

トンネル内に静止した車両からの 水素漏洩に関する数値解析

環境工学研究部 熱・空気流動研究室
上席研究員 福田 傑

本日の発表

- 研究の背景
- 数値解析条件
- 数値解析方法
- 数値解析結果
- まとめと成果の活用

研究の背景

- 低炭素社会の実現に向けた鉄道の取り組みの一つに、燃料電池鉄道車両の開発
- 鉄道総研およびJR東日本は水素ハイブリッド試験電車を開発、前者は所内試験線、後者は営業線で走行試験
- 燃料電池鉄道車両の社会実装のためには安全性の検証が必要
- 燃料電池に用いられる水素は、空気に対する比重が0.0695と小さいため拡散しやすく、空気中における可燃限界の値が4 ~ 75 %と他の可燃性ガスに比べてきわめて広い
- 安全性の検証における課題の一つに、トンネル内水素漏洩時の流動性状、水素濃度分布の把握
- トンネル内水素流動の数値解析手法を構築することが必要

鉄道総研の水素ハイブリッド試験電車



研究の背景



- 日本の在来線トンネルは、道路トンネルと比べて断面積が小さい



- 閉塞率が、道路に比べて大きい

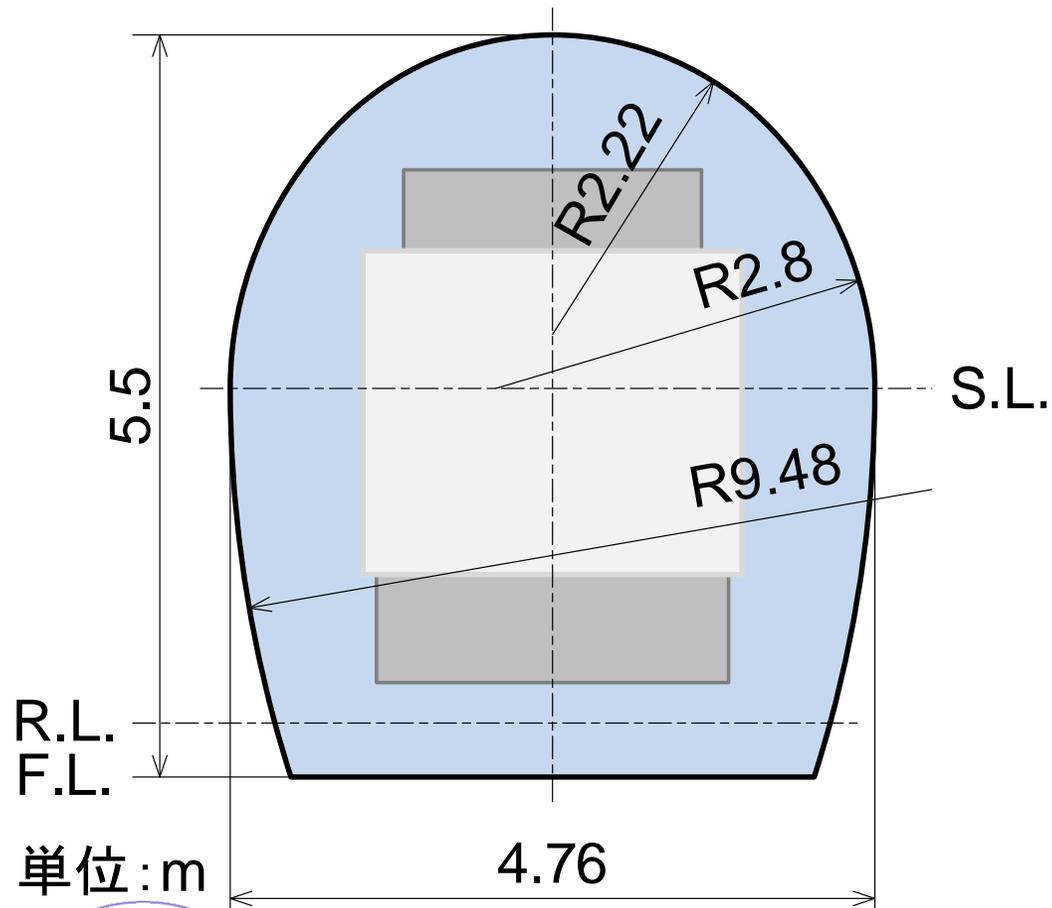


本研究では、

- 水素流動の数値解析手法を構築
- トンネル内に静止した車両の屋根上機器から漏洩した水素の流動特性を解析

数値解析条件

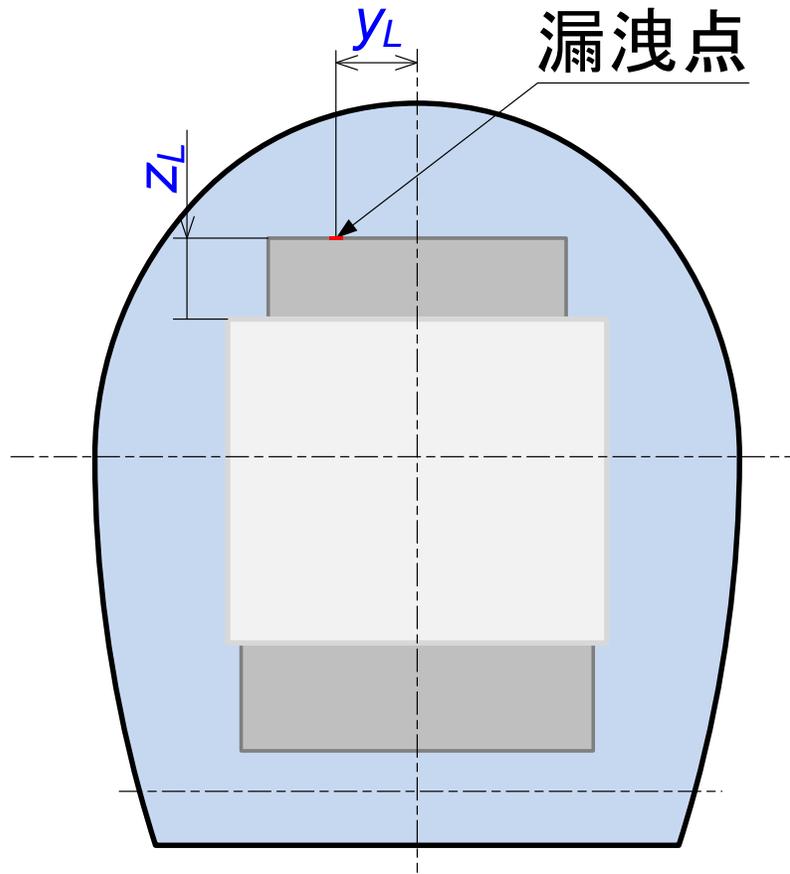
トンネルと車両



トンネル	断面積	23.1 m ²
	周長	17.8 m
	長さ	400 m
車両	断面積	10.1 m ²
	編成数	2両
	編成長	39.5 m
閉塞率		0.44

