

# 坑内湧水を用いたトンネル用冷風発生装置

酒井健二<sup>1</sup>・酒井喜久雄<sup>2</sup>・片谷篤史<sup>3</sup>・大塚輝人<sup>4</sup>・進士正人<sup>5</sup>

<sup>1</sup>(株)エムシーエム 北陸センター (〒939-0121 富山県高岡市福岡町下老子43番地2)

E-mail:s-kenji@mcmcm.jp

<sup>2</sup>(株)エムシーエム 本社 (〒468-0006 愛知県名古屋市中白区植田東2-1014)

E-mail:sakai@mcmcm.jp

<sup>3</sup>片谷アツシ技研 (〒486-0927 愛知県春日井市柏井町5-87シャトレ愛松春日井 407)

E-mail:katatani.atsushi@gmail.com

<sup>4</sup>(独法)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 (〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6)

E-mail:ohtsuka@s.jniosh.go.jp

<sup>5</sup>正会員 山口大学教授 大学院創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail:shinji@yamaguchi-u.ac.jp

建設工事中のトンネルの坑内は暑熱環境に陥りやすく、作業員への熱中症対策が重要である。大電力を用いて暑熱空気を冷却するには、設備と運転のコストがかかるという問題点がある。山岳トンネルの建設現場では20℃程度の坑内湧水が存在するケースが多く、この湧水と暑熱空気をラジエーターで直接熱交換し、冷風を発生させる装置を開発した。この冷風発生装置の実験機を実際のトンネル建設現場に持ち込み、WBGT (Wet Bulb Globe Temperature : 湿球黒球温度) を評価する実験を行った。その結果、実験機の吐出口から10 m離れた位置でWBGTの低下を確認した。

**Key Words :** tunnel construction, heatstroke, WBGT, subsoil water, cool-wind generator

## 1. はじめに

近年、夏になると熱中症に関する報道が増え、熱中症に対する社会的な注目度が増している。

熱中症関係省庁連絡会議の運営要綱には、「会議は、消防庁、文部科学省、厚生労働省、農林水産省、気象庁、環境省の部局長により構成され、環境省大臣官房環境保健部が連絡会議の事務を行う」という内容の記載がある。平成29年度第1回熱中症関係省庁連絡会議幹事会の資料「厚生労働省における熱中症に関する平成29年度の取組」によると、H24～H28年累計の熱中症による死傷者数の業種別の状況は、建設業が全9業種中で最悪であり、トンネル以外の現場も含めると死傷者数で全体の約3割、死亡者数で約4割を占める<sup>1)</sup>。

また、文献2)に、「トンネル内は、作業の安全衛生を確保するため28℃以下の温度で、0.3 m/s程度の風速を維持することが望ましい」と示され、さらに、「山岳トンネルでは大型重機を多用するため、排熱が大きく、コンクリート硬化熱による発熱も大きく、特に夏場では劣悪な暑熱環境となるため、ファンでの局所通風による体感

温度の冷却、局所冷房装置、冷房休憩室の導入により、快適で安全な作業環境を保持する必要がある」と記述されている。しかしながら、現状この対策を行っている現場は少ない。

さらに、文献3)に、粉塵やガス濃度を管理制御するシステムが示されており、この中では、坑口に設けたクーラーで冷却した外気を、換気ファンで坑内に送風するという新しい試みにも触れている。また、坑口にクーリングタワーを、坑内にクーリングユニットとファンコイルを設置する大型坑内冷房システムを製品化したメーカーもある。

一方で、(NPO法人)地中熱利用促進協会のホームページに、「深さ10mくらいのところの地温は年平均気温にはほぼ等しく、四国九州の南部で20℃、北海道で10℃、東京や大阪では17℃程度、もちろん深くなれば地温は上昇するが、100m程度の深さでは温度の上昇は2～4℃程度。(間略)日本では冬と夏に地上と地中との間で10℃から15℃もの温度差が生ずる。つまり温度が一定である地中は冬温かく夏冷たい。地中熱利用は、この温度差に着目し、効率的に熱エネルギーの利用を行っている」と

の記述がある<sup>4)</sup>。

著者らは、「山岳トンネルの湧水（地下水）の温度は、大抵の場合、高くても20℃程度であり、夏場の外気温の管理目標の温度28℃より低いので、冷熱源として利用可能であり、この冷たい湧水とトンネル坑内の暑熱空気をラジエーターで直接熱交換すれば、暑熱空気を低電力で冷却できる」と考えた。即ち、熱中症対策として有効な冷風発生装置を実現できると考えた。この考えのもとに、冷風発生装置の実験機（以下実験機）を製作し、現場実験を行った。

## 2. 実験方法

### (1) 実験機

トンネル建設現場で使用する実験機の開発コンセプトを次の通りとした。

- ① 低電力：チラーを用いない。湧水をラジエーターに通水し、直接熱交換することで暑熱空気を冷却する
  - ② 小型：2トントラックに積載可能。狭隘な現場で機動性を確保。作業員に直接風を当てることも可能
  - ③ ファン搭載：ラジエーターに通風し、冷えた空気をファンで吹き出す
  - ④ 大風量：作業員が仕事を行う切羽近くで送風し、風による体感温度低下の効果を狙う
  - ⑤ 簡便な設置：湧水を利用し、200V系の電源を繋ぐだけで冷風を生成する
  - ⑥ 簡便なメンテナンス：装置構造をシンプルにする
- コンセプトに基づき製作した実験機の外観および概略の仕様を図-1に示す。2トントラックに積載可能な大きさである。このため、作業員が集中する切羽近くまで移動させることが可能である。

実験機の構造を図-2に示す。空気系は、軸流ファンで外気を吸込み、後流のラジエーターに通風し、熱交換により温度低下した空気を吐出するものである（定格風量1,000 m<sup>3</sup>/min）。水系は、供給される湧水をポンプで上段と下段のラジエーターに通水（定格水量100 L/min）し、空気との熱交換で、温度上昇した水を排水する。なお、本装置は熱交換装置であるから、外気温が水温よりも低い場合には、温風発生装置としても使用可能である。

工場の実験機の性能確認した結果の一部を図-3に示す。この特性は、インバーターで軸流ファンの風量を変化させた場合に、入口空気温度と出口空気温度（吐出口中心軸から2 m位置での温度）の差の絶対値 $\Delta t$ がどのように変化するかを示したものである。①記号○、②記号□、③記号△は、いずれも入口空気温度と入口水温の差を10℃同一の条件とした。また、水量を、51、43、28 L/minと変化させた。（供給できる水量の関係でラジエ

ーター1台のみ通水し試験した。）



図-1 冷風発生装置実験機の外観と仕様

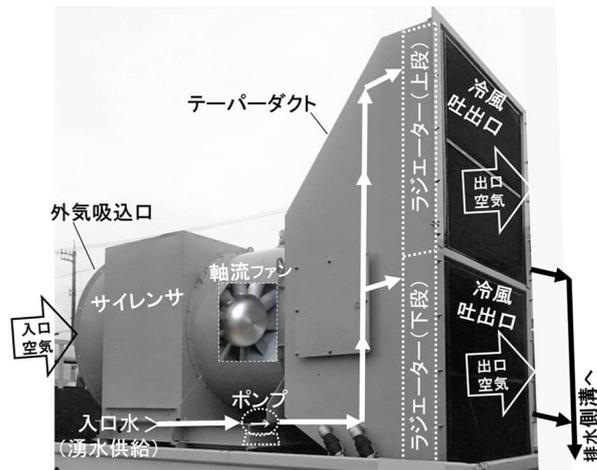


図-2 実験機の構造説明図

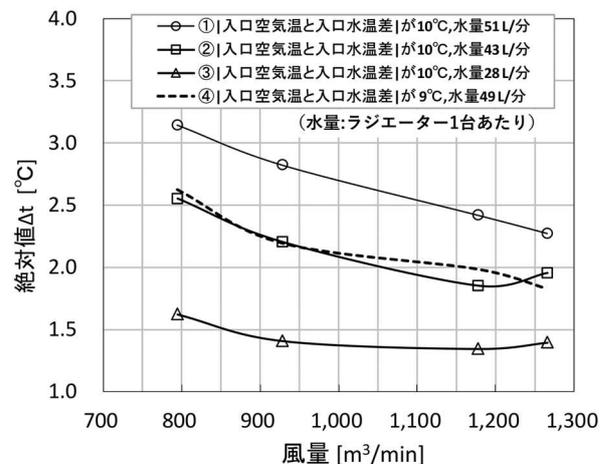


図-3 実験機の $|\Delta t|$ 特性（空気温度差特性）  
[入口℃-出口℃]

