

トンネル内での水素の安全性

三石 洋之

財団法人日本自動車研究所

〒311-4316 茨城県東茨城郡城里町大字小坂字高辺多1328-23

Safety Research on Hydrogen Diffusion in Tunnels

Hiroyuki MITSUISHI

Japan Automobile Research Institute

1328-23 Takaheta, Osaka, Shiroato, Ibaraki 311-4316

CFD simulation was carried out on diffusion of hydrogen leakage in tunnels. In this study, two typical shapes of tunnel which is fifty meters long and existing tunnel (Kanetsu tunnel) were selected. For the amount of hydrogen leaked, 60 m³ was selected, which corresponds to the amount necessary for fuel cell vehicles to achieve their desired driving range. We investigated the influence of tunnel shape and the effect of tunnel ventilation. As a result, we found that leaked hydrogen is immediately carried away from point of leakage under existing ventilation conditions. The basic data on behavior of leaked hydrogen was obtained.

Keywords: hydrogen diffusion, hydrogen safety, fuel cell, vehicle safety

1. はじめに

地球規模で年々深刻化する温暖化対策として、炭酸ガス (CO₂) 排出低減に向けた取り組みが各方面で盛んに進められている。自動車についても例外ではなく、化石燃料を使用する現行の内燃機関自動車に対して、炭酸ガスを排出せず、クリーンなエネルギーの利用が可能な車両の開発が進められている。そのクリーンなエネルギー源として、再生可能な水素の利用を自動車分野でも実現すべく、技術開発が産学官で積極的に進められている。そのような状況下において、水素・燃料電池自動車は、2015年の普及の開始を目指して、各種の規制のさらなる合理化検討が進められている。

これまでの自動車用燃料は、ガソリン、軽油、LPG、天然ガスなどが主流であり、水素を量産車に使用するためには、現行の社会基盤に対する適合性など、多くの確認項目がある。特に、水素・燃料電池自動車が事故に遭遇した場合の水素漏洩による危険性を予測することは被害拡大防止の観点からも重要であり、なかでもトンネルや地下駐車場など、水素の優れた拡散性が損なわれる

可能性のある閉ざされた空間に対する安全対策の確認は重要項目の一つである。

一方、水素・燃料電池自動車の導入初期段階に対応した規制の再点検は2005年3月に完了しており、その際、自動車や車載容器のみならず、トンネルや地下駐車場などでの水素漏洩に対する検討についても、(財)日本自動車研究所は新エネルギー・産業技術総合開発機構からの委託を受けて実施した研究の中で取り組んでおり、一連の検討結果は既に報告されている[1][2]。以下では、それらの報告から、長大・水底トンネルを模擬したトンネル、さらには実在トンネルの換気設備を対象とした水素拡散シミュレーション結果を引用し、トンネル内における水素漏洩時の安全性について述べる。

2. 解析対象

模擬トンネルとしては、内陸部などのトンネルを想定した長大トンネル (長さ5km以上の道路トンネル) と海底トンネルなどを想定した水底トンネルを解析モデルに選択した。前者は高さ7.0mの馬蹄形断面かつ2%の縦

断勾配（拌み勾配）とし、後者は高さ4.5mの矩形断面かつ5%の縦断勾配（谷勾配）構造とした。両模擬トンネル共に幅10mの2車線の道路とし、長さ50mの範囲に限定して解析した。図1.に両模擬トンネルの断面図を示す。

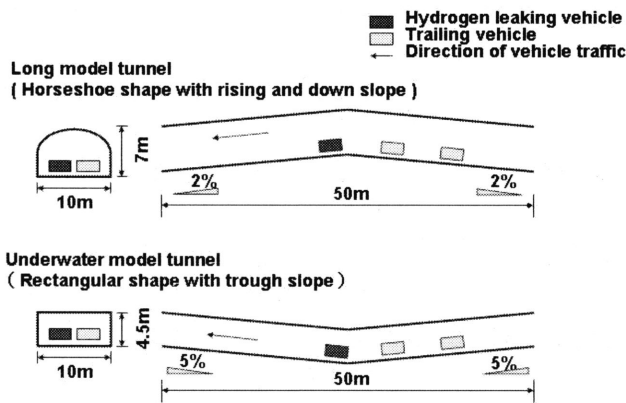
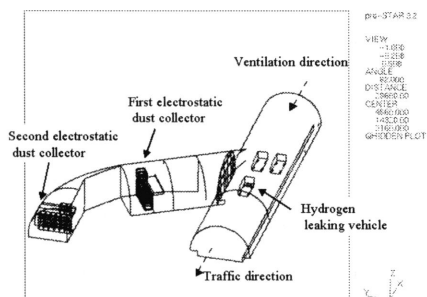
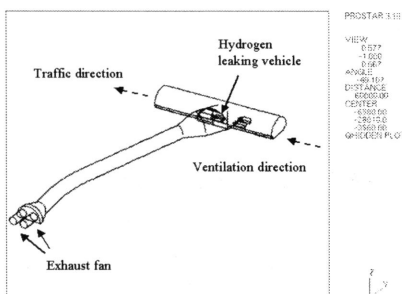


