

IV-132

地下鉄道の熱環境シミュレーション

一周波数応答による地中熱流のモデル化—

鉄建建設 エンジニアリング本部 正会員 堀江 篤

まえがき 地下鉄道における熱収支の主要要素は、従来、列車発熱等の内部発熱、換気による熱の移動、壁体吸放熱作用が考えられてきた。しかし路線が熱的に対称でない場合には、列車車体の金属材料が蓄熱運搬する熱量が各駅間の熱収支に影響を及ぼす。そこで壁体および地中の熱流を周波数応答によりモデル化し、車体交換熱量を含めて温度と熱流をフーリエ級数に分解して全路線の熱バランス式を立て、これを解いてから合成して温度を求めるシミュレーション手法を提案した。

計算手法の提案 図-1 に示すセクションの熱平衡モデルを考え、計算領域および各熱量に関して次の仮定・条件を置く。

1) 計算領域は一つの路線の各駅とトンネルとし、領域をセクションに分割して添字_(i)を付けて番号を表す。セクション間の熱移動は換気と列車車体による熱移動を考え、空気完全混合を仮定し、一時間ごとの温度を計算する。

2) 内部発熱量は列車発熱量（人体発熱含む） $q_{T(i)}$ 、駅空調・照明熱量 $q_{A(i)}$ 、壁面蒸発熱量 $q_{W(i)}$ の和とする。各熱量はフーリエ級数に展開する調和解析により、平均項と周期項の和で表示する。

3) 壁体交換熱量は定常伝熱量 $q_{CA(i)}$ と周期伝熱量（吸熱応答 $q_{CD(i)}$ 、貫流応答 $q_{CE(i)}$ ）の和とする。定常伝熱量は壁厚を δ 、熱伝導率を λ 、壁面熱伝達率を h_a として、単位伝熱量 $K(=1/(\delta/\lambda+1/h_a))$ 、空気・地中各温度の平均値 $(E_{A(i)}, E_{S(i)})$ 、セクション係数 $C_{HA(i)}$

（表面積と一日の時間の積）より計算する。周期伝熱量は各応答 $(G_A(jn\omega)_{(i)}, G_K(jn\omega)_{(i)})$ 、空気・地中各温度の振幅 $(A_{A(i)}^n, A_{S(i)}^n)$ 、位相 $(\beta_{A(i)}^n, \beta_{S(i)}^n)$ 、セクション係数 $C_{HA(i)}$ より計算する。各応答は温度伝導率を

a としてラプラス変換領域での温度 (Θ_A, Θ_S) 、熱流 (Q_A, Q_S) の関係を表すマトリックスの式(1)より壁体の伝達関数 $G(s)$ を求め、 $s=jn\omega$ より計算する。

4) 車体交換熱量は下り列車交換熱量 $q_{MD(i)}$ と上り列車交換熱量 $q_{MU(i)}$ の和とする。空気温度 $\theta_{A(i)}$ と車体温度 $\theta_{MD(i)}, \theta_{MU(i)}$ との差および車体熱伝達係数 $C_{T(i)}$ （車体熱伝達率、車体表面積、列車本数、通過時間の積）

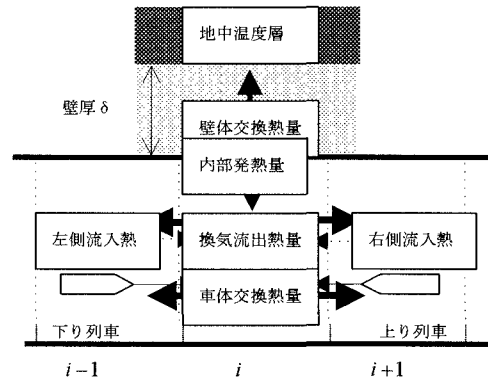


図-1 セクションの熱平衡モデル

$$\begin{bmatrix} \Theta_A \\ Q_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/h_a \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} \delta & \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} \delta / \lambda \sqrt{\frac{s}{a}} \\ \lambda \sqrt{\frac{s}{a}} \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} \delta & \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Theta_S \\ Q_S \end{bmatrix} \quad (1)$$

表-1 セクション各熱量の計算式

内部発熱量	$q_{T(i)} = q_{T(i)}^0 + \sum_n q_{T(i)}^n \sin(n\omega t - \varepsilon_{T(i)}^n)$ $q_{W(i)} = q_{W(i)}^0 + \sum_n q_{W(i)}^n \sin(n\omega t - \varepsilon_{W(i)}^n)$ $q_{A(i)} = q_{A(i)}^0 + \sum_n q_{A(i)}^n \sin(n\omega t - \varepsilon_{A(i)}^n)$
壁体交換熱量	$q_{CA(i)} = C_{HA(i)} \cdot K_{(i)} (E_{A(i)} - E_{S(i)})$ $q_{CD(i)} = \sum_n C_{HA(i)} \operatorname{Im} [G_A(jn\omega)_{(i)} \cdot A_{A(i)}^n \cdot e^{j(n\omega t - \beta_{A(i)}^n)}]$ $q_{CE(i)} = \sum_n C_{HA(i)} \operatorname{Im} [G_K(jn\omega)_{(i)} \cdot A_{S(i)}^n \cdot e^{j(n\omega t - \beta_{S(i)}^n)}]$
車体交換熱量	$q_{MD(i)} = C_{T(i)} (\theta_{A(i)} - \theta_{MD(i-1)})$ $q_{MU(i)} = C_{T(i)} (\theta_{A(i)} - \theta_{MU(i+1)})$
換気流出熱量	$q_{VR(i)} = C_{LT(i)} (\theta_{A(i)} - \theta_{A(i-1)}) + C_{RT(i)} (\theta_{A(i)} - \theta_{A(i+1)})$ $q_{VU(i)} = C_{LU(i)} (\theta_{A(i)} - \theta_{A(i-1)}) + C_{RU(i)} (\theta_{A(i)} - \theta_{A(i+1)})$

