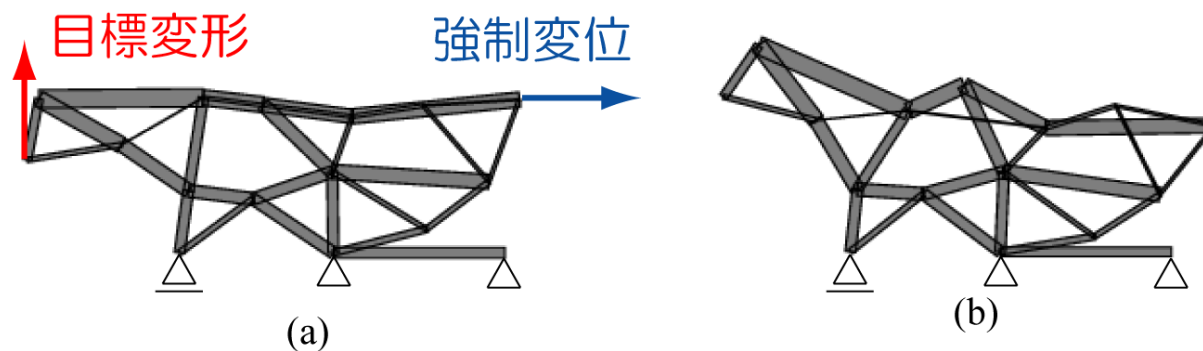


柔構造のトポロジー最適化による 上下方向免震装置の設計

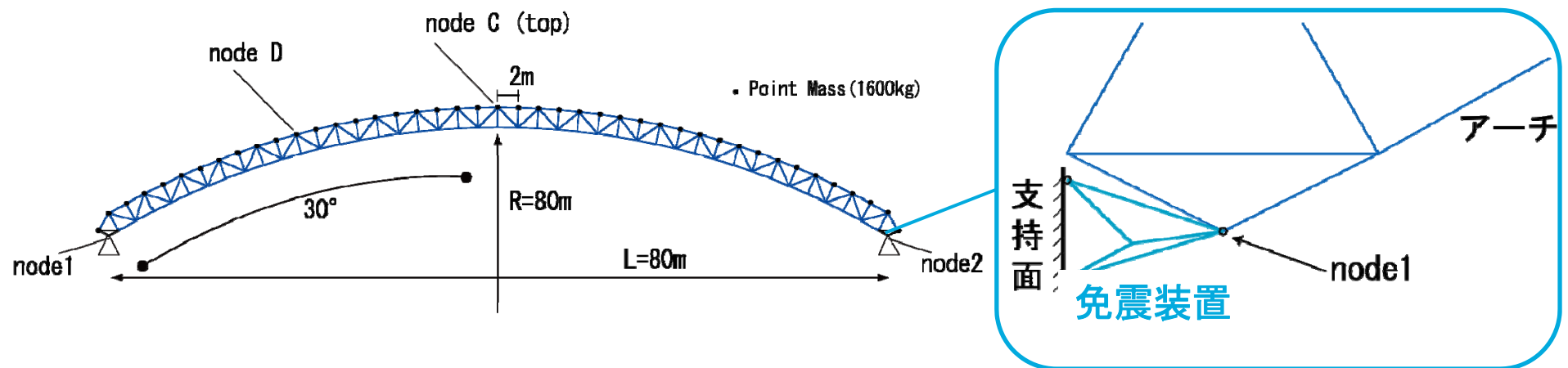
- 中嶋 拓 (京都大学大学院)
- 大崎 純 (広島大学大学院)
- 木下 拓也 (株式会社竹中工務店)

- **コンプライアントメカニズム**
 - 部材や接合部の弾性変形性能を利用した柔な構造
 - 大変形を生じ、多くのエネルギーを蓄えられる
- **柔性を利用した構造**
 - 指定非線形釣合い経路を有する構造系
 - グランドストラクチャ法に基づくトラス構造のトポロジー最適化問題によって、柔な構造の釣合い経路を、指定した釣合い経路に近づける手法を提案した



トラス要素によるコンプライアントメカニズム (Ohsaki and Nishiwaki 2005)

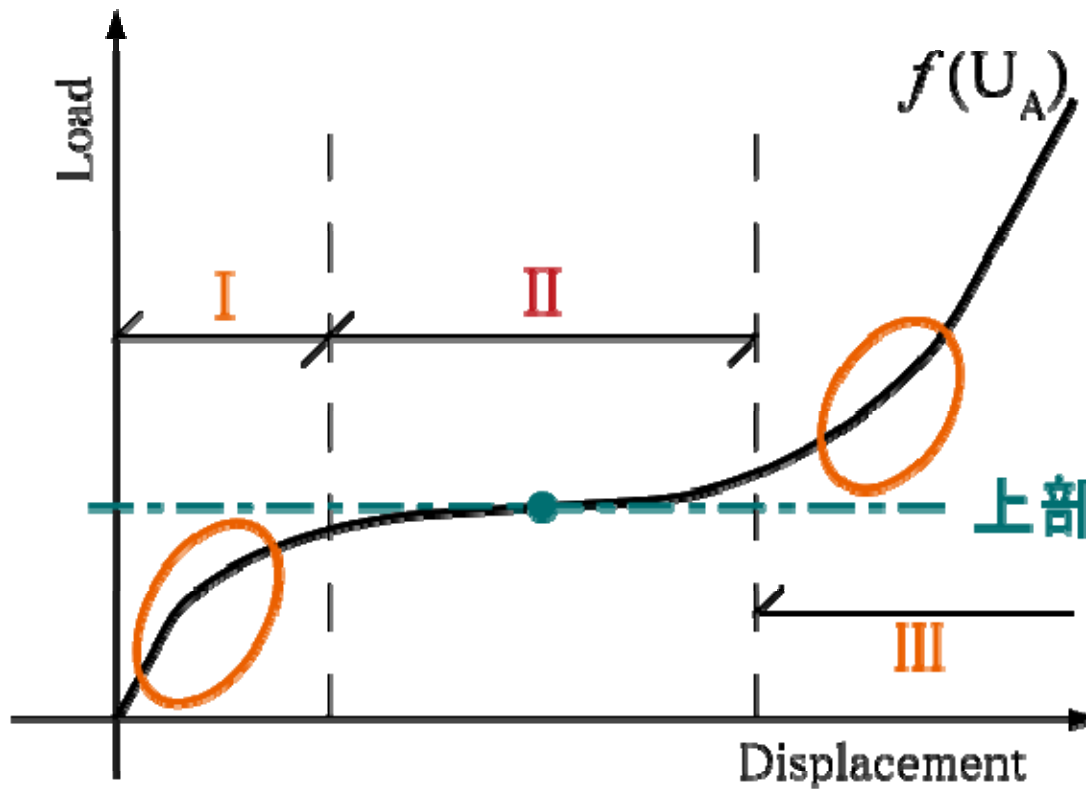
- 構造系が意図した釣合い経路を有することを求められるケース ⇒ 免震システムのための支承
- 上下動を対象とする免震装置
 - 自重作用時...**過大な変形を生じない**・固有周期が大きい
- 建築構造を対象にした免震構造
 - 著者ら...コンプライアントメカニズムによって, 建築構造物の水平方向および鉛直方向の免震を実現



- **コンプライアントメカニズム**の最適化により, 精密機器の上下方向免震構造を設計する.
 - トラスのトポロジー最適化
 - ⇒ 指定釣合い経路を持つ**柔な構造**を設計
 - ⇒ **免震装置としての効果を**
時刻歴応答解析で検討
- 減衰を付加することにより免震効果が向上
- 機器の質量変化の応答量への影響を検討

参考文献(6) T. Kinoshita, M. Ohsaki and T. Nakajima, Topology optimization of compliant mechanisms for vertical seismic isolation of spatial structures, J. Int. Assoc. for Shell and Spatial Struct., Vol. 50(2), pp. 89–96, 2009.

