

# Advance/FrontSTRを用いた バラスト軌道の動的応答解析

(公財)鉄道総合技術研究所 (軌道力学) 相川 明

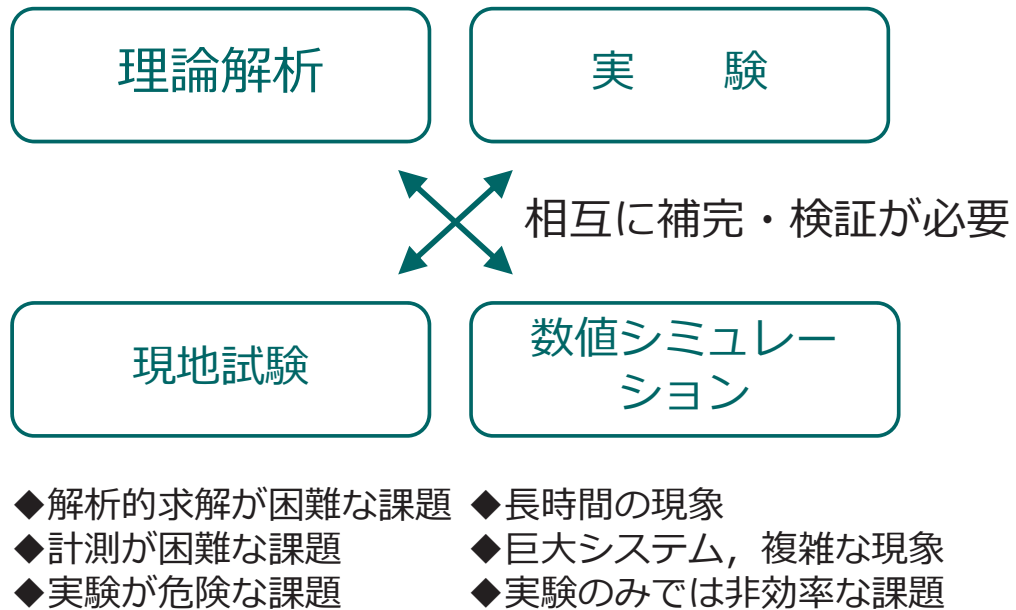
email: aikawa.akira.11@rtri.or.jp

1

## 研究の背景

2

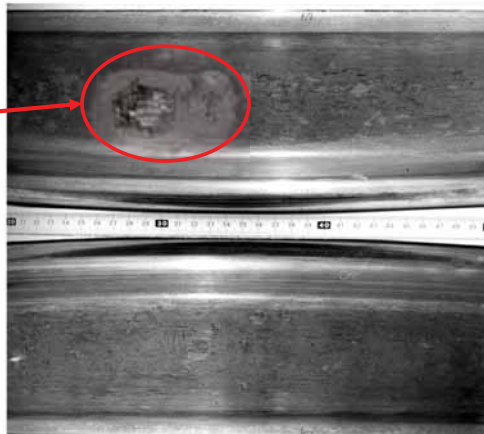
## 数値シミュレーションの基本的な考え方



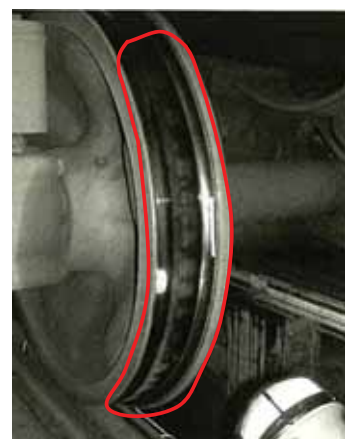
3

## 軌道に関する劣化現象（車輪）

- ・ フラット : 制動時の車輪滑走による局所的な摩耗
- ・ 多角形摩耗 : 車輪に規則的な周期で生じる摩耗



フラット

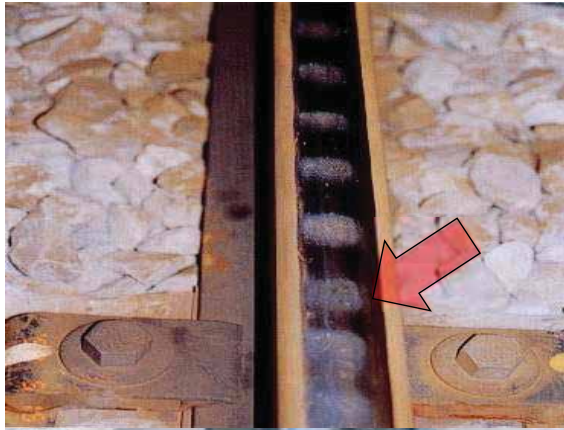


多角形摩耗

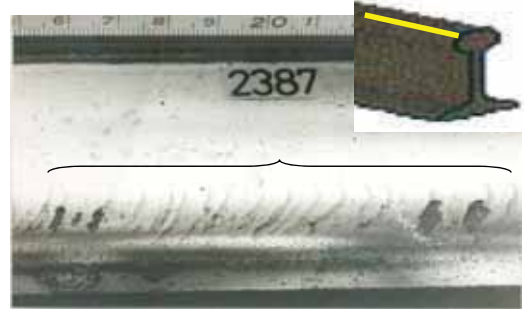
4

## 軌道に関する劣化現象（レール）

- ・波状摩耗 : レール頭頂面に規則的な周期で起こる摩耗
- ・きしみ割れ : レール頭側部（車輪のフランジと接する部分）に起こる亀裂・剥離



波状摩耗



きしみ割れ

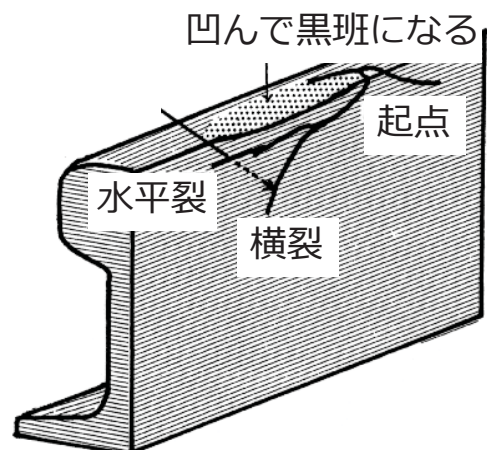
5

## 軌道に関する劣化現象（レール）

- ・シェリング : レール頭頂面にできる「貝殻状」の凹み  
⇒ 亀裂が鉛直方向に延びる(横裂)と破断の危険も



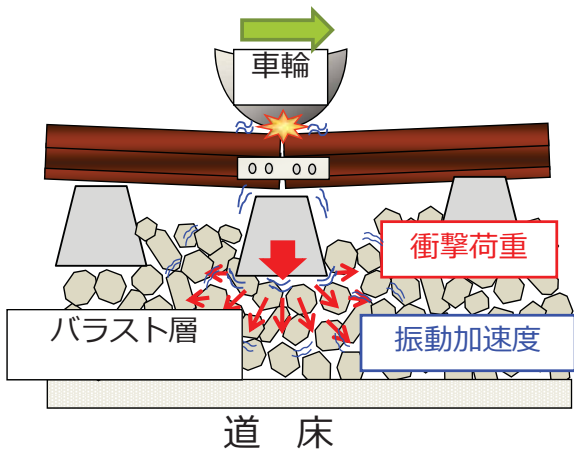
レールシェリング



各種の事例に対し、理論的なメカニズムの解明が必要

6

## 軌道に関する劣化現象（バラスト）

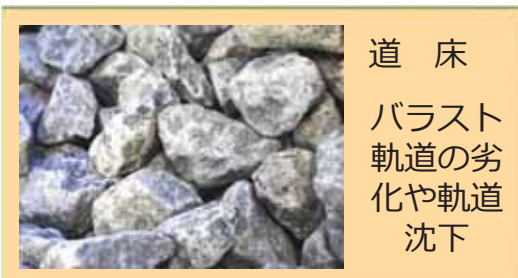
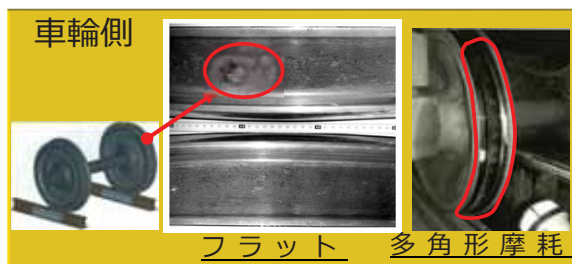
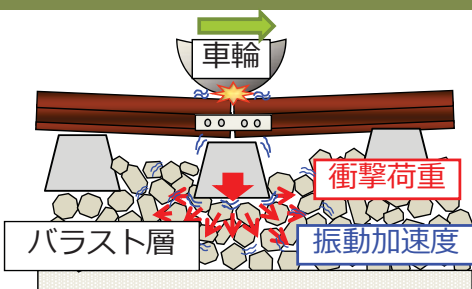


夜間の人手による維持管理作業が必須  
経常に膨大な維持管理費が必要

1. バラストの摩耗・劣化
2. バラストの移動や側方流動
3. 軌道面の不同沈下

7

## 軌道に関する劣化現象



安全性  
乗り心地  
騒音

劣化のメカニズムは未解明であり、定期的なメンテナンスによる対処が基本  
現象解明が進めば、より適切なメンテナンス頻度形状設計につなげられる

8

## 問題設定と開発方針

9

## 解析で対象とする周波数について

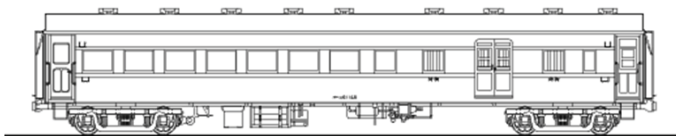
### 新幹線270 km/hで走行すると仮定



秒速75 m/s (約3両分, 12軸) → 平均12Hz

秒速75 m/s ÷ 2.5m(軸距) → **30 Hz**

### 在来線140 km/hで走行すると仮定



秒速38.9 m/s (約2両分, 8軸) → 平均8Hz

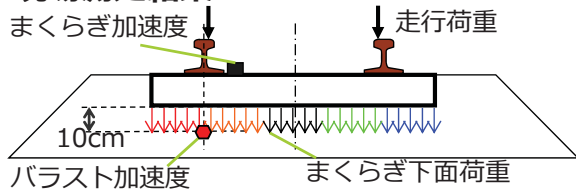
秒速38.9 m/s ÷ 2.0 m(軸距) → **20 Hz**

- ✓ 従来はおよそ30Hz以下の低い周波数領域のみに着目していた.
- ✓ 現場測定においてノイズ無く測定する手法が無かった.

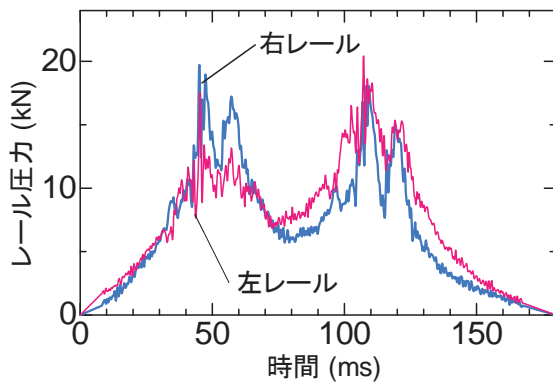
10

## 列車の衝撃荷重の周波数について

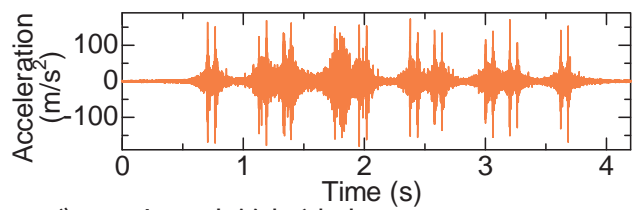
### 現場測定結果



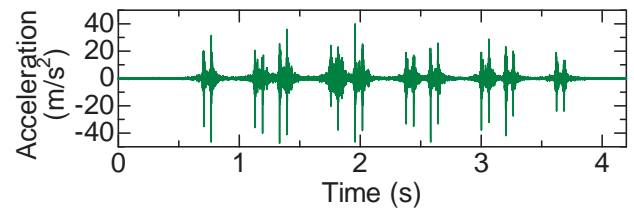
### レール圧力の実測波形



### まくらぎの応答加速度



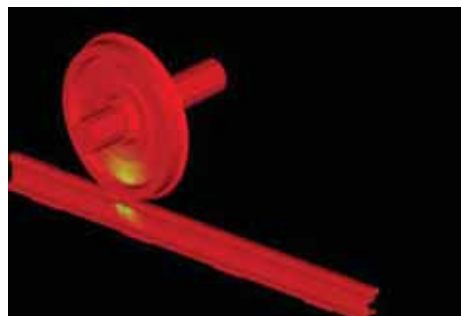
### バラストの応答加速度



- ✓ 実測値のパルス波形は数kHzまでの高周波域の振動成分を含んでいる.
- ✓ まずは軌道構造に関する1kHzまでのすべての固有振動モードを再現するモデルを構築する.

