

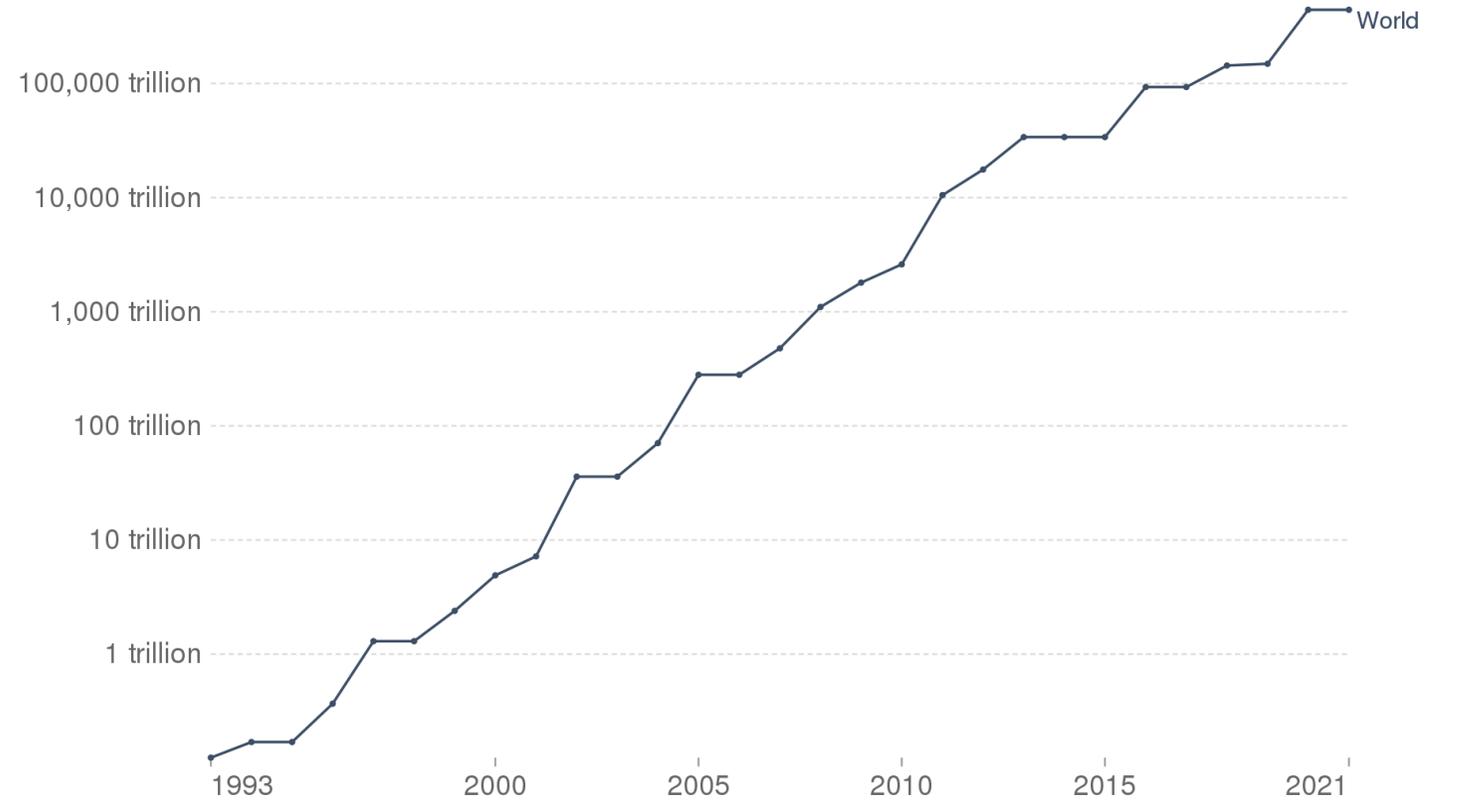
地震の備えと対応のためのDXチャレンジ ～防災用都市のデジタルツインの構築と利用～

堀宗朗（海洋研究開発研究機構）

スーパーコンピュータ

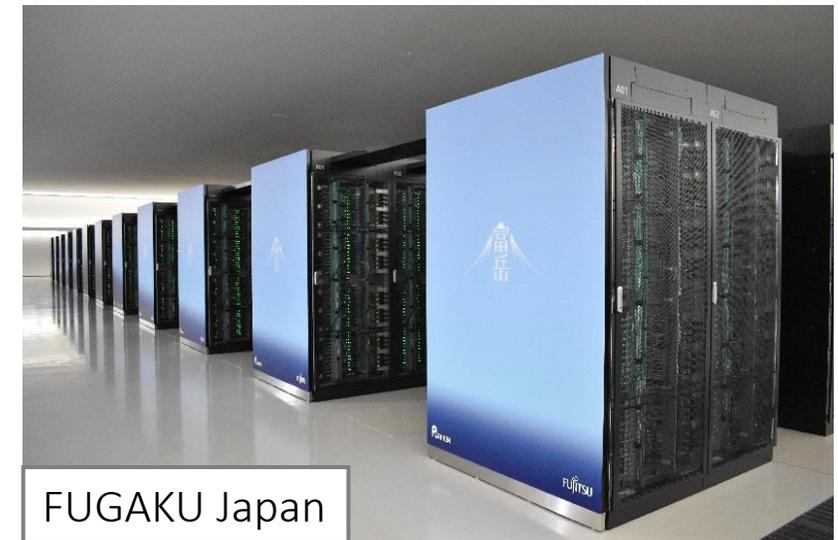
The exponential growth of supercomputers

Number of floating-point operations carried out per second by the largest supercomputer in any given year



Source: TOP500 Supercomputer Database

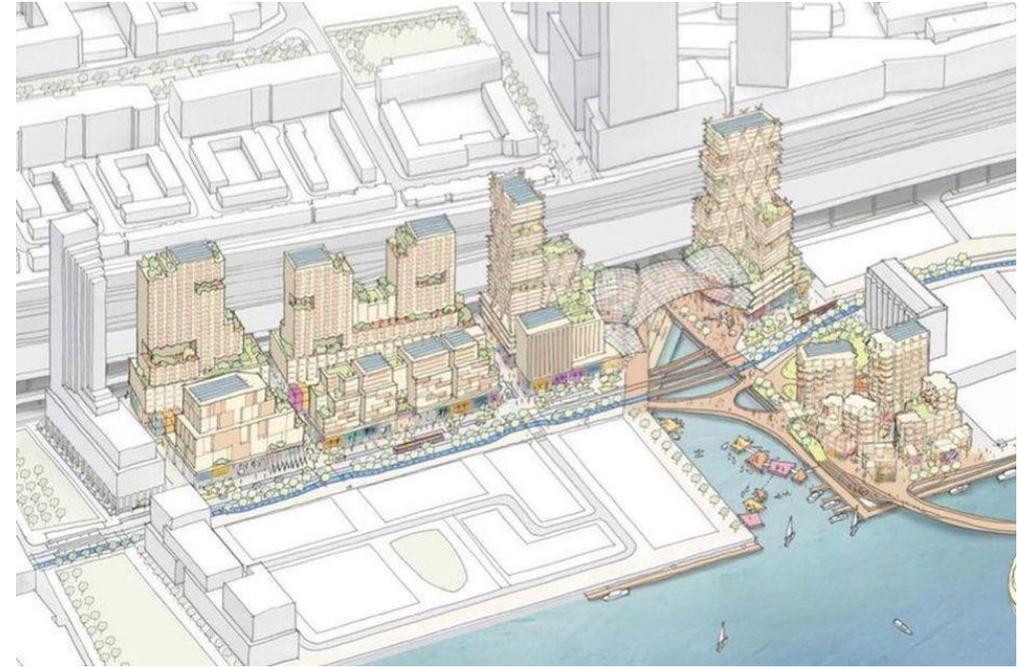
Note: Floating-point operations are needed for very large or very small real numbers, or computations that require a large dynamic range. Floating-point operations per second are therefore a more accurate measure than instructions per second.



都市のデジタルツイン



Virtual Singapore, Dassault Systèmes



Virtual Toronto, Google

- ◆ GIS系産業は3次元空間情報を使った3次元地図に投資
- ◆ BIM系産業は機械構造物から建設構造物へデジタルツインを拡張中
- ◆ 巨大ICT産業は都市を含むデジタルツインの研究開発に投資

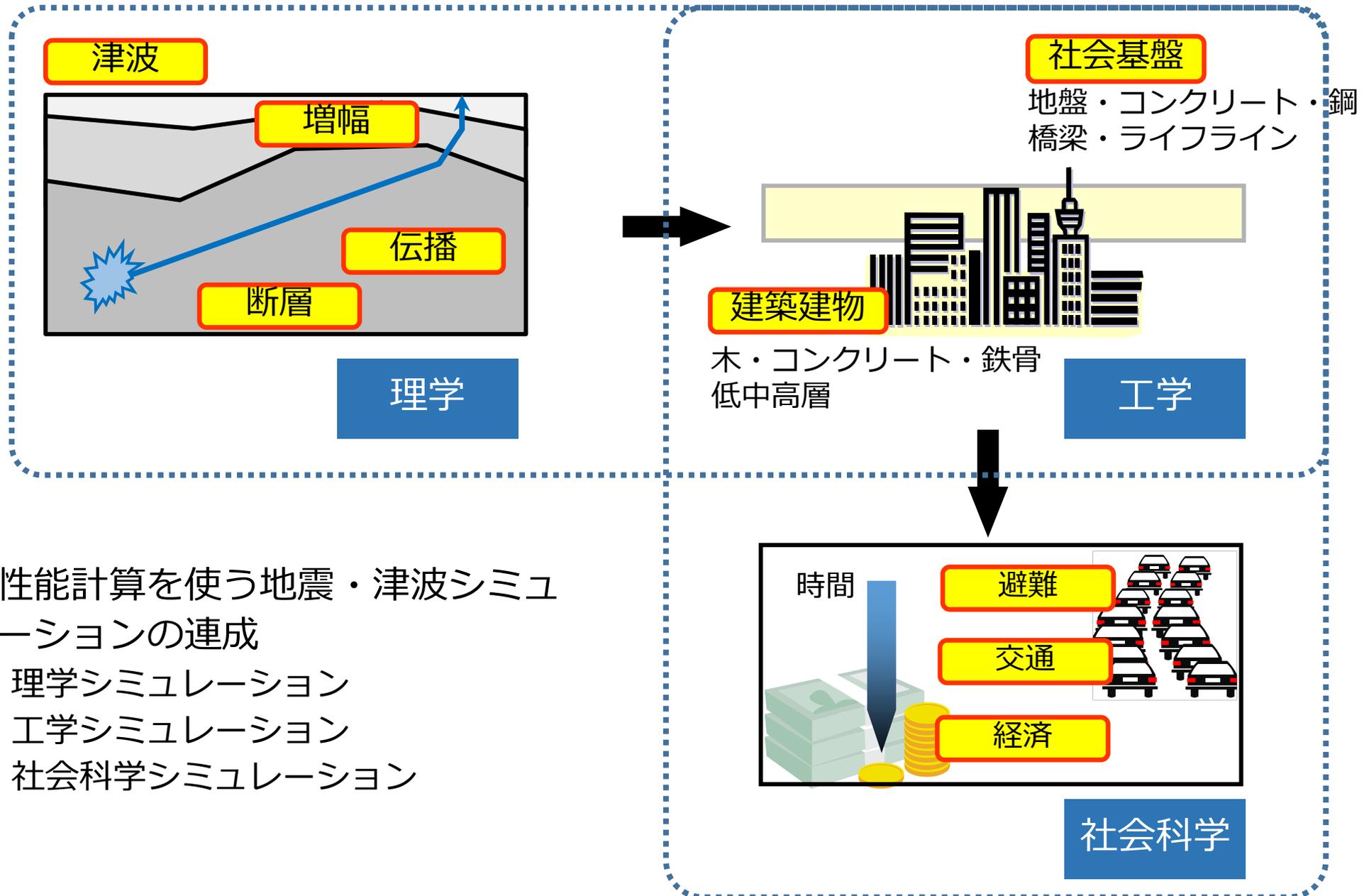
内容

- ◆ 防災用都市のデジタルツインを利用した統合地震シミュレーション
 - 防災用都市のデジタルツイン
 - 首都直下地震と南海トラフ地震の例
- ◆ デジタルツインの中核となる並列有限要素法
 - 特徴：高性能計算を利用するソルバ, コンクリートと地盤の3次元構成則
 - 重要構造物へのデジタルツインの適用例
- ◆ デジタルツインの自動構築
 - 基盤技術としてのDPP (Data Processing Platform)
 - 実データを利用した自動構築の適用例：RC橋梁, NATMトンネル, 地盤, 河川・港湾
- ◆ 国交DPFへの貢献というデジタルツインの挑戦
 - デジタルツインによる予測というサービスを提供する機能を国交DPFに
 - 第3期SIPのスマートインフラとスマート防災で研究開発されるデジタルツインの例

内容

- ◆ 防災用都市のデジタルツインを利用した統合地震シミュレーション
 - 防災用都市のデジタルツイン
 - 首都直下地震と南海トラフ地震の例
- ◆ デジタルツインの中核となる並列有限要素法
 - 特徴：高性能計算を利用するソルバ, コンクリートと地盤の3次元構成則
 - 重要構造物へのデジタルツインの適用例
- ◆ デジタルツインの自動構築
 - 基盤技術としてのDPP (Data Processing Platform)
 - 実データを利用した自動構築の適用例：RC橋梁, NATMトンネル, 地盤, 河川・港湾
- ◆ 国交DPFへの貢献というデジタルツインの挑戦
 - デジタルツインによる予測というサービスを提供する機能を国交DPFに
 - 第3期SIPのスマートインフラとスマート防災で研究開発されるデジタルツインの例

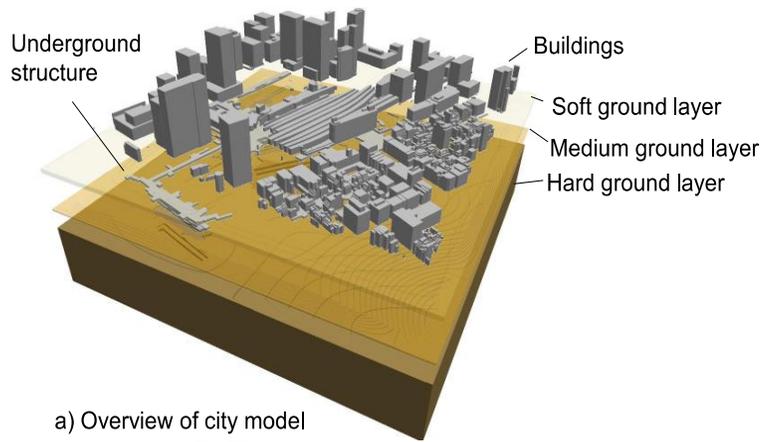
統合地震シミュレーション



◆ 高性能計算を使う地震・津波シミュレーションの連成

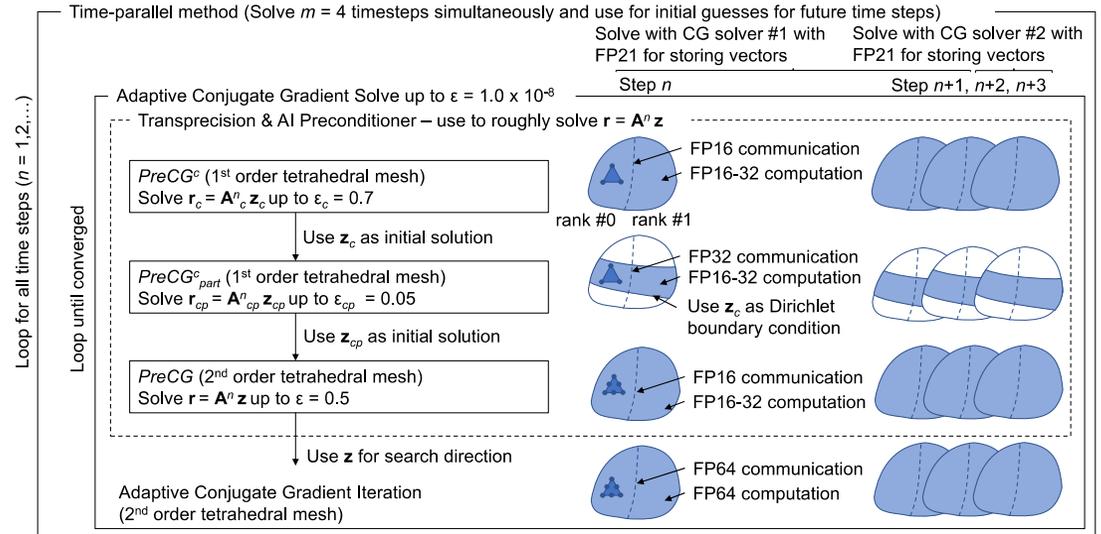
- 理学シミュレーション
- 工学シミュレーション
- 社会科学シミュレーション

理学・工学：非線形有限要素法

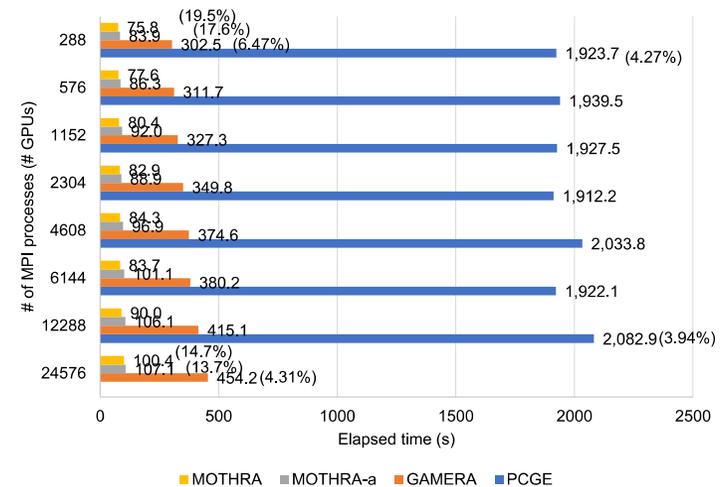


a) Overview of city model

都市モデル



ソルバのアルゴリズム



Summitでのweak scaling

◆ HPCとAIの新たな融合を提案し，SC18ゴードン・ベル賞ファイナリストに選出

- SC14・15でのゴードン・ベル賞ファイナリス
- SC16・17でのベストポスター賞に続く快挙
- ソルバのさらなる高速化を達成
- 精度混合演算 & 時間並列手法

◆ AIを用いた収束性の低い領域の抽出

- FP21を用いた効率的データ格納
- Summit (TOP500 No.1) を含む高い並列性能

理学 : DEM

25億粒子を用いたDEM断層形成シミュレーション

- ◆ 動的負荷分散技術の高度化により, 超多数粒子に成功
- ◆ 砂箱実験による妥当性確認
- ◆ 動的負荷分散技術の津波粒子シミュレーションへの適用

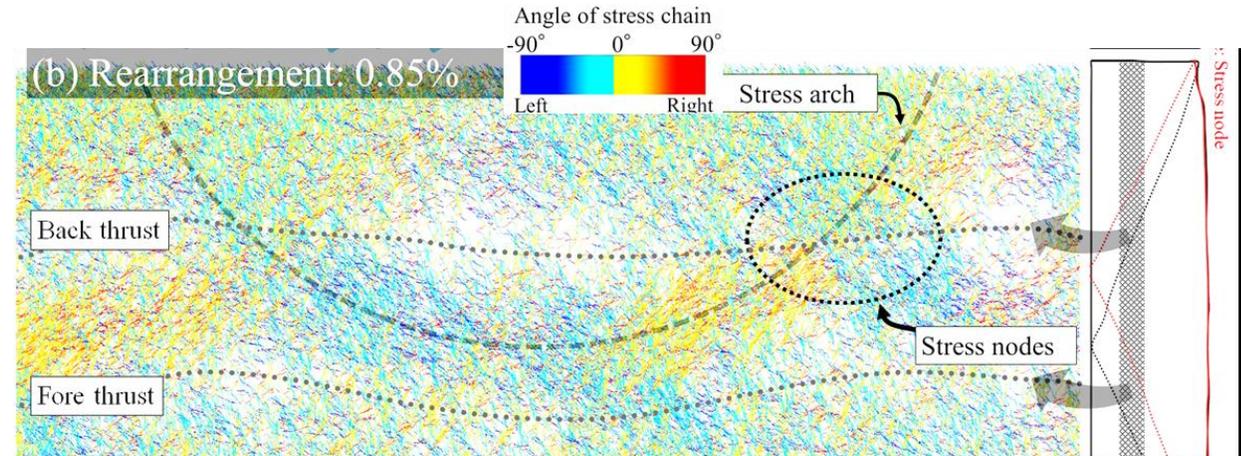
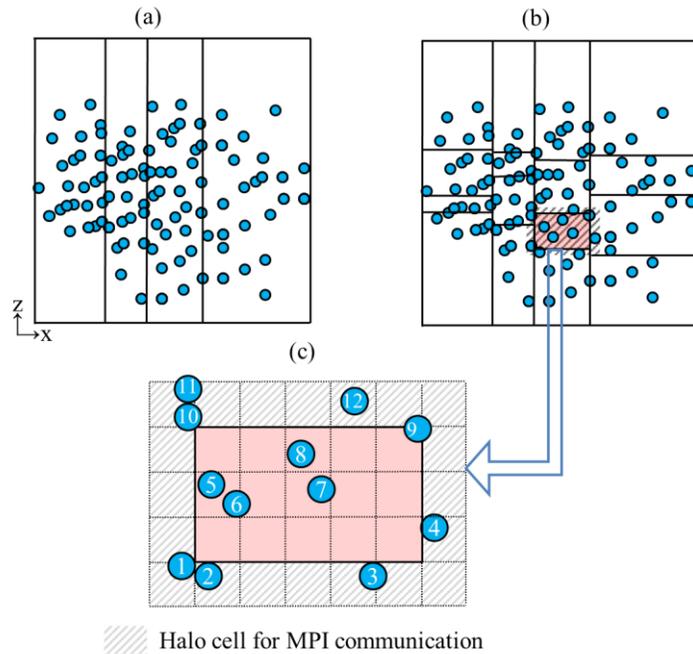
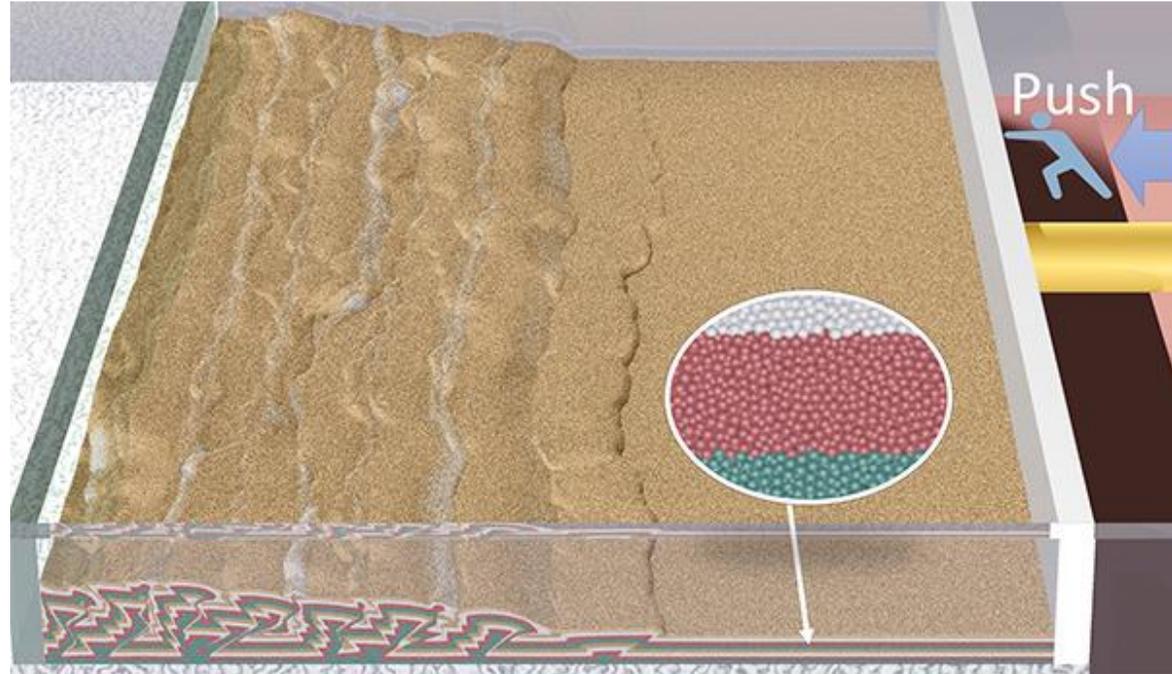
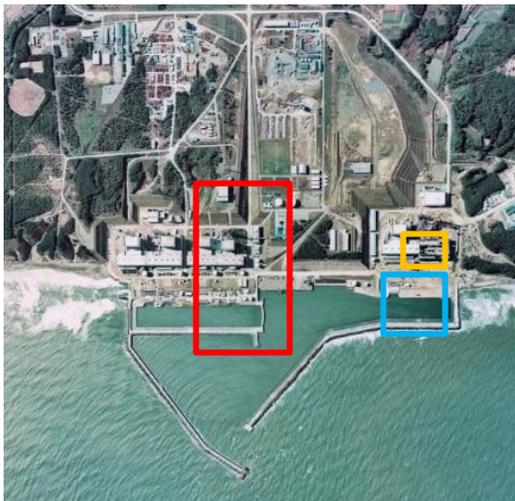


Fig. 1: Map view of σ_1 of particles in the stress chain at the first thrust formation

工学：津波

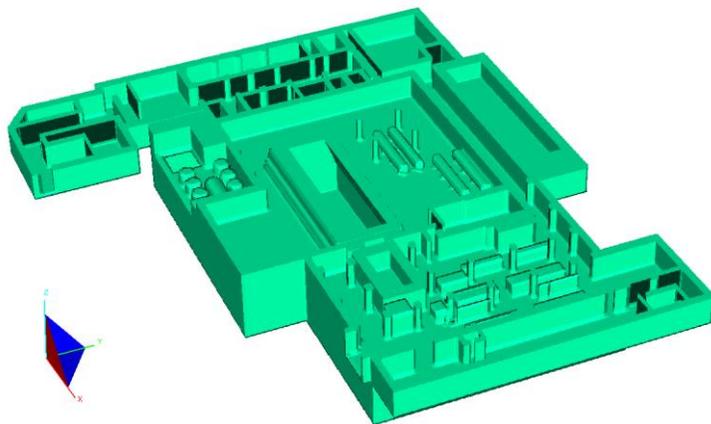
MScPHY：粒子系固体-流体数値解析手法

- 粒子で津波や地形・建物をモデル化
- 自由表面の扱いが容易
- 元来，並列計算には適さない粒子系の計算で高性能

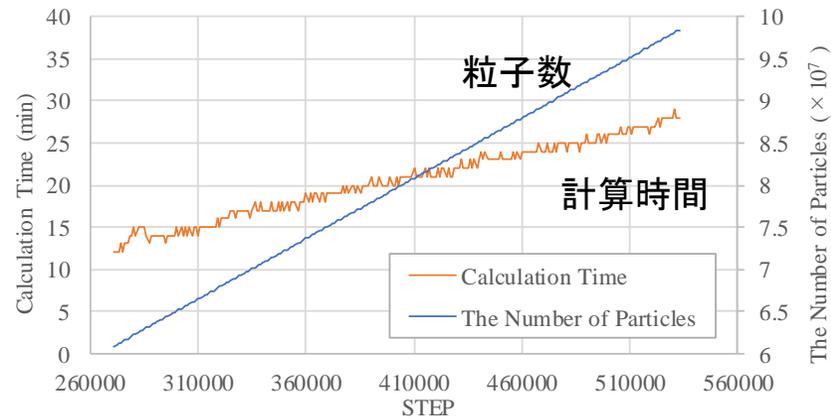


解析モデル

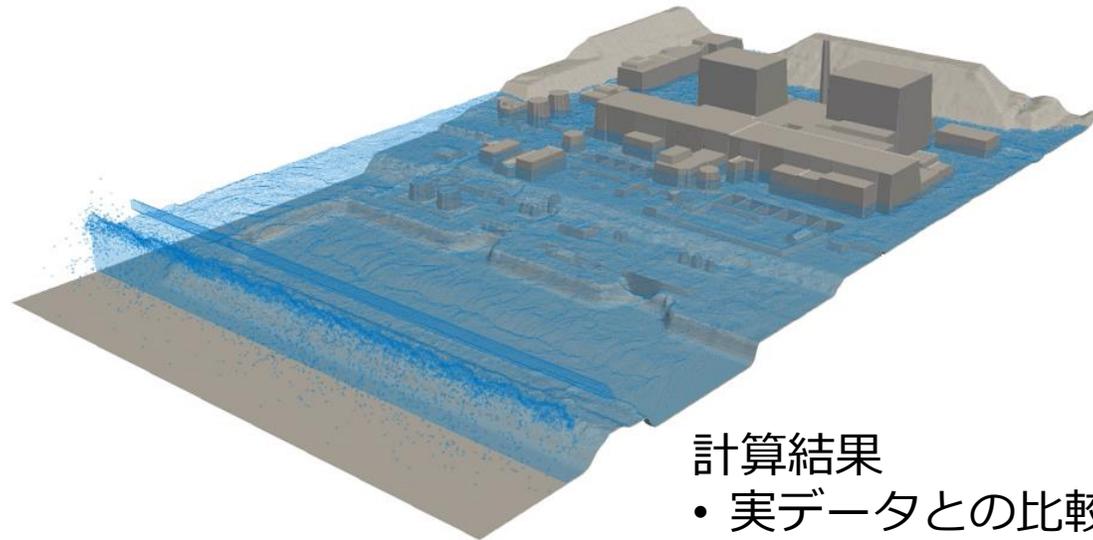
- 建屋の中までモデル化
- 粒子系 30cm
- 並列数 128ノード (京)



福島原子力発電所の津波浸水の再現



粒子数の増加による計算時間の増加は鈍
→高い負荷分散



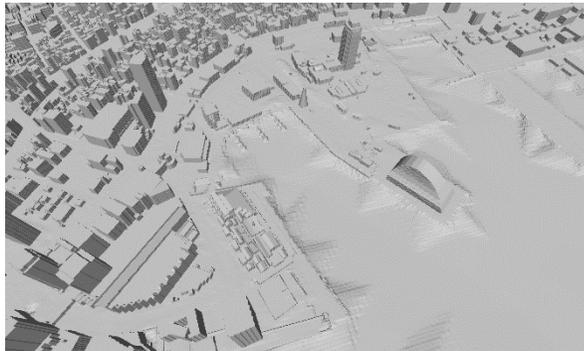
計算結果

- 実データとの比較
- 計算性能の確認

工学：津波用都市のデジタルツインの自動構築



3次元地形データ



1m解像度2次元格子データ

- ◆ 津波解析モジュールJAGURSに入力
- ◆ 地震・津波シミュレーション用の高度都市モデルの構築可能



社会科学：群集避難MAS

Strong Scalability

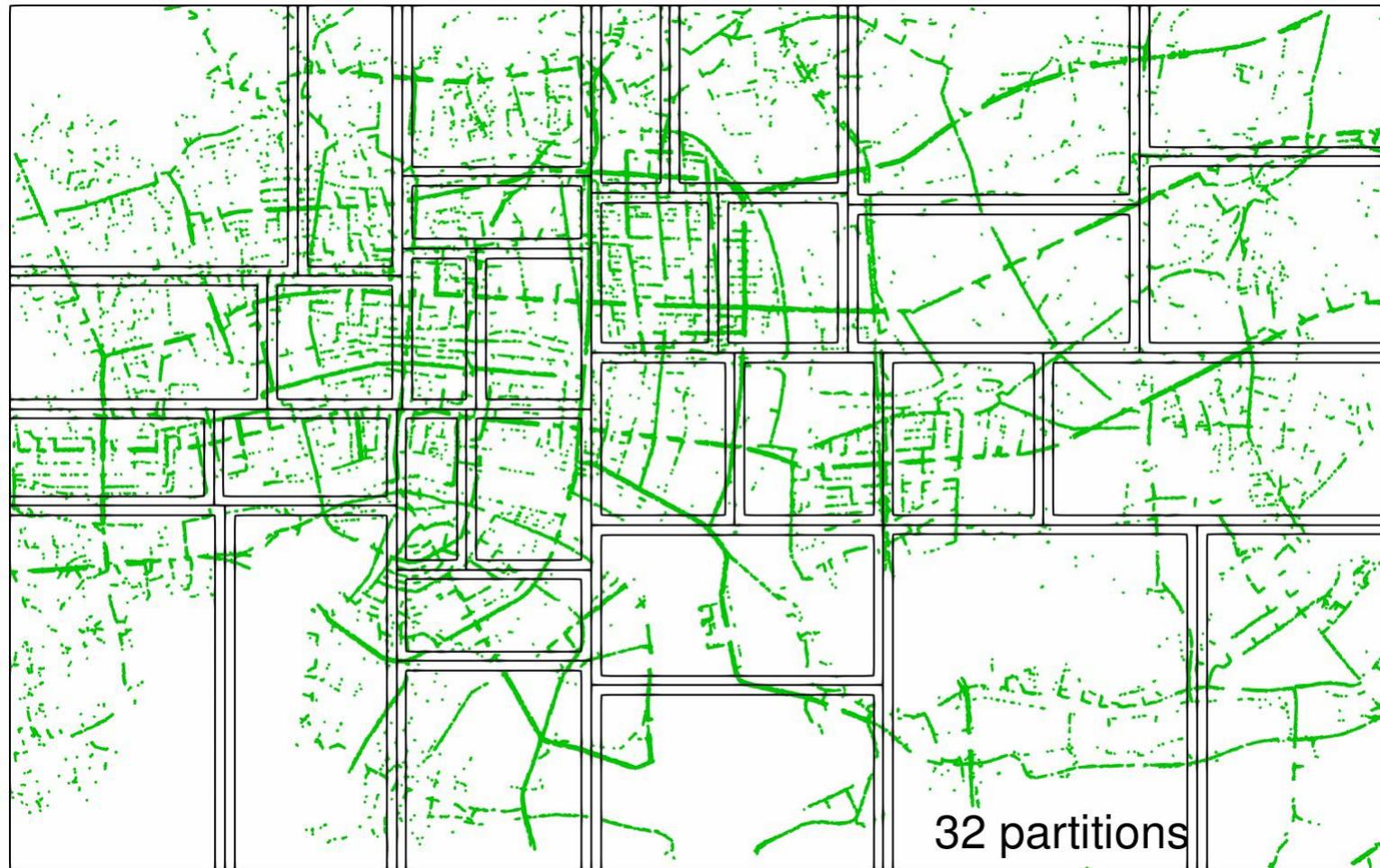
| Number of nodes | Runtime (s) | Strong scalability |
|-----------------|-------------|--------------------|
| 256 | 5016 | |
| 512 | 2516 | 99% |
| 1024 | 1400 | 89% |
| 2048 | 842 | 83% |

性能

- 空間：1m×1m, 時間：0.1秒
- 領域 最大900km²
- エージェント数1,000万以上
- 京で2048ノードまでスケール

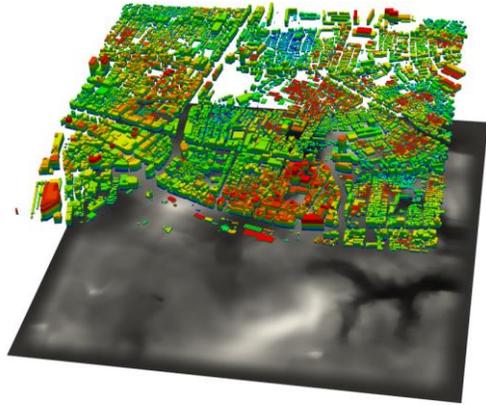
モデル自動構築

- 多様な都市データの自動変換
- エージェント挙動用グリッドモデル
- エージェント記憶用ノードリンクモデル



社会科学：交通シミュレーション

地震・建物倒壊シミュレーション



建物の揺れ 小 大
地盤の揺れ 弱 強

家屋被害
インフラ被害

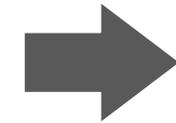
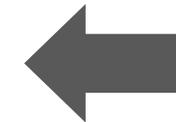
交通需要シミュレーション： OD交通量パターンの集合を形成

| | 着地1 | 着地2 | ... | ... |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| ... | | | | 408 |
| ... | | | | 413 |
| ... | | | | 369 |
| ... | | | | 397 |
| ... | : | 315 | 354 | 812 |
| ... | : | 365 | 371 | 803 |

