CFD 解析による夏季及び冬季の地下ピット内伝熱性状の動的評価

－ 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1）－

DYNAMIC EVALUATION OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS IN UNDERGROUND PIT
IN SUMMER AND WINTER BASED ON CFD ANALYSIS

Evaluation method of cooling and heating effect of an earth-to-air heat exchanger (Part 1)

芦谷 友美*, 白石 靖幸**, 安永 龍一***, 龍 有二**

Yumi ASHITANI, Yasuyuki SHIRAISHI, Ryuichi YASUNAGA

and Yuji RYU

In order to evaluate the cooling and heating effect of underground pit as one of the Earth-to-Air Heat Exchangers for diurnal cycle, unsteady CFD simulations for the pit of an office building in summer and winter were carried out using the results of one dimensional heat conduction analysis for underground in vertical direction as initial condition. The following results were obtained: 1) Outlet air temperature, cooling and heating performance of the underground pit system were predicted approximately in this CFD analysis. 2) The contribution ratio to outlet air temperature fluctuation of bottom surface in the pit was the largest in summer and winter. Especially in summer daytime, since warm outdoor air flowed along with the upper part of the pit, the contribution ratio of bottom surface became small. In winter, contribution ratios in the pit hardly changed all day long. 3) The relative humidity in the pit of summer was high and the difference of air temperature at inlet and outlet was small from midnight to morning. During daytime, the difference became about 7.5-8.0%. The dew condensation did not occur on these analysis conditions.

Keywords : *Underground Pit, CFD Analysis, 1 Dimensional Heat Conduction, Unsteady State,**Earth-to-Air Heat Exchanger, Dew Condensation*

地下ピット, CFD 解析, 1 次元熱伝導, 非定常, 土壌熱交換, 結露

1. はじめに

近年、機械装置を用いずに建物側の工夫により、日射、自然風、地中熱などの自然エネルギーを利用又は排除することで冷暖房効果を得るパッシブシステムが注目されている。地中熱の恒温性を利用し、冷却・加熱した外気を直接室内又は外調機を経て室内へ導入する土壌熱交換システムもその一つであり、地中に埋設したパイプを利用する「チューブ方式」と地下ピットを利用する「地下ピット方式」の2種類に大きく分類される。

チューブ方式に関しては、既に実大実験や数値解析などによる研究が幾つか行われている。例えば、小川ら¹⁾は、二次元差分モデルを用いて、土壌の種類、チューブの埋設深さ、長さ、流量を変化させ、積算冷却量を算出し、その結果より、設計段階の資料としての検討を行っている。また、石原と張^{2,3)}は、実大住宅のクールチューブを対象とし、三次元差分モデルを用いて、実験データとの比較からモデルの妥当性を検証しており、その上で、チューブの埋設深さ、長さ、流量の検討を行い、クールチューブの出口温度の推定式を提案している。安積ら⁴⁾も同様に、実大住宅のクールチューブを

対象としており、実験結果と二次元差分モデルの数値解析結果の比較より、三次元モデルによる解析の必要性について言及している。また、尹ら⁵⁾は、三次元モデルを用いて、チューブを複数埋設した際の近接埋設が及ぼす熱交換性能への影響を検討している。一般にチューブ方式は、住宅などの小規模建築に導入される例が多く、外気導入量を多く必要とする比較的大規模な建築に関しては、地下ピット方式を採用する場合が多く、現段階では、学校校舎^{6,7,8)}や庁舎、保育施設⁹⁾、郵便局舎¹⁰⁾などの事例がある。

地下ピット方式においても、実測調査や数値解析による検証が行われている。品田ら⁶⁾は、ピット方式とソーラーチムニーを併用した自然換気システムを採用している大学校舎において、実測調査により換気システムの運用状況、給排気量などの基本性能の把握を行っている。また、永井ら¹¹⁾は、大型児童厚生施設の地下ピットを対象とした実測調査を実施すると共に二次元モデルを用いた熱伝導解析を行っている。更に実測値と解析値の比較により解析モデルの妥当性を明らかにした上で、長期運用時の性能評価を行っている。また、孫ら¹²⁾は、永井らと同様の解析モデルを用いて、地下ピット

本論文は既に発表した文献(23), 24)を加筆・修正したものである。

* 前田建設工業

(研究当時 北九州市立大学大学院 大学院生)

** 北九州市立大学国際環境工学部 教授・博士(工学)

*** 北九州市立大学大学院国際環境工学研究科 大学院生

Maeda Corporation, M. Eng.

