

令和 5 年度
「大型車の車輪脱落事故に係る実車を用いた
実証実験調査」
報告書

国土交通省物流・自動車局 自動車整備課

目次

1. 目的	1
2. 実証実験調査概要	1
2.1. 車輪外力計測	1
2.2. 実験結果に基づく解析調査	1
3. 車輪外力計測	2
3.1. 実験車両	2
3.2. 実験期間	2
3.3. 実験場所 テストコース	2
3.4. 計測概要	3
3.5. 実験シナリオ	10
3.6. 実験前作業	11
4. 実験結果	12
4.1. 交差点走行実験	12
4.2. 加減速実験	18
4.3. 横断(片)勾配走行実験	22
4.4. 高速レーンチェンジ実験	24
4.5. 縁石乗り越え実験	26
4.6. 突起路走行実験	28
4.7. ホイール冷間/熱間軸力影響確認	30
4.8. 実験結果総まとめ	31
5. まとめ	32
5.1. 左右輪に作用する外力計測(6分力計計測)と左右差比較に関するまとめ	32
5.2. ボルト軸力計測、およびねじりモーメント計測に関するまとめ	32
6. 実験結果に基づく解析調査	34
6.1. 令和4年度の実験結果概要	34
6.2. 原因分析方策の検討	35
6.3. DA表	40
7. 結語	40

1. 目的

大型車の車輪脱落事故は、大事故に繋がりがねない大変危険なものである。国土交通省は、関係機関と連携し、啓発活動をはじめとした各種対策を行ってきているところであるが、大型車の車輪脱落事故は近年増加傾向にあり、令和 4 年度には 140 件発生している。

「大型車の車輪脱落事故防止対策に係る調査・分析検討会」(以下「検討会」という。)の中間とりまとめにおいて、車輪の脱落前に車両側でナットの緩みを検知できるシステムの有用性についても今後の検討課題になっていることも踏まえつつ、大型車の車輪脱落事故を専門的な観点から調査・分析することで原因を解明し、さらなる対策を講じることを目指し、大型車の車輪脱落事故に係る実車を用いた実証実験調査を実施し、結果を取りまとめることを目的とした。

2. 実証実験調査概要

2.1. 車輪外力計測

検討会の中間とりまとめにもある、令和 4 年度に国交省が実施した限界軸力確認実験及び左輪過負荷入力実験(以降、令和 4 年度の実験と表する)の結果を踏まえ、実際の大型車の走行実態を模擬した走行パターンをテストコースで再現させ、左右の車輪に作用する外力を各評価シナリオ毎で計測・比較し、その結果を取りまとめた。なお外力は車輪に作用する回転方向トルク、荷重、横力等を計測した。

2.2. 実験結果に基づく解析調査

検討会の中間とりまとめにある令和 4 年度の実験結果において、大型貨物自動車を用いた走行実証実験でわずかではあるが左輪が軸力の低下が大きい傾向が見られたが、その原因特定には至らなかったため、さらなる実験が必要とされている。

2.1 の結果を踏まえ、その原因分析の方策を検討した。原因分析の方策としては、シミュレーションを用いる方法、テストピースを用いる方法、実車を用いる方法などを想定し、実施方法を網羅的に検討しそれぞれのメリット／デメリットや組み合わせ方法について検討を行った。

3.車輪外力計測

3.1. 実験車両

- (1) 車両総重量 14トン車 最大積載 5.7トン
- (2) 大型 2 軸車(リアダブルタイヤ/タイヤサイズ 265/70R19.5)
- (3) ISO 方式平座面ボルト(アルミホイール用)

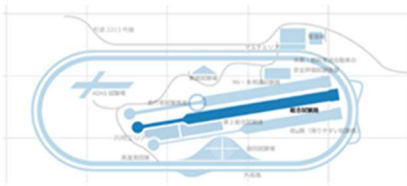
3.2. 実験期間

令和 6 年 1 月 15 日～1 月 25 日

3.3. 実験場所 (財) 日本自動車研究所城里テストセンター

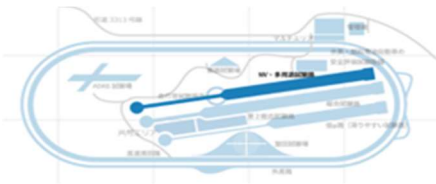
(1) 総合実験路

- ・アスファルト舗装
- ・全長:1,500 m
- ・加速路(幅 10 m×長さ 500m)
- ・実験路(幅 50 m×長さ 1,000m)
- ・0.5 %片勾配



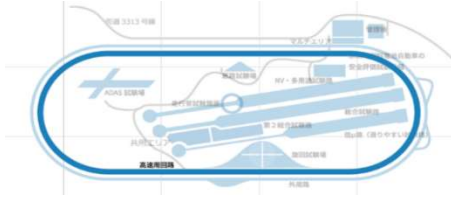
(2) 多用途実験路

- ・アスファルト舗装
- ・0.5 %片勾配



(3) 高速周回路

- ・アスファルト舗装
- ・周長:5,500 m×幅 12 m
- ・直線長:1,112 m×2 曲線長:1,638 m×2
- ・円曲線部半径:400 m
- ・直線部勾配:1%片勾配



3.4. 計測概要

(1) 計測項目

- #1. IMU/GPS による車両走行状態計測
- #2. 6 分力計によるホイール外力計測
- #3. 回転エンコーダーによるホイール回転速度計測
- #4. 加速度センサ(前後・上下加速度)による車輪加速度計測
- #5. 放射温度計によるホイール温度計測
- #6. ひずみゲージによるハブボルト軸力計測およびねじりモーメント計測
- #7. データロガー
- #8. 輪荷重計測

(2) 計測機器一覧

今回使用した計器に関する情報を表 3.4.1 に示す。

表 3.4.1 計測機器一覧

計測器名		型式	数量
IMU/GPS		VSAS-4GM	1式
データロガー	メインユニット	NR-X100	1
	ひずみゲージゲージユニット	NR-ST04	2
	アナログユニット	NR-HA08P	1
	CANユニット	NR-C512	3
6分力計	Wheel Force transducer	LW-2T-50K	2式
	エンコーダ`内蔵型36極スリップ`リング`	SR36AW/E512/AX7・	
	専用ホイール・アダプター他	19.5x6.75	
スリップ角センサー		TrueSlip	1
ひずみゲージ	メーカー純正ハブボルト加工・組み込み	4ゲージx2/本 UFCA-1-11-005LE	4本 (2本/輪)
ハンドヘルドひずみゲージチェッカー		TC-32K	1
トルク計測器	200Nm	LTA-200NA	1
トルク計測器	500Nm	LTA-500NA	1
デジタルトルクレンチ		T6DT850H	1
放射温度計		IT-545NH	1

(3) 計測#1:IMU/GPS による車両走行状態計測

- ✓ IMU: 前後、横、上下加速度、旋回回転速度、左右傾き角度
- ✓ GPS: 車速計測

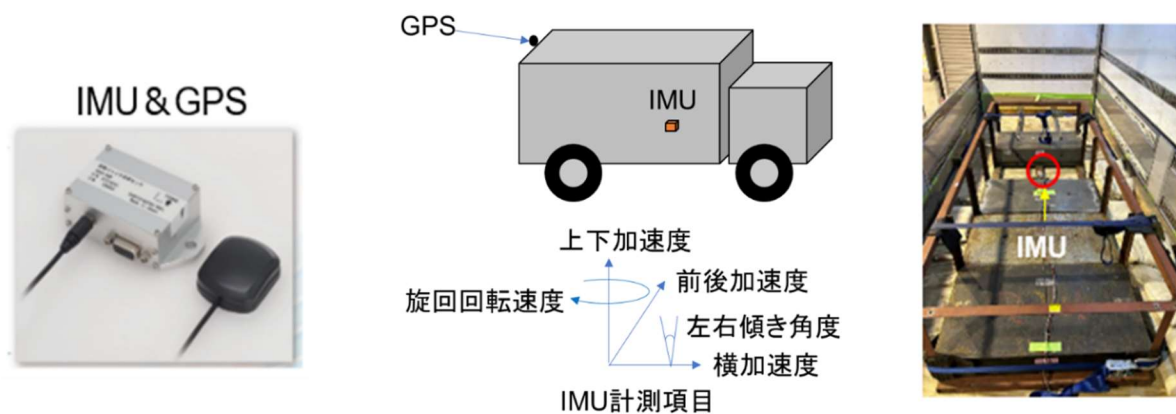


図 3.4.1 IMU &GPS 計測装置

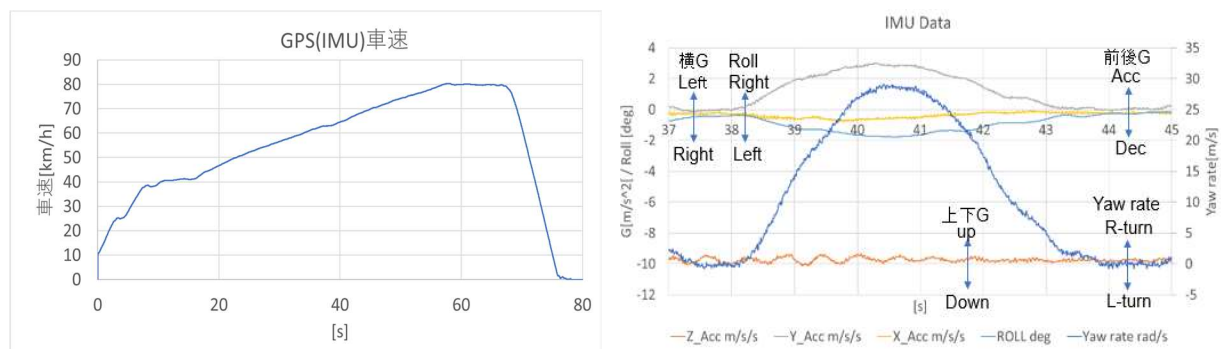


図 3.4.2 IMU/GPS 計測例

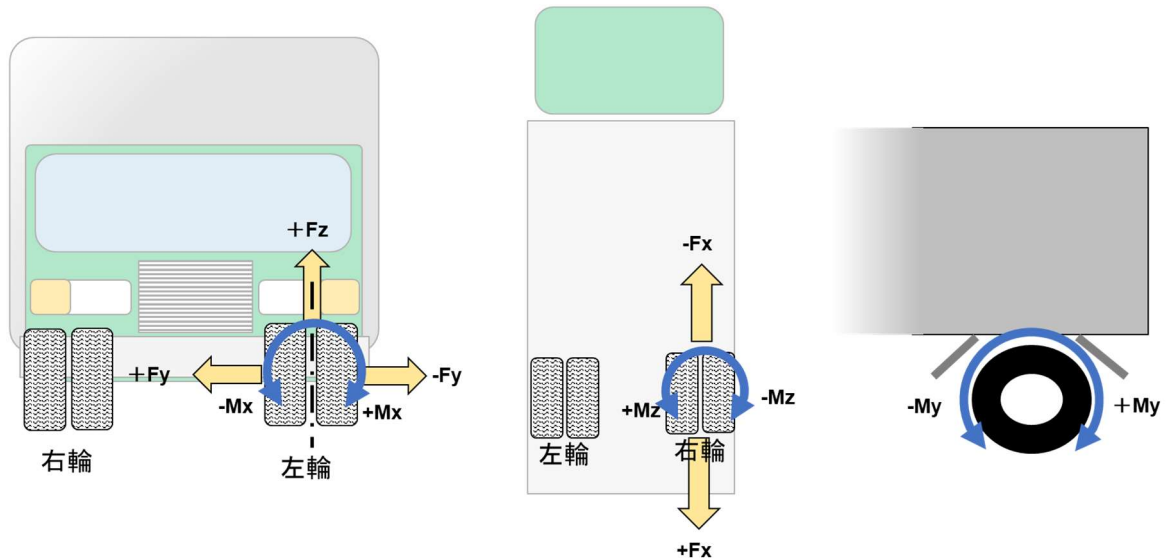
(4) 計測#2: 6 分力計によるホイール外力計測

- ① 6 分力計および取付構造を図 3.4.3 に示す。



図 3.4.3 6 分力計および搭載構造

② 6 分力計力・モーメントと車輪外力の関係図を図 3.4.4 に示す。



- F_x : 前後にかかる力
- F_y : 左右にかかる力
- F_z : 上下にかかる力
- M_x : 車両前後から見た時の車輪の回転しようとする力(モーメント)
- M_y : 車両左右から見た時の車輪の回転しようとする力(モーメント)
- M_z : 車両上下から見た時の車輪の回転しようとする力(モーメント)

