

MIDAS CONSTRUCTION TECHNICAL SEMINAR

現代構造学：その発展と展望

Modern Structural Engineering

早稲田大学

名誉教授 西谷 章

MIDAS × NISHITANI



現代構造学 その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

MIDAS × NISHITANI

AGENDA

- session.1 **現代構造学とは**
- session.2 **運動方程式からみた現代構造学**
- session.3 **最適制御と Kalman Filter**
- session.4 **構造制御の発展**
- session.5 **ふたつの公的研究に関連して**
- session.6 **これからの現代構造学**
- session.7 **まとめ**

現代構造学： その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

本題に入る前に：

略歴

- 1973 早稲田大学卒業（建築学科）
- 1975 大学院修士課程修了
- 1980 コロンビア大学博士課程修了（PhD）
- 1988 助教授（建築学科）
- 1993 教授（建築学科）
- 2006 常任理事（～2010）
- 2020 特任研究教授（～2022）
- 2020 名誉教授

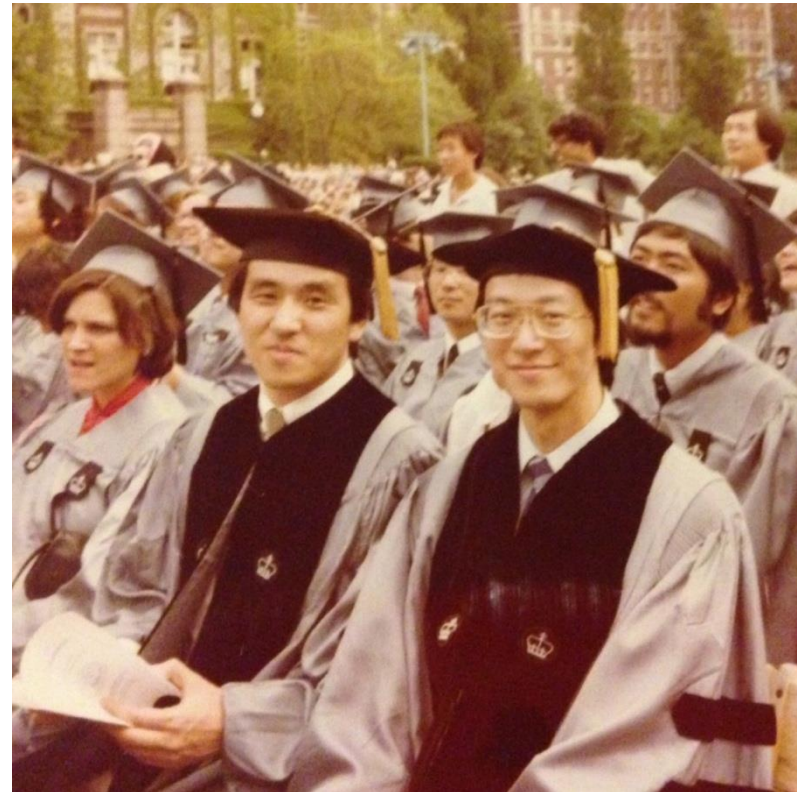
現代
構造学
との接点

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

本題に入る前に：

4



Commencement, May 1980

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

本題に入る前に：

5

現代構造学：制御と深い関係

応答制御・構造制御
Structural Control

私自身

1990年頃から
制御の研究に深く関与

本題に入る前に：

1976~1981

Prof M. Shinozuka
Columbia Univ
in the City of New York

そもそもの

Control との出会い

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

本題に入る前に：

7



**Professor
Masanobu
Shinozuka**

篠塚 正宣 教授

<https://alchetron.com/Masanobu-Shinozuka>

現代構造学：その発展と展望

早稲田大学 名誉教授 西谷 章

MIDAS × NISHITANI

Session.1

現代構造学とは

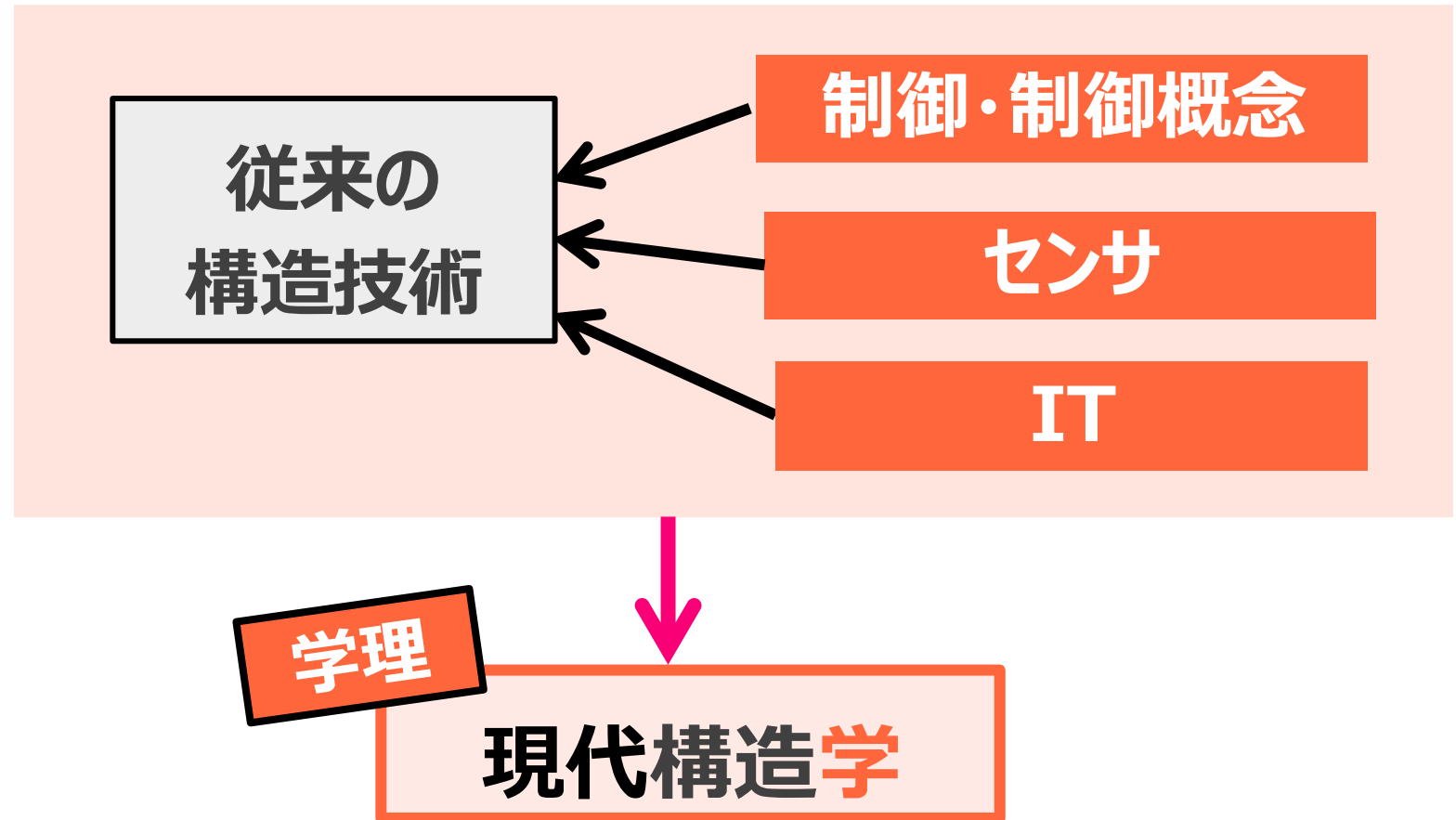
制御理論の発展にならった「私的なNaming」

現代構造学： その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

現代構造技術

9

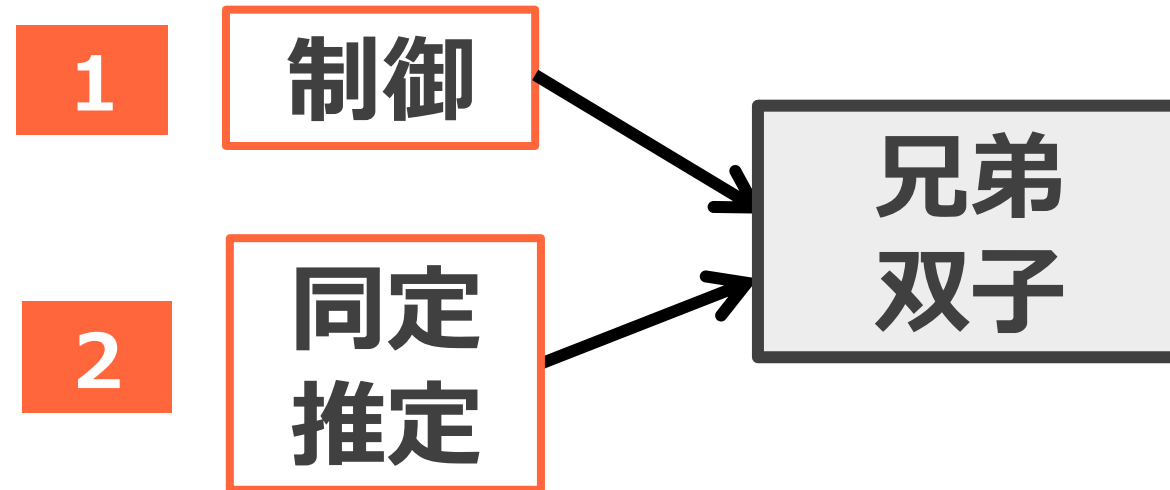


現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

現代構造学のふたつの中心・素

10

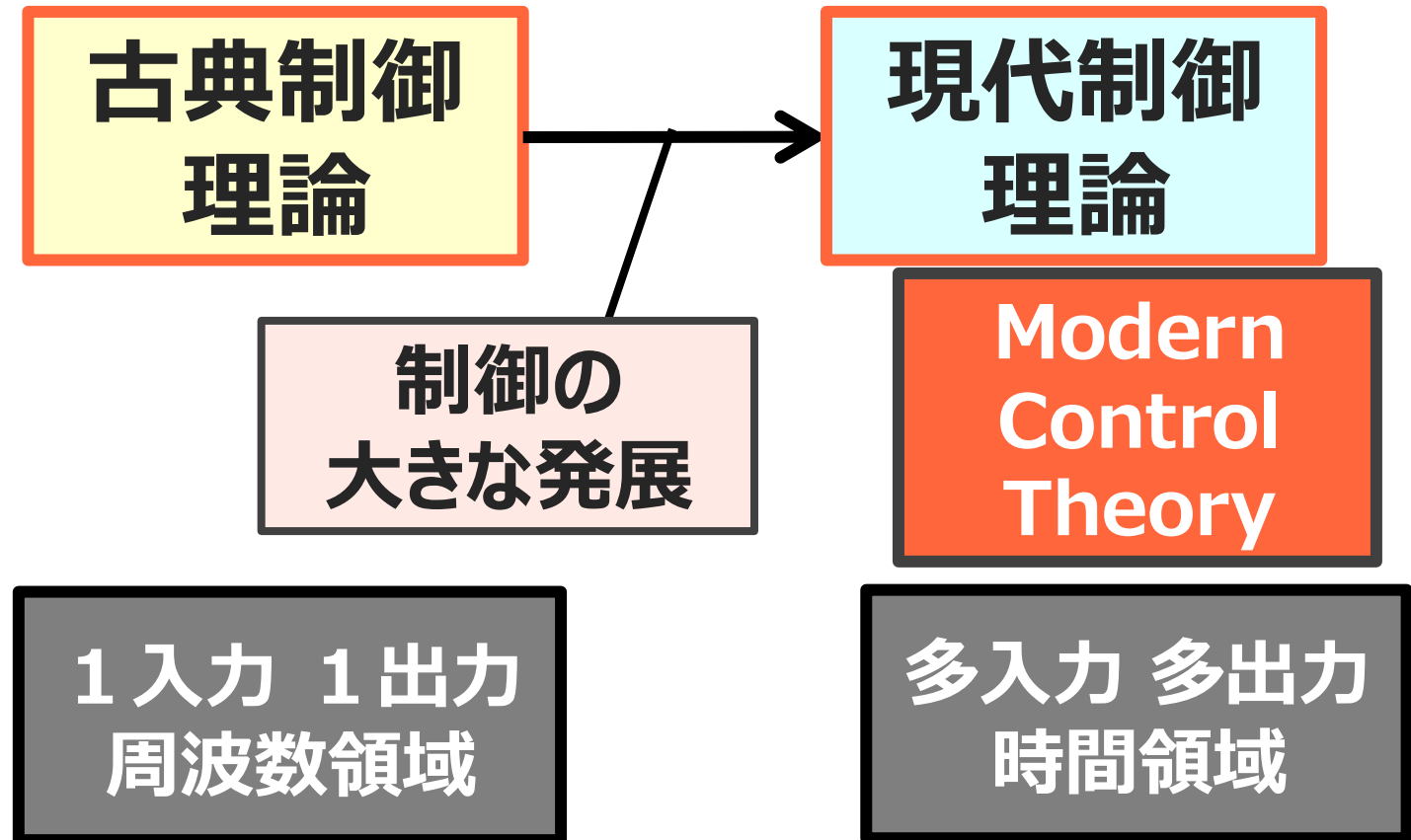


現代構造学： その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

制御、Control の世界

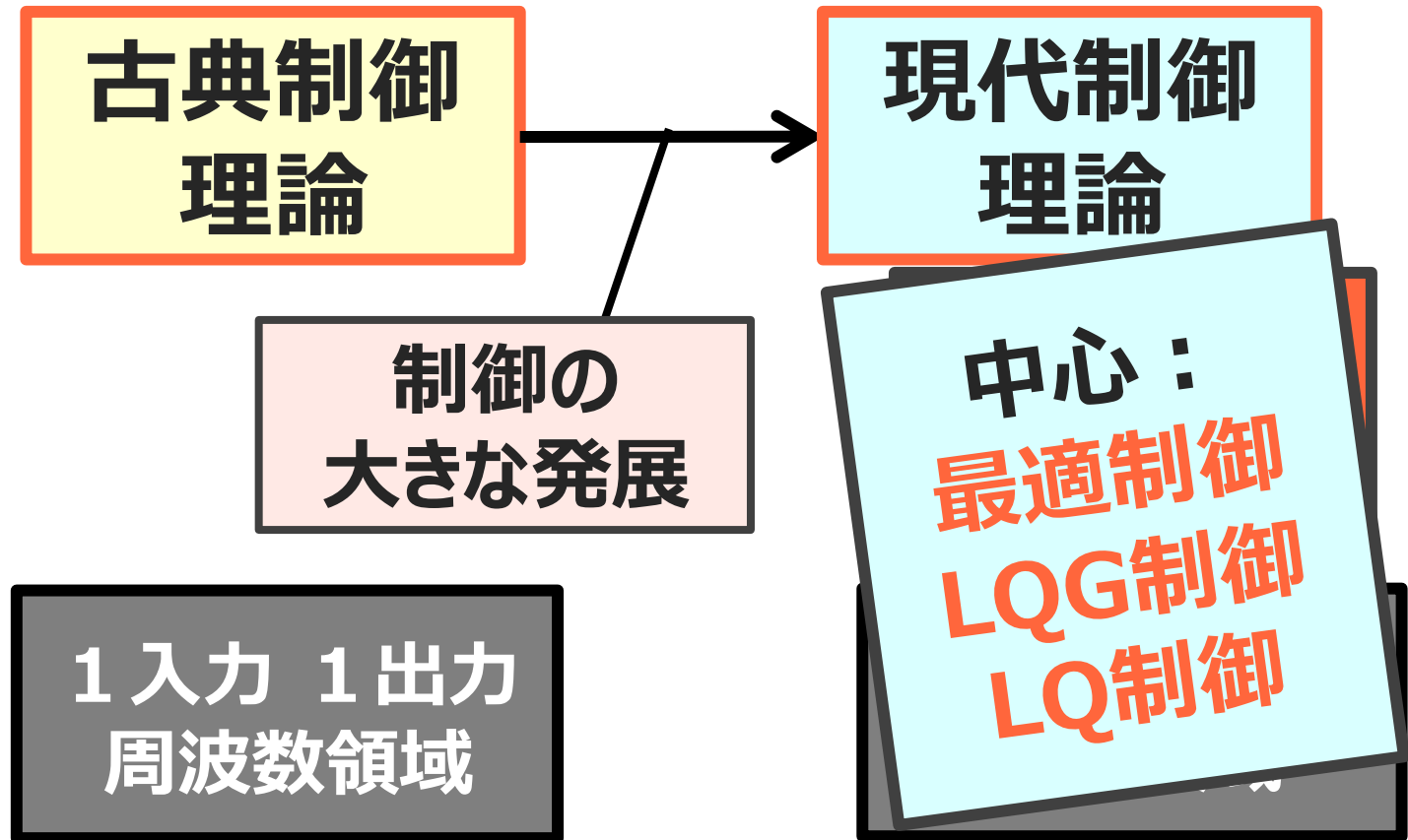
11



現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

制御、Control の世界

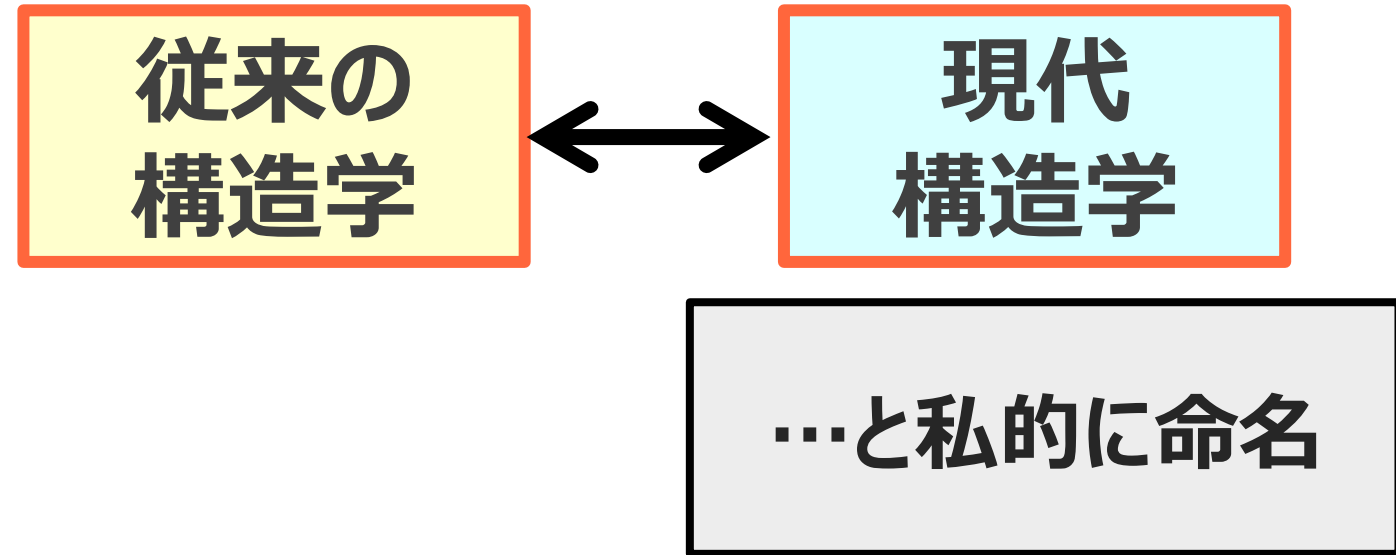


現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

現代制御理論の発展にならって…

13



現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

現代構造学の Keywords

14

変化させる
制御する・操る

制御

特定する
見極める
判定する・判断する

同定
推定

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

制御関連の 現代構造学の Keywords

15

変化させる
制御する・操る



以下、
運動方程式から見て
整理してみる

現代構造学：その発展と展望

早稲田大学 名誉教授 西谷 章

MIDAS × NISHITANI

Session.2

運動方程式から見た現代構造学

〈変化させる／制御する／操る〉に焦点をあてて

運動方程式から見ると...

