土壌熱交換システムの長期運用に伴う予冷・予熱特性（その2）：
夏季実測調査と CFD 解析による地下ピット内空気環境の実態把握PRE-COOLING / PRE-HEATING CHARACTERISTICS OF THE EARTH-TO-AIR HEAT EXCHANGER
SYSTEM IN LONG-TERM OPERATION (PART 2):
INVESTIGATION OF ACTUAL CONDITION OF AIR ENVIRONMENT IN UNDERGROUND AIR
TUNNEL THROUGH FIELD MEASUREMENT AND CFD ANALYSIS IN SUMMER平田 一馬^{*1}, 白石 靖幸^{*2}, 塘田 研仁^{*3}, 長谷川 兼一^{*4}*Kazuma HIRATA, Yasuyuki SHIRAIISHI, Kento TOMODA
and Kenichi HASEGAWA*

In this study, we aim to propose the optimal operation method of an earth-to-air heat exchanger (EAHE). As a first step, in this paper, we investigated the relationship between the occurrence of condensation and air pollution by fungi in the underground air tunnel of an actual building. Firstly, we evaluated of condensation in the underground air tunnel based on actual measurement and unsteady CFD analysis. Secondly, exhaustive investigation of fungal flora in the underground air tunnel was conducted by DNA analysis.

Keywords: *Earth-to-Air Heat Exchanger, Field measurement, CFD analysis, Prediction of condensation, DNA analysis, Fungi*

土壌熱交換システム, 実測調査, CFD 解析, 結露予測, DNA 解析, 真菌

1. はじめに

日本では、「2030 年までに新築建築物の平均で ZEB (Net Zero Energy Building) の実現を目指す」という目標が掲げられている¹⁾。ZEB を実現するためのパッシブ技術の一つとして、土壌熱交換システムがある。土壌熱交換システムは土壌の膨大な熱容量を活用し、予冷・予熱した外気を導入することで空調機等の外気負荷を削減するものである。同システムはチューブ方式と地下ピット方式があり、本研究対象の地下ピット方式の特徴としては外気導入経路が複雑であることが挙げられる。このため、同方式の省エネ効果等の性能予測は、複雑な形状を再現可能な三次元 CFD (Computational Fluid Dynamics) と放射・熱伝導の連成解析による長期的な検討が望ましいが、その性能予測は計算負荷等の制約から、短期的もしくは簡易なモデルによる検討に限定されることが多い。この問題に対し、筆者らは既往研究²⁾にて、流れ場の計算負荷を低減した非定常 CFD 解析手法の提案を行っている。また前報³⁾では、複数年の長期実測結果との比較から同手法の有効性を示すと共に、システムの予冷・予熱効果の有効性を明らかにしている。

一方、夏季運用時において、土壌熱交換システム内での結露の発生や高湿度環境が維持されることに由来する導入外気の空気質汚染が懸念されており⁴⁾、特に影響要因の一つである結露に関しては、実測結果に基づいた研究がいくつかなされている。例えば、木下ら⁵⁾は学校建築（4 校）に導入された土壌熱交換システム（地下ピット方式）において、ピット内の露点温度、一部の床表面温度との比較から結露発生時間を計測しており、6 月から 8 月にかけて頻繁に結露が発生したと報告している。尹ら⁶⁾は地下ピット方式の性能評価の一環として、結露の判定を実施している。これによると、計測期間の一部の時間においてピット出口付近の壁面に結露発生の可能性を示唆しているものの、目視では結露が確認できなかったと結論付けている。また茂木ら⁷⁾は群馬県内のモデル住宅のアースチューブを対象として実測を行っており、2017 年 8 月において月全体の 58%の期間で結露発生の可能性があったと結論付けている。しかし、これらの論文では目視やシステム内の相対湿度、露点温度と一部の表面温度との比較により結露発生の有無を判断するに留まっている。また、数値解析により土壌熱交換システム内での結露発生の予測等

^{*1} 北九州市立大学大学院国際環境工学研究科 博士前期課程・学士（工学）

^{*2} 北九州市立大学国際環境工学部 教授・博士（工学）

^{*3} HEROZ ㈱ 博士（工学）

^{*4} 秋田県立大学システム科学技術学部 教授・博士（工学）

Grad. Student, Graduate School of Environmental Engineering, The Univ. of Kitakyushu, B.Eng.

Prof., Faculty of Environmental Engineering, The Univ. of Kitakyushu, Dr.Eng.

HEROZ, Inc., Dr.Eng.

Prof., Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefecture University, Dr.Eng.

を実施した研究も既に報告されており^{8)~10)}、筆者らも年間シミュレーションにより詳細な結露発生の予測や結露抑制策の検討を試みている¹¹⁾。しかし、結露発生は現象が複雑であるため実測調査と数値解析による相互補完的な検討が必要である。現在のところ、結露発生の把握は実測調査、または数値解析のどちらか一方のみに留まっており、双方の比較を通じた検討は行われていない。

近年、土壤熱交換システム内の空気環境に関する研究も行われており、例えば、柳ら¹²⁾は5つのクールチューブを対象として実測を行っており、クールチューブ内の付着細菌量と真菌量が在来の空調機と同程度であり、*Cladosporium* や *Penicillium* などの真菌が検出されたと報告している。溝上ら¹³⁾は実験施設に導入された土壤熱交換システム（チューブ方式）において、外気とシステム内の浮遊真菌濃度の比較から、土壤熱交換システムによって浮遊真菌が除去されたと結論付けている。また姜ら¹⁴⁾は北海道内の戸建て住宅に導入されたアースチューブの微生物汚染評価の一環として、浮遊微生物濃度の測定を実施している。結果として、アースチューブ内の浮遊微生物濃度は外気や室内より高い傾向にあり、*Penicillium* sp.や *Cladosporium* sp.といった真菌が検出されたと報告している。しかし、これらの研究はいずれも培地法や形態観察に基づいたものであり、培地法は培地の種類や培養条件によって培養できる微生物が限られている。微生物の同定手法として、近年、環境中の微生物から直接 DNA を抽出し、その配列情報を網羅的に分析可能なメタゲノム解析が注目されている。メタゲノム解析により土壤熱交換システム内の微生物同定を行った研究もいくつか報告されており¹⁵⁾、¹⁶⁾、特に新村ら¹⁶⁾は次世代シーケンサーを用いた 16SrRNA 解析により、クールヒートピット内の細菌叢の網羅的な把握を行っている。一方、地下ピット内の真菌に関しては、同定の際に参照する塩基配列データベースとの相同性の点で課題が残ることから、地下ピット内の真菌叢を網羅的に把握するまでに至っておらず、結露発生と微生物増殖の関係性についても明らかとなっていない。

