トンネル換気設備の排煙運用による火災時避難環境確保に関する検討

菅原　千尋[1]・中野　清人[2]・山﨑　哲也[3]

[1]正会員　株式会社高速道路総合技術研究所　道路研究部（〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1）
E-mail: c.sugawara.aa@ri-nexco.co.jp

[2]正会員　株式会社高速道路総合技術研究所　道路研究部（〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1）
E-mail: k.nakano.aa@ri-nexco.co.jp

[3]正会員　株式会社高速道路総合技術研究所　道路研究部（〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1）
E-mail: t.yamazaki.ac@ri-nexco.co.jp

道路トンネル非常用施設を取巻く国内外の動向を踏まえ，2019 年 3 月に国土交通省より「道路トンネル非常用施設設置基準」が改訂され，1979 年の基準通達から約 40 年ぶり，2001 年の解説発刊から約 20 年ぶりに「道路トンネル非常用施設設置基準・同解説」についても 2019 年 9 月に改訂された．その中で排煙設備による，火災初期段階における避難環境の確保が有効となる旨が明記されたことから，本検討では，換気設備の排煙運用による具体的な効果を明らかにするため，高速道路トンネルを想定した煙拡散挙動シミュレーション解析を行った．

Key Words: *tunnel ventilation equipment, vehicle fire, smoke diffusion behavior simulation*

1. はじめに

道路トンネル非常用施設を取巻く国内外の動向を踏まえ，平成 31 年 3 月に国土交通省より「道路トンネル非常用施設設置基準」が改訂され，昭和 56 年の基準通達から約 40 年ぶり，平成 13 年の解説発刊から約 20 年ぶりに「道路トンネル非常用施設設置基準・同解説」（以下，「基準」という）についても令和元年 9 月に改訂され，その中で排煙設備については，火災初期段階における避難環境の確保に有効となる旨が明記されている [1]．特に高速道路トンネルにおいては換気設備が数多く設置されており，排煙運用として使うことが出来れば非常に合理的である．したがって，本検討は換気設備の排煙運用による具体的な効果を明らかにするため，高速道路の 2 車線一方通行トンネルを想定した煙拡散挙動シミュレーション解析を行った．

2. 煙拡散挙動および避難行動のシミュレーション解析

基準によると排煙設備は，「一方通行トンネルでは，適切な運用体制等を構築したうえで排煙設備を設置し，事故車両もしくは火災地点より進行方向前方（車両の停滞していない側）へ排煙することにより，火災初期段階における避難環境の確保に有効となる」と明記されており，下記条件により必要に応じて設置することとなった．

・トンネル延長 3,000m 以上
・高速道路や自動車専用道路にて，2.5%以上の下り勾配が 750m 以上続き，交通量 1 万台/日以上

そこで，解析条件を排煙設備が必要な供用中高速道路における最急下り縦断勾配 4.58%と設定した．さらに，将来的には交通量増に伴う防災等級の見直しにより，B 等級から A 等級への変更もありうることから，道路構造令で認められている速度 80km/h での最急勾配 7.0%でも検討することとした．通常の一方通行トンネルにおいては，車速風（順風）があるため，車両火災発生時において自然風（逆風）が発生する頻度は少ないと考えられるが，排煙設備の風力をより厳しい条件で確認するため，あえて一般的な換気設計に用いる自然風（逆風）を-2.5m/s に設定した.その他の煙拡散挙動・避難行動シミュレーション条件を**表-1** に示す．

トンネル断面は一般的な第 1 種 3 級 A 規格とし，その停車車両は、大型車と小型車の 2 種類に大別して配置し

表-1 煙拡散挙動・避難行動シミュレーション条件

項　目	条　件
トンネル延長	1,500m
トンネル断面	断面積 58m^2
縦断勾配	下り勾配（4.58%，7.0%）
交通条件	一方通行トンネル
交通状況	滞留車　大型車 42 台，普通車 127 台 （20,000 台/日，大型車混入率 25%想定）
火災規模	大型ﾊﾞｽ 30MW（t^{2}火災成長モデル）
火点位置	入口から 1,300m（出口から 200m）
自然風	-2.5m/s
排煙設備	火災発生 2 分後に運転開始 排煙風速 2m/s ｼﾞｪｯﾄﾌｧﾝ φ1250×2 台 稼働の有無を比較
避難評価手法	歩行速度は 1.0m/s 火災発生 2 分後に避難開始

