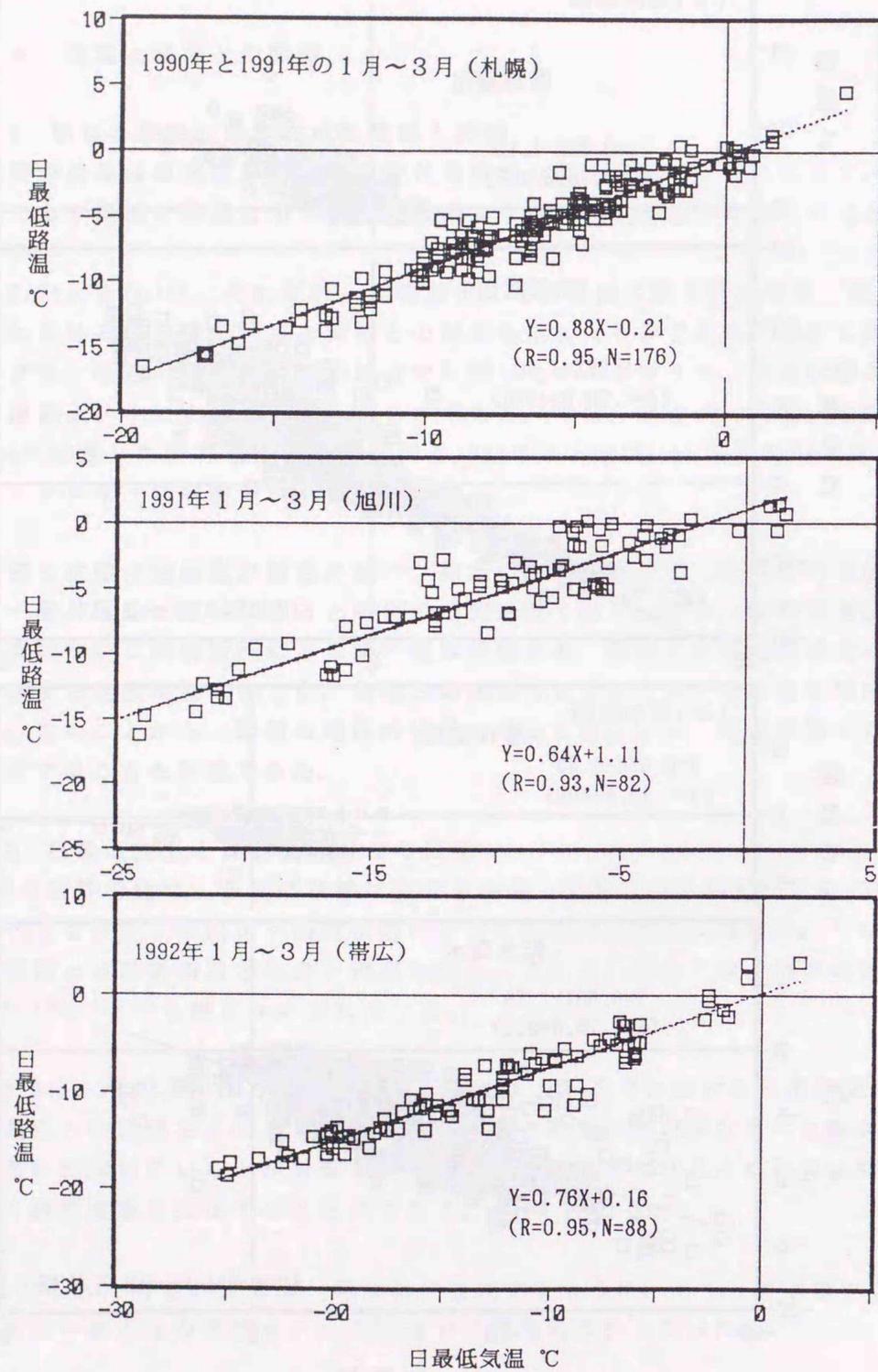


図-6.8 日最低気温と日最低路温との関係

6.5 まとめ

- 日中の暖域が進入して路面が融解しても0°C以上になる部分は10cm程度で浅く、その下層部は常時、凍結状態であるため、地中熱の補給がほとんどない。その結果、地表面が冷却されると路面凍結が起こり、凍結融解が繰り返される。
- 日変動における深さ1cm当りの位相の遅れは平均10～20分程度で、凍結過程においては深さによる位相の遅れは更に小さくなる。
- 表層部の温度は、舗装断面の違いによりほとんど影響を受けない。
- 冬期の表層部の深さによる温度差は、夏期のその約1/3である。路温の計測深さが、0.5cm、1.0cmの場合には、冬期における地表面との温度差は、0.3°C、0.6°C程度になると推定されるが、これは年最低温度出現時であるので、通常の温度差は更に低減すると考えられる。
- 深さの違いによる路温の位相遅れや変動についての解析結果から、路面凍結を対象とした路温計測ではセンサーの埋設深さが1cm程度ならばほぼ地表面温度との差は許容される範囲内と考えられる。
- 道内における路面の凍結融解回数は、道路の諸条件により異なるが、年平均50回程度と考えてよい。
- 初冬期・融解期と厳寒期における凍結融解の路温の変動パターンには規則性が見られる。
- 気温の変化に対する路温の変化、出現範囲から路面状態をおおよそ推定することができる。
- 日最低気温と日最低路温との相関は非常に良い。

参 考 文 献

- 1) 武市靖・佐川淳一：舗装体の温度分布特性に関する研究（その2），北海学園大学工学部研究報告，第14号，pp.169～212，1987
- 2) Thomas N. Rumney, R.A. Jimenez: Pavement Temperature in the Southwest, HRR No. 361, pp. 1～13, 1971
- 3) B.F. Kallas: Asphalt Pavement Temperature, HRR No. 150, pp. 1～11, 1966
- 4) 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
- 5) 久保宏：舗装用アスファルト混合物への凍結融解作用の影響，土木学会論文報告集，第279号，pp. 73～78, 1978
- 6) 長谷川寿夫，藤原忠司：凍害，技報堂出版，pp. 71～76, 1988
- 7) 北海道十勝支庁：十勝中央地区 路面凍結解析業務報告書，pp. 77～83, 1992
- 8) 北海道舗装事業協会：江別恵庭線道路事業調査実施報告書，1987
- 9) 近藤佳宏，三浦裕二：アスファルト舗装体内温度の推定に関する研究，土木学会論文報告集，第250号，pp. 125～127, 1976
- 10) 大田昌明，熊谷茂樹，菅原竜蔵，大谷正男：北海道におけるアスファルト舗装体の温度について，pp. 343～348, 1969
- 11) 松野三郎：アスファルト舗装の温度について，土木技術資料，NO. 5-5, pp. 28～31, 1963

第7章 誘電式路面凍結検知器の開発と測定原理

7. 1 既存の路面凍結検知器

北米や北欧等では、路面凍結検知器を雪氷管理システムの一部に組み込んだ雪氷管理を進めており、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¹⁾。

既存の路面凍結検知器は、おおよそ次の5タイプに分類できる。

- a) 気温計、
- b) 路面温度計、
- c) 路面水分検知器の単独使用、
- 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

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、観測面積及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²⁾。

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。

7. 2 誘電式路面凍結検知器(DPF)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、誘電率による判別の原理は、空気の誘電率の値が1であるのに対し、氷は約3、水は約80となり、乾燥、氷、水の区別が容易にできることに基づいている^{3), 4), 5)}。

DPFの形状は図-7.1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⁶⁾。

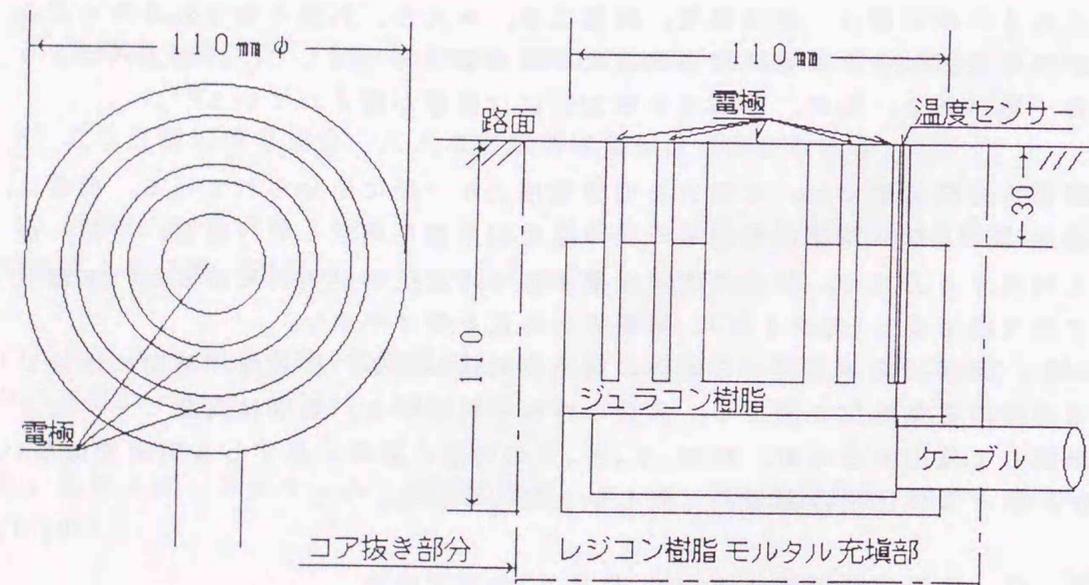


図-7.1 誘電式路面凍結検知器 (DPF) の構造

図-7.2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。

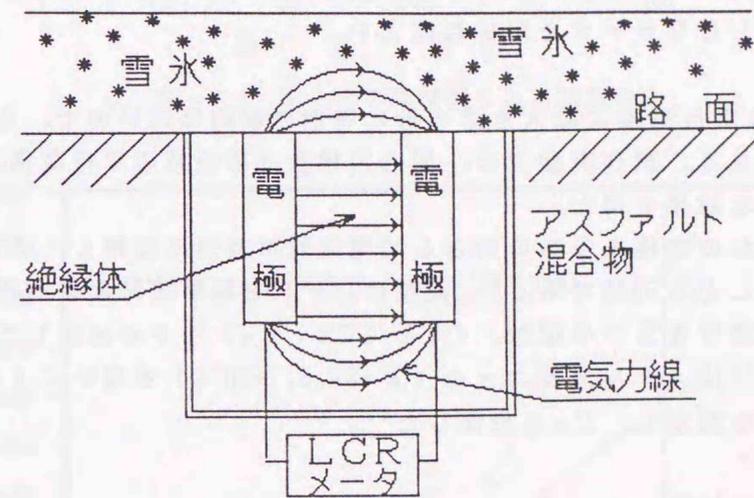


図-7.2 測定原理の模式図

7.3 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、(7)式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。

$$\kappa = C_x / C_a \quad (7)$$

(7)式における C_x と C_a は直接測定できないので、(8)式と(9)式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_a 、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、(8)式で表される。

$$C_m = C_x + C_a + C_s \quad (8)$$

路面に何ものっていない場合に測定される電気容量 C_1 は、(9)式で表される。

$$C_1 = C_a + C_0 + C_s \quad (9)$$

C_a は、路面上の空気の電気容量である。結局、求める路面誘電率は、(7)式と(8)式より、(10)式となる。

$$\kappa = C_x / C_a = \{C_m - (C_0 + C_s)\} / C_a \quad (10)$$

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。

D P Fに用いる平行電極には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、同心円状及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、より大きなシグナルを得ることも可能である。実際にD P Fを用いて路面凍結検知を行う場合、(10)式における2つの定数、 C_a と $(C_0 + C_s)$ を予め決定しておく必要がある。本研究ではメチルアルコール($\kappa = 32.6, +20^\circ\text{C}$)を用いて $(C_2 - C_1)$ と $(C_0 - C_s)$ を測定し、 C_a を設定した⁶⁾。

7. 4 測定周波数

D P Fで使用する周波数は、約1 kHzから10 MHzの周波数範囲ならば、特に問題はない。しかし、1 kHz以下では、図-7.3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U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を判別しやすいからである^{3), 8), 9), 10)}。

本研究では、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、湿潤状態及び乾燥状態のD P Fによる路面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、図-7.4にまとめた。

また、図-7.5は、氷温を -10°C に保ち氷厚に対する路面誘電率の測定結果を示したものである。室内実験の結果、乾燥、水及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で路面誘電率がそれぞれ40、100程度となり、D P Fは路面凍結検知器として利用できることが分かった。

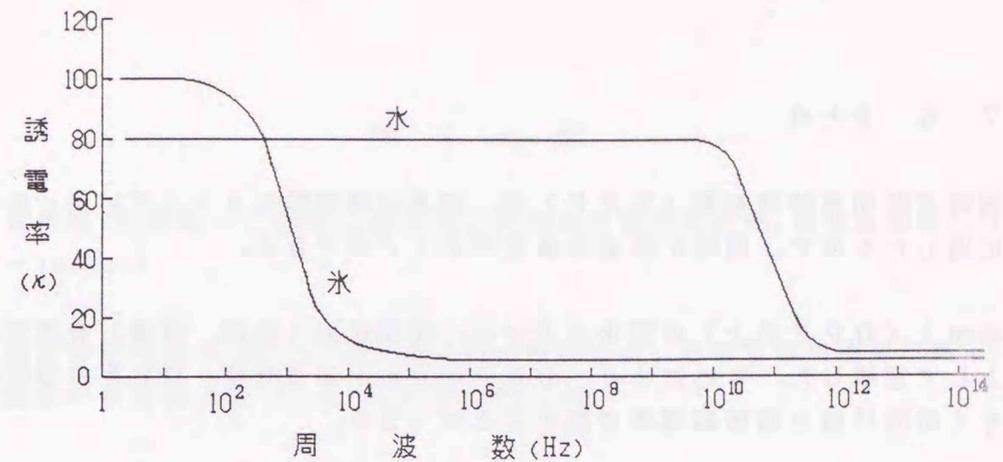


図-7.3 水と氷の周波数による誘電特性

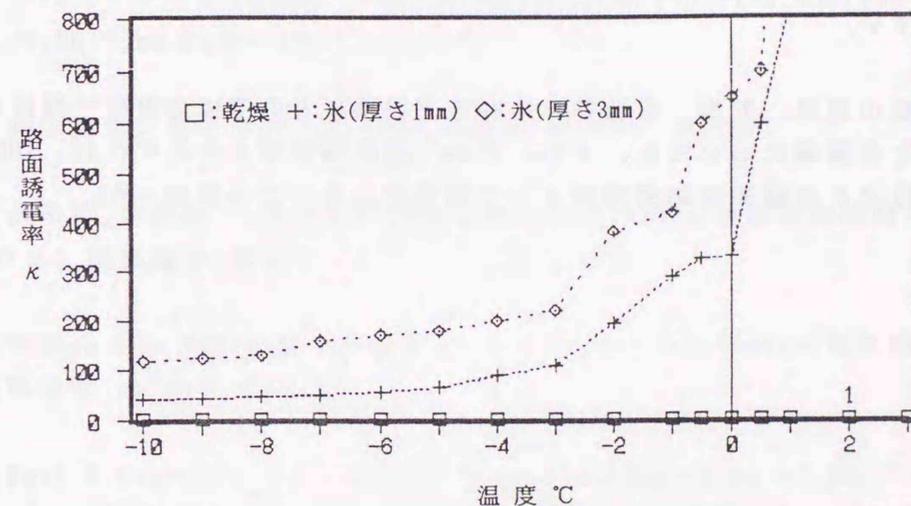


図-7.4 凍結過程における乾燥状態、氷膜・氷板状態の路面誘電率

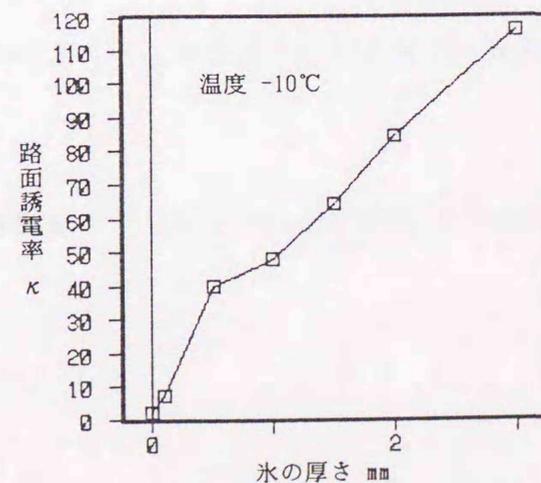


図-7.5 氷厚と路面誘電率との関係

7. 5 まとめ

• 誘電式路面凍結検知器(DPF)は、雪氷の誘電特性とコンデンサーの原理を応用したもので、同時に路温を測定することができる。

• 路面上(DPF面上)の雪氷あるいは、路面状態(湿潤, 乾燥)を路面誘電率として定義した。これにより、DPFの定数が定まれば、DPFの形状に関係なく路面状態を路面誘電率で表すことができる。

• DPFで使用する周波数は、約1kHzから10MHzの範囲ならば、低周波数ほど氷の誘電率は大きいので、氷と空気の混合誘電体である雪の誘電特性の違いを判別しやすい。

• 室内実験の結果、乾燥、水及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、1mm、3mmで路面誘電率がそれぞれ40、100程度となり、DPFは路面凍結検知器として利用できることが分かった。

参 考 文 献

- 1) 武市靖, 前野紀一: 誘電式路面凍結検知器の実用化研究, 開発論集第44号, pp.1~19, 1989
- 2) 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
- 3) 黒岩大助: 積雪の誘電的性質, 低温科学, 第8号, pp.1~25, 1951
- 4) Peter, S.R.: Broadband complex refractive indices, Applied Optics, Vol.11, No.8, pp.1936~1844, Aug., 1972
- 5) 鈴木道也: 雪氷電波・光工学, 昭晃堂, pp.83~104, 1987
- 6) 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.21~24, Oct., 1990
- 7) Graham Lee Moses(松本安弘訳): Electrical Insulation(電気絶縁), 近代科学社, pp.39~123, 1977
- 8) Paul R.Camp, David J.Halchin: Electric Properties of Ice-Solid Interface, TRB, Snow and Ice Control Research Special Report 185, pp.35~43, 1979
- 9) 山本勝弘ら: マイクロ波領域における積雪の誘電的性質, 雪氷, 46巻1号, pp.1~8, 1984
- 10) 竹井巖, 前野紀一: 氷の低周波誘電測定, 低温科学 物理篇, 第40号, pp.1~9, 1981

