

学位論文題名

土壤熱を利用した低温水循環型の融雪システムに関する研究

学位論文内容の要旨

積雪寒冷地において良好な都市機能を維持するためには、除・排雪や融雪装置による雪処理が必要不可欠である。中でも、利便性の高い道路融雪は住宅の玄関先や歩道および都心部交差点において普及しつつあり、特に近年ではタイヤのスタッドレス化に伴い坂道での施工が急増している。しかし、現状の融雪システムは過剰なエネルギーを消費している。融雪には、数百度の燃焼温度を有する、貴重な化石燃料あるいは電力を用いる必要はなく、雪は本来0℃でも融解することから、自然エネルギーや都市排熱等、低温の未利用エネルギーの活用を図ることが、地球環境問題を抱えた今日において、特に重要であると考えらる。

本論文は、普遍的に存在する土壤の保有熱を利用した、低温水循環型の融雪システムに関する研究である。まず、低温熱源によっても十分な路面放熱量が得られる浅層埋設管と鋼板製の2種類の低温水循環型路盤を試作し、融雪の可能性と有効性を実験によって明らかにした。土壤採熱装置には、必要設置面積が小さくてすみ垂直埋設管をとりあげ、線源理論による伝熱解析を行なって、単管および複数本管の寸法と採放熱量および管壁温度の関係を明らかにした。次いで、採熱井戸を掘削して土壤熱利用による融雪システムを作成し、融雪の可能性とその諸特性を実験によって検証した。実験システムは地中熱交換器、不凍液循環ポンプ、融雪路盤の3要素から構成され、不凍液を採熱井戸に循環させ地中温度レベル近くまで加温して融雪に用いる。運転に必要なエネルギーは、不凍液循環ポンプの動力のみである。また、冬期の採熱により、低温となった土壤を回復させるために、夏期において路盤で太陽熱を集熱し、地中熱交換器へ循環させる年間サイクル実験も行なった。最後に、融雪路盤と地中熱交換器の伝熱解析結果を用い、土壤熱利用融雪システムの融雪面積と地中熱交換器の埋設深さの関係を推定する方法を示した。さらに融雪シミュレーションを行い、融雪状況の日変動と残雪日数の出現割合を予測した。

本論文は9章より構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章は序論であり、積雪寒冷地における雪処理問題と、道路融雪の熱源として土壤熱を利用することの有効性について述べた。

第2章では、道路融雪と地中熱交換器の伝熱解析に関する従来の研究および実施例について概説し、本研究の目的および位置付けを述べた。

第3章では、低温熱源によっても融雪可能な低温水循環型の路盤構造を、理論および数値解析により検討した。まず、浅層にパイプを埋設する浅層埋設管路盤についての基礎的特性を、定常線源理論を用いて検討し、一般に用いられるパイプ口径13Aの場合では、埋設深さ(d)と埋設間隔(p)の比(d/p)が0.35~0.43の範囲にあれば、実用上路面の放熱むらが小さくなることを示した。また、複数のパイプ埋設層材料に検討を加え、数値解析により、コンクリートが優れていることを明らかにした。次に、表層に

熱伝導率の高い鋼板を用いた鋼板製路盤についての放熱特性を、数値解析により明らかにし、数10分の立上り時間内で放熱効率が80%以上に達することを示した。さらに、パイプ埋設層材料の熱伝導率およびパイプ直下の断熱層が放熱特性に及ぼす影響について明らかにした。

第4章では、第3章で示した2種類の路盤を用い、低温融雪の可能性に関する実験を行い、10℃、15℃の低温水を循環させた浅層埋設管路盤と鋼板製路盤の放熱および融雪特性を明らかにした。実験結果より、許容できる路面状態を考慮した融雪可能な限界温水温度は、浅層埋設管路盤の連続運転では約15℃、鋼板製路盤の連続運転では約10℃、ON・OFF運転では約15℃であることを示した。

第5章では、融雪路盤の積雪状態を考慮した解析モデルを作成して、1シーズンの融雪シミュレーションを行い、第3章で示した2種類の路盤に関する融雪限界温水温度と融雪状況の関係を、解析的に明らかにした。まず、第4章の実験を対象にシミュレーションを行い、期間全体のパイプ放熱量と融雪効率を相対誤差20%以下で再現し、路面状態をほぼ予測できることを示した。次に、12月～3月の気象変動を与えて、浅層埋設管路盤と鋼板製路盤に関する融雪限界温水温度を求めたところ、第4章の実験結果とはほぼ一致する結果を得ることができた。

第6章では、垂直埋設管の寸法および配置形態と採放熱量および管壁温度の関係を、線源理論から推定する方法を示した。実際の土壤中に存在する垂直埋設管を想定し、半無限固体中に存在する有限線源を用いた。まず、単管について、仮定の管壁位置における深さ方向の平均温度の推定方法を示し、さらに口径や埋設深さなどとの関係を明らかにした。また、平均温度を求める簡易手法として、管半径に補正係数を乗じる等価半径を用いた算定方法を示した。定常状態ではほぼ一定の補正係数を用いることが可能であり、またステップ入力では補正係数の近似式を与えた。複数本管については、隣接管の影響による管壁平均温度の変化率を表す相互干渉率を用い、必要な埋設間隔を示した。例えば、口径80A、深さ30mの垂直管を2～3本埋設した場合、埋設間隔は約4～6mでよいことがこの方法で予測される。

