

理論解析と模型実験によるトンネル内温熱環境 シミュレーションの検証

環境工学研究部 熱・空気流動研究室

主任研究員 齋藤 寛之

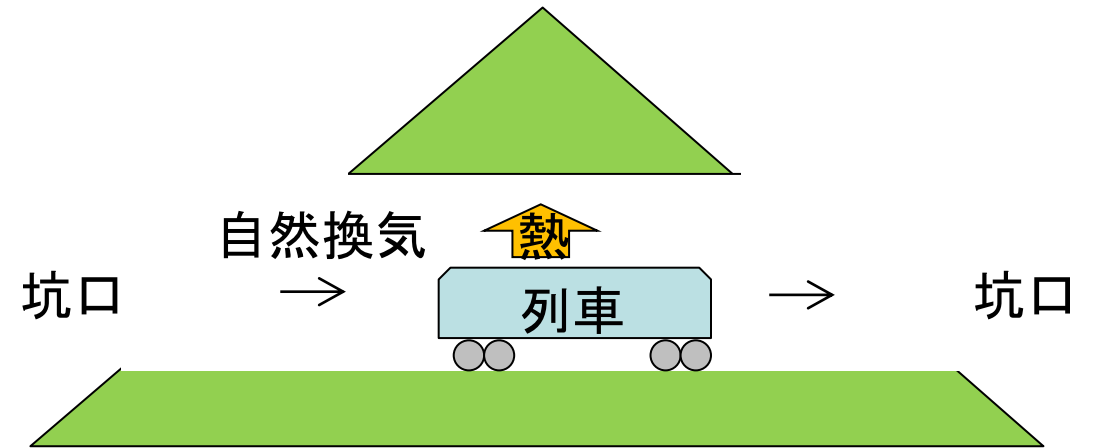
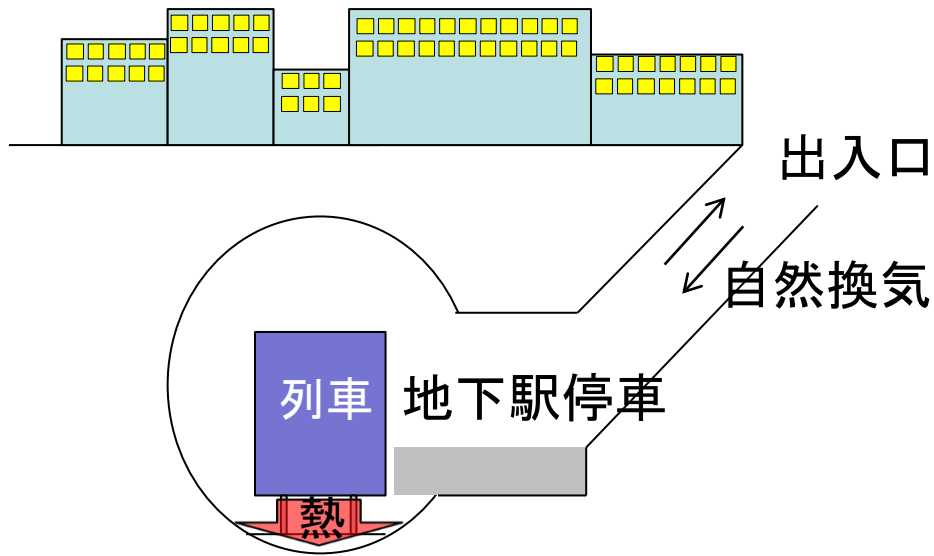
目次

- ◆背景
- ◆目的
- ◆トンネル内温熱環境シミュレーションの概要
- ◆理論解析による検証
- ◆模型実験による検証
- ◆まとめと成果の活用

背景：トンネル機械換気の必要性

- ・ 地下駅停車→ブレーキ→発熱
- ・ 高密度ダイヤ→発熱大
- ・ 外気の流入経路：出入口など

- ・ トンネル通過
- ・ 比較的ダイヤに余裕→発熱小
- ・ 外気の流入経路：トンネル坑口



都市部の鉄道トンネル

(鉄道) 山岳トンネル

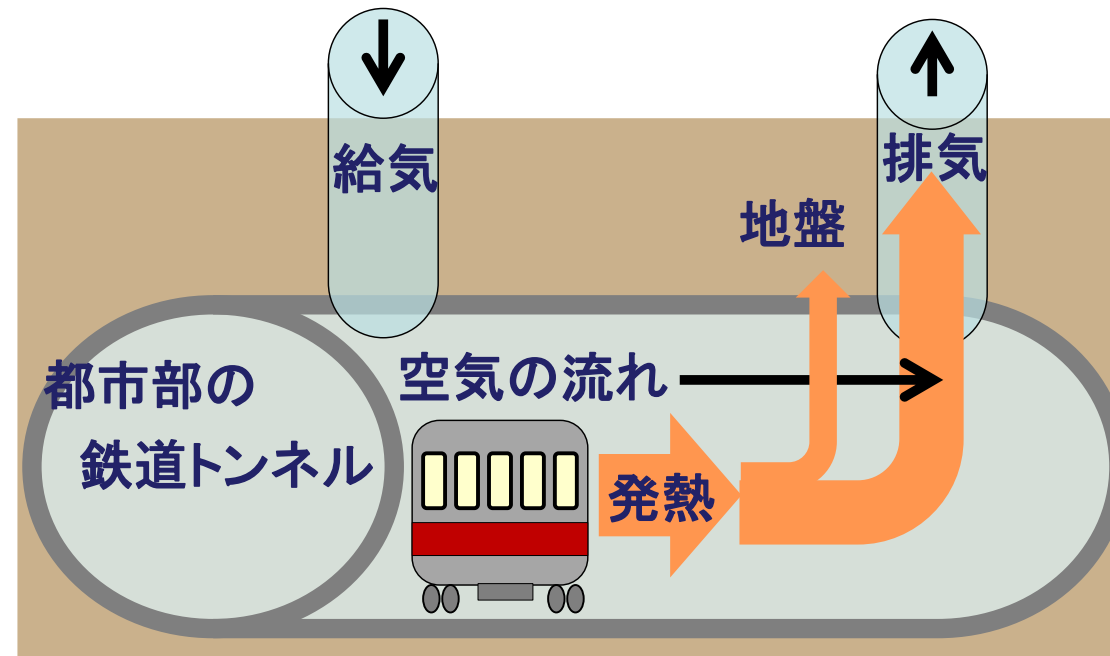
- ・ 都市部の鉄道のトンネルは熱的に不利(機械換気装置設置の場合あり)

