

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

構造エネルギー工学学位プログラム 修士2年

佐久間 活機

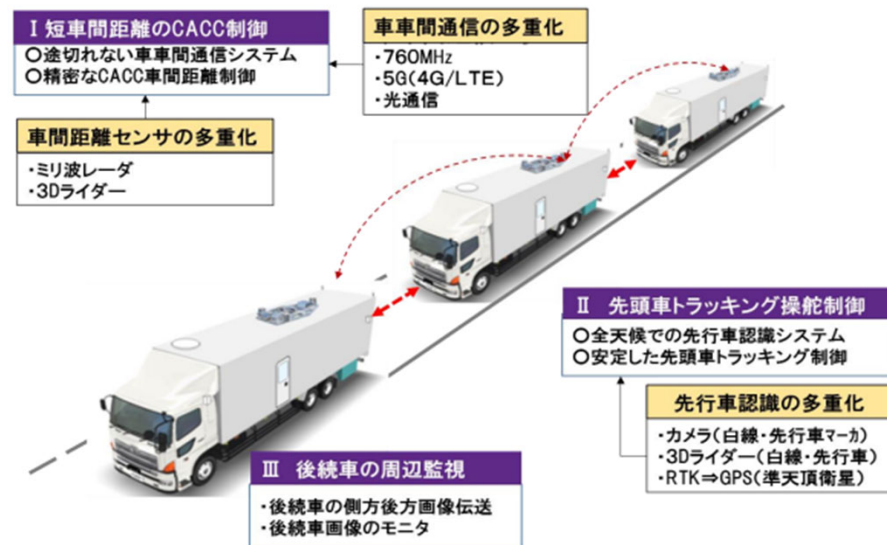
筑波大学/理工情報生命学院/システム情報工学研究群/令和5(2023)年度
令和6(2024)年1月31日(木)

研究背景 | Introduction

- 物流の課題 = **宅配便の増加** × **人員の不足**
 - EC(電子商取引)による宅配物増加
 - 低賃金 & 長時間労働
- **トラック隊列走行による問題解決**
 - 1人で数台の車を運転(省人化)



実証実験(2020年2月) [1]



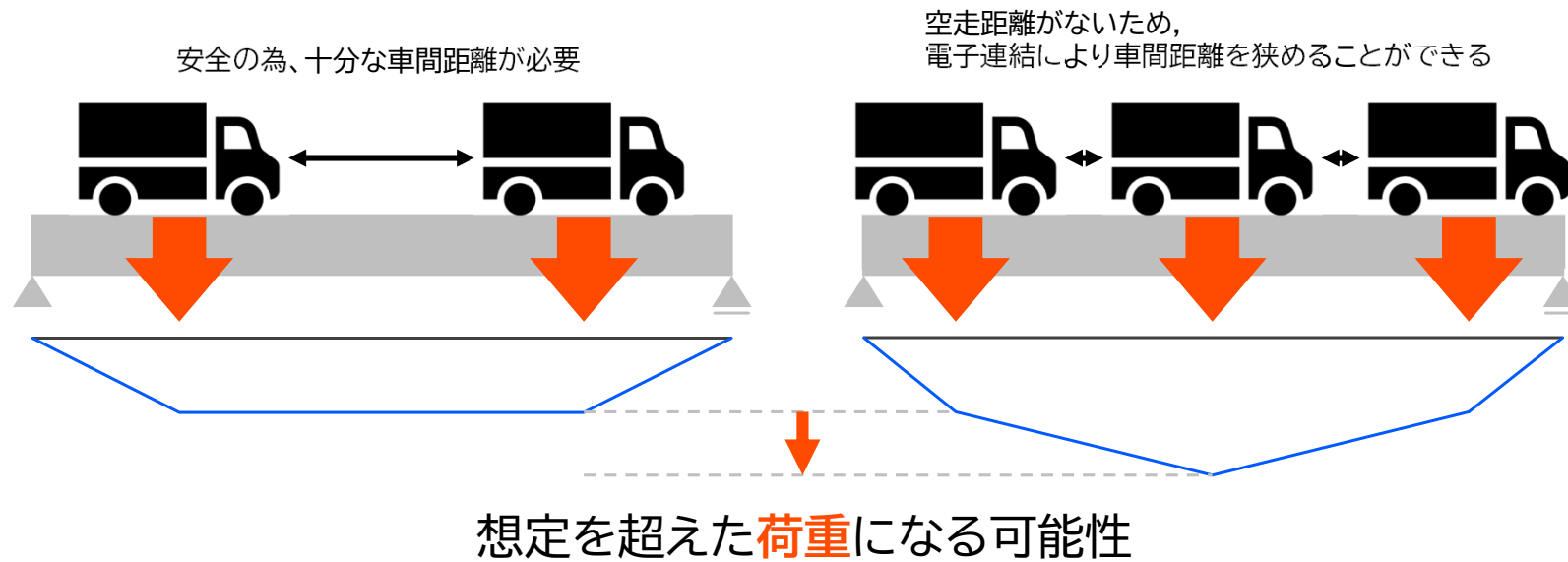
電子連結による隊列走行の実現 [2]

[1] 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(2021年3月5日)
(URL: <https://www.meti.go.jp/press/2020/03/20210305003/20210305003.html>)

