

Micro Electro  
Mechanical Systems **MEMS**利用による  
交通振動計測の可能性検証

# 社会のニーズと工学的解法 Background

## 橋梁の老朽化



### 木曽川大橋

Built in 1963. Located in Mie prefecture. A penetrating crack was found by a staff of MLIT in 2007. If he didn't find the crack, the bridge might collapse.

## 点検の義務化

5年に1回

道路法施行規則 第四条の五の二  
平成26年5月28日施行

## 自治体の負担

熟練技術者  
予算  
技術力

不足

## 求められる点検手法

低成本・技術者に依らない



## 振動多点計測

- ・安全 (コスト改善)
- ・高い客観性
- ・低成本

## 技術的課題

設置の労力

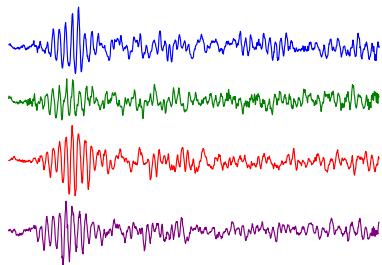
センサ費用

厳しい条件

（計測位置 時刻同期  
加振条件 etc.）

# 適用範囲の広い分析手法

## 振動データ



$$\begin{Bmatrix} y_1(t) \\ \vdots \\ y_n(t) \end{Bmatrix}$$

加振条件に依らず  
適用可能な分析手法

フーリエ変換

## 特異値分解

Singular Value Decomposition

$$y(t) = Aq(t)$$

A:モード形状行列

Estimated modes shapes matrix

## FDD法 Frequency Domain Decomposition

クロスパワースペクトル

$$G^+_{YY}(\omega) = \begin{Bmatrix} y_1(\omega) \\ \vdots \\ y_n(\omega) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1(\omega) \\ \vdots \\ y_n(\omega) \end{Bmatrix}^T$$

## 固有値分解

Eigenvalue Decomposition

$$G^+_{YY}(\omega) = \mathbf{U}(\omega) \mathbf{S}(\omega) \mathbf{U}^T(\omega)$$

