

## 2章. BWIMの内容

### 2.1 システムの開発目標

当システムの開発にあたっては、道路橋の設計活荷重検討のための全国規模の自動車荷重の傾向調査に活用することを念頭に、測定の簡便性と汎用性、測定されたデータの均質性に配慮した。そこで、主桁のひずみ応答を利用し、影響線の線形和と実測波形との誤差を最小化する計算により、車両重量を算定する方法を採用することとした。以下に、開発にあたって目標とした主な性能を示す。

- ・大型車について、個々に、総重量、軸重、軸数、軸距の推定ができる。
- ・全ての計測を橋梁の下で行い、計測行為が交通の特性に影響を与えない。
- ・2車線以上で交通量が多く、連行、並走状態を生じやすい路線にも対応できる。
- ・計測にあたってなるべく特殊な技術や機器を必要としない。
- ・一カ所当たりの計測費用が安価となる。
- ・各種の交通条件、橋梁条件に対し、適用範囲、精度レベルが明確である。

## 2.2 システムの基本構成と算定の流れ

図-2.2.1に当システムの基本構成、図-2.2.2にその算定の流れを示す。当システムでは、まず、軸重、軸距等の諸元が既知である車両（以下、「荷重車」という）を用いて、主桁のひずみの影響線を求める事前計測を行う。それに続いて、通過が確認された車軸の軸重（未知量）と事前計測で求めた影響線（既知量）との線形和が、主桁のひずみの実応答に等しくなるとして、互いの差が最小となるように連立方程式を作成し、各車両の軸重、総重量などを求める本計測を行う手順になっている。

なお、車両通過の有無の検出、走行速度、軸距等の算定は、車軸の通過に対し、鋭く上がった影響線形状となる部材のひずみ応答を利用する。また、軸重列から一台一台の車両への分離は別途作成した車両判別のアルゴリズムを使用する。