図 3.4.4 6 分力計の各外力

③ 6 分力計の計測例を図 3.4.5 に示す

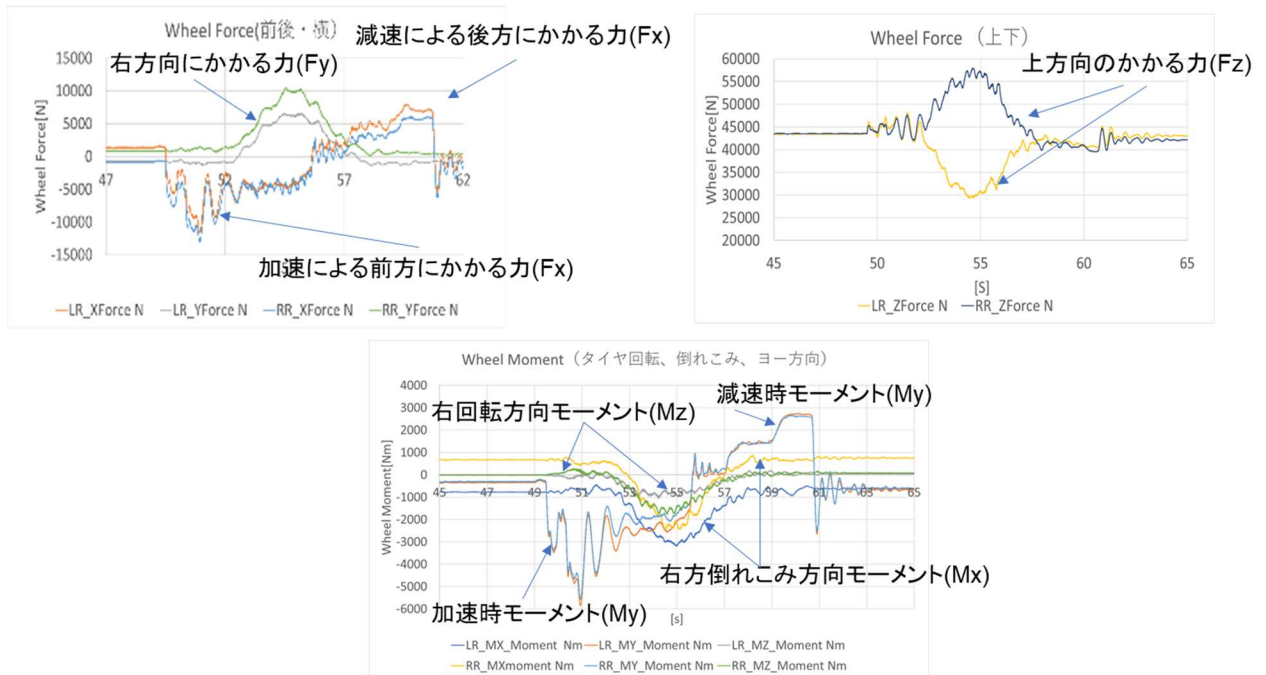


図 3.4.5 6 分力計計測例

(5) 計測#3: 回転エンコーダーによるホイール回転速度計測

6 分力計信号取り出し用回転式ユニット(エンコーダ)に回転計測センサが内蔵されており、そのセンサにて車輪の回転数を計測する。計測例を図 3.4.6 に示す。

スリップリング内蔵回転エンコーダ

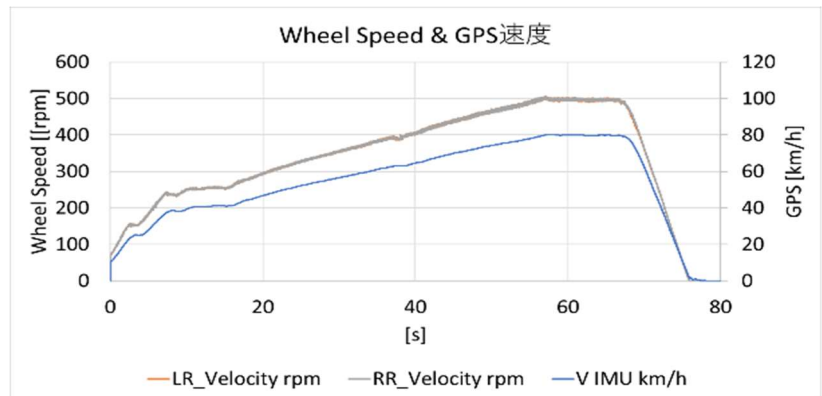


図 3.4.6 車輪回転数計測例

(6) 計測#4: 加速度センサ(前後・上下加速度)による車輪加速度計測

6 分力計に前後加速度・上下加速度センサが内蔵されており、左右車輪(ばね下)のそれぞれの加速度を計測する。計測例を図 3.4.7 に示す。

6分力計内蔵前後、上下Gセンサ

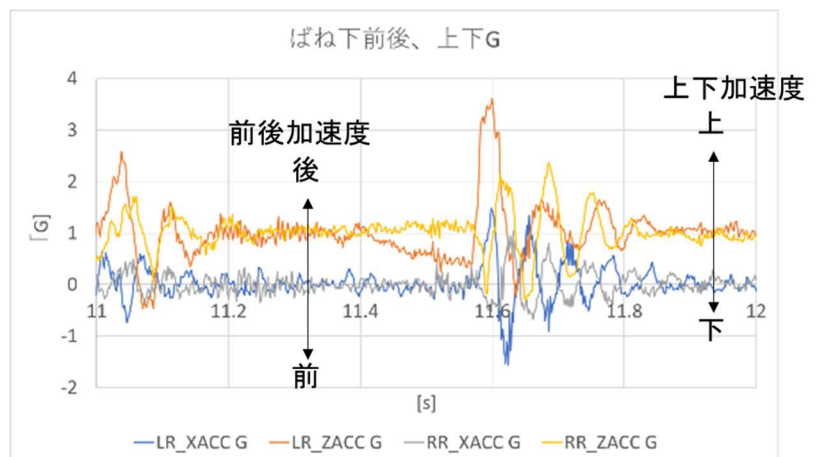


図 3.4.7 車輪前後・上下加速度計測例

(7) 計測#5:放射温度計によるホイール温度計測

(8) 計測#6: ひずみゲージによるハブボルト軸力計測およびねじりモーメント計測

- ① 後左右輪のハブボルト各 2 本にひずみゲージを貼り付け、軸力およびねじりモーメントを計測する。温度の影響を減らすため 4 ゲージ法^{*1}を用いた。計測用ボルトを図 3.4.8 に示す。

^{*1}ブリッジの 4 辺すべてにひずみゲージを接続する方法

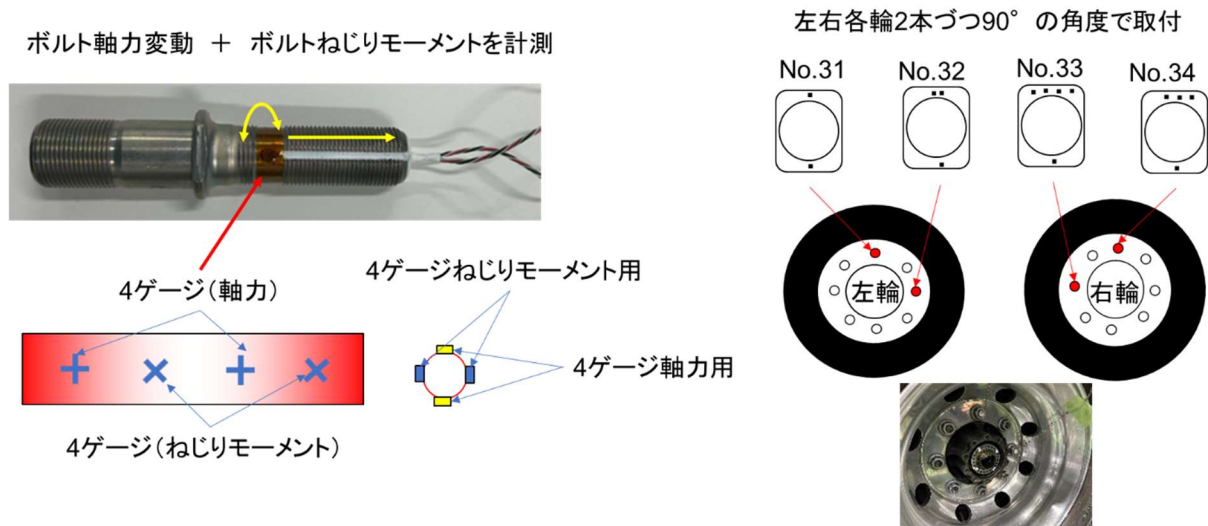


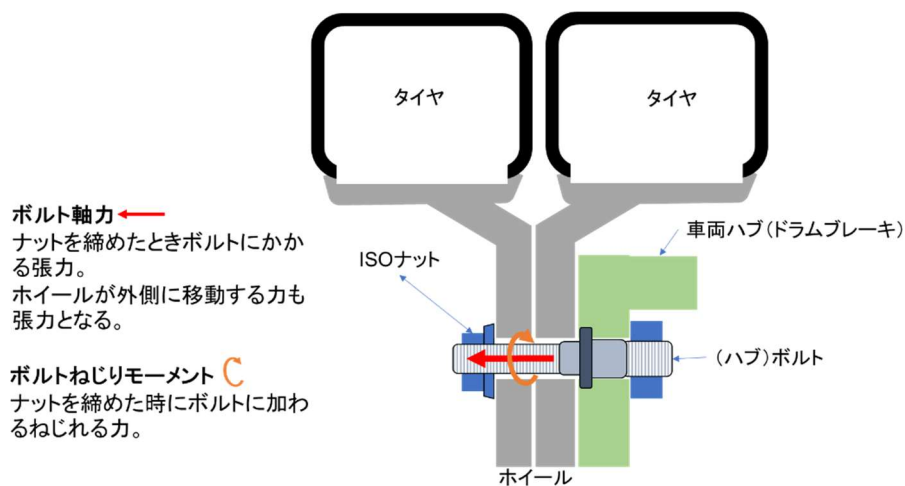
図 3.4.8 ひずみゲージ組み込み計測用ボルト

② ひずみゲージ校正(物理量変換)

- ✓ 軸力については製作メーカーにて計測した成績書の校正係数値を用いた。
- ✓ ねじりモーメントについてはトルク計測器(LTA-200NA)を用いて計測した値を用いた。



- ③ ボルト軸力、ボルトねじりモーメントのイメージ図、およびボルト軸力とナット締め付けトルクの関係を示す図 3.4.10 に示す。



軸力とナット締め付けトルクに関する数式

$$T = kdF$$

T : 締め付けトルク N・m

F : 軸力 N

d : ネジの呼び径 m

k : トルク係数(ナット・ボルトねじ面結合面とナット座面等の統合摩擦係数)

図 3.4.10 ボルト軸力・ねじりモーメント、

(9) 計測#7: データロガー

信号取り込み形態を表 3.4.2 で示す。また各信号取り込みサンプリングは 500Hz(本ロガー最速)で行った。



表 3.4.2 データロガー計測信号形態

入力ユニット	センサ名	備考
CAN 1	6分力計出力 (左右輪)	ばね下Gセンサ、回転エンコーダ含む
CAN 2	スリップ角センサー	左輪のみ
CAN 3	IMU	GPS含む
ひずみゲージ 1	4ゲージ軸力・モーメント	ボルト2本分
ひずみゲージ 2	4ゲージ軸力・モーメント	ボルト3本分
アナログ	熱電対センサ	

(10) 計測#8: 輪荷重計測

実験前に実験車両の輪荷重計測を行った。後輪 1 輪の荷重は 6 分力計の最大静荷重 (4.56t) を超えないよう 4.5t とし、左右差 5kg 以内となるよう鉄ウェイトと砂袋にて微調整を行った。

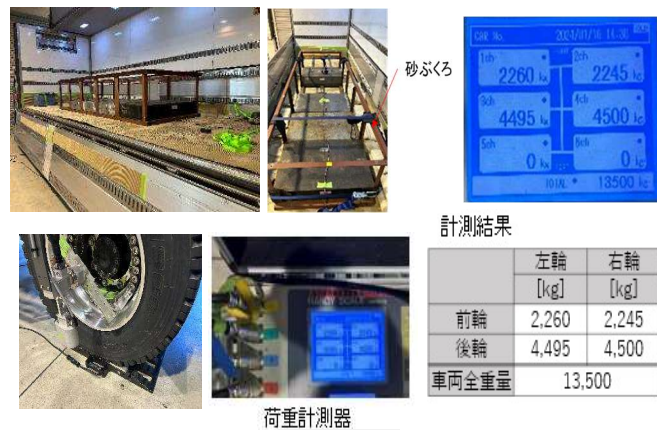


図 3.4.11 各輪荷重計測

(11) 計測器(車両)結線図

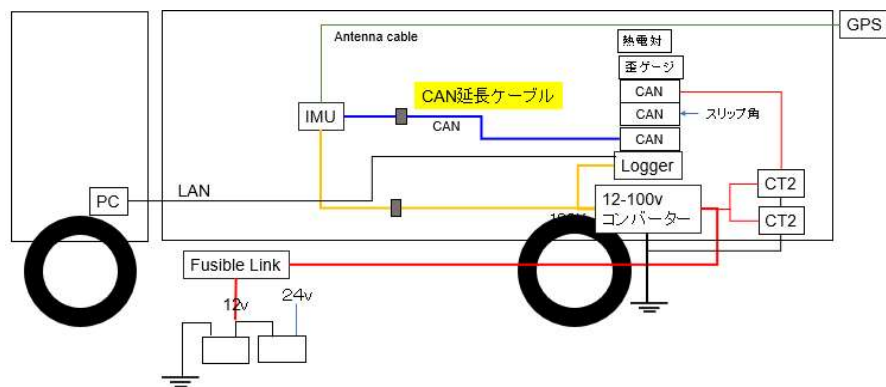


図 3.4.12 計測装置車両搭載図

(12) 計測器結線図

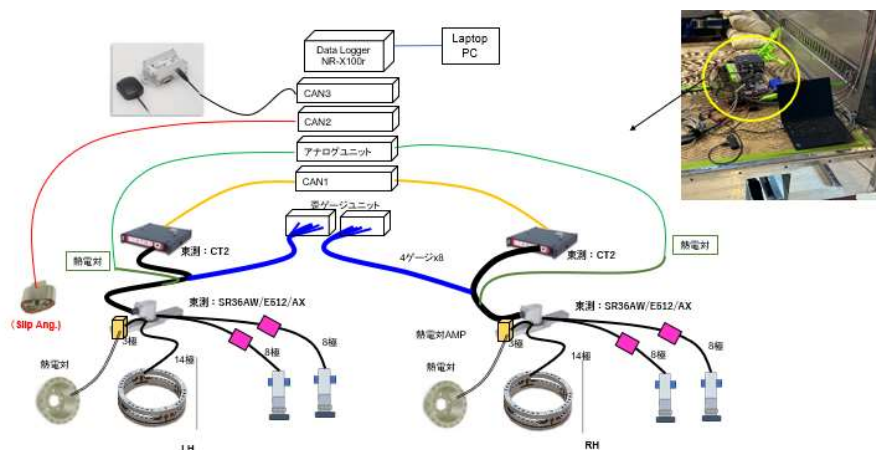


図 3.4.13 計測装置結線図

3.5. 実験シナリオ

3.5.1. 実験目的

- (1) 走行状態の左右輪にかかる外力を把握することを目的に、実際の走行状態を模擬した7つの走行シナリオにおける外力を計測した。
- (2) ナット締め付けトルクは規定の 600Nm(軸力 200kN)で実験を行った。なお、車輪に制駆動力および横力がかかる走行シナリオについては、軸力が低下した場合におけるボルトにかかる力の変化を確認するため、ナット締め付けトルク 150Nm(ボルト軸力 45kN^{*1})の条件でも実験を行った。

*1 令和4年度の実験においてボルト軸力が低下し続かなかった最低軸力を用いた

3.5.2. 実験シナリオ

- (1) 車輪に制駆動力および横力がかかる走行シナリオ: 交差点走行実験、加減速実験、横断(片)勾配走行実験、高速レーンチェンジ実験
- (2) 衝撃外力のあるシナリオ: 縁石乗り越え実験、突起路走行実験
- (3) ホイール熱膨張が加わるシナリオ: ホイール冷間/熱間軸力影響計測

表 3.5.1 走行シナリオ一覧

実験内容	詳細	150Nm (45kN) 実験
交差点走行実験	・<u>交差点右左折を模擬</u> ・右左折走行の違い(発進停止の有無、旋回半径の違い、旋回速度の違い)による左右輪にかかる力を計測した。	実施
加減速実験	・<u>市街地、高速走行時の加速、減速を模擬</u> - 発進加速・減速停止による車輪にかかる力を計測した。	実施
横断(片)勾配走行実験	・<u>横断(片)勾配のある直線道路走行を模擬</u> ・道路横断(片)勾配による左右輪にかかる力の差を計測した。	実施
高速レーンチェンジ実験	・<u>高速道路における低速車追い越しを模擬</u> ・60km/h⇒レーンチェンジ開始⇒80km/h⇒レーンチェンジ終了⇒80km/h	実施
縁石乗り越え実験	・<u>左折時、左輪縁石乗り越えを模擬</u> ・直線低速で鉄板段差を乗り越えたときの左右輪にかかる力を計測した。	—
突起路走行実験	・<u>道路上の突起を再現</u> ・突起量違いで乗り越えたときの車輪にかかる力を計測した。	—
ホイール冷間/熱間軸力影響計測	・冬場冷えた状態で車輪交換を模擬 ・冷間作業後の走行で温度が上がったときのボルト軸力への影響を把握するため冷間時 600Nm でボルト締め付け⇒熱間⇒放置(常温)でボルト軸力を計測した。	—

3.5.3. 実験フロー

走行シナリオ、およびホイール・ナットの締め付けタイミングに関して実験のフローを図 3.5.1 に示す。

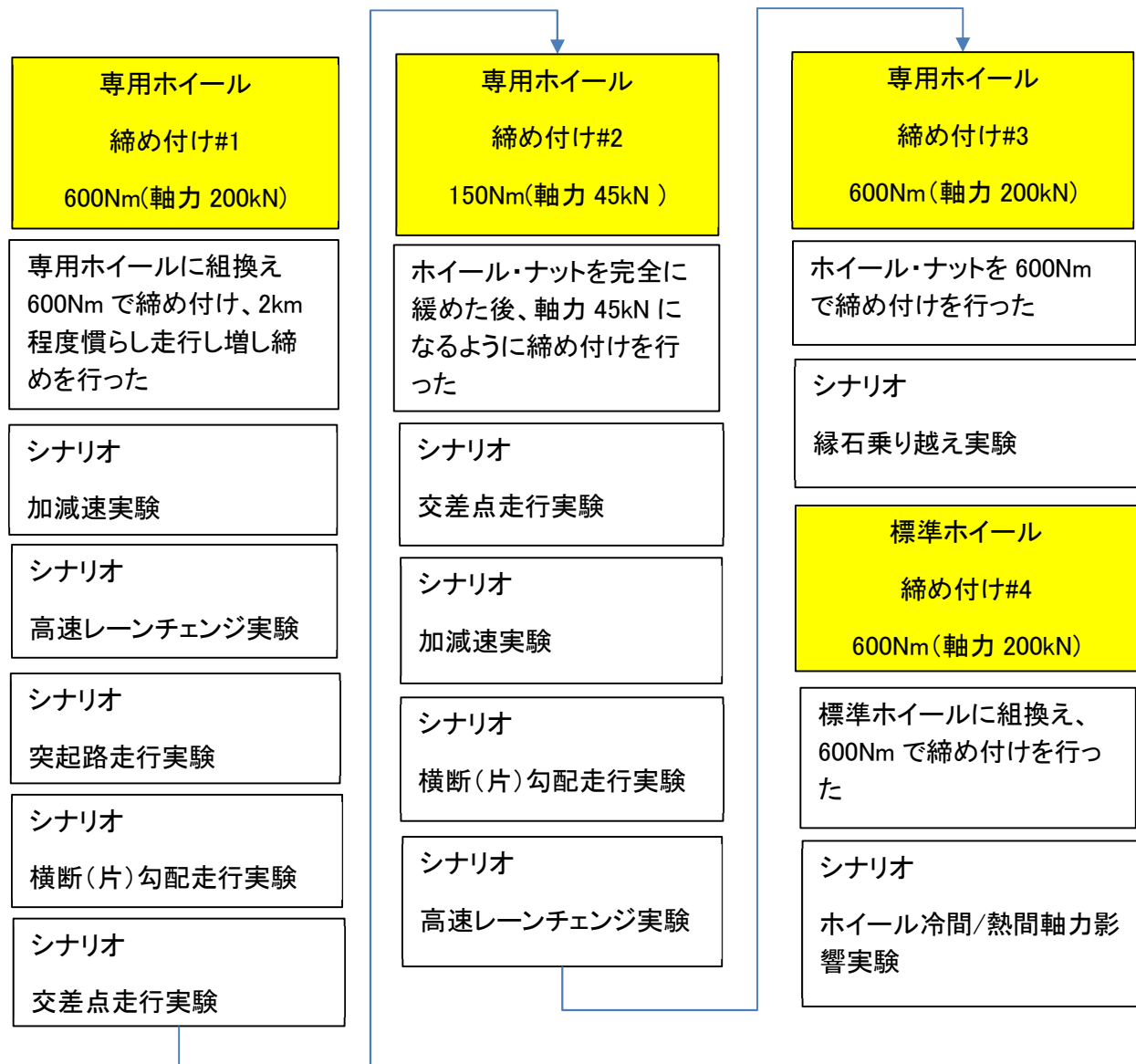


図 3.5.1 実験フロー

3.6. 実験前作業

3.6.1. ホイール・ナット締め付け作業

- ✓ 全ホイール・ボルト、ナットのメーカー指定場所に 10W-30 エンジンオイルを塗布
- ✓ センター出しツールにてホイールを装着、トルクレンチ支持治具(写真)を用いデジタルトルクレンチにてナット締め付け作業を行った



