

氏名	齋藤 寛之
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博第1334号
学位授与の日付	2024年6月19日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	鉄道トンネルおよび地下駅空間内の温度予測精度向上に関する研究 (Foundation study on the improvement of prediction accuracy in the numerical simulation of temperature fields of underground railway station and tunnels)
論文審査委員	主査 教授 長谷川 豊 教授 石野 洋二郎 教授 古谷 正広 教授 鈴木 昌弘 (名城大学)

論文内容の要旨

本研究は、鉄道トンネルおよび地下駅空間内の温度予測精度の向上を目的として、数値流体力学手法を適用することにより、接続されるトンネルの機械換気装置の動作に起因する地下駅ホーム階の空気流動と熱伝達を定量的に調べたものである。単線トンネルが接続する地下駅内の空気流動現象の根幹を解明するために、空気が2か所から流入し、2か所から流出する「壁に囲まれた空間」を代表させた平面形状H型流路を解析対象として、気流速度と空間形状がH型流路内の空気流動および気流による熱伝達に及ぼす影響を明らかにした。また、同種の問題に Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation (RANS) を適用する際に、複数の乱流モデルによる計算結果を比較・評価して乱流モデル選択の指針を示した。

はじめに、数値流体力学の手法を適用して、H型流路内の対向流の乱流計算により速度場を解析した。その結果、H型流路内対向流の空気流動については、レイノルズ数5650の条件（実物換算で0.17 m/s）では、予測精度の比較検討に使用した3種類の低レイノルズ数型 $k-\varepsilon$ モデルのなかで、Abe-Kondoh-Nagano モデル（AKN モデル）が Large Eddy Simulation (LES) に最も近い予測結果を示した。また、実際のトンネル換気風速に相当する条件で計算を実行したところ、対向流が全長100 m～400 mの地下駅ホーム階に流入する場合には、流入空気流が半円に近い軌跡を描いて180°転向し、隣接トンネルへと流出する興味深い現

象を示す結果を得た。また、H型流路内対向流は、一般にレイノルズ数が高いと直進し、低い場合には180°転向する傾向を示す。また、H型流路における混合領域の長さが短い場合には直進し、長くなると180°転向する傾向を示す。さらに、地下駅の温熱環境を解析する従来の手法に見られる解析パラメータ設定の不明確な部分については、H型流路の損失係数を地下駅ホーム階の長さが10~400mの条件で求めることにより問題を解消した。

次に、H型流路内対向流の温度場の乱流計算を実行し、一般的な温度場0方程式モデル（乱流プラントル数が一定の仮定）とやや複雑ではあるが信頼性の高い温度場2方程式モデルの予測結果を比較・検討した。その結果、新幹線の地下駅に相当する長い流路形状の場合には互いの差異が大きくなり、剥離領域内で最大で10%程度になることが明らかになった。また、トンネルから流入する空気流の温度の影響が強く現れる領域は、トンネルとの接続部から7.5m下流までに限定されることが分かった。ついで、地下駅部の熱伝達率を地下駅への流入部における壁面と換気流の温度差で定義すれば、地下駅の熱伝達率は、上流側に接続するトンネル部の熱伝達率（管内発達乱流の強制対流熱伝達の実験式による推定値）に対して、線路方向に平行な壁面では約0.1倍、垂直な壁面については約1.3倍になることを明らかにした。さらに、従来の手法では不明確であった地下駅ホーム階における熱伝達率を地下駅ホーム階の長さが10m~400mの場合について明確にした。

最後に、実務的な乱流数値計算にRANSを適用する際の計算手法選択の資料と指針を得るために、二方程式乱流モデル($k-\epsilon$ モデル)の種別と基礎方程式群の対流項離散化手法が予測結果に及ぼす影響を調べた。その結果、単純な平行平板間乱流に近いと見なせる領域ではそれらの差異は小さいが、H型流路内で対向流が直進する場合と180°転向する場合の2つの状態が同時に現れる特別な流路形状条件では、通常の高レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデルによる速度場および温度場の計算結果は、代表的な低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデル(AKNモデル)による結果と大きく異なることが分かった。このような流路条件では壁近傍に対数速度分布が成立しない領域が発生すると考えられるため、低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデルを選択することが望ましいと考えられる。また、流路形状条件によっては、基礎方程式群における対流項の離散化手法は計算結果に大きな影響を及ぼす場合があることを明確にした。

