新製品紹介

25型ギガの車輪脱落予兆検知システムについて

Development of Loose Wheel Alarm System for 2025 Model GIGA

飯島　一平*
Ippei Iijima

要　旨

車輪脱落事故の低減を目的に、25型ギガ向け車輪脱落予兆検知システムを開発した。本システムは、後軸に装着した車輪速センサの信号から車輪の回転特性を算出し、正規締め付け時の学習値との差分に基づいて後輪のホイールナットゆるみを検知し、警報を発する。本稿では、検知原理、システム構成、判定ロジック及び評価結果を紹介する。

Abstract

To reduce wheel separation incidents, a Loose Wheel Alarm System was developed for 2025 Model GIGA. The system calculates wheel rotational characteristics from rear wheel speed sensor signals and compares them with values learned under properly tightened conditions. It detects changes caused by rear wheel-nut loosening and alerts the driver. This paper outlines the detection principle, system configuration, decision logic, and evaluation results.

1　はじめに

大型車の車輪脱落事故は、車両の安全運行に重大な影響を及ぼすだけでなく、歩行者や他の交通参加者を巻き込む重大事故につながる恐れがあることから、安全・安心な交通社会の実現に向けて解決すべき重要な社会的課題である。国土交通省資料によれば、2020年度には131件の車輪脱落事故が発生している。また、脱落箇所別発生割合では、左後輪が95%、右後輪が4%であり、後輪からの脱落が大半を占めている[(1)]。車輪脱落事故の主な要因は、タイヤ及びホイール脱着作業時の整備不良である。そのため、整備啓発によって適切な締め付け作業を促すことは、車輪脱落事故の低減に向けて重要である。一方で、タイヤ及びホイール脱着作業は人を介する作業であり、啓発や管理を徹底しても、人為的ミスを完全に排除することは難しい。このような背景から、国土交通省においても、人為的な作業ミスを前提とした車両側のハード対策を中・長期的に推進すべきことが提言されており[(2)]、整備不良に起因するホイールナットゆるみを車両側で早期に検知し、脱落前の対処につなげる技術の重要性が高まっている。

いすゞでは、2020年から車輪脱落事故の低減に向け、脱落ゼロを目指す社内プロジェクトを立ち上げ、整備啓発活動と車両側のハード対策の両面から取り組んできた。LWAS(車輪脱落予兆検知システム: Loose Wheel Alarm System)は、車両側のハード対策として開発した技術の一つである。

本稿では、25型ギガ向けLWASについて、車輪脱落に至るメカニズムを踏まえた検知原理、システム構成、判定ロジック及び評価結果を紹介する。

2　開発の狙い

本システムの狙いは、車輪脱落に至る前に余裕をもって警報を発し、ドライバーに適切な対処を促すことで、ホイールナットゆるみに起因する車輪脱落事故を未然に防止することである。25型ギガでは、脱落箇所の発生傾向を踏まえて後輪を対象とし、ナット座面とホイールとの間に所定量の隙間が生じた際の車輪の回転特性変化を車輪速信号から捉える構成とした。

3　車輪脱落メカニズムと検知原理

3.1 車輪脱落に至るシーケンス

LWASの検知対象を明確にするため、ホイールナットゆるみが車輪脱落に至る過程を整理した。車輪脱

*車両設計第二部

Copyright© 2026 ISUZU MOTORS LIMITED.
All Rights Reserved. 無断転載・複製・配布禁止

落に至る過程は、大きく3つの段階に分けられる。第一段階は締結軸力不足である。タイヤ及びホイール脱着時の締め付けトルク不足や、座面の錆(さび)、潤滑不良に伴うトルク係数の増大により、ホイールナットの軸力が不足する。第二段階は軸力消失である。初期なじみ及び座面のフレッチングにより軸力がさらに低下し、締結力が失われる。第三段階はナット回転ゆるみ及びナット脱落である。軸力が消失すると、ハブとホイール間の摩擦力が低下し、インロー隙間の範囲でハブとホイールに相対変位が生じる。この結果、ナット座面の接触状態が不均一となり、ナットを回転させるトルクが発生することで、ナットの回転ゆるみが進行し、最終的にナット脱落及び車輪脱落に至る。これらの車輪脱落に至るシーケンスを**図1**に示す。

