

数学・数理科学の知見が必要な 地震・防災研究課題

堀宗朗

所属：東京大学地震研究所／社会基盤学専攻
専門：計算地震工学・固体応用力学

地震・防災研究の基礎学問

- 理学：地球科学・地球物理学・地震学
観測主体
線形弾性体の動的解析
- 工学：耐震工学
実験主体
多質点系モデルの非線形解析
- 工学：防災工学
社会科学との接点

課題の整理

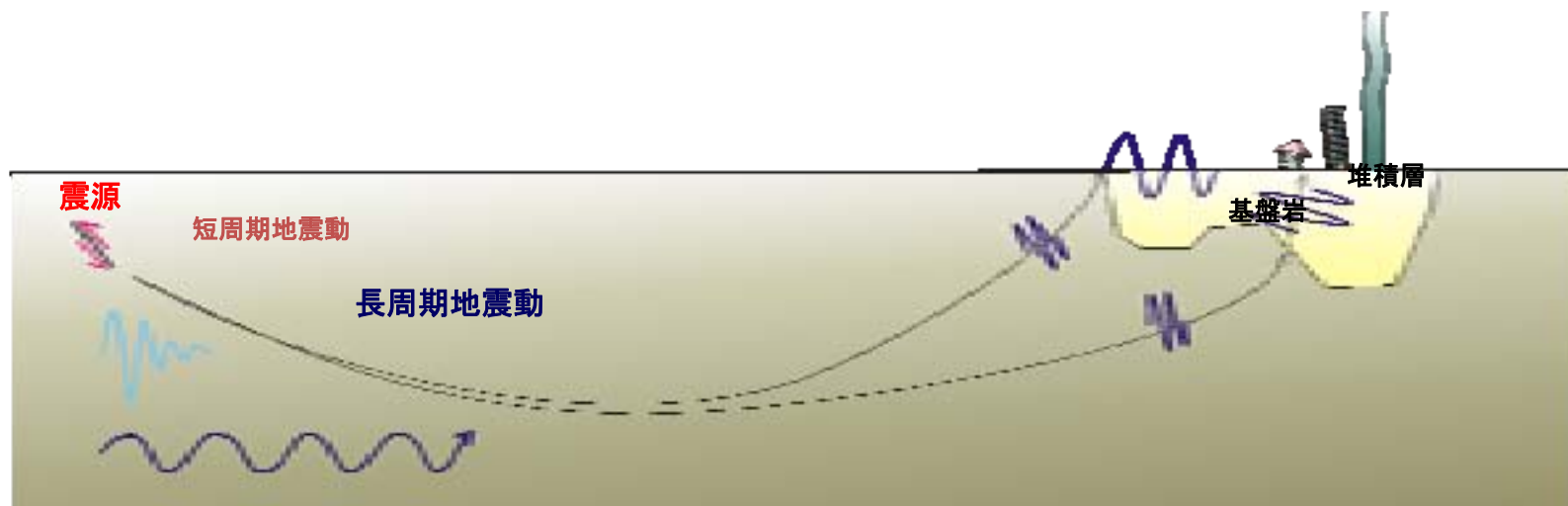
	地震(理学)	防災(工学)
顕在化した課題	地震・津波の予測 -数値解析手法 -観測との融合	被害の予測 -数値解析手法
潜在的課題	連続ネットワーク観測のデータ解析 -地震・地殻変動 -重力・電磁気	維持管理と地震防災 -更新と耐震補強 -健全性評価 復旧の最適化 -ライフライン

数学・数理科学の知見が必要と思われる地震・防災研究

- 顕在化している課題は共通認識
- 潜在的課題は必ずしも認識されているわけではない

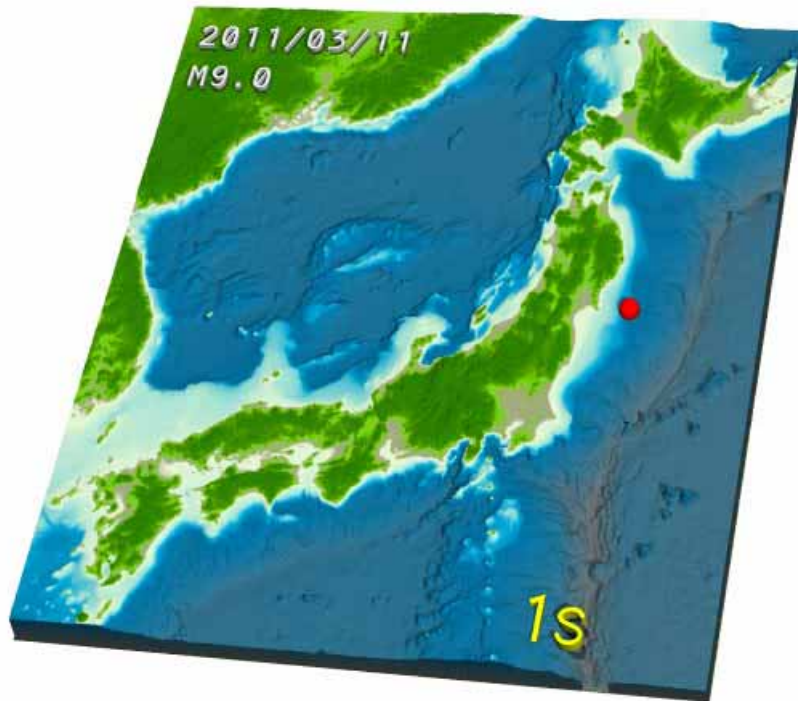
地震・津波の予測

- 物理 線形波動方程式・Navier-Stokes式
- 数理 逆問題：破壊過程・構造同定
確率：不確からしさの取扱い
- 計算 モデルの高分解能化
解法的高速化