ホイールセンター出しツールを使用。



図 3.6.1 ホイール組付け作業

3.6.2. 計測データ名称

グラフに示された信号名称について表 3.6.1 に示す。

表 3.6.1 信号名称一覧

名称	単位	計測内容	名称	単位	計測内容
左輪温度	° C	ハブアダプタ側面温度	LR_XForce	N	6分力計出力 前後にかかる力
右輪温度	° C	ハブアダプタ側面温度	LR_YForce	N	6分力計出力 左右にかかる力
(右輪)軸力No.33	kN	ボルト軸力	LR_ZForce	N	6分力計出力 上下にかかる力
(右輪)トルクNo.33	Nm	ボルト軸力ねじりモーメント	LR_MX_Moment	Nm	6分力計出力 前方向から見たときの回転する力
(右輪)軸力No.34	kN	ボルト軸力	LR_MY_Moment	Nm	6分力計出力 加減速時に発生する車輪が回転する力
(右輪)トルクNo.34	Nm	ボルト軸力ねじりモーメント	LR_MZ_Moment	Nm	6分力計出力 車両上方から見たときの回転する力
(左輪)軸力No.31	kN	ボルト軸力	LR_Velocity	rpm	車輪回転速度
(左輪)トルクNo.31	Nm	ボルト軸力ねじりモーメント	LR_XACC	G	車輪下前後加速度
(左輪)軸力No.32	kN	ボルト軸力	LR_ZACC	G	車輪下前後加速度
(左輪)トルクNo.32	Nm	ボルト軸力ねじりモーメント	RR_XForce	N	6分力計出力 前後にかかる力
Yaw rate	rad/s	車両 旋回回転速度	RR_YForce	N	6分力計出力 左右にかかる力
Z_Acc	m/s/s	車両上下加速度	RR_ZForce	N	6分力計出力 上下にかかる力
Y_Acc	m/s/s	車両横加速度	RR_MXmoment	Nm	6分力計出力 前方向から見たときの回転する力
X_Acc	m/s/s	車両前後加速度	RR_MY_Moment	Nm	6分力計出力 加減速時に発生する車輪が回転する力
ROLL	deg	車両左右傾き角度	RR_MZ_Moment	Nm	6分力計出力 車両上方から見たときの回転する力
V IMU	km/h	車速	RR_Velocity	rpm	車輪回転速度
			RR_XACC	G	車輪下前後加速度
			RR_ZACC	G	車輪下前後加速度
			Slip_Angle	Degrees	スリップ角度

4. 実験結果

4.1. 交差点走行実験

4.1.1. 実験目的

- (1) 交差点における右左折走行時左右輪にかかる外力を把握するために交差点走行実験を実施した。
- (2) 令和4年度の実験において左輪の軸力低下が右輪に比べ若干大きい結果が得られたが、当時はその要因を特定するに至らなかった。今回の実証実験でその要因を把握するため、同様の実験条件を再現し車輪に加わる外力を計測した。

4.1.2. 実験条件

(1) 令和4年度の実験と同一走行条件にて実験を実施した。その条件を図4.1.1に示す。

(大型車の車輪脱落事故防止対策に係る調査分析検討会「さらなる車輪脱落事故防止対策の検討」
中間取りまとめ 令和4年(2022年)12月より抜粋)

表 6-3. 左輪過負荷入力実験条件

	項目	テストコース条件	車速	左輪過負荷条件
④	交差点	右折	20km/h	4回
⑤	交差点	左折	停止→発進(5km/h)	4回

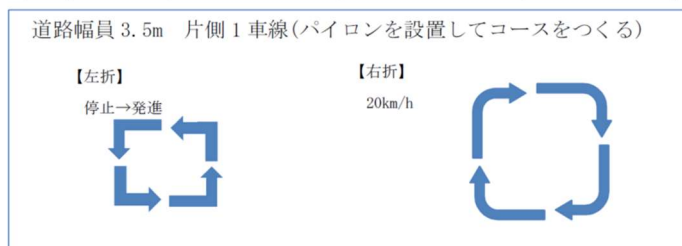


図 6-10. 左輪過負荷入力実験走行方法

図 4.1.1

(2) 実験のコース寸法を図4.1.2に示す。

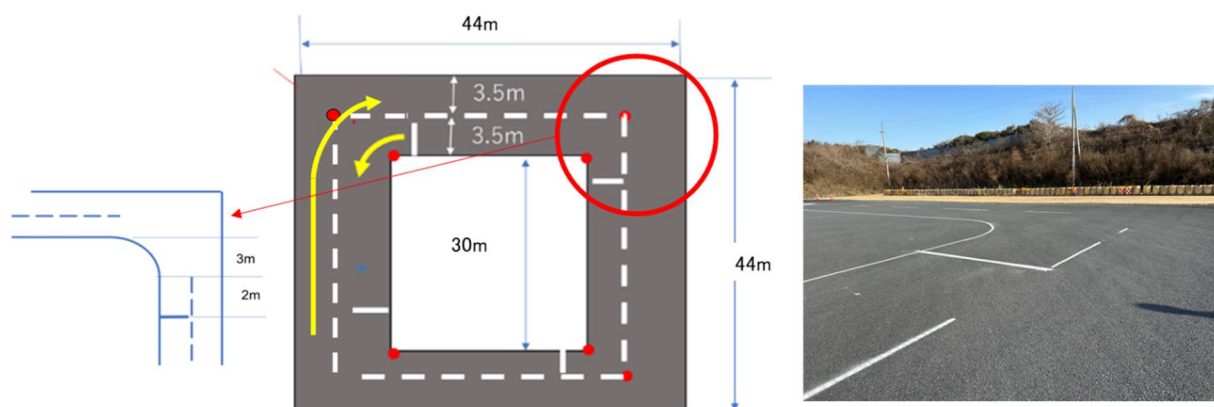


図 4.1.2 交差点実験コース

(3) 走行手順を表 4.1.1 に示す。

表 4.1.1 交差点実験手順

右左折	詳細	サイクル数
左折	発進⇒5km/h⇒停止	4コーナー×3周
右折	車速20km/h一定	4コーナー×3周

4.1.3. 実験結果まとめ

(1) 車輪への外力計測結果

- ① 交差点右左折時、左右輪にかかる外力(力・モーメント)データの左右差を表 4.1.2 に示す。
- ② 各図中、表中の L(左輪)/R(右輪)は外力の大きかった輪を示し、数値は旋回中の左右輪の外力最大値の差を示す。ナット緩みへの影響は、車輪への外力の最大値、外力の仕事量(力×時間)の大きさ、外力の変化量の大きさ、またはその複合要因が可能性として考えられる。一方で実際の外力の波形(図 4.1.6～8)から、左右輪への外力の比較は、最大値が大きいものは、仕事量も大きくかつ変化量も大きいといえるため、ここでは外力の最大値を比較対象とした。
- ③ 右左折時の左右輪外力差を図 4.1.3～4 に示す。

* 左輪への入力が多い場合を赤字、右輪への入力が多い場合を青字にて表記する。

- ✓ 前進方向の力($\Delta F_x=0\sim 1\text{kN}$)、駆動トルク($\Delta M_y=0\sim 100\text{Nm}$)の左右差は他の外力の左右差に比べ比較的小さい。
- ✓ 右折時旋回内輪(右輪)から外輪(左輪)へ $2t$ ($\Delta F_z=43\text{kN}/2$)程度の荷重移動が計測された。
- ✓ M_x (x軸のモーメント)および F_y (軸の力)は、停車状態においてホイールの構造上左右逆向きのオフセットモーメントがかかる。その構造を図 4.1.5 に示す。
- ✓ 交差点右左折走行ともに左輪により大きな外力が加わっていた。左右差が比較的大きかった F_z , M_x , M_z のグラフを図 4.1.6～8 に示す。
- ✓ 旋回による外輪への荷重移動により内輪 F_z が減りその分外輪 F_z へ外力が増えた。その結果を図 4.1.6 に示す。
- ✓ 旋回により左右輪とも旋回外側に x 軸回りのモーメントが計測された。その結果を図 4.1.7 に示す。左右輪の波形がオフセットしているのは図 4.1.5 で示した 6 分力計の M_x の静的オフセットのためと考えられる。
- ✓ 旋回時車両進行方向と車輪の向きの差により z 軸回りのモーメントが計測された。その結果を図 4.1.8 に示す。

表 4.1.2 交差点実験結果

ナット 締め付け	右左折	詳細	ΔF_x [kN]	ΔF_y [kN]	ΔF_z [kN]	ΔM_x [Nm]	ΔM_y [Nm]	ΔM_z [Nm]
600Nm	左折	発進⇒5km/h⇒停止	L=R	R 2	R 8	L 1,600	L 100	L=R
600Nm	右折	車速 20km/h 一定	R 1	L 12	L 43	L 1,800	R=L	L 900

L: 左輪 R: 右輪

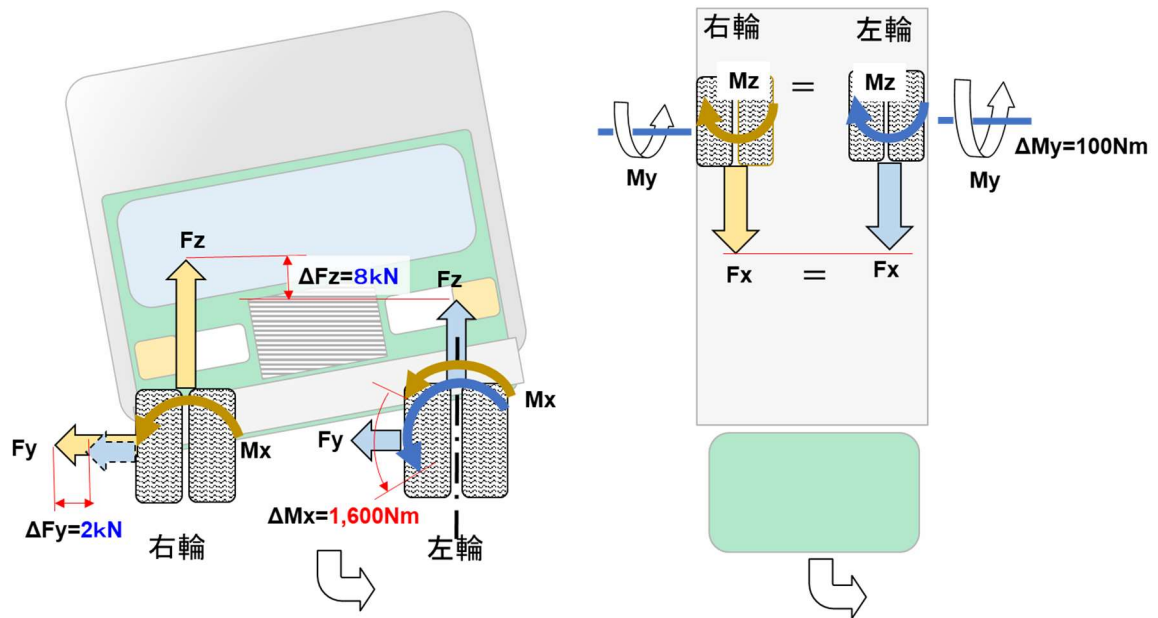


図 4.1.3 交差点左折時車輪にかかる力

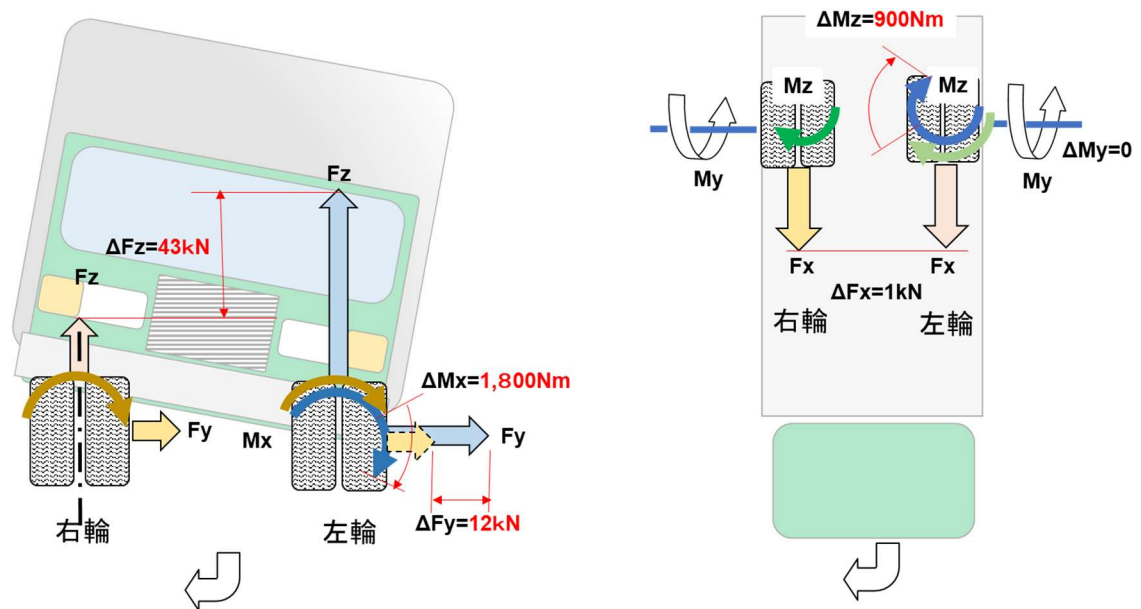


図 4.1.4 交差点右折時車輪にかかる力

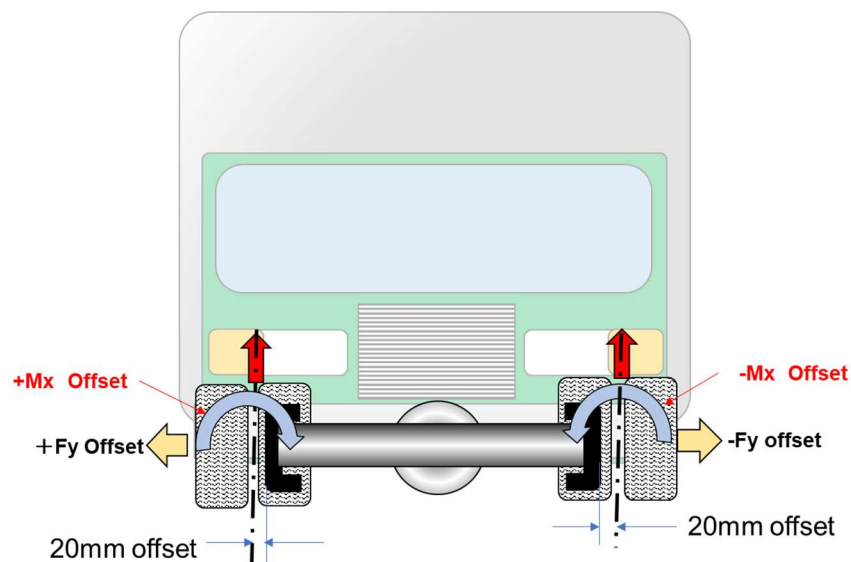
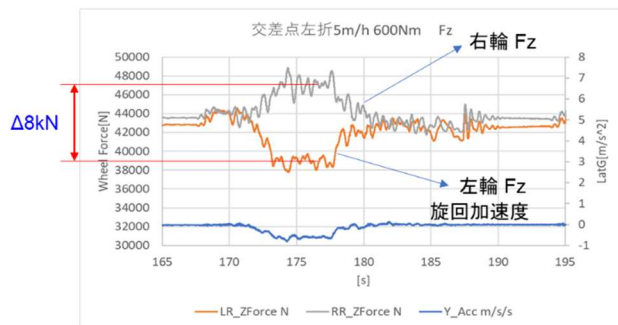