これから言えることは、

- 1) 風量増加とともに $\Delta t$ は小さくなる
- 2) 入口空気温度と水温の差が一定ならば、水量が大きい程、 $\Delta t$ は大きくなる

また④破線は、①とほぼ同水量の49 L/minだが、入口空気温度と入口水温の差が9°Cと少し小さい場合の特性である。①と④を比較することにより、次のことが言える。

- 3) 水量が同じでも、入口空気温度と水温差が小さい程、 $\Delta t$ は小さくなる

また、図4に、実験機の吐出口からの距離による冷風温度・風速について、工場測定の結果を示す。例えば、吐出口から12 mの位置で2.5°Cの温度低下を確認した。

図5に、ファンの消費電力と風量の関係を示す。定格風量時（1,000 m<sup>3</sup>/min），実験機の吐出面上の平均風速は約5 m/s、消費電力は10 kWである。また、その他所要電力は、ポンプ2.2 kWのみである。

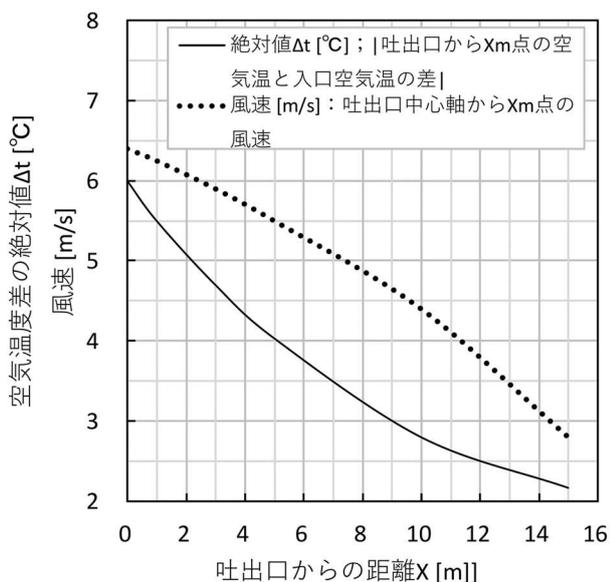


図4 冷風温度・風速の距離特性

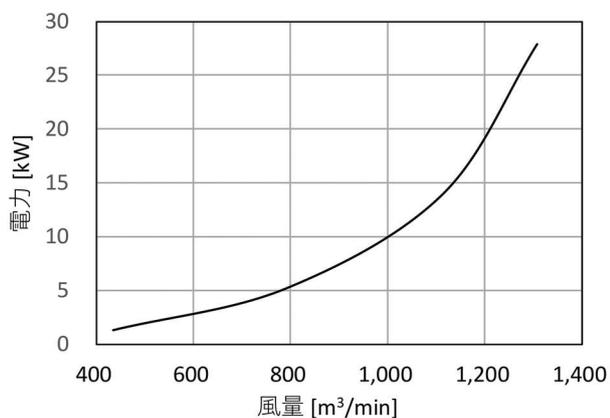


図5 実験機の電力特性（ファン）

## (2) 温度計測器

図6に、データロギング機能付きの熱中症指数計HI-2000SD（以降、HI-2000SD）の外観と仕様を示す。HI-2000SDは、乾球温度、湿球温度、黒球温度、湿度、WBGT（Wet Bulb Globe Temperature：湿球黒球温度）という各種温度データを同時に計測・記録することができる（厚労省が示す「身体作業強度等に応じたWBGT基準値」は、熱中症に陥らない為の管理基準であり、WBGTが用いられる）。WBGTは屋内の場合、式(1)で定義される。

$$\text{WBGT} [^\circ\text{C}] = \text{湿球温度} \times 0.7 + \text{黒球温度} \times 0.3 \quad (1)$$

高性能なHI-2000SDをトンネル建設現場で、温度計測用の基準器として用いることとしたが、この計器は、比較的高価な精密機器であり、また、防水と防塵については無防備である。従って、トンネル現場に多数配置することは、費用面でも耐久性の面でも躊躇された。

そこで、安価で、IP56相当の防塵・防水構造を備えたボタン電池形状の小型温度ロガー「サーモクロンSL」（以降、SLと表記）も現場計測に導入することとした。図7に、SLの外観と仕様を示す。

