

# 室内における漏洩水素の 流れ解析

福岡水素エネルギー戦略会議  
平成20年度研究分科会  
水素燃焼・安全評価に関する検討分科会  
シミュレーション研究分科会(7月30日)

月川久義  
西部ガス(株)総合研究所  
九州大学知能機械システム社会人博士課程2年

# 発表内容

- 水素拡散シミュレーションの目的
- Hallway Model の解析について
- 天井モデル について
- ダクトモデル について
- まとめ

# 水素拡散シミュレーションの目的

水素を安全に使用するには

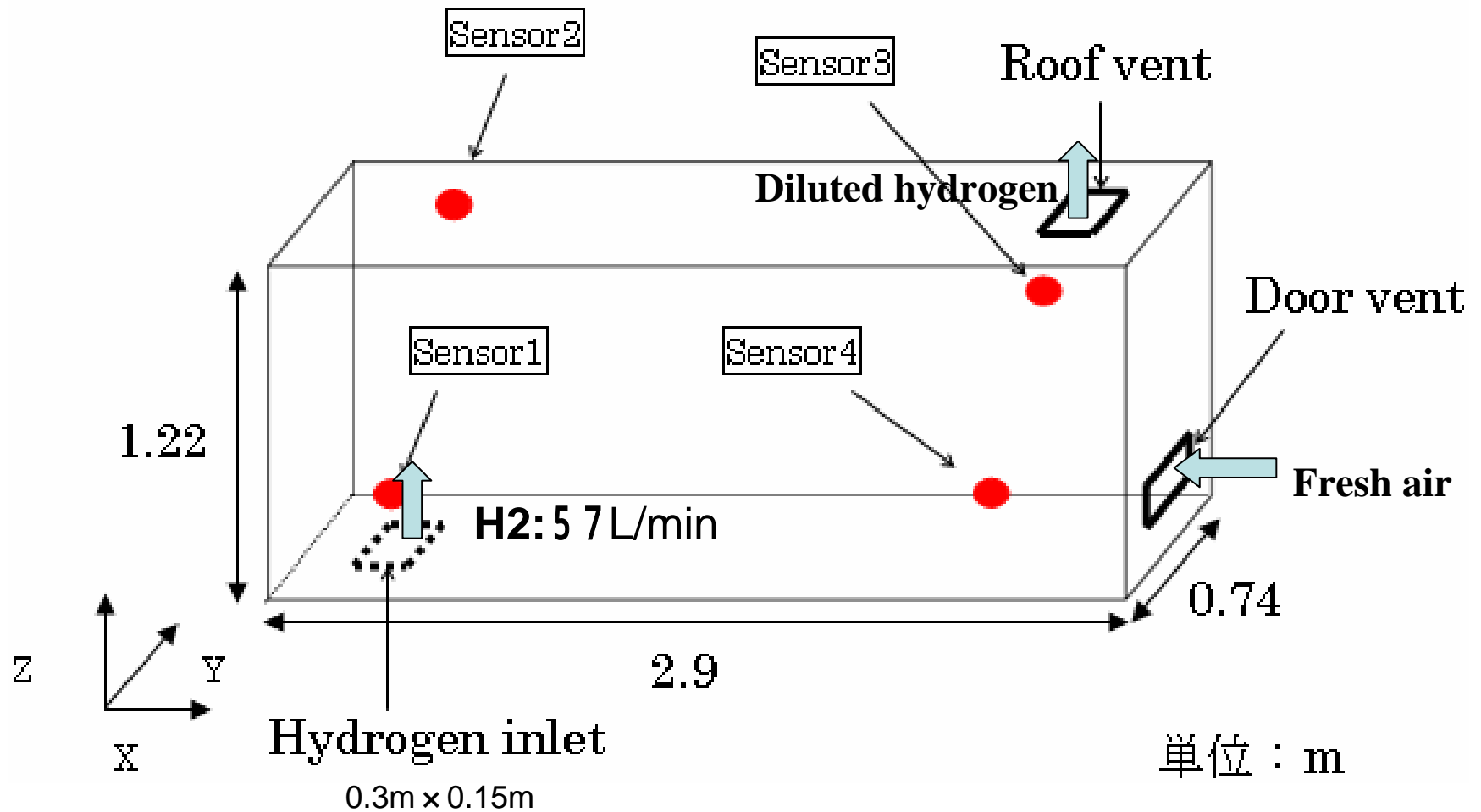
漏洩した水素の流動の把握が必要

- 設備毎に実験で確認するのは**安全、コスト**面から困難。
- 現実的にはCFDが有効な手段。
- 設備利用者自身が**手持ちのCFDコード**で解析出来れば、水素社会の実現に大いに寄与する。

# 水素の流動を把握すると

- 水素センサーは何処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何処か。
- 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。

# Hallway Model の概要図



**Table 1 The details of the Hallway Model**

	<b>X(m)</b>	<b>Y(m)</b>	<b>Z(m)</b>
<b>Domain size</b>	<b>2.9</b>	<b>0.74</b>	<b>1.22</b>
<b>Sensor 1 location</b>	<b>0.15</b>	<b>0.14</b>	<b>0.15</b>
<b>Sensor 2 location</b>	<b>0.15</b>	<b>0.52</b>	<b>1.01</b>
<b>Sensor 3 location</b>	<b>2.68</b>	<b>0.14</b>	<b>1.01</b>
<b>Sensor 4 location</b>	<b>2.68</b>	<b>0.52</b>	<b>0.15</b>
<b>Roof vent location</b>	<b>2.6</b>	<b>0.22</b>	<b>1.22</b>
<b>Roof vent size</b>	<b>0.15</b>	<b>0.3</b>	<b>0.0</b>
<b>Door vent location</b>	<b>2.9</b>	<b>0.22</b>	<b>0.15</b>
<b>Door vent size</b>	<b>0.0</b>	<b>0.3</b>	<b>0.15</b>
<b>Hydrogen inlet location</b>	<b>0.15</b>	<b>0.22</b>	<b>0.0</b>
<b>Hydrogen inlet size</b>	<b>0.15</b>	<b>0.3</b>	<b>0.0</b>
<b>Hydrogen leak rate:57L/min ; leak duration:600seconds</b>			

# 井上先生の実験(全景)



# Hydrogen Inlet 部





# 気体熱伝導式水素センサー

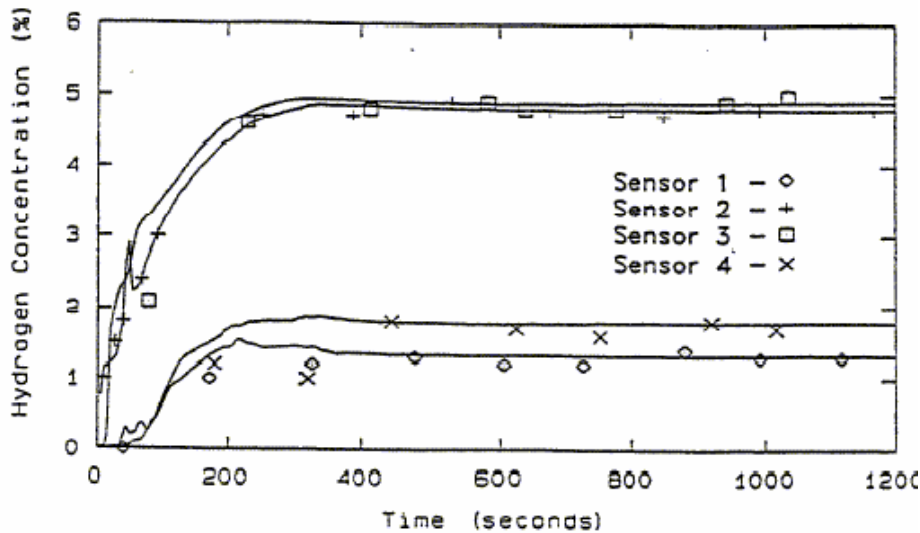
寸法：直径1cm 高さ3cm



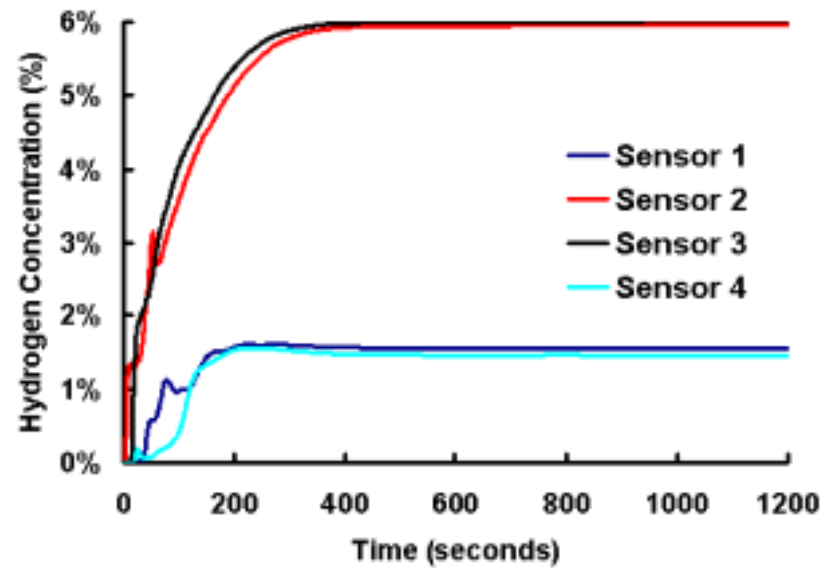
# Hallway Model 解析の始まり

- (1) Michael R. Swain, Eric S. Grilliot and Matthew N. Swain; Risks incurred by hydrogen escaping from containers and conduits. NREL/CP-570-25315. Proceedings of the 1998 U.S. DOE Hydrogen Program Review.
- (2) Vladimir AGARANT, Zhong CHENG and Andrei TCHOUVELEV; CFD modeling of hydrogen releases and dispersion in hydrogen energy station, Proceedings of the 15th World Hydrogen Energy Conference, 2004.

# 解析は定常性を示す 実験は定常性を有するのか？



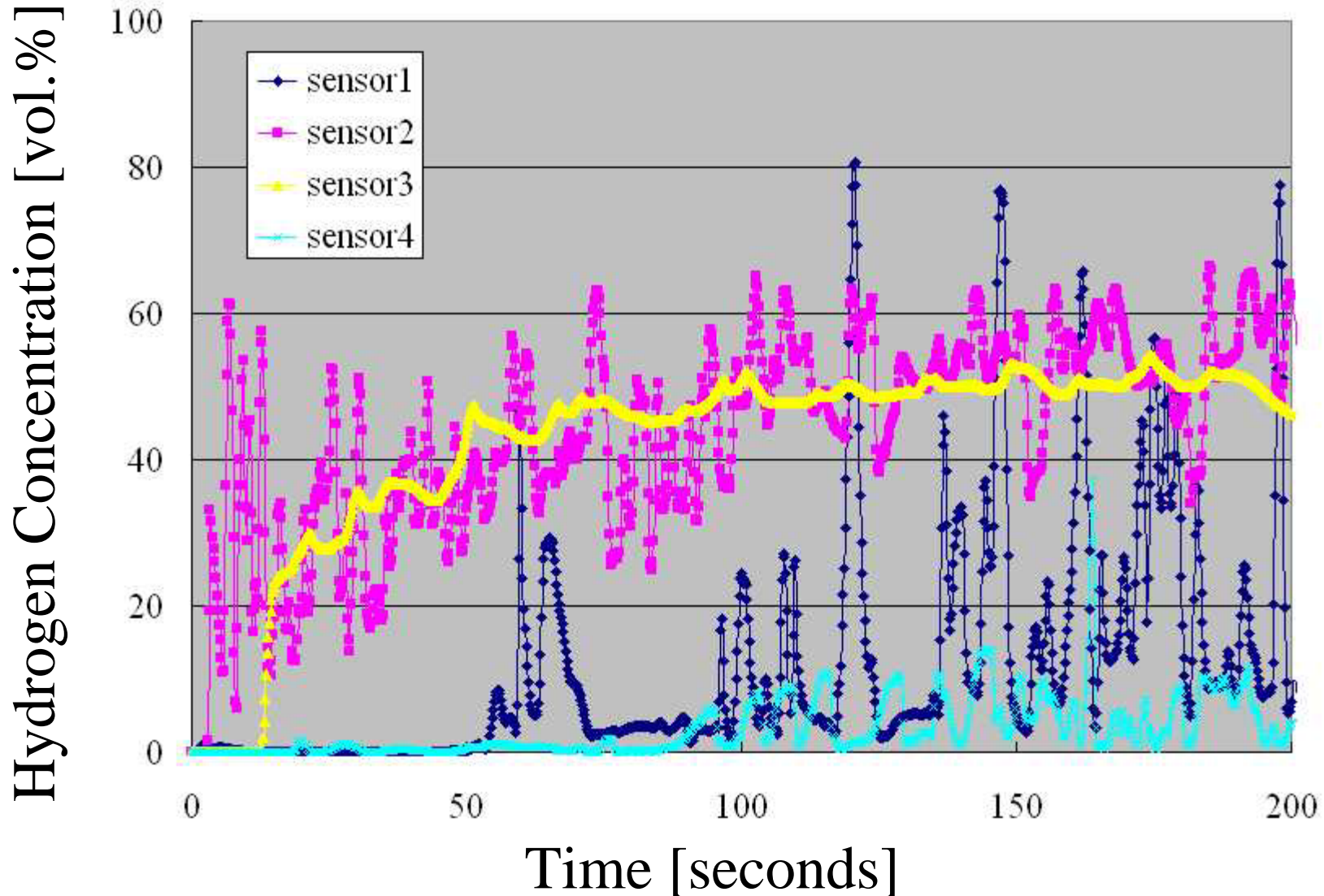
実験, FLUENT[1]



PHOENIX[2]