第8章 DPFの現場試験による路面凍結の検知¹⁾

8.1 現場試験の概要

札幌市の幌平橋付近の市道（中央区南16西2）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-8.1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、路温も計測できる。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1KHz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。

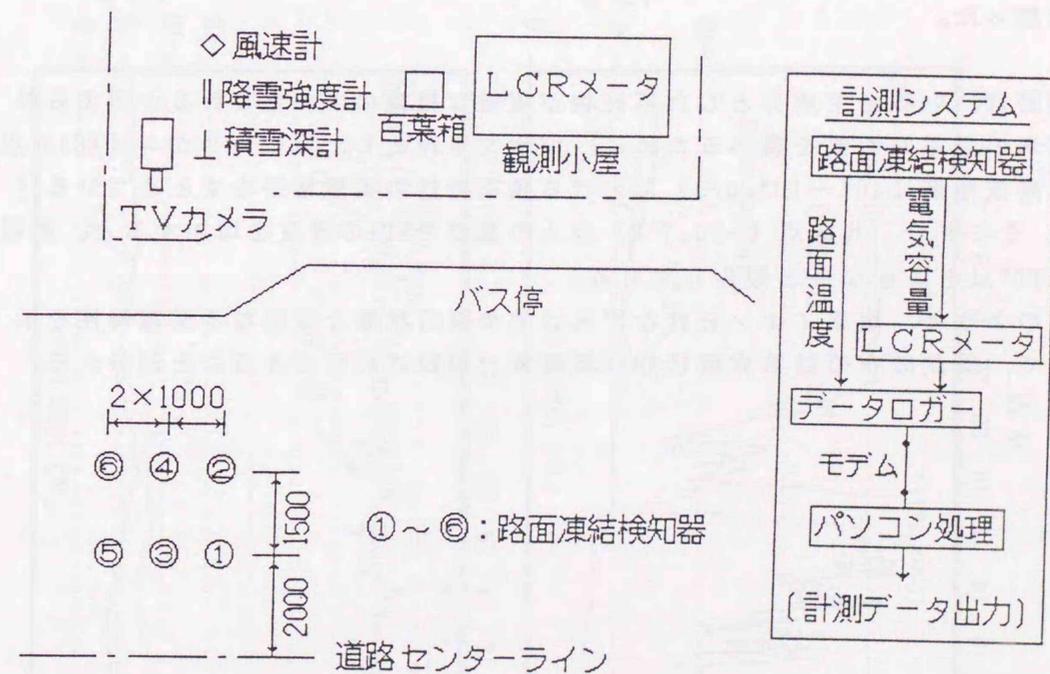


図-8.1 試験現場の概要と計測システム

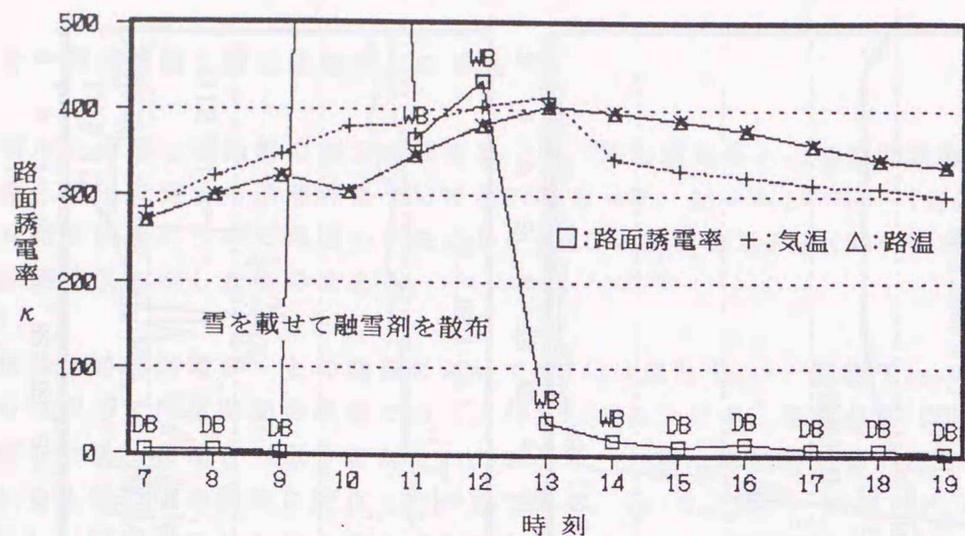


図-8.3 融雪剤の散布による路面誘電率の変化

8.3 路面状態の判別

図-8.2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、氷膜及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 $0.5\sim-0.5^{\circ}\text{C}$ 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-8.2における各測定値のうち路温のみをまとめた図-8.4の(a)~(d)に示すように、路温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、路温は 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)の路温では 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、今後、試作実験を重ねて検知器を多層極板タイプの構造にする、電極間にガード電極を挿入して自己電気容量を低減する等の改良を行う必要がある。

図-8.5は路面状態と路面誘電率、路温との関係を模式図として示したものである。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-8.6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⁴⁾。

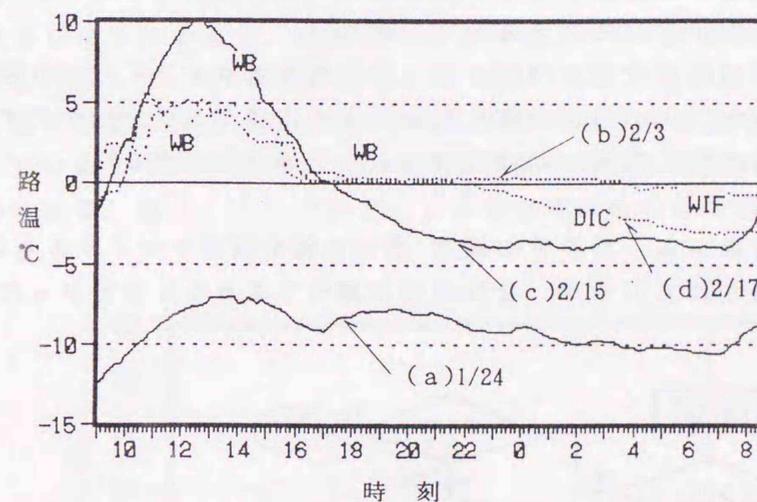


図-8.4 路面状態と路温との関係

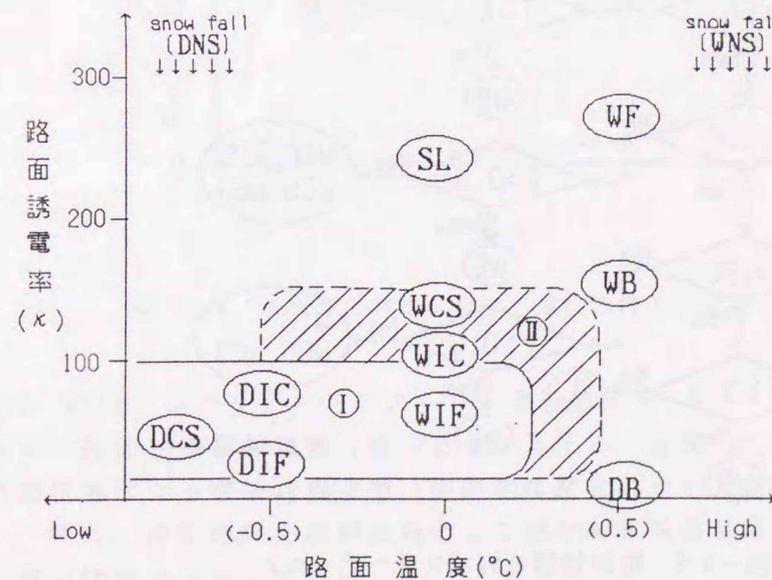


図-8.5 路面状態と路温、路面誘電率との関係

両者の結果が一致した割合は84%で、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℃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ことと、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とがある⁵⁾。

以上の検証結果から、DPFの構造・検知性能や判別アルゴリズムにおいて改良すべき点が残されているが、ほぼ現場に適用できることが分かった。

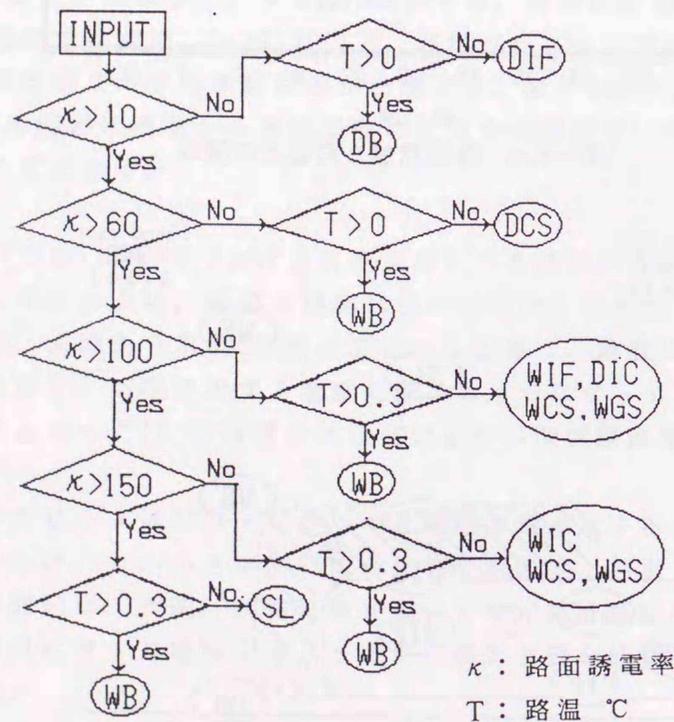


図-8.6 路面状態の判別フローチャート

8.4 検知性能と判別アルゴリズムの改良に対する検討

8.4.1 DPFの検知性能

DPFの構造・検知性能については、極板の枚数を増やしたり、極板間にガード電極を挿入して自己電気容量をキャンセルし、微小電気容量の検知精度を向上させる改良を加えた。更に、周波数72kHz、電気容量測定範囲0~1000pFの電気容量変換器を製作し、測定精度を上げた。

図-8.7は、ガード電極を挿入した3重リング状電極の円筒型DPFの室内実験結果を示したものである。恒温室内において、DPFの表面上に1、3、5mmの氷厚を作成して、0~-20℃における電気容量を測定した結果、氷厚と温度に対する電気容量の関係が得られた。乾燥状態における自己電気容量をほぼ0に設定しているため、氷膜による微小電気容量の増分の測定とその判別が容易なことが分かる。現在、このDPFによる現場実験を札幌市郊外で行う準備を進めている。

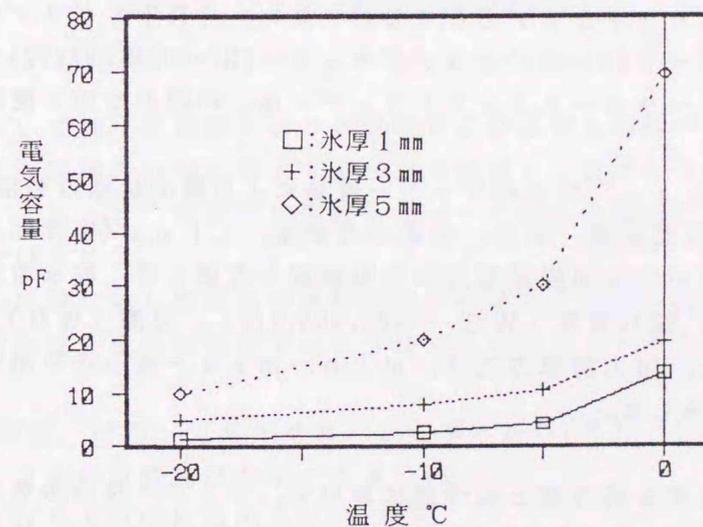


図-8.7 各氷厚に対する温度と電気容量との関係

8.4.2 判別アルゴリズムへのファジー理論の適用

冬期間の路面状態は、4章で述べたように圧雪、湿潤、乾燥等、一日中、一様な路面状態になる場合もあるが、時間的に変化したり、空間的に異なる場合が多い。特に、凍結過程と融解過程では各種の路面状態が混在した状況になり、一つの路面状態で表現しづらい。

そのため、図-8.6における路面状態の判別アルゴリズムでは、幾つかの路面状態を路温 T と路面誘電率 κ により一まとめに分類して、一義的な判別を行った。従って、判別結果は明確であるが、異なる路面状態の発生の可能性の情報は、 T と κ から主観的に判断する必要がある。

情報が十分にある場合やあるパターンに適合している場合には、種々の不確実性を確率統計的手法で合理的に処理できるが、そうでない場合には合理的な解を得ることは難しい。路面状態は混在した領域を含む場合が多く、各種の測定データも不明確で分離できない形で出現する。

試みとして、このようなあいまいさを”程度を考慮した帰属度”で表現できるファジー理論の適用による路面状態の判別手法について検討を行った。検討対象とした観測現場は、4.2.3で述べた国道393号線の在来舗装と凍結抑制舗装の試験区間で、1990年12月～1991年3月の観測データ⁶⁾に基づき判別結果の検証を行った。

(1) ファジー推論による判別手法の概要

システムは、ハードウェアとしてのパソコン、CRT、プリンタ、ファジイコントローラボード(HF-003)とソフトウェア(HF-003用FUZZY2)で構成されている。コントローラボードとソフトウェアは、市販のものを使用した。

”if ~ then”形式のファジー推論による路面状態の判別には、if(前件部)として電気容量、路温、気温の3要素、then(後件部)として路面状態は、検証に用いた路面撮影写真の判別精度を考慮して、乾き雪氷(DI……DCS, DGS, DIF)、濡れ雪氷(WS……WCS, WGS, WIF)、湿潤(WB)、乾燥(DB)の4要素とした。出力演算方式は、min-max-重心法を用い、その概念図を図-8.8に示した。

各ルールに対する前件部と後件部において、ファジー集合の分布を与えるメンバーシップ関数 $\mu(x)$ を三角形とし、三角形の中央値をNL, NM, NS, ZR, PS, PM, PLの7グレード(段階)にした。

縦軸の α, β, γ は、 $\mu(x)$ とグレードから与えられるメンバーシップ値で確信レベルや推定レベルと呼ばれるものである。各ルールにおける前件部の積集合をとり(MIN値をとる)、後件部では和集合(MAX値をとる)をとって、その合成論理和の横軸方向の重心の位置が推論値として求められる。推論値は非ファジー化した確からしさの数値で示される^{7), 8)}。

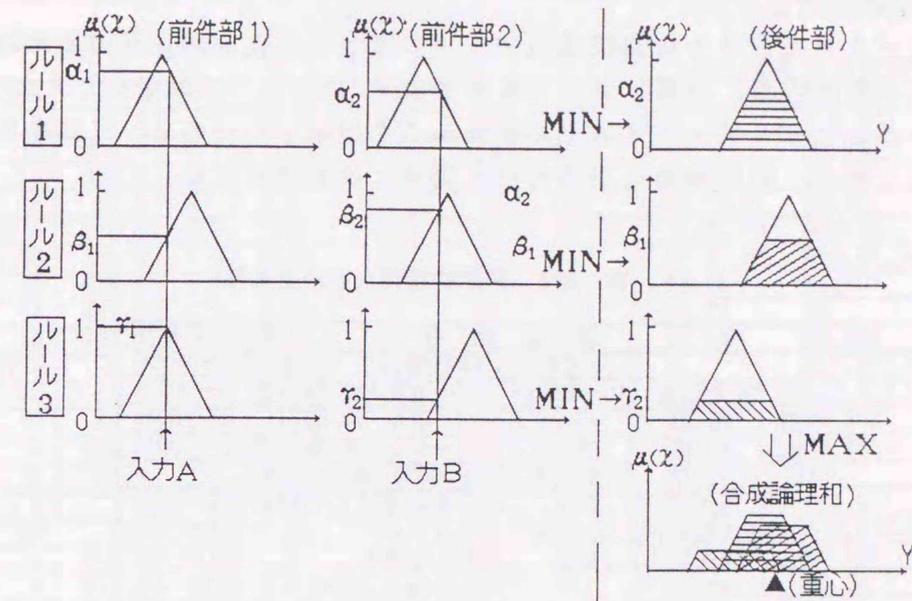


図-8.8 ファジー推論手法の概念図

本研究においては、前件部における各段階の中央値と両端の幅は、電気容量、路温、気温の測定値の分布と最大・最小値を考慮して設定した。判断の基準となる”if ~ then”の形式で作成したルール数は各路面状態の特性を表現できるように12とした。

例えば、a) 圧雪ないし氷膜状の凍結路面、b) 晴天の日中の湿潤路面を想定する場合は、前件部と後件部が以下のようなルールを作成すればよい。

- a) もし電気容量、路温、気温がそれぞれ非常に低い(NL, NL, NL)なら、
- DIの可能性は非常に大きい(PL)、
 - WSの可能性は小さい(NM)、
 - DBの可能性は50%位(ZR)、
 - WBの可能性は非常に小さい(NL)、
- b) もし電気容量、路温、気温がそれぞれ非常に高い(PL, PL, PL)なら、
- DIの可能性は非常に小さい(NL)、
 - WSの可能性は小さい(NM)、
 - DBの可能性は50%位(ZR)、
 - WBの可能性は非常に大きい(PL)、

(2) 的中率の検証

12月～3月における観測現場のデータに基づき、在来舗装路面と凍結抑制舗装路面の電気容量、路温、気温の範囲を表-8.1のように設定して入力した。ただし、ここではリアルタイムでの検知のみを対象としたので、気温はNGとして無視したが、路面凍結の予測を行う場合には必要になる。

表-8.1 路面状態判別の設定条件

項目	設定範囲		項目	設定範囲
	在来舗装	抑制舗装		
電気容量	10~200pF	40~400pF	DI①	0~100%
路温	-6~6°C	-6~6°C	WS②	0~100%
気温	-6~6°C	-6~6°C	DB	0~100%
			WB③	0~100%
①:DCS,DIF, ②:WCS,WGS,WIF,DGS, ③:SLを含む				
NL:NEGATIVE LARGE	(非常に小さい)		***	-128~-85
NM:NEGATIVE MEDIUM	(小さい)			-125~-43
NS:NEGATIVE SMALL	(少し小さい)			-83~-1
ZR:ZERO	(50%くらい)			-41~41
PS:POSITIVE SMALL	(少し大きい)			1~83
PM:POSITIVE MEDIUM	(大きい)			43~125
PM:POSITIVE MEDIUM	(非常に大きい)			85~128
NG:NEGATION	(無関係、影響無し)			
***分解能8ビット(256)の入出力データとラベルの関係				

