

学位論文題名

路面凍結の検知と予測に関する研究

学位論文内容の要旨

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について具体的な方策が求められている。最近、問題となっている”ツルツル路面”の発生は、スリップ事故の多発や交通容量の低下による交通渋滞を招き、路面管理の重要性を道路の利用者・管理者に認識させた一例といえるであろう。また、社会・経済活動に係わる夏期交通需要と冬期交通需要との差が縮まり、冬期交通においても夏期交通と同様の量的・質的管理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、氷結路面対策としての路面管理(Ice Control)を含む雪氷管理(Snow and Ice Control)は社会的要請となっており、極めて重要な検討課題である。

諸外国では、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)が定着しているが、その一方で、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。しかし、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、雪氷管理の効率化と散布量の最適化を図るために、路面温度地図作成(Thermal Mapping)や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、管理技術者の教育等に積極的に取り組んでいる。

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、狭隘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。一部で採用されている路面管理もスポット管理的なものが多く、一路線全体で見ると気象条件、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やすい。このように、欧米における管理方法とその路面状態はわが国と異なり、雪氷管理の方策を検討する場合には、わが国特有の諸条件を考慮する必要があると考えられる。

本研究では、第1章において、社会的要請となっている雪氷管理の必要性和研究の目的・意義を明らかにした。

第2章において、欧米の雪氷管理に対する基本的な考え方と管理方法、塩害の問題とその対策のための研究・技術開発状況等について調べた。次に、わが国の現状について分析し、本研究の位置づけを行った。特に、Thermal Mappingに代表されるような路面凍結の検知と予測手法をふまえ、3章以下、次のような取り組み方により、本論分をまとめた。

第3章では、現場観測と室内実験により、道路雪氷の分類と密度、圧密過程等の工学的特性について調べた。これは、路面状態に影響を与える道路雪氷の変成過程と圧雪路面の形成過程について検討を行ったもので、同時に、雪氷路面の鏡面化、いわゆる”ツルツル路面”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を算出すると同時に、道路横断・深さ方向による路温の違いについて調べ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選択基準となる路温の日較差について、その算出根拠となる日最低の路温と気温との相関性を調べ、両者に高い相関があることを示した。

第7章では、雪氷の誘電特性を利用した誘電式路面凍結検知器(DPF)を開発し、従来の検知器では困難であった雪・氷・水の判別ができることを示した。ここでは、測定原理、新たに定義した路面誘電率、周波数による雪氷の誘電特性及び室内実験によるDPFの検知性能等についてまとめた。

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、現場への適用性を明らかにした。さらに、検知精度の向上を図るため、ハードとソフトとの両面から検討を加えた。

第9章では、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の予測手法の提案を行い、予測モデルの検証結果を示した。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をするもの、道路周辺の気象・地温観測データを用いたb)熱収支解析や、c)熱伝導解析による路温予知、d)路温のパターン解析、e)熱伝導方程式と気象統計値を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。これらの予測手法に共通していることは、簡略化したモデルでは予測精度に問題がおき、予測精度を向上させようとすると多くの説明変数を要して複雑なモデルになり、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。

これに対し、本研究で提案したフーリエ解析による予測手法は、Thermal Mapping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、上記の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、
 - ② 路温の変動パターンをフーリエ展開による予測モデル曲線で分類した、
 - ③ 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、
- 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。

また、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、
- 等を行ったことである。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予測入力値として、気象モデルを用い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。

以上のように、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、帯広の各観測現場における実測値と予測値から算出した的中率で検証した結果、両者とも良好な結果が得られ、現場への適用性を備えていることを確認した。更に、今後の研究課題として、Thermal Mapping、道路気象情報、DPFによる路面情報の系統化と提案した2つの予測モデルの合成等により、路面凍結の検知・予測手法の雪氷管理システムへの導入を行うための研究の展開についてまとめた。

10章では、本研究で得られた結論について取りまとめた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 加 来 照 俊
副 査 教 授 佐 伯 浩
副 査 教 授 森 吉 昭 博
副 査 教 授 三 田 地 利 之
副 査 教 授 前 野 紀 一（地球環境科学研究科）

