

筑波大学大学院博士課程  
理工情報生命学院  
システム情報工学研究群修士論文

電子連結されたトラック隊列と  
橋梁の動的相互作用に  
関する数値的検討

佐久間 活機  
修士（工学）  
（構造エネルギー工学学位プログラム）

指導教員 山本 亨輔

2024年3月

## 概要

近年、物流業界における深刻なドライバー不足の緩和・解決が期待できる技術として、電子連結による隊列走行が注目されている。電子連結は、物理的連結よりも車間距離の調整が容易である。よって、車間距離などのパラメータを調整しながら、橋梁の疲労蓄積を遅らせる方策が考えられる。そこで、本研究では、車間距離、車両速度、橋長、車両台数、路面凹凸の5つのパラメータに着目して、隊列走行車群と橋梁の数値計算モデルを作成し、隊列走行車群が橋梁の動的応答に及ぼす影響を明らかにした。結果として、5つのパラメータは、すべて橋梁の動的応答に大きな影響をもたらしていることが分かった。また、路面凹凸を適切に保持することで、橋梁に悪影響を及ぼす可能性が示唆された。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景	1
1.1.1	物流業界 2024 問題	1
1.1.2	電子連結技術による自動トラック隊列走行	1
1.2	既往の研究	2
1.3	研究目的	2
<b>第2章</b>	<b>方法</b>	<b>3</b>
2.1	VBI システム	3
2.2	車両モデル	3
2.3	橋梁モデル	5
2.3.1	入力プロファイル	6
2.3.2	接地力	7
2.3.3	Newmark- $\beta$ 法	7
2.3.4	収束条件	8
2.4	路面モデル	8
<b>第3章</b>	<b>数値実験</b>	<b>9</b>
<b>第4章</b>	<b>結果と考察</b>	<b>11</b>
4.1	橋梁最大たわみ	11
4.2	たわみ比	13
4.3	RMS (二乗平均平方根)	14
4.4	共振について	14
4.5	路面凹凸の影響	17
<b>第5章</b>	<b>まとめ</b>	<b>23</b>
	謝辞	24
	参考文献	25
	付録	27

# 目次

1.1	宅配便取扱個数の変遷	1
1.2	隊列走行のイメージ図	2
2.1	VBI システムの概要	3
2.2	車両モデル (ハーフカーモデル)	4
3.1	路面凹凸	10
3.2	本研究における車間距離の定義	10
4.1	速度/車間距離の分布図	11
4.2	各橋長に対してのたわみ (路面凹凸 ExtraGood)	12
4.3	橋長と車両台数によるたわみの違い (速度 10m/s)	13
4.4	橋長 10m, 速度 10m/s, 車両台数 1 台の時の橋梁中点のたわみ (時刻歴)	14
4.5	各橋長に対してのたわみ比 (路面凹凸 ExtraGood)	15
4.6	各橋長に対してのたわみ比 (路面凹凸 ExtraGood) コンター図	16
4.7	橋長 20m の時のたわみ比	17
4.8	各橋長に対しての RMS (路面凹凸 ExtraGood)	18
4.9	橋長 45m, 車間距離 13.545m, 車両速度 20m/s の時のそれぞれの指標	19
4.10	各 $i_t$ による共振速度 (m/s)	20
4.11	各橋長と車間距離に対する速度とたわみ比の関係	21
4.12	全データの路面凹凸の違いによる各指標の差	22
5.1	各橋長に対してのたわみ (路面凹凸 ExtraGood) 付録	27
5.2	各橋長に対してのたわみ比 (路面凹凸 ExtraGood) 付録	28
5.3	各橋長に対しての RMS (路面凹凸 ExtraGood) 付録	29

# 第1章 はじめに

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 物流業界 2024 問題

近年、我が国では宅配便の数が増加している（図 1.1） [1]。その宅配便の9割は、トラックが担っている。しかし、その宅配を担っている物流業界は多くの問題を抱えている。例えば、全産業と比べて、労働時間が長いこと、賃金が低いこと、人手が足りていないこと、働き手が高齢化していること等が挙げられる [2]。

このような問題への対策を講じないと、2024年には輸送力が14%減少し、2030年には34%減少することが見込まれて、国民生活や経済への影響が心配されている。この問題を「物流業界 2024 問題」と言われている。

そこで、この問題の対策の1つとして、「物流の効率化」が挙げられている。

### 1.1.2 電子連結技術による自動トラック隊列走行

物流の効率化を目指すために、国内外では「電子連結技術による自動トラック隊列走行 (Automated Truck Platooning: ATP)」が注目されている [3][4][5][6]。この技術は数台のトラックを電子的に連結し、隊列走行車群を構成するため、ドライバー1人が運搬できる荷物量を増やすことができ、輸送効率の向上が期待されている。

また、この技術は、燃料消費量や炭素排出量の削減も期待されている [7][8]。しかし、トラックなどの重量車両は、一般車両と比べて、重量や軸重が大きく、舗装や橋梁などの道路構造物の疲労損傷を進行させやすい。さらに隊列走行は、その特性から車間距離を

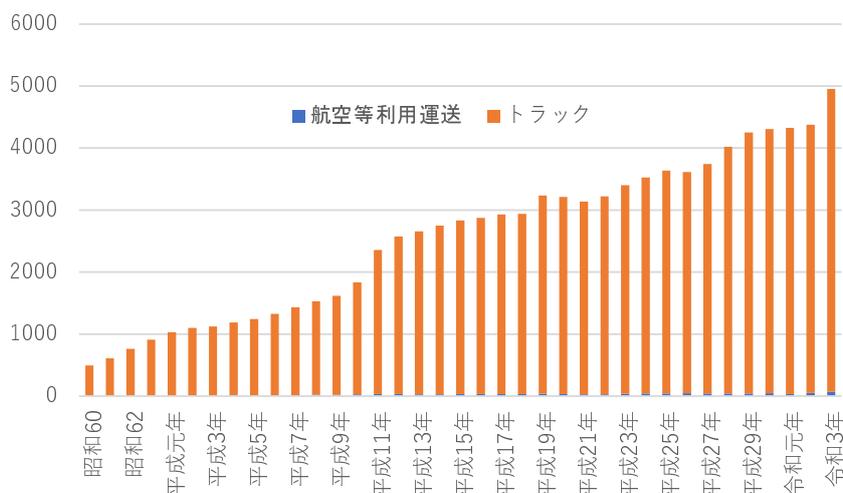


図 1.1: 宅配便取扱個数の変遷

短くし (<10m), 走行するため, 重量車両が集中的に橋梁に負荷をかける (図 1.2). よって, 橋梁へどのような影響を受けるか, 検討する必要がある.

ここで, 電子連結は, 物理的連結よりも車間距離の調整が容易である. よって, 車間距離を調整しながら, 橋梁への損傷を軽くさせる方策が考えられる.

## 1.2 既往の研究

自動トラック隊列走行が橋梁に及ぼす影響を調べるために, 先行研究では数値計算による研究が多くなされている. 例えば, Tianyang[9][10][11]らは, 15m以下の橋梁では定常共振, 支間長が長ければ(橋梁固有振動数が6.5Hz)過渡の共振影響が発生し, DAF(Dynamic Amplification Factor)が増加すること調べた. そして, 路面凹凸が粗ければ, ATPが従来の規格(中国, アメリカ)であるDAFを越える可能性があるとして指摘している. そのため, 動的影響を軽減させる速度について提案している.

テキサス州運輸省の報告書[8]では, 従来の橋梁建設設計法では, 今後出てくるトラック隊列走行に対応できない可能性があるとして指摘している.

Mohamed[12]らは, ATPが橋梁の曲げモーメントやせん断力に及ぼす影響を調べた. 車両台数とその間隔が2つの指標に大きな影響を与えていることが分かった. また3つの荷重評価手法を用いて, 橋梁の荷重評価に与える影響を検討し, 最適なパラメータを出力するガイドラインの開発を行った.

## 1.3 研究目的

1.2で紹介した既往の研究は, 米国, 欧州, 中国などを舞台にしており, これらの国の物流に用いられる最大重量車の重さは日本の25tよりもはるかに超えている. そこで本研究では, 車両モデルを日本で用いられる大型車両に設定し, 国土交通省が現在考えている案を参考に[2], 橋梁の動的影響を調べる. また, 車両の速度, 車間距離や台数, 橋長, 路面凹凸を変化させ, その軽減策について考察する.

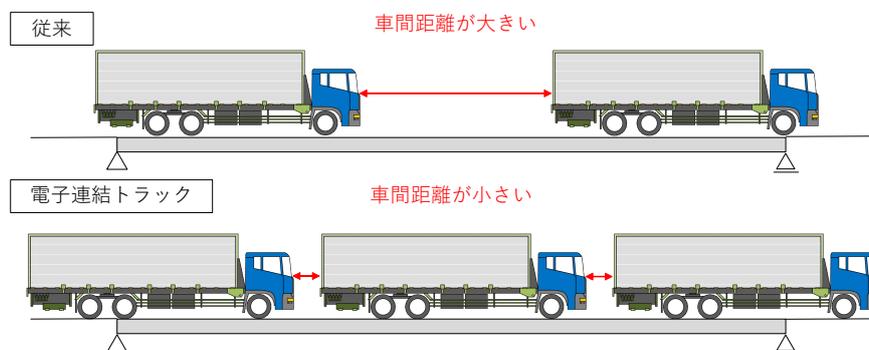


図 1.2: 隊列走行のイメージ図

## 第2章 方法

### 2.1 VBIシステム

本研究で用いる VBI システム [13][14][15][16] の概要を図 2.1 に示す。一般的に、車両と橋梁の応答は、互いの出力を入力とする相互作用によってモデル化される。この相互作用を考慮した数値シミュレーションは、以下の手順により実現される。はじめに、路面プロファイルのみを車両システムに入力して、その時の車両振動を計算する。そして、得られた車両振動から橋梁への接地力を求め、橋梁振動を計算する。この橋梁振動を車両走行位置の値に変換した上で、路面プロファイルと合わせることで、新たな入力プロファイルを作る。入力プロファイルを車両振動に入力し、再び、車両振動を再計算する。以上の工程を繰り返すことで、車両と橋梁の変位振動が求められる。

### 2.2 車両モデル

車両モデルは図 2.2 に示すようなハーフカーモデルを採用した。各車両の運動方程式は、

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{K}_v \mathbf{z}(t) = \mathbf{F}_v(t) \quad (2.1)$$

ここで  $\mathbf{M}_v$ ,  $\mathbf{C}_v$ ,  $\mathbf{K}_v$  は車両システムの質量、減衰、剛性マトリクスであり、式 (2.2), (2.3),