# 非定常性を最初に示した解析

## 前田さん 有限要素法 初出2004年

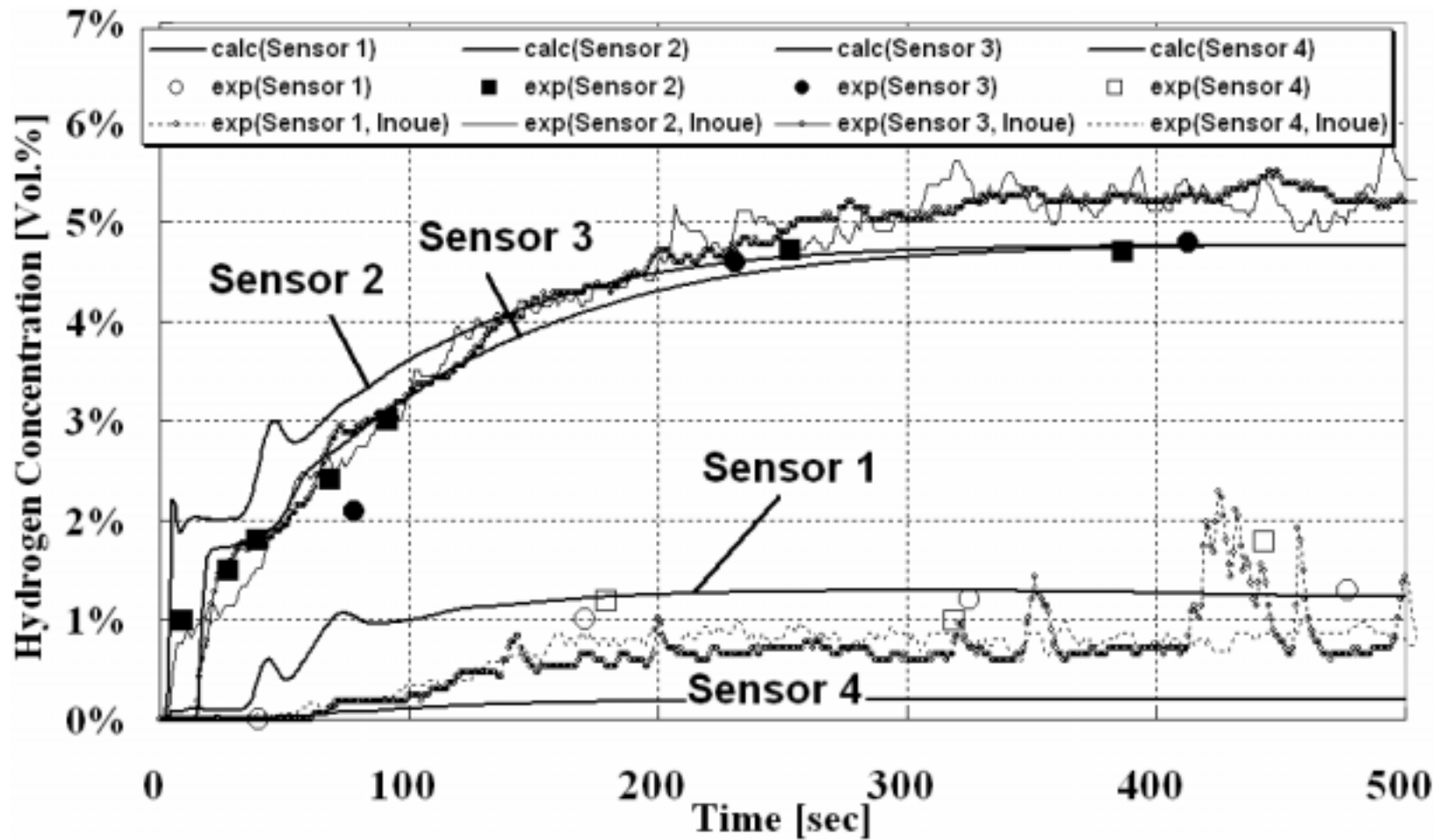


# 松浦さんの解析

- 出典：部分開放空間における水素拡散挙動に関する研究 松浦一雄, 金山寛, 月川久義, 井上雅弘  
水素エネルギーシステム; 2006 Vol. 31, No. 2  
pp.50-57
- 計算コード: CFD-ACE+
- 解法: 圧縮性流体の低マッハ数近似
- 乱流モデル: 標準k-εモデル
- Inlet Vent, Door Vent 近傍の速度勾配の大きい部分の格子を細分化 格子点数: 約3万
- 自作のコードでSimplest法、スタガードガード格子の有効性の再確認

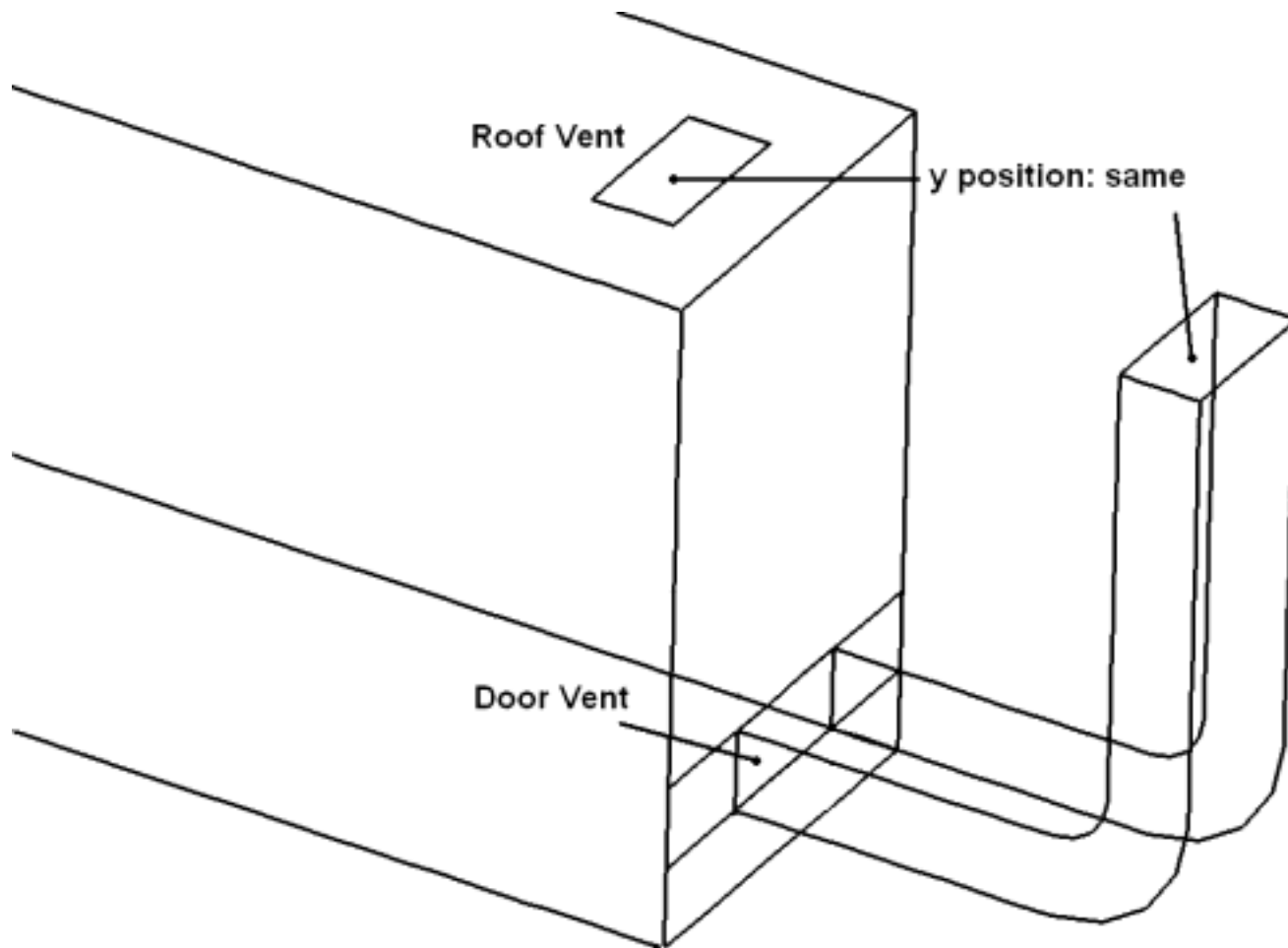
# 松浦さん

# はSwainの実験



# 水頭圧設定の境界条件の工夫

## 松浦さん



# ADVENTURE s-Flow

- 大規模解析に適した、先進の有限要素法  
非圧縮性熱流体解析コード

佐藤大吾さんの解析

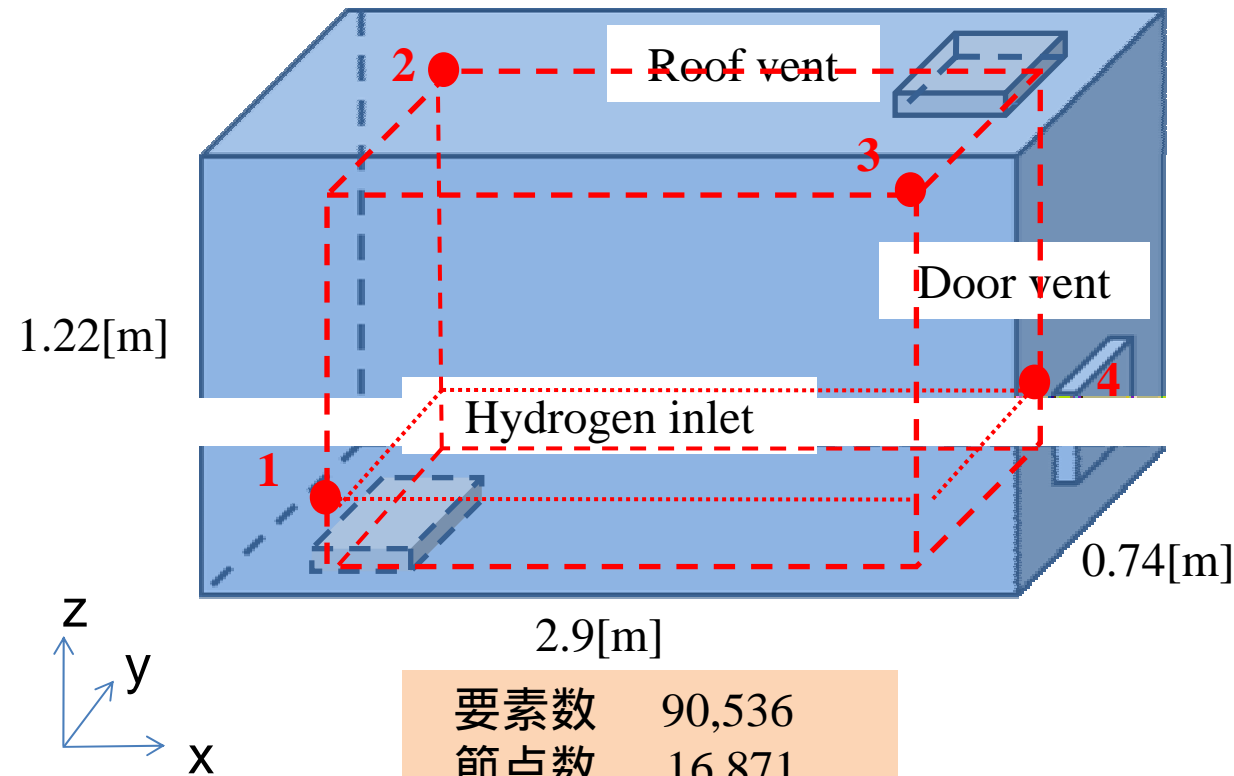
櫻木理さんの解析

- 非圧縮性流れとして境界条件を検討



# 非定常水素拡散問題

4カ所の濃度センサーに見立てた節点における濃度[vol%]の時刻歴を実験データ(\*)と比較し、最終的に新しい解析手法を確立することを目指す



要素数	90,536
節点数	16,871
自由度	84,355

## B.C.

Hydrogen inlet部

$$u = v = 0.0, w = 0.02 \text{ [m/s]}$$

$$C = 6.94 \text{ [mass\%]}$$

Door vent部

流速: 自然境界

$$C = 0.0 \text{ [mass\%]}$$

Roof vent部

流速, 濃度とも自然境界

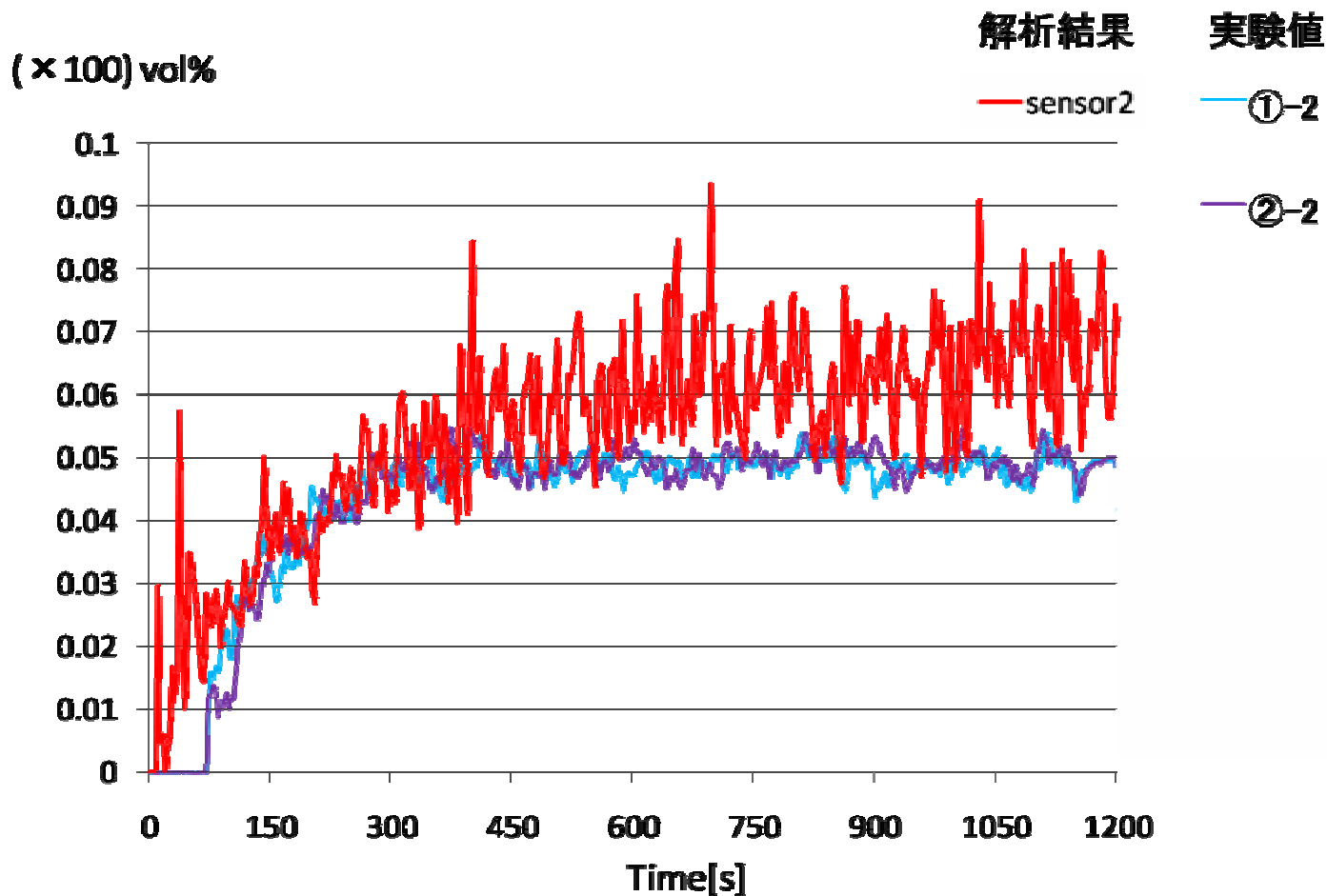
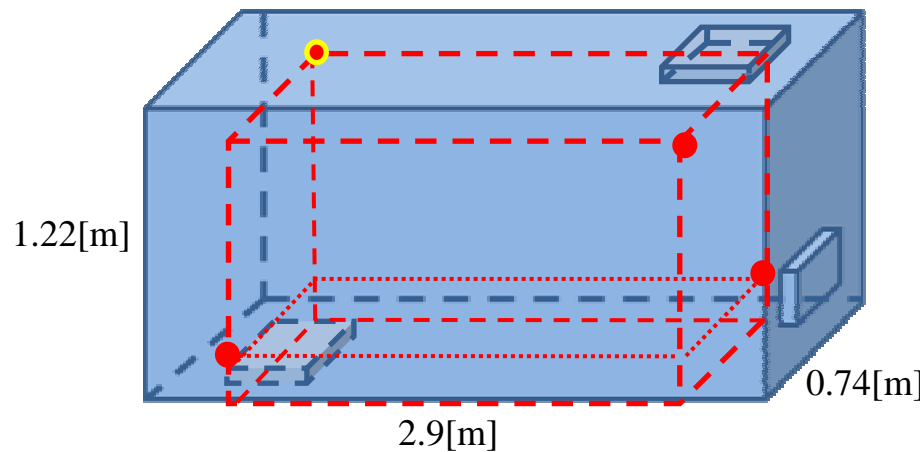
壁面

