

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



筑波大学
University of Tsukuba

工学システム学類4年
指導教官

浅川 一樹
山本 亨輔

社会のニーズと工学的解法 Background

橋梁の老朽化



木曾川大橋

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

低コスト・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
- ・低コスト

技術的課題

設置の労力

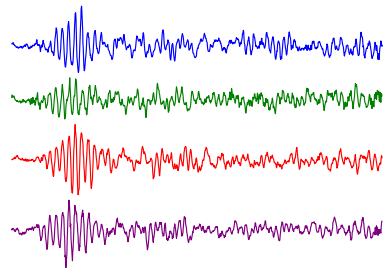
センサ費用

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

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{A}\mathbf{q}(t)$$

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

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

固有値分解

Eigenvalue Decomposition

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

S(ω):特異値スペクトル

Estimated singular shapes matrix

U(ω):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

低コスト、GPS時刻同期

STEP2 手法

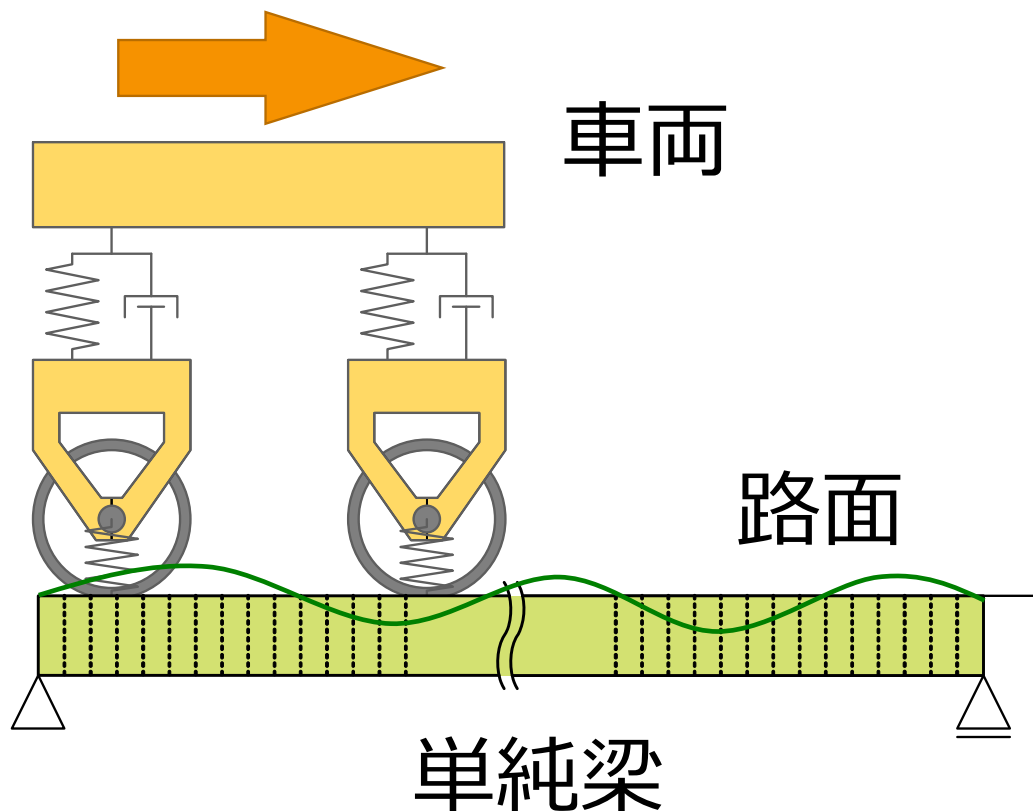
実橋梁実験

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

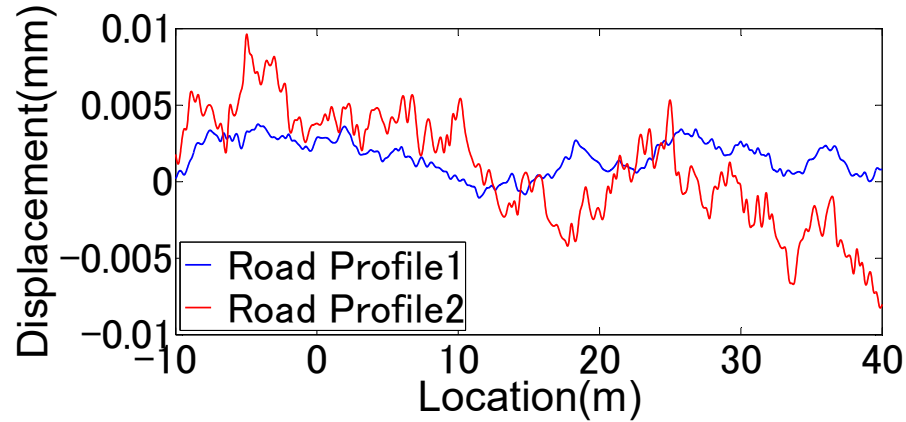
Sprung	Mass	m_s	18000[kg]
	Stiffness	K_s	1.0×10^6 [kg/s ²]
	Damping	c_s	1.0×10^4 [kg/s]
	Inertia	I_p	64958[kg m ²]
	Distance	l	1875[m]
Unsprung	Mass	m_u	1100[kg]
	Stiffness	k_u	3.5×10^6 [kg/s ²]
	Damping	c_u	3.0×10^4 [kg/s]