図 4.1.5 静的オフセット

左折ナット締め付けトルク 600Nm(軸力 200kN)



右折ナット締め付けトルク 600Nm(軸力 200kN)

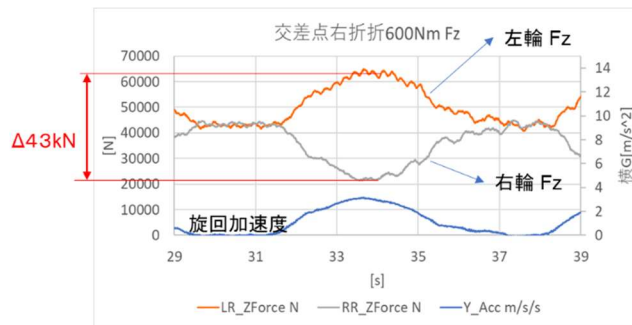
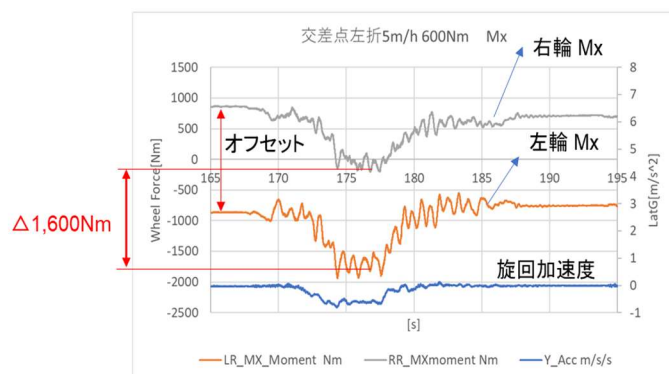


図 4.1.6 交差点右左折時車輪外力左右差(F_z)

左折ナット締め付けトルク 600Nm(軸力 200kN)



右折ナット締め付けトルク 600Nm(軸力 200kN)

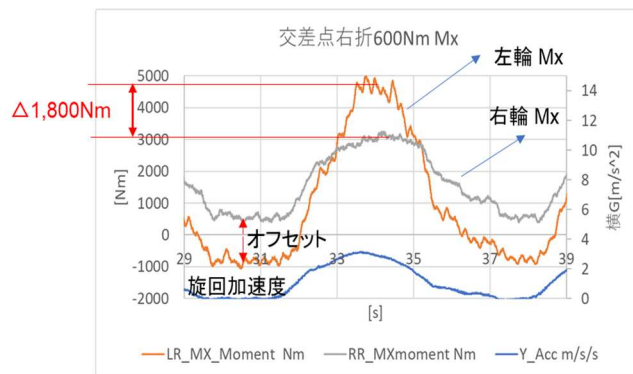


図 4.1.7 交差点右左折時車輪外力左右差(M_x)

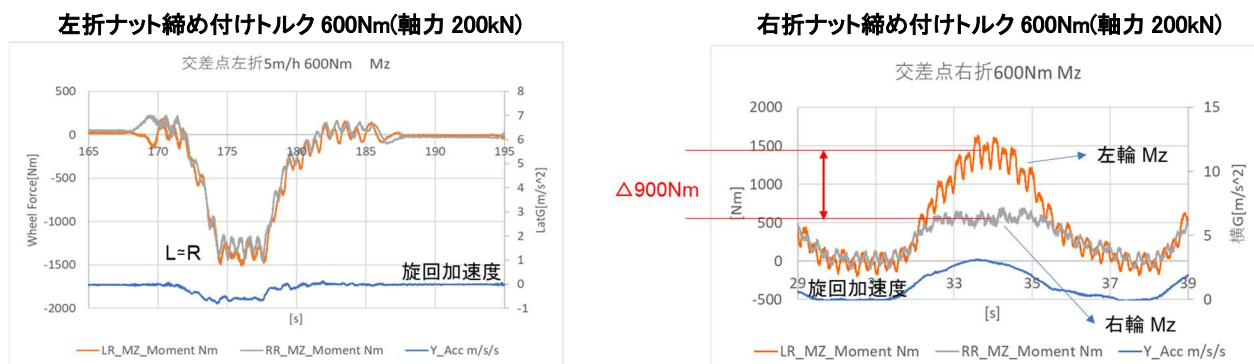


図 4.1.8 交差点右左折時車輪外力左右差(Mz)

(2) ボルト軸力計測結果

外力の大きかった右折時について、ナット締め付けトルク 600Nm(軸力 200kN)および 150Nm(軸力 45kN)それぞれに対するボルト軸力変化の結果を図 4.1.9 に示す。

- ✓ 軸力に関しては横加速度に応じて振動波形の外力が生じており、また旋回外輪がより大きく、その周波数は車輪回転速度に一致する。

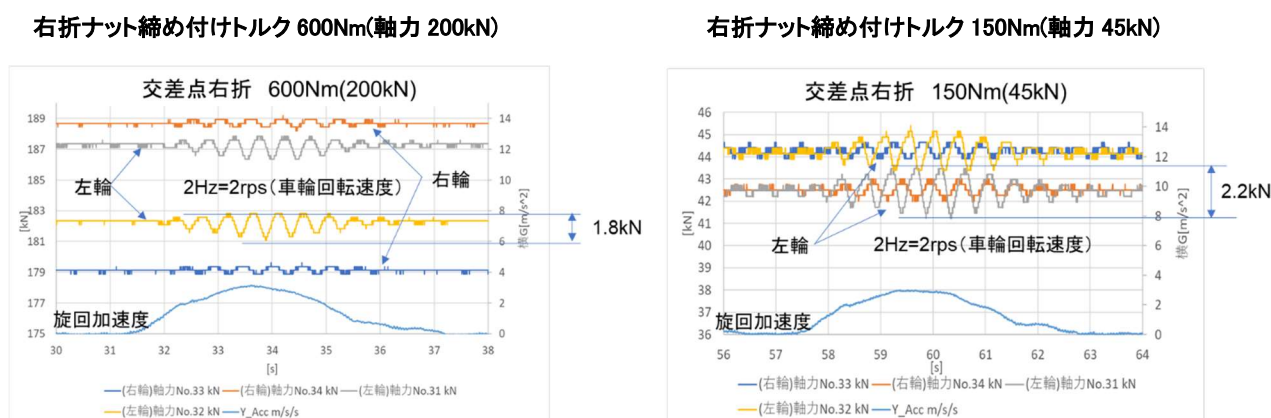


図 4.1.9 交差点右折時のボルト軸力変化

(3) ボルトねじりモーメント計測結果

外力の大きかった右折時のナット締め付けトルク 600Nm(軸力 200kN)および 150Nm(軸力 45kN)それぞれに対するボルトねじりモーメントの結果を図 4.1.10 および図 4.1.11 に示す。

- ✓ 規定トルク 600Nm(軸力 200kN)でナットを締め付けた場合、ボルトのねじりモーメントの大きな変化は見られなかった。一方締め付けトルクが 150Nm(軸力 45kN)の場合は数 Nm ではあるが旋回に合わせた変動が発生している。
- ✓ 締め付けトルク 150Nm(軸力 45kN)時において交差点内での発進、停止の影響を受けていた。また、そのモーメントの向きは左右輪で反対であった。

右折 ナット締め付けトルク 600Nm (軸力 200kN)

右折 ナット締め付けトルク 150Nm (軸力 45kN)

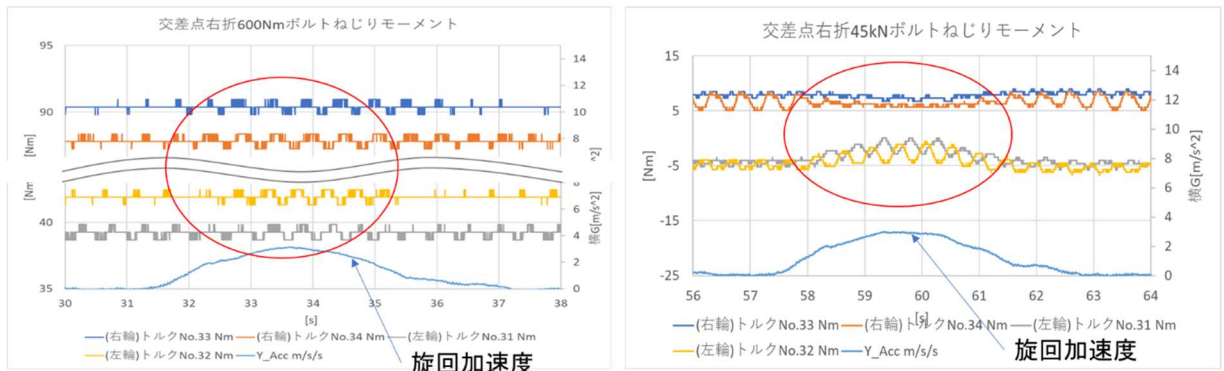


図 4.1.10 交差点右折時ボルトねじりモーメント変化

左折 ナット締め付けトルク600Nm(軸力200kN)

左折 ナット締め付けトルク150Nm(軸力45kN)

