

SVD-FDD法による 橋梁健全性評価の可能性検討

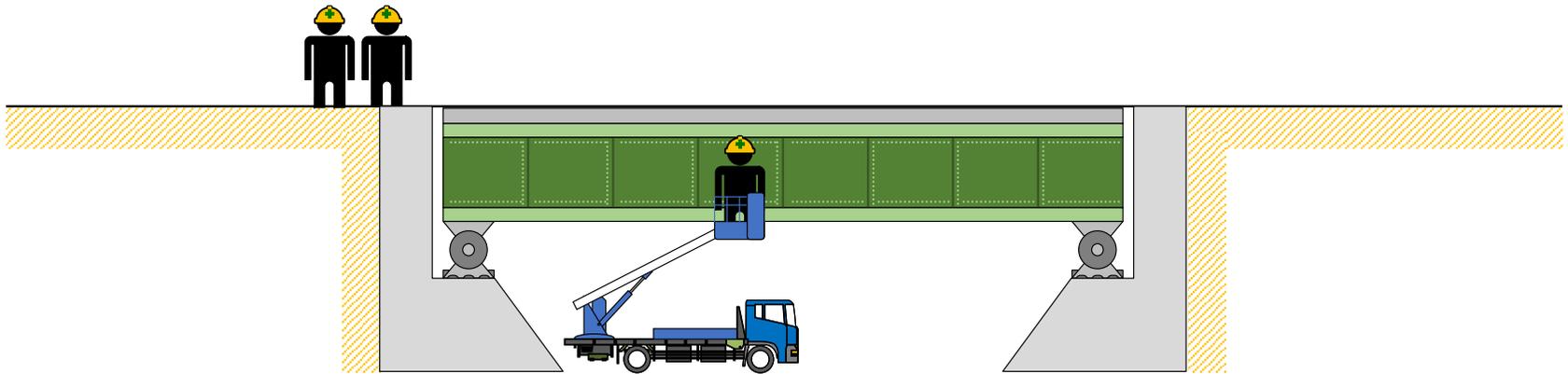
筑波大学 工学システム学類

フロンティア工学グループ 山本研究室 4年

酒井 真清

1. 研究背景 | 社会的課題

橋梁点検は **主観的・高コスト・高所作業** が課題
(近接目視・打音検査)



1. 研究背景 | 橋梁振動の利用

近接目視・打音検査のような

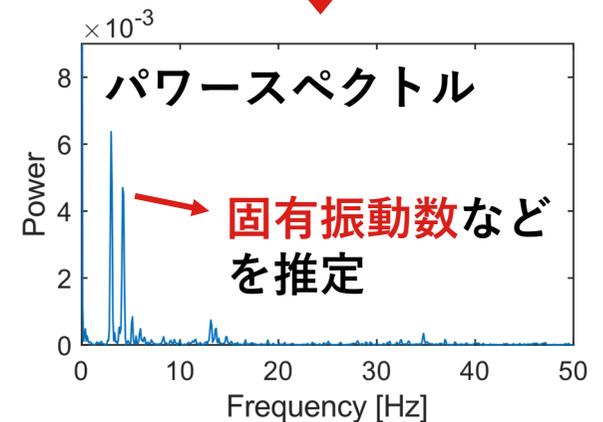
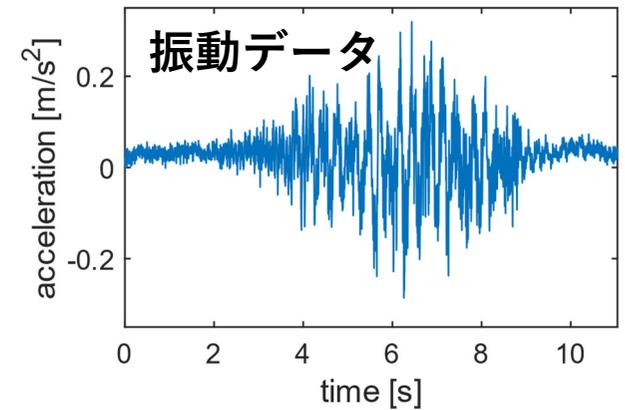
主観的・高コスト・高所作業



橋梁振動に基づく点検

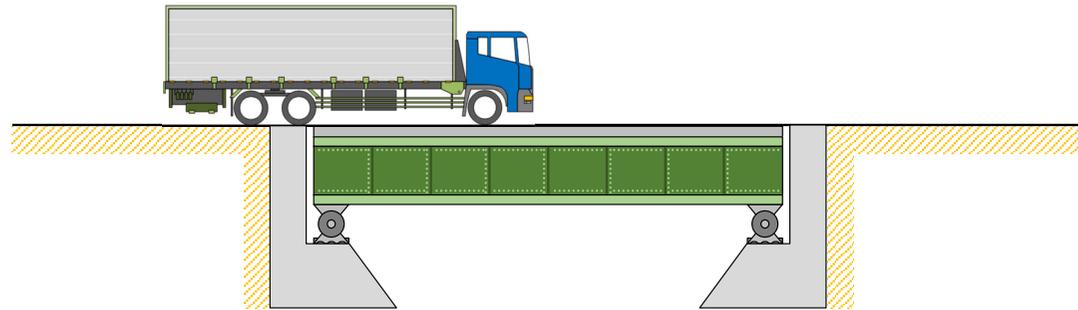
客観的・低コスト・安全簡単

点検指標はモーダル・パラメータが一般的
(固有振動数・モード形状・減衰等)



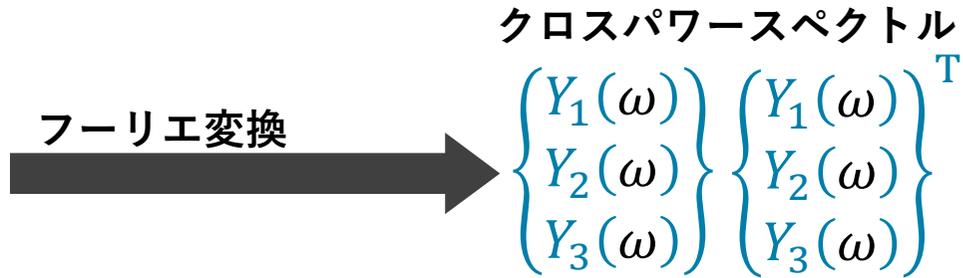
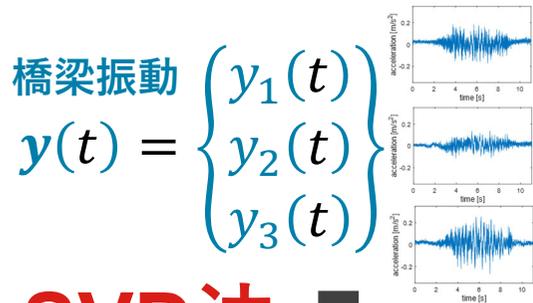
1. 研究背景 | 実稼働モード分析

多くの橋梁において**交通振動**が**卓越**する
(中小スパン橋：70万基) (車両に励起される橋梁振動)



自由振動では無いので**実稼働モード分析**が必要
代表は**FDD法**
(Frequency Domain Decomposition)

1. 研究背景 | SVD法とFDD法



実稼働モード分析として一般的な方法

SVD法

SVD (特異値分解) により
直交モードマトリクスを計算
= 振動モード形状の推定値

$$= \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ q_3(t) \end{Bmatrix}$$

1次モード 2次 3次 基準座標 $q(t)$ の無相関性を仮定

FDD法

各周波数 ω において
クロスパワー行列を対角化
= 周波数 ω の振動モード形状の推定値

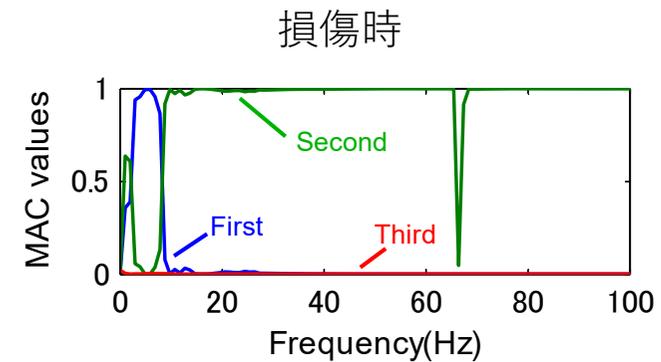
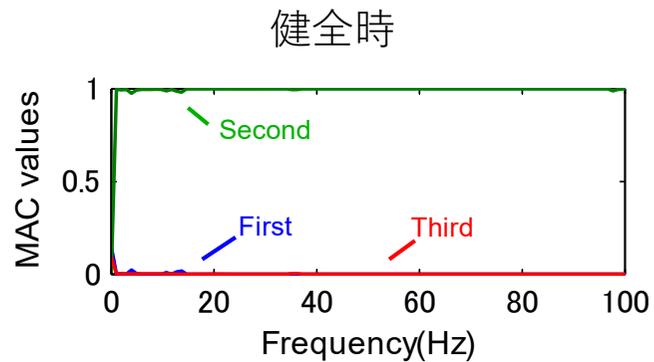
$$= \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 & c_1 \\ b_2 & c_2 \\ b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 & & \\ & S_2 & \\ & & S_3 \end{bmatrix} U^T$$

卓越モード 外力の白色性が仮定できる時,
 a がモード形状に一致

1. 研究背景 | 課題

技術的課題

- ① 交通振動がSVD法・FDD法的前提条件を満たすとは思えない
- ② 浅川ら(2015)は『SVD-FDD結果比較』による損傷検知の可能性を示した
 - 1次元梁では損傷の発生前後でSVD法によって推定された卓越モードとFDD法で推定された卓越モード形状の一致度が変化した。