全要素1
のベクトル

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -M\{\mathbf{1}\}a_g$$

a_g : 地動加速度

主に、 K を設計 $\rightarrow X, \ddot{X}$ を抑える

運動方程式から見ると…

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -M\{1\}a_g$$

制御・変化

制御・変化

応答制御を実現

運動方程式から見ると…

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -M\{1\}a_g$$

M さえ
増大

C, K を
変化

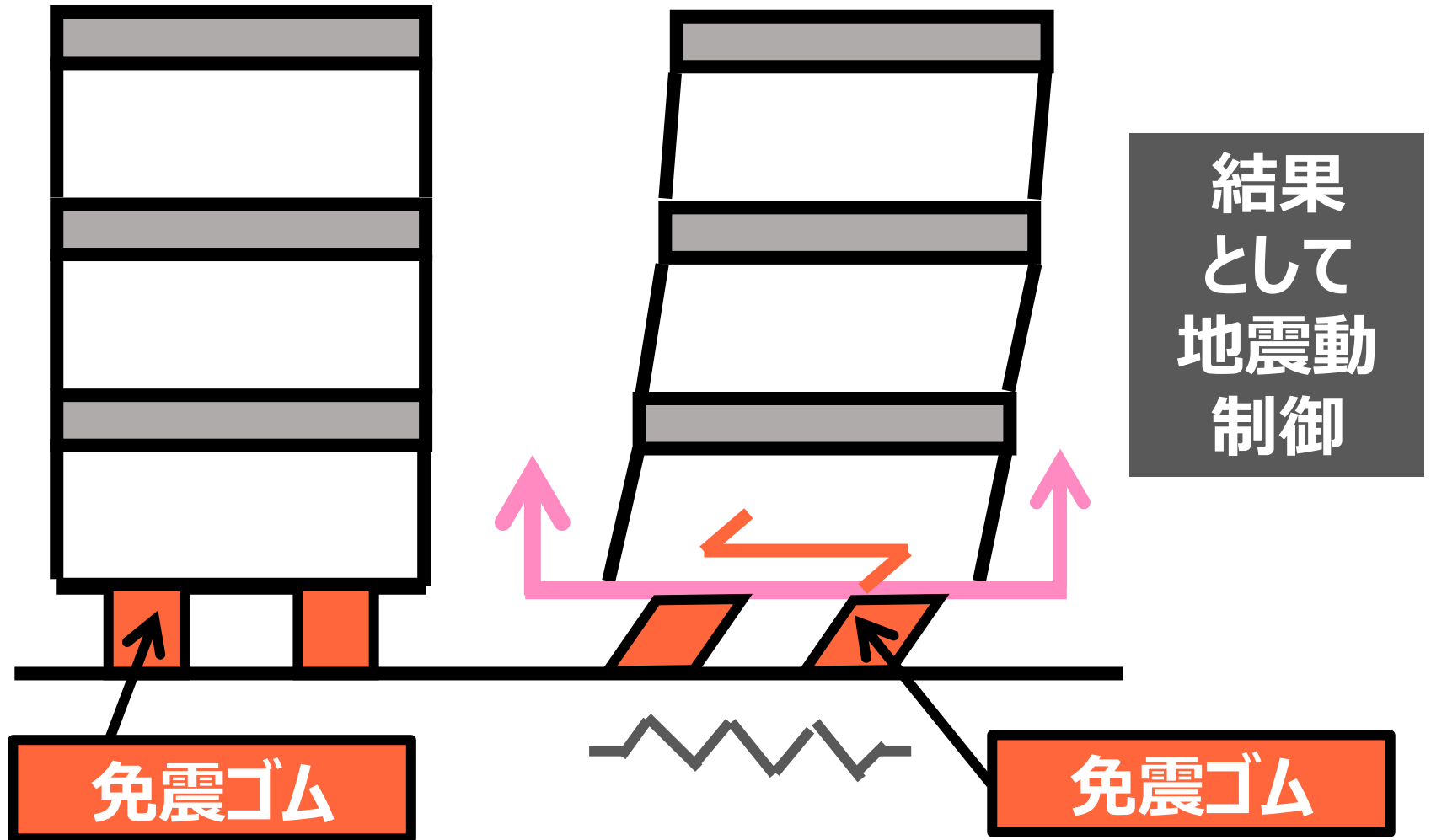
慣性質量ダンパ

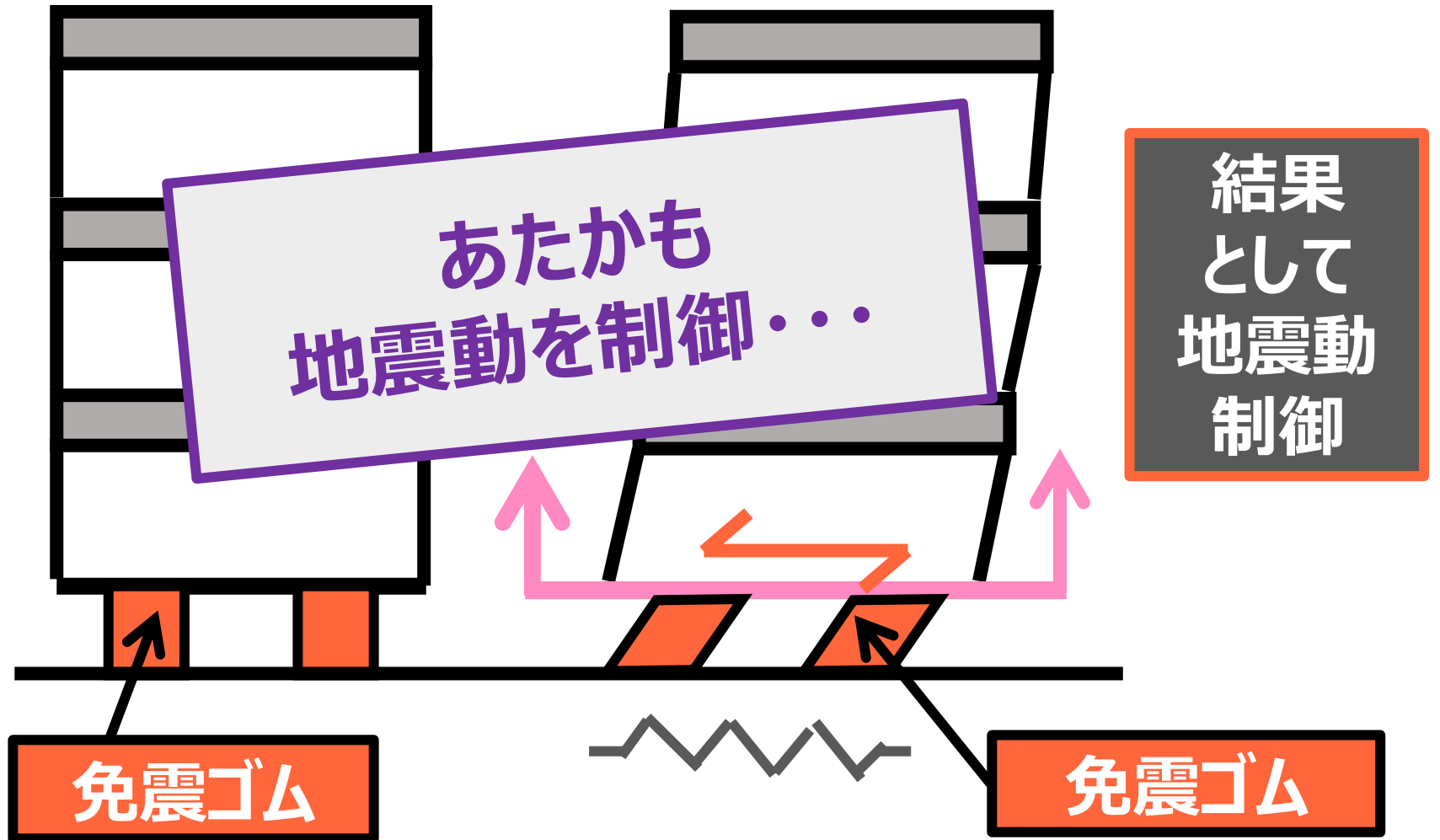
運動方程式から見ると…

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -M\{1\}a_g$$

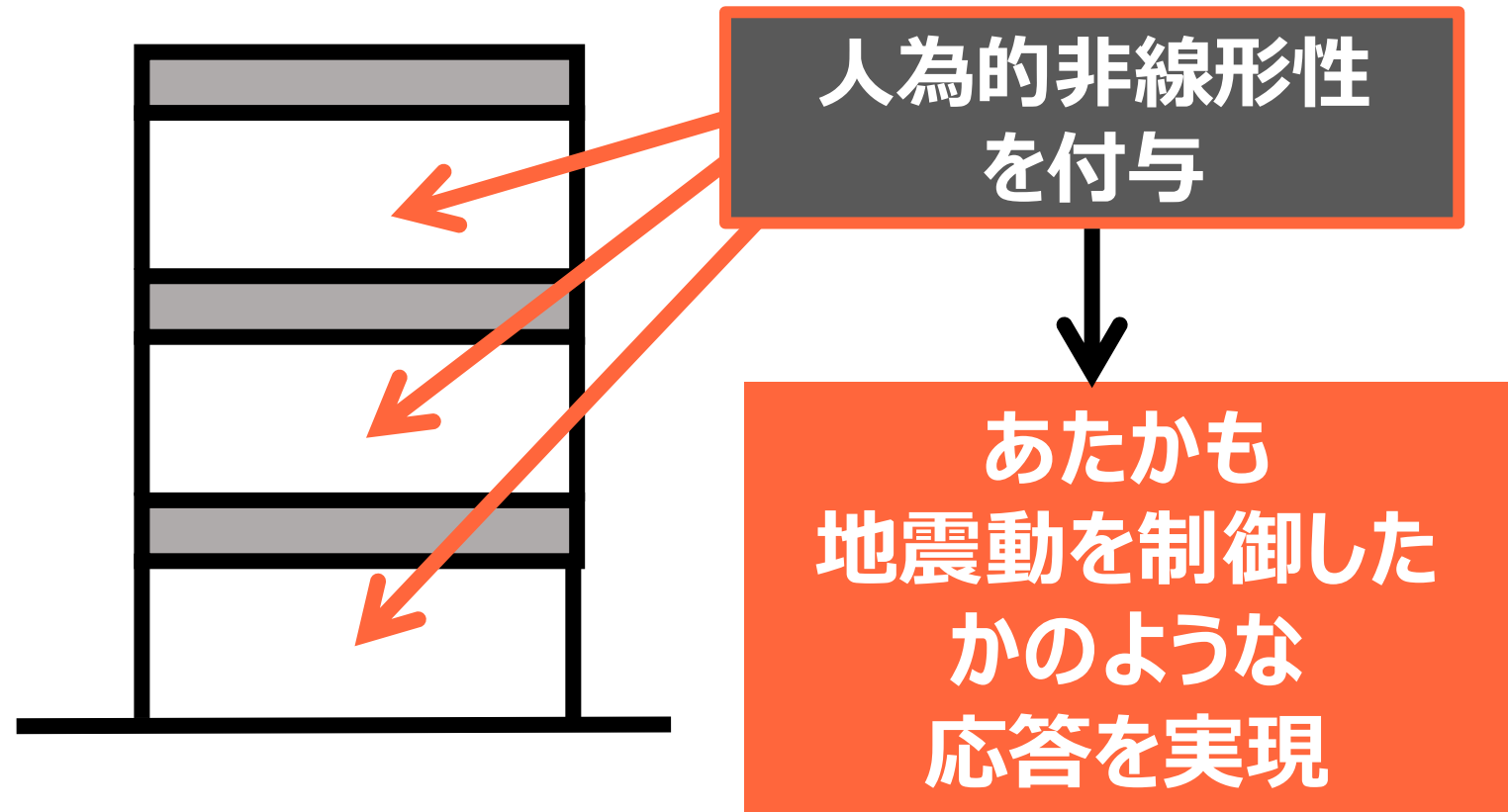
a_g さえ制御

…と同様な効果





この「制震構造」の基本概念



現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

「制震構造」提唱者

24



小堀鐸二
教授

小堀鐸二・南井良一郎

制震系の解析（制震構造に関する研究Ⅰ）

制震系の条件（制震構造に関する研究Ⅱ）

建築学会論文報告集, 1960

あたかも 地震動 を制御・・・

制震

論文中で「制振」も定義

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

現代構造学の発展を世界規模で促したのは

26



**James T.P. Yao
(1932-2009)**

Jim Yao

[onlinelibrary.wiley.com/
doi/full/10.1002/stc.379](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/stc.379)

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

現代構造学の発展を世界規模で促したのは

27

論文

James T.P. Yao
Concept of Structural Control
J of Structural Div., ASCE, 1972

<制御概念 → 構造学に導入>

提唱

世界規模：研究を触発

Seminal Paper

Yao による提案：背景に制御工学の発展

現代構造学：その発展と展望
早稲田大学 名誉教授 西谷 章

MIDAS × NISHITANI

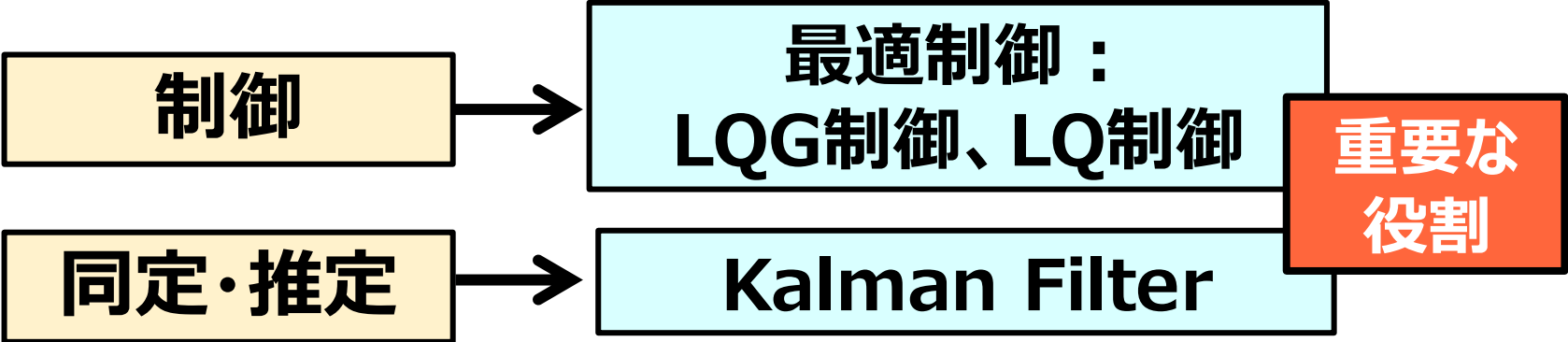
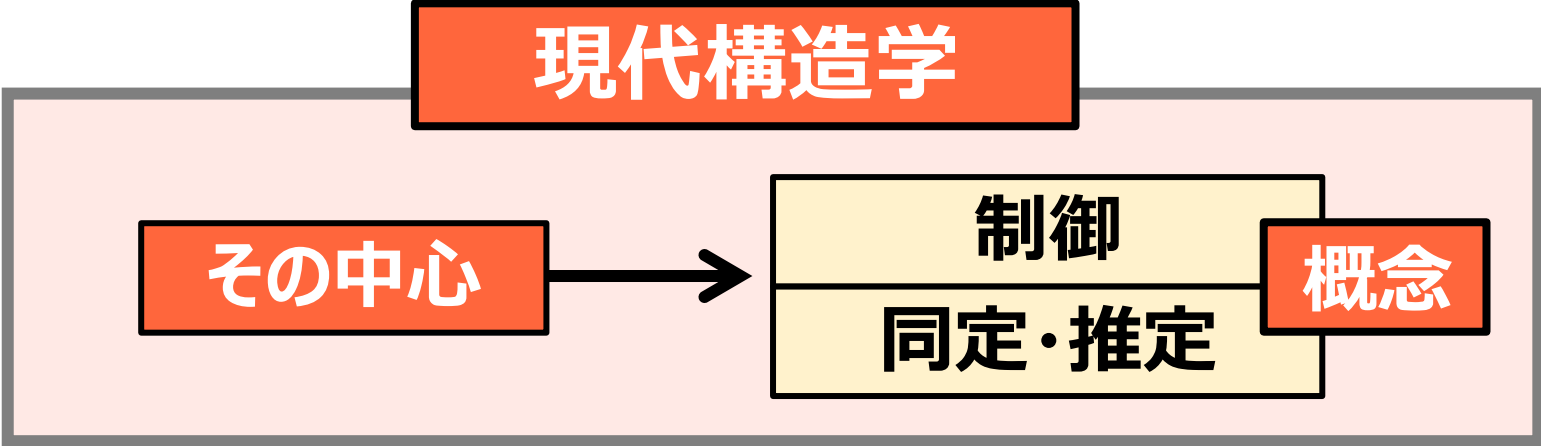
Session.3