測定に用いる機器は、ひずみゲージ、動ひずみアンプ、パソコン、といった汎用的なものばかりであり、安価で手軽に測定ができるように構成した。

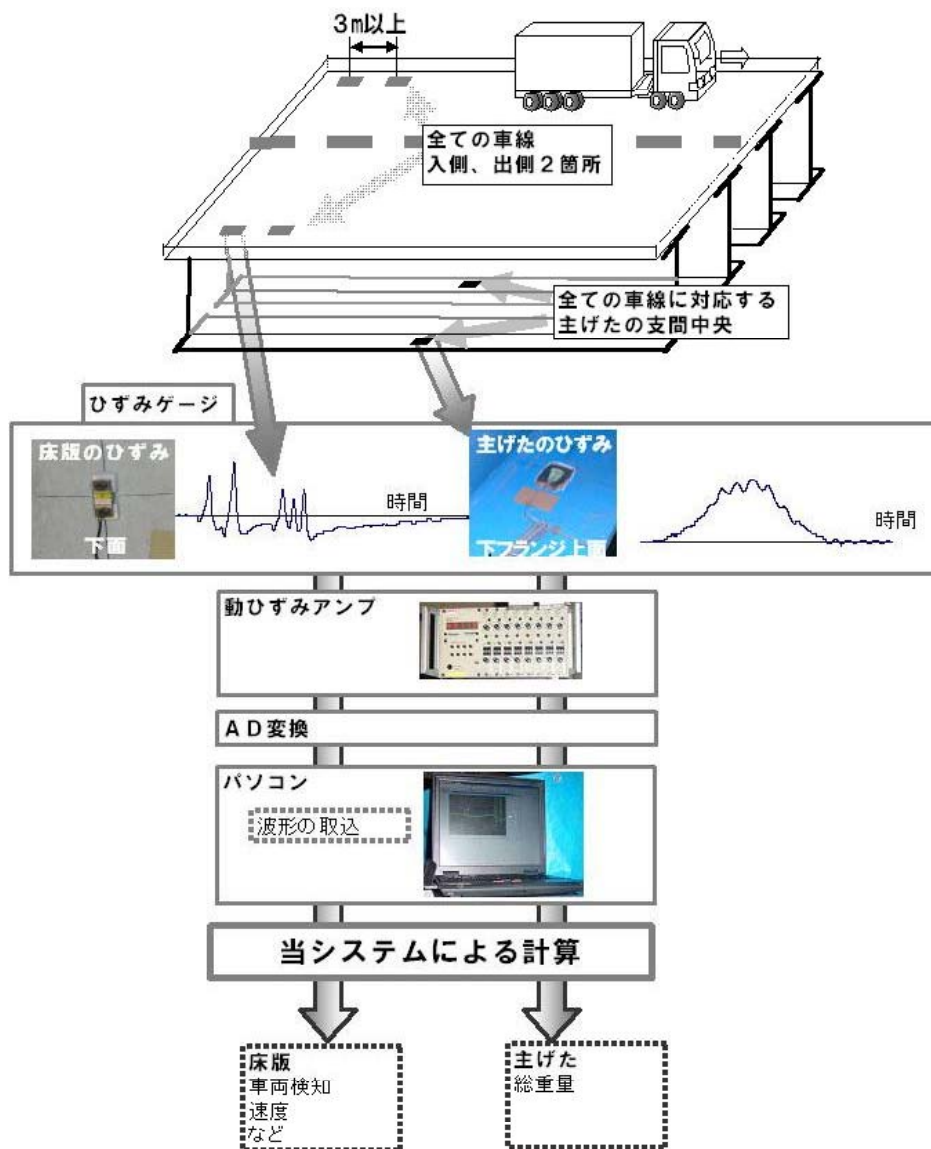


図-2.2.1 システムの基本構成

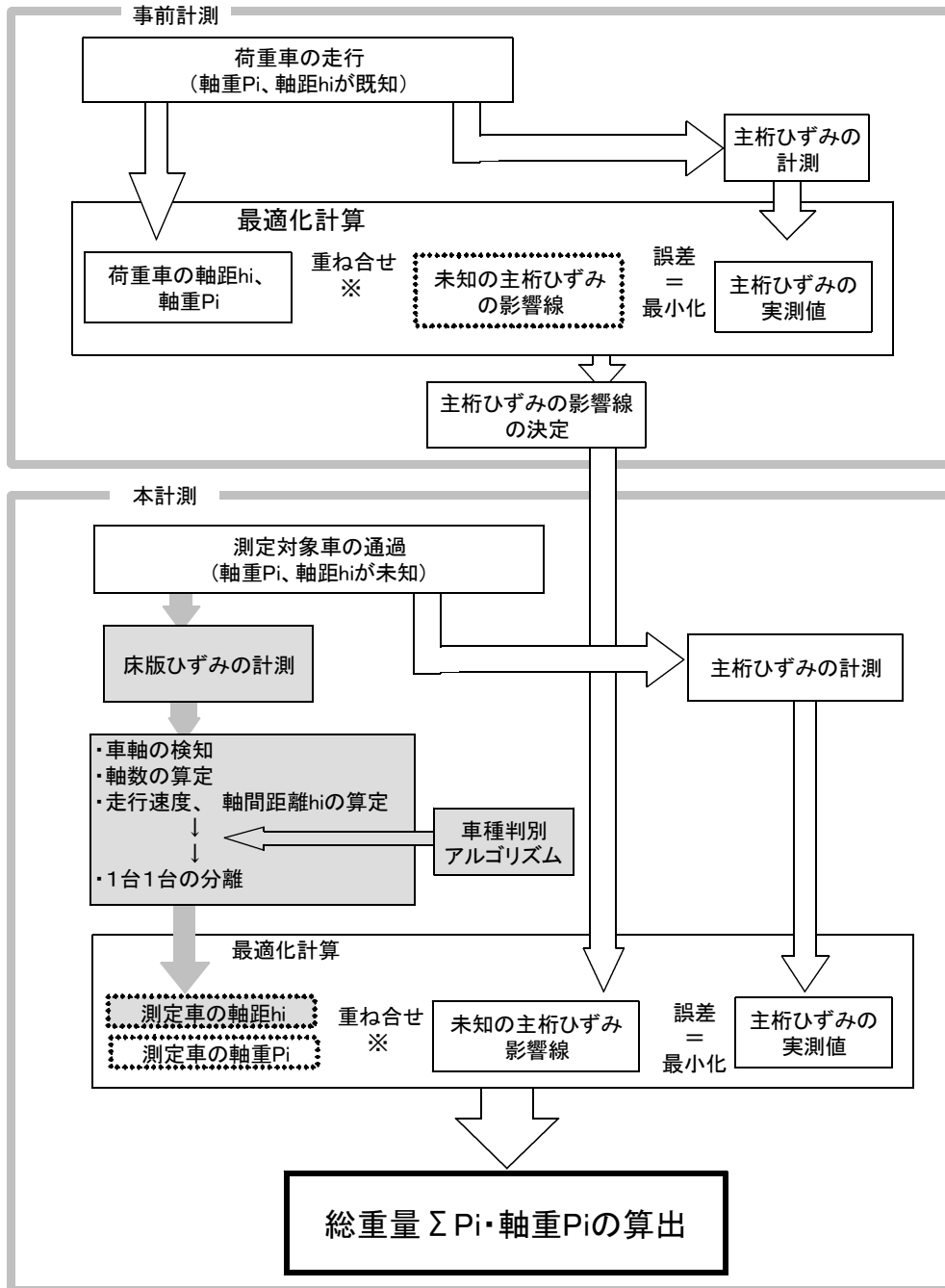


図-2.2.2 算定の流れ

## 2.3 車軸の検知

車軸の検知は、図-2.3.1 に示すような、車軸の通過に対し、各軸毎に独立した応答変化を示す部材を用いて行う。また、走行方向に間隔をおいて 2 カ所測定すれば、センサー間の距離と通過時間の差から走行速度や軸間距離を算出することができる。

表-2.3.2 には、車軸の通過に対し、顕著な応答変化を示す部材における応答波形の例を示す。床版、端対傾構、垂直補剛材のひずみ応答では、車軸の通過時に明瞭なピークがみられ、特に橋軸方向の床版のびずみ応答では、タンデム軸のような近接する軸同士でも独立した応答波形が得られている。一方、支点部の垂直補剛材では、各軸の通過に対応した応答変化が見られるが、車両振動の影響で応答変化がわかりづらくなる場合もある。

これらの部材応答の測定結果をふまえて、車軸の検知にあたっては、床版下面の橋軸方法のひずみのように各軸毎に独立した明瞭な応答変化を示す部材を用いるのがよいが、既設橋梁の RC 床版では著しいひびわれがある場合や下面への鋼板接着による補強が行われている場合など、必ずしも適切にひずみの計測が行えない場合も少なくない。そのような場合には、床版の代わりに、軸の判別が可能であるその他の部材を用いてもよい。

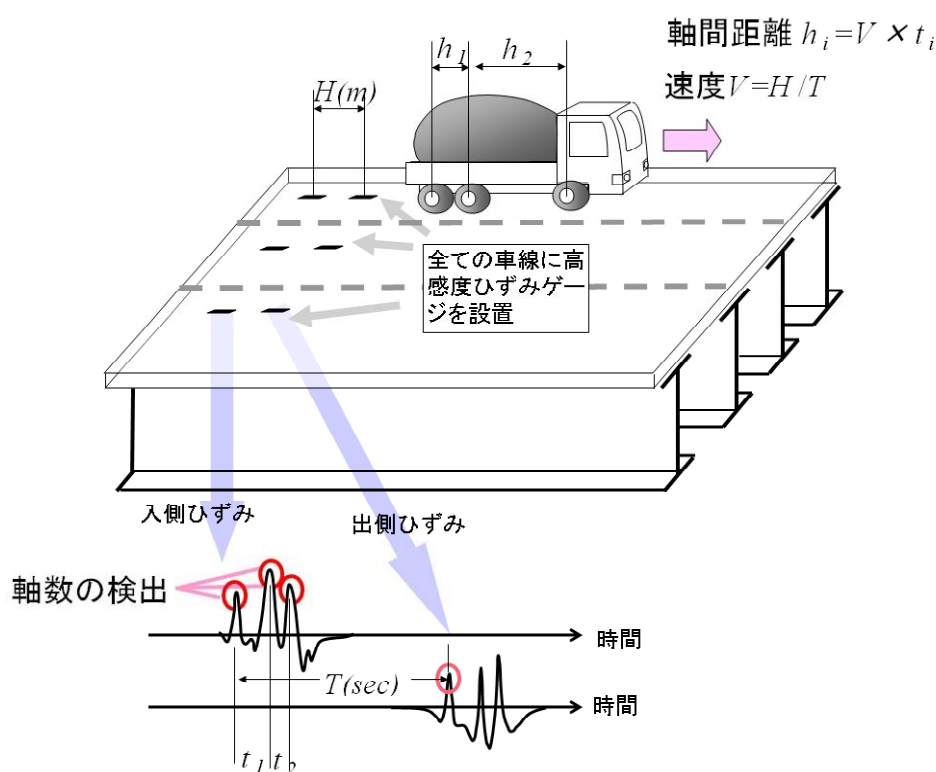


図-2.3.1 計測方法の概要

表-2.3.1 応答波形の例

		走行速度 5km/h	走行速度 40km/h	走行速度 80km/h
5 軸 ト レ ー ラ	橋軸直角方向 床版ひずみ (x1)			
	橋軸方向 床版ひずみ (y1)			
3 軸 ト ラ ッ ク	支承部主桁 垂直補剛材 のひずみ (S1)			
	端対傾構の ひずみ (SB)			

## 2.4 車両の分離（軸数の判別）

応答時間の短い部材の波形から得られる情報は、そのままでは車軸の存在と、個数、位置関係だけを示す軸重列にすぎない。そのため、個々の車両の重量を求めるためには、車両一台一台を分離し、測定時にどの車線に何台の車両が存在しているか、正しく把握することが必要である。

そこで、当システムは、同一車線上に存在する一台一台の車両の分離を図-2.4.1 に示す「車両判別のアルゴリズム」を用いて行う。このアルゴリズムは、「1999年版車両諸元表<sup>1)</sup>」（以下「現有車両諸元表」という）に記載された車両と、平成 9, 11, 12 年度に関東地方整備局東京国道工事事務所に特殊車両として通行許可申請された車両を利用して、実在する大型車両の諸元を広範に分析し、軸間距離のパターンなどに基づいて作成したものである。表-2.4.1 に、ここで分析対象とした車両の車種、軸数別の台数を示す。