数值解析条件

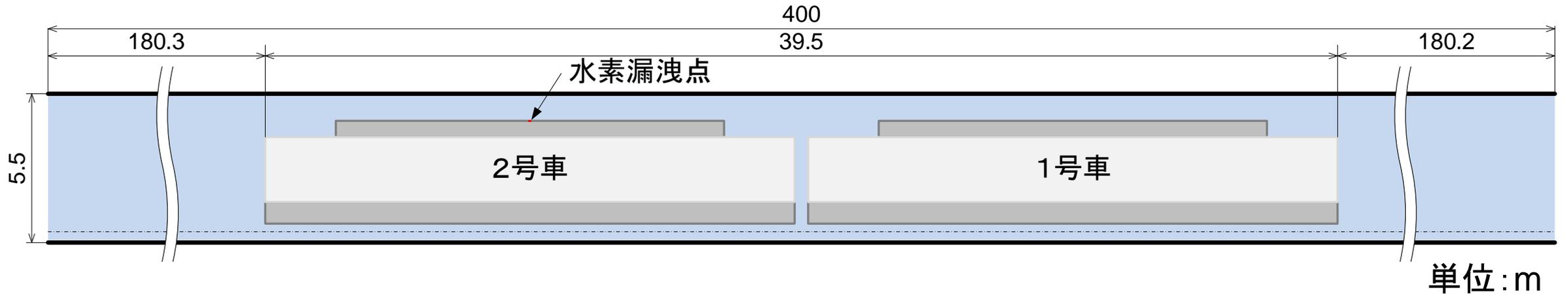
水素漏洩点



マクラギ方向偏心 y_L (m)	屋根上機器高さ z_L (m)		
	0.10	0.45	0.60
0.00	○	○	○
0.35			○
0.65			○

数値解析条件

トンネルと車両

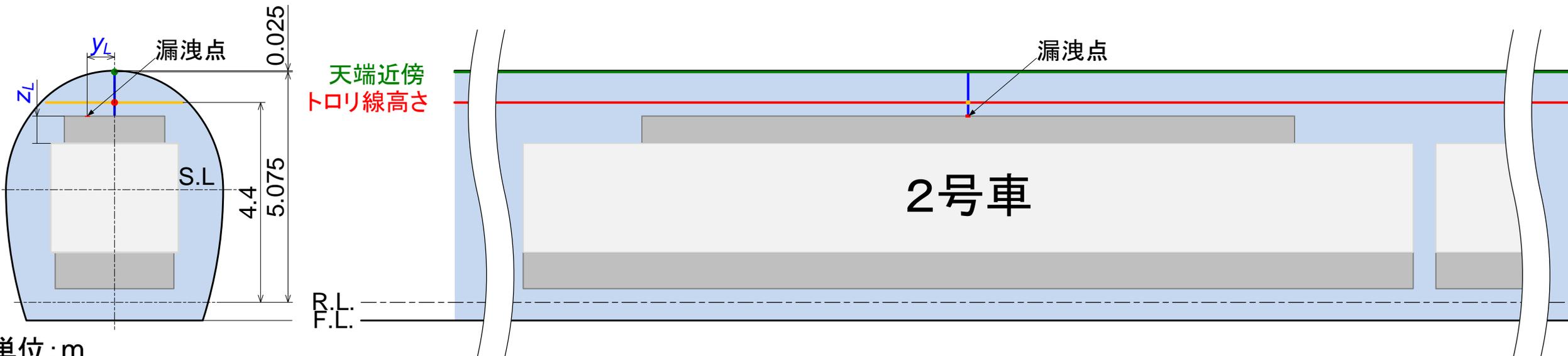


- 全長400mのトンネル中央に車両が静止
- 図中左側の車両(2号車)の屋根上機器から水素が漏洩

数値解析条件

水素の漏洩条件と濃度の評価点

- 水素漏洩量: 5 NL/min (NL: 温度0°C、大気圧1013hPa、相対湿度0%という基準状態での体積)
自動車の水素漏洩(成瀬ら, 2009)のナット1/4緩み漏れ量を参考に設定
- 水素漏洩時間: 3600 s(車両の水素配管の容量を考慮)
- トロリ線高さ(長手方向、横方向)、トンネル天端近傍(長手方向)、
漏洩点直上(鉛直方向)の濃度分布を評価

