

# 模型桁実験による**車両応答**を用いた モード形状推定法の 桁損傷検知への適用性に関する検討

APPLICATION OF **MODE SHAPE ESTIMATION** EMPLOYED **VEHICLE**  
**RESPONSE** TO GIRDER DAMAGE DETECTION IN MODEL EXPERIMENT



筑波大学  
*University of Tsukuba*

工学システム学類4年次 中釜 裕太

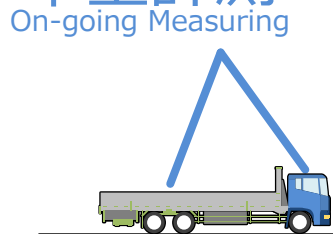
(Yuta NAKAGAMA)

指導教員 システム情報系助教 山本 亨輔

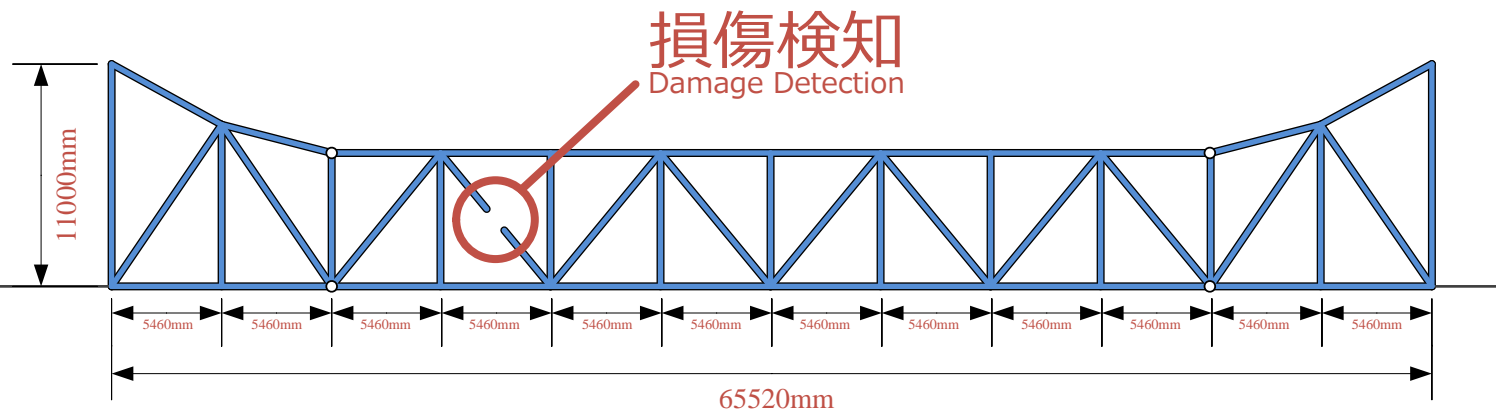
(Kyosuke YAMAMOTO)

# 研究背景 Background of this study

車上計測  
On-going Measuring



25t トラック



※ 旧鳥飼大橋(トラス橋)における実車走行実験の様子

モード形状  
Mode shape

減衰  
Damping

固有振動数  
Natural frequency



車上計測により得られた振動応答データ

- ① 基底関数を用いて空間的に補正
- ② 特異値分解により**モード形状推定**

# 特異値分解 Singular value decomposition

$$\begin{matrix} \square & \square & \square \\ \square & \square & \square \end{matrix} \mathbf{Q} \quad \begin{matrix} \square & \square \\ \square & \square \end{matrix} \mathbf{Q}^T = \text{diag}(\sigma_1 \dots \sigma_n)$$

無相関性  
De-correlation

$$\begin{matrix} \square & \square & \square \\ \square & \square & \square \end{matrix} \mathbf{Y} = \begin{matrix} \square & \square \\ \square & \square \end{matrix} \mathbf{A} \begin{matrix} \square & \square & \square \\ \square & \square & \square \end{matrix} \mathbf{Q} = \begin{matrix} \square & \square \\ \square & \square \end{matrix} \mathbf{U} \begin{matrix} \square & \square \\ \square & \square \end{matrix} \mathbf{\Sigma} \begin{matrix} \square & \square & \square \\ \square & \square & \square \end{matrix} \mathbf{V}^T$$