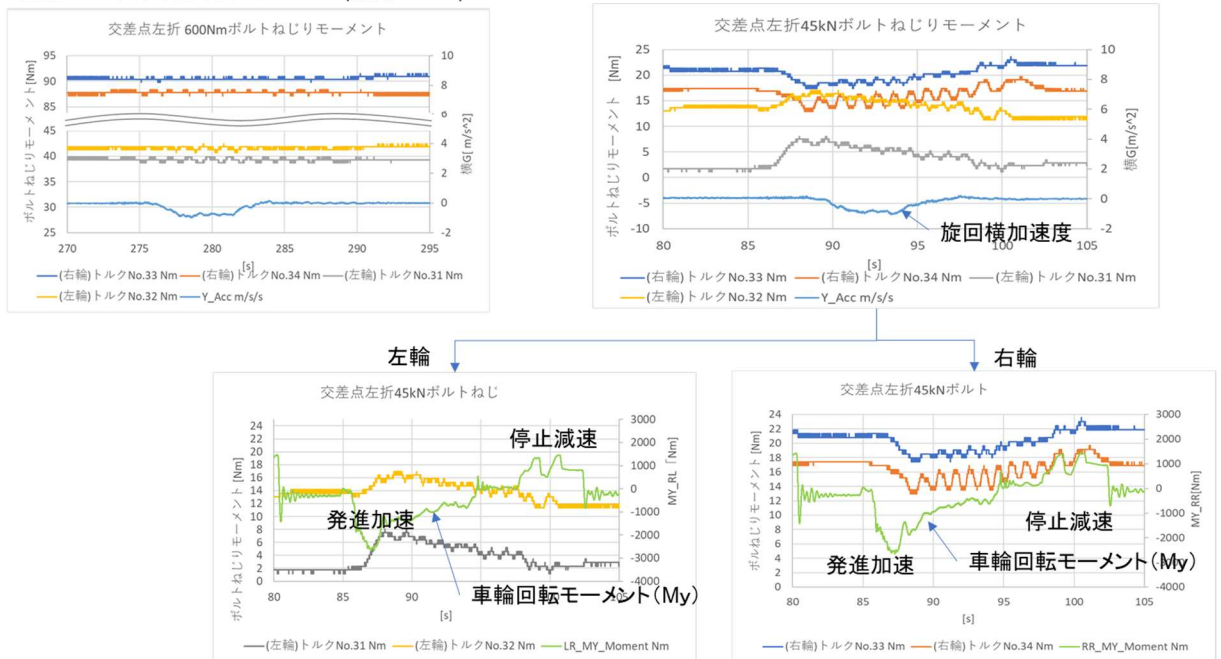


図 4.1.11 交差点発進・停止時ボルトねじりモーメント変化

4.2. 加減速実験

4.2.1. 実験目的

市街地、高速道路での加速、減速による左右輪にかかる外力を把握するために加減速実験を実施した。

4.2.2. 実験条件

発進から加速、中速から加速、減速から停止の組み合わせで同条件の実験を3回ずつ行った。実験パターンを図 4.2.1 に示す。

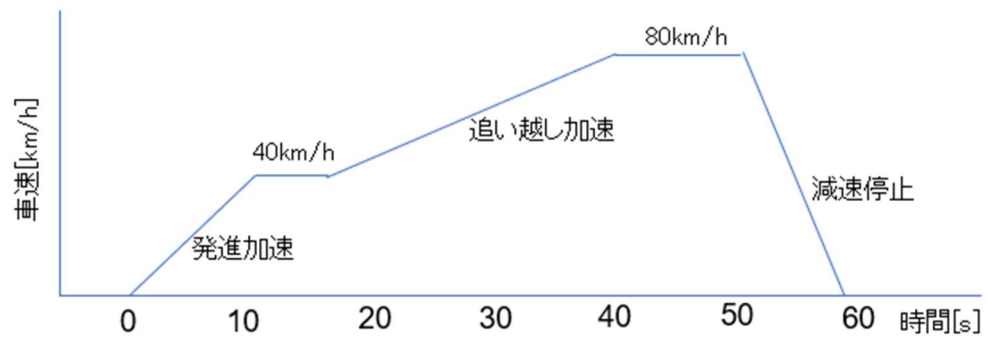


図 4.2.1 加減速実験パターン

4.2.3. 実験結果まとめ

(1) 車輪への外力計測結果

6 分力計による車輪外力の左右差は計測されなかった。その結果を図 4.2.2 に示す。

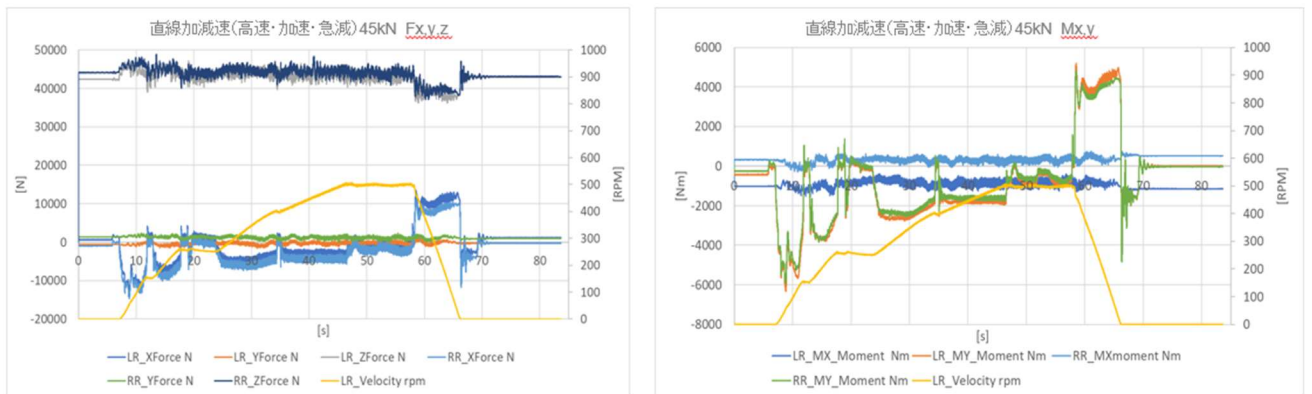


図 4.2.2

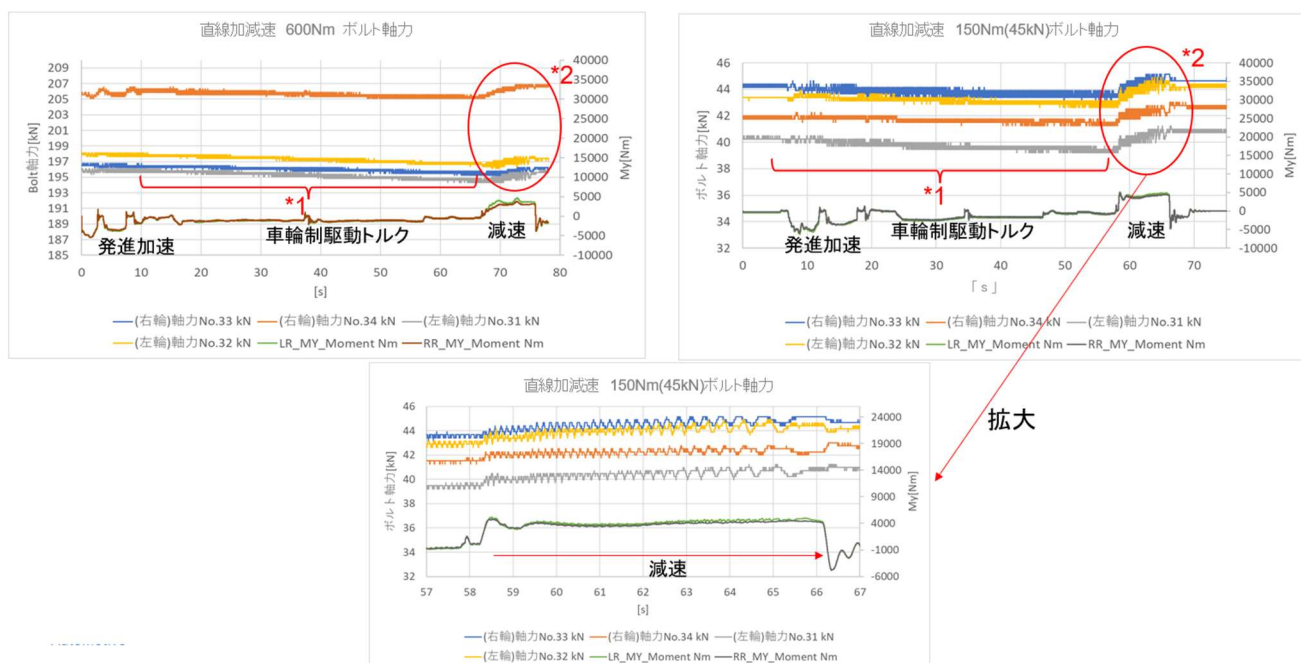
(2) ボルト軸力計測結果

ボルト軸力の影響を図 4.2.3 に示す。

- ✓ 左右輪とも発進から減速まで軸力に若干(0.5～1kN)の低下がみられた。(図 4.2.3 中の*1)
- ✓ 左右輪とも減速時に軸力が 1～2kN 程度上昇した。(図 4.2.3 中の*2)

直線加減速 ナット締め付けトルク 600Nm (軸力 200kN)

直線加減速 ナット締め付けトルク 150Nm (軸力 45kN)



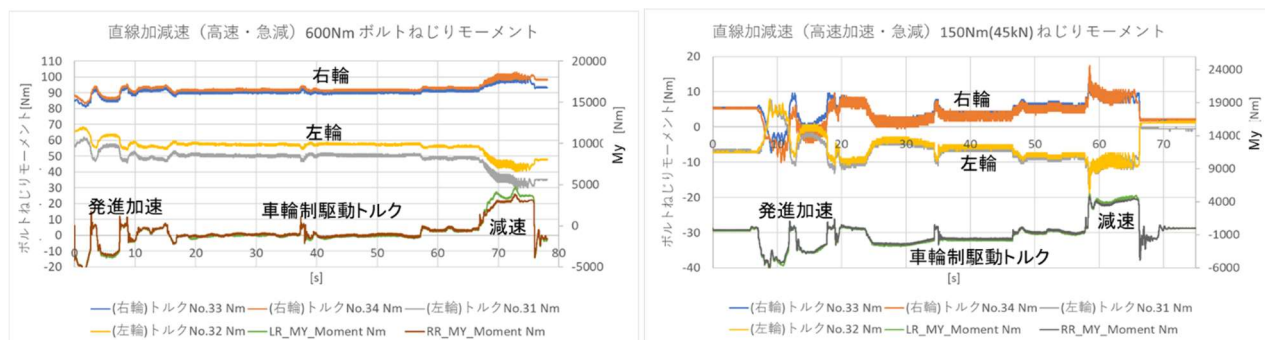
(3) ボルトねじりモーメント計測結果

ボルトねじりモーメントの変化を図 4.2.4 および図 4.2.5 に示す。

- ✓ 発進加速・減速停止時ボルトねじりモーメントが発生しており、その向きは左右輪で反転している。なお、発生したねじりモーメントは 10Nm 程度であった。

直線加減速 ナット締め付けトルク 600Nm (軸力 200kN)

直線加減速 ナット締め付けトルク 150Nm (軸力 45kN)



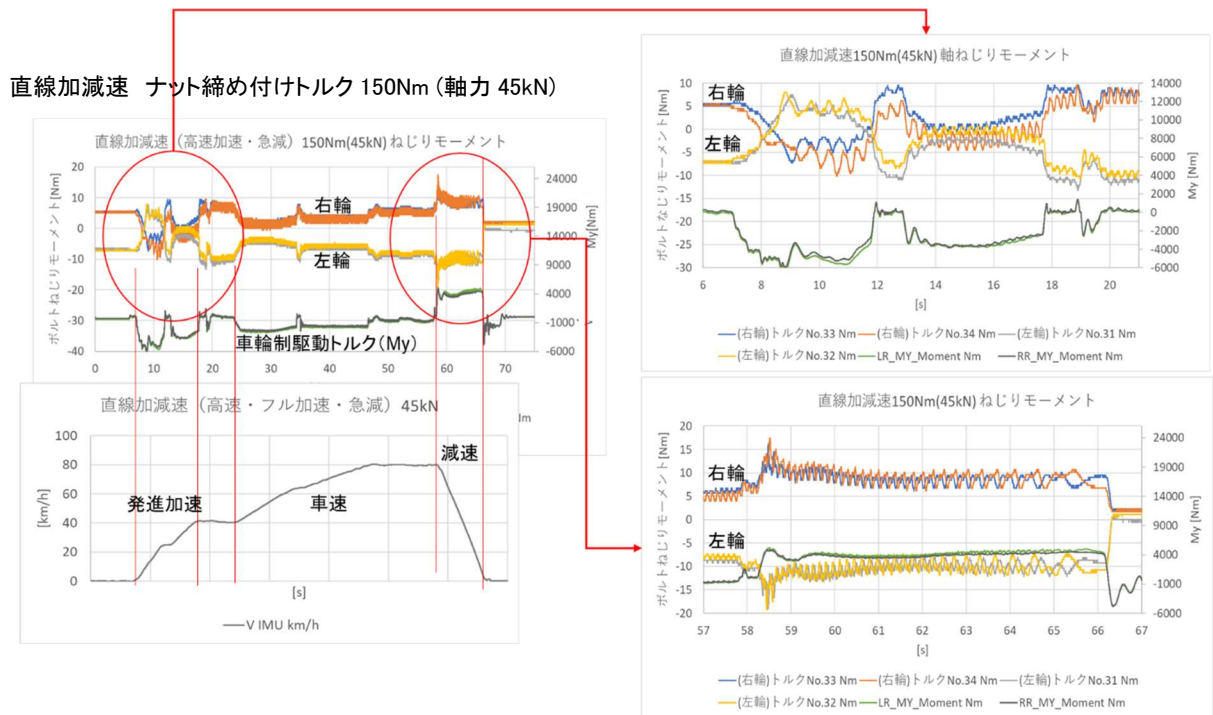


図 4.2.5 直線加減速走行時ボルトねじりモーメント変化詳細

(4) ボルトねじりモーメントによるボルト軸力低下、ナット緩みへの影響について

① 初期ボルトねじりモーメントについて

- ✓ ボルトねじりモーメントの初期値は実際にボルトを締めつけた際のねじりモーメント応力が残っているものと考えられ、このねじりモーメント残留応力はハブ、ホイール、およびナット座面間の摩擦力で保持されていると考えられる。なお、走行中にこの応力は徐々に解放され最終的には 0Nm となると考えられる。

② 車両加減速時のボルトねじりモーメントの影響

- ✓ 今回の実験におけるボルトねじりモーメントの変化を表 4.2.1 に示す。ナット締め付けトルク 600Nm(軸力 200kN)時の左輪におけるモーメント減少率が大きいのは、今回の走行実験が大きな減速加速度を伴う実験が多かったため左輪に応力解放方向のモーメントがより多く加わったこと、また交差点実験で左輪により大きな力が加わったことが要因ではないかと考えられる。

表 4.2.1 実験前後でのねじりモーメント変化

	ボルト装着輪 #番号	ナット締め付け600Nm		Δ [Nm]	減少率 [%]
		試験開始前	試験終了後*		
ねじり モーメント [Nm]	右輪_#33	196	91	106	54%
	右輪_#34	185	87	98	53%
	左輪_#31	151	42	109	72%
	左輪_#32	166	36	130	78%

*ナット締め付けトルク 0 Nmでの残存ねじりモーメントを差し引いた値

	ボルト装着輪 #番号	ナット締め付け150Nm (軸力45kN)		Δ [Nm]	減少率 [%]
		試験開始前	試験終了後		
ねじり モーメント [Nm]	右輪_#33	54	6	49	90%
	右輪_#34	47	4	43	92%
	左輪_#31	33	-4	38	112%
	左輪_#32	57	1	57	99%

4.3. 横断(片)勾配走行実験

4.3.1 実験目的

道路横断(片)勾配が日本の道路では最大 2%程度左下がりで設けられており、直線・一定速走行時にこの横断(片)勾配から左右の車輪に加わる外力差の影響を把握するために横断(片)勾配走行実験を実施した。

4.3.2 実験条件

直線路を速度 40km/h、60km/h、および 80km/h で走行した。テストコース周回路の直線部横断勾配は約 1%であり、公道の横断勾配の向きに合わせるため正方回りを同条件で 2 回ずつ行った。

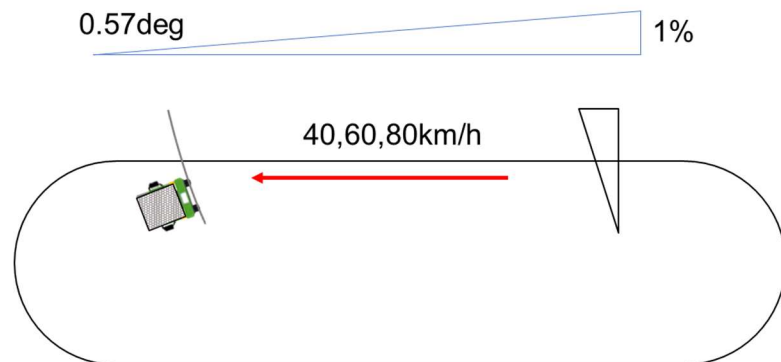


図 4.3.1 横断(片)勾配実験シナリオ

4.3.3. 実験結果まとめ

(1) 車輪への外力計測結果

左右輪での外力差のイメージを図 4.3.2 に示す。

- ✓ 傾き(左輪下がり)方向の外輪に 750N 程度の荷重移動(左右差 1.5kN)が計測された。

その結果を図 4.3.3 に示す。

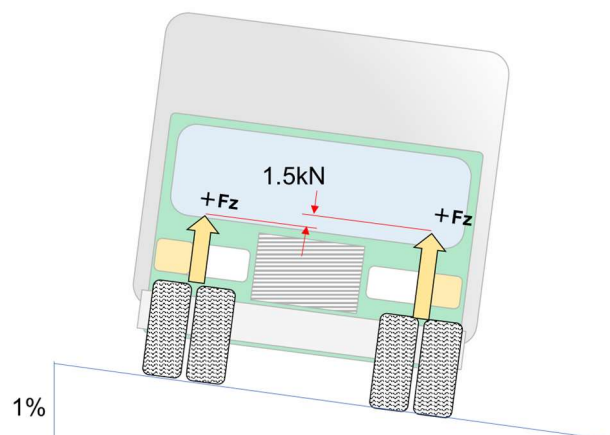


図 4.3.2 横断(片)勾配 1%での車輪への外力左右差

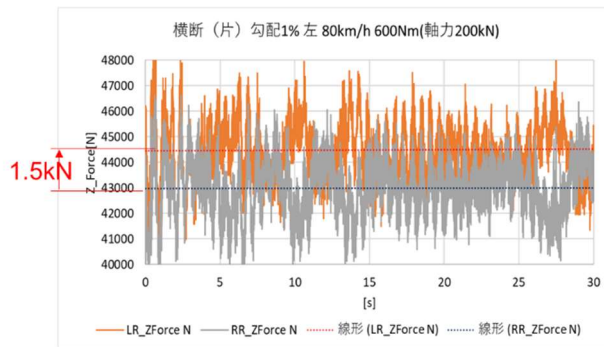


図 4.3.3 横断(片)勾配による荷重左右差

(2) ボルト軸力計測結果、およびボルトねじりモーメント計測結果

試験時のボルト軸力、ねじりモーメントのデータを図 4.3.4 に示す(ナット締め付けトルク 600Nm (軸力 200kN)での計測も実施しているが、変化は計測されなかったため、車輪外力の影響をより受けやすいナット締め付けトルク 150Nm (45kN)時のものを示す)。

- ✓ ボルト軸力、およびねじりモーメントともに変化は計測されなかった。

左周り走行

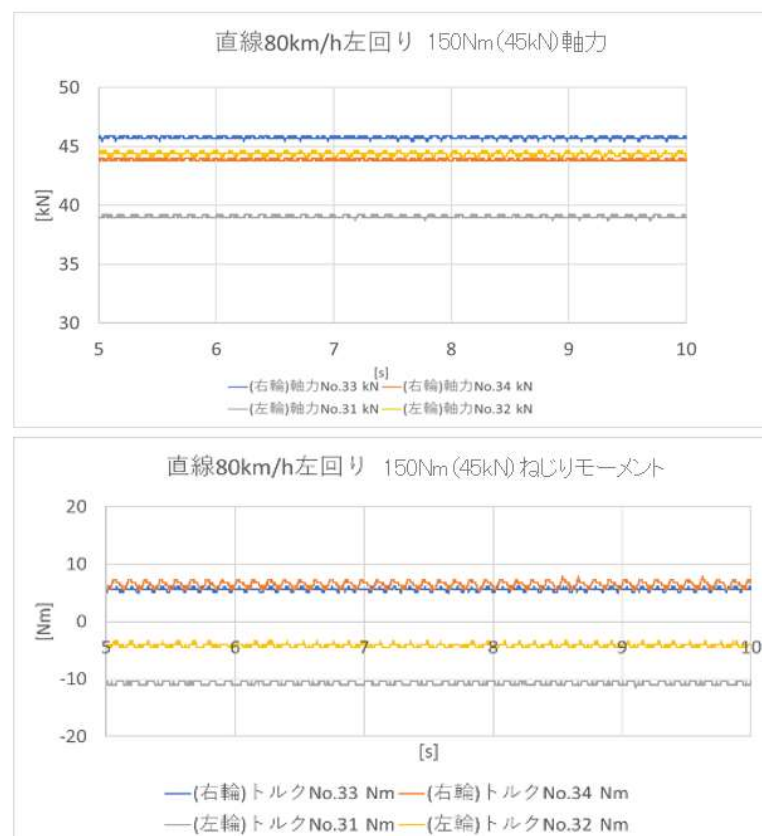


図 4.3.4 直線走行(80km/h)時ボルト軸力・ねじりモーメントへの影響

4.4. 高速レーンチェンジ実験

4.4.1. 実験目的

高速道路走行時、低速車の追い越しを行う際の左右輪に加わる外力を把握するためレーンチェンジ実験を実施した。

4.4.2. 実験条件

60km/h から 80km/h まで加速しながらレーンチェンジを行い、そのまま定速で元の車線に戻る走行パターンで 3 回実験した。走行イメージを図 4.4.1 に示す。