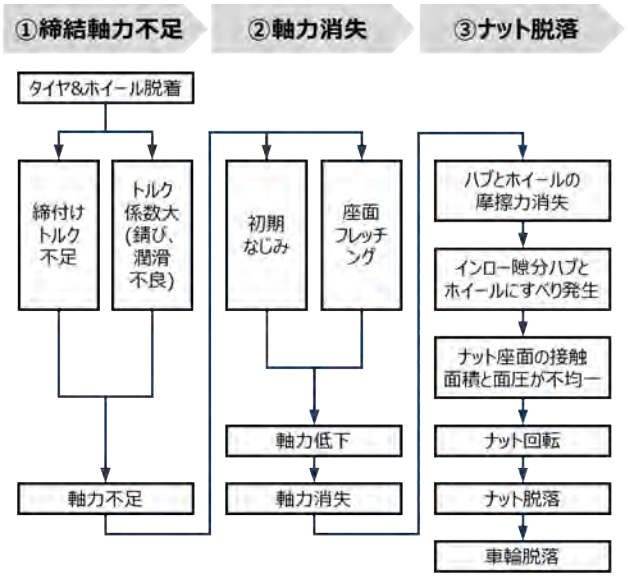

図1　車輪脱落に至るシーケンス

3.2 CAE及び実車による軸力消失後のナット回転ゆるみメカニズムの確認

前節で示したシーケンスにおいて、LWASの検知に直結する現象は、軸力消失後に発生するハブとホイール間の相対変位である。本節では、この相対変位がナット座面圧を変化させ、ナット回転ゆるみにつながる過程を、CAE(Computer Aided Engineering)解析及び実車検証により確認した。CAEでは、ハブとホイールインローの半径方向の隙間、及びホイールナットゆるみにより生じる軸方向の隙間を考慮した解析モデルを用い、ホイール回転時のナット座面圧分布を評価した。解析の結果、ホイール回転時のナット座面圧は円周方向に均一ではなく、局所的に高い座面圧が発生することを確認した(**図2**)。座面圧が高い領域では、ナット座面とホイール間の摩擦力が相対的に大きくなり、周方向の相対すべりが抑制される。一方、座面圧が低い領域では相対すべりが生じやすい。この摩擦力の偏りにより、ナット中心軸まわりにゆるみ方向の回転モーメントが発生すると考えられる。

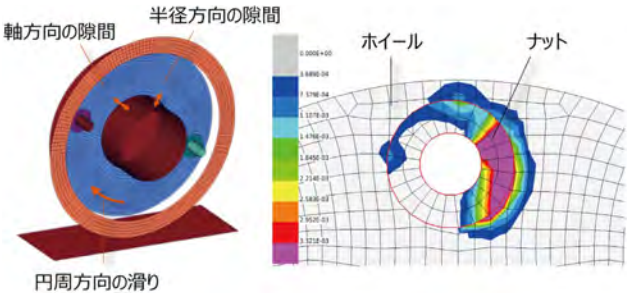

図2　ナット座面圧分布の解析結果

また、実車検証により、ナット回転ゆるみの進行挙動を確認した。ナットのゆるみ回転が発生した後、当該ナットの座面接触が失われると、そのナットの回転は停止する。その後、次のナットで座面圧の不均一に起因するゆるみ回転が発生する。このように、座面圧が不均一となったナットから順次回転ゆるみが進行することを確認した。次節では、この相対変位に伴う車輪の回転挙動変化を、車輪速信号から検出する原理を説明する。

3.3 フラフープ現象に着目した検知原理

前節で示したように、軸力消失後はハブとホイール間の摩擦による拘束が弱まり、インロー隙間の範囲で相対変位が生じる。本システムでは、この相対変位に伴う車輪の回転挙動変化に着目した。本稿では、軸力消失後にホイールがハブに接触しながら相対変位を伴って回転する挙動を、フラフープ現象と呼ぶ。