地震と津波の観測とシミュレーション

観測



シミュレーション



数理的課題

- データ同化 (逆問題としての構造・初期値の推定)
- 「京」上での高速計算

被害の予測：構造物

- 物理 非線形波動方程式
- 数理 非線形方程式の解の安定・不安定
 一挙動のばらつき
- 計算 モデルの精緻化
 解法的高速化・高精度化

実験：E-Defense（世界最大の実験装置）

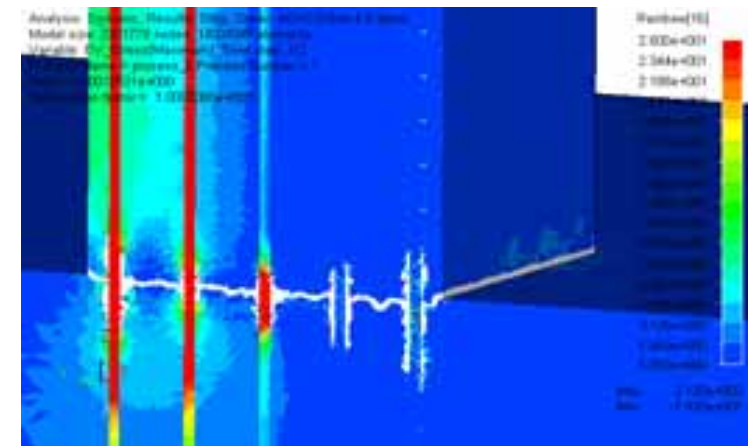
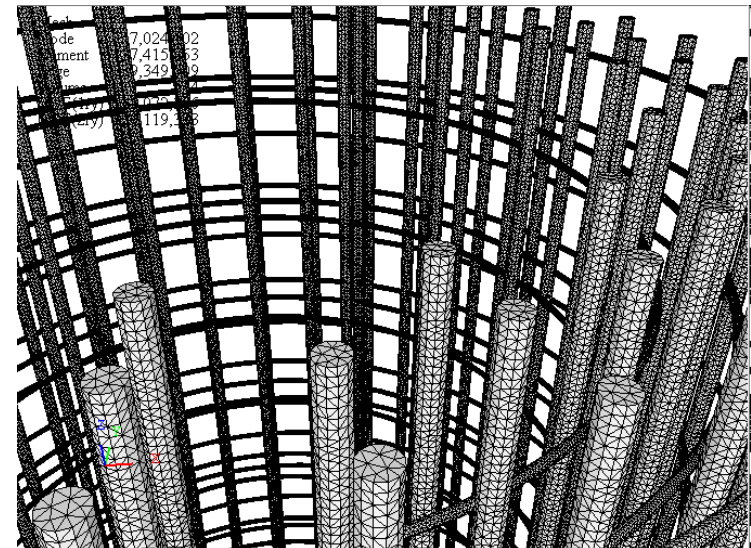
計算：「京」計算機

実験と計算

実験



シミュレーション

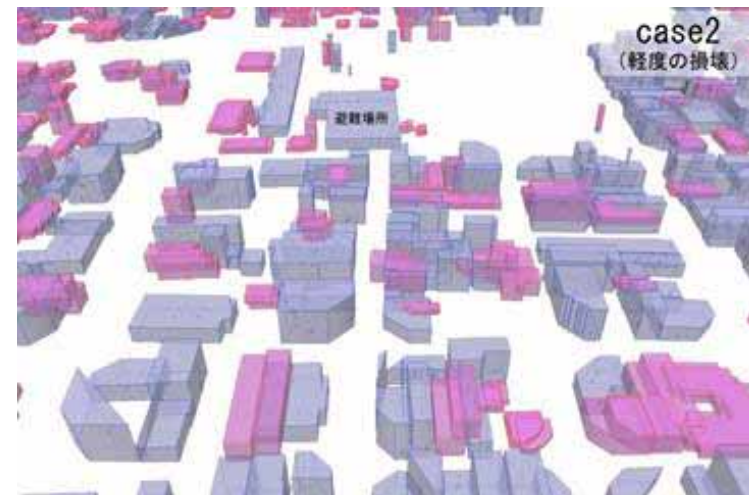
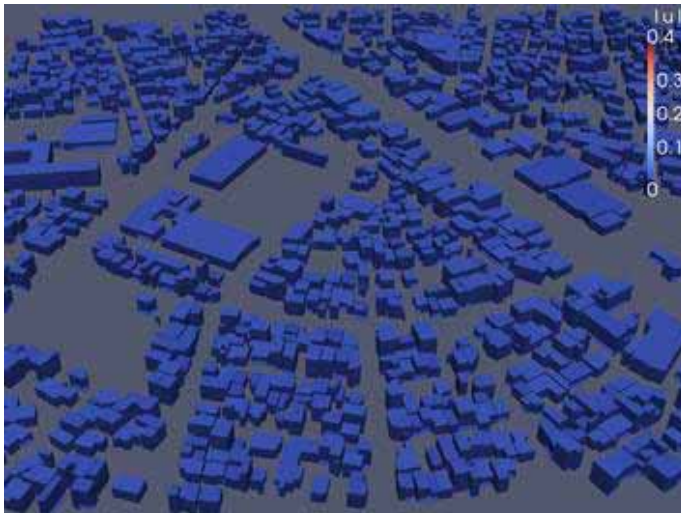