表-8.2は、在来舗装路面と凍結抑制舗装路面において、各月の路面状態の日変化が大きい日の検証例を示したものである。両方の路面ともほぼ、10頃迄の凍結路面が正午～14時にかけて湿潤ないし濡れ雪氷路面、16時では、凍結路面と濡れ雪氷路面が混在している。

この表では、路面状態を撮影した各時間帯の写真から有意と考えられる1～3種類の路面状態と推論結果の1～2順位が一致し、かつ確からしさの数値で明確に表現されていれば○の的中1とした。また、両者が一致していても、その数値が有意でない要因の数値に対して十分大きくない場合を△の的中2として示し、その他は×の非的中とした。

推論結果は、有意と見られる幾つかの路面状態を確からしさの数値で表現するので、推論の路面状態と写真の判別結果と一致しやすいことが分かる。

冬期間全体における在来舗装路面と凍結抑制舗装路面の的中率は、表-8.3に示すように、的中1との中2はともに90%以上になり、良好な結果が得られた。

道路の車線数や交通条件から轍部とそれ以外の部分で出現する路面状態の違いに規則性がある場合には、ルール作成時にそれらを考慮すれば、非フuzzy

表-8.2 路面状態の判別結果と的中の程度

区分	日時	入力条件			出現路面状態の確からしさ%				Fuzzy理論による判別 有意の路面	写真判別による 有意の路面	的中 の程度
		電気容量 pF	路温 °C	気温 °C	乾き DI	濡れ雪氷 WS	湿潤 WB	乾燥 DB			
在来舗装	12/15 8	23.8	-5	-3.4	99	1	1	34	DI	DIF,DCS	○
	10	50.8	-1.8	-0.5	61	56	21	27	DI,WS	DIF,DCS	○
	12	356.0	0.7	1.5	6	39	80	18	WB	WB,WGS	○
	14	232.0	0.3	-0.2	8	41	77	18	WB,WS	WB,DGS	○
抑制舗装	12/15 8	205.0	-4.9	-2	46	44	42	17	DI,WS,WB	WGS,SL	△
	10	264.8	-2.2	0.3	42	31	48	17	WB,DI,WS	WGS,WB,SL	△
	12	615.8	1.2	2.4	4	37	85	18	WB,WS	WB,WGS	○
	14	487.8	0.3	-0.4	8	41	77	18	WB,WS	WB	○
在来舗装	1/21 8	9.5	-2.9	1.2	93	18	1	34	DI,	DCS,DIF,DB	○
	10	12.3	0	1.3	58	42	26	34	DI,WS	DCS,DIF,DB	○
	12	64.2	1.5	1.2	3	69	78	20	WB,WS	WB,WGS	○
	14	103.3	2.7	1	1	57	83	13	WB,WS	WB,WGS	○
抑制舗装	1/21 8	74	-3.5	-4.2	88	34	47	34	DI	DCS,DIF	○
	10	123	-0.6	-1.6	28	71	83	25	WB,WS	DIF,DCS,WGS	△
	12	263.5	1.2	-1.4	4	43	91	17	WB	WB,WGS	○
	14	317.5	1.9	-0.8	1	34	66	17	WB	WB,SL	○
在来舗装	2/9 8	22.5	-6.3	-5.5	99	1	1	34	DI	DCS	○
	10	21.5	-3.3	-3.4	94	17	1	34	DI	DCS	○
	12	53.3	0.7	0.8	9	74	67	25	WB,WS	WB,WGS	○
	14	46.3	0.6	-3.2	11	77	63	30	WB,WS	WIF,WCS	○
抑制舗装	2/9 8	53.8	-6.3	-7.4	99	10	1	34	DI	DCS,DIF	○
	10	54.5	-3.3	-2.1	90	28	1	34	DI	DIF,DCS	○
	12	370.8	2.8	4.6	1	25	93	13	WB	WB,WCS	○
	14	306.5	1.6	-1.8	2	35	88	17	WB	WB,WGS,WCS	○
在来舗装	3/2 8	20.8	-2.4	-4.1	91	27	1	34	DI	DIF,DCS	○
	10	23.0	-1.0	-0.9	69	41	16	34	DI,WS	DIF,DCS	○
	12	22.0	-0.9	-2.8	68	41	17	34	DI,WS	DIF,DCS	○
	14	23.8	-0.8	-3.5	64	44	19	34	DI,WS	DCS,DIF	○
抑制舗装	3/2 8	116.0	-2.2	-2.5	67	53	16	27	DI,WS	DCS,DIF	○
	10	124.0	-0.8	-1.6	32	69	45	25	WS,WB	DCS,DIF	×
	12	317.0	0.8	-0.7	5	38	81	17	WB	WB,WCS	○
	14	254.5	0.4	-0.5	7	50	75	17	WB,WS	WB,WCS	○
	16	93.8	-0.2	-0.7	33	70	40	34	WS,WB	DCS,DIF	×

表-8.3 在来舗装と凍結抑制舗装の的中率

月	在来舗装			抑制舗装		
	個数	的中1	的中2	個数	的中1	的中2
12月	93	85	91	92	73	87
1月	114	103	110	125	115	121
2月	113	111	103	135	133	126
3月	38	30	33	14	9	11
総数	358	329	337	366	330	345
的中率(%)		92	94		90	94

化された各要因に対する数値の大ききで不均一な路面状態をかなり表現することができる。

しかし、付随的な条件をルールに組み入れ過ぎると推論結果の有意差が低減する場合があるので、ルール作成時に検討を要する。従って、ファジー推論による路面状態の判別は、ルール作成が極めて重要であり、推論する現象をきちんと把握しておく必要がある。

8. 5 まとめ

- 各路面状態における路面誘電率と路温との観測結果から、広範囲の道路雪氷状態、湿潤・乾燥状態を比較的精度良く判別できることが分かった。

- 路面誘電率と路温の経時変化をモニターすることにより、湿潤路面から凍結路面に変化する過程、またはその逆の過程を知ることができる。

- 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、その後の試作改良により、きめ細かな検知が可能になった。

- 融雪剤の散布により塩素イオンを含んだ雪氷は、路面誘電率が大幅に増加し他の路面状態とは異なる誘電特性を示すので、薬剤散布の効果発現状態を誘電率で明瞭に判別できる。

- 判別アルゴリズムについては、ファジー推論の判別手法を適用することにより、有意とみられる幾つかの路面状態を確からしきの数値で表現することができ、的中率の向上も図ることできる。

- ファジー推論におけるルール作成には、対象とする路面の道路・交通条件による路面状態の変化の特性を把握しておく必要がある。

- DPF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り、薬剤散布の管理にも利用できる利点を有している。

参 考 文 献

1) 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.

2) 前野紀一：塩化カリウム氷の誘電分散 I，低温科学，物理篇第28号，pp.1～14，1970

3) 前野紀一：塩化カリウム氷の誘電分散 II，低温科学，物理篇第28号，pp.17～21，1970

4) Takeichi, K., Maeno, N. and Kubo, H: Snow and ice detection by a Dielectric Freezing-detector(DPF), Proc. of the 4th Workshop on Paving in Cold Areas, Vol.1, pp.319～337, Sep., 1990.

5) J.C.Leifer: Present Status of the Bridge Ice Detection Program at FHWA, Interface, TRB, Snow and Ice Control Research Special Report 185, pp.215～219, 1979

6) H.Ninomiya, K.Takeichi, K.Kawamura: Snow Removal and Ice Control, TRB, Vol.2, Preprint No.36(TRRに今期掲載), 1993

7) 古田均ら：ファジー理論の土木工学への応用，森北出版，pp.184～224，1992

8) Arnold Kaufmann, Madan M.Gupta (田中英夫, 松岡浩訳)：ファジー数理と応用，pp.2～82，1992

第9章 路面凍結の予測手法

9.1 概説

路温の予測手法としては、気象現象に物理則を適用した物理的手法とその統計的な規則性に基づく統計的手法の2種類に大別できる。物理的手法には熱収支解析法、熱伝導方程式法等、統計的手法には調和解析法、重回帰分析法等がある。

現在では、気象現象はかなりの程度まで物理学的に解明されて、気象予報の精度も向上している。しかし、気象現象は、物理則の適用により量的にも、質的にも明確に原因を解明できるものばかりではなく、局地的な気象変化を予測する場合には、物理的な考え方のみでは処理できないことも多い。気象現象の物理的な原因が分からなくても、気象変化の周期性や類似則に着目した統計的手法の方が実態にあった予測を与える場合があるというのはこの理由によるものである^{1), 2), 3)}。

特に道路気象については、道路周辺の地形や建物、道路構造、交通条件、路面状態等により、局地的な現象が強く出る地点、あるいは一様な現象が連続する区間が存在するため、路温も様々に変化する。諸外国では、この問題を克服するために、道路気象情報のシステム化、道路管理技術者の教育等を国家ないし国家間のプロジェクトレベルで推進している点については前述した通りで、わが国においても今後の重要な検討課題である。

しかし、わが国の現状において、このような微気候の現象を一般の道路管理者が逐一解析処理するのは困難で、各気象官署でも把握できない状況にある。

以上の点をふまえ、本研究では、基本的に次のような考えに基づき検討を行った。

- 複雑な気象現象の解析処理をしなくても、検知器の設置やT.M.による路温測定の実施により、路面情報を自動的に検知し、それを予め作成した予測モデルに適用あるいは修正して路温の予測や路面凍結の予測を行う方法が、実態に即している。
- 本研究における路面凍結の予測手法は、観測現場での検討に限られているが、今後、T.M.の導入や主要地点での道路気象情報の収集等の整備が進めば、路線全体に適用することが可能である。

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モデルと熱収支解析モデルによる2つの予測手法を考えた。ただし、フーリエ解析モデルでは路温実測値によるモデルの修正を行い、熱収支解析モデルでは、入力条件として気象統計処理⁴⁾をした気象モデルを用いており、統計的手法と物理的手法とをある程度おり混ぜた手法といえる。

また、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周期変動特性、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、14時頃までのモデル化した気象条件、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、路面凍結において水と氷が混在する温度範囲を+0.5~-0.5°C、温度センサーの測定精度を±0.5°C^{5),6)}と仮定したことに基づいており、同時に、この時間帯予測により入力条件の誤差や路面状態が一様でない場合の横断・延長方向の路温の不均一性を考慮することができる。英国の予測モデルでも、気象予測は必ずしも厳密な科学に基づいて処理できるものばかりではないとの前提にたって、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^{7),8)}。

本研究では、2つのモデルの適用性を調べるために、札幌、旭川、帯広の現場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。

9.2 フーリエ解析による予測モデル

9.2.1 予測手法の手順と予測モデル

予測手法の手順は、図-9.1に示す通りである。まず、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の算出をした。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予測モデル曲線とした。

この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¹³⁾、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 $(F_{max}-T_{max})=\Delta T$ 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。一般に、最高路温を示す頻度が高い13時で ΔT の移動をすればよいが、13時から14時にかけての路温の低下が大きい場合には、14時における ΔT の移動を行う。

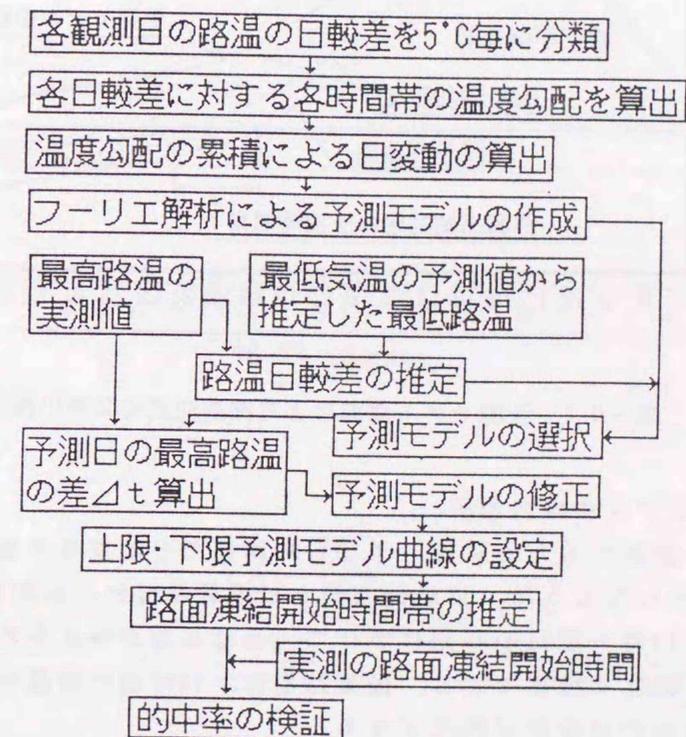


図-9.1 フーリエ解析モデルのフローチャート

ΔT の移動は、予測モデル曲線を与えるフーリエ曲線の(1)式において、 $F(t)$ の平均値を示す項の A_0 に $(A_0 + \Delta T)$ を代入した予測曲線を作成することを意味する。次に、凍結開始時間帯の予測を行うためには、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ればよい。

図-9.2は、予測モデル曲線に対する上限・下限予測曲線の設定方法の模式図である。路面凍結開始時間の予測については、実測路温の 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れば的中である。

図-9.3は、札幌における1月～3月の予測モデル曲線を示したもので、旭川と帯広の予測モデル曲線は、付図-9.1と9.2に示した。

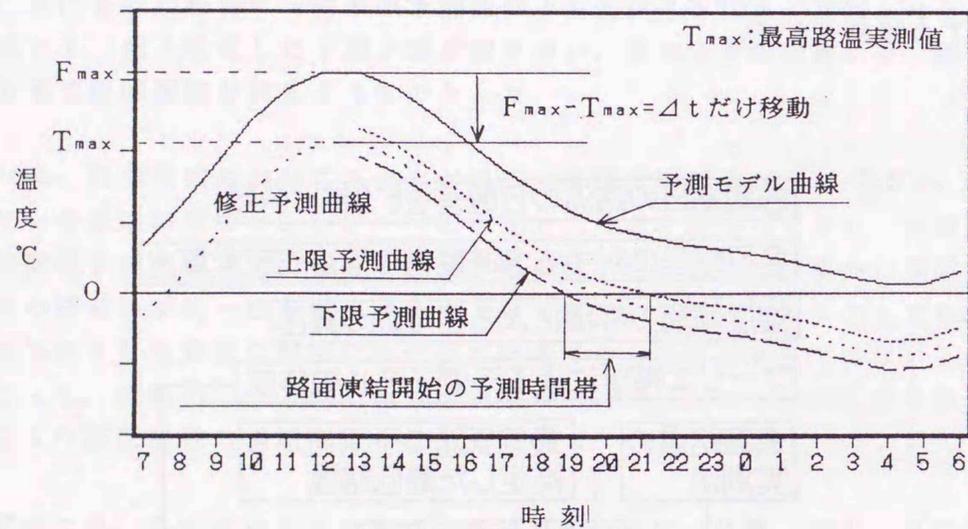


図-9.2 予測モデル曲線による凍結開始時間帯の推定方法

9.2.2 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-6.8で示したように、日最低気温と日最低路温との相関は良いので、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。

推定路温日較差と実測路温日較差との比較を札幌、旭川及び帯広について行くと、図-9.4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。

