

2016年 日本建築学会賞(論文)受賞業績の紹介

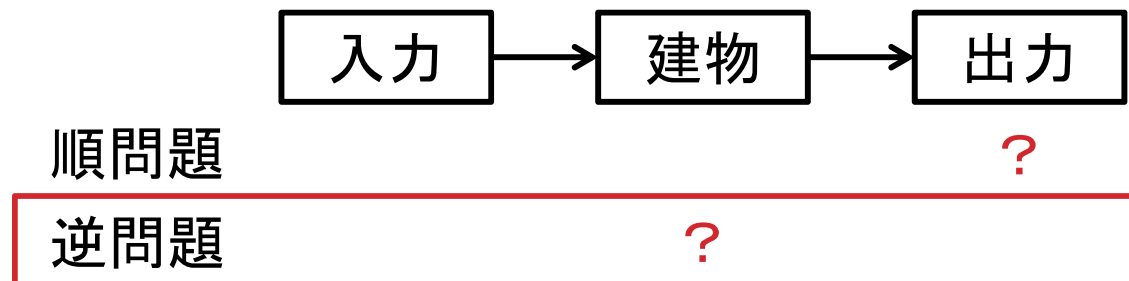
# 振動計測に基づく建築構造物の動特性評価と その応用に関する研究

鹿島建設株式会社 技術研究所

池田 芳樹

# 研究の背景

- 情報技術の進展が、建物振動を手軽に計測できる技術的・経済的環境を整備 ⇒ 建物の振動計測は普及、計測データの有効利用
- 1995年兵庫県南部地震, 2011年東北地方太平洋沖地震など ⇒ 建物の実性能と地震直後の継続使用性を判断する技術に関心
- 性能規定型設計 ⇒ 期待した性能を検証する技術が必要
- 大型震動台実験施設の運用 ⇒ 耐震性能の把握は、部材レベルから建物全体に、縮小モデルから実大モデルに移行
- 動特性評価における順問題の限界 ⇒ 逆問題からのアプローチ
- 逆問題の進展遅れ, 理論と実用の乖離



# 研究の目的

- 建物振動データの分析法の高度化と多様化により、振動データの有効利用に貢献する。
- 実建物による手法の検証を行い、理論と実用の乖離を埋める。

# 論文の構成

第1章 はじめに – 研究の背景と目的

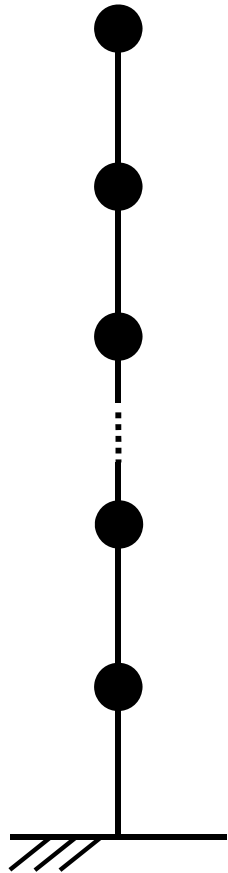
第2章 質点系簡易モデルによる建築構造物のパラメトリック同定法の確立

第3章 建築構造物の動特性変動の評価および損傷検知法と被災度判定法の提案

第4章 建築構造物の同定とアクティブ振動制御の統合

第5章 まとめ

# 第2章 質点系簡易モデルによる建築構造物の パラメトリック同定法の確立



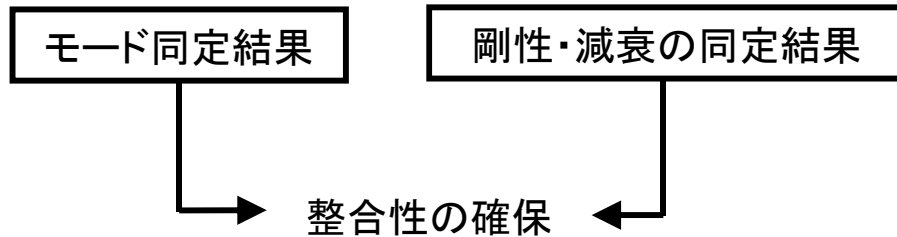
同定モデル

質点系モデルの運動方程式にある物理パラメータの  
直接同定法の提案

- せん断振動型モデルと曲げ・せん断振動型モデルの剛性評価
- Voigt型モデル, Maxwell型モデル
- 層剛性の同定とモード同定の間で整合性確保
- 刺激関数を用いた質量同定
- 震動台実験を利用した同定法の検証
- 計測データの前処理による実用性の向上

# せん断振動型モデルの同定

- モード同定結果と剛性・減衰の同定結果で整合性確保



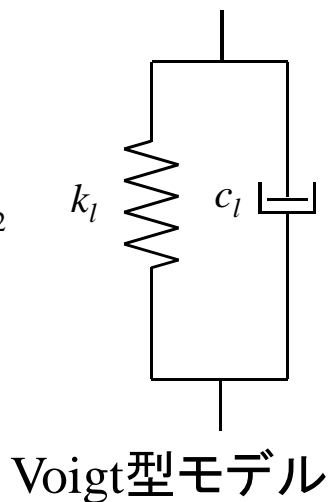
- モード同定結果を制約条件

- 重み付き最小二乗法の利用で線形計算

$$c_l(\dot{x}_l - \dot{x}_{l-1}) + k_l(x_l - x_{l-1}) = -\sum_{i=1}^n m_i(\ddot{x}_i + \ddot{z})$$

$$\sum_{i=1}^n c_i(u_{ij}\beta_j - u_{i-1j}\beta_j)^2 = 2h_j\omega_j \sum_{i=1}^n m_i(u_{ij}\beta_j)^2$$

$$\sum_{i=1}^n k_i(u_{ij}\beta_j - u_{i-1j}\beta_j)^2 = \omega_j^2 \sum_{i=1}^n m_i(u_{ij}\beta_j)^2$$