表-2.4.1 分析対象とした車両の台数

車両	軸数(台)	1999年版車両諸元表	特車申請車両
単車	2	101	17
	3	107	11
	4	28	27
	5	0	6
	6	0	4
	合計	236	65
セミトレーラ	3	27	2
	4	84	54
	5	33	43
	6	9	23
	合計	153	122
フルトレーラ	5	0	20
	合計	0	20
合計(台)		389	207

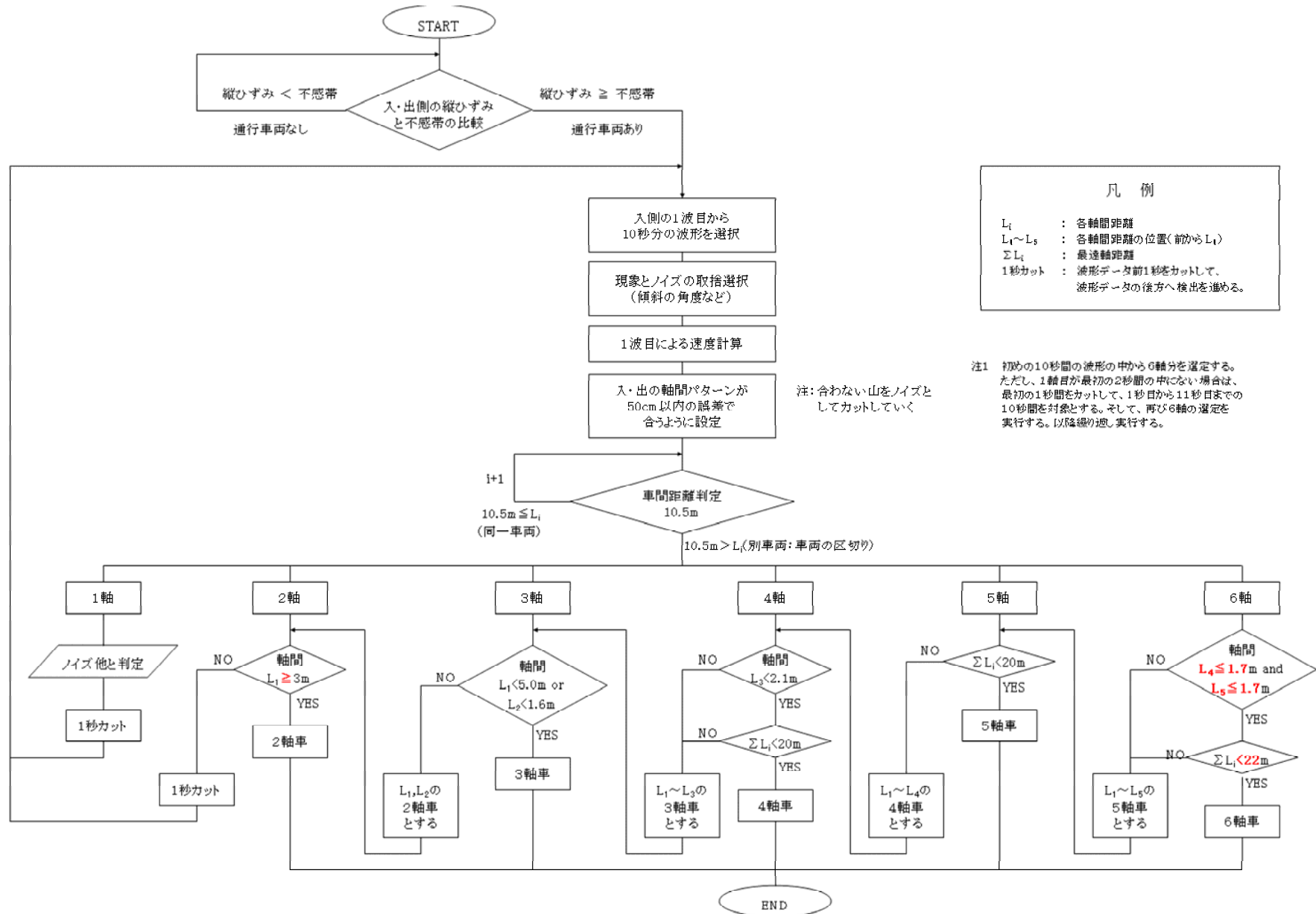


図-2.4.1 車種判別アルゴリズム

## (2) 軸間距離のパターン分析

### 1) 軸間距離による分離

分析対象とした全車両の隣接する車軸相互の距離の分布状況を図-2.4.2 に示す。これより大型車両の隣接軸距は、ほぼ 10.5m 未満の範囲に分布していることがわかる。そのため、検出された軸重列において、隣接する車軸相互の距離が 10.5m を超える場合には、それぞれの車軸が別々の車両に属しているものとみなすこととした。10.5m を超える軸距を有する車両を測定の対象とするために別車両とみなす軸間距離の最小値を大きくすると、分離された軸重列の中に複数の車両が含まれるケースが増え、この後のステップでの処理が煩雑となるため、ここでは、別車両とみなす軸間距離の最小値を 10.5m と設定した。以上を「軸間距離による分離」と呼ぶこととする。

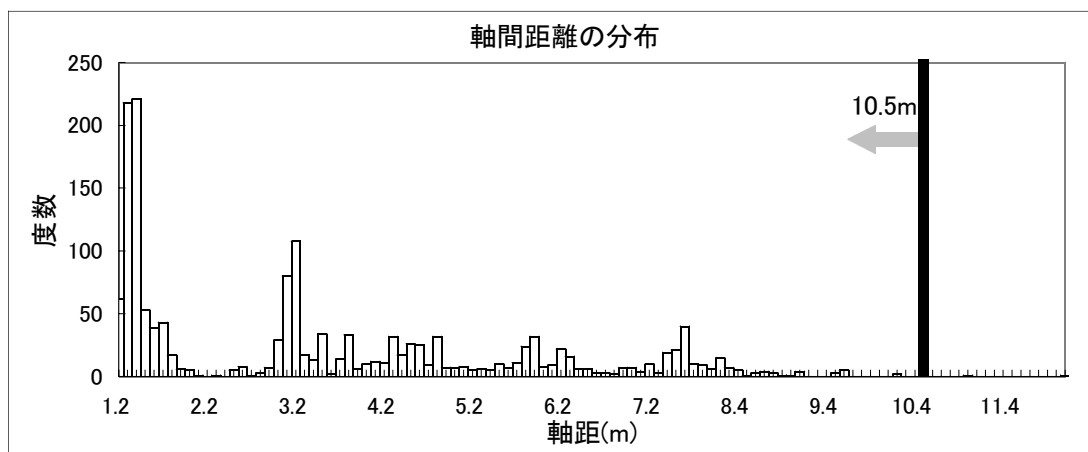


図-2.4.2 隣接軸距の分布状況

### 2) 6軸車の判別

ここでは、前述の「軸間距離による分離」において、6軸と判定された軸重列について、それが1台の6軸車両に対応するものか、複数台の車両からなるものであるかを判別する。

