

VINAS Users Conference 2005

November, 1-2, 2005. (at Tokyo, JAPAN)



Super Matrix Solver 国内事例発表

SMS導入による離散解析手法を用いた コンクリート破壊解析システムの開発

北海道大学大学院工学研究科 環境創生工学専攻
社会基盤施設管理講座 維持管理システム研究室

(現: スイス連邦工科大学チューリッヒ校 日本学術振興会海外特別研究員)

長井 宏平

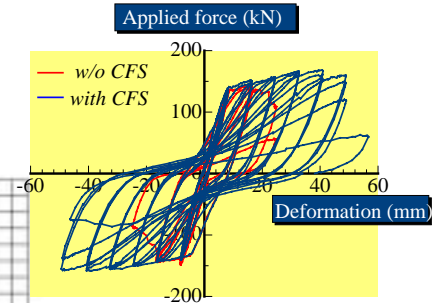
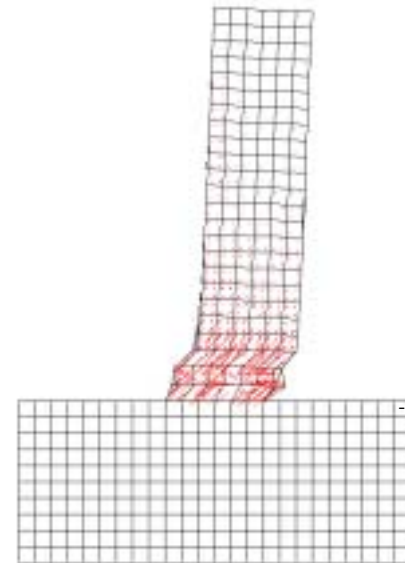
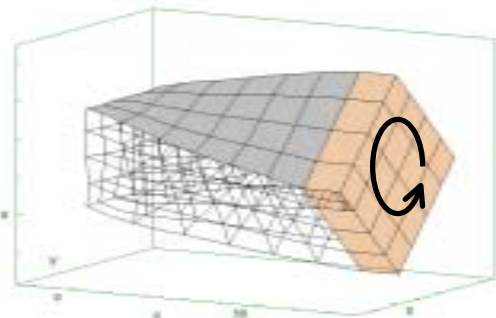
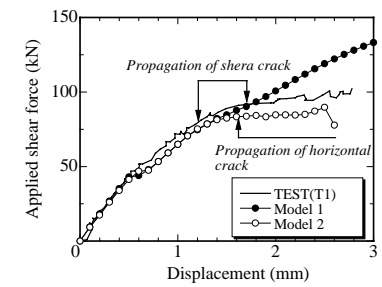
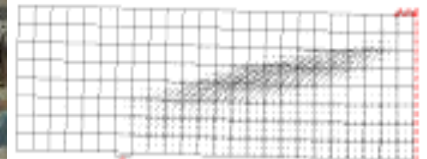
発表内容

1. システム開発の経緯
コンクリート構造物の維持管理
2. システム開発の流れ
離散解析手法によるコンクリートのメソスケール解析
3. SMS導入
数値計算の知識が少ない中で大規模計算が必要
三次元解析への導入過程と計算速度
三次元解析結果
4. 纏めと今後に向けて
更なるシステムの拡張へ向けて



システム開発の経緯

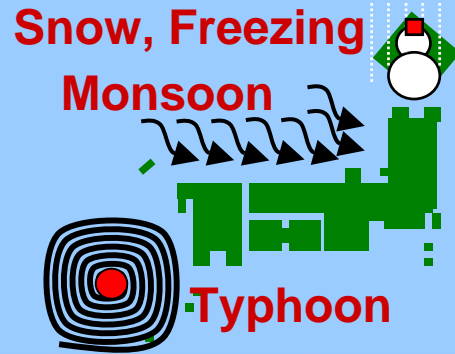
社会基盤施設管理講座 維持管理システム研究室



鉄筋コンクリート構造物(土木系)の設計基準に関する研究
実験 + 解析(主にFEM)

維持管理の重要性

コンクリートの生涯



Dispersal of Anti-freezing admixture

Time (day)

10^{-1}

10^0

10^1

10^2

10^3

10^4

コンクリート構造物の環境作用による劣化の例

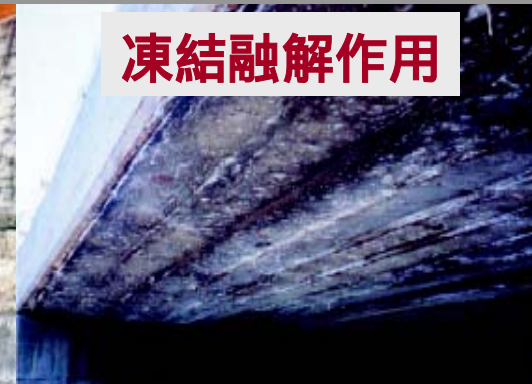
鉄筋腐食



アルカリ骨材反応



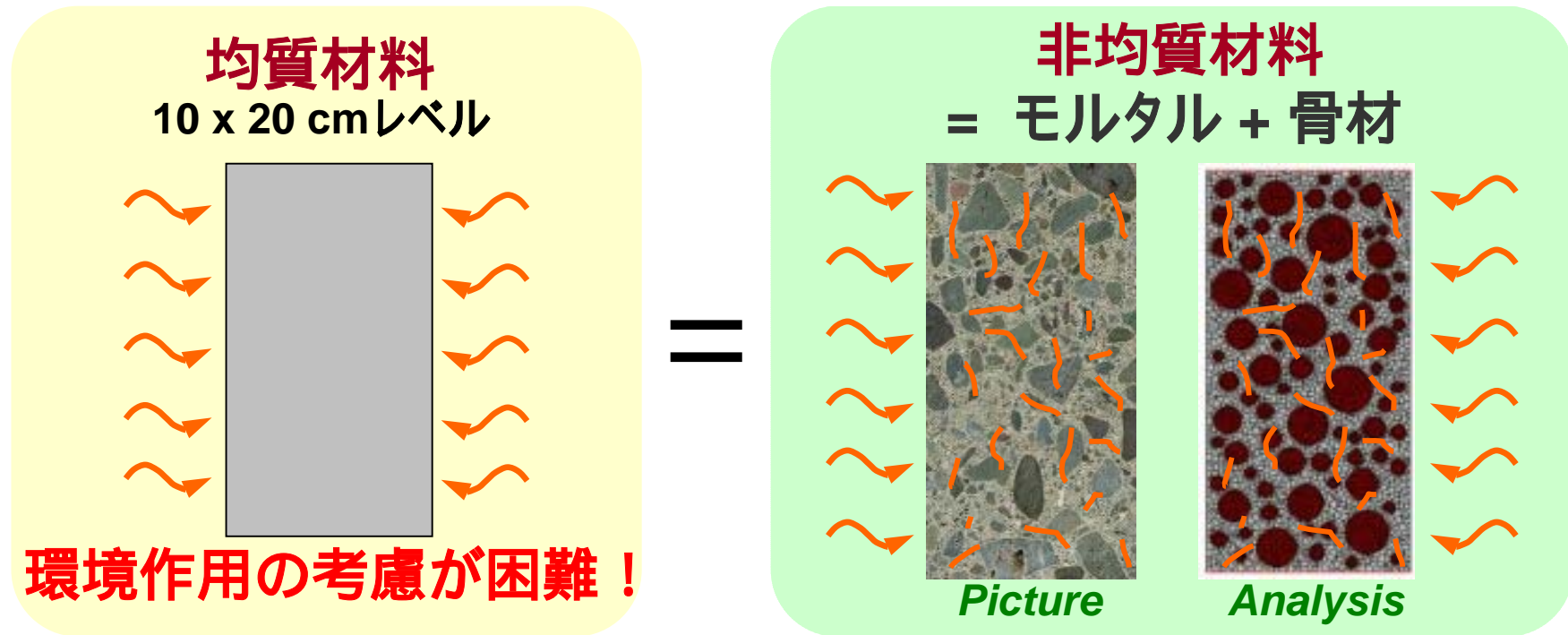
凍結融解作用



コンクリート構造物の耐久性予測が重大な使命

➡ コンクリート材料の破壊・劣化メカニズムの追及が必要

コンクリート材料レベル(メソスケール)における解析



環境作用の導入が可能となる

構成材料の質と量の影響を調べられる

新材料系コンクリートの開発に役立つ

メソスケール解析は実験による負担を軽減できる可能性がある

システム開発の流れ

メソスケール解析システム開発のスタート

コンクリートの破壊はひび割れに支配される

離散解析手法が適当

コンクリートの解析への適用例がある

剛体ばねモデル(RBSM)を選択 



しかし、解析システムが市販されていない

既往の研究が少ない(特に三次元解析)



研究室で独自にシステム開発を始める

二次元RBSM解析システム (2000年)

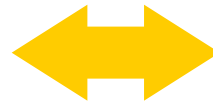
三次元RBSM解析システム (2002年)