2. 研究目的

**交通荷重によって発生した橋梁振動への
SVD-FDD法適用による橋梁健全性評価の可能性を検証する**

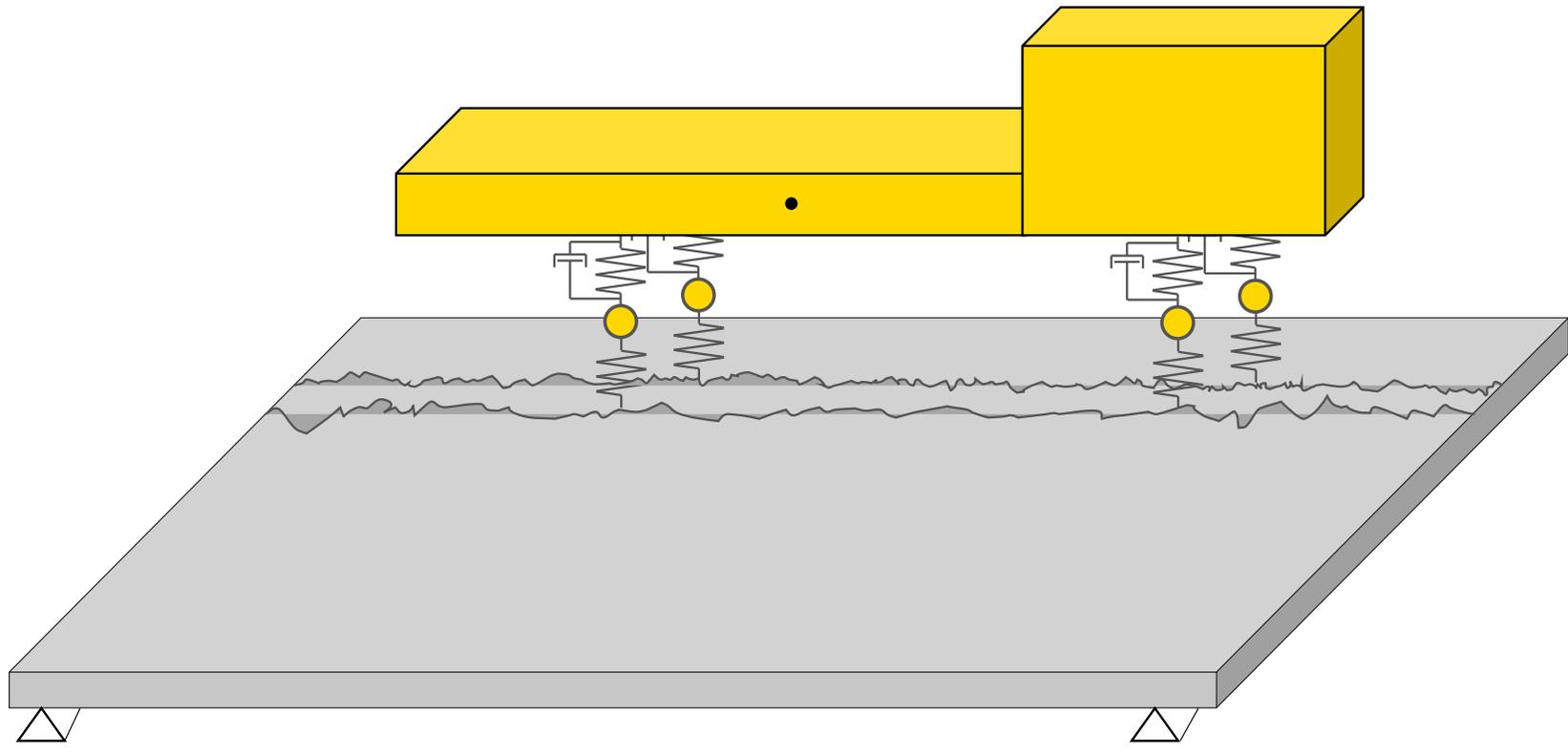
3. 数値シミュレーション | VBIモデル

交通振動へのSVD-FDD法の適用性の検討のために

VBI (Vehicle-Bridge Interaction : 車両-橋梁相互作用) システムの数値シミュレーションを行う

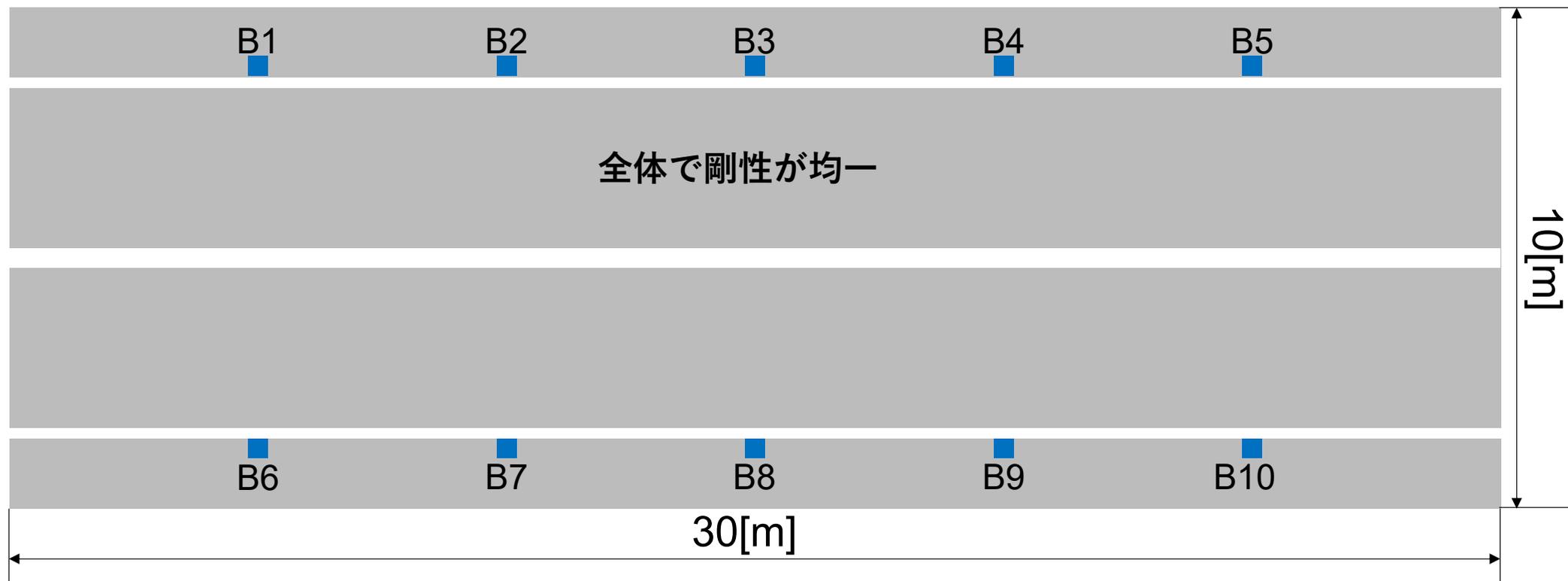