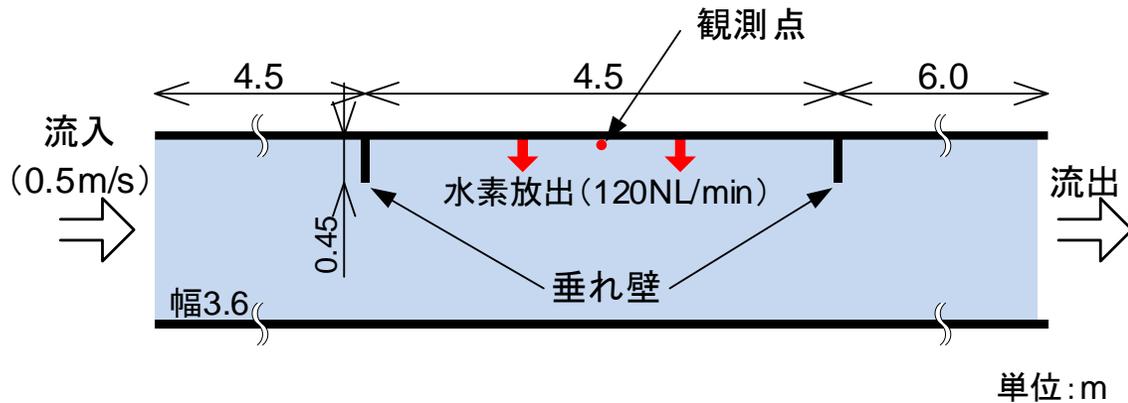


数値解析方法

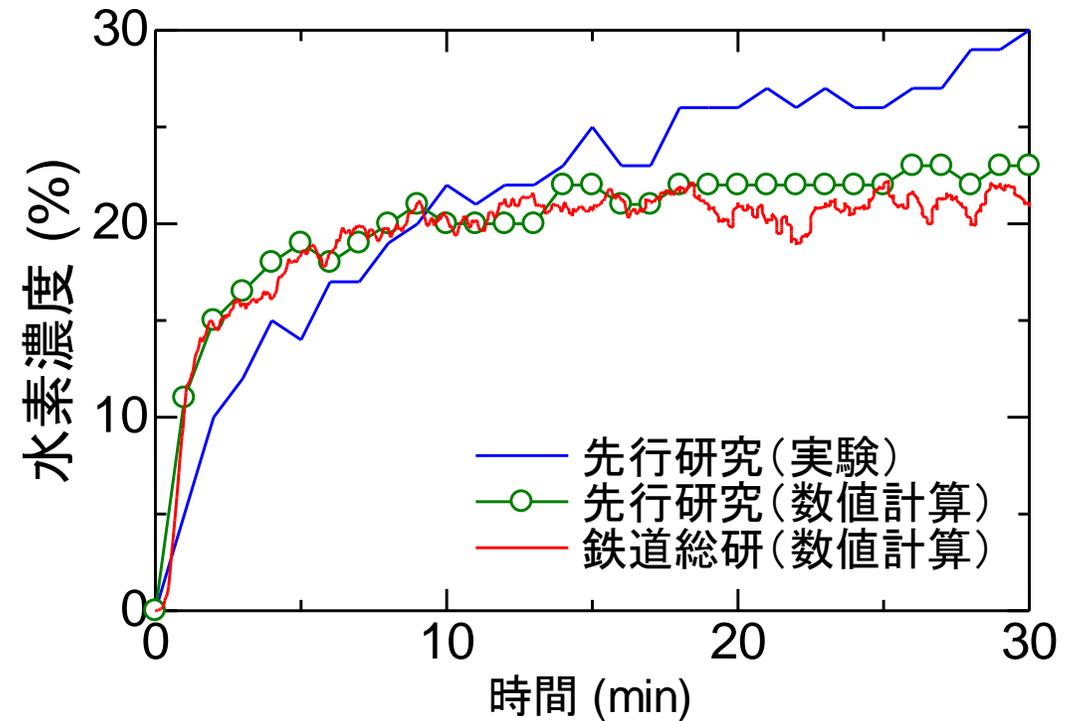
- Fire Dynamics Simulator (FDS) ver. 6.8.0
- Subgrid-scale (SGS) モデル: Smagorinskyモデル、Smagorinsky 定数 $C_s = 0.1$
- グリッド幅
レール方向 (x方向): 10 cm
マクラギ方向 (y方向): 5 cm
高さ方向 (z方向): 5 cm
- 上記の設定は、岡ら(2017)の可燃性ガス風洞における水素移流拡散に関する実験、数値解析結果との比較により決定

数値解析方法

可燃性ガス風洞を用いた水素漏洩の実験・数値計算(岡ら, 2017)と比較し、数値解析手法を検証



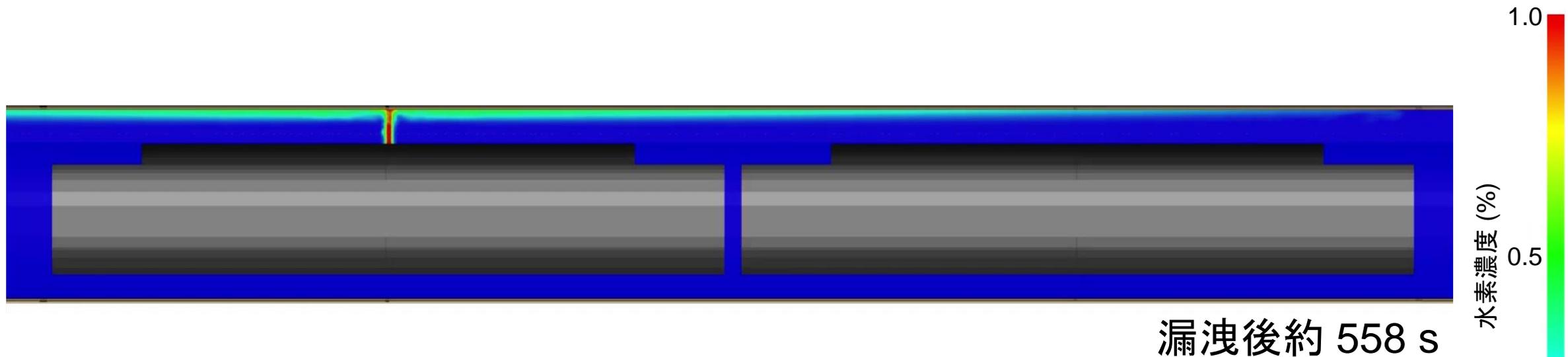
可燃性ガス風洞における水素移流拡散実験の概要



水素濃度の時間変化

数値解析結果

トンネル縦断面水素濃度分布 ($y_L = 0.00\text{m}$ 、 $z_L = 0.60\text{m}$)



- 漏洩した水素は、天端まで鉛直に上昇する
- 水素は天端に達した後、天端に沿って両坑口へ向かって流れる
- なお、設定した漏洩時間 3600 s では、水素は長さ 400 m のトンネル坑口まで達していない。