[2] 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」

研究背景 | Introduction

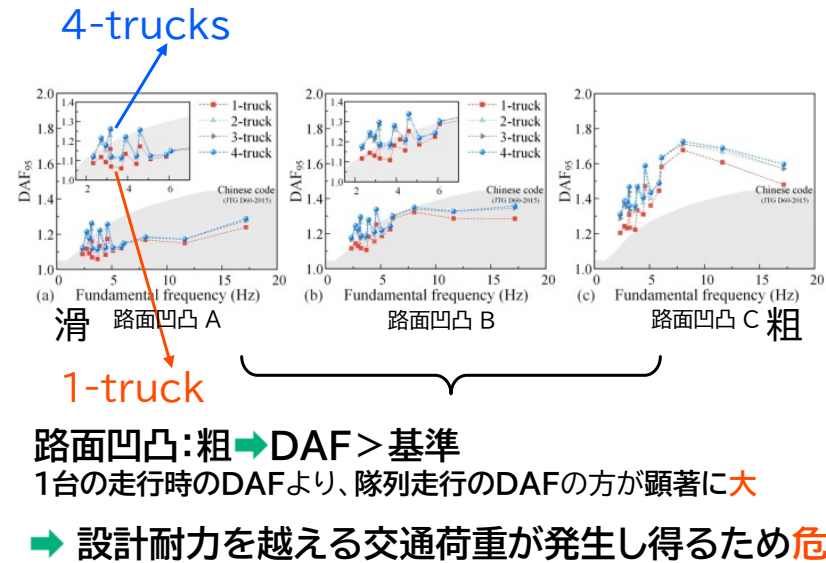
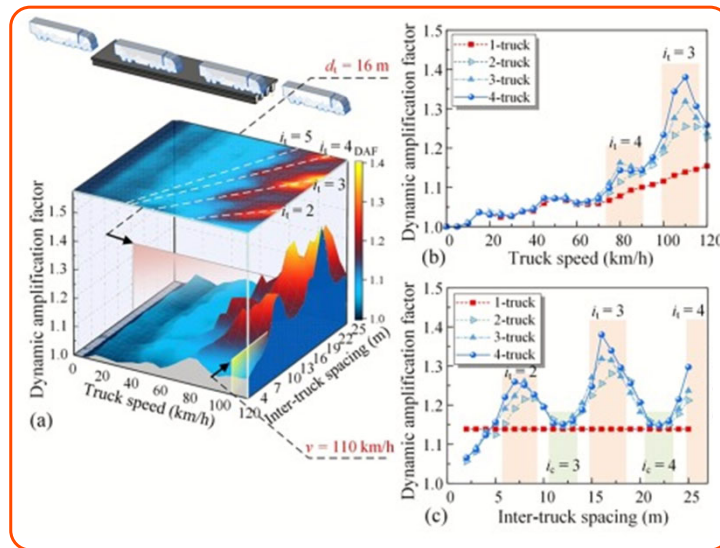
- 隊列走行による交通荷重が設計荷重を上回る可能性
 - 電子連結は車間距離が短い(10m以下) → 断面力の大幅増加



既往の研究 | Previous Research

- 中国・米国では隊列走行によって**基準値以上のひずみ**が発生する可能性[1]

$$\text{DAF (Dynamic Amplification Factor)} = \frac{\text{最大動的ひずみ}}{\text{最大静的ひずみ}} \text{による評価}$$



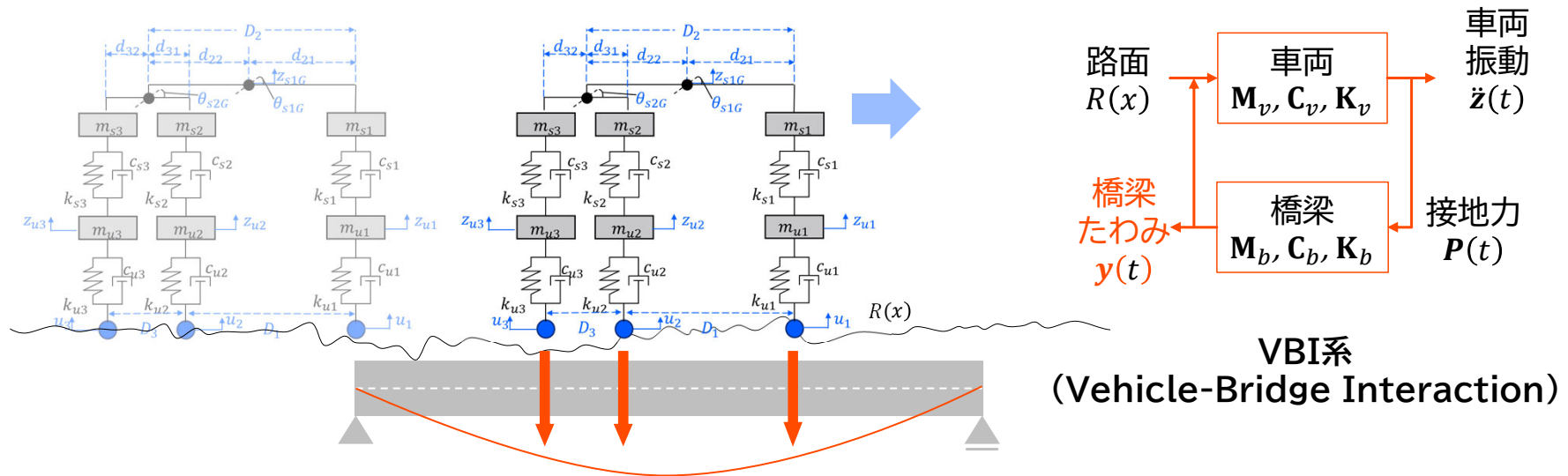
[1] Tianyang et.al : Determination of dynamic amplification factors for small- and medium-span highway bridges considering the effect of automated truck platooning loads, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 204, 2023.

