都市内長大トンネルの温度低減に資する効率的な換気運転方法

西浦　武[1]・長江　将宏[2]・金　惠英[3]

[1]非会員　首都高速道路株式会社　技術部　施設技術課（〒100-8930 東京都千代田区霞が関 1-4-1）
E-mail: t.nishiura810@shutoko.jp

[2]非会員　首都高速道路株式会社　神奈川建設局　施設工事事務所（〒224-0041 神奈川県横浜市都筑区仲町台 5-2-20）
E-mail: m.nagae1310@shutoko.jp

[3]正会員　横浜国立大学助教　先端科学高等研究院（〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5）
E-mail: kimhy @ynu.ac.jp

首都高速道路山手トンネルは延長 18.2km の都市内長大トンネルであり，延長が約 10km になった 2010 年夏季以降トンネル内の高温化が課題となっている．高温化の主たる要因はトンネル延長と重交通であるが，これらの課題に対応するためトンネル換気設備によりトンネル内の空気を入れ替えるとともに，2013 年からは渋滞発生箇所へのミスト噴霧設備を設置し，換気運転とミスト噴霧の併用による温度低減対策を実施し一定の効果を得た．その一方で，換気運転による年間数億円のコストが大きな課題となっていた．本論文では同トンネルの温度低減対策の効率化を目的に，現場計測，熱収支解析及び 3 次元熱流体解析を実施し，換気運転による温度低減効果の確保と換気運転コスト低減を両立した検討結果について報告する．

Key Words: *Road Tunnel,　Tunnel Ventilation System,　Temperature Rise Controlling Effect*

1.　はじめに

山手トンネルは，延長 9.8km の新宿線と延長 8.4km の品川線を接続した全延長 18.2km の都市内長大トンネルである．各区間はそれぞれ 2010 年 3 月と 2015 年 3 月に供用開始し，現在世界で 2 番目に長い道路トンネルである．このトンネルは，それぞれが 2 車線を有する一方通行の 2 本のチューブからなり，設計速度 60km/h，平均交通量 4.5 万台/日の重交通のトンネルである（**図-1**）．

図-1　山手トンネル位置図

山手トンネルの換気方式は，**表-1** に示すように区間に応じて 2 種類の換気方式を組み合わせて採用している[1]．

一つは横流換気方式で，これは，送排気ダクトを道路下に設け，トンネル内を一様に換気する方式であり，分岐合流が多い新宿線区間で採用されている．もう一つは縦流換気方式で，これは，車道空間を利用して特定の換気所で排出する方式で，品川線区間に採用されている．

表-1　山手トンネルの換気方式

	新宿線区間	品川線区間
延長	約9.8km	約8.4km
分岐合流数	15 (内外接続5箇所)	4 (内外接続なし)
断面図		
換気方式	横流換気方式	縦流換気方式 （ＪＦ付）
換気所数	9	4