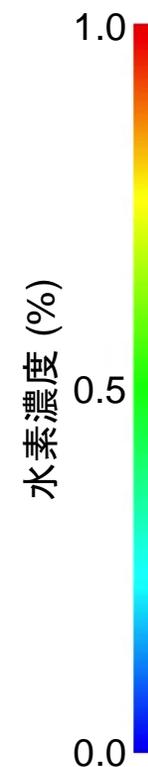
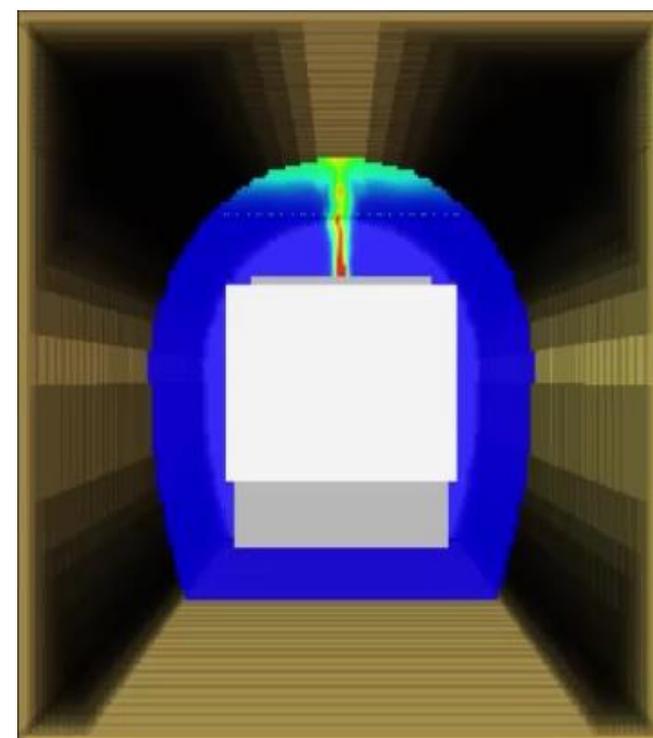
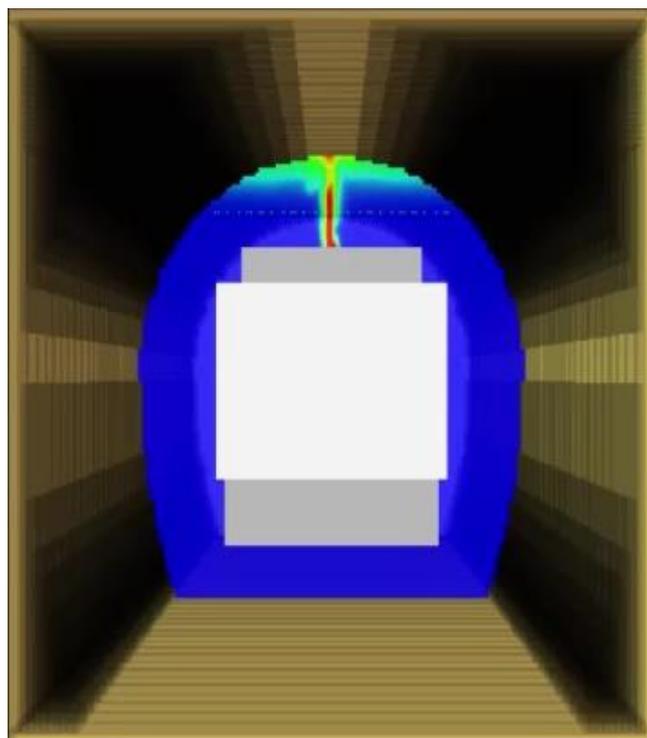
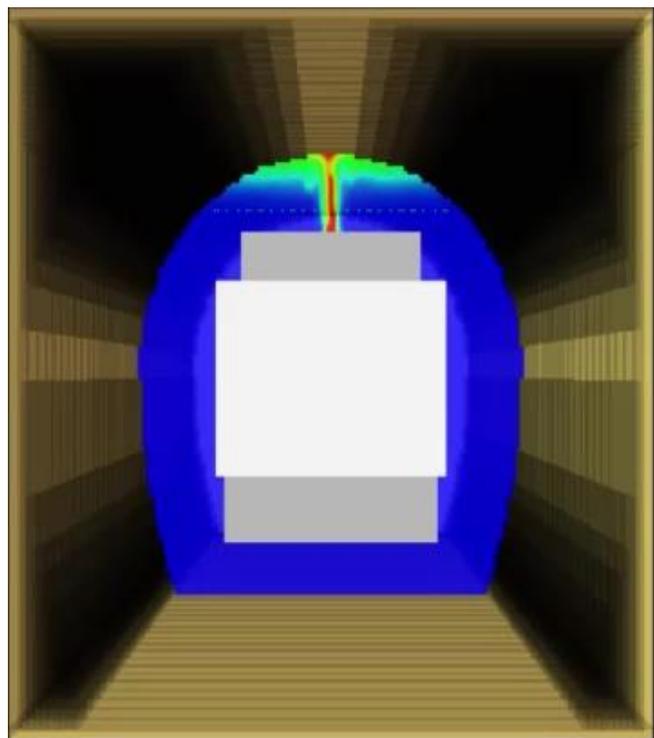
数値解析結果（漏洩点の高さの影響）

トンネル横断面水素濃度分布 ($y_L = 0.00\text{m}$)

