

## 新幹線振動測定を利用した水平振動公害の研究

An Experimental Study on the Characteristics of Horizontal  
Vibration Hazard through the Measurement of the Ground  
Vibration induced by the Elevated Shinkansen Train

梅 沢 夏 実

Natsumi Umezawa

### 要 旨

高架構造物の列車走行によって発生する地盤振動を測定・解析することにより、一般の水平振動公害についてその原因となる波動の種類、伝搬性及び地下構造の影響等の諸性質を明らかにする方法を検討した。

そのために、県内の新幹線沿線の2か所で、高架構造物から発生する列車走行時の地盤振動測定及び地下構造を決定するためのアレイ微動観測を行った。

その結果、振動の最大卓越成分は、ラブ型の波動によるものであり、振動源（高架構造物）付近より遠方の振動が大きくなる、いわゆる異常伝搬を起こしていることが確認された。

また、この成分を含め遠方における地盤振動のスペクトルは、加振力特性を入力とし、地盤のS波速度構造により定まる増幅度特性を伝達関数とした、線形系の応答出力として説明できることが判明した。

### 1 はじめに

振動公害の大半は、法規制の対象となる上下振動によるものであるが、多くの場合苦情の範囲が発生源の近傍にとどまり、原因の究明や防止対策は比較的容易である。一方、水平振動に由来する苦情は、時に異常伝搬により広い範囲に及ぶことがあり、家屋内で著しく増幅される場合があるなど、発生源の特定や因果関係の立証が困難な事例も報告されている<sup>1)</sup>。

このうち家屋による増幅現象については、既に家屋の振動特性を簡便に測定する方法が開発され、数多くのデータが集積されている<sup>2)</sup>。しかしながら、水平振動の異常伝搬については調査事例（苦情件数）が少ないこと、簡便な地盤の水平加振方法がなく実験が容易

でないことなどから、必ずしも十分な調査・研究が行われていない。

そこで、今回水平振動の様々な性質を研究する際の水平振動源として、新幹線高架構造物を利用することに着目した。これは、高架構造物が新幹線の走行に伴って特に軌道方向に水平加振されること、構造物が同一の種類なら、走行速度、列車編成等が等しい場合には加振特性をそえられることなどから、安定した大振幅の水平振動源として取り扱うことができると想定されることによる。すなわち、高架構造物が水平振動源として有効であれば、新幹線振動を沿線の様々な地質構造を有する場所で測定することにより、異常伝搬など水平振動の性質を一般化することも可能であると考えられる。

本稿は、東北新幹線沿線で列車走行時の振動測定及び測定地盤の地下構造（S波速度構造）を決定するための微動の群列観測（アレイ微動観測）を実施し、発生する波動の特定、距離減衰傾向及び異常伝搬の地盤構造との関連性などについて検討したものである。

## 2 測定及び解析方法

### 2・1 測定場所の選定

特に遠距離伝搬を確認するために、橋脚付近から100m以上の測線の配置が可能であること、また、優勢な表面波が発生しやすい地盤（表層が下位層に比べて十分に軟弱な地盤）であることを条件に、県内の東北新幹線の沿線地盤を概査して、蓮田市閩戸（東京起点42.40km，以下、蓮田という。）及び白岡町野牛（東京起点47.72km，以下、白岡という。）の2か所を測定場所に選定した。

図1は各測定場所近傍の地質柱状図であるが、いずれも腐植土、粘土等の極めて軟弱な表層の下位に砂質土を主体としたやや硬質な層が存在している。周囲の地形及び柱状図から、蓮田は後背湿地性、白岡は氾濫原性の低地であると考えられる。なお、2か所とも約45m以深に現れる砂れき層を工学的基盤に想定することができる。

