曲線通過時の鉄道車両の輪軸アタック角測定法*

宮本 昌幸^{*1}, 藤本 裕^{*1}
岡部 忠臣^{*2}, 佐藤 栄作^{*1}New Measuring Methods of Wheelset Angle
of Attack of Railway Vehicle on CurvesMasayuki MIYAMOTO, Hiroshi FUJIMOTO,
Tadaomi OKABE and Eisaku SATO

New measuring methods of the wheelset angle of attack of railway vehicles on board and on the ground have been developed by RTRI in Japan. Using these methods, wheelset angle of attack has been measured on curves in the field running tests of limited express trains on a narrow gauge commercial line. The results measured are as follows: (1) The measuring accuracy of these methods attains to that which we aimed. (2) The higher the velocity and the larger the curve radius, the smaller will be the steady angle of attack. The steady angle of attack of the first wheel is 0.28 degrees, and that of the second wheel is 0.02 degrees for a curve radius of 400 m at a velocity of 110 km/h. (3) The measurements and the simulation results for wheelset angle of attack are close.

Key Words: Dynamics of Machinery, Measurement, Railway Vehicle, Wheelset Angle of Attack, Curving

1. ま え が き

鉄道車両の曲線通過特性は、車輪・レールの断面形状、輪軸のアタック角、曲線半径、走行速度、クリープ力特性、軸箱前後・左右支持剛性、台車回転抵抗など多くの要因によって影響される。特に輪軸のアタック角は、横圧に大きな影響を及ぼす。したがって曲線通過時の横圧の低減策を検討するためには、実際の曲線走行における輪軸のアタック角をできるだけ正確に測定し、その実態を把握することが必要である。

また、現在用いられている脱線に対する安全性を評価する基準である脱線係数の限度値 0.8 は、安全側の値となるよう大きなアタック角となっていると仮定しての値であるので、正確なアタック角の測定が行えるなら、その情報をもとに、より適切に脱線の安全性を評価できる。さらにこの実測値は、車両運動シミュレーションプログラムの検証にも有用な情報となる。

日本では、輪軸の動きに関連した測定項目としてこれまで車輪の横圧、輪重および台車・輪軸間の変位が測定されてきた。しかし、輪軸のアタック角、車輪とレ

ール間の相対変位は測定されていなかった。海外では、いくつかの試験例が報告されているが、その方法には欠点があることが指摘されている。そこで我々は、輪軸のアタック角を車上と地上で測定する方法を開発した。そして新幹線と JR の在来線特急車両による走行試験時に、これらの方法による測定を行い、曲線通過するときの輪軸のアタック角を知ることができた。

本論文では、車上と地上でのアタック角の測定方法(第2章)、測定誤差の評価(第3章)および走行試験における測定結果について述べ(第4章)、最後に輪軸のアタック角実測値とシミュレーションによる計算値とを比較・検証した結果を述べる(第5章)。

2. 輪軸のアタック角の測定方法

輪軸のアタック角は、レールと車輪の進行方向とのなす角で、図1のように定義される。輪軸のアタック角を測定する方法には、車上測定法と地上測定法があり、車上の測定では連続したデータを取ることができる反面、測定輪軸の数は限られる。一方、地上測定では列車の全輪軸について測定できる反面、一断面でしか測定できない。このように車上測定と地上測定とはそれぞれ長所、短所を持ち合せている。したがって、同じ走行試験で双方の方法で測定し、相互に補完してより

* 原稿受付 平成3年8月14日。

^{*1} 正員, (財)鉄道総合技術研究所 (〒185 国分寺市光町2-8-38)。^{*2} (財)鉄道総合技術研究所。

良いデータを得ることが望ましい。

2・1 車上で測定方法 輪軸のアタック角を測定する方法として、英国鉄による機械的な方法⁽¹⁾とスイス連邦鉄道による光学的な方法⁽²⁾が報告されている。

英国鉄の方法は、軸箱の前後にアームを介して小さな測定用車輪を取付けて、この二つの測定車輪をレールの内側に押付けて、その変位から輪軸の左右変位およびアタック角を知る方法である(図2)。この方法の欠点は、機械的な接触があるために高速での測定が困難なことである。