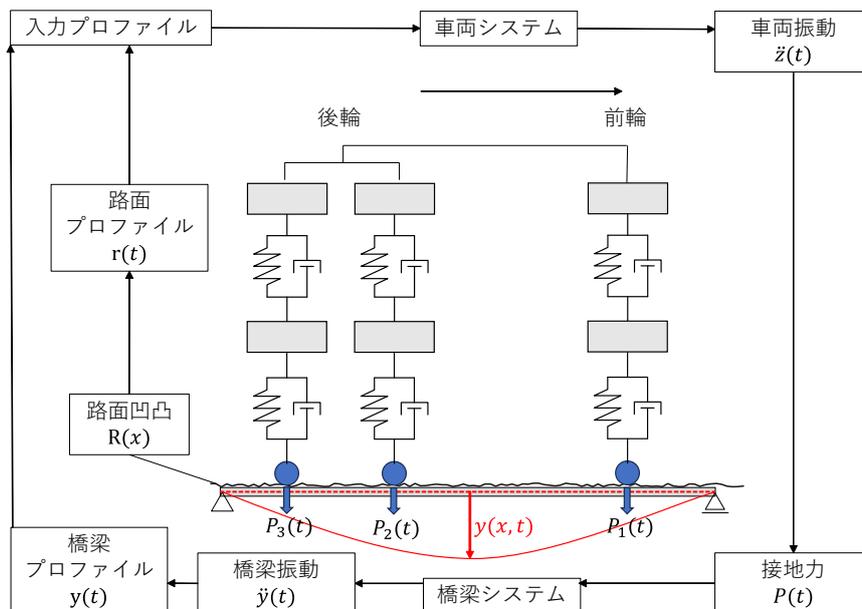


図 2.1: VBI システムの概要

(2.4) で表される.

$$\mathbf{M}_v = \begin{bmatrix} m_{s1} & m_{s1} \cdot d_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_{s2} & -m_{s2} \cdot d_{22} & m_{s2} \cdot d_{31} & 0 & 0 & 0 \\ m_{s3} & -m_{s3} \cdot d_{22} & -m_{s3} \cdot d_{32} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{u1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{u2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{u3} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{C}_v = \begin{bmatrix} c_{s1} & c_{s1} \cdot d_{21} & 0 & -c_{s1} & 0 & 0 \\ c_{s2} & -c_{s2} \cdot d_{22} & c_{s2} \cdot d_{31} & 0 & -c_{s2} & 0 \\ c_{s3} & -c_{s3} \cdot d_{22} & -c_{s3} \cdot d_{32} & 0 & 0 & -c_{s3} \\ -c_{s1} & -c_{s1} \cdot d_{21} & 0 & c_{s1} + c_{u1} & 0 & 0 \\ -c_{s2} & c_{s2} \cdot d_{22} & -c_{s2} \cdot d_{31} & 0 & c_{s2} + c_{u2} & 0 \\ -c_{s3} & c_{s3} \cdot d_{22} & c_{s3} \cdot d_{32} & 0 & 0 & c_{s3} + c_{u3} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{K}_v = \begin{bmatrix} k_{s1} & k_{s1} \cdot d_{21} & 0 & -k_{s1} & 0 & 0 \\ k_{s2} & -k_{s2} \cdot d_{22} & k_{s2} \cdot d_{31} & 0 & -k_{s2} & 0 \\ k_{s3} & -k_{s3} \cdot d_{22} & -k_{s3} \cdot d_{32} & 0 & 0 & -k_{s3} \\ -k_{s1} & -k_{s1} \cdot d_{21} & 0 & k_{s1} + k_{u1} & 0 & 0 \\ -k_{s2} & k_{s2} \cdot d_{22} & -k_{s2} \cdot d_{31} & 0 & k_{s2} + k_{u2} & 0 \\ -k_{s3} & k_{s3} \cdot d_{22} & k_{s3} \cdot d_{32} & 0 & 0 & k_{s3} + k_{u3} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

車両の振動を表す変数  $\mathbf{z}(t)$  は式 (2.5) のように表される.

$$\mathbf{z}(t) = [z_{s1G} \ \theta_{s1G} \ \theta_{s2G} \ z_{u1} \ z_{u2} \ z_{u3}]^T \quad (2.5)$$

式 (2.1) にある  $\dot{\mathbf{z}}(t)$ ,  $\ddot{\mathbf{z}}(t)$  はそれぞれ  $\mathbf{z}(t)$  の 1 階・2 階時間微分を表しており, 速度振動と加速度振動である.

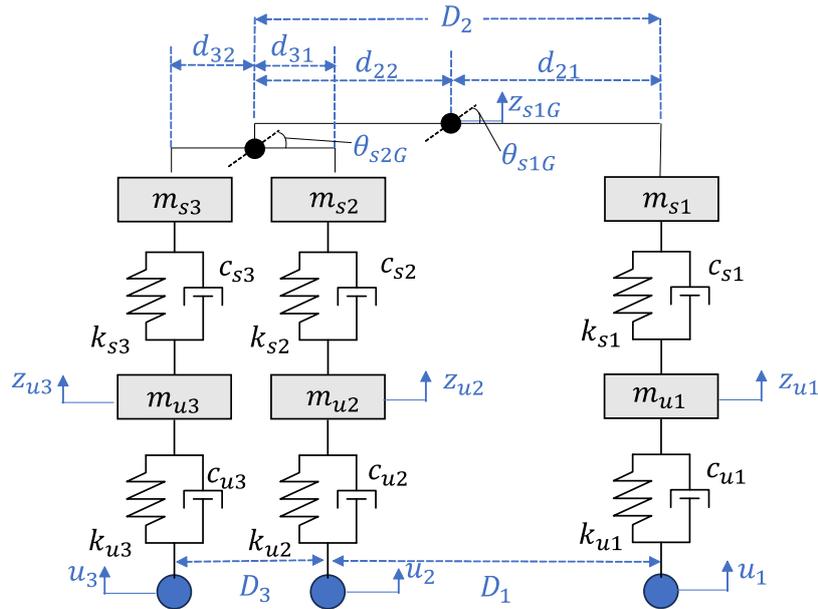


図 2.2: 車両モデル (ハーフカーモデル)

また,  $\mathbf{F}_v(t)$  は外力を示しており, 式 (2.6) に示した.

$$\mathbf{F}_v(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ c_{u1} & 0 & 0 \\ 0 & c_{u2} & 0 \\ 0 & 0 & c_{u3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ k_{u1} & 0 & 0 \\ 0 & k_{u2} & 0 \\ 0 & 0 & k_{u3} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

本研究では, 隊列走行をモデルにするため, 車両が  $n$  台となると, 式 (2.2)~(2.4) のマトリクスは  $6n \times 6n$  となり, 式 (2.5) は  $n \times 6n$ , 式 (2.6) は第 1 項, 第 2 項それぞれ  $3n \times 6n$  となる.

## 2.3 橋梁モデル

橋梁は曲げのみを考慮した 1 次元オイラー・ベルヌーイ単純梁とした. 橋梁の運動方程式は,

$$\rho A \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EI \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} \right) = p(x, t) \quad (2.7)$$

で表される. ここで,  $p(x, t)$  は外力であり, 位置  $x_i$  に作用する集中荷重  $P_i(t)$  の和で表すと式 (2.8) となる.

$$p(x, t) = \sum_{i=1}^3 \delta(x - x_i(t)) P_i(t) \quad (2.8)$$

ここで,  $\delta(x)$  は Dirac のデルタ関数である. 式 (2.7) の重み付き残差式は,

$$\int_0^L \gamma \left( \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - p \right) dx = 0 \quad (2.9)$$

である. ここで,  $\gamma$  は重みを表す. 式 (2.9) を弱形式化すると,

$$\int_0^L \left( \rho A \gamma \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^2} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - p \right) dx = 0 \quad (2.10)$$

を得ることができる.

次に任意の基底関数  $\mathbf{N}(x)$  と節点における数値解  $\mathbf{y}(t)$  を用いて, 橋梁振動  $\mathbf{y}(x, t)$  を離散化する. 近似解は,

$$\mathbf{y}(x, t) = \mathbf{N}(x) \cdot \mathbf{y}(t) \quad (2.11)$$

となる. 同様に, 重みも離散化する.

$$\gamma(x) = \mathbf{N}(x) \cdot \boldsymbol{\gamma} \quad (2.12)$$

式 (2.11) と式 (2.12) を式 (2.9) に代入すると, 式 (2.13) を得る.

$$\boldsymbol{\gamma}^T (\mathbf{M}_b \mathbf{y}(t) + \mathbf{K}_b \mathbf{y}(t) - \mathbf{F}_b(t)) = 0 \quad (2.13)$$

ここで,  $\mathbf{M}_b$  と  $\mathbf{K}_b$  はそれぞれ橋梁の質量, 剛性マトリクスである. 基底関数  $\mathbf{N}(x)$  がエルミート基底の時,  $\mathbf{y}(t)$  は各節点におけるたわみとたわみ角を成分とする変形量ベクトルであ

り,  $\mathbf{F}_b(t)$  は各節点における集中外力と力のモーメントを成分とする外力ベクトルである. さらに, レイリー減衰を考慮し,

$$\mathbf{C}_b = \alpha \mathbf{M}_b + \beta \mathbf{K}_b \quad (2.14)$$

を導入する.  $\alpha, \beta$  については, 式 (2.15), (2.16) のように求める.

$$\alpha = \frac{2\xi\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (2.15)$$

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_2} \quad (2.16)$$

ここで,  $\xi$  は橋梁減衰比であり,  $\omega_n$  は式 (2.17) で表される.

$$\omega_n = \frac{n^2\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2.17)$$

である. 任意の重み  $\gamma$  に対して, 式 (2.13) の等号成立条件を求めると, 以下のような有限要素式が得られる.

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}_b \mathbf{y}(t) = \mathbf{F}_b(t) \quad (2.18)$$

### 2.3.1 入力プロファイル

車両システムの入力である入力プロファイル  $\mathbf{u}(t)$  は, 路面プロファイル  $\mathbf{r}(t)$  と橋梁プロファイル  $\tilde{\mathbf{y}}(t)$  の和で与えられ, 式 (2.19) で表される.

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{r}(t) + \tilde{\mathbf{y}}(t) \quad (2.19)$$

ここで, 路面プロファイルとは, 車軸位置における路面凹凸を表しています. 路面凹凸が  $R(x)$ , 車軸位置が  $x_i(t)$  の時,

$$r_i(t) = \mathbf{R}(x_i(t)) \quad (2.20)$$

と表される.  $r_i(t)$  は,  $\mathbf{r}(t)$  の第  $i$  成分である. 一方, 橋梁プロファイル  $\tilde{y}_i(t)$  は, 車軸位置  $x_i(t)$  での橋梁振動のことであり,

$$\tilde{y}_i(t) = y(x_i(t), t) \quad (2.21)$$

である. 一方, 橋梁振動  $\mathbf{y}(t)$  は, 橋梁上に固定された各節点の変形量ベクトルであるから, 車軸位置  $x_i(t)$  における橋梁変位  $\tilde{y}_i(t)$  に変換する必要がある. これは離散化で用いた時と同じ基底  $\mathbf{N}(x)$  をそのまま用いれば, 変換マトリクス  $\mathbf{L}(t)$  が,

$$\mathbf{L}(t) = \left[ \mathbf{N}(x_1(t)) \quad \mathbf{N}(x_2(t)) \quad \mathbf{N}(x_3(t)) \quad \mathbf{N}(x_4(t)) \right] \quad (2.22)$$

と得られるので, 橋梁プロファイルは,

$$\tilde{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{L}^T(t) \mathbf{y}(t) \quad (2.23)$$

となる.

