

鉄道軌道のメンテナンス

公益財団法人鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 部長

古川 敦 *Atsushi Furukawa*

1. はじめに

鉄道軌道^{※1}は、車両からの力を直接受け止め、軌道より下部の構造物に伝える役割を持っている。

軌道の多くは図1のバラスト軌道と呼ばれる、碎石（バラスト）上にまくらぎを敷き詰め、これにレールを締結した構造をしている。バラスト層は緩衝材および吸音材として優れた機能を有しているが、車両からの荷重を受けて徐々に形を変えていく。このため、バラスト上に敷設されたレールの位置も徐々に変化する。これが進展すると列車の乗り心地が

図1 バラスト軌道



悪化し、場合によっては脱線に至る。このように、軌道は強度面のみならず形状の面からも、その状態を評価し、定期的な保守を行う必要があるという、一般の土木構造物とは異なる特徴をもつ。

本稿ではこのようなレール位置の変化（軌道変位）のメンテナンスについて紹介する。

2. 軌道変位の管理

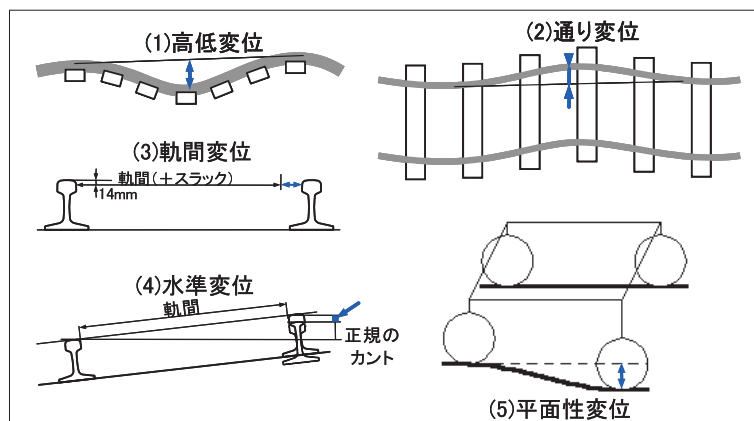
(1) 軌道変位の種類

軌道の形状のうち、波長数 m~100 m のレールの曲がりや軌道変位（軌道狂い、または軌道不整ともいう）という。軌道変位は一般に図2に示す5項目について測定・評価されている。また、JRのうち貨物列車が走行する線区では、後述する複合変位も管理されている。

① 高低変位

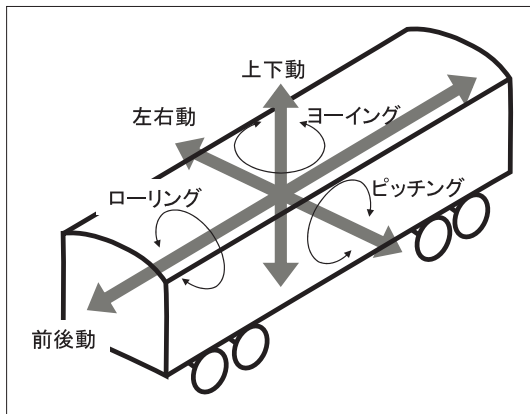
レールの上下方向の変位を「高低変位」という（図2 (1)）。高低変位は車両の上下振動およびピッチングの原因となる。車両の振

図2 軌道変位の種類



※1 軌道
軌道は「線路」と呼ばれることが多いが、レール、レール締結装置、まくらぎ、道床など道床から上の構造物の総称であり、線路とは別の概念である。なお、「線路」とは軌道に加えて橋りょう、トンネルや架線など車両の走行に必要な全ての施設を包含した概念である。

図3 車両の振動の種類



動の種類を図3に示す。

②通り変位

レールの左右方向の変位を「通り変位」という(図2(2))。通り変位は車両の左右振動に影響する。また、通り変位が大きくなると車両のローリングを誘発し、最悪の場合には脱線につながる。従って、走行安全上重要な項目の一つである。

③軌間変位

左右のレール間隔(軌間)の設計値からの差を「軌間変位」という(図2(3))。曲線中にスラック^{※2}が設定されている場合は、所定のスラックからの差をいう。軌間が広がりすぎると、車輪が左右レールの間に落下し、脱線することがある。これも走行安全上重要な項目である。

