

博士論文

冬期路面管理のための地中熱地下備蓄タンク方式
パイプヒーティングシステムの開発

Development of Practical Pipe Heating System
with Underground Water Tank for Snow Thawing
and Ice Prevention on Roads and Bridge Decks

2011年 3月

安村 成史

Narifumi YASUMURA

山口大学大学院 理工学研究科

学位論文の要旨

学位論文題目：冬期路面管理のための地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの開発

Development of Practical Pipe Heating System with Underground Water Tank for Snow Thawing and Ice Prevention on Roads and Bridge Decks

氏 名：安村 成史

年間の平均気温が+15℃程度と比較的温暖な地域にある山口県においても、冬期の山間部では、最低気温が-10℃以下に達し、多くの降雪や積雪もみられる。積雪・寒冷地域に比べて、雪道運転に不慣れな人が多く、さらにタイヤのチェーンや冬用タイヤの装備率は高くないことから、ひとたび大雪が降ると事故が起こりやすく、交通への影響が少なくない。特に、橋梁上の積雪や凍結によるスリップ事故が多発している。このような背景から、山口県内の山間部にある一般国道 315 号の葉の内 3 号橋から同 4 号橋の区間(計画区間)において、雪寒対策事業として無散水融雪装置を設置することとなった。

本研究では、この計画区間に設置する無散水融雪装置の熱源として、地表近傍(地下10m程度)の深さに構築したタンク内に、路面融雪に必要な熱量(地下水)を備蓄保温すると共に、路面下に埋設したパイプ内に備蓄水を循環させ融雪・凍結防止を行う「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステム」を開発した。同様のパイプヒーティングシステムとして、2つの大型貯水タンク(最大φ2.6×240m)と集熱器(96@φ0.5×53m)を用いてチェーン着脱場に適用した事例が報告されている。本研究で開発したシステムは、この既往のシステムに比べて小規模な貯水タンク(φ5.5×12.75m)のみで循環水の加温および保温を行い、これを橋梁の冬期路面の管理に適用したところに特徴があげられる。本論文では、開発したシステムの設計・施工について概説するとともに、3年以上におよぶ計測による気温・路面温度・タンク内水温・岩盤温度などの温度性状を報告する。

本論文は計6章で構成しており、各章の要約は以下のとおりである。

第1章「緒論」では、本研究の背景を述べるとともに、開発した「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステム」の計画の経緯を示し、本研究の目的と意義を明確にした。

第2章「冬期路面管理の課題と既往の研究」では冬期路面管理の現状と課題について整理するとともに、「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステム」の開発の基礎となった研究を中心に、冬期路面管理に関する既往の研究をレビューした。

第3章「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの開発」では地下10m程度の地中熱を活用する「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステム」の概念を示すとともに、その設計・施工に関する基礎的データを示した。あわせて、開発したシステムと従来工法との建設コストや維持管理コストの比較を行い、建設コストで約50%、維持管理コストで約10%の縮減ができることを示した。

第4章「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの運転」では、同システムの運転方法を概説し、その融雪・凍結防止効果を記述した。開発したシステムでは、路面融雪に要する熱量(地下水)を地下タンク内に備蓄保温し、降雪・路面凍結時など必要に応じて自動的に水中ポンプが稼働する。温度計測データによれば、システムの非稼働時間中に周辺地中熱等によって、タンク内水温を上昇させることができ、経済的かつ効率的な冬期路面管理が可能となることを示した。さらに、2005年12月の豪雪では設計値を上回る連続した降雪や連続した低気温が生じたが、橋梁部においても融雪・凍結防止効果がみられ、少なくとも地中熱が供給される一般路面よりも先に無雪状態にできたことを示した。

第5章「タンク内温度の計測と効率的な運転手法の検討」では、長期におよぶ温度計測データに基づき、本システムの温度特性を示した。このシステムでは、非稼働時間中に、周辺地熱や地下水の流入等によって、徐々にタンク内水温は上昇するものの、路面融雪に用いた循環水がタンク内に環流することで、タンク内水温は徐々に低下する。冬期の運転によって低下したタンク内水を加温するため、路面温度が高いときに強制運転することで、タンク内水温を上昇させることができることを示した。特に、冬期の強制運転によるタンク内水温の上昇は、夏期の強制運転と比べてその効果は小さいが、冬期においても短時間でタンク内水温を上昇できることを示した。

第6章「結論」では本研究の総括であり、本論文の研究成果を要約するとともに、今後の研究課題についてまとめて示した。

以上

Abstract

Development of Practical Pipe Heating System with Underground Water Tank for Snow Thawing and Ice Prevention on Roads and Bridge Decks

Narifumi YASUMURA

Yamaguchi prefecture locates in the western end of Honshu Island in Japan; the climate is relatively mild even in winter. Most drivers in the mild region have no winter tires, and they are not good at driving a car on snowy roads. Thus, slip accidents often happen on icy roads in the event of snow or low temperature. In particular, most of such traffic accidents occur on slopes, bridges and curves. To prevent the accidents in winter, road heating systems have been employed even in the mild region.

The object of this research is a pipe heating system with underground water tank. The system is employed at an actual mountain road in Yamaguchi. The site locates in a relatively mild region, where the annual average air temperature is approximately 15 °C. Snow accumulations are not frequent in winter, but the temperature often drops below 0 °C through midnight and the early morning hours.

The practical pipe heating system which uses only groundwater stored in a large underground tank was developed in the present study. The underground tank provides geo-thermal energy, i.e. groundwater of constant temperature, through heating pipes embedded in concrete pavements with no electric heater or fuel boiler. The system was constructed in the National road Route 315 in Yamaguchi prefecture. The section of roadway for snow thawing and ice prevention is 116.4 m in length, and consists of 2 short bridges and a road between the bridges. Moreover, the road was dangerous for drivers in winter because the site is a limited visibility S-shaped curve.

This paper outlines its design and construction, and provides fundamental data on the developed system. In addition, this paper reports on snow-thawing effects and ice prevention, and presents thermal properties based on long-term measurement over 3 years.

The outline of this thesis is summarized as follows:

Chapter 1, Introduction, presents the background and purpose of this study. In particular, this chapter outlines characteristics of traffic accidents and road heating systems, and describes the plan of the developed pipe heating system.

In **Chapter 2 Review of Previous Studies**, previous investigations dealing with road heating system are reviewed, and the object of the study is clarified as comparing with former systems.

Chapter 3, Development of Practical Pipe Heating System with Underground Water Tank, describes the concept of the developed system. Moreover, this chapter outlines the design and construction, and presents fundamental data of the developed system. To prevent icy roads, groundwater of constant temperature stored in the underground tank is circulated to the heating pipes embedded in the concrete pavement. The pipe heating system was constructed at approximately 50% of the cost of comparable systems. In addition, there is a reduction of 10% in operating costs compared with the previous system.

Chapter 4, Effect of the Pipe Heating System, reports the snow-thawing and ice prevention effects of the road. According to the long-term observation, the piped heating system has kept the road conditions safe during the winter season by always removing the snow and ice from the heated road and bridge sections earlier than the surrounding roads. In particular, it is remarkable that the system was able to remove snow even in heavy snowfall.

Chapter 5, Proposal of an Appropriate Running Method Based on the Long-term Measurement of Temperature, proposes an appropriate running method for the system. To control the water temperature, the study tried to circulate water in the tank to the pipes when the road temperature is higher than the water temperature. The test results indicate that the proposed method increases the water temperature even by running the water for short periods of time in winter. According to long-term temperature measurements, this system has prevented the road temperature from decreasing below 0°C, even through nighttime and morning periods. The author recommends that the proposed pipe heating system can be implemented as an economical and effective method for snow thawing and anti freezing in relative mild regions, e.g. western Japan.

Chapter 6, Conclusions, summarize important knowledge of the study, and describes future problems at the end of the thesis.

目 次

学位論文の要旨	I
Abstract	III

第 1 章 緒論

1.1 研究背景	1
1.2 本研究の目的	6
1.3 本論文の構成	8
1.4 参考文献	10

第 2 章 冬期路面管理の課題と既往の研究

2.1 冬期路面管理の課題と既往の研究	13
2.2 凍結防止剤散布における既往の研究	17
2.3 凍結抑制舗装および凍雪害防止施設における既往の研究	18
2.4 無散水融雪施設における課題と既往の研究	20
2.4.1 自然熱エネルギー利用に関する既往の研究	20
2.4.2 無散水融雪施設に関する既往の研究	24
2.5 参考文献	26

第 3 章 地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの開発

3.1 路面融雪計画地における課題と目的	31
3.2 地中熱地下備蓄タンク	34
3.2.1 パイプヒーティング熱源の検討	34
3.2.2 地中熱地下備蓄タンクの構造	40
3.2.3 パイプヒーティングシステムのコスト比較	42
3.2.4 地中熱地下備蓄タンクの施工	43
3.3 パイプヒーティング舗装の施工	45
3.4 第 3 章のまとめ	48
3.5 参考文献	50

第4章 地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの運転

4.1	パイプヒーティングシステムの概要	53
4.2	パイプヒーティングシステムの運転	57
4.3	パイプヒーティングシステムの路面融雪効果	59
4.3.1	通常運転時の状況	59
4.3.2	異常降雪時の状況	61
4.4	第4章のまとめ	66
4.5	参考文献	67

第5章 タンク内温度の計測と効率的な運転手法の検討

5.1	温度の計測方法	69
5.2	通常運転時のタンク内水温の変化	72
5.3	作動基準温度の変更	74
5.4	連続運転が継続した時の温度変化	79
5.5	逆熱交換実験	82
5.6	パイプヒーティング舗装の検査	87
5.7	第5章のまとめ	89
5.8	参考文献	90

第6章 結論

6.1	本研究のまとめ	93
6.2	今後の課題と研究展望	95
6.3	本論文に関する著者の発表論文および講演	97

謝辞

第 1 章

緒論

第1章 緒論

1.1 研究背景

北海道や東北・北陸地方に比べ、中国地方は比較的温暖な気候であり、冬期における降雪量も比較的少ないといえる。年間の平均気温が+15℃程度と比較的温暖な地域にある山口県では、積雪・寒冷地区に比べて、雪道運転に不慣れな人が多く、さらにタイヤのチェーンや冬用タイヤの装備率は高くないことから、ひとたび降雪となると事故が起こりやすく、交通への大きな影響がみられる¹⁾。実際に、2009年12月31日未明に広島県から山口県にかけての瀬戸内海側で大雪となり、山口県の瀬戸内海側の道路はほぼ麻痺状態となった(2010年1月1日中国新聞)。また2010年3月10日には山口県の西部地区で大雪となり、山口県西部地区の道路はほぼ麻痺状態となった(2010年3月11日山口新聞)。道路法第42条第1項に「道路管理者は、道路を常時良好な状態に保つように維持修繕し、一般交通に支障を及ぼさないようにしなければならない責務を負っている」とある。この責務を果たすため、道路管理者は道路パトロールなどを通じて、路面の損傷などに対して維持修繕を行っている。また、降雪や積雪などの冬期防災に関しても、「積雪寒冷特別地域における道路交通の確保に関する特別措置法」に基づき、安全で安心な生活を支え、地域間の交流・連携を強化するため、道路の除雪・防雪・凍雪害防止の事業(雪寒事業)により対応を行っている²⁾。

山口県³⁾においても積雪時や凍結時においては機械除雪^{4),5)}(写真-1.1.1, 写真-1.1.2)、凍結防止剤の散布^{4),5)}(写真-1.1.3, 写真-1.1.4, 写真-1.1.5, 写真-1.1.6)などの対応を行っている。山口県では降雪量や積雪量がそれほど多くはなく、多くの除雪専用車を配備しても非効率なため、大雪の際には除雪専用車ではなく、写真-1.1.2のように舗装用のグレ



写真-1.1.1 除雪車による除雪状況



写真-1.1.2 グレーダーによる除雪状況

第1章 緒論

一ダガーにて対応をすることが多い。凍結防止剤の散布は、大きく分けて事前散布方式と事後散布方式とがある。事前散布方式は主に塩化ナトリウムを散布し、凍結防止効果を得るものである。事後散布方式は主に塩化カルシウムを散布し、融雪効果を得るものである。また、事後、事前両方の方式とも、溶液で散布する方法(写真-1.1.3, 写真-1.1.4)と粒剤のまま散布する方法(写真-1.1.5, 写真-1.1.6)とがある。溶液で散布したほうが即効性であるが、勾配のあるところでは、すぐに流出してしまう欠点があるため、道路の状況により使い分けを行っている。山口県での凍結防止作業は残雪箇所を中心に事後散布方式で散布を実施している。場合によっては写真-1.1.4 ように除雪作業と同時に実施することもある。



写真-1.1.3 凍結防止剤（溶液）の散布状況



写真-1.1.4 凍結防止剤散布作業状況

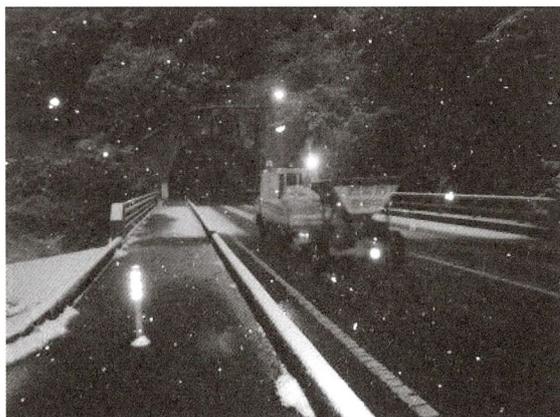


写真-1.1.5 凍結防止剤（溶液）の散布状況



写真-1.1.6 凍結防止剤の散布準備状況

第1章 緒論

中国地方のような比較的温暖な気候で大雪となった場合、その地域で生活する人たちやその地域の植生も雪に不慣れのため、多くの交通事故、写真-1.1.7のように雪により立ち往生する車両、写真-1.1.8のような倒木が多く発生し、交通は麻痺状態となる。その後、雪は解け路面からなくなり始めるが、写真-1.1.9のような他方向から熱の供給の少ない橋梁部や日陰、トンネルの出入り口付近などで残雪となり、それが原因で多くのスリップ事故が発生している。このような残雪に対しては、写真-1.1.10の様に凍結防止剤の散布を行う必要があり、道路管理者にとって相当の負担となっている。



写真-1.1.7 雪により立ち往生する車両



写真-1.1.8 降雪により発生した倒木



写真-1.1.9 橋梁上の残雪状況



写真-1.1.10 凍結防止剤散布状況

降雪後には写真-1.1.11, 写真-1.1.12 のような交通事故による道路構造物の破損が発生している。山口県警察本部の統計では1999年12月から2002年3月までの間に図-1.1.1に示すとおり229件の路面凍結・積雪による事故が発生している。図-1.1.1から積雪に起因する交通事故よりも凍結に起因する交通事故の方が多いことがわかる。これらことから、降雪後の路面管理や凍結路面への対応は非常に重要であり、道路管理者にとっても大きな課題である¹⁾。



写真-1.1.11 スリップ事故の痕跡



写真-1.1.12 スリップ事故による破損

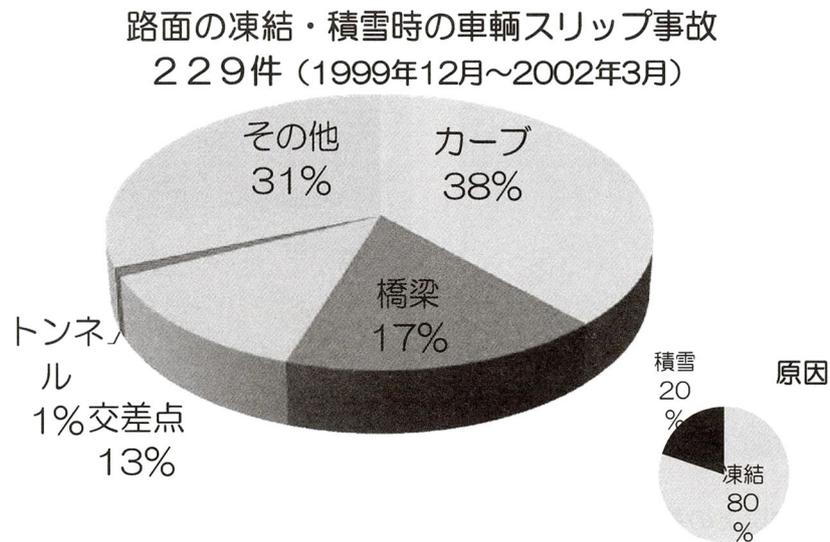


図-1.1.1 山口県の一般道における冬期スリップ事故¹⁾

第1章 緒論

降雪時，積雪時，凍結時に人の手でこのような除雪や凍結防止作業を行うには限界がある。道路構造令⁶⁾には「なだれ，飛雪又は積雪により交通に支障を及ぼすおそれがある箇所には，雪覆工，流雪溝，融雪施設その他これらに類する施設で国土交通省令で定めるものを設けるものとする。」とある。このため山口県においても，流雪溝の設置(写真-1.1.13)，凍結抑制舗装(写真-1.1.14，写真-1.1.15，写真-1.1.16)，散水式融雪装置の設置(写真-1.1.17)，無散水融雪装置(写真-1.1.18)の設置，除雪基地⁶⁾の設置の事例がある。このような背景から，山口県を含む中国地方では，路面積雪・凍結により危険となる山間部のカーブや橋梁といった局所的な区間を中心に，路面融雪施設の整備が近年活発に進められている。また，近年は環境問題から地中熱利用についても活発に研究が行われている^{7),8),9)}。ここで，比較的温暖な地方においては，地中熱などの自然熱エネルギーの利用可能性が高いことが多く，さらに，降雪時間があまり長くないことから，自然熱エネルギーを用いた無散水融雪施設の適用も多くある^{10),11),12)}。



写真-1.1.13 流雪溝の設置例



写真-1.1.14 下り坂での凍結抑制舗装

写真-1.1.15 橋梁上での凍結抑制舗装



写真-1.1.16 凍結抑制舗装（交差点付近）



写真-1.1.17 散水融雪施設

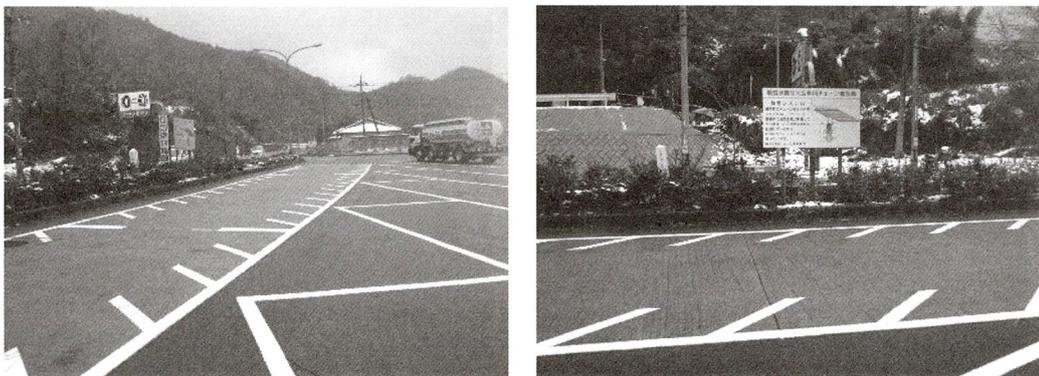


写真-1.1.18 無散水融雪施設

1.2 本研究の目的

山口県では平成12年度から雪寒対策事業として、交通危険個所に地中熱を熱源とする無散水融雪設備の設置を行っている。その一環として平成14年度から、一般国道315号の葉の内3号橋から同4号橋の区間において、自然熱エネルギーを用いた無散水融雪施設を設置する事業を行うこととなった。地中熱を熱源とした融雪施設として、熱交換杭と路面下のパイプ内に不凍液を循環させることで融雪する工法が実用化されている^{10),11)}。しかし、一般国道315号の葉の内3号橋から同4号橋の区間の無散水融雪施設の設置にあたり、現場における条件から以下の内容が課題となった。

1. 融雪装置を設置したい箇所は、橋梁部分であるため、路肩はなく、かつ、周辺は保安林であるため、多数の採熱用のボーリングができない。
2. パイプヒーティングについて新設橋梁への適用事例は存在するが、既設橋梁への適用事例がみられない。
3. 葉の内3号橋は昭和49年に、葉の内4号橋は昭和50年に竣工した橋梁である。非常に古い橋梁であるため、架設当時の図面などが存在しない。

これらの課題に対して、次のような研究成果も報告されている。

1. 山岳トンネルの外周地熱を熱源としてトンネル坑口部およびトンネルに近傍する橋梁のパイプヒーティングを行うことのコスト評価を行った研究^{13),14),15)}。
2. 温水パイプを橋梁床版に埋め込み、その温水パイプに地下水を利用し、融雪効果を評価した研究^{16),17)}。
3. パイプヒーティング機能を有するコンクリート版のライフサイクルコスト評価を行い、かつ、コンクリート版に埋設するパイプが構造部材となる、あるいは埋設するパイプは構造性能を低下させないことを示した研究^{18),19),20),21)}。

これらの研究成果から、上記の課題に対しては解決が可能と判断された。しかし、上記の課題1に対して従来工法とは異なる熱源の検討をする必要があるとの結論となった。

調査ボーリング孔を使用した採熱試験の結果から、地表近傍(地下10m程度)の深さにタンクを構築し、路面融雪に必要な熱量(地下水)を備蓄保温し、路面下に埋設したパイプ内に備蓄水を循環させる方針で設計を行うこととした。設計、施工の結果、地下タンクに熱量(地下水)を備蓄保温し、路面下に埋設したパイプ内に備蓄水を循環させる「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステム」を完成した。そして、山口県内の山間部にある一般国道315号の葉の内3号橋から同4号橋の区間において、このシステムを用いた冬期路面管理を行った。

第1章 緒論

そこで本研究では、上記の課題から本システムを開発した経緯、システムの設計・施工について論じるとともに、供用開始後に行った計測による気温・路面温度・タンク内水温・岩盤温度といった温度性状について報告する。この「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステム」が今後も同様な環境条件等において採用され利活用できるように、その諸知見を報告することを目的とする。

1.3 本論文の構成

本論文は緒論を含め、6つの章から構成されている。本論文の構成を図-1.3.1に示すとともに、各章の内容について以下に概説する。

第1章 緒論

山口県における冬期路面管理の現状と凍結・積雪による交通への影響および事故の発生状況から防雪事業の必要性を示した。また、「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステム」を開発するに至った経緯を示し、本研究の目的と意義を明確にした。

第2章 冬期路面管理の課題と既往の研究

凍結防止剤による環境への影響や既存の凍雪害防止システムの問題など冬期路面管理の課題について整理した。そして、「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステム」の開発の基礎となった研究を中心に、自然熱エネルギーに関する研究、無散水融雪施設に関する研究など、冬期路面管理に関する研究をレビューした。

第3章 地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの開発

課題であった熱源の確保について論じるとともに、地下10m程度に存在している地中熱という自然熱エネルギーを活用する「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステム」の開発・設計・施工・コストに関する基礎的データを示した。

第4章 地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの運転

完成した「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステム」の概要を示すとともに、運転方法を概説し、その融雪・凍結防止効果を記載した。そして、2005年12月の豪雪では設計値を上回る連続した降雪や連続した低気温が生じたが、そのときの橋梁部における融雪・凍結防止効果についても示した。

第5章 タンク内温度の計測と効率的な運転手法の検討

3年以上におよぶ計測による気温・路面温度・タンク内水温・岩盤温度といった温度性状についてまとめるとともに、初期設定における問題点と設定変更後の効果についても論じる。同時に、適切な稼働・管理方法の確立および逆熱交換運転による、さらなるランニングコストの低減、必要熱量の備蓄保温が可能性について論じた。

第6章 結論

本論文の総括であり、本研究の成果を要約するとともに、今後の「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステム」における研究課題について言及している。

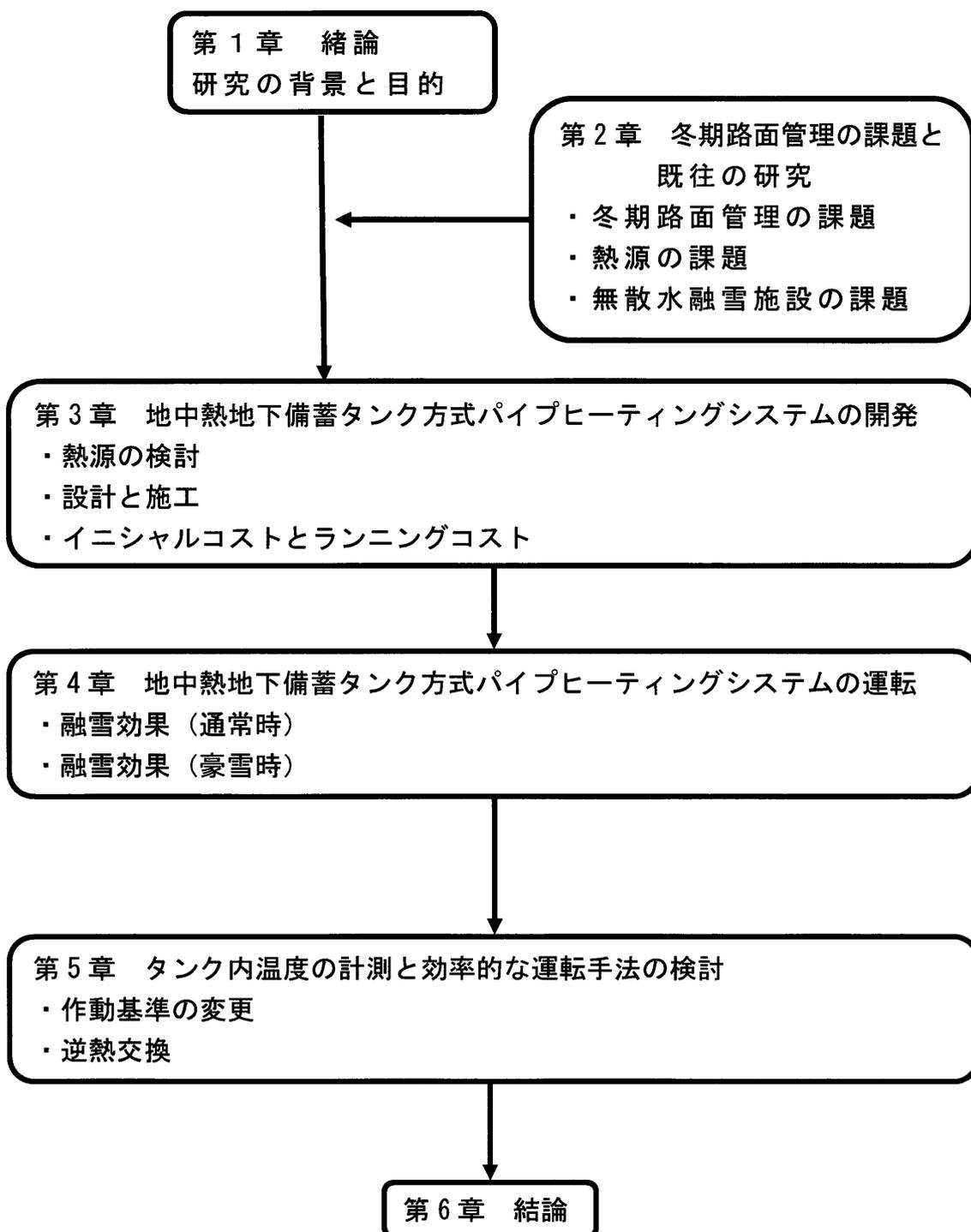


図-1.3.1 本論文の構成

1.4 参考文献

- 1) 吉武 勇, 安村成史: 比較的温暖な中国地方における冬期路面管理の実例と課題, 日本雪工学会誌, Vol.24, No.4, pp.304-305, 2008.
- 2) 国土交通省: 国土交通白書2010, 2010.
- 3) 山口県土木建築: 土木建築概要, 2009.
- 4) D.M.Gray, D.H.Male (松田益義編訳): 防雪技術ハンドブック, 築地書館, 1990.2
- 5) 日刊建設通信新聞社: 特集雪寒対策資機材, 積算資料SUPPORT, 2010.7.
- 6) 社団法人日本道路協会: 道路構造令の解説と運用, 2004.
- 7) 川津孝徳, 加藤 禎, 芳賀千賀子: 一般国道13号主寝坂道路における消融雪設備計画～多様な熱源の効率的活用について, 日本雪工学会誌, Vol.22, No.1, pp.14-17, 2006.
- 8) 福原輝幸, 阪本信弘: 地中熱利用による路面温度制御 冬期融雪および夏期路面冷却, 土木学会誌, Vol.10, No.84, pp.63-65, 1999.
- 9) 福原輝幸, 小寺健太郎, 浅田興志男, 河合源悟: 地中熱を利用した貯水槽集熱システムの性能評価, 土木学会論文集, No.741/VII-28, pp.143-153, 2003.
- 10) 森山和馬, 林 拓男: 地中熱利用のBHES融雪システム, 自然・未利用エネルギーによる雪寒対策シンポジウム論文集, pp.9-14, 1999.
- 11) 雪センター: 「平成14年度国土交通省における雪に関する施策概要資料」, 2002.
- 12) 川津孝徳, 加藤 禎, 芳賀千賀子: 一般国道13号主寝坂道路における消融雪設備計画～多様な熱源の効率的活用について, 日本雪工学会誌, Vol.22, No.1, pp.14-17, 2006.
- 13) 永井泉治: 山岳トンネルの熱エネルギーを利用したパイプヒーティングシステムの設計に関する研究, 山口大学博士論文, 2002.
- 14) 永井泉治, 吉武 勇, 中村秀明, 浜田純夫: 山岳トンネルにおける湧水を利用した橋梁の融雪実験とその適用性, 土木学会論文集, No.665/VI-49, pp.183-188, 2000.
- 15) 永井泉治, 吉武 勇, 仁尾彰一郎, 浜田純夫: パイプヒーティングによる路面融雪のためのトンネル坑内加温実験とコスト評価, 土木学会論文集, No.707/VI-55, pp.219-224, 2002.
- 16) 谷本俊夫: 温水パイプによる橋梁床版の融雪・凍結防止に関する研究, 山口大学博士論文, 2000.
- 17) 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床版の融雪・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.
- 18) 辻 和秀: パイプヒーティング用コンクリート版の構造特性とライフサイクルコストに関する研究, 山口大学博士論文, 2006.
- 19) 吉武 勇, 辻 和秀, 三村陽一, 山口哲矢, 浜田純夫: パイプヒーティングの構造設計に用いるコンクリート版の要素実験, 土木学会論文集, No.770/VI-64, pp.53-63, 2004.

