

# まくらぎの変形モードに着目した道床への荷重伝播特性

浦川 文寛\* 相川 明\* 名村 明\*

## Load Transmission Characteristic to the Ballast Layer Focused on the Deformation Mode of the Sleeper

Fumihiro URAKAWA Akira AIKAWA Akira NAMURA

In this paper, we report the experimental modal analysis as developed for the 3PR-sleeper and the dynamic response measurement in the existing track in order to clarify the transmission characteristic of a dynamic load to the ballast layer. The result shows that the sleeper vibrates in its normal mode by some frequencies with a superior response of the load at the lower side of a sleeper, in addition, the deformed shape of sleeper's normal mode cause specific load distributions at the lower side of a sleeper.

キーワード：固有モード，有道床軌道，まくらぎ下面荷重，まくらぎ変形，動的応答，荷重伝播特性

### 1. はじめに

有道床軌道の塑性沈下は，まくらぎ下面を介して道床部に動的な荷重が伝播することで促進される。まくらぎ下面に生じる荷重を測定し，道床への荷重伝播特性を明らかにすることは，軌道劣化対策や効率的な保守を行う上で重要となる。まくらぎ下面の動的な荷重は，列車走行によりまくらぎを含めて軌道全体が振動することで生じる。一般に構造物の振動問題を考える上で，その固有モードは重要なデータであり，コンクリートまくらぎは1kHz以下の周波数帯で複数の固有モードを持つことが既往の研究で明らかになっている<sup>1)</sup>。まくらぎは固有振動数付近の周波数で加振されると共振を起こすだけでなく，まくらぎの変形によりまくらぎ下面の荷重は場所的に不均一となり，道床の沈下を促進するものと思われる。

本研究では，まくらぎの固有モードと道床への荷重伝播特性の関係を調べるため，まくらぎの実験モーダル解析を行い，まくらぎの固有モードを特定する。また，実軌道でのインパルスハンマーによる加振試験と列車走行時の動的測定を行い，実軌道にてまくらぎの振動と道床への加振荷重，および道床の応答を測定し，まくらぎの固有モードと比較する。

### 2. まくらぎ単体の固有モードの測定

構造物は形状，材質，支持条件が定まると，特定の周波数（固有振動数）において固有の状態で振動する性質

があり，これを固有モードと呼ぶ。固有モードは構造物が持つ自由度と同じ数だけ存在し，構造物の任意の変形形状が固有モードの重ね合わせで表わされる。

振動試験で測定した加振力と応答の実験データを分析することによって，重なり合った固有モードを単一のモードに分離するのが実験モーダル解析である。ここでは，コンクリートまくらぎ（3PR）の固有モードを測定するため，実験モーダル解析を実施した。実験内容は図1に示すとおりで，まくらぎ端部1点のインパルス加振に対するまくらぎ上22点のアクセラランス（加速度/加振力）を測定するものである。なお，まくらぎの境界条件を自由支持にするため，厚手のウレタンマットで支持した。

測定データに対し，モーダル解析ソフトウェアME'scopeVES（Vibrant Technology社）を用いてモード解析を行い，1kHz以下で表1，図2に示すような6つの固有モードを特定した。実軌道のまくらぎはこれら固有モードの影響を受け，特定した固有振動数付近で応答がピークとなり，かつ対応するモード形状で振動すると考えられる。

ただし，Remennikovら<sup>1)</sup>は，まくらぎを道床で支持した状態では，境界を自由支持とした状態と比べ，固有振動数が最大で40Hz程度増加することを示している。実軌道では，道床の支持に加え，レールや締結装置の剛性や質量が加わるため，ここで特定した固有振動数と，応答がピークとなる周波数は若干異なることが予想される。また，実軌道では道床の支持剛性により，まくらぎの6自由度分の剛体振動の固有モードが，上下1次曲げモードより低い周波数に存在すると思われる。

