

地下空間浸水解析シミュレーション

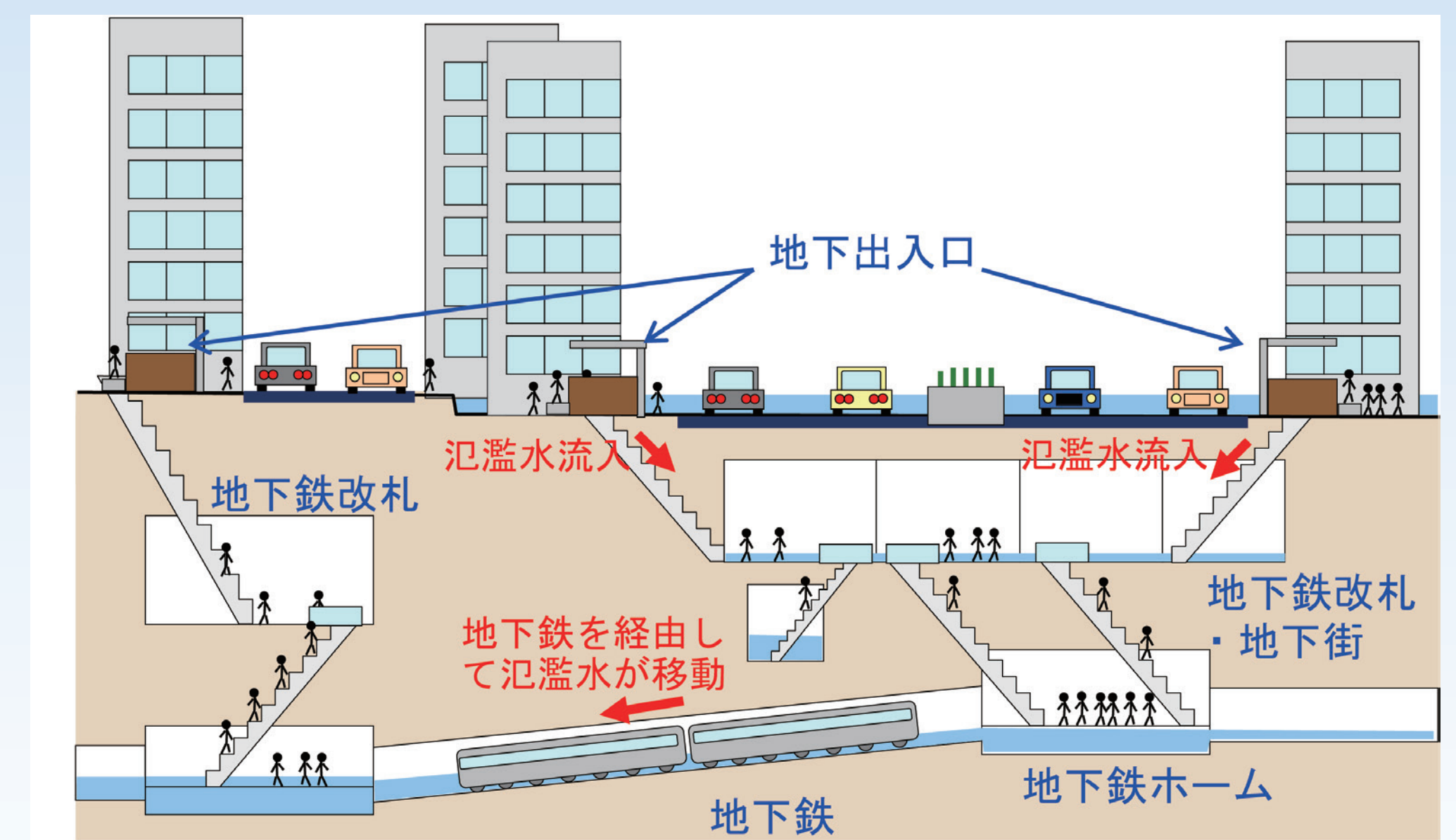
はじめに

我が国の都市では、人口や資産、各種の中核機能が集中し、地下空間を含めて高度な土地利用が行われています。

近年、局地的豪雨が多発し都市部での水害が増加している中、地下街や地下鉄等の地下空間における浸水被害も増加しています。地下空間の浸水は、人命に関わる深刻な被害につながる可能性が高く、その対策は重要な課題となってきました。

本技術は、大都市部の地下に広がる複雑な“地下空間”と“地上”の浸水状況を同時に解析し、地上から地下空間への氾濫水の流入、地下空間内の氾濫水の貯留、移動等（地下鉄路線を經由しての移動も考慮可能）を解析することができます。

また、河川からの氾濫やゲリラ豪雨等による浸水等、様々な水害を想定した浸水解析シミュレーションを実施することで、適切な浸水対策や避難計画の検討、BCP（事業継続計画）等の検討に有益な情報を得ることができます。



地下空間の浸水イメージ

必要とされる背景

平成27年7月に水防法等の一部が改正されました。これにより、以下が義務付けられました。

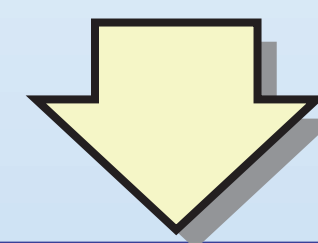
- ・ 想定し得る最大規模の洪水、内水又は高潮に係る浸水想定区域ごとに、浸水する地下街等の名称、所在地、洪水予報等の伝達方法等を地域防災計画に記載
- ・ 地下街等の所有者等による避難確保・浸水防止計画の作成

“安全で確実な避難確保”、“効果的な浸水防止計画”のための課題

- 様々な水害（河川の氾濫、内水氾濫*1、高潮・津波災害等）に対する地下空間の浸水状況の想定
- 地下空間施設の浸水防止のための検討（避難を考慮した適切な止水板の設置等含む）
- 上記とは別に、BCP（事業継続計画）*2の検討も必要

*1：“ゲリラ豪雨”等の大雨が降り、道路側溝、下水道等で雨が排水できずに氾濫すること。

*2：浸水による業務中断に伴うリスクを最低限にするための事業継続について戦略的に検討を行う必要がある（どうやって、浸水した水を排水するか等の復旧対策）



地下空間の浸水解析シミュレーションによる検討が有効

① 様々な水害に対する浸水状況を事前に精度よく想定できる	<ul style="list-style-type: none"> ・ 様々な水害が発生した場合に、浸水エリアや浸水深はどうか ・ どの地上開口部、地下街等のどこから流入、浸水するのか ・ 地下街等のどこに水がたまるのか ・ どれくらいの時間で浸水するのか、浸水が到達するのか ・ どれくらい浸水が継続するのか
② 浸水防止策の効果把握できる	<ul style="list-style-type: none"> ・ 止水板の効果的な配置検討 ・ 地下街等の浸水開始・水没時期の遅延
③ 地下空間からの排水検討が可能	<ul style="list-style-type: none"> ・ 排水方法や排水ルート、排水時間、効果

地下空間浸水解析シミュレーション

浸水解析モデルの特徴

地下空間の浸水状況を精度よく把握するためには、地下鉄、それに接続する地下街等の全ての地下空間をモデル化することが重要です。

また、地表と地下空間を同時に解析可能な浸水解析モデルによるシミュレーションにより、地下空間内の時々刻々の浸水状況、各種浸水対策の効果等の把握、様々な水害を想定した検討が可能となります。

【地表モデル】

- ・洪水ハザードマップで用いられている氾濫解析モデル

+

【地下空間モデル】

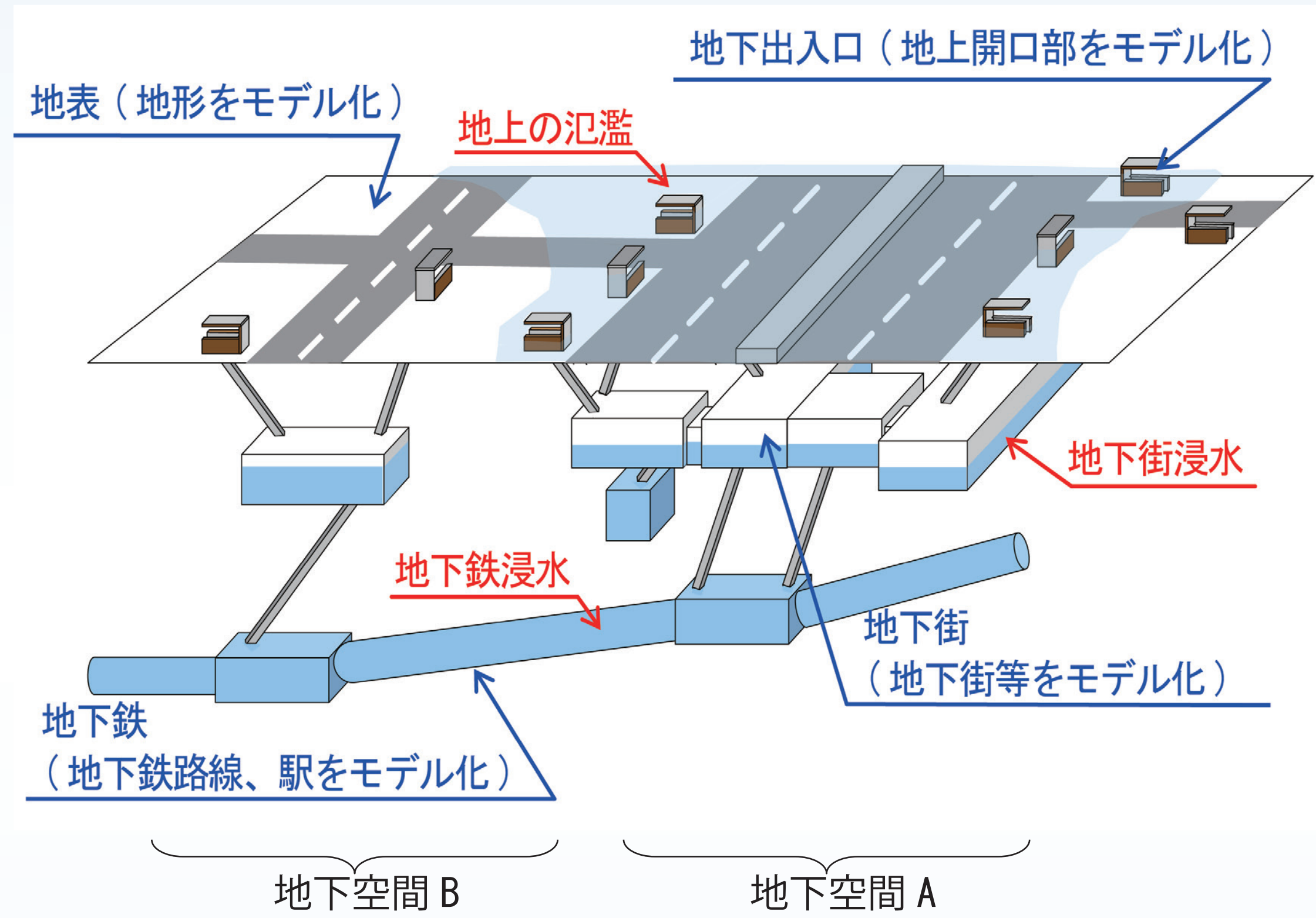
- ・地下空間（地下街、地下鉄、地下室、地下駐車場等）の浸水状況を解析するモデル

=

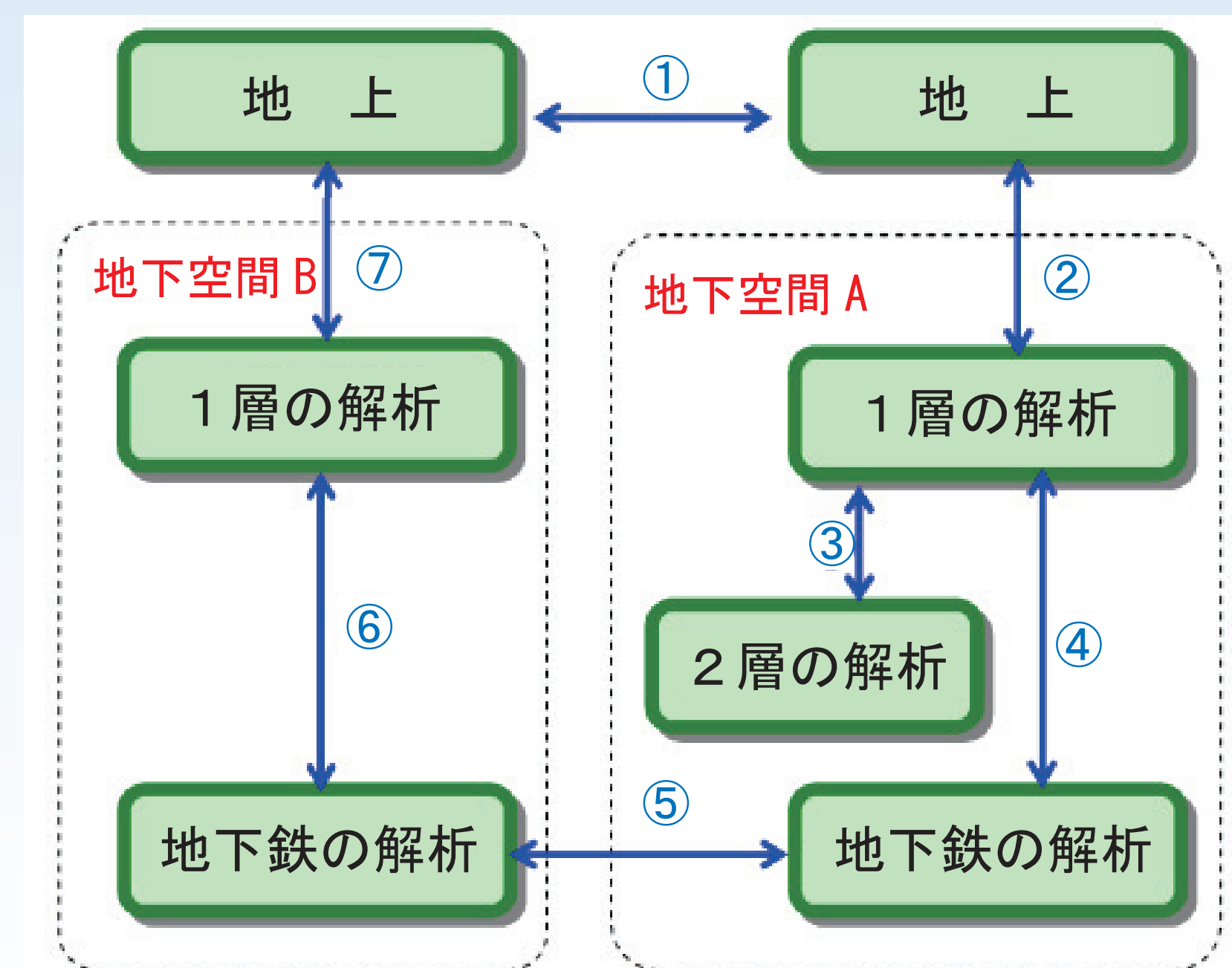
【地上と地下を同時に解析】

- ・地上・地下空間の時々刻々の浸水状況を把握可能
- ・様々なシナリオによる浸水状況を想定可能

分類	解析方法
地上	平面二次元不定流解析モデルを採用
地下街 地下駐車場	地下街等の店舗や通路を複数の箱と見立てて H~V（水深と容量）の関係で表現
地下鉄	地下鉄路線を管と見立てて、プライスマンロットによる一次元不定流解析モデルを採用