$\mathbf{S}(\omega)$ :特異値スペクトル

Estimated singular shapes matrix

$\mathbf{U}(\omega)$ :モード形状行列

Estimated modes shapes matrix

# 目的・手法 Purpose

## STEP1 目的

**交通振動による  
分析手法の確立**

適用性検証：FDD法

**省力的なセンサ開発**  
**独立型センサ**

使い勝手の良さ  
低成本、GPS時刻同期

## STEP2 手法

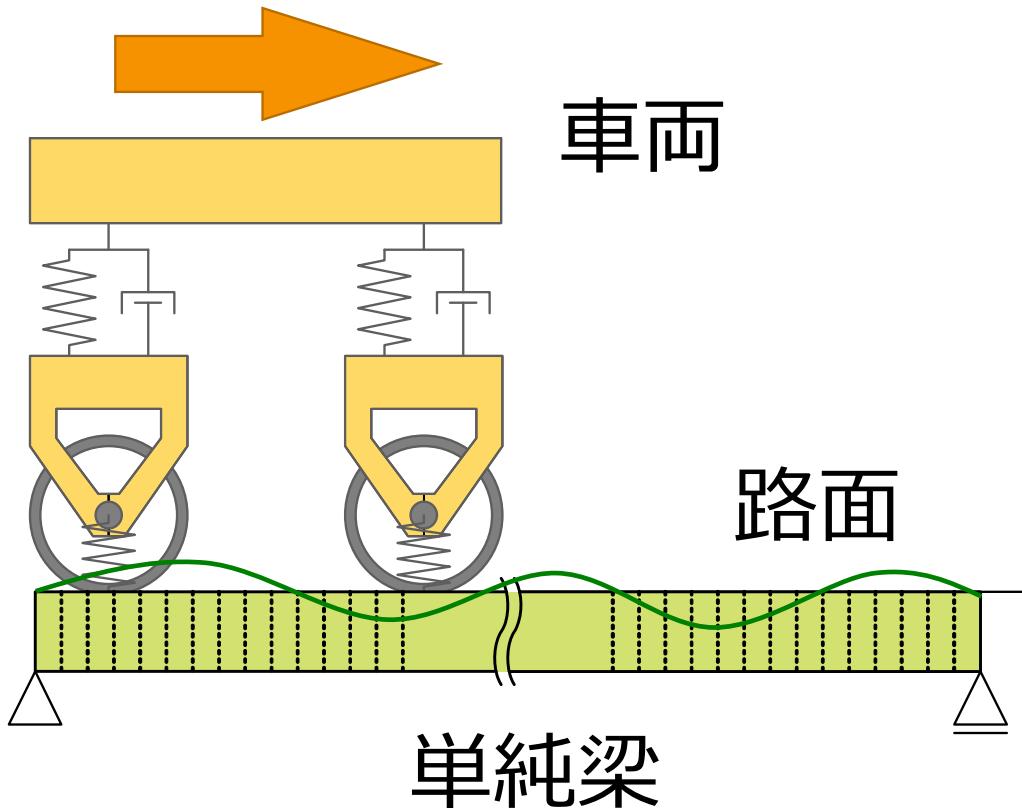
**実橋梁実験**

センサーの試用  
FDD法、特異値分解の比較、検証