以上により、従来使用されてきた鉄道トンネルおよび地下空間の温熱環境を解析するための専用解析手法では十分に検討されていなかった(1)地下駅ホーム階の対向流の抵抗係数(損失係数)、および(2)地下駅ホーム階の対向流と壁面との熱伝達率に関して、信頼性の高い数値流体力学手法を適用することにより、それらの特性を定量的に明らかにした。さらに、鉄道トンネルおよび地下空間の温熱環境解析のような実務に近い分野・領域においても予測精度の向上を図ることが喫緊の課題であることから、(3)地下駅ホーム階の対向流への高レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデルの適用可能条件を明らかにするとともに、鉄道トンネルおよび地下駅空間内の乱流温度場の予測精度を高める解析方法の基礎と指針を示した。

論文審査結果の要旨

本論文は、鉄道トンネルおよび地下駅空間内の温度予測精度の向上を目的として、数値流体力学手法を適用することにより、接続されるトンネルの機械換気装置の動作に起因する地下駅ホーム階の空気流動と熱伝達を定量的に調べたものである。単線トンネルが接続する地下駅内の空気流動現象の根幹を解明するために、空気が2か所から流入し、2か所から流出する「壁に囲まれた空間」を代表させた平面形状H型流路を解析対象として、気流速度と空間形状がH型流路内の空気流動および気流による熱伝達に及ぼす影響を調べた。また、Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation (RANS) を適用時に、複数の乱流モデルによる計算結果を比較・評価してモデル選択の指針を示した。以下に、本研究で得られた主な成果・知見を示す。

数値流体力学の手法を適用して、H型流路内の対向流の乱流速度場を解析した結果、レイノルズ数 5650 の条件（実物換算で 0.17 m/s）では、予測精度の比較検討に使用した3種類の低レイノルズ数型 $k-\varepsilon$ モデルのなかで、Abe-Kondoh-Nagano モデル（AKN モデル）が Large Eddy Simulation (LES) に最も近い予測結果を示した。また、実際のトンネル換気風速に相当する条件で計算を実行したところ、対向流が全長 100 m～400 m の地下駅ホーム階に流入する場合には、流入空気流が半円に近い軌跡を描いて 180°転向し、隣接トンネルへと流出する興味深い現象を示す結果を得た。

H型流路内対向流の温度場の乱流計算を実行し、温度場 0 方程式モデルと温度場 2 方程式モデルの予測結果を比較・検討した結果、新幹線の地下駅に相当する長い流路形状の場合には互いの差異が大きくなり、剥離領域内で最大で 10% 程度になることが明らかになった。また、トンネルから流入する空気流の温度の影響が強く現れる領域は、トンネルとの接続部から 7.5 m 下流までに限定されることが分かった。ついで、地下駅の熱伝達率は、上流側に接続するトンネル部の熱伝達率に対して、線路方向に平行な壁面では約 0.1 倍、垂直な壁面については約 1.3 倍になることを明らかにした。

実務的な乱流数値計算に RANS を適用する際の計算手法選択の資料と指針を得るために、二方程式乱流モデル ($k-\varepsilon$ モデル) の種別と基礎方程式群の対流項離散化手法が予測結果に及ぼす影響を調べた結果、単純な平行平板間乱流に近いと見なせる領域ではそれらの差異は小さいが、H型流路内で対向流が直進する場合と 180°転向する場合の2つの状態が同時に現れる特別な流路形状条件では、高レイノルズ数型 $k-\varepsilon$ モデルによる速度場および温度場の計算結果は、低レイノルズ数型 $k-\varepsilon$ モデル (AKN モデル) による結果と大きく異なることが分かった。このような流路条件では壁近傍に対数速度分布が成立しない領域が発生すると考えられ、低レイノルズ数型 $k-\varepsilon$ モデルを選択することが望ましい。

以上により、鉄道トンネルおよび地下空間の温熱環境の解析に従来使用されてきた専用解析手法では十分に検討されていなかった (1) 地下駅ホーム階の対向流の抵抗係数 (損失係数)、および (2) 地下駅ホーム階の対向流と壁面との熱伝達率に関して、信頼性の高い数値流体力学手法を適用することにより、それらの特性を定量的に解明できた。さらに、(3) 地下駅ホーム階の対向流への高レイノルズ数型 $k-\varepsilon$ モデルの適用可能条件を明らかにするとともに、鉄道トンネルおよび地下駅空間内の乱流温度場の予測精度を高める解析方法の基礎と指針が示せた。

これらの成果・知見は、鉄道トンネルおよび地下駅空間内の温度予測精度向上に多大な寄与を齎すものであり、論文審査の結果を「合」と判定した。

また、博士論文公聴会における質疑・応答から齋藤寛之氏は、本研究が対象とした鉄道トンネルおよび地下空間の温熱環境を検討する上で重要となる熱力学、流体力学、伝熱工学等につき十分な知識・学力を有すると共に、研究手法として用いた数値流体力学にも精通し高度なスキルを有していることから、最終審査 (学力の確認) に関しても、「合」と判定した。