現有車両諸元表から6軸車両のほとんどは、図-2.4.3 に示すような3軸のトラクタがトリプル軸をもつトレーラを牽引した状態のものであり、これ以外の形式で6軸となる車両はほとんど存在しない。

図-2.4.4 には、3軸のトラクタがトリプル軸を有するトレーラを牽引した車両について、トリプル軸の軸距 L4 および L5 の分布を示す。図-2.4.4 より、トリプル軸の軸間距離は 1.7m 以下の範囲に分布している。さらに、図-2.4.5 に示した全調査対象車両の最遠軸距の分布では、最遠軸距が 22m 以上となる6軸車はみられないため、トリプル軸の軸間距離 L4, L5 が 1.7m 以下の場合でも、最遠軸距が 22m 以上となる場合には、6軸車とはせず、複数の車両からなる軸重列とみなすこととした。

以上を「6軸車の判別」と呼ぶこととし、6軸車の判別フローを図-2.4.6 に示す。



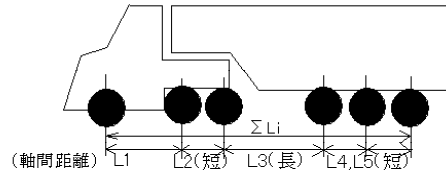


図-2.4.3 代表的な6軸車の軸配置例

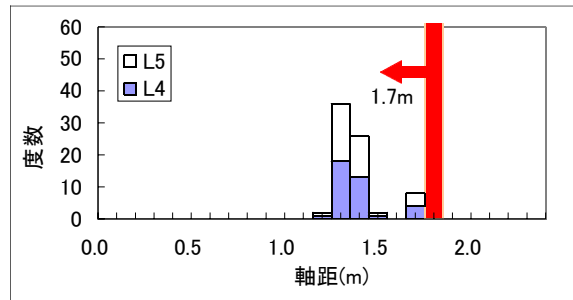


図-2.4.4 6軸車のトリプル軸の軸間距離  $L_4$  および  $L_5$  の分布

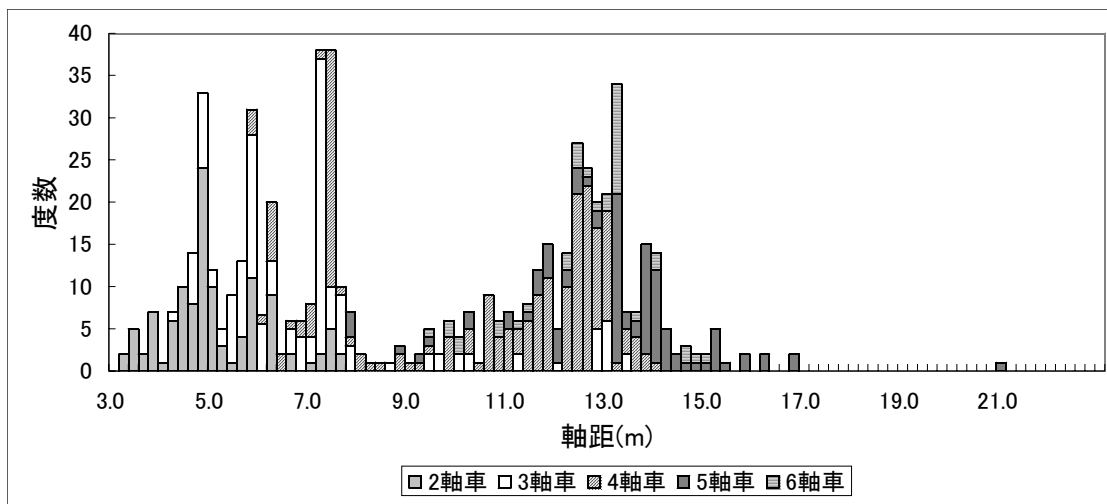


図-2.4.5 最遠軸距の分布

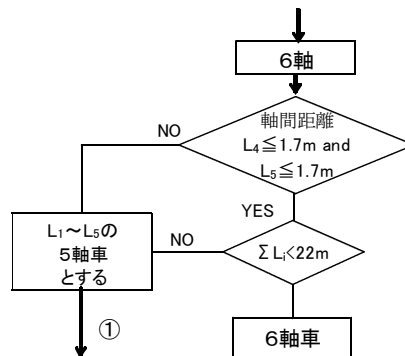


図-2.4.6 6軸車の判別フロー

### 3) 5軸車の判別

ここでは、前述の「車間距離による分離」において、5軸と判別された軸重列および「6軸車の判別」で6軸車でないと判別された軸重列のうち、前から5つの軸重列について、それらが1台の5軸車両に対応するものか、複数の車両からなるものであるかを判別する。

図-2.4.5 に示した大型車両の最遠軸距の分布状況から、5軸車の最遠軸距が20m以上となることはほとんどないことがわかる。また、連行走行する複数の大型車の全長が20m未満となることもほとんどないと考えられる。そのため、5軸車の判別では、軸重列の長さが20m以上となった場合には、これらが異なる複数の車両からなる軸重列であるとみなし、それ以外のものについて5軸車と判別することとした。

以上を「5軸車の判別」と呼ぶこととし、5軸車の判別フローを図-2.4.7 に示す。

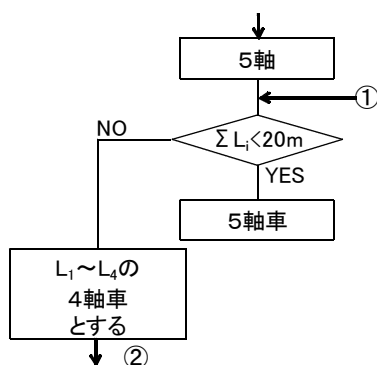


図-2.4.7 5軸車の判別フロー

### 4) 4軸車の判別

ここでは、前述の「車間距離による分離」において4軸と判定された軸重列および「5軸車の判別」で5軸車でないと判定された軸重列のうち、前から4つの軸重列について、それらが1台の4軸車両に対応するものか、複数の車両からなるものであるかを判別する。

現有車両諸元表から、4軸車の多くは、図-2.4.8 に示すような2軸トラクタとタンデム軸を有するトレーラの組合せである。図-2.4.9 に4軸車におけるタンデム軸の軸距L3の分布を示す。

図-2.4.9 より、4軸車のタンデム軸の軸間距離L3は、ほとんどが2.1m未満の範囲に分布していることがわかる。一方、走行時に異なる車両間で車軸の距離が2.1m未満に近接することは考えにくいため、4つの軸重列のうち末尾の2軸の軸距が2.1m未満の場合には、4軸車と判別することとした。

さらに、図-2.4.5 に示す最遠軸距の分布状況から、最遠軸距が20m以上となるケースはほとんどないため、後ろ2軸の軸間距離が2.1m未満の場合でも、最遠軸距が20mを超える場合には、1台の4軸車とはせず、複数の車両からなる軸重列とみなすこととした。