以上のことから、本報では実在建物に導入された地下ピットを対象として、夏季実測調査と数値解析の双方から地下ピット内の結露発生の実態を明らかにしつつ、真菌増殖による空気質汚染との関係性を明らかにすることを目的としている。即ち、夏季実測調査に基づいたシステムの性能評価・結露性状の把握を行うと共に、流れ場の計算負荷を低減した非定常 CFD 解析を実施し、実測結果との比較による予測精度の検証を行った上で三次元的に結露発生の把握を行う。更に、同地下ピット内にてサンプリングした真菌を対象に、DNA 解析を実施し、地下ピット内における真菌叢の網羅的な把握を行い、結露との関係性に関する基礎的な検討を行う。

また、土壤熱交換システム（地下ピット）は通常、地下空間の有効利用を目的としたシステムであるが故に設計の自由度が低く、建物ごとに形状最適化を実施することは困難である。そのため、普遍的なシステム性能の向上を考慮すると、外気導入時間や外気導入量といった運用条件の最適化が望ましい。そこで本研究では本報の結果を踏まえて、土壤熱交換システムの省エネ効果の確保と結露発生・微生物増殖の抑制を両立させた運用手法の確立を最終的な目的としている¹⁷⁾。

Table 1 Site Overview

Site	Fukuoka, Japan
Use	Accommodation and research facilities
Construction	Reinforced concrete
Floor number	1F-4F
Completion year	July, 2008
Total floor space	5,498m ²
Tunnel width × height	1.5-1.7m × 3.0m
Length of Tunnel	76.8m

Fig. 1 Plan of underground air tunnel

Fig. 2 Section view of underground air tunnel

2. 対象建物の概要

対象建物の概要を Table 1 に、地下ピットの平面図および断面図を Fig. 1, 2 にそれぞれ示す。本報では前報⁹⁾に引き続き、福岡県北九州市に位置する地上 4 階建ての宿泊・研究施設を対象としている。同建物では外気負荷の削減を目的として、地下ピット方式の土壤熱交換システムが導入されている。地下ピットへの外気導入は、建物より西に 12m 離れた給気塔より行う。外気導入口はガラリのみでフィルタは設置されていない。Fig. 1, 2 に示すように、流入口より導入された外気は、全長 76.8m の流路にて土壌との熱交換を行った後、外調機を経て室内に導入される。また Fig. 2 に示す通り、建物直下の流路には結露・高湿度状態の対策として調湿炭が敷設されており、流路全体の約 77% を占めている。流路天井には断熱材として A 種押出法ポリスチレンフォーム保温材 ($t = 25\text{mm}$) が設置されている。尚、同建物は 2009 年当初からセンサー (BEMS) による各種物理量の測定・記録が行われている。

3. システム導入施設を対象とした夏季実測調査

3.1 実測概要

本研究では、地下ピット内の性能評価・結露性状を把握するために、2019 年 7 月 1 日～2019 年 9 月 30 日において実測調査を実施した。測定点は、流入出口付近、地下ピット内流路である中間地点の計 3 箇所 (Fig. 1) とした。これらの箇所にて空気の温湿度の測定、更に天井面、壁面、入隅部及び床面の温度の測定を 1 時間毎に行った。また、BEMS データより外気導入量、室内温度及び実測期間外 (2019 年 1 月 1 日～2019 年 6 月 30 日) の地下ピット流入

出口温度等を取得した。

3.2 実測結果

実測期間における各測定点の空気温度を Fig. 3 に示す。流入口温度と比較して、中間地点・流出口温度は第一四分位、第三四分位間の幅が小さく、且つ中央値が低下していることから、土壌の恒温性を利用した土壌熱交換システムの特徴が確認できる。また、8 月は第一四分位、第三四分位間の変動幅が最も大きかったことから、最も冷却効果のある月であることが確認できた。流入出口の相対湿度・絶対湿度差（流出－流入）を Fig. 4 に示す。実測期間の多くの時間帯で流出口相対湿度は流入口相対湿度よりも高くなっており、90～100%近くに達していることから、地下ピット内（特に流出口付近）にて高湿度環境が頻繁に発生していたものと推察される。また同期間において絶対湿度差が大きく変動しており、調湿炭による吸放湿や躯体表面での結露・蒸発が繰り返し発生していたものと推察される。絶対湿度差が 0 を下回っている時間帯は結露発生の可能性があり、特に 7 月においてその傾向が見られた。Fig.5 に月積算処理熱量（顕熱）及び外気導入量をそれぞれ月別で示す。月積算処理熱量は測定期間中において、外気導入量に比例して 8 月が 7.1GJ と最も高く、このことから 8 月において最も冷却効果が高いことが確認できた。8 月に次いで 7 月（6.4GJ）が高く、9 月が 4.3GJ と最も低い結果となった。

4. 計算負荷低減手法

既往研究²⁾にて提案した計算負荷低減手法を採用し、本報ではまず、各時刻の外気導入量毎の代表的な流れ場を等温定常解析^{注1)}により事前に複数取得する。次に、この事前解析から得た流れ場を Fig.6 (a) に示すような解析フローに基づき、読み込むことで、温度及び湿度輸送方程式の線形化が可能となり、計算負荷の低減を図る。同解析手法（以下、非連成解析）では、次に示す①、②の効果が期待できる。

① 流れ場の事前解析による計算負荷の低減

Fig. 6 (b) に示すように従来の解析手法（完全連成解析）は各タイムステップで流れ場に関する複数の方程式を解いているが、非連成解析中は事前解析から得た流れ場を用いることで解くべき方程式が温度及び湿度輸送方程式のみとなる。