【解析モデルのイメージ】

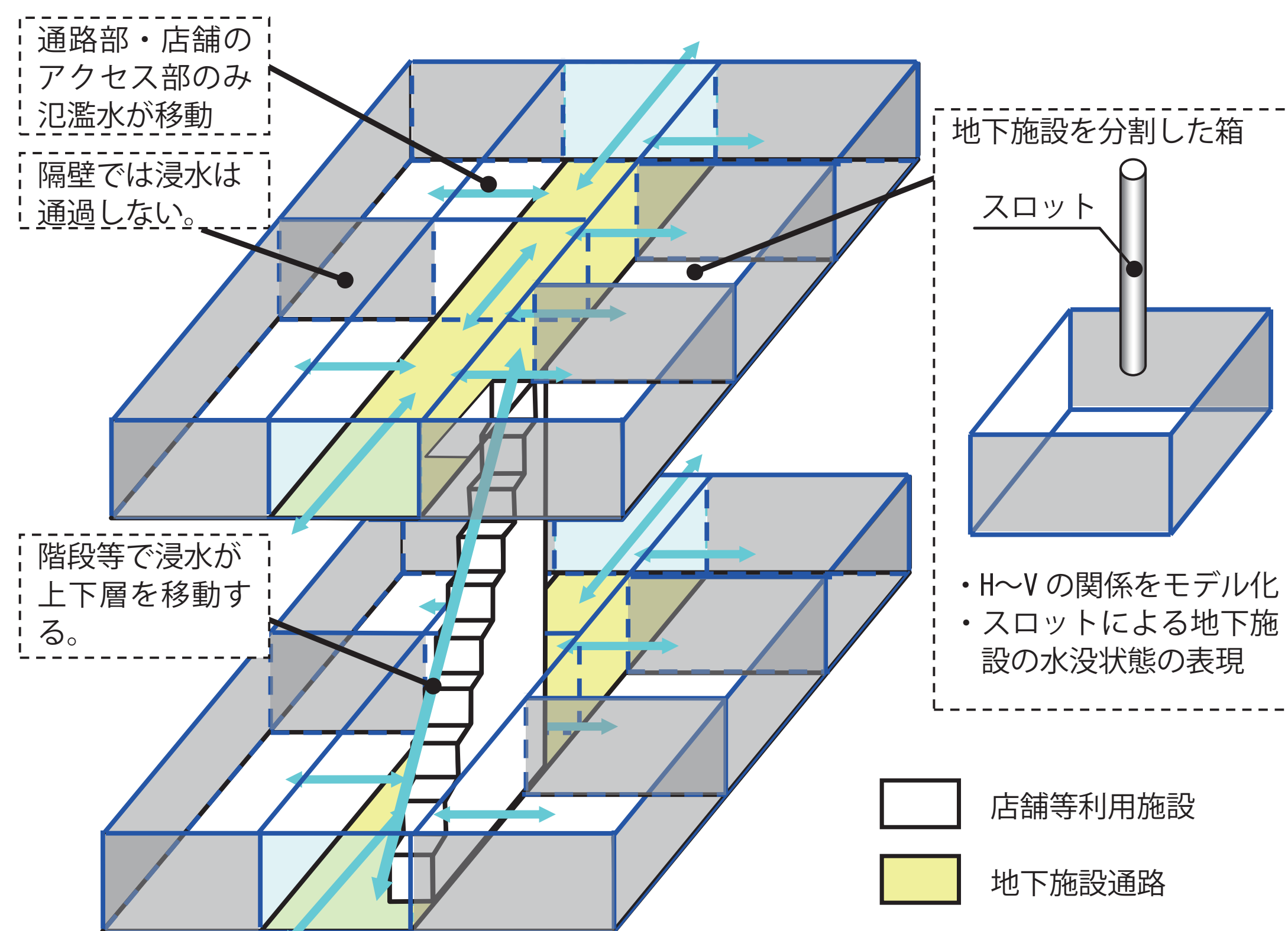


項目	解析の流れ
地上	① 地上における氾濫水の移動
地下空間 A	② 地上出入口から地下空間への氾濫水の流入
	③ 地下空間の1層から2層への氾濫水の流入
地下鉄路線	④ 地下空間の1層から地下鉄への氾濫水の流入
	⑤ 地下鉄路線を通じて、地下空間Aから地下空間Bへの氾濫水の移動
地下空間 B	⑥ 地下空間の1層から地下鉄への氾濫水の流入
	⑦ 地上出入口から地下空間への氾濫水の流入

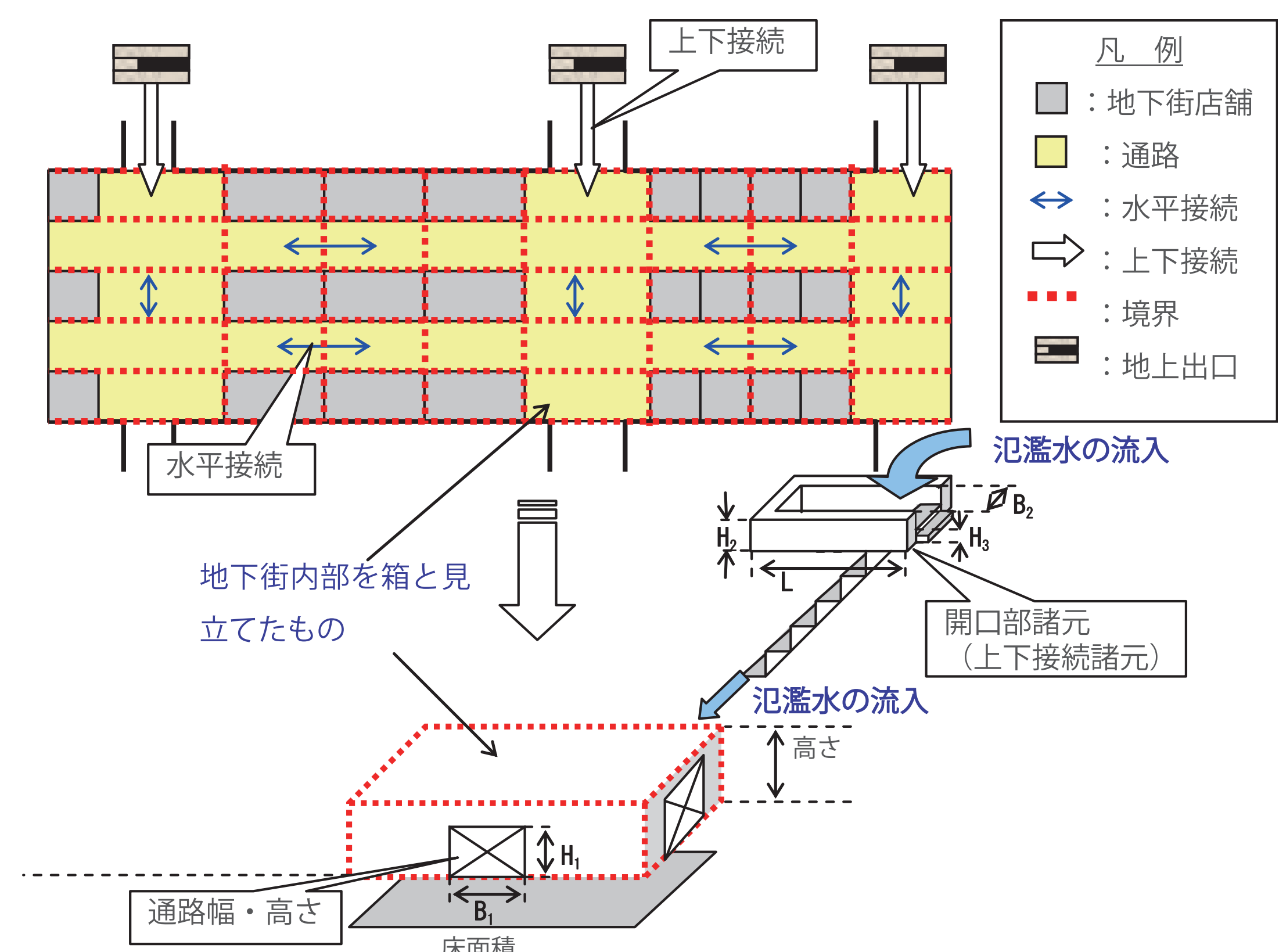
【解析の流れのイメージ】

浸水解析モデルの概要（地下街等のモデル化）

地下街等における氾濫水の流れを適切に表現するために、地下街の内部を分割して個々の箱と見立ててモデル化します。店舗を構成する壁面等を考慮することで実態の形状に応じた氾濫水の流れを再現します。また、階層間（上層と下層）では、スロットを設置することで地下街の各層の水位差に応じて氾濫水の流れを再現します（下層から上層、地下空間から地表への流出も表現）。



【地下空間の階層構造のイメージ】

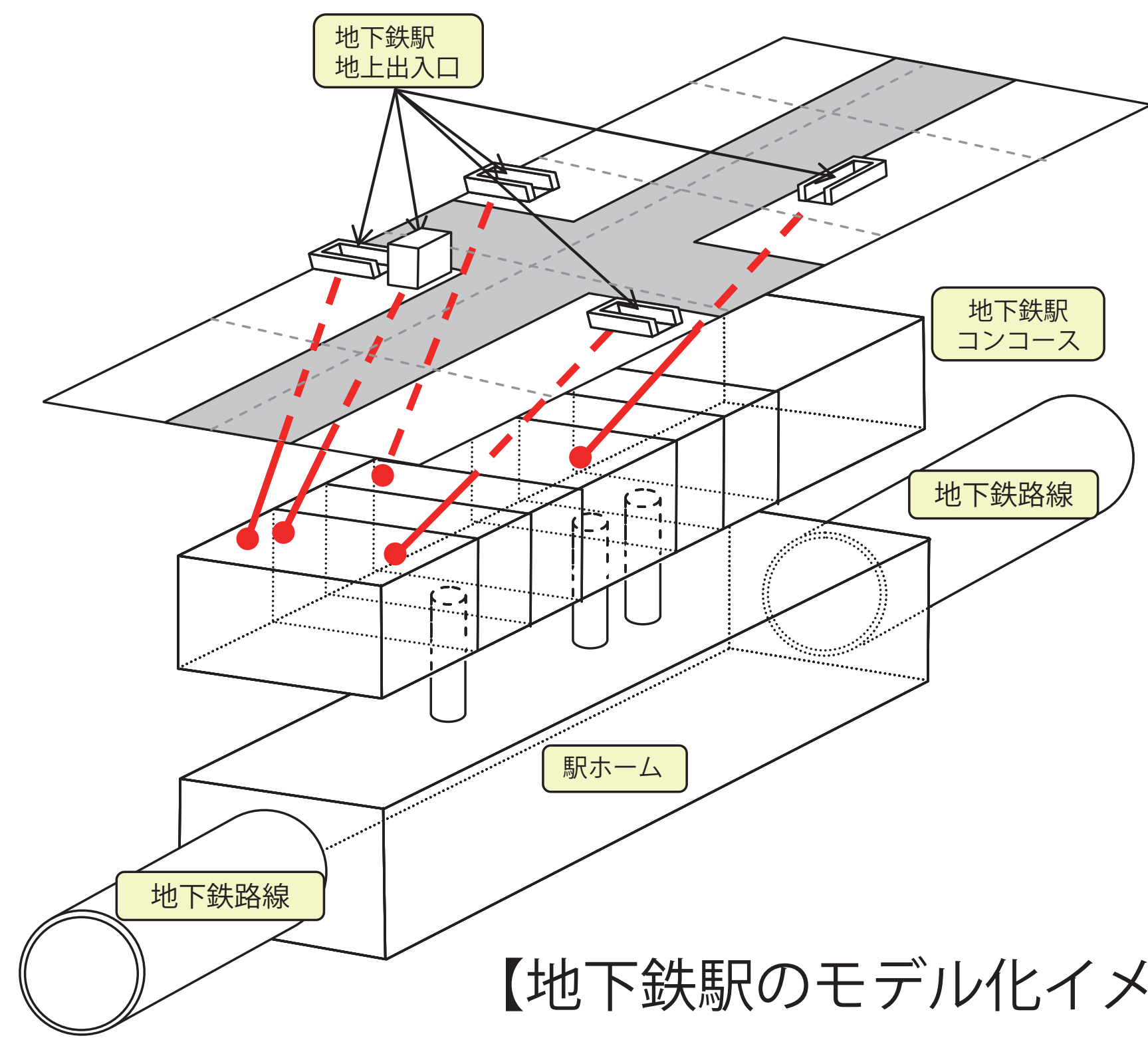


【地上流入口と地下空間の接続イメージ】

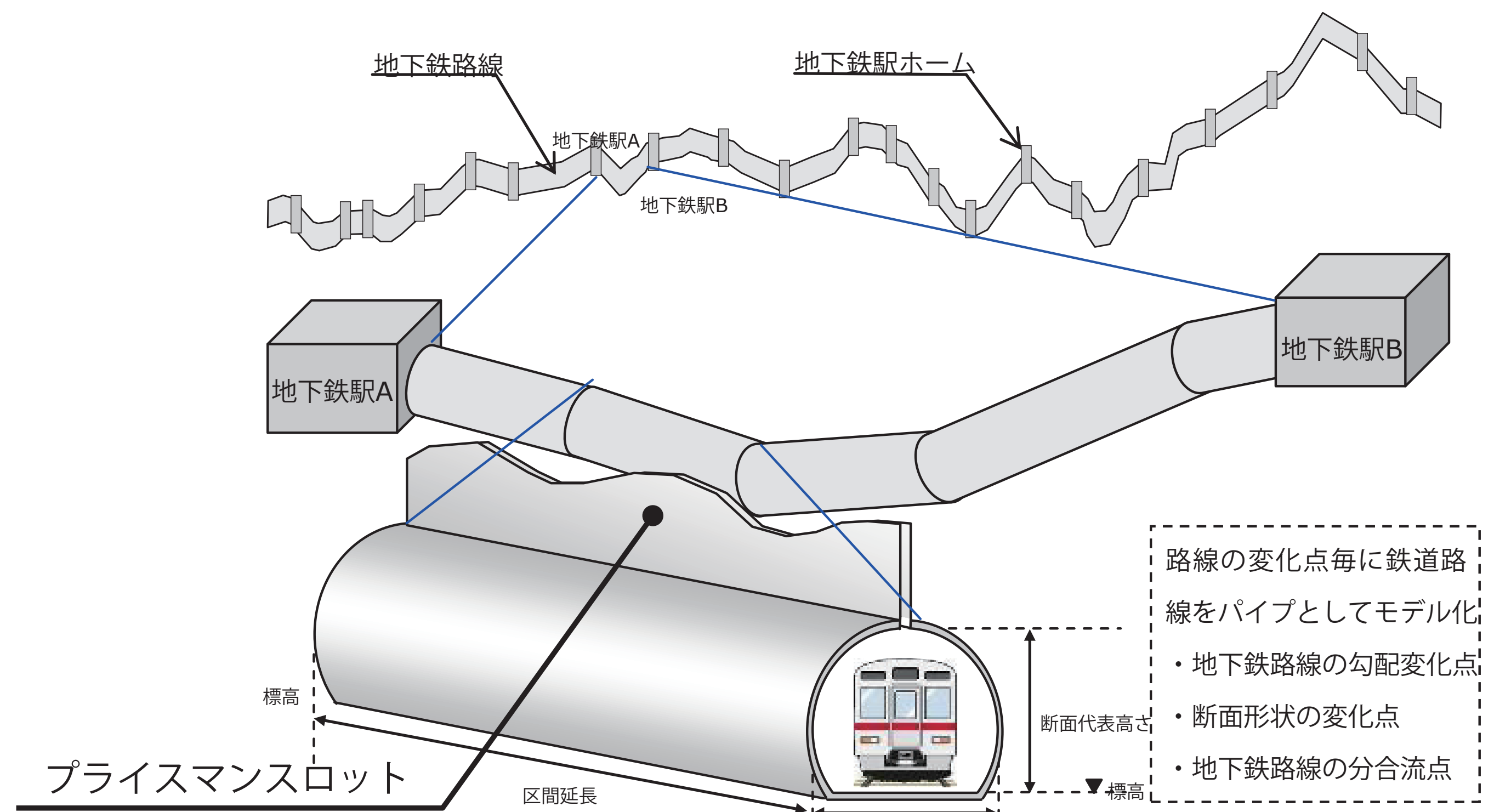
地下空間浸水解析シミュレーション

浸水解析モデルの概要（地下鉄のモデル化）

地下鉄駅は地下街と同様の考え方でモデル化を行います。地下鉄路線は、管と見立ててモデル化を行います。地下鉄路線では、氾濫水の量によって満杯状態（圧力状態）で流れる場合や開水路状態で流れる場合があります。また、地下鉄路線を経て地下街に氾濫水が逆流する等の現象が生じます。これらを適切に再現するために、プライスマンスロットによる一次元不定流解析を行います。