以上を「4軸車の判別」と呼ぶこととし、4軸車の判別フローを図-2.4.10 に示す。

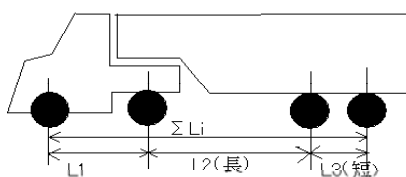


図-2.4.8 代表的な4軸車の軸配置例

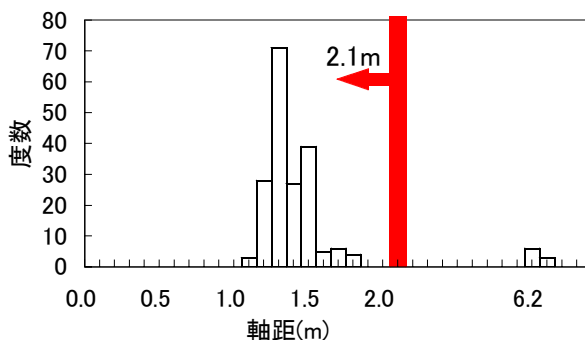


図-2.4.9 4軸車のタンデム軸の軸間距離  $L_3$  の分布

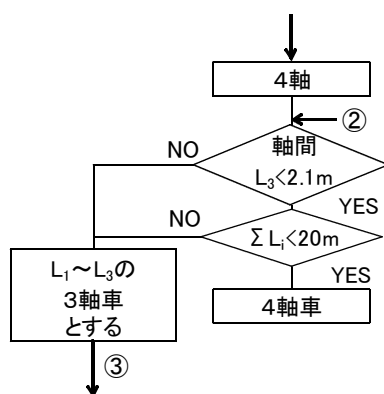


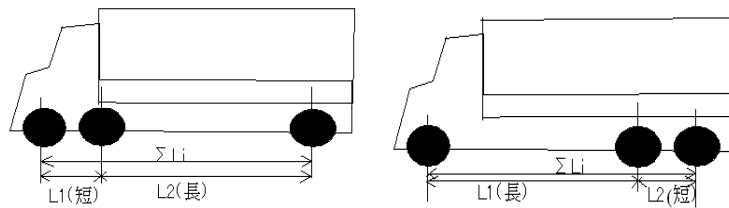
図-2.4.10 4軸車の判別フロー

### 5) 3軸車の判別

ここでは、前述した「車間距離による分離」において3軸と判定された軸重列および「4軸車の判別」で4軸車でないと判定された軸重列のうち、前から3つの軸重列について、それらが1台の3軸車両に対応するものか、それ以外であるかの判別を行う。

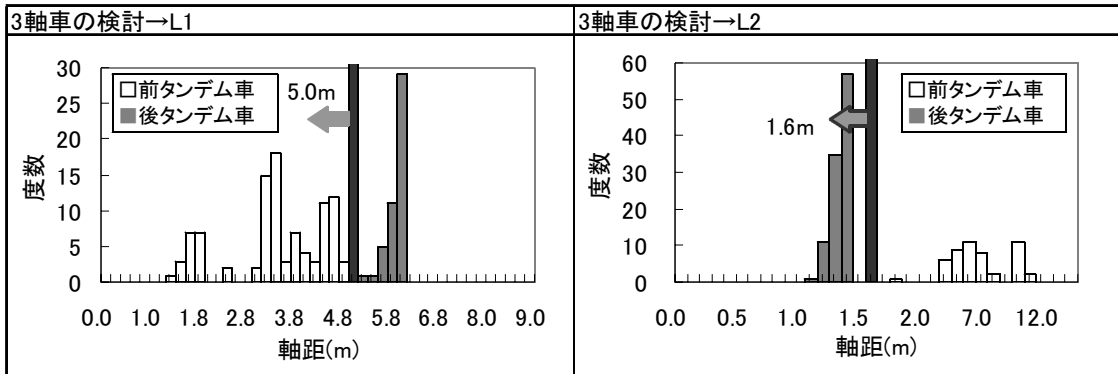
3軸の大型車は、図-2.4.11 に示すような前タンデムと後タンデムの2つのタイプに大別でき、図-2.4.12 に示す軸距の分布状況から、前タンデム車では軸距  $L_1$  (第1軸と第2軸の距離)が 5m 未満であるケースが多く、後ろタンデム車では軸距  $L_2$  (第2軸と第3軸の距離)が 1.6m 未満となるケースが多いことがわかる。そのため、軸距  $L_1$  が 5.0m 未満、もしくは軸距  $L_2$  が 1.6m 以上の場合には、3軸車と判別することとした。

以上を「3軸車の判別」と呼ぶこととし、3軸車の判別フローを図-2.4.13 に示す。



(a) 前タンデム車 (b) 後タンデム車

図-2.4.11 代表的な3軸車の軸配置例



(a) 第1軸～第2軸(L1)

(b) 第2軸～第3軸(L2)

図-2.4.12 4軸車の隣接軸距の分布

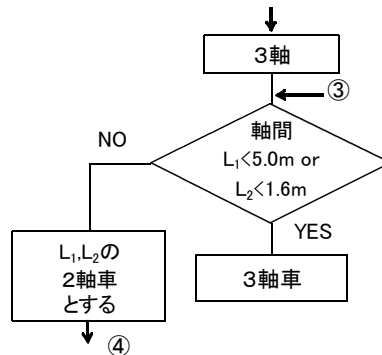


図-2.4.13 3軸車の判別フロー

## 6) 2軸車の判別

ここでは、前述した「車間距離からの分離」において2軸と判定された軸重列および「3軸車の判別」で3軸車でないと判定された軸重列のうち、前2つの軸重列について、それらが1台の2軸車両に対応するものであるかどうかの判定を行う。

図-2.4.14 に示す2軸の大型車の軸距分布によると、軸距は、3.0m以上の範囲に分布しているため、対象となる2軸間の距離が3.0m以上の場合には2軸車と判別し、それ以外については車両として扱わないこととした。

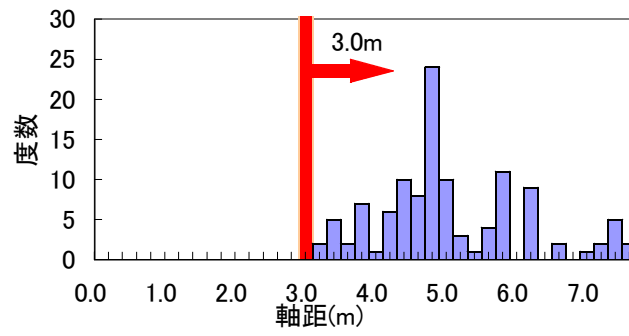


図-2.4.14 第1軸～第2軸(L1)の隣接軸距の分布

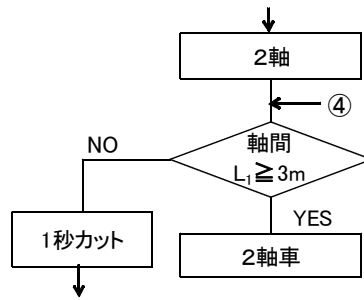


図-2.4.15 2軸車の判別フロー

### (3)車両判別アルゴリズムの検証

車両判別のアルゴリズムで、適切に分離できない車両がどの程度存在するのかを確認するため、表-2.4.1 に台数を示す分析対象車両の中から分離不能となる車両を抽出した。その結果、図-2.4.16 に示す最遠軸距が 22.0m 以上である 5 軸車と 3 軸トラクタに 1 軸のトレーラを組み合わせた 4 軸車の 2 通りが適切に判別できなかった。しかしながら、これらの車両は極めて稀なケースであると考えられ、本アルゴリズムは実用上必要な精度が確保されていると判断した。