橋梁振動  
Bridge vibration

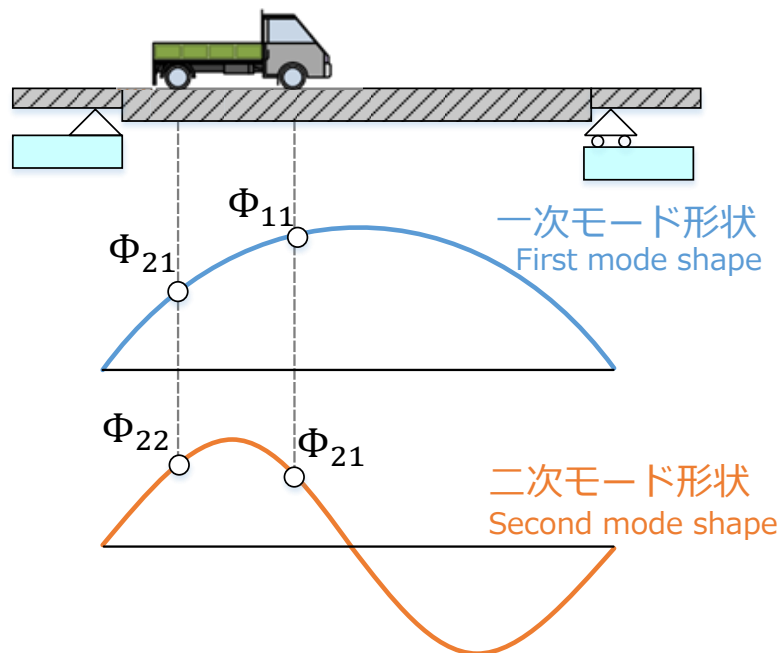
モード形状  
Mode shape  
( $\mathbf{A}\mathbf{A}^T = \mathbf{I}$ )

基準座標  
Reference coordinate

直交行列  
Orthogonal matrix  
( $\mathbf{U}\mathbf{U}^T = \mathbf{I}$ )

対角行列  
Diagonal matrix  
( $\mathbf{\Sigma} = \text{diag}(\sigma_1 \dots \sigma_n)$ )

直交行列  
Orthogonal matrix  
( $\mathbf{V}\mathbf{V}^T = \mathbf{I}$ )



$$\begin{matrix} \square & \square & \square \\ \square & \square & \square \end{matrix} \tilde{\mathbf{Y}} = \begin{matrix} \square & \square \\ \square & \square \end{matrix} \mathbf{\Phi} \begin{matrix} \square & \square & \square \\ \square & \square & \square \end{matrix} \mathbf{Q}$$

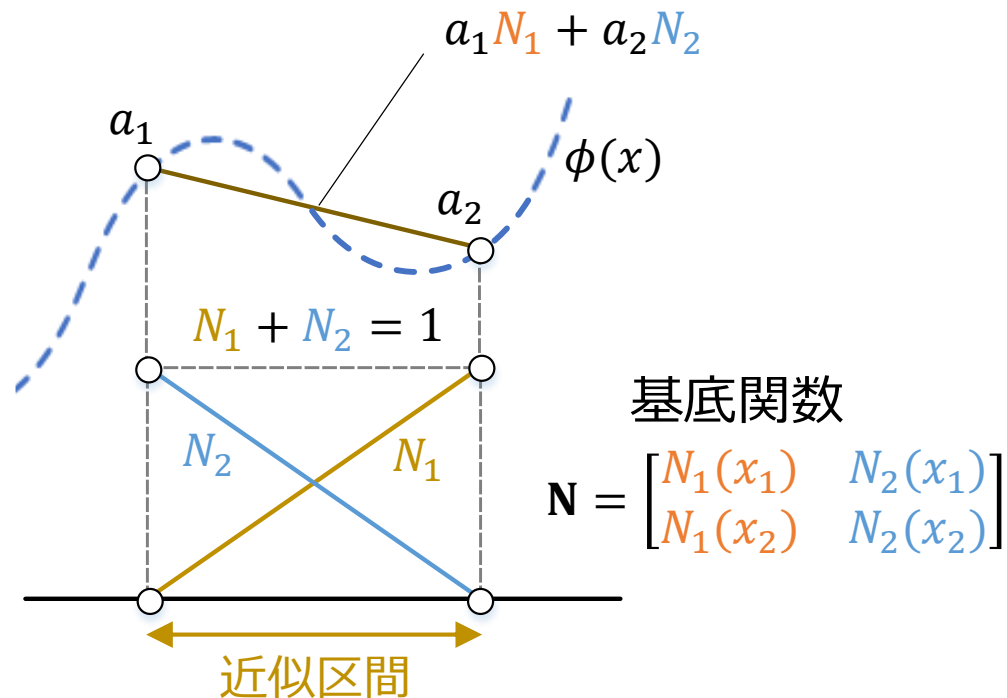
移動上橋梁振動  
Bridge vibration on vehicle's position

モード形状  
Mode shape  
( $\mathbf{\Phi}\mathbf{\Phi}^T \neq \mathbf{I}$ )

