

三次元空間への 水素拡散現象の数値予測

Numerical Analysis of Air-Hydrogen Mixture Flow in Rectangular
Indoor Space with Ventilators

- 高橋 佳多 (宇都宮大学大学院工学研究科)
- 杉山 均 (宇都宮大学大学院工学研究科)
- 加藤 直人 (宇都宮大学大学院工学研究科)
- 寺田 敦彦 (日本原子力研究開発機構)
- 上地 優 (日本原子力研究開発機構)
- 日野 竜太郎 (日本原子力研究開発機構)

背景

水素はクリーンなエネルギーとして注目されている。

しかし、

- 着火エネルギーが極めて小さい
- 可燃範囲が広く、圧力上昇も大きい
- 空気中での拡散係数が大きい

などの性質を有している。

従って、空気中に水素が拡散される場合、その濃度分布を正確に知ることは水素を安全に管理する上で工業上重要な課題であり、また水素の拡散メカニズムを解明することは学問的見地から重要である。

目的

本研究では、井上らにより報告された

室内における 漏洩水素の拡散に関する実験的研究

井上雅弘, 月川久義, 金山寛, 松浦一雄,
水素エネルギーシステム, Vol.33, No.4, pp.32-43(2008)

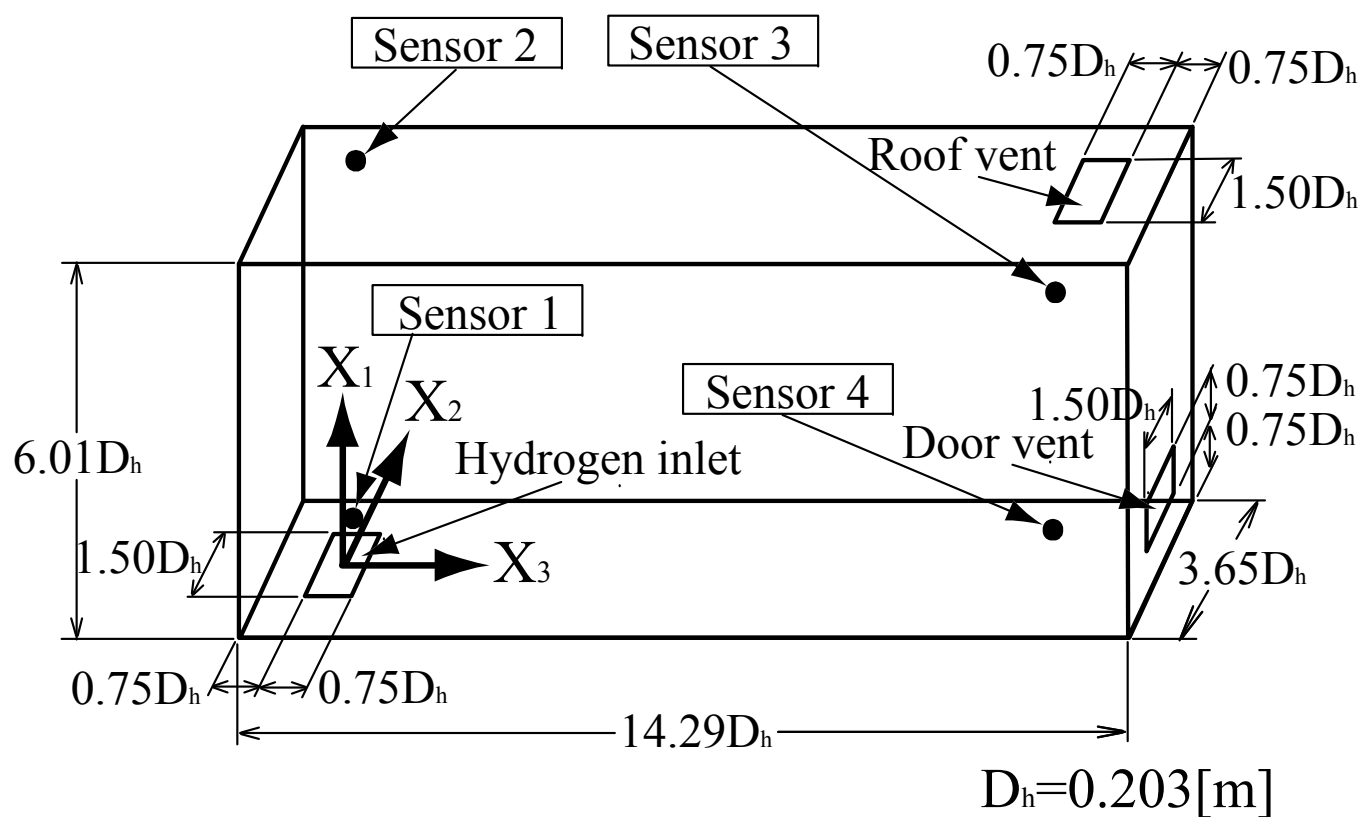
を対象に数値解析を行い実験結果と比較することで解析手法の妥当性を示し、水素拡散現象のメカニズムを明らかにすることを目的とする。

水素の流動を把握すると・・・

- 水素センサーをどこに設置するのが適切か
- 漏洩した水素が可燃性範囲に入る領域はどこか
- 水素が漏洩してから、対応するのにどの程度の時間的余裕があるか

解析対象実験

- Hallway model の概略図, 座標系



支配方程式

- 運動方程式

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial (U_i U_k)}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right) + \left(\frac{\rho - \rho_\infty}{\rho} \right) g$$

- 水素輸送方程式

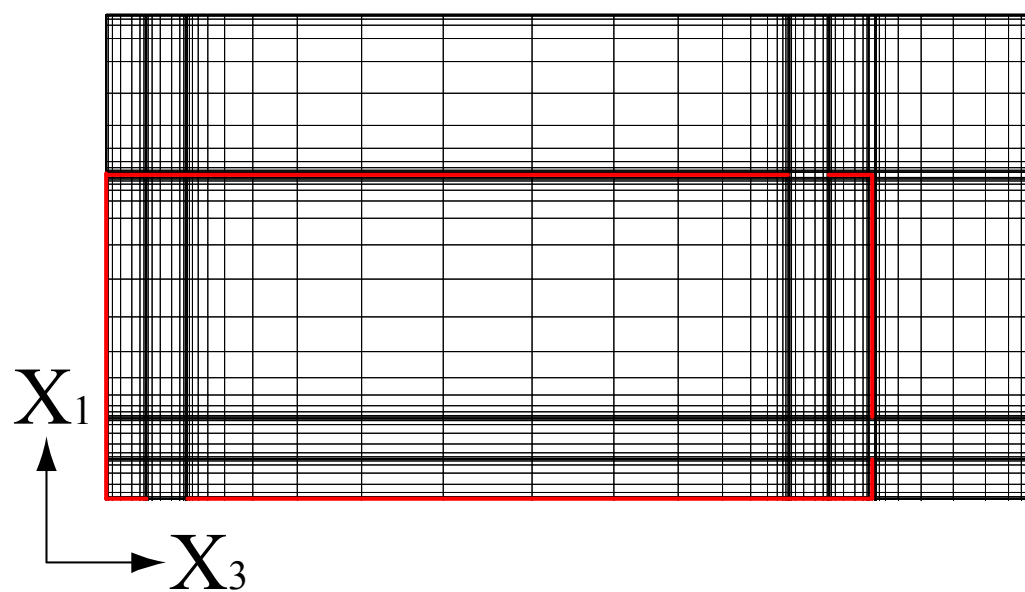
$$\frac{\partial C_{H_2}}{\partial t} + \frac{\partial (U_k C_{H_2})}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(D \frac{\partial C_{H_2}}{\partial x_k} \right)$$

混合気体の密度 ρ と 動粘性係数 ν については

$$\frac{\rho_{H_2}}{\rho} + \frac{\rho_A}{\rho} = C_{H_2} + (1 - C_{H_2}) = 1, \quad \nu = \nu_{H_2} C_{H_2} + \nu_A (1 - C_{H_2})$$