学 位 論 文 題 名

路面凍結の検知と予測に関する研究

本論文は、路面凍結の検知と予測手法の提案を行い、道路雪氷管理の効率化とシステム化に役立てようとするものである。

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について具体的な方策が求められている。

しかし、近年、冬期道路交通において

- ・雪氷路面の鏡面化いわゆる”ツルツル路面”の発生が、スリップ事故の多発や交通容量の低下による交通渋滞を招いている点、
 - ・冬期交通需要の増加により、冬期交通においても夏期交通と同様の量的・質的管理水準の維持が要求されるようになってきている点、
- 等の社会的要請に応える雪氷管理の調査・研究や技術開発は、必ずしも十分に行われておらず、未開拓の研究分野である。

従って、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）は、極めて重要な今日的検討課題であると言える。

本論文では、このような点に着目し、雪氷管理を効率的に実施するには、路面凍結の検知と予測は不可欠であると考え、道路雪氷や路面状態に関する基礎的研究から検知・予測手法の提案へと研究を展開し、論文をまとめている。

本論文は、5つの内容から構成されており、主要な成果を要約すると以下の通りである。

- ① 第1章と第2章では、上記したような雪氷管理の必要性から研究の目的・意義を明らかにし、雪氷管理の実態や研究に関する文献調査により、欧米とわが国の現状を分析し、研究の位置づけを行っている。特に、路面凍結の検知・予測には、路面状態と路温の把握、道路気象情報の収集、路温地図の作成(Thermal Mapping)等の重要性を指摘している。

② 第3章と第4章では、路面凍結の検知や予測の対象となる道路雪氷の工学的特性を調べるために室内・現場試験を行い、路面状態の実態把握のためには経時観測を行って、基礎的研究結果を体系的にまとめている。これらは多雪国としての気象条件や無雪氷路面の管理政策を採用しづらい点を考慮すると、わが国の実態に即した雪氷管理をきめ細かく検討する上で重要である。

③ 第5章と第6章では、路面の凍結・融解現象に係わる地温や路温の周期特性、分布について、フーリエ解析と熱伝導理論による理論値と観測データとの検証を行い、9章で提案している予測モデルの理論的妥当性を明らかにしている。また、路温の道路横断・深さ方向の変動を調べ、Thermal Mappingにおける路温計測位置や凍結検知用センサーの埋設位置等に対する具体的な提案を行っている。

④ 第7章と第8章では、誘電式路面凍結検知器(DPF)の開発と現場への適用性を検証し、路面凍結検知手法の提案を行っている。DPFは、雪氷の誘電特性に着目して、従来の検知器では困難であった雪、氷、水の判別を可能にし、融雪氷剤の効果発現状態の評価による散布の最適化も図ることができる検知器である。また、路面状態の判別アルゴリズムにも検討を加えその的中率を向上させており、リアルタイムでの路面状態の把握と凍結予測の路面情報を提供する上で有用であることを実証している。

⑤ 第9章では、以上の検討結果をふまえ、2つの路面凍結予測手法の提案を行い、雪氷管理の効率化をめざす視点から予測手法について検討を加えている。フーリエ解析モデルでは、従来のパターン解析モデルに路温の周期変動、日較差、位相遅れ及び日最低の気温と路温との関係等を予測モデルにとりこみ、予測的中率の向上を図る工夫がなされている。また、熱収支解析モデルでは、予測入力データに天気区分による気象モデルとDPFによる路面情報の適用を行い、簡便性と的中率の向上を図っている。更に、今後の研究課題として、Thermal Mapping手法やDPFによる路面情報の系統化と提案した2つの予測モデルの合成により、路面凍結・検知手法の雪氷管理システムへの導入に関する研究の展開方法を示した。

以上を要するに、本論文は合理的な路面凍結の検知・予測による雪氷管理の効率化のみならず、今後、雪氷管理システムの開発と導入に関する研究へと展開する上でも有益な知見を得ており、交通工学、道路工学及び雪氷工学に寄与するところが極めて大きい。よって、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。