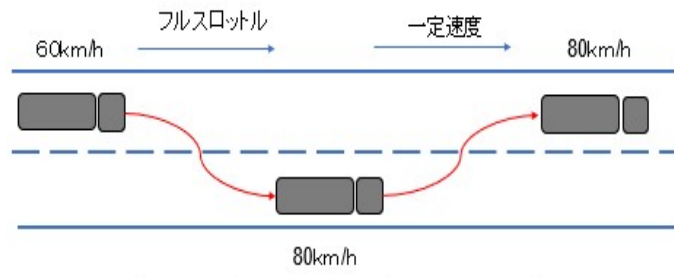


図 4.4.1 高速レーンチェンジ走行イメージ

4.4.3. 実験結果まとめ

(1) 車輪への外力計測結果

レーンチェンジの車両挙動を図 4.4.2 に示す。また左右差のあった外力を図 4.4.3 に示す。

- ✓ レーンチェンジ開始および完了時ヨーレートに応じて上下方向の外力が逆位相で入るが、外力値の差はほとんど計測されなかった。

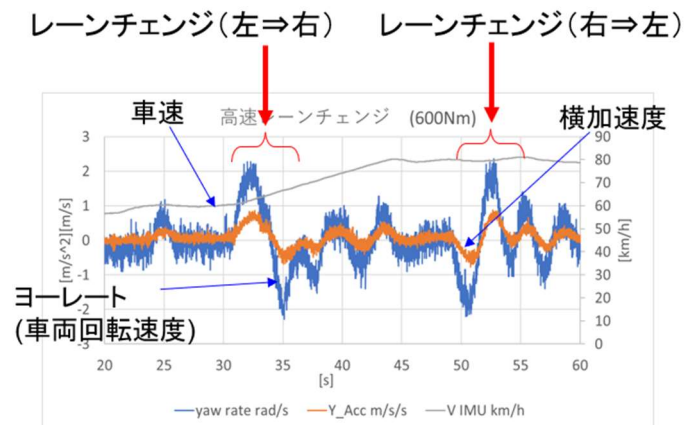


図 4.4.2 レーンチェンジの車両挙動

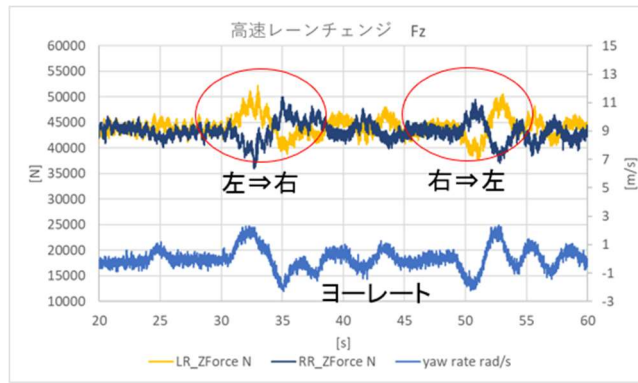


図 4.4.3 高速レーンチェンジ時上下外力左右差

(2) ボルト軸力計測結果

- ✓ ナット締め付けトルク 600Nm(軸力 200kN)、および 150Nm(軸力 45kN)の条件では、軸力への影響は計測されなかった。その結果を図 4.4.4 に示す。

(3) ボルトねじりモーメント計測結果

- ✓ ナット締め付けトルク 150Nm(軸力 45kN) の条件に限り、レーンチェンジ開始時の加速中にボルトねじりモーメントに 2~3Nm 程度の変動が計測された。その結果を図 4.4.4 に示す。

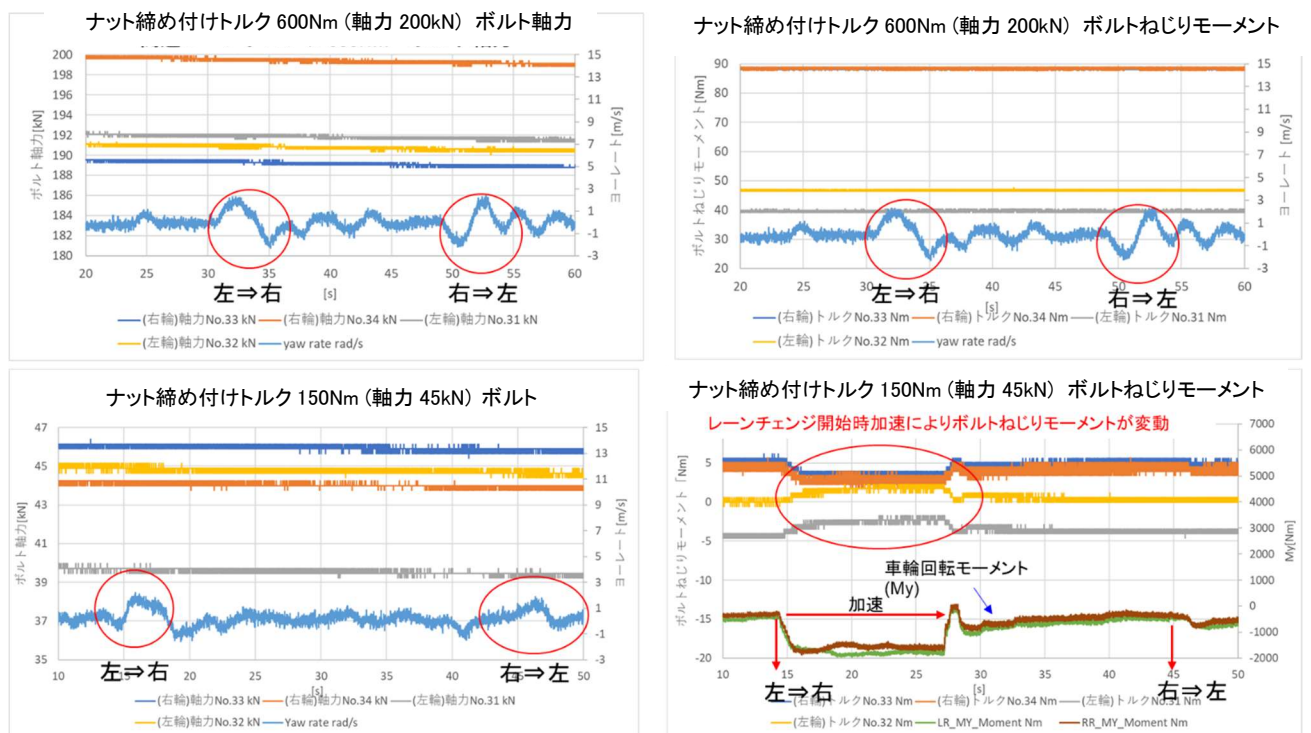


図 4.4.4 高速レーンチェンジ時ボルト軸力・ねじりモーメントへの影響

4.5. 縁石乗り越え実験

4.5.1. 実験目的

車両が縁石乗り上げ、また乗り越えたときの車輪への外力を把握するために縁石乗り越え実験を実施した。

4.5.2. 実験条件

- (1) 厚さ 70mm、及び 170mm の鉄ウェイトを片輪ずつ乗り越える実験を行った。試験車速は徐行（5km/h 以下）で実施した。
- (2) 170mm については乗り越えることが出来ず実験データを取得できなかった。



図 4.5.1 実験イメージ図

4.5.3. 実験結果まとめ

(1) 車輪への外力計測結果

- ✓ 左右輪への衝撃加速度（上下、前後加速度）を図 4.5.2 に示す。
- ✓ 左輪縁石乗り上げ時、ホイール外力は左輪前後力に大きな外力が観測された。上下にかかる力（ F_z ）は位相が反転するがほぼ同等の大きさの外力となっており、車両左右の揺れに対する外力と考えられる。その結果を図 4.5.3 に示す。
- ✓ 他の外力についても左右の差は計測されなかった。外力のイメージ図を図 4.5.4 に示す。

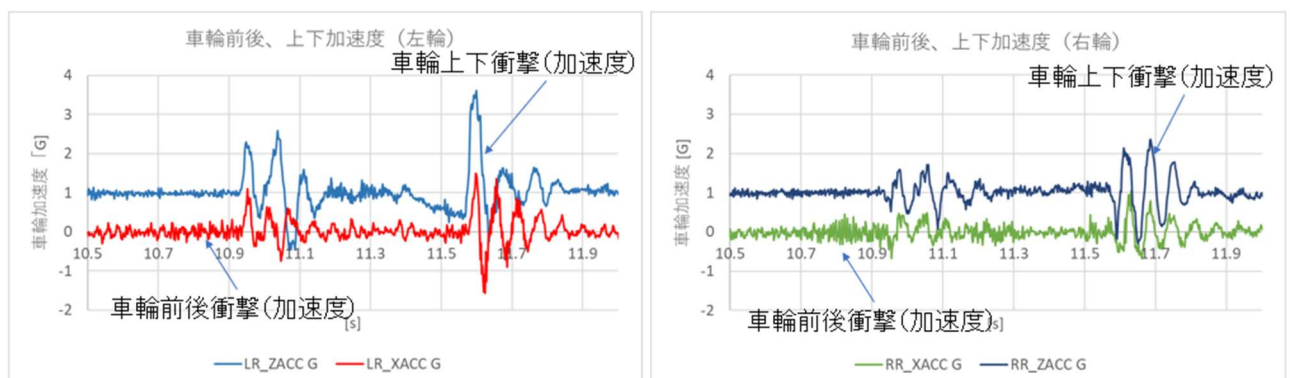


図 4.5.2 縁石乗り越え時車輪衝撃加速度

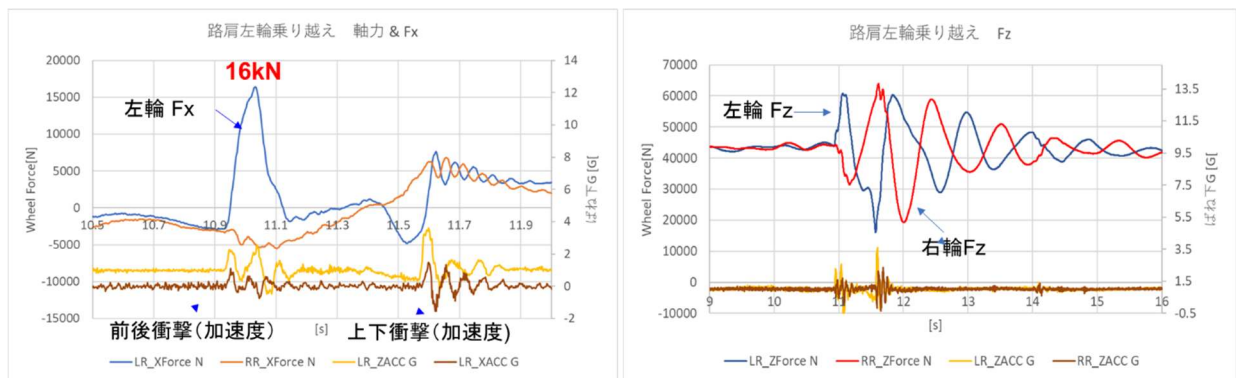


図 4.5.3 縁石乗り越え時車輪への外力左右差

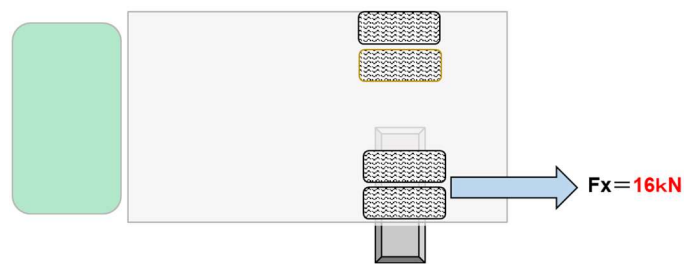


図 4.5.4 縁石乗り越え時主な車輪外力左右差

(2) ボルト軸力計測結果、およびボルトねじりモーメント計測結果

ボルト軸力、ボルトねじりモーメントへの大きな影響は計測されなかった。その結果を図 4.5.5 に示す。

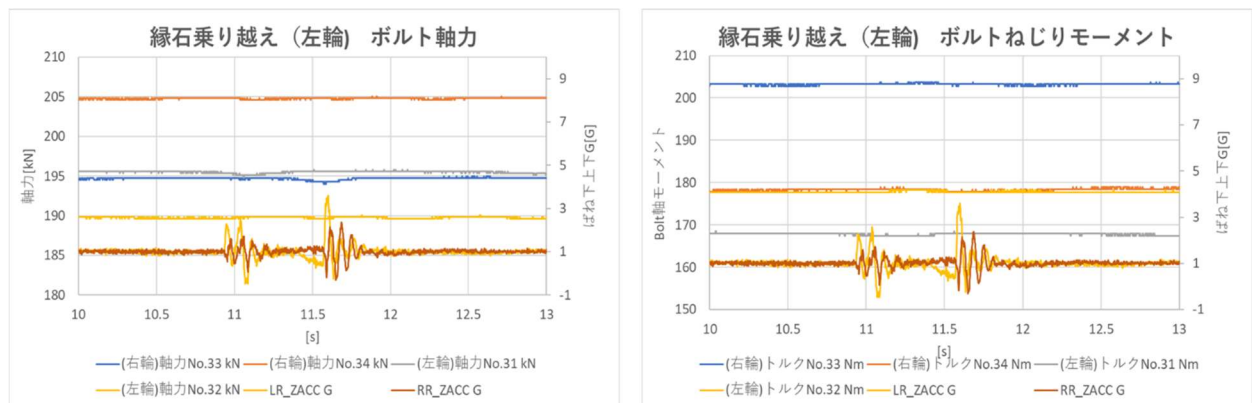


図 4.5.5 縁石乗り越え時ボルト軸力・ねじりモーメントへの影響

4.6. 突起路走行実験

4.6.1. 実験目的

走行時に想定される突起を再現し、車輪に加わる外力を把握するために突起路走行実験を実施した。

4.6.2. 実験条件

- (1) 10, 20, 30mm の突起を左右輪どちらかで通過する実験を行った。
- (2) 30m 間隔で突起を設置し、その上を車速 40, 60, 80km/h で左右輪各 3 サイクルずつ実施した。

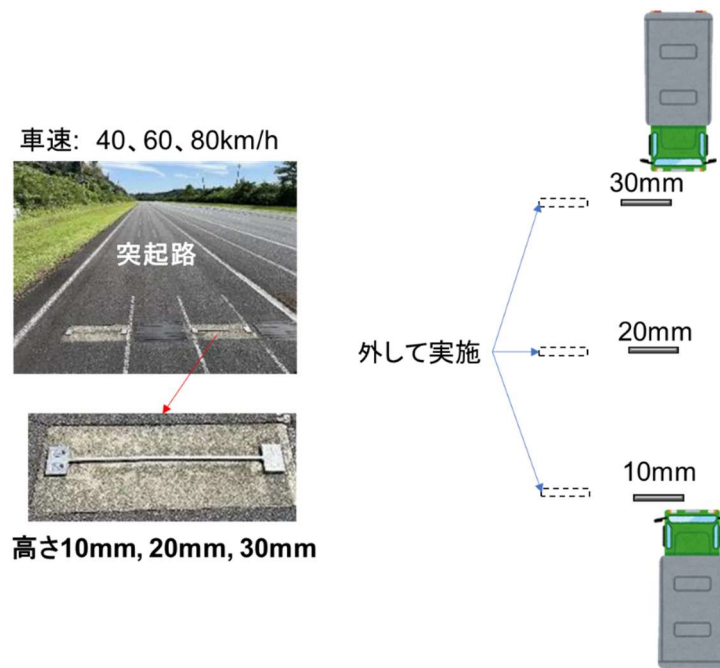


図 4.6.1 突起乗り越え実験シナリオ

4.6.3. 実験結果まとめ

(1) 車両への外力計測結果

- ✓ 突起乗り越え時、上方向にパルス状の外力が観測された。上下方向の外力 F_z の左右差を図 4.6.2 に示す。ここで 44,000N(4.5t)は静的な後輪荷重であり、本荷重からの増加分を赤字で示している。また車輪外力の結果を図 4.6.3 に示す。