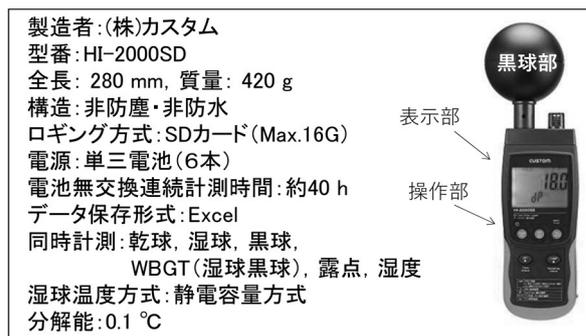


図6 熱中症指数計HI-2000SDの外観と仕様

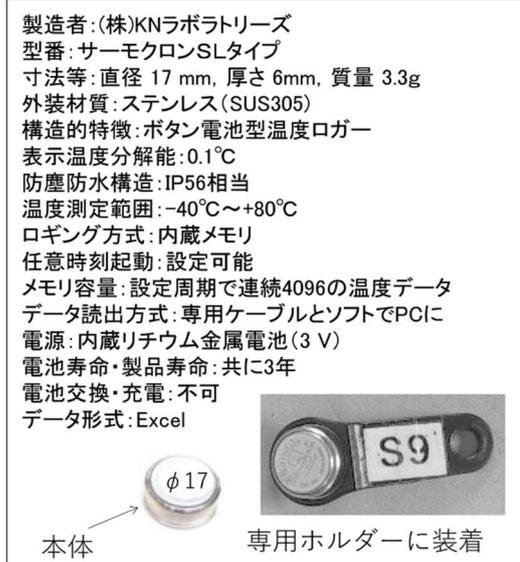


図7 ボタン電池型温度ロガーSLの外観と仕様

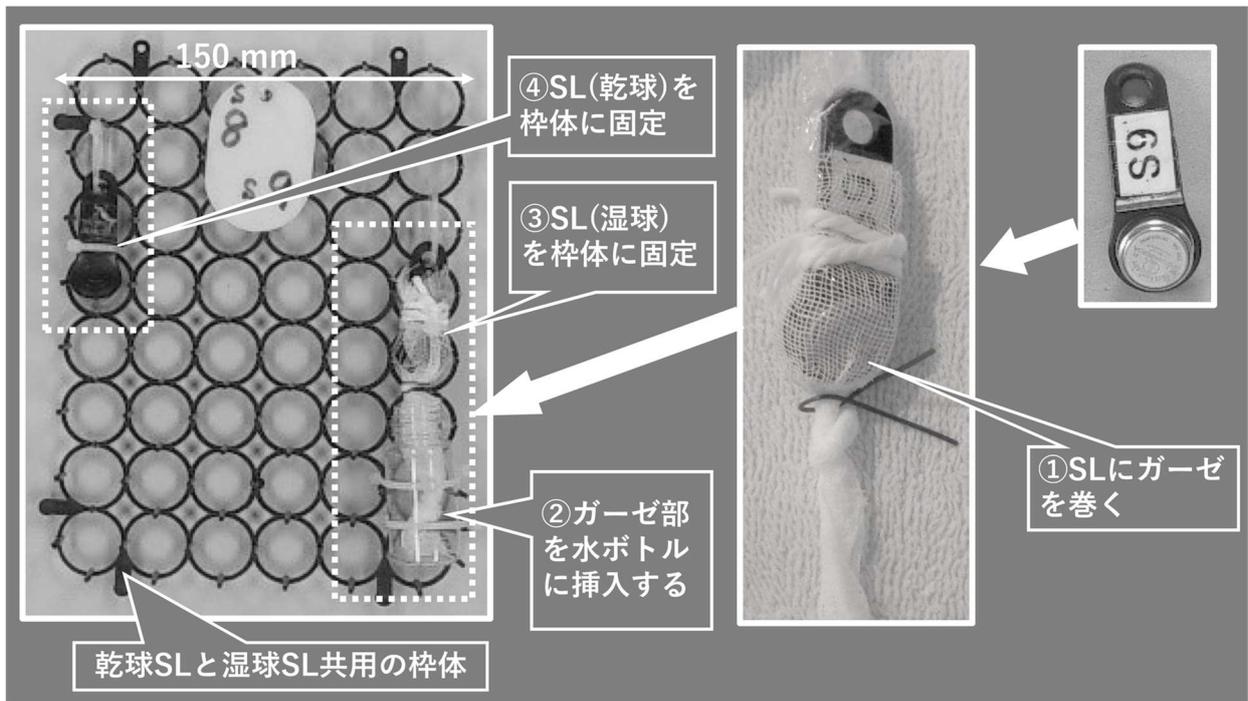


図-8 湿球温度計測部の作製要領および乾球温度と湿球温度を計測するSL組の外観

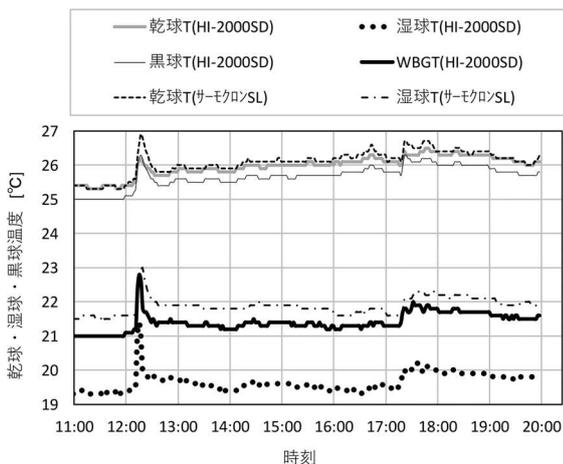


図-9 温度計器同時稼働の推移 (HI-2000SDとSL組)

このSLを用いれば、トンネル現場での乾球温度の計測は可能だが、さらに、図-8に示す要領でSLにガーゼを巻き、ガーゼ部の下端を水ボトルに浸すことにより、湿球温度も計測可能になると考えた。網状の枠体に、乾球温度計測用と湿球温度計測用の2個のSLを取り付けた。以降、これをSL組と呼ぶことにする。

図-9は、HI-2000SDとSL組1セットを、事務所内の同一場所で同時に9時間稼働させた時のログデータをグラフ化したものである。これを見ると黒球温度 (HI-2000SD) は、乾球温度 (HI-2000SD) よりも僅かに低いだけで、ほぼ同じ増減で推移していることが分かる。また、乾球温度 (HI-2000SD) と乾球温度 (SL) は、ほぼ同じ値を示していることも伺える。このことから、乾球温度

(SL) を補正して黒球温度 (HI-2000SD) を類推することは、ある程度可能と考えるに至った。また、図中の太い実線WBGT (HI-2000SD) は、とりわけ湿球温度 (HI-2000SD) の変動推移と似ているが、これはWBGTの定義の式(1)において、WBGTの構成要素の7割が湿球温度であることからして当然と言える。

また、湿球温度 (SL) は、湿球温度 (HI-2000SD) より高いが、ほぼ同じ増減で推移していることも分かった。このことから、湿球温度 (SL) を補正して湿球温度 (HI-2000SD) を類推することも可能と考えた。この湿球温度差の主要原因は、HI-2000SDは、電気的な静電容量方式で湿球温度を計るのに対し、SLは湿りガーゼを用いるという方式の違いによるものと考えられる。

以上の予備実験から、トンネル現場の同一地点に、1台のHI-2000SDと一組のSL (乾球温度および湿球温度用) を配置することにより、SL組の二計測値から、基準器HI-2000SDに整合するように、乾球温度、湿球温度、黒球温度を補正・類推して求め、WBGTが得られる目算がたった。

SLは比較的安価なので、これをトンネル現場の複数個所に配置することにより、WBGTを含めた各種温度データを収集する計画を立案した。

### 3. 実験結果と考察

2018年7月に、北陸地方のトンネル建設現場に実験機を持ち込み、2日間、実験を行った。このトンネル工区は、全長約2.2 kmで、実験当時、坑口から切羽まで780 mあった。コンクリート二次吹付け前のトンネル断面積は約75 m<sup>2</sup>である。坑口の送気ファンは100%風量時2,500 m<sup>3</sup>/min（盤面表示値）で、直径1.6 mの風管を通して切羽に送気していた。

現場の湧水の水温は約15°Cで安定していた。しかし、湧水量が不足したので、水槽を用い湧水に川からの水を混合し、20°C前後の比較的冷たい水を調製した。これにより長時間のポンプ稼動が可能となった。一方、湧水のみを水槽に溜めた場合、ポンプは最大10分間、稼動可能であった。

実験初日は、切羽から約150 m後方（坑口寄り）の発破退避小屋付近で実験し、2日目は切羽近傍で実験した。

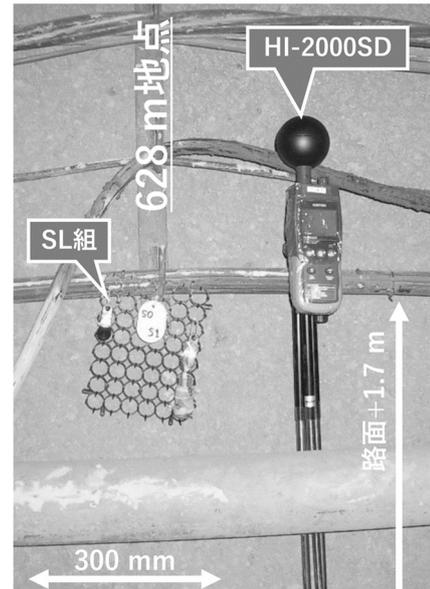


図-10 温度計測基準器HI-2000SDとSL組の設置状況

#### (1) 温度計測器間の補正

628 m地点、切羽に向かって左側の壁面に、SL一組（乾球・湿球温度用）と基準器HI-2000SD（調理用ラップで防滴養生実施済）を設置した（設置高さ約1.7 m）。この様子を図-10に示す。両者温度計測器を、ロギング周期2分で同時稼動し、4時間、温度データを収集した。

図-11に、基準器HI-2000SDのWBGTの計測値（実線）と、SL組により得た二つの温度を補正・類推して得たWBGT値（点線）を示す。両者はよく一致している。ここで、SL組の二つの温度計測値を用い、基準器HI-2000SDの各計測値に近い値を、補正・類推して得た手法は、次の通りである（注：補正値は実測値より算出）。

$$\text{補正乾球温度} [^{\circ}\text{C}] = \text{SL乾球温度} - 0.26 \quad (2)$$

$$\text{補正湿球温度} [^{\circ}\text{C}] = \text{SL湿球温度} - 0.68 \quad (3)$$

$$\text{類推黒球温度} [^{\circ}\text{C}] = \text{SL乾球温度} - 0.45 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{類推WBGT} [^{\circ}\text{C}] &= \text{補正湿球温度} \times 0.7 \\ &+ \text{類推黒球温度} \times 0.3 \quad (5) \end{aligned}$$

両者の乾球温度、湿球温度を並べて図示しなかったが、それぞれの温度について両者はよく一致していたことを、ここで付け加える。

図-12に、湿度についても同様に示す。こちらも、類推値（点線）が実測値（実線）と概ね一致している。なお、類推値の湿度は、補正乾球温度と補正湿球温度を用い、以下による簡易計算<sup>9)</sup>で求めた。

$$\text{飽和水蒸気圧 } P_{ws} [\text{hPa}] = A \times \text{Exp}[C \times m \times T \div (T_d + T_n)] \quad (6)$$

（ただし、 $A = 6.1162$ ,  $C = 2.30258$ ,  $m = 7.5892$ ,  $T_n = 240.71$ ,  $T_d$ は乾球温度 $[^{\circ}\text{C}]$ ）

$$\text{水蒸気圧 } P_w [\text{hPa}] = P_{ws} - 1013 \times K \times (T_d - T_w) \quad (7)$$