- 20) 辻 和秀, 三村陽一, 吉武 勇, 浜田純夫: 凍結防止剤の塩害を受けるコンクリート版のライフサイクルコスト, 土木学会論文集, No.784/VI-66, pp.65-75, 2005.
- 21) 辻 和秀, 吉武 勇, 谷本俊夫, 浜田純夫: パイプヒーティング機能を有するコンクリート版のライフサイクルコスト, 土木学会論文集, No.805/VI-69, pp.131-136, 2005.

第2章

冬期路面管理の課題 と既往の研究

第2章 冬期路面管理の課題と既往の研究

2.1 冬期路面管理の課題と既往の研究

本研究において融雪装置を設置することとなった山口県周南市の葉の内3号橋および同4号橋のある一般国道315号(図-2.1.1)は山口市周南市(旧徳山市)を起点とし、中国山地を越え山口県萩市(旧阿武郡須佐町)を終点とする全長88.7kmの国道である。この間に橋梁が88箇所、トンネルは13箇所存在する^{1),2)}。国道2号との交差点を起点とし、途中で中国縦貫道路鹿野インターチェンジおよび国道9号と交差し、山陰地方に通じる主要な国道である。一般国道315号は高低差のある箇所が非常に多く、カーブや橋梁およびトンネルも多く存在し、冬期にはスリップ事故が多く発生している。そして、中国山地を越えるため、最高海拔地点である河内峠(標高585m)付近は冬期における交通の難所となっている。また、一般国道315号河内峠付近の24時間交通量³⁾は3000台程度と非常に多いため、冬期における積雪・凍結対策が不可欠な路線である。

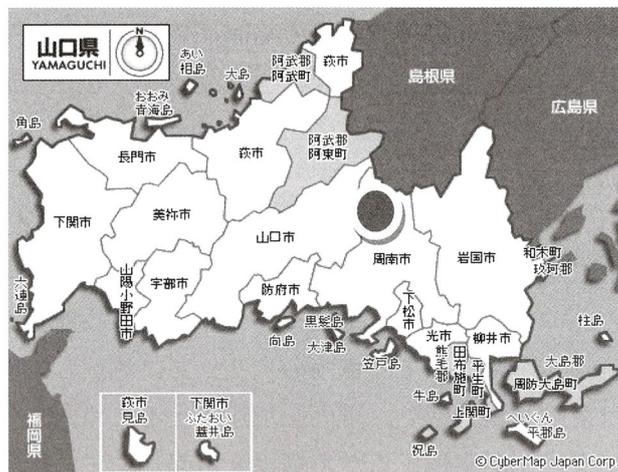


図-2.1.1 融雪装置設置位置

道路法第42条第1項に「道路管理者は、道路を常時良好な状態に保つように維持修繕し、一般交通に支障を及ぼさないようにしなければならない責務を負っている」とある。この責務を果たすため、道路管理者は道路パトロールなどを通じて、路面の損傷などに対して維持修繕を行っている。また、冬期においては、交通確保を目的に、除雪や凍結防止剤の散布などを行っている。

1990年にスパイクタイヤ粉じんの発生の防止に関する法律が公布、施行された。この法律によりスパイクタイヤの使用規制は加速し、同時に除雪・排雪が中心であった冬期道路管理が路面状態に即した道路管理へと変わってきている。積雪・凍結時の路面状況には新雪、圧雪、氷板（アイスバーン）などがあり、それぞれ、交通への危険度と道路管理者側の対応方法が異なる。武市ら⁴⁾は誘電式凍結路面検知機を開発し、道路管理者が路面状況を把握するだけでなく、ロードヒーティングの制御センサーとして活用できる可能性があるとしている。また武市⁵⁾は、交通開放をしていない道路を使用して、除雪を行った後の路面状態と路面温度と気温の実観測データから、凍結路面の予測手法と精度について検討を行い、現場への適用性を検証している。このように、道路管理者が行う冬期における交通の確保はスパイクタイヤの使用規制により路面状態を把握し、それに対応するようになってきている。このスパイクタイヤの使用規制がはじまった頃に凍結抑制舗装の普及⁶⁾およびスタッドレスタイヤの普及があり、道路管理者による凍結防止剤散布が増加している。

警察庁・国土交通省・交通事故総合分析センターが発表した交通事故統計⁷⁾によると、寒冷地である北海道と東北地方6県での平成19年冬期（1～3月、11・12月）の交通事故総数は31071件。そのうち凍結もしくは積雪状態の路面下での交通事故件数は7612件であり、冬期に発生した交通事故のうち、実に約4件に1件が凍結・積雪状態の路面で発生している。一般に、路面凍結は、外気温0℃前後で発生し、凍結路面上の運転の危険性を、路面滑り摩擦係数（表-2.1.1）⁸⁾で見ると、湿潤状態では0.9～0.3であるのに対し、積雪路面では、0.5～0.2、氷路面では0.2～0.1と、約1/10までに減少し、車両の停止が困難になる。また、路面形状別交通事故発生件数⁷⁾（図-2.1.2）では、乾燥・湿潤路面状態に対し、凍結・積雪路面状態下では、交差点の事故件数割合が低く、カーブの事故件数割合が高くなる特徴がある。これは、ドライバーが交差点では車両のスリップに注意して運転するのに対し、見通しの良い直線路では危険意識が低く、車両を加速させるため、カーブにさしかかったときに、積雪・氷路面でタイヤが空転するため横滑りが起きやすい状況となるためである。特に、橋梁・高架橋上や無雪状態から暴露路面に出るトンネル出口など、一般路面部とギャップが生じやすい箇所では、運転制御が困難となるため、車両のスリップ事故があとを絶たない。交通量の多い市街地の路面でも、車両の通過による雪氷の圧密により、氷板・氷膜状態、いわゆるミラーバーン⁹⁾になりやすく、かつ交通量も多いゆえ、交通事故が多発するという悪循環に陥っている。

表-2.1.1 路面状態と摩擦係数⁸⁾

路面の種類	摩擦係数の範囲	
	乾燥	湿潤
コンクリート舗装	1.0～0.5	0.9～0.4
アスファルト舗装	1.0～0.5	0.9～0.3
砂利道	0.6～0.4	—
鉄板等	0.8～0.4	0.5～0.2
積雪路面	—	0.5～0.2
氷路面	—	0.2～0.1

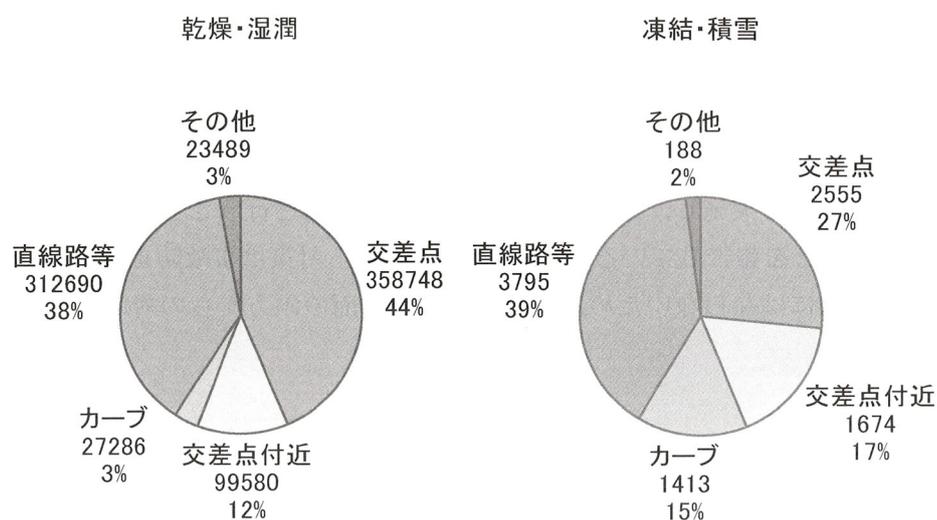


図-2.1.2 平成19年全国路面状態別交通事故件数路面形状の分布

(出典：(財)交通事故総合分析センター：交通安全マップ，事故統計情報)

近年、高い道路管理の水準を求められる傾向にあり、路面の積雪・凍結による交通障害に対して、i)交通途絶や孤立集落の解消、ii)除雪の広域ネットワーク化、iii)旅行時間の定時性、iv)緊急時の輸送手段の確実性、などが求められるようになってきた。

年間の平均気温が+15℃程度と比較的温暖な地域にある山口県において、冬期の山間部では、最低気温が-10℃以下に達し、多くの降雪や積雪もみられる。積雪・寒冷地区に比べて、雪道運転に不慣れな人が多く、さらにタイヤのチェーンや冬用タイヤの装備率は高くないことから、ひとたび大雪が降ると事故が起こりやすく、交通への大きな影響がみられる^{10),11)}。

このような背景から、道路管理者が実施する積雪凍結対策は機械除雪や凍結防止のみならず、路面状況の情報提供などソフト面での対応が増えてきており、冬期 ITS 事業¹²⁾として道路管理者が路面温度、凍結、積雪センサーの設置、(写真-2.1.1) 塩分濃度センサーの設置、路面状況監視カメラ(写真-2.1.2)の設置などを行っている。そして、道路利用者に対して路面状態の情報提供を行っている。山口県においても、凍結積雪センサーにおける観測結果の提供および道路上に設置したカメラによる路面状況の映像をインターネット上でやっている¹³⁾。

また、松田ら¹⁴⁾は実際に行っている道路情報の提供について、その内容について道路利用者へアンケートを実施し、道路画像を用いて情報提供を行うことにより、危険回避を促す効果があることを報告している。このような、ソフト対策は事故防止に有効ではあるが、事故の原因除去にはならないため、ソフト・ハード面の両方からの対応が必要であるとしている。



写真-2.1.1 凍結・積雪センサー



写真-2.1.2 路面状況監視カメラ

2.2 凍結防止剤散布における課題と既往の研究

道路管理目的で、地方自治体が路面の凍結時に凍結防止剤散布を実施している。この凍結防止剤は通常、塩化ナトリウムもしくは塩化カルシウムなどの塩化物である。この散布する塩化物によりコンクリート中の鉄筋腐食¹⁵⁾や車両の錆、生活環境への影響が懸念されている¹⁶⁾。特に床版部はかぶりがかうすく、塩分の鉄筋への到達が早いために鉄筋が腐食する可能性が大きい¹⁷⁾。

土木学会コンクリート小委員会コンクリート小委員会凍結防止剤ワーキンググループ¹⁸⁾は1994年に道路の凍結対策に散布される塩化ナトリウムや塩化カルシウムなどの塩化物がコンクリート構造物に影響があるとして、道路管理者が散布している1m²あたりの散布量と1冬期間の散布実績をまとめ、実構造物への塩化物含有量の測定を行い、アルカリ骨材反応対策が必要という結果をまとめている。

三村ら¹⁹⁾は、コンクリート版のライフサイクルコストを算出するにあたり、凍結防止剤散布による影響から発生する修繕費および更新費の金額は非常に大きいことを報告している。また、三村ら²⁰⁾は、凍結防止剤散布によるコンクリート版中の塩化物イオンの浸透の推定方法を示し、コンクリート版の塩化物濃度の解析を行っている。そして、凍結防止剤散布によるコンクリート版の中に存在する鉄筋への影響についてまとめている。

辻ら²¹⁾は舗装版および橋梁床版などのコンクリート版の凍結防止剤による影響から、建設初期コストから補修コストおよび更新コストを含むライフサイクルコストによる評価を行っている。この試算では、凍結防止剤散布によるコンクリート版中の塩化物イオン濃度の推定方法を示し、同評価方法を用いてコンクリート版の塩化物濃度の推定を行っている。その結果、コンクリート版において鉄筋の腐食を減らすための増厚に伴う建設初期コストの増加よりも、塩害劣化による補修コストおよび更新コストの大きいという試算結果をまとめている。

近年は凍結防止剤の過剰散布による環境への負荷や財政上の負担について議論されることが増えてきており、散布量の見直しや散布タイミングの最適化により散布量を減らす事例の報告が増えてきている。沼田ら²²⁾は凍結防止剤散布後の残留塩分濃度と凝固点開始点濃度に着目して、路面センサーの観測結果と路面凍結危険度から、区間ごとの凍結防止剤散布タイミングの目安を表示する道路管理支援システムを構築している。また、東ら²³⁾は路面に路温センサーと塩分濃度計測センサーを設置し、その情報から凍結が発生する路温および残留塩分濃度から薬剤散布作業基準を設定し、道路管理を支援するシステムを構築している。しかし、この凍結防止剤の散布をなくすことは現段階では困難であり、ソフト・ハード面両方からの対策が必要であるとしている。

2.3 凍結抑制舗装および凍雪害防止施設における課題と既往の研究

上記の機械除雪および凍結防止剤の散布による冬期路面管理方法は、路面状況や降雪状況に応じた管理が可能である。しかしながら、冬期の道路状況は、その日の気象状況だけでなく、前日までの気象状況、交通量、除雪状況、積もった雪の乾湿により影響を大きく受け、重要度や降雪量により区分して作業を行うため、人的要素が大きく、限られた人員において常時無雪状態の路面とすることは極めて困難である。ここで、人的要素の小さい冬期路面管理方法として凍結抑制舗装が挙げられる。

凍結抑制舗装はスパイクタイヤの製造中止の動きから1980年代後半に登場した²⁴⁾。西澤ら²⁵⁾は、粉砕廃タイヤのゴム粒子を混入した特殊なアスファルト混合物(AMRP)で舗装した箇所における雪氷剥離効果について現地実験、室内実験、解析による検証結果をまとめており、雪氷厚が薄い場合に効果があることを報告している。同時に、冬期路面管理は難しい問題であり、さまざまな手段を組み合わせるべきであるとしている。また田高ら²⁶⁾は、凍結抑制舗装の効果が限定的であることから、排水性舗装の路面の粗いきめによりすべり摩擦抵抗の向上が期待できないかの検討を行い、排水性舗装の表層部分にゴムチップとバインダを混ぜた予防剤の充填を行い、試験車による評価を行い、一定の凍結抑制効果と耐久性について報告をしている。

しかしながら、凍結抑制舗装はランニングコストが0(ゼロ)であるという利点はあるが、凍結抑制効果は限定的であり、耐久性における課題や、降雪量の多い場所や、交通量の多少により効果が発揮できないなどの課題を有している。

このような機械除雪・凍結防止剤・凍結抑制舗装を用いない冬期路面管理方法としては、流雪溝の設置、散水消雪設備の設置、電熱融雪設備の設置、温水融雪施設の設置などがある²⁷⁾。

散水消雪設備は、地下水や河川水などをスプリンクラーによって路面に均一に散水する工法であり、経済性、施工性に優れている。しかしながら、散水時の車両による歩行者への水はねや、路面の再凍結等の問題がある。さらに、散水用の水資源が十分に確保できる地域に限定され、豊富で利用可能な地下水、温泉、工場排水等がある場合を除いて、化石エネルギーや電力に大きく依存するものである。そのため、地下水の枯渇による地盤沈下や水位低下、二酸化炭素の発生や電力の使用など、資源・環境・コストに多大な影響を与えるため、施工計画も大きく制限を受けるという課題を有している。

温水融雪施設は無散水消雪(ロードヒーティング)工法とも呼ばれ、熱源を化石エネルギーに依存するものと、自然エネルギーに依存するものとに分類される。熱源を化石エネルギーに依存するものとしては、電熱線式ロードヒーティングが挙げられる。電熱線式ロードヒーティングは、連続稼動と間欠稼動が容易に行えるとともに、融雪効果が高いこと、維持管理が容易であることが利点である。しかしながら、償却費を含んだランニングコストが機械除雪や凍結防止剤の散布の30~40倍とコスト面で問題を抱えている。また破損時

の電熱線ケーブルからの漏電がコンクリート内部の鉄筋の錆を発生させる原因となる。

自然エネルギーに依存するものとしては、ヒートパイプ式ロードヒーティングやパイプヒーティングなどが挙げられる。ヒートパイプ式ロードヒーティングは、温泉・地下水・地熱などの自然熱や廃熱などを利用可能であるが、融雪面積が小さく初期コストが大きい点が課題である。さらに、パイプに封入されているアセトンなどがパイプ破損時に漏出し、周辺の土壤汚染を引き起こす原因にもなりうる。

近年、二酸化炭素による地球温暖化問題が世界的に問題となっている。路面融雪施設の熱源としても、化石エネルギーの使用量を可能な限り削減した自然未利用エネルギーを活用した施設が注目・開発されてきている^{28),29),30)}。そのため、中国地方のような比較的温暖な地域における冬期路面管理方法として、近年においては、地熱などの自然未利用エネルギーを使用し、経済性に優れ、自然環境への負荷が小さいことに着目したパイプヒーティングによる融雪施設の研究・開発が活発に行われている。

2.4 無散水融雪施設における課題と既往の研究

2.4.1 自然熱エネルギー利用に関する既往の研究

中国地方における山間部の気象条件は、降雪量も比較的少なく、長時間継続した降雪はあまりみられない。ところが、昼間は比較的暖かな気温となるものの、夜間には -10°C 程度まで気温は低下し、路面は積雪・凍結状態となる特徴を有している。このような背景から、山口県を含む中国地方では、路面積雪・凍結により危険となる山間部のカーブや橋梁といった局所的な区間を中心に、路面融雪施設の整備が近年活発に進められている。

また、近年は環境問題から地下に存在する様々な資産の利用を検討する動きがある³¹⁾。菅野³²⁾は、多くの地域の近く、様々な形で発電などに利用可能な熱が存在しており、その利活用方法の提案を行っている。また、水田³³⁾は地下の深さと熱の存在の関係を、ある一定の深さにおける条件から計算する手法を示し、地下に多くの熱が存在することを示している。このように、地熱の活用が活発になる中で、ロードヒーティングにおいても地中熱利用についても活発に研究が行われている³⁴⁾⁴²⁾。ここで、比較的温暖な地方においては、地中熱などの自然熱エネルギーの利用可能性が高いことが多く、さらに、降雪時間があまり長くないことから、自然熱エネルギーを用いた無散水融雪施設の適用が望ましいものと考えられる⁴³⁾⁴⁴⁾。

しかしながら、イニシャルコスト、ランニングコストが大きい融雪施設を設置することになると、費用対効果の観点からも望ましいものではない。そこで、中国地方のような比較的温暖な地域においても、経済的かつ効率的な融雪施設の構築が必要となってくる。本研究では特に、自然未利用エネルギーである地中熱を用いたパイプヒーティングに着目するものである。パイプヒーティングについてはこれまで、融雪能力⁴⁴⁾、熱源の検討⁴⁰⁾、コストパフォーマンス³⁹⁾、コンクリート床版内に存在するパイプの影響⁴⁵⁾に関する報告がなされている。

福原ら³⁷⁾³⁸⁾は、2つの大型貯水タンク(最大 $\phi 2.6 \times 240\text{m}$)と集熱器(96@ $\phi 0.5 \times 53\text{m}$)を用いてチェーン着脱場に適用した事例を報告している。そして、夏季における路面冷却実験による水温の加温効果と冬期における路面加温効果を測定結果により報告している。

谷本ら⁴³⁾は、パイプヒーティングシステムの適用にあたり、路面への熱の伝達状況、融雪状況等の観測を行っている。また、省エネ化を図るため、平野部と山岳部で地中の温度分布を計測し、恒温域の地下水利用について検討を行っている。また、平野部における恒温域の地下水はパイプヒーティングシステムの温水として利用可能であるため、省エネ化を推進できるとしている。

吉武ら⁴⁶⁾は、恒温域での地下水の利用を念頭に置いたパイプヒーティングシステムの設計の基礎資料を提供することを目的として、地中温度分布の測定、地中温度分布の予測式、地下水の利用による融雪効果の検討を行っている。その結果、温度の安定した地下水温は、

簡易式を用いた年平均気温より推定できることを明らかにし、さらに、均一な融雪を行うには、床版全体から雪層への熱の供給できる程度のパイプ埋設深さが必要であることや、地下水が15℃以上の地域では、パイプ間隔30cmにおいて20℃程度の加熱量となることを明らかにしている。

谷本⁴⁴⁾は、恒温域での地下水の利用およびパイプヒーティングシステムの設計の基礎資料を提供することを目的に、図-2.4.1のような供試体を作製し、床版全体から雪層への熱の供給について、パイプ埋設深さ、間隔について検討を行っている。中国山地の山間部を通過する国道で、地下水が15℃以上の地域について検討を行い、パイプ間隔30cmにおいて均一な融雪が行えることを明らかにしている。

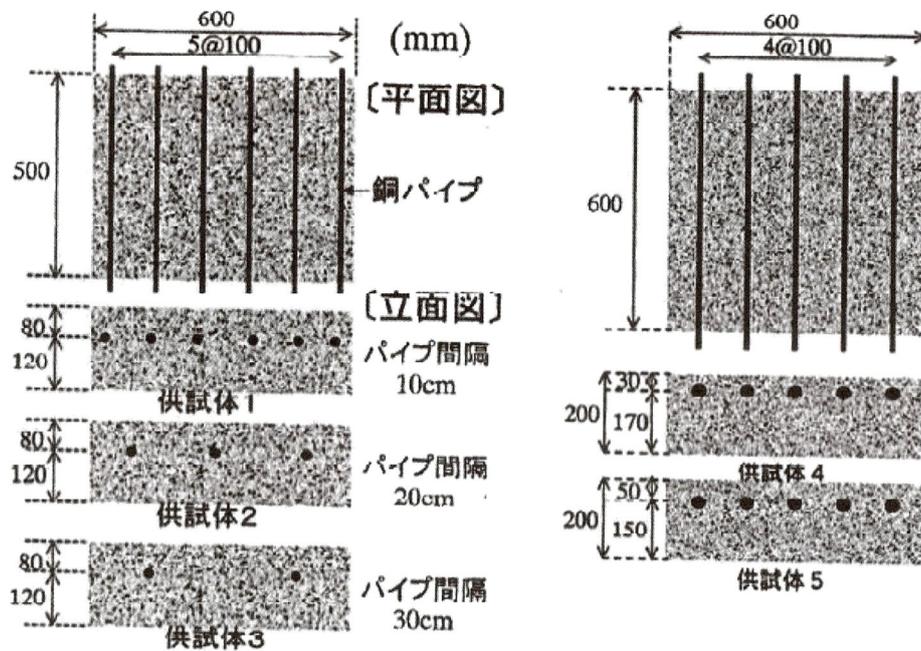


図-2.4.1 谷本らの研究における実験

吉武ら⁴⁷⁾は、山岳トンネル出口部の融雪・消雪に関し、トンネル内部の地熱・湧水等の利用性について検討している。その中でトンネル内地熱の現場計測結果より、トンネル内部の地熱等は恒温状態にあることから、融雪施設へある程度適用できることを明らかにした。また、その適用に関する簡易解析結果より、恒温水槽を設けることで、安定した熱の供給ができることが予測されることを報告している。

永井ら⁴⁸⁾は、トンネル湧水利用の基礎データを資する目的から、山岳トンネルの地熱・湧水温度を測定するとともに、トンネル坑口部の橋梁を対象とした実トンネルの湧水を用いた融雪実験を行っている。温度測定の結果、トンネル内の地熱や湧水は、年間を通じて安定した未利用の自然エネルギー源であると考えられ、パイプヒーティング等の融雪・凍結防止方法に適用すればその効果を発揮できることを明らかにした。現場実験の結果、水温 10°C 程度のトンネル湧水を直接利用したパイプヒーティングでは、降雪量 29cm/day に対しても無雪状態にすることができたことを報告している。さらに永井ら⁴⁹⁾は、トンネル湧水を利用して、トンネル坑口付近の橋梁を対象として、融雪施設の実用化について検討している。そして永井ら⁵⁰⁾は、トンネル湧水を利用して、トンネル坑口付近において融雪を行う実験を試みている。

吉武ら⁵¹⁾は、中国地方のような比較的温暖な地域における地下水の温度を計測して、その地下水を利用して路面融雪の適用性を検討している。地下 6m の温度は、その地域の年間の平均気温とほぼ同じである計測結果から、地下水がパイプヒーティングに適用できることをまとめている。

辻ら⁵²⁾は、トンネル湧水を利用したパイプヒーティングシステムにおけるコスト評価を行っている。トンネル湧水を、岩盤を掘削して作製したタンクに貯蔵し、不足する熱量についてボイラーにて加熱した場合および地下 100m のボーリングから採熱する場合との建設コストとランニングコストの比較を行っている。比較対象にトンネルからの湧水を直接融雪に利用した場合（散水方式）と電熱線によるロードヒーティングも加えてコスト比較を行っている。耐用年数 15 年とした場合の、トータルコストの算出結果から、利用できる水源が近くにあり、路面形態に大きな支障がない場合は、散水方式が最も経済的な方法であるが、散水方式が利用できないような条件下では、加温をできる限り小さくしたトンネル湧水等によるパイプヒーティングは、経済的にも有効な手段となるとしている。

永井ら³⁹⁾は、パイプヒーティングによる融雪所要面積に比して、トンネル湧水が不足する場合を想定し、トンネル外部からの水補給を行う際のトンネル坑内における加温特性について実験的検討を試みている。さらに計算を行い、耐用年数 15 年とする場合の、平均年間経費の算出を行っている。その実験結果より、融雪所要面積に必要な水量 $1.45\text{m}^3/\text{min}$ を満足できる通水量 $1.00\text{m}^3/\text{min}$ の実験でも、トンネル坑内にて約 2°C 程度水温を上昇させることができることを明らかにした。設備費・維持管理費の算出結果から、利用できる水源が近くにあり、路面形態に大きな支障がない場合は、散水方式が最も経済的な方法であるが、散水方式が利用できないような条件下では、トンネル湧水等によるパイプヒーティン