スイス連邦鉄道の方法は、軸箱に光電式トランジューサを付けてアタック角を測定するものである。トランジューサとセンサをおおの45°の角度に取付け、トランジューサからの赤外光をレールの頭部側面に当て、この反射光をセンサで受けて、その入射光軸の位置変化から左右方向の変位を知るものである。軸箱の前後の離れた位置にトランジューサとセンサのセットを取付けてあるので、相互の左右変位測定値の差からアタック角を知ることができる。この方法の欠点として、通常の軸箱にはトランジューサを取付けるための十分なスペースがないこと、またトランジューサの出力信号が外乱光やレール表面の状態によって影響されることが考えられる。

これらの欠点を取り除くために、我々はビデオカメラを台車枠に取付け、そのカメラの映像を合成することによって台車枠とレールとの間のヨーイング角 ψ_i を測定する方法を開発した。

2・1・1 台車枠とレール間のヨーイング角 ψ_i 図3のように台車枠の前後端にビデオカメラを取付け、これらから得られた二つの画像を合成して一つの画像にする。二つのレールの画像(黒塗の部分)のずれ η より、 ψ_i を下記の式から得ることができる。

$$\psi_i = \eta \cdot a / (2c) \quad \dots\dots\dots (1)$$

図1 輪軸のアタック角の定義

ただし、 a は(実際のレール幅/画像のレール幅)であり、 $2c$ は前後のカメラ間の距離である。

このビデオカメラによる非接触測定法は、機械式のものより高速走行に用いることができ、光電式トランジューサなら、日光の急激な変化や注目している以外のものが視野に入り込んで誤出力をするような場合でも、画像に人間の判断を加えて正確な情報を得ることができる。さらにこの方法では、車体の上下振動によって生じる誤差を一定幅に保たれているレール底部幅によって補償することができる。

2・1・2 輪軸と台車枠間のヨーイング角 ψ_{w1} , ψ_{w2}

台車の前軸、後軸それぞれの左および右軸箱と台車枠間の前後変位は、巻尺式変位計等通常の変位計によって測定できる。これらのデータから ψ_{w1} (第1軸)および ψ_{w2} (第2軸)を求める。

2・1・3 車輪とレール間のアタック各 ϕ_1 , ϕ_2 曲

図2 英国鉄の測定車輪によるアタック角測定装置

図3 台車ヨーイング角と車輪左右変位の測定方法

線通過中の輪軸のアタック角は、図4において、輪軸の中心線CDと輪軸位置での曲線の半径方向線OAとのなす角 $\angle AOC$ によって与えられる。

これより輪軸のアタック角 ψ_1, ψ_2 は下記の式によって与えられる。

$$\psi_1 = \psi_t + \psi_{w1} + (a/R) : \text{第1軸} \quad \cdots \cdots (2)$$

$$\psi_2 = \psi_t + \psi_{w2} - (a/R) : \text{第2軸} \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで $\psi_t, \psi_{w1}, \psi_{w2}$ は2・1・2項および2・1・3項によって与えられる。

R : 曲線半径

$2a$: 台車のホイールベース

2・2 地上での測定方法 図5のように曲線の半径方向に沿って、外軌側のAと内軌側のBでレールに直接光電スイッチを取付ける。光電スイッチには発光部と受光部とがあり、お互いにレールをはさんで反対側に設置する。この区間を車輪が通過すると発光部からの光は遮断され、受光部はパルス信号を出力する。そこでアタック角は下記の式で与えられる。

$$\psi = \tan^{-1}(Vt/2b) \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで

t : 外軌側受光部Aと内軌側受光部Bの二つの出力パルス信号間の時間差

V : 列車の走行速度

$2b$: 左右の車輪フランジの頂点間の距離

列車の速度を求め、かつ輪軸が定常的な動きをしているか否かを確認するために、最初の地点から5cm程度離れた地点にも光電スイッチを設置する。列車速度は第1軸と第2軸の通過で生じる二つのパルス信号の時間差からも得ることができる。

この外軌側と内軌側の車輪通過の時間差によってアタック角を求める方法は既にカナダ⁽³⁾で用いられているが、カナダの方法はレーザ式の発光部と受光部を用いており、これらの装置は大形でレールでなく地上に設置されている。一方、我々は、可視光の小形で耐震性の優れた光電スイッチを用いており、レールに直接取付けることが可能である。このレールへの直接の取付けが、列車通過時のレールの沈み込み(速度と輪重によって異なる)によって生じる測定誤差をなくしている。また、列車通過時のレールの沈み込みの影響を受けないため、車輪、レール、センサの位置関係から、車輪のレールに対する左右変位も副次的に求めることができる。

