

3703 急曲線区間における水準及び通り狂いと 輪重・横圧の関係について

正 [土] ○中村 幸一 正 [土] 川崎 祐征 (東海旅客鉄道株式会社)

Study on relationship between wheel load, lateral force and track irregularities in sharp curves

Kouichi NAKAMURA, Yoshiyuki KAWASAKI (Central Japan Railway Company)

It is known that combination of alignment and cross-level irregularities affect the running safety of the vehicle. However, it is not well studied how the phase of these irregularities effects on the dynamic wheel load and lateral force. In this paper, we made trial calculations of dynamic wheel load and lateral force caused by the different wave length, the wave number and phase of the track irregularities, using a multi-body vehicle-track dynamics simulation.

Keywords : track irregularity, dynamic wheel load, lateral force, vehicle dynamic simulation

1. はじめに

一般的に軌道狂い管理は、10m 弦高低狂い、10m 弦通り狂い、水準狂い、平面性狂い、軌間狂い及び複合狂いの6つの軌道狂いについて、種々の管理値が定められている。このうち複合狂いは、鶴見事故に代表される2軸貨車の脱線事故を契機に、狩勝実験線による各種実験データ¹⁾や鉄道技術研究所におけるシミュレーション結果^{2,3)}などにより、通り狂いと水準狂いが逆位相で連続すると車両の走行安全性が低下することが明らかとなったことを受け、1982年に複合狂いの基準値が制定されている⁴⁾。走行安全性の指標の1つである脱線係数(以下、Q/Pと言う)は輪重と横圧の比であり、通り狂いと水準狂いの位相によってその値は変化すると予想されるが、既往の研究⁵⁾においては軌道狂いの波長や波高、速度などの条件での検討が主であり、通り狂いと水準狂いの位相差に着目した検討はあまり行われていない。

そこで本研究では、通り狂いと水準狂いの位相が逆位相状態から変化した場合に、通り狂いと水準狂いが輪重・横圧に及ぼす影響について検討することとした。本論では、初めに低速域の急曲線区間において、連続した複合狂いが輪重・横圧に及ぼす影響について車両運動シミュレーションによる試算を行い、次に、同様の条件下において、複合狂いの通り狂いと水準狂いの位相が逆位相状態から位相が変化した場合に、複合狂いが輪重・横圧に及ぼす影響について車両運動シミュレーションの試算結果から明らかにする。なお、以降では輪重、横圧、Q/Pは外軌側の値とする。

2. シミュレーションの設定条件

車両運動シミュレーションには、汎用シミュレーションソフトであるVAMPIREを使用した。VAMPIREによるシミュレーションに使用した計算条件を表1に示す。車両モデルは営業列車を想定した一車体モデルとし、シミュレーション結果の輪重、横圧は先頭軸の値を出力した。平面線形は、曲線半径400m、カント180mmの右カーブとし、速度は70km/h、90km/h、110km/hの3条件を設定した。また、レール形状は60kgレール、車輪形状は新幹線

円弧踏面とし、レール形状・車輪形状ともに新品形状として、レール/車輪間の摩擦係数は0.3とした。

表1の計算条件に対して、表2に示す軌道狂いを設定してシミュレーションを実施し、軌道狂いと輪重・横圧の関係について検討を行った。軌道狂いの形状は、同一波長の正弦波を3波連続で設定し、始終点部分は余弦波にて滑らかに取り付けた。また、軌道狂いの波長(以下、 λ と言う)は10mと20mの2種類設定し、軌道狂いの波高は水準狂いを7mm、通り狂いを $\lambda=10\text{m}$:3mm、 $\lambda=20\text{m}$:6mmとした。なお、10m弦正矢の検出特性により、通り狂いは $\lambda=10\text{m}$ 、20mいずれの場合も10m弦正矢で6mmとなる。以上の条件にて作成した $\lambda=10\text{m}$ の軌道狂い波形例を図1に示す。