基準座標  
Reference coordinate

特異値分解の適用不可

# 基底関数 Basis function



$$\begin{bmatrix} \phi_1(x_1) & \phi_2(x_1) \\ \phi_1(x_2) & \phi_2(x_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1(x_1) & N_2(x_1) \\ N_1(x_2) & N_2(x_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{N}^{-1}(t)\tilde{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{q}(t)$$

( $\mathbf{A}\mathbf{A}^T = \mathbf{I}$ )

特異値分解の適用可

$$\tilde{\mathbf{y}}(t) \rightarrow \ddot{\mathbf{z}}(t) \quad \text{車 上 振 動}$$

Vehicle vibration



車両パラメータ変化  
Change of vehicle parameter  
路面変化  
Change of road unevenness

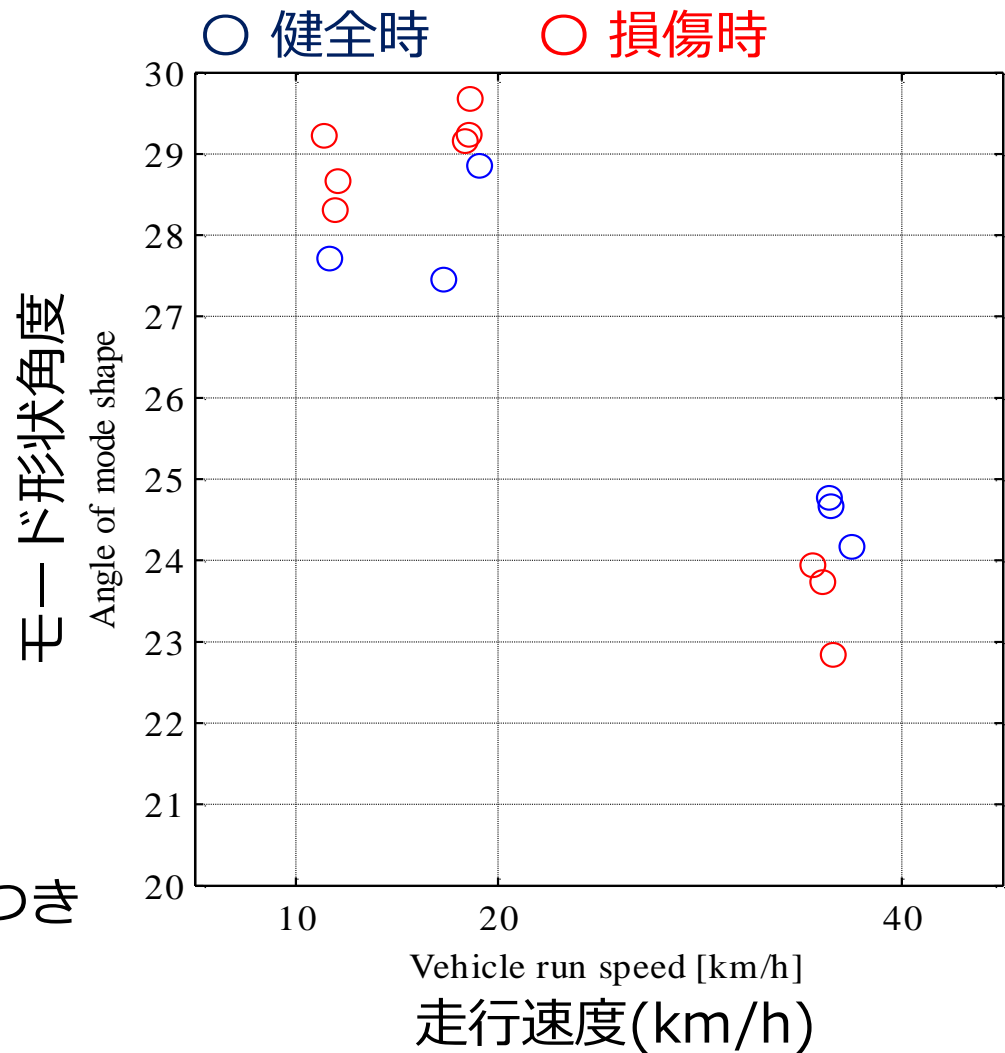
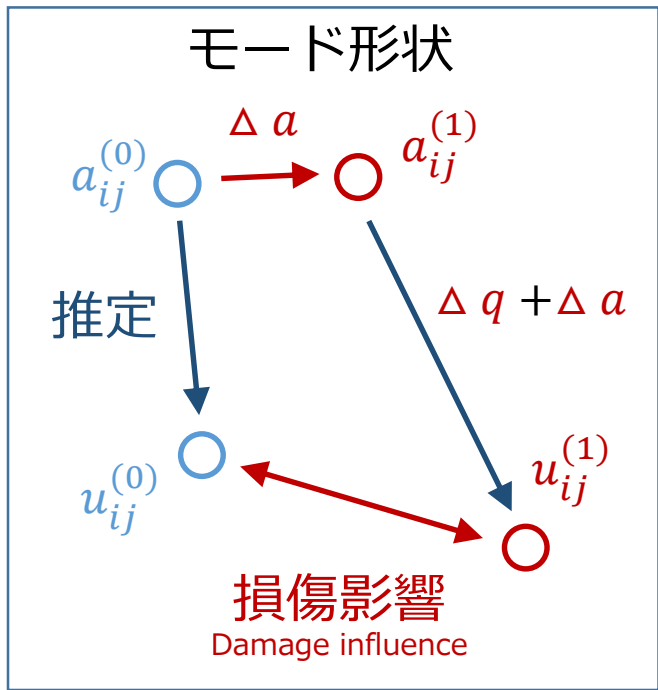
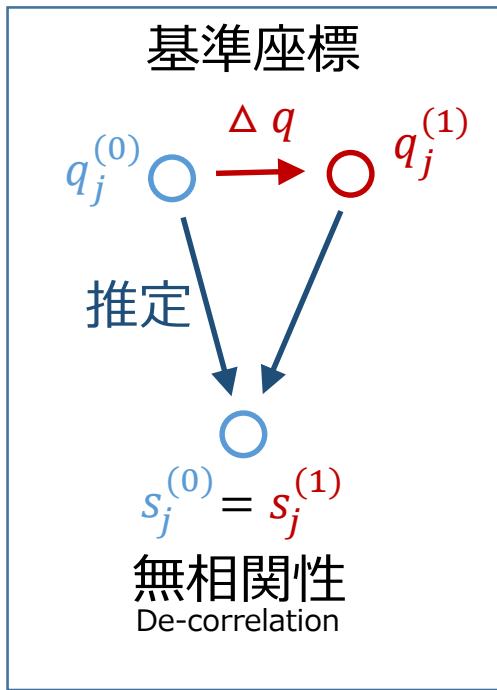
$$\mathbf{Q} \quad \mathbf{Q}^T \neq \text{diag}(\sigma_1 \dots \sigma_n)$$