以上の輪軸のアタック角、左右変位を求めるために、センサからの出力パルス信号を用いて、各軸についての内・外軌輪のパルス信号の立ち上がり時間差、通過時間をリアルタイムに演算できるアタック角演算装置

を製作した。

3. 輪軸アタック角の測定誤差

3・1 予想されるアタック角の値 4章で述べる実測結果の対象とする車両であるJRの381系試験電車を想定して検討した。

輪軸が台車に剛に取付けられている場合に、軸距2.1mの台車が軌道接線方向に向きながら、半径400mの曲線を走行すると、先頭軸のアタック角は 0.15° 、第2軸のアタック角は -0.15° となる。実際には台車自体が軌道接線方向に角度を持つことや輪軸が台車に対して回転することなどから、先頭軸のアタック角は 0.5° 、第2軸は 0.2° 程度になることが予想される。

軸箱支持剛性や車輪踏面形状等を変えて、アタック

図4 曲線走行時の台車ヨーイング角とアタック角

図5 地上での輪軸アタック角の測定方法

角の改善をはかる場合に、大きなアタック角をとる先頭軸を第2軸のアタック角と同程度に減少させることが一つの目標と考えられる。その場合には測定上の精度としては先頭軸と第2軸との角度差 0.3° 程度の違いを検出することが不可欠となる。

3・2 車上測定方法の誤差^{(4),(5)} 車上測定に伴う誤差としては、まずビデオ・カメラの解像度による誤差が考えられる。本測定においては、図3および式(1)の η の解像度が約 1 mm であり、式(1)の ϕ_i にして 0.016° 、そして式(2)、(3)においても ϕ_i のみが η の解像度に関係しているので、アタック角にして 0.016° となる。

したがって、この車上でのアタック角測定法の誤差は、 0.02° 以内である。

ただし、ビデオは $1/30$ 秒のフレームサイクル(1こまの間隔)ごとの離散的な画像しかとれない。他方、アタック角の、軌道狂いなどによる動的応答を調べる場合、応答の1周期に6個程度の画像が必要となる。これらのことより、検知できるアタック角の応答値は $5\text{ Hz} [=1/(6 \times 1/30)]$ 程度以下のものに限られる。しかし軌道狂い応答の大半は 5 Hz 以下と考えられるので、アタック角の軌道狂い応答を調べる場合でも問題はないと思われる。

3・3 地上測定方法の誤差⁽⁶⁾ 地上測定に伴う主な誤差としては、センサのレールへの取付けに伴う誤差とセンサの特性による誤差が考えられる。これら誤差の評価式を示し、5章で述べる実際の測定区間の条件である曲線半径 400 m 、速度 110 km/h 、 10 m 弦での片振幅通り狂い 1 mm を用いて各要因に対する誤差を求める。

まずセンサ取付けに伴う誤差としては以下のものが考えられる。

(1) 発・受光軸の、T定規(2 m 弦で、軌道半径の

図6 T定規を用いてプレートを曲線半径方向に規定しながらレールに取付け

規定に用いる(図6))で規定した軌道半径線からのずれによる誤差(発・受光センサを取付けたプレートのレールへの取付誤差)

図7の軌道半径線との誤差 $\Delta\sigma_i$ 、 $\Delta\sigma_o(\text{mm})$ を用いて、アタック角の誤差 $\Delta\phi(^\circ)$ は以下の式で求められる。

$$\Delta\phi = (\Delta\sigma_o - \Delta\sigma_i) / 2b \times (180/\pi)(^\circ) \quad \cdots\cdots (5)$$

ただし、 $\Delta\sigma_o$ 、 $\Delta\sigma_i$ は図において軌道半径線より左にあるときは負、右にあるときは正とし、 $2b$ はフランジ先端間距離(mm)とする。