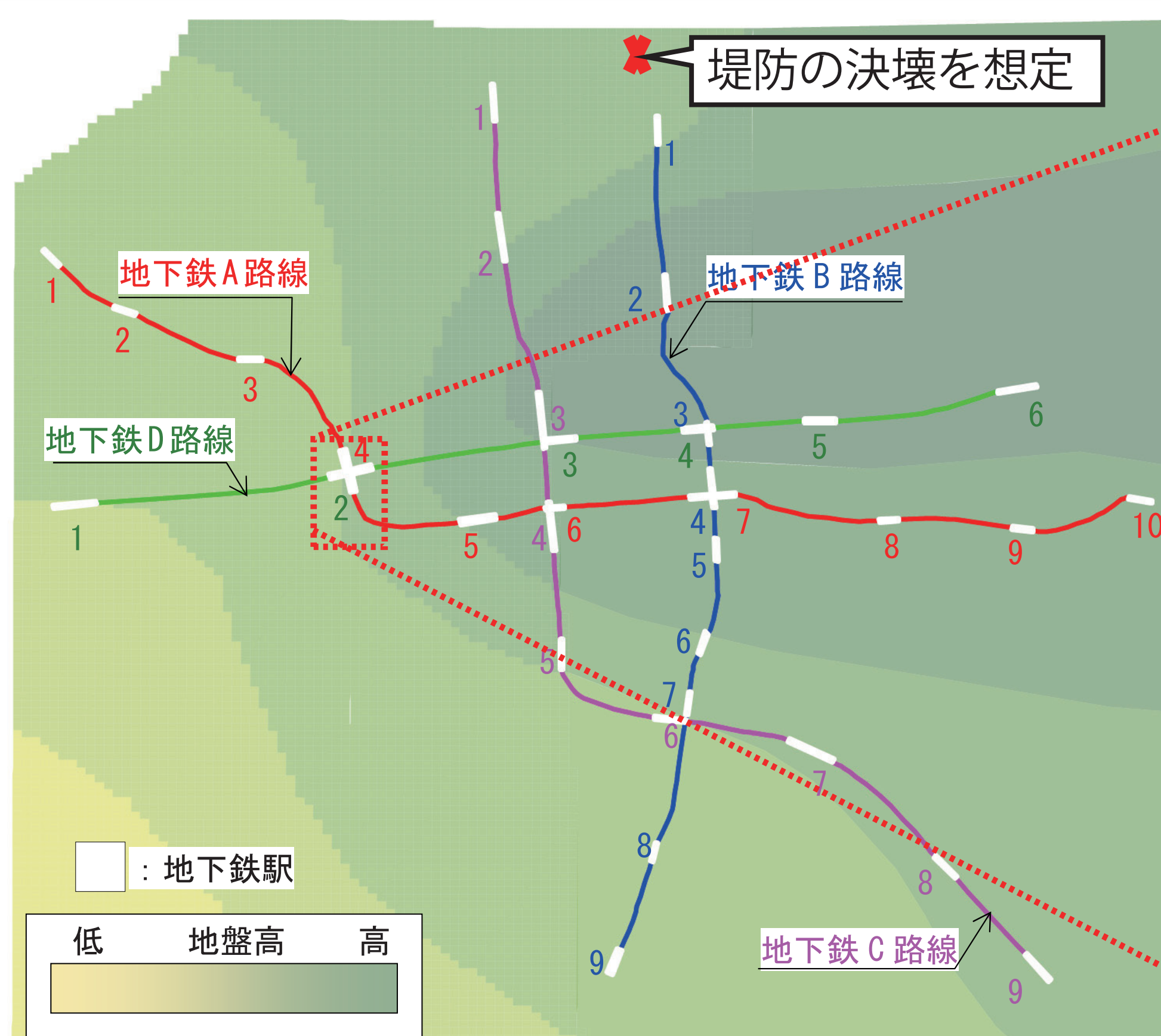
【地下鉄駅のモデル化イメージ】



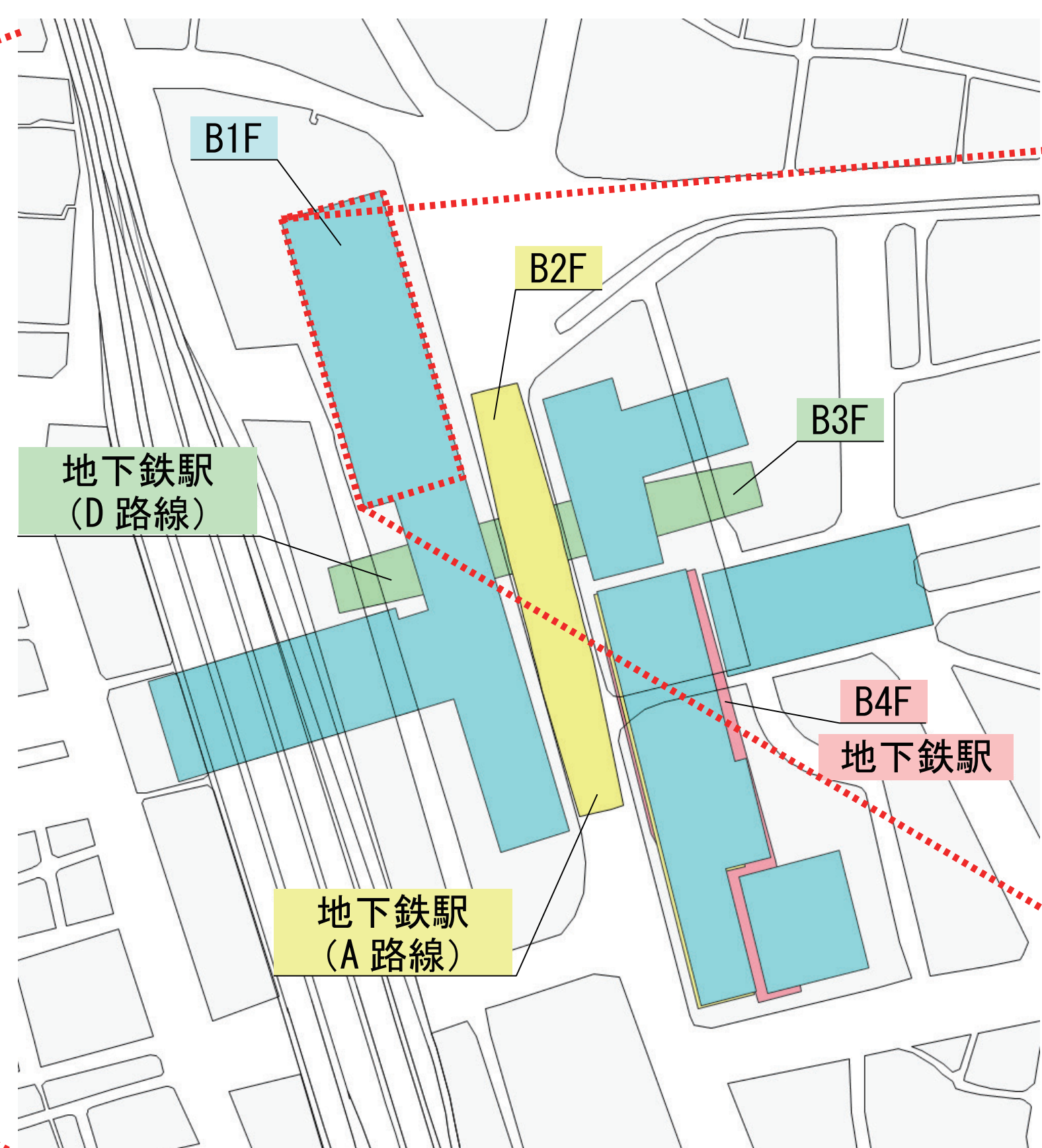
【地下鉄路線のモデル化イメージ】

地下空間浸水解析シミュレーション例

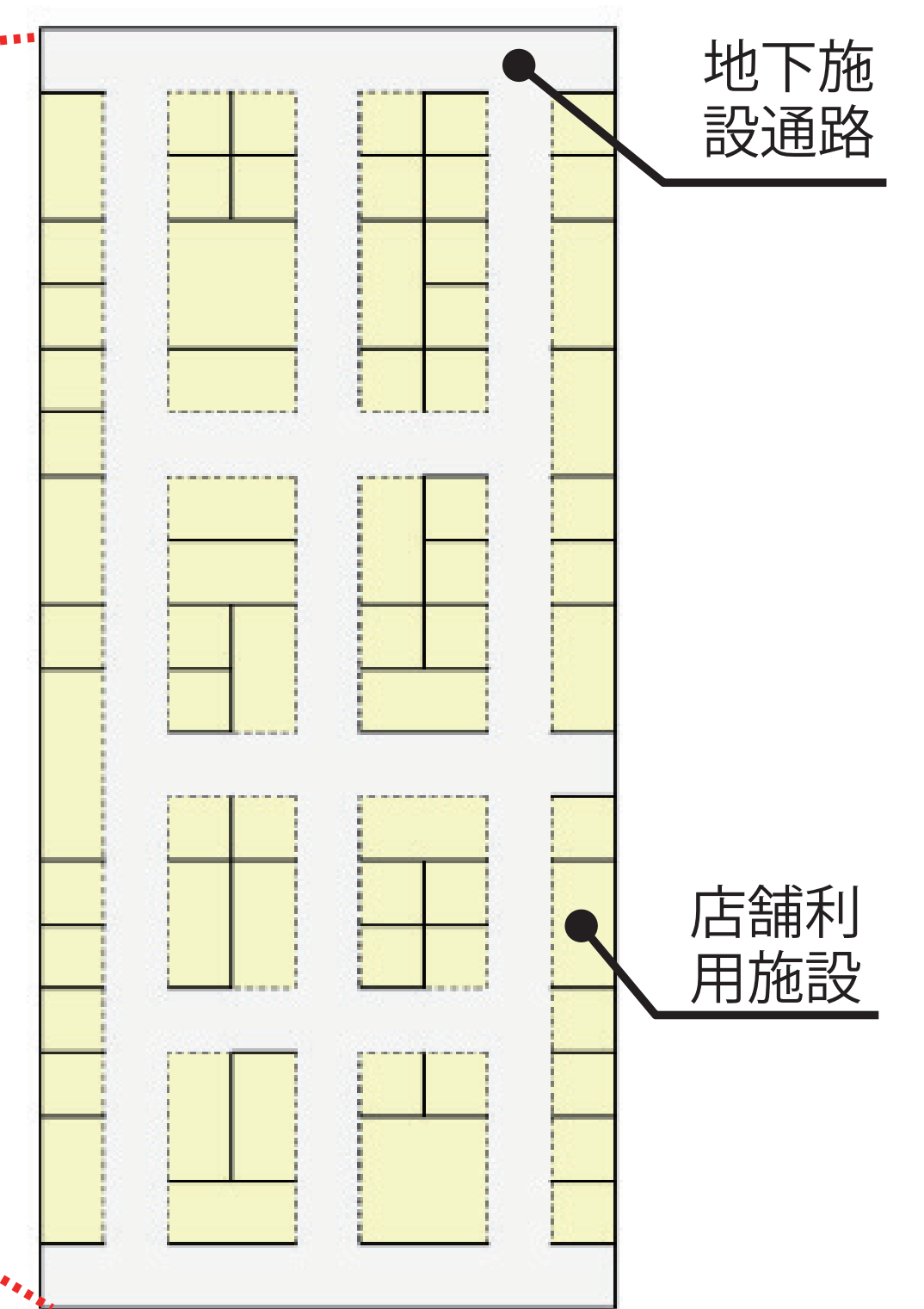
地表と地下空間（地下街、地下鉄）をモデル化した仮想空間に対して、地下空間浸水解析シミュレーションを実施した例を以降に示します。



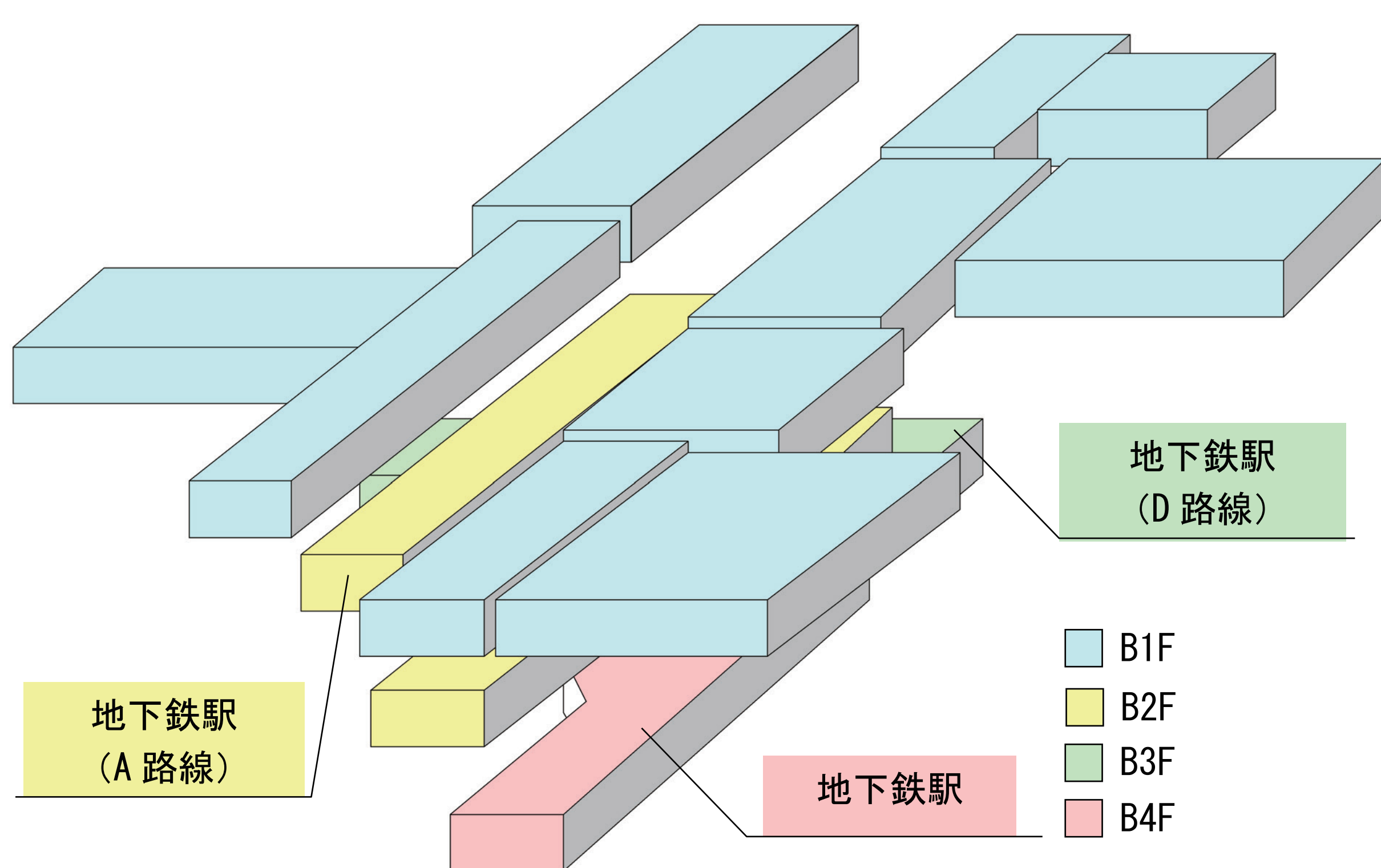
【地上の地形と地下鉄路線の状況（番号は駅を示す）】



【地下街の平面的な配置状況】

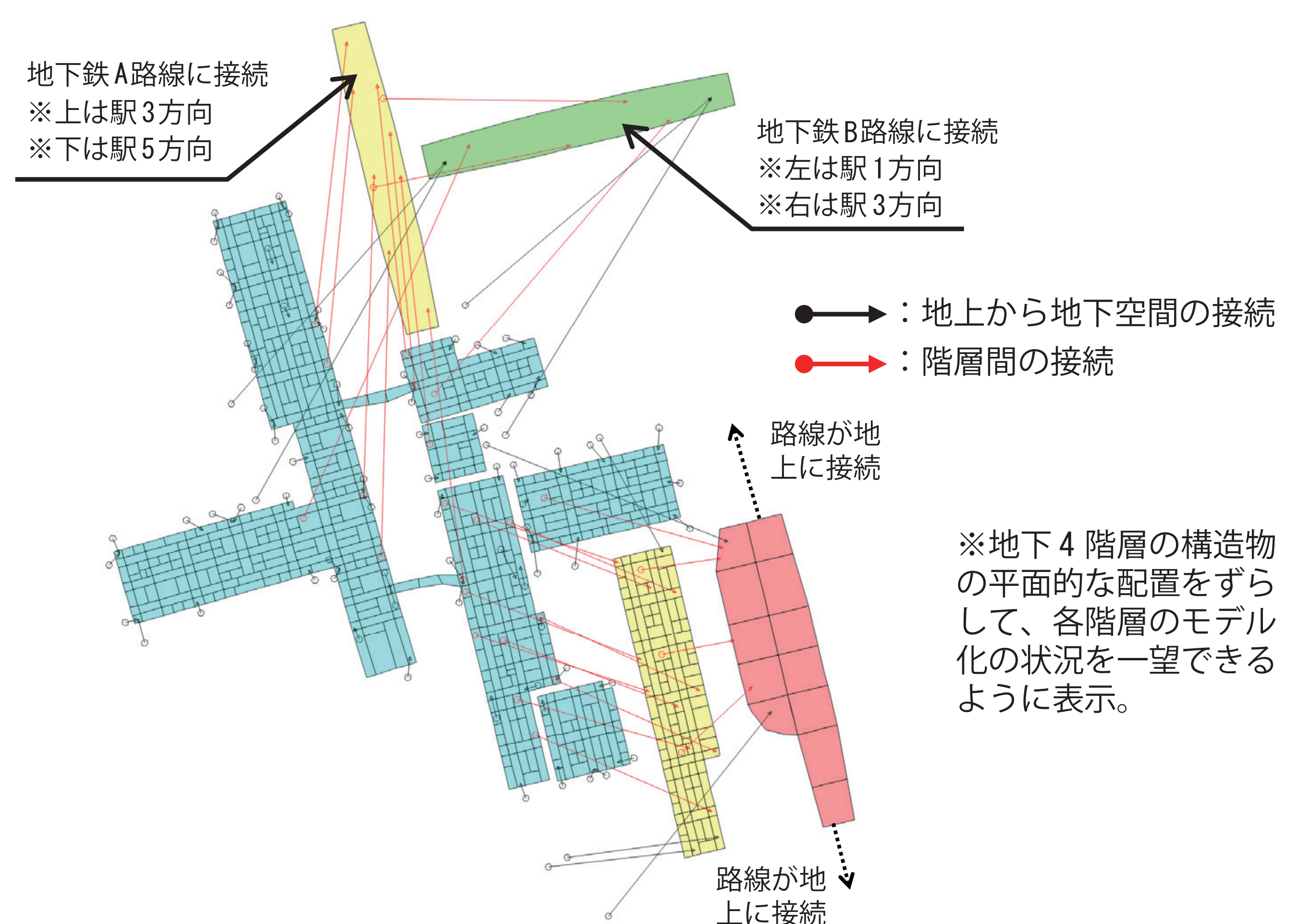


【地下街内部の状況】



※地下街、地下鉄駅、鉄道駅（地上から地下へ路線が接続）で構成される4階層構造の地下空間を想定
 ※地上と、階層間は、アクセス路で接続される。鉄道駅は、鉄道路線で地上と接続されるものとした。

