

三次元数値解析を用いた 小規模地下空間の浸水予測

京都大学大学院工学研究科
都市社会工学専攻
間島 真嗣




研究の背景と目的

都市部で氾濫すると地下空間に浸水のおそれ

地下空間 { 「地下街・地下鉄」 大規模
「中小ビルの地下階・地下室」 小規模

床面積や容積が小さく
急激な浸水深の増加が予想される

1999年6月福岡，同7月東京
小規模地下空間での死亡事故



階段部も含めた小規模地下空間での氾濫水の挙動を
解析モデルにより精度よく予測する



解析手法の選択

➤ これまでの解析手法（例えば，ポンドモデル）

対象：大規模な地下空間（地下街）

目的：氾濫水の拡がりの概略をつかむ

➤ 今回の解析対象：階段部も含めた小規模地下空間

目的：氾濫水の挙動を精度よく予測



氾濫水の挙動を精度よく予測するため、
三次元数値解析手法を用いる



解析手法の概要

- 計算領域を直交格子で分割
- 以下の基礎方程式を連立させて、
各計算格子での流速，水の存在割合を算定する方法

<連続方程式（質量保存式）(i=1,2,3)>

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

<運動方程式（水平二方向と鉛直方向）(i=1,2,3)>

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = G_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

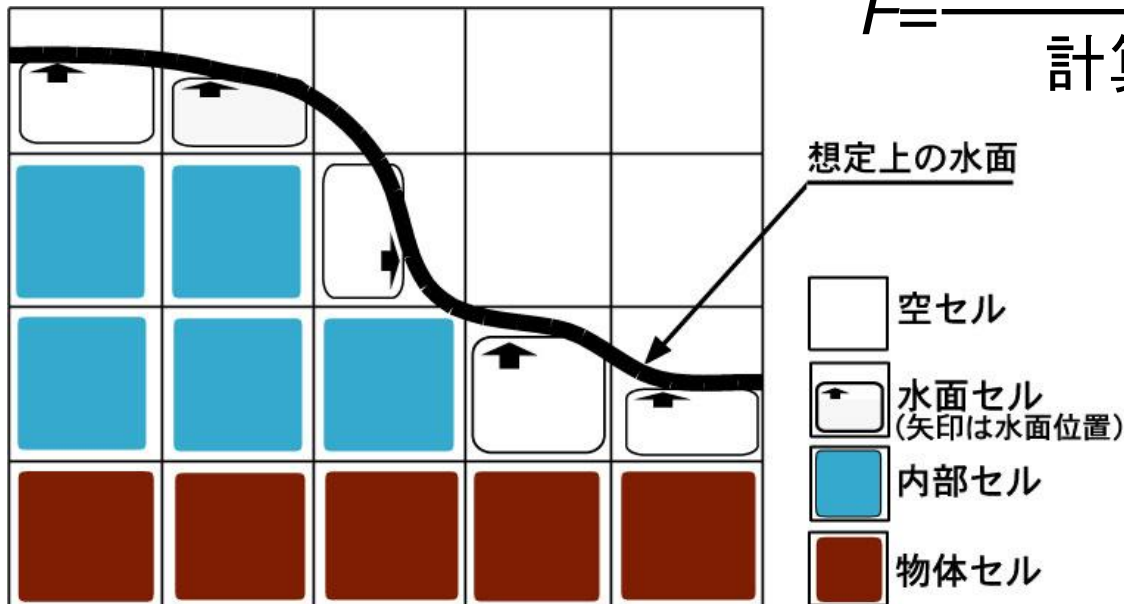
<VOF法(Volume of Fluid)にもとづく水面方程式>

水面の扱い（VOF法）

VOF (Volume of Fluid) 法での流体表現法

- ・ 計算セル内の流体配置を流体充填率 F で表す
- ・ 水面向きを周囲のセルによって決める
(6つの向き)