で求めた。添え字 H_2 は水素, A は空気を表している。計算では混合気体の密度を1と無次元化した値を用いている。

計算格子

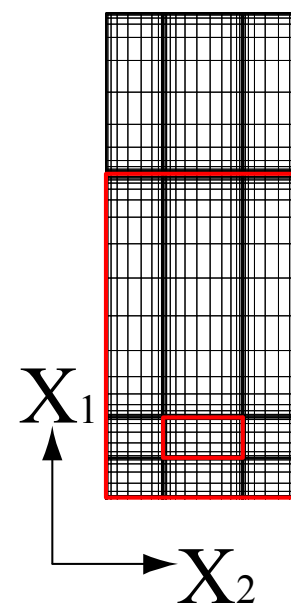


格子点数

鉛直方向 X_1 :53
奥行き方向 X_2 :38
長辺方向 X_3 :75

総格子点数

151,050

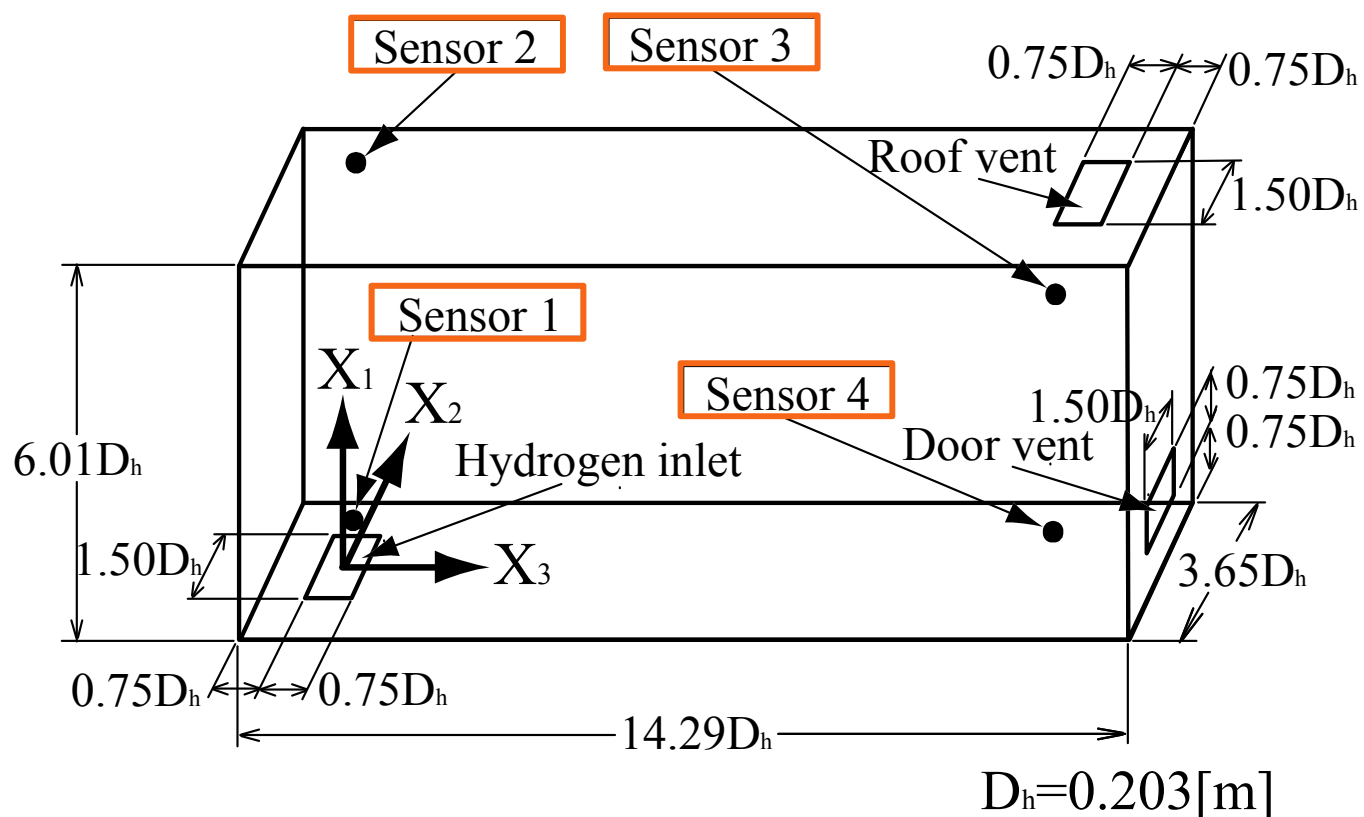


$$Fr = \frac{U_{in}^2}{gD_h}$$

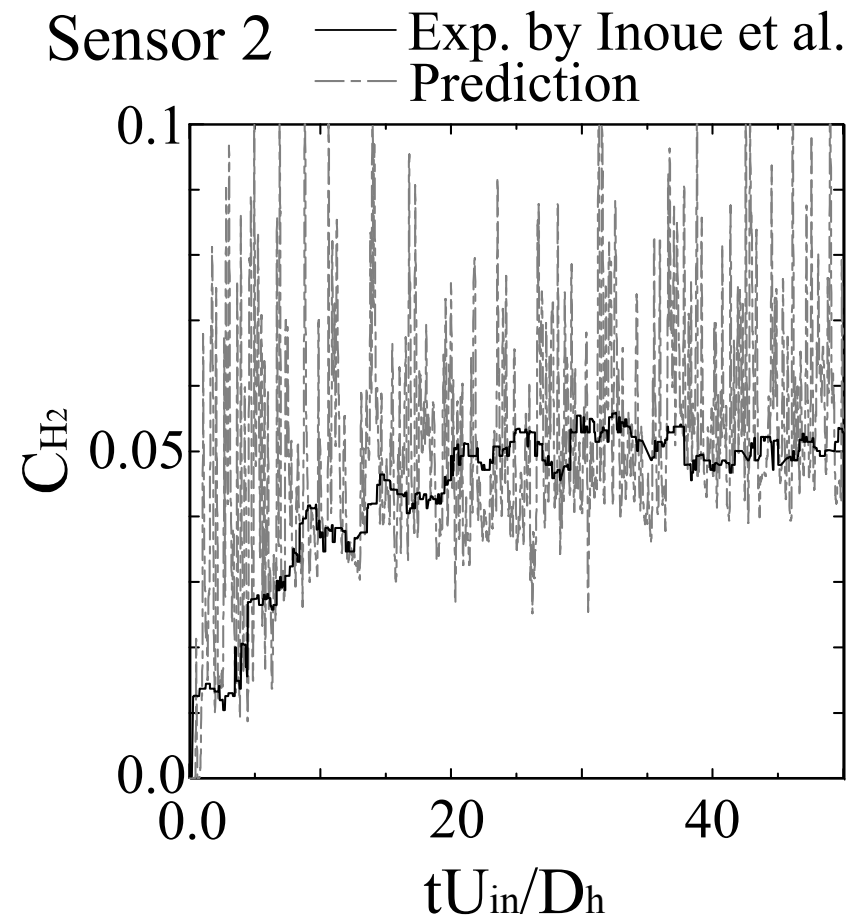
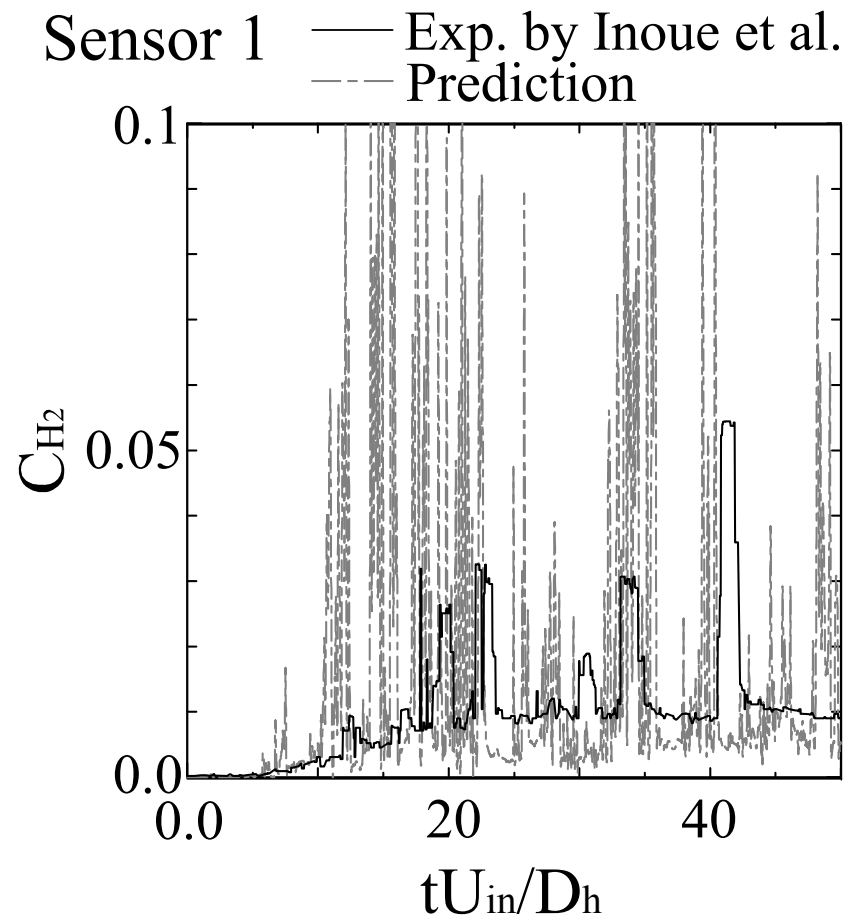
$$= 1.0 \times 10^{-3}, 2.0 \times 10^{-3}$$

