

第101回 耐震工学研究会

平成31年 4月 23日(火)
中央大学駿河台記念館610号室

長周期地震動に対応した
免震構造用積層ゴム支承の座屈安定性

東京都市大学 教授 西村 功

■ 本日の話題

1. 積層ゴム支承の座屈現象の解明

応用1: 戸建免震構造の実用化

2. 大型積層ゴム支承の実証研究

応用2: 長周期地震動に対応した免震構造

3. 制震構造への展開

応用3: 中高層ビルの耐震性能向上を目的
とした動吸振器の開発

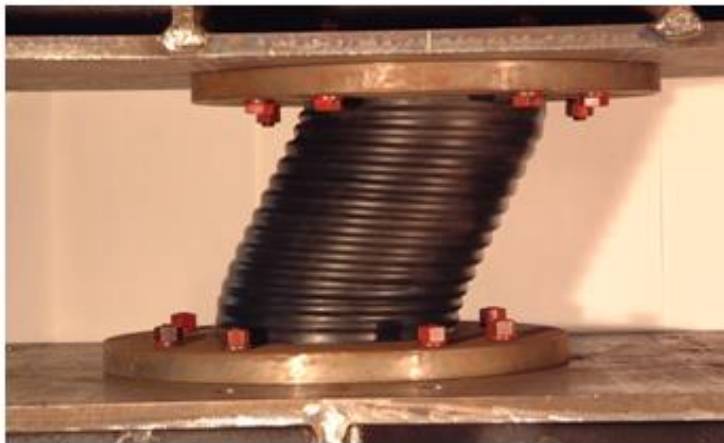
応用4: 再生可能エネルギーへの応用

■ 積層ゴム支承の座屈現象の解明

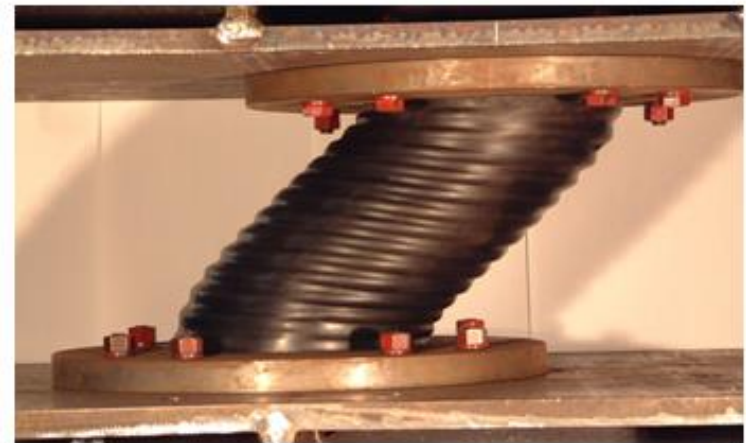
○実験室における現象の発見

→ 大変形状態でも座屈荷重が低下しない

○疑問 → なぜ、このような現象が起きるのか？



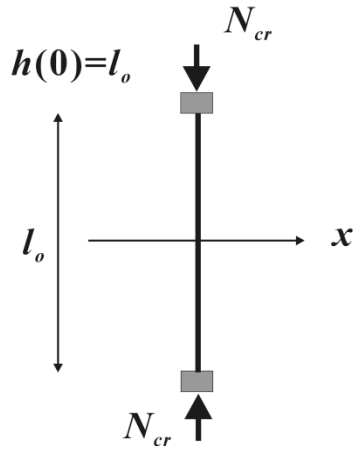
水平変形 100mm 鉛直荷重 241kN
(直径 250mm、中空断面直径 150mm)



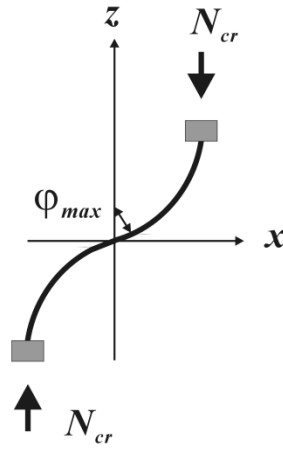
水平変形 200mm 鉛直荷重 263 kN
(直径 250mm、中空断面直径 150mm)

■ 解析予想

(I) $k = 0$

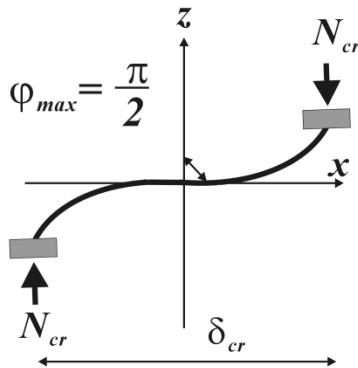


(II) $0 < k < 0.3$

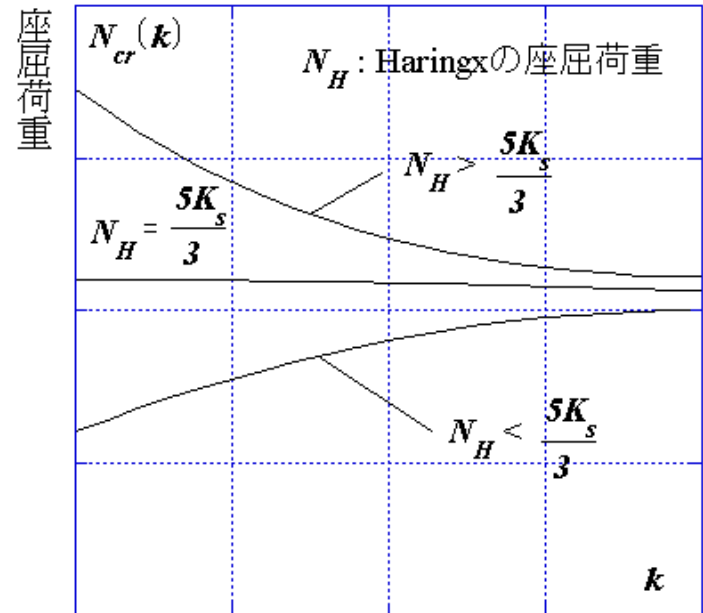
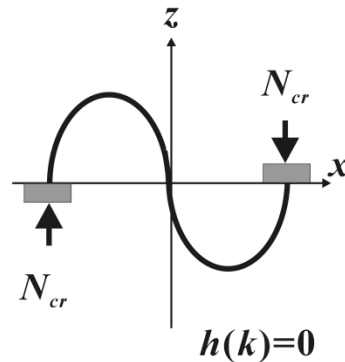


$$\begin{cases} N_H < \frac{5K_S}{3} & \Leftrightarrow \lambda(k) < \frac{l_o}{\pi} = \lambda_H \\ N_H > \frac{5K_S}{3} & \Leftrightarrow \lambda(k) > \frac{l_o}{\pi} = \lambda_H \end{cases}$$

