

# バラスト軌道に作用する動的荷重の計測技術

浦川 文寛

鉄道力学研究部(軌道力学 研究員)



うらかわ ふみひろ

## はじめに

鉄道線路の多くは、路盤とまくらぎの間にバラストと呼ばれる碎石を敷き詰めたバラスト軌道です。バラスト軌道は、排水性、施工性、保守のしやすさ等多くの長所を持つ一方で、列車走行による動的な荷重が繰返し長期的に作用することにより、図1のように、バラストの摩耗や破碎、沈下等の劣化現象が起こるため、定期的に保守を行う必要があります。劣化の原因となる動的荷重が、レール、まくらぎを通じて、バラストにどの様に伝わるかを、荷重計測により明らかにすることは、劣化のメカニズムを解明し、保守を効率化する上で重要となります。

荷重計測には様々なものがありますが、ここでは、車輪/レール間、レール/まくらぎ間、まくらぎ/バラスト間で鉛直方向に作用する荷重の計測技術について説明します。

また、計測を行う場合、センサ、センサからの信号収録装置、機器の制御系を組み合わせ、計測システムを構築します。計測の目的、条件に応じてシステムを組む必要がありますが、今回、営業線にて数日から数ヶ月間、連続して計測を行うために、インターネットを用いた遠隔自動計測システムを構築しましたので、併せて紹介します。

と呼び、一般にせん断ひずみ法により計測します。

せん断ひずみ法の原理を図2に示します。図2上段のように、レールに輪重 $P$ を加え、まくらぎとまくらぎの間を少しずつ移動させたとき、2箇所の測点 $A1$ 、 $A2$ に加わるせん断荷重 $Q_{A1}$ 、 $Q_{A2}$ は、輪重 $P$ の位置により、それぞれ図2中段の緑線のように変化します。さらに、2箇所のせん断荷重の差、 $Q_{A1} - Q_{A2}$ を計算しますと、図2下段の赤線となり、その値は、測点 $A1$ 、 $A2$ の間は輪重 $P$ 、それ以外の場所ではゼロとなります。せん断ひずみ法は、これを利用し、レール上の2箇所のせん断ひずみ(荷重に比例)を測り、その差をとることで、輪重を計測する方法です。せん断ひずみ法では、レール締結部の中間での輪重しか計測することができませんが、隣接する車輪の影響を受け難いという利点があります。

計測の際には、レール締結部の中間から100mmずつ離れた2箇所の計測点にそれぞれ、2軸直交型のひずみゲージをレール腹部中立軸に対し45°傾斜させて貼りつけます(図3(a))。これら計8軸のひずみゲージを図3(b)のようにつなぎ、ブリッジ回路を構成すると、レールのひずみによる抵抗変化を電圧として取り出すことが出来ます。