- モード形を利用した質量の同定

目的関数  $m_0 \rightarrow$  最小

制約条件  $m_0 \geq 0$

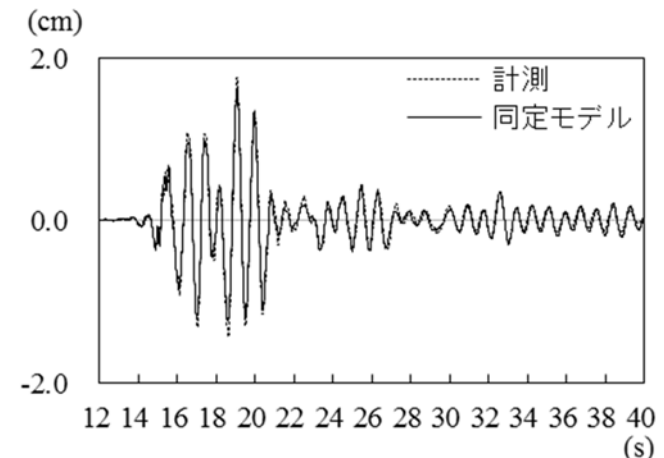
$$-\varepsilon_k \leq m_0 + \sum_{i=1}^n m_i u_{ij} \beta_j (u_{ij} \beta_j - 1) \quad (k = 1, 2, \dots, l)$$

$$-m_0 + \sum_{i=1}^n m_i u_{ij} \beta_j (u_{ij} \beta_j - 1) \leq \varepsilon_k \quad (k = 1, 2, \dots, l)$$

$$0 < \varepsilon_k \quad (k = 1, 2, \dots, l)$$

$$0 < b_{\min,i} \leq m_i \leq b_{\max,i} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

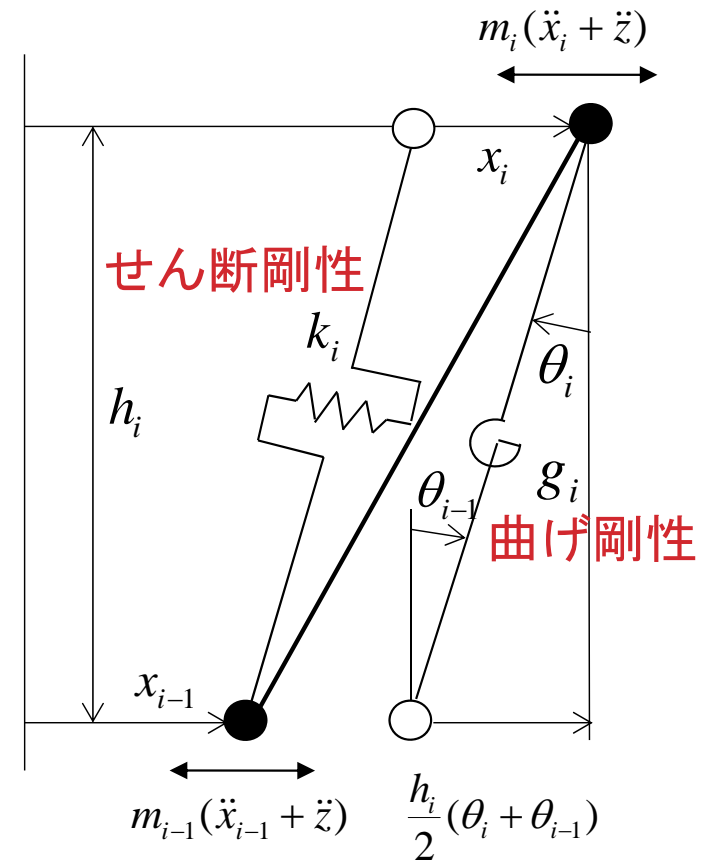
$$0 < c_{\min} \leq \sum_{i=1}^n m_i \leq c_{\max}$$



E-Defense公開データによる検証

# 曲げ・せん断振動型モデルの剛性の同定

- 水平方向の地震記録から、各層のせん断剛性と曲げ剛性を時間領域で評価
- 初期値設定と収束計算の回避. 閉じた表現による同定法の簡素化
- 曲げ・せん断振動型モデルの同定問題における基本特性の把握
- 高層建物の簡易質点系モデルによる同定
- せん断振動型モデルの同定問題を包含

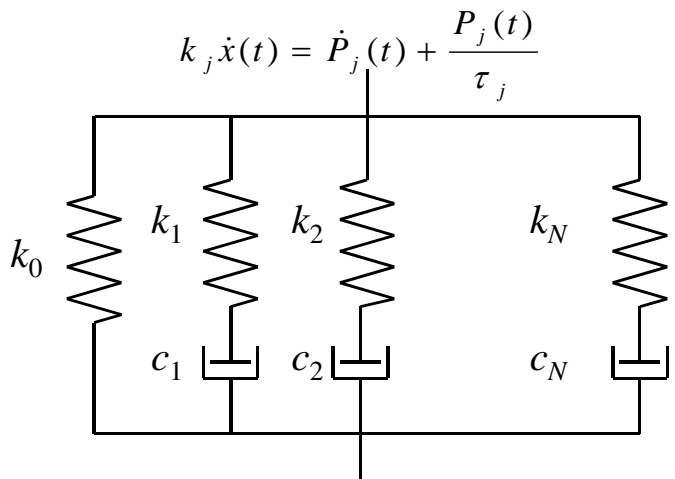


各層のモデル

# Maxwellモデルの時間領域における同定

- 強制加振実験と地震記録による同定
- パッシブ/セミアクティブ制御装置の代表的なモデル
- 振動数依存性のあるMaxwellモデルを時間領域で評価 ⇒ 振動数ごとの強制加振実験を回避, モデル化の効率化
- 一般化MaxwellモデルとARXモデルの対応を説明

