

地中熱を利用したトンネル坑口融雪設備の性能調査について

宮川 昌樹¹・松島 健朗²

¹近畿地方整備局 福井河川国道事務所 防災課 (〒918-8015 福井県福井市花堂南 2-14-7)

²近畿地方整備局 近畿技術事務所 施工調査・技術活用課 (〒573-0166 大阪府枚方市山田池北町 11-1)

近年、注目されている自然エネルギーを利用した融雪設備について、国道158号中部縦貫自動車道 永平寺大野道路のトンネル坑口に設置した、極浅層地中熱および深層地中熱交換器を用いた融雪設備の性能・効果について調査を実施した。

キーワード 自然エネルギー，地中熱利用，融雪設備，融雪性能，性能調査

1. はじめに

福井河川国道事務所では、国道158号中部縦貫自動車道(L=160km)の一部である永平寺大野道路の改築事業をおこなっている。永平寺大野道路は大野市中津川から福井市玄正島町に至る26.4kmの自動車専用道路であり、順次部分供用をおこないながら全線供用を目指して事業を進め、2013年(平成25年)3月に勝山IC~大野IC間(L=7.8km)が暫定2車線で開通した。

永平寺大野道路の開通により、交通渋滞の緩和、高度医療施設へのアクセス向上、災害時における安定した交通の確保、文化・地域資源を活かした沿線地域の活性化が期待されている。

冬の積雪・凍結等の安全で円滑な交通確保を図るため、平成24年度に勝山IC~大野IC間にあるトンネルの両坑口に自然エネルギーを利用した極浅層地中熱および深層地中熱交換器を用いた融雪設備を設置し、今回、この融雪設備について性能・効果の調査を行ったので報告する。



図-1 調査箇所図

2. 融雪設備概要

(1) 調査位置

調査を実施した融雪設備は、より気象条件が厳しいと考えられる杉俣トンネルの大野側坑口、大袋トンネルの大野側坑口、小矢戸トンネル福井側坑口の各1箇所ずつ、計3箇所とした。図-1に調査箇所を示す。

(2) 設備概要

杉俣トンネル・大袋トンネルは深層地中熱採熱器および極浅層地中熱採熱器を併用、小矢戸トンネルは極浅層地中熱採熱器のみでシステム構成されている。融雪設備の概要を図-2、-3、融雪設備の設計条件を表-1に示す。

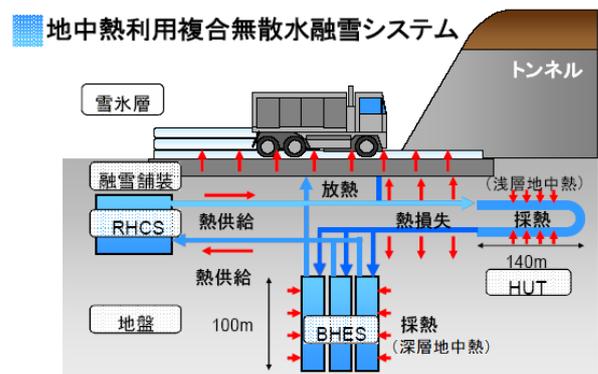
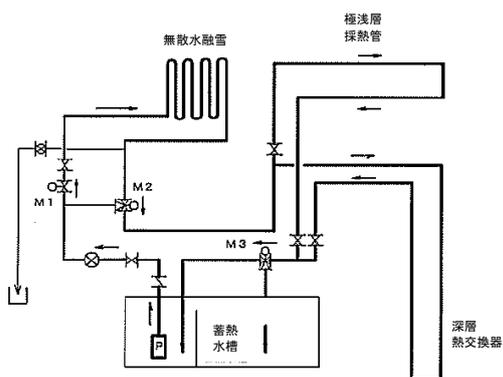