## 荷重計測の方法

### 車輪/レール間に加わる荷重

車輪/レール間に加わる荷重の内、鉛直方向の力を輪重

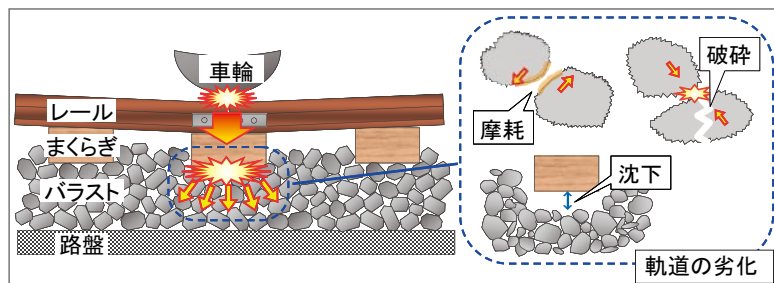


図1 動的荷重によるバラスト軌道の劣化

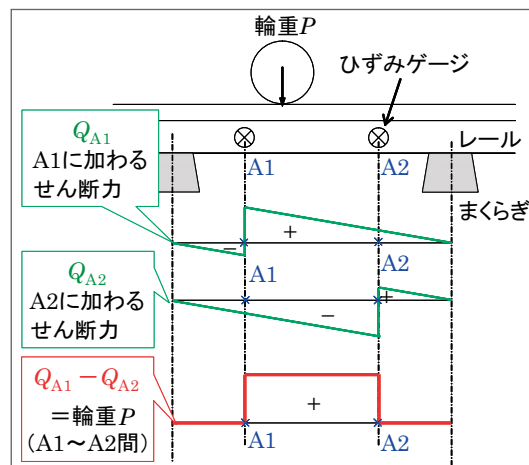


図2 せん断ひずみ法の原理

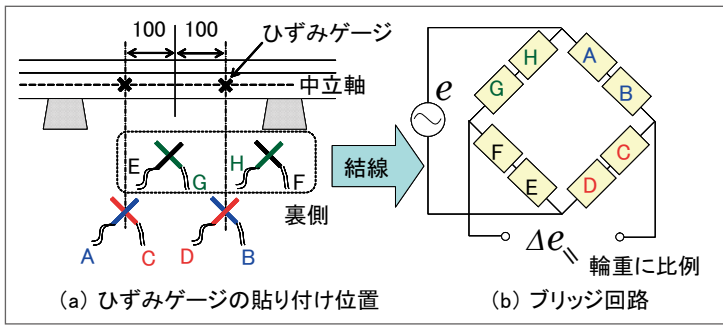


図3 輪重の計測方法



図4 輪重検定作業



図5 圧力パッド

ここで、ブリッジの1辺で、異なる計測点で互いに90°傾いたひずみゲージのペアを直列に結線しています。ひずみゲージを貼る角度が90°変わると、正と負(引張りと圧縮)が逆になりますので、2点で互いに90°傾いたひずみゲージ同士を直列につなぐことは、2点のひずみの差を測ることを意味しています。

ひずみゲージ貼りつけ後、計測に先立ち、ひずみと荷重の関係を調べます。この作業を輪重検定と呼びます。図4のような器具をレールに取り付け、油圧ジャッキでレールに載荷し、載荷荷重とひずみの関係から、ひずみから荷重への換算値を割り出します。この値は、レールの形状、ひずみゲージの貼り付け位置などによって異なるため、計測点ごとに輪重検定を行う必要があります。

### レール/まくらぎ間に加わる荷重

レールとまくらぎの間には、衝撃の緩衝用に、軌道パッドと呼ばれる厚さ1cm程のゴム板が挟まれています。この軌道パッドに加わる荷重をレール圧力と呼び、レール/まくらぎ間に働く荷重として、このレール圧力を計測します。計測の際には、軌道パッドにひずみゲージ式のロードセルを埋め込んだ圧力パッド(図5)を用います。

### まくらぎ/バラスト間に加わる荷重

バラストの粒径(ふるいを通す最小のふるい目寸法)はおよそ20mm~60mmと、在来線のまくらぎ下面のサイズ(2000mm×240mmが一般的)に比べてサイズを無視できるほどには小さくないため、まくらぎ下面とバラスト

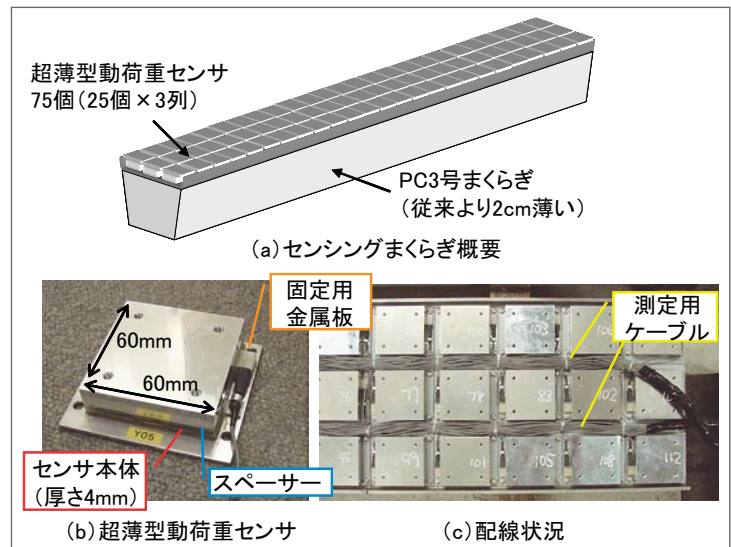


図6 センシングまくらぎ

との接触状態は、まくらぎ1本の中でも場所によってばらつきが生じます。また、まくらぎ自体もレールからの荷重により変形するので、まくらぎ/バラスト間では荷重が不均一に分散し、数箇所に大きな荷重が集中します。このような荷重の不均一性は軌道劣化に影響していると思われます。