図1. 模擬トンネルの形状

さらに、実在トンネルとしては、道路法第46条第3項の中で危険物積載車両の通行制限・禁止の規制を実施している国内24ヶ所の長大・水底トンネルの中から、2005年時点で最長であった関越トンネルを計算対象に選定した。関越トンネルは車道（トンネル本坑）の換気設備として、電気集じん器、立杭への排気ファン（地下換気



(a) 電気集じん機周辺の形状



(b) 地下換気所周辺の形状

図2. 実在トンネルの解析部の形状

所)を設置している。前者は分流坑に設置された電気集じん器の高電圧を印加した電極部にて空気中の浮遊状粒子物質などを付着させるものであり、クリーンにした空気をトンネル本坑の車両進行方向に対して再流入させる構造である。後者は分流坑に設置された排気ファンを介して立杭へ排気ガスの混じったトンネル本坑内の空気を排出する構造である。

実在トンネルの解析範囲は、関越トンネルの電気集じん器周辺と、地下換気所周辺とし、トンネル形状は、関越トンネルの高さ6.9mの馬蹄形断面かつ1.4%の縦断勾配、幅11.2mの2車線道路を忠実に再現し、モデル化した。図2.に電気集じん器周辺と地下換気所周辺のモデルを示す。

3. 数値シミュレーションの方法

3.1 シミュレーションシナリオ

模擬トンネルによる水素拡散シミュレーションでは、水素漏洩車両は1台とし、燃料電池自動車1台に搭載された水素量は60m³とした。水素漏洩は、トンネル中央部の追い越し車線上の車両から発生するものとし、後続車両を4台配置した。各車両は事故等で停車状態にあるものとし、水素は車室内に進入しないものとした。水素漏洩量は全搭載水素量(60m³)とし、漏洩は容器安全弁 (PRD) からの放出を想定して約52secで終了するものとした。

実在トンネルによる水素拡散シミュレーションでは、前述の模擬トンネルのシナリオと同様の漏洩条件とし、後続車両は2台を配置して解析を行った。

3.2 計算モデル

計算には汎用熱流体解析ソフトSTAR-CDを使用した。また、解析時間は、漏洩開始後30 minあるいは濃度分布に経時変化がみられなくなるまでとした。

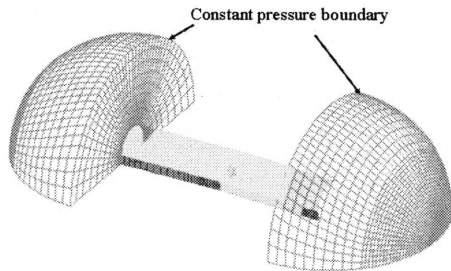
3.3 境界条件と格子

水素漏洩部については、水素漏洩車両の下部に高圧水素が噴出する部分を設定し、その噴流部分はトンネル全体の計算とは別計算するものとした。別計算する水素噴流モデルは直径0.5m、高さ0.3mの円筒空間とし、得られた円筒側面での水素の流速および濃度をトンネルの計算に水素流入境界の条件として与え、トンネル全体には地面に垂直な円筒面より放射状に水素が噴出するものとした。

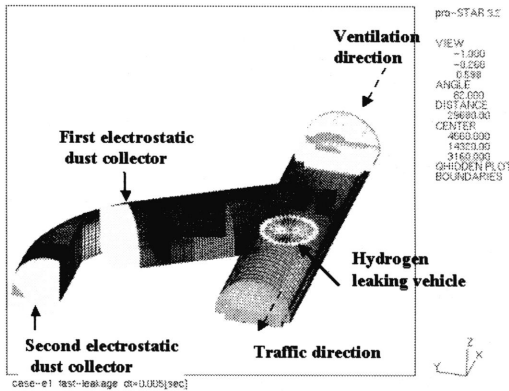
換気がトンネル内の水素拡散に与える影響を調査するため、換気速度をパラメータとした関係から、換気に

