

のり上がり脱線の根絶を目指して—第2報— アタック角連続測定装置の開発と測定結果

片折 暁伸* 土井 賢一

飯島 仁 桃崎 秀二 堀岡 健司 (東日本旅客鉄道株式会社)

Development of the continuous measuring equipment of the Attack Angle and measurement results

Akinobu Kataori*, Kenichi Doi,

Hitoshi Iijima, Shuji Momosaki, Kenji Horioka, (East Japan Railway Company)

The attack angle, the tangential angle on the contact point position between wheels and rails is known to seriously affect wheel-climb derailments. However, continuous measuring of the angle is said to be so difficult that there are few examples to make a survey of it. To investigate the detail behaviors of wheel-climb derailments, authors developed measuring equipment, which could easily and continuously measure the angle of running vehicles. In this paper, the system component and the result of the experiment are described.

キーワード：アタック角，連続測定，摩擦係数，脱線

(Keywords, *attack angle, continuous measuring, coefficient of friction, derailment*)

1. はじめに

鉄道車両の曲線走行では、車輪の踏面勾配による左右車輪の回転半径差によって、輪軸が自然に曲線に沿って走行する。しかし急曲線では外側の車輪はレールに対してアタック角を持つ。アタック角は車輪とレールの境界問題に大きな影響を与える因子であり、これまで走行車両のアタック角を連続的に測定するために、様々な手法が研究、提案されてきた^{(1)~(4)}が、測定にかかる労力や技術的な困難さゆえに測定例は少ない。

アタック角は横圧のほか、車輪とレールの接触点位置変化によって、車輪がレールをのり上がりきるまでに要する走行距離に影響を及ぼす⁽⁵⁾など、のり上がり脱線に深く関与することが知られており、事故後の調査においては非常に有用なデータとなる。のり上がり脱線に対する安全性を評価するためには、車輪フランジがレールを乗り上がり始める瞬間の状態（以下、臨界脱線状態と記す）における車輪・レール間の摩擦状態を把握する必要があるが、過去の研究によって、この臨界脱線状態を捉えるためには、車輪・レール境界における輪重、横圧、アタック角、車輪上昇量等の各種パラメータについて、高い測定精度が必要であるとされている⁽⁶⁾。

そこで著者らは、脱線事故の原因究明等において、アタック角の連続的な変化を調査するため、またのり上がり脱

線に対する限度値を知る上で不可欠である臨界脱線状態を検出し、その瞬間における各種パラメータを測定するための道具として、近年のセンサ技術の進歩により入手可能となった、小型高性能の変位計等を用いて、曲線走行時に発生する車輪とレールの接触点におけるアタック角（図1）を安定して連続的に測定することができる「アタック角連続測定装置」（以下、本装置と記す）を開発した。本稿では、装置の構成、および本線走行試験にて分岐器を含む様々な曲線におけるアタック角を測定した結果について報告する。

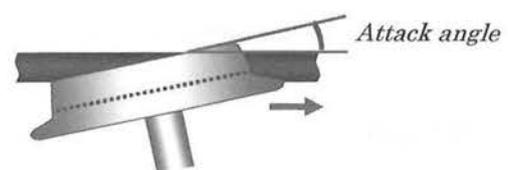


Fig.1 Definition of the attack angle

2. 装置の性能目標

過去の研究⁽⁷⁾では、臨界脱線状態に達してから脱線に至るまでの距離は約0.4m程度であることが報告されている。また急曲線走行中の車輪はレールに対し、のり上がり現象とすべり下がり現象を交互または同時に起こしつつ走行しているとされ、それらの現象の遷移の瞬間を捉えるには走行

距離にして数 mm レベルのサンプリング周期での測定が必要である。

東日本旅客鉄道株式会社 (以下、当社と記す) では、過去にも車両の走行安全性を評価する目的でアタック角を連続測定する装置⁽⁸⁾を開発し、測定を行ってきた。図 2 に装置の概観と測定原理を示す。この装置の原理はレールの直上に車輪を挟んで片側 2 台のセンサを配置し、互いのレールの端部のマクラギ方向の相対位置からアタック角を計算するものであるが、臨界脱線状態を検出する場合において、以下の点に改良が必要であった。