\* 鉄道力学研究部（軌道力学）

特集：鉄道力学

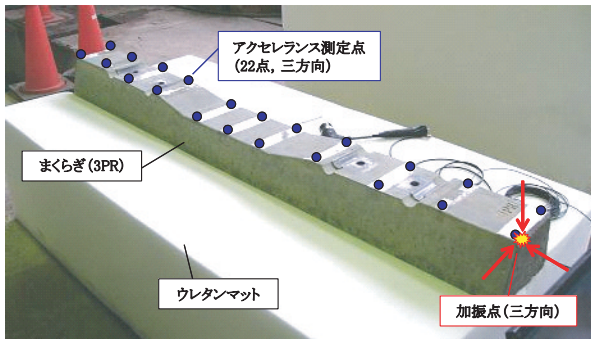


図1 まくらぎのインパルス加振試験

表1 まくらぎの固有モード測定結果

No.	モード形状	固有振動数 [Hz]
a	上下1次曲げ	148
b	前後1次曲げ	241
c	上下2次曲げ	435
d	1次ねじり	538
e	前後2次曲げ	630
f	上下3次曲げ	825

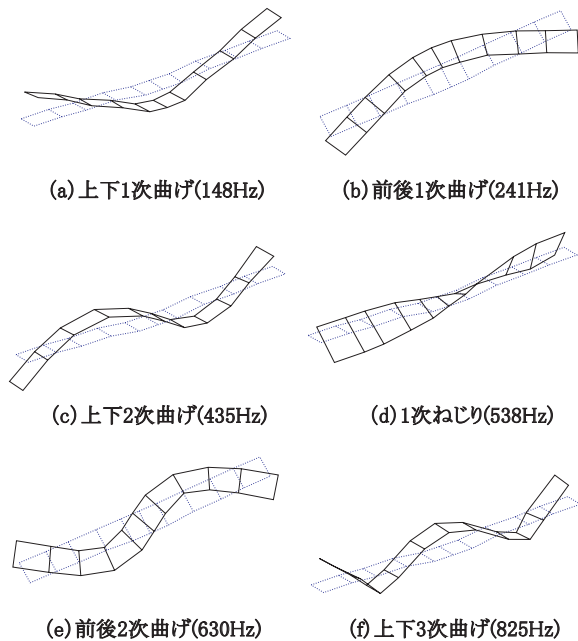


図2 3PR まくらぎのモード形状

3. 実軌道のまくらぎ振動特性

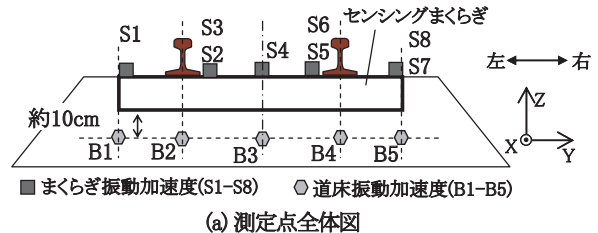
実軌道にてまくらぎの振動と道床への加振荷重、および道床の応答の関係を調べるため、インパルスハンマーによる加振試験を行った。

3.1 試験条件

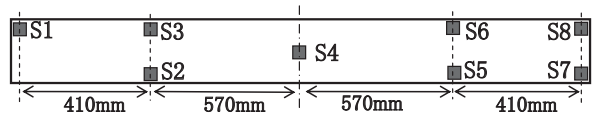
測定項目はまくらぎ振動加速度、まくらぎ下面荷重、道床振動加速度で、それぞれ鉛直方向の応答を測定した。測定箇所は図3に示す通りで、まくらぎ振動加速度

は、上下3次曲げモードまで捉えるため、まくらぎ上の8点を測定した(図3(b))。まくらぎ下面荷重の測定は、筆者らが開発したセンシングまくらぎ<sup>2)</sup>を用いて行った。ここで、センシングまくらぎとは、まくらぎ下面に全面に75個(25個×3列)の荷重センサを貼り付け、まくらぎ下面荷重の分布を測定するものである。まくらぎ下面荷重分布の場所的な平均値を波形で比較するため、図4のようにまくらぎを長手方向に5分割し、各領域のまくらぎ下面荷重(15個のセンサの測定値)の合計値をまくらぎ左側よりそれぞれSM1, SM2, SM3, SM4, SM5として整理した。

