

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*

車輪とレールとの相対角度であるアタック角は、鉄道車両の曲線通過性能を左右する支配的なパラメータの一つであり、特に横圧に大きな影響を及ぼす。しかし、走行中の車両に発生するアタック角を測定することは難しく、これまでさまざまな方法でアタック角の連続測定が試みられてきたものの、測定例は少なかった。そこで今回、乗り上がり脱線現象解明の一環として、近年のセンサ技術の向上により入手可能となった小型高性能のセンサを用いて車両走行中のアタック角の変化を連続的に測定できる装置を開発し、走行試験を実施した。これにより曲線走行時および、分岐器走行におけるアタック角特性が把握できることを確認し、装置が乗り上がり脱線現象解明に有効であることを確認した。

●キーワード：アタック角、連続測定、摩擦係数、急曲線、脱線、乗り上がり

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図1に示すようにアタック角を伴って曲線を通過する。アタック角は曲線通過中の台車の挙動を解明するうえで重要な要素であることから、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、さまざまな手法が研究、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かった。

アタック角は横圧などとともに乗り上がり脱線に深く関与することが知られており、特に車輪がレールを乗り上がりきるまでに要する走行距離に影響を及ぼす⁽⁵⁾ことから、脱線現象の解明においても非常に重要な因子である。乗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条件が揃った瞬間の状態（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、車輪上昇量など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⁾。

そこで今回、アタック角の連続的な変化を脱線事故の原因究明などに活用できるようにするため、また乗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特定し、その瞬間における各種パラメータを測定するために、「アタック角連続測定装置」（以下、本装置と記す）を開発した。本装置では近年入手可能となった、小型高性能の変位計等を用いることにより、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を安定して連続的に測定することができる。本稿では、装置の構成、および走行試験にて分岐器を含むさまざま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。

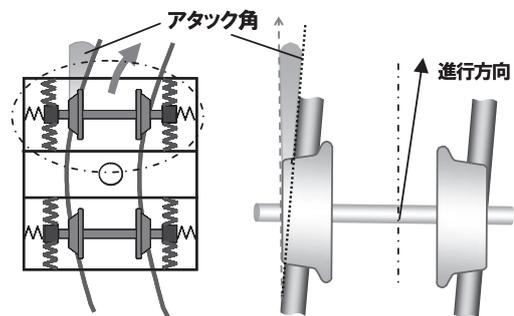


図1 アタック角の定義

2. アタック角と走行安全性

2.1 乗り上がり現象時の車輪挙動

車輪がアタック角を伴いながら、外軌側車輪フランジ部をレールに押し付けた状態で急曲線を走行する場合、車輪フランジとレールは、図2のように車軸の直下よりも進行方向寄りに接触する。この接触点位置は、主に車輪とレールの形状や、アタック角などの幾何学的条件によって決まる。そして輪重の減少や横圧の増加など、乗り上がり脱線に対して厳しい条件がそろった場合に、この接触点位置を支点とした乗り上がりの挙動が発生する。したがって接触点位置が進行方向に対して前方にあるほど、乗り上がりの角度は大きくなり、レールを乗り上がりきるまでに要する走行距離は短くなる。実際の車両が急曲線を走行する場合には、車輪とレールの接触位置や接触状態が刻々と変化するために、接触点にかかる力は

変化し、その結果、微小な乗り上がりやすべり下がりを通りながら走行していると考えられる。このようにアタック角は、乗り上がり脱線に関与する因子の中でも特に、車輪がレールを乗り上がりきるまでに要する時間（走行距離）に深く関与するものであり、乗り上がり脱線に関する調査およびその安全性の評価においては非常に重要な因子である。

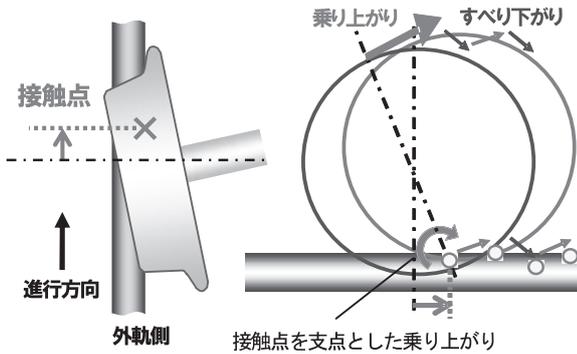


図2 急曲線における外軌側の車輪挙動

2.2 乗り上がり現象解明のための装置性能

当社では、過去に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⁽⁷⁾を開発し、測定を行ってきた。図3に装置とその測定原理を示す。この装置は、レールの直上に車輪を挟んだ片側2台のセンサから検出されるレーザーの反射光量からレール端部を特定し、その相対位置からアタック角を計算するものである。これは本線での高速走行時においてもリアルタイムにアタック角が測定可能な装置であったが、臨界脱線状態を特定する場合には、以下の点について改良が必要であった。