図3に示すように、フラフープ現象が発生すると、ホイールはハブインロー部に接触しながら相対変位を伴って回転する。このため、車輪1回転中にハブとホイールの相対位置が周期的に変化し、見かけの動半径が変動する。ここで、rは**図3**下段の左図及び右図に示す接触状態における見かけの動半径、Δrはハブとホイールの接触位置の変化に伴うその減少量を表し、中央図の状態では見かけの動半径がr-Δrとなる。この変動は、車輪速センサが検出するエキサイタリング各歯の通過周期変動として現れる。正規締め付け時の通過周期変動は、主にエキサイタリングの工作ばらつき及び走行時の外乱に起因する。一方、ホイールナットゆるみ時には、これらの変動に加え、フラフープ現象に起因する周期的な回転変動が発生する。

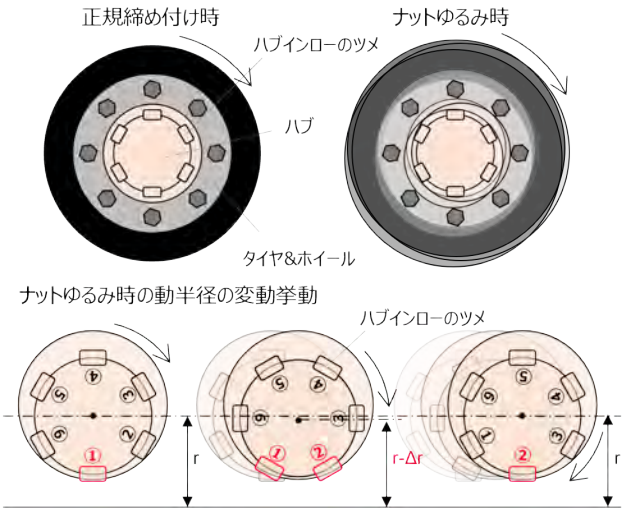

図3　フラフープ現象

4　システム構成

LWASのシステム構成を**図4**に示す。本システムは、LWAS ECU(LWAS用電子制御ユニット: Loose Wheel Alarm System Electronic Control Unit)後軸に追加した電磁誘導式(パッシブ型)車輪速センサ、エキサイタリング、メータ及びブザーで構成される。

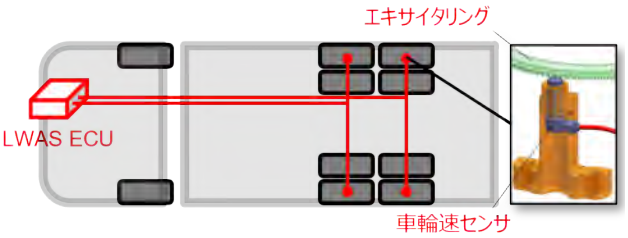

図4　LWASのシステム構成

信号取得部では、後軸に装着した車輪速センサにより、エキサイタリングの歯がセンサ先端を通過する際の磁束変化を電圧信号として取得する。ECUは同信号を処理し、ホイールナットゆるみの判定を行う。判定結果は、メータ表示及びブザーによりドライバーへ通知する。メータは、警報内容を表示するとともに、警報解除などの操作インタフェースとして機能する。警報発生時は、ドライバーに必要な対処を明確に伝えるため、車両状態に応じてメータ表示及びブザーの作動を切り替える。**図5**に示すように、走行中はメータ表示及びブザーにより安全な場所への停車を促し、停車後は全てのホイールナットの増し締め及び警報解除操作をメータ表示により案内する。

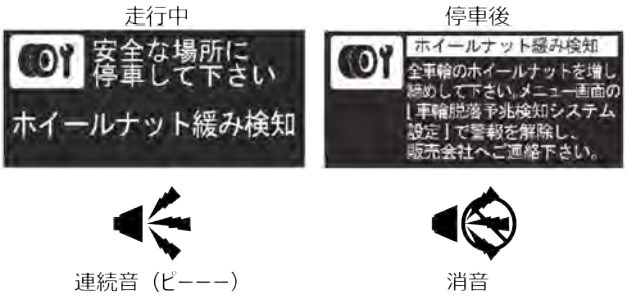

図5　ホイールナットゆるみ警報表示

5　ゆるみ判定ロジック

本開発では、車輪回転速度信号の時間的ばらつき及び回転次数成分に基づく車輪異常検知技術[3]を適用し、25型ギガへの車両適合開発を行った。

5.1 車輪速信号処理

車輪速センサから取得した電圧信号は、エキサイタリング各歯の通過時間に変換される。1回転中のi番目の歯の通過時間をt_i、1回転中の平均通過時間をt_{ave}とすると、通過時間変動率ε_iは**式(1)**で表される。

$$\varepsilon_i = \frac{t_i - t_{ave}}{t_{ave}} \tag{1}$$

ここで、iはエキサイタリングの歯番号を表す。**式(1)**により、車速の影響を受ける通過時間そのものではなく、1回転中の相対的な通過時間変動として回転特性を扱うことができる。更に、1回転分の通過時間変動率列を1周期波形として次数分析し、タイヤ回転次数ごとの振幅を算出する。