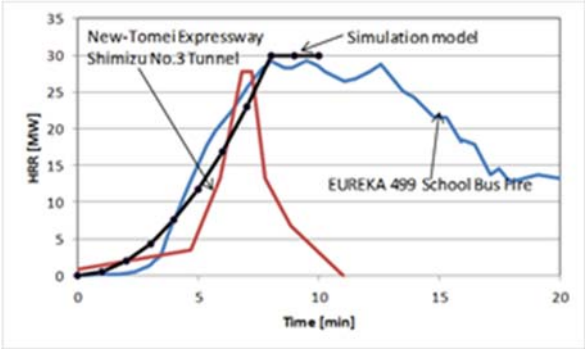

図-1 熱放出率(HRR)

た．また，火災時の熱放出率については大型バスの単独火災を想定した 30MW としており（図-1），第二東名高速道路（清水第三トンネル）やEURECA（スクールバス）での実験と比べても，概ね同規模である．火点については入口から 1,300m で出口からは 200m の位置とした．排煙設備については，運転しない場合と，ジェットファン 2 台を火災発生 2 分後に運転する場合で比較した．

なお，避難評価手法については，歩行速度は一般的な 1.0m/s とし，火災発生 2 分後に避難開始としており，避難者の目線高さ 1.5m に，避難限界とされている Cs 濃度 0.4m^{-1} の煙が到達しなければ，避難環境が確保されているものと考える．

3. 煙拡散挙動および避難行動のシミュレーションの結果

煙拡散挙動および避難行動のシミュレーションの結果を以下に示す．図-2 については，縦に高さ，横に距離として，60 秒毎に煙の拡がりを表したものである．縦断勾配-4.58%において，排煙運用無しでは，縦断勾配および自然風の影響が大きく広範囲に煙が拡がっており，10 分後には坑口まで煙が到達している結果が得られた．一方，排煙運用有りでは，運転開始からしばらくは避難方向に煙が遡上するが，2 分後に排煙設備が起動しており，概ね 6 分後には完全に煙を押し返している状況となっていることから，避難者への煙は最小限にとどめることが可能であることが導かれた（図-3）縦断勾配-7.0%において，排煙運用無しの場合，縦断勾配-4.58%と比べさほど差はなく，縦断勾配および自然風の影響が大きく広範囲に煙が拡がっており，10 分後には坑口まで煙が到達している結果が得られた（図-4）．一方，排煙運用有りの場合でも，縦断勾配-4.58%と大きな違いがない結果となった．運転開始からしばらくは避難方向に煙が遡上するが，2 分後に排煙設備が起動すれば，概ね 6～7 分後には完全に煙を押し返しており，避難環境を確保することが可能であるという結果が得られた（図-5）続いて，図-6 については，縦に時間，横に距離として，避難者の目線高さ 1.5m での煙の拡がりと避難者の移動軌跡について表したものである．縦断勾配-4.58%の排煙運用無しにおいて，火災発生から煙が時間とともに拡大する傾向が示されており，概ね 4 分後には避難者に Cs 濃度 0.4m^{-1} の煙が到達する．一方，排煙運用有りでは，一般的な目線高さの 1.5m 位置において，Cs 濃度 0.4m^{-1} 未満の煙がわずかに到達するものの，避難環境は確保されている（図-7）．縦断勾配-7.0%の排煙運用無しにおいて，避難者の行動軌跡を見ても，縦断勾配-4.58%と比べ，大きな違いはないと判断できる（図-8）．また，排煙運用有りについても，大きな違いはなく，一般的な目線高さの 1.5m 位置において，Cs 濃度 0.4m^{-1} 未満の煙がわずかに到達するものの，避難環境は確保されている（図-9）．