$$u = v = w = 0.0 \text{ [m/s]}$$

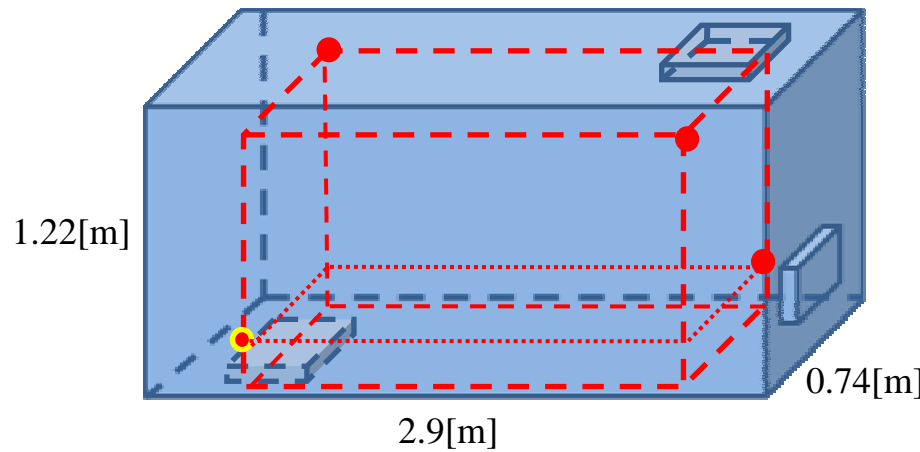
濃度: 自然境界

(\*)提供元: 工学研究院地球資源システム工学部門 井上雅弘先生

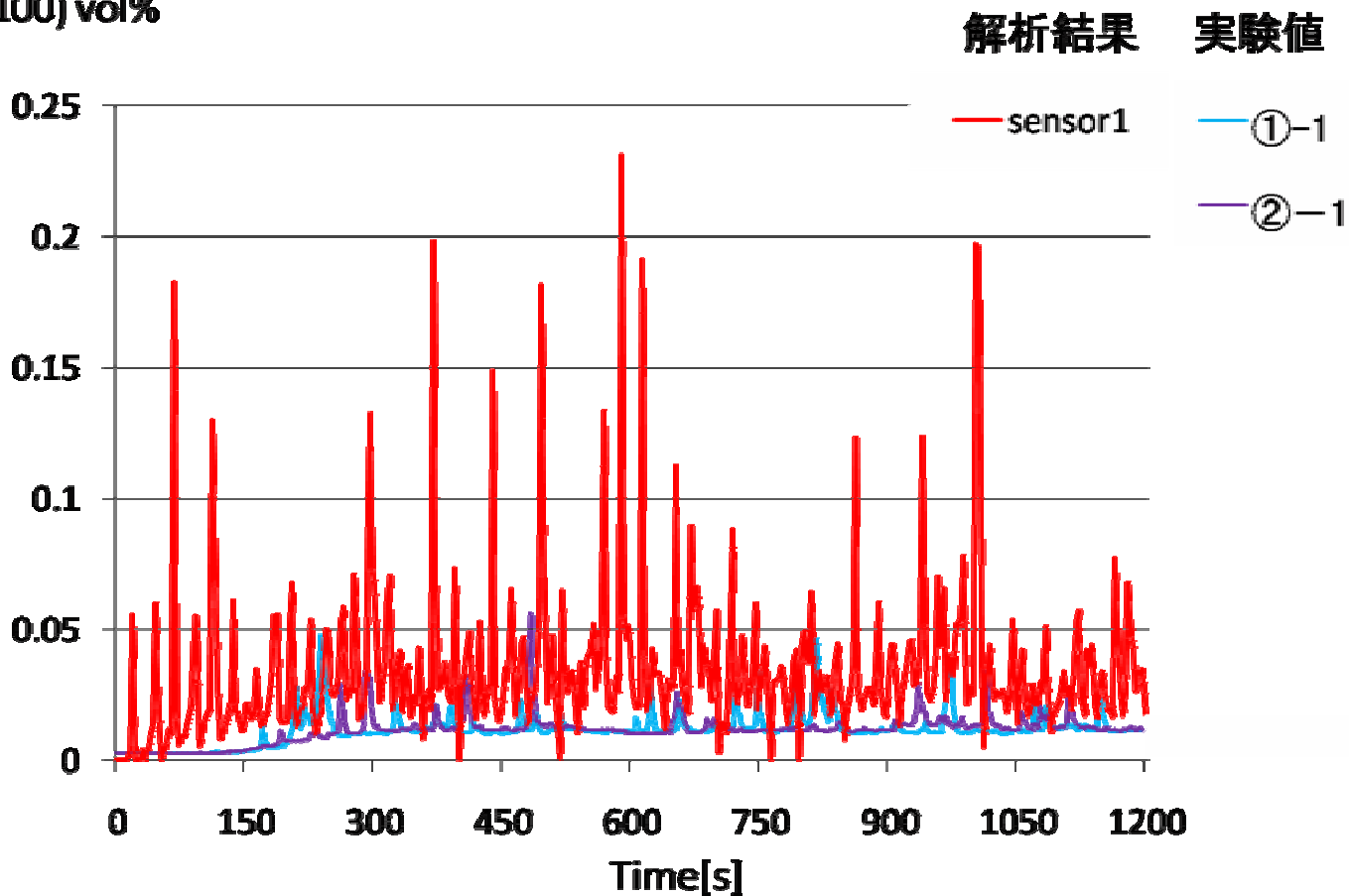
# 解析結果 $\Delta t=3.0[s]$ センサー2での濃度時刻歴



# 解析結果 $\Delta t=3.0[s]$ センサー1での濃度時刻歴



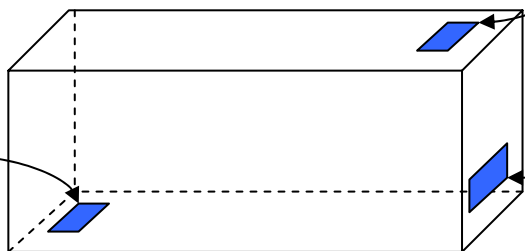
( $\times 100$ ) vol%



# 櫻木理さんの解析

- 出典: **ブシネスク近似のアナロジー**による水素拡散の有限要素シミュレーション 金山寛, 月川久義, 櫻木理 2008年3月19日 日本機械学会 九州支部 第61期総会・講演会
- ブシネスク近似 浮力  $f = - \beta T g$   
ここで  $\beta$ : 体積膨張率  $T$ : 温度  
**浮力  $f = -13.4 C g$**
- $C$ : 水素の重量分率  $g$ : 重力

# 境界条件



## Roof vent 部について

流れ場:  $\sum_{j=1}^3 \sigma_{ij} n_j = 0$  [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]

濃度 :  $a \frac{\partial C}{\partial n} = 0$  [m/s]

## Door vent 部について

流れ場:  $\sum_{j=1}^3 \sigma_{ij} n_j = 0$  [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]

濃度 :  $C = 0$  [mass%]

## 壁面, 床, 天井部について

流れ場:  $u_x = u_y = u_z = 0$  [m/s]

濃度 :  $a \frac{\partial C}{\partial n} = 0$  [m/s]

## Hydrogen inlet 部について

流れ場:  $u_x = 0, u_y = 0, u_z = 0.02$  [m/s]

濃度 :  $C = 100/14.4 = 6.94$  [mass%]

## 物性値

$\mathbf{g} = (0, 0, -9.8)$  [m/s<sup>2</sup>]

$\beta = 13.4$  [-]

$\nu = 1.05 \times 10^{-4}$  [m<sup>2</sup>/s]

$a = 6.1 \times 10^{-5}$  [m<sup>2</sup>/s]

質量流量保存 体積濃度 約52% 相当

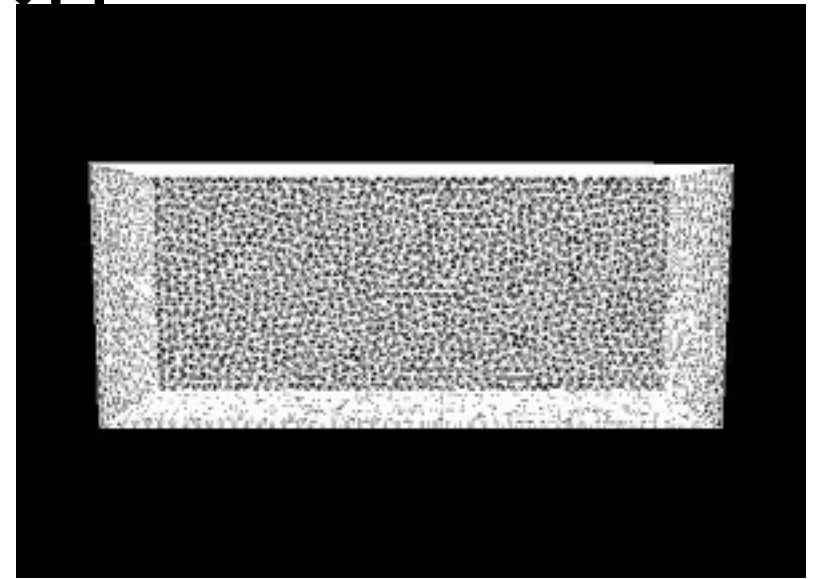
# 解析条件

## メッシュ

要素数: 165,434

節点数: 235,245

自由度: 870,447



メッシュ図

## ソルバー

BiCGSTAB(L) (L=4)

ILU前処理 (加速係数:1.05)

収束条件: 相対残差  $< 10^{-6}$

## 計算機

Core 2 Duo 2.4 [GHz]

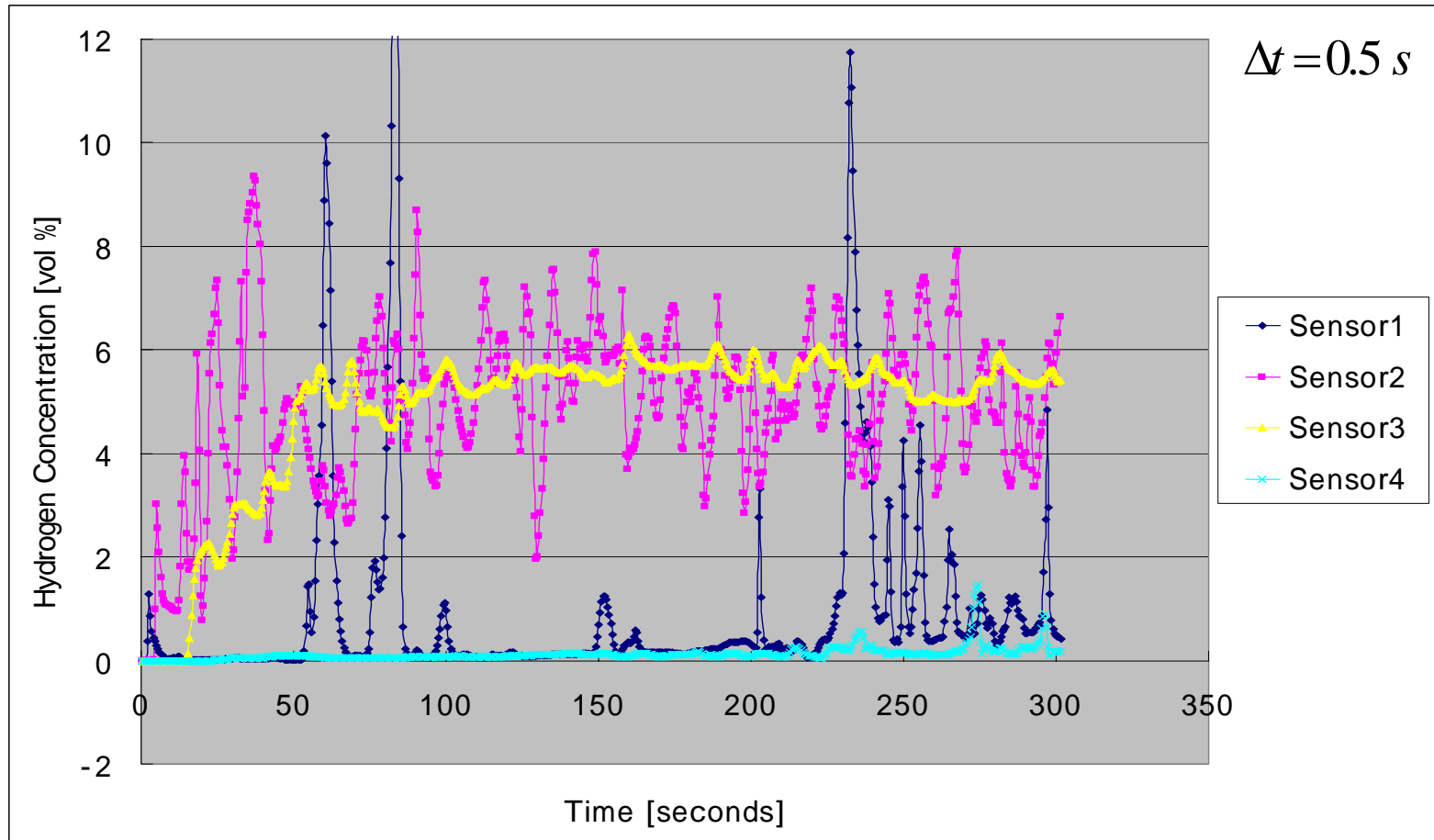
メモリー 4 [Gbyte]