Parameter of Bridge

Flexural Stiffness	EI	1.56×10^{10} [Nm]
Mass per unit length	ρA	3000[kg/m]

路面凹凸と損傷モデル

路面凹凸

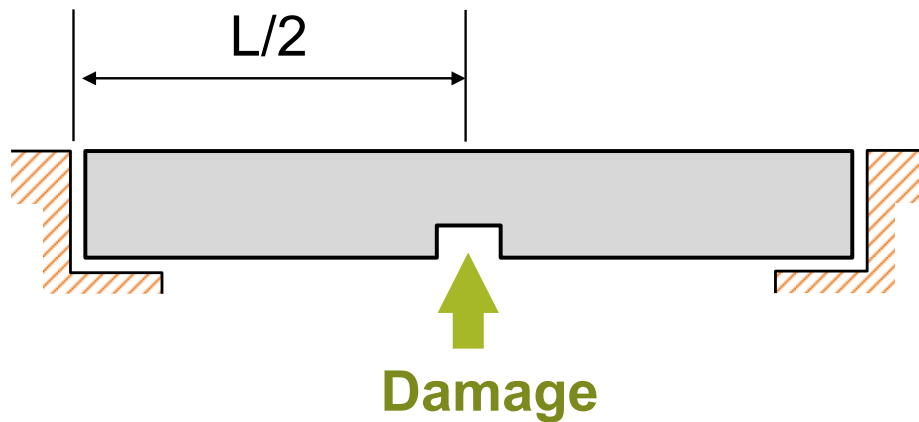


損傷モデル

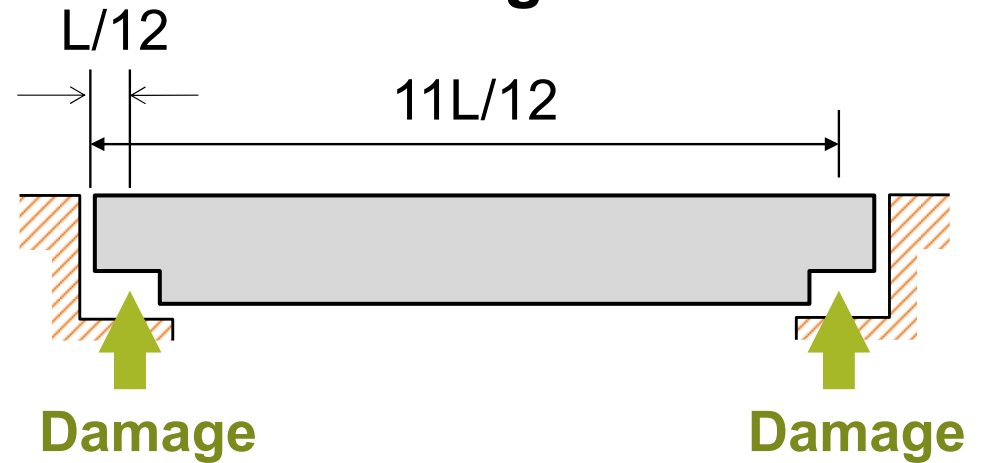
Parameter

Decreasing ratio of stiffness	10[%]
Damage width	$L/6$

Damage 1



Damage 2



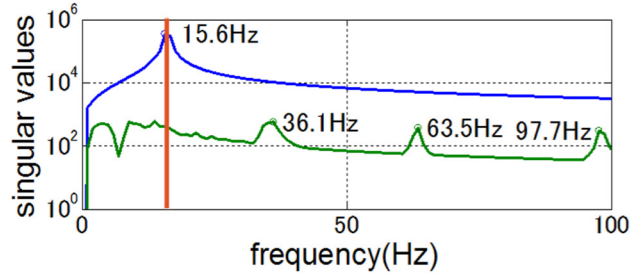
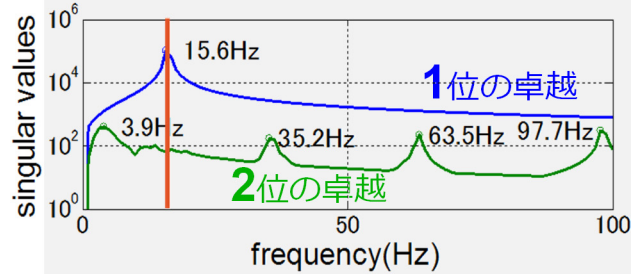
FDD法による特異値スペクトルの比較 $G_{YY}^+(\omega) = U(\omega)S(\omega)U^T(\omega)$