表1 計算条件

計算モデル	VAMPIRE
車両モデル	1車体モデル(新幹線営業列車を想定)
平面線形	R=400m、C=180mmの曲線(右カーブ)
走行速度	70km/h、90km/h、110km/h
レール/車輪形状	60kgレール、新幹線円弧踏面(いずれも新品形状)
レール/車輪間の摩擦係数	0.3

表2 軌道狂い設定条件

形状	正弦波(始終点を余弦波で滑らかに取り付け)
波長	10m、20m
波数	3波連続
波高	通り狂い: 6mm(10m弦換算値) 水準狂い: 7mm

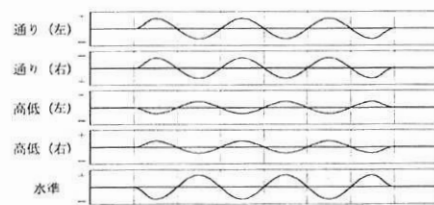


図1 軌道狂い波形例

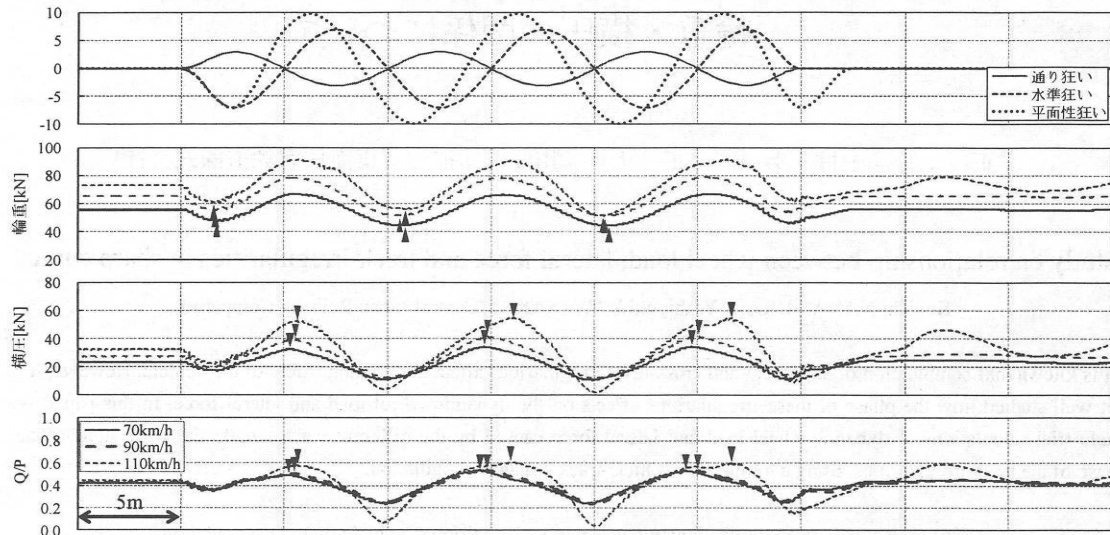


図2 シミュレーションによる輪重・横圧・Q/Pの波形 ($\lambda=10\text{m}$)

3. 軌道狂いの波数と Q/P の関係

表1、表2の条件にて、通り狂いと水準狂いを逆位相状態で3波連続複合させ、 $\lambda=10\text{m}$ 、 20m でシミュレーションを行った。 $\lambda=10\text{m}$ の条件でのシミュレーション波形を図2に、波数別の速度とQ/Pの関係を図3に、 $\lambda=20\text{m}$ の条件でのシミュレーション結果について、波数別の速度とQ/Pの関係を図4に示す。また、軌道狂いの波長に対する速度別のQ/Pについて、2波目の結果を図5に示す。なお、図2中には最小輪重発生位置を▲、最大横圧、最大Q/Pの発生位置を▼で示している。(削除)

