

自然熱源による路面の
融雪・凍結抑制システムに関する研究

1999年

宮本重信

目次

第1章	路面の融雪・凍結抑制の現状、課題と研究開発の目的	1
1-1	路面融雪の現状と技術課題	1
1-2	路面凍結抑制の現状と技術課題	2
1-3	本研究開発の方向、視点、方法と課題	2
1-4	本論文の内容と構成	4
第2章	放熱管方式無散水融雪	5
2-1	はじめに	5
2-2	モデル式	5
2-3	雪と舗装表面の間の熱コンダクタンスの計測	6
2-4	実験による融雪モデル式の検証（地盤部）	8
2-5	実験による融雪モデル式の検証（橋梁部）	9
2-6	舗装の高熱伝導化	12
2-7	放熱管埋設舗装のプレキャスト化	12
2-8	放熱管の配置	13
2-9	放熱管の凍結時の破損・断熱材の使用など	15
2-10	低温度の水での融雪能力について	15
第3章	スプリンクラー散水による融雪の熱解析と実用化	18
3-1	はじめに	18
3-2	モデル式	18
3-3	実験装置と実験方法	20
3-4	実験結果と考察	20
3-5	融雪運転記録からのモデル式の検証	21
3-6	ノズル散水との比較	23
3-7	実用化と課題	24
第4章	歩道無散水と車道散水の組み合わせによる融雪	25
4-1	節水型の地下水利用システムの現状と課題	25
4-2	カスケードな（二度使い）地下水利用による節水型融雪	25
4-3	実施例	26
第5章	融雪装置を制御するセンサー	28
5-1	融雪装置を運転するセンサーの現状	28
5-2	フィードバック制御（積雪センサー）の提案と開発	28
5-3	積雪センサーの効果	29
5-4	積雪センサーと融雪装置の相互関係	31
5-5	実施例	31
第6章	基礎杭利用地熱融雪の概念・設計・施工・運転例	33
6-1	はじめに	33
6-2	本融雪システムの説明	33

6-3	開発の経緯と本論の構成	34
6-4	設計・施工・運転の事例	34
第7章	基礎杭利用地熱融雪の能力と数値シミュレーション	39
7-1	実験装置	39
7-2	実験結果と考察	41
7-3	モデル式	44
7-4	杭内水1巡までの融雪の実測と数値シミュレーション	45
7-5	杭内水7巡までの融雪の実測と数値シミュレーション	50
7-6	実用施設・1シーズン融雪での実測と数値シミュレーション	51
7-7	豪雪時の数値シミュレーション	55
7-8	杭の設置間隔が融雪に及ぼす影響	56
7-9	放熱管の種類、間隔などの融雪部条件が融雪能力に及ぼす影響	57
第8章	熱交換杭の温度変化にともなう変位と応力	59
8-1	モデル式	59
8-2	実測杭頭変位からの逆解析	60
8-3	豪雪時の応力と変位	61
8-4	第6章から第8章のまとめ	63
第9章	橋梁路面の凍結と熱収支	65
9-1	はじめに	65
9-2	実験と計測の方法	67
9-3	鋼床版橋下面での熱移動	67
9-4	下面を断熱した鋼床版橋の温度変化	67
9-5	閉断面リブと開断面リブの違い	69
9-6	R C床版橋での熱移動	70
9-7	まとめ	70
第10章	潜熱蓄熱材封入による凍結抑制ー鋼床版開断面リブ橋での実測ー	71
10-1	潜熱蓄熱材封入工法の原理	71
10-2	潜熱蓄熱材・舗装の特性	72
10-3	実験の方法	73
10-4	代表的な降雪日の効果	73
10-5	シーズン通じての降雪時の効果	75
10-6	代表的な結露凍結日の効果	77
10-7	シーズン通じての結露凍結時の効果	78
10-8	結露凍結時の滑り抵抗での効果測定	79
第11章	潜熱蓄熱材封入による凍結抑制ー鋼床版Uリブ橋での施工と実測ー	81
11-1	はじめに	81
11-2	施工方法	81
11-3	計測対象の構造	83
11-4	結露凍結時の代表的な温度変化と効果	85

1 1 -5	シーズン通じた結露凍結時の効果	85
1 1 -6	開断面リブとの比較	85
1 1 -7	まとめ	86
第 1 2 章	橋梁路面の凍結と潜熱蓄熱材によるその抑制の数値シミュレーション	88
1 2 -1	はじめに	88
1 2 -2	モデル式	88
1 2 -3	床版下面の熱伝達率	92
1 2 -4	潜熱蓄熱材の取り扱い	93
1 2 -5	実測による数値シミュレーションの検証	94
1 2 -6	第9章から第12章のまとめ	98
第 1 3 章	結論	100
参考文献		102
本研究に関する筆者の発表論文など		106
謝辞		109

第 1 章 路面の融雪・凍結抑制の現状、課題と研究開発の目的

1-1 路面融雪の現状と技術課題

1961年12月に長岡市で地下水を散水しての道路融雪が初めてなされた。その後、北陸・東北地方などに急激に普及し、現在でも整備されつつある。かなりの路面から雪が消えたが、一方で、降雪時に地下水位が一時的に急激に低下し、地盤の沈下が生じた¹⁾。

井戸水を生活用水としている福井県大野市では、地下水涵養量が減ったことと1970年代の市街地面積の10%におよぶ路面と屋根の融雪装置の普及によって、地下水位は低下した。1977年には地下水が真空ポンプでは揚水できない事態になった。そこで、水位低下の際には、飲水優先で融雪への使用を禁じる条例が作られた。そのことで、整備された多くの地下水利用の融雪は実質的に使用できなくなった。

大野市ではこのように融雪より水道優先となったが、多くの地域例えば福井県坂井郡六町では、1977年の水道法改正に伴う広域水道の国の補助事業による推進とも重なり、結果として、地下水は融雪に、水道水源はダム水にということになった²⁾。このことが、地下水に比べて、凝集沈殿による高価で夏には水温が23℃にもなるまずい水道になった¹⁾。福井県武生市や鯖江市などでも水道水源の地下水からダム水への移行が現在進められ、水道原価は3倍になるともいわれている。

地下水は、天然のダム（貯水）、天然の浄化装置、天然の蓄熱装置となりえる。したがって、その涵養地を保全し、無駄なく節水しながら、水道利用を優先して、その涵養量の範囲内で融雪などに利用されるべきものと思われる。

この水源問題の外に、散水融雪の普及は、福井市の旧市街地の合流式下水道の区域では、下水道処理量の増加と河川の汚染という問題を招いている。合流式下水道では、污水管を雨水管と兼用していることから、汚水量の3倍までの流入水は下水処理場に、3倍を越えた水量は河川へ直接放流される。この汚水と雨水の混合水の河川への放流は、降雨時は河川の水量が多いため希釈され問題が少ないとされている。しかし、降雪時は河川は増水していないので、河川の汚染は著しいことになる。

こうしたことから、合流式下水道区域内の駐車場などでの融雪用の地下水使用に対して、福井市は下水道使用料を徴収しはじめた。その料金は一冬で融雪面積1㎡当たり500円にも達し、ほとんどの駐車場で地下水利用の散水融雪は除雪に転換された。しかし、下水道使用料が減免された道路では散水融雪が普及拡大し、そのことが河川を汚染するに至っている。

以上の環境問題を背景に、地下水の熱源のみを融雪に利用する技術が開発され、山形市の市街地などで、この数年急激に普及しつつある。これは、地下水を道路に埋設した放熱管に流して融雪し、融雪後の冷えた水を別の井戸で地下に戻すシステムである。しかし、このシステムは、直接地下水帯水層に水に戻すことから、地下水の水質を汚染する可能性があるとして、福井市では禁じられている。

地下水散水融雪の普及で地盤沈下に至った新潟県長岡市では、融雪が夜間連続運転となることから、センサーによる運転を義務づける条例を制定し、節水化を図っている。ここでは、必要最低限の運転となるセンサー技術が待たれている。

また、地下水の散水が路面凍結となる北海道などでは、電気や化石エネルギーを熱源とする融雪が普及してきた。これらは、グローバルな環境の破壊やエネルギーの枯渇になる。また、

そのシステムが普及した札幌市では、その路面融雪の維持管理の財政負担が大きくなり、今後は、その融雪装置を更新せず、次第に除雪や融雪剤散布に切り替える方針を1998年に示した。

一方、太陽熱、地熱や風力などを利用しての道路融雪も開発されているが、そのほとんどが地下水利用や電気融雪の数倍の建設コストである。もし普及によるコストダウンも見込めない高価なシステムであるなら、環境保全とはいえ、国民負担の面から問題といえよう。

1-2 路面凍結抑制の現状と技術課題

粉塵問題から1992年にはスパイクタイヤが禁止され、そのことによって、つるつる路面が出現した。そこで、福井県などでは管理する道路での融雪（凝固点降下）剤の散布を従来の約2倍に増やして対処してきている。空気中の水分が結露しての路面凍結に対しては、散水融雪で散水すると、その散水された水が車で周囲に引きずられてスケートリンクになり、逆に事故を招く。こうしたことから、結露凍結しやすい橋梁などでは、融雪剤を頻繁に散布しなければならない。この融雪剤散布は、橋梁などの錆やアルカリ骨材反応などを助長している³⁾。

融雪剤の散布以外では、融雪剤を舗装の内部にまぶし、その浸みだして水の凝固点温度を下げる工法がある。夏の車両の通過で空隙が少なくなった舗装表面がスパイクタイヤの規制で削られなくなり、内部の融雪剤は舗装表面に浸み出れなくなり、この工法の効果が得られなくなったとされている⁴⁾。また、舗装表面に弾性体（ゴム）を押し込み、そのゴムが車の通過時にたわむことで、その上の氷膜や圧雪が破壊されるというゴムロール工法は、氷膜や圧雪が長く続き、大型交通の多い箇所では効果があるとされている。しかし、比較的暖かい北陸では効果が疑問視される。この二つの技術のルーツは気温が低く少雪の北欧とスイスであることから、日本で改良されてきたものの、比較的暖かい積雪地では無理があるように思われる。

1-3 本研究開発の方向、視点、方法と課題

こうした現状から、自然の熱源利用による実用的な融雪・凍結抑制システムの研究開発が課題となっている。また、既に使われている地下水利用の散水融雪についても、その節水化となる技術開発は、地域環境の保全とおいしくて安価な水道水源を残すために緊要となっている。

さて、こうした技術開発では、その開発の方向が重要で、融雪や凍結抑制の技術開発の方向を考えるに際しては、次の二つの視点が大切と考えた。

第1の視点は、0℃以下を対象とする融雪や凍結には、これよりわずかに高温な地温や太陽熱や海水などの熱でも可能であること。それにもかかわらず、この分野で高質熱源を使用することは、浪費であり、地球温暖化防止の点からも問題であるとの視点である。

高温の熱は環境の中に入り、環境の常温の熱となって雲散霧消する。熱は、温度の高い方から低い方に不可逆的に流れ、自分では決して戻らない（熱力学の第2法則）。100℃の1gの水は、50℃2gの水に容易にできるがその逆はできない。すなわち、エネルギーが同じであってもエネルギーの質（有用性）が違う。周囲の環境温度から外れる度合いの大きいものほど利用価値の高い高質のエネルギーである。また電気エネルギーは熱エネルギーに比べ高質である。燃焼で1000℃にも達する化石燃料などのエネルギーを数℃の低温でも十分雪を溶かすことに使うことは、エネルギーの大変なムダ使いとなる。こうした視点から、スイスの多くの州では、電気や化石エネルギーの高質エネルギーを暖房熱源に使うことすら抑制するため、地熱の使用を助成し、薦めている⁵⁾。日本においても、少なくとも融雪への高質エネルギーの使用は、

極めて限定した対象に限られるべきだと思われる。

もう一つの視点は、熱のエネルギーは、運動のエネルギーに比べて大きいことである。高木秀男は『科学思想としての物理学』の中でジュールの仕事に触れ「ここで、注目してほしいことは、熱と仕事の換算率 J の値が非常に大きいという点である。J の値が大きいということは、熱を仕事に変換すると非常に大きな仕事を得られるということである。例えば、お風呂の水を 1 度低くしてその熱を仕事に換えられたとすれば、そのお湯を東京タワーのてっぺんまで運びあげる仕事ができるのである。このことは、風呂の水を手でかき回して 1 度あげようとしたらどれほど大変かという、逆の場合を想像すれば理解しやすいであろう。」と述べている⁶⁾。したがって、熱を作るよりは他から熱を運ぶ仕事の方が、建設費用を除くと、多くの場合省資源になる。また、風力などの運動エネルギーを直接熱源に変換しての融雪もされているが、その融雪が容易でないことが推測される。ヒートポンプが実用的な訳も、熱と仕事の換算率 J の値が非常に大きいことによる。

このように考えると、融雪や凍結抑制での技術開発の方向は、自然の熱源の利用とすべきことは一層明らかとなる。特に、比較的暖かい積雪地では、自然熱源の温度が高く実用可能性も高いので、こうした努力がなされるべきである。そして、その技術開発の課題は、次の三つに分類される。

第 1 に、自然熱源は低温であることから、時間当たりの融雪能力が不足することが多い。したがって、低温でも融雪能力が得られるように融雪面で技術的な工夫が必要である。

第 2 に、自然熱の集熱や蓄えでの独自の工夫である。水などの熱媒体を使って熱を運ぶエネルギーは比較的小さくても、自然の熱を集めたり蓄えたりする装置の建設費が高価になる。地熱、海水、太陽などの自然の熱をどのようにして取りだし蓄えるかなど、集熱や蓄熱の技術の開発が第 2 の課題となる。

第 3 は、第 1 の融雪（凍結抑制）部と第 2 の集熱蓄熱部をつないだシステムをどのように運転制御するか、あるいは運転制御しないかである。熱量総体が限られたものであれば、一般には、ムダな運転をせずに必要最低限での運転となるようなセンサー利用での制御となる。熱源が低温で時間当たりの融雪能力が不足するなら、降雪となる前から運転する、あるいは降雪後にも運転時間を延長することでの対応も考えられる。一方、運転にはトラブルとメンテナンスを伴うことから、規模や目的や熱源などの条件によっては一切運転しないことも考えられる。目的や条件にあった運転方式の選択と関連する技術の開発が第 3 の課題である。

これらの課題に対して、自然熱源を使用することから気象、地盤、対象構造物などの条件によって多様な代替方法が考えられる。本研究では、この 3 課題のそれぞれについて幾つかのオリジナルな提案と実験を行い、更にそれらを組み合わせて、システムとして実用化を行った。

さて、本論文では、冬期の路面の問題として融雪と凍結抑制の二つを扱う。この二つはエネルギー量から見ると、融雪は一寒波に必要とされる熱量が非常に大きく、それに比べ結露凍結では、必要となる 1 回の総熱量は周期が 1 日と短く小さくて、時間当たりに必要な出力も融雪の福井県内では約 1/3～1/2 程度と小さい。したがって、融雪の方が自然熱源を使用する場合の対策としては困難が伴う。特に北陸地方など比較的温かい積雪地の融雪では、豪雪と少雪の変動が激しく、より困難となる。それに比べると、凍結抑制では、建設費を安価にできるなり、容易な制御で対応できることになる。

本研究開発では、システムのアイデアを多く考え、その各々について、時間当たりの能力、

その持続性とそのライフサイクルコストを概算した。その中で、能力とコストの両面から実用性の高いと思われるものについて、より本格的な研究開発を行ってきた。本論文では、その中で実用化されたものを紹介する。

また、本研究開発では、自然熱源での利用を前提にしたことから、その技術は気象条件に依存せざるを得ない。さらに、筆者が県の研究者であることから、その実験や実用化は比較的温暖な積雪地福井での実験という制約を受けた。しかし、この比較的温暖な積雪域という条件は、自然熱源での融雪や凍結抑制には非常に有利で、この地で実用化し普及することがコスト縮減になり、より厳しい条件への適応が図られる。そして、気象条件の制約については、気象データを読み込んだ数値シミュレーションで検討できるようにした。

本論文の目的の一つは、融雪や凍結抑制には、再生可能となる自然の低温熱源であっても、システム全体として工夫しその適用箇所が適切なら、電気などの高質な熱源利用のシステムよりトータルに安価になることを示すことにある。そのことを通じて、その個々の融雪システムの実用的な可能性にとどまらず、様々な可能性とその開発を考える基礎になることを願う。

1-4 本論文の内容と構成

まず、次章の第2章で、放熱管方式での無散水融雪の融雪能力算定のモデル式とその実験による検証を扱う。第3章では、スプリンクラーを使用した散水融雪での融雪能力算定のモデル式とその実験による検証を扱う。第4章では、第2章の歩道の放熱管方式無散水融雪と第3章のスプリンクラー散水融雪を組み合わせた地下水二度使用のシステムについて、その実施例などを示す。第5章では、融雪装置を制御するセンサーの現状と問題を示し、そこから積雪センサー（フィードバック系）の提案とその試作による節水効果の実例を示す。以上第2章から第5章は、融雪部での技術と熱解析であると同時に、現在すでに普及した地下水利用の融雪での改良と地下水使用量の節水化に関する研究でもある。

第6章から第8章は熱源部の開発としての地熱の集熱を扱う。地熱の集熱に基礎杭を兼用することで従来の地熱利用融雪システムの建設費を約1/3～1/4に削減した融雪システムの設計・施工・運転の実施例をまず第6章で扱う。その融雪の数値シミュレーションを第7章で、融雪に伴って杭に生じる応力・変位などについて第8章で扱う。

第9章では、道路管理の上で特別に凍結しやすく雪が積もりやすいことから問題となっている鋼床版橋を取り上げ、その凍結と熱収支とりわけ橋床版下面の熱移動について、実測した結果について述べる。ついで、第10章で潜熱蓄熱材をバブルリブの鋼床版橋上に封入することで、太陽熱を蓄えての凍結抑制の実験を述べる。その実験で効果が検証されたので、第11章で、Uリブ鋼床版橋について潜熱蓄熱材封入の実際規模の施工を実施し、その施工と実測による効果検証を行った。その効果は気象や橋の構造などに依存することから、第12章で、気象台の日原簿データから全天日射量、雲量とその種類、気温や風速などを取り込んだ数値シミュレーションによる効果予測について扱った。

第13章で以上のまとめを述べる。

第 2 章 放 熱 管 方 式 無 散 水 融 雪

2-1 はじめに

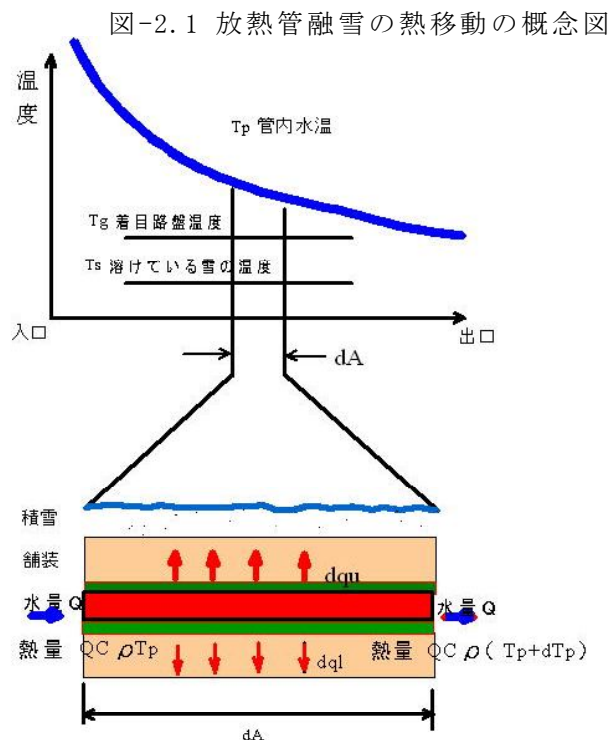
第 2 章では、舗装に埋設した放熱管に温度を変えた水を流した場合の融雪能力についての熱解析を行い、その実験による検証をまず行う。放熱管種や水温、流量、舗装材料を変えての熱解析のモデル式の実験による検証は、これまでなされてないので、地下水を利用した放熱管方式融雪として意義がある。また、そのモデル式は、低温水利用融雪で、実用的にどのような工夫をすれば融雪能力が得られるかを検討する上で有用である。さらに、具体的に、福井県内で産する珪石を骨材にした高熱伝導舗装や現場での施工性などを考えた放熱管組み込みのプレキャスト融雪平板などの効果を述べる。

このモデル式によって放熱管出口水温が求められるが、それは、第 4 章で述べる地下水を一旦歩道埋設の放熱管に流して融雪を行い、その使用後の放熱管出口水を車道に散水する地下水節水の融雪システムでも必要とされる。また、第 2 章で扱う放熱管方式融雪の技術がベースとなって、第 6 章の基礎杭を兼用利用した地熱利用融雪が可能となる。

2-2 モデル式

放熱管方式無散水融雪では、放熱管の種別、放熱管の舗装表面までの距離、舗装の熱伝導率、流量などの条件によって、融雪能力がどのように変化するかを知ることが必要となる。特に、時間当たりの融雪能力を一定以上に確保しながら、できる限り低温な熱を利用するには、そのことが大切である。これらを総括的に理解するにはモデル式による検討が必要となる。

放熱管の舗装表面までのかぶりが深いものでなければ、ある程度連続する降雪での融雪は定常条件で考えればよい⁷⁾。放熱管の入口から出口までの熱交換を図-2.1で考えると面積要素 dA



で舗装上の雪に流れる熱量 dq_u と舗装下の路盤に流れる熱量 dq_l の合計がその区間で失う熱量

($= -Q_o \cdot \rho \cdot C_p \cdot dT_p$)になる (式2-(1))。 dq_u については配管内流水から積雪までの、 dq_l については配管内流水から路盤までの熱抵抗から求められる。それを式2-(1)に代入し、その微分方程式を解くと、式2-(2)～2-(9)を得る。

なお、これまでの融雪の設計では、舗装表面の温度を1～2℃に設定するとされ、その範囲の何℃とするかは明らかにされてなかった^{8)、9)、10)}。そこで、筆者は融雪中の積雪と舗装表面との間に熱抵抗があるとして次のモデル式を考えた。この方法なら舗装表面温度を決めることなく融雪時の積雪温度を0℃として、流量・水温・放熱管の種別と設置位置・舗装体の熱伝導率などから融雪能力 q_{uo} などを式2-(2)～2-(9)で得ることができる。

$$dq_u + dq_l = -Q_o \cdot \rho \cdot C \cdot dT_p \quad 2-(1)$$

$$q_{uo} = Q_o \cdot \rho \cdot C \cdot f \cdot [T_{pi} - \{f \cdot T_s + (1-f) \cdot T_g\}] \cdot \{1 - \exp(-\frac{U_u}{Q_o \cdot \rho \cdot C \cdot f})\} + U_u \cdot (1-f) \cdot (T_g - T_s) \quad 2-(2)$$

$$T_{po} = [T_{pi} - \{f \cdot T_s + (1-f) \cdot T_g\}] \cdot \exp(-\frac{U_u}{Q_o \cdot \rho \cdot C \cdot f}) + \{f \cdot T_s + (1-f) \cdot T_g\} \quad 2-(3)$$

$$f = \frac{U_u}{U_u + U_l} \quad 2-(4)$$

$$U_u = \frac{1}{\frac{P_p}{\pi \cdot h \cdot Di} + \frac{P_p \cdot \log(D_o/D_i)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_p} + \frac{P_p}{\lambda_{cu} \cdot Su} + \frac{1}{Sn}} \quad 2-(5)$$

$$U_l = \frac{1}{\frac{P_p}{\pi \cdot h \cdot Di} + \frac{P_p \cdot \ln(D_o/D_i)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_p} + \frac{P_p}{\lambda_{cl} \cdot Sl}} \quad 2-(6)$$

$$Re = V_m \cdot Di / \nu \quad 2-(7)$$

$$\text{層流} (Re < 2,300) \text{ では } h = 4.36 \lambda_w / Di \quad 2-(8)$$

$$\text{乱流} (Re \geq 2,300) \text{ では } h = 0.0395 Re^{3/4} Pr^{1/3} \lambda_w / Di \quad 2-(9)$$

ここに、 q_{uo} :単位面積当り舗装上面への放熱量(融雪熱量) Q_o :単位面積当り流量 ρ :水の密度 C :水の比熱 T_{pi} :放熱管入口の水温 T_{po} :放熱管出口水温 T_g :着目する路盤温度 T_s :溶けている雪の温度(0℃) U_u :管内水から舗装面上の雪までの総括熱通過率 U_l :管内水から着目する路盤までの総括熱通過率 P_p :放熱管配管間隔 D_o :放熱管外径 Di :放熱管内径 λ_p :放熱管の熱伝導率 h :放熱管内の流水と放熱管の間の熱伝達率 λ_{cu} :放熱管から舗装表面までの舗装の熱伝導率 λ_{cl} :放熱管から着目路盤までの舗装の熱伝導率 S_u :放熱管から舗装表面までの二次元形状係数¹¹⁾ S_l :放熱管から着目路盤までの二次元形状係数 S_n :雪と舗装表面の間の熱コンダクタンス Re :流水のレイノルズ数 λ_w :流水の熱伝導率 Pr :流水のプラントル数である。

2-3 雪と舗装表面の間の熱コンダクタンスの計測

雪と舗装表面の間の熱コンダクタンスを求めるため図-2.2の実験装置で実験した。暖冬で降雪での実験を十分行えなかったことと実験の再現性を得るため、残雪のざらめ雪をコンクリート表面に載せて融雪した。定常状態になったと考えられる融雪開始から2時間以降についてデータを取り、コンクリート内部の温度分布は直線的であるとしてコンクリート上面側と下面側

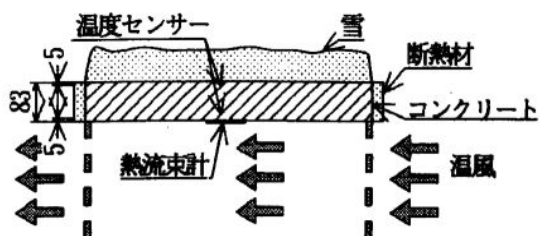


図-2.2 雪と舗装表面の間の熱コンダクタンスの計測装置

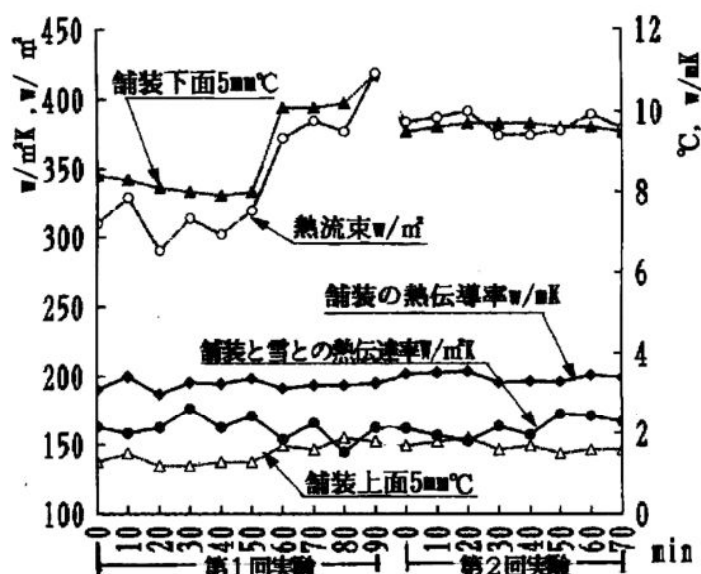
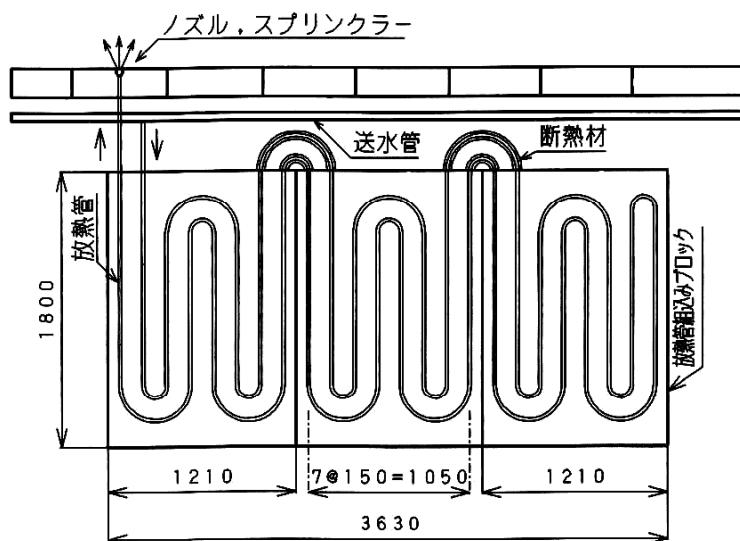
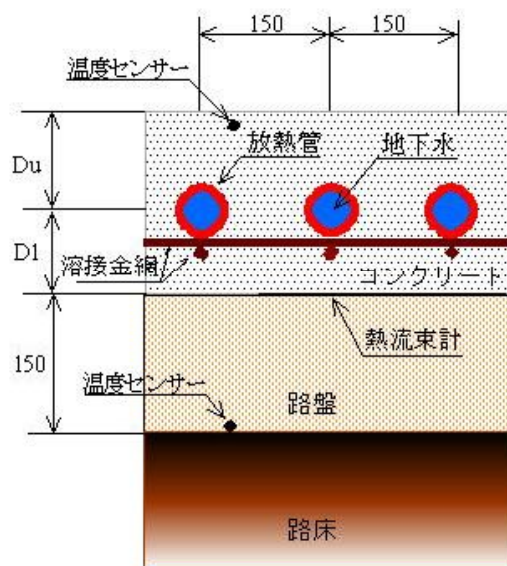


図-2.3 雪と舗装表面の間の熱コンダクタンスの計測結果



平面図



断面図

図-2.4 放熱管融雪構造図

表-2.1 放熱管融雪仕様一覧

設備 No	舗 装		放 熱 管				位 置	
	種別	熱伝導率 W/(mK)	種別	熱伝導率 W/(mK)	外径 mm	内径 mm	Du mm	Dl mm
①	プレキャスト珪石骨材コンクリート	3.26	銅管	442	15.9	14.3	40.0	43.0
②	現場打普通コンクリート	1.51	架橋ポリエチレン管	0.42	17.0	13.0	57.0	63.0
③	現場打普通コンクリート	1.51	コルゲートステンレス管	16.3	13.1	12.5	58.5	61.5
④	プレキャスト珪石骨材コンクリート	3.26	コルゲートステンレス管	16.3	13.1	12.5	38.0	45.0

注 コルゲート管は中間径を記載

の二点の実測温度からコンクリート表面温度を推定した。また、融雪中の雪を 0°C とし、コンクリート下面に張り付けて計測した熱流束は舗装と雪との間の熱流束に等しいことからコンクリートと雪との間の熱コンダクタンスを 熱流束 / (舗装表面温度 - 0°C) で、 $174\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ であると推定した。更にコンクリートの二点の温度と熱流束から、そのコンクリートの熱伝導率を求めた。その値は、ヒートプローブ法 (QTM 迅速熱伝導率計) で計測した値 $3.26\text{W}/(\text{mK})$ とほぼ一致し、計測の正確さが裏付けられた。図-2.3は、これらの実験を整理したものである。なお、降雪直後の新雪と舗装表面との熱コンダクタンスについては2-4の実験からの逆算で $290\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ と推定した。なおこの値は、翌年図-2.2で温風を温水に替えたほぼ同様な福原輝幸による降雪直後の新雪での実験でもほぼ近い $253.9\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ との結果で検証されている¹²⁾。

2-4 実験による融雪モデル式の検証 (地盤部)

図-2.4と表-2.1に示す設備などを用いて、放熱管の種類・舗装の種類・水温・水量を変えて融雪し、出口の水温を計測した。表-2.1の設備①を用いて、1989年1月27日に水温 16°C 流量 $9\text{cm}^3/(\text{m}^2\text{S})$ を流して、雪が 1cm 積もってから融雪を始め、4時間で降雪を含め 14cm の雪を溶かした経過を図-2.5に示す。図-2.5には、計測した舗装の熱伝導率、新雪と舗装との熱コンダクタンス $253.9\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ と前述のモデル式を用いて出口水温を計算し、その計算値を○で、その実測値を●で示した。融雪開始後20分で、出口水温はほぼ一定値になり、その計算値と実測値は一致し始める。そして雪が溶けて路面の約60%が露出した写真-2.2の状態までその一致は続いている。

このような降雪時の融雪実験を水量・水温を変えて5ケース実施した。さらに、残雪のざらめ雪を融雪路面に載せて、放熱管・舗装・水温・水量を変えて11ケースの実験を行った。その

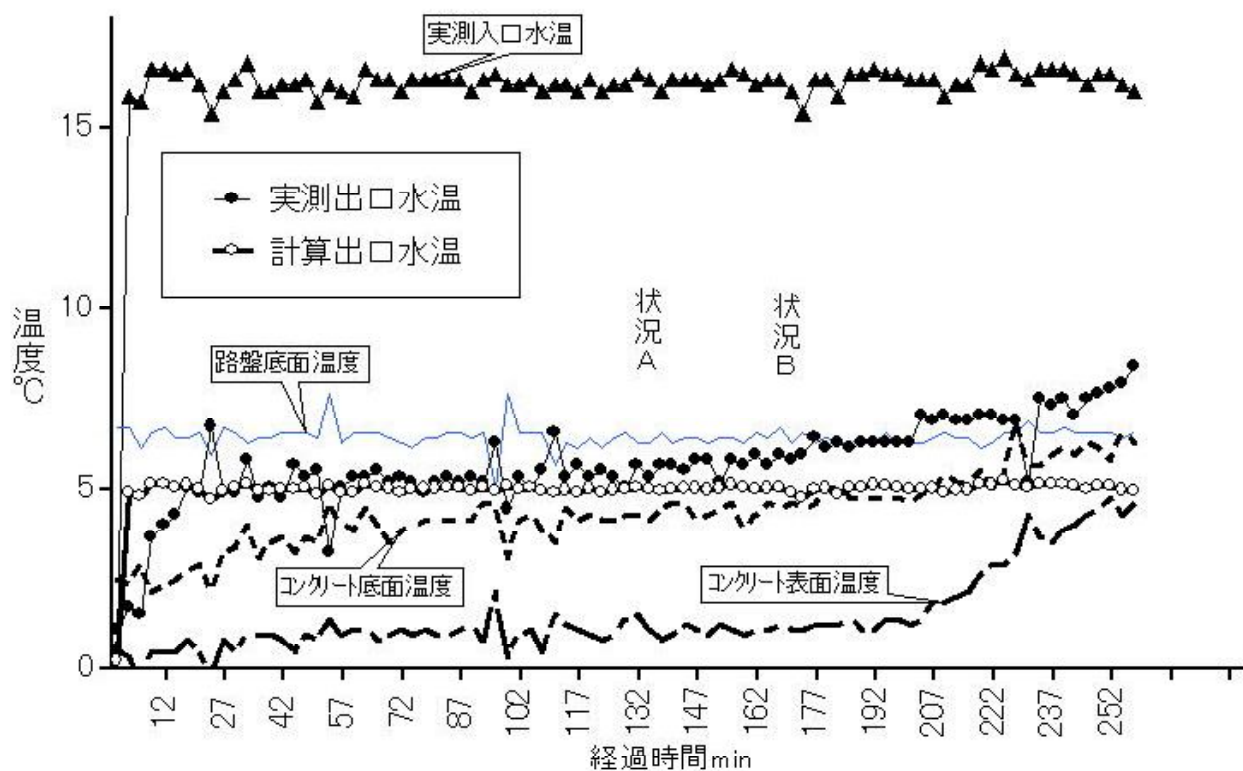


図-2.5 放熱管融雪の実験と計算例



写真-2.1 状況A

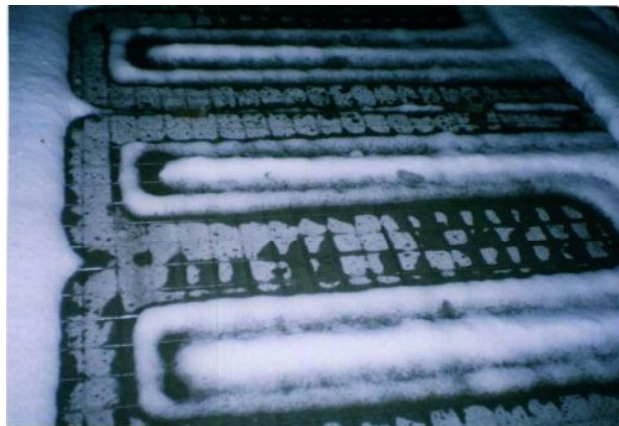


写真-2.2 状況B

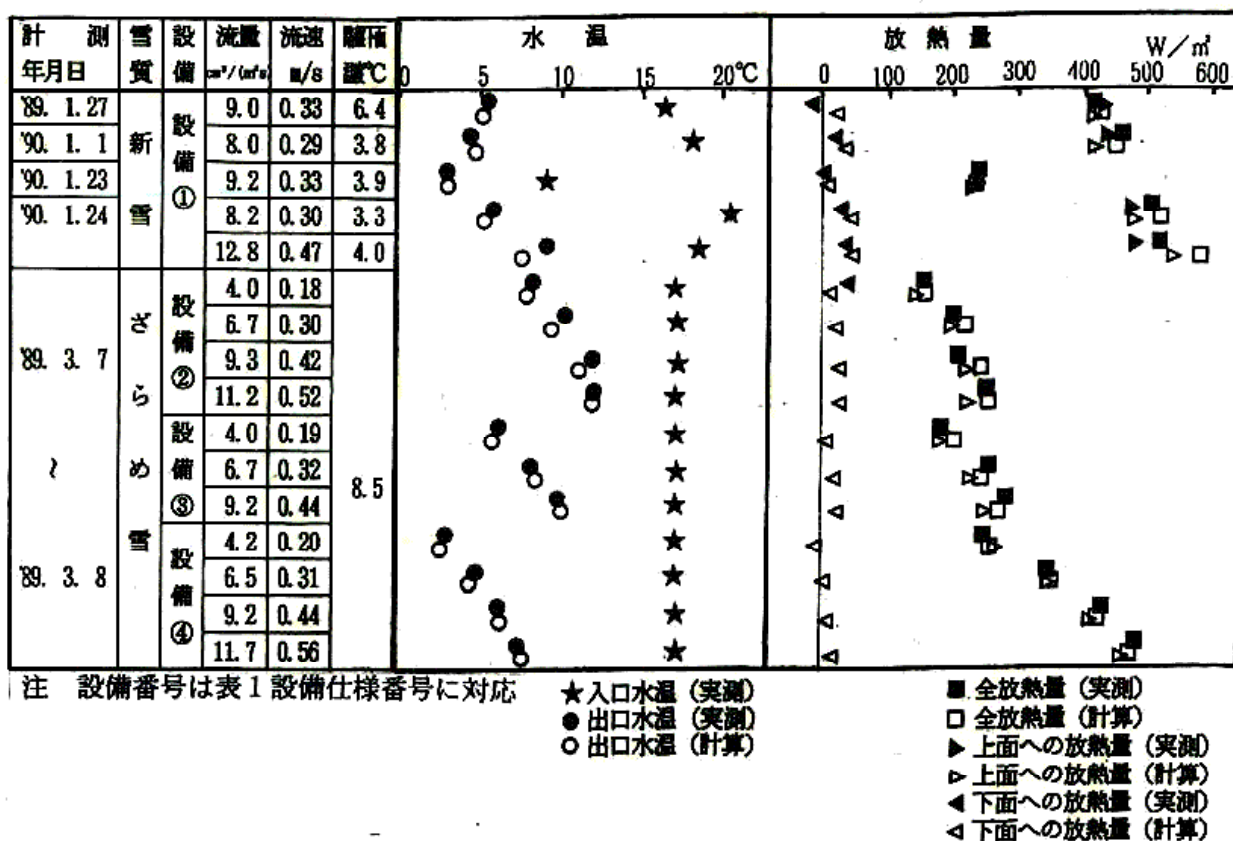


図-2.6 放熱管融雪の実験と計算の一覧

各々の実験結果を平均値で一覧表としたのが図-2.6である。条件を変えたこれらの計算値はいずれも実測値とよく一致し、モデル式や定数が適切であることが検証された。

なお、実際の設計に際して必要とされる路盤底面の温度は、融雪開始から終了までに図-2.5にみられるようにほとんど上昇していない。更に、この路盤底面温度は、上面放熱量に大きな影響を与えないので、福井では安全側に3～4℃を見込めば良いと考えられる。

2-5 実験による融雪モデル式の検証（橋梁部）

凍結や積雪が問題になることが多い橋梁については、管内水から着目する路盤温度までの総

括熱通過率 U_l を求める式2-(6)は、床版下の空気までとなることから式2-(10)となる。ただし、ここでは、簡便のため床版の下面の温度と地盤表面温度との温度差は小さいとして放射熱を無視した。

$$U_l = \frac{1}{\frac{P_p}{\pi \cdot h \cdot D_i} + \frac{P_p \cdot \ln(D_o/D_i)}{2 \pi \cdot \lambda_p} + \frac{P_p}{\lambda_{cl} \cdot S_l} + \frac{1}{h_a}} \quad 2-(10)$$

$$\begin{aligned} h_a &= 5.6 + 3.9 v_a \quad (v_a \leq 4.9 \text{ m/s}) \\ h_a &= 7.2 v_a^{0.78} \quad (v_a > 4.9 \text{ m/s}) \end{aligned} \quad 2-(11)$$

ここに、 h_a は床版下面と下面空気との熱伝達率で、ユルゲスの実験式¹³⁾ 2-(11)を用いた。実験では、降雪時、放射冷却時のいずれも風は弱く、更に床版下の空間が狭いことから v_a (床版下の風速) = 0 とみなした。

床版の厚さが薄いために凍結や積雪が最も問題となっている鋼床版橋の模型 (写真-2.3) を用いて、式2-(2)～2-(5)と式2-(10)の実験による検証を行った。

この実験装置は、潜熱蓄熱材を充填したタンクと鋼床版 (厚さ1.2cm) 上の舗装 (厚さ8cm) に埋設した放熱管 (鋼管15A, 15cm 間隔, かぶり4cm で設置) とを閉じた管路とし、管路内部に不凍液を満たしたものである。潜熱蓄熱材には、昼間循環ポンプを運転することで太陽熱が蓄熱材の液化として貯められている。融雪・凍結抑制時にポンプを運転すると、その潜熱蓄熱材の固化の進行で、ゆっくりと放熱管入口水温が下がり、結果として入口水温を徐々に変えたモデル式の検証となった。

実験では、まず降積雪のない放射冷却時の凍結での抑制条件での式の検証を行い、ついで、積雪時の実験を行った。放射冷却時の凍結では、式2-(5)の中で、積雪と舗装表面との熱抵抗 ($1/S_n$) はないとして、舗装表面温度と放熱管入口水温を実測値で与え、放熱管出口水温の実測値と計算値が一致するかを調べた。図-2.7の左側に、凍結時の2回の実験の際の条件と結果を示す。2回の実験とも、運転開始後は、出口水温の実測値は計算値より低い、次第に一致するようになる。運転開始後しばらく計算値より実測値が低温になるのは、冷えた床版を定常状態にするために熱が奪われることによると考えられる。

融雪実験では、その開始前に不凍液の量を増やしたので、動粘性係数は凍結実験とは異なっ

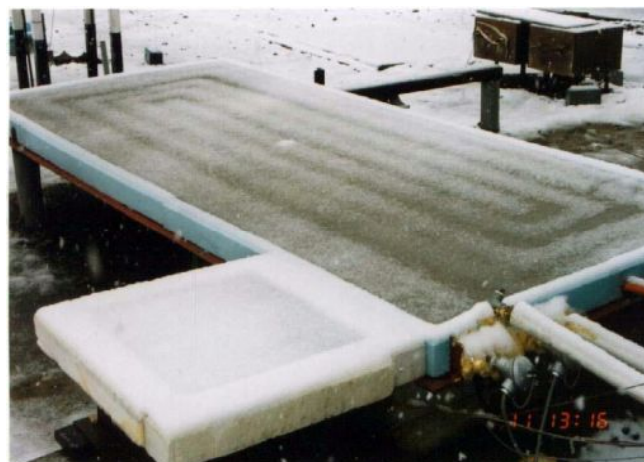


写真-2.3 鋼床版橋放熱管融雪の模型

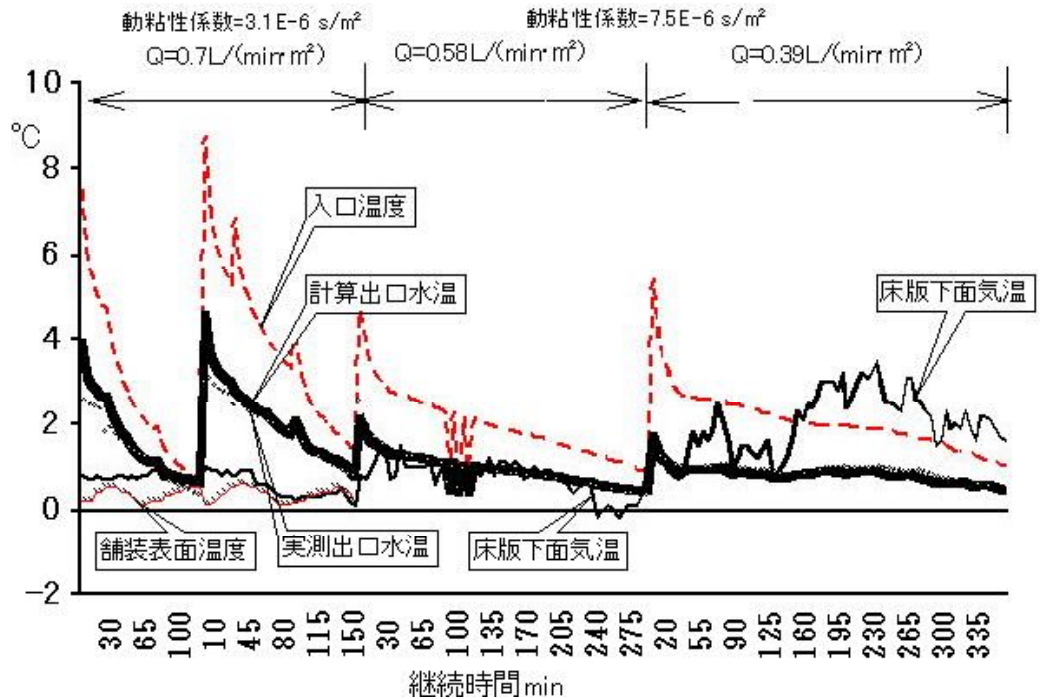


図-2.7 凍結抑制と融雪の実験値と計算値

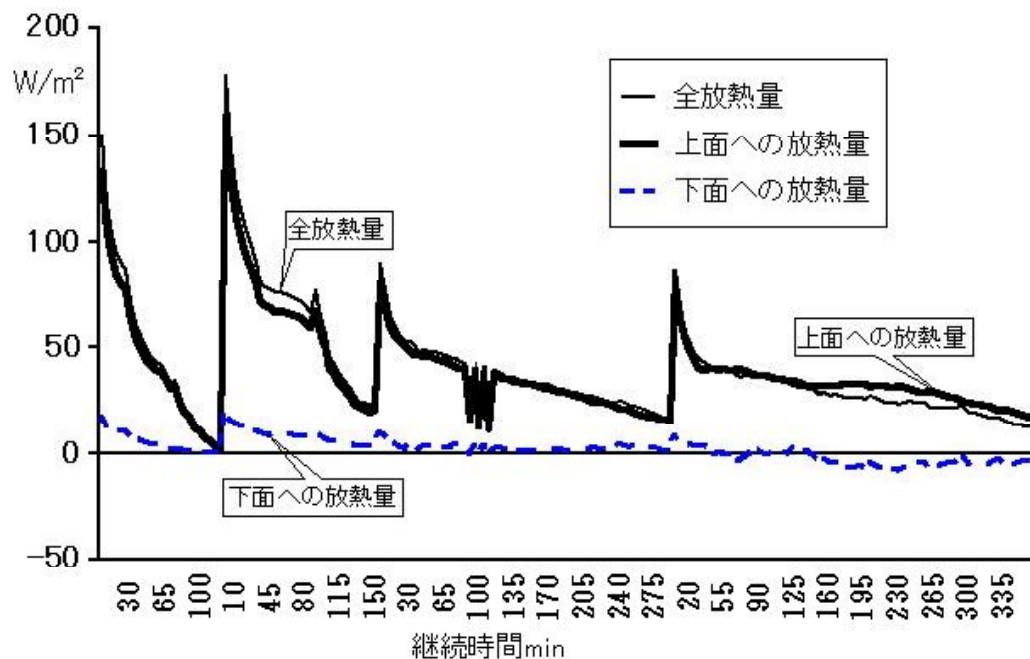


図-2.8 凍結抑制と融雪の熱流束値

た。融雪の実験であるので、積雪までの熱抵抗 ($1/S_n$) を考慮して計算値を求めた。図-2.7の右側に、水量を変えた2回の実験結果を示す。2回の実験とも、実測値は計算値にほぼ一致している。このように、凍結抑制と融雪の両方のケースで出口水温の実測値が計算値と一致することから、橋梁では下面の熱移動を式2-(10)で求めれば、放熱管方式の凍結抑制と融雪でのその能力の算定ができることが分かる。

図-2.8は、図-2.7での条件での床版の上面と下面へ流れる熱流束の計算結果を示したものである。図-2.7から、下面の気温がそれほど低くない福井での気象では、下面へ流れる熱流は少ないこと、したがって、橋梁での融雪だからと地盤部の融雪より下面への熱ロスを大きく見込む設計は適切でないことが分かる。また、図-2.8の最も右側の実験では床版下面気温が約2℃変化しても（図-2.7）、下面への熱流が元々少ないことから、上面への熱流束にはほとんど影響しないことが分かる。このように、下面の熱流が小さいのは、床版下面の熱伝達率 h_a が小さいからである。なお、この模型では床版の下面にリブを設けなかったので床版下面の対流でリブを考慮しなかったが、リブがある場合にはそれを熱フィンとして考慮することが必要となる。これについては、第12章を参考にされたい。

凍結抑制での設計では、舗装表面温度を0℃として、モデル式から上面への放熱熱流束を求め、それが放射冷却時の上面からの放熱熱流束（およそ80W/m²）以上であれば良い。融雪での設計でも同様に計算された上面への放熱熱流束が、設計条件の降雪を溶かす熱流束以上であれば良い。

2-6 舗装の高熱伝導化

珪石骨材と安山石骨材、現場打設コンクリート、アスファルト、プレキャストコンクリートなどの熱伝導率を計測し比較した。結果は、表-2.2のとおりで、福井県内で既に骨材として利用されている珪石を用いれば高熱伝導舗装が得られること、工場での製作は現場打設より高熱伝導となることなどが分かる。