よるトンネル本坑内の空気の流れが定常となった状態から水素漏洩を開始させた。また、換気風速は車両進行方向の後方から一様に与えた。

モデルサイズは、模擬トンネルの格子数が約20万点、実在トンネルの格子数が約49万点である。格子図を図2.に示す。



(a) 模擬トンネル (長大トンネル)



(b) 実在トンネル (電気集じん器周辺)

図3. 解析モデル

4. 解析結果

4.1 模擬トンネル

計算結果は図4に示すように漏洩車両を含む代表的な断面にて表示する。

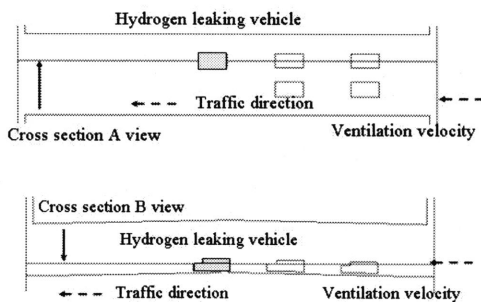


図4. 解析結果の表示断面

解析パラメータである換気風速は0m/s、1m/s、2m/sの3種類について解析を行った。なお、国内のトンネルの非常時の換気は、火災発生時のトンネル上層に形成される煙層とその下の空間に形成される空気層が2層に保たれる風速である2m/sに設定されている。長大トンネルの水素漏洩中の結果を図5.に、水底トンネルの結果を図6.にそれぞれ示す。

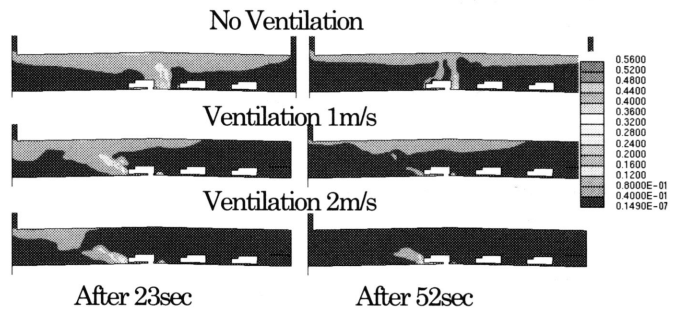


図5. 長大トンネルの解析結果

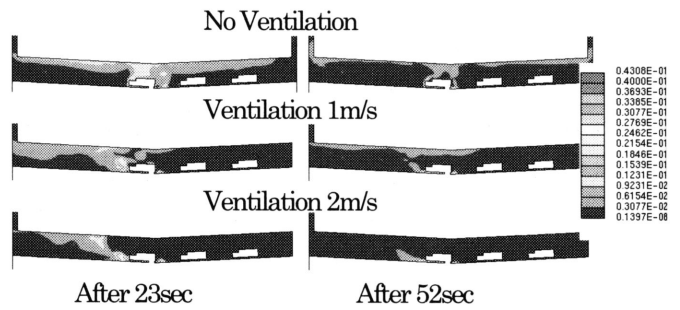


図6. 水底トンネルの解析結果

灰色の領域が可燃下限界 (4%)の水素濃度の領域を示す。長大トンネル、水底トンネルともに、換気風速が存在しない場合、漏洩開始から23sec後にはトンネルの長さ方向の上層部分のほとんどが可燃下限界以上の領域であるのに対し、換気風速が存在する状況では漏洩水素は換気下流側 (左側) に吹き飛ばされ、可燃下限界 (4vol%) 以下の濃度に薄まっている。さらに、水底トンネルではトンネル開口部に向かって上昇勾配を有するため、その上昇勾配の効果により、長大トンネルと同じ換気風速であっても水素の拡散が促進されている。