5.2 学習及びゆるみ判定

LWASでは、車両ごとの回転特性差を補正するため、正規締め付け時の回転特性を学習値として記憶する。構成部品には工作ばらつきがあり、特定次数成分の振幅特性に車両差が生じる。このため、固定基準値のみで判定すると、車両差をホイールナットゆるみによる変化として誤判定する可能性がある。本システムでは、正規締め付け時の特定次数成分の振幅特性を学習値として保持し、検知時の振幅特性との差分に基づいてホイールナットゆるみを判定する。

一方、学習値は正規締め付け状態で取得されることが前提である。市場での車輪脱落事故の多くは、タイヤ・ホイール脱着作業時の整備不良に起因する。そのため、脱着作業ごとに再学習を行うと、不適切な締め付け状態を基準値として記憶する可能性がある。

そこで本システムでは、学習を工場出荷時に限定し、正規締め付け状態で取得した学習値を判定基準として保持する構成とした。なお、エキサイタリングを交換した場合は、歯間隔特性及び取り付け状態が変化し、車輪速信号の特性に大きく影響する。このため、交換後は学習値をリセットする。また、学習時と検知時の車速差により、正規締め付け状態であってもゆるみ検知指標が変動する場合がある。この影響を低減するため、速度域を複数に分割し、各分割単位で学習値を管理する。検知時も同一速度域の学習値と比較する。

ゆるみ判定では、検知時に算出した特定次数成分の振幅と学習値との差分を算出する。この差分がゆるみ判定閾値(しきいち)を超えた状態をカウントし、カウント値が所定値に達した場合に、ホイールナットゆるみと判定する。カウント方式を採用することで、一時的な外乱により差分が閾値を超えた場合の誤警報を抑制する。以上の判定ロジックを**図6**に示す。

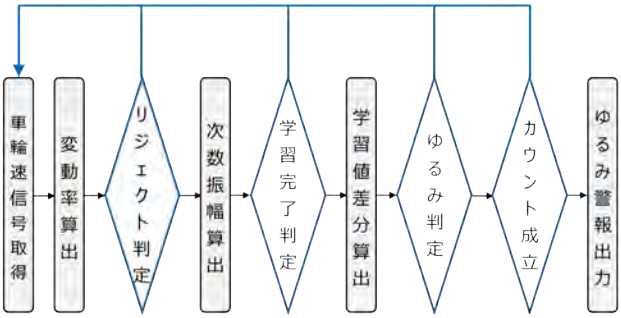

図6　ゆるみ判定ロジックの流れ

5.3 ゆるみ判定次数

3.3節で述べたフラフープ現象に起因する周期変動は、車輪速信号を次数分析することで、特定の回転次数成分として抽出できる。ホイールナットゆるみ時には、ハブインローのツメ本数(**図3**)に対応する回転次数に、ゆるみ起因成分が顕著に現れる。一方、正規締め付け状態であっても、車速差、走行状態、部品交換及び使用環境などにより、ゆるみ検知指標が変動する場合がある。複数の次数成分を判定に用いると、ゆるみと関係の小さい次数成分の変動もゆるみ検知指標に含まれる。このため本システムでは、ゆるみ時に顕著に現れるハブインローのツメ本数に対応した次数に判定対象を限定し、同次数の振幅と学習値との差分に基づいてホイールナットゆるみを判定する構成とした。

判定次数の選定前後における正規締め付け状態のゆるみ検知指標とゆるみ判定閾値の関係を**図7**に示す。複数の次数による判定では、複数の誤検知要因が重なった場合に、ゆるみ検知指標が閾値を超過する可能性があった。一方、ハブインローのツメ本数に対応した次数による判定では、判定対象をゆるみ起因成分が顕著に現れる次数に限定したことで、誤検知要因の影響を低減し、閾値に対する余裕を確保した。

