

人間活動に伴う都市域地下の熱環境変動-特に地下鉄の運行に着目して-

2010年3月環境システム学専攻修了 86670 藤井 健太郎

指導教員 徳永 朋祥 准教授

キーワード：地下鉄、地中温度、伝熱、熱伝達

1 緒言

現在、都市部においてはその空間を有効的に利用するという観点から、地下空間の利用が積極的に行われている。地下鉄、下水道、地下道路、地下施設などがその代表であり、地上における物質の密集度を解消し、良好な景観整備や渋滞の緩和に貢献している。しかし、長年の地下開発に伴い、都市域の浅い地下は施設が混雑しており、新しく設置される施設は年々深くなってきている。一方で都心部では地上だけでなく地中も温度上昇していることが近年報告されている^[1]。そこで、今後深刻な環境問題として浮上してくる前に、地下の熱環境を把握し、地下空間を半永久的に快適な環境として利用していくことが必要である。また、地中における人為的な熱影響を評価することは、エネルギーの有効利用の観点からも重要である。地下に蓄えられた熱を負の資産として扱うのではなく、地中熱ヒートポンプなどのエネルギー源として、利用することにより、地中への排熱とエネルギー源としての回収をバランスよく行うことも可能である。半永久的に快適な地下空間の利用を計画するために、また熱源としてのポテンシャルを評価するために、人間活動が地下空間に与える熱影響を定量的、空間的に把握することが必要である。

2 研究目的

以上をふまえ、本研究では、都市部の地下空間における人間活動が地中に与える熱影響を把握することを目的とする。その中でも80年以上の間、地下空間で大量の熱を排出してきた地下鉄から土壌への伝熱をモデル化し、対象地域における地下熱環境を評価する。また、解析結果が既存の観測結果にみられる地下温度分布を再現することを示すことによって、本研究で構築したモデルの妥当性を検証する。

3 対象地域とモデル

東京都（区部）大深度地下地盤図^[2]によると東京都の地形は西部から東部へと次第に低くなっており、多摩川の左岸に広がる広大な台地は武蔵野台地（山手台地）、東部の隅田川や荒川に広がる低地は下町低地と呼ばれている。両地域における表層土壌は山手台地が関東ローム層、下町低地が軟弱なシルト層によって代表される沖積層であり、両者は熱的に異なった挙動を示す可能性がある。そこで両地域において、路線の開通年、地表面からトンネルまでの深さの違いによる影響を検討できそうな地域を解析の対象場所として選定した。台地では青山一丁目駅、下町では日比谷駅を選定した。

青山一丁目駅、日比谷駅それぞれにおいて、地質柱状図^[3]、地盤断面図^[4]を参考にして地盤モデルを構築した。また駅ホームの深さ情報を参考にしてトンネルの位置関係を求めた。両地域における地層とトンネル位置の関係を示したものを図1、2に示す。

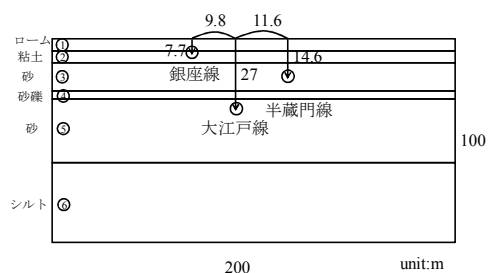


図1. 青山一丁目モデルにおけるトンネル位置図

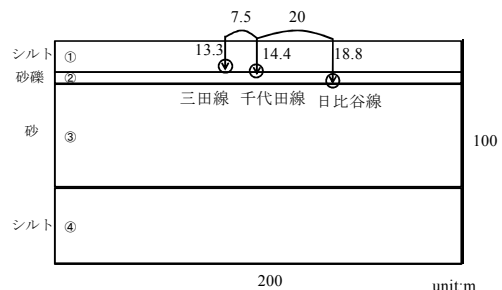


図2. 日比谷モデルにおけるトンネル位置図

各地層における物性値は中島ら^[3]の報告により経験的に下式によって示される。

$$\lambda = 1.21 \times 10^{-3} \cdot \gamma - 0.733 \quad (1)$$

$$c = 0.0335 \cdot \phi + 0.837 \quad (2)$$

但し、 λ : 土の熱伝導率(W/mK)、 γ : 土の密度(kg/m³)、 c : 比熱(kJ/kgK)、 ϕ : 土の重量含水率(%)である。

また、含水率は式(3)によって含水比より求められる。

$$\phi = \frac{W_w}{W_s + W_w} \times 100 = \frac{w}{1 + w/100} \quad (3)$$

但し、 W_w : 水の質量、 W_s : 土粒子の重量、 w : 含水比である。

地盤の γ と ϕ 及び飽和度の関係は式(4)で表される。

$$\gamma = \frac{\left(1 + \frac{\phi}{100 - \phi}\right) G_s \times \gamma_w}{1 + \frac{100\phi}{S_r(100 - \phi)} G_s} \quad (4)$$