### 2.3.2 接地力

橋梁への入力である接地力は、タイヤに働く復元力に相当する。ただし、車両の運動方程式 (式 (2.1)) ではつり合い位置を基準としているため、重力項が消えていることに注意を要する。復元力の計算では自然長にある時を基準として、重力の影響を考慮する。車体の回転中心が重心位置であることなどに注意すると、それぞれ前輪と後輪の接地力は、

$$\mathbf{P}_1(t) = - \left( m_{s1}(\ddot{z}_{s1G} + d_{21}\ddot{\theta}_{s1G} + g) + m_{u1}(\ddot{z}_{u1} + g) \right) \quad (2.24)$$

$$\mathbf{P}_2(t) = - \left( m_{s2}(\ddot{z}_{s1G} - d_{22}\ddot{\theta}_{s1G} + d_{31}\ddot{\theta}_{s2G}) + m_{u2}(\ddot{z}_{u2} + g) \right) \quad (2.25)$$

$$\mathbf{P}_3(t) = - \left( m_{s3}(\ddot{z}_{s1G} - d_{22}\ddot{\theta}_{s1G} + d_{32}\ddot{\theta}_{s2G}) + m_{u3}(\ddot{z}_{u3} + g) \right) \quad (2.26)$$

である。橋梁に働く外力ベクトルは、

$$\mathbf{F}(t) = \mathbf{L}(t) \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \end{bmatrix} + \mathbf{H}(t) \quad (2.27)$$

である。 $\mathbf{H}(t)$  は支点反力を表す。

### 2.3.3 Newmark- $\beta$ 法

車両振動  $\mathbf{z}(t)$ 、橋梁振動  $\mathbf{y}(t)$  はそれぞれの運動方程式に Newmark- $\beta$  法を適用して求める。運動方程式が MCK 系で式 (2.28) のように表されるとする。

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{s}}(t) + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{s}}(t) + \mathbf{K}_s \mathbf{s}(t) = \mathbf{Q}(t) \quad (2.28)$$

ここで、時間関数である  $\mathbf{s}(t)$  を離散化して  $\mathbf{s}_k$  とする。  $\mathbf{s}_k$  は橋梁または車両の応答変位であり、  $\Delta t$  を時間刻みとすると、

$$\mathbf{s}_k = \mathbf{s}(k\Delta t) \quad (2.29)$$

である。Newmark- $\beta$  法では、

$$\dot{\mathbf{s}}_k = \dot{\mathbf{s}}_{k-1} + \Delta t \left( (1 - \lambda)\ddot{\mathbf{s}}_{k-1} + \lambda\ddot{\mathbf{s}}_k \right) \quad (2.30)$$

$$\mathbf{s}_k = \mathbf{s}_{k-1} + \Delta t \dot{\mathbf{s}}_{k-1} + \Delta t^2 \left( \frac{1}{2} - \mu \right) \ddot{\mathbf{s}}_{k-1} + \mu \Delta t^2 \ddot{\mathbf{s}}_k \quad (2.31)$$

と仮定する。Newmark- $\beta$  法を適用すると、

$$\ddot{\mathbf{s}}_k = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b}_k \quad (2.32)$$

とすることができる。ここで、

$$\mathbf{A} = \left[ \mathbf{M} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{C} + \frac{(\Delta t)^2}{4} \mathbf{K} \right] \quad (2.33)$$

$$\mathbf{b}_k = \mathbf{Q}_k + \mathbf{C} \mathbf{b}_1 + \mathbf{K} \mathbf{b}_2 \quad (2.34)$$

$$\mathbf{Q}_k = \mathbf{Q}(k\Delta t) \quad (2.35)$$

$$b_1 = -\dot{s}_{k-1} - \frac{s''_{k-1}}{2}\Delta t \quad (2.36)$$

$$b_2 = -s_{k-1} - \dot{s}_{k-1}\Delta t - \frac{s''_{k-1}}{4}(\Delta t)^2 \quad (2.37)$$

である。本研究では  $\lambda = 0.5$ ,  $\mu = 0.25$  とした。

### 2.3.4 収束条件

最初に得られる車両振動  $\mathbf{Z}$  を  $\mathbf{Z}^0$  とする。  $\mathbf{Z}^0$  を用いて 2.3 で記載した方法で橋梁振動  $\mathbf{Y}^0$  を求める。この橋梁振動  $\mathbf{Y}^0$  を用いて、  $\mathbf{Z}^1$  を求めることができる。これを繰り返すことによって、  $\mathbf{Z}^i$  から  $\mathbf{Y}^i$  ,  $\mathbf{Y}^i$  から  $\mathbf{Z}^{i+1}$  を求めることができる。この繰り返し計算の収束条件として、

$$\varepsilon = \frac{|Z^{(i+1)} - Z^i|}{|Z^{(i+1)}|} \leq \varepsilon_{\max} \quad (2.38)$$

を定める。また、  $\|\cdot\|$  は 2 次ノルムを示す。

## 2.4 路面モデル

本実験で用いた路面凹凸は式 (4.1) のように周波数関数で表される路面凹凸パワースペクトルに対し、モンテカルロシミュレーションを適用し生成した。

$$S = \frac{a}{\Omega^\xi + b^\xi} \quad (2.39)$$

$\Omega[m^{-1}]$  は単位長さ当たりの測定点数 (空間周波数),  $a$  および  $b$  は路面状態の良否を決めるパラメータである。

### 第3章 数値実験

数値シミュレーションに用いるトラックのパラメータ [17] を表 3.1 に示す. 我が国の最大車両総重量が 25t であるため, それに近い値を採用した.

また, 橋梁のパラメータ [18] を表 3.2 に示す. なお, ヤング率  $E$  は  $35 \times 10^9 [N/m^2]$  とし, 20 要素で分割した.

路面凹凸 ExtraGood, Good の式 (4.2) に用いるパラメータを表 3.3 に示す [15].

また, 図 3.1 にそれぞれの路面凹凸を示す. 本研究では, -10m の位置に 1 台目の第 1 軸 (前輪) があり, 0m 地点から橋梁となっている. その他のパラメータについては, 車間距離は 6.795~14.795m で 0.25m 刻みとし, 33 パターン検討した. 車両速度は 10, 20, 25, 30m/s の 4 パターン, 車両台数は 1~5 台の 5 パターンとし, 合計 10640 パターンの数値実験を行う. なお, 本研究において車間距離は図 3.2 のように車両の 3 軸目から後続車の 1 軸目の距離のことを指す.

表 3.1: トラックパラメータ

	パラメータ名称	記号	値 [単位]
全体	車両総重量	$M$	24420[kg]
	1-2 軸間距離	$D_1$	5.83[m]
	前後軸間距離	$D_2$	6.52[m]
	前軸-重心間距離	$d_{21}$	3.26[m]
	重心-後軸重心間距離	$d_{22}$	3.26[m]
	2-3 軸間距離	$D_3$	1.37[m]
	2 軸-後輪重心間距離	$d_{31}$	0.69[m]
	後輪重心-3 軸間距離	$d_{32}$	0.68[m]
前輪	ばね上質量	$m_{s1}$	5640[kg]
	ばね上減衰	$c_{s1}$	4900[kg/s]
	ばね上剛性	$k_{s1}$	441000[N/m]
	ばね下質量	$m_{u1}$	1300[kg]
	ばね下減衰	$c_{u1}$	19601[kg/s]
	ばね下剛性	$k_{u1}$	3430000[N/m]
後輪	ばね上質量	$m_{s2}, m_{s3}$	7140[kg]
	ばね上減衰	$c_{s2}, c_{s3}$	24501[kg/s]
	ばね上剛性	$k_{s2}, k_{s3}$	1666000[N/m]
	ばね下質量	$m_{u2}, m_{u3}$	1600[kg]
	ばね下減衰	$c_{u2}, c_{u3}$	19601[kg/s]
	ばね下剛性	$k_{u2}, k_{u3}$	3430000[N/m]

表 3.2: 橋梁パラメータ

No.	橋長 [m]	$\rho A$ [kg/m]	$I$ [m <sup>4</sup> ]	1次固有振動数 [Hz]	2次固有振動数 [Hz]
1	5	10875	0.0676	29.39	118.61
2	10	19625	0.1431	7.96	32.13
3	15	28375	0.5386	5.71	23.04
4	20	37125	1.2541	4.28	17.29
5	25	18423	1.3693	4.07	16.41
6	30	21067	2.2318	3.37	13.61
7	35	21752	3.3628	2.99	12.08
8	40	23752	4.7503	2.61	10.52
9	45	25752	6.4178	2.30	9.28
10	50	27752	8.3653	2.05	8.26

表 3.3: 路面凹凸パラメータ

Name	$a$	$b$	$\xi$
ExtraGood	0.001	0.05	2.00
Good	0.003	0.02	2.50

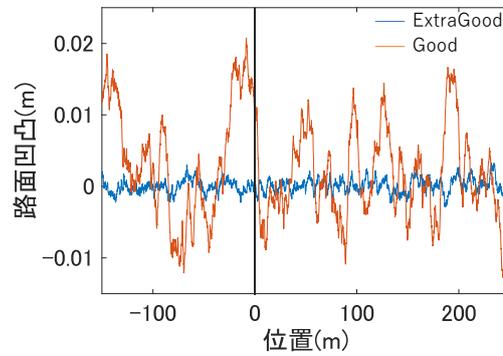


図 3.1: 路面凹凸

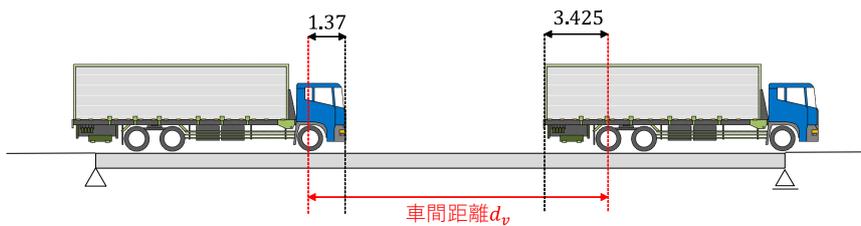


図 3.2: 本研究における車間距離の定義

## 第4章 結果と考察

評価手法として以下の3つの指標を用いて評価する。

- ・ 橋梁中央節点の最大たわみ
- ・ たわみ比
- ・ RMS

最大たわみは、車両が橋梁に及ぼした影響を直接評価するための指標として用いる。しかし、たわみが大きくなることは、必ずしも悪影響とは限らないため、その想定されるたわみ（静的たわみ）を考慮して考える必要がある。そこで、動的なたわみの最大値と静的なたわみの最大値を考慮したたわみ比を算出し、動的な影響と、本研究で設計値として考える静的な影響の比較を行い、設計値の超過について評価する。RMSは橋梁加速度振動の2乗平均平方根を算出し、橋梁に及ぼされるエネルギーや疲労損傷を評価する。