路面1 (滑らか)

路面2 (粗い)

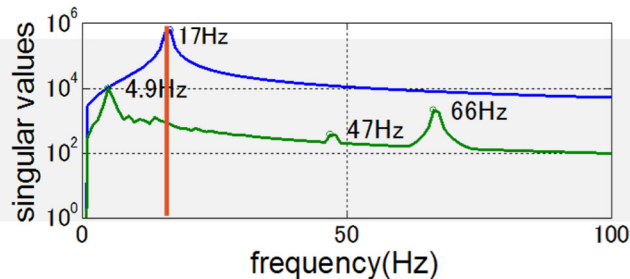
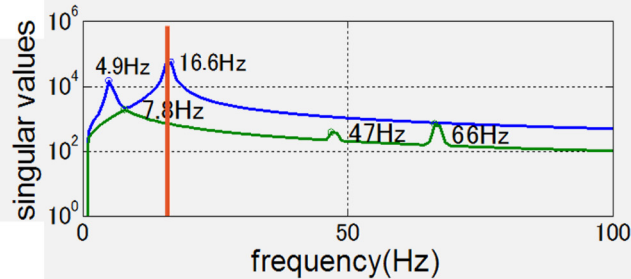
橋梁固有振動数

Intact
(健全時)



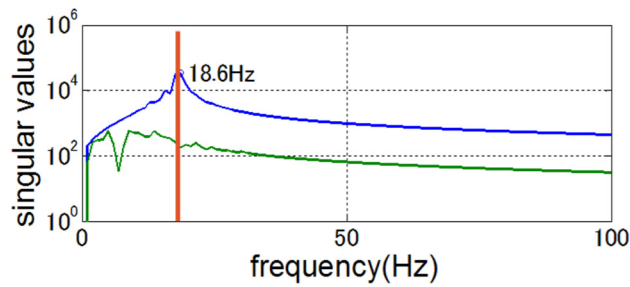
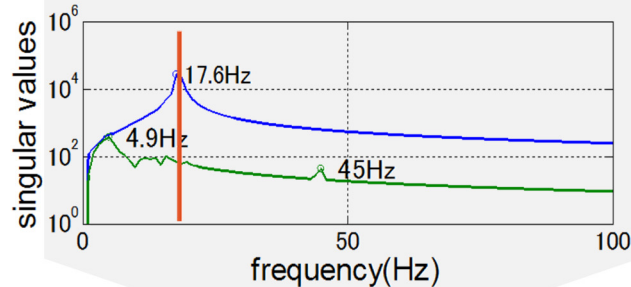
	First	Second
Intact	3.97[Hz]	15.75[Hz]
Damage 1	4.96[Hz]	16.00[Hz]
Damage 2	4.10[Hz]	17.70[Hz]

Damage 1
(中央損傷)



交通振動の変化
特異値スペクトルは
各次固有モードでピーク
の高さが変化

Damage 2
(両端損傷)