- (1) 測定精度を確保するために、レール頭頂面の表面状態や摩耗状態等に応じ、レール端部を判定するセンサ信号のしきい値について、細かな設定を要する。
- (2) 車輪の前後にセンサを配置するため、車輪とレールの接触点近傍におけるアタック角を測定する場合や短い波長の曲率変化を測定する場合に、精度が低下する。
- (3) 装置のサンプリング周期が最高 10ms であり、より高速なサンプリング速度が必要である。
- (4) 走行中の測定状況の把握が困難であり、測定された値について、センサが正常な位置を捕らえ、正しく測定できているかどうかの判断が難しい。

以上の問題点を克服し、臨界脱線状態の特定に必要な精度とサンプリング周期を確保できる性能を目標とした。

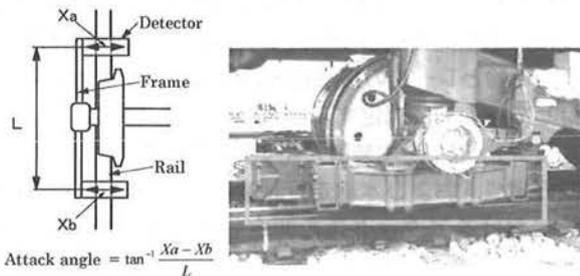


Fig.2 Old measuring equipment

3. 装置の概要

(3.1) 測定原理

アタック角の測定原理は、地上測定法に用いられ、従来より実績のある非接触式センサを用いた方式⁽⁹⁾が最もシンプルであり、精度良く安定して測定できると考え、この原理を車上測定に応用した。測定原理を図 3 に示す。車輪の側面付近にレーザ変位計を配置し、車輪リム部およびレール頭側面それぞれ 2 点の距離から角度情報を得るものである。この方法ではレーザ変位計は測定面に対し、垂直にレーザが当たるように配置するのが理想であるが、本装置では本線や分岐器走行時の測定を可能とするため、車両限界を支障しないように、レールに対し斜め方向から照射し、その水平方向成分から角度を演算することとした。

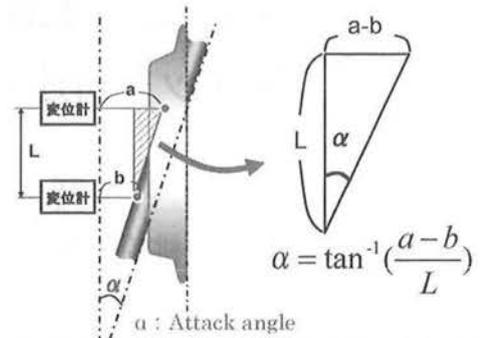


Fig.3 Measuring principle

(3.2) 機器構成 図 4 に本装置の構成を示す。軸箱下にレーザ変位計、車内に測定データをアタック角に演算し、出力する装置 (プログラマブルコントローラ) とそれを記録する装置 (PC) で構成されている。軸箱下へのセンサの固定については、これまで当社で使用していたアタック角測定装置 (図 2) を取り付ける際に使用した、ボルト穴がついた特殊軸箱を流用することとし、それに合った形状の治具を製作して取り付けた。本装置では軸受けのスキマなどに伴う、測定装置と車輪間の相対変位の影響による測定精度の低下を防ぐために、1 車輪あたり 4 台の変位計を用い、車輪およびレールそれぞれ 2 点の距離を測定し、軸箱-車輪間と軸箱-レール間の角度の差分をとる方式とした。本装置は、レーザ変位計による距離測定のみであり、測定に伴う複雑なしきい値等の設定がなく、アタック角を高いサンプリング周期で測定できかつ、安定的にデータを収集することが可能であるという特徴を有している。また取り付け治具以外の機器は、市販品を用いているため、より高性能なセンサや記録装置へ比較的安価に更新することが可能である。

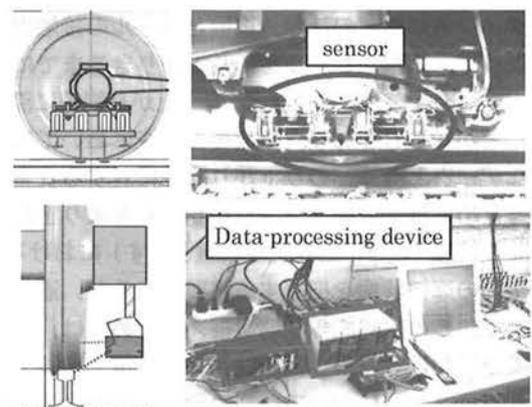


Fig.4 Measuring equipment

(3.3) 装置の性能と測定精度

変位計と演算装置の性能から推定されるアタック角の測定精度は 0.002°、サンプリング周期は最高 20μs である。また今回、装置に使用したレーザ変位計は、レールや車輪の表面粗さによる影響を平均化して測定できる、ワイドスポットタイプのセンサを