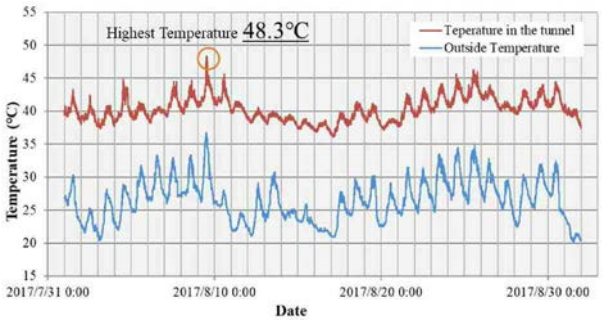


図-2　トンネル内温度の推移（2017年 最高温度観測地点）

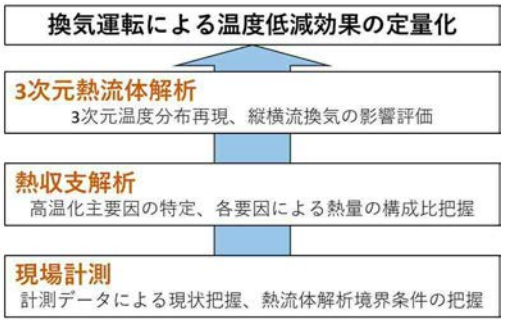


図-3　検討フロー

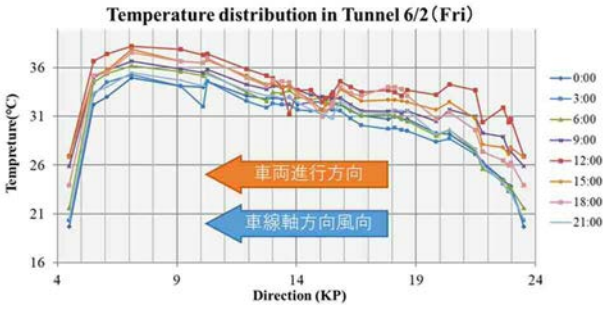
都市部におけるこの長い地下トンネルは，延長が約10km となった 2010 年夏季以降トンネル内の高温化が課題となっており，高温化が顕著となる 8 月は昼夜問わず月平均温度が 40℃以上となり，2017 年夏季の最高温度は 48.3 度に達している（図-2）．

山手トンネルの換気設備規模は，通常時の煤煙・CO 発生量及び火災時の排煙量を考慮して決定されているが，トンネル内の高温化は，特に二輪車運転手や点検作業員に対して安全性・快適性を損なう重要な課題であることから， 2013 年から換気ファンの増風運転及びミスト噴霧を順次実施してきた．しかしながら，未だ高温状態である上，換気増風運転に年間数億円の高いコストがかかっていることから，改善が必要とされている．

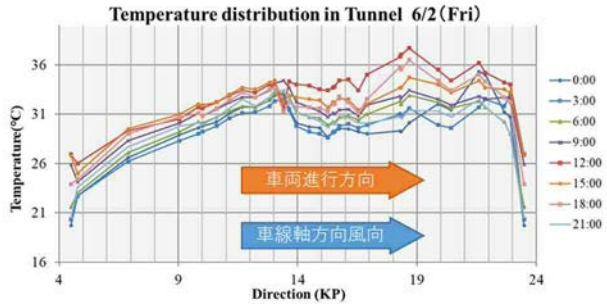
本稿では，温度低減対策の効率化及びコスト削減を目的として，現場計測・熱収支解析・3 次元熱流体解析を実施し，換気運転による温度低減効果の定量化及び評価を行った．図-3 に検討フローを示す．

2.　現場計測

まず始めに，トンネル内高温化の現状把握及び熱流体解析の境界条件設定のために，トンネル内温度・送気，排気ダクト内温度・交通量・風速・熱流束の各種計測データを整理，分析した．加えて，サーマルカメラを用いて，二度の現場観測を行った．

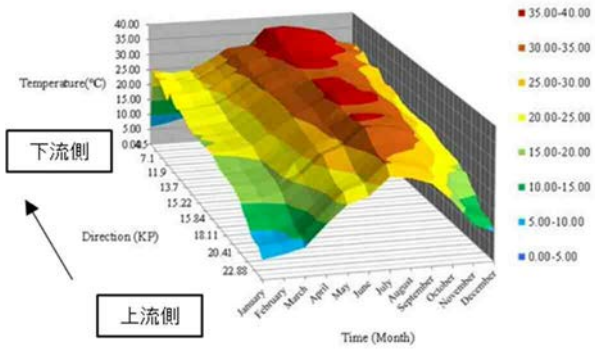


(a) 内回り

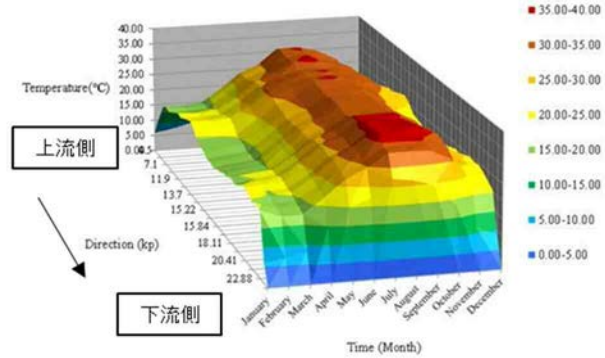


(b) 外回り

図-4　トンネル内温度（夏季　平日）



(a) 内回り



(b) 外回り

図-5　トンネル内温度の年間分布

トンネル内温度の計測データを分析した結果，　図-4に示すとおり全ての時間帯において，トンネル下流側ほど温度が上昇する傾向であることが確認された．また図-5に示すとおり年間分布で整理すると，内回り，外回りともに年間を通してトンネル下流側での温度上昇が顕著であることが確認された．