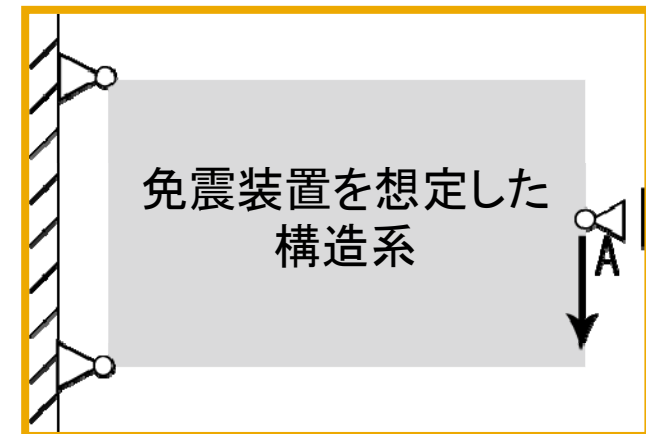
- 釣合い経路



領域 I, III:
十分な剛性を持ち
過大な変形を防ぐ

上部構造の自重

領域 II: 中間点で自重を支持,
変形に伴い荷重が漸増



定式化

- 指定経路 \bar{f} と得られた経路 $f(U_A)$ との誤差の総和を最小化
- 領域II(荷重漸増域) で荷重が単調増加
- 体積に上限値
- 設計変数は, 部材断面積 A , 節点座標 X

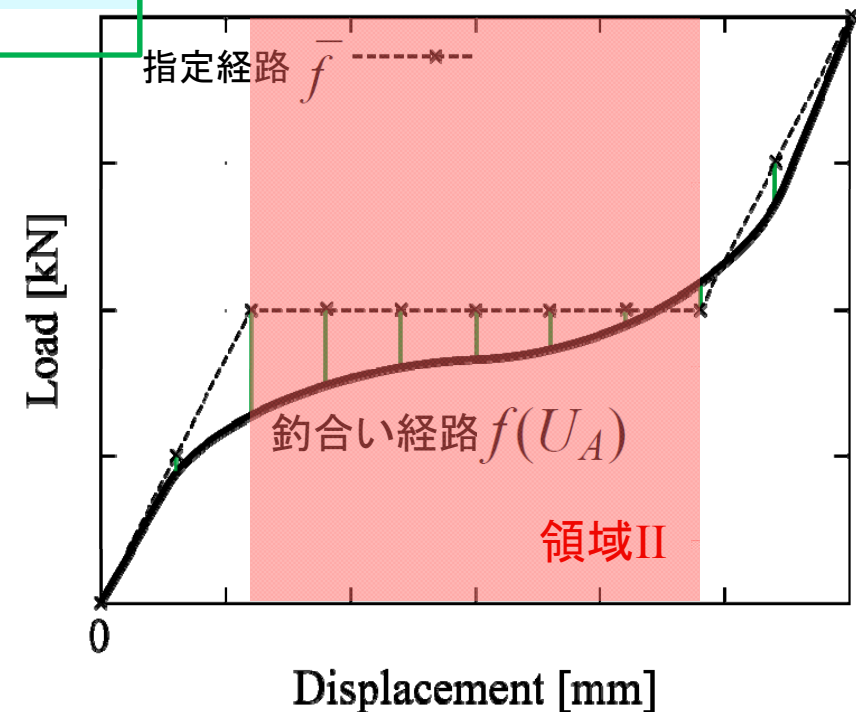
$$\text{Minimize } e(X, A) = \sum_{i=1}^m (f(U_A^{(i)}) - \bar{f}_i)^2$$

$$\text{subject to } f(U_A^{(i)}) \leq f(U_A^{(i+1)})$$

$$V(X, A) \leq V^{\max}$$

$$A^L \leq A \leq A^U$$

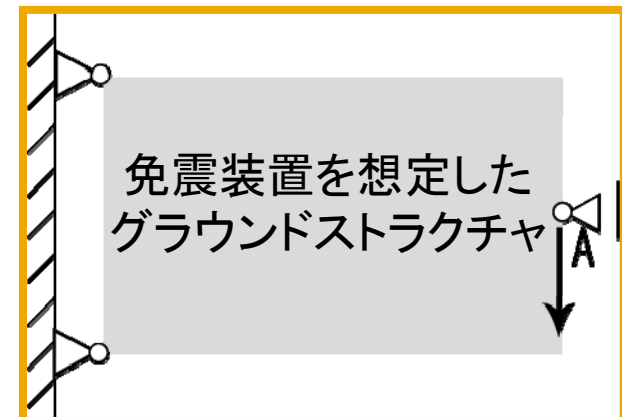
$$X^L \leq X \leq X^U$$



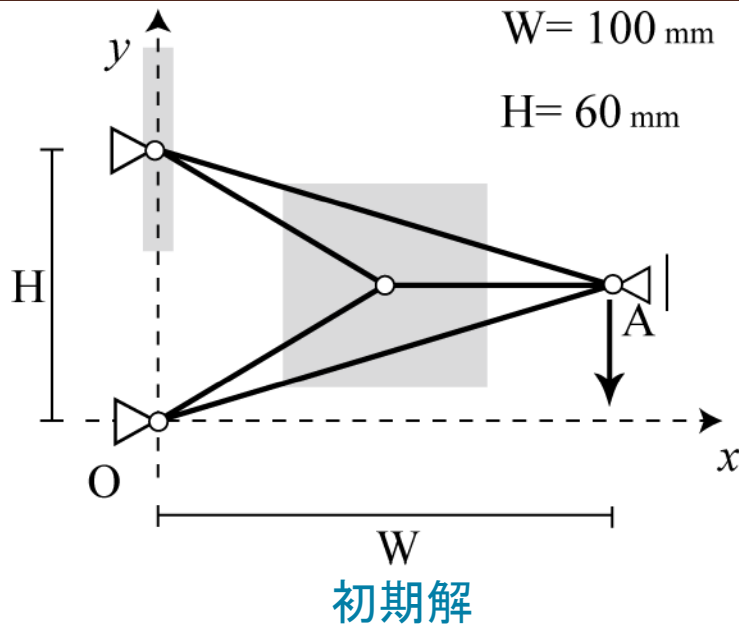
最適化アルゴリズム

1. A , X に初期解を与える
2. 点 A に強制変位を与えて解析を行い, 得られた釣合い経路から目的関数・制約条件を求める
3. 目的関数・制約条件の設計変数に関する感度係数を求める
4. 最適化手法のアルゴリズム(逐次2次計画法)により設計変数を変更する
5. 収束条件を満たさなければ2.へ戻る