なお、当システムによる車両重量計測において、通行車両のビデオ撮影する等により、直接確認が行える場合には、本アルゴリズムによらず収録される波形データとそれらを対照することでも車種判別が行え、この場合には異常値の検証も容易である。

表-2.4.2 判別アルゴリズムの精度検証結果

車両	軸数(台)	検証車両計	エラー数(台)	正解率
単車	2	118		100.0%
	3	118		100.0%
	4	55		100.0%
	5	6		100.0%
	6	4		100.0%
	合計		301	
セミトレーラ	3	29		100.0%
	4	138	9	93.5%
	5	76	1	98.7%
	6	32		100.0%
	合計		275	
フルトレーラ	5	20		100.0%
	合計		20	
合計		596	10	98.3%

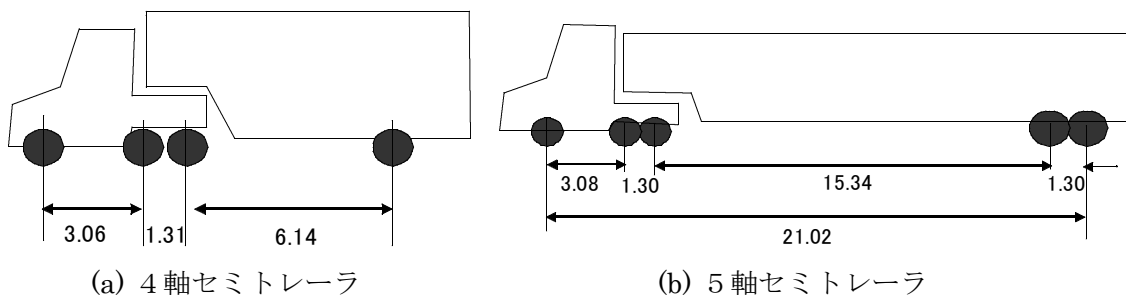


図-2.4.16 判別不能な車両の例

## 2.5 車両重量の算出

### (1) 事前計測（影響線の算出）

事前計測は、荷重車を用いて、対象橋梁毎に主桁ひずみの影響線をあらかじめ算出しておくための計測である。影響線算出の方法は以下に示す通りである。

図-2.5.1 に示すように、橋梁を両端単純支持の一本のはりであるとすると、荷重入力Pに対する主桁ひずみの応答値は、以下のように表される。

$$\varepsilon(x) = \frac{\sigma}{E} = \left( \frac{y'}{EI} \right) M(x) = EZ \cdot P \frac{x'}{2} \quad (\text{式1})$$

ここに、 $\varepsilon$  : ひずみの応答値

$y'$  : 中立軸から下フランジまでの距離

$Z$  : 主桁の断面係数

$EI$  : 主桁の曲げ剛性

$x$  : 位置

$$M(x) = P \cdot \frac{x'}{2} \quad (\text{式2})$$

$x'$  : 集中荷重 P の位置 (床版のひずみ応答で算出)

$$\begin{cases} x' = x & (0 \leq x \leq \frac{L}{2}) \\ x' = L - x & (\frac{L}{2} \leq x \leq L) \end{cases}$$

ここに、 $L$  : スパン長 (m)

実際の橋梁は、奥行き方向に複数の車線や主桁を有しており、各車線に対応した主桁にひずみゲージを設置している当システムでは、主桁の断面係数 $Z$ 、曲げ剛性 $EI$ といった諸量は、測定橋梁毎、車線毎に、橋梁構造、ゲージ貼り付け位置などの条件に応じて固有の値が定まることとなる。ここで、荷重車の軸数が $n$ 、橋梁の車線数を $m$ とすると、 $k$ 車線に設置したひずみゲージの位置に生じるひずみは $\varepsilon_k$ は、各軸重 $P_{ik}$ により生じるひずみ $\varepsilon_i(x)$ の計算値の重ね合わせで(式3)のように表すことができる。

$$\varepsilon_k(x) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i(x_i) = EZ_k \sum_{i=1}^n \left( P_{ik} \frac{x_i'}{2} \right) \quad (\text{式3})$$

そして、(式4)に示すように各車線毎に荷重車の各軸分を重ね合わせたひずみの計算値 $\varepsilon_k$ と荷重車走行時のひずみの実測値 $d_k$ との差が最小となるように連立方程式を作成し、ひずみの影響線を設定する。

$$\left. \begin{aligned}
 s_1(x) &= \sum_{k=1}^m \{ \varepsilon_k(x, P_{1k}, \mathbf{EZ}_k) - d_1(x) \} \rightarrow \text{最小} \\
 s_2(x) &= \sum_{k=1}^m \{ \varepsilon_k(x, P_{2k}, \mathbf{EZ}_k) - d_2(x) \} \rightarrow \text{最小} \\
 &\dots \dots \dots \\
 s_k(x) &= \sum_{k=1}^m \{ \varepsilon_k(x, P_{ik}, \mathbf{EZ}_k) - d_k(x) \} \rightarrow \text{最小}
 \end{aligned} \right\} \text{(式4)}$$

$\mathbf{EZ}_k$  : 車線Kに対応した主桁の影響線

$P_{ik}$  : 車線Kにおけるi番目の軸重

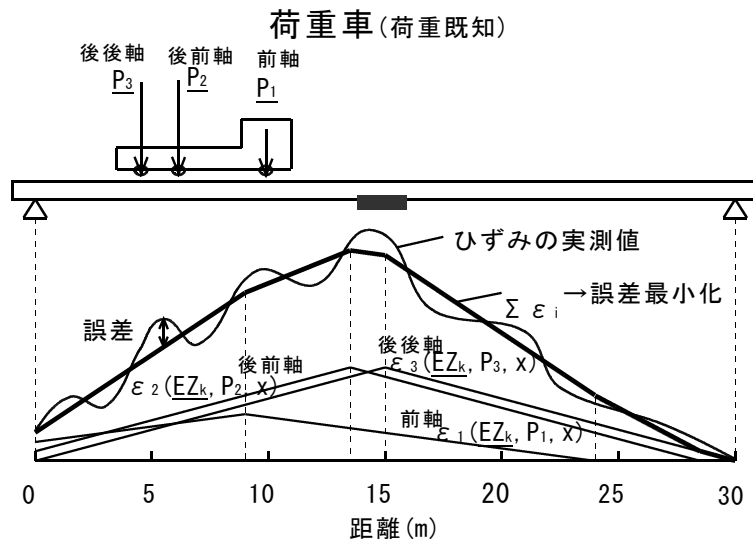


図-2.5.1 ひずみの実測値と理論波形

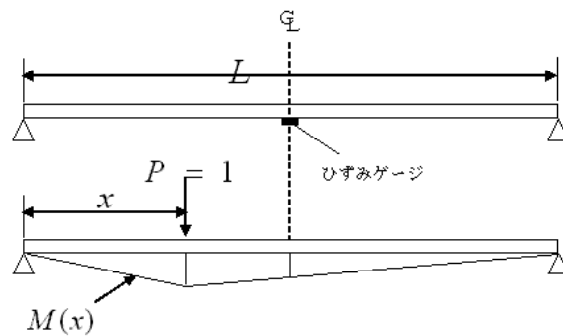


図-2.5.2 曲げモーメントの算出



## (2) 本計測 (一般車両の重量算出)

重量が未知の一般車両については、未知の重量 $P_{ik}$ を荷重車を用いて求めた主桁のひずみの計算値 $\varepsilon_k(x)$ と、ひずみの実測値 $d_k(x)$ との誤差 $s_k(x)$ が最小となるように車線毎に未知の軸重 $P_{ik}$ を計算する。