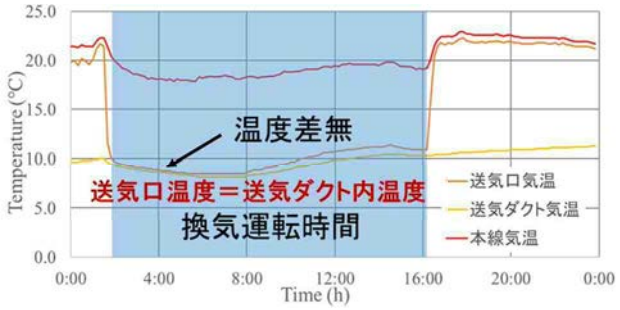


図-6　送気口と送気ダクト内の温度変化（新宿線区間の例）

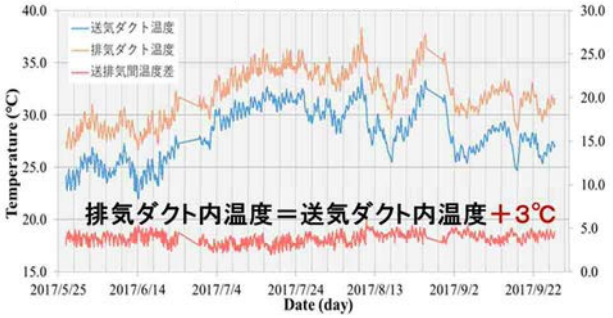


図-7　送気・排気ダクト内の温度変化

表-2　躯体-空気間平均熱流束（内回り　6月）

内回り	9.15 KP	15.22 KP	18.79 KP	19.84 KP	22.64 KP
0～12時 平均熱流束(W/m²)	-18.1012	-9.4313	-6.9633	-2.3835	-0.9834

表-3　躯体-空気間平均熱流束（外回り　6月）

外回り	13.09 KP	19.88 KP	21.6 KP
0～12時 平均熱流束(W/m²)	-9.2229	-2.6312	-1.7099

(a)通常カメラ　　(b)サーマルカメラ

写真-1　トンネル躯体温度分布

これらの結果は，走行車両により誘発された風（交通換気力）及び縦流換気の運転により車線軸方向へ風が流れ，温度の高い空気塊がトンネル下流側へ移動した影響と考えられる．

図-6に送気ダクト内の計測結果，図-7に送気ダクト内と排気ダクト内の計測結果を示す．図-6に示すとおり換気運転時間においては，送気口と送気ダクト内の温度差はなくなり，送気口温度と送気ダクト内温度は等しくなることが確認された．また，図-7に示すとおり排気ダクト内の温度は，送気ダクト内の温度よりも 3℃程度高いことが確認された．

この結果から，トンネル内の熱量が換気により完全に外気と交換されていない状態であることが考えられる．

次に，躯体-空気間の熱移動量を計測するために，トンネル躯体壁面に設置した熱流束計データを解析した結果を表-2，表-3 及び図-8 に示す．トンネルの深さが深くなる大井 JCT 側（KP の若番側）に向かって熱流束が徐々に吸熱方向に向かう傾向を確認した．なお，熱流束が負の場合は，トンネル坑内からトンネル躯体への熱移動を表し，つまりトンネル躯体が吸熱していることを示す．