車両 . . . 3次元モデル

橋梁 . . . 2次元有限要素板モデル

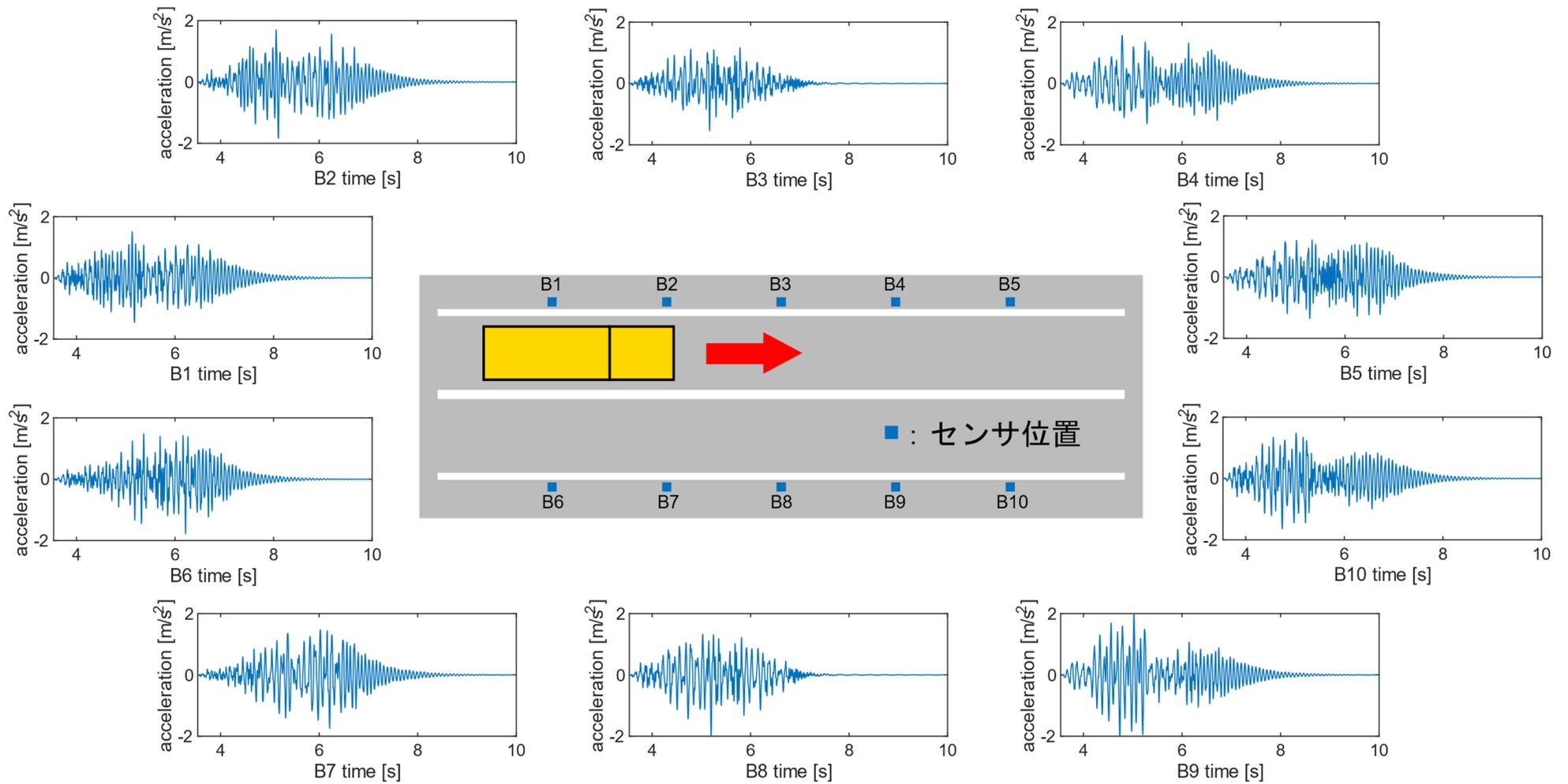


3. 数値シミュレーション | 健全モデルについて

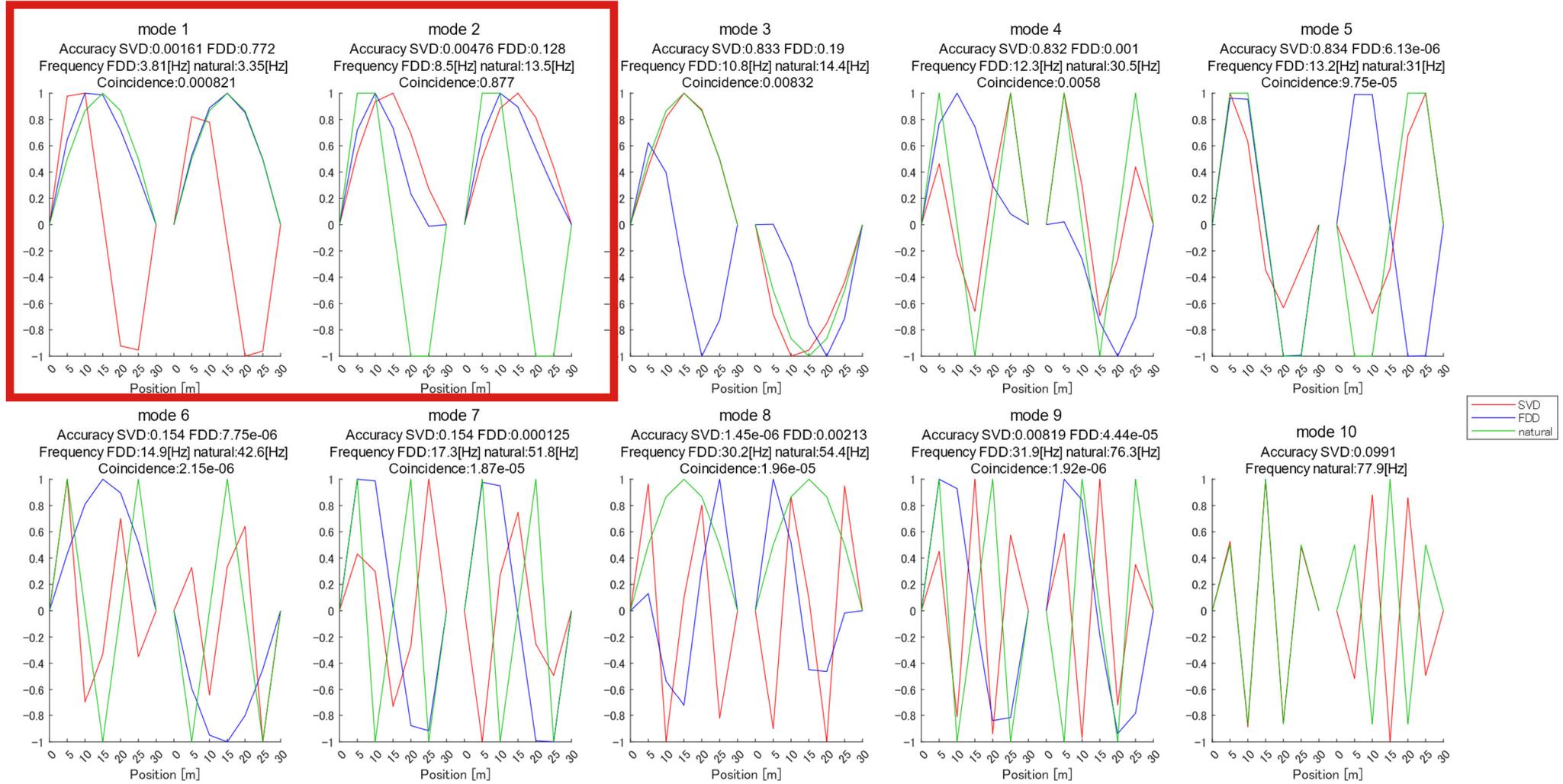
健全モデル



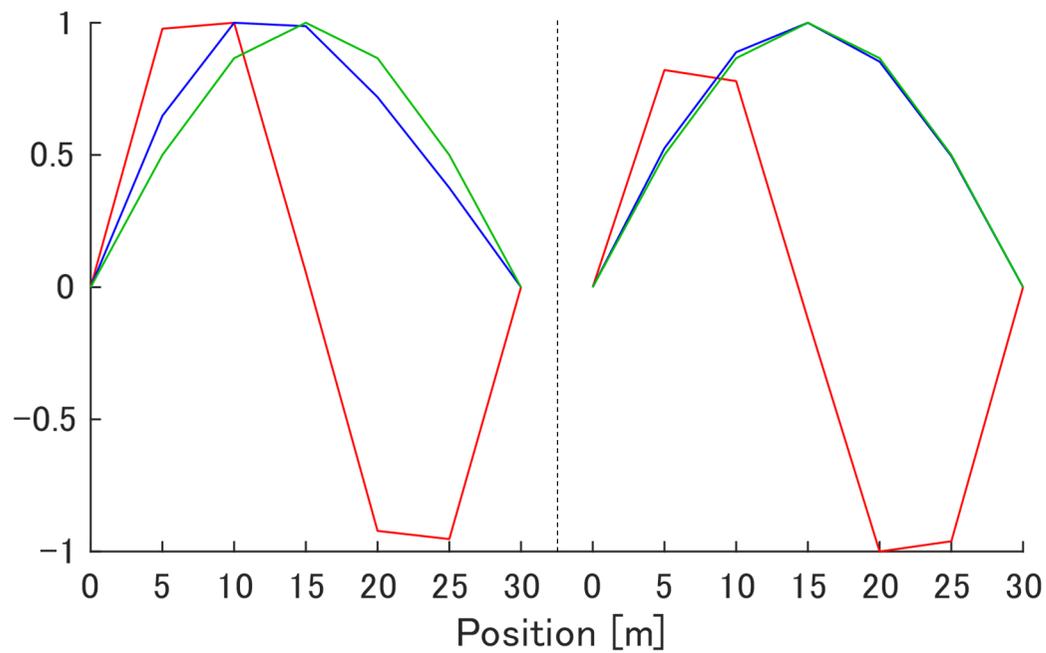
3. 数値シミュレーション | 各センサで計測した加速度振動波形



3. 数値シミュレーション | 健全モデルの推定モード形状と正解値