$$F = \frac{\text{計算セル中の流体体積}}{\text{計算セルの体積}}$$





解析対象

氾濫水は階段を經由して地下空間へ流入
地下空間内の氾濫水の挙動に大きな影響を及ぼす



階段部へ解析手法を適用できるかどうか検証

➤ 階段部のみを対象として解析

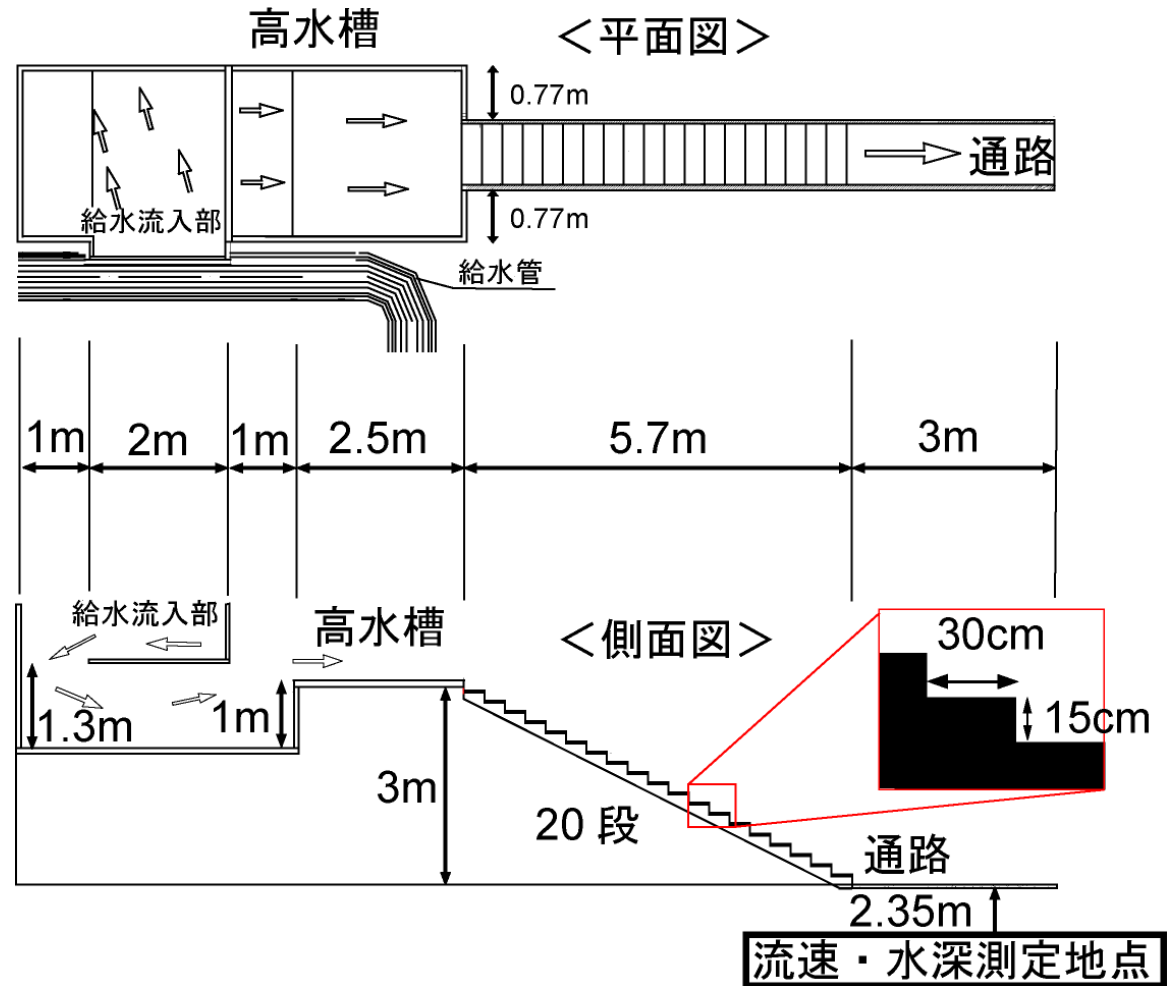
対象：実物大階段模型

そして、

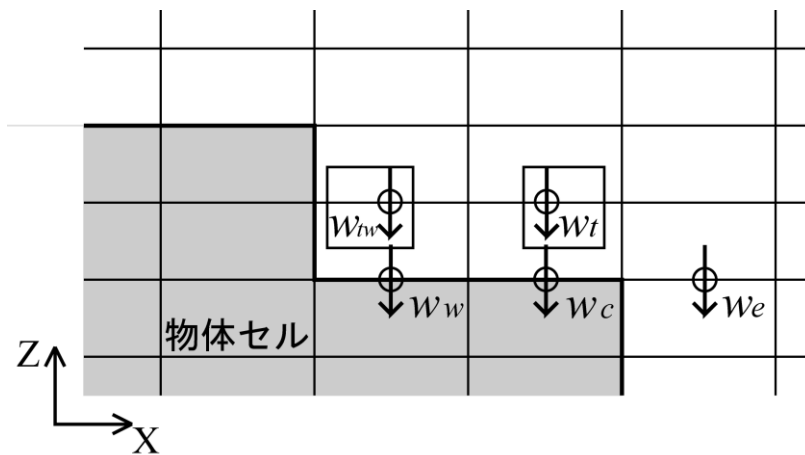
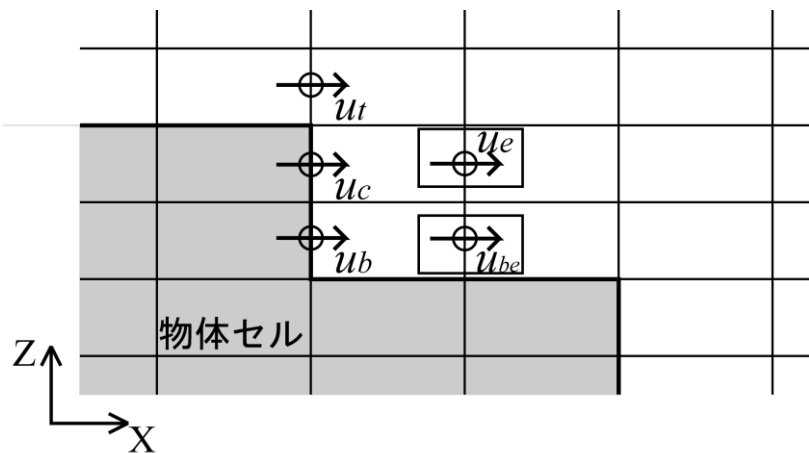
➤ 小規模地下空間を対象として解析