本測定では、T定規、センサを取付けるステーおよびセンサの寸法誤差の合計として $|\Delta\sigma_i|$ 、 $|\Delta\sigma_o|$ が最大 0.2 mm の誤差になるので、 $\Delta\sigma_o - \Delta\sigma_i = 0.4\text{ mm}$ 、また $2b = 1020\text{ mm}$ として、式(5)より $\Delta\phi = 0.022^\circ$ となる。

(2) T定規の狂いによる誤差

図8の軌道半径線とT定規との誤差 $\Delta\sigma_{io}$ 、 $\Delta\sigma_{ii}$ を用いて、アタック角の誤差 $\Delta\phi(^\circ)$ は以下の式で求められる。

$$\Delta\phi = (\Delta\sigma_{io} - \Delta\sigma_{ii}) / l_w \times (180/\pi)(^\circ) \quad \cdots\cdots (6)$$

ただし、 $\Delta\sigma_{io}$ 、 $\Delta\sigma_{ii}$ の符号は(1)と同様である。また l_w はT定規の縦棒の長さ(mm)である。

本測定では、 $\Delta\sigma_{io} - \Delta\sigma_{ii}$ が 0.5 mm 以内になるようT定規を調整したので、 $\Delta\sigma_{io} - \Delta\sigma_{ii} = 0.5\text{ mm}$ 、 $l_w = 1285\text{ mm}$ として、 $\Delta\phi = 0.022^\circ$ となる。

図7 発・受光軸のT定規で規定した軌道半径線からのずれ

図8 T定規に狂いがある場合の誤差

(3) 軌道の通り狂いにより T 定規が規定する方向が軌道半径方向とずれるための誤差

通り狂いが測点 $\pm l_t/2$ (mm) 間で最大 a_t (mm) とすると, T 定規の規定方向と軌道半径方向との最大のずれ, すなわちアタック角の誤差 $\Delta\phi$ は図 9 のようになり, 以下の式で表される。

$$\Delta\phi = (2a_t/l_t) \cdot (180/\pi) (^{\circ}) \quad \cdots \cdots \cdots (7)$$

本測定では, 測定点として, その ± 1 m の区間での 10 m 弦の通り狂いが 1 mm 以内の地点を選んでいたので, $a_t = 1.0$ mm, $l_t = 2000$ mm として, $\Delta\phi = 0.057^{\circ}$ となる。

次に, センサの特性による誤差として以下のものが考えられる。

(4) 内・外軌側センサの応答時間差による誤差

外軌センサの立ち上がり, 立ち下がり応答時間の遅れをそれぞれ Δt_{ou} (s), Δt_{od} (s), 内軌用センサの立ち上がり, 立ち下がり応答時間の遅れをそれぞれ Δt_{iu} (s), Δt_{id} (s) とし, 列車速度を V (km/h) とすると, 式(5)で σ_o , σ_i を,

$$\sigma_o = (10^3 V/3.6) \cdot (\Delta t_{ou} + \Delta t_{od})/2 \text{ (mm)}$$

$$\sigma_i = (10^3 V/3.6) \cdot (\Delta t_{iu} + \Delta t_{id})/2 \text{ (mm)}$$

として $\Delta\phi$ を求めることができる。

本測定で用いるセンサ特性は, $\Delta t_{ou} - \Delta t_{iu}$ および $\Delta t_{od} - \Delta t_{id}$ が 10 μ s 以内となるので, $\Delta t_{ou} - \Delta t_{iu} = 10$ μ s, $\Delta t_{od} - \Delta t_{id} = 10$ μ s, $V = 110$ km/h として式(5)から $\Delta\phi$ を求めると, $\Delta\phi = 0.017^{\circ}$ となる。

以上の地上測定での誤差をまとめると表 1 のようになる。

ただし, センサの特性による誤差は速度 110 km/h 時の値である。

表 1 より, 主要誤差の合計は 0.12° 以内に収まっている。また, 列車ごとや前, 後軸間などの相対差の誤差はセンサの取付誤差は考えなくてもよいので, さらに 1 桁小さくなり, 0.02° 以内となる。

図 9 軌道に通り狂いがある場合の誤差

4. 走行試験での測定結果

測定は, 中央西線で実施された 381 系試験電車の走行試験時に行った⁽⁷⁾。走行試験では, 半径 300 から 800 m の曲線を含む約 66 km 長の区間で, 70 から 130 km/h の速度で計 12 回走行した。これらの試験では, 従来の 1/20 のこう配の円すい踏面に代わって円弧踏面車輪⁽⁸⁾ が用いられた。また試験区間のレールは 50 N レール⁽⁹⁾ であった。