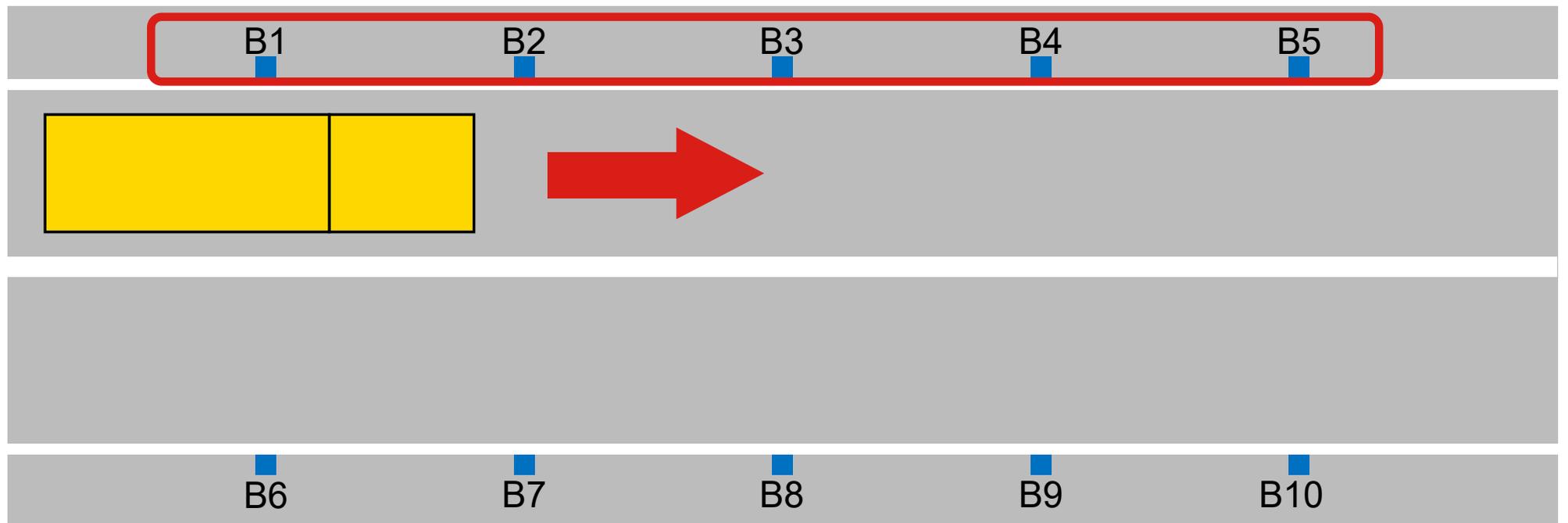


たわみ一次モード (3.35Hz) の推定結果

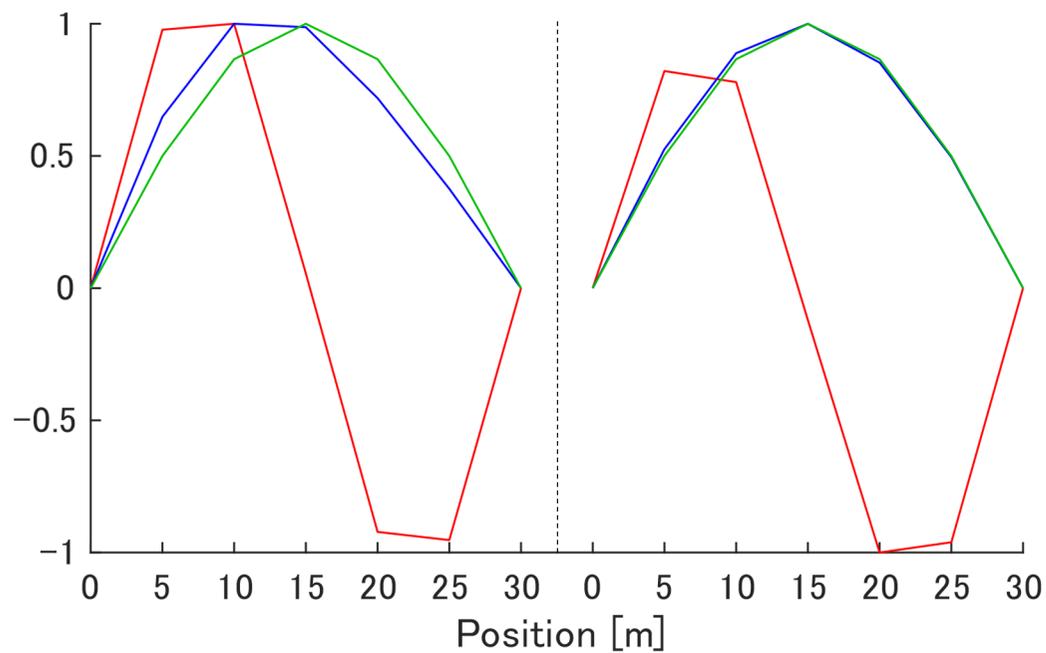


走行車線側

3. 数値シミュレーション |



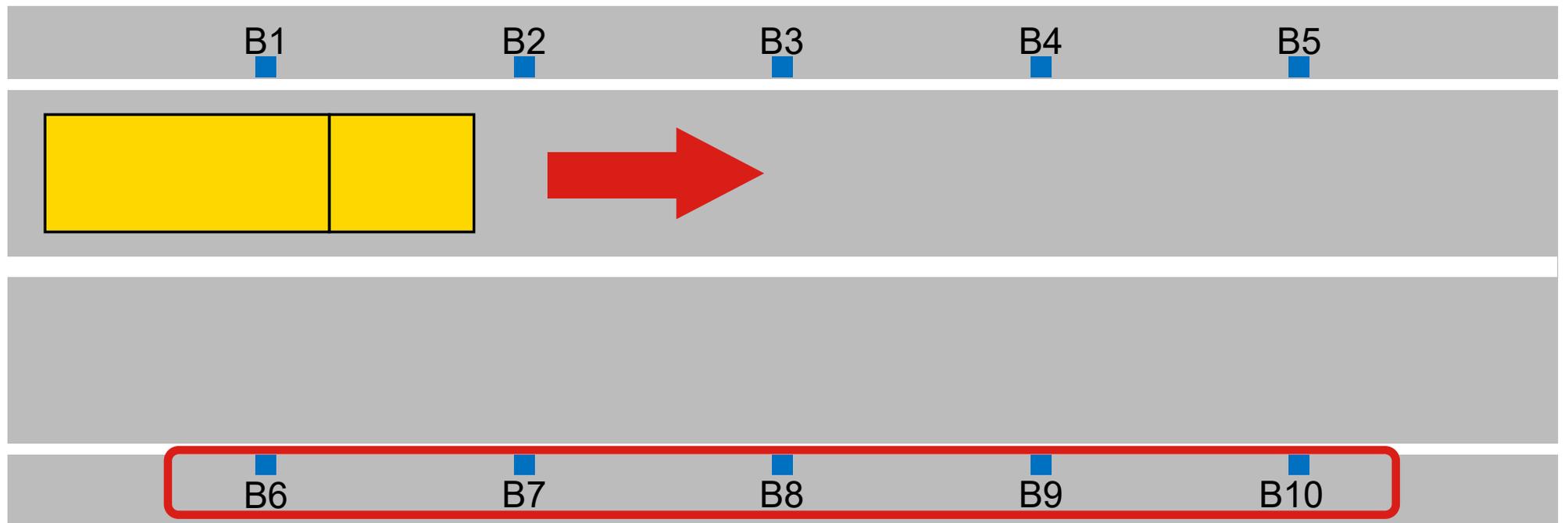
たわみ一次モード (3.35Hz) の推定結果



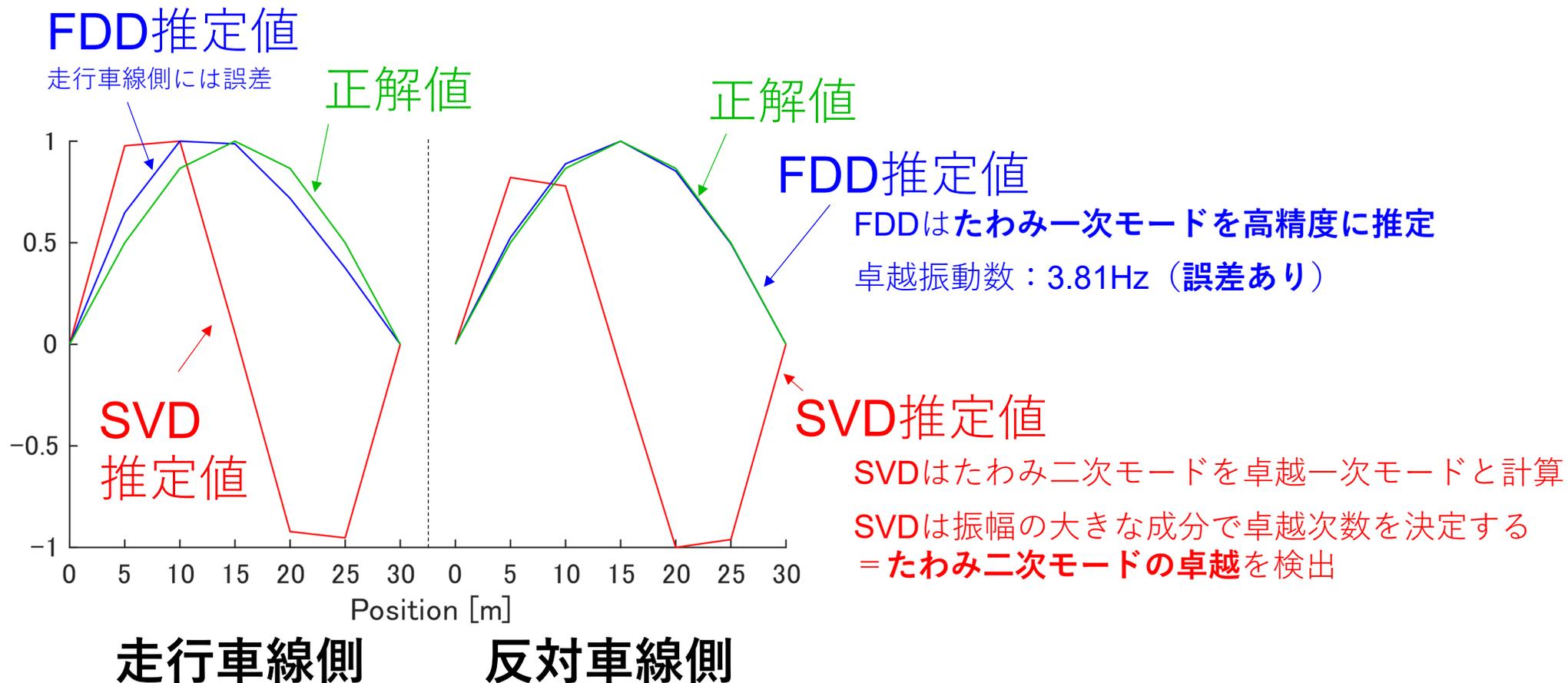
走行車線側

反対車線側