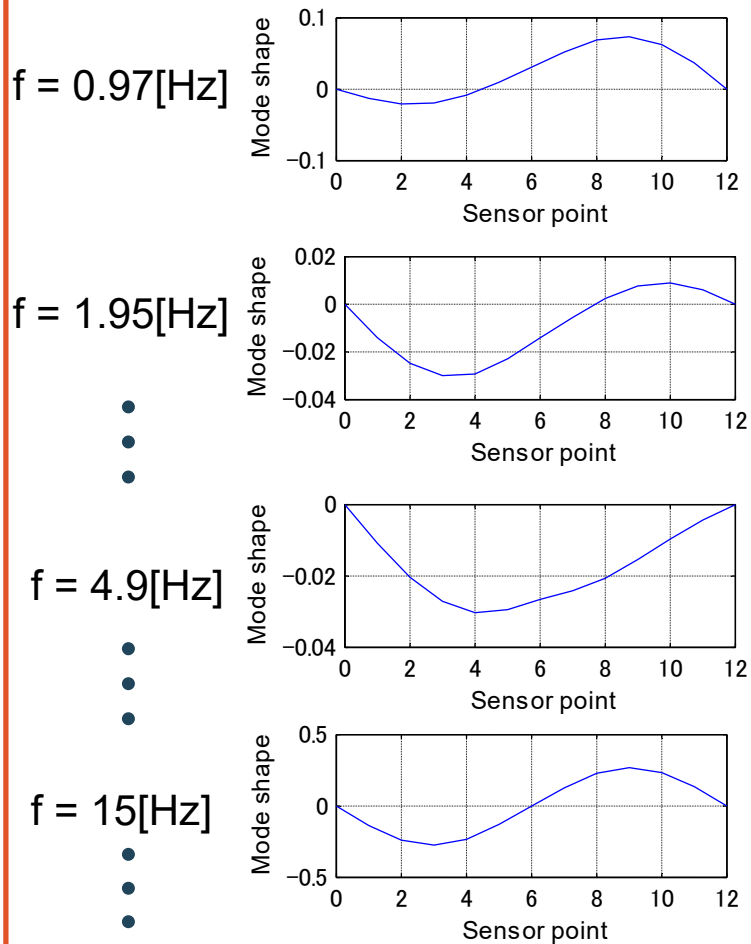
橋梁損傷の変化

特異値スペクトルは
各次固有モードの変化を追跡可能

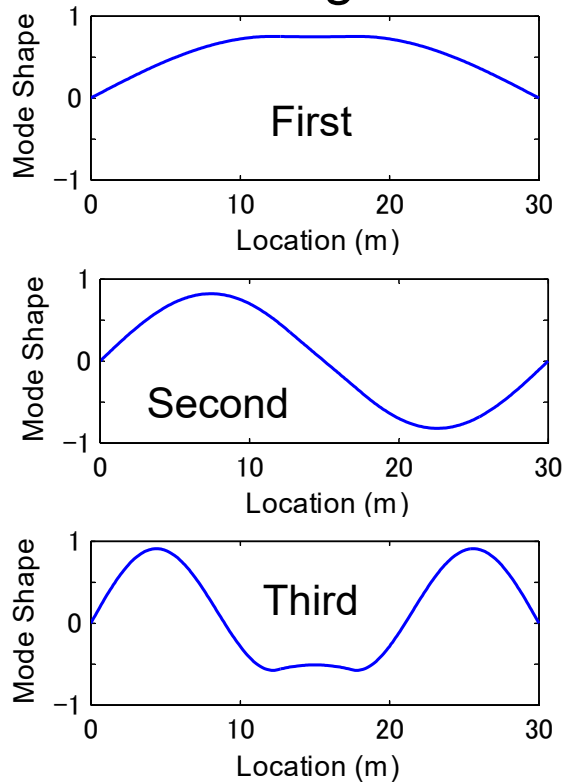
FDD法の
有効性を確認

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

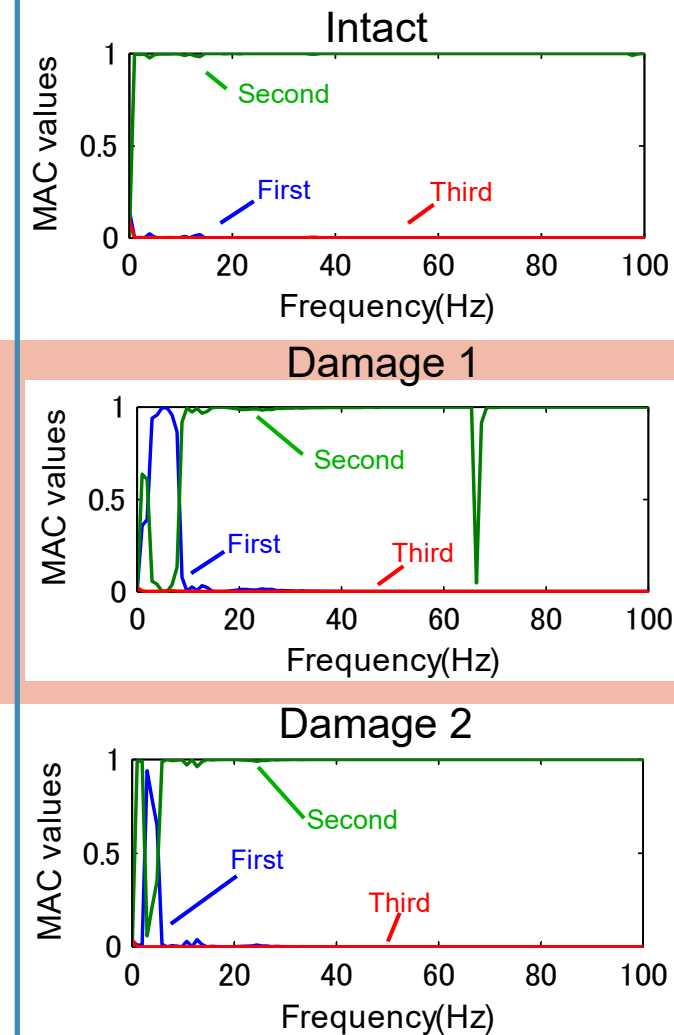
FDD法によるモード形状 Damage1 (中央)