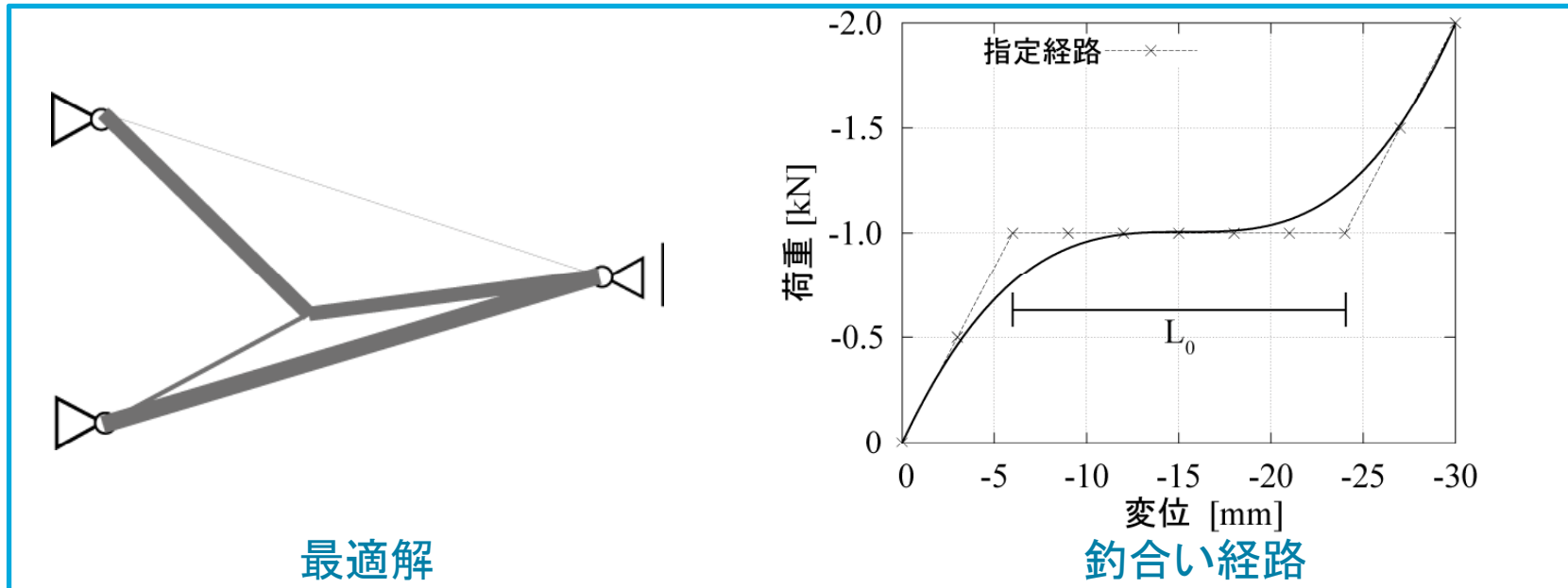
- トラス要素を用いた**グラウンドストラクチャ法**
- 問題の**非線形性**が大きく初期解依存が生じる
⇒ 一様乱数により初期解を変更,
複数回最適化を実行



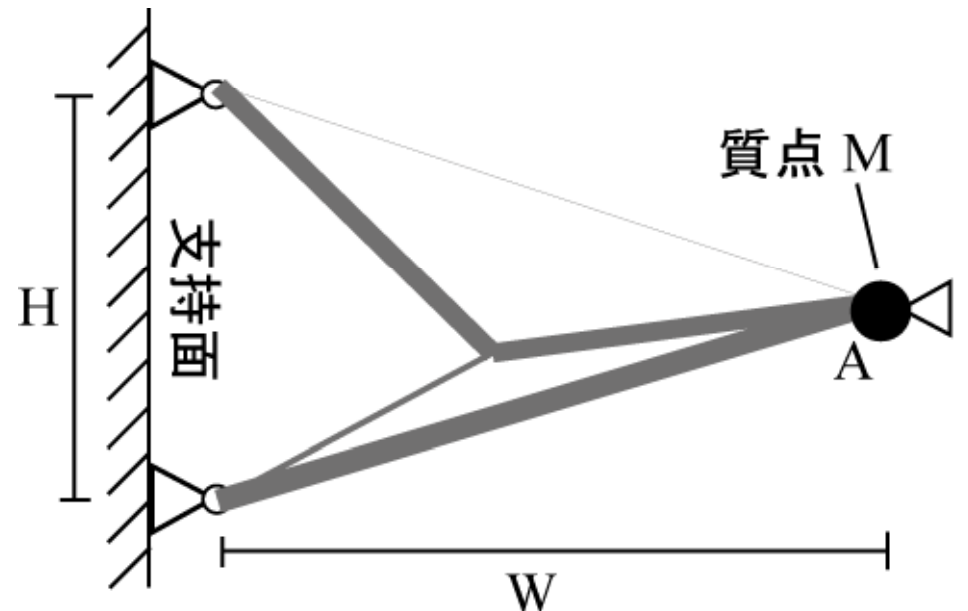
最適解



- トラス要素
- 弾性係数 $2.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
- 断面積の初期値 $= 1.0 \text{ mm}^2$

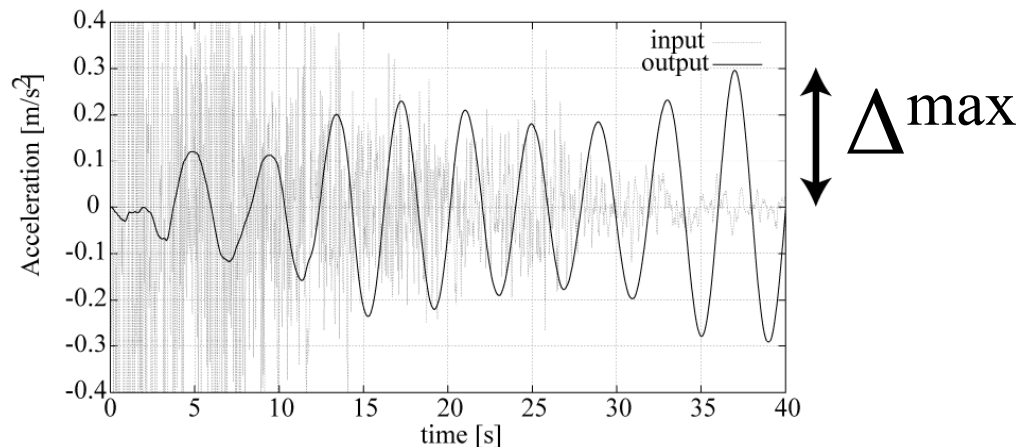
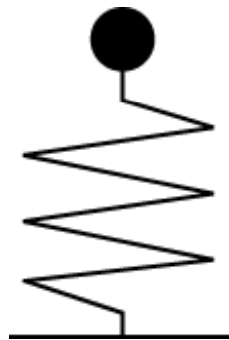