以上のように，排煙運用無しの場合では煙が避難者に到達し避難行動が困難となるが，排煙運用有りの場合では煙がわずかに到達するものの，避難環境が確保されている．そして，今回の解析条件下においては，縦断勾配-4.58%と-7.0%の違いによる煙拡散挙動については大きな差は無いことがシミュレーション結果より導かれた．

なお，今回のシミュレーションは，避難方向に煙が遡上したとしても，高さ 1.5m まで煙が降下しなければ避難環境が確保されるという観点であったが，PIARC の文献[2] において，避難方向に煙が遡上することがない臨界風速の例が示されている（図-10）．この図については，縦に臨界風速，横に熱放出率として，高さ 5m および 7m 位置を表しており，火災規模 30MW における排煙運用の臨界風速は概ね 2.2～2.3m/s 程度であるとされている．

そのため，排煙風速 2.0m/s であれば避難方向へ煙が遡上しても避難環境としては確保されているという，本検討で行ったシミュレーションの結果は，海外事例と比較してみても，概ね一致していると言える．

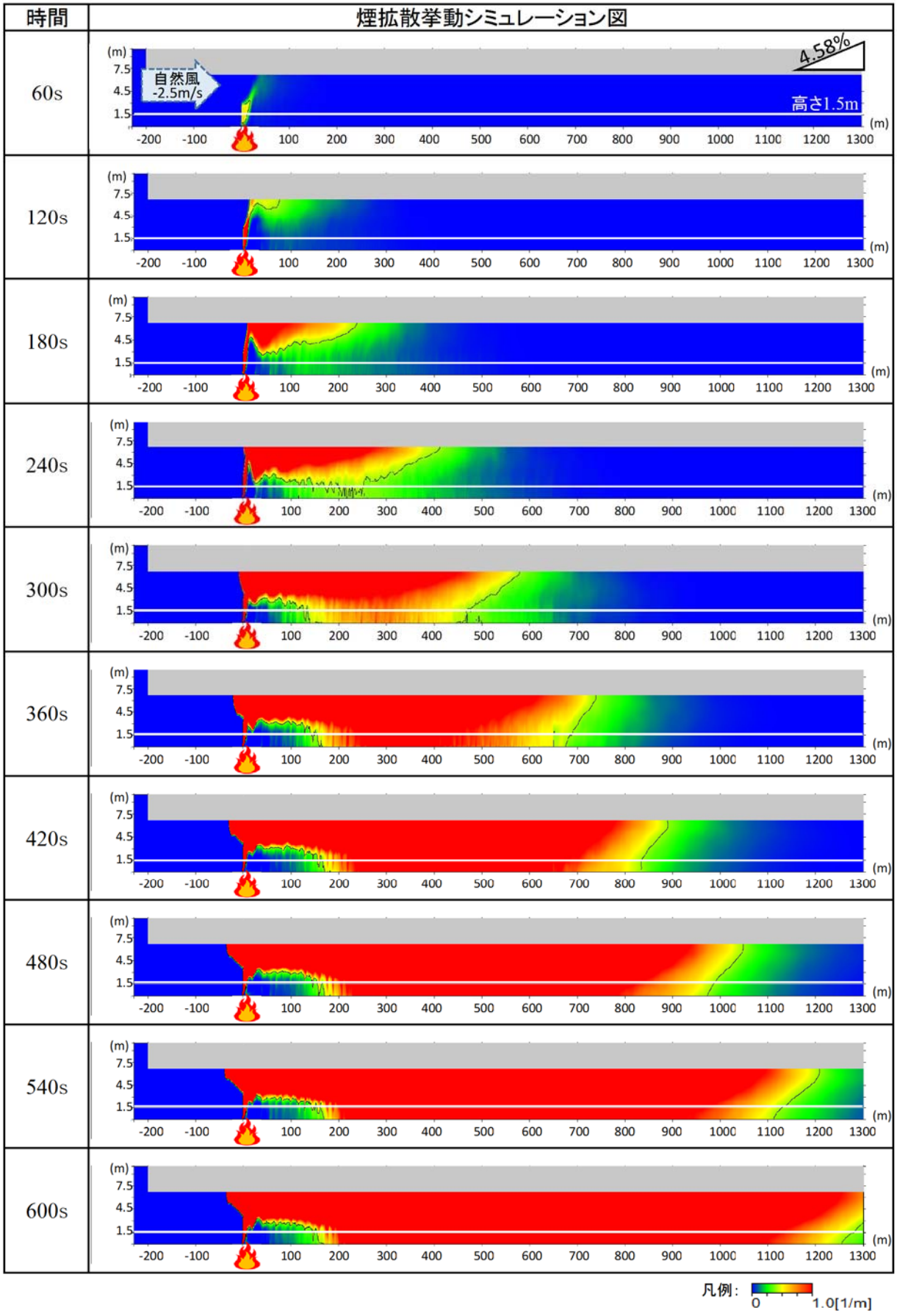

図-2　シミュレーション結果（縦断勾配-4.58%　排煙運用無し）

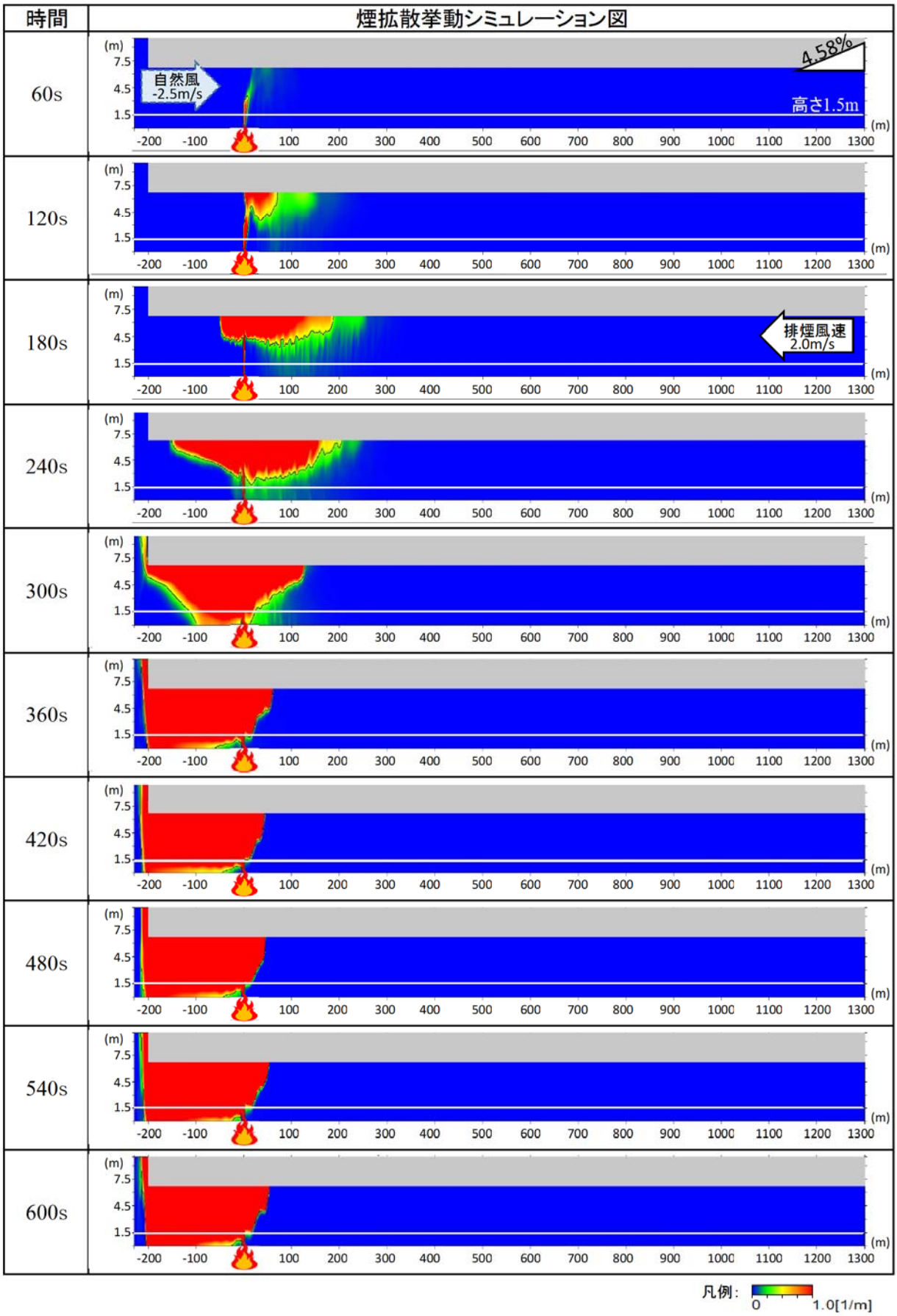

図-3　シミュレーション結果（縦断勾配-4.58%　排煙運用有り）

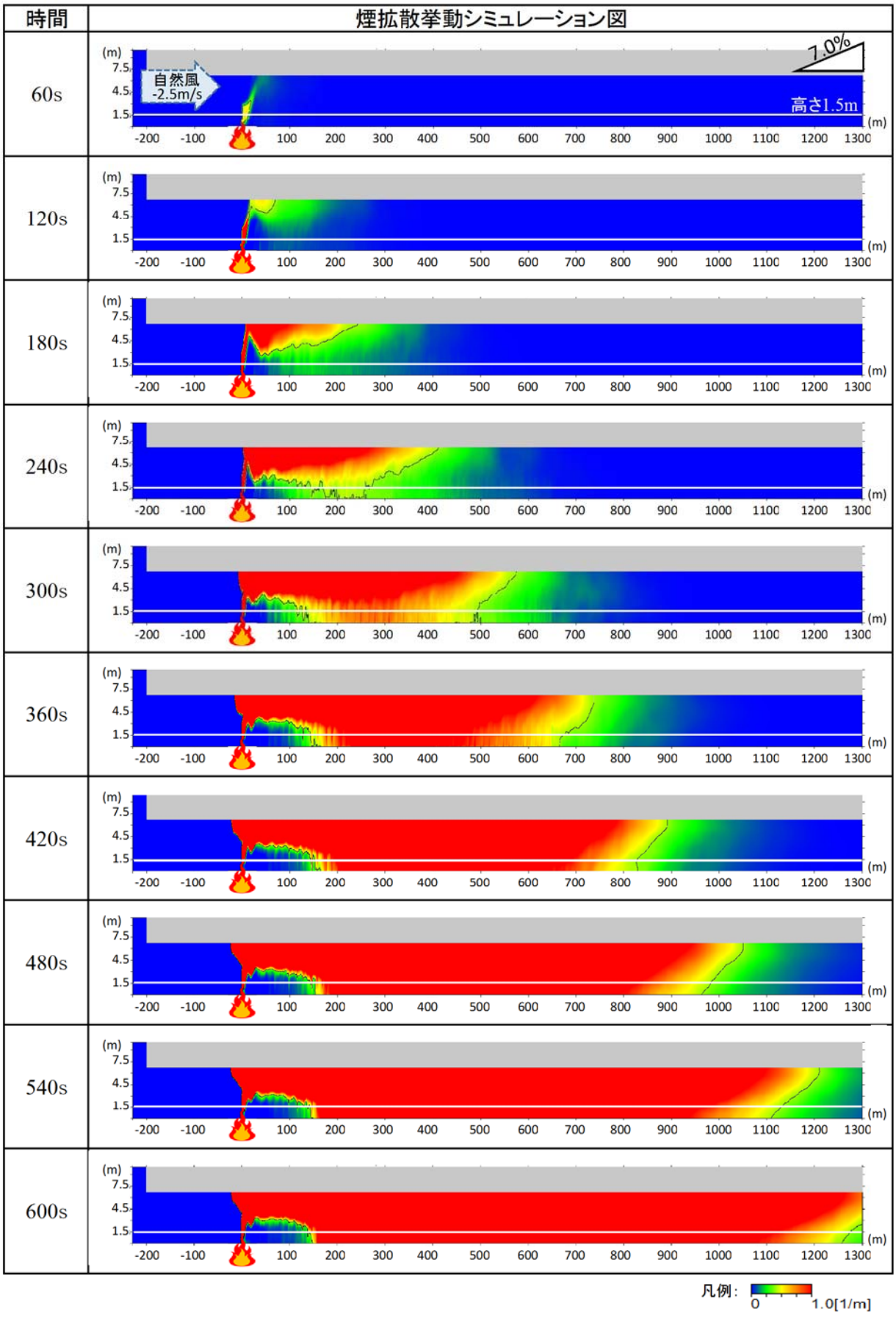

図-4　シミュレーション結果（縦断勾配-7.0%　排煙運用無し）

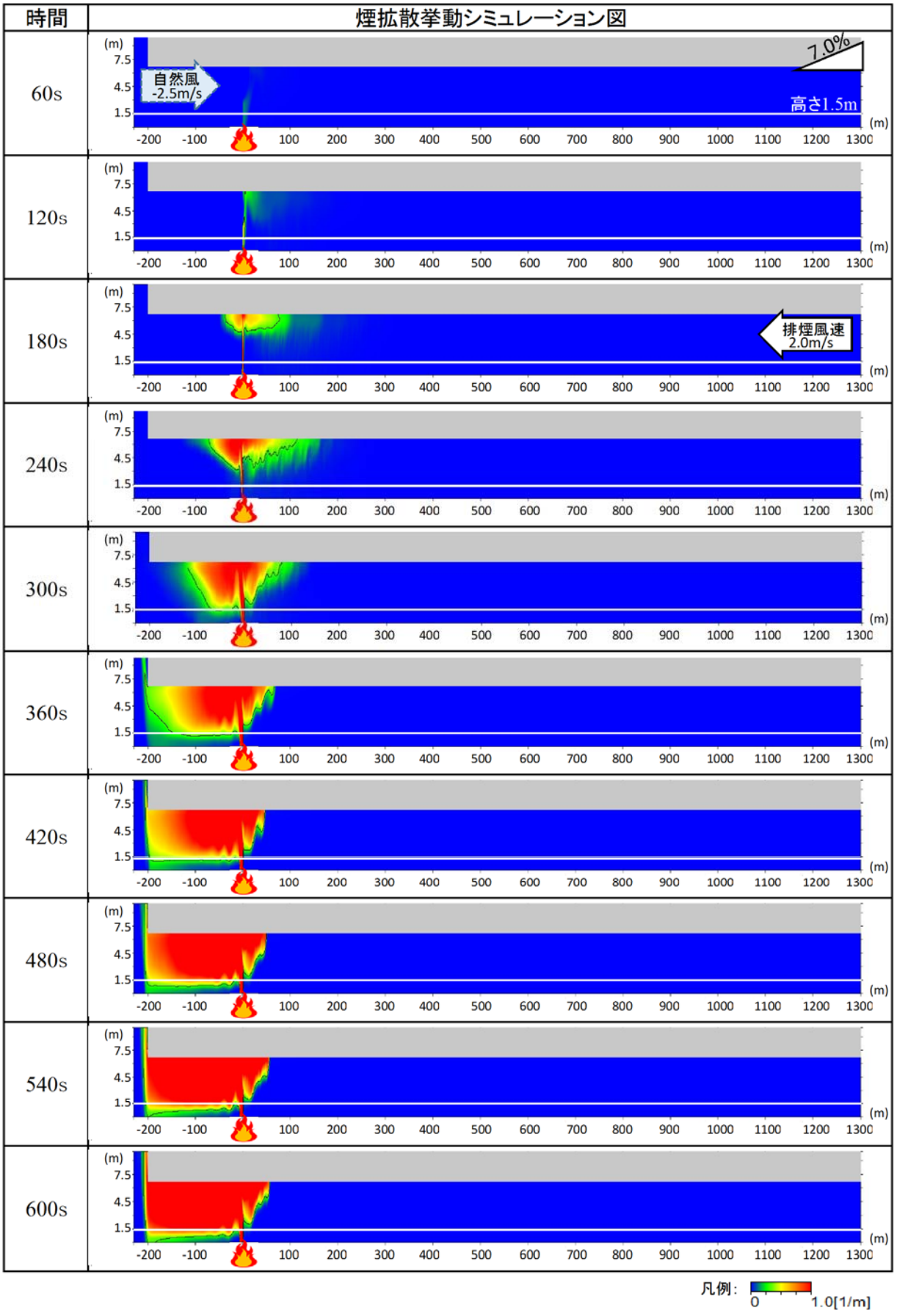

図-5　シミュレーション結果（縦断勾配-7.0%　排煙運用有り）

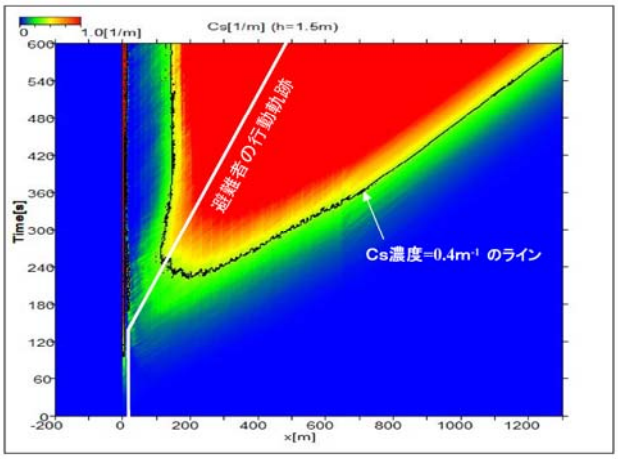

図-6　避難者の移動軌跡（縦断勾配-4.58%　排煙運用無し）