研究目的 | The purpose of this study

- 電子連結されたトラック隊列の走行が、橋梁に及ぼす影響を明らかにする。
 - 車両のパラメータを日本の基準に合わせる
- また、トラック隊列が橋梁に及ぼす影響を軽減する方策を考案、検討する
 1. VBIシミュレーションにより、橋梁動的応答を算出
 - VBI: Vehicle-Bridge Interaction(車両-橋梁相互作用)
 2. パラメトリックスタディ | 車間距離・走行速度・車両台数・橋梁スパン長・路面凹凸

方法論 | methodology

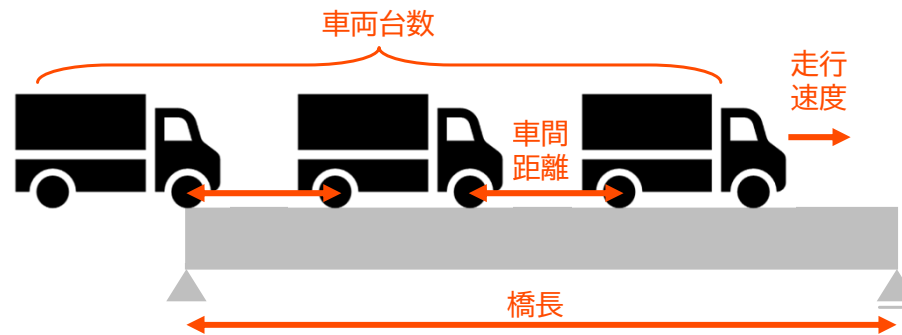
- トラック隊列 | 剛体バネでモデル化
- 橋梁 | Euler-Bernoulli梁として有限要素法でモデル化



VBIは非線形なので、収束計算により車両振動, 橋梁振動を再現

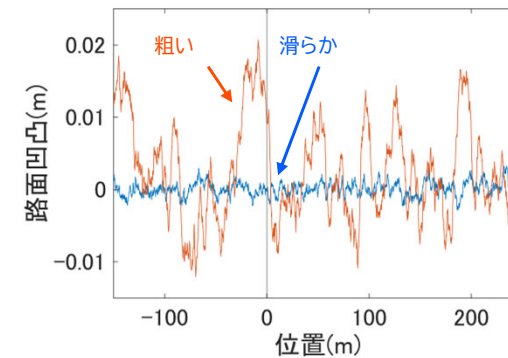
パラメトリックスタディ | Parametric Study

- 変化させるパラメータ
 - 車両台数 1~5台 (5パターン)
 - 車間距離 6.795~14.795m (33パターン)
 - 走行速度 10,20,25,30m/s (4パターン)
 - 橋長 5~50m (10パターン)
 - 路面凹凸 滑らか, 粗い (2パターン)



橋梁パラメータ[1]

| No. | 橋長 [m] | ρA [kg/m] | I [m ⁴] | 1次固有振動数 [Hz] |
|-----|--------|-----------------|-----------------------|--------------|
| 1 | 5 | 10875 | 0.0676 | 29.39 |
| 2 | 10 | 19625 | 0.1431 | 7.96 |
| 3 | 15 | 28375 | 0.5386 | 5.71 |
| 4 | 20 | 37125 | 1.2541 | 4.28 |
| 5 | 25 | 18423 | 1.3693 | 4.07 |
| 6 | 30 | 21067 | 2.2318 | 3.37 |
| 7 | 35 | 21752 | 3.3628 | 2.99 |
| 8 | 40 | 23752 | 4.7503 | 2.61 |
| 9 | 45 | 25752 | 6.4178 | 2.30 |
| 10 | 50 | 27752 | 8.3653 | 2.05 |