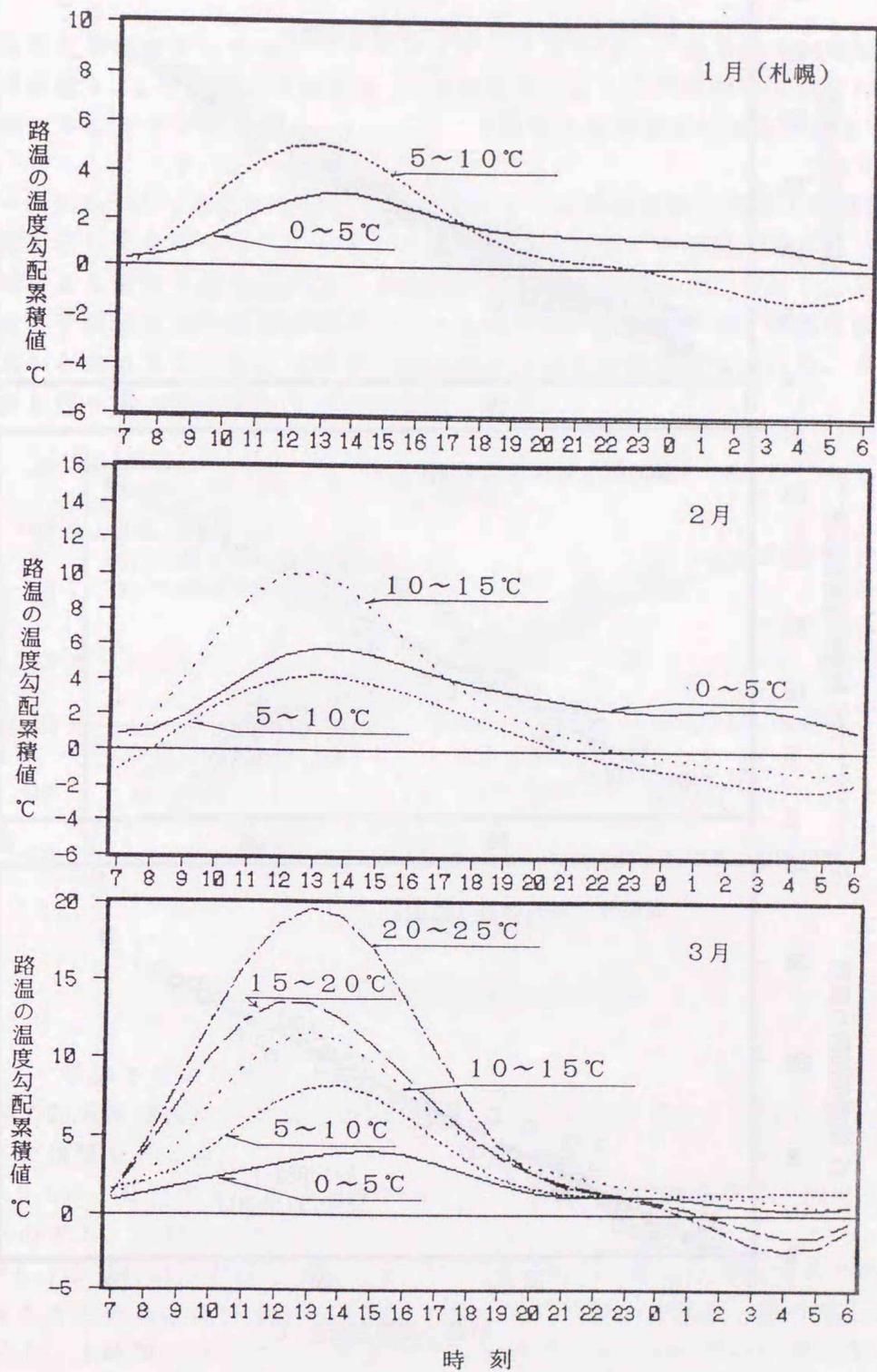


図-9.3 札幌の路温日較差による予測モデル曲線

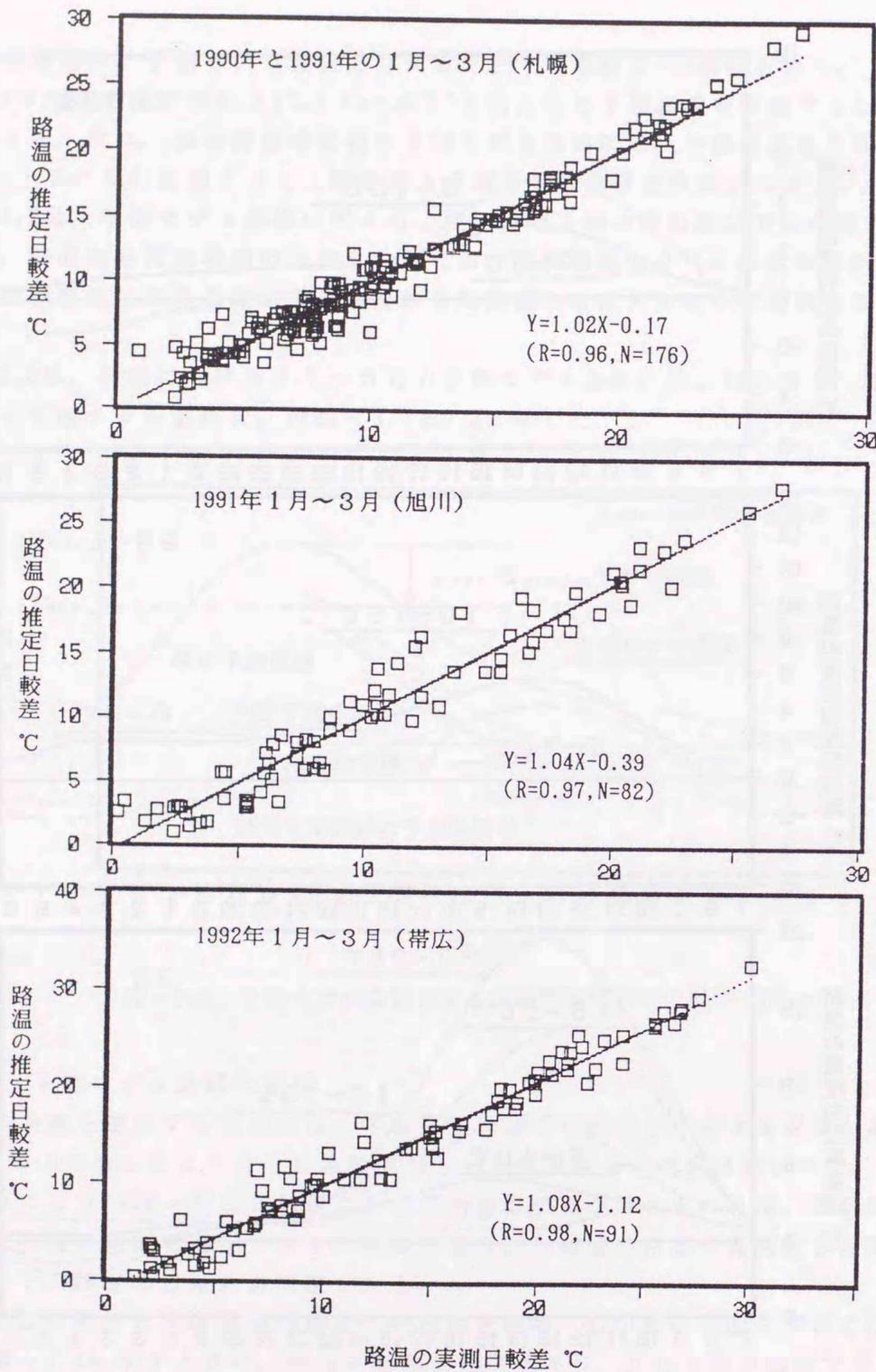


図-9.4 路温日較差の実測値と推定値との相関

路面温度を測定せずに気象データのみを用いる場合は⁹⁾、朝7時~14時迄の気温の累積値 x_1 と日射量の累積値 x_2 を説明変数として、最高路温 Y は(11)式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。

$$Y = b_1 x_1 + b_2 x_2 + a \quad (11)$$

図-9.5は、(11)式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、(11)式による推定方法を用いると比較的良い相関が得られた。しかし、気象観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(11)式から求める方法は、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。

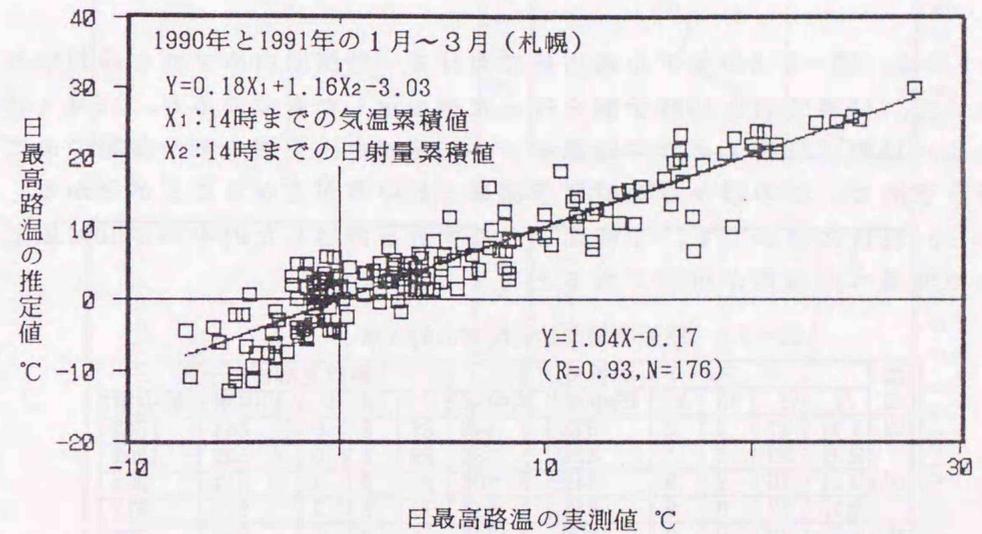


図-9.5 日最高路温の実測値と推定値

9.2.3 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-9.6は、2月末~3月の札幌における予測モデルの適用例で、的中、一時間以内のずれ、非的中の場合を示したものである。

表-9.1は、1991年1月~3月における札幌、旭川、帯広の観測地点での予測的中率をまとめたものである。各地点とも完全に的中した割合(的中率1)は80%以上、1時間以内のずれ(的中率2)を許容すると90%以上に達した。

また、札幌において1991年1月~3月のデータに基づいて作成したモデルをそのまま1990年1月~3月に適用して的中率の検証を行った。表-9.2に示すよ

うに、冬期間全体の的中率1は87%、的中率2は91%となり、1991年の的中率よりわずかに低下しただけで、年変動に対する予測モデルの適用性を確認した。

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、路面融解水の急激な出現や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れた。

これは、パターン解析モデルの限界を示すものであるが、2、3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りかなり改善できる。

図-9.7は、図-9.6のモデル適用例における一時間以内のずれと非的中の場合について、15時予測と16時予測を行った例を示したものである。15時（16時）予測とは、15時（16時）までの路温データに基づき、予測モデル曲線のあてはめを行う予測で、この図から短時間予測ほどの的中率が上がることが分かる。

しかし、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。

表-9.1 路面凍結開始時間帯の的中率

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%	
帯広	1月	30	0	1	97%	97%	27	4	0	87%	100%	
	2月	25	2	2	86%	93%	23	5	1	79%	97%	
	3月	26	4	1	84%	97%	21	5	4	70%	87%	
	合計	81	6	4	89%	96%	71	14	5	79%	94%	

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
 的中率1: $\{Y / (Y + YN + N)\} * 100$, 的中率2: $\{(Y + YN) / (Y + YN + N)\} * 100$
 札幌は1/25, 1/30, 2/20欠測

表-9.2 1990年の観測結果に予測モデルを適用した場合の的中率

地点	フーリエ解析モデル					
	月	Y	YN	N	的中率1	的中率2
札幌	1月	29	0	0	100%	100%
	2月	23	2	3	82%	89%
	3月	25	1	5	81%	84%
合計	76	3	8	87%	91%	

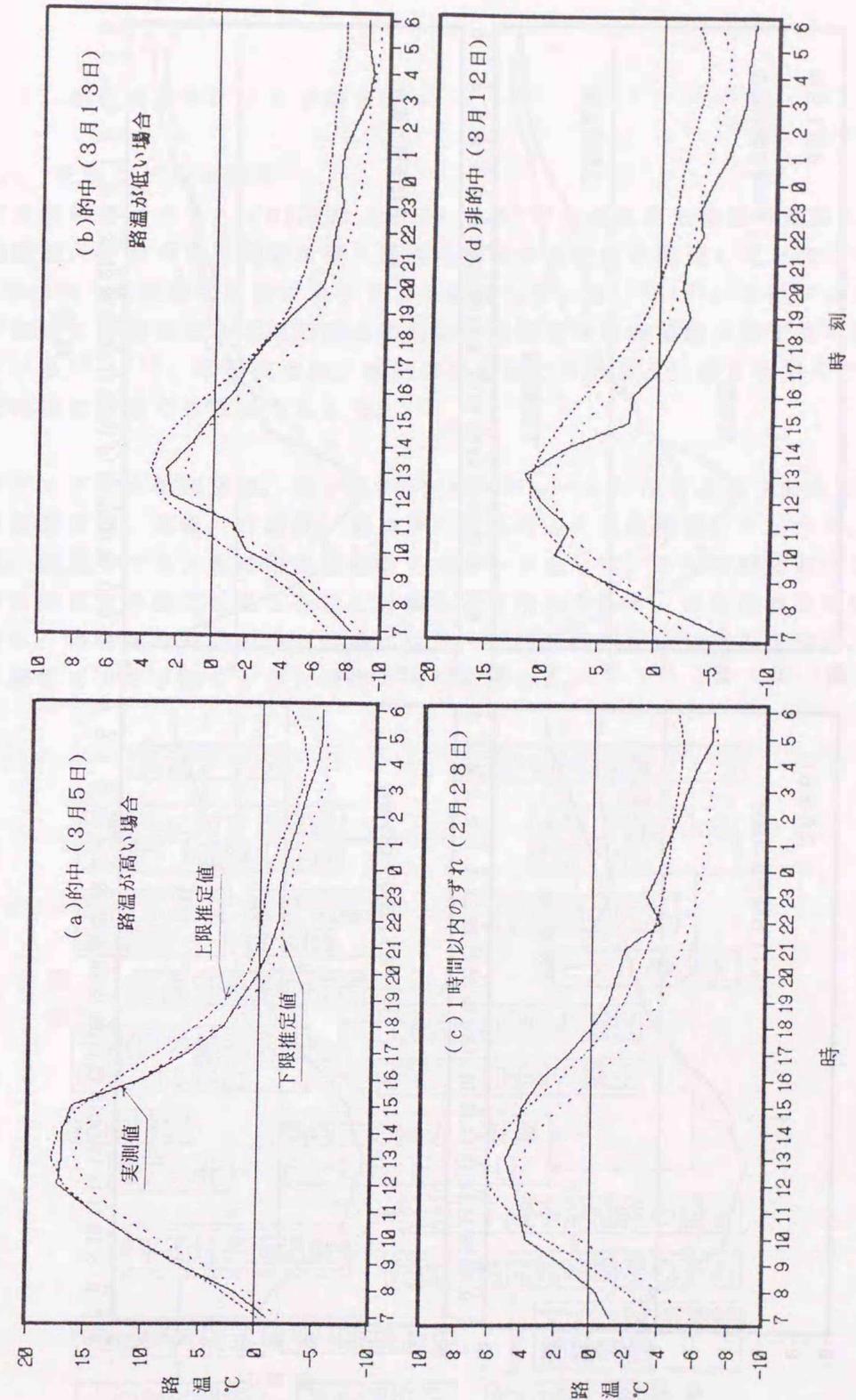


図-9.6 フーリエ解析モデルの適用例（札幌）

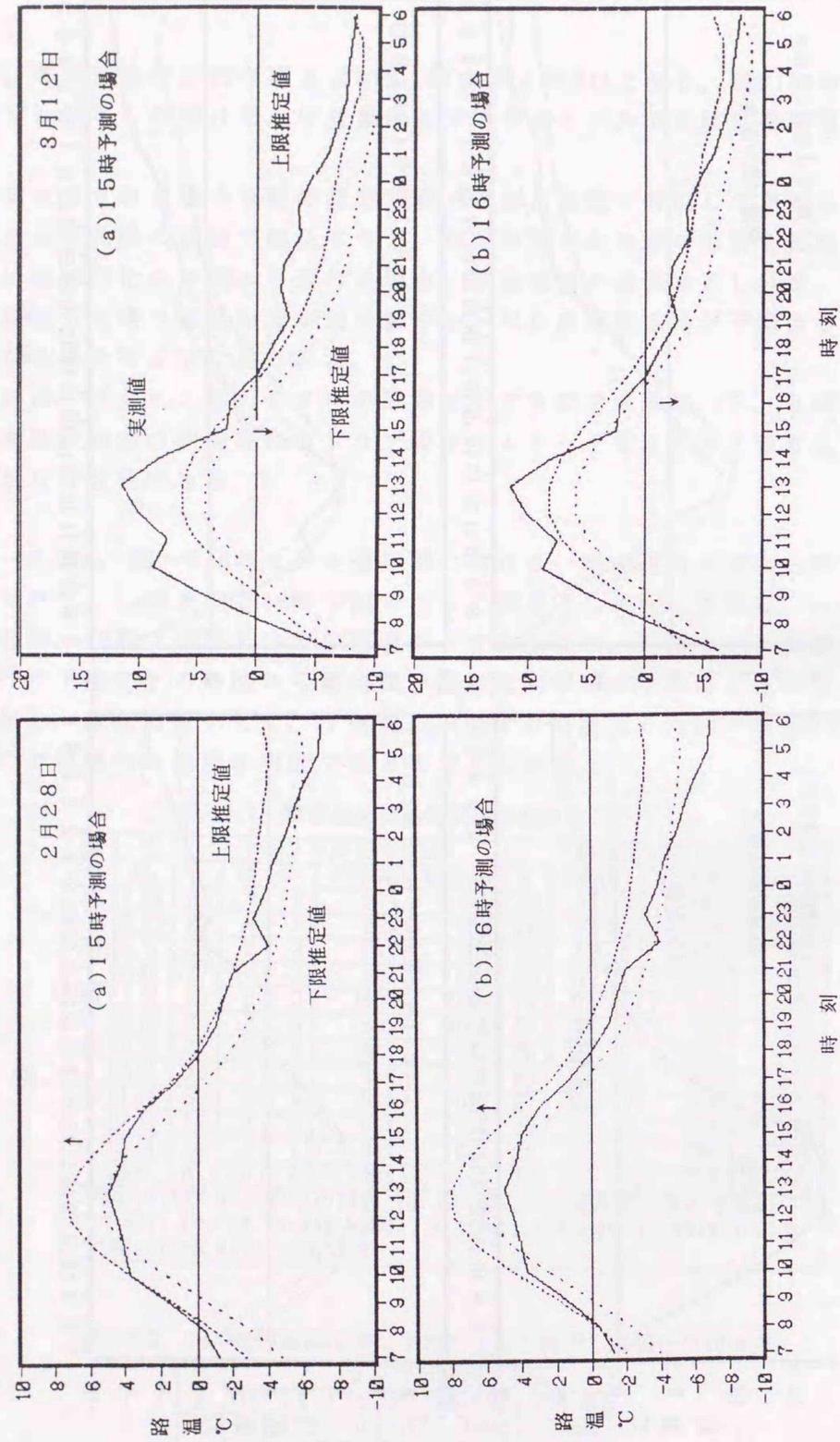


図-9.7 15時予測と16時予測による的中率の状況

9.3 熱収支解析による予測モデル

9.3.1 予測モデルの概要

熱収支解析プログラム (MICRO) は、Smithら¹⁰⁾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、Outcaltも同様の解析プログラムを提案している^{11), 12)}。このプログラムは、既往の研究において凍結深さの推定や冬期間の路面温度の推定等に用いられている^{13), 14)}。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。