荷重のばらつきまで適切に計測するため、センシングまくらぎを開発しました。図6の(a)にセンシングまくらぎの概略を示します。このまくらぎは、在来線のPCまくらぎの下面に、荷重センサを縦25個×横3列に隙間無く貼り付け、まくらぎ下面の接触荷重とその分布を計測するものです。

コンクリート部の厚さが従来品のまくらぎより2cm薄く、それでいて従来品と同程度の強度を有するまくらぎを新たに設計、製作しました。また、荷重センサの取り付けと保護のため、ネジ穴を切ったユニット板を、まくらぎ下面に貼り付けています。

荷重センサには、なるべくまくらぎの厚さが変わらないよう、図6の(b)の圧電フィルムを用いた超薄型の動荷重センサを採用しました。圧電フィルムは荷重を受けると分極し、電荷を発生させますので、これを電圧に変換し

て荷重を計測します。このセンサ本体は大きさ60mm×60mmの正方形で、その厚さは僅か4mmと薄く、センサの片側に固定用金属板を貼り付けることで、まくらぎへの脱着を可能としています。もう片側には60mm×60mm×10mmのスペーサーを設け、図6の(c)のように配線用スペースを確保しました。また、このスペーサーには4

つのネジ穴があり、配線を行った後に碎石に接する面に80mm×80mm×5mmのアルミ合金製の受圧板を取付ける構造としました。

### 計測結果例

図7に、先頭台車が通過したときの、輪重、レール圧力、まくらぎ下面荷重の計測波形の一例を示します。台車の前後2つの輪軸が、各測点を通じた時刻で、概ね計測値がピークとなっています。

輪重計測では、2つのゲージ間以外では計測されませんので、切り立った波形となり、レール圧力とまくらぎ下面荷重は、比較的緩やかな山形の波形となります。また、輪重、レール圧力、まくらぎ下面荷重と、車輪から下方に遠ざかるほど、荷重は小さくなります。

まくらぎ下面荷重の分布を図8に示します。荷重の分布は一樣ではなく、レール下付近では、まくらぎ中心付近に比べて荷重が大きい傾向が見えますが、レールの真下が必ずしも大きいとは限らず、この計測例では、まくらぎ左端から2番目のセンサ部分で、荷重が最も大きく加わっています。この部分では、まくらぎとバラストが密着していると思われ、まくらぎ/レール間に働く力は、まくらぎとバラストの接触状況に強く影響されることを示しています。