相関性 → 特異値分解の推定精度に影響  
Correlation affects on estimation accuracy

※ 特異値分解により正確にモード形状を推定することは**不可**

# モード形状推定法による損傷評価 Damage evaluating

○ 健全時(0)      $i$ : 橋梁上の計測位置  
 ○ 損傷時(1)      $j$ : モード次数



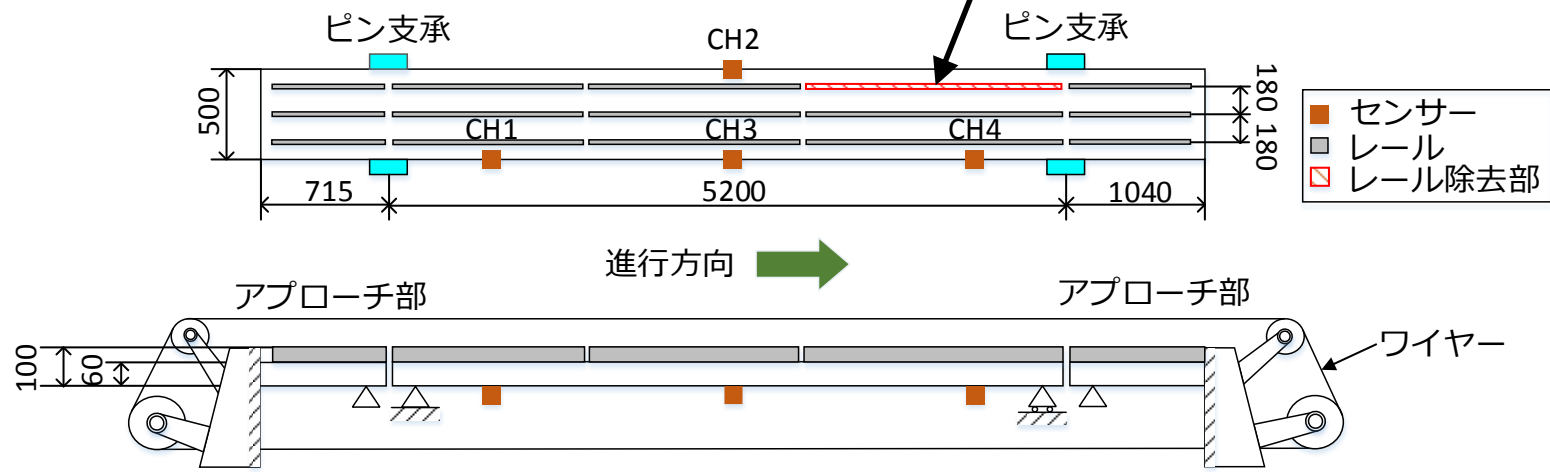
走行速度の変化による特異値分解の推定精度のばらつき  
 Change of estimation accuracy on singular value decomposition by run speed