数理的課題

- 不連続に係数が変化する非線形偏微分方程式
- 不連続な解, 特異性を持つ解

被害の予測：社会

- 物理 社会構成要素の相互依存性
- 数理 被害推定の高度化
 復旧戦略最適化
- 計算 統計解析
 マルチエージェントシミュレーション



連続ネットワーク観測

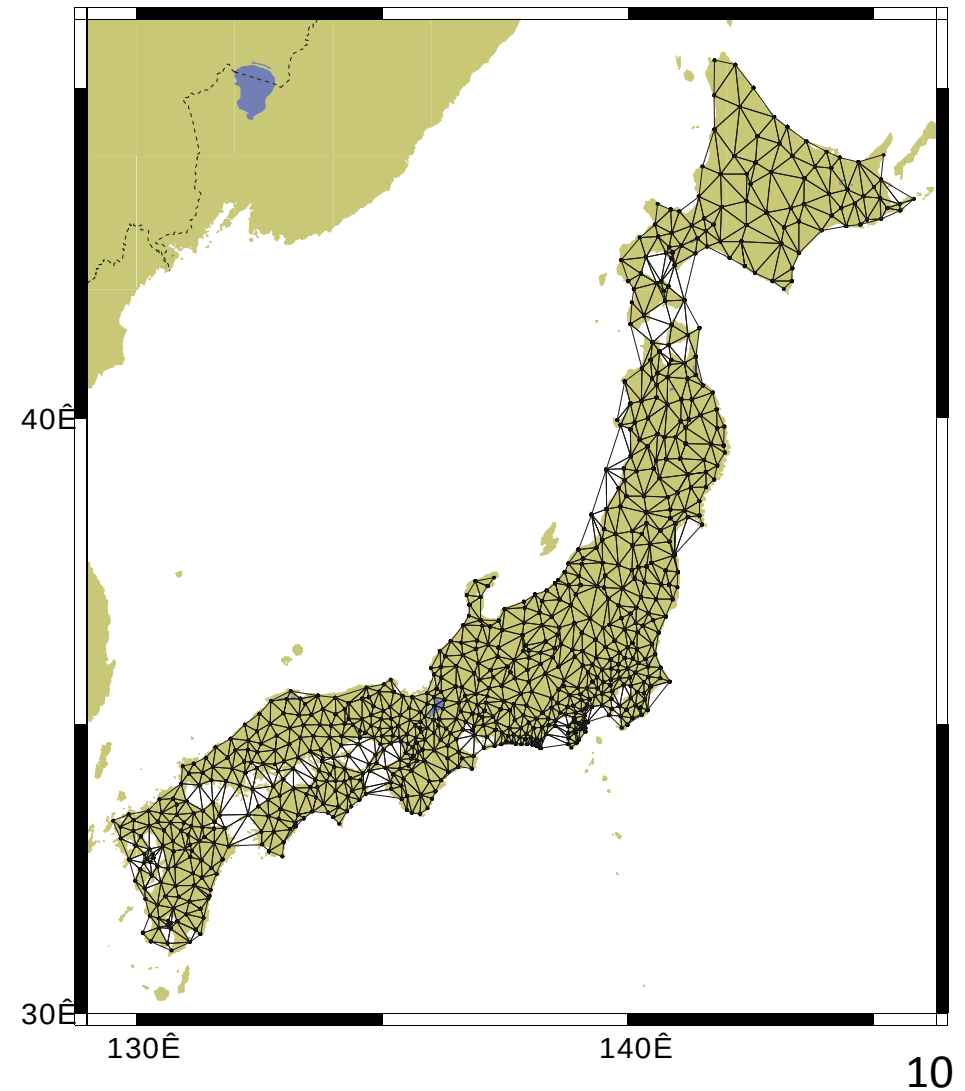
- 地震波 NIED: Hi-net, F-net, K-NET/KiK-net
 - 全国展開, 各々100~1000の観測点
 - 様々な帯域, 常時計測, ネットワーク化
- 地殻変動 国土地理院: GEONET
 - 全国展開, 1000程度の観測点
 - 常時計測, ネットワーク化
- その他
 - 必ずしも連続ではなく, 全国展開はされていない
 - 海洋観測, 重力, 電磁気, 衛星観測

K-NETとGEONET

K-NET



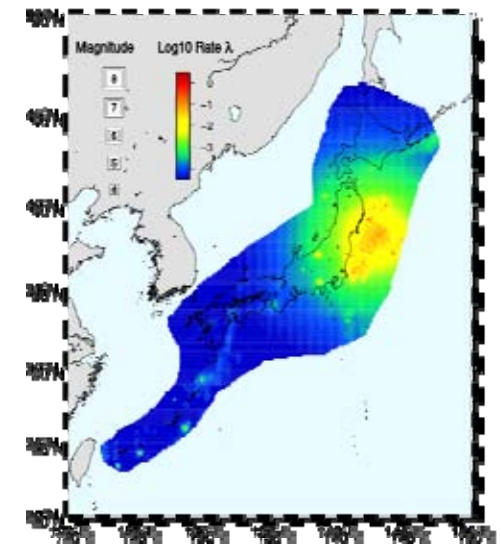
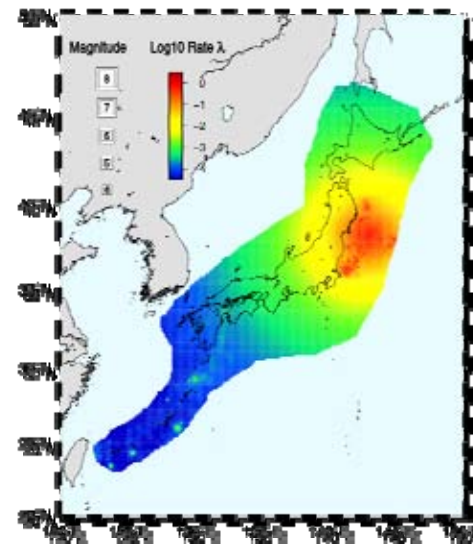
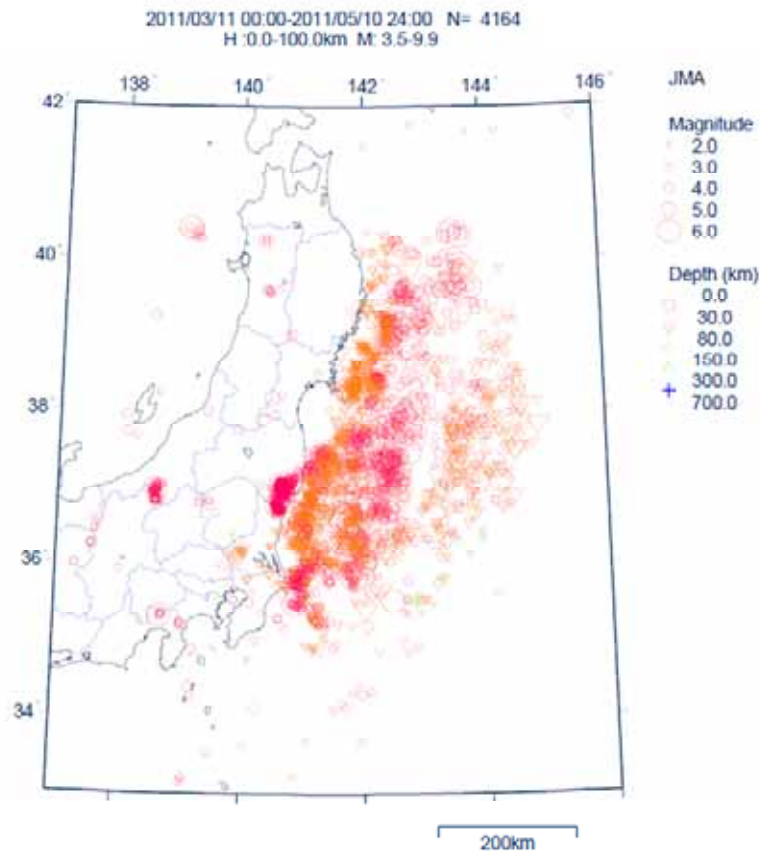
GEONET