【地下空間の階層構造の状況】

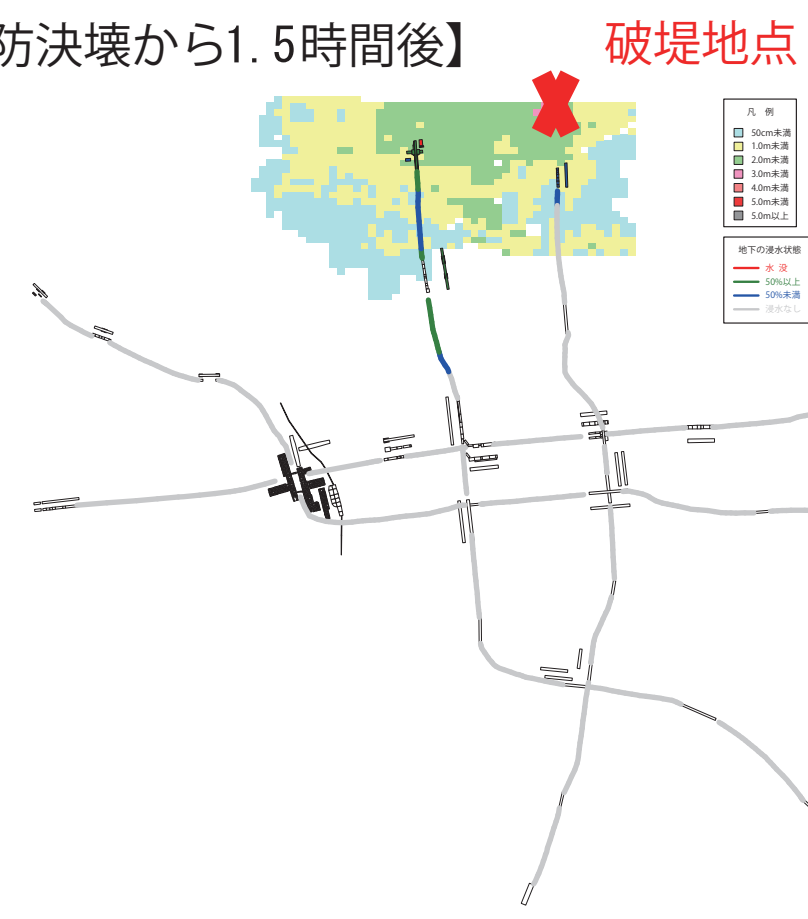


【地下空間のモデル化状況】

地下空間浸水解析シミュレーション

地上と地下鉄の広域的な浸水状況の把握

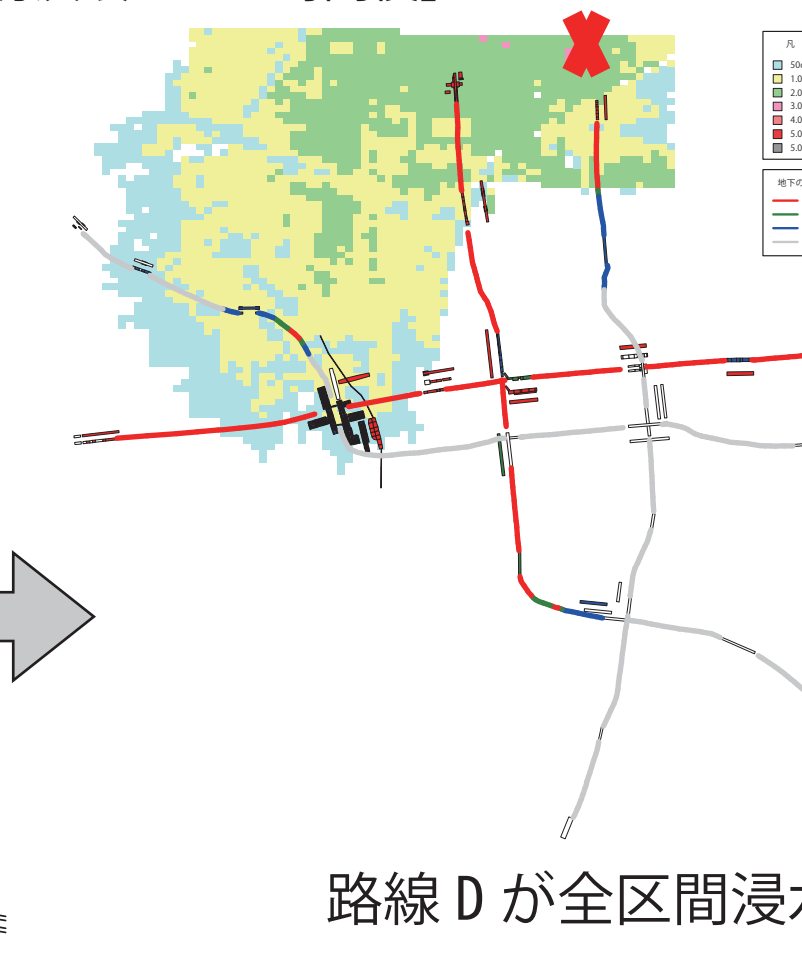
【堤防決壊から1.5時間後】



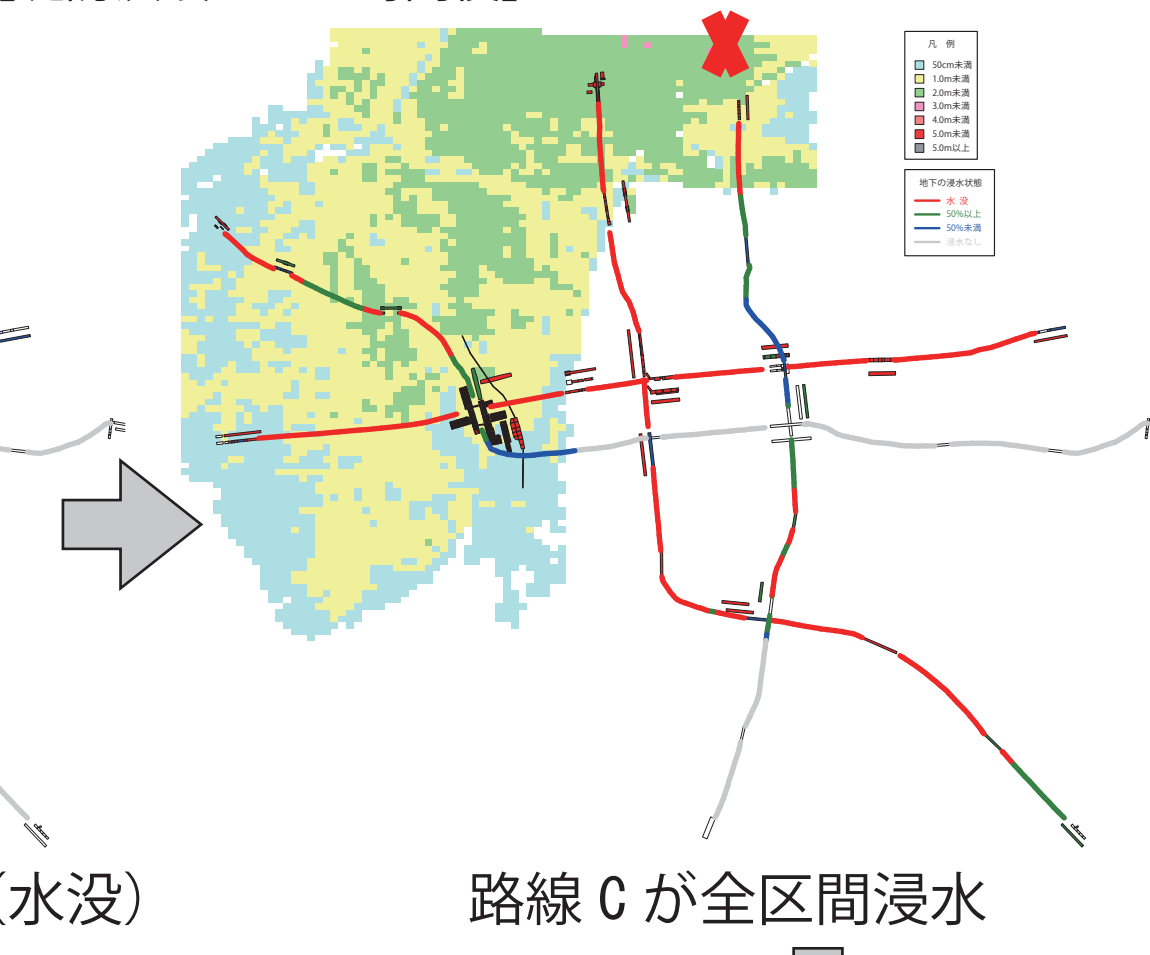
【堤防決壊から3時間後】



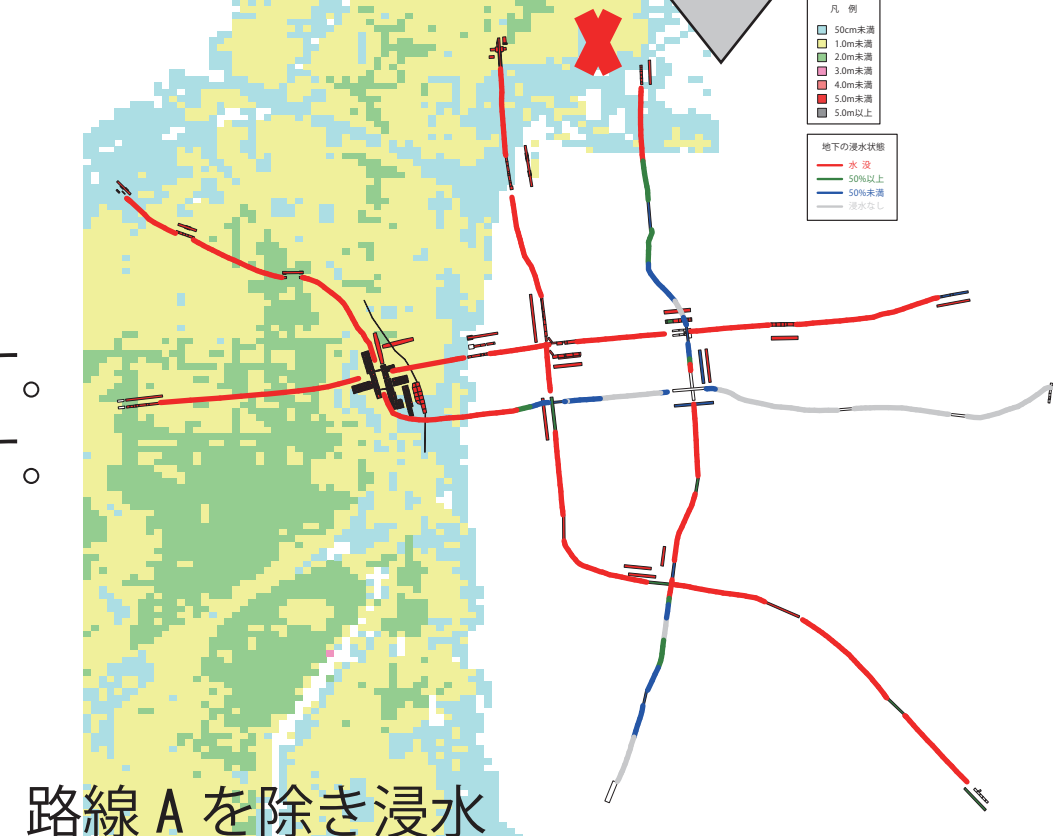
【堤防決壊から4時間後】



【堤防決壊から6時間後】



【堤防決壊から12時間後】



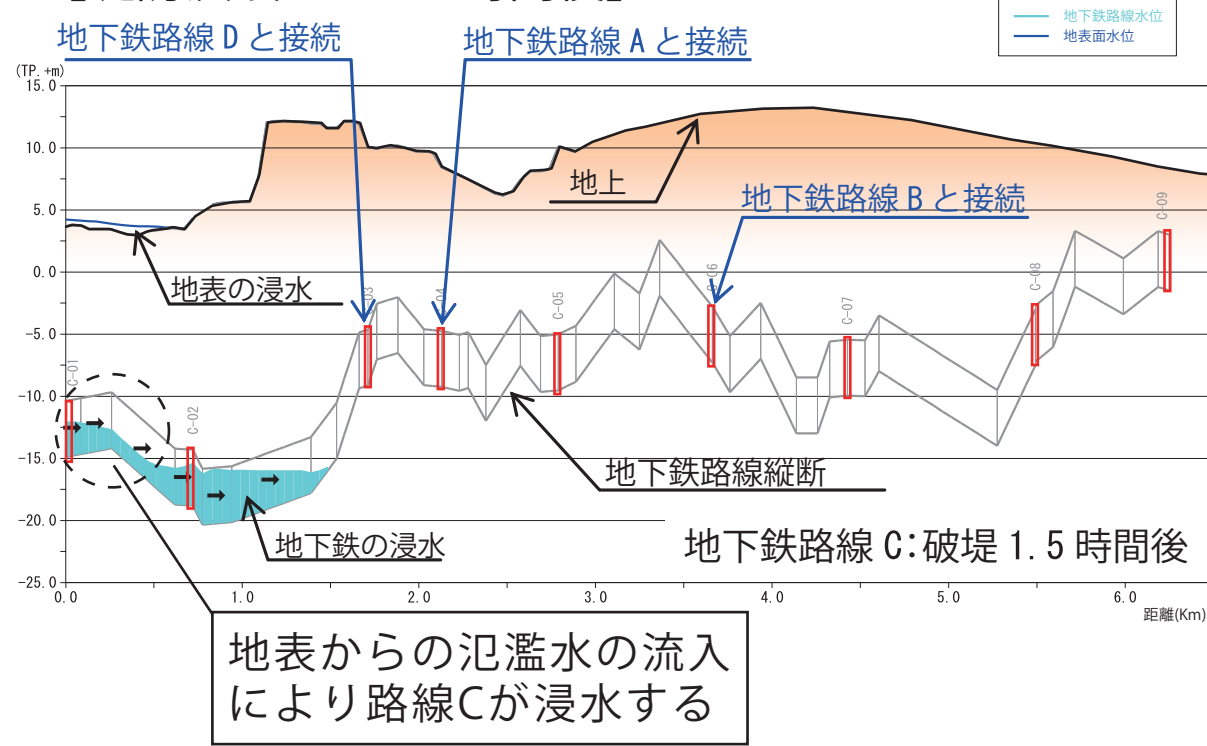
- 地上の浸水と地下鉄路線の浸水状況の時系列変化を平面的に表示することができます。
- 時々刻々の浸水状況からは、地上で浸水した氾濫水が地下鉄駅の地上開口部から流入し、地下鉄路線を経由して、広がっていく状況時を確認することができます。