また、本章では、最初に路面凹凸 ExtraGood で走行した際の結果について述べ、4.5節 路面凹凸の影響 で路面凹凸 Good に対しての結果と比較する。また、橋梁の長さを10パターン検討したが、本章ではその一部（5, 15, 25, 35, 45, 50m）の結果を示し、示していないパラメータの結果については付録に示す。

### 4.1 橋梁最大たわみ

各橋梁に対しての最大たわみ(-)の結果を図4.2に示す。

x軸は「速度/車間距離」(以降  $v/d_v$ )として、単位は  $s^{-1}$  であり、Hzと同じ次元である。この分布を図4.1に示す。

図4.2より、短スパン橋（5 15m）では、車両速度、車間距離、車両台数によって変化がない。中スパン橋（20 35m）では、速度/車間距離の影響を受けているが、車両台数の影響は小さいことが分かる。長スパン橋（40 50m）では、速度/車間距離が大きい場合では、車両台数も大きく影響していることが分かる。全体的に、車間距離が短くなる（ $v/d_v$ ）が大きくなる

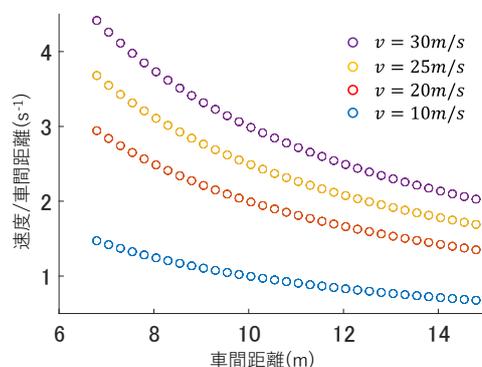
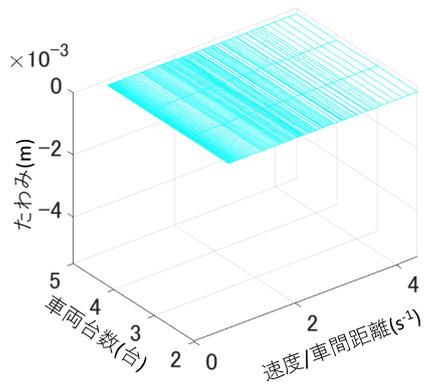
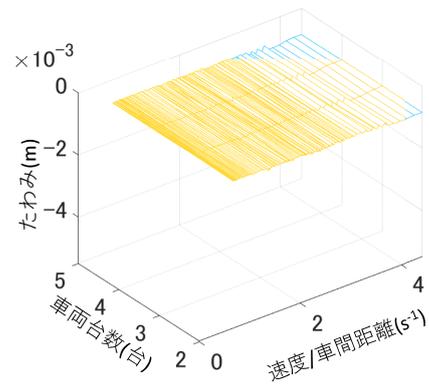


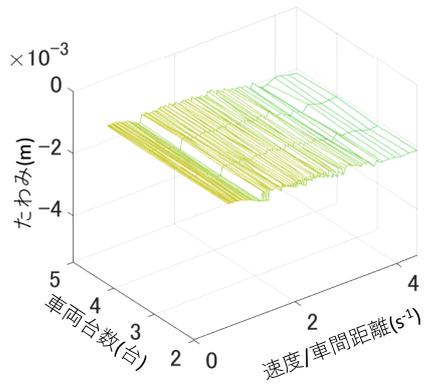
図 4.1: 速度/車間距離の分布図



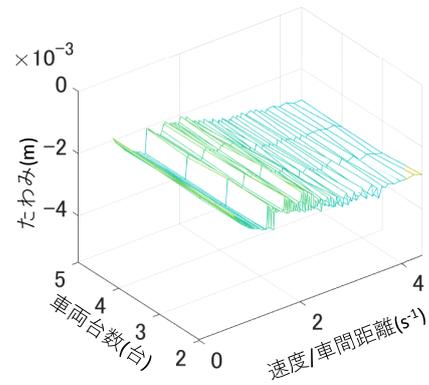
(a) 橋長 5m



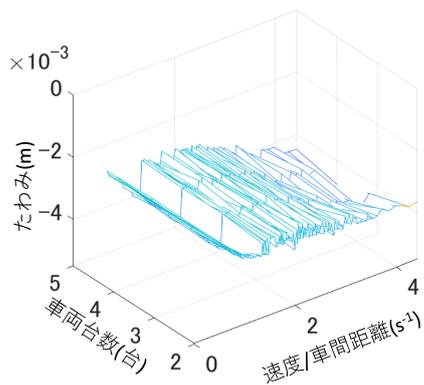
(b) 橋長 15m



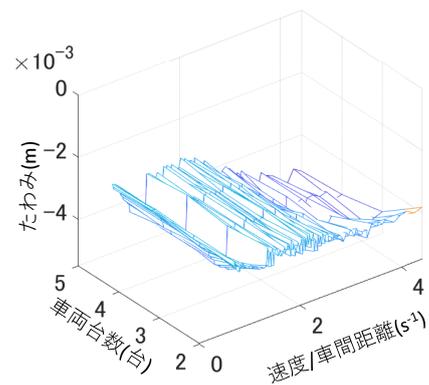
(c) 橋長 25m



(d) 橋長 35m



(e) 橋長 45m



(f) 橋長 50m

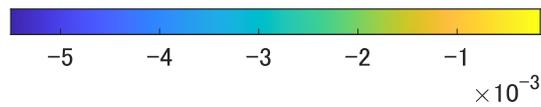


図 4.2: 各橋長に対してのたわみ (路面凹凸 ExtraGood)

につれ、最大たわみが大きくなっていることも分かる。これについても、同様に車間距離が短くなると橋梁上を同時に走行する車両が多くなるからであると考えられる。また車両台数が同数の場合でも、車間距離が短いと最大たわみが発生しやすい橋梁中心付近に、多くの荷重（軸重）が集中するため、たわみが大きくなると考えられる。

結果を詳しく見るために、図 4.3 に同速度におけるたわみの結果を示す。図 4.3a より、橋梁 25m では、車両台数が変化しても、最大たわみはあまり変わらないことが分かる。これは橋梁上を同時に走行できる車両台数に限りがあるためであると考えられる。本研究で用いた車両モデルは全長 11.970m あり、橋梁 25m では 2 台が限界である。そのため、橋梁 25m 以下においては車両台数によって大きくたわみが増えることはないと考えられる。しかし、橋梁 50m (図 4.3b) では、車両台数 2 台とそれ以外の車両台数では、たわみに大きな差があることが分かる。この橋長においては、車間距離を考慮すると、車両台数 3 台が限界であるため、このような結果になったと考えられる。

また、図 4.2 の結果で述べた通り、車間距離が短いと、最大たわみが大きくなるような結果となっている。そして、橋長の長さによって、ある車間距離から最大たわみの減少が落ち着くことが分かる。これも、車間距離を大きくすることで、橋梁上を同時に走行する車両が制限できるため、有効な対策であると考えられる。

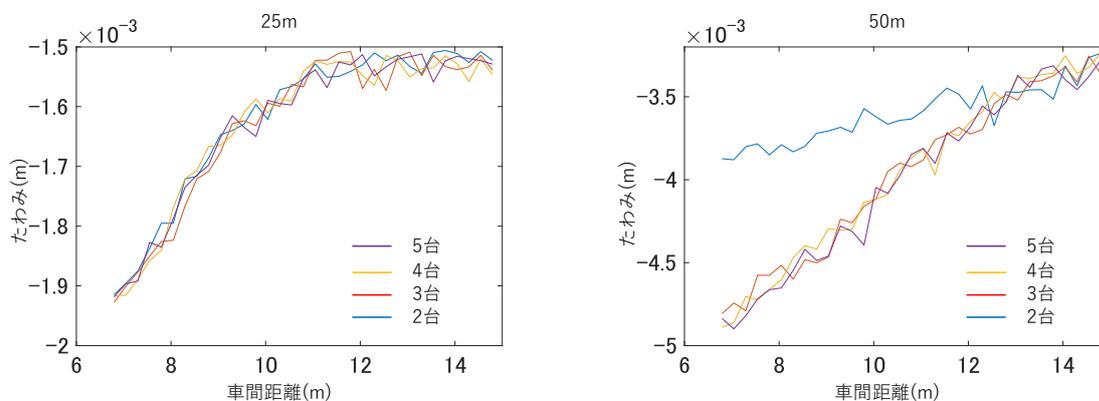
## 4.2 たわみ比

本節では、静的たわみと動的たわみの関係（たわみ比）について述べる。たわみ比は式 (4.1) によって表す。

$$\text{たわみ比} = \text{最大動的たわみ} / \text{最大静的たわみ} \quad (4.1)$$

最大動的たわみ（数値解）は、数値実験上から得られる中心の節点のたわみの最大値を用いた。また、最大静的たわみ（理論解）は、各パターンにおいて、橋梁上に存在する荷重（軸重）を静的荷重とし、各荷重によって得られるたわみ曲線を算出し、すべてのたわみ曲線を合計（重ね合わせの原理）することで、全体のたわみ曲線を得る。そのたわみ曲線の最大値を最大静的たわみとする。ここで、最大静的たわみは必ずしも橋梁の中心に発生するとは限らないことに注意する。

たわみ比の 1 例を図 4.4 に示す。数値解と理論解がよく一致していることを確認できる。



(a) 橋長 25m の時の各パターンにおけるたわみ

(b) 橋長 50m の時の各パターンにおけるたわみ

図 4.3: 橋長と車両台数によるたわみの違い (速度 10m/s)

図 4.5 にたわみ比の結果を示す。短・長スパン橋では、たわみ比が 1.2 倍程度であるが、中スパン橋では、一部たわみ比が最大 1.5 倍程度になることが分かる (図 4.5b, 4.5c, 4.7a)。 $v/d_v$  が 2~2.5Hz の時に、たわみ比が 1.2 以上を示している例が多い。その後の 2.5Hz~3.5Hz では、たわみ比が小さくなる。しかし、その後再度たわみ比が上昇するような結果となっている。これについては共振が発生していると考えられる。詳細は 4.4 で紹介する。また、結果より一部のたわみ比が 1 を下回る (動的たわみ < 1) 結果となった。その結果を赤丸で示した結果を図 4.6 に示す。

5280 個のデータから 47 個のデータ (おおよそ 0.9%) が、たわみ比 1 を下回る。また、そのほとんどが橋長 15m 以下であり、固有振動数が高いことから、車両では励起できず、たわみ比が 1 を下回る結果となったと考える。

たわみ比の結果から、隊列走行では、動的な影響が強い場合 (特に中スパン橋) があることが分かる。そのため現在日本で使用されている「道路橋示方書」の B 活荷重を考える際、「衝撃係数」などの動的な影響を考慮した項目については、今後精査する必要があると考える。