地震短期予測システム

ETASモデル

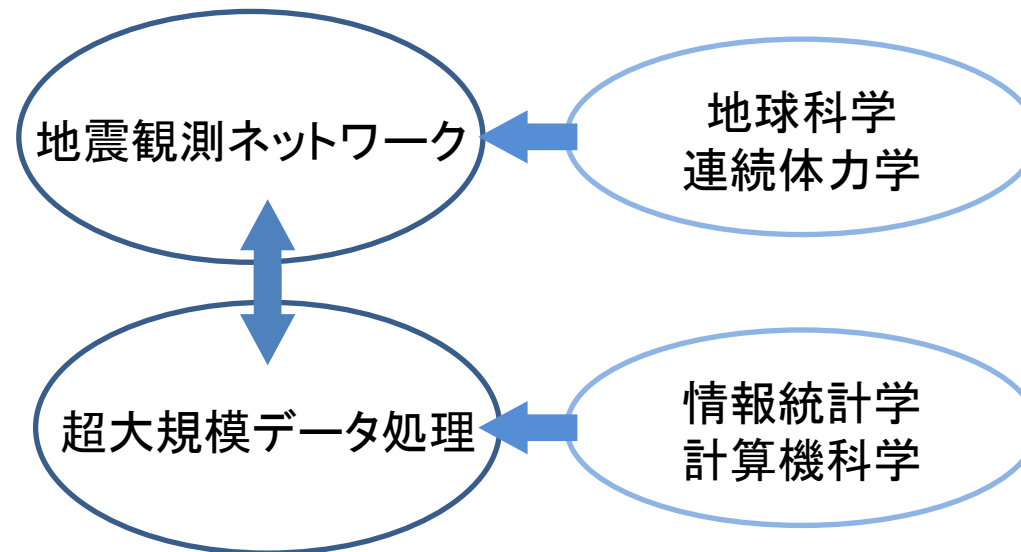
Epidemic Type Aftershock Sequence



観測時系列データを、位置・震度等の震源情報に集約

一日予測の例. 図は一日以内に $M \geq 4$ の地震がどこで何個起きるか示す

次世代型地震波形データ処理



地殻構造に対応した周波数領域グリーン関数のテイラー展開係数の同定

構造同定の手順

1. 構造に対応した周波数域グリーン関数
2. 周波数域グリーン関数のテイラー展開
3. 展開係数の同定

目標

- 定常観測データの連続処理を利用した、継続的列島構造同定
- 次世代型地震波形データ処理の構築

グリーン関数の係数同定

観測点
 x^1

周波数領域グリーン関数 $G(x, \omega)$ 地殻構造で決定

$$u(x^\alpha, \omega) = G(x^\alpha - y, \omega) \cdot f(y, \omega)$$

震源
 y

観測データの差: $G(x, \omega)$ のテイラー展開による線形近似

x^2

x^3

$$u(x^\alpha, \omega) - u(x^\beta, \omega) = A(\omega) \cdot (x^\alpha - x^\beta) \cdot f(y, \omega) + \dots$$

複数の観測点のデータに対し、適当な周波数範囲において、ある確度で係数 $A(\omega)$ が決定できる場合、地震発生と判定

- 問題点

周波数範囲, フーリエ変換のウィンドウ, G の形式, ソース f が不定

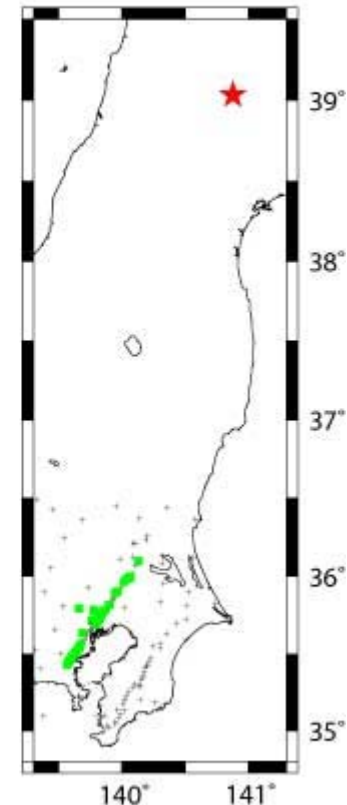
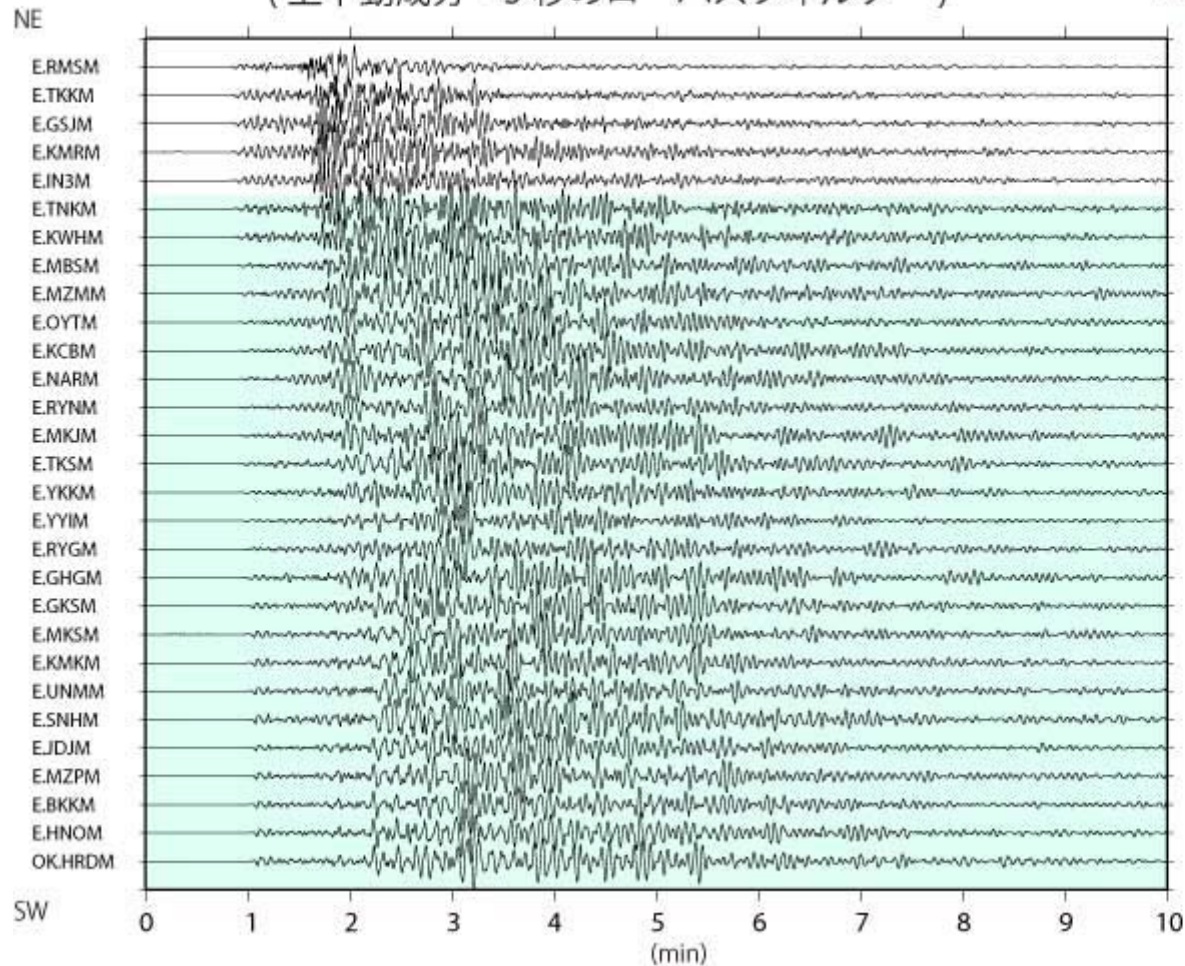
- 効果