※地下鉄路線がグレーの場合は浸水していないことを示します。
 ※地下鉄路線が青色の場合は浸水を示します。
 ※地下鉄路線が赤色の場合は水没を示します。

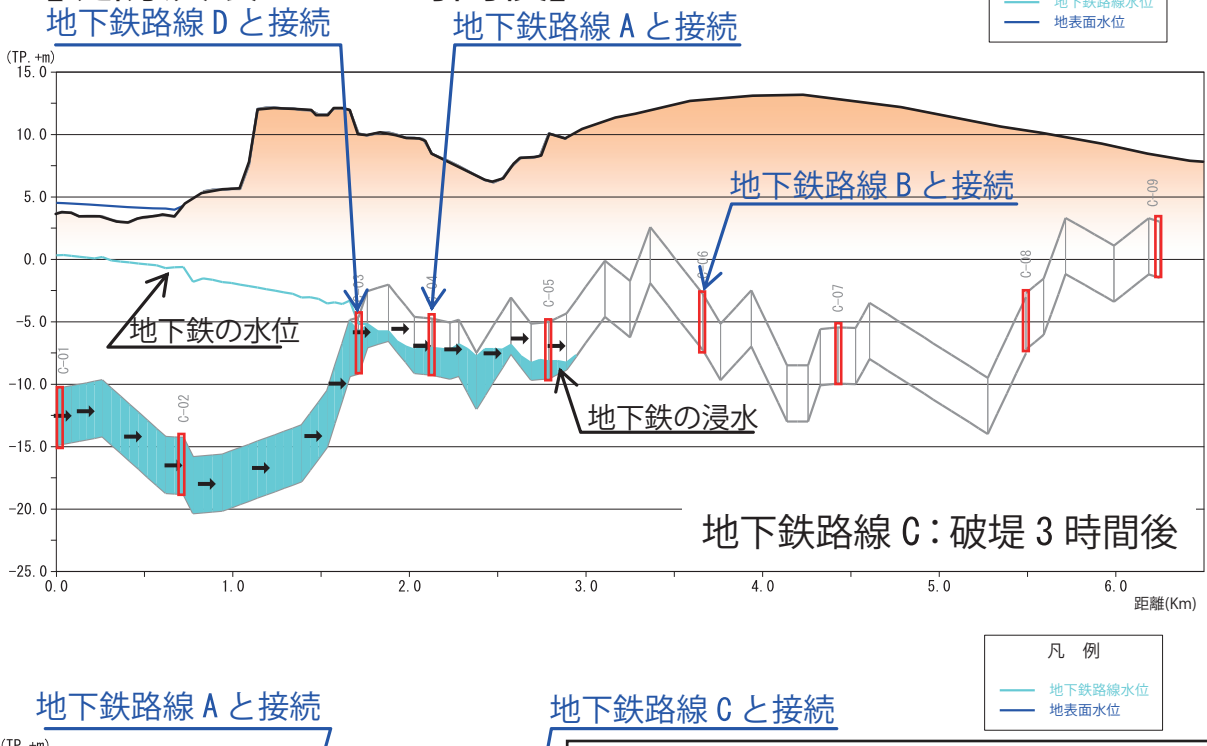
地下鉄路線内の浸水状況の把握

※路線縦断面図の赤色の四角は、地下鉄駅を示します。

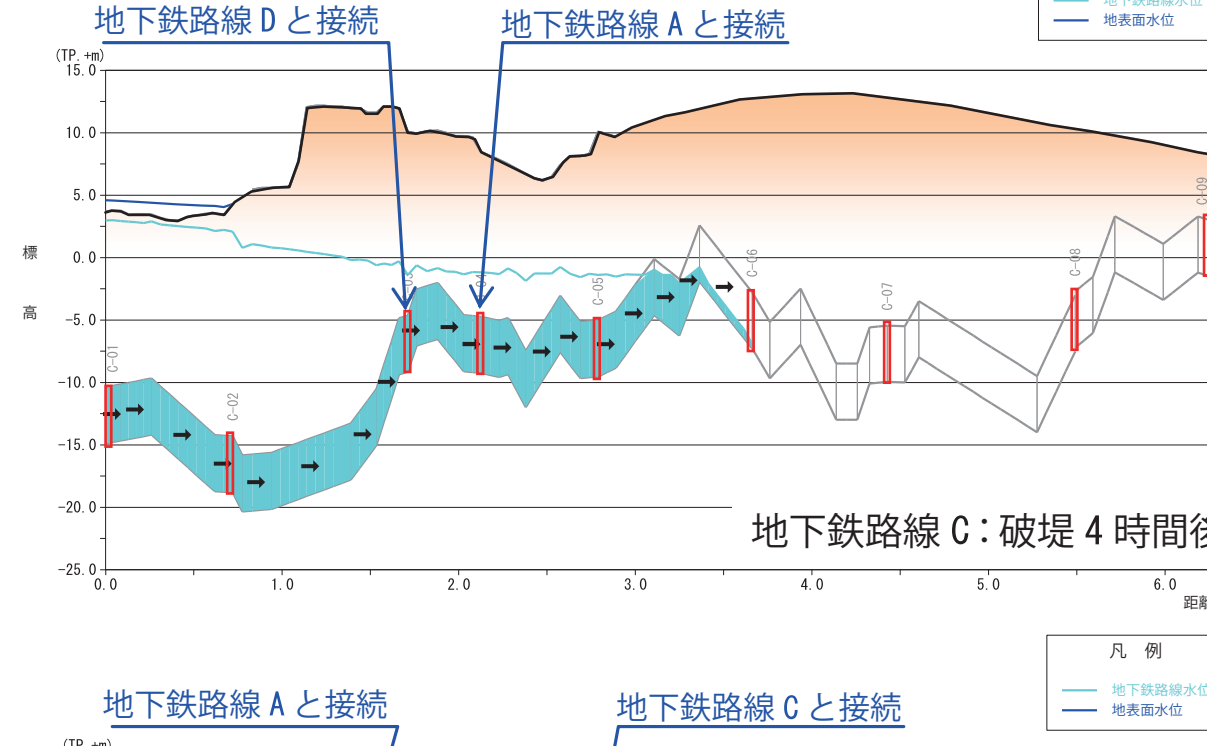
【堤防決壊から1.5時間後】



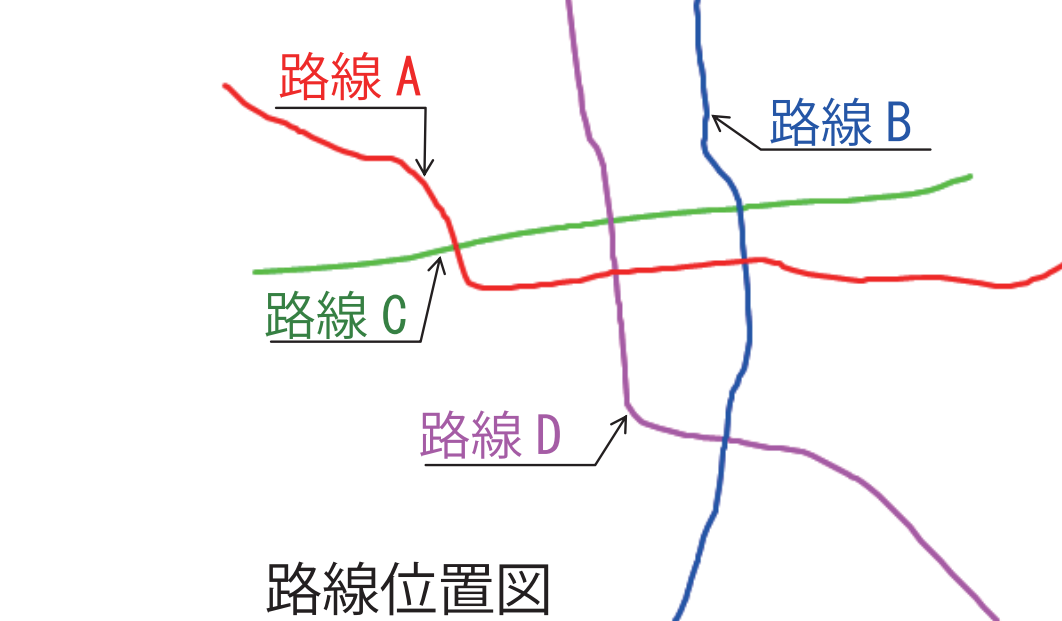
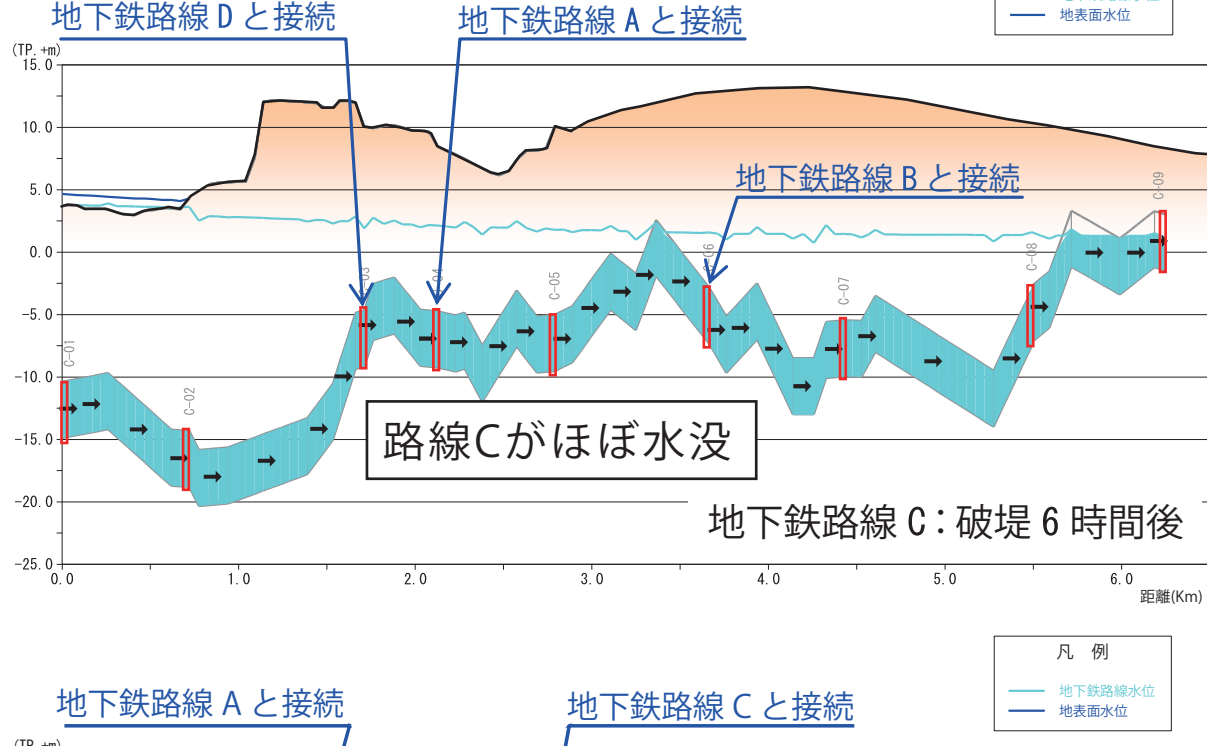
【堤防決壊から3時間後】



【堤防決壊から4時間後】

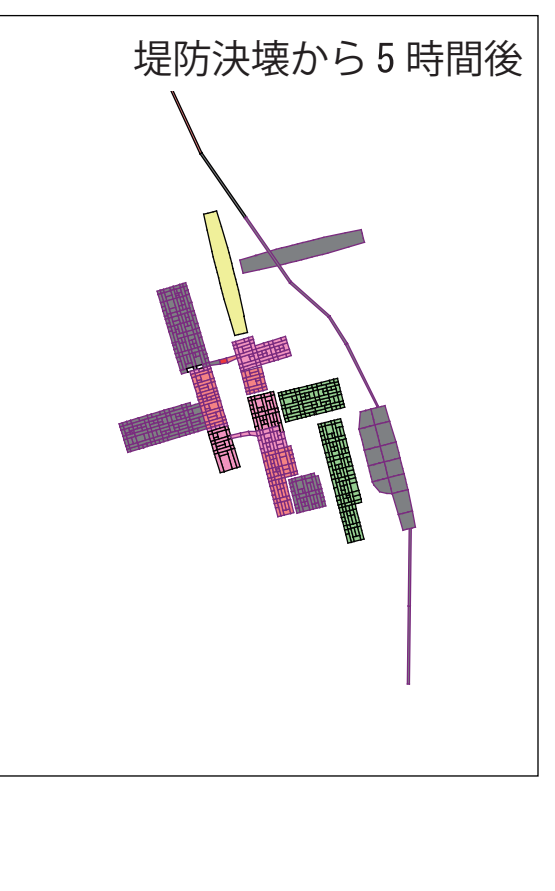
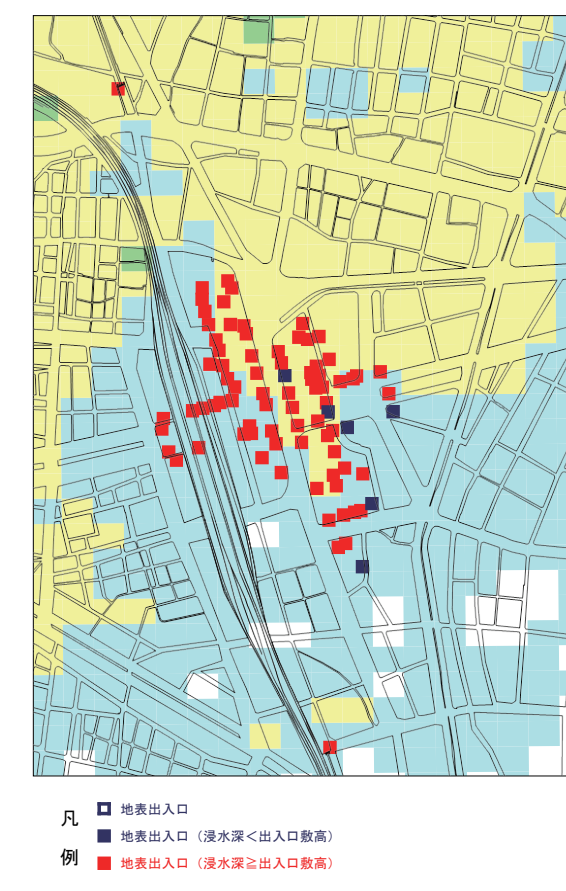
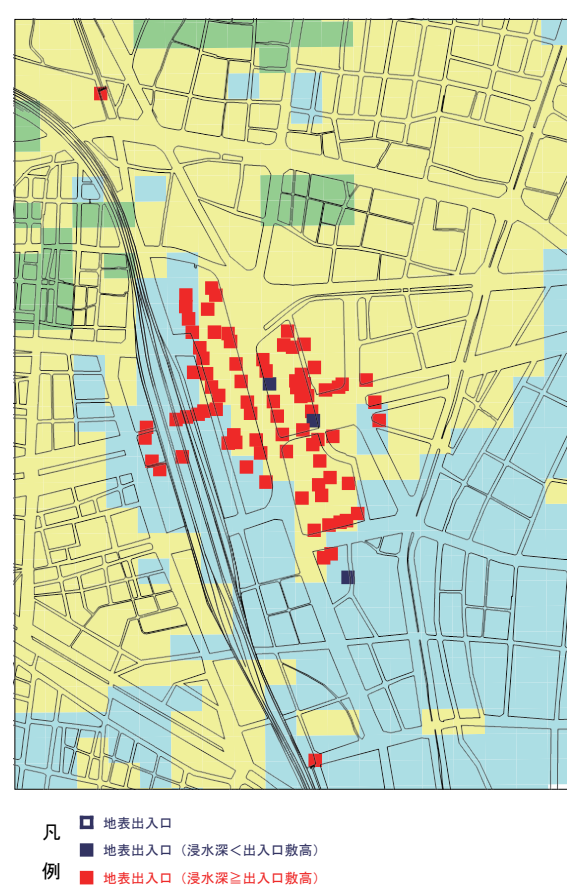
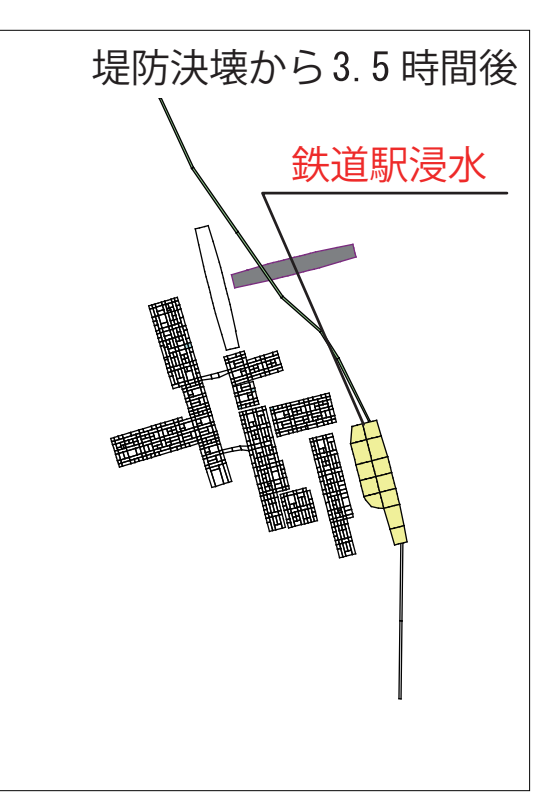
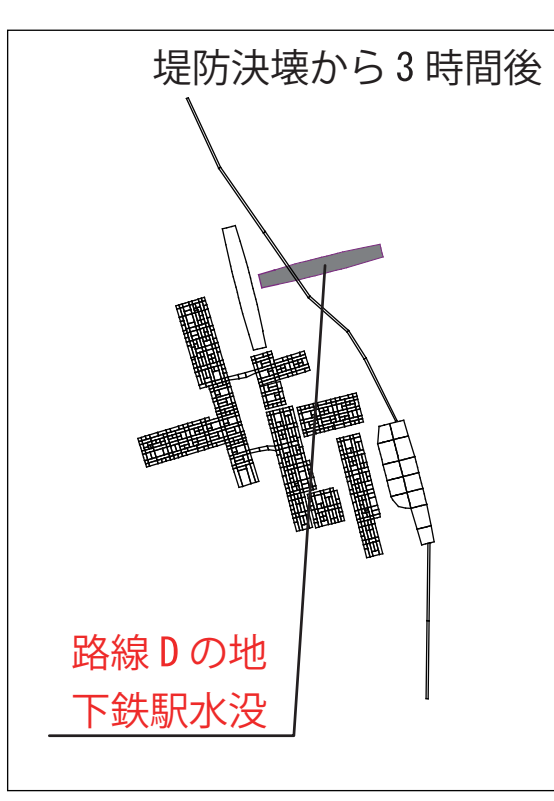
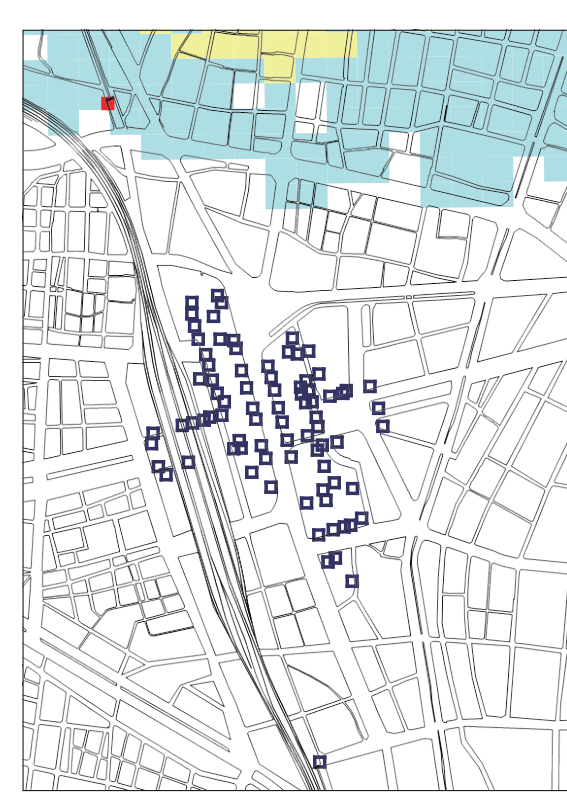