これらの試験では輪軸のレールに対するアタック角, 相対左右変位のほか, 横圧, 輪重, 加速度が測定された。

車上でのアタック角の測定は先頭車の先頭台車でを行った。図 10 は台車枠に取付けたビデオカメラの保護箱を示している。

地上でのアタック角の測定は, 半径 400 m の曲線の 6 断面(図 11)で行った。6 断面で測定した理由は, アタック角が曲線中一定なのか, 変動しているのかを知るためである。6 cm 間隔については短い周期の変動の有無を, 12 m 間隔については長い周期の変動の有無を知るために設置した。また 6 cm 間隔のセンサによって断面通過時の速度も検出している。図 12 はレールに取付けた光電スイッチを, 図 13 はアタック角演算装置を示している。また試験区間の何箇所かの断面で摩

表 1 地上測定誤差のまとめ

From sensor set			From sensor	Sum of Primary error
Set to rail	T-square warp	Lateral irregu.	Response delay	
0.022°	0.022 °	0.057°	0.017°	0.118°

図 10 車上測定でのビデオカメラのレンズ箱

耗したレールの断面形状も測定した。これらのレール摩耗断面形状を関数化して車両運動シミュレーションプログラムに入力できるようにした。

これら車上・地上の測定結果は下記ようになった。

4.1 車上測定結果 アタック角などの波形の一例を図 14 に示す。輪軸のアタック角の零の値は走行試験区間の出発点の直線部でとっている。すなわち、この地点で、式(2)、(3)での ϕ_i , ϕ_{w1} , ϕ_{w2} , a/R の値が零であるとしたものである。

輪軸と台車枠との間のヨーイング角(ϕ_{w1} と ϕ_{w2})は、台車枠とレールとのヨーイング角 ϕ_i と比較して小さい。 ϕ_{w1} , ϕ_{w2} の符号は ϕ_i の符号とは逆になっている。そして ϕ_{w1} のほうが ϕ_{w2} より大きい。これは、輪軸に発生する第1輪軸の操舵モーメントのほうが第2軸のそれよりも大きいことを意味している。この ϕ_{w1} と ϕ_{w2} は、先に測定した新幹線のものと比較して2~5倍である。曲線区間での図 14 の ϕ_1 と ϕ_2 の平均値は定常アタック角として定義される。この定常アタック角は次章でシミュレーションの検証に用いられる。

4.2 地上測定結果 381系試験電車および従来の381系営業電車に対する地上でのアタック角の測定結果を図 15 に示す。この図にある矢印はデータのばらつきの範囲を表している。381系試験電車はボルスタ

図 11 地上6断面アタック角測定時のセンサ配置

図 12 地上測定での光電スイッチ取付け状態

レスで円弧踏面を採用し、軸箱前後柔支持化(従来の1/2以下)、および軸距を短縮化(2.3 m → 2.2 m)している⁽¹⁰⁾。この試験電車の第1軸のアタック角は従来の営業用381系電車のそれより約30%小さくなっていることがわかる。

5. 実測値とシミュレーション計算値の比較・検証

4章で述べたように、アタック角実測値が得られたので、これまで行われていなかったアタック角の実測

図 13 地上測定でのアタック角演算装置

図 14 曲線走行時の車上でのアタック角測定値 (曲線半径 400 m, 速度 110 km/h)

値と、文献8に示したシミュレーション・プログラムによって得られた計算値とを比較し、両者を相互に検証した。

図16は、半径400 m, 300 m, 800 mの曲線を走行するときに車上および地上で測定したアタック角を示したものである。定常アタック角測定値は、先頭車第1軸、第2軸それぞれのアタック角の曲線走行中の平均値⁽⁷⁾である。地上でのアタック角測定値は、該当する速度に対する6断面での測定値の平均である⁽⁷⁾。これらの図から以下のことがわかる。

(1) 車上測定の実測値と地上測定の実測値との比較では、地上および車上測定での測定誤差を考慮すると、両者はほぼ一致している。また、速度に対する定常アタック角の特性もほぼ一致している。