### 4.3 RMS (二乗平均平方根)

橋梁振動の RMS (Root Mean Square : 二乗平均平方根) の結果を図 4.8 に示す。

RMS は振動のエネルギーを評価する指標として用いられ、RMS が大きいと振動が強いと言える。橋長が短いと RMS は大きくなるような結果となった。また、中スパン橋ではたわみ比と似たような共振が発生している結果となった。長スパンでは、他と比べて常に低い値を示している。図 4.9 などから、車両台数が増えた時に RMS が減少する結果もあることが分かった。図 4.9a を見ると、加速度の最大値 (絶対値) も大きくなっていることが分かる。これについては、その例が多いわけではなく、詳細な検討が必要である。

隊列走行において、短スパン橋は大きなエネルギーを受けているため、構造物の疲労が早くなると予想される。そのため、疲労設計に関する項目で精査が必要である。

### 4.4 共振について

共振とは、橋の固有振動数が外部 (車両) の振動源の振動数と一致するときに発生する。この共振を起こすときの速度を「共振速度」呼ぶ。既往の研究 [9] では、共振速度は式 (4.2) に

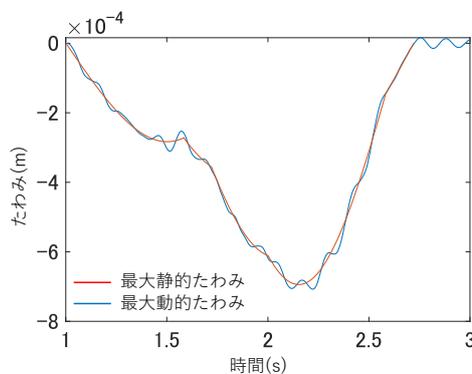
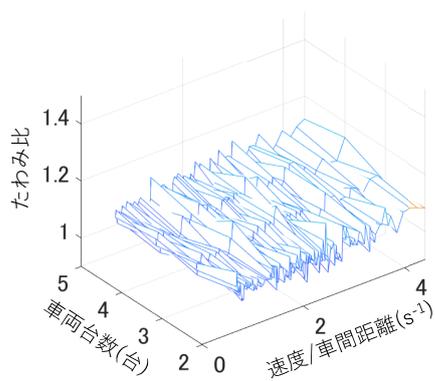


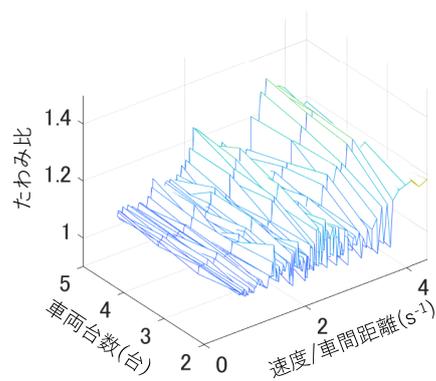
図 4.4: 橋長 10m, 速度 10m/s, 車両台数 1 台の時の橋梁中心のたわみ (時刻歴)

のように定義されている。

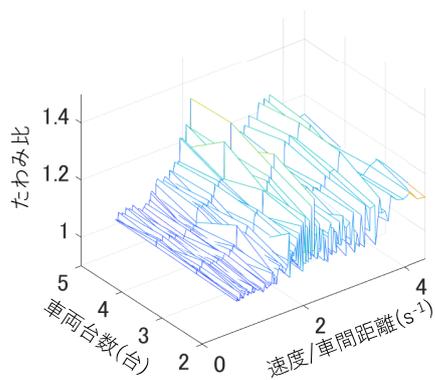
$$v_r / (d_v + D_1 + D_3) = f_{bj} / i_t \quad (j = 1, 2, 3 \dots; i_t = 1, 2, 3 \dots) \quad (4.2)$$



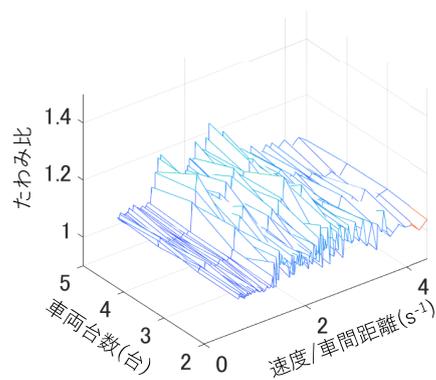
(a) 橋長 5m



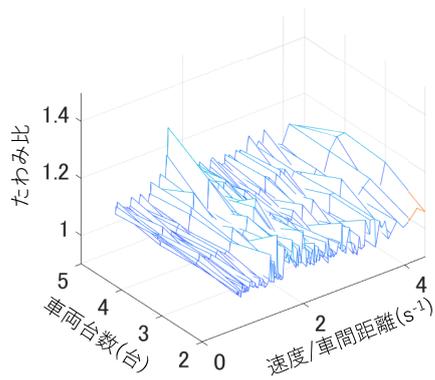
(b) 橋長 15m



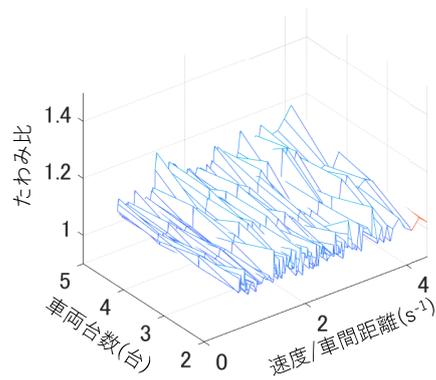
(c) 橋長 25m



(d) 橋長 35m



(e) 橋長 45m



(f) 橋長 50m

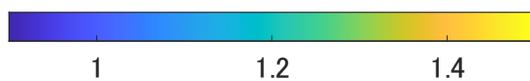


図 4.5: 各橋長に対してのたわみ比 (路面凹凸 ExtraGood)

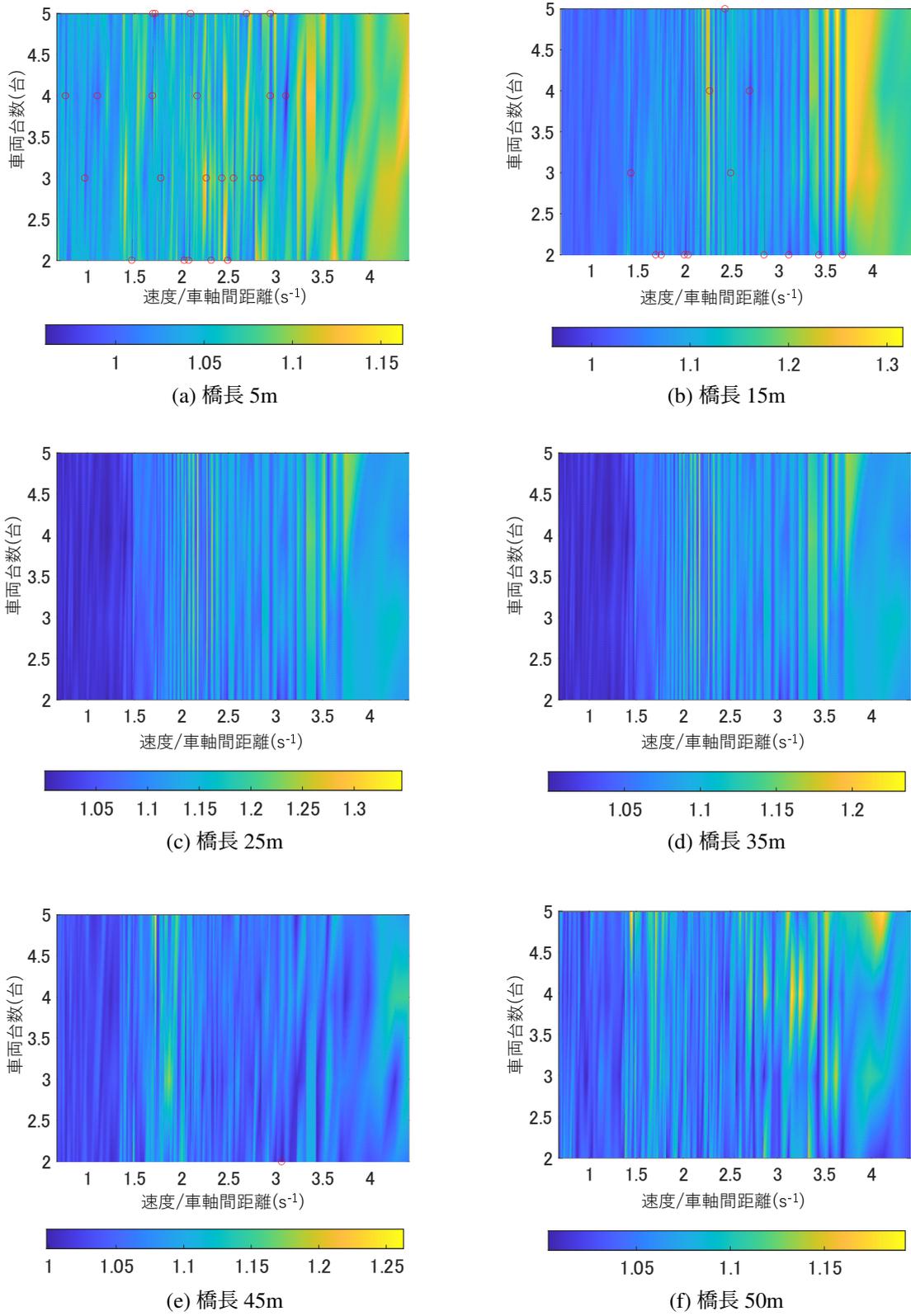


図 4.6: 各橋長に対してのたわみ比（路面凹凸 ExtraGood）コンター図

表 4.1: 各指標の差の平均値

指標	たわみ	たわみ比	RMS
路面凹凸による差	$1.7 \times 10^4$	0.0767	0.0277

ここで、 $v_r$  は共振速度で、 $f_{bj}$  は橋梁の  $j$  次固有振動数、 $i_t$  は次数 (= 整数) である。

式 (4.2) を、今回の車両速度の範囲で図 4.10 に示す。

図 4.10 から、橋梁の固有振動数が高い橋長 5m では、今回用いた速度の範囲では共振が発生しにくいことが分かる。

実際に共振が発生しやすい例を図 4.11 に示す。この図のみ、車両速度の範囲を広げ、5:2.5:30m/s とした。図中に示す青い枠は、式 (4.2) によって算出された共振速度を示している。この結果から、中スパン橋 (図 4.11c, 図 4.11d, 図 4.11e, 図 4.11f) では、共振速度において、たわみ比が 1 台の時より、複数台の時の方が大きくなるような傾向があることが分かる。しかし、共振速度が小さくなると、1 台の時より、複数台のたわみ比が下回る結果が多くなることも分かる。また長スパン橋 (図 4.11a, 図 4.11b) では、大きい共振速度においても、1 台の時より、複数台のたわみ比が下回る結果が多くなることも分かる。よって、車両速度小さいと、動的影響が小さいため、共振速度においても共振しにくいと考える。また、次数が大きくなることで、固有振動数の影響が小さくなり、反応しにくいことが考えられる。よって、特に中スパン橋での ATP 走行では、共振速度に注意して、車両速度・車間距離などのパラメータを決める必要がある。