トンネル換気装置の役割

トンネル内の排熱の一部→地盤に蓄積される

トンネル内気温の経年的上昇の原因：地盤温度の上昇

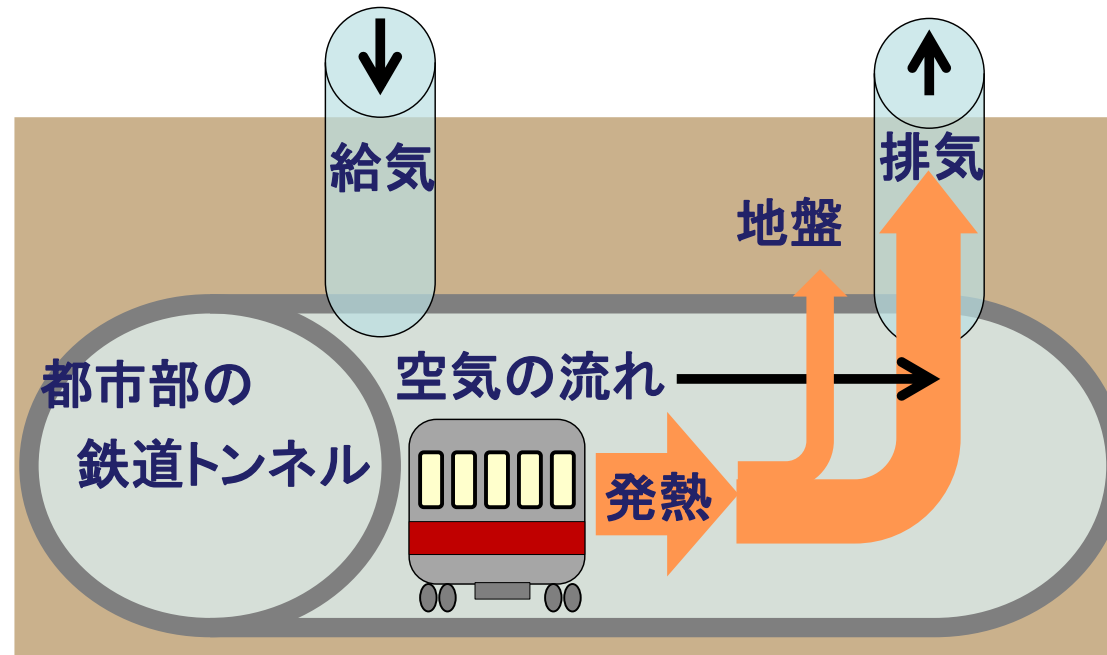
トンネル換気装置による換気の強化→地盤への蓄熱を減少させる



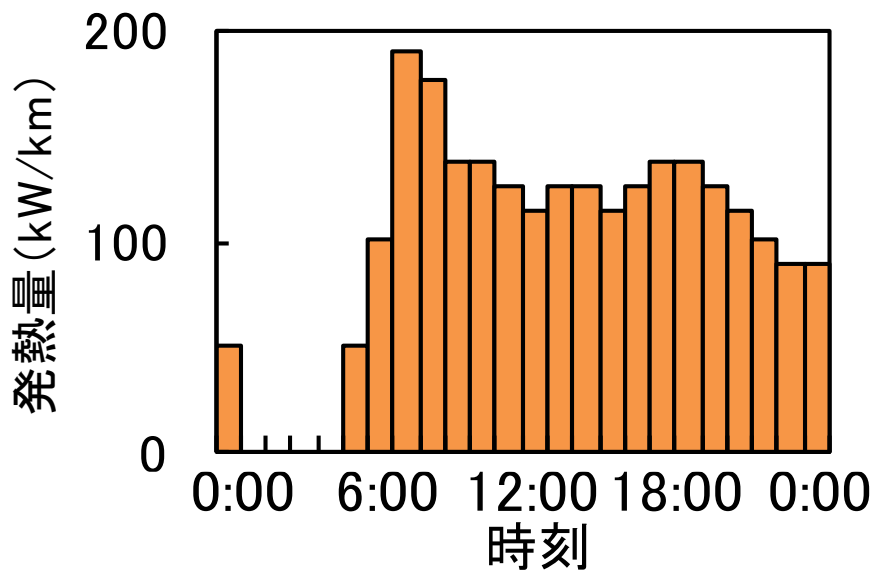
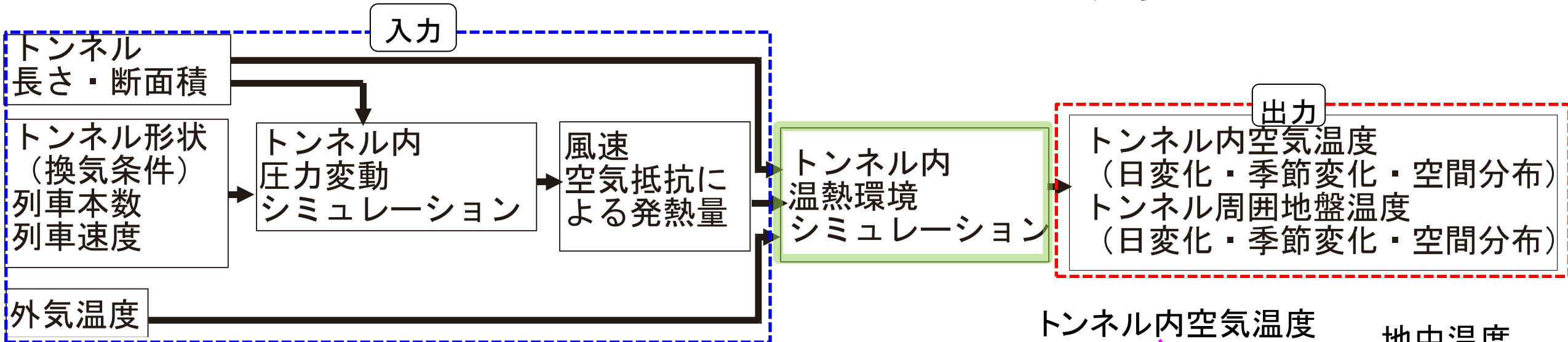
研究の目的