Prof., Faculty of Environmental Engineering, The University of Kitakyushu, Dr. Eng.
Graduate Student, Graduate School of Environmental Engineering, The University of Kitakyushu

トの床面の深さ、地下ピット直上居室の温度状態、地下ピット内の風速及び有効伝熱面積などの設計条件が冷却・加熱性能に及ぼす影響を明らかにすると共に、全熱交換器に対する地下ピット方式の省エネルギー性の判別法の提案も行っている。

地下ピット方式は通常、ピット内の外気導入経路や伝熱性状が複雑であり、二次元モデルではそれらの再現性が低い。このため、CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析のような三次元モデルによる温度・風速分布等を考慮した非定常的な検討が望ましい。一方、CFD 解析では計算負荷等の制約から設計段階において必要な地下ピット方式の年間の冷却・加熱効果等の推計は困難であるため、CFD 解析の結果を用いたマクロモデル(熱・換気回路網解析等)の高精度化による対応も重要であると考えられる。また導入外気の空気質に配慮すると、設計段階における地下ピット内の防露手法の事前検証や結露判定も重要な検討課題であると言えるが、既往の研究では殆ど行われていない。

本研究では、土壤熱交換システムの一つである地下ピット方式における導入外気の冷却・加熱効果や結露判定などを短期的及び長期的に評価するための解析手法の提案及びその有効性を示すことを目的とする。本論文では、まず短期的な評価手法として、地中の鉛直方向1次元熱伝導解析の結果を初期条件とした日周期レベルの非定常CFD解析を実施し、夏季冷房時及び冬季暖房時における動的な冷却・加熱効果やピット内伝熱性状の詳細評価や結露判定について、地下ピット方式を有する実在オフィスを対象に試みる。また、実測値と解析値との比較を踏まえ、同解析手法の予測精度の検証を行う。次報以降では、本論文の解析結果を踏まえ、長期的な評価手法としてマクロモデルの高精度化による年周期レベルの検討を行う。

2. 建物及び実測の概要

2.1 建物概要

対象建物は、福岡県北九州市若松区の北九州学術研究都市内に位置するオフィスビルである。写真1に建物外観、図1に建物配置図、表1に建物概要を示す。同建物は、東側にオフィスエリア、西側に共有エリアが配置されている。南・西面の窓面積が大きく日射負荷が多いため、様々な省エネルギー手法が採用されており、空調熱源としての地下ピット方式の利用の他に、階段室のトップライトによる夏季の排熱促進、中間期の自然換気利用や共有エリアにおける定風量自然換気装置の導入等が挙げられる。同建物の地下ピット平面図を図2に示す(ここでは、南東側を東側、北東側を北側、北西側を西側と簡易的に表記する)。尚、地下ピットの高さ情報は図10及び11にて示す。導入された外気は、網掛け部の経路を通り、外調機を経て各階の共有エリアへ供給されるシステムとなっている。またピット内は結露防止のため、セラミック炭住宅用脱臭調湿材が敷設されている。

2.2 実測概要

本実測では、地下ピットの顕熱冷却(加熱)熱量の評価のため、対象建物における地下ピットの流入出空気温度を測定した¹³⁾。尚、次節以降では同結果を用いて提案する解析手法の精度検証を行う。実測期間は、2006年の7/31~8/4(夏季)、12/18~12/22(冬季)の計10日間である。図3に夏季代表日7/31、冬季代表日12/18における水平面全天日射量、外気温度、相当外気温度の実測結果を示す。

写真1 建物外観

図1 建物配置図

図2 地下ピット平面図

(a) 夏季 (2006/7/31)

(b) 冬季 (2006/12/18)

図3 代表日の気象データ

表2 地中の鉛直方向1次元熱伝導解析の解析条件

解析期間	1/1~12/31 (助走期間は更に20年間)
気象データ	拡張アメダス標準年気象データ ¹⁵⁾ (福岡県北九州市八幡地区)
モデル要素数	23点(不等間隔)
地表面境界条件	気象データより外気の温湿度を与えた。 対流熱伝達率: 17.9 W/m ² K 日射吸収率: 0.7 [-] 放射率: 0.9 [-] 蒸発比: 0.3 [-]
地中最下端の境界条件	断熱条件(地中20m地点)

尚、夏季を対象とした解析ではピット内湿度場の解析も行うため、図 3 (a) のみ外気相対湿度の結果も示す。相当外気温度の算出方法については、注 1) にて示す。

3. 解析概要

非定常 CFD 解析の初期条件算出のため、まず地中の鉛直方向 1 次元熱伝導解析により地表面から地盤深さ 20m までの温度分布を算出した。次に、CFD 解析では、夏季及び冬季の代表日である 2006/7/31 と 2006/12/18 の 2 日間を対象とし、熱伝導解析の結果を初期条件とした解析を行い、地下ピット内の対流熱伝達量の評価に加え、躯体及び地中の熱伝導、更にはピット内の放射熱伝達を連成して解析する^{注 2)}。