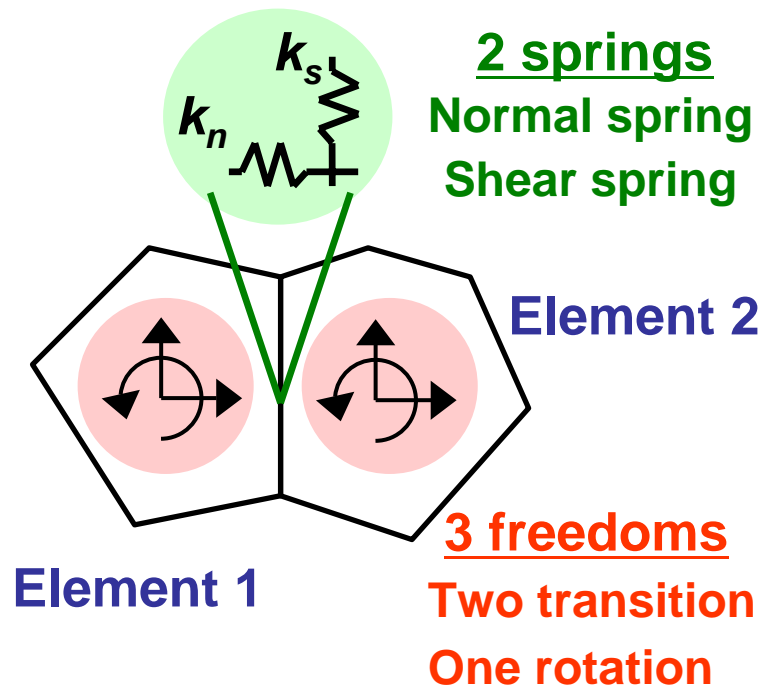
剛体ばねモデル (RBSM)

RBSM
離散解析手法

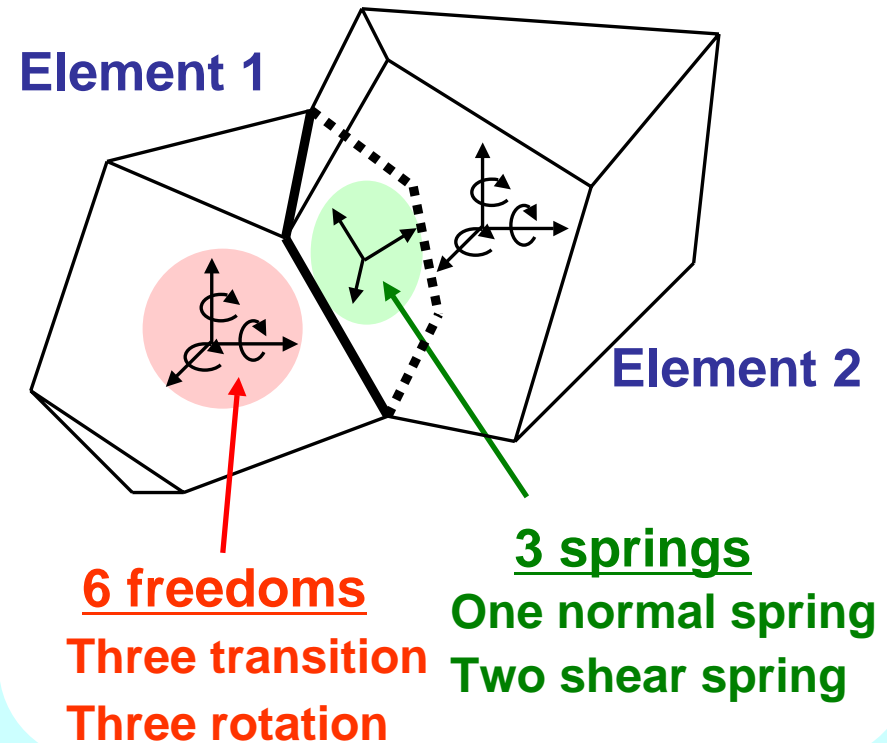
FEM
連続体解析手法



二次元力学モデル



三次元力学モデル



剛性行列の作成 (概要)

ばね剛性の計算 弾性理論 (一軸状態を仮定)

剛性行列の計算 仮想仕事の原理

要素剛性行列 → 全体剛性行列の作成



FEMと同じ非線形解析手法が適応可能

非線形解析求解法: **修正ニュートンラプソン法**を採用

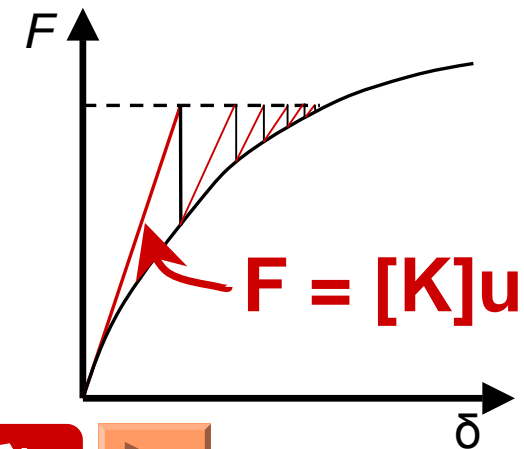
/ 剛性行列の再構築を必要としない

/ 不釣り合い力を解消するために

1ステップ内で収束計算



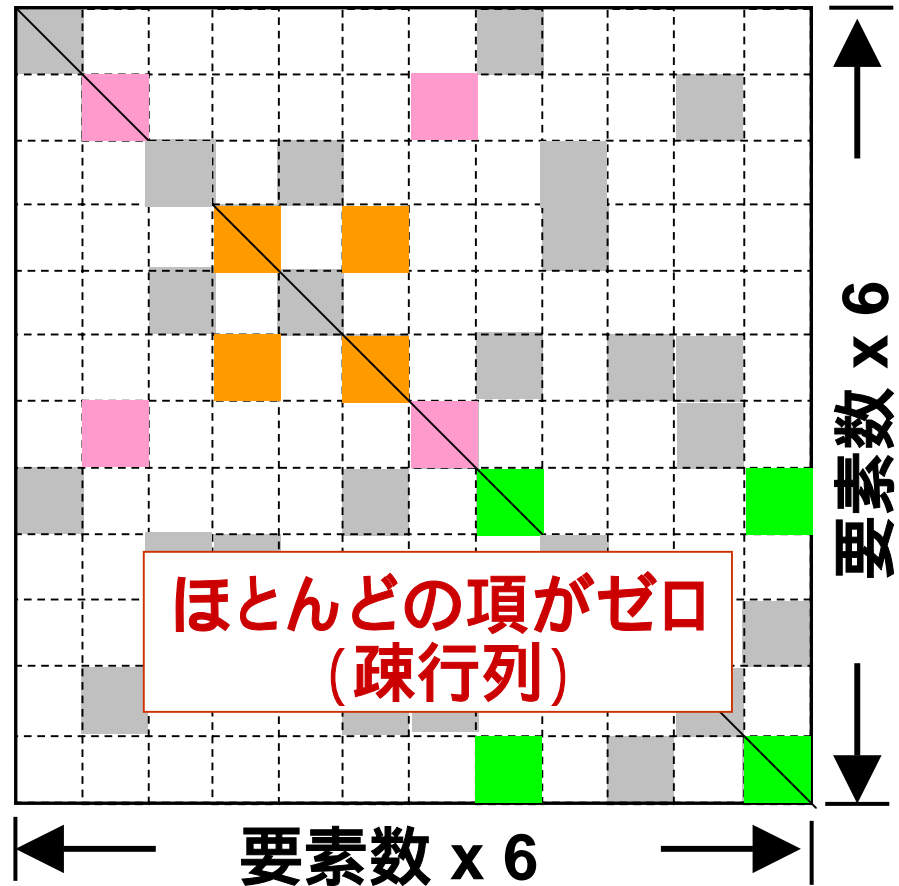
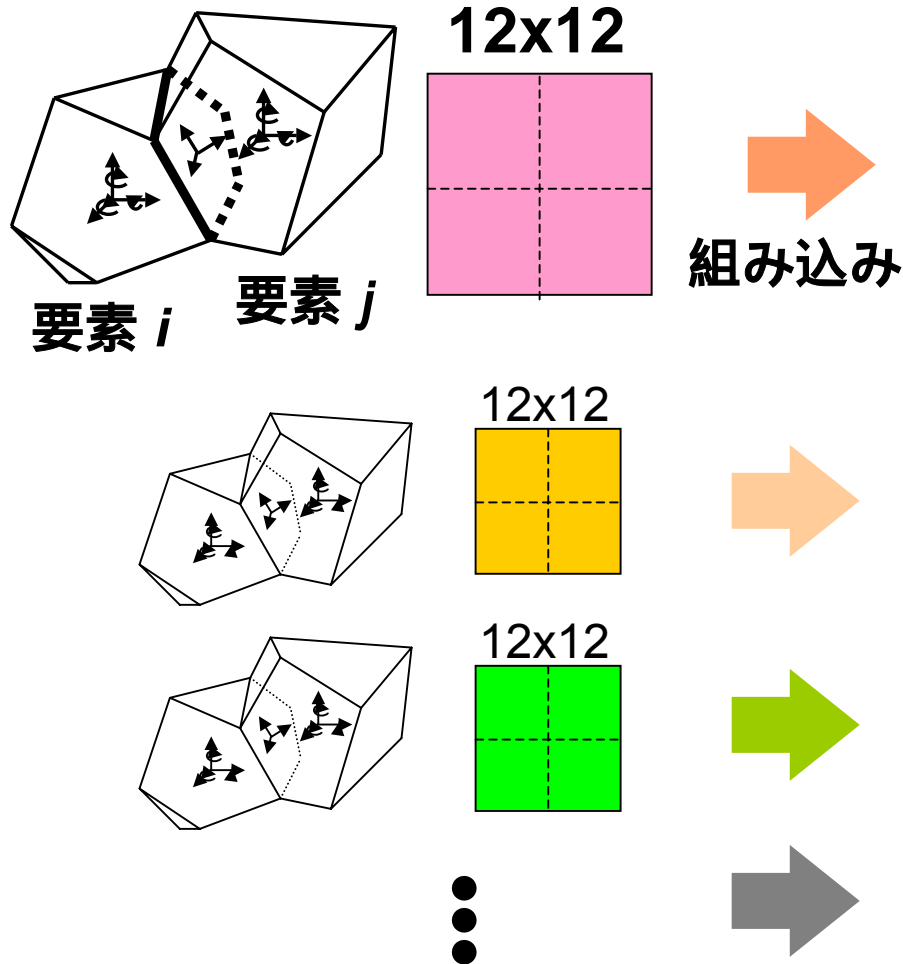
行列を解く回数が膨大 (数千 ~ 数万回/1解析)