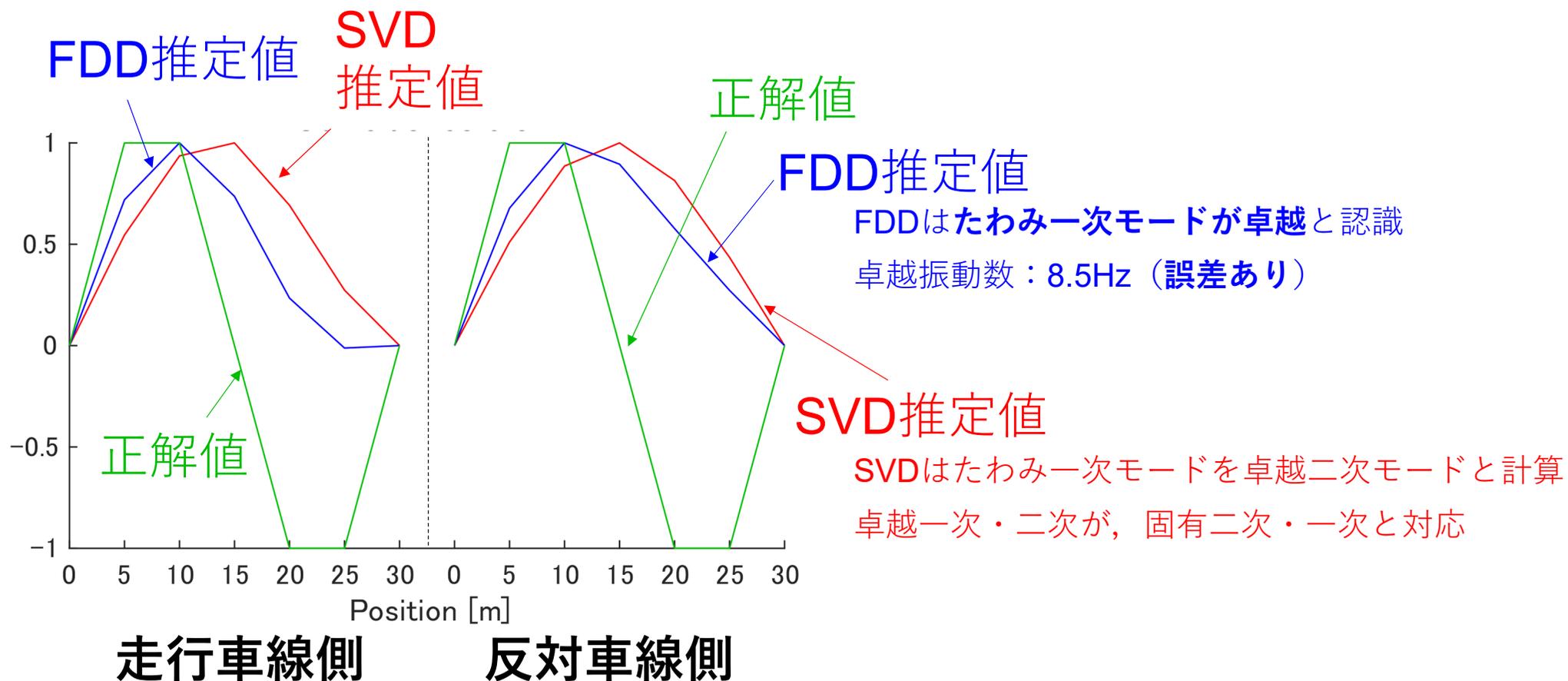
3. 数値シミュレーション



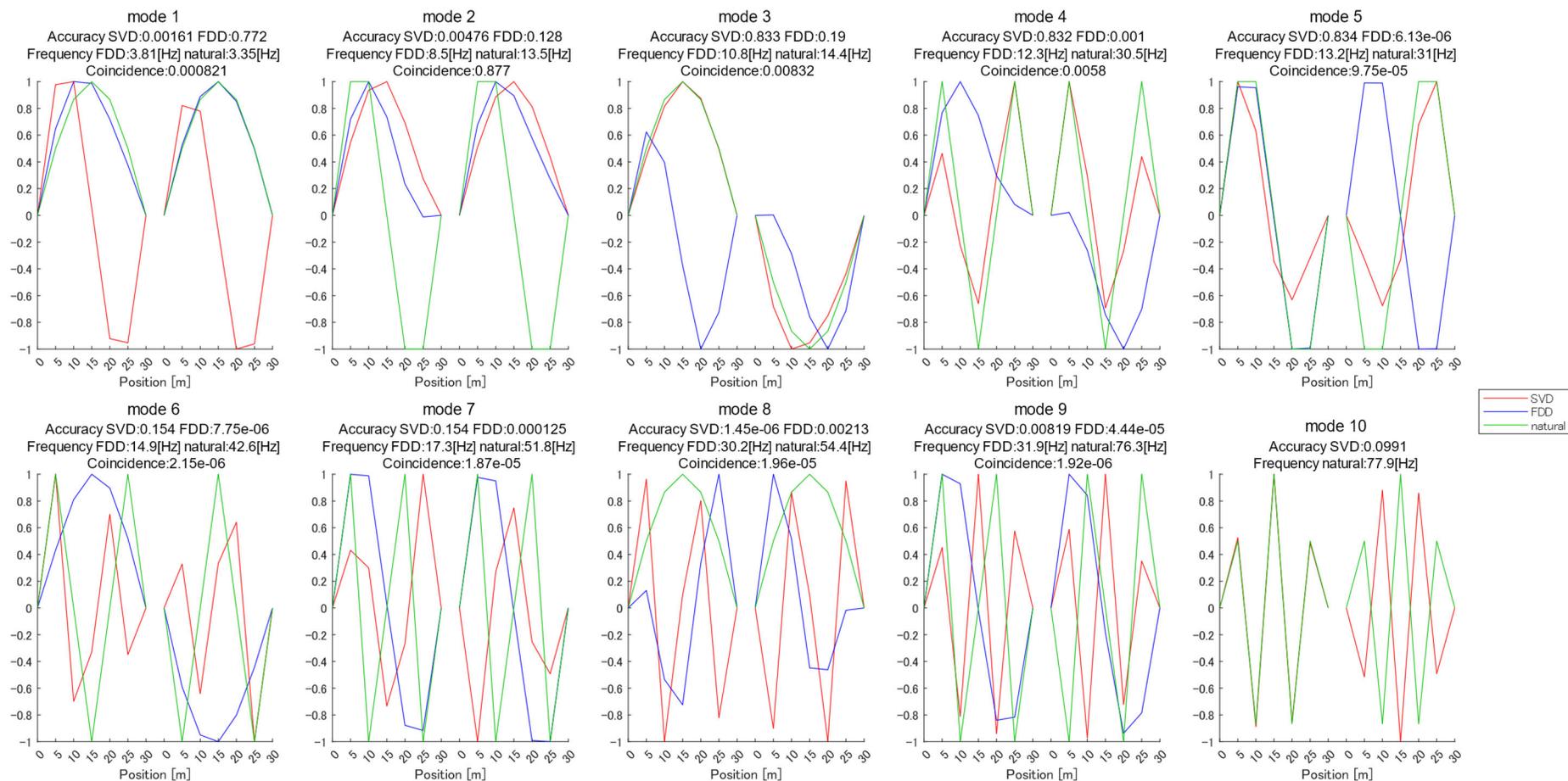
たわみ一次モード (3.35Hz) の推定結果



たわみ二次モード（13.5Hz）の推定結果



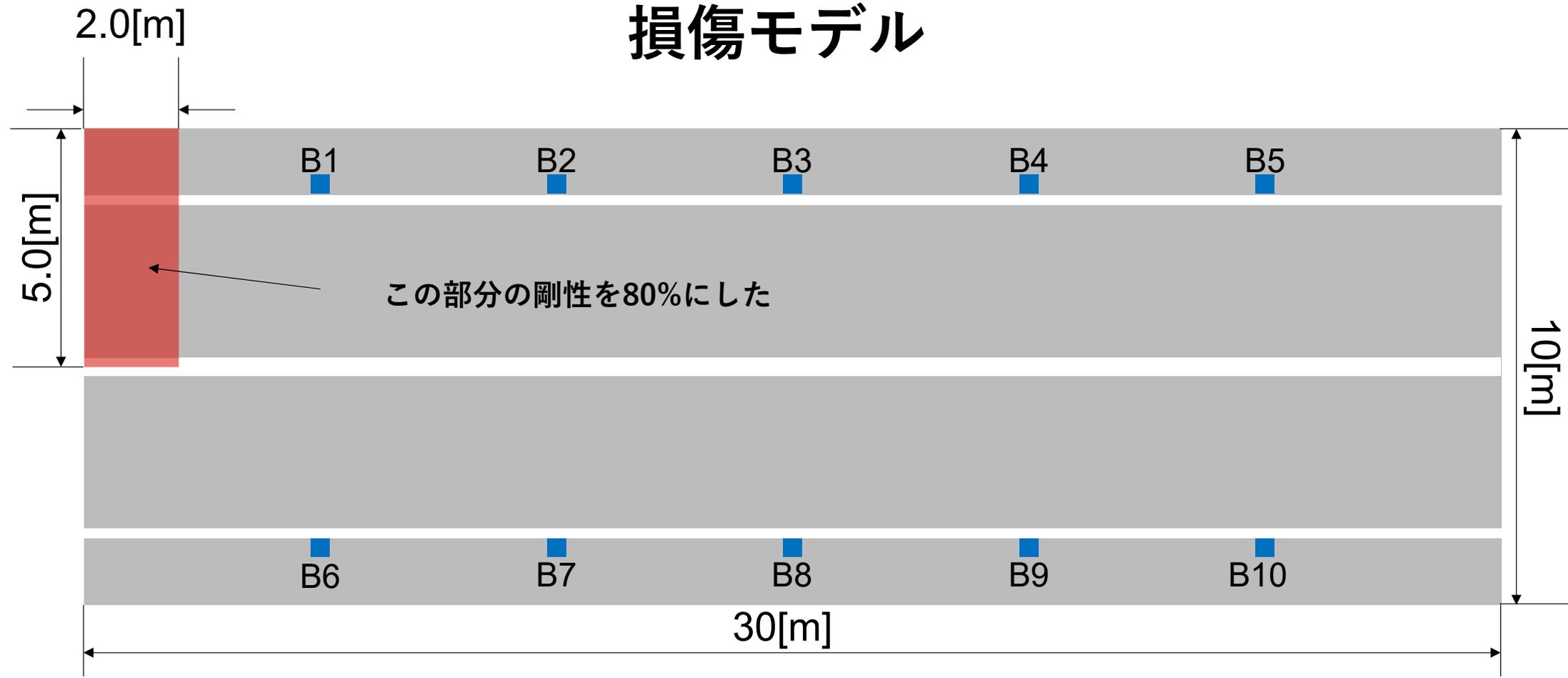
3. 数値シミュレーション | 健全モデルの推定モード形状と正解値



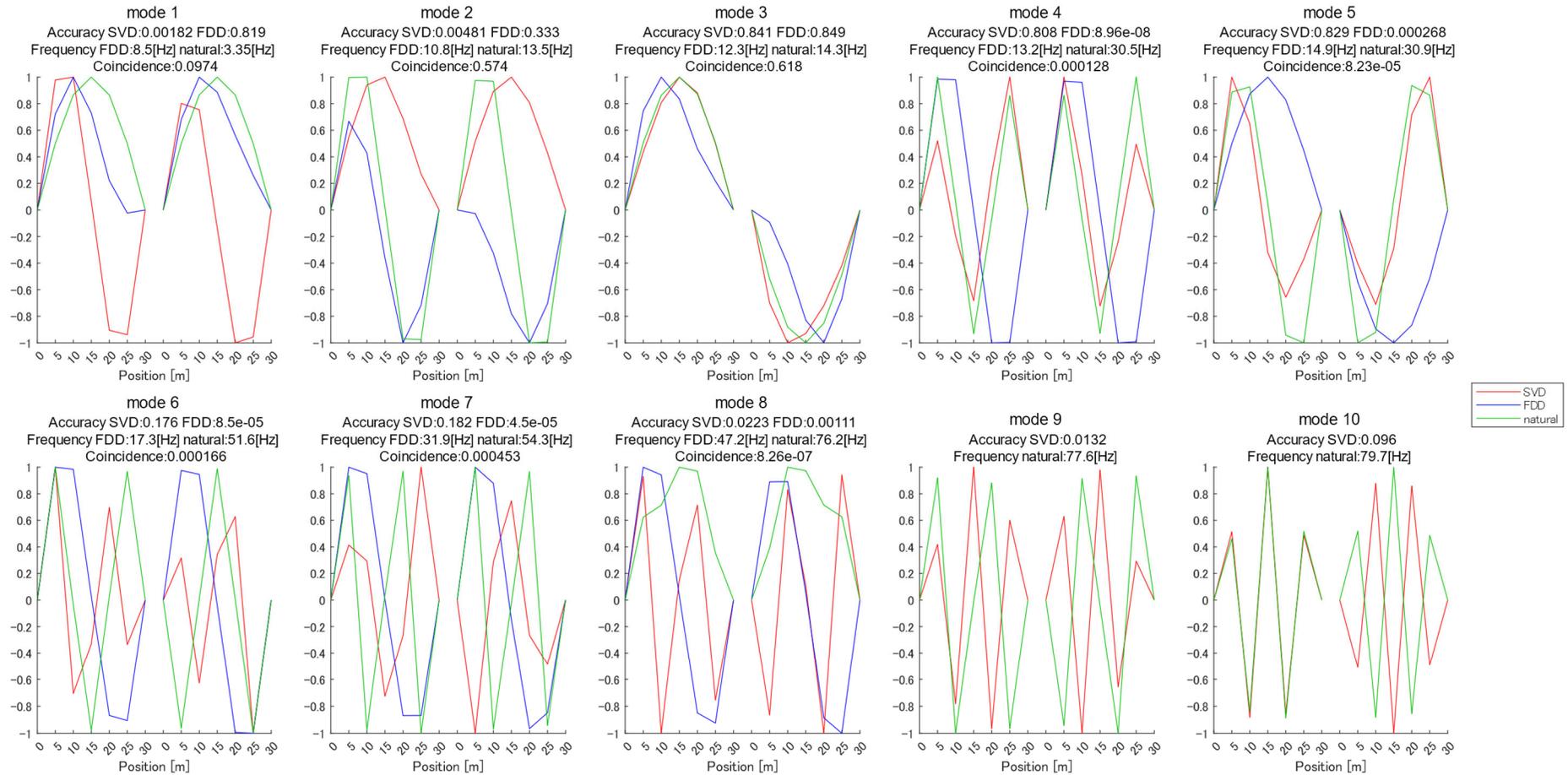