ARXモデル次数 → Maxwell要素数



$$k_j \dot{x}(t) = \dot{P}_j(t) + \frac{P_j(t)}{\tau_j}$$

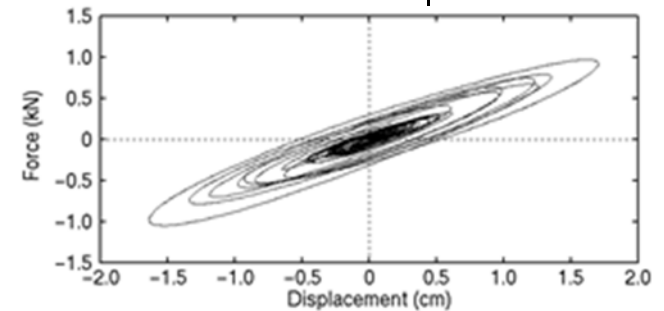
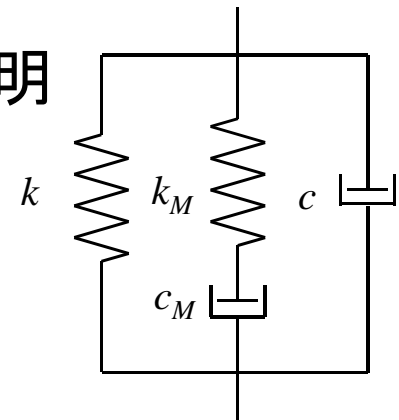
極 → 緩和時間

$$\tau_j = \frac{\Delta t}{\sqrt{(\ln|_z p_j|)^2 + (\text{Arg}_z p_j)^2}}$$

留数 → 剛性

$$k_j = -\frac{\tau_j \text{Re}[{}_z r_j]}{\Delta t}$$

一般化Maxwellモデルの同定



地震による質点系モデルの同定

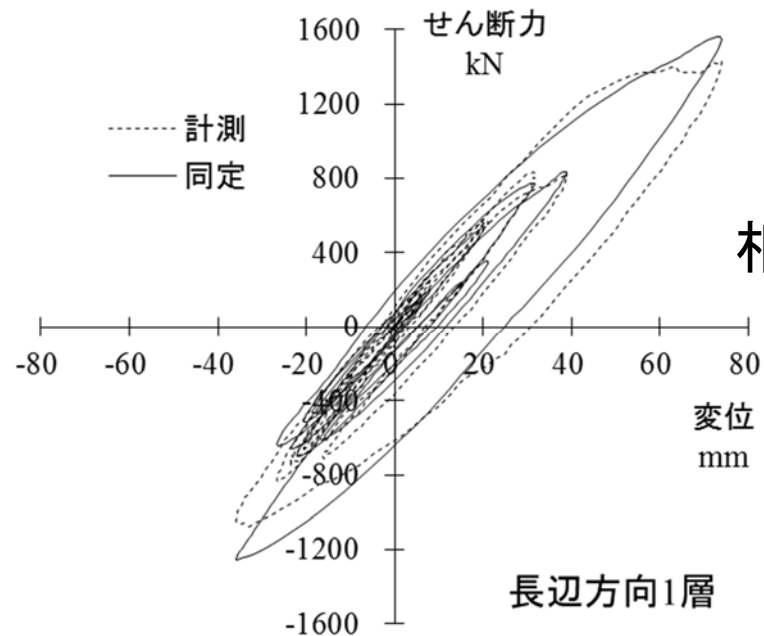
# 第3章 建築構造物の動特性変動の評価および 損傷検知法と被災度判定法の提案

- Bouc-Wen非線形履歴モデルの同定法の検証
- 解析モデルを事前にもたずに、同定分野の知見を活かす簡易な被災度判定
  - 建築構造物の非線形性の評価
  - 損傷検知
  - 限られた階の振動データから全階の応答推定 ⇒ 地震被災度判定法の提案
- 実大実験・実建物による検証，実績の蓄積



# 建物の非線形性の評価

## E-Defense実大4層鉄骨造建物の実験データの利用



相互検証

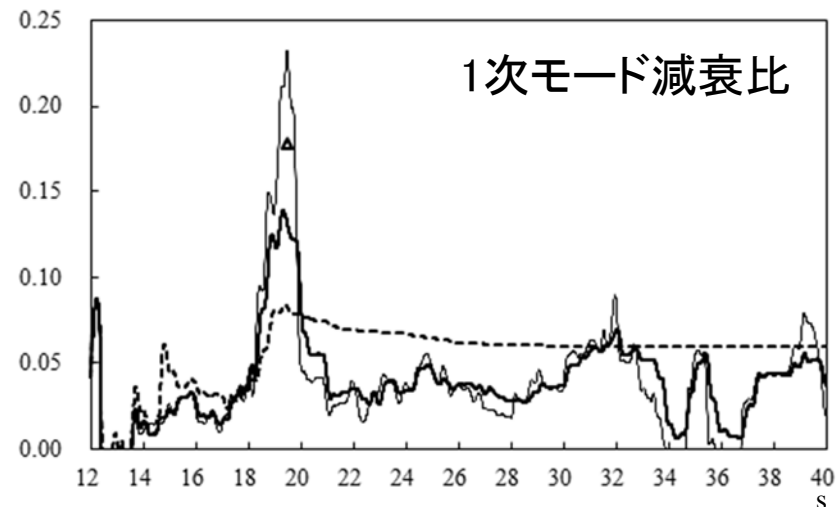
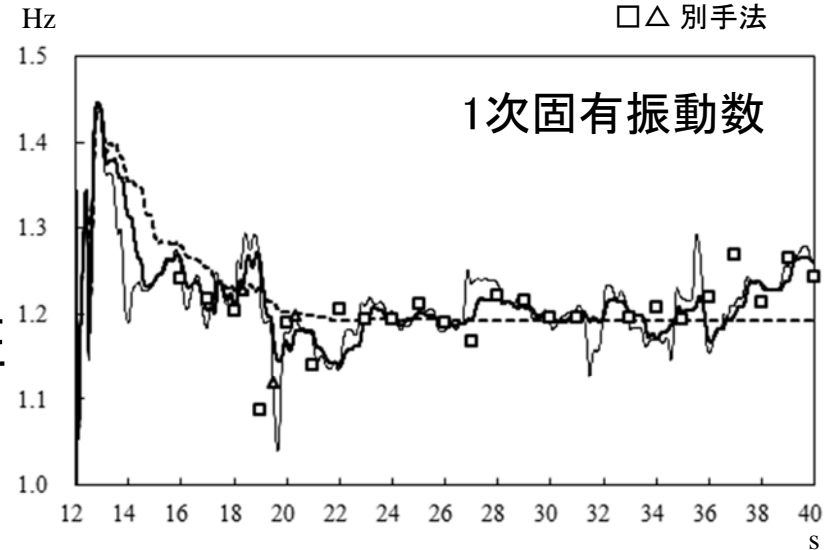