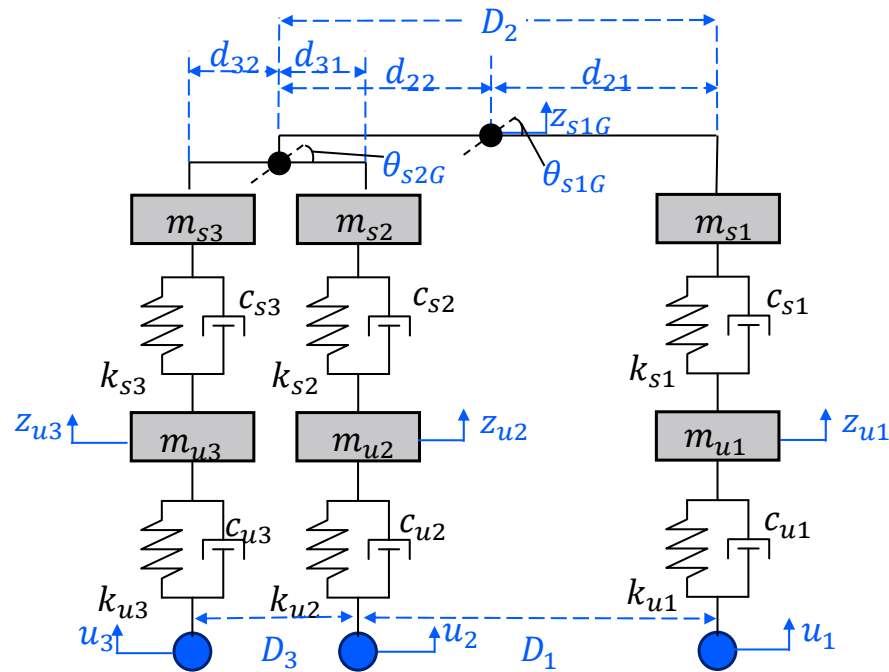


橋梁のヤング係数 E は $35 \times 10^9 \text{N/m}^2$ とした

[1] A.Gonzalez et.al:Dynamic increment for shear force due to heavy vehicles crossing a highway bridge , Computers Structures , 7 Volume 89(23-24), pp2261~2272, 2011

パラメトリックスタディ | Parametric Study

• 車両モデルとパラメータ[1]



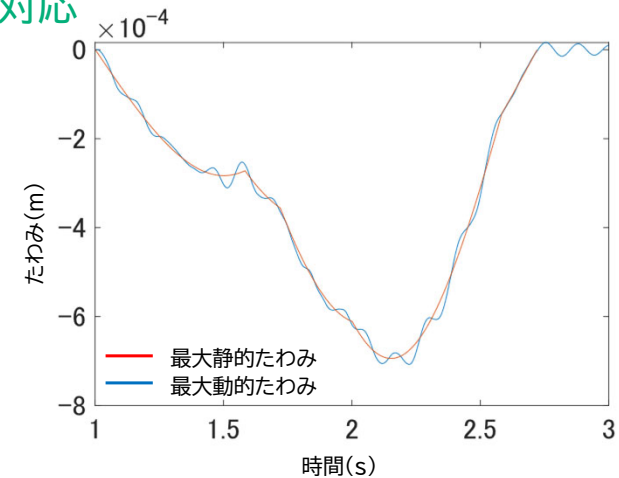
| | パラメータ名称 | 記号 | 値 [単位] |
|----|-------------|------------------|--------------|
| 全体 | 車両総重量 | M | 24420[kg] |
| | 1-2 軸間距離 | D_1 | 5.83[m] |
| | 前後軸間距離 | D_2 | 6.52[m] |
| | 前軸-重心間距離 | d_{21} | 3.26[m] |
| | 重心-後軸重心間距離 | d_{22} | 3.26[m] |
| | 2-3 軸間距離 | D_3 | 1.37[m] |
| | 2 軸-後輪重心間距離 | d_{31} | 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] |

[1] 深田 宰史ら: 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, ppI45~I53, 2012

評価手法 | Evaluation method

- **最大たわみ** = 橋梁中央のたわみの最大値
- **たわみ比** = 動的最大たわみ / 静的最大たわみ (**設計荷重の超過確率**)
 - 静的最大たわみ・・・車軸重を荷重として求めた橋梁中央のたわみ影響線の最大値
 - 動的最大たわみ・・・数値シミュレーションにより求めた橋梁中央のたわみ最大値
 - 既存手法の**DAF**(=動的最大ひずみ/静的最大ひずみ)に対応
 - 設計時の想定を上回る可能性を示唆する指標
- **RMS** = 橋梁加速度振動のRMS (**疲労を評価**)
 - 振動のエネルギーを評価する際に用いられる指標

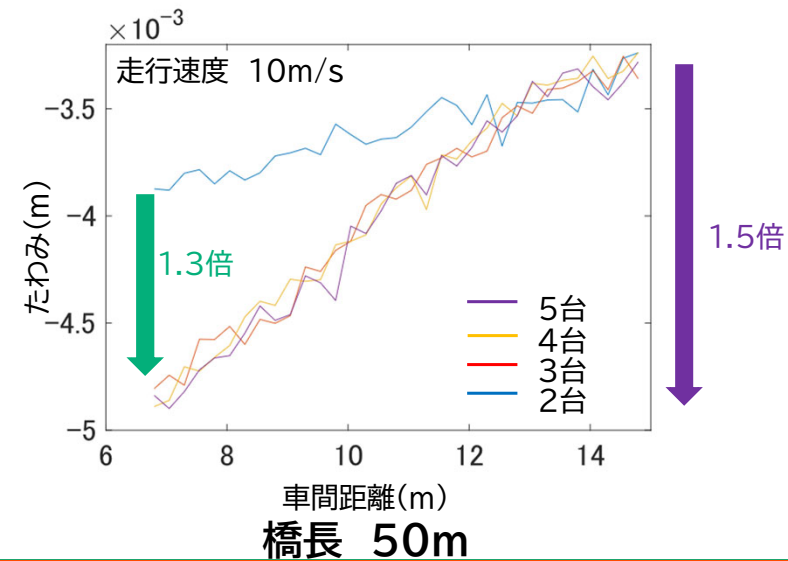
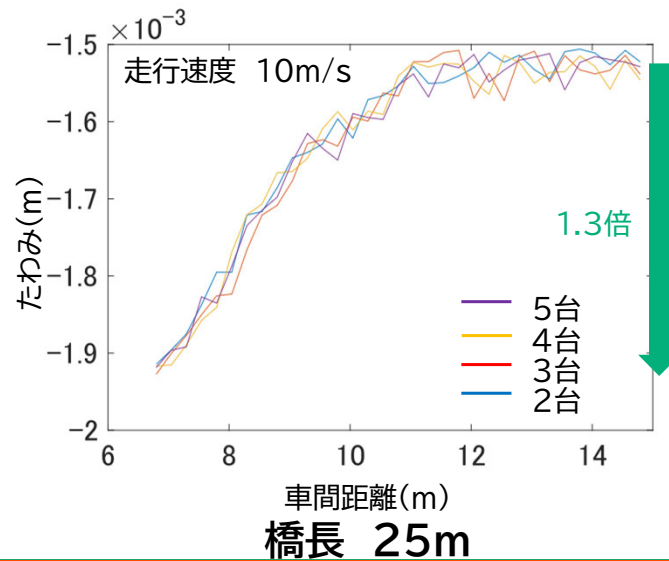
$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \dot{y}_t^2}$$