使用している。センサの取り付けおよび測定方法に伴って生じる主要な誤差要因として、レール頭側部は鉛直面に対してわずかに勾配がついており、その面に対して距離を測定するため、走行中における車輪の左右変位や軸ばねの伸縮による測定箇所のズレによるものが考えられるが、レールの頭側部の直線形状の範囲にレーザが照射されている場合においてはその影響は小さいため、走行中のカメラ画像でレーザの照射位置を確認し、有効な測定データかどうかを判断することにした。

〈3・4〉 ゼロ点の設定 車両は車両基地などの直線レール上に留置されている場合でも、アタック角がゼロであるとは限らず、一般にアタック角を車上から測定する装置の場合、アタック角がゼロとなる点を設定することは難しい。本装置では、装置取り付け後に図 5 のようなイメージで平らな板を車輪のリム部に当て、変位計のレーザを車輪リム部と平行な同一平面状に照射させ、この点をゼロと定義してゼロ点設定を行った。

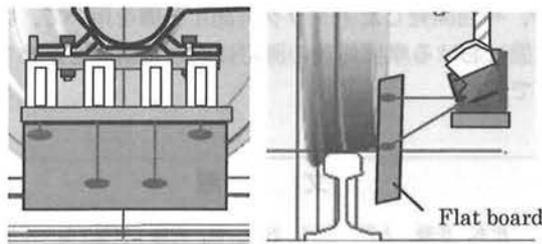


Fig.5 Zero setting method

4. 走行試験

本装置を当社の 209 系試験電車 (MUE-Train, サヤ 209-8) に装着し、構内および本線で走行試験を行った。走行試験では正常測定時とレールボンドやクロッシング通過等での測定エラー時を区別するため、レーザ光の照射位置の変動が大きいレール頭側面部について CCD カメラによる、レーザ照射状態の確認も併せて行った。今回の走行試験ではサンプリング周期は 1 ms として行った。

5. 測定結果

〈5・1〉 曲線走行 R400 程度の曲線を多く有する本線にて、低速 (10~30km/h) から曲線における最高速度までの範囲で走行試験を実施した。

図 6 に各曲線の円曲線部での定常的なアタック角を示す。定常的なアタック角は曲線半径に応じた値をとることが分かる。次に、走行試験日の直近の軌道検測データの 10m 弦通り正矢を元に曲線半径に換算し、それに対してアタック角をプロットしたものを図 7 に示す。ただし、レール継ぎ目部などの測定不能箇所のデータは省いてある。曲線半径に対するアタック角は R400 で約 0.3° 程度であり、それ以上の曲線半径では、ほぼ横ばいとなる結果であった。一方、R400 以下の曲線において、アタック角は急激に大きくなる

傾向があることが分かった。この傾向は過去に測定⁹⁾されたものと同様であった。

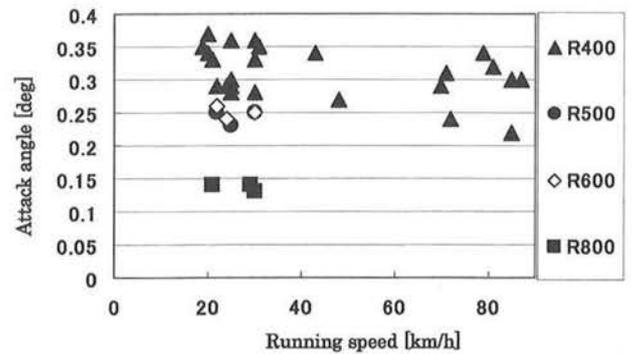


Fig.6 Relationship between running speed and the steady-state value of the attack angle