$$Q(x(t), \dot{x}(t)) = c\dot{x}(t) + z(x)$$

$$\dot{z}(t) = A\dot{x}(t) - \alpha|\dot{x}(t)||z(t)|^{n-1}z(t) - \beta\dot{x}(t)|z(t)|^n$$

- Bouc-Wenモデルの同定法の検証
- 履歴減衰と粘性減衰の分離

忘却係数  
--- 1.00  
— 0.98  
— 0.95  
□△ 別手法

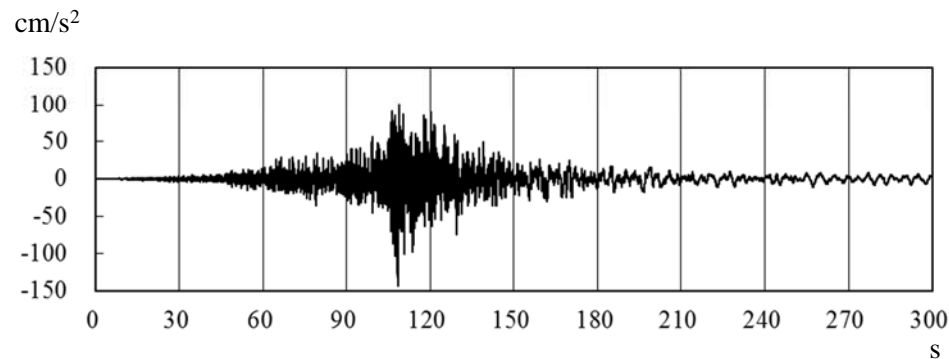


- ARXモデルと忘却係数付き逐次最小二乗法による等価モード特性の評価

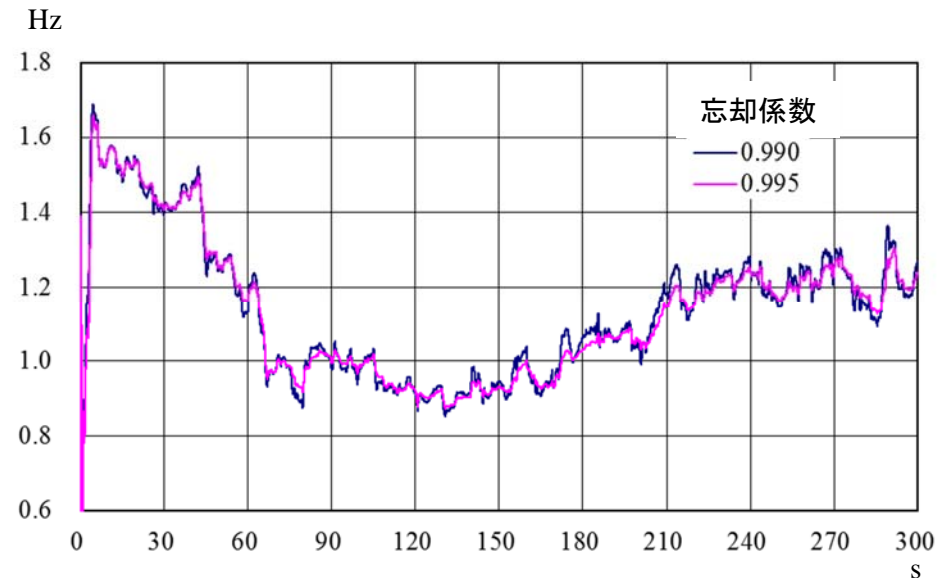
# 逐次最小二乗法の免震効果の検証への適用例

## 2011年東北地方太平洋沖地震

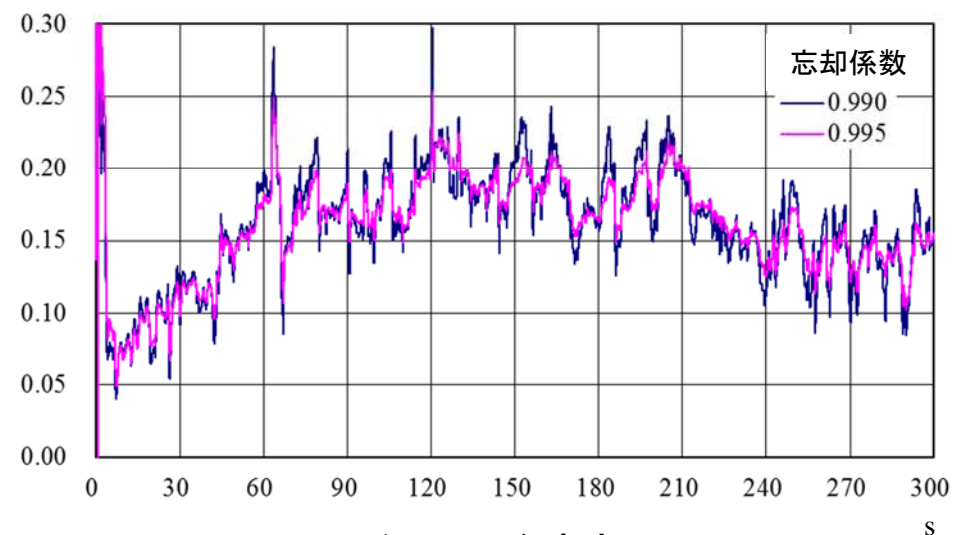
- 免震層の非線形性を簡易評価
- 事前に解析モデルは不要
- 等価1次モードで固有振動数の低下と減衰の増加を確認
- データを時間毎に区切る必要なし