④水準変位

2本のレールの高さの差を「水準変位」という(図2(4))。曲線中にカント^{※2}が設定されている場合は、所定のカントからの差をいう。水準変位は通り変位と同じく、車両のローリングを誘発する。また、次に述べる平面性変位も水準と関係がある。

⑤平面性変位

一定距離を隔てた2点の水準変位の差を「平面性変位」という(図2(5))。ほとんどの鉄道車両の台車は車軸2本、車輪4つで構成されているが、平面性変位は車輪が接するレール上の4点からなる面のねじれを表わ

す。

平面性変位が大きいと、ねじれた床の上に4本足の机を置いたときのように、車輪のうちの 하나가浮き上がる。これがひどくなると、車輪がレールを乗り越えて脱線することがあるので、走行安全上最も重要な項目である。なお、直線と円曲線の間には設けられる緩和曲線では、カントの変化によってそもそも平面性変位が0とならない。従って、緩和曲線区間は特に平面性変位の管理が重要となる。

⑥複合変位

前述のように、通り変位と水準変位は車両のローリングを誘発する。これが軌道側に連続して存在し、かつ車両のローリング固有振動数に一致した波長であると、共振によってローリングが極めて大きくなり脱線に至ることがある。1963年11月に発生した鶴見事故はこの典型で、走行中の貨車が脱線、これに隣接線を走行していた旅客列車が衝突、脱線、さらにもう1本の旅客列車が衝突し、死者161人、重軽傷者120名という国鉄史上最大の列車事故となった^{※3}。事故の原因は、貨車のローリングを誘起する波長の通り変位と水準変位が同じ区間に存在したことと、当時の一部の貨車が、ローリングが大きくなりやすい構造をしていたことであり、対策の一つとして複合変位が導入された。これは、通り変位と水準変位が同じ場所に連続して存在することを防止するためのもので、以下の式で定義される。

$$\text{複合変位} = |\text{通り変位} - 1.5 \times \text{水準変位}|$$

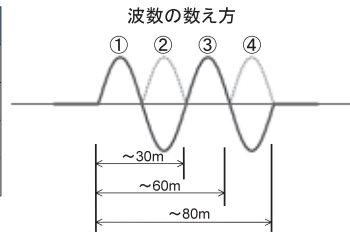
水準変位の前に-1.5の係数がかかっているのは、当時の貨車は水準変位により敏感に反応することと、通りと水準の符号が逆向きの場合にローリングが増幅されることを考慮したものである。また、車両の共振を防止するため、連続する波数に応じた波高(振幅)の管理値が定められている(表1)。なお、

※2 スラック、カント
一般に曲線中では、鉄道車両の走行を円滑にするためにレールの間隔を広げる。これをスラックという。同様に、客室で感じる遠心力を打ち消すために曲線外側のレールを高くする。このときの内外レールの高さの差をカントという。

※3 国鉄史上最大の列車事故
列車事故ではない国鉄最大の事故は、1954年に発生した洞爺丸台風による青函連絡船5隻の沈没事故である。なお、鉄道省時代以前には鶴見事故よりも大きな列車事故があった。

表1 複合変位の整備基準値

波数と延長	波高限度 [mm]
全般	35
30 m 以内に2ヶ所	25
60 m 以内に3ヶ所	21
80 m 以内に4ヶ所	18



複合変位は絶対値で定義されており、表1における波数の数え方は、同表横の丸数字のとおりである。

(2) 軌道変位の測定法

前章で定義した軌道変位のうち、軌間変位、水準変位、平面性変位は、ある断面における左右レールの相対的な位置関係であるので、適切なセンサがあれば測定は難しくない。例えば保守作業の後などには、図4に示す簡単な器具で軌間・水準の仕上がり状態を確認している。一方、高低変位、通り変位についてはレールの長手方向の形状であり、その絶対的な形状を測定するのは大変困難である。現在では、GPSなどを用いてレール位置の緯度、経度、標高を線路に沿って連続的に測定するのは不可能ではないが、要求される精度が

0.1 mm オーダーであることから、実務上有用なデータは得られない。一方、車両を安全に走行させるためには、必ずしもレールの絶対的な位置を知る必要はない。これは、新幹線の線路が（構造物を含めて）東京から新大阪まで一斉に1 m 南側に動いたとしても、車両の走行安全性には影響を与えないことからご理解いただけたと思う。