# 数値計算によるFDD法の確かめ

## 車両橋梁相互作用モデル (VBI)



### The parameters of Vehicle

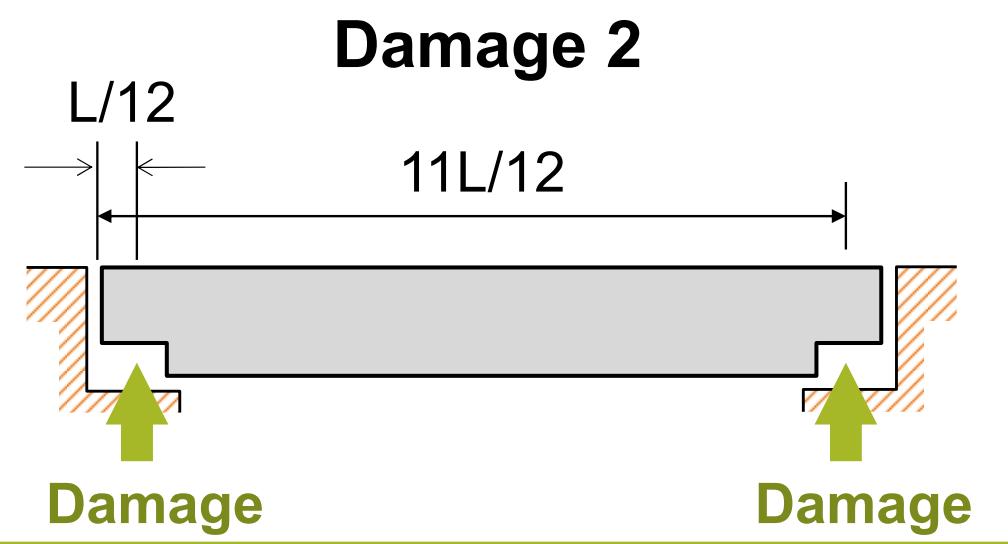
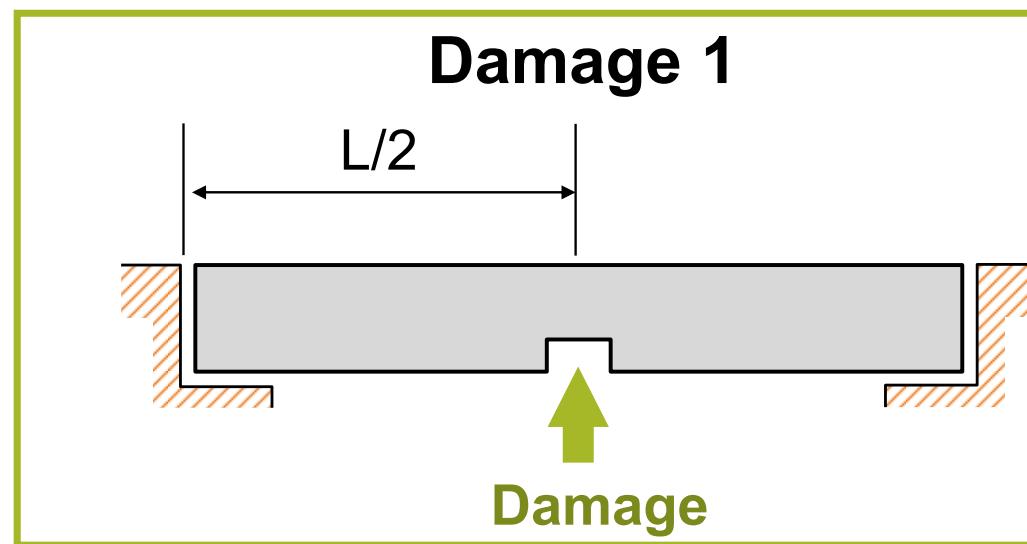
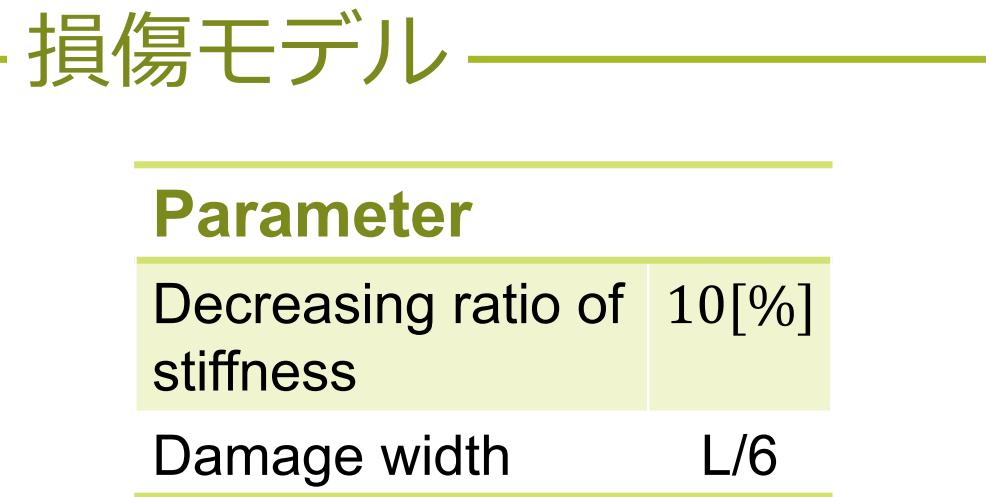
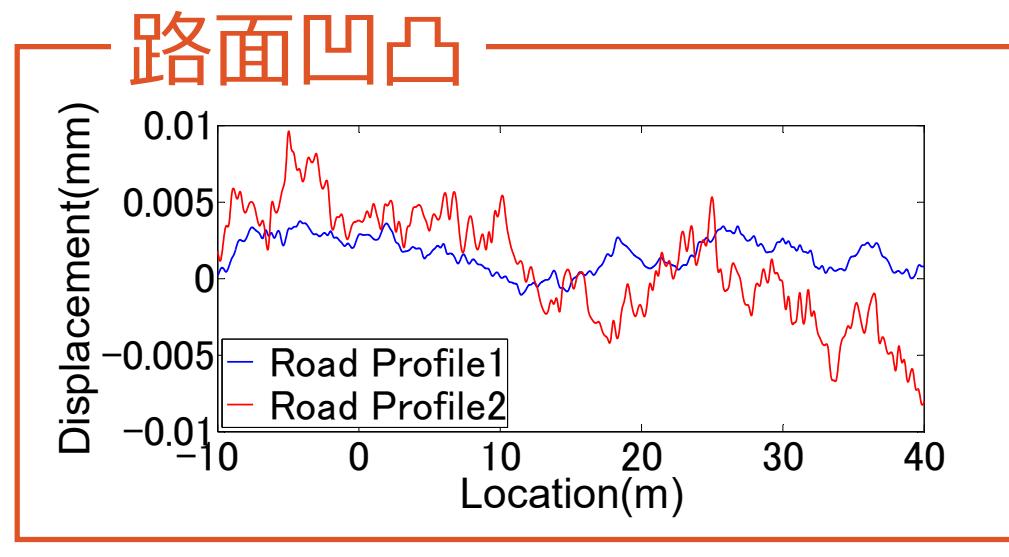
Sprung	Mass	$m_s$	18000[kg]
	Stiffness	$K_s$	$1.0 \times 10^6 [kg/s^2]$
	Damping	$c_s$	$1.0 \times 10^4 [kg/s]$
	Inertia	$I_P$	64958[kg m <sup>2</sup> ]
	Distance	$l$	1875[m]