➡ 模型実験による統計データの収集  
 Model experiment for statistical data acquisition

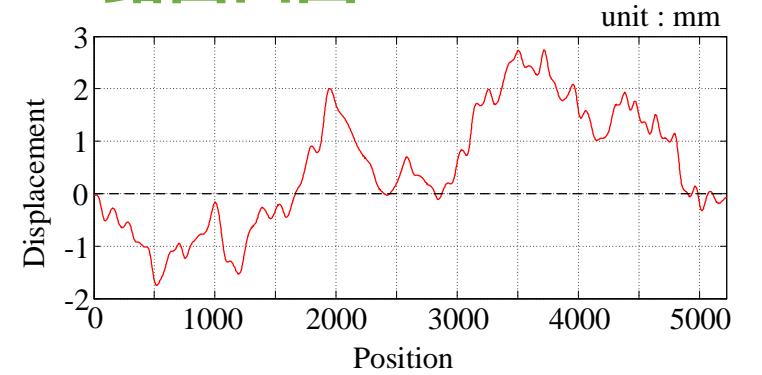
- モード形状推定法の**損傷検知**への適用性を検討
  - ① 走行速度の変化による推定精度のばらつきを損傷影響と比較
    - ➡ 特異値分解の条件設定の変化
  - ② 推定モード形状・基準座標による損傷評価
    - ➡ 外的影響と**損傷影響**の区別
- 反復実験が可能な模型実験により統計的分析を行う

# 模型実験 Model experiment

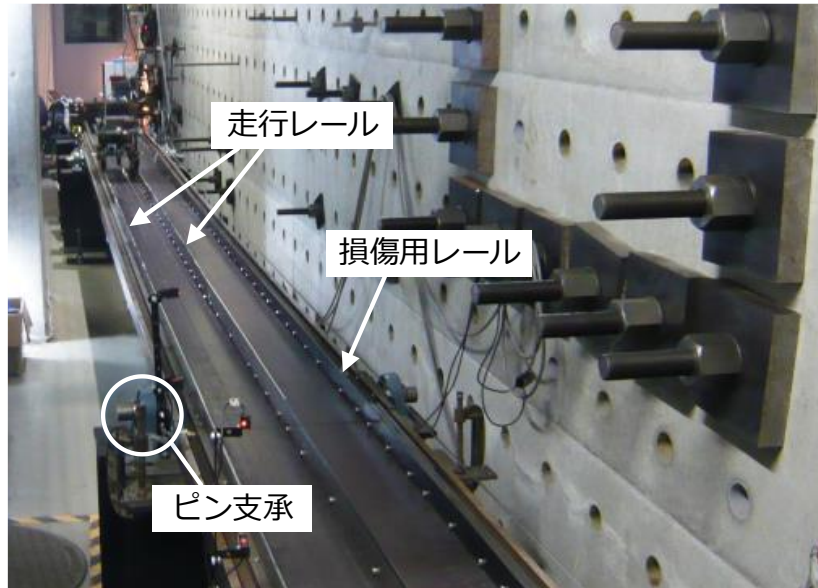
剛性低下による**損傷模擬**  
Stiffness reduction for **simulated damage**