トンネル内温度の予測結果などからトンネル換気装置の容量決定

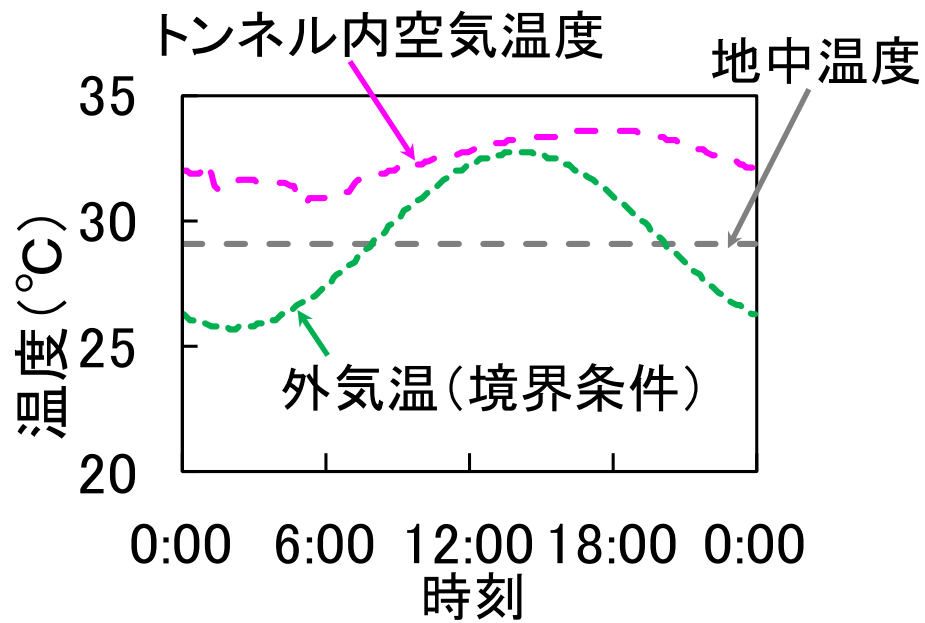
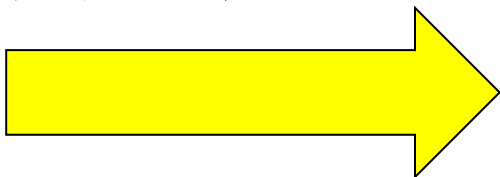
トンネル換気装置の経済的な設計→トンネル内温度予測の精度検証



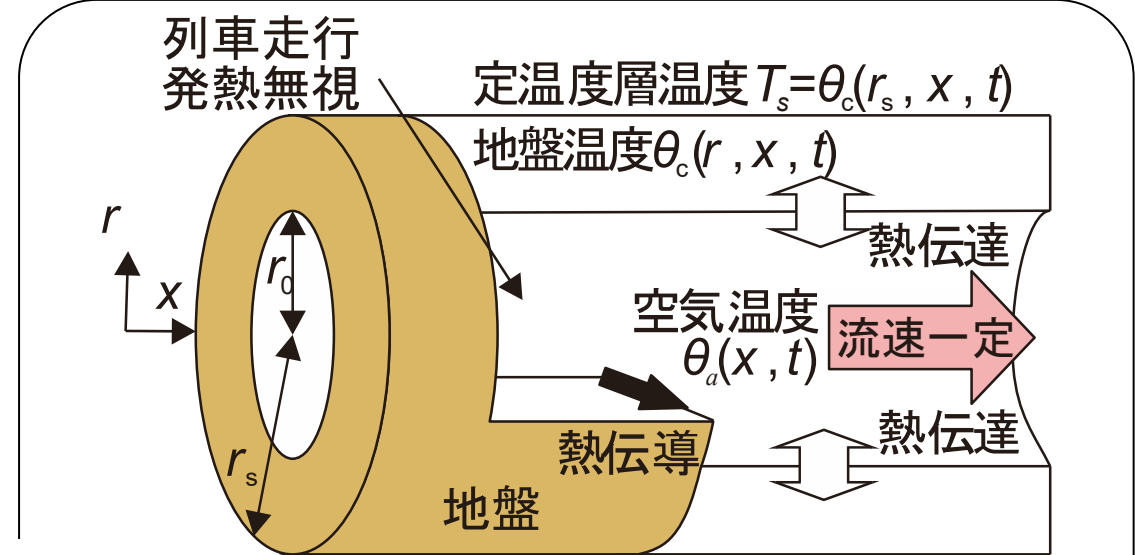
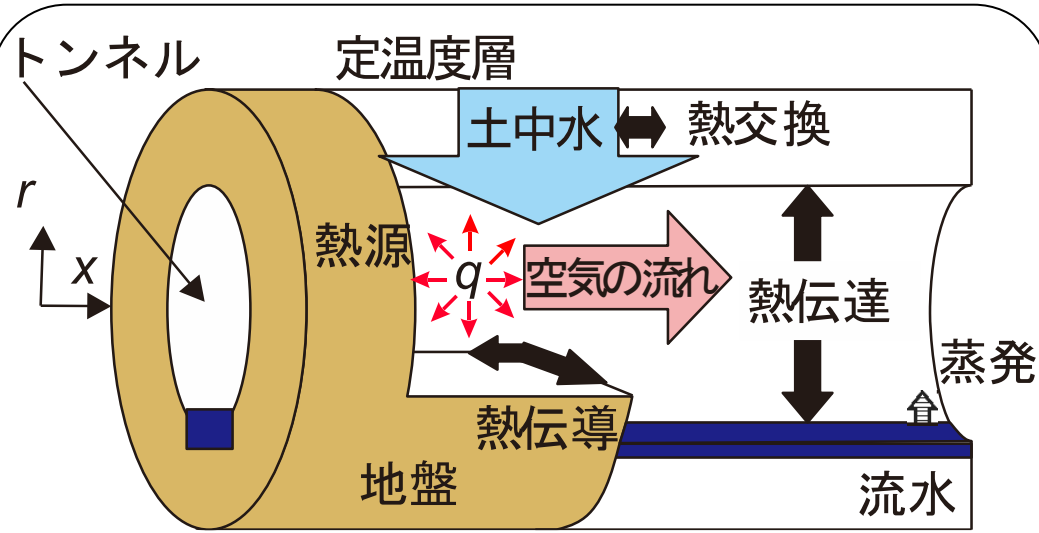
シミュレーションの概要



発熱量、風速など



シミュレーション検証対象



主要部分

- ・空気温度の式
- ・地盤温度の式
- ・土中水温度の式
- ・流水温度の式

風速時間変化

列車走行発熱

検証対象主要部に絞る

基礎方程式単純化

- ・空気温度の式
- ・地盤温度の式

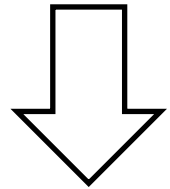
風速一定

外気温変動が主な熱源(それ以外省略)

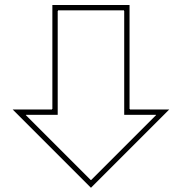
理論解析による検証

空気温度と地盤温度の理論解

(理想的な条件で理論解が得られている)