但し、 G_s : 土粒子の比重、 S_r : 土の飽和度(%)、 γ_w : 水の密度(kg/m³)である。

ここで青山公園と日比谷公園で測定された含水比より式(1)~(4)を用いて、それぞれの地域における地層の物性値を決定した(表1, 2)。

表1. 青山一丁目における物性値

| 地層番号 | 熱伝導率 λ (W/mK) | 比熱 c (kJ/kg K) | 密度 γ (kg/m ³) | 含水率 ϕ (%) | 土粒子 の比重 G_s | 飽和度 S_r (%) | 水の密度 γ_w (kg/m ³) | 含水比 w (%) |
|------|-----------------------------|---------------------------|--|----------------------|---------------------|---------------------|--|-------------------|
| 1 | 1.55 | 1.69 | 1885.09 | 25.43 | 2.7 | 100 | 1000 | 34.1 |
| 2 | 1.60 | 1.63 | 1925.42 | 23.66 | 2.7 | 100 | 1000 | 31 |
| 3 | 1.65 | 1.57 | 1968.11 | 21.88 | 2.7 | 100 | 1000 | 28 |
| 4 | 1.94 | 1.27 | 2209.96 | 13.04 | 2.7 | 100 | 1000 | 15 |
| 5 | 1.59 | 1.64 | 1918.67 | 23.95 | 2.7 | 100 | 1000 | 31.5 |
| 6 | 1.62 | 1.60 | 1944.86 | 22.84 | 2.7 | 100 | 1000 | 29.6 |

表2. 日比谷における物性値

| 地層番号 | 熱伝導率 λ (W/mK) | 比熱 c (kJ/kg K) | 密度 γ (kg/m ³) | 含水率 ϕ (%) | 土粒子 の比重 G_s | 飽和度 S_r (%) | 水の密度 γ_w (kg/m ³) | 含水比 w |
|------|-----------------------------|---------------------------|--|----------------------|---------------------|---------------------|--|------------|
| 1 | 1.59 | 1.64 | 1916.00 | 24.07 | 2.7 | 100 | 1000 | 31.7 |
| 2 | 1.81 | 1.40 | 2103.90 | 16.67 | 2.7 | 100 | 1000 | 20 |
| 3 | 1.71 | 1.51 | 2014.93 | 20.00 | 2.7 | 100 | 1000 | 25 |
| 4 | 1.61 | 1.61 | 1939.23 | 23.08 | 2.7 | 100 | 1000 | 30 |

4 支配方程式

地盤土壌中の熱伝導における支配方程式は式(5)で表わされる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

5 各種条件の設定

地表面温度

地表面温度は1900年代前半から徐々に上昇していることが報告されているため、本研究においては地下鉄銀座線の青山一丁目駅が開通した1938年に地表面温度が上昇を始めたとして、玄地ら^[4]の報告を参考に上昇するまでの地表面温度を式(6)で、上昇し始めてからの地表面温度を式(7)で表した。

$$T = 15 \sin\left(\frac{2\pi t}{31536000}\right) + 15 \quad (6)$$

$$T = 15 \sin\left(\frac{2\pi t}{31536000}\right) + \frac{5}{60} \times \frac{t}{31536000} + 15 \quad (7)$$

但し、 t : 時間(s)である。

側方境界

本研究では地下鉄トンネルから側方境界までの距離を十分にとっており、境界で熱の移動はないと考えられるので、NO FLOWとした。

トンネル壁面での境界

本研究で熱源の対象としている地下鉄路線と土壌における熱の授受はトンネル壁面とトンネル内空気の熱伝達で説明できる。ここで放射による熱伝達はないものとする、対流熱伝達による流入熱量は式(8)で表わされる。

$$q = hA(t_t - t_w) \quad (8)$$

但し、 h : 対流熱伝達率 (W/m²K)、 A : トンネル単位長さ当たり壁表面積 (m²)、 t_t : トンネル空気温度 (°C)、 t_w : トンネル壁表面温度 (°C) である。また対流熱伝達率は矢崎ら^[5]に倣い式(9)で表す。

$$h = 5.3 + 3.6v \quad (v \leq 5 \text{ m/s}) \quad (9)$$

但し、 v はトンネル風速 (m/s) である。

また本モデルで用いた月別トンネル空気温度を表3, 4に表す。

初期条件

地球内部においては深さが増すに従って温度が増加している。これを地温勾配といい、鈴木^[6]の報告を元に青山一丁目における初期地温勾配を

$$T = 0.023 \times z + 15 \quad (10)$$

とした。但し z : 深度(m)である。

表 3. 月別トンネル空気温度 (武田^[7])

| 月 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---------------|----|------|------|------|------|------|------|----|------|------|------|------|
| トンネル内空気温度(°C) | 23 | 22.5 | 21.3 | 23.7 | 23.9 | 25.8 | 27.9 | 28 | 27.8 | 26.1 | 26.7 | 22.8 |

