

首都高中央環状線山手トンネルの防災安全システムの概要 OUTLINE OF FIRE PREVENTION SYSTEM FOR YAMATE TUNNEL OF METROPOLITAN EXPRESSWAY CENTRAL CIRCULAR ROUTE

遠藤 蔵人¹・松村 成和¹・石戸谷 淳²
Kurato ENDO・Shigekazu MATSUMURA・Jun ISHITOYA

Almost all section of Central Circular Shinjuku Route is constructed as tunnel, called Yamate tunnel. The length is about 10km and will become 18km after connected with Central Circular Shinagawa Route, which is unprecedented length, characterized by heavy traffic in urban area. Because it is connected with other expressways and forms a road network in Tokyo area as a crucial infrastructure, not only standard measures against tunnel fire but also special measures have been applied considering examples of domestic and foreign fire accidents.

This report mentions the outline of fire prevention measures for Yamate tunnel and performance of one year after its open

Key Words :Road tunnel, tunnel fire prevention, traffic control, immediate detection system

1. はじめに

首都高中央環状線山手トンネルは都内の主要幹線道路である山手通りの直下に位置しており、その延長は約10kmと都市内の道路トンネルとしてはわが国でも最大級の延長を有している。また計画交通量として1日約8万台もの重交通が予測されており、さらには出入口・ジャンクションのための分岐合流部が複数箇所トンネル内に存在していることから、大規模なトンネル火災を想定した防災安全対策の充実が求められている。首都高速道路においてはこれまで多くの都市トンネルの建設・管理の経験があるが、これまでに経験の無い都市内長大トンネルであることから、従来の非常用施設の設置基準以上に様々な対策を行っている。

本稿では山手トンネル防災安全対策の概要と伴に、2007年12月の開通後1年を迎えての運用状況報告を行う。

2. 都市内長大トンネル ～山手トンネル～

首都高中央環状線は東京都心から約8kmに位置する環状道路で、現在東側と北側及び西側の一部区間は既に開通しており全計画延長47kmの約7割が完成している。本稿の山手トンネルは中央環状線西側の11kmにあたり、2007年12月に4号新宿線と5号池袋線間の約6kmが開通し、2010年3月に残る3号渋谷線と4号新宿線間が開通する予定である。ほぼ全線が山手通りの地下を利用した片側2車線、内回り・外回り別のトンネル構造となっている。

都市内長大トンネルと位置付けている山手トンネルの防災安全の観点から見た特徴は、

① トンネル延長が長いこと。

キーワード：道路トンネル、トンネル防災安全、交通運用、交通異常事象検出システム

¹ 非会員 首都高速道路株式会社 保全・交通部 管制技術グループ

² 非会員 首都高速道路株式会社 技術管理室 設計技術グループ

- ② トンネル延長が長いこと。
 - ③ 予測日平均交通量が6～8万台と交通量が多いこと。
 - ④ トンネル内に分合流を有すること。
 - ⑤ 中央環状線の一部として、トンネル直近で他の路線とネットワークで繋がっていること。
- 等が挙げられる。

3. 総合的な防災安全対策の基本方針

前述の特徴を十分に踏まえ、トンネル防災安全の設備として国内最上級のAA級の設備を設置している。さらに交通制御及び避難誘導の迅速かつ正確な実施の支援に資する独自の設備を設定している。また現地への早期現着を図る観点から二輪車によるパトロール隊を導入している。また海外でのトンネル火災時の事例を見ると、十分な設備が設置されていても実際の発災時にその運用を十分に行えなかったことが被害拡大に繋がっているケースがあることから、山手トンネルでは構造物耐火、非常用設備の設置といったハード対策に加え、非常用設備の運用、交通運用、広報啓発等といったソフト対策を考慮し、実際の「避難者の行動」、「管制室の運用」等の交通運用に着目した総合的な防災安全対策を構築している。