(III) $k = 0.707$

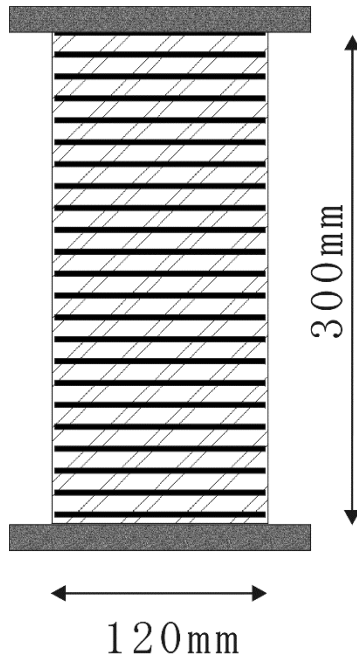


(IV) $k = 0.908$



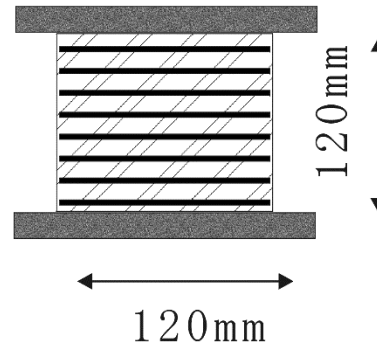
変形の増大 →

■ 解析予想



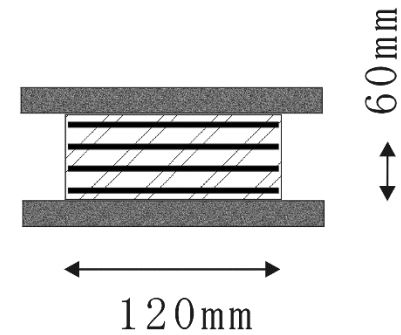
$$G_e = 2.0 \text{ N/mm}^2$$

A type



$$G_e = 1.0 \text{ N/mm}^2$$

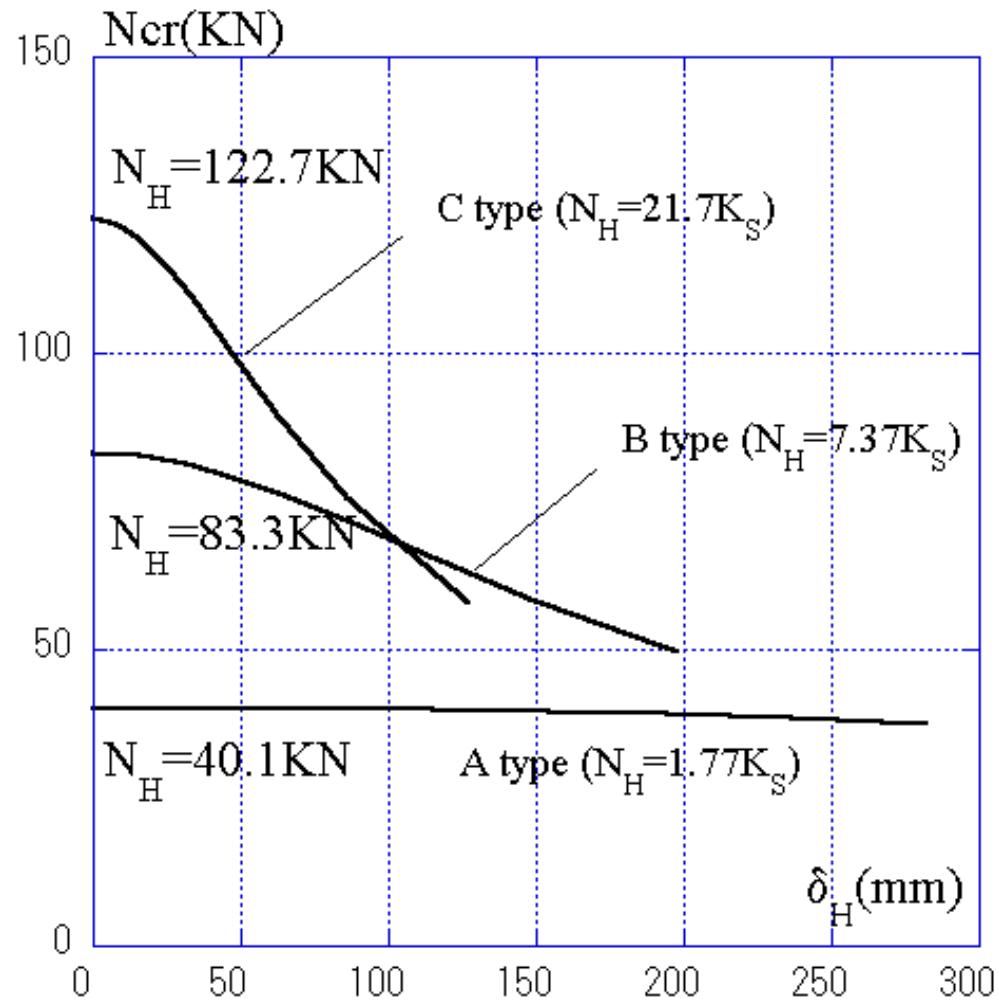
B type



$$G_e = 0.5 \text{ N/mm}^2$$

C type

■ 解析予想



なぜ、不安定な現象を二つ合わせると安定になるのか？

◇非線形波動(ソリトン波)



◇ソリトン(非線形波動)の非線形微分方程式

$$4(1+k^2)\frac{du}{dx} - 6u(x)\frac{du}{dx} + \frac{d^3u}{dx^3} = 0$$

ソリトン是非線形波動の分散性と非線形性が打ち消しあって、安定な波形が維持される。

$$u(x) = 2k^2 \operatorname{sn}^2(x)$$

◇積層ゴム支承の非線形座屈問題と非線形波動の関係

$$\frac{d^2 M}{ds^2} + \frac{1}{\lambda^2} \left(1 - 2k^2 \operatorname{sn}^2 \left(\frac{s}{\lambda} + K(k) \right) \right) M(s) = 0$$

$$\frac{d^2 \varphi}{ds^2} + (\mu - V(s)) \varphi(s) = 0$$

曲げモーメントの満足すべき関係式はシュレディンガー波動方程式に等しく、ポテンシャル関数はKdv方程式の周期解に等しい。さらに、座屈荷重はこの問題の固有値となる。

◇非線形波動方程式の周期解と固有値

$$\frac{d^2\varphi}{ds^2} + (\mu - V(s))\varphi(s) = 0$$

KdV方程式のソリトン解は、シュレディンガー方程式のポテンシャル関数となり、その場合の固有値 μ は時間の変動に対して一定であることが知られている。

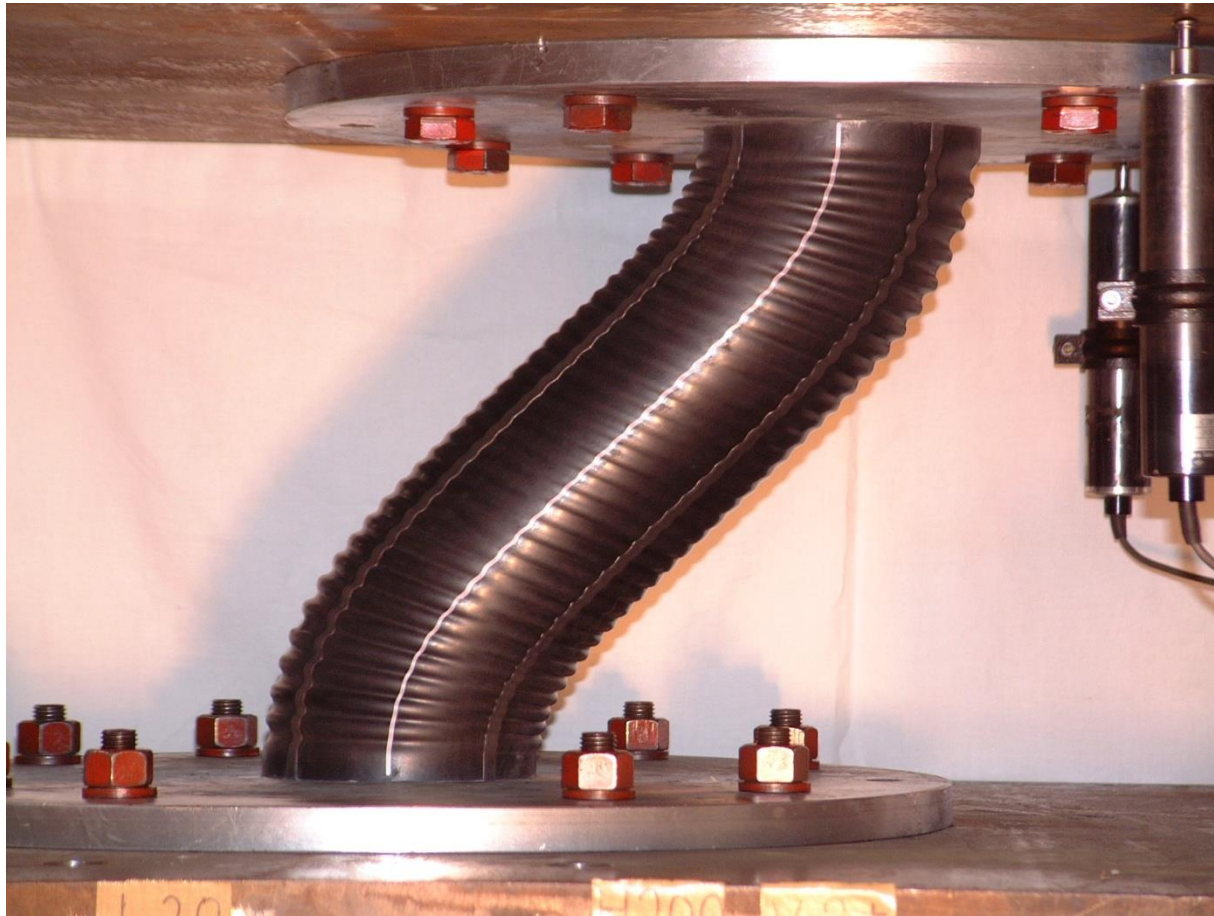
ソリトン是非線形波動の分散性と非線形性が打ち消しあって、安定な波形が維持される。

◇非線形波動と非線形座屈の類似

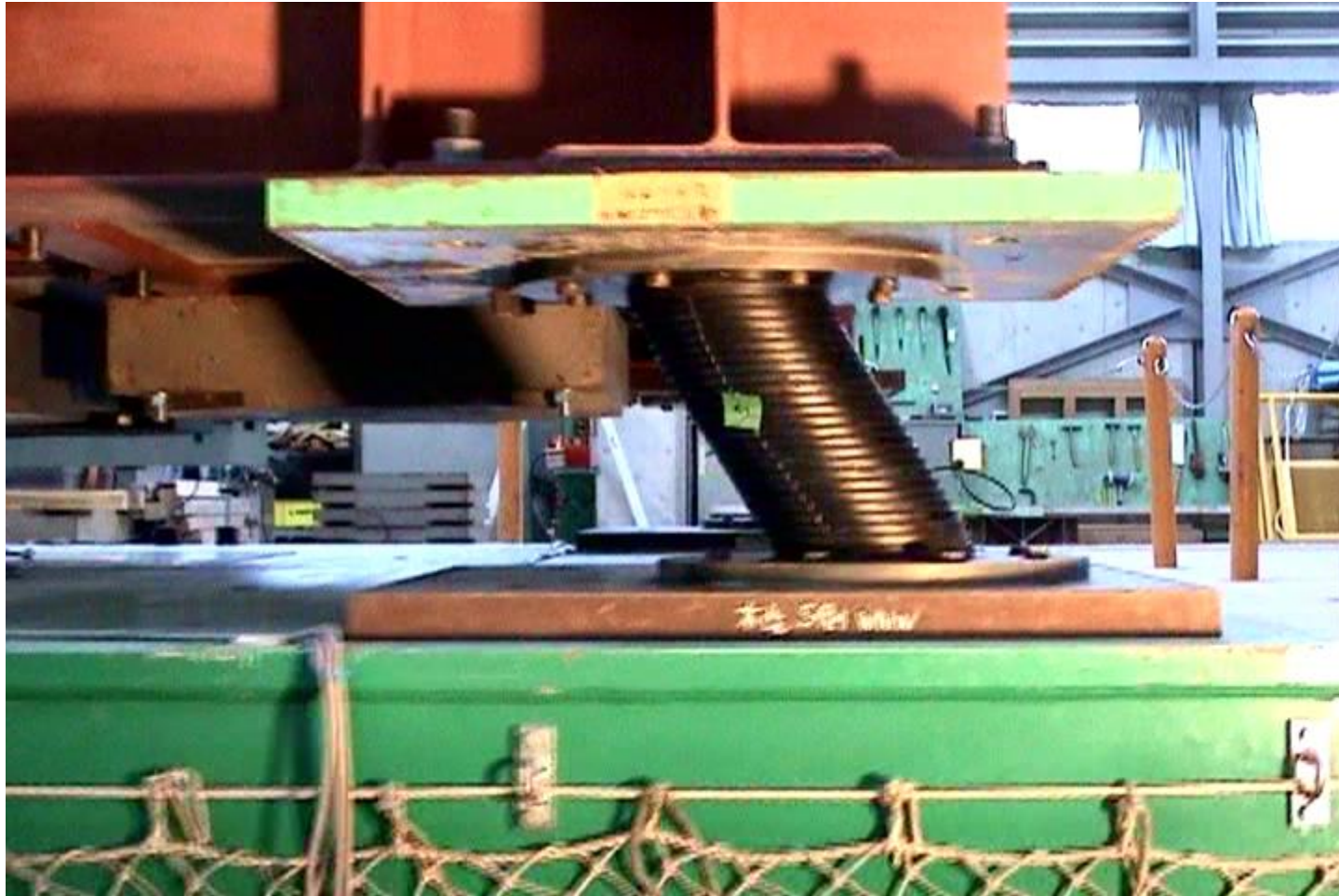
ソリトン是非線形波動の分散性と非線形性が打ち消しあって、安定な波形が維持される。