この考え方は、橋梁上に存在する車両数に関係なく適用される。橋梁上に存在する全ての車軸の軸重を上記計算で求めておき、車種判別アルゴリズムにより分離された車両ごとに軸重を合計して総重量が求められる。また、同一方向に複数の車線を有する道路の場合、誤差最小化の計算は、各車線に対応した主桁ひずみのデータを用いて、車線毎に行い、当該車線を走行した車両の重量計算結果を出力する。

なお、計算は車両間の走行速度の違いに対応できるように、(式5)に示すように位置 $x$ の代わりに時間 $t$ を用いて行う。一般車両の重量算出の考え方を図-2.2.3に示す。

$$s_1(t) = \sum_{k=1}^m \{ \varepsilon_k(t, P_{ik}, EZ_k) - d_i(t) \} \rightarrow \text{最小}$$

$$s_2(t) = \sum_{k=1}^m \{ \varepsilon_k(t, P_{ik}, EZ_k) - d_2(t) \} \rightarrow \text{最小} \quad (\text{式5})$$

. . . . .

$$s_k(t) = \sum_{k=1}^m \{ \varepsilon_k(t, P_{ik}, EZ_k) - d_k(t) \} \rightarrow \text{最小}$$

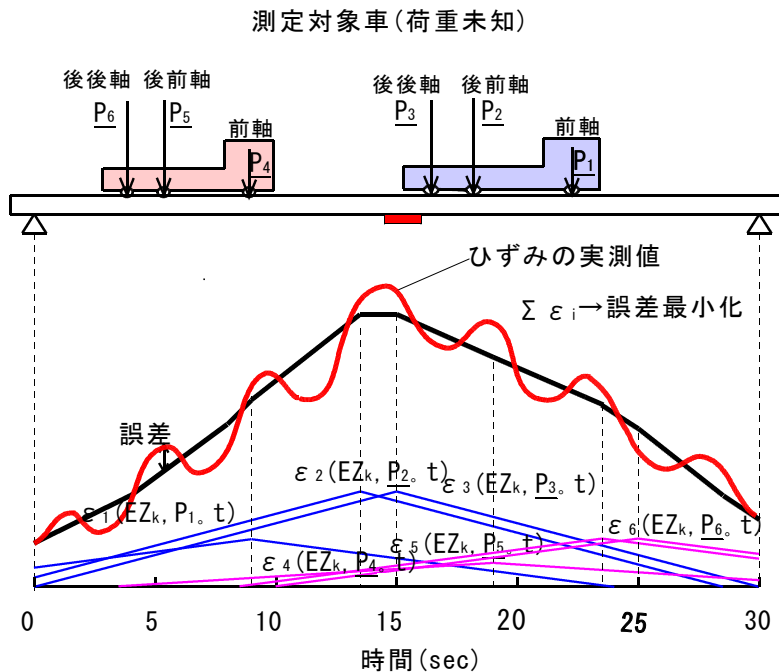


図-2.5.3 重量算出の考え方

## 2.6 各種の処理

### 2.6.1 ノイズの処理

橋梁部材の応答波形には、自動車荷重以外の外乱による振動や電波無線の影響など、様々なノイズが混入し、それらが算定結果に大きな影響を及ぼすことがある。特に、応答時間の短い部材の応答を用いる車軸の特定においては、車軸による応答とノイズとを混同することがあり注意が必要である。

そのため、当システムで記録されたひずみは、不感帯を設け、一定の値（以下、「不感帯」という）に達しない応答は、処理対象とならないようにしている。不感帯は、部材のひずみ応答波形の特性をふまえ、ノイズの影響を適切に除去できる範囲を設定する必要がある。

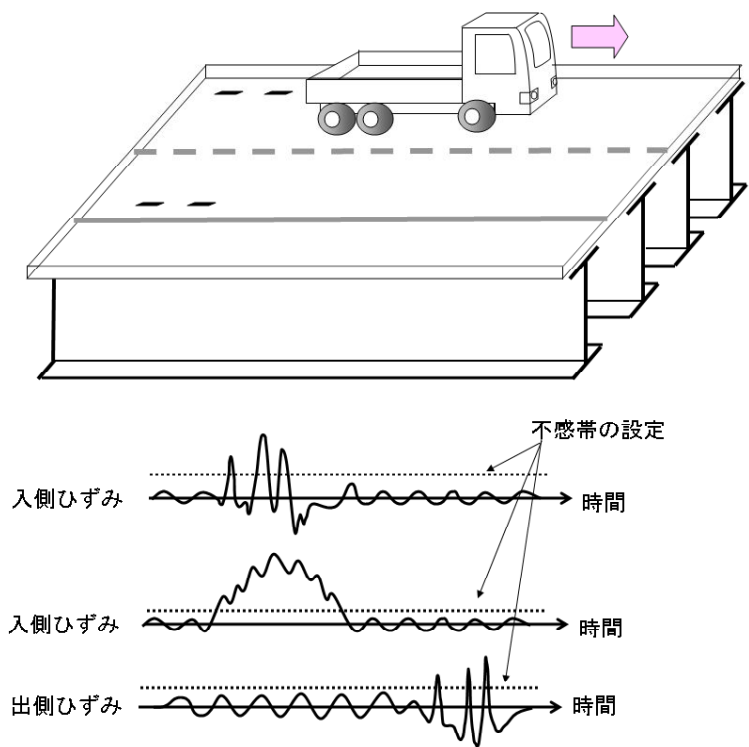


図-2.6.1 不感帯の設定

## 2.6.2 温度変化に対する処理

鋼桁のひずみ応答を利用して重量算定を行う当システムでは、図-2.6.2 のイメージに示すように、温度変化の影響により、主桁のひずみ変動し、車両重量の算定結果に影響を及ぼす場合がある。そのため、当システムでは無載荷状態における主桁のひずみが、常に0の状態に保たれるように自動的な処理を行っている。

処理の方法は、片側1車線の場合、図-2.6.3 に示すように主桁ひずみの極大点間 a-c の中点 b の前後 0.5 秒の平均値を基線（0 の状態）とする。複数車線の場合は、主桁ひずみの極大点間 a-c の所用時間が 9 秒以上の場所を見つけ、さらにこの区間の中点 b の主桁ひずみが不感帯以下の場合に中点 b の前後 0.5 秒の平均値を基線とする。また、全ての車線の主桁ひずみが不感帯以下の場合は、10 分ごとに記録されるバイナリファイルの先頭から 1 秒間の平均値を基線とする。