対象：小規模地下空間模型

実物大階段模型の概要

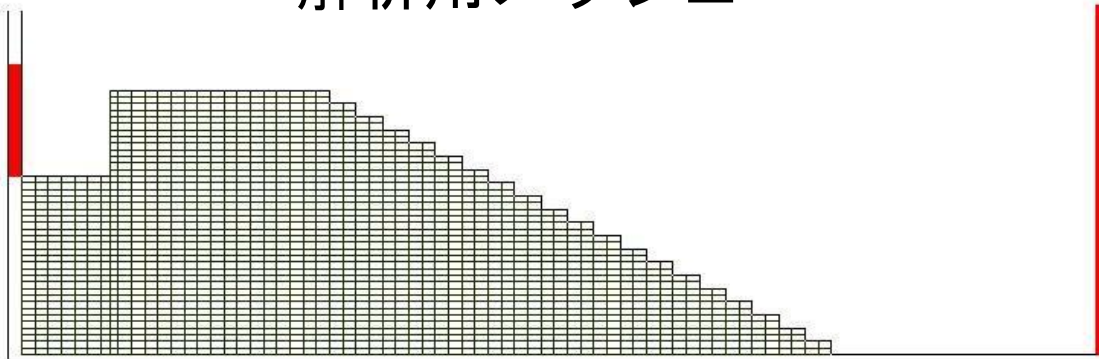


解析用メッシュ



解析用メッシュ

流入境界



流出境界

メッシュ数 110,864個

X方向82 × Y方向26
× Z方向52

計算条件

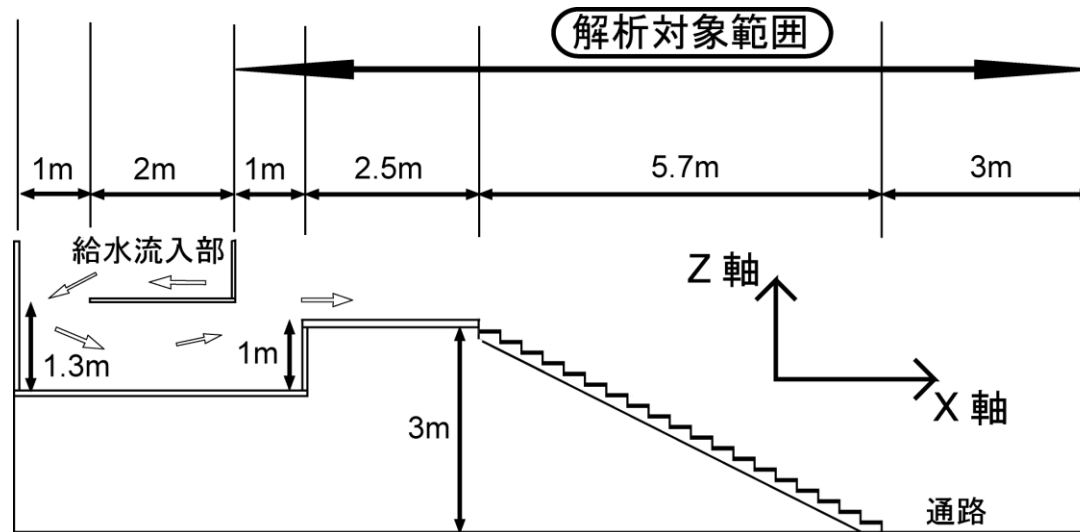
➤ 流入条件

境界値（流速値や乱流量）は予備計算により求めた高水槽の水深10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cmに相当する流量を与える

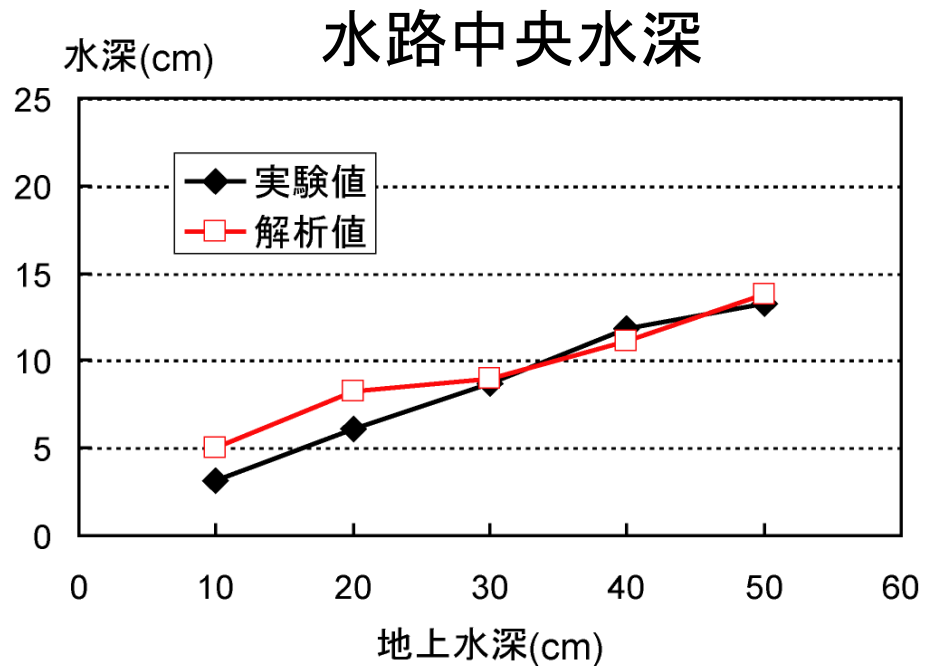
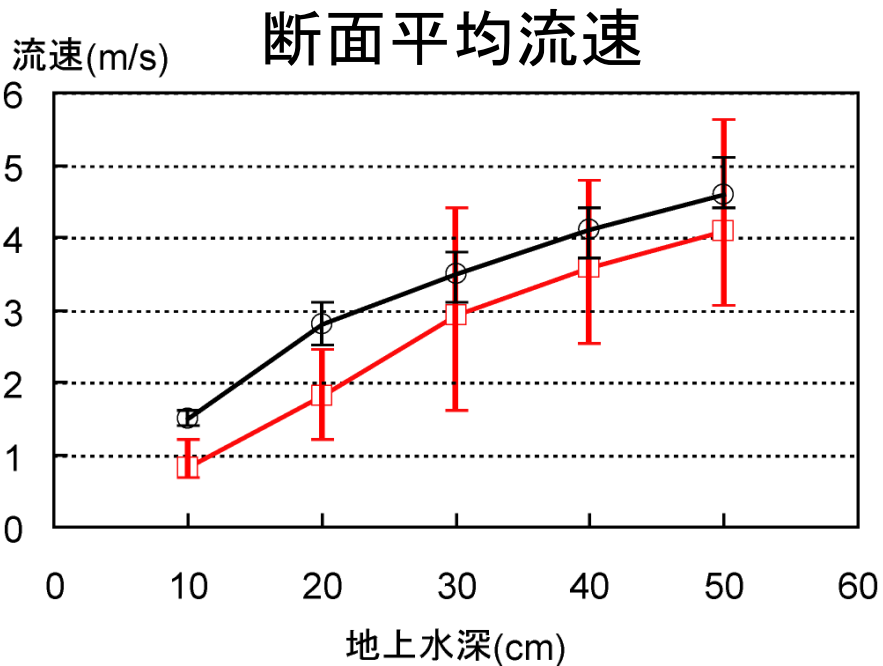
➤ 流出境界：自由流出