屋根上機器高さ $z_L = 0.60\text{m}$

0.45m

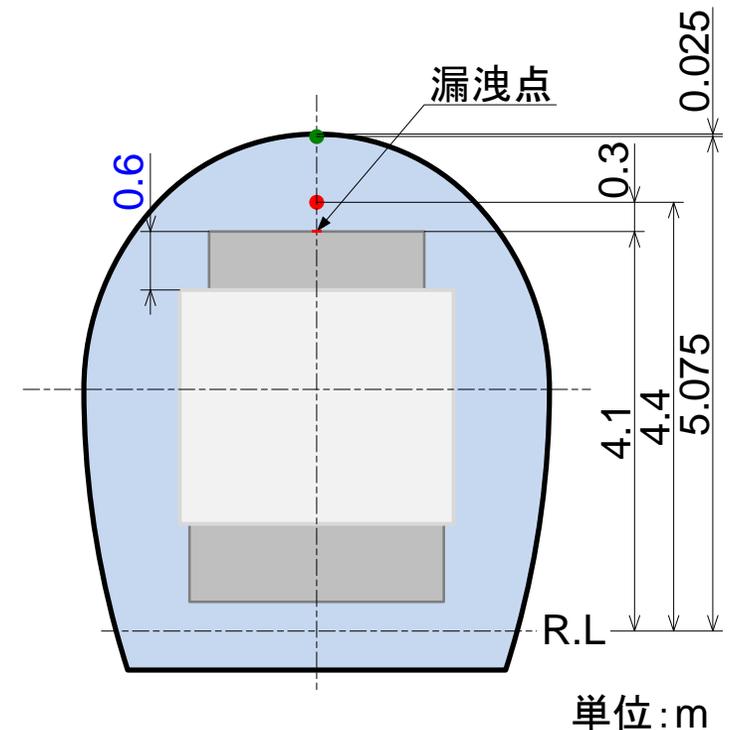
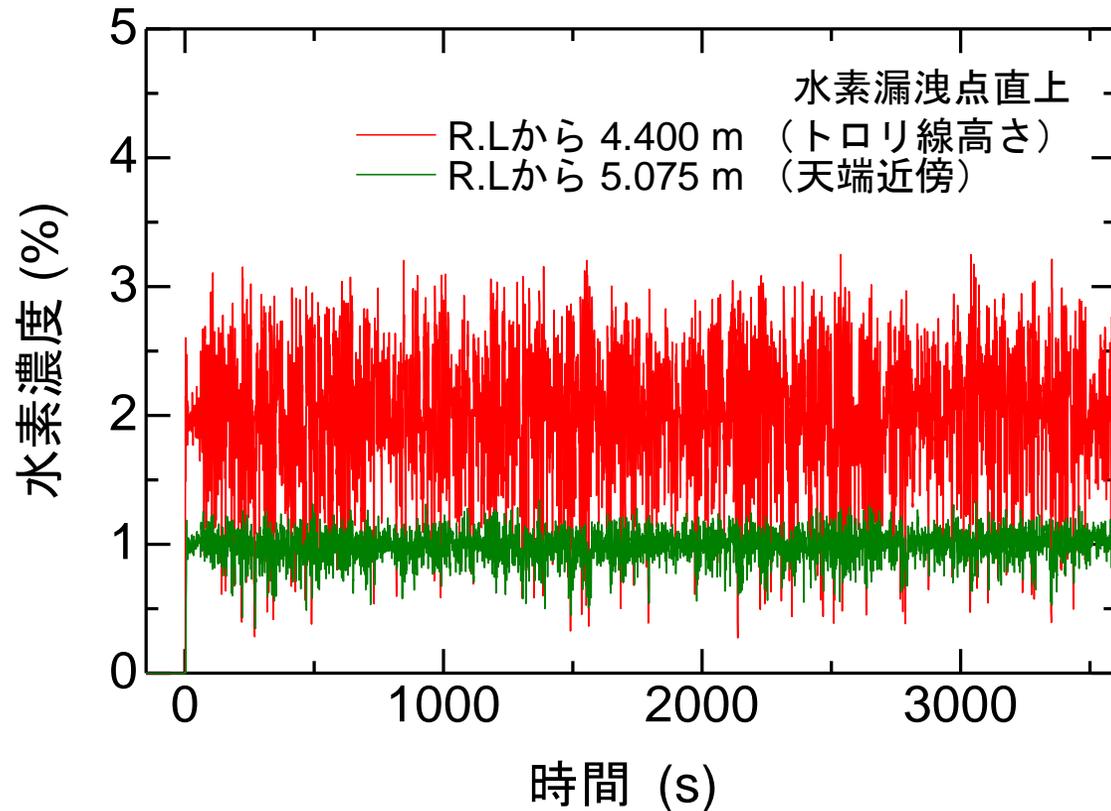
0.10m



漏洩後 3600 s

数値解析結果

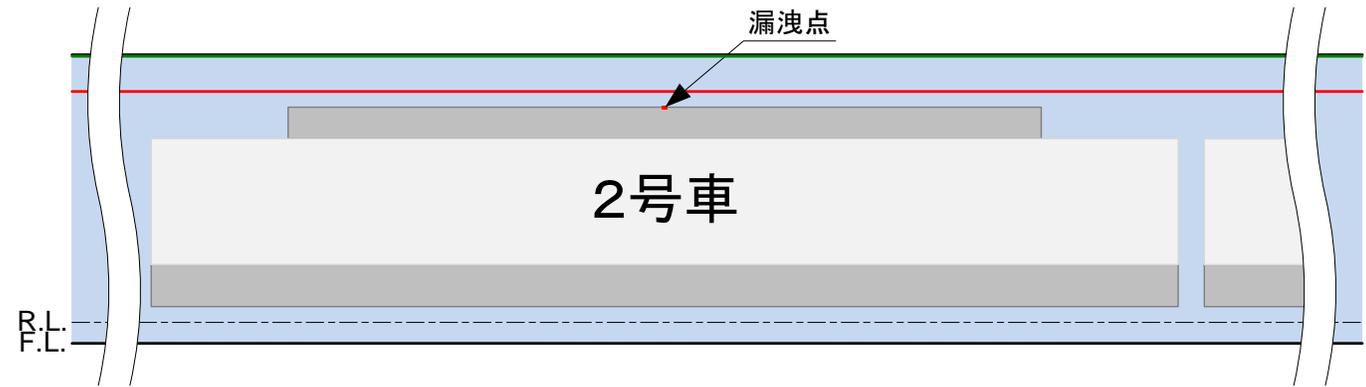
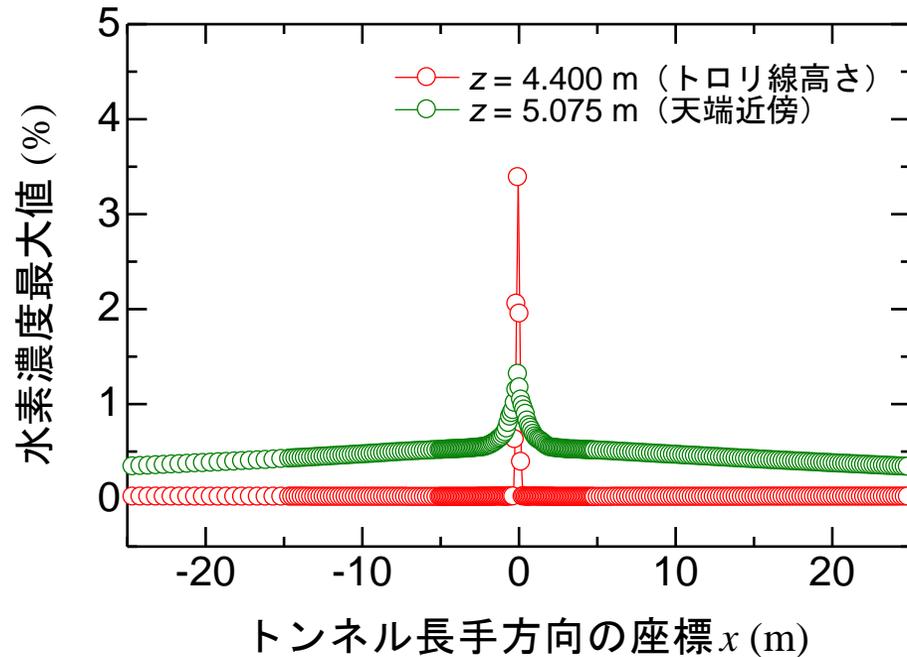
水素濃度の時間変化(水素漏洩点直上)、 $y_L = 0.00\text{m}$ 、 $z_L = 0.60\text{m}$