(2) 交通運用の基本方針

山手トンネルにおける交通運用方針としては、通常時から発災に繋がる事象の低減に取り組むとともに、発災時には人命確保を最優先に安全側の運用を行うこととしている。基本方針を以下の通り示す。

- ① 火災時には人命を第一とし利用者の避難を最優先とした対応を図る。
- ② 二次災害防止を目指し関係機関との連携により、総合的な防災安全対策を確保する。
- ③ 重交通に配慮し、通常時から走行の安全性を確保する道路交通運用を行うと伴に、渋滞時の火災についても配慮した運用を行う。

これらを実現するための手段として、具体的には、

- ・火災発生時は、山手トンネルの発災側トンネル・非発災側トンネルともに全線通行止め運用を一旦行う。
 - ・火災状況を確認しつつ、通行止め解除可能な箇所はその状況に応じて通行止めを順次解除する。
- といった運用等を行うこととしている。



図-1 山手トンネル位置図

表-1 山手トンネルに設置した防災安全設備

トンネル非常用施設	<ul style="list-style-type: none"> ・非常電話 ・押しボタン式通報装置 ・火災検知器 ・非常警報装置 ・信号機 ・消火器 ・泡消火栓 ・避難通路等 ・<u>誘導表示板</u> ・排煙設備 	<ul style="list-style-type: none"> ・給水栓 ・水噴霧設備 ・無線通信補助設備 ・ラジオ再放送設備 ・<u>拡声放送設備</u> ・監視用テレビ装置 ・無停電電源設備 ・非常用予備発電設備 ・緊急車出入口 ・Uターン路
首都高独自	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>非常口強調灯</u> ・<u>トンネル内警報板</u> ・<u>トンネル内信号機</u> ・<u>交通異常事象検出システム</u> ・<u>遮断機</u> ・<u>バイク隊の導入</u> 	

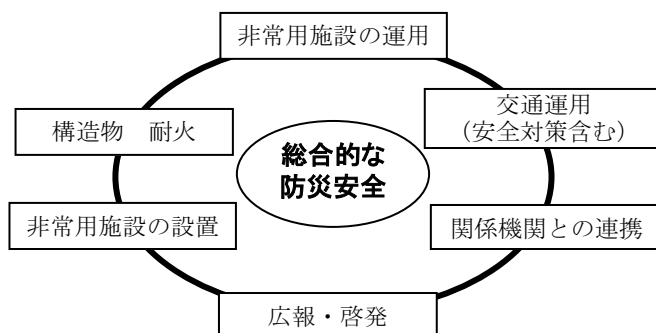


図-2 総合的な防災安全の考え方

4. 首都高の取り組み

(1) 早期の火災・検知発見

火災の検知・認知・判定は火災時対応の最初の施策であり、水噴霧の運用等といった初期火災への対応、利用者の早期避難や消防活動に大きく影響する。大規模火災に繋がることも想定し、利用者が早期に避難を完了するためには出来るだけ避難時間を確保することが重要である。火災検知を行う手段としては従来から非常用施設（火災検知器、非常電話等）や交通管制施設（CCTV画像等）により24時間の監視体制を行っているが、山手トンネルではトンネル区間だけで約380台のCCTVカメラが設置され、その映像は明かり部とは異なりほとんど同じように見えるため、これらの監視を人的に行うことは管制員への負荷が非常に大きい。このような背景にあって山手トンネルでは交通異常事象検出システムを導入している。

交通異常事象検出システムとは、CCTV映像を画像処理することでトンネル内で発生した交通異常事象（事故、故障車等）を早期に自動検知し、管制員に対し回転灯及び警報音によってそれを通知するものである。これにより以下の効果が期待される。

- ・事故の早期発見により発生した被害を最小限に抑えることや、他の交通の安全確保に資するため、二次災害の防止を期待できる。
- ・早期対応による円滑な交通確保が可能になるため、広義の社会的損失の低減が期待できる。
- ・自動通報をすることで管制業務の人的負荷軽減が可能であり、交通運用上のヒューマンエラー防止が期待できる。