水素濃度分布比較

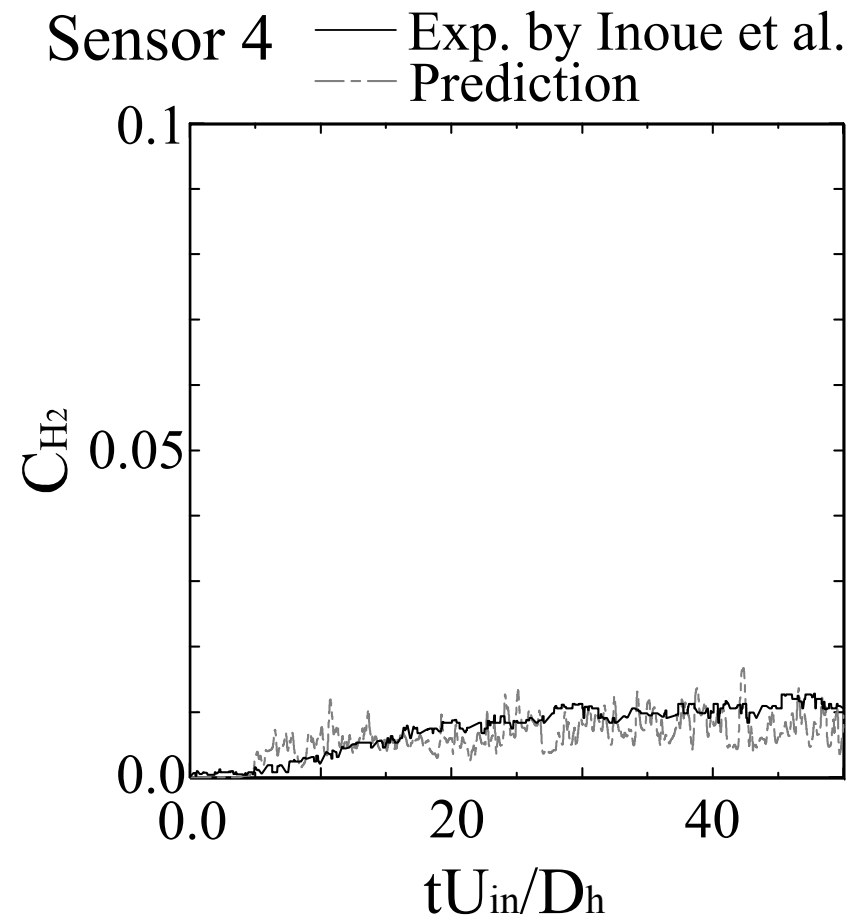
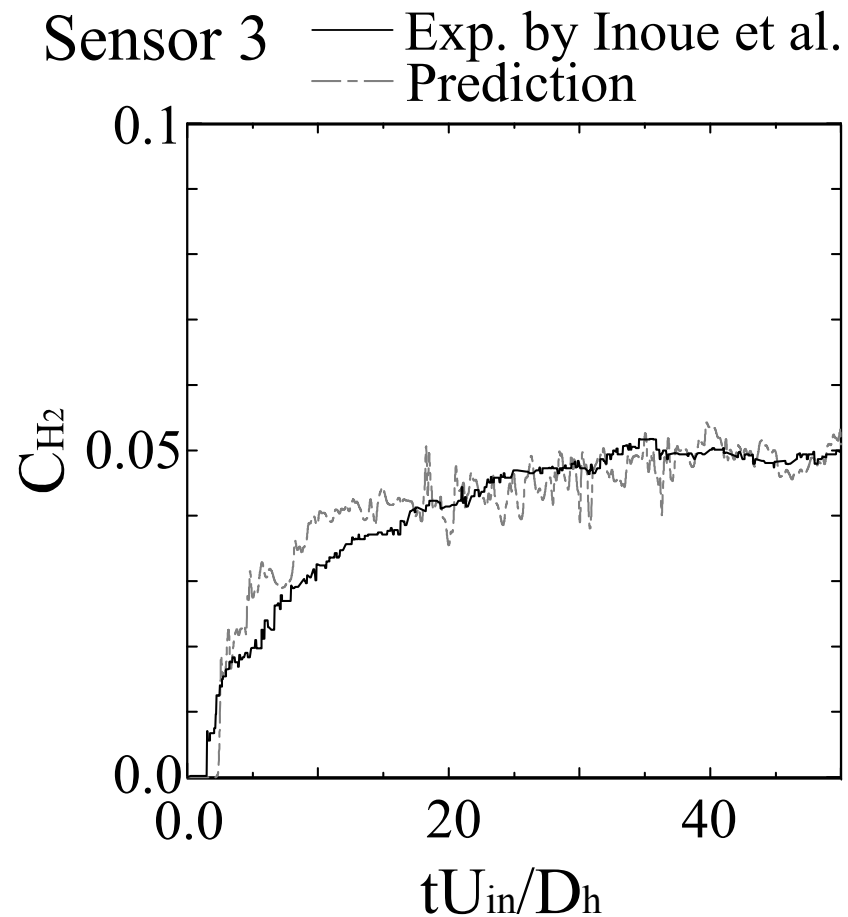
- Hallway model の概略図, 座標系



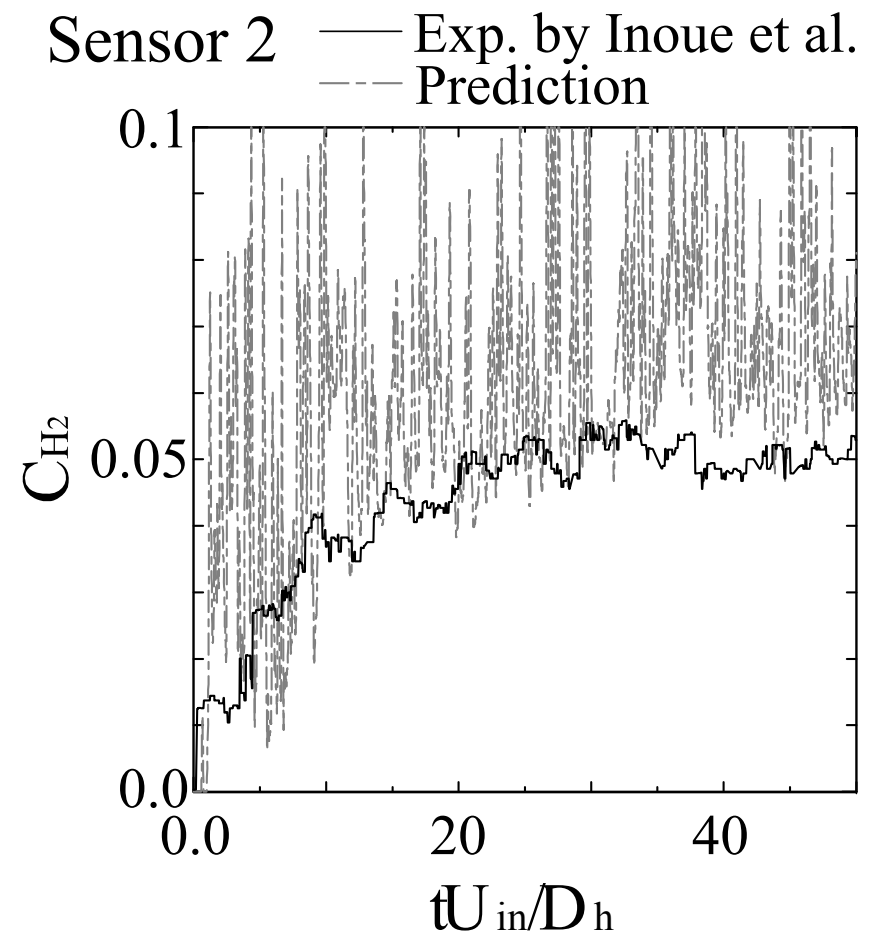
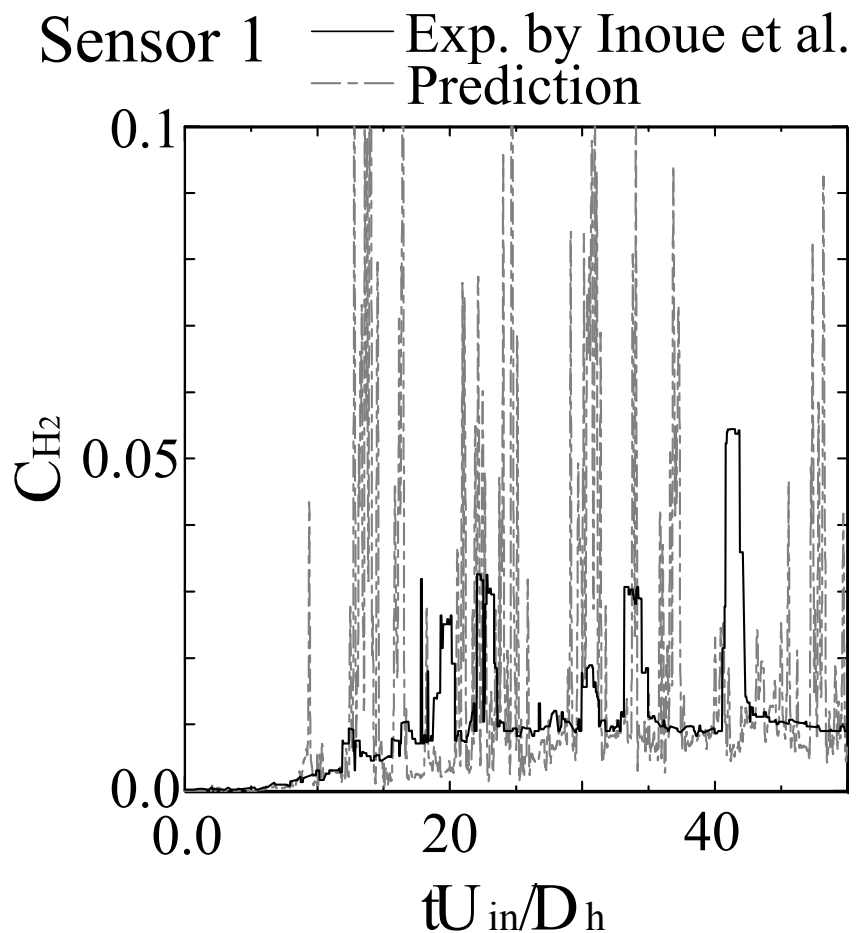
水素濃度分布比較 ($Fr = 1.0 \times 10^{-3}$)