- 免震構造とする機器の自重を1質点で表す
- 自重 $P_1 = 980.7 \text{ N}$ (質量 100kg)
- 機器の自重 P_1 が作用した時の釣合い状態が釣合い経路の荷重漸増域の中央に存在するように、各部材の断面積を $\alpha = P_1/P_0 = 0.935$ 倍する。
(P_0 : 最適解の経路の中央における荷重, 1049.1 N)



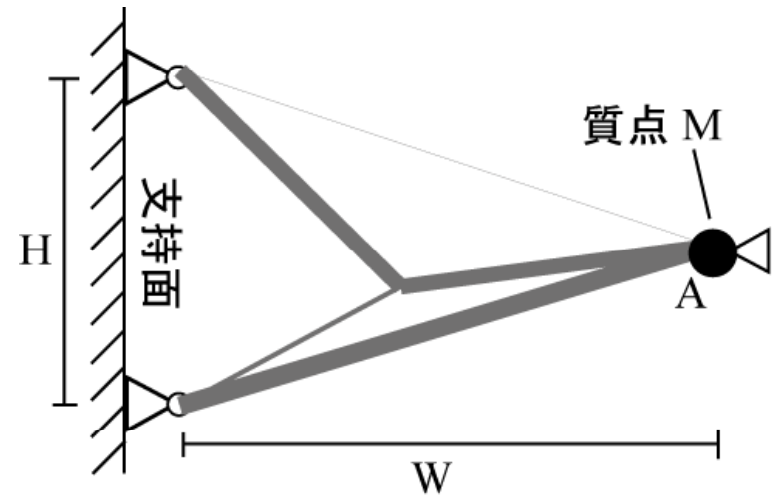
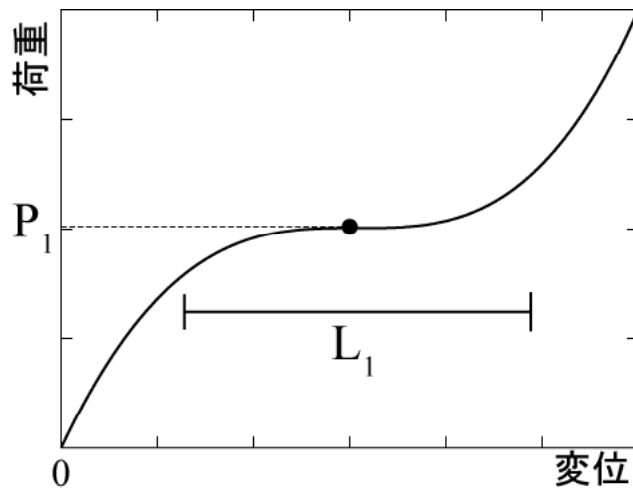
- 免震装置が、ある入力に対して十分な荷重漸増域の幅を有していない場合、変位が過大になり装置の剛性が大きくなる → 十分な免震性能が得られない。

- 周期4秒の**仮想線形ばね**による解析



- 必要な釣合い経路の荷重漸増域の幅 $L_1 = 2\Delta^{\max}$

- 釣合い経路に求められる荷重漸増域の幅 $L_1=2\Delta^{\max}$
- 各部材長を $\beta=2\Delta^{\max}/L_0$ 倍 ($L_0=0.018$ m)
- El centroのレベル1および2を入力し, 2つの装置 Dev-1, Dev-2 を作成



| 装置 | Δ^{\max} (m) | 倍率 β | モデルの幅 W (m) | 固有周期(sec) |
|-------|---------------------|------------|---------------|-----------|
| Dev-1 | 0.12 | 13.3 | 1.13 | 7.17 |
| Dev-2 | 0.24 | 26.6 | 2.26 | 10.13 |

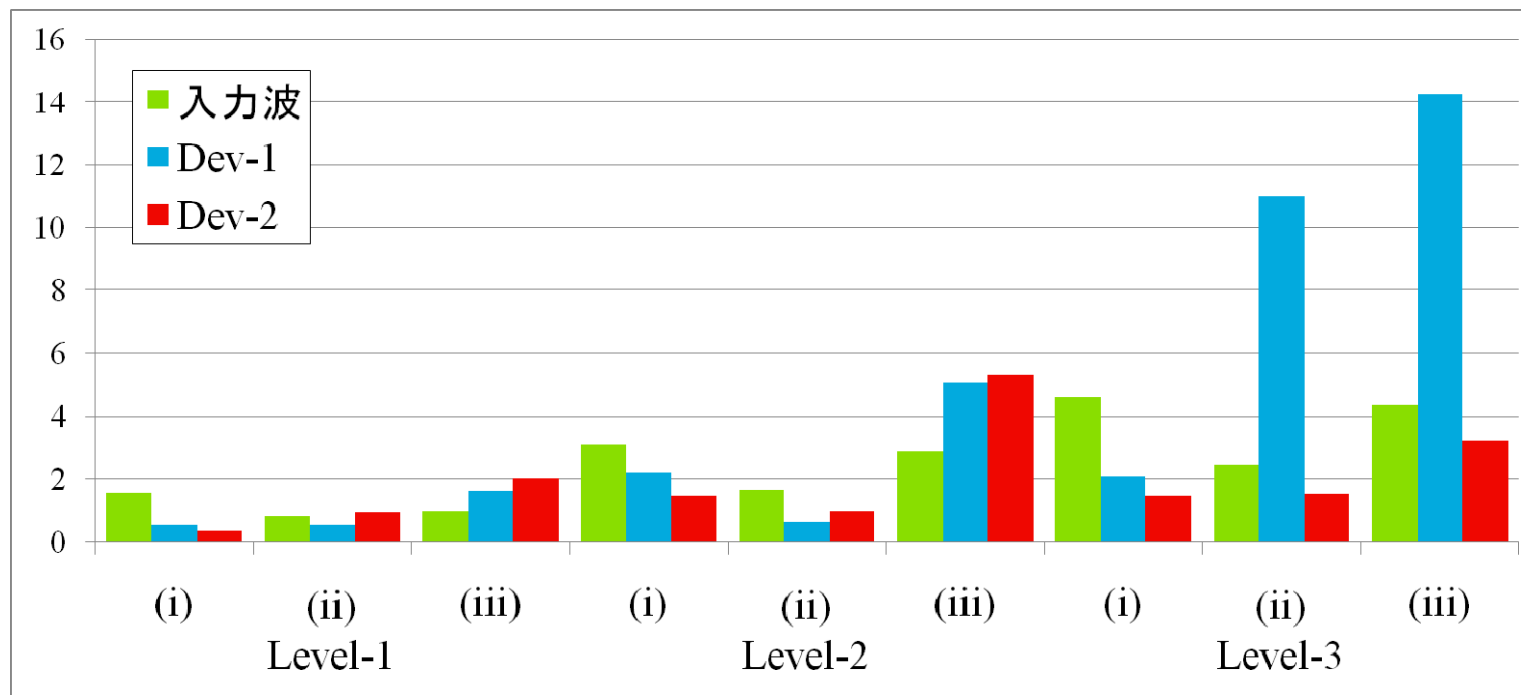
- 入力地震動

(i) El centro UD (1940)