他の骨材では、カンラン石、蛍石など結晶を有する石が高熱伝導であることが知られている。

鋼繊維補強コンクリートについては、鋼繊維を1～2vol.%混入すると20～45%熱伝導率が大きくなるとされている¹⁴⁾。珪石骨材のコンクリートでは、鋼繊維を1.25vol.%混入すると約20%熱伝導率を大きくできる¹⁵⁾。鋼繊維で放熱管のかぶりを薄くしても強度と耐久性や得られれば、この熱伝導率がやや高くなることも寄与して、大きな効果を得ることができる。なお、鋼繊維補強コンクリートを用いた車道部での放熱管と表面のかぶりの耐久性からの限界は明らかにされていないが、鋼繊維補強コンクリートを放熱管の保護舗装に用いた実施例や試験は少ない^{16), 17), 18)}。

2-7 放熱管の埋設舗装のプレキャスト化

放熱管方式の融雪歩道は高価で面的敷設となることから、ガス・水道などの工事で将来掘り返されても再利用できることが望ましい。そこで、内部に放熱管を表面にはタイルを組み込んだ広さ約2m²のコンクリート舗装体を工場で製造し、現地で据え付けた。工場では、タイルを下向きに敷き、その上に放熱管を並べ、珪石コンクリートを流し込んだ。工場では十分な振動が与えられるなどで、表-2.2に示すように、現場打設に比べ1.3倍の熱伝導率を得られた。

従来のプレキャストによらない施工では、放熱管の配管、コンクリートの打設と養生、雨を避けてモルタルでタイルを接着するという工程を要したが、プレキャスト化で現場作業は数分の1になった。この工期短縮は当該施工が都心部で実施されるため有意義であった。

タイルは、珪石骨材のコンクリートより熱伝導率が小さいので、厚さを10mmと薄いものを使った。プレキャストコンクリートと一体的に施工されたタイルは、駐車場への出入り口箇所

表-2.2 コンクリート・骨材などの熱伝導率測定結果

対 象	W/(mK)
安山岩を骨材とする現場打設コンクリート	1.51
珪石を骨材とする現場打設コンクリート	2.44
安山岩を骨材とする転圧コンクリート	1.98
珪石を骨材とする工場製作コンクリート	3.26
安山岩を骨材とする現場のアスファルト	1.8 ¹⁹⁾
珪石を骨材とする現場のアスファルト	2.8
安山岩を骨材とするモルタル（1:2配合）	1.51
珪石を骨材とするモルタル（1:2配合）	2.38
安山岩	2.09
珪石	6.05

注）計測は QTM 迅速熱伝導率計による。計測温度 20～30℃

対象材は 2 週間以上室内で保管したものを使用

でも、8 年経過したが剥がれたり割れたりしなかった。一方、同じタイルを現場でモルタルで張り付けたものでは、同じ駐車場への出入り口箇所で、2 年経過でタイルは割れて剥がれた。

放熱管を組み込んだプレキャストコンクリートに、厚さ 20mm のタイルを現場でモルタルで張り付ける（タイルのみを現場で張り付ける）場合は、放熱管のプレキャストコンクリート表面とのかぶりは 5mm と薄くし、モルタルは珪砂骨材とし、それを 10mm と薄くして施工することで総括的な熱抵抗を小さくした。

2-8 放熱管の配置

放熱管の配置間隔が広くてそのかぶりが浅いと融雪に溶けむらが生じる。谷本俊夫らは、放熱管が深いケースで、この問題を扱っている²⁰⁾。これまでの筆者らの実験と施工例からは、15 cm までの間隔で、かぶりが 3cm 程度であれば、実務的には問題がないように思われる。

ただし、写真-2.2 の融雪状況が示すように、入口に近い放熱管同士、出口に近い放熱管同士が隣接すると、溶けむらは大きくなる。入口に近い放熱管同士の管の真上では溶けた水が蒸発している一方で、出口に近い放熱管同士の中間では雪が残っているという状況になる。これを防ぐには、

1. U ターン配管：温水ヘッダー管から放熱管を送り反対側で U ターンさせて戻った管を冷水ヘッダー管につなぐ配管（写真-2.4, 図-2.9）
2. 両端ヘッダー配管：上記 1. で U ターンさせずに反対側に冷水ヘッダー管を設ける。温水冷水を交互にするため、両端にそれぞれ温水と冷水のヘッダー管が必要となる。（図-2.10）
3. クロス配管：溶接金網の一部を切り取り放熱管を下でクロスさせる配管（写真-2.5, 図-2.11）
4. 中心部リターン配管：外側からブロック中心に放熱管を配管し、中心部から折り返して元の外側へと放熱管を戻す配管（写真-2.6, 図-2.12, 写真-2.3）

といったように、温水の隣りは冷水となるような配管にすることが考えられる。なお、これらは、いずれも第 6 章で紹介する地熱融雪の施工現場の写真である。この方法で流量がある程度



写真-2.4 Uターン配管（県立音楽堂歩道）

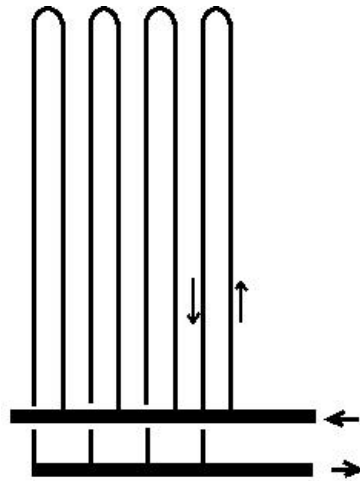


図-2.9 Uターン配管

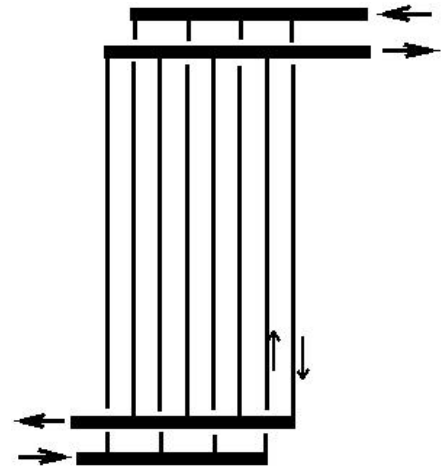


図-2.10 両端ヘッダー配管



写真-2.5 クロス配管（県立大学職員住宅駐車場）

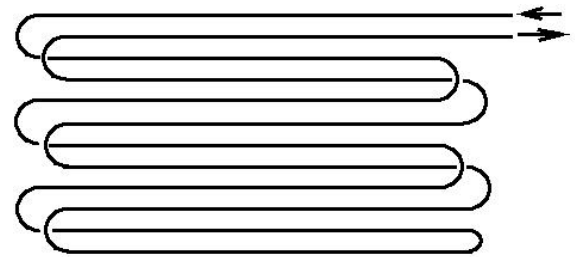


図-2.11 クロス配管



写真-2.6 中心部リターン配管（若狭地区建設業会館駐車場）

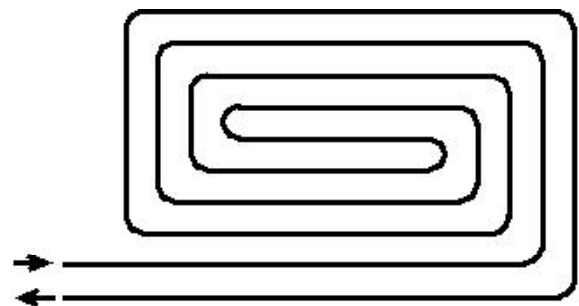


図-2.12 中心部リターン配管

あれば、溶けむらは少なくなる。

放熱管の区割りについては、ヘッダー管から分岐してヘッダー管までの1経路の放熱管の長さを短くするとヘッダー管とのジョイント施工が増える。長くすると、出口側水温が低くならないようにその1経路が負担する面積に応じて流量を増やさなければならないので、長さで相乗されて急激に速度水頭損失が大きくなる。それらのことと市販されている放熱管の1

本の長さをも考慮して、その1経路長さを決めることになる。この速度水頭損失がある程度大きくて、送水管がリバースリターンで配管されて、各経路の長さが同一ならば、各経路に流れる水量は自動的に同じとなるはずである。この場合に、それぞれの経路長をほぼ同じようにしないと融雪にむらができる。特に、他の経路長に比べて長い箇所は、速度損失が大きくなることから流量は他に比べて少なくなる。その上に、負荷面積は大きいので、出口側が他に比べ著しく低温になり、融雪できない。部分的に良く溶けるのはよいが、溶けない箇所があると目立つ。なお、各経路長を同じにできない場合などで、特に必要な場合には定流量バルブを用いることも一つの方法である。

2-9 放熱管の凍結時の破損・断熱材の使用など

舗装や放熱管の熱伝導率を大きくすることに伴い、放射冷却での凍結による放熱管の破壊が懸念された。放熱管内部に水が残らないように放熱管を設置することを考えたが、曲げのある放熱管の配管ではそれは容易でなかった。そこで、実験期間中に最低気温が -10.6°C を記録した寒冷地福井県勝山市に放熱管方式の融雪装置を設置した。放熱管内に残った水が何度か凍結したが、架橋ポリエチレン放熱管は伸び膨らんで破損には至らなかった。しかし、コンクリート表面には放熱管に沿ったひび割れが生じた。

福井市内での橋梁歩道部で断熱材を敷設し、その上に放熱管を設置しコンクリートを打設し、そうでないものとの比較を行った。2-5で述べたように、福井では橋梁でも融雪時の放熱管から下面への熱損失は少ない。したがって、断熱しても大きな効果はない。逆に、降雪の初期には床版が持っている熱がこの断熱によって舗装表面に流れなくなり、雪が早くから積もり、逆効果となった。また、同様な理由で、放射冷却による凍結が生じやすくなった。断熱材挿入でコンクリート舗装の断面係数が小さくなったことから、コンクリート表面に放熱管に沿ったひび割れが生じた。福井市内では断熱材設置を行わない場合には10年経過した現在まで架橋ポリエチレンの放熱管内の水の凍結は問題となっていない。しかし、銅管を放熱管としたもので、その放熱管を埋設したコンクリート舗装下面に断熱材を敷設したものは、地盤からの熱が得られず凍結して破損し漏水に至った。

2-10 低温度の水での融雪能力について

低温度の水を融雪に利用する場合、熱の総量があればいつかは雪は溶けるが、低温であることから単位時間当たりの融雪能力が不足し、長く残雪となることが多い。そこで2-6に示した舗装の高熱伝導化や舗装のかぶりを小さくすることを行ってきた。ここでは、実際に可能な条件の事例で、放熱管内の流水と積雪との間の熱抵抗はどの程度小さくなり、融雪能力が向上するかを2-2のモデル式を用いて示す。

図-2.13は、表-2.3に示す放熱管、コンクリート、かぶり条件の組み合わせでの熱抵抗を示したものである。図から、流水が乱流であれば放熱管との熱伝達抵抗および雪と舗装表面の熱抵抗は、放熱管内流水と積雪の間の全抵抗体の中では比較的小さいことが分かる。また、放熱管は架橋ポリエチレン管では大きな熱抵抗になり、銅管にすると無視できるほどに小さくなる。舗装の熱抵抗は、かぶりを3cmと小さくしても全体の熱抵抗の中では大きく、珪石を骨材とした珪石コンクリートなどによって高熱伝導にすることが効果的であることが分かる。例えば、放熱管が銅管、そのかぶり3cm、配管間隔15cmの条件で、コンクリートを普通コンクリート

（安山石骨材、装置 No. 5）を珪石骨材（装置 No. 6）にすれば、全体の熱抵抗はほぼ1/2になる。

流量を $0.6 \text{ l}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ と固定して、流入水温を変化させて流出水温、融雪能力を示すとそれぞれ図-2.14, 図-2.15が得られる。図-2.15から、例えば、ボイラー加熱で一般に使われることの多い融雪装置 No. 1（架橋ポリエチレン管15cm 間隔、普通のコンクリート舗装）では14℃の流入水温で1.5cm/hr(約150W/m²)の融雪能力となるが、同じ融雪能力を装置 NO. 6（鋼管15cm 間隔、珪石コンクリート）では約6℃の流入水温でも得ることができることが分かる。このように、熱抵抗を小さくすることで、低温熱源でも十分な融雪能力が得られる。

次に、放熱管に流す流量と融雪能力の関係を図-2.16に示す。図では、熱抵抗が小さな融雪装置 No. 7では、同じ流入水温でも、熱抵抗が大きな装置 No. 3に比べて、かなり融雪能力が大きくて、流量が少ないと融雪能力の低下が著しい。これは、熱抵抗の小さな融雪装置 No. 7では、熱が雪によく伝わるので、流量が少ないと放熱管の途中で流水の温度は下がり、途中で融雪能力が下がってしまうことによる。図から、熱抵抗の大きな融雪装置 No. 3では、5℃の低温水では熱交換されず、流量を増やしても融雪能力はほとんど変わらないことが分かる。

以上をまとめると、舗装を珪石を骨材にするなどで高熱伝導化する、かぶりを薄くする、放熱管を金属管にする、放熱管の設置間隔を狭くするなら、熱抵抗を小さくでき、低温水であっても、流量を増やすなら、融雪能力が確保できることが分かった。逆に、高温水であっても、雪と放熱管内の流水の間の熱抵抗の大きな融雪装置では、流量を増やしても融雪能力は上がらない。地下水ほどの温水を流しても、熱伝導の悪い舗装を用いるとか放熱管を深く設置するなどによって、融雪能力が得られない失敗例（写真-2.7）が少なくないのは、このことによる。

なお、実務的には、その地域で必要とされる降雪強度と得られる熱源の温度に応じて、放熱管の材質や間隔、舗装の種類などを、その建設コストを配慮して決定することになる。

表-2.3 想定した装置No一覧

	配管の種類	配管設置間隔	配管かぶり	舗装の種類
No. 1	架橋ポリ管	15cm	7cm	普通コンクリート
No. 2	架橋ポリ管	15cm	3cm	普通コンクリート
No. 3	架橋ポリ管	15cm	3cm	珪石コンクリート
No. 4	架橋ポリ管	10cm	3cm	珪石コンクリート
No. 5	鋼管	15cm	3cm	普通コンクリート
No. 6	鋼管	15cm	3cm	珪石コンクリート
No. 7	鋼管	10cm	3cm	珪石コンクリート



写真-2.7 放熱管は矢印の区間にも続いて埋設されているが、放熱管が深くに埋設され、手前の舗装のような高熱伝導舗装でないため、雪は溶けない。

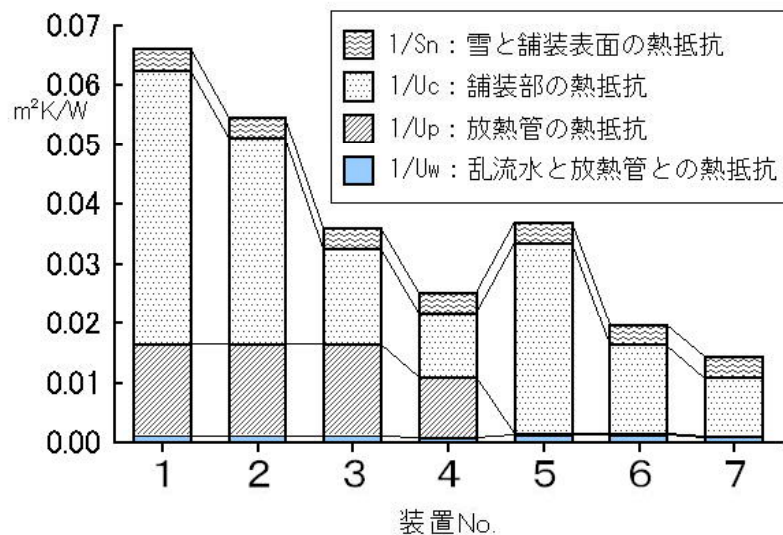


図-2.13 表-2.3の設備での融雪熱抵抗

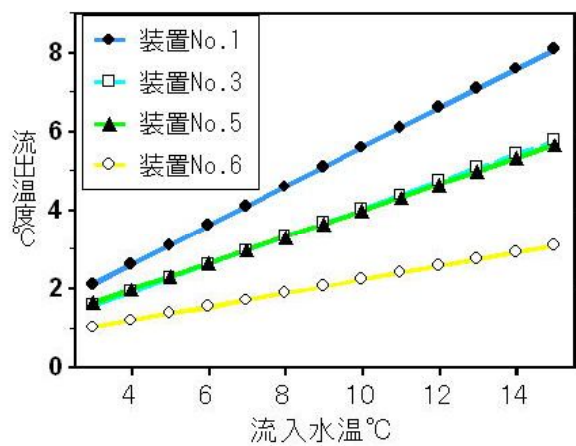


図-2.14 表-2.3の設備, $0.6 \text{ l}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ での
流入水温-流出温度

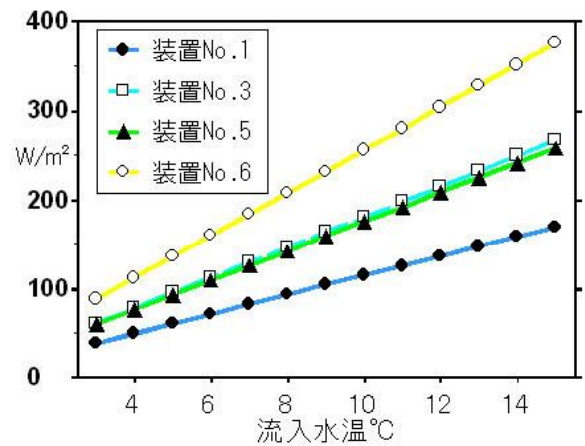


図-2.15 表-2.3の設備, $0.6 \text{ l}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ での
流入水温-融雪能力

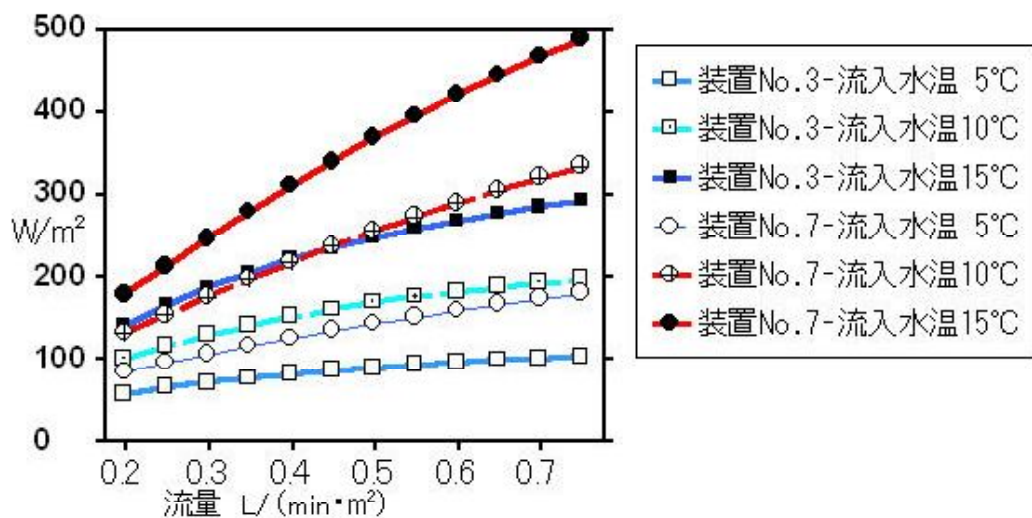


図-2.16 表-2.3の設備での水量、流入温度-融雪能力

第 3 章 スプリンクラー散水による融雪の熱解析と実用化

3-1 はじめに

ノズル散水では、車で攪拌されない限り、水が流れる筋道しか溶けない。そこで、路面全体の均一な散水融雪を目指してスプリンクラーでの融雪を試みた。スプリンクラー融雪については、旧国鉄で実施されている²¹⁾が、とりまとめがされていない。そこで、熱解析と実験を行い、従来のノズル散水との比較を行った。

3-2 熱解析

散水による融雪では、雪は落下瞬間に溶けるとすると流水が図-3.1のように道路横断方向に任意の n 点から微小区間 Δx 下流の $n+1$ 点に達するまでの熱と水量について次式を得る。

$$\rho \cdot C \cdot T_{so} \cdot q_n \cdot \Delta x + \rho \cdot C \cdot T_n \cdot V_n \cdot H_n + (-R_s + R_e + Q_a + Q_e + Q_g + Q_s) \Delta x = \rho \cdot C \cdot T_{n+1} \cdot V_{n+1} \cdot H_{n+1} \quad 3-(1)$$

$$V_n \cdot H_n + q_n \cdot \Delta x + I_s \cdot \Delta x / \rho = V_{n+1} \cdot H_{n+1} \quad 3-(2)$$

$$Q_s = I_s \cdot (C_{sm} + C \cdot T_{n+1} - C_s \cdot T_s) \quad 3-(3)$$

ここに、 ρ :水の密度 C :水の比熱 T_{so} :落下点での散水温度 q_n : n 点から $n+1$ 点までの面積当たり散水量(道路センターからのノズル散水では0) T_n : n 点での流水温 V_n : n 点での流水速度 H_n : n 点での流水の水深 R_s :流水が吸収する短波長(日射)放射熱量 R_e :流水が放出する長波長放射熱量 Q_a :大気(空気)への顕熱失熱量 Q_e :蒸発による失熱量 Q_g :舗装への失熱量 I_s :面積当り重量換算降雪強度 Q_s :降雪を融解し融解水を流水温にまで昇温させるのに要する熱量 C_{sm} :雪の重量当たり融解熱量 C_s :雪の比熱 T_s :雪の温度 である。

$Q_a + Q_e$ については、

$$Q_a + Q_e = K(T_n - T_a) \quad 3-(4)$$

T_a :気温 K :係数 となり、 K についてはノズル散水融雪での実験と解析²²⁾から中村秀臣、今井清保はそれぞれ $K = 14.2 + 2.8 U$ [$J/(K \cdot s \cdot m^2)$]、 $K = 13.3 \times (1 + 0.22 U / 2)$ [$J/(K \cdot s \cdot m^2)$] U :風速[m/s] と推定している^{23)、24)}。二つの式は風速 2 m/s までで7%以内の差に過ぎない。ここでは中村秀臣の式を用いた。

$V_0 \cdot H_0$ はスプリンクラーでは0、道路センターノズル散水方式では散水量となり、式から逐次 T_{n+1} が求められる。

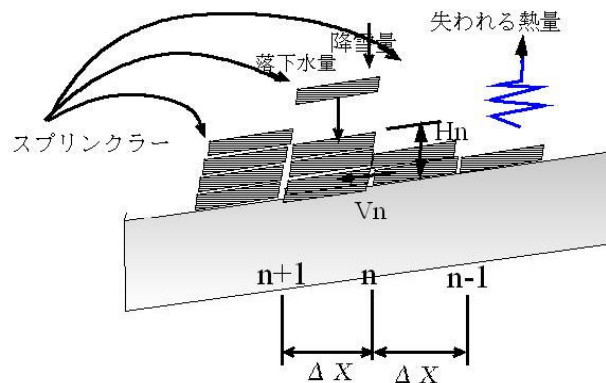


図-3.1 スプリンクラー散水融雪概念図

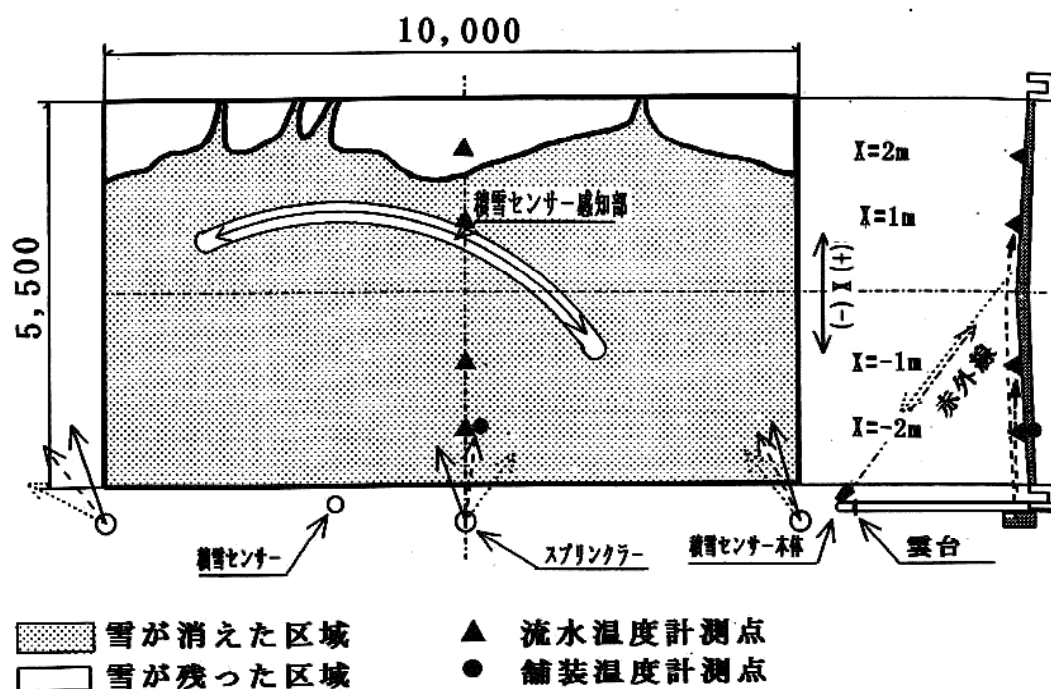


図-3.2 スプリンクラー散水融雪実験施設と融雪状況(写真-3.1参照)

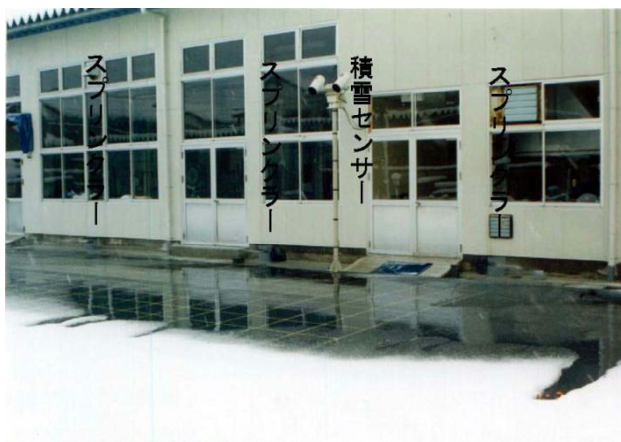


写真-3.1 スプリンクラー散水融雪実験施設と融雪状況



写真-3.2 スプリンクラーの散水状況

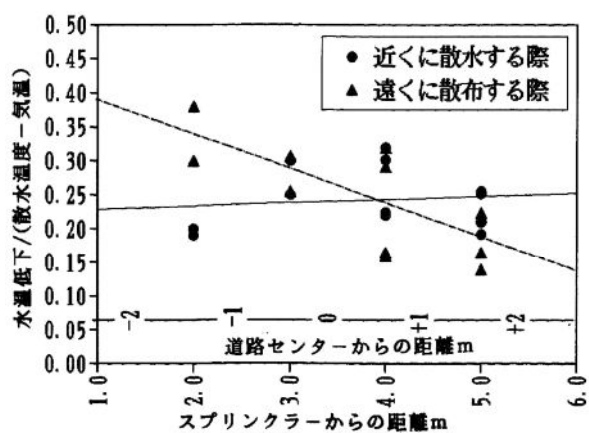


図-3.3 空中での水温低下

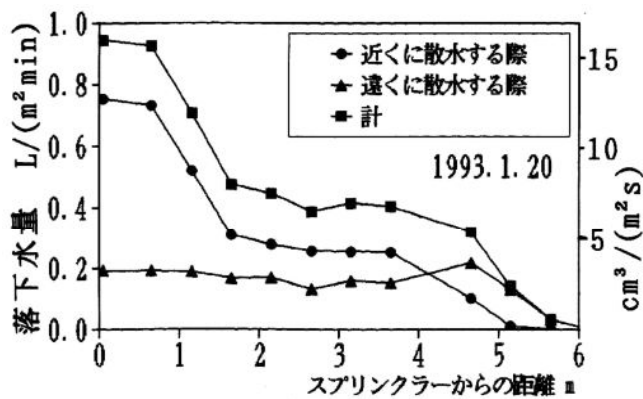


図-3.4 散水の分布

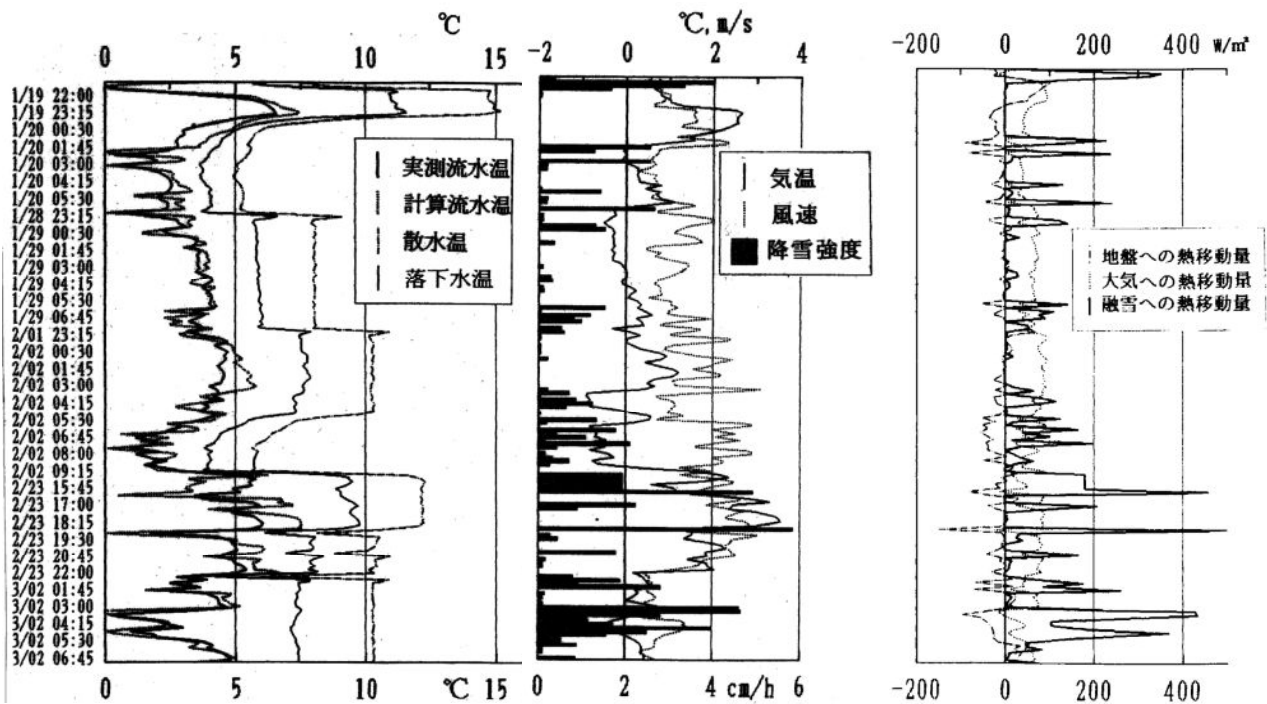


図-3.5 流水温 (X=-2m)

図-3.6 気象条件

図-3.7 流水から奪われる熱量内訳

この差分法により、中村秀臣や今井清保の方程式を解いた一般解の方法^{25)、26)}では扱えなかったスプリンクラーでの散水融雪の計算が行える。さらに、熱量不足で残雪となった後も、残雪分相当を次の時間帯に繰り越すことで、時間経過をともなった融雪の数値シミュレーションが可能となる。

3-3 実験装置と実験方法

モデル式の検証のため、図-3.2, 写真-3.2のスプリンクラー散水融雪施設で実験を行った。スプリンクラーは、低空で水が飛び、その回転速度も低速なものを製作依頼した。隣接するスプリンクラーからの散水のない道路横断線上の図-3.2に示す四ヵ所の舗装表面に2mmのV字切込みを作り、そこに熱電対温度センサーを設置して、流水の温度を計測した。更に、降雪重量・風速・気温を自動計測した。これらの計測は、降雪予報のあった日に散水温度を適当に変えながら散水し続けて行った。

空中での水温低下は、少量の水が貯まる断熱容器を1m間隔に設置し、貯まった水温を散水しながら計測することで求めた。気温と散水温度を変えて実験を重ね図-3.3を得た。

なお、使用したスプリンクラーは、任意の2点で反転し、右回転では遠くに多く散水し、左回転では水はねを多くして近くに多く散水するように作られている(写真-3.2)。左右の回転の違いで水球径が違っているので、左右を分けて空中水温低下と散水分布を計測した。空中での水温低下が飛距離に比例しないのは、遠くに飛ぶ水の球径が大きいことによると考えられる²⁷⁾。

なお、スプリンクラーの散水分布は、寒波ごとに孔の迎角を数度変え、その都度散布状態を計測した。図-3.4はその一例である。

3-4 実験結果と考察

15分ごとに平均化した実測データと式3-(1)、3-(2)、3-(3)と

表-3.1 流水温の実測と計算の平均値

	X=-2m	X=-1m	X=1m	X=2m
散水温度	8.98 °C			
落下水温度	7.46 °C	7.03 °C	6.79 °C	6.65 °C
実測平均水温	3.56 °C	2.38 °C	3.67 °C	2.61 °C
計算平均水温	3.72 °C	3.04 °C	3.40 °C	2.71 °C
計算-実測水温	0.16 °C	0.66 °C	-0.27 °C	0.10 °C

①降雪重量は全て 0 °C の氷である

②流水から地盤への熱移動は、各地点での流水の温度差が小さいので全地点同じで、地点 X=-2m での舗装表面下5mm と15mm での温度差と舗装の熱伝導率の積にほぼ等しい

③流水が 0 °C に達しない限り雪は時間遅れを伴わず溶ける

④流水が 0 °C に達した領域では雪は流れず止まり、次の時間帯に残る

⑤短波長放射熱量は夜間であることから、また長波長放射熱量は雪雲があり無視できる

の仮定で流水温を計算した。図-3.5は X=-2m 地点での散水温・落下直後の水温・流水温の実測値と計算値、図-3.6はその折の気象、図-3.7は X=-2m 地点で流水が奪われる熱量の内訳である。他の三地点を含めて流水温の実測と計算・落下水温・散水温の平均値を示したのが表-3.1である。散水温の平均値8.98°Cに対して、流水温の計算値と実測値との差は0.7°C以内でよく一致している。また空中での熱損失は表-3.1からこの気象条件では散水熱量の1/4～1/5である。これに比べ大気への熱損失量は降雪時には流水温が低いため小さいことが図-3.7から分る。図-3.5で流水温の計算値は実測値に比べ降雪時に低く、降雪直後に高くなる傾向がある。これは流水が0°C以上であっても雪が流水に溶けるまでに時間を要し上記③の仮定が崩れることによると考えられる。そのことは、あられの降った場合にはあられが長く残ることで目視観察された。なお、表-3.1では、時間的に平均化するため、その不一致がなくなっている。

3-5 融雪運転記録からのモデル式の検証

次に、より強い降雪があった1992年2月22日における断続融雪運転での記録から考察する。この日は午前1時から8時までに図-3.8のように8.5mm の雨量換算降雪があり、融雪運転がなされた。融雪は図-3.2に積雪センサー感知部として示す円弧領域が25%以上白い場合に融雪運転となるように第5章で述べる積雪センサーで制御された。また、運転の更新は18分ごとになされた。

この一連の降雪について、先の数値シミュレーションを今度は1時間ごとに、隣接するスプリンクラーからの散水を重ねて行った。その際地盤への熱移動は無視できるとした。また、その時刻の運転時間に1時間の全降雪があり、運転のない時は路面に変化が生じないとして計算した。最も降雪の強かった1:00～2:00での運転時間当りの降雪強度は4.1cm/hであった。流水温を計算した結果が図-3.9で、流水温度が0°C以下は残雪とした。この図では、スプリンクラーとスプリンクラーの中間部で、流水温度が高温となっているが、これは両端のスプリンクラーからの落下水温が重なり、落下水量が多いことによる。また、図-3.9に積雪センサー感知部を重ねてみると、薄白くなった部分が25%という融雪運転の稼働限界に近いことから計算がほ

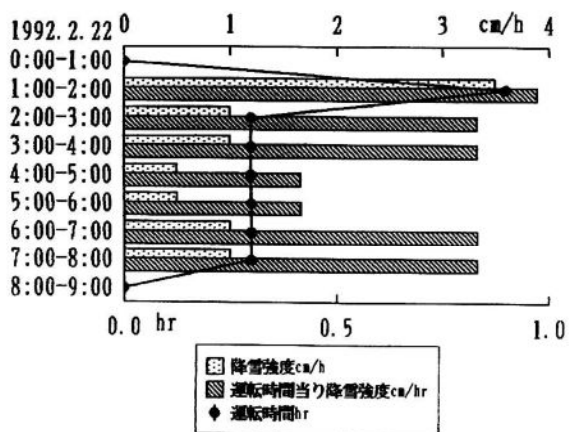


図-3.8 積雪センサー制御でのスプリンクラー融雪と降雪の例

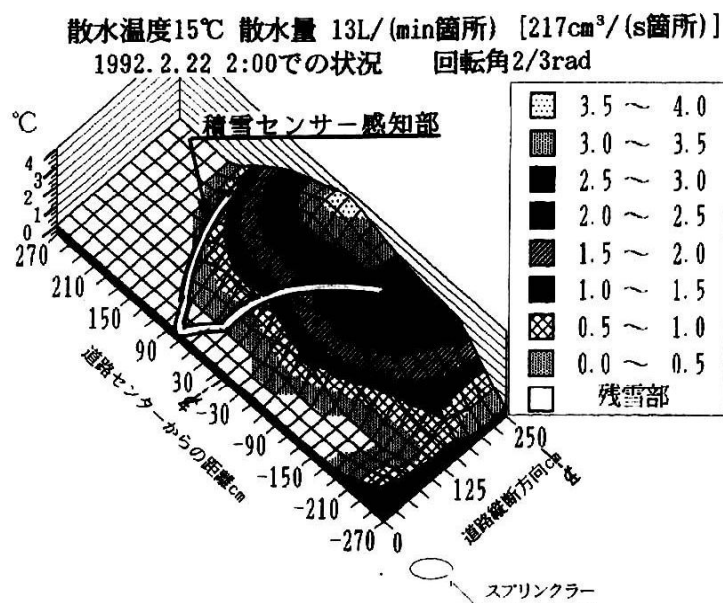


図-3.9 流水温

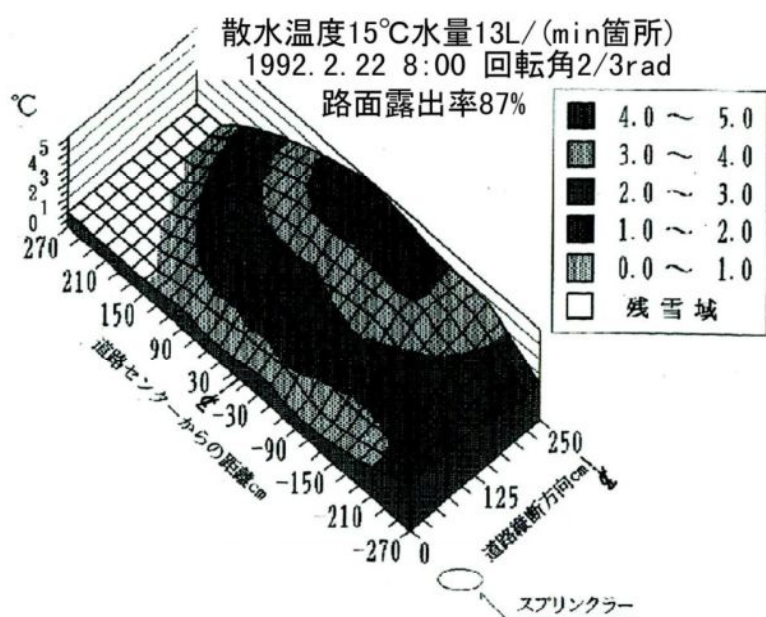


図-3.10 流水温



写真-3.3 ノズル散水での路面状況



写真-3.4 スプリンクラーによる散水状況

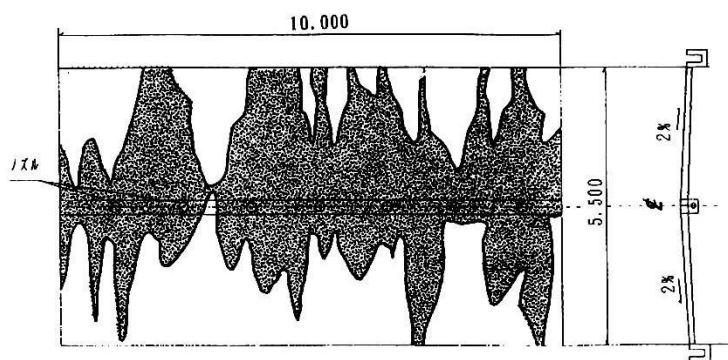


図-3.11 ノズル散水融雪実験施設と路面状況

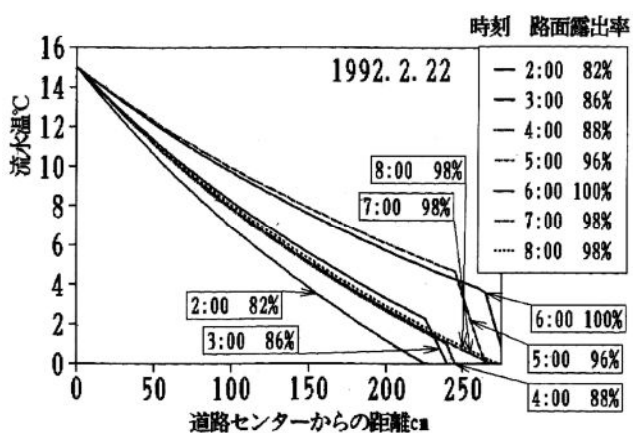


図-3.12 ノズル散水融雪シミュレーション

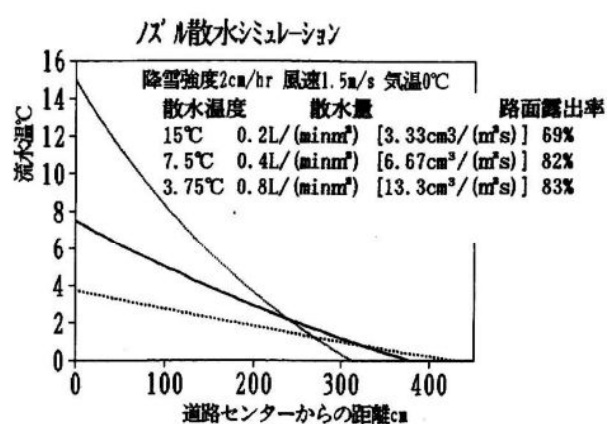


図-3.13 ノズル散水融雪シミュレーション(熱量一定)

ば妥当であると推察される。

次に、朝8:00まで逐次数値シミュレーションし、朝8:00の流水温を図-3.10に図示した。この図と8:00での実際の路面上の残雪の状況を記録した図-3.2とを比べると路面露出率も残雪の形も良く一致している。

以上によりスプリンクラー散水による融雪は先のモデル式により、数値シミュレーションでできることが分った。

3-6 ノズル散水との比較

この1992年2月22日にはスプリンクラーと同じ散水温度15℃で全く同じ時間帯だけ図-3.11

(写真-3.3) に示すノズル方式の施設で散水融雪がなされていた。水量は、路面当たりでスプリンクラーより22%少なかった。この時の状態を同じように3-(1)から3-(4)の式でシミュレートしたのが図-3.12である。実際の路面状況は図-3.11に記載のとおりで、計算での路面露出率98%に比べ著しく低い56%であった。このようにノズル散水で実際に計算に比べ溶けないのは、二つの理由からであろう。一つは、道路センターで溶けた部分が路側に向かう途中で消えていることから計算を上まわる熱損失があること。その熱損失は、路面が運転休止中に冷え、その上スプリンクラーと違って流水温が高いので路面への熱損失が無視できないほど大きいことによると考えられる。もう一つは、図-3.11の右上のように路側まで溶けている部分もあることから水が計算と違って路面を均一に流れないことである。この二点から、ノズル散水での融雪能力の見積りが実際と合わないと考えられる。

なお、中村秀臣のノズル散水融雪の実験²⁸⁾は、連続散水の実験条件でかつ水が完全に均一に流れるとして結果を整理し直しているため、また、今井清保の実験²⁹⁾はドーム膜での融雪実験で下面への熱損失が無視できたために、実験値と一致していると考えられる。

ここで、路面当たり水量を同じにしたスプリンクラーでのシミュレーションを行うと路面露出率は66%となる。このスプリンクラーでのシミュレーションは比較的实际に近いことから、ノズル散水に比べ10%路面露出率が良くなると推定される。

更に、ノズルでは流水温が0℃の区域は全く溶けないが、スプリンクラーでは落下する水の熱で流水温は0℃以下でもかなり溶ける計算になる。実際に残雪はノズルでは全く溶けず写真-3.3や写真-5.3のような雪こぶに、スプリンクラーでは残雪部がやや溶けてシャーベット状態になっていることが観測される。

ノズル散水では、熱量を同じにした15℃ $3.33\text{cm}^3/(\text{m}^2 \text{ s})$ 、7.5℃ $6.67\text{cm}^3/(\text{m}^2 \text{ s})$ 、3.75℃ $13.3\text{cm}^3/(\text{m}^2 \text{ s})$ の三種類の散水を地盤への熱損失を無視できるとして計算すると図-3.13のように、3.75℃の方が15℃に比べ35%路面が多く露出する。これは、水量が多くて流水温度が低いほど流下中の大気への無駄な熱損失が少なくなることによる。このことは計算では無視した舗装への熱損失についても同様であるから、この点でも低温水の方が路面露出率は大きくなる。しかし、スプリンクラー散水では、ノズル散水ほどには低温水が有利にはならない。それは、流下中の水温が低いため大気や舗装への熱損失の絶対量が少ないことと、水量の増加は空中での比表面積の減に必ずしもならず空中での熱損失の減にならないことによる。

以上熱的に雪を溶かすという解析を行ってきたが、水量が増えると、雪が溶けなくても流水で流される流雪現象が生じるとの考えがある³⁰⁾。このことについては、水量が少なかったためか本実験で観測されず熱的解析のみになっており、今後の課題となった。

3-7 実用化と課題

1991年1月からこのスプリンクラーによる散水を、福井県庁前で設置し(写真-3.4)維持管理を行ってきた。その結果、この現場では、スプリンクラーをゆっくりと回転させるようにしたことと水量がやや少なかったことから設置台数の約半数が1年で回転しなくなってしまった。しかし、ノズル径は、従来の固定式に比べ散水領域が広いことからスプリンクラーでは大きくでき、目づまりは生じなかった。

今後の対応として、少ない水量でも安定して回転するスプリンクラーの開発、あるいは、散水区域を半分ずつ交互に散水することで、稼働時の水量を2倍にすることなどが挙げられる。

第4章 歩道無散水と車道散水の組み合わせによる融雪

4-1 節水型の地下水利用システムの現状と課題

地下水利用の融雪では、散水融雪の他に、地下水の熱だけを使い、使用後の冷水は地盤に井戸で涵養することが地盤沈下対策からなされている。地下水を歩道に埋設した放熱管に流して融雪し、使用後の冷水は別の井戸で地中の砂礫層に戻すというこのシステムは、山形市内でこの数年普及されてきた。このシステムは、直接地下水層に水を戻すことが地下水汚染になる可能性が皆無といえないことから、福井市では、このような涵養を認めていない。また、このシステムは、井戸が涵養と揚水の二つ必要となることで、放熱管敷設によるコストアップと併せて建設費が高くなる。

さらに、市街地での歩道部だけの融雪では、交差点の横断歩道部に車道除雪された雪が山積みされるので、車道も融雪しなければ、せっかくの無散水融雪歩道も分断されてしまう。歩道だけでなく車道も融雪を実施すれば、建設費用がかさむ。特に、車道での無散水融雪のための放熱管敷設は、車両が通過するため構造上の補強が必要となり、建設コストは歩道より高くなる。

4-2 カスケードな（二度使い）地下水利用による節水融雪

そこで、歩道は、散水した地下水が歩行者にかかり不評の散水融雪でなく無散水融雪で、車道は、従来の散水融雪ということ考えた。具体的には、図-4.1に示すように歩道は地下水を埋設された放熱管で無散水融雪し、使用後のやや冷たくなった水を車道で散水して融雪する。

この方式は、無散水融雪では低温になると融雪能力が低くなることから使えなくなった水を、雪と直接接触する散水融雪で使うことになる。地下水を高温領域は、熱抵抗が相対的に大きい無散水融雪で、低温となった領域ではより低温でも利用可能な散水融雪で使うこの方法は、カスケードな利用である。化石エネルギーを高温領域では発電に、発電に利用できない低温熱は

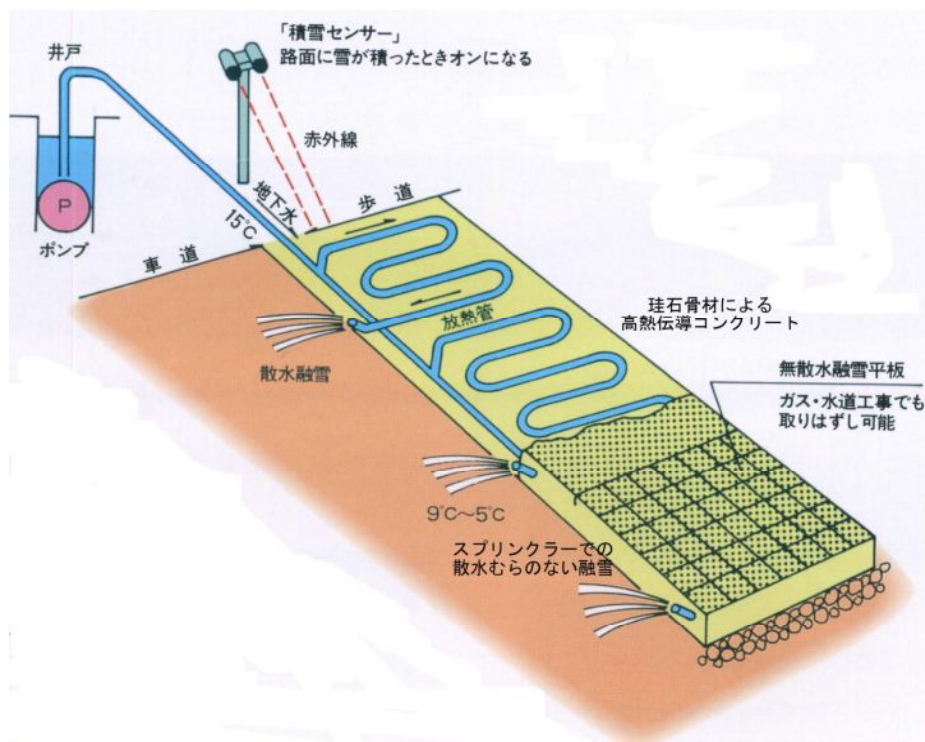


図-4.1 地下水再利用融雪システムの概念図

空調にというコジェネレーションの考え方（ヒート・カスケーディング）の融雪版である。

歩道無散水・車道散水を組み合わせた当該融雪システムは、こうした地下水のカスケードな利用の点の他に、大きな荷重のかかる車道では放熱管を浅くに設置しにくい点、歩道は水がかからない無散水でという利用の点、車の攪拌の期待できる車道は散水融雪で攪拌の期待できない歩道は攪拌効果がなくてもムラなく溶ける無散水融雪という攪拌効果の点、既に整備されている車道散水融雪システムをそのまま活用してリニューアルできる点の五つからも合理的である。