交通需要

道路被害

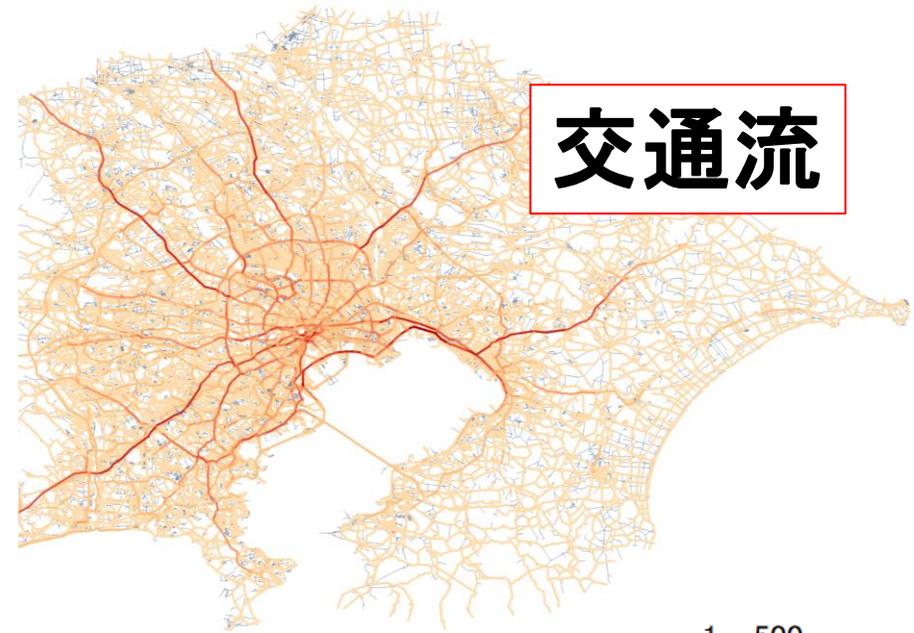
旅行時間



交通需要

交通流シミュレーション：

繰り返し計算により交通流の定常状態（動的利用者均衡）を求め、各需要パターンのリンク遅れ時間を算出

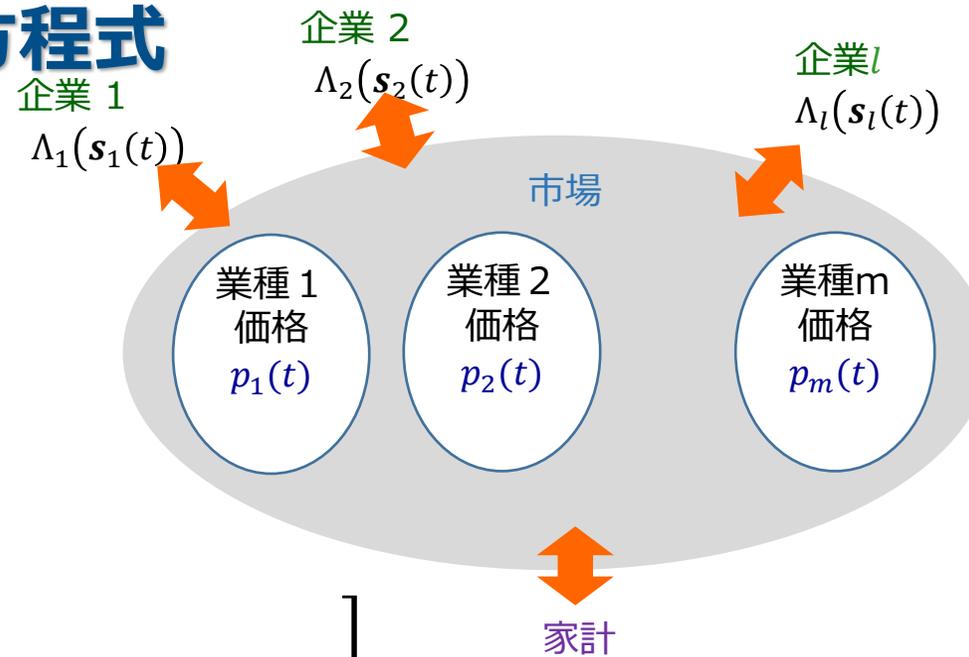


交通流

圏央道内ネットワーク
(約35万リンク)

- 1 - 500
- 500 - 1000
- 1000 - 1500
- 1500 - 2000
- 2000 - 2500
- 2500 - 3000
- 3000 - 3185

社会科学：Bellman方程式



Λ_i : 第i番目企業の企業価値

t期の企業価値
(株価に相当)

$$\Lambda_i(s_i(t)) = \max_{d_i(t)} \left[E_\varepsilon[\Pi(s_i(t), d_i(t))] + \psi \sum_{\{q', \Delta\theta_i\}}^Q \phi_i(q', \Delta\theta_i) \cdot \Lambda_i(s_i'(s_i(t), d_i(t))) \right]$$

割引因子

t期の期待利潤：
収入 - 費用
(投資費用を含む)

t+1期の状態
の確率

t+1期の企業価値

変数

$s_i(t)$

状態変数ベクトル

資本, 労働, インフラ, {価格}, {ライフライン}, サプライチェーン

$\{\phi_i(q', \Delta\theta_i)\}$

次期の価格ベクトル q' とライフライン・サプライチェーンの稼働に関する確率

$d_i(t)$

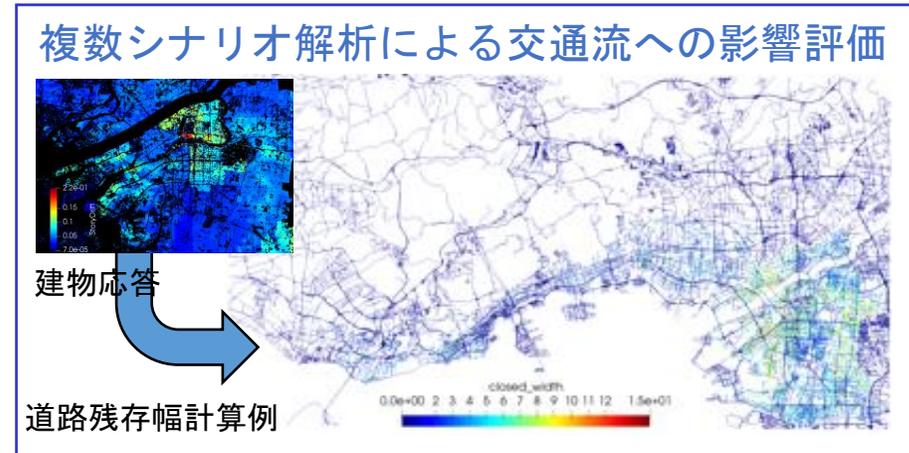
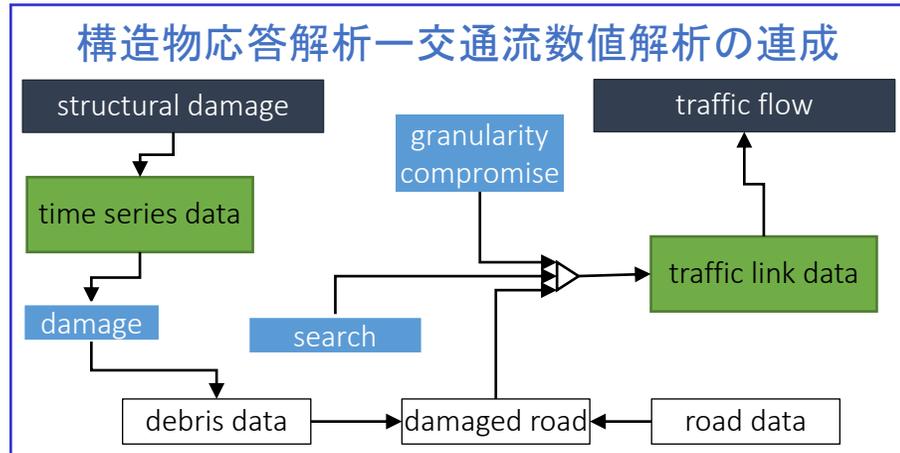
制御変数ベクトル

$s_i'(s_i(t), d_i(t))$

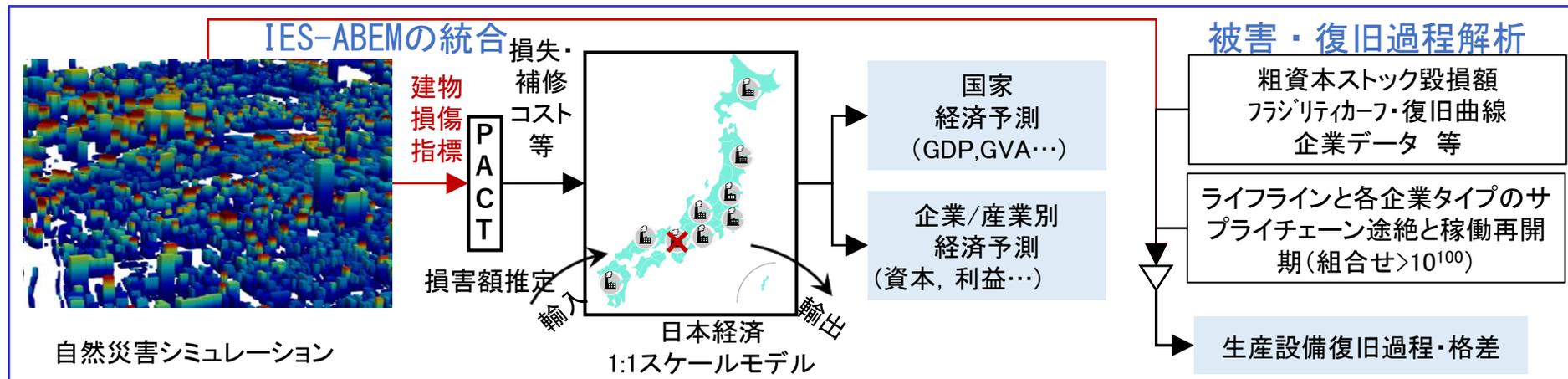
今期の状態と制御によって決まる次期の状態

シミュレーションの統合

◆ IES-交通障害シミュレーションの統合



◆ IES-経済活動シミュレーションの統合

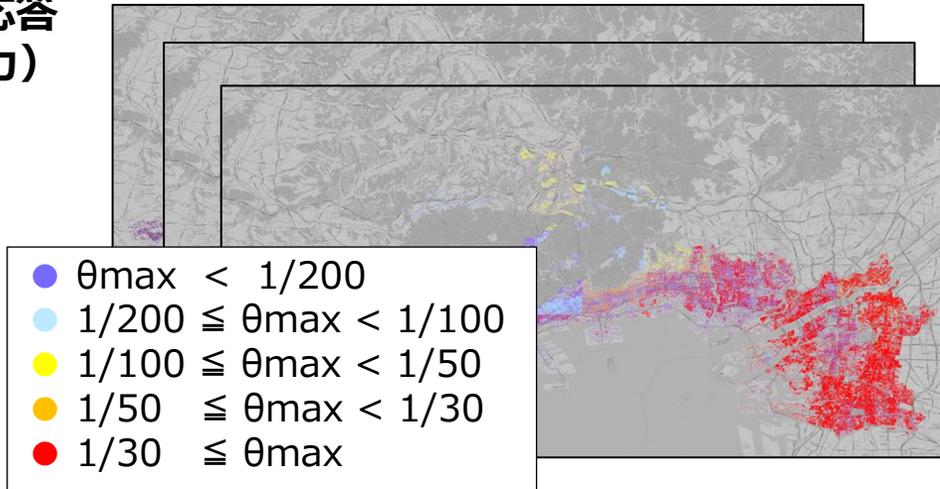


シミュレーションの統合のためのデータ加工・変換

構造物応答シミュレーションと
交通シミュレーション

データ変換

建物最大応答
(SRA出力)

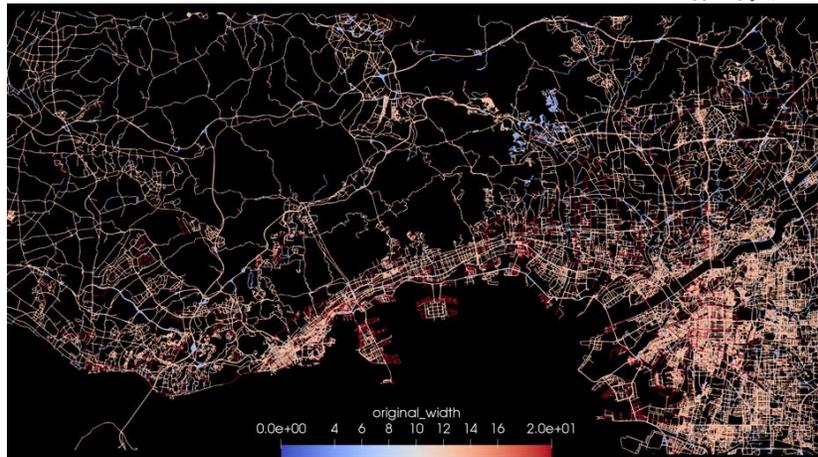


情報追加

道路情報

- ノード座標
- リンク
- 道路幅

ソース：
DRM



閉塞領域 (ポリゴン)

計算

リンクごとの閉塞領域
~道路中心最短距離

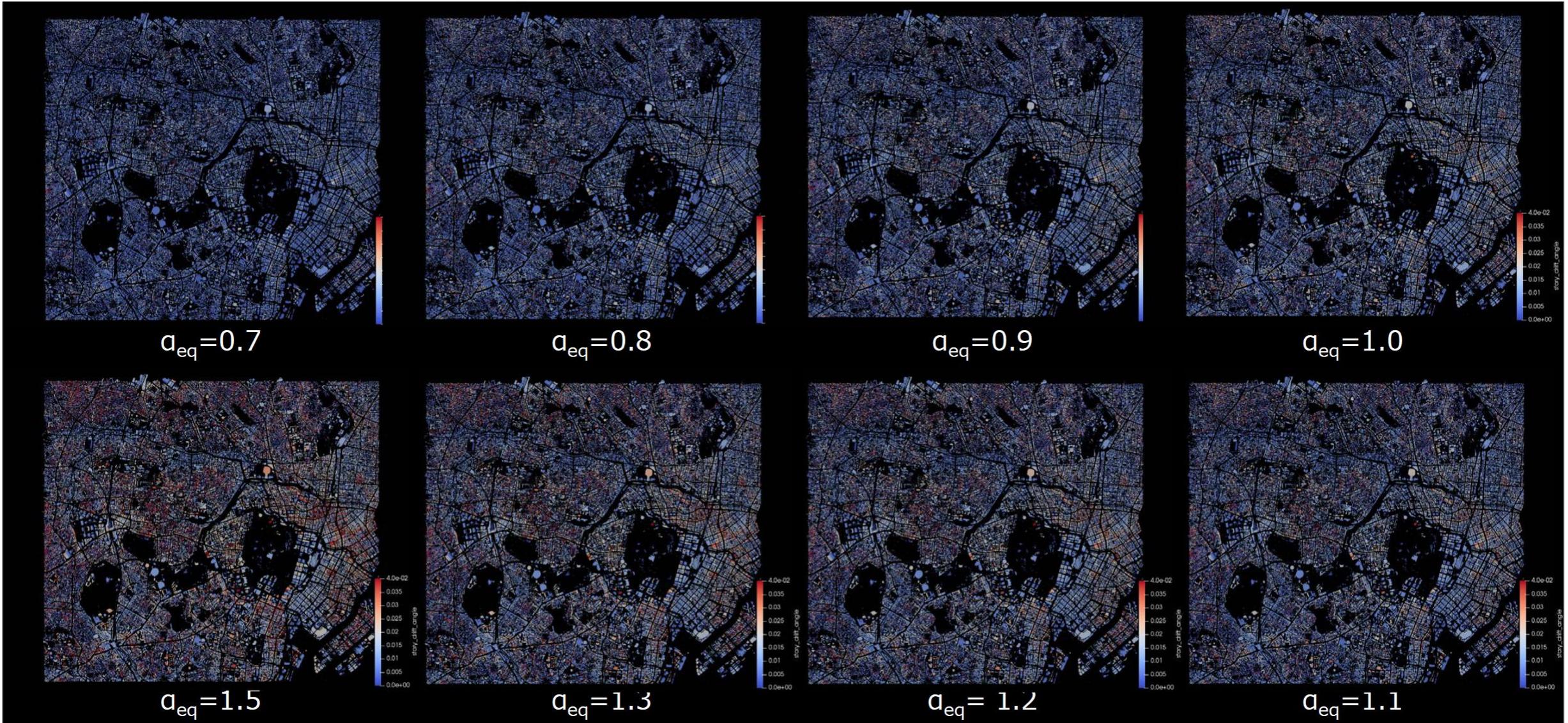
データ変換



首都直下地震シミュレーション

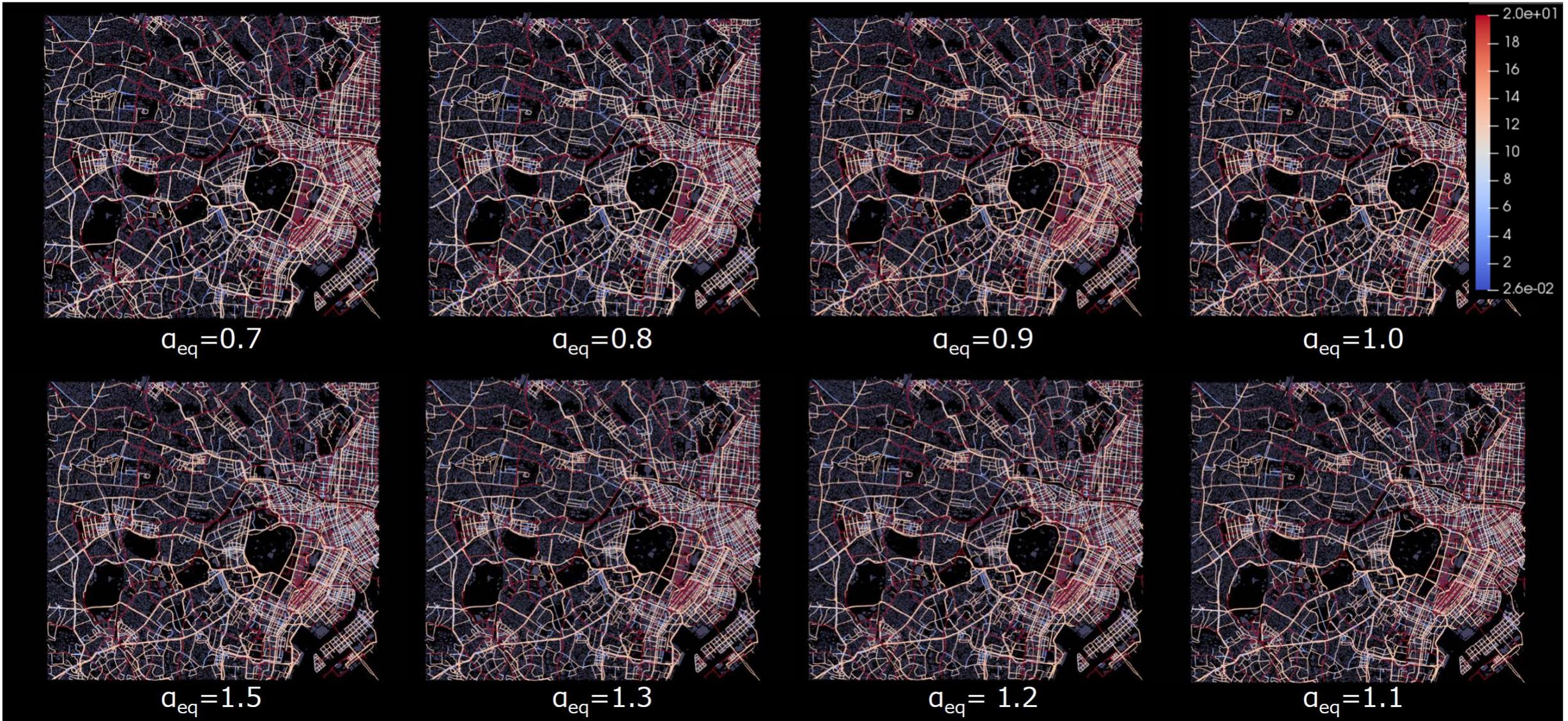
- ◆地震シナリオ 内閣府想定
断層からの地震波動伝播の計算結果を地盤モデルの底面に入力
- ◆地盤モデル 工学基盤以浅, 三層構造FEM モデル
非線形RO
- ◆構造モデル 243,132棟
線形MDOF
- ◆交通ネットワーク
 - 圏央道内 リンク数 : 347,691
 - 自動車 普通車500万台, 大型車250万台
(普通車10台, 大型車5台 1 パッケージとし, 558,572パッケージ)
4時~10時

計算結果：建物倒壊



a_{eq} :地震動増幅のパラメータ

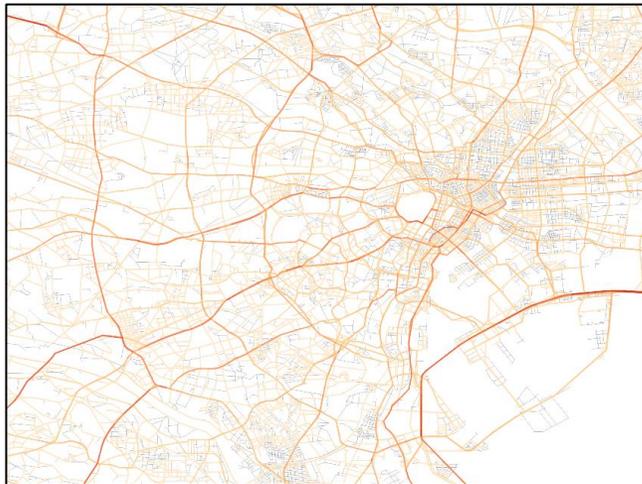
計算結果：道路残存幅



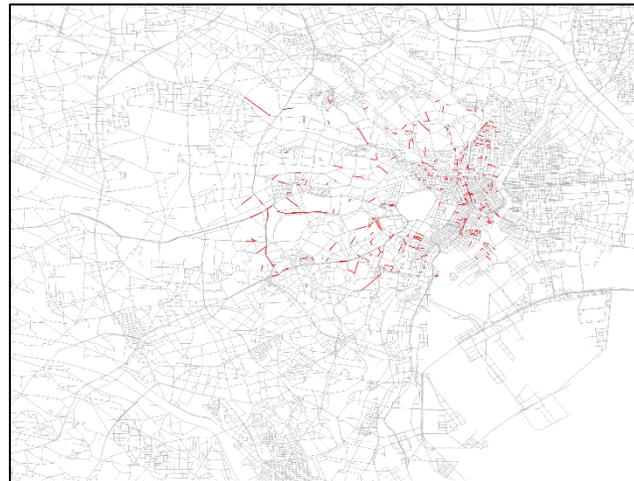
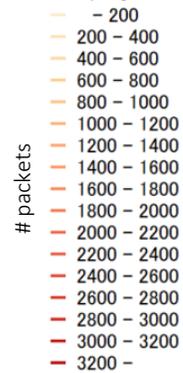
50%以下の残存率のリンクはすべて閉塞と仮定 19

計算結果：交通流

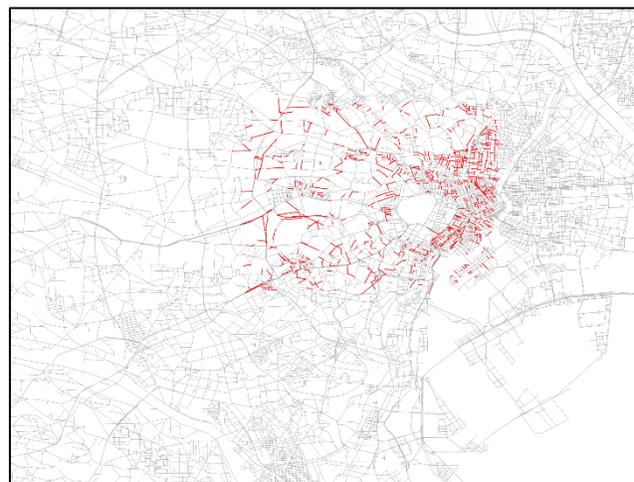
Case 1



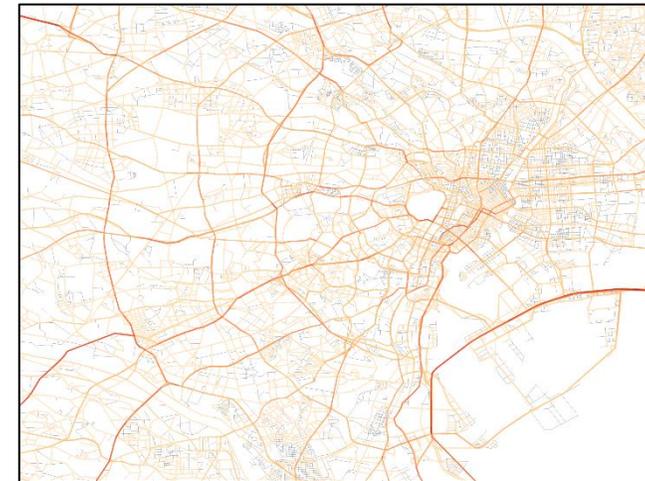
常時



Case 2



被害箇所

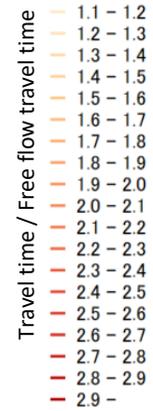


交通量

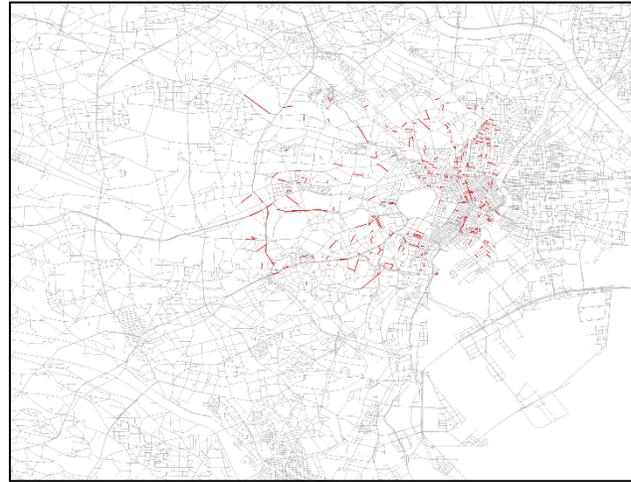
計算結果：混雑の度合い



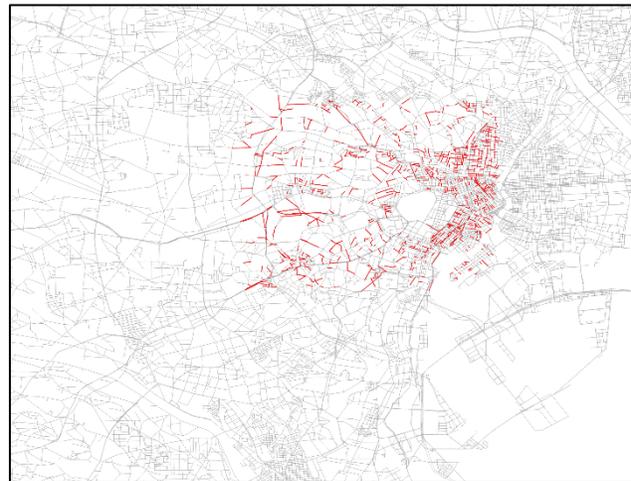
常時



Case 1



Case 2



被害箇所



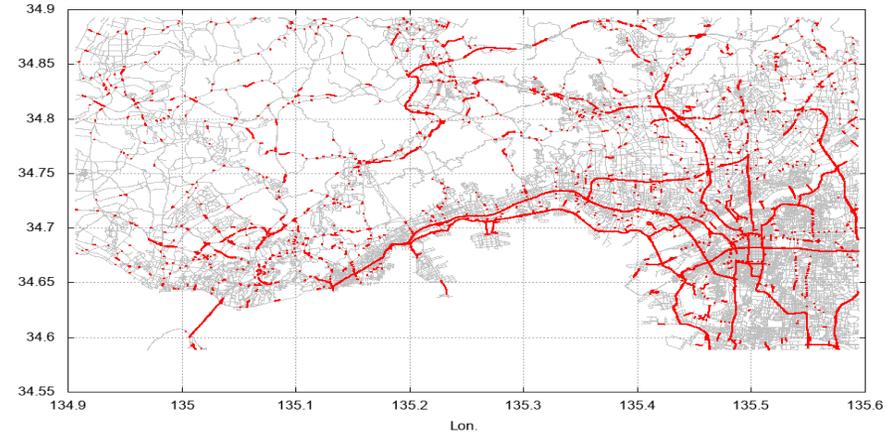
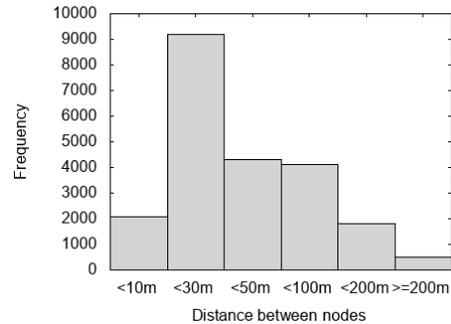
混雑度

南海トラフ地震シミュレーション

- ◆地震シナリオ 内閣府（基本ケース，東ケース，陸側ケース）
大阪エリア：シミュレーション，その他：想定震度分布
- ◆地盤モデル 二層増幅モデル（工学基盤＋表層），非線形RO
- ◆構造モデル 1,266,706棟，線形MDOF
- ◆交通ネットワーク
 - 関西圏 リンク数：495,595
 - 自動車 普通車500万台，大型車250万台
（普通車10台，大型車5台1パケットとし，558,572パケット）
4時～20時
 - 交通需要 市町村想定避難所（熊本地震に準拠）

防災用都市のデジタルツインの高度化

都市情報：「橋・高架」属性
リンク数：21,968



データソース

構造物関連

- ・住宅地図データ
- ・GISデータ
- ・設計CAD図
- ・設計基準類 etc.

道路関連

- ・座標/リンク
- ・属性
- ・規格
- ・幅 etc.

地盤関連

- ・標高
- ・柱状図, N値
- ・AVS30 etc.

橋梁区間の同定 (ノード重複箇所を連続化)

道路情報・地盤情報

構造形状の設定

幅員・支間割・橋梁高・地盤条件

設計基準類

応答解析用モデル (3Dフレーム)

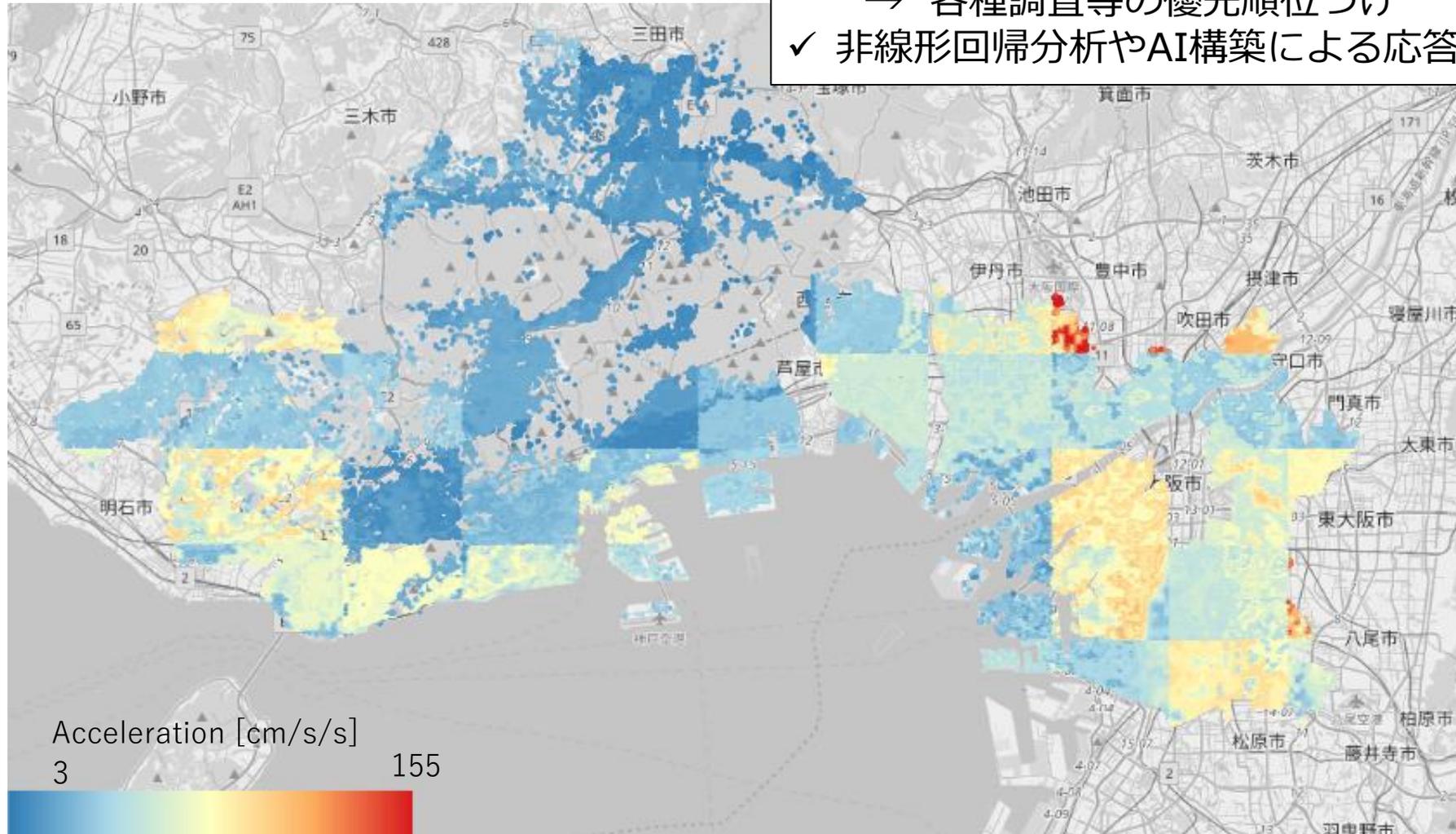
節点・要素・断面形状・材料・支点条件

解析コード (SRA導入予定)

計算結果：地震動

表層硬さ一地表最大加速度

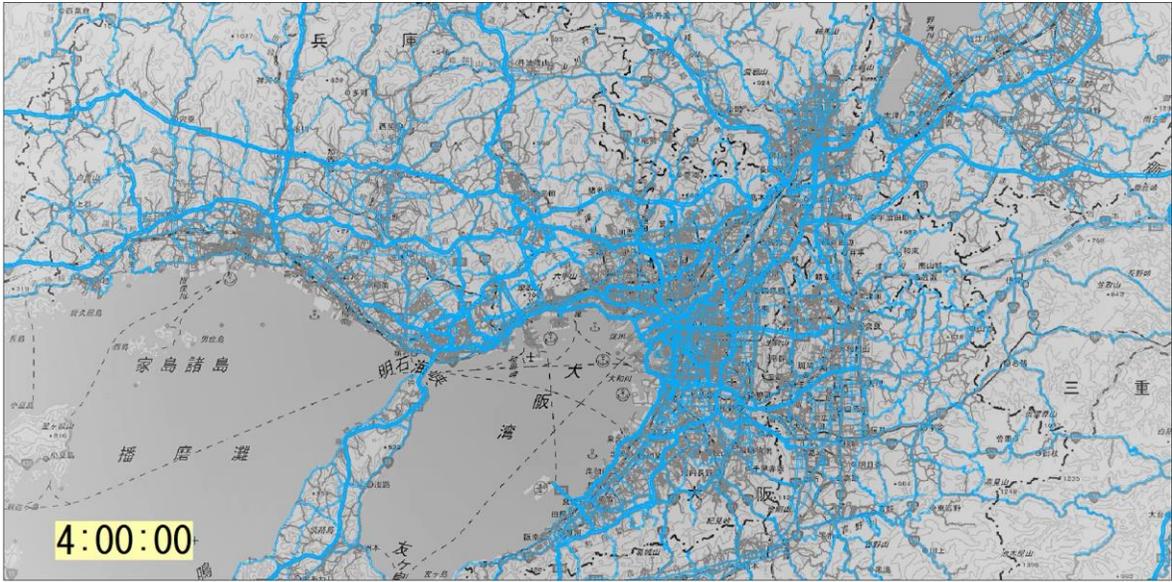
AVS30 ± 30% 変動時標準偏差



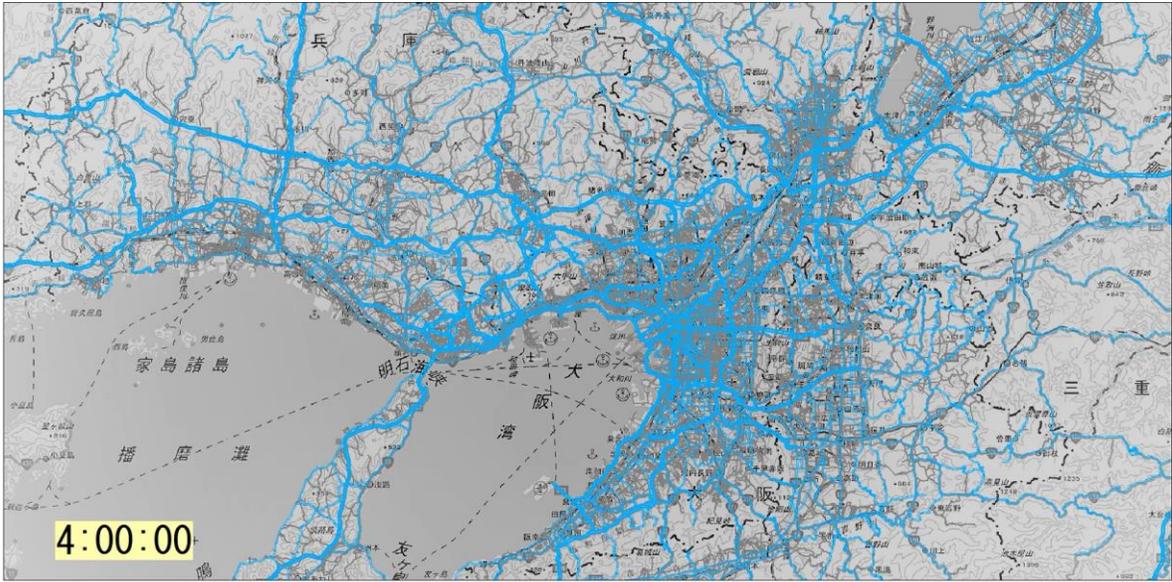
〈多数シナリオ解析の活用〉

- ✓ 入力パラメタに対する感度が高い領域の把握
 - 推定結果の信頼性評価
 - 各種調査等の優先順位づけ
- ✓ 非線形回帰分析やAI構築による応答推定の効率化