図2より、いずれの速度においても波数の増加による輪重変動が確認できるが、特に速度110km/hで輪重変動が大きくなっている。また横圧については、速度90km/h及び110km/hにおいて、軌道狂いの波数が増加するほど横圧が大きくなっており、特に速度110km/hにてその傾向が顕著に表れていることが確認できる。(削除)

最小輪重発生位置は、速度に関わらず平面性狂いが最小となる位置で発生しており、輪重抜けが影響していると考えられる。最大横圧発生位置は、速度70km/h及び90km/hでは軌道狂いの始点から半波長の位置であるのに対し、速度110km/hのケースでは、1波目では速度70km/hや110km/hと同様の位置で最大値を示しているが、2波目、3波目では曲線内方への通り狂いのピーク手前で最大値を示している。最大Q/P発生位置は、速度に関わらず最小輪重発生位置ではなく最大横圧発生位置に一致した。

次に、軌道狂いの波数や波長がQ/Pに及ぼす影響について考察する。

(1) 波数

図3、図4において、1波目のQ/Pに比して2波目、3波目のQ/Pが大きくなる傾向が読み取れる。また、 $\lambda=10\text{m}$ と $\lambda=20\text{m}$ のQ/Pを比較すると、 $\lambda=10\text{m}$ の場合にその傾向が大きい。また、 $\lambda=20\text{m}$ 、速度110km/hの条件では最大Q/Pは3波目で発生しているが、それ以外の条件では、3波目よりも2波目のQ/Pが最大となった。軌道狂いの波長や速度によって若干の傾向の違いはあるが、いずれのシミュレーション結果においても、軌道狂い1波目よりも2波目及び3波目のQ/Pが大きくなっている

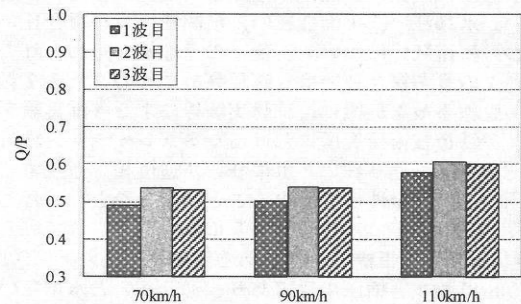


図3 波数別の速度と外軌側Q/Pの関係 ($\lambda=10\text{m}$)

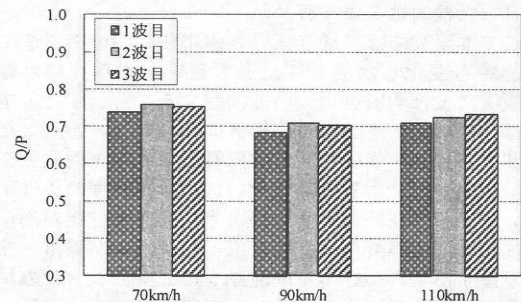


図4 波数別の速度とQ/Pの関係 ($\lambda=20\text{m}$)

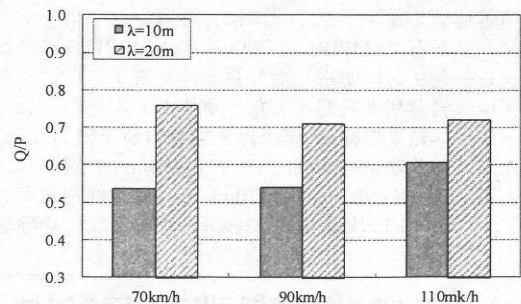


図5 波長に対する速度別のQ/P (2波目)

ことが確認できた。

(2) 軌道狂いの波長

図 5 より、いずれの速度においても $\lambda=20\text{m}$ の Q/P が $\lambda=10\text{m}$ の Q/P を上回り、速度 70km/h のケースで最もその差が大きくなった。本研究で使用した車両モデルのローリング固有周期は 0.8Hz 程度であり、 $\lambda=20\text{m}$ の軌道狂いを速度 70km/h 、 90km/h 、 110km/h で走行した際の周期はおおよそ 1.0 、 0.8 、 0.7Hz となることから、 $\lambda=20\text{m}$ の Q/P が $\lambda=10\text{m}$ の Q/P を上回った原因は、軌道狂いの周期が車両のローリング固有周期とほぼ一致したためと考えられる。