4-3 実施例

写真-4.1は、福井市内で地下水カスケード使用のシステムの試験施工である。写真-4.2は、モデル施工として、歩道には高熱伝導率融雪パネルを、また車道には車道の交通量が少なく攪拌が少ないことを考慮しスプリンクラーを用いたものである。さらに、これらの実施例はいずれも、後述の第5章で開発した積雪センサーを用いて運転されている。この場合、車道の散水融雪を積雪センサーで制御しなくても、歩道の無散水融雪を安価な固定式の積雪センサーで制御するだけで、10年間の実際の運転でもトラブルは生じていない。これらの設計では、歩道の放熱管の材料選択や放熱管と舗装表面のかぶりなどで調整することで、歩道の放熱管の出口水温を適当に調整し、車道と歩道との融雪能力のバランスを得ている。

歩道無散水と車道散水を組み合わせた本システム（セット融雪）は、その後、写真-4.3に見られるように、福井県内の都心部六か所で施工され、都心部の最も一般的な融雪法となった。なお、ここでは、歩道融雪後の水を一旦回収し、中央分離帯付近に埋設されたノズルから散水し車道融雪としている。さらに、既設の車道散水融雪設備に、歩道無散水融雪を付け加えるリニューアルも金沢市兼六園周辺や武生市内の通学路でなされ始められた。



写真-4.1 歩道無散水と車道散水をセットにした融雪
(右側未施工)



写真-4.2 高熱伝導融雪パネルブロックと
積雪センサー



写真-4.3 歩道無散水と車道ノズル散水での融雪実施例（手前未施工）

第 5 章 融雪装置を制御するセンサー

5-1 融雪装置を運転するセンサーの現状

現在のほとんどの道路融雪装置は、雪が降っているかどうかを判定する降雪センサーで運転されている。このセンサーは、降雪時間中に融雪装置が雪を溶かすことが前提になっている。したがって、降雪時間内に多くの降雪があると、雪が溶けずに残雪となる。逆に、降雪センサーがようやく感知できるほどの降雪強度の雪が長く降ると必要以上の水（熱）が使われることになる。その上、一般にかなりの降雪であっても十分融雪できるように設計され、また、昼間は降っても舗装に蓄えられた日射熱などで積もらないことが少なくないので、現在の降雪センサーによる運転では無駄な運転となる。

こうしたことと環境保全の高まりの中で、降雪強度に合わせて融雪出力を可変することを前提に降雪の強度を測る降雪強度センサーの開発が進められてきた。その代表的なものは、次の3つである。

(1) 雪片を光遮断・反射のカウント方式

水平に放射した超音波が降ってくる雪片に反射し戻る数をカウントし、降雪強度を推定する。

(2) 雨量計タイプ

降雪を筒で受け、これを溶かした水が水滴となって落下する際の水滴数をカウントすることで、降雪強度を計測する。

(3) 疑似融雪面(受け皿)での積雪感知タイプ

このタイプは、降雪センサーの同種類の方法で、常に積雪を0にするのに必要となる最低限の熱をヒーターの熱量を可変させながら求めることで、融雪必要熱量を求めるものである。この方法は、降雪強度でなく融雪熱量を直接求める点では、他と違って気温・風速・日射の条件が考慮される点では優れている。

雨量計タイプの降雪センサーを用いて、その降雪強度に応じた間欠運転を実際の道路で行った結果、降雪センサーに比べ最大約50%の節水が道路交通に支障を与えることなく得られたとされている³¹⁾。

現在、降雪強度センサーの利用としては、降雪強度に応じて融雪能力を可変する方法と降雪強度に応じて間欠もしくは降雪後の延長運転を行う方法がある。前者の方法による散水融雪では、水量の増減となるが、ノズルからの散水飛距離が変わり、坂道では散水されない区間が生じる問題が生じる。それに比べ、後者は取り込みが容易で、間欠運転のインターバルさえ適切であれば、交通の支障にはならない。

5-2 フィードバック制御（積雪センサー）の提案と開発

すでに述べたように、融雪装置の制御は、降雪センサーから降雪強度感知センサーで省資源を図ろうという方向に向かっている。しかし、降雪強度センサーでも交通量を計測していないので、溶けむらと関わって散水融雪の能力を大きく支配するとされている車の攪拌効果を考慮することはできない。また、路面が暖かいと降っても雪は積もらないが、これも降雪強度センサーでは考慮できない。更に、地下水利用では、地下水位を設計時には安全側に低く想定するが、通常は低くなく、配管での水頭損失も設計と実際では異なり、井戸もスクリーンの目詰まりなどで、実際の流量は設計と異なって時々刻々変化している。こうした流量の変化も考慮しよう

とするとインバーターでポンプの回転数を制御しなければならない。仮に、融雪能力に関わる気象・交通・路面・地下水流量のなどの全てのデータを入手しても、それらのデータから融雪能力を算定する正確なモデル式が得られなければ意味がない。このようなことから、降雪強度センサーによる制御でも、必要最小限の運転という目標からすれば大きな限界がある。

これらの限界は、運転によってうまく融雪ができたどうかを感知し、それを運転にフィードバックする制御で克服される。それが融雪路面の積雪を感知するセンサーによる制御で、その制御方式は降雪センサーや降雪強度センサーと本質的に異なる。積雪センサーでの運転では、融雪能力が相対的に降雪強度に比べて大きいときには、短時間の運転で雪は溶けるので、間欠運転になる。逆に、雪が降り止んだ時に融雪路面に雪が残った場合には、継続した運転となる。この積雪センサーであれば、融雪能力が変化するような装置であっても、その条件を取り込んで必要最小限の運転時間となる。

このような積雪センサーは、1990年頃は市販されてなく、石川高専での構内での実験用融雪の自動運転装置として1986年に今井清保によって試作されていた³²⁾のみであった。そのセンサーは、赤外線を路面に放射し、路面が雪に覆われるとその赤外線の反射量が増えることを利用したものである。そのセンサーを実際の道路に融雪運転できるように改良試作し用いた。

放熱管方式融雪歩道での積雪センサーの運転では、気温計測を同時に行い4℃以上では雪は降らないとしたことと、融雪路面を黒く着色することで太陽光などによる誤操作を除いたことで、順調な運転とすることができた。

しかし、車道部のノズル散水では、写真-5.1, 写真-5.2, 写真-5.3のように車輪の通る部分の雪が先に溶け、どの部分を感知させておけば良いのかが分からなくなった。特に、雪が降り続けると車の通過部分が道路センターへとシフトするため、感知すべき部分を予め決めることはできなかった。そこで、センサー本体を雲台に取り付け首振りさせ図-3.2のように円弧上の路面を感知させ、路面に雪がないと判断した時間の比率を計測することで運転を可能とした。なお、この方法では路面露出率（路面全体に占める積雪のない部分の比率）を道路管理者が任意に設定できる。

5-3 積雪センサーの効果

このようにして実用可能となった積雪センサーを用いて、実際の道路での運転を従来の降雪センサーと比較して行った。効果測定は、地下水利用のノズル散水車道融雪と歩道無散水・車道スプリンクラー散水をセットにした融雪（以下セット融雪という）の二か所で行った。積雪センサーは路面が25%以上白くなった際に積雪と判断するように設定し、降雪センサーは福井県内で最も多用されているものを用いた。その運転の記録を二つの現場から1km以内に位置する福井地方気象台での降雪記録と併せて図-5.1に整理した。期間は最大積雪深60cmを記録した1991年2月下旬の1週間と1992年1月18日からの1か月間で、午前午後の9時を区切りに半日単位で整理した。図-5.2は図-5.1を含めた一定期間の運転を集計し、比較したものである。

図-5.2に示すように、降雪センサーは期間中90.7時間の運転を指示したが、これを100%とすると、積雪センサーでの車道ノズル散水運転では37%、セット融雪では51%と驚くほどの節水となった。また降雪センサーに比べ、昼間（9:00～21:00）での運転が車道ノズル散水では13%、セット融雪では23%で、夜間のそれぞれ51%、67%に比べ大きな節水となっている。昼間に節水となるのは、昼間の日射熱・気温・車の攪拌による。夜間でも大幅な節水となるのは、



写真-5.1 スプリンクラー散水開始直後（セット融雪）



写真-5.2 断続的融雪での散水直前



写真-5.3 融雪の終了時（散水融雪）

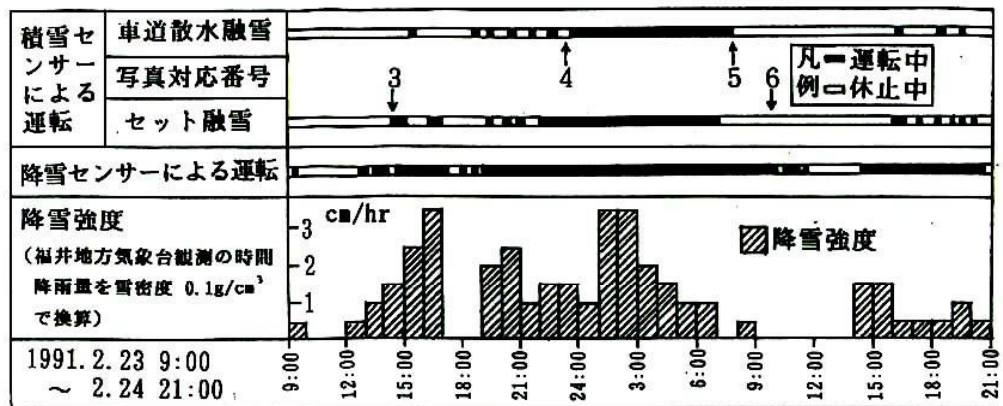


図-5.1 積雪センサーと降雪センサーの運転時間比較

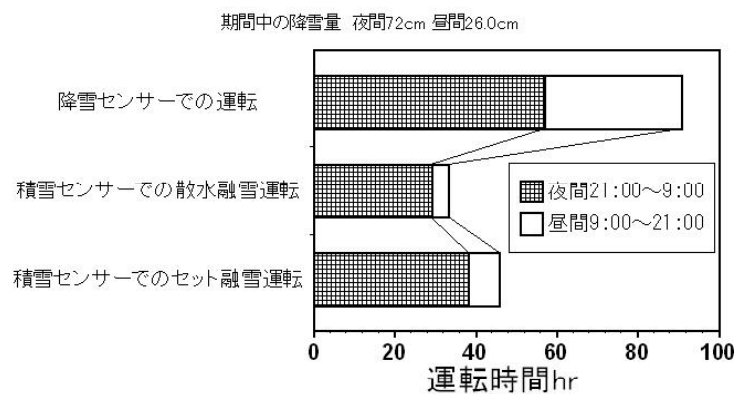


図-5.2 降雪センサーと積雪センサーの運転時間記録

ほとんどの降雪強度で地下水位が低下しても、融雪できるように設備が安全側に設計されていることによる。なお昼間の散水がこのように13%にまで削減されると、散水による歩行者への水はねはほとんどなくなる。

積雪センサー制御での路面状態については、融雪能力以上の降雪では雪が降り止んでも融雪が続いた(写真-5.3)。このことは雪が強く降った1991年2月23日～24日の節水率が図-5.1で小さいことにも示されている。

以上、積雪センサーを用いれば、路面状態を一定に保ちながら、その設備と時々々の気象・地下水位・交通量などによって決まる融雪能力に応じて大幅な節水となることが確認された。

5-4 積雪センサーと融雪装置の相互関係

低温水利用の無散水融雪システムでは、降雪センサーによる雪が降ってからの運転でも、融雪が追いつかなくて問題となっている事例が少なくない。例えば、福井駅西口の地下水利用による歩道融雪では、雪が降り始める前から降雪を予測して運転を行わなければ融雪路面の積雪に、融雪が追いつけない。日本道路公団での地中蓄熱による無散水融雪でも同じように、雪が降り始める以前から融雪する対応が必要とされているという。このことから、降雪を事前に予知する技術の開発を課題とする考えもある。

しかし、第2章で示した放熱管方式の無散水融雪や第6章から第8章で述べる基礎杭利用地熱融雪では、雪が降り始めて雪が積もり、その後誤操作防止のために数分間連続感知してから積雪センサーによる運転であっても、立ち上がりが遅くて雪が積もり融雪が追いつかない問題は生じていない。これは、問題となっている融雪では舗装と放熱管とのかぶりが6～8cmと厚いが、筆者らの融雪では、かぶりが3～5cmと薄くて、その上珪石骨材使用の高熱伝導舗装で、時間遅れが少なくなるように工夫されていることによる。問題の解決の方向は、降雪予知による解決ではなく、立ち上がりの早い融雪装置にすることに求められるべきである。そのために、放熱管と舗装表面のかぶりを薄くし、珪石骨材使用などで熱伝導率の大きい舗装にする。かぶりを薄くすることによる破壊・耐久性への対策は鋼繊維補強コンクリートやプレキャストの高強度コンクリートなどで行う。そのことが、2-10で述べた低温熱源での融雪能力の上昇にもつながり、またエネルギーのムダの少ない融雪運転にもつながる。

次に設備容量の設計と運転管理の関係について述べる。降雪センサーを前提にした降雪時間内での融雪から、降雪後も残雪がある限り運転される融雪になれば、設備容量の設計も見直されるべきであろう。その際に、その地方の過去の時刻ごとの気温・風・交通量・日射・地熱・地下水位変動などをそのまま取り込んだの数値シミュレーションが設計方法として展望される

³³⁾。

5-5 実施例

開発した積雪センサーは、1997年12月現在、北陸地方を中心に36台使用されるに至っている。地盤沈下が問題になっている新潟県では、交互に散水して融雪するシステムにも使われ、地下水使用量が大幅に削減される結果を得ている³⁴⁾。1988年から歩道無散水融雪の現場に導入された首振りしない積雪センサーと1990年から導入された首振りタイプの積雪センサーのいずれも、現在も異常なく稼働している。

その後、1996年には、北海道で個人住宅の駐車場融雪などを対象に、路面下から空を見上げ

て、上面に雪があれば積雪とみなす積雪センサーが販売されはじめた³⁵⁾。北海道で電力のピークとなる融雪時の節電のために、電力会社と融雪メーカーが開発したものである。北海道での融雪需要を背景に量産で安価にして、その普及が図られようとしている。

さらに、豪雪と地盤沈下の新潟県六日町では、散水融雪路面を監視制御している筆者ら開発の積雪センサーからの運転信号を電話回線で役場へ送り、その運転信号を町内の他の道路融雪装置に電話回線で送り運転することを行い始めた。そのことで、積雪センサーの設置箇所数を増やすことなく、集中制御システムを利用して運転管理を確認しながら地下水の削減を図っている。

このように、筆者らが降雪センサーでなく積雪センサーにすべきだと提起し³⁶⁾、開発実用化してから約10年、その合理性から他の地域でも多様なかたちで広がり、今後の主流となろうとしている。

第 6 章 基礎杭利用地熱融雪の概念・設計・施工・運転例

6-1 はじめに

ここでは、第 2 章で開発した高熱伝導舗装などの低温熱源での融雪技術と第 5 章で開発した積雪センサーの技術を用いて、地下水を用いない自然熱源による融雪システムを目指す。身近な自然熱源としては、地盤に蓄えられた熱がある。第 4 章で利用した地下水も地盤に蓄えられた熱で、この熱だけを利用すれば、自然に、あるいは夏に強制的に地盤の温度は元に戻せて、循環のシステムとなり、ほとんど環境の破壊にならない。

地盤には、地表面での熱収支から伝えられた、その地方の年平均気温より $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 高い温度の熱が蓄えられている^{37), 38)}。その熱容量は、地盤が水で飽和状態にあることから、後述の計測結果のように容積比熱で 0.78 と大きい。したがって、常温に近い温度でも利用できるもので、大量の熱を必要とする用途に適している。すでに、欧米では、地球環境保全を目的に、地熱を熱源とするヒートポンプを用いた冷暖房が実用化されている^{39), 40)}。国内では、地熱を利用した融雪が既に試みられている⁴¹⁾。しかし、この地熱融雪は、維持費用は安価だが、地熱を集めるための熱交換杭の施工費が高いことで普及が阻まれている。このことは、地熱を熱源にヒートポンプを利用した空調などについても同様である⁴²⁾。

6-2 本融雪システムの説明

こうした中で、筆者らは、構造物の基礎杭を熱交換器に兼用することによる安価な地熱融雪システムの開発を行った。この地熱融雪システムの構成は、図-6.1に示すように、道路や駐車場などの融雪舗装面に埋設した放熱管と基礎杭の中空部を管路でつなぎ、その内部に水などの熱媒体を注入し、管路の途中には循環ポンプを設置したものである。融雪路面上に雪が積もっている時は、その積雪を感知する第 5 章で開発した積雪センサーからの信号で循環ポンプが運転される。また、熱管側面の温度センサーが 0°C 近くになると放熱管内部の熱媒体が凍結しな

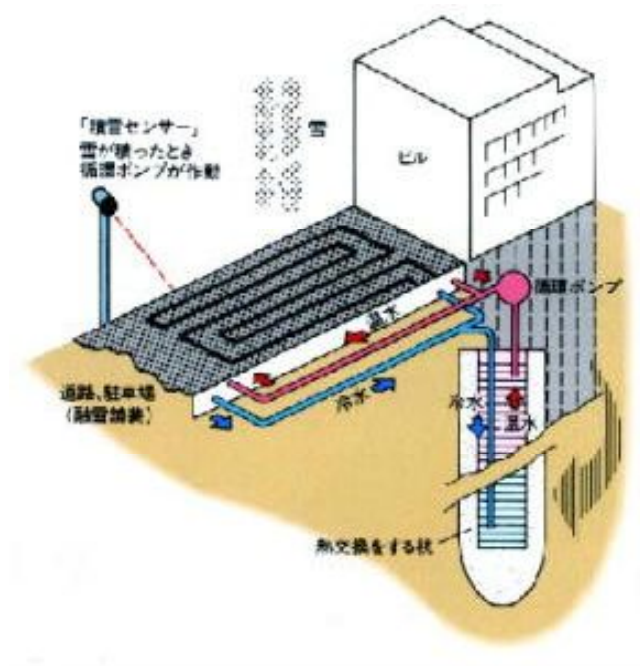


図-6.1 融雪シスムの概念図

表-6.1本融雪システムの事例概要

融雪対象	福井県立大学職員住宅駐車場	400㎡
熱交換使用杭	48本(設計施工)	45本(実際の使用)
PHC 杭	長さ35m,	外径400mm
構造物設計内径	290mm(実際:	270mm)
杭1本当り融雪負荷	8.3㎡/本(設計施工)	8.9㎡/本(実際の使用)
循環ポンプ	2.2kW	循環水量240L/min 設計揚程30m
地盤の自然状態での平均温度	15.8℃	

いように、循環ポンプが運転される。杭頭部の熱媒体は路面内の放熱管に送られ、路面上の雪を溶かす。放熱後の冷たくなった熱媒体は、杭の中の細い管を通り杭底に送られる。杭底部で管から出た熱媒体は、杭の中空部をゆっくり上昇し杭頭部に流れ、その間に杭壁や周囲の地盤から熱を集める。温められた熱媒体は、再び舗装面に流れ、雪を溶かす。冬期間にポンプの運転によって冷やされた地温は、地表面と周囲から次シーズンまでにある程度の回復が期待され、夏期間のポンプの運転によっても初期の状態に回復し得る。

本融雪システムでは、2-5で述べたような高熱伝導の舗装などと組み合わせることで、地盤熱から得られる低い温度であっても、ヒートポンプを用いることなく十分な融雪能力が得られるようにして、設備全体の建設費と維持電気代を縮減し、実用的なものとしている。更に、地熱融雪では、後述するように、融雪運転経過に伴って、杭からの水温が変動することから、融雪能力は一定しない。このことに対して、第5章で述べた積雪センサーでの運転制御は、能力の高い時は断続運転、能力が低下すると雪が降り止んだ後も積雪がなくなるまで継続運転し、効率的な運転となる。

6-3 開発の経緯と本論の構成

まず、1991年1月に、杭2本と融雪面積20㎡規模の7-1で述べる融雪実験を行った。約23時間の融雪運転とその後72時間の回復時における熱移動などについて、数値シミュレーションを行い、実測との一致を確認した。この実験などから、このシステムが大きな融雪能力を持つことが推測された。

そこで、1991年5月から福井県立大学職員住宅駐車場400㎡を試験工事に着工し、1993年1月から供用開始した。以後今日まで、周辺で積雪66cmを記録した際にも、6cm程度の積雪にとどまり、その融雪能力が確認された。その後、本融雪システムは、1996年12月からは福井県小浜市の建設業会館駐車場に、1997年12月からは福井県立音楽堂の歩道に設置され、雪を溶かしつつある。

一連の施工によって、本融雪システムの建設費は、他の地熱利用融雪システムの約1/3～1/4で⁴³⁾、電気や石油ボイラー融雪なみであることが分かった。また、夏の回復運転を含めても循環ポンプの運転動力のみであることから、その運転に要する電気使用量は、融雪に要する熱量の約1/20程度と見積もられた。

しかし、このシステムは、低温熱源での融雪で、かつ杭内水温や地温の変化で融雪能力が変化することに加え、構造物の杭を兼用利用することから、①杭からの漏水、杭との配管、建物下の配管などの設計施工 ②杭の形状や地盤の条件に対応した現場ごとの融雪能力の評価 ③杭壁の温度変化にともなう杭頭変位と杭壁の応力の発生 などに特別な配慮が必要とされる。①については、まず6-4で上記の3例の設計・施工・運転から得られた知見に基づいて述べる。②については、第7章で融雪実験とその熱的な解析・数値シミュレーションで述べる。③については第8章で述べる。最後に8-4で、全体としてのシステムの評価をまとめる。

6-4 設計・施工・運転の事例

本融雪システムを福井市内で試験的に施工した福井県立職員住宅駐車場の概要を表-6.1に示す。これを主な事例にして、設計・施工・運転で得られた知見を以下に示す。



写真-6.1 杭からのポリエチレン管とヘッダー管



写真-6.2 建物下の配管（県立音楽堂）



写真-6.3 杭内部への配管（県立音楽堂）

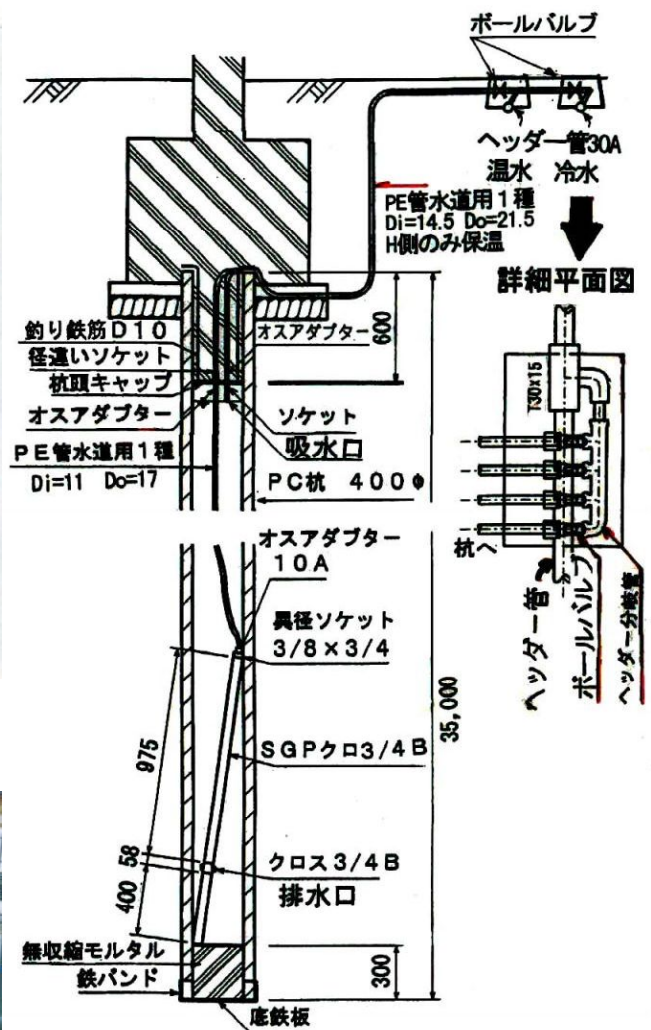


図-6.2 杭内部と杭周辺の配管図

6-4-a) 採熱部（杭とその周辺）

各杭からの流入と流出の2本ずつの管は、写真-6.1、図-6.2に示すように建物の周囲に設けたヘッダー管に接続した。その接続箇所には、ボールバルブを設けた。このバルブは、漏水杭の発見に有用で、漏水杭につながるバルブを閉栓することで、システム全体の破綻は回避された⁴⁴⁾。

杭は、打撃工法で施工されたが、打撃途中に無収縮モルタルを投入し、杭底に厚さ30cmのモルタル層をつくり、漏水防止対策にした(図-6.2)。しかし、48本中3本は、漏水が著しくて利用できないことが竣工後の注水で分かった。残り45本については、全部で年間1m³の漏水が生じた。これは、地上部での試験によって主に杭の底部と杭頭部からの漏水であると推測された。小浜市の若狭地区建設業会館駐車場でも、ほぼ同様な漏水であった。県立音楽堂の施工では、無収縮モルタルの杭底への投入は行わず、杭打設後に杭中空部を満水にし、漏水が少ない杭を選んで配管した。しかし、無収縮モルタルを投入したものにと比べると漏水のない杭は少なく、かなり漏水する杭をも使わざるをえなかった。なお、杭周囲がセメントミルクで覆われるプレボーリング杭を用いた最初の実験施工では、水漏れは生じなかった。

各杭からヘッダー管までの建物下の流入と流出の管は、その内部に空気だまりが生じないようにできるだけ凹凸とならない配管とした。写真-6.2に、その施工状況を示す。

杭の中空部と外部との配管の接続は、杭頭キャップに開けられた穴を通して行った(写真-6.3, 図-6.2)。配管は、必要に応じて鞘管の中を通し、管の保護と戻り管・送り管の識別に用いた。また、杭内部の配管(ポリエチレン水道1種管)の直径は、市販の最小のもの(内径11mm)を用いた。これによって、各杭どれも同じ長さである杭内の鉛直配管の水頭損失が大きくなり、杭頭部からヘッダー管までの配管(内径13mm)長が杭の位置によって異なることによる杭ごとの流量のバラツキは小さくなった。杭から建物周囲のヘッダー管までの水平配管長が杭によって著しく異なる県立音楽堂では、各杭ごとに定流量バルブを取り付けた。

6-4-b) 融雪部（駐車場部）

融雪部では、流水(熱媒体)から積雪までの熱抵抗が大きいと時間当たりの融雪能力が低下する。したがって、低温水利用の融雪では、この熱抵抗を小さくすることがとくに大切である。そこで、この駐車場では、放熱管のかぶり(舗装の表面から放熱管頂までの距離)を3cmと小さくし、舗装には高熱伝導の珪石骨材のコンクリート舗装(熱伝導率: 2.44W/mK)を用いた。



写真-6.4 放熱管の上での舗装の施工（福井県立大学職員住宅駐車場）

また、國島正彦らの研究⁴⁵⁾を参考に専用の平面バイブレーターを作り、稠密なコンクリート舗装となるようにした(写真-6.4)。

放熱管の設置間隔は10cmとした。隣接放熱管の温度が相殺されるように、2-8で紹介したクロス配管で施工した。

放熱管は、鋼管にすれば熱抵抗をかなり小さくできるが、福井県立職員住宅駐車場では、材料コストと施工性からポリエチレン一般1種管(内径13mm 外径17mm)を使用した。

県立音楽堂内の歩道融雪(写真-6.5)では、意匠と雨水排水のため舗装表層に熱伝導率の小さなポーラスな舗装を使うことになったが、放熱管に架橋ポリエチレン管を、またその管を包む表層下のモルタルに表-2.2で紹介した珪砂骨材を使うことで、全体としての熱抵抗が大きくなりないようにした。

放熱管のかぶりについては、約5cm まででは、路面が雪で白くなってから運転開始となる積雪センサー運転であっても、融雪のスタートが遅れて問題になることは生じてない。なお、放熱管のかぶりを3cm と薄くした舗装面は、自家用車の駐車場として6年供用された現在もクラックなどの異常は見られない。

本融雪システムにおいて、放熱管の種類や間隔、そのかぶり、流速が融雪能力に及ぼす影響については、熱解析に基づく数値シミュレーションを用いることから、7-9で述べる。

6-4-c) ポンプ、センサーなどの設備と運転

杭からの温水は、全て温水ヘッダー管に集められ、融雪面に流れる。融雪面からの冷水は、機械室で循環ポンプで加圧され、建物周囲の冷水ヘッダー管に送られ、さらに杭へと流れる。

杭内に貯められた83m³の水が温度変化によって体積変化しても、それが水位変動内で収まるように容量0.6m³のタンクを循環ポンプ直前に設けた。しかし、実際には、杭からの水漏れが生じ、このタンクは不必要で、逆に自動給水装置(ボールタップ)が必要となった。

運転制御に関しては、杭内部の水温変化で融雪能力が変動することから、降雪を感知する降雪センサーではその運転は困難と考え、第5章で紹介の融雪路面の積雪を感知するセンサー(写真-6.6)で行った。このセンサーによって、杭内貯留の水温が高くて融雪能力が高い時は断続運転、融雪能力が低く強い降雪が続き残雪が生じた時は降雪後も継続運転となり、効果的な運転が実現した。

杭内部に貯める熱媒体は、漏水による地下水汚染が懸念されるので、水道水を用いた。この場合、放熱管内の水が凍結して放熱管が破壊するとか舗装にひび割れが生じることが心配されるので、放熱管に沿わせて温度センサーを設置し、0℃でポンプを自動運転することにした。この凍結運転は、福井市内では暖かくて実際にはほとんどなされなかった。

以上の融雪と凍結の自動運転を5年間続けたところ、2度だけポンプ内部に空気がたまり、積雪時に循環ポンプが稼働しないことが生じた。循環ポンプは、常に満水となるように水タンクより下面に設置したにもかかわらず、稼働しないことが生じたことから、それ以後に設計した2カ所の施設では循環ポンプを自吸式とした。

なお、県立音楽堂では配管途中に当初自動給水装置のタンクを設けずに施工がされた。他の2カ所では、ポンプ直前の位置に設置されたそのタンク位置で管路内の空気は排除されたが、音楽堂では、ゆっくりと流れる管路での空気弁の設置はなかったことから、管路内の空気は空気抜き弁では抜けなかった。そこで、配管の一部でその径を大きくして流速を遅くし、その部

分に空気抜き弁を設置して対処した。しかし、それでもバルブ全開で流速を速めると管路の中の空気が自吸ポンプに流れ込むためか、突然に流れが止まってしまう現象が生じた。バルブをやや締めて流速を遅くして運転を長時間継続すると管路内の空気が抜けたためか、バルブを全開にしても流れが止まることはなくなった。なお、このような現象は、ポンプ位置の前にボールタップを組み込んだ開放タンクを設けた他の2カ所では生じなかったことから、音楽堂でもこの空気抜きの箇所が流れにおいてポンプの直前であったなら問題が生じなかったと思われる。ポンプの直前の管路に、チーズを設け細い配管で別室の自動吸水タンクと接合したが、これは空気抜きには効果がなかった。

この融雪システムでは、水道水がコンクリート杭と放熱管の中に注水され、貯留されている。注入した水道水は PH が7.1、カルシウム・マグネシウムなどの硬度が38mg/ℓであったが、5年経過時の貯留水は、それぞれ11.9、174mg/ℓとなっていた。これは杭のコンクリートによる影響であると考えられ。また、これまでの実施例ではポンプを除いて施工性から樹脂管しか使用していないが、鋼管を使用しても内面からの腐食は、この水質からは生じないと思われる。



写真-6.5 県立音楽堂（写真-2.4参照）
背景の住宅の基礎杭を地熱集熱に利用



写真-6.6 県立大学職員住宅（左上部の筒が積雪センサー）
背景の音楽堂の基礎杭を地熱集熱に利用

図-7.1 実験用融雪システムの平面図

止に役立つ。

融雪用の舗装面は広さ 10.4m^2 ($2.6\text{m} \times 4\text{m}$) $\times 2$ 面、厚さ 10cm のコンクリート舗装とし、舗装の下には厚さ 150mm の碎石路盤を施工した。舗装内には表面より 38mm 下に放熱管として内径 13mm 、外径 17mm の架橋ポリエチレン管を 10cm のピッチで配管した。放熱管の配管では図-7.1に示すような往路と復路の配管で、第2章で示したような完全な往路と復路の相殺配管ではないので、融雪にむらが生じた(写真-7.1, 写真-7.2)。また、舗装面の中央位置で、舗装の表裏、中央を含めて深さ方向に5点の温度と放熱管の表面温度、および気温を測定した。さらに、コンクリート舗装の裏面と碎石路盤の間に熱流計を設置し、碎石路盤舗装への移動熱量を測定した。舗装内の放熱管とコンクリート杭の間は内径 16mm 、片道長さ 17m のV P管で連結し、連結管には厚さ 25mm のスチロール保温材を巻いた。

熱媒体には水を用い、ポンプ運転時にはそれぞれのコンクリート杭の入口、出口の温度と流量を測定した。降雪深などの気象データは福井地方気象台(実験場所と直線距離で 450m 離れている)の観測データを用いた。また、積雪センサーは出口側に近い放熱管同士が隣接する融雪が最も遅れる舗装面を観測するように設置した。一定時間ごとに測定されたデータはパソコンへ収録保存した。

また、実験場所の土質調査のため、地温測定位置でボーリングを行った。実験場所の土質はシルトと砂が層状にたい積したものであり、熱的に影響を与えるような地下水の流れは生じないと思われる。サンプリングした試料を用いての熱的な性質を計測した結果を図-7.2に示す。

杭から取り出した熱量は循環水の杭出口と杭入口との温度差と流量により、また杭内の水の温度分布を用いて計算した。杭内の水がコンクリート杭、杭周囲のセメントミルクおよび土から集める熱量は杭内の水が保有する熱量の増加量と杭から取り出した熱量の和から計算した。

7-2 実験結果と考察

実験期間である1991年1月1日の9時から3月5日の9時までの期間に各日の9時から21時までおよびその日の21時から翌日の9時までの各12時間に1本当たりのコンクリート杭が取り出した熱量と降雪深を図-7.3に示す。また、図-7.3には各12時間ごと(9時と21時)の平均地温(深さ 5.5m から 21.5m までの測温点の平均)、コンクリート杭内の水の平均温度および融雪を行わない

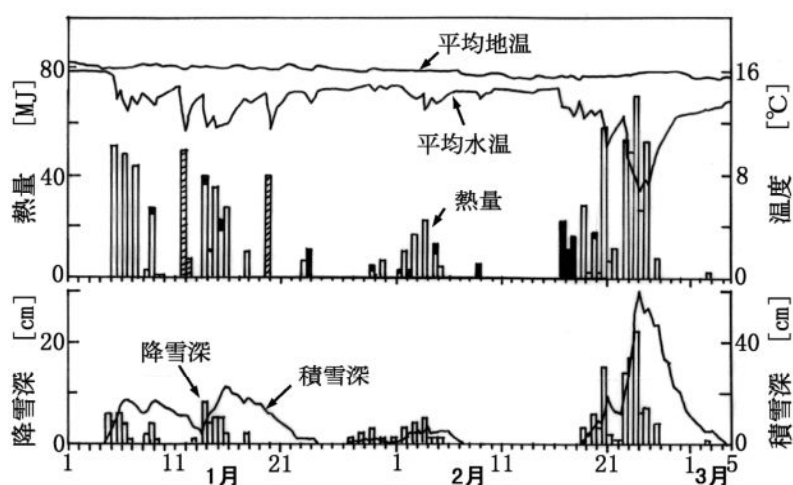
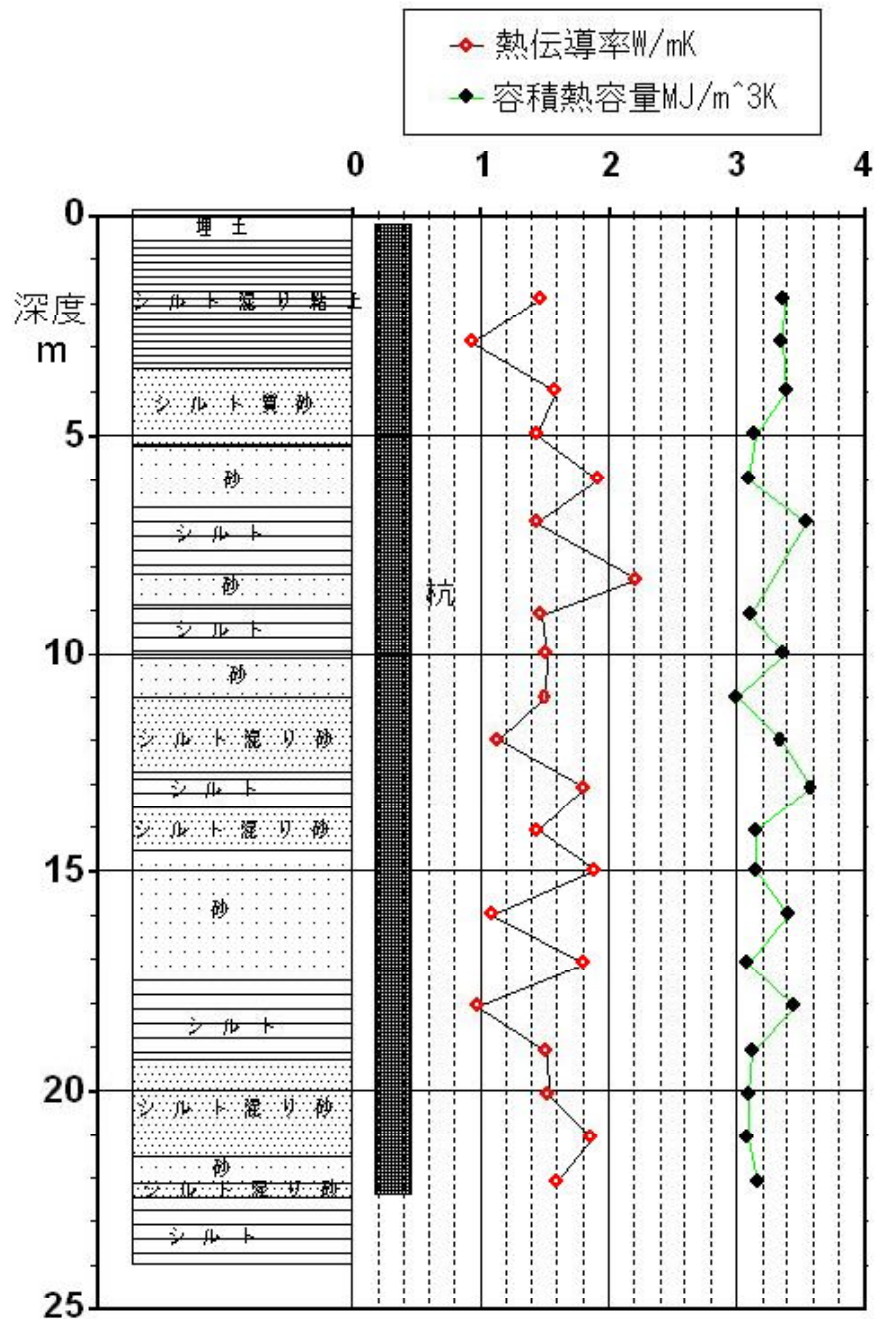


図-7.3 杭1本当たりの取り出し熱量、降雪深などの経過



熱伝導率：ダブルコアバックでサンプリングし、サーマルプローブ法で計測

容積熱容量： $C_s \cdot \rho_s \cdot (1 - n) + C_w \cdot \rho_w \cdot n \cdot Sr / 100$

C_s ：土粒子の比熱 粘性土は 0.92 kJ/kgK 砂質土は 0.84 kJ/kgK として算出

ρ_s ：土粒子の密度 深度 10m 以上は JISA1202 で実測 それ以外は推定

C_w ：水の比熱

ρ_w ：水の密度

Sr ：土の飽和度 100%とした

n ：土の間隙率 土粒子比重 G_s は ρ_s から、含水比 w は JISA1203 で実測し、

$n = G_s / (Sr + w \cdot G_s)$ で算出

図-7.2 実験地点の土質柱状図と熱特性⁴⁶⁾

自然状態の積雪深も併せて示す。図のように集熱の対象となる杭から約2m離れた点の土の平均地温は実験期間中で約16℃でほとんど温度降下がないことが分かる。

また、図-7.3でコンクリート杭より取り出した熱量のうち黒塗りの熱量は凍結防止のために使用された熱量を示しており、白塗りの熱量は融雪に使用された熱量を示している。また、ハッチングの熱量は積雪センサーが誤動作をしたために融雪にも凍結防止にも使用されずに無駄になった熱量を示している。実験の都合で1月5日から7日までの3日間は舗装面にかなりの積雪が生じてから手動で融雪を開始したため降雪時間と融雪のための熱量の取出し時間にずれがあるが、それ以外の積雪センサーで運転された期間では降雪時間と融雪のための熱量の取出し時間に良い対応がみられる。目視観察では、実験期間の降雪深累計187cm(自然状態の最大積雪深60cm)の降雪について、舗装面は本システムの運転によりほぼ無雪の状態に保たれたことが確認できた。また、実験期間の間に、融雪のために運転された時間の累計とコンクリート杭1本当たりの取出し熱量の総計は95時間50分、765.5MJ であるのに対し、凍結防止のために運転された時間とコンクリート杭1本当たりの取出し熱量の総計は6時間9分(総ポンプ運転時間の6.0%)、86.4MJ(全取出し熱量の10.1%)であり、融雪以外に使われる熱量は小さいことが分かる。また、図-7.3から分かるように、コンクリート杭内の水の平均温度はポンプが運転され熱量が

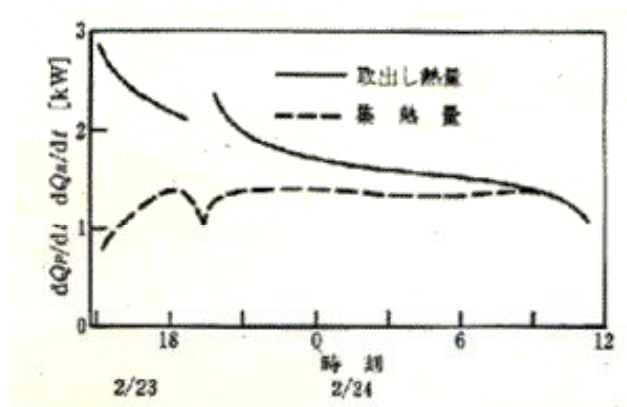


図-7.4 杭1本当たりの取り出し熱量と集熱量の経過

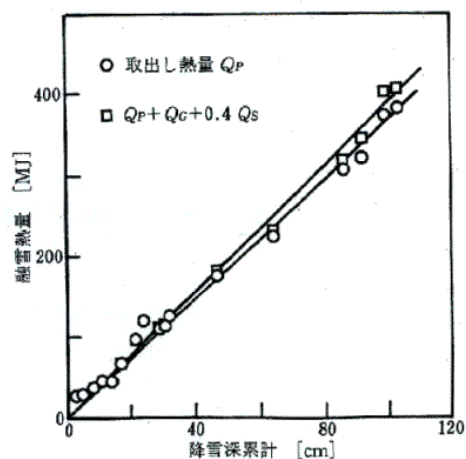


図-7.5 降雪深の累計と融雪熱量



写真-7.1 融雪状況(2月24日1時24分(降雪強度4.5cm/h))



写真-7.2 融雪状況
(2月24日10時32分 融雪を行わない舗装上の積雪53cm)

取り出される間は低下するが、ポンプ運転の停止中に平均地温近くまで上昇し、間欠的な降雪に対しては本システムは有効に機能する。

図-7.3から分かるように2月8日には自然積雪は全くなかったが、2月19日から26日の期間に断続的な降雪があり、この降雪は実験期間中で最大のまとまった降雪(この期間の降雪深累計103cm、自然状態の積雪深最大値60cm)となった。特に2月23、24日ごろは集中した降雪になり融雪のためのポンプ運転が長時間にわたって行われた。その際の約4.5cm/hの最も激しい降雪が続いている最中では、戻り管と戻り管が隣接する放熱管部分を中心に舗装面が雪に覆われているが、行き管同士が隣接する部分では舗装面が現れている(写真-7.1)。また、雪が降りやんだ時に、写真-7.2のように舗装面上には放熱管の戻り管同士が隣接する中間部でしま模様状に5～10cmの深さで積雪が残るのが認められた。しかし、積雪センサーの制御でポンプ運転が継続されることにより、このしま模様状の積雪もすべて溶けた。

図-7.4は2月23、24日のポンプ運転に関して、コンクリート杭1本について、単位時間当たりに、杭から取り出した熱量 dQ_p/dt と杭内の水が周囲から集めた熱量 dQ_R/dt を示す。ポンプは融雪のために2月23日の14時42分から18時51分まで、および19時27分から翌日の11時42分まで運転され、ポンプが停止した36分間は取出し熱量の曲線はとぎれている。ポンプの運転開始時の取出し熱量は杭内の水の温度状態と流量および舗装面の融雪負荷に依存するが、図-7.4のように本システムの運転例(流量5.20 l/min)では単位時間当たりの取出し熱量は時間とともに約3kW から約1.3kW まで徐々に減少していく。一方、集熱量は約1.3kW で時間的な変化が小さく、長時間のポンプ運転により単位時間当たりの取出し熱量と集熱量がほぼ等しくなる。なお、後述の降雪深当たりの融雪熱量 $390 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{cm})$ を用いると、3～1.3kW の取出し熱量は融雪面積 10 m^2 当たり $2.8 \sim 1.2 \text{ cm/h}$ の降雪を融雪する能力に該当する。

融雪中におけるコンクリート舗装の熱収支を考えると、杭よりの取出し熱量 Q_p 、連結管よりの熱損失 Q_L 、碎石路盤より舗装に流れた熱量 Q_G 、舗装より上方の雪に流れた熱量 Q_M 、融雪中に舗装と放熱管内の水が蓄えた熱量 Q_C および水の流動に伴う摩擦損失仕事 Q_F の間に、

$$Q_C = Q_p + Q_G + Q_F - Q_M - Q_L \quad 7-(1)$$

の関係が成り立つ。水の流動に伴う摩擦仕事 Q_F はポンプの揚程曲線と流量から推量すると融雪面積 10.4 m^2 当たり 12 W と非常に小さく、また、融雪中の舗装の温度変化は非常に小さいので舗装が蓄えた熱量 Q_C も非常に小さい。さらに、連結管の出入り口間の温度変化は 0.1°C 以下と非常に小さかったので連結間からの熱損失 Q_L も非常に小さいものと考えられる。したがって、これらの熱量を無視すると、舗装より上方の雪に流れる熱量すなわち融雪熱量は

$$Q_M = Q_p + Q_G \quad 7-(2)$$

で計算される。さらに積雪の上方からの日射と風による熱量も積雪を溶かすのに使われると考えられる。図-7.5は一まとまりの降雪に対する降雪深の累計とその降雪を融雪するために本システムで杭から取出した熱量の累計値 Q_p を杭1本当たりの融雪面積である 10.4 m^2 について示している。図-7.5には、融雪のためにコンクリート杭より取り出した熱量の累計値 Q_p に融雪のためにポンプが運転されている時間に碎石路盤より舗装に流れた熱量(熱流計の測定値) Q_G と全天日射量の累計値 Q_s を加えた $Q_p + Q_G + 0.4 Q_s$ (雪の日射吸収率を0.4とした)も示している。融雪中に碎石路盤より舗装へ流れる熱量は非常に小さく、また、降雪中の全天日射量もそれほど大きくないので、それらの熱量は融雪のための熱量に占める割合は小さい。ただ、2月24日のように、前日の夜間の降雪深が大きく、当日の晴れた昼間に降雪がない状態で積雪状態

を解消するためのポンプ運転が続けられると、全天日射量が融雪に若干の寄与をする。図-7.5から本システムの運転状態では実験期間の降雪 1 cm 当たりの融雪に約 390 kJ/m² の熱量を消費すると言える。これは、降雪密度を福井の最頻値の 0.1 g/cm³ として⁴⁷⁾、その全てが氷であるとした場合の融解熱量 335 kJ/m² に比べて妥当な値といえよう。

7-3 モデル式

本システムの 1 本の杭の取出し熱量と集熱量を数値シミュレーションするために、コンクリート杭、杭の外側のセメントミルクおよび土、コンクリート杭内の水について、図-7.6に示す座標系を用いて数値計算した。ただし、杭の高さ方向の二つの水平断面で測定された杭内の水の半径方向の温度分布によると、杭内の水の速度が非常に遅いにもかかわらず、温度変化が見られなかったため、杭内の水は一次元で取り扱った。また、本システムでは、杭の下端に流入する水の温度は杭の上端から出る水の温度と融雪のための放熱量の大きさによって時間的に変化する。したがって、非定常な温度変化をシミュレーションするには、融雪面である舗装と放熱管内の水の非定常な温度変化を計算し、放熱管出口の水の温度すなわち杭の下端に流入する水の温度(実際には、連結管における温度降下も考慮する)を求める必要がある。連結管および放熱管内の水と舗装の温度分布を三次元非定常計算するのはあまりにも複雑であるので、本シミュレーションでは熱交換器の考え方を適用して、一次元非定常計算で近似した。したがって、杭周囲の土、杭内の水、放熱管および連結管を一体の系として温度場の数値計算を行ったことになる。以上の条件で熱移動に関する基礎式には、次式 7-(3)、7-(4)、7-(5)、7-(6)、7-(7)を用いて数値計算を行った。

1) コンクリート杭および土に関して

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad 7-(3)$$

2) コンクリート杭内の水に関して

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\lambda_w}{C_w \rho_w} \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} - U_w \frac{\partial T_w}{\partial z} + \frac{h P_w}{C_w \rho_w A_w} (T_l - T_w) \quad 7-(4)$$

$$\left(\frac{h D}{\lambda_w} \right)^3 = (3.657)^3 + \left[\frac{0.75 (Ra D / L)^{1/4}}{\{1 + (0.492 / Pr)^{9/16}\}^{4/9}} \right]^3 \quad 7-(5)$$

3) 融雪面となる舗装内の放熱管の熱移動に関して

$$(1 + \alpha) \frac{\partial T_w}{\partial t} = - V_w \frac{\partial T_w}{\partial x} - \frac{K_u B}{C_w \rho_w} (T_w - T_s) - \frac{K_d B}{C_w \rho_w} (T_w - T_d) \quad 7-(6)$$