積層ゴムでは、部材長さが長くなることと、微分方程式の非線形性(剛性低下)が打ち消しあって、固有値が一定になる。

■ 静的な実験による座屈理論の検証

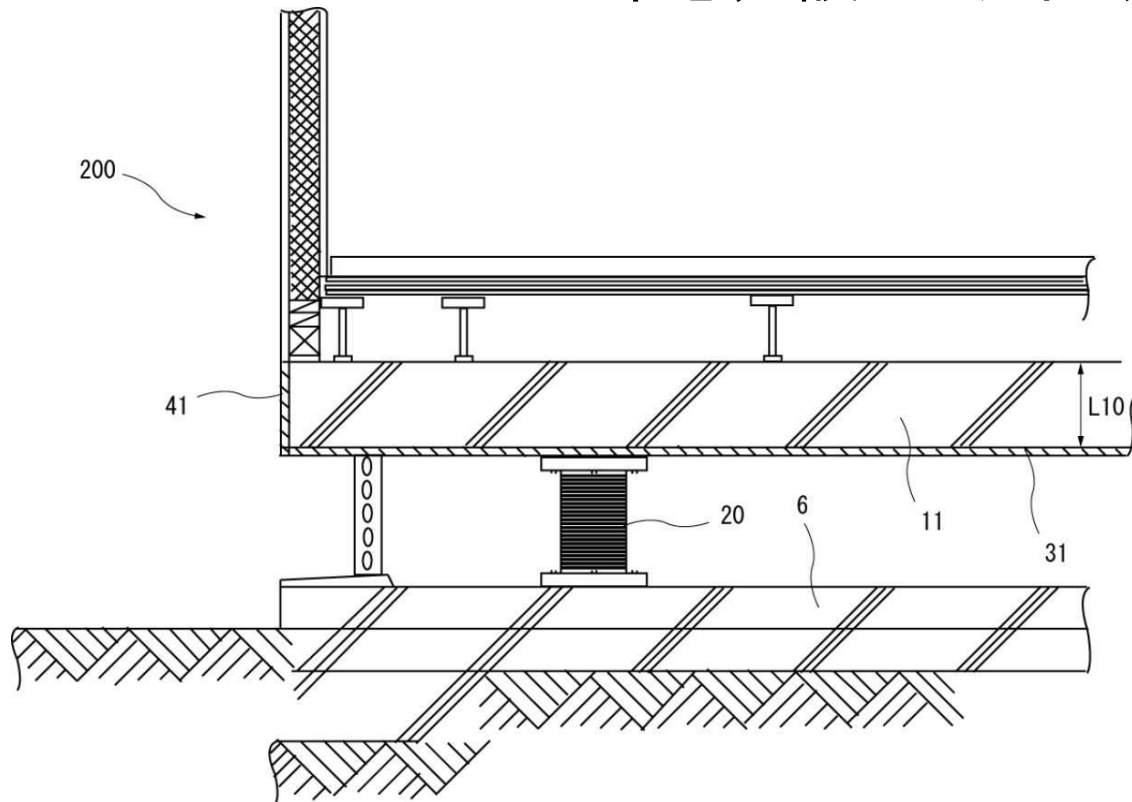


■ 応用1： 戸建免震構造の実用化
東急建設との共同研究



■ 応用1： 戸建免震構造の実用化

東急建設との共同研究



■ 応用1： 戸建免震構造の実用化
東急建設との共同研究



小さな積層ゴムでできても、大型の積層ゴムでは無理？

■ 新理論から予想された未発見の現象

1. 座屈荷重が高いと変形性能は却って低下する
2. 材料のせん断剛性の高い方が変形性能は増大する
3. 縦方向の部材長の長い方が、水平変形は増大する
4. 曲げ剛性とせん断剛性には最適な組み合わせがあり、これを満足すると非線形固有値問題が見かけ上線形の固有値をとる → どんなに変形しても潰れない柱ができる。

免震ゴム（建築用）



■ 大型積層ゴム支承の実証実験研究

国土交通省建設技術助成研究課題

2012年6月 ～ 2015年3月(3年間)

1. 開発目的

中低層建築 → 告示免震の普及

高層建築 → 長周期地震動対応

2. 技術的手段

座屈しない積層ゴム支承の実現

3. 学術的新規性

非線形固有値問題の定式化

ソリトン波動方程式との類似性

■ 研究組織

○研究代表：西村 功

東京都市大学
工学部 建築学科
西村研究室

○共同研究者：

東急建設株式会社
技術研究所
豊嶋 学
鈴木 敏志

○試験体の制作

オィレス工業株式会社
長田修一
仲村崇仁

○研究推進委員会

- ・中村英夫(東京都市大学学長)
- ・秋山 宏(東京大学名誉教授)
- ・塩原 等(東京大学大学院教授)
- ・西山 功(建築研究所 理事)
- ・深澤義和(日本免震構造協会
副会長)
- ・有山伸司(JR東日本旅客鉄道)
- ・沼上 清(東急建設技研所長)

■ 免震構造用積層ゴムの常識

1. 平たくて座屈荷重の高い方が安定している
2. 面積が大きくて、高さが低い
3. ゴムのせん断弾性係数は低い方が良い
4. → 部材は座屈によって終局耐力が決定する

免震ゴム（建築用）

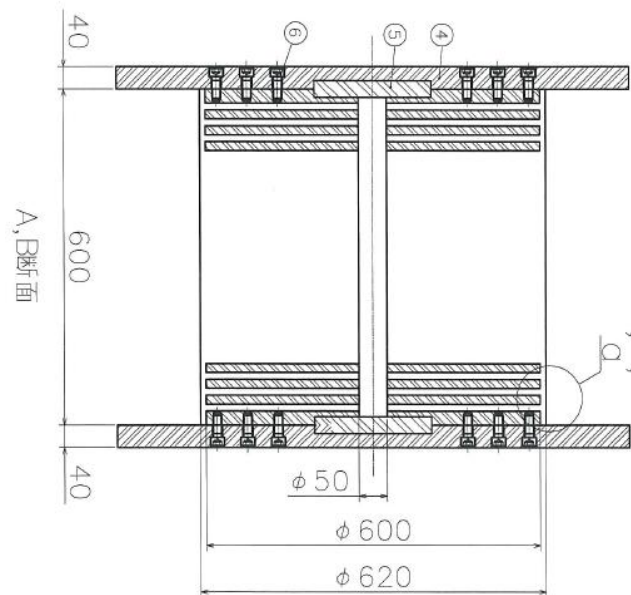


■ 新発見の原理を応用する

1. 座屈しない積層ゴム支承を試作する
2. ゴムのせん断弾性係数は高い方が良い。
3. ゴムの引張耐力か接着剤能力で終局耐力が決まる。
4. 変形能力は、支承高さから決まる。
5. 大型の積層ゴム支承で実験し、理論の普遍性を検証する。

■ プロトタイプ積層ゴムの形状

A: 材料強度で終局耐力 B: 接着性能で終局耐力



試験体形状

Aタイプ試験体

直径 600mm

支承高さ 550mm

積層鋼板厚み 16mm × 19

積層ゴム厚み 12.3mm × 20

ゴムせん断弾性係数 $G = 1.3 \text{ N/mm}^2$

ハリンクス座屈荷重 = 10,000KN

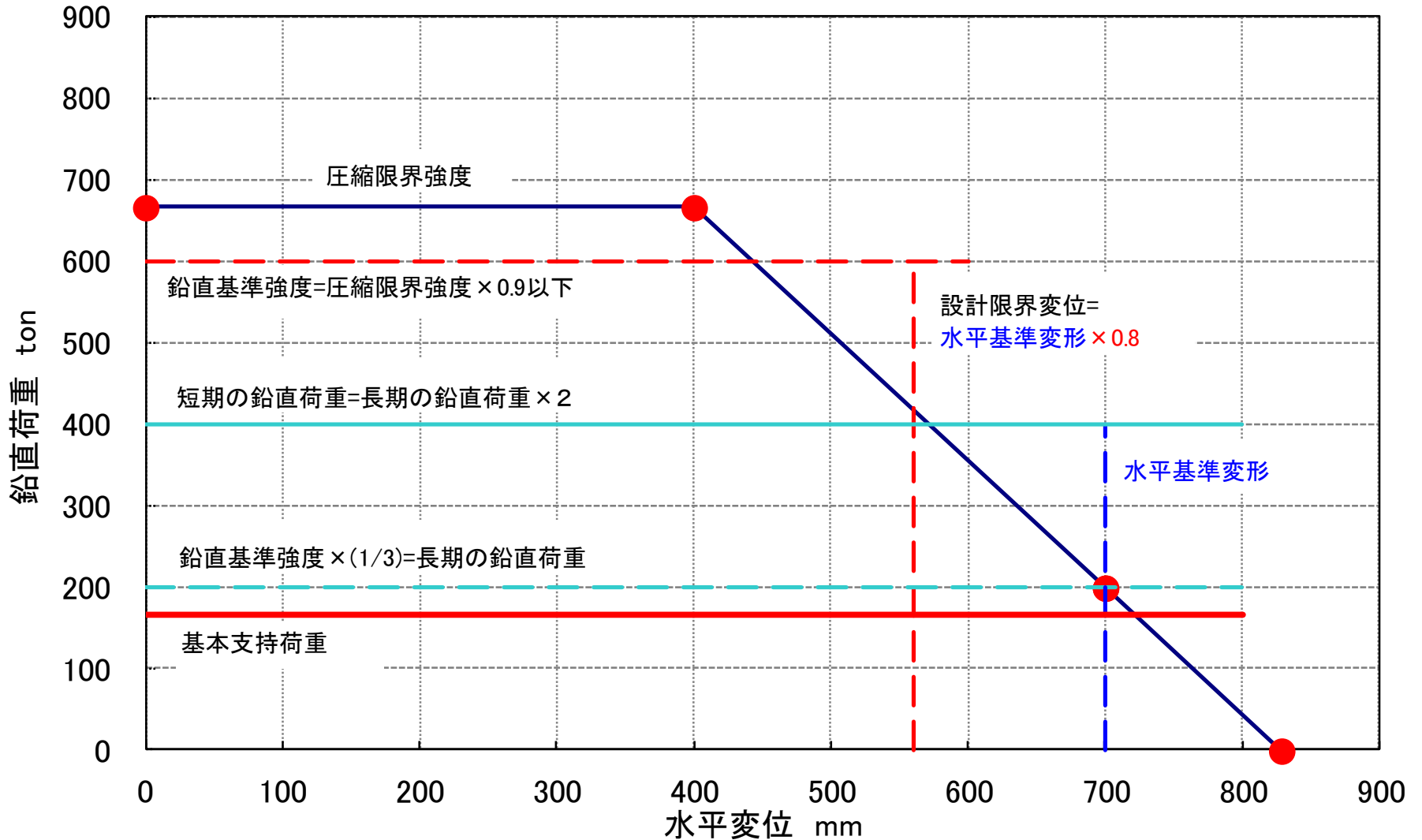
Bタイプ試験体

積層鋼板厚み 9mm × 28

積層ゴム厚み 10.28mm × 29

■ プロトタイプ積層ゴムの目標性能(限界耐力)