以上のように、低速域の急曲線区間において複合狂いと輪重・横圧の関係をシミュレーションした結果、既往の研究と同様に、複合狂いが連続する場合には 2 波目、3 波目において Q/P が大きくなること、また、複合狂いの波数や波長によって Q/P が変化することが確認できた。

4. 水準・通り狂いの位相差と輪重・横圧の関係

前節においては、同一波長の通り狂いと水準狂いが逆位相で 3 波連続した場合を対象にシミュレーションを実施した。しかし図 2 を見て分かるように、最大 Q/P の発生位置は最大横圧発生位置となっているが、最大 Q/P 発生位置と最小輪重発生位置は軌道狂いの $1/4$ 波長程度の差が生じている。これは、同一波長で逆位相の複合狂いが連続する区間に車両が軌道狂いに入ると、外軌側レールが低下し、かつ外軌側への通り狂いによって輪重・横圧ともに減少し、平面性狂いの最小値となる箇所です。次に、外軌側レールが上昇し、かつ通り狂いが外軌側から内軌側へ向かうため、輪重・横圧ともに上昇し、内軌側への通り狂いのピーク手前で最大横圧が発生する。さらに、内軌側への通り狂いのピークを過ぎると、外軌側レールが低下し始め、通り狂いも内軌側から外軌側へと向かい、輪重・横圧ともに減少する。複合狂いが連続する場合は、この過程を繰り返すことで車体がローリングを引き起こし、輪重変動と横圧変動が増幅することで Q/P が増加することとなる。しかし、最小輪重発生位置である平面性狂いが最小となる位置（軌道狂い始点から $1/4$ 波長の位置）と、最大横圧発生位置である内軌側への通り狂いが最大となる位置（軌道狂い始点から $1/2$ 波長の位置）が異なるため、両者には軌道狂いの $1/4$ 波長程度の差が生じることとなる。最小輪重は平面性狂いが最小値となる位置で発生するため、仮に水準狂いと通り狂いの位相が逆位相状態から変化すれば、最小輪重と最大横圧の発生位置が接近し、Q/P はより大きくなると予想される。

そこで、通り狂いと水準狂いを逆位相で複合した位置から、水準狂いの位相を 1m ずつ変化させ、最も Q/P が大きくなる通り狂いと水準狂いの位置関係についてシミュレーションによる試算を行った。以降では、通り狂いと水準狂いが逆位相で複合した状態から、水準狂いを 1m 遅らせた状態を、「位相差 1m 」と表記する。

シミュレーションに使用した計算条件は表 1 と同様とし、設定する軌道狂いは $\lambda=10\text{m}$ 、通り狂いと水準狂いの位相差を図 6 のように $0\sim 7\text{m}$ まで 1m ずつ変化させた 8 条件とし、波数及び波高は表 2 と同様とした。通り狂いと水準狂いの位相を変化させた場合の、速度別の Q/P を図 7 に示す。いずれの速度においても、通り狂いと水準狂いの位相差がない条件（位相差 0m ）から、位相差が

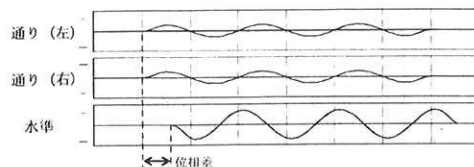


図 6 通りと水準狂いに位相差がある波形例

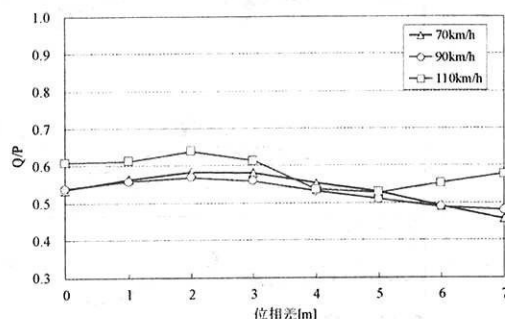


図 7 速度別の軌道狂いの位相差による Q/P (2 波目の結果)