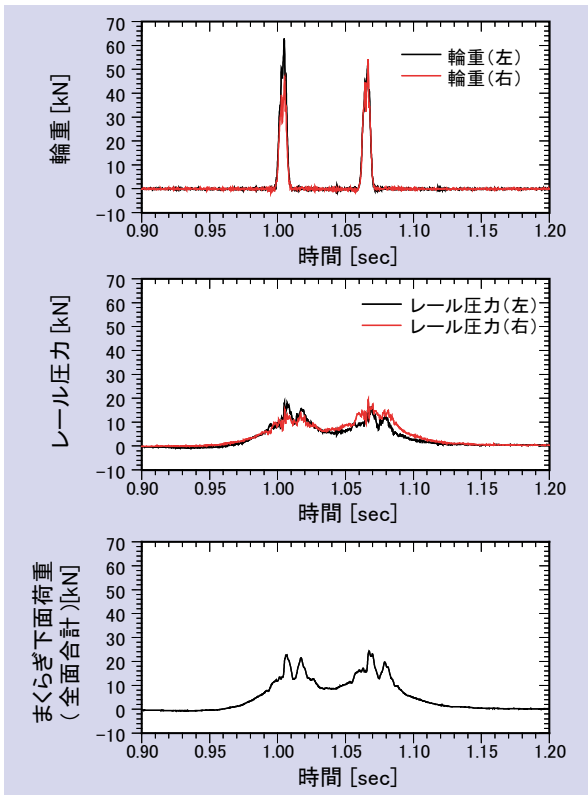


図7 荷重計測結果例

### 遠隔自動計測システム

軌道の動的計測を長期間連続して行うには、多くの人員を必要とします。そこで、自動で計測し、その状況を遠隔地から監視するシステムを構築しました(図9)。その特徴

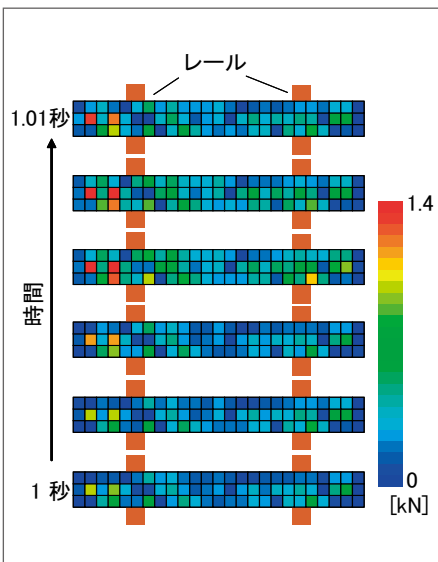


図8 まくらぎ下面の荷重分布

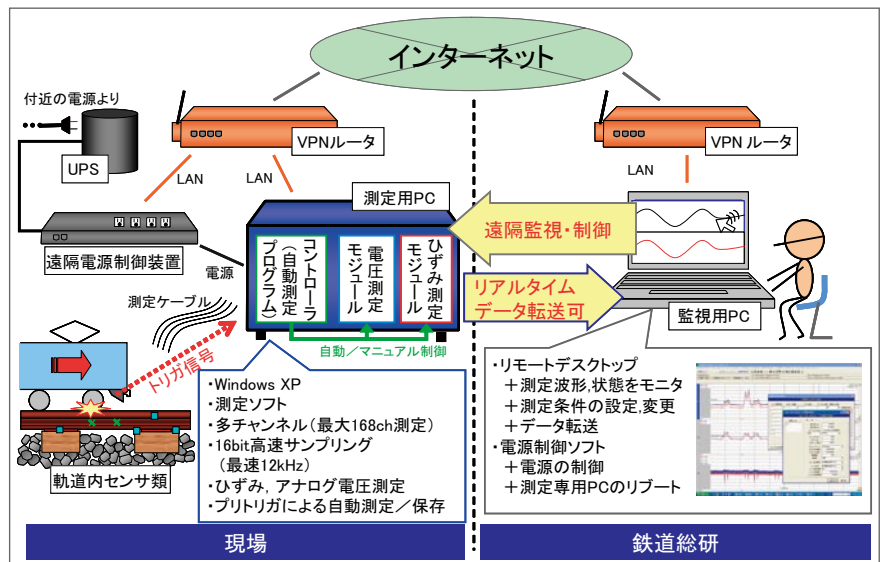


図9 遠隔自動計測システムの概要

を以下に述べます。

### 自動で計測する(トリガによる自動計測・保存)

動荷重を計測する場合、1秒間に数千から数万回と、非常に高い頻度でデータを記録しますので、データはしばしば膨大な量となります。例えば、100個のセンサの計測値を、毎秒1万回、絶えず記録した場合、記録形式にもよりますが、容量が250GBのハードディスクが概ね1日で一杯になってしまいます。地上側から計測を行う場合、列車が通過している数秒、数十秒の間のみ計測を行うよう、通常、トリガを用いて計測のタイミング、時間を制御します。トリガとは、計測値がしきい値を超える、あるいは下回った場合に特定のアクションを起こすための“引き金”のことです。本計測システムでは、計測を始めるのにトリガを用い、その後、任意の時間、計測を続けるようにプログラムされています。

本計測では、輪重が10kNを超えた場合にトリガが反応するように設定しています。輪重を用いた理由は、前述のとおり、輪重計測では、2箇所のみずみゲージ間以外は基本的にみずみ値がキャンセルされるので、トリガに良く適しているためです。

### 自動で計測誤差を補正する

計測した値は、様々な要因により、実際の値とずれが生じます。ずれがどれだけ生じているかを特定し、正しい値に補正することを較正といい、正確な計測のためには頻繁に較正を行う必要があります。較正は主に、(1)ゼロ点(荷重が加わっていない状態での計測値)、(2)感度(荷重と計測値の比例関係)の2つがあり、輪重・レール圧力には(1)と(2)、まくらぎ下面荷重では(1)のみを、1回の計測が終了する毎に自動で行っています。