4) コンクリート杭と放熱管をつなぐ連結管に関して

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = - W_w \frac{\partial T_w}{\partial x} - \frac{K_G P_w}{C_w \rho_w A_w} (T_w - T_G) \quad 7-(7)$$

ここに、 t は時間、 T はコンクリート杭または土の温度、 T_w は杭内、放熱管あるいは連結管内の水温、 T_l は杭内壁の表面温度、 T_s, T_d, T_G はそれぞれ舗装面上の雪、舗装下方の路盤、連結管周囲の土の温度である。 U_w, V_w, W_w はそれぞれ杭内、放熱管内および連結管内の水の速度である。 r は杭の中心から半径方向の距離、 x は放熱管入口からの放熱管に沿った距離、 z は杭の底より上方向の距離である。 h は杭内の水と杭の内壁との間の熱伝達率である⁴⁸⁾。 α は舗装のもつ熱容量を放熱管内の水の熱容量に置き換えた場合の割合を示している。 B は放熱管の配管

表-7.1 計算に用いた定数

コンクリート杭：	
熱伝導率	1.83 W/(mK)
比熱	0.9 kJ/(kgK)
密度	2400 kg/m ³
セメントミルク：	
熱伝導率	0.92 W/(mK)
比熱	1.2 kJ/(kgK)
密度	1600 kg/m ³
土：	
熱伝導率	1.54 W/(mK)
比熱	1.9 kJ/(kgK)
密度	1730 kg/m ³
水：	
熱伝導率	0.58 W/(mK)
比熱	4.2 kJ/(kgK)
密度	1000 kg/m ³
熱通過率：	
放熱管と雪の間	23.8 W/(m ² K)
放熱管と放熱面下方路盤の間	7.1 W/(m ² K)
連結管内の水と保温外面の間	3 W/(m ² K)
一定に保たれる温度：	
雪	0 °C
舗装面の下方路盤	4 °C
連結管の保温材外壁	3 °C

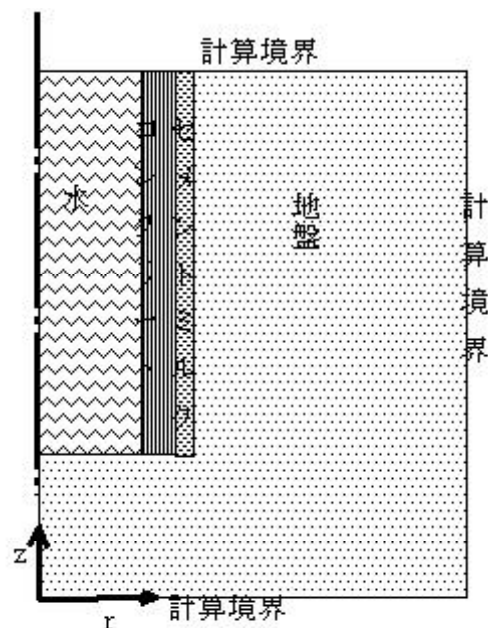


図-7.6 地中杭の断面図と座標系

ピッチ、 P_w, A_w は杭あるいは連結管の周囲長さと断面積、 K_u, K_d, K_G はそれぞれ舗装面の上方と下方、および連結管の熱通過率である。 λ, ρ, C と λ_w, ρ_w, C_w は、それぞれ土もしくはコンクリートと水の熱伝導率、密度、比熱である。 Pr, Ra は杭内流水のそれぞれプラントル数とレーレー数である。また、 D は杭の内径、 L は杭内で自然対流が生じる領域の長さである。

また、図-7.12に後述するように、融雪を開始すると、初期の時間では杭の下方では杭内壁と杭内の水との間に温度差が生じるが、杭の上方では温度差が生じない。そして、時間の経過とともに温度差の生じる範囲が上方に広がっていく。したがって、自然対流が生じる領域もこの温度差が生じる範囲に限定されると考えられるので、ここでは便宜的に、杭内壁と杭内の水の温度差の最大値の1/2以上の温度差を示す範囲を自然対流が生じる領域 L とした。また、レーレー数 Ra に含まれる温度差には領域 L の平均温度差を用いた。

さらに、融雪のためのポンプの運転開始時には放熱管にたまっていた雪の温度に近い水が杭の底に還流するが、杭の上方から放熱管に送られた水は融雪によって温度が降下しても雪の温度よりかなり高い温度で杭の底に還流するので、この時間の間は杭の底に下方で温度が高く、上方で温度が低い温度の急激な逆転層が生じる。このような温度の逆転層が生じる場合にはその逆転が解消される範囲で上下方向に水が混合するものとした。

7-4 杭内水1巡までの融雪の実測と数値シミュレーション

数値計算におけるコンクリート杭などの形状は実験の形状に合わせ、土などの物性値も実測値を用いた（図-7.2）。計算に用いた物性値などを表-7.1に示す。また、杭の有効採熱長さを21m、杭の水平遠方の計算境界を4m、杭の下方計算境界を杭の底より3mとし、それらの計算

境界で断熱に保たれるとした。数値計算と実験との比較を行うため、融雪開始時に杭内の水、コンクリート杭、その周囲のセメントミルクと土の温度が一樣であるとの条件を満足するように、冬季の最初の積雪について行った融雪実験を対象に数値シミュレーションを行った。その際の融雪実験は、連続的な融雪負荷を与えるため、積雪センサーを作動させず、舗装面上にかなりの積雪が認められる状態で手動でポンプの運転を開始して融雪を行った。以下に、杭内の流量、融雪面積の異なる2例についてのシミュレーション結果を示す。なお、初期温度が一樣であるという条件は実験結果ではコンクリート杭外壁および土の測温点の温度のばらつきが0.6℃以内で満たされていた。

1991年1月5日9時45分から13時45分までの4時間にわたって連続して行われた融雪の実験(融雪過程)および融雪終了直後から翌日の9時45分までの20時間にわたって連続してポンプが停止し、杭内の水の温度が回復する実験(回復過程)をシミュレートした。融雪過程の数値計算では実験に合わせて一樣な初期温度15.8℃と流量5.47 l/min(杭内の流速4.36m/h)を与えた。また、杭1本の取出し熱量で融雪する面積は10m²(放熱管のピッチ0.1m、放熱管の長さ100m)とした。さらに、回復過程の数値計算では杭内の水、コンクリート杭、セメントミルクおよび土の初期温度に融雪終了時(t=4h)の数値計算結果を与え、杭内の水の上昇速度Uを0とした。

図-7.7、図-7.8 はそれぞれ融雪過程の杭内の水の温度 T_w の分布とコンクリート杭の外壁の温度 T_2 の分布を示す。図のように、融雪のためのポンプ運転を始めると融雪に熱量を費やされ温度低下した水が杭の底に流入するため、杭内の水は下方から階段状に温度低下する。そして、時間経過とともに杭内壁からの熱移動によりこの階段状の温度分布はなだらかになり、高さ方向に直線的な温度分布に近づく。また、杭外壁の温度も下方から順次低下していくが、熱伝導による熱拡散のため温度分布は杭内の水のような階段状の分布を示さない。これらの様子は定性的にも定量的にも実験と数値計算でほぼ一致している。なお、この実験条件では杭内の水が下端から上端まで移動するのに要する時間(以下この時間を杭内の水が一巡する時間という)は4.8時間であるため、4時間の融雪実験時間では杭の上方の温度は初期温度のままに保たれている。

図-7.9、図-7.10はそれぞれ回復過程の杭内の水の温度 T_w の分布とコンクリート杭の外壁の温度 T_2 の分布を示す。なお、図-7.9、図-7.10中の時間は回復過程開始時の時間を $t=0$ としてあり、この時の温度分布は図-7.7、図-7.8の $t=4h$ の温度分布に等しい。図より分かるように、杭内の水の温度は時間経過とともに徐々に上昇していき、その上昇割合は温度が低い杭の下方ほど大きい。また、温度の上昇割合は時間が経過するほど小さくなる。杭外壁の温度は回復過程の初めは低下し、時間が経過すると、上昇に変わる。その温度低下量は杭の上方ほど大きい。これらの様子は実験と数値計算で定性的にも定量的にもほぼ一致している。

上述の実験では融雪開始時の舗装面上の積雪深が約3cmと小さいため、4時間で融雪が終了し、杭内の水が一巡していないので、一巡後の融雪能力の変化がわからない。そこで、図-7.7、図-7.8と同じ条件で4時間経過後も舗装面に積雪があるものとして、融雪のためのポンプ運転を続行し、72時間経過するまで数値計算した結果を図-7.11、図-7.12、図-7.13に示す。図-7.11は杭内の水の温度分布を示している。図のように、水が1巡後は杭内の水は高さ方向にほぼ直線的に変化し、杭壁から熱量を受けて温度上昇しながら上方に流れるのが分かる。また、時間経過とともに杭内の水の平均温度は徐々に低下するが、その温度低下の割合は小さくなる。

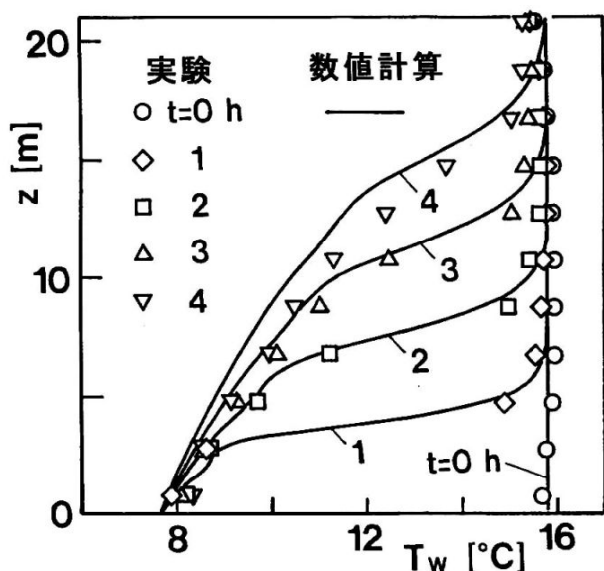


図-7.7 杭内の水の温度分布（融雪過程）

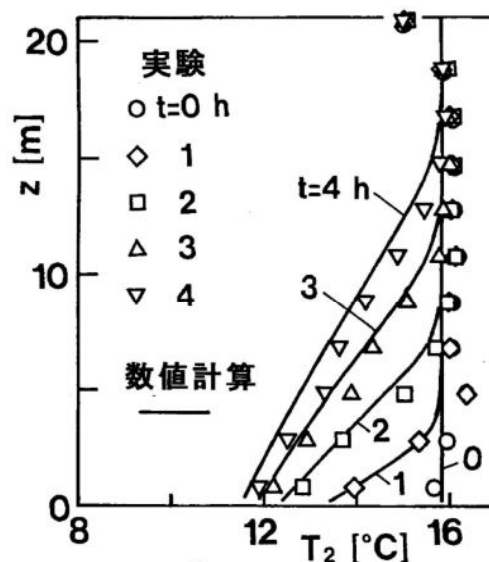


図-7.8 コンクリート杭外壁の温度分布（融雪過程）

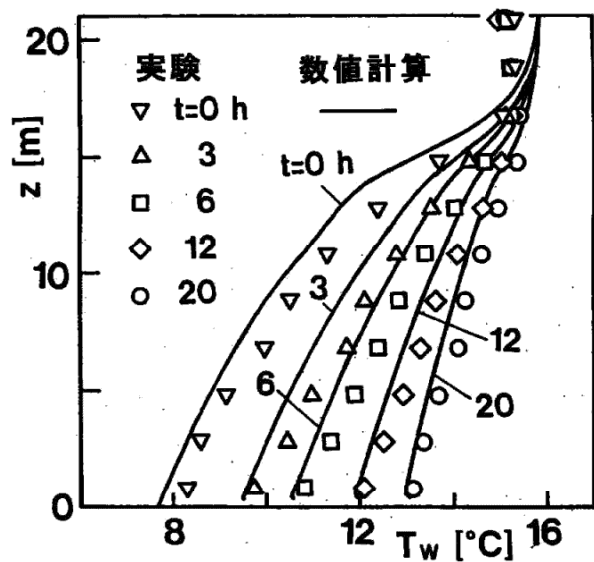


図-7.9 杭内の水の温度分布（回復過程）

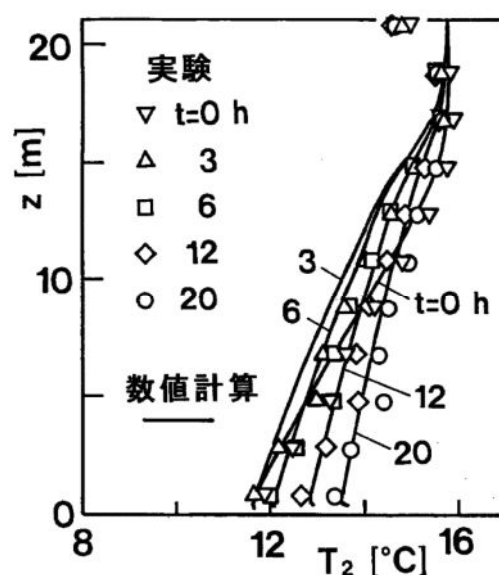


図-7.10 コンクリート杭外壁の温度分布（回復過程）

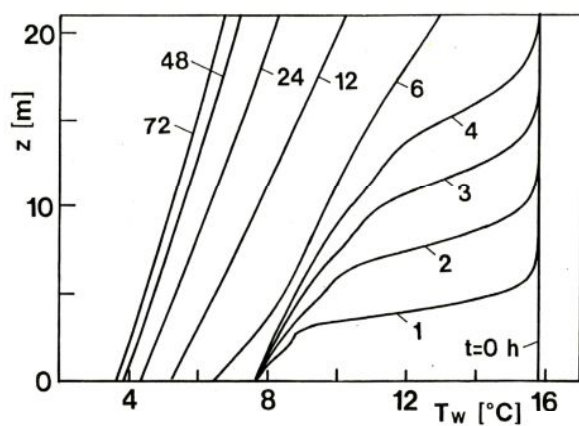


図-7.11 杭内の水の温度分布（融雪過程）

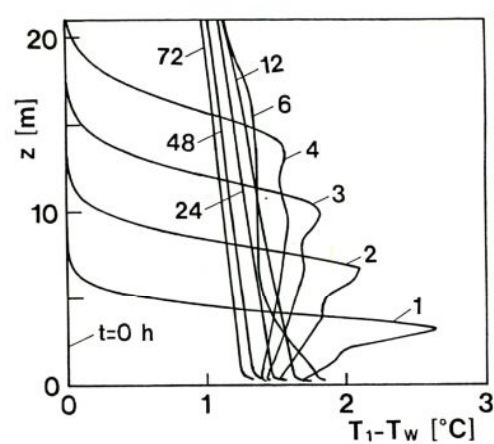


図-7.12 コンクリート杭内壁と杭内の水の温度差（融雪過程）

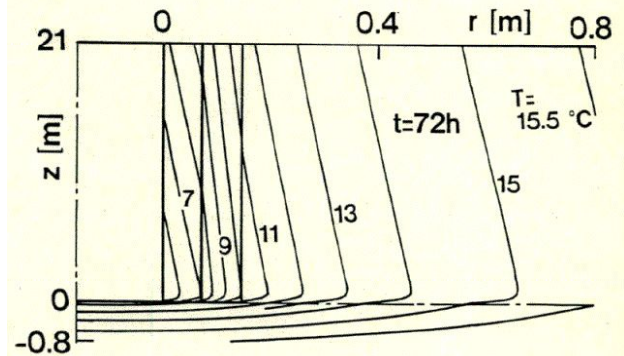
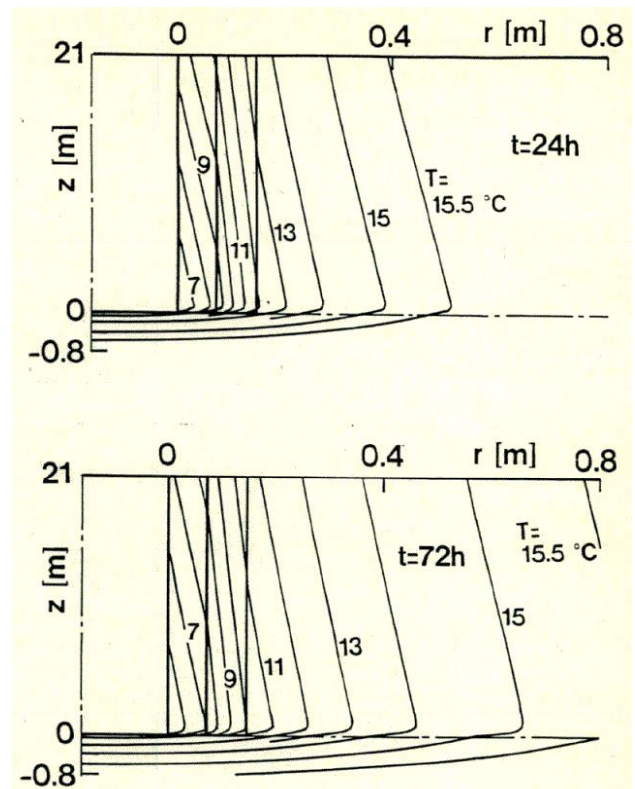
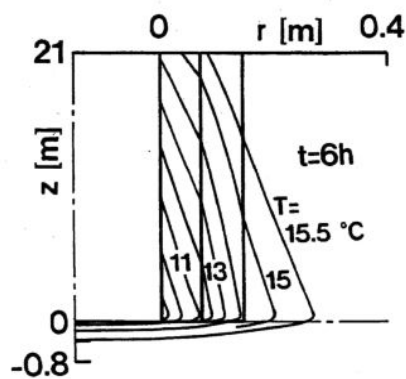
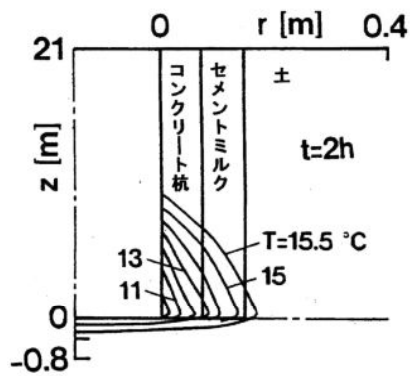


図-7.13 コンクリート杭、セメントミルクおよび土に生じる温度場（融雪過程）

図-7.12はコンクリート杭壁と杭内の水の温度差 $T_1 - T_w$ の分布を示している。図のように、杭内の水が一巡するまでは杭の上方では温度差が0であり、杭の下方でのみ温度差が生じる。そして、温度差の生じる範囲が時間経過とともに上方に広がっていく。一巡後はこの温度差は杭の下方から上方までそれほど大きく変化せず、また時間経過によっても温度差はそれほど大きく変わらない。図-7.13はコンクリート杭、セメントミルク、土に生じる温度場の等温線を示している。なお、図-7.13では z 軸のスケールを $z = 0 \sim 21\text{m}$ と $z = 0 \sim -0.8\text{m}$ で変えて、後者のスケールを拡大してある。図-7.12のように融雪の最初は温度変化の伝わる範囲は杭の下方に限られるが、時間経過とともにその範囲は杭の上方と遠方に広がるのが分かる。また、72時間経過後では初期温度より 0.3°C 以上温度低下した領域は、 15.5°C の等温線に見られるように、杭の内壁と底より遠方におよそ80cm程度まで広がるが、その時点でも土の温度は杭の底に相当する深さあたりが一番低下するのが分かる。図-7.14は杭1本について、杭から取り出した熱量の積算値 Q_p とその時間こう配(単位時間あたりに取出す熱量) dQ_p/dt および杭内の水が周囲から単位時間あたりに集める熱量 dQ_R/dt を示している。杭内の水が一巡するまでは杭から取り出される水の温度は初期の一定温度に保たれるので、単位時間あたりに取り出す熱量は変わらないが、一巡後はその値が急速に小さくなり単位時間あたりの集熱量に漸近する。単位時間あたりの集熱量は杭内の水が一巡するまでは急速に大きくなり、およそ二巡するまでほぼ一定に保たれ、それ以後は徐々に小さくなるのが分かる。融雪の初期の時間では単位時間あたりに取り出す熱量は単位時間の集熱量より大きい、その差は時間経過とともに小さくなる。この差は実際の融雪では反復して融雪が行われる際の回復過程（ポンプの運転の停止期間）で杭内の水が蓄えた熱量に依存することになる。本計算例では蓄えた熱量が24時間でほぼ

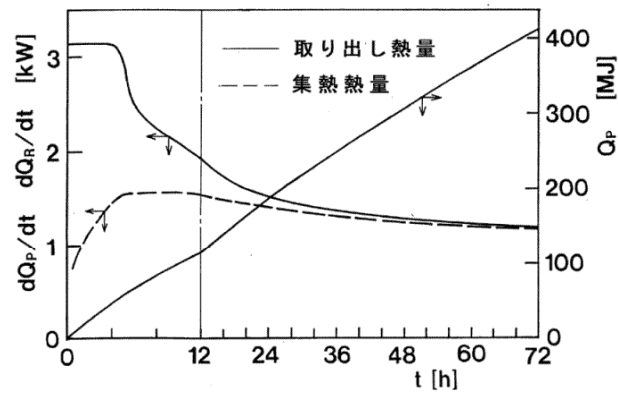


図-7.14 取り出し熱量と集熱量の経過（融雪過程）

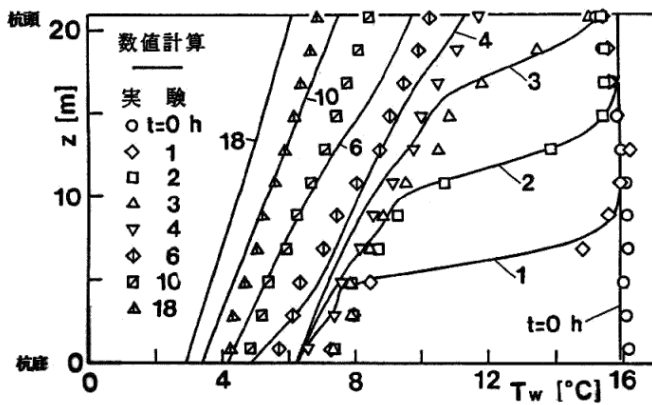


図-7.15 杭内の水の温度分布（融雪過程）

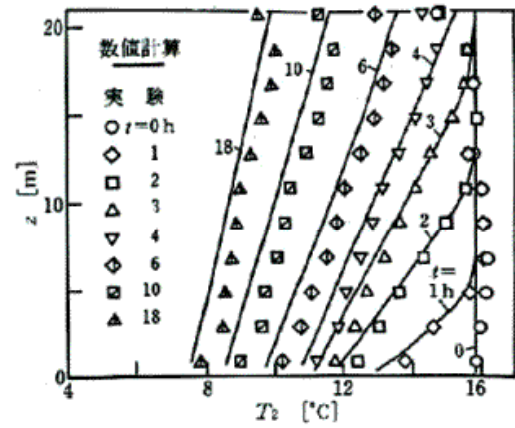


図-7.16 コンクリート杭外壁の温度分布（融雪過程）

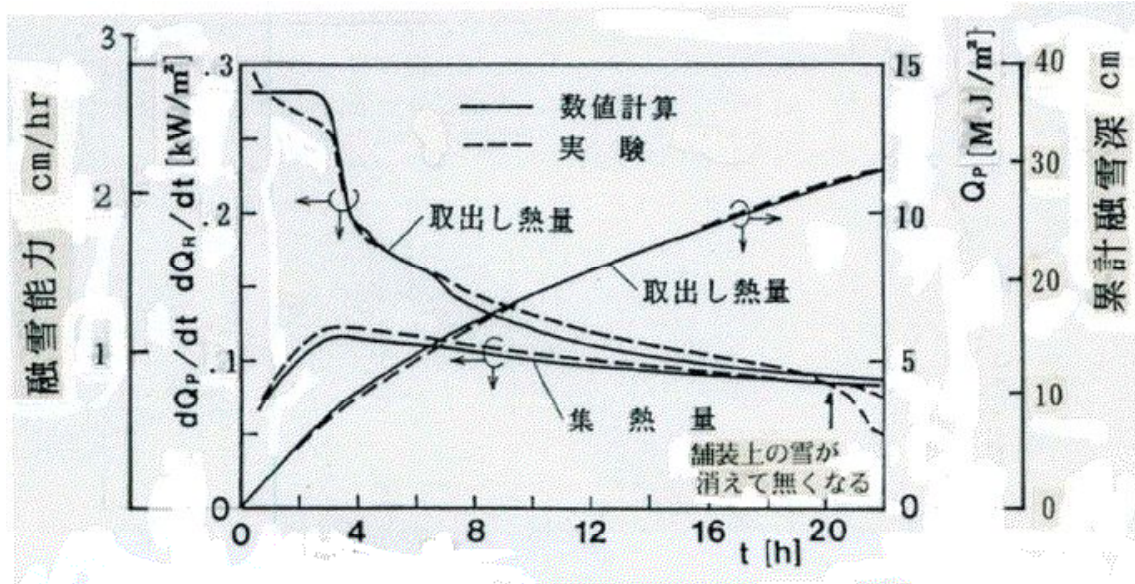


図-7.17 取り出し熱量と集熱量の経過（融雪過程）

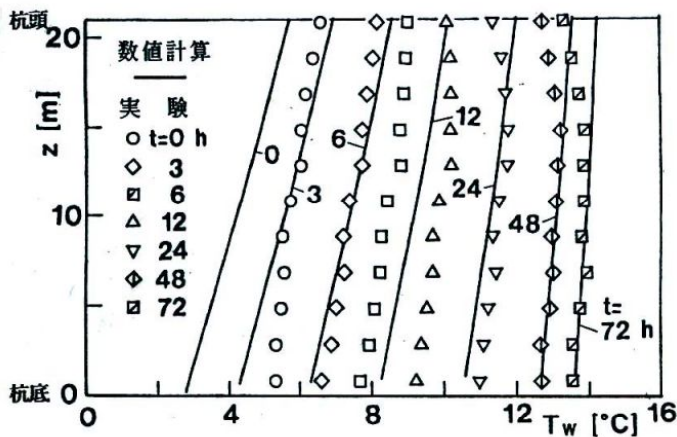


図-7.18 杭内の水の温度分布（回復過程）

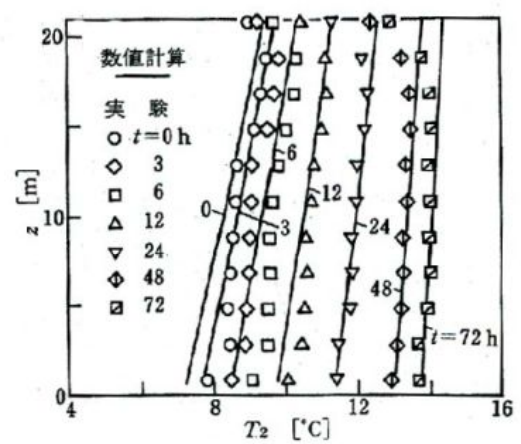


図-7.19 コンクリート杭外壁の温度分布（回復過程）

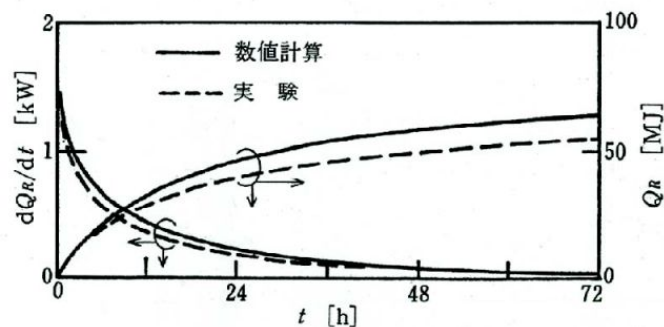


図-7.20 集熱量の経過（回復過程）

消費されるのが分かる。また、72時間で取り出した積算熱量は412MJであり、先述の実験データから、降雪深に基づく融雪熱量 $390 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{cm})$ を用いると、この熱量は106cmの降雪深を溶かす能力に相当する。また、72時間経過後の単位時間当たりに取り出す熱量は1.2kWであり、この値は図-7.4に示した実験値にほぼ匹敵する値となっている。すなわち、長時間にわたるポンプ運転後の熱量も実験結果と数値シミュレーション結果はよく一致するといえる。

7-5 杭内水7巡までの融雪の実測と数値シミュレーション

1992年1月19日14時0分から翌日の12時30分までの22時間30分の間にわたって連続して行われた融雪の実験（融雪過程）と融雪終了直後から3日後の9時45分までの72時間にわたって連続してポンプが停止し、杭内の水の温度が回復する実験（回復過程）をシミュレートした。数値計算の初期条件としては、実験に合わせて、融雪過程では、一様な初期温度 15.9°C と流量 8.28 L/min （杭内の流速 6.58 m/h ）を与え、杭1本の取出し熱量で融雪する面積を 20 m^2 （放熱管のピッチ 0.1 m 、放熱管の長さ 100 m を並列に2回路）とした。さらに、回復過程の数値計算では杭内の水、コンクリート杭、セメントミルクおよび土の初期温度に融雪過程終了時（図-7.15、図-7.16、図-7.17の $t=22.5 \text{ h}$ ）の数値計算結果を与え、杭内の水の上昇速度 U_w を0とした。この実験例では融雪面積と杭内の水の速度が7-4の例より大きく、かつ、融雪開始時の舗装面上の積雪深が13cmと大きいので融雪終了までに杭内の水が約7巡しており、融雪過程の実験で1巡後の熱量、温度の変化の様子が分かる。また、融雪終了後の杭内の水の温度低下が大き

く、その後の長時間にわたる温度回復の様子が分かる。

融雪過程の実験結果と数値計算結果について、杭内の水の温度 T_w と杭外壁の温度 T_2 の分布および杭 1 本について、杭から取り出した熱量の積算値 Q_p とその時間こう配(単位時間当たりに取り出す熱量) dQ_p/dt および杭内の水が周囲から単位時間当たりを集める熱量 dQ_R/dt を図-7.15、図-7.16、図-7.17に示す。図のように、放熱管から杭への戻り温度の計算結果が実験結果より若干低いため、計算結果と実験結果の間で、1 巡後の杭内の水の温度分布に若干の差異が認められるが、温度分布の推移の様子、取出し熱量と集熱量の値とその推移の様子は良く一致している。なお、融雪終了時の取出し熱量と集熱量の実験値が急に小さくなっているが、これは融雪終了に近づくと写真-7.2のように部分的に積雪が残り、融雪のための熱負荷が融雪面全面が積雪で覆われている場合より小さくなるためである。融雪終了時では取出し熱量と集熱量の時間微分値の計算値は約1.7 kWとなっており、この値は0.8cm/h の降雪深を溶かす能力に相当する。

図-7.18、図-7.19、図-7.20は回復過程の実験結果と数値計算結果について、杭内の水の温度 T_w と杭外壁の温度 T_2 の分布および杭 1 本について、杭内の水が周囲から集める熱量の積算値 Q_R とその時間こう配(単位時間当たりの集熱量) dQ_R/dt を示す。図のように、回復過程初期の温度分布は実験と数値計算で若干の差異があるが、時間経過とともにそれらは一致してくるのが分かる。実験と数値計算とに生じる集熱量の積算値の差異は回復過程開始時の杭内の水の温度分布の差異によるものである。図-7.20のように単位時間当たりの集熱量は最初は急激に小さくなり、その後は時間経過とともに徐々に小さくなる。

7-6 実用施設・1 シーズン融雪での実測と数値シミュレーション

以上、数値計の結果は実測値とよく一致した。しかし、その期間は、連続22時間30分の融雪とその直後から72時間に限られたものであった。また、小規模な実験施設での結果である。そこで、かなりの降雪があった1993年12月中旬から翌年3月15日までの1シーズンの降雪について、表-6.1の事例概要で示した県立大学職員住宅の実際の融雪で、数値シミュレーションを行い、実測との比較を行った。

長期の融雪では、 r 方向と杭軸下方向の計算(断熱)境界までの距離が影響する。 r 方向については、建物周囲の杭ではその外方向の境界は無限になるし、内部の杭も等間隔に設置されていない。そこで、その影響の大きさを計算結果で後に確認するとして、ここでは、建物の内側の隣接杭間の平均距離4mの1/2とした。

計算領域の地盤の平均熱伝導率と平均熱容量は、1mごとのサンプリング試料から、各々1.82W/(mK)、3.22MJ/(m³K)であること、またコンクリート杭のそれは供試体から各々1.83W/(mK)、4.56MJ/(m³K)であることを求めた。

実測値として、建物周囲に設置されたヘッダー管分岐部での代表的な杭への出入口水温とその流量、杭内部の水温(杭の頭部近傍と底部近傍)を自動計測した。

計算では、シーズン初め(1993年12月17日)の地盤、杭内水などの温度を、杭内部の水温の実測値から全て17℃とした。この値は、この地域の自然状態での地盤温度15.8℃に比べて高いが、これは、夏に路面温度が上昇した際にポンプを運転したところ、前シーズン融雪に使用した以上の熱が地盤に貯えられたことによる。

計算は、実測の流量と杭への入口水温を杭底の流出位置に与え、水が杭内を流れ地熱を回収

し杭頭出口に達するとして行った。運転停止の際の熱移動も計算を行い、杭とその周囲の温度場を逐次計算した。図-7.21は、融雪運転中のデータについて取りだして、杭入口水温の実測値、杭出口水温の実測値およびその計算値を示したものである。なお、図の横軸は、日付について等間隔でなく、比較的まとまった降雪のあった1月20～24日、2月3日、2月16～17日が拡大されている。

ほぼ連続した融雪運転となった1月23～24日では、実測された入口水温(図-7.21)は、最初は融雪路面全体が冷やされているため5.2℃と低く、路面が温かくなるにつれ融雪にのみ熱が使われ9℃近くまで上昇している。やがて、冷水が杭頭にまで流れてきて杭出口水温が下がると融雪面への入口水温が下がる。すると融雪面からの出口温度は当然下がり、杭入口水温が下がる。融雪面に雪が少なくなると杭出口水温が下がっても杭入口水温は上昇し、無積雪になると運転は停止する。この連続した融雪運転期間の出口水温での計算値は、次第に温度が下がるが、実測値とよく一致している。

1月23～24日以外では、降雪量が少なく長続きしないため、融雪面からの冷えた水が杭出口に流れない内に融雪が完了してしまうので、杭出口水温は融雪の影響をほとんど受けないことが推測される。

図-7.22は、図-7.21と同じ計算によって得られた杭頭近傍(杭頭より0.5m下方)と杭底近傍(杭底より1.5m上方)の計算水温を1シーズン全期間について、実測値と対比したものである。この図の杭頭近傍の水温について、計算値は融雪による水温低下の影響のみを考慮しているが、実測値は融雪とは関わりなく全期間にわたって徐々に低下していることが分かる。この杭頭近傍の水温の実測値は、計算値より次第に低くなり、やがて3月には約2℃低くなっている。その現象は、図-7.21でも、出口水温の実測値が計算値より次第に低くなっていることに見られる。これは、計算では地表面(建物の下)を断熱と仮定しているが、実際には地表面から熱が奪われ、杭頭近傍ではその水温が低下することによる。したがって、杭内部の水温分布は、杭頭部では地表面からの冷却でやや低くなり、杭底部では融雪でかなり冷やされ、杭頭部よりやや下部で最も高温になる。そこで、融雪開始後しばらくすると、その最も高温の水が杭頭部に送られ、図-7.22の矢印Aで典型的なように杭頭近傍部の水温は0.2～0.3℃上昇する。地表面の実際の熱的条件は、建物内の暖房などによっても異なるが、参考までに12月から3月の外気温の月平均は6.0℃、3.3℃、3.0℃、5.4℃であった。

図-7.22で、杭底近傍水温は、融雪時に冷水が入ってくると8℃近くまで急激に低下する。しかし、その後融雪運転停止とともに、1月20日までは、融雪運転時間が少なく、ほぼ元の水温にゆっくりと回復している。1月20～23日のかなりの降雪による連続的な運転でも、徐々に回復し、2月9日では約15℃にまで回復している。

また、運転開始直後の杭底水温の最低温度は、計算値が実測値より例えば図-7.21の矢印Bで示されるように、1～3℃低くなっている。これは、ヘッダー管分岐点から杭底までポリエチレン管内を流れる間に、建物下面の地盤と杭内水で温められることが計算されてないことによると思われる。しかし、この計算と実測の差は、ポリエチレン管の周囲の地盤がすぐに冷やされるためか、一時的なもので、すぐに計算値と実測値は一致し始める(図-7.21)。

杭出入口水温の差と流量の積から杭1本から取り出した熱量を求め、その累計を図-7.23に示した。この図から、すでに述べた計算と実測の差違は小さくて、その熱量累計の差違は1シーズンで約8%にすぎないことが分かる。

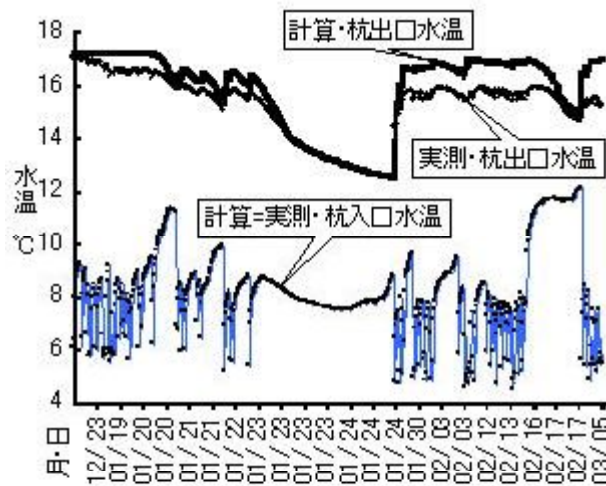


図-7.21 杭の入り口水温と出口水温の計算値と実測値

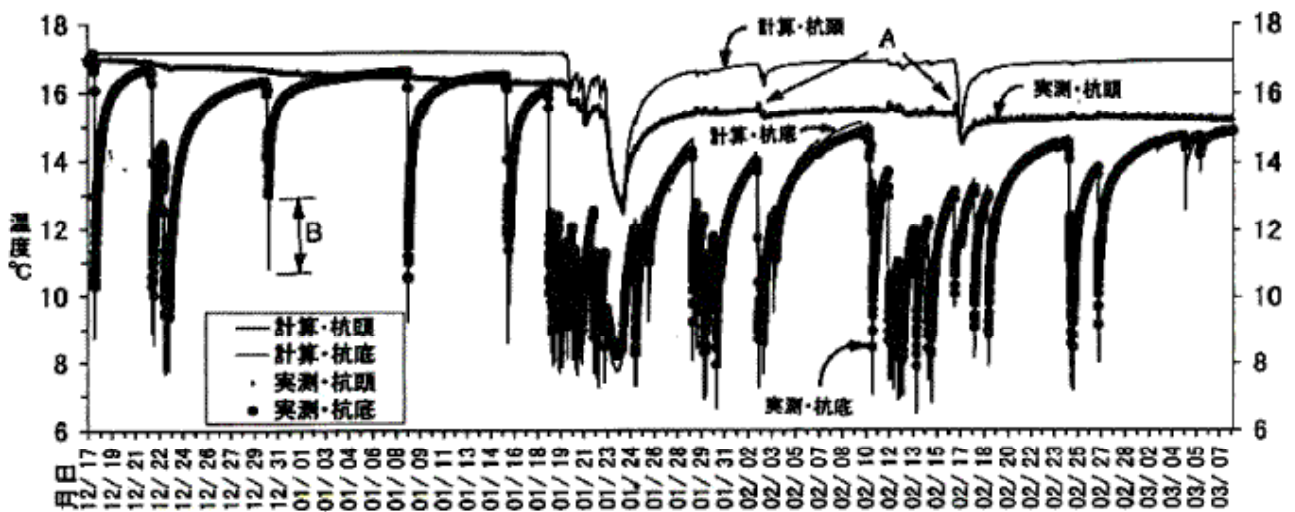


図-7.22 杭頭、杭底の水温（計算値と実測値）

次に、このシーズンの福井地方気象台記録の降水量からの降雪負荷を融雪面に与え、7-2で示したように、福井市内では降雪1cm 融雪するには 390kJ/m^2 の熱量が必要と見積もって、数値シミュレーションを行った。さらに、本融雪システムの融雪能力が変動することが融雪に与える影響を知るため、電気ヒーターやボイラーなどの融雪能力が一定しているシステムとの比較を行った。ここでは、福井市内で一般に使われている融雪能力 2cm/h のものを取り上げた。計算では、それぞれ融雪能力を超えた降雪を残雪深として求めた。図-7.24は、その結果で、図の上部に、能力 2cm/h 融雪での残雪深から本融雪システムでの残雪深を差し引いたものを示した。シーズン中いずれも、本融雪システムの方が 2cm/h の融雪より残雪が少なかった。本融雪システムの残雪深は1月23日16時では 9.3cm と計算されたが、実際の残雪深は約 6cm であった（写真-7.3）。これは、計算では駐車場全面に融雪負荷がかかるとしているが、実際には車の駐車場で負荷が少ないことなどによると考えられる。この時刻では、図-7.24に示す自然積雪深（気象台観測） 66cm に達し、周辺の駐車場では、写真-7.4のように車はフロントの高さまで雪に埋もれた。なお、その後2月2日夜～3日朝には、新たに 26cm が積もる降雪があったが（図-7.24）、写真-7.5のようにほぼ無積雪で、これは図-7.24の残雪深とも一致した。

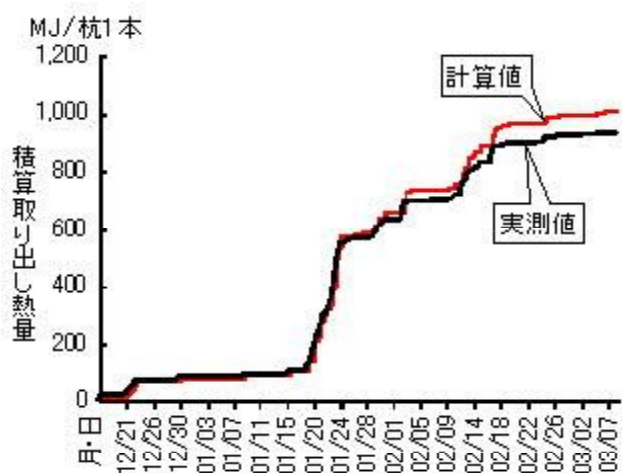


図-7.23 積算取り出し熱量

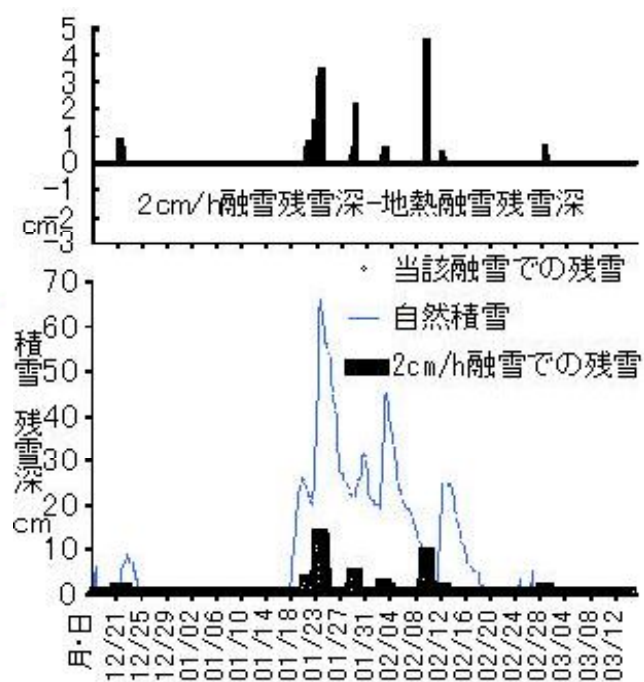


図-7.24 融雪の数値シミュレーション結果



写真-7.3 5年間で最大積雪の際の状況1994年1月23日16時
(背景の建物の杭を利用)



写真-7.4 写真-7.3と同じ時刻での周囲の駐車場



写真-7.5 新たな積雪26cmでの状況 1994年2月2日10時

7-7 豪雪での数値シミュレーション

福井地方を1980年12月27日から翌年1月23日まで襲った約20年来の豪雪(56豪雪)の降雪パターン(气象台記録)を、県立大学職員住宅の融雪システムで融雪したとして、その残雪深を数値シミュレーションで求めた。図-7.25に、その結果を、能力2cm/hの一定融雪での残雪深、積算降雪深、自然状態での積雪深とともに示した。また、図の上部に、能力2cm/h融雪での残雪深から本融雪での残雪深を差し引いたものを示した。なお、この残雪深は、積雪の自然沈下や日射などでの融雪は考慮されてない。しかし、その影響は、12月27日から12月29日にかけて積算降雪深と自然降雪深(气象台観測)がほぼ一致していることから、残雪になるような雪が激しく降り続けている期間は、無視できると考えられる。

図-7.25では、本融雪装置は、積算降雪深495cm、最大自然積雪深195cmの56豪雪に対して、集中的な降雪があった12月27～30日、1月5～7日、1月11日～15日には、降雪に融雪が追いつけず、最大で35cmの残雪となるが、それ以外はほぼ無積雪となっている。

また、図-7.25の上部から、能力2cm/hの融雪に比べ、本融雪は、初めは能力が上回り残雪量が少ないが、やがて能力が下がり、約90cmの連続融雪後は、能力2cm/hの融雪残雪深より残雪が多くなることが分かる。初めの能力が高いことで最大残雪深は、能力2cm/hの融雪とほぼ同じである(図-7.25)。融雪の終了では、能力2cm/hの融雪に比べ、12月30日では3時間、1月7日では7時間、1月11日では1時間遅れるものの無積雪となる。

このような融雪結果となる原因を同じ期間中の杭内部の平均水温と杭壁の平均温度の変化を示した図-7.26で見てみる。最初15.8℃の平均水温と平均壁温度は、連続融雪で、各々6℃、8℃近くまで下がる。その低下は初めは急速だが、次第に低下しなくなっている。これは、水温が低下すると、融雪に使われる熱流は小さくなり、逆に杭内の水が杭壁や地盤から集熱する熱流は大きくなり、両熱流は次第に等しくなることによる。等しくなるにつれ、杭内の水温の低

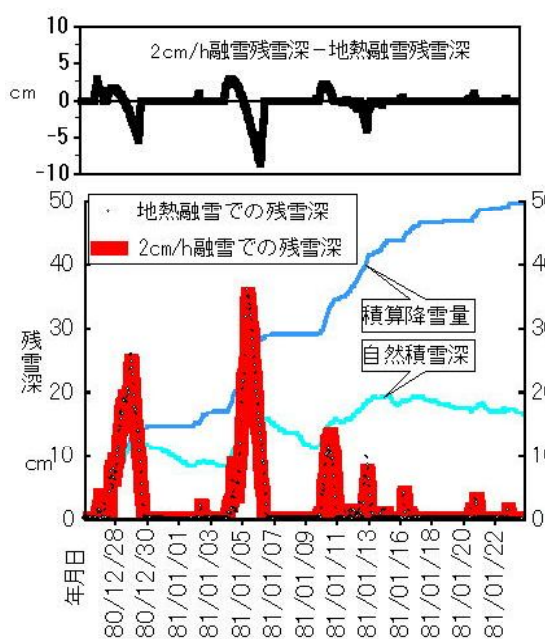


図-7.25 豪雪での数値シミュレーション結果

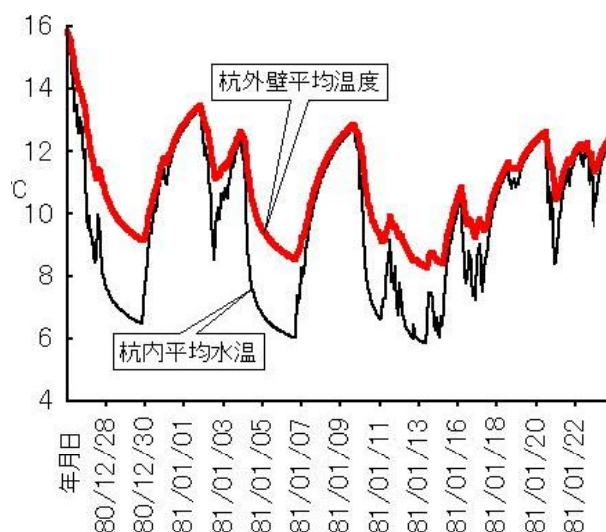


図-7.26 豪雪の際の杭内平均水温

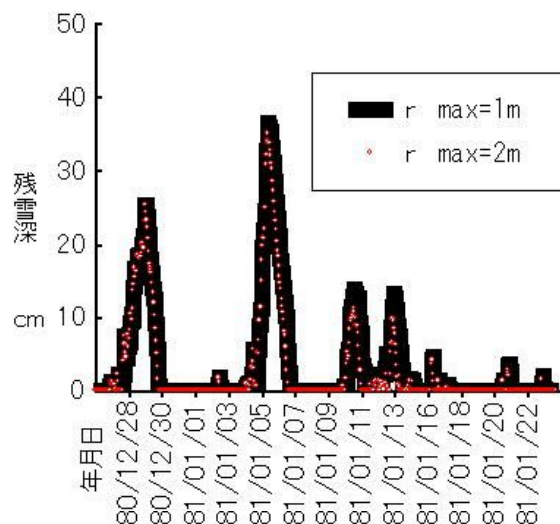


図-7.27 断熱境界の距離の違いが融雪能力に及ぼす影響

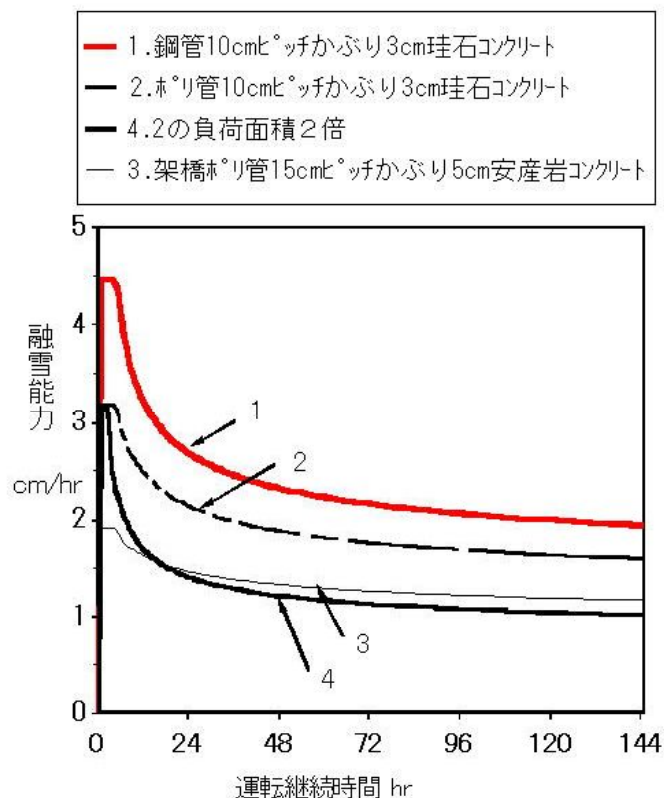


図-7.28 融雪面の違いと融雪能力の変化

下はわずかになり、融雪能力はほぼ低下しなくなる。そして、融雪終了後も、地熱を集め続け、次の寒波までには、13℃まで回復している。

なお、ここでは、積雪センサーによって積雪がある限り運転されるが、現在一般的に使われている降雪センサーでは、12月30日7時以後は雪が降っていないため、30日7時の積雪11cmで運転がストップしてしまう。なお、能力2cm/hの融雪であっても、積雪7cmの状態では運転が停止し無積雪に至らない。