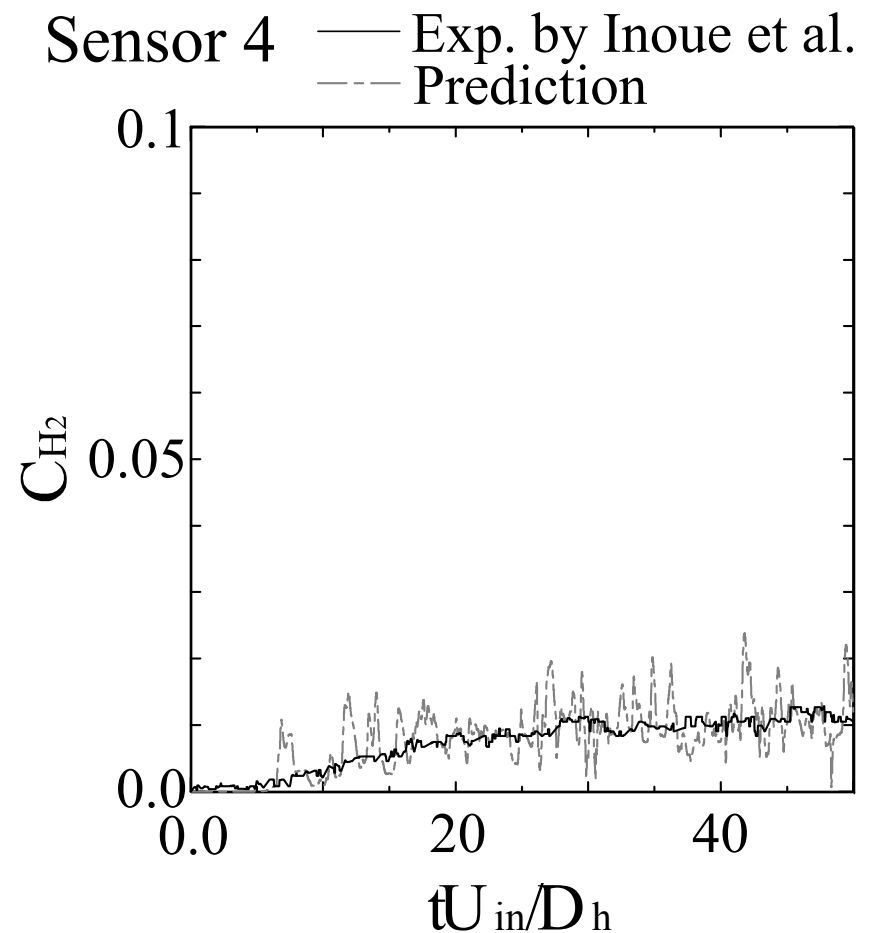
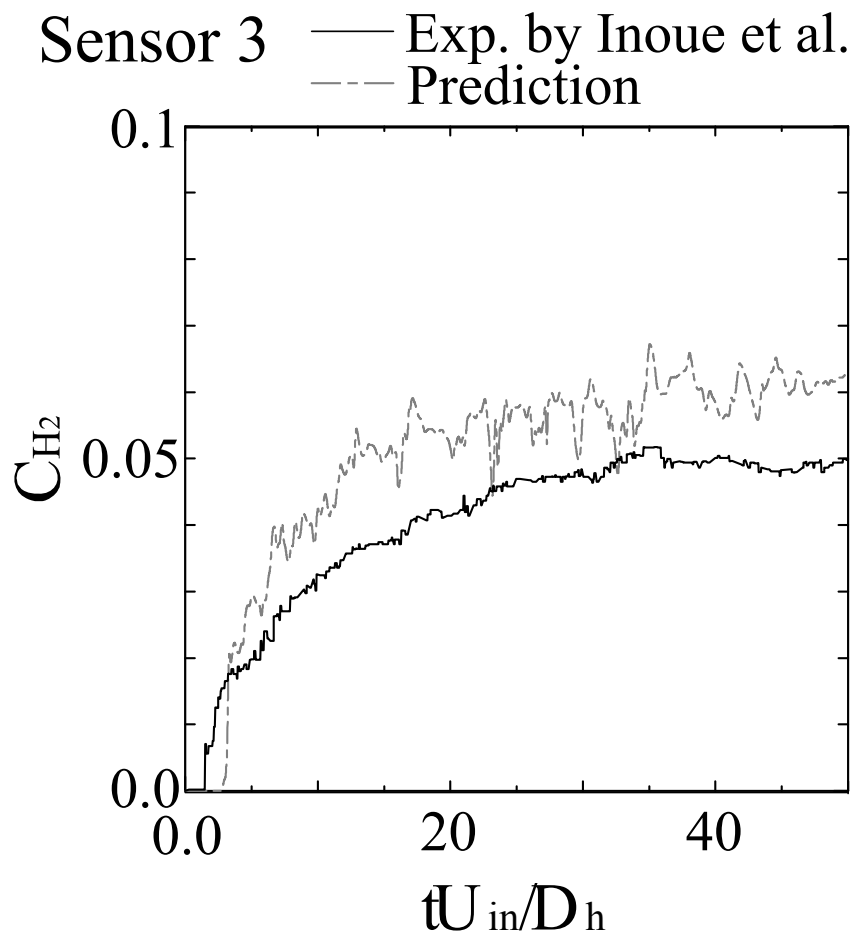
水素濃度分布比較 ($Fr = 1.0 \times 10^{-3}$)



水素濃度分布比較 ($Fr = 2.0 \times 10^{-3}$)

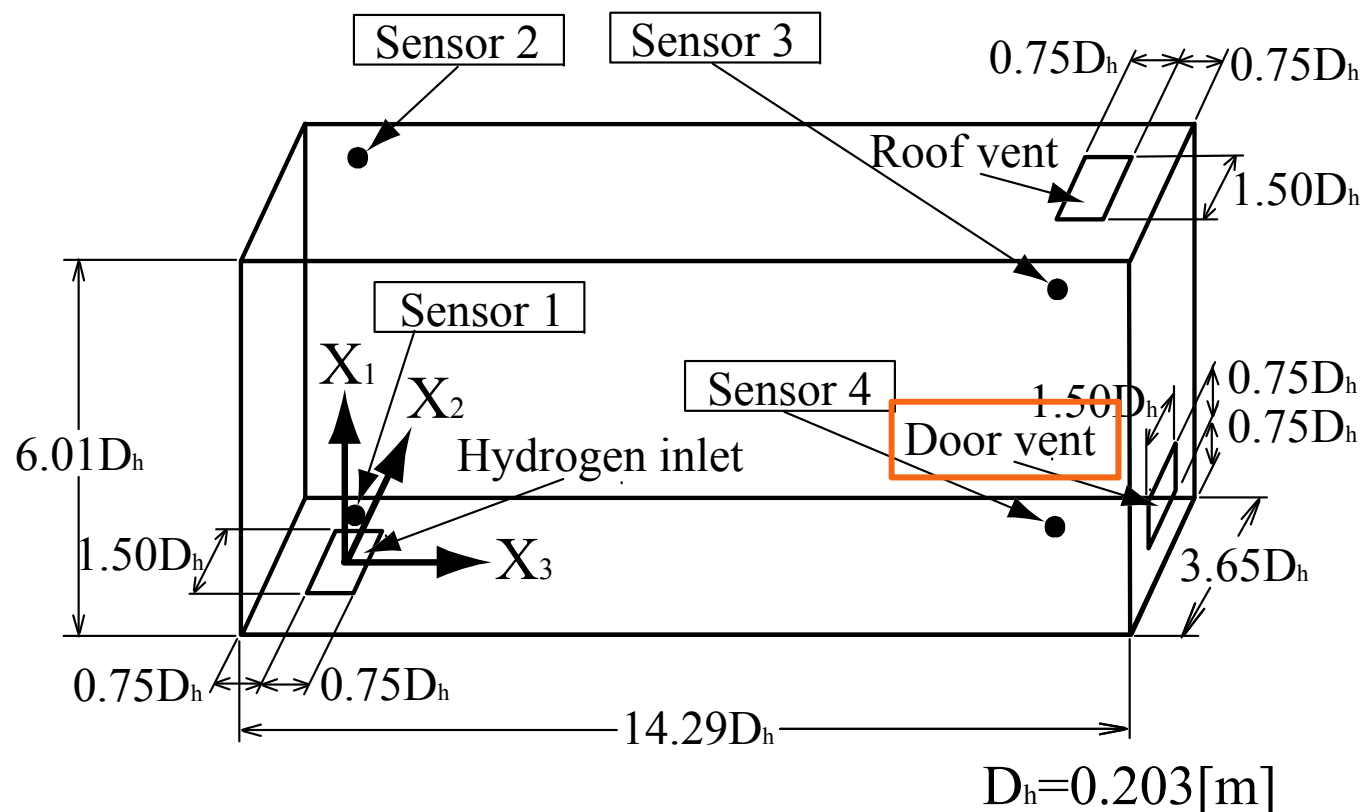


水素濃度分布比較 ($Fr = 2.0 \times 10^{-3}$)