結果と考察 | Results and Discussion

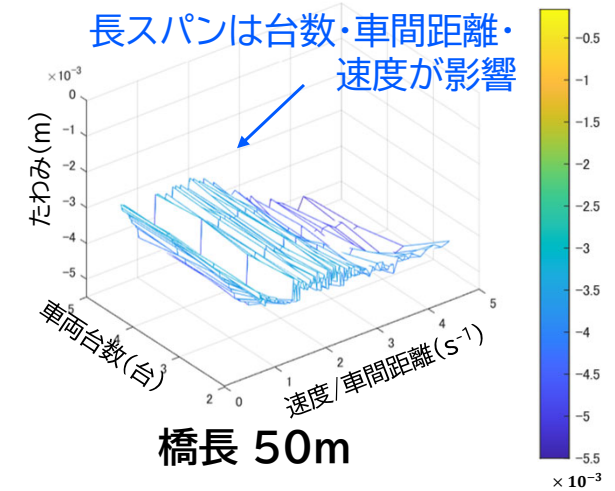
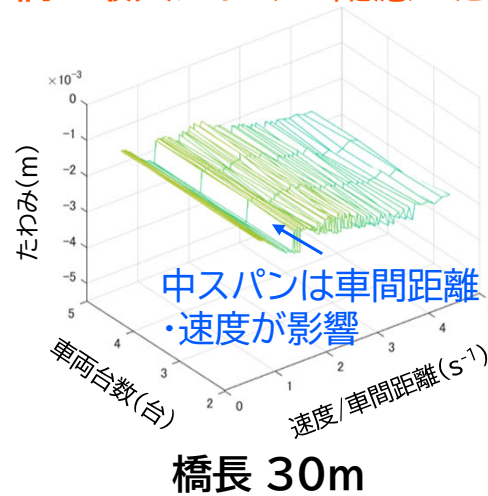
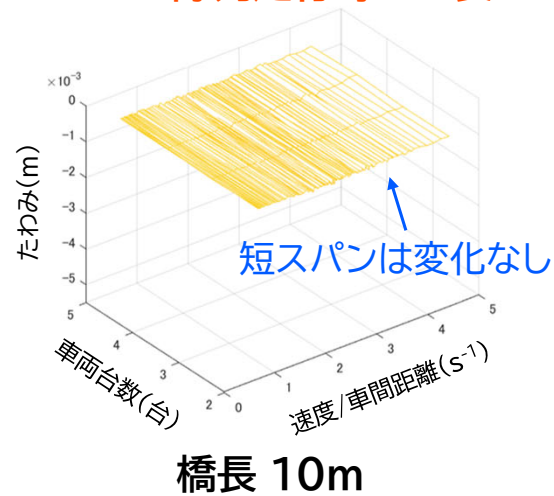
• 最大たわみ

- 車両台数の影響・・・短スパン橋:なし, 長スパン橋:あり
- 隊列走行時には長スパン橋の最大たわみに配慮が必要



結果と考察 | Results and Discussion

- 最大たわみ・・・隊列走行の台数・車間距離・速度の影響は橋梁スパンによって異なる
 - 短スパン橋は同時に橋梁上を通過する車両台数が限定されるため変化が少ない
 - 長スパン橋ほど台数・車間距離・走行速度の影響を受ける
 - 隊列走行時には長スパン橋の最大たわみに配慮が必要