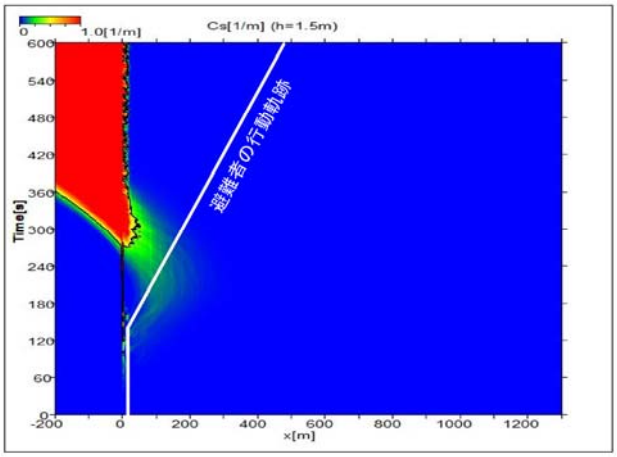

図-7　避難者の移動軌跡（縦断勾配-4.58%　排煙運用有り）

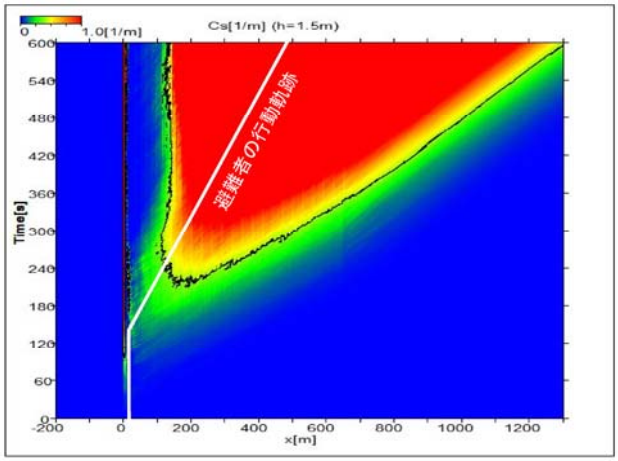

図-8　避難者の移動軌跡（縦断勾配-7.0%　排煙運用無し）

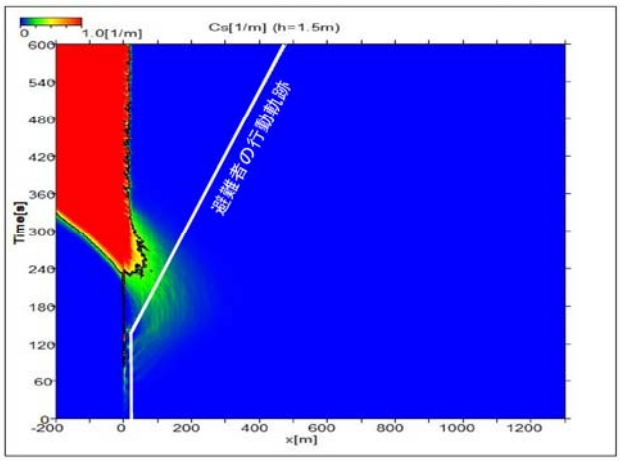

図-9　避難者の移動軌跡（縦断勾配-7.0%　排煙運用有り）

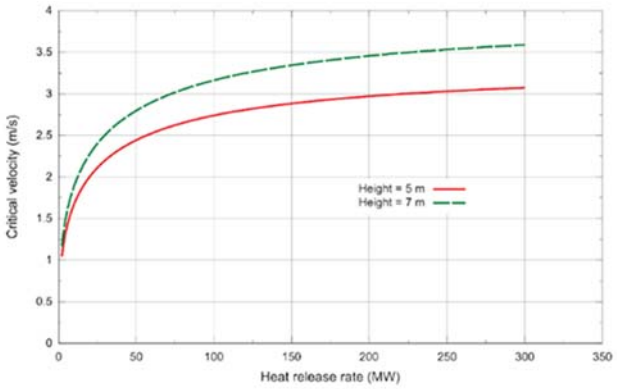

図-10　臨界風速と熱放出率の例

4.　まとめと今後の検討課題

今回行った一般的な高速道路の2車線一方通行トンネルにおける煙拡散挙動および避難行動のシミュレーション解析について，縦断勾配-4.58%および-7.0%，かつ自然風（逆風）という条件下においては，大きな違いは無く，排煙運用が無いと避難環境を確保できないが，排煙運用が有れば避難環境の確保できることとなり，換気設備の排煙運用についての有用性を確認することができた．