圧縮限界強度領域図



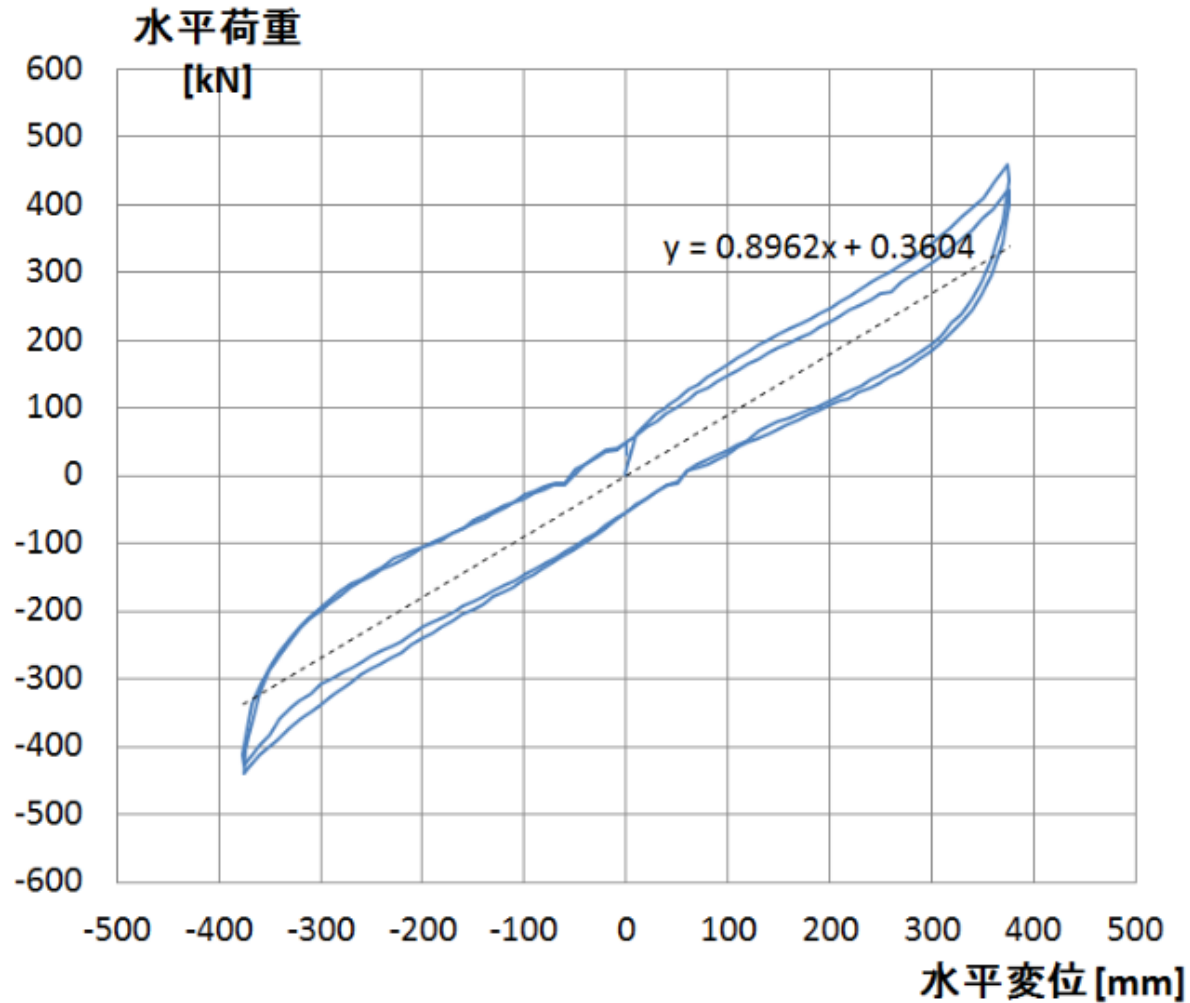
■ 2軸 加力装置(スライド支承による低摩擦実験装置)