## ソフトウェアと開発の方針

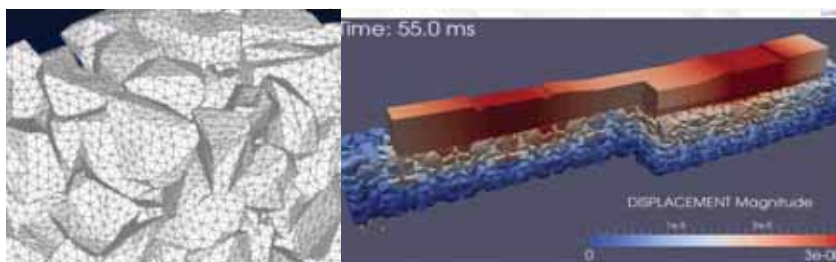
### ■ 車輪・レール間の弾塑性動的転がり接触解析



(開発の方針)

- ✓ 駆動トルクによる回転走行機能が必要
- ✓ 公開版のFrontISTRに機能を追加する (東京大学奥田教授との共同開発)

### ■ バラスト粒状集合体の動的応答解析



- ✓ 大規模計算・非線形ばね要素・直接法ソルバー
- ✓ 要素形状やばね等の機能が豊富な製品版 Advance/FrontSTR を利用

## 車輪/レール/バラストの動的挙動の 大規模シミュレーション

- 研究目的と本解析手法の特徴
- 弾塑性動的転がり接触解析プログラムの開発
  - 一軸一輪モデルによる解析結果と検証
  - 脈動の原因特定（速度依存成分の特定）
  - 車輪・レール間の接触力（衝撃荷重）の卓越周波数
- バラスト・まくらぎ系の大規模過渡応答解析
  - まくらぎ-バラスト系の固有振動特性
  - 剛体振動モードと弾性振動モードの特定
  - 接触力の周波数特性とバラスト層の固有振動の関連性

13

## 弾塑性動的転がり接触解析プログラムの開発 (公開版をもとに東京大学奥田教授との共同開発)

14

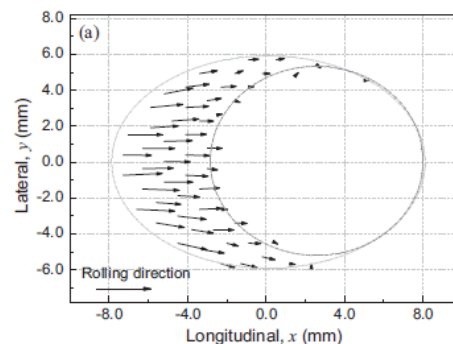
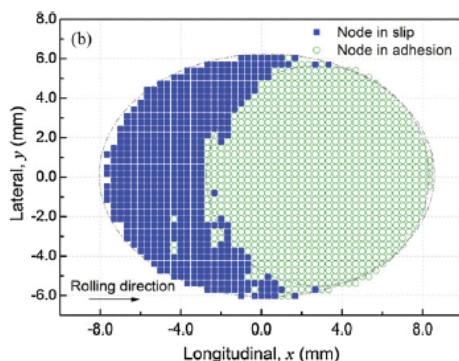
## 車輪・レール間の接触挙動評価の既存アプローチ

- 理論的アプローチ
  - Hertzの接触理論
  - 車輪・レール形状の単純化や2次元解析
  - 弾性範囲, 定常的な転動まで (静的/準静的)
- 数値解析的アプローチ
  - KalkerのCONTACT
    - 複雑形状/複雑な接触 (スピンやフランジ接触)
    - 三次元境界要素法プログラム (法線方向・接線方向)
    - 非線形材料の取り扱いが弱い
  - FEMモデルによる数値シミュレーション
    - 材料非線形
    - より現実的な接触の取り扱い より厳密な物理現象の模擬
    - 動解析

15

## 接触解析の評価対象と必要なメッシュサイズ

- わずか数センチ四方の領域で固着・滑り状態が分布
- 接触領域の精緻な評価には, 1ミリ以下の離散化が必要



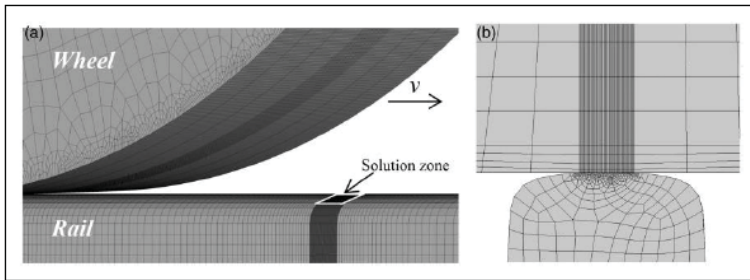
接触領域における固着/滑り分布

接触領域における微視すべり

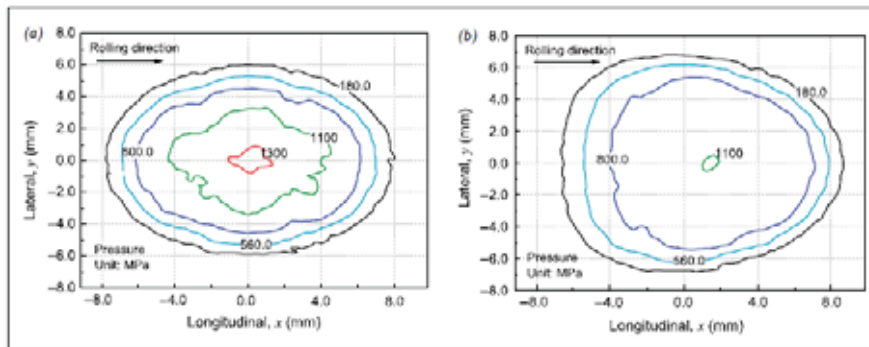
X. Zhao, Z. Li, The solution of frictional wheel-rail rolling contact with a 3D transient finite element model: Validation and error analysis, Wear, 271, pp.444-452, 2011.

16

## 関連研究：Zhao and Liの三元動的FEモデルによる車輪・レール転がり接触解析



ANSYS/LS-DYNAを利用  
評価帯のみ  
ファインメッシュ



解析結果例  
弾性 (左)  
弾塑性 (右)

## 本解析手法の主な特徴

- 大規模並列計算によって接触部に一様なファインメッシュ（オンメモリ領域分割）
- キャタピラメッシュ機能による計算コストの節約（短いレール上で加速計算）
- レールモデル端部における無反射境界の導入



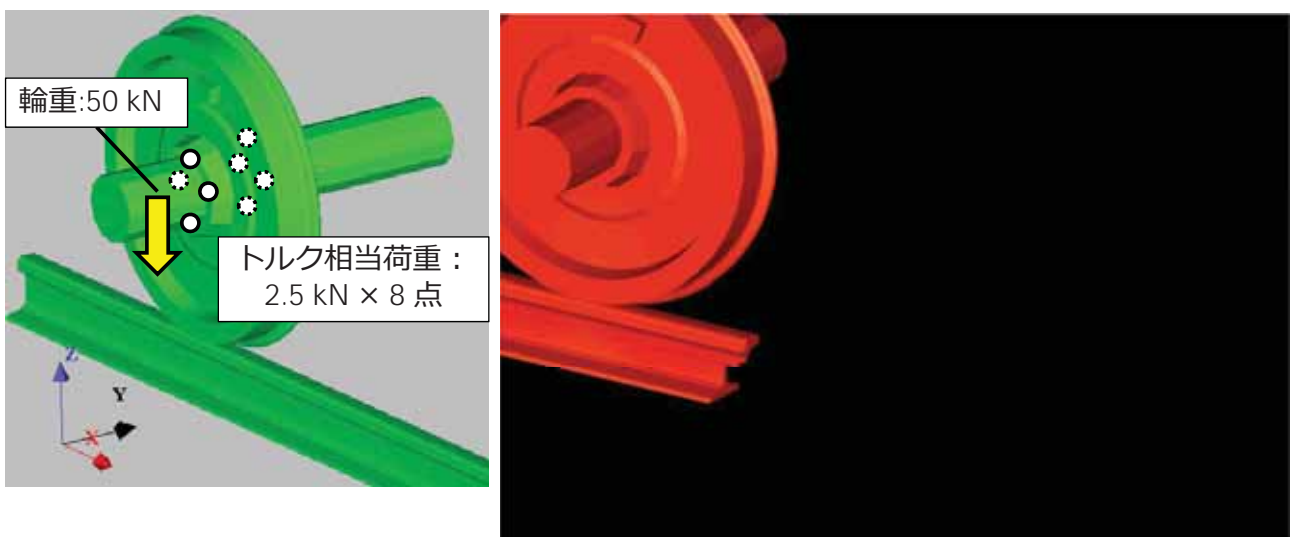
大規模並列有限要素法構造解析ソフトウェア「FrontISTR」をベースに  
東京大学奥田教授と「車輪・レール間の転がり接触解析」ツールを開発

## FrontISTRにおける動的・接触解析手法

- 弾性／弾塑性解析 Updated Lagrange法
  - 時間積分：Newmark  $\beta$ 法
  - 接触解析：法線方向つり合い条件「ラグランジュ乗数法」  
接線方向つり合い条件「ペナルティ法」
  - 摩擦力を考慮（クーロン摩擦）
  - 領域分割法による並列計算
  - 行列方程式解法：分散並列用直接解法「MUMPS」
- 
- 材質 新幹線車両の車軸・車輪鋼材, 60kgレール鋼材
  - 要素 8節点六面体要素

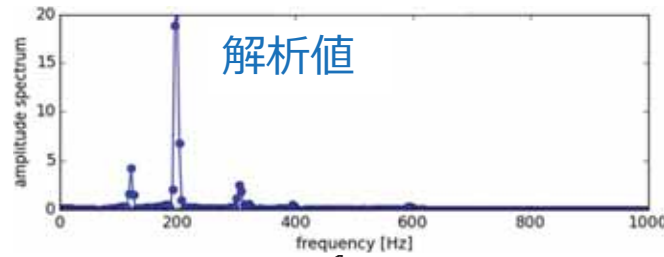
19

## 実形状の1軸1輪モデルの車軸に駆動トルクを加えて車輪を自走させる動的転がり接触解析(弾塑性解析)



20

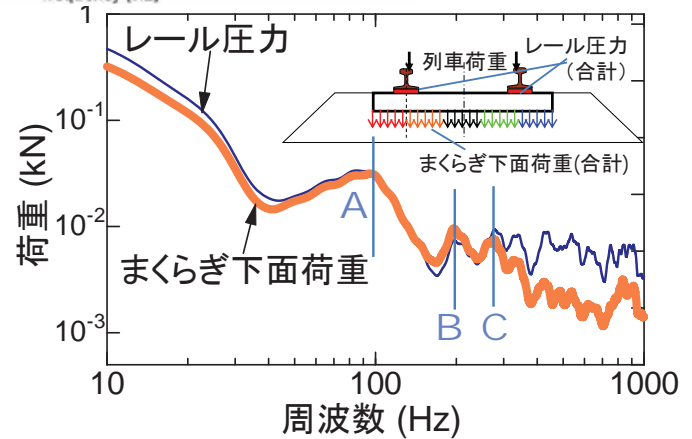
## 弾塑性動的転がり接触解析により得られた車輪・レール間の接触力（衝撃荷重）の卓越振動数