（ただし、乾湿計係数 $K [^{\circ}\text{C}^{-1}] = 0.000662$ , 湿球温度 $T_w [^{\circ}\text{C}]$ ）

$$\text{相対湿度 } Rh [\%] = P_w / P_{ws} \times 100 \quad (8)$$

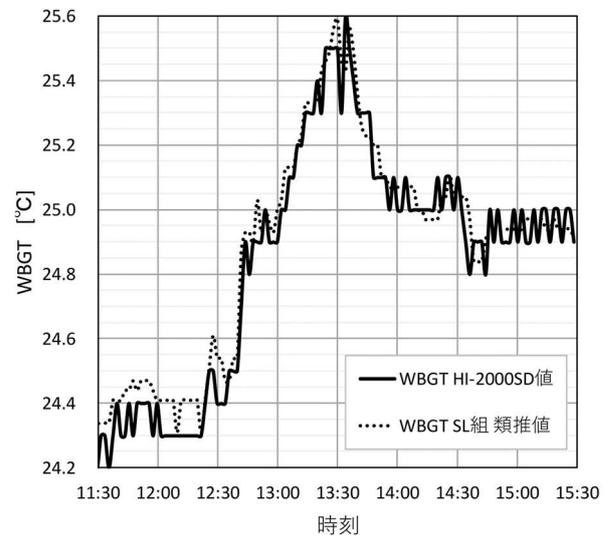


図-11 基準器の計測値とSL組の補正類推値の相関 (WBGT)

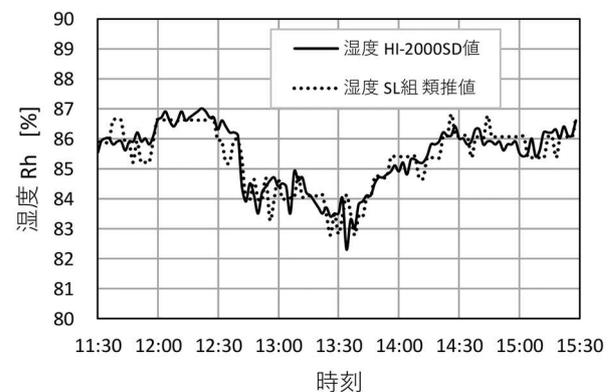


図-12 基準器の計測値とSL組の補正類推値の相関 (湿度)

従って、SL組をトンネル内の実験エリアに複数配置することで、各位置の温度データ収集が可能と判断した。

また、本実験から、SL組で得られた乾球温度と湿球温度を補正・類推するという簡易法により、概ね正確にWBGTを得る手法を確立することができた。

## (2) 切羽から百数十メートルエリアでの実験

図-13に、実験機と温度計測器の配置を示す。上の図は、切羽から百数十メートルエリアの平面図であり、下の図は側面図を示す。実験機の冷風の吹出し面を坑口から620 m位置とした。図中の△マークは温度計測基準器HI-2000SDを示し、▲はSL組を示す。各SL組は2個のSLを備えており、例えば、乾球温度用s0と湿球温度用s1を備えたSL組を、628 m位置に設置した。

s0からs11までの12個のSLにおいて、偶数番号が乾球温度用であり、奇数番号が湿球温度用である。実験機の風上側にはs0s1組を設け、風下側にはs2s3組からs10s11組までの5組を配置した。s0s1組から最遠のs8s9組までの距離は20 mである。全6組のうち、s10s11の1組のみは、右側の壁面に設置し、残り5組は左側壁面に設けた。実験機を定格風量1,000 m<sup>3</sup>/minで稼働することにより、この実験エリアの温度がどのように変化するか確認する実験を行った。この時、坑口送気ファンの風量は2,500 m<sup>3</sup>/min (100%) であった。

ここで、実験開始前の気掛かりは、温度計測器を、壁面のみに設置することが最良の計測方法にはならないであろうという懸念であった。理想的には、路面の幅方向において、両端の左右壁面の他に、両端間のいくつかの場所にも温度計器を配置するのが良いと思われた。しかし、実験中、重機車両が常時往来する路面の途中に、計器を置くことは、工事の妨げになり許されない。従って、壁面のみに設置する方法を選んだ。

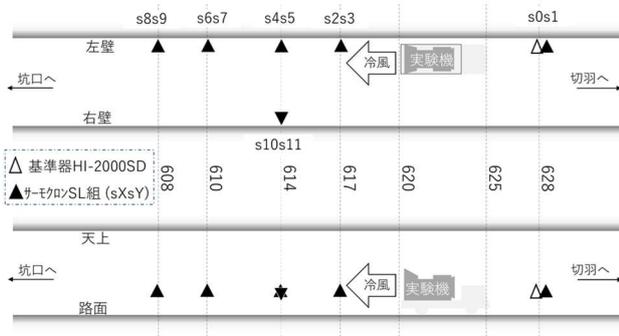


図-13 実験機と温度計器の配置  
(切羽から百数十メートルエリア)

## a) 坑口外気温と坑内温度の確認

図-14に、実験エリア (図-13) に、SL組を配置した17:00から翌日11:00までの18時間における坑口外気温と各SL組の乾球温度を示す (坑口の外気温は、乾球温度のみ計測したので、WBGTによる表記はしない)。

この時間帯における、坑口外気温と6組のSLで示される坑内温度の相関性はあまりなかった。また、発破後、ずり出し車両が走行すると、ずり出し工程が終わるまで、坑内の温度は顕著に上昇した。さらに、概して、6組のSLの内、s10s11組が、他5組よりも約0.5℃低温であった。これは図-13の平面図からも分かるように、s10s11組のみが、車両通行側 (右壁面に近い側) に位置しているからである。即ち、車両通行側は坑口から切羽近傍まで、重機・電源車・集じん機などが配置されないので、坑口の送気ファンで切羽に送風された空気が、切羽に当たり、坑口に戻る際、障害物なしに、よりスムーズに流れるからと考えられる。

## b) 実験機の稼働・停止

図-15に、03:00から21:00までの18時間の、実験エリア (図-13) における、各SL組のWBGT [°C]の経時推移を示す。冷風実験の期間 (実験機を稼働・停止させる実験を行った期間) は11:08から15:36である。冷風実験期間外の時間帯では、各SL組のWBGTは、概ね、皆同じ傾向で増減しながら推移した。一方、冷風実験期間 (11:08から15:36) における、各SL組のWBGTには、比較的顕著な差異が見られるものがある。

実験機の吸い込み口よりも風上側に位置するSLのs0s1組 (一点鎖線) のWBGTを基準に議論を進めたいが、この基準とするWBGTも変動しており、残り5組との相関が分かりにくい。そこで、s0s1組のWBGTを基準として、その他の組のWBGTの差を観ることにする。即ち、s2s3組からs10s11組までの5組のWBGT値のそれぞれから、基準点s0s1組のWBGT値を差し引いた値をΔWBGTとし、s2s3組からs10s11組まで5か所の温度推移をΔWBGTを用いて評価した。

図-16に、各ΔWBGTの推移グラフを示す。例えば、s2s3組のWBGTからs0s1組のWBGTを差し引いた値をΔ (s2s3-s0s1)と表記している。他も同様である。

実験期間中の実験機の稼働状態を説明する。実験機のファンを、時刻11:08に稼働し、15:14に停止し、さらに、15:28に稼働し、15:36に停止した。これを「丸印F」で示す (2か所)。また、実験機のラジエーターに冷却水を通水するためのポンプを稼働させた時間帯を「丸印P」で示す (4か所)。