(2) 速度が高いほど、また曲線半径が大きいほど、曲線走行中の定常アタック角は小さくなる。

(3) 半径400 mの曲線を速度110 km/hで走行する場合、第1軸の定常アタック角は 0.28° 、第2軸の定常アタック角は 0.02° である。

一方、測定値に対応するシミュレーション結果を線——および……で示す。

曲線半径400 m(最上図)で線……は、台車の回転抵抗が空気ばねのみで、車輪とレール間の摩擦係数が0.3のときのシミュレーションによる第1軸および第2軸の定常アタック角の値である。また、線——は、空気ばね以外に10 kNmの台車回転抵抗があり、車輪とレール間の摩擦係数が0.15のときのシミュレーションによる定常アタック角の値である。線……は、実測値よりやや小さな値となっているが、線——は実測値

図15 曲線走行時の地上でのアタック角測定値

と一致している。

車輪・レール間の摩擦係数は通常0.3程度で、天候などによっては0.15程度まで低下することが考えられる。またボルスタレス台車であるので、空気ばね以外の台車回転抵抗はせいぜい10 kNmと考えられる。

図16 アタック角の測定値と計算値との比較
(曲線半径400 mおよび800 m)

したがって、実際にあり得ると考えられる条件のもとでの計算値は、線-----から線——程度の範囲の値となる。

下の二つの図は、半径 300 m と 800 m の曲線での実測値とシミュレーション値(——)とを比較したものである。

これら 3 種の曲線半径に対する図から、実測値と計算値(——)とは、半径 300 m の曲線での計算値が第 1 軸および第 2 軸で実測値よりやや小さいことを除いてほぼ一致している。したがって、輪軸のアタック角測定法、シミュレーションプログラム、これらから得られたアタック角の値は有効であると考えられる。

6. あとがき

輪軸のレールに対するアタック角の測定方法、測定誤差の評価、アタック角の実測結果およびこれら実測値とシミュレーション計算値の比較・検証について述べた。これらを以下にまとめる。

(1) 車上アタック角測定法と地上アタック角測定法を開発した。その測定誤差は、車上測定法では 0.02° 以内、地上測定法では 0.12° (列車ごとや前、後軸間の相対差で 0.02°) 以内である。

(2) 車上測定の実測値と地上測定の実測値との比較では、地上および車上測定での測定誤差を考慮すると、両者はほぼ一致している。また、速度に対する定常アタック角の特性もほぼ一致しており、速度が高いほど定常アタック角は小さくなっている。

(3) 車上測定を行った 381 系試験電車では、曲線半径が大きいほど定常アタック角が小さくなり、半径 400 m の曲線を速度 110 km/h で走行するときの定常アタック角は、第 1 軸で 0.28° 、第 2 軸で 0.02° であることがわかった。

(4) 地上測定から、円弧路面を採用し、軸箱前後柔支持化(従来の $1/2$ 以下)、および軸距を短縮化(2.3 m $\rightarrow$ 2.2 m)した 381 系試験電車の第 1 軸のアタック角は、従来の営業用 381 系特急電車のそれより約 30% 小さいことがわかった。

(5) 輪軸のアタック角の実測値は、適切なパラメータを用いて計算したシミュレーションの結果とほぼ一致しており、輪軸のアタック角測定法、シミュレーションプログラム、これらから得られたアタック角の値は有効であると考えられる。

文 献

- (1) Elkins, J. A., ほか 1 名, *BR Research*, (1979), 1.
- (2) Kummrow, R., *Trans. ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control* 103-12(1981), 375.
- (3) Kalousek, J., ほか 1 名, *Track Train Dynamics*, I(1978), 157.
- (4) 岡部・宮本, 鉄研速報, A-84-88(1984), 1.
- (5) 笹間・鶴飼, 鉄研速報, A-87-57(1987), 1.
- (6) 藤本・宮本, 鉄研速報, A-84-62(1984), 1.
- (7) 宮本・岡部・藤本・佐藤, 機講論, No. 860-13(1986-11), 41.
- (8) 藤本・宮本, 機講論, No. 880-8(1988-10), 17.
- (9) 丸山・深沢, 土木技術者のための鉄道工学, (1981), 65, 丸善.
- (10) 岡本, 電気車の科学, 37-7(1984), 25.