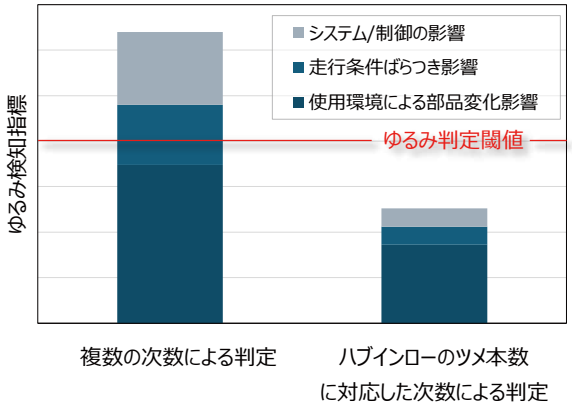

図7　判定次数による誤検知リスク低減効果

5.4 リジェクト判定

実使用環境では、悪路走行、急加減速、急旋回、ブレーキ作動及びタイヤ回転制御などにより、ホイールナットゆるみとは異なる回転変動が発生する場合がある。LWASでは、これらの走行状態をリジェクト条件として判定し、該当区間のデータを学習処理及びゆるみ判定処理の対象から除外する。これにより、ホイールナットゆるみに起因しない回転変動をゆるみとして誤判定することを抑制する。主なリジェクト条件と判定方法を**表1**に示す。

表1　リジェクト条件と判定方法

条件	判定情報	狙い
悪路走行	車輪速信号に基づく路面入力判定	路面入力に起因する回転変動を除外
急加減速	CAN信号	駆動力変化に伴う回転変動を除外
急旋回	CAN信号	旋回に起因する回転変動を除外
ブレーキ作動	CAN信号	制動に伴う車輪速変動を除外
タイヤ回転制御	CAN信号	制御介入による回転変動を除外

悪路走行時は、路面入力により車輪速信号の通過時間変動が回転ごとにばらつく場合がある。このような非定常な変動は、ホイールナットゆるみに起因する周期的な回転特性変化とは性質が異なる。本シ

ステムでは、この違いに着目し、車輪速信号から得られる回転変動のばらつき状態を監視することで、悪路走行の影響を受けた区間を判定する。悪路走行と判定した区間のデータは、学習処理及びゆるみ判定処理の対象から除外する。これにより、路面入力に起因する一時的な回転変動を、ホイールナットゆるみによる回転特性変化として誤判定することを抑制する。急加減速、急旋回、ブレーキ作動及びタイヤ回転制御については、CAN(Controller Area Network)信号などの車両情報に基づきリジェクト判定を行う。

5.5 タイヤチェーン装着時のOFF設定

タイヤチェーン装着時は、車輪の回転特性が大きく変化する。また、回転特性の変化量は、チェーンの種類、形状及び装着状態によって異なるため、システム側でチェーン装着状態を安定して判定することは困難である。このため、タイヤチェーン装着時は、ドライバーがメータのカスタマイズ画面からLWASをOFFに設定する運用とした。OFF設定中は、システムOFFランプを点灯させ、LWASがOFF状態であることをドライバーに通知する(**図8**)。ただし、OFF状態が継続するとホイールナットゆるみを検知できない。このため、イグニッションをOFFからONに切り替えた後は、自動的にLWASをON状態へ復帰させる仕様とし、有効状態への戻し忘れを防止した。

図8　システムOFFランプ

6　評価

6.1 信号取得性の評価

車輪速センサ信号は、車速が低いほど発生起電力が小さくなる。また、センサ及びECUの抵抗値ばらつき、ハーネス長、センサ温度、センサエアギャップ、エキサイタリングの振れなども信号波形に影響する。これらの影響を組み合わせて確認し、検知対象車速域の下限を想定した条件でも信号取得が可能であることを確認した。次節では、取得した車輪速信号を用いたゆるみ判定の成立性について評価した。

6.2 ゆるみ検知性、誤検知及び検知漏れに対する評価

ゆるみ判定性能の評価では、ホイールナットのゆるみ状態をpositive、正規締め付け状態をnegativeと定義し、実際の締め付け状態と警報の有無に基づき、判定結果を以下の4つに分類した。