以上から、図-7.24の通年の最大降雪では能力一定の融雪に比べ残雪が少なかった本融雪システムも、豪雪では、次第に能力が低下し、能力一定の融雪に比べ最大残雪深はほぼ変わらないが、寒波の後半では残雪はやや多くなる。しかし、融雪は続けられ、能力一定の融雪に比べ、数時間遅れで無積雪にできることが分かる。

7-8 杭の設置間隔が融雪に及ぼす影響

ここで、杭の設置間隔が融雪に及ぼす影響について述べる。これまで計算で用いた図-7.6の r 方向の計算（断熱）境界の2mを4m、1mに変えて残雪深を計算してみた。その結果を図-7.27に示す。境界を4mにしても、最大で0.2mmの違いにすぎなかった。1mにすると、12月30日では全く差がないが、1月7日で最大3.9cm、1月14日で最大5.6cm残雪深が多くなった。豪雪で地盤がかなり冷やされても、その熱伝導率と容積比熱からは、この程度の差しか生じない。したがって、杭の間隔については、あまり厳密に考えずに平均での取り扱いが良い。

7-9 放熱管の種類、間隔などの融雪部条件が融雪能力に及ぼす影響

表-6.1の杭や地盤などの集熱部の条件と融雪面積は変えずに、放熱管などの融雪部の条件を図-7.28の上の1～4に示すように変えて、その違いによる融雪能力への影響を6日間(144時間)の連続融雪運転で試算した。図-7.28は、その結果である。図-7.28の上の1～4のいずれの条件でも、本融雪能力は、杭内部に貯留された水が1巡するまでは一定で、その後急速に低下し、やがて、融雪などで取り出された熱量と杭内部の水が杭壁や地盤から集める熱量とが等しくなり、ほとんど低下しなくなっている。

図-7.28で、1.の鋼管を10cm 間隔、そのかぶりを3cm にして珪石骨材のコンクリート舗装(熱伝導率 2.5W/mK)に埋設した融雪部の融雪能力は、最初の杭内水温が 15.8°C の際には 4.5cm/hr 、144hr 連続運転後も 2cm/hr を維持している。しかし、ボイラー加熱温水循環で代表的な3.の架橋ポリエチレン管15cm 間隔、かぶり5cm、安山岩骨材の舗装(熱伝導率 1.5W/mK)のものでは、1巡目でも 2cm/hr の能力が得られない。これは、1.の融雪部の条件では、熱抵抗が小さいために融雪で使われる熱量が大きくなり、杭底に戻る水温も低くなり、2巡目からは融雪能力がダウンすると思われるが、杭底に環流する水の温度が下がることで、杭内の水が杭壁や周囲の地盤から多くの熱を集めることができ、融雪で取り出す熱量とのバランス点が大きくなることによる。このように、杭利用の地熱融雪でも、流水(熱媒体)から積雪までの熱抵抗を小さくすることが融雪能力を大きくする上で大切であることが分かった。

表-6.1の県立大学職員住宅の駐車場の現場では、施工性なども考慮し、2.のポリエチレン管を10cm 間隔、かぶり3cm、珪石骨材のコンクリート舗装にした。この場合の融雪能力は、 $3.2\sim 1.7\text{cm/hr}$ で、福井市内で一般に使われている 2cm/hr にほぼ対応する。

次に、この2.の融雪部の条件は変えずに、杭1本当当たりの融雪面積を2倍にする例を図-7.28に4.として示した。この場合の融雪能力は、管路内の水が1巡するまでは水温は変わらないので、元の2.と同じであるが、1巡後は急激に下がり、その後一定値に収斂し、144時間後では元の2.の能力の64%になる。このことから、融雪部の設計は、杭本数などの採熱部の条件をも考慮して決められるべきであることが分かる。

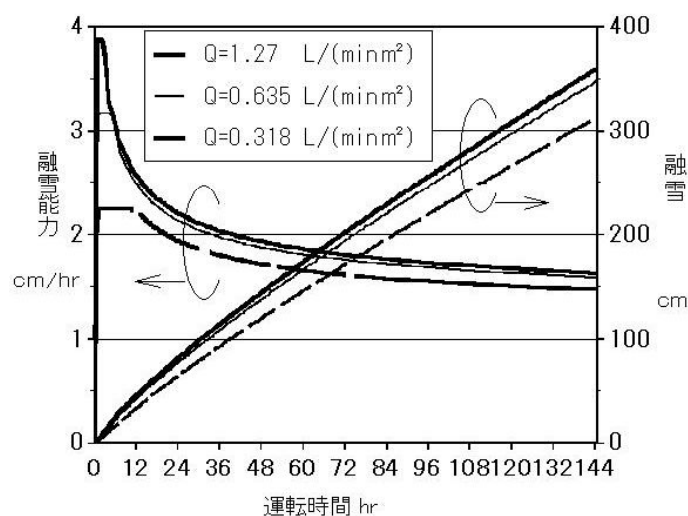


図-7.29 循環水量が融雪能力に及ぼす影響

図-7.29に、図-7.28の2.の融雪部の条件の循環水の流量 $0.635 \text{ l}/(\text{minm}^2)$ を2倍と1/2倍にした場合の融雪能力の変化を示した。流量を2倍に速めると融雪面の放熱管の途中での水温低下が少なくなり初期の融雪能力は上昇する。しかし、1巡後は杭内部の水温がその分低くなるため、その効果はなくなる。杭内部への水温の低下は僅かで、時間当たりの集熱量は杭内部の流速変化に対してほぼ一定であることから、1巡後は、流量2倍の効果はほとんど見られない。流速を1/2にすると、融雪部では流れが乱流から層流になることで、融雪部の熱抵抗が大きくなるため、この場合はやや融雪能力が低下する。

実際の設計に際しては、放熱管種とその間隔とかぶり、舗装の熱伝導率、循環流量、使用杭本数を変えた幾つかの条件で、通年と豪雪の降雪パターンで本数値シミュレーションを行う。そして、その結果をもとに、例えば図書館と緊急病院などといった各々の豪雪時の融雪目標の違いも考えて、最適な条件のものを選定することになる。

このように、融雪部の条件や杭1本が負担する融雪面積などを適正にとれば、当該融雪システムは、豪雪に対しても破綻することなく、能力一定の融雪などに比べ遜色のない能力が得られるものと計算された。

第 8 章 熱交換杭の温度変化にともなう変位と応力

8-1 モデル式

この地熱融雪システムは、基礎杭を兼用するため安価であるが、その代償として、基礎杭が温度変化し、杭には応力と変位が生じる。この値は豪雪時に最大となるが、その値を事前に知ることが必要とされる。

杭の軸直交方向の温度差は小さいので後述（8-3）するとして、杭の軸方向の変位を考えると、杭の軸方向の変位と外力の関係は、図-8.1に示すように、周囲および先端にバネを有する弾性体としてモデル化される。

図-8.1において微小区間 dx での力の釣り合いを考えると

$$dN + \tau U dx = 0 \quad 8-(1)$$

ここに、 dN ：微小区間 dx での圧縮力の増加量 dx ：微小区間長 U ：杭外周長 τ ：杭周面摩擦応力である。

杭周面摩擦応力は変位 ν に比例するとみなせるので

$$\tau = C_s \nu \quad 8-(2)$$

ここに、 ν ：深さ x における杭の軸方向変位量 C_s ：すべり係数（杭周囲のバネ定数）である。

さて、杭の dx 部分に温度変化 T が生じたとすると、杭周囲の拘束がなければ長さ dx は $(1 + \alpha T) \cdot dx$ になるはずだが、拘束を受けて $dx + (d\nu/dx) \cdot dx$ にしかない。したがって、この場合に生じる圧縮力 N は

$$N = \frac{(1 + \alpha T) dx - \{dx + (d\nu/dx) \cdot dx\}}{(1 + \alpha T) dx} A_p \cdot E_p = (\alpha T - d\nu/dx) \cdot A_p \cdot E_p / (1 + \alpha T) \quad 8-(3)$$

ここに、 α ：杭の熱膨張率 T ：深さ x における杭の温度変化 A_p ：杭の純断面積 E_p ：杭のヤング係数となる。

式8-(1)、8-(2)、8-(3)より

$$\alpha \frac{dT}{dx} - \frac{d^2 \nu}{dx^2} = -C_s \cdot \nu \cdot U \frac{1 + \alpha T}{A_p \cdot E_p} \quad 8-(4)$$

を得る。

杭長 L を n で等分割し式8-(4)を差分式に直し、 $\alpha T \ll 1$ であるから $1 + \alpha T \approx 1$ として整理すると $i = 1$ から $i = n - 1$ までについて

$$\nu_{i+1} - \left\{ 2 + \frac{C_s \cdot U}{A_p \cdot E_p} x \right\}^2 \nu_i + \nu_{i-1} = \alpha \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2} \Delta x \quad 8-(5)$$

が得られる。

次に境界条件について考える。建物全体が同一仕様の杭によって支持され、融雪による杭頭変位は全ての杭について同じであるとする、建物荷重などによるそれまでの杭内部の変位・応力に温度変化による変位・応力を重ね合わせることで杭の変位・応力は求められる。また、この場合温度変化によって生じる杭頭での応力は0で、杭底での圧縮力は変位に比例するものと考えられる。

$$N_{x=0} = (\alpha T_{x=0} - d\nu/dx_{x=0}) \cdot A_p \cdot E_p / (1 + \alpha T_{x=0}) = 0 \quad 8-(6)$$

$$N_{x=L} = (\alpha T_{x=L} - d\nu/dx_{x=L}) \cdot A_p \cdot E_p / (1 + \alpha T_{x=L}) = k\nu \cdot A_{pb} \cdot \nu_{x=L} \quad 8-(7)$$

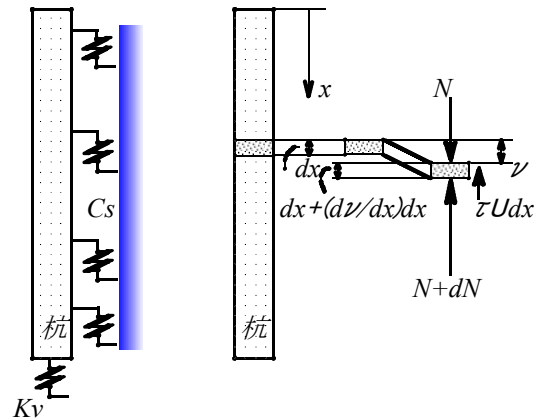


図-8.1 杭の軸方向の応力－変位モデル

ここに、 k_v ：鉛直方向地盤反力係数 L ：杭長 A_{pb} ：杭底の全断面積 を得る。

C_s 、 k_v と杭位置での温度 T を既知とするなら式8-(5)、8-(6)、8-(7)の併せて $n+1$ 個の式から $v_0 \sim v_n$ までの $n+1$ 個の未知数が求められる。そこで、次に滑り抵抗(バネ定数) C_s 、 k_v について検討する。

8-2 実測杭頭変位からの逆解析

融雪実験に用いた杭は、セメントミルクで孔壁保護を行いながらのプレボーリング工法で設置したので岡原らの場所打ち杭の実験式と杭先端が砂質土で N 値が16 であることから $k_v = 6.7 \text{ N/cm}^3$ と推定した⁴⁹⁾。

次に C_s については、駒田敬一、山川朝生は杭径の1%の変位について $C_s = N \text{値} / 1.5 \text{ N/cm}^3$ とし⁵⁰⁾、岡原美智夫らはコンクリート杭の降伏時の変位量について砂質土で $C_s = N \text{値} / 5.1 \text{ N/cm}^3$ 粘性土で $C_s = N \text{値} / 1.5 \text{ N/cm}^3$ であるとしている⁵¹⁾。これらの C_s と N 値 の関係は、ばらつきが大きく、さらに、杭壁温度変化による変位に比べ変位の大きな領域での値である。

そこで、ここでは C_s は N 値に比例し、また粘性土と砂質土でその比例定数が違うと仮定し、その比例定数を徐々に変えて先のモデル式を用いて杭頭変位を算出し、この計算値が実測杭頭変位と最も一致する値を求めることにした。

ここでの杭頭変位は、門型の支持固定鋼管にダイヤルゲージを取り付けて計測した。また、杭の熱膨張率は、杭の供試体を用いて計測した。1992年1月19日14時からの融雪運転によって、杭には図-8.2に示す温度変化と図-8.3の杭頭変位量が実測された。これらの値を用いて、先のモデル式で試行計算した。その結果、 C_s を砂質土では $N \text{値} / 1.1 \text{ N/cm}^3$ 、粘性土では $N \text{値} / 0.44 \text{ N/cm}^3$ と仮定した杭頭変位量の計算結果は図-8.3に示すように実測値とよく一致した。前述の駒田敬一らや岡原美智夫らの $N \text{値} / 1.5 \sim N \text{値} / 5.1 \text{ N/cm}^3$ に比べて、ここでの C_s が大きいのは、 C_s は変位量の小さい領域では大きいことによると考えられる。

次に、この逆算された C_s を用いて、この融雪実験期間中の杭の引張応力、杭の各位置での変位量を6時間ごとに求めた結果を図-8.4、図-8.5に示す。これらの図から、杭の温度低下によって、杭はある程度縮み、杭頭では沈下し、杭底では上昇していることが分かる。なお、実際は

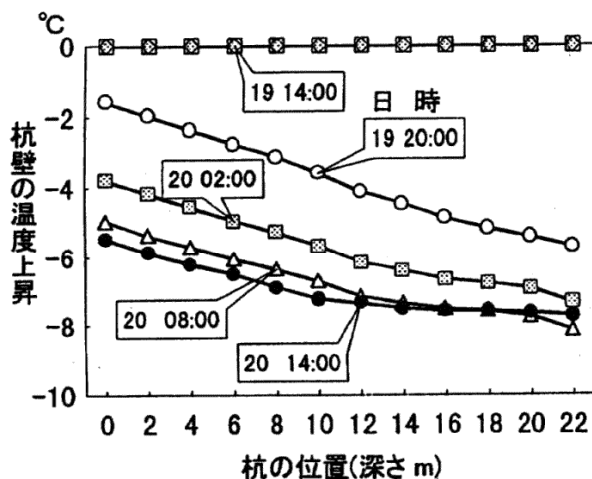


図-8.2 杭壁温度の変化

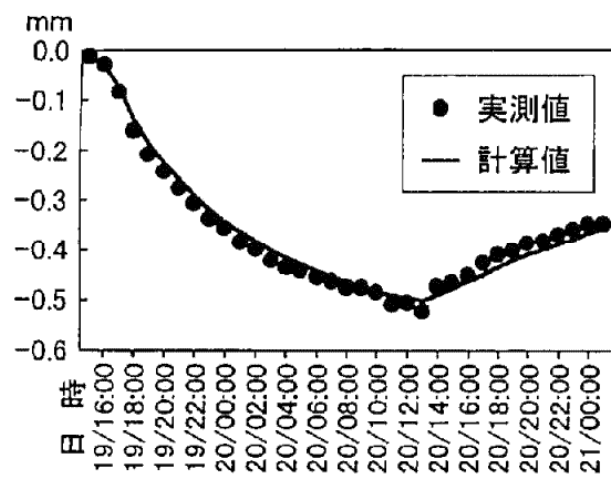


図-8.3 杭頭の変位量

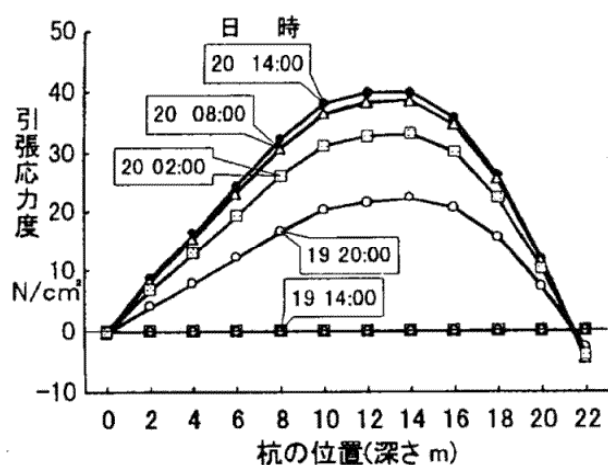


図-8.4 杭の応力度

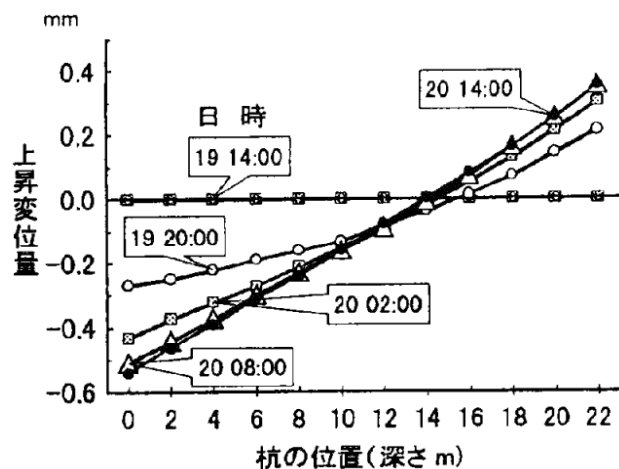


図-8.5 杭の変位量

建物荷重による杭底の沈下量が温度低下で小さくなることを意味する。したがって、温度低下で、杭底地盤への負荷は小さくなり、杭の先端支持力としては安全側になる。

また、杭と周辺地盤のすべり抵抗と杭底鉛直方向の地盤反力によって、その変位はある程度拘束されていることから、杭には引張応力が発生している。その値は、杭の中央部よりやや下で最大の 38.7N/cm^2 になると計算された。

8-3 豪雪時の応力・変位

以上の計算では、建物を支える全ての基礎杭が同じように温度変化すると仮定した。しかし、1本の柱の元に複数の基礎杭があって、その内の1本だけを融雪に使う場合は、その杭頭は周囲の使わない杭で固定され変位しないと考える方が杭の応力に関しては安全側になる。この場合は、式8-(6)は次式に置き替えて求められる。

$$\nu_0 = 0$$

$$8-(8)$$

この杭頭固定のケースを含めて、先に述べた56豪雪時での県立大学職員住宅での数値シミュレーションで、杭壁温度が最も低くなった1月14日11時での温度変化を求め（図-8.6）、杭の変位とその応力を求めた（図-8.7、図-8.8）。

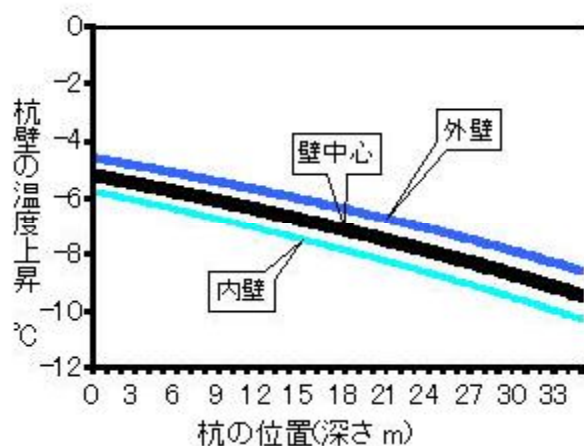


図-8.6 豪雪時の杭壁温度上昇

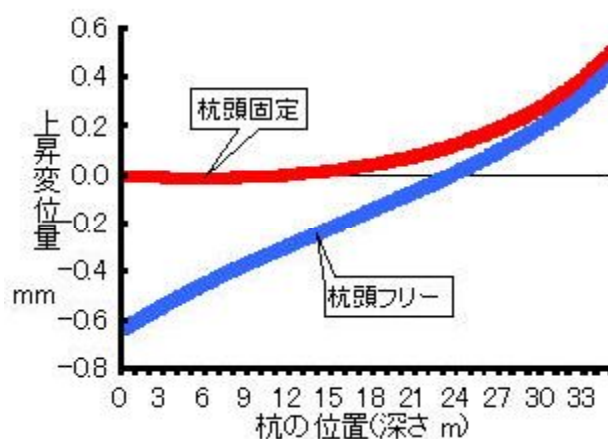


図-8.7 豪雪時の杭の変位量

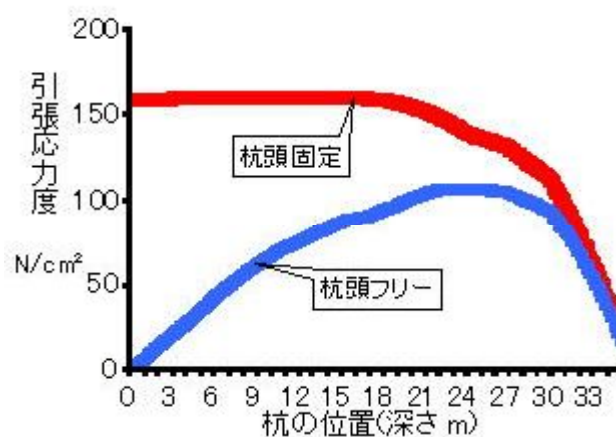


図-8.8 豪雪時の杭の応力度

建物の杭全てが融雪に使われ、杭頭が自由に上下する杭頭フリーでは0.64mm 沈下する結果が得られている。この程度の沈下は、柱下の基礎杭の本数を1本から2本と整数で負担させることでも生じる程度の変位であり、その程度で建物への影響は一般に生じないと考えられる。また、杭には中央部よりやや下の深さ23m で、最大値108 N/cm^2 の引張応力が生じると計算された。

また、杭頭固定では、杭のほぼ中央部付近の13m の深さまで、杭は変位せず、それより深い部分で、杭が上昇する結果が得られた。これらは、杭頭変位フリーで縮んだものをその杭頭変位量だけ上に引っ張ったものと解される。そして、杭底では杭頭フリーよりやや大きく上昇する結果となっている。杭には、杭頭から深さ17m までの区間で、ほぼ同じ160 N/cm^2 の引張応力が生じている。それより深いところでは、その変位が完全に拘束されなくなり、引張応力は小さくなっていることが分かる。

これらの応力は、常時荷重としては豪雪時の値を100%用い、地震時と同時に作用すると考える場合は、屋根への積雪荷重の扱いに準じて⁵²⁾、融雪による温度応力の35%を考慮して設計するのが適当と考えられる。これで設計すると、一般に、常時荷重では、構造物載荷で設計された杭の応力にかなり余裕があつて問題にならない。地震時では融雪起因での引張応力の35%は、一般に許容曲げ引張応力の一割程で小さく、杭の応力に余裕があれば杭種のランクを上げ

るまでに至らない。

最後に、杭の軸直交方向の温度差による応力について述べる。杭壁が一様に温度低下する場合は、杭は杭軸直交方向に縮み、内部に応力は生じない。杭の内壁が外壁より $T^{\circ}\text{C}$ 低くなると、内壁と外壁に $\alpha E_p T / (2(1-\nu))$ のそれぞれ引張応力と圧縮応力が生じる⁵³⁾。ここに、 ν はポアソン比で、杭の供試体での試験から0.2を得ている。豪雪時には、壁の内と外側の温度差は図-8.6に示すようになり、最大値は 1.7°C と計算された。したがって、壁内側と壁外側に 29.4 N/cm^2 のそれぞれ引張応力と圧縮応力が生じる。なお、杭軸直交方向には、建物の荷重による応力は生じないので、十分な余裕があり、この程度の小さな応力では問題にならない。

8-4 第6章から第8章のまとめ

基礎杭利用の地熱融雪システムに関しての第6章～第8章を要約すると次の通りとなる。

- ①提案した数値シミュレーション結果は、十数時間の杭内部の実測温度場とも一致し、実際の規模の1シーズンの融雪出力の実測ともほぼ一致した。したがって、本数値シミュレーションは融雪能力の見積もりに有効である。
- ②実際と数値シミュレーションから、長時間連続融雪運転での融雪能力は、次のようになることが分かった。すなわち、杭内の水が一巡するまでは、一定の融雪能力で、その後徐々にその能力は低下する。しかし、やがて杭壁と地盤から杭内の水が集熱する熱量と融雪部で放熱する熱量がバランスする熱量レベルで、融雪能力がほぼ一定に収斂する。それ以後の融雪能力の低下は、非常にゆっくりとしたものとなる。
- ③今回の条件の本融雪システムは、通年の降雪では能力 2cm/h の融雪よりよく溶けることが分かった。数値シミュレーションから、豪雪時にも、降雪初期はよく溶けるため 2cm/h の融雪とほぼ同じ最大残雪深にでき、雪が降り止んだ後も、積雪センサーによって運転され、その数時間後には無積雪にできることが分かった。
- ④放熱管の種類や設置間隔とのかぶり、舗装の熱伝導率などの融雪部の条件と、使用する杭の本数や杭の径や長さによって、融雪能力は全く異なる。したがって、提案の数値シミュレーションを用いての試行による設計が実用的となる。
- ⑤④により適切な設計がされて、かつ長い管路に留意した設計と施工がなされれば、本融雪システムによって、ポンプ動力のわずかな電気代と漏水によるわずかな水道料金のみで十分な融雪が可能となる。
- ⑥本融雪システムによって生じる杭の変位と応力を数値シミュレーションで求めた結果、杭頭変位は建物などに悪影響を与えるほど大きくならず、また杭内部に生じる引張応力も、構造物の荷重による応力に比べて大きくならないことが分かった。
- ⑦打ち込み杭では、杭底からの漏水を防ぐため、杭打設時に無収縮モルタルを投入したが、全体の一割ほどの杭本数が漏水で使えなかった。
- ⑧建設費は、専用の熱交換杭を用いた融雪システムの $1/3\sim 1/4$ で、ほぼ電気ヒーターやボイラーなみである。

以上から、少なくとも福井のような比較的温暖な雪国では、本融雪システムは非常に有効である。

これまで、本融雪システムは豪雪時には地盤が冷えてしまい電気熱源などの融雪能力一定の融雪に比べて劣るのではないかと、あるいは建物や杭に悪影響が生じるのではないかなど設計者

に不安があった。こうした不安が本融雪システム普及の桎梏になっていた。本稿によって、その不安が解消され、いっそう普及が進むことを願う。

福井県内の橋長120mの橋梁の中掘鋼管杭基礎を利用する融雪の概算では、地下水利用散水融雪より建設費が安価になる結果が得られ、橋梁への利用が展望される。なお、懸案となっている杭からの水漏れについても、筆者は安価な止水を考案し、現在試験検証中である。

第 9 章 橋 梁 路 面 の 凍 結 と 熱 収 支

9-1 はじめに

写真-9.1は、結露凍結の朝の福井市郊外の鋼床版橋とコンクリート（ＲＣ）床版橋が連続する路面状況を撮影したものである。コンクリート床版橋には結露が見られないが、鋼床版橋の路面は結露で白くなっている。写真-9.2は、4月初旬の降雪時の鋼床版橋の状況で、地盤部に比べ雪が積もりやすいことが分かる。また、ほぼ同時刻の付近のＲＣ床版橋の状況を写真-9.3に示す。鋼床版橋の路面は、ＲＣ床版橋に比べても圧雪になりやすい^{54)・55)}。そのことで、鋼床版橋で突然に結露凍結や圧雪の路面に出くわすことになり、交通事故になることが少なくない。北陸地方などの散水融雪では、結露凍結の際に散水すると、その水がタイヤに引きずられ、散水区間外の路面で氷面になり逆に危険となる。また、融雪装置が設置されていても、4月になれば降っても積もらないことから電源が切られ、これが鋼床版橋では圧雪になり、大きな事故となった例もみられる（写真-9.4）。また、結露凍結対策として電気ヒーターを鋼床版路面に敷設したものの、適正に稼働していないことも福井県内で生じている。結露対策として最も一般的になされている融雪剤の散布は、凍結予知・散布作業が大変なだけでなく、橋梁の錆の促進と周辺環境への影響が懸念される。特に、この鋼床版橋のみが特別に凍結しやすいことで、その散布に特別の態勢を取らなければならない。こうした鋼床版橋の凍結は、本州四国連絡橋などの暖かい地域の橋でも生じ、シーズン15日ほど融雪剤散布の対策を行っている⁵⁶⁾。



写真-9.1 鋼床版橋とRC床版の結露凍結の違い



写真-9.2 鋼床版橋の積雪状況



写真-9.3 RC床版橋での積雪状況



写真-9.4 鋼床版橋のみが凍結しての事故

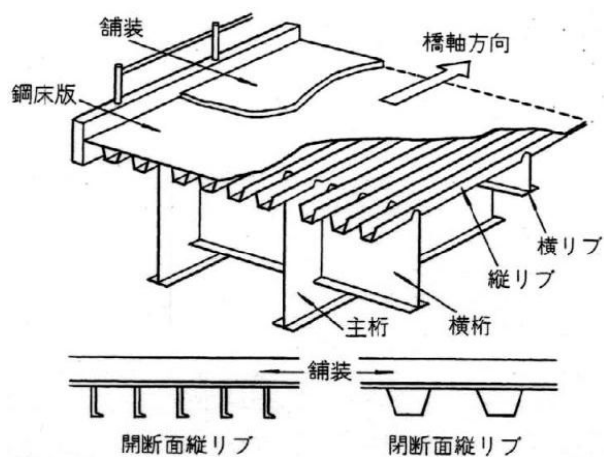


図-9.1 鋼床版橋のリブ構造



写真-9.5 開断面リブ鋼床版橋とその断熱実験



写真-9.6 閉断面リブ鋼床版橋

鋼床版橋が凍結しやすい原因は、下面から冷やされるからでなく熱容量が小さいため昼間の熱を蓄熱できないからだと筆者らは考えてきた。このことは、約3倍の熱容量を持つRC床版橋では、結露凍結しないことから推測される。しかし、橋は下から冷やされるので凍結しやすいという「常識」を信じる研究者も少なくなくて、床版下面を断熱して凍結を抑制しようという試みが富山や青森でなされた。しかし、十分な報告がされずに今日に至っている。

こうしたことを背景に、鋼床版開断面リブ橋での熱収支を調査した。さらに、床版下面断熱の有無、開断面（バブルプレート）リブと閉断面（U）リブの違い、RC床版橋と鋼床版橋との違いなど床版下面の構造が路面凍結に及ぼす影響を実橋で観測した。床版下の断熱材吹き付けや床版下面からの熱を遮断する閉断面リブでは、結露凍結が促進されることが実測された。

なお、橋梁上面での熱移動は、基本的に地盤部と同じであり、地盤部については多くの研究がなされているので^{57)、58)}、ここでは橋梁床版下面の熱移動を対象にした。

この第9章によって、鋼床版橋の下面断熱は安価であるが、凍結抑制には逆効果となることが確認されたので、鋼床版と舗装の熱容量を潜熱蓄熱材で大きくするシステムの実験を行った。その開断面リブと閉断面リブでの施工と実測での効果をそれぞれ第10章、第11章で述べる。冬季の橋梁路面の変化を気象データからシミュレーションすることを第12章で述べる。

9-2 実験・計測の方法

計測は、福井市内において、開断面リブ鋼床版橋（構造：図-9.1、写真-9.5）とその橋の床版下面に断熱を施した橋（写真-9.5）について、舗装内の温度を計測した。あわせて、河川水と護岸の表面温度、橋上気温、橋下気温、橋下面での正味放射熱量を計測した。

また、翌年度（1996年）は、鋼床版橋での下面のリブ構造の違いが及ぼす影響を実際の橋で調べるため、閉断面(U)リブ鋼床版橋（構造：図-9.1、写真-9.6）でも、舗装温度などを計測した。

更に、RC 床版橋と鋼床版橋との比較を同一条件で行うため、福井市内に両方の模型を地上30cmの位置に設置し、その内部の温度を計測した。

9-3 鋼床版橋下面での熱移動

1996年2月24日13時から鋼床版橋が結露凍結した25日午前9時までの開断面リブ鋼床版橋の舗装温度、橋下の気温、橋下の護岸表面、河川水の温度を時刻ごとに示したのが図-9.2である。

図-9.3は、同じ計測を、縦軸を高さに橋床版と河川の断面で考え、その断面位置での温度を横軸に4時間ごとに示したものである。この図で各時刻での空間での温度が分かる。両方の図から次のことが分かる。

昼間は日射によって舗装表面は暖められ舗装下面でも約15℃に達し、橋下の気温や河川水の温度に比べ約10℃も高くなっている。したがって、床版下では、空気の対流や河川への放射によって、床版は冷やされていることになる。

日没後は、日射がなくなり、放射冷却などで舗装表面が冷やされ、舗装下面温度は、21時頃からは河川水より、翌日1時頃には橋下気温より低くなっている。したがって、床版は、深夜から朝は、床版下の空気や河川によって暖められていることになる。河川水の温度は、図-9.2で分かるように、ほとんど時刻変動することなく一定している。これは、鋼床版橋に比べ河川水の熱容量が大きいことによって生じると考えられる。したがって、どの地域でも放射冷却の夜は、床版下面は河川水からの放射熱によって暖められると推測される。

次に、床版下の護岸表面温度についても、図-9.2からほぼ一定温度であることから、河川水と同じように、床版下面との正味の放射では、昼間は床版を冷やし、夜間から朝までは、床版を暖めていることが分かる。床版下面の護岸は、鋼床版橋に比べ影響する熱容量が大きいことと天空との直接的な放射熱移動がないので、その温度変化の幅は、鋼床版橋より小さくなると考えられる。

9-4 下面断熱鋼床版橋の温度変化

次に、実際の鋼床版橋の一部で下面を厚さ3cmの発泡ウレタンで断熱し（写真-9.5）、その舗装表面温度を図-9.2の断熱なしの舗装表面温度と比較した。図-9.4は、その比較結果である。午後3時の舗装表面温度は、断熱によって床版下面からの熱流出がなくなり、21.3℃と断熱なし床版より2.3℃高くなっている。22時でも開断面リブ鋼床版橋より依然として1.5℃高温であった断熱した鋼床版橋の舗装表面は、翌日4時から逆になり、7時には0.4℃低い -4.3℃にまで低下している。これは、深夜から早朝の床版下面での床版への熱の流入が、断熱材によって遮断されることによって生じると考えられる。

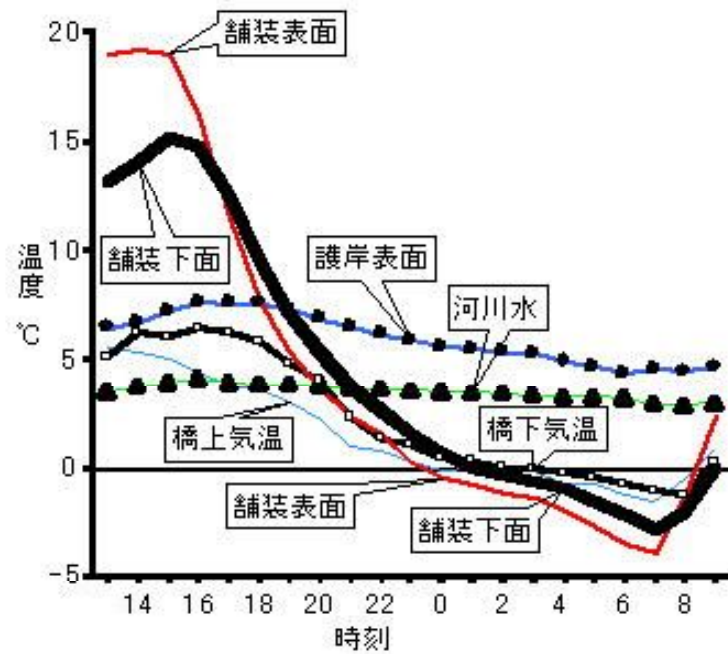


図-9.2 開断面リブ鋼床版とその周囲の温度変化

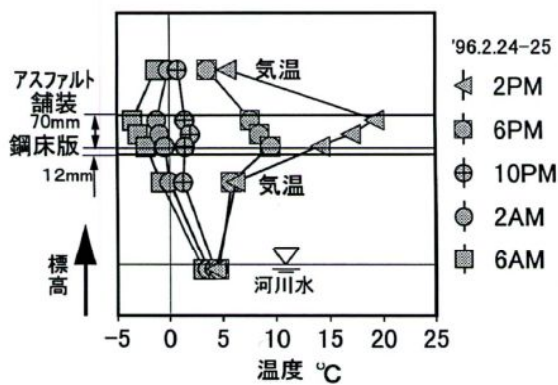


図-9.3 開断面リブ鋼床版と気温, 河川水の温度

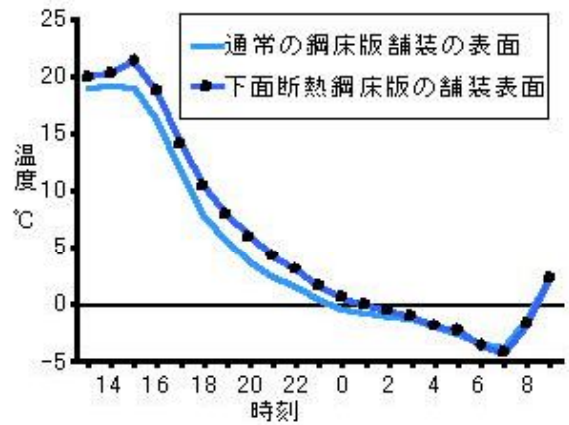


図-9.4 鋼床版舗装温度への下面断熱の影響

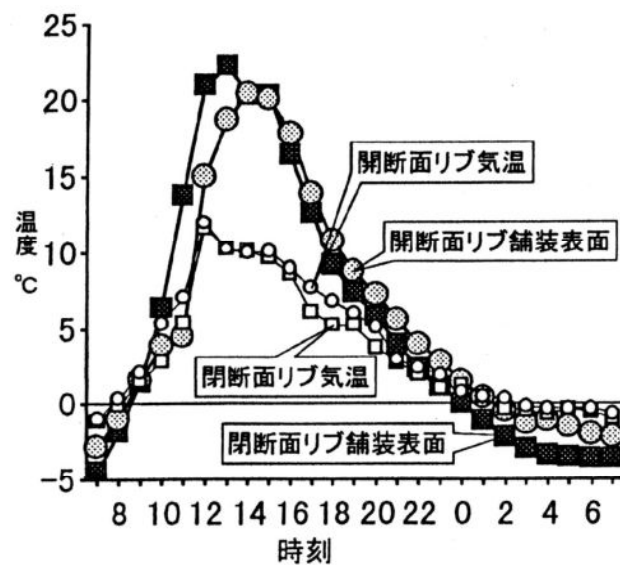


図-9.5 リブの違いによる舗装表面温度の違い



写真-9.7 未舗装閉断面リブ鋼床版の結露



写真-9.8 未舗装閉断面リブ鋼床版での自然融雪

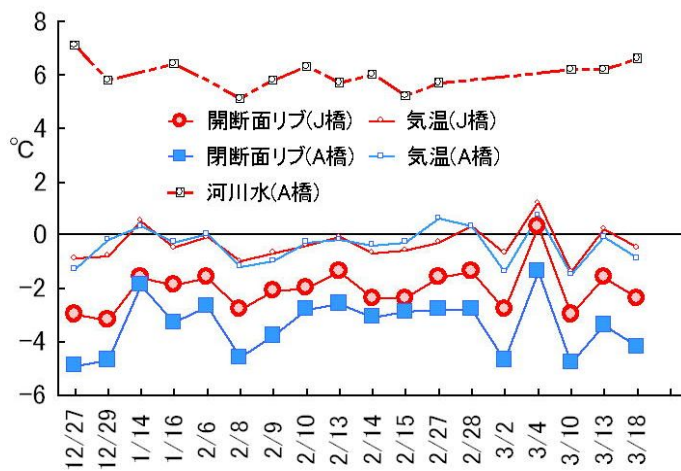


図-9.6 リブの違いによる最低路面温度の違い

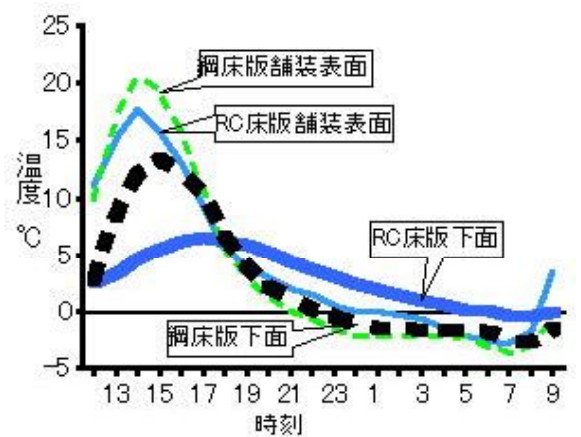


図-9.7 RC床版と鋼床版橋の温度変化比較

9-5 閉断面リブと開断面リブの違い

次に、閉断面リブ鋼床版橋(A橋)と開断面リブ橋(J橋)の温度変化を同時に計測し、その比較を行った。図-9.5に、1997年2月8日7時から24時間のそれぞれの舗装表面と舗装上1.5mの空気の温度変化を示す。両橋は8km離れたところに位置するが、両橋の気温の差は少ない。また、舗装厚はA橋の方が88mmでJ橋より18mm厚いので、その路面温度変化は小さくなるはずである。しかし、観測結果は、閉断面リブのA橋の路面が、城東橋に比べ、昼間は高温になり、早朝は低温となっている。これは、上面での熱移動を打ち消す方向での床版下面での熱移動を、閉断面リブが遮断することによると考えられる。

図-9.6は開断面リブと閉断面リブの1シーズンの放射冷却日の最低舗装表面温度と各々の現場の最低気温を比較したものである。二つの最低気温の差は小さいので、気温による床版への影響は少ないと思われる。舗装表面温度は、いずれの日も閉断面リブの方が低く、平均では1.36℃低くなっている。

写真-9.7は、天管生橋の舗装未施工区間での状況を写真撮影したものに、下面の構造を描いたものである。閉断面リブ上のみが結露で白くなっているこの写真は、閉断面リブが下面からの流入熱を遮断していることを見事に説明している。

また、わずかな積雪のあった直後の状況を写真-9.8で示す。リブや桁と鋼床版との付け根部で雪が溶けているこの写真は、リブや桁がフィンとなって、この気象条件では熱が下面から上

面に流れていることを説明している。

9-6 R C床版橋での熱移動

次に、R C床版橋（舗装厚さ6cm, コンクリート床版厚さ20cm）と鋼床版橋（舗装厚さ7cm, 鋼床版厚さ12mm）との比較を模型を並べて行った。図-9.7に、2月24日正午から25日朝のそれぞれの橋の舗装表面と床版下面の温度変化を示した。鋼床版橋に比べR C床版では、舗装表面と床版下面とも温度変化幅が小さいことと、床版下と舗装表面の温度ピークの時刻が大きくずれていることが図から分かる。これは、熱容量が大きいこととR C床版が厚くて熱がすぐに伝わらないことによる。

0時、7時では、R C床版下面温度は、鋼床版のそれよりそれぞれ3.6℃、2.3℃高い2.4℃ -0.4℃であった。このようにR C床版下面は鋼床版橋ほど温度が下がらないことから、R C床版下面での深夜から早朝までの熱流入は少ない。その上に、床版が厚くて、その流入熱がすぐには舗装表面にまで伝わらない。したがって、R C床版下面では、断熱などの構造の違いは、その舗装表面温度に影響を与えない結果となる⁵⁹⁾。

9-7 まとめ

本章で得られた結論は以下のとおりである。

- ①鋼床版は、放射冷却の深夜から早朝にかけて、橋下の気温や河川・護岸の温度より低温となり、その床版は下面で対流熱と放射熱で暖められている。
- ②したがって、鋼床版橋下面を断熱することになる閉断面リブなどは、放射冷却時の結露凍結を促進する。福井市内では、放射冷却の早朝の閉断面リブの路面の温度は、開断面リブに比べ、1シーズン平均で約1.4℃低くなった。
- ③コンクリート床版橋では、熱容量が大きく路面から下面までの距離も大きいことから、床版下面は下面の気温や河川・護岸の温度に比べ鋼床版のように低温にならないので、下面の構造は路面温度に鋼床版ほどの影響を与えない。

本調査は、福井土木事務所の維持管理担当から「同じ鋼床版でもF橋（開断面リブ）はあまり結露凍結しないが、T橋（閉断面リブ）はすごく凍結する。なぜか」と問われたことが契機であった。このように、開断面リブと閉断面リブでは、路面管理面で大きな差があることを最後に述べておく。

第10章 潜熱蓄熱材封入による凍結抑制 - 鋼床版開断面リブ橋での実測

10-1 潜熱蓄熱材封入工法の原理

これまで示した実験結果は、床版橋が凍結しやすいのは、下面での冷却にあるのではなく、別に原因があることを示している。ここで、写真-9.2の鋼床版橋（舗装厚7cm, 鋼床版厚1.2cm の鋼床版橋、以下ノーマル鋼床版橋）と写真-9.3のコンクリート床版橋（舗装厚6cm, コンクリート床版厚20cm）の熱特性の違いを考えてみる。その違いは、それらの熱容量が各々約 $160\text{kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ 、約 $550\text{kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ で、前者が著しく小さいことにある。日射で暖かかった後に降雪があると、熱容量の大きな橋は蓄熱量も多いので、雪がよく溶け、熱容量の小さなものより積雪が少なくなる。その典型例が、先の写真の鋼床版橋だけの積雪である。もちろん、厳しい冷え込みが続いた後ならば、熱を貯める器が大きくても熱は貯まらないので、鋼床版橋、コンクリート床版橋、地盤部の積雪の差は少なくなる。このように考えると、橋部が凍結しやすいのは、熱容量が小さいことによることが分かる。

そこで、死荷重を増やすことなく凍結直前の熱容量を大きくする方法として、 0°C よりやや高い温度で凝固融解する潜熱蓄熱材を舗装表面近くに封入することを考えた⁶⁰⁾。昼間には日射で舗装は暖められ、その蓄熱材も融解温度以上になり潜熱蓄熱される(図-10.1左)。降雪や凍結の早朝には、舗装表面温度が 0°C に下がる直前に、その蓄熱材は液体から固体になり潜熱が放出され、凍結は抑制され、あるいは舗装上の雪を溶かす(図-10.1右)。

ここで、ノーマル鋼床版橋、コンクリート床版橋、後述する蓄熱材（凝固融解温度: $3\sim 4.6^\circ\text{C}$ 、凝固潜熱量: $130\text{J}/\text{cm}^3$ ）を厚さ 1.77cm 封入した鋼床版橋の3種類の橋の舗装・床版・蓄熱材の温度と蓄熱量の関係を考える。3種類の各々の舗装・床版・蓄熱材の内部には温度差が生じないとして、その温度-蓄熱量を示すと、図-10.2の太線が得られる。この図から、同じ熱量が舗装・床版から流出（流入）すれば、ノーマル鋼床版は、コンクリート床版に比べ、低温（高温）になることが分かる。実際には、低温（高温）になるほど、それを抑制する熱移動が生じ、同じ熱量の流出（流入）にはならない。しかし、この抑制は、低温（高温）の程度に伴って生じるので、相対的にノーマル鋼床版が低温（高温）になることに変わりない。

更に、この図から、ノーマル鋼床版の熱容量は、蓄熱材の封入によって、ほぼ $0\sim 7^\circ\text{C}$ の範

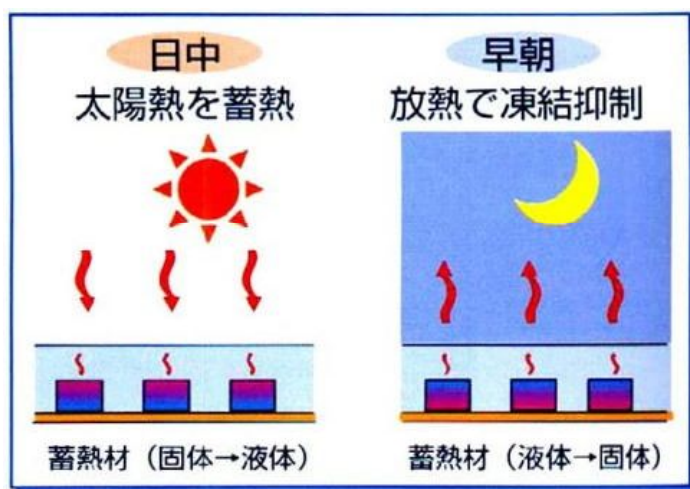


図-10.1 潜熱蓄熱材による凍結抑制の概念図

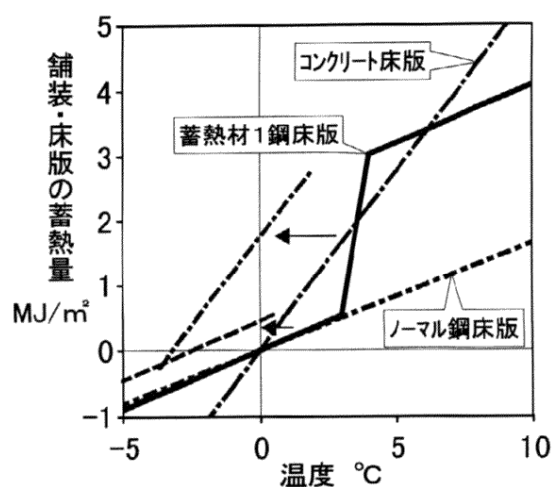


図-10.2 各種橋の舗装・床版の温度-エンタルピー

表-10.1 潜熱蓄熱材の熱特性

	蓄熱材 1	蓄熱材 2
主要材料	パラフィン	芒硝
凝固温度℃	3.1 ～ 4.6	4 ～ 7.5
融解温度℃	3.1 ～ 4.6	8 ～ 10
熱伝導率 W/(mK)	0.163	0.99
顕熱容量 J/(cm ³ K)	1.74	3.0(固体) 4.2(液体)
融解熱量 J/cm ³	130	260
液体での状態	コンニャク状	ゲル状

囲では、コンクリート床版の蓄熱状態にまで改善されることが分かる。また、例えば蓄熱材封入鋼床版とコンクリート床版の両方が図-10.2の7℃の状態から同時に同量の熱量が奪われ、蓄熱量が0～2MJ/m²の範囲にまで冷えると、蓄熱材封入鋼床版の温度の方が、コンクリート床版の温度より高くなることが分かる。実際には、表面と内部で温度差があるので、この時の舗装表面温度は、図示の太線の温度より数℃低く、図中の←方向にシフトしたものとなる。したがって、蓄熱材封入鋼床版とコンクリート床版の各々シフトした線の交点（マイナス数℃）までの凍結では、蓄熱材封入鋼床版橋の方が表面温度が高くなる。以上から、蓄熱材封入鋼床版は、マイナス数℃の凍結では、コンクリート床版より、表面温度を高く保てることが分かる。

10-2 潜熱蓄熱材・舗装の特性

潜熱蓄熱材に関しては、その凝固温度を0℃近くまで下げ過ぎるとその潜熱放出が遅くて、舗装表面を0℃以上に保てない。また、融雪では融雪速度が遅くなり、降雪に追いつけず積雪となる。逆に、融解温度が高すぎると、昼間に蓄熱材が液体に戻らず潜熱蓄熱できない。そこで、凝固・融解温度が適切で潜熱量の大きな潜熱蓄熱材を封入することが必要となる。ここでは、安全性・コスト・潜熱量・凝固融解温度を勘案し、比較のためパラフィン系(蓄熱材1)と芒硝系(蓄熱材2)の2種類を用いた⁶¹⁾。その熱特性を表-10.1に示す。融解温度が高い芒硝系は、暖かくなる3月頃までは十分液体に戻れず潜熱蓄熱効果が発現しなかったなので、ここでは主にパラフィン系について述べる。

また、舗装と潜熱蓄熱材を熱伝導の良いものにすれば、舗装表面と潜熱蓄熱材の温度差は小さくなり、舗装表面温度を0℃以上にしながら、潜熱蓄熱材の凝固温度を0℃近くまで下げられ、昼間の潜熱蓄熱も容易となる。

潜熱蓄熱材の設置については、潜熱蓄熱材を封入した角型鋼管を鋼床版橋上に設置し、高熱伝導(6.05W/(mK))の珪石骨材の鋼繊維補強コンクリート(SFRC)で覆い、これを舗装とした(図-10.3、写真-10.1)。SFRCを舗装として用いるのは、アスファルトでは夏の流動で角鋼管上に凹凸が生じることと鋼繊維なしのコンクリートでは、橋のたわみに追従できないと考えたことによる。

なお、鋼床版橋でのSFRC使用に関しては、名古屋高速道路公社での実績などを参考にした

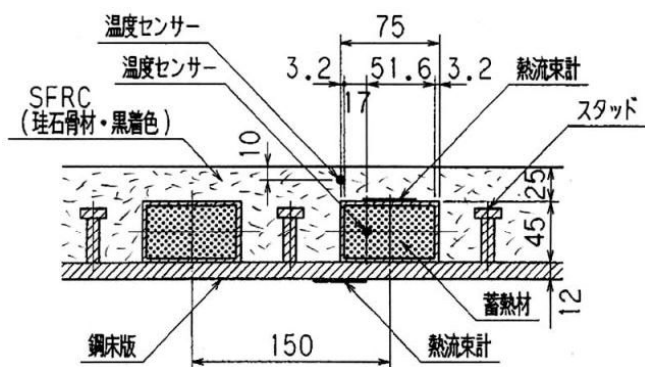


図-10.3 舗装内潜熱蓄熱材封入の断面図

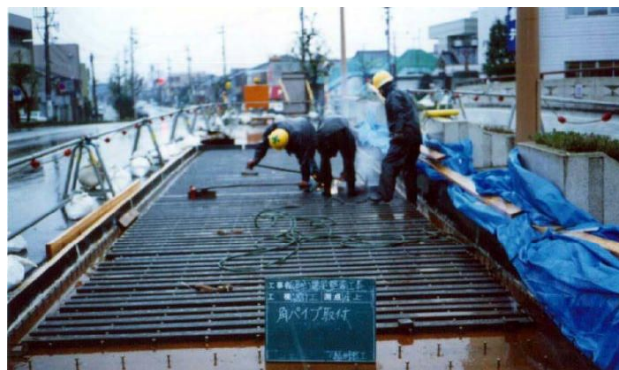


写真-10.1 潜熱蓄熱材封入鋼管の設置

表-10.2 比較タイプ一覧

type. No.	type 1	type4	type5	type6	type11	type13
橋／地盤の別	鋼床版橋	鋼床版橋	鋼床版橋	鋼床版橋	地盤部	コンクリート橋
蓄熱材の有無	なし	パラフィン系封入	芒硝系封入	芒硝系封入	なし	なし
舗装と厚さ	アスファルト 7cm	アスファルト 7cm	高熱伝導 SFRC 7cm	高熱伝導 SFRC 7cm	アスファルト 15cm	アスファルト 6cm
下面	鋼床版1.2cm I 桁開断面リブ	鋼床版1.2cm I 桁開断面リブ	鋼床版1.2cm I 桁開断面リブ	鋼床版1.2cm I 桁開断面リブ 断熱材3cm	路盤 路床	コンクリート 床版20cm

10-3 実験の方法

9-3の熱収支計測と同じ鋼床版橋（開断面リブ）の一部で潜熱蓄熱材封入の試験施工を行った。更に、その現場から1kmの野外にコンクリート床版橋を含めた模型を地上30cmに設置し、比較を行った。実験の対象とした橋・地盤部の別、橋の種類、潜熱蓄熱材の種類、舗装の種類などの組み合わせのtype一覧を表-10.2に示す。

効果測定のため図-10.3に示す位置に温度センサーを設置し、近くの地盤部の舗装温度なども同時に計測した。更に、結露凍結の際には、路面の滑り抵抗を実測した。

10-4 代表的な降雪日の効果

ここでは、降雪と結露凍結が連続した1996年2月23日7時から25日9時までを取り上げて考察する。期間中の気温・降雪量を図-10.4に、全天日射量・風速を図-10.5に示す。また、type4の舗装表面温度、蓄熱材温度、type1の表面、type4の蓄熱材と同じ深さでのtype1の温度を図-10.6に示す。蓄熱材の温度は、23日朝は1℃以下であることから、それまでの降雪で完全に固体となっていると推測される（図-10.6）。以後10.4 MJ/(day・㎡)の日射でtype1はほぼ全層が13℃にまで上昇している。しかし、type4では、融点の3℃に達した12時以後は、蓄熱材の温度上昇速度が鈍くなり、同時に舗装表面と蓄熱材との温度差が大きくなっている。これは、蓄熱材が一定温度で潜熱蓄熱を行っていることによって生じる。夕方17時までに蓄熱材は4.7℃に達した。この温度は、翌日24日の蓄熱材が急激に温度上昇しはじめる温度であることから、鋼管内の蓄熱材はほぼ液体状態に達したと推定される。

雪は、夕方16時から断続的に降った（図-10.4）。この間、type1では舗装の表面と深部で0.