グは、経済的にも有効な手段となるとしている。

永井⁴⁰⁾は、設備費・維持管理費の算出結果から、利用できる水源が近くにあり、路面形態に大きな支障がない場合は、散水方式が最も経済的な方法であるが、散水方式が利用できないような条件下では、トンネル湧水等によるパイプヒーティングが経済的にも有効な手段であるとし、中国山地を通過する国道において実際に行う場合は図-2.4.2のように手法を提案している。

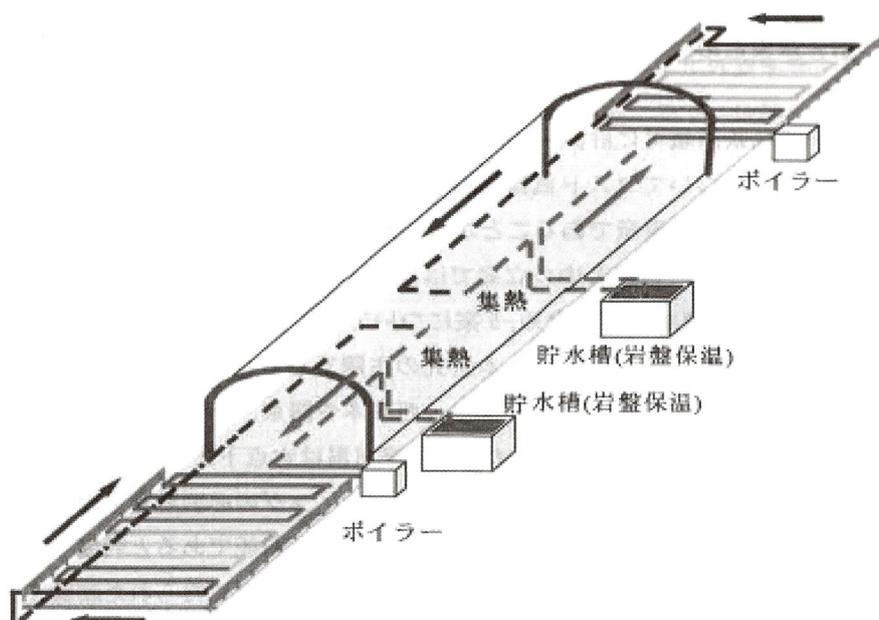


図-2.4.2 トンネル湧水を利用した場合のパイプヒーティング工法の提案図

2.4.2 無散水融雪施設に関する既往の研究

山口県において、冬期の山間部では、最低気温が -10°C 以下に達し、多くの降雪や積雪もみられる。積雪・寒冷地区に比べて、雪道運転に不慣れな人が多く、さらにタイヤのチェーンや冬用タイヤの装備率は高くないことから、ひとたび大雪が降ると事故が起こりやすく、交通への大きな影響がみられる。特に、橋梁での雪や凍結によるスリップ事故が多発している。新しく設置される橋梁でパイプヒーティングシステムを行う事例はいくつかみられるが^{41),42)}、既設の橋梁にこのようなシステムを設置する事例はほとんどみられない。

パイプヒーティングに用いるコンクリート版については、その構造について検討がされた事例^{43),45)}が存在する。また、宮本ら⁵³⁾は、橋梁下面は、その構造により断熱効果があることを報告し、パイプヒーティングを橋梁で行うにあたり、橋梁下面に断熱を行う必要がないことを報告している。

谷本ら⁴³⁾は、パイプヒーティングシステムの適用にあたり、特に、パイプ間隔、温水温度、外気温が融雪効果に及ぼす影響を明らかにするため、路面への熱の伝達状況、融雪状況等の観測を行っている。実験結果より、外気温の低下に伴い、パイプ間隔の融雪効果にもたらす影響が大きくなることや、温水温度を高温にすれば融雪効果は向上するが、パイプ間隔ほど有効でないことも明らかにしている。

西澤ら⁵⁴⁾は、道路融雪のために、地中で熱交換された水を舗装体内に通した管に流すシステムについて報告している。具体的には、熱効率を上げるためになるべく舗装の表面に放熱管を設置することが望ましいが、早期の破損をもたらす恐れがある。そこで、放熱管の影響について、モデル舗装による実験結果を用いて、FEM解析による検討を行っている。その結果、放熱管の存在がコンクリート舗装全体の挙動に及ぼす影響はわずかであるという結果が得られている。

宮本ら⁴²⁾は、建物のコンクリート基礎杭を熱交換器に兼用して地中熱を集熱し、その周囲の駐車場や歩道を融雪するシステムを開発し、夏に循環ポンプを運転することで路面の熱を地中に蓄え、冬の融雪に使うことを報告している。蓄熱のための循環ポンプ運転は必要となるが、電気融雪と比べて著しい省エネルギーとなり、電気融雪に比べ、建設費は42%、電気代(維持費)は4.1%と安価であり、建設時の一次エネルギーに関してはシステムも電気融雪もほぼ同じ約 $90\text{kWh}/\text{m}^2$ であるが、運転時の一次エネルギー消費は電気融雪の1/38になることを報告している。また、宮本ら⁵⁵⁾は、橋梁基礎杭に熱交換用のボーリングを共用させ、群杭効果で夏の蓄熱は冬まで保存され高い融雪能力が得られることを報告している。

パイプヒーティング用の埋設パイプを有するコンクリート版の合理的な設計を行うためには、埋設パイプがコンクリート版の耐荷性能および鉄筋-コンクリート間の付着に及ぼす影響、あるいは埋設パイプの応力負担能力などを把握する必要がある。埋設パイプを有するコンクリート版のモデル実験として、吉武ら⁵⁶⁾はパイプおよび鉄筋をコンクリートに埋設した供試体を用いた各種のモデル実験を行い、圧縮荷重作用下におけるコンクリート

の耐荷性能，曲げ強度および曲げ付着強度に対し，埋設パイプが及ぼす影響について検討している．その結果，圧縮荷重作用下におけるコンクリートの破壊形態はパイプ界面を起点としたひび割れの進展による割裂破壊であること，および鋼製パイプがパイプヒーティングに適した材料であることを報告している．また，パイプと鉄筋を一線上に重ねて配置した場合でも，十分な鉄筋定着長を確保すれば，鉄筋が降伏に至るほどの十分な曲げ・付着耐力を確保できること，およびパイプの付着強度が鉄筋の最大付着応力の約 20%以下であるため，埋設パイプを応力部材として捉えず，鉄筋のみで曲げ引張荷重を負担させる構造設計法が妥当であることを報告している．

中村ら⁵⁷⁾は，橋梁床版内に設置するパイプについて，同じ深さで異なる間隔でパイプを配置し，それぞれについて温水を流した場合の熱分布について解析上の評価を行っている．また，三村ら⁵⁸⁾は，橋梁床版内に設置するパイプについて，同じ深さで異なる間隔でパイプを配置し，その供試体を作製しパイプ内に通水を行い，それぞれについての温度分布について評価を行っている．

辻ら⁵⁹⁾は橋梁床版に埋設するパイプについて，ライフサイクルコスト設計を行っている．そこで，パイプヒーティング舗装において，コンクリート版の輪荷重疲労破壊よりも，先にパイプ自体が使用限界に達すること，およびステンレスパイプの使用はインシヤルコストの増額があってもライフサイクルコストを小さくできることを報告している．

宮川ら⁶⁰⁾は図-2.1.4のような供試体を作製し，パイプヒーティング舗装用コンクリート版の疲労実験を行い，パイプヒーティング舗装で使用するパイプは構造体となり得ることを報告している．そして，辻⁴⁵⁾は既往の設計式や設計資料を用いることでパイプヒーティング舗装において，コンクリート版輪荷重疲労破壊よりも，先にパイプ自体が使用限界に達することを報告している．また，このパイプがパイプヒーティング舗装の構造体となることを報告している．

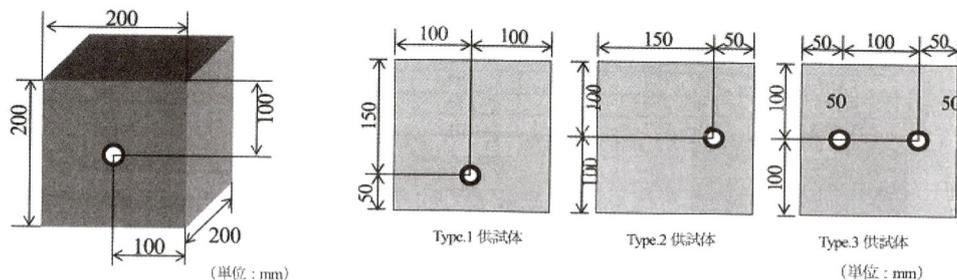


図-2.1.4 パイプヒーティング舗装構造試験供試体図

2.5 参考文献

- 1) 全国道路利用者会議（国土交通省監修）：道路統計年報-2007年版-, 2007.
- 2) 山口県土木建築部道路整備課：山口県の道路現況（平成22年4月1日現在），2010.
- 3) 山口県土木建築部：平成17年度道路交通センサス一般交通量調査総括表，2005.
- 4) 武市 靖，前野紀一，久保 宏：凍結路面の検知と推定手法に関する研究，土木学会論文集，No.440/IV-16，pp.155-164，1992.
- 5) 武市 靖：凍結路面の予測に関する研究，土木学会論文集，No.470/IV-20，pp.175-184，1992.
- 6) 多田宏行：語り継ぐ舗装技術 道路舗装の設計・施工・保全，鹿島出版会，2000.
- 7) （財）交通事故総合分析センター：交通安全マップ，事故統計情報
- 8) 市原 薫，小野田光之：路面のすべり，技術書院，1986.11.
- 9) 二瓶光弥：氷の性状とタイヤの氷上性能，表面科学，Vol.27，No.2，pp.116-119，2006.
- 10) 古堅辰一，松村光太郎，荒木紀人，佐久本光章，安岡真希：関西・中国地方の「平成18年豪雪」における交通障害に関する研究，日本雪氷学会全国大会講演予稿集，Vol. 2006，p.112，2006.
- 11) 福原輝幸，金澤文彦：平成18年豪雪がもたらした福井の冬季道路交通問題，日本雪工学学会誌，Vol.22，No.3，pp.78-83，2006.
- 12) 国土交通省：国土交通白書，2010.
- 13) 山口県土木建築部：山口県の道路2008，2008.7.
- 14) 松田泰明，加治屋安彦，松島哲朗，山際祐司，正岡久明，星野 洋：道路利用者の行動意識からみた冬期道路情報の表現方法について，寒地技術論文・報告集，Vol.22，pp.125-128，2006.
- 15) 日本コンクリート工学協会：融雪剤によるコンクリート構造物劣化研究委員会報告書・論文集，1991.1.
- 16) 木村恵子，並河良治，曾根真理：凍結防止剤が沿道直物に与える影響について，寒地技術論文・報告集，Vol.22，pp.143-146，2006.
- 17) 関口武一，笹井幸男，石原喬康：塩害を受けたRC床版の劣化調査と保全工事，コンクリート工学，Vol.32，No.5，pp.41-45，1994.
- 18) 土木学会コンクリート小委員会コンクリート小委員会凍結防止剤ワーキンググループ：我が国のコンクリート構造物における凍結防止剤の影響，土木学会論文集，No.490/V-23，pp.15-19，1994.
- 19) Yoichi MIMURA, Isamu YOSHITAKE, Kazuhide TSUJI and Sumio HAMADA: Life Cycle Cost of RC Slab Deteriorated by Anti-Freezing Agent, *3rd New York Bridge Conference*, 2005.
- 20) 三村陽一，吉武 勇，辻 和秀，浜田純夫：凍結防止剤によるコンクリート版の塩分浸透に関する解析的評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1231-1236，

- 2005.
- 21) 辻 和秀, 三村陽一, 吉武 勇, 浜田純夫: 凍結防止剤の塩害を受けるコンクリート版のライフサイクルコスト, 土木学会論文集, No.784/VI-66, pp.65-75, 2005.
 - 22) 沼田 実, 長門幸朗, 栗林直義, 川平吉則, 稲澤太志, 浦野 隆: 凍結防止剤散布の最適化手法に関する評価試験報告, 寒地技術論文・報告集, Vol.22, pp.218-223, 2006.
 - 23) 東 拓生, 稲澤太志: 塩分濃度の減衰を考慮した凍結防止剤散布支援システムの開発, 寒地技術論文・報告集, Vol.24, pp.273-277, 2008.
 - 24) 多田宏行: 語り継ぐ舗装技術 道路舗装の設計・施工・保全, 鹿島出版会, 2000.
 - 25) 西澤辰男, 村井貞規, 国分修一: ゴム粒子混合型アスファルト混合物の雪氷剥離効果, 土木学会論文集, No.585/V-38, pp.153-162, 1998.
 - 26) 田高 淳, 石田 樹: 凍結路面とその対策 舗装による凍結路面对策, 日本雪工学会誌, Vol.21, pp.349-352, 2005.
 - 27) 社団法人日本道路協会: 道路構造令の解説と運用, 2004.
 - 28) 落藤 澄, 谷口孚幸: 未利用エネルギーを活用したオンサイト型都市融雪システムの実際と計画, 理工図書, 2000.
 - 29) 森山和馬, 林 拓男: 地中熱利用のBHES融雪システム, 自然・未利用エネルギーによる雪寒対策シンポジウム論文集, pp.9-14, 1999.
 - 30) 雪センター: 「平成14年度国土交通省における雪に関する施策概要資料」, 2002.
 - 31) 稲田善紀: 地下の空間利用, 森北出版株式会社, 1989.
 - 32) 菅野弘則: 地熱開発の現状と将来展望, 資源と素材, Vol.115, pp.505-511, 1999.
 - 33) 水田義明: 演習 岩盤開発設計, 株式会社アイピーシー, 1996.
 - 34) 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.77-86, 1994.
 - 35) 森井和宏: 環境に優しい地中熱利用の融雪システムの施工について, ゆき, Vol.66, pp.26-29, 2007.
 - 36) 川津孝徳, 加藤 禎, 芳賀千賀子: 一般国道13号主寝坂道路における消融雪設備計画～多様な熱源の効率的活用について, 日本雪工学会誌, Vol.22, No.1, pp.14-17, 2006.
 - 37) 福原輝幸, 阪本信弘: 地中熱利用による路面温度制御 冬期融雪および夏期路面冷却, 土木学会誌, Vol.84, No.10, pp.63-65, 1999.
 - 38) 福原輝幸, 小寺健太郎, 浅田興志男, 河合源悟: 地中熱を利用した貯水槽集熱システムの性能評価, 土木学会論文集, No.741/VII-28, pp.143-153, 2003.
 - 39) 永井泉治, 吉武 勇, 仁尾彰一郎, 浜田純夫: パイプヒーティングによる路面融雪のためのトンネル坑内加温実験とコスト評価, 土木学会論文集, No.707/VI-55, pp.219-224, 2002.6.
 - 40) 永井泉治: 山岳トンネルの熱エネルギーを利用したパイプヒーティングシステムの設計に関する研究, 山口大学博士論文, 2002.

- 41) 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.
- 42) 宮本重信, 竹内正紀: 橋梁基礎杭を利用した地中への季節間蓄熱融雪, 土木学会論文集 No.797/VI-36, pp.51-62, 2005.
- 43) 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床版の融雪・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.
- 44) 谷本俊夫: 温水パイプによる橋梁床版の融雪・凍結防止に関する研究, 山口大学博士論文, 2000.
- 45) 辻 和秀: パイプヒーティング用コンクリート版の構造特性とライフサイクルコストに関する研究, 山口大学博士論文, 2006.
- 46) 吉武 勇, 中村秀明, 谷本俊夫, 浜田純夫: 温水パイプを埋設したコンクリート床版の融雪効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.1075-1080, 1998.
- 47) 吉武 勇, 浜田純夫, 永井泉治, 中村秀明, 谷本俊夫, 郡内康栄: 山岳トンネル内の恒温地熱および湧水の融雪施設への適用性に関する研究, 自然・未利用エネルギーによる雪寒対策技術シンポジウム, pp.21-26, 1999.12.
- 48) 永井泉治, 吉武 勇, 中村秀明, 浜田純夫: 山岳トンネルにおける湧水を利用した橋梁の融雪実験とその適用性, 土木学会論文集, No.665/VI-49, pp.183-118, 2000.
- 49) 永井泉治, 吉武 勇, 浜田純夫: トンネル湧水を利用した温水パイプ式ロードヒーティングの実用性に関する研究, 寒地技術論文・報告集, Vol.17, pp.258-265, 2001.
- 50) Senji NAGAI, Isamu YOSHITAKE and Sumio HAMADA: Fundamental Experiments of Pipe Heating by Means of Tunnel Spring Water, *Proceedings of the 11th International Road Weather Conference*, SIRWEC2002, CD-ROM, 2002.
- 51) Isamu YOSHITAKE, Senji NAGAI, Toshio TANIMOTO and Sumio HAMADA: Simple Estimation of the Ground Water Temperature and Snow Melting Process, *Proceedings of the 11th International Road Weather Conference*, SIRWEC2002, CD-ROM, 2002.
- 52) Kazuhide TSUJI, Isamu YOSHITAKE, Senji NAGAI and Sumio HAMADA: Cost Performance of Pipe Heating System by Thermal Energy in Mountain Tunnel, *Proceedings of the 12th International Road Weather Conference*, SIRWEC2004, CD-ROM, 2004.
- 53) 宮本重信, 室田正雄, 杉森正義: 橋梁の床版下面構造がその路面凍結におよぼす影響, 日本雪工学会誌, Vol.14, No.1, pp.36-42, 1998.
- 54) 西澤辰男, 本間裕介, 武市 靖, 宮本重信: 放熱管を埋め込んだコンクリート舗装版の力学的挙動, 土木学会第58回年次学術講演会, Vol.58, pp.1309-1310, 2003.
- 55) 宮本重信, 竹内正紀, 永井二郎, 菅原桂一郎: 熱交換杭群を用いた合成鋼床板橋での季節間蓄熱融雪の一設計, 土木学会論文集G, Vol.64, No.1, pp.10-25, 2008.
- 56) 吉武 勇, 辻 和秀, 三村陽一, 山口哲矢, 浜田純夫: パイプヒーティングの構造設計

- に用いるコンクリート版の要素実験, 土木学会論文集, No.770/VI-64, pp.53-63, 2004.
- 57) Hideaki NAKAMURA, Toshio TANIMOTO and Sumio HAMADA: Study of a Snow-melting and Antifreeze System for Prevention of Auto Accidents Slippery Bridge Decks, *Proceedings of the third international conference on snow engineering*, 1996.
- 58) Yoichi MIMURA, Isamu YOSHITAKE, Kazuhide TSUJI, Toshio TANIMOTO and Sumio HAMADA: Influence of Heating Pipe on Snow Melting and Mechanical Properties, *Proceedings of the 12th International Road Weather Conference*, SIRWEC2004, CD-ROM, 2004.
- 59) 辻 和秀, 吉武 勇, 谷本俊夫, 浜田純夫: パイプヒーティング機能を有するコンクリート版のライフサイクルコスト, 土木学会論文集, No.805/VI-69, pp.131-136, 2005..
- 60) 宮川 誠, 辻 和秀, 三村陽一, 吉武 勇: パイプヒーティング用コンクリート版の構造性能とライフサイクルコスト, 寒地技術論文・報告集, Vol.21, pp.68-75, 2005.

第3章

地中熱地下備蓄タンク 方式パイプヒーティング システムの開発

第3章 地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの開発

3.1 路面融雪計画地における課題と目的

一般国道315号は山口市周南市（旧徳山市）を起点とし、中国山地を越え山口県萩市（旧阿武郡須佐町）を終点とし、橋梁は88箇所、トンネルは13箇所存在し^{1),2)}、途中で中国縦貫道路鹿野インターチェンジおよび国道9号と交差する主要な国道である。しかし冬期においては凍結や積雪を原因とするスリップ事故が多く発生するため、機械除雪や凍結防止剤の散布を多く行っている。

路面融雪装置の計画地は、一般国道315号の葉の内3号橋から同4号橋（以下、計画地と呼ぶ）で計画地付近の交通量は約1600台/日³⁾であり、標高約570mの山間部である。図-3.1.1に示すように、計画地周辺はS字カーブ区間にあり、道路線形は縦断勾配4.2%である。そして、隣接する河川は二級河川錦川である。また、中国地方における山間部の冬期における気候は、豪雪地帯と呼ばれる地域と比べて降雪量は比較的少なく、長時間におよぶ降雪はあまりみられない。ところが、昼間は比較的温暖な気温となるものの、夜間には、 -10°C 程度まで気温は降下し、路面は積雪・凍結状態となる特徴を有している。このようなことから、冬用タイヤの装着率があまり高くない本計画地では、路面積雪・凍結によりスリップ事故が多発していた。本計画地の事業着手前の状況を写真-3.1.1および写真-3.1.2に示す。

これまで山口県を含む中国地方の冬期路面管理では、主に機械除雪と塩化カルシウムなどの凍結防止剤散布で行われてきた。本計画地は、河川を横断する箇所であるため、このような凍結防止剤を使用した場合、塩化物が河川内へ流出する危険性がある。また、広く



写真-3.1.1 計画地冬期の路面状況

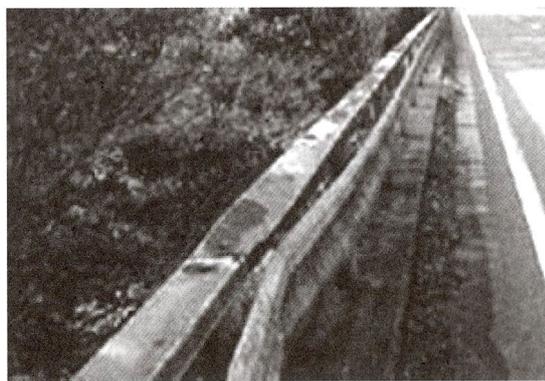


写真-3.1.2 計画地のガードレール状況

普及している散水工法は、現地において散水に要する水量確保が困難なことから、同計画地においては適さないものであった。そこで本計画地では、環境負荷を低減できるとともに経済的な路面管理を行えるよう、地中熱を利用した無散水融雪施設のひとつであるパイプヒーティングを行うこととした。ここで、路面融雪の計画地における1992年～2002年の気象データによると、平均継続降雪時間は3時間程度であり、その最長継続降雪時間も9時間(10年間で2回)であった。このことから、本計画地では、9時間以上におよぶ継続的な降雪まで完全に融雪する必要はなく、比較的短時間の局時的な降雪に対して、通行車両の安全性を確保できる程度の路面管理を行う方針とした⁴⁾。

地中熱を熱源とした融雪施設として、熱交換杭と路面下のパイプ内に不凍液を循環させることで融雪する工法が実用化されている⁵⁾。しかしボーリング1本あたりの採熱量は比較的小さく、この工法を本計画地に適用するには、多数のボーリングが必要となる⁶⁾。本計画地は、橋梁部を含む区間があり、且つ保安林と河川に囲まれているため、多数の熱交換杭の設置が困難な場所であり、この工法の採用ができなかった。本計画地には2本の橋梁があり橋面凍結が著しいが、山影や樹木のため昼間の日照による融雪もあまり期待できない。また図-3.1.1に示すように、計画地周辺はS字カーブ区間にあり、道路線形は縦断勾配4.2%であるため、融雪区間を葉の内3号橋から同4号橋までの延長116.4mとし、融雪面積を橋梁部430m²、土工部265m²とした⁷⁾。

そこで本計画地では、必要な熱量(水)を地中熱地下備蓄タンクに確保しておき、路面融雪・凍結防止に必要な時のみ、システムを稼働させる工法を考案した。地中熱地下備蓄タンクの概要を図-3.1.2および図-3.1.3に示す。

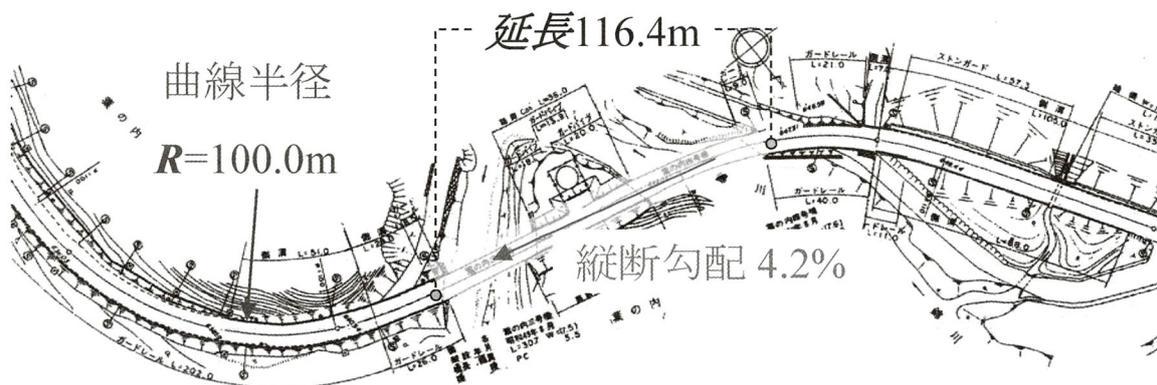


図-3.1.1 計画地平面図

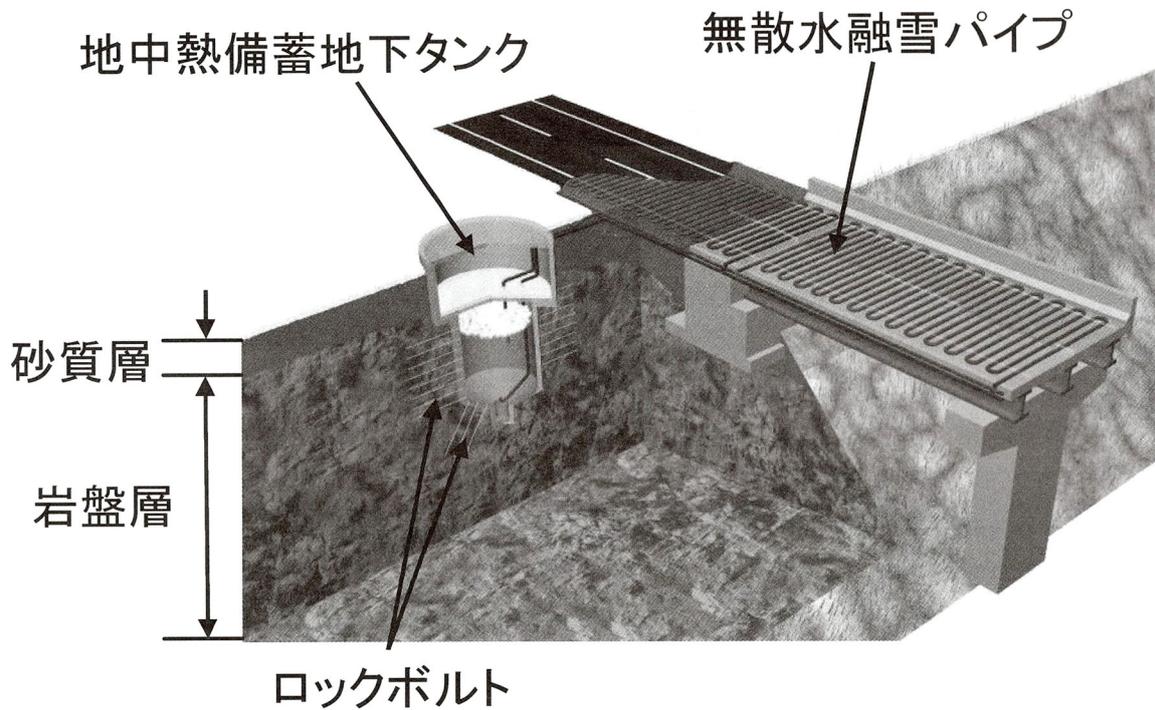


図-3.1.2 「地中熱地下備蓄タンク方式」の概念図（1）

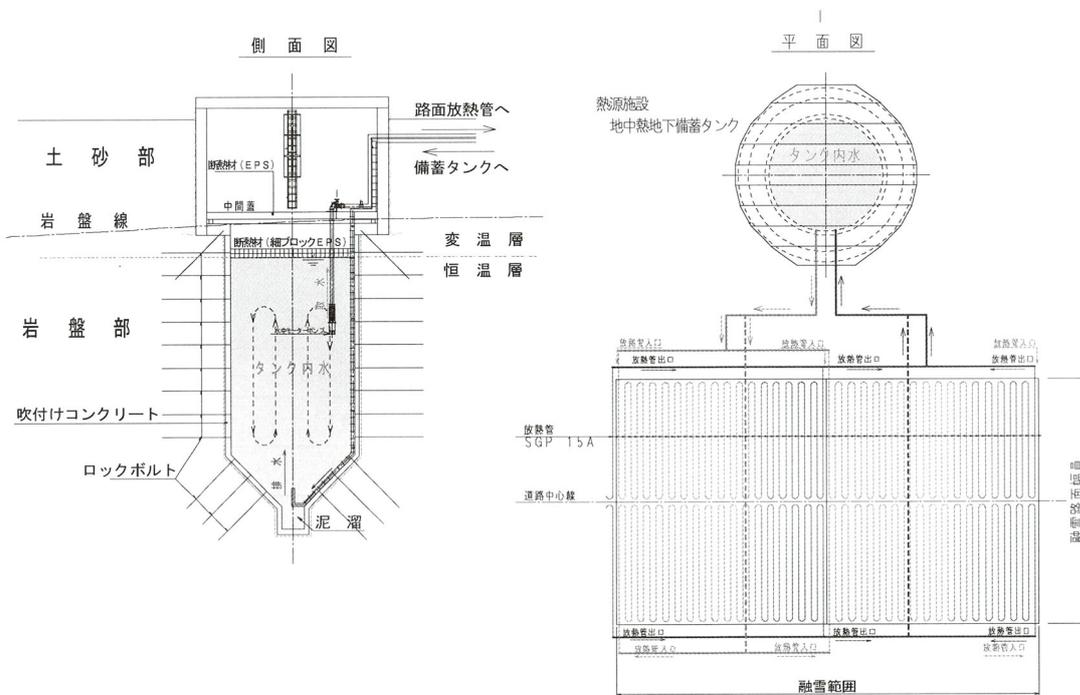


図-3.1.3 「地中熱地下備蓄タンク方式」の概念図（2）

3.2 地中熱地下備蓄タンク

3.2.1 パイプヒーティング熱源の検討

本計画地で用いた「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステム」の設計にあたり、1992年～2002年の気象データを基に表-3.2.1に示す気象条件を仮定し、設計時の設計要領⁸⁾に基づき表-3.2.2の必要熱量を算定した。ここで求めた必要熱量に基づき、融雪面積(橋梁部 430m²、土工部 265m²)に対して、表-3.2.3に示すような融雪・凍結防止に要する水温を算定した⁴⁾。