② 計算時間間隔 Δt の拡大

非連成解析では事前解析により求めた流れ場を用いるため、流れ場と温度場及び湿度場を直接的に連成させず、流速等を定数として扱う事が可能となる。これにより温度輸送方程式が線形化され、計算時間間隔 Δt の拡大が可能となる。更に、線形化に伴い温度及び湿度輸送方程式の収束性の向上も期待できる。

5. 夏季運用時における結露性状の把握

5.1 解析概要

Table 2 に事前解析時及び非連成解析時の CFD 解析の解析条件、Fig. 7 に解析モデルを示す。事前解析では、BEMS データを分析し、月積算流量が実測値とほぼ同程度（誤差 1%以下）になるような計 23 種の代表的な外気導入量（0～11,600m³/h）を選定した上で、流れ場のみの解析を行った。また等温の定常解析としたため、初期温度及び湿度の境界条件は設定していない。非連成解析による

Fig. 3 The inlet, mid and outlet air temperature in summer

Fig. 4 The inlet and outlet air humidity in summer

Fig. 5 Monthly integrated pre-cooling quantity

(a) Uncoupled simulation (b) Full coupled simulation

Fig. 6 Flow analysis

Table 2 Conditions for CFD analysis 注2)

		Pre analysis	Main analysis (Unsteady state)
Calculation period		Steady state analysis	Summer analysis : July 1, 2019 to September 30, 2019
Time interval		Steady state analysis	360 s
Domain		85.7m (X) × 12.8m (Y) × 11.9m (Z)	
Mesh		221 (X) × 74 (Y) × 84 (Z) = 1,373,736	
Turbulence model		Low Re-type k - ε model (Abe-Nagano-Kondo model ¹⁸⁾)	
Scheme for advection term		QUICK	
Initial temperature of underground air tunnel		Results of the one-dimensional heat conduction analysis	
Boundary conditions	Inlet of air tunnel	T_{in} , X_{in} , U_{in} : Measurement results, $k_{in} = 3/2 (U_{in} \times 0.05)^2$, $\varepsilon_{in} = C\mu^{3/4} \cdot k_{in}^{3/2}/l_{in}$	
	Outlet of air tunnel	Free slip	
	Wall in air tunnel	Velocity and Temperature : Analytical wall function (AWF) ¹⁹⁾ , Humidity 注3) : Lewis relationship (Exponent=0.67)	
	Ground surface	Temperature : Sol air temperature, Convective heat transfer coefficient : 17.9W/(m ² ·K)	
	Room side boundary	Temperature : Measurement results [°C], Overall heat transfer coefficient : 9.0 W/(m ² ·K)	
	Lateral and bottom	Adiabatic	
Convergence condition		Temperature transport equation and Pressure correction equation: 1×10^{-4} Momentum, k and ε transport equation: 1×10^{-6}	

T_{in} : Inlet temperature [°C], X_{in} : Inlet absolute humidity [kg/kg(DA)], U_{in} : Inlet wind velocity [m/s], ℓ_{in} : Length scale (=1.2) [m], k_{in} : Inlet turbulence energy [m²/s²], ε_{in} : Dissipation rate of k_{in} [m²/s³], $C\mu$: Model constant (=0.09) [-]

解析期間は3ヶ月間(2019年7月1日～2019年9月30日)とし、6ヶ月間(2019年1月1日～2019年6月30日)を助走期間とした。地中の躯体と土壌の初期温度条件は、地中鉛直方向の一次元熱伝導解析^{注4)}の結果である上下温度分布を与えた。ピット内の放射熱伝達は Gebhart の吸収係数を用い、相互放射を考慮して算出している。また本解析では実運用時と同様の流路 (Fig. 2) にて調湿炭をモデリングし、固体(調湿炭)内の熱水分同時移動方程式(蒸気拡散支配方程式)^{注5)}を連成させている。Table 3に導入した調湿炭の物性値を示す。尚、既往研究²¹⁾より、コンクリート躯体内の水分移動及びコンクリート躯体表面の吸放湿が地下ピット内の温湿度環境に及ぼす影響は微小であることを確認しているため、コンクリート躯体の吸放湿特性は考慮していない。

5.2 結露評価の概要

地下ピット内の結露状況を評価する指標として、寺西ら²³⁾の論文を参考に時刻ごとの結露面積割合 A_r [%]、コンクリート表面の面要素ごとの結露時間割合 $t_{r,i}$ [%]を定義した。本報における $A_{r,n}$ 及び $t_{r,i}$ は次式の通りである。

$$A_{r,n} = A_{c,n} / A_a \times 100 \quad (1)$$

$$t_{r,i} = t_{c,i} / t_a \times 100 \quad (2)$$

A_a は地下ピットで外気と接するコンクリートの全表面積[m²]、 $A_{c,n}$ は A_a の内、各時刻で結露水が存在するコンクリートの表面積[m²]、 t_a は解析期間の時間数[h]、 $t_{c,i}$ は各面要素で結露水が存在していた時間数^{注6)} [h]を表す。

5.3 予測精度の検証

Fig. 8 に流出口の絶対湿度^{注7)}の実測及び解析結果を示す。分布図より R^2 値は 0.975、また RMSE 値は 4.3×10^{-4} kg/kg' であり、良好な精度を有していると推察される。尚、同期間における実測及び解析の流出口温度/相対湿度の RMSE 値は 0.32°C/2.49% だった。また、Fig. 9 に地下ピット内における実測と解析の結露発生の有無^{注8)}を示す。実測と解析の結果を比較すると期間全体を通して、概ね結露性状の傾向を捉えているため、解析モデルは地下ピット内の結露性状を把握するために十分に有効的であると考えられる。Fig. 9 より、7～9 月前半において頻繁に結露が発生する結果となった。また結露が期間全体を通して断続的に発生していることから、調湿

Table 3 Computer configurations used for the analysis

Maximum porosity	0.11 m ³ /m ³
Moisture conductivity	7.16×10^{-5} kg/m·s (kg/kg(DA))
Absorption/desorption of moisture	κ : 2629.1 kg/m ³ (kg/kg(DA)) ν : 0.006123 kg/m ³ ·K
Thermal conductivity	0.11 W/(m·K)
Thickness	50 mm