➤ フリースリップ

➤ $\nu_t = 1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, $\Delta t = 0.002 \text{ s}$



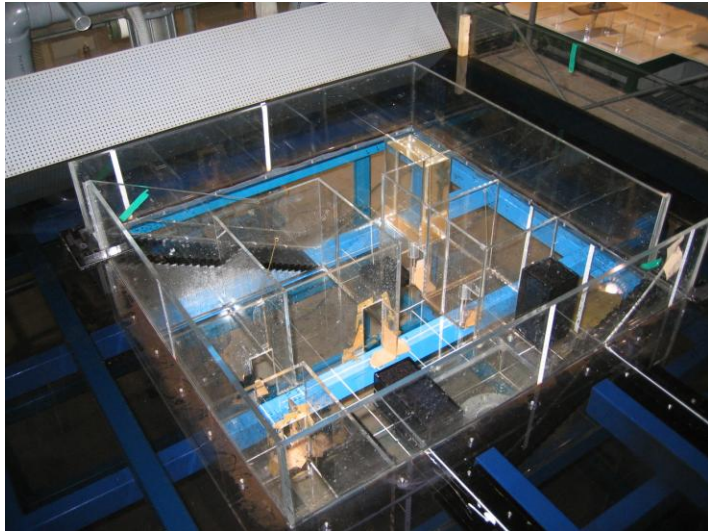
解析・実験結果の比較



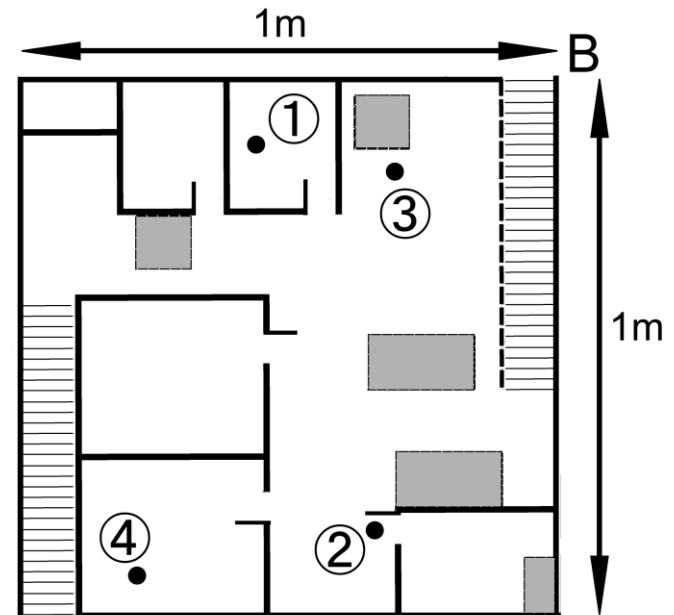
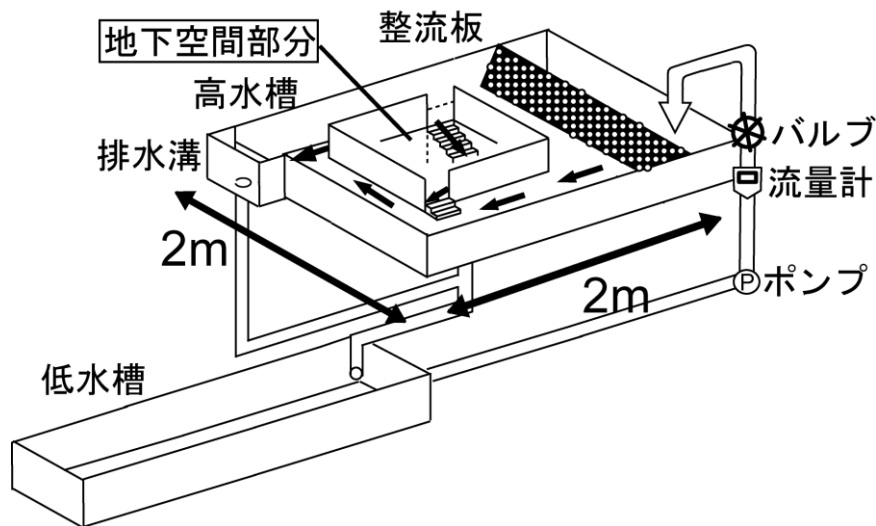
○ 最大
| 断面平均流速 (実験)
| 最小

□ 最大
| 断面平均流速 (解析)
| 最小

小規模地下空間模型の概要



- ◆ 縮尺 1/15
 - ◆ アクリル製
 - ◆ 仮想の地下空間
- $L_m/L_p = 1/15$
 $V_m/V_p = 1/\sqrt{15}$
 $T_m/T_p = 1/\sqrt{15}$
 $Q_m/Q_p = 1/15^2 \sqrt{15}$