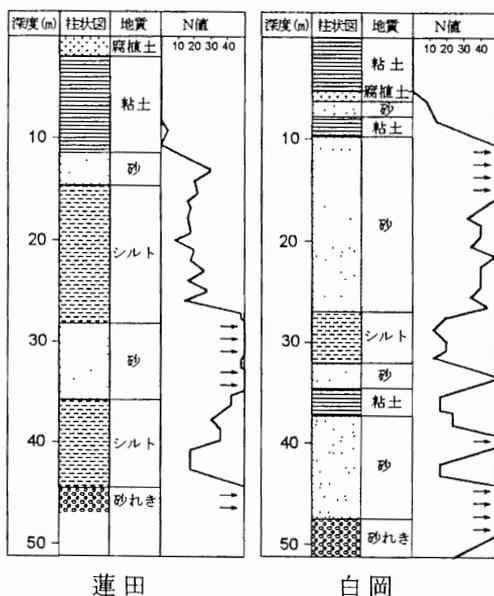


図1 地質柱状図

### 2・2 新幹線振動測定

測定点については図2に示すように上り軌道直下を0m地点とし、以下6.25m（白岡は7m）、12.5m、

25m、50m及び100mの各地点に設けた。また、測定成分は白岡では、上下方向V（Vertical）、軌道と平行な水平方向T（Transverse）及び軌道と垂直な水平方向R（Radial）の3成分、蓮田ではT方向のみの1成分とした。測定には振動加速度計（VICMODEL-106）を使用し、列車通過時の時間波形をサンプリング周波数50Hzでデータレコーダ（TEACDR-M2a）に収録した。

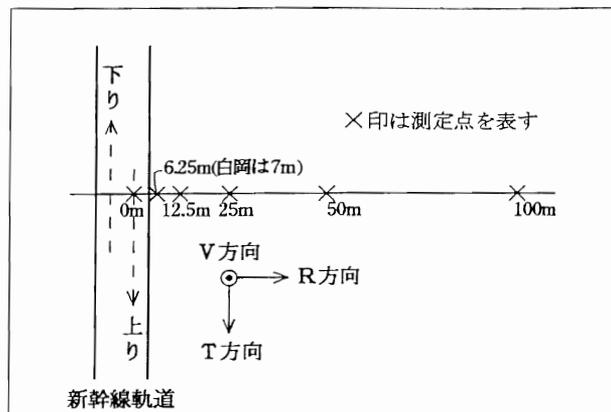


図2 測定点の配置

図3は測定された加速度波形の一例（T方向）であるが、列車走行に伴う特有の振幅変化が表れている。また、橋脚からの距離によって周波数分布も異なることが予想されるため、列車ごと及び距離ごとにスペクトルを比較するには、解析対象とする振幅及び周波数範囲をある程度そろえる必要がある。

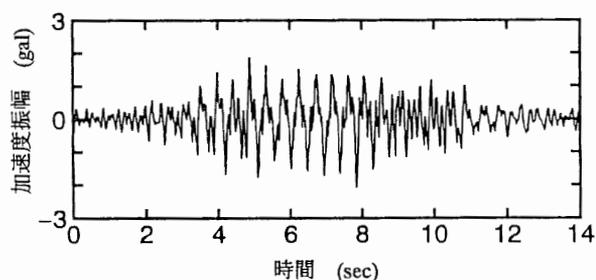


図3 加速度波形の例(蓮田, T方向, 100m地点)

図4は蓮田を例にとって加速度スペクトルの時間変化を橋脚からの距離ごとに比較したものであるが、橋脚近傍から100m地点まで共通する主な卓越成分は10Hz以下に表れており、各成分はおおむね同一時刻にピークに達することが分かる。

そこで、以後の解析については周波数範囲を0～10Hzとし、時間波形において一定以上の振幅が持続する

部分を対象とした。実際には、サンプリングされた時間波形に10Hzのローパスフィルタを掛けたのち、1 galを越える部分について128点のFFT（周波数分解能0.391Hz）を64点オーバーラップさせながら行い、平滑化のために3点ずつ移動平均することによって求めた。