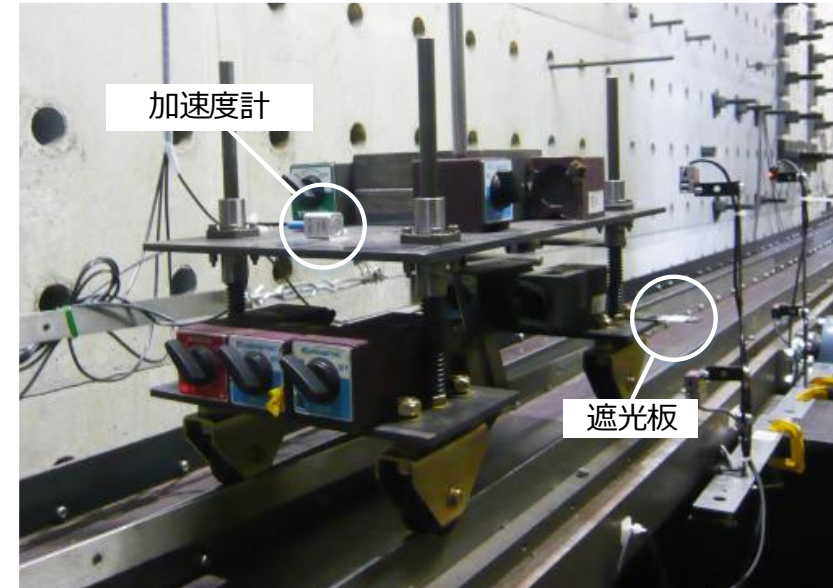
路面凹凸 Road unevenness



模型桁 Girder model

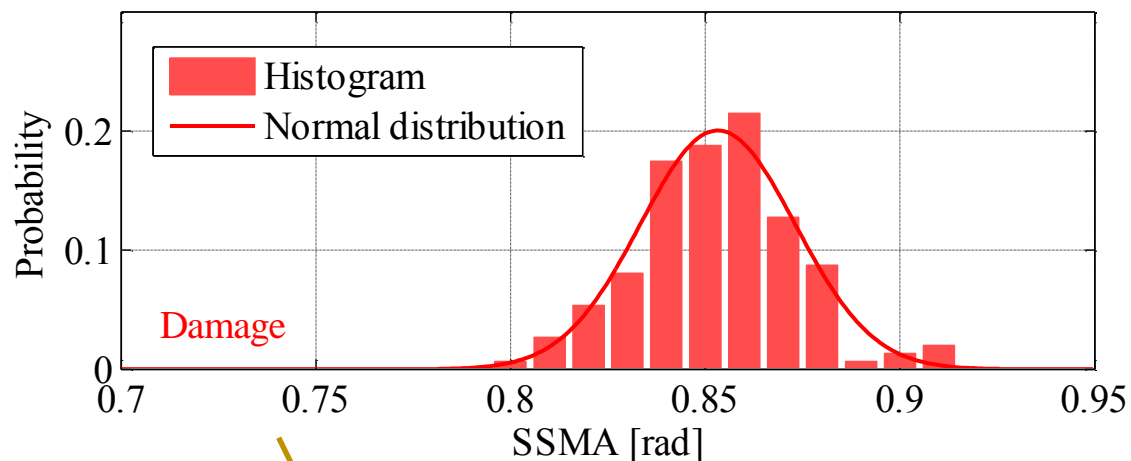
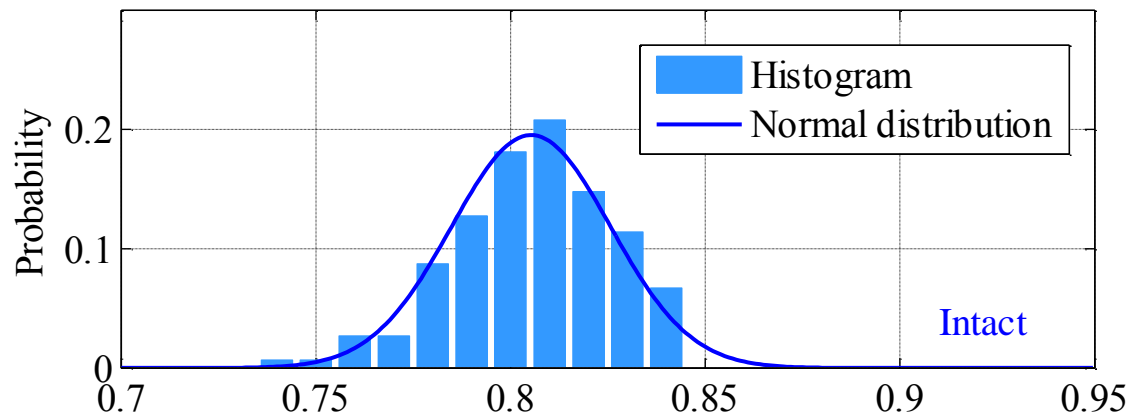