入力加速度



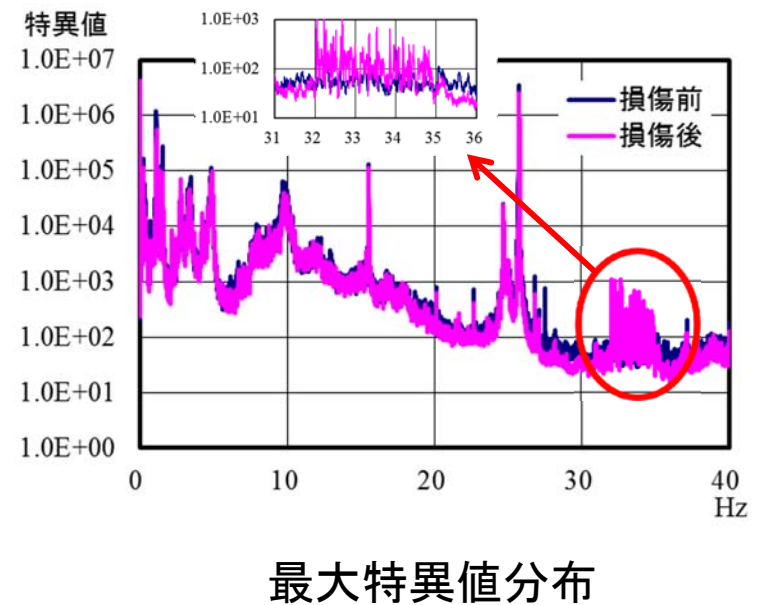
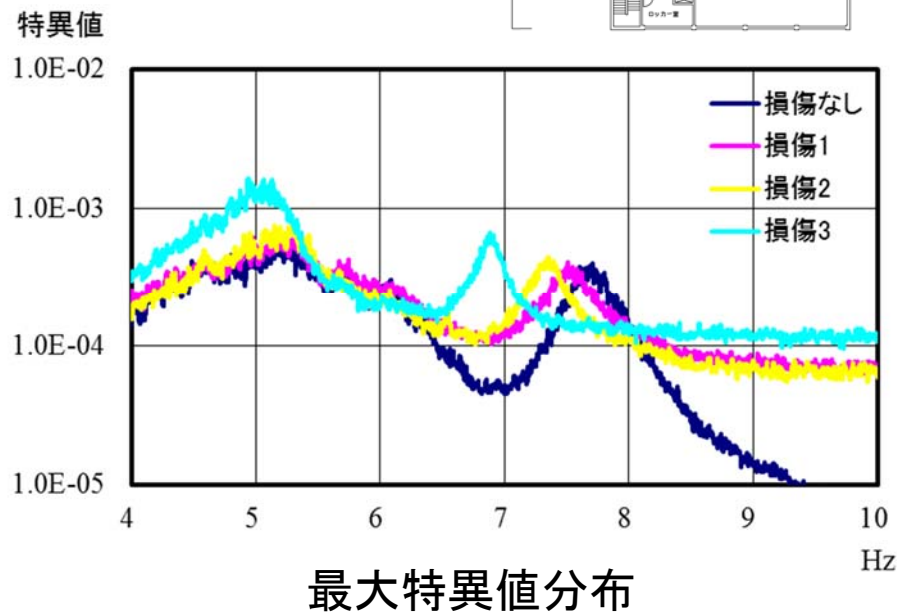
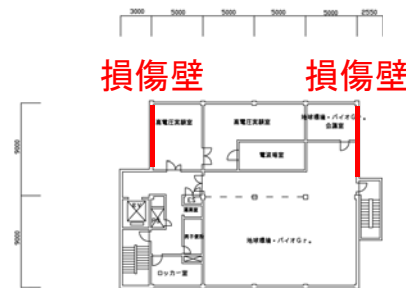
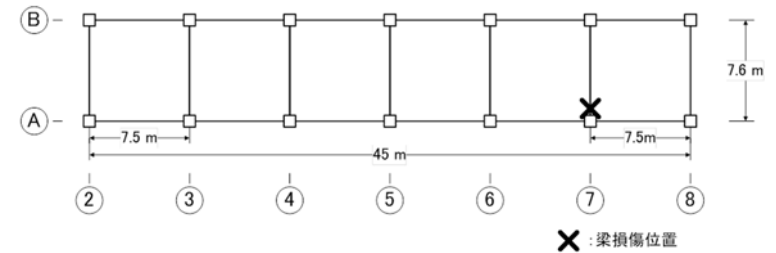
1次固有振動数