現場測定値

車輪・レール系の回転  
走行時の固有振動数

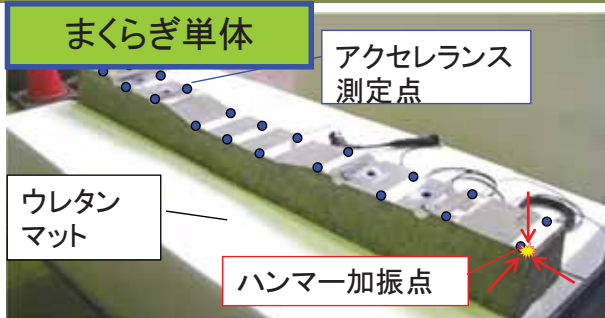
モデル	10.80 m
A	98 Hz
B	196 Hz
C	314 Hz



21

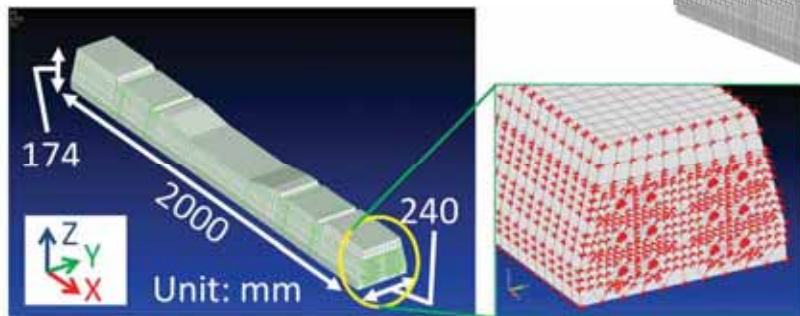
## バラスト・まくらぎ系の実験モーダル解析 バラスト軌道実物大模型の加振実験

## 軌道構造部材の固有振動モード (三次元FEM解析と実物大モデルの加振試験)



まくらぎをモデル化

FEM固有モード解析



23

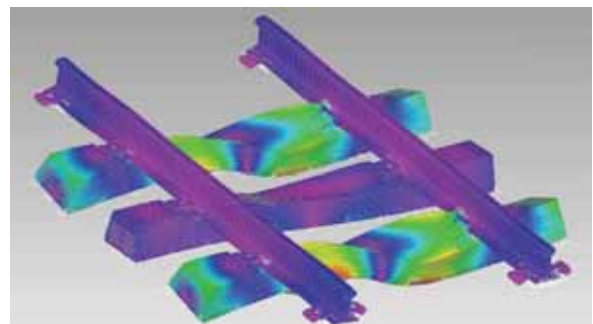
## 軌道構造部材の固有振動モード (三次元FEM解析と実物大モデルの打撃試験)

軌きょう構造



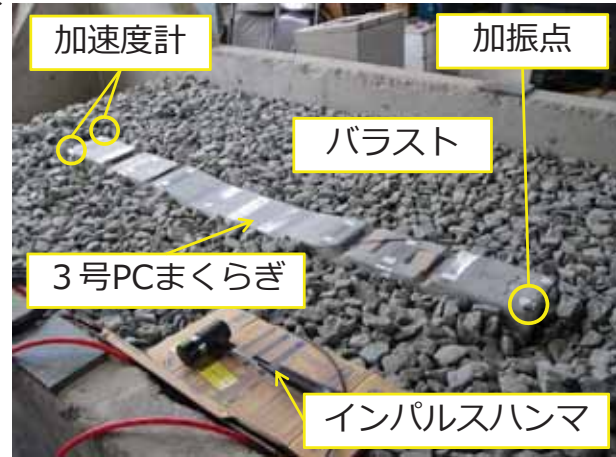
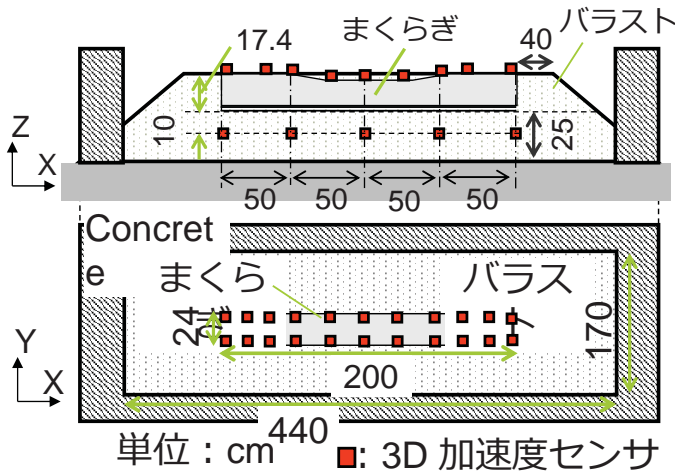
レール・締結装置・  
パッド・まくらぎを  
モデル化

FEM固有モード解析



24

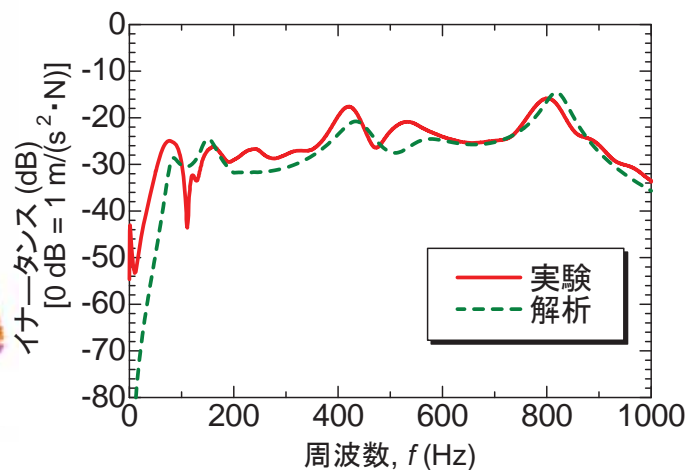
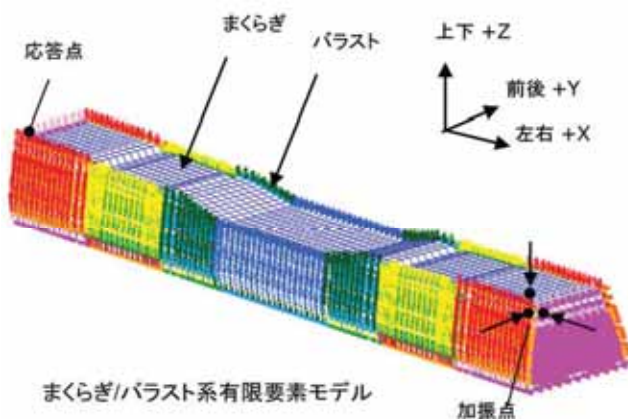
## まくらぎバラスト系の実験モーダル解析(加振実験)



- ✓ まくらぎバラスト系の1000Hz までの固有振動数, バラストのばね係数および構造減衰特性を同定した。

25

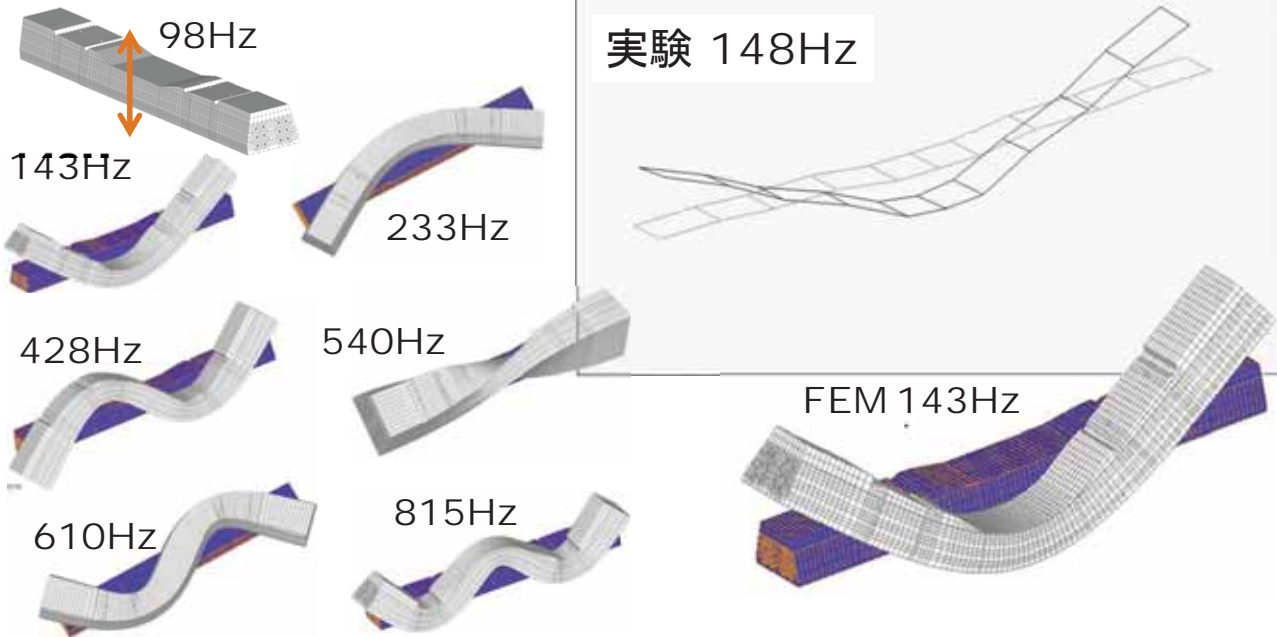
## まくらぎバラスト系モデルの構築



- ✓ 1000Hz までの6個の剛体振動モードと6個の曲げ・ねじりモードすべてについて, 固有振動数と応答値を誤差5%以内で再現する。

26

## まくらぎバラスト系モデルの構築



✓ 1000Hz までの固有振動数と応答値を誤差5%以内で再現する.