SVD法ではその他の固有モードも形状はほぼ推定できている。
 FDD法も周波数帯を合わせると固有モード形状を推定できている。

3. 数値シミュレーション | 損傷モデルについて

損傷モデル

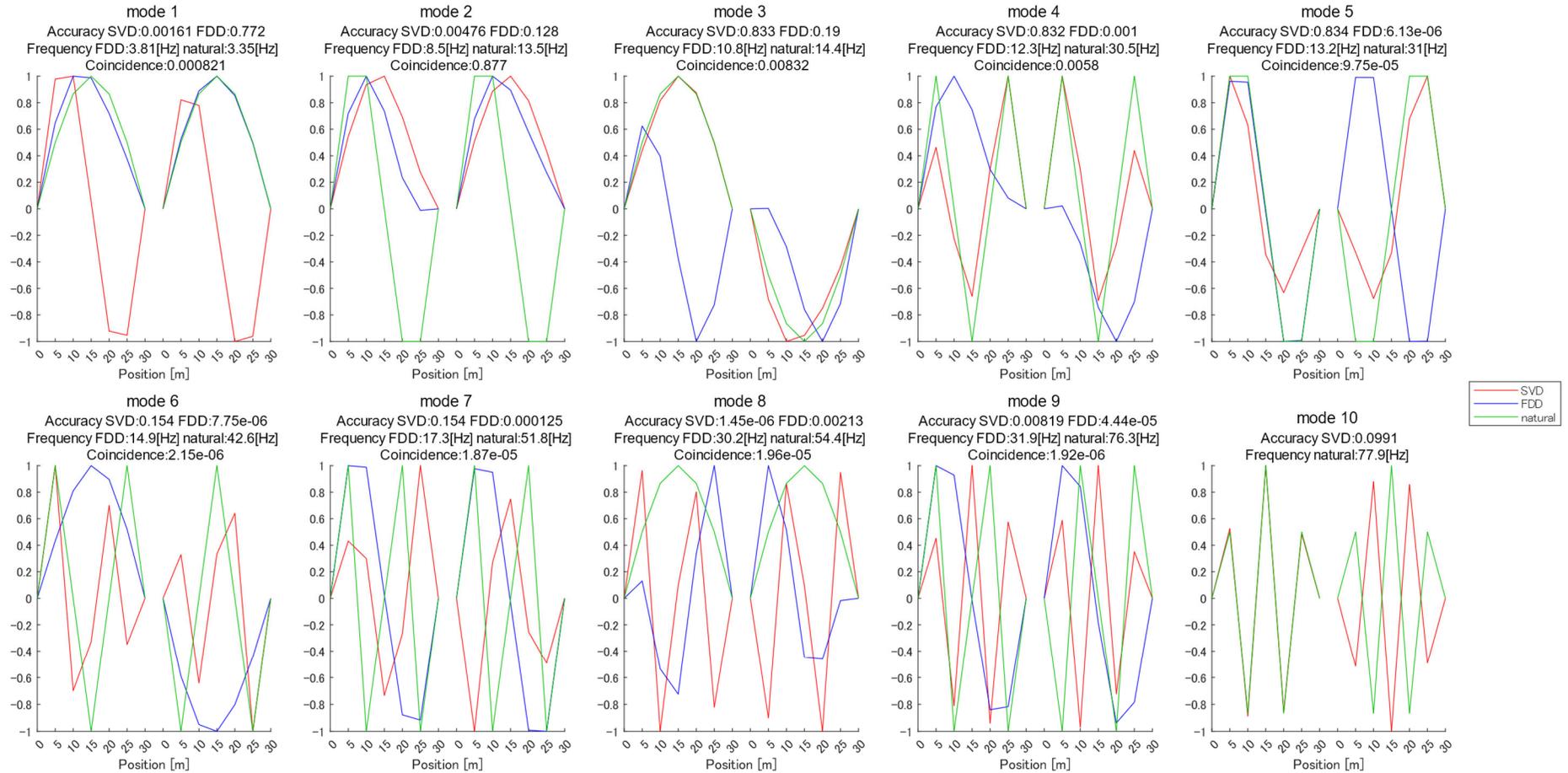


3. 数値シミュレーション | 損傷モデルの推定モードと正解値



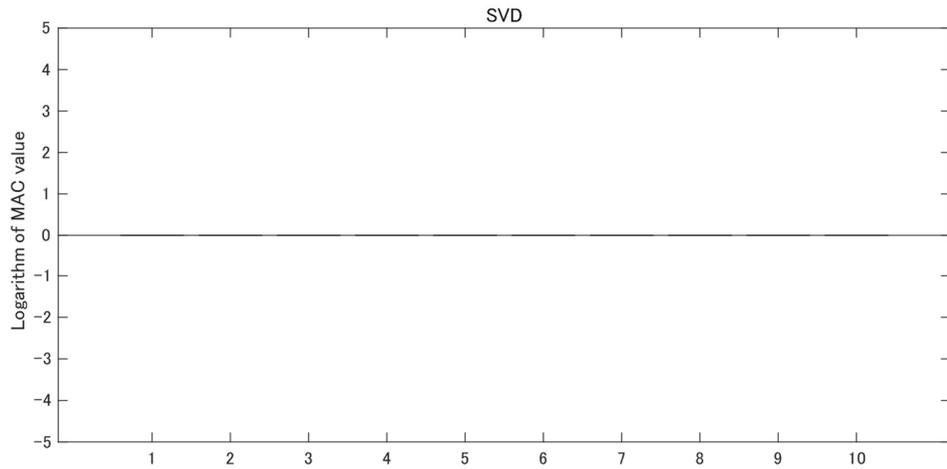
SVD法は健全モデル同様に精度よく推定できている
FDD法も健全モデル同様である、しかし推定するモード形状に違いが存在する。