最適制御と Kalman Filter

LQG制御・LQ制御
Kalman Filter

現代構造学： その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

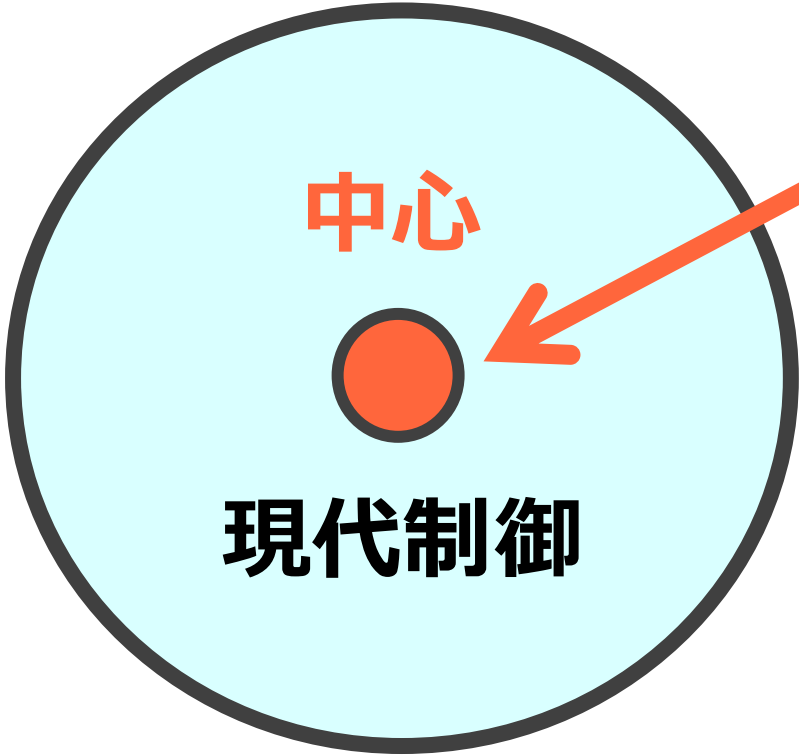


実は、上のふたつ：双子

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

前スライドで触れたように・・・

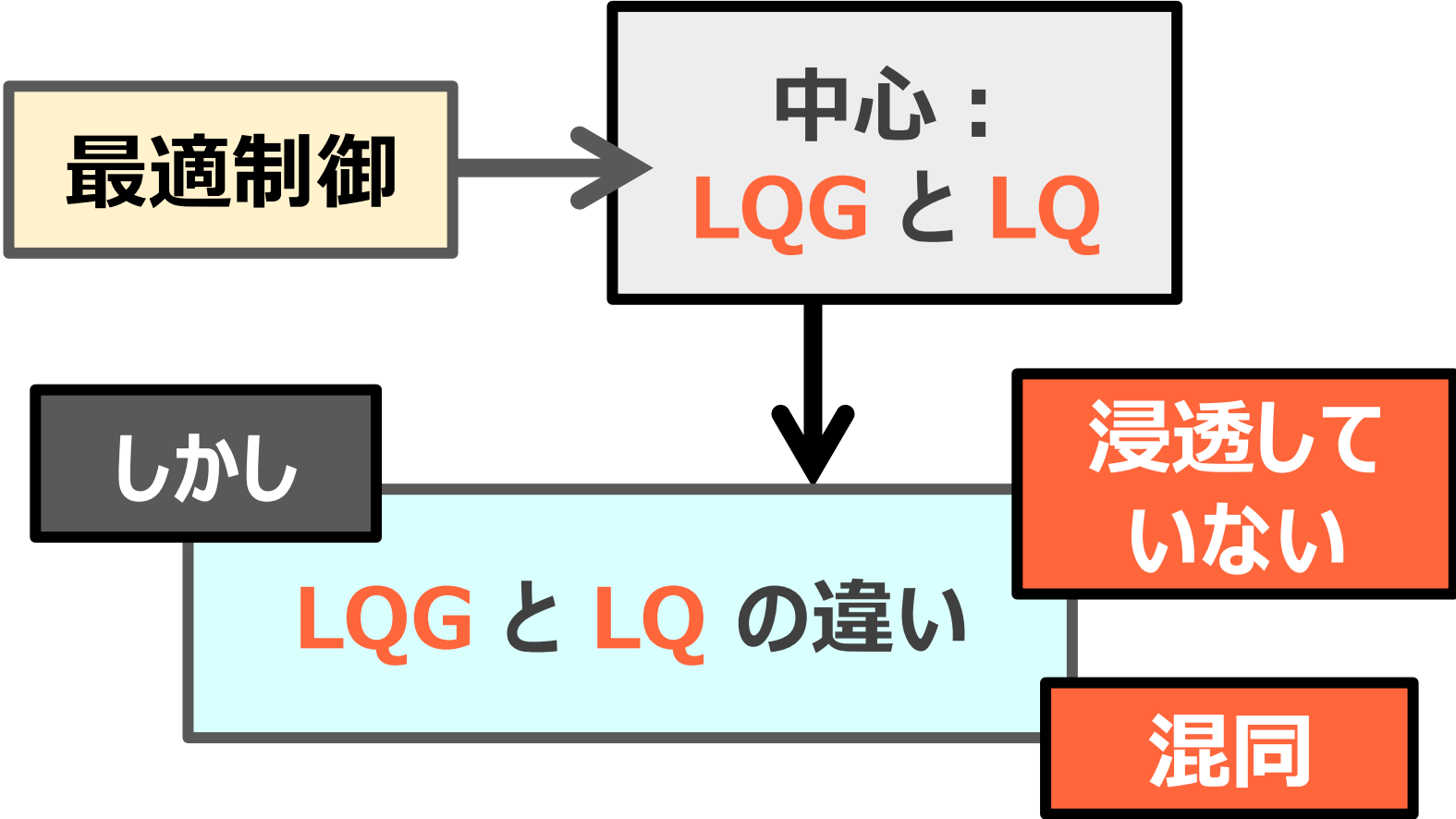


最適
制御

LQG 制御
LQ 制御

現代構造学： その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章



運動方程式に代わって

X ：状態
 Y ：出力

$$\dot{X} = AX + BU$$

状態方程式

$$Y = CX + DU$$

出力方程式

が使われる

最適制御理論：

X ：状態、状態量、
状態ベクトル

Y ：出力、計測出力

$$\dot{X} = AX + BU$$

状態方程式

$$Y = CX + DU$$

出力方程式

U ：制御入力

$$\dot{X} = AX + BU$$

State Equation

$$Y = CX + DU$$

Output Equation

State Space Representation

1 質点系の、加速度出力ならば：

状態方程式

$$\dot{X} = AX + BU$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} u$$

出力方程式

$$Y = CX + DU$$

$$y = \ddot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \frac{1}{m} u$$

最適制御理論：

$$\dot{X} = AX + BU$$

状態方程式

$$Y = CX + DU$$

出力方程式

制御入力

$$U = -GX$$

G : Feedback ゲイン

状態 X を
Feedback して
制御入力 U
を決める

$$\dot{X} = AX + BU$$

状態方程式

$$J = \int_0^{T_f} (X' Q X + U' R U) dt$$

最適制御の
一般論
としては

J を最小化する
ように G を決定

LQG制御では：

$$\dot{X} = AX + BU$$

状態方程式

$$J = \int_0^{T_f} (X' Q X + U' R U) dt$$

状態 X が
定常正規白色雑音
により乱されていると仮定

X, U
定常正規
確率過程

Gaussian

X, U が定常正規確率過程となると：

$$U = -GX$$

X : 状態

U : 制御入力

$$J = \int_0^{T_f} (X' Q X + U' R U) dt$$

X, U
定常
Gaussian

始点も終点もない

$$J = E[X' Q X + U' R U]$$

E : 期待値

LQG制御の基本式：

$$\dot{X} = AX + BU$$

状態方程式

$$J = E[X'QX + U'RU]$$

状態 X が
定常正規白色雑音
によって乱されている

LQG制御の基本式：

$$\dot{X} = AX + BU$$

状態方

線形
Linear

$$J = E[X'QX + U'RU]$$

2次形式
Quadratic

状態 X が
定常正規白色雑音
によって乱されている

X, U
定常正規
確率過程
Gaussian

LQG制御の基本式：

$$\dot{X} = AX +$$

状態方

線形
Linear

$$J = E[X'$$

U]

2次形式
Quadratic

状
定常正
によって記述している

L
Q
G

X, U
定常正規
確率過程
Gaussian

LQG制御

$$J = E[X' Q X + U' R U]$$

X, U
定常Gaussian

$$U = -GX$$

J を最小
にする G

Riccati方程式
の解から
決定できる

LQG制御 の Riccati 方程式：

$$J = E[X' Q X + U' R U]$$

LQG制御の Riccati方程式

$$P A + A' P - P B R^{-1} B' P + Q = 0$$

$$G = R^{-1} B' P$$

$$U = -G X$$

LQG 制御から
G の仮定 が 抜けたもの

~~仮定：定常 Gaussian 確率過程~~

LQ制御：

$$\dot{X} = AX + BU + Ff$$

状態方程式

$$f = a_g$$

f : 確定量



X, U : 確定量

$$J = \int_0^{T_f} (X' Q X + U' R U) dt$$

f : 確定量 → 始点と終点がある

LQ制御：

$$J = \int_0^{T_f} (X' Q X + U' R U) dt$$

X, U : 確定量

$$U = -GX$$

$$G = R^{-1} B^T P$$

$$\dot{P} = PA + A'P - PBR^{-1}B'P + Q$$

LQ制御の Riccati方程式

似た Riccati方程式を解くが...

LQG 制御

外乱に関係なく
いつも同じ G

外乱を
定常正規白色雑音
と見なして、
定常 G を決める

LQ 制御

外乱ごとに
異なる G

確定外乱に対して
非定常の G を
決める

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

構造制御の理論的検証への貢献

49

Jann N. Yang

George Washington U.
UC Irvine

LQG 制御 と LQ 制御の検証；
瞬間最適制御の提案、etc

70~80
年代

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

Jann N. Yang

50



George
Washington
University



UC Irvine

“Kyodai Deshi”

engineering.uci.edu/users/jann-yang

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

Jann N. Yang

51



Civil
Engineering
Dept.



Jet
Propulsion
Laboratory

engineering.uci.edu/users/jann-yang

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

Jet Propulsion Laboratory

52

Jet

Propulsion

Laboratory

pruh·puhl·shn

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

現代構造学もう一方の Keyword

53

もう一方の
keyword

特定する
判断する
判定する

推定
同定
モニタリング

制御に関連

現代制御の機能のひとつ

推定・同定
に関連して

Observer
観測器

State Observer

推定器

Observer

出力に
含まれない
状態量を推定



推定した
状態量も
制御に
Feedback

出力方程式の左辺 Y
に含まれない X を推定

1 質点系の、加速度出力なら：

状態方程式

$$\dot{X} = AX + BU$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} u$$

出力方程式

$$Y = CX + DU$$

$$y = \ddot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \frac{1}{m} u$$

y : x も \dot{x} も含まれていない

Observer

出力に含まれない
状態量を **推定**

推定のみ
にも使える

Kalman Filter

$u =$
確定外乱

Kalman Filterの基本式

$$u = a_g$$

確定外乱

$$\dot{X} = A'X + C'a_g + W$$

$$Y = B'X + V$$

互いに
無相関の
定常正規
白色雑音

付
加

Y データから
X を推定

正規：
Gaussian

Kalman Filterの基本式

絶対加速度
計測なら

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -ma_g$$

$$\ddot{x} + a_g = -\frac{k}{m}x - \frac{c}{m}\dot{x}$$

$$y = \ddot{x} + a_g = \begin{bmatrix} -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}$$

$D'u$ 不要

絶対加速度計測
絶対加速度出力

なら

$$Y = B'X + V$$

Kalman Filterの基本式

$$u = a_g$$

$$\dot{X} = A'X + C'a_g + W$$

$$Y = B'X + V$$

注目

最適制御とは
ABC記号の
つけ方を
変えている

Y データから
X を推定

制御と同じ
Riccati 方程式
により推定可能

確認：制御とKalman Filter

$$\begin{aligned}\dot{X} &= AX + BU \\ Y &= CX + DU\end{aligned}$$

制御

$$\begin{aligned}\dot{X} &= A'X + C'U + W \\ Y &= B'X + D'U + V\end{aligned}$$

Kalman Filter

$$U = a_g$$

絶対加速度出力

$$Y = B'X + V$$

Kalman Filterの基本式

$$u = a_g$$

62

$$\dot{X} = A'X + C'a_g + W$$

$$Y = B'X + V$$

互いに
無相関の
定常正規
白色雑音

この式で推定

$$\dot{\tilde{X}} = A'\tilde{X} + C'a_g + K(Y - B'\tilde{X})$$

\tilde{X} : 推定値

K : Kalman ゲイン

出力方程式

$$y = \ddot{x} + a_g = \begin{bmatrix} -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + v$$

状態方程式

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} a_g + \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix}$$