1次モード減衰比

# 解体建物を利用した人為的損傷の検知実験

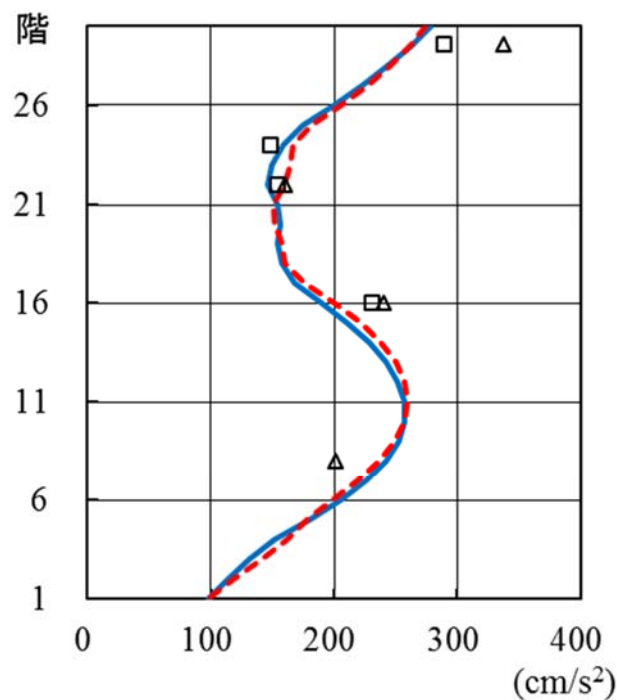
- 微動のパワースペクトル密度関数の特異値分解による損傷検知
- 壁の損傷と梁端部下フランジの損傷
- 小さな損傷は低振動数帯には現れない



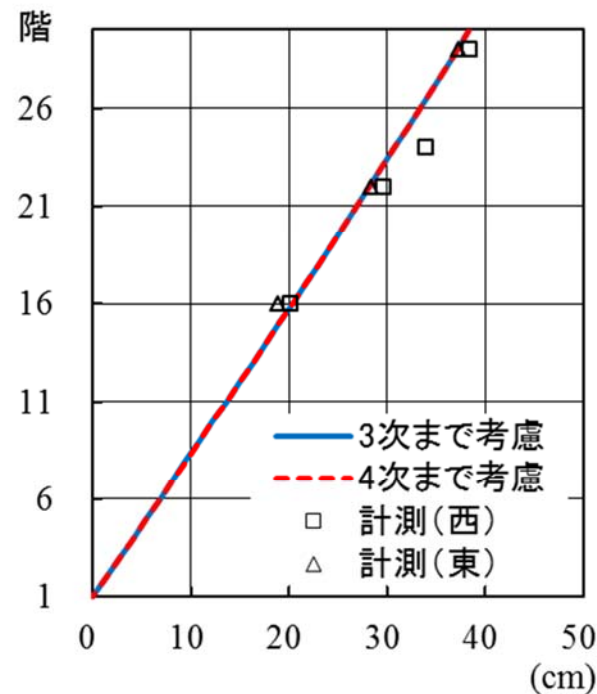
# 限られた階の計測による建物の被災度判定

- ARXモデルで同定した計測階の刺激関数からモード形を近似
- 事前に解析モデルは不要
- 計測データから全階の応答波形も推定
- 実高層建物の2011年東北地方太平洋沖地震のデータで検証

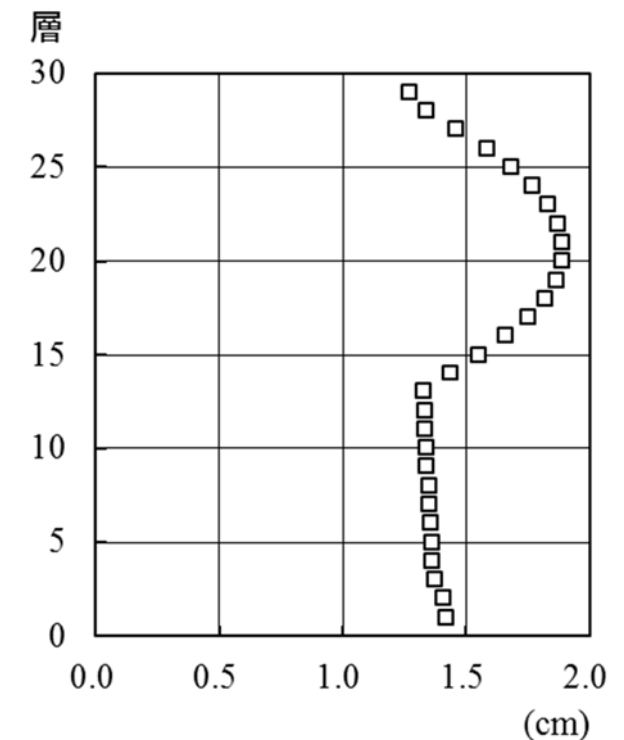
$$\hat{u}_{ij}\hat{\beta}_j = b_j \sin\left(\frac{2j-1}{2}\pi c_j \xi_i\right)$$