- 漏洩時間 3600 s の間の最大値で、水素濃度を評価

数値解析結果

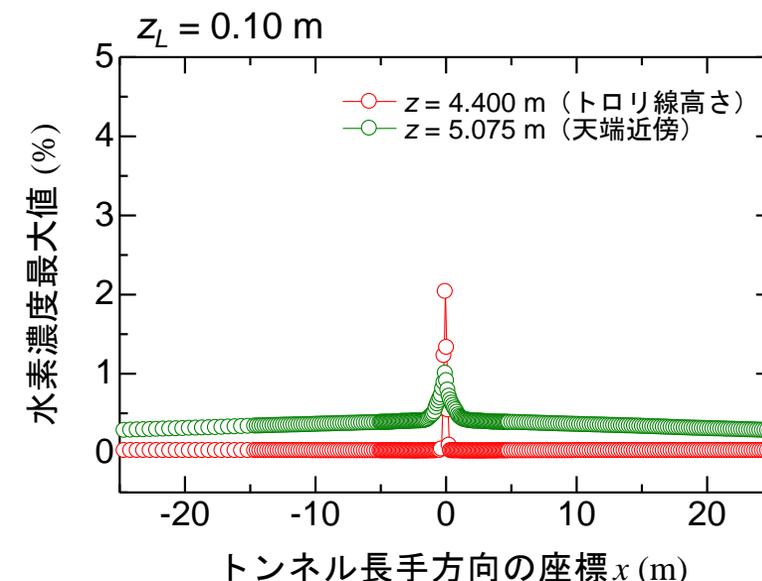
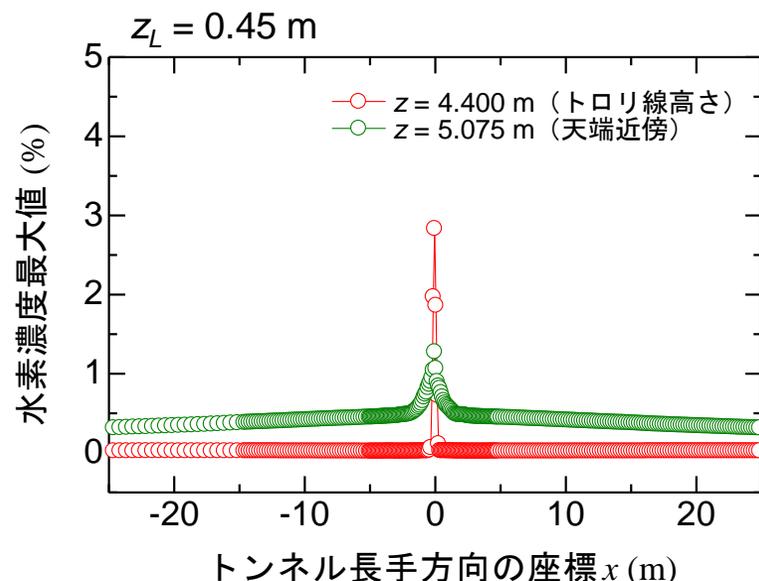
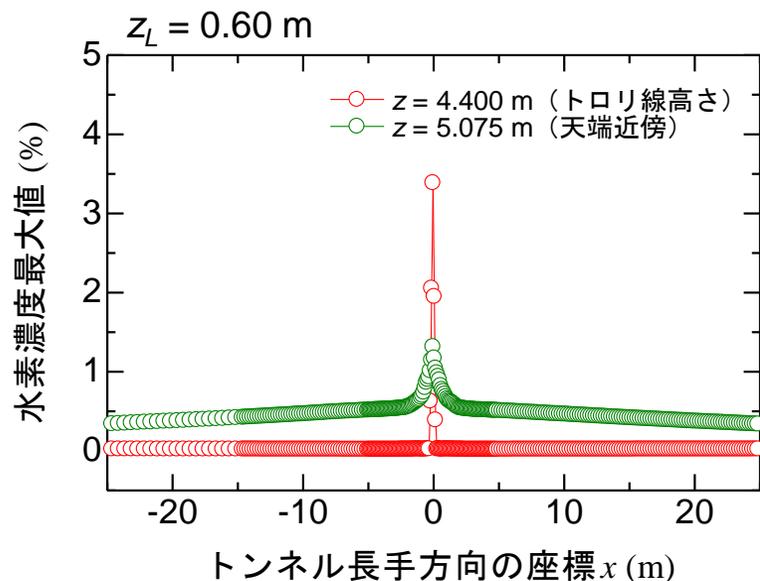
水素濃度の分布(トンネル中心軸縦断面)、 $y_L = 0.00\text{m}$ 、 $z_L = 0.60\text{m}$



- 漏洩点直上の水素濃度が高い
- トロリ線高さでは、漏洩点からレール方向に離れると水素濃度は急激に低下
- レール方向にある程度離れると、天端近傍の水素濃度はトロリ線高さよりも高い