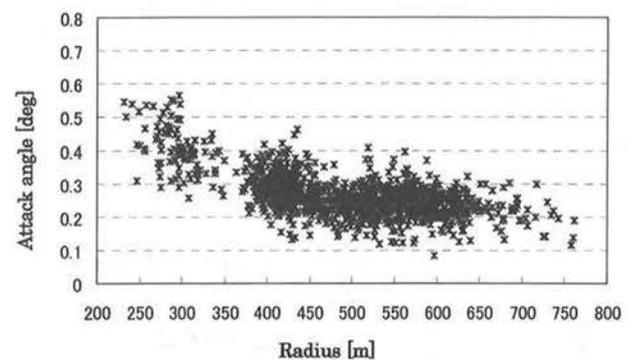


Fig.7 Relationship between the radius and the attack angle calculated from the 10m-chord versine

〈5・2〉 分岐器走行 車両基地内にて分岐器通過時のアタック角を測定した。のり上がり脱線に対して厳しい条件と考えられる片開きの 8 番分岐器 (T50NK8-101 以下、本線用 8 番分岐器と記す) と側線用 8 番分岐器 (T50NK8-201) が同一ルート上に対向で存在するルートにてアタック角を測定した。

図 8 に本線用 8 番分岐器、図 9 に側線用 8 番分岐器の速度約 20km/h での対向走行におけるアタック角測定結果の一例を示す。横軸は走行距離で、トングレー先端部を 0m とした。装置の原理上、トングレー先端部やクロッシング部などでは、センサが正常にレール頭側面を捉えることができないため、正常に測定できていないが、本線用 8 番分岐器ではトングレー先端部より約 5m、側線用 8 番分岐器では約 2.5m の地点よりクロッシング部までの 8~9m 間において、センサがレール頭側面中心付近を捉えていることが CCD カメラの映像より確認できた。そのためこの範囲においては正常に測定できていると考えられる。今回の測定ではリード部の曲線半径に対応し、本線用 8 番分岐器では最大約 1.2°、側線用 8 番分岐器で最大約 1.4° のアタック角が測定された。また、分岐器の構造の違いによるアタック角の特徴が表れていた。本線用 8 番分岐器ではリードレ

ール上でほぼ一定のアタック角をとるが、側線用 8 番分岐器では、トンゲル部において、アタック角が一旦減少し、リードレール部において再びアタック角が増加している様子が測定された。本線用分岐器とは異なり、トンゲル部が直線である側線用 8 番分岐器を対向走行する場合のアタック角は、トンゲル先端の入射角である約 2°からトンゲル部の直線部で輪軸の転向と共にアタック角が減少し、リードレールの曲線半径に応じた値まで増加するという特徴があると考えられる。

2008 年 2 月、東北線尾久駅構内で発生した脱線事故後の調査⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾では側線用 8 番分岐器のトンゲル部先端部から約 8380mm の位置より車輪乗り上げ痕跡が確認され、その後の調査で、この地点のやや手前において外軌側脱線係数が最大値をとることが分かった。今回、同形式の分岐器でアタック角を測定したところ、トンゲル部より約 8m 地点でアタック角がリードレール部中の最大値をとることが分かった。今回の測定では、測定箇所および車両は事故時とは異なるが、同形式の分岐器であり、その傾向は同様であると考えられることから、脱線事故地点においては脱線係数、アタック角が共に大きい値をとっていた可能性が高いと考えられる。

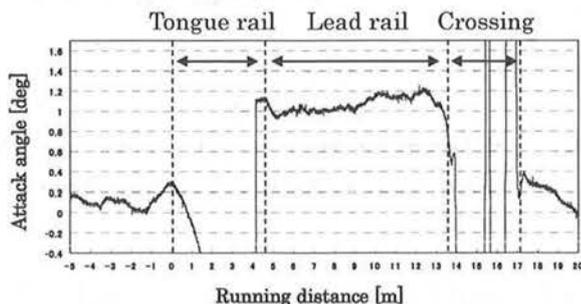


Fig.8 Changing of the attack angle at the turnout (T50NK8-101B)

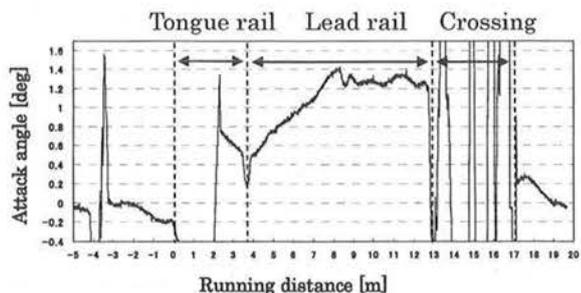


Fig.9 Changing of the attack angle at the turnout (T50NK8-201B)