Kalman Filter

$$\begin{aligned}\dot{X} &= A'X + C'a_g + W \\ Y &= B'X + V\end{aligned}$$

出力 $Y \rightarrow$
状態量 X を推定

推定の式

$$\dot{\tilde{X}} = A'\tilde{X} + C'a_g + K(Y - B'\tilde{X})$$

\tilde{X} : 推定値

K : Kalman ゲイン

Kalman Filter による推定

$$PA + A'P - PBR^{-1}B'P + Q = 0$$

KFの
Riccati
方程式

$$E[W'(t)W(t + \tau)] = Q\delta(\tau)$$

$$E[V'(t)V(t + \tau)] = R\delta(\tau)$$

$$E[W'(t)V(t + \tau)] = 0$$

W, V : 無相関の定常 Gauss 白色雑音

Kalman Filter による推定

$$PA + A'P - PBR^{-1}B'P + Q = 0$$

KFの
Riccati
方程式

$$E[W'(t)W(t + \tau)] = Q\delta(\tau)$$

$$K = PBR^{-1}$$

Kalman
ゲイン

$$E[W'(t)V(t + \tau)] = 0$$

W, V : 無相関の定常 Gauss 白色雑音

<KF による推定> と <制御>

同じ
Riccati
方程式

$$PA + A'P - PBR^{-1}B'P + Q = 0$$

KF による推定

制御

$$K = PBR^{-1}$$

$$G = R^{-1}B'P$$

$$K = PBR^{-1} = G'$$

Kalmanゲイン

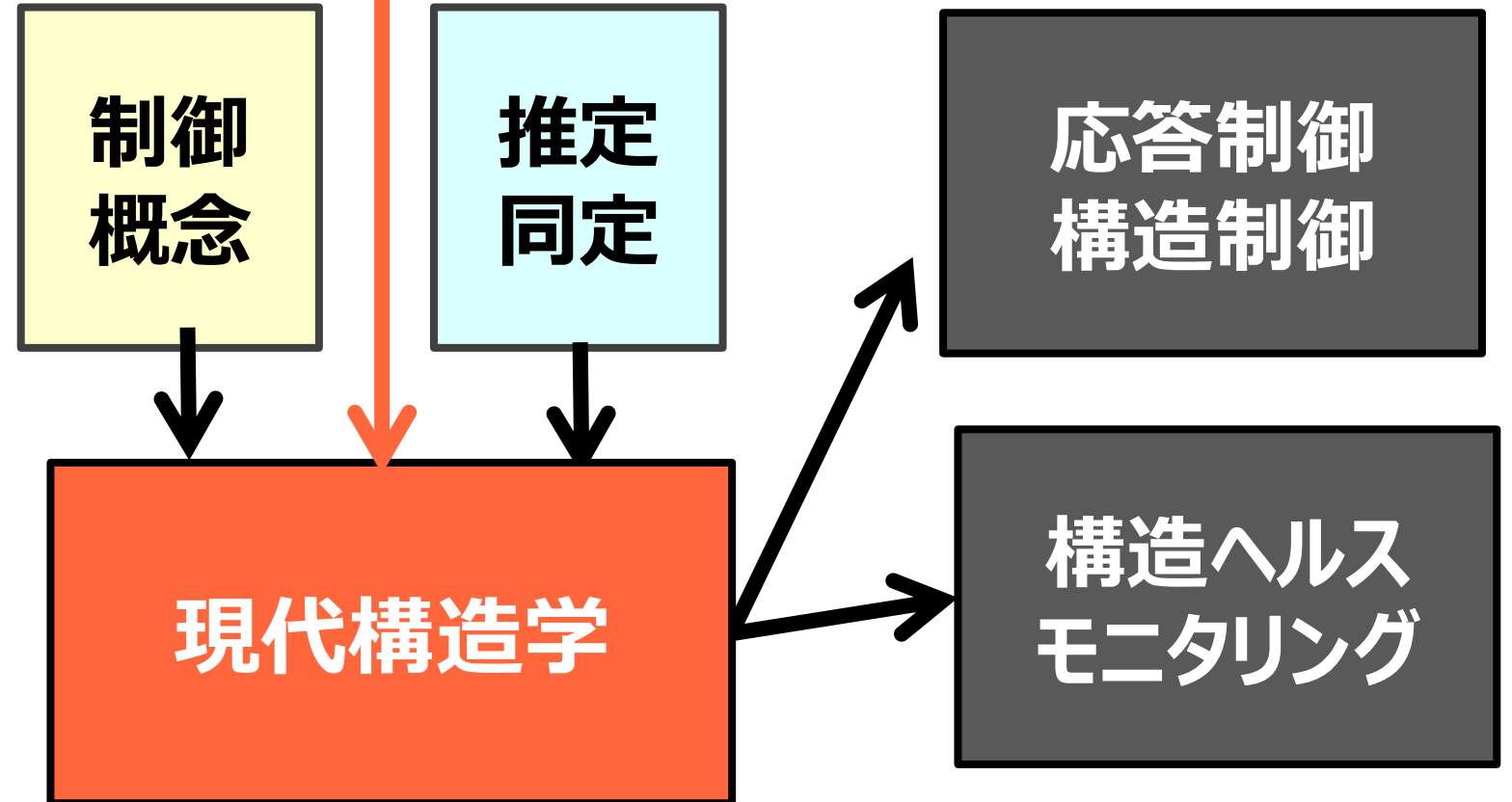
FBゲイン

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

センサ、IT を融合した構造技術

68



現代構造学：その発展と展望

早稲田大学 名誉教授 西谷 章

MIDAS × NISHITANI

Session.4

構造制御の発展

現代構造技術の発端

TMD

John Hancock Tower

Citigroup Center Building

AMD

京橋成和ビル

LQG制御

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

John Hancock Tower

71



60 Stories
790 ft , 240 m

Completed in 1976
I.M. Pei & Partners

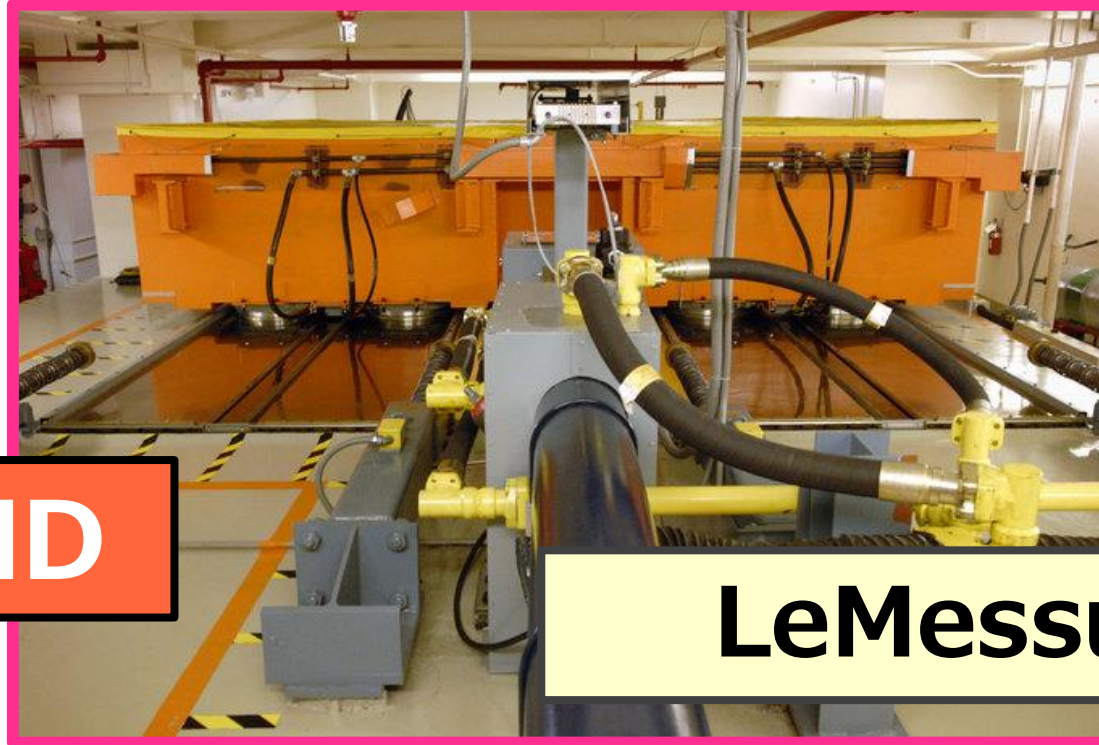
http://en.wikipedia.org/wiki/John_Hancock_Tower#/media/File:John_Hancock_Tower.jpg

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

John Hancock Tower

72



TMD

LeMessurier

[cache.boston.com/news/special/
audio_slideshows/hancock/
mass_tune_damper/_Hancock_Tower-02.jpg](http://cache.boston.com/news/special/audio_slideshows/hancock/mass_tune_damper/_Hancock_Tower-02.jpg)

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

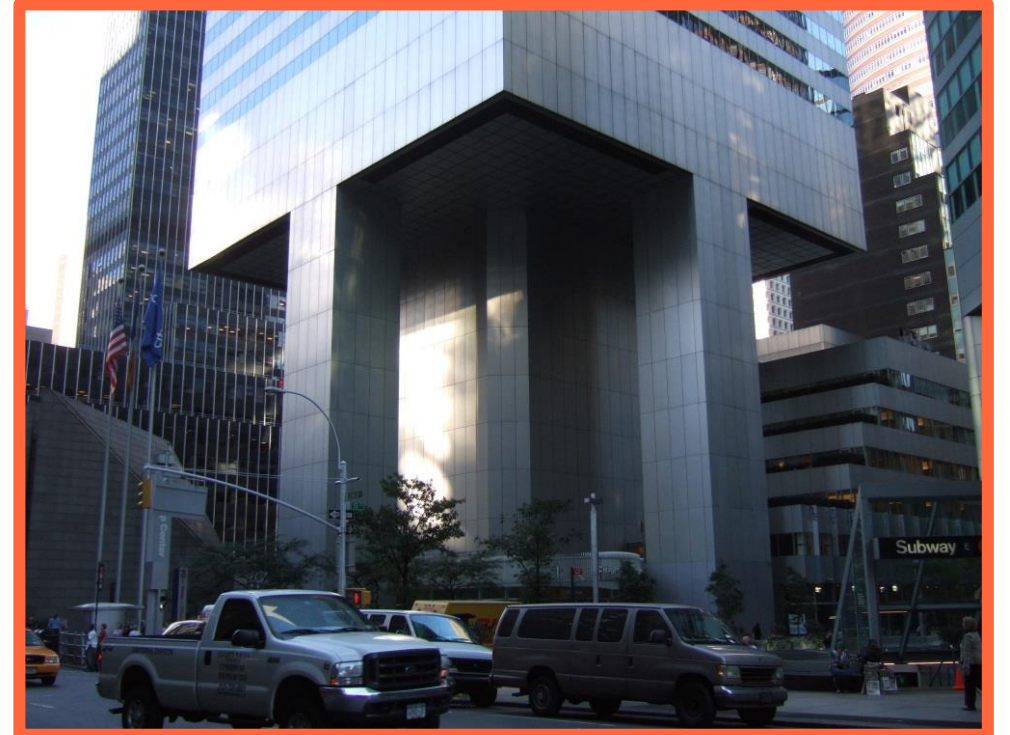
構造制御の Impact

73

59 St
279 m
C.1977



William J. LeMessurier



[wikimedia.org](https://www.wikimedia.org)

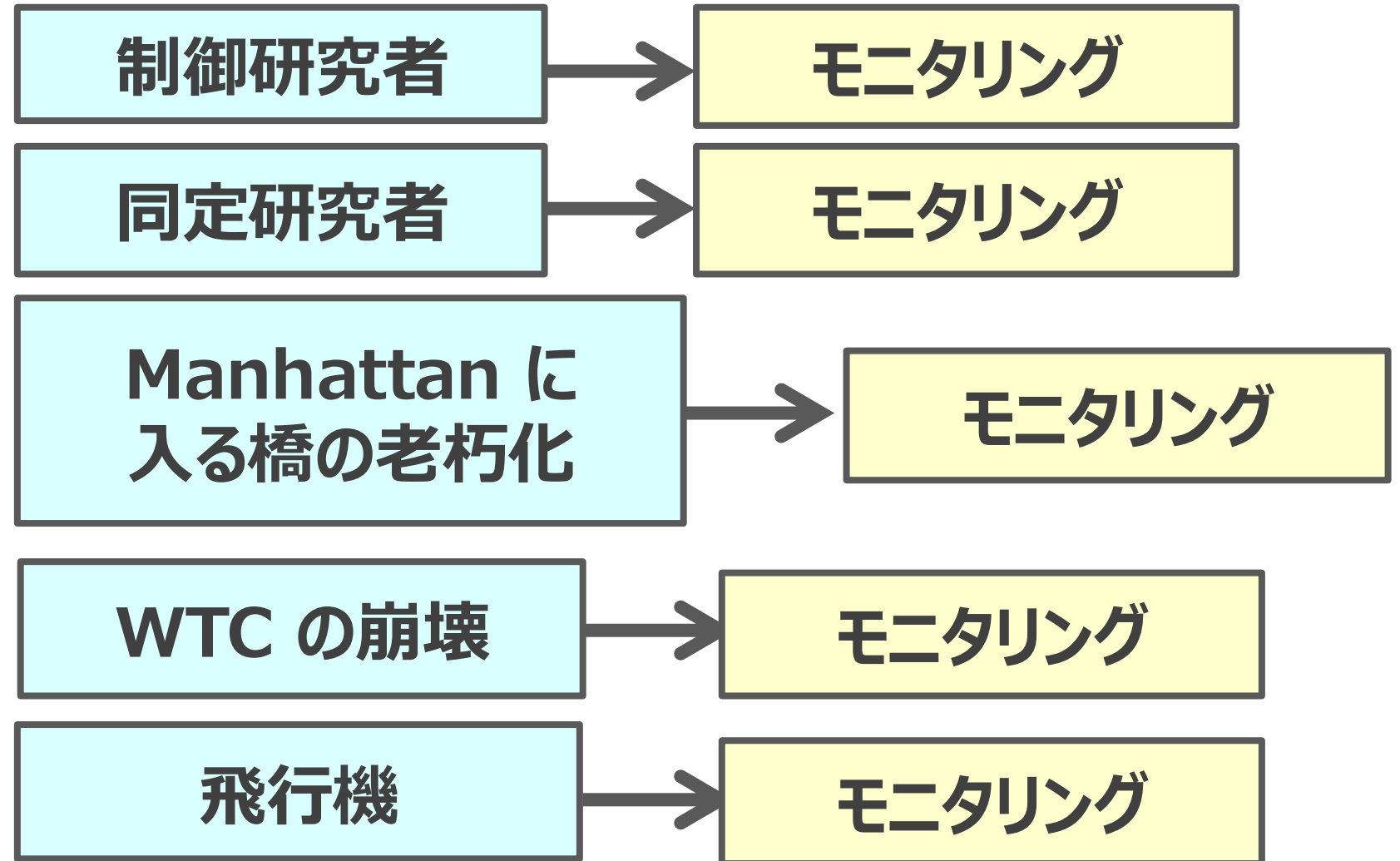
アクティブ制御

LA地震
神戸地震

セミアクティブ制御

可変ダンパ
Semiactive ダンパ
Smart ダンパ

機械的メカニズムで
セミアクティブ制御
と同様な効果実現



現代構造学：その発展と展望

早稲田大学 名誉教授 西谷 章

MIDAS × NISHITANI

Session.5

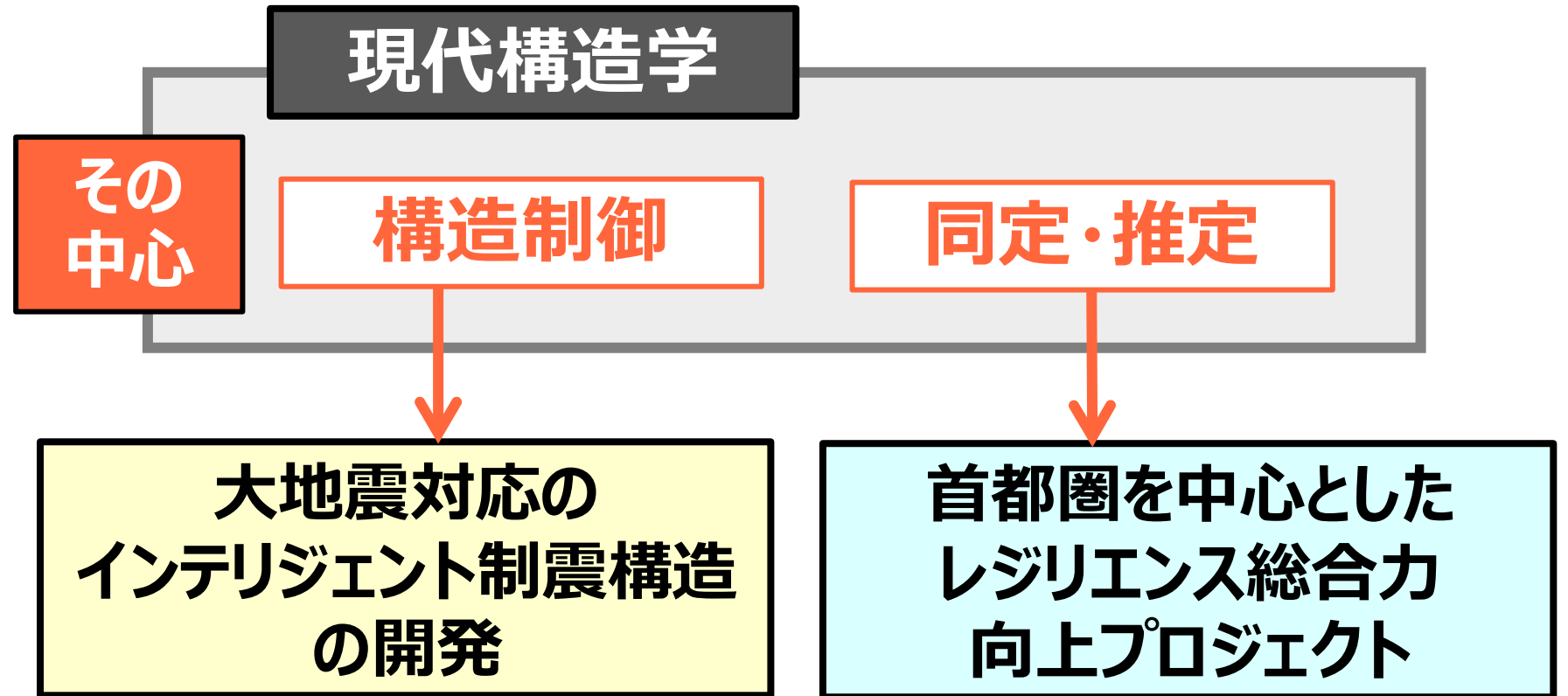
ふたつの公的研究に関連して

現代構造学に関連する公的研究

現代構造学： その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

ふたつの公的研究



このふたつの公的研究への関わり

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

公的研究

78

制御

1996

日本学術振興会
未来開拓学術推進事業研究

インテリジェント制震構造の開発

モニタリング

2017

首都圏レジリエンス
向上プロジェクト

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

公的研究

制御

自律分散
制御

可変スリップ
レベルダンパ

996

モニタリング

層間変位センサと
無線加速度センサ

2017

大地震対応の インテリジェント制震構造の開発

自律分散制御としての

可変スリップレベルダンパ

を提案

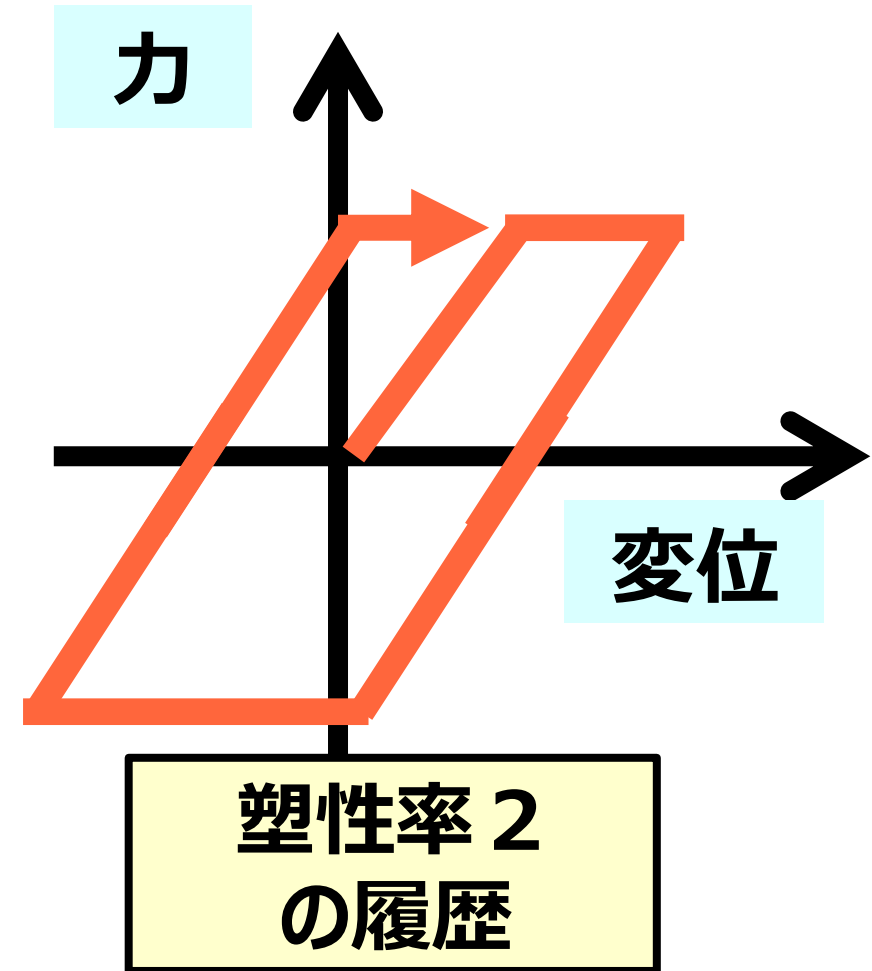
オイルダンパで実現

可変スリップレベルダンパ

原理的には

層間変位がゼロ
を通過するとき
にスリップさせる

ダンパ設置層
の情報のみ



現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

自律分散制御

英語名

**Autonomous-Decentralized
Control**

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

可変スリップレベルダンパ

英語名

Variable Slip-Force Level Damper

B. F. Spencer
英語の名付け親

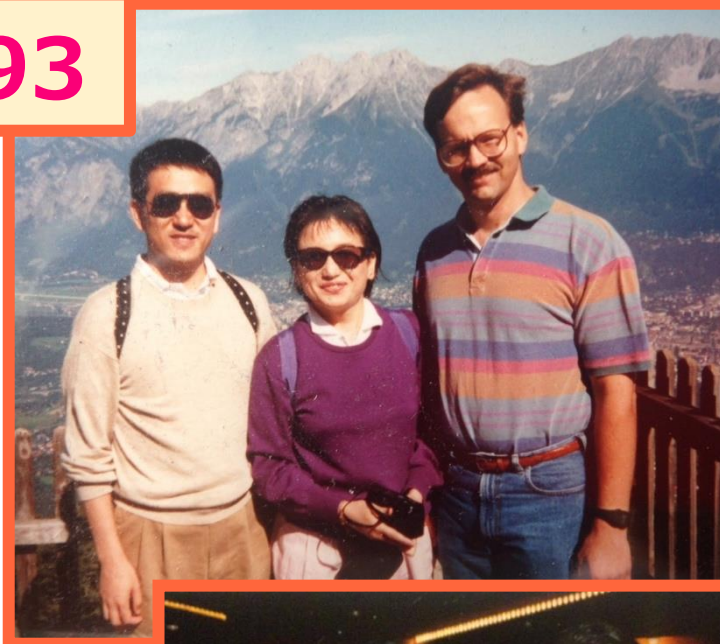
現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