これまで同システムは首都高速道路において千代田トンネル、新都心トンネルにて運用されている。尚、検出する事象は以下の通りである。

①停止

事故・故障等による停止車両を検出。

②低速

停止する可能性が高い低速走行車両を検出。

③避走

落下物等の交通の障害となる事象を回避する挙動を捉え検出。

④渋滞

渋滞末尾地点を捉え検出。

システムが交通異常事象を検出すると、管制室の管制員前方のモニターが事象発生地点にあわせ3画面ロックをかけるとともに、回転灯及び警報音で通知する。また画面には防災区画（水噴霧区画）が表示され、そ

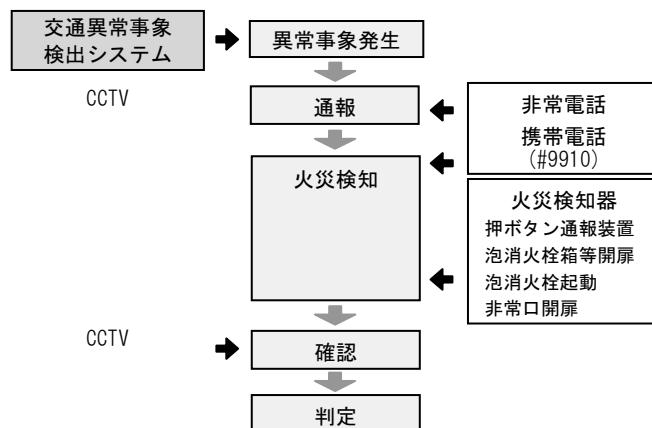


図-3 発災時の情報収集機器等



図-4 交通異常事象検出システムの検出画面

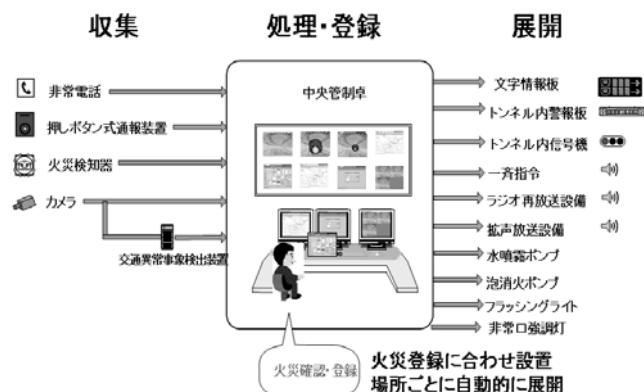


図-5 システムの自動連動の強化

の後の水噴霧運用への連携を図るものとなっている。通知された交通異常事象は管制員により処理・登録がなされ、あらかじめシステムに登録された発災地点に応じた情報板メッセージが自動展開され、利用者等への情報提供が迅速に行われる。このように発災に迅速に対応するためのシステムと管制員とを繋ぐHMI(Human Machine Interface)の強化を行っている。

尚、システムの実際の運用に当たっては検出精度が課題に挙げられるが、その運用状況について次章にて説明する。

また、火災の早期認知、交通弱者の通報手段の充実には携帯電話からの通報も重要と考え、トンネル内に道路緊急ダイヤル#9910の案内標識を設置した。

(2) 火災時の換気運用

トンネル火災時の被害を抑えるために、火災初期段階においてはトンネル内の避難環境を確保するため、後期段階においては消防隊による本格消火活動を支援するため、以下のような考え方に基いて換気運用を行う。

a) 火災初期段階

渋滞時に火災が発生した場合、火災地点より前方（下流側）では渋滞により既に車両が滞留しており、火災地点より後方（上流側）では火災により進路を断たれた車両が滞留することとなる。従って火災地点の上下流両方に存在する避難者の避難環境を確保することを目的とした換気運用を行う必要がある。具体的には火災地点において排気運転を行い排煙を促すとともに、火災地点の上下流両方への熱や煙の拡散を極力抑制するよう、縦流風速を0m/sまで低下させ維持するような換気運転を行う。