表-3.2.1 計画地の気象データ

日平均降雪深	cm/day	10.0
時間降雪深	m/h	0.022
雪温 (=気温)	°C	-1.9
雪密度	g/cm ³	0.07
風速	m/s	2.0
雪の比熱	kJ/(kg·K)	2.1

表-3.2.2 必要熱量の算定結果

	融雪	凍結防止
橋梁部必要熱量 (W/m ²)	223	82
土工部必要熱量 (W/m ²)	161	59

表-3.2.3 融雪・凍結防止に要する水温

	融雪	凍結防止
橋梁部	11.5°C	4.9°C
土工部	10.9°C	4.6°C

貯水用のタンク設置を行う上で、地下の地質条件および温度変化を把握するため、本計画地の路肩近くでボーリング調査を行った。図-3.2.2 にボーリング調査の結果を示すとともに、このボーリング孔に設置した計12点の熱電対(T-type)の位置を示す。この熱電対を使用して、1年間(2004年3月～2005年5月)を通じて時間制御による自動計測を行った。その計測結果を図-3.2.1に示す。この結果に示されるように、路盤面より10m程度で地中熱はほぼ一定となり、その温度は12°C程度であった。またこれよりも浅い位置では、深度に応じて外気温と温度の位相差が生じているものの、路盤面より5m以深では、その差異はあまり大きいものではなかった⁹⁾。一般に地表から深さ10m程度までは外気温変動の影響を受けるため、季節変化する層(変温層)がある。一方、地下10m以深では外気温変動の影響をほとんど受けず一定となり、その温度は、ほぼ年平均気温と一致する¹⁰⁾。以上から、本計画地における採熱位置の温度12°Cは、表-3.2.2に示す融雪・凍結防止に要する水温をいずれも超過しており、適切な水量を確保し、かつ適切な運転を行えば、特に人工的に加温することなく、この自然熱エネルギーをもって融雪・凍結防止が可能であると推察された¹¹⁾。

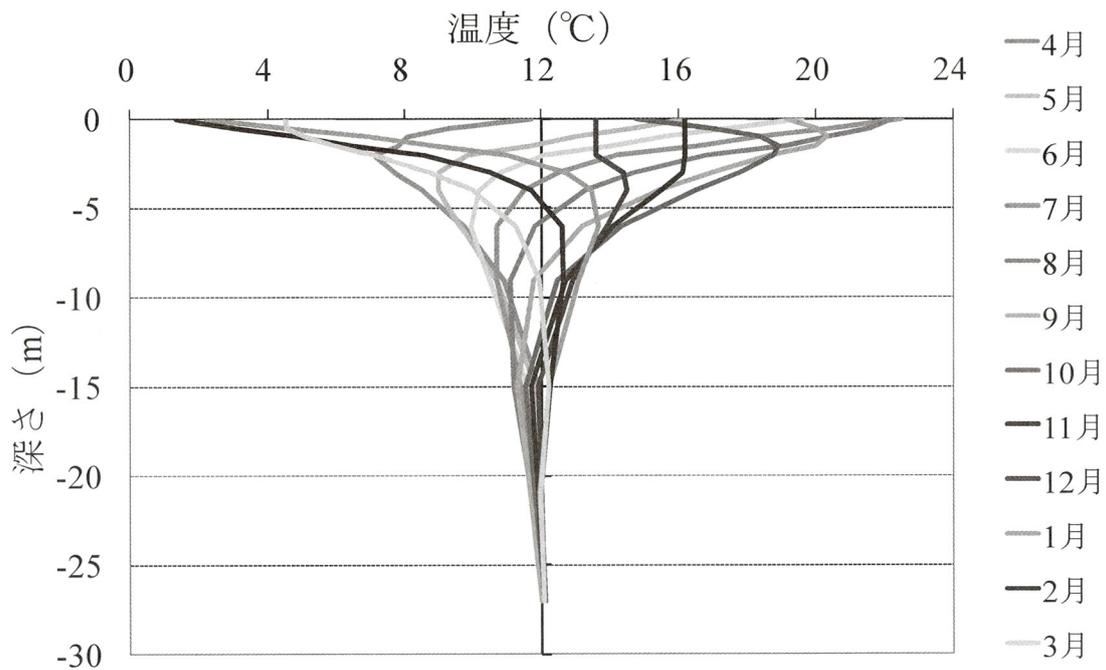


図-3.2.1 地中熱の計測結果

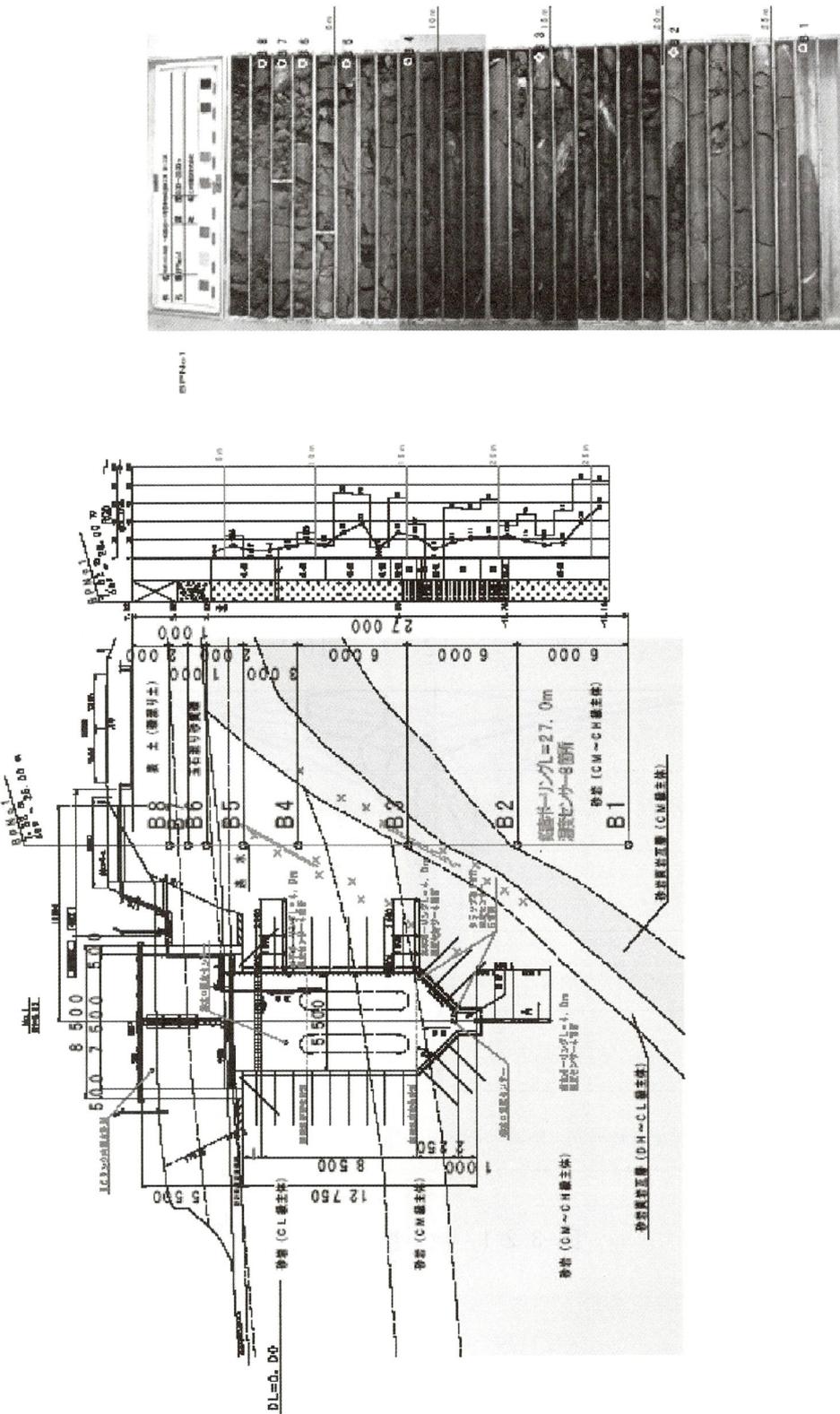


図-3.2.2 計画地における地質調査結果

計画地の融雪面積(橋梁部 430m², 土工部 265m²)について, 必要とする熱量から地中熱地下備蓄タンクの水量の検討を行った. 熱源として自然熱エネルギーのみを利用する本システムでは, 地中熱地下備蓄タンク内の水温を短時間で上昇させることは, 不可能である. 一方, 計画地における最長継続降雪時間は 9 時間程度であり, 数日に及ぶような長期の降雪はみられない. そこで本研究では, 最長のシステム稼働時間分を担う(温められた)備蓄水量を必要水量として設定した⁴⁾. 本システムにおいて必要となる熱量 Q (W/m²)は, 既往の設計要領⁸⁾で与えられる式(1) から求められる.

$$Q = \frac{c_s \cdot \Delta T_s + J_s}{\eta} \cdot h_s \cdot \rho_s \quad (1)$$

ここに, Q : 必要熱量(W/m²), c_s : 雪の比熱(2.1 J/g°C), ΔT_s : 雪温と水の融点との温度差(-1.9°C), J_s : 雪の融解熱(334 J/g), h_s : 降雪速度(0.022 m/hr), ρ_s : 雪の密度(70000 g/m³), η : 熱効率(橋梁部: 0.65, 土工部: 0.9)

式(1)を用いて必要単位水量 q (m³/hr/m²)が次式のように計算できる.

$$q = \frac{Q}{c_w \cdot \gamma_w \cdot \Delta T_w} \quad (2)$$

ここに, c_w : 水の比熱(4.19 J/g°C), γ_w : 水の密度(1.0×10⁶ g/m³)を表す. なお, ΔT_w はパイプパネル(標準サイズ: 3.0×5.1m, パイプ長: 約 100m)に通水循環した場合の温度低下量を表し, 本研究では 5°C と仮定した.

式(1), (2)を用いて, 橋梁部・土工部における必要単位水量(q_{u1} , q_{u2})を計算すると, それぞれ 0.65, 0.50 (l/min/m²)が求まる.

これらの必要単位水量を基に, システム最長稼働時間が 9 時間のときの必要水量 V (m³)は, 同設計要領⁸⁾により次式から得られる.

$$V = (q_{u1} \cdot A_1 + q_{u2} \cdot A_2) \times 60 / 1000 \times h = 225 \quad (3)$$

ここに, V : 必要水量(m³), q_{u1} : 橋梁部の必要単位水量(0.65 l/min/m²), q_{u2} : 土工部の必要単位水量(0.50 l/min/m²), A_1 : 橋梁部の面積(430m²), A_2 : 土工部の面積(265m²), h : システム稼働時間(9hr)

これらの結果に基づいて, タンク容量は 225m³ 以上を確保できるサイズ(容量 230m³)とした¹²⁾. そして, システム稼働時におけるタンク内の水温低下を予め把握するため, 汎用 FEM 数値解析ソフトウェアを用いた非定常熱伝導解析を行い, タンク容量の妥当性について検証した. そして, その解析モデルを図-3.2.3 に示す. 本モデルは, 概略設計段階で考えた円筒状のタンクについて, その軸対称性を考慮した上で 2 次元モデル化したものである.

また解析対象とした岩盤は、タンク壁面から10m（タンク半径の約3.6倍）、およびタンク底面から22.75mまでとし、それぞれの縁部を温度固定境界（12℃）とした。

ここでは、表-3.2.4に示す解析条件において計算を行った。なお、周辺岩盤およびタンク内の水の初期温度は、ボーリング時の地中熱調査に基づいて12℃と設定した。なお、1992年～2002年の気象観測データの中で、最長の継続降雪時間が9時間であったことから、そのような気象が3日間連続した場合を想定した解析を行った⁷⁾。

タンク内の平均水温の解析結果を図-3.2.4に示す。なお、9時間連続稼働した際の温度低下は、既往の設計要領⁸⁾に基づき算定したものである。これらの結果より、融雪に必要な熱量を約26時間で確保できなくなるものの、凍結防止に必要な熱量は3日間連続稼働した場合においても確保されていた⁷⁾。

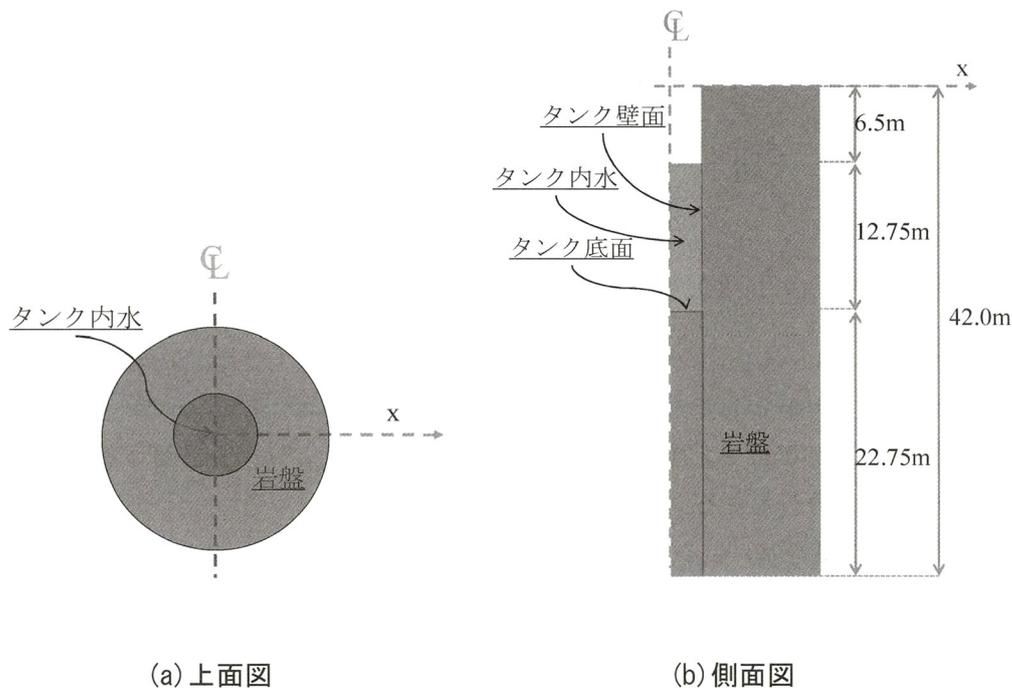


図-3.2.3 解析モデル図

表-3.2.4 解析条件

名称	記号	内水	岩盤
熱伝導率	W/m・℃	——	4.3
比熱	J/kg・℃	4199	1100
密度	kg/m ³	999.9	2650
タンク (タンク内水)	2次元軸対称モデル 幅 2.75m×高さ 19.25m (幅 2.75m×高さ 12.75m) 要素数：23×8 (要素数：16×8)		
岩盤	2次元軸対称モデル 幅 12.75m×高さ 42m 要素数：56×20		
温度固定	タンク壁面より 10m 位置の周辺岩盤 およびタンク底面より 22.75m の岩盤 ：温度一定(12℃)		
熱伝達境界	タンクと岩盤の境界全周 (タンク上面を断熱するため、外気への 熱伝達はないものと仮定した)		

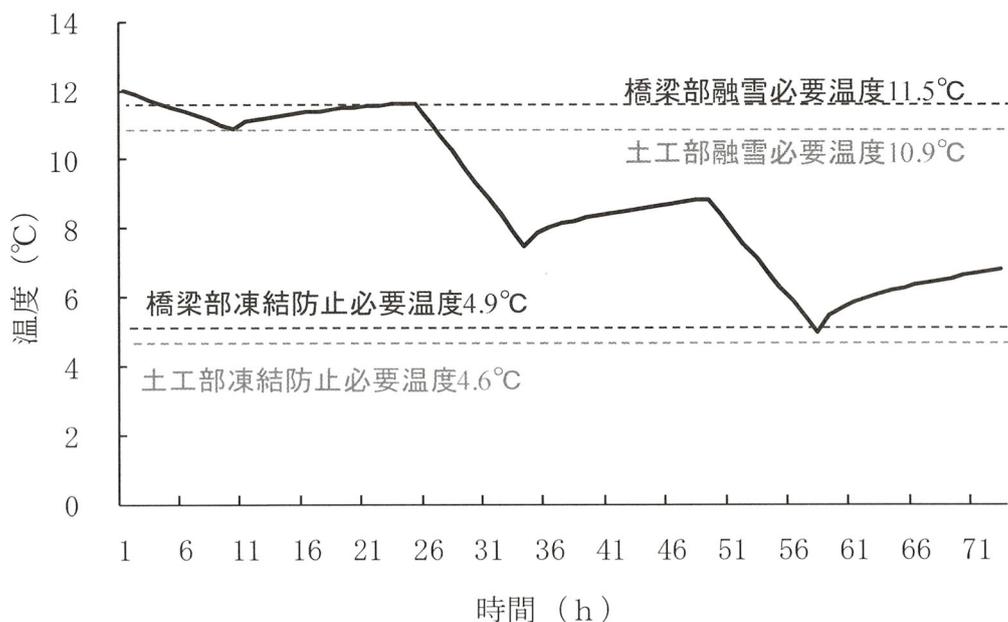


図-3.2.4 タンク内の平均水温の解析結果

3.2.2 地中熱地下備蓄タンクの構造

先述のように必要水量(225m³)が十分に備蓄できるよう、地中熱地下備蓄タンクの主形状は、図-3.2.5に示すように直径5.5m×高さ9.5m(深さ12.75m)とした。また、備蓄タンク設置位置は、先述の地熱計測結果より、有効に地熱採取可能な地下6.5m以深に設置した⁷⁾。同タンクは、小断面トンネルの支保構造¹³⁾を参考に設計・施工を行った。なお、小断面トンネルでは、一次覆工(吹付けコンクリート)の標準厚は、5~12cm程度であるが、ひび割れ漏水防止の観点から、同タンクでは20cm厚(支保パターンDIIに相当)とした。

集熱方策の一環として、タンク周辺に図-3.2.6に示すように鋼製ロックボルト(L=3.0m)を1.0m間隔で打設し、周辺岩盤からの採熱効率の向上を検討した。また、ロックボルト頭部は、備蓄タンク内水と接触することより、亜鉛メッキで防食したロックボルトを使用した。熱伝導を効率的に行なう目的で、水中ポンプにより循環させた水(融雪・凍結防止水)をタンク底部付近から上向きに放出させた。これは、タンク内水を循環させることで岩盤と水との温度差を大きくし、集熱効果を上げる目的である。なお、タンク内水をより循環しやすい構造とするため、タンク下端部は45°程度の角度を設けた。

地中熱地下備蓄タンク方式は地熱を必要量水量としてタンク内に備蓄し、路面の融雪・凍結防止に必要な時のみシステムを稼働させるものである。このため、タンク水温の外部流出および外の冷たい物質(水、空気等)の流入を防止する必要がある。そこで外気温による備蓄タンク内水温度の低下を防ぐため、土砂部タンク構造は、鋼材に比べて断熱効果が高い鉄筋コンクリート構造とした。なお、部材厚は、鉄筋コンクリートケーソンに準じて、0.5m以上とした¹⁴⁾。地表近傍より地下水混入防止のため、防水シートをタンク外周面に設置した。また、備蓄タンク内が外気温により冷却しないよう、備蓄タンク内面に保温材(グラスウールマット等)を設置した。また、岩盤部と土砂部の中間部は、備蓄タンク内水が、外的環境の影響を受けないよう保温蓋を設けた。保温蓋は、亜鉛メッキ加工の鋼材で作製し、断熱材として、発泡スチロールブロック(EPS)を設置し、内水面に発泡スチロールブロック(EPS)を浮かべた⁹⁾。

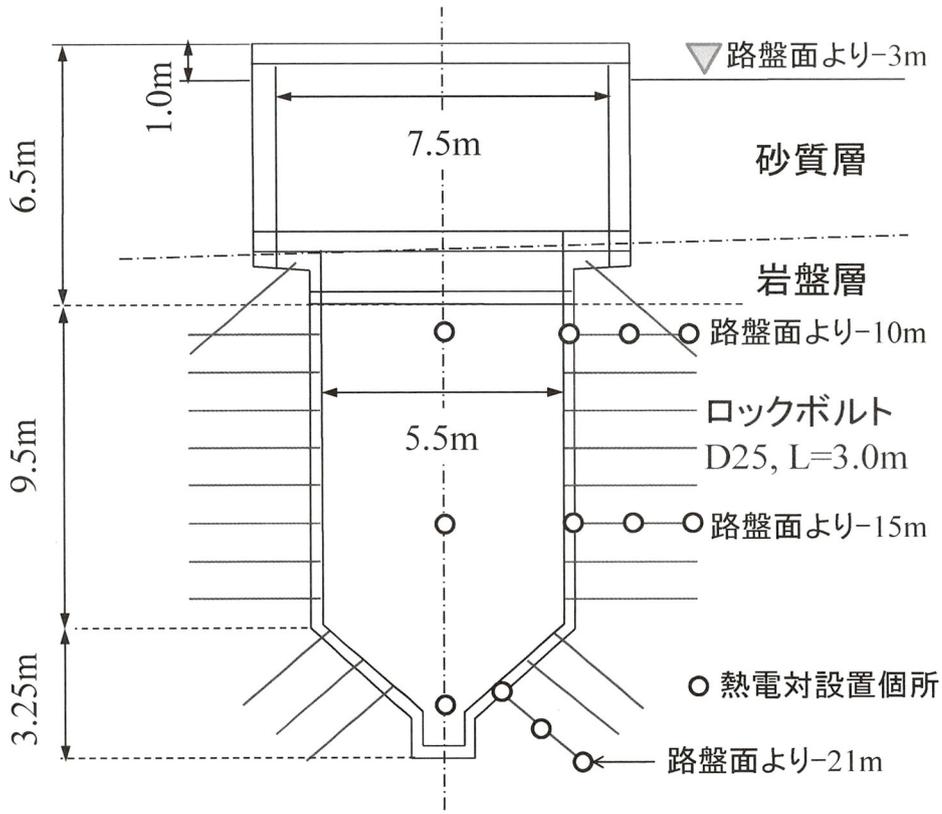


図-3.2.5 地中熱地下備蓄タンクの形状

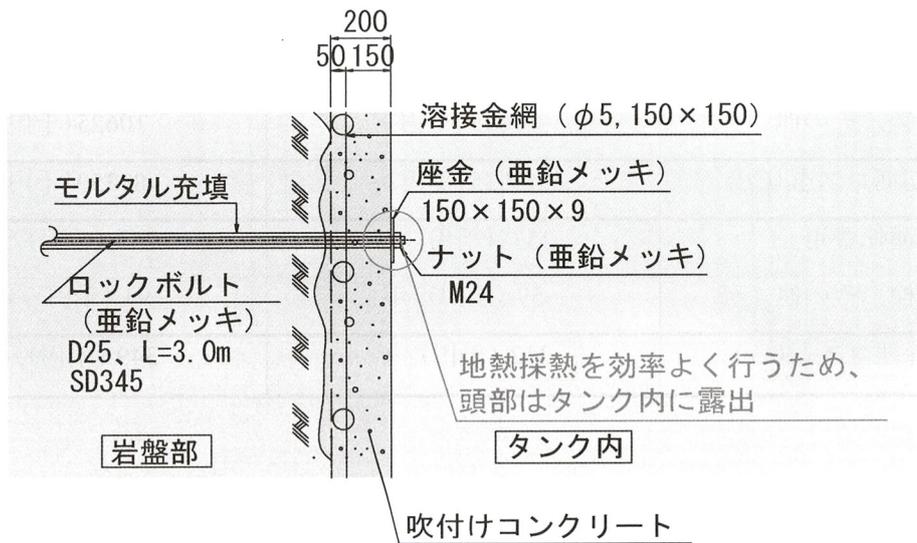


図-3.2.6 地中熱地下備蓄タンクのロックボルト概念図

3.2.3 パイプヒーティングシステムのコスト比較

ここで、地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの採用にあたり、建設初期コスト(C_i)および維持管理コスト(C_r)の試算を行った。比較のため、先述の地中熱交換杭方式パイプヒーティングシステムによる各コストの試算結果も表-3.2.5に示す。この結果に示すように、地中熱地下備蓄タンク方式では、多くの杭打設を必要としないことから、本研究で対象とした現地条件においては、地中熱交換杭方式に比べ、建設初期コスト(C_i)を約5割にまで低減することができる。さらに維持管理コスト(C_r)も、約1割のコスト低減が図れることから、設計耐用年数は電気を使用するポンプが15年程度で更新を必要とするが、この期間をより長くできる場合、経済的な優位性はいっそう大きなものになると予想される¹²⁾。

表-3.2.5 パイプヒーティングシステムのコスト比較

コスト	地中熱地下備蓄タンク	地中熱交換杭
熱源 (タンク、杭)	17508(千円)	44835(千円)
放熱パイプ, 接続パイプ	14502(千円)	26890(千円)
舗装, その他	10625(千円)	10625(千円)
建設初期コスト(C_i)	42635(千円)	82350(千円)
運転費用	253 (千円)/年	255 (千円)/年
点検, その他	59 (千円)/年	94 (千円)/年
維持管理コスト(C_r)	312 (千円)/年	349 (千円)/年

3.2.4 地中熱地下備蓄タンクの施工

備蓄タンク設置位置の伐開除根・整地を行い、備蓄タンクの掘削を行った。土砂部掘削はライナープレート土留めによるバックホウ掘削、岩盤部は発破により、深度1mごとに掘削を行った（写真-3.2.1）。排土はクラムシェルにより行った。また、深度1mごとに、支保工として20cm厚の吹付けコンクリートおよびロックボルト（D25×3m長）を打設した（写真-3.2.2、写真-3.2.3）。ロックボルト施工中に湧水があったため、排水しながら施工した（写真-3.2.4）。