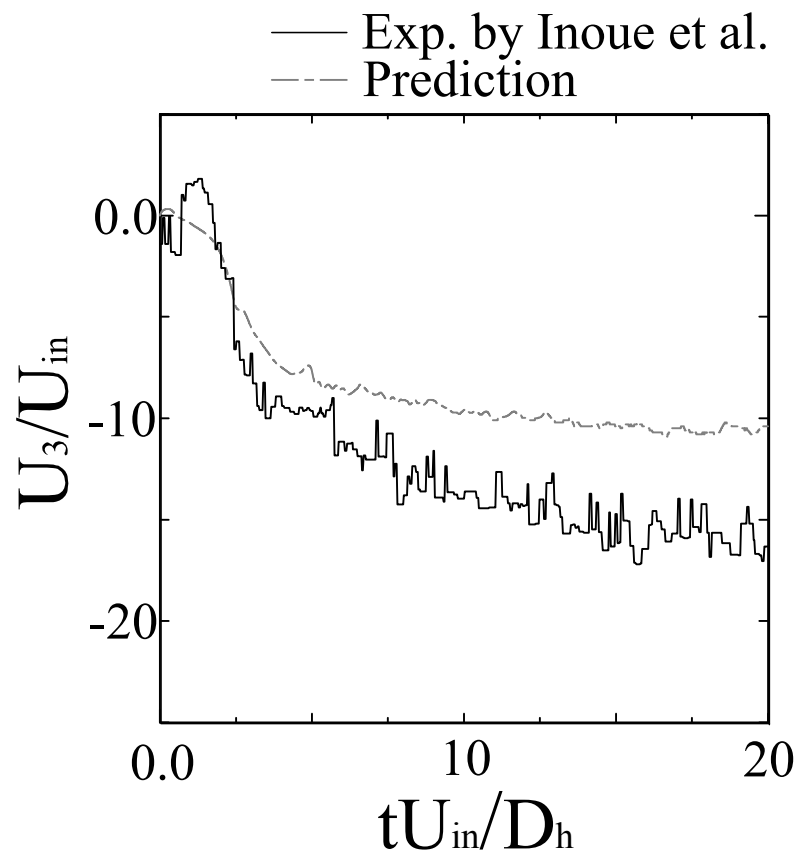


Door vent 中央の流入速度比較

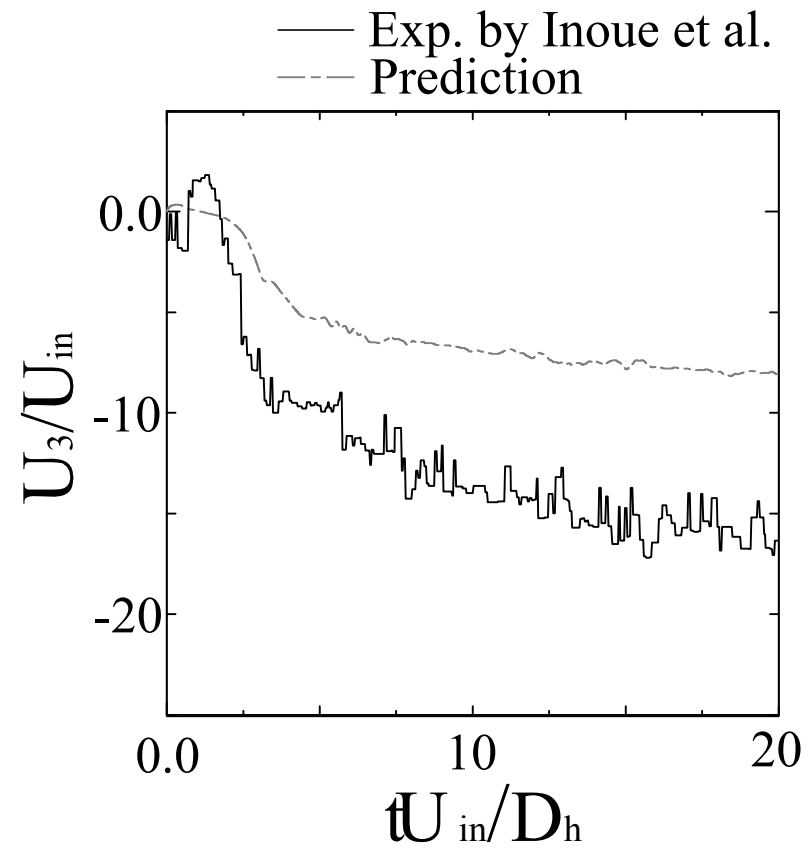
- Hallway model の概略図, 座標系



Door vent 中央の流入速度比較



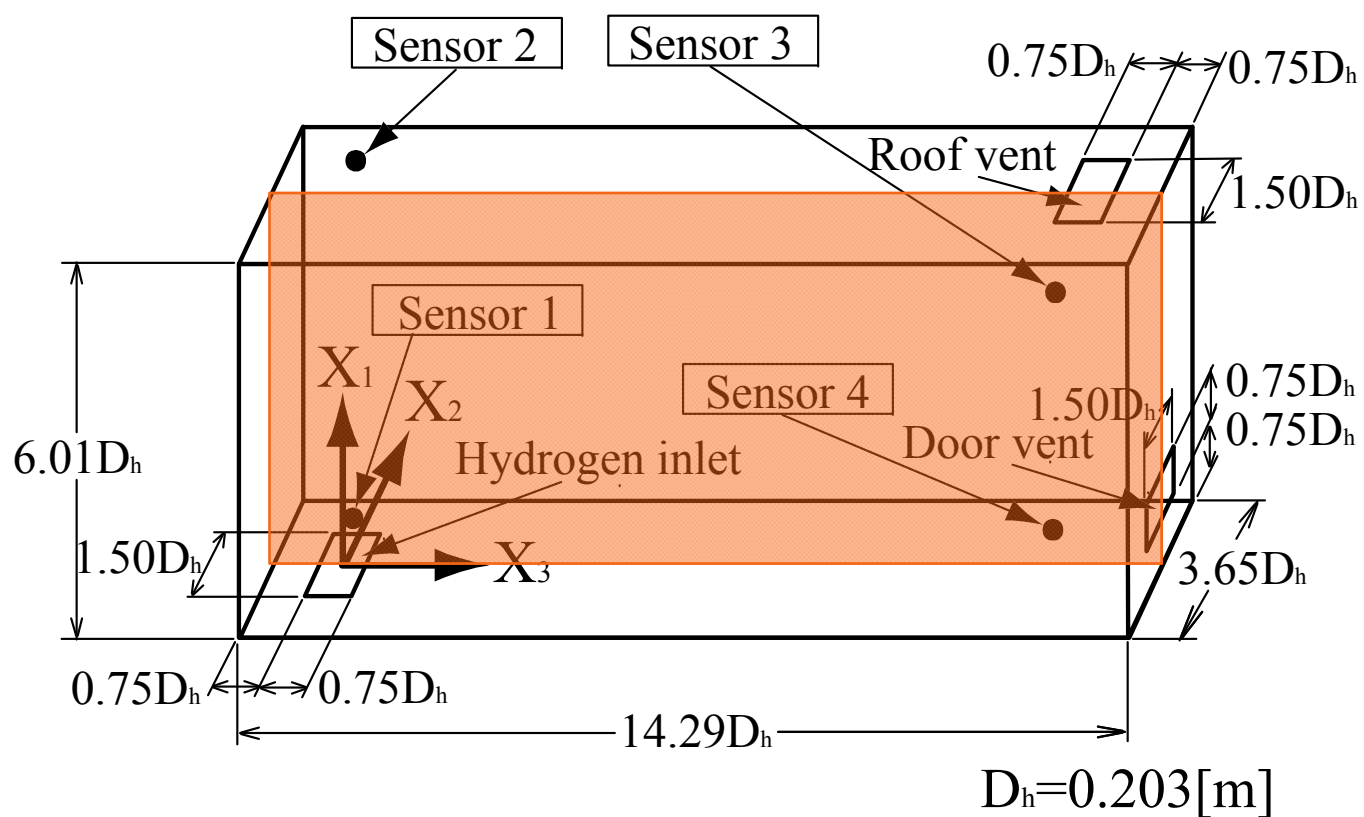
$$Fr = 1.0 \times 10^{-3}$$



$$Fr = 2.0 \times 10^{-3}$$

計算結果

- Hallway model の概略図, 座標系



計算結果(水素濃度分布)

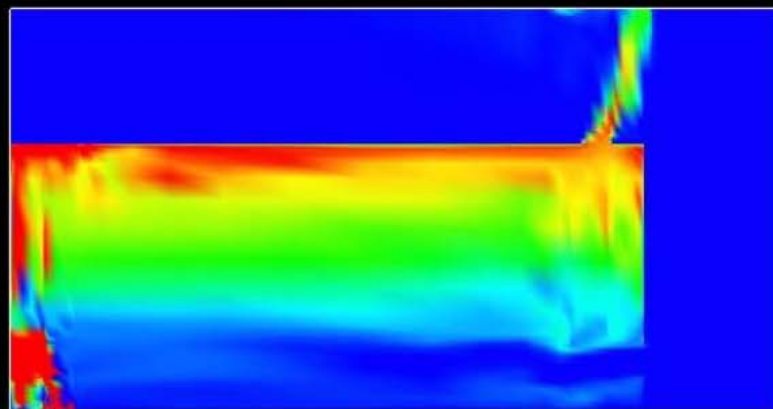


$$Fr = 1.0 \times 10^{-3}$$

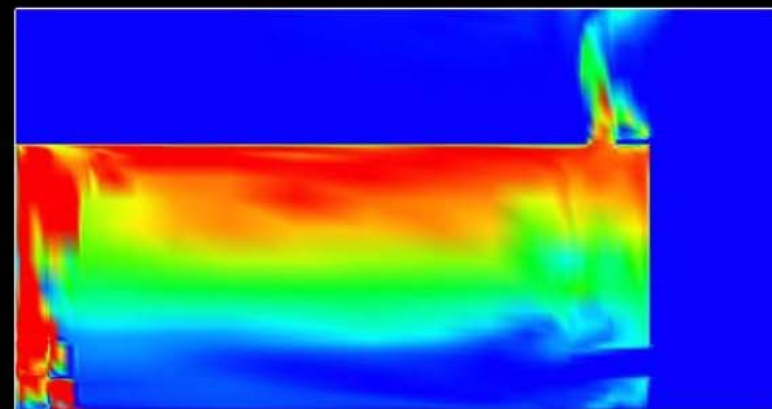


$$Fr = 2.0 \times 10^{-3}$$

計算結果(水素濃度分布)