増えるに従って Q/P も増加して位相差が 2m の条件で Q/P が最大となり、さらに位相差が増えると Q/P は減少に転じ、通り狂いと水準狂いが同位相となる位相差 5m で位相差 0m とほぼ等しくなった。位相差 2m というのは、軌道狂いの波長が 10m であることから、軌道狂いの $1/4$ 波長である 2.5m に近く、妥当な結果であると言える。また、位相差 5m の条件は、外軌側への通り狂いが最大となる位置で外気側が高くなる水準狂いが発生していることとなり、実際の軌道においては発生しにくいと考えられる。

図 7 において最も Q/P が大きくなった位相差 2m のシミュレーション結果について、シミュレーション波形を図 8 に、波数別の速度と Q/P の関係を図 9 に示す。なお、図 8 中には最小輪重発生位置を▲、最大横圧、最大 Q/P 発生位置を▼で示している。

最小輪重発生位置は、位相差 0m (図 2) のシミュレーション結果と同様、速度に関わらず平面性狂いの最小値付近で発生しており、輪重抜けが影響していると考えられる。最大横圧に着目すると、速度 110km/h のケースでは位相差 0m の結果と比較して 2 波目、3 波目で約 5kN 低下しているが、速度 70km/h 及び 90km/h のケースでは位相差 0m とほぼ同じ値となった。また、最大横圧発生位置は、いずれの速度においても軌道狂いの始点から半波長の位置となった。最大 Q/P 発生位置は、位相差 0m のように最大横圧発生位置ではなく、最小輪重発生位置と最大横圧発生位置の間となった。

図 9 を見ると、いずれの速度においても 1 波目に比して 2 波目、3 波目の Q/P が上回っており、2 波目で Q/P が最大となった。また、速度 110km/h の 3 波目を除き、位相差 2m での Q/P は、位相差 0m の条件での Q/P を上回った。速度 110km/h において、3 波目の Q/P が位相差 0m の条件での Q/P を下回った原因は、速度 110km/h の 3 波目の横圧が位相差 0m の横圧よりも最大値で約 5kN 低下していたことが影響していると考えられる。

以上のシミュレーション結果から、通り狂いと水準狂いが逆位相で複合する場合に比べ、両者の位相が変化することにより、逆位相で複合した場合の Q/P と比較して Q/P が増加するケースがあることが明らかとなった。