図-2.6.2 温度変化の影響による0点シフトのイメージ

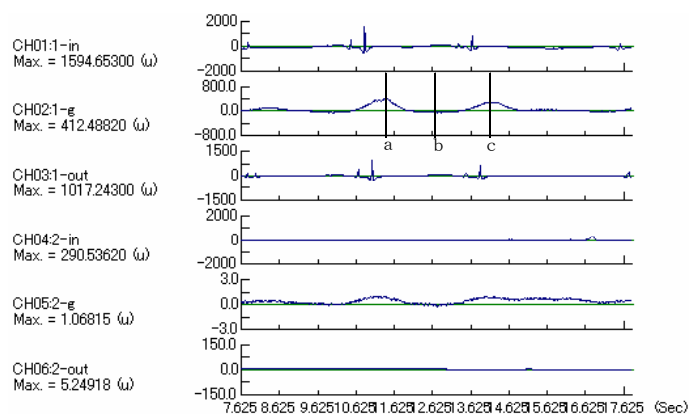


図-2.6.3 主桁下フランジを用いた処理

### 2.6.3 隣接軸の処理

図-2.6.4 は、軸間距離 1.6m 以下の隣接軸の軸間距離と軸重の関係を、車両諸元表の分析から示したものである。これによると、隣接する車軸の軸重の比率（以下、「軸重比」という）が 1.0 ～ 1.1 の車両が 90% 近くを占めていることがわかる。

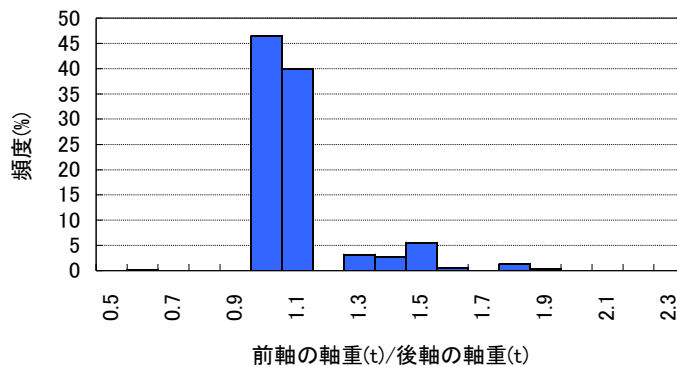


図-2.6.4 軸間距離と軸重の関係

橋梁上に同時載荷される車軸数が多くなると、主桁の応答値から各軸重を算定する過程で、算定精度が低下する可能性が高くなる。そのため、軸間距離が 1.6 m 以内のタンデム軸やトリプル軸においては、各軸重を同一とする仮定を設けた。

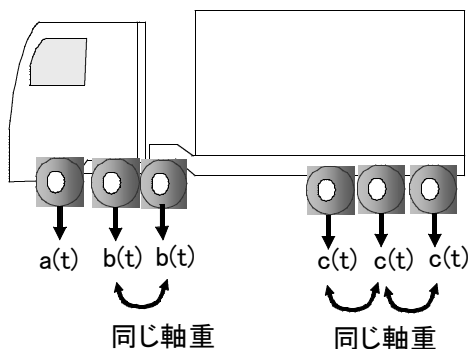


図-2.6.5 隣接軸の処理

## 2.6.4 低速走行車両の処理

渋滞時は、加速・減速に伴う走行速度の変化が頻繁に発生する。当システムでは、橋梁上を一定速度で通過すると仮定して計算を行っているため、渋滞時には、算定精度が低下する可能性がある。そのため、渋滞時には重量計算を行わず適用範囲外としている。

当システムでは、一台の車両が橋梁に進入してから通過するまでに 10 秒以上を要する場合と定義した。例えば、橋長 30m の橋梁の場合、 $10.8\text{km/h}(=30\text{m}/10\text{s}\times 3600/1000)$ 以下になると、渋滞とみなし重量計算は実施しない。

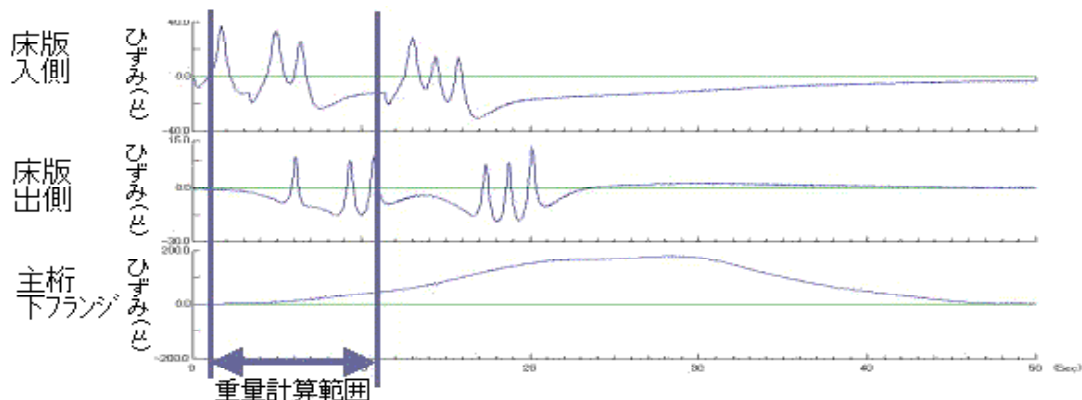


図-2.6.6(1) 渋滞時の波形の例

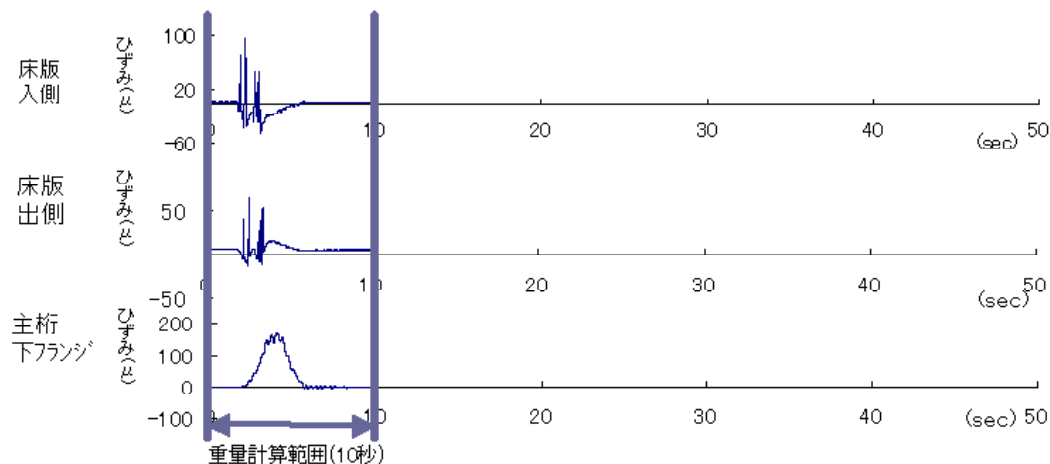


図-2.6.6(2) 時速 40km の波形の例