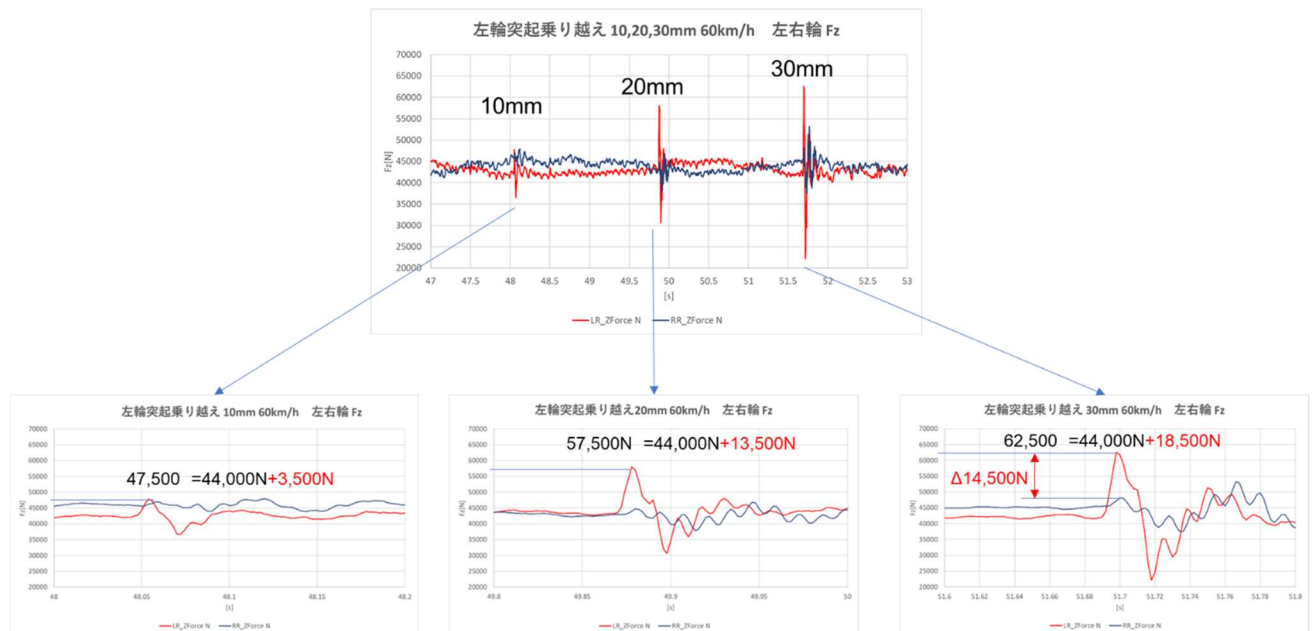


図 4.6.2 左輪突起乗り越え時上下方向の外力 F_z

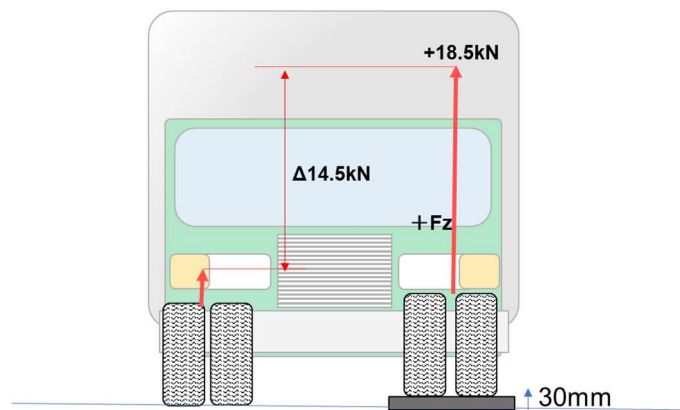


図 4.6.3 左輪突起乗り越え時車輪外力

(2) ボルト軸力計測結果、およびボルトねじりモーメント計測結果

✓ 軸力、ボルトねじりモーメントへの影響は計測されなかった。その結果を図 4.6.4 に示す。

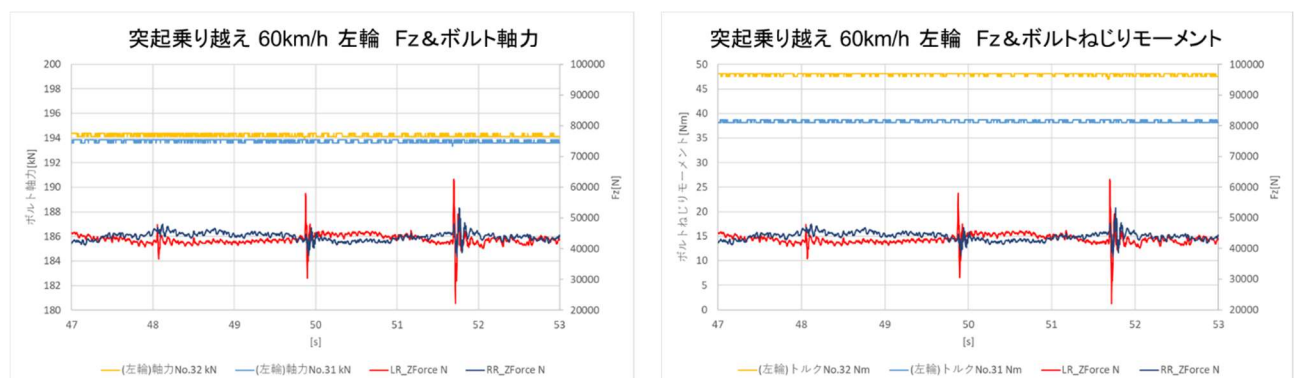


図 4.6.4 突起乗り越え時ボルト軸力、ねじりモーメントへの影響

4.7. ホイール冷間/熱間軸力影響確認

4.7.1. 実験目的

タイヤ(ホイール)交換等の、冷間作業後の走行で温度が上がったときのボルト軸力への影響を把握するために熱影響実験を実施した。

4.7.2. 実験条件(手順)

以下の手順で実験を実施した。

- ✓ 標準ホイールに履き替え
- ✓ 左輪ホイール側のみボルトをドライアイスで冷却（右輪ホイールは冷却なし）
- ✓ ナット締め付けトルク 600Nm(軸力 200kN)で左右輪の軸力を計測
- ✓ ブレーキ走行によりホイール温度を上昇(ナット温度がおよそ 90℃以上になるよう、約 0.3G の減速を 15 回ほど繰り返し走行)
- ✓ ホイール熱間時の軸力を計測



4.7.3. 実験結果まとめ

ホイール温度とボルト軸力計測結果を表 4.7.1 に示す。

- ✓ 温度の影響はほとんど計測されなかった。

表 4.7.1 ボルト軸力の温度影響結果

ナット締め付け トルク 600Nm		軸力[kN]	
		初期 締め付け時	温度上昇後 (試験後)
左輪	温度[°C]	-4°C	92
	#31	228	225
	#32	213	218
右輪	温度[°C]	8	92
	#33	201	205
	#34	214	218

4.8. 実験結果総まとめ

車輪への外力計測結果まとめを表 4.8.1 に示す。詳細は各実験結果まとめを参照。

表 4.8.1 外力計測結果

実験内容 B2:I41	車輪に働く外力						
	・Fx: 前後にかかる力 ・Fy: 左右にかかる力 ・Fz: 上下にかかる力 ・Mx: 前方から見たときの回転する力(モーメント) ・My: 加速・減速時に発生する車輪が回転する力(モーメント) ・Mz: 車両上から見たときの回転する力(モーメント)						
	外力	外力が大きかった車輪	外力の差	倍率 [倍]	外力が大きかった車輪	外力の差	倍率 [倍]
交差点走行実験 (令和 4 年の実験)		左折			右折		
	Fx	左右輪同等	0「kN」	1	右輪	1「kN」	∞ * ¹
	Fy	右輪	2「kN」	2	左輪	12「kN」	3
	Fz	右輪	8「kN」	1.2	左輪	43「kN」	3
	Mx	左輪	1,600「Nm」	9	左輪	1,800「Nm」	1.6
	My	左輪	100「Nm」	1.2	左右輪同等	0「Nm」	1
	Mz	左右輪同等	0「Nm」	1	左輪	900「Nm」	2.6
加減速実験	Fx	左右輪同等	0「kN」	1	* ¹ オフセットにより左輪外力 0 [kN] のため * ² 左右逆位相入力(+、-)のため絶対値の倍率で計算		
	Fy	左右輪同等	0「kN」	1			
	Fz	左右輪同等	0「kN」	1			
	Mx	左右輪同等	0「Nm」	1			
	My	左右輪同等	0「Nm」	1			
	Mz	左右輪同等	0「Nm」	1			
横断(片)勾配走行 実験	Fx	左右輪同等	0「kN」	1			
	Fy	左右輪同等	0「kN」	1			
	Fz	左輪	1.5「kN」	1.03			
	Mx	左右輪同等	0「Nm」	1			
	My	左右輪同等	0「Nm」	1			
	Mz	左右輪同等	0「Nm」	1			
高速レーンチェン 実験	Fx	左右輪同等	0「kN」	1			
	Fy	左右輪同等	0「kN」	1			
	Fz	左右輪同等	0「kN」	1			
	Mx	左右輪同等	0「Nm」	1			
	My	左右輪同等	0「Nm」	1			
	Mz	左右輪同等	0「Nm」	1			
縁石乗り越え実験	Fx	左輪	16「kN」	1.6* ²			
	Fy	左右輪同等	0「kN」	1			
	Fz	左右輪同等	0「kN」	1			
	Mx	左右輪同等	0「Nm」	1			
	My	左右輪同等	0「Nm」	1			
	Mz	左右輪同等	0「Nm」	1			
突起路走行実験	Fx	左右輪同等	0「kN」	1			
	Fy	左右輪同等	0「kN」	1			
	Fz	突起乗り越え輪	3.5～ 18.5[kN]	1.04～ 1.3			
	Mx	左右輪同等	0「Nm」	1			
	My	左右輪同等	0「Nm」	1			
	Mz	左右輪同等	0「Nm」	1			

* 数値は各実験における代表値より計算

5. まとめ

5.1. 左右輪に作用する外力計測(6 分力計計測)と左右差比較に関するまとめ

- (1) 実際の大型車の走行実態を模擬した走行パターンとして、①交差点右左折走行、②直線加減速走行、③横断勾配のある直線路走行、④高速レーンチェンジ走行、⑤縁石乗り越え、⑥突起路走行の 6 つの走行パターンをテストコースにて再現した。
- (2) 左右車輪に働く外力は 6 分力計により、 F_x :前後にかかる力、 F_y :左右にかかる力、 F_z :上下にかかる力、 M_x :車両前後から見た時の車輪の回転しようとする力(モーメント)、 M_y :車両左右から見た時の車輪の回転しようとする力(モーメント)、 M_z :車両上下から見た時の車輪の回転しようとする力(モーメント)で計測を行った。
 - ① 交差点右左折走行:交差点旋回時、荷重移動による上下にかかる力 F_z 、車輪倒れこみによるモーメント M_x 、車両の進む向きと車輪の向きの差により生じる M_z において左輪が右輪より比較的大きな外力が計測された。
 - ② 直線加減速走行:加減速時、左右輪で等価かつ向きが反対となる前後にかかる力 F_z 、車両左右から見た時の車輪の回転しようとする力(モーメント) M_y が計測された。
 - ③ 横断勾配のある直線路走行:車両傾きによる荷重移動による上下力 F_z において傾きが生じ、外側である左輪への外力が若干ではあるが大きい結果が計測された。
 - ④ 高速レーンチェンジ走行:明確な左右差は計測されなかった。
 - ⑤ 縁石乗り越え:縁石乗り上げ輪(左輪)に前後方向に比較的大きな力(F_x)が計測された。
 - ⑥ 突起乗り越え:左輪(突起乗り越え側車輪)にて上下方向にパルス状の外力が計測された。

5.2. ボルト軸力計測、およびねじりモーメント計測に関するまとめ

- (1) 今回の実証実験では車輪外力に対する明確な軸力低下及びナットの緩みは計測および観測されなかった。
- (2) 実験開始時から、終了時では 8~11%の軸力の低下が計測されており、徐々に軸力は低下していた。その結果を表 5.2.1 に示す。
- (3) 軸力の低下の理由に関しては、今回計測された外力をもとに軸力低下検証を目的とした実証実験が必要と考える。

表 5.2.1 実験前後での軸力変化

	ボルト装着輪 #番号	ナット締め付け600Nm		Δ [Nm]	減少率 [%]
		試験開始前	試験終了後*		
軸力 [kN]	右輪_#33	191	172	18	10%
	右輪_#34	197	181	16	8%
	左輪_#31	203	182	21	10%
	左輪_#32	199	176	23	11%

*ナット締め付けトルク 0 Nmでの残存軸力を差し引いた値

	ボルト装着輪 #番号	ナット締め付け150Nm		Δ [Nm]	減少率 [%]
		試験開始前	試験終了後		
軸力 [kN]	右輪_#33	46	46	1	2%
	右輪_#34	45	44	1	3%
	左輪_#31	45	40	5	11%
	左輪_#32	46	45	2	3%

5.2.1 ボルト軸力への影響

- ✓ 旋回時、車輪回転速度と同じ周波数の振動波形が計測された(1~2kN 程度)。データを図 5.2.1 に示す。
- ✓ 減速時左右輪とも軸力の上昇(1~2kN 程度)が計測された。データを図 5.2.2 に示す。これは減速によりボルトが伸び方向に力がかかっていると考えられる。

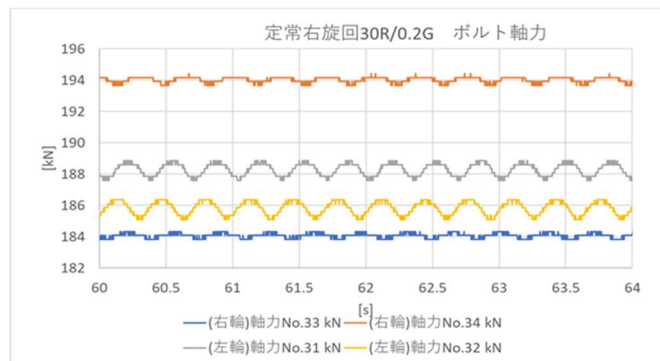


図 5.2.1 右旋回時ボルト軸力変化

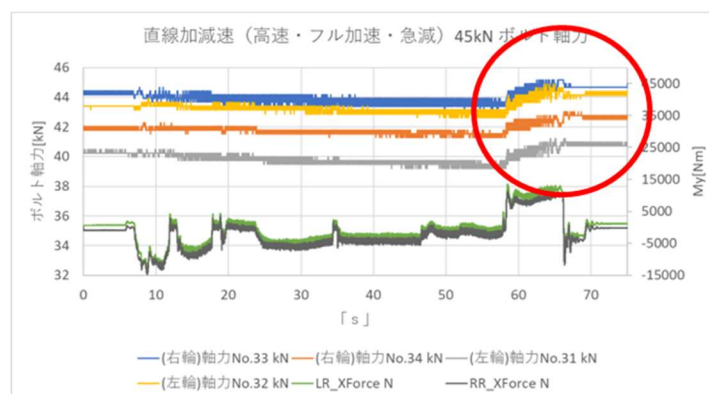


図 5.2.2 直線減速時ボルト軸力変化

5.2.2. ボルトねじりモーメントへの影響

- ✓ 加速・減速時、数 Nm~15Nm のボルトねじりモーメントの変動が計測された。なお、実験後、目視での確認において、ナット緩みは観測されなかった。

6. 実験結果に基づく解析調査

6.1. 令和4年度の実験結果概要

限界軸力確認実験(両輪均等負荷条件)において左輪の平均軸力低下が右輪より大きい結果となった。

令和4年度の実験の概要を図 6.1.1 に示す。また同実験の結果から平均軸力の低下率を表 6.1.1 に示す。

以下、大型車の車輪脱落事故防止対策に係る調査分析検討会「さらなる車輪脱落事故防止対策の検討」中間取りまとめ 令和4年(2022年)12月より抜粋

(2) 限界軸力確認実験(両輪均等負荷条件)1サイクル

表 6-2. 限界軸力確認実験条件

	項目	テストコース条件	車速	両輪均等負荷条件	
				左回り	右回り
①	悪路等	ハンプ突起路	30km/h	1回	1回
②	8の字旋回	半径15m	20km/h	1周	1周
③	一般路	周回路	30~60km/h	1周	1周

※走行順序: 左回り → 右回り

1サイクル走行距離: 約4.4km

左右輪の入力を等価にするため、同じコースを左右回りで1サイクルとし、20サイクル走行
1サイクル毎に軸力(20本)測定

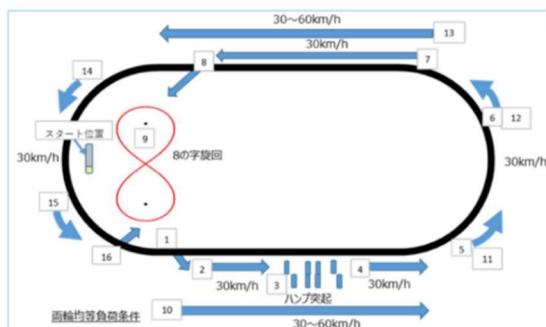


図 6-8. 限界軸力確認実験走行方法(左回り)