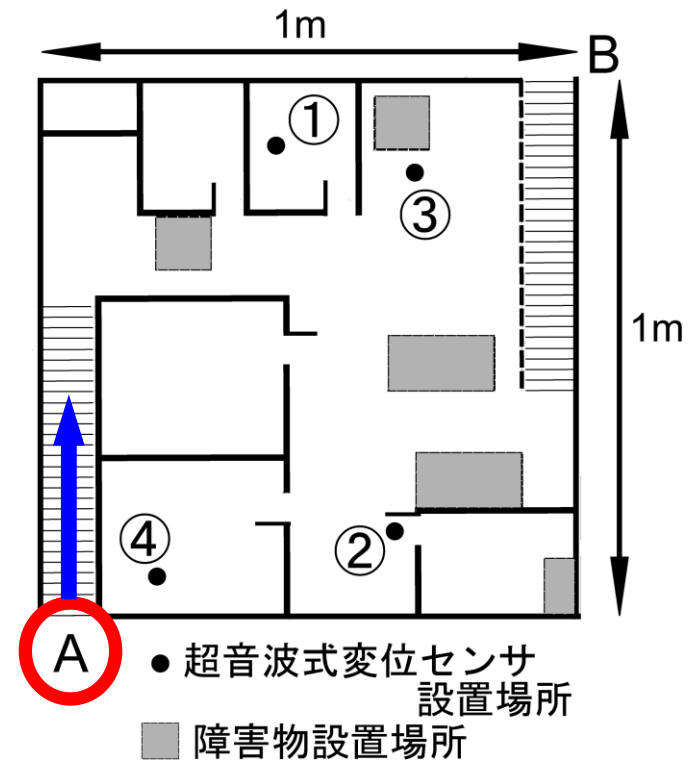
- A
- 超音波式変位センサ設置場所
 - 障害物設置場所

実験条件

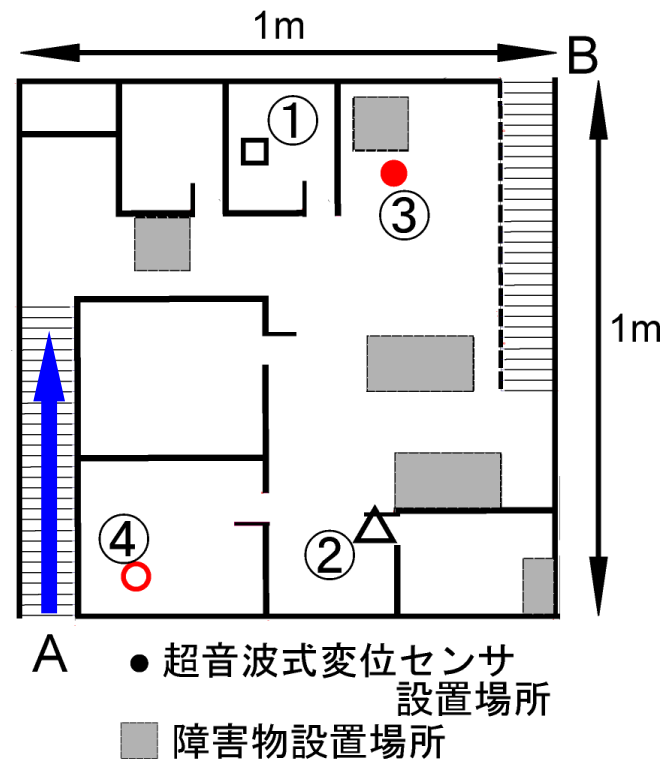
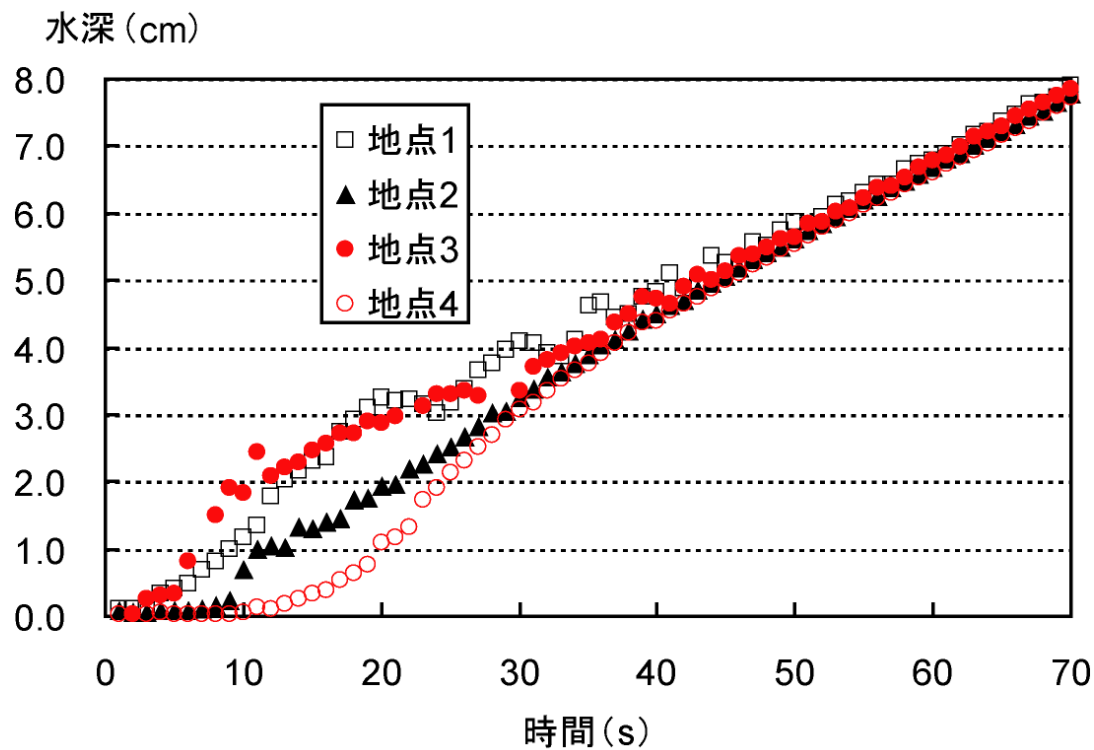
- 流入口を閉じて高水槽に水を貯留
- 高水槽の水深を5.1cmに
入り口の段差のため，越流水深3.3cm
- 水面の安定後，流入口Aのみ開放