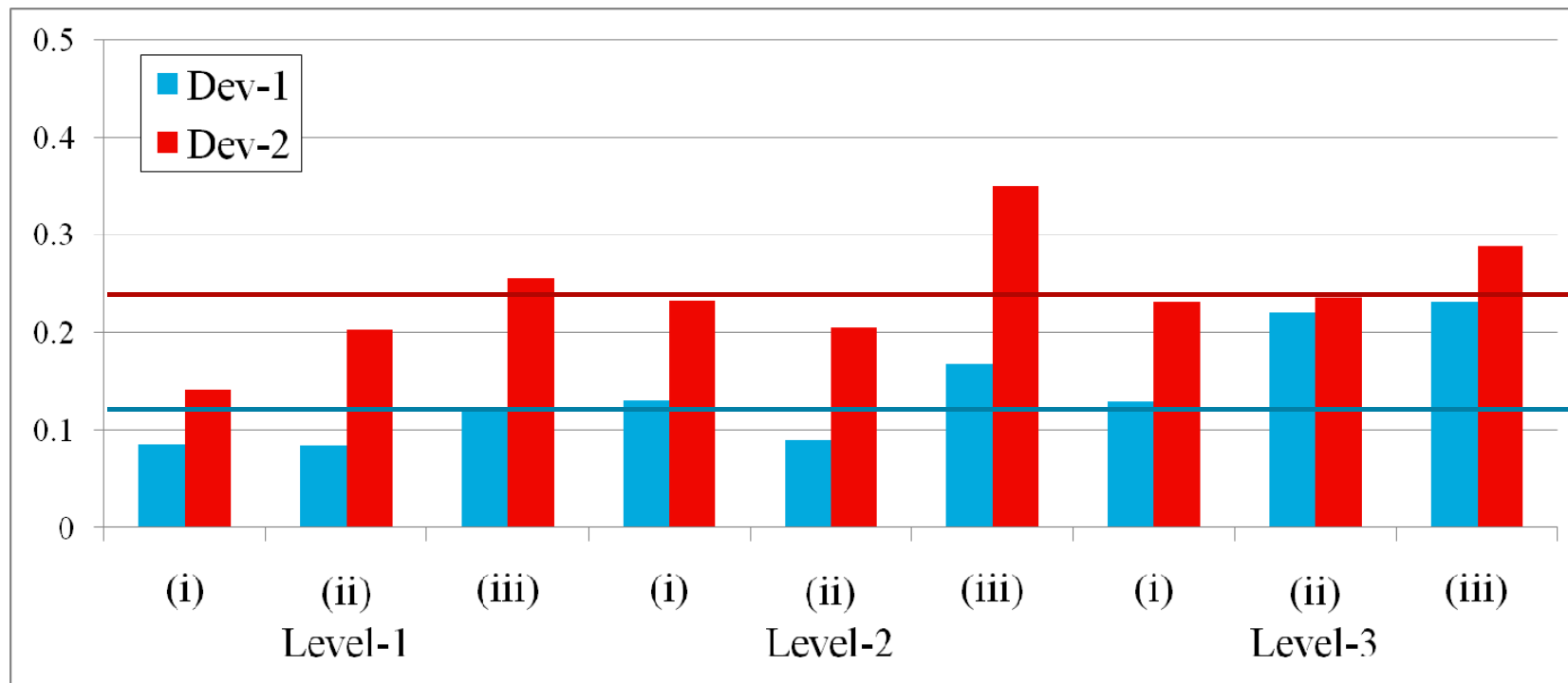
(ii) Hachinohe UD (1968)

(iii) Taft UD (1952)