剛性行列の作成 (図解-三次元の場合)

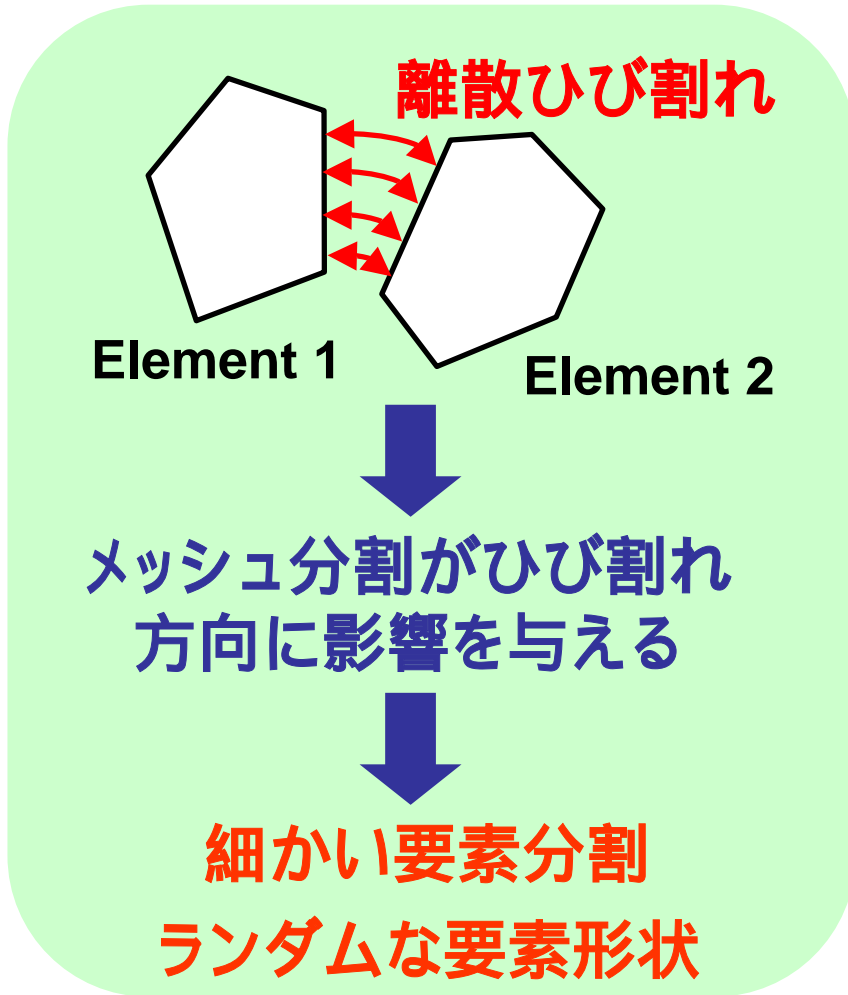
要素剛性行列

全体剛性行列 [K]

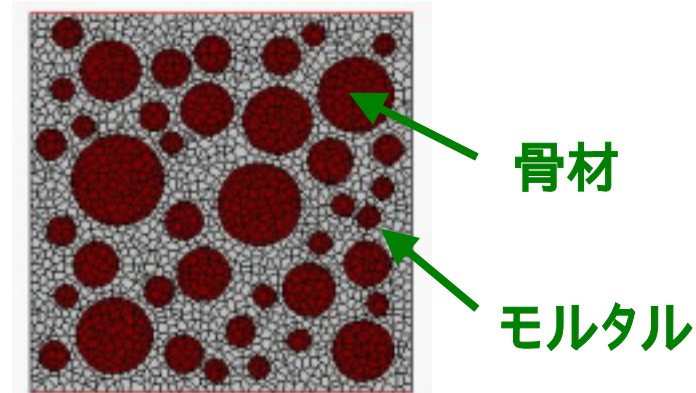


(二次元解析では 要素数 $\times 3$)

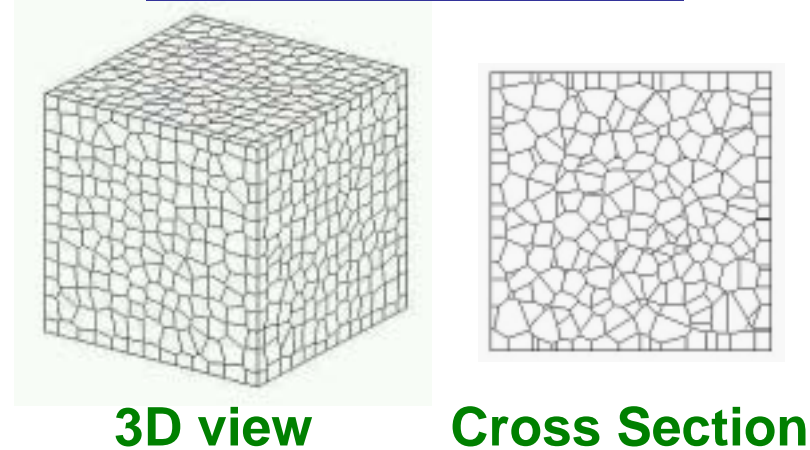
RBSM におけるメッシュ分割



二次元ポロノイ分割



三次元ポロノイ分割



メッシュ分割, 解析, アウトプットまでの統一したシステムが必要



システム開発における方針

研究室の知識

計算力学の研究室ではないので知識が少ない

FEM解析プログラムは保有している

(研究室作成の三次元非線形FEMプログラムCAMUI)