時間刻み:  $\Delta t = 0.5, 1.0$  [s]

初期条件:  $u_x = u_y = u_z = 0$

$C = 0$

# 各センサー部における水素濃度の推移



- ・ Sensor2,3 おおよそ50～100秒で定常状態に達する
- ・ 0～50秒でSensor2の振動が激しくピーク値を持つ
- ・ Sensor1 60,80,240秒付近で非常に高いピーク値

# CFD解析手法 月川

- 計算コード: PHOENICS
- 解法: SIMPLEST
- 格子: 構造格子 スタaggered格子
- 空間差分近似: ハイブリッド法  
1次風上差分と中心差分の組合せ
- 時間発展: 後退オイラー法 時間刻み0.5sec
- 乱流モデル: LEVEL(0方程式モデル)
- 浮力: 密度差  $-(\rho - \rho_{air})g$



# 保存式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \text{div}(\rho v\Phi) = \text{div}(\Gamma_{\Phi} \text{grad}\Phi) + S_{\Phi}$$

- 輸送変数  $\Phi$  は、速度成分、全エンタルピー、化学種の質量分率、k-εモデルの乱流エネルギー、乱流エネルギーの散逸率、等
- 拡散係数  $\Gamma_{\Phi}$
- ソース項  $S_{\Phi}$  浮力等
- 物性値はChemkin サブルーチンを使用

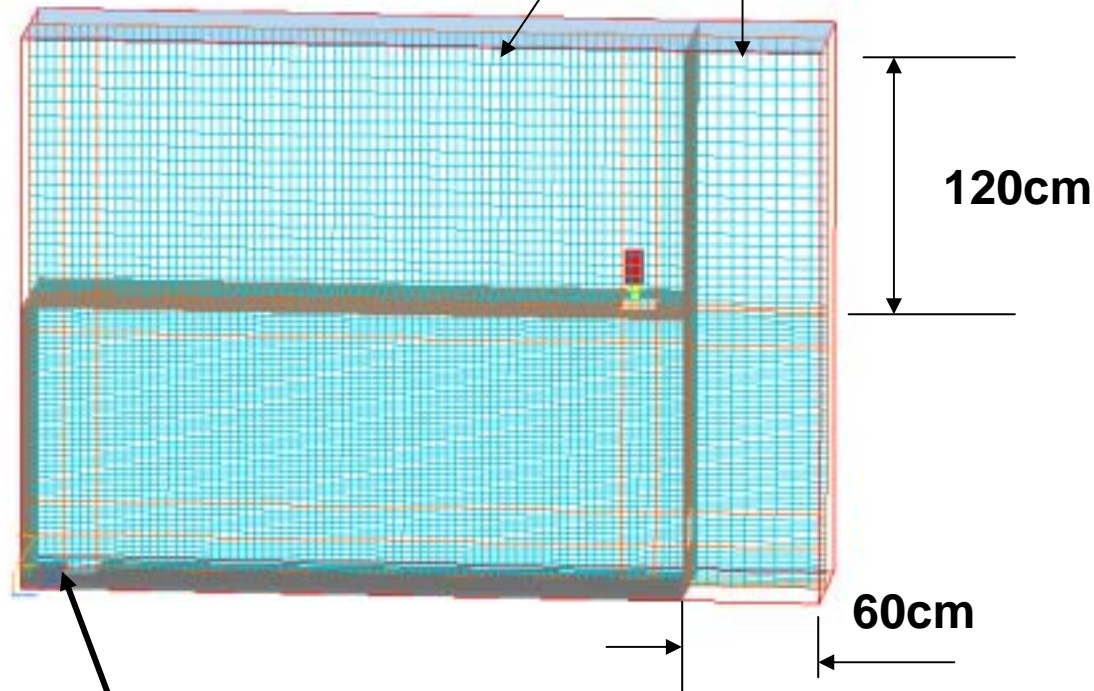
# Hallway内部の格子(セル)分割

$$77 \times 20 \times 45 = 69,300$$

AGARANTの約1/2のセル寸法

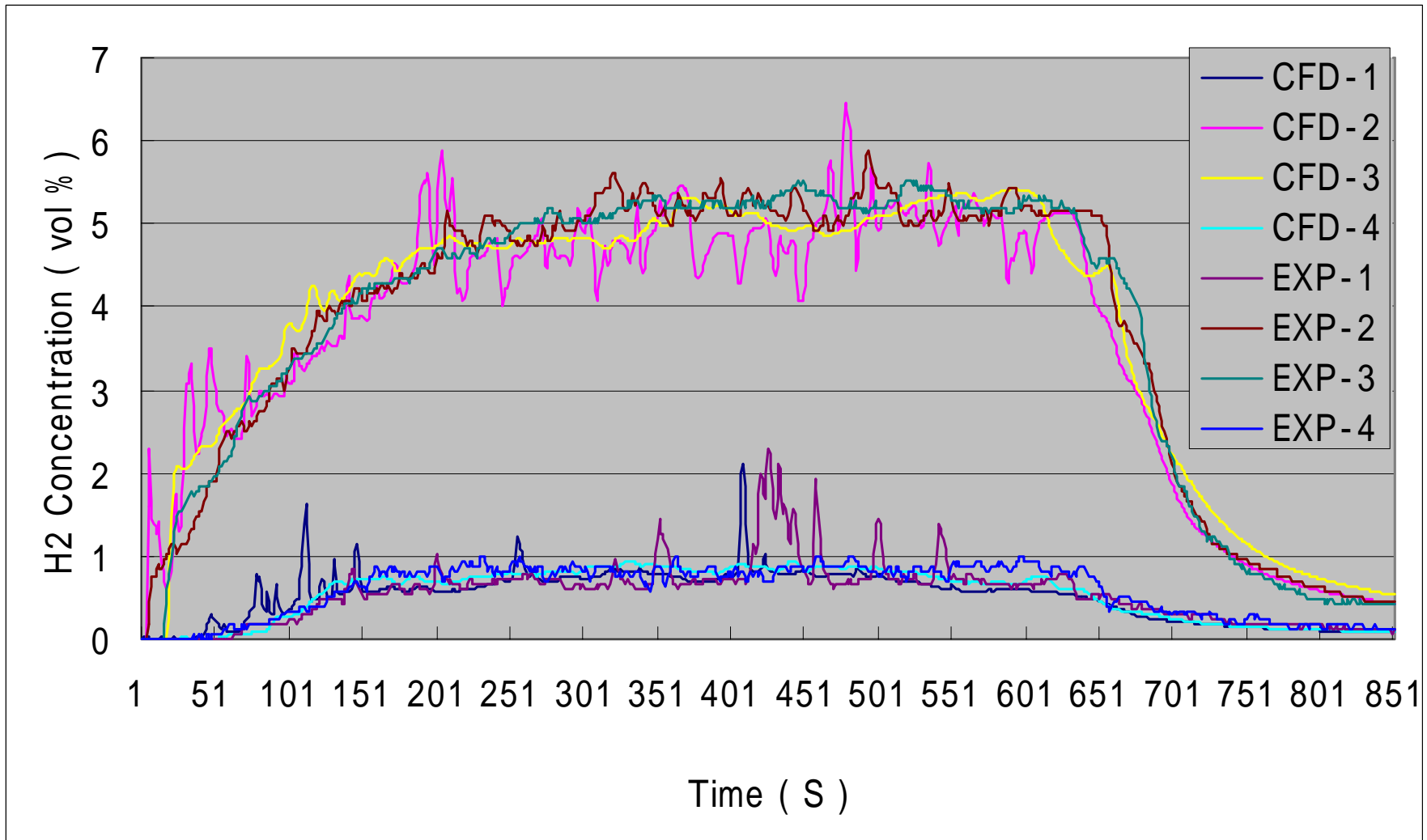
水平方向3.75cm 鉛直方向3.0cm

Atmosphere ( $O_2:0.233$ )



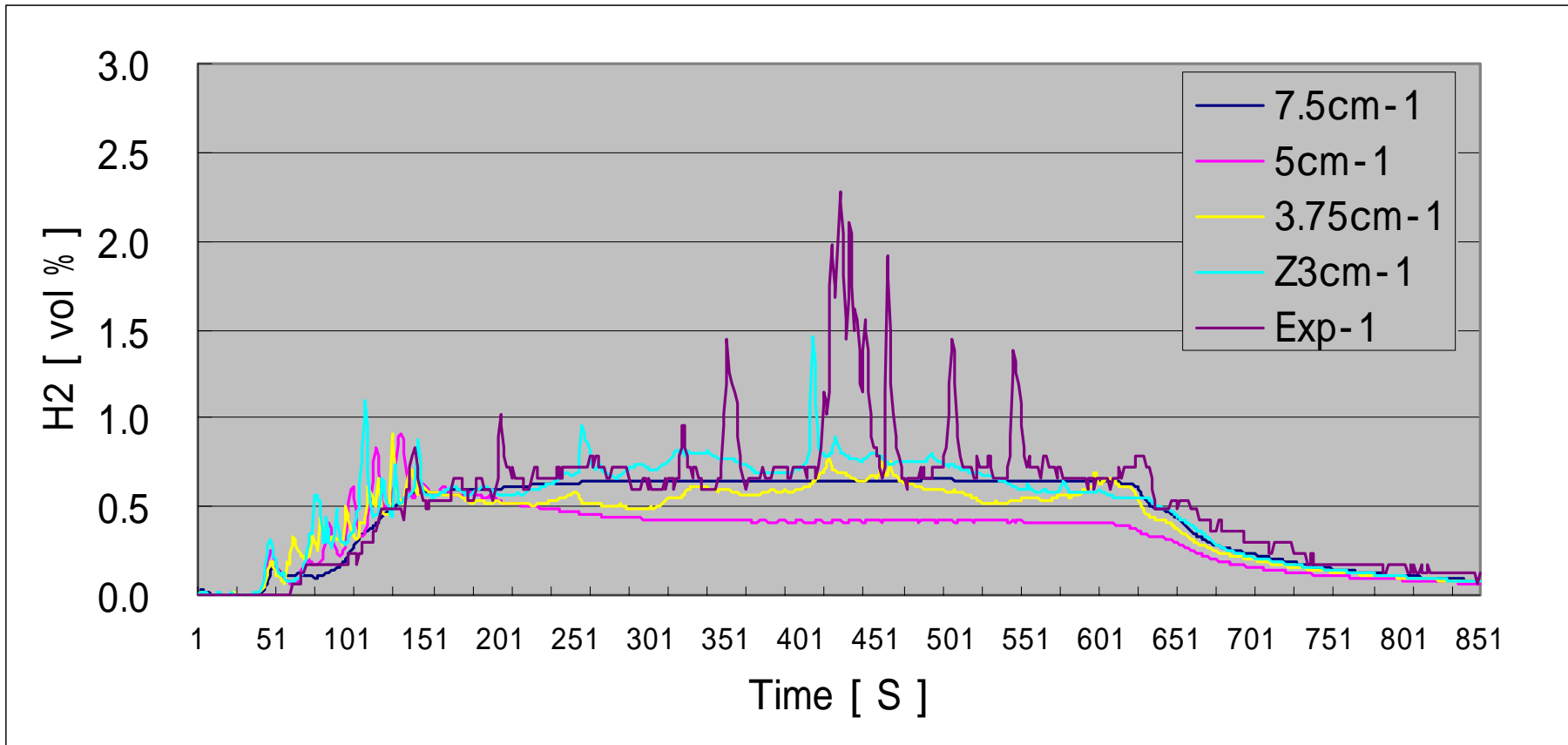
Hydrogen Inlet ( $Z=-2.5cm$ )と床 ( $Z=0.0$ ) の間を2セル分割