より各熱量を計算する。車体の金属材料は台車、床下機器、外板等外気に触れる部分を対象とする。

5) 換気流出熱量は列車換気流出熱量 $q_{VR(i)}$ と機械換気（自然換気含む）流出熱量 $q_{VU(i)}$ の和とする。換気量は時間あたりの平均値を用い、熱量は左右セクションに対する流出入熱量の和とする。セクションの換気量、空気密度、同比熱の積となる換気容量係数 $C_{xx(i)}$ については、列車および機械換気に添字 T, U 、左右より流出入する換気には添字 L, R を付けて区別する。

以上の仮定・条件により求めたセクションの各熱量の計算式を表-1 に示す。交換・流出熱量は流出する方向を正とする。

温度の計算では、セクションの各熱量項目を平均項と周期項（ n 次まで）に分解すると、熱平衡の条件により温度を変数として各項ごとに独立した熱バランス連立方程式が得られる。全セクションに関する連立一次方程式を繰り返し計算し、収束すれば解となる。

六甲・新関門トンネル測定値との比較 両トンネルは駅も機械換気もない山岳トンネルであるが、長大トンネルであり、延長方向の温湿度測定データがあるので試算を行った。トンネル内は21のセクション（長さ六甲770m, 新関門890m）に分割した。両トンネルの換気モデルと一日平均換気量を図-2、表-2 に示す。

外気の場合は平均気温 16.2℃、振幅 11.2℃とした。列車とトンネルの各係数の入力条件を表-3 に示す。セクションの平均列車発熱量は六甲 15.1GJ/日、

新関門 10.0GJ/日

と計算した。壁体交換熱量に関しては、湧水、地下水による熱の排出が壁体厚と地中温度の設定という形でモデル化されているので、セクションの湧水量と温度に合わせてこれを設定した。両トンネルの夏・冬の温湿度測定結果と気温の年変化数値計算結果の比較を図-3、図-4 に示す。両者は比較的良く一致している。

まとめ 列車本数が一定な年周期変動については、計算値と測定値が良く一致する。列車本数や換気量が変化する一日周期の変動では、温度の係数に変動が発生する。この計算法についてさらに検討したい。

参考文献:1)大塚全一：地下鉄の温度環境に関する現況と分析、土木学会論文集、No.241,1975. 2)井口裕雄：青函トンネルの温度予測、鉄道技術研究報告、No.1288、1985. 3)下田ほか：地下空間における地盤の吸熱効果に関する研究（第2報）空気調和・衛生工学会論文集、No.53、1993. 4)堀江ほか：トンネル換気と空気圧に関する試験、鉄道技術研究報告、No.1313、1986.

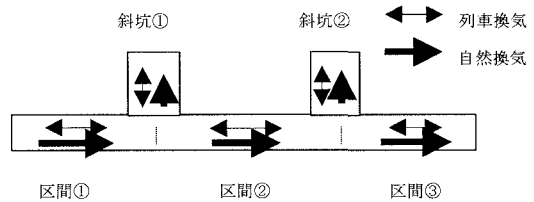


図-2 六甲・新関門トンネル換気モデル

表 2 トンネルの一日平均換気量 (m^3/s)

種類	区間	六甲トンネル		新関門トンネル	
		列車換気	自然換気	列車換気	自然換気
本坑	区間①	±84.4	+2.0	±60.5	-0.1
	区間②	±87.0	+1.3	±61.1	+0.1
	区間③	±84.4	+0.5	±58.7	+2.4
斜坑	斜坑①	± 9.1	+0.8	± 2.2	-0.3
	斜坑②	±14.0	+0.8	±21.6	-2.3

表-3 列車・トンネル各係数の入力条件

列車	トンネル
上下列車本数六甲 124 本/日	壁体厚（地盤含む） 1.5~2.0 m
同 新関門 82 本/日	地中温度 16~20℃
列車速度 180 km/h	壁体熱伝導率 1.1W/(m・℃)
車体鋼材質量 226 000 kg	壁体温度伝導率 0.0016 m/h
車体熱伝達率 178 W/(m ² ・℃)	壁面熱伝達率 7.0 W/(m ² ・℃)
車体鋼材表面積 1920 m ²	壁面ぬれ率 1~2%
車体鋼材代表長 0.1 m	壁面蒸発率 3×10^{-8} kg/(m ² s Pa)

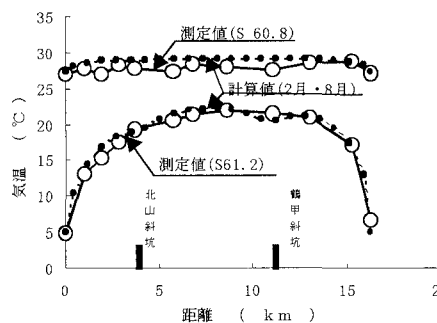


図-3 六甲トンネル延長方向気温分布

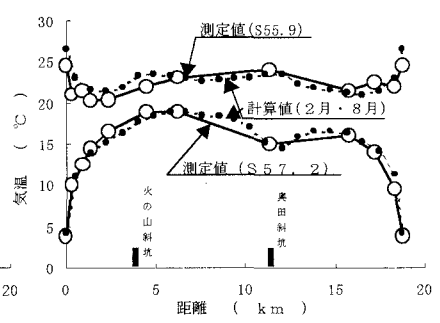


図-4 新関門トンネル延長方向気温分布