- (1) 精度良くレール端部を特定するため、センサ信号のしきい値をレール頭頂面の表面状態や摩擦状態などに応じて、細かく設定する必要がある。
- (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) 従来の装置の測定サンプリング周期は最高10msであるが、乗り上がり現象やすべり下がり現象へ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間隔での測定が必要であり、これには1ms以下の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捉え、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。

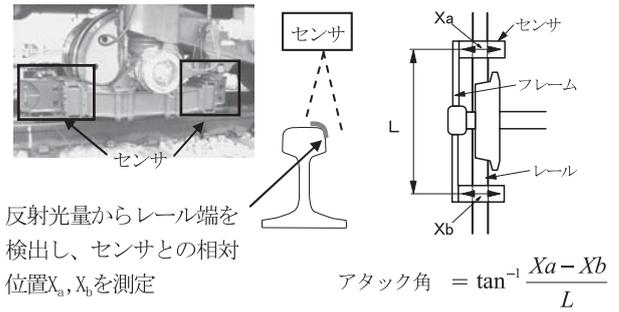


図3 従来のアタック角測定装置

3. 装置の概要

3.1 測定原理

アタック角の測定原理は、車輪側面の固定点からレールまでの距離を2点で測定し、図4の幾何学的な関係から角度を算出するものである。本装置では、軸受けの遊びなどに伴う、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、軸箱から車輪とレールそれぞれに対して2点で距離を測定し、軸箱-車輪間と軸箱-レール間の角度の差分をとり、これをアタック角とした。

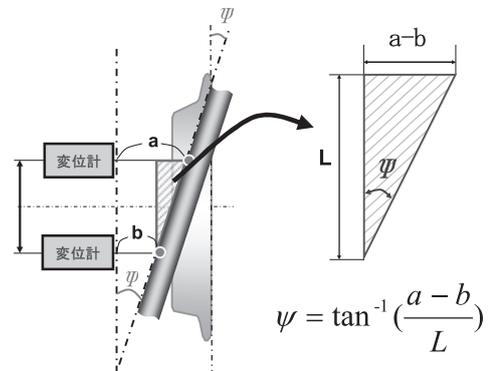


図4 アタック角測定原理

3.2 測定装置

図5に本装置の構成を示す。軸箱下にレーザー変位計、車内に測定データをアタック角に演算し、記録する装置で構成されている。距離の測定には、地上からの定点測定では従来から用いられ、実績のある非接触式センサ（レーザー変位計）を用いた。これまでの非接触式センサでは、車輪とレールといった、走行により表面状態が変化していく対象物に対する測定精度が高くなく、また測定対象に対するセンサの設置角度などの制約が大きかったことなどから、車上からのアタック角測定には使用されてこなかったが、近年のセンサ技術の進歩により、測定の安定性の向上とともに、装置の小型化が進み、車両限界を侵すことなく、車輪の側面からの測定が可能となったため、本装置ではこれを用いることとした。これにより、

測定精度が向上するとともに、従来の装置で必要とされた、測定環境に応じたきめ細かなしきい値などの設定は不要となった。このように本装置はレーザ変位計による距離測定を行うのみであり、しきい値判定に伴う演算がないため、演算処理も単純になり、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としては 0.002° 、サンプリング周期は最高 $20\mu\text{s}$ という、臨界脱線状態の検出にも十分な性能を有している。また取り付け治具以外の機器は、市販品を用いており、より高性能なセンサや記録装置へ比較的安価に更新可能である。ただし本装置はレールの頭側面に対してレーザを照射し、距離情報を得るため、レールボンドや継ぎ目部、およびレール付近に草などが存在すると正しく測定できない。また、走行中の輪軸の左右変位や軸ばねの伸縮などによる装置の変位によって、レーザの照射ポイントがレール頭側面から外れることで測定誤差が大きくなる。そこで上記のようなデータを排除するために、CCDカメラによってアタック角データと同期してレーザの照射状態を確認できるようにしている。

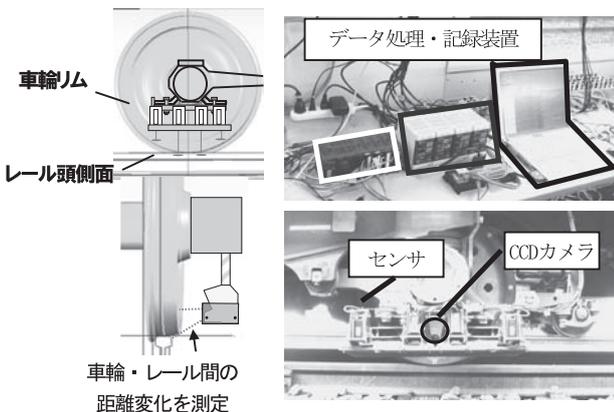


図5 機器構成

4. 測定結果

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。

4.1 本線の曲線走行

総武本線・成田線の四街道～成田間で走行試験を実施した。曲線区間での走行速度は、乗り上がり脱線に対して厳しい条件である低速（ $10\sim 30\text{km/h}$ ）を中心として測定を実施した。