3.1 鉛直方向 1 次元熱伝導解析の概要及び結果

地中の上下温度分布を算出するための鉛直方向の 1 次元解析モデルは、熱・換気回路網計算プログラム NETS¹⁴⁾ を用いて作成した。熱回路網解析の解析条件を表 2 に示す。解析期間は 1/1~12/31 の 1 年間とし、助走期間は更に 20 年間設けている。気象データとして、福岡県北九州市八幡地区の拡張アメダス標準年データを用いた。また、既往の研究¹⁶⁾ より、地表面の蒸発潜熱のみの考慮でも、地盤内の温度が実現象を大きく外れることはなく、長期的な変動を予測するには十分な精度であるとされているため、今回の解析においては、地盤内の水分移動に関しては考慮していない^{注 1) 17)}。

地表面から地盤深さ 10m までの月代表日別の上下温度分布を図 4 に示す。地盤深さ約 8m 以降では、概ね 17.6℃ に収束する。尚、この値は、対象建物が位置する福岡県北九州市若松区の北九州学術研究都市内の地盤温度と同程度であることを事前測定により確認している¹⁸⁾。この地盤の上下温度分布の結果を、CFD 解析の地盤及び躯体温度の初期条件として用いた。また、この上下温度分布に加え、図 3 の相当外気温度を CFD 解析の際の地表面の境界条件とした。

3.2 CFD 解析の概要

解析対象は、対象建物の地下ピットと周囲の地盤を含む領域 ($X=53,900\text{mm}$, $Y=46,300\text{mm}$, $Z=20,000\text{mm}$) とした。図 5 に地下ピットの解析モデルを示す。尚、地盤の寸法については、水平方向に 10m、鉛直方向に 20m 程度設けており、解析領域の寸法による影響がないように、予備解析を行い決定している。

CFD 解析の解析条件を、表 3 に示す。解析期間は、助走期間を 2 日 (48 時間)^{注 3)} 設け、各対象日の 0:00~24:00 までの 24 時間 (86,400 サイクル, $\Delta t=1.0\text{s}$) の非定常解析を行った。尚、助走期間においても送風機は稼働させている。メッシュ数は、119 (X) $\times$ 99 (Y) $\times$ 46 (Z) = 525,504 メッシュとしている。また、乱流モデルとしては、低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデル (ANK モデル)¹⁹⁾ を採用しており、壁近傍領域の強い粘性応力作用と乱れの減衰作用を考慮している。壁面境界条件に関しては流れ場及び温度場共に壁面隣接セルにて輸送方程式を解析的に積分する解析的壁関数^{20, 21, 22)}を用いることで、壁近傍の計算格子解像度に殆ど影響されない解析を行っている。尚、本解析にて用いた壁面近傍の壁座標 $y+$ は、低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデルの乱流エネルギー生成領域である、30 以下であることを確認している。地盤温度の初期条件は、3.1 にて示した地盤の上下温度分布を解析領域全体に与えている。躯体温度の初期条件についても、1 次元の熱伝導解析より算出した結果を用いており、床面は

図 4 地中の鉛直方向温度分布 (月代表日別)

図 5 地下ピットの解析モデル

表 3 CFD 解析の解析条件

解析期間	夏季 2006/7/31, 冬季 2006/12/18 の 0:00~24:00 (助走期間はそれぞれ 2 日間)
メッシュ数	119 (X) $\times$ 99 (Y) $\times$ 46 (Z) = 525,504
乱流モデル	低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデル (ANK モデル)
差分スキーム	一次風上
収束判定条件	連立 1 次方程式: 1×10^{-4} 圧力修正量: 1×10^{-4}
地下ピットの流入条件	T_{in} : 外気温度 [℃] (図 3 の実測値参照) X_{in} : 外気絶対湿度 [kg/kg'] (図 3 の外気の温度及び相対湿度より算出) $U_{in}=1.55$ (送風機の定格風量 10,000 m ³ /h より算出), $k_{in}=3/2(U_{in} \times 0.05)^2$, $\epsilon_{in}=C_{\mu}^{3/4} \cdot k_{in}^{3/2}/l_m$ $H_{in}=0.82$, $W_{in}=2.18$
地下ピットの流出条件	自由流出
地盤温度初期条件	1 次元の熱伝導解析より算出した上下温度分布
躯体温度初期条件	1 次元の熱伝導解析結果に基づき算出 (例えば、夏季の床面は 19.61℃、冬季の床面は 18.70℃ と設定)
地下ピット内の壁面境界条件	速度: 解析的壁関数 ^{20, 22)} 温度: 解析的壁関数 ^{21, 22)} 湿度: 断湿条件
地下ピット上端境界条件	建物側から地下ピットへの熱的影響は無いものと仮定し、地下ピット内のスラブ上部を断熱と設定 (スラブ厚さは 200mm)
地盤表面境界条件	相当外気温度 (図 3 の解析値参照)
地盤側面及び最下端境界条件	断熱条件