解析プログラムの概要は、図-9.8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。

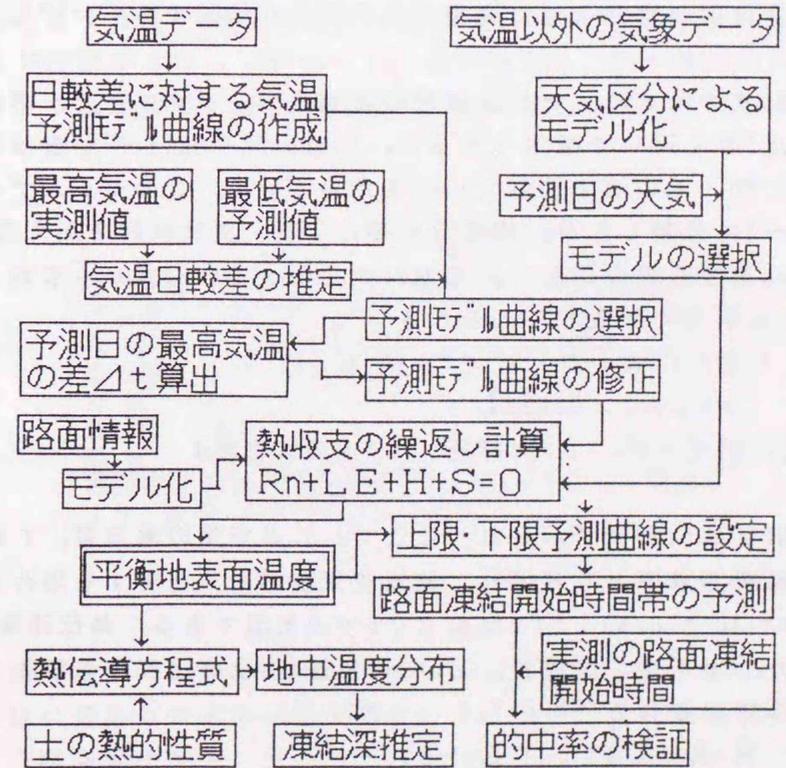


図-9.8 熱収支解析モデルのフローチャート

9.3.2 平衡地表面温度の算出理論^{15), 16)}

地表面を介して、大気ないし地中への熱伝達は、(12)式により表される。

$$R_n + LE + H + S = 0 \quad (12)$$

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(13)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。

$$R_n = (1-A)R_s + \Delta R \quad (13)$$

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、(14)式から求められる。

$$\Delta R = (1-n^2 \cdot K) [\sigma T_e^4 - \sigma T_a^4 \{1 - 0.26 \exp(-7.77 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta T^2)\}] \quad (14)$$

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^{17), 18)}。

LE は(15)式で示され、 α は地表面の湿潤度ファクターで、ボーエン比(顕熱と潜熱の比)等を用いて推定できるが、Smith¹⁸⁾やDavies¹⁹⁾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 $\alpha = 0 \sim 1$ 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(16)式から求められるが、 $\beta / (\beta + \gamma)$ は気温の関数で与えられる²⁰⁾。

$$LE = \alpha (R_n - S) \cdot \beta / (\beta + \gamma) \quad (15)$$

$$\gamma = C_p p / 0.622 L \quad (16)$$

(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(17)式で示され、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、 $\approx 0.98 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$)、 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 及び地表面の粗度を Z_0 とすると(18)式から算出される^{15), 21)}。

$$H = K_h \cdot C (T_2 - \Gamma Z_2 - T_e) \quad (17)$$

$$K_h = K^2 U_2 \rho / \{\ln(Z_2 / Z_0)\}^2 \quad (18)$$

地中伝導熱流量 S は(19)式で示され、ここで、 λ は土の熱伝導率、 T_e は深さ D_z における地温である。

$$S = \lambda (T_e - T_g) / D_z \quad (19)$$

9.3.3 入力条件

入力条件の内容は表-9.3に示す通り、その項目数は多く、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、観測データの収集も容易ではない。そのため、熱収支法を用いた研究の解析では气象台等の観測データに基づき、気象要素のモデル化が行われている^{18), 14), 22), 23)}。

本研究においても、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14時~翌朝にかけての天気の予報と最低気温予測値が与えられれば、気象条件の選択ができるようにした。モデルの作成は札幌、旭川と帯広の観測現場の気温データと气象台の観測日原簿^{24), 25), 26)}に基づき行った。

本研究において、気象モデルの選択の目安となる天気は、観測日原簿に3時間ごと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、例えば車両による強制乱流、タイヤと路面との摩擦熱等は定量化が困難であるので無視した。道路周辺の地形や建物等の影響を受けやすい日射量や風速等は、路温の実測値と予測値との感度分析により作成した気象モデルを修正することができる。

表-9.3 入力条件の内容

気象要素	路面状態	土の熱的性質
日射量 ly/h	アルベド 0~1	体積含水比 %
雲量 0~1	湿潤度ファクター 0~1	熱伝導率 cal
雲の種類 0~1	路面積雪厚 cm	cm · s · °C
気温 °C		熱容量 cal
風速 cm/s		cm · °C
気圧 hPa		
路面状態は路面凍結検知器、Thermal Mappingの整備により、適切な路面情報が得られる。		

• 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-9.9には、札幌における気温モデル曲線を示した。旭川と帯広については、付図-9.3と9.4に示した。

気温については、札幌市周辺8箇所の大気観測所の観測データにおいて伏見と他の観測所との地域間の相関を調べてみた。表-9.4は、伏見を基準として他の7箇所の大気観測所との日最低気温と日平均気温の相関係数を各月ごとに計算し、その結果をまとめたものである。

日最低気温に関して、地域別では篠路が、月別では3月の相関が低い。日平均気温は篠路との相関がやや低い点を除けば、地域別、月別でも良い相関を示している。

以上から、作成した気温モデルは札幌周辺における気温の変動パターンをほぼ表しているといえる。しかし、局地的な石狩湾低気圧の影響を強く受ける篠路については、独自の気温モデルを作成した方が良く、また、3月の最低気温は基準地点と各地点との補正が必要である。

従って、他の気象要素についても、ある地点における基準モデルを路線の各地点に適用する場合には、観測データとの比較や感度分析^{22), 27)}による修正が必要であることが分かる。

表-9.4 伏見を基準にした日最低気温、日平均気温の地域相関
大気観測所データ 1989年11月~1990年3月

地区	日最低気温					日平均気温				
	11月	12月	1月	2月	3月	11月	12月	1月	2月	3月
伏見	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
西	0.976	0.944	0.935	0.977	0.940	0.996	0.993	0.989	0.997	0.960
東	0.960	0.952	0.915	0.958	0.813	0.990	0.988	0.977	0.993	0.967
白石	0.974	0.965	0.940	0.981	0.903	0.993	0.993	0.987	0.996	0.958
篠路	0.930	0.879	0.912	0.926	0.703	0.980	0.957	0.919	0.951	0.928
発寒	0.969	0.967	0.956	0.984	0.926	0.995	0.992	0.989	0.996	0.960
月寒	0.963	0.969	0.970	0.984	0.847	0.994	0.993	0.992	0.994	0.955
手稲	0.949	0.919	0.900	0.943	0.850	0.990	0.984	0.933	0.985	0.962

• 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、札幌、旭川については気象台の1987年~1991年の4年度、帯広については1987年~1992年の5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²⁸⁾。

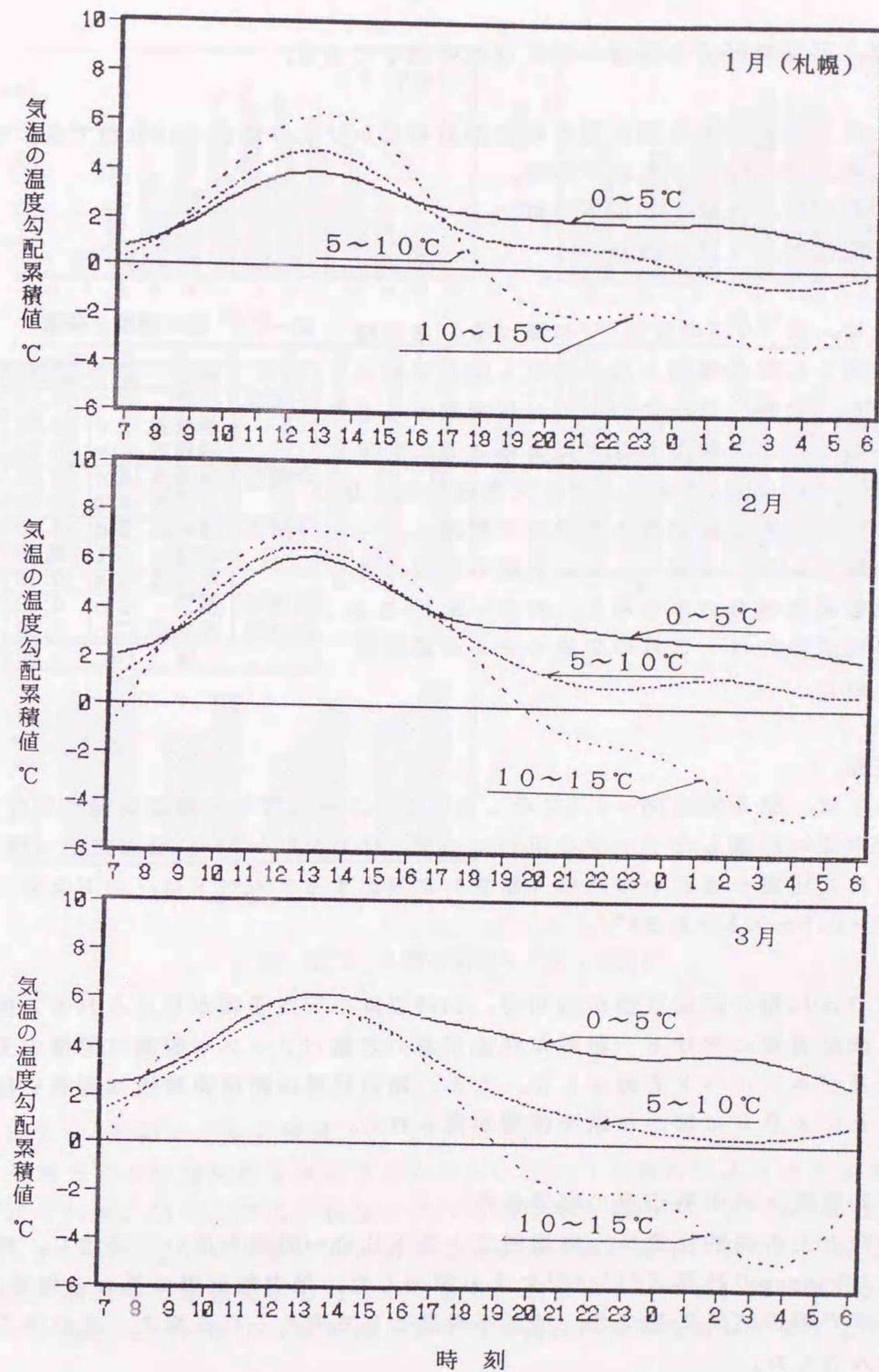


図-9.9 札幌の気温予測モデル曲線

ここで、天気の違い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-9.5の分類¹⁰⁾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、1011~1013hPaである。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-9.10に札幌の3月における各気象要素のモデルを示し、付表-9.1~9.3には、各地点の11月~3月の気象モデルの算出結果をまとめた。

• 路面状態

アルベドは、第4章の図-4.5に示したように、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^{29), 30)}。湿潤露出~濡れ雪氷~汚れた圧雪~きれいな圧雪(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²⁶⁾。

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て、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。なお、路面状態は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。

• 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^{31), 32)}により算出した。地中熱伝導に係わる境界条件は、5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。

表-9.5 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
	霧	Fog	1.00

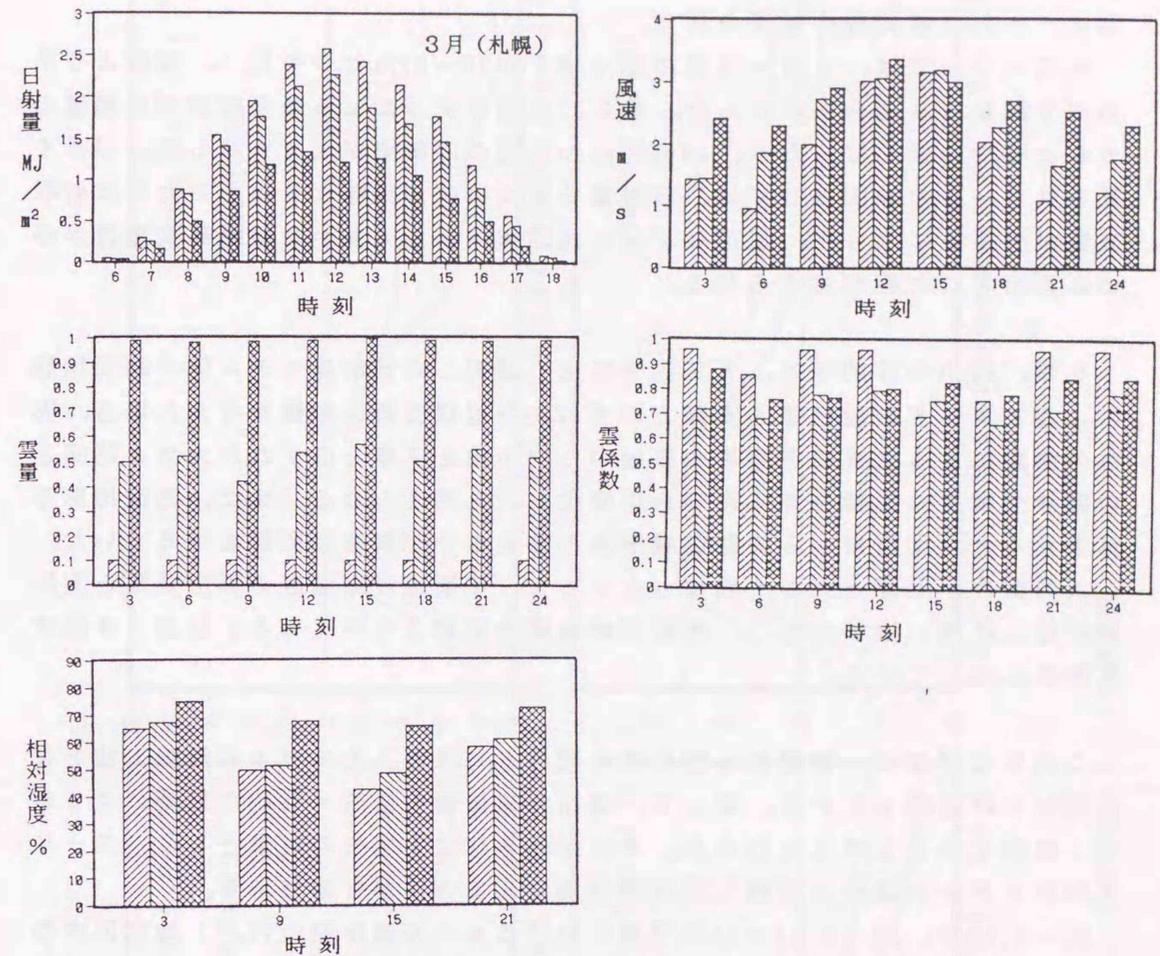


図-9.10 札幌の気象モデル(3月)

9.3.4 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札幌、旭川、帯広の現場における的中率を算出し、表-9.1にまとめた。図-9.11は、3月の札幌における予測モデルの適用例で、的中、一時間以内のずれ、非的中の場合を示したものである。的中については、図-9.6に示したフーリエ解析モデルによる解析例と同じ日を選び両者の比較ができるようにした。

札幌と旭川については、予測が完全に的中した割合(的中率1)が80%以上、1時間以内のずれ(的中率2)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。

帯広については、1月～3月の的中率1が70～87%でやや低く、実際より早めの予測を行う場合が多かった。特に、予測モデルによる最高路温が実測値のそれよりやや低くなったり、14時以降の路温の下降率が大きくなる場合が多く見られた。この原因としては、日射量モデルの値が実際より小さいため放射収支量が少なめになった、風速モデルの値が実際より大きいため顕熱交換量が多めに算出された等が考えられる。

札幌、旭川の非的中は、天気区分により選択した日射量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たと考えられる。また、路面撮影写真を見ると、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。

入力条件が実際と大きく異なっていると、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になっている。

これらの問題は、客観性と簡便性を重視した予測入力モデルの選択方法ときめ細かさに起因している。従って、道路気象情報の量的・質的な整備によりかなり改善できると考えられるが、それが得られない場合の対策として、フーリエ解析モデルの場合と同様に短時間予測による方法が有効である。

図-9.12は、図-9.11の14時予測におけるモデル適用例の内、1時間以内のずれと非的中の場合をとりあげ、15時予測とした場合の予測の的中状態を示したものである。この図から、予測誤差が少なくなる短時間予測により、予測精度が向上することが分かる。