Unsprung	Mass	$m_u$	1100[kg]
	Stiffness	$k_u$	$3.5 \times 10^6 [kg/s^2]$
	Damping	$c_u$	$3.0 \times 10^4 [kg/s]$

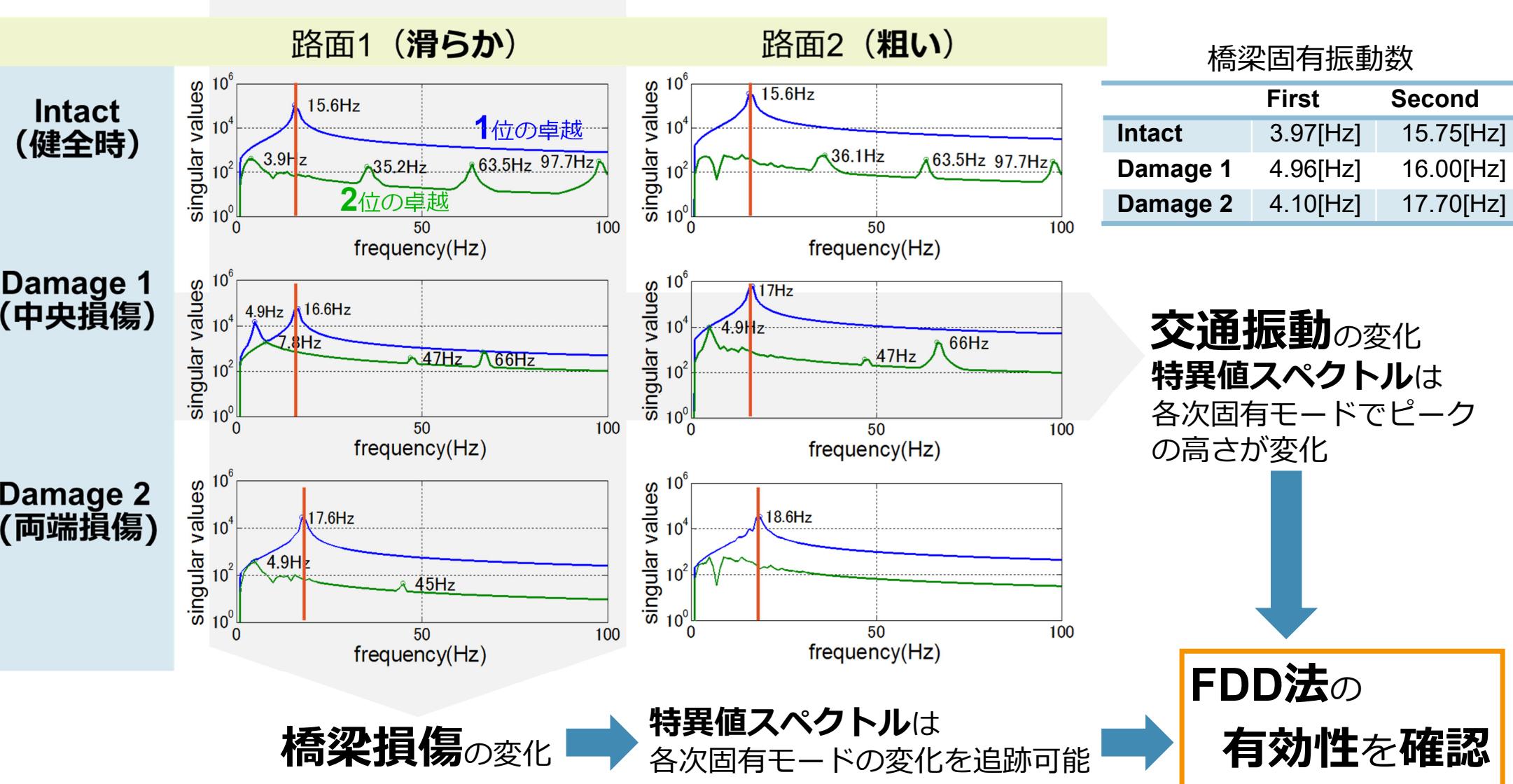
### Parameter of Bridge

Flexural Stiffness	$EI$	$1.56 \times 10^{10} [Nm]$
Mass per unit length	$\rho A$	3000[kg/m]