加振条件としては図4のように、左側レール頭部を、Z(鉛直)方向とY(こ返り)方向に20kN程度の力で5回加振して伝達関数(応答/加振力)を測定し、5回の平均値を各測定点の測定値とした。



(a) 測定点全体図



(b) まくらぎ振動加速度の測定点

図3 測定点配置

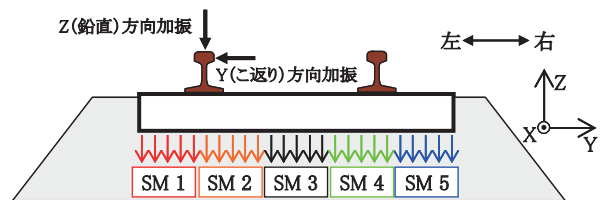
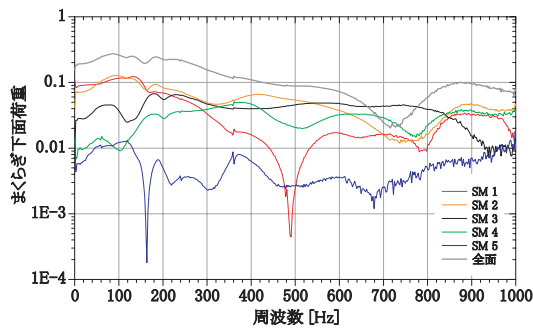


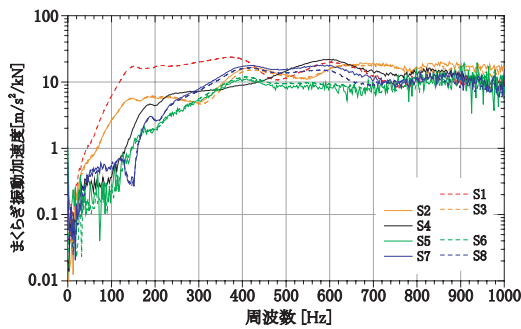
図4 加振方向及び荷重測定領域

3.2 伝達関数測定結果

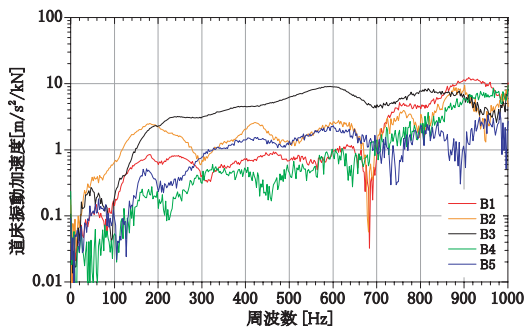
SM1~SM5およびまくらぎ下面全面の荷重合計値の伝達関数を、Z方向加振時について図5(a)に、Y方向加振時について図6(b)に示す。また、まくらぎ振動加速度の伝達関数を、Z方向加振時について図5(b)に、Y方向加振時について図6(b)に、道床振動加速度の伝達関数を、Z方向加振について図5(c)に、Y方向加振について図6(c)それぞれ示す。図5(a)、図6(a)より、まくらぎ下面荷重の伝達関数は、全体として100~200Hzの間で最も大きく、周波数が増加するにつれて減少し、700Hz付近で再び増加し始める。まくらぎ振動加速度は、図5(b)、図6(b)より、200Hz付近までは伝達関数が増加し、その後はほぼ横ばいである。道床振動加速度は、図5(c)、図6(c)より、200Hz付近まで伝達関数が急激に増加し、その後も緩やかに増加する。