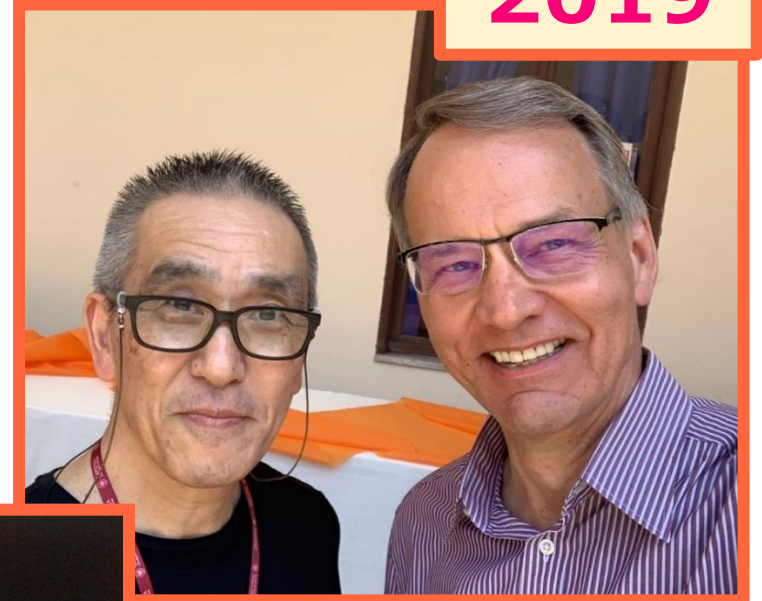
With B.F. Spencer

84

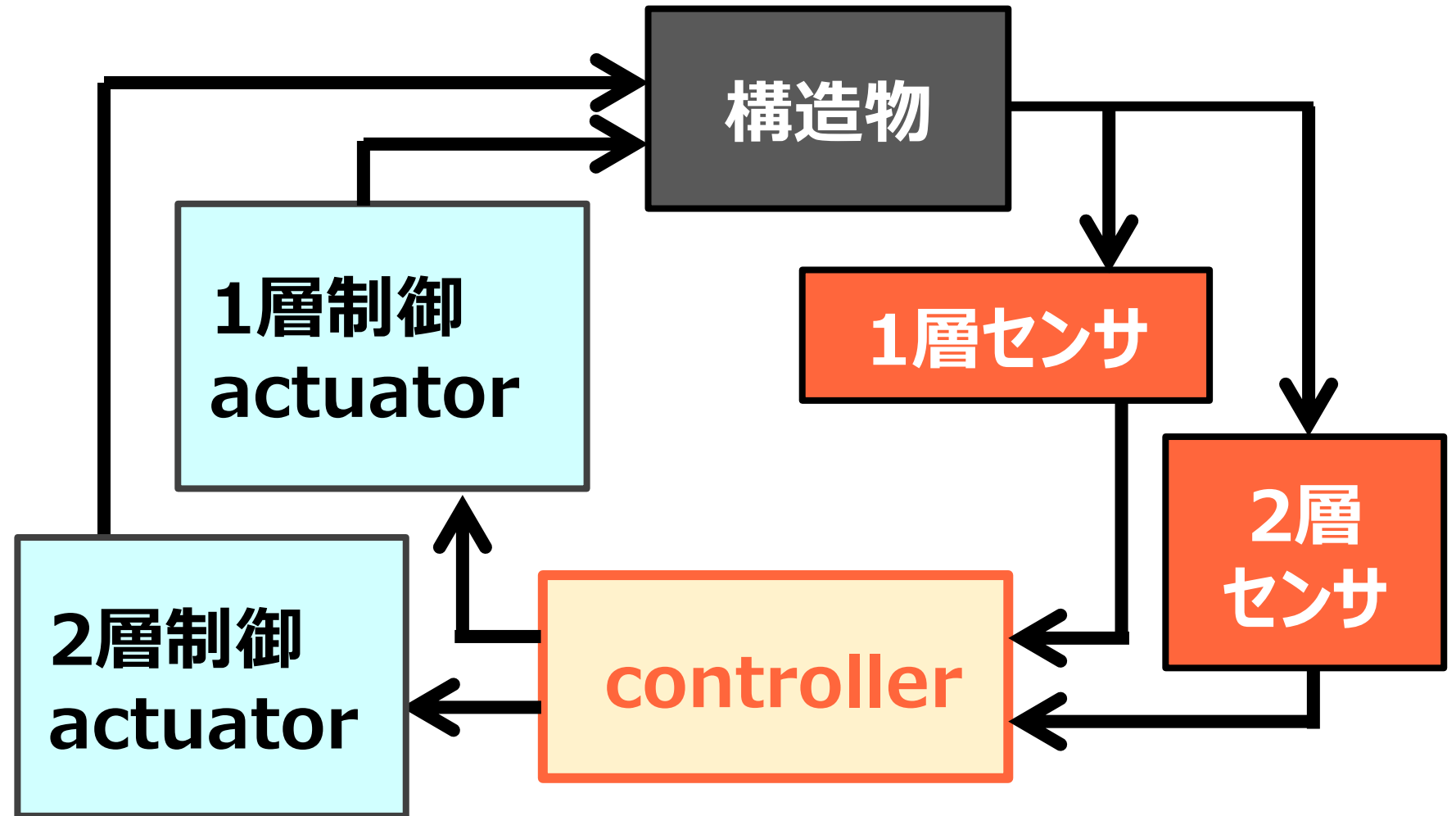
1993

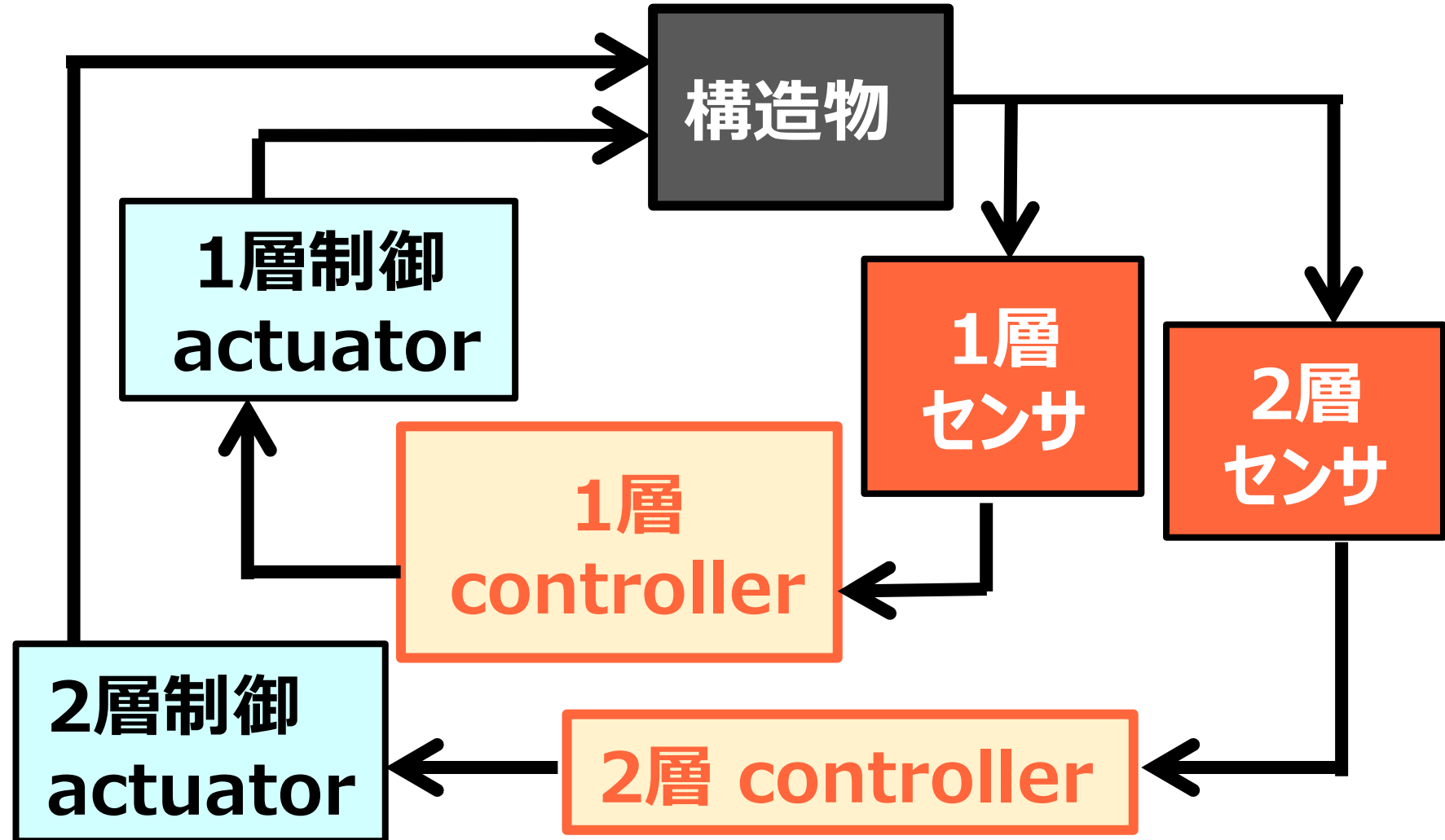


2019



Around
1995



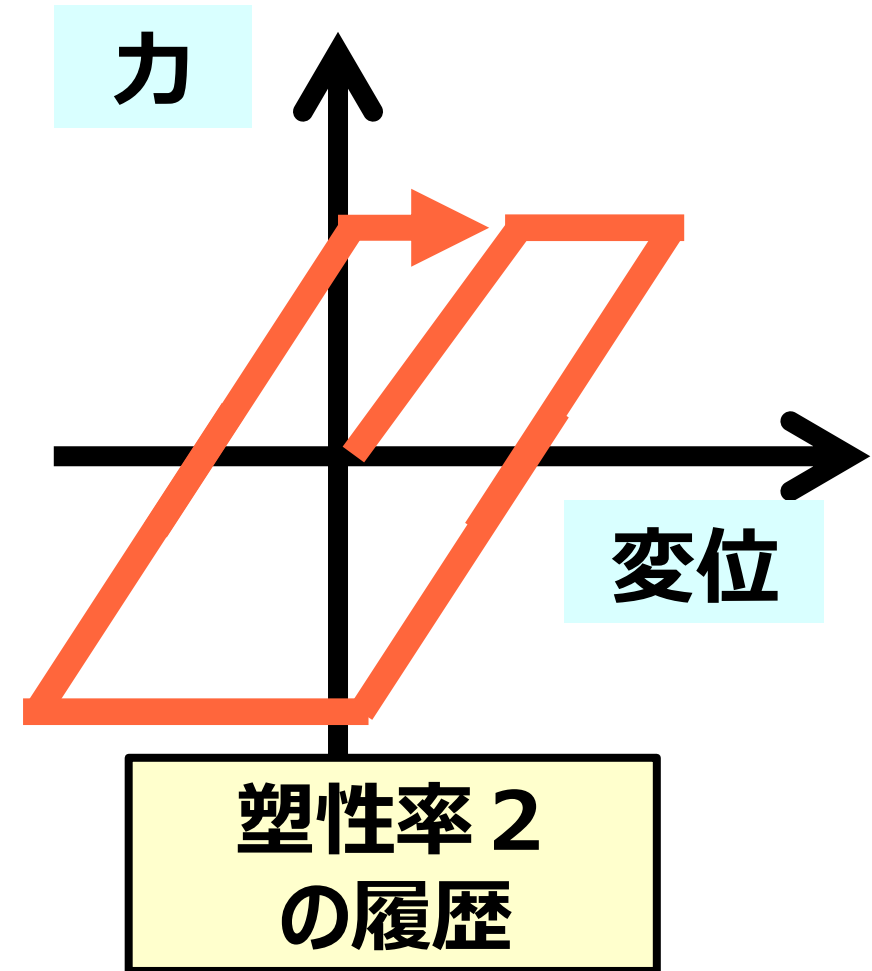


可変スリップレベルダンパ

原理的には

層間変位がゼロ
を通過するとき
にスリップさせる

ダンパ設置層
の情報のみ



可変スリップレベルダンパ

原理的には

層間変位がゼロ
を通過するとき
にスリップさせる

ダンパ設置層
の情報のみ

力

エネルギー
消費効率が
もっとも良い

変位

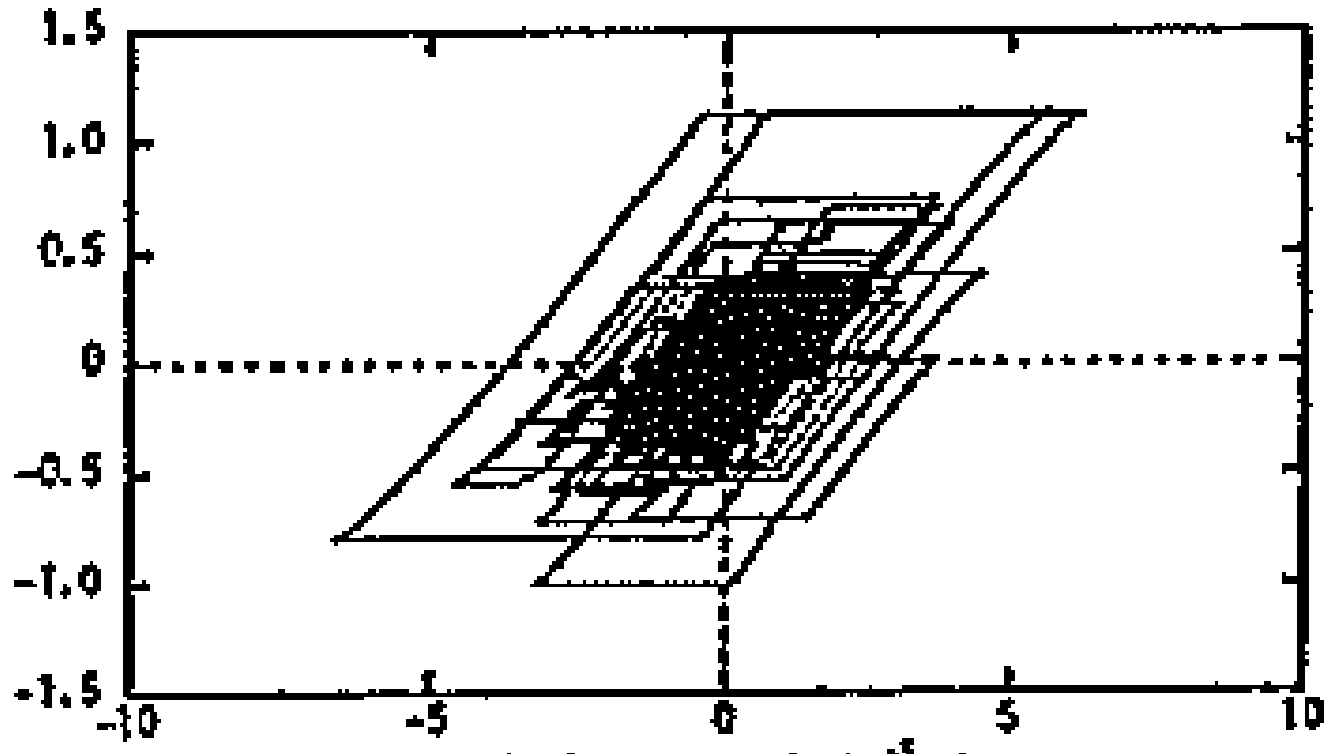
塑性率 2
の履歴

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

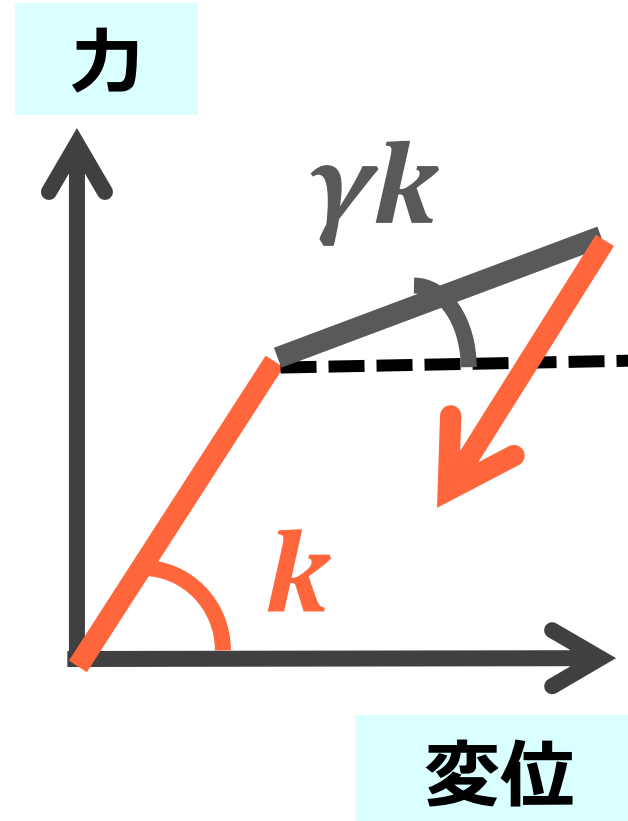
可変スリップレベルダンパの履歴

力 (kN)