離散化誤差を含まない
計算結果



シミュレーションの離散
化誤差を得られる

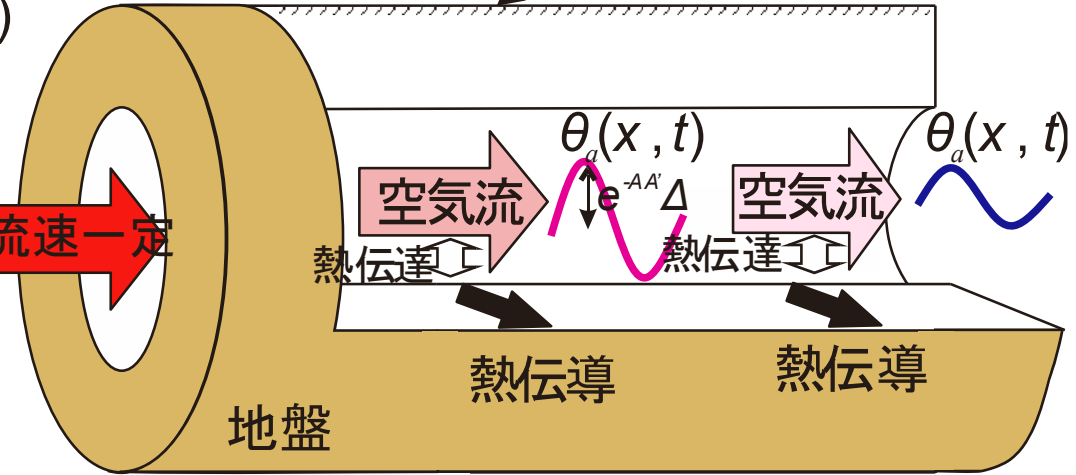
外気温度の境界条件
(温度直流成分+交流成分)

日周期または年周期変動

空気温度
 $\theta_a(0, t)$



流速一定



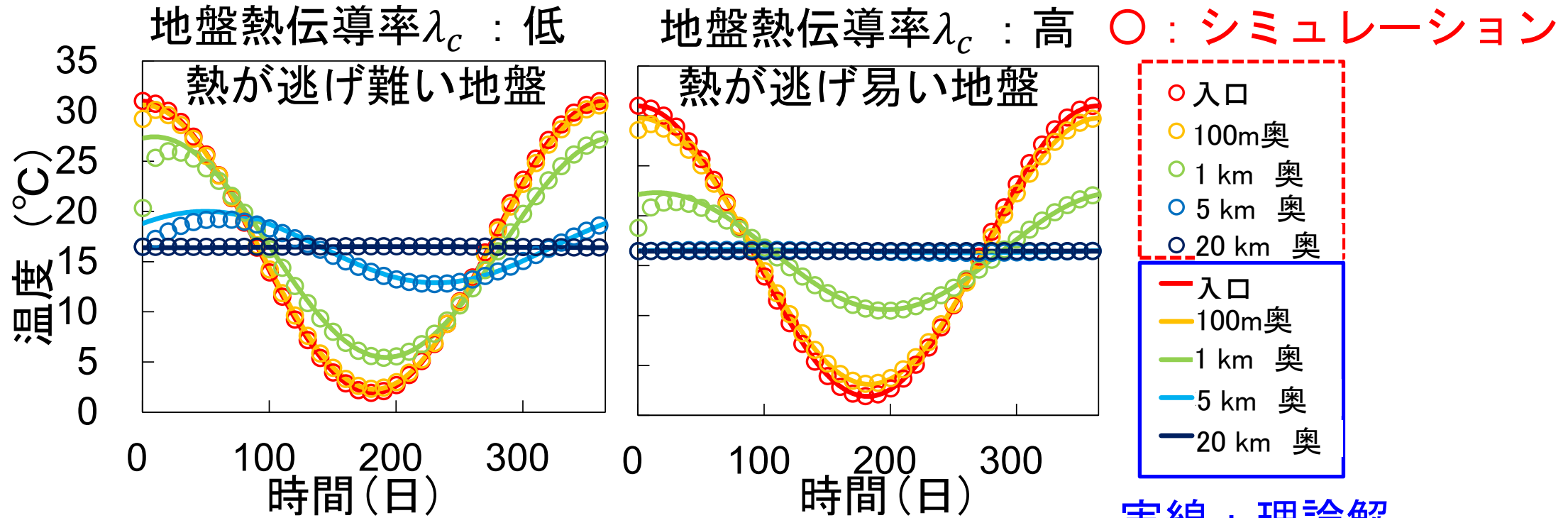
θ : 定温度層温度 T_s を基準とする温度

Peavy(1961)による近似解 (トンネル内の気流温度変動)

(距離減衰の項) × [直流成分と交流成分の応答の和]

引用文献: Peavy, B. A. "Heating and Cooling of Air Flowing Through an Underground Tunnel", Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol.65C, No.1(1961) pp.157-162.

理論解とシミュレーションの比較



(a) $\lambda_c = 0.5$ [W/(m · K)] (b) $\lambda_c = 5.0$ [W/(m · K)]

トンネル内気流温度の比較 (近似解とシミュレーション)

地盤熱伝導率が高い条件 : 入口から離れた地点の温度変動小

過渡応答除きほぼ一致 ⇔ シミュレーション主要部の離散化誤差の影響小

模型実験による検証の意義

シミュレーションの検証には、境界条件が既知の条件での
実物実験／現地試験結果が必要

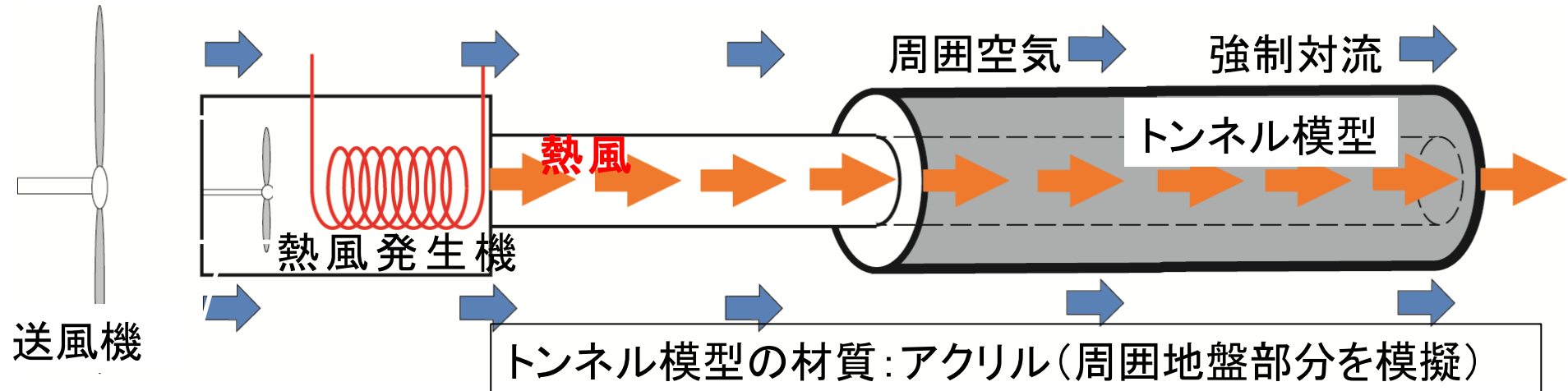
対象とするトンネル全長にわたり温度境界条件（地盤温度）
を測定することは容易ではない