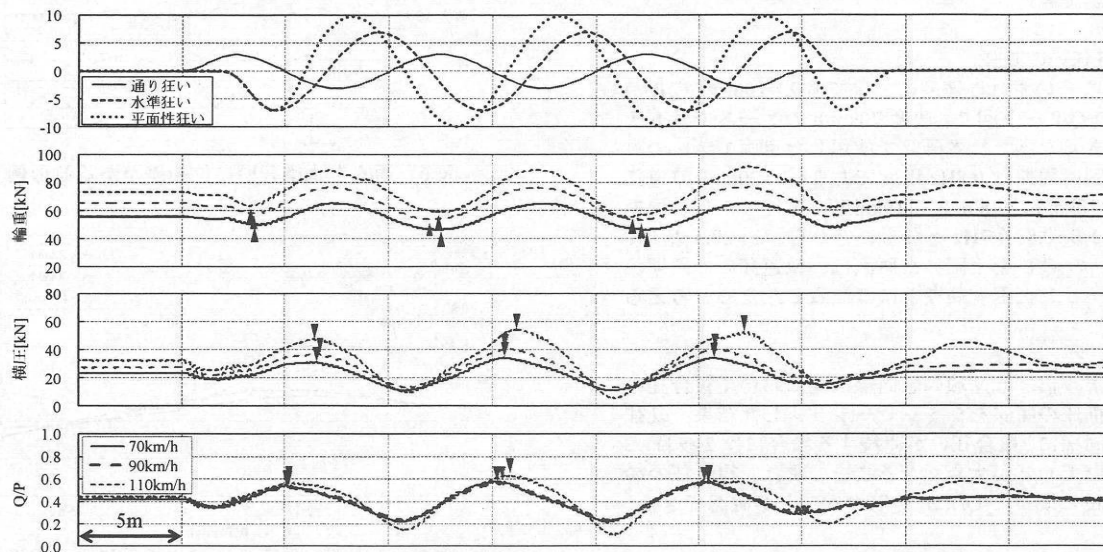


図8 シミュレーションによる輪重・横圧・Q/Pの波形 ($\lambda=10\text{m}$ 、位相差 3m)

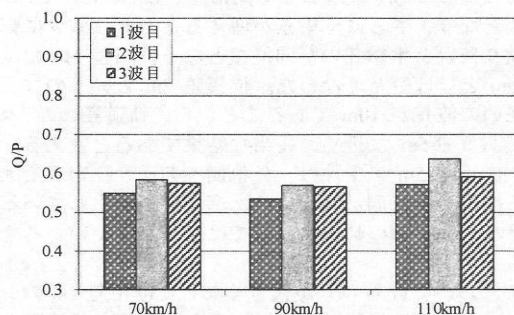


図9 速度別の波数とQ/Pの関係 (位相差 2m)

5. まとめ

本研究において実施した車両運動シミュレーションにより、複合狂いが輪重・横圧に及ぼす影響について、以下のことが明らかになった。

- (1) 逆位相の通り狂い及び水準狂いが同一波長の正弦波で3波連続した場合、軌道狂い2波目、3波目のQ/Pは1波目のQ/Pよりも増加する。また、今回のシミュレーション条件においては、波長 20m の条件でのQ/Pが波長 10m の条件でのQ/Pを上回った。
- (2) 最小輪重は、複合狂いの位相差の有無に関わらず平面性狂いが最小となる位置で発生するが、最大横圧、最大Q/Pは、通り狂い及び水準狂いの位相や速度によって発生位置が異なる。
- (3) 通り狂いと水準狂いの位相が逆位相で複合する状態から変化させた場合、逆位相で複合する条件と比べてQ/Pが大きくなる条件があり、本研究のシミュレーション条件では、軌道狂いの波長が 10m の場合では位相差が 2m でQ/Pが最大となった。ただし、通り狂いと水準狂いの位相差が生じることによって必ずしもQ/Pが位相差がない条件のQ/Pよりも増加するわけではなく、軌道狂いの波長や速度によっては、位相差がある条件のQ/Pが位相差がない条件のQ/Pを下回ることがあることも確認できた。

本研究では、通り狂いと水準狂いの位相が逆位相状態から変化した場合に、通り狂いと水準狂いが輪重・横圧に及ぼす影響について検討した。しかし、本論でのシミュレーションでは、速度や平面線形、軌道狂いの波長や波高等の条件数を限定して実施しているため、今後も様々な条件で試算を行い、通りと水準狂いの位相差が輪重・横圧に及ぼす影響について検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 青野泰三，原禮次：狩勝実験線における各種軌道狂いに対する貨車の走行安全性試験、鉄道技術研究所速報、1978.7
- 2) 杉山武史：昭和54年度狩勝実験線貨車走行試験結果(その1)、鉄道技術研究所速報、No.81-15、pp.24-35、1981.1
- 3) 池守昌幸：軌道狂いの波形の整備に関する研究、鉄道技術研究報告、No.1038、pp.135-148、1977.3
- 4) 滝野幸雄：複合狂いの整備、鉄道線路、1982.6
- 5) 佐藤吉彦，原礼次ほか：新幹線軌道狂い設定試験結果の解析、鉄道技術研究報告、No.1240、1983.3