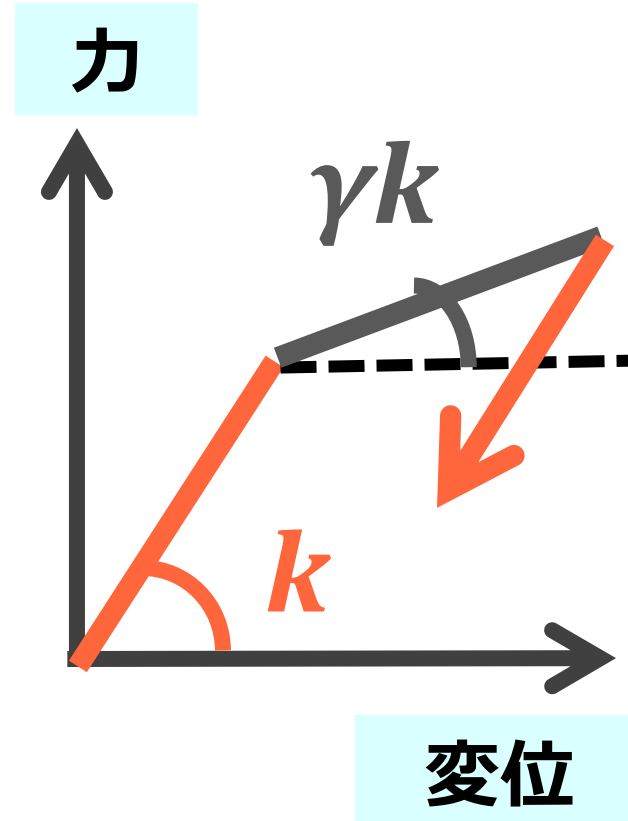
変位 ($\times 10^{-3}$ m)

地震動に対するダンパ履歴の simulation



$\gamma k =$
線形構造物の剛性

$k =$
線形構造物の剛性 +
完全弾塑性履歴ダンパ
の初期剛性



$$m = 1.0 \text{ ton}$$

$$k = (2\pi)^2$$

$$k = \pi^2$$

$$k = (2\pi/3)^2$$

kN/m

$$\gamma =$$

0.5, 0.6, 0.7

線形構造物 + 完全弾塑性履歴ダンパ

+

El Centro 1940 NS
Taft 1952 EW
Hachinohe 1968 EW
JMA Kobe 1995 NS

$m = 1.0 \text{ ton}$

PGA
 2.0 m/s^2

$(2\pi/5)$
kN/m



変位

$\gamma =$
0.5, 0.6, 0.7

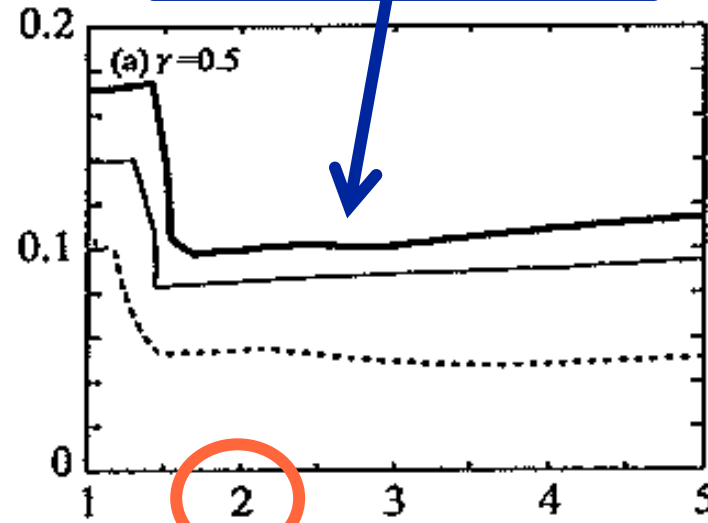
ダンパを含む変位・加速度応答

$\gamma = 0.5$

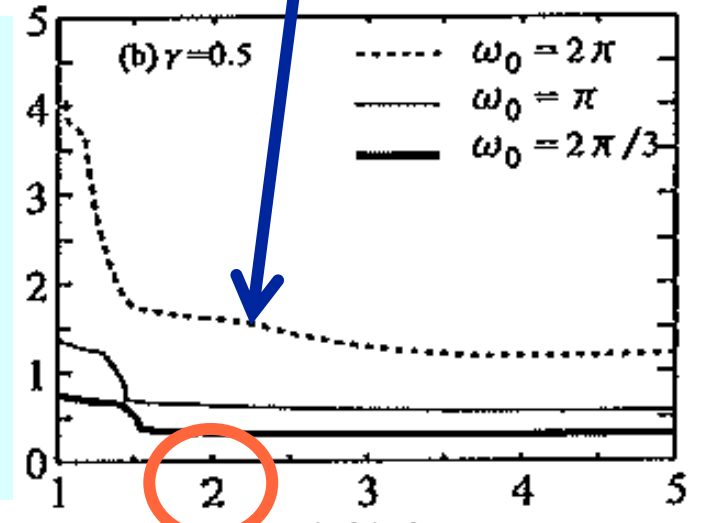
$\omega_0 = 2\pi/3$
 $\omega_0 = \pi$
 $\omega_0 = 2\pi$

$\omega_0 = 2\pi$
 $\omega_0 = \pi$
 $\omega_0 = 2\pi/3$

変位



絶対加速度



2

塑性率

塑性率

Taft 1952 EW

西谷章、若原知広、仁田佳宏

バイリニア-履歴系の応答性状と塑性率に関する
基礎的検討

構造工学論文集 Vol. 55B,479-484, 2009

A. Nishitani, Y. Nitta, C. Wakahara

Artificial nonlinearity in structural control:
Its original concept survey and significance
in semiactive control scheme

Structural Control and Health Monitoring,
16: 17-31, 2009

可変スリップレベルダンパ

層間変位がゼロ
を通過するとき
にスリップさせる



各層独立
の制御

層ごとに自律した
制御を実行

複数層に
自律コントローラ

自律分散制御

可変スリップレベルダンパ

Autonomous-
Decentralized
Control

自律分散
制御

ASCE

Civil Engineering の
Paper として、初めて
A-D Control の名称
を提示して提案

A.Nishitani, Y.Nitta, Y.Ikeda
Semiactive Structural-Control Based on
Variable Slip-Force Level Dampers,
J. of Structural Engineering, ASCE,
Vol.129, No.7, 933-940, 2003

Autonomous-
Decentralized Control

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

可変スリップレベルダンパ の 論文

98

西谷章他、
可変スリップレベルダンパの
概念によるセミアクティブ振動
制御に関する基礎的研究
日本建築学会構造系論文集、
No.558, 93-100, 2002

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

ふたつめの公的研究

2017-21 年度

首都圏を中心とする
レジリエンス総合力向上プロジェクト

首都レジ・プロジェクト

委託研究

防災科学技術研究所
NIED

文部
科学省

サブ C

非構造部材を含む構造物
の崩壊余裕度に関する
データ収集・整備

研究統括
西谷
梶原(NIED)