計算結果：交通流

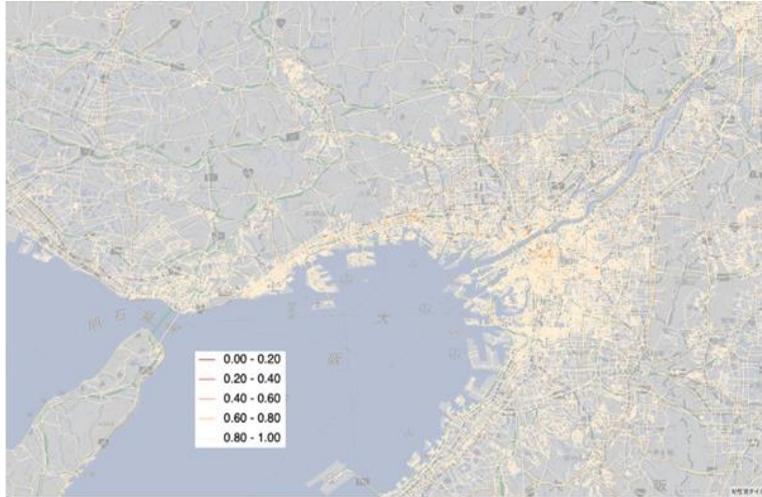


平時

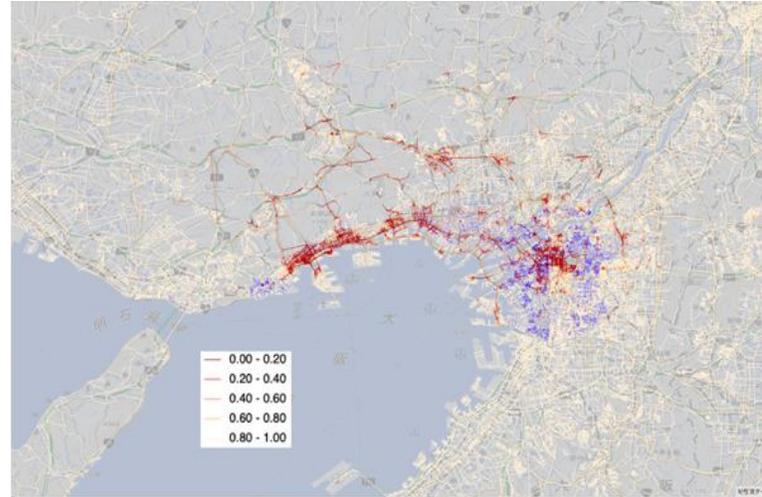


被災後（基本ケース）

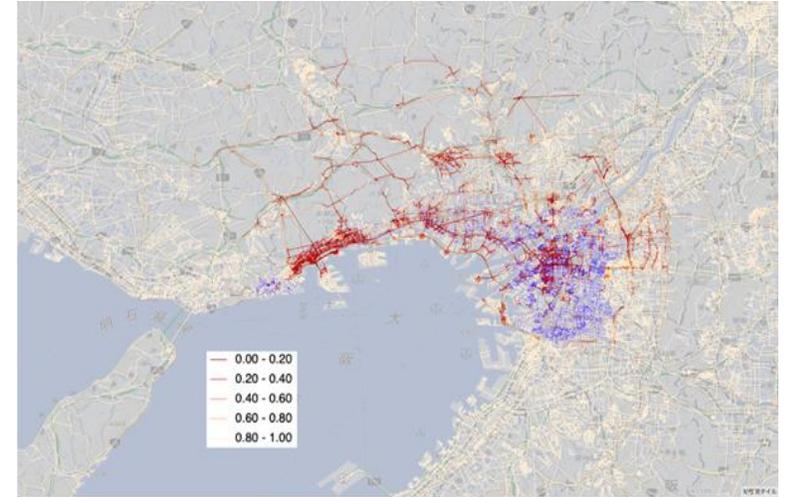
計算結果：地震シナリオ毎の交通流



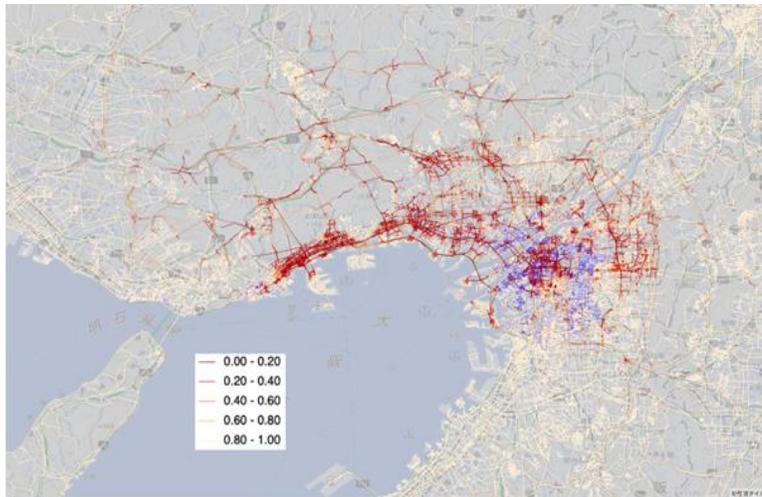
平時



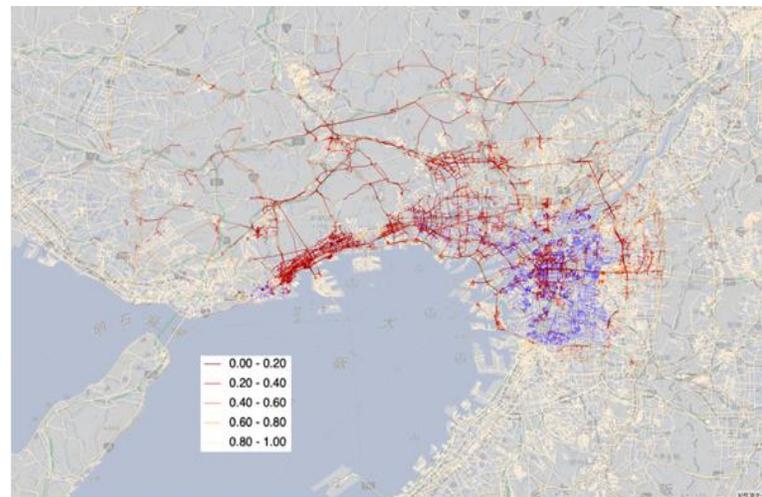
東



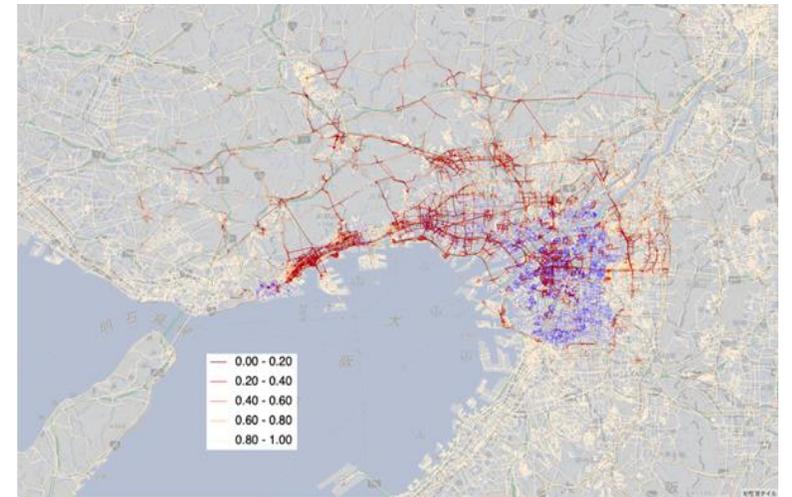
基本



陸



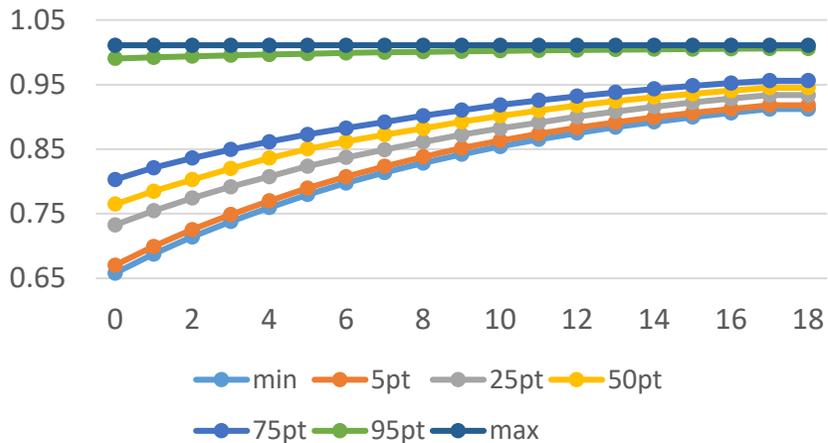
陸振幅1.5



陸地盤1.3

計算結果：経済活動の復旧状況

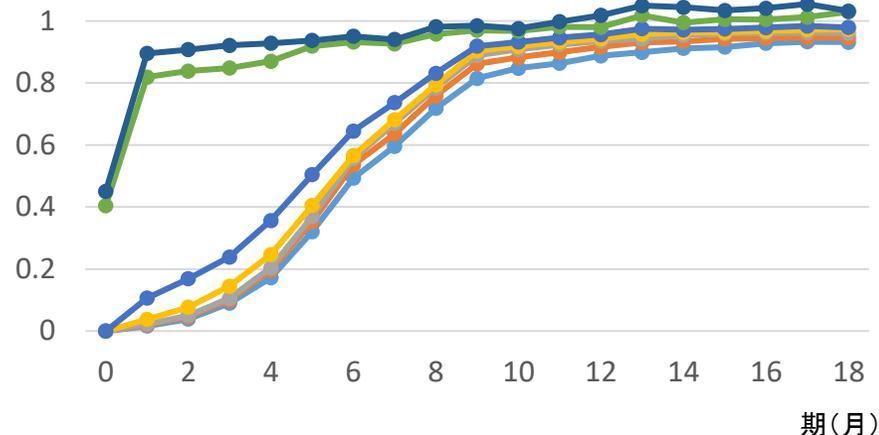
復旧率(各部門の災害前の水準を1に基準化)



生産設備(資本)

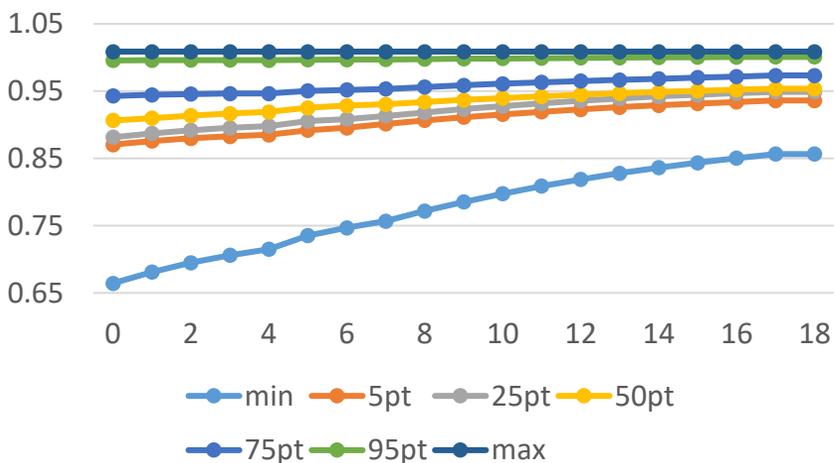
(pt: パーセンタイル値)

地域OSK (大阪府) の36部門 (業種) の復旧過程と格差



生産水準

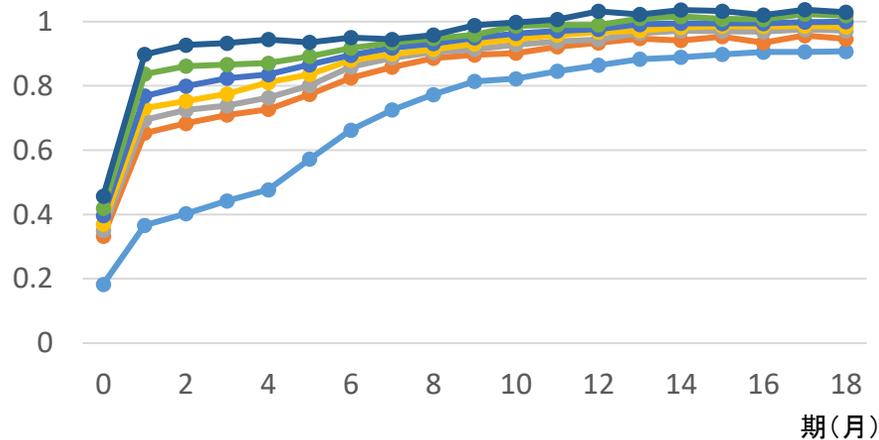
復旧率(各部門の災害前の水準を1に基準化)



生産設備(資本)

(pt: パーセンタイル値)

地域ROK (大阪府以外の関西) の36部門 (業種) の復旧過程と格差

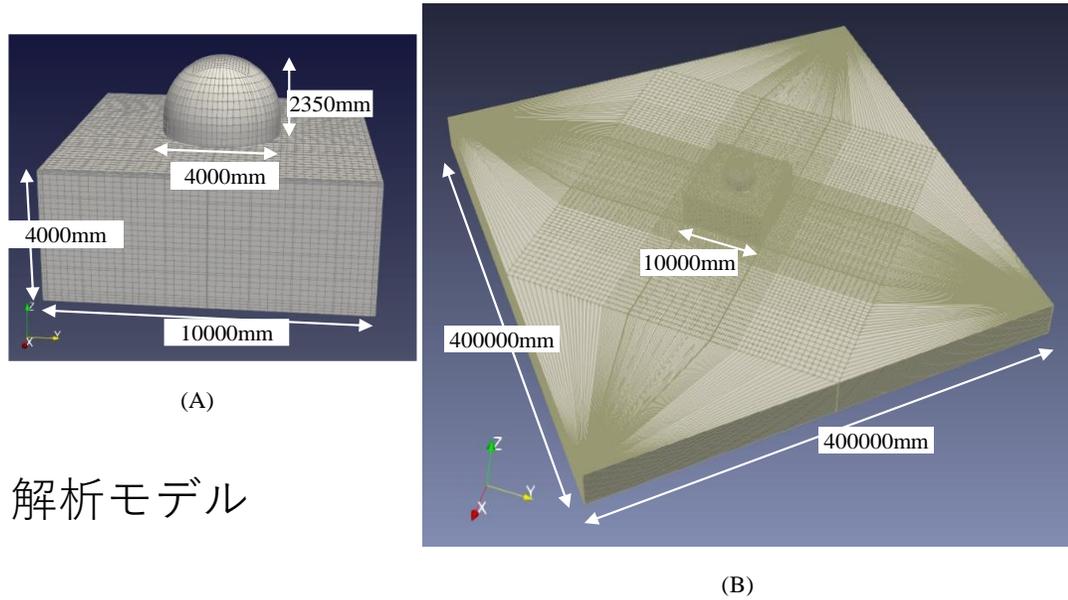


生産水準

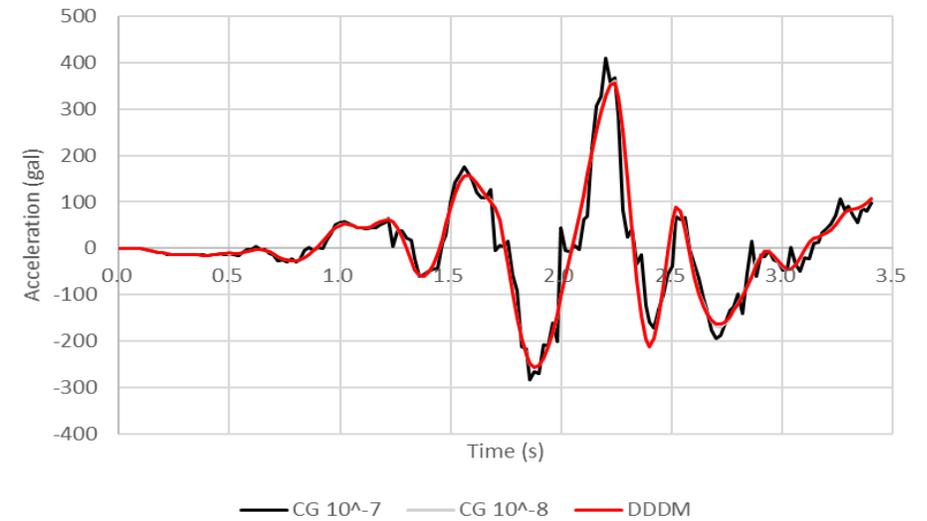
内容

- ◆ 防災用都市のデジタルツインを利用した統合地震シミュレーション
 - 防災用都市のデジタルツイン
 - 首都直下地震と南海トラフ地震の例
- ◆ デジタルツインの中核となる並列有限要素法
 - 特徴：高性能計算を利用するソルバ, コンクリートと地盤の3次元構成則
 - 重要構造物へのデジタルツインの適用例
- ◆ デジタルツインの自動構築
 - 基盤技術としてのDPP (Data Processing Platform)
 - 実データを利用した自動構築の適用例：RC橋梁, NATMトンネル, 地盤, 河川・港湾
- ◆ 国交DPFへの貢献というデジタルツインの挑戦
 - デジタルツインによる予測というサービスを提供する機能を国交DPFに
 - 第3期SIPのスマートインフラとスマート防災で研究開発されるデジタルツインの例

高速ソルバ : DEFLATED DOMAIN DECOMPOSITION METHOD (DDDM)



解析モデル



加速度時刻歴の比較

高速化：シングルコアの計算時間を基準とした計算時間

| No of processes | 1 | 2 | 4 | 8 | 16 |
|--|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| Computing time of Original CG method [s] | 219108.43 | 157030.73 | 109416.04 | 66907.79 | 49649.25 |
| Acceleration factor | - | 1.40 | 2.00 | 3.27 | 4.41 |
| Computing time of DDDM [s] | 19773.69 | 13666.07 | 7638.48 | 4740.08 | 3984.33 |
| Acceleration factor | - | 1.45 | 2.59 | 4.17 | 4.96 |
| Ratio of Computing time | 11.08 | 11.49 | 14.32 | 14.12 | 12.46 |

スケーラビリティ

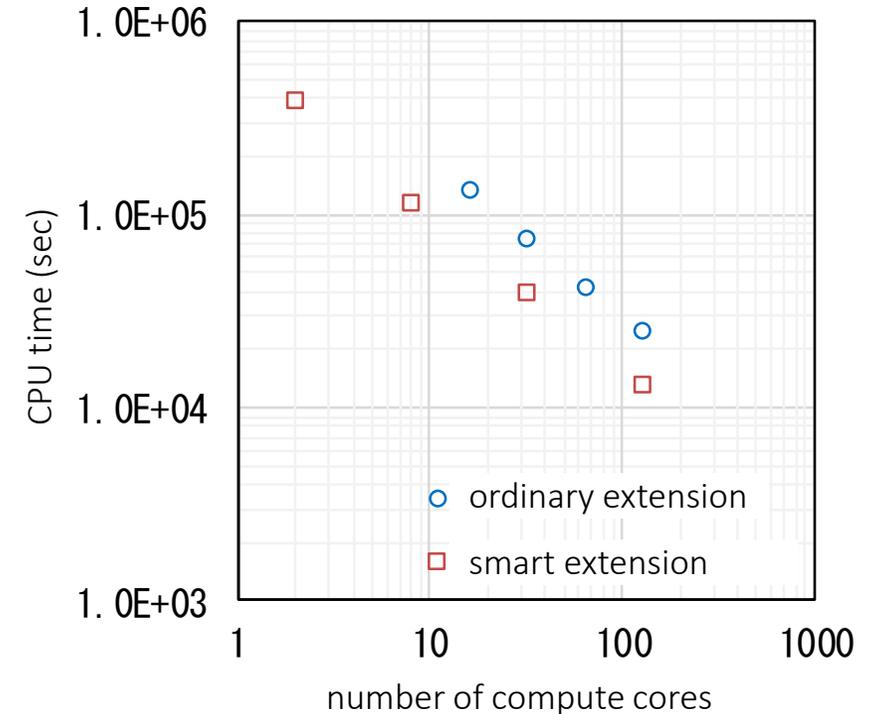
◆ スケーラビリティの算定のため計算時間

◆ 問題設定

- 解析モデル: 前出
- コア数: 2 ~ 128
- 入力地震動: 9.0 sec (900ステップ)

◆ e-FrontISTRのスケーラビリティ

- 128 cores: 3.7 h CPU time
- 128 cores or more: 12.0 h CPU time
1.5M自由度, 22.0 sec入力地震動



ストロングスケーリング

128コアのウィークスケーリング

| | CPU time (h) | estimated CPU time for 22.08 sec (h) | Model DOF for 24 h CPU time | estimated CPU time for 100 M DOF model (day) |
|--------------------|--------------|--------------------------------------|-----------------------------|--|
| ordinary extension | 6.9 | 17.0 | 2,051,031 | — |
| smart extension | 3.7 | 9.0 | 3,874,135 | 25.8 |

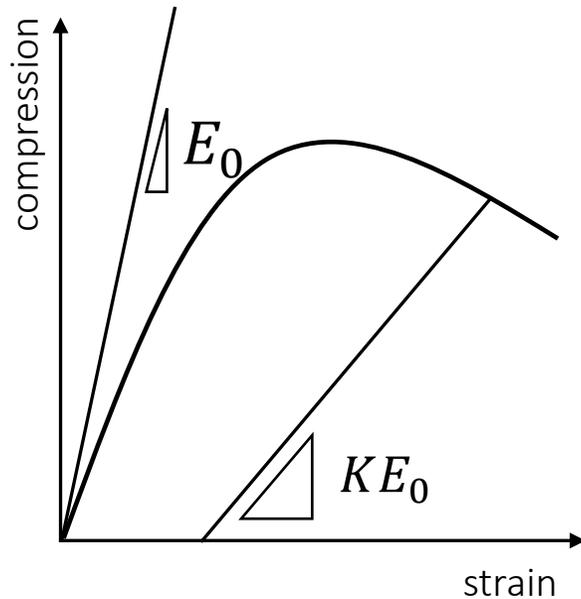
鉄筋コンクリート耐震壁実験

◆ 特徴 (前川元東京大学教授)

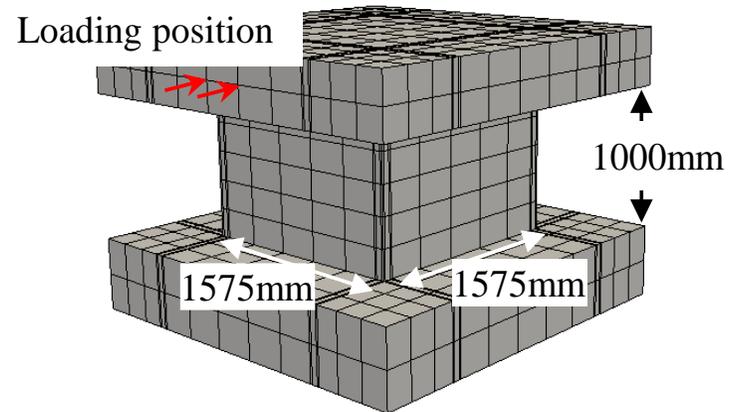
- 弾塑性 + 損傷
- 亀裂発生前 : 3D
- 亀裂発生後 : 1D 軸方向 + 1D せん断方向

数値計算の収束性の改善

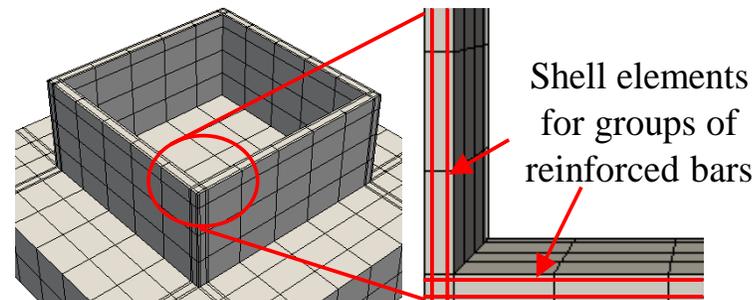
| | original | implemented |
|---------------------|----------|-------------|
| dt [s] | 0.001 | 0.01 |
| number of iteration | 10,000 | 3,485 |



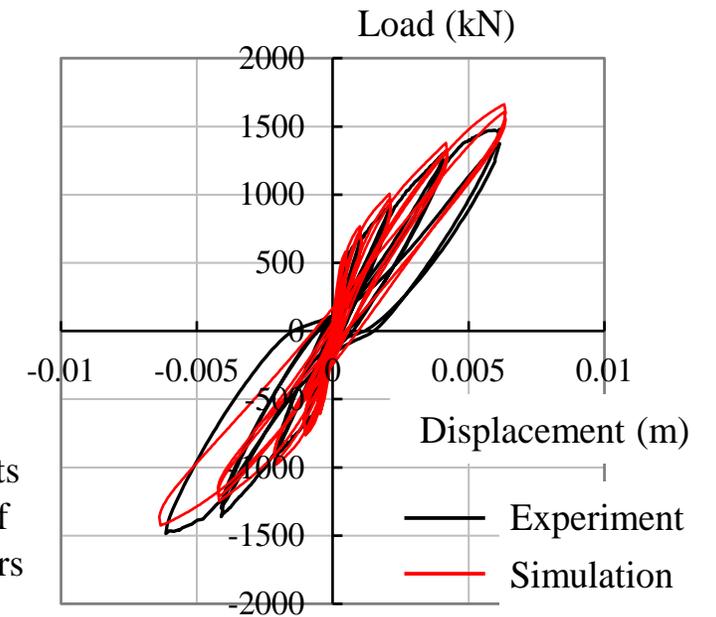
テンソル構成則に埋め込まれた
コンクリートの圧縮応力-歪関係



(A)



(B)

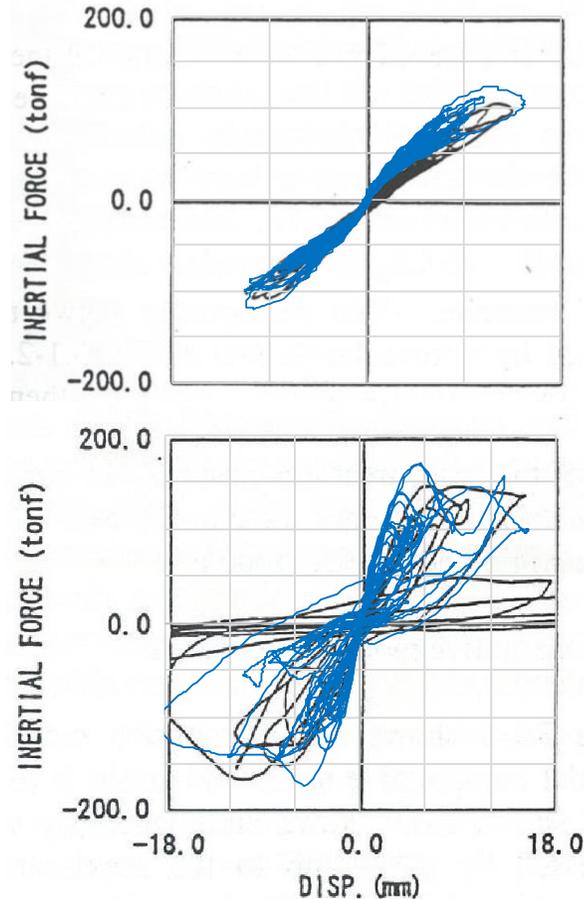


(C)

鉄筋コンクリート耐震壁実験：変位-荷重関係と亀裂分布

◆ 変位-荷重関係の再現

- 最大10/1,000程度の変計角に対応
- 履歴ループが良好に計算

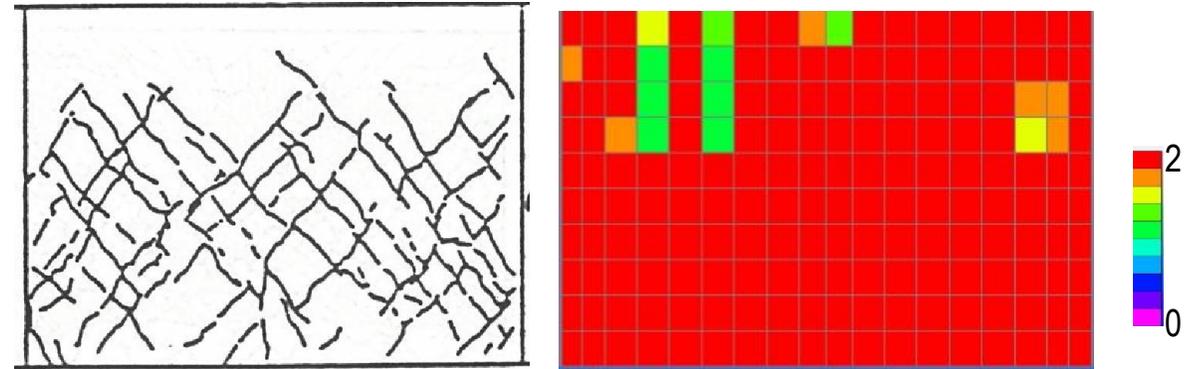


black: experiment
blue: analysis

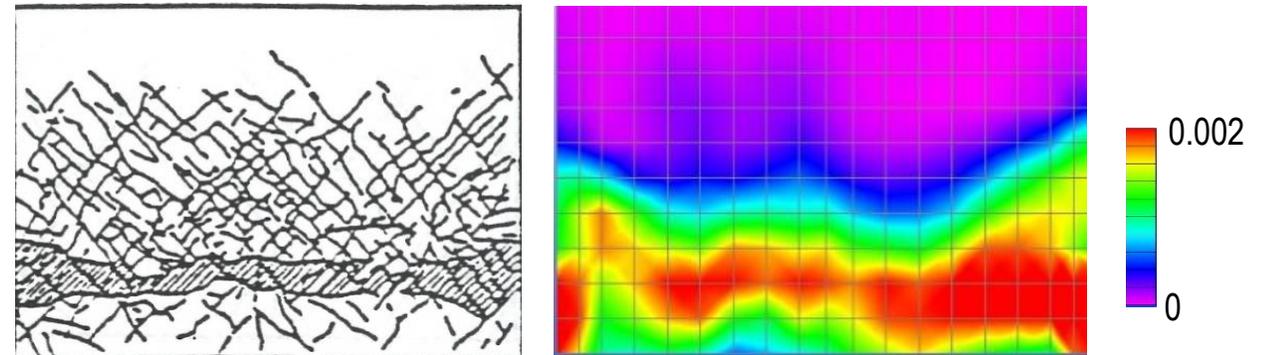
Case 2: 変位-荷重関係

◆ 亀裂発生パターンの再現

- せん断壁の二方向対角亀裂群
- 大歪領域と損傷領域が良好に計算



Case 2: RUN-4の亀裂数



Case 2: RUN-5の主歪分布

E-DEFENCE地盤実験

◆ せん断地盤

- 15 cm厚の鋼製リングを40個, 重ねて

◆ 砂

- Albany silica, 60%と90%の相対密度
- パイル底面にはセメント混合砂

◆ パイル

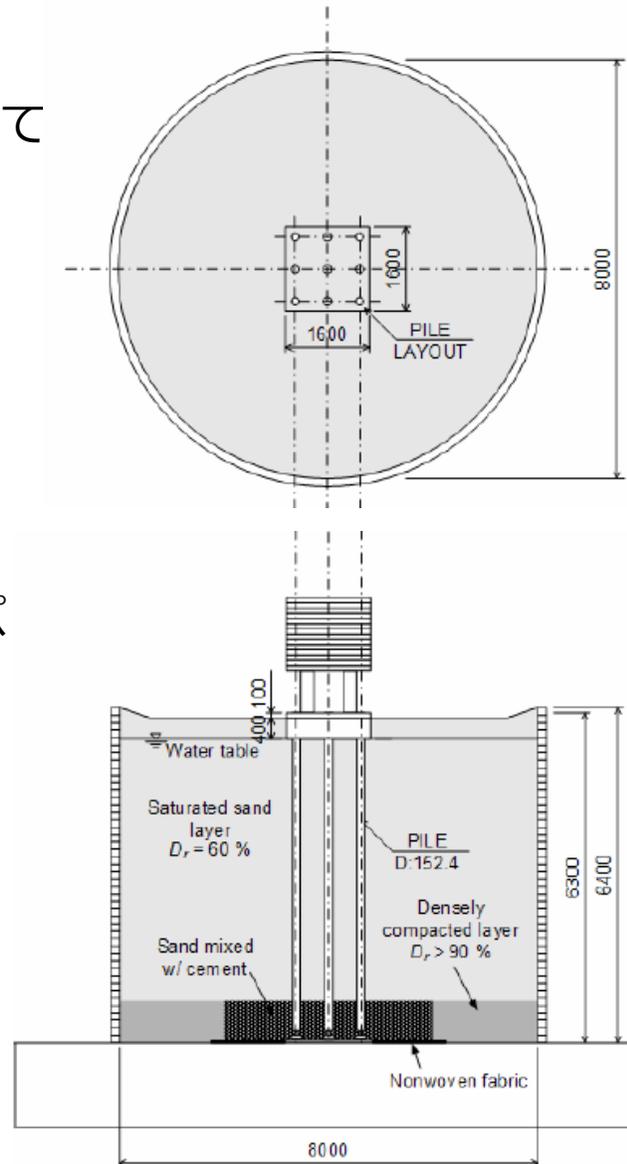
- 直径152.4 mm, 厚さ 2 mmの鋼製パ

◆ 上部構造

- 鋼製プレート

◆ 基礎

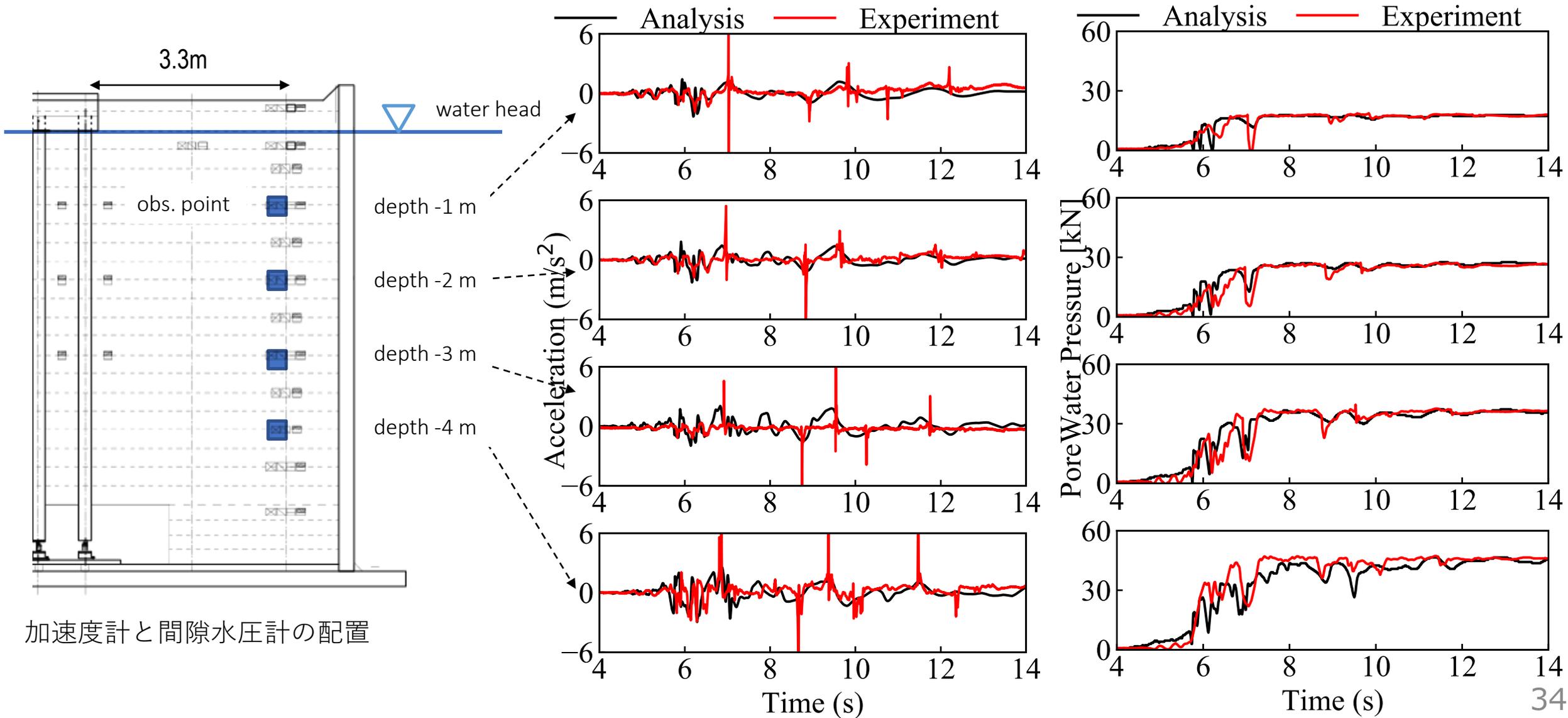
- 鋼製プレート



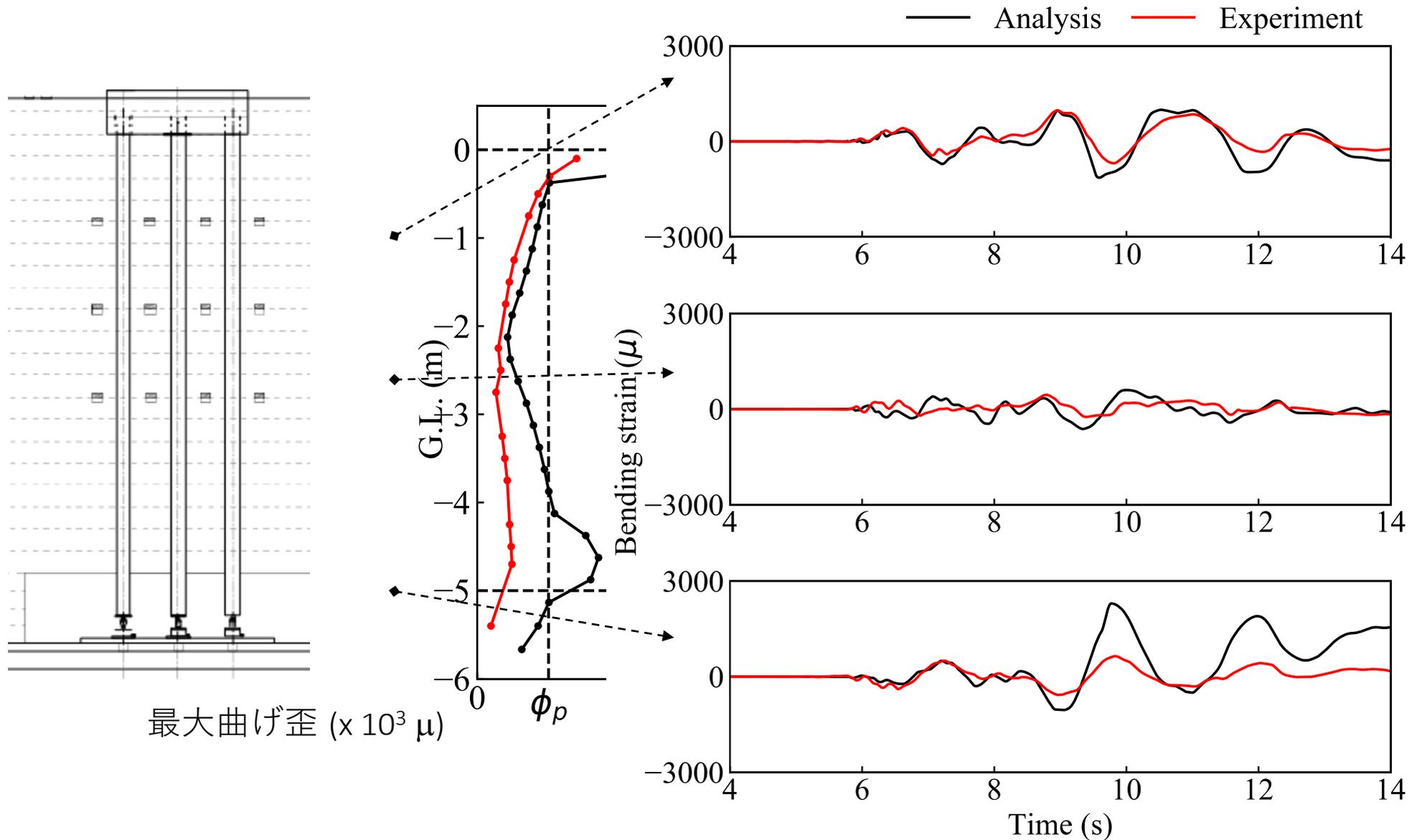
| | |
|---------------------------|-----|
| strain gauge | 382 |
| accelerometer | 237 |
| velocity meter | 4 |
| displacement meter | 42 |
| pressure meter | 96 |
| pore water pressure gauge | 124 |
| load cell | 26 |

| | designed max. acc. (gal) | | |
|-------------|--------------------------|----|-----|
| Tottori | 30 | 80 | 300 |
| JR Takatori | 30 | 80 | 300 |