正解値のモード形状 Damage1

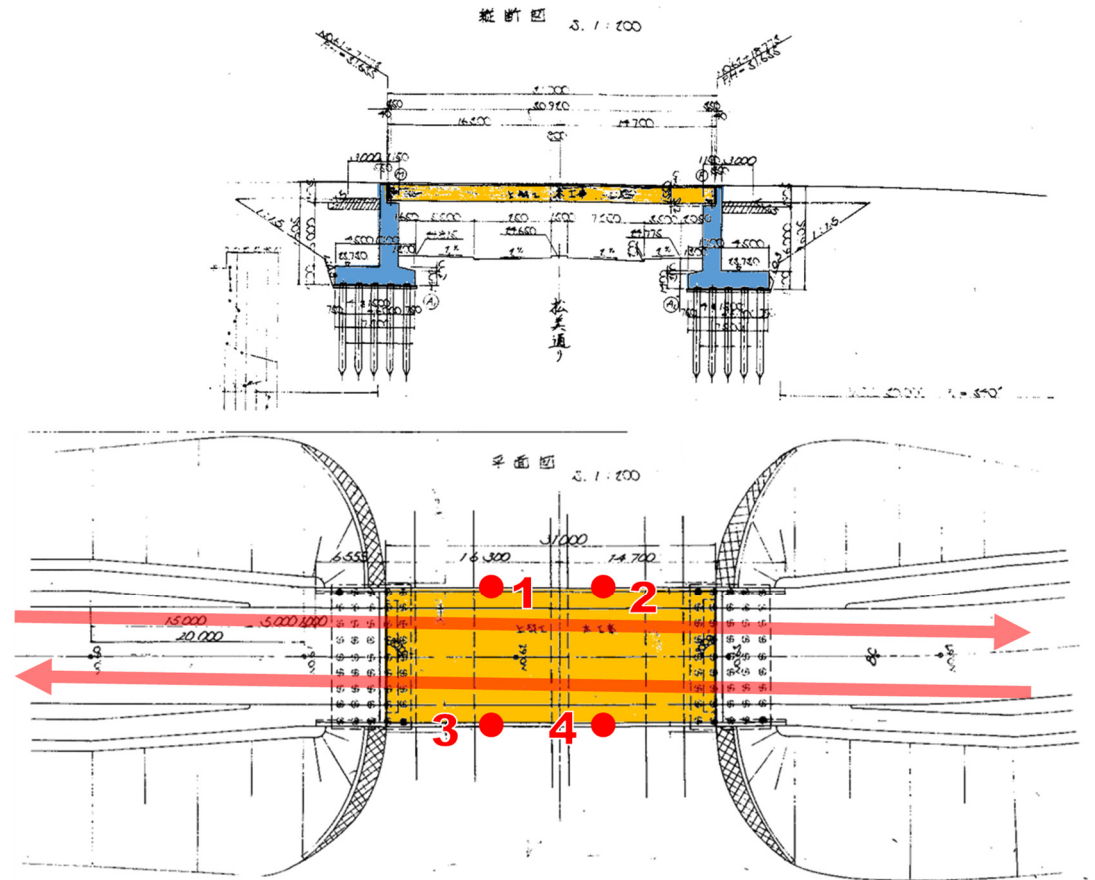


MAC値



実橋梁計測 measuring bridge

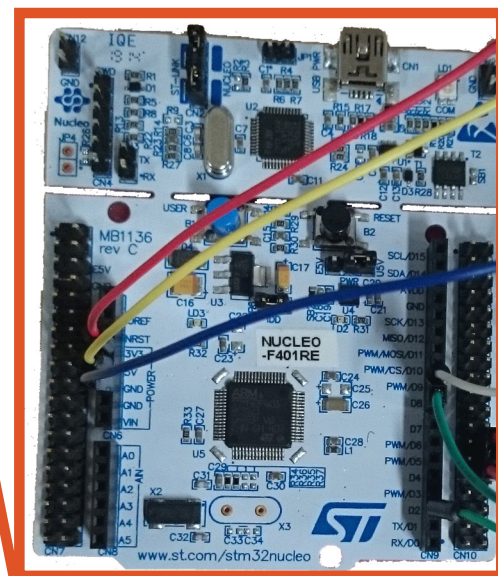
Matsumi Bridge 松美橋



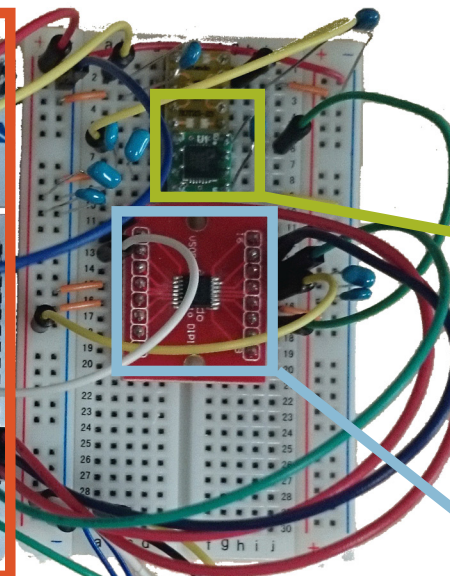
● : センサー設置地点

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

Micro computer
Nucleo-F401RE



Acceleration sensor
加速度センサ
KXR94-2050

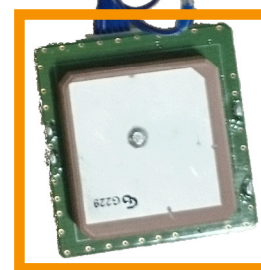


AD converter
ADコンバータ
ADS1220(24bit)