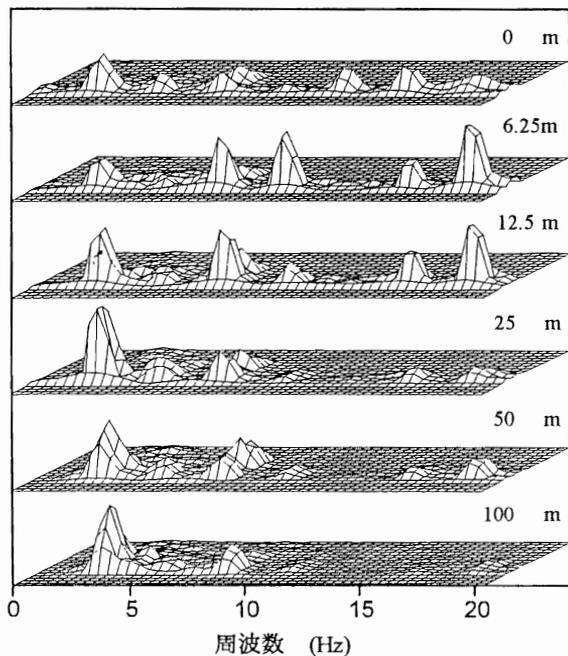


図4 スペクトルの時間変化（蓮田，T方向）

### 2・3 アレイ微動観測

必要な観測場所が確保された蓮田において、地盤のS波速度構造を推定するために、図5に示す4点円形アレイによる微動観測を行った。アレイ半径は、地質柱状図の深度を満足するために、3m、10m、20mを組み合わせた。

観測は微動計（振動技研 MTKV-1C）により、

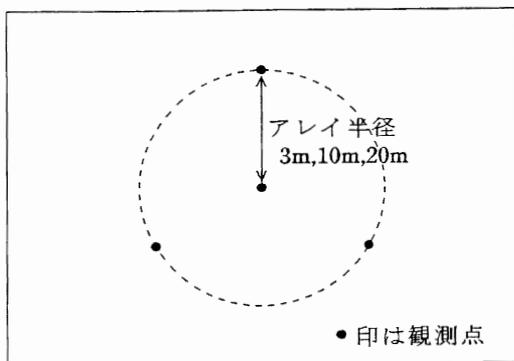


図5 微動観測に用いた円形4点アレイ

5～10分間の微動（上下動）の速度波形をサンプリング周波数50Hzでデータレコーダ（TEAC DR-2a）に収録した。

解析はFFT法による空間自己相関法<sup>3)</sup>を用い、観測場に到来する微動の位相速度分散曲線をアレイ半径ごとに求めた。

## 3 結果及び考察

### 3・1 振動の卓越成分の比較

図6及び図7は、橋脚近傍（12.5m）及び遠方（100m）のスペクトルで、上り（測定地点側）全列車の平均を示したものである。

白岡におけるスペクトルは、橋脚近傍においては数多くの卓越成分が表れており、方向ごとに最大卓越周波数はそれぞれ異なっているが、遠方においては各方向とも6.6Hzが卓越している。なお、蓮田のT方向は、近傍、遠方とも2.3Hz及び6.6Hzが卓越しているが、最大卓越成分は近傍では6.6Hz、遠方では2.3Hzと異なっている。