E-DEFENCE地盤実験：加速度と間隙水圧の再現



E-DEFENCE地盤実験：杭の曲げ歪の再現



実務利用：原子力発電所の極大地震動に対する耐震性評価

◆ 原子力発電所の耐震性評価の最終段階

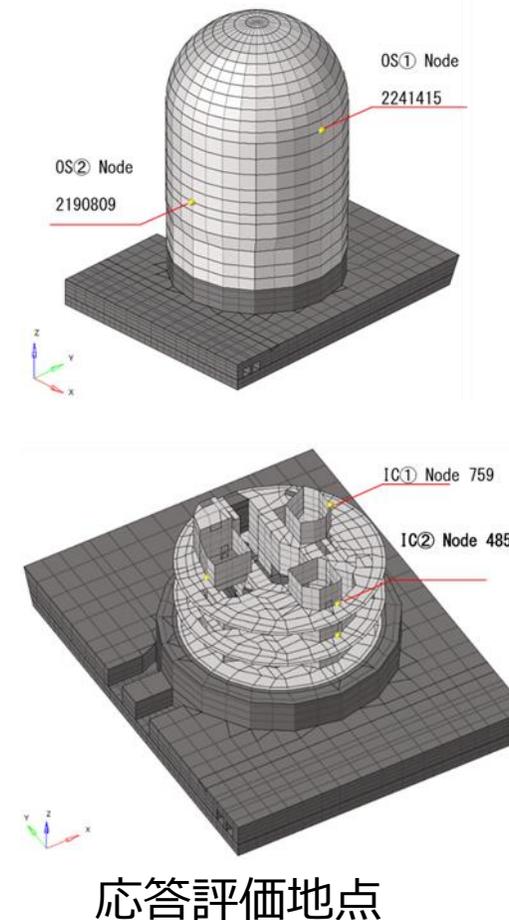
- 耐震性の最大は構造物の損傷・破壊に至って初めて判明
- 実験すら困難な地震動を入力する原子力発電所のデジタルツインの利用

デジタルツイン = 原子力発電所建屋 + 周辺地盤

原子力発電所のデジタルツインを使う数値実験

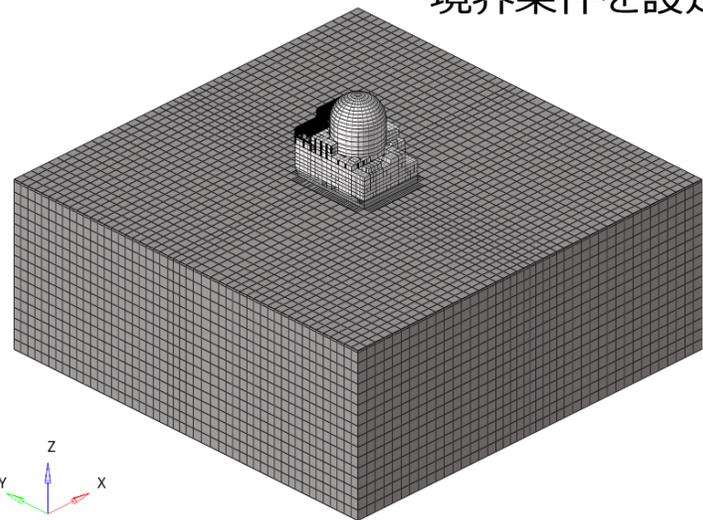
| case | amplification | Newton's method | time increment (s) | max. iteration number | analysis |
|------|---------------|-----------------|----------------------|-----------------------|------------|
| 1 | 1.5 | initial | 2.5×10^{-4} | 50 | Not stable |
| 2 | 1.5 | initial | 2.5×10^{-4} | 10 | Stable |
| 3 | 1.5 | initial | 1.0×10^{-4} | 20 | Stable |
| 4 | 1.5 | modified | 5.0×10^{-4} | 10 | Stable |
| 5 | 2.0 | initial | 2.5×10^{-4} | 20 | Not stable |
| 6 | 4.0 | initial | 2.5×10^{-4} | 20 | Not stable |

- global performances are examined for convergence state of nonlinear analysis and CG method
- local performances are examined at observation nodes and elements near observation points

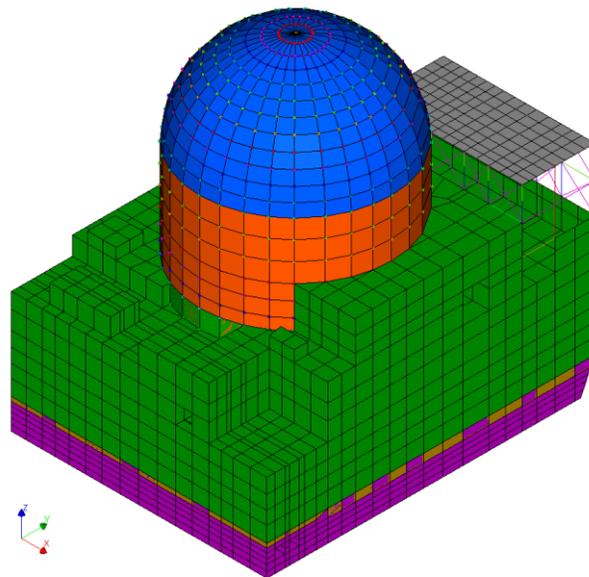


原子力発電所デジタルツインの概要

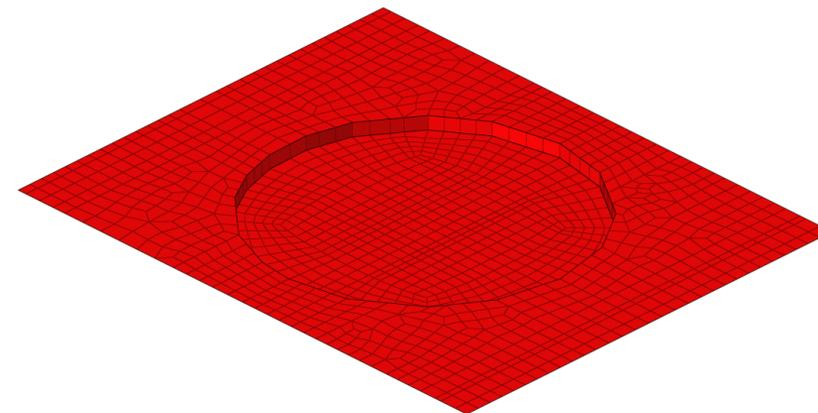
仮想境界では吸収
境界条件を設定



overview



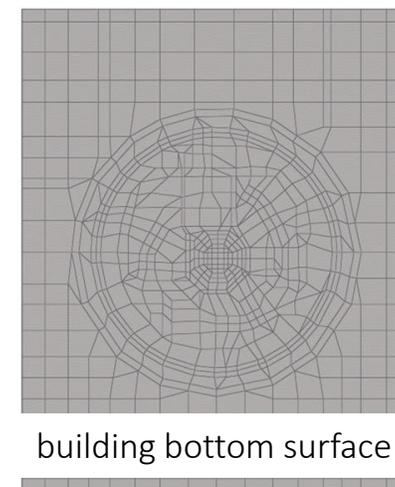
reactor building



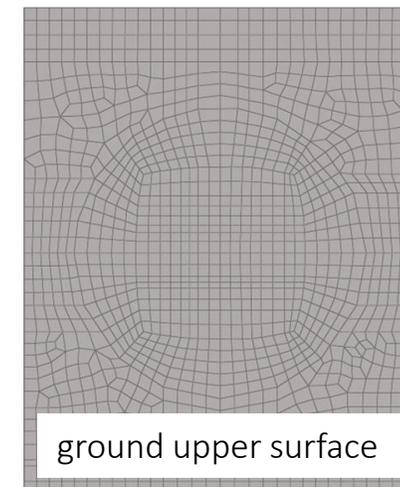
浮上りのためのジョイント要素

解析モデルの諸元

| | | |
|------------------|---------|--------|
| reactor building | node | 22,077 |
| | element | 39,513 |
| ground | node | 41,115 |
| | element | 42,498 |



building bottom surface



ground upper surface

MPC (Multiple-Point Constraint)

基礎と地盤での要素の粗密を解消

数値解析の安定性の検証

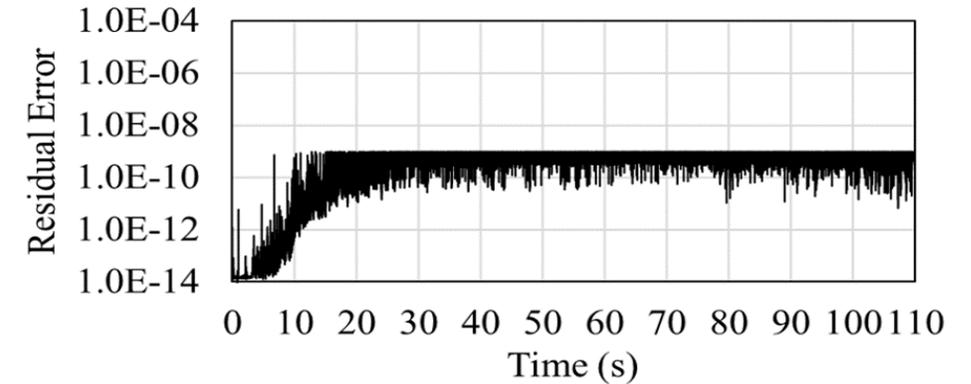
数値解析の基本性能

| case | amplification | CPU time (s) | iteration number |
|------|---------------|--------------|------------------|
| 1 | 1.5 | 126.0 | 472,626 |
| 2 | 2.0 | 142.1 | 503,271 |
| 3 | 4.0 | 234.0 | 633,570 |

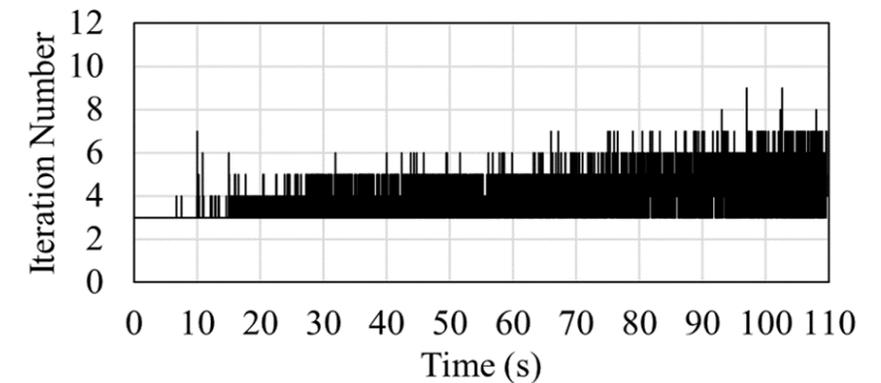
プログラムの改良による数値解析の改善

| case | algorithm | amplification | CPU time (s) | CPU time ratio |
|------|-----------|---------------|--------------|----------------|
| 1 | Original | 1.5 | 247.3 | 2.05 |
| 2 | Improved | 1.5 | 126.0 | |
| 3 | Original | 2.0 | 319.3 | 2.25 |
| 4 | Improved | 2.0 | 142.1 | |

誤差は許容値 (10^{-10}) 以下



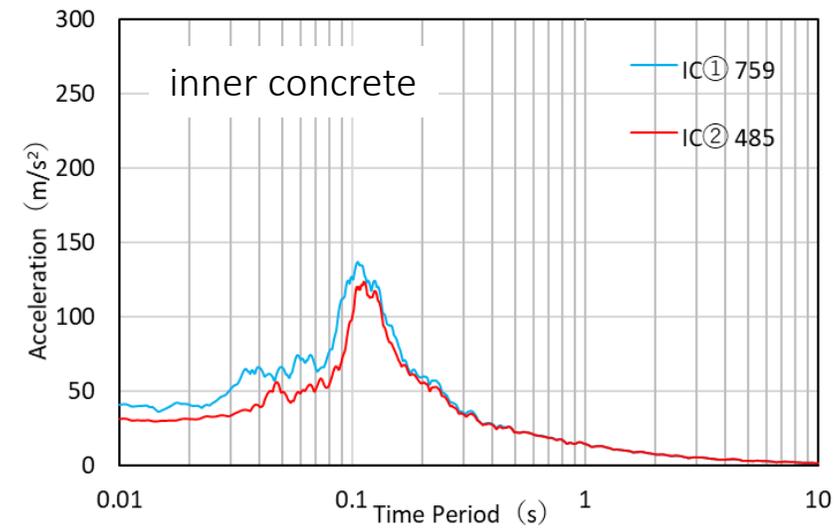
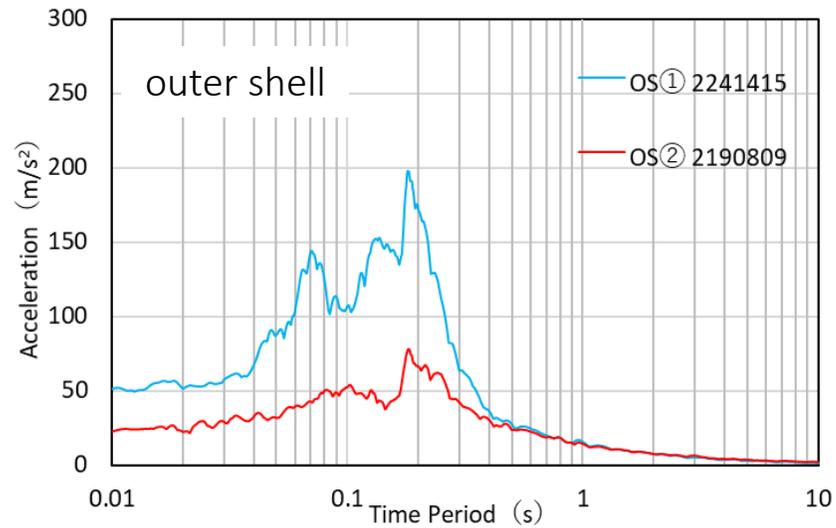
繰返し回数は許容値 (12) 以下



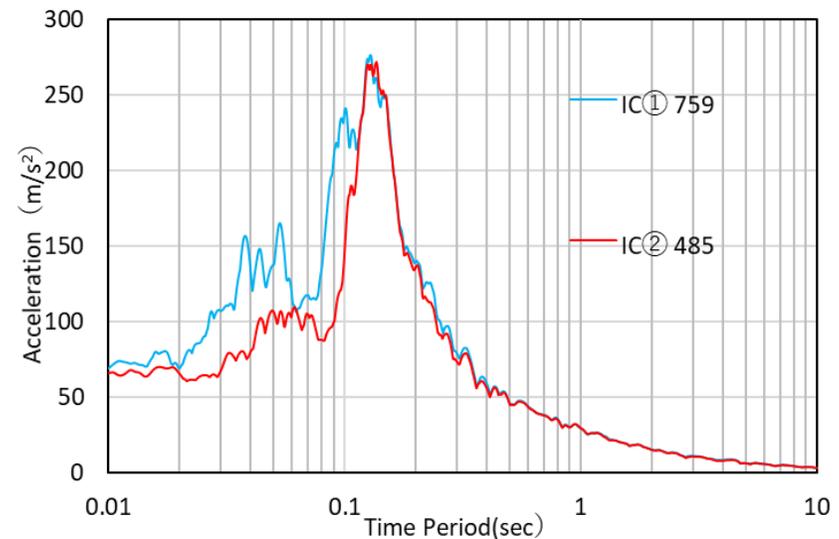
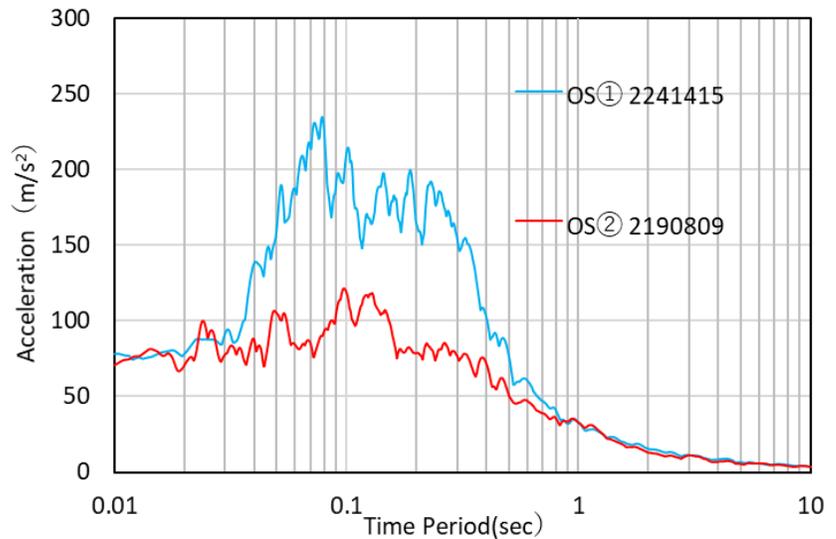
誤差と繰返し回数：case 3

評価地点での地震応答スペクトル

amplified by 2.0



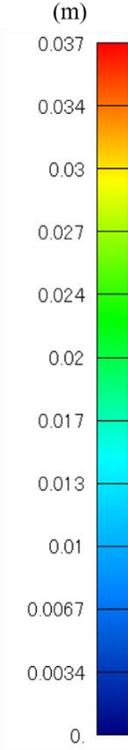
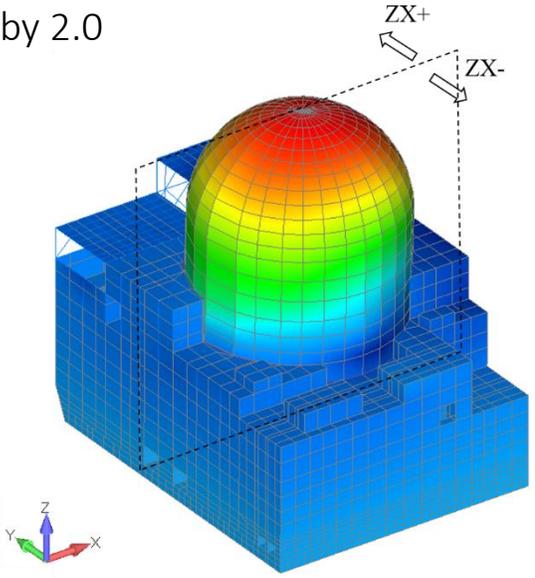
amplified by 4.0



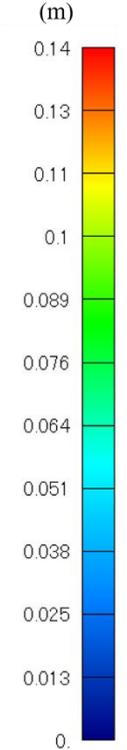
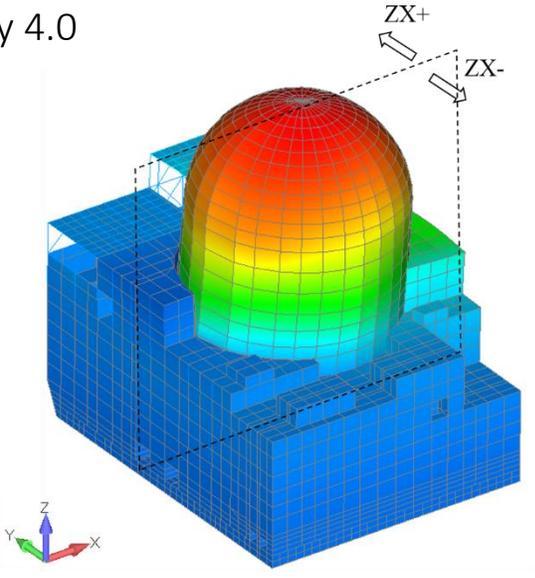
acceleration response spectra

最大変位分布

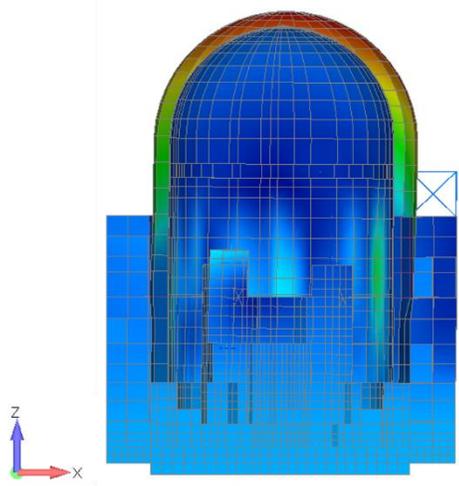
amplified by 2.0



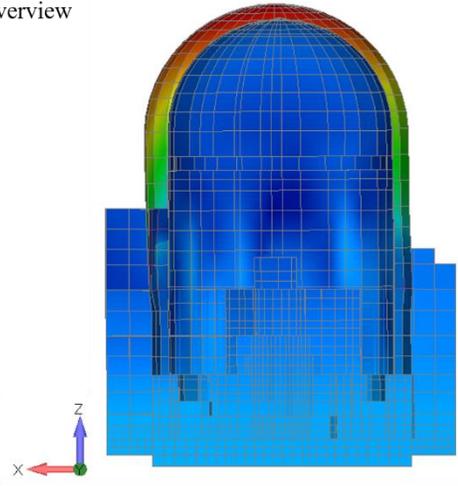
amplified by 4.0



Overview

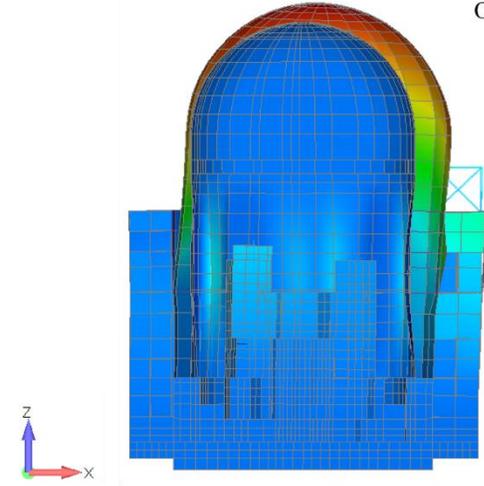


ZX+

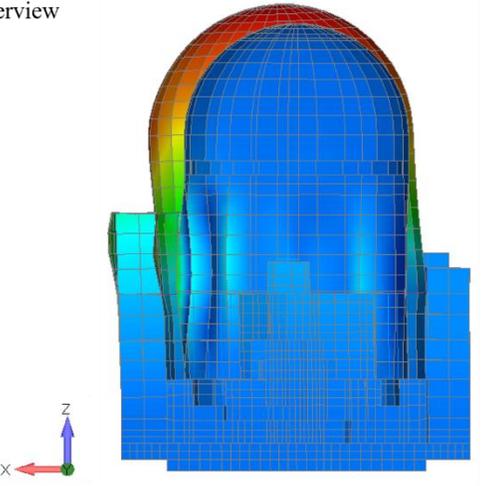


ZX-

Overview



ZX+

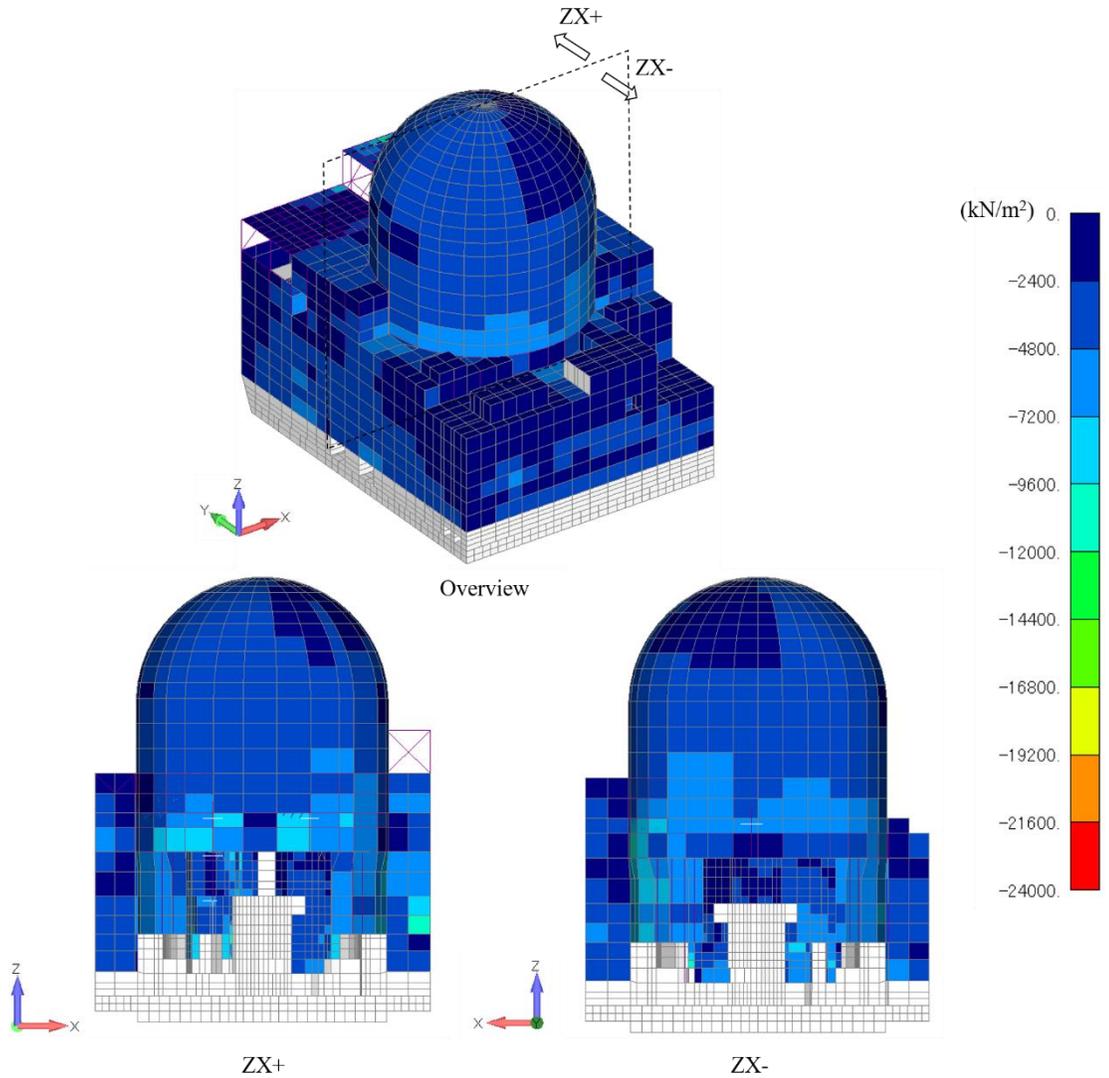


ZX-

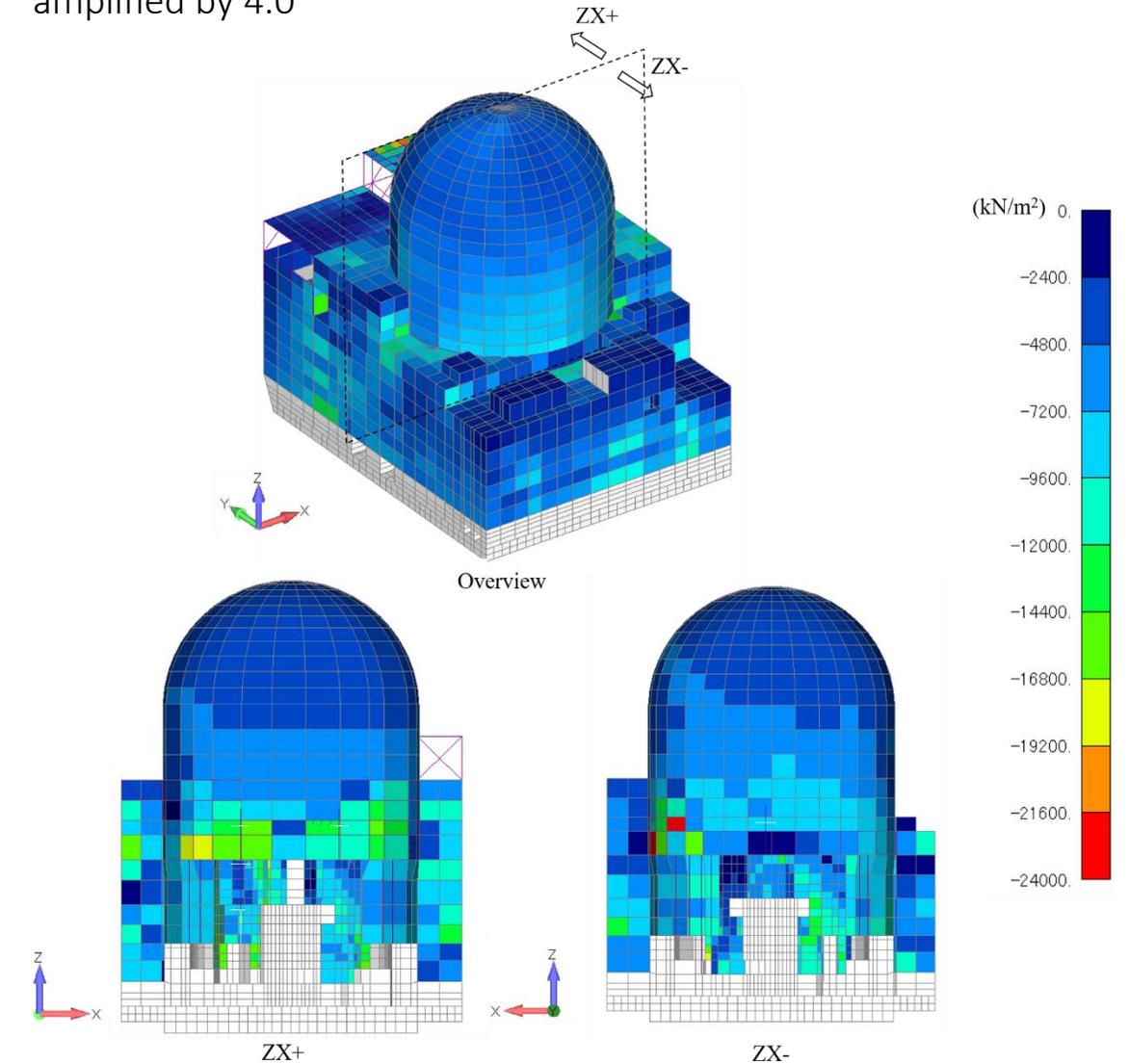
distribution of maximum displacement

コンクリートの最大圧縮応力分布

amplified by 2.0



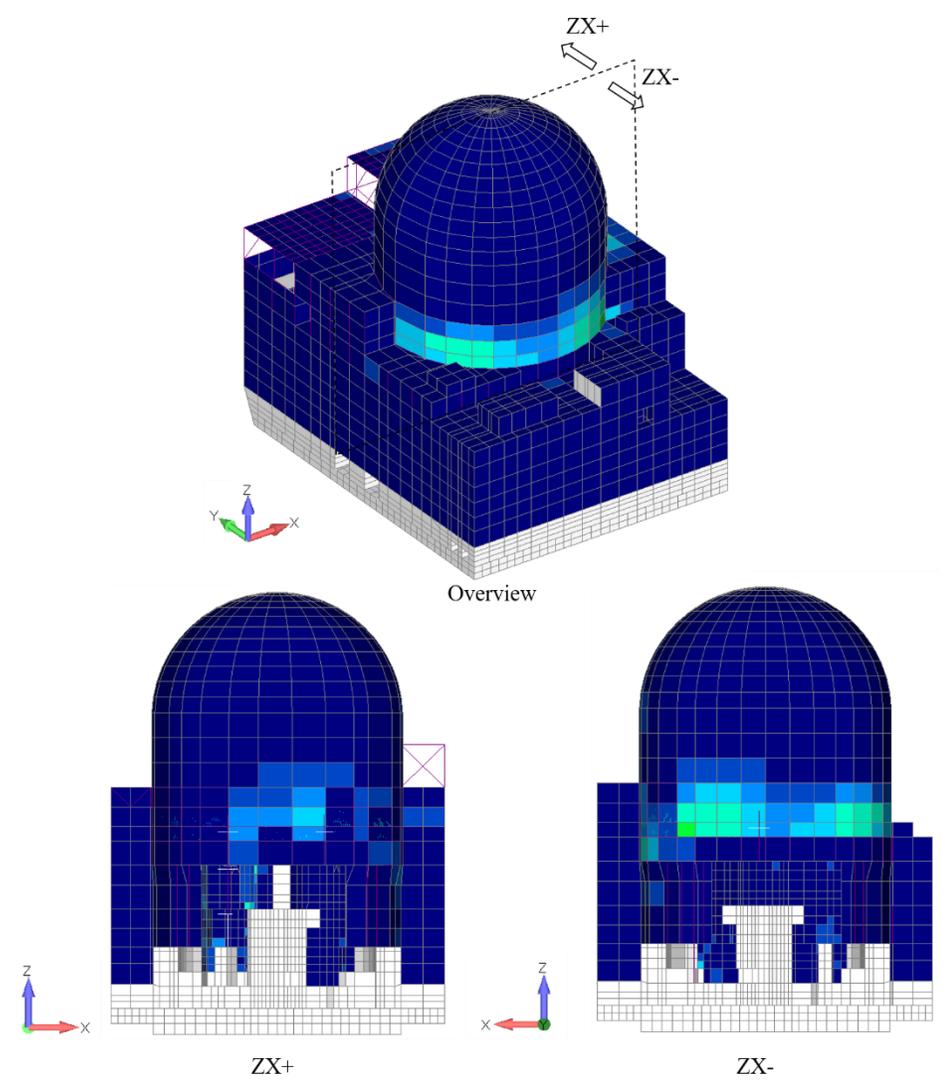
amplified by 4.0



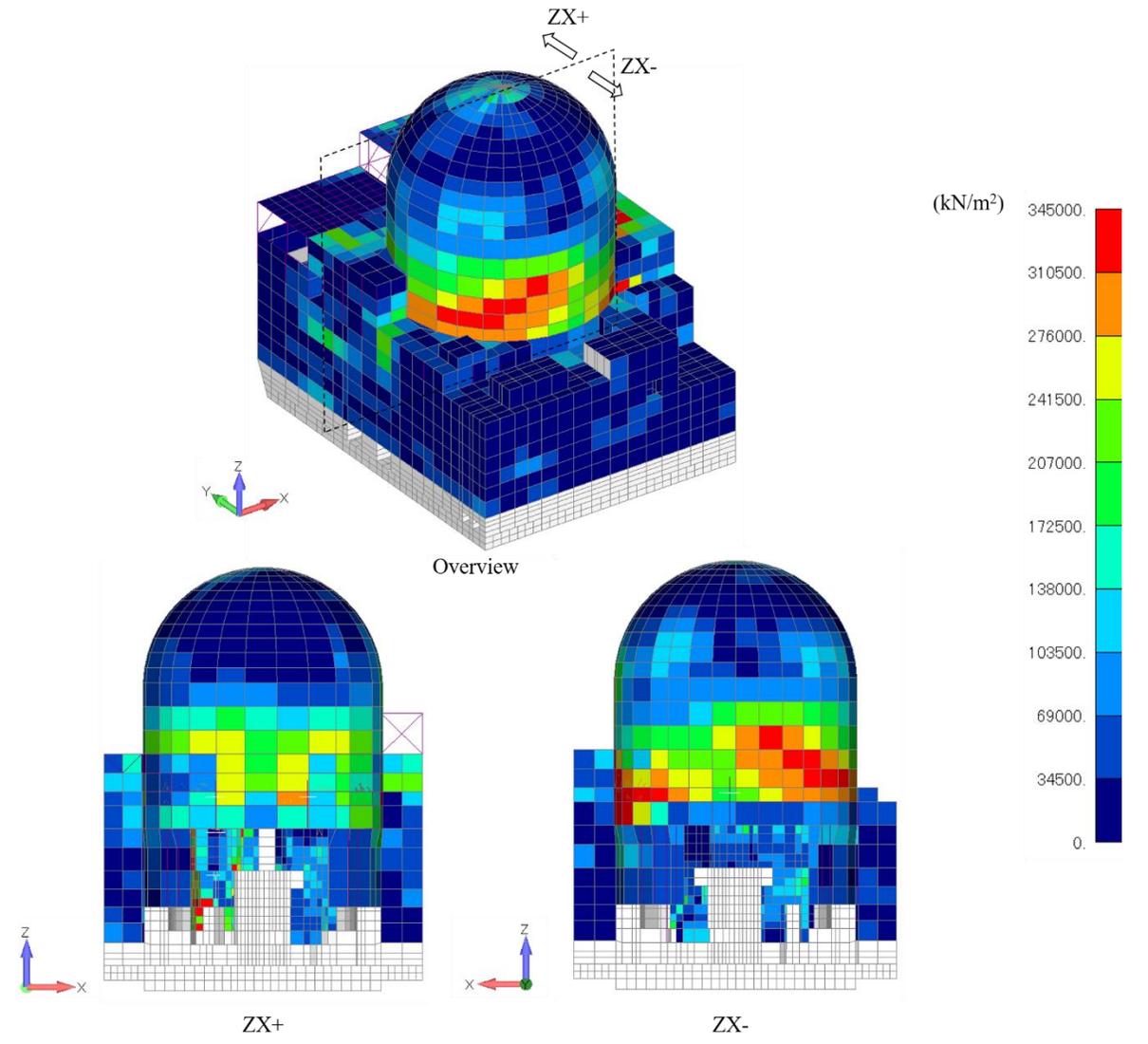
distribution of maximum compressive stress in concrete