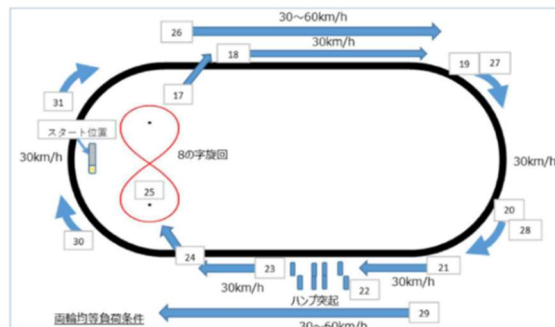


図 6-9. 限界軸力確認実験走行方法(右回り)

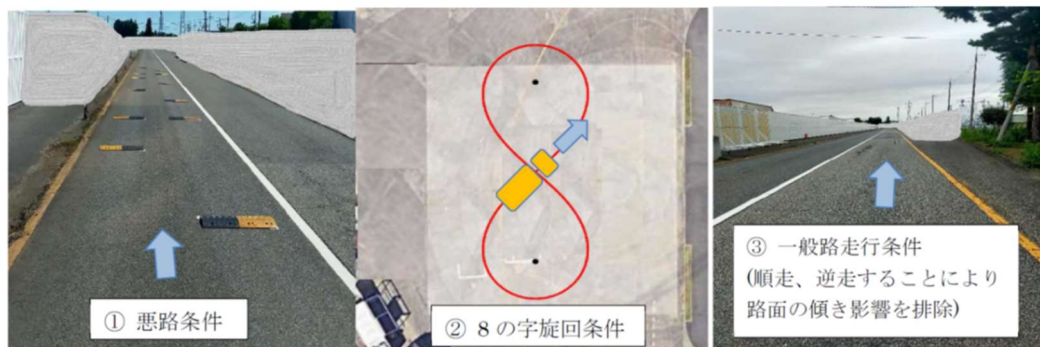


図 6.1.1 令和4年度の実験概要図

表 6.1.1 平均軸力の低下率

初期軸力	平均軸力低下率		試験サイクル	走行距離
[kN]	左輪	右輪	[サイクル]	[km]
120	8.1%	6.8%	20	88
60	11.8%	8.8%	20	88
45	18.7%	17.7%	20	88

6.2. 原因分析方策の検討

令和4年度の実験結果において、わずかではあるが左輪の軸力低下が大きい傾向が見られたが、その原因特定には至らなかった。本原因特定のために、今回の実験結果である左右輪への外力及び左右輪のハブボルトに加わる力の影響をもとに、以下4つの解析方法について検討を行った。

- (1) 実車による実走行実験
- (2) タイヤアッセンブリーでの台上実験
- (3) テストピースによる台上実験
- (4) シミュレーションによる解析

6.2.1. 実車による実走行実験

(1) 実験概要

- ① 今回の実験で左右輪の外力差および左右輪のハブボルトへの入力差があった実験の組み合わせによって耐久試験パターンを設定し(以下「耐久試験コース」と記す。)、本試験パターンを繰り返しおこない左右輪の軸力の低下、ナット緩みの有無を計測する。



- ② 初期軸力を低下させて同じ実験を繰り返す。

(令和4年度の実験条件から参照: 初期ボルト軸力 120kN / 60kN / 45kN / 30kN)

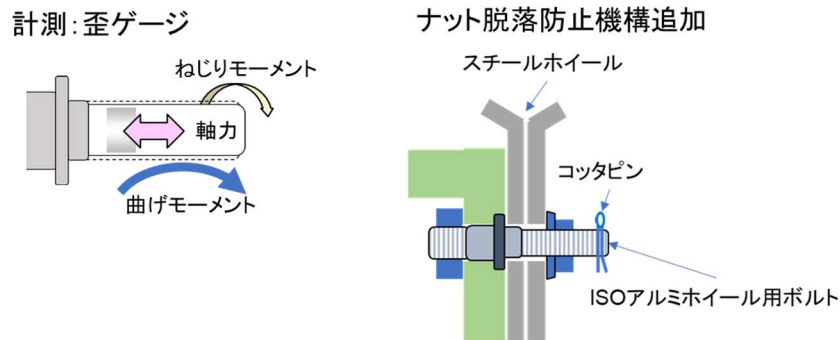


図 6.2.1 実車実験での計測

(2) 本実験における考慮すべきポイント

① メリット

- ✓ 実験車両を令和4年度の実験と同等の車両(25トン車)での再現が可能。
- ✓ 実際の車両での走行再現のため実走行における複合外力すべてが再現される。

② デメリット

- ✓ 実際に大型トラックを使用してテストコースで走行させるため、実験が大がかりとなりコスト、および期間がかかる。
- ✓ 加速実験ができないため時間がかかる可能性がある。

6.2.2. タイヤアセンブリーでの台上実験

(1) 実験概要

- ① タイヤ摩耗実験機上で「耐久試験コース」の走行を模擬した負荷条件を用いてサイクル試験をおこない、軸力の低下を計測する。
- ② 初期軸力を低下させ同じ実験を繰り返す。

(令和4年度の実験条件から参照: 初期ボルト軸力 120kN / 60kN / 45kN / 30kN)

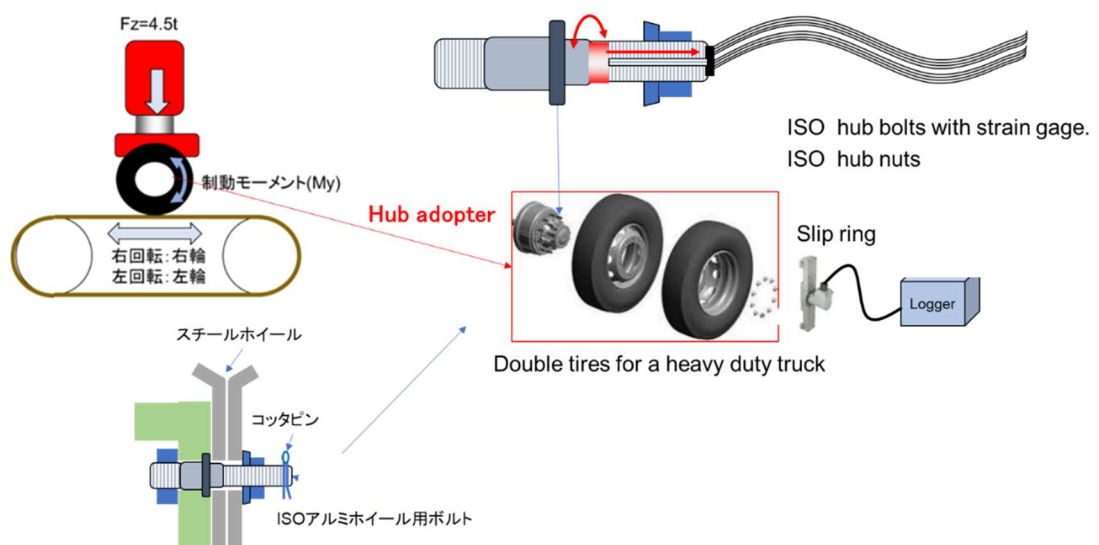


図 6.2.2 タイヤアセンブリー台上実験での計測

(2) 本実験における考慮すべきポイント

① メリット

- ✓ 実際のタイヤアッセンブリーを使用して試験が可能となり、さらに荷重・制駆動モーメントを入力できるため実車に近い条件での実験が可能。
- ✓ 加速実験が可能のため短時間で実験が可能。
- ✓ ナット緩みが発生した場合、観測(画像記録)が行いやすい。

② デメリット

- ✓ ハブ(ドラム)は実車と同等の構造で試作する必要がある。
- ✓ トラックのダブルタイヤ実験が可能で設備を所有する実験機関(会社)が限定される。現状海外のみであり部品輸送費、人件費、諸経費等コストがかかる。

6.2.3. テストピースによる台上実験

(1) 実験概要

- ① ボルト 1 本とホイール相当の部品を連結し、ホイール相当部品に軸力、およびねじりモーメントを入力可能な台上加振装置を準備する。
- ② 今回の実験結果で得られたボルト軸力、ボルトねじりモーメントを台上加振機にて発生させる耐久入力試験を行う。
- ③ 初期軸力を低下させ同じ実験を繰り返す。

(令和 4 年度の実験条件から参照: 初期ボルト軸力 120kN / 60kN / 45kN / 30kN)

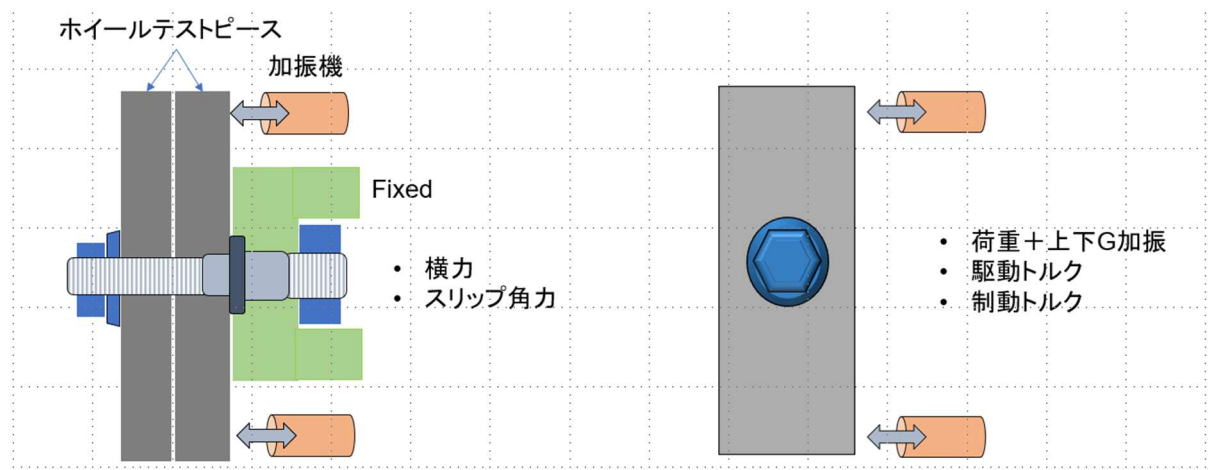


図 6.2.3 テストピースによる台上実験での計測

(2) 本実験における考慮すべきポイント

① メリット

- ✓ テストピースのため、装置含め大がかりなものの準備が不要のためコスト面で有利
- ✓ 加速実験が行えるため短時間の実験が可能

② デメリット

- ✓ 外力が単独(モーメントのみ)のため複合外力要因が軸力低下に起因する場合、結果を導くことができない可能性がある。
- ✓ ホイール間、ホイールとハブドラム面の摩擦力が実際とは異なり傾向の把握のみとなる。
- ✓ 回転運動が無いいため実際の走行状態の再現は難しい可能性がある。

6.2.4. シミュレーションによる解析

(1) 解析(実験)概要

- ① 有限要素法(Finite Element Method) * によるネジ山モデル(ねじ面, ナット・ボルト頭部の両座面, 被締結物間に接触要素を定義したねじ山モデル)によってナット緩みの詳細評価を行う。

* 日本機械学会第 20 回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2012)「ボルト・ナット締結体の CAE モデリング手法の確立と産学共同研究の事例紹介」からの引用を以下に示す。

『ボルト締結の三次元有限要素法解析において、近年では計算機の性能向上により以前は不可能であったねじ山の螺旋形状を含めたボルトのモデリング(以下、ねじ山モデル)が可能となっている。

(結語から抜粋)

本研究では、ボルト締結体に対して代表的な 4 種類の荷重を作用させ、モデリング手法による解析結果の相違を比較検討した。結果、やはりねじ山モデルは緩み挙動を含めて詳細な評価が行え、解析精度の点では最も有効で推奨されるが、計算コストは非常に大きかった』

- ② 解析の手順概要を以下に示す。

- ✓ 実際のホイールアッセンブリー、ハブ、ボルト、ナットを有限要素法でモデル化

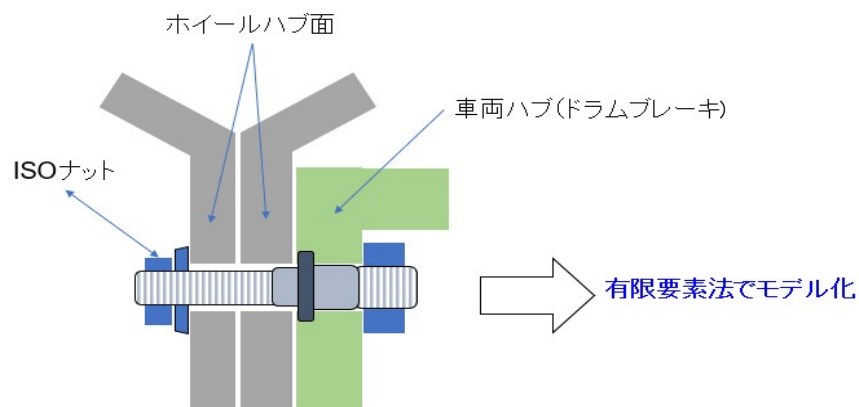


図 6.2.4 実際のハブボルト構造例

- ✓ ホイール形状、8 本ボルト内一本をネジ山モデル化もしくは 1 本だけのモデル化を検討
- ✓ 今回の実験結果からシミュレーション外力条件を決定
- ✓ 繰り返し外力を入力することによって軸力低下、ナット緩みに左右差が出るかシミュレーション解析を行う

③ 解析に必要な情報

- ✓ ホイール、ナット、ボルト等関連部品の CAD 図面
- ✓ 材質情報(ヤング率、ポアソン比など)、もしくは一般材料特性からの推定
- ✓ 各部摩擦係数、もしくは一般材料から推定

(2) 本実験における考慮すべきポイント

① メリット

- ✓ 計測が難しい微小座面滑り、ネジ面滑りの把握が可能。ただし滑りの程度までの評価は難しく、滑り発生の有無までとなる。
- ✓ 複合外力シミュレーションが可能で実機に近い条件でのシミュレーションが可能。(車輪の回転を条件に入れられるかは要検討。)

② デメリット

- ✓ どこまでモデル精度を上げられるか不明である。高精度＝計算コスト^{*1} 高であるため、実際のコスト高になる可能性がある。
- ✓ 条件設定が増えるとその分コストがかかる。(現在左輪のみ 4 軸力(計 4 シナリオ)を想定。)
- ✓ 実機とのコリレーションの確認ができない。
- ✓ 今回の結果がでている微妙な左右の軸力低下率の差を正確にシミュレーションするのは難しい。左輪のねじりモーメントが軸力低下に起因するか否かまでの判断にとどまると思われる。

^{*1}:シミュレーション時にプロセッサが実行するタイムステップごとのタスクの数と複雑度を計測したもの

6.3. DA 表

上記 4 つの検討方策について QCT の観点で以下表にまとめる。

実験結果に基づく解析調査	技術的達成度			コスト ◎: ~10M¥ 予測 ○: 10~20M¥ △: 20M¥~		期間 ◎: ~3 か月 ○: 3~6 か月 △: 6 か月~		推奨
	入力条件の再現性	実機の コリレーション	達成度	主費目	費用			
実車による走行実験	◎	◎	◎	・コース使用料 ・トラックレンタル料 ・テストドライバー・他 ・ハブボイルひずみゲージ組み込み試作費	△	4~6 か月	○	◎
タイヤアッセンブリーによる台上実験	◎	○	◎	・海外での試験準備(機材搬送) ・試験費(治具作成) ・出張による試験対応費 ・ハブボルトひずみゲージ試作費	△	4~6 か月	○	○
テストピースによる台上実験	△	X	△	加振装置の改造、治具・テストピース試作費用	○	4~6 か月	○	△
シミュレーションによる解析	◎	×	○	・モデルの規模による。 ・左輪のみ 4 軸力(計 4 シナリオ)を想定	○	~6 か月	○	○

7. 結語

実証実験では 6 分力計により左右輪の外力計測およびボルト軸力・ねじりモーメントを市場での走行を想定したシナリオで計測し、左右輪の外力差を明確にするとともに、ボルトにかかる力の計測を行った。交差点右左折走行、道路横断(片)勾配、縁石(段差)乗り越えで左輪により大きな力が計測された。

令和 4 年度の実験において左輪の平均軸力低下が右輪より大きくなった結果について、実車での走行実験、タイヤアッセンブリーでの台上実験、テストピースでの台上実験およびシミュレーションによる解析の 4 つの方策について検討を行いそれぞれの優位性を整理した。

以上