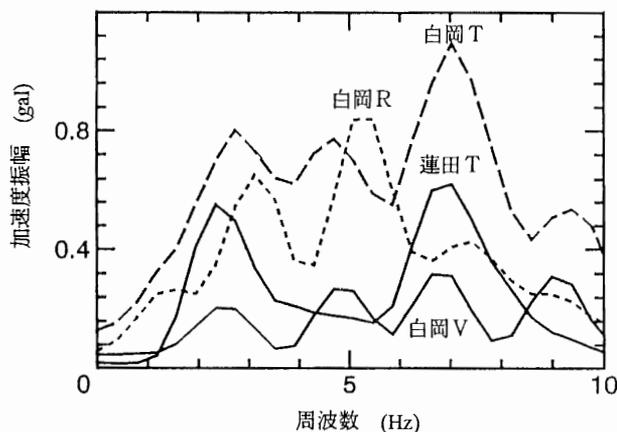


図6 橋脚近傍のスペクトル（12.5m地点）

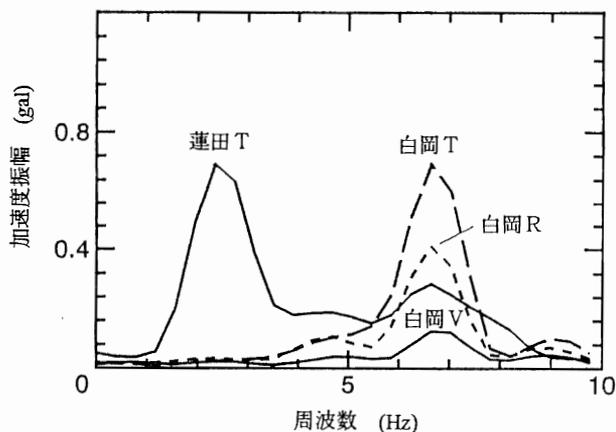


図7 橋脚遠方のスペクトル（100m地点）

また、白岡における各方向の振幅を比較すると、橋脚の近傍、遠方ともT方向の水平振動が優勢であることが分かる。

新幹線の走行に伴う振動の卓越周波数は列車速度に応じて変化することが知られている<sup>4)</sup>。測定時の列車速度は、白岡では大半が約205km/hであった。1両の長さが25mであることから、単位をそろえて計算すると式(1)により基本周波数は約2.28Hzで、その高調波は4.6Hz、6.8Hz、9.1Hzとなり、これらの周波数の加振力は、他の周波数に比較して大きいものと考えられる（蓮田では約200km/h、基本周波数は約2.22Hzとなる）。

$$\frac{205 \times 1,000}{25 \times 3,600} \approx 2.28(\text{Hz}) \dots\dots\dots (1)$$

例えば、白岡における橋脚近傍（図6）のV方向及びT方向ではこれらすべての周波数に卓越成分が見られ、遠方（図7）では6.8Hz成分（周波数分解能の関係上6.6Hzに表れている）のみが卓越している。このように橋脚遠方において特定の周波数のみが選択的に卓越する原因については、3・4に考察する。

### 3・2 地盤の粒子運動軌跡

波動の種類を推定するために、白岡の12.5m、25m、50m、100m地点において、地盤の粒子運動軌跡を求めたものが図8である。作図に当たっては、列車通過時の最大加速度振幅を示す付近の時間波形に、卓越周波数を中心周波数とするバンド幅0.1Hzのバンドパスフィルタを掛けた。

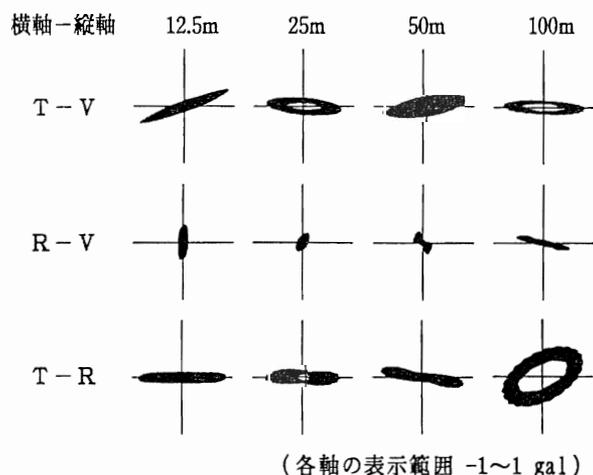


図8 地盤の粒子運動軌跡（白岡）

図から、各地点ともT方向の振動がV方向に比べて大きい。このことから、全体にラブ型の波が優勢であると推定される。また、100m地点ではR方向の振動も大きいため、レイリー型の波も混入しているものと推測される。

一般に、半無限媒質の表面にその媒質よりインピーダンスが小さい別の媒質があるとラブ型の表面波が優勢に出現するが、図1のボーリングデータによると表層に軟弱な沖積粘性土があるため、この要件を満たしている。

### 3・3 周波数別の距離減衰

周波数別の距離減衰傾向を調べるため、橋脚近傍（蓮田6.25m地点、白岡7m地点）の加速度振幅を基準とした各地点の相対振幅を列車ごとに算出し、それらを平均した。

図9は、繁雑を避けるため周波数分解能の3点ずつを平均した各地点の相対振幅を示したものである。図から、いずれの場所においても遠方で相対振幅が大きくなる周波数成分が存在する。すなわち、100m地点の方が基準点より高い振幅を示す周波数は、蓮田では0.8~3.1Hz、白岡では6.6Hzとなっている。これらの異常伝搬を起こしている周波数は、図7の最大卓越周波数と一致している。