Fig. 7 Analysis model of the system

Fig. 8 Comparison of air absolute humidity at air tunnel outlet (X-axis : CFD analysis, Y-axis : Measurement)

炭の吸湿による結露抑制効果^{注9)}が示唆される。これらの結果を踏まえ、以降では CFD による地下ピット内の詳細な結露性状の把握

を行う。

5.4 結露面積割合

Fig. 10 に解析期間における結露面積割合を示す。7 月後半において頻繁に結露が発生しており、7 月 21 日 14:00 に結露面積割合は最大で 25.4% となり地下ピットの約 4 分の 1 の範囲において結露発生の可能性が示唆された。これは 7 月後半は雨天日が続いたことで、地下ピット内に高湿度な外気が頻繁に流入したためであると推察される (Fig. 4)。また、夏季初頭である 7 月は 8 月や 9 月と比べて冬季の冷熱を蓄えており、更に土壌・ピット空間からの冷熱の供給により躯体の表面温度の上昇が抑制されるため、高湿な外気の導入に伴い、結露面積割合が高くなる傾向にあることが推察される。8 月、9 月では夏季の外気導入による躯体表面温度の上昇や調湿炭の結露抑制効果により結露面積割合が低下している。また 8 月、9 月における結露面積割合が微小であることから、一部の限られた箇所で結露が発生しているものと推察される。即ち、地下ピット内において結露が発生しやすい箇所が存在することが示唆される。

5.5 結露時間割合

Fig. 11 に結露時間割合を示す。同期間中、長時間に渡り結露が発生する部位は、流路全体の入隅部、次いで壁面であることが確認できた。このことから、Fig. 10 の結露面積割合において 8 月や 9 月に結露が発生していた箇所は入隅部であることが推察され、同時に入隅部は地下ピット内において結露が発生しやすい箇所であることが示唆された。入隅部は壁面や床面などと比較して吸熱量が多く結露が生じやすい上、相対的に風速が緩やかとなり空気が滞留し、結露水の蒸発が抑制されるため、結露時間割合が高くなったものと推察される。また、流出口付近の結露時間割合は約 40% (約 883h) であるのに対し、流入口付近では約 10% であったため、流入口付近よりも流出口付近において長時間の結露発生が示唆された。調湿炭の敷設されている床面では結露が発生しておらず、結露が抑制されていることが確認できる。調湿炭が敷設されていない地下ピット流入口付近の床面では結露が発生していた。Fig. 10、11 より、地下ピット内の特定の箇所にて結露が長時間生じる可能性が示唆されたため、調湿炭の敷設に加えて、雨天時などの外気が高湿度となる時間帯において、外気導入を制限する等の対策¹⁷⁾の必要性が示唆された。

5.6 結露量^{注10)}

Fig. 12 に Fig. 9 において結露面積割合が最も高い時間帯 (7 月 21 日 14:00) におけるピット内表面の結露量の分布を示す。同時刻では入隅部の大部分において結露が発生している様子が確認できる。これは外気の相対湿度が 98% と高く、この高湿な外気が直接ピット内に流入したためと推察される。更にピット内の流出口付近において最も結露量が多くなる結果となった。これはピット内の前半部にて冷却された外気が後半部のピット内表面において更に冷却されるためと推察される。また、結露量分布と Fig. 11 の結露時間割合の分布が類似する結果となった。

6. 地下ピット内の空気質環境

6.1 サンプルングの概要

地下ピット内の空気質環境を把握するため、地下ピット内にて微生物のサンプルングを実施した。サンプルング箇所は、地下ピット

Fig. 9 Occurrences of dew condensation
(Above : Measurement, Below : Numerical analysis.)
Blue bands indicate periods of condensation

Fig. 10 Condensation area ratio

Fig. 11 Condensation time ratio

Fig. 12 Condensation amount

内の流入出口付近、中間地点の計 3 箇所 (Fig. 1) であり、これらの箇所の床面にてダストを採取し、微生物のサンプルングを行った。サンプルングは掃除機先端にフィルタを装着し、床ダストの採取を行った。また今回、サンプルングの捕集面積に関しては、解析用のダストを多く取得するために規定せずに採取を行ったが、定量的

な評価を行うためにはサンプリング条件の統一が必要となる。分析にあたり、今回は単位捕集面積当たりの真菌種の割合を用いて評価する。サンプリングの実施日は2019年8月26日^{注11)}であり、その後、秋田県立大学バイオテクノロジーセンターにて真菌を対象にDNA解析手法の一つであるメタゲノム解析²⁴⁾を実施し、地下ピット内の真菌叢の網羅的な把握を行った。

6.2 メタゲノム解析の概要

メタゲノム解析は、次世代シーケンサ（NGS）により、微生物の培養をせずとも大量のDNA配列情報を高速・高精度で処理し、種レベル^{注12)}での同定を可能としたDNA解析手法の一つである。これにより、室内微生物を網羅的に把握することができる。本研究では、真菌叢を解析するために、リボゾームのITS2領域の遺伝子情報に基づいて、真菌種の同定を実施した。

6.3 メタゲノム解析の結果

Fig. 13に真菌叢の内、子囊菌門のメタゲノム解析の結果を示す。地下ピットの各地点において異なる真菌叢が形成されていることが確認できる。真菌は主には外気由来であるが、長期的な運用に伴う経年劣化やホコリ等の栄養分がピット内に堆積すること、また外気導入により侵入した真菌が浮遊し、流出口付近の結露箇所に着着することで発芽・増殖を繰り返すものと推察される。ピット全体の入隅部にて結露が発生していたため中間地点と流入口に真菌が多く繁殖し、その結果、ピット全体で真菌が存在すると推察される。また、地下ピット内では *Cyphellophora* spp. や *Alternaria* spp.、*Penicillium* spp.、*Engyodontium* sp.などが比較的多く検出され、*Alternaria* spp.は好湿性真菌であるため多く検出される結果となった。また *Alternaria* spp.はアレルギー性鼻炎を引き起こす原因菌とされているため、このような真菌が室内に侵入することで、居住者の健康状態への影響や真菌臭等の可能性が推察される。このため、地下ピット経由による外気を室内へ直接導入することは衛生上避けるべきであると推察される^{注13)}。更に、真菌の増殖を抑制させる対策の必要性が示唆される。今回のメタゲノム解析により約200種（子囊菌門：約100種）もの真菌種が特定され、地下ピット内の空気質汚染の可能性が懸念された。また、地下ピット内の真菌叢の一端が明らかとなった。