非渋滞時に火災が発生した場合、火災地点の下流側では車両はそのままトンネル外へ走り去ってしまうが、火災地点より上流側では渋滞時同様、火災により進路を断たれた車両が滞留することとなる。従って火災地点の上流側に存在する避難者の避難環境を確保することを目的としつつも、下流側を走行している車両に極力影響を及ぼさないような換気運用を行う必要がある。具体的には火災地点において排気運転を行い排煙を促すとともに、下流側への煙の移動速度が速くなり過ぎて走行車両に追いつかないよう縦流風速を2~3m/s程度に維持し火災地点上流側への熱や煙の拡散を抑制する換気運転を行う。

b) 火災後期段階

渋滞時・非渋滞時のいずれの場合にあっても、消防隊は火災地点上流側からトンネル内に進入して現場に向かうため、上流側における消火活動環境を確保することを目的とした換気運用を行う必要がある。具体的には火災地点において排気運転を行い排煙を促すとともに、火災地点上流側への熱や煙の拡散を抑制する換気運転を行う。

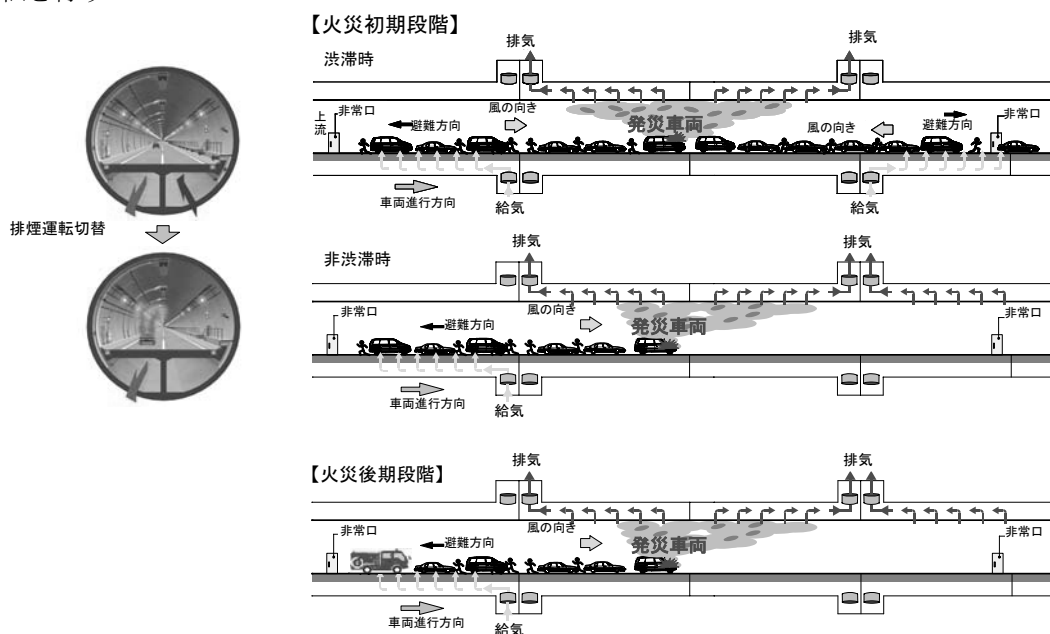


図-6 火災発生時の換気運用イメージ

(3) 迅速な情報提供

交通管制室での情報実施操作が迅速かつ確実に利用者に伝えられるよう山手トンネルでは以下のことを実施している。

①従来は坑口のみを設置していたトンネル警報板と信号機を分岐部・転回路部に設置した。

②発災時の停止等の行動を促すような効果的なメッセージをドライビングシミュレータ等の検証結果を踏まえ以下の点に留意して実施する。

- ・メッセージの表示方法は、誘目性を高めるために点滅（交互）表示を行う。
- ・「ここでとまれ」「ここで出よ」等ドライバーが行うべき行動を直接示すメッセージが良い。
- ・同じ情報を複数個所で提供することにより、信頼性が高まる。