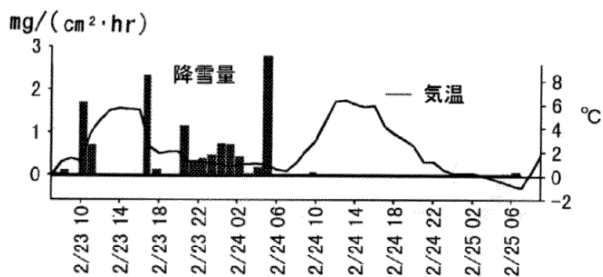


図-10.4 気温・降雪量の変化

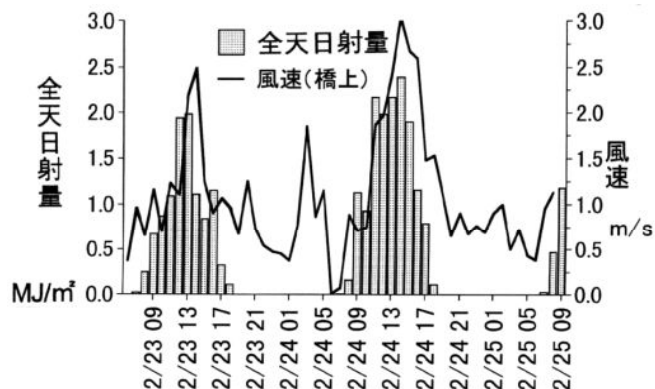


図-10.5 全天日射量・風速の変化

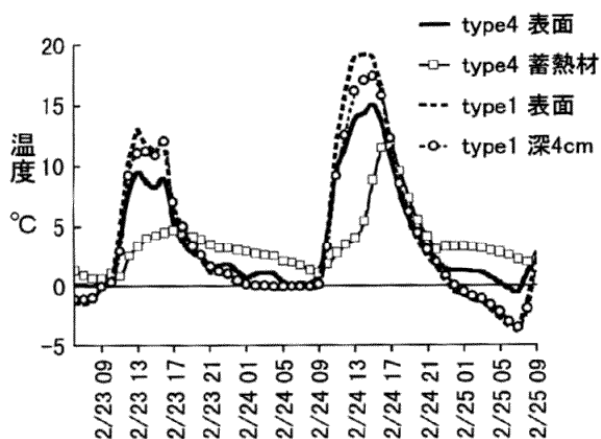


図-10.6 潜熱蓄熱材と舗装表面の温度変化(城東橋)

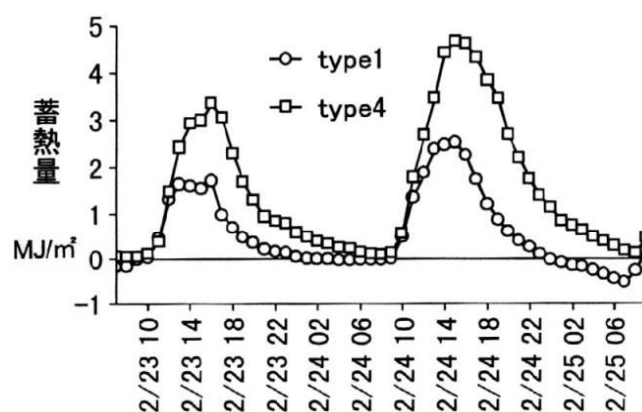


図-10.7 蓄熱量の変化 (城東橋)

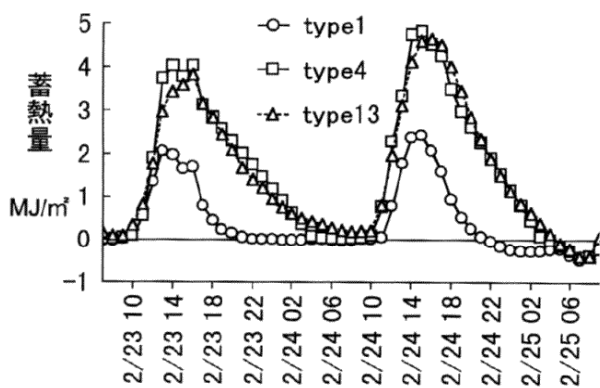


図-10.8 蓄熱量の変化 (模型橋)



写真-10.2 路面状況 2/24 8:00

5℃の差を保ちつつ徐々に冷えていく。そして、表面温度が0℃を示す21時から路面に雪が積もりはじめた。これに対して、type4の潜熱蓄熱材は約3℃から非常にゆっくりと低下している。これは、蓄熱材が液体から固体になって、潜熱を放出していることによる。type4の表面温度は、24日1時に0.7℃に下がったものの、3時には1.1℃に上昇している。これは、表面から奪われる熱量以上の熱が蓄熱材から舗装表面に流れたことによる。このtype4の路面は、2.8mg/(□・hr)の強い降雪が始まる5時15分まで無積雪であった。朝8時における路面状況は、写真-10.2に示すとおりである。写真では車輪の通過量の違いが路面状況に影響しているので、

その比較は同じ車輪通過線上で行わねばならない。右車線の車輪通過帯では、type4のみが無積雪で、その差が写真からも分かる。そして、路側部の積雪は、type1の4cm に対して、type4は2.4cm と少なかった。

次に、舗装・床版と蓄熱材を含めた蓄熱量（エンタルピー）を、それぞれの温度と熱特性などから推定すると図-10.7 が得られる。ここで降雪密度を福井での最頻値 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ とすると、 $1\text{MJ}/\text{m}^2$ で深さ約3cm の雪を溶かせると見積もられる。この見積もりと図-10.7の蓄熱量から、16時以降翌朝までの累積降雪 $9.74\text{mg}/\text{cm}^2$ に対して、残雪深は、type1では4.6cm、type4ではなしと見積もられる。実測の残雪量は、前者が5.5cm で、後者は3.0cm であった。type1では16時の蓄熱量の全てが融雪に使われ、type4では67%が融雪に使われたことになる。その融雪効率の差は、type1は、21時には朝まで残る雪が積もり、雪という断熱材で覆われたが、type4では、5時15分まで無積雪で、融雪以外に放射や風で熱を奪われたこと、更に、type1では、積雪の沈降も大きくなり見かけ上効率が上がり、100%にも達したと考えられる。

ここで、コンクリート床版橋(type13)との比較について述べる。並べて試験した type1、type4、type13の模型橋の蓄熱量を示したのが図-10.8である。この図から、type4の蓄熱量は、type13のそれとほぼ一致していることが分かる。図-10.2では、舗装・床版・潜熱蓄熱材の内部に温度差が生じなくて全て同一温度になるとしたことから、type4は凝固温度で急激に蓄熱されるように表されたが、実際には、内部に温度差が生じるので、図-10.8のように、type13と type4は、ほぼ同じ蓄熱をたどる。路面状況は、24日4時の時点では、type4には積雪がなかったが、type13の上にはわずかな積雪があった。これは、type13では、コンクリート床版厚が厚くて中心部の熱が舗装表面に伝わりにくく、雪が溶けるのに時間を要することによる。24日の5時から6時の強い降雪後の7時30分には、両者の積雪は同じ3.0cm となり、type1の5.5cm に比べ 2.5cm 少ないものとなった。

以上、潜熱蓄熱材に蓄熱されることで、降雪時の鋼床版橋路面の早くからの積雪がかなり改善されることが確認された。

10-5 シーズン通じての降雪時の効果

次に、実際の橋で2月下旬以降春までの積雪深を比較すると図-10.9が得られる。この図から、潜熱蓄熱材封入で鋼床版橋の積雪量は、2月下旬には地盤部とほぼ同じまでに減ることが分かる(写真-10.3)。3月以降は、地盤部の方が積雪量が少なくなっているが、効果は見られる(写真-10.4)。なお、この写真では、蓄熱材封入鋼管の上で雪が残り、鋼管と鋼管の中間上で雪がよく溶け筋状となっている。このように、蓄熱材の真上でない方が雪が早く溶けるのは、鋼床版とコンクリート舗装に比べて蓄熱材の熱伝導率が桁違いに悪いので、蓄熱材の熱が厚い鋼板底面と側面の両方から蓄熱材真上でない領域に伝わる量が、蓄熱材からその真上に伝わる量より大きくなることによる。なお、このことは、12-5の数値シミュレーションで温度場を示して述べる。

ここで、蓄熱材2を封入した type5、type6が写真に見えるので、簡単に述べる。蓄熱材2は潜熱量は大きいが融点が $8\sim 10^{\circ}\text{C}$ と高いことから、1月と2月は type4に比べて効果が少なかった。これが、3月になり暖かくなると、下面を断熱した type6は、type4より効果が得られた(写真-10.4、写真-10.5)。これは、昼間に下面から熱が流出せず高温になり、type4を上回る蓄熱となったことによる。4月になると、type5も潜熱蓄熱でき、写真-10.5のように type4よ

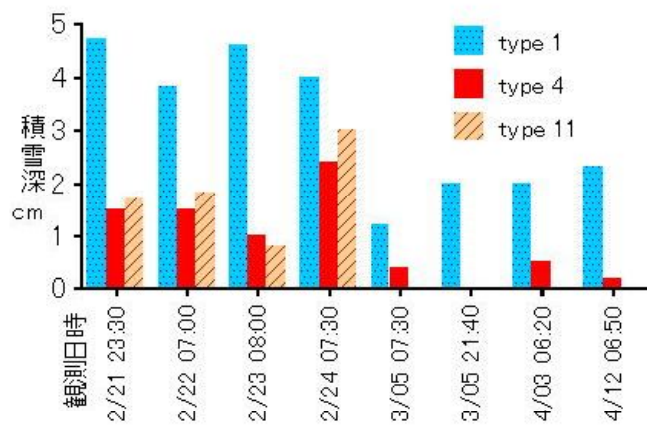


図-10.9 各 type 上の積雪深 (城東橋)

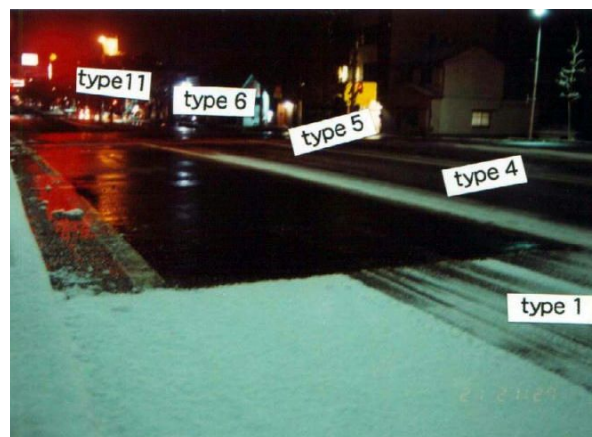


写真-10.3 路面状況 ('96.2.21 21:30)

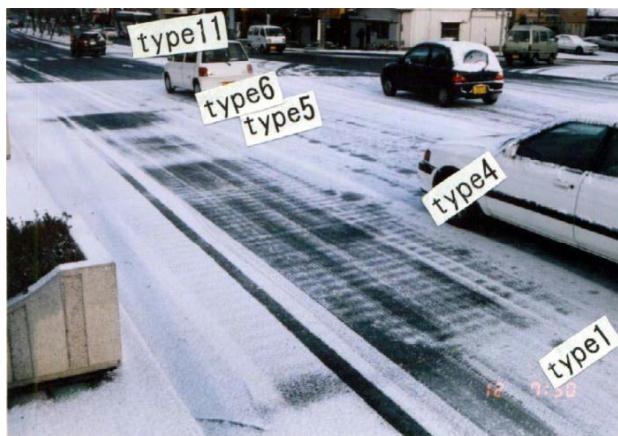


写真-10.4 路面状況 ('96.3.12 7:50)

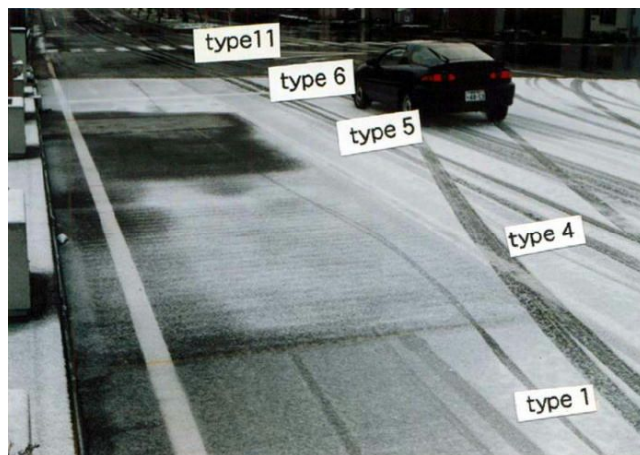


写真-10.5 路面状況 ('96.4.3 6:10)

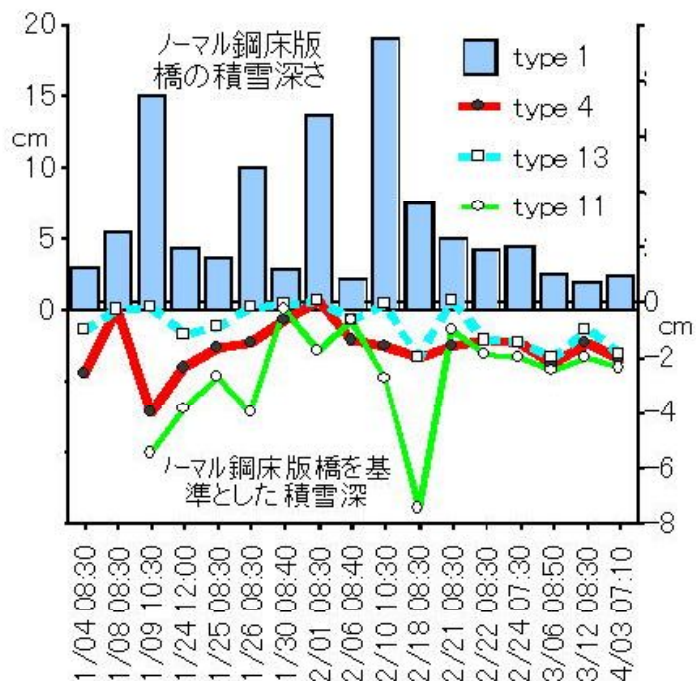


図-10.10 ノーマル鋼床版橋を基準とした積雪深比較

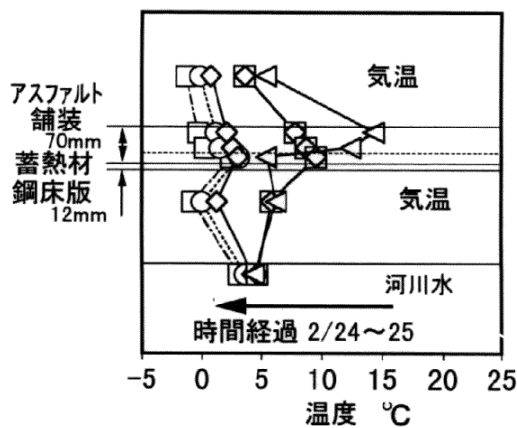


図-10.11 蓄熱材封入鋼床版 (type4) の温度変化

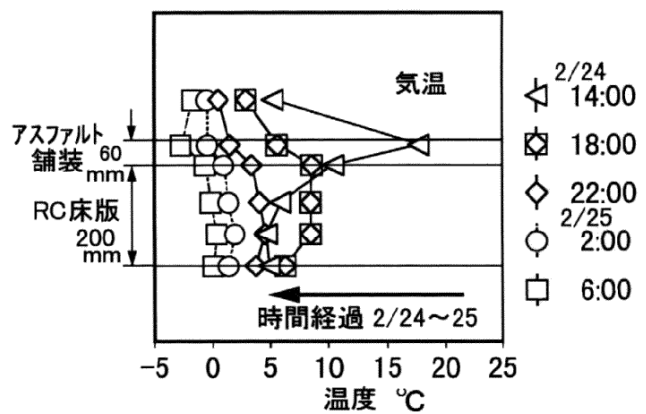


図-10.12 コンクリート床版 (type13) の温度変化

り効果が得られた。

模型橋での計測結果である図-10.10からは、type13に比べ、type4はほぼ全期間にわたって積雪量が少ないことが分かる。しかし、地盤部 (type11) までの改善には至っていない。

図-10.9と図-10.10から、総じて蓄熱材封入によって鋼床版橋は約2cmほど積雪深が少なくなることが分かる。

10-6 代表的な結露凍結日の効果

先の2月24日朝から結露凍結のあった翌朝までについて考察する。図-9.3と同じ時刻でのtype4の温度変化を図-10.11に示す。

24日は全天日射量が 14.9 MJ/m^2 と23日より日射しが強く (図-10.5)、舗装温度は、より高温となった (図-10.6)。蓄熱材は、 3°C (10時) になってから 5°C (14時) となるまでは、潜熱蓄熱で、その温度上昇が遅い。約 5°C となった後は、急速に温度が上昇し、蓄熱材が完全に液体になったことが推測される。

放射冷却によって、蓄熱材は、24日22時には 3.0°C まで低下するが、23時には 3.3°C まで上昇し、25日1時まで 3.3°C を維持している。ここで、蓄熱材が一度 3.0°C まで下がり 3.3°C にまで上昇するのは、過冷却によるもので、固体化の始まりを示す。蓄熱材の潜熱放出にともない、蓄熱材封入の舗装表面温度は、21時 1.4°C から3時の 1.1°C まではほぼ一定温度を維持している。その後 type4は、ほぼ type1と同じ速度で温度が下がり、type1との差はすぐには縮まらず、最低表面温度 (7時) では type1が -3.4°C に対して、 2.9°C 高い -0.5°C に止まった。なお、地盤部表面の最低温度は、 -1.1°C であった。

次に、10-1で示した原理を実測データで検証する。図-10.2ではコンクリート床版 (type13) と比較したので、type13の温度変化を図-10.12に示す。また、図-10.2の温度-エンタルピーに対応させて、実測に基づく熱容量加重平均温度、舗装表面温度-蓄熱の関係 type1、type4、type13について整理すると、各々図-10.13、図-10.14、図-10.15を得る。type1、type4、type13の昼間の最高熱容量加重平均温度は、各々 14.7°C 、 14.0°C 、 8.3°C で、蓄熱量は、type4が type13より大きく、type1の約2倍になっている。図-10.2で type13が type4と同じ蓄熱量となるとした 7°C を越えた温度域でも type4の蓄熱量が大きいのは、type4では舗装表面近くの熱容量が大きいため、蓄熱変動が大きいことによる。

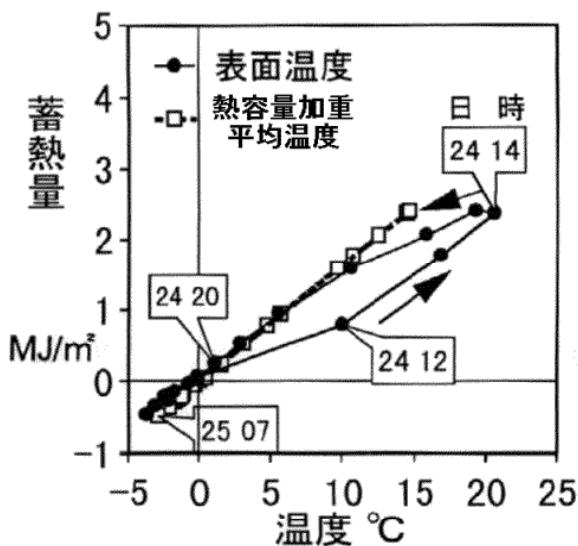


図-10.13 type1の温度－蓄熱量

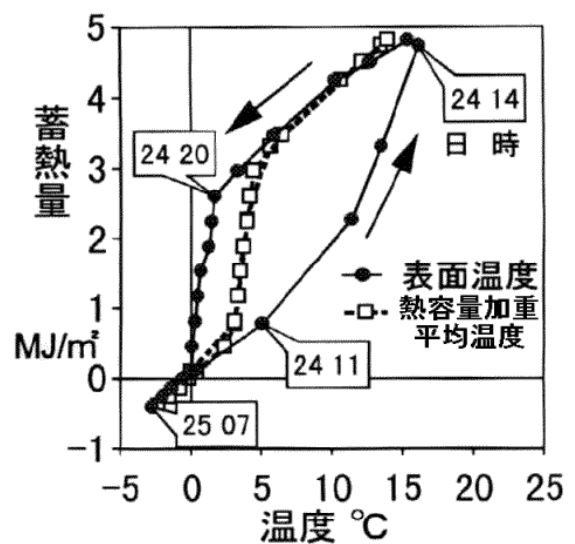


図-10.14 type4の温度－蓄熱量

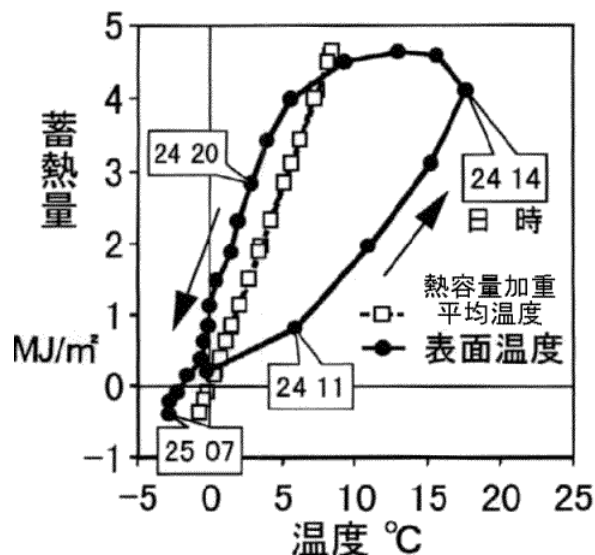


図-10.15 type13の温度－蓄熱量

冷却過程については、蓄熱材が4.6℃で潜熱を放出し始めた20時から舗装表面温度の低下が鈍くなり、23時には type13の表面温度より高くなり、2時まで0℃以上となっている。この時間帯では、type4の舗装表面は熱容量加重平均温度より2.9℃も低い、以後潜熱放出がなくなるとその差は約0.5℃にまでに縮まっている。一方、type13では、この温度差は約2℃である。このような表面温度と熱容量加重平均温度とのズレと蓄熱材の凝固温度が数℃であることが、舗装表面温度が-2.8℃となる7時でも type4が type13より高温となることをもたらしめている。

以上、10-1で示した表面温度がマイナス数℃の範囲では type4の方が type13より表面温度が高くなることが実測からも明らかになった。

10-7 シーズン通じての結露凍結時の効果

放射冷却で type1舗装表面が0℃以下となった日の午前7時の表面温度を、type1、type4、type11、type13について比較すると、図-10.16の下図を得る。図の上部に前日の蓄熱材の最高温度を示した。これらのいずれの日においても、その蓄熱材の最高温度が融解温度以上であること

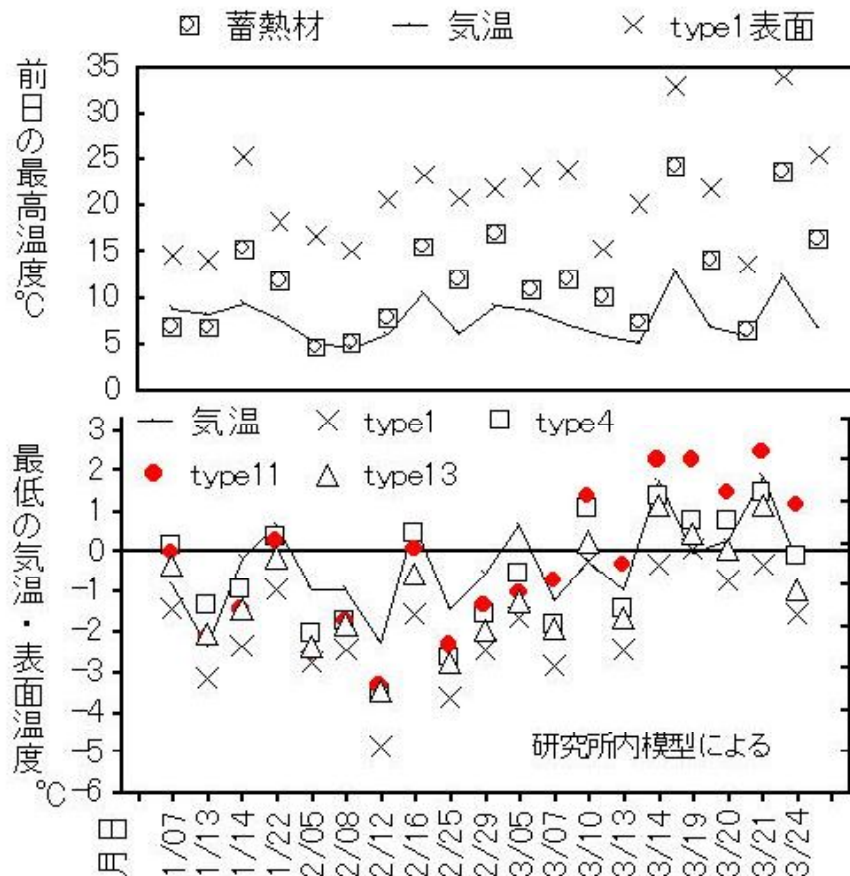


図-10.16 各 type の表面温度と前日の潜熱蓄熱材の最高温度

から蓄熱材はほぼ完全に液体になったものと推測される。

放射冷却の際の type4 の表面温度は、凍結が厳しくない時は type13 より 1°C ほど高いが、温度が下がるにつれて、type13 の温度に近づき、 -3°C ほどではほぼ同じになる。この時にも、type1 に比べると type4 は 1°C ほど高く、効果が見られる。図-10.16 の下図の最低温度の平均を求めると、type1 で -1.93°C 、type4 で -0.66°C 、type11 で -0.36°C 、type13 が -1.08°C であった。したがって、平均値では、蓄熱材は鋼床版を 1.27°C 上昇させ、コンクリート床版よりも 0.4°C 高温になっている。このことは、マイナス数 $^{\circ}\text{C}$ までの凍結では、コンクリート床版より当該工法は、表面温度を高く保てるという 10-2 で述べた原理を検証するものとなっている。

更に、気象との関わりで図-10.16 の気温を見ると、シーズン中の最低気温は -2.4°C で、この程度の冷え込みでは、当該工法は十分効果が得られることが分かる。

10-8 結露凍結時の滑り抵抗での効果測定

放射冷却の強い深夜早朝、鋼床版路面の温度が氷点以下になり更に露点よりも下がると、空気中の水分が乾燥した路面に凝結し、それに伴い、路面は急激に滑りやすくなる。そこで、ここでは、当該工法によって、滑り抵抗がどの程度改善されるかを、各路面の滑り抵抗値 BPN (British Pendulum Number) を結露凍結の朝実測することで調べた。

図-10.17 は、2月25日の朝7時の各 type の路面の滑り抵抗比(乾燥時の BPN を100とした比)を縦軸に、舗装表面の最低温度を横軸にして表したものである。type1 の舗装表面温度 -3.7°C に対

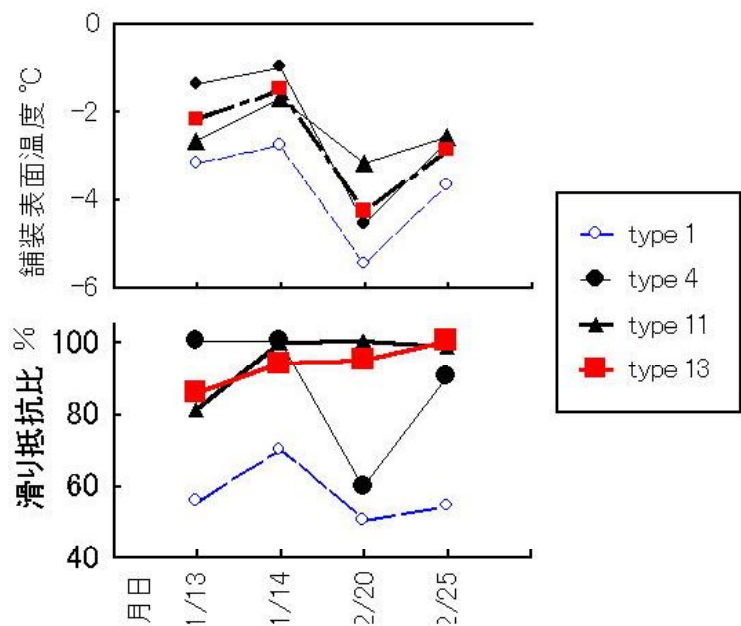
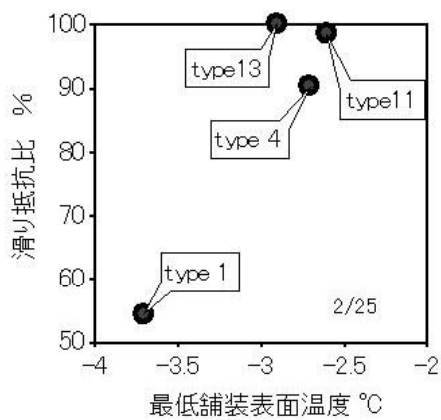


図-10.17 舗装表面の最低温度と滑り抵抗

図-10.18 舗装表面温度と滑り抵抗比

して、滑り抵抗は乾燥時の54%に下がっている。表面温度が type1より約1.0℃高い type13、type4、type11では滑り抵抗はほとんど低下しなかった。ここでは、表面温度1℃の違いが、滑り抵抗では46%もの違いになっている。図-10.18は、他に計測した3日を含めて、舗装表面最低温度を上部に、滑り抵抗比を下部に示した。いずれの日も、舗装表面温度を1℃でも高くできれば、滑り抵抗は大幅に改善される結果となっている。

第 1 1 章 潜熱蓄熱材封入による凍結抑制 —鋼床版Uリブ橋の施工と実測—

1 1-1 はじめに

第10章で示したように、開断面リブ鋼床版橋での小規模な試験で効果が確認されたので、翌1996年度に、施工中であった天管生橋のカーブ区間延長70m 施工面積500m²で、本工法を実用化することにした。

この天管生橋は、第10章の城東橋とは床版リブ構造が異なる閉断面リブ（Uリブ）で、第9章の調査からその凍結はより著しいと予想されたので、潜熱蓄熱材封入での効果測定を実施した。また、実用規模の施工となったことで、施工上の知見も得られた。ここでは、この橋での潜熱蓄熱材の封入の施工とその効果に関して述べる。

1 1-2 施工について

1 1-2-a) 鋼管の選定、配置

舗装全体の厚さを厚くせず蓄熱材を多く封入するために、蓄熱材を封入する鋼管は、角型鋼管とした。円形鋼管では、鋼床版との間に薄層舗装ができないようにスペースを設けなければならないので、舗装厚全体が大きくなってしまう。その大きさと設置間隔は、施工上の制約と鋼床版橋を地盤部なみの凍結にまで抑制するのに必要とされる蓄熱材の量とするべきで第10章の実験から厚さ45mm 幅75mm の角型鋼管に封入し、150mm 間隔に設置した（図-11.1）。写真-11.1は、蓄熱材（パラフィン系）を90℃で液状にしてコンニャク状にする物質と混ぜて鋼管に計量しながら詰める作業状況である。鋼管の配置は、鋼床版が格子構造となり、床版が補強されることの利点などを考えて、鋼床版下の U リブに直交する橋軸直角方向配置とした（写真-11.2）。ただし、鋼床版の添接箇所では蓄熱材封入鋼管を連続させることができないので、道路の路側部は、橋軸直角方向配置では短い鋼管となり、施工性が著しく低下する。そこで、道路の路側部は、活荷重が少ないことも考慮し、橋軸方向配置とした。施工性を優先し、また、車輪箇所付近のみの施工を考え橋軸方向配置とすることや鋼管と SFRC を床版構造として設計に組み込むことなどが今後の検討課題だと思われる。

1 1-2-b) 舗装

舗装は鋼管設置によるひび割れなどを防ぐため、SFRC（鋼繊維補強コンクリート）を用いた。鋼繊維補強コンクリート（SFRC）のファイバーは、ここでは、曲げ強度および曲げじん性係数ともに高いドラミックス（商品名）を用いた⁶⁴⁾。また、ファイバーとコンクリートとの付着を良くすること、水の浸透を防ぐことから、名古屋高速道路公社での仕様に準じ膨張剤 CSA#20を30kg/m³入れた⁶⁵⁾。SFRC の舗装とすることで、当該床版の剛性は大幅に改善される⁶⁶⁾。舗装の中の鋼管は、ランダムに配向された鋼繊維によってマクロセルの形成や維持が行われなくなり、その腐食が抑制されることも期待される⁶⁷⁾。

コンクリート舗装の打設は、幅3.5m ずつ施工するのがよいとの事前の舗装関係者の意見であったが、現場代理人サイドで、ほぼ全幅一度打設を舗装業者に指示したため、簡易フィニッシュが使われた。そのことと片勾配のカーブ区間であったことから、表面に40cm ほどの周期で5mm の凹凸ができるという仕上がりになってしまった。

なお、表面には、滑り抵抗を向上させるため、軽くフレッシュ・グルーピングを施した。

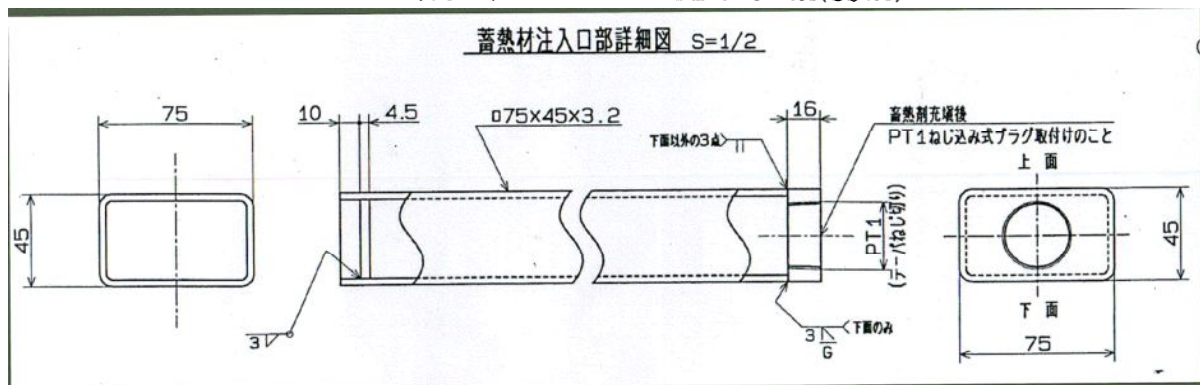
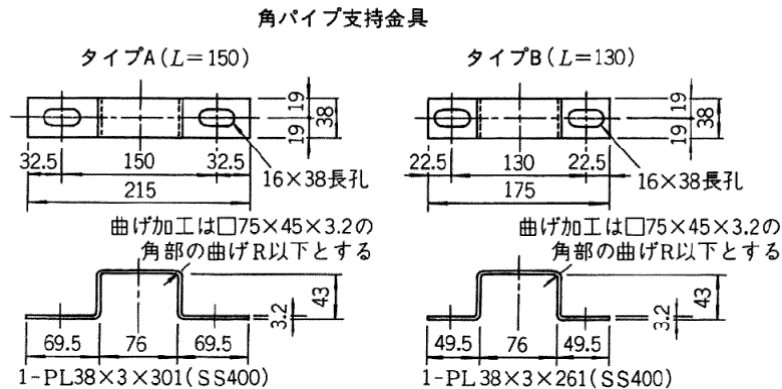
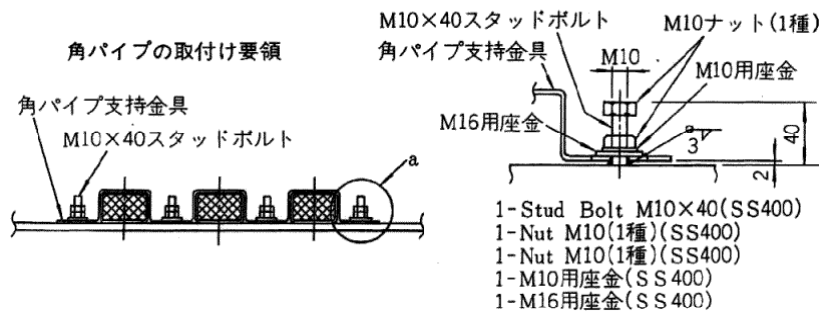
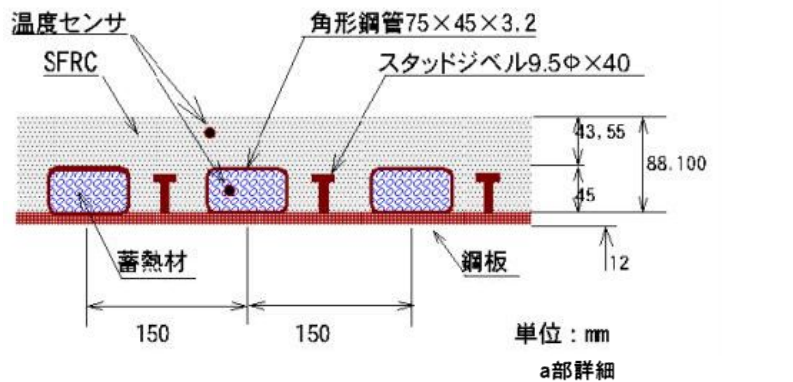


図-11.1 潜熱蓄熱材封入鋼管の設置図

また、表面の酸化鉄による黒着色は、施工直後はセメントの白華現象で黒くならないが、3年ほどで黒くなる。次に施工が計画されている勝山橋では表面をシリカサンドアスファルト薄層（15mm）舗装とし、黒着色とすべり抵抗の向上を目指す。舗装表面をSFRCとすることについては、第10章の開断面リブ鋼床版橋の施工で用いた平鋼状スチールファイバーに比べ、今回の強度優先で選定した針状スチールファイバーでは、市街地で施工するとその針が路面表面に現れることが気になる。この問題は、このように表層を別に施工すれば解決される。



写真-11.1 潜熱蓄熱材の鋼管への注入



写真-11.2 潜熱蓄熱材封入鋼管の設置

表-11.1 比較タイプ一覧

タイプ番号	タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3	タイプ 4	タイプ 5
橋／地盤の別	鋼床版橋	鋼床版橋	鋼床版橋	鋼床版橋	地盤部
蓄熱材の有無	なし	なし	パラフィン封入	パラフィン封入	
舗装と厚さ	アスファルト 8.8cm	アスファルト 10cm	高熱伝導 SFRC 8.8cm	高熱伝導 SFRC 10cm	アスファルト 15cm
下面	鋼床版1.2cm 箱桁外 U リブ	鋼床版1.2cm 箱桁内 U リブ	鋼床版1.2cm 箱桁外 U リブ	鋼床版1.2cm 箱桁内 U リブ	路盤 路床

コンクリートの打ちつぎは、接着防水材(商品名：ダイトサイザー)を塗布した。

1 1-2-c) 施工工数と工事費

実際に要した工数から積算すると、500㎡ほどの施工で SFRC 舗装を含めてこのパラフィン系蓄熱材封入工法は、通常の鋼床版橋アスファルト舗装より3.8万円／㎡程度のコストアップとなる。その内訳では、パラフィン系蓄熱材の材料費が約1.6万円／㎡と高い。なお、日射量が多くて暖かい地域では、融解温度の高い芒硝系蓄熱材や包接水和物（クラスレート・ハイドレート）でも効果が期待され、この場合には約2.4万円／㎡となる。

1 1-3 計測対象の構造と施工法

路面温度は、蓄熱材の有無、下面の構造や舗装の厚さなどによって、異なる。そこで、天菅生橋で今回比較対象とした一覧を表-11.1に示す。

1995年度試験施工した城東橋では舗装厚さは70mm としたが、天菅生橋では最小厚さ88mm（蓄熱材封入鋼管上のかぶりで43mm）とした。鋼床版は重ね合わせであったことから、舗装厚

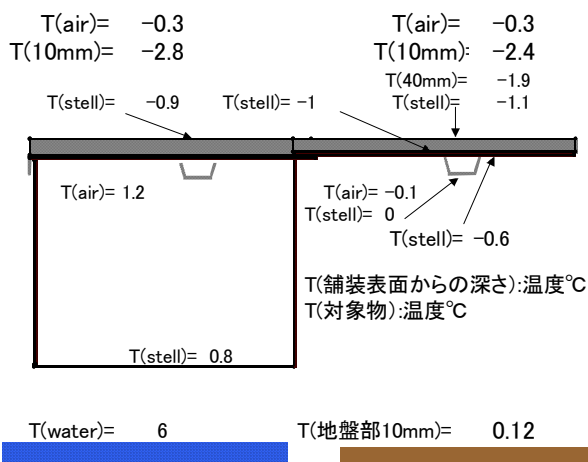


図-11.2 タイプ1, タイプ2の温度状況 2月10日7:00

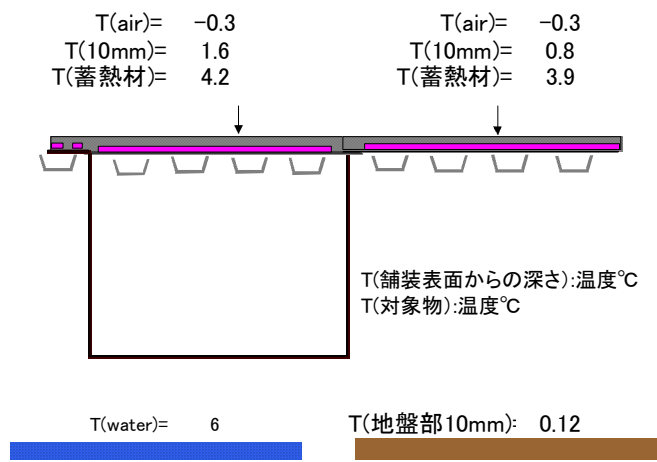


図-11.3 タイプ3, タイプ4の温度状況 2月10日7:00

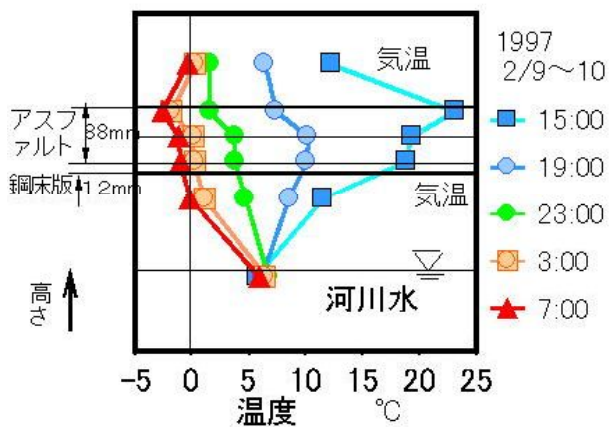


図-11.4 タイプ1の温度変化

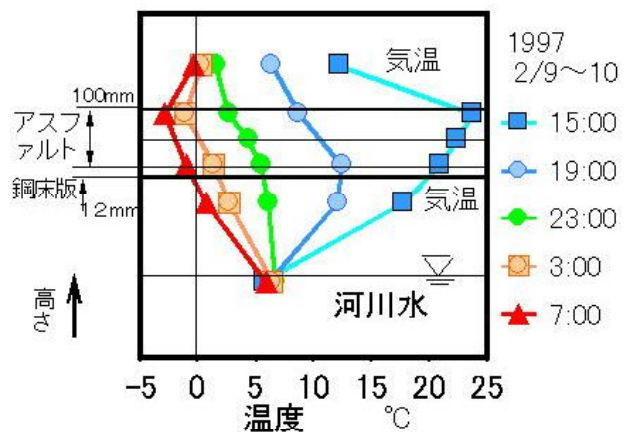


図-11.5 タイプ2の温度変化

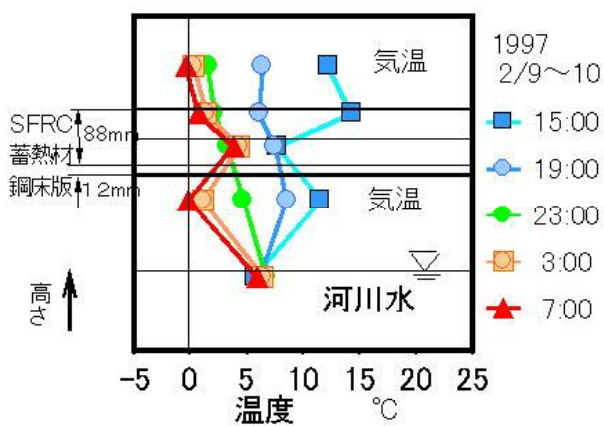


図-11.6 タイプ3の温度変化

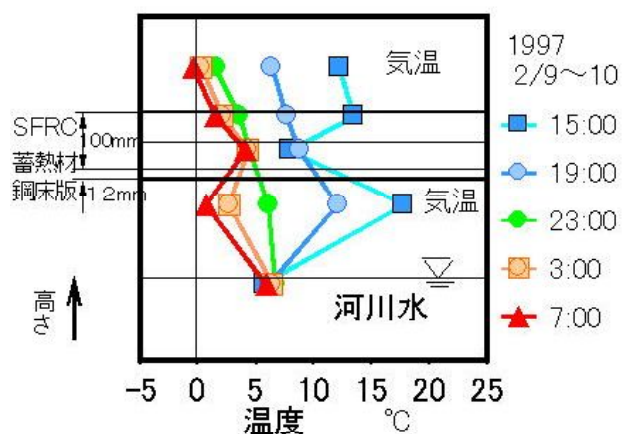


図-11.7 タイプ4の温度変化

は、箱桁上では100mm、箱桁からはずれる上では88mmの2種類となった。

なお、計測は、TCC 温度センサーを図-11.1に示す位置に設置し、1996年12月から1997年3月まで1時間毎に自動計測した。

11-4 結露凍結時の代表的な温度変化と効果

結露凍結が生じた日の代表として、2月10日朝を選び、午前7時の蓄熱材を封入しない従来の鋼床版橋（タイプ1、タイプ2）の温度状況を図-11.2に、蓄熱材を封入したもの（タイプ3、タイプ4）について、図-11.3に示した。蓄熱材なしの舗装表面下10mm（以下舗装表面という）の温度は、それぞれ-2.4℃、-2.8℃と凍結したが、蓄熱材封入のタイプ3、タイプ4ではそれぞれ0.8℃、1.6℃で、当該工法によって3.2℃、4.4℃高温となった。また、蓄熱材の温度は、それぞれ3.9℃、4.2℃であることから、固液共存域であることが分かる。これら4タイプの温度変化を前日15時から朝まで4時間毎に、舗装・床版断面に示したのが図-11.4、図-11.5、図-11.6、図-11.7である。これらの図を比べると、蓄熱材によって熱慣性が大きくなり、舗装温度の変化幅が、小さくなっていることが分かる。また、蓄熱材は、前日の昼のその温度が融解温度以上であることから、完全に液化していることが分かる。また、付近の地盤部道路の舗装表面最低温度は0.1℃であった。地盤部より蓄熱材封入タイプは高くなっていたことになる。