7. 結露発生と真菌による空気質汚染の関係性

3章、5章の結果より、地下ピット内の結露発生と真菌増殖の関係性が示唆された。結果として、地下ピット内の入隅部において頻繁に結露が発生しており、特に流出口付近の入隅部では、結露時間割合が40%を超えていたことから、長時間結露が発生していたものと推察される。真菌の増殖には水分は必要不可欠な要素であるため、真菌は水分が存在する箇所増殖する。そのため、地下ピット内の入隅部、特に流出口付近において真菌が増殖する可能性が示唆された。メタゲノム解析の結果では、地下ピットの各地点において異なる真菌叢が形成されており、流出口付近では外気由来の真菌である *Penicillium* の割合が流入口付近の半分以下、かつ *others* の割合が増加している。このことから、地下ピット内では真菌が繁殖しており、流出口付近は流入口付近よりも真菌濃度が高いことが推察される。しかし本論文では、外気真菌濃度等の測定を行っていないため、地下ピット内部での真菌増殖により空気質が汚染された

Fig. 13 Result of metagenome analysis

と判断するには客観的な評価はできない。

以上のことから、地下ピットにおける結露発生と真菌による空気室汚染の関係性は以下のように推察される。

- 1) 地下ピット内の入隅部、特に流出口付近では長時間結露が発生していたため、他の箇所と比較して真菌増殖の可能性が示唆された。
- 2) 地下ピットの各地点において異なる真菌叢が形成されていたことから、地下ピット内では真菌が繁殖していたことが推察される。
- 3) 結露が発生する箇所においても、長時間の結露発生を抑制することで真菌の増殖も抑制できる可能性が示唆された。

8. まとめ

本報では、実在建物に導入された土壌熱交換システム（地下ピット方式）を対象に、夏季実測調査と非定常CFD解析に基づいた地下ピット内の結露性状の把握を実施した。更に地下ピット内にてサンプリングした真菌を対象にメタゲノム解析を実施し、地下ピット内の真菌叢の網羅的な把握を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 地下ピット経由による外気導入により、土壌熱交換システムの予冷効果が確認できた。また、夏季の多くの期間で地下ピット内（特に流出口付近）の相対湿度が90%以上達しており、頻繁に高湿度環境が生じていることから、結露の発生が懸念された。
- 2) 結露発生の有無に関して、実測と解析とを比較すると、概ね結露発生の挙動が一致していることから、結露予測における解析モデルの有効性が示唆された。
- 3) 7月は結露が頻繁に発生しており、結露面積割合は最大で25.4%であった。一方、8月、9月は結露面積割合が非常に低く、入隅部等の限られた箇所において長時間結露の発生が示唆された。
- 4) 流入口付近の結露時間割合は約10%、流出口付近では40%を超えていたことから、流出口付近では長時間の結露発生が示唆された。
- 5) ピット全体を通じて真菌が存在しており、結露が長時間発生する流出口において最も多くの真菌が検出され、結露発生に伴う真菌の増殖が示唆された。また、*Alternaria* spp.等の病原菌となる真菌も検出されており、地下ピット内の空気質汚

染の可能性が懸念される。

本対象の地下ピットの床面には調湿炭が敷設されているため、本来の地下ピットとは諸性能（特に結露性状）に差異が生じている可能性がある。今後は調湿炭を設置していない地下ピットを対象とした検討も行う必要がある。また、本論文では、外気及び地下ピット内部の真菌濃度の測定を行っておらず、地下ピット内部の空気質汚染の原因を精緻に特定するまでに至っていないため、この点についても今後の研究課題と位置付けている。更に、本報の結果を踏まえて、省エネ効果を維持しつつ、結露発生更には真菌増殖を抑制する地下ピット（導入外気量）の最適運用手法の提案・検証を行う予定である¹⁷⁾。

謝辞

本研究は科学研究費補助金(課題番号:19H02301)を受けて実施したものです。

注

- 注1) 本来であれば温度場の性状に応じて外気導入量毎に複数の流れ場を用意すべきであるが、既往研究より、浮力の影響を考慮しなくても十分な予測精度が得られることを確認しているため、等温の流れ場を使用した。
- 注2) 本研究では株式会社ソフトウェアクレイドルの熱流体解析ソフト「STREAM V12」を使用した。また、解析に使用した PC のスペックを以下の補表に示す。

Computer configurations used for the analysis	
CPU	Intel® Core™ i7-6700K
Frequency	4.00GHz
System RAM	8.00GB

- 注3) 結露の判定方法は流体側の壁面近傍第一メッシュの絶対湿度 X_a [kg/kg(DA)] と躯体表面温度に対する飽和絶対湿度 X_s [kg/kg(DA)] を比較し、 $X_a > X_s$ の場合には結露が発生するものとした。更に、タイムステップ毎に各面要素の結露速度を算出し、 $X_a > X_s$ の状態が継続する場合は結露速度を時間積分することで結露量を定義した。結露速度 C_s [kg/m²s]、結露量 C_a [kg/m²] の定義は以下の通りである。

$$C_s = \rho \cdot h_s \cdot (X_a - X_s)$$

$$C_a = \sum C_s \cdot \Delta t$$

ここで ρ は空気密度[kg/m³]、 h_d は湿度伝達率[m/s]、 Δt は計算時間間隔[s]を表す。また、 $0 < C_s$ かつ $X_a < X_s$ の場合には結露水の蒸発が発生するものとして負の結露速度(蒸発速度)に応じて結露量が減少していく。