U_{in} : 流入風速[m/s], k_{in} : 流入風の乱流エネルギー[m²/s²], ϵ_{in} : k_{in} の散逸率[m²/s³],
 T_{in} : 流入温度[℃], X_{in} : 流入湿度[kg/kg'], C_{μ} : モデル定数(=0.09)[-], l_m : 代表長さ(=1.2)[m],
 H_{in} : 流入口高さ[m], W_{in} : 流入口幅[m]

床レベルにおける地盤温度とし、その他の躯体については、地下ピットの埋設深さの中間地点における地盤温度を与えている。ピット内の放射熱伝達に関しては、Gebhart の吸収係数を用い固体表面間の熱流束を解析している。放射解析に用いた総メッシュ数は 929、ピット内表面の放射率は 0.9[-]とした。夏季は、高温多湿な導入外気がピット内で冷却されることで、結露の発生が懸念される。よって、夏季冷房時のみ流れ場及び温度場に加え、絶対湿度の輸送方程式を解くことで湿度場の解析も行っている。湿度のピット内壁面境界条件については断湿条件とし、躯体からの発湿・吸湿は無いものと仮定した^{注4)}。

4. 予測精度の検証

図 6 に、夏季冷房時 (2006/07/31) 及び冬季暖房時 (2006/12/18) の地下ピット流出温度に関する実測値と解析値との比較による予測精度の検証結果を示す。

夏季冷房時は、RMSE^{注5)}が 0.77℃程度となっているが(図 6(a))、時系列変化に着目してみると、解析値は実測値と比較すると朝方の 4:00~8:00 には低く、逆に日中の 10:00~18:00 にかけては高くなる。その他の時間帯は、実測値と解析値はほぼ同程度であるが、若干解析値が小さくなる。このような誤差が生じた理由として、地盤の熱容量の過小評価も要因として考えられるが、今回対象とした建物は運用開始後既に 1 年以上が経過しているため (2005/04 竣工)、解析にて用いた地下ピット躯体及び地中温度分布の初期値が、実測の初期条件を忠実に再現できていない点^{注6)}も大きな誤差要因として考えられる。この点は、今後の検討課題と位置づけており、年周期を対象としたマクロモデルにて検討を行う予定である。冬季暖房時に関しては、RMSE が 0.79℃と誤差は夏季冷房時と同程度であるが、日周期の変動傾向を概ね捉えており、再現性が高い (図 6 (b))。

地下ピットの顕熱冷却(加熱)熱量の 1 日の積算値に着目してみると、夏季は実測値の 90%、冬季は実測値の 80%程度となっており、解析値が実測値を若干下回る結果になったが、本解析手法による処理熱量の予測精度は概ね高いと言える。

以上より、解析にて用いた地下ピット躯体及び地中温度分布の初期値に関して改善の余地はあるものの、実測結果と解析結果の比較より、夏季及び冬季共に地下ピット出口温度及び顕熱冷却(加熱)熱量を概ね再現できることが確認できた。

5. 解析結果

夏季冷房時及び冬季暖房時における地下ピット内の動的伝熱性状の詳細な分析・解析結果を図 7~図 15 にそれぞれ示す。

5.1 ピット内の空気温度と処理熱量

(1) 夏季冷房時

地下ピットの流出入温度と顕熱冷却熱量に関しては、図 6 (a) に

(a) 夏季 (7/31)

(b) 冬季 (12/18)

図 6 流出入温度と処理熱量 (実測値と解析値の比較)

図 7 水平面温度分布 (Z=1.0m)

示した通り、流入温度が最大となる 15:00 に流出入の温度差も最大の 4.30℃となっており、それと同時に顕熱冷却熱量も約 3,000W とピークを迎える。一方、深夜 (24:00) から朝方 (6:00) にかけては、外気温度が低くなるため、流入温度と地下ピットの躯体温度との温度差が小さくなる。結果として流出入の温度差も 6:00 に最小の 0.89℃程度となっており、顕熱冷却熱量も約 620W と同様に低下している。しかし、一日を通して、流入温度よりも流出温度が低くなっており、地下ピットの冷却効果が概ね一日中有効であることが確認できる。図 7 (a) に、6 時間毎の水平面温度分布 (Z=1.0m, 地下ピット床表面を Z=0m と設定) を示す。深夜から朝方にかけては、地下ピット内に温度分布は殆ど生じていない。日中 (12:00 及び 18:00) は、地下ピットの出口に近づくにつれて、温度低下が顕著であることが確認できる。