3. 数値シミュレーション | 健全モデルの推定モード形状と正解値

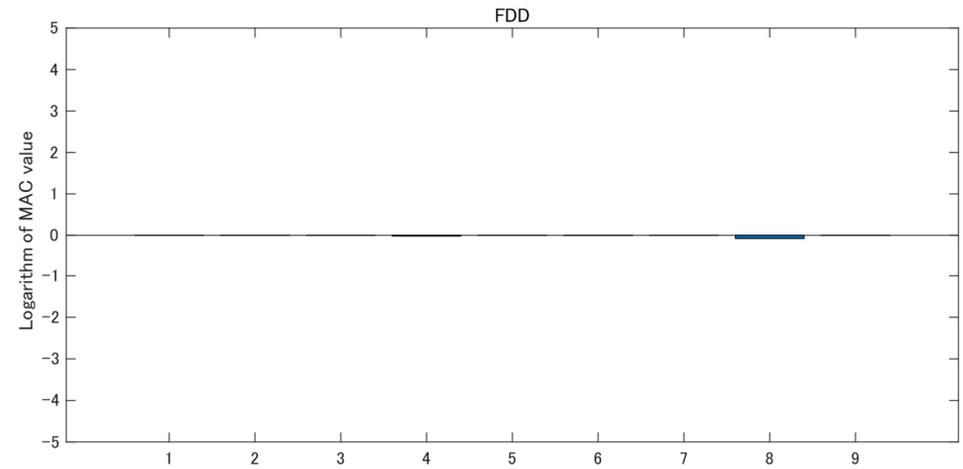


健全モデル

3. 数値シミュレーション | 健全モデルと損傷モデルの推定モード形状の違い



SVD法による推定値の
損傷前後での不一致度

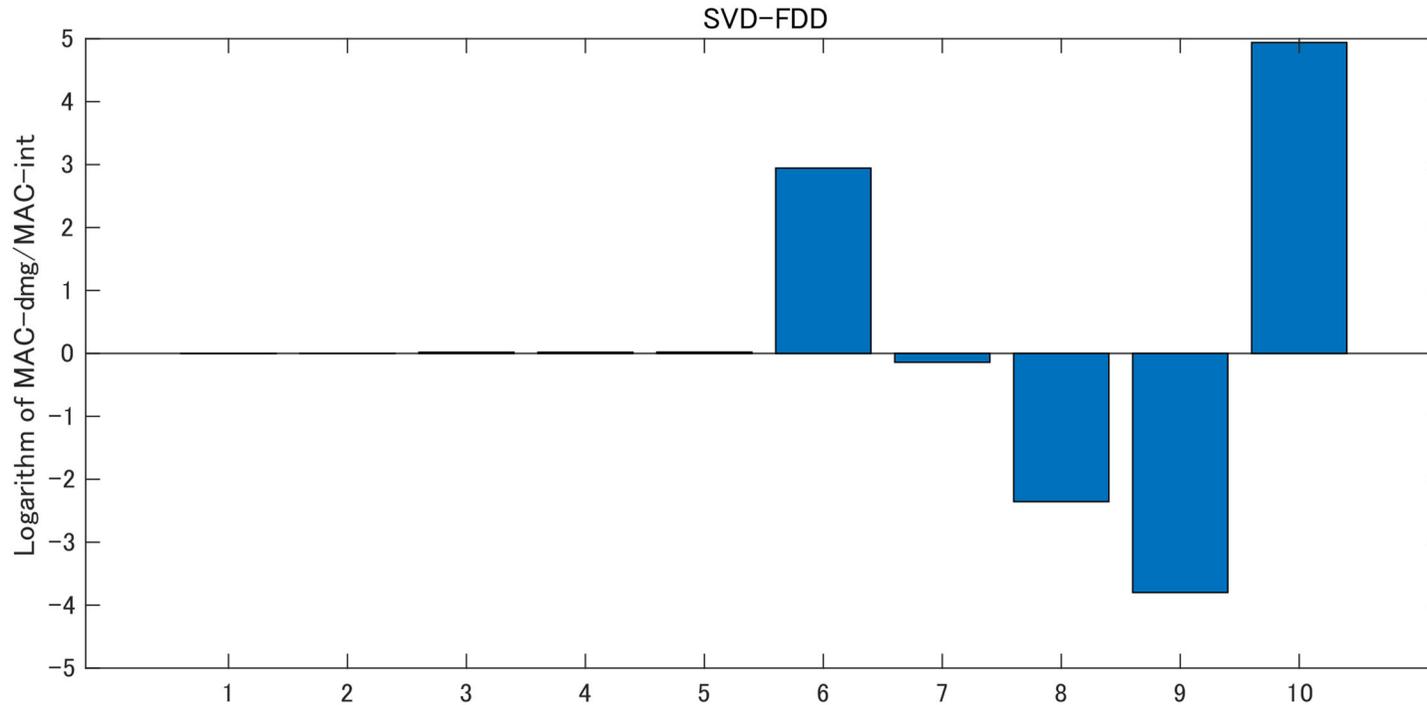


FDD法による推定値の
損傷前後での不一致度

MAC値はモード形状の相関の2乗値

FDD法のモード形状は健全モデルで推定された1~9次モードの周波数での振動モードである。

3. 数値シミュレーション | 健全モデルと損傷モデルの推定モード形状の違い



各卓越モードにおける $\frac{MAC_{SVD-FDDdmg}}{MAC_{SVD-FDDint}}$ のグラフ

- $MAC_{SVD-FDDint}$ は健全モデルにおいてSVD法により計算された卓越1~10次モードとFDD法により求められる各周波数での振動モードの内、卓越1~10次モードのそれぞれと最も似ているモードのMAC値である。
- $MAC_{SVD-FDDdmg}$ も同様である。

3. 数値シミュレーション | まとめ

- 損傷の有無で、SVD法による推定結果はほぼ変わらない
- FDD法も同様である
- **SVD法とFDD法の推定結果の差は損傷の有無で大きく変わる**
→高次モードの変化が大きい。これは高次モードになるにつれ、モード形状のピーク間距離が小さくなり、各センサでより顕著な差が出たためだと思われる。
- 損傷検知には至らなかった

4. 実環境実験 | 対象橋梁

橋名：旭橋

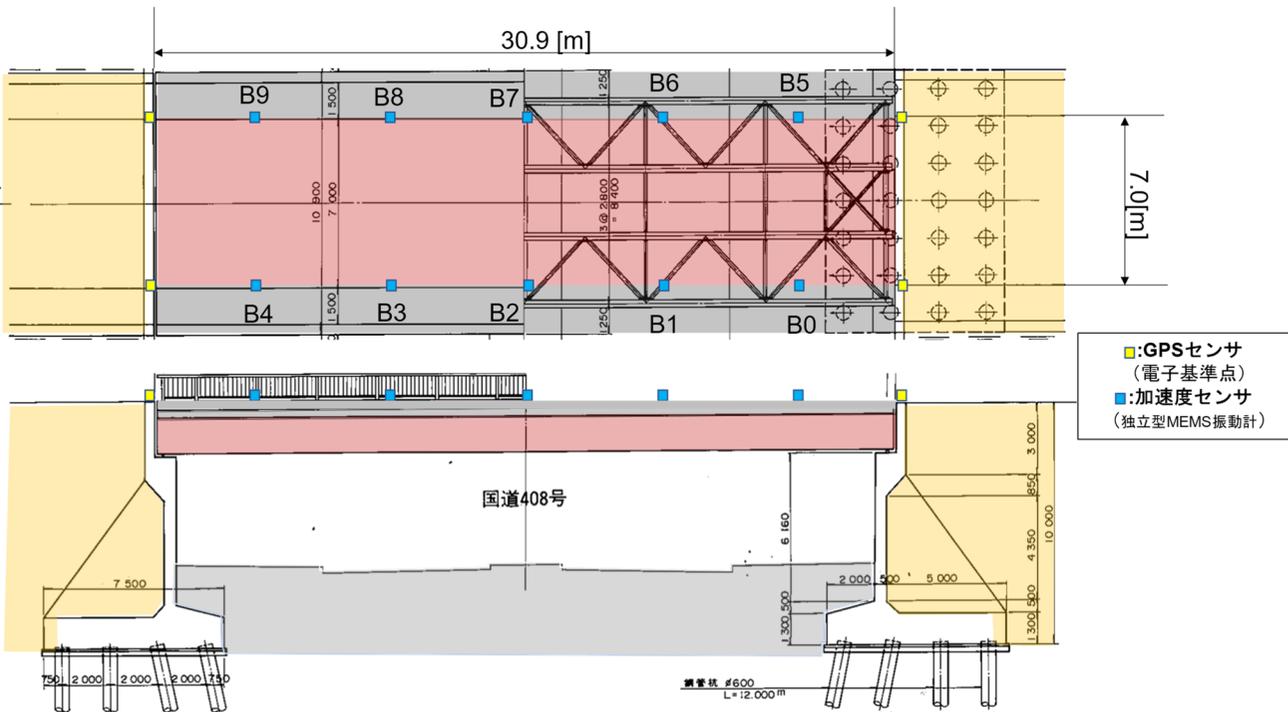
所在地：つくば市大字要地内

路線名：県道200号藤沢豊里線

橋長：30.9[m]

幅員：10.0[m]