(a)まくらぎ下面荷重



(b)まくらぎ振動加速度



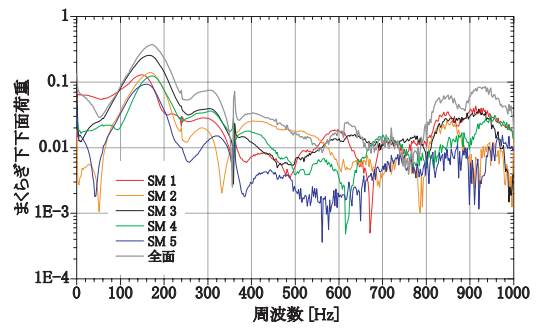
(c)道床振動加速度

図5 Z方向加振時の伝達関数

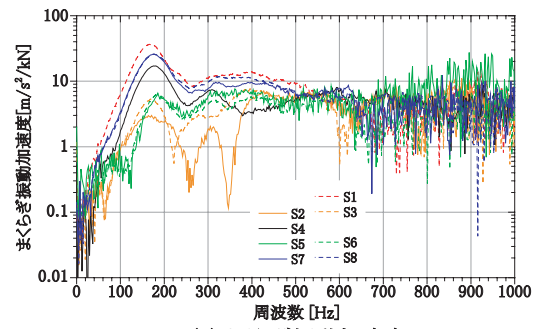
各測定値がピークとなる周波数を比較すると、Z方向加振とY方向加振の両者とも、180Hz、400Hz、600Hz、860Hz付近でまくらぎ下面荷重、まくらぎ振動加速度、道床振動加速度がピークとなる。80～100Hzでは、Z方向加振時のまくらぎ下面荷重でピークが見られるものの、まくらぎ振動加速度、道床振動加速度の伝達関数は小さい。300Hz付近でY方向加振時のまくらぎ下面荷重にピークがあり、まくらぎ振動加速度とまくらぎ両端下の道床振動加速度 (B1, B5) で小さなピークを示す。

### 3.3 まくらぎの固有モードとの比較

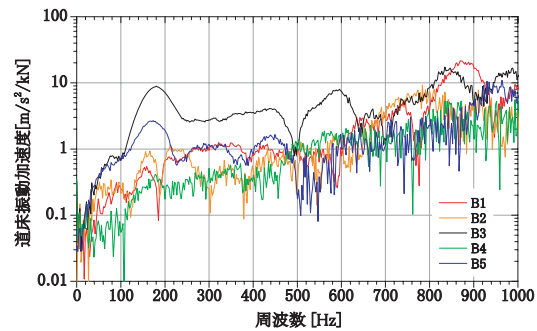
まくらぎ下面荷重、まくらぎ振動加速度、道床振動加速度の伝達関数には、1kHz以下の周波数帯域でいくつかピークがあり、ピークとなる周波数は三者でほぼ同じであった。伝達関数がピークとなる周波数付近に、まくらぎの固有モードが存在するものと思われる。ここでは、伝達関数のピークがどの固有モードによるものかを調べるため、2章で特定したまくらぎの固有モードと、実



(a)まくらぎ下面荷重



(b)まくらぎ振動加速度



(c)道床振動加速度

図6 Y方向加振時の伝達関数

軌道での加振試験におけるまくらぎの応答を比較する。

図7 (a) から (f) は、まくらぎ下面荷重がピークとなる周波数における、Z方向加振時のまくらぎ下面荷重の、伝達関数の分布とまくらぎの変形形状を描写した図である。まくらぎ変形については、S1～S8の加速度を周波数領域で変位に変換し、振幅と位相差 (加振力からの) を与えて時刻歴データに直し、 $t=0$ 、 $t=T/4$ 、 $t=T/2$  ( $T$ : 周期) での値をプロットした。この際、振動モードが見えやすいよう、 $t=0$ の時刻を周波数毎に調整した。まくらぎ下面荷重については、各センサに対してまくらぎ変形と同様に振幅と位相差 (加振力からの) を与えて算出した時刻歴の荷重を、センサ毎に色で描写したものである。なお、荷重と変位の値は、周波数毎に大きく異なるため、周波数毎に各々レンジを調整している。Y方向加振時の同様の図を、図8 (a) から (f) に示す。

80Hzでは、まくらぎ下面荷重の伝達関数がピークを示すZ方向加振時で、加振点側のみ大きく振動する形状が見られるが (図7 (a))、この周波数近傍ではまくらぎが変形を伴うような固有モードは存在しない。また、荷重の伝達関数