目標

RBSM非線形解析システムの構築

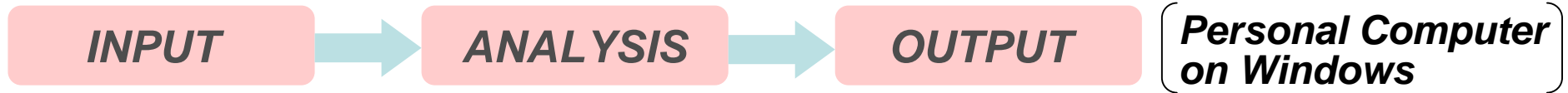
出来るだけ自動化されたシステムの構築

計画

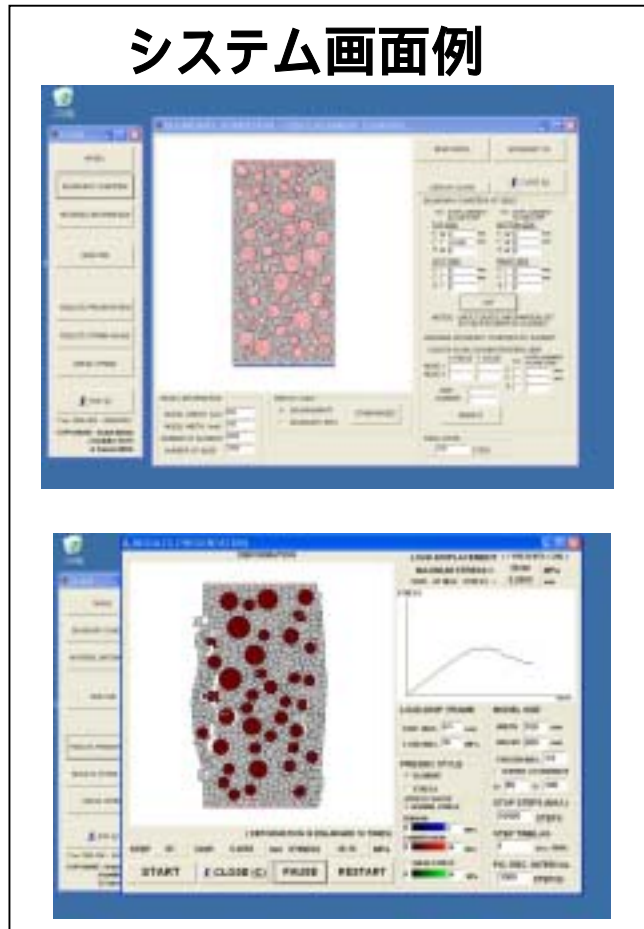
FEMプログラムのフローチャート(解析パート)を利用

C++言語による開発によるオブジェクト指向システムの開発

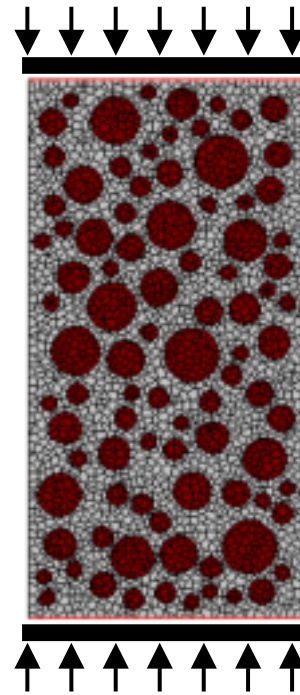
二次元解析システムの構築(2000年~)



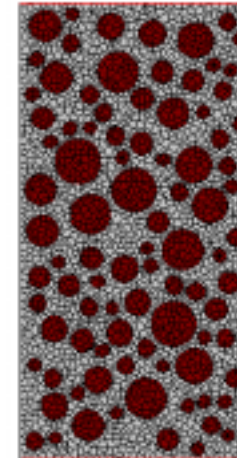
約1年で解析システムの骨格が完成 (SMSの導入はしていない)



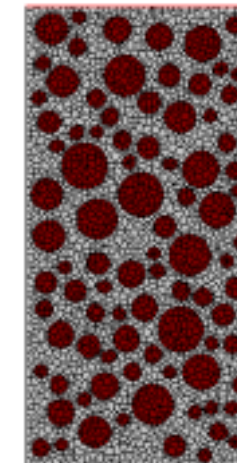
解析例



圧縮



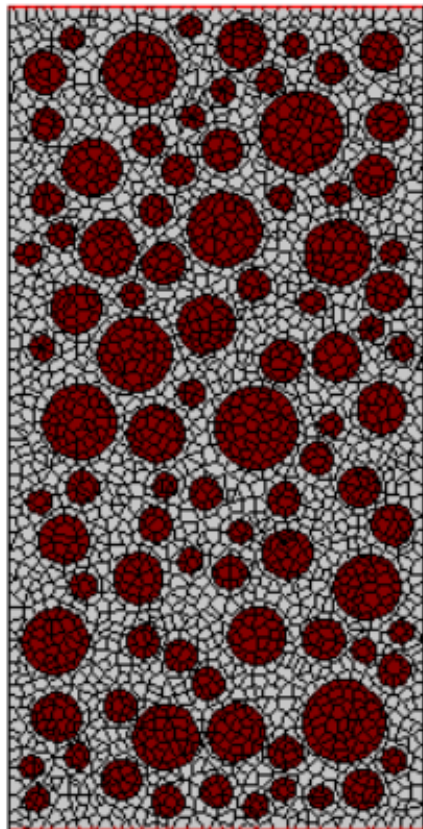
引張



二次元解析システムの計算規模

サイズ100x200 mm

3,619 要素



1要素 = 3自由度

全体剛性行列のサイズ

10,857 x 10,857

最大: 要素数 8,000
行列 24,000 x 24,000

1解析 = 数千回行列を解く
解法: 直接法 (スカイライン法利用)
(FEM解析プログラムから流用)

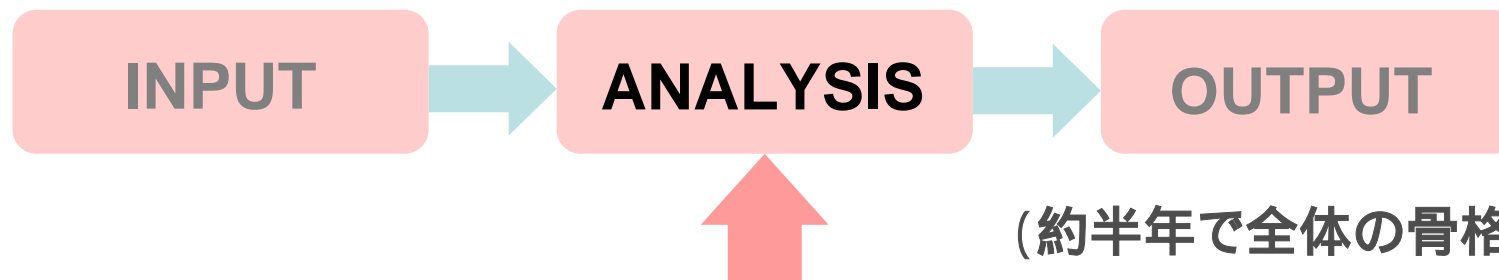
計算時間: PCで半日 ~ 数日

研究遂行への負担は許容範囲内

三次元解析システムの構築(2002年～)

基本的なフローは同じ

二次元と比べ全ての過程で計算時間が増大



計算時間の95%以上が行列を解くための時間

二次元解析システムの直接解法では...

自由度(DOF) 2倍, 3倍, ...  計算時間 4倍, 9倍, ...

三次元解析では計算時間が膨大になることが予想される!

二次元解析と三次元解析の自由度 (DOF) の違い

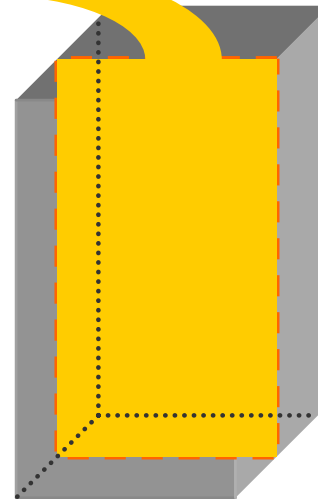
比較例

二次元モデル

ある代表面



三次元モデル



サイズ	100x200mm	100x100x200mm
要素数 ($2.5\text{mm}^{2\text{or}3}/\text{要素}$)	3,200	128,000 (40倍)
自由度	9,600	768,000 (80倍)

三次元解析

自由度80倍



計算時間

6,400倍!

直接法では
三次元解析
は不可能!

SMS導入

SMSに出会うまでに

高速行列解法に関する基礎知識が全く無かった

直接法?? 反復法??

反復法について調べてみると...

前処理付共役勾配法(PCG)

ヤコビアン共役勾配法(JCG)

不完全共役勾配法(ICCG)

SOR法

マルチグリッド法

etc.

自主作成するには相当な労力(時間)が必要

コンクリートについての研究がメイン

情報基盤センター(スーパーコンピュータ)の利用

ライブラリプログラム MATRIX/MPP (HITACHI)

疎行列用反復解法ルーチン (ICCG法)

行列を自動的に解いてくれる (行列のゼロ以外の項の情報を渡す)

サブルーチンとしてプログラムに組み込める

ソースコードは非公開

メモリ(RAM)容量が大きい(スーパーコンピュータなので)