## 4.5 路面凹凸の影響

路面凹凸を粗くすることで、ATP 走行が橋梁にどのような影響を与えるかを検討する。図 4.12 に全走行データから得られる各指標それぞれの Good から ExtraGood の値の差を示す。また図中の黒線は 0 を示し、赤線は各指標それぞれの平均値を示す。また、その値を表 4.1 に示す。

全てのパターンで Good が ExtraGood を上回るような結果とはならなかったが、Good が上

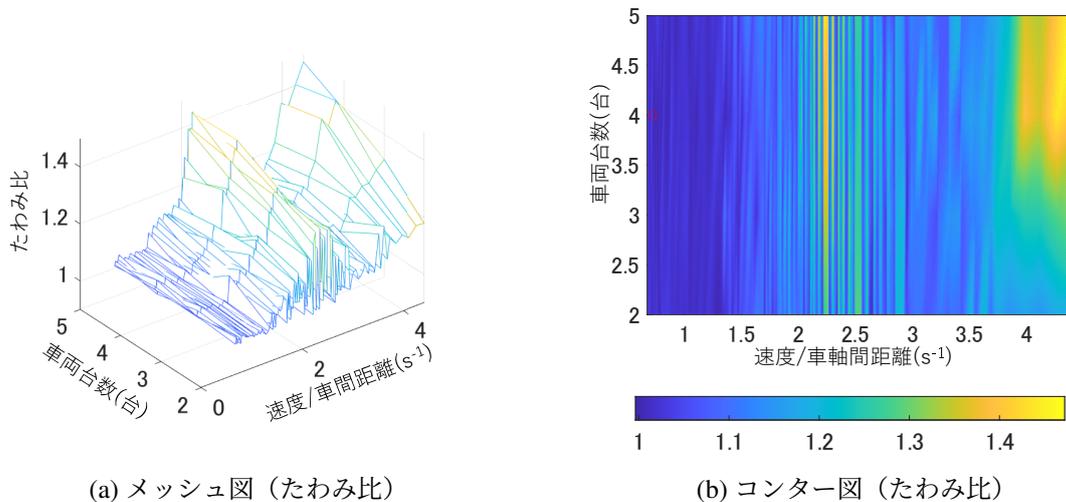
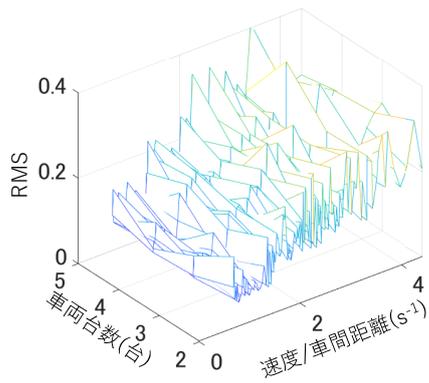
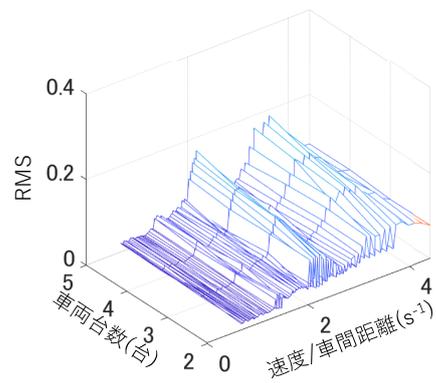


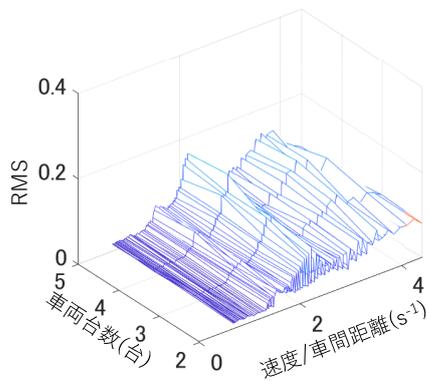
図 4.7: 橋長 20m の時のたわみ比



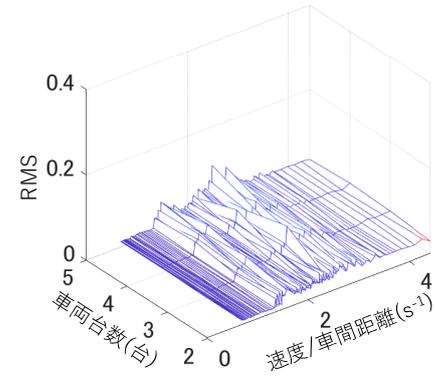
(a) 橋長 5m



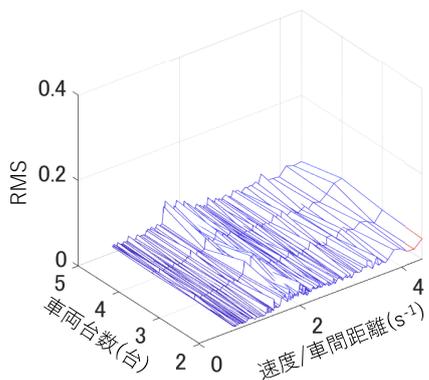
(b) 橋長 15m



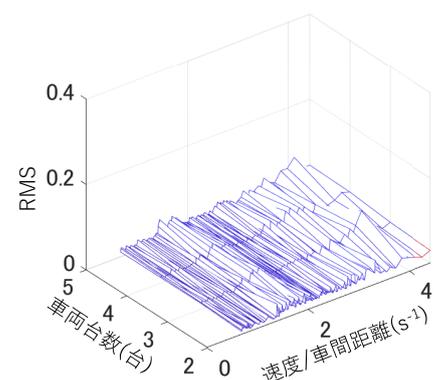
(c) 橋長 25m



(d) 橋長 35m



(e) 橋長 45m



(f) 橋長 50m

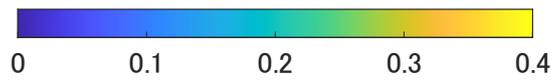


図 4.8: 各橋長に対する RMS (路面凹凸 ExtraGood)

回る結果が多く、また、その値も大きいことが分かる。そしてこの結果から、すべての指標において、平均値が0より高いことから、路面凹凸が粗くなると、橋梁に悪影響が出ていることが分かる。そのため、路面を適切に維持することで、橋梁への負荷を軽減することが分かる。

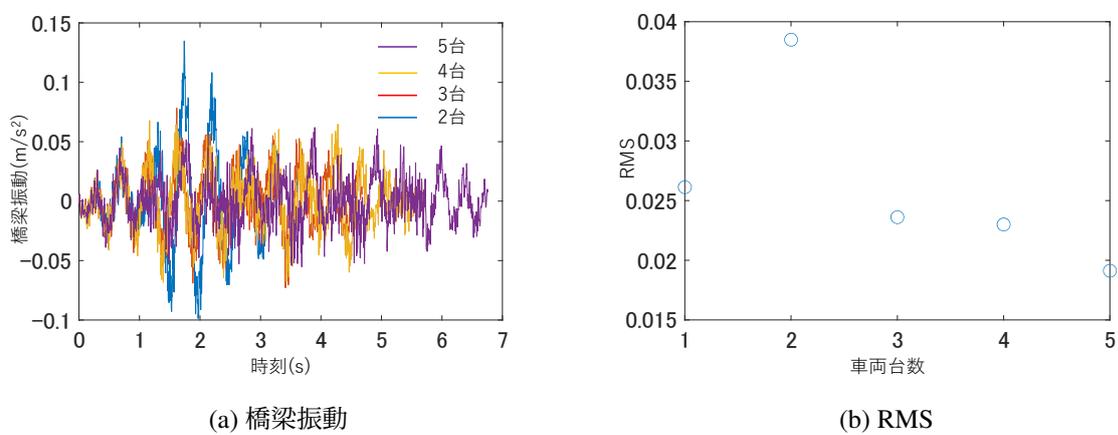
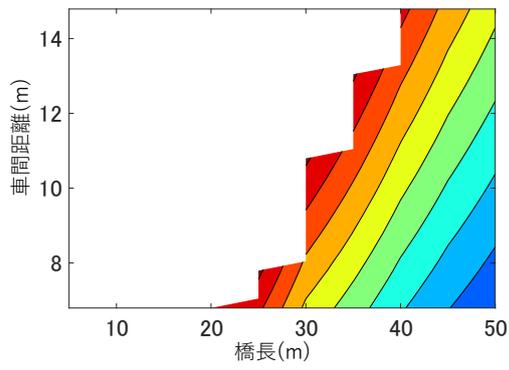
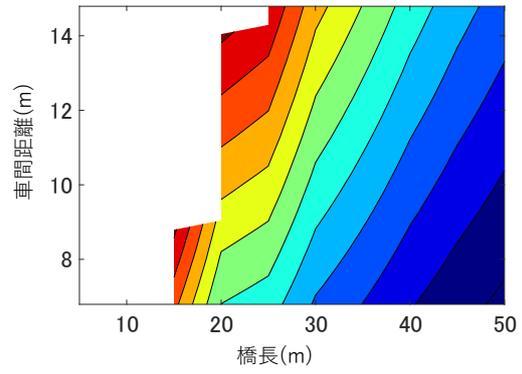


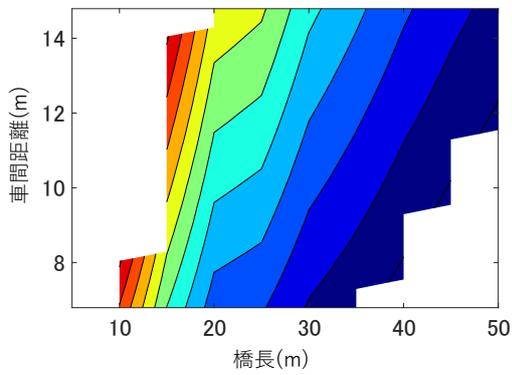
図 4.9: 橋長 45m, 車間距離 13.545m, 車両速度 20m/s の時のそれぞれの指標