特集：鉄道力学

がピークとなるのはZ方向加振のみであることから、まくらぎが道床で支持されることにより、その上下の支持剛性により生じた上下剛体モード、あるいは剛体回転モード（ピッチング）の影響を受け、ピークが生じたものと思われる。

180HzではY方向加振時のまくらぎ下面荷重の伝達関数で鋭いピークを示す（図6（b））。その際のまくらぎの変形形状から、この周波数でのまくらぎ下面荷重の伝達

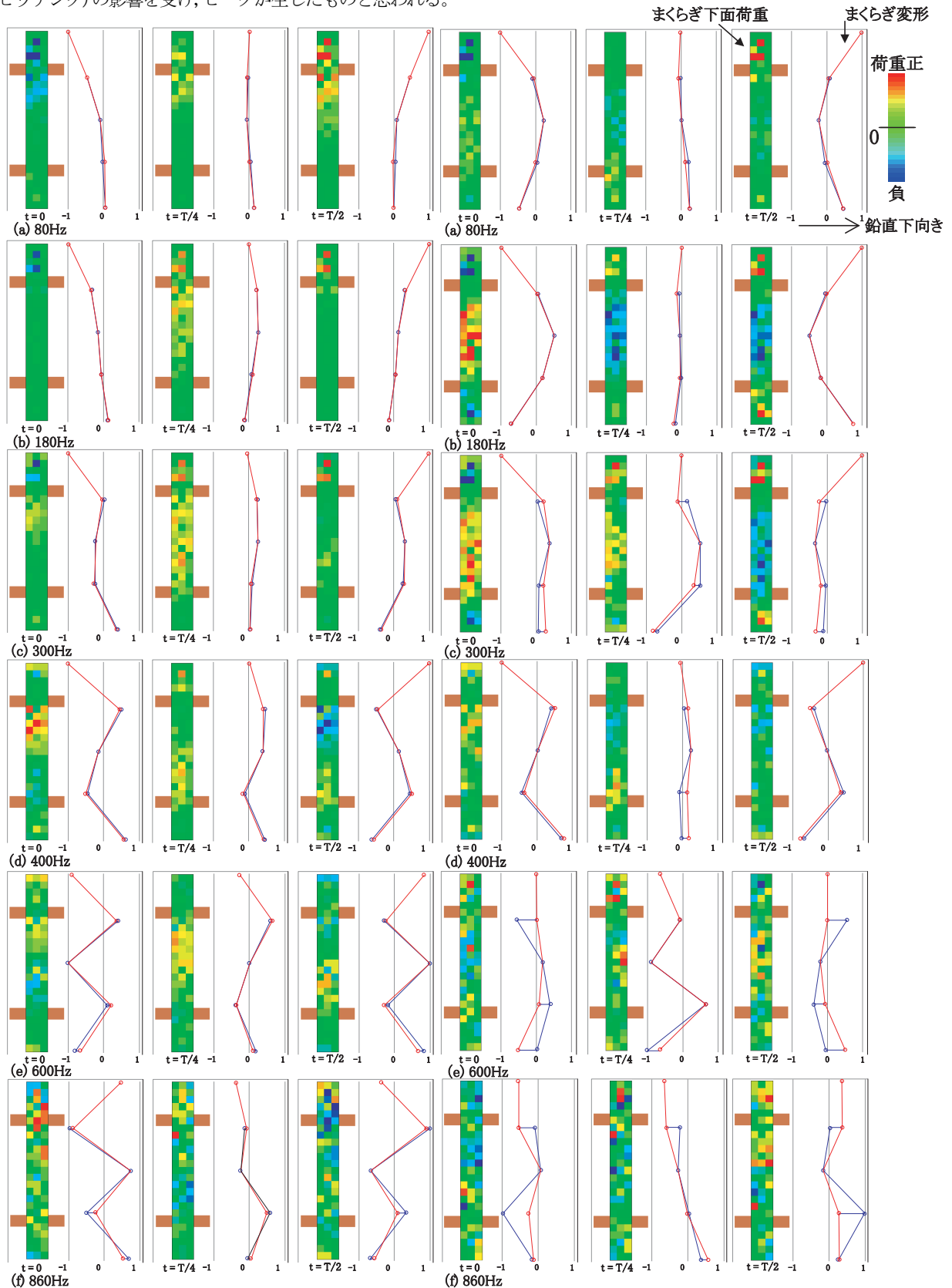


図7 まくらぎ下面荷重と変形形状（Z方向加振）

図8 まくらぎ下面荷重と変形形状（Y方向加振）

関数のピークは、上下1次曲げ振動モードに起因している可能性が高い。ピークとなる周波数がまくらぎ単体の固有振動数148Hzに比べて高いのは、道床による支持剛性が加わったためと考えられる。まくらぎ下面荷重もまくらぎのモードに対応して中央と両端の荷重が大きく、中央と両端で位相が180°ずれている。

300Hzでは、表1よりこの周波数帯近傍には上下振動に関わる固有モードはなく、まくらぎの変形形状からも特徴的な形状は見られない。ここでの振動は、レール等、まくらぎ以外の軌道部材のモードによるものと思われる。

400Hz近傍の435Hzには、まくらぎ単体の固有モードとして上下2次曲げがある。図7(d)、図8(d)のまくらぎ変形を見ると左右レール付近の変形が大きく、上下2次曲げモードで振動しているものと思われる。また、まくらぎ下面荷重についても、この周波数では左右レール付近の荷重(図5(a)、図6(a)のSM2, SM4)が他の領域より大きい。