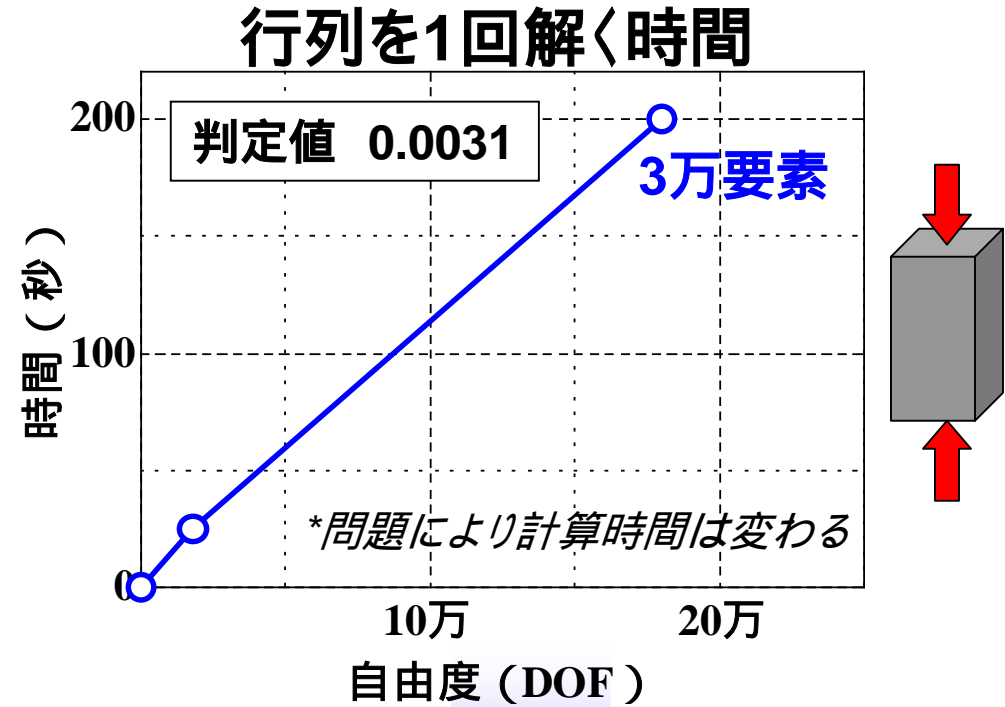
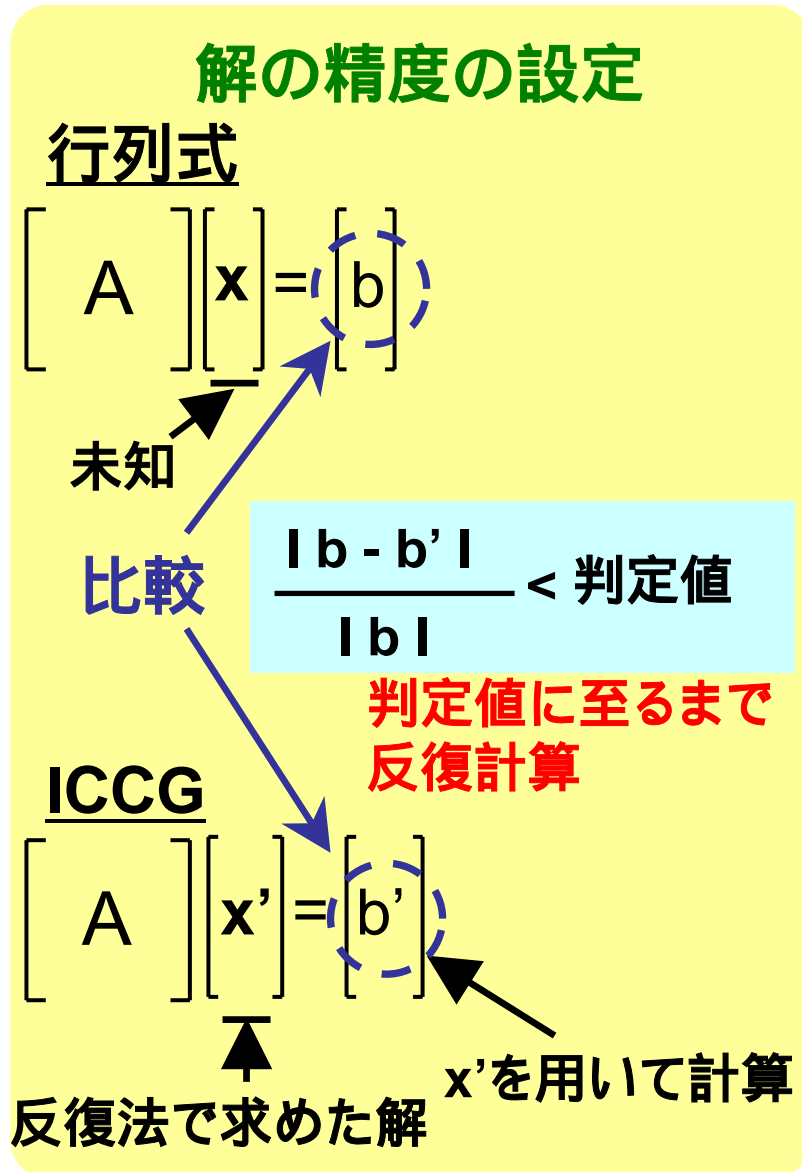
問題点 計算時間により費用がかかる(スーパーコンピュータ)

割引価格例	200万秒(556時間=23日)	10万円	0.05円/1秒
	2000万秒(5556時間=231日)	50万円	0.025円/1秒

問題点 サポートが厚くない

スムーズな組み込みのためにFORTRANに書き換えた

ICCG法(スーパーコンピュータ)による計算時間



例) 要素数 3万, 1解析1万回解くとすると...

計算時間: 約23日
時間 + 費用の負担大!

SMS-AMGの導入へ

Super Matrix Solver - AMG

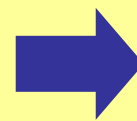
代数マルチグリッド法(AMG)による反復解法ルーチン

行列を自動的に解いてくれる (行列のゼロ以外の項の情報を渡す)

サブルーチンとしてプログラムに組み込める

ソースコードは非公開

MATRIX/MPPと同コンセプト
の導入方法



移行が難しくなかった
SMS-AMG導入に成功

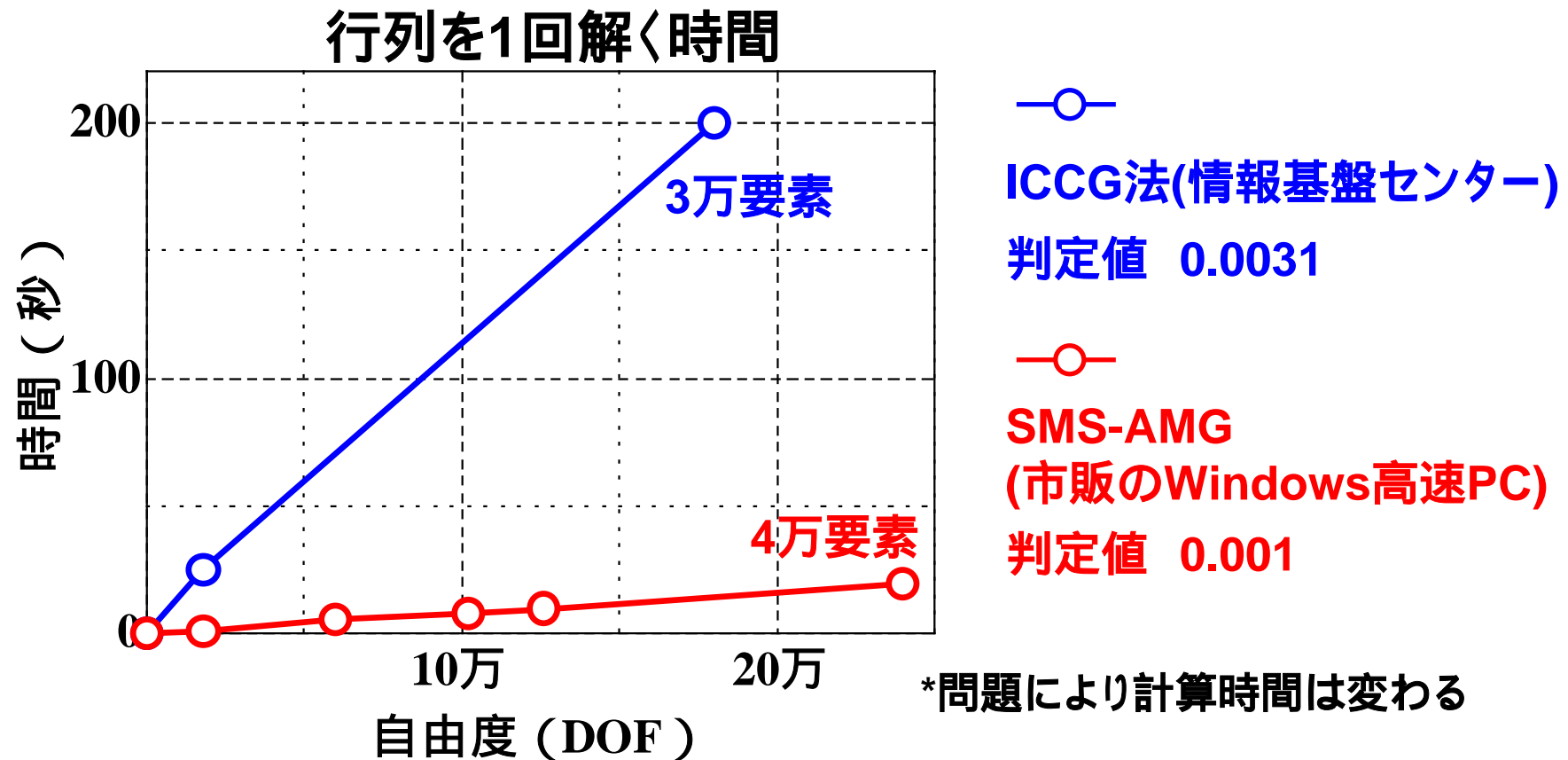
その他

パーソナルコンピュータで計算可能

費用: 購入代金(初期) + テクニカルサポート料(年間)