境界条件（地盤温度）を正確に測定した模型実験を実施し、
模型実験測定値を境界条件として設定したシミュレーション結
果を模型実験結果により検証する

検証用模型実験

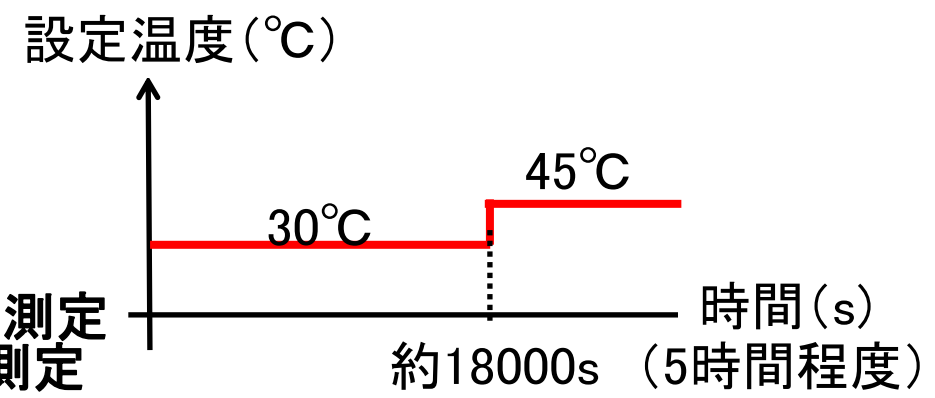
模型実験の特徴

- 模型縮尺: 1/178
- 地盤部アクリル製
- 単純な形状
- 均質な材質
- 温度の動的応答
- 高精度温度測定

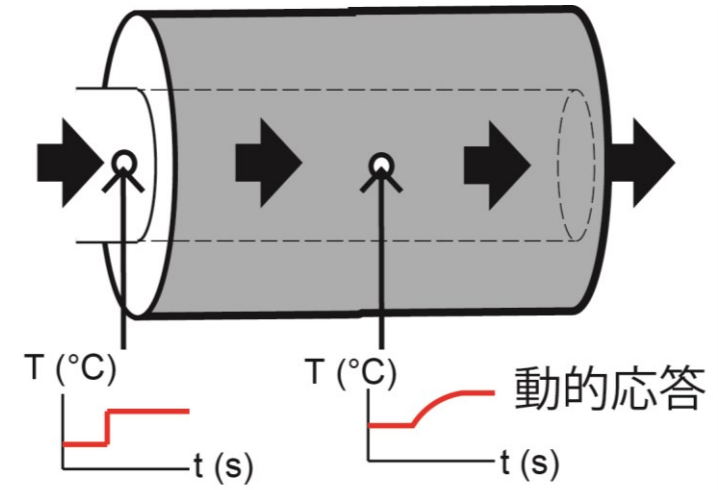


実験方法

- 模型トンネルに熱風送風
- 定常状態 → 熱風15°C昇温
- トンネル内空気温度時間変化測定
- 境界条件(模型外表面温度)測定

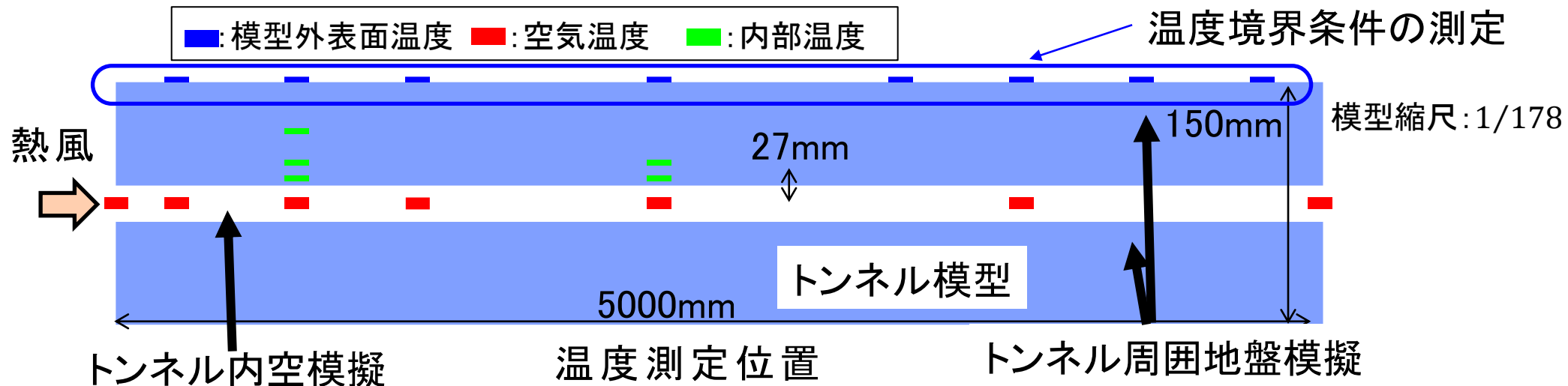


熱風発生機の設定温度(気流温度)