# CFDと実験は整合する有効な手法

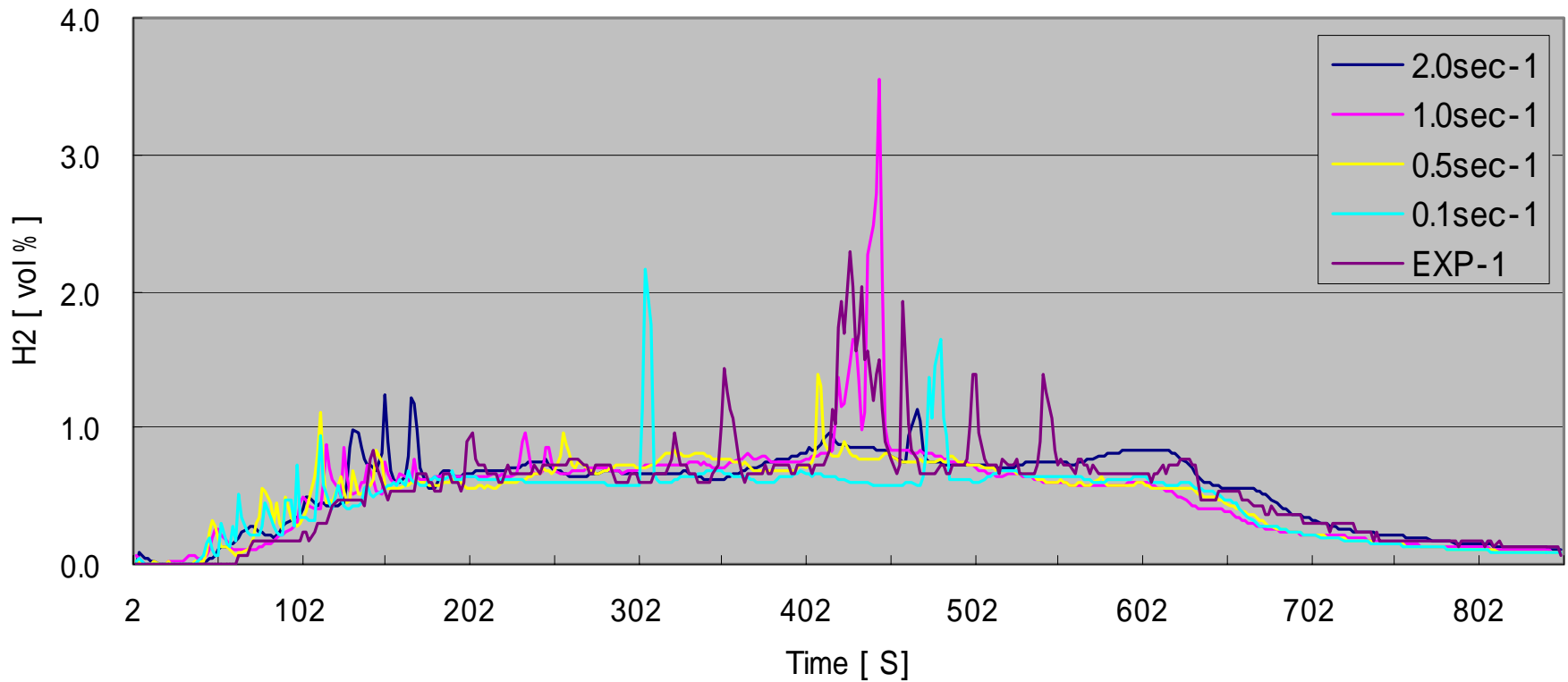


# 格子のサイズの影響

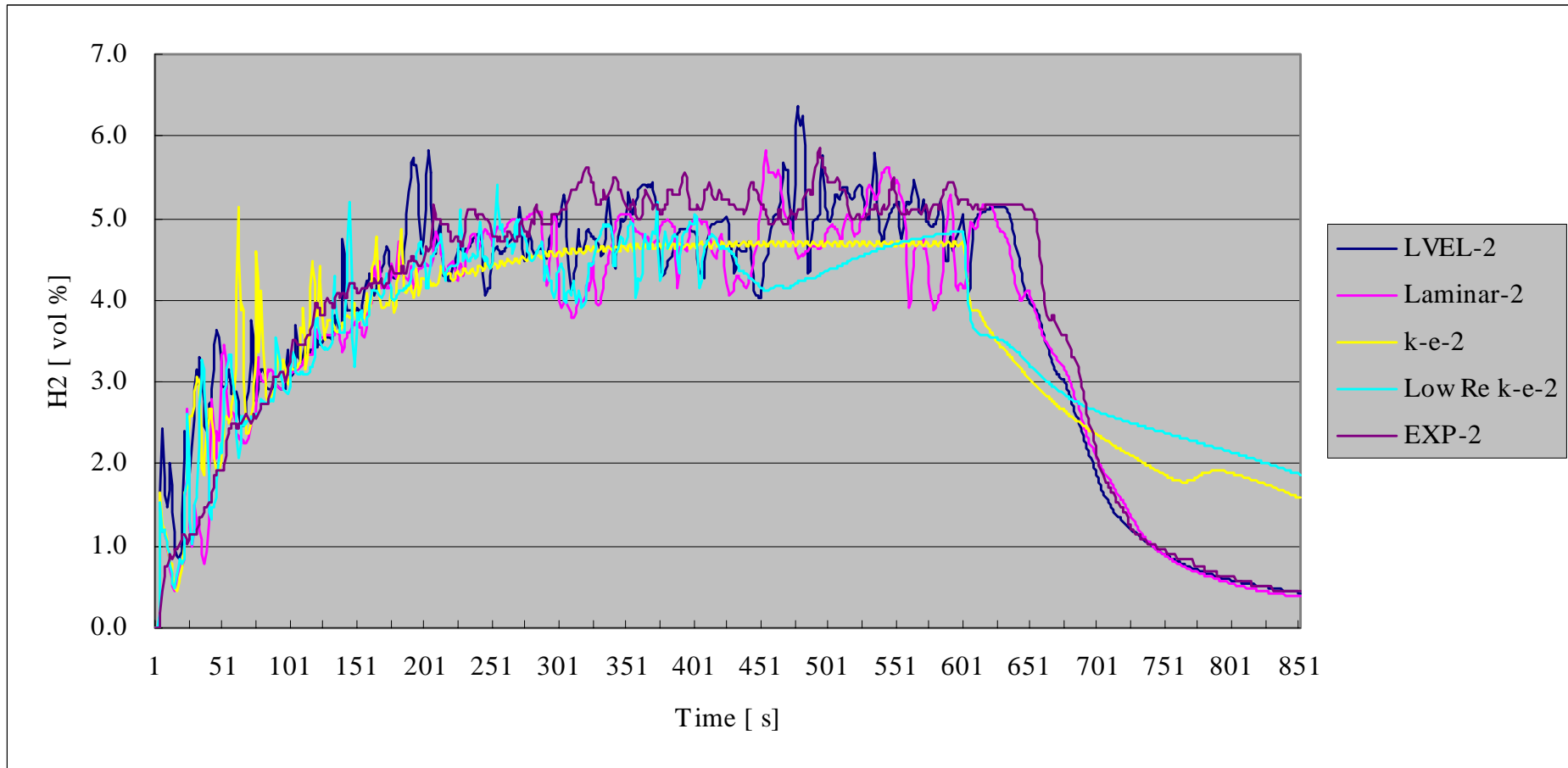
## 5cm以上では定常解となる



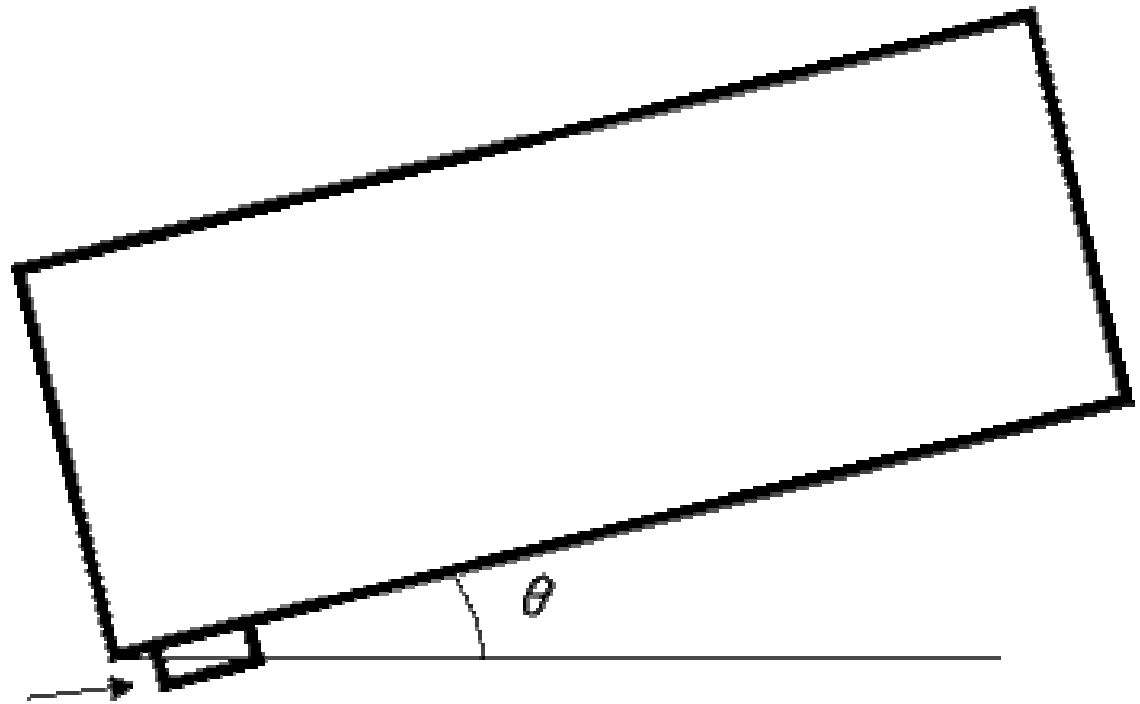
# 時間刻みの影響2秒以上では解が鈍る。 佐藤さんの3秒との違いは？



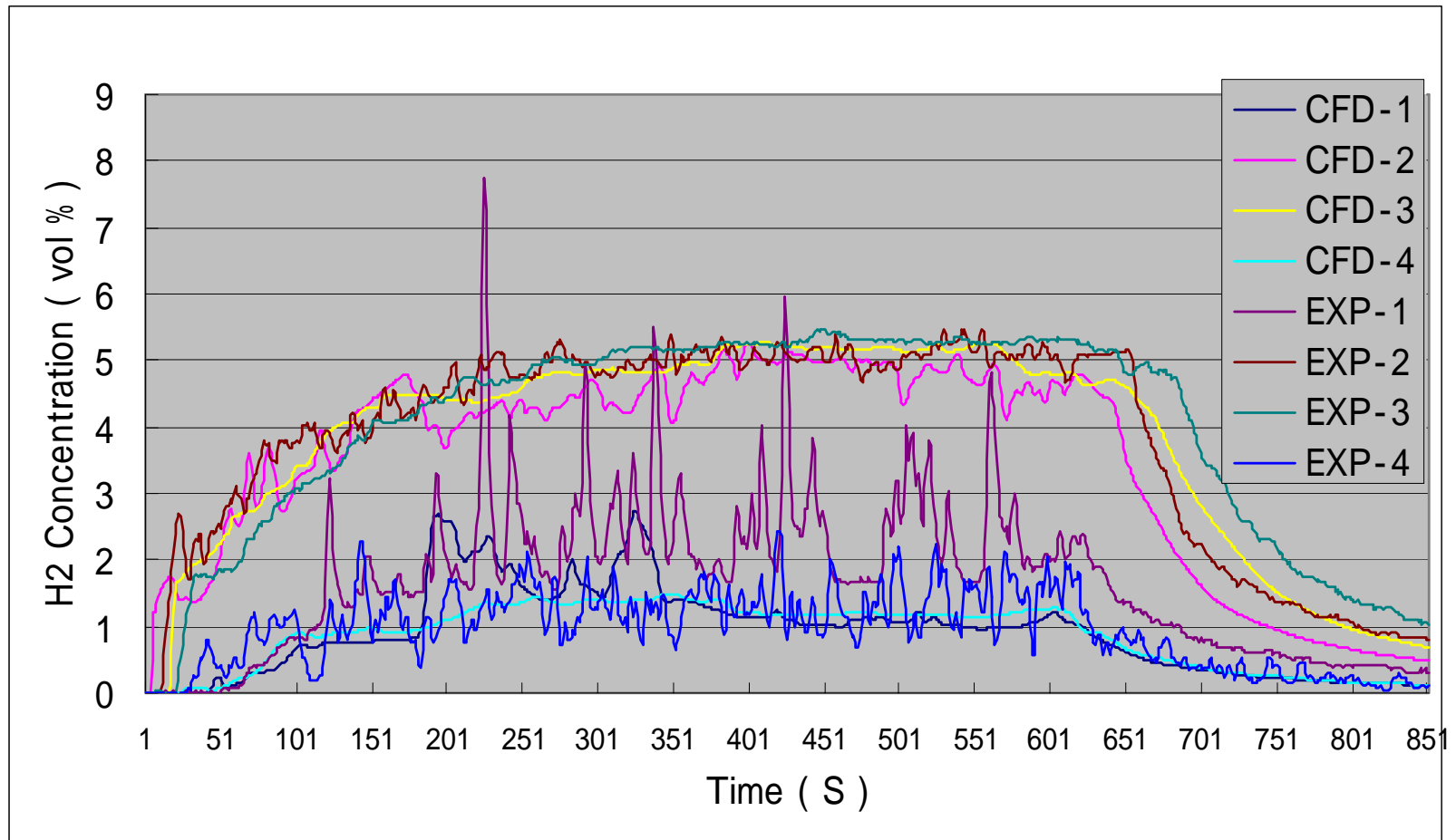
# 乱流モデルの比較 (センサー2)



天井を傾斜させると、水素の排出  
が促進される 5度傾斜させた

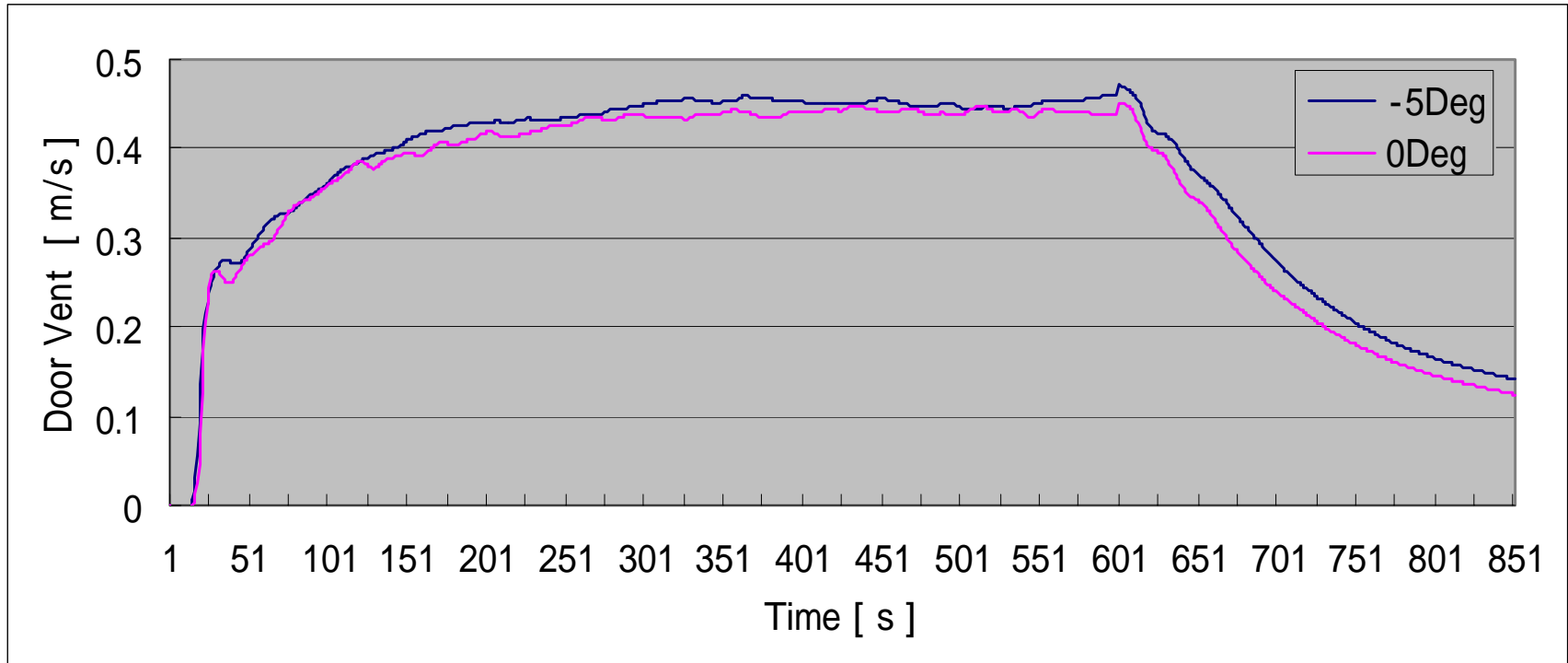


# 傾斜の効果は水素濃度からは不明





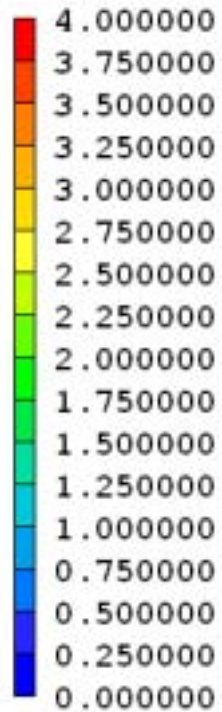
# CFDでDoor Vent の流速を求めると、 速くなっている 換気性能が向上