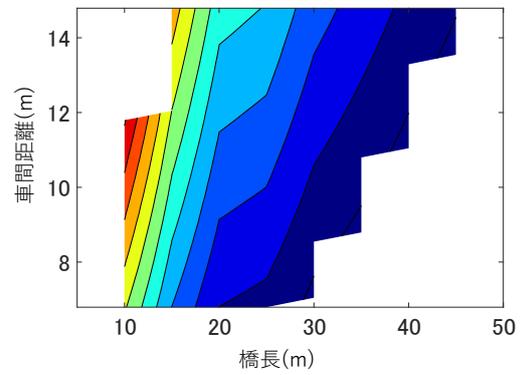
(a)  $i_t = 2$



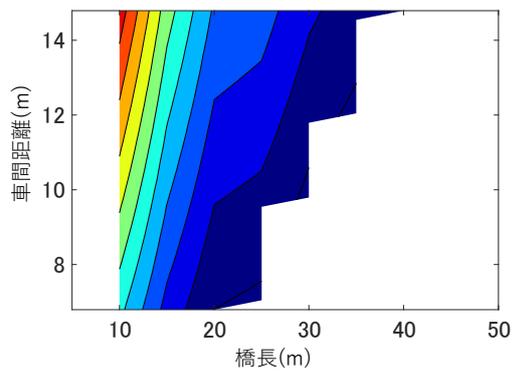
(b)  $i_t = 3$



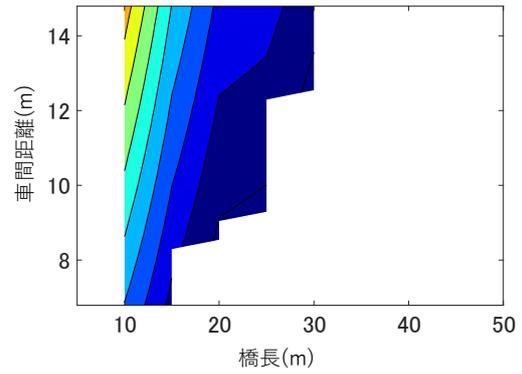
(c)  $i_t = 4$



(d)  $i_t = 5$



(e)  $i_t = 6$



(f)  $i_t = 7$

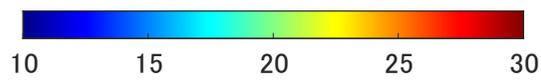
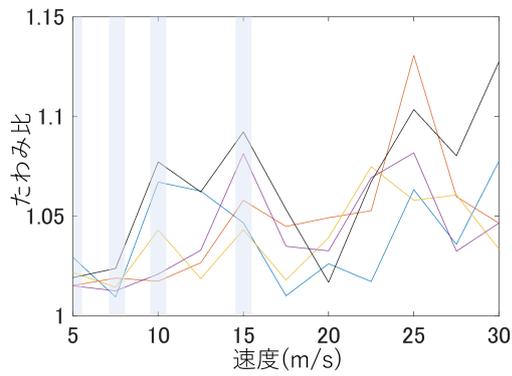
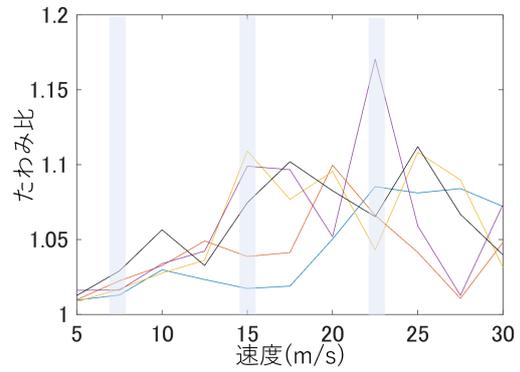


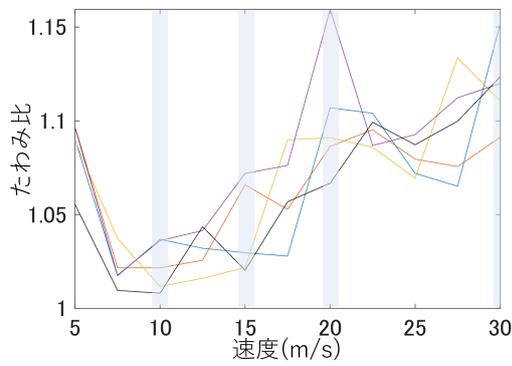
図 4.10: 各  $i_t$  による共振速度 (m/s)



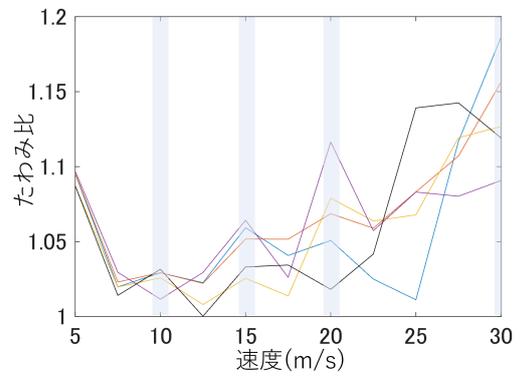
(a) 橋長 50m 車間距離 7.545m



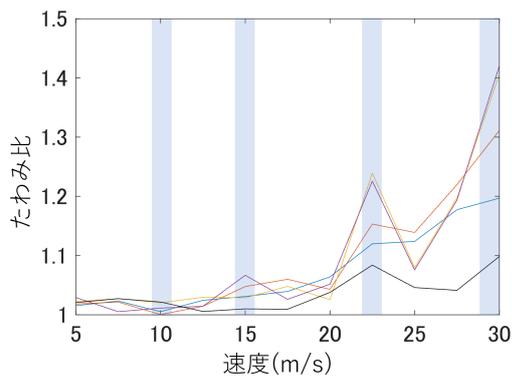
(b) 橋長 45m 車間距離 12.295m



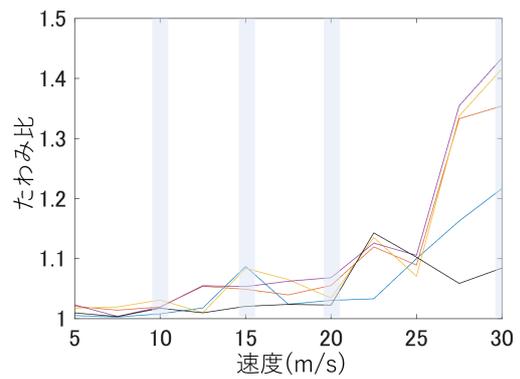
(c) 橋長 35m 車間距離 12.795m



(d) 橋長 25m 車間距離 7.545m



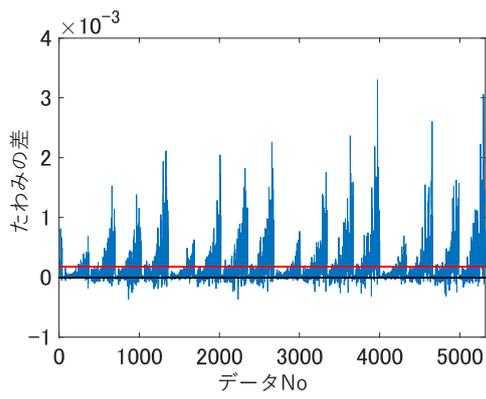
(e) 橋長 20m 車間距離 13.795m



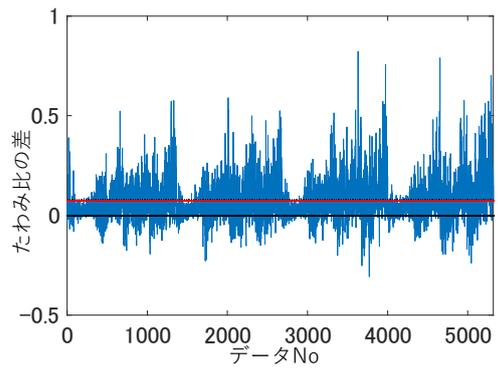
(f) 橋長 20m 車間距離 6.795m

5台	4台	3台	2台	1台

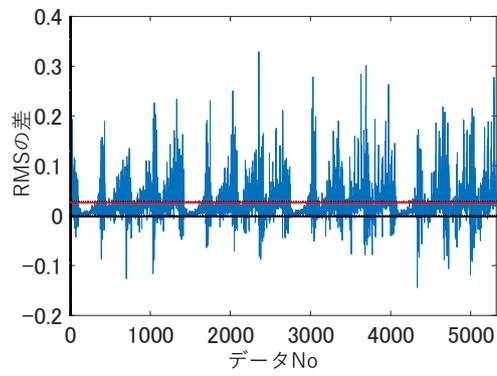
図 4.11: 各橋長と車間距離に対する速度とたわみ比の関係



(a) たわみ



(b) たわみ比



(c) RMS

図 4.12: 全データの路面凹凸の違いによる各指標の差

## 第5章 まとめ

本研究では、電子連結技術による自動トラック隊列走行が橋梁にどのような影響を及ぼすか、また、軽減策について調べた。得られた知見を以下にまとめる。

1. 長スパン橋においては、車両台数・車間距離の影響で橋梁上を同時に走行できる台数が決まり、その軸重の数と車両位置から、最大たわみが大きく変化することが分かった。
2. 中スパン橋においては、共振が多く発生し、たわみ比と RMS が共振速度において、大きくなることが分かった。
3. 短スパン橋においては、トラック隊列で走行すると、他の橋梁長より大きく RMS が発生するため、疲労設計に今後の検証が必要と考える。

隊列走行による輸送が一般化されるならば、共振を起こさないように、事前に橋梁の固有振動数などを調べ、調整可能パラメータ（車間距離、走行速度）を適切に調整するように走行計画を立てることを推奨する。また、管理者は滑らかな路面の維持を行うことで、橋梁への負担が減るため、適切な維持が求められる。

# 謝辞

本論文が完成に至るまで、皆様からの厚情と献身的なサポートを賜りましたこと、心より感謝の意を述べさせていただきます。まず指導教員として、本研究のサポートはもちろんのこと、土木について深く教えてくださった山本亨輔准教授、松島巨志教授に感謝申し上げます。そして研究をサポートしてくれた研究室のメンバーにも深く感謝を申し上げます。最後に、このような成長できる環境を提供してくださった筑波大学に深い感謝と愛情をこめて、本論文を締めくくらせていただきます。

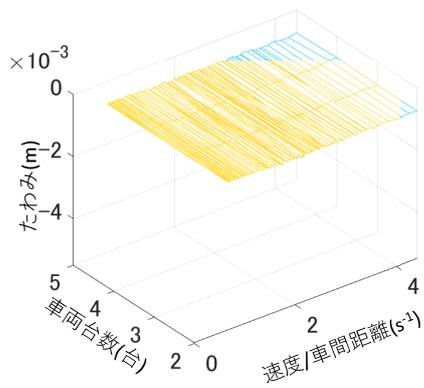
## 参考文献

- [1] 国土交通省. 令和3年度宅配便等取扱実績関係資料. 国土交通省, August 2022. [https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha04\\_hh\\_000255.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha04_hh_000255.html) (閲覧日 2023/12/12) .
- [2] 国土交通省. 物流の2024年問題について. 国土交通省, 社会資本整備審議会道路分科会基本政策部会第23回物流小委員会, 資料1, July 2023. [https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01\\_sg\\_000645.html](https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01_sg_000645.html) (閲覧日 2023/12/12) .
- [3] 小川博. トラック隊列走行への取り組み. 国土交通省, 第2回新しい物流システムに対応した高速道路インフラの活用に関する検討会, 資料5, January 2019. <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/nls/doc02.html> (閲覧日 2024/01/04) .
- [4] 経済産業省. 高速道路におけるトラックの後続車無人隊列走行技術を実現しました. 経済産業省, March 2021. <https://www.meti.go.jp/press/2020/03/20210305003/20210305003.html> (閲覧日 2024/01/04) .
- [5] The Federal Highway Administration (FHWA). Truck platooning-Develop truck platooning technology and conduct an inservice field operational test to assess the impacts in a real operational environment. United States Department of Transportation, November 2021. <https://highways.dot.gov/research/laboratories/saxton-transportation-operations-laboratory/Truck-Platooning> (閲覧日 2024/01/04) .
- [6] Volvo Group. Volvo self-driving truck platoon in the European Truck Platooning Challenge. March 2016. <https://www.youtube.com/watch?v=lx9EFJ6qgZc> (閲覧日 2024/01/04) .
- [7] Sadayuki Tsugawa. An Overview on an Automated Truck Platoon within the Energy ITS Project. IFAC Proceedings Volumes, Volumes 46, pp41~46 September 2013. <https://doi.org/10.3182/20130904-4-JP-2042.00110>.
- [8] Bjorn Birgisson, Curtis A.Morgan, Matthew Yarnold, Jeffery Warner, Brianne Glover, Maxwell P.Steadman, Sunkari Srinivasa, Shengxin Cai, and Dahye Lee. Evaluate Potential Impacts, Benefits, Impediments, and Solutions of Automated Trucks and Truck Platooning on Texas Highway Infrastructure: Technical Report. Washington: U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration; Report No.:FHWA/TX-21/0-6984-R1, 0-6984-R1, October 2020. <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/0-6984-R1.pdf>.
- [9] Tianyang Ling, Lu Deng, Wei He, Ran Cao, Wenjie Zhong. Determination of dynamic amplification factors for small- and medium-span highway bridges considering the effect of automated