鉄筋の最大引張歪分布

amplified by 2.0



amplified by 4.0



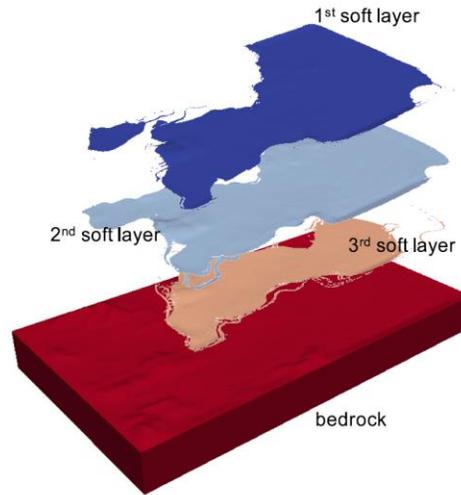
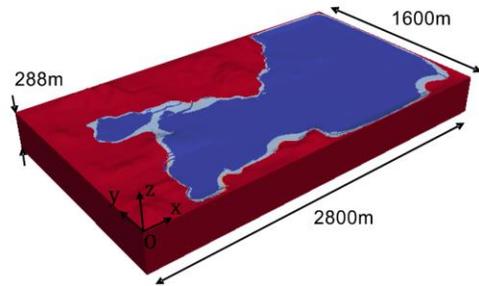
distribution of maximum tensile stress in steel

実務利用：埋設管ネットワークの耐震性評価

解析モデル

| | |
|---------|------------|
| DOF | 36,804,567 |
| Node | 12,268,289 |
| Element | 8,716,033 |

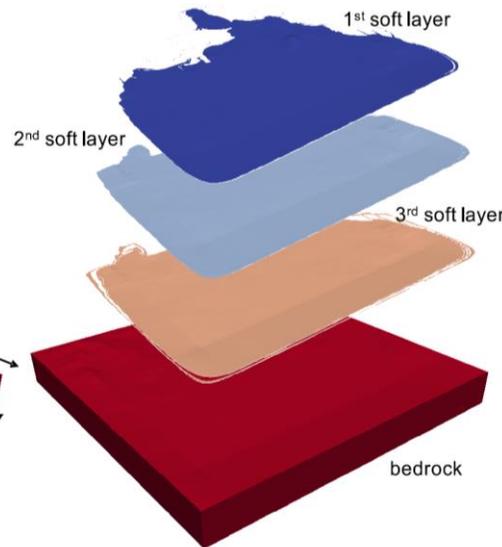
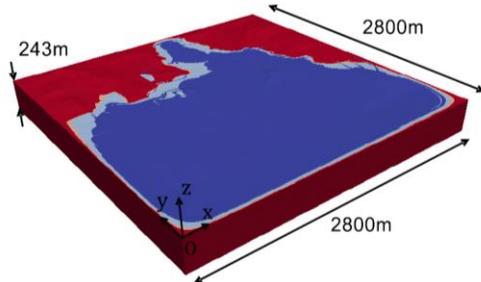
地区 1



解析モデル

| | |
|---------|------------|
| DOF | 71,641,293 |
| Node | 23,880,431 |
| Element | 17,065,263 |

地区 2



埋設管ネットワークを網羅する実務利用の地盤デジタルツイン (10 km x 10 km x 100 m)

地盤条件

| Model | Layer | V_p [m/s] | V_s [m/s] | ρ [kg/m ³] | h_{max} | γ_r |
|-------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------------|-----------|------------|
| M | 1 st layer | 1400 | 100 | 1600 | 0.23 | 0.007 |
| | 2 nd layer | 1600 | 200 | 1800 | 0.23 | 0.001 |
| | 3 rd layer | 1600 | 160 | 1700 | 0.23 | 0.007 |
| | bedrock | 2000 | 500 | 2000 | 0.01 | — |
| I | 1 st layer | 1400 | 120 | 1600 | 0.23 | 0.007 |
| | 2 nd layer | 1600 | 220 | 1800 | 0.23 | 0.001 |
| | 3 rd layer | 1600 | 160 | 1700 | 0.23 | 0.007 |
| | bedrock | 2000 | 500 | 2000 | 0.01 | — |

解析条件

| | |
|---------------|--------|
| increment (s) | 0.005 |
| step | 65,536 |

OpenMP/MPIのハイブリッド並列解析により、地区 1 と地区 2 の計算時間は3.5 h and 8.0 h (Oakleaf-FX: 240 compute nodes利用)

埋設管ネットワークの入力となる地盤変位・歪分布



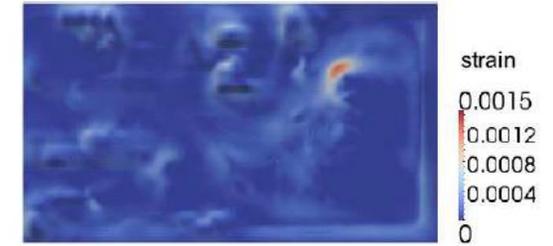
33.4 sec



33.6 sec



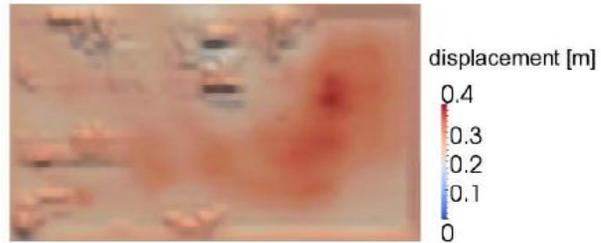
33.4 sec



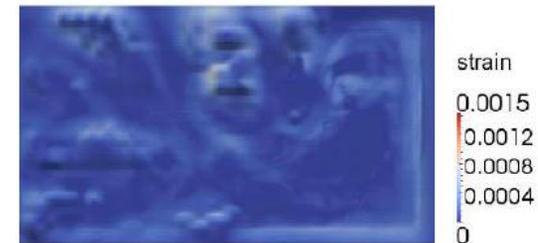
33.6 sec



33.8 sec



34.0 sec



33.8 sec



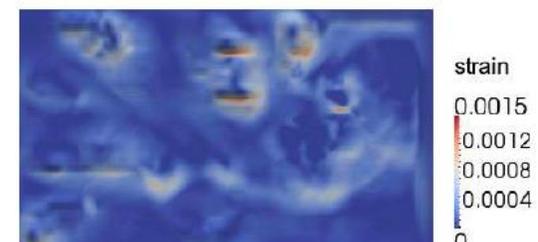
34.0 sec



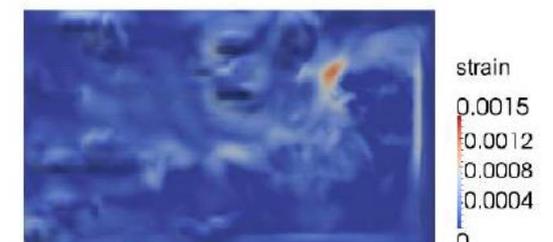
34.2 sec



34.4 sec

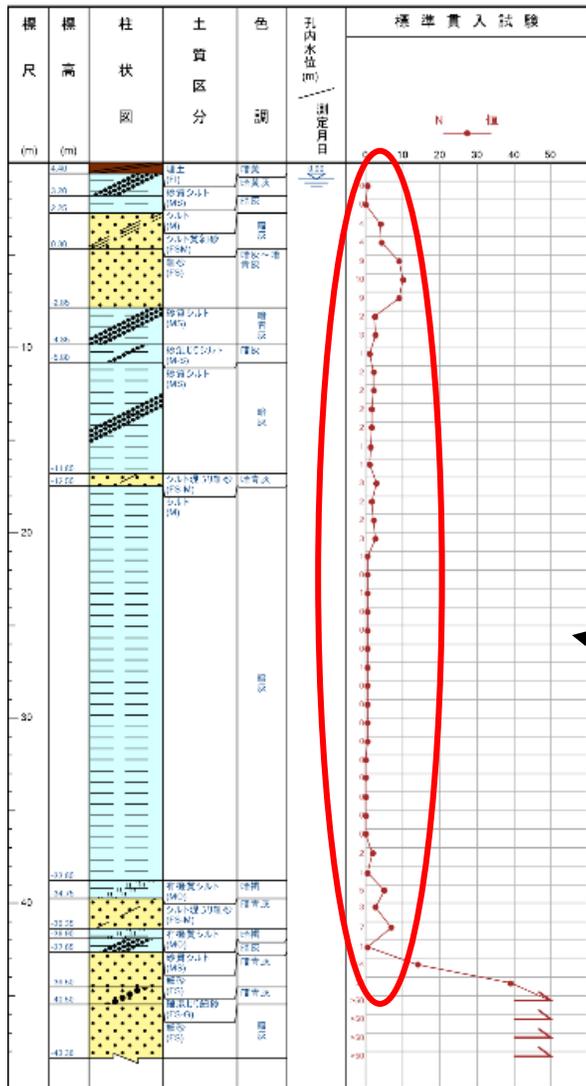


34.2 sec

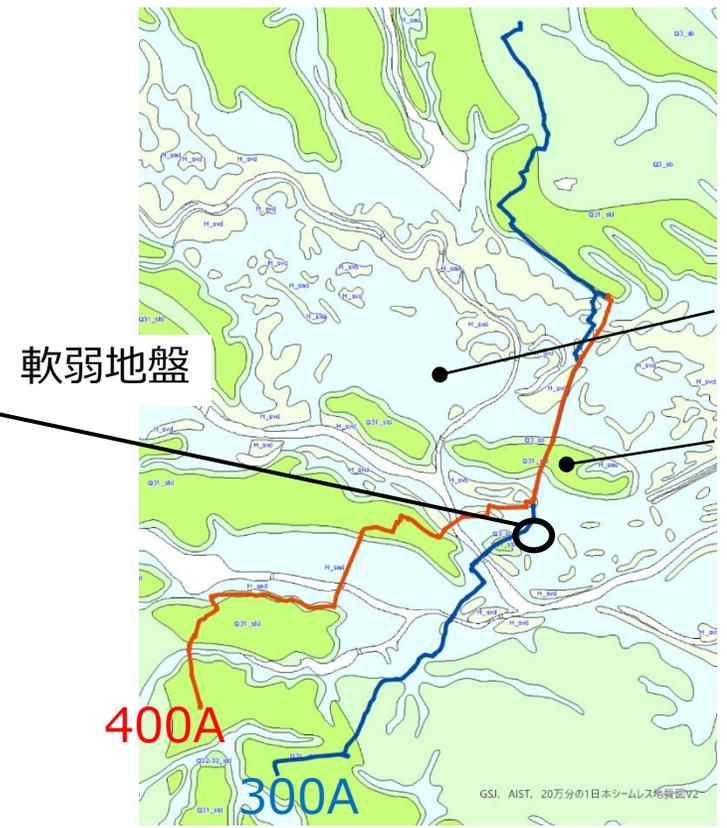


34.4 sec

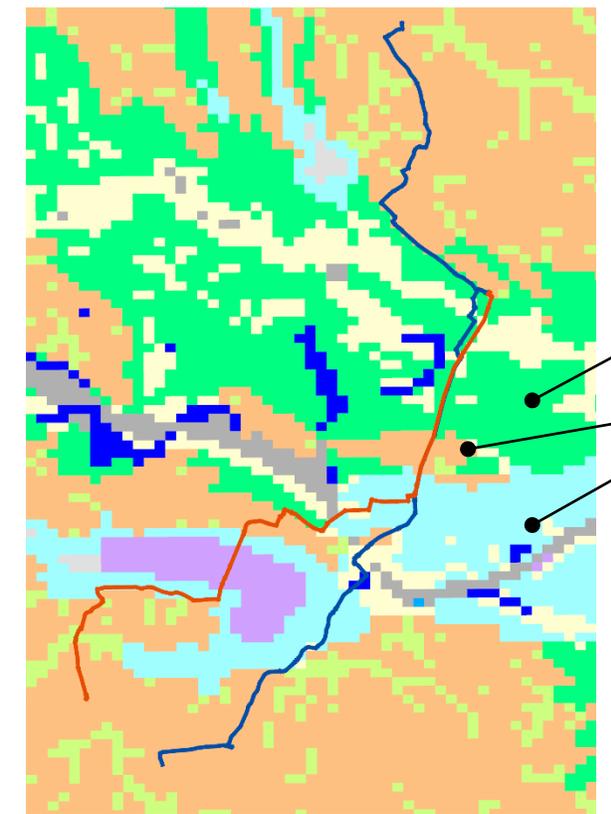
地盤データ



ボーリングデータ

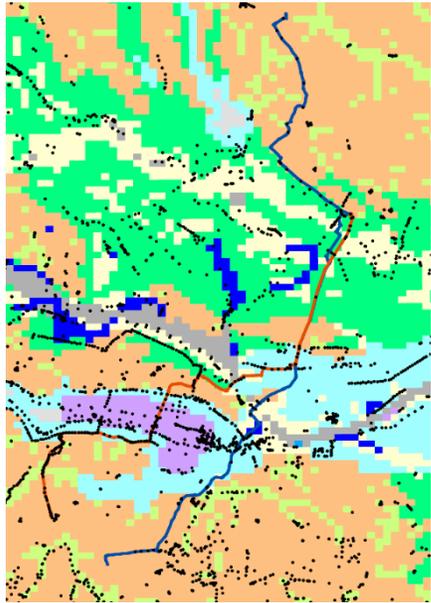


地質図



J-SHIS 詳細地質図

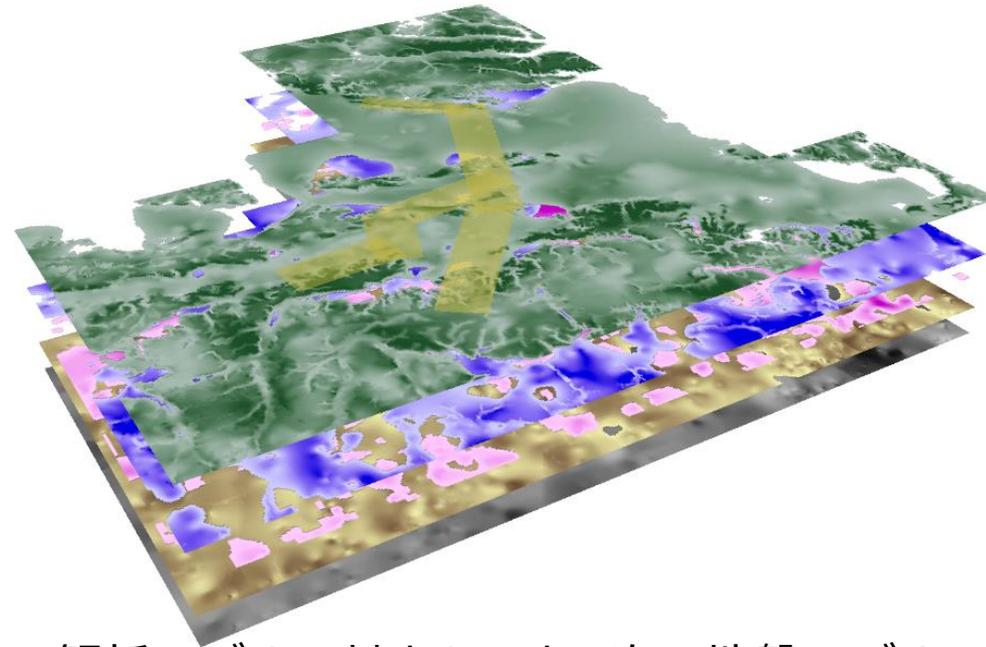
地盤モデル



ボーリングデータ



評価箇所

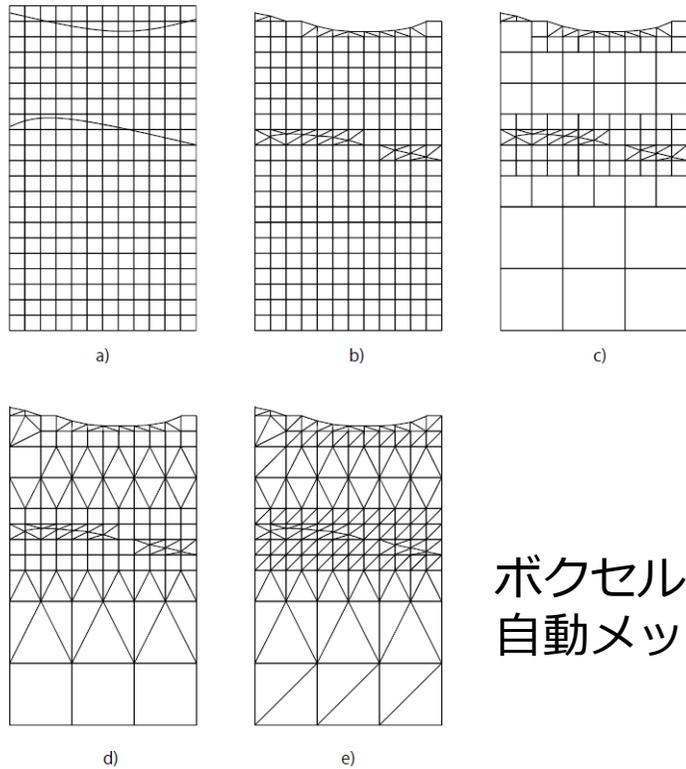


解析モデルの基となった3次元地盤モデル

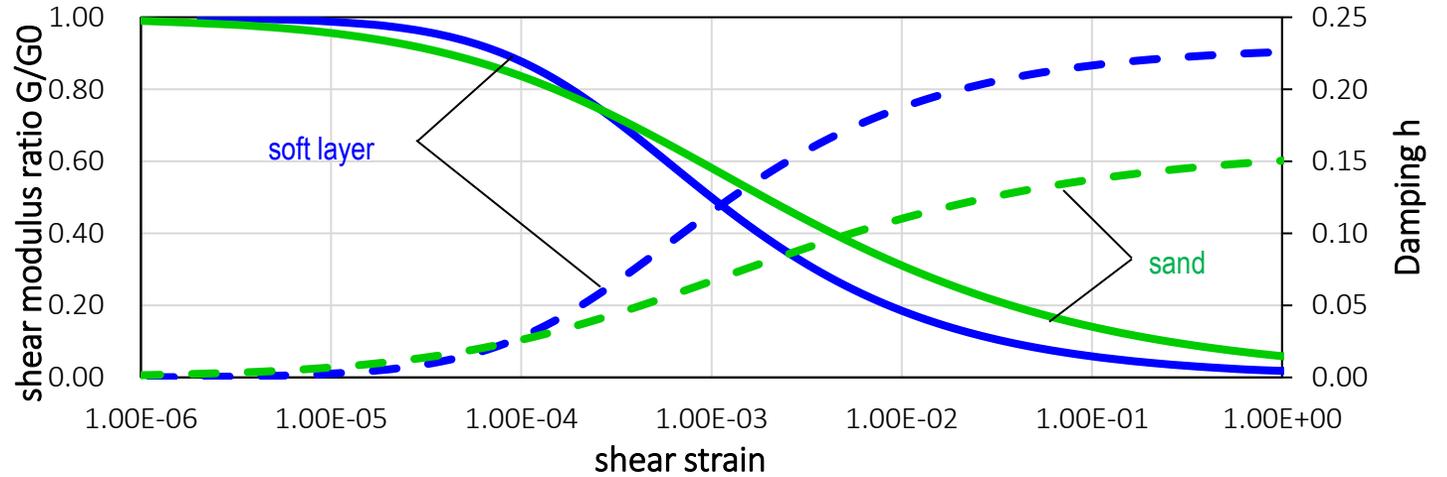
地盤モデルの諸元

| layer | type | Vs (m/s) | Vp (m/s) | density (t/m ³) | ref. strain | max. damping |
|---------|---------|----------|----------|-----------------------------|-------------|--------------|
| 1 | surface | 100 | 1,500 | 1.7 | 0.001 | 0.23 |
| 2 | sand 1 | 160 | 1,500 | 1.8 | 0.001 | 0.23 |
| 3 | soft | 120 | 1,500 | 1.7 | 0.0019 | 0.16 |
| 4 | sand 2 | 210 | 1,500 | 1.8 | 0.001 | 0.23 |
| bedrock | N ≥ 50 | 350 | 2,000 | 2.0 | — | — |

地盤の高詳細解析モデル



ボクセルを使う
自動メッシュ

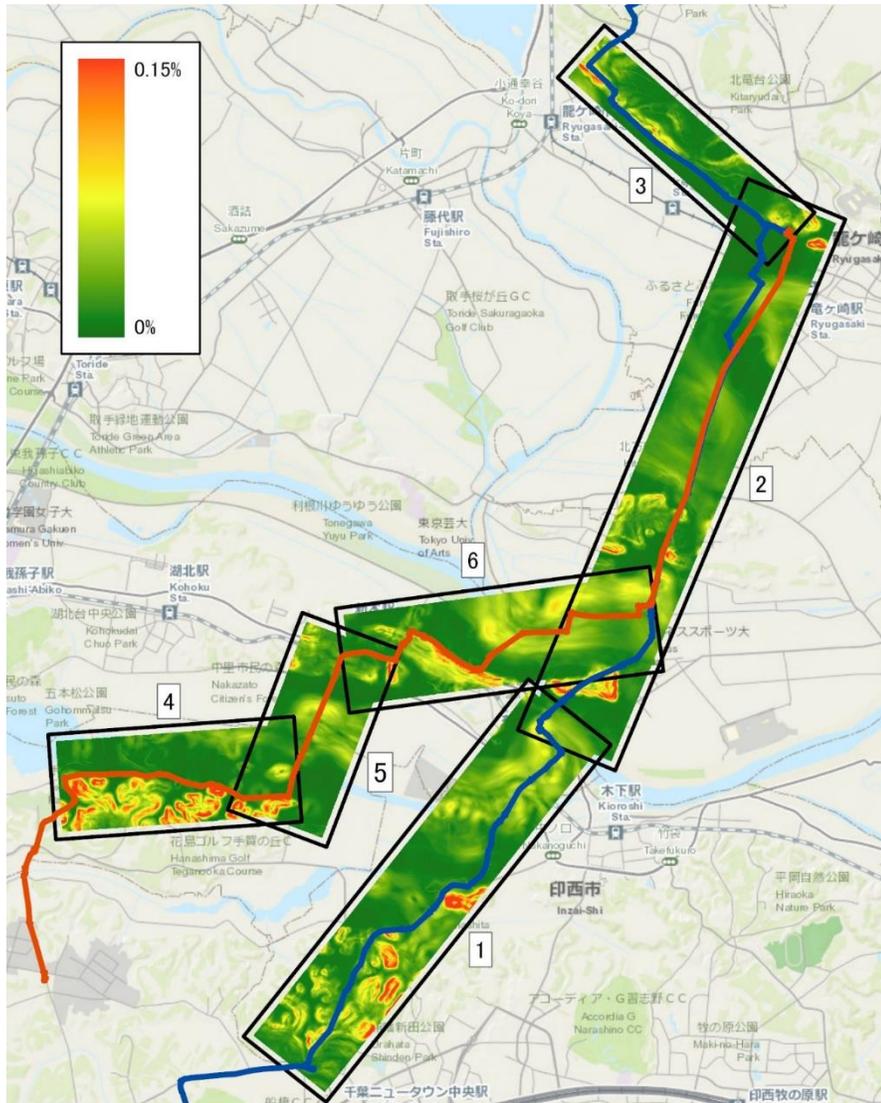


地盤の非線形構成則

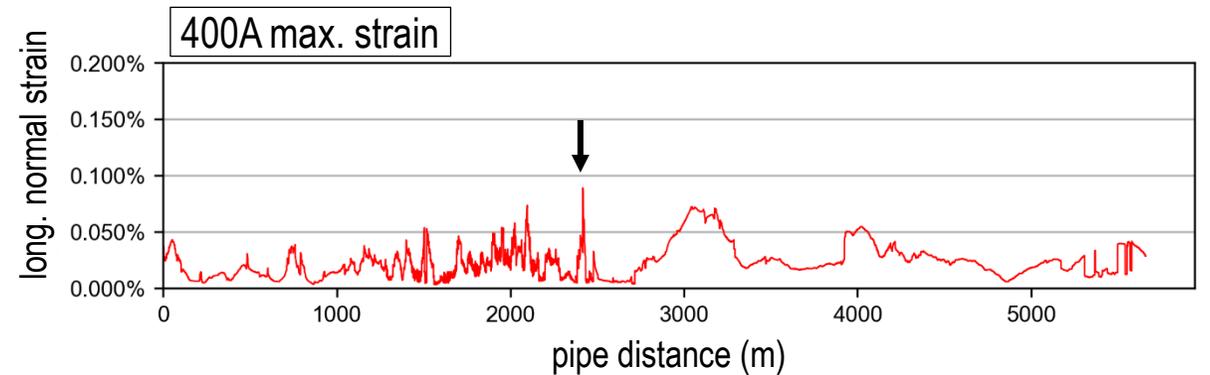
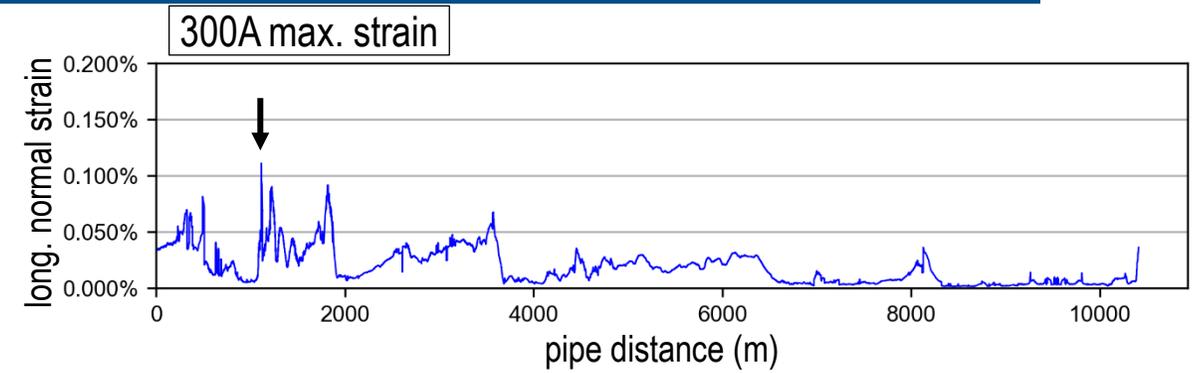
解析モデルの諸元

| domain | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| node | 89,475,954 | 121,610,771 | 37,961,490 | 42,376,407 | 38,503,369 | 65,839,567 |
| element | 65,473,166 | 89,113,852 | 27,628,583 | 30,863,663 | 28,045,101 | 48,195,284 |
| size (m) | 2,048 x 7,048 | 2,048 x 9,048 | 1,548 x 4,548 | 2,048 x 4,048 | 2,048 x 2,548 | 2,048 x 5,048 |

サイト地盤歪



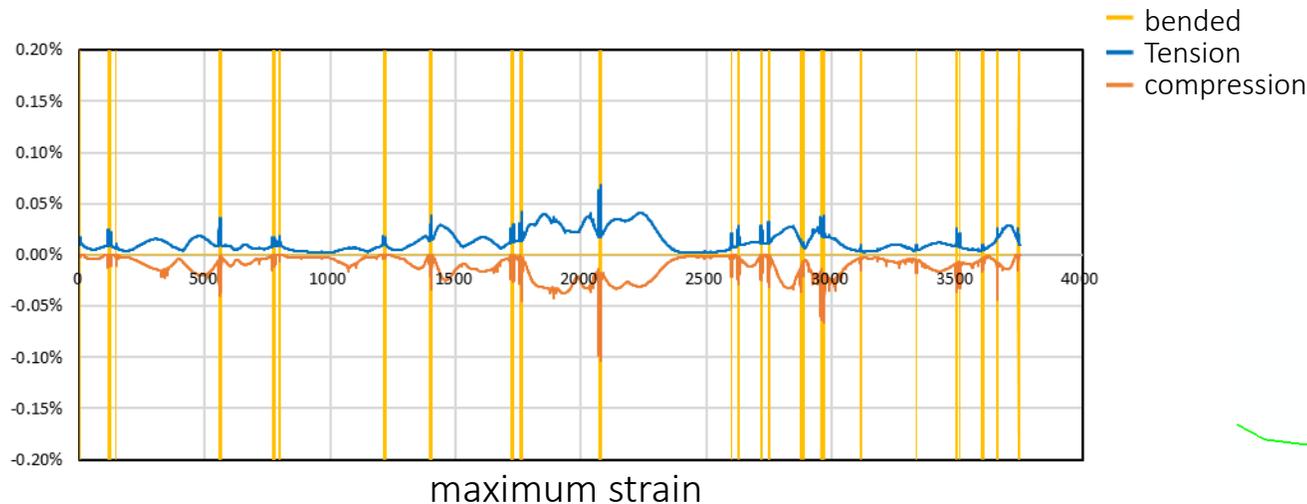
内閣府地震シナリオに基づくサイト地盤歪



埋設管ネットワークに沿った最大軸方向サイト地盤直歪

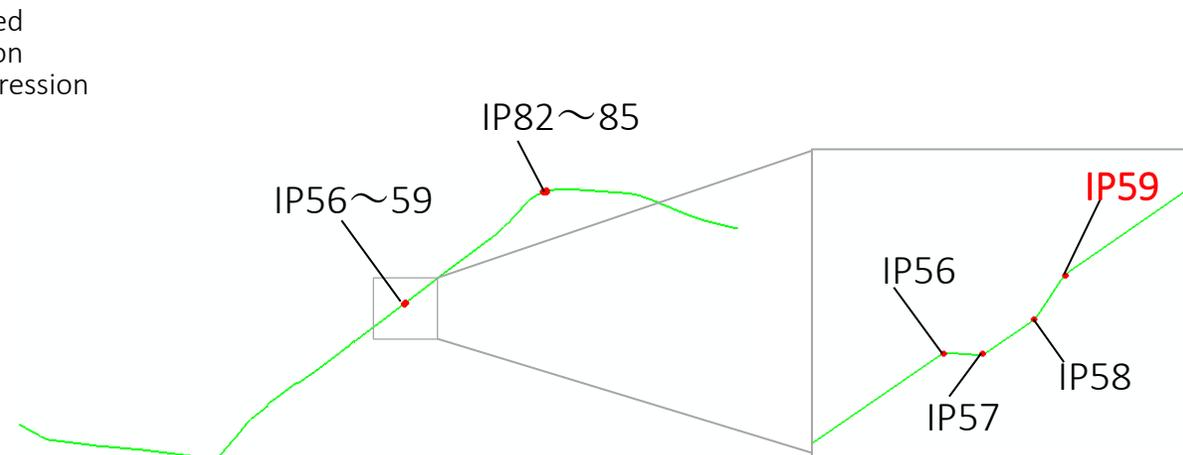
- ◆ 従来法によって評価された地盤歪よりも，サイト地盤歪は有意に小さい
- ◆ 埋設管ネットワークには，サイト地盤歪が集中する箇所があり，この箇所での埋設管の耐震性には慎重な評価が必要

埋設管歪

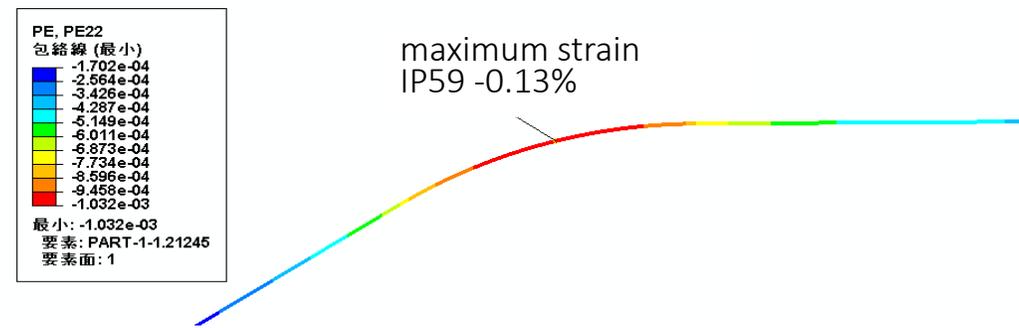


内閣府地震シナリオに基づく埋設管歪

- ◆ 地盤の高詳細解析モデルを使って，地震シナリオを入力し，地点毎のサイト地盤歪を評価
- ◆ 埋設管ネットワークの解析モデルを使って，サイト地盤歪を入力し，地点毎の埋設管歪を評価
- ◆ 埋設管ネットワークの歪は，座屈を引き起こすような限界歪には達しないことが確認