③特に重要となる坑口停止誘導については、トンネル警報板をメッセージ表示部と点滅灯を分離した構造とし、かつ点滅灯（フラッシュタイプ）をトンネル内に設置することにより、トンネル内全体が赤くするようにした。これにより坑口手前に設置している信号機と相まって情報の緊急性を強調し、停止誘導効果を高める。

(4) バイク隊の創設

山手トンネルは重交通が予想されていることから、一度事故が発生するとその直後から事故現場上流に急速に渋滞が発生することが懸念される。そこで早期に現地到着することを目的として、日本初の自動二輪車によるパトロール隊を山手トンネル開通と同時に創設し、従来の四輪パトロールカーでの交通管理体制に加え機動性の高い二輪車を連携させることとした。バイク隊の役割は以下の通りである。

・二輪車の機動性を活かし早期に事故・火災現場に急行し、現場の状況把握及び火災発生等による避難誘導を行う。

・火災発生等による二次災害防止のため、早期に火災現場上流の分岐部及びトンネル坑口等で後続車両を抑止する。（遮断機操作での閉鎖措置）

バイク隊及び通常巡回車での山手トンネルのパトロールは、全体で一日約30回通過のコースを設定しており交通異常事象発生に迅速に対応できるものとしている。昼夜二輪3台・四輪1台が山手トンネルを24時間巡回監視及び有事事象に備え基地等で待機している。また他の巡回車においても他路線と同等に山手トンネルを巡回し管理強化を実施している。

(5) 迅速・確実な避難誘導

火災事故現場近くにあつては、トンネル利用者が自主的にかついち早く避難することが不可欠である。

a) 車道から非常口までの避難誘導

非常口から先は安全空間であるため、まずはトンネル内の非常口へ出来るだけ早期に誘導することが、避難者の安全上最も重要である。山手トンネルではトンネル内の非常口間隔を最大350mとしており、非常口への利用者の避難完了目標を上述の通り火災発生後10分以内、すなわち火災初期段階内としている。



図-7 トンネル警報板表示例（発災地点付近）



図-8 バイク隊

火災時、トンネル利用者はまず車内でラジオ緊急割込放送やトンネル内の情報板を確認して避難行動を開始、車外に出た後、トンネル内で放送されている拡声放送を聞き、非常口誘導表示灯に従って非常口まで到達する。この際、遠くからでも非常口が視認できるよう非常口の位置を強調するための非常口強調灯（発災時に点滅）を設置している。また、非常口扉には従来の6倍の大きさのピクトグラムを採用し、より認識しやすいデザインとした。非常口までの避難誘導イメージを図-8に示す。

また拡声放送の運用に当たって複数のスピーカーを同時に用いると、トンネル内の音場特性から明瞭度の確保が困難となる。このような課題に対しこれまでは小出力、小ピッチで拡声器を取り付ける方法が用いられてきたが、トンネル内の自動車騒音や換気音の反響で避難者に明瞭な音声を到達させることは技術的にも、コスト的にも困難な場合が多かった。そこで山手トンネルでは、大型スタジアムやコンサートホール等で用いられている連続的時間遅延技術を導入することにより音の明瞭性を確保することとした。

b) 地上までの避難

前述のように非常口から先は安全空間（非発災空間）であることから、ここに誘導された避難者は誘導標識等に従い地上まで避難することとなる。しかし構造条件により経路の長い避難路もあるため、避難者に不安感を抱かせることなく確実に誘導する必要がある。そこで、誘導標識等の有効性（レイアウト、設置位置等）について、防災計画の専門家や、警察・消防関係者、一般ドライバーの方に被験者となって貰い、現地確認試験を実施して最終的な避難路の誘導計画を策定した。具体的には、わかりやすい誘導標識のデザイン（路面表示、避難経路案内図）、避難を促すための放送設備や避難状況を把握するためのカメラおよび緊急電話の設置を行った。