- ・ 地点①～④で水深測定
- ・ 上部からビデオ撮影



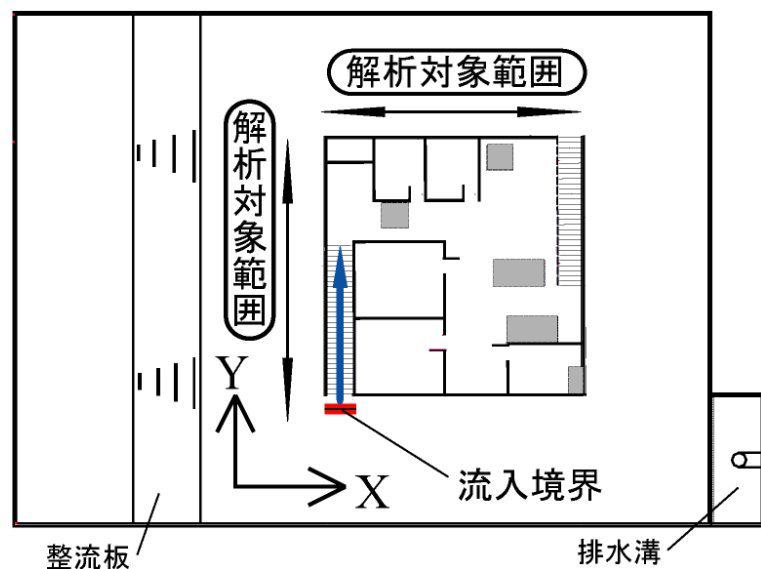
実験結果 (水深の時間変化)



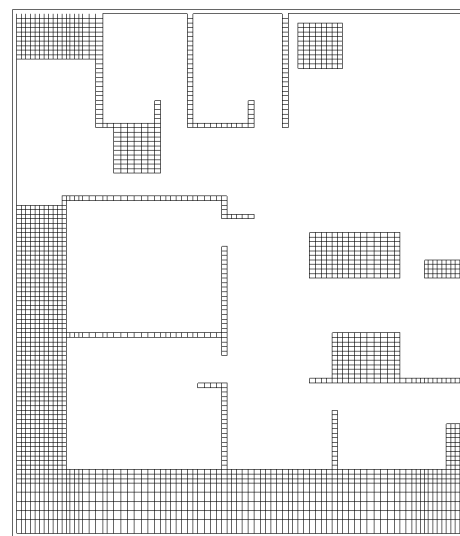
解析用メッシュと計算条件

地下空間部分を抽出

《平面図》



解析用メッシュ



メッシュ数 616,896個

X方向84 × Y方向108
× Z方向68

- 流入条件
境界に一定流量0.91l/sを与える
- フリースリップ
- $\nu_f = 1.7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $\Delta t = 0.001 \text{ s}$