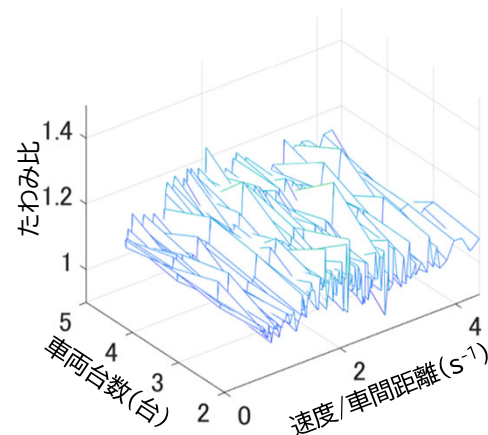


結果と考察 | Results and Discussion

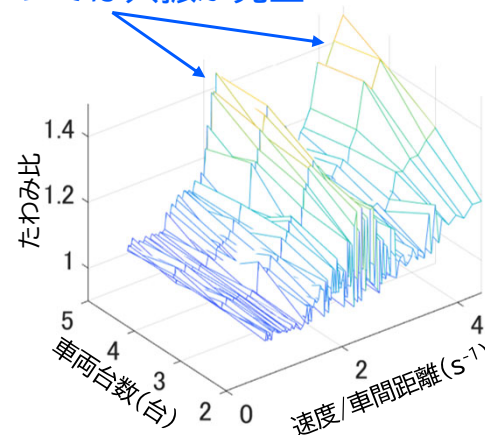
• たわみ比

- 短・長スパン橋 = 台数・速度・車間距離の影響: 小 ⇔ 中スパン橋では大
- 橋長20mのたわみ比は最大で1.5倍程度

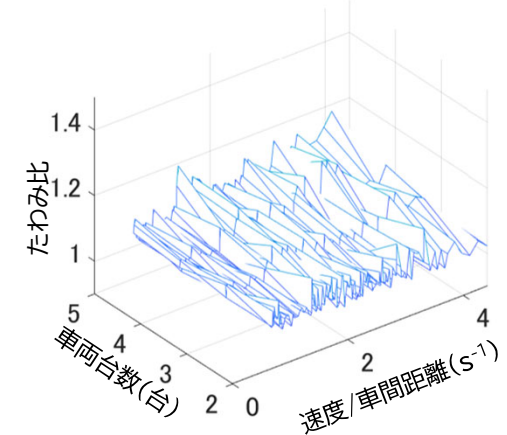
中スパンでは共振が発生



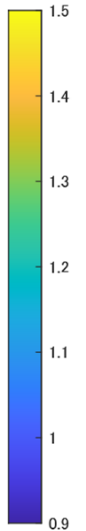
橋長 10m



橋長 20m



橋長 50m

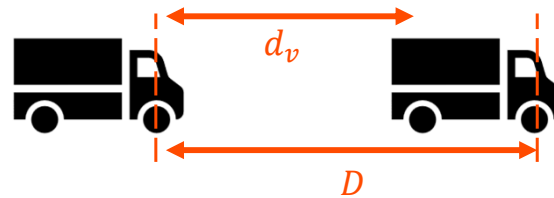


結果と考察 | Results and Discussion

• 共振[1]

$$\frac{v_r}{D} = \frac{f_b}{i_t}$$

v_r : 共振速度
 i_t : 次数 ($i_t = 1, 2, 3, 4 \dots$)

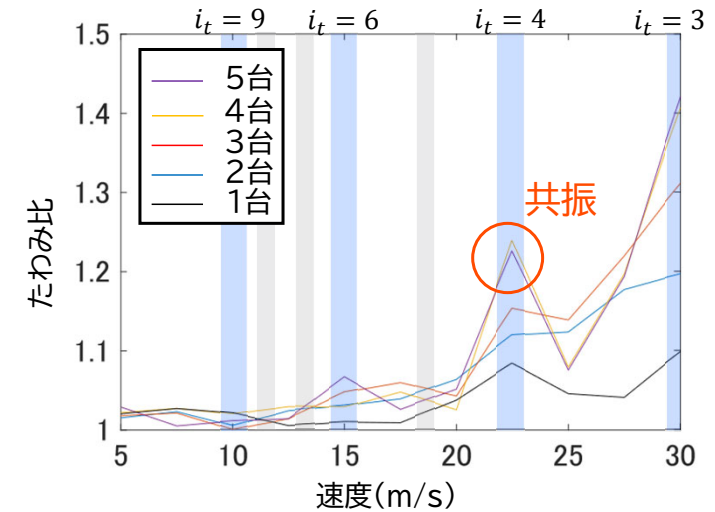


| 次数: i_t | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| v_r (m/s) | 89.86 | 44.96 | 29.98 | 22.48 | 17.99 | 14.99 | 12.85 |

