平成14年度日本雪工学会 学術奨励賞を受賞して

地中熱を活用した融雪および路面温度制御

Snow Melting and Pavement Temperature Control Using Shallow Ground Heat

渡 邊 洋*
Hiroshi Watanabe

1. はじめに

平成14年度の日本雪工学会学術奨励賞を授与いただき、誠に有り難く御礼申し上げます。これら一連の研究は福井大学福原輝幸教授の指導によるもので、真冬の寒空の下、共に野外観測に明け暮れた後輩達の努力の結晶でもあります。その代表として選んで頂いたことに感謝し、これからも道路雪氷の研究に果敢に取り組みたいと思っています。

この研究は、「何故、冬の橋は凍るのか？」から始まりました¹⁾。当時は「放射冷却」もあまり聞き慣れない言葉で、実際に橋の上で夜を明かすまで、大気中の水分が路面に付着するとは思いませんでした。その後、「橋梁道路以外にも路面凍結などが起き易い箇所もあるはず」とサーマルマッピングの作成を始め、融雪・凍結防止設備が求められるような冬道の危険箇所をピックアップしました²⁾。しかしながら、凍結防止や融雪を行い、安全な路面を確保するためには何らかの熱源が必要です。そこで着目したのが、「地盤の持っている熱」です^{3, 4)}。地表面下 100m 程度までの浅層地盤のそれを指して「地中熱」と呼称し、発電などに使う深層の「地熱」とは区別しています。

ここでは、地中熱を活用した融雪および路面温度制御について、これまでの研究から得られた知見を紹介します。

2. 地中熱の特性とその利用

地中熱は決して高品位な熱源ではないものの、季節を通して比較的安定した温度範囲にあり、地域的な偏在性も小さい点に特徴がある。図-1に豊岡市、福井市、上越高田市、山形市および札幌市における1991年から2000年に亘る過去10年間の月平均気温（各地方気象台の観測日原簿より）の典型的な変化パターンを示す。また、同図には4都市で観測された地盤温度の平均値（破線）^{5, 6)}も併せて示した。同図より、いずれの都市でも平均気温の最高値は8月に、最低値は1月、もしくは2月に出現し、地盤温度の平均値に対して各都市の平均気温は夏期で10～12℃程度高く、冬期で12～14℃程度低い。よって、地中熱は相対的な大気と地盤との間の温度差を通年利用し、地盤から夏期には冷熱を、冬期には温熱を、それぞれ抽出することに合理性がある。なお、地盤温度のレベルは地域的な相違があるものの、雪国の足下には概ね10～15℃の熱源があると考えてよい。

図-2に1998年から2002年に亘る道の駅「ハチ北」（一般国道9号、兵庫県美方郡村岡町）⁴⁾における気温および地盤温度の経年変化を示す。同図より、これらの温度変化は周期的な変動を呈し、気温(○)の変化に対し、深度9mの地盤温度(×)は、概ね5～6ヶ月の位相遅れがある。よって、両者の相対的な関係から冬期には約17℃の温熱源を、夏期には13℃の冷熱源を、それぞれ抽出することが期待できる。しかしながら、実際のハチ北では地中熱システムの積極的な通年利用により、夏の終わりには約24℃の温水が、冬の終わりには約10℃の冷水が、それぞれ貯水槽に貯留され、この蓄熱効果が信頼性の高い路

節を通して比較的安定した温度範囲にあり、地域的な偏在性も小さい点に特徴がある。図-1に豊岡市、福井市、上越高田市、山形市および札幌市における1991年から2000年に亘る過去10年間の月平均気温（各地方気象台の観測日原簿より）の典型的な変化パターンを示す。また、同図には4都市で観測された地盤温度の平均値（破線）^{5, 6)}も併せて示した。同図より、いずれの都市でも平均気温の最高値は8月に、最低値は1月、もしくは2月に出現し、地盤温度の平均値に対して各都市の平均気温は夏期で10～12℃程度高く、冬期で12～14℃程度低い。よって、地中熱は相対的な大気と地盤との間の温度差を通年利用し、地盤から夏期には冷熱を、冬期には温熱を、それぞれ抽出することに合理性がある。なお、地盤温度のレベルは地域的な相違があるものの、雪国の足下には概ね10～15℃の熱源があると考えてよい。

* 水工工学研究所

面温度制御機能を保証している。

3. 貯水槽周りの熱的挙動

道の駅「ハチ北」には地盤内に第1集熱槽（鋼製，写真－1参照），第2集熱槽（ダクタイル鋳鉄製，写真－2参照）およびステンレスパイプを束ねた集熱器（写真－3参照）を備え，さらに地表部では大

気や雪氷との熱交換を行う無散水融雪舗装体パネル（写真－4参照）が駐車場内に敷き詰められている。

図－3に第1集熱槽（鋼製）内部水温および周囲地盤温度の鉛直および水平分布の経時変化（1999年6月～2000年6月，1999年10月は欠測）を示す。図中の円は集熱槽の横断面を表し，縦軸および横軸は貯水槽の半径を1とした無次元長さである。同図よ

図－1 1991年～2000年に亘る各都市の月平均気温の典型的なパターンと地盤温度平均値

図－2 道の駅「ハチ北」における気温および地盤温度の経年変化（1998年～2002年）

写真－1 第1集熱槽（鋼製）の設置状況

写真－2 第2集熱槽（鋳鉄製）の施工状況

写真－3 集熱器の施工状況

写真－4 融雪舗装体の設置状況

図-3 第1集熱槽（鋼製）における内部水温および周辺地盤温度の鉛直および水平分布の経時変化
（1999年6月～2000年6月，1999年10月は欠測）

り，1999年8月において集熱槽内流体と周辺地盤との間には大きな温度勾配が生じ，集熱槽から地盤への熱輸送が理解できる。また，12月であっても集熱槽内流体温度は18～20℃の範囲にあり，依然として