以上の検証から、現状においても現場への適用が可能な精度を有していると考えられるが、適用箇所によりの中率にばらつきが見られることが分かった。

今後、感度分析や道路気象情報の整備による予測入力モデルの修正、精度の向上により、解析モデルの的中率を上げると同時に、短時間予測の導入も考慮する必要がある。

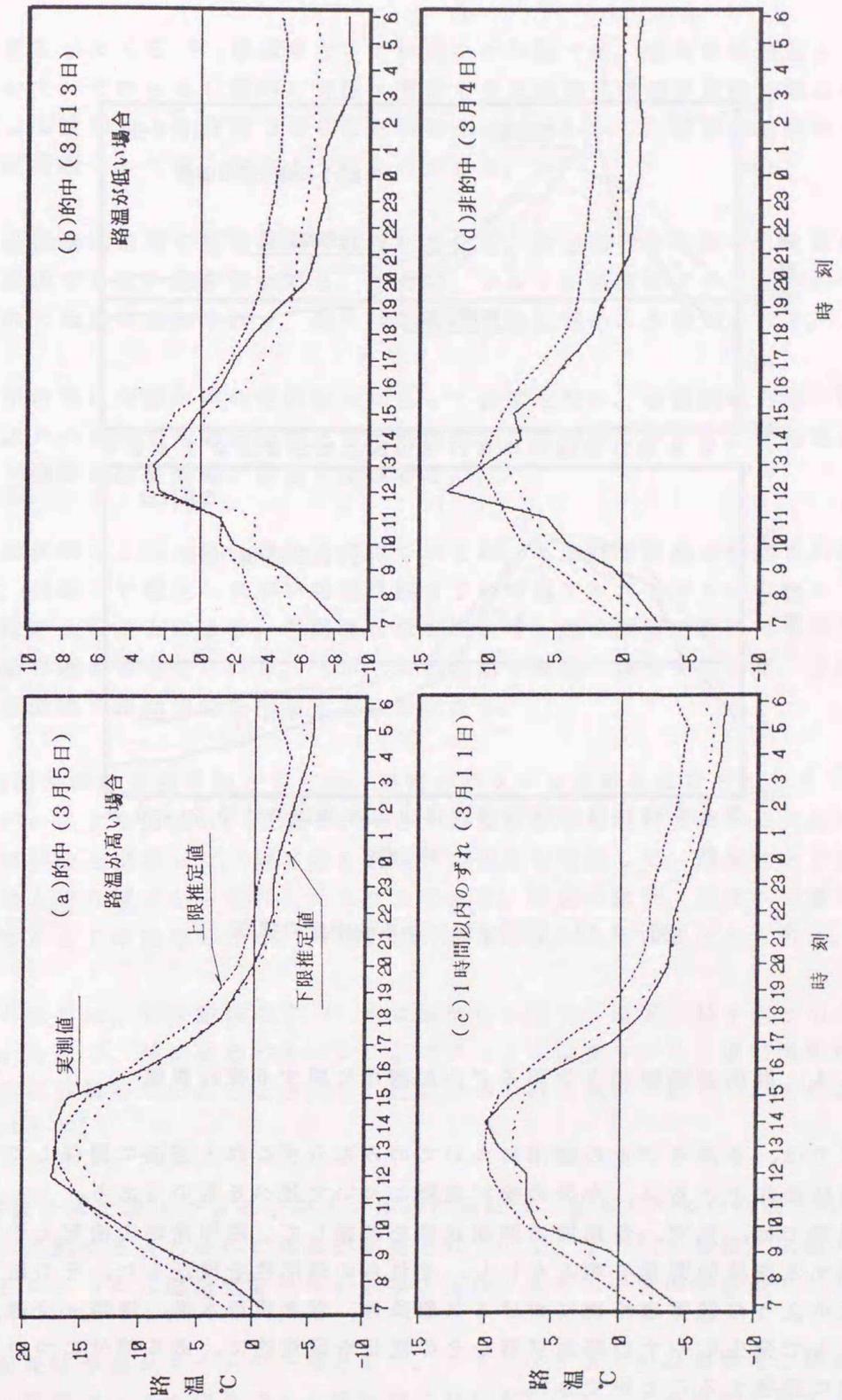


図-9.11 熱収支解析モデルの適用例

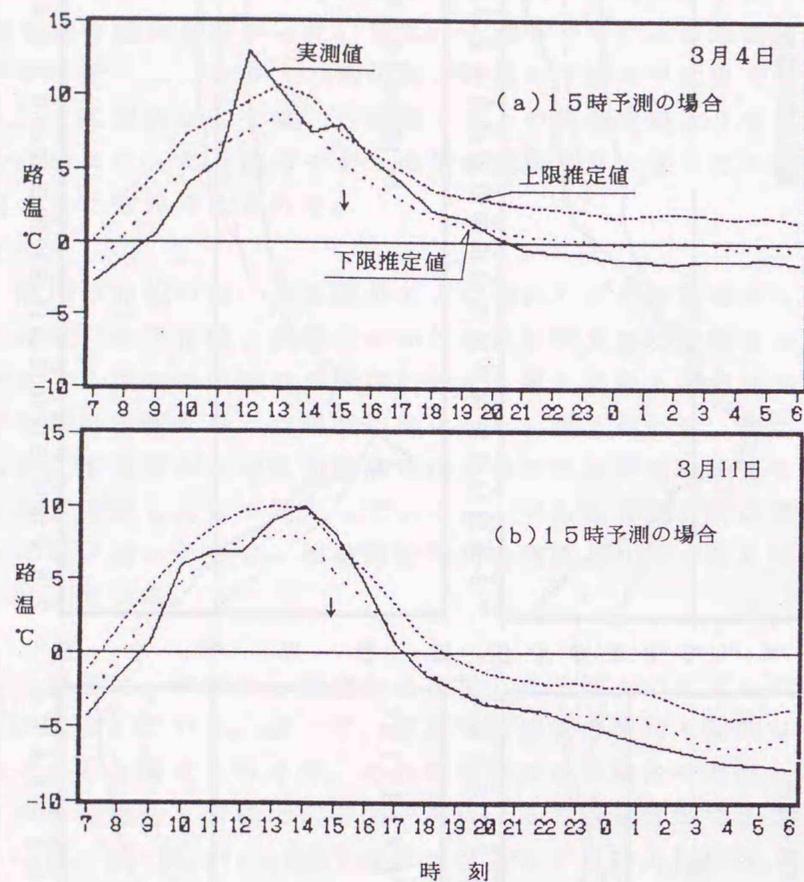


図-9.12 15時予測による的中度の状態

9. 4 路面凍結検知と予測モデルの適用に関する検討課題

ここでは、予測モデルの適用についてのみならずこれと密接に関係している路面凍結検知とともに、今後の検討課題について述べるものである。

本研究では、先ず、冬期間の路面状態を把握して、路面凍結の検知と予測手法に関する理論的背景を明らかにし、それらの適用性を検証した。その結果、北海道のような積雪寒冷地における気象条件、雪氷管理水準、道路・交通条件等のもとで発生しやすい路面状態やその変化を定性的に、ある部分については定量的に評価することができた。

降雪量が多くB.P.政策をとっていないわが国では、様々な道路雪氷が存在するので、それらを定量的に評価・判別できる誘電式路面凍結検知器は他の方式による検知器より有効であることが分かった。しかし、路面凍結検知に関する検討課題としては、次のようなものがある。

- 路面状態は各種の要因により複雑に変化し、検知器はある限られた路面情報しか提供できない場合が生じる。例えば、ツルツル路面のように圧雪の上に形成された氷膜は検知されず、単に検知器の上の圧雪のみが検知される。
- 路面状態は交通車両の走行分布によって影響を受け、車道横断方向の轍部とそれ以外の部分では露出路面と雪氷路面が交互に発生しやすく、検知器の設置位置と個数が路面情報の精度と関係する。
- 路面状態の不均一性に係わる点については、ある路面状態が検知された場合には、付随して発生しやすい路面状態を予め判別アルゴリズムの中にルールとして組み込むことにより、各路面状態を確からしさの数値で表現できるファジー理論の適用も考えられる。だが、この理論を現場に適用するには、予め対象とする道路の路面状態を把握する必要がある。

路面凍結の予測手法としては、路温のパターン解析を基本としたフーリエ解析モデルによる方法と、気象モデルを入力条件とした熱収支解析モデルによる2つの手法を提案した。両者とも現場への適用を考慮して、簡便性と予測精度の確保という観点から検討したモデルである。検証の結果、現場への適用は可能であるとの結論を得たが、今後の検討課題は次のようにまとめられる。

- 諸外国では、対象路線のT.M.や気象情報に基づく路面凍結予測が中心になっているので、路温変動パターンによるフーリエ解析モデルと道路気象情報による熱収支解析モデルとを合成し、路線全体の路面凍結予測モデルを作成する必要がある。

• 路線全体に適用できる予測モデルの作成には、基本モデルの作成と時間・空間的に変動する入力条件の確保が前提となるので、T.M.の整備、広域の気象情報とローカルな道路気象情報の収集と提供システムの整備が必要である。

• 路面凍結予測システムの一環として、リアルタイムでの路面情報と路面凍結予測の基礎データを提供できる検知器の利用方法についても検討を要する。

9. 5 まとめ

- 上限・下限の2本の予測曲線による凍結開始時間帯の予測は、道路センサーの測定精度、入力条件の誤差及び不均一な路面状態を考慮できる手法である。
- 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。
- フーリエ解析モデルは、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し、最高路温で補正を行うことができるので、従来のパターン解析モデルより路面凍結予測の精度向上を図ることができる。
- フーリエ解析モデルは、的中率が80%以上、1時間以内のずれを許容すると90%以上になり、現場への適用性を有している。
- 熱収支解析モデルは、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路面凍結の予測手法に改良することができた。
- 天気別、時間帯別の気象条件及び気温等の気象モデルは、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。しかし、現場の気象条件と気象モデルとの食い違いが大きい場合には、予測精度に影響を与えるので、感度分析により気象モデルの修正が必要である。
- 熱収支解析モデルは、札幌と旭川についてはフーリエ解析モデルと同様の的中率を与えるが、帯広の現場ではやや低く、入力条件の気象モデルの修正が必要であることを示している。同時に、リアルタイムの路面情報や道路気象情報を取り込むことにより、予測精度の向上を図る必要がある。
- 諸外国では、対象路線のThermal Mappingや気象情報に基づく路面凍結予測が中心になっており、路温変動パターンによるフーリエ解析モデルと道路気象情報による熱収支解析モデルとを合成し、路線全体にわたりきめ細かい路面凍結予測が可能なモデル作成が必要である。

参 考 文 献

- 1) 今堀克巳,小林禎作: 調和解析による長期予報について(I),低温科学 第9号,pp.1~18,1952
- 2) 今堀克巳: 調和解析による長期予報について(II),低温科学 第9号,pp.33~44,1952
- 3) 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
- 4) 鈴木栄一: 気象統計学,地人書館,pp.230~254,1983
- 5) (社)計量センサー利用技術調査研究委員会: センサの原理と使い方(3),コロナ社,pp.66~67,1984
- 6) 棚澤一郎ら: 伝熱研究における温度測定法,養賢堂,pp.45,1985
- 7) Highways: SAFETY ON THE ROAD,Highway April,pp.20~22,1987
- 8) J.E.Thornes: A preliminary performance and benefit analysis of the UK national road ice prediction system,Meteorological Magazine,pp93~98,May,1989
- 9) Edward S.Barber: Calculation of Maximum Pavement Temperatures From Weather Reports,HRB Bull.168,pp.1~8,1975
- 10) M.W.Smith: 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
- 11) S.I.Outcalt,et al: A digital computation of the annual snow and soil thermal regimes at Barow, Alaska,CRREL,Research Report 331,pp.1~12,1975

12) S.I.Outcalt: A Numerical Surface Climate Simulator, Geophysical Analysis 3, pp. 379~392, 1971

13) 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

14) M.W.Smith, Arve Tvede: Computer Simulation of Penetration Beneath Highways, Final Report for M.O.C.T. of Ontario, 1976

15) 竹内清秀, 近藤純正: 地表に近い大気, 東京大学出版会, pp. 71~126, 1990

16) 武市靖: 路面凍結と舗装体の熱伝導・熱収支解析に関する研究, 開発論集第41号, pp. 125~164, 1988

17) 小島賢治: 融雪機構と熱収支, 気象研究ノート 136, pp. 1~38, 1979

18) 石川信敬: 融雪熱収支, 北海道の農業気象第43号, pp. 1~10, 1991

19) J.A.Davies, C.D.Allen: Equilibrium, Potential and Evaporation from Cropped Surfaces in Southern Ontario, Journal of Applied Meteorology, Vol. 12, pp. 649~657, 1973

20) 榎根勇: 水文学, 大明堂, pp. 88, 1987

21) C.A.Paulson: The Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles in the Unstable Atmospheric Surface Layer, Journal of Applied Meteorology, Vol. 9, pp. 856~891, 1970

22) 近藤純正, 山崎剛: 熱収支法による融雪量の予測, 雪氷49巻, 4号, pp. 181~191, 1988

23) B.J.Dempsey, M.R.Thompson: A Heat-Transfer Model for Evaluating frost Action and Temperature-Related Effects in Multilayered Pavement Systems, HRR345, pp. 48~49, 1970

24) 札幌管区气象台: 地上気象観測日原簿, 1988年~1991年の11月~3月

25) 旭川地方气象台: 地上気象観測日原簿, 1988年~1991年の11月~3月

26) 帯広地方气象台: 地上気象観測日原簿, 1988年~1992年の11月~3月

27) 石川信敬, 成瀬廉二, 前野紀一: 道路雪氷の熱収支特性, 低温科学 物理編, 第46号, pp. 151~161, 1987

28) 吉野正敏ら: 気候学・気象学辞典, 二宮書店, pp. 364, 1986

29) 武市靖, 前野紀一: 誘電式路面凍結検知器の実用化研究, 開発論集第44号, pp. 27~28, 1988

30) 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, 1987

31) O.T.Farouki: Thermal Properties of Soils, Trans Tec Publications, pp. 102~119, 1986

32) 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

第10章 結論

本研究の2章における文献調査、3章～9章における室内実験及び現場の調査・観測に基づく解析結果の結論を要約すると、以下の通りである。

10.1 諸外国における雪氷管理の取り組み方とわが国の現状

- 諸外国では、スパイクタイヤの使用規制の強化・禁止に伴い、安全で円滑な交通の確保のための冬期道路管理政策として、除・排雪を主とした管理 (Snow Removal) のみならず氷結路面对策の路面管理 (Ice Control) をも行う雪氷管理 (Snow and Ice Control) が不可欠であると位置づけている。
- 塩散布による無雪氷路面の管理政策 (Bare Pavement Policy) が、冬期間の道路管理の基本となり、この管理政策が定着した。このような背景が、道路区分に応じた雪氷管理水準の確立とそれによる管理を可能にしたといえる。
- 1980年代に入ると、塩散布量の急増による道路施設や環境への塩害が顕在化し、深刻な社会問題へと発展した。その対策として、CMAに代表される低塩害の融氷剤の開発、凍結抑制舗装材料の開発等が行われたが、塩にとって代わるものとしては評価されなかった。
- 塩害対策の本格的な調査・研究は、アメリカでは1987年に開始されたSHRP計画、ヨーロッパでは11カ国共同により1986年に発足したCOSTプロジェクトに見ることができる。両者のプロジェクトは塩散布の管理方針を再確認した上で、散布量の低減・最適化を図るための技術開発を第一の目標とした。
- 技術開発は、ソフト面ではThermal Mappingと道路気象情報のシステム化と、それらに基づく路面凍結の検知と予測システムの開発、維持管理技術者の教育等、ハードの面からはロードセンサーの開発、道路気象観測点の設置、除排雪車両と散布装置の改良、ブライン (塩水溶液) の製造と利用等、多方面にわたっている。
- わが国では、1980年後半～1990年にかけてスパイクタイヤの使用規制の強化・禁止措置に対する社会的な合意が得られるようになり、現在では、禁止措置が社会的な趨勢となっている。その結果、近年、除・排雪中心の管理から氷結路面对策としての路面管理が重要視されるようになった。

- わが国の路面管理政策の立ち後れの背景には、スパイクタイヤの急速な普及が、路面管理の代替的な役割を果たしてきたこと、塩の散布が積雪の多い気象条件、狭あいな国土・環境条件、経済性の面から適用しづらいこと等、わが国の諸事情により路面管理に対する認識が十分に育たなかったことが考えられる。

- 北陸地方における散水消雪システムのように地域の気象条件に合致した路面管理として定着したものもある。高速道路や幹線道路の一部では、路面管理のシステム化、道路気象情報機器の設置が進められている。しかし、路面管理水準を明確に設定して、雪氷管理システムとして運用されている例は少ない。

- 寒さの厳しい地域では、危険箇所のピークカットを目的としたスポット管理が大部分である。スパイクタイヤの禁止に伴い鏡面化した圧雪路面の発生頻度の増加により、路線全体の路面管理の必要性が高まってきたといえる。

10. 2 道路雪氷の工学的特性

- 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変化する。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、道路雪氷の工学的特性を明らかにすることができた。

- 道路雪氷の密度と熱伝導率との関係、道路雪氷の種類とアルベドとの関係を示し、熱収支解析モデルによる路面凍結予測の入力データとして利用できるようにした。

- 現場観測と室内のホイールトラッキング試験により、道路雪氷の圧密過程と構造・密度との関係を調べた結果、新雪は交通車両により極めて短時間の内に圧密されると同時に磨かれることが分かった。

- 室温0°Cにおける圧雪供試体のホイールトラッキング試験を行った結果、タイヤ摩擦熱により圧雪表面に瞬間的に発生する水膜が氷膜に変わり、それが層状に生成して氷板に変成する過程を明らかにすることができた。

- 圧雪の表面に氷膜が形成された滑りやすい雪氷路面を本文では、“鏡面化圧雪路面”と呼び、凍雨や雪氷の融解水が凍結して氷膜・氷板が形成される、通称“ブラックアイス”、“アイスバーン”と呼ばれる凍結路面と区別した。最近、一般用語となっている“ツルツル路面”は、両者を総称したものであると考えられる。

- 雪氷の繰返し走行試験は、“鏡面化圧雪路面”の形成過程を明らかにし、その対策を講じる上で有用である。今後、雪質・雪温、接地圧、タイヤの性状等、各要因別の詳細な実験が必要である。

10. 3 冬期間の路面状態

- 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。すなわち、凍結と融解を繰り返す日変動の大きい危険な路面状態が発生しやすく、路面管理が交通安全上必要であることを明らかにした。

- 生活道路では冬期間、圧雪で被覆され、道路幅が狭くなる場合が多く、先ず、除・排雪の水準が問題となる。平地部の積雪深と平均路面積雪深から必要な除雪回数を推定することができ、除雪水準を検討する際の目安となる。

- 山地部道路に施工した凍結抑制舗装は、在来舗装と比較して、塩化カルシウム成分の溶出により路面露出率は10%上昇し、また、“ザクザク”状の粒雪路面を生成して、“鏡面化圧雪路面”の発生頻度が20%低減した。しかし、路面積雪厚が大きくなると、その効果は激減するので、きめ細かな除雪が必要である。

10. 4 舗装体の温度及び路温の変動特性

- 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。

- 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。これらの解析結果は、任意の深さの地温、地温の日変動及び深さ、不易層の深さとその温度等、地温の分布・変動特性を把握し、熱伝導・熱収支解析における境界条件を知る上で有用である。

- 道路において凍結融解が繰り返される深さは、路面から10cm程度で、表層のアスファルト混合物層に集中しており、日変動の及ぶ深さを50cm程度とすると、その約1/5である。

- 凍結融解を繰り返す路温の変動パターンには規則性があり、パターン解析に基づくフーリエ解析モデルの基礎となる。

- 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回程度で路肩付近の約2倍である。

- 路温は堆雪帯に隣接する路肩側の車線と走行軌跡が集中する轍部とでは道路横断方向により異なるので、計測地点と計測数の選定に注意を要するが、路面状態が均一ならば大きな違いはないことが分かった。

- 路温の深さ方向の変動については、表層部1cm当りの位相の遅れや温度差を考慮すると、路温計測センサーの埋設深さが路面下1cm前後ならば、その計測温度は路温として取り扱うことができる。

- 路面が乾燥露出や乾き雪氷の状態では、路温と気温との相関は比較的良いが、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、路温の範囲は狭く、気温との相関は低い。これらの関係は、路面状態をおおよそ推定する際の目安となる。

- 日最低気温と日最低路温との相関は良く、フーリエ解析モデルにおいて予測モデル曲線を作成するための理論的根拠となった。

10.5 路面凍結の検知

- 本研究において開発した誘電式路面凍結検知器(DPF)は、雪氷の誘電特性を利用したもので、広範囲の道路雪氷状態を比較的精度良く判別できる。特に、雪・氷・水の判別、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、乾燥ないし湿潤路面の状態の判別が可能である。