埋設管ネットワークの形状



埋設管歪（軸歪成分）の分布の詳細歪

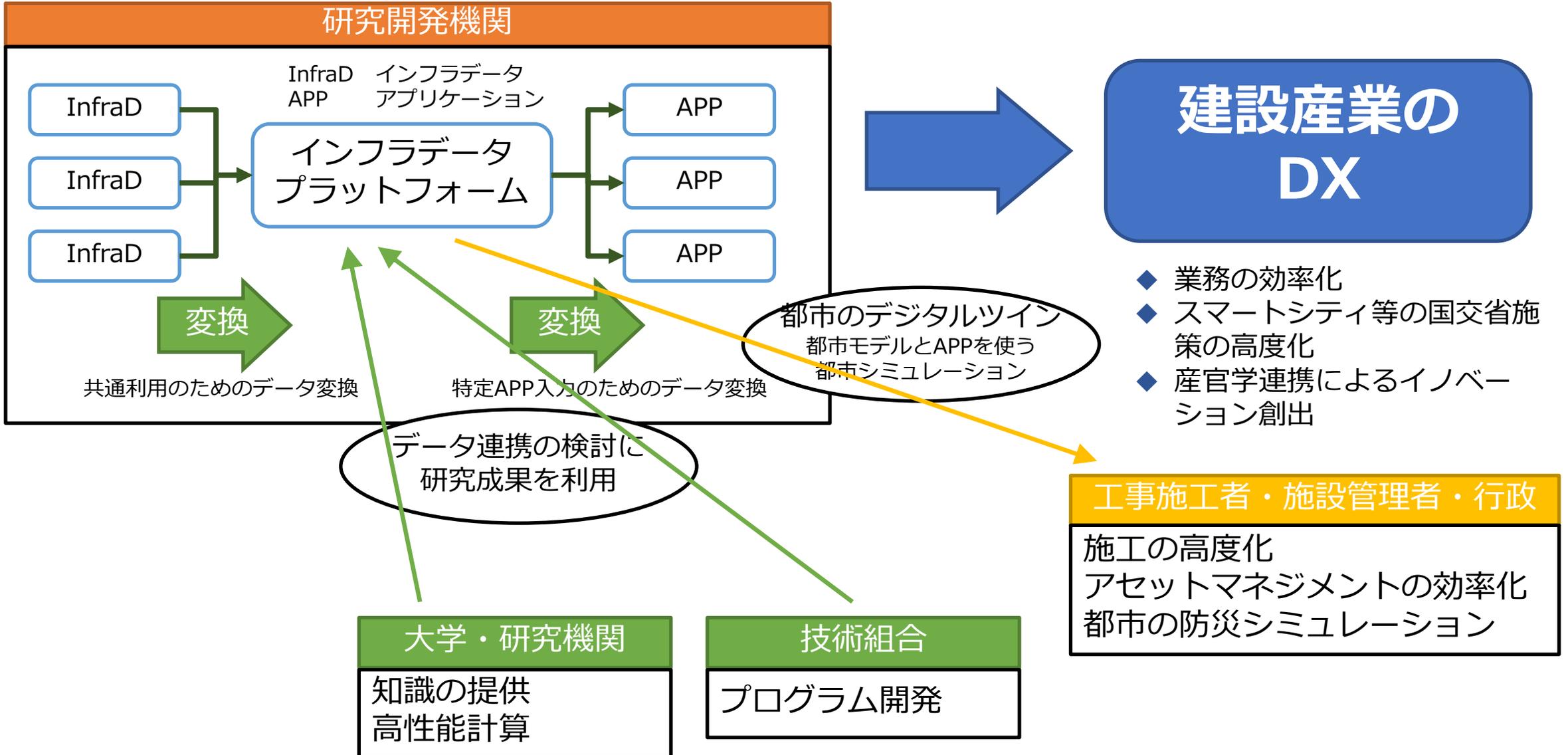
内容

- ◆ 防災用都市のデジタルツインを利用した統合地震シミュレーション
 - 防災用都市のデジタルツイン
 - 首都直下地震と南海トラフ地震の例
- ◆ デジタルツインの中核となる並列有限要素法
 - 特徴：高性能計算を利用するソルバ, コンクリートと地盤の3次元構成則
 - 重要構造物へのデジタルツインの適用例
- ◆ デジタルツインの自動構築
 - 基盤技術としてのDPP (Data Processing Platform)
 - 実データを利用した自動構築の適用例：RC橋梁, NATMトンネル, 地盤, 河川・港湾
- ◆ 国交DPFへの貢献というデジタルツインの挑戦
 - デジタルツインによる予測というサービスを提供する機能を国交DPFに
 - 第3期SIPのスマートインフラとスマート防災で研究開発されるデジタルツインの例

背景

国交省

研究開発機関

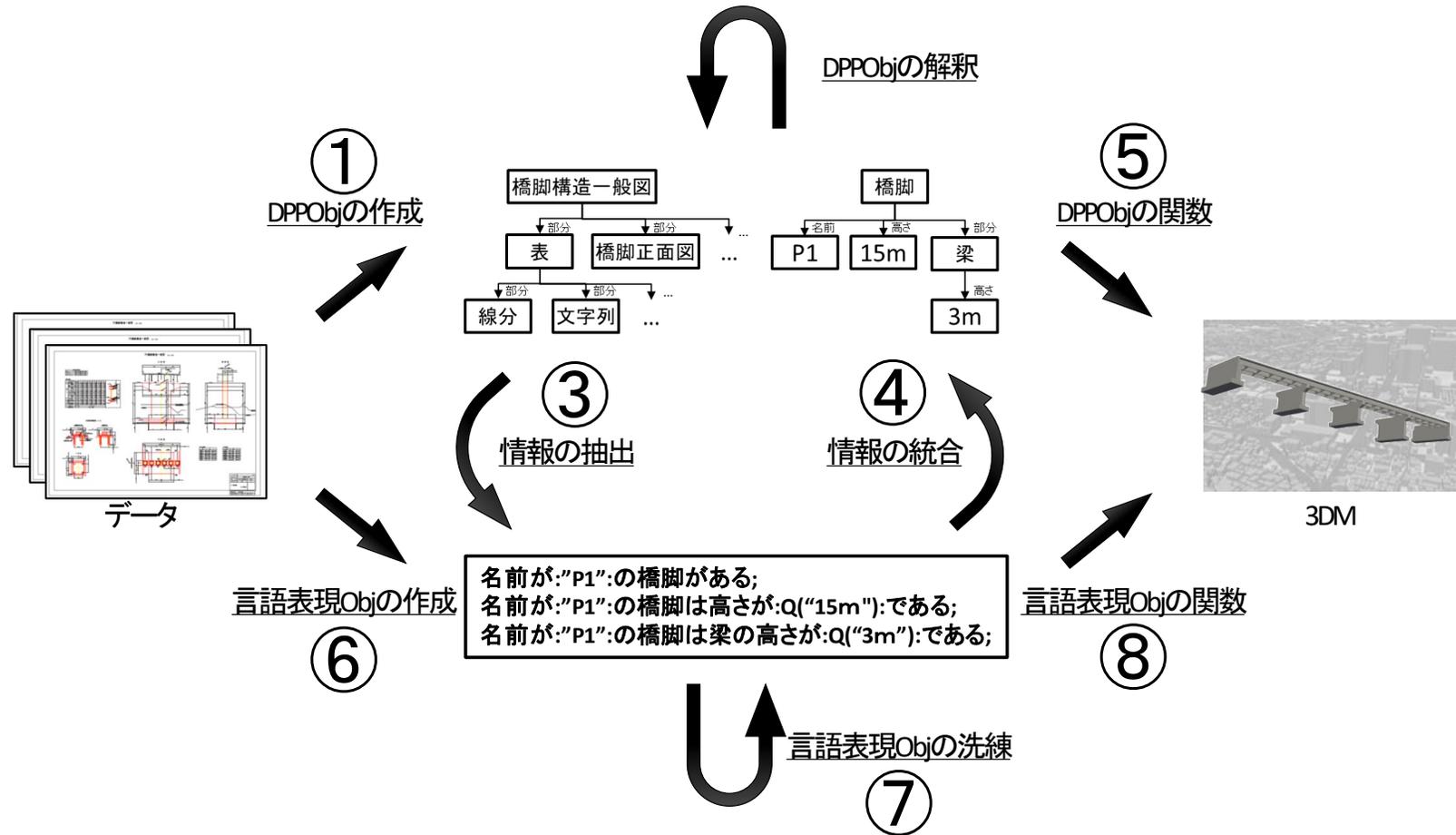


防災・インフラ用の都市のデジタルツインの自動構築

- ◆ 先端解析プログラムを適用する高詳細解析モデル
 - BIM (Building Information Modeling) を使う建設産業用統合システムの開発
 - GISを使う都市の3次元可視化の「次」
- ◆ 蓄積が進む都市のデジタル情報を利用した、都市のデジタルツインの自動構築
 - 理化学研究所計算科学研究センター総合防災・減災研究チーム
 - 都市丸ごとのシミュレーション技術研究組合（国交省認可）
 - 東京大学工学系研究科i-Constructionシステム学寄付講座
- ◆ DPP (Data Processing Platform) の開発
 - 各種データを読み込・加工・集約統合し、3次元モデル等に変換する統合プログラム
 - NATMトンネル, RC橋梁, 地盤, 河川, 港湾, 埋設管

DPP (Data Processing Platform)

- ◆ 互換性が完全ではないインフラデータ
- ◆ 互換性の代替として、インフラデータを多様な形式のデータに自動変換
- ◆ 自動変換の二つのプログラム
 - DPP (Data Processing Platform) 汎用ライブラリ：インフラデータの自動入力・変換・出力のためのツール群
システム研究者がC++を使って研究開発
 - DPPスクリプト
特化プログラム：個々のインフラデータの特定の目的の自動変換を実行
建設技術者がDPPを使って作成



DPPの特徴

- 互換性が完全ではないファイルは、正しく認識できるデータは断片的
- 断片的なデータに対し、情報抽出・洗練・統合・解釈を繰り返す、より網羅的なデータに漸近

RC橋梁：3次元可視化モデル自動構築の適用範囲拡張

- ◆ 高度化：判読が困難な表
 - 「セル配置」に基づく判読法
 - 「文字列の内容と配置」に基づく判読法
 - 二つの表の判読法を併用
- ◆ 橋梁モデル化成功件数
 - 上部構造線系図があることを想定
 - チューンアップをしたスラブ桁橋26橋に対して25橋成功（96%）
 - 全種類の84橋に対して31橋成功（39%）

| 10 | C11 | C12 | C13 | C14 | S4 | GE4 | A2 | CROSS | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|------|
| | | | | | | | | | LINE |
| 25.2767 | 27.3454 | 29.4142 | 31.4829 | 33.5517 | 35.6204 | 35.9704 | 36.1704 | X | L1 |
| 7.3979 | 7.3983 | 7.3988 | 7.3992 | 7.3997 | 7.4001 | 7.4002 | 7.4003 | Y | |
| 6.7947 | 6.7817 | 6.7657 | 6.7465 | 6.7244 | 6.6991 | 6.6945 | 6.6919 | Z | |
| 25.2134 | 27.2822 | 29.3509 | 31.4197 | 33.4884 | 35.5572 | 35.9072 | 36.1072 | X | L2 |
| 6.9979 | 6.9983 | 6.9988 | 6.9992 | 6.9997 | 7.0001 | 7.0002 | 7.0002 | Y | |
| 6.6951 | 6.6822 | 6.6662 | 6.6472 | 6.6251 | 6.5999 | 6.5954 | 6.5927 | Z | |
| 25.2023 | 27.2711 | 29.3398 | 31.4086 | 33.4773 | 35.5461 | 35.8961 | 36.0961 | X | G1 |
| 6.9279 | 6.9283 | 6.9288 | 6.9292 | 6.9297 | 6.9301 | 6.9302 | 6.9302 | Y | |
| 6.6944 | 6.6815 | 6.6656 | 6.6466 | 6.6245 | 6.5994 | 6.5948 | 6.5922 | Z | |
| 24.7389 | 26.8077 | 28.8764 | 30.9452 | 33.0139 | 35.0827 | 35.4327 | 35.6327 | X | L2 |

「セル配置」に基づく判読法が不得手な表（右側に項目欄）

| スラブ桁橋の26橋梁データ | |
|---------------|-----|
| 3次元モデル自動生成 | 橋梁数 |
| 成功 | 25 |
| 失敗 | 1 |

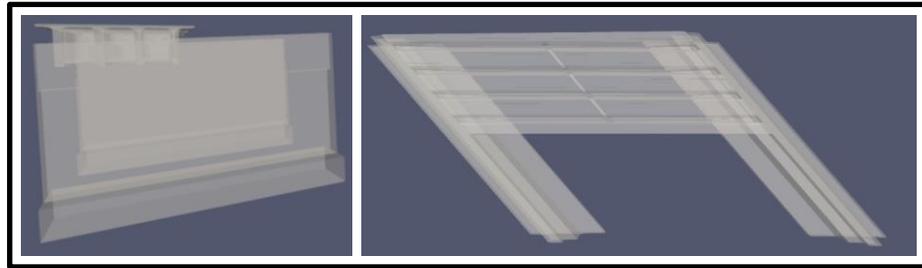
注) 3次元モデルはLOD200相当の詳細度

| 117橋梁データ(スラブ橋含む) | | |
|------------------|------------|-----|
| 上部構造線形図 | 3次元モデル自動生成 | 橋梁数 |
| 有 | 成功 | 51 |
| | 失敗 | 49 |
| 無 | 生成不可能 | 17 |

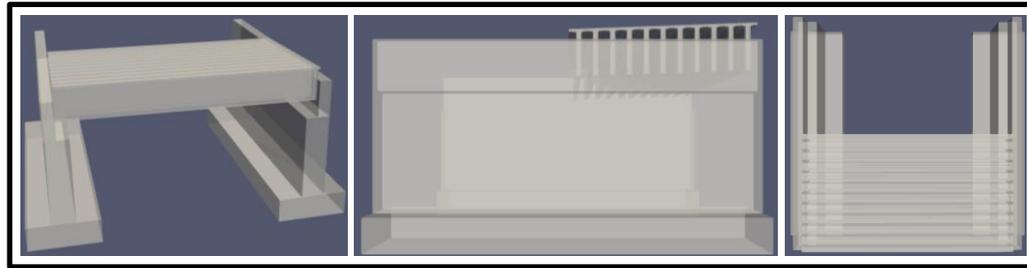
平均処理時間（1工事，数10枚のデータ）

- ◆ 改良前 26分/工事
- ◆ 改良後 2分/工事

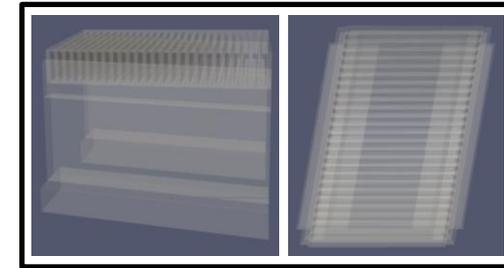
RC橋梁：3次元可視化モデル自動構築



国道6号千代田石岡BP幸町田島下線跨道橋上部工事



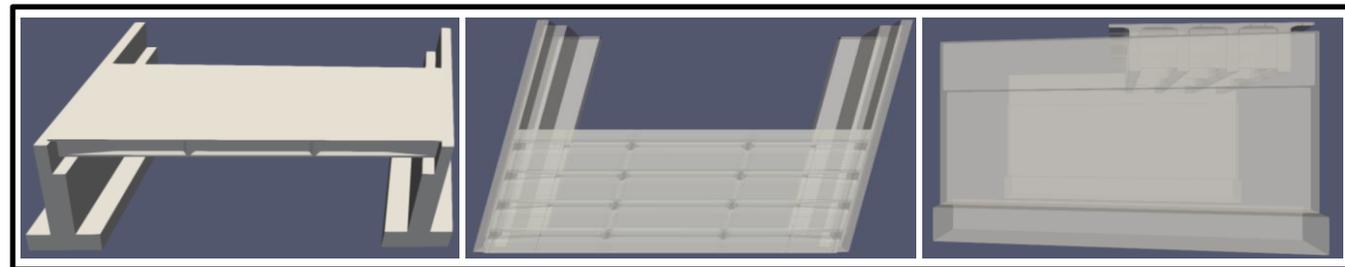
圏央道内野山橋上部工事



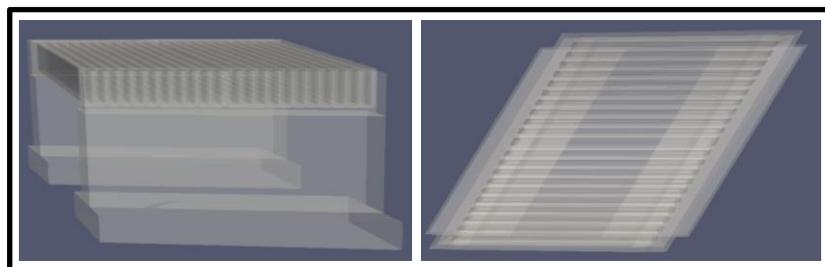
藤沢川橋



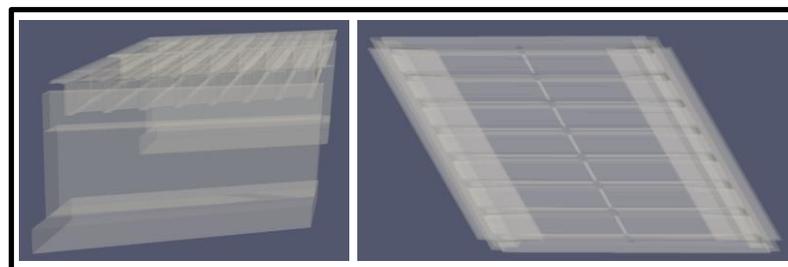
佐久南IC Bランプ橋



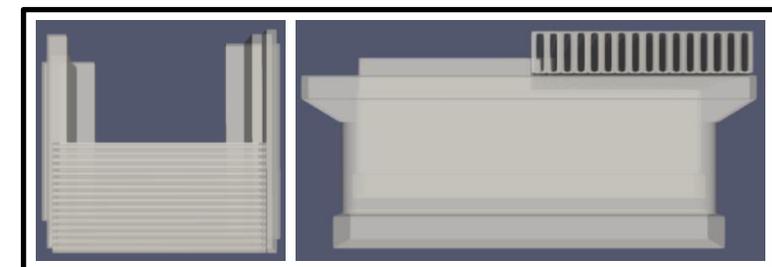
圏央道浄向川第1橋上部工事



沖村橋



荻窪川橋上部工事

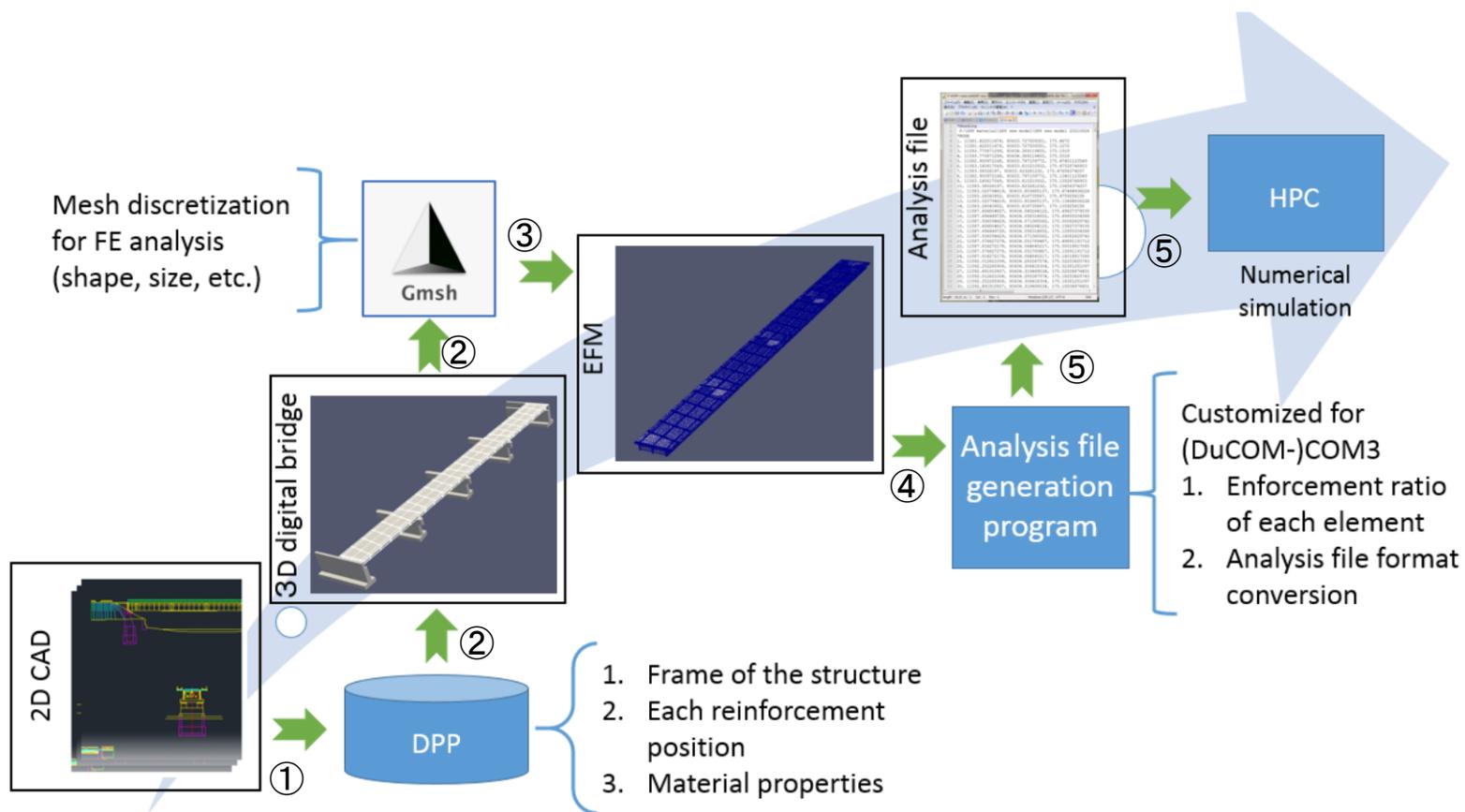


国道6号土浦BP桜川橋上部工事

RC橋梁：3次元可視化モデルからFEMモデルへの展開

- ◆ 目標：3次元モデルからFEM+劣化解析の入力ファイルへの自動変換
 - 材料物性・境界条件の設定等の自動化による作業量の低減（時間短縮）
 - 形状に関する必要情報の明確化による高品位メッシュの自動作成（品質向上）

解析の流れ 2DCAD ⇒ DPP ⇒ Mesh作成 ⇒ 設定ファイル ⇒ シミュレーション
ファイル CAD GEO MSH MSH+材料情報 DAT

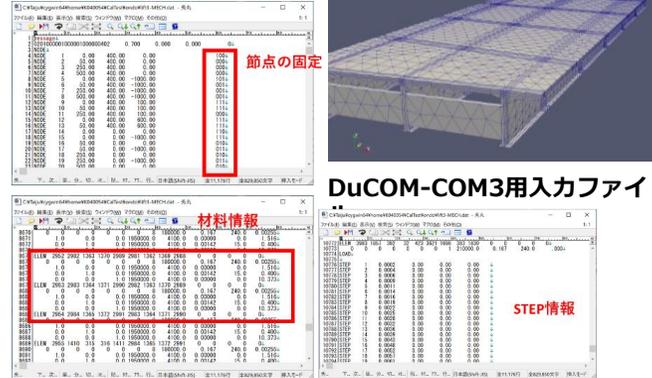
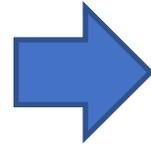


- ① CADファイル
- ② GEOファイル
- ③ MSHファイル
- ④ MSHファイル
- ⑤ + 材料情報
- ⑥ DATファイル

RC橋梁：FEMモデル自動構築

解析ノウハウを持つ専門家が
入力ファイルを**手作業**で作成

従来

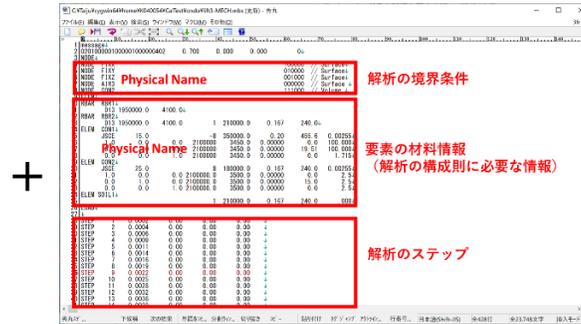
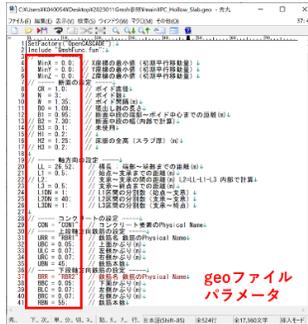


- ① 内部の鉄筋情報も考慮したFEMモデルの生成アルゴリズム
⇒ 変更なし
- ② 複雑な形状を図面からそのまま構築し、4面体でメッシュを生成
- ③ 「**形状ファイル**」と「**材料情報ファイル**」が**密結合**
⇒ **手作業**で入力ファイルを修正
- ④ **境界条件・過重情報**（図面に非存在）を**手作業**で作成

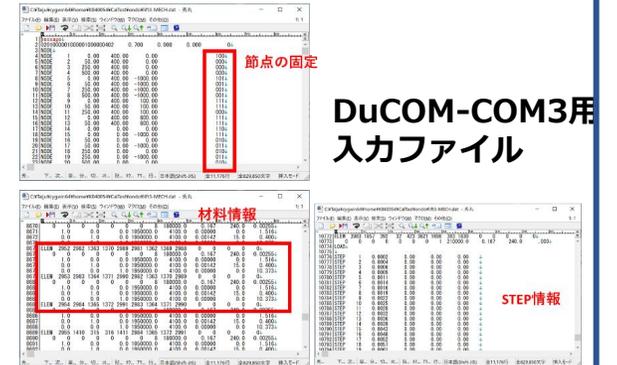
2つのファイル内に解析ノウハウを保持し、条件に合った**入力ファイルを自動生成**

形状ファイル

材料情報ファイル



節点番号・要素番号に代わってPhysical Nameで情報を紐づけ



DuCOM-COM3
入力ファイル

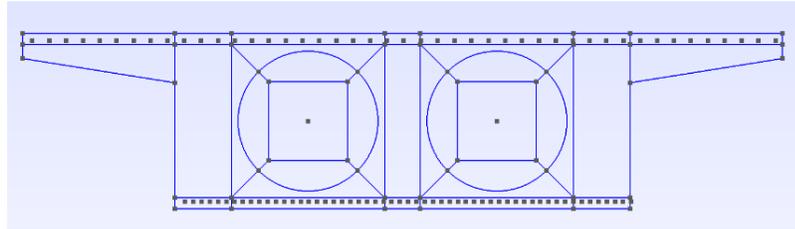
将来
(現在)

専門家の解析ノウハウを取り込んだ自動化

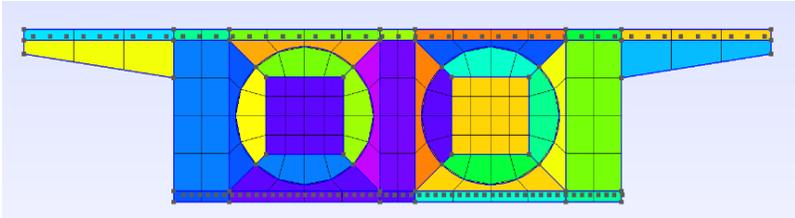
- ① パラメトリックモデルを再検討、境界条件・载荷方法の検討
 - 必要最低限のパラメータに限定したメッシュの簡素化(6面体メッシュの利用)
 - 固定条件(境界条件)や载荷方法(荷重データ)等の専門家の知見の取り込み
- ② 「**形状ファイル**」と「**材料情報ファイル**」を**疎結合化**
- ③ 「**形状ファイル**」と「**材料情報ファイル**」を**自動統合**して、**境界条件・荷重情報**を簡易に設定

RC橋梁：自動構築されたFEMモデルを使った輪荷重解析

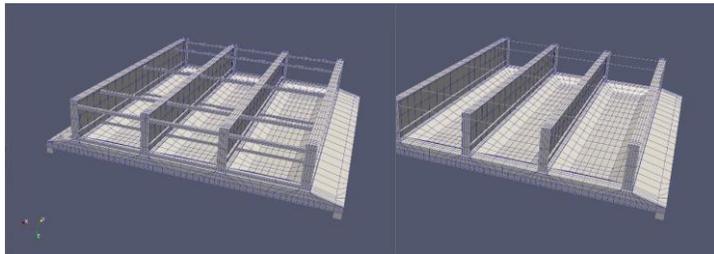
輪荷重による変形図



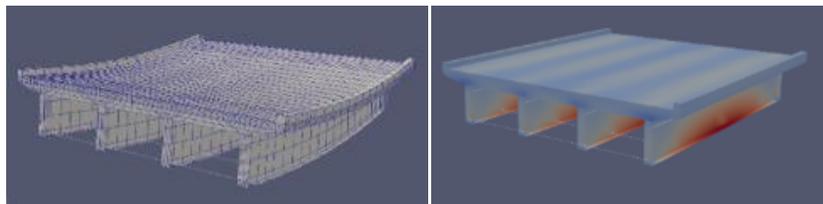
PCホロースラブの場合のメッシュ分割補助線



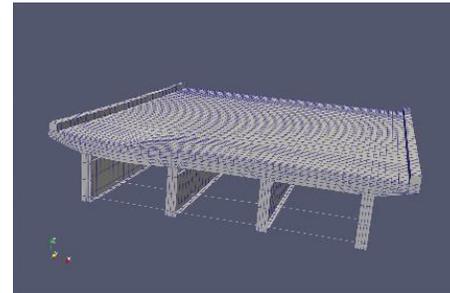
メッシュ補助線で分割された6面体要素での断面



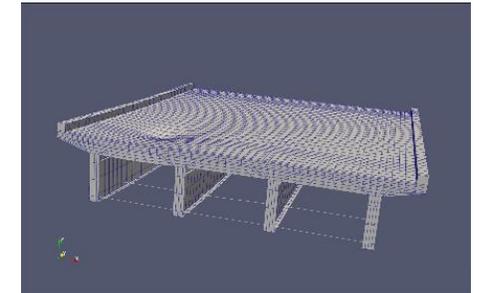
メッシュ補助線で分割された6面体要素での断面



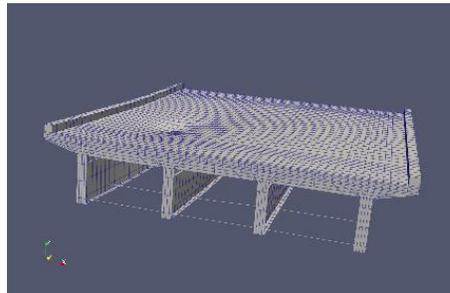
対傾構の解析用モデルの例(左:シェル要素, 右:梁要素)