岩盤部のタンクが完成した後、土砂部のオープン掘削を行いながらライナープレートを撤去し、RCタンクを構築した。

岩盤部のタンク内に足場支保工を設置し、鋼製中間蓋を設置した。鋼製中間蓋を支保として、RCタンク内に足場支保工を設置し、RC天蓋を構築した（写真-3.2.5）。

上記の工程により、備蓄タンクが完成した後、設備・電気工事（配管の接続、水中ポンプ設置、電機機器類設置等）を行った。さらに、足場支保工を撤去し、タンクに融雪必要水量を溜めた後、断熱構造とするため、EPSを水面に浮遊および鋼製中間蓋上面に設置することで完成とした¹²⁾。



写真-3.2.1 地下タンク施工状況（掘削）



写真-3.2.2 ロックボルト施工状況

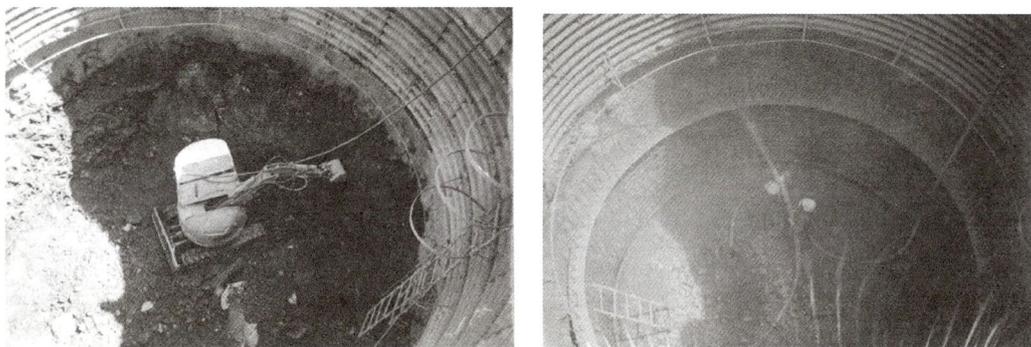


写真-3.2.3 地下タンク施工状況（排土，素吹き）

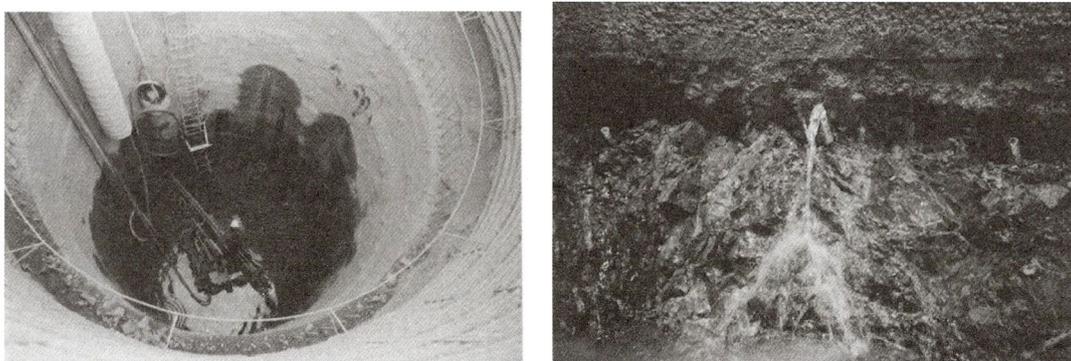


写真-3.2.4 湧水状況

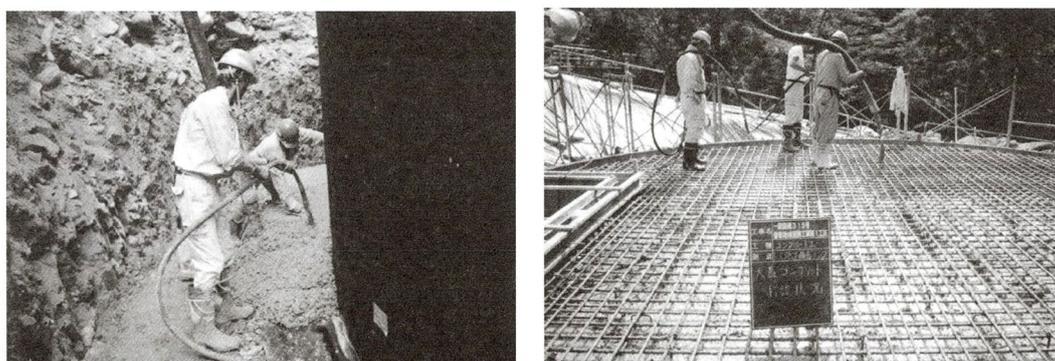


写真-3.2.5 地下タンク天蓋施工状況

3.3 パイプヒーティング舗装の施工

新しく設置される橋梁で、パイプヒーティングシステムを行う事例はいくつかみられるが¹⁵⁾、本例のように既設の橋梁にこのようなシステムを設置する事例はほとんどみられない。そこで、パイプヒーティングに用いるコンクリート版の構造について検討がされた事例^{16),17)}を参考に橋梁の構造を検討した。埋設したパイプは、図-3.3.1のように標準サイズで3.0×5.1mのパネル状になっており、そのパイプ間隔は150mmである。そのパイプに設置は、写真-3.3.1、写真-3.3.2および写真-3.3.3に示すように、本計画地における既設の路面舗装を切削し、鋼製のパイプ(15A)を埋設深50mmの位置に設置した。埋設したパイプの総延長は、約4600mにおよぶ⁷⁾。

なお、本システムでは一般的なコンクリート舗装においてもアスファルト舗装に比べ、耐久性や熱伝導率が高いことからこれを用いた。また、橋梁部のコンクリート舗装は、ポリプロピレン繊維補強コンクリートを用いることとし、ひび割れの抑制を図った。橋梁部、土工部のパイプヒーティング舗装のコンクリート配合を表-3.3.1に示す。

なお、本システムのパイプヒーティング舗装はコンクリート舗装であり、パイプは既往の研究¹⁸⁾から構造性能を低下させないことがわかっているため、その耐用年数は50年と想定した。これはパイプヒーティングを行うこととなった橋梁の建設時期とその橋梁の耐用年数を考慮すると、パイプヒーティング舗装の使用限界は、その橋梁の使用限界の方が早いものと判断した。

表-3.3.1 舗装コンクリートの配合条件

	W/C	単体量 (kg/m ³)			補強繊維 (kg/m ³)
		C	S	G	
橋梁部	0.43	363	716	1091	1.0
土工部	0.43	342	660	1191	—

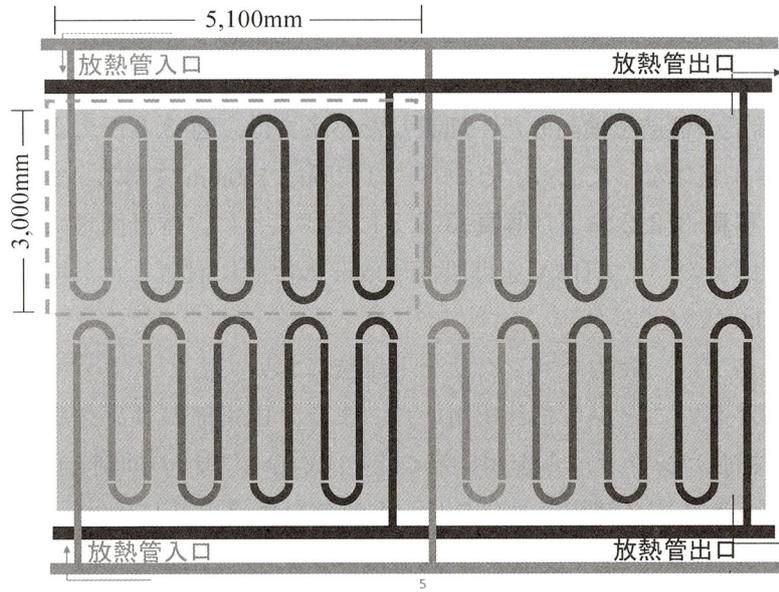


図-3.3.1 パイプヒーティング舗装の概念図



写真-3.3.1 土工部のパイプヒーティングパネル設置状況



写真-3.3.2 片車線でのパイプヒーティングパネル設置状況

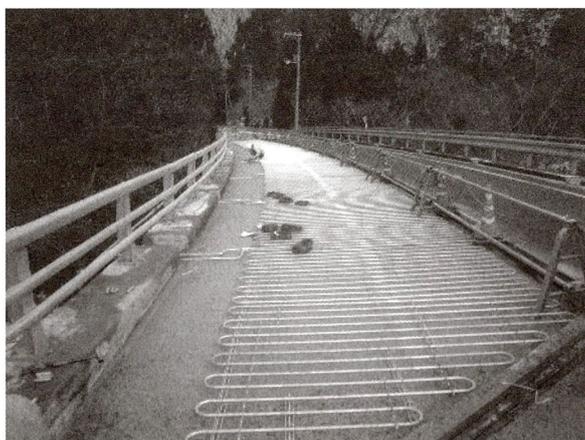


写真-3.3.3 橋梁部のパイプヒーティングパネル設置状況

3.4 第3章のまとめ

第3章では、自然未利用エネルギーのひとつである地下10m程度の地中熱を有効活用した地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの概念を示すとともに、その設計・施工に関する基礎的データを示した。その設計条件となった現地の地理的条件および気象条件は次の通りである。

- ① 地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの計画地となった、一般国道315号の葉の内3号橋から同4号橋付近は、標高約570mの山間部であり、計画地周辺はS字カーブ区間にあり、道路線形は縦断勾配4.2%である。
- ② 中国地方における山間部の冬期における気候は、豪雪地帯と呼ばれる地域と比べて降雪量は比較的少なく、長時間におよぶ降雪はあまりみられない。ところが、昼間は比較的温暖な気温となるものの、夜間には、 -10°C 程度まで気温は降下し、路面は積雪・凍結状態となる特徴を有している。
- ③ 冬用タイヤの装着率があまり高くない本計画地では、路面積雪・凍結によりスリップ事故が多発していた。
- ④ 融雪装置の設置を必要とする箇所は、橋梁部分であるため、路肩はなく、かつ、周辺は保安林であるため、多数の探熱用のボーリングができなかった。
- ⑤ 河川が横にあるため、凍結防止剤の散布は塩化物が河川に流れ出る恐れがあるため、推奨できるものではなかった。
- ⑥ パイプヒーティングについて新設橋梁への適用事例は存在するが、既設橋梁への適用事例は見つからなかった。
- ⑦ 葉の内3号橋は昭和49年に、葉の内4号橋は昭和50年に竣工した橋梁である。非常に古い橋梁であるため、架設当時の図面などが存在しなかった。

このような背景から自然未利用エネルギーのひとつである地下10m程度の地中熱を有効活用した地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの概念を示した。それに至った過程をまとめると以下の通りである。

- A) 山岳トンネルの外周地熱を熱源としてトンネル坑口部およびトンネルに近傍する橋梁のパイプヒーティングを行うことのコスト評価を行った研究^{19),20),21)}があり、計画地における探熱方法の参考となった。
- B) 温水パイプを橋梁床版に埋め込み、その温水パイプに地下水を利用し、融雪効果を評価した研究^{10),22)}が報告されており、計画地における地下水活用の参考となった。
- C) パイプヒーティング機能を有するコンクリート版のライフサイクルコスト評価を行い、かつ、コンクリート版に埋設するパイプが構造部材となる、あるいは埋設するパイプ

第3章 地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの開発

は構造性能を低下させないことを示した研究^{17),18),23),24)}があったことから、既設橋梁へのパイプヒーティング舗装設置の参考となった。

このような背景から自地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの設計・施工に関する基礎的データを示した。その内容をまとめると以下の通りである。

- (1) 地中熱地下備蓄タンク近傍の年間地熱計測結果より、路盤面より6m程度以深では地中温度はほぼ一定であった。このため比較的地表より比較的浅い位置であっても、路面融雪・凍結防止の有効な熱源となりえる。
- (2) 数値シミュレーションの結果によると、この地中熱を利用した地中熱地下備蓄タンク方式は、同地において融雪・凍結防止は可能と判断された。
- (3) 本システムは、従来工法と比較して、イニシャルコストを約50%、ランニングコストを約10%縮減することができることを示した。
- (4) 既設橋梁へのパイプヒーティング路面の設置事例として、その設計概要と工事概要をまとめて示した。

3.5 参考文献

- 1) 国土交通省：道路統計年報-2007年版-, 2007.
- 2) 山口県土木建築部道路整備課：山口県の道路現況（平成22年4月1日現在），2010.
- 3) 山口県土木建築部：平成17年度道路交通センサス 一般交通量調査総括表，2005.
- 4) 菖蒲迫正之，安村成史，永井泉治，吉武 勇：地中熱地下備蓄タンク方式による路面融雪の実用化に関する検討，寒地技術論文・報告集Vol.20，pp.198-204，2004.
- 5) 森山和馬，林 拓男：地中熱利用のBHES融雪システム，自然・未利用エネルギーによる雪寒対策シンポジウム論文集，pp.9-14，1999.
- 6) 雪センター：「平成14年度国土交通省における雪に関する施策概要資料」，2002.
- 7) 安村成史，志賀亮子，菖蒲迫正之，吉武 勇：地下タンク内に保存した地下水を用いるパイプヒーティングシステムの温度特性，土木学会論文集G，Vol.66，No.4，pp.211-221，2010.
- 8) 建設省北陸地方建設局：「路面消・融雪施設等設計要領」，2000.
- 9) 菖蒲迫正之，安村成史，石田純一，海野達夫，永井泉治，吉武 勇：地中熱地下備蓄タンク周辺の恒温層地熱とタンク内水温，寒地技術論文・報告集：Vol.21，pp.575-580，2005.
- 10) 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床版の融雪・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.
- 11) 菖蒲迫正之，安村成史，石田純一，吉武 勇：無散水路面融雪に用いる地中熱地下備蓄タンクの設計，土木学会第61回年次学術講演会，VI-227，pp.453-454，2006.
- 12) Isamu YOSHITAKE, Narifumi YASUMURA, Masayuki SYOBUZAKO and Andrew Scanlon: Pipe Heating System with Underground Water Tank for Snow Thawing and Ice Prevention on Roads and Bridge Decks, *Journal of Cold Regions Engineering, ASCE*, 掲載決定（プレビュー版 オンライン公開）
- 13) 日本道路協会：「道路トンネル技術基準(構造編)・同解説」2003.
- 14) 日本道路協会：道路橋示方書IV下部構造編，2002.3.
- 15) 例えば 宮本重信，竹内正紀：橋梁基礎杭を利用した地中への季節間蓄熱融雪，土木学会論文集，No.797/VI-36，pp.51-62，2005.
- 16) 吉武 勇，辻 和秀，三村陽一，山口哲矢，浜田純夫：パイプヒーティングの構造設計に用いるコンクリート版の要素実験，土木学会論文集，No.770/VI-64，pp.53-63，2004.
- 17) 辻 和秀，吉武 勇，谷本俊夫，浜田純夫：パイプヒーティング機能を有するコンクリート版のライフサイクルコスト，土木学会論文集，No.805/VI-69，pp.131-136，2005.
- 18) 辻 和秀：パイプヒーティング用コンクリート版の構造特性とライフサイクルコストに関する研究，山口大学博士論文，2006.
- 19) 永井泉治：山岳トンネルの熱エネルギーを利用したパイプヒーティングシステムの設計

- に関する研究，山口大学博士論文，2002.
- 20) 永井泉治，吉武 勇，中村秀明，浜田純夫：山岳トンネルにおける湧水を利用した橋梁の融雪実験とその適用性，土木学会論文集，No.665/VI-49，pp.183-188，2000.
 - 21) 永井泉治，吉武 勇，仁尾彰一郎，浜田純夫：パイプヒーティングによる路面融雪のためのトンネル坑内加温実験とコスト評価，土木学会論文集，No.707/VI-55，pp.219-224，2002.
 - 22) 谷本俊夫：温水パイプによる橋梁床版の融雪・凍結防止に関する研究，山口大学博士論文，2000.
 - 23) 吉武 勇，辻 和秀，三村陽一，山口哲矢，浜田純夫：パイプヒーティングの構造設計に用いるコンクリート版の要素実験，土木学会論文集，No.770/VI-64，pp.53-63，2004.
 - 24) 辻 和秀，三村陽一，吉武 勇，浜田純夫：凍結防止剤の塩害を受けるコンクリート版のライフサイクルコスト，土木学会論文集，No.784/VI-66，pp.65-75，2005.

第4章

地中熱地下備蓄タンク 方式パイプヒーティング システムの運転

第4章 地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの運転

4.1 地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの概要

地中熱地下備蓄タンク方式によるパイプヒーティングシステムについて、2005年11月に完成し、2005年12月から運転を開始した^{1),2),3)}。本システムの完成写真を写真-4.1.1と写真-4.1.2に示す。また、本システムの地下備蓄タンクの完成写真を写真-4.1.3、写真-4.1.4、写真-4.1.5に示す。本システムの地下備蓄タンクは外気温による備蓄タンク内水温度の低下を防ぐため、断熱材として、発泡スチロールブロック(EPS)を設置した(写真-4.1.6)。さらに、内水面に発泡スチロールブロック(EPS)を浮かべ、断熱構造とした(写真-4.1.7)⁴⁾。なお、備蓄タンク内に雨水、雪、ゴミ等の侵入を防ぐとともに、人が転落事故を起こさないよう、RC床版構造の天板を設けた(写真-4.1.8)⁵⁾。



写真-4.1.1 本システムの完成写真

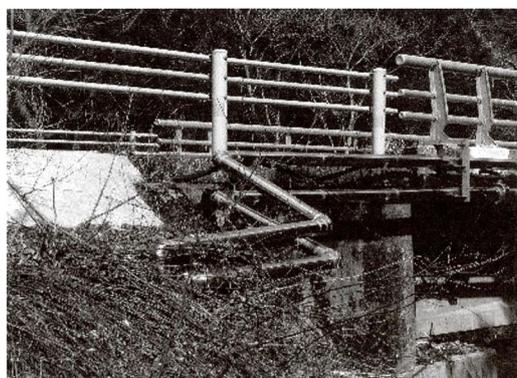


写真-4.1.2 本システムの完成写真（配管部分）



写真-4.1.3 本システムの完成写真（タンク部分）

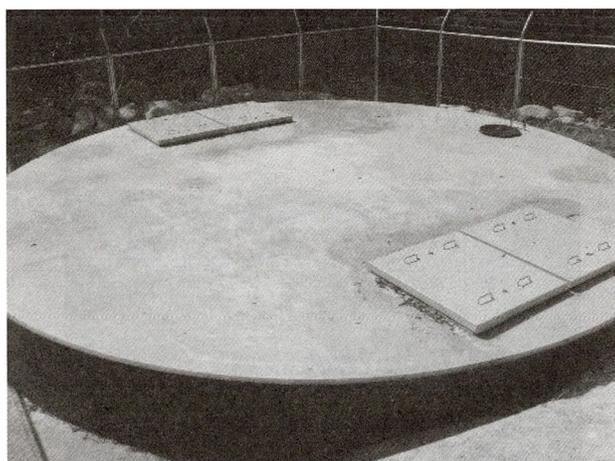


写真-4.1.4 本システムの完成写真（タンク上面）

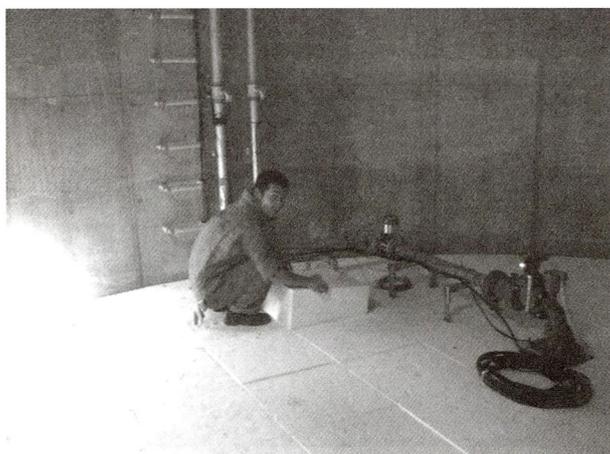


写真-4.1.5 タンク内部の状況



写真-4.1.6 保温蓋設置状況



写真-4.1.7 内水面 EPS 浮遊状況

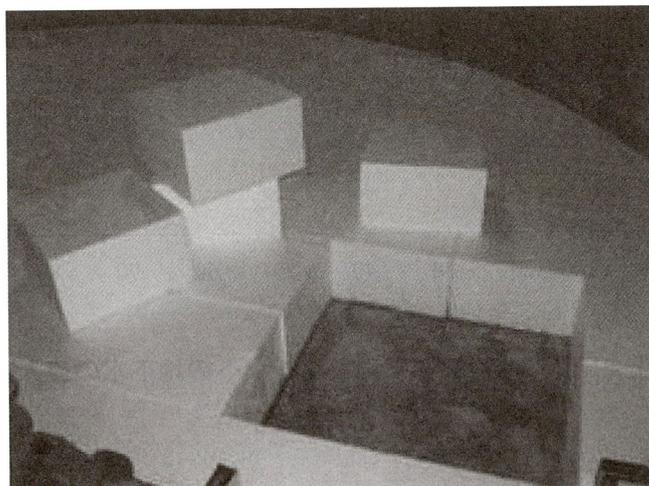


写真-4.1.8 タンク天板の状況

地下備蓄タンク内に支保工として打設したロックボルト頭部より、地下水が備蓄タンク内に流入していた。2005年6月～10月までその地下水の温度を計測した。その結果、外気温および付近の河川水温度に拘わらず恒温層温度と同じ12.5℃程度であった。このため、この地下水は恒温層の地盤の中を流れており、冬期も一定の温度であることが窺える。

システム稼動時におけるタンク内の水温変化シミュレーションを行っている。これによると、1992年～2002年の最大連続降雪時間である9時間が3日間連続した場合においても、貯留したタンク内水のみで、凍結防止熱量は確保できる結果となっている（第3章参照）。しかしながら実際には、このようなタンク内水に加え、比較的温かい地下水が備蓄タンク内に流入しているため、冬季のシステム稼動時には、設計段階での熱源能力を上回ることが予想できる。そこで本研究では、この地下水の流入量について実験的調査を試みた。

恒温層を流れる温かい地下水が、備蓄タンク内に流入している量を計測した。これは、備蓄タンク内水を全て排出したのち、地下水の流入のみで備蓄タンク内が満水となる時間を計測したものである。

図-4.1.1に示すように、90時間程度でほぼ備蓄タンク（容量230m³）内は満水となる結果が得られた。設計時におけるシミュレーションでも十分な路面融雪・凍結防止熱量を有しているが、それに加え、恒温層で温められた地下水が流入することで、当初設計において想定した連続降雪日数3日以上の降雪があったとしても、ある程度融雪・凍結防止は可能であると推察できる⁹⁾。

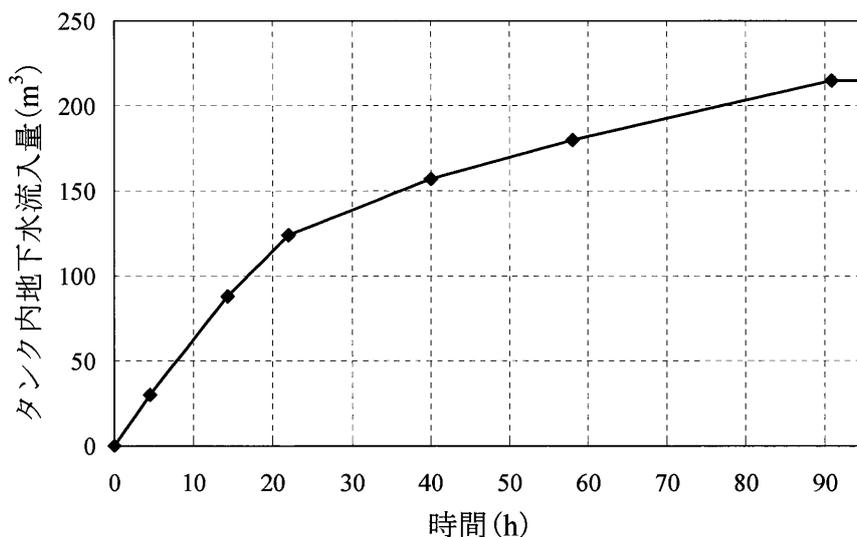


図-4.1.1 地中熱地下備蓄タンクへの地下水の流入

4.2 パイプヒーティングシステムの運転

地中熱地下備蓄タンク方式によるパイプヒーティングシステムについて、2005年冬期より供用を開始した⁶⁾。このシステムの基礎的データを収集するため、地下備蓄タンク内、路面内、調査ボーリング孔内など、様々なポイントに熱電対を68測点設置した⁷⁾。各ポイントの温度は、30分間隔で自動計測を行った。本システムに設置した水中ポンプは稼動制御機と接続されており、降雪、気温、路面温度、水分センサーにより制御が可能である。本システム供用開始時は、写真-4.2.1示す制御装置により、外気温が+3℃以下、あるいは橋梁部の路面温度が+1℃以下となった場合にシステムが自動制御するように設定した⁸⁾。

制御装置の外観を写真-4.2.2に示す。また、本システムが作動しているときの制御装置の表示状況を写真-4.2.3および写真-4.2.4に示す。

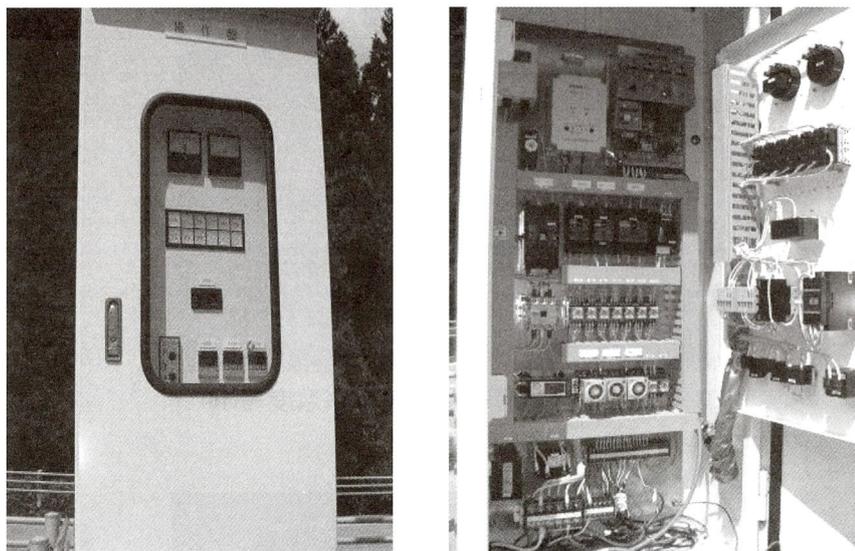


写真-4.2.1 自動運転制御装置

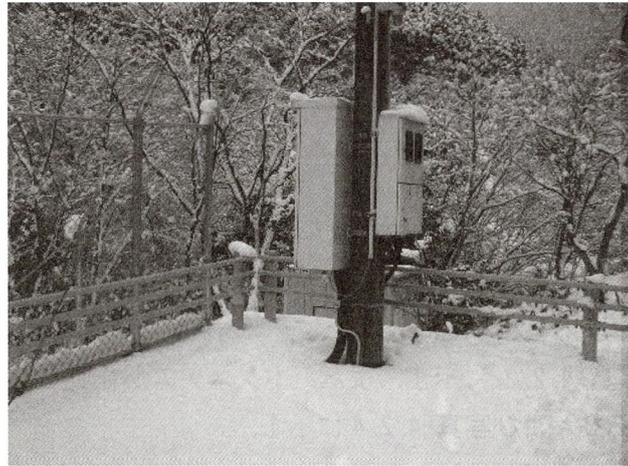


写真-4.2.2 自動運転制御装置

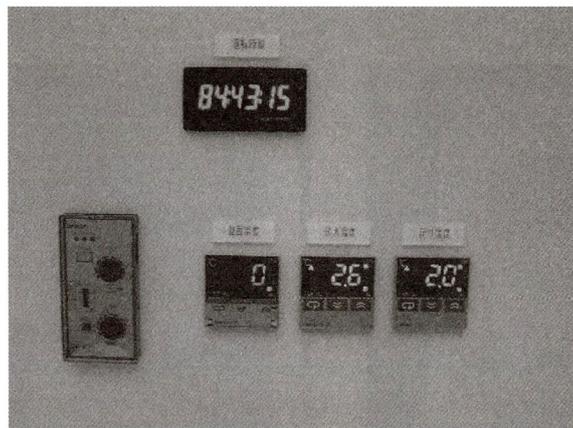


写真-4.2.3 自動運転制御装置（温度表示）

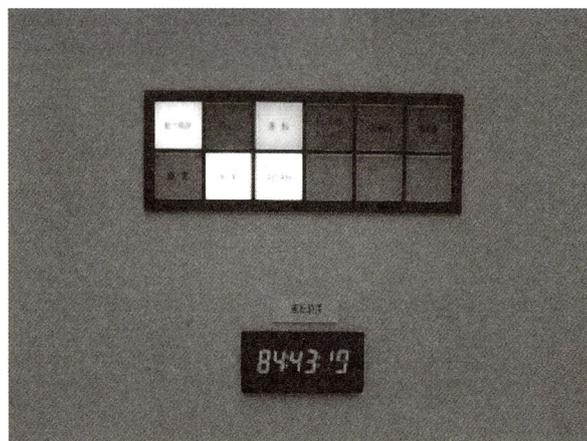


写真-4.2.4 自動運転制御装置（運転状況表示）

4.3 パイプヒーティングシステムの路面融雪効果

4.3.1 通常運転時の状況

本システム完成後で降雪のない時の写真を写真-4.3.1および写真-4.3.2に示す。本システムの標準的な運転例として、供用開始後である2005年12月における冬期運転時の路面状況を写真-4.3.3および写真-4.3.4に示す。この写真の例に示すように、一般路面と同様に、パイプヒーティングを設置した橋梁上にはほとんど残雪はなく、十分に融雪できていた^{8),9)}。なお、本システムを設置した区間に近接する複数の橋梁では、パイプヒーティングのような路面融雪施設がないため、写真-4.3.5のように路面には残雪が圧雪・圧着し、アイスバーンが発生した。このため、アイスバーンの剥ぎ取り作業および塩化カルシウム散布を行うこととなった。これに対し、本システムを設置した区間においては、このような路面管理作業が不要であったことから、冬期路面の維持管理業務における省力化にも貢献できる技術となる可能性が窺えた¹⁰⁾。