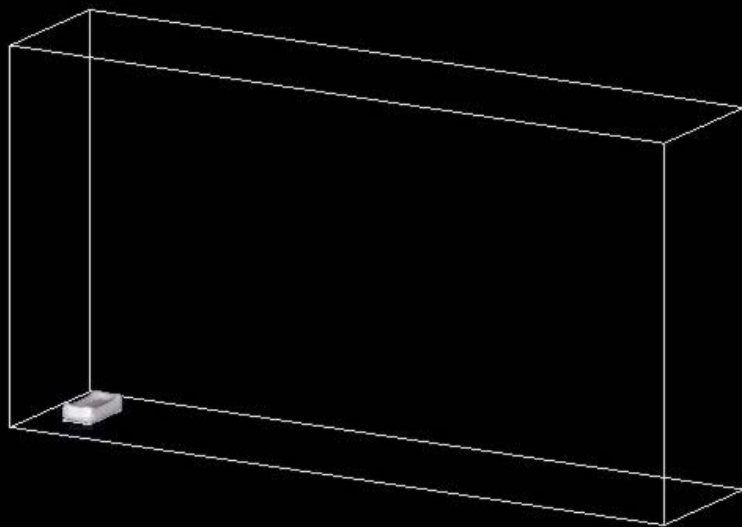


$$Fr = 1.0 \times 10^{-3}$$

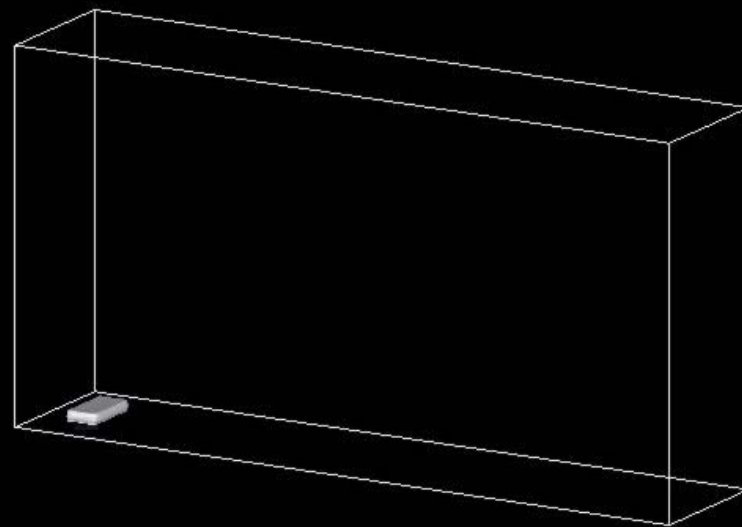


$$Fr = 2.0 \times 10^{-3}$$

計算結果(4%水素濃度等値面)

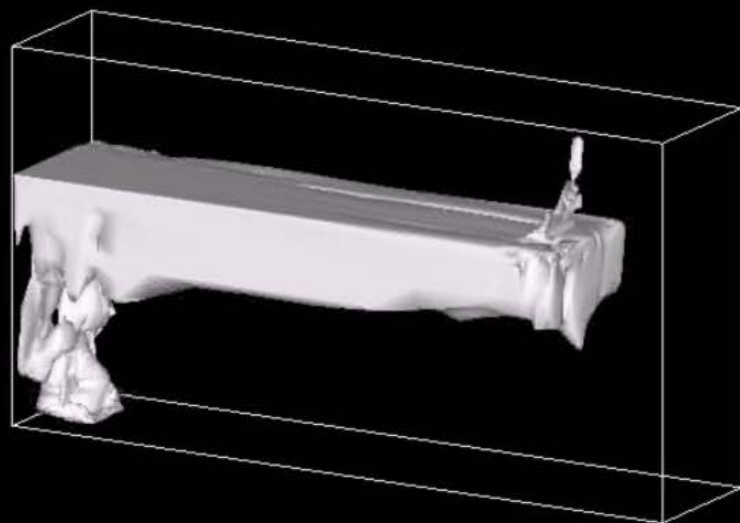


$$Fr = 1.0 \times 10^{-3}$$

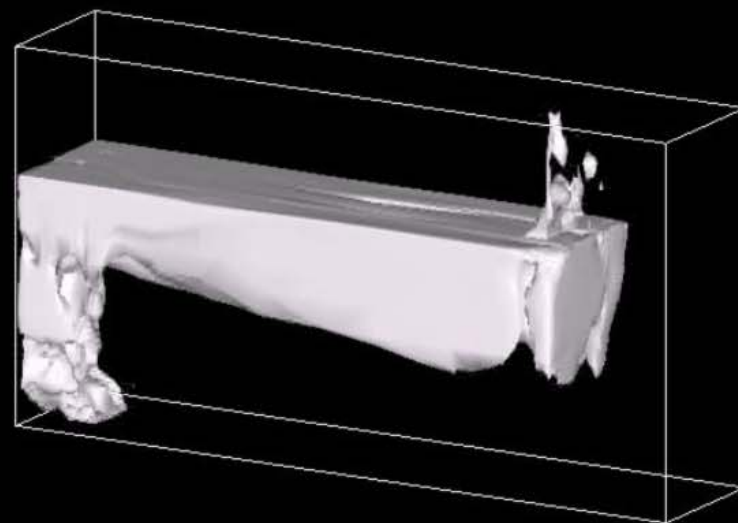


$$Fr = 2.0 \times 10^{-3}$$

計算結果(4%水素濃度等値面)

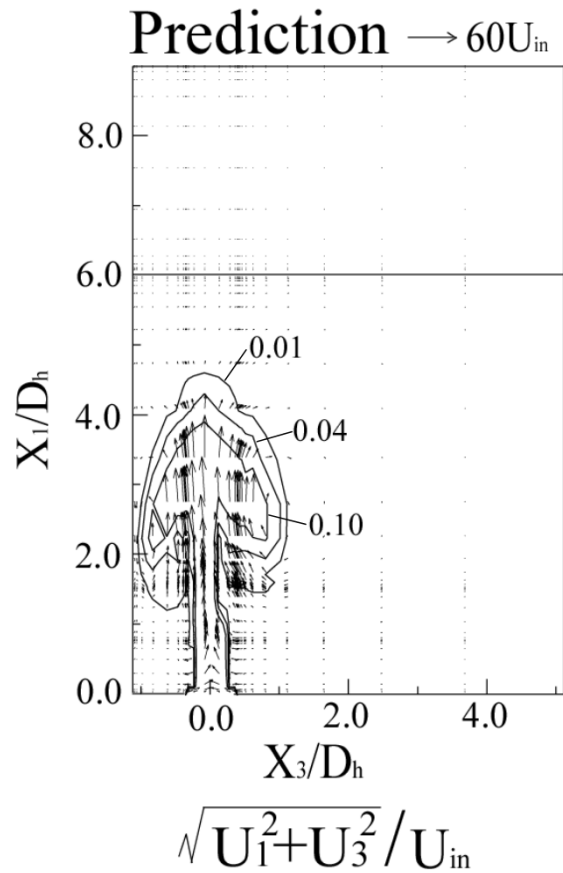


$$Fr = 1.0 \times 10^{-3}$$

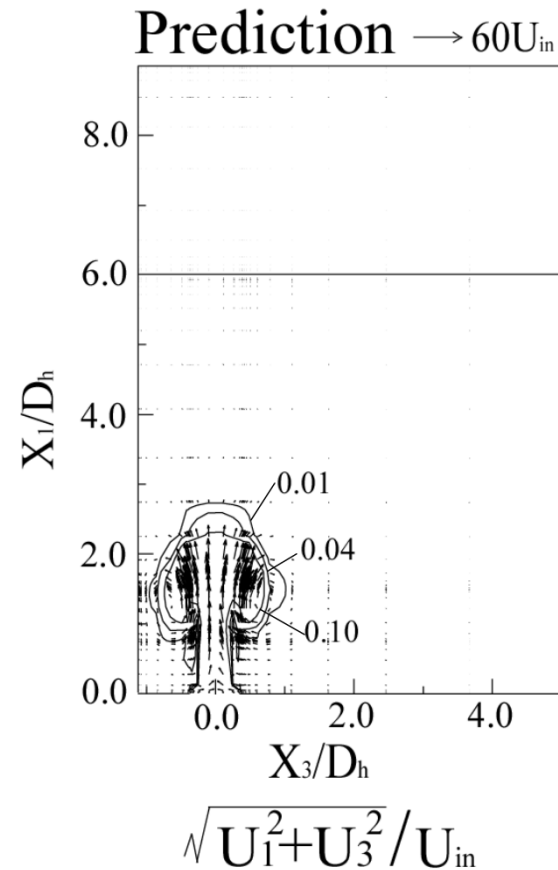


$$Fr = 2.0 \times 10^{-3}$$

計算結果 (速度ベクトル, 無次元時間0.4)