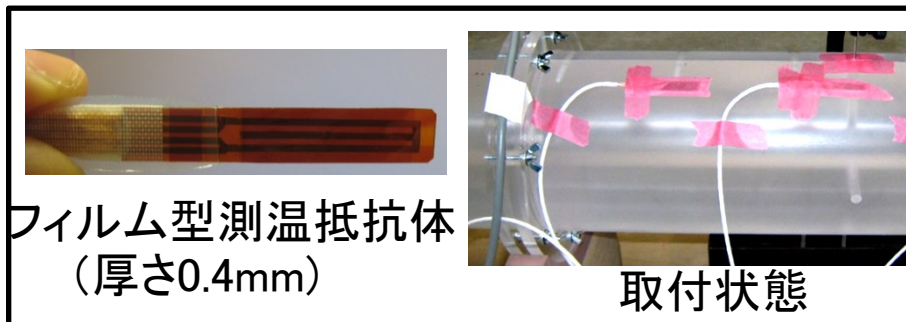


実験値と計算結果の比較により検証

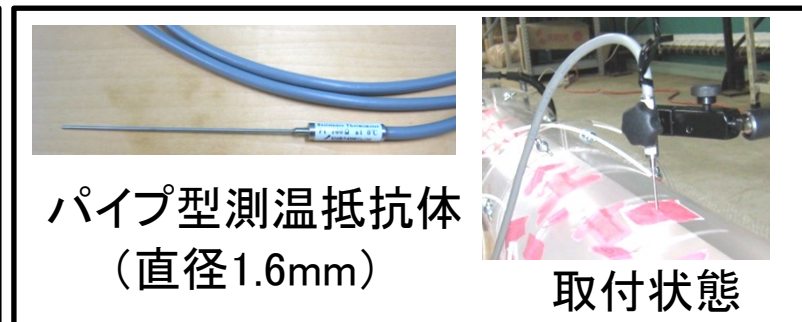
検証用模型実験：測定方法 (模型外表面温度・トンネル内空気温度)



測温抵抗体 (JIS A級: 許容差 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ (測定温度 30°C)) により温度を測定



模型外表面温度測定 (8点)
(上の図中 ■)

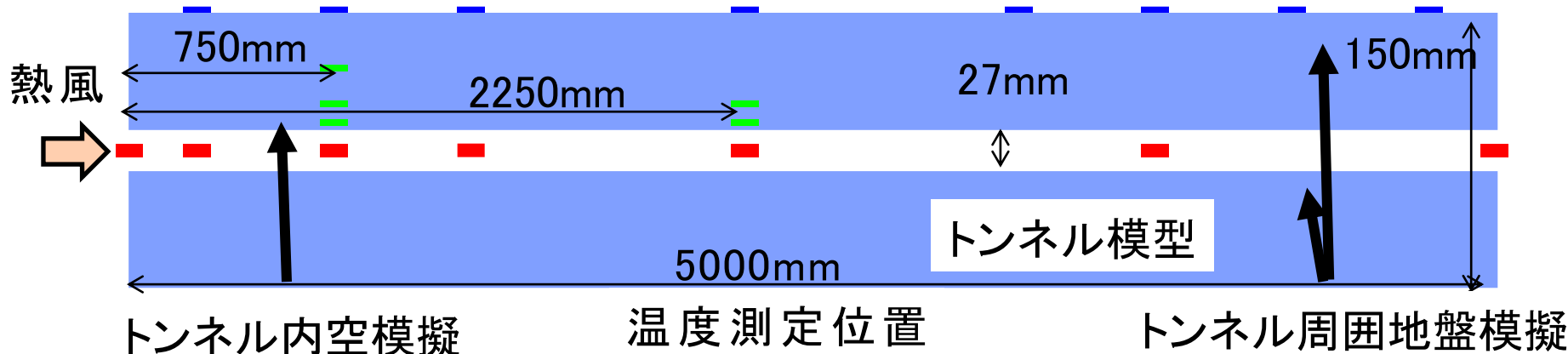


空気温度測定 (7点)
(上の図中 ■)

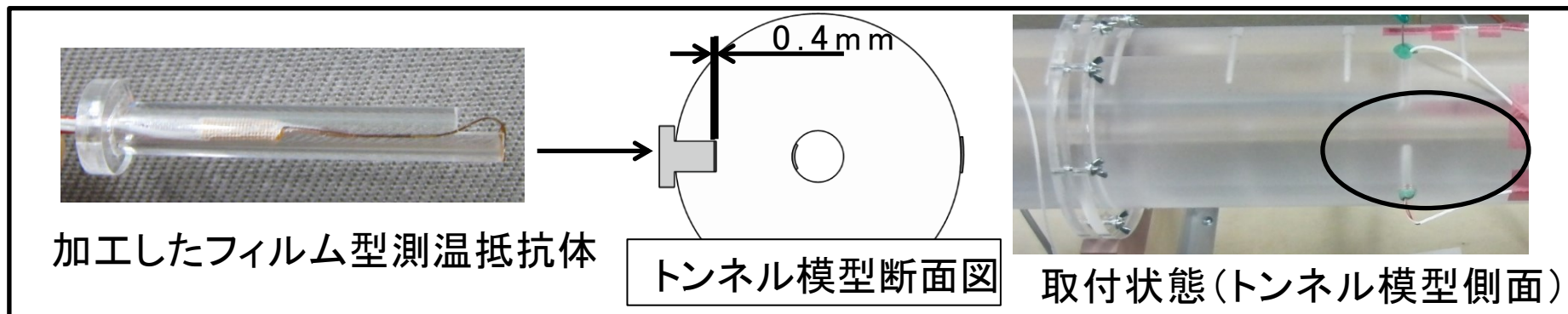
検証用模型実験：測定方法 (トンネル周囲地盤温度)

■: 模型外表面温度 ■: 空気温度 ■: 内部温度

模型縮尺: 1/178



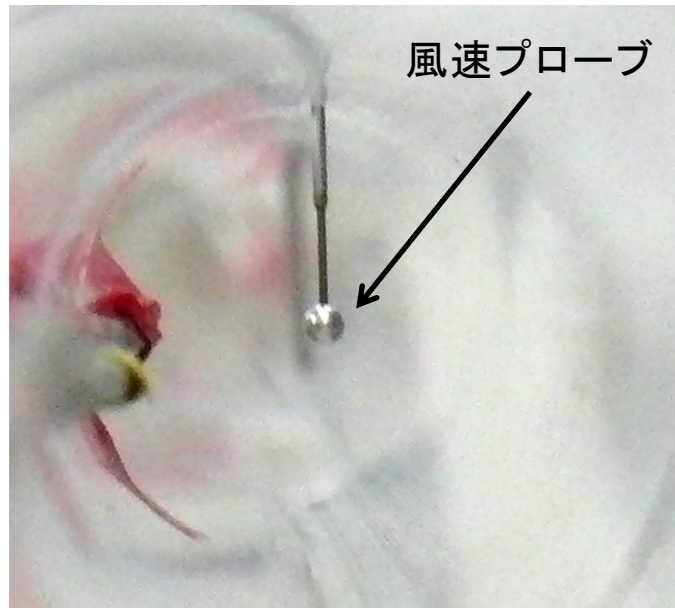
測温抵抗体 (JIS A級: 許容差 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ (測定温度 30°C)) により温度を測定