写真-4.3.1 パイプヒーティング路面（葉の内3号橋）



写真-4.3.2 パイプヒーティング路面（葉の内4号橋）



写真-4.3.3 標準運転時の路面状況（システム稼働中）



写真-4.3.4 標準運転時の路面状況（システム停止後）



写真-4.3.5 周辺橋梁の路面状況

4.3.2 異状降雪時の状況

本システムの設計に用いた気象データから、最長継続降雪時間を9時間としており、これを超える長時間の連続した運転は想定していなかった。

しかし、本システムを供用開始した最初の冬期において、「平成18年豪雪」^{11),12),13)}と命名されるほどの全国的な記録的寒波が到来した。山口県においては、特に2005年12月に、この寒波の影響を大きく受けた。この寒波においては、本計画地の外気温はほとんど0℃以下であり、約7日間(2005年12月12日～18日)の連続的な降雪で設計値を大きく上回るものであった。

2005年12月の日降雪量を図-4.3.1に示す。2005年12月14日には31cm/日の降雪があった。同日における降雪直後の路面状況を写真-4.3.6に示す。また、降雪後で除雪直後の写真を写真-4.3.7に示す。また、この降雪後(約3時間後)における路面状況を写真-4.3.8および写真-4.3.9に示す。また、この降雪後(約6時間後)における路面状況を写真-4.3.10および写真-4.3.11、写真-4.3.12に示す。

写真-4.3.6に示すように、同日のような降雪に対しては、パイプヒーティングを設置した区間においても、一般路面と同様に多くの残雪がみられた。しかしながら、これから6時間後においては、パイプヒーティングを設置した路面上の雪は、ほぼ完全に融けており、コンクリート舗装が露出していた(写真-4.3.12)。写真-4.3.13および写真-4.3.14は、パイプヒーティングの設置区間と設置していない区間の境界を撮影したものである。パイプヒーティング設置区間外の路面上には残雪しているが、設置区間路面上はほぼ完全に融雪できていた¹⁴⁾。

写真-4.3.14に示す境界部近傍を、熱赤外線カメラを用いて撮影した(写真-4.3.15)。これらの写真に示すように、パイプヒーティングが設置されている橋梁部路面では、地熱供給のある一般路面と同時、もしくは若干早く無雪状態となるため、路面状態の格差に起因した積雪・凍結による車両のスリップ事故の低減に寄与できるものと考えられる⁴⁾。

なお、本システムを設置した区間に近接する一般国道315号の葉の内1号橋および同2号橋では、パイプヒーティングのような路面融雪施設がないため、写真-4.3.5のように路面には圧雪・圧着し、厚さ20cm程度のアイスバーンが発生した。このため、アイスバーンの剥ぎ取り作業および塩化カルシウム散布を行うこととなった。これに対し、本システムを設置した区間においては、このような路面管理作業が不要であったことから、冬期路面の維持管理業務における省力化にも大きく貢献できる技術となる可能性が窺えた¹⁰⁾。

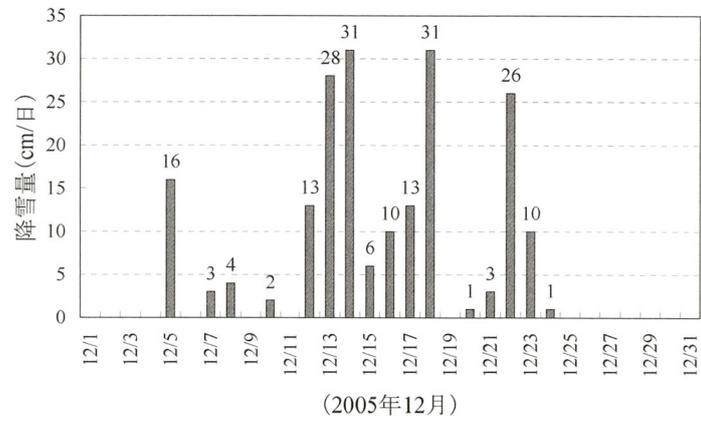


図-4.3.1 2005年12月の日降雪量



写真-4.3.6 降雪直後の路面状況



写真-4.3.7 除雪後の路面状況

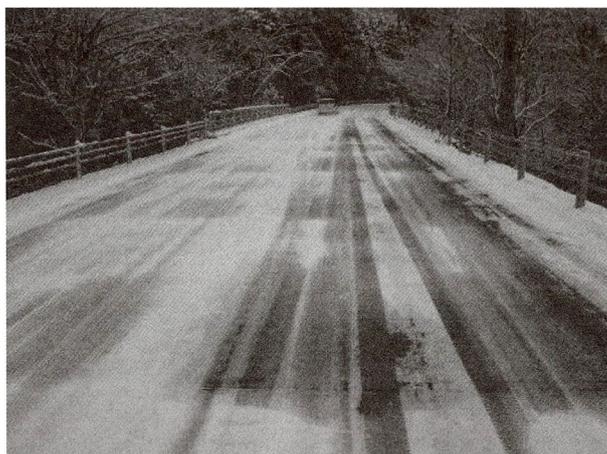


図-4.3.8 降雪後の路面状況(約3時間後)

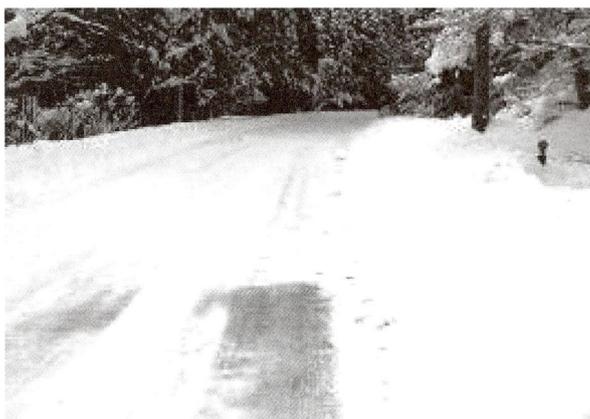


写真-4.3.9 降雪後の路面状況(約3時間後)



写真-4.3.10 降雪後の路面状況(約6時間後)



写真-4.3.11 降雪後の路面状況(約6時間後)



写真-4.3.12 降雪後の路面状況(約6時間後)



写真-4.3.13 降雪後の路面状況（2005年12月14日撮影）



写真-4.3.14 パイプヒーティング有無の境界（2005年12月14日撮影）

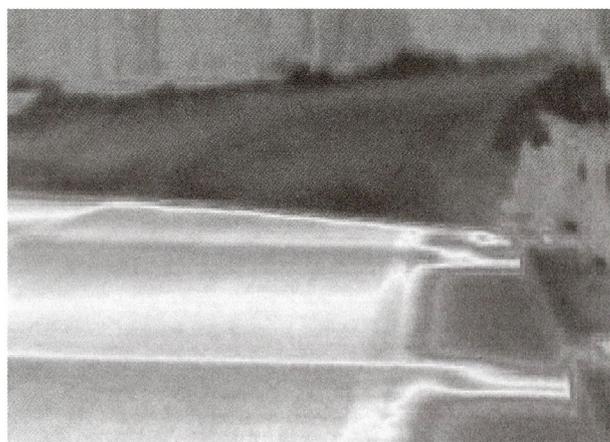


写真-4.3.15 設置区間起点側の熱赤外線写真（2005年12月14日撮影）

4.4 第4章のまとめ

第4章では、完成した地中熱地下備蓄タンクパイプヒーティングシステムの概要および運転方法を概説し、その融雪・凍結防止効果について示した。本章の主な内容は以下の通りである。

- (1) 本システムの地中熱地下備蓄タンクは、容量 230m³ の RC タンクであり、外気温による備蓄タンク内水温度の低下を防ぐため、断熱材として、発泡スチロールブロック(EPS)を設置し、内水面に発砲スチロールブロック(EPS)を浮かべ、断熱構造とした。
- (2) 地中熱と地下備蓄タンク内に支保工として打設したロックボルトおよび頭部より流入する地下水があり、その流入する地下水は熱源を確保に寄与するものであることを示した。
- (3) 比較的温暖な地方において、地下 10m 程度の恒温層に構築したタンク内に、路面融雪に要する熱量(地下水)を備蓄保温し、降雪時など必要に応じてパイプヒーティングシステムを稼働することで、経済的かつ効率的な路面融雪を行うことができることを示した。
- (4) 地中熱地下備蓄タンク方式によるパイプヒーティングシステムについて、2005年12月から運転を開始した。開発したシステムでは、路面融雪に要する熱量(地下水)を地下タンク内に備蓄保温し、降雪・路面凍結時など必要に応じて自動的に水中ポンプが稼働する。実際の降雪時における運転の結果、本システム運転による路面融雪効果および凍結防止効果について示した。また、近接する橋梁での残雪と比較しても、本システムの稼働が融雪・凍結防止効果があることを示した。
- (5) 2005年12月の豪雪では設計値を上回る連続した降雪や連続した低気温が生じたが、橋梁部においても融雪・凍結防止効果がみられ、少なくとも地中熱が供給される一般路面よりも先に無雪状態にできたことを示した。

4.5 参考文献

- 1) 日経BP社：技術フラッシュ，日経コンストラクション，2006年3月10日号，pp.20-21，2006.
- 2) 中建日報社：地中熱地下備蓄タンク方式路面融雪システムを開発，中建日報，2006年2月6日号，2006.
- 3) (株)日刊建設通信新聞社：新製品・新工法情報，「地中熱地下備蓄タンク方式」による無散水路面融雪システム，積算資料SUPPORT，2006年4月号，2006.
- 4) Isamu YOSHITAKE, Narifumi YASUMURA, Masayuki SYOBUZAKO and Andrew Scanlon: Pipe Heating System with Underground Water Tank for Snow Thawing and Ice Prevention on Roads and Bridge Decks, *Journal of Cold Regions Engineering*, ASCE, 掲載決定 (プレビュー版 オンライン公開)
- 5) 菖蒲迫正之, 安村成史, 石田純一, 海野達夫, 永井泉治, 吉武 勇: 地中熱地下備蓄タンク周辺の恒温層地熱とタンク内水温, 寒地技術論文・報告集, Vol.21, pp.575-580, 2005.
- 6) 安村成史, 石田純一, 菖蒲迫正之, 吉武 勇: 山口県における無散水路面融雪施設の冬期道路管理への活用, 土木学会第61回年次学術講演会, VI-228, pp.455-456, 2006.
- 7) Narifumi YASUMURA, Ryoko SHIGA, Katsuki AZUMA, Masayuki SYOBUZAKO and Isamu YOSHITAKE: Development of Pipe Heating System with Geo-Thermal Tank and Its Rational Maintenance, *Proceedings of Snow Engineering VI*, No.6, 2008.
- 8) 菖蒲迫正之, 安村成史, 石田純一, 吉武 勇: 地中熱地下備蓄タンクによる路面融雪効果, 寒地技術論文・報告集, Vol.22, pp.234-238, 2006.
- 9) 吉武 勇, 安村成史: 比較的温暖な中国地方における冬期路面管理の実例と課題, 日本雪工学会誌, Vol.24, No.4, pp.304-305, 2008.
- 10) 安村成史, 志賀亮子, 菖蒲迫正之, 吉武 勇: 地下タンク内に保存した地下水を用いるパイプヒーティングシステムの温度特性, 土木学会論文集G, Vol.66, No.4, pp.211-221, 2010.
- 11) 古堅辰一, 松村光太郎, 荒木紀人, 佐久本光章, 安岡真希: 関西・中国地方の「平成18年豪雪」における交通障害に関する研究, 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, Vol. 2006, p.112, 2006.
- 12) 福原輝幸, 金澤文彦: 平成18年豪雪がもたらした福井の冬季道路交通問題, 日本雪工学会誌, Vol.22, No.3, pp.78-83, 2006.
- 13) 国土交通省河川局防災課災害対策室: 「平成18年豪雪」について, 土木学会誌, Vol.91, pp.38-39, 2006.
- 14) 安村成史, 梅田高正, 菖蒲迫正之, 東 克樹, 吉武 勇: 冬期におけるパイプヒーティングの稼働温度制御と路面変状, 土木学会第62回年次学術講演会, VII -102, 2007.

第5章

タンク内温度の計測と 効率的な運転手法の検討

第5章 タンク内温度の計測と効率的な運転手法の検討

5.1 温度の計測方法

地中熱地下備蓄タンクの貯留水やパイプヒーティング路面、タンク周辺岩盤の温度変化を把握するため、既設の地中熱地下備蓄タンク内、調査ボーリング孔内およびその周辺、ロックボルト周辺、路面内に熱電対を計68点設置した。地中熱地下備蓄タンクおよび調査ボーリング孔内およびその周辺の熱電対設置位置を図-5.1.1に示す。また、パイプヒーティング舗装内の熱電対の設置箇所を図-5.1.2にパイプヒーティング舗装内の熱電対と放熱管との位置関係を図-5.1.3に示す。また、写真-5.1.1に地下備蓄タンク内の熱電対の設置位置を、写真-5.1.2にパイプヒーティング舗装内の熱電対設置位置を示す。

これらの熱電対を用いて、継続的にタンク内の水温、タンク周辺の岩盤温度、橋梁部路面内の温度、土工部路面内の温度、外気温について測定を行った。この温度計測は調査ボーリング孔および路面内については2004年3月～2009年3月まで、タンク内およびロックボルト周辺については2005年9月～2009年3月まで計測を行った。なお、調査ボーリング孔はタンクとパイプヒーティングを行う道路との間に位置し、タンクの端部からおよそ10m離れている¹⁾。

本研究では、ここで得られる温度データのうち、タンク内水温、外気温の変動をほとんど受けない深さと考えられる路盤面から21m深にあるタンク壁面およびロックボルト内、調査ボーリング孔内の温度変化に着目することとした。

本システムは、2005年11月より運用を開始したが、その後においても基礎的データを収集するため、タンク内、路面内、調査ボーリングによる地盤内など、様々なポイントに熱電対を計68点設置し、継続的に温度測定を行い、本システムの近傍に設置した観測小屋(写真-5.1.3)にて、状況に応じて10～30分間隔で自動温度計測を行った。その後、十分なデータを得ることができたため、2009年3月に計測を終了した²⁾。

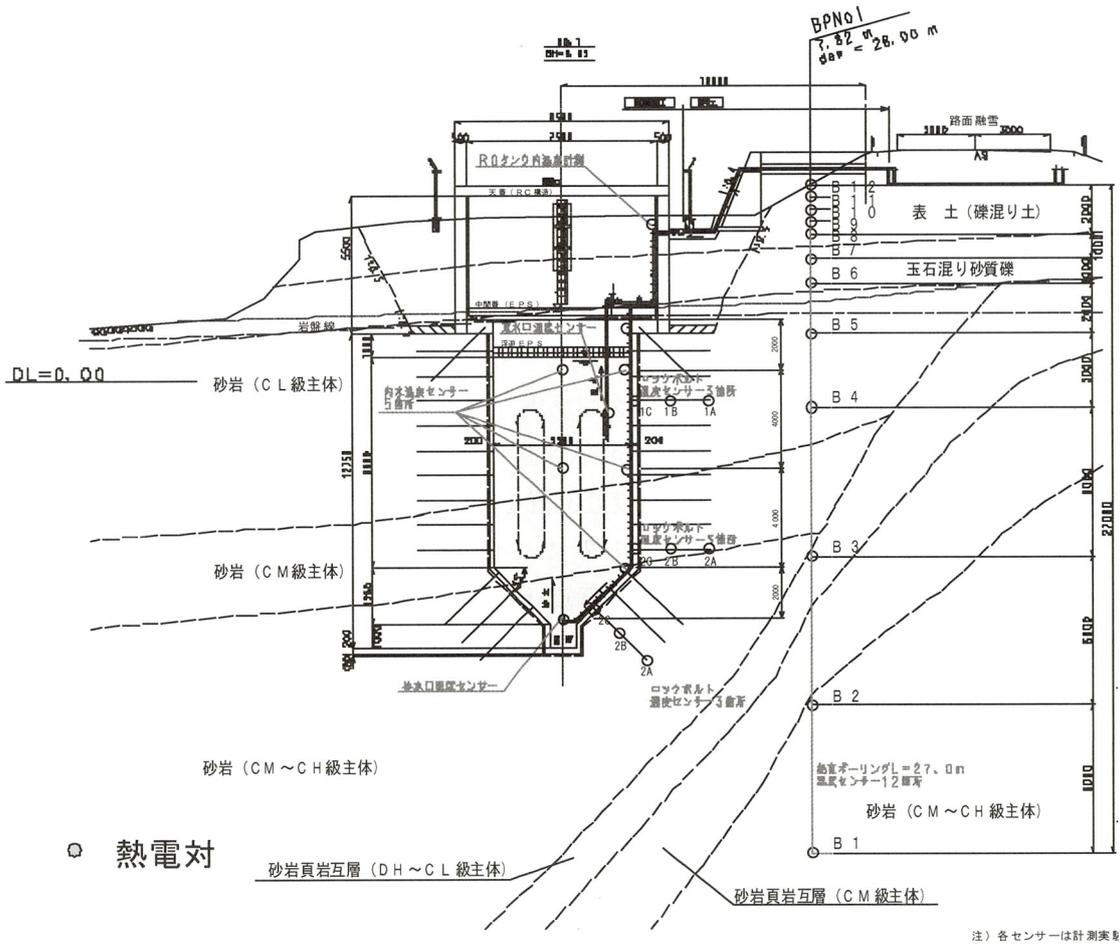


図-5.1.1 タンク周辺の熱電対設置個所

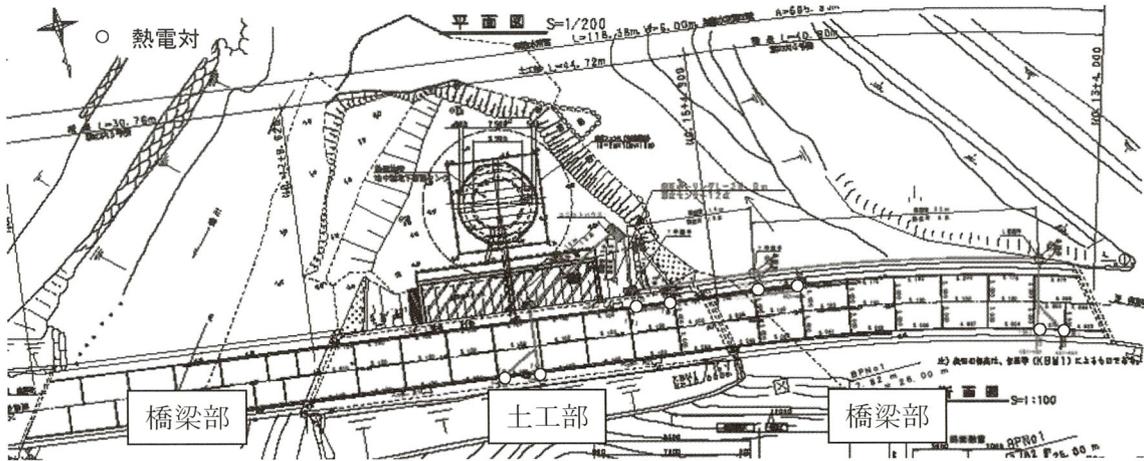


図-5.1.2 パイプヒーティング路面の熱電対設置個所

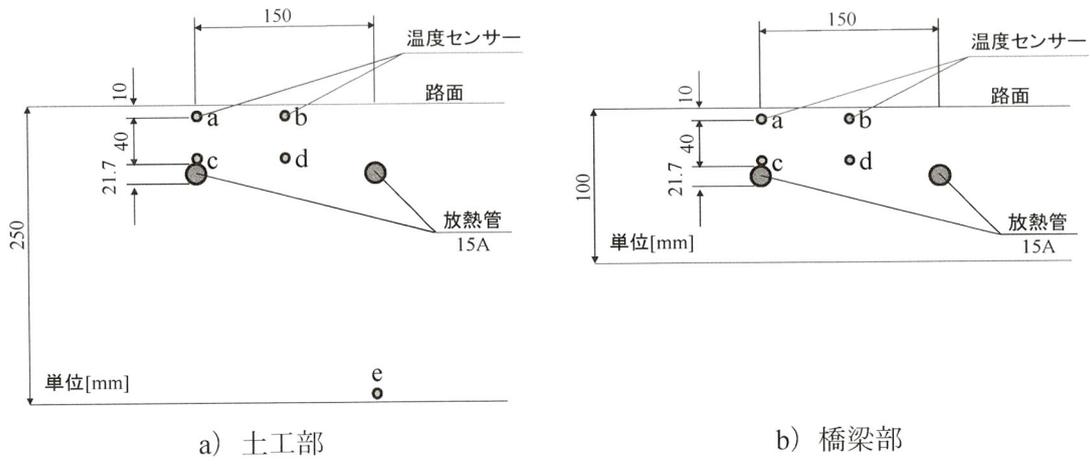


図-5.1.3 パイプヒーティング舗装内の熱電対設置位置

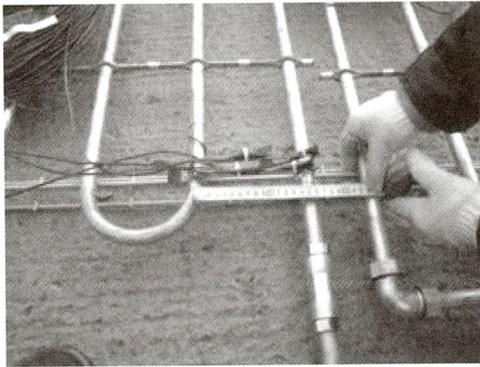


写真-5.1.1 路面内への熱電対設置状況



写真-5.1.2 タンク内の熱電対設置状況

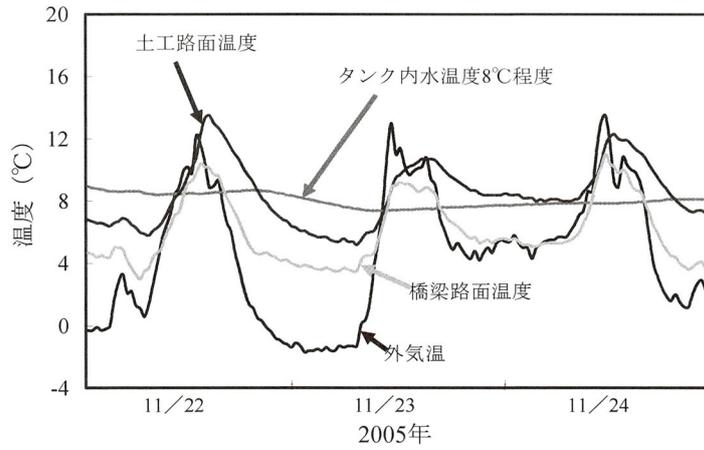


写真-5.1.3 観測小屋

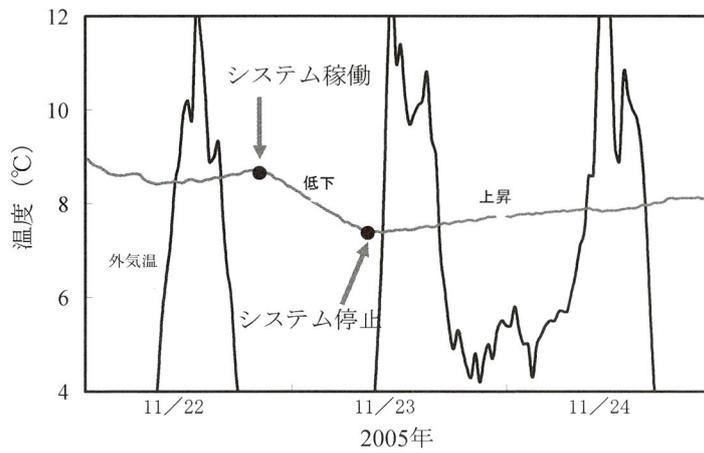
5.2 通常運転時のタンク内水温の変化

本システムは設置した地域の気候特性上、夜間から早朝にかけて気温が氷点下となり、昼間は比較的温暖な状況である。そのため主に夜間運転し、昼間時に停止する。タンク内の水温については、本システムの稼働に伴い水温が低下し、停止時に水温が上昇する。その一例として、2005年11月22日～24日における冬期標準運転時のタンク内水温、および外気温・路面温度の変化を図-5.2.1 a) b)に示す。本システムでは、路面内に埋設したパイプを通じて冷却された循環水がタンク内に再び戻るため、タンク内水温は一時的に低下するが、システム停止時には、周囲の地熱等によりタンク内水は温められた³⁾。

一方で、本システムの運用開始前である2005年9月から11月までのタンク内水温について検証した。その一例として2005年11月14日～16日におけるパイプヒーティングシステムの非稼働時のタンク内水温、および外気温・路面温度の変化を図-5.2.2に示す。この結果より、外気温が+3℃まで低下してもタンク内水温にはほとんど変化がみられず、ほぼタンク内初期温度の+15℃を保持できていた。また、そのほかの期間についてもタンク内水温にはほとんど変化がみられなかった²⁾。



a) 各温度とタンク内水温変化



b) 稼働に伴うタンク内水温の低下と上昇

図-5.2.1 冬期標準運転時のタンク内水温

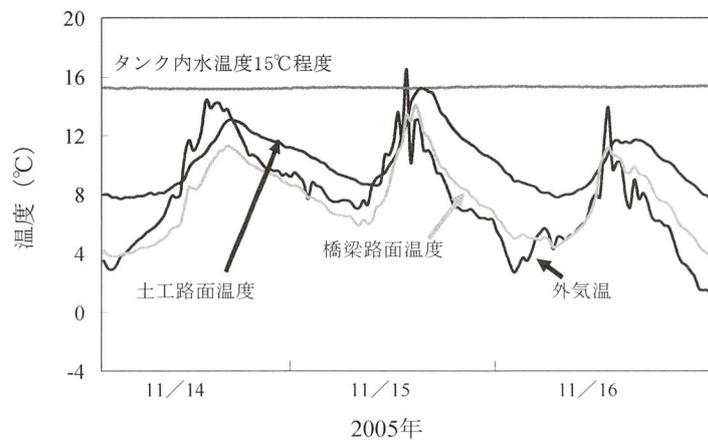


図-5.2.2 供用開始前のタンク内水温

5.3 作動基準温度の変更

本システム設置後に発生した停電などにより、1ヶ月程度システム全体の停止を余儀なくされた。しかし、この間も温度計測ができていたため、冬期における運転休止中のタンク内温度について温度変化のデータが得られた。この休止中であった2006年1月20日から2006年1月30日のタンク内水温および路面温度、外気温の変化を図-5.3.1に示す。図-5.3.1に示すように、外気温が大きく変化した場合、路面の温度は変化しているが、タンク内水温の変化はほとんど認められない。ここで、外気温の変化よりも路面温度の変化に着目し、システム運転に伴うタンク内水温の変化について検証を行った。