- 注4) 既往研究²⁾の解析条件を参考にし、拡張アメダスの気象データ（標準年、八幡）²⁰⁾を用いて不易層の温度が対象地域の年平均温度と一致するようにパラメータを調整し、計 21 年間の解析を行った。（対流熱伝達率：17.9W/m²K、日射吸収率：0.7 [-]、長波長放射率：0.9 [-]、蒸発率：0.1 [-]
- 注5) 個体（調湿炭）内の熱水分同時移動方程式（蒸気拡散支配方程式）を以下に示す。

$$(c' \rho_{dry} + \kappa) \frac{\partial X}{\partial t} - v \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial l} \left(\lambda_x \frac{\partial^2 X}{\partial l^2} \right)$$

$$-r \kappa \frac{\partial X}{\partial t} + (C_p \rho + r v) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial l} \left(\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial l^2} \right)$$

c' : 最大空隙率[J/kgK]、 ρ_{dry} : 乾燥空気密度[kg/m³]、 κ : 単位体積の材料の絶対湿度を単位変化させるのに要する水分量[kg/m³(kg/kg(DA))], X : 絶対湿度[kg/kg(DA)], t : 時間[h]、 v : 単位体積の材料の温度が単位変化したときに変化する水分量[kg/m³K]、 T : 温度[°C]、 l : 位置[m]、 λ_x : 湿気伝導率[kg/ms(kg/kg(DA))], r : 水蒸気から液体への相変化熱[J/kg]、 c_p : 個体比熱[J/kgK]、 ρ : 個体密度

度[kg/m³]

- 注6) 本解析における解析期間は、2019 年 7 月 1 日～2019 年 9 月 30 日（2,208h）であり、既往研究¹¹⁾では、解析期間が年間(8,760h)であるため、結露時間割合の意味合いが異なる。
- 注7) 本論文では、CFD 解析の流入条件として、実測より取得した外気温度、外気絶対湿度等を使用しているため、絶対湿度差を算出する際には流出口の絶対湿度の精度が重要となる。そのため、本論文では、流出口の絶対湿度による精度確認を実施した。
- 注8) 結露判定は地下ピット経由時における流出口の絶対湿度と流入口の絶対湿度との差が 0 以下になる場合を結露発生とさせた。
- 注9) 既往研究²⁰⁾より、調湿炭をモデリングしていない場合、結露の発生が連続的となることから、調湿炭の敷設による結露抑制効果と示唆される。
- 注10) 本解析では壁面での面的な結露水の移流は考慮していない。
- 注11) 本研究では、微生物のサンプリングとして、掃除機の先端にフィルタを装着し、床ダストの採取する方法を採用しているため、結露が頻繁に発生している 7 月ではサンプリングが困難であった。そのため、結露により増殖した真菌がピット内に十分に飛散したと考えられる 8 月においてサンプリングを実施した。
- 注12) 生物は、ドメイン、界、綱、目、科、属、種に分類することでき、種は生物を最も細かく分類する階級である。
- 注13) 空調システム及び室内において、微生物による空気質汚染を防止するには、微生物の室内への侵入を防ぐことも重要であり、エアフィルタにより浮遊微生物を含めた微粒子を除去することは、容易かつ有効な方法とされており、既往研究²⁰⁾では、高性能のエアフィルタを用いることで、浮遊真菌濃度が低減されることが報告されている。

参考文献

- 1) Ministry of Economy, Trade and Industry Agency for Natural Resources and Energy, Basic Energy Plan, 2014.4, (online), available from <http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf> (accessed 2021.7.8)
経済産業省資源エネルギー庁：エネルギー基本計画，2014,4（参照 2021.7.8）
- 2) Tomoda, K. and Shiraishi, Y.: Evaluation method of cooling and heating effect of an earth-to-air heat exchanger (Part 2): Annual Prediction Method for The Thermal Performance of Earth-to-Air Heat Exchanger by CFD Analysis where Calculation Loads were Reduced, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 81, No. 722, pp. 393-401, 2016.4 (in Japanese)
塘田研仁，白石靖幸：流れ場の計算負荷を低減した CFD 解析による土壌熱交換システムの年間性能予測－土壌熱交換システムの冷却・加熱効果の予測手法に関する研究（その 2）－，日本建築学会環境系論文集，Vol. 81, No. 722, pp. 393-401, 2016.4
- 3) Muta, A., Tomoda, K. and Shiraishi, Y.: Pre-cooling / pre-heating characteristics of the earth-to-air heat exchanger system in long-term operation (Part 1): Performance Verification Based on Measurement and Unsteady CFD Analysis that Low Calculation Load for 8 years, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 83, No. 750, pp. 711-718, 2018.8 (in Japanese)
牟田彬俊，塘田研仁，白石靖幸：実測調査と流れ場の計算負荷を低減した非定常 CFD 解析による 8 年間の性能検証－土壌熱交換システムの長期運用に伴う予冷・予熱特性（その 1）－，日本建築学会環境系論文集，Vol. 83, No. 750, pp. 711-718, 2018.8
- 4) Ishimatsu, S., Matsuu, S. and Ryu, Y.: Seasonal Changes of Airborne Microorganisms and Temperature-Humidity Conditions in a Building with Geothermal Utilization Pit, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 77, No. 676, pp. 491-498, 2012.6 (in Japanese)
石松維世，松鶴悟美，龍有：地中熱利用ピットを有する建物における浮遊微生物の濃度変動と温湿度環境，日本建築学会環境系論文集，Vol. 77, No. 676, pp. 491-498, 2012.6
- 5) Kinoshita, M.: Study on the Form and Thermal Performance of Cool/Heat Pit, Tokyo Metropolitan University Master's thesis, 2014