地震発生 of 客観的判定, 長期観測による地殻構造の同定

観測地震波: シグナル

岩手・宮城内陸地震の MeSO-net による記録
(上下動成分・5 秒のローパスフィルター)

MeSO-net

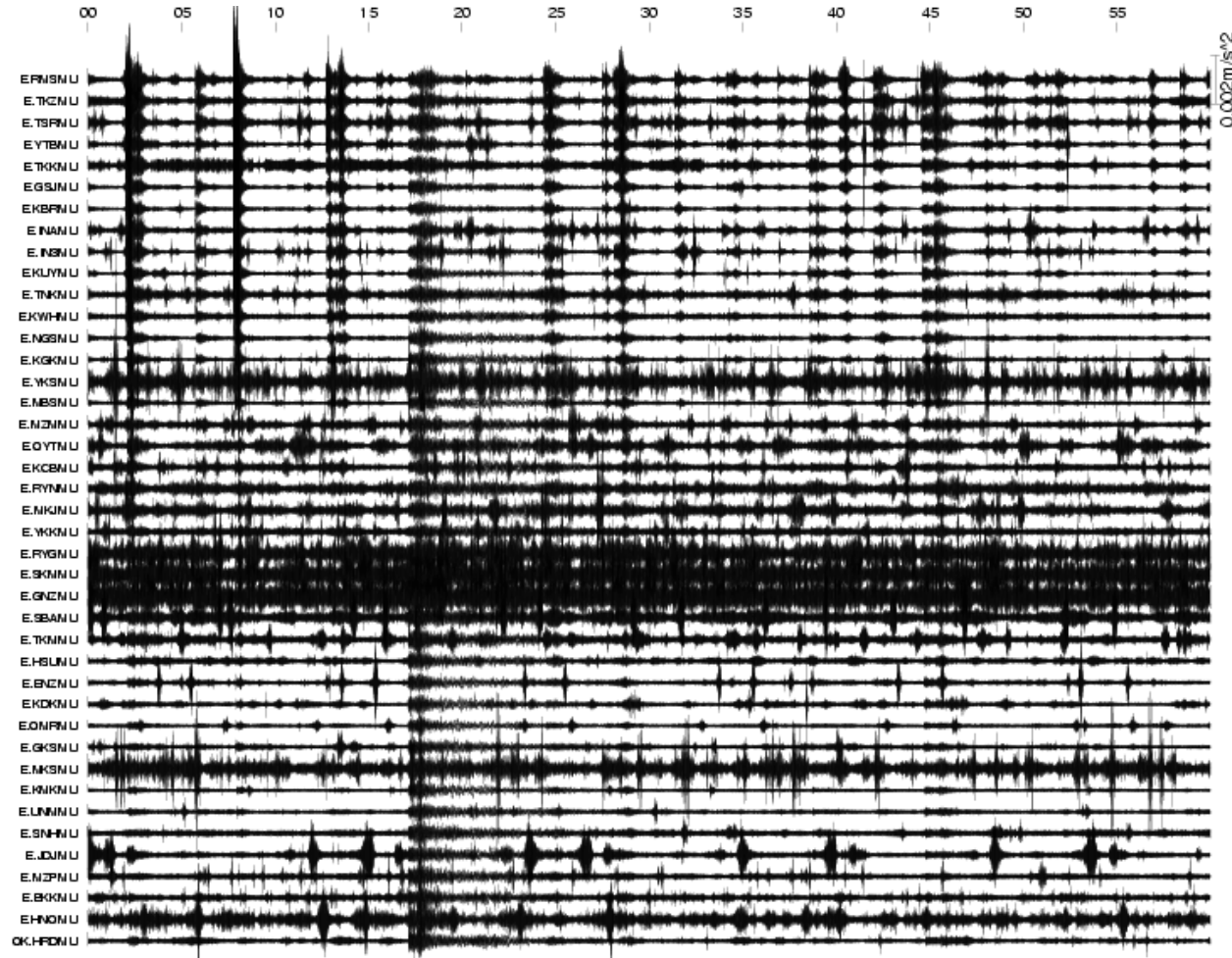


東京大学地震研究所

地震が発生した場合の、明瞭なシグナルとして認識できるデータ

震源(赤星)が分析可能: 緑点は観測器

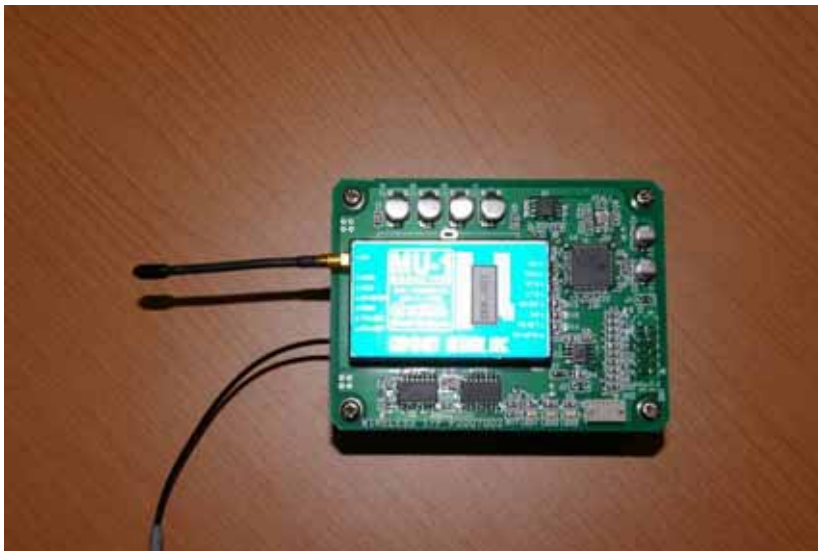
観測地震波：ノイズ+シグナル



常時の、ノイズとシグナルが混在したデータ(従来の手法ではシグナルの分離が困難であり、震源の解析や予測は不可能)