表 4. 月別トンネル内平均風速と熱伝達率 (武田^[7])

| 風速(m/s) | 1.4 | 1.6 | 2.0 | 1.7 | 2.0 | 1.7 | 1.7 | 2.0 | 1.8 | 1.5 | 1.3 | 1.7 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 熱伝達率 (W/m ² /K) | 12.0 | 12.9 | 14.4 | 13.1 | 14.5 | 13.4 | 13.4 | 14.6 | 13.6 | 12.3 | 11.7 | 14.9 |

下方境界

下方からは地殻熱流が伝わっており、境界にその熱流を指定する。地殻熱流量は地温勾配と図 1、2 における最も下層の熱伝達率を用いて、フーリエの法則より求めた。青山一丁目での値は 0.03726 W/m² であり、日比谷での 0.0368 W/m² 値はである。

シミュレーションの手順

まず地殻熱流量と地表面の影響のみを与えた状態でシミュレーションを進め、ある季節における地温分布が翌年も同じ状態になった時をヒートアイランド現象が起きる前 (1938) の地盤状態とした。そこから実際の路線の開通年代に合わせて路線を開通させた。青山一丁目では銀座線を開通させて 40 年後 (1978) に半蔵門線を、半蔵門線開通から 23 年後 (2001) に大江戸線を開通させ 10 年後の現在まで計算した。日比谷では地表面の温度が上昇して 30 年後に日比谷線を開通させて、7 年後に千代田線、1 年後に三田線、さらに 37 年後の現在まで計算を行った。

5 シミュレーション結果

青山一丁目駅と日比谷駅でのシミュレーション結果を図 3、4 に示す。路線に囲まれた部分は広範囲に 22°C 以上の温度を示した。さらに三つのトンネルに囲まれた領域が一つの熱源のように振舞い、約 30 m の範囲に 1°C 以上の温度上昇を示している。

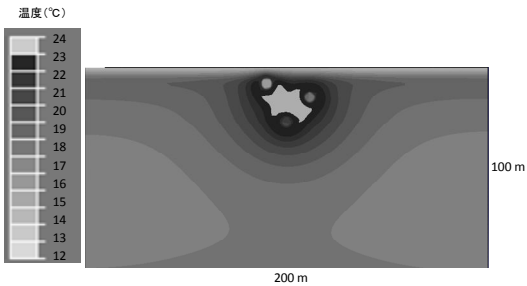


図 3. 青山一丁目駅における 2010 年現在の地中温度分布図

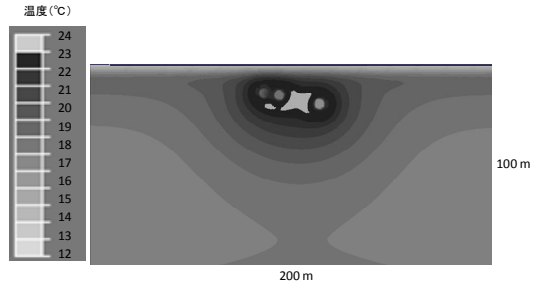


図 4. 日比谷駅における 2010 年現在の地中温度分布図

6 計算結果における妥当性の検証

目黒観測井は東急田園都市線の中心位置から 31m の距離に位置する。図 5 に 2001 年 11 月 6 日における観測結果を示すが、深度 15 m 付近に地表面以外の影響と思われる局地的な温度上昇が表れている。この特定の深度における局所的な温度上昇に、東急田園都市線からの熱がどの程度寄与しているかを評価するために、青山一丁目で行った解析と同じように地盤モデルを作製し、各種境界条件を設定し、実際の年代に沿って 2001 年 11 月まで計算した。図 5 に東急田園都市線が存在する場合と存在しない場合の観測井における温度の計算結果を示す。観測結果は、深度 60 m よりも深い地点では、トンネルが存在しない場合の計算結果と比較的一致しているが、それよりも浅い 10~30 m の深度の地点ではトンネルが存在する場合の計算結果よりも温度が高くなっている。計算結果に比べて、30~60 m の深度での温度が上昇していない分、10~30 m の深度での温度が上昇していることから推測できる。地下鉄トンネルのほかに観測井温度に影響をおよぼす熱源がないとすると、このような結果になる原因の一つとして、水平方向に熱を移動させる地下水流れの影響が考えられる。