27

## 実軌道での動的応答測定

28

## まくらぎ下面荷重の測定

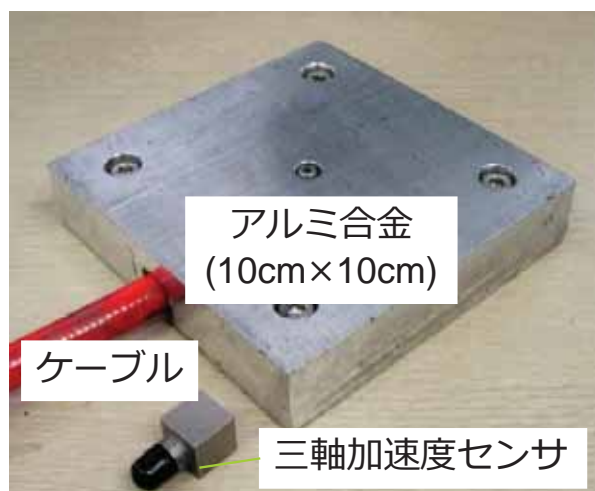


超薄型衝撃荷重センサ



29

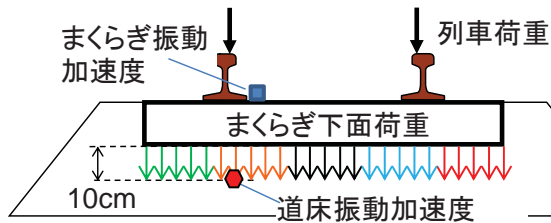
## バラストの加速度応答の測定



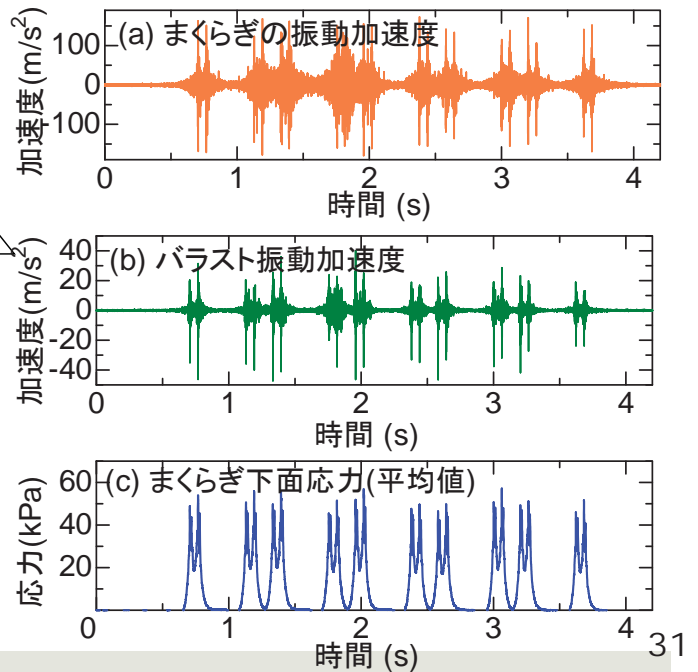
30

## 実軌道での動的応答測定

### 測定現場(在来線・直線)



### センシングまくらぎ



## 特急列車(時速90km/h)通過時のまくらぎ下面応力

まくらぎ下面荷重の測定例

<測定条件>

特急車両の先頭車の1軸お

よび2軸通過時

走行速度：90 km/h

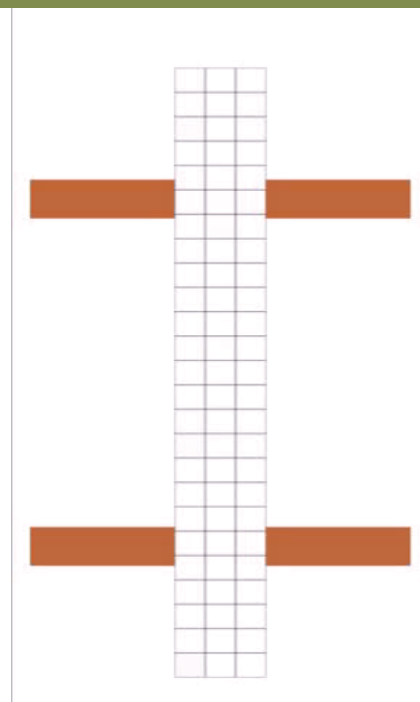
在来線バラスト軌道

砂質地盤上の直線区間

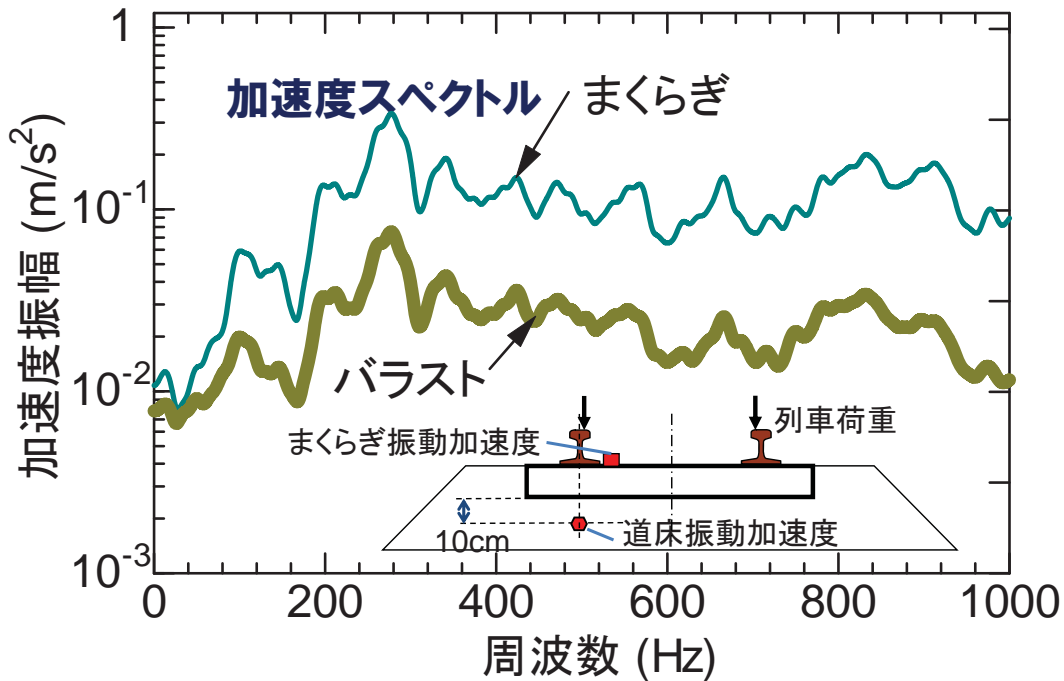
バラスト層厚：30 cm

60-kg/mロングレール

PC3号まくらぎ



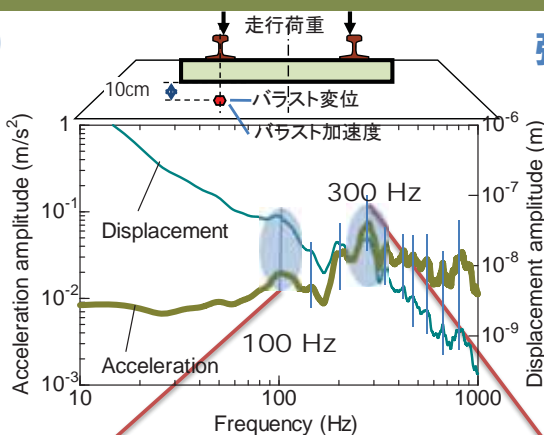
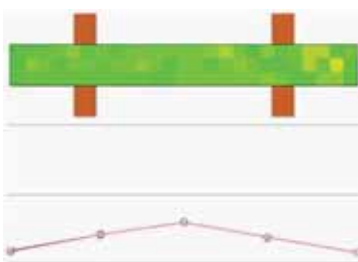
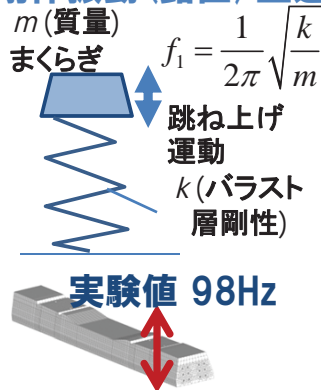
## 特急列車（走行速度110 km/h）通過時のバラストおよびまくらぎの加速度スペクトル



33

## バラストの鉛直方向の振動特性（実測値）

### 剛体振動（鉛直/並進）

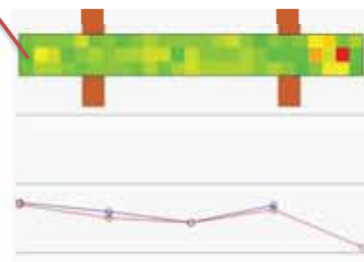
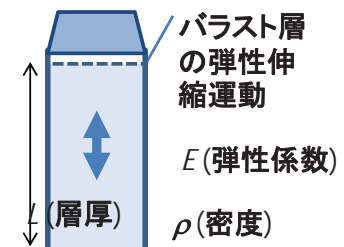


- (a) 100Hz近傍：剛体振動
- (b) 300Hz近傍：弾性振動

実測値ではバラスト層の固有振動と予想される。

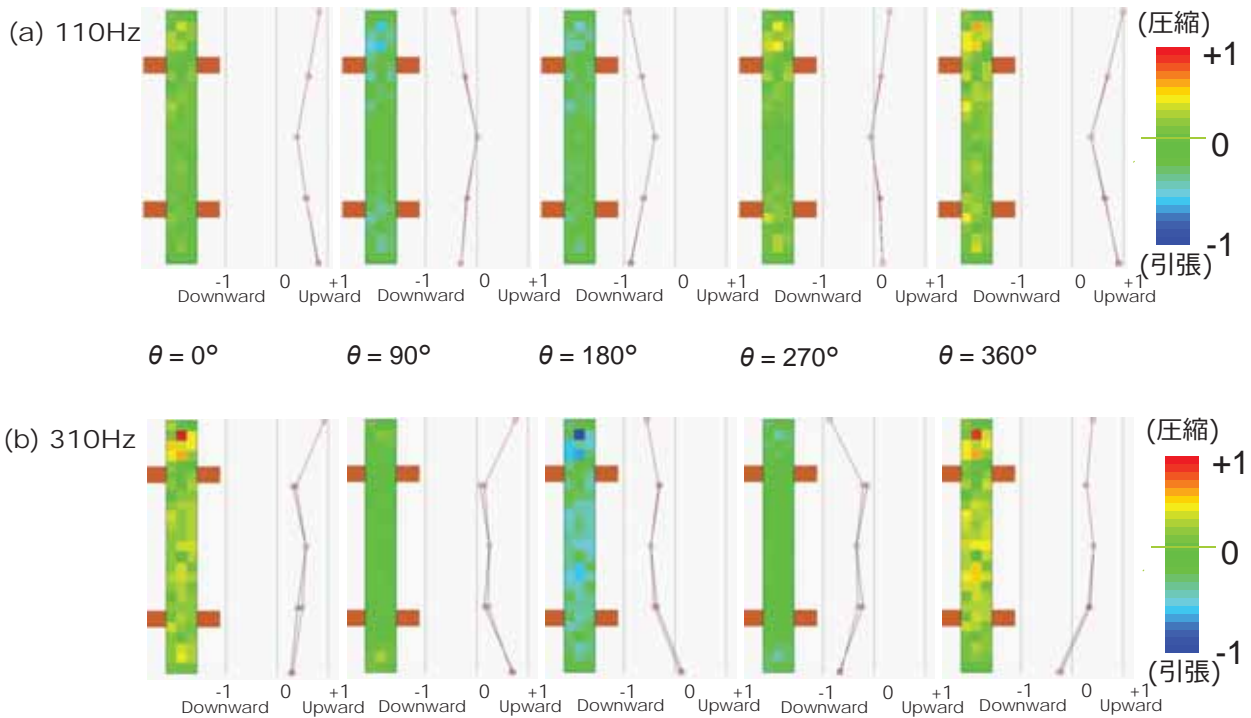
### 弾性振動（伸縮）

$$f_1 = \frac{1}{4L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$



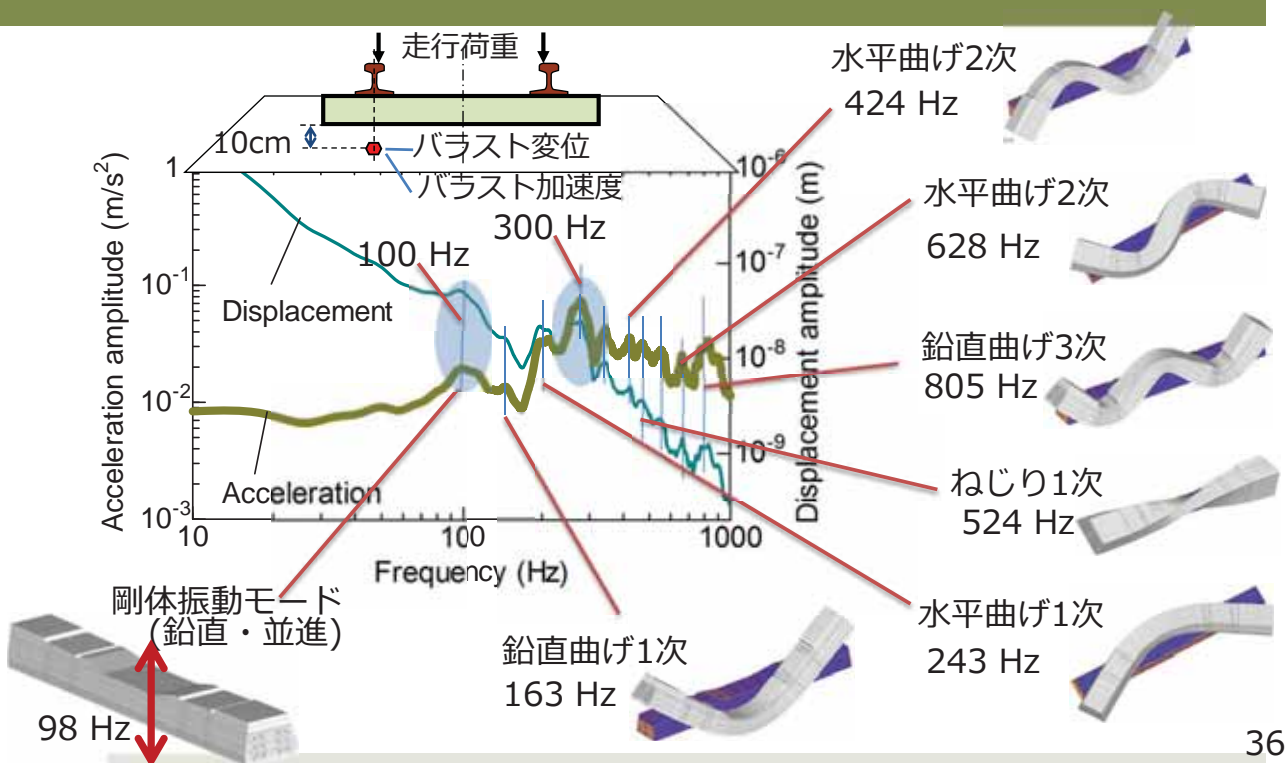
34

## バラストの鉛直方向の振動特性（実測値）



35

## バラストの変位振幅と加速度振幅



36

## 実物大軌道模型による衝撃载荷試験

37

## 落錘衝撃载荷実験装置



38



## 重錘落下試験装置を用いた衝撃载荷実験



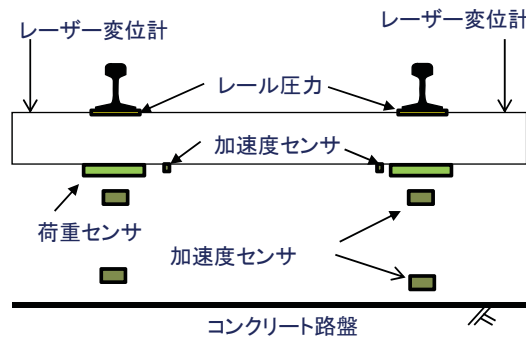
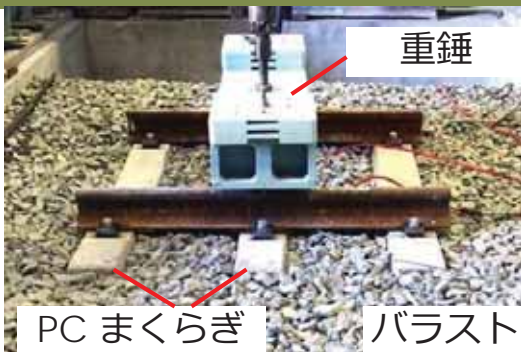
41