図6に、アタック角と曲線半径との関係を示す。ここで曲線半径は、走行試験日の直近の軌道検測データの10m弦通り正矢から換算した値とした。また測定値の妥当性を評価するため、推定脱線係数比算定式を用いて計算されるアタック角

を併せて示す。アタック角測定値はR400で $0.2^\circ\sim 0.4^\circ$ 程度、R300では $0.3^\circ\sim 0.5^\circ$ であった。そしてR400以下の曲線では、曲線半径の変化に対するアタック角の変化量が大きくなる傾向があった。これらの傾向は推定脱線係数比算定式によって計算される値と傾向が一致しており、また過去に測定⁽⁸⁾されたものと同様であることから、本装置による測定方法は妥当であると考えられる。

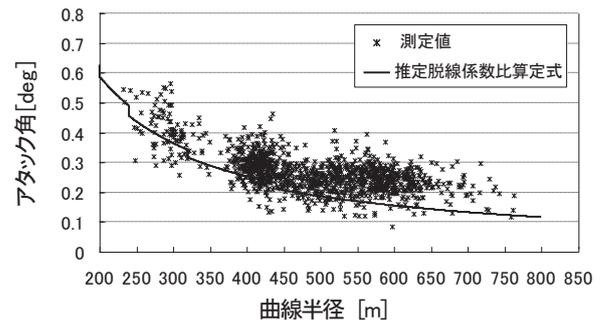


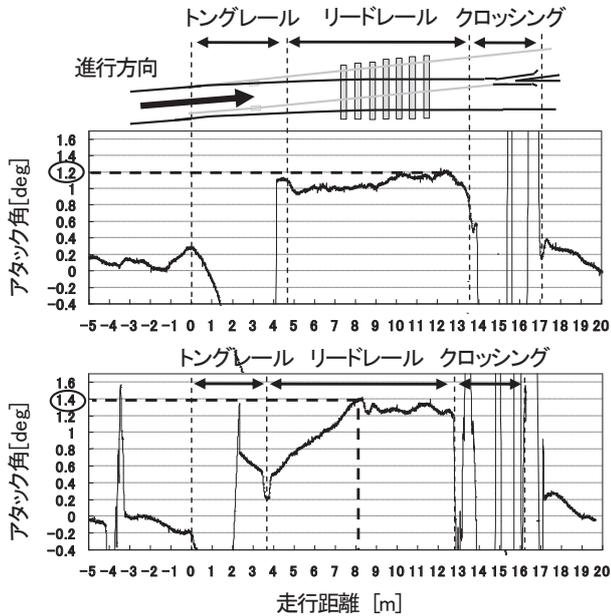
図6 曲線半径とアタック角

4.2 車両基地内の分岐器走行

車両基地内にて分岐器通過時のアタック角を測定した。乗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）が同一ルート上に存在するルートにて対向走行（線路が分かれていく方向）におけるアタック角を測定した。

図7に本線用8番分岐器と側線用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便宜上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ず、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間においては、センサがレール頭側面中心付近を捉えており有効な値であることがCCDカメラの映像より確認できた。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。また発生するアタック角の特徴として、本線用8番分岐器ではリードレール上ではほぼ一定のアタック角をとるが、側線用8番分岐器では、トングレー部において、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する様子が見られた。トングレーが直線である側線用8番分岐器を対向走行する場合、外軌側車輪が直線部からトングレー先端に接触した時点でその入射角と同等の約 2° のアタック角が発生することが

推定される。その後トングレールの直線部にかけて輪軸の転向と共にアタック角が減少し、曲線部で再び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ことが特徴であると考えられる。



上段: 本線用8番 T50NK8-101, 下段: 側線用8番 T50NK8-201

図7 分岐器通過時のアタック角 (対向走行)

4.3 乗り上がり脱線とアタック角に関する考察

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⁹⁾では側線用8番分岐器のトングレール先端部から約8mの位置より車輪の乗り上がりの痕跡が確認された。そしてその後の調査で、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、トングレールより約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、発生するアタック角の傾向は同様であると考えられることから、脱線事故地点は脱線係数、アタック角が共に大きい値となる地点であった可能性が高いと考えられる。

5. おわりに

乗り上がり脱線現象に対し重要な因子であるアタック角を車上から連続的に測定できる装置を開発し、走行試験を実施した。その結果を過去に行われた測定結果や推定脱線係数比算定式による計算結果と比較することにより、その妥当性を確認した。

乗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、車輪上昇量などとともにアタック角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¹⁰⁾。今後、R100程度の急曲線に対して、従来のPQ測定に加え、車輪上昇量測定装置¹¹⁾、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推定に向けた研究を進めていく予定である。

参考文献

- 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,pp.359-362.
- 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,pp.633-636.
- 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,pp.106-113,(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,pp.97-100.
- 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,pp.59-65,(2007-1)
- 6) 若林,田邊,平間,永瀬:乗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および影響-,鉄道技術連合シンポジウム2001,pp.637-640.
- 7) 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
- 8) 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,pp.5-10,(2005-9)
- 9) 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
- 10) 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,pp.1-7,(2007-8)
- 11) 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,pp.523-526,(2008)