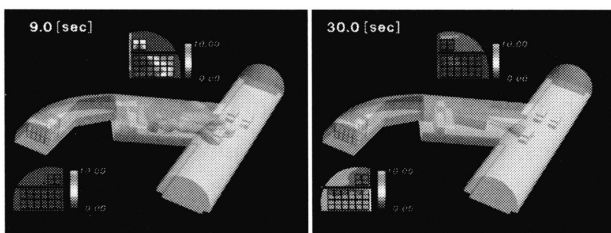
4.2 実在トンネル：電気集じん器周辺

電気集じん器の近傍にある車両からの水素漏洩時の水素濃度分布を図7.に示す。可燃下限界以上の濃度領域を可視化して示している。トンネル本坑内の大部分の空気は電気集じん器の存在する分流坑に吸込まれる。漏洩水素もトンネル内の空気の流れによって、上昇しながら

電気集じん器へと運ばれる。

漏洩した水素は周りの空気と一緒に電気集じん器側
に流れ込み、9秒後にはトンネル本坑から分流坑に吸い
込まれた水素が分流坑内を最も広範囲に覆うが、30秒後
には殆ど吸い込まれ、車両からの水素漏洩が終了してか
ら約13秒が経過した約65秒後には分流坑内は可燃下限
界以下になる。

また、水素漏洩車両の位置を本坑・分流坑の分岐部か
ら少し遠ざけ、25m後方に停車させた場合は、解析中の
全ての時間において集じん器に流入する水素濃度が9%
を超えることはなかった。



漏洩9秒後

30秒後

図7. 実在トンネルの解析結果（電気集じん器周辺）

4.3 実在トンネル：地下換気所周辺

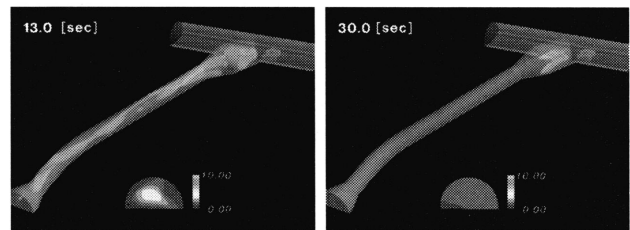
地下換気所の近傍にある車両からの水素漏洩時の水素濃度分布を図8に示す。

電気集じん器の場合と同様にトンネル本坑内の殆どの空気は分流坑に流入する。地下換気所の分流坑内には旋回流が発生しており、水素濃度が高い領域は分流坑内の上下両側に現れている。濃度4vol%以上の水素が分流坑の奥にある排気ファンに到達するのは約13秒後であり、その後約26秒まで存在し続ける。ただし、排気ファン入口で水素濃度が9vol%を超えることはなく、水素濃度4%以上の領域も約62秒後には消滅する。

一連の解析結果から、長大トンネルや水底トンネルについては、万一、水素・燃料電池自動車に搭載されている水素が安全弁から急速に放出された場合であっても、トンネル内に存在する換気風速により速やかに拡散し、可燃下限界以下に薄まるものと考えられ、現行のトンネル本坑内の設備で安全は確保できるものと考えられる。

一方、実在トンネルの電気集じん器や地下換気所などの近傍で水素漏洩が発生した場合においては、可燃下限界レベルの低濃度の水素が拡散しながら分流坑内に吸い込まれていく。そのため、分流坑近傍で発生した水素

漏洩に対しては、低濃度の水素の流れ場での着火の可能性に関する解析を進めることが重要と考える。ただし、分岐部から25m以上離れた場所での水素漏洩については、特に危険な状況を引き起こすとはないと考えられる。



漏洩13秒後

30秒後

図8. 実在トンネルの解析結果（地下換気所周辺）

5. まとめ

今回実施したトンネル内で水素漏洩に対するシミュレーションにより以下の知見を得た。

- (1) トンネル内の通常の換気風速により、漏洩水素は速やかな拡散し、数十秒レベルで散逸する。
- (2) トンネル本坑と分流坑の分岐部近傍で水素漏洩が生じた場合、分流坑により接続される集じん器や排気設備には、それらの機器の設置位置によって可燃下限界以上の水素が流入する可能性があり、着火を考慮した検討が必要であるが、水素の拡散状況などから特に危険な状況を引き起こすとはしないものと考えられる。

参考文献

1. 向井・鈴木・三石・渡辺, トンネル内水素漏洩拡散シミュレーション-トンネル内事故時の漏洩水素の安全性評価, 自動車研究, 27-7(2005), 335-338
2. 向井・鈴木・三石・渡辺, トンネル内水素漏洩拡散シミュレーション (第二報) -トンネル内事故時の漏洩水素の安全性評価, 自動車研究, 28-7(2006), 321-325