- TP(True Positive)：ゆるみ状態で警報を発する正しい判定
- TN(True Negative)：正規締め付け状態で警報を発しない正しい判定
- FP(False Positive)：正規締め付け状態で警報を発する誤った判定(誤検知)
- FN(False Negative)ゆるみ状態で警報を発しない誤った判定(検知漏れ)

4分類のうち、TP及びTNはシステムに求める正常判定であり、FP及びFNは抑制すべき誤判定である。そこで、評価ではTP及びTNの成立性を確認するとともに、FMEA(故障モード影響解析: Failure Mode and Effects Analysis)により、正常判定を阻害し、FPまたはFNにつながる要因を抽出した。抽出した要因は、部品ばらつき、使用環境に起因する部品特性変化、走行条件、車両諸元差、信号処理及び制御上の影響に分類した。

TPについては、ホイールナットをゆるませ、ナット座面とホイールとの間に所定量の隙間を生じさせた状態でテストコースを走行するゆるみ走行試験を実施した。その結果、仕様検討で設定した所定の走行距離内にゆるみ警報が発せられ、ゆるみ判定可能な走行条件下で、ホイールナットゆるみに伴う回転特性変化を検知できることを確認した。

TN及びFPについては、ホイールナットを正規締め付け状態とした車両を用い、一般路、高速道路、山間路、砂利路及び積雪路など、実使用環境を想定した実路走行試験により評価した。その結果、ホイールナットゆるみに起因しない回転変動はゆるみとして判定されず、正規締め付け状態で非警報判定を維持した。また、本実路走行試験では、FPに相当する誤警報は発生しなかった。代表条件として、一般路、高速道路及び山間路での各輪のゆるみ検知指標平均値を**図9**に示す。いずれの走行路においても、各輪のゆるみ検知指標平均値はゆるみ判定閾値を下回り、閾値に対して余裕を有していた。これにより、走行路に応じた入力条件の違いがある場合でも、正規締め付け状態では警報を発しない判定が成立することを確認した。

図9　正規締め付け状態における
ゆるみ検知指標平均値

FNについては、リジェクト条件によってゆるみ判定に用いる有効区間が不足しないかを確認するため、TN及びFP評価で取得した実路走行データを用い、ホイールナットゆるみ発生時を想定して評価した。具体的には、リジェクト判定で除外されない有効区間を抽出し、ゆるみ警報を発するために必要な有効走行距離を評価した。その結果、必要な有効走行距離は、仕様検討で定めた許容範囲内であった。また、この有効走行距離は、車輪脱落に至るまでの想定走行距離に対して所定の余裕を有しており、本評価で対象とした走行条件の範囲において、ドライバーが安全な場所へ停車し、ホイールナットの増し締めなどの対処を実施できる段階で警報を発することを確認した。

7　おわりに

25型ギガ向け車輪脱落予兆検知システムを開発し、ホイールナットゆるみに起因する車輪脱落を未然に防止するための検知・警報技術を実用化した。これにより、整備啓発活動を補完する車両側ハード対策として、車輪脱落事故低減に向けた取り組みに寄与できた。また、実使用環境を想定した試験により、ゆるみ検知及び誤警報抑制に加え、リジェクト処理後の有効走行区間においても判定が成立することを確認し、市場適用に必要な基本性能を確保した。本システムで用いた車輪速信号の通過時間変動解析は、ホイールナットゆるみ以外の車輪周辺部品の状態監視にも応用できる可能性がある。今後は、対象とする故障モードごとに検知原理及び判定条件を明確にし、適用可能性を検証していく。

最後に、本開発に際し、多大なご支援及びご協力をいただいた社内外の関係各位に心より感謝する。

参考文献

(1) 国土交通省自動車局：大型車の車輪脱落事故発生状況と傾向分析について，大型車の車輪脱落事故防止対策に係る調査・分析検討会 第1回 資料2-1，https://www.mlit.go.jp/jidosha/content/001465269.pdf，(参照日：2026.06.25)
(2) 国土交通省自動車局：大型車の車輪脱落事故防止対策に係る調査・分析検討会報告書，https://www.mlit.go.jp/jidosha/content/001580707.pdf，(参照日：2026.06.25)
(3) 住友ゴム工業株式会社：車輪の異常検知装置，特許公報，特許第7786280号，(2025)