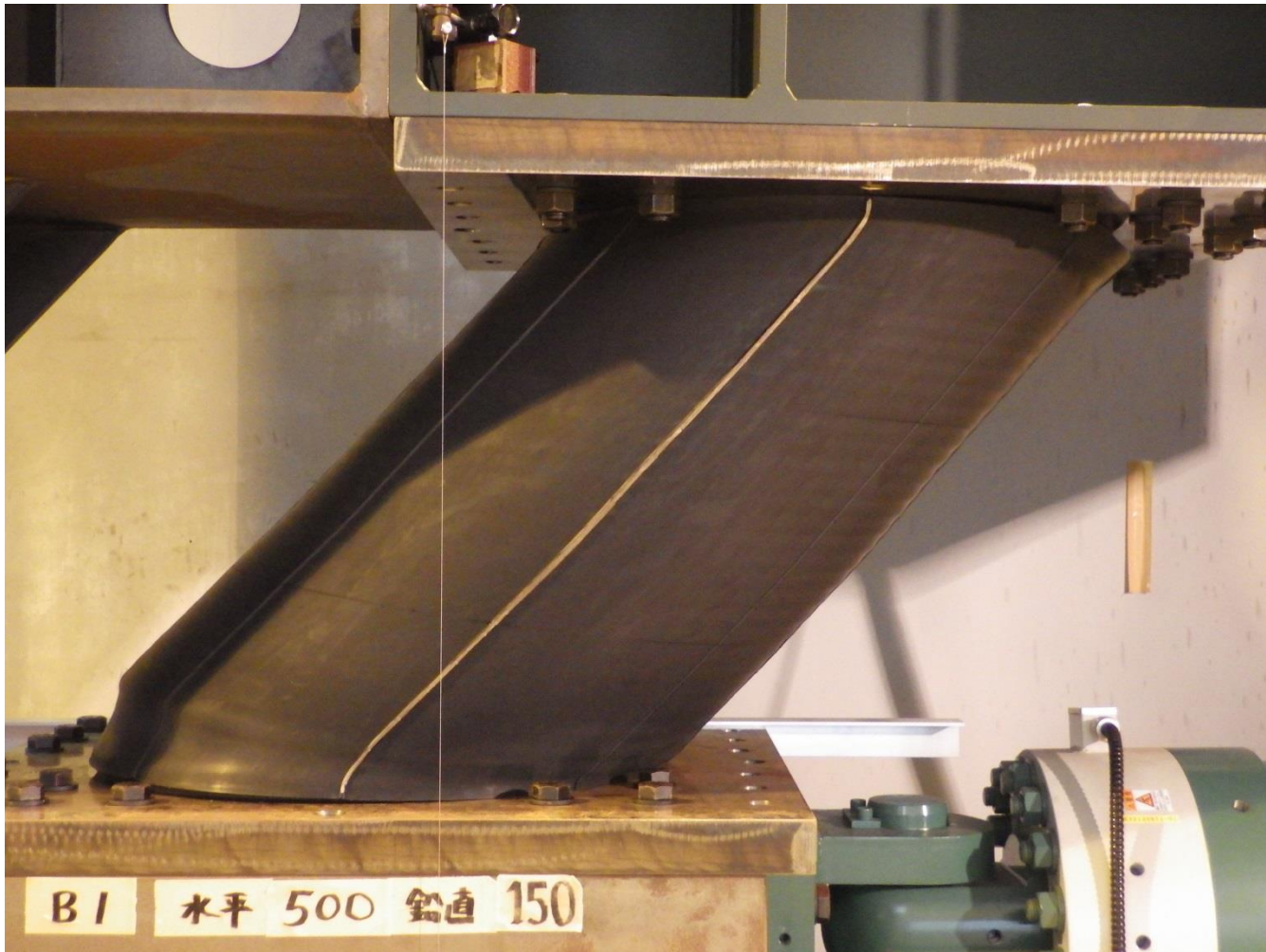
■ 試験体積層ゴム(Bタイプ)の実験状況



■ プロトタイプ積層ゴム(Bタイプ)の実験状況



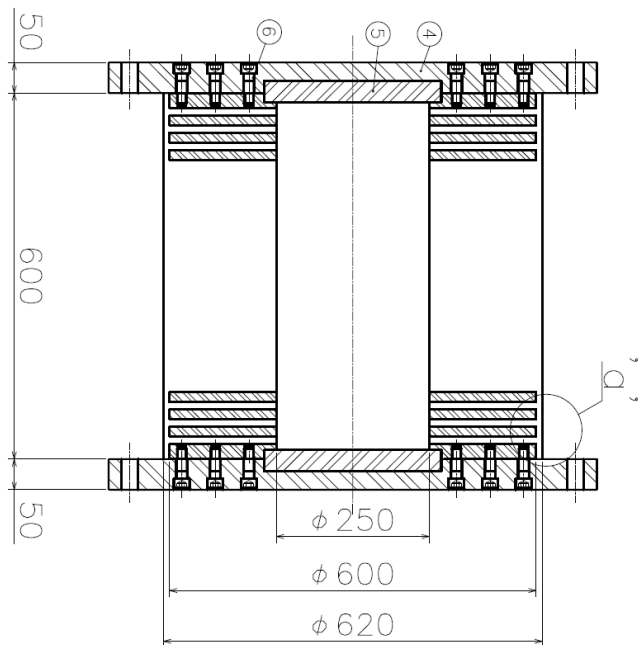
■ 試験体積層ゴム(Bタイプ)の実験状況



■ 試験体積層ゴム(Aタイプ)の実験状況



■ プロトタイプ積層ゴムの形状
C: 中空孔あり



Cタイプ試験体

直径 600mm

支承高さ 550mm

積層鋼板厚み 16mm×19

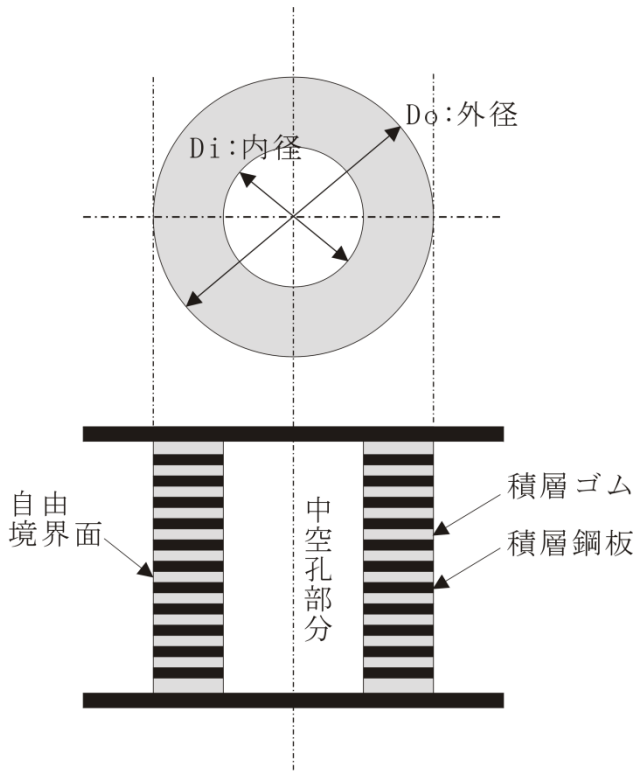
積層ゴム厚み 12.3mm×20

ゴムせん断弾性係数 $G=1.3\text{N/mm}^2$

中空孔あり→せん断剛性が低下

Cタイプ試験体形状

◇中空断面積層ゴム支承の鉛直剛性

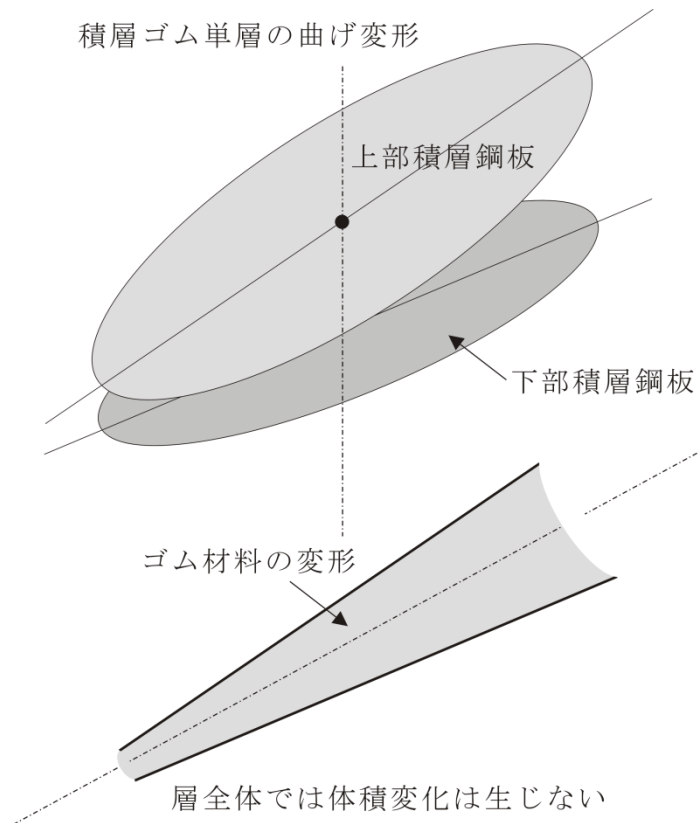


$$E_c = 2G + K + \frac{2K}{\lambda_o^2 - \lambda_i^2} \times \left(\begin{array}{c} B_1 \left(\lambda_o I_1(\lambda_o) - \lambda_i I_1(\lambda_i) \right) \\ + B_2 \left(\lambda_i K_1(\lambda_i) - \lambda_o K_1(\lambda_o) \right) \end{array} \right)$$

$$\frac{2G}{K + 2G} \begin{pmatrix} \frac{I_1(\lambda_i)}{\lambda_i} & -\frac{K_1(\lambda_i)}{\lambda_i} \\ \frac{I_1(\lambda_o)}{\lambda_o} & -\frac{K_1(\lambda_o)}{\lambda_o} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix}$$

$$- \begin{pmatrix} I_o(\lambda_i) & K_o(\lambda_i) \\ I_o(\lambda_o) & K_o(\lambda_o) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{K}{K + 2G} \\ \frac{K}{K + 2G} \end{pmatrix}$$

◇中空断面積層ゴム支承の曲げ剛性



$$E_b = 2G + K$$

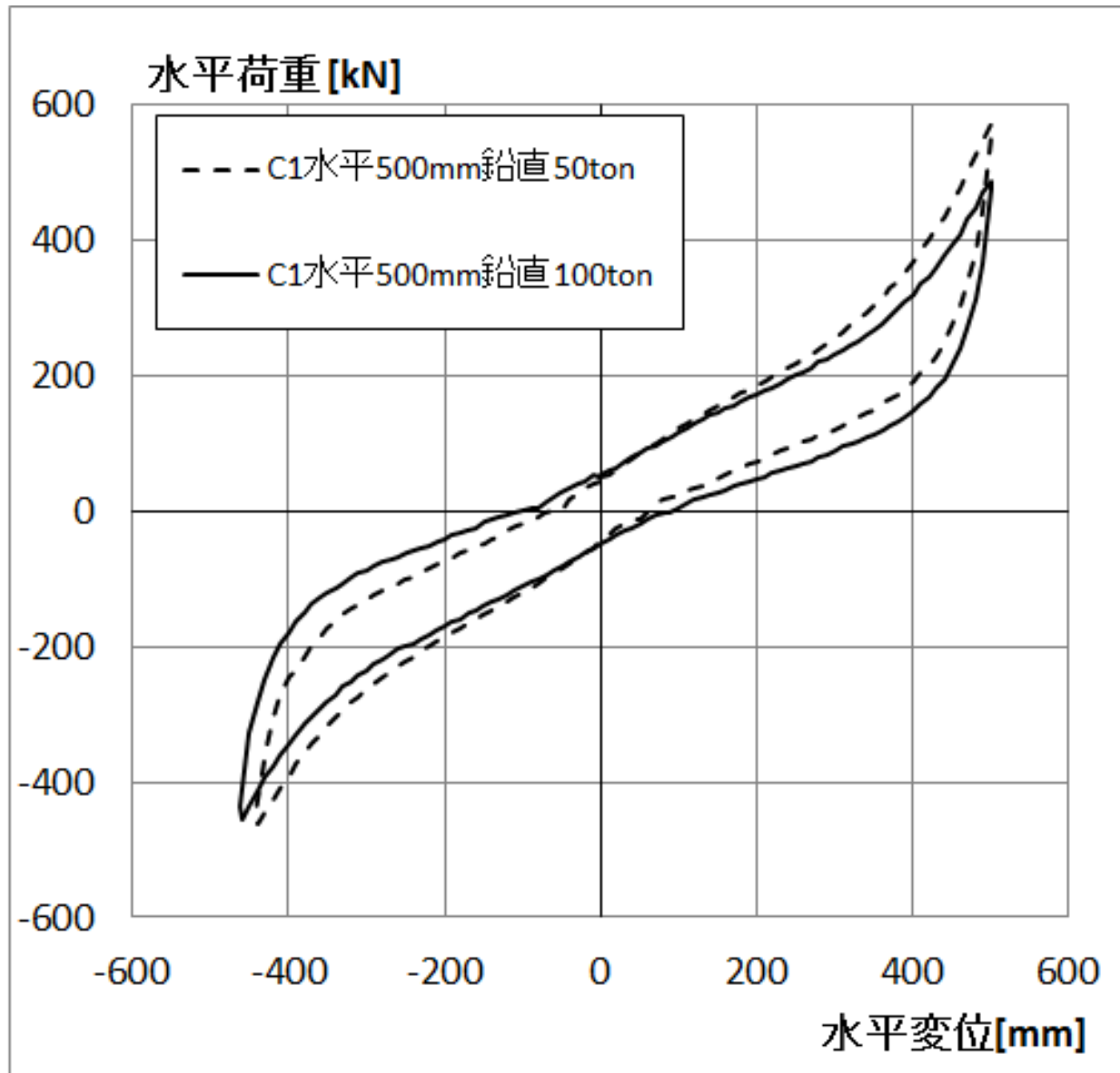
$$+ \frac{4K}{\lambda_o^4 - \lambda_i^4} \left(\begin{array}{l} C_1(\lambda_o^2 I_2(\lambda_o) - \lambda_i^2 I_2(\lambda_i)) \\ + C_2(\lambda_i^2 K_2(\lambda_i) - \lambda_o^2 K_2(\lambda_o)) \end{array} \right)$$

$$\left(\begin{array}{cc} 2\frac{G}{K} I_1''(\lambda_i) + I_1(\lambda_i) & 2\frac{G}{K} K_1''(\lambda_i) + K_1(\lambda_i) \\ 2\frac{G}{K} I_1''(\lambda_o) + I_1(\lambda_o) & 2\frac{G}{K} K_1''(\lambda_o) + K_1(\lambda_o) \end{array} \right)$$