図-2 融雪設備イメージ



放熱量 (融雪)	141.2 W/m ²	放熱量 (凍結防止)	68.8 W/m ²
----------	------------------------	------------	-----------------------

図-3 融雪設備の概要

表-1 融雪設備の設計条件

項目	記号	単位	設計値	備考	
設計日降雪深	Hs	cm/d	11.0	過去10年累積相対頻度80%	
設計時間降雪深	hs	cm/h	1.7	hs=0.32/Hs*0.7	
設計気温	降雪時	t a	℃	-2.0	降雪日の平均気温
	凍結時	t a	℃	-2.4	風を考慮して1℃以上

(3) 設備の運転パターン

各システムには凍結防止運転（路面温度3℃以下でON、5℃以上でOFF）、融雪運転（路面温度1℃以下でON、3℃以上でOFF）、採熱運転（路面温度20℃以上でON、40℃以下でOFF）、蓄熱運転（蓄熱水槽温度12℃以下ON、15℃以上OFF）がある。設備の運転の概要を図4に示す。

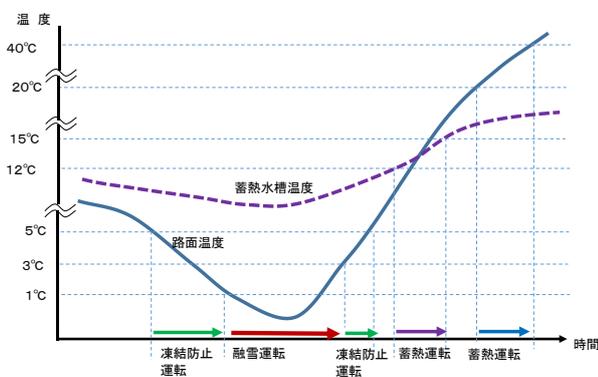


図-4 温度条件による運転パターン

3. 調査方法

(1) 観測項目

期待する融雪性能を確保しているか確認するためには、配管の循環水の行き帰り温度の測定だけでなく、実際の融雪時の路面状況・降雪量・気温の測定も必要である。

施設の制御条件を判別するために制御盤内の運転信号情報も同時に取得するほか、現地の制御に使われている路温データ、気温データも記録した。路面状況は、監視カメラで路面を撮影し、映像を間欠録画で記録した。

融雪設備で取得する観測項目として表-2に既存の観測項目、表-3に追加した観測項目を示す。

観測は、2013年12月10日～2014年2月28日の期間実施した。

表-2 既存の観測項目

	観測項目	観測内容	計測間隔
融雪制御機器測定	運転条件 制御条件	・運転状態（凍結防止運転、融雪運転、蓄熱運転、） ・路面温度	1時間

表-3 追加観測項目

	観測項目	観測内容	計測間隔
融雪制御機器測定	配管温度 流量	・行き配管表面温度 (T_o) ・戻り配管表面温度 (T_i) ・行き配管の流量 (q)	1時間
	循環水温	・循環水槽水温	〃
路面状況観測	気温	・気温	〃
	積雪深	・非融雪部の積雪深	〃
	融雪状況	・カメラによる融雪部の路面状況撮影	〃

(2) 性能調査方法

性能調査としては、融雪設備稼働時の路面状態、路面温度、参考として放熱量を算出する。

a) 放熱量

融雪設備における放熱量の考え方は路面消・融雪施設等設計要領（H20.5路面消・融雪施設等設計要領編集委員会 以下、設計要領）に記された温度低下の考え方の式を用いて逆算することで推定した。設計要領では放熱による温度低下として ΔT_i を求め、その上で設計温度を設定している。