## 重錘落下試験装置を用いた衝撃载荷実験

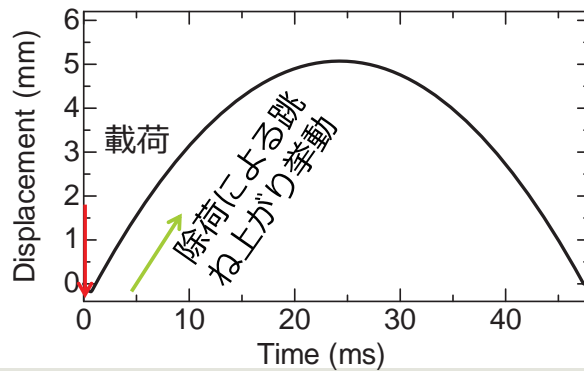
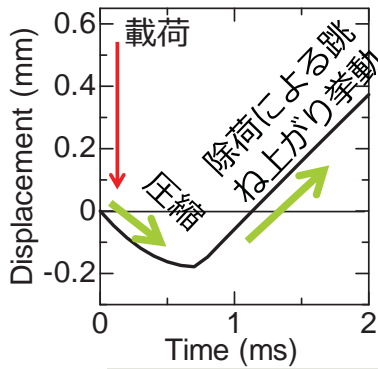


42

## 重錘落下試験装置を用いた衝撃载荷実験



### 衝撃荷重载荷時のまくらぎの鉛直変位 (実験による平均値)



衝撃荷重の平均値  
左右合計 217 kN

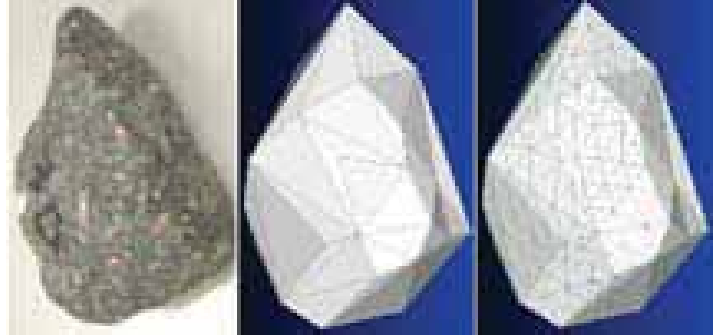
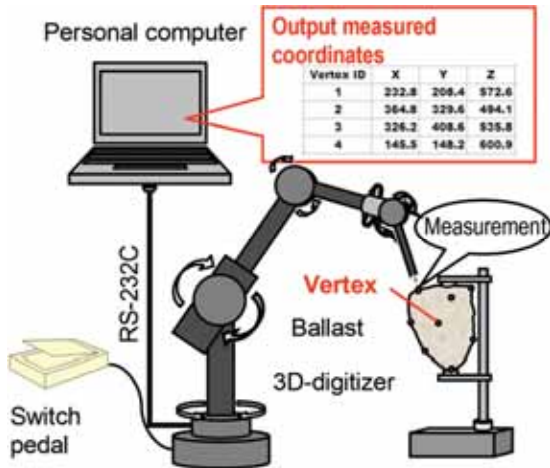
43