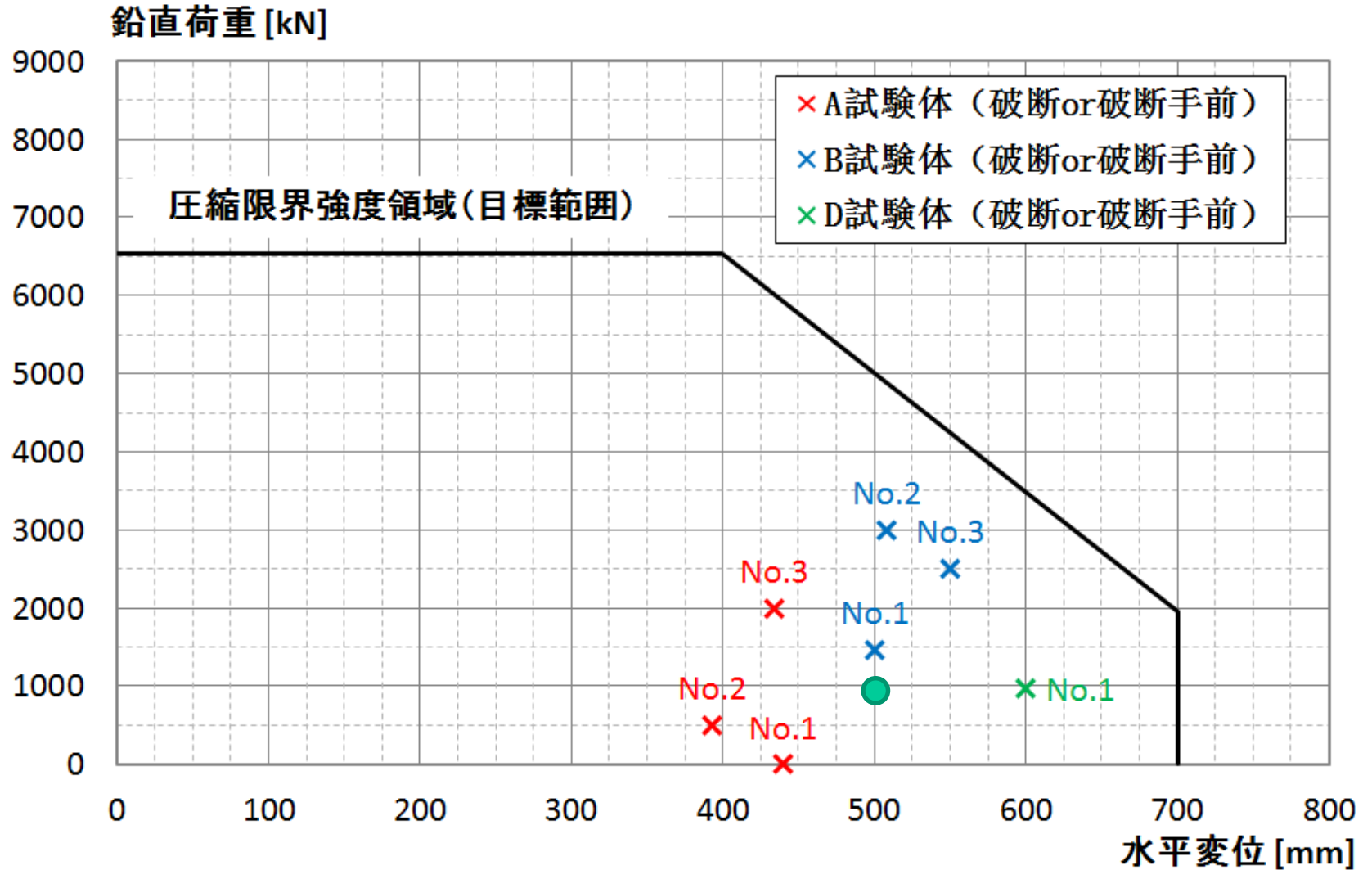
$$\times \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\lambda_i \\ -\lambda_o \end{pmatrix}$$