本融雪設備の場合、 $\Delta T_i \cdot$ 流量 \cdot 面積 \cdot 循環液の比熱 \cdot 密度の値は現場で実際に運用している上で発生する既知の値となり、これらの数値をもとに放熱による温度低下が発生するユニット単位の流量と面積を算定式に代入することで、融雪中の単位面積当たりの放熱量 Q を求めることが可能となる。設計要領に記載された計算式より、既設の融雪設備における単位面積あたりの放熱量は以下に示した式で推定した。

$$Q = \Delta T \cdot q \cdot \rho_w \cdot C_w / a \quad (1)$$

ここで、 Q : 単位面積あたり放熱量 (W/m²) ΔT : 循環水の低下温度の平均値 (℃)、 $\Delta T =$ 送り温度 T_o (観測値) - 戻り温度 T_i (観測値) q (観測値) : 単位ユニットあたりの循環流量 (m³/s)、 ρ_w : 水の密度 (1,000kg/m³)、 C_w : 水の比熱 (4,186 J/kg/℃)、 a : 放熱する1ユニット当たりの面積 (m²) である。

4. 融雪施設の稼働状況

(1) 杉俣トンネルの稼働状況

①12月の稼働事例

12月の稼働状況グラフを図-4に示した。運転形態としては、融雪・凍結防止・蓄熱・採熱というパターンがあるが、杉俣の12月は凍結防止または蓄熱の運転パターンだけが確認できる。

凍結防止運転の場合、運転中の送り温度 (To) が12月初旬で8~9℃、12月下旬で7~8℃、戻り温度 (Ti) は12月初旬も下旬もあまり変わらず5~6℃程度となっている。ただし、流量は12月下旬の方がやや多い運転形態となっている。

蓄熱運転をかけることで少しずつ送り戻り温度、および蓄熱部温度が回復していることが確認できる。

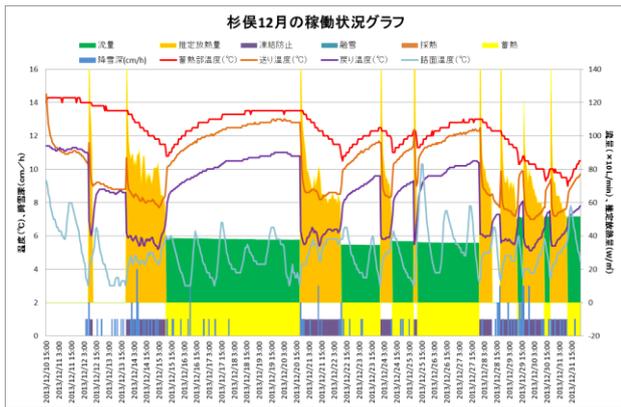


図-4 杉俣12月の稼働状況グラフ

②降雪時の稼働状況例

降雪初期の状況として最初の降雪が確認された12月13日から12月15日にかけてのグラフを図-5に示す。

降り始めの12月14日1:00頃は特に路面に積雪は見られないが、12月14日5:00頃にはうっすらと積雪が残っているのが確認できる。このとき、4cm/hの降雪があり融雪に必要な熱量は332W/m²と考えられるが、1時間あたりでの平均的な推定放熱量は89W/m²であった。その後、12月14日7:00の写真を見ると、路肩には積雪が残っているが、車両走行部分の積雪は確認できず、路面温度も4℃を超えていた、全体を通して熱量が不足する状況はなかったものと考えられる。