実物建物モデルの
E-defense 震動台実験

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

首都レジ・プロジェクト

101

首都レジ
サブC

構造ヘルスマモニタリング

実大・実物 E-defense 実験

層間変位センサ 計測
無線加速度センサ 計測

崩壊余裕度に関するデータ収集・整備

実大実物 E-defense 実験

2018 FY： 木造 3層住宅

2019 FY： RC造 防災拠点建物

2020 FY： S造 病院

2021 FY： 室内空間の機能維持

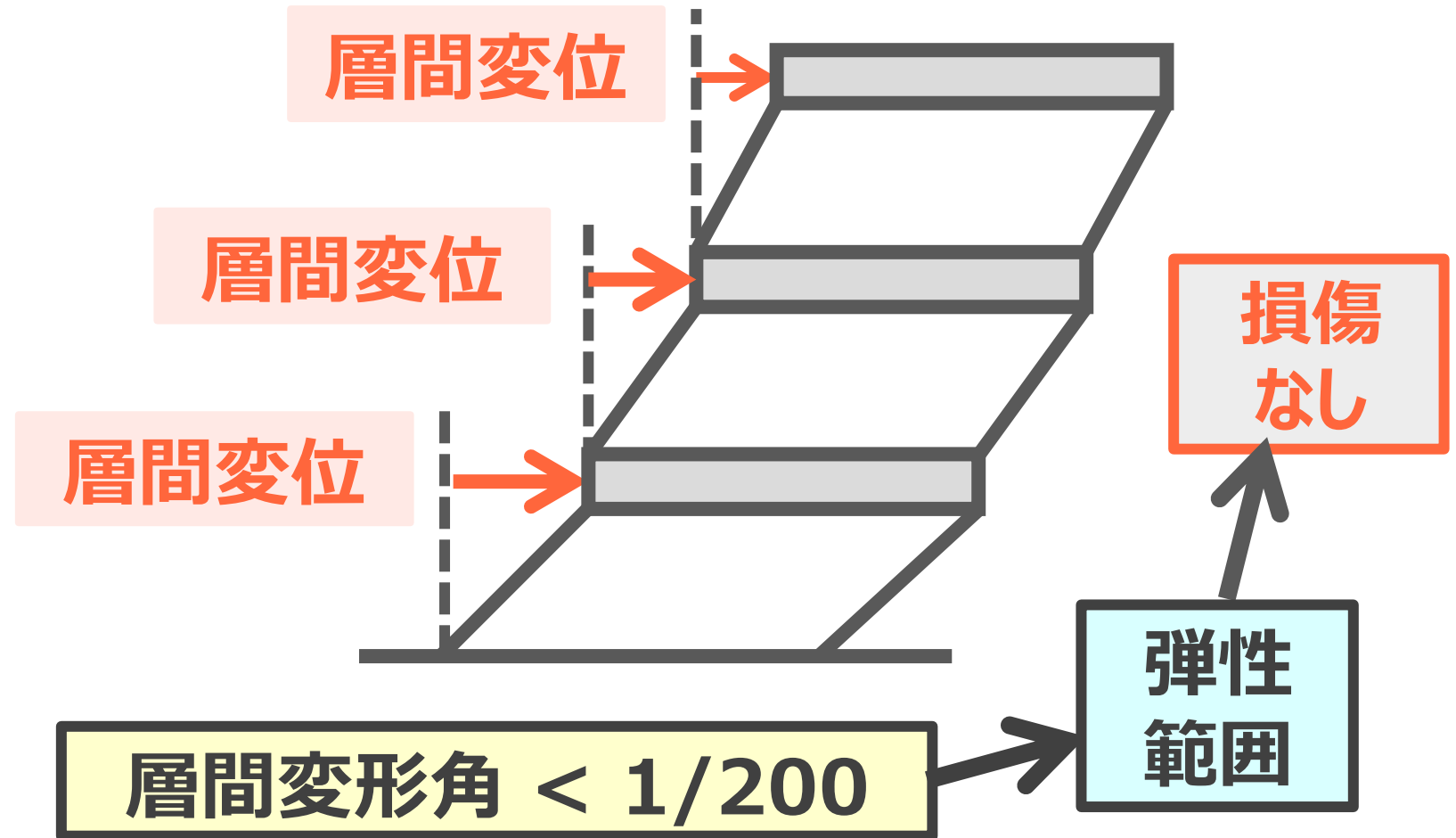
層間変位センサ

Inter-story Drift Displacement Sensors

2006~

早稲田・ナノ研究機構

鹿島建設と協働研究



層間変位センサ

直接的な
安全性検証の
指標となる

構造技術者
に馴染み深い

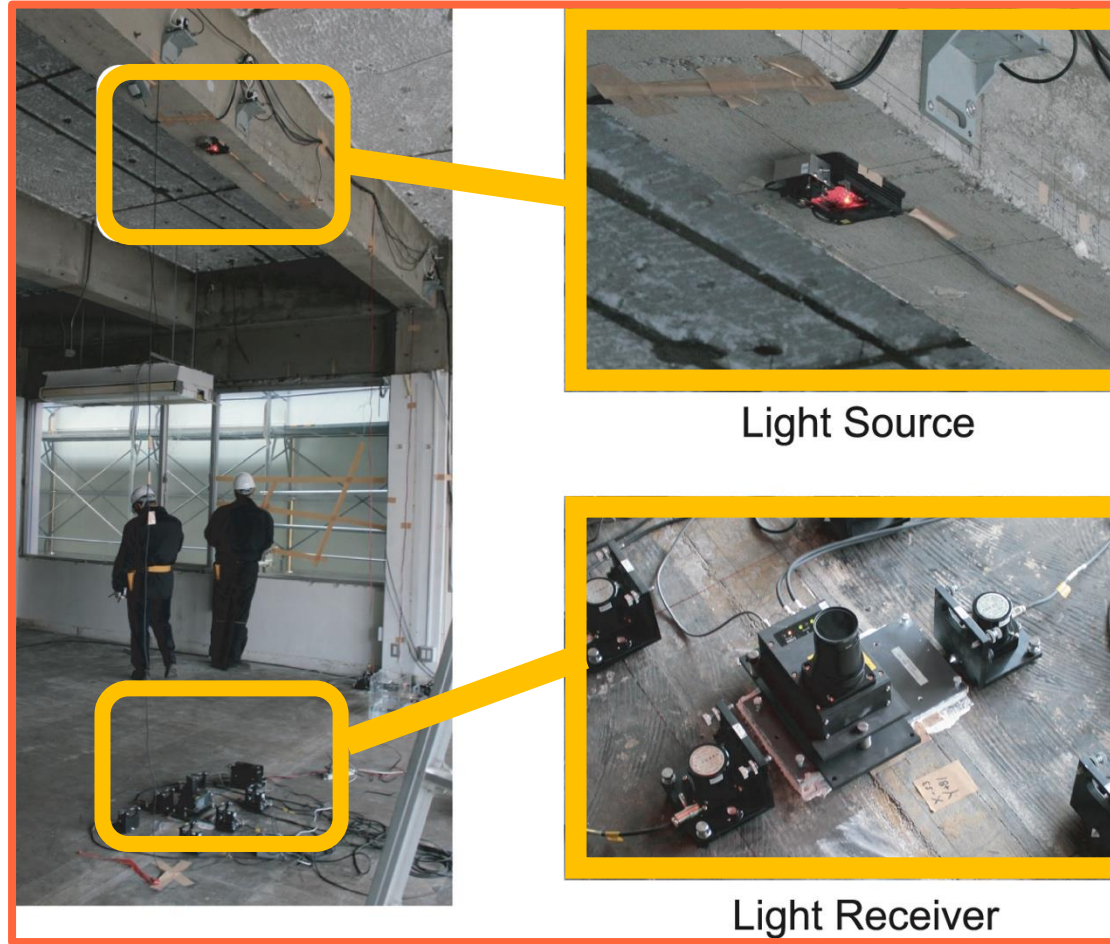
構造設計者 Friendly



現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

層間変位センサ計測



光源部

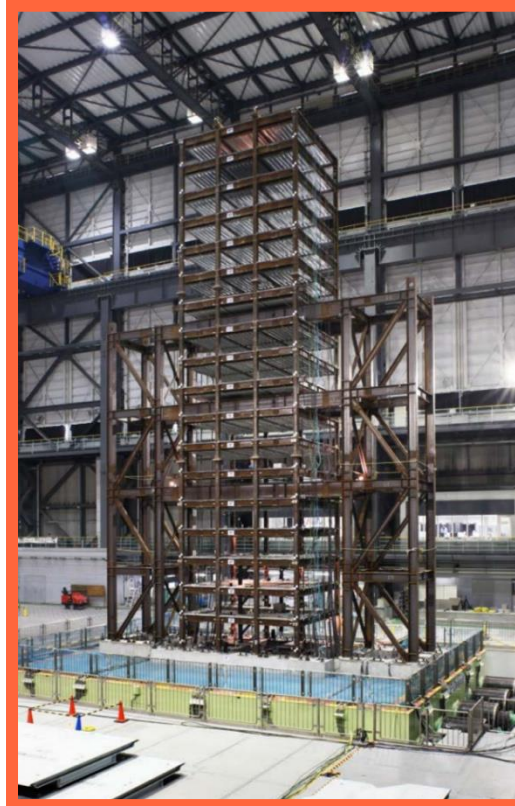
受光部

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

層間変位センサ計測

108



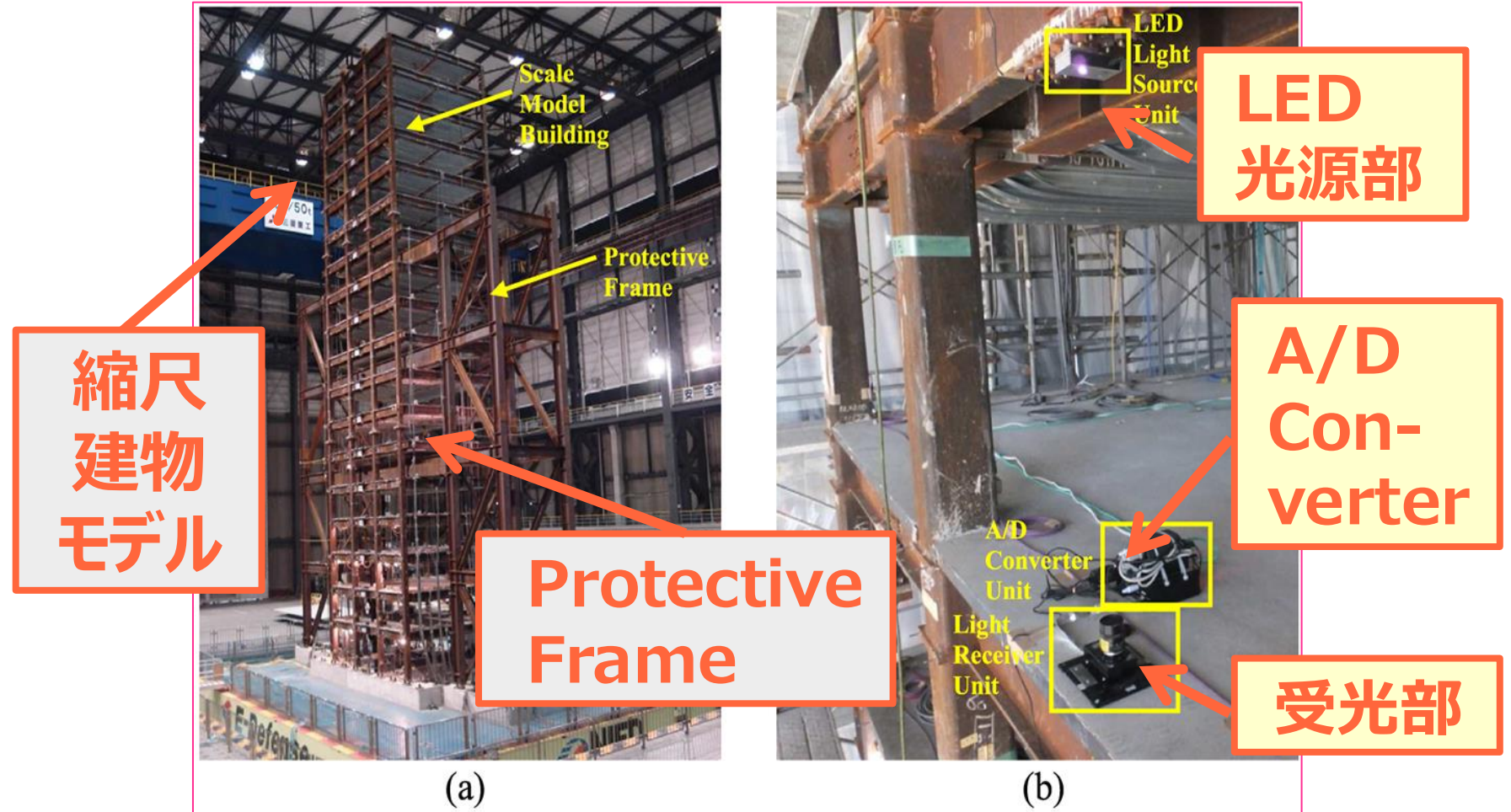
E-defense 実験

**鉄骨造 18 層
1/3 縮小試験体**

2013年12月

都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト
<http://www.toshikino.dpri.kyoto-u.ac.jp/>

層間変位センサ計測



From: EESD, May 2016, DOI:10.1002/eqe.2752

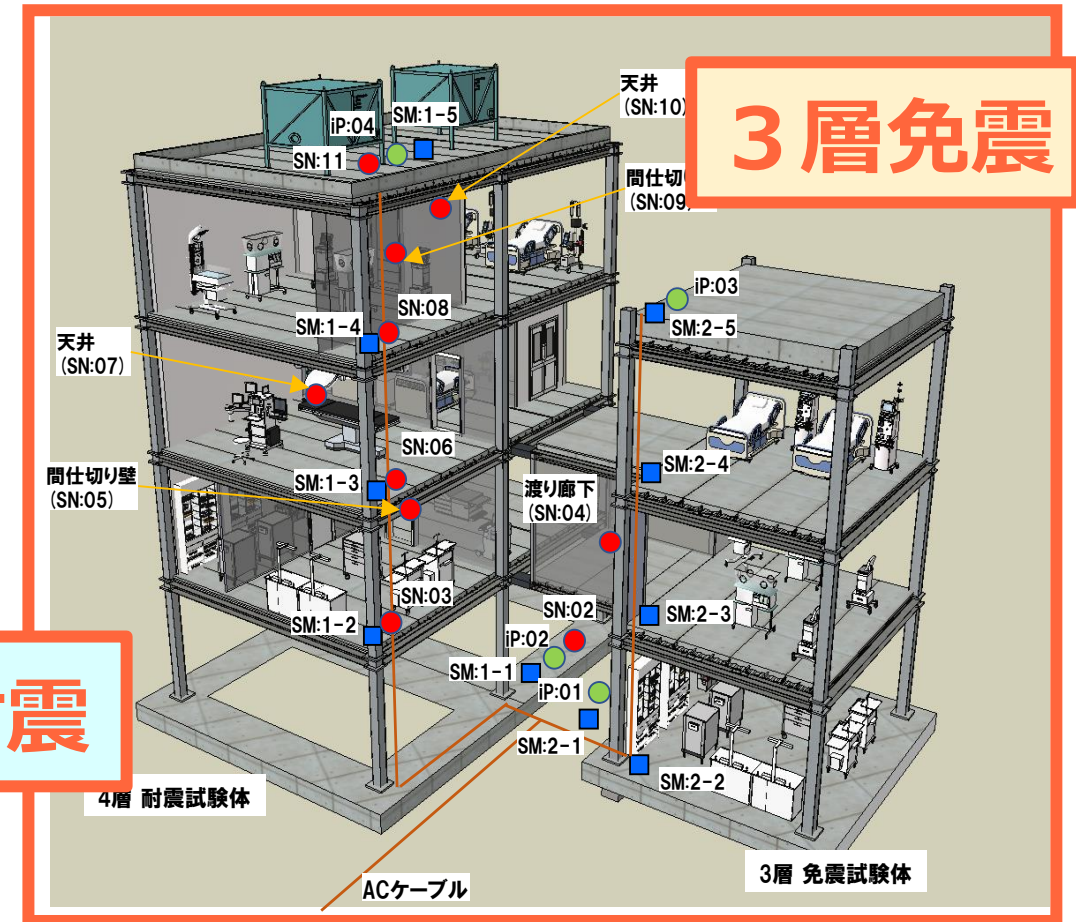
首都
レジ

Kalman Filter
2020年度 S造 4層耐震建物
限定層の加速度出力からの
全層推定

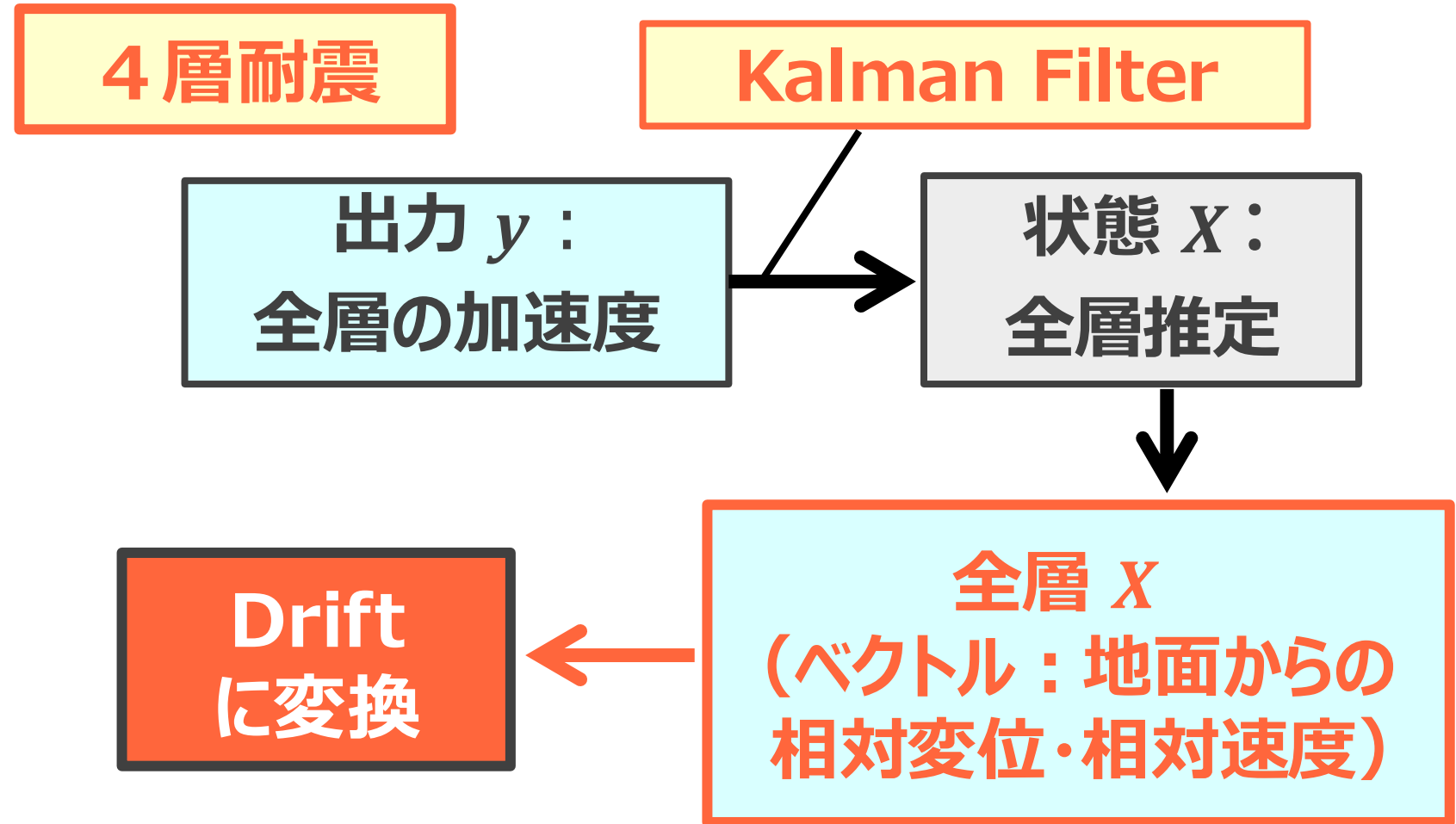
層間変位センサ data
無線加速度センサ data

併用

2020年度 S造 病院建物 E-defense 実験

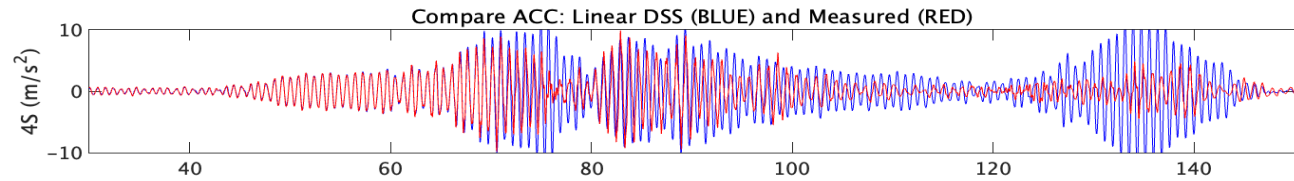


全層加速度からの 全層推定

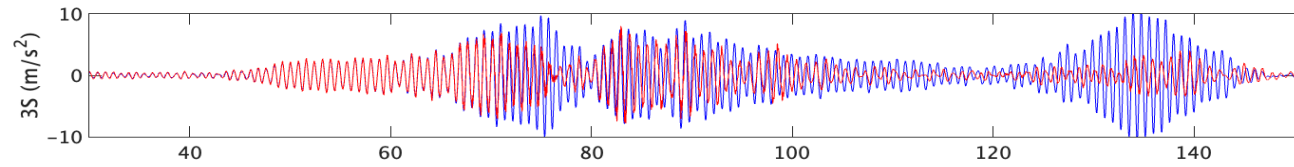


線形加速度応答と加速度計測値の比較

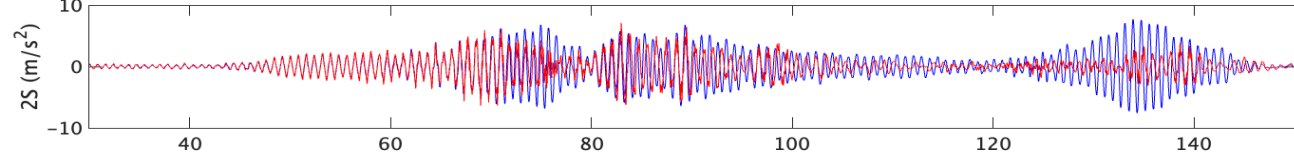
4S



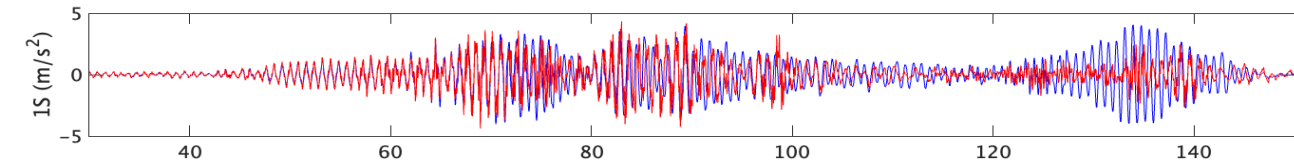
3S



2S



1S

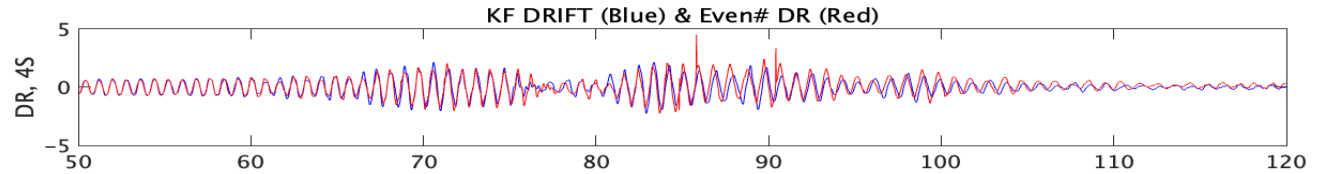


赤：計測値
青：線形加速度値

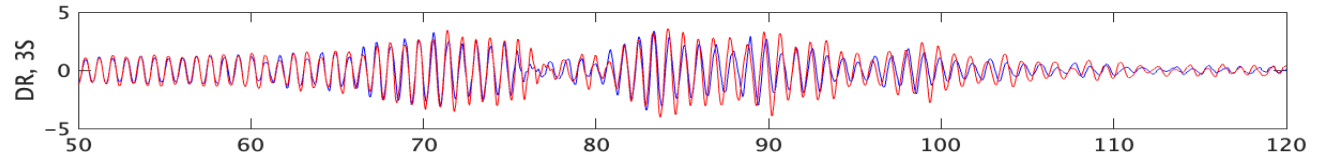
計測値 < 計算値

全層 Drift 推定

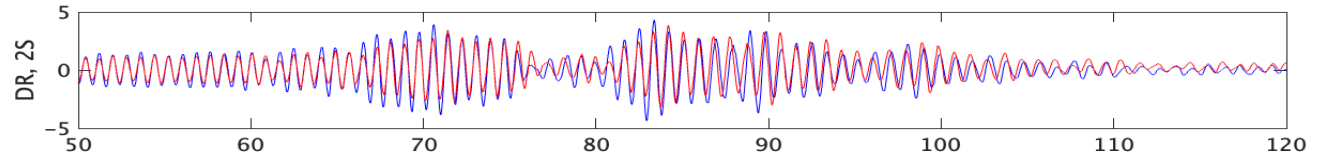
4S



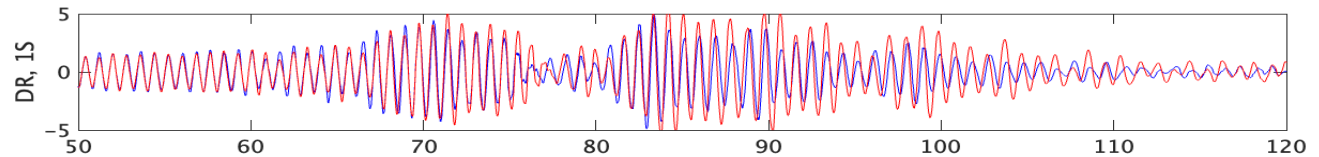
3S



2S



1S



赤：計測値
青：線形計算値

計測値 > 計算値

限定層計測値からの全層推定

Kalman Filter

出力 Y ：
限定層の加速度

状態 X ：
全層推定

$Y = B'X$
(全層の加速度を求める
出力方程式)