# 路面凹凸と損傷モデル



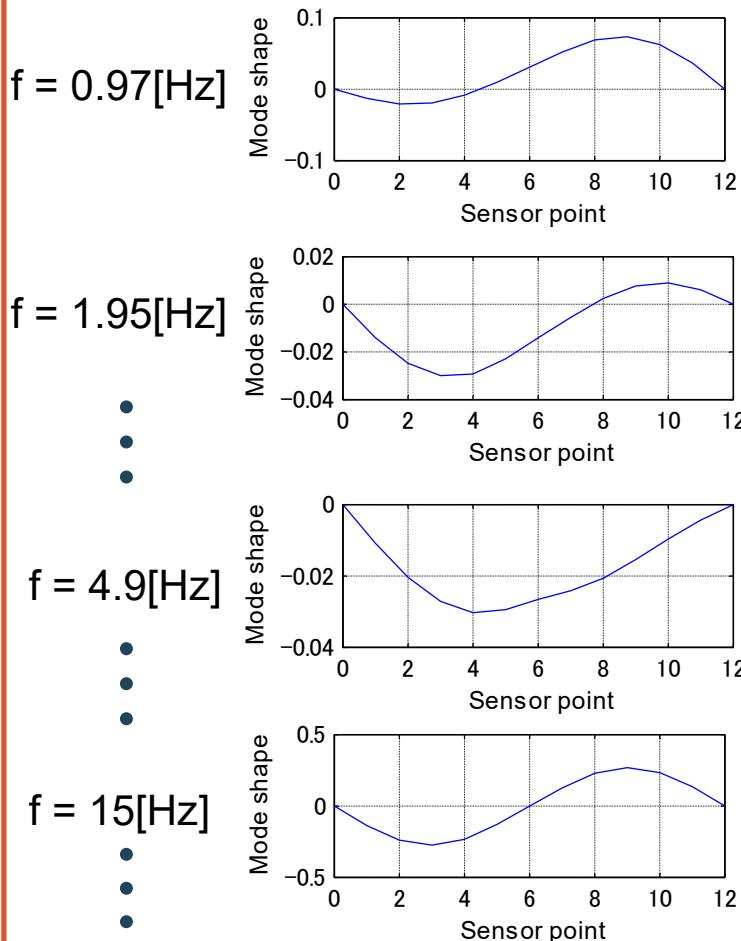
# FDD法による特異値スペクトルの比較 $G_{YY}^+(\omega) = \mathbf{U}(\omega)\mathbf{S}(\omega)\mathbf{U}^T(\omega)$



# FDD法と正解値のモード形状の比較 $G_{YY}^+(\omega) = \mathbf{U}(\omega)\mathbf{S}(\omega)\mathbf{U}^T(\omega)$

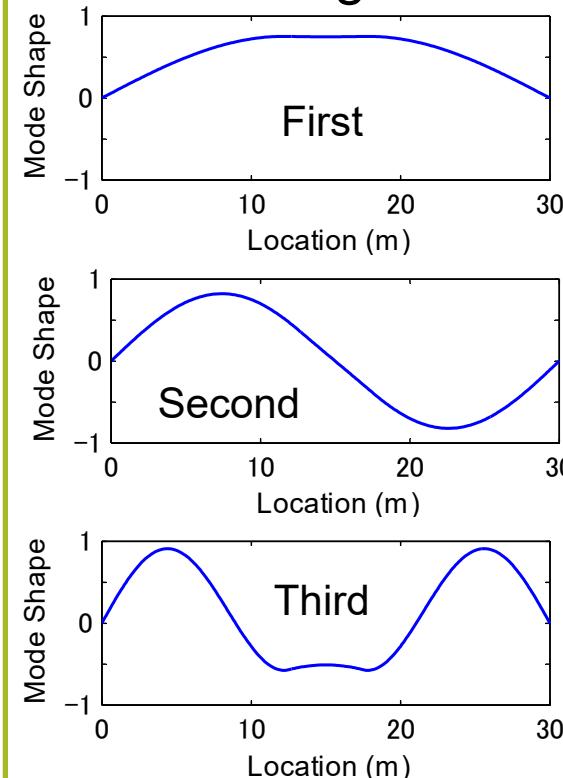
FDD法によるモード形状

Damege1 (中央)