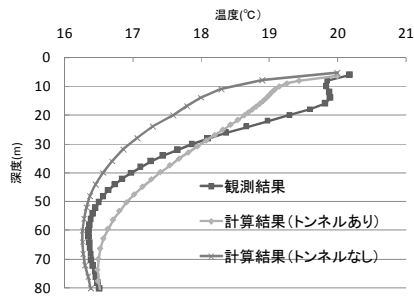


図5. 目黒観測井における観測と計算結果

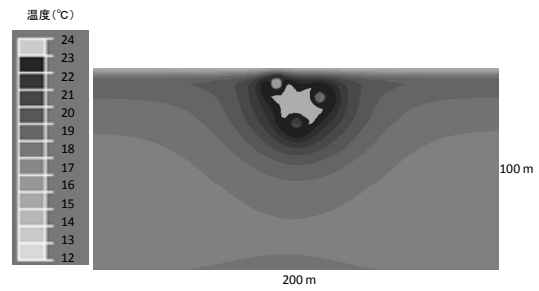


図7. 青山一丁目における2010年の地中温度分布図
(地下水位変動あり)

7 被圧帯水層の不圧化の影響

被圧地下水位は人為的な地下水揚水によって変動することが一般に知られている。揚水に伴い地下水位が変化しているとすると、地盤の物性値も変化するため、地下水位が変動しない場合と比較して解析結果が異なってくる可能性がある。そこで青山一丁目駅モデルにおいて、地下水位変動を考慮した解析を行った。

ここで遠藤ら⁸⁾が江東地区において示した地下水位変動と同様の傾向で青山一丁目の地下水位も変動するとした。また青山一丁目と同様、東久留米層を被圧帯水層とする新宿における地下水位変動を参考に、青山一丁目での地下水位の変動を推測した(図6)。図6に従い地下水位が変動するにつれて、地盤中土の飽和度も変化するものと思われる。本研究においては、被圧帯水層内で地下水面よりも深い位置では土壌は完全に水に満たされているため飽和度は100(%)とし、それよりも浅い位置では毛管現象により一定割合の水が土壌に分布しているとして飽和度を20(%)とする。その他の条件は地下水位が変動しない青山一丁目の解析と同じであるとする。その結果を図7に示す。地下水位の変動を考慮しない図3と大きな差異はみられなかった。

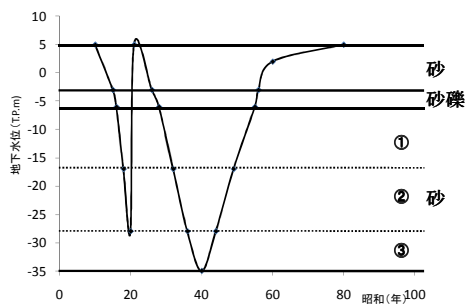


図6. 青山一丁目被圧帯水層における地下水位変動

8 まとめ

青山一丁目駅、日比谷駅付近の解析では、地下鉄路線に囲まれた領域が一つの熱源のように振舞い、周囲の地盤を数十メートルの範囲にわたって1°C以上上昇させることが示唆された。目黒観測井における深度15m付近の特異な温度上昇部分は、地下鉄路線からの熱によるものであるという仮説を検証するための解析を行った。提案したモデルでは特異な温度上昇部分は再現できなかったものの、それが地下水流動の影響によるものらしいという可能性が示された。

参考文献

- [1]『朝日新聞社』2009年5月19日ホームページ「東京都心、地中も高温化 ヒートアイランドが影響か」
- [2]東京都土木技術研究所，東京都（区部）大深度地下地盤図-東京都地質図集6-，1996年
- [3]中島 康孝・大橋 一正・伊藤 宏之・鈴木 厚志，蓄熱材量における土壌の熱的特性に関する研究（その3），日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），581-582，1982年10月
- [4]玄地 裕・大谷 武弘・天野 治男・小杉 信明・長 豊・長本 英俊・小宮山 宏，都市ヒートアイランド現象が地温に与える影響-東京都内における観測結果-，日本気象学会，23-31，1998年9月
- [5]矢崎 淳史・武田 仁・坂本 誠，地下鉄の排熱に関する基礎的調査 その2
- [6]鈴木 宏芳，関東平野の地中温度，国立防災科学技術センター研究報告書，第35号，139-154，1985年11月
- [7]武田 仁，地下鉄の排熱利用のための温熱環境実測調査，日本建築学会計画系論文集，第474号，7-15，1998年8月
- [8]遠藤 毅・川島 眞一・川合 将文，東京下町低地における“ゼロメートル地帯”展開と沈静化の歴史，応用地質，第42巻，第2号，74-87，2001年