- 融雪剤の散布により塩素イオンを含んだ雪氷は、路面誘電率が大幅に増加し、他の路面状態とは異なる誘電特性を示すので、薬剤散布の効果発現状態を明瞭に判別できる。

- 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。その後の試作改良により、きめ細かな検知が可能になった。

- 判別アルゴリズムについては、ファジー推論の判別手法を適用することにより、有意とみられる路面状態を確からしさの数値で表現することができ、的中率の向上も図れることが分かった。

- DPFは、日変動の大きい幹線道路の路面状態の監視、路面管理のための路面情報の提供等において有用であり、薬剤散布の管理にも利用できる利点を有している。

10.6 路面凍結の予測

- 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、道路センサーの測定精度、路面状態の不均一性、入力データの誤差等を考慮した予測ができる利点を有している。

- 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、実測の日較差と良い相関を示す。

- フーリエ解析モデルでは、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し、日最高路温で修正する手法を用いた。これにより、従来のパターン解析モデルより予測精度を向上させることができた。

- 熱収支解析モデルは、気象要素の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。

- 現場の気象条件と気象モデルとの食い違いが大きい場合には、予測精度に影響を与えるので、感度分析により気象モデルの修正が必要である。同時に、リアルタイムの路面情報や道路気象情報を取り込むことにより、予測精度の向上を図る必要がある。

- 2つの解析モデルによる予測手法を札幌、旭川、帯広の現場に適用し、1~3月の的中率による検証を行った。冬期間全体の的中率はほぼ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。しかし、熱収支解析モデルによる帯広の現場の的中率は、やや低くばらつきが見られた。これは、上記の検討の必要性を示すものである。

• 諸外国では、対象路線のThermal Mappingや気象情報に基づく路面凍結予測が中心になっており、路温変動パターンによるフーリエ解析モデルと道路気象情報による熱収支解析モデルとを合成し、路線全体にわたりきめ細かい路面凍結予測が可能なモデル作成が必要である。

• 今後、リアルタイムでの路面情報と路面凍結予測の基礎データを提供できる路面凍結検知器の利用、Thermal Mappingの導入、広域とローカルな道路気象情報の収集と提供システムの開発等を行い、路面凍結の検知と予測に関するトータルシステムについて更に検討を加えたい。

また、緊急な検討課題となっている圧雪路面の鏡面化現象の対策に関しても、その発生メカニズムの解明と具体的な方策についてさらに研究を進めたい。

謝 辞

本論文のとりまとめに当り、北海道大学工学部の加来照俊教授から、適切かつきめ細かな御指導を賜った。特に、国内・国外の道路雪氷管理の実態とその検討課題等に基づいた、本研究の位置づけ、取り組み方及び路面凍結の検知・予測手法の基本的な考え方についての助言・指導をいただき、本論文をまとめることができた。ここに、加来照俊教授には、心から感謝申し上げます。

北海道大学低温科学研究所の前野紀一教授、同大学工学部の佐伯浩教授、森吉昭博教授、三田地利之教授からは、多方面からの貴重な助言と指導をいただいた。とりわけ、前野紀一教授からは、道路雪氷の工学的特性や誘電式路面凍結検知の基本原則に関する具体的な助言・指導をいただいた。ここに、諸先生には、厚く感謝申し上げます。

また、北海道大学工学部の中辻隆助教授、萩原享助教授には、論文の編集に係わる作業等でお世話になり、お礼申し上げます。

本研究では、多くの現場観測や室内実験を行ったが、その際、北海道大学低温科学研究所の気象学・雪害科学・融雪科学部門の諸先生、札幌市土木技術センター、北海道開発局土木研究所、北海道上川支庁・十勝支庁、札幌総合情報センター（株）、木村電機製作所の関係各位にご協力をいただき、日本道路公団札幌建設局からは、観測資料を提供していただいた。また、北海学園大学工学部武市卒論の学生諸君には、道路雪氷調査や路面状態の経時観測の実施に多大な協力をいただいた。ここに、お礼申し上げます。

付表-9.1 札幌の気象モデル (1987年~1991年の平均)

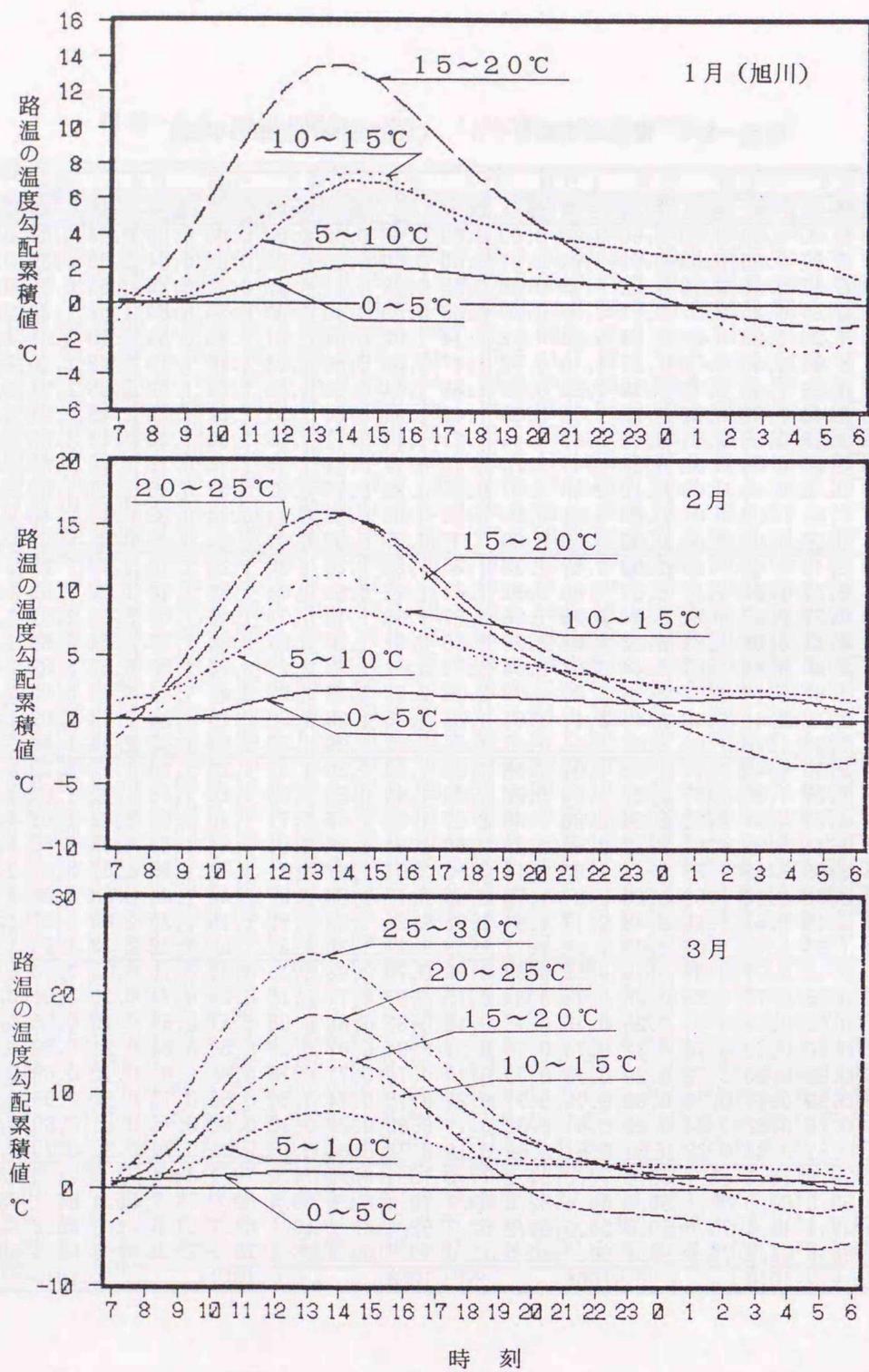
項目	時刻	11月			12月			1月			2月			3月		
		快晴	晴	曇り												
日射量 MJ/m ²	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03	0.03
	7	0.06	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.02	0.29	0.24	0.15
	8	0.37	0.30	0.15	0.17	0.12	0.07	0.14	0.12	0.08	0.40	0.30	0.20	0.87	0.82	0.49
	9	0.86	0.71	0.34	0.63	0.51	0.28	0.59	0.54	0.34	0.96	0.84	0.52	1.54	1.41	0.85
	10	1.23	1.07	0.65	0.86	0.80	0.58	1.07	0.87	0.61	1.50	1.29	0.92	1.95	1.77	1.18
	11	1.50	1.23	0.73	1.14	1.05	0.70	1.44	1.25	0.80	1.81	1.64	1.12	2.39	2.13	1.34
	12	1.61	1.27	0.70	1.22	1.14	0.72	1.59	1.39	0.82	2.02	1.75	1.15	2.58	2.27	1.22
	13	1.29	0.99	0.64	1.15	0.99	0.71	1.49	1.22	0.82	1.79	1.48	1.17	2.42	1.87	1.26
	14	1.10	0.81	0.48	0.89	0.77	0.50	1.24	0.98	0.60	1.49	1.38	0.90	2.15	1.68	1.05
	15	0.66	0.56	0.28	0.53	0.46	0.28	0.82	0.67	0.39	1.15	1.09	0.66	1.77	1.47	0.77
16	0.20	0.16	0.09	0.13	0.09	0.08	0.32	0.23	0.16	0.56	0.44	0.35	1.18	0.90	0.50	
17	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.04	0.02	0.02	0.16	0.14	0.10	0.56	0.44	0.19	
18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.08	0.06	0.02	
風速 m/s	3	1.20	1.85	2.19	1.26	1.84	1.81	1.68	1.90	1.82	0.78	1.29	1.88	1.43	1.45	2.42
	6	1.12	1.81	2.20	0.99	1.91	1.58	1.64	1.64	1.58	1.70	1.54	1.87	0.97	1.86	2.30
	9	1.60	2.23	2.47	1.41	1.78	1.94	1.56	1.85	2.21	1.64	1.99	2.12	2.00	2.74	2.91
	12	1.91	2.86	2.68	1.74	2.47	2.67	2.32	2.42	2.45	1.97	2.73	2.67	3.01	3.06	3.37
	15	2.43	3.16	2.68	2.10	2.38	2.76	2.06	2.23	2.27	2.02	2.93	2.58	3.16	3.19	3.00
	18	1.13	1.84	2.16	1.01	1.83	2.13	1.26	1.56	2.09	1.07	1.80	2.37	2.04	2.28	2.70
	21	1.46	1.81	2.18	1.22	1.99	1.73	1.73	1.38	1.92	1.03	1.39	2.09	1.09	1.65	2.52
24	1.24	1.77	1.99	2.26	1.74	1.73	1.64	1.70	2.13	0.99	1.44	1.95	1.23	1.76	2.31	
雲量	3	0.10	0.50	1.00	0.10	0.48	0.99	0.10	0.55	0.99	0.10	0.53	0.99	0.10	0.50	0.99
	6	0.10	0.49	0.99	0.10	0.49	0.99	0.10	0.47	0.99	0.10	0.44	0.99	0.10	0.52	0.98
	9	0.10	0.55	0.99	0.10	0.47	0.99	0.10	0.47	0.98	0.10	0.53	0.99	0.10	0.42	0.99
	12	0.10	0.54	0.98	0.10	0.54	0.99	0.10	0.52	0.99	0.10	0.58	0.99	0.10	0.53	0.99
	15	0.10	0.54	0.99	0.10	0.53	0.99	0.10	0.56	0.99	0.10	0.56	0.99	0.10	0.57	1.00
	18	0.10	0.49	0.99	0.10	0.56	0.99	0.10	0.51	0.98	0.10	0.51	0.99	0.10	0.50	0.99
	21	0.10	0.52	0.98	0.10	0.47	0.99	0.10	0.50	0.99	0.10	0.58	0.98	0.10	0.55	0.99
24	0.10	0.53	0.99	0.08	0.49	0.99	0.10	0.50	0.99	0.10	0.52	0.99	0.10	0.52	0.99	
雲係数	3	0.96	0.85	0.91	0.96	0.84	0.92	0.96	0.87	0.90	0.69	0.77	0.87	0.96	0.72	0.88
	6	0.78	0.78	0.89	0.96	0.89	0.89	0.96	0.75	0.91	0.96	0.78	0.88	0.86	0.68	0.76
	9	0.80	0.77	0.81	0.94	0.81	0.79	0.76	0.78	0.83	0.96	0.65	0.70	0.96	0.78	0.77
	12	0.69	0.78	0.83	0.56	0.80	0.80	0.96	0.77	0.84	0.96	0.76	0.77	0.96	0.80	0.80
	15	0.94	0.84	0.77	0.89	0.78	0.85	0.56	0.85	0.85	0.81	0.87	0.79	0.69	0.75	0.83
	18	0.96	0.75	0.86	0.90	0.84	0.86	0.76	0.77	0.90	0.76	0.78	0.85	0.76	0.66	0.78
	21	0.96	0.75	0.87	0.96	0.83	0.86	0.96	0.84	0.92	0.96	0.86	0.83	0.96	0.72	0.85
24	0.76	0.83	0.91	0.96	0.89	0.91	0.74	0.82	0.93	0.96	0.76	0.88	0.96	0.79	0.85	
湿度 %	3	75.9	61.6	73.7	76.8	68.6	77.0	62.1	68.1	76.0	71.9	67.6	75.3	65.2	67.3	75.0
	9	57.5	56.1	68.2	64.6	60.3	58.1	62.5	61.7	83.0	55.4	60.8	74.0	49.7	51.6	67.8
	15	48.6	54.5	65.8	48.3	57.4	71.5	44.0	58.6	78.0	47.8	56.2	69.5	42.1	48.7	65.9
	21	66.1	65.9	69.5	83.0	69.6	72.0	65.7	68.1	83.0	64.8	68.2	71.2	58.2	60.8	72.5
気圧 hPa		1012			1014			1012			1013			1011		

付表-9.2 旭川の気象モデル (1987年~1991年の平均)