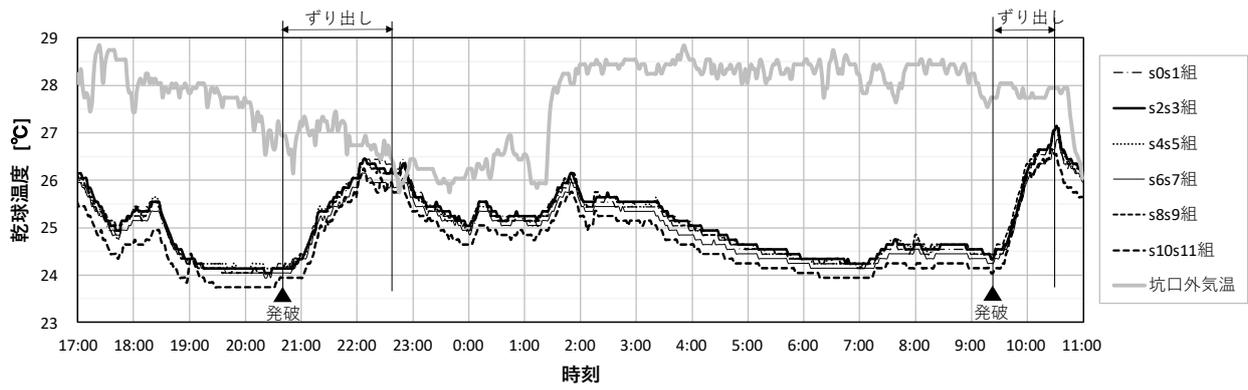


図-14 18時間中の坑口外気温とSL組の乾球温度の推移

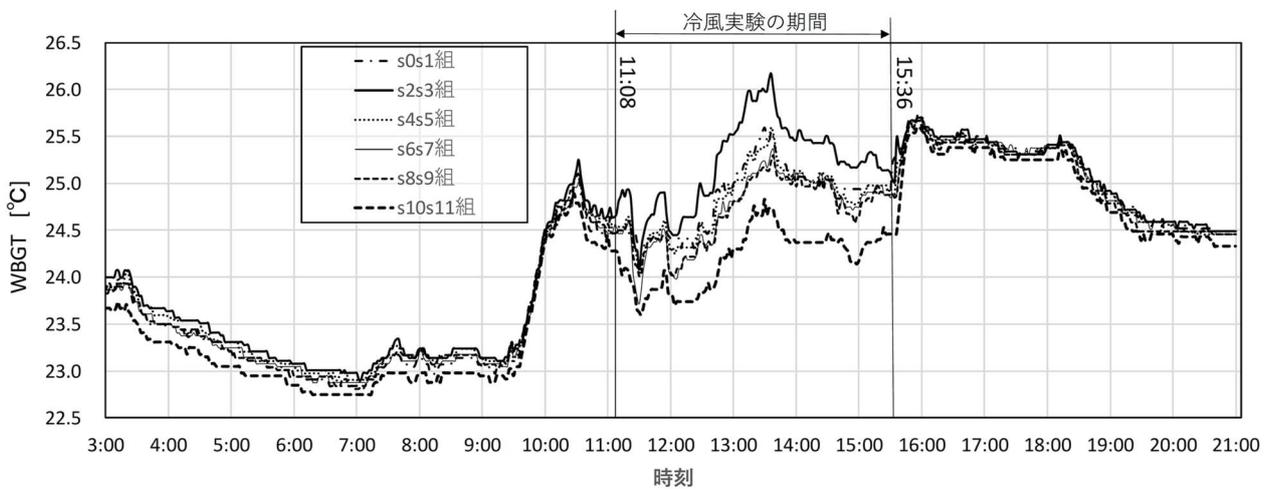


図-15 18時間中のWBGTの推移

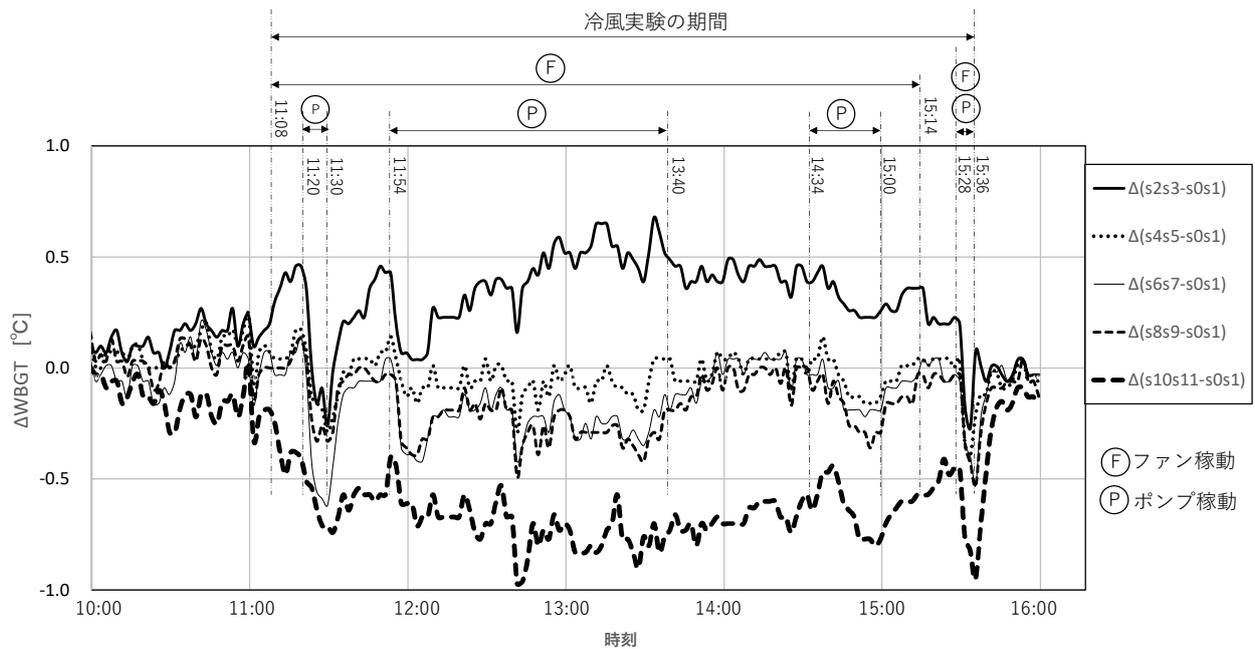


図-16 各ΔWBGTの時間推移

実験機のファンとポンプの両者が稼動して初めて冷風が生成されるが、両者が同時に稼動し、冷風の生成条件が整った時間帯は、①11:20から11:30、②11:54から13:40、③14:34から15:00、④15:28から15:36の4つある。

一方、ポンプは稼動せず、ファンのみが稼動した時間帯は、①11:08から11:20、②11:30から11:54、③13:40から14:34の3つある。また、冷風実験の期間中、15:14から15:28の時間帯では、ファンもポンプも稼動しなかった。冷風実験期間外の11:08以前は、ファンもポンプも稼動しなかったし、15:36以降も両者共稼動しなかった。

最初のファンの稼動時間帯11:08から15:14には、実験機のポンプが稼動した場合も稼動しなかった場合も存在する。11:08にファンが稼動すると直ちに、614 m右壁位置の $\Delta(s10s11-s0s1)$ が、 $0^{\circ}\text{C}$ を下回って低下し続け、その後、概ね $-0.5^{\circ}\text{C}$ から $-1.0^{\circ}\text{C}$ の範囲内に落ち着いたことが分かる。ポンプが稼動していない時でも、実験機のファンのみが稼動しただけで、 $\Delta(s10s11-s0s1)$ は負値を示し、冷気環境下にあることが分かった。ポンプが稼動しないのに、冷気環境になったことは検討課題である。一方、617 m左壁位置の $\Delta(s2s3-s0s1)$ は、稼動時間中の8割以上の時間で、 $0^{\circ}\text{C}$ を上回った。ファンとポンプが稼動し、冷風が発生している11:54から13:40の時間帯と14:34から15:00の時間帯でさえも、実験機吐出620 m位置から3 m風下(617 m位置)にあるs2s3が、暖気環境下にあったことも検討課題である。

図-17に、今回、実験機が設置された620 m位置付近の状況を示す。実験機の吐出面から2.5 mの位置に、高さ1.9 mの発破の退避小屋(間口2.0 m、奥行1.5 m)が存在する。実験機と小屋の中間位置に、パレット上に積載した資材も存在する。従って、ファンを稼動させると、実験機の上段ラジエーターからの吐出風は概ね、小屋の頂部を通過するが、下段ラジエーターからの吐出風の大部分がパレット資材の上部と小屋の面(切羽側の背面)に衝突する。ここで、実験機からの吐出風の一部は、小屋の頂部で絞られ、ある程度高風速になったものとする。また、トンネルの天井付近の空気温度は、路面近傍の空気温度よりも高く、小屋付近のトンネル天井部にも、暖気が存在すると考える。ファンが稼動すると、小屋の頂部で高速化した空気流に天井暖気の一部が誘引され、この誘引された暖気を、s2s3組が検知したものと思われる。

次に、実験期間中に、ファンとポンプの両者を稼動し、冷風を発生させた場合について考察する。この条件の時間帯は、4回(4ケース)存在する。図-18に、各計測位置ごとに、ポンプ稼動中の $\Delta\text{WBGT}$ を平均値で示す。