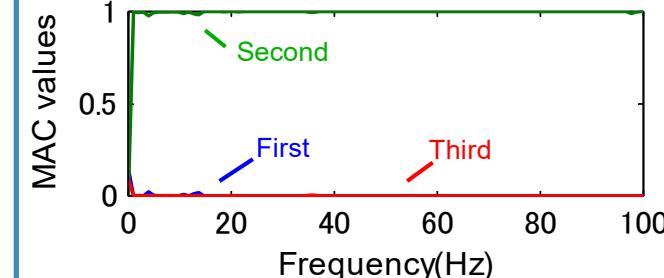
正解値のモード形状

Damege1

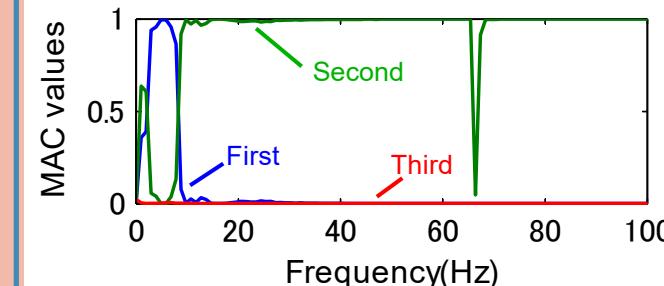


MAC値

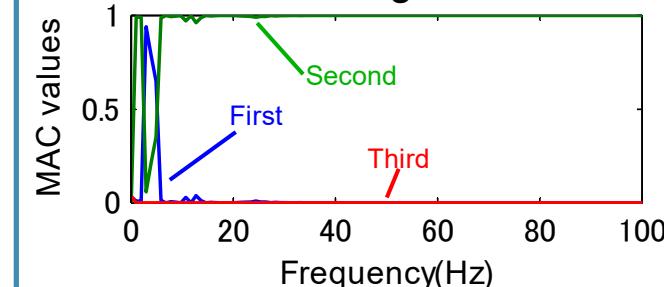
Intact



Damage 1

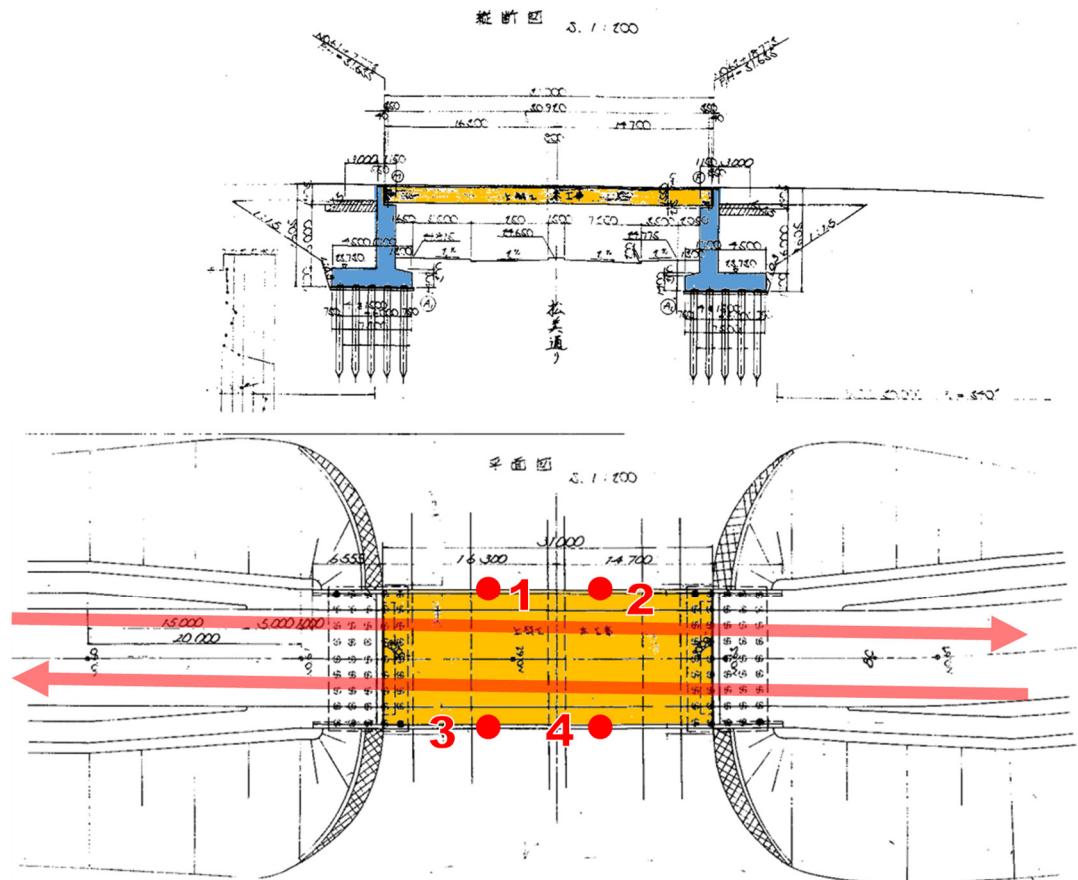


Damage 2



# 実橋梁計測 measuring bridge

Matsumi Bridge  
松美橋