Data logger

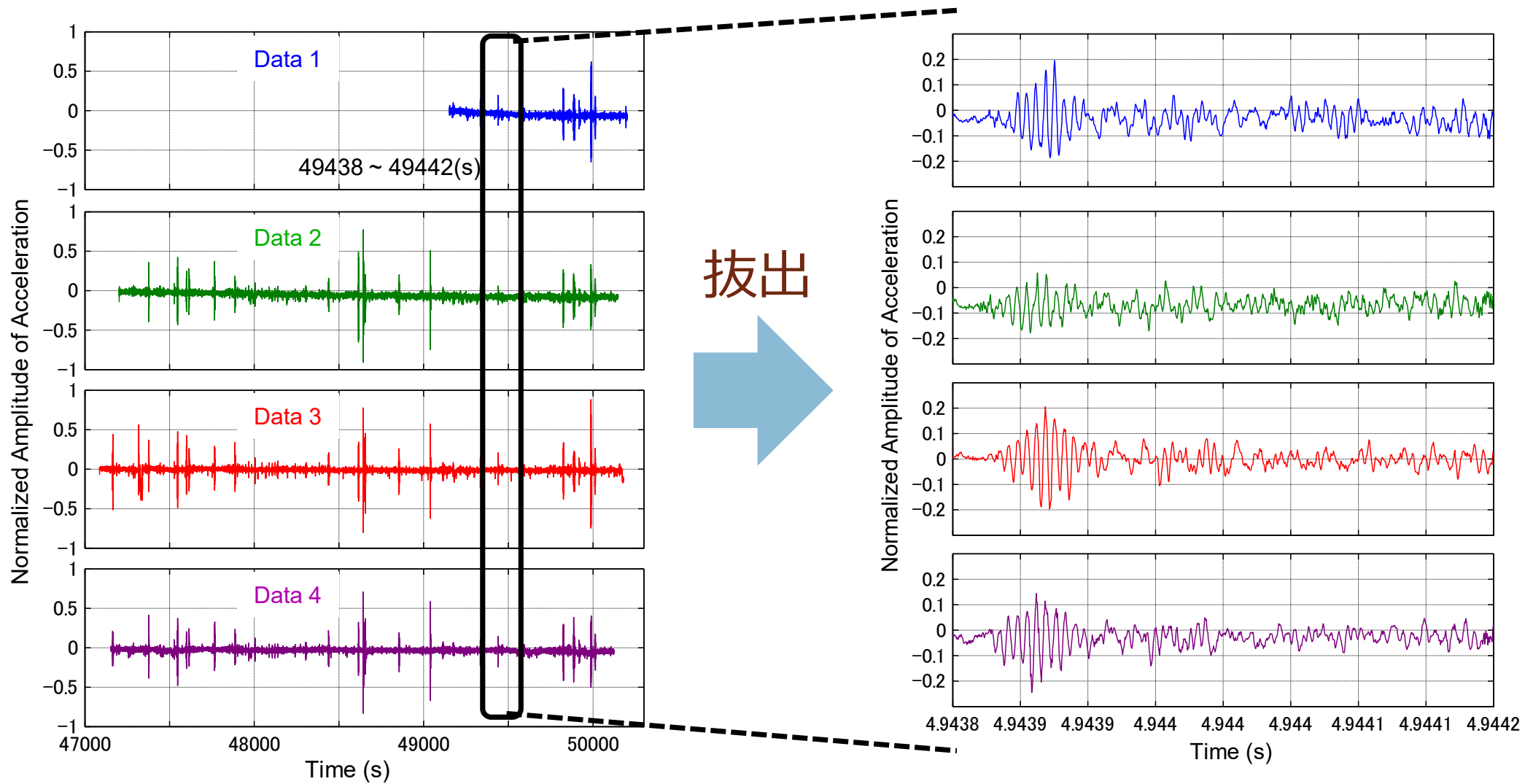
PC

Serial communication
between PC and
Micro computer

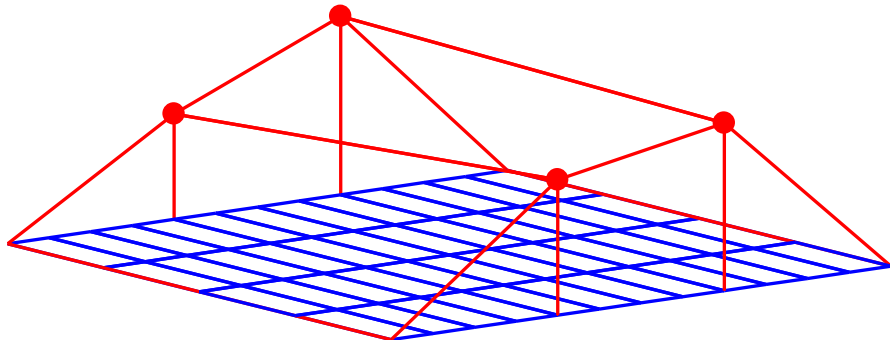


GPS sensor
GPSセンサ
GMS6-CR6

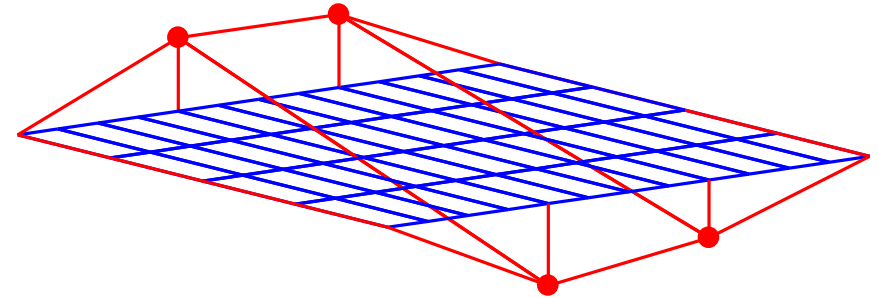