【堤防決壊から6時間後】

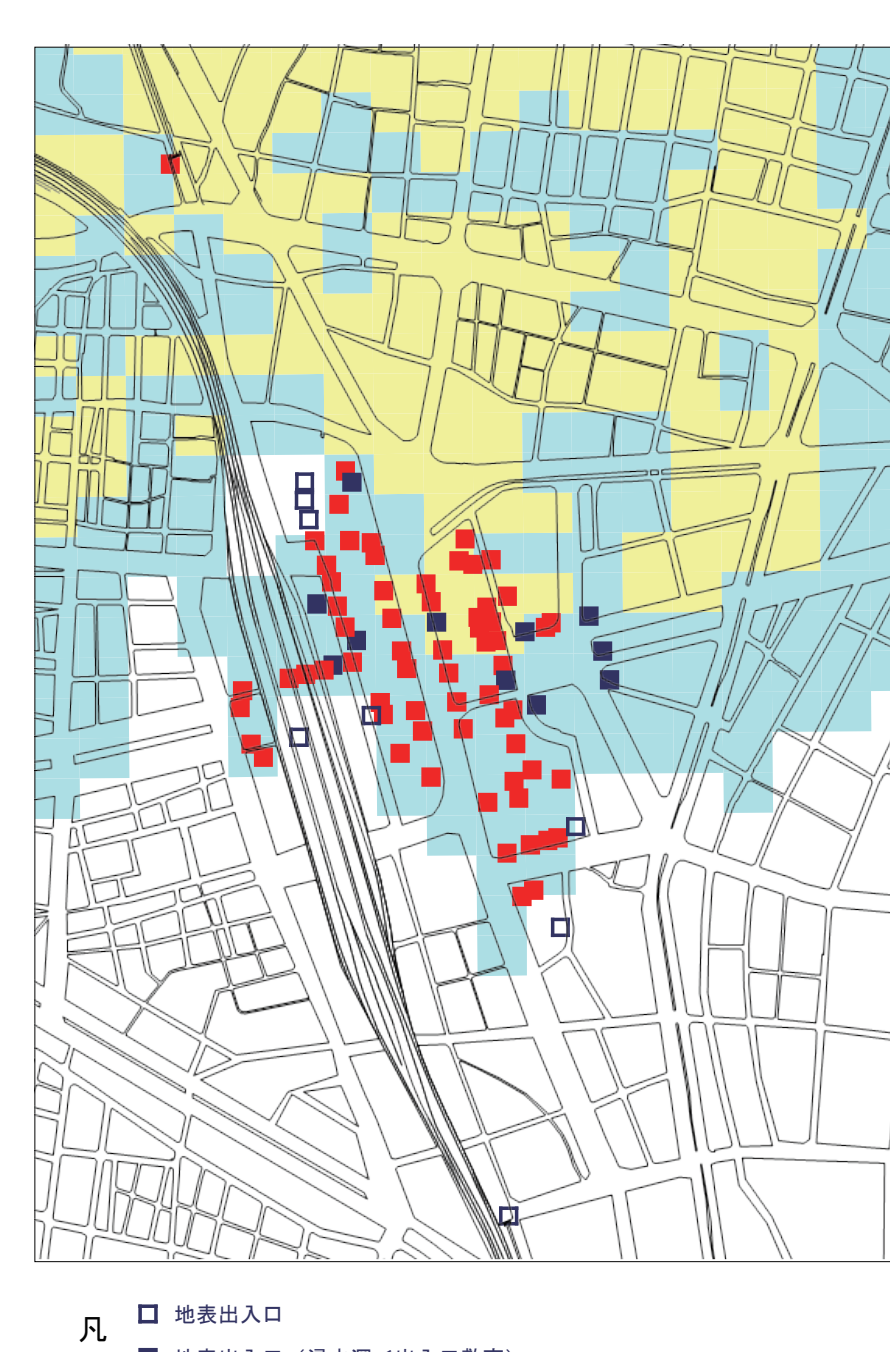


- 地下鉄路線毎の縦断形状、地形、浸水状況の時々刻々の縦断的な変化を表示することができます。
- どこから浸水が流入して、どのように地下鉄路線内を拡がるのか、地下鉄路線内でどこが最も浸水深が大きくなるのか、どこに氾濫水が溜まるのかを詳細に把握することができます。

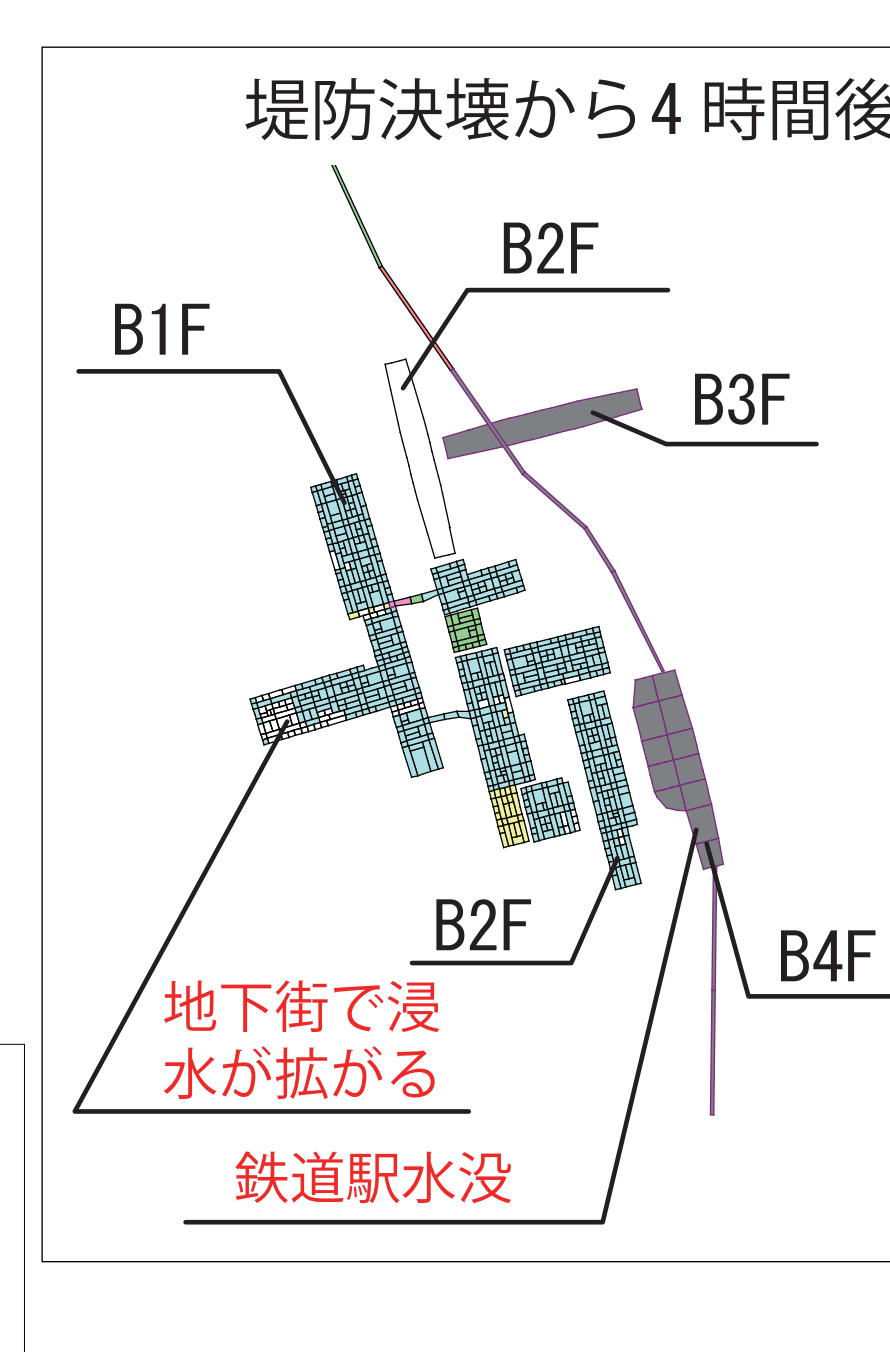
地上と地下街等の浸水状況及び氾濫水の流入状況



【地上の氾濫と地上の開口部の状況】



【地下街等の浸水状況】



- 地上と地下街等の浸水状況の時々刻々の変化を平面的に表示することができます。また、地上から地下街等への氾濫水の流入状況を時々刻々に表示することができます。
- どこから、地下街等に氾濫水が流入して、浸水が始まるのか、地下街等の内部での浸水の拡がり方を詳細に把握することができます。
- 地上出入口等の流入条件を変更することで、止水板などの浸水対策を実施した場合の浸水状況の変化を把握することができます。

※左図の■は地上から氾濫水が地下空間に流入している地上開口部を示します。■は、地上で浸水しているが、氾濫水の流入がない地上開口部を示します。□は、地上で浸水していない地上開口部を示します。
 ※右図は、B1F から B4F までの地下空間を一望できるように、平面的な位置をずらして表示しています。

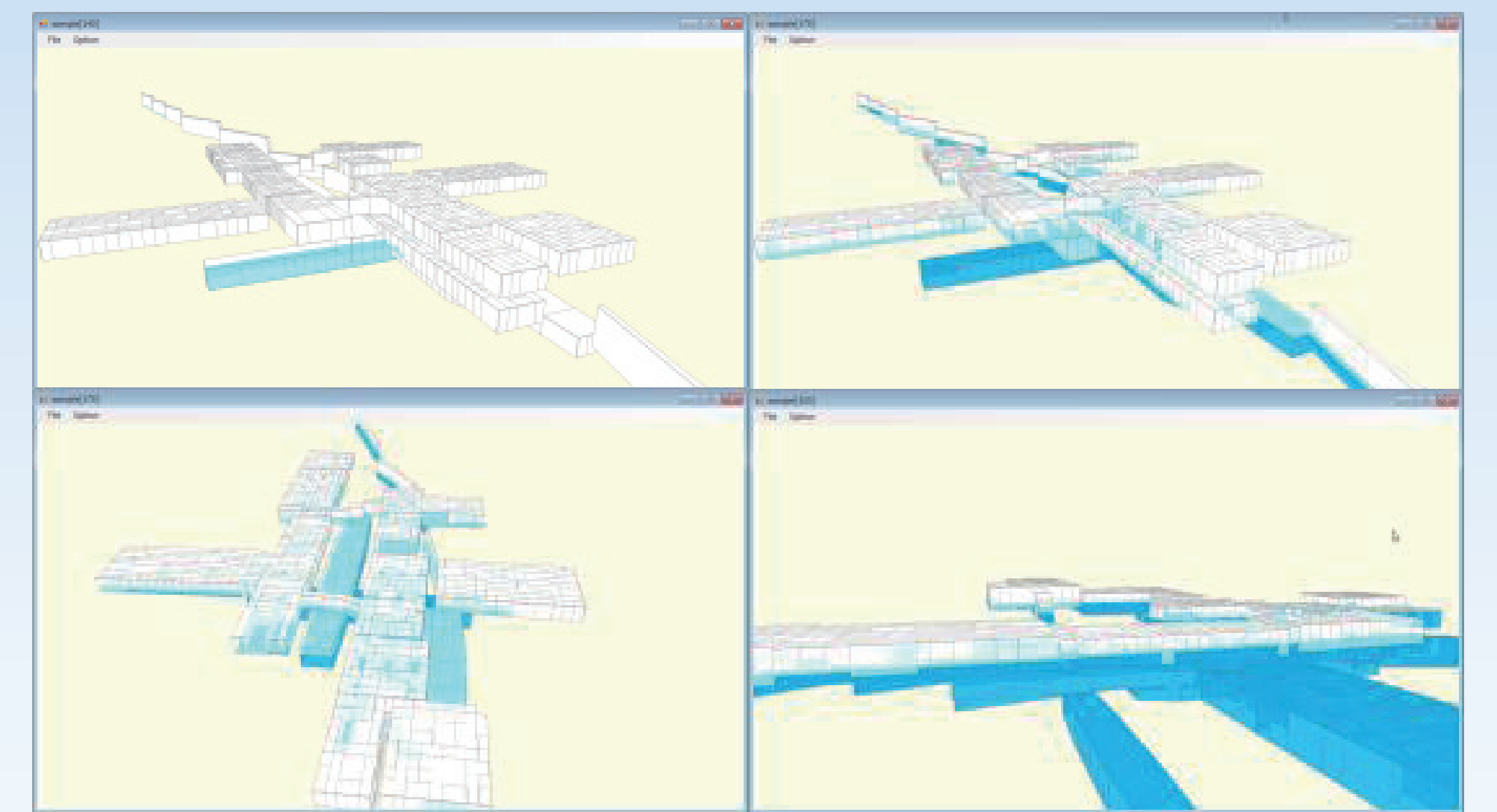
地下空間浸水解析シミュレーション

地下空間の浸水状況の可視化

地下空間の浸水は、地上の氾濫水の拡がり方とは異なり、複雑な地下空間の形状、利用形態（地下街、地下駐車場、地下鉄等）や階層毎で浸水の拡がり方が変わります。得られた浸水解析シミュレーションの結果を、分かりやすく表示し、避難確保・浸水防止計画、復旧計画等の検討に活用できるようにするために、浸水状況の可視化の工夫を行っています。