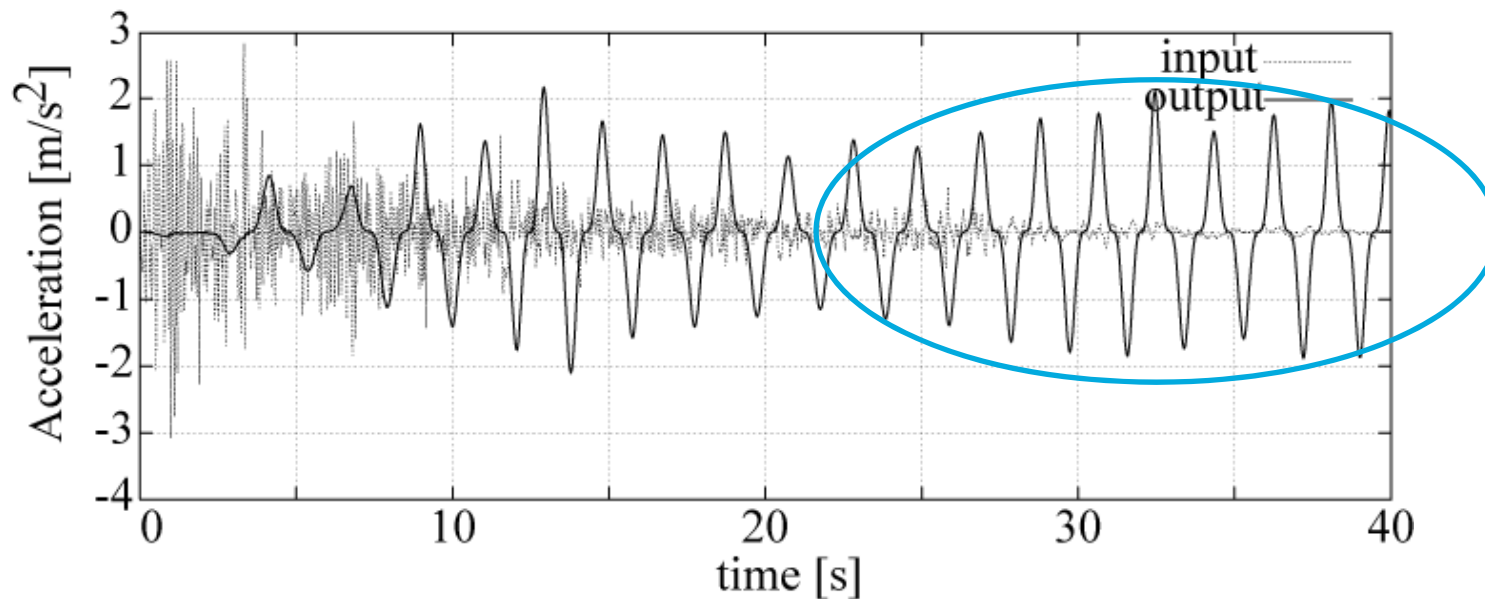
Level-1,2,3 = 9種類



- 装置の最大応答変位
- 最大変位が荷重漸増域の幅を上回る
→ 応答加速度が増大



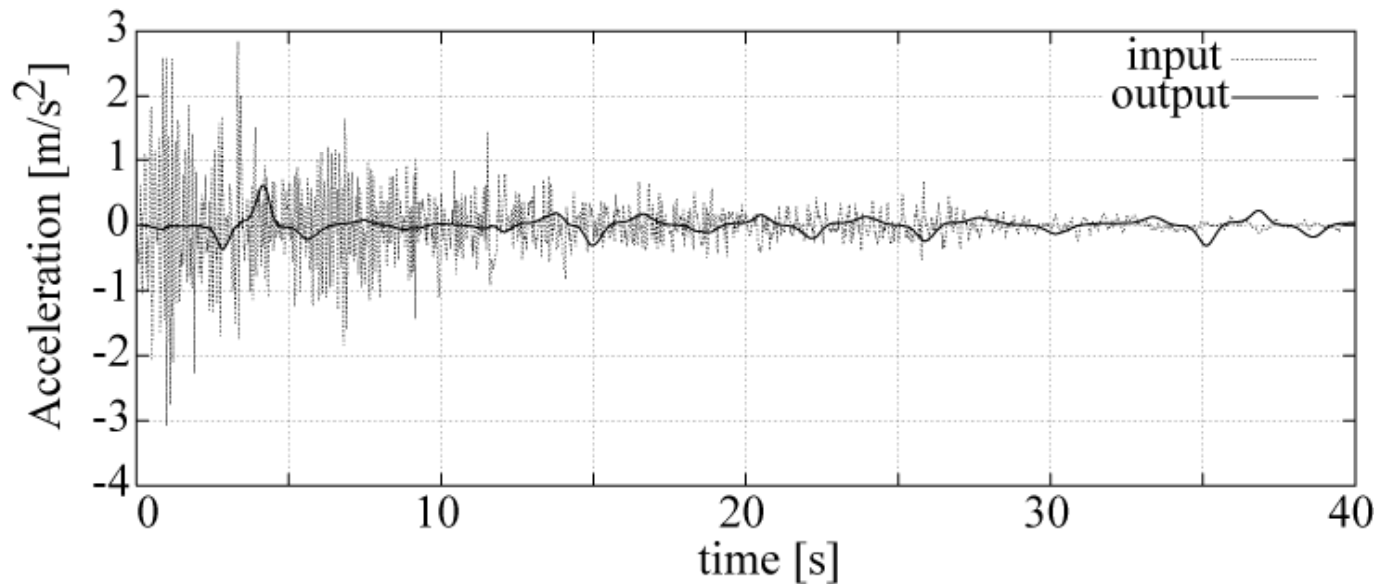
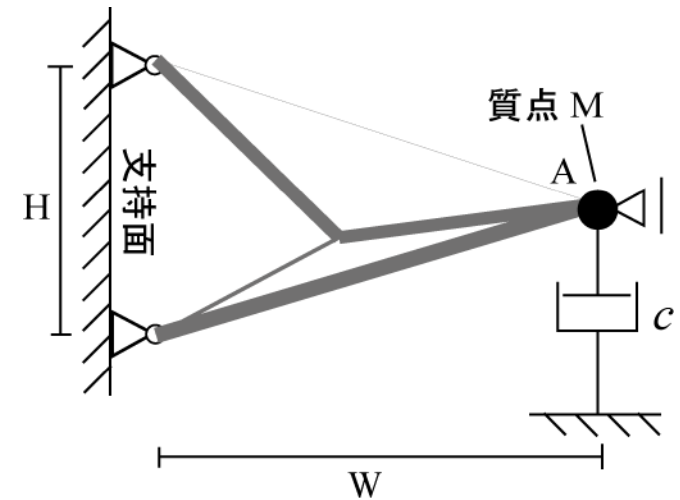
- 解析時間の後半で最大応答値が得られる傾向
- 装置に減衰力が与えられていないことに起因する



Dev-1 のEl centro UD Level-2 に対する時刻歴応答加速度

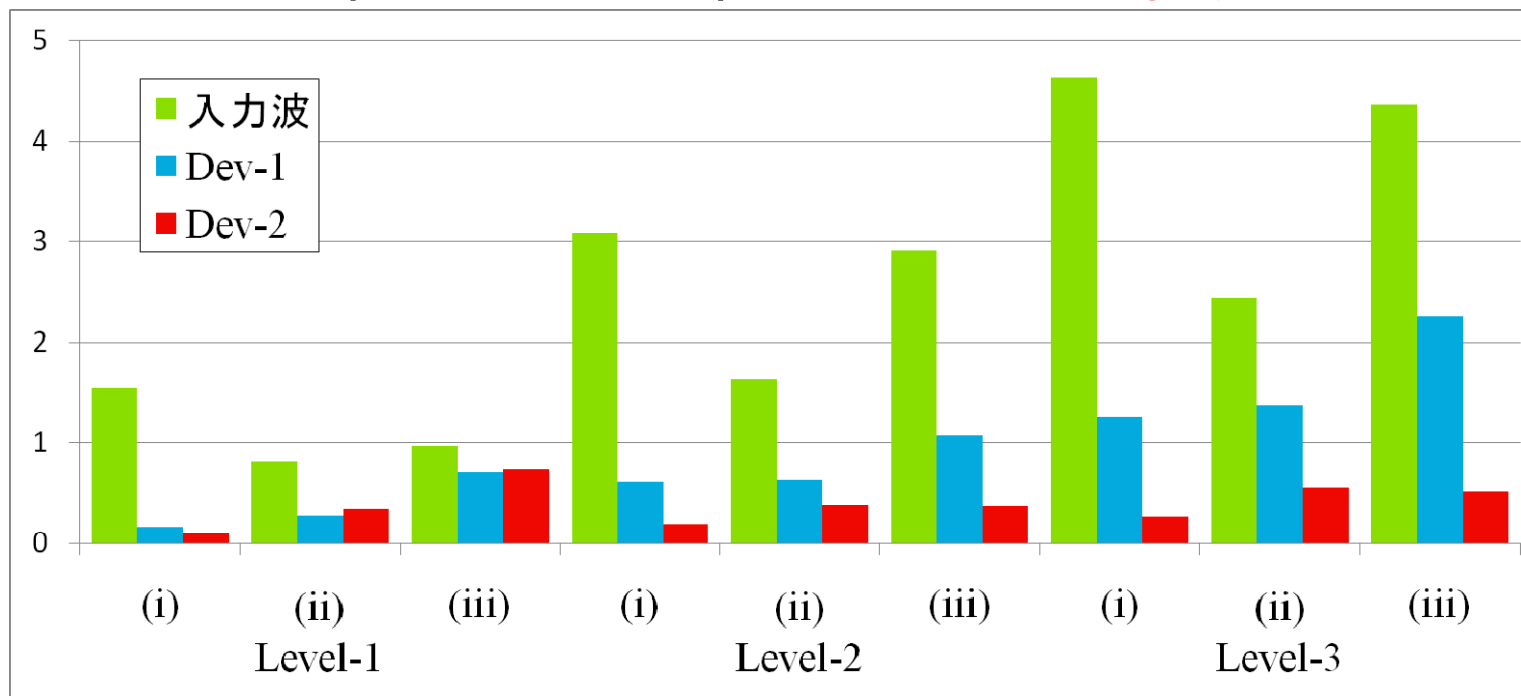
減衰を導入した場合

- Dev-1, 2に対して**減衰力**を導入
- 減衰係数 $c = 30.0 \text{ Ns/m}$ とする.
- 応答が長周期化され,
その大きさが低減されていることが分かる.