11-5 シーズン通じた結露凍結時の効果

放射冷却によって、舗装表面温度が-1℃以下になった日を凍結日として、その凍結日について、タイプ1と蓄熱材を封入したタイプ3、地盤部のタイプ5について、その路面の最低表面温度を1シーズン示したのが図-11.8である。タイプ3では、前述の2月10日以外でも2月14日を除く18日間で効果が見られ、ほぼ地盤部なみの温度になっていることが分かる。それぞれの最低温度の平均は、-3.45℃、-0.1℃、0.01℃である。蓄熱材封入によって、平均すると凍結日の最低表面温度を約3℃上昇できたことになる。

次に、タイプ3とタイプ4を比較すると図-11.9が得られる。箱桁上のタイプ4の方がわずかながら高くなっている。この図には、それぞれの蓄熱材の前日の最高温度を記載した。効果のなかった2月14日は、前日に蓄熱材が十分に液体に戻っていないことが分かる。前年度の開断面リブでの計測では、このように蓄熱材が液化されなかった日は、地盤部のタイプ5も蓄熱できずに、凍結することが観察されたが、今回の2月14日は、そうっていない。これは、前日に降雪があり、タイプ5の地点のみが供用された道路で除雪されたため、日射熱が蓄えられたことによると考えられる。したがって、タイプ3の地点も除雪されていたなら、地盤部と同じ温度になったと思われる。

11-6 開断面リブとの比較

次に、第10章の開断面リブとの比較を行う。図-11.10は、開断面リブでの結果を図-11.8に対応させて示したものである。欠測日がそれぞれにあるが、蓄熱材なしの開断面舗装表面温度は、図-11.8の開断面リブに比べかなり高く、平均値で1.35℃高い-2.1℃となっている。これは、深夜早朝に閉断面Uリブが床版下面から流入する熱を遮断することによる。しかし、蓄熱材封入タイプでは、図-11.8と図-11.10に大きな差がなく、平均値では前者に比べ0.3℃高い0.2℃で床版橋では著しく低温になるため、相対的に閉断面リブでの蓄熱材工法による凍結抑制

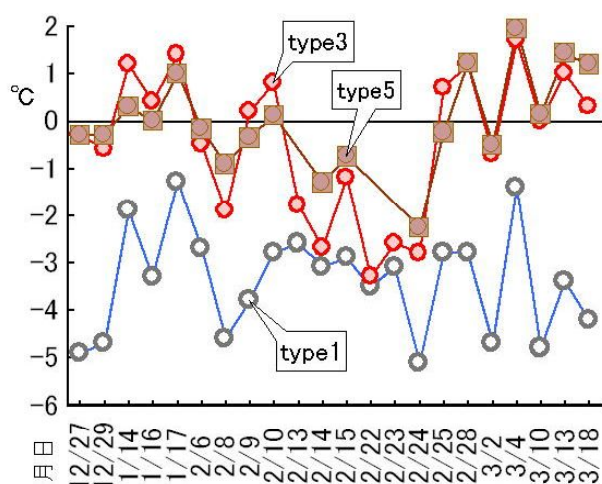


図-11.8 凍結日の各最低舗装表面温度

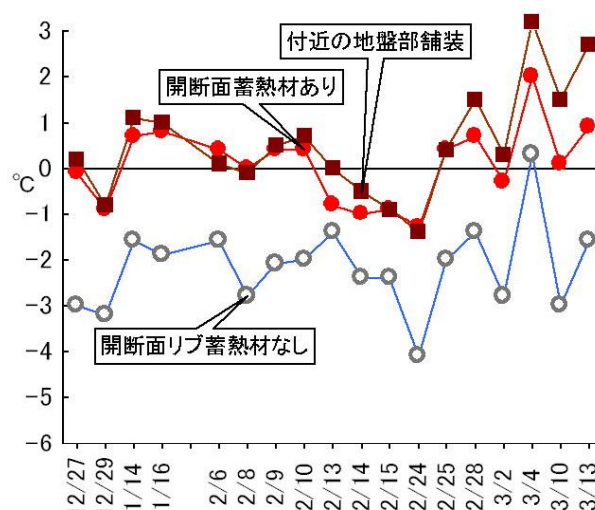


図-11.10 開断面リブでの凍結日の各最低表面温度

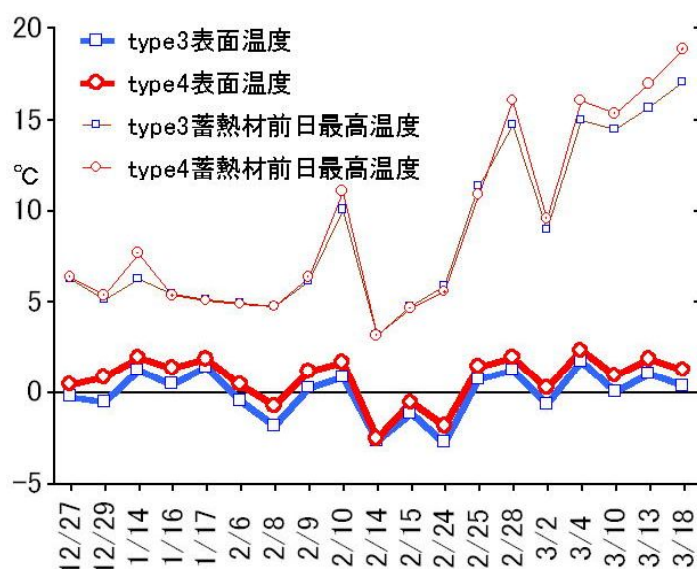


図-11.9 凍結日の各最低舗装表面温度と前日の蓄熱材最高温度

効果が大きくなっていることが分かる。いずれにせよ、蓄熱材を封入することによって、閉断面リブも開断面リブも、ほぼ地盤部なみに凍結が抑制される。

11-7 まとめ

以上、本工法を用いれば、Uリブ構造や箱桁構造の鋼床版橋における結露凍結も、地盤部なみに、凍結を抑制されることが分かった。

コスト面では、当該施工での作業実績から、本工法による新たな費用増は3.8万円/㎡で、電気融雪に比べ安価なことが分かった⁶⁸⁾。

舗装の内部に角型鋼管を挿入することによる構造の疲労破壊については、支障となる有害なひび割れを抑制するため、SFRCを用いている。1995年11月にSFRCのかぶり（鋼管表面と舗

装表面との距離)を25mm で試験施工を実施した。大型交通量が少ないこの現場では、現在のところ、その舗装にひび割れなどの異常は見られない。1996年度の閉断面での施工では、安全のため、その最小かぶり厚を43mm とすることで対処した。鋼床版が完全に剛体で変形しないと仮定して10ton の輪加重を載せると、有限要素法解析で、最大10kgf/cm²の引張応力と5kgf/cm²の圧縮応力が生じる結果となる。これは、許容応力度からすると十二分な安全を有するものである。

第 1 2 章 橋梁路面の凍結とその潜熱蓄熱材による抑制の数値シミュレーション

1 2-1 はじめに

これまで述べた実測に基づく研究から、福井市内の気象条件では、鋼床版橋では2～5℃で凝固・融解する蓄熱材を鋼管に詰め込み、これを鋼床版上の舗装の内に封入すれば、路面凍結を抑制できることが分かった。この工法の効果は、鋼床版橋路面の凍結を地盤部なみに改善する程度に限られているが、電気ヒーター方式より建設費が安価で、運転管理が一切不必要で、昼間の太陽熱を蓄え利用するソーラーシステムで環境にやさしい。そこで、福井市より寒冷な勝山市での鋼床版橋や新潟県下の北陸自動車道の RC 床版でも使用されようとしている。

しかし、この工法は、昼間の日射で蓄熱材が液化し潜熱蓄熱されなければ効果が得られないので、その効果はその地域の気象に大きく依存する。また、鋼床版橋床版下面の構造や RC 床版などではその床版と舗装厚さの違いによっても、9-5、9-6、11-6 で述べたようにその効果は異なる。したがって、気象条件が異なり、構造も異なる橋梁への普及には、設計時にその効果を予測できる数値シミュレーションが必要である。

さらに、この数値シミュレーションができれば、翌朝の融雪剤散布の必要性を、前日の夕方までに予測することができる。なお、数値シミュレーションでの予知システムは英国では実用化されている^{69), 70)}が、国内では重回帰分析による凍結予知が実用化され^{71), 72)}、数値シミュレーションによるものは研究発表段階である⁷³⁾。その数値シミュレーションの対象も路面温度だけで、実際に必要とされる路面の結露量、すべり抵抗、積雪量、圧雪かシャベットの別にまでは及んでない。

そこで、その地方の気象台のデータを逐次読み込み、熱の流入を計算し、これらを数値計算で求めることにした。本論では、数値シミュレーションのモデル式・仮定・手法などを示し、その計算結果と実測との比較を行う。

1 2-2 モデル式

ここで対象とする潜熱蓄熱材を有する鋼床版橋の構造を図-12.1に示す。また、熱解析での座標系と計算境界を図-12.1のようにとると、この舗装・床版・潜熱蓄熱材の内部と舗装表面、床版裏面での熱移動について、式12-(1)、式12-(2)、12-(3)が成り立つ。

なお、蓄熱材を封入しない鋼床版橋では、図-12.1の蓄熱材鋼管は舗装に置き換えられ、この場合はX方向に温度差は生じないので、1次元の解析となる。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) \quad 12-(1)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial Y} \Big|_{Y=0 \text{ (舗装表面)}} = q_u \quad 12-(2)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial Y} \Big|_{\text{(床版裏面)}} = q_l \quad 12-(3)$$

ここに、 ρ, C, k, T はそれぞれ舗装または床版の密度, 熱容量, 熱伝導率, 温度で、 τ は時間、 q_u, q_l はそれぞれ舗装表面と床版下面への外からの流入熱量である。

以下では式をパソコン計算を前提に差分的に記す。積雪 Q_{sw}^{P+1} は、降雪量（降雨換算重量）を計算時間ステップ毎に積み上げる（式12-(4)）。 $\Delta \tau$ は時間間隔。同時に、その積雪量を融

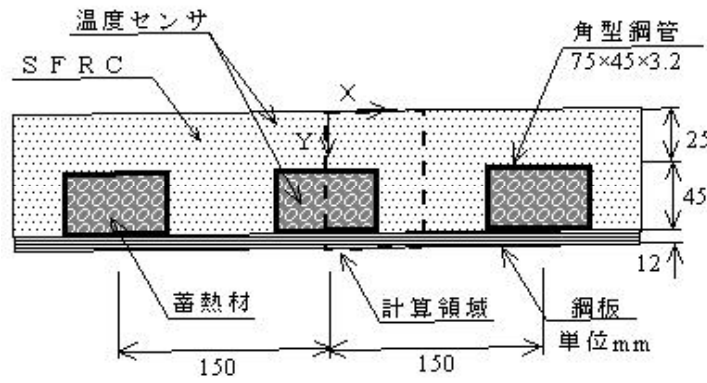


図-12.1 潜熱蓄熱材封入鋼床版の断面と座標系

解熱量に置き換えた Qs^{P+1} も計算時間ステップ毎に積み上げる（式12-(5)）。降雪を含む降水重量 Sw の中で、氷の割合 $s(T_{wet})$ はその雨水の水温の関数とされ⁷⁴⁾、その水温からは湿球温度 T_{wet} に等しいことから、さらに、 T_{wet} は水蒸気圧から推定した^{75)、76)}。

路面上の水分量 Q_{water} については式12-(6)で積み上げを行うが、横断勾配のある路面にとどまる水量には限度があることから式12-(7)で制限した。

降雪があるか残雪が路面にある（熱量 Qs^{P+1} が0を越える）場合は、上空からの短波長放射 G は表面で反射（雪面での日射反射率 α_s ）され、その残りのなかで、 $1 - \beta_G$ （積雪中の透過率）が捕捉され（式12-(8)）、それ以外は路面に達し、路面に反射（路面での日射反射率 α_r ）されない部分が路面に吸収される（式12-(16)）と仮定した。長波長放射 N と対流 H についても、同様に考えそれぞれ透過率を β_N 、 β_H とした。透過率は式12-(9)で得ることができる。 A_G 、 A_N 、 A_H は積雪中のそれぞれ短波長、長波長放射、対流の消光（減衰）係数である⁷⁷⁾。蒸発 E 、降雨伝導 R などは、直接路面に伝わらない（式12-(10)）。積雪から路面への熱流 M は、路面温度が 0°C を越える条件では第2章の無散水融雪実験で得られた熱コンダクタンス h で得られ（式12-(11)）、 0°C 以下では積雪と舗装表面の境界には熱抵抗がないとした（式12-(12)）。

積雪は、融雪と降雪で重量が変動する一つの層として扱った。雪は上下縦（ y ）軸方向の熱移動は生じるが、横（ X ）方向は積雪の温度差が小さいので無視した。

計算によって求められた Qs^{P+1} が積算された降積雪重量と融解熱量の積より大きい（ $Qs^{P+1} > Q_{sw}^{P+1} Ls$ ）時は、積雪温度 T_{snow} が 0°C より下がる（式12-(13)）。逆に Qs^{P+1} が積算された降積雪重量と融解熱量の積以下である時は、積雪温度 T_{snow} は 0°C となり、積雪重量 Q_{sw}^{P+1} は Qs^{P+1} に対応して溶けたものとして減らす（式12-(14)）。

路面に流入する熱量 qu は通過車による影響は交通量が少ないことから無視できるとして式12-(15)によって与えた^{78)、79)}。なお降積雪がない条件では、 β_G 、 β_N は1で、 M は0となる12-(16)。

$$Qws^{P+1} = Q_{sw}^P + s(T_{wet}) Sw \Delta \tau \quad 12-(4)$$

$$Qs^{P+1} = Qs^P + s(T_{wet}) Sw Ls \Delta \tau \quad 12-(5)$$

$$Q_{water}^{P+1} = Q_{water}^P + Sw \Delta \tau \quad 12-(6)$$

$$\text{ただし } Q_{water}^{P+1} < Q_{water \max} \quad 12-(7)$$

$Qs^{P+1} > 0$ (降積雪時) では

$$Qs^{P+1} = Qs^{P+1} - \{ (1 - \beta_G) G (1 - \alpha_s) + (1 - \beta_N) \cdot Ns + Hs + Es + Rs - M \} \quad 12-(8)$$

$$\beta_G = \exp(-A_G \cdot Qsw^P / \rho_s) \quad \beta_N = \exp(-A_N \cdot Qsw^P / \rho_s) \quad \beta_H = \exp(-A_H \cdot Qsw^P / \rho_s) \quad 12-(9)$$

$$Hr = Er = Rr = 0 \quad 12-(10)$$

$$T_{y=0} > 0 \text{ では } M = (0 - T_{y=0}) h \quad 12-(11)$$

$$T_{y=0} \leq 0 \text{ では } M = (T_{snow} - T_{y=0}) ks / (2Qsw^P / \rho_s) \quad 12-(12)$$

$$Qs^{P+1} > Qsw^{P+1} Ls \text{ では } T_{snow} = -(Qs^{P+1} - Qsw^{P+1} Ls) / (Cs \rho_s) \quad 12-(13)$$

$$Qs^{P+1} \leq Qsw^{P+1} Ls \text{ では } T_{snow} = 0, \quad Qsw^{P+1} = Qs^{P+1} / Ls \quad 12-(14)$$

$$Qs^{P+1} = 0 \text{ (無降雪かつ無積雪時) では } M = 0 \quad 12-(15)$$

$$qu = \beta_G G (1 - \alpha_r) + \beta_N Nr + Hr + Er + Rr + M \quad 12-(16)$$

ここに、 Qs^{P+1} は(P+1)時刻での積み上げられた積雪必要融解熱量 Qsw^{P+1} は積み上げられた積雪の重量 Sw は降雪を含む降水重量、 Ls は降雪重量当たり必要融解熱量、 Cs は氷の熱容量 ks は積雪の熱伝導率である。積雪密度は福井の最頻値 0.1g/cm^3 を用いて⁸⁰⁾、Devauxの式⁸¹⁾から求めた。添え字の s は積雪との熱移動、 r は積雪なしで路面との熱移動を意味する。 ρ_s は路面上の積雪密度を示す。

顕熱Hについては、ユルゲスの式12-(17)⁸²⁾を用いて見積もった。

$$Hr = hj \cdot (T_\infty - T_{y=0}) \quad 12-(17)$$

$$U \leq 5 \text{ では } hj = 3.95U + 5.8$$

$$U > 5 \text{ では } hj = 7.13U^{0.78}$$

ここに、 hj は熱伝達率 $[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$ 、 T_∞ は気温 $[\text{K}]$ 、 $T_{y=0}$ は舗装表面の温度、 U は平均風速 $[\text{m/s}]$ である。 Hs では、 $T_{y=0}$ を積雪の表面温度 T_{snow} に置き換える。

降雪後に溶けた融雪水や降雨水は、ある一定水量 $Q_{watermax}$ までは路面に残り蒸発するが、それを越えると排水されると仮定した。 $Q_{watermax}$ は1.5%の勾配を有する舗装に水をスプレーで吹き付け路面から路面上の水が流れ出す限度の水膜厚 0.3mm から求めた。なお、J. E. Thornesは 0.2mm としている⁸³⁾。

路面上の結露(蒸発)潜熱 Er については、ボーエン比を用いた実験式もある^{84), 85), 86)}が、湿気の移動と熱移動は相似性を有する⁸⁷⁾ことから、式12-(17)で得られた熱伝達率 hj を用いた方が合理的である(式12-(18))⁸⁸⁾。ただし、蒸発($Ewr < 0$)では路面に水がない条件では Ewr は0となる(式12-(19))。時間中の結露(蒸発)を積み上げることで路面上の水分量は求まる(式12-(20))。結露(蒸発)潜熱 Er は式12-(21)によって求めることができる。

$$Ewr = (hj / Cair) (Xo - X_{suf}) \quad 12-(18)$$

$$\text{ただし、} Ewr < 0 \text{ かつ } Q_{water}^{P+1} = 0 \text{ では } Ewr = 0 \quad 12-(19)$$

$$Q_{water}^{P+1} = Q_{water}^{P+1} + Ewr \Delta \tau \quad 12-(20)$$

$$Er = L Ewr \quad 12-(21)$$

ここに、 Ewr は時間当たり路面での結露(蒸発)量 L は水(氷)の結露(蒸発)潜熱 $Cair$ は湿り空気の比熱 X_{suf} は舗装表面の飽和絶対湿度 Xo は空気の絶対湿度 である。

路面水分量 Q_{water}^{P+1} と路面温度からは、結露量と路面すべり摩擦係数の実験式⁸⁹⁾を用いて路面のすべり摩擦係数を推測することができる。積雪での蒸発は、 X_{suf} を積雪表面のそれに置き換え、積雪は水分であることから $Q_{water}^{P+1} > 0$ となるので式12-(19)は無視すれば良い。

日射については、アスファルト舗装の^{アルベド}日射反射率は路面上に水分がある時は0.1、ない時は0.

18と推定した⁹⁰⁾。蓄熱材封入の舗装は、鋼繊維補強コンクリートであることから、その日射反射率は、路面に水分がある時は0.20、ない時は0.28とした。積雪路面での日射反射率は0.75とした⁹¹⁾。

大気との正味の長波長放射は、雲量・雲の種別・水蒸気圧に依存し、幾つかのモデル式がある⁹²⁾。ここでは、代表的な一つである山本・Brunt の式12-(22)を用いた。

$$Nr = \varepsilon_r (1 - n \cdot K) [\sigma T_r^4 - \sigma T_\infty^4 \cdot \{0.51 + 0.066 \cdot e^{1/2}\}] \quad 12-(22)$$

ここに、 ε_r は路面の放射率、 σ はステファンボルツマン定数、 T_r は舗装表面温度[K]、 n は雲量、 K は雲の種類による係数、 T_∞ は気温[K]、 e は地表付近の空気の水蒸気圧[hPa] である。 Ns は上記の路面に対する式の中で ε_r 、 T_r を積雪に置き換える。雲の種類による係数は、Sellers のものを用いた⁹³⁾。

雪を除く降水による熱伝導Rは雨水の水温が湿球温度 T_{wet} に等しく⁹⁴⁾、その水温は路面表面温度もしくは積雪温度にまで至るとした（式12-(23), 12-(24)）。

$$Rr = (1 - s(T_{wet})) \cdot Sw \cdot Cw \cdot (T_{wet} - T_{y=0}) \quad 12-(23)$$

$$Rs = (1 - s(T_{wet})) \cdot Sw \cdot Cw \cdot (T_{wet} - T_{snow}) \quad 12-(24)$$

ここに Cw は水の顕熱容量である。

床版下面での熱移動の式12-(3)に関しては、河川水との正味の長波長放射 N_l と下面空気からの顕熱熱移動 H_l のみを考えた式12-(25)で q_l を求めた。

$$q_l = Fl \cdot N_l + Fl \cdot G \cdot (1 - \alpha_l) \cdot \alpha_{river} + H_l \quad 12-(25)$$

$$N_l = \varepsilon_l \cdot \sigma \cdot (T_{river}^4 - T_{sl}^4) \quad 12-(26)$$

$$H_l = (Ch + Cv \cdot S_{fin} \cdot \eta_{fin}) \cdot (T_{l\infty} - T_{sl}) \quad 12-(27)$$

ここに、 T_{river} は床版下の河川水の温度[K]、 T_{sl} は床版下表面温度[K]、 $T_{l\infty}$ は床版下の気温[K]、 ε_l は床版下面の放射率、 Fl は形態係数、 S_{fin} は床版面積当たりのリブの表面積、 η_{fin} はリブを熱フィンとみなすフィン効率⁹⁵⁾、 α_{river} は床版下の河川水のアルベドである。 Ch 、 Cv はそれぞれ床版とリブの空気との熱伝達率である。

形態係数 Fl については、主桁下フランジと隣接する主桁下フランジをつなぐ仮想面に流入した放射は仮想面内側の主桁側面と床版の面積比に応じて放射されるとして、その値を求めた。

主桁で囲まれた床版下とリブが周囲の空気から得る熱量は、後述（12-3）する現地観測で熱伝達率を求め、その値を用いて求めた。

以上の計算にデータとして用いる雲量、雲の種別の係数、気温、降雨(降雪)量、日射量の気象条件は、地方気象台の気象日原簿から得ることができる。福井地方気象台では、雲量と雲の種別は、21時から翌朝9時まで12時間観測されていないことから、この12時間を比例案分するという方法で計算した。

平均風速は、福井地方気象台の値は地上26.2m の観測値であることから、実測するか、高さや周辺状況を換算して推定しなければならない⁹⁶⁾。ここでは、実測値を用いた。

床版下面への長波長放射を求めるための河川水温も実測値を用いた。なお、河川水による長波長放射は、後述の計算結果（図-12.17）から流入熱量全体の中ではわずかな量であることから、実測せずに適当に推定しても結果にあまり影響を与えないと思われる。

なお、実測した橋梁は、福井地方気象台から0.8km の距離に位置する。

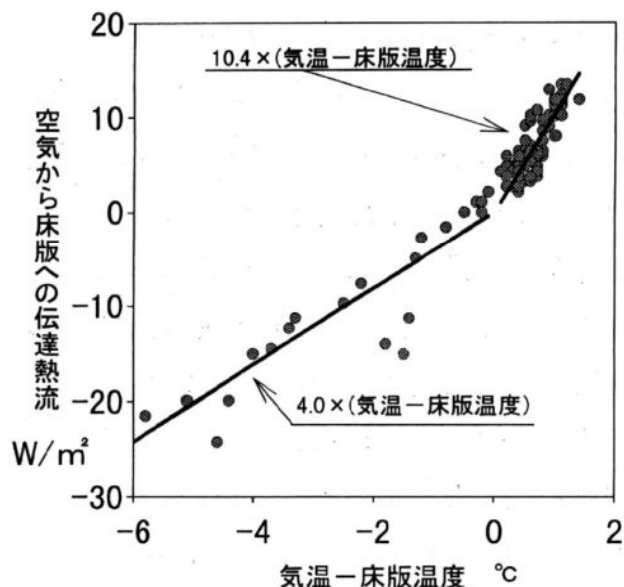
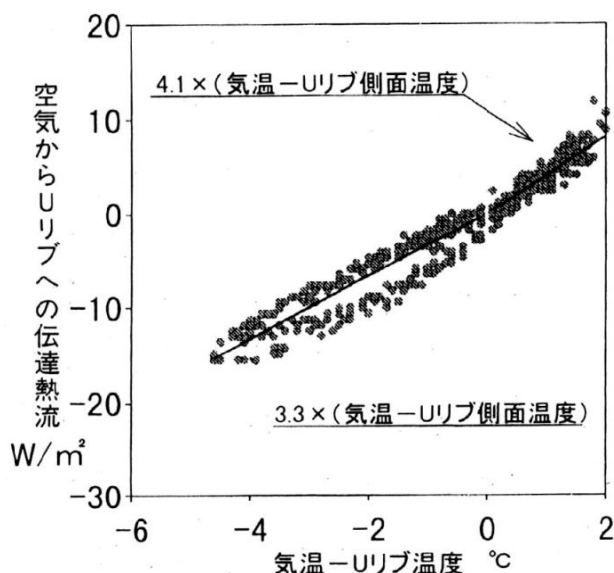


図-12.2 鋼床版橋箱桁内での U リブの熱伝達率

図-12.3 桁鋼床版橋バブルリブでの床版の熱伝達率

表-12.1 計測された熱伝達率 $W/(m^2 K)$

		リブ (水平) Ch		リブ (鉛直) Cv	
		上向き	下向き	上向き	下向き
箱桁	外	13.3	7.1	8.8	8.3
	内	5.8	4.7	4.1	3.3
I 桁		10.4	4.0	6.5	3.6

12-3 床版下面の熱伝達率

床版下面の対流については、リブの構造が類似する実験式がないので、箱桁内部とその外での U リブと鋼床版、および I 桁でのバブルリブと鋼床版について、それぞれ空気との熱伝達率を求めるための計測を行った。箱桁橋は九頭竜川に架かる天菅生橋で、I 桁は福井市内の九十九橋で観測した。

それぞれの床版下面とリブ面に熱流束計と熱電対温度センサーを張り付け、その上から熱放射の影響を取り除くため光沢のあるアルミ膜で周辺一体を密着カバーした。空気温度も、アルミ膜でカバーした熱電対温度センサーで計測した。なお、箱桁内部については、温度成層が見られたので、鉛直方向に 4 カ所計測した。

図-12.2は、箱桁内での気温と U リブの温度差と熱流束計が示した値を示したものである。平均すると熱伝達率は熱流上向きで $4.1 W/(m^2 K)$ 、熱流下向きではやや低い $3.3 W/(m^2 K)$ であった。なお、熱流下向きでは温度成層が見られたが、その成層は U リブ下面 20cm より上側にとどまったので、ここでは空気温度として U リブ下面 20cm の値を用いた。

I 桁とバブルリブに囲まれた床版と空気との熱伝達を同様に整理したのが図-12.3である。風の影響を受けることから橋上風速を独立変数にして重回帰分析したが、データ数が少ないことや風速の計測が適切でなかったことから相関は良くなかった。気温と床版温度にのみ依存す

表-12.2 計算に用いた潜熱蓄熱材・舗装などの熱特性

材 料 名	熱 伝 導 率	熱 容 量
パラフィン系蓄熱材	0.165 W/mK	融解潜熱 130 J/cm ³ 融解：3.6～4.9 °C 凝固：3.5～2.0 °C 顕熱 1.741 J/(cm ³ K)
アスファルト	2.44 W/mK	2.05 J/(cm ³ K)
SFRC 珪石骨材	3.6 W/mK	2.05 J/(cm ³ K)
鋼	53.5 W/mK	3.65 J/(cm ³ K)

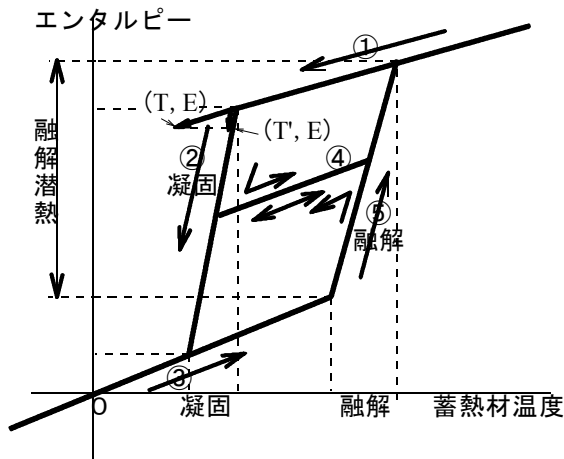


図-12.4 潜熱蓄熱材の温度－エンタルピー

るとして熱伝達率を求めると、熱流上向きで10.4, 下向きで4.0を得た。

他の熱伝達率についても、同様に整理し、表-12.1を得た。箱桁外と I 桁では、風の影響を受けバラツキが大きい。放射冷却の深夜早朝では風がほとんどなく自然対流に近いと考えられ、箱桁の内部の値を用いることが実際に近いと思われる。

12-4 潜熱蓄熱材の取り扱い

ここで用いた蓄熱材は、一定範囲の温度幅で凝固・融解する。また、凝固温度は過冷却をも考慮して融解温度より低いと考えた。この凝固・融解の過程を、図-12.4の蓄熱材の温度－エンタルピーに基づき次に説明する。

まず、完全液体から温度低下すると、ライン①（勾配：液体の顕熱容量）上で下がり、凝固開始温度以下になるとライン②（勾配：凝固潜熱容量）上で温度が下がる。凝固終了温度以下にまで下がればライン③（勾配：固体の顕熱容量）に移行し急激に温度が下がる。もし、凝固途中から温度が上昇すると、ライン④（勾配：その時点での固液混合比に応じた顕熱容量）上を上るとライン⑤（勾配：融解潜熱容量）に移り、液化する。

凝固時には、過冷却が生じるケースも実測では見られたので、凝固温度を表-12.2に示すように融解温度よりやや下げて扱った。

上記の式をパソコンで計算するが、蓄熱材を封入した鋼床版橋では、陽解法ではパソコンの計算時間が長くなるので、陰解法を用いた。陰解法での計算では、舗装と床版下面からの熱の流入量は、直前の計算時刻での舗装表面温度から求め、その値は当該ステップの時間中は変わらないとした。

また、熱容量も、直前の温度で液体、固液共存域、固体の相状態から対応する熱容量を求め、時間経過後の温度を求める。その時間経過後の温度が熱容量の異なる領域に突入した場合には、エンタルピーの変化量を新しい領域の熱容量で除して得られる温度で補正する⁹⁷⁾。例えば、蓄熱材が図-12.4のライン①上にあった場合、このライン上の温度－エンタルピーで次の時間ステップの温度を計算し、その結果が温度低下で図-12.4の(T, E)のようにライン上をはみ出した時は、エンタルピーを同じとしたライン②上の(T', E)に修正する。

この方法と熱流束を時間ステップ直前の温度を用いることによって生じる誤差を大きくしな

いため、陰解法での計算時間ステップは3分とした。

12-5 実測による数値シミュレーションの検証

降雪と結露凍結が繰り返された1996年2月20日16時から10日間について、鋼床版橋（城東橋）を対象に、20日16時の実測舗装温度を初期値として与えて数値シミュレーションを行った。なお、この初期値が多少違っても、熱容量が小さい橋梁では短時間に、その影響はなくなる。

なお、今回の使用した潜熱蓄熱材や舗装の熱特性を表-12.2に示す。この期間の気象条件を図-12.5に示す。

12-5-a) 結露凍結時

まず、蓄熱材を封入しない鋼床版橋の舗装表面から10mmの深さの温度（以下表面温度）について、計算値と実測値とを示したのが図-12.6である。

この図では、放射冷却が著しかった21、25、29日の早朝の舗装表面の最低温度について、計算は実測より最大でも0.6℃の誤差におさまリ、良く一致している。この時の結露量を計算すると図-12.7（蓄熱材なし）を得る。舗装表面温度は25日より21日の早朝が低いが、露点温度も25日は低いため、結露量は25日が多く48g/m²になっている。現場でのBPNは結露によって乾燥時の54%であった。室内実験では結露量が10g/m²以上でBPNは乾燥時の約半分程にまで低下し、その後はあまり低下しない結果が得られ、計算結露量からのBPNとほぼ一致した。なお、福原輝幸らは結露量が10g/m²以上では、すべリ抵抗はほぼ氷膜になりBPNは乾燥時の22%になるとしている⁹⁸⁾。

蓄熱材を封入した表面温度の計算結果について、実測との比較を行ったのが図-12.8である。これも、計算値は、実測値と最大で0.8℃の誤差でよく一致している。この場合には、舗装表面温度は露点以下にならず、結露は生じなかった（図-12.7）。図-12.9と図-12.10に、蓄熱材の温度と蓄熱材の液体になった比率を示した。図から、期間中昼夜の1日サイクルで融解凝固が繰り返されていることが分かる。

12-5-b) 積雪時

積雪時の路面温度の計算値と実測値を図-12.6、図-12.8で比べると、蓄熱材なしでは計算値が実測値より最大3℃高いケースが1日あるが他はよく一致し、蓄熱材ありではより一致している。

図-12.11に蓄熱材ありとなしでの積雪の計算結果と現場での実測値を示した。計算された積雪量と実測値はほぼ一致している。例えば、21日21時30分の写真-12.1の状況は、蓄熱材なしでは1cmの積雪で蓄熱材ありでは無積雪で、計算の結果と一致している。

蓄熱材ありでの21日23時から翌朝9時までの積雪過程を断面で1時間ごとに計算し示したのが図-12.12、図-12.13である。この結果は写真-12.2の22日7時の状況とほぼ一致している。図-12.14に23日8時の積雪断面を示す。これを同時刻の写真-12.3と比べると、積雪深はやや異なるが、蓄熱材封入鋼管の角の部分辺りが最も積雪が少ない形状は似ている。蓄熱材の真上（図-12.15のX=0）で、積雪が少なくなるように思われるが、写真も計算もそうになってない。この結果は積雪時の舗装と蓄熱材内部の温度場と積雪を示した図-12.15の舗装表面での鋼管の角の部分辺りが高温であることと整合性を有する。これは、蓄熱材の熱伝導率が舗装の22分の1と小さく、

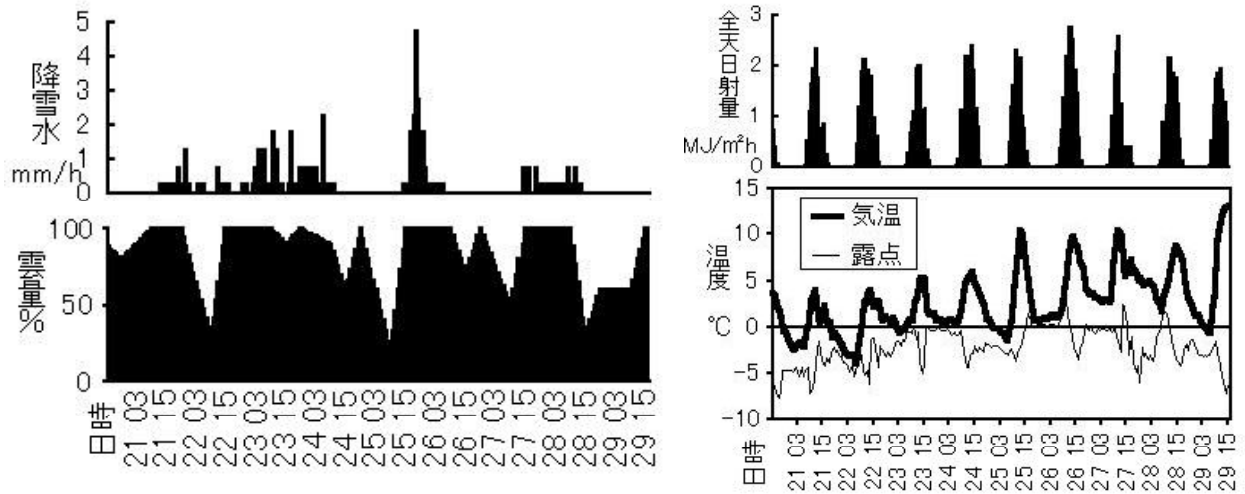


図-12.5 雲量、全天日射量、降雪水量、気温、露点

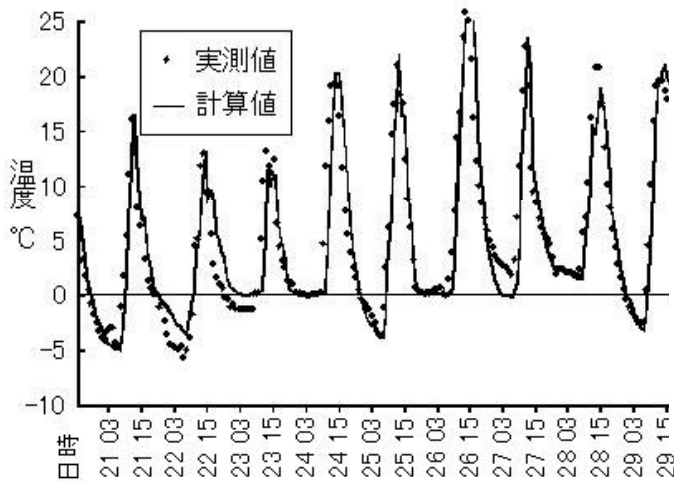


図-12.6 蓄熱材なし鋼床版橋の舗装表面温度

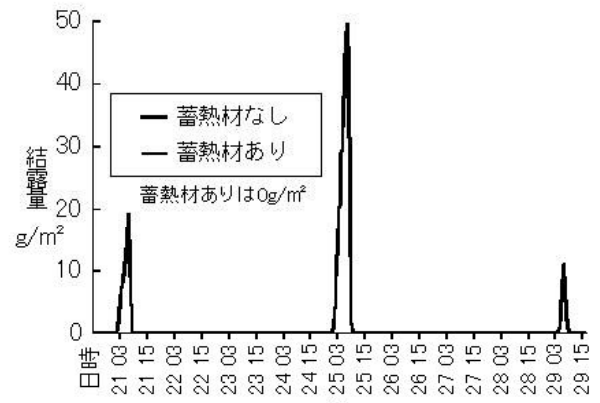


図-12.7 鋼床版橋の結露量

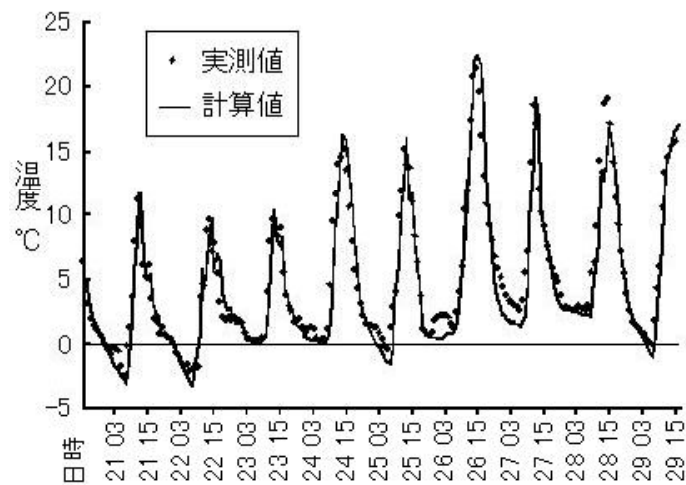


図-12.8 潜熱蓄熱材封入鋼床版橋の舗装表面温度

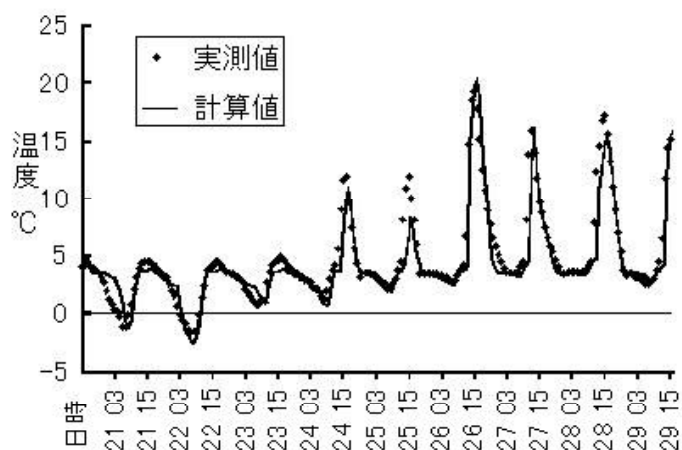


図-12.9 潜熱蓄熱材の温度変化

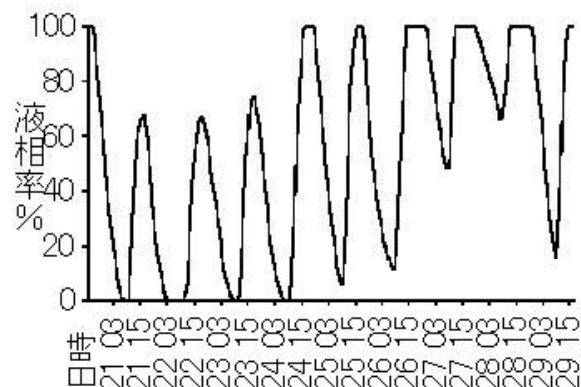


図-12.10 潜熱蓄熱材の液相率の変化

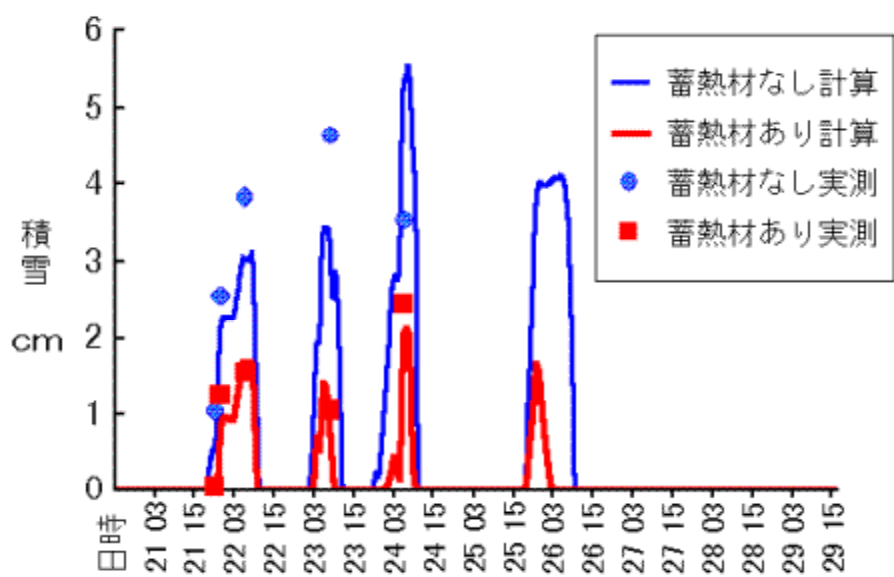


図-12.11 鋼床版橋（蓄熱材ありとなし）での積雪深



写真-12.1 2月21日 21時30分



写真-12.2 2月22日 7時00分



写真-12.3 2月23日 8時00分

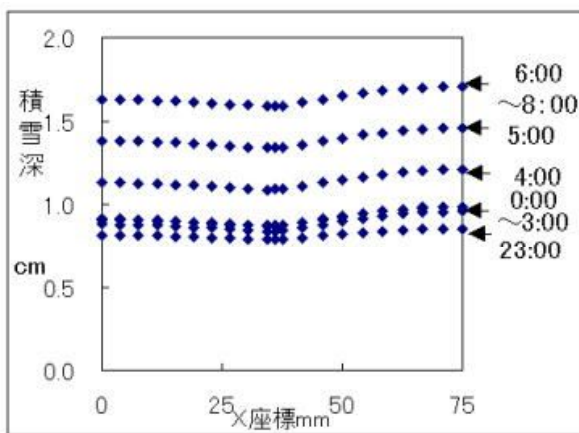


図-12.12 積雪融雪過程 (21日23時～22日8時)

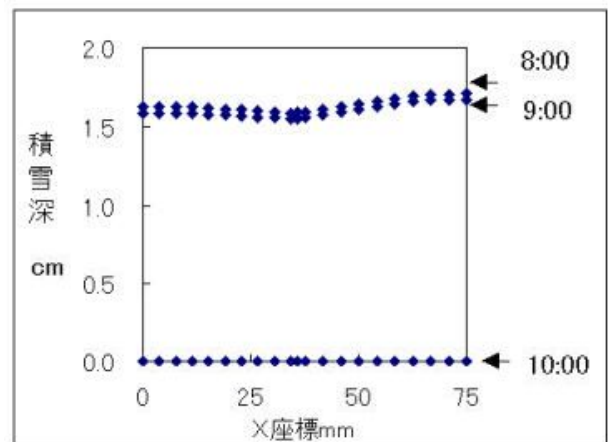


図-12.13 積雪融雪過程 (22日8時～10時)

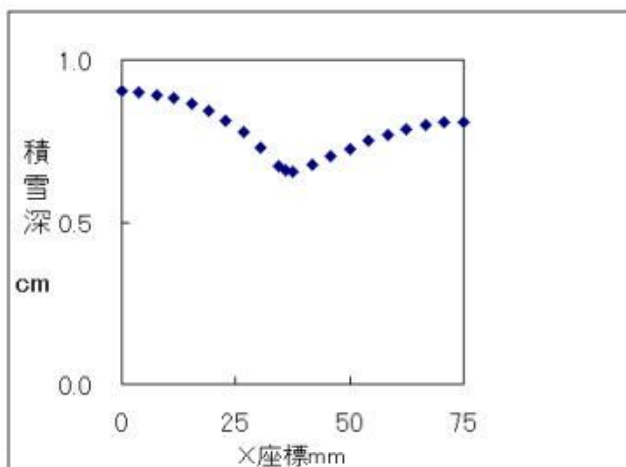


図-12.14 23日8時の積雪断面

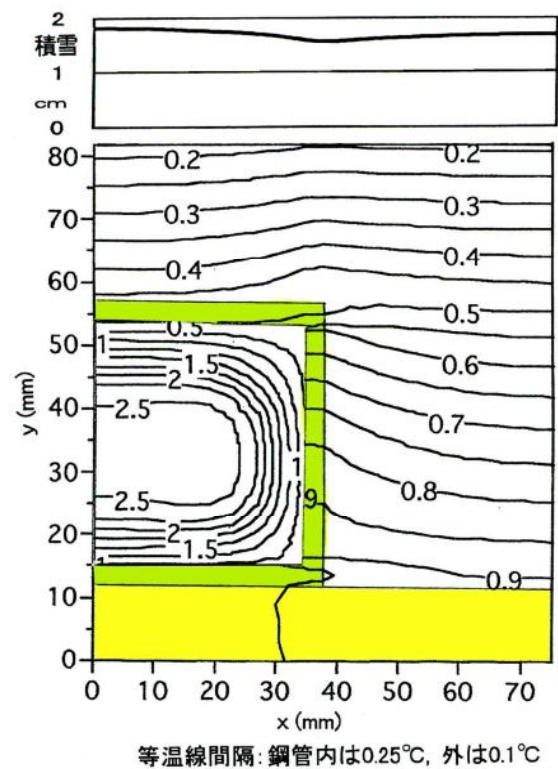


図-12.15 舗装・潜熱蓄熱材の温度場と積雪

また下面床版と鋼管はその舗装の15倍と熱伝導率が大きいため、鋼管の側面と下面の両方から回り込んで舗装表面に流れる熱量が少なくないことによる。このことは、図-12.15で、蓄熱材のほぼ中心部が高温となっていることや舗装の等温線からも分かる。

12-5-c) 橋 へ の 熱 流

図-12.16に、橋舗装面への外部から流入した熱流を示した。冬期といえども、かなりの日射（短波長放射）があること、蒸発はかなりの熱流になること、結露はその絶対量が少なくその熱流もほとんどないことが分かる。雪から舗装への熱流は、路面温度が低いので小さいが、朝になって日射で路面温度が上昇すると、かなりの熱が雪へと流れる結果となっている。なお、雨による熱流は、その絶対値が極めて少ないので記載しなかった。

図-12.17に、橋の裏面から橋へ流入した熱流を示した。裏面からの絶対熱流は、舗装面からの絶対量に比べて、かなり小さいことが分かる。更に、路面が暖かい昼間は橋裏面から対流や長波長放射で熱が流出し、路面が冷たくなった際には逆に熱が裏から流入し床版を暖めているという9-3で実測で明らかにしたことがこの図からも分かる。この計算での対流は、放射冷却凍結時を優先的に想定し、自然対流と見なし、表-12.1の箱桁内の熱伝達率を使って見積もった。ここではリブが熱フィンとして作用している。