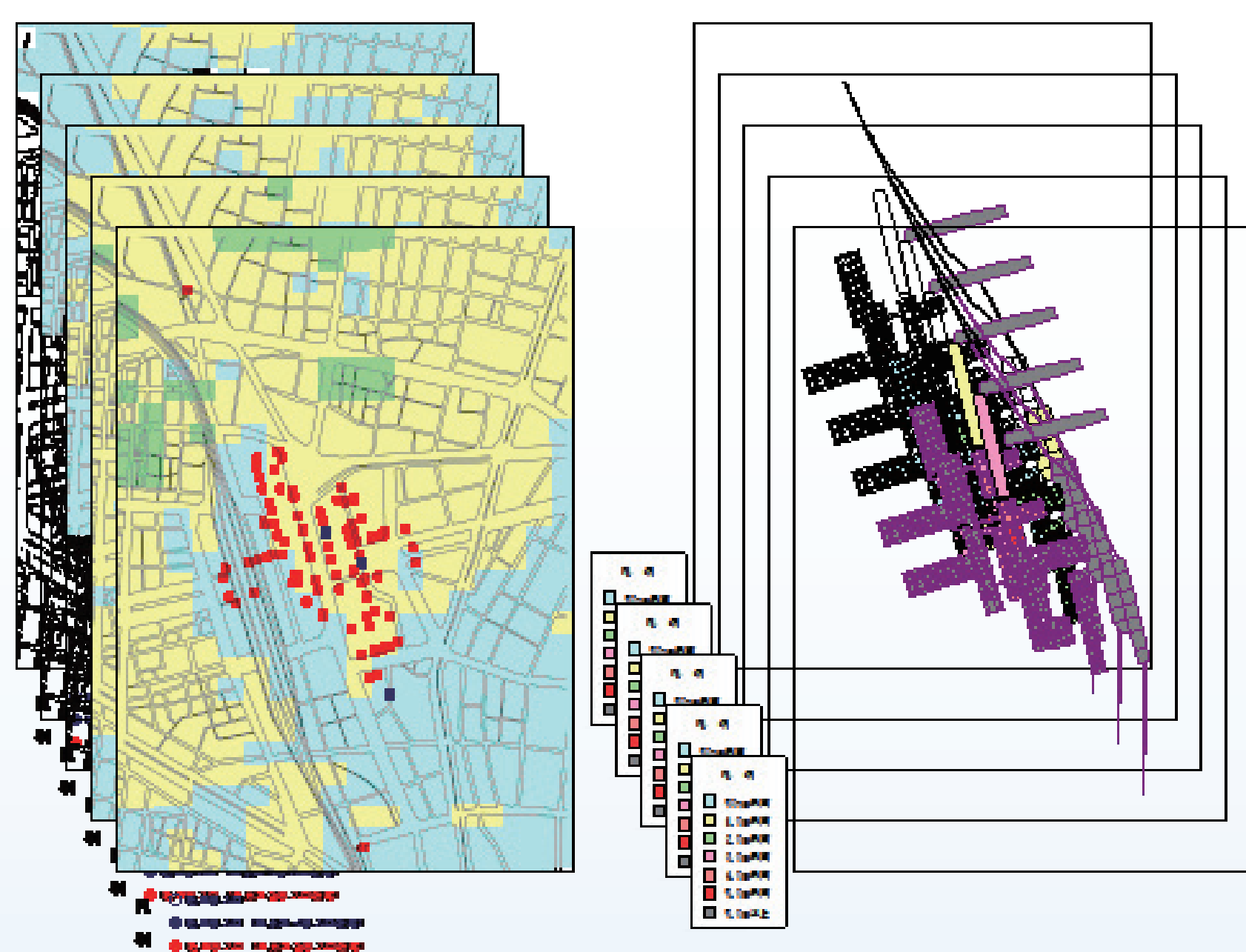
3次元表示

地下空間を立体的に表現し、それらの視点場の変更、拡大表示、アニメーション表示により、地下空間の階層構造、浸水状況を視覚的に把握できるようにします。



2次元のアニメーション表示

アニメーション表示により氾濫水の動き、浸水過程を視覚的に把握できるようにします。



施設毎の浸水状況の表示

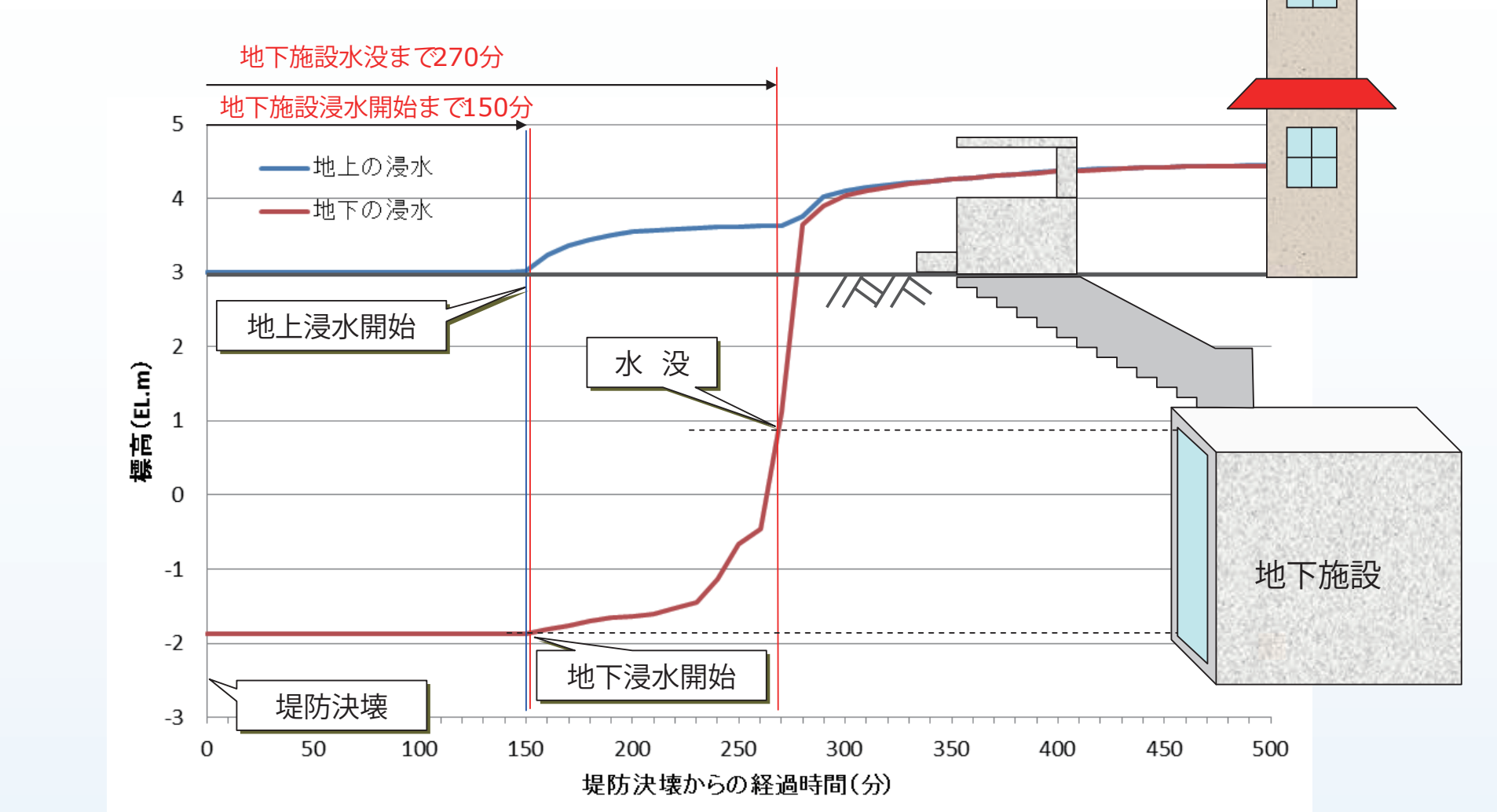
施設毎に浸水状況を切り出して表示します。(2次元、3次元による表示)



地下空間内の詳細な浸水情報の表示

地下空間内の浸水時の水位上昇速度、流速等、避難計画に必要な詳細な情報を分かりやすく表示します。

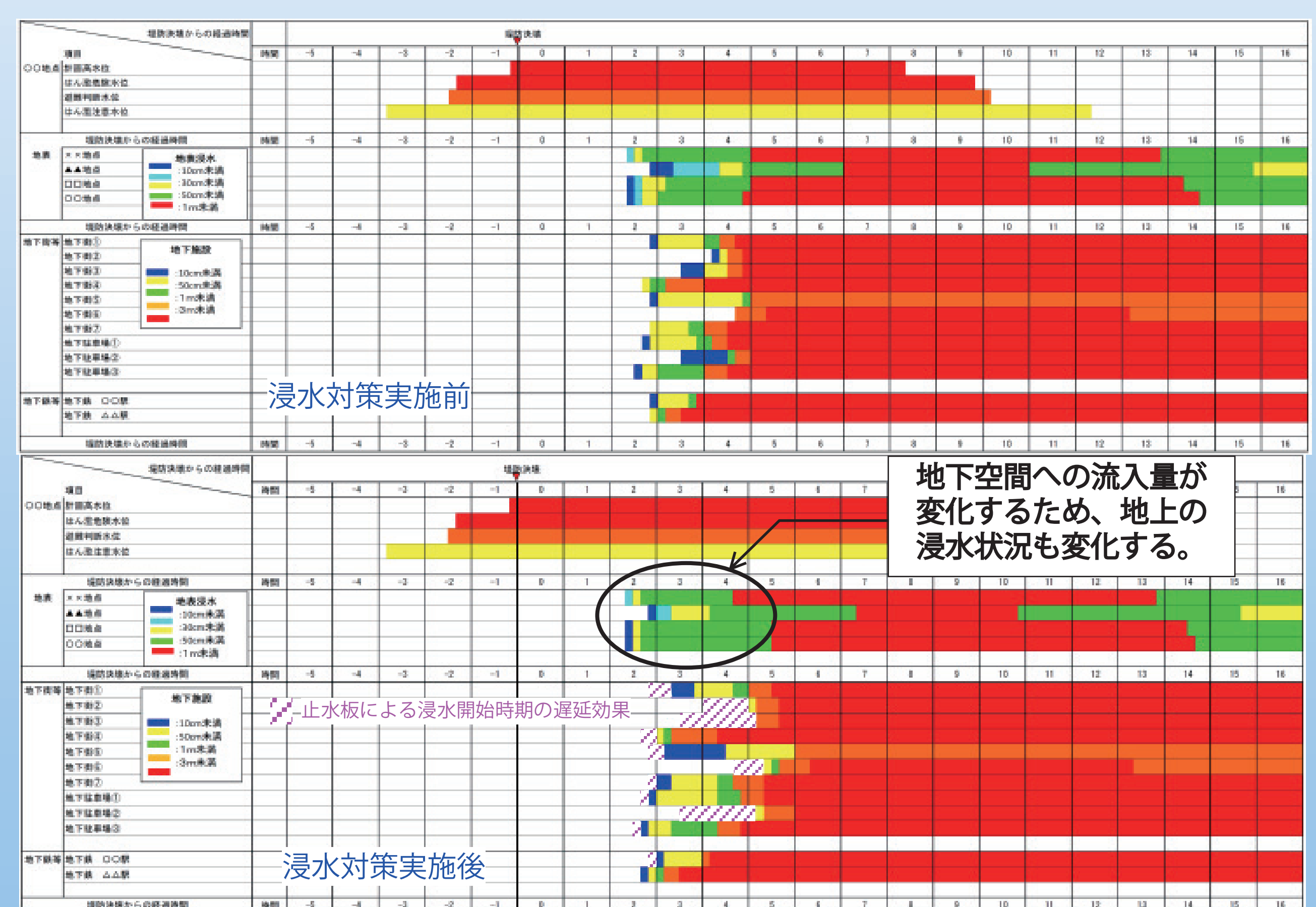
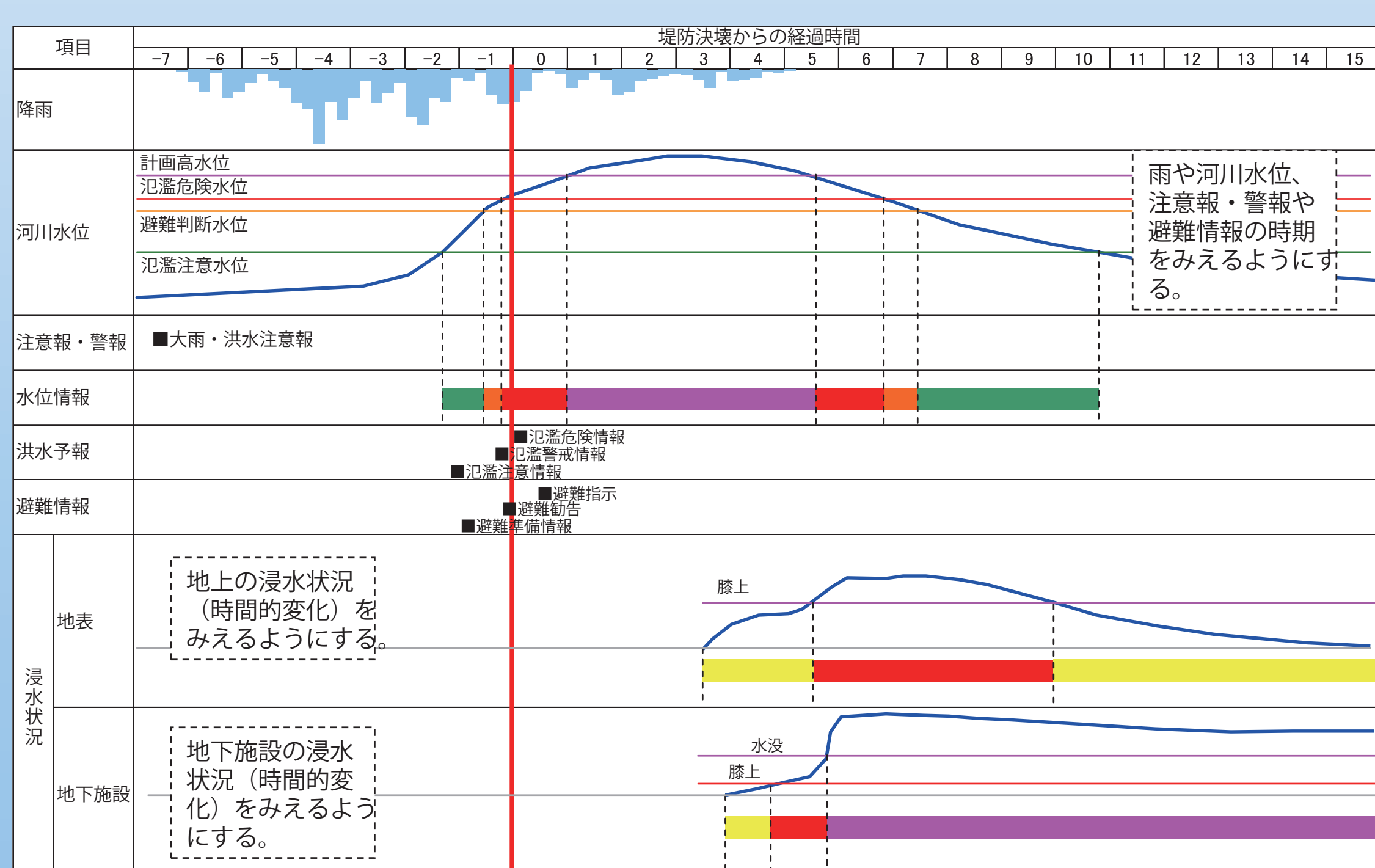
水位上昇速度の表示例



タイムチャートによる浸水情報の整理

地下空間の浸水は、接続する施設（他の地下街や地下鉄等）を含めて、全体の浸水状況を把握することが重要です。このため、各地下空間、階層毎に浸水開始時間、浸水期間等をタイムチャートによる整理を行うことで、一望できるようにします。これらの情報は“タイムライン”の検討等にも活用できます。