各種パラメータ設定で高速化の可能性がある

SMS-AMGの計算時間



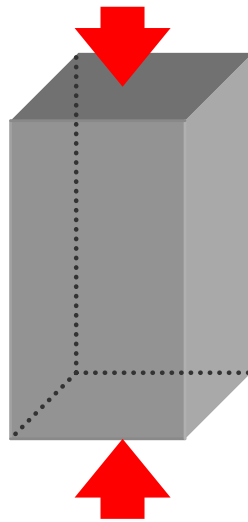
SMS-AMGの方がかなり早く行列を解くことが可能

➡ 本格的に三次元解析を始める

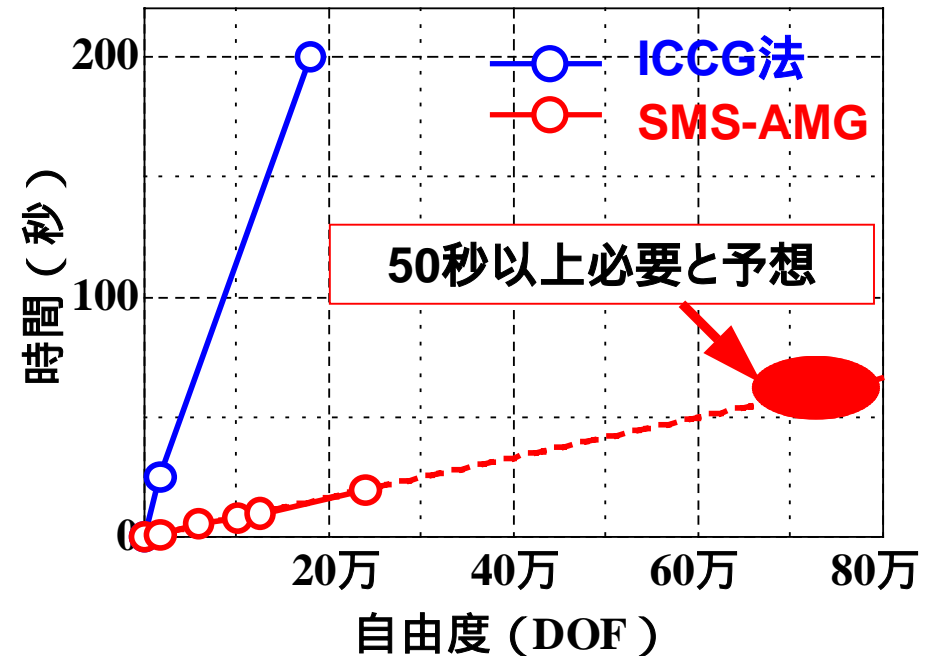
CPUから見た解析要素数

理想のサイズ 100x100x200mm

要素数 128,000
($2.5\text{mm}^{2\text{or}3}/\text{要素}$)
自由度 768,000



行列を1回解く時間

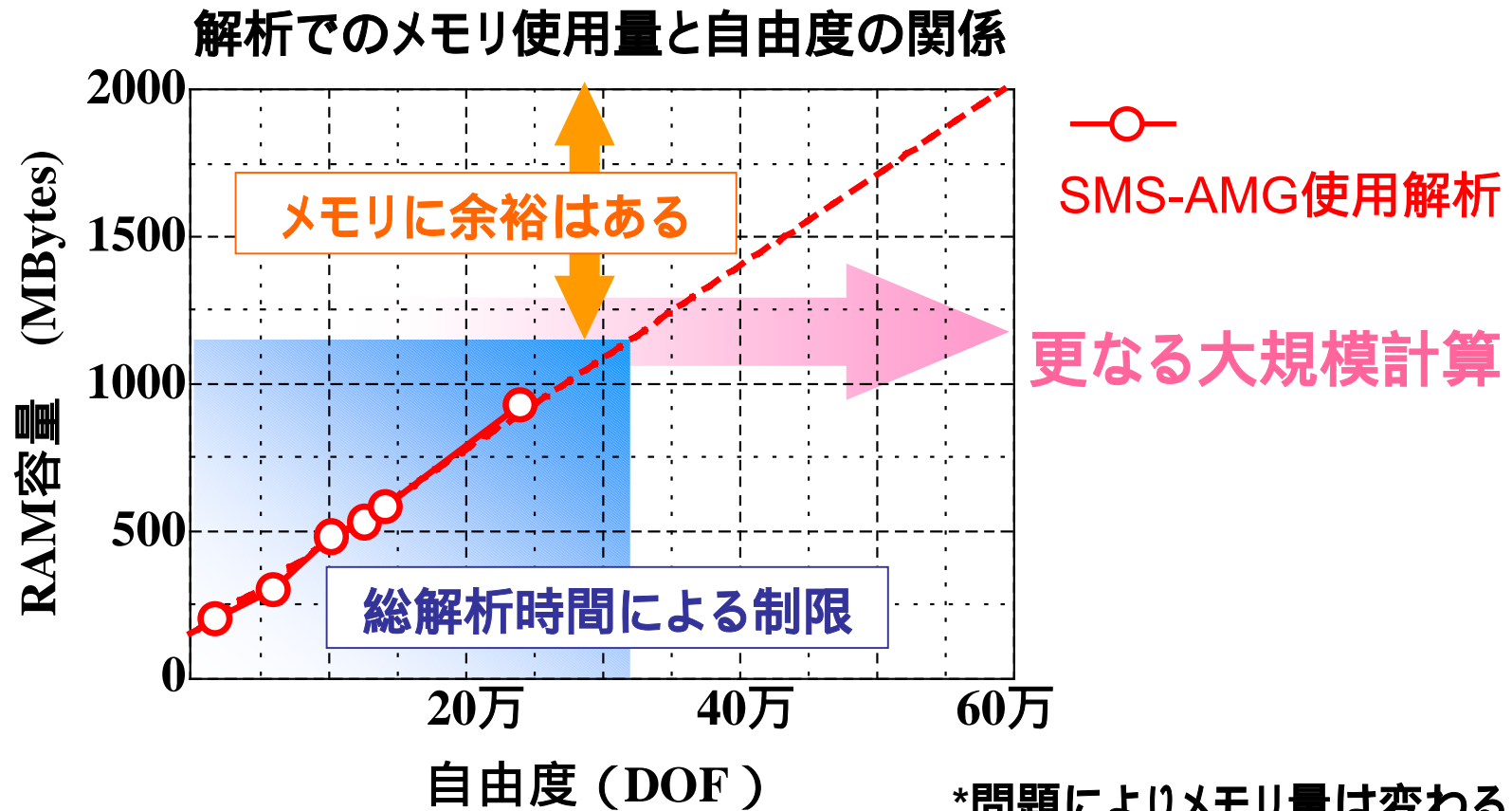


依然, 計算時間が膨大

1解析を1週間程度で終了させたい

➡ 対象供試体を小さくした (140x70x70mm, 約4万要素)

メモリ容量(RAM)から見た解析要素数



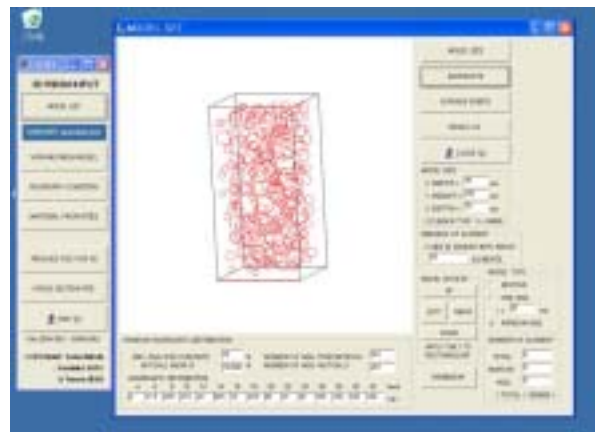
更なる大規模計算はPCの能力としては実行可能
SMS-AMG またはCPUの性能向上が待たれる