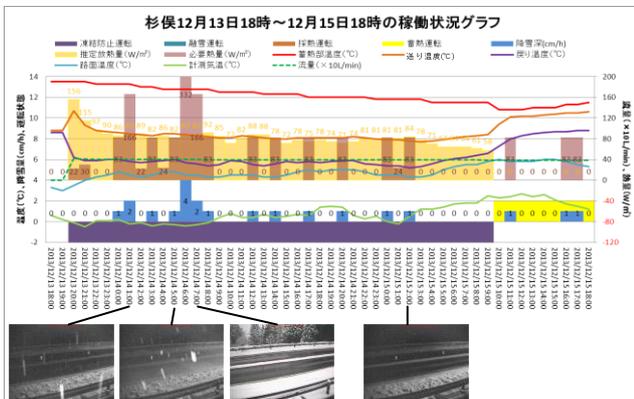


図-5 杉俣12月13日18時~12月15日18時の稼働、路面状況

(2)大袋トンネルの稼働状況

①12月の稼働事例

12月の稼働状況を図-6に示した。運転形態としては、融雪・凍結防止・蓄熱・採熱というパターンがあるが、大袋の12月は凍結防止または蓄熱の運転パターンだけが確認できる。凍結防止運転時の送り温度 (To) は6℃~14℃、戻り温度 (Ti) は5~10℃程度である。

運転状況を見ると12月20日からの蓄熱運転による温度上昇が終わった直後に凍結防止運転が開始され、蓄熱運転で得られた熱量が利用されている。また、降雪が頻繁に発生している割に路面温度が1℃以下まで下がらないため、凍結防止運転のままとなっている。

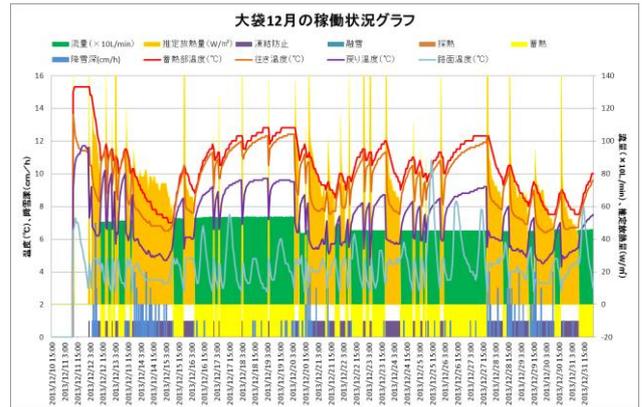


図-6 大袋12月の稼働状況グラフ

②降雪時の稼働状況例

降雪初期の状況として最初の降雪が確認された12月13日から12月15日にかけてのグラフを図-7に示す。

降雪当初の12月13日20:00頃は積雪も発生せず融雪されていたが、12月14日5:00頃から積雪が発生し始め、12月14日11:00頃には、路面積雪が残るほどの雪が確認できるが、路面温度を見ると積雪が断続的に続いた上記の時間帯は3.5℃と一定の温度となっている。このことから推察すると、路面が積雪状態のときでも融雪設備が機能しており、路面温度が3.5℃以下の状況とならないものと推定できる。

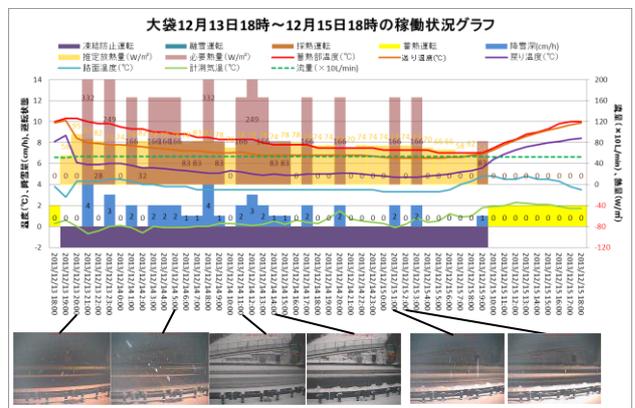


図-7 大袋12月13日18時~12月15日18時の稼働、路面状況

(3)小矢戸トンネルの稼働状況

①12月の稼働事例

12月の稼働状況を図8に示した。凍結防止運転時の送り温度 (To) は 7.5℃~12℃、戻り温度 (Ti) は 6~9.5℃程度である。

運転は凍結防止運転または蓄熱運転のいずれかであり、降雪が多い時間帯でも路面温度が 3℃になると凍結防止運転が始まり、路面温度が低下しないため、そのまま凍結防止運転を続けている様子を読み取れる。