第7章では、第3章～第5章の路盤および第6章の垂直型地中熱交換器に関する研究結果を用いて、土壤熱を利用した融雪システムを作成し、1994～1995年度にわたり、融雪の可能性と実用性に関する年間サイクル実験を行い、その成果について述べた。地中熱交換器は深さ100mのダブルU字管で、路盤面積は26m²である。まず、1994年度冬期には、埋設層材料が3種類の鋼板製路盤を用い、降雪センサーと遅延タイマーの連動によるON・OFF運転を行った。土壤側では、単位埋設深さあたりの採熱量が13W/mで、路盤へ9～10℃の温水が供給可能であった。路盤側では、埋設層材料によって異なるが、パイプ放熱量が54～100W/m²であり、許容残雪面積率0.2以下が期間全体の約80%以上出現していた。次に、1995年度夏期には、年間サイクル運転を想定した太陽熱集熱実験を行った。土壤側では、単位埋設深さあたりの放熱量が22W/mであり、路盤側では、期間平均集熱温度18℃における集熱効率が0.36であった。最後に、1995年度冬期には、標準施工型でパイプ埋設層材料の熱伝導率を高めた高熱伝導路盤を新たに作成し、連続運転を行った。土壤側では、単位埋設深さあたりの採熱量が9.3W/mで、路盤へ約7℃の温水が供給可能であった。路盤側では、高熱伝導路盤のパイプ放熱量が51W/m²であり、許容残雪面積率0.2以下と許容積雪深2cm以下のいずれかが、期間全体の93%出現した。また、路面の凍結は期間の4.3%出現し、明け方に多く観察された。

第8章では、第3章の路盤および第6章の地中熱交換器に関する伝熱解析を組み合わせ、融雪面積に必要な地中熱交換器の埋設深さを推定する方法を示し、融雪状況の日変動と残雪日数の出現割合を、シミュレーションによって予測した。まず、線源

理論により、地中熱交換器の採熱率および管壁温度の日変動と期間平均値を求め、実験結果をほぼ再現できることを示した。次に、融雪面積と必要な地中熱交換器の埋設深さの関係を近似的に求める方法を提案し、札幌市において、1シーズンの降雪量を融解するためには、路盤構造や運転方法で異なるが、約 $3 \sim 5 \text{ m}^2$ 必要であることを示した。高熱伝導路盤 20 m^2 で口径100A、深さ100mの地中熱交換器の場合、シミュレーション結果により、残雪日数は降雪日の約20%以下、期間全体の約10%以下という結果を得、本システムの活用の可能性を示した。

第9章は総括であり、本研究で得られた結果を要約して述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 落 藤 澄

副 査 教 授 荒 谷 登

副 査 教 授 持 田 徹

副 査 教 授 工 藤 一 彦

学 位 論 文 題 名

土壌熱を利用した低温水循環型の融雪システムに関する研究

道路融雪は都心部の交差点や坂道において普及し、多くの化石燃料や電力を消費している。雪は0℃以上の低温熱源があれば融解することから、自然エネルギーや低温の未利用エネルギーを活用することが可能である。

本論文は、どこにでも存在する土壌の保有熱を利用した低温水循環型の融雪システムに関して研究したものである。研究は3つに大別される。低温融雪のための路盤構造に関する研究、土壌内の熱交換器(垂直管)に関する研究、および路盤と土壌内熱交換器を組み合わせた実験とシミュレーションに関する研究である。得られた成果は次の点に要約される。

- ① 路盤に関する研究については、浅層埋設管方式と鋼板方式が優れていることを示し、その構造と放熱特性を理論的に解析し、パイプ間隔と深さの関係および路盤の熱物性値の影響について明らかにするとともに、適正な路盤構造のあり方を示した。
- ② 2種類のフィールド実験を行い、許容し得る路面の残雪面積率を0.2以下とする限界温水温度は、路盤構造と運転方法によって異なるが、浅層埋設管路盤においては、連続運転の場合で約15℃、鋼板製路盤においては、連続運転の場合約10℃、オン・オフ運転の場合約15℃が低温の限界であることを示した。
- ③ 積雪状態を考慮した解析モデルを作成し、融雪と温度に関するシミュレーションを行った。融雪限界温度、融雪効率および路面の残雪状態は実験値とほぼ同じ結果が得られた。
- ④ 土壌内の熱交換器(垂直管)の研究については、採熱量と温度の関係を線源理論によって解析し、線源からの管壁の平均温度を等価半径を用いて補正する新しい方法を初めて導いた。また、複数管の相互の影響については、相互熱干渉率なる指標を用いることを提案し、複数管の間隔は一般に4～6m必要であることを明らかにした。
- ⑤ 路盤と地中熱交換器を組み合わせた研究については、2年間にわたるフィールド実験を行い、残雪面積率が0.2以下で積雪深が2cm以下となる出現割合が93%に達することを明らかにし、浅層埋設管と鋼板方式の両路盤ともに融雪が可能であることを示した。
- ⑥ 最後に、地中垂直管と路盤の容量を決める方法について論じ、地中垂直管の所要長さは、路盤面積あたり3～5m/m²であることを示した。また、土壌採熱と路盤融雪を組み合わせたシミュレーション結果によって、実験と同じく本システムの有効性を確認している。

これを要するに、著者は、土壌熱を利用した低温水循環型の融雪システムの構造と特性に関して、実験と理論の両面から明らかにするとともに新しい方法を提案し、融雪システムの設計に多くの有用な新知見を得たものであり、熱工学、雪工学の発展に寄与するところ大なるものがある。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。