## バラスト単体モデルの構築

44

## バラスト単体モデルの作成

バラスト約4000個について  
頂点座標の3次元測定を実施

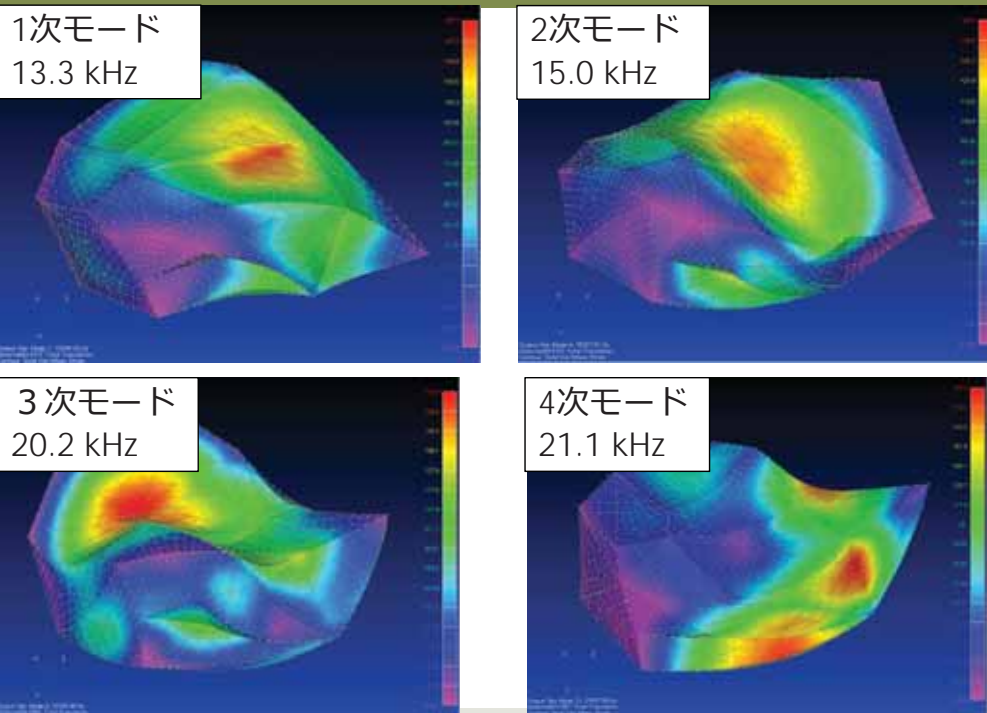


バラスト  
形状測定

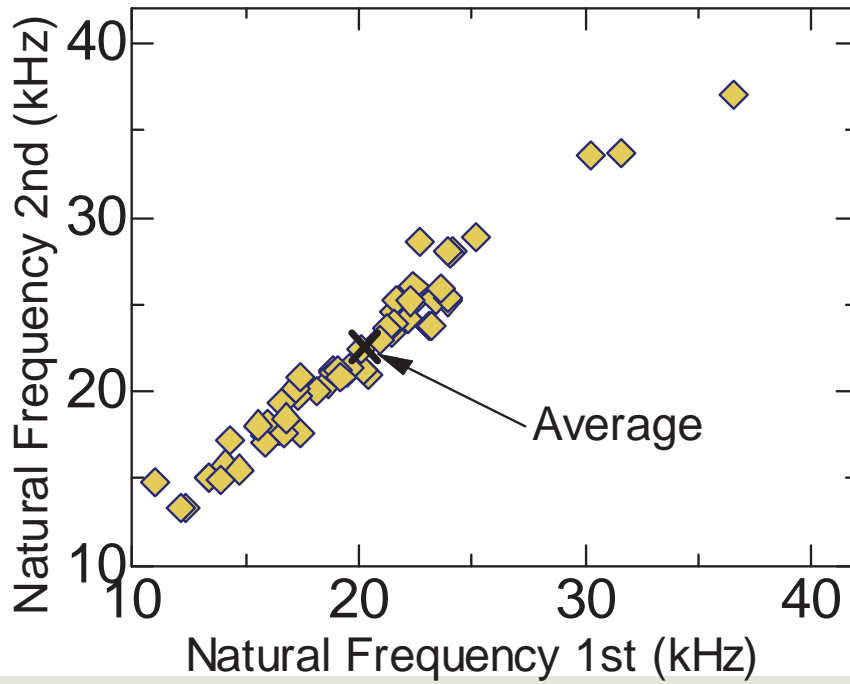
個別要素法  
多面体モデル

有限要素法  
四面体モデル

## バラスト単体モデルの固有値解析例

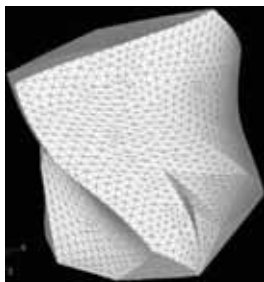


## バラストの単体モデルの固有振動数

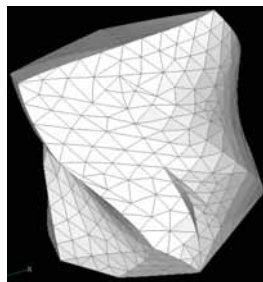


47

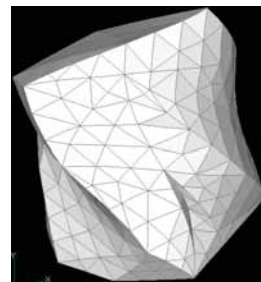
## バラストの単体モデルの固有振動数



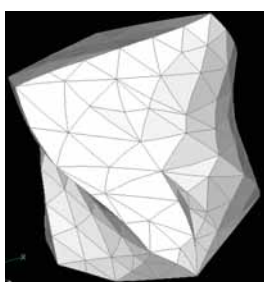
(a) 2 mm メッシュ



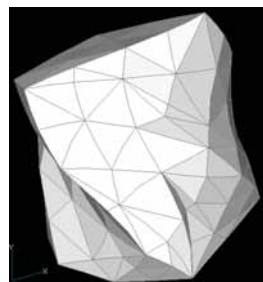
(b) 5 mm メッシュ



(c) 10 mm メッシュ



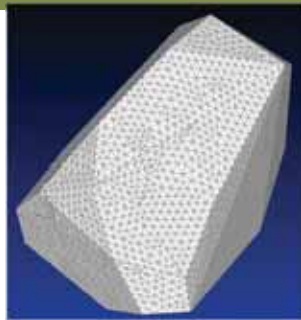
(d) 10 mmメッシュ



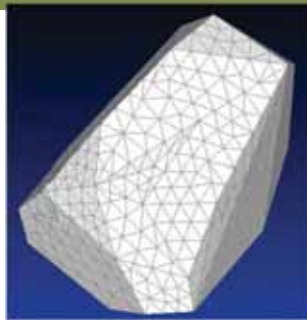
(e) 15 mmメッシュ

48

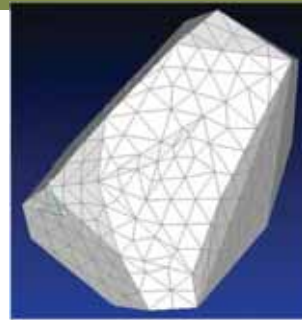
## バラストの単体モデルの固有振動数



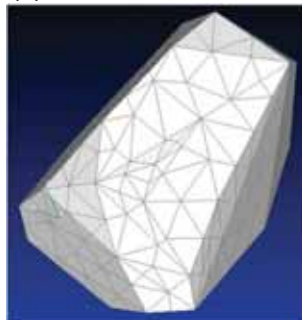
(a) 2 mm メッシュ



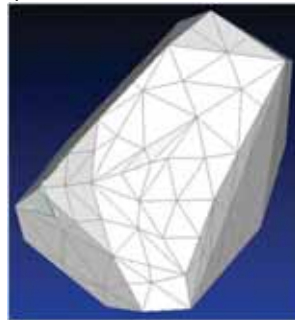
(b) 5 mm メッシュ



(c) 10 mm メッシュ



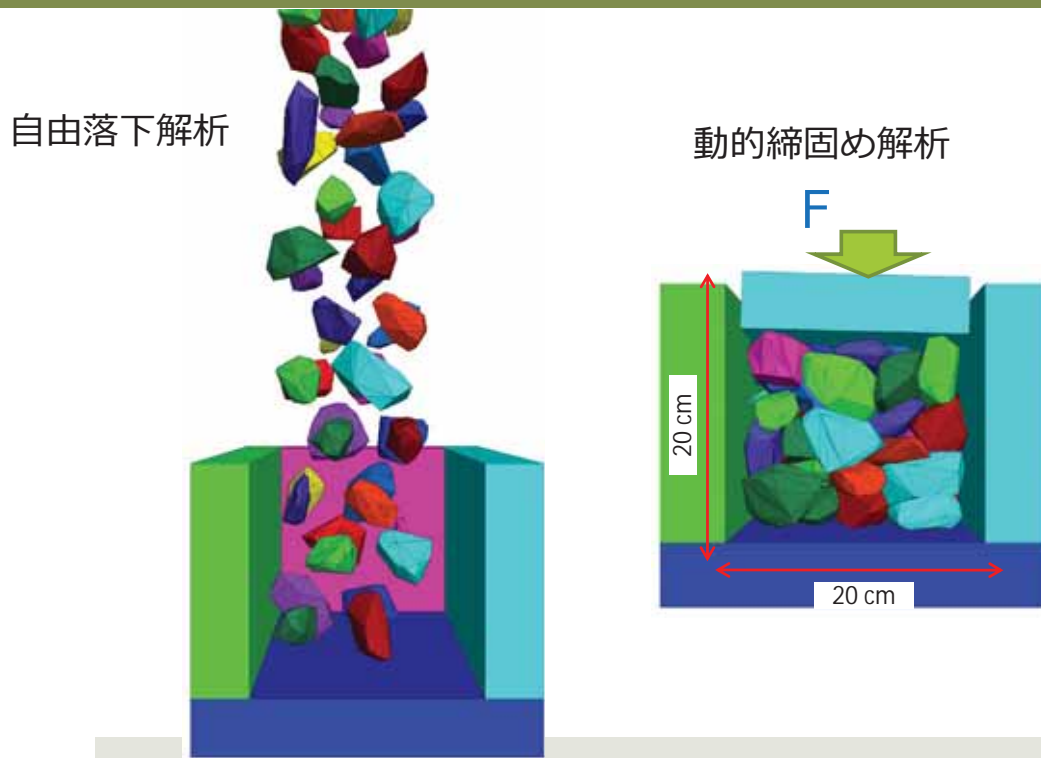
(d) 10 mmメッシュ



(e) 15 mmメッシュ

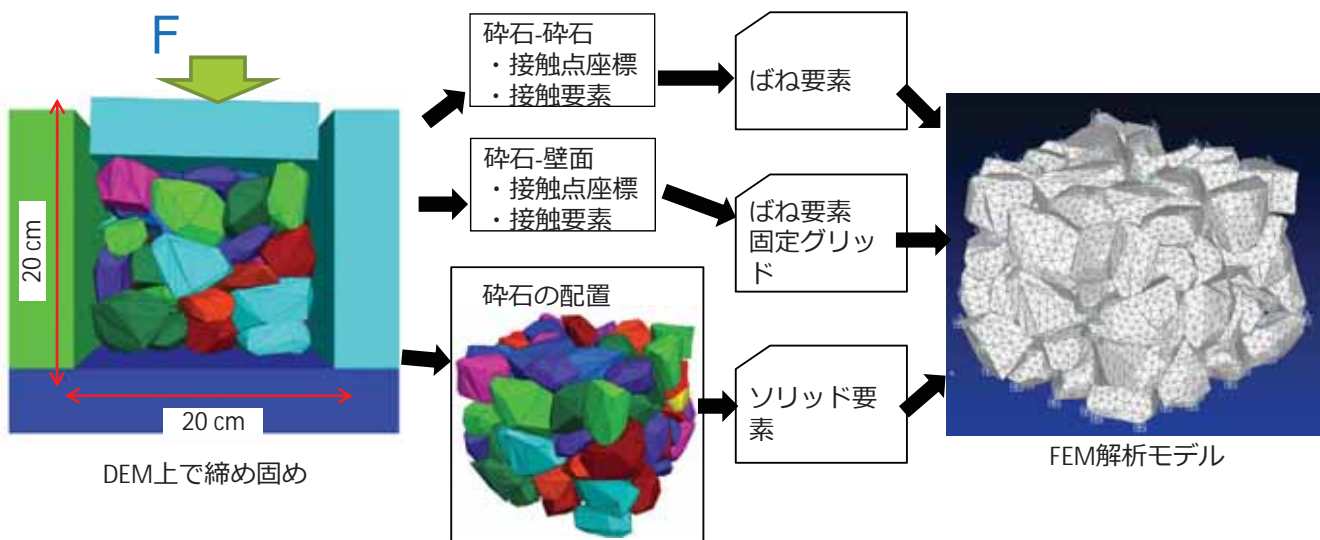
## バラスト集合体ユニットモデルの構築

## DEMによるバラスト多面体モデルの締め固め解析



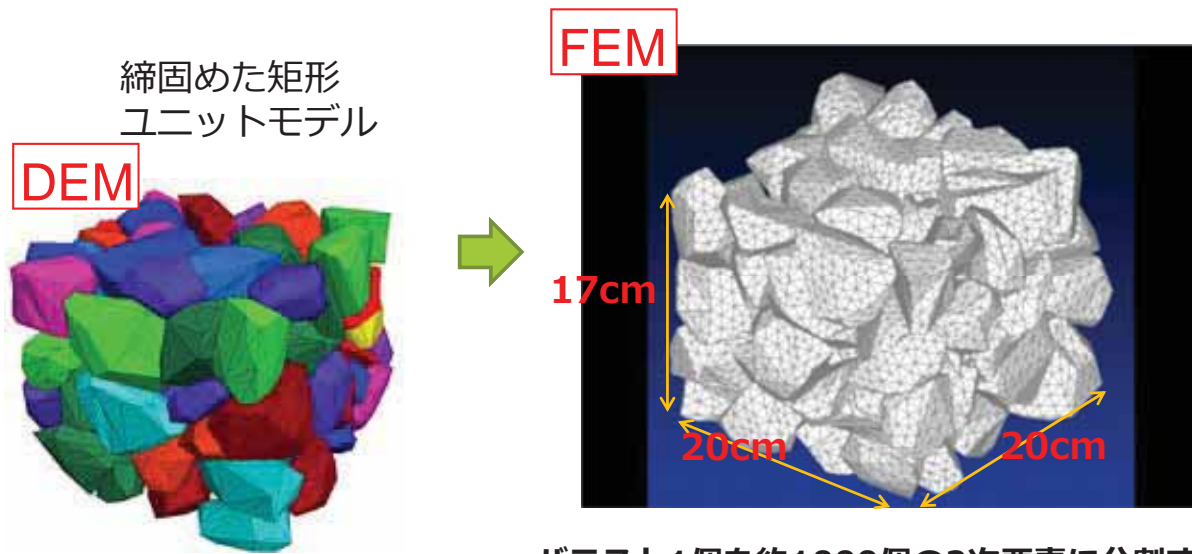
51

## バラスト集合体ユニットモデルの構築



52

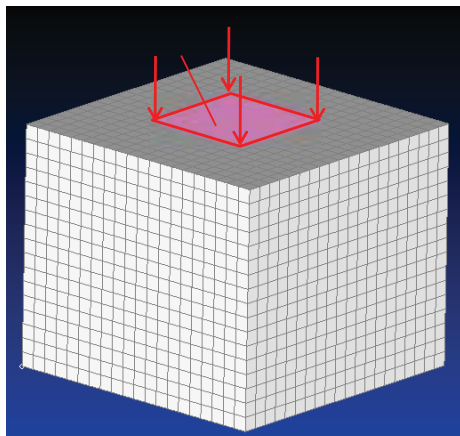
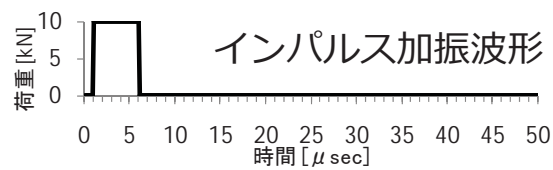
## バラスト集合体ユニットモデルの構築



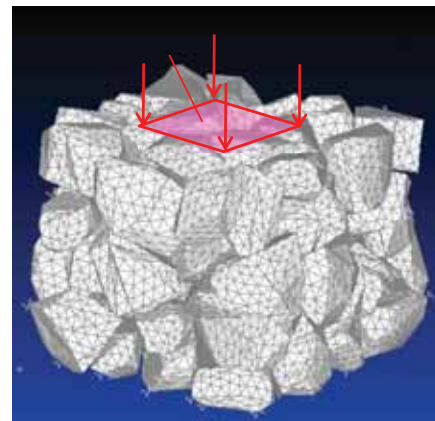
バラスト1個を約1000個の2次要素に分割する  
約9万個の四面体2次要素に変換

53

## バラスト集合体ユニットモデルの構築



(a) インタクトな岩塊モデル



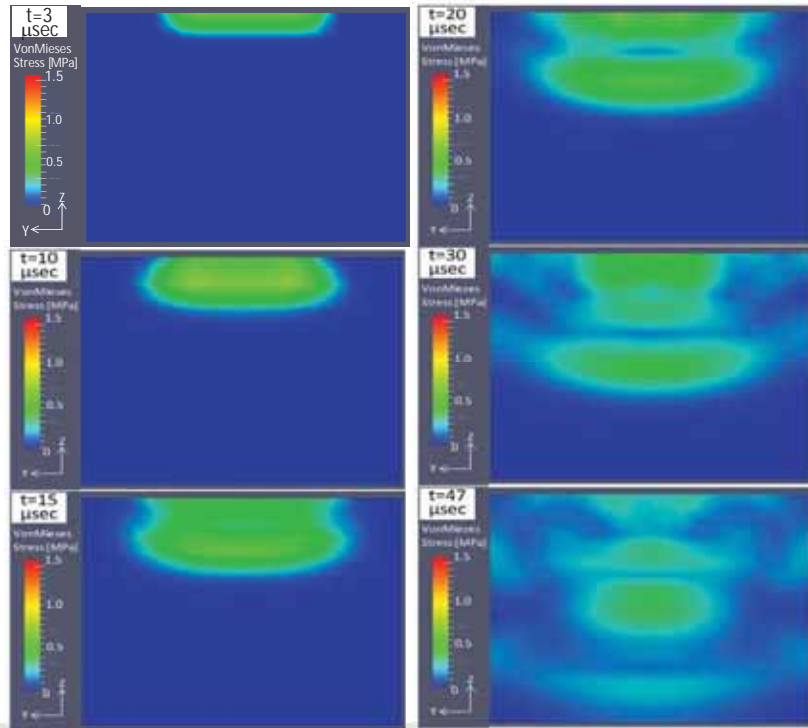
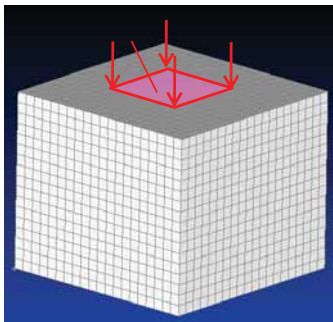
(b) バラスト集合体ユニットモデル

54

## インタクトな岩塊モデル

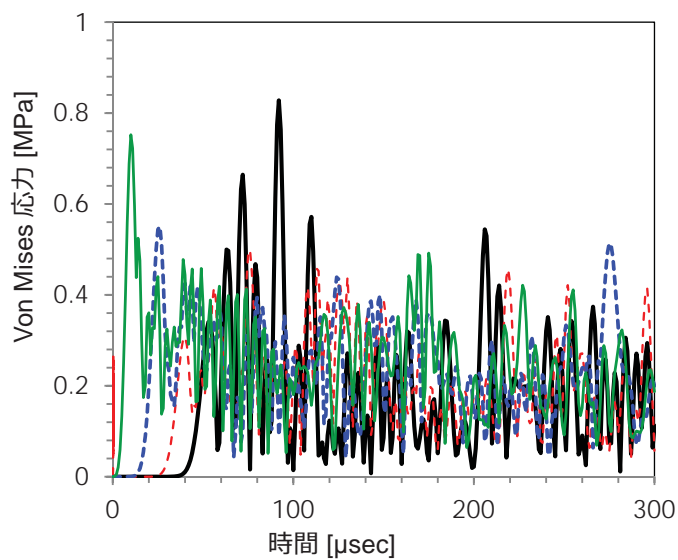


10 kN



55

## インタクトな岩塊モデル



モデル天端からの深さ

— Z=0.00 m

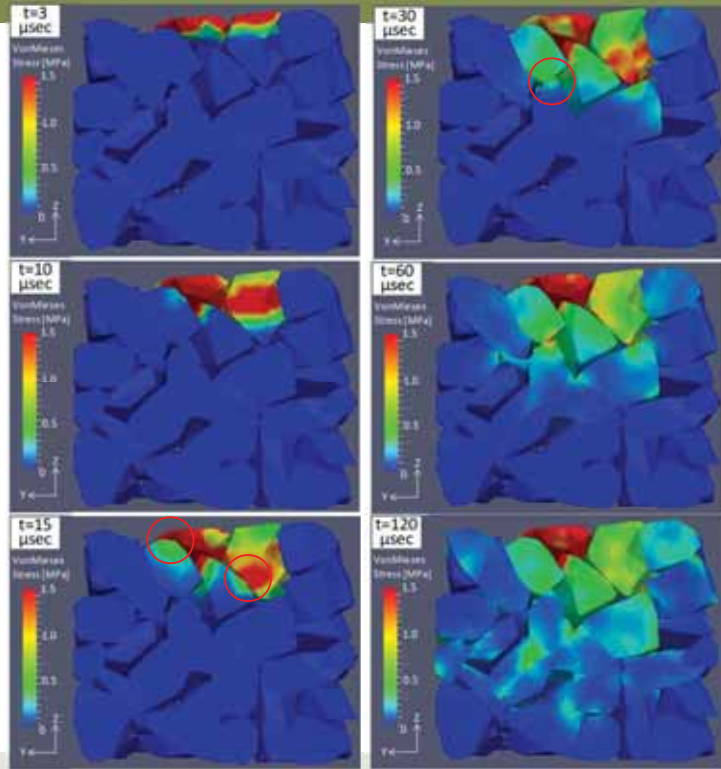
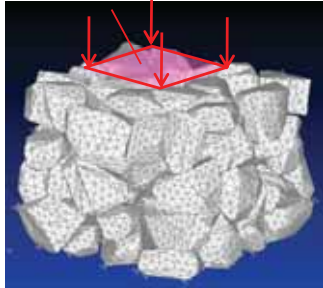
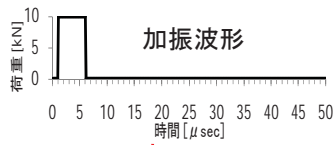
- - - Z=0.05 m