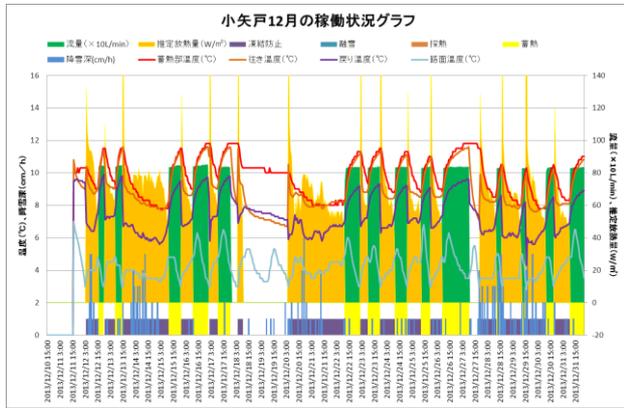


図-8 小矢戸12月の稼働状況グラフ

②降雪時の稼働状況例

降雪初期の状況として最初の降雪が確認された12月13日から12月15日にかけてのグラフを図7に示す。

降雪は翌日 12月14日 13:00 まで降り続き、路面の積雪がなくなり、落ち着いてきたのは 12月14日 16:00 であった。この間、降雪が強かったため、路肩部にはかなりの積雪が確認できる。

調査期間中も降雪が多く、路面温度も 3℃を下回ることがあったものの、路面温度が 1℃を下回ることがなかったため、路面が積雪状態のときでも融雪設備が機能しており、路面温度が 1℃以下の状況とならないものと推定できる。

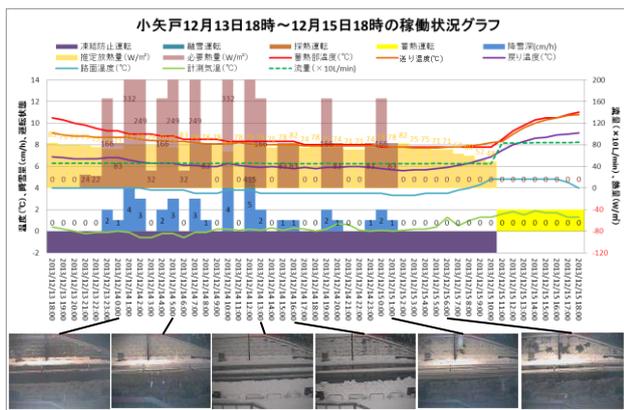


図-9 小矢戸12月13日18時~12月15日18時の稼働、路面状況

(4)設計条件下での稼働状況

融雪設備の設計条件下での稼働状況事例として、杉俣の設計条件 (時間降雪深1.7cm、気温-2℃) に近い状況時 (平成26年1月22日13時~23日12時) の稼働状況を図-10に示す。この期間の気温は17時から翌日9時まで 0℃以下であり、1~2cmの時間降雪深が観測されていた。

融雪設備の運転機能は、当初は蓄熱運転であったが、20時に路面温度が3℃に低下したため21時から凍結防止運転となり、翌日路面が5℃以上に上がる11時まで凍結防止運転が継続した。その後蓄熱運転に切り替わった。