(2) 冬季暖房時

冬季の流出入温度と顕熱加熱熱量に関しては、図 6 (b) に示した通り、流入温度が最も低下する朝方の 6:00~8:00 頃に最大 4.14℃程度加熱され、夏季と同様に顕熱加熱熱量も 3,000W 程度となる。外気温度が高くなる日中においては、流出入の温度差が 14:00 に最小の 0.64℃程度となり、顕熱加熱熱量も約 450W と減少している。夏季同様に冬季も地下ピットの加熱効果が 1 日を通して有効であることが確認できる。図 7 (b) に、6 時間毎の水平面温度分布 (Z=1.0m) を示す。流出入の温度差が 1.5℃~2.0℃と小さい 12:00、18:00、24:00 に関しては、温度分布があまり見られない。一方、温度差が 4.14℃と最大である 6:00 では特に流出口側で温度分布が顕著となる。

5.2 ピット流出口の温度変化に対する寄与率

夏季及び冬季におけるピット流出口空気温度の変化に対する各部位の寄与率を時系列で図 8 にそれぞれ示す。寄与率に関しては、各部位のピット内表面の顕熱冷却(加熱)熱量の全部位による顕熱冷却(加熱)熱量に対する割合として算出している。これは前述の流出口空気温度の変化に対する各部位の寄与率に対応する。また部位については、外気導入経路全ての天井、床及び、経路の北側、西側、東側それぞれの垂直壁面 (2 面) の計 5 つを意味する。

(1) 夏季冷房時

1 日を通して、床面の寄与率が最も大きく、床面において効果的に冷却を行っている様子が確認できる。ただし、その寄与率は一定ではなく、日中と夜間では導入外気温度の変化に伴い大きく変化する傾向にある。外気温度が高くなる日中 8:00~18:00 までは、床面の寄与率が 40%~50%程度と他の時間帯と比較して低くなる。これは導入外気温度が高く、浮力の影響でピット内上部に沿って流れるためである (図 10)。壁面における寄与率を比較すると、北側壁面の寄与率が約 15%、西側壁面が約 10%、東側壁面が約 10%~5%であり、北側壁面の寄与率が最も大きくなる。理由として、地下ピット北側はピット内上部に梁が数多く設けられており、導入外気が床面近傍に沿って流れることにより表面温度が低い壁面との対流熱伝達が促進されるためと推察される (図 11)。同様の現象は既報²³⁾にて示した定常解析でも確認している。外気温度が低下する 1:00~8:00 及び 18:00~24:00 では、床面の寄与率が増大し約 60%~90%に達する。結果として、他の部位の寄与率の合計が 10%~40%程度に低下する。ただし、図 6 (a) にて示した通り、夜間から早朝にかけての顕熱冷却熱量は日中に比べて相対的に小さい。

(a) 夏季 (7/31)

(b) 冬季 (12/18)

図 8 ピット流出口の温度変化に対する各部位の寄与率

(a) 夏季 (7/31)

(b) 冬季 (12/18)

図 9 各部位の平均ヌセルト数

図 10 地下ピット西側南北断面の鉛直面温度分布 (12:00)

図 11 地下ピット北側東西断面の鉛直面温度分布 (12:00)

(a) 夏季 (7/31)

(b) 冬季 (12/18)

図 12 床面局所ヌセルト数分布 (Z=0m)

図 13 夏季の床面相対湿度分布 (Z=0m)

以上より、夏季は導入外気の温度によってピット内の伝熱性状が大きく異なる。特に、日中は導入外気の温度が高くピット内床面の冷却効果が十分に得られない可能性があるため、対象建物のようにピット内上部に梁を設置する等の対策が有効であると考えられる。

(2) 冬季暖房時

図 8 (b) に示すように各部位が昼夜を問わず加熱面としてピット内の温度上昇に寄与している。顕熱加熱熱量は時間帯において異なるが (図 6 (b))、各部位の寄与率は 1 日を通して殆ど変化しない。部位別では、床面の寄与率が約 40%と最も高く、次に天井面が 20%~25%、北側壁面が 15%~20%、西側壁面が約 10%となっている。壁面における寄与率を比較すると、北側壁面の寄与率が最も大きく、夏季同様、梁や柱によって対流熱伝達が促進されているものと推察される。

5.3 ピット内のヌセルト数^{注7)}

(1) 夏季冷房時

図 9(a) に 6 時間毎の地下ピット各部位の平均ヌセルト数を示す。前述の導入外気温度、顕熱冷却熱量、温度低下に対する寄与率等の結果を反映し、床面の平均ヌセルト数が 1 日を通して最も大きい。特に、外気温度が低い深夜から朝方の 6:00 と 24:00 において顕著となる。他の部位としては、ピットの上流に位置する東壁面が大きくなる。

(2) 冬季暖房時

図 9 (b) に冬季の平均ヌセルト数を示す。夏季と同様、床面の平均ヌセルト数が最も大きく、他の部位に関しては、東側壁面、北側

(a) 夏季 (7/31)