維持管理と地震防災

- 老朽化した構造物の更新と耐震補強
- センサネットワークによる健全性評価
 - MEMSセンサとセンサネットワーク



無線制御ボード
データ通信＋時刻同期確保

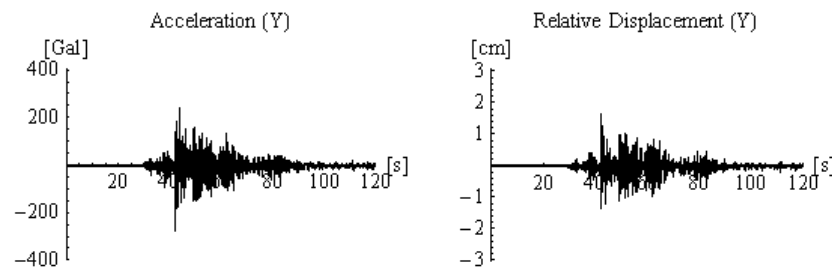
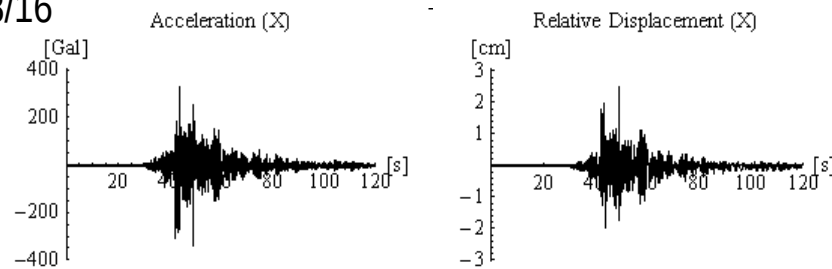


デジタルデータ蓄積ボード
3軸, 800SPS, データ長約2分

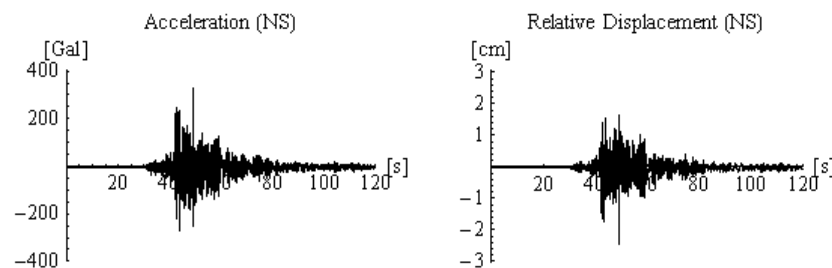
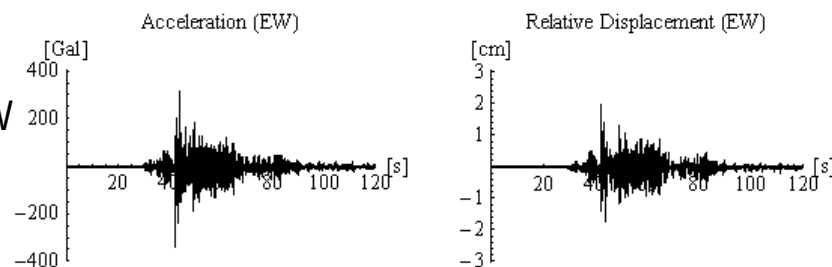
仙台市営アパート：波形

2005/8/16

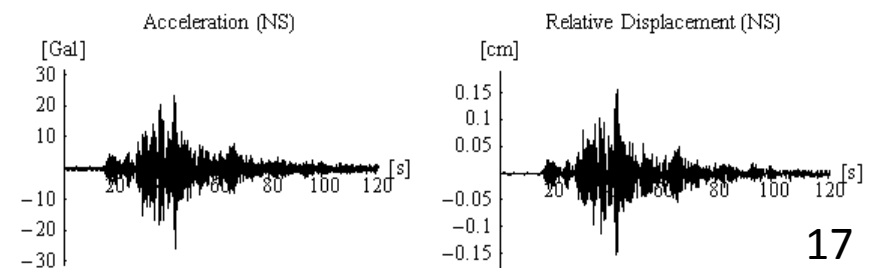
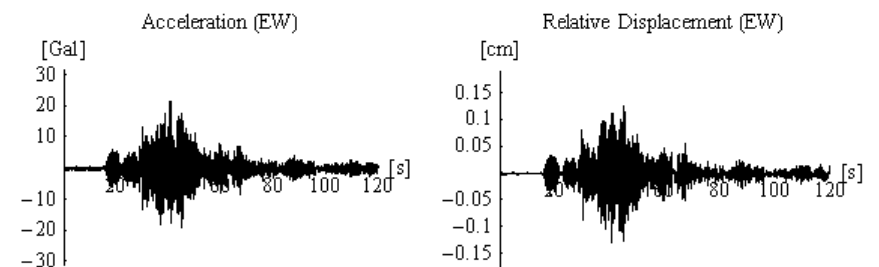
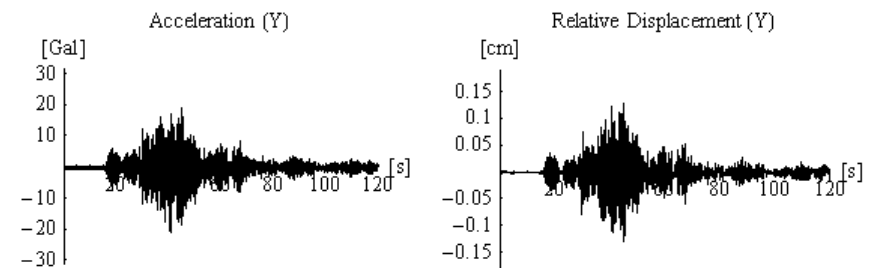
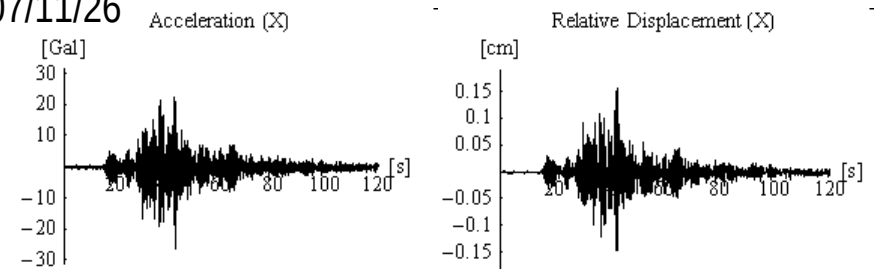
主軸