数値解析結果（漏洩点の高さの影響）

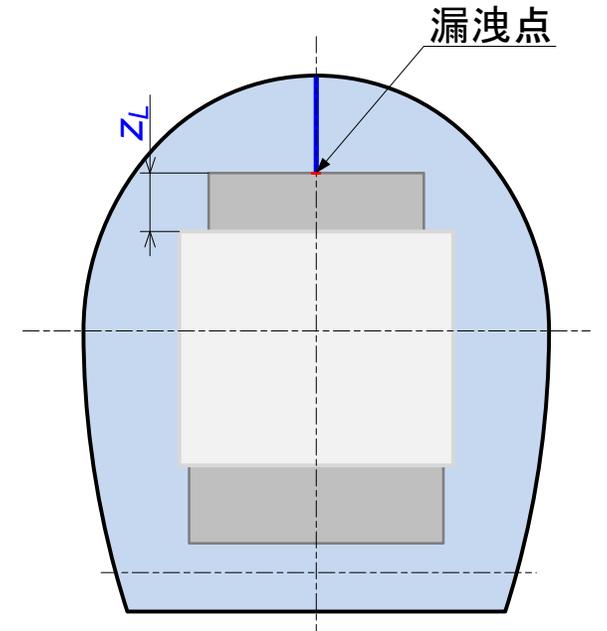
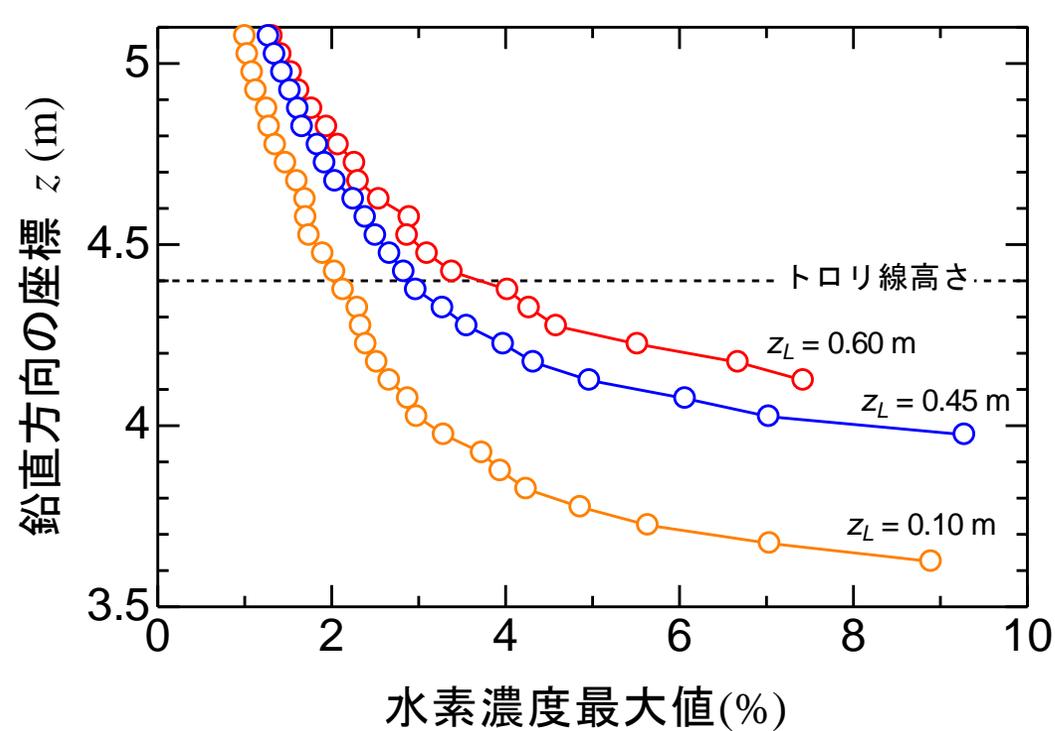
トンネル長手方向の水素濃度の分布（トンネル中心軸縦断面）、 $y_L = 0.00\text{m}$



- 屋根上機器が低くなり、トロリ線高さの評価点では、漏洩点から離れることにより水素濃度は低下
- 天端近傍の水素濃度は、屋根上機器高さによる変化は小さい

数値解析結果（漏洩点の高さの影響）

鉛直方向の水素濃度の分布（水素漏洩点直上、 $y_L = 0.00\text{m}$ ）

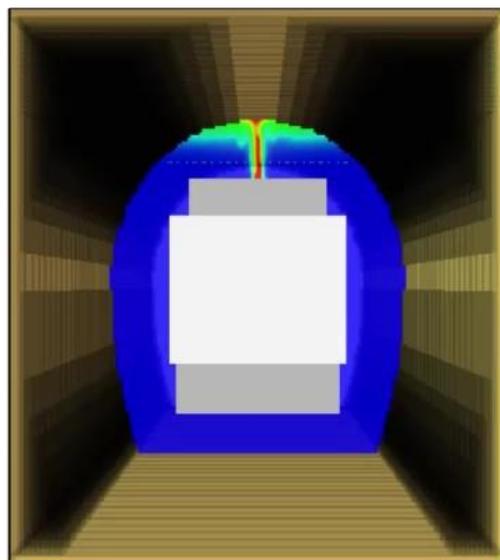


- 漏洩点から離れると水素濃度は低下
- 天端近傍の水素濃度は、屋根上機器高さによる変化は小さい

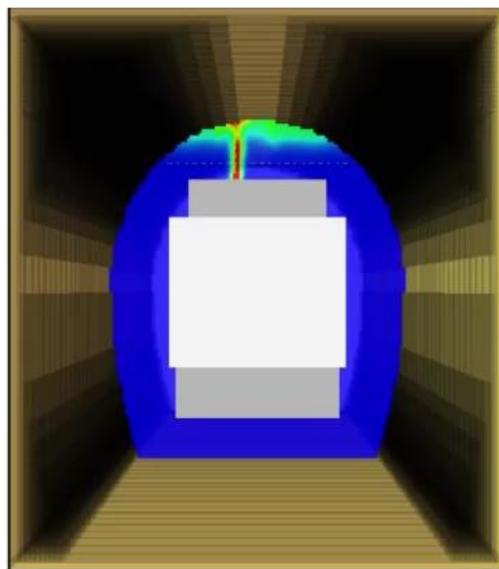
数値解析結果（漏洩点の偏心の影響）

トンネル横断面水素濃度分布（ $z_L = 0.60\text{m}$ ）

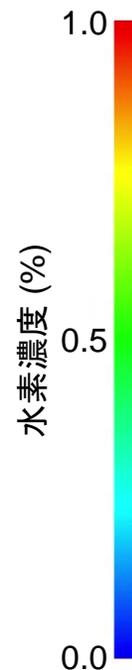
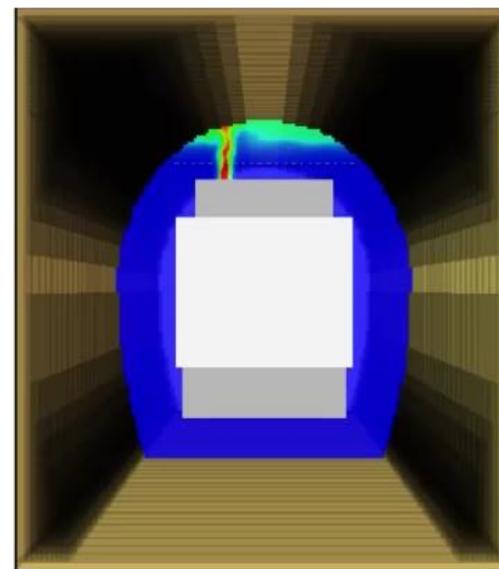
偏心 $y_L = 0.00\text{m}$