内部温度測定 (5点) (上の図中 ■)

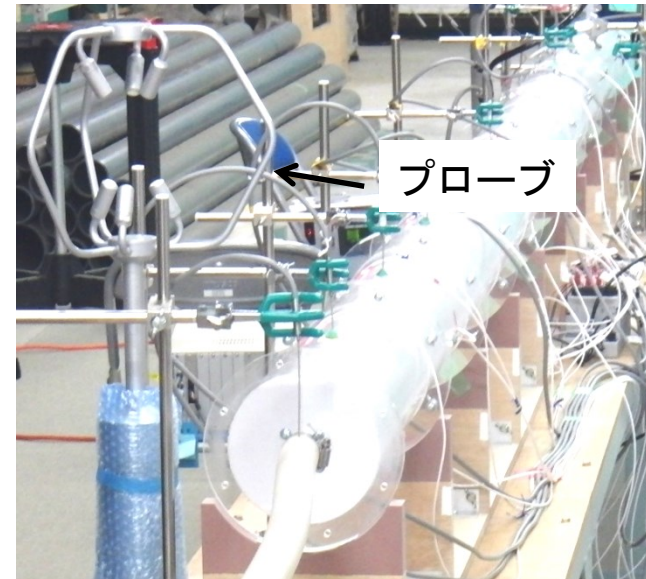
検証用模型実験：測定方法 (トンネル内風速・模型周囲風速)

トンネル内風速測定



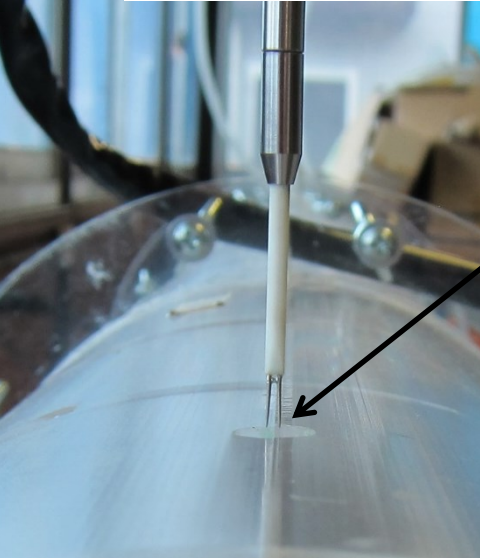
簡易型熱式風速計

模型周囲風速測定



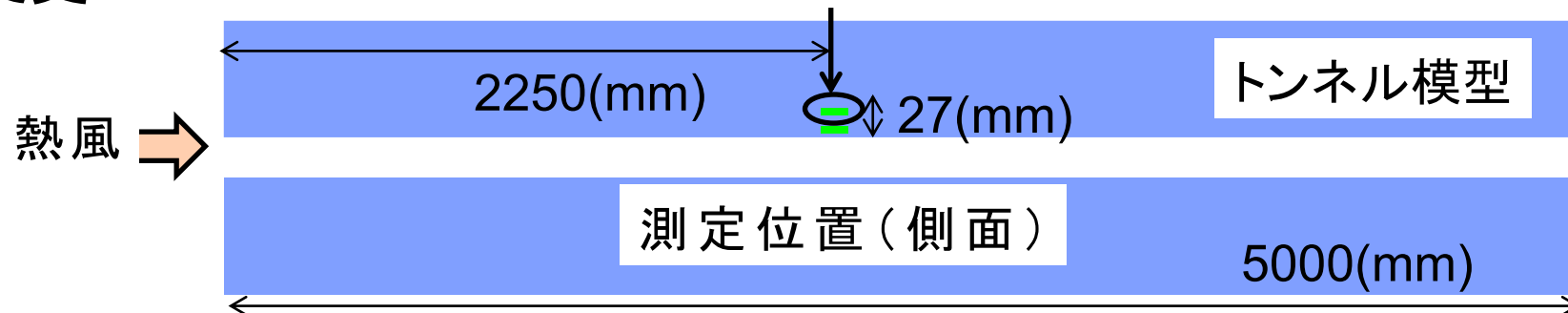
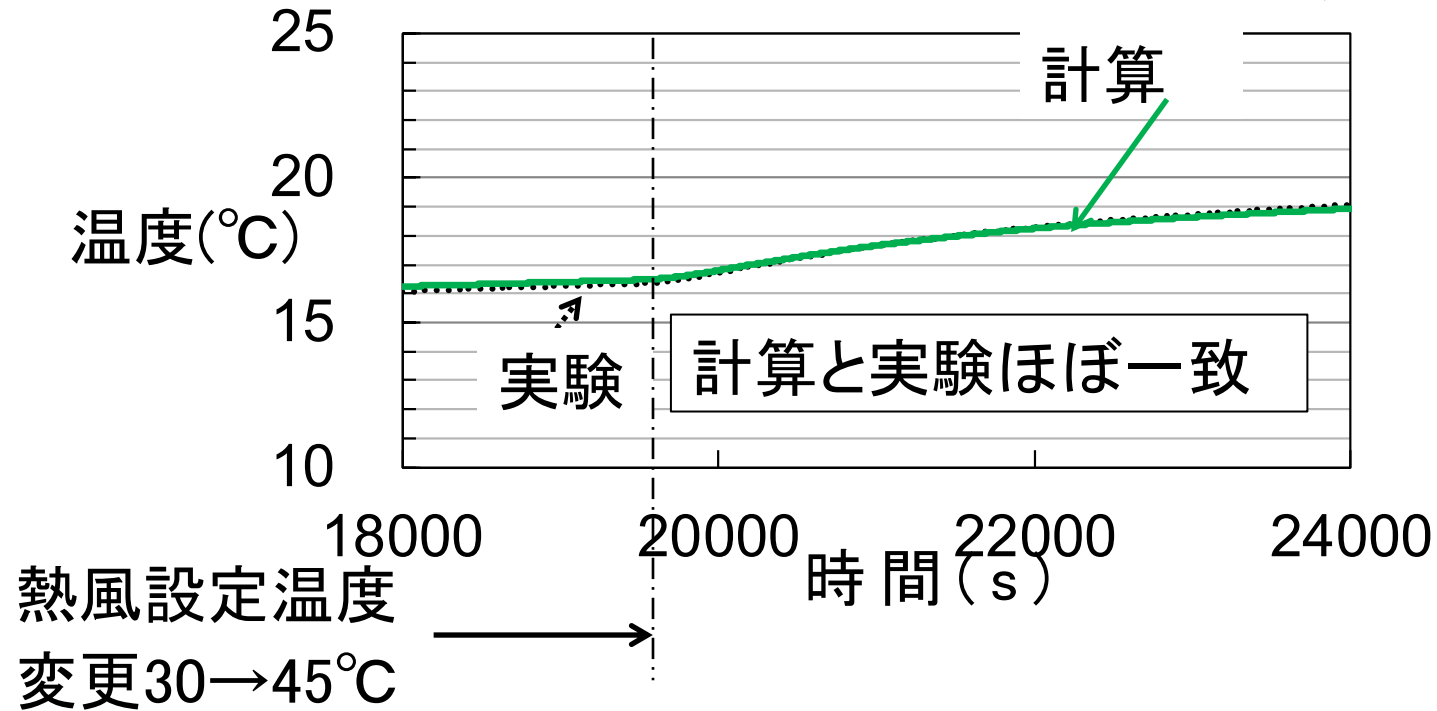
3次元超音波風速計