NS,EW

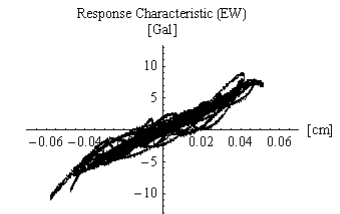
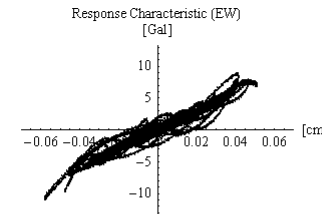
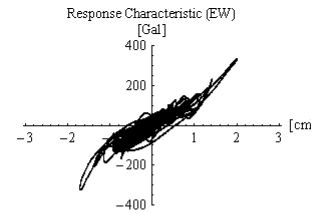
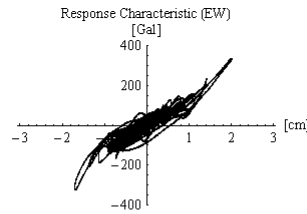


2007/11/26

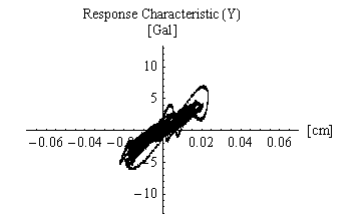
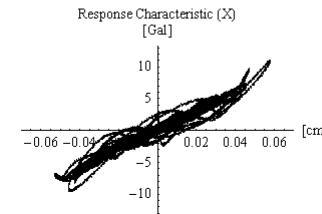
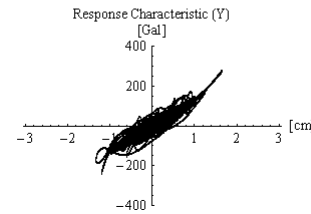
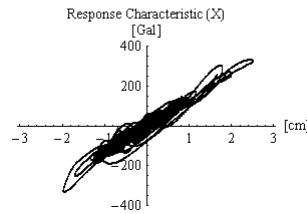


仙台市営アパート: 復元力特性

主軸



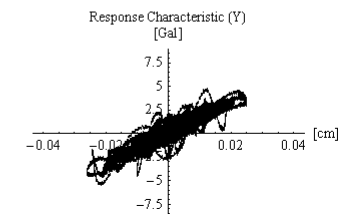
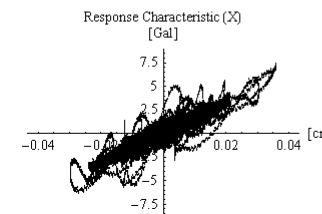
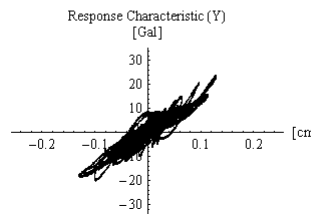
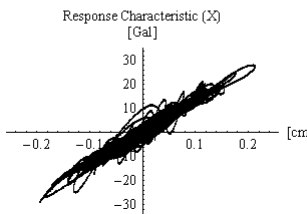
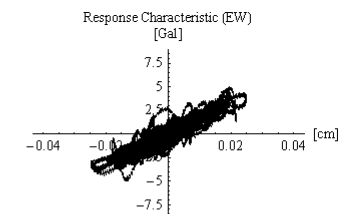
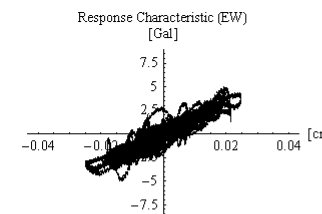
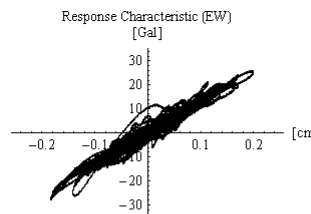
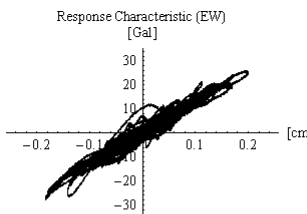
NS,EW



400[Gal]程度

10[Gal]程度

NS,EW

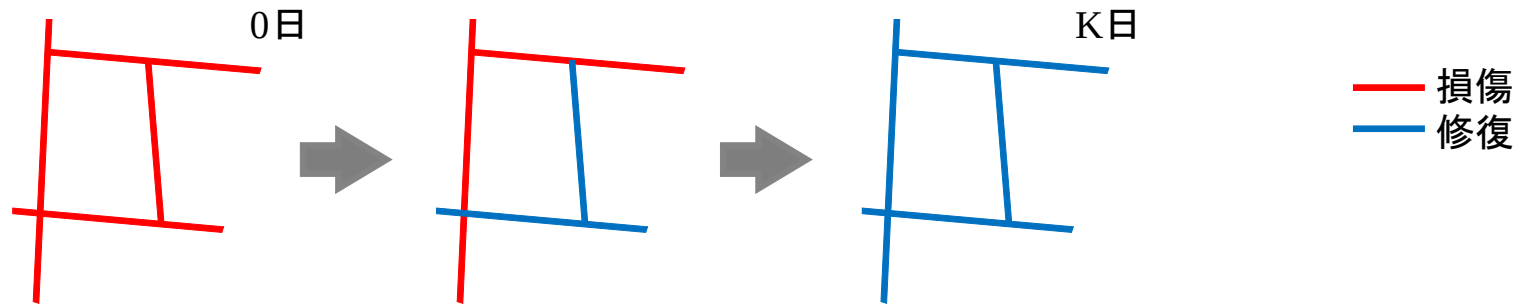


30[Gal]程度

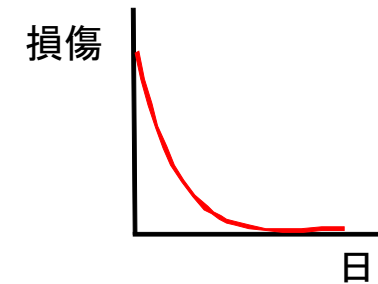
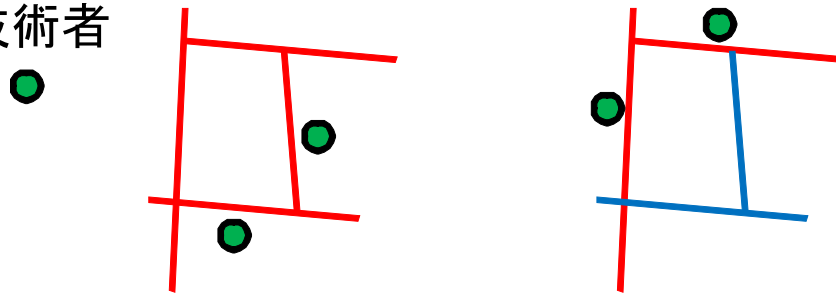
10[Gal]未満