# 5度傾斜の50秒の水素濃度(%)

## 白抜き部は水素濃度4%以上の範囲

PERH



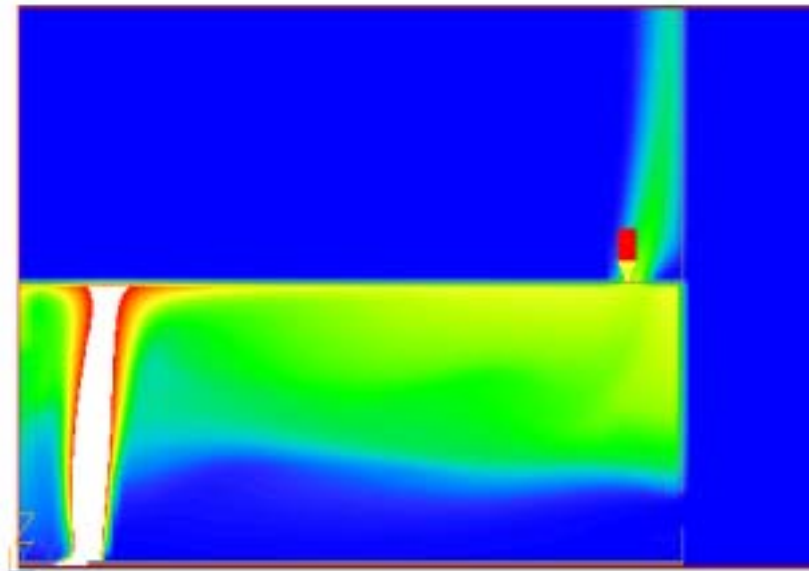
Time 50.00000 s

Probe value

2.429536

Average value

0.732357

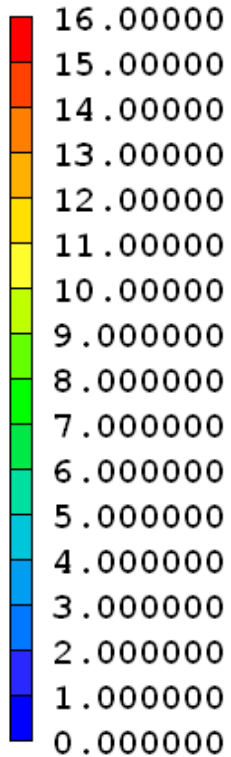


LVEL +5.0deg 3.75cm Z3cm time step=0.5se

# 5度傾斜の100秒の水素濃度(%)

## 白抜き部は水素濃度16%以上の範囲

PERH



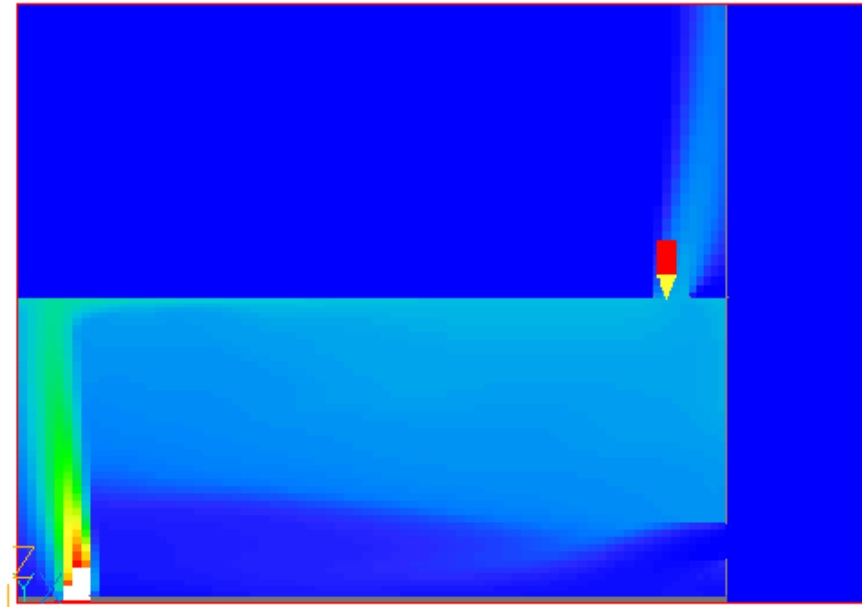
Time 100.0000 s

Probe value

3.709719

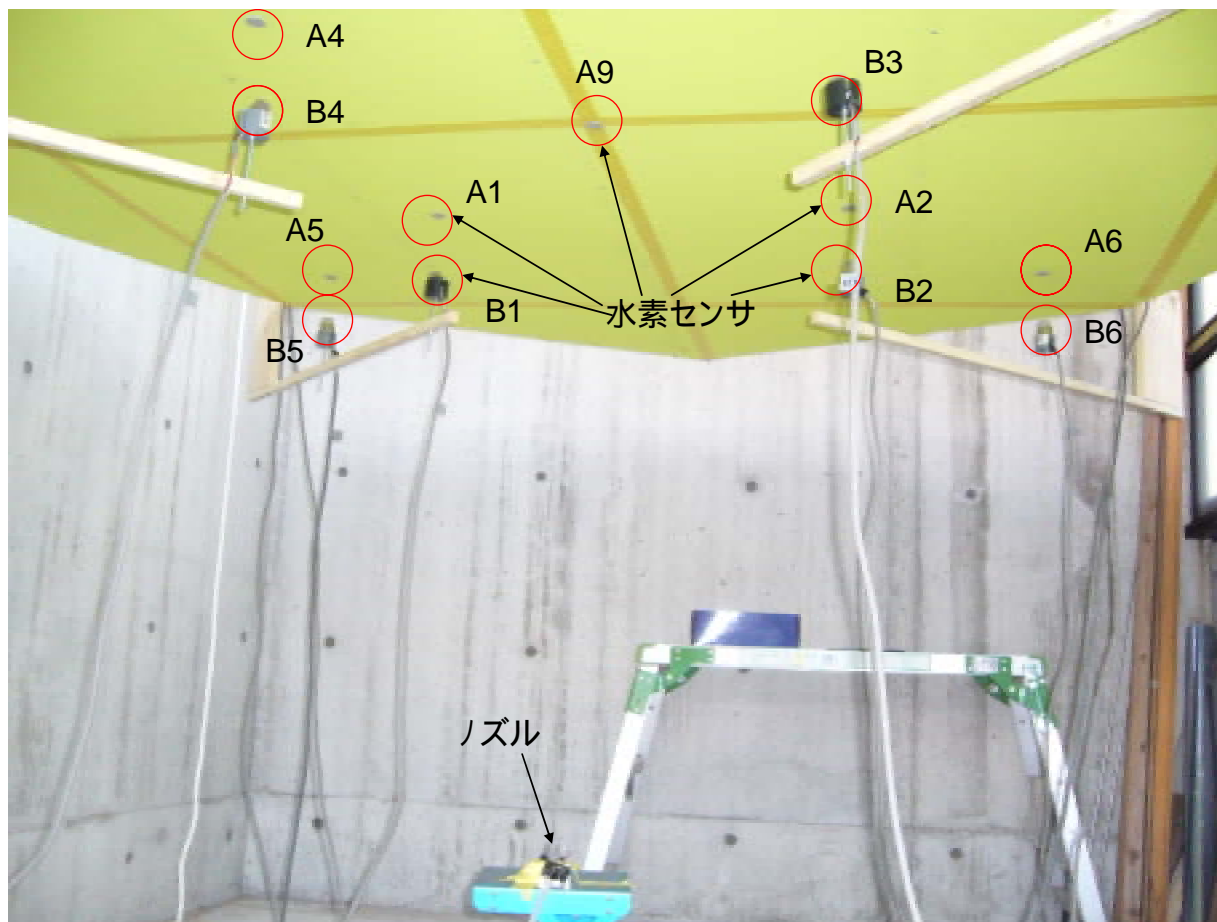
Average value

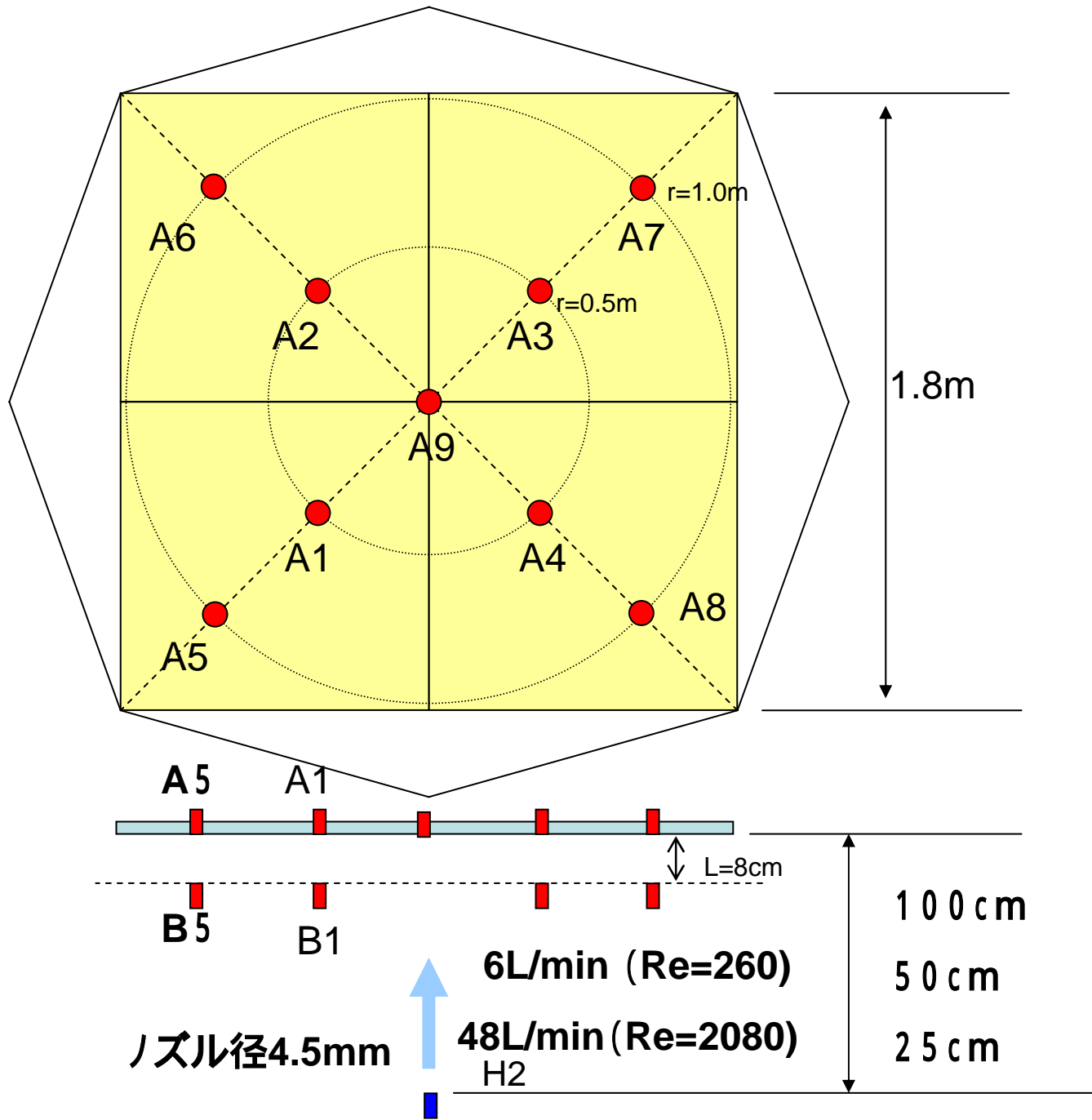
1.211061



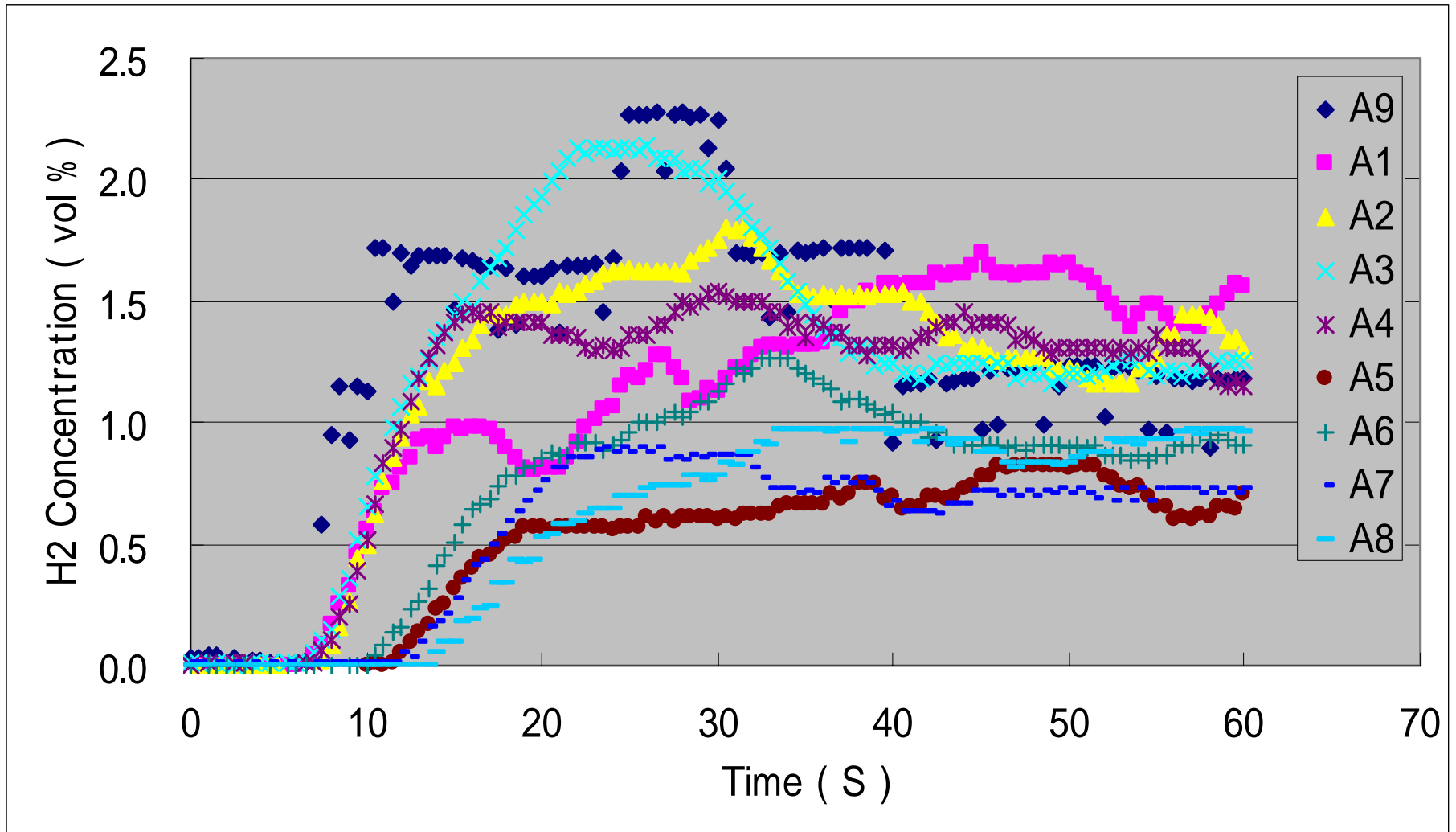
LVEL +5.0deg 3.75cm Z3cm time step=0.5se