また、図-12.18に、橋裏面に正味放射計を設置しての長波長と短波長の合計の放射熱実測値を計算値と対比して示した。概ね計算値が実測値と一致することが分かる。

12-6 第 9 章 から 第 12 章 の ま と め

第9章から第12章までの結果は

- ①放射冷却で結露凍結する時の深夜から早朝では、鋼床版は河川水や気温よりも低温になることから、河川水からの放射や空気からの対流で、床版は下面から暖められている。
 - ②したがって、床版下を断熱することになる閉断面リブは、開断面リブに比べ結露凍結しやすい。福井市内では、結露凍結時の日々の閉断面リブの最低路面温度は、1シーズン平均で開断面リブより1.4℃低いことが観測された。露点温度以下で結露することから、その温度差は路面の滑りにはかなり影響する。
 - ③3～5℃で凝固融解する潜熱蓄熱材を舗装に封入すれば、結露凍結しやすい閉断面リブと開断面リブのいずれの鋼床版橋についても、福井市内では地盤部なみの結露凍結と積雪の路面状況にはほぼ改善できる。閉断面リブでは結露凍結のあった日々の最低路面温度は、1シーズン平均で約3℃上げることができた。
 - ④地方気象台の日原簿データを読み込んだの熱収支の路面数値シミュレーションは、路面温度、積雪量について、実測とよく一致する。路面の結露量と路面のすべり抵抗も計算でき、他の気象と構造条件での設計時の潜熱蓄熱材封入の効果予測に有効である。
- にまとめられる。

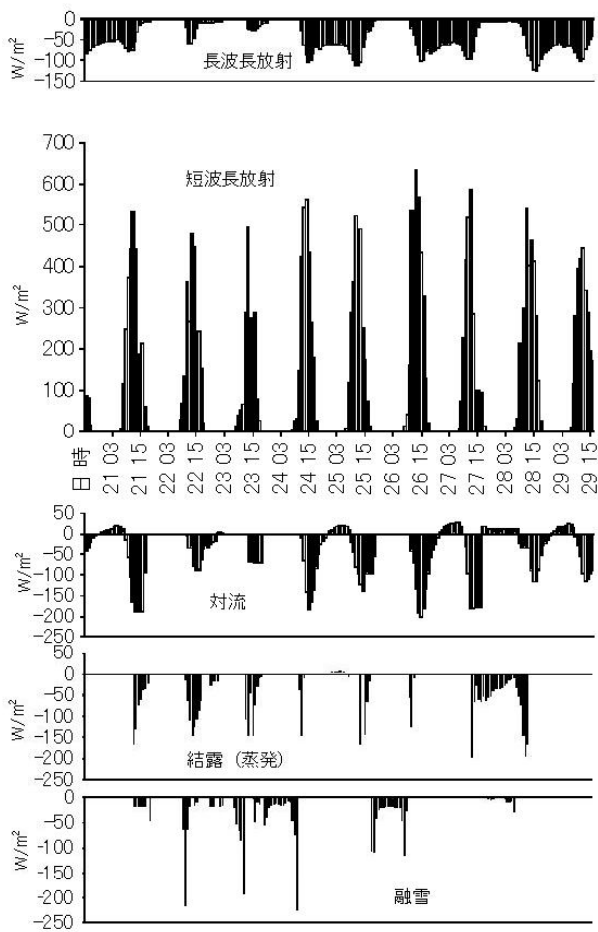


図-12.16 橋舗装上面への外部からの流入熱量

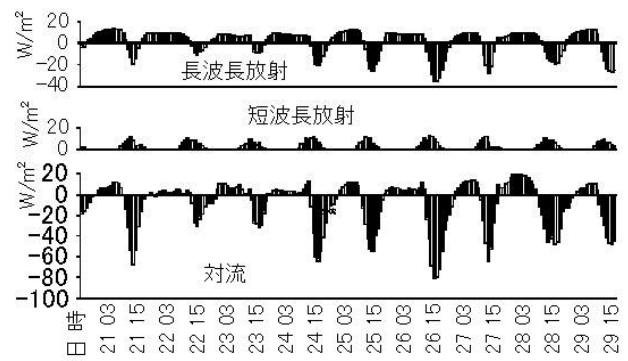


図-12.17 橋裏面への外部からの流入熱量

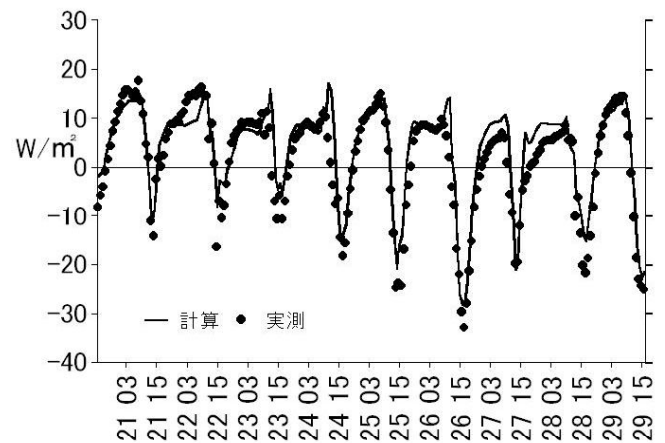


図-12.18 橋裏面の正味放射流入 (実測値と計算値)

第 1 3 章 結 論

本論で扱った地下水、地熱、冬の太陽熱などは、自然に再生可能な熱であるが、そのままの温度ではほとんど利用用途がない未利用熱である。しかし、対象となる雪や凍結では 0°C 以下であることから、その対象と熱源との間の熱抵抗を高熱伝導骨材や鋼繊維の補強でかぶりを薄くすることなどで小さくすれば、必要な時間当たりの出力が得られ、ヒートポンプを使わずにそのままの温度で利用できる。このことを放熱管方式融雪の実験とモデル式から示した。

さらに、散水融雪では、直接に雪に接することから熱抵抗は小さくて、より低温な未利用熱でもそのまま利用できる。したがって、放熱管方式融雪で使用した後の冷えた水でも、散水して融雪することができ、カスケードな熱利用で節水となる。また、ノズル散水では水筋以外は溶けないことから、通行車両の少ない道路ではスプリンクラー散水は均一散水で節水になる。

このような節水は、地下水の揚水量を減らすことから、建設費の削減にもなる。

降雪時間帯での運転となる降雪センサーから、路面の積雪の有無を感知しての積雪センサーへの運転制御方式の変更は、相対的に融雪能力が降雪強度より大きいケースでは断続運転になり、逆に降雪強度が大きいケースでは、降雪後も延長運転になる。このように、フィードバック制御となる積雪センサーは、融雪設備の能力は余裕を見込んで設計されていることなどから、大幅な省エネ省資源となることが実際の融雪で実証された。

融雪ではかなり大きな熱量を必要とするが、沖積の地盤は容積比熱が約 0.78 と大きく、低温ではあるが、地盤にストックされている熱量は大きい。この豊富な熱を安価に集めるのに、基礎杭を兼用して利用することは可能で実用的であった。この融雪システムは、融雪部での流水と雪との間の熱抵抗を小さくし、杭内水温の変化による融雪能力の変化を積雪センサー制御によってカバーし、杭1本当たりの融雪面積を適切に取れば、問題なく融雪ができることが実際の融雪で実証された。

杭と融雪面を一体の系とした数値シミュレーションの結果は、杭内部の水温場や杭の出入口水温などの実測値と一致した。数値シミュレーションと実測から、長時間連続融雪では、つぎのようになることが分かった。すなわち、杭内の水が1巡するまでは、放熱管への流入水温度が一定であるため、融雪能力は一定であるが、その後徐々にその能力は低下する。しかし、杭内の水が低下するにつれて、周囲の杭壁と地盤から集める熱流と融雪で放熱する熱流がバランスしはじめ、融雪能力はほぼ一定に収斂し、能力の大きな低下には至らず、豪雪であっても、粘り強い融雪となることが分かった。また、気象台の降雪量を取り込んだ実際の規模の融雪での数値シミュレーションによる残雪結果は、1シーズン通じてほぼ一致した。融雪能力が変動し杭の条件は与件となる本システムでは、この数値シミュレーションは設計時に有用となる。

杭の温度低下による応力についても、杭頭変位の計測と数値シミュレーションから、豪雪であっても、杭頭の沈下量は問題にならないほど小さく、また、杭壁に生じる応力も建物による応力に比べ小さいことが分かった。

打撃杭では、約一割ほどの杭が水漏れで使えないことも生じたが、これを見込んだ設計であっても、建設コストは電気ヒーターやボイラー加熱の融雪とほぼ等しく、維持費用は安価で実用的なものであることが示された。

鋼床版橋は、地盤部やコンクリート床版橋に比べて圧雪や結露凍結しやすいために非常に危

険な路面となり、道路管理者泣かせの路面である。放射冷却の深夜早朝は、直接放射で熱を失う路面は下面の河川、護岸や空気より低温になるので、床版の下面では放射と対流の熱は鋼床版へ向かって流れる。したがって、下面を断熱するような閉断面リブの路面は、開断面リブに比べ福井市内では1シーズン平均で約1.4℃低温になった。結露凍結は、露点以下で生じることから、そのわずかな違いは、路面結露に大きな影響を与えている。

このように、鋼床版橋が結露凍結で危険になるのは、下面から冷やされるのではなく、熱容量が小さいことによる。そこで、約3～5℃で凝固融解する潜熱蓄熱材を舗装に封入して凍結直前の熱容量を大きくすることを試みた。その蓄熱材は昼間の太陽熱で液化し熱を貯え、凍結時に凝固し放熱し、路面の凍結は抑制された。福井市内での閉断面リブ鋼床版橋では、放射冷却時の最低路面温度を1シーズン平均で約3℃高くすることができた。この方法は、完全な融雪はできないが、一切の管理なしで結露凍結や積雪を地盤部なみにまで改善できることと電気融雪以下の建設費用であることから実用的となった。

気象台の気象日原簿データを読み込み、放射・対流・蒸発（結露）・融雪の熱収支計算を行い、橋面の温度、積雪量などを逐次求めていく数値シミュレーションの結果は実測と一致した。この数値シミュレーションの方法で、気象条件や橋の構造が異なっても、潜熱蓄熱材封入の効果を設計時に予測できる。

以上、地下水を効率的に利用するシステム、地盤の熱を安価に取り出してのシステム、制御・動力をも用いない潜熱蓄熱材封入のパッシブなシステムなど、克雪の用途に応じた多様な方法があること。その運転コストは自然熱源であるから安価であるが、建設コストも実用的になりえることが示された。

自然熱源での融雪や凍結抑制では、

1. 低温である自然熱源から必要な時間当たりの出力を得るには熱の抵抗を小さくすること
2. 幾分か高温の自然の熱を貯えるか、貯えられた地盤、地下水や海から熱を取り出すこと
3. 熱を移動させる時は効率的な制御を行うことが一般には優れていること、ただし、逆に制御なしも方法として対象によってありえること

の3点に留意することが大切である。そして、用途・地域気象・構造の特性などに適した方法を工夫して用いるなら、環境とエネルギーの面で持続可能な融雪や凍結抑制は実用的なレベルで可能であることが本研究開発で示されたものと思われる。

参考文献

- 1) 宮本重信：次世紀にもおいしくて安価な水道を!!, 福井の科学者, No. 63, pp. 11-21, 1992. 5
- 2) 森瀧健一郎：水資源開発事業の「公共性」を問う, 日本の科学者, vol. 33, No. 2, Feb, pp. 10-14, 1998. 2
- 3) 野田幹夫・小川健・小柳洽・川村満紀：凍結防止剤散布環境下における ASR によるコンクリート構造物の損傷状況調査, コンクリート工学, vol. 36, No. 9, pp. 15-21, 1998. 9
- 4) 鈴木秀輔・藤沢信明：塩化系凍結抑制舗装の効果に関する検討, 第12回北陸雪氷技術シンポジウム, pp. 43-46, 1998. 1
- 5) 盛田耕二・田子真：地熱の新たな可能性を示唆するスイスの例, 地熱第31巻第2号, pp. 41-57, 1994
- 6) 高木秀男：科学思想としての物理学, しん福井出版, pp. 158, 1993
- 7) 杉森正義：無散水融雪における熱流の設計および維持管理に関する考察, 第6回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 235-240, 1989. 11
- 8) 日本建設機械化協会編：新編防災工学ハンドブック, pp. 370-413, 1988. 3
- 9) 浦上晃一・佐藤守：低温な地下水を用いた道路融雪の実験, 温泉工学会誌, Vol. 19, NO. 2/3, pp. 41-62, 1985
- 10) 熊谷元伸・野坂以伊部：地下水利用による無散水融雪工法の実用化に関する研究, 国立防災科学技術センター研究報告, 第41号, pp. 285-309, 1988
- 11) J. P. ホールマン著, 平田賢監訳(1985)：伝熱工学(上), pp. 60, ブレイン図書出版 K. K, 1982
- 12) 福原輝幸・橋本泰英：放熱管を有する舗装体の融雪能力特性, 水工学論文集第36巻, pp. 721-724, 1992. 2
- 13) 浦見良美・中村洋：建築環境工学, pp. 208, 1996
- 14) 島田提彦・白川潔・小林純夫・小山清一・宮原俊二：鋼繊維補強コンクリートを用いた融雪道路, 第2回北陸舗装会議論文集, pp. 203-206, 1982
- 15) 宮本重信：舗装の熱拡散率の逆解析, 福井県雪対策・建設技術研究所年報第8号, pp. 53-54, 1995
- 16) 大畑一夫：放熱管を設置したコンクリート舗装 東北自動車道坂梨舗装工事, 道路とコンクリート, No. 76, pp. 4-9, June, 1987.
- 17) 小島康夫・山下雄康：既設橋梁への無散水融雪設備の設置に関する検討, 第53回年次学術講演会, pp. 364-365, 1998
- 18) 島田捷・白川潔・小林純夫・小山清一・宮原俊二：繊維補強コンクリートを用いた融雪道路：第2回北陸舗装会議論文集, pp. 203-206, 1982
- 19) 小林五太夫・今村秀樹・杉森正義：高熱伝導アスファルト試験舗装(2)について, 福井県建設・雪対策技術センター年報第7号, pp. 66, 1994
- 20) 谷本俊夫・吉武勇・中村秀明・谷直彦・浜田純夫：温水パイプによる橋梁の融雪・凍結防止システムに関する研究, 土木学会論文集, No. 595/VI-39, pp. 103-116, 1998. 6
- 21) 中俣三郎：上越新幹線消雪システムの研究経過と概要, 新潟大学災害研究所年報第7号, pp. 1-5, 1985
- 22) 斎藤博英：地下水を利用する融雪の基礎理論, 雪害実験研究所報告, 1967
- 23) 中村秀臣：地下水による道路融雪実験から算出した適性散水量, 国立防災科学技術センター研究報告, 第18号, pp. 117-147, 1977. 11
- 24) 今井清保・割沢安泰ほか：頂上散水法による屋根融雪の熱力学, 第5回雪工学シンポジウム, pp. 197-204, 1989. 11

- 25) 中村秀臣：地下水による道路融雪実験から算出した適性散水量, 国立防災科学技術センター研究報告, 第18号, pp. 117-147, 1977. 11
- 26) 今井清保・割沢安泰ほか：頂上散水法による屋根融雪の熱力学, 第5回雪工学シンポジウム, pp. 197-204, 1989. 11
- 27) 中俣三郎：上越新幹線消雪システムの研究経過と概要, 新潟大学災害研究所年報第7号, pp. 1-5, 1985
- 28) 中村秀臣：地下水による道路融雪実験から算出した適性散水量, 国立防災科学技術センター研究報告, 第18号, pp. 117-147, 1977. 11
- 29) 今井清保・割沢安泰：頂上散水法による屋根融雪の熱力学, 第5回雪工学シンポジウム, pp. 197-204, 1989. 11
- 30) 建設省北陸地方建設局監修：路面消・融雪施設等設計要領, pp. 44, 1990. 7
- 31) 茅亮・石丸民之永・加藤務・宮越秀巳：水滴計数式降雪強度センサー, 雪氷北信越第14号, pp. 46, 1995
- 32) 今井清保・石田博明・割沢泰・木下智・中川敏和・吉田志郎：小規模消雪システムの自動制御, 石川高専紀要, No. 18, 1986
- 33) 宮本重信：道路融雪設計のためのシミュレーション, 第6回日本雪工学大会論文報告集, pp. 213-220, 1989, 11
- 34) 宮本重信・猪又正一・山田忠幸：積雪センサーによる消融雪の節水効果, 第21回日本道路会議論文集一般論文集, pp. 216-217. 1995
- 35) 宮本重信：融雪を制御するセンサーについて, 社団法人雪センター発行「ゆき」No. 25, pp. 55-60. 1996. 10
- 36) 宮本重信：降雪センサーから積雪センサーへ, 第5回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 181-184, 1988. 9
- 37) 地下熱利用委員会活動報告(Ⅱ)ヒートポンプ熱源利用部会：空気調和・衛生工学会, pp. 122, 1997. 2
- 38) 地下水の世界：榎根勇, NHK ブックス, pp. 130～131, 1992. 10
- 39) 盛田耕二・田子真：地熱の新たな可能性を示唆するスイスの例ー浅部低品位地熱資源の利用, 地熱第31巻第2号, pp. 41-57, 1994. 6
- 40) IEA Heat Pump Centre :NEWSLETTER Vol. 16 No. 2/1998
- 41) 新潟県企画調整部地域政策課：人と地球環境にやさしい雪対策, pp. 30-40, 1997
- 42) 空気調和・衛生工学会ヒートポンプ熱源利用部会:地下熱利用委員会活動報告(Ⅱ), pp. 167-167, 1997. 2
- 43) 新潟県企画調整部地域政策課：人と地球環境にやさしい雪対策, pp. 50-51, 1997
- 44) 権利者 福井県・三谷セキサン(株)・(株)ホクコン, 考案者 宮本重信：基礎杭を利用した熱交換システム(実用新案), 出願1991. 3, 登録1996. 12
- 45) 國島正彦・小沢一雅：沈下ひびわれ防止によるコンクリート構造物の耐久性向上（表面締固めバイブレータ使用の標準化の提案）, 土木学会論文集第421号／VI-13, pp. 185-193, 1990. 9
- 46) 土質工学会：土質工学ハンドブック, pp. 59, 1985
- 47) 山田穰：日本海沿岸22都市における新積雪密度の度数分布と平均値について, 防災科学技術研究所報告第52号, pp. 51-67, 1993, 12
- 48) S. W. Churchill : Combined Free and Forced Convection in Channels, Heat Exchange Handbook, 1983, 2. 5, 10-1, Hemisphere
- 49) 岡原美智夫・中谷昌一・松井謙二：杭の鉛直および水平方向の支持特性に関する研究, 土木学会構造論文集, vol. 37A, pp. 1457, 1991
- 50) 駒田敬一・山川朝生：くいの支持力と変形特性に関する調査, 建設省土木研究所資料, 第963号, pp. 20, 1974

- 51) 岡原美智夫・中谷昌一・松井謙二：杭の鉛直および水平方向の支持特性に関する研究, 土木学会構造論文集, vol. 37A, pp. 1457, 1991
- 52) 建築基準基本法施行令第86条5項, 1996.
- 53) 日本機械工学会機械工学便覧改訂第51版, pp. 4-89. 1968
- 54) 洲崎治平・井上要三・仙黒邦行・飯塚敏樹・矢島篤：橋梁部における路面凍結調査, 雪と道路, No. 21, pp. 60-70, 1989
- 55) 山田忠幸・福原輝幸・横江重行・元木真二：サーマルマッピングに観られる橋梁路面温度特性, 土木学会第49回年次学術講演概要集第4部, pp. 650-651, 1994
- 56) 森谷・金子：路面温度予測システム, 本四技報, Vol. 15, No. 15, No. 57, pp. 14-17, 1991
- 57) 中尾正義・清水増治郎・高橋修平：積雪域交通路における路面凍結に関する研究, 防災科学技術研究報告所, 第50号, pp. 169-191, 1992
- 58) 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, 北海学園大学工学部研究報告, 第19号, pp. 31-51, 1992
- 59) 太田貞次・高橋秀幸・吉川薫・深沢泰晴・檜貝勇：軽量充填材を使用した合成型枠橋の概要と特徴, 鋼構造年次報告集, 第1巻, pp. 821-pp. 828, 1993
- 60) 福井県・宮本重信：蓄熱材を格納した舗装道路, 特許出願平成6年, 特許願第059931号, 1996. 10認証.
- 61) 木村寛・小坂岑雄：蓄熱材材料・ブライン1. 3水和反応物蓄熱材, 冷凍, 第71巻, 第823号, pp. 18-23, 1996. 5
- 62) 寺田博昌：鋼繊維補強コンクリートを用いた合成床版の開発研究, 名古屋大学学位論文, 1986
- 63) 前野裕文・鈴木教義・梅原秀哲・吉田弥智：鋼繊維補強コンクリートを用いた鋼床版の舗装, コンクリート工学, Vol. 24, No5, May, pp. 39-46, 1986
- 64) 名古屋工業大学工学部社会開発工学科：鋼繊維補強コンクリートの強度特性に冠する研究（報告書）, 1994. 2
- 65) 名古屋高速道路公社：舗装設計基準, pp. 20-23, 1984. 10
- 66) 佐藤章次・前野裕文・北原俊男・中村幸・寺田博昌：鋼繊維補強コンクリート舗装を施した鋼床版の合成効果, 橋梁と基礎, 86-2, pp. 26-30. 1986. 2
- 67) 小林一輔・星野富夫・辻恒平：海洋環境下における鋼繊維補強コンクリートの鉄筋防食効果, 土木学会論文集, 第414号V-12, pp. 196-203, 1990. 2
- 68) 宮本重信・室田正雄：鋼床版橋路面の蓄熱材封入による凍結抑制の技術開発, 設計施工編, 福井県雪対策・建設技術研究所年報地域技術第10号, pp. 1-10, 1997. 7
- 69) P. j. Rayer : The Meteorological Office forecast road surface temperature model, The Meteorological Magazine , vol. 116, pp. 180-191, 1987
- 70) J. E. Thornes : A preliminary performance and benefit analysis of the UK national road ice prediction system, The Meteorological Magazine , vol. 118, No. 1402. pp. 24-25, 1992. 9
- 71) 富山県, 路面凍結予測などの開発業務, 委託報告書, pp. 204, 1996
- 72) 森谷俊美・金子正猪：路面温度予測システム, 本四技報 vol. 15, No. 57, pp. 14-17, 1991
- 73) 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, 北海学園大学工学部研究報告, 第19号, pp. 31-51, 1992
- 74) 菅谷博：寒候期降水中の雨・雪の判別(その3)－湿球温度による推定, 平成3年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, pp. 41, 1991

- 75) 山崎剛：厳寒地に適用可能な積雪多層熱収支モデル, 日本雪氷学会誌雪氷第60巻2号, pp. 134, 1998. 3
- 76) 山崎剛：厳寒地に適用可能な積雪多層熱収支モデル, 日本雪氷学会誌雪氷第60巻2号, pp. 134, 1998. 3
- 77) 小島賢治：融雪機構と熱収支, 気象研究ノート第136号, 融雪・なだれ特集, pp. 27, 1979. 3
- 78) 中尾正義・清水増次郎・高橋修平：積雪路面交通路における路面凍結に関する研究, 防災科学技術研究所報告第50号, pp. 175-177, 1992. 12
- 79) 武市靖：地表面熱収支解析による冬期間の路面温度の推定, 土木学会第46回年次学術講演会, pp. 24-25, 1992. 9
- 80) 山田穰：日本海沿岸22都市における新積雪密度の度数分布と平均値について, 防災科学技術研究所報告第52号, pp. 51-67, 1993, 12
- 81) Devaux, J : Annular Physica, 1933. 5
- 82) 建築学大系編集委員会：建築学大系 8 音・光・熱・空気・色, pp. 343, 1959. 6
- 83) J. E. Thornes: A preliminary performance and benefit analysis of the UK national road ice prediction system, The Meteorological Magazine , vol. 118, No. 1402. pp. 24-25, 1992
- 84) 小島賢治・石川信敬・本山秀明・山田芳典則：積雪の蒸発量, 北海道低温科学研究所低温科学物理編, 第44号, pp. 52-60, 1985
- 85) 福原輝幸：橋梁上の微気象と凍結, 福井大学積雪研究室研究紀要, No. 2, 29-36, 1995
- 86) P. j. Rayer : The Meteorological Office forecast road surface temperature model, The Meteorological Magazine , vol. 116, pp. 183, 1987
- 87) 空気調和・衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧第12版 1 基礎編, pp. 167, 1995
- 88) 渡辺俊行：住宅の採涼設計, 住宅のパッシブクーリング(浦野良美編著), pp. 87, 1991
- 89) 木曾忠幸・福原輝幸：橋梁路面の結露凍結に関する基礎的研究, 土木学会第50回年次学術講演会IV部, pp. 748-749, 1995. 9
- 90) 中尾正義・清水増次郎・高橋修平：積雪路面交通路における路面凍結に関する研究, 防災科学技術研究所報告, 第50号, pp. 177-178, 1992. 12
- 91) 石川信敬・成瀬廉二・前野紀一：道路雪氷の熱収支特性, 北海道大学低温科学研究所業績第3101号, 低温科学物理篇第46輯, pp. 153, 1987
- 92) 竹内清秀・近藤純正：大気科学講座 1 地表に近い大気, pp. 86-88, 1981
- 93) Sellers. W. D. : Physical Climatology , University of Chicago Press, pp. 58, 1965
- 94) 小島賢治：融雪機構と熱収支, 気象研究ノート第136号融雪・なだれ特集, pp. 12, 1979. 3
- 95) 相原利男：伝熱工学, 裳華房, pp. 26, 1994
- 96) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説, 丸善(株), pp. 258-268, 1997
- 97) 大中逸雄：コンピュータ伝熱・凝固解析入門ー鋳造プロセスへの応用ー丸善, pp. 202, 1985
- 98) 木曾忠幸・福原輝幸：橋梁路面の結露凍結に関する基礎的研究, 土木学会第50回年次学術講演会IV-374, pp. 748-749, 1995. 9

全文審査論文

1. 宮本重信：地下水を利用した節水型融雪システムの開発, 土木学会論文集, No. 492/VI-23, pp. 78-86, 1994. 6, [第2章,第3章,第4章,第5章]
2. 竹内正紀・木村照夫・宮本重信・坪田諭治：基礎くい利用地熱融雪法の開発と数値シミュレーション, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 52, pp. 59-69, 1993. 6, [第7章]
3. 宮本重信・竹内正紀・木村照夫：基礎杭利用による設計施工運転と数値シミュレーション, 土木学会論文集, No. 609/VI-41, pp. 99-110, 1998. 12, [第6章,第7章,第8章]
4. 宮本重信・室田正雄・杉森正義：床版下面構造が橋梁路面の凍結におよぼす影響, 日本雪工学会誌論文, Vol. 14, No. 1, pp. 36-42, 1998. 1, [第9章]
5. 宮本重信・室田正雄：鋼床版橋路面の蓄熱材封入による凍結抑制の研究, 土木学会論文集, No. 574/VI-36, pp. 73-83, 1997. 9, [第10章]
6. 宮本重信：鋼床版橋路面での蓄熱材封入凍結抑制法の数値シミュレーションによる効果予測, 土木学会論文集, No. 595/VI-39, pp. 117-125, 1998. 6, [第12章]

概要審査シンポジウム

7. 宮本重信・室田正雄：蓄熱材封入による鋼床版橋路面の凍結抑制-閉断面リブ鋼床版橋での計測, 第13回寒地技術シンポジウム寒地技術論文・報告, vol. 13, pp. 121-125, 1997. 12, [第11章]
8. 宮本重信・加賀久宣：橋梁の放熱管方式での融雪と凍結抑制に関する研究, 第14回寒地技術シンポジウム寒地技術論文・報告, vol. 14, pp. 187-190, 1998. 12, [第2章]
9. 宮本重信・室田正雄：鋼床版橋の路面凍結と蓄熱材封入による抑制, 第1回鋼橋床版のシンポジウム講演論文集, pp. 247-252, 1998. 12, [第9章,第10章,第11章]

研究雑誌、研究報告など

10. 宮本重信・室田正雄：蓄熱材封入による路面の凍結抑制, 「舗装」, No. 7, pp. 15-20, 1996. 7, [第10章]
11. 宮本重信・室田正雄：鋼床版橋の路面凍結と蓄熱材封入による抑制, 「橋梁と基礎」, Vol. 32, No. 6, pp. 25-31, 1998. 6, [第9章,第10章,第11章]
12. 宮本重信：地下水再利用の節水型融雪システム, 社団法人雪センター「ゆき」, No. 18 調査研究報告, pp. 108-122, 1995. 1, [第2章,第3章,第4章,第5章]
13. 宮本重信：融雪を制御するセンサーについて, 社団法人雪センター発行「ゆき」, No. 25, pp. 55-60, 1996. 10, [第5章]
14. 宮本重信：環境にやさしい融雪, 北陸道路研究会「北陸路」, pp. 21-26, 1992. 12, [第2章,第3章,第4章,第5章]
15. 宮本重信・室田正雄・三田村文寛・橋本泰英・奥村茂・近間正行・寺田博昌：鋼床版橋路面の蓄熱材による凍結抑制, 北陸道路研究会「北陸路」, pp. 19-26, 1996. 12, [第10章]
16. 宮本重信：環境にやさしい融雪をめざして（プロジェクトレポート）, 土木学会誌, pp. 7-9, 1993. 5, [第10章]
17. 宮本重信：次世紀にもおいしくて安価な水道を!!, 福井の科学者, No. 63, pp. 11-21, 1992. 5, [第1章]
18. 宮本重信：環境にやさしい道路克雪技術の開発, 雪と対策'95-'96, pp. 74-80, 1995. 10, [第2章,第3章,第4章,第5章,第6章,第7章,第10章]
19. 宮本重信：環境にやさしい融雪（地球環境）, 建築設備士, pp. 27-30, 1994. 6, [第4章,第5章,第6章]

工業所有権

特許

20. 発明者：宮本重信，蓄熱材を格納した舗装道路，特許出願平成6年特許願第059931号，1996. 認証，特許権者：福井県，出願 H6. 3. 15, 登録 H8. 10. 8, [第10章]
21. 発明者：宮本重信，蓄熱材を格納した橋梁，特許出願平成5年特許願第294530号，1997. 認証，特許権者：福井県，出願 H5. 10. 29, 登録 H9. 1. 14, [第10章]

実用新案

22. 考案者：宮本重信・藤野間幸英・浦田俊夫：コンクリート製無散水融雪装置，権利者：福井県・(株)ホクコン，出願 S62. 7. 27, 登録 H8. 1. 26, [第2章]
23. 考案者：山田忠幸・宮本重信・西村彰朗：路面赤外線反射方式積雪センサー，権利者：(株)山田技研・福井県，出願 H2. 4. 28, 登録 H8. 2. 9, [第5章]
24. 考案者：宮本重信，基礎杭を利用した熱交換システム，権利者：福井県・三谷セキサン(株)・(株)ホクコン，出願 H3. 5. 9, 登録 H8. 12. 2, [第6章]

講演概要集、発表講演集など

25. 宮本重信・藤野間幸英：無散水歩道融雪と散水車道融雪のセット化，第5回日本雪工学会大会論文報告集，pp. 173-pp. 180, 1989. 1
26. 宮本重信・藤野間幸英：放熱管方式道路融雪の解析と実測，第6回日本雪工学会大会論文報告集，pp. 241-pp. 248, 1989. 11
27. 宮本重信・今村秀樹：スプリンクラー散水消雪の実験と数値シミュレーション，第10回雪工学大会論文報告集，pp. 65-72, 1994. 1
28. 宮本重信・藤野間幸英：降雪センサーから積雪センサーへ，第5回日本雪工学会大会論文報告集，pp. 181-pp. 184, 1989. 1
29. 宮本重信・猪又正一・山田忠幸：積雪センサーによる消融雪の節水効果，第21回日本道路会議論文集一般論文集 A, pp. 216-217. 1995
30. 宮本重信：道路融雪設計のためのシミュレーション，第6回日本雪工学会大会論文報告集，pp. 213-220
31. 竹内正紀・木村照夫・宮本重信：地熱と太陽熱を組み合わせた融雪装置の実験，第7回雪工学大会論文報告集，pp. 151-156, 1990. 11
32. 竹内正紀・木村照夫・宮本重信・千田秋広・橋詰善光・青木由裕・高橋浩三・小林志伸：基礎杭利用地熱融雪法の開発，第8回雪工学大会論文報告集，pp. 183-190, 1992. 1
33. 竹内正紀・木村照夫・宮本重信・坪田諭治：基礎杭利用地熱融雪法の開発と数値シミュレーション，第29回日本伝熱シンポジウム講演論文集，No. 52, pp. 59-60, 1993. 6
34. 宮本重信・室田正雄・杉森正義：橋梁路面の凍結と熱収支に関する研究，第14回日本雪工学会大会論文報告集，pp. 175-178, 1996
35. 宮本重信：蓄熱剤封入による路面凍結緩和の実験的研究，土木学会第50回年次学術講演概要集第5部，pp. 648-649, 1995.
36. 宮本重信・室田正雄：蓄熱材封入による鋼床版橋路面凍結抑制の研究，第51回土木学会全国大会 I -A338, 1996
37. 宮本重信・室田正雄：路面凍結における鋼床版橋下面の熱流とリブの影響，第52回土木学会全国大会 I -A335, 1997
38. 室田正雄・宮本重信：蓄熱材封入による鋼床版橋路面凍結抑制の研究，第52回土木学会全国大会 I -A336, 1997
39. 宮本重信・室田正雄・杉森正義：橋梁の路面凍結と床版下面の熱流に関する研究，第22回日

本道路会議論文集, pp. 784-785, 1997. 12

40. 宮本重信：凝固潜熱利用による路面凍結緩和の実験, 第11回日本雪工学大会論文報告集, pp. 81-86, 1994.
41. 宮本重信：蓄熱剤封入による路面凍結抑制, 第8回雪と道路の研究発表会, 発表資料, pp. 33-34, 1997. 2
42. 宮本重信：橋梁路面の凍結と熱収支, 第9回雪と道路の研究発表会, 発表資料, pp. 7-10, 報告書, pp. 31-33, 1997. 2
43. 宮本重信・杉森正義・室田正雄：蓄熱剤格納による路面凍結緩和, 第21回日本道路会議一般論文集(A), pp. 230-231, 1996
44. 室田正雄・宮本重信：鋼床版橋での蓄熱材封入凍結抑制(1. 施工・計測), 第22回日本道路会議論文集, pp. 884-885, 1997
45. 宮本重信・和田敏洋・室田正雄:鋼床版橋での蓄熱材封入凍結抑制(2. 数値シミュレーション), 第22回日本道路会議論文集, pp. 886-887
46. 宮本重信：舗装の凍結シミュレーション, 第7回日本雪工学大会論文報告集, pp. 157-162, 1990
47. 宮本重信：橋面の結露凍結と積雪の数値シミュレーション, 土木学会第53回年次学術講演概要集第5部, pp. 362-363, 1998
48. 宮本重信：橋面の積雪と結露凍結の数値シミュレーション, 1998年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, pp. 116, 1998
49. 宮本重信：鋼床版橋路面の扇風機による凍結抑制の研究, 福井県雪対策・建設技術研究所年報「地域技術」第11号, pp. 10-12, 1998
50. 加賀久宣・宮本重信：蓄熱材タンクによる路面の凍結抑制, 第14回寒地技術シンポジウム, 寒地技術論文・報告, Vol. 14, pp. 180-186, 1998. 12
51. 藤野間幸英・宮本重信:福井ならではの雪対策技術の開発を, 福井の科学者, pp. 20-30, 1988. 9
52. 宮本重信：名水の湧き出る雪のまちの再生に向けて-雪国大野市の地下水問題-, 日本の科学者, Vol. 24, No. 3, Mar. 1989, pp. 36-41, 1989. 3
53. 宮本重信：福井の内発的發展を展望するー克雪技術の開発と五湖リゾート開発をケースに, 『地域を考える』, 日本科学者会議福井支部, pp. 229-25, 1990
54. 宮本重信：震災対策-消防・給水に井戸を, 住民と自治, pp. 79-81, 1995. 6

表彰

第2章～第5章の研究開発：功労賞（福井県知事） 1990. 12

第6章～第8章の研究開発：全建賞（全日本建設技術協会、調査研究部門） 1996. 6

第10章～第11章の発明：注目発明選定（科学技術長官） 1999. 4

第9章～第12章の研究開発：技術開発賞（土木学会） 1999. 5

謝 辞

地下水利用融雪での節水に関する研究に関して

私が土木事務所から現在の研究所の前身の建設技術センターへと人事異動となったのは、1986年であった。当時のセンターは、生コン業者などから持ち込まれた材料の品質証明と県の技術職員の研修を業務としていたが、職場はすさんでいた。前年に私とは県庁同期の職員が研究機関としての職場の新しいあり方を提起していた。このことが背景となって、私の異動となったようにも思われた。以前から宮本憲一立命館大学教授らの地域の「内発的発展論」（『環境経済学』岩波書店ほか）に魅せられていた私は、地域にふさわしい建設技術を開発研究することで職場を再生し、また地域に役立ちたいと取り組みはじめた。当時知事となられた栗田幸雄知事が雪を政策に掲げておられたことと、雪は地域性の強いテーマで地の利で東京の研究に負けないし、この問題は地域の私たちが研究しなければ解決されないと考えた。そのことが伝わり、本庁道路維持課から、無散水の歩道融雪を失敗してもやむを得ないから日本にない新しいシステムを考えやってくれと依頼された。技術者冥利な話であった。

そこで、一ヶ月ほど、本来の研修業務の合間に、当時の全国の融雪システムの研究を調べた。この中で、建設省土木研究所新潟支所の当時の所長下村忠一氏との電話でのやりとりから生まれたのが歩道無散水と車道散水をセットにした地下水再利用のシステムである。

また、現場で融雪などを担当していた当時の福井土木事務所の藤野間幸英氏には管理上の問題をヒヤリングした。「雪が降っても積もらないことが多いのに、降雪センサーでは散水してしまう。水のムダ使いで、歩行者に迷惑だから、降雪センサーに頼らずに、私たちは事務所で融雪の中央制御盤を24時間手動で運転している。これが大変だ。」という。そこで、融雪路面の積雪を感知するセンサーを作ればよい、これは、融雪の運転を自動運転からフィードバック運転に変えるもので本質的に従来のものとは異なり、革命的なものになると語り合った。

当時路面の積雪を感知するセンサーは市販されてなくて、数年前に校内での実験用融雪の運転のために、路面を見るセンサーを石川高専機械工学科今井清保教授が試作されていた。そこで、先生には歩道用に使えるように改良の設計を引き受けていただいた。このセンサーの試作などを(有)西村電気商会にお願いし、無散水融雪のセンサーとして使い、効果を確認した。

その後、(株)山田技研と、カメラの露出技術や首振りにするなど、乾燥時にかなり白くなるアスファルト車道の散水融雪でも誤操作なく稼働できる積雪センサーを開発することになった。私は、自宅から歩いて3分の橋で試験的にそのセンサーを設置し、山田忠幸氏と徹夜の観測や3シーズンの降雪時の早朝観測でその信頼性の確認を行った。

舗装の高熱伝導化については、全国のセメントメーカーに問い合わせたところ、ホクコン(株)の当時の技術部長浦田俊夫氏と(株)小野田セメントの方が来られ、福井の珪石を使う提案をいただき、放熱管を埋設したプレキャスト製品として実用化した。

これらの一連の融雪の新しいアイデアは、2ヶ月で、できあがった。しかし、本来の研修業務を行いながら、研究と現場の管理を一人ではできない。幸いにも、藤野間幸英氏と久保俊章氏が異動で来られ、当初は本来の受託試験などを行いながら、3人で、日本の融雪を変えようと語りながら取り組みはじめた。特に、熱解析と実験によるその検証は藤野間幸英氏との共同であった。県内の管設備、井戸の業界の方々には、地下水の節水となるなら協力したいと申し出があつて、雪が降る深夜の計測で応援をいただいた。

この一連の試験施工は、マスコミに大きく取り上げられ、やがて、知事や道路維持課の指示でモデル施工が市街地でなされた。さらに、県議会での３人の議員が雪への取り組みを一般質問され、知事は、私どもの事務所への雪対策技術センターの併設を答弁された。また私はこの一連の研究開発で知事から功労賞をいただいた。

基礎杭利用地熱融雪開発に関して

この研究開発がマスコミなどで報じられると、県の環境保全課で幹部３人から、地盤沈下になるからと地下水を使った融雪技術を研究開発することに対して厳しい批判をいただいた。積雪センサーを融雪に義務づけることや地下水涵養地での岡砂利の採取規制などで、地下水を節水しながら涵養しながら行えばという私の彼らへの反論と提案は、今日も日の目を見ないが、彼らからの批判は私には重く感じられ、地下水を使わない技術開発を目指す契機になった。また、環境保全の枠の中での開発という私の指針とした内発的発展論からも、環境の枠の中であることが前提であり、なんとかすべきだと考えた。

そうしたことを考えていた際に、放熱管を埋設した融雪パネルで、下面に断熱材を敷設したものは、断熱材のないものに比べ積雪が多いことが観察された。さらに、下面に断熱材を敷設したものは、放射冷却の凍結で、銅管の放熱管が２度壊れた。このことから、地盤の熱は工夫すれば使えろと実感した。また、凍結抑制だけなら、わずかな熱で済みそうだと感じた。

地熱が使えろという実感と地下水利用融雪への批判から地熱を使った融雪システムの開発に着手した。当初は、1.5m ほどを掘削し、そこに縦横15cm の間隔で架橋ポリエチレン管を敷設し、銅管を埋設した融雪パネルとつないで、不凍液を入れた。昼間に地盤より融雪パネルが高温となった際には、循環ポンプを運転し地盤に熱を蓄える。融雪パネル上に雪が積もった際にも運転で雪を溶かす。過去の研究を調べると、夏の太陽熱を貯めるということで札幌市で実験されていた。札幌では、寒くて実用化されなかったが、福井では可能性があると考えた。この実験システムの開発を行おうとした際には、私の職場に雪対策技術センターが併設されたことによる人事異動などで、私の下には誰もいなくなってしまった。そこで、相談にのっていただいていた福井大学機械工学科竹内正紀教授、当時の木村照夫助教授（現京都工芸繊維大学大学院教授）に共同研究をお願いし、学生らを含めた手作りの実験装置の試作と実験を行った。

ところが、これに類する実験を全く同じ冬に、(株)興和と建設省北陸技術事務所が行っていた。私どもののは、放熱管のかぶりが薄く舗装も高熱伝導であること、そのことから冬の日射をメインにしていること、積雪センサーでの運転であることなどで異なるものの、地盤での蓄熱はほぼ同じであったので別の方法をと考えた。それが、基礎杭を熱交換器に使うというアイデアであった。土質・基礎の技術士でもあった私としては、私ならではのアイデアに思われて実用化したかった。

しかし、当時は、その実験に要する八百万円の施工費を公費で得る見通しがなかった。うまくいくかは分からない、その上に企業への資金提供依頼は、当時の役所では前例がなく、私も躊躇し、いろんな方に相談した。役所関係のいずれの方からも、企業から資金を得るには、かなりの手続きが必要だとのことで、当時はそのような見通しが立たない。そこで、これが万一問題にされる可能性のある県議会での唯一野党議員で、県庁土木部 OB で行政事情が分かり、かつ建築構造の実務者として著名な渡辺三郎氏に電話をした。氏は、非常に面白いアイデアだ、是非試して欲しい。資金がないのなら、行政なり杭メーカーに頼んであげようかとまで言ってくくださった。翌日、コンクリート杭の県内メーカーの三谷セキサン(株)と(株)ホクコンに、まずは全くの個人的な話

として打診した。両者とも引き受けてくださって、実験費用を出していただき、竹内正紀教授らを含めた共同研究ということで、福井県産業振興財団にも助成をいただいた。

最初私の考えたものは、コンクリート基礎杭の壁に放熱管を添わすというものであった。しかし、竹内正紀教授が概算された結果は、それほど大きな融雪能力は見込めないものとなった。その上、杭メーカーからは放熱管の周囲をコンクリートにするとコストがかなり高くなると言われた。杭の中に水を貯めても漏れないだろうと杭メーカーからの回答で、杭の中空をそのまま熱交換器にするという今日の方法に転換した。研究所敷地内での基礎杭利用の実験では、雪をよく溶かすことができた。

翌年度は、実用規模での400㎡のモデル施工に着工となった。その後県内企業を中心に設立されたパイプ・イン・パイル融雪協会などの協力で更に2カ所の施工に至った。

蓄熱材封入凍結抑制の技術開発に関して

その頃、福井の発明博士として著名な酒井弥理学博士は、セラミックをブロックに塗るだけで吸着熱かなにかの作用で雪が溶けるというパフォーマンスを行い、それがマスコミに報じられた。この方法では溶ける雪は限られると思われたが、用途によっては実用性があるように思われた。そこで、三谷セキサン㈱にスポンサーになっていただいて、酒井博士から材料をいただき、大野土木事務所などで模型実験を2年行ったが、なぜか成果が得られなかった。しかし、私は、うまくいくことを前提に実験と実用化の予算を得ていた。そこで、潜熱蓄熱にしぼり、化学メーカーに問い合わせた。このときは、あまり有益な情報は得られず、三洋化成工業(株)から得られた情報などから、ポリエチレングリコールの分子量や含水量を変え、その凝固温度と潜熱量の測定に1ヶ月ほど費やした。

これらを鋼管に封入し、その鋼管を舗装に埋設した道路の模型で、雪を少し溶かすことに成功した。この写真などを同封し、化学薬品メーカーに再度問い合わせを行った。また、潜熱量の測定装置でお世話になっていた県工業技術センターの上山明彦主任研究員からいただいた論文から、潜熱蓄熱材の研究者として、当時三菱電機㈱中央研究所の木村寛理博（現希産金属(株)）を知った。以後氏から蓄熱材の材料に関する多くのアドバイスをいただいた。こうして三菱電線工業㈱や三菱油化エンジニアリング、三菱化学㈱などから潜熱蓄熱材を得ることができるようになった。

また、実験と並行して、潜熱材の効果を予想するため、大まかな数値シミュレーションを行い、橋梁での実用化の見通しを立てた。

実施では、なんとかせよと注文のあった鋼床版橋が効果的と考え、その模型実験をまず実施し、同時に施工の容易な地盤部での試験施工を勝山市で先行した。その後、たまたま架橋中の鋼床版橋（天菅生橋）の設計図をみる機会があった。カーブ途中でRC床版から鋼床版になるこの橋は、そのままでは、県内で最も危険なものになると思われた。そこで、この橋での適用を二年後に行うとして、城東橋（鋼床版橋）でのやや小規模な試験施工をお願いした。庁内の方々の大変な行政的な協力があって、短期間に実用化できた。

また、技術面では、舗装の内部への封入で、鋼床版橋でのSFRCP舗装の開発者であった(株)横河ブリッジの故寺田博昌工学博士に随分と助言をいただいた。現場でのモデル施工にも足を運んでいただき、貴重な指摘をいただいた。また、名古屋工業大学大学院都市循環システム専攻梅原秀哲教授、大阪大学大学院松井繁之教授、建設省土木研究所舗装研究室中村俊行室長（当時）、池田拓也室長、橋梁研究室西川和廣室長にも貴重な助言や励ましをいただいた。実際の工事では、

福井鉄鋼㈱、県生コンクリート工業組合中央試験所などに協力をいただいた。この鋼床版橋での蓄熱材封入の試験施工は、室田正雄氏との共同研究となった。数十回の早朝の路面のすべり抵抗測定などを一緒にやっていただいた。

この数値シミュレーションでは、潜熱の取り扱いなどで福井大学機械工学科竹内正紀教授、放射の取り扱いで名古屋工業大学大学院堀越哲美教授、福井高専田中貞行教授、結露と路面のすべりで福井大学環境設計工学科福原輝幸教授、雲の取り扱いなどで北海学園大学武市靖教授、積雪内部での放射の透過の扱いなどで東北大学理学部山崎剛助教授に、プログラムの作成では合資会社共栄コンピューターサイエンス和田敏洋氏に貴重な助言をいただいた。

さらに、金沢大学北浦勝教授の推薦によって、この技術は土木学会への技術開発賞を得ることができた。

全体を通じて

県内の管設備、井戸、電気、コンクリート二次製品の企業の方々とは福井県雪技術研究会において、本研究の実験に際して技術面での検討や助言をいただいた。また試験施工では、多くの職人さんからも現場で意見をいただき改良につながった。

この研究会の顧問にもなっていた竹内正紀教授には、地熱融雪での共同研究を通じて、熱解析の多くを教えていただいた。先生のご指導がなければ、本研究のほとんどの数値シミュレーションに関する研究は実現できなかったであろう。歴代の所長は、役所の枠や前例に捕らわれず走りながら考えるなどと言われる私を自由にさせてくださった。職場の多くの方々に多大な応援をいただいた。工事の発注者である庁内土木部の方々には、開発リスクが伴う世界的にも全くの新工法を快く推進・応援していただいた。これらの技術が短期間で実用化できたのは、こうした背景による。企業や大学では得られない利点であった。また、10年来要求してきた事務所の研究所（研究職）化に際しても、職員組合と県庁内の人事関係者などに多大な支援をいただいた。研究所化がなかったなら、私の人事異動で、橋面の凍結と蓄熱材による抑制の研究はなかった。

本研究を博士論文としてまとめるに際しては、梅原秀哲教授に多大な労と貴重な助言をいただいた。また、私の大学時代の恩師である名古屋工業大学の吉田弥智元学長、長谷部宣男教授、および私の十余年の上司杉森正義学術博士には励ましをいただいていた。

技術全体への考え方では、「もう一つの技術-巨大技術の行き詰りをどう克服するか」（NIRA、学用書房、1979）、「オルターナティブ・テクノロジー-技術変革の政治学」（デイビット・ディクソン、田窪雅文訳、時事通信社、1980）、「スモール・イズ・ビューティフル」（E・シューマッハ、小島慶三・酒井懋訳、講談社）などは随分と参考になり、環境保全の枠の中での、市民に分かりやすい、力づくでない、分散型の技術を考える原点となった。

数十回の取材をマスコミの方々からは受けてきたが、この考え方を含めてや地域での取り組みを興味深く暖かく報じてくださった。

また、本稿の研究開発は、「情報ネットワーク社会論」（今井賢一、岩波新書）の示唆から、自治体での研究者は情報ネットワークや産業革命時のボルトンのような組織者になるべきだとして、“know who”ということで様々な方から情報や応援をいただくことに徹して研究を進めたものである。一連の経過を述べたのは、そのことを明らかにすることがお世話になった方への謝辞になり、今後の参考にもなると考えたことによる。

最後に、本研究に際してお世話になった方々に、再度心からお礼申し上げます。

自然熱源による路面の融雪・凍結抑制システムに関する研究

名古屋工業大学学位審査論文

1999年3月

著 者 宮本重信

住 所 〒910-0856 福井市勝見3-8-7

勤務先 福井県雪対策・建設技術研究所

〒918-8108 福井市春日3丁目303

TEL 0776-35-2412

FAX 0776-35-2445