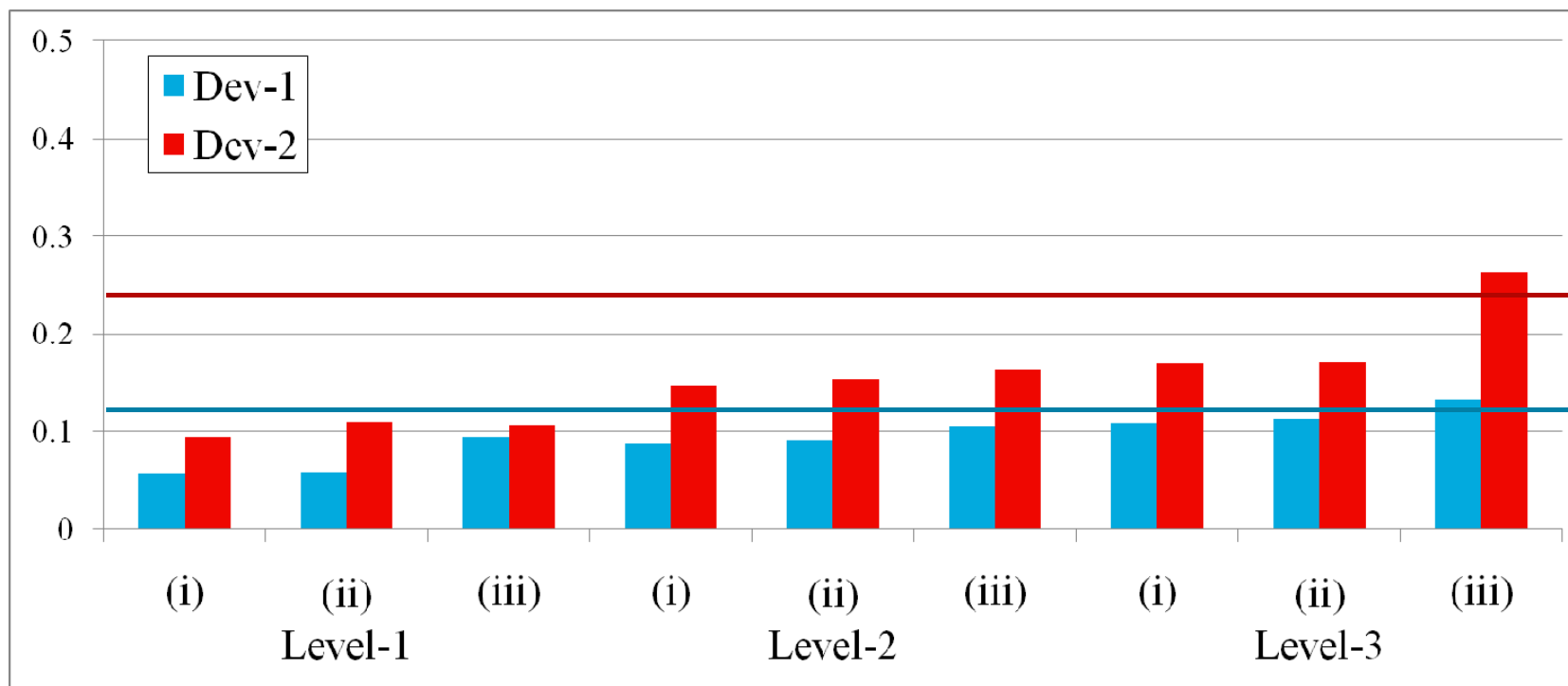


Dev-1 のEl centro Level-2 に対する時刻歴応答加速度

- Dev-1
 - すべての入力に対して, 加速度応答が**80%以下に低減**
 - 想定したLevel-1を上回る規模のLevel-2,3の地震動に対しても応答加速度は低減
- Dev-2
 - 全ての応答について応答が**50%以下に低減**