(b) 冬季 (12/18)

図 14 水平面流速分布 (Z=1.0m, 12:00)

図 15 ピット内の相対湿度の時系列変化

壁面、西側壁面、天井面の順に大きくなる傾向にある。また、夏季ほど時間帯毎の変化があまり生じていない。

(3) 床面局所ヌセルト数

夏季及び冬季の 6 時間毎の床面の局所ヌセルト数分布を図 12 にそれぞれ示す。夏季と冬季で分布性状に差異は殆どなく、地下ピット

ト出口に近付くにつれて局所ヌセルト数は減少する傾向にある。また、地下ピット北側のように、ピット内上部に梁があることによって流速が加速される領域（図 14）やピットがクランクすることで導入外気が部位に衝突する領域等において、ヌセルト数が局所的に増大することが確認できる。

以上より、マクロモデルによって地下ピットの冷却・加熱効果を算出する際には、ピット内の対流熱伝達率を一律に固定値として与えるのではなく、部位毎に設定する、部位内である程度の分布を再現する、もしくはピット内平均流速や温度差パラメータ等を用いて関数化する等の必要性が示唆された。また、その際には本 CFD 解析の結果を活用可能である。

5.4 ピット内の結露判定

夏季冷房時のピット内の相対湿度の時系列変化を図 15 に示す。深夜から朝方にかけては、外気温度が低く相対湿度は高い。また、ピット内表面との外気温度の温度差が小さいため、ピット内全体で相対湿度差は殆ど生じておらず、1:00～8:00 までの相対湿度の標準偏差は 1%以下であった。一方、外気温度が高くなる日中は、外気の相対湿度は低くなるが、ピット出口に近付くにつれて冷却され相対湿度は高くなる。流出入口での相対湿度差は 7.5～8.0%程度となる。図 13 に夏季の 6 時間毎の床面の相対湿度分布 (Z=0m) を示す。相対湿度は全体的に高く、分布は殆ど見られないが、日中の 12:00 と 18:00 においては、地下ピット出口に近付くにつれて相対湿度が高くなる傾向にある。今回の解析条件では、地下ピット内の空気の相対湿度が 100%未満となっており、結露の発生は確認できなかった。しかし、導入外気の絶対湿度がピット内表面の飽和絶対湿度である 0.018 kg/kg' 以上の場合（今回の解析では終日 0.017 kg/kg' 程度）、更には竣工直後で躯体からの発湿があるような場合には、ピット内全体で絶対湿度が高くなりやすく、特に床面での結露等の問題も懸念される。

6. まとめ

本論文では、地下ピット方式における導入外気の冷却・加熱効果や結露判定などを短期的に評価するための解析手法として、地中の鉛直方向 1 次元熱伝導解析の結果を初期条件とした日周期レベルの非定常 CFD 解析を提案し、実在オフィスの地下ピットを対象として解析を行った。得られた知見は下記の通りである。

- 1) 地中の鉛直方向 1 次元熱伝導解析の結果では、地盤深さ約 8m 以降の温度が 17.6℃に収束し、対象建物周辺の地中温度と概ね一致した。
- 2) 非定常 CFD 解析では、初期条件として用いた地下ピット躯体及び地中温度分布に関して改善の余地は残るものの、実測結果と解析結果の比較より、夏季及び冬季共に地下ピット出口温度及び顕熱冷却(加熱)熱量を概ね再現できた。
- 3) ピット流出口の空気温度変化に対する各部位の寄与率を算出したところ、夏季及び冬季共に 1 日を通じて床面の寄与率が最も大きい。ただし、夏季は導入外気の温度によって各部位の寄与率が大きく変化し、特に日中は導入外気の温度が高く空気がピット内上部に沿って流れるため、ピット内床面の寄与率が低下した。一方、冬季は各部位の導入外気の温度上昇への寄与率は 1 日を通して殆ど変化しない。

- 4) ピット内表面の各部位の平均ヌセルト数や床面の局所ヌセルト数を算出したところ、床面の平均ヌセルト数が最も大きく、また床面では特に流れの衝突・加速領域で局所ヌセルト数が大きくなる傾向にあった。

- 5) 夏季冷房時のピット内の相対湿度は、深夜から朝方にかけては全体的に高く、流出入口で相対湿度差は殆ど見られない。一方、日中は流出入口での湿度差は 7.5～8.0%程度となった。今回の解析条件では結露は発生しなかった。