ポンド(貯留槽)モデル

〈基礎式〉

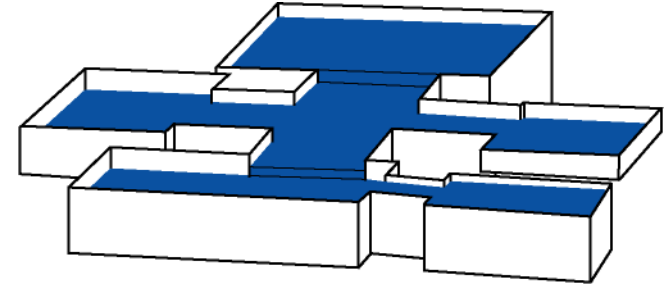
・連続式

$$A_f \frac{dh}{dt} = \sum_{i=1}^m Q_i + Q_{in}$$

・運動量式

$$\frac{L}{gA_b} \frac{dQ}{dt} = \Delta H - \alpha L Q |Q|$$

モデルの概念

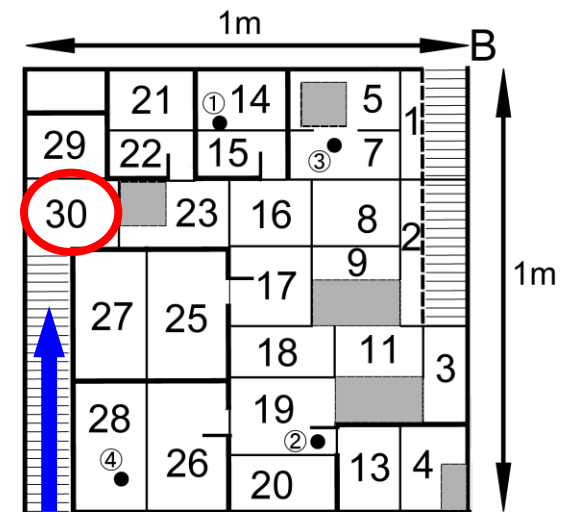


〈計算条件〉

➤ 30個の貯留槽に分割

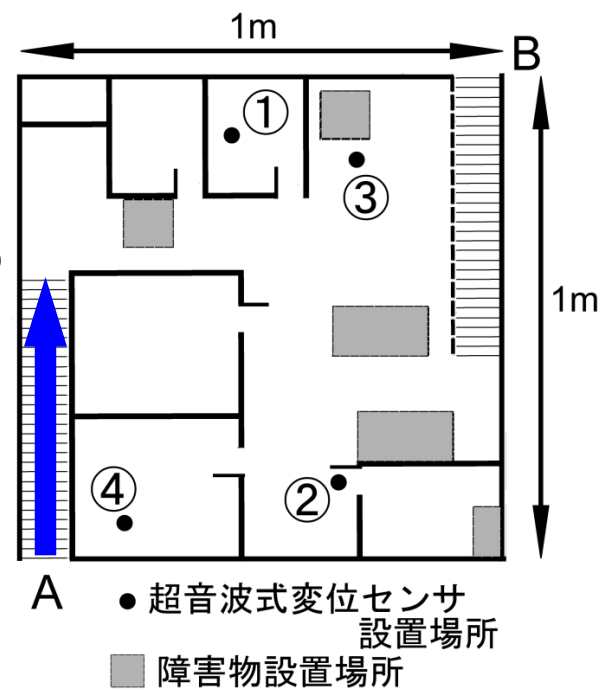
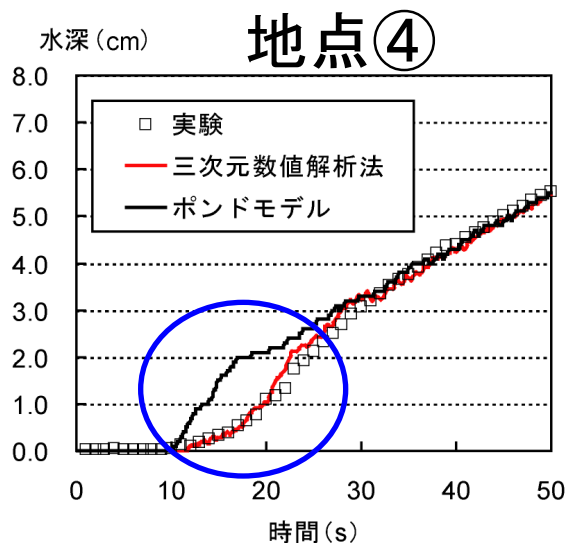
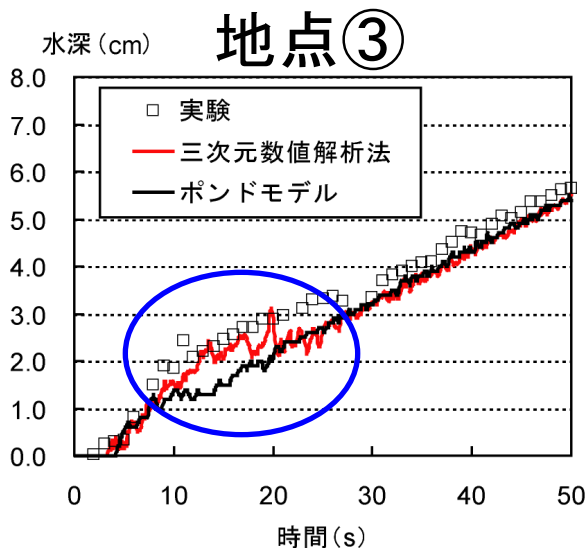
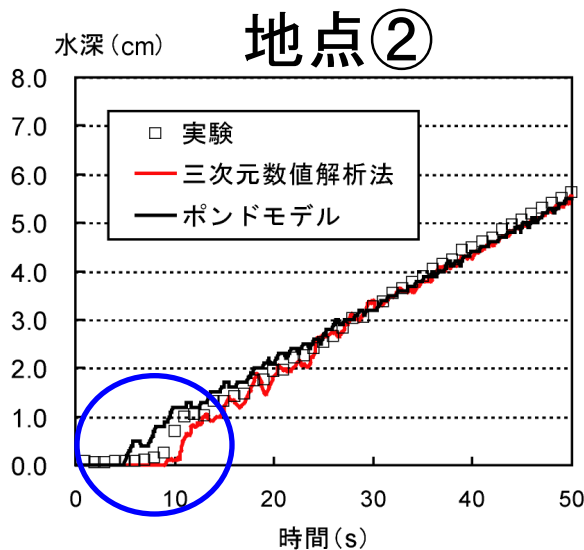
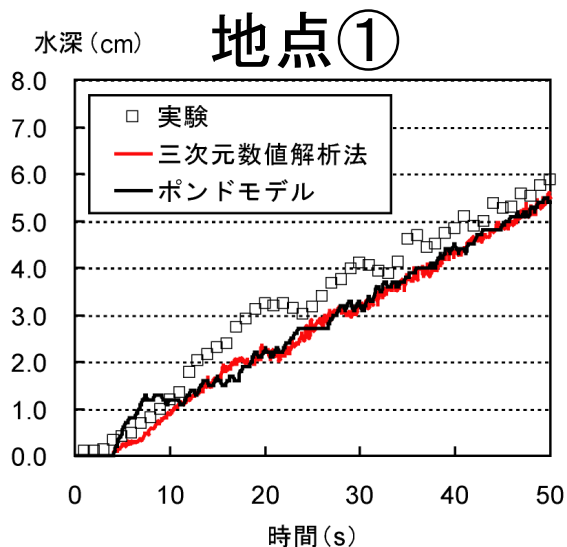
➤ 30番に0.91l/sを流入