600Hz近傍で上下振動に関わる固有モードには1次ねじりモード(538Hz)があり、Y方向加振時のまくらぎ変形モードには、前後で位相がずれるようなねじりの振動が見られる(図8(e))。また、Z方向加振より、上下2次曲げ、3次曲げの形状も見られることから、これらのモードの影響も強く受けていると思われる。

860Hzでは、Z方向加振時のまくらぎの変形形状(図7(f))と、近傍の固有モード(825Hz)より、上下3次曲げモードで振動しているものと考えられる。

#### 4. 列車走行時の動的応答測定

前節のインパルスハンマー試験と同じ軌道、測定項目に対し、列車走行時の動的な応答を測定した。列車の走行速度は125km/hであった。

##### 4.1 周波数応答測定結果

まくらぎ下面荷重、まくらぎ振動加速度、道床振動加速度のフーリエ振幅スペクトルをそれぞれ図9(a), (b), (c)に示す。この値は、1列車が通過する6.55秒間(65536点)の測定データに対してフーリエ解析を行い、帯域幅20HzのParzenウィンドウで平滑化した値である。図9(a)より、まくらぎ下面荷重は全体として、周波数ゼロ付近から、周波数の増加とともに急激に減少し、45 Hz付近でディップとなり、100 Hzまで緩やかに増加する。100 Hzでピークとなった後、再び150 Hzまで急激に減少し、その後は、200Hz, 280Hz, 340Hz, 430Hz, 550Hz, 670Hzでピークとなり、周波数の増加とともに荷重が減少していく。700Hz付近で最小となった後は再び荷重が増加し、900Hz付近でピークとなる。まくらぎ振動加速度と道床振動加速度は、概ねまくらぎ下面荷重がピークとなる周波数付近ではフーリエ振幅がピークを示す(図9(b), (c))。