実橋梁計測 measuring bridge



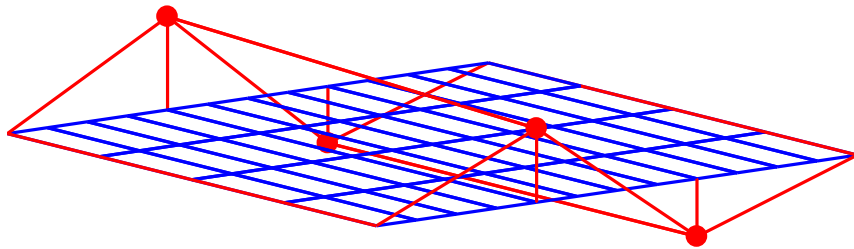
特異値分解によるモード形状



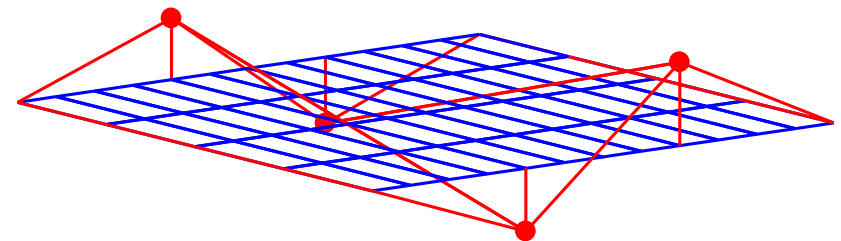
たわみ1次モード



ねじれ1次モード



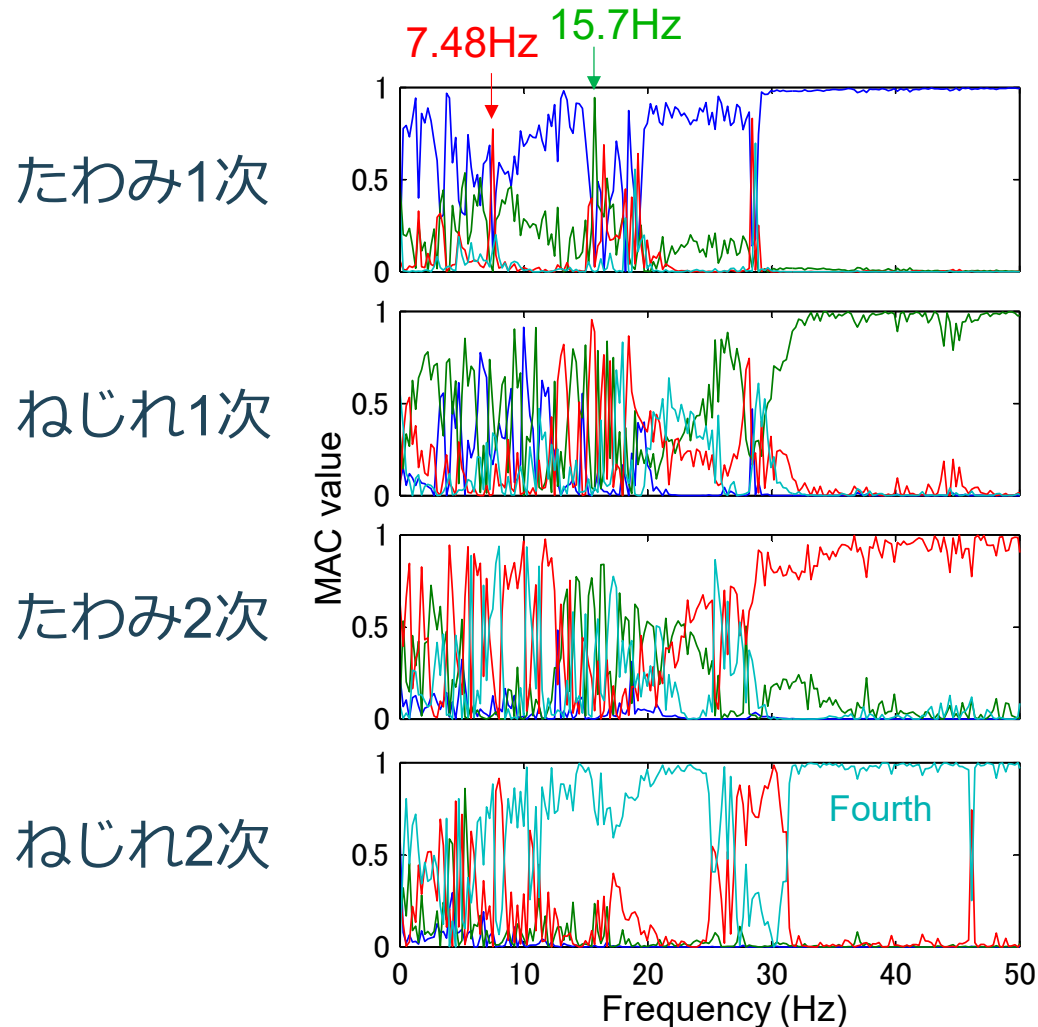