■ 試験体積層ゴム(Cタイプ)の実験状況

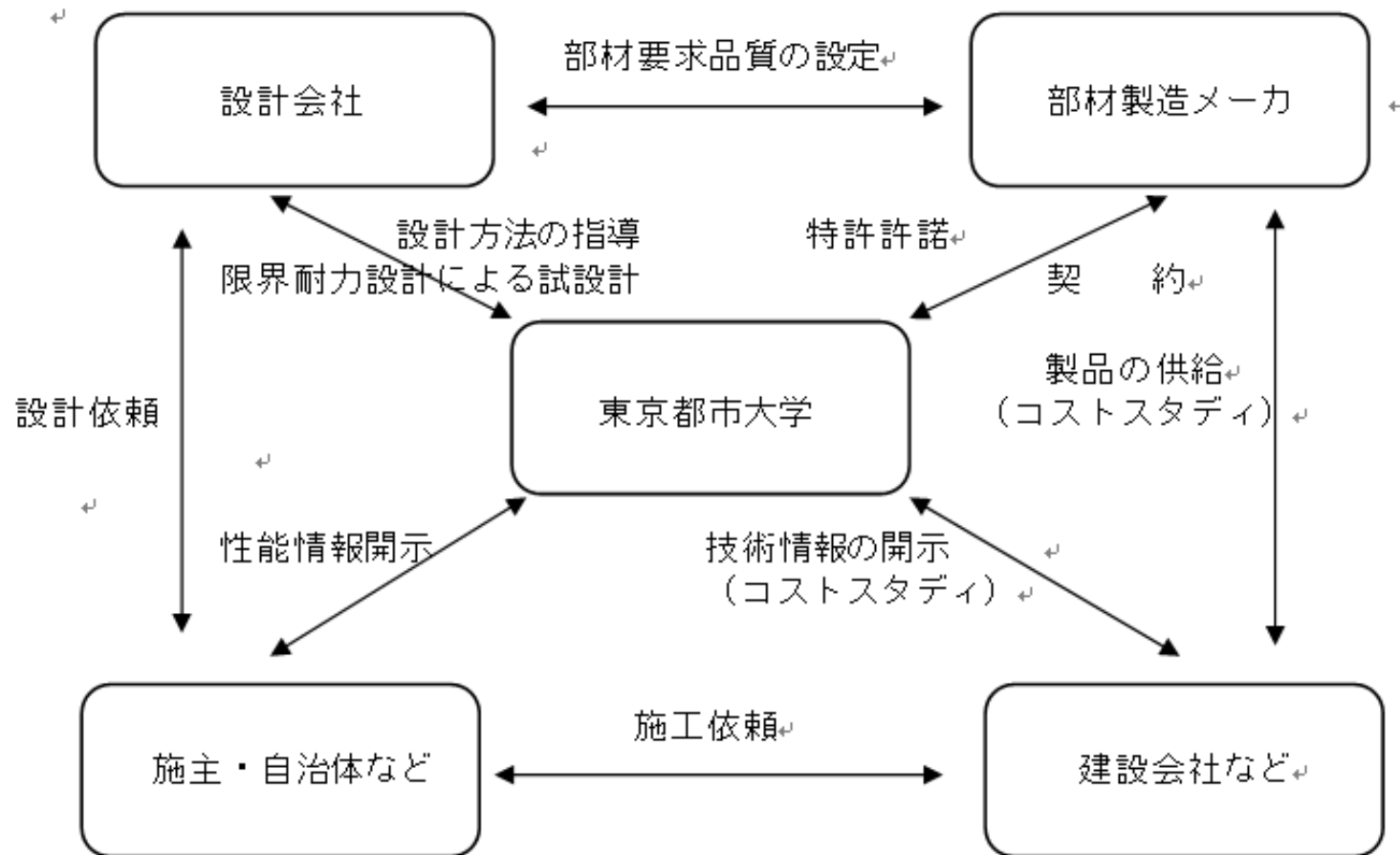




■ プロトタイプ積層ゴム(Cタイプ) 実験結果

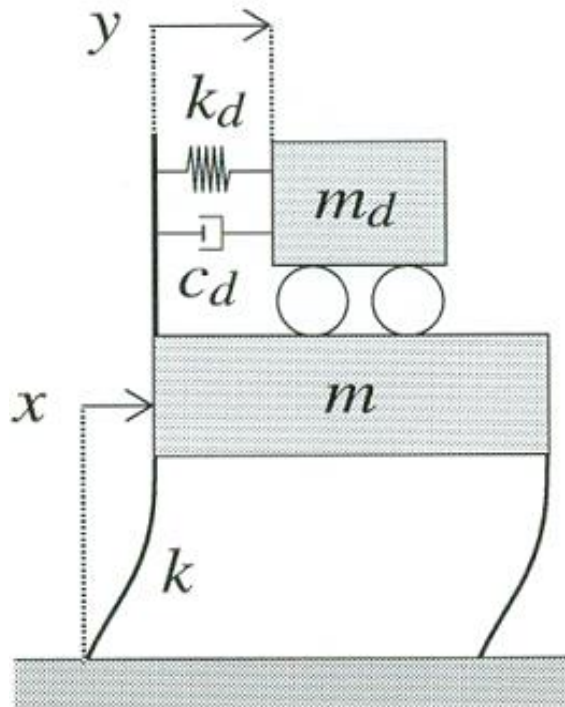


■ 応用2: 長周期地震動に対応した免震構造の開発 ゴムメーカーと実用化共同研究に移行



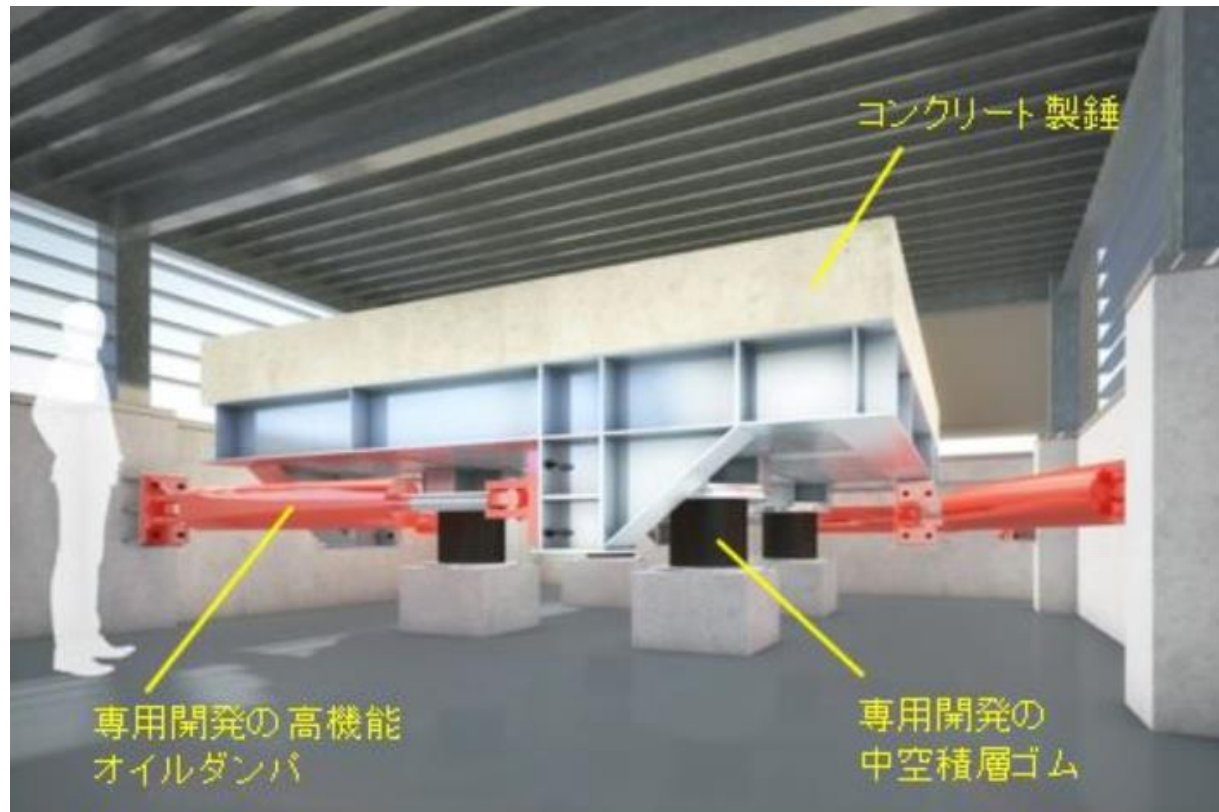
他分野への応用が可能なのではないか？

■ 応用3: 中高層ビルの耐震性能向上を目的としたTMD



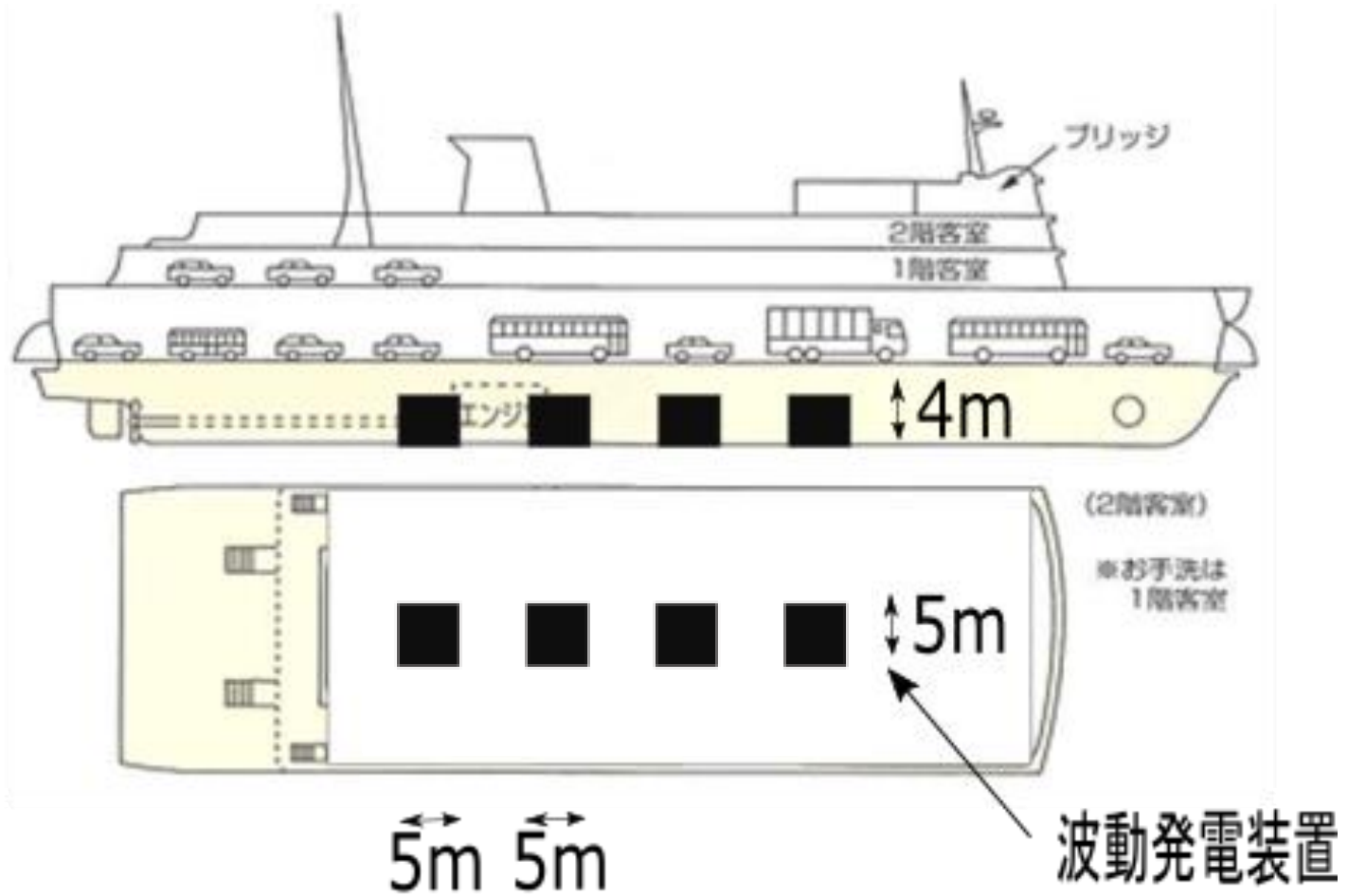
- 重量が軽い :
50トンから100トン
- 周期が長い :
1秒以上2秒程度
- ストロークが大きい:
50cm以上100cmまで