620 m位置が実験機の冷風吐出面であり、ここから坑口方向に向けて冷風を送風した。617 m位置に、発破の退避小屋(の中心)が存在する。

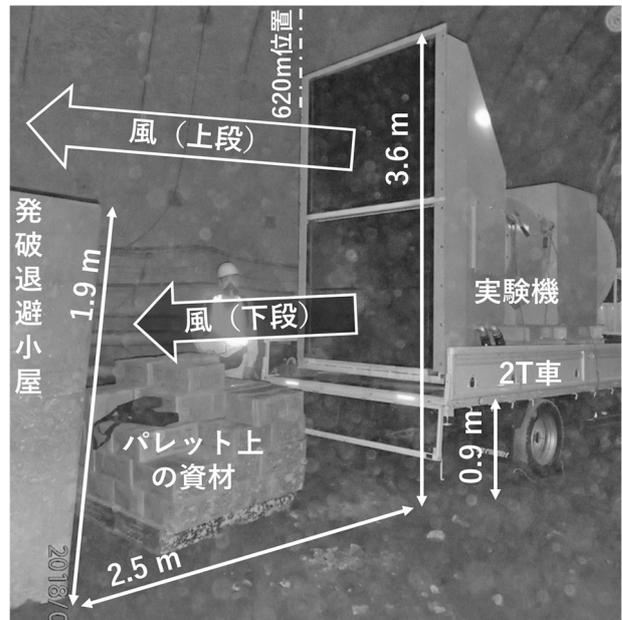


図-17 実験機吐出の近傍の配置物の状況

4ケースとも、実験機の吐出面から10~12 m坑口側の610~608 m位置において、供給する冷水温度が、 $19.2^{\circ}\text{C}$ 、 $19.0^{\circ}\text{C}$ 、 $17.1^{\circ}\text{C}$ 、 $15.3^{\circ}\text{C}$ と下がるにつれ、 $\Delta\text{WBGT}$ が、より負側に増えて(冷えて)おり理解できる。4ケースの曲線は左壁面のSL組によるものであり、 $\Delta\text{WBGT}$ の最低値は、吐出面から12 m先の608 m位置における $-0.6^{\circ}\text{C}$ であった。この $-0.6^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta\text{WBGT}$ )は、 $-0.75^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta$ 乾球温度)に相当する。しかし、図-4で示した工場試験結果では、吐出口中心軸から12 m離れた位置での $\Delta$ 乾球温度は $-2.5^{\circ}\text{C}$ であった。工場試験と比べると、今回の現場実験では温度低下が少なかった。

612~617 mの位置では、冷水温度と $\Delta\text{WBGT}$ の上下関係が乱れており、各特性の交叉が存在する。その理由として、小屋頂部の高速空気流の乱流成分の影響が考えられるが、詳細は不明である。

一方、614 m位置にのみ存在する右壁面のSL組のデータについては、特性曲線は形成されず、○印、■印、×印、▲印の4点で示される。これら $\Delta\text{WBGT}$ の全てが、左壁面の最低値よりも小さい値となっている。そして、水温の違いによる $\Delta\text{WBGT}$ 値の上下関係は成立していない。これらの理由の詳細は不明である。

切羽から百数十メートルエリアでの実験で、 $\Delta\text{WBGT}$ が最小値となったのは、 $-0.85^{\circ}\text{C}$  (614 m位置右壁面)であり、 $-1^{\circ}\text{C}$ に満たない小さな値であった。これは、誘引された天井暖気の影響によるものかもしれないが、詳細不明である。また、今回得た温度低下の値は小さかったが、これは、あくまで壁面に温度計器を設置した結果であるということに留意すべきである。

また、608 ~ 617 m間で、壁から離れた路面中央寄りの領域では、実験機のファンにより1 m/s前後の風速が生

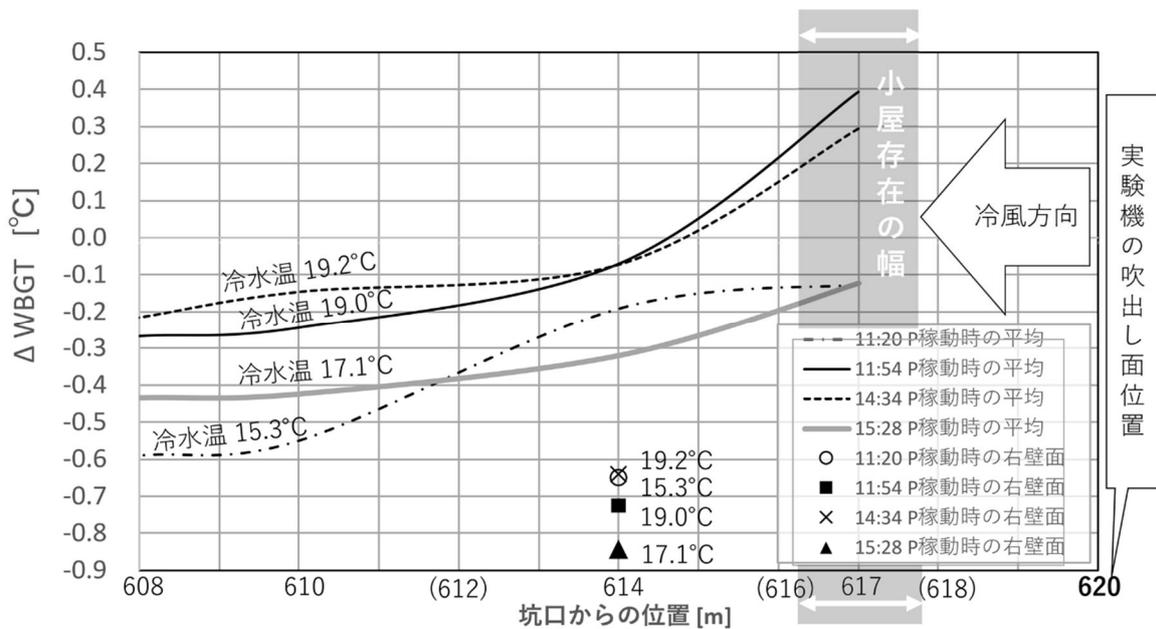


図-18 ΔWBGTの位置による変化 (冷風発生時)

じたことも手伝い、体感温度的には、もっと冷却効果があったように感じられた。

### (3) 切羽近傍エリアでの実験

切羽近傍に実験機を持ち込み、吹付け作業中に、冷風を切羽に向かって吹く実験を行った。吹付け作業を妨害しないよう、実験期間は、11:00から12:00までの1時間と決められた。このトンネル現場では、吹付け時、坑口送気ファンの風量を100% (2,500 m<sup>3</sup>/min) とするが、実験機の効果をより顕著に見たい狙いがあり、実験中の換気風量を60% (1,500 m<sup>3</sup>/min) とした。一方、実験機の風量は、定格1,000 m<sup>3</sup>/minとした。また、実験中、吹付け作業は、切羽面に向かって右半分の部位で行われた。

図-19に、実験配置を示す。切羽に向かって左側に、吹付け機とミキサー車が配置されたので、実験機を右側に配置した。実験機の吐出面は、切羽に向かって24 mの位置とした。ここで、実験機の吐出風(冷風)を切羽面に向かって垂直に吹くケース ( $\theta = 0^\circ$ ) と、斜め左に  $15^\circ$  傾けて吹くケース ( $\theta = 15^\circ$ ) を設定した。また、切羽から14 m位置の右壁面にSLのs0s1組を設け、16 m位置の左壁面にs2s3組を設置し、WBGTを計測することとした(実験機の吐出面からs0s1組までの距離は10 m)。両SL組の設置高さは路面から0.7 mとした。また、切羽から50 m位置に換気用風管( $\phi 1.6$  m)の吐出口がある。また、実験中の水温は約20°Cで安定していた。

図-20に実験結果を示す。横軸は時刻、縦軸は各SL組から得られたWBGT [°C]である(ΔWBGTではない)。

切羽14 m右壁面のWBGT(実線, s0s1)は大きく変動

している。11:00から11:10の間、実験機を稼動しなかったが、29.5°Cから26.6°Cまで急に温度が低下した。これは、実験機を切羽24 m位置に移動するに際し、それまで切羽15 m位置に停車していた小型トラックを移動させたことにより、切羽からはね返る風の路が確保され(つまり換気性が向上し)、急に温度低下したものと思われる。

実験機の吐出風向  $\theta = 15^\circ$  にて、11:16から11:24まで冷風稼動すると、右壁面SL (s0s1組)のWBGTは27.7°Cから26.4°Cに下がった。

次に、風向  $\theta = 0^\circ$  にて、11:34から11:46まで冷風稼動すると、右壁面SL (s0s1組)のWBGTは、27.8°Cから25.4°Cまで下がった。