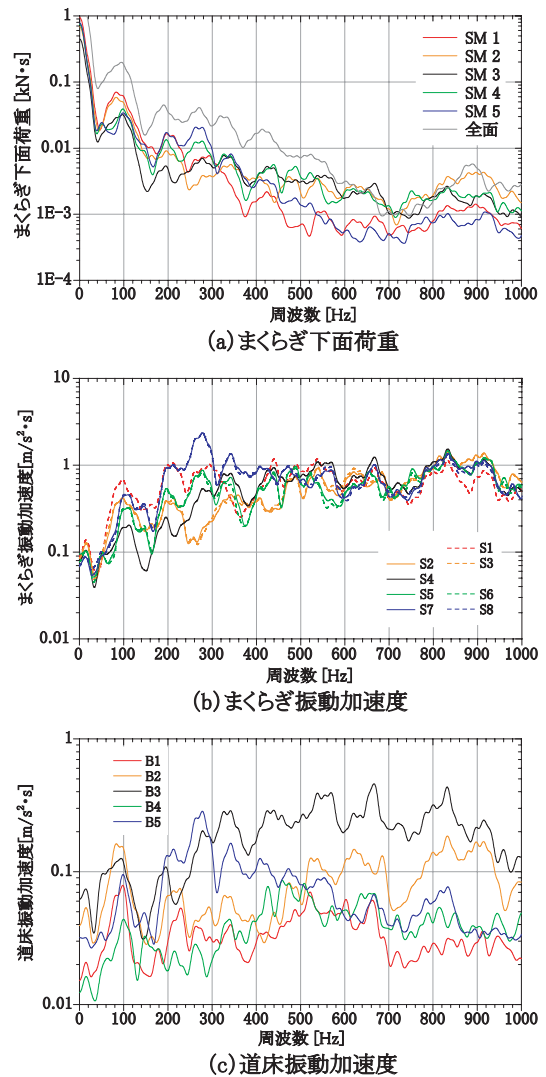


図9 列車走行時のフーリエ振幅スペクトル

##### 4.2 まくらぎ変形形状とまくらぎ下面荷重の分布

図10(a)から(h)に、まくらぎ下面荷重のスペクトルがピークとなる周波数でのまくらぎ下面荷重分布、まくらぎの変形形状の図を示す。ここでは、まくらぎ下面荷重とまくらぎ振動加速度の測定データに対し、前節で述べたフーリエ解析、平滑化処理を行って周波数領域での値に変換した後、振動の振幅にフーリエ振幅、位相にS5からの位相差を与えて時刻歴データに直し、 $t=0$ ,  $t=T/4$ ,  $t=T/2$  ( $T$ : 周期)での値を周波数毎にプロットした。

100Hzでは、まくらぎ両端が同位相で大きく振動し、中心の振幅は小さく、上下1次曲げに近い形で振動している(図10(a))。ただし、実軌道でのインパルスハンマー試験より、上下1次曲げモードは180Hz付近に現れていることから、ここでの荷重のピークは、同試験において80Hz付近で得られた剛体モードによるものと思われる。200Hzでは両端の振幅が大きく、互いに90°位相がずれた状態で、変形を伴って振動する(図10(b))。280Hzでは、片側のみが大きく振動する(図10(c))。