● : センサー設置地点

# センサシステム開発 Development of Sensor System

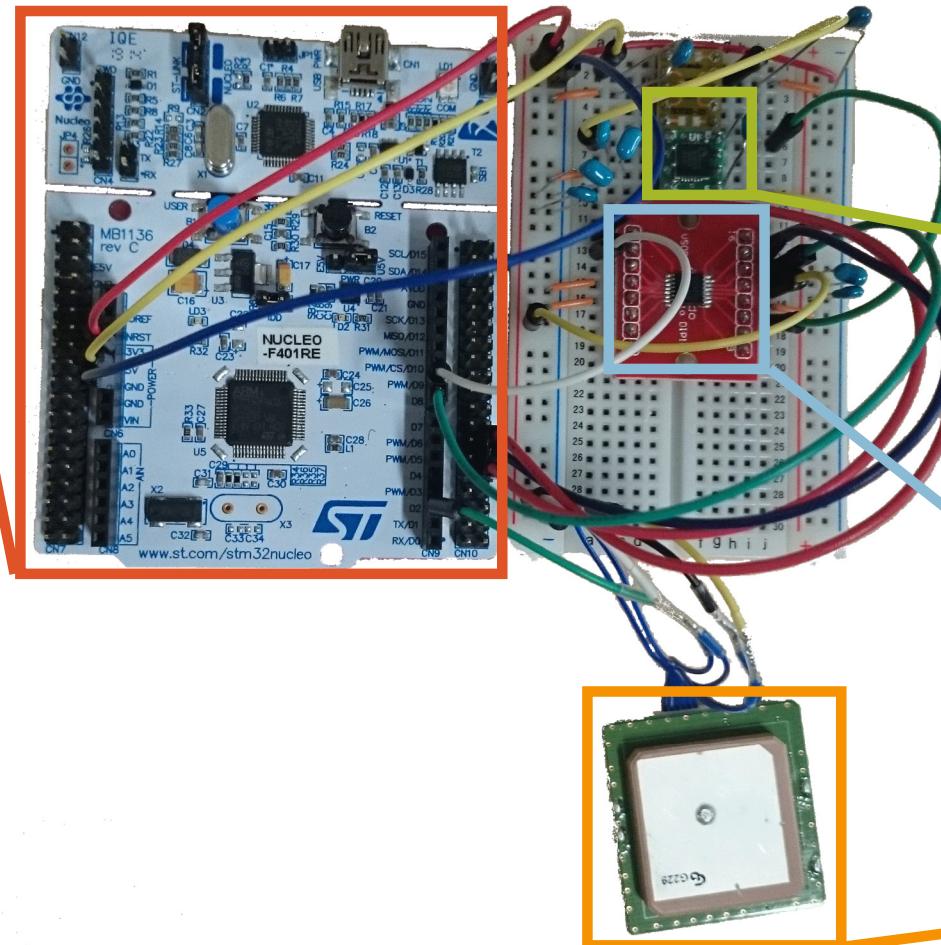
Micro computer

Nucleo-F401RE

Data logger

PC

Serial communication  
between PC and  
Micro computer

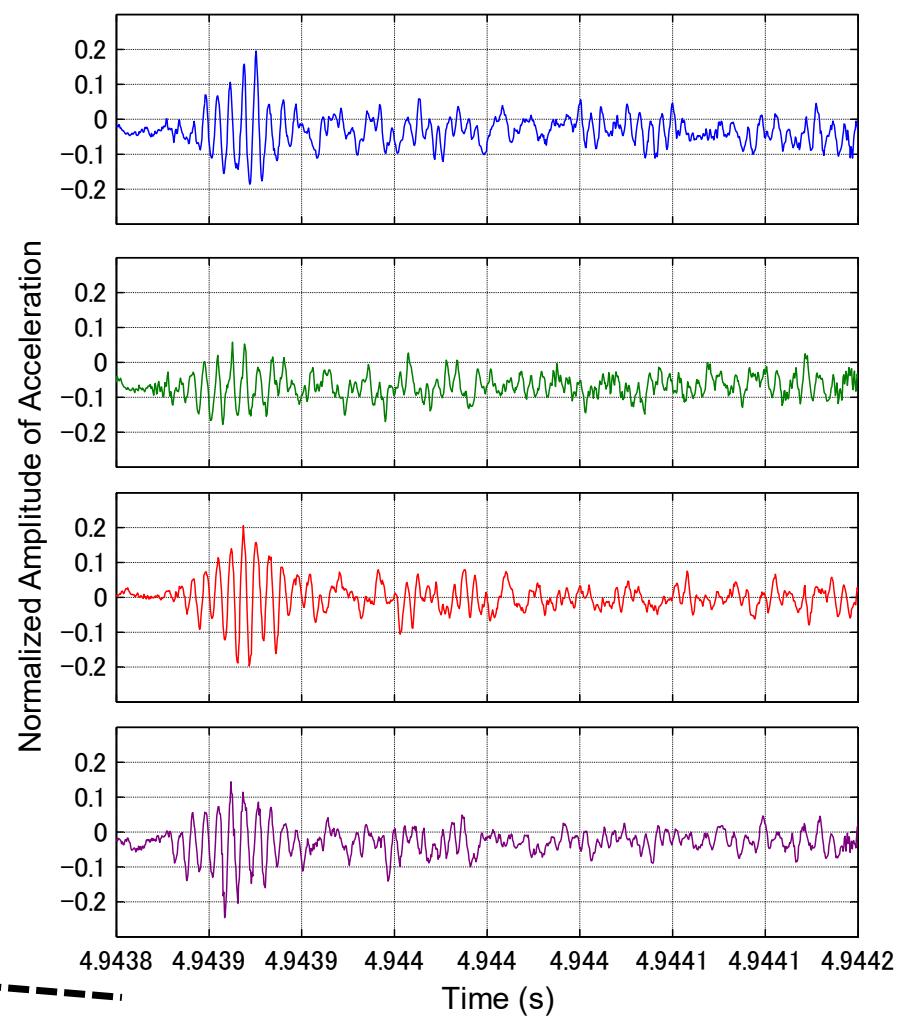
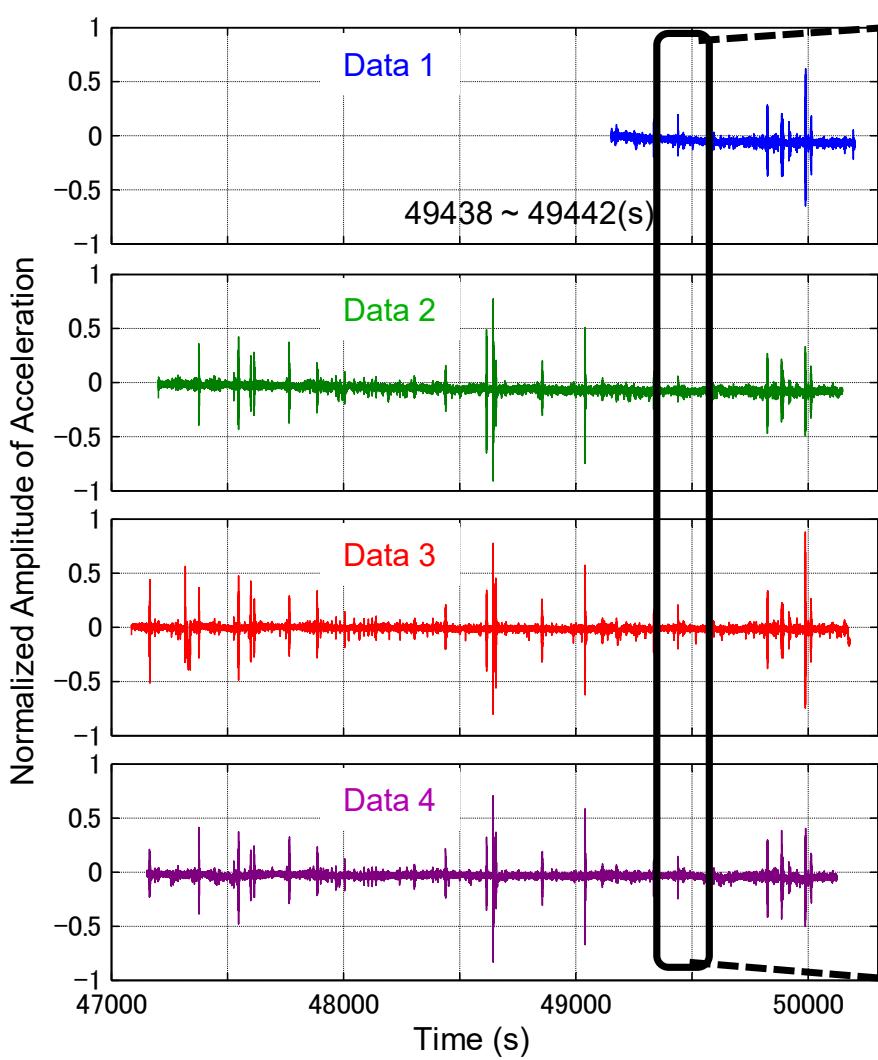