11:50から12:00の間は、実験機を稼動しなかったが、右壁面SL (s0s1組)は27.5±0.4°Cの範囲で変動していた。そこで、実験期間中の実験機を稼動しない場合の、右壁面SL (s0s1組)における基準WBGT値を27.5°Cとした。この基準値を用いると、 $\theta = 15^\circ$  の場合、実験機吐出から10 m切羽寄りの位置で、基準27.5°Cから26.4°Cに、1.1°Cの温度低下があったことになる(ΔWBGT; -1.1°C)。また、 $\theta = 0^\circ$  の場合、基準27.5°Cからの温度低下ΔWBGTは-2.1°Cである。実験機からの吐出風を向ける方位が  $15^\circ$  違っただけで、冷風効果の程度に差が生じたが、これは、 $\theta = 15^\circ$  よりも  $\theta = 0^\circ$  の方が、冷風が右壁面のs0s1組に当たり易かったからと考える。また、-2.1°C (ΔWBGT) は、-3.9°C (Δ乾球温度)に対応するが、工場試験時のΔ乾球温度は-2.8°C (10 m位置)であり、Δ乾球温度両者に差が生じた。その原因は不明である。

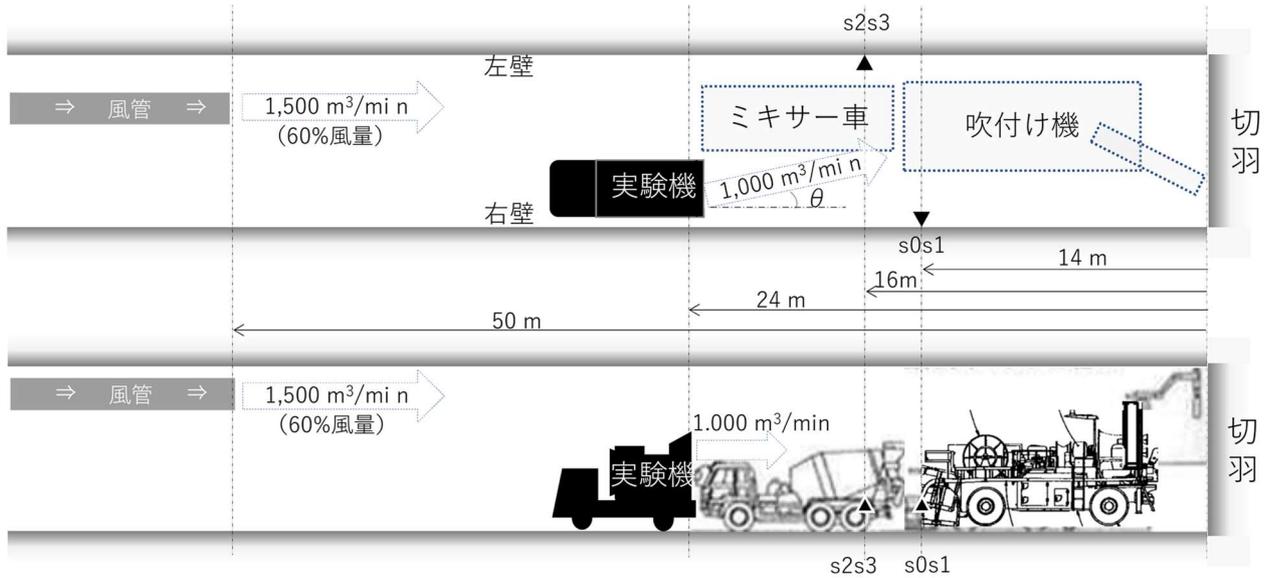


図-19 切羽近傍での実験配置

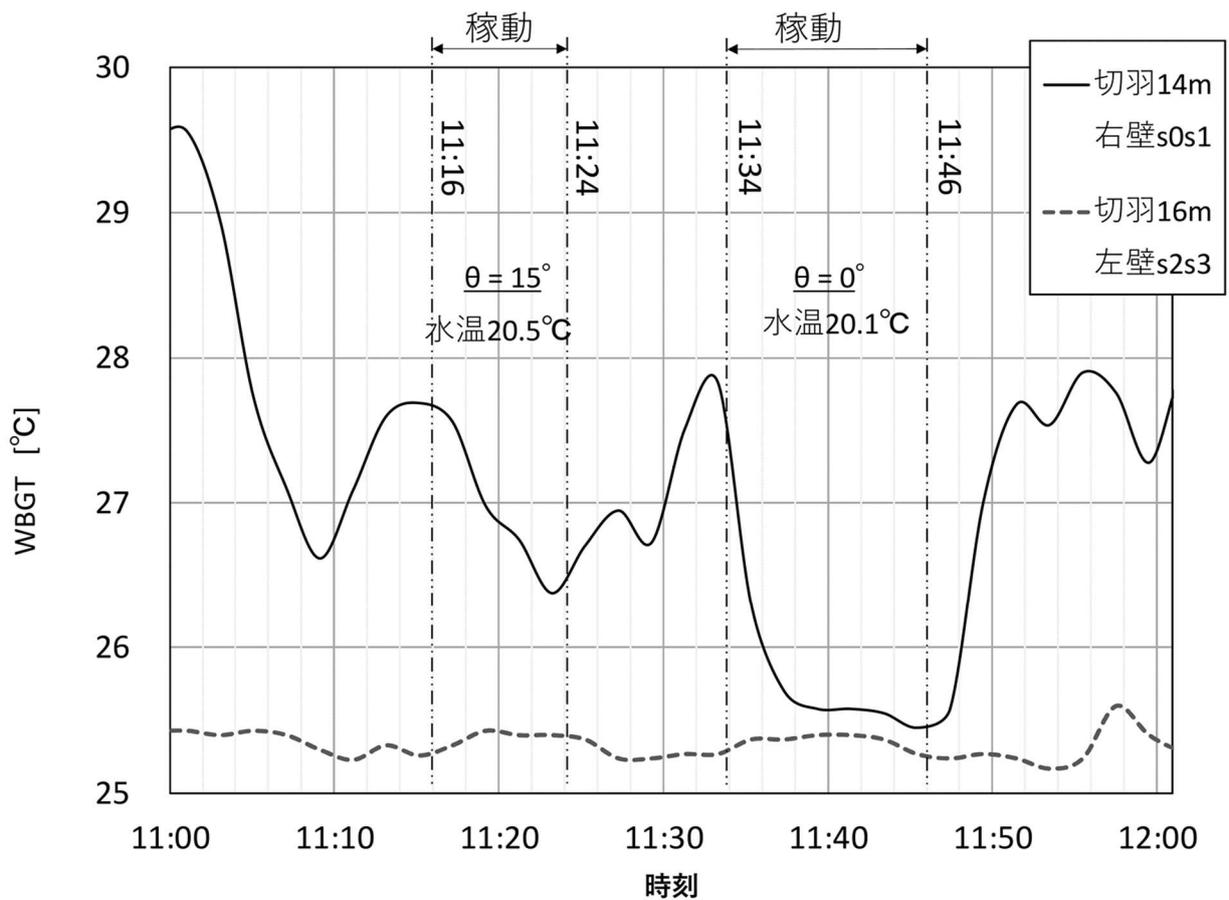


図-20 切羽に向けて冷風を送風した実験の結果

一方、実験期間中、実験機の稼働の有無を問わず、破線で示す切羽16 m位置の左壁面のWBGT温度 (s2s3) は、ほとんど変化なく、 $25.3 \pm 0.1^\circ\text{C}$ と安定していた。安定した理由を述べる。この実験期間中、坑口外気の乾球温度も $23.7 \pm 0.2^\circ\text{C}$ と安定していた。この安定した温度の外気が、坑口送気ファンにより切羽に送られた結果、切羽面の左半分 (吹付けされていない部位) に近いSL組 (s2s3) は、安定した温度を検知したものと考える。

図-21で上記を深掘りする。実験中の換気流の状態をイメージ図で表わす。図-21の上段が、(a)平面図であり、SLのs2s3組近傍のA-A'断面の箇所と、s0s1組近傍のB-B'断面の箇所を示している。吹付け機には大きな発熱源のコンプレッサーが備わっており、その位置を記号Zで表わす。また、吹付け機の噴射ノズルは、切羽に向かって右側の領域 (記号Y) に向いている。図の中段は、(b) A-A'断面視、下段は(c) B-B'断面視である。

(c) B-B'断面視を見ると、風管の吐出口Xから吐出された $1,500 \text{ m}^3/\text{min}$ の新鮮空気流は直進し、切羽Yに衝突する。この衝突した気流は、吹付け面からコンクリート硬化熱