タイムチャートを活用することで、止水板などの浸水対策による効果（浸水開始時期の遅延効果）、排水による復旧に要する時間等を、分かりやすく表示します。



地下空間浸水解析シミュレーション

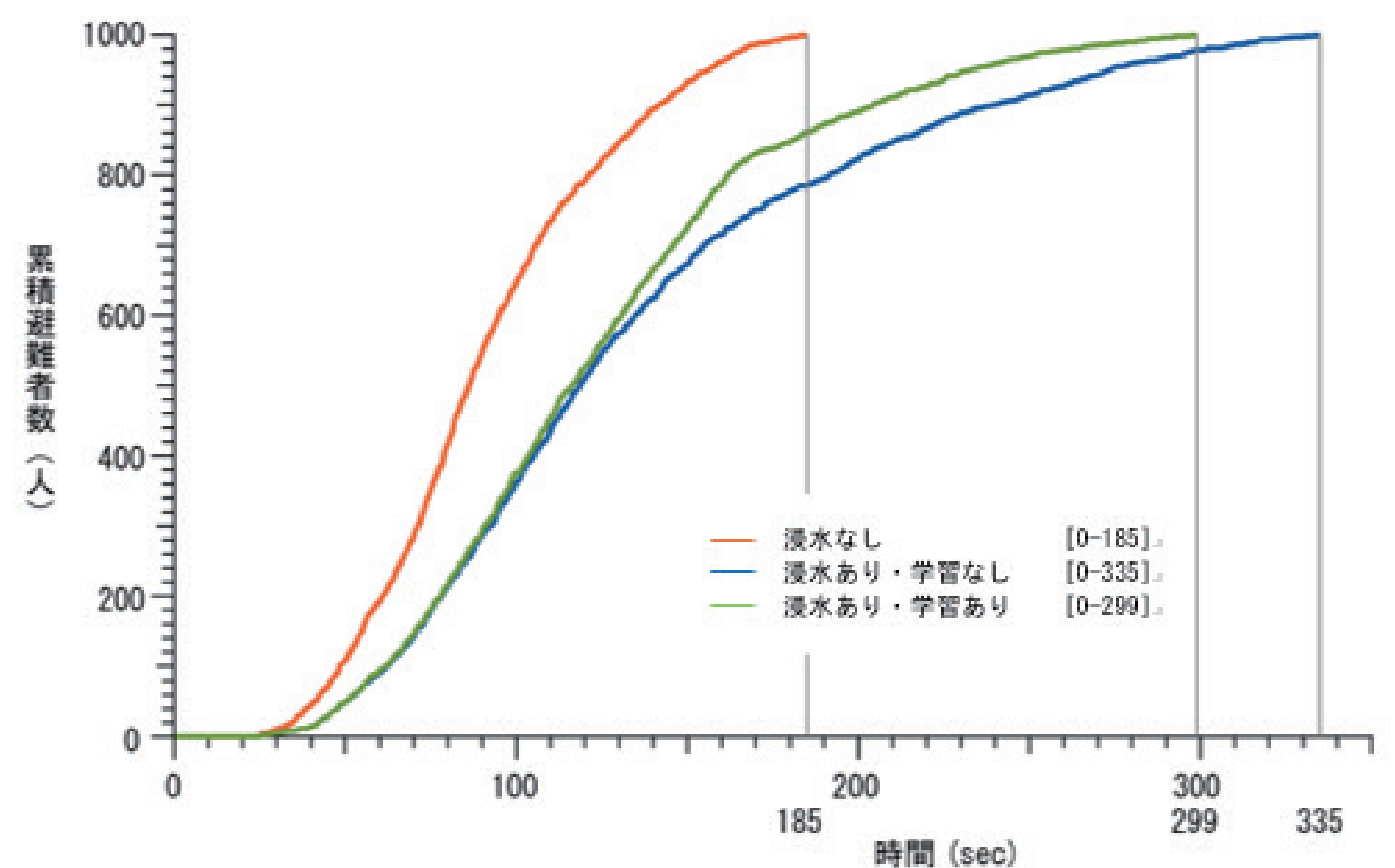
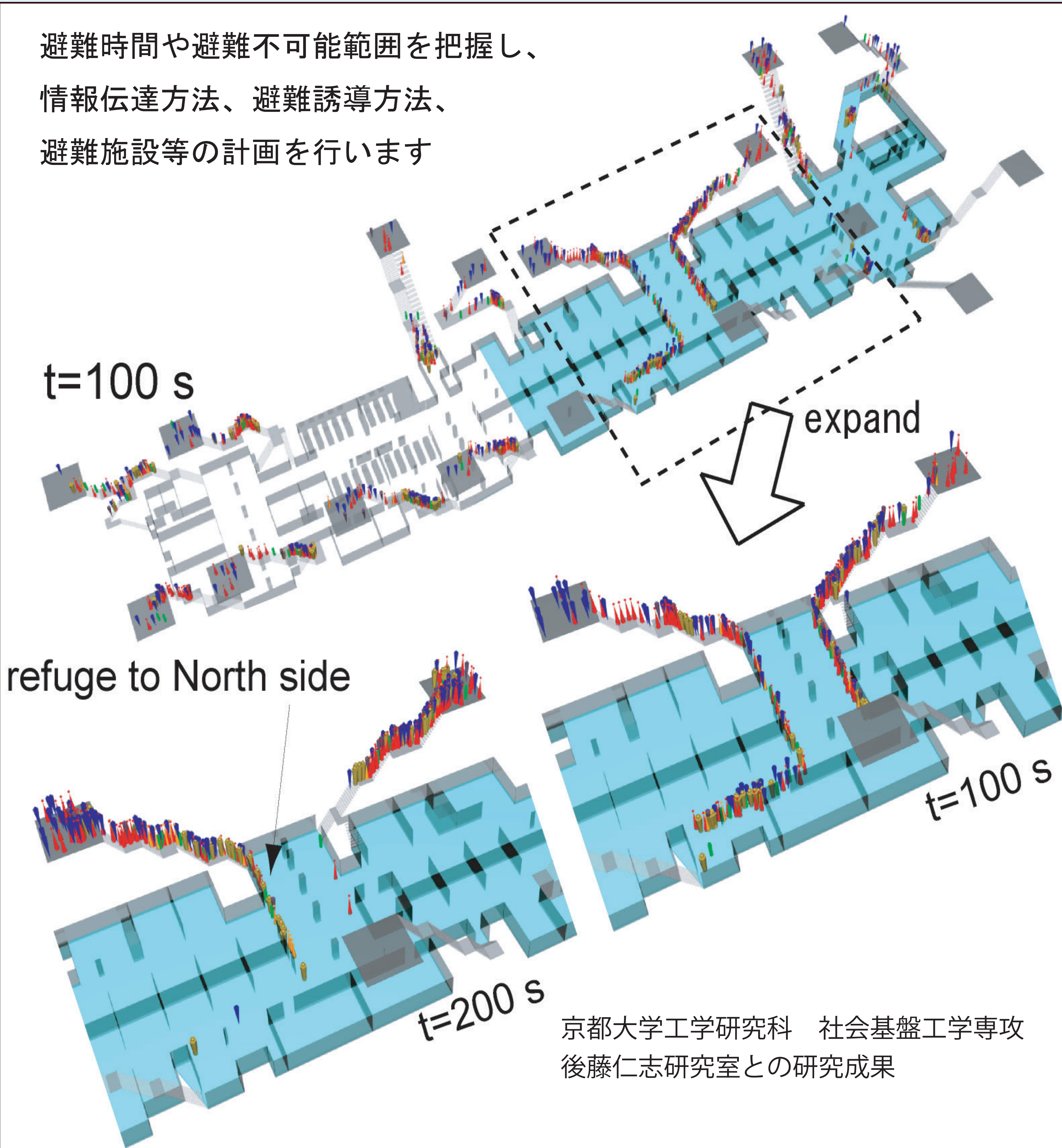
地下空間の浸水時避難計画シミュレーションへの適用

地下空間の浸水では、迅速かつ円滑な避難が人命を守る鍵になります。そのため、適切な避難路、避難階段および避難先等の確保等が非常に重要になります。しかし、災害時の避難者の渋滞や複数の条件下における避難状況を平常時の避難訓練等で再現するのは困難であり、避難路、避難階段および避難先の適切性を検討する手段は決め手を欠いているのが現状です。

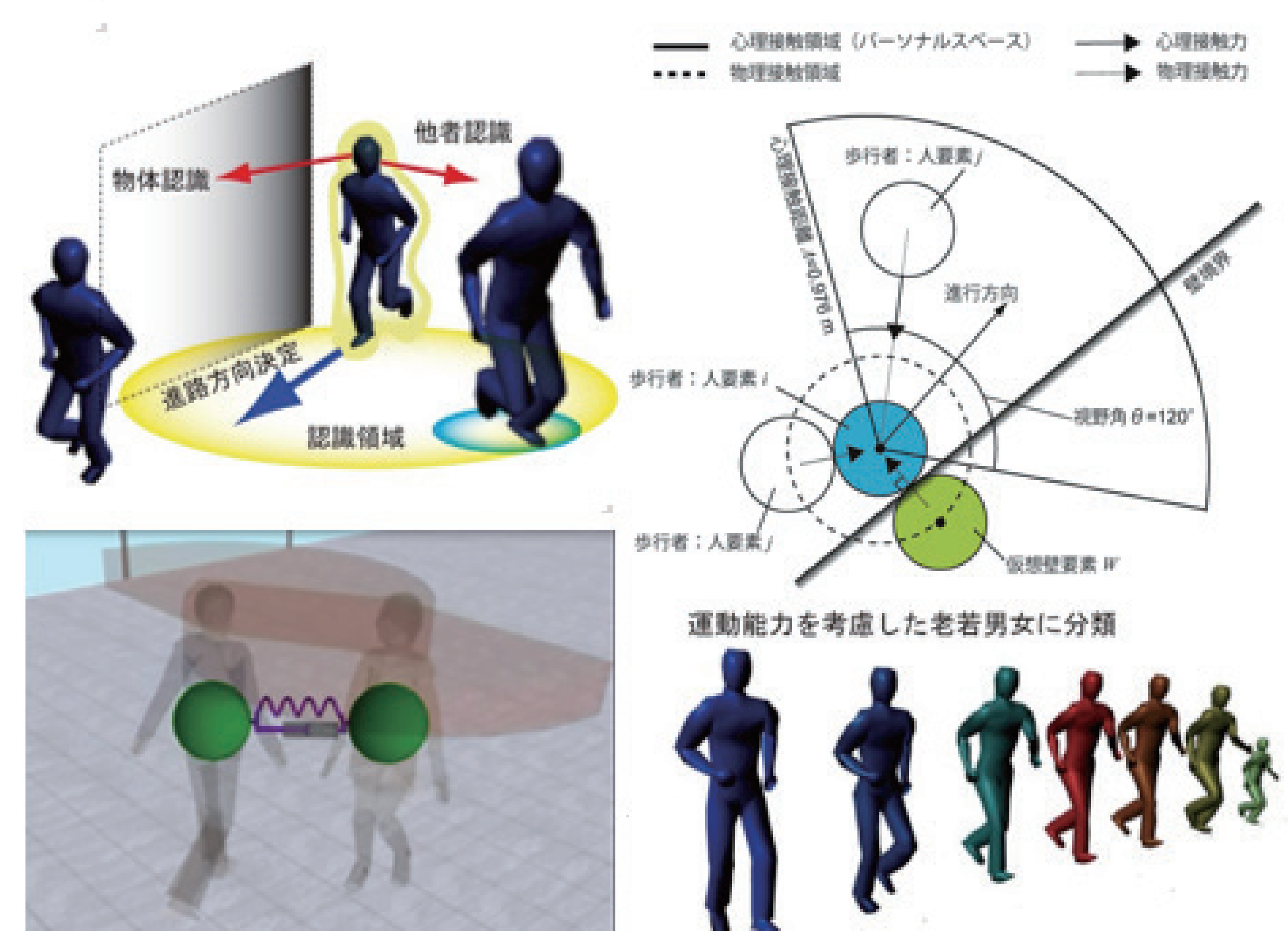
トンネル火災、津波・浸水、交通事故等に対する取り組みを検証する方法として「社会実験」がありますが、費用、人員、場所、時間等の制約があり、容易には実施しがたいのが実情です。そこで、地下空間の浸水解析シミュレーション結果を基に、京都大学後藤仁志研究室との共同開発による“群集行動シミュレータを用いたバーチャル社会実験”によって“安全で確実な避難確保”、“効果的な浸水防止計画”の検討に役立てることが可能となります。

【シミュレーション結果】

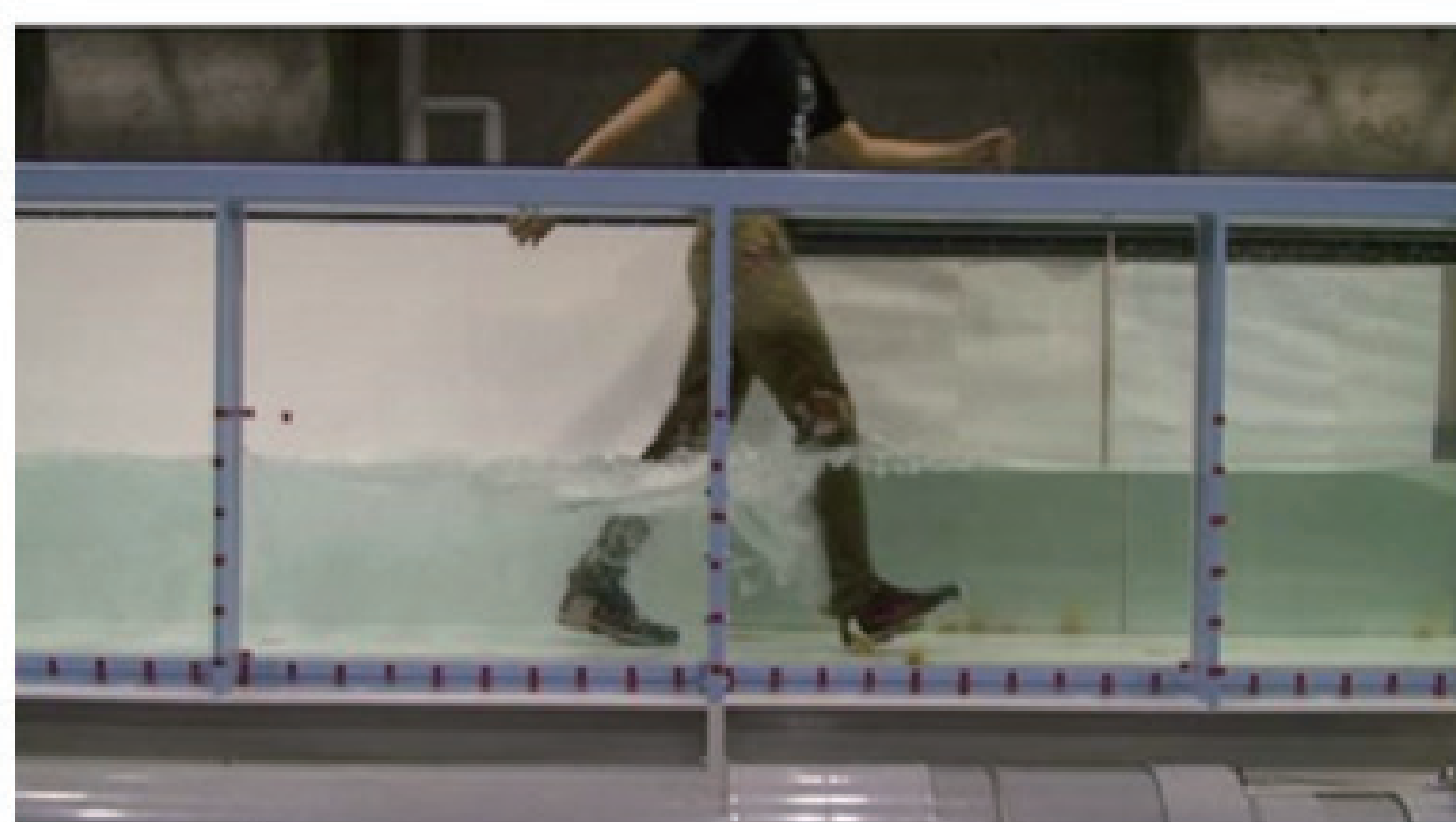
避難時間や避難不可能範囲を把握し、
情報伝達方法、避難誘導方法、
避難施設等の計画を行います



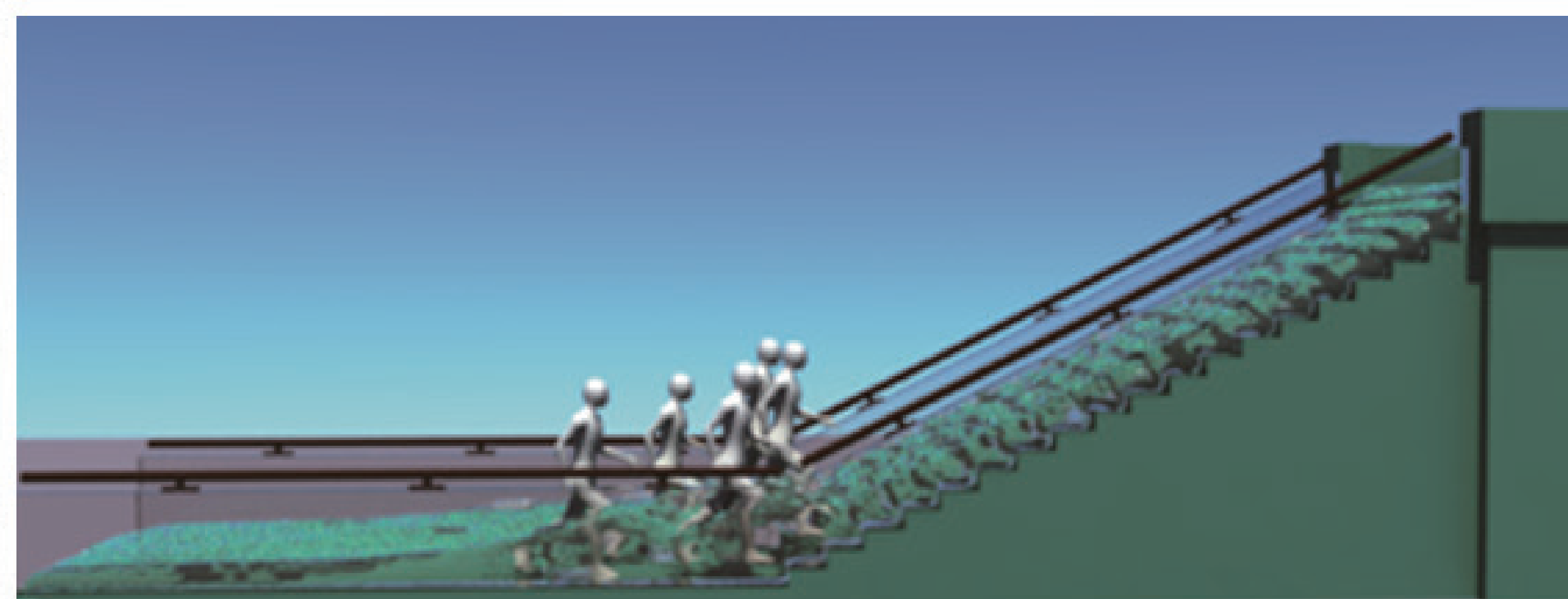
[浸水なし][浸水あり・学習なし][浸水あり・学習あり] の避難完了時間の比較



個別要素法 (DEM 法) による避難者の物理的・心理的接触や身体特性を考慮した群集行動モデル



水中歩行実験による歩行運動の観測・モデル化



個別要素法 (DEM 法) と粒子法 (高精度 MPS 法) による避難者の群集行動と流体運動の相互作用を考慮したカップリングモデルの構築



福岡豪雨災害 1999.6 出典: 国土交通省 HP