6. まとめ

のり上がり脱線現象に対し、重要な因子であるアタック角について、車上から連続的に測定できる装置を開発し、走行試験で以下の点を確認した。

- (1) 今回開発した装置は、曲線走行中における定常的なアタック角を連続的に測定できる。
- (2) 今回開発した装置は、急曲線の低速走行時におけるアタック角を、臨界脱線状態の検出に必要な精度で連続的に測定できる。
- (3) 従前の方法では困難であった、分岐器通過中におけるアタック角を、リードレール部の広範囲において測定が可能である。

7. おわりに

のり上がり脱線現象に対する安全性評価のためには、車輪フランジ・レール間の摩擦係数の把握が不可欠である。摩擦係数を測定することは、非常に困難とされているが、輪重、横圧、アタック角、車輪上昇量などのパラメータを連続的に測定することで、臨界脱線状態を捉え、その瞬間における各種測定値より、摩擦係数を求め得ることが示されている⁽¹²⁾。著者らは今後、R100 程度の急曲線に対して走行試験を実施し、従来の PQ 測定に加え、車輪上昇量測定装置⁽¹³⁾、今回開発したアタック角測定装置を用いて、臨界脱線状態における摩擦係数の測定に向けた研究を進めていく予定である。

文 献

- (1) 松本, 佐藤, 大野, 留岡, 谷本, 陸, 佐藤: 車輪・レール接触に関する各種特性値の測定に関する考察—横圧, 輪重, 接線力, アタック角, 接触点などの実態把握—, 鉄道技術連合シンポジウム 2005, pp359-pp362.
- (2) 上林, 白井, 坂上, 新村, 岡田: 画像処理を用いた輪軸アタック角測定法, 鉄道技術連合シンポジウム 2001, pp633-pp636.
- (3) 宮本, 藤本, 岡部, 佐藤: 曲線通過時の鉄道車両の輪軸アタック角測定法, 日本機械学会論文集 (C編), 58 巻 547 号, pp106-pp113, (1992-3)
- (4) 宮本, 池田, 古川, 土井, 石田: 曲線通過中の輪軸アタック角測定, 鉄道技術連合シンポジウム 2002, pp97-pp100.
- (5) 佐藤, 橋, 若林, 永瀬: 低速域における乗り上がり脱線現象解明の一研究 (第 3 報, 車輪乗り上がり量の算出方法), 日本機械学会論文集 (C編), 73 巻 725 号, pp59-pp65, (2007-1)
- (6) 若林, 田邊, 平間, 永瀬: のり上がり脱線臨界状態下における車輪の挙動—アタック角の微小変動がのり上がり及ぼす影響—, 鉄道技術連合シンポジウム 2001, pp637-pp640.
- (7) 永瀬, 橋: 低速域における乗り上がり脱線防止のための一提案, 日本機械学会論文集 (C編), 74 巻 744 号, pp8-pp17, (2008-8)
- (8) レール位置測定装置, レール位置測定方法およびアタック角測定装置: 特開平 6-235609
- (9) 石田: 急曲線低速走行試験における安全性評価手法, 鉄道総研報告, Vol.19, No.9, pp5-pp10, (2005-9)
- (10) 東北線尾久駅構内列車脱線事故, 鉄道事故調査報告書, 運輸安全委員会, 2008.11.28, RA2008-02
- (11) 桃崎, 片折, 今田, 飯島, 土井, 村木, 松本, 土井: 車輪削正が低速乗り上がり脱線へ及ぼす影響に関する基礎試験 (繰り返し走行条件下における摩擦状態の変化), 鉄道力学論文集, 第 13 号, pp37-pp42, (2009-7)
- (12) 橋, 佐藤, 牛若, 永瀬: 低速域における乗り上がり脱線現象解明の一研究 (第 4 報, のり上がり脱線時におけるレール・車輪間の摩擦係数の測定方法とその結果), 日本機械学会論文集 (C編), 73 巻 732 号, pp1-7, (2007-8)
- (13) 今田, 村木, 飯島, 土井, 桃崎, 片折, 松本: 低速走行時の車輪上昇量の連続的に測定に関する基礎的検証, 第 15 回鉄道技術・政策連合シンポジウム, pp523-pp526, (2008)