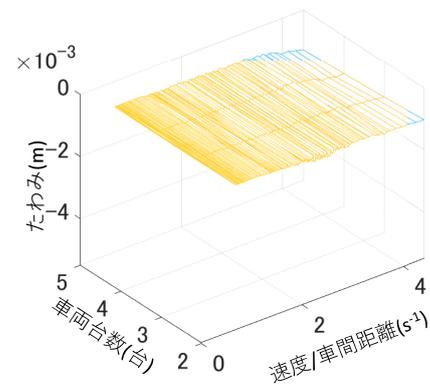
- truck platooning loads. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 204, December 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2023.110812>.
- [10] Tianyang Ling, Ran Cao, Lu Deng, Wei He, Xin Wu, Wenjie Zhong. Dynamic impact of automated truck platooning on highway bridges. *Engineering Structures*, Volume 262, July 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114326>.
- [11] Tianyang Ling, Lu Deng, Wei He, Haibing Wu, Jiayu Deng. Load Effect of Automated Truck Platooning on Highway Bridges and Loading Strategy. *Sensors*, Volume 22(20), 7704, October 2022. <https://doi.org/10.3390/s22207704>.
- [12] Mohamed T. Elshazli, Ahmed Ibrahim, Ahmed Abdel-Rahim. Truck platooning impact on existing Bridges' load ratings. *Structures*, Volume 51, pp1706-1721, May 2023. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.131>.
- [13] 秦涼太, 岡田幸彦, 山本亨輔. 移動センシングを用いたシステム同定におけるパラメータ推定精度の数値的検討. 構造工学論文集, Vol.68A, pp298~309, March 2022. <https://doi.org/10.11532/structcivil.68A.298>.
- [14] 塚田健人, 秦涼太, 山本亨輔. 複数回走行時の車両振動データを用いた VBI システム同定の適用性に関する数値的検討. 土木学会論文集, Vol.79, 2023. <https://doi.org/10.2208/jscej.22-15010>.
- [15] 山本亨輔, 大島義信, 金哲佑, 杉浦邦征. 車両応答データの特異値分解による橋梁損傷検知技術の提案と検討. 構造工学論文集, Vol.59A, pp320~331, March 2013. <https://doi.org/10.11532/structcivil.59A.320>.
- [16] Yamamoto, K., Shin, R., Mudahemuka, E. Numerical Verification of the Drive-By Monitoring Method for Identifying Vehicle and Bridge Mechanical Parameters. *Applied Sciences*, 13(5), 3049, February 2023. <https://doi.org/10.3390/app13053049>.
- [17] 深田 宰史, 松本 剛也, 岡田 裕行, 樺山 好幸. 高速道路走行時の大型車ドライバーにより抽出された短波長の苦情路面に対する評価. 土木学会論文集, Vol68, pp145~153, 2012. [https://doi.org/10.2208/jscejpe.68.I\\_45](https://doi.org/10.2208/jscejpe.68.I_45).
- [18] A.Gonzalez, D.Cantero, E.J.Obrien. Dynamic increment for shear force due to heavy vehicles crossing a highway bridge. *Computers Structures*, Volume 89(23-24), pp2261-2272, August 2011. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.08.009>.

# 付録

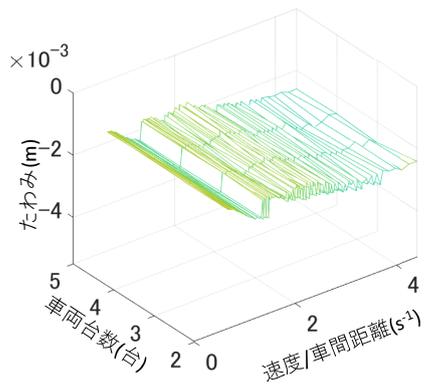
ここでは、4章の結果で示せなかった橋長 10m, 20m, 30m, 40m の結果をそれぞれ示す.



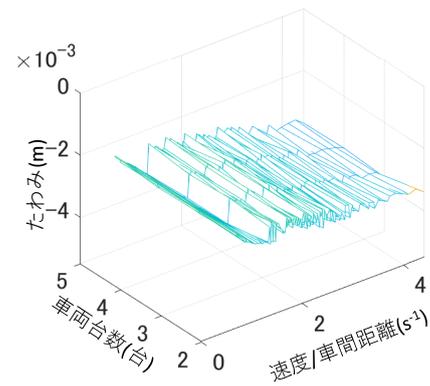
(a) 橋長 10m



(b) 橋長 20m



(c) 橋長 30m



(d) 橋長 40m

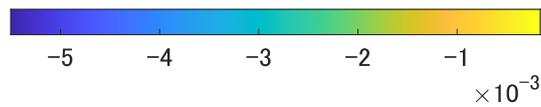
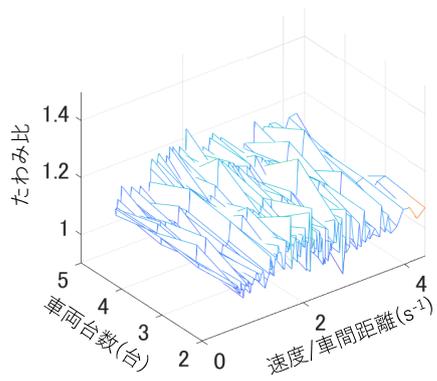
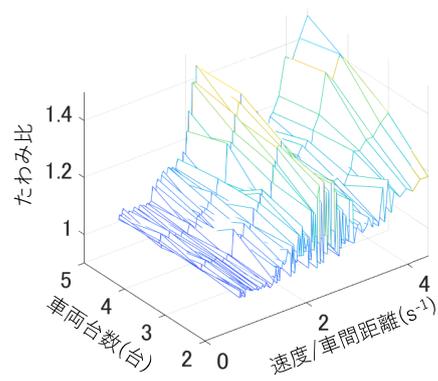


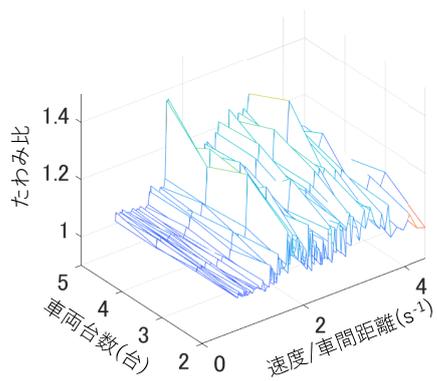
図 5.1: 各橋長に対してのたわみ (路面凹凸 ExtraGood) 付録



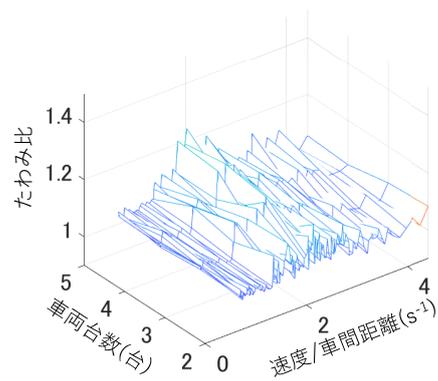
(a) 橋長 10m



(b) 橋長 20m



(c) 橋長 30m



(d) 橋長 40m

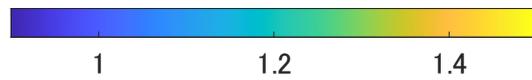
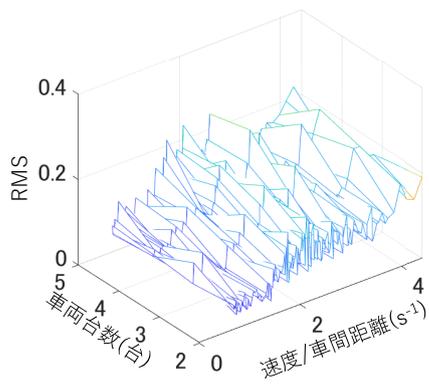
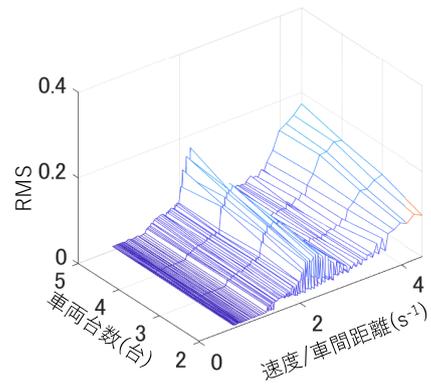


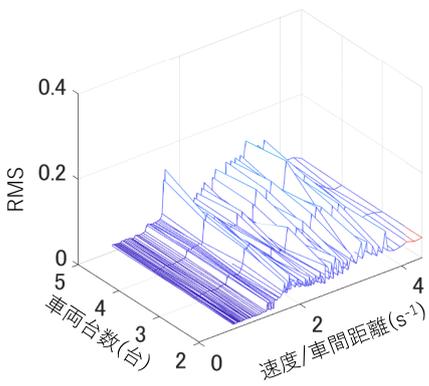
図 5.2: 各橋長に対してのたわみ比 (路面凹凸 ExtraGood) 付録



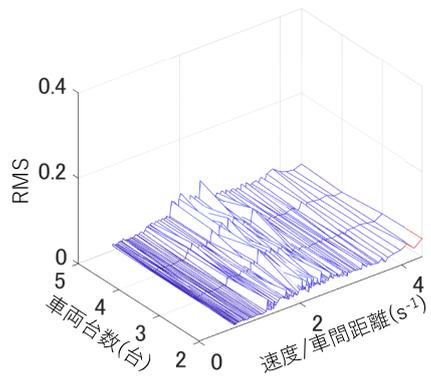
(a) 橋長 10m



(b) 橋長 20m



(c) 橋長 30m



(d) 橋長 40m



図 5.3: 各橋長に対する RMS (路面凹凸 ExtraGood) 付録