全層加速度推定

**全層 Drift
推定**

1層加速度出力
からの推定

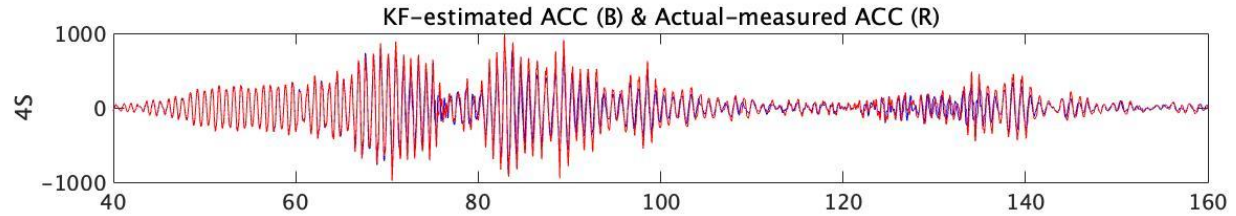
```
graph TD; A[1層加速度出力からの推定] --> B[全層加速度推定]; A --> C[全層Drift推定];
```

全層
加速度
推定

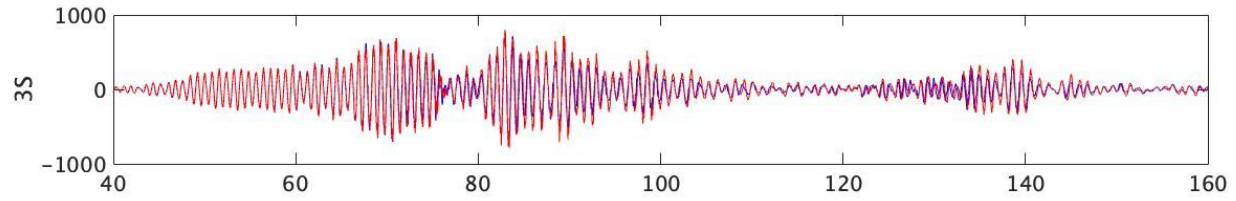
全層
Drift
推定

1層加速度 → 全層加速度推定

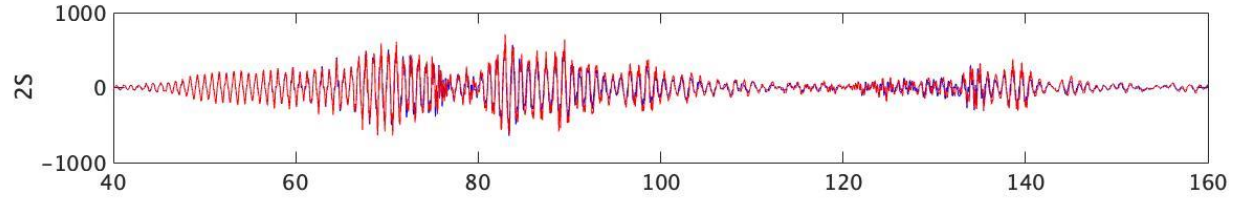
4S



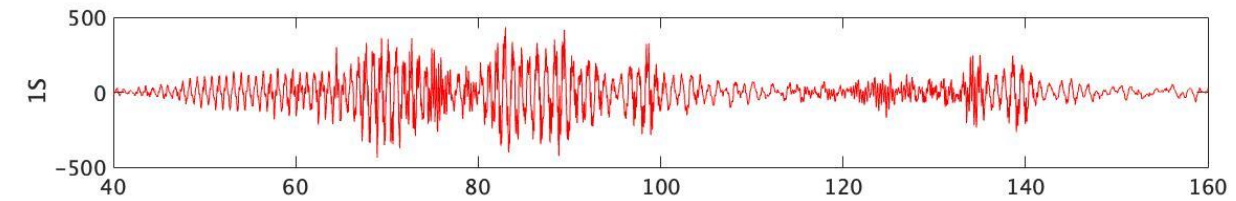
3S



2S



1S



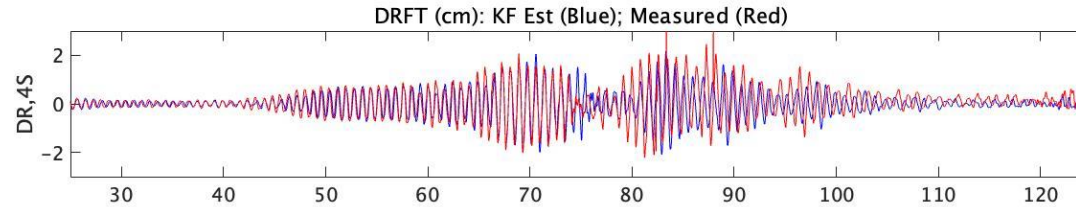
On = 0.25; Rn = 0.25; Blue: Estimated; Red: Measured

赤：計測値；青：KF

適合

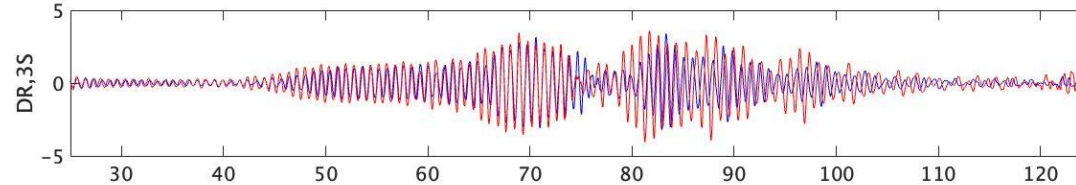
1層加速度 → 全層 Drift 推定

4S



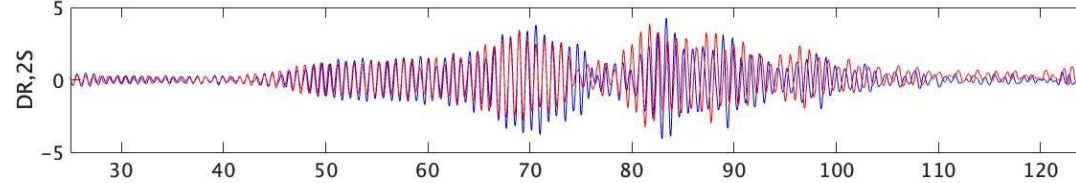
計測 > KF

3S



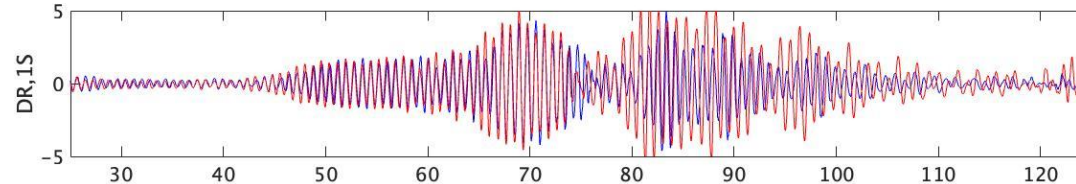
計測 > KF

2S



計測 > KF

1S



計測 > KF

赤：計測値；青：KF

現代構造学：その発展と展望

早稲田大学 名誉教授 西谷 章

MIDAS × NISHITANI

Session.6

これからの現代構造学

独断と偏見版：応答制御の Keywords

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

構造制御の Keywords

120

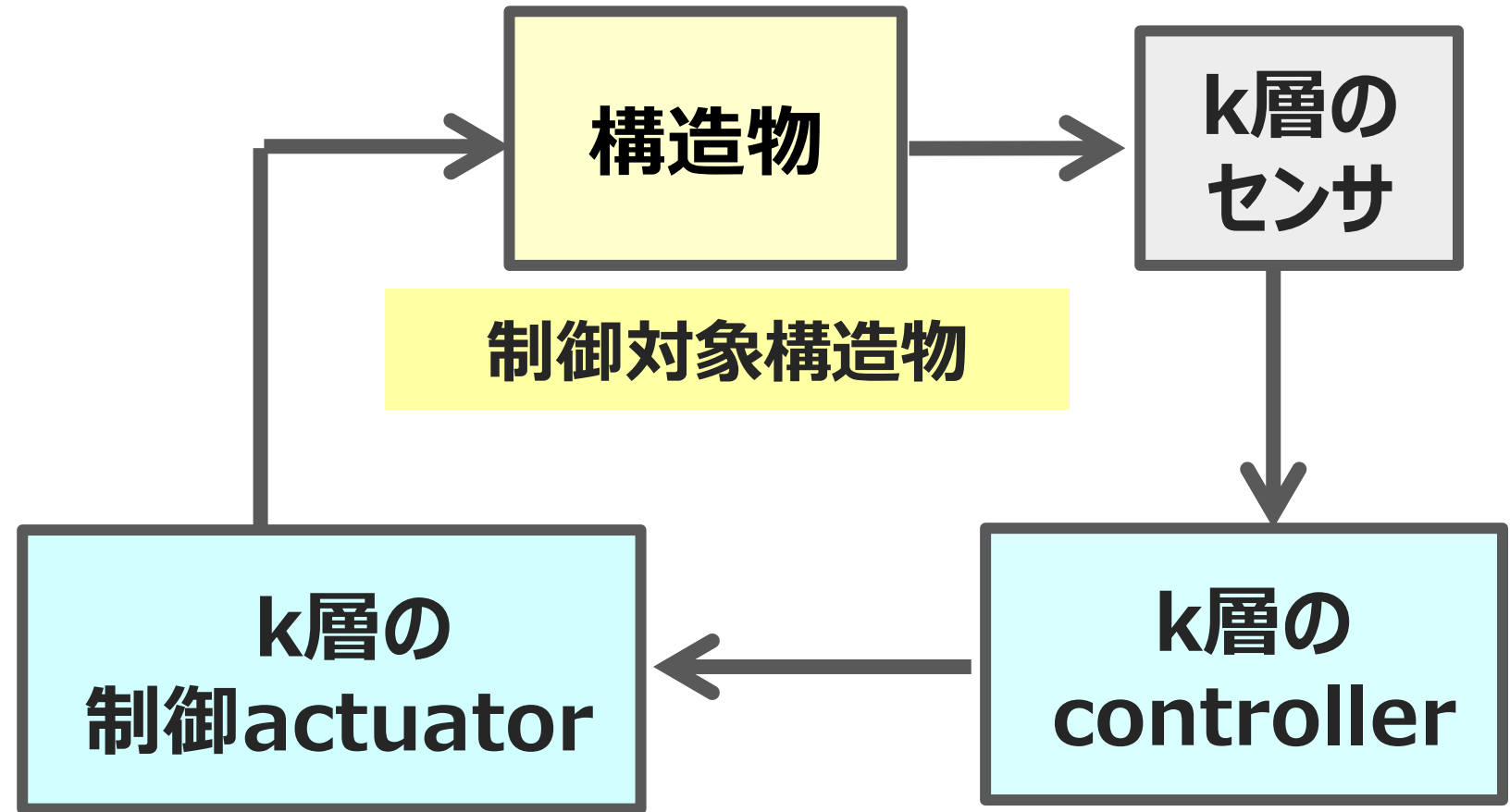
ロバスト
セミアクティブ
自律分散

制御

層で完結した制御

その層のみの情報に基づく
その層のみの controller による
その層のみの actuator による

自律分散制御のフロー



ロバスト制御

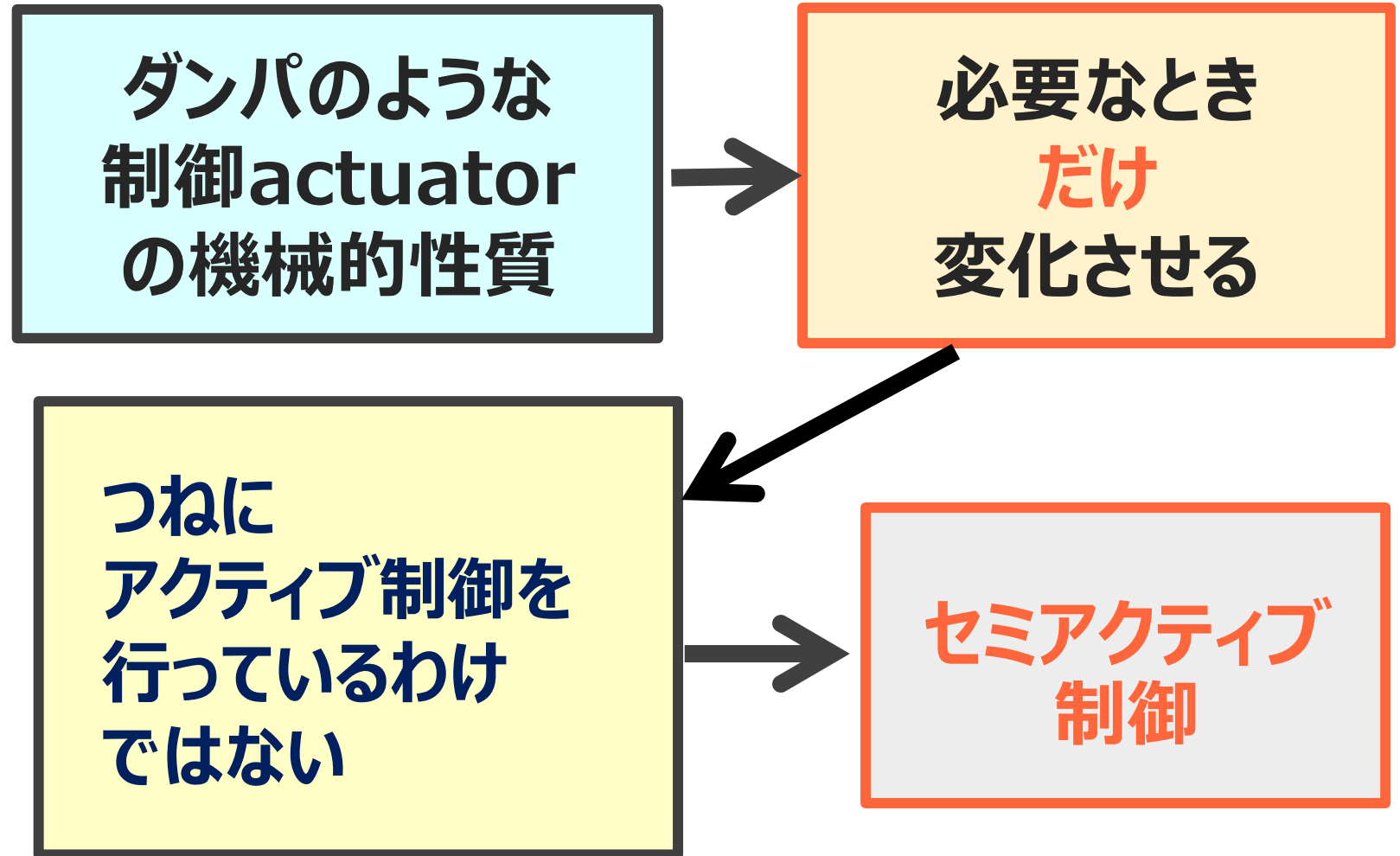
ロバスト = 頑強

123

ロバスト制御

制御対象に
不確かさがあっても、
的確な制御を行う

制御対象の性格（の変化）
に **鈍感** な制御



現代構造学：その発展と展望

早稲田大学 名誉教授 西谷 章

MIDAS × NISHITANI

Session.7

まとめ

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章

現代構造学について述べた

Columbia に行かなかったら・・・

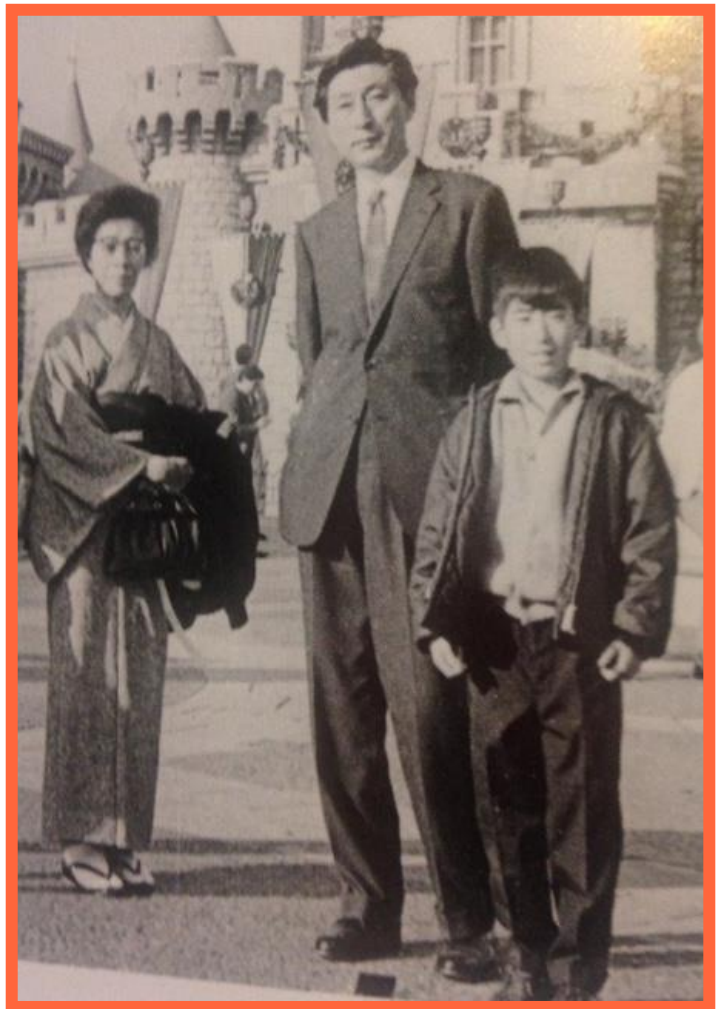
制御にかかわらなかつたら・・・

多くの外国研究者との交流がなかつたら

これらのきっかけ

現代構造学：
その発展と展望

早稲田大学
名誉教授 西谷 章



松井源吾
教授

ご縁
に感謝

現代構造学：その発展と展望

早稲田大学 名誉教授 西谷 章

MIDAS × NISHITANI



Thanks for your attention.