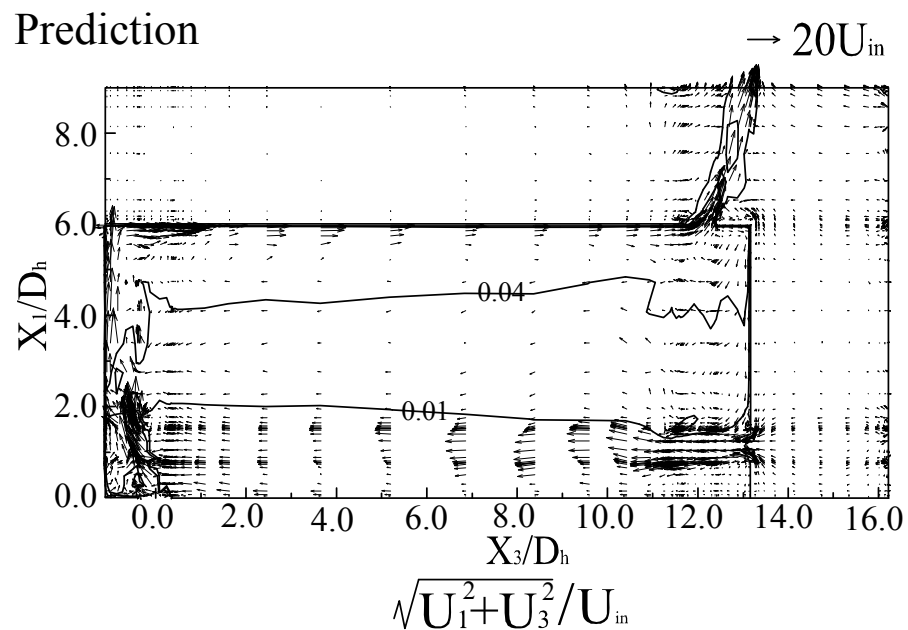


$$Fr = 1.0 \times 10^{-3}$$

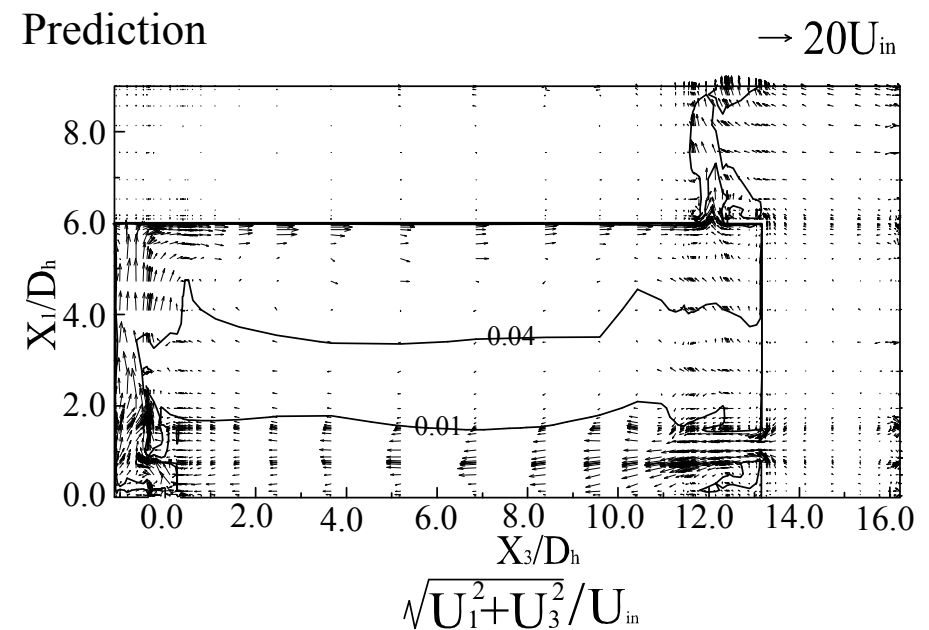


$$Fr = 2.0 \times 10^{-3}$$

計算結果 (速度ベクトル, 無次元時間20)

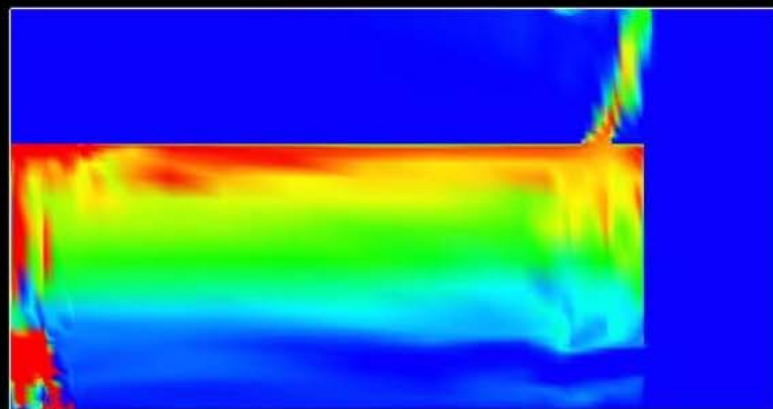


$$Fr = 1.0 \times 10^{-3}$$

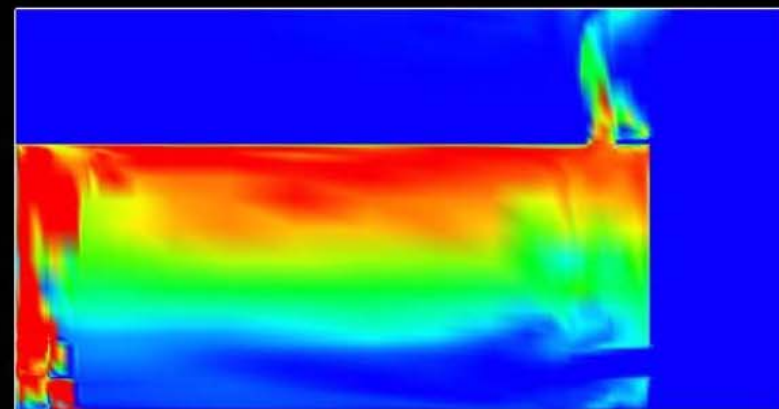


$$Fr = 2.0 \times 10^{-3}$$

計算結果(水素濃度分布)



$$Fr = 1.0 \times 10^{-3}$$



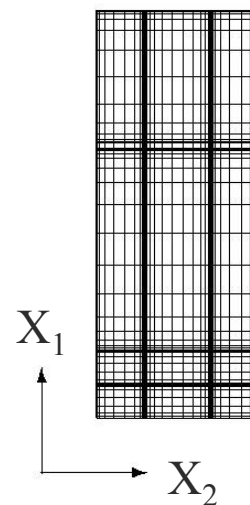
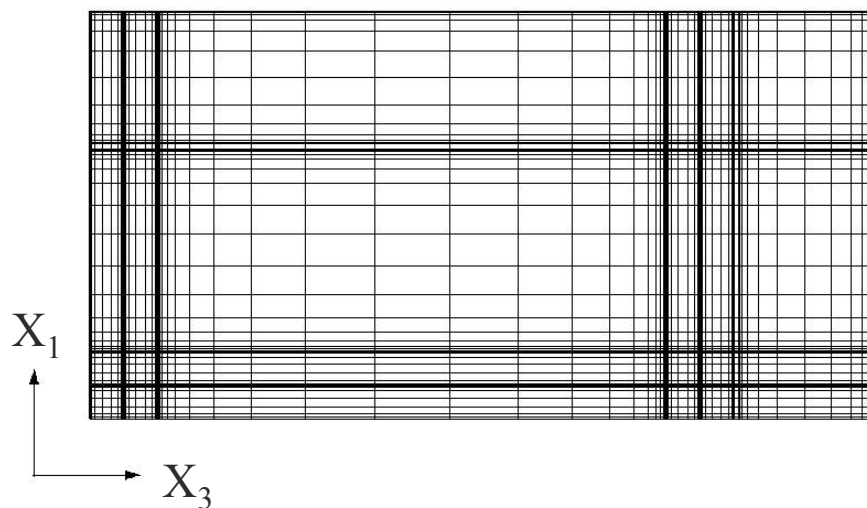
$$Fr = 2.0 \times 10^{-3}$$

結論

1. Fr 数 1.0×10^{-3} の条件において、計算は水素濃度の計測結果を定量的に再現した。ただし、Hydrogen inlet近傍、ならびに、その上部に位置する天井部近傍において、計算結果は大きな濃度変動を伴う。
2. 計測結果は、Door ventから高速の混合気体の流入を報告しているが計算も定量的に差はあるものの、この特徴的現象を再現した。
3. Door ventからの混合気体の流入は、 Fr 数に関係し Fr 数を増加すると減衰する。 Fr 数の増加は、浮力の抑制を意味することから、Door ventからの混合気体の流入は浮力による効果と推察される。
4. 計測から報告された100%濃度で放出された水素が1.01m上昇しただけで5%の低濃度まで急激に拡散する現象は、浮力により加速された高速の流れに起因する。

なお、本研究は経済産業省資源エネルギー庁からの受託事業平成26年度「発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業（水素安全対策高度化）」の成果である。