ライフラインの復旧

ライフライン

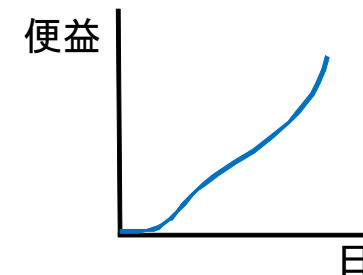
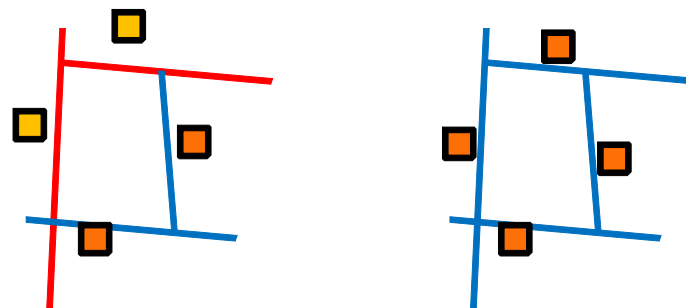


技術者



利用者

■ 使用
■ 未使用



離散化された最適問題

資源配分問題

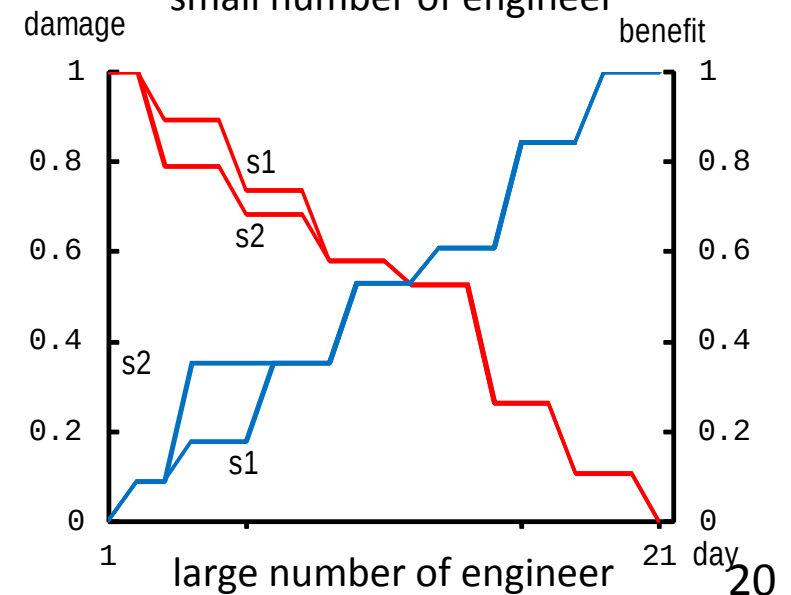
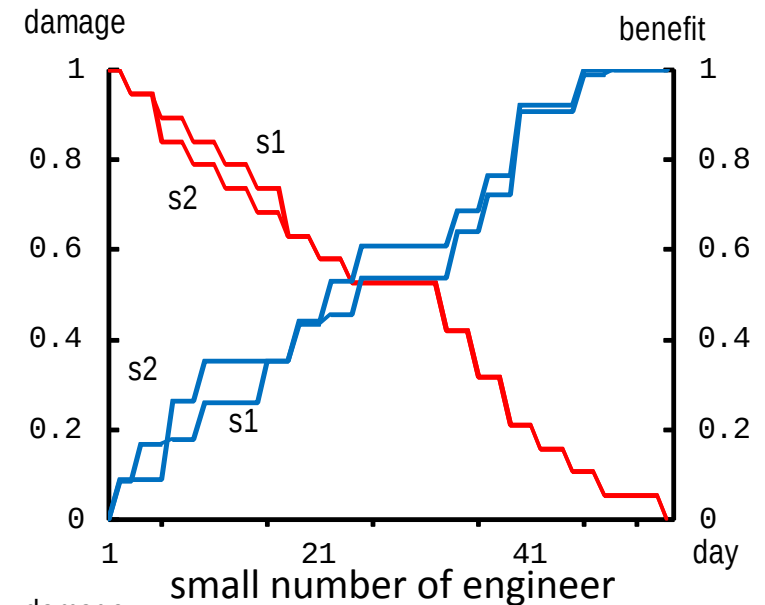
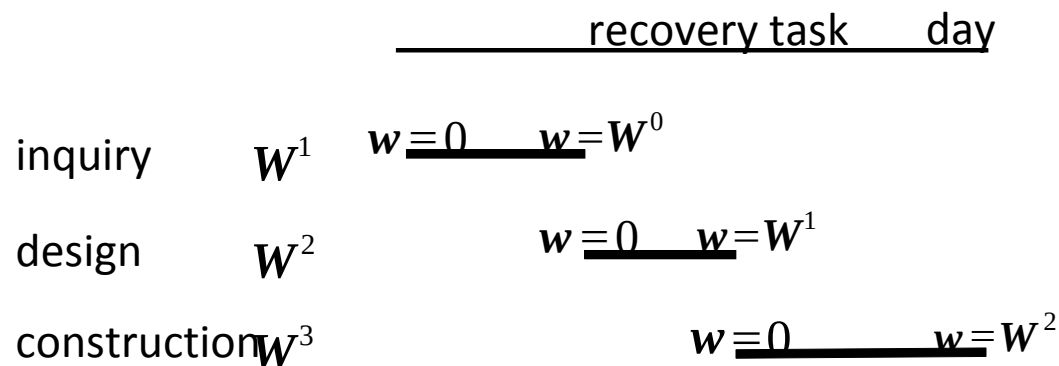
損傷

$$W = \begin{bmatrix} M \\ P \\ E \end{bmatrix} \quad \begin{array}{ll} M & \text{material} \\ P & \text{man power} \\ E & \text{energy} \end{array}$$

修復量

$$w = \begin{bmatrix} m \\ p \\ e \end{bmatrix} \quad w = w + dw \quad (0 \rightarrow W)$$

dw : speed per day



おわりに

- 大震災の即時的解決策はあるか？
地震は繰り返される物理現象であるが，社会が変化するため，新しい被害が発生。社会の変化に対応する解決策の考案と実装が重要。
- 地震・防災分野の人的資源の枯渇
古典物理を基にした学問分野は非可逆的に衰退。耐震設計の成熟と研究開発ニーズの低下は顕著。
- 地震・防災分野での計算・数理の強化
地震・防災分野に新しい血を流入し，新しい解決策を考案することが必要。