三次元非線形解析システムの完成

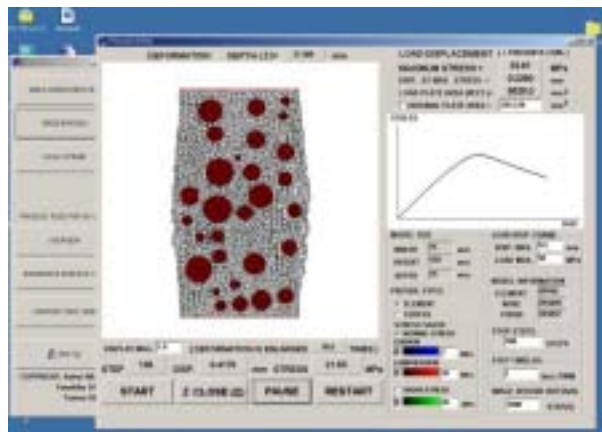


システム画面例

INPUT

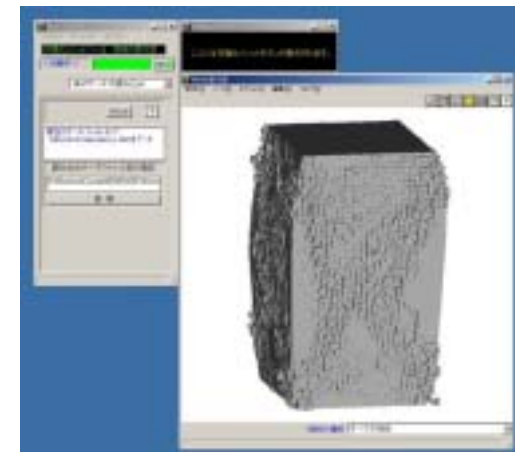


OUTPUT



システム画面例

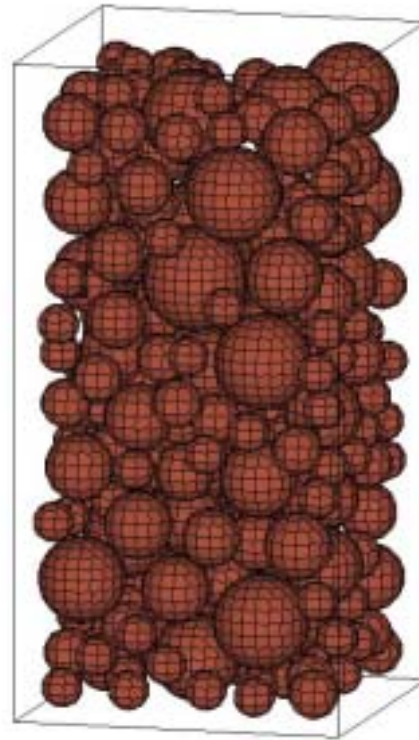
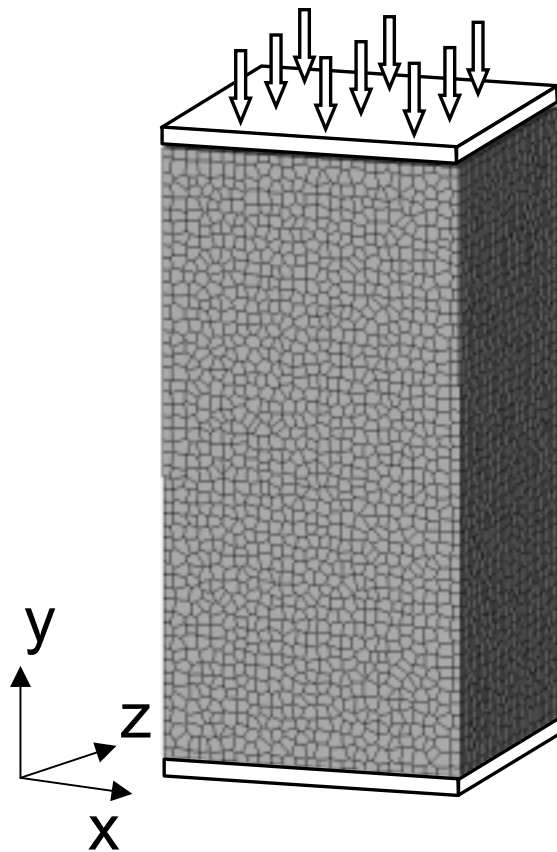
Micro AVS



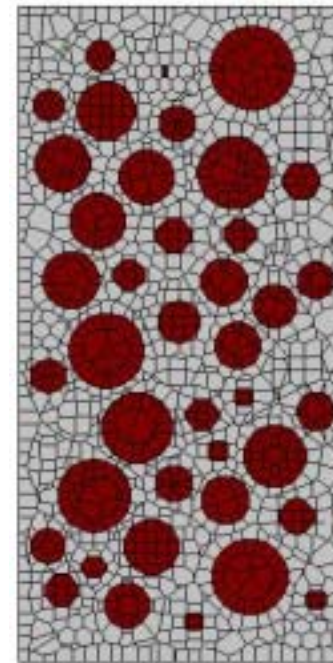
〔Personal Computer on Windows〕

三次元解析結果例

解析モデル



内部骨材



断面($z=35\text{mm}$)

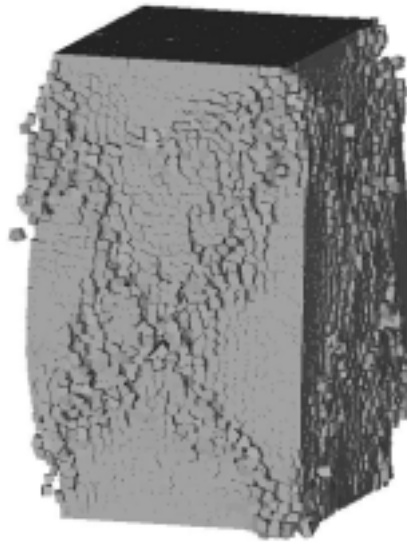
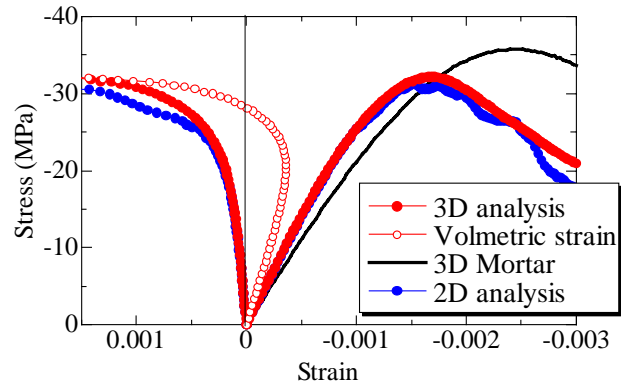
モデルサイズ
70x70x140mm

要素数
39,162

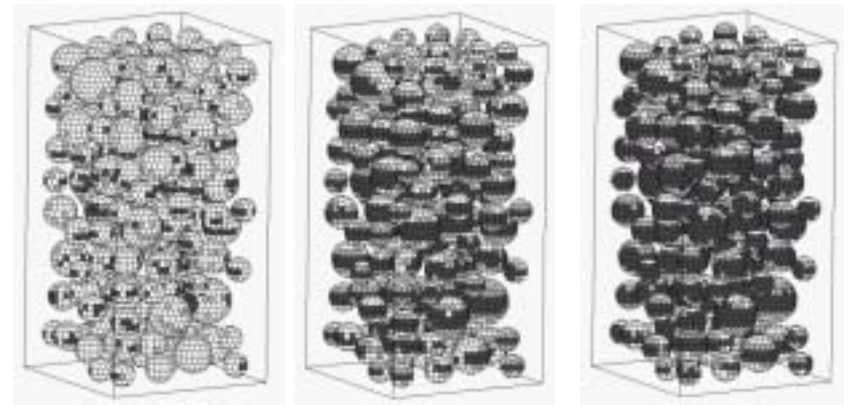
自由度
234,972

圧縮試験と引張試験 (解析時間: 各約一週間)

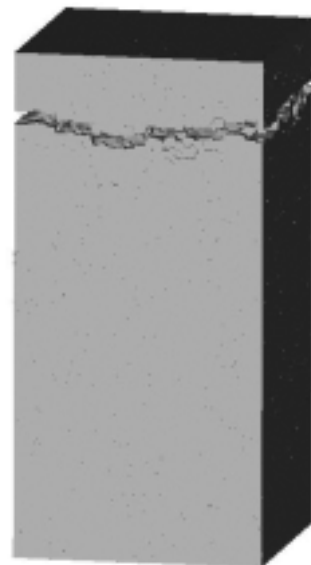
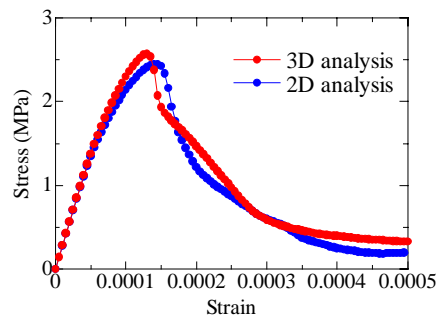
圧縮試験