模型車両 Vehicle model



# 推定モード形状 Estimation mode shape

頻度確率



モード形状角度

※ モード形状角度は**正規分布**に従う傾向

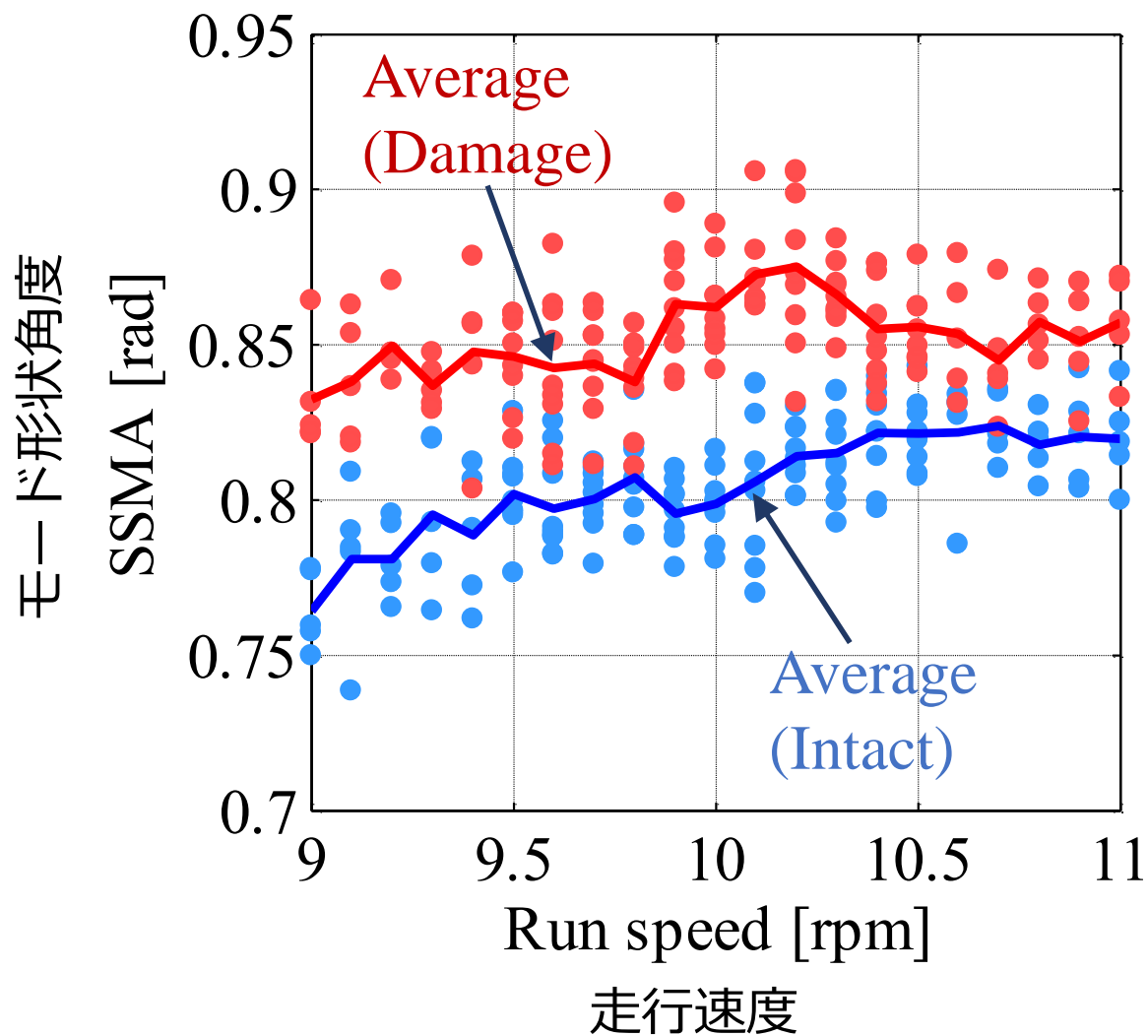
## JB検定の結果と統計量

	Intact	Damage
Mean ( $\times 10^{-1}$ )	8.05	8.53
Variance ( $\times 10^{-4}$ )	4.17	3.96
Skewness ( $\times 10^{-3}$ )	-9.47	1.68
Kurtosis	3.11	3.11
JB ( $\times 10^{-2}$ )	7.70	7.17
$\Pr(\chi^2 \geq \chi_0^2)$	0.962	0.965
Determination	n.s.	n.s.

n.s. 非有意, s 有意 (有意水準 5%)