0.35m



0.65m



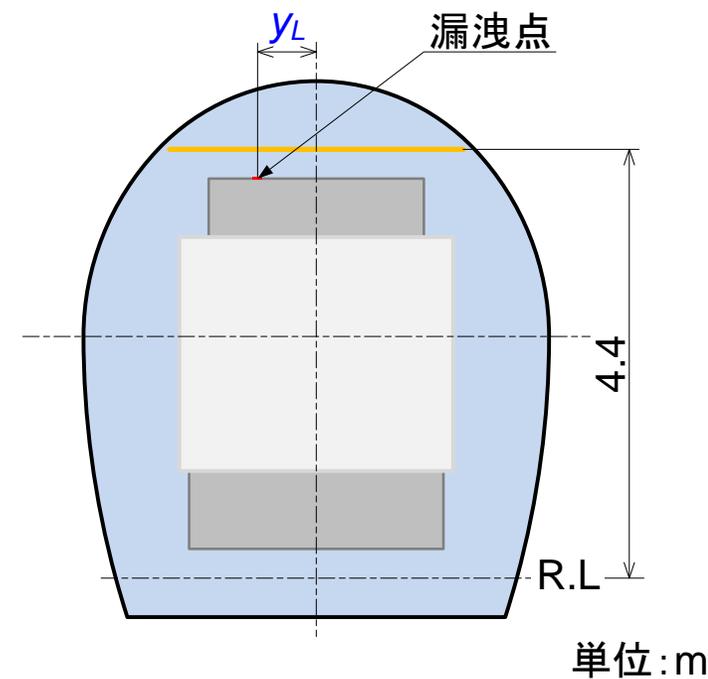
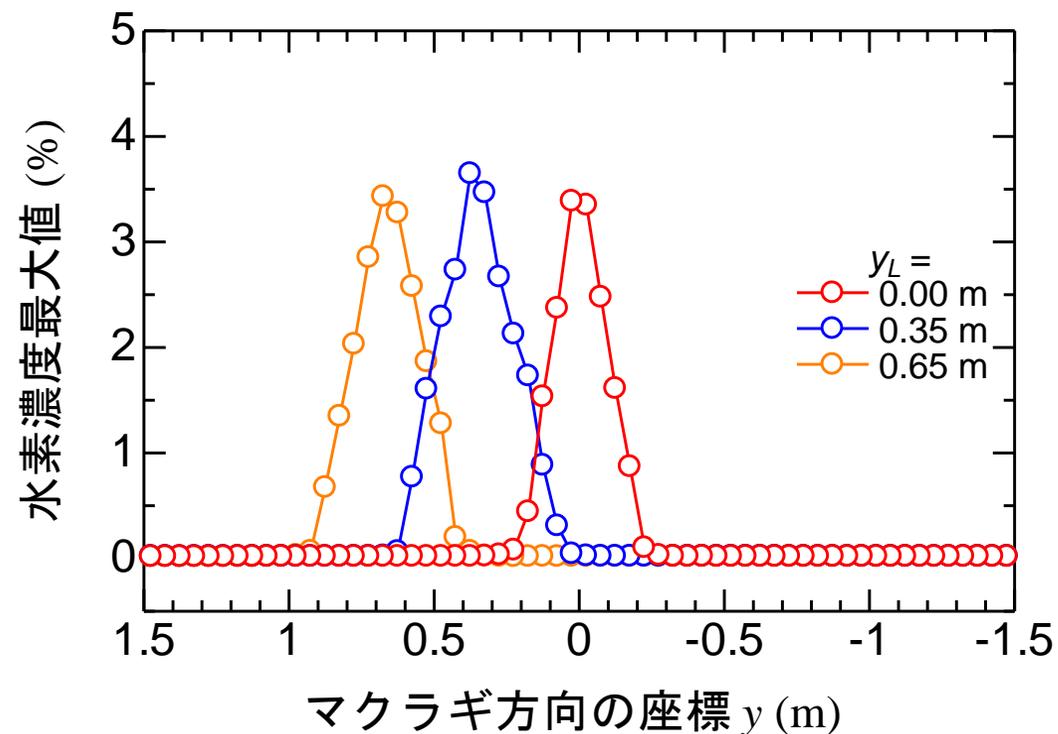
漏洩後 3600 s

水素は、

- 漏洩点からトンネルのアーチへ向かって鉛直に上昇
- 水素はアーチに沿って天端へ向かって流れる
- 天端に沿って両坑口へ向かって流れる

数値解析結果(漏洩点の偏心の影響)

水素濃度の分布(水素漏洩点横断面)



- 漏洩点の偏心にしたがって、最大となる位置も偏心
- 山型の分布、漏洩点からマクラギ方向に離れると水素濃度は低下

まとめ

- トンネル内水素流動の数値解析手法を構築した。
- トンネル内に静止した燃料電池鉄道車両の屋根上機器から漏洩した水素の流動特性を数値解析により調査した。
- 漏洩した水素は上昇し、トンネル天端に達した後、天端に沿って両坑口へ向かって流れる。
- 評価点(トンネル中心軸上のトロリ線高さ、トンネル天端近傍)でのトンネル長手方向の素濃度分布は、漏洩点直上で最大となり、両坑口へ向かうに従い急激に小さくなる。
- 漏洩点から離れると、トンネル天端近傍の方が、トロリ線高さよりも水素濃度は大きくなる。

まとめ

- 屋根上機器の高さが低いほど、トロリ線高さの評価点においては、漏洩点との間隔が広くなり、水素濃度は低くなる。
- 漏洩点がマクラギ方向に偏心すると、それに従って水素濃度が最大となる位置も偏心する。

成果の活用

- 今後、得られた成果を水素燃料電池鉄道車両の安全性評価に活用していく。

参考文献

- 小川賢一, 米山崇, 須藤貴幸, 柏木隆行, 山本貴光: 燃料電池ハイブリッド試験電車の高性能化, 鉄道総研報告, Vol.34, No.5, pp.5-10, 2020
- 福田傑, 齊藤実俊: トンネル内に静止した列車の屋根上機器からの水素漏洩に関する数値解析, 日本機械学会2024年度年次大会, J011-02, 2024