(6) 広報

これまでは道路を管理する立場からの防災安全技術について紹介してきたが、事故や火災が発生した時に利用者自らが率先して避難行動を起こして頂くことが、トンネル防災安全性の向上に非常に大きな役割を占めることは言うまでも無い。広報啓発活動は、パンフレットやホームページ等様々な媒体を用いて全ての人に情報が行き渡るようにし、特に発災時の避難行動を率先して行って貰うことを期待しプロドライバー（タクシー、バス、トラックの運転手等）への活動を意識している。

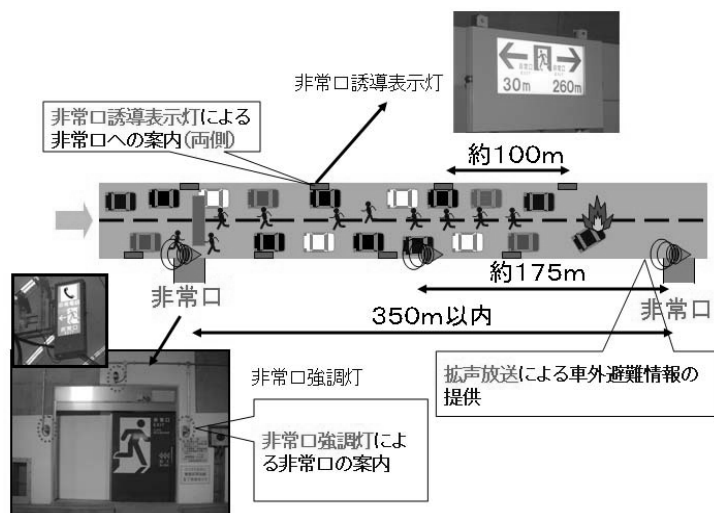


図-9 非常口までの誘導イメージ



図-10 非常口内の状況



図-11 パンフレットの一例

5. 開通一年を向かえての運用状況

(1) 事故状況

平成19年12月22日の山手トンネル開通以来、幸いなことに水噴霧を必要とする規模のトンネル火災は生じていない。引き続き通常時の交通運用に配慮すると共に、火災発生に備えいかなる場所においても迅速かつ的確な初期対応を行えるよう訓練を行っていく。

(2) 交通異常事象検出システムの運用状況

山手トンネル供用開始後、以下の指標を用いて事故検出、正検出の2つの観点から精度検証を行った。

1) 検証期間

2008年6月9日～2008年6月22日

2) 検証内容

①事故検出率

実際に生じた事故に対してシステムがどれだけ反応していたかの相対評価を検証する。交通管制システムに登録された交通異常（事故や故障者等）に対し、システムの検出履歴を比較した。

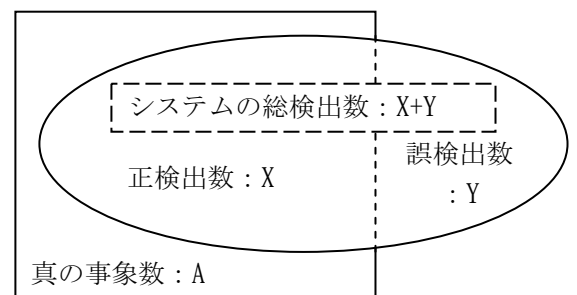


図-12 指標のイメージ図

$$\text{事故検出率} = \frac{\text{正検出数 (事故)}}{\text{真の事象数 (事故)}} = \frac{\text{検出システム稼動件数 (事故) (=X)}}{\text{交通異常件数 (事故) (=A)}}$$