- · - · Z=0.10 m

— Z=0.15 m

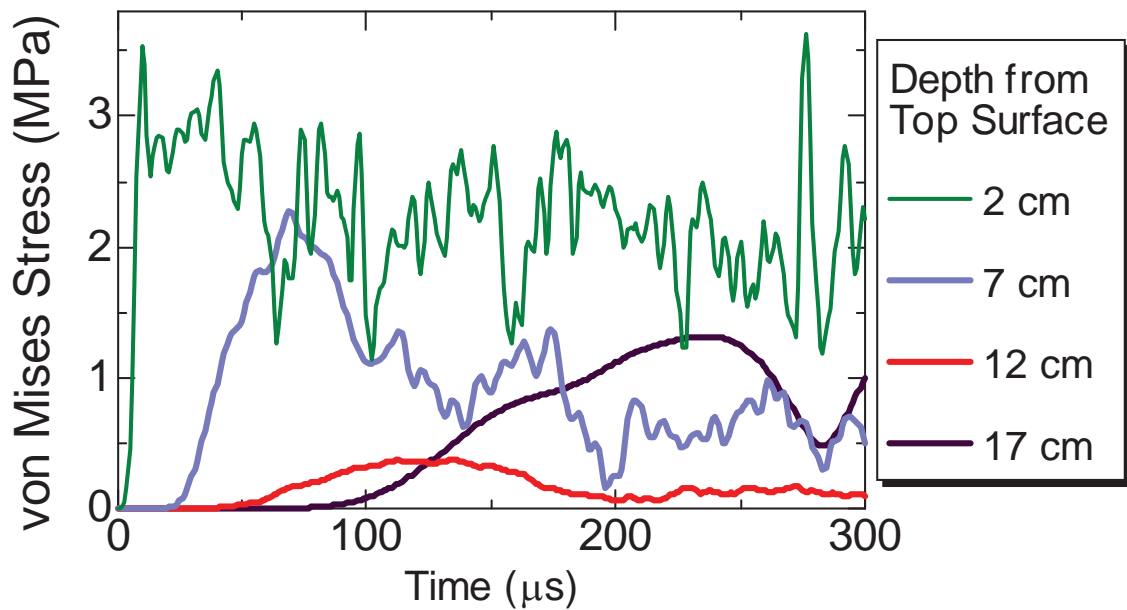
56

## バラスト集合体ユニットモデルの構築



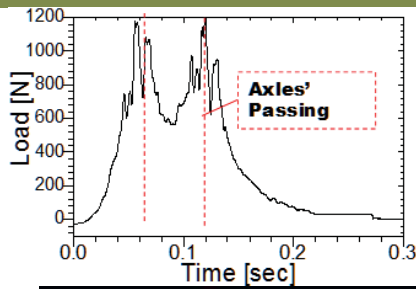
57

## バラスト集合体ユニットモデルの接触点応力

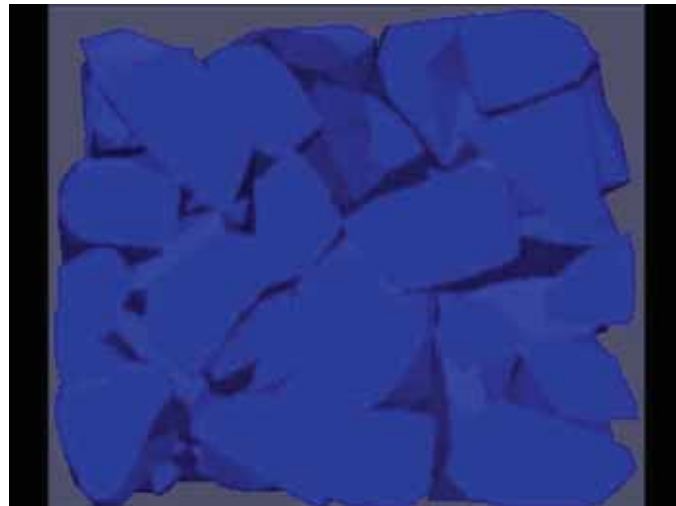
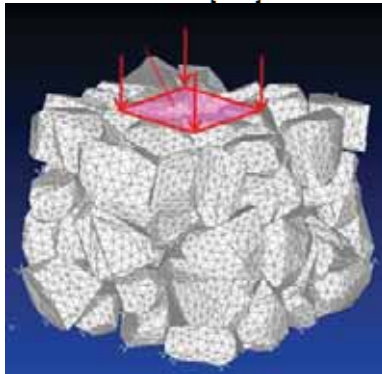


58

## 実測荷重波形を入力した過渡応答解析

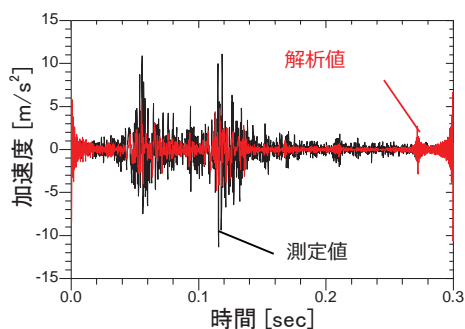
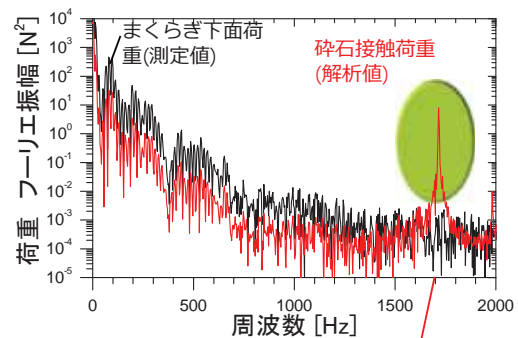
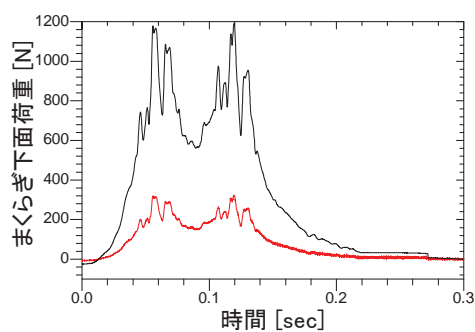


実測荷重: 125km/h  
測定サイズ: 8 cm x 8 cm



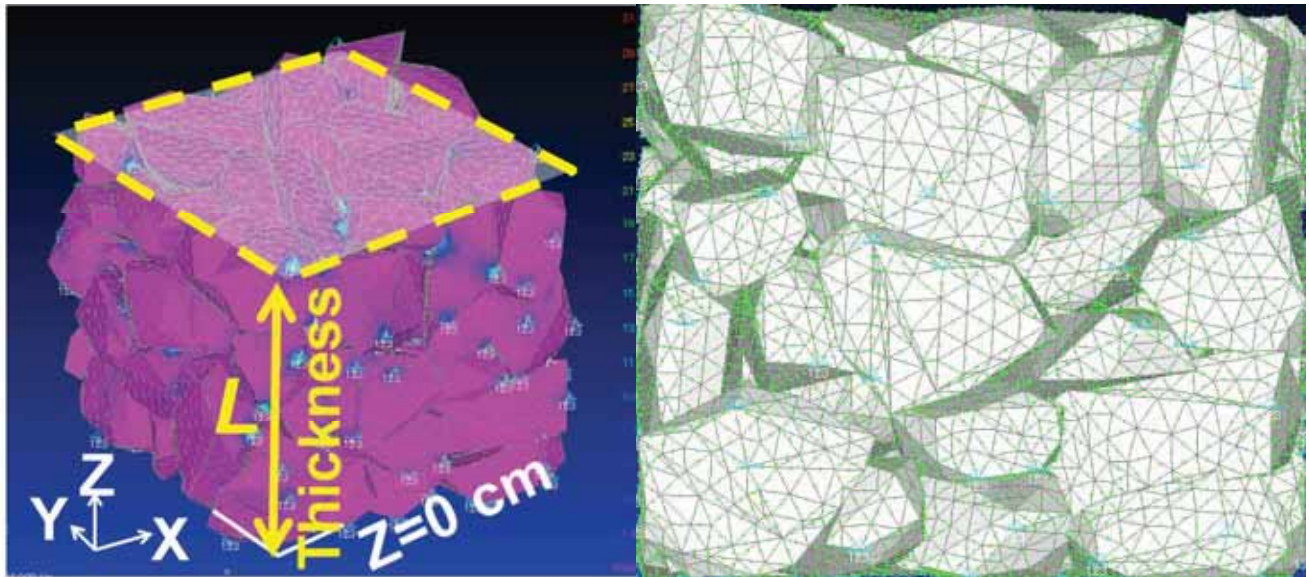
最大応力 43 MPa (入力荷重 1.2 kN, 0.19 MPa).

## 実測荷重波形を入力した過渡応答解析



バラスト集合体ユニットモデルの固有振動モード

## バラスト集合体ユニットモデルの構築



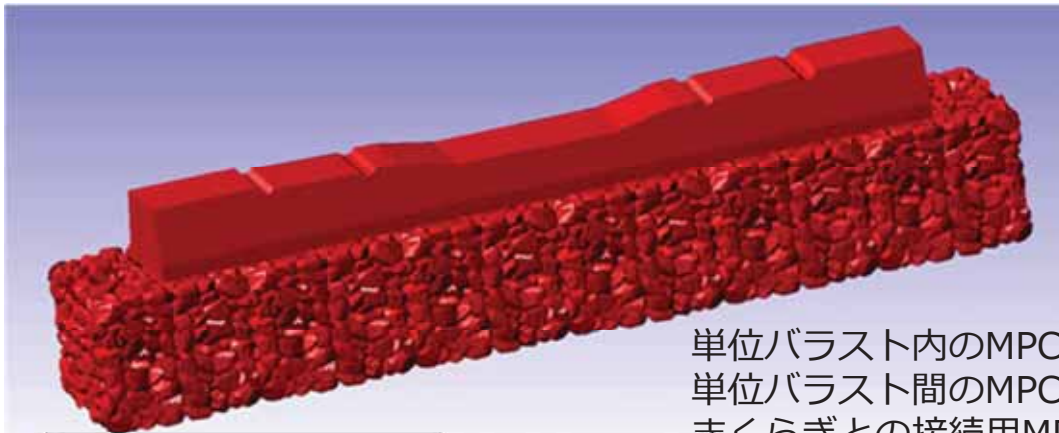
バラスト1個を約1000個の2次要素に分割する  
(約50 kHzまでの固有振動数の再現性)