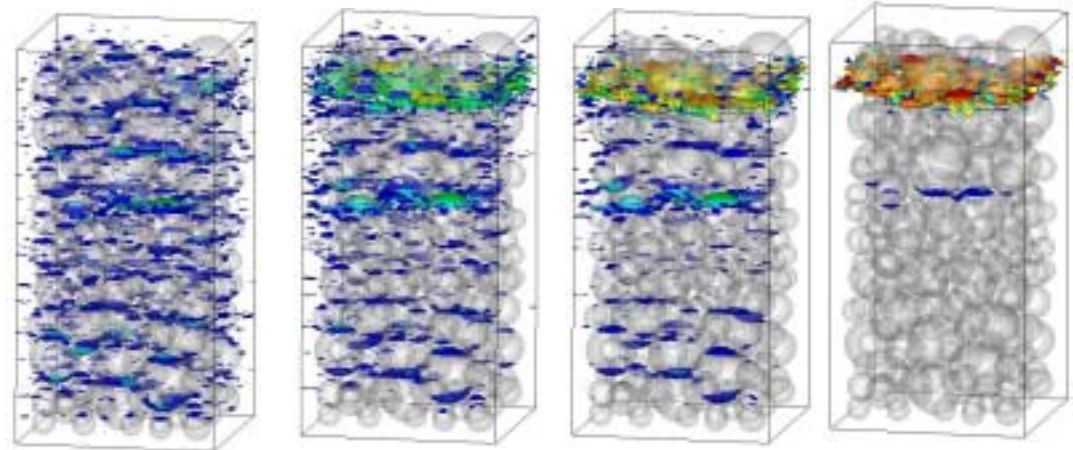
界面ひび割れの進展



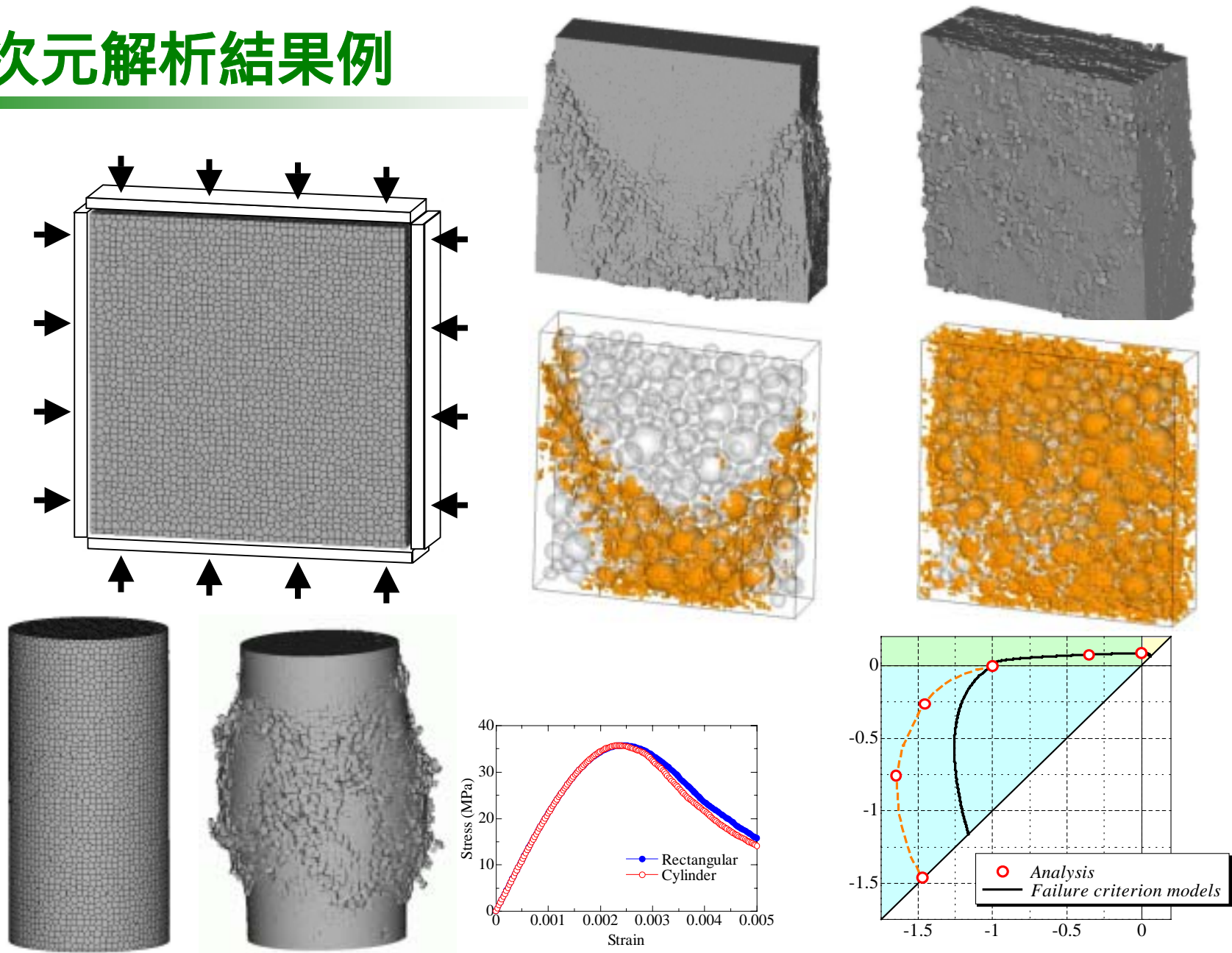
引張試験



ひび割れの進展 (局所化現象)



三次元解析結果例



強度，ひび割れ進展，内部応力状態などを研究

纏めと今後に向けて

まとめ

コンクリートのメソスケール解析システムを構築を目指した

1. メジャーではない離散解析手法 2. ランダムな要素形状 etc.

システムの自主開発

INPUT

ANALYSIS

OUTPUT

少ない知識の中で膨大な作業(特に三次元)

三次元解析での行列解法は**解析時間(=研究成果)**を支配

SMSの導入

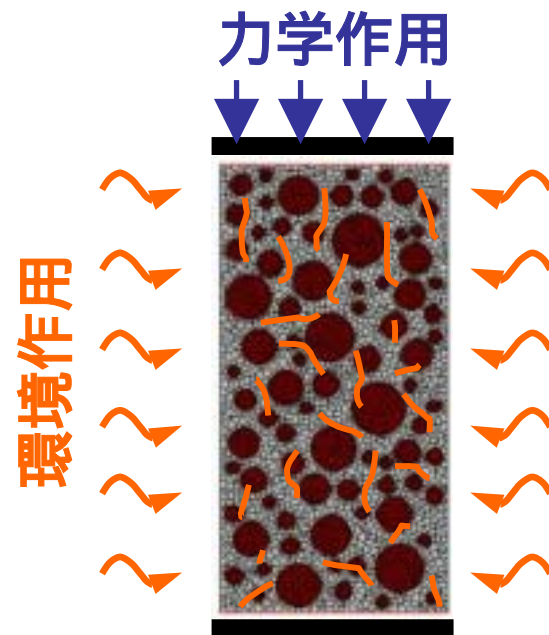
専門知識が少なくても容易に導入可能(ユーザーとして使用)

解析時間の減少で研究が大きく進捗した

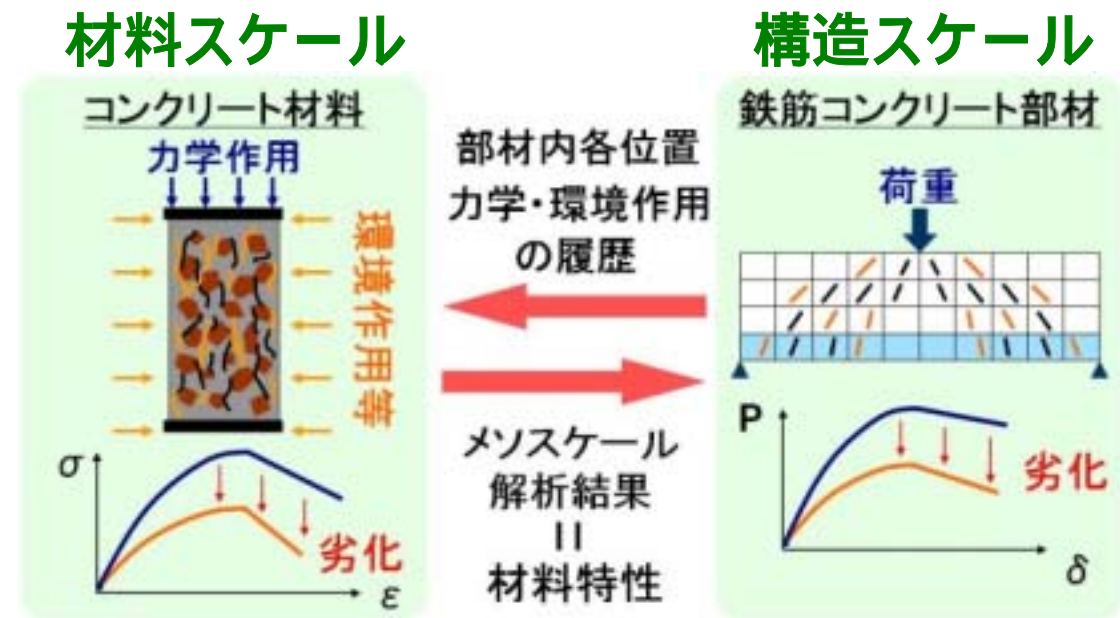
今後に向けて(将来の開発目標)

1. 環境作用の導入

(時間軸の追加)



2. マクロスケールとのリンク



鉄筋コンクリート構造物の耐久性予測が可能に

更に高速で容易に導入できるシステムを利用できれば、
研究が飛躍的に進捗すると期待している

Thank you very much for your kind attention!

Kohei NAGAI
kohei.nagai@ibk.baug.ethz.ch