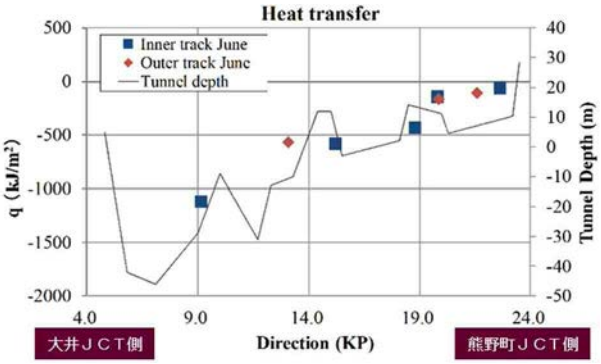


図-8　躯体吸熱量とトンネル深さの関係

また，写真-1に示すとおり，サーマルカメラによるトンネル躯体温度分布の観測から，車両走行部分の舗装面の温度が面状に上昇していることを確認した．

送気，排気ダクトの温度キャリブレーション及び車両走行部分の面上熱源については，後述の熱流体解析モデルに適用することとした．

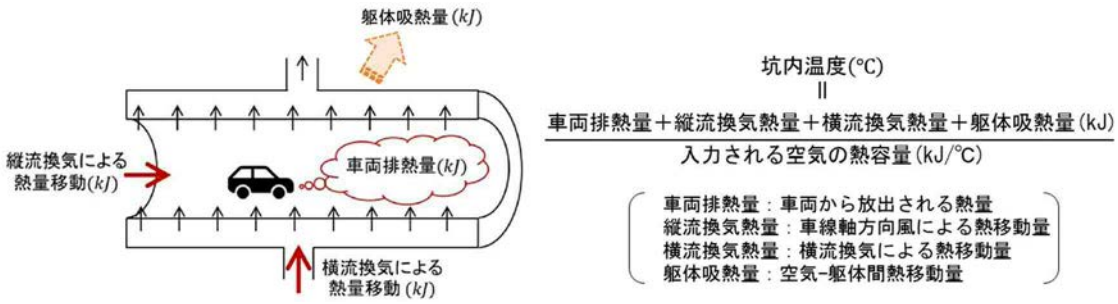
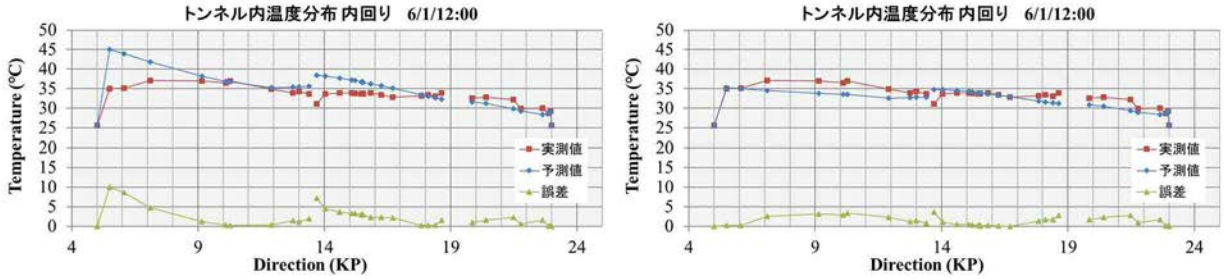