# 天井モデルの写真





# 水素流量 48L/min 天井高さ1mの 天井面(センサA)水素濃度実験結果



# 天井モデルの格子 (113 × 113 × 63)

Atmosphere O<sub>2</sub>:0.233

1.8m

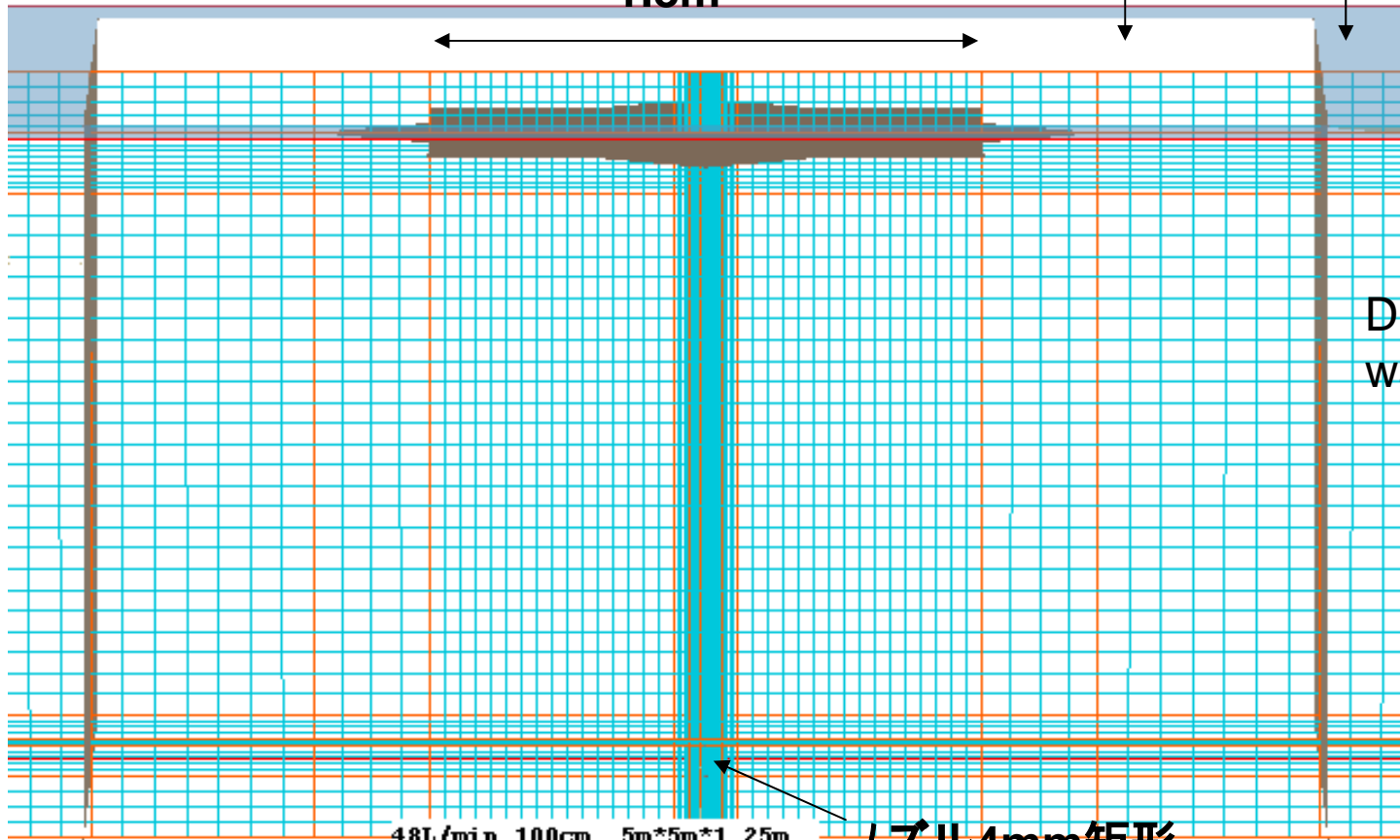
Dummy wall

1m

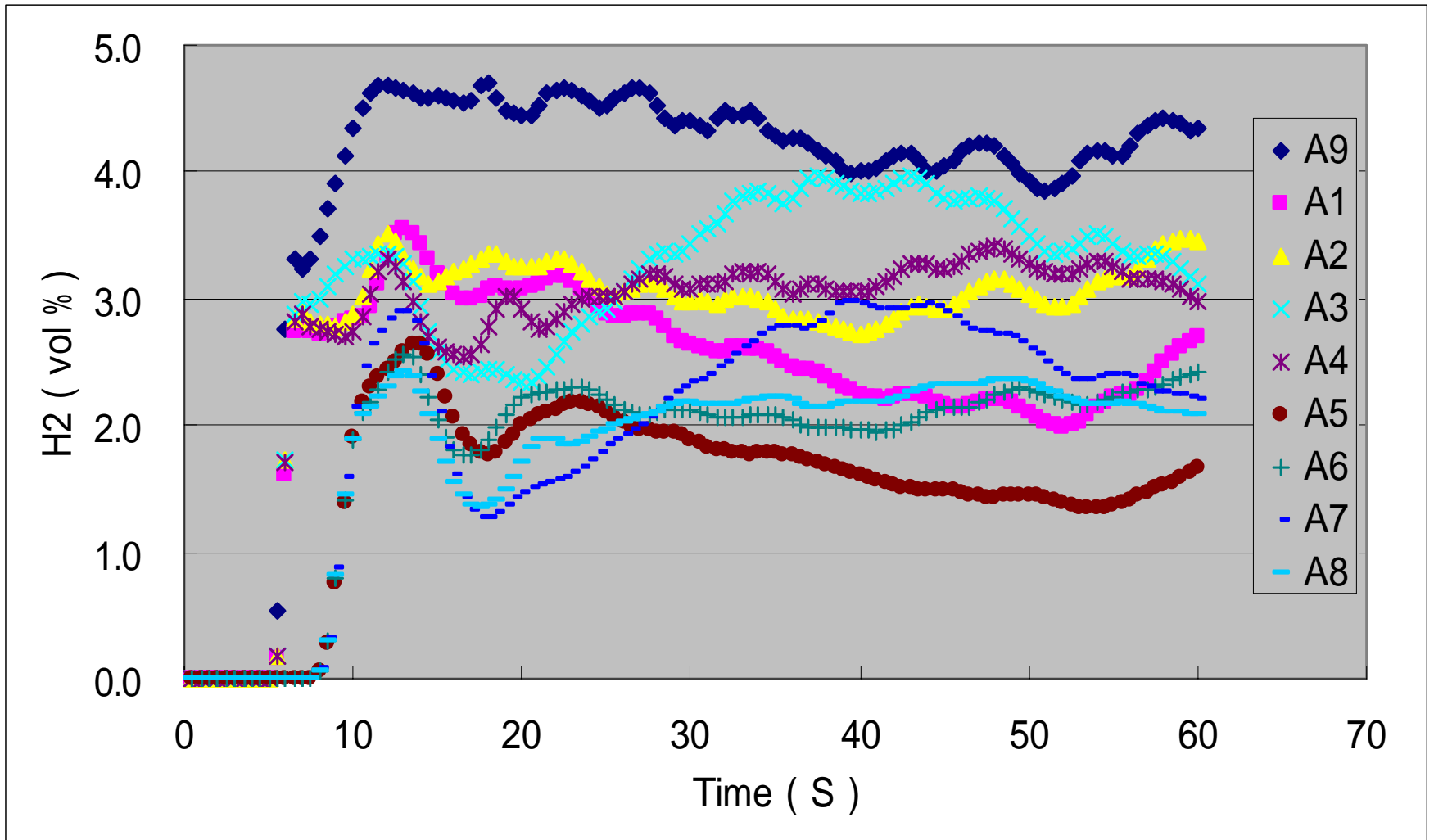
48L/min 100cm 5m\*5m\*1.25m

ノズル4mm矩形

X

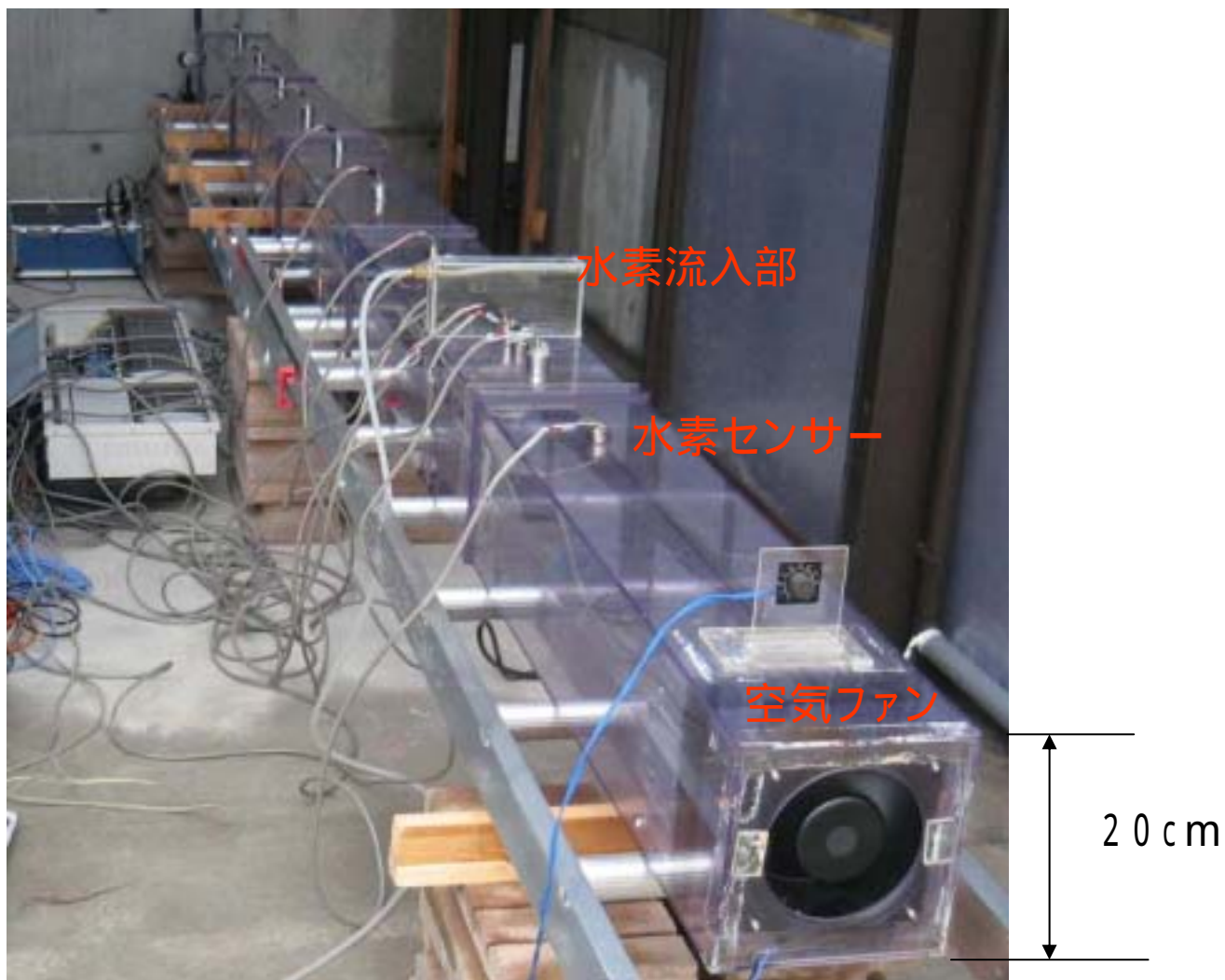


# CFD解析が高濃度





# ダクトモデル実験装置写真

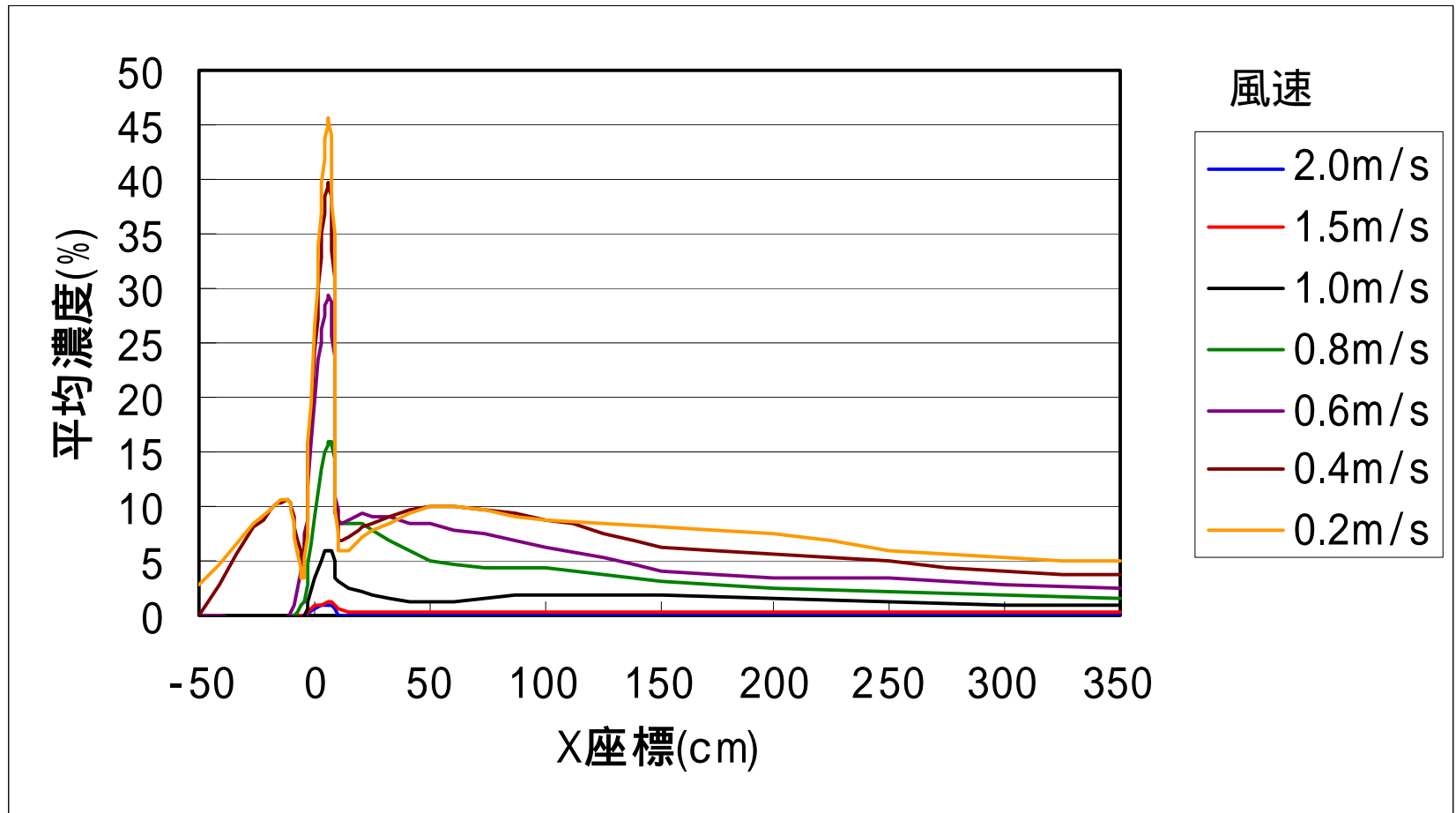


# 特徴的な実験結果

- 空気の流速が遅い場合、水素は空気の入り口側に逆流する
- 水素流入位置の上流10cmのセンサーが5cmのセンサーより高い水素濃度となる