を拾い高温化しながら下方に下り、トンネル底部を逆方向 (坑口方向) に進行する。その際、吹付け機のコンプレッサーZの排熱も拾い、空気流はさらに高温化する。この高温化した換気流と、実験機からの冷風がぶつかり合うが、その近傍にSLのs0s1組が存在する。s0s1組が、このような環境下にあるので、図-20の実線の如く、s0s1組のWBGTは、比較的大きく変動したものと思われる。切羽からの戻りの換気流と実験機からの冷風がぶつかり合うことは、冷風が切羽まで届きにくいことを意味するので、配置方法を含めた改善が重要であり、今後の課題である。

一方、(b) A-A'断面視を見ると、風管の吐出口Xから吐出された新鮮空気流は直進し、切羽面左に衝突するが、この衝突した気流が、コンクリートの硬化熱を拾うことは (吹付けがないので) ほとんどなく、また、コンプレッサーから遠く、排熱を拾うこともない。従って、SL組のs2s3が検知する温度は、概ね、風管から吐出される新鮮空気流の温度の安定性に支配されたものと考えられる。ただし、風管吐出端での温度計測は未実施である。

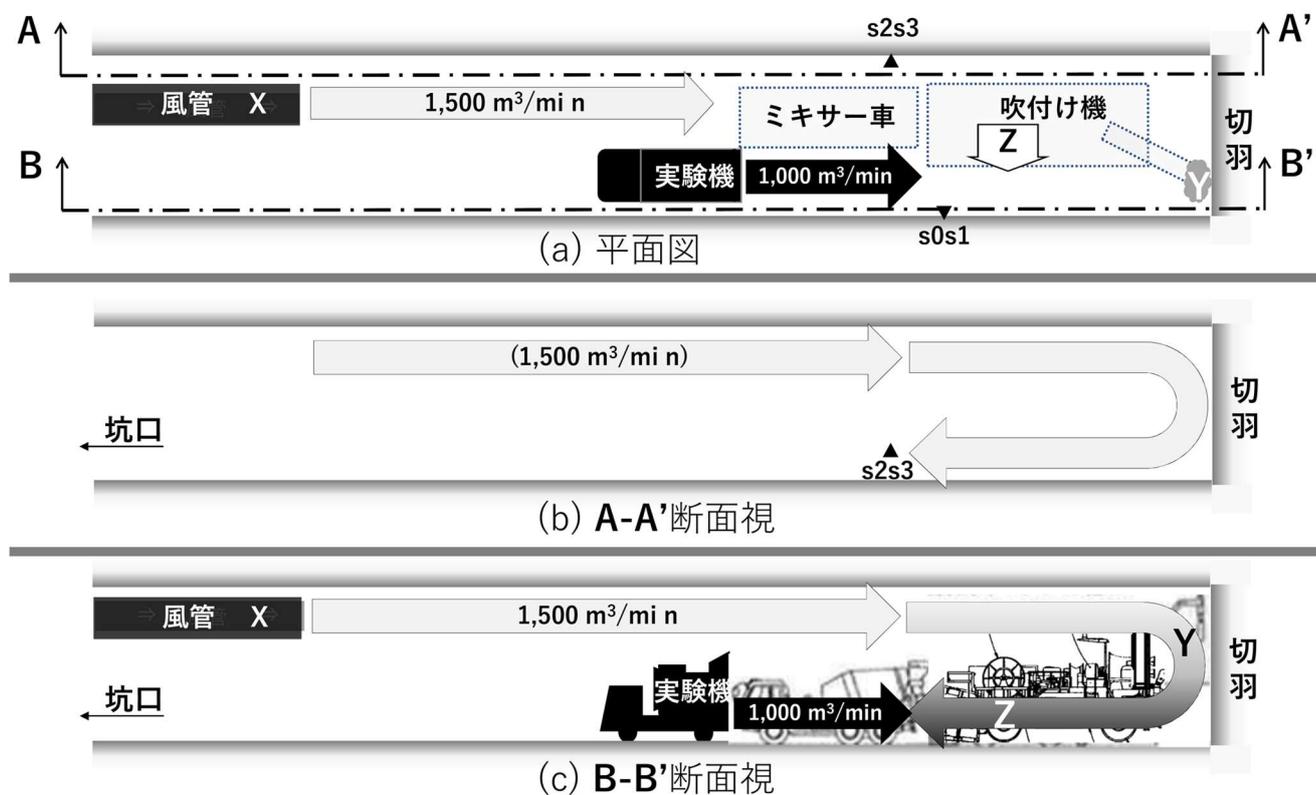


図-21 切羽近傍の換気流のイメージ図  
(a)平面図 (b)A-A' 断面視 (c)B-B' 断面視

#### 4. 結論と今後の課題

山岳トンネルの暑熱空気対策として、湧水を用いたラジエーターで直接熱交換し、1,000 m<sup>3</sup>/minの冷風を発生させる装置（実験機）を開発した。この実験機を、実際のトンネル建設現場に持ち込み、1台のWBGTロガーと複数組の乾球・湿球温度ロガーを配置し、平面的なエリアのWBGTを計測し評価を行った。その結果、以下の項目が明らかになった。

- ① 小型温度ロガーで計測された乾球温度と湿球温度を補正・類推するという簡易法により、概ね正確にWBGTを得る手法を確立した。
- ② 切羽から百数十メートル離れたエリアで、実験機のラジエーターに通水せずに、ファンのみを稼働させた。すると、計測エリア内の各点のWBGT間に顕著な差が表れた。
- ③ 切羽から百数十メートル離れたエリアでは、実験機の吐出口から3 m程度の位置に高さ2 m程度の障害物が存在した。この条件下で実験機から冷風を発生させると、実験機の吸込み位置のWBGTに比べ、障害物の風下側付近のWBGTが、最大で0.4℃高くなった。一方、吐出から12 m風下の位置では、最大で-0.6℃の冷却効果があった。
- ④ 切羽近傍エリアでの実験中、切羽に向かって右側の領域で吹付け作業が行われた。この条件下で、実験機の吐出口を切羽から24 m位置の右壁面側に配置し、切羽に向かって冷風を発生させた。吐出口から10 m離れた位置の右壁位置のWBGTは最大で2.1℃低下した。一方、離れた左壁位置のWBGTは、ほとんど変化しなかった。

最後に、稼働している現場のため、当初意図したような計測が行えなかったが、本装置により作業現場のWBGTを低減できることが確認された。しかし今後は、重機類の配置や送気流の影響などを考慮し、冷風装置の配置を検討し、より効果を上げられるよう更なる開発を進めたい。また、温度分布については、壁側だけでなく路面エリア・垂直方向にも留意し、把握できるよう努めたい。

#### 参考文献

- 1) 環境省熱中症予防情報サイトホームページ：平成 29 年度第 1 回熱中症関係省庁連絡会議幹事会議事要旨：資料 2-3 厚生労働省提出資料：厚生労働省における熱中症に関する平成 29 年度の取組について、[http://www.wbgt.env.go.jp/pdf/ic\\_rma/2902/index.php](http://www.wbgt.env.go.jp/pdf/ic_rma/2902/index.php) , (2018 年 7 月アクセス)
- 2) 建設業労働災害防止協会：ずい道等建設工事における換気技術指針，pp.54-58，2012.
- 3) 小林由委，田中徹：トンネル坑内環境一元管理自動制御システム（TD-Green）の開発，戸田建設技術研究報告，pp.1-16，Vol.42，2016.
- 4) NPO 法人 地中熱利用促進協会ホームページ，<http://www.geohpaj.org/outline/inquiry>，(2018 年 7 月アクセス)
- 5) 日本工業規格：JIS Z8504 人間工学-WBGT（湿球黒球温度）指数に基づく作業者の熱ストレスの評価-暑熱環境，p.2，1999.
- 6) VAISALA：湿度計算の計算式集，B210973JA-D，2012.

(2018.8.10 受付)

## THE COOL—WIND GENERATOR FOR TUNNELS USING SUBSOIL WATER

Kenji SAKAI, Kikuo SAKAI, Atsushi KATATANI, Teruhito OHTSUKA  
and Masato SHINJI

As the hot environment exists in tunnels under construction, the heatstroke-measures to tunnel-workers are important. However, it takes much cost about equipment and operation to cool heat-air by using large power consumption. Subsoil-water around 20 degrees (C) exists in many cases in the construction-sites of mountain-tunnels. Therefore, a machine, which can do direct-heat-exchange between this subsoil-water and heat-air with radiators to generate cool-wind, has been developed. The testing machine for generating cool-wind was introduced into an actual tunnel under construction, and tests for evaluating WBGT were carried out. As a result, the decreased WBGT was found at 10 m distance from the outlet of the machine.