以上より、自動計測の流れは図10となります。待機状態→列車接近→輪重10kNを超える→トリガ・計測開始→20秒後に計測終了→データ保存・較正→待機状態に戻る。これを計測期間中延々と繰り返します。

### 遠隔地から計測器を監視・制御する

本計測システムは、一度計測の設定を行えば、後は自動で計測を続けます。しかしながら、計測が長期間となりますと、計測器にエラーや故障が生じる可能性がありますので、これらをいち早く察知しなければなりません。また、計測範囲等、最初に設定した条件が、計測に適さない場合は、計測結果を見ながら適時設定しなおす必要があります。

そこで、本計測システムでは、現場の計測用PC、鉄道

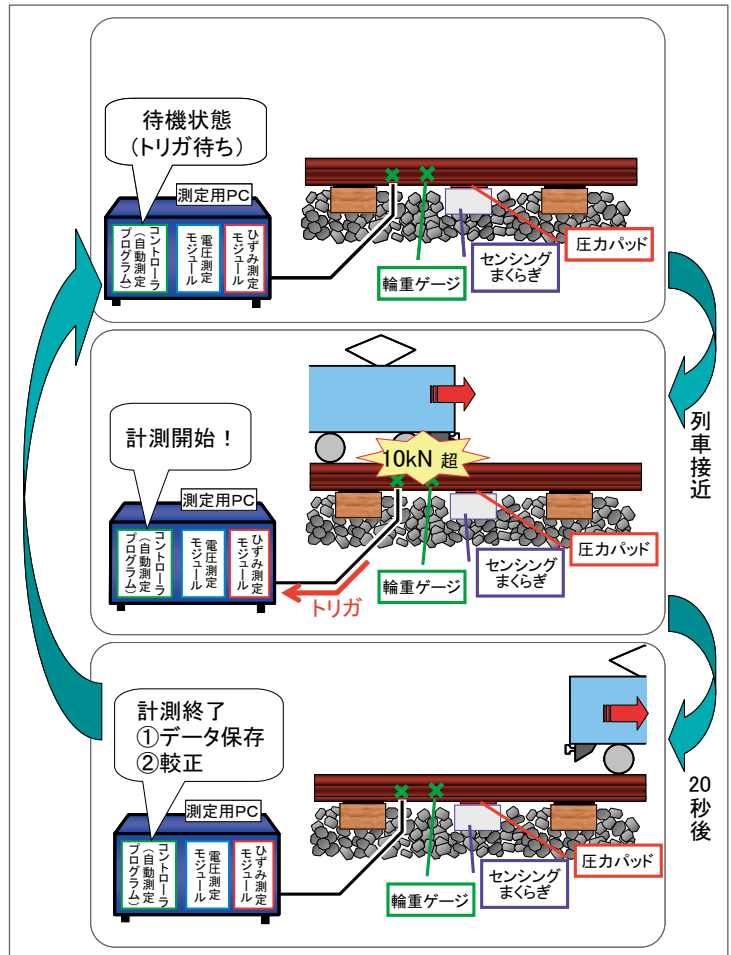


図10 自動計測の手順

総研の監視用PCをインターネットで接続し、現場の計測機器を計測用PCで制御、計測用PCを鉄道総研の監視用PCで操作することにより、鉄道総研から計測の監視・制御が行えるようにしました。鉄道総研からは、Windowsのリモートデスクトップで簡単に操作でき、計測値のリアルタイムモニタリング、計測の設定変更、データ転送が可能です。また、計測用PCのOSがフリーズした場合は、電源制御装置により、計測用PCへの電源供給を一旦ストップすることで、PCを強制的にリブート(再起動)させます。

### おわりに

本稿では、輪重、レール圧力、まくらぎ下面荷重の計測方法と、営業線で長期間計測を行うために開発した、遠隔自動計測システムを紹介しました。実際の計測では、荷重だけでなく、レールやまくらぎ、バラストの振動等も同時に計測しており、これらの計測結果の分析とシミュレーションから、軌道の動的な特性と、それらが軌道の劣化に及ぼす影響を明らかにしていきたいと考えています。RRR