高いものの，地盤表層（集熱槽上方）の温度は9℃程度まで低下し，集熱槽から表層地盤を介して，大気への熱損失が示唆される。一方，2000年2月には降雪に伴う融雪負荷により，集熱槽近傍の地盤温度

は9～10℃程度にまで低下する。しかしながら、周囲の地盤の温熱領域は、依然として15～19℃の範囲にある。さらに、2000年4月における集熱槽内の水温は10℃程度にあるものの、時間の経過と共に温度上昇し、6月では集熱槽内の水温分布には温度成層が観察され、前年の同時期の温度分布に類似する。

4. 路面温度の制御機能の効果

近畿地方整備局管内で一般国道（8号）で初めて無散水路面温度制御システム（熱交換掘削杭タイプ：BHES）を適用した福井県坂井郡金津町中川峠の路面温度制御機能の明瞭な効果を図－4に紹介する。同図には、1998年1月から1999年3月に亘る同シ

テムの融雪舗装体温度 T_p (○) および通常舗装体温度 T_n (△) と気温 T_a との関係を、それぞれ示した。また、温度制御に関する閾値（冬期は5℃で稼働し、10℃で停止する。また、夏期は25℃で稼働し、20℃で停止する）も同図には矢印で併示した。まず、 T_n と T_a の関係に注目すると、両者は傾き1となるような線形関係 ($T_n=T_a$) にあり、夏期 (T_a が高温時) における T_n の最高温度は、50℃程度まで上昇することが判る。なお、図中に併記した領域Aは冬期 (T_a が低温時) において、通常舗装体上に積雪があることを意味している。次に、 T_p と T_a の関係に注目すると、冬期で T_p は常に5℃以上にあり、夏期で路面温度の上昇は30℃程度までに抑制される。

図－4 気温と路面温度の関係（一般国道8号線福井県中川峠，1998年1～1999年3月）

5. 道の駅ハチ北におけるエネルギー収支

図－5に1998年12月～1999年3月に亘る第1集熱槽、第2集熱槽、集熱器および融雪舗装体におけるエネルギー収支を示す。なお、同図では4ヶ月間に亘る第1集熱槽、第2集熱槽および集熱器から抽出したエネルギー総和（2763GJ）を除数とした百分率も併示した。まず、融雪舗装体のエネルギー収支に注目すると、総消費エネルギー597GJのうち、融雪には371GJ（うち予熱運転は240GJ）、凍結防止には226GJがそれぞれ消費された。また、この総エネルギー消費に対する熱供給は、第1および第2集熱槽が保有していた内部エネルギー82GJ（前

図－5 「ハチ北」における地中熱システムのエネルギー収支（1998年12月～1999年3月）

者で 44GJ, 後方で 38GJ) に加え, 地盤より抽出した 515GJ (内訳はそれぞれ第 1 集熱槽で 124GJ, 第 2 集熱槽で 102GJ, 集熱器で 186GJ および地盤に埋設された配管で 103GJ) により賄われたことになる。なお, 循環ポンプの発熱は地盤内の配管による集熱分 103GJ に含まれる。さらに, システムの稼働状況に大きく依存する実績値ではあるが, 当該期間において総エネルギー 2763GJ のうち, 56.7% を集熱器で, 24.3% を第 1 集熱槽で, 19.0% を第 2 集熱槽で, それぞれ負担したことが判った。

6. おわりに

降り積もる雪を全て融かすためには, 莫大なエネルギーが必要となる。しかしながら, 南北に長い日本列島では, 地域によって様々な種類の雪氷問題が顕在化する。そこでは雪を融かす努力も必要であり, 雪を活かす努力もまた, 必要である。差し当たって, 降雪量を鑑みても近畿地方などは雪を融かす努力が主として求められる地域であり, 東北地方などはむしろ活かす努力を主として求めている地域であるような気がしてならない。地中熱は散逸した太陽エネルギーがその源であり, 地中熱システムはそれらを季節的に, そして長期に亘って再利用することを可能にする設備であると考え。温度レベルが低い浅層の地中熱でも雪を解かすことができる。現在は, 経済性の高いシステムの開発を念頭に置いている。

この場をお借りして, これまでご協力を頂き, 応

援して下さった皆様に改めて御礼を申し上げます。

7. 参考文献

- 1) 渡邊 洋・木曾忠幸・福原輝幸：橋梁道路における霜の発生に及ぼす橋梁微気象の影響とすべり抵抗, 日本雪工学会誌, Vol.16, No.2, pp.3-14, 2000
- 2) 渡邊 洋・福原輝幸：サーマルマッピングによる冬期道路の路面温度特性, 日本雪工学会誌, Vol.14, No.2, pp.11-18, 1998
- 3) 渡邊 洋・大木政弘・福原輝幸・森山和馬：掘削杭熱交換システム (BHES) による学内駐車場融雪と路面温度制御, 日本雪工学会誌, Vol.15, No.1, pp.10-18, 1999
- 4) 渡邊 洋・福原輝幸・横山孝男・伊藤利和・河合源悟：道の駅「ハチ北」の地中熱による路面温度制御と融雪効果, 日本雪工学会誌, Vol.18, No.2, pp.224-237, 2002
- 5) 落藤 澄：地盤蓄熱を考慮した自然冷暖房と分散型再生エネルギーシステムに関する研究, 文部科学研究費補助金研究成果報告書, 1996
- 6) 横山孝男・渡邊 洋・石原寛之・安彦宏人・後藤宣明・福原輝幸：熱交換手法の違いによる地中熱の採熱特性, 第38回伝熱シンポジウム講演論文集, Vol.III, PP.757-758, 2001