走行速度: 大 → たわみ比: 大

共振の影響も高速領域で発生

共振次数 i_t は小さいほど、共振しやすい



車間距離 d_v : 13.795m

橋長 L : 20m

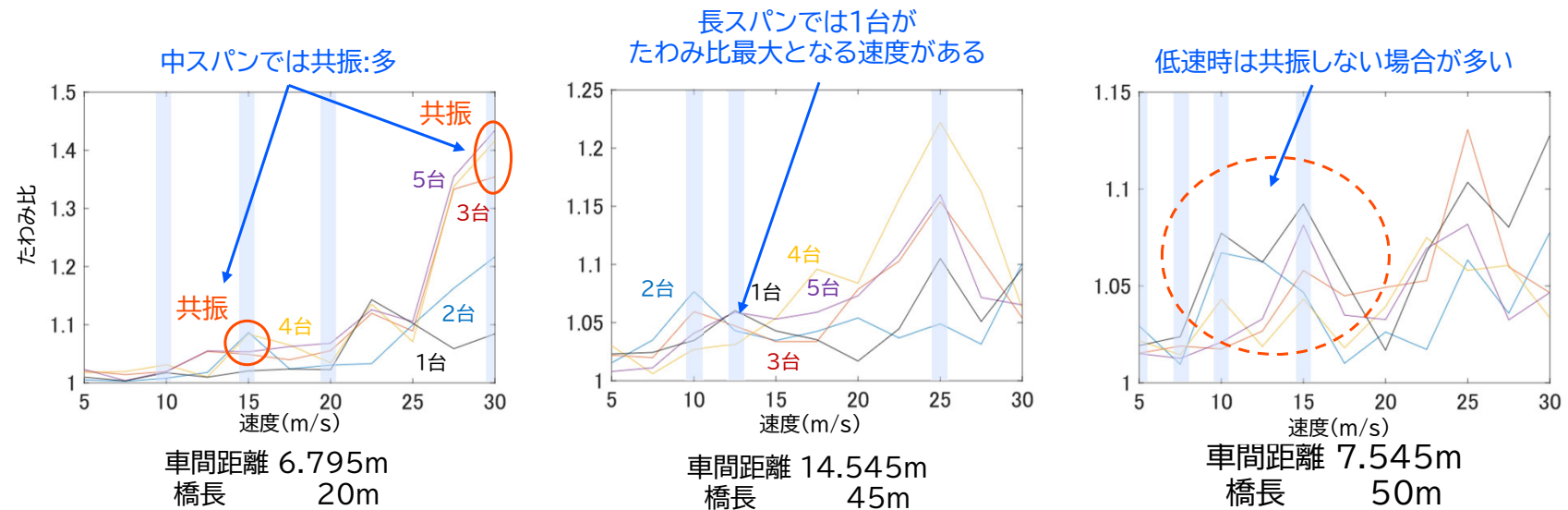
橋梁の固有振動数 f_b : 4.28Hz

図の速度は5:2.5:30で計算した

[1] Tianyang et.al: 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, 2023.

結果と考察 | Results and Discussion

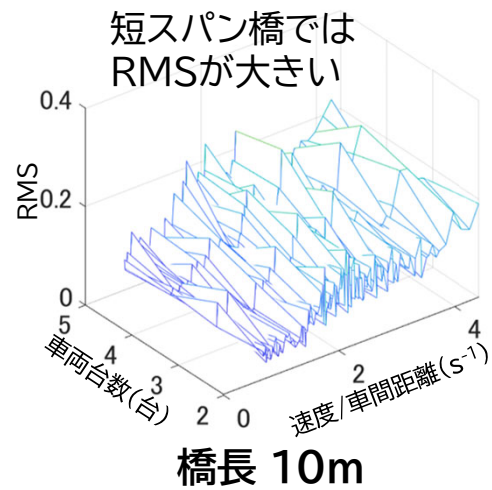
- 共振
 - 長スパンや低速度では, 共振が発生しない傾向



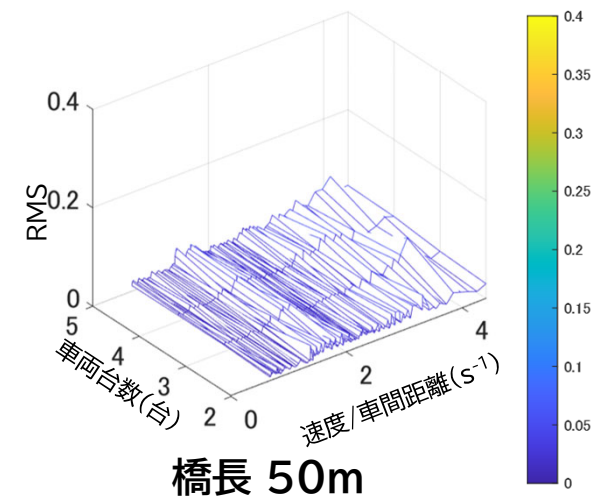
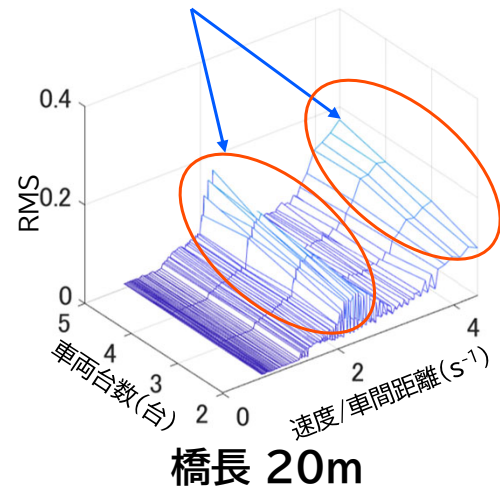
結果と考察 | Results and Discussion