供用開始当初は、外気温が+3℃以下、あるいは橋梁部の路面温度が+1℃以下となった場合にシステムが自動作動するように設定したため、明らかに路面が凍結しない場合でもポンプが稼働するなど、不要と思われる自動作動が多数みられた。このようなことから、作動基準の変更について検討を行った⁴⁾。

図-5.3.1によると、同期間における現地の路面の温度変化は外気温の変化に比べて小さかった。この結果を用いて、図-5.3.2に示すように作動時間の推定を行った。作動時間の推定は橋梁部の路面温度のみを考えることとし、作動基準温度3℃、2℃、1.5℃、1℃、0.5℃、0℃について検討した。その結果、図-5.3.2に示すように作動基準温度の差により作動時間に大きな差異がみられた。このことから、運転の制御を橋梁部の路面温度変化によることとした。図-5.3.3に本システム供用開始当初の温度変化を示す。図-5.3.3中の黄色で着色した部分はシステムが稼働した時間である。図-5.3.1、図-5.3.2および図-5.3.3に示すような温度結果に基づき、2006年12月から橋梁部道路路面温度が+0.5℃以下となった場合にシステムが自動作動するように設定を変更した²⁾。

図-5.3.4に作動基準変更後の温度変化を示す。図-5.3.4中の黄色で着色した部分も同様に、システムが稼働した時間を表している。図-5.3.4から、同じような気温変化で大きく運転時間が減少したことがわかる。これにより、過剰と思われるシステムの自動作動を削減できるため、タンク内水温の低下は減少する。このことは、熱源として自然熱エネルギーのみを利用する本システムにとってより長い降雪などに対応できることを意味する。

あわせて、設定温度の変更に伴いランニングコストおよびCO₂排出量の低減が見込まれる。蓄熱機能を目的としたタンク内水温に注目すると、先述のように稼働に伴う水温低下は著しく、水温回復には長期の時間を要する。仮にタンク内水温が1℃低下した場合、地下備蓄タンク内(230m³)の水温を1℃上げるのに要する熱量を消費あるいは保持することになる。そこで、地下備蓄タンク内(230m³)の水温が1℃低下した場合のエネルギー損失量を推定した。容量230m³の水が1℃変化するのに必要な熱量は、およそ963×10³(kJ)である⁵⁾。これは電力100%(ロスを含まない)に置き換えると268(kWh)に相当し、仮に電気エネルギーで加温を行うと、同値にCO₂排出係数0.67(kg/kWh)を乗じることで少なくとも180(kg)のCO₂排出量となる。

図-5.3.5 に示すように、従来の外気温制御方法(3℃)から、橋梁部路面温度制御方法に変更することで、3.5 時間/日の稼働時間を短縮できる。外気温 3℃から橋梁部路面温度 0.5℃に変更を行うことで、推定を行った期間における試算結果では、図-5.3.6 に示すように、324(円/日)のランニングコスト削減が見込まれる⁵⁾。そのため適切な運転制御を行うことで、図-5.3.7 に示すように、270~360(kg/日)の CO₂削減効果をもたらす。これは、先述の運転に伴う CO₂排出量 18.1(kg/日)の約 15~20 倍に相当し、その効果は大きい。

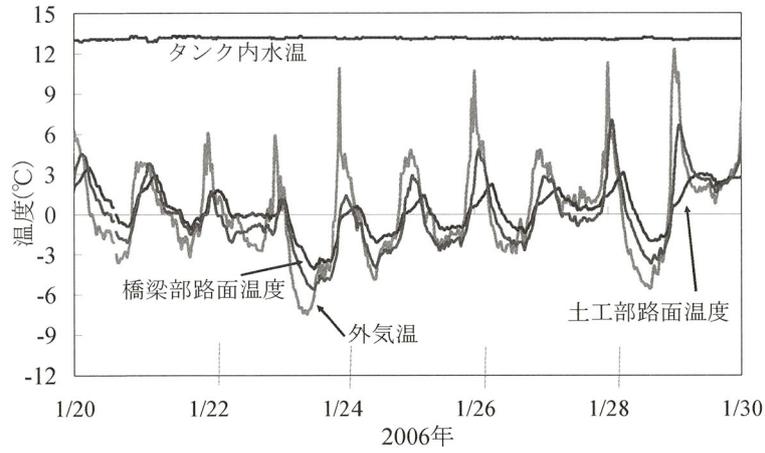


図-5.3.1 システム休止中の温度変化

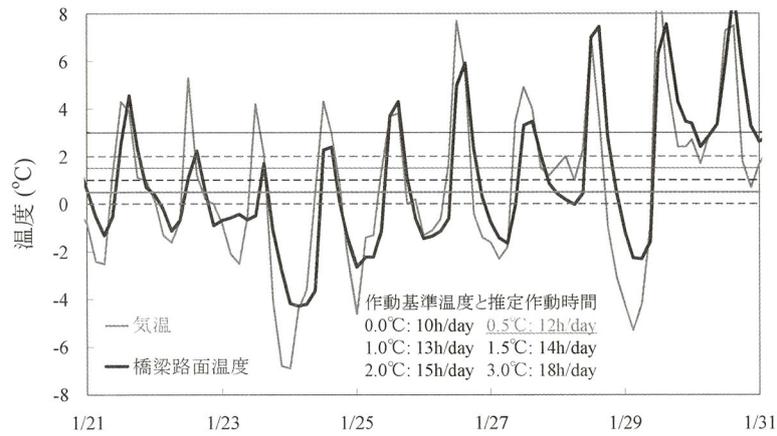


図-5.3.2 システム休止中における推定稼働時間

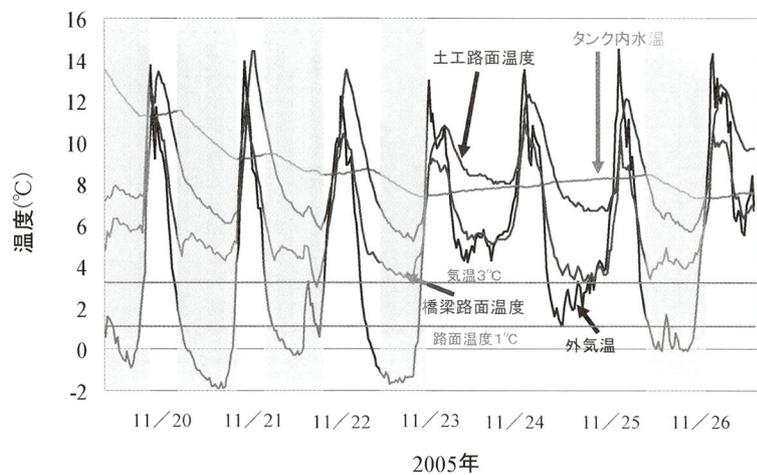


図-5.3.3 作動基準変更前の温度変化

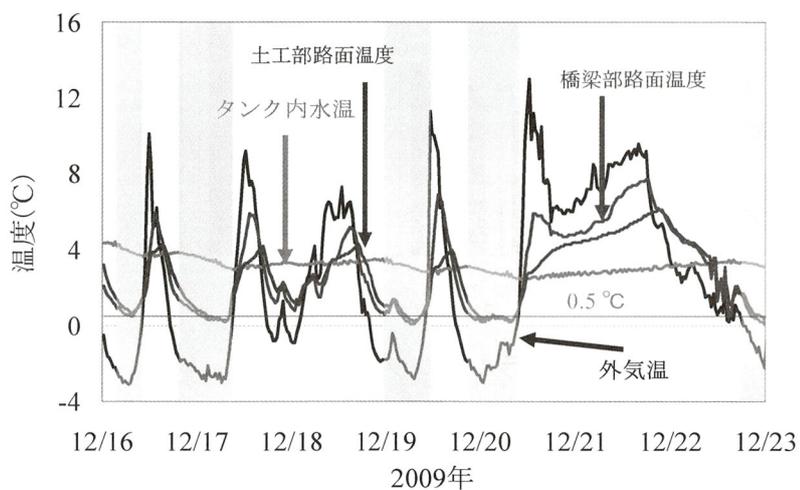


図-5.3.4 作動基準変更後の温度変化

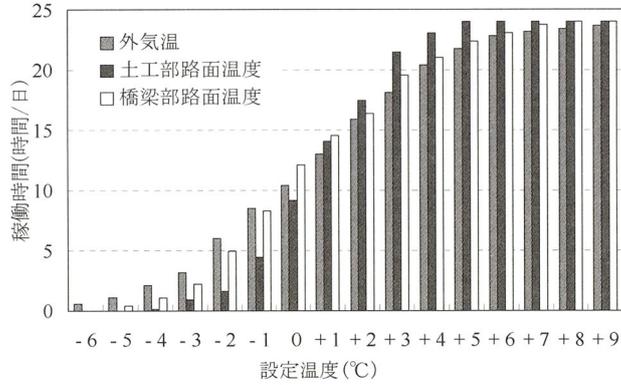


図-5.3.5 設定温度変更に伴う稼働時間の推定

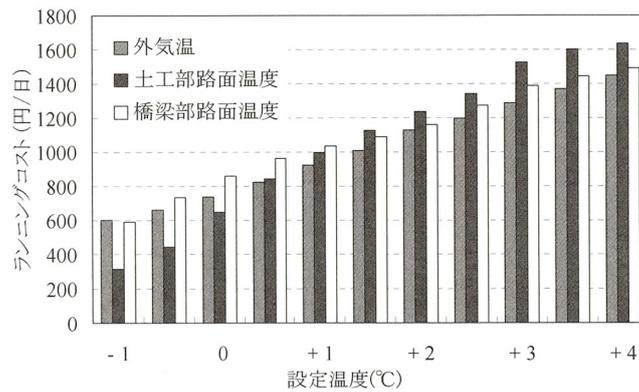


図-5.3.6 ランニングコスト評価

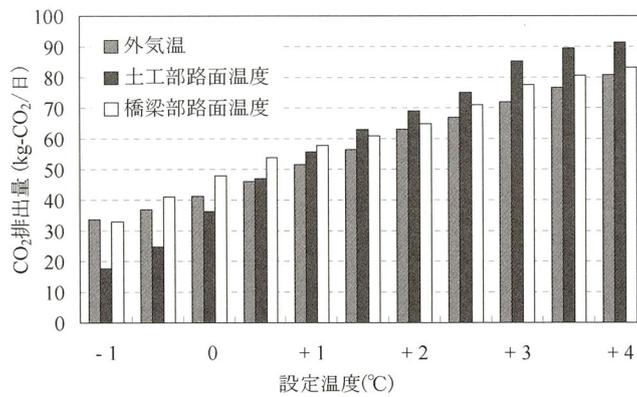


図-5.3.7 CO₂ 排出量評価

5.4 連続運転が継続したときの温度変化

本システムを供用開始した最初の冬期において、「平成18年豪雪」⁶⁾⁹⁾と命名されるほどの全国的な記録的寒波が到来した。山口県においては、特に2005年12月に、この寒波の影響を大きく受けた。2005年12月の日降雪量を図-5.4.1に示す。この寒波においては、本計画地の外気温はほとんど0℃以下であり、2005年12月14日には31cm/日の降雪であった。この2005年12月における降雪量は、地中熱地下備蓄タンクの設計に用いた1992年～2002年の10年間および2002年～2004年に観測した降雪量をも大きく上回るものであった。そして、約7日間(12月12日～18日)の連続した運転、降雪量、連続した低温は設計値を大きく上回るものである。しかしながら、これらの期間も、パイプヒーティングを設置した路面上の雪は、ほぼ完全に融けており、コンクリート舗装が露出していた¹⁰⁾。このときのタンク内水温の変化を図-5.4.2に示す。これらのことから、本システムは路面の凍結防止に大きく寄与していることがわかる²⁾。

図-5.4.3に、作動基準温度変更後の気象状況の典型的な例として2007年12月温度変化を示す。平均温度は比較的高いが、最低気温はしばしば0℃未満である。気温が0℃未満である大部分の時間は、夜間または早朝であったことから、0時から7時と21時以降の各定時の橋梁部路面温度の測定結果を図-5.4.4に示す。図-5.4.4から、本システム運転の影響のため、橋梁部路面温度は常に作動基準温度である0.5℃以上であることがわかる。これにより、本システムが橋梁部において一般路面と同じように熱を供給していることがわかる⁴⁾。

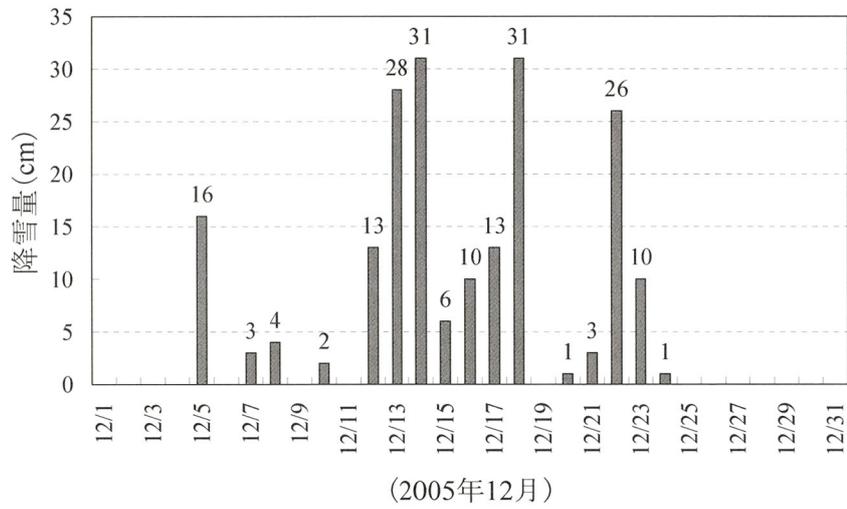


図-5.4.1 2005年12月の日降雪量

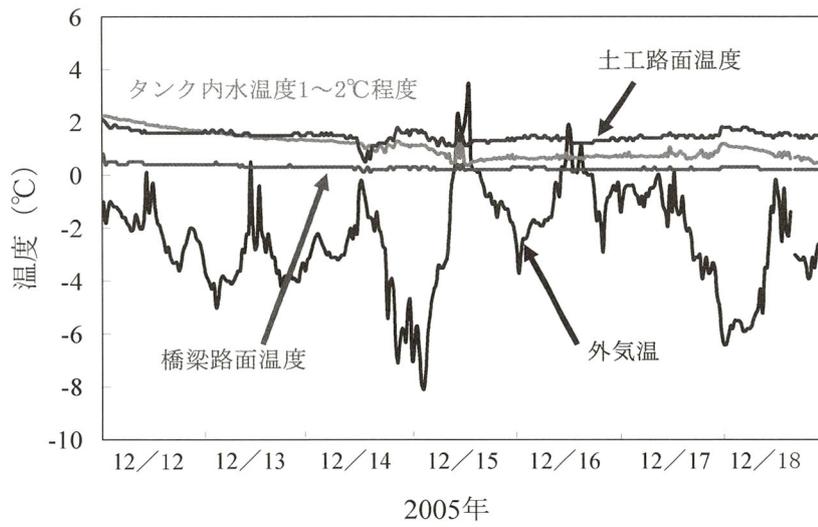


図-5.4.2 2005年12月の豪雪時におけるタンク内水温

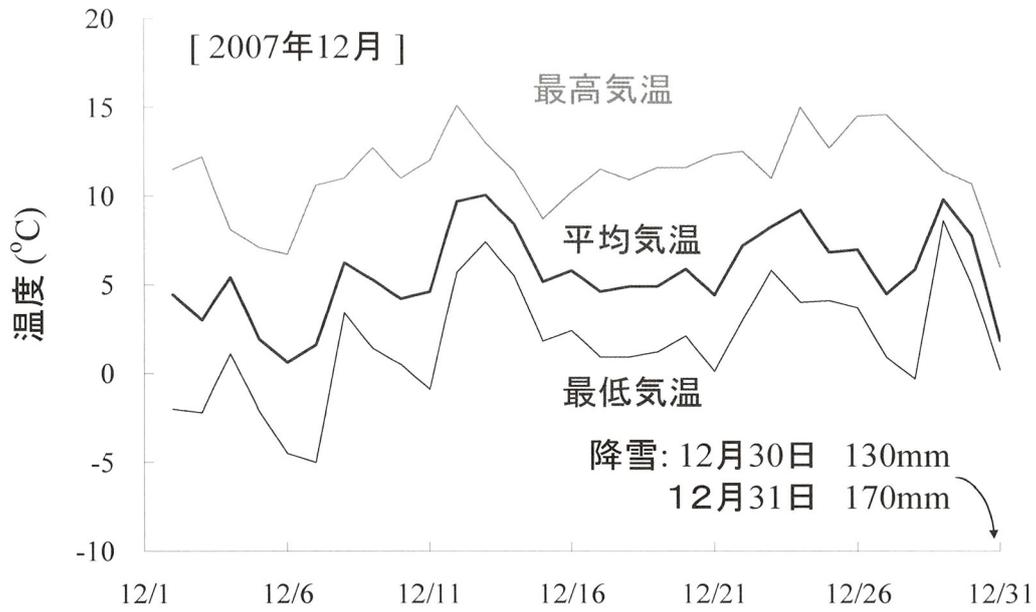


図-5.4.3 2007年12月の気温変化

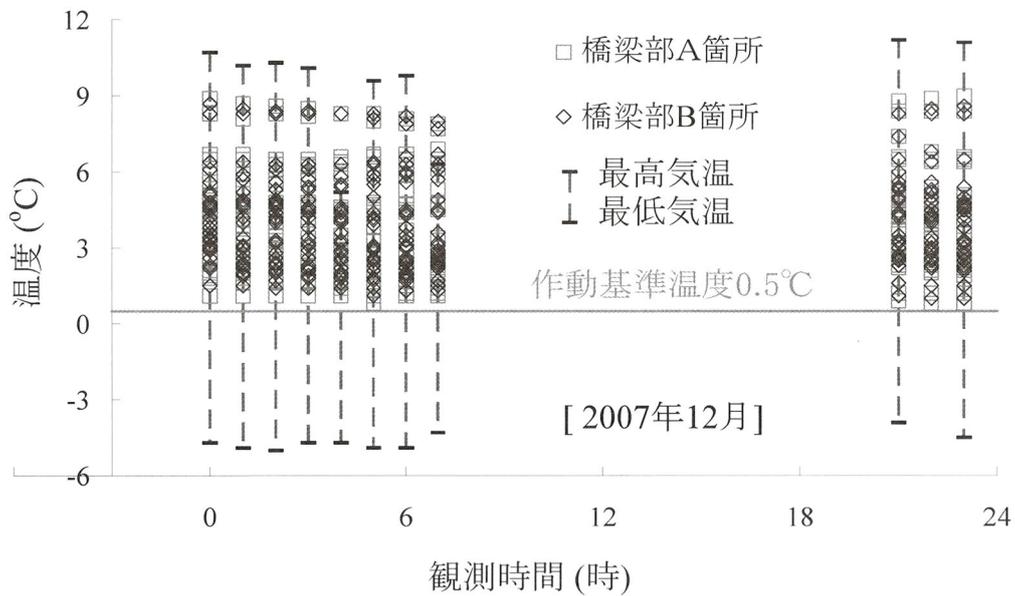


図-5.4.4 2007年12月の橋梁部の路面温度変化

5.5 逆熱交換実験

中国地方の気象特性を活かした本システムは、昼間に地中熱を備蓄し、夜間に路面へ放熱することを基本としている。そして、本システム設計に用いた気象データから、最長継続降雪時間を9時間としており、これを超える長時間の連続した運転は想定していない。このため、タンク内の水温が充分回復しない状態で連続運転を行う結果となった。このような状況下では、地中熱だけでは採熱が間に合わず、タンク内水温がさらに低下した場合、路面融雪・凍結防止効果が得られない可能性がある。熱源として自然熱エネルギーのみを利用する本システムでは、地中熱地下備蓄タンク内の水温を短時間で上昇させることは不可能である。そこで、タンク内に比べ比較的湿度の高い路面内のパイプに通水することで、低下したタンク内水温を上昇させる方法について検討した。そして、融雪装置の運転に伴う路面温度およびタンク内水温の変化に加え、循環水で低温化するタンクによって、周辺岩盤が徐々に温度低下する程度を把握するため、温度計測結果を用いて検証を行った。

まず外部からの温度変化の影響をほぼ無視できる路盤面からの深さ21mのタンク内水温、ロックボルトに設置した温度計の温度、および同じ深さにある調査ボーリング孔の温度に着目することとした。ロックボルトに設置した温度計の温度変化はタンクと接する地盤温度、すなわちタンク近傍の地盤温度である。そこで、2008年8月から2009年3月までにおける同深さのタンク内水温、タンク近傍の地盤温度(ロックボルトに取り付けた熱電対を用いて計測)、および地盤の温度計測結果を図-5.5.1に示す。この深さでは外気の影響をほとんど受けなため、年間を通じて地盤の温度は約12°Cで一定であった。2008年11月下旬にシステムが稼働するとともにタンク内水温は低下し、12月には約3°C、1月には約1°Cであった。一方、タンク壁面より3mの位置の地盤は8°C程度に低下した。このことは、2月以降にみられるタンク内水温の上昇に関係しているものと思われる¹⁾。

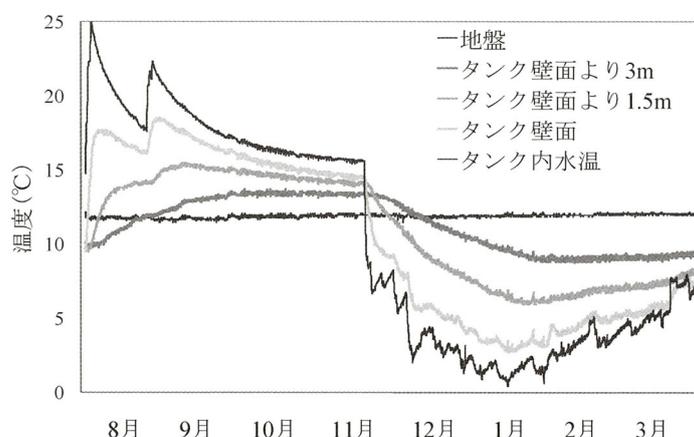


図-5.5.1 2008年8月～2009年3月の計測結果

橋台のコンクリート基礎杭を熱交換器と兼用して地中熱を集熱し、車道を融雪するシステムにおいて、夏期に循環ポンプを運転させ路面の熱を地中に蓄え冬期の融雪に使う工法（逆熱交換）が実用化されている¹²⁾。また、夏期と冬期両方に循環ポンプを運転させることで、夏には涼しく冬には暖かくする試みが報告されている^{13),14)}。これらの研究を参考に、路面温度とタンク内水温の温度差が大きい2008年8月上旬および下旬の2回にわたって、それぞれ3日間連続してシステムを稼働させ運転を行った。強制運転における温度計測結果を図-5.5.2に示す。

図-5.5.2から、タンク内水温は25℃まで上昇し、冬期運転開始前のタンク近傍の地盤温度およびタンク内水温はともに15℃程度を維持していた。しかし本システムの場合、冬期にパイプ内を循環した水がタンクに還流するため、いったんシステムが稼働すると、急激にタンク内水温が低下する。そのため、夏期に水温を上昇させることは、その効果がごく初期の運転時に限られるものであり、必ずしも効率のよい熱源の確保方法ではなかった²⁾。

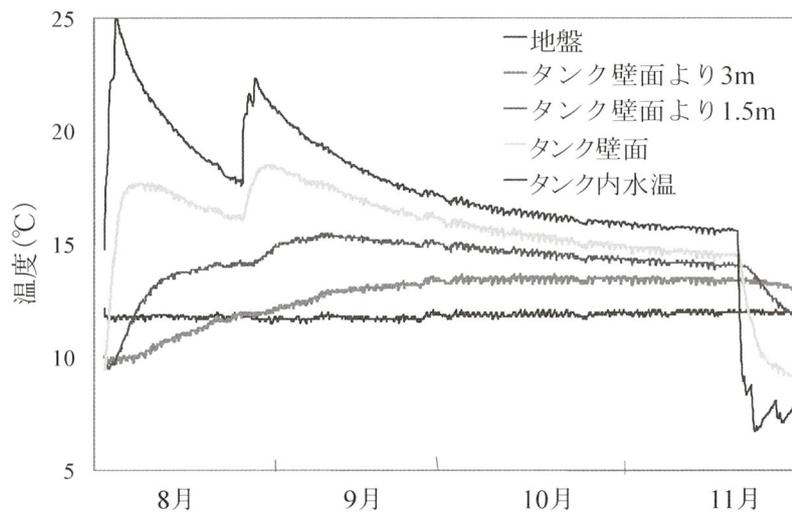


図-5.5.2 2008年8月～2008年11月の計測結果

本システムの設置した場所の気候は冬期間であっても数日間、路面温度が 0°C 以下にならず、且つ最高気温が 10°C 以上となり路面温度が上昇する日がみられた。このようにタンク内水温が路面温度に比べて著しく低い場合に本システムを稼働させることによりタンク内水温を上昇させられる可能性がある。図-5.5.3に2008年12月～2009年2月の土工部路面温度変化、橋梁部路面温度変化、タンク内水温および外気温の計測結果を示す。そして、図-5.5.3の結果によると、タンク内水温に比べて路面温度が高くなっている場合もみられる。一方、1月14日には2008年度の最低気温の -9°C にまで低下している。しかし、日中には 10°C 以上まで外気温は上昇し、24時間連続して気温が氷点下以下となった状況ではない。図-5.5.4は図-5.5.3の2009年2月の部分を拡大したものである。この図から、システムの稼働により低下したタンク内水温を上昇させることができる可能性が高いため、冬期の比較的気温の高い日中に数時間システムを稼働させる実験を行った¹⁾。

図-5.5.5は2008年3月10日に行った運転時の温度変化を示している。前日夜間から当日早朝の気温は約 5°C であったが、日中には約 20°C まで上昇した。本システムの運転は9時から15時まで行った。その結果、タンク内水温は 3.2°C から 6.0°C まで 2.8°C 上昇した。夏期に行った強制運転の温度上昇と比較するとその効果は小さいが、このように必要な時期に短時間でタンク内水温を上昇させることができたことから、凍結防止・融雪効果に少なからず寄与できるものと考えられる²⁾。