Acceleration sensor  
加速度センサ  
KXR94-2050

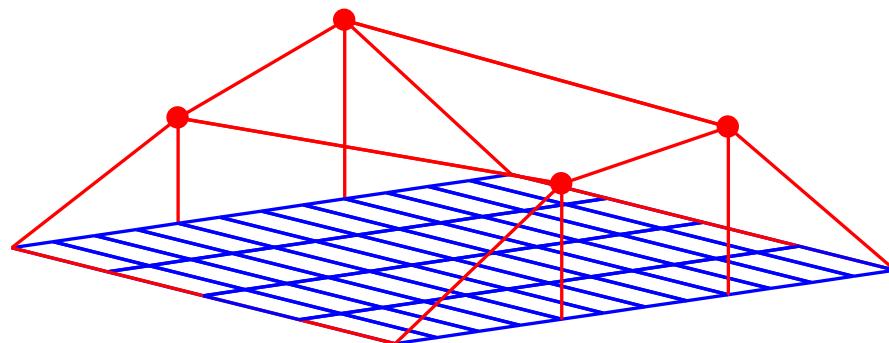
AD converter  
ADコンバータ  
ADS1220(24bit)

GPS sensor  
GPSセンサ  
GMS6-CR6

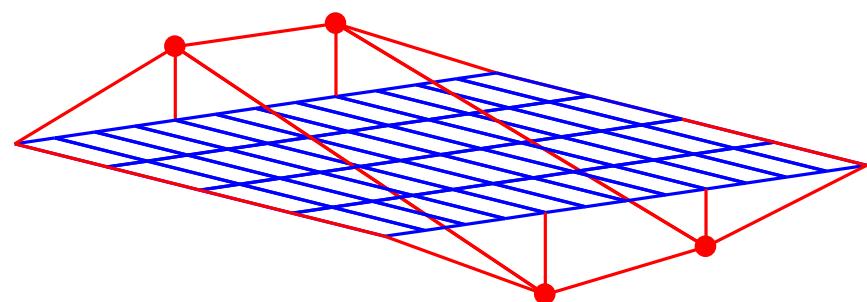
# 実橋梁計測 measuring bridge



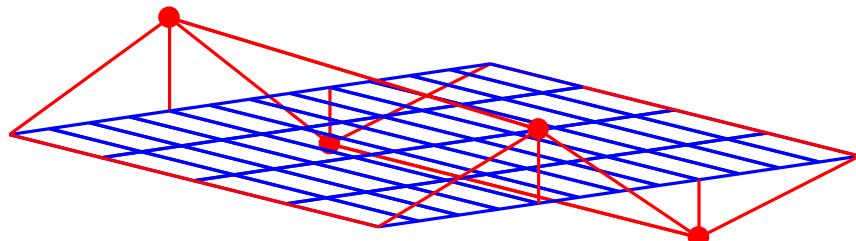
# 特異値分解によるモード形状



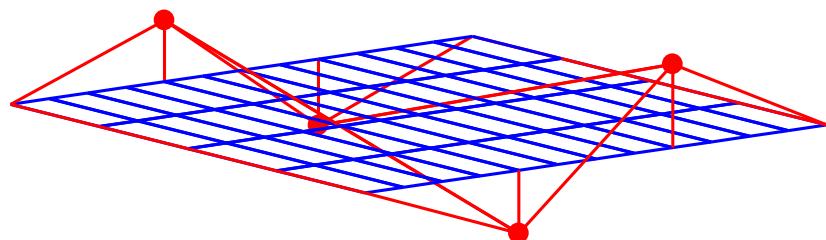
たわみ1次モード



ねじれ1次モード



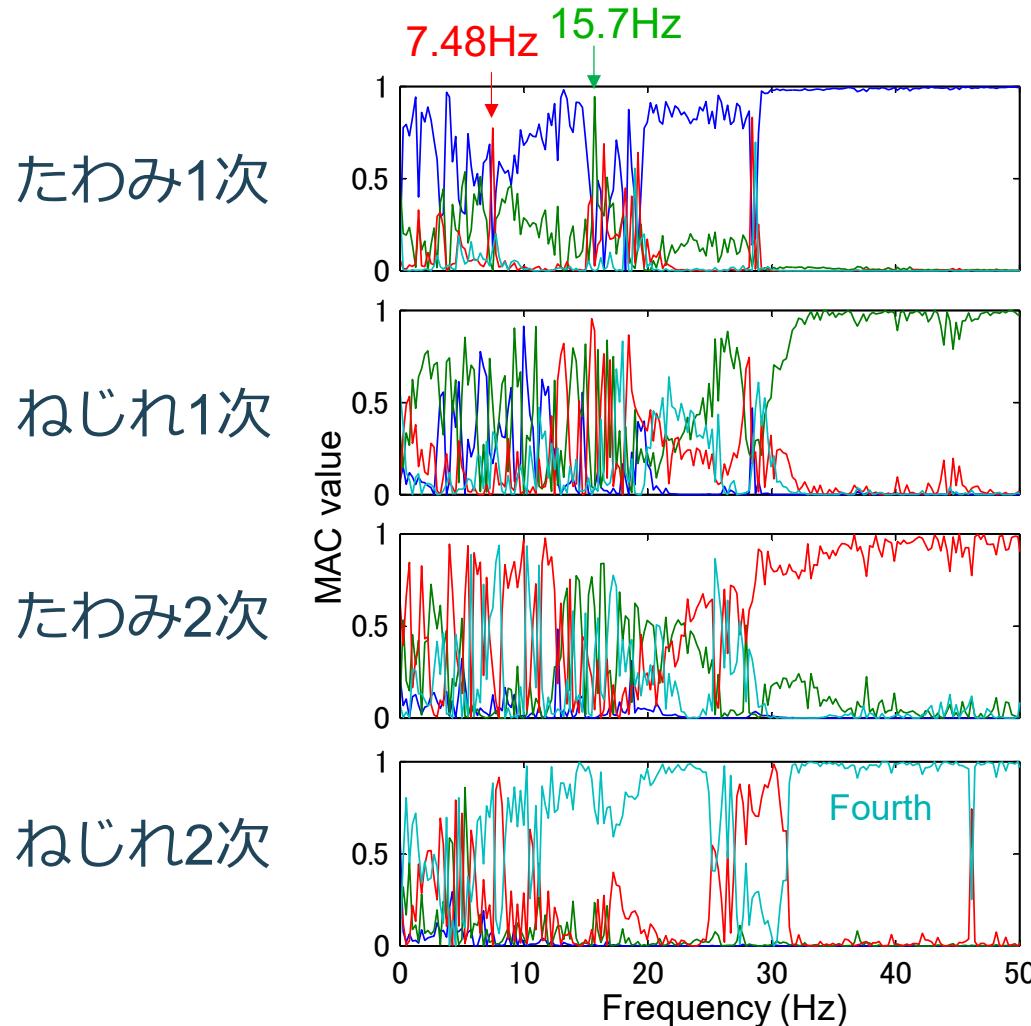
たわみ2次モード



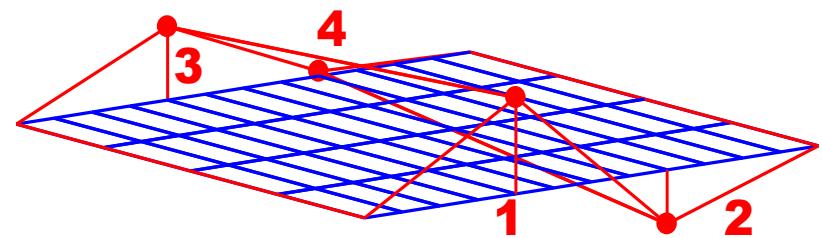
ねじれ2次モード

# FDD法と特異値分解のモード形状のMAC値の比較

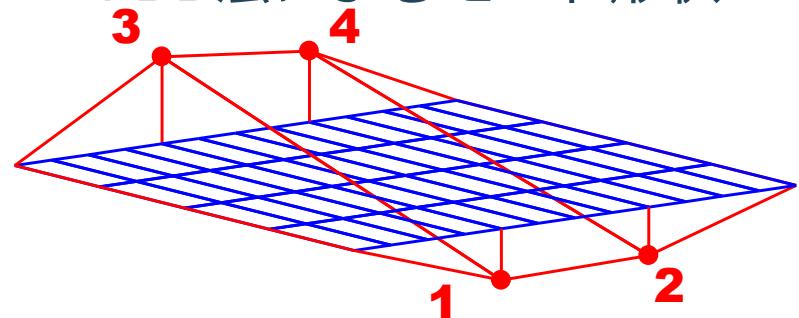
## FDD法と特異値分解のMAC値



7.4Hz時の  
FDD法によるモード形状



15.7Hz時の  
FDD法によるモード形状



MAC値別の卓越モードの考察  
損傷？ノイズ？車両走行向き？

# まとめ

---

## FDD法の適用性検証

- VBIシステムより簡易シミュレーションを行った
- 実稼働モードによる損傷検知の可能性が見えた
- 特異値分解との差異についてはさらなる考察が必要

## MEMSセンサ開発

- 複数センサをGPSにより時刻同期を可能とした
- 実橋梁の交通振動計測を行った
- 交通振動よりモード形状を推定できた