型式：単純活荷重合成桁



4. 実環境実験 | 使用車両

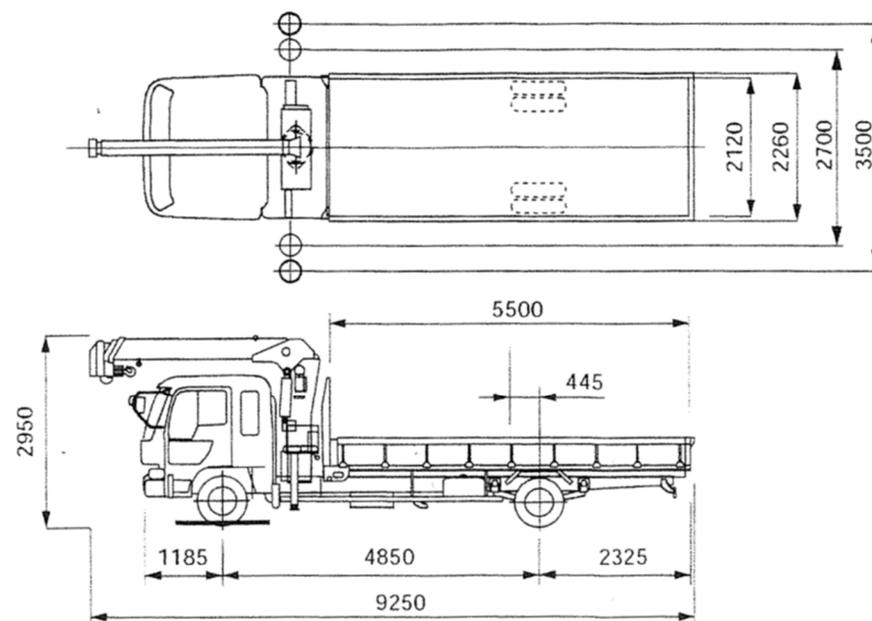
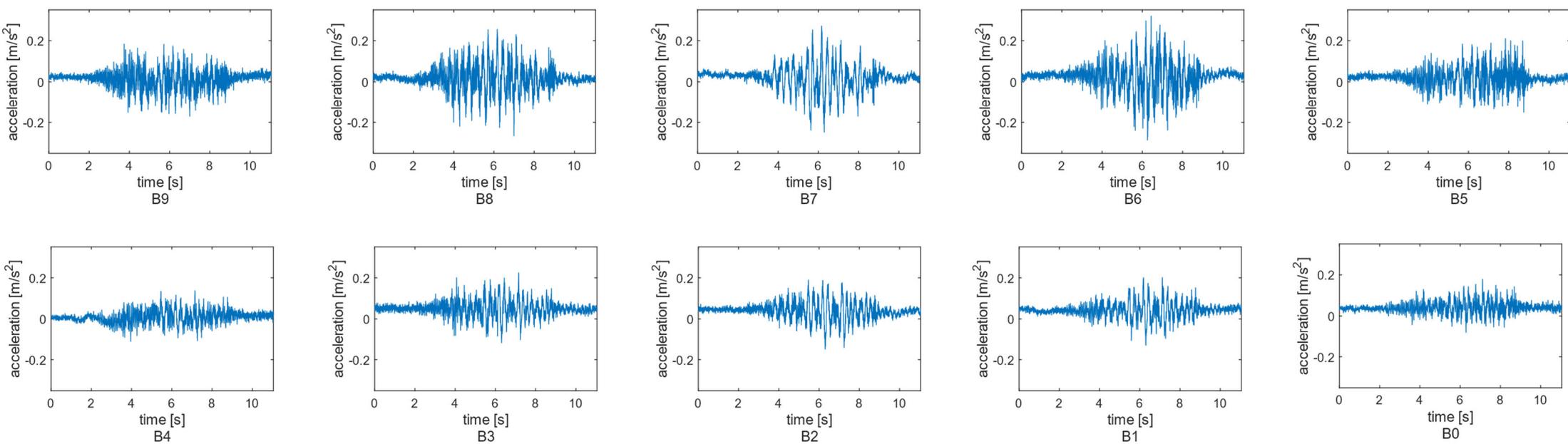


表1 車両諸元

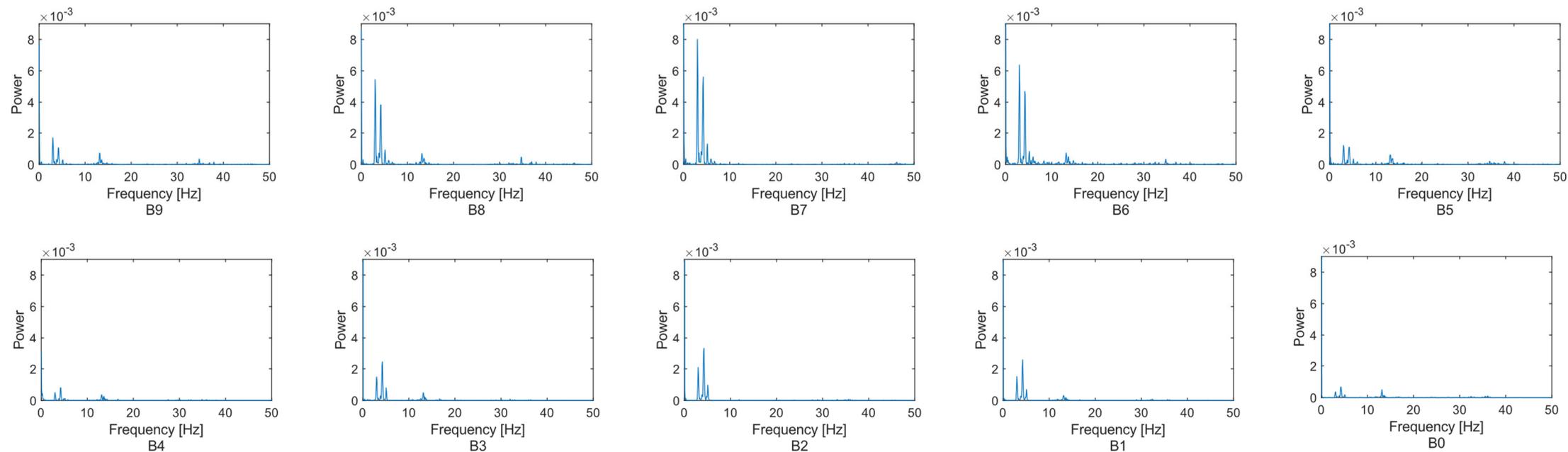
空車(kg)	前軸重(kg)	後軸重(kg)	全重(kg)
7,600	3,980	9,680	13,730

4. 実環境実験 | 得られた加速度振動



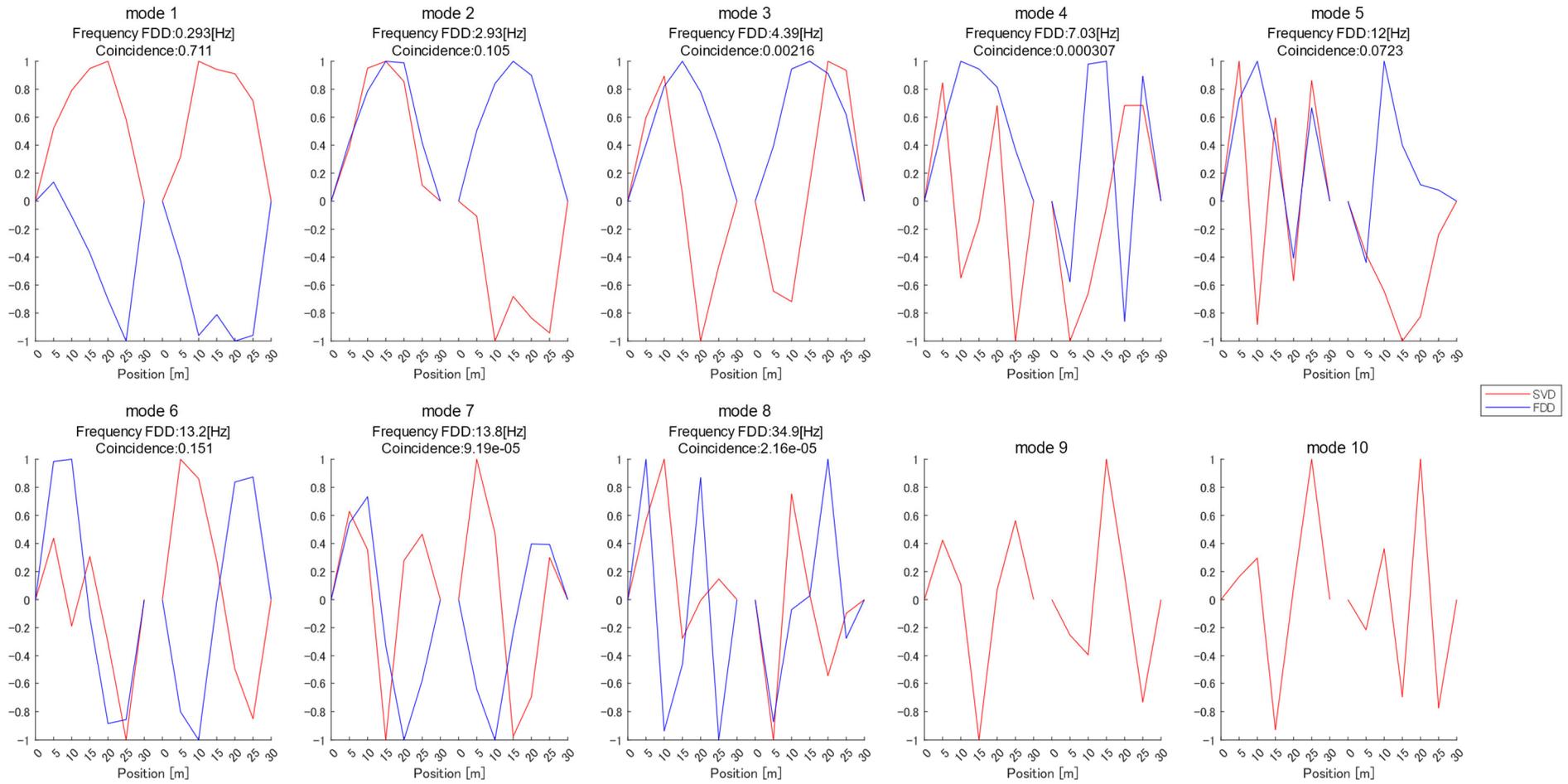
各センサで計測された振動波形を配置されていた順番に並べた。
車両が通過した車線側の方が振幅が大きい。
また、車両が通過した順に振幅のピークが遅れていっている。

4. 実環境実験 | 得られた加速度振動のパワースペクトル



全てのセンサで3.0,4.2[Hz]にピークが存在
B2、B7以外のセンサで13[Hz]にもピークが存在

4. 実環境実験 | 推定モード形状



5. まとめ

- I. 数値シミュレーションでは得られたSVD法、FDD法によりモード形状を推定したが、どちらも精度には限界がある。
- II. 損傷発生後は健全時と比較し、SVD法による推定値とFDD法による推定値の差が変化するが損傷検知までは至らなかった。
- III. 実環境実験でも数値実験と同様にSVD法、FDD法による推定値には差がある。

今後の展望

- I. モデルの高度化
- II. 損傷の発生有無が確認できる実橋梁における計測
- III. 数値シミュレーションにおける常時微動の考慮