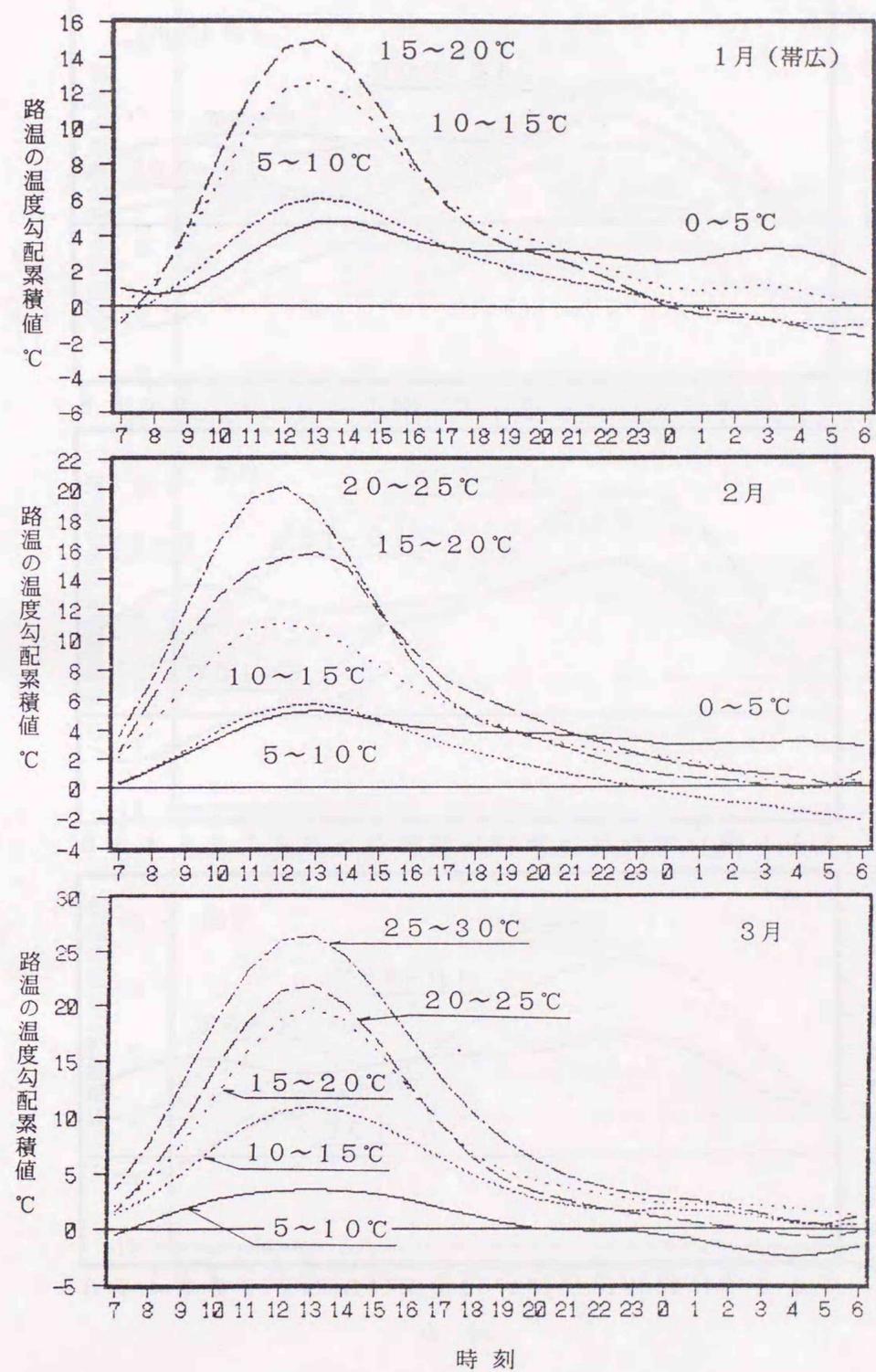
項目	時刻	11月			12月			1月			2月			3月		
		快晴	晴	曇り												
日射量 MJ/m ²	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.02
	7	0.05	0.03	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	0.03	0.28	0.31	0.17
	8	0.41	0.28	0.18	0.12	0.15	0.09	0.17	0.12	0.08	0.37	0.28	0.24	0.92	0.89	0.52
	9	0.88	0.71	0.37	0.53	0.49	0.31	0.65	0.49	0.34	0.94	0.79	0.58	1.55	1.49	0.93
	10	1.03	0.99	0.64	0.86	0.68	0.59	1.00	0.86	0.62	1.46	1.24	1.04	2.07	1.76	1.33
	11	1.34	1.27	0.79	1.16	0.99	0.68	1.41	1.17	0.81	1.82	1.57	1.30	2.44	2.08	1.57
	12	1.49	1.33	0.77	1.26	1.13	0.70	1.54	1.36	0.89	2.00	1.92	1.33	2.57	2.31	1.59
	13	1.32	0.96	0.69	1.16	0.85	0.74	1.49	1.14	0.85	1.94	1.50	1.35	2.56	1.95	1.56
	14	1.07	0.88	0.49	0.87	0.64	0.53	1.23	0.98	0.65	1.72	1.33	1.10	2.29	1.94	1.33
	15	0.69	0.56	0.30	0.48	0.43	0.29	0.79	0.64	0.41	1.28	1.07	0.71	1.88	1.64	1.02
16	0.15	0.14	0.08	0.09	0.08	0.07	0.30	0.21	0.17	0.65	0.52	0.41	1.12	1.01	0.61	
17	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.16	0.14	0.10	0.53	0.47	0.24	
18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.08	0.07	0.03	
風速 m/s	3	0.44	1.32	1.50	0.66	2.12	1.58	0.98	1.18	1.61	0.70	0.80	1.20	0.68	1.39	1.67
	6	0.46	1.34	1.59	1.25	1.24	1.67	0.91	1.43	1.44	0.60	0.80	1.20	0.68	1.23	1.61
	9	1.30	2.18	2.08	1.58	1.00	1.93	1.52	1.45	1.56	1.30	1.00	1.70	1.11	1.95	1.87
	12	1.10	3.08	2.46	0.90	2.20	2.39	1.48	1.98	2.03	1.20	1.90	2.20	2.13	2.68	2.58
	15	1.65	2.23	2.39	0.72	0.97	2.23	1.35	1.96	1.98	1.50	2.10	2.20	2.54	3.07	2.68
	18	1.08	1.83	2.03	0.92	0.73	2.00	1.11	1.26	1.75	1.00	1.50	2.00	1.96	1.99	2.22
	21	1.09	1.24	1.89	0.55	0.58	1.74	1.20	1.41	1.84	1.10	1.00	1.60	1.30	1.30	2.06
	24	1.07	1.42	1.54	0.98	1.11	1.79	0.70	1.34	1.67	0.80	1.40	1.50	0.81	1.40	1.75
雲量	3	0.10	0.47	0.99	0.10	0.49	0.99	0.10	0.48	0.99	0.10	0.62	0.99	0.10	0.60	0.99
	6	0.10	0.47	0.99	0.10	0.45	1.00	0.10	0.50	1.00	0.10	0.52	0.99	0.10	0.46	0.99
	9	0.00	0.49	0.99	0.10	0.57	0.99	0.10	0.52	0.99	0.10	0.58	0.99	0.10	0.51	0.99
	12	0.10	0.53	0.98	0.10	0.54	0.99	0.10	0.52	0.99	0.10	0.50	0.98	0.10	0.60	0.98
	15	0.10	0.51	0.99	0.10	0.59	0.99	0.10	0.66	0.99	0.10	0.51	0.99	0.10	0.55	0.99
	18	0.10	0.50	0.99	0.10	0.53	0.98	0.10	0.53	0.99	0.14	0.59	0.98	0.10	0.40	0.99
	21	0.10	0.53	1.00	0.00	0.56	0.98	0.10	0.54	0.99	0.10	0.50	0.99	0.10	0.45	0.99
	24	0.10	0.44	0.99	0.10	0.54	0.99	0.10	0.52	1.00	0.10	0.38	0.99	0.10	0.57	0.99
雲係数	3	0.56	0.83	0.90	0.67	0.88	0.93	0.96	0.77	0.92	0.96	0.69	0.89	0.59	0.77	0.82
	6	0.96	0.88	0.89	0.89	0.83	0.92	0.91	0.84	0.87	0.93	0.87	0.88	0.44	0.64	0.84
	9	0.00	0.85	0.85	0.96	0.77	0.86	0.93	0.83	0.82	0.96	0.69	0.76	0.78	0.73	0.73
	12	0.77	0.80	0.85	0.96	0.76	0.86	0.39	0.79	0.85	0.96	0.63	0.70	0.79	0.74	0.71
	15	0.16	0.79	0.84	0.66	0.72	0.85	0.36	0.82	0.79	0.78	0.76	0.70	0.96	0.78	0.73
	18	0.86	0.76	0.86	0.59	0.60	0.89	0.96	0.85	0.89	0.56	0.80	0.81	0.85	0.79	0.75
	21	0.73	0.80	0.83	0.79	0.89	0.91	0.96	0.77	0.86	0.85	0.74	0.84	0.92	0.79	0.80
	24	0.96	0.79	0.88	0.81	0.76	0.94	0.96	0.74	0.92	0.96	0.75	0.93	0.81	0.74	0.83
湿度%	3	91.1	84.9	84.3	88.5	79.7	85.2	88.0	84.0	85.0	65.2	87.7	85.8	85.4	80.3	82.8
	9	75.8	75.2	81.9	78.2	84.5	82.8	80.3	82.4	85.4	54.3	83.7	83.8	67.5	67.0	75.0
	15	57.0	60.5	74.8	63.4	70.0	77.9	57.9	67.8	78.1	41.0	62.7	70.7	38.9	51.5	64.2
	21	80.8	82.4	81.4	83.5	83.1	83.1	79.8	84.0	84.8	50.1	82.8	82.5	70.1	72.8	79.1
気圧 hPa	1001			999			1000			1001			1000			

付表-9.3 帯広の気象モデル (1987年~1992年の平均)

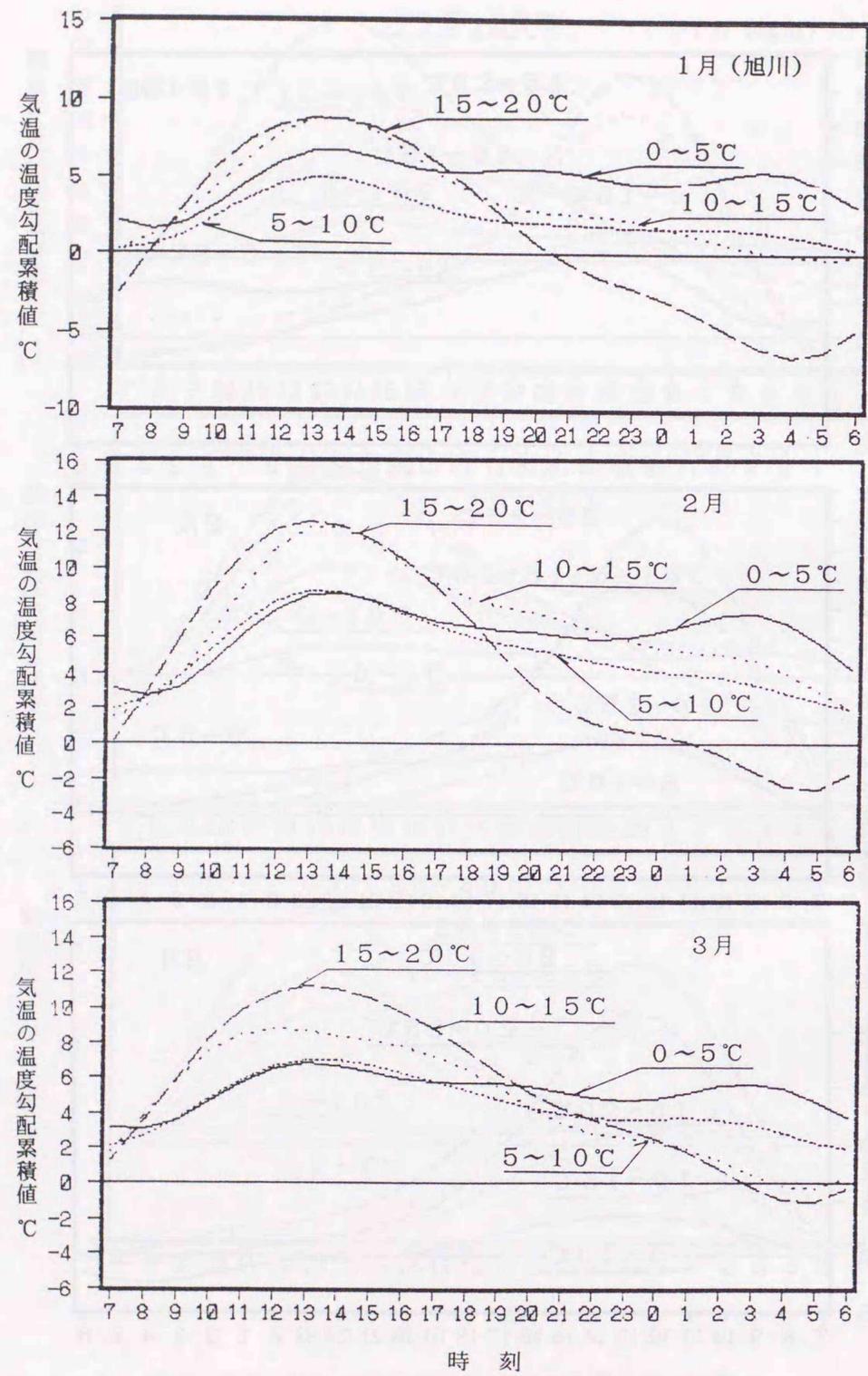
項目	時刻	11月			12月			1月			2月			3月		
		快晴	晴	曇り												
日射量 MJ/m ²	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	7	0.07	0.05	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.04	0.36	0.32	0.17
	8	0.47	0.38	0.16	0.22	0.19	0.08	0.22	0.18	0.11	0.45	0.42	0.25	0.98	0.86	0.49
	9	0.97	0.85	0.37	0.64	0.59	0.30	0.68	0.60	0.40	1.00	0.95	0.60	1.61	1.49	0.85
	10	1.36	1.26	0.53	1.04	0.98	0.52	1.14	1.02	0.67	1.51	1.46	0.95	2.10	2.01	1.08
	11	1.61	1.40	0.70	1.27	1.19	0.62	1.47	1.35	0.86	1.84	1.73	1.16	2.42	2.25	1.31
	12	1.59	1.45	0.70	1.36	1.22	0.69	1.58	1.44	0.95	1.98	1.84	1.32	2.56	2.31	1.42
	13	1.44	1.30	0.68	1.25	1.11	0.63	1.49	1.31	0.84	1.91	1.81	1.22	2.49	2.23	1.37
	14	1.13	0.95	0.51	0.92	0.83	0.44	1.21	1.11	0.71	1.59	1.60	1.00	2.18	1.93	1.12
	15	0.65	0.56	0.30	0.52	0.47	0.26	0.79	0.72	0.44	1.15	1.15	0.76	1.70	1.62	0.87
16	0.19	0.16	0.08	0.12	0.10	0.07	0.30	0.26	0.16	0.62	0.57	0.40	1.07	1.02	0.51	
17	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.02	0.02	0.14	0.14	0.09	0.43	0.40	0.20	
18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.03	
風速 m/s	3	2.10	1.45	1.17	1.99	1.57	1.18	1.35	1.53	1.20	1.43	1.29	1.18	1.79	2.25	1.32
	6	2.27	1.95	1.17	2.27	1.80	0.92	1.64	1.45	0.95	1.34	1.20	1.18	1.92	1.62	1.32
	9	3.57	2.97	1.22	2.24	2.39	1.36	2.27	1.32	1.12	1.71	1.46	1.03	3.08	2.01	1.60
	12	4.41	3.95	1.61	3.32	2.68	2.28	2.89	2.81	1.20	3.01	2.34	1.38	4.88	3.60	1.99
	15	3.89	3.89	1.57	3.44	3.02	2.14	3.52	3.01	1.67	3.21	3.73	1.90	5.67	3.92	2.47
	18	2.62	2.19	1.52	2.26	2.27	1.79	2.06	2.17	1.39	2.37	2.45	1.44	3.58	3.05	2.05
	21	2.10	2.41	1.46	2.43	2.17	1.61	1.65	2.25	1.33	1.92	2.15	1.26	2.64	2.07	1.58
	24	1.83	1.79	1.08	2.07	1.81	1.27	1.58	1.71	1.26	1.57	1.59	1.22	2.13	1.84	1.40
雲量	3	2.10	1.45	1.17	1.99	1.57	1.18	1.35	1.53	1.20	1.43	1.29	1.18	1.79	2.25	1.32
	6	2.27	1.95	1.17	2.27	1.80	0.92	1.64	1.45	0.95	1.34	1.20	1.18	1.92	1.62	1.32
	9	3.57	2.97	1.22	2.24	2.39	1.36	2.27	1.32	1.12	1.71	1.46	1.03	3.08	2.01	1.60
	12	4.41	3.95	1.61	3.32	2.68	2.28	2.89	2.81	1.20	3.01	2.34	1.38	4.88	3.60	1.99
	15	3.89	3.89	1.57	3.44	3.02	2.14	3.52	3.01	1.67	3.21	3.73	1.90	5.67	3.92	2.47
	18	2.62	2.19	1.52	2.26	2.27	1.79	2.06	2.17	1.39	2.37	2.45	1.44	3.58	3.05	2.05
	21	2.10	2.41	1.46	2.43	2.17	1.61	1.65	2.25	1.33	1.92	2.15	1.26	2.64	2.07	1.58
	24	1.83	1.79	1.08	2.07	1.81	1.27	1.58	1.71	1.26	1.57	1.59	1.22	2.13	1.84	1.40
雲係数	3	0.16	0.77	0.87	0.14	0.82	0.86	0.08	0.70	0.84	0.10	0.65	0.76	0.05	0.70	0.79
	6	0.35	0.77	0.85	0.26	0.75	0.84	0.15	0.61	0.77	0.16	0.54	0.74	0.10	0.61	0.75
	9	0.33	0.74	0.81	0.25	0.75	0.76	0.18	0.63	0.63	0.09	0.47	0.64	0.18	0.55	0.66
	12	0.50	0.72	0.79	0.32	0.74	0.76	0.27	0.64	0.67	0.30	0.56	0.64	0.21	0.59	0.70
	15	0.29	0.80	0.72	0.26											



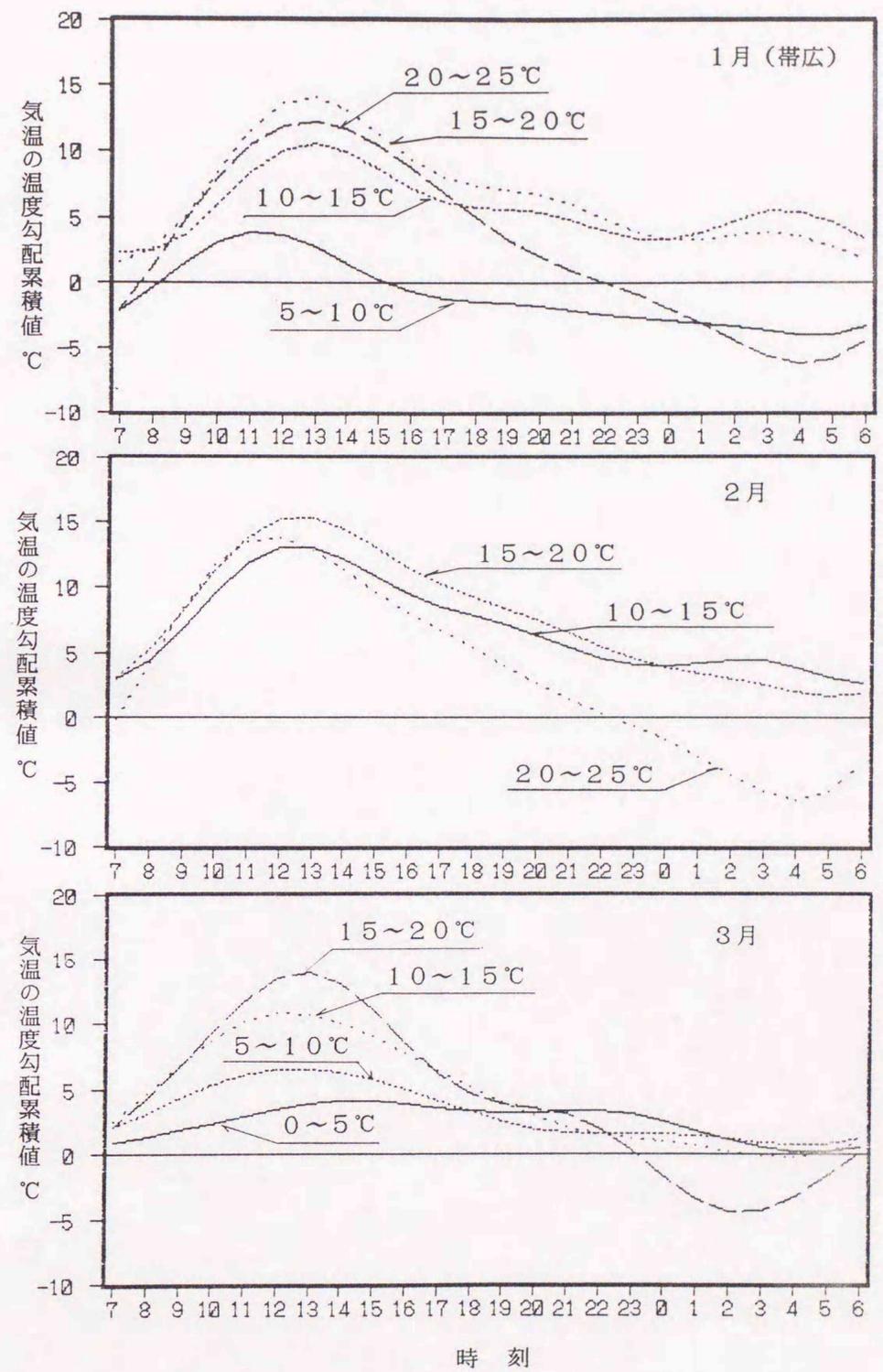
付図-9.1 旭川の路温日較差による予測モデル曲線



付図-9.2 帯広の路温日較差による予測モデル曲線



付図-9.3 旭川の気温予測モデル曲線



付図-9.4 帯広の気温予測モデル曲線