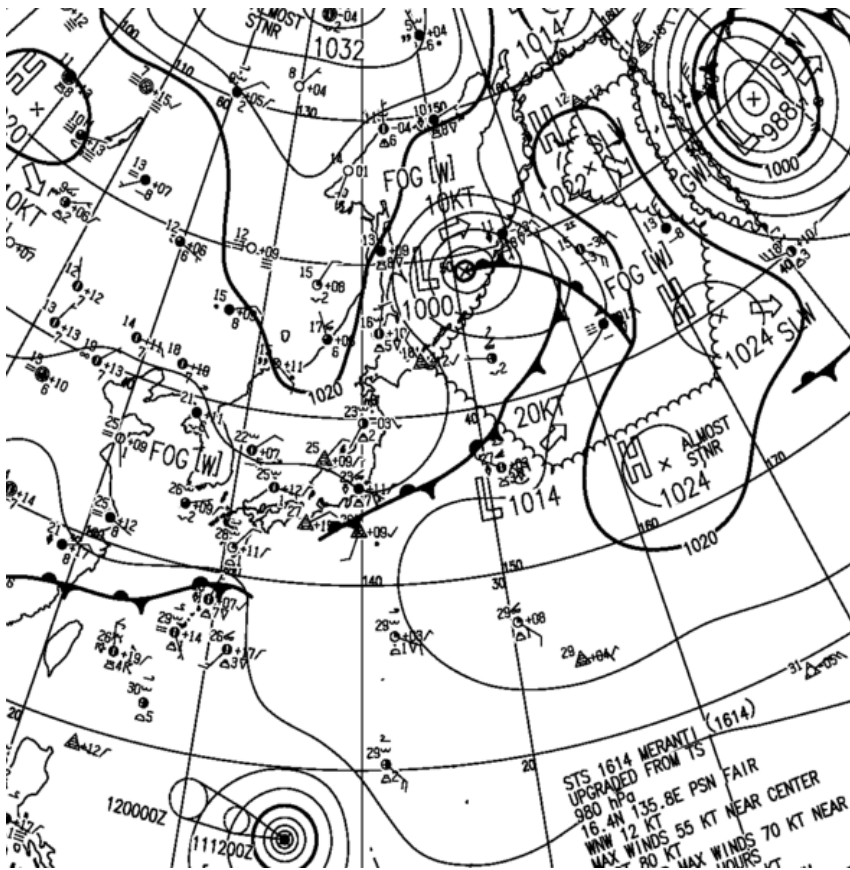
■ 応用3: 超高層ビルの耐震性能向上を目的としたTMD
鹿島建設との共同開発



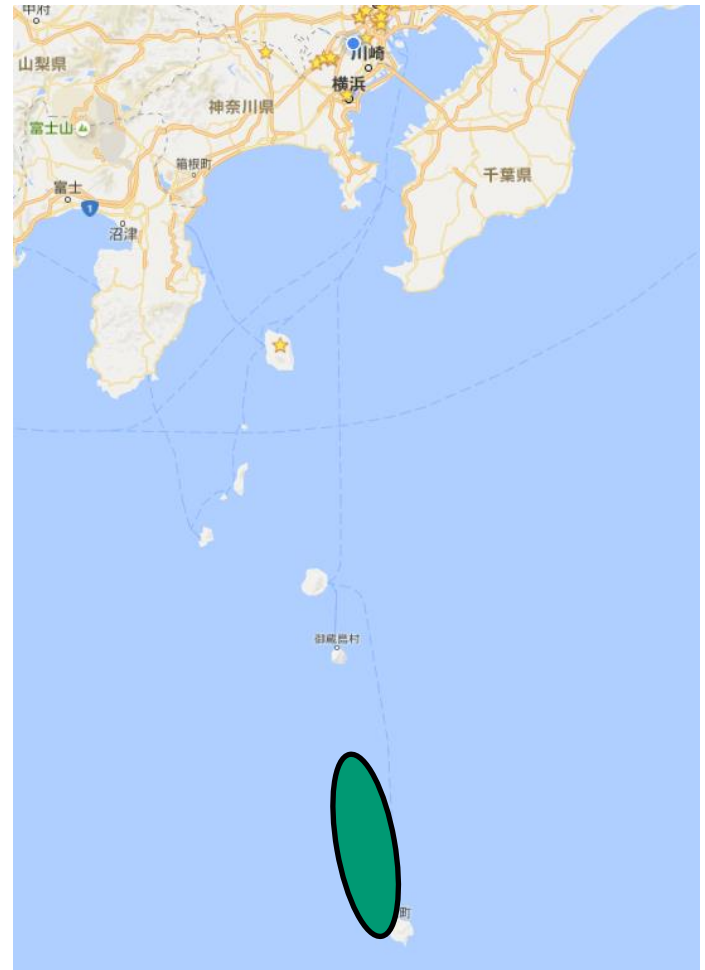
異分野の技術革新が可能ではないのか？

■ 応用4： 再生可能エネルギーへの応用





観測時の気圧配置
2016年9月11日

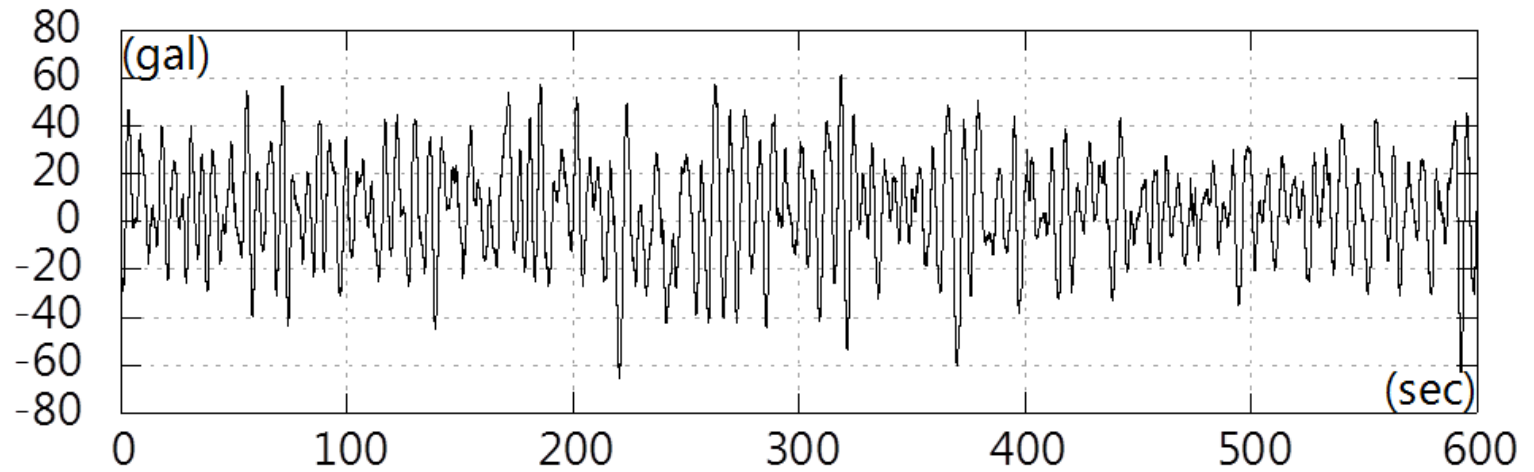
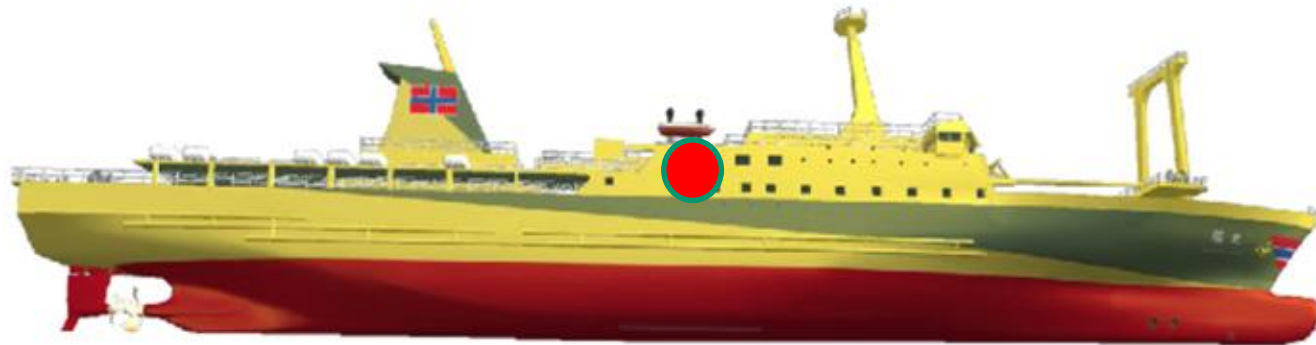


観測海域

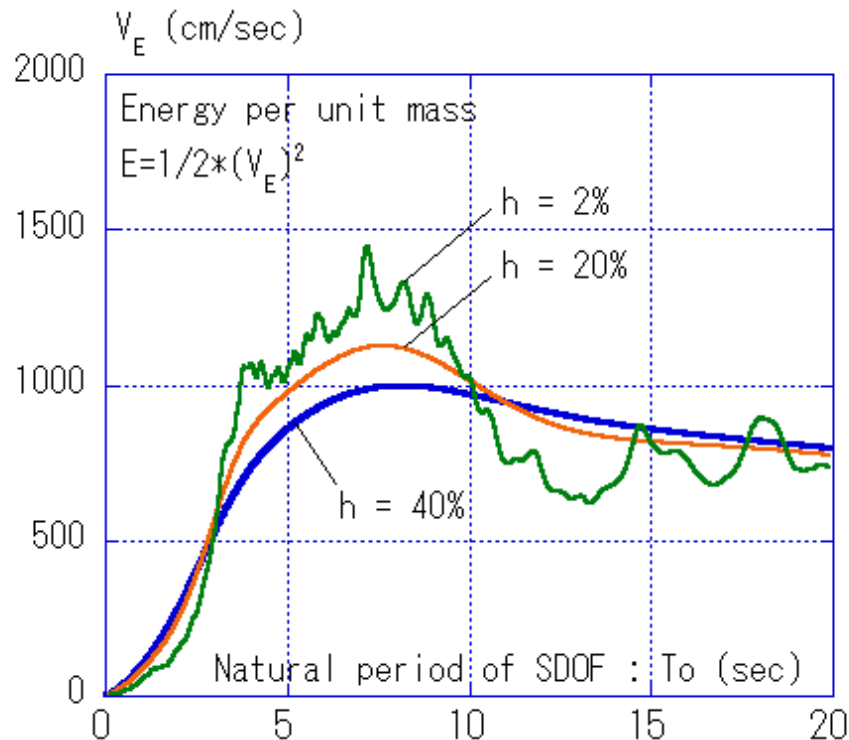
■ 橘丸(5700トン)



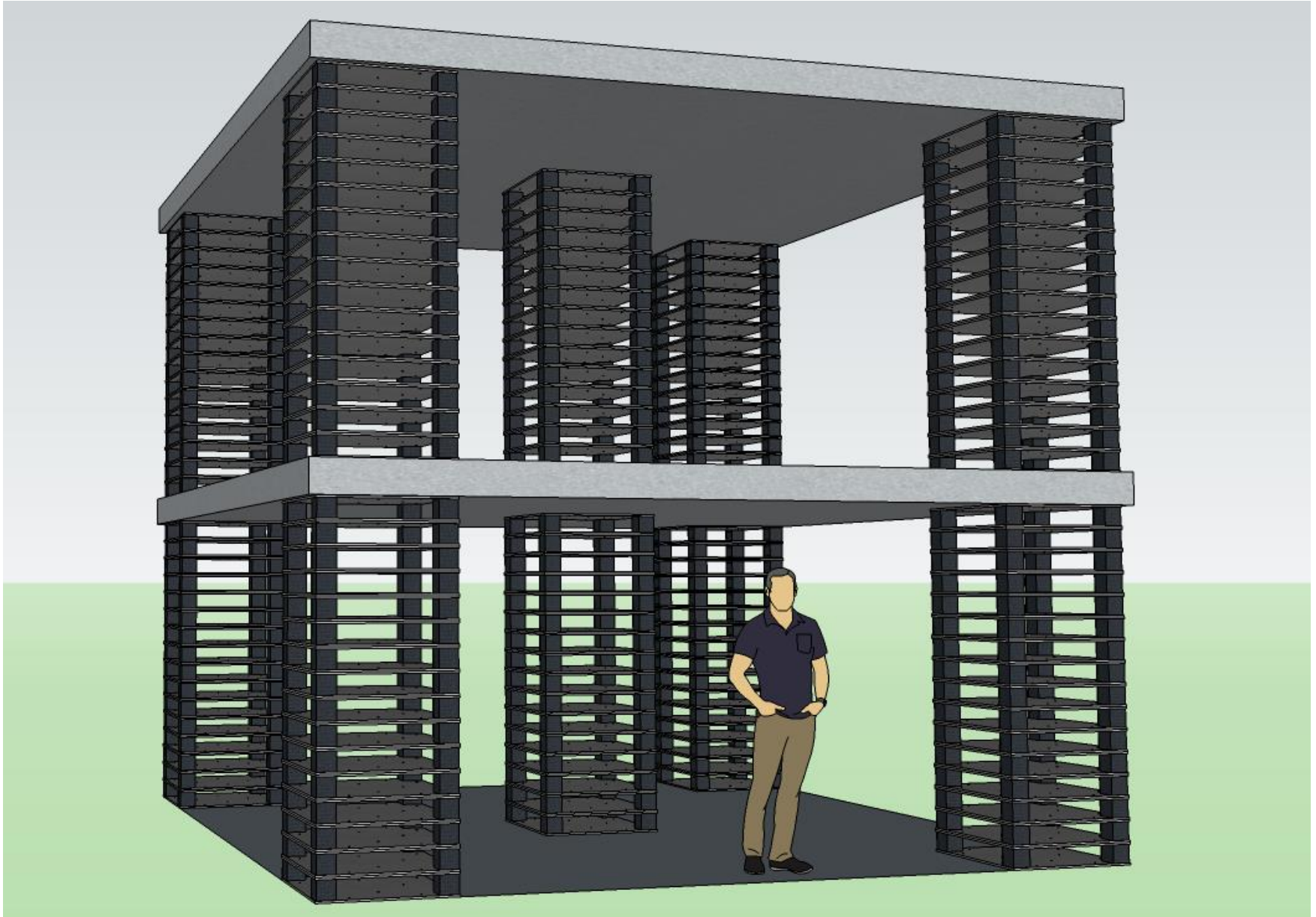
■ 観測位置と観測波動



■ 波動エネルギースペクトルと波動エネルギー量



- 波高1.0 Mの気象条件
- 1質点のエネルギー
応答スペクトル
- 50分間の計測による
単位重量当たりの
エネルギー量計測



■ 大型動吸振器の試作



■ まとめ

1. 積層ゴムは、コンクリートより強く、鉄のように座屈しない大きな変形能力のある構造部材である
2. 多様な分野への応用と、既存技術の革新が可能
3. 我が国が直面している様々な工学あるいは社会的問題を解決するための、考えるヒント

第101回 耐震工学研究会

平成31年 4月 23日(火)
中央大学駿河台記念館610号室

長周期地震動に対応した
免震構造用積層ゴム支承の座屈安定性

東京都市大学 教授 西村 功