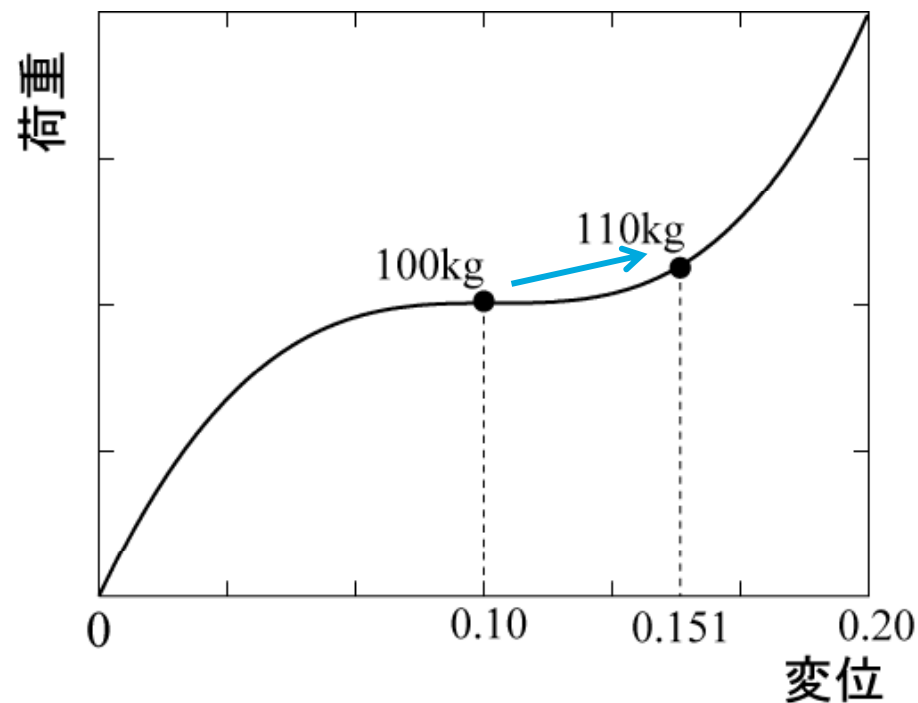


- 装置の最大応答変位
- 概ね、最大変位が荷重漸増域の幅を下回る

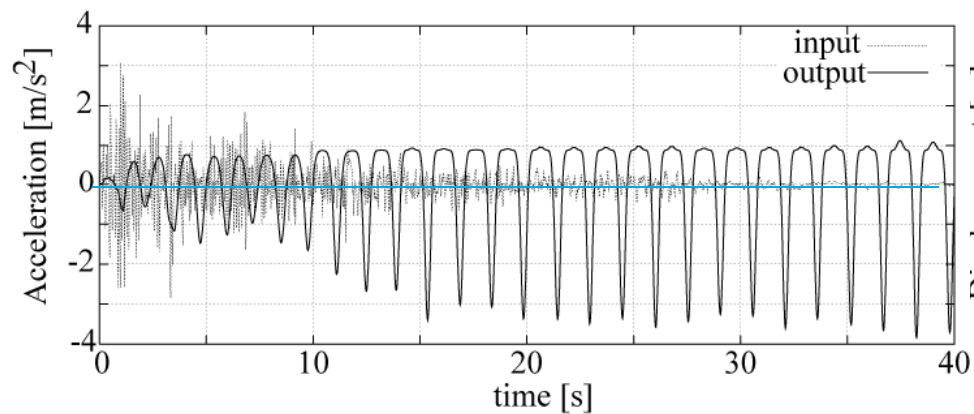


最大応答変位

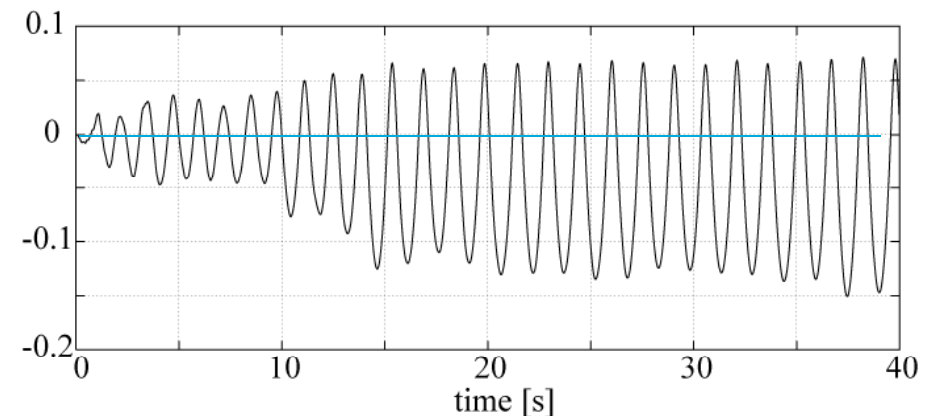
- 前節で設計したDev-1 を用い, 減衰はない.
- 質点M の質量を100 kg から110 kg に変更する.
- 質量110kgのとき, 釣合い状態での固有周期は1.16 秒であった.



- El centroのLevel-1, 2, 3を入力
- **剛性のより小さい**鉛直上向き方向（釣合い経路の負の方向）の加速度が大きくなる
- 鉛直上向き方向（釣合い経路の負の方向）の変位が大きくなる

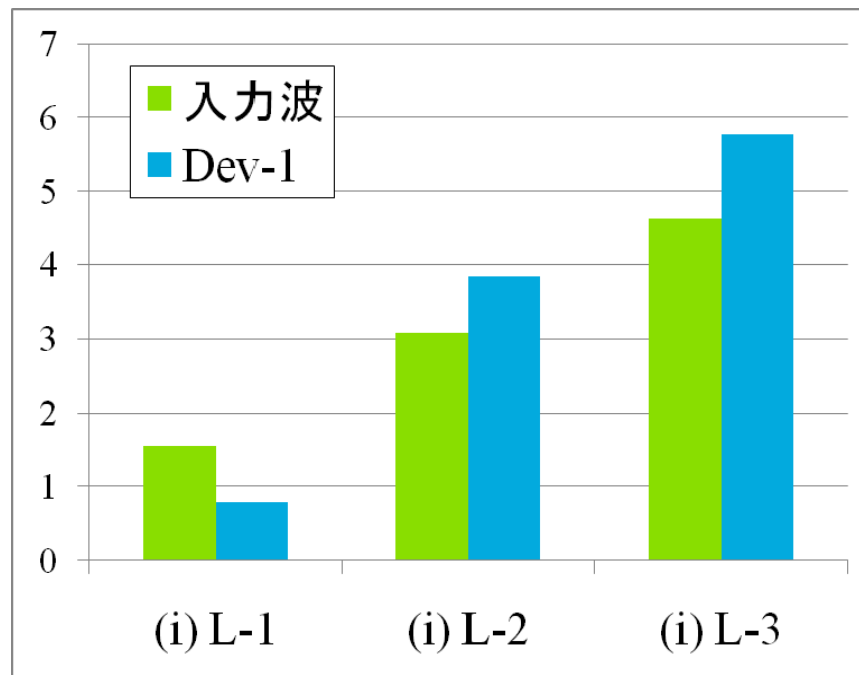


El centro Level-2 応答加速度

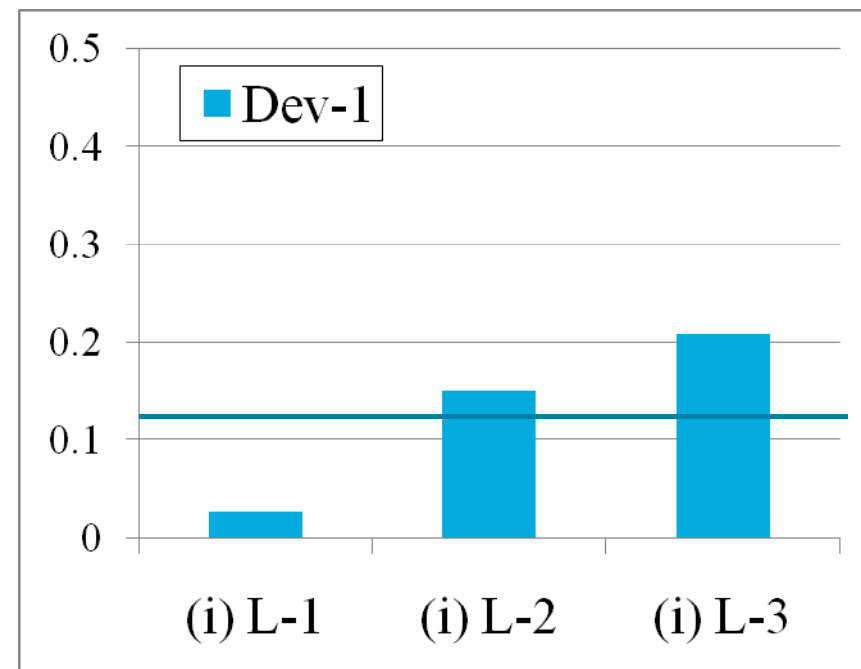


El centro Level-2 応答変位

- Level-1の入力波に対しては，最大加速度は低減される．しかしLevel-2, 3 に対しては応答が増大する
- Level-2, 3 に対しては応答変位が大きくなる



最大応答加速度



最大応答変位

1. トラス構造のトポロジー最適化手法を大変形を許容したコンプライアントメカニズムに適用することにより、**指定釣合い経路を有する構造系**を生成することができた。
2. 上記手法を用いると、荷重漸増領域を有する構造を得ることができ、**上下動に対する免震装置**として用いることができる。
3. 精密機器などを想定した質点を上記の免震装置で支持し、記録地震波に対する時刻歴応答解析を行った。解析結果から、いくつかの入力に対して質点での応答加速度が低減した。しかしいくつかの入力に対して応答が増大する結果となった。また、**減衰を導入することにより応答加速度を低く抑えることができ、免震装置としての有用性を示すことができた。**
4. 機器の質量が変化した場合の応答について検証した。**質量の増加により応答加速度、変位ともに上向きの応答が大きくなる傾向が見られた。**