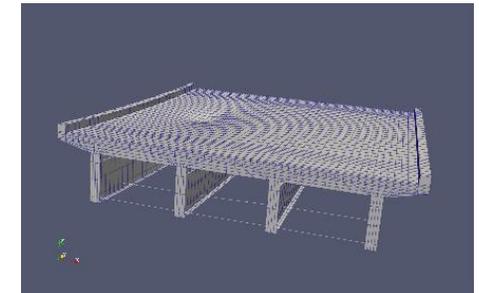
STEP10



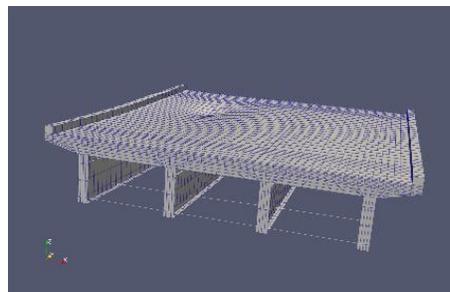
STEP20



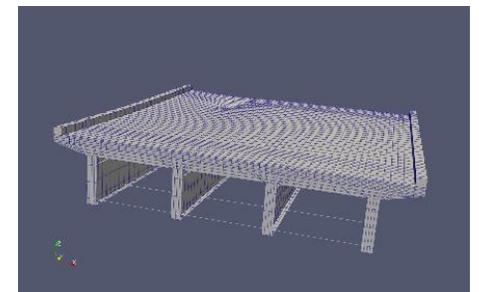
STEP30



STEP40

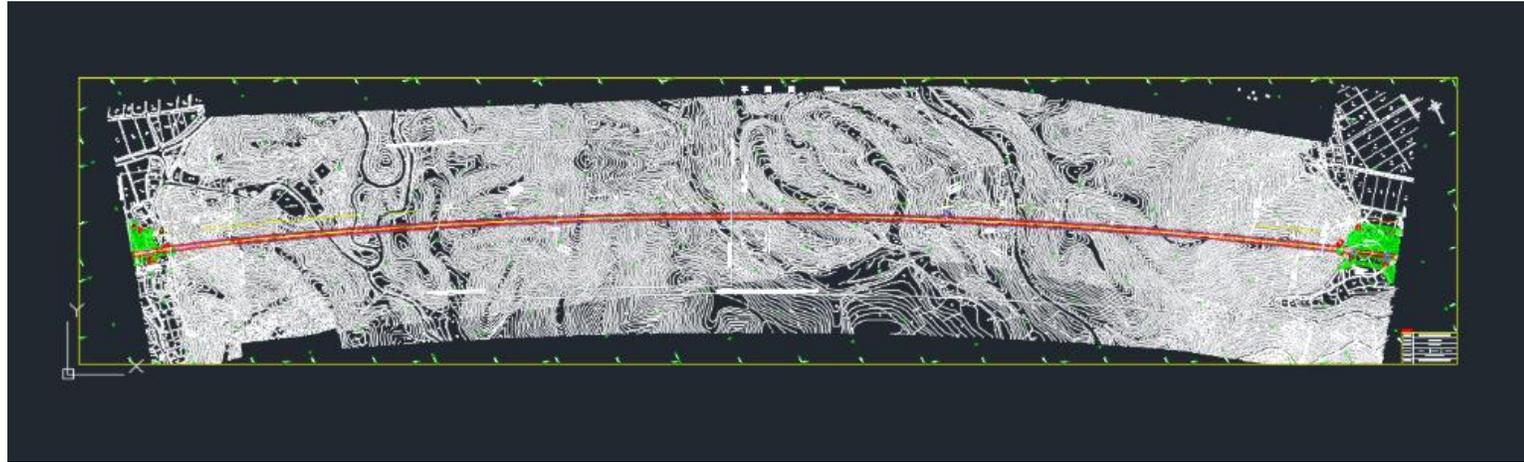


STEP50

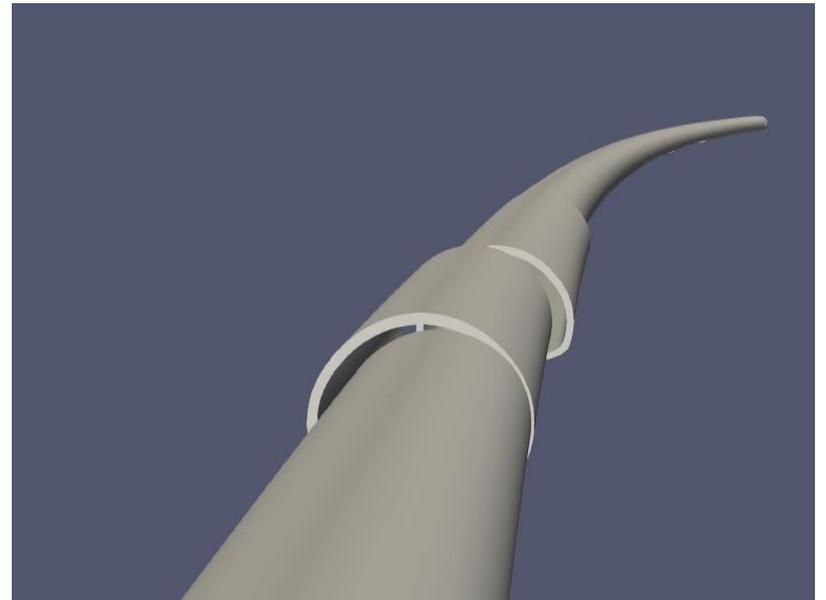


STEP60

NATMトンネル

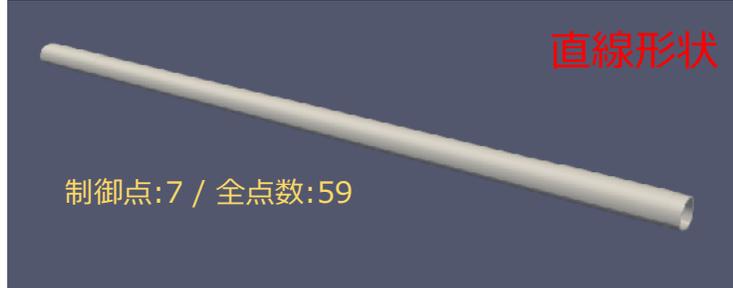


3次元モデル

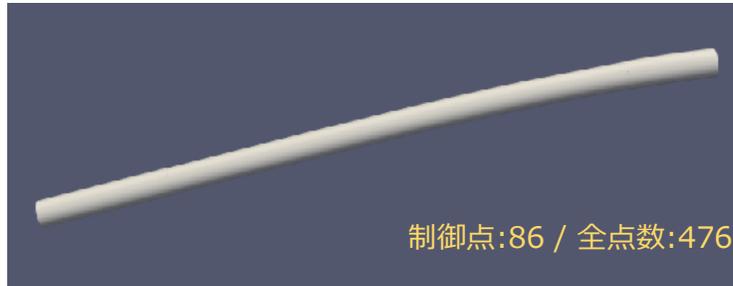


NATMトンネル：補間を利用した3次元モデル

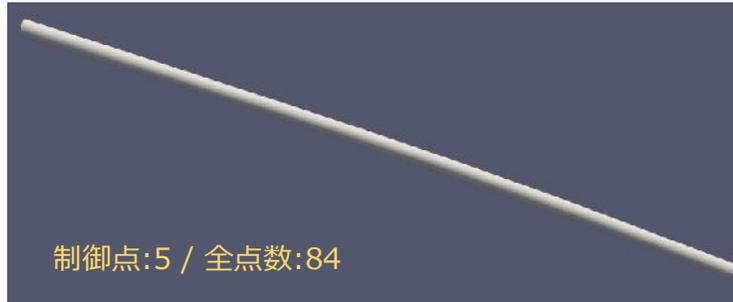
02_三隅・益田道路
古市場トンネル工事



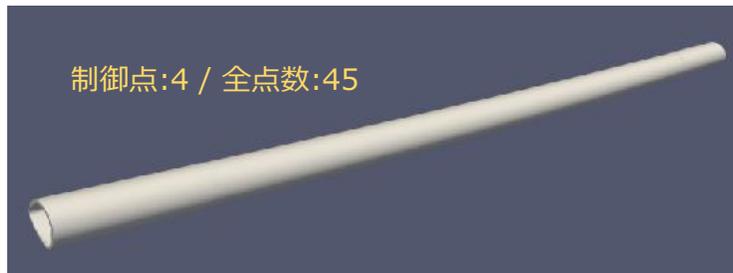
01_三隅・益田道路
新木部トンネル工事



06_鳥取西道路気高
第2トンネル工事

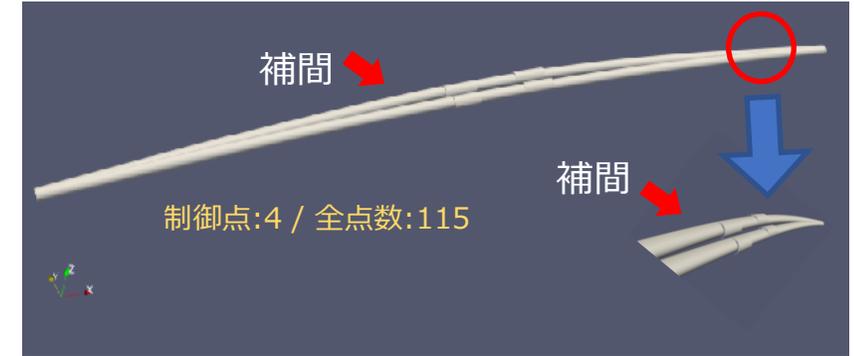


09_鳥取西道路気高
鹿野トンネル工事



不適切な制御点が選択された精度の悪い補間の例

04_鳥取西道路気高
第1トンネル東工事



05_鳥取西道路気高
第1トンネル西工事



07_鳥取西道路気高
青谷トンネル第1工
事



NATMトンネル：3次元モデル自動構築



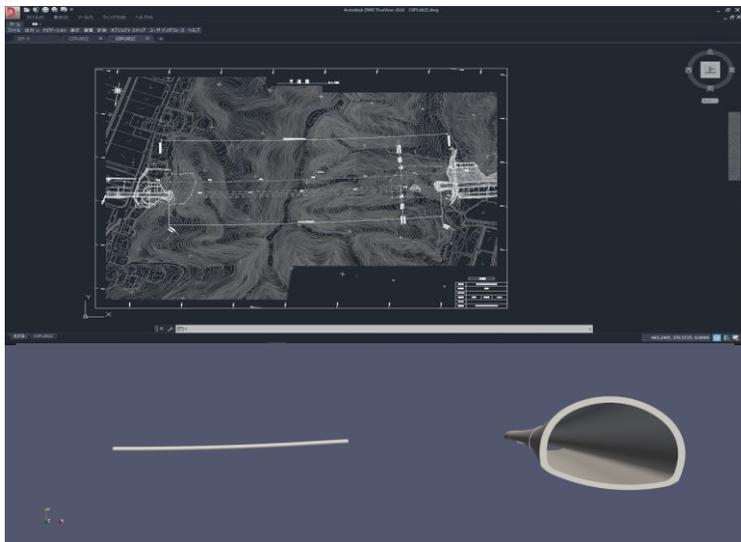
01_三隅・益田道路新木部トンネル工事



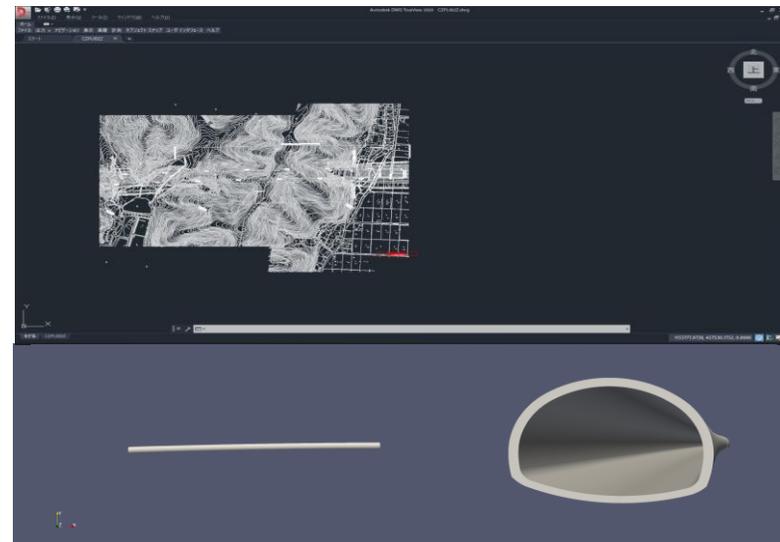
04_鳥取西道路気高第1トンネル東工事



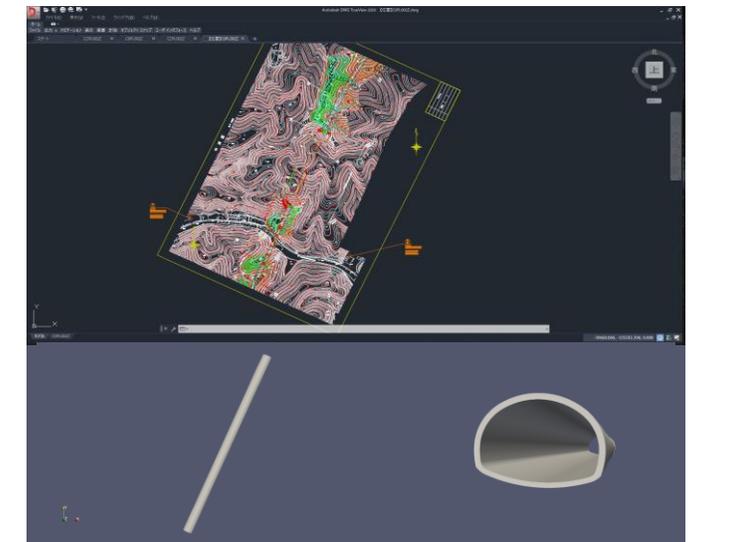
05_鳥取西道路気高第1トンネル西工事



06_鳥取西道路気高第2トンネル工事



09_鳥取西道路気高鹿野トンネル工事



02_三隅・益田道路古市場トンネル工事

NATMトンネル：レポートファイルとリクエストファイル

CADデータ取得

線形 IP 測点レポート

日付: 2022/10/03 17:54:19

線形名: 線形 - (1)

説明:

測点範囲: 開始: 165+89.00、終了: 187+20.97

クライアント: 作成者:

| IP 測点 | 北座標 | 東座標 | 距離 | 方向 |
|-----------|-----------|-------------|------------|-------------|
| 165+89.00 | 242.4144m | 185.8544m | 62.364m | 81-42' 07" |
| 166+51.36 | 251.4149m | 247.5656m | 1,028.143m | 84-05' 02" |
| 176+79.49 | 357.3895m | 1,270.2324m | 1,007.312m | S83-39' 59" |
| 186+79.44 | 246.2657m | 2,271.3964m | 41.533m | S82-40' 30" |

リクエストファイル

```
Common1::MTunnel::Type0 mt;
```

```
mt.PutPos("No.165+89.00",185.8544,242.4144);
```

```
mt.PutPos("No.166+00.00",196.7421,243.9819);
```

```
mt.PutPos("No.166+02.86",199.5706,244.3825);
```

```
...
```

```
mt.PutDsname("NO.187+0.0", "NO.187+20.0", "DⅢa");
```

```
mt.PutOffsetH("default", Q("0mm"));
```

```
mt.PutOffsetV("default", Q("-1570mm"));
```

```
Def:トンネルは:mt:である;
```

request.dpp

CADデータ取得

縦断の標高差レポート

日付: 2022/10/03 17:55:06

縦断線形: 縦断計画 (2)

既存縦断: 地形_EL5m - (2)

説明:

測点範囲: 始点: 165+89.00、終了: 187+20.97

クライアント: 作成者:

| PVI | 測点 | 東座標 | 北座標 | 既存の標高 | 標高設計 | 標高差分 | ポイントタイプ |
|-----|-----------|----------|----------|--------|---------|----------|---------|
| 0 | 165+89.00 | 185.8544 | 242.4144 | 5.000m | 27.166m | -22.166m | 開始 |
| 1 | 166+00.00 | 196.7421 | 243.9819 | 5.000m | 27.100m | -22.100m | 標準 |
| 2 | 166+02.86 | 199.5706 | 244.3825 | 5.000m | 27.083m | -22.083m | 既存 |

NATMトンネル：リクエスト機能

リクエスト機能：設計図面から読めなかった3次元モデルのパラメータに対し、**手入力をリクエストする機能**

プログラム実行後、Requestフォルダの中にmakemodel.dppというファイルが自動作成

makemodel.dppの例

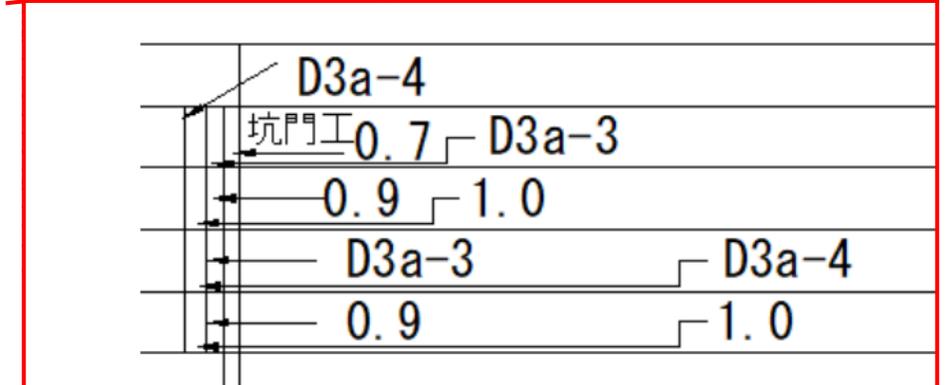
```
Def:名前が:"DIIIa":の断面の吹付コンクリート厚は:Q("25cm"):である;  
Def:名前が:"DIIIa":の断面の覆工コンクリート厚は:Qy("35cm"):である;  
Def:名前が:"DIIIa":の断面のインバート厚は:Q("50cm"):である;  
Common1::MTunnel::Type0 mt;  
mt.PutUsname("NO.110+71.0", "NO.110+72.6", "D3a-3");  
mt.PutUsname("NO.110+72.6", "NO.110+73.6", "D3a-4");  
mt.PutOffsetH("default", Q("-122mm"));  
mt.PutOffsetV("default", Q("-1580mm"));  
Def:トンネルは:mt:である;
```

自然言語に近い表現とプログラミング言語の表現

意味

測点NO.110+71.0と測点NO.110+72.6の間に断面D3-3がある
測点NO.110+72.6と測点NO.110+73.6の間に断面D3-4がある
FHの水平オフセットのデフォルト値を-122mmとする
FHの垂直オフセットのデフォルト値を-1580mmとする

| Stationing | Section Labels | Other Labels |
|------------|-------------------|--------------|
| 84.0256 | | 地盤高 |
| 79.7566 | | |
| 72.9057 | | |
| 66.0757 | | |
| 54.5858 | | |
| D1 | D3a | 地山等級 |
| -b-i-1 | D3a-7 D3a-1 D3a-5 | 支保パターン |
| 46.2 | 15.8 14.6 11.0 | 延長係 |
| -b-i-1 | D3a-7 D3a-1 D3-5 | 支保パターン |
| 46.2 | 15.8 14.6 11.0 | 延長係 |
| 15 | 25 | コンクリート厚 |
| 半部 | 上・下半部 | 断面別 |
| 125 | H200 | 上半部 |
| 125 | H200 | 下半部 |



デフォルト値を修正する必要

RC橋梁とNATMトンネルの3次元モデル自動構築の検証

◆ 比較対象

- 受領モデル：研究者が、自分の計算環境で自動構築したモデル
- 処理結果
技術者が、プログラム群を含む計算環境を作成し、自動構築したモデル

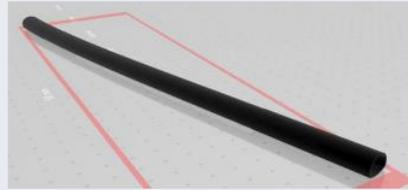
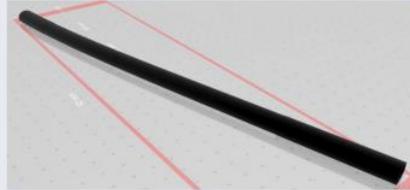
◆ 比較内容

- 部材単位での一致／不一致
- リクエスト機能の良否

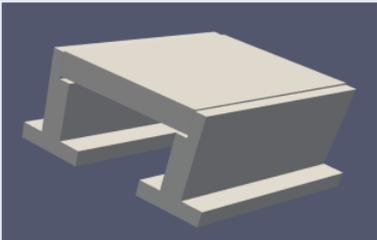
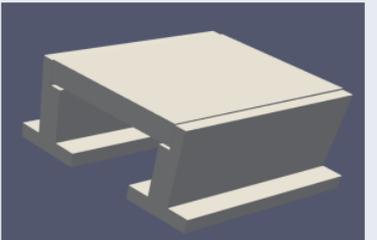
NATMトンネル

| | request修正(貸与データ) | | | | | | | request修正(01/17時点) | | | | | | |
|---------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|
| | 01 | 02 | 04 | 05 | 06 | 07 | 09 | 03 | 08 | 12 | 13 | 15 | 16 | 17 |
| 1. 断面 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | - | ○ | - | ○ | - | ○ |
| 2. 複数断面 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | × | - | ○ | - | ○ | - | ○ |
| 3. 断面配置 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | × | - | ○ | - | ○ | - | ○ |
| 4. 線形 | △ 曲線 勾配なし | △ 曲線 勾配なし | △ 曲線 勾配なし | △ 曲線 勾配なし | △ 曲線 勾配なし | △ 曲線 勾配なし | △ 曲線 勾配なし | × | - | △ 曲線 勾配なし | - | △ 曲線 勾配なし | - | △ 曲線 勾配なし |
| 5. スパン | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | × | - | ○ | - | ○ | - | ○ |
| 6. 空洞 | × | ○ | × | × | × | × | ○ | ○ | - | × | - | ○ | - | |
| 備考 | | | | | | | | 一部のみ | モデルなし | | モデルなし | .stlなし | モデルなし | |

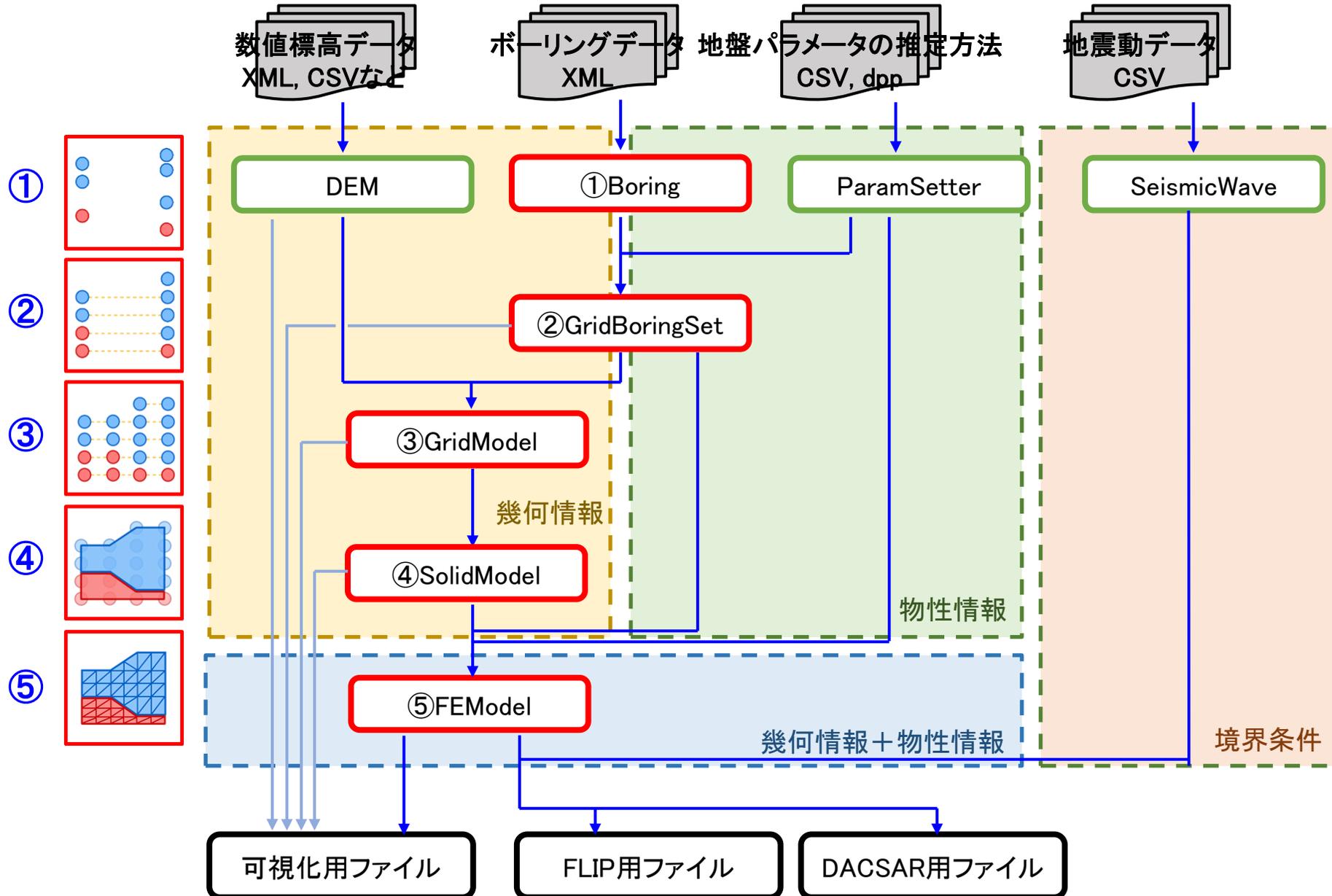
01_三隅・益田道路新木部トンネル工事

| | 受領モデル (主点) | 処理結果 (全点) |
|--------------------------------|---|---|
| shape.stl (Print 3D で表示) |  |  |
| shape.vtk (ParaView で表示) |  |  |

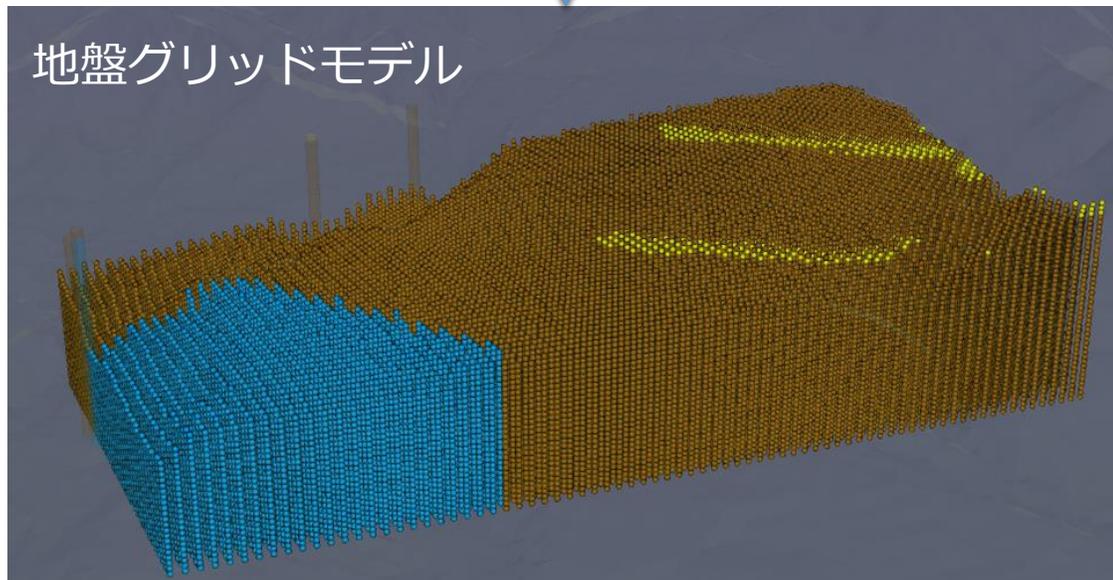
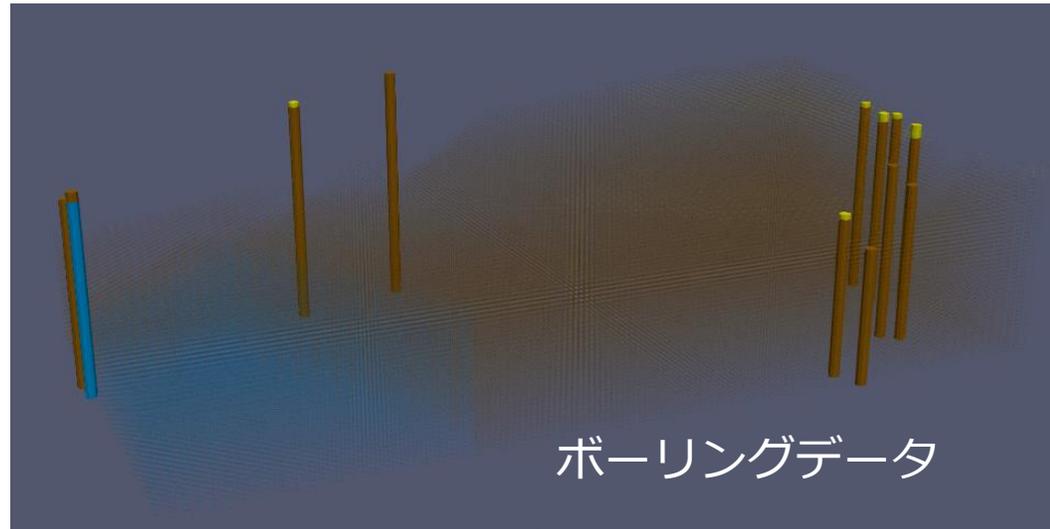
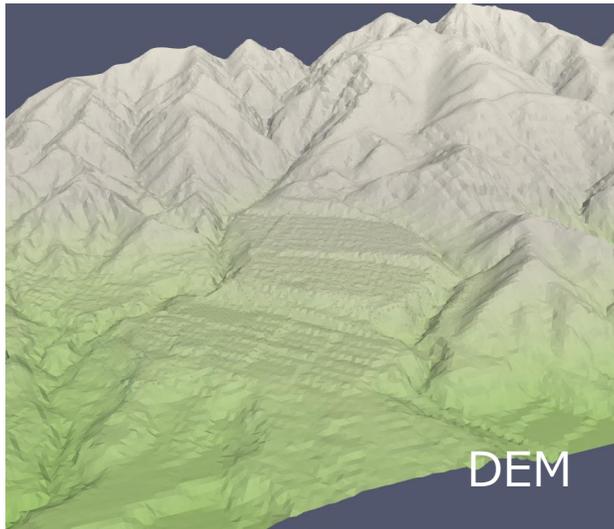
RC橋梁

| 19 沖村橋 | |
|---|--|
| 受領モデル shape.vtk (ParaViewで表示) | 処理結果 shape.vtk (ParaViewで表示) |
|  |  |

地盤

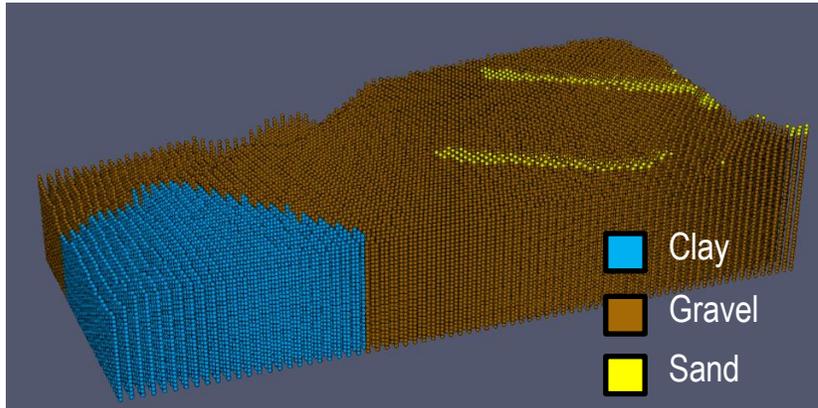


地盤 : グリッドモデル自動構築

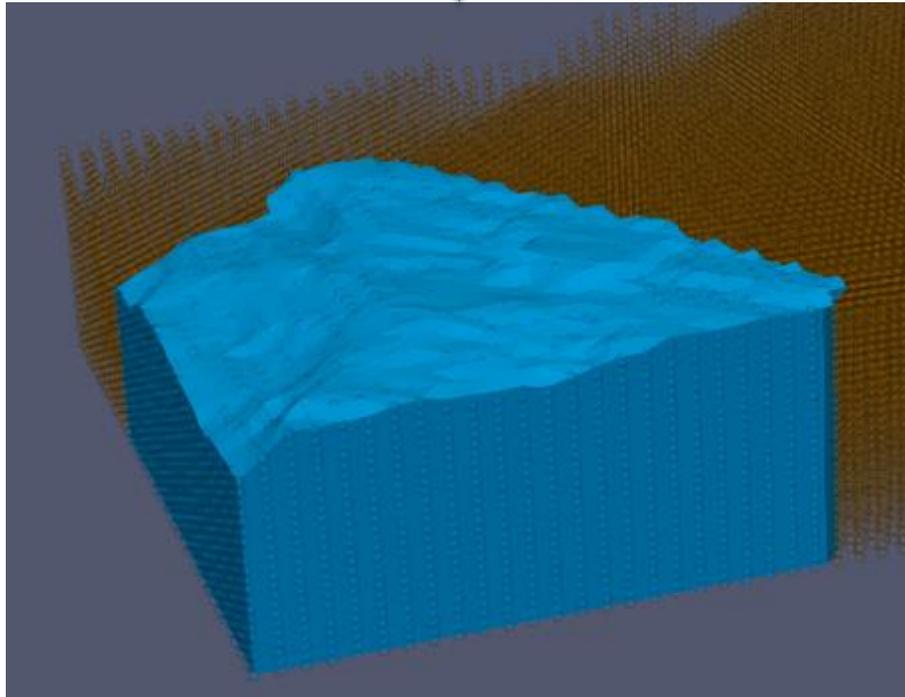


- ① X, Y方向の間隔を指定し, 地盤グリッドモデルを作成
- ② 地表面の形状にはDEMを適用
- ③ 地盤グリッドの格子点には, ボーリングデータのカテゴリの情報を設定
→格子点には水平面上で最も近いボーリングデータのカテゴリを適用

地盤：ソリッドモデル自動構築

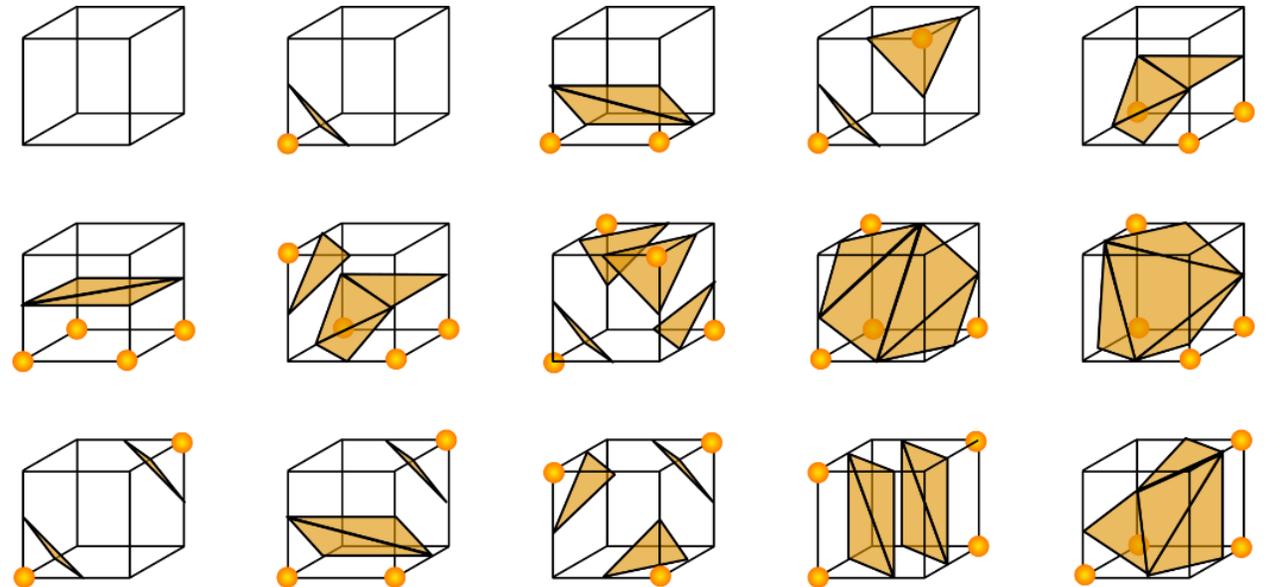


粘土の境界を作成



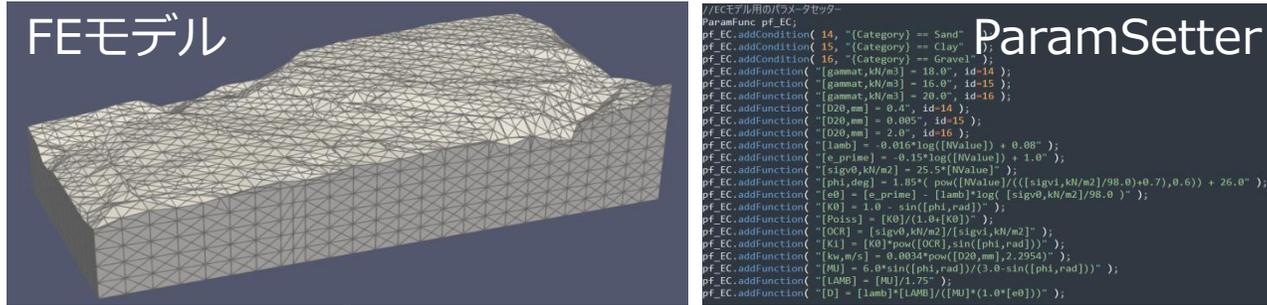
- ① 地盤グリッドモデルの格子点を頂点とする立方体のソリッド要素を作成
- ② ソリッド要素内部に、カテゴリの境界に対応した面を作成
- ③ 境界面を使って、立方体ソリッド要素を四面体ソリッド要素に分割

ソリッド要素内の境界：Marching Cube法



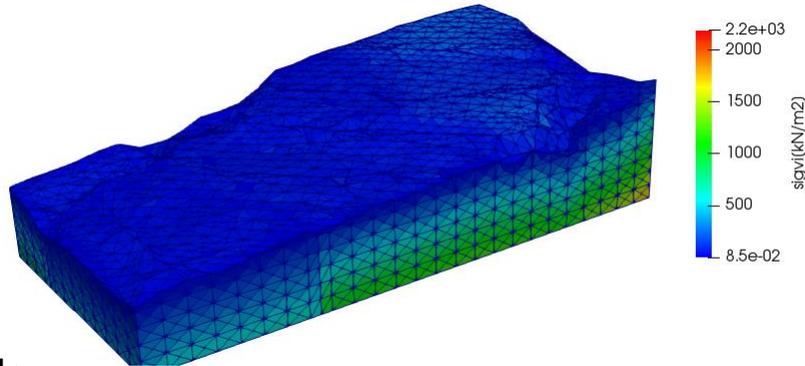
立方体の頂点のカテゴリから三角形の分割面を生成

地盤：FEMモデル自動構築

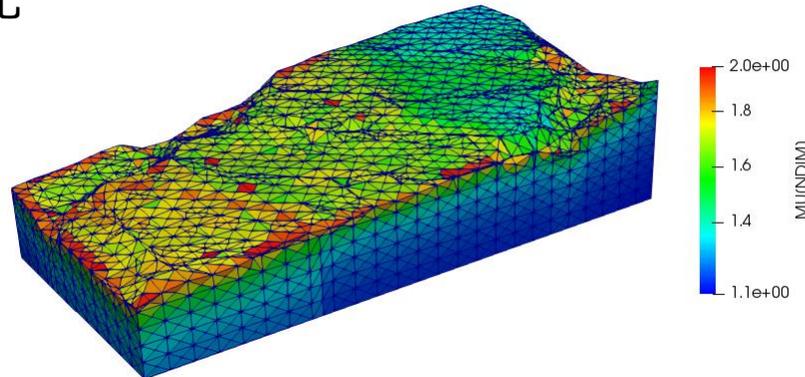


- ① 各要素のN値を周辺のボーリングデータから補完
- ② 各要素のパラメータを, N値を使う推定方法に従って設定

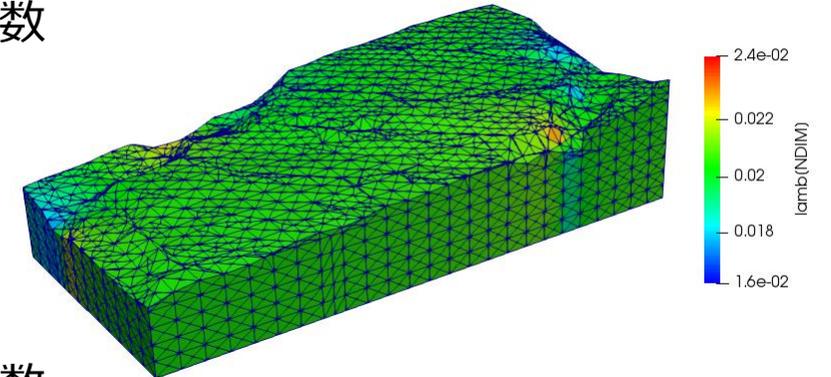
初期鉛直有効応力



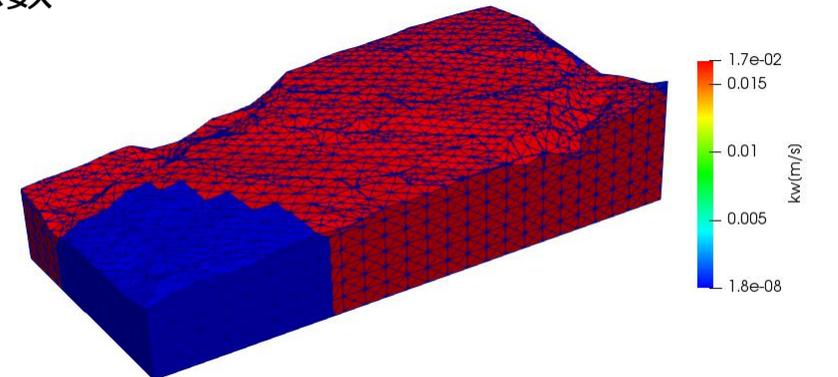
限界応力比



圧縮指数



透水係数



地盤：検証

◆ 読込機能とモデルの作成機能

- 動作確認
- 異常な引数が入力された際の異状検知

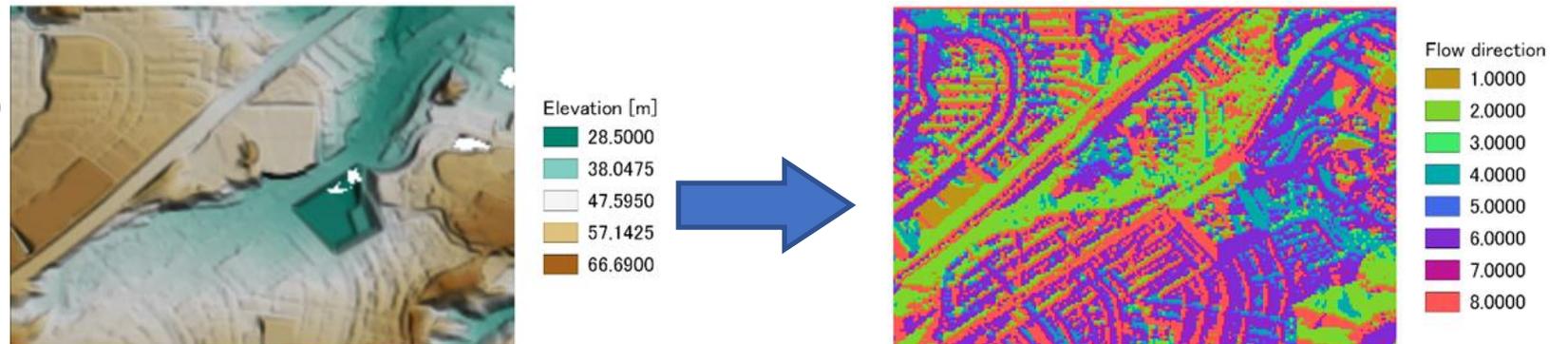
| | 対象スクリプト | 確認事項の例 |
|---|---|--|
| 1 | <code>BoringXML(ipath+"Boring_XML/");</code> | ボーリングXMLファイル読込機能 <ul style="list-style-type: none">• 読み込むXMLファイルを変更• XML柱状図ファイルの拡張子を変更• 柱状図ではないXMLファイルを読込 |
| 2 | <code>dem.addData(GSI_DEM(ipath+"DEM_XML/"+fname, origin_no=5, elev_no_data=0.0));</code> | DEMデータ読込機能 <ul style="list-style-type: none">• 引数の座標系の変更• 引数の出力間隔の変更 |
| 3 | <code>Ground::GridBoringSet(bdat, ps_category, 5, zspacing="20m", zmin="120m");</code> | グリッドボーリングデータの作成機能 <ul style="list-style-type: none">• 引数zspacingを変更• 引数zminを変更 |
| 4 | <code>Ground::GridModel(gridbdat, dem, xspacing="30m", yspacing="30m");</code> | グリッドモデルの作成機能 <ul style="list-style-type: none">• 引数xspacingを変更• 引数yspacingを変更 |
| 5 | <code>Ground::SolidModel(gridmodel, ps_category);</code> | ソリッドモデルの作成機能 <ul style="list-style-type: none">• 引数gridmodelの条件変更 |
| 6 | <code>Ground::FEModel(solidmodel, ps_EC, dirpath=opath);</code> | FEモデルの作成機能 <ul style="list-style-type: none">• 引数dirpathの変更• 引数ps_ECの条件変更 |