検証用模型実験：追加測定 (トンネル内風速・トンネル内空気温度)

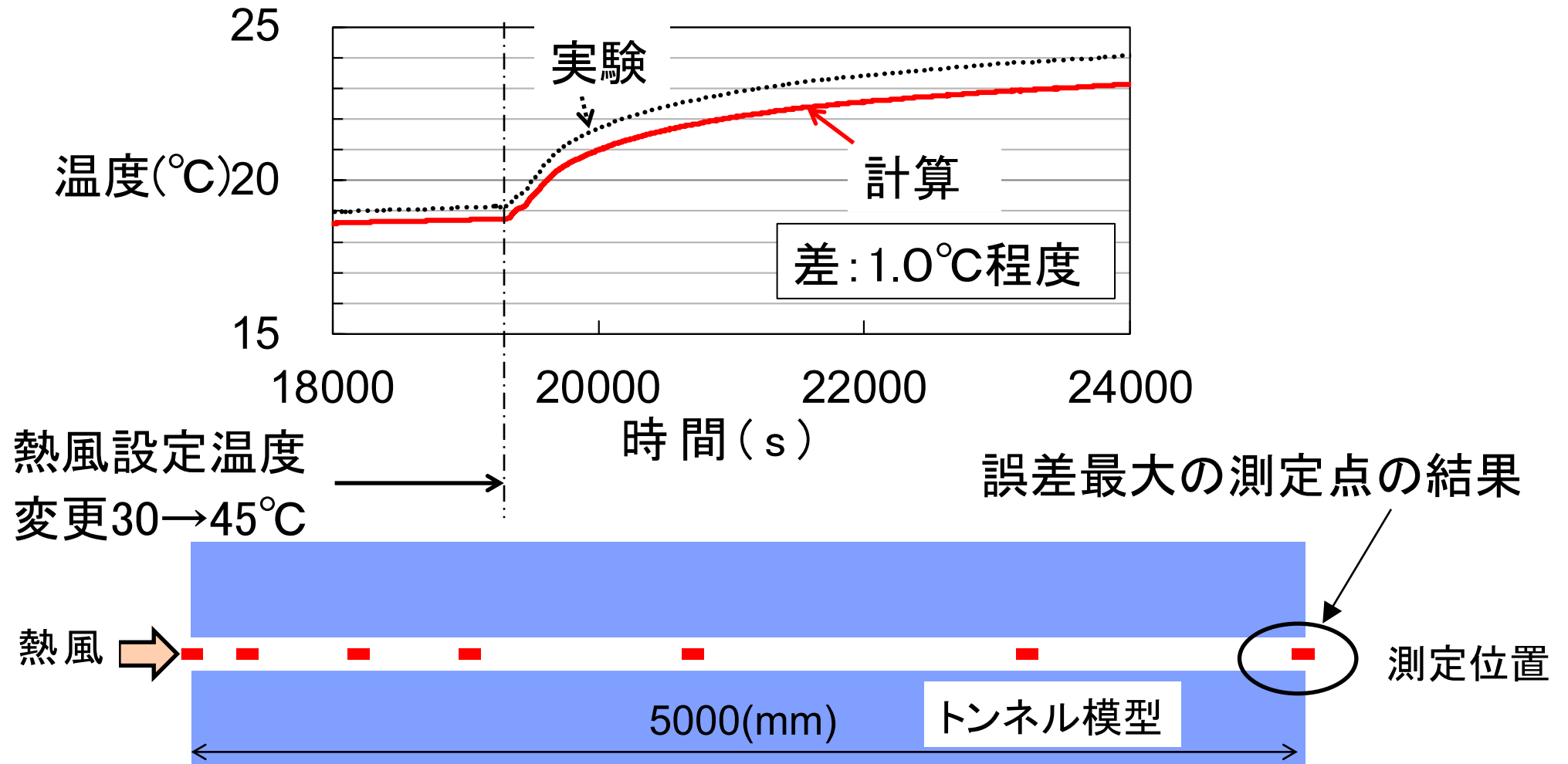
トンネル内風速測定	トンネル内空気温度
	
風速プローブ	熱線風速計のプローブ を抵抗温度計として使う
直径: $5\mu\text{m}$	電流: 0.5mA
長さ: 1.25mm	
タングステン線	金属抵抗線温度計

空間分解能を高めた測定方法により追加測定を行った。

検証用模型実験 実験とシミュレーションの比較(地盤温度)



検証用模型実験 実験とシミュレーションの比較(空気温度)



まとめ

【まとめ】

- トンネル内温熱環境シミュレーションの基本部分について、理論解析とシミュレーション結果が概ね一致した。
- 検証実験と境界条件を合わせたシミュレーションの結果を比較したところ、気流温度の差が最大約 1°C であった。

成果の活用

【成果の活用】

- 本研究の成果から、温熱環境評価にシミュレーションを実際に使用する際に、数値計算による誤差、それ以外の誤差の程度をふまえた評価を行うことができる。

参考文献

齋藤寛之, 梶山博司, 斉藤実俊: 理論解析と模型実験によるトンネル内温熱環境予測手法の検証, 鉄道総研報告, Vol.34, No.3, pp.17-22, 2020.3.

齋藤寛之, 梶山博司, 斉藤実俊: 模型実験によるトンネル内温熱環境予測手法の検証, 鉄道総研報告, Vol.30, No.7, pp.23-28, 2016.7.

梶山博司: 地下鉄道の温熱環境シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol. 11, No. 10, pp. 41-46, 1997.11

Peavy, B. A. "Heating and Cooling of Air Flowing Through an Underground Tunnel", Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol.65C, No.1, pp.157-162,1961.