図-9　熱収支1次元解析の算定概念



(a) 躯体吸熱量−無しの場合　　(b) 躯体吸熱量−有りの場合

図-10　1 次元解析モデル坑内温度分布の推定結果

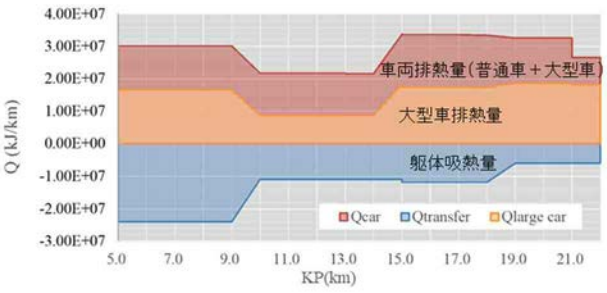


図-11　単位長さ当たりの車両排熱量と躯体吸熱量

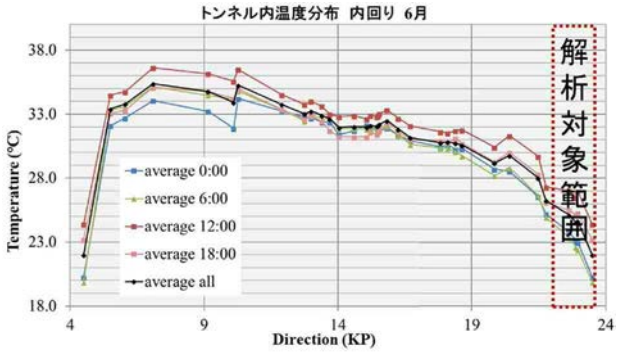


図-12　熱流体解析の対象範囲（内回り）

3.　熱収支解析

熱収支解析では坑内温度に支配的に作用する要因を特定するために，熱力学第一法則に基づき，坑内温度を順次算定する 1 次元解析を行った．**図-9** に熱収支 1 次元解析の算定概念を示す．

1 次元解析結果と実測値とを躯体吸熱量の有無で比較した結果，**図-10** に示すとおり躯体吸熱量を加味した方が誤差は小さくなり，躯体吸熱量が坑内温度に影響があることを確認した．これにより，坑内温度に対して支配的な要因として『車両排熱量』，『縦流換気熱量』，『横流換気熱量』，『躯体吸熱量』の 4 つを特定した．

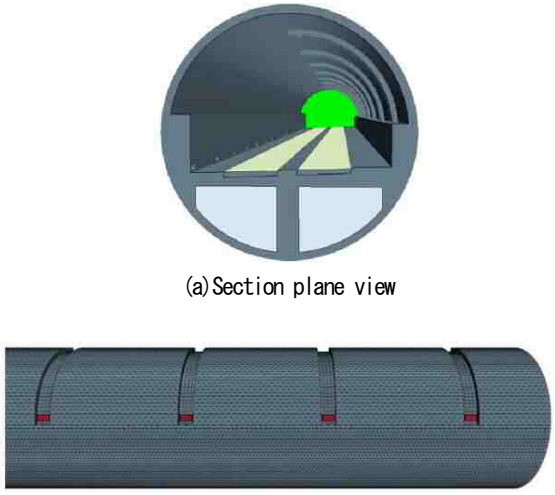
また，車両排熱量と躯体吸熱量を各区間でまとめ，熱量構成比について分析した結果，**図-11** に示すとおり普通車排熱量：大型車排熱量＝1:1.7 となり，躯体吸熱量は区間で変動し，車両排熱量の 10～80%に相当することが明らかとなった．

なお，解析に当たり，車両排熱量は実測交通量と既往の報告[2]から求めた 1 台当たりの排気エネルギー量との積をとって算出した．また，縦横流換気熱量は実測値の各換気質量風量と各気温から換気による熱移動量を算出し，躯体吸熱量は熱流束計の実測データから空気−躯体間の熱移動量を算出した．

4.　熱流体解析

(1)　解析条件

熱流体解析ソフトは非圧縮流体を対象とした 3 次元定常解析の Star CCM+，乱流モデルは RANS の二方程式モデルの「修正 k-ε モデル」を使用した．また，前述の 4 つの要因に着目するとともに，現場観測から得られた知見（舗装部分の面上熱源，送気，排気ダクト内の温度キャリブレーション）を境界条件に適用した．各風速と風量は実測値を境界条件として設定し，解析領域は温度上昇が顕著なトンネル入口坑口付近の 1,000m（新宿線区間）を対象範囲とした(**図-12**)．