- 木下雅広：クール/ヒートピットの形状と性能に関する研究，平成25年度首都大学東京修士論文，2014
- 6) Yoon, G., Yoshioka, S., Koga, O., Kumata, Y., Koyama, M. and Niwa, H.: Study on Air Quality for Earth-to-air Heat Exchanger: Part 1 Field Measurement for Air temperature and Humidity for the High Humidity season, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering II, pp. 1371-1372, 2013.7 (in Japanese)
尹奎英, 吉岡沙野, 古賀修, 熊田瑠子, 高山真, 丹羽英治: 既存アースチューブの空気質に関する研究 第1報 湿潤期のチューブ内温湿度測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 1371-1372, 2013.7
- 7) Mogi, T., Mitamura, T. and Harasawa, H.: Performance Evaluation in the Central Air-Conditioning House Using Geothermal Heat for Three Years, AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 25, No. 59, pp. 229-234, 2019.2 (in Japanese)
茂木拓也, 三田村輝章, 原澤浩毅: 地中熱を利用した全館空調住宅における3年間を通じた性能評価, 日本建築学会技術報告集, Vol. 25, No. 59, pp. 229-234, 2019.2
- 8) Takada, S., Nakagawa, H. and Matsushita, T.: Analysis of Heat and Moisture Behavior of Cooling Tube at Residential House: Analysis Based on Simplified Model of Complicated Tube Design, and Evaluation of Air Quality in Cooling Tube, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering II, pp. 147-148, 2011.7 (in Japanese)
高田暁・中川浩・松下敬幸: 実住宅に導入されたクールチューブの熱湿気性状の解析 複雑な形状を有する管の簡易モデルに基づく解析と管内空気質評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.147-148, 2011.7
- 9) Aoki, T., Yoon, G., Hatate, Y., Yoshioka, S., Wakamede, I. and Okumiya, M.: About the Energy Conservation Technique in the Environmental Symbiosis Type Communal Facilities: Part2. Verification of Effect of Earth Tube Introduction by CFD, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering II, pp. 1055-1056, 2011.7 (in Japanese)
青木貴均・尹奎英・旗手康信・吉岡沙野・若目田郁夫・奥宮正哉: 環境共生型公共施設における省エネルギー手法の導入について その2 CFDによるアースチューブ導入効果の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.1055-1056, 2011.7
- 10) Adati, Y., Nagano, S. and Suzuki, H.: Evaluation in the Performance of Cool/Heat Trench in a High School: Part5. Simulation for Improving a Trench, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering II, pp. 629-630, 2014.7 (in Japanese)
足立勇樹・永野紳一郎・鈴木啓泰: 学校建築のクールヒートトレンチの効果検証 その5 性能向上のための数値解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.629-630, 2014.7
- 11) Tomoda, K., Muta, A. and Shiraishi, Y.: Evaluation method of cooling and heating effect of an earth-to-air heat exchanger (Part 3): Prediction of Dew Condensation and Effectiveness Study of Countermeasure of Dew Condensation by Annual Simulation, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 82, No. 736, pp. 579-587, 2017.6 (in Japanese)
塘田研仁, 牟田彬俊, 白石靖幸: 年間シミュレーションによる結露予測及び結露抑制策の有効性の検討ー土壤熱交換システムの冷却・加熱効果の予測手法に関する研究 (その3)ー, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 82, No. 736, pp. 579-587, 2017.6
- 12) Yanagi, U., Okabe, M. and Abiko, M.: Actual Conditions Control Methods Microbial Contamination in a Cool Tube, Transactions of the Society Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, Vol. 270, pp. 9-15, 2019.9 (in Japanese)
柳宇, 岡部優志, 吾孫子正和: クールチューブにおける微生物汚染の実態とその対策, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 270, pp. 9-15, 2019.9
- 13) Mizokami, A., Kim, H., Koganei, M., Hashimoto, M., Yoshihara, M. and Kawamura, Y.: The Evaluation of Airborne Fungi Removal Rate in House with the Geothermal Ventilation System, AIJ Chugoku chapter architectural research meeting, pp. 423-426, 2017.3 (in Japanese)
溝上暁大, 金炫允, 小金井真, 橋本真成, 吉原基文, 川原洋輔: 地中熱換気システムにおける浮遊真菌の除去率評価に関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, pp. 423-426, 2017.3
- 14) Kang, Y., Nagano, K. and Nakamura, M.: The assessment of microbial contamination on energy recovery ventilation devices of a residential building in Sapporo, the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, pp. 109-112, 2014.9 (in Japanese)
姜允敬, 長野克則, 中村真人: 札幌市内住宅における省エネルギー換気装置の微生物汚染調査, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 109-112, 2014.9
- 15) Matsuu, S., Sato, T. and Nimiya, H.: Study on Fungal Flora in the Geothermal Utilization Pit: Part 5 Measurement Investigation and Gene Analysis in 2018, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering II, pp. 711-712, 2019.7 (in Japanese)
松鶴さとみ, 佐藤龍義, 二宮秀典: クール/ヒートピット設備における真菌叢に関する研究 第5報 2018年度実測調査と遺伝子解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.711-712, 2019.7
- 16) Niimura, M., Yanagi, U., Kagi, N., Kim, H. and Hatanaka, M.: The Actual Condition Elucidation of Microbiome in a Cool or Heat Pit (Part 1): Comparison of Bacterial Flora between Indoor Environments and the Environment in a Pit, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 85, No. 770, pp. 259-266, 2020.4 (in Japanese)
新村美月, 柳宇, 鍵直樹, 金勲, 畑中未来: クール・ヒートピットにおけるマイクロバイオームの実態解明 第1報: 室内とピット内の細菌叢の比較, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 85, No. 770, pp. 259-266, 2020.4
- 17) Tomoda, K. and Shiraishi, Y.: Operational Control for Earth-to-Air Heat Exchanger by Reinforcement Learning (Part 1): Applicability Verification of Algorithm Considering Counterfactual Reward, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 86, No. 785, pp. 708-718, 2021.7 (in Japanese)
塘田研仁, 白石靖幸: 強化学習による土壤熱交換システムの運用制御 (その3): 反事実の報酬を考慮したアルゴリズムの適用可能性の検証, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 86, No. 785, pp. 708-718, 2021.7
- 18) Abe, K., Nagano, Y. and Kondoh, T.: An Improved $k-\epsilon$ Model for Prediction of Turbulent Flows with Separation and Reattachment, Transactions of the JSME. B, Vol. 58, No. 554, pp. 3003-3010, 1992. 10 (in Japanese)
安部賢一, 長野靖尚, 近藤継男: はく離・再付着を伴う乱流場への適用を考慮した $k-\epsilon$ モデル, 日本機械学会論文集(B編), Vol. 58, No. 554, pp. 3003-3010, 1992. 10
- 19) Craft, T.J., Gerasimov, A.V., Iacovides, H. and Launder, B.E.: Progress in the generalization of wall-function treatments, Int. J. Heat Fluid Flow, Vol. 23, Issue 2, pp. 148-160, 2002. 4
- 20) AIJ : Expanded AMeDAS Weather Data, AIJ, pp.360-362, 2000 (in Japanese)
日本建築学会: 拡張アメダス気象データ, 日本建築学会, pp.360-362, 2000
- 21) Muta, A. and Shiraishi, Y.: Moisture Adsorption and Desorption Characteristics of Building Material in a Cool and Heat Trench - Performance Prediction based on Unsteady CFD Analysis that Reduced Calculation Load -, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering II, pp. 165-166, 2017.7 (in Japanese)
牟田彬俊・白石靖幸: クールヒートトレンチを対象とした躯体の吸放湿特性の把握ー計算負荷を低減した非定常 CFD 解析による検証ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.165-166, 2017.7