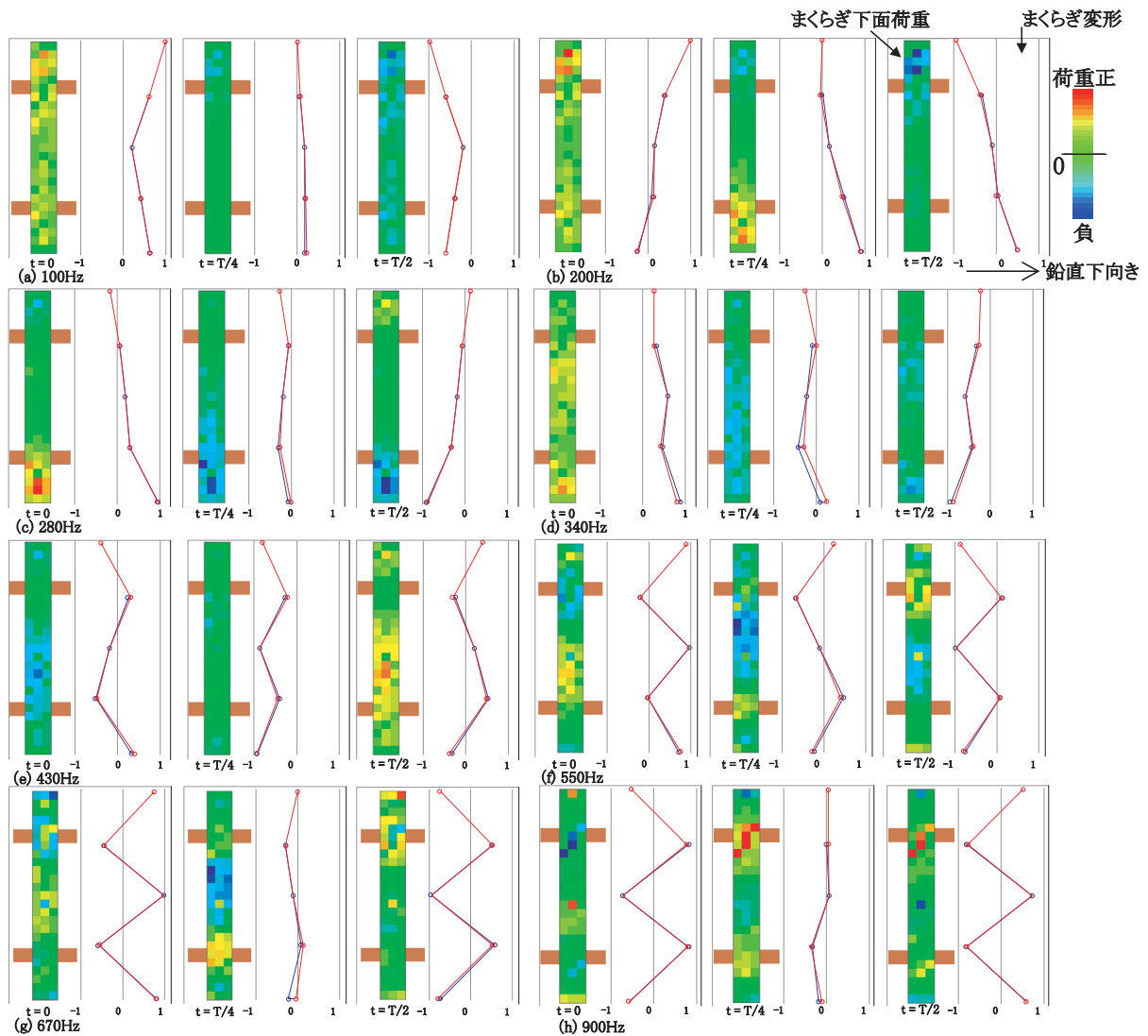


図 10 周波数毎のまくらぎ変形状とまくらぎ下面荷重の分布

340Hzになると、今まであまり大きく振動していなかったまくらぎ中心部の振幅も大きくなり、複雑な振動の形状が現れるようになる（図 10 (d)）。430Hzではレール下付近が大きく振動する上下2次曲げのような形が現れた。550Hz、670Hzでは、上下2次曲げと上下3次曲げの形が見られる。また、この周波数近傍には、まくらぎの固有モードとして、1次ねじりモードが存在するが、ここでの変形状からはそのモードは見られない。900Hzでは、まくらぎ中心と両端が同位相で変位が大きく振動する上下3次曲げモードの形状が現れている（図 10 (h)）。

る周波数近傍にまくらぎの固有モードが存在し、まくらぎが、その固有モードに近い変形状を保って振動していることがわかった。また、その際のまくらぎの変形状により、まくらぎ下面に特異な荷重分布が生じることがわかった。列車走行時の応答については、インパルスハンマー試験時のように顕著ではないものの、まくらぎ下面荷重がピークとなるいくつかの周波数で、まくらぎの固有モードの影響と思われる振動特性が観察された。

## 5. まとめ

本研究では、まくらぎの固有モードと道床への荷重伝播特性の関係を調べるため、3PRまくらぎの実験モーダル解析を行い、1kHz以下の6つの固有モードを特定した。実軌道でのインパルスハンマー試験により、まくらぎ下面荷重、まくらぎ振動加速度の伝達関数がピークとな

## 文献

- 1) A. Remennikov, S. Kaewunruen : Investigation of Vibration Characteristics of Prestressed Concrete Sleepers in Free-Free and In-situ Conditions, Australian Structural Engineering Conference 2005 (ASEC 2005), Newcastle, Australia, 11-14 September, 2005.
- 2) 相川明他: 超薄型動荷重センサを用いたまくらぎ下面の動荷重分布測定, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, 4-071, pp. 141-142, 2008