(a) Section plane view

(b) Span-wise direction view

図-13　3 次元解析モデル

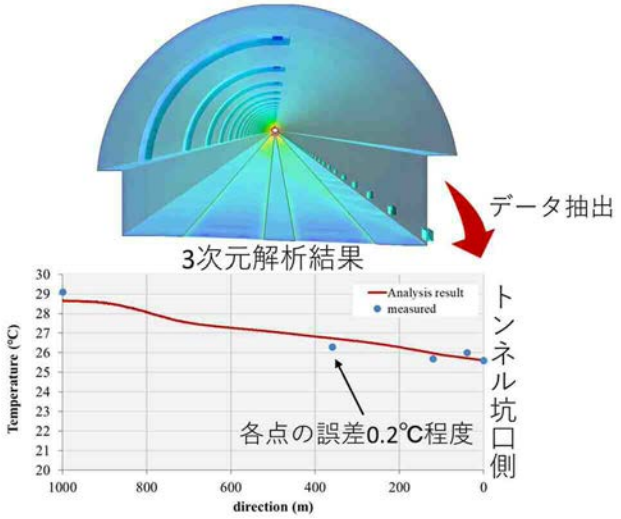


図-14　3 次元解析結果と実測値との比較

図-13 に 3 次元解析モデルの正面図及び上面図を示す．なお，解析にあたり，3 次元解析結果と実測値との比較を行い，各点の誤差が 0.2℃程度と微少あることを確認し，予めモデルの妥当性を検証した（図-14）．

(2)　解析ケース

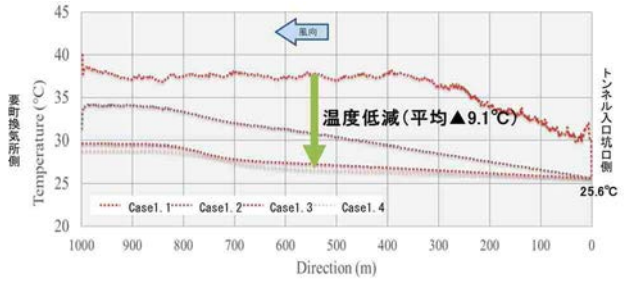
妥当性の検証されたモデルに対して，横流換気風量と縦流換気風量（軸方向風速）を変化させ，表-4に示すとおり，計12ケースのパラメトリックスタディを行った．

Case1　横流換気風量0㎥/s固定，軸方向風速を変化
Case2　横流換気風量120㎥/s固定，軸方向風速を変化
Case3　軸方向風速2.75m/s固定，横流換気風量を変化

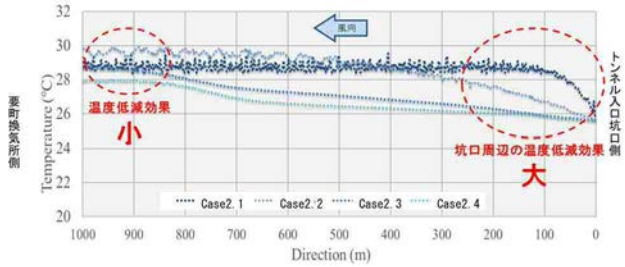
なお，横流換気風量120㎥/s及び軸方向風速2.75m/sが当該区間の現状である．

表-4　解析ケース

No.	軸方向風速	横流換気風量
Case1.1	0(m/s)	0(m³/s)
Case1.2	0.75(m/s)	
Case1.3	2.75(m/s)	
Case1.4	4.75(m/s)	
Case2.1	0(m/s)	120 (m³/s)
Case2.2	0.75(m/s)	
Case2.3	2.75(m/s)	
Case2.4	4.75(m/s)	
Case3.1	2.75(m/s)	0 (m³/s)
Case3.2		30 (m³/s)
Case3.3		60 (m³/s)
Case3.4		120(m³/s)



(a) 横流換気-無しの場合



(b) 横流換気-有の場合

図-15　軸方向風による温度低減効果

(3)　解析結果

a)　横流換気無，軸方向風速を変化させた場合

完全無風状態から軸方向風を増風させた場合では，坑内温度が平均9.1℃低減する結果から軸方向風は温度低減に有効であることを確認した(図-15(a))．

b)　横流換気有，軸方向風速を変化させた場合

現状の横流換気風量120㎥/sで軸方向風を増風させた解析結果(図-15(b))から，現状の軸方向風で温度低減効果は大きく，さらなる増風対策は効果が小さいことを確認した．