計算格子



$$Fr = \frac{U_{in}^2}{gD_h}$$

$$= 1.0 \times 10^{-3}, 2.0 \times 10^{-3}$$

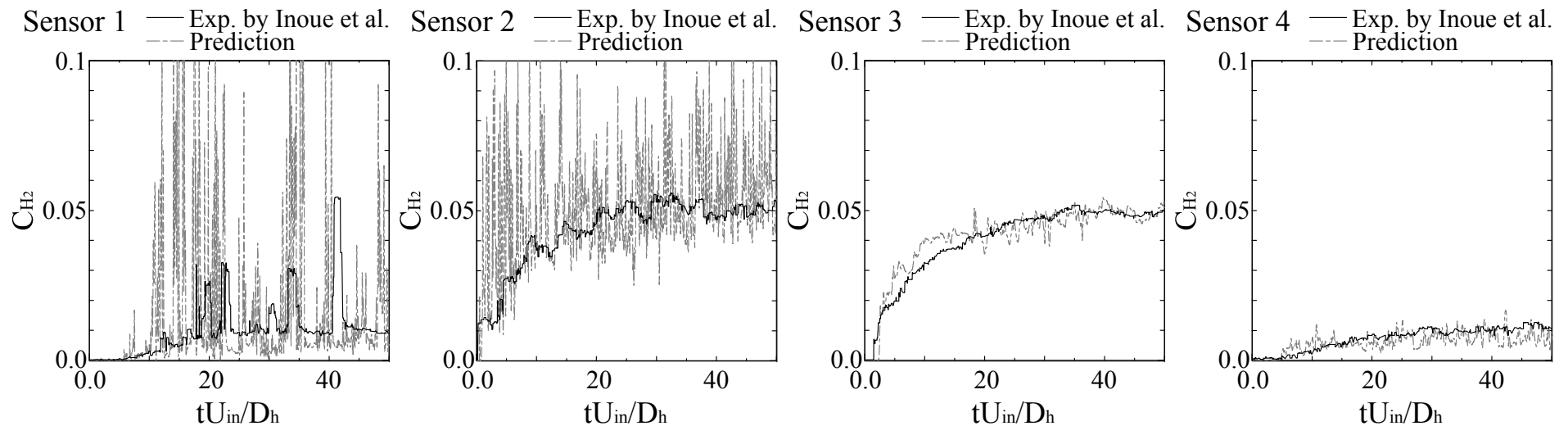
格子点数

鉛直方向 X_1 :53
奥行き方向 X_2 :38
長辺方向 X_3 :75

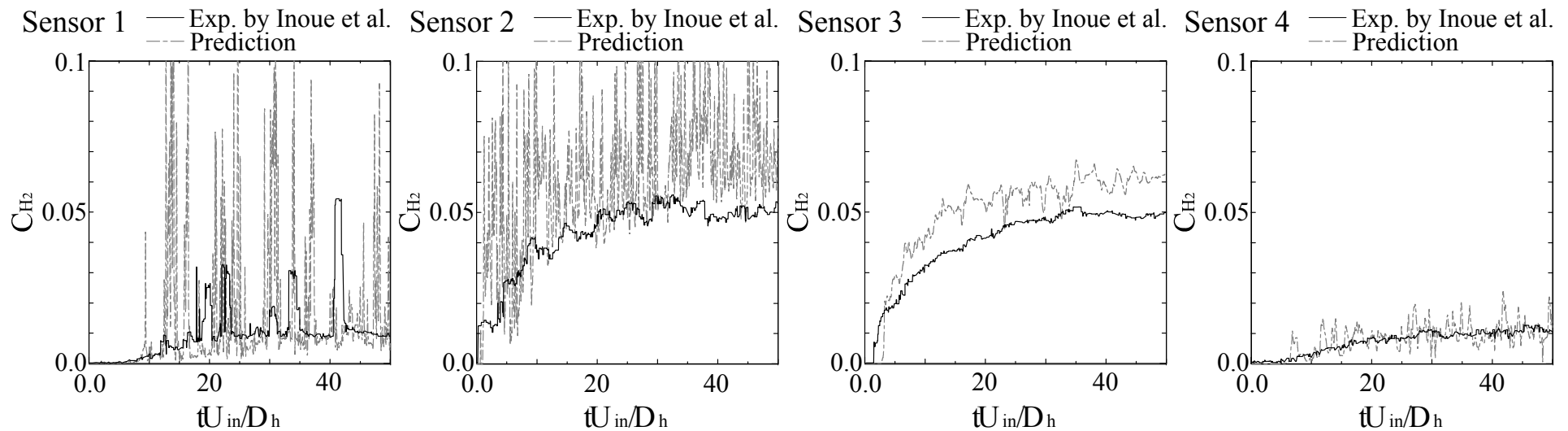
総格子点数

151,050

水素濃度分布比較 ($Fr = 1.0 \times 10^{-3}$)



水素濃度分布比較 ($Fr = 2.0 \times 10^{-3}$)



無次元数

- レイノルズ数

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu}$$

U : 代表速度(m/s)

L : 代表長さ (m)

μ : 粘性係数 (Pa·s , N·s/m² , kg/(m·s))

ν : 動粘性係数 ($\nu=\mu/\rho$) (m²/s)

ρ : 密度(kg/m³)

- シュミット数

$$Sc = \frac{\mu}{D} = \frac{\eta}{\rho D}$$

μ : 動粘度(m²/s)

D : 拡散係数 (m²/s)

η : 粘度 (Pa·s)

ρ : 密度(kg/m³)

- フルード数

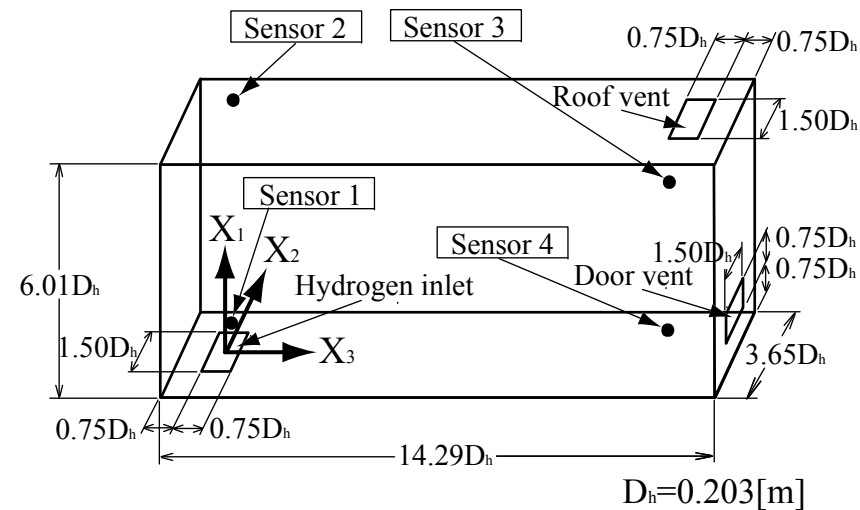
$$Fr = \frac{U}{\sqrt{Lg}}$$

U : 代表速度(m/s)

L : 代表長さ (m)

g : 重力加速度 (m/s²)

解析対象実験



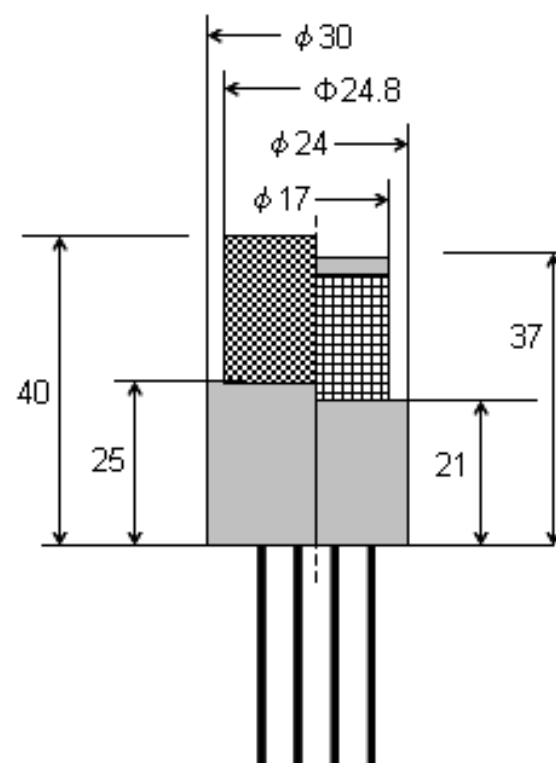
	X_1/D_h	X_2/D_h	X_3/D_h
Sensor 1	0.74	-1.13	-0.38
Sensor 2	4.98	0.74	-0.38
Sensor 3	4.98	-1.13	12.08
Sensor 4	0.74	0.74	12.08

実験(センサー概略図)

気体熱伝導式水素センサー

寸法：直径30[mm]

高さ40[mm]



井上, 月川, 金山, 松浦,
室内における漏洩水素の拡散に関する実験的研究

解析対象実験

- Hallway model の写真



井上, 月川, 金山, 松浦,
室内における漏洩水素の拡散に関する実験的研究

支配方程式

無次元化

- 運動方程式

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial (U_i U_k)}{\partial X_k} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial X_i} \right) + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial X_k} \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_k} \right) + \frac{C_{H_2}}{Fr}$$

- 水素輸送方程式

$$\frac{\partial C_{H_2}}{\partial t} + \frac{\partial (U_k C_{H_2})}{\partial X_k} = \frac{1}{Re_{A_{Sc}}} \frac{\partial}{\partial X_k} \left(\frac{\partial C_{H_2}}{\partial X_k} \right)$$