次報では、非定常 CFD 解析の結果を踏まえ、マクロモデルの高精度化を行い、年周期レベルの検討を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、科学研究補助金・基盤研究（B）（研究代表者：龍有二，課題番号：21360280）の研究助成を受けて行ったものである。また、葛隆生氏（北九州市立大学国際環境工学部建築デザイン学科 講師）、梶枝李弥氏（当時、北九州市立大学国際環境工学部環境空間デザイン学科 学部生）に多大な協力を頂きました。ここに記して、謝意を表します。

注

注 1) 地盤内の熱移動の基礎式及び相当外気温度 θ_o [K]の定義式を以下にそれぞれ示す。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda}{C_e} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\infty} = 0 \quad - \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_c (\theta_o - T_s)$$
$$\theta_o = T_o + \frac{aI + \varepsilon L \downarrow - \varepsilon \sigma T_s^4}{\alpha_c} + \frac{kH}{C_o} (x_o - x_s)$$

z：地表面下方の距離[m]，T：深さ z の地温[K]，C_e：深さ z における土壌の容積比熱[J/m³K]，λ：土壌の熱伝導率[W/(mK)]，T_o：気温[K]，a：地表面の日射吸収率[-]，T_s：地表面温度[K]，I：水平面全日射量[W/m²]，ε：地表面の放射率[-]，L↓：下向き大気放射量[W/m²]，σ：シュテファン・ボルツマン定数[W/(m²K⁴)]，α_c：地表面の対流熱伝達率[W/(m²K)]，H：蒸発潜熱(=2501.1) [J/g]，k：蒸発比[-]，C_o：外気の湿り比熱(=1,000) [J/kg·K]，x_o：外気の絶対湿度[g/kg]，x_s：地表面温度に対する飽和絶対湿度[g/kg]

注 2) 今回の解析では、株式会社ソフトウェアクレイドルの STREAM ver.7 を用いた。

注 3) CFD 解析では、鉛直一次元の温度分布の解析結果を初期条件として与えているため、特に地下ピット内表面近傍での温度場が不連続となる。この影響を緩和し、最小限に抑えるため、助走期間を設けている。今回、助走期間は試行的に 2 日としているが、一般的に地中温度の変動に影響を与えるのは、数ヶ月程度のタイムスパンと考えられるため、助走期間を 1 週間程度としても今回の解析結果と大きく異なるものではないと考えられる。実際に、助走期間を 4 日間設けて解析を行ったが、今回の結果と同様であることを確認している。

注 4) 今回の解析では、ピット内での吸放湿を考慮していないため、ピット内で形成される絶対湿度分布は流入条件の非定常的な変化に起因するものであり、分布は殆ど生じていない。よって、相対湿度の分布は主として温度分布によるものである。吸放湿を再現した結露判定に関しては今後の研究課題として位置づけている。

注 5) RMSE とは、2 乗平均平方根誤差(Root Mean Square Error)のことであり、以下の式を用いて算出している。

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 / n} \quad \bar{x} : \text{実測値}, x_i : \text{解析値}, n : \text{データ数}$$

注 6) その他、非定常 CFD 解析の初期条件である地中の鉛直方向 1 次元温度分布を算出する際に、屋外側の条件として福岡県北九州市八幡地区の拡張アメダス標準年データを用いている点も誤差要因として考えられる。

注 7) ヌセルト数 Nu は以下の式を用いて算出する。

$$Nu = \alpha_c \cdot L / \lambda \quad (\alpha_c = q_c / \Delta \theta, \Delta \theta = \theta_{in} - \theta_{out}), \quad \alpha_c : \text{対流熱伝達率}[W/m^2K], \\ L : \text{代表長さ}(=1.2)[m], \quad q_c : \text{熱流束}[W/m^2], \quad \lambda : \text{空気の熱伝導率}[W/mK], \\ \theta_{in} : \text{導入外気の温度}[^\circ C], \quad \theta_{out} : \text{ピット流出口の空気温度}[^\circ C]$$