なお、全体として白岡の減衰量が大きくなっているが、白岡の地下構造が十分明らかにされなかったため、その原因を推定することができない。

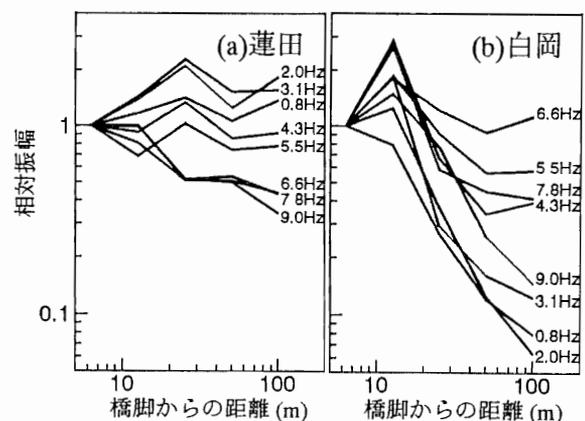


図9 周波数別の距離減衰

### 3・4 地盤のS波速度構造と異常伝搬の関係

3・2及び3・3から、今回測定した地盤では、新幹線走行に伴って発生する振動は、軌道方向に平行な水平成分（T方向）が優勢なラブ型の表面波が主体と

なり、異常伝搬を起こしている周波数が橋脚遠方の最大卓越周波数と一致していることが確認された。

ここでは、ラブ型の水平振動の異常伝搬について地盤構造から説明するための検討を行う。

### 3・4・1 地盤のS波速度構造の決定

微動観測の結果を基に、蓮田の地下構造（S波速度構造）を決定するために、図1のボーリングデータを基に7層構造として、各層のS波速度を回帰式<sup>5)</sup>により算出した。これらを初期値とした地下構造モデル（初期モデル）から出発し、このモデルに基づく理論分散曲線（レイリー波基本モード）がアレイ微動観測によって得られた観測分散曲線とベストフィットするまでS波速度を試行錯誤的に修正することにより、最適モデルを決定した。

図10に、これら観測分散曲線（○印）と最適モデルの理論分散曲線（実線）及び決定されたS波速度構造（内挿図）を示した。

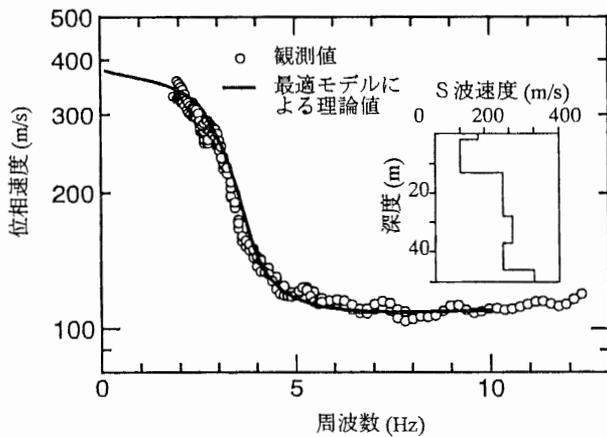


図10 分散曲線（蓮田）

### 3・4・2 入出力モデルによる説明

3・4・1で求めた速度構造から、Haskellの方法に従ってSH波垂直入射の地盤の増幅度スペクトルを計算し、加振力特性の混入が最も少ない100m地点における地盤振動のスペクトルと比較したものが図11である。

両者はおおむね類似した傾向となるが、卓越周波数は増幅度スペクトルが1.7Hz及び5.6Hzであるのに対し、100m地点のスペクトルは2.3Hz及び6.6Hzと、必ずしも一致しない。これは100m地点のスペクトルの形状が単に地盤の特性のみに支配されるのではなく、加振力特性も含まれることを示唆している。