最大加速度の推定



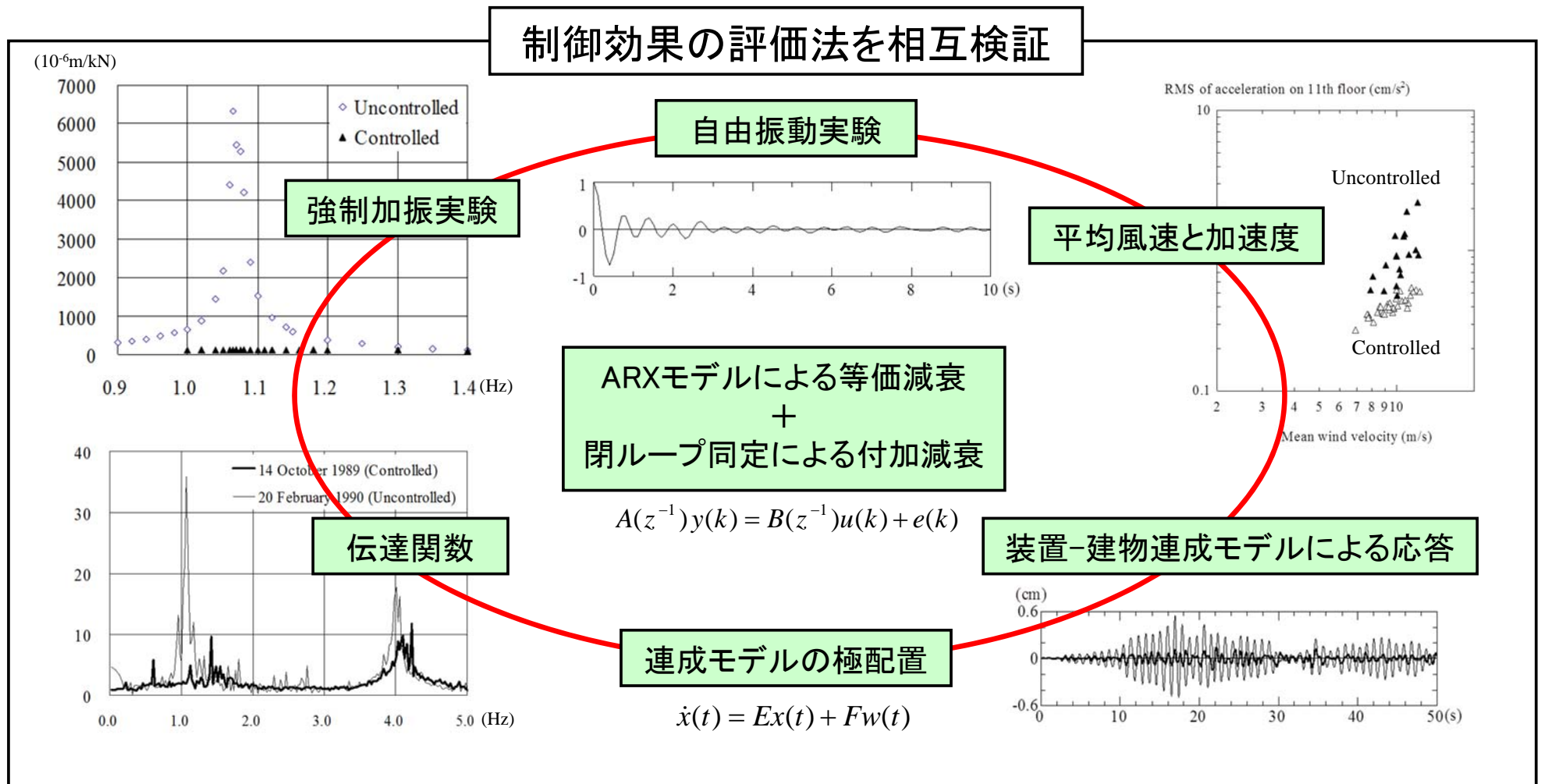
最大変位の推定



最大層間変位の推定

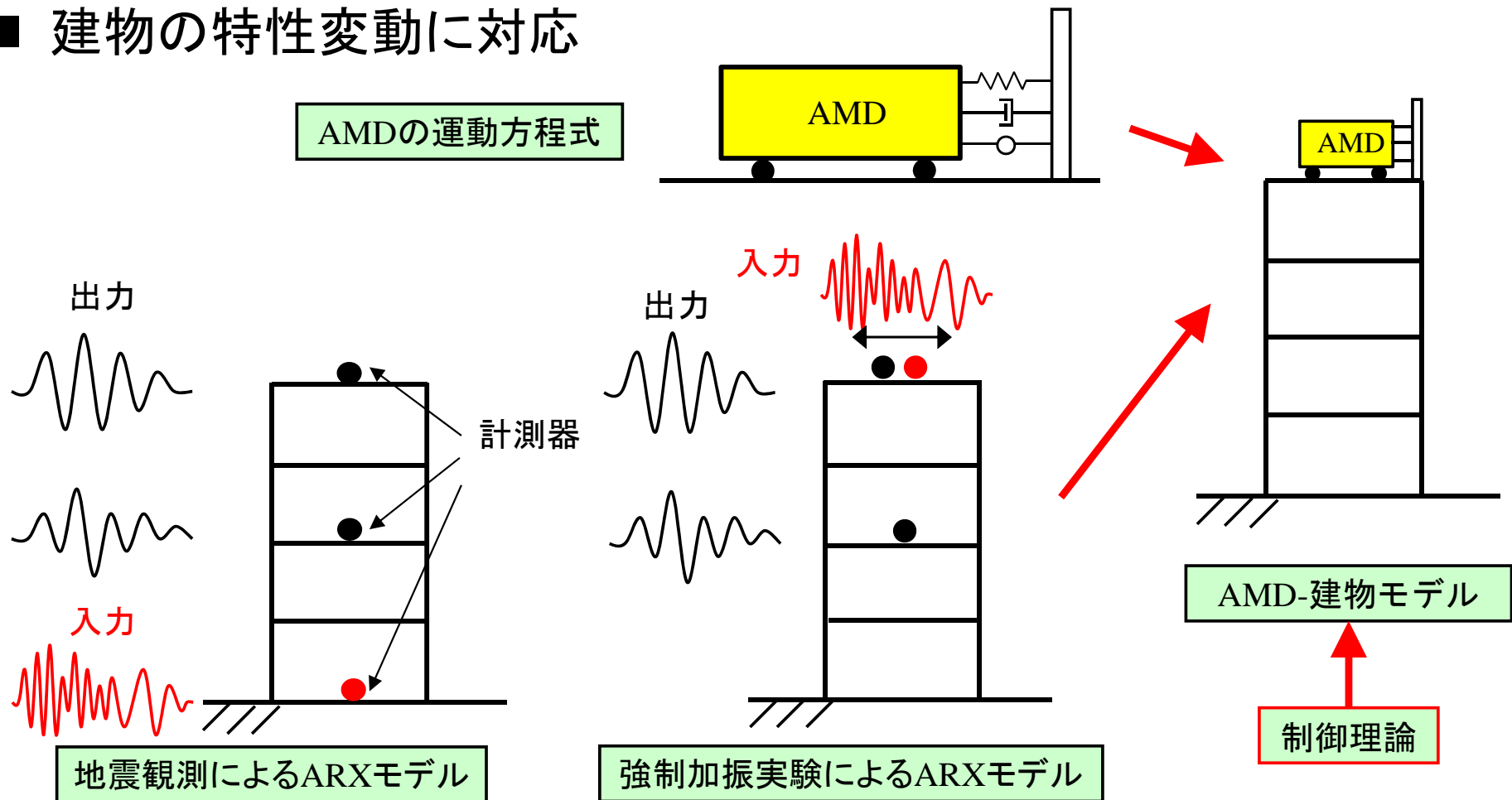
# 第4章 建築構造物の同定とアクティブ振動制御の統合

- システム同定と統合して、アクティブ振動制御を高度化する提案
- 同定と制御の連携により、多くの情報が獲得できることを実証



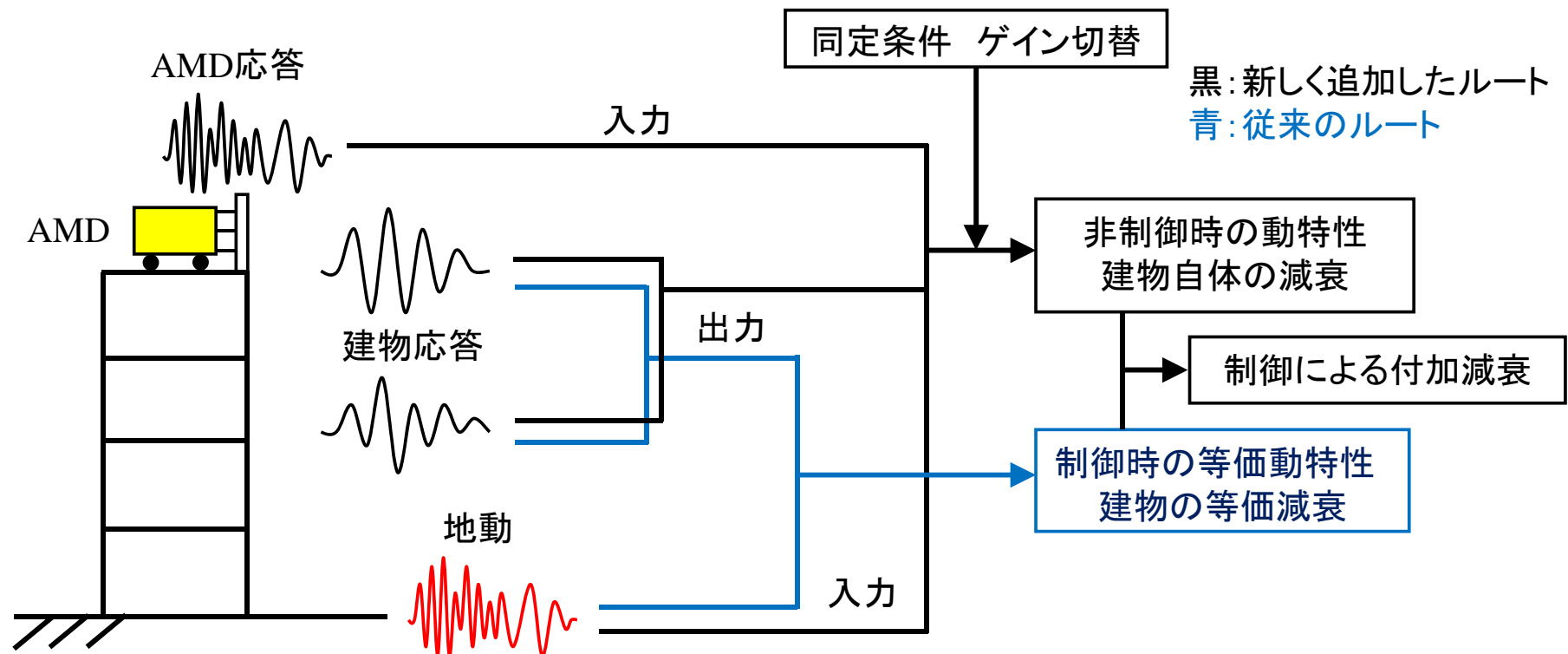
# 建物のARXモデルを用いたAMDによる制振

- 運動方程式による建物モデルが制振適用上の制約という観点  
⇒ 同定分野の成果の直接利用
- AMDの運動方程式と建物のARXモデルを連成させて制御を適用
- 建物の特性変動に対応



# 閉ループ直接同定法に基づく制御効果の検証法

- アクティブ制御を停止させずに，非制御時の建物動特性を把握  
⇒ 等価減衰と付加減衰を同時に評価，計測データの有効利用
- 装置の効果を生分離 ⇒ 効果を除きたい装置の応答は入力に追加
- 実建物で初めて検証



# 第5章 まとめ

- 振動計測に基づいて、建物の質点系モデルを同定する方法を展開
- 事前に解析モデルをもたずに、建物の非線形性を評価する方法や被災度判定法を提案
- システム同定と統合して、建物のアクティブ振動制御を高度化
- 建築構造分野に期待されている新しい技術を、システム同定と振動計測の立場から提供し、計測データの有効利用に貢献。  
性能規定型設計の検証を支える基盤技術の一部を整備
- 大型・中型震動台実験、実建物による検証、評価法の相互検証で当該分野の理論と実用の乖離を埋めることに貢献



# 謝辞

- 本研究を共に進めて戴いた論文共著者に深く感謝致します。
- 本研究では、実建物と大型・中型震動台実験の振動計測データを数多く使わせて戴きました。データを提供された建物所有者、大学ならびに国立研究開発法人 防災科学技術研究所の実大三次元震動破壊実験施設(Eーディフェンス)に厚く御礼を申し上げます。