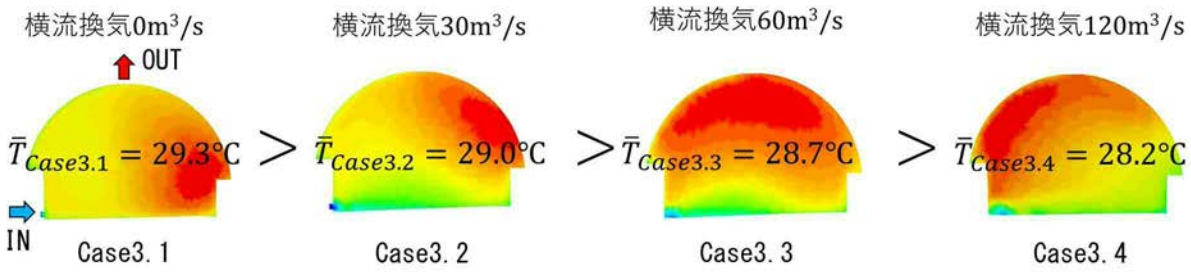


図-16　断面平均温度の比較

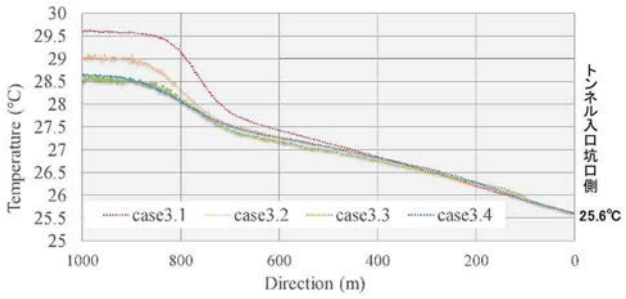


図-17　感知位置（高さ 1.2m）における温度比較

c)　軸方向風速 2.75（m/s）固定，横流換気風量を変化させた場合

現状の軸方向風速で横流換気風量を変化させた場合，**図-16**のように横流換気風量が大きいほど断面平均温度は低下する．

一方で，人が感知する高さ（1.2mに設定）における坑内温度は**図-17**のように横流換気風量60m³/sと120m³/sではほぼ変化がないことが明らかとなった．

5.　まとめ

熱収支解析より，トンネル坑内温度を決定する主要因4つを特定し，普通車排熱量と大型車排熱量の比1:1.7，躯体吸熱量が車両排熱量の約10～80%であることを明らかにした．

熱流体解析から，換気の有効性及び縦流換気の増風効果が薄いことを確認し，トンネル利用者への負担及びコストを考慮すると横流換気風量は60m³/sが推奨されることを明らかにした．換気ファン増風運転による温度低減効果の定量化とコスト削減の一助となる材料を示すことができた．

なお，2018年夏季は換気増風運転を一部見直し，電気代を年間約1.5億円削減した．

道路管理者として，コストを意識しつつ現状の高温化改善を進めることが責務であり，今後も温度低減の効率化及び新たな温度低減策の提案等，引き続き検討を行う．

謝辞：本研究 [3]にあたり，現場計測及び各種データ分析において多くの協力及びアドバイスをいただいた横浜国立大学の山田教授，勝地教授及び研究室の学生の皆様方に厚く御礼を申し上げます．

参考文献

1)　新居崇，水野明哲，柳寛孝，久保田繁樹：縦流と横流の換気システムを組み合わせた都市内長大トンネル，日本機械学会 2016 年次大会，S0540103，2016.9
2)　環境省：都市における人口排熱抑制によるヒートアイランド対策調査報告書，環境省報告書，p74，2004
3)　山手トンネル内温度上昇メカニズムの分析及びモデル検討に関する研究，首都高-横国大共同研究，2018.4

EFFICIENT VENTILATION OPERATION TO SUPPRESS THE TEMPERATURE RISE IN LONG ROAD TUNNELS

Takeshi NISHIURA, Masahiro NAGAE and Haeyoung KIM

The Yamate Tunnel operated by Metropolitan Expressway Company Limited, Japan, is a long tunnel in the city around 18.2km long. The air temperature in the tunnel tends to get high and this leads to a serious problem since the summer of 2010 when the extension was about 10 km, and the cost of several hundred million yen per year due to ventilation operation has become a major problem. This paper introduced on-site measurement, heat balance analysis, and three-dimensional thermal fluid analysis to improve the efficiency of temperature reduction measures in the Yamate Tunnel, and introduced the results of studies to ensure the temperature reduction effect by ventilation operation and reduce the ventilation operation cost.