➤ 粗度係数n=0.013

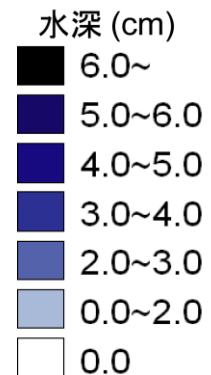
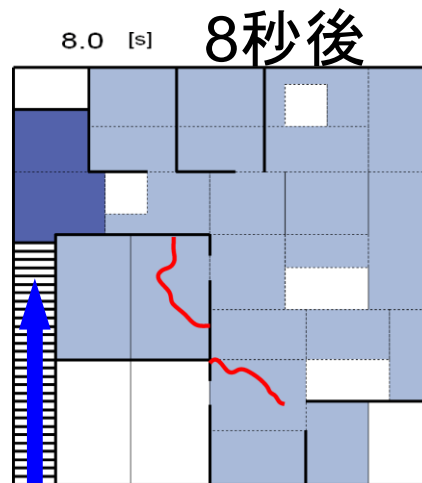
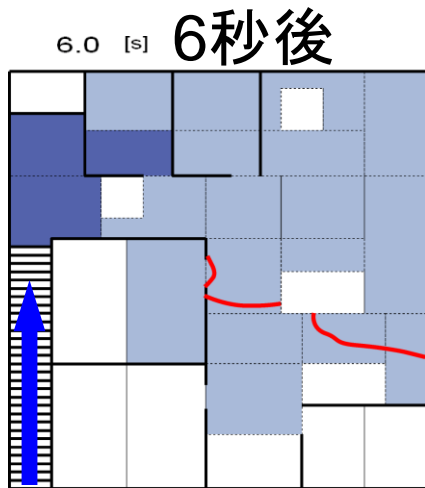
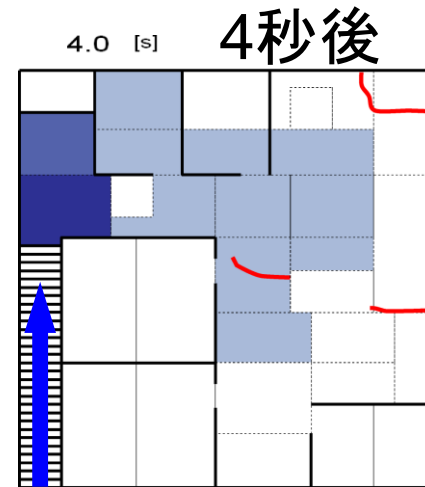
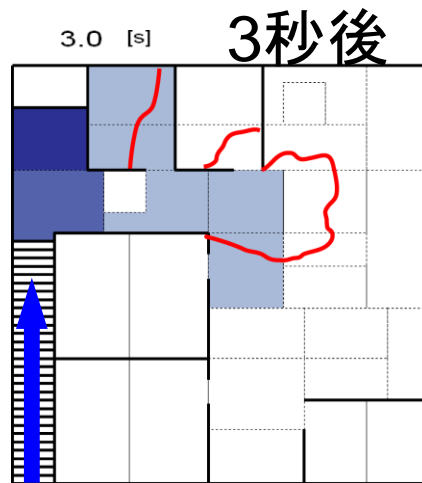
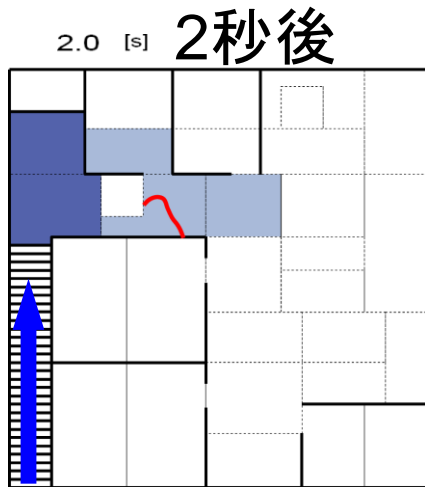


- A ● 超音波式変位センサ
設置場所
■ ブロック設置場所
数字はポンド番号

水深の時間変化



ポンドモデルでの先端の拡がり

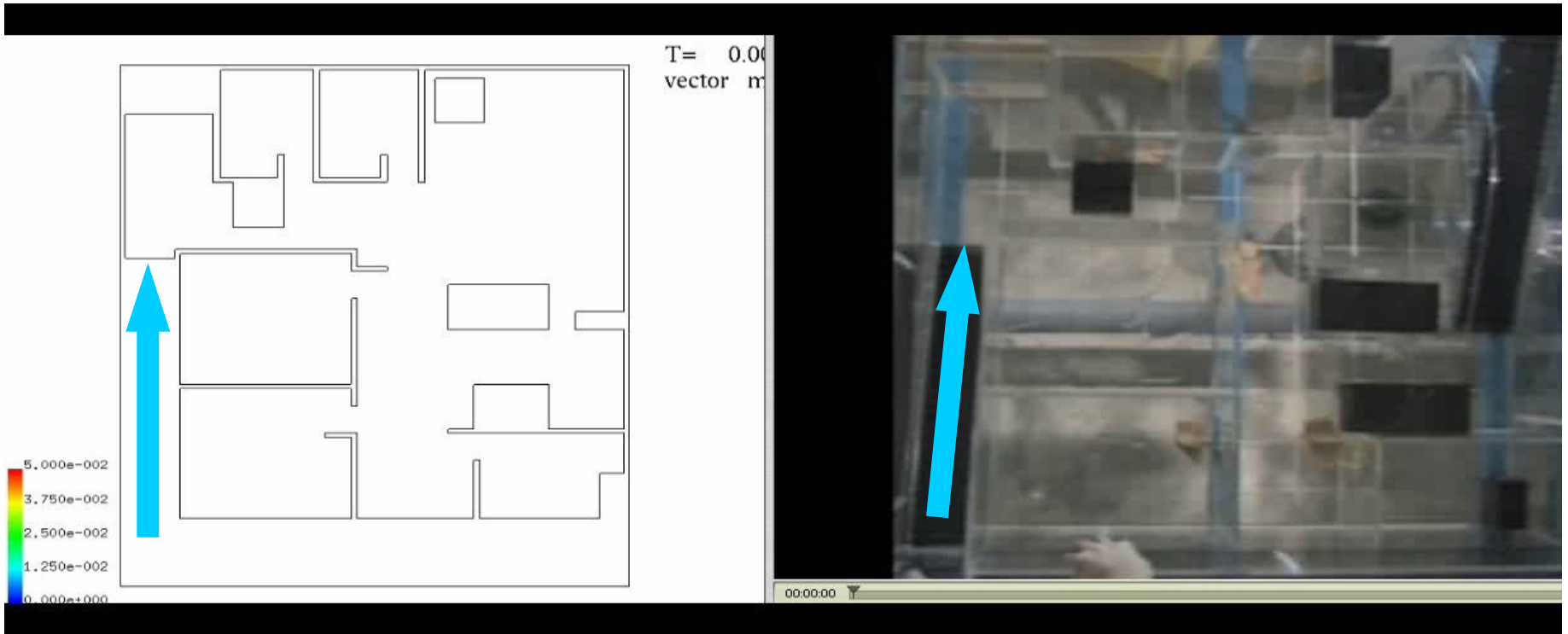


実験での
浸水の先端

三次元数値解析法での先端の拡がり

三次元数値解析法

実験





結論

- 実物大階段模型に解析手法を適用した結果，階段下流通路での流況をおおむね再現できたことから，解析手法を階段部に適用できることがわかった。
- 小規模地下空間模型に解析手法を適用した結果，階段上部に実験から算出した流量を与えた場合，実験結果を適切に再現できることがわかった。また，従来の浸水解析法の一つであるポンドモデルでは表現できない，障害物や流速の影響を考慮した解析を行なうことができた。