# 推定モード形状 Estimation mode shape



## ウェルチの t 検定の結果

自由度	295
T	-20.5
$\Pr\{ T  \geq t_0\}$	$1.66 \times 10^{-58}$
Determination	s

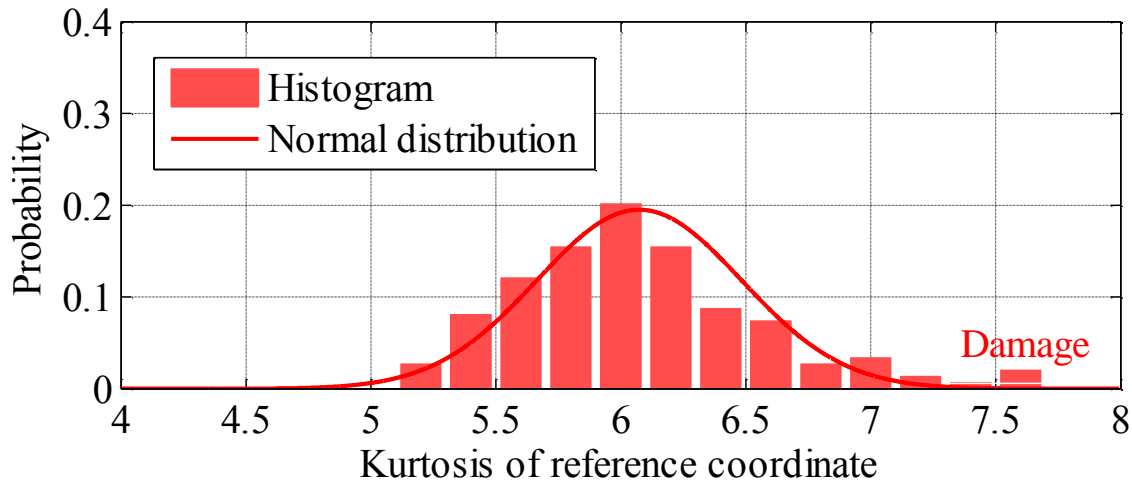
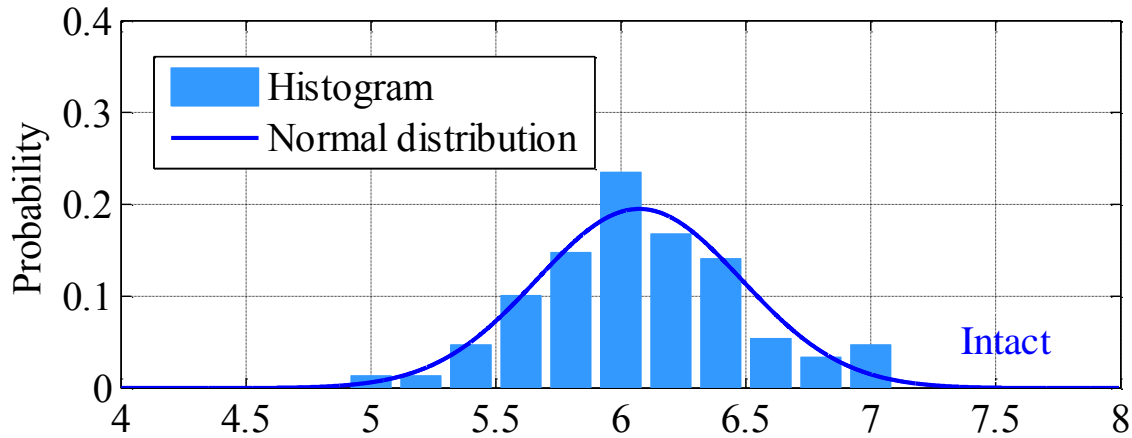
n.s. 非有意, s 有意 (有意水準 0.1%)

損傷変化 >> 推定精度のばらつき



※ モード形状は損傷前後で**有意に異なる**

頻度確率



推定基準座標の尖度

## JB検定とKS検定の結果

	Intact	Damage
JB	$6.01 \times 10^{-2}$	7.41
$\Pr(\chi^2 \geq \chi_0^2)$	0.97	$2.45 \times 10^{-2}$
Determination	n.s.	s

KS	1.09
$\Pr(\chi^2 \geq \chi_0^2)$	0.581
Determination	n.s.

n.s. 非有意, s 有意 (有意水準 5%)

※ 基準座標は損傷前後で**有意な差なし**

**損傷影響 >> 外的影響**

- 損傷前後でのモード形状の**有意な差**を確認

**損傷影響** >> 推定精度のばらつき

- 損傷前後での**基準座標**に有意差なし

**➡ 損傷前後でのモード形状変化は損傷影響である可能性が高い**

- 今後の課題

健全時における計測値の再現性

実橋梁実験に拡張したとき、高い推定精度が必要

□ モード形状推定法の**損傷検知**への適用性を検討

- ・ 模型実験による統計データの収集
- ・ 走行速度変化による**推定精度のばらつき**を考慮
- ・ **推定モード形状・基準座標**による損傷評価

□ 統計分析により損傷前後での変化を検証

**推定モード形状** → **有意差あり**

**推定基準座標** → **有意差なし**

**損傷前後での変化は損傷影響の可能性が高い**