河川：関連データ

- ◆ DPPに河川レーザ測量データの読込機能を実装
- ◆ ラスター形式データを，流域スケールのシミュレーション（降雨流出iRIC・氾濫モデルRRI・土砂移動モデルDRSRIS）の入力ファイルに自動変換する技術の開発

| | 入力ファイル | 出力ファイル | 詳細 |
|---|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 1 | UAVレーザ測量データ (.las) | iRIC用 (.csv) | .lasはバイナリファイル |
| 2 | 数値標高モデルデータ (.xml, .tif) | RRI用 (.asc) DRSRIS用 (.asc) | DEMから流向データを作成 .ascはasciiファイル |
| 3 | 土地被覆図データ (.tif) | DRSRIS用 (.asc) | 土地被覆を土地利用に変換 |

変換例：
tif形式の数値標高（DEM）
→流向データ



河川：3次元アプリケーションモデル自動構築

- ◆ land xml形式の3次元堤防データの3次元河床変動シミュレーションに利用
- ◆ 地盤分野作成のland xmlの読込機能を応用（再利用）



- 橋脚
- 樋門
- 護岸 など

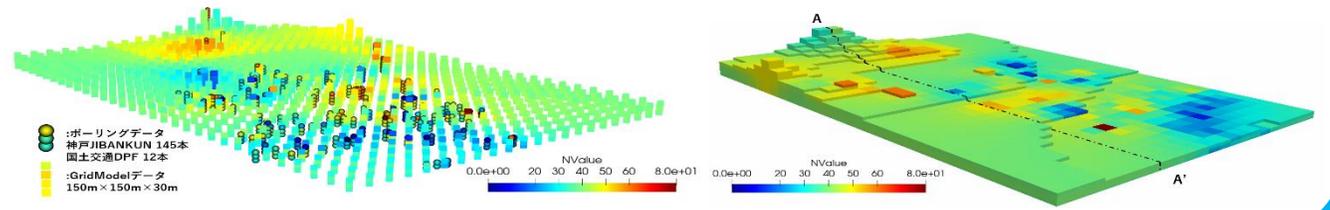


land xmlの可視化

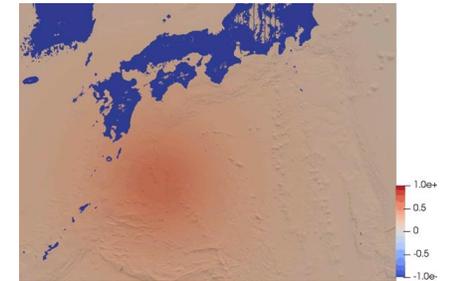
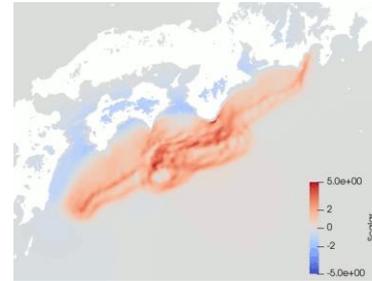
港湾：津波と地震のシミュレーションの統合

| 対象 | 開発内容 |
|-----------|--|
| 津波 | 津波解析T-STOCを標準仕様と想定し，G空間情報センターのデータをT-STOC用の入力ファイルに変換する手作業を自動化 |
| 地震応答 | 地震応答解析FLIPの利用を想定し，汎用3次元地盤モデルを3次元FEMモデルに変換し，さらにFLIP用入力ファイルに変換 |
| 地震応答・津波統合 | FLIPの地盤沈下の解析結果を反映したT-STOCの入力ファイルの自動作成 |

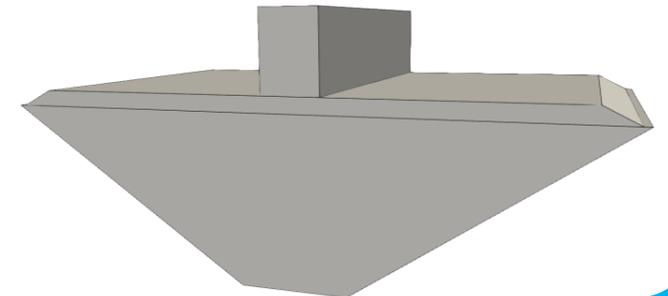
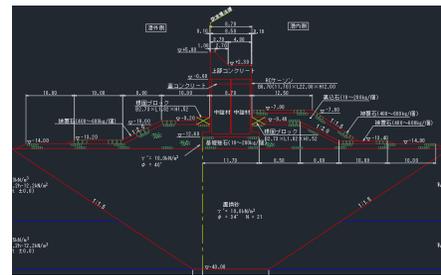
3次元地盤モデルからFLIP用の入力ファイル自動作成



津波・高潮解析の省力化

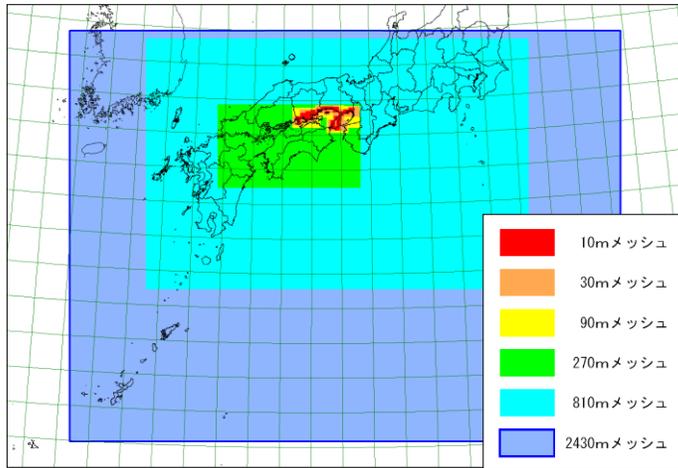


2次元港湾構造物図面から3次元モデルの生成

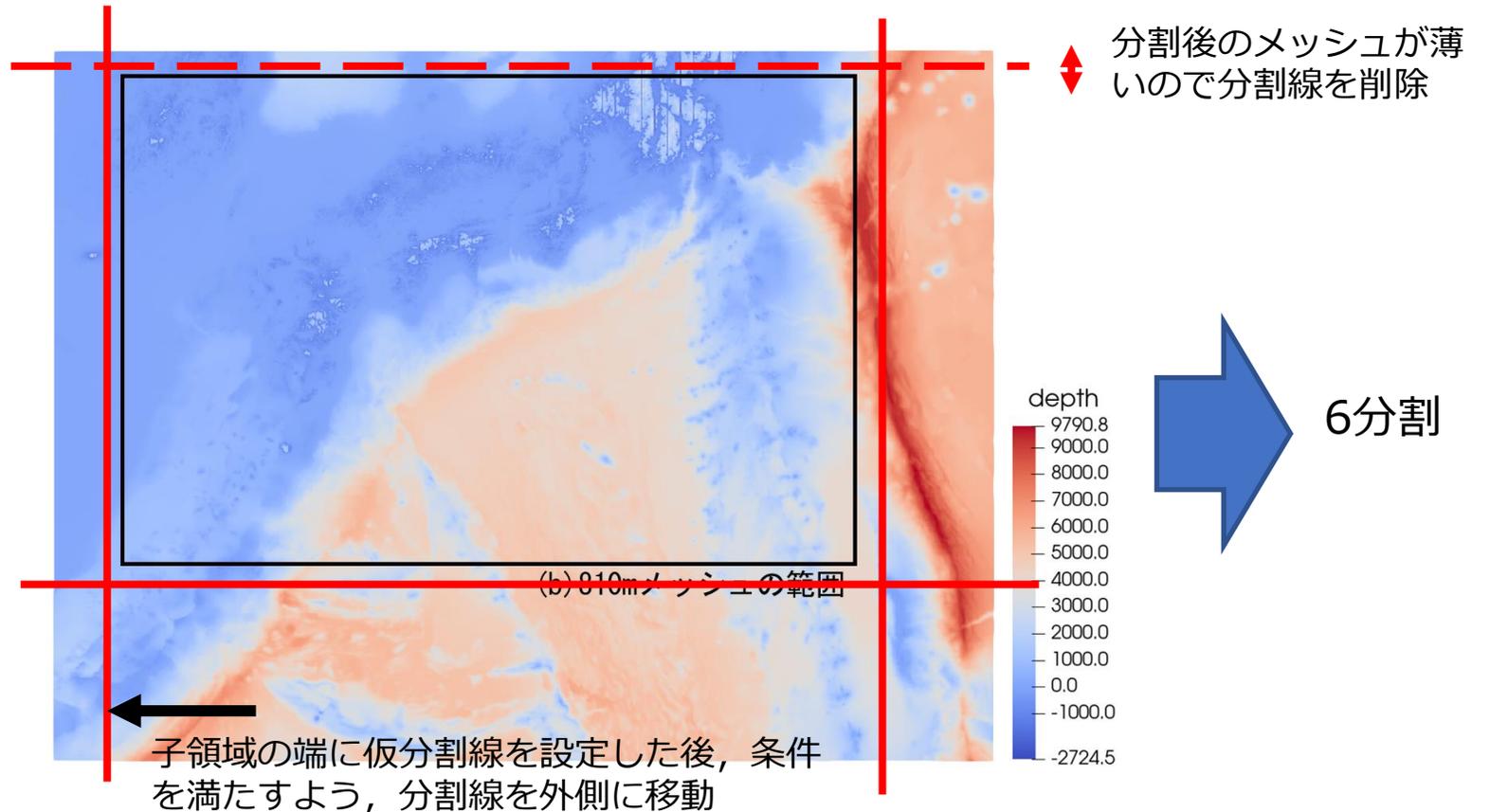


港湾：津波・高潮解析の省力化

- ◆ マルチスケール解析：低分解能大領域から高分解能小領域
- ◆ 各種データを利用したマルチスケール解析モデルの自動構築

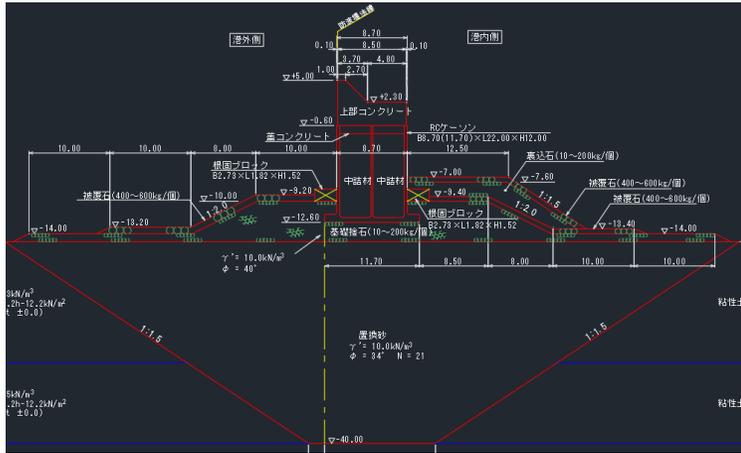


津波のマルチスケール解析

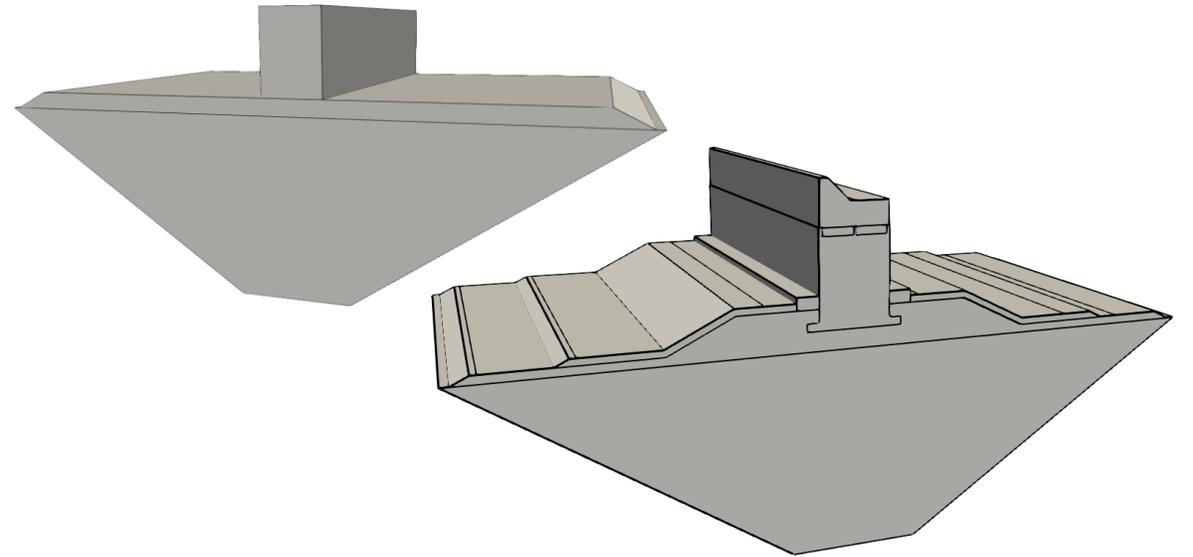


必要なパラメータを自動設定 → 解析コストの削減

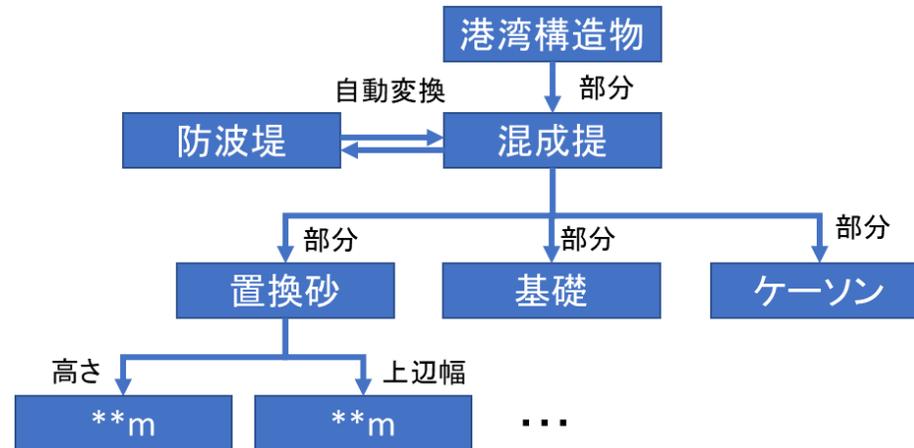
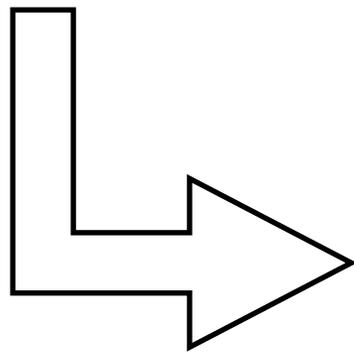
港湾：FEMモデル自動構築



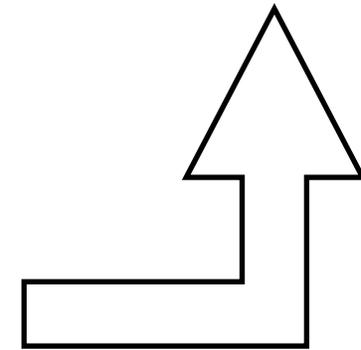
電子納品基準を満たした図面データ



FEMモデル



ナレッジグラフを作成



内容

- ◆ 防災用都市のデジタルツインを利用した統合地震シミュレーション
 - 防災用都市のデジタルツイン
 - 首都直下地震と南海トラフ地震の例

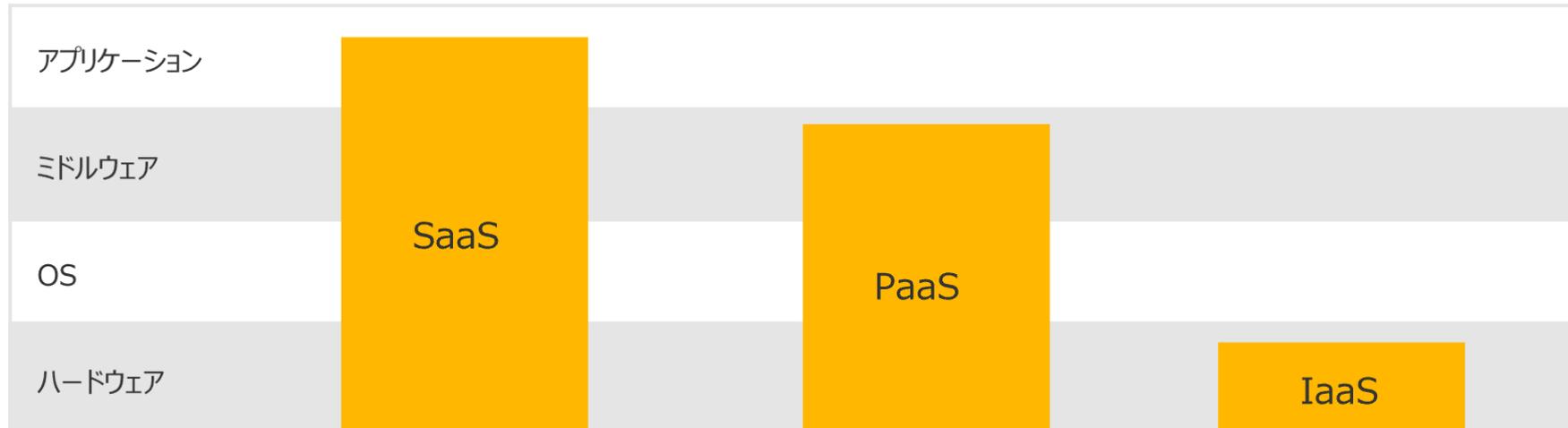
- ◆ デジタルツインの中核となる並列有限要素法
 - 特徴：高性能計算を利用するソルバ, コンクリートと地盤の3次元構成則
 - 重要構造物へのデジタルツインの適用例

- ◆ デジタルツインの自動構築
 - 基盤技術としてのDPP (Data Processing Platform)
 - 実データを利用した自動構築の適用例：RC橋梁, NATMトンネル, 地盤, 河川・港湾

- ◆ 国交DPFへの貢献というデジタルツインの挑戦
 - デジタルツインによる予測というサービスを提供する機能を国交DPFに
 - 第3期SIPのスマートインフラとスマート防災で研究開発されるデジタルツインの例

クラウドサービス : SaaS (Software as a Service)

クラウド事業者が運用管理する範囲



出典: <https://www.itmanage.co.jp/column/saas-paas-iaas/>

◆ サービスの形態

- SaaS インターネット経由で、各種ソフトウェアを提供
- PaaS インターネット経由で、主にソフトウェア開発を支援するプラットフォームを提供
- IaaS インターネット経由で、計算環境を提供

◆ データとソフトウェアのユーザ

- データを提供するサービスは、ソフトウェアを持つユーザが利用
- ソフトウェアを提供するサービスは、データを持つユーザが利用
- データ取得のソフトウェアを含めることで、データもソフトウェアも持たない多くのユーザが利用

ソフトウェアとしてのCADとBIM

◆ CADの利用拡大

- 設計図の製図を効率化するDXとしてCAD
- 解析を含めた設計工程から、製造工程・検査工程へのDX的利用拡大
→CAD からCAE へ（製図機能から、解析機能、最適製造機能、検査診断機能等の機能追加）

◆ BIM

- 「一設計多製造」の機械系ではCAD/CAEの利用が盛んであるが、「一設計一製造」の建設系ではCADの利用は製図に限定？
- CAD/CAE企業の視点では、機械系で発展したCAEを建設系に適用しても採算が取れるようになったため、BIMとして進出？
→ BIMのMはModelingであり、機能として解釈可能

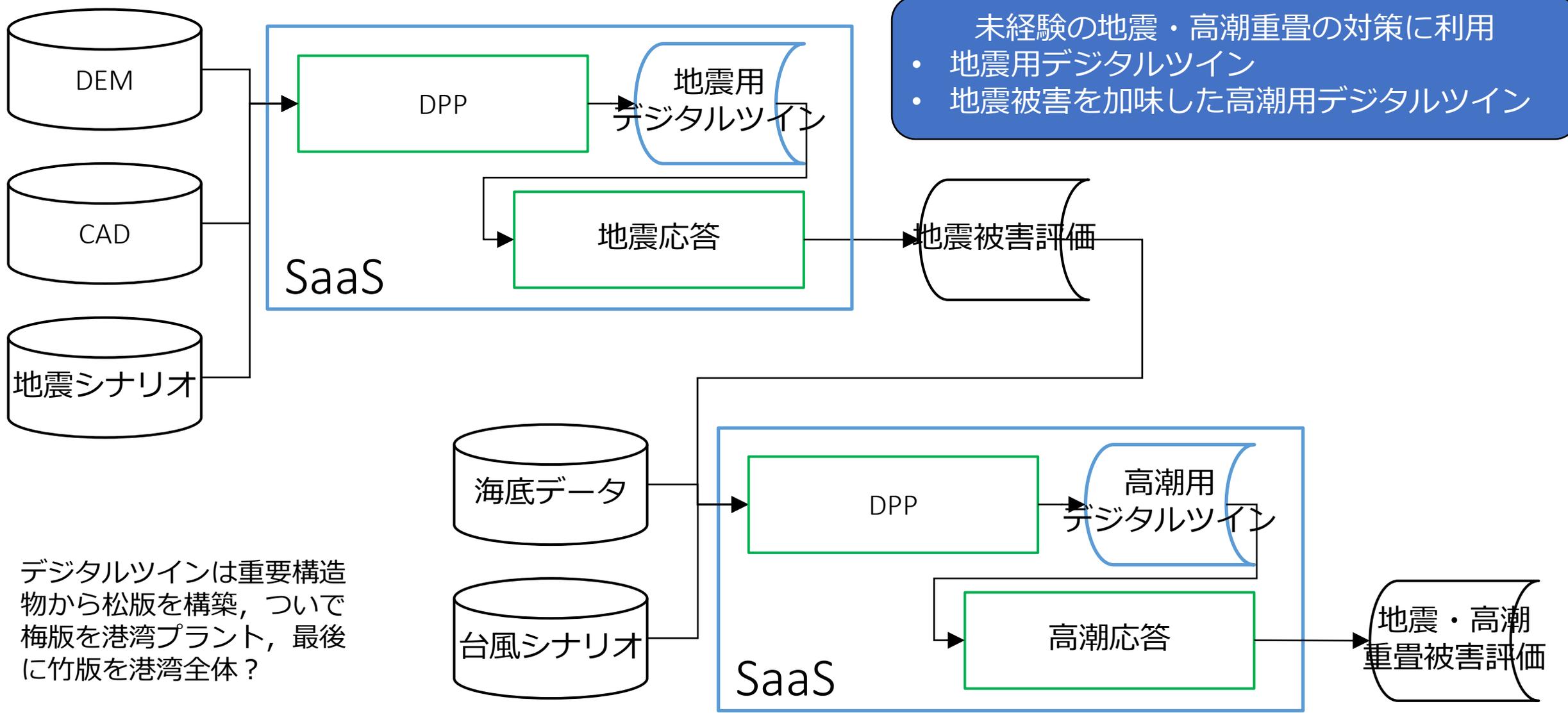
◆ BIM（ないしCAE）利用は、データの互換性が不完全なため、非可逆的？

- 我が国の建設産業のR&Dは、CAD/CAE企業のBIMシステムに関わることが死活問題？
- データの不完全互換を前提に、現在のBIMの分析と将来のBIMの予測が必須

国交DPFと建設系構造物のデジタルツイン

- ◆ CAD/CAEは機械系構造物のデジタルツイン自動構築が目標
 - 仮想実験が可能な高度な数値解析手法群の整備
 - 製造工程の最適化機能に加え，モニタリングのデータを利用した検査診断機能
- ◆ 機械系CAD/CAEの拡張であるBIMでの建設系構造物のデジタルツイン自動構築
 - 「一設計一製造」のため膨大な数となる設計データの互換性確保はコスト高？
 - 建設系構造物のデジタルツインに周辺環境を取り込む技術開発が必要？
- ◆ SaaSとしての国交DPF
 - 国交DPFは土木系技術者にデータ変換と周辺環境取込みのサービスを提供
 - データ互換と周辺環境取込みはDPPスクリプトを利用（ローコード開発）
- ◆ 国際展開
 - BIMの最終形は世界の建設産業にSaaSを提供
 - BIMソフトウェアの違いに基づく不完全な互換性のため，都市のデジタルツインは不可能？
 - 「非BIMのBIM化」を目指すDPPを含むSaaSはBIMソフトウェア依存性を解決

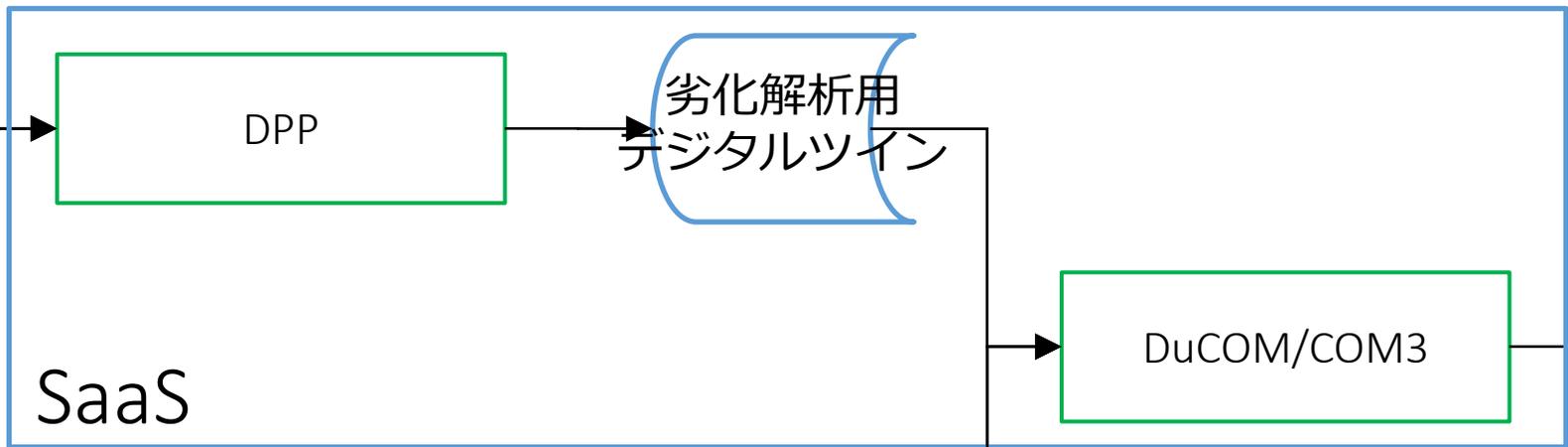
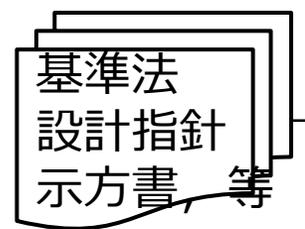
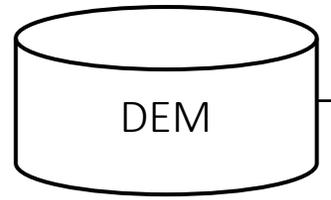
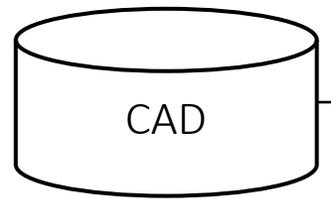
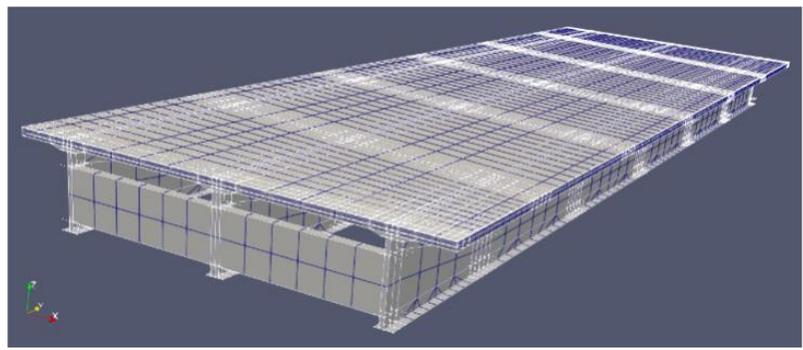
地震と高潮の重畳被害評価



デジタルツインは重要構造物から松版を構築，ついで梅版を港湾プラント，最後に竹版を港湾全体？

RC床板デジタルツインを使う劣化予測

フルスケール解析モデル



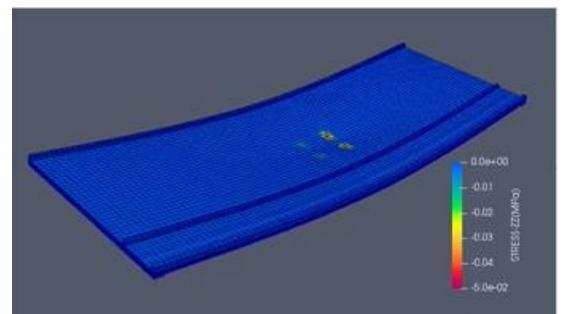
DuCOM COM3 劣化解析 構造解析



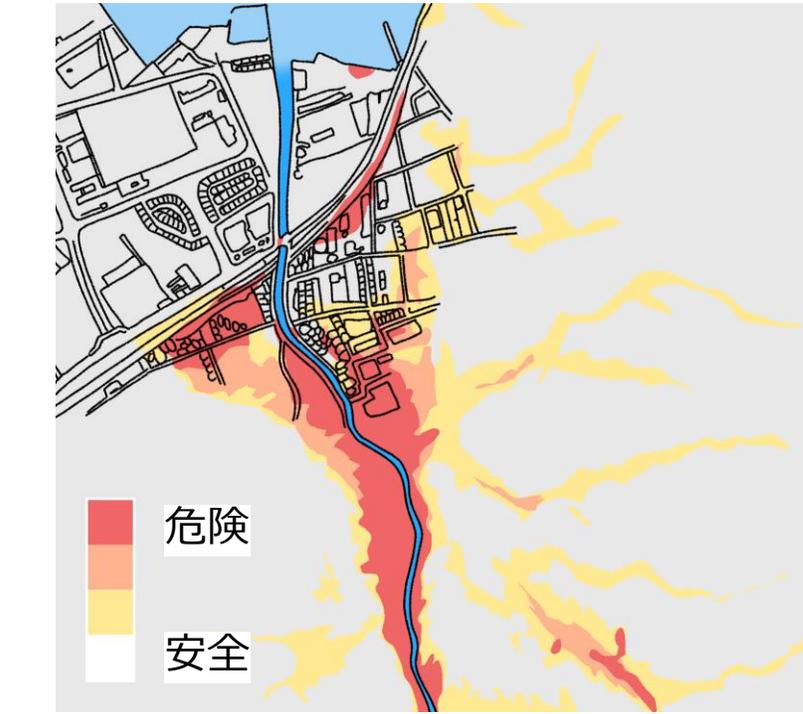
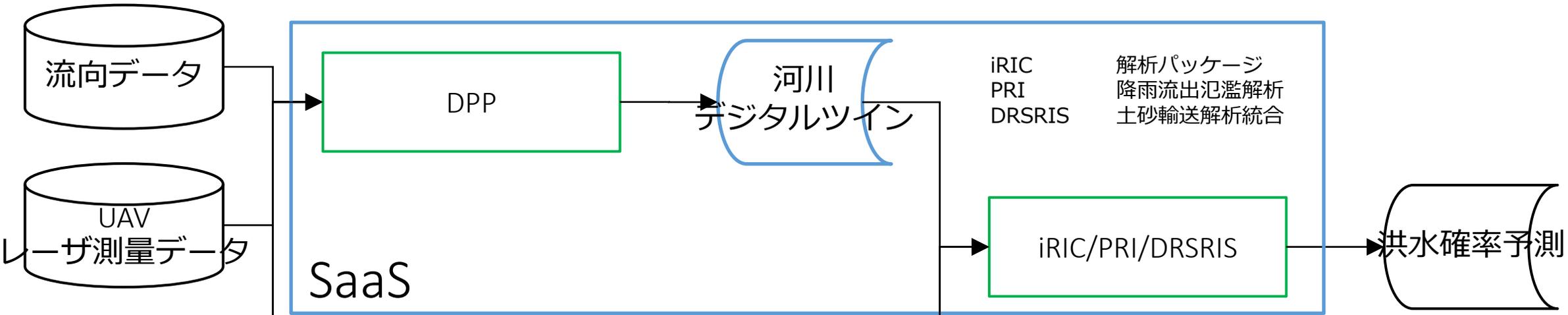
維持補修計画の立案に利用



劣化予測に必要な 応力分布



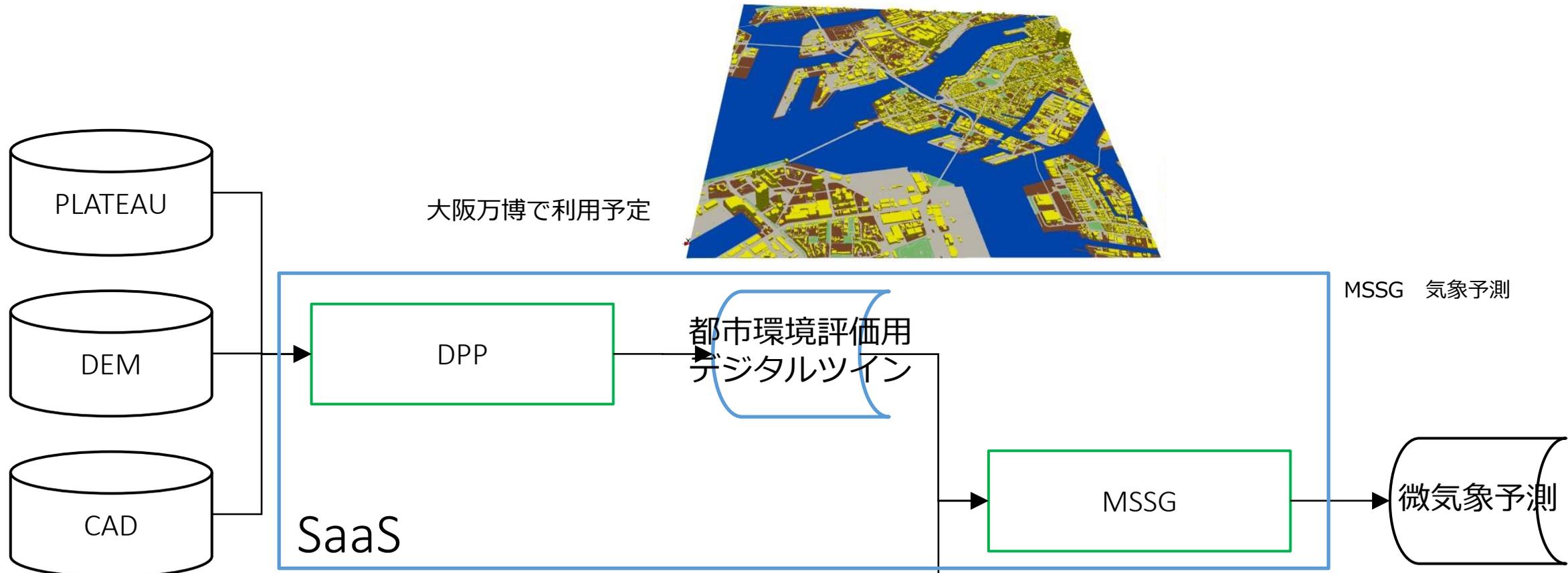
河川デジタルツインを使う洪水確率予測



河川改修・防災対策等を利用

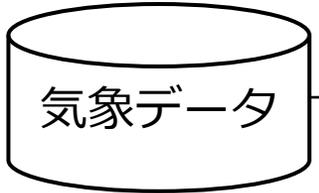
洪水確率

街区・地区デジタルツインを使う熱波予測



大阪万博で利用予定

建設現場での熱波対策に利用



気象データ



温度・湿度・風速

おわりに

- ◆ 防災用都市のデジタルツインを利用した統合地震シミュレーション
 - 高性能計算を利用した首都直下地震と南海トラフ地震の災害・被害評価
- ◆ デジタルツインの中核となる並列有限要素法
 - 実務で進む重要構造物へのデジタルツインの適用
- ◆ デジタルツインの自動構築
 - DPPを利用した, RC橋梁, NATMトンネル, 地盤, 河川・港湾の自動構築デジタルツイン
- ◆ 国交DPFへの貢献というデジタルツインの挑戦
 - SIPスマートインフラとSIPスマート防災で研究開発される高度なデジタルツインの例
 - 地震と高潮の重畳という未経験災害の備えには, 高度なデジタルツインの被害評価が必要

- ◆ 黒船が来る前の備えとして, 高性能計算を利用する高度な数値解析と, 非BIMをBIM化するDPPを利用する, 都市のデジタルツインの先端研究開発
- ◆ 国交DPFの利用形態の一つは, ローコード開発を前提に, 土木技術者がデジタルツインを利用できるSaaSを継続的に提供?