- 22) Hirata, K., Shiraishi, Y. and Hasegawa, K.: Investigation of Actual Conditions of Dew Condensation and Air Pollution in the Earth-to-Air Heat Exchanger System in Summer, AIJ Kyushu chapter architectural research meeting, pp. 337-340, 2020.3 (in Japanese)
平田一馬, 白石靖幸, 長谷川兼一: 土壌熱交換システムの夏季運用時における結露発生並びに空気質汚染の実態把握, 日本建築学会九州支部研究報告集, pp. 337-340, 2020.3
- 23) Teranishi, S., Cho, W., Iwamoto, S., Makino, Y., Kono, H. and Kato, S.: A Study on Dew Condensation Risk Evaluation for Commercial Building: Dew Condensation Risk Evaluation by Different Airtightness and Different Thermal Insulation Property, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 80, No. 718, pp. 1133-1142, 2015.12 (in Japanese)
寺西翔平・趙旺熙・岩本静男・牧野由佳・河野仁志・加藤信介: 業務用ビルを対象とした結露リスク評価に関する研究 気密性能および断熱性能の違いによる結露リスク評価, 日本建築学会環境系論文集, Vol.80, No.718, pp.1133-1142, 2015.12
- 24) Hasegawa, K. and Hukushima, J.: Study on Indoor Environment and Occupant's Health in Damp Buildings Part. 14: Evaluation of fungal diversity using Next-generation DNA sequencing, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering II, pp. 707-708, 2019.7 (in Japanese)
長谷川兼一・福島淳: ダンプビルディングの室内環境と健康に関する研究 その14 DNA解析技術を用いた室内真菌叢の評価手法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.707-708, 2019.7
- 25) Matsuu, S., Ishimatsu, S. and Ryu, Y.: Study on the Removal Effect of the Airborne Microbes with Air Filters in Geothermal Utilization Air-Conditioning System, AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 16, No. 33, pp. 573-578, 2010.6 (in Japanese)
松鶴悟実・石松維世・龍有二: 地中熱利用外気導入システムに組み込んだ外調機のエアフィルタによる浮遊微生物の除去効果に関する調査研究, 日本建築学会技術報告集, Vol. 16, No. 33, pp. 573-578, 2010.6

PRE-COOLING / PRE-HEATING CHARACTERISTICS OF THE EARTH-TO-AIR HEAT EXCHANGER
SYSTEM IN LONG-TERM OPERATION (PART 2):
INVESTIGATION OF ACTUAL CONDITION OF AIR ENVIRONMENT IN UNDERGROUND AIR
TUNNEL THROUGH FIELD MEASUREMENT AND CFD ANALYSIS IN SUMMER

Kazuma HIRATA^{*1}, *Yasuyuki SHIRAISHI*^{*2}, *Kento TOMODA*^{*3}
and Kenichi HASEGAWA^{*4}

^{*1} Grad. Student, Graduate School of Environmental Engineering, The Univ. of Kitakyushu, B.Eng.

^{*2} Prof., Faculty of Environmental Engineering, The Univ. of Kitakyushu, Dr.Eng.

^{*3} HEROZ, Inc., Dr.Eng.

^{*4} Prof., Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefecture University, Dr.Eng.

In recent years, many passive cooling and heating systems have been added to existing buildings, bringing them to the public's attention. Passive cooling and heating systems, which control or utilize natural energy sources, can contribute to the cooling and heating of a building without mechanical equipment. Underground Air Tunnel, which are a type of earth-to-air heat exchanger (EAHE), have often been adopted in relatively large buildings. Despite the viability of using underground air tunnels as passive heating and cooling systems, especially in the summer, condensation can build up within the underground tunnels, promoting the growth of microorganisms that can lead to potentially serious air pollution. This problem has received particular attention in Japan, where climatic conditions may further stimulate fungal growth. The occurrences of condensation have been estimated in several studies. However, these studies are limited to either actual survey or numerical analysis. Moreover, air pollution in underground air tunnels has been estimated in several studies. However, the relationship between dew condensation and microbial growth has not been clarified in these studies.

The purpose of this paper is to clarify the actual condition of condensation in the underground air tunnel and the relationship between the condensation and air pollution caused by fungal growth. Firstly, we evaluated the thermal performance and investigated condensation in the underground air tunnel through actual measurement in summer. Secondly, we verified the prediction accuracy through comparison between actual measurement and CFD analysis, and then conducted detailed evaluation of condensation in the underground air tunnel. Finally, we carried out DNA analysis of fungal flora in the underground air tunnel in order to estimate the fungal flora in it comprehensively.

The following results were obtained.

1. In summer, condensation frequently occurred in the underground air tunnel. Especially in July, the condensation area ratio was high, and it was 25.4% at the maximum. The condensation time ratio was high in the corner of the entire underground air tunnel. Moreover, the condensation time ratio at the inlet and outlet was about 10%, and at the outlet was over 40%. Therefore, it was suggested that condensation occurred at the outlet for a long time.
2. Fungi were present throughout the underground air tunnel and most fungi were detected at the outlet. It was suggested that the reason for this is that condensation occurred at the corner of the entire underground air tunnel, and that condensation occurred for a long time at the outlet. Moreover, disease-causing fungi such as *Alternaria* spp. were detected. Therefore, there is concern about the possibility of air pollution in the underground air tunnel.

Based on the above results, in the future, we will propose the optimal operation method of the EAHE system in order to construct a control law that achieves both energy savings and suppression of dew condensation.

(2021年8月10日原稿受理, 2021年9月28日採用決定)