凍結防止運転期間中の推定放熱量は最初127W/m²と大きいのがその後70 W/m²と安定し、気温は氷点下であったが路面温度は4℃に安定していた。

また、図-11に時間降雪深2cm、気温-3℃であった23日8時の路面状況を示す。周囲には積雪があるものの路面は黒く雪がない状況であった。

杉俣 1月22~23日の稼働状況グラフ

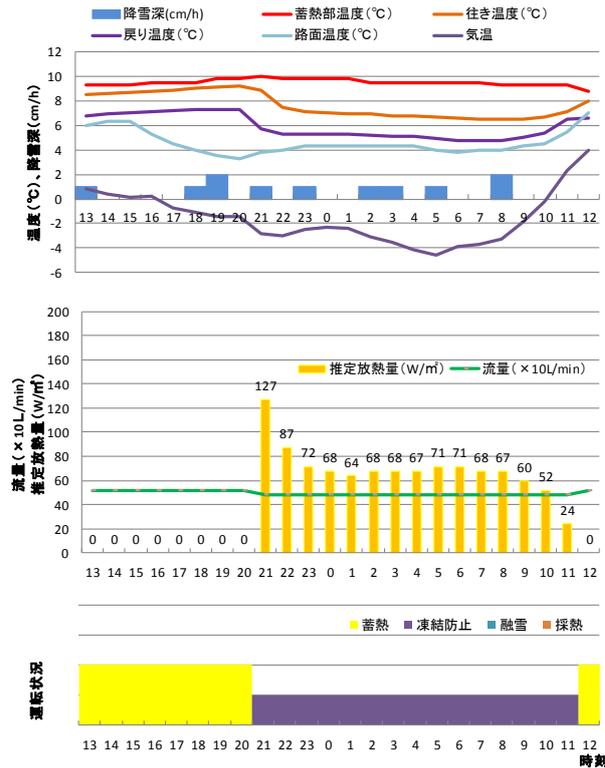


図-10 設計条件に近い状況時の稼働状況グラフ

平成26年1月22~23日



図-11 杉俣トンネル大野側坑口付近の路面状況
平成26年1月23日8時

5. 融雪設備の調査結果

測定期間 (2013年12月10日~2014年2月28日) の融雪設備の運転時間、最低気温、及び最低路温を表-4に示す。凍結防止運転 (路面温度3℃以下ON) は510~895時間と

総運転時間の27.6~48.9%であり、蓄熱運転（蓄熱水槽温度12℃以下）は935~1,338時間と51.1~72.4%（=1,338/1,848）であった。融雪運転と採熱運転は行われていなかった。

表4 融雪施設の運転時間、最低気温・路温

期間※1	杉俣 TN (大野側)	大袋 TN (大野側)	小矢戸 TN (福井側)
凍結防止運転(h)	510	752	895
融雪運転(h)	0	0	0
採熱運転(h)	0	0	0
蓄熱運転(h)	1,338	1,140	935
総運転時間(h)	1,848	1,894	1,830
ロガー計測時間(h)	1,929	1,929	1,929
最低気温(℃)	-7.3	-7.2	-7.3
最低路温(℃)	2.8	1.8	2.0

※1：12月10日~2月28日

融雪設備の凍結防止性能、融雪性能及び蓄熱性能について。

① 凍結防止性能

・今回、 $\Delta T = \text{送り側温度 } T_o \text{ (観測値)} - \text{戻り側温度 } T_i \text{ (観測値)}$ $q \text{ (観測値)}$: 単位ユニットあたりの循環流量 (m³/s) を計測することで、熱量として算出

し、設計値での確認が行えた。

また、実際の路面状況からも、測定期間で気温の最低は-7.3℃であったが、路温は最低1.8~2.8℃程度までしか下がっていなかったことから凍結防止の効果が確認できた。

② 融雪性能・蓄熱性能

・今冬は少雪傾向だったこともあり、融雪運転に切り替わることが無く、データの収集が行えなかった。

6. まとめ

今回の調査で、設備の蓄熱水温・外気温・路面温度等の収集データより想定される熱量を算出し、設備の凍結防止運転時の性能を確認することが出来た。

融雪運転については、雪の少ない年であったため、調査期間中に融雪運転に切り替わることが無く、融雪運転のデータについては収集することが出来なかった。

今後、自然エネルギーを利用した融雪設備を効率的に活用するためには、引き続き調査を行いデータを蓄積し、設備の計画・設計に生かしていきたい。

参考文献

- 1) 路面消・融雪施設等設計要領編集委員会：路面消・融雪施設等設計要領 H20.5