尚、ヌセルト数の平均値を算出する場合、q_c は部位毎の平均値を用い、局所値を算出する場合は各部位を構成する面要素毎の値を用いている。

参考文献

- 1) 小川順一・浦野良美・渡辺俊行・龍有二・的野孝一・財津秀隆・高橋康之・梶山清：蒸暑地域における付設地下室住宅の涼房効果 その 3 数値計算によるクールチューブの効果の検討，日本建築学会九州支部研究報告，第 31 号，pp.149-152，1989.3
- 2) 石原修・張晴原：クールチューブの冷却効果に関する実大住宅実験およびシミュレーション解析 クールチューブによる室内環境の改善に関する研究 第 1 報，日本建築学会計画系論文報告集，第 429 号，pp.7-16，1991.11
- 3) 張晴原・石原修：クールチューブの設計出口温度と冷却エネルギー量の検討 クールチューブによる室内環境の改善に関する研究 第 2 報，日本建築学会計画系論文報告集，第 477 号，pp.11-18，1995.11
- 4) 安積弘高・桜井美政：住宅における自然換気駆動型クールチューブの熱性状解析，日本建築学会計画系論文報告集，第 547 号，pp.33-39，2001.9
- 5) 尹奎英・田中英紀・奥宮正哉：近接埋設されたクール/ヒートチューブの熱交換特性 近接埋設される複数管型クール/ヒートチューブに関する研究ーその 1ー，日本建築学会環境系論文報告集，第 579 号，pp.44-52，2004.5
- 6) 品田宜輝・木村建一・桂木宏昌・宋城基：ソーラーチムニーと地中ピットとを組み合わせた自然換気システムの性能に関する 4 年間の実測調査，空気調和・衛生工学会論文報告集，No.153，pp.45-56，2009.12
- 7) 山本佳嗣・北田真・田辺新一・市川卓也・水越英一郎：建築系環境・情報マネージメントに関する研究 その 9 自然換気システムの実測調査概要と LCM システムによる長期実測結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp.1321-1322，2005.9
- 8) 北田真・山本佳嗣・渡邊進介・田辺新一・市川卓也・水越英一郎：建築系環境・情報マネージメントに関する研究 その 10 自然換気システムの実測調査結果と LCM システムによる長期実測結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp.1323-1324，2005.9
- 9) 今井綾子・菊田弘輝・絵内正道・羽山広文・高瀬敏洋：平屋建て RC 造外断熱建物の環境性能に関する実測調査 その 1 冬期における床暖房及びピット経由給気効果の検証，日本建築学会北海道支部，研究報告集 No.81，pp.205-208，2008.6
- 10) 松浦友和・大村紋子・吉田太一：「環境に配慮した郵便局舎」における環境負荷低減の試み 1.小田原東郵便局における試行の概要，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，pp.1079-1080，2001.9
- 11) 永井久也・渡辺孝佳・孫元得・田中英紀・奥宮正哉・中原信生：床下ピットを用いた空調外気負荷低減システムに関する研究，日本建築学会技術報告集，第 6 号，pp.121-126，1998.10
- 12) 孫元得・田中英紀・永井久也・奥宮正哉・中原信生：土壌熱容量を用いた外調機負荷削減低減システムに関する研究，空気調和・衛生工学会論文報告集，No.87，pp.69-77，2002.10
- 13) 趙亮・龍有二・小島昌一：長期実測結果に基づく地中熱利用および自然換気装置の導入効果，日本建築学会九州支部，第 47 号，pp.497-500，2008.3
- 14) 奥山博康：熱・換気回路網計算プログラム NETS の検証，IBPSA-Japan 講演論文報告集，2002
- 15) 日本建築学会：拡張アメダス気象データ，2000
- 16) 塩月義隆・片山忠久・林徹夫・津々見伸広・佐々木俊彦：地表面の温度および熱収支の長期観測 その 5 水分移動を考慮した地盤内の伝熱シミュレーション，日本建築学会大会学術講演梗概集，D，pp.767-768，1990.10
- 17) 日本建築学会：拡張アメダス気象データ，pp.361-362，2000
- 18) 花岡竜也：九州地区における地中熱ヒートポンプシステム導入の可能性についての検討，北九州市立大学国際環境工学部建築デザイン学科卒業論文，2010.11
- 19) 安倍賢一・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，日本機械学会論文報告集(B編)，58 巻 554 号，pp.57-64，1992.10
- 20) 須賀一彦・CRAFT Timothy J.・IACOVIDES Hector：汎用的な解析的壁関数モデル 第 1 報 ~粗面乱流に対応した流れ場のモデル，日本機械学会論文報告集(B編)，71 巻 711 号，pp.113-121，2005.11
- 21) 須賀一彦・CRAFT Timothy J.・IACOVIDES Hector：汎用的な解析的壁関数モデル 第 2 報 ~粗面乱流に対応した強制対流温度場のモデル，日本機械学会論文報告集(B編)，71 巻 711 号，pp.122-128，2005.11
- 22) CRAFT T. J.・Gerasimov A. V.・Iacovides H.・Lauder B. E.：Progress in the generalization of wall-function treatments，International Journal of Heat and Fluid Flow，Volume23，Number2，pp.148-160，2002.4
- 23) 芦谷友美・白石靖幸・龍有二：CFD 解析による地下ピット方式の有効利

用法に関する研究(その 1) 夏季冷房時における地下ピット内の伝熱性状評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp.1313-1314，2010.9
24) 芦谷友美・白石靖幸・龍有二：CFD 解析による地下ピット方式の有効利用法に関する研究(その 2) 非定常解析モデルによる熱伝達特性の動的評価，日本建築学会九州支部，第 50 号，pp.465-468，2011.3

(2011年12月 8 日原稿受理，2012年 3 月23日採用決定)