交通管制システムに登録される事故や故障車等のイベント情報（工事情報等の画像処理監視対象外のイベントは除外する）と、画像処理装置の交通異常事象検出履歴とを比較した。検証の結果、イベント発生件数17件のうち、画像処理装置では16件を検出していた。結果、事故検出率は94%であった。尚、千代田トンネルの検証結果を参考に示すと事故検出率は91%（=31/34）であった。

②正検出率

センサーの性能を検証する。対象カメラを5地点選出し、その正解率を確認した。

$$\begin{aligned} \text{正検出率} &= \frac{\text{正検出数（停止、低速、避走、渋滞）}}{\text{総検出数（停止、低速、避走、渋滞）}} \\ &= \frac{\text{正稼働件数（停止、低速、避走、渋滞）（=X）}}{\text{全稼働件数（停止、低速、避走、渋滞）（=X+Y）}} \end{aligned}$$

対象カメラ5地点の交通異常事象検出履歴と蓄積映像を比較した結果、雨天時の誤報を除いた正検出率は95%（検出件数81件に対して正解77件）となった。尚、千代田トンネルの検証結果を参考に示すと正検出率は93%（=178/192）であった。2指標ともに90%の精度を確保していることが確認できた。

また、システムの使いやすさや有効性を確認する目的で、システム利用者である交通管制員へ2008年12月にヒアリングを実施した。実感として、落下物などはたまに検知できないときがあるがほとんどは検知している等、システムの有効性について肯定的な意見が多く得られ、一定の評価を確認できた。

(3) バイク隊の運用状況

山手トンネル開通から平成20年10月末までのバイク隊等扱い状況を表-2に示す。尚、バイク隊の扱いは山手トンネル以外も含んでいる。

事象発生時には、バイク隊の平均到着時間は全体平均到着時間に比べ約6分間早い約8分間となっており、早期の初期対応実施による二次事故の防止及び怪我人や自走不可能車両等の状況確認を迅速に実施している。また2008年8月3日に発生した5号池袋線の熊野町でのタンクローリー横転炎上事故に伴う早期交通規制対応及び、事故復旧作業における交通規制誘導、暫定供用時の有事事象対応に伴う定点監視も実施した。その他交通安全イベント等へも積極的に参加し、事故防止啓発活動も実施している。

表-2 バイク隊等扱い状況（2007年12月22日～2009年10月末）

	扱い件数 (バイクのみ)	平均到着時間 (バイクのみ)	※参考 全体平均到着時間 (巡回車全体)
事 故	76件	約8.7分	約15.5分
故障車	129件	約7.3分	約12.7分
合 計	205件	約8.0分	約14.1分

6. おわりに

本稿では山手トンネルの防災安全対策について説明するとともに、2007年12月の開通から1年を経た現在までの運用状況について報告した。

山手トンネルは、2010年3月に3号渋谷線～4号新宿線間が開通し11kmとなり、さらには品川線までを含めると18kmの他に類を見ない都市内長大トンネルとなる。これまでの運用によって得られた知見を活かしつつ、トンネル延伸に向けて引き続きトンネル防災安全についての検討を行っていく。例えば、拡声放送の明瞭性確保にあつては、トンネルの断面変化、舗装による吸音程度、道路線形によって調整が必要である。大橋ジャンクション部にあつてはその螺旋構造を有しているという特徴を考慮し、継続して明瞭性確保に努めているところである。

謝辞：山手トンネルの運用に当たっては、警察や消防はじめ各関係機関との協力・連携が非常に重要である。日頃より首都高の防災への取り組みにご協力頂くとともに、ご指導頂いている関係機関の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 川田成彦, 伊藤崇法, 岡野孝司：首都高中央環状線山手トンネルにおける避難誘導手法の検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第13巻, 土木学会, pp. 203-210, 2008.1
- 2) 岡田知朗, 岡野孝司, 長谷川勉：首都高中央環状新宿線トンネル防災安全に向けた交通運用方針, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第12巻, 土木学会, pp. 169-176, 2007.1