今後については，効果的な排煙運用について検討していく予定である．

参考文献

1)　日本道路協会：道路トンネル非常用施設設置基準・同解説，pp19，2019

2)　PIARC：Design fire characteristics for road tunnels，pp22，2017

(2021.8.6 受付)

THE CONSIDERATION CONCERNED WITH REFUGE ENVIRONMENT SECUREMENT AT THE TIME OF FIRE BY SMOKE EJECTION PRACTICAL USE OF TUNNEL VENTILATING INSTALLATION

Chihiro SUGAWARA, Kiyoto NAKANO and Tetsuya YAMAZAKI

"Road tunnel installed base of facilities for emergency use" is based on the domestic and abroad environmental change with which road tunnel facilities for emergency use are surrounded, and is revised more than the Ministry of Land, Infrastructure and Transport in March, 2019, and it has been also revised in September, 2019 about "road tunnel installed base of facilities for emergency use and the said explanation" in about 20 after from an explanation start in about 40 and 2001 from a standard notification in 1979. Because the effect which becomes effective in securement of the refuge environment in the fire early stage was written clearly about a smoke eliminating equipment in it, the smoke spread behavior simulation analysis which assumed 2 lane one-way traffic tunnel on the expressway is performed and the utility of the smoke eliminating equipment is considered.