• RMS

- 短スパン橋 → RMS:大・・・疲労の影響は検討が必要
- 低速時のRMS:小



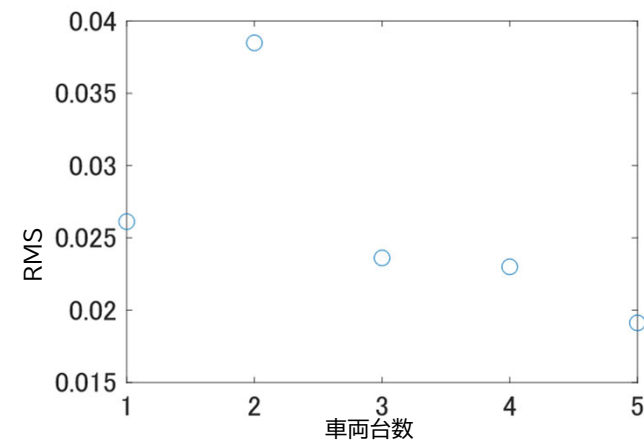
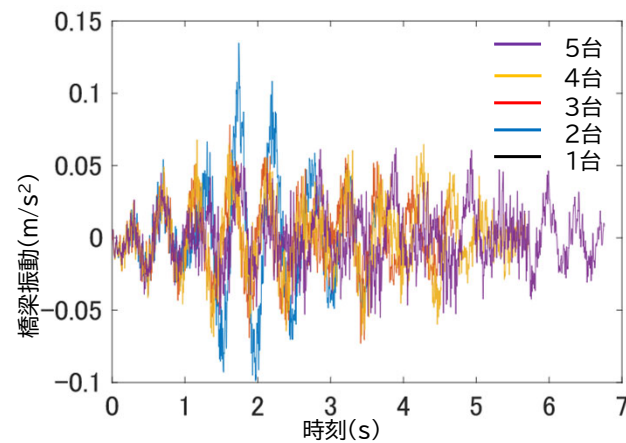
中スパン橋では共振が発生



結果と考察 | Results and Discussion

• RMS

- 隊列走行の車両台数が増える時、必ずしも橋梁応答が大きくなるわけではない
- 『隊列と橋梁の共振』など多様な因子からRMSは決まる可能性

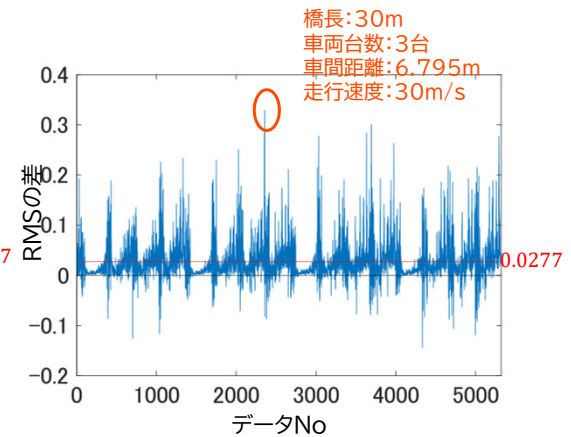
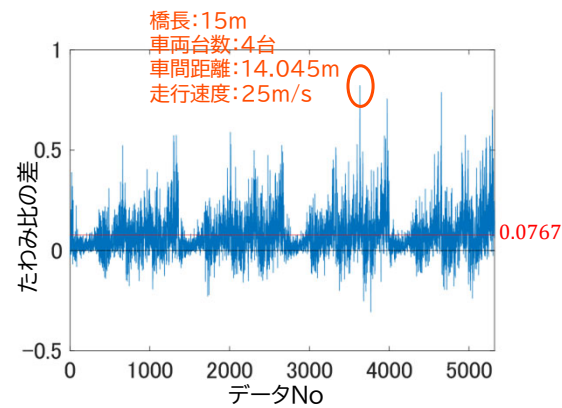
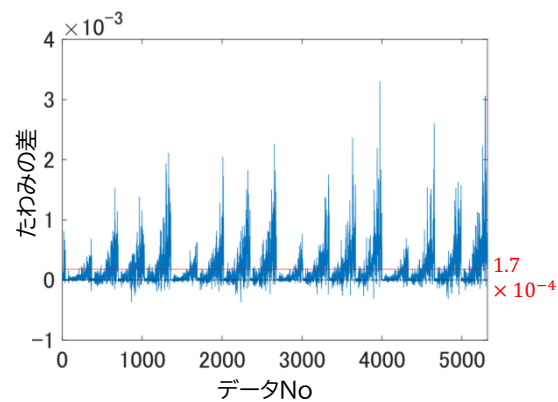


橋長45m 走行速度20m/s 車間距離13.545m

結果と考察 | Results and Discussion

• 路面凹凸の影響(粗一滑)

- 全指標の平均値 > 0 ...路面凹凸が粗いと橋梁への悪影響が隊列走行により悪化
- 舗装の維持によって、橋梁への負荷を抑制可能



結論 | Conclusion

電子連結されたトラック隊列が橋梁に及ぼす影響を明らかにした。また、その軽減策を考察した。

- 長スパン橋: 最大たわみは車両台数・車間距離の影響で大きくなる
 - 短～中スパン橋は同時に通行する車両台数は限定され影響は小さい
- 中スパン橋: **共振が多く発生**, たわみ比とRMSが大
- 短スパン橋: RMSが大きく, 疲労設計に今後の検証が必要
- 軽減策・・・共振を起こさないよう事前の走行計画を推奨
 1. 走行速度・車間距離を微調整すれば, 共振を抑制可能(中スパン橋が主な対象)
 2. 管理者は舗装の維持が重要(全指標を抑制可能)

ご清聴ありがとうございました