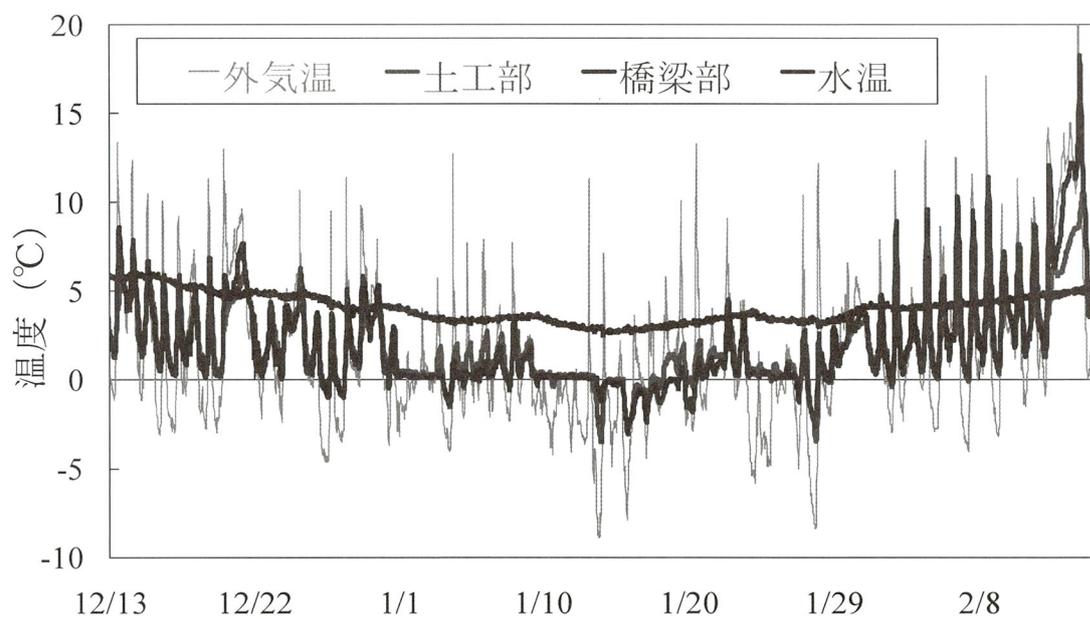


図-5.5.3 2008年12月～2009年2月の温度計測結果

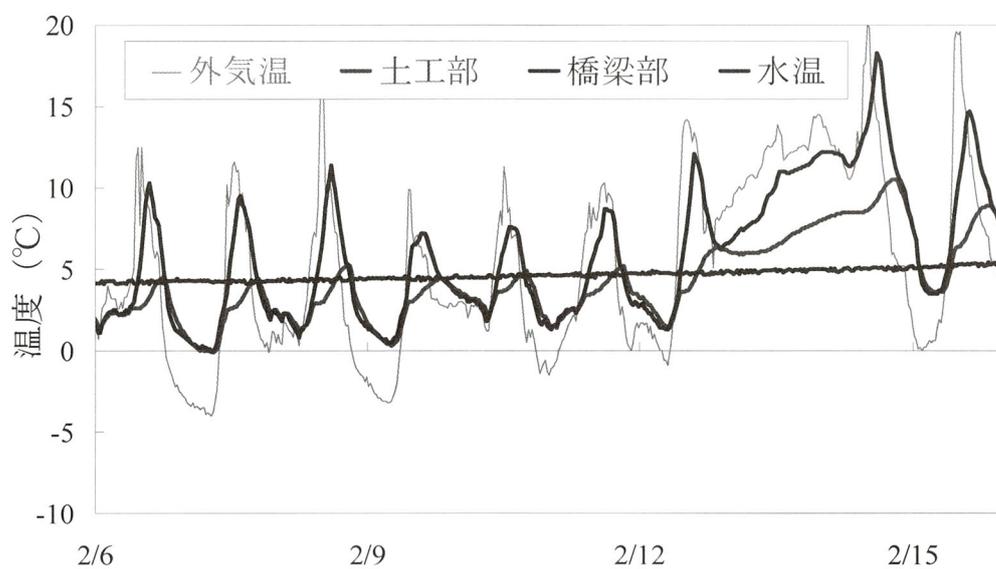


図-5.5.4 2009年2月の温度計測結果

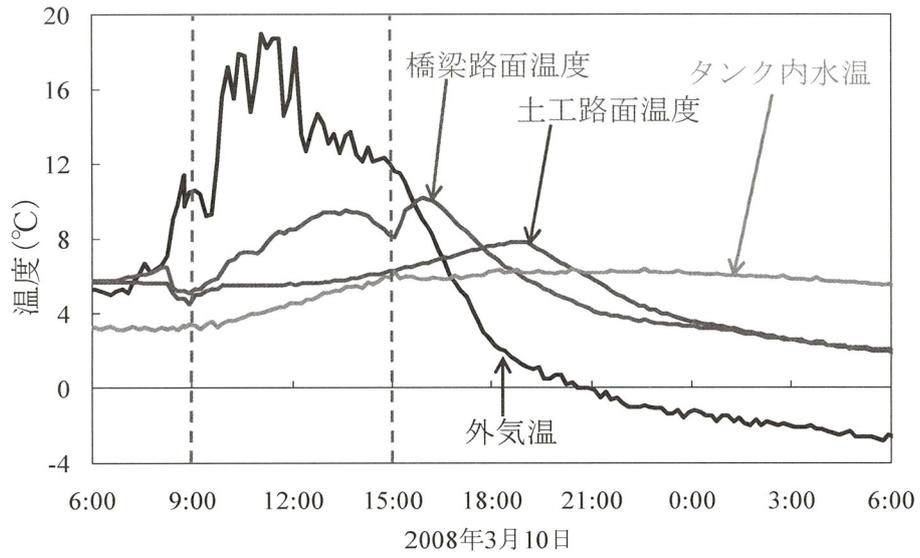


図-5.5.5 冬期における逆熱交換実験結果

5.6 パイプヒーティング舗装の検査

本システムは、地下にタンクがあり、舗装内にパイプがあるなど、運転を通じてでないと確認の出来ないシステム部分が多く存在する。そこで、夏期に実施した逆熱交換実験において、熱赤外線カメラを用いた通水状況の観察を行い、パイプヒーティング舗装の点検・管理における同カメラの適用性について検討した¹⁵⁾。

通水状況を確認するため、逆熱交換時に熱赤外線カメラを用いて路面の撮影を行った(写真-5.6.1, 写真-5.6.2)。写真-5.6.1からわかるようにパイプの形状が青く浮かび上がっており、路面温度に比べて冷えたタンク内水が放熱管内を流れていることが確認できる。

また、本システムは複数のコンクリートパネルから構成されており、写真-5.6.2から、そのうちの1カ所のパネルのみが赤く写し出されていることが確認できる。周囲のパネルの路面温度が33℃前後であるのに対し、赤く写し出されているパネルの路面温度は40℃近くあった。これはこのパネルに通水されていないために、逆熱交換実験を行っても路面温度が下がらなかったものと考えられた。なお現在においては、この結果を基に同パネルの補修工事を行っている。

以上のことから、熱赤外線カメラによる撮影により、夏期においてパイプの通水状況の確認ができることがわかり、パイプを用いた融雪施設の点検に有効であることが窺えた。

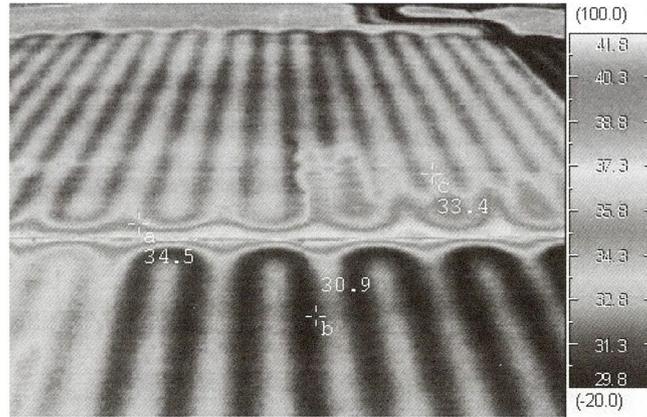


写真-5.6.1 健全なパネルへの通水状況

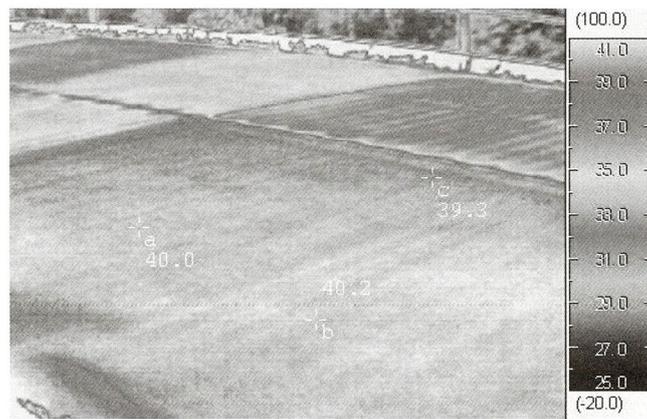


写真-5.6.2 通水の停止しているパネルの状況

5.7 第5章のまとめ

本章では、地中熱地下備蓄タンクの貯留水やパイプヒーティング路面、タンク周辺岩盤の温度変化を把握するため、地下備蓄タンク内、調査ボーリング孔内、路面内に熱電対をし、温度計測を行った。本章で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) 地中熱地下備蓄タンクは、外気温の変動にも拘わらず、非運転時においてタンク内水温度に変動がほとんどなく、高い放熱防止効果を有するものであった。
- (2) 路面融雪に用いた循環水がタンク内に環流することで、タンク内水温は一時的に低下するものの、システムの非稼働時間中に、周辺地熱や地下水の流入等によって、徐々にタンク内水温は上昇するため、同システムは連続的な降雪が少ない地方においては有効な手段のひとつである。
- (3) 2005年12月の豪雪などにおける設計値を上回る連続した降雪や連続した低気温時においても、本システムの稼働に凍結防止効果があることを、タンク内温度の計測結果および路面温度の計測結果により示した。
- (4) 3年以上の長期に及ぶ温度計測データに基づき、本システムの温度特性を示した。
- (5) システム稼働の閾値を適切に設定することで、過剰な稼働時間を削減することができる。そこで、外気温に基づく制御をなくすとともに、橋梁部路面の設定温度を $+1^{\circ}\text{C}$ から $+0.5^{\circ}\text{C}$ に変更した。これにより、運転時間の短縮効果が得られたことを示した。
- (6) システムでは、非稼働時間中に、周辺地熱や地下水の流入等によって、徐々にタンク内水温は上昇するものの、路面融雪に用いた循環水がタンク内に環流することで、タンク内水温は徐々に低下した。冬期の運転によって低下したタンク内水を加温するため、路面温度が高いときに強制運転することで、タンク内水温をできることを示した。
- (7) 熱源となるタンク内水の強制運転による温度上昇について、夏期および冬期の両方で効果が得られることが確認できた。冬期の強制運転でのタンク内水温の上昇効果は、夏期のタンク内水温と路面温度との差が大きい場合と比較するとその効果は小さいが、冬期においても短時間でタンク内水温を上昇できた。このことは、凍結防止・融雪効果に少なからず寄与できるものと考えられる。

5.8 参考文献

- 1) Narifumi YASUMURA, Ryoko SHIGA, Katsuki AZUMA, Masayuki SYOBUZAKO and Isamu YOSHITAKE: Development of Pipe Heating System with Geo-Thermal Tank and Its Rational Maintenance, *Proceedings of Snow Engineering VI*, No.6, 2008.
- 2) 安村成史, 志賀亮子, 菖蒲迫正之, 吉武 勇: 地下タンク内に保存した地下水を用いるパイプヒーティングシステムの温度特性, 土木学会論文集G, Vol.66, No.4, pp.211-221, 2010.
- 3) 安村成史, 梅田高正, 菖蒲迫正之, 東 克樹, 吉武 勇: 冬期におけるパイプヒーティングの稼働温度制御と路面変状, 土木学会第62回年次学術講演会, VII -102, 2007.
- 4) Isamu YOSHITAKE, Narifumi YASUMURA, Masayuki SYOBUZAKO and Andrew Scanlon: Pipe Heating System with Underground Water Tank for Snow Thawing and Ice Prevention on Roads and Bridge Decks, *Journal of Cold Regions Engineering, ASCE*, 掲載決定 (プレビュー版 オンライン公開)
- 5) 東 克樹, 安村成史, 梅田高正, 菖蒲迫正之, 吉武 勇: 地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの効率的な温度管理, 寒地技術論文・報告集, Vol.23, pp.66-70, 2007.
- 6) 国土交通省河川局防災課災害対策室: 「平成18年豪雪」について, 土木学会誌, Vol.91, pp.38-39, 2006.
- 7) 佐藤篤司: 平成18年豪雪ー概要, 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 2006.11.
- 8) 古堅辰一, 松村光太郎, 荒木紀人, 佐久本光章, 安岡真希: 関西・中国地方の「平成18年豪雪」における交通障害に関する研究, 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, Vol. 2006, p.112, 2006.
- 9) 福原輝幸, 金澤文彦: 平成18年豪雪がもたらした福井の冬季道路交通問題, 日本雪工学会誌, Vol.22, No.3, pp.78-83, 2006.
- 10) 菖蒲迫正之, 安村成史, 石田純一, 吉武 勇: 地中熱地下備蓄タンクによる路面融雪効果, 寒地技術論文・報告集, Vol.22, pp.234-238, 2006.
- 11) 志賀亮子, 安村成史, 菖蒲迫正之, 吉武 勇: 地中熱地下備蓄タンクと周辺地盤の長期温度計測, 寒地技術論文・報告集, Vol.24, pp.453-457, 2008.
- 12) 宮本重信, 竹内正紀, 永井二郎, 菅原桂一郎: 熱交換杭群を用いた合成鋼床板橋での季節間蓄熱融雪の一設計, 土木学会論文集G, Vol.64, No.1, pp.10-25, 2008.
- 13) 福原輝幸, 阪本信弘: 地中熱利用による路面温度制御 冬期融雪および夏期路面冷却, 土木学会誌, No.84, Vol.10, pp.63-65, 1999.
- 14) 福原輝幸, 小寺健太郎, 浅田興志男, 河合源悟: 地中熱を利用した貯水槽集熱システムの性能評価, 土木学会論文集, No.741/VII-28, pp.143-153, 2003.
- 15) 志賀亮子, 安村成史, 菖蒲迫正之, 東 克樹, 吉武 勇: 熱赤外線カメラを用いたパイ

プヒーティングシステムの点検方法，土木学会中国支部第60回研究発表会，VII-29，
CD-ROM，2008.

第 6 章

結論

第6章 結論

6.1 本研究のまとめ

本研究では、新たに開発した「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティング」の計画・設計・施工の要点をまとめた。そして、地下10m程度の深さに構築したタンク内に、路面融雪に要する熱量(地下水)を備蓄保温し、降雪時など必要に応じてパイプヒーティングシステムを稼働させ、路面融雪効果および熱源についてまとめた。特に、システム稼働後3年以上における計測結果に基づき、主に融雪・凍結抑制効果および路面・タンク内温度変化についてまとめた。

第1章「緒論」では、本研究の背景を述べるとともに、開発した「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステム」の計画の経緯を示し、本研究の目的と意義を明確にした。そして第2章「冬期路面管理の課題と既往の研究」では、冬期路面管理の現状と課題について整理するとともに、「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステム」の開発の基礎となった研究を中心に、冬期路面管理に関する既往の研究をレビューした。

ここで本論文は6章構成であるが、その主な研究内容は第3～5章に記載している。第3～5章のまとめを以下に示す。

第3章「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの開発」では一般国道315号の葉の内3号橋から同4号橋にて計画および設計を行った地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの概念を示すとともに、その設計・施工に関する基礎的データを示した。本システムは、地下10m程度の地中熱を活用するものであり、従来工法と比較して、イニシャルコスト、ランニングコストともに縮減できたことを示した。また、既設橋梁へのパイプヒーティング路面の設置についても、その設計概要と工事概要について示した。

第4章「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの運転」では、同システムの運転方法を概説し、その融雪・凍結防止効果を記載した。開発したシステムでは、路面融雪に要する熱量(地下水)を地下タンク内に備蓄保温し、降雪・路面凍結時など必要に応じて自動的に水中ポンプが稼働する。本システムの地中熱地下備蓄タンクは、地中熱と地下備蓄タンク内に支保工として打設したロックボルトおよび頭部より流入する地下水により熱源を確保した。地中熱地下備蓄タンク方式によるパイプヒーティングシステムについて、2005年12月から運転を開始し、その後の融雪効果および凍結防止効果について示した。また、近接する橋梁での残雪と比較しても、本システムの稼働が融雪・凍結防止効果があることを示した。さらに、2005年12月の豪雪では設計値を上回る連続した降雪や連続した低気温が生じたが、橋梁部においても融雪・凍結防止効果がみられ、少なくとも地中熱が供給される一般路面よりも先に無雪状態にできたことを示した。

第5章「タンク内温度の計測と効率的な運転手法の検討」では、一般国道315号の葉の内3号橋から同4号橋にて供用した地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの運転に伴うタンク内の水温変化および路面の温度変化について示した。温度計測データによれば、システムの非稼働時間中に周辺地中熱等によって、タンク内水温を上昇させることができることを示した。また2005年12月の豪雪などにおける設計値を上回る連続した降雪や連続した低気温時においても、本システムの稼働に凍結防止効果があることを、タンク内温度の計測結果および路面温度の計測結果により示した。長期に及ぶ温度計測データに基づき、本システムの温度特性を示した。このシステムでは、非稼働時間中に、周辺地熱や地下水の流入等によって、徐々にタンク内水温は上昇するものの、路面融雪に用いた循環水がタンク内に環流することで、タンク内水温は徐々に低下する。冬期の運転によって低下したタンク内水を加温するため、路面温度が高いときに強制運転することで、タンク内水温をできることを示した。特に、冬期の強制運転によるタンク内水温の上昇は、夏期の強制運転と比べてその効果は小さいが、冬期においても短時間でタンク内水温を上昇できることを示した。

6.2 今後の課題と研究展望

本研究では、開発した「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティング」を実際に稼働させることにより本システムの基本的なデータを得た。本システムはパイプヒーティング路面についてはコンクリート舗装であるということ、および、パイプ延長の縮減は困難であることから、熱源でのコスト縮減が重要である。今後、他箇所での採用・実施される場合においては運転効率、採熱機能のよりいっそうの向上が望まれる。また、本システムでは地下水が熱源のひとつとなったが、トンネルなどからの湧水や下水道水などの利活用により熱源を確保することも考えられる。また、都市部においては住宅からの廃熱の利用も考えられる。

中国地方の気象特性を活かした本システムは、昼間に地中熱を備蓄し、夜間に路面へ放熱することを基本としている。そして、本システム設計に用いた気象データから、最長継続降雪時間を9時間としており、これを超える長時間の連続した運転は想定していない。このため、タンク内の水温が充分回復しない状態で連続運転を行う結果となった。このような状況下では、地中熱だけでは採熱が間に合わず、タンク内水温がさらに低下した場合、路面融雪・凍結防止効果が得られない可能性がある。熱源として自然熱エネルギーのみを利用する本システムでは、地中熱地下備蓄タンク内の水温を短時間で上昇させることは不可能である。そこで、熱源となるタンク内水の強制運転による温度上昇について実験を試み、夏期および冬期の両方で効果が得られることが確認できた。また、地中熱地下備蓄タンク内に地下水が流れ込んでいることを考えると、水温が低下したタンク内水を排水し、より温度の高い地下水を流入させる手法も考えられる。これらのことは、凍結防止・融雪効果に少なからず寄与できるものと考えられ、今後、他箇所での採用・実施される場合において、運転効率、採熱機能のよりいっそうの向上につながるものと考えられる。

また、本システム供用開始後の豪雪により発生した8時間以上におよぶ停電および豪雪の処理により、システム停止を余儀なくされた。そして、システム停止中に写真-6.2.1および写真-6.2.2で示すようなパイプ継手箇所の漏水に伴うコンクリートのポップアウトがパイプヒーティング路面に発生した^{1),2)}。なお、コンクリートの材質、施工などについて確認を行った結果、これらのポップアウトは施工不良によるものではなかった¹⁾。

そこで、このような損傷機構を調べるため、実験室内にて再現実験を試みた^{1),2)}。その結果、パイプ内水の凍結膨張が原因である可能性が高いとの結論が得られた。このような路面の損傷は、全てのパイプヒーティング路面に生じる可能性があるものであり、今後もより詳細な検討が望まれる。



写真-6.2.1 パイプヒーティング路面に発生した損傷



写真-6.2.2 ポップアウトにより露出したパイプ継手

参考文献

- 1) 安村成史, 東 克樹, 志賀亮子, 梅田高正, 菖蒲迫正之, 吉武 勇: パイプヒーティング舗装で生じたコンクリート路面変状事例, 寒地技術論文・報告集, Vol.23, pp.474-477, 2007.12.
- 2) 岡部能直, 吉武 勇, 安村成史, 加々谷治: パイプヒーティングシステムにおけるコンクリート舗装の剥離機構に関する実験的検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1201-1206, 2009.7.

6.3 本論文に関する著者の発表論文および講演

【論文】

- (1) 菖蒲迫正之, 安村成史, 永井泉治, 吉武 勇: 地中熱地下備蓄タンク方式による路面融雪の実用化に関する検討, 寒地技術論文・報告集, Vol.20, pp.198-204, 2004.10.

【本文との関連: 第3章】

- (2) 菖蒲迫正之, 安村成史, 石田純一, 海野達夫, 永井泉治, 吉武 勇: 地中熱地下備蓄タンク周辺の恒温層地熱とタンク内水温, 寒地技術論文・報告集, Vol.21, pp.575-580, 2005.12.

【本文との関連: 第3章, 第4章】

- (3) 菖蒲迫正之, 安村成史, 石田純一, 吉武 勇: 地中熱地下備蓄タンクによる路面融雪効果, 寒地技術論文・報告集, Vol.22, pp.234-238, 2006.11.

【本文との関連: 第4章, 第5章】

- (4) 東 克樹, 安村成史, 梅田高正, 菖蒲迫正之, 吉武 勇: 地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの効率的な温度管理, 寒地技術論文・報告集, Vol.23, pp.66-70, 2007.12.

【本文との関連: 第5章】

- (5) Narifumi YASUMURA, Ryoko SHIGA, Katsuki AZUMA, Masayuki SYOBUZAKO and Isamu YOSHITAKE: Development of Pipe Heating System with Geo-Thermal Tank and Its Rational Maintenance, *Proceedings of Snow Engineering VI*, No.6, 2008.6.

【本文との関連: 第4章, 第5章】

- (6) 吉武 勇, 安村成史: 比較的温暖な中国地方における冬期路面管理の実例と課題, 日本雪工学会誌, Vol.24, No.4, pp.304-305, 2008.10.

【本文との関連: 第1章, 第4章】

- (7) 志賀亮子, 安村成史, 菖蒲迫正之, 吉武 勇: 地中熱地下備蓄タンクと周辺地盤の長期温度計測, 寒地技術論文・報告集, Vol.24, pp.453-457, 2008.11.

【本文との関連: 第5章】

- (8) Isamu YOSHITAKE, Narifumi YASUMURA, Masayuki SYOBUZAKO and Andrew Scanlon: Pipe Heating System with Underground Water Tank for Snow Thawing and Ice Prevention on Roads and Bridge Decks, *Journal of Cold Regions Engineering*, ASCE, 掲載決定 (プレビュー版 オンライン公開)
【本文との関連 : 第3章, 第4章, 第5章】

- (9) 安村成史, 志賀亮子, 菖蒲迫正之, 吉武 勇: 地下タンク内に保存した地下水を用いるパイプヒーティングシステムの温度特性, 土木学会論文集 G, Vol.66, No.4, pp.211-221, 2010.12.
【本文との関連 : 第3章, 第4章, 第5章】

【講演】

- (1) 菖蒲迫正之, 安村成史, 石田純一, 吉武 勇: 無散水路面融雪に用いる地中熱地下備蓄タンクの設計, 土木学会第 61 回年次学術講演会, VI-227, pp.453-454, 2006.9.

【本文との関連 : 第3章】

- (2) 安村成史, 石田純一, 菖蒲迫正之, 吉武 勇: 山口県における無散水路面融雪施設の冬期道路管理への活用, 土木学会第 61 回年次学術講演会, VI-228, pp.455-456, 2006.9.

【本文との関連 : 第4章】

- (3) 安村成史, 梅田高正, 菖蒲迫正之, 東 克樹, 吉武 勇: 冬期におけるパイプヒーティングの稼働温度制御と路面変状, 土木学会第 62 回年次学術講演会, VII-102, 2007.9.

【本文との関連 : 第4章, 第5章】

- (4) 志賀亮子, 安村成史, 菖蒲迫正之, 東 克樹, 吉武 勇: 熱赤外線カメラを用いたパイプヒーティングシステムの点検方法, 土木学会中国支部第 60 回研究発表会, VII-29, CD-ROM, 2008.5

【本文との関連 : 第4章, 第5章】

謝 辞

本論文は、著者が山口大学大学院博士後期課程（2007年10月～2011年3月）の在籍期間中に行った「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの開発」に関する研究をとりまとめたものです。

ご多忙な公務にもかかわらず、本論文の主査としてご審査頂きました山口大学大学院理工学研究科 中村秀明教授、ならびに副査を務めて頂いた宮本文穂教授、羽田野袈裟義教授、朝位孝二准教授、吉武 勇准教授には、謹んで御礼申し上げます。

主査を務めていただいた中村教授には、本論文に関する貴重な意見を多数頂きました。そして、地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの開発途中および供用開始後に発生した諸事象に対して多くの貴重なアドバイスを頂くとともに、コンクリート構造物の維持管理および論文のとりまとめについて多くの御指導を頂きました。これらのことは、研究活動のみならず、私自身が土木行政という仕事をするにあたり、大きな力となりました。

宮本教授におかれましては、地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの今後の利活用および維持管理について御指導を頂きました。また、本論文内容以外に、道路、公園などの維持管理について多くのアドバイスを頂くとともに、舗装面で発生した損傷、橋梁で発生した損傷、その他の構造物で発生した諸現象について多くのアドバイスを頂きました。これらのことは、本論文をまとめるだけでなく、私自身が道路や公園の維持管理を担当する仕事をするにあたり、大きな力となりました。

羽田野教授におかれましては、本論文に隅々まで目を通していただき、表記方法等も含めた有益な御教示を多数いただきました。また、私が山口県に採用された直後から、二級河川錦川の河川改修工事をはじめとする多くの事業についての工法等について御教示をいただきました。これらのことが、私の河川に対する環境意識を向上させ、地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの開発を行う際に真剣に現場での課題を考えるきっかけになりました。

朝位准教授におかれましては、本論文をまとめるにあたり有益な御教示をいただきました。そして、私の研究活動に関するアドバイスと私の勤務先にて担当する事業に関するアドバイスと励ましの言葉を頂きました。

吉武准教授には、入学時から丁寧な御指導を頂きました。そして、数々の実験をはじめとして、多くの関連論文の作成、学会等での発表、本論文の構成、とりまとめなど多くの内容で丁寧な指導を頂きました。そして、本論文の研究テーマのみならず、幅広い分野にて多くの御助言をいただきました。これらの研究活動を通して、多くの経験と多くの知見を得ることができたものと思っております。これらの経験等は今後の土木行政に携わる技術者として、必ず役立つものと思っております。今後は、この経験を活かし、土木行政に存在する様々な課題に取り組んでいく所存

謝辞

であります。ここに深く感謝の意を表します。

本研究は過去に山口大学で行われた多くの研究が基礎となっております。浜田純夫名誉教授をはじめとするDR会の皆様から多くの励ましと御助言を頂きました。そして、株式会社エイト日本技術開発の谷本俊夫博士、永井泉治博士、辻 和秀博士、海野達夫氏、菖蒲迫正之氏をはじめとする皆様からは過去の研究成果における考え方、現地での設計における考え方、トラブルなどにおける対処法など多くの研究へのご協力とアドバイスを頂きました。特に菖蒲迫正之氏におかれましては、関連論文の作成、図・表の作成、データ採取の御協力を頂きました。これらのことがなければ、本論文の完成はもちろんのこと、本研究にて開発したシステムは完成していなかったものと思われます。ここに厚く感謝の意を表します。

山口大学大学院博士前期課程に在籍されていた東 克樹氏（現 前田建設工業株式会社）、志賀亮子氏（現 広島市）、岡部能直氏（現 三井造船株式会社）には本研究の根源となる多くの実験や図・表の作成、関連論文の作成に協力いただきました。ここに厚く感謝の意を表します。

本研究に深いご理解とご支援を山口県土木建築部道路整備課の皆様、周南土木建築事務所の皆様、宇部土木建築事務所の皆様、山口きらら博記念公園管理事務所の皆様からいただきました。心から感謝いたします。

在学中には山口大学の多くの先生方からたくさんの御助言と励ましをいただきました。そして、参加させていただいた学会を通じて、本研究へのアドバイスや道路における雪氷管理の考え方などを教えていただきました。また、上述した以外の方からも多くの方から御指導とご協力を頂きました。これらのことは、本論文の作成のみならず、山口県の土木行政職員として非常に役立つものでありました。あらためて感謝いたします。本当にありがとうございました。

最後に、体調を気遣いながら見守ってくれた父と母に心から感謝します。そして最愛の妻 央恵は、研究期間中、出産、育児、家事に追われ多忙であったにもかかわらず、私の研究活動を支え、そして、国際学会では主に英語面において多大なる協力をしていただきました。心から感謝します。

2011年3月

安村 成史