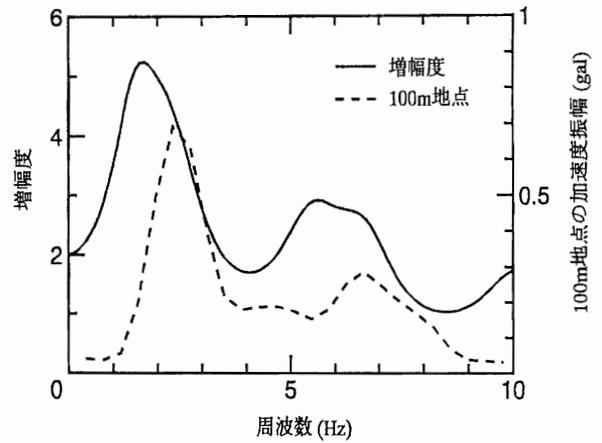


図11 増幅度スペクトルと100m地点のスペクトル（蓮田）

そこで、100m地点のスペクトルを図12のような線形系の応答出力として、その計算値を求めた。

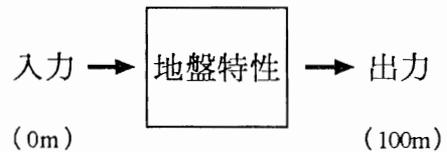


図12 振動の入出力モデル

図13は地盤の粘性減衰及び振動の幾何減衰を仮に無視して、100m地点の地盤振動のスペクトルと応答出力を比較したものである。減衰要素を考慮していないので振幅自体の比較は困難であるが、卓越周波数及びスペクトル分布は良く一致している。

したがって、100m地点のスペクトルを、地盤を系とした入出力関係の応答出力と考えることは可能であり、異常伝搬を含めて橋脚遠方のスペクトルは、加振力特性を入力とし増幅度特性を伝達関数とした、線形系の応答出力として説明できる。

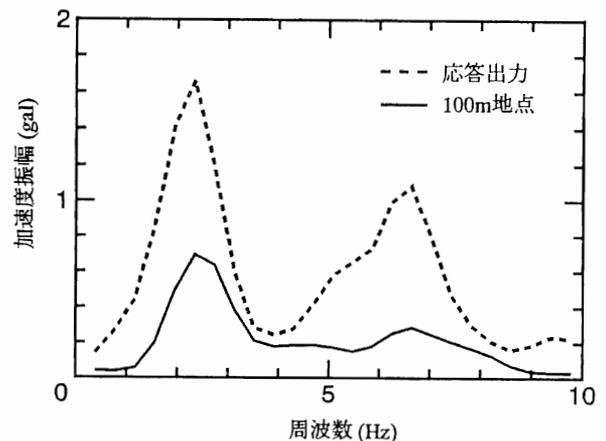


図13 100m地点のスペクトルと応答出力（蓮田）

#### 4 おわりに

新幹線の走行に伴って高架構造物から発生する振動について測定及び解析を行った結果、以下のことが分かった。

- (1) ラブ型の水平振動が優勢であり、鉛直振動に比べて遠方まで伝搬する。
- (2) 長距離伝搬する周波数はおおむね10Hz以下であるが、地盤によって最大卓越周波数は異なり、その成分が異常伝搬を起こしている。
- (3) 橋脚遠方における地盤振動のスペクトルは、加振力特性を入力とし増幅度特性を伝達関数とした、線形系の応答出力として説明できる。

以上のように、新幹線の高架構造物を振動源として水平振動を調査することにより、水平振動の性質について検討することができた。高架構造物は、加振特性のばらつき（列車速度、編成車両数、乗客数による重量変化）があるものの、遠方まで到達する大エネルギーの水平振動源として利用できる。

今後、様々な地盤で同様の調査を実施することにより、水平振動の更に詳しい挙動が明らかにされていくことが期待される。

#### 文 献

- 1) 松岡達郎・小林良夫：金属工場周辺の地盤と家屋の振動について，埼玉県公害センター年報，8，19～25，1982.
- 2) 松岡達郎ら：常時微動の伝達関数測定による低層住宅の動特性の決定，物理探査，40，117～128，1987.
- 3) 松岡達郎ら：空間自己相関法による浅い地下構造の推定，物理探査学会第92回学術講演論文集，149～153，1995.
- 4) 吉岡 修：列車の走行による振動の発生機構についての一考察，物理探査，29，159～169，1976.
- 5) 太田 裕・後藤典俊：S波速度を他の土質的諸指標から推定する試み，物理探査，29，251～261，1976.