たわみ2次モード



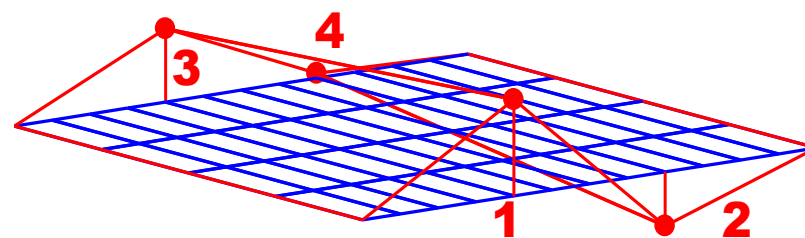
ねじれ2次モード

FDD法と特異値分解のモード形状のMAC値の比較

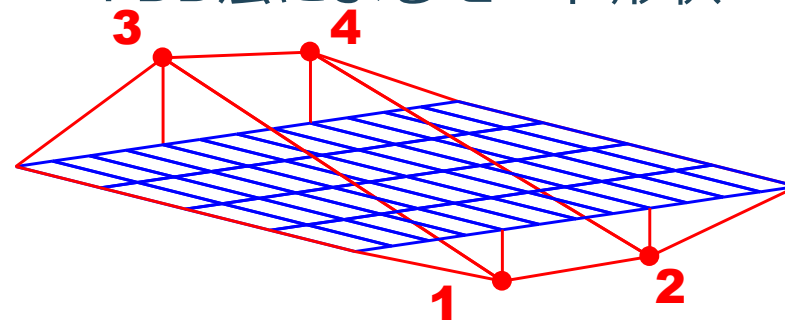
FDD法と特異値分解のMAC値



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