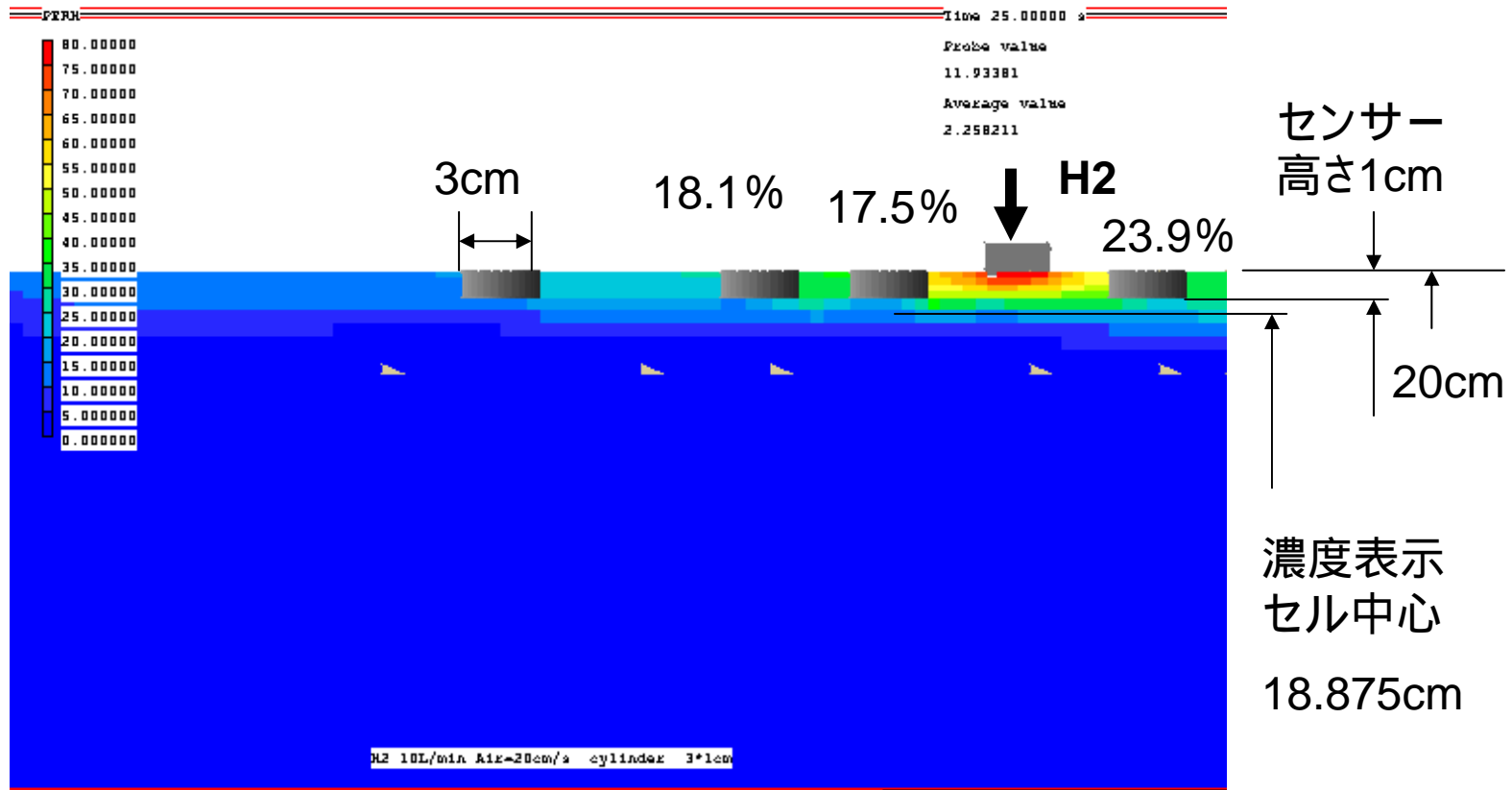
# 実験結果の1例(水素流量10L/分)

## 水素センサーの測定レンジ10%の影響あり

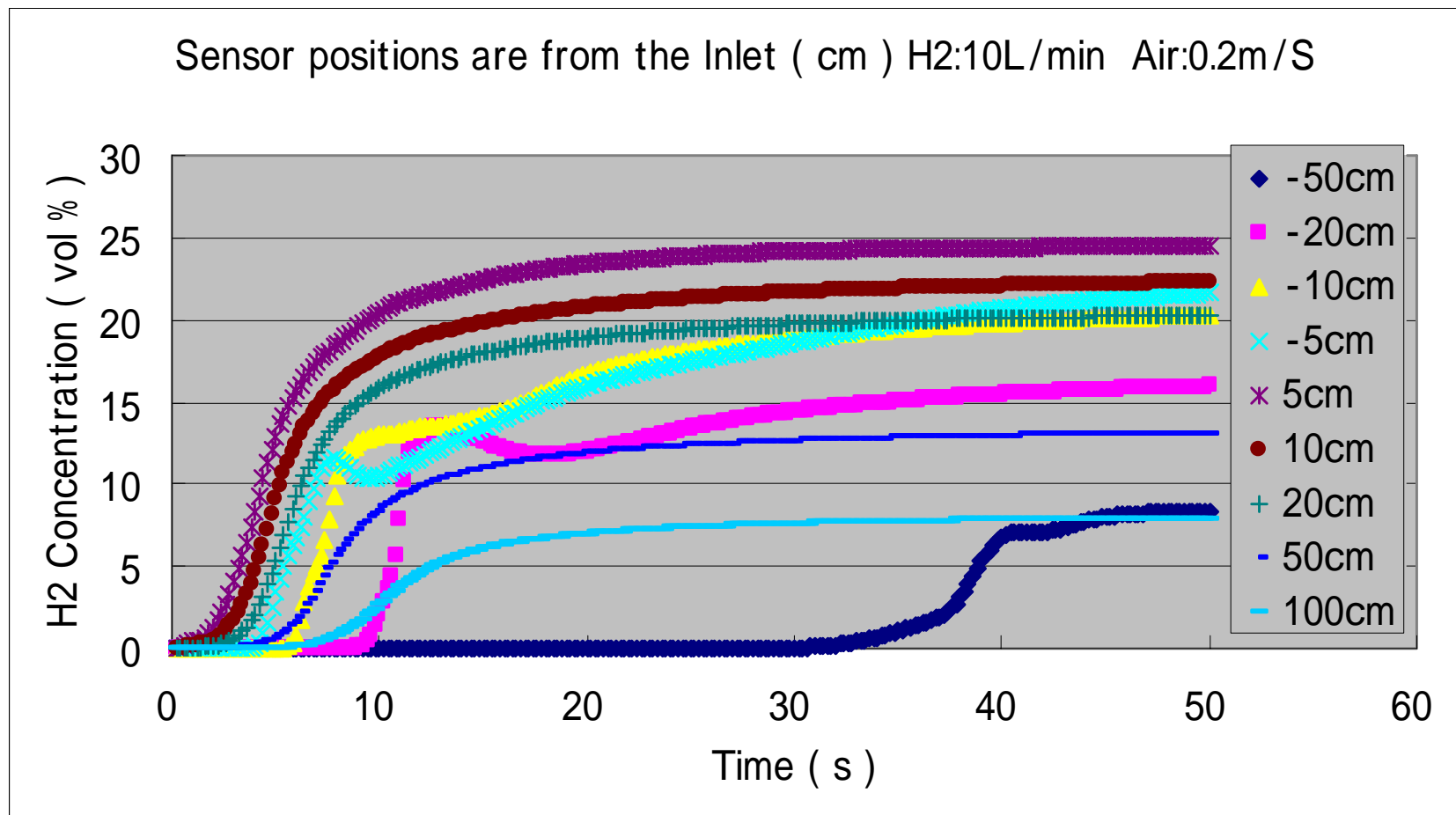


水素流量: 10L/min 風速: 0.2m/S

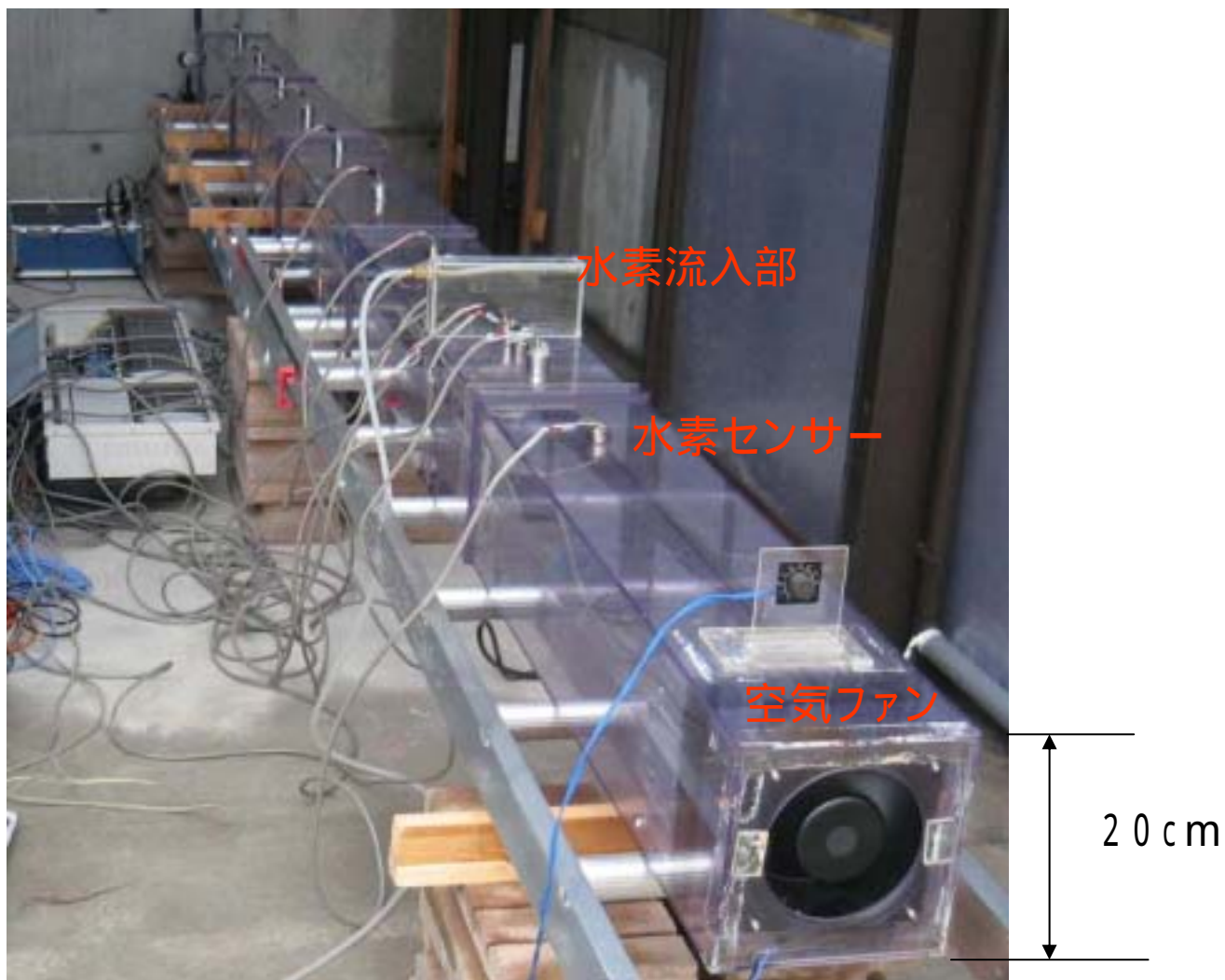
格子 265 × 49 × 29 時間刻み 0.2秒



# 各センサー位置の水素濃度変化



# ダクトモデル実験装置写真



# まとめ

- 水素は漏洩すると entrainmentによるよりも、密度差に起因する振動で混合し、水素濃度が低下する。非定常の3次元流れ。
- 燃焼下限近傍の水素濃度の領域が広い。
- 手持ちのCFDで解析可能

妥当性は井上雅弘(地球資源システム工学)の実験データ(福岡水素戦略会議支援)で検証する。

使用する解析コードで精度が異なるので、実用にあたっては要求される精度の考慮が必要