61

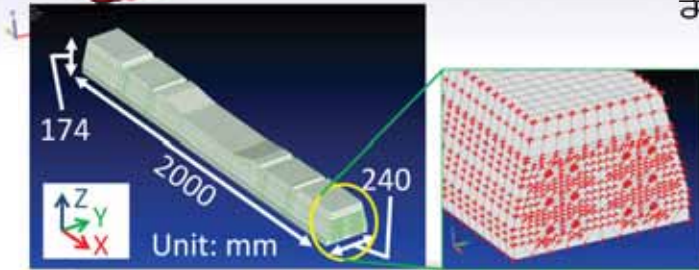
## まくらぎバラスト集合体モデルの構築

62

## まくらぎバラスト集合体モデルの構築

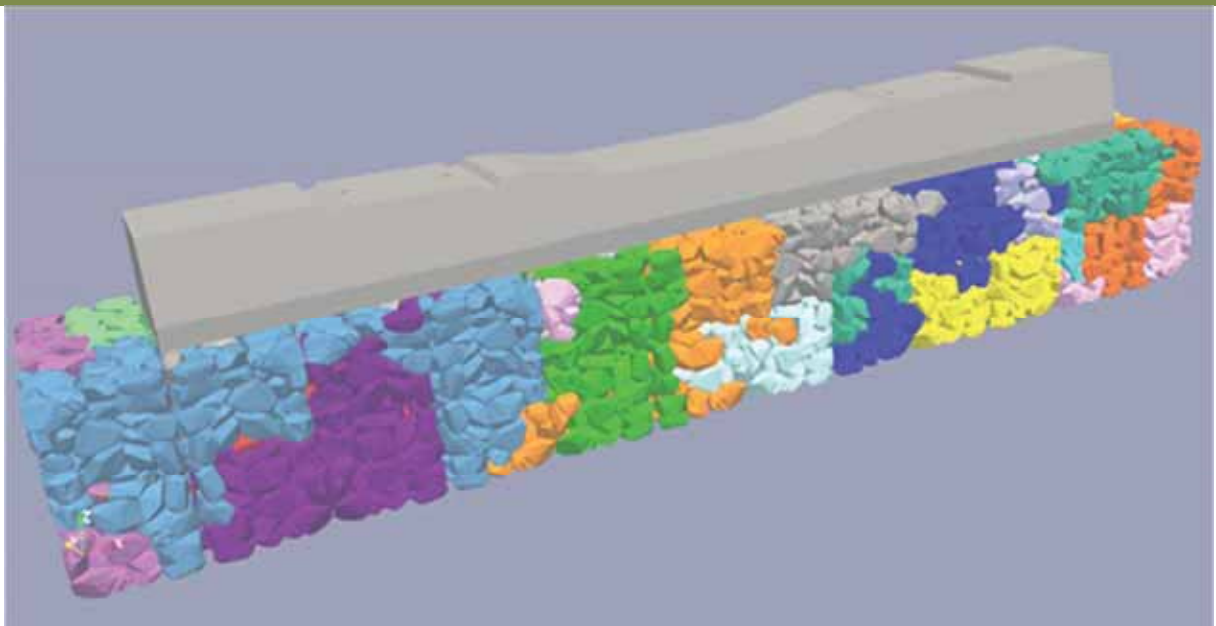


単位バラスト内のMPC 1044  
単位バラスト間のMPC 1656  
まくらぎとの接続用MPC 1740



63

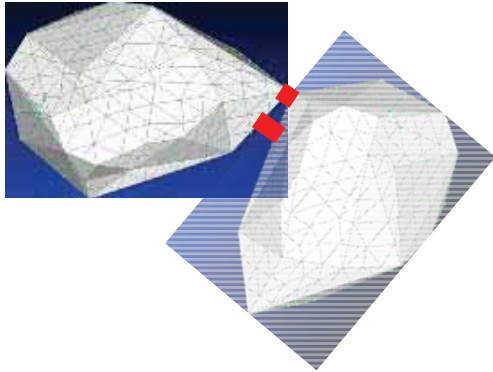
## まくらぎバラスト大規模モデルの領域分割



64

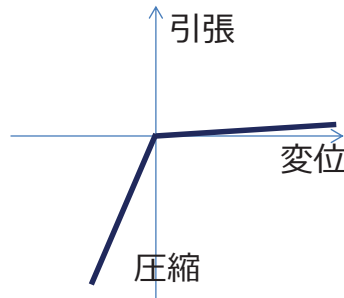
## バラストとまくらぎの接触構造のモデル化

### (1) 共有節点(MPCs)



まくらぎ下面の接触構造がしっかり維持される。粘着力が付加された状態や拘束圧が作用している状態に近い (理想的なバラスト構造)

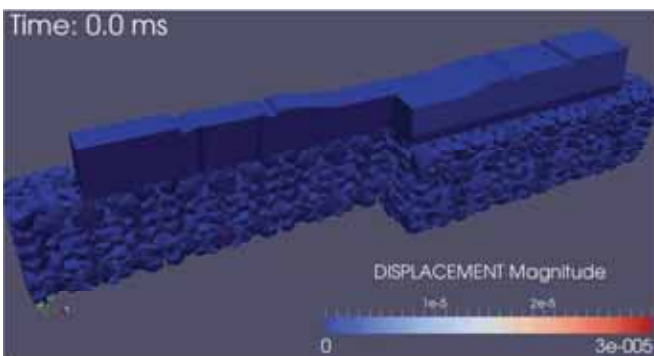
### (2) 非引張りばね



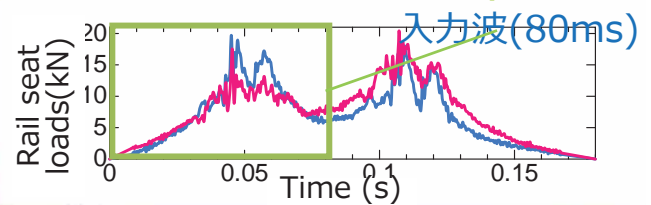
Spring stiffness (GN/m)	Compression	Tension
Ballast - Ballast	30	0.0003
Sleeper - Ballast	10	0.0001

圧縮力のみ伝わる。引張応力は作用しない。(実際の軌道構造に近い)

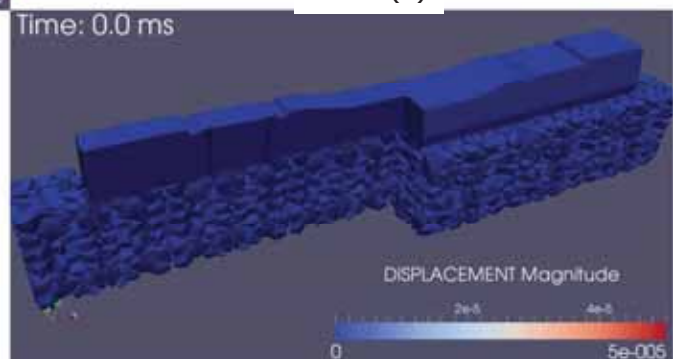
## 実測荷重に対する応答解析



まくらぎ下面がバラスト層と一体化している場合 (共有節点) (理想的なバラスト構造)

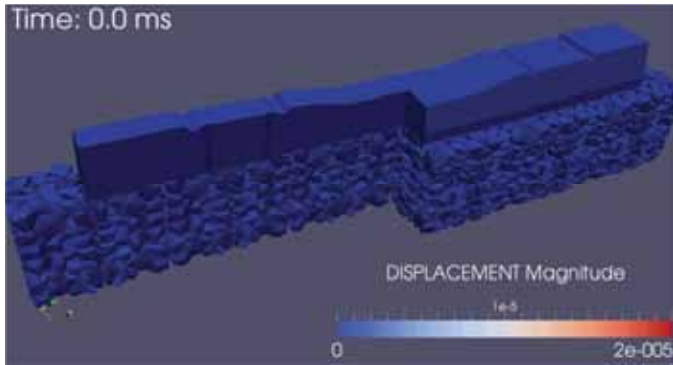


まくらぎ下面に圧縮力が作用するが、引張力が作用しない場合。非引張ばね (実際の構造に近い)





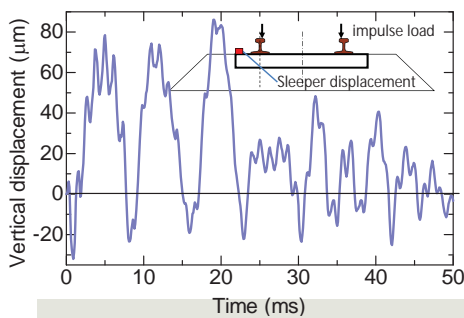
# インパルス加振(100kN) 非引張ばねモデル



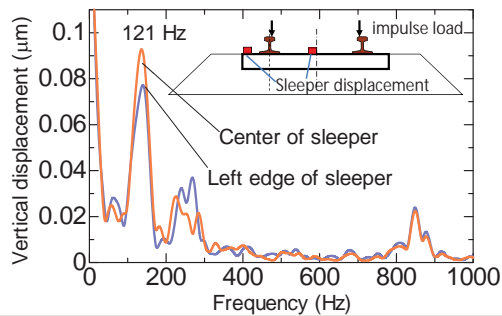
剛体振動が120 Hzにおいて発生した。非引張モデル  
実測値 約100Hz

弾性振動が310 Hzにおいて発生した。共有節点モデル  
実測値 約300Hz

時刻歴変位応答



変位振幅スペクトル

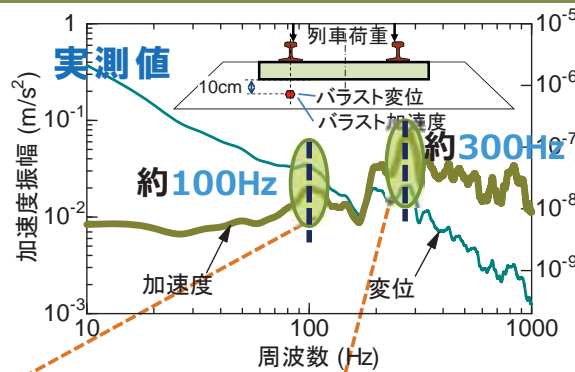
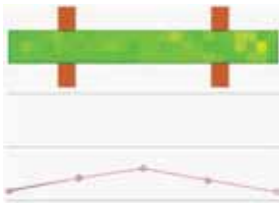


# バラスト・まくらぎ系の固有振動特性

## 剛体振動

実験値  
98Hz

(a) 110Hz 測定値

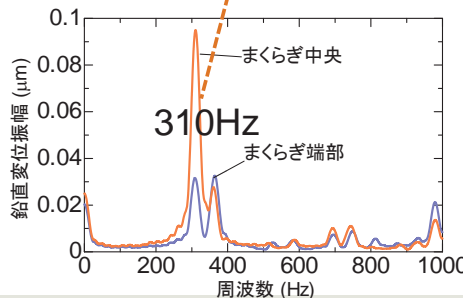
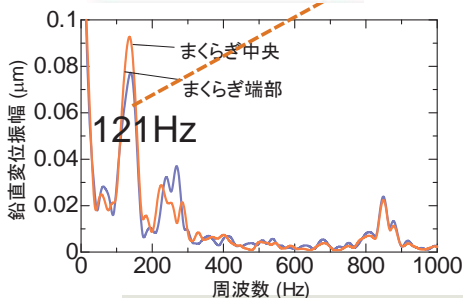


## 弾性振動

(b) 310Hz 測定値



## FrontISTR過渡応答解析結果



まくらぎバラスト系の剛体振動モードが100Hz近傍に、弾性振動モードが300Hz近傍にある。解析値は実測値に概ね符合する。

## 接触力の周波数特性とバラスト層の固有振動

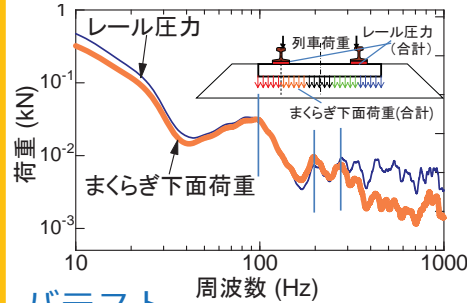
### 車輪レール間の走行荷重

#### 接触力の卓越振動数

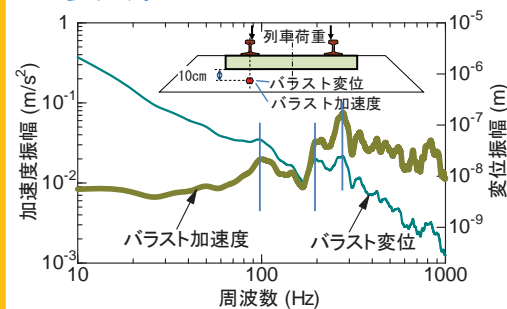
98 Hz  
196 Hz  
314 Hz



### 走行荷重

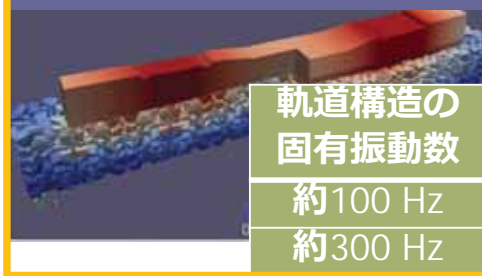


### バラスト



走行荷重の卓越振動数と、バラスト軌道構造の固有振動数がほぼ一致する。共振現象のため振動が減衰しにくくなる可能性がある。

### バラスト軌道の固有振動数



71

## まとめ

- 研究目的と本解析手法の特徴
- 弾塑性動的転がり接触解析プログラムの開発
  - 脈動の原因特定（速度依存成分の特定）
  - 車輪・レール間の接触力（衝撃荷重）の卓越周波数
- バラスト・まくらぎ系の大規模過渡応答解析
  - 剛体振動モードと弾性振動モードの特定
  - 接触力の周波数特性とバラスト層の固有振動の関連性
- 解析モデルの検証と妥当性確認
  - 模型実験（実験モーダル解析），現場測定他

72