従って、通常軌道の高低、通り変位は長手方向にある間隔だけ離れた3点間の相対変位で測定、評価する。具体的には、図5に示す「10 m 弦正矢法」と呼ばれる方法が用いられる。これは長さ10 m の弦をレールにあて、その中央の位置における弦とレールとの離れを測定するものである。非常にシンプルな原理であるが、測定が簡単でかつ再現性が高いという特徴を持っている。人力で測る場合は3人一組で行い、2人が10 m の糸の両端を手でレールにあて、もう1人が中央で糸とレール

図4 軌間ゲージ



図5 10 m 弦正矢法

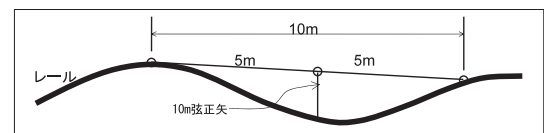
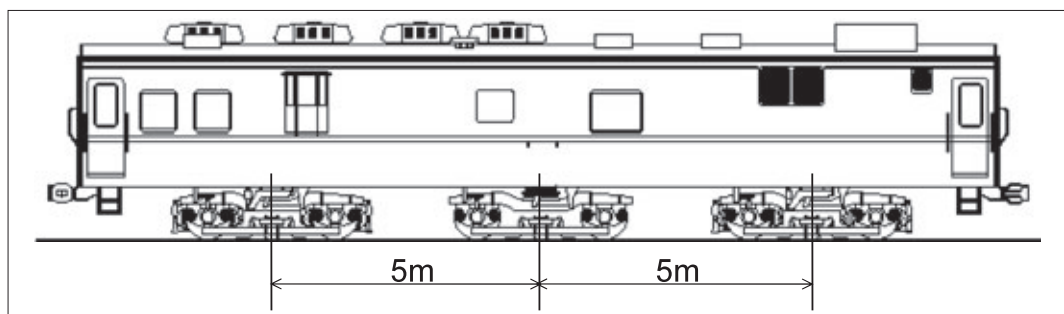


図6 高速軌道検測車 マヤ34



ルとの離れを測定する。線区全体の軌道変位を連続的に測定する場合は、「軌道検測車」と呼ばれる専用の車両を用いる。軌道検測車は一般の車両と異なり、**図6**に示すように5 mずつ離れた3つの台車を備えている。各々の台車には車体とレール位置との距離を測定するための変位計が設けられており、車体そのものを一種の弦と見なすことで**図5**の10 m弦正矢法を機械的に実現している。ただし、**図6**のような車両は中間台車の走行安定性の問題から、新幹線の営業列車並の速度では走行できないので、最新の軌道検測車は、2つの台車のみで10 m弦正矢法による測定ができるよう工夫されている。よく知られたドクターイエローは、この2台車タイプの軌道検測車で、最高270 km/hの速度で走行しながら、毎月3回軌道変位を測定している。

ところで、10 m弦正矢法による測定波形は、レールの長手方向の形状そのものを示したのではない。これは**図5**で弦の長さを5 mあるいは20 mとすると、10 mの場合と比較して測定値が変わることで理解いただけると思う。言い換えれば、**図5**のようにレールに弦をあてて測定する方法では、弦の長さを変えると測定値が変わるので、どのような方法を用いてもレールの長手方向の形状そのものを知ることはできない。

もう少し詳しくいうと、10 m弦正矢法で理想的な正弦波（サイン波）状の軌道変位を測定した場合、その波長によって測定される振幅が変化する。具体的には**図7**の例のように、波長30 mの正弦波では元の振幅の0.5倍に、波長50 mでは0.19倍となる。また波長5 mの正弦波を10 m弦正矢法で測定すると、振幅はいたるところで0（ゼロ）と測定される。このような、軌道の変位波長と測定倍率（検測倍率）との関係は**図8**のようになる。参考までに、同図には弦長を20 m、40 mにした場合のものも示す。10 m弦正矢法では波長が6.67 m～20 mの範囲では測定倍率が1より大きくなり、実際の軌道変位よりも振幅が大きく測定される。20 m弦正矢法、40 m弦正矢法では測定倍率が1より大きくなる波長が、10 m弦正矢よりも長くなる。

(3) 軌道変位の管理基準

前述のように10 m弦正矢法では「レールの長手方向の実形状」が測定できないのに、この方法で軌道変位を測定する意味があるのだろうか？その答えは、鉄道車両の揺れ方の特徴にある。

一般に三次元の物体の振動を考える際、**図3**のように、それぞれ3方向の並進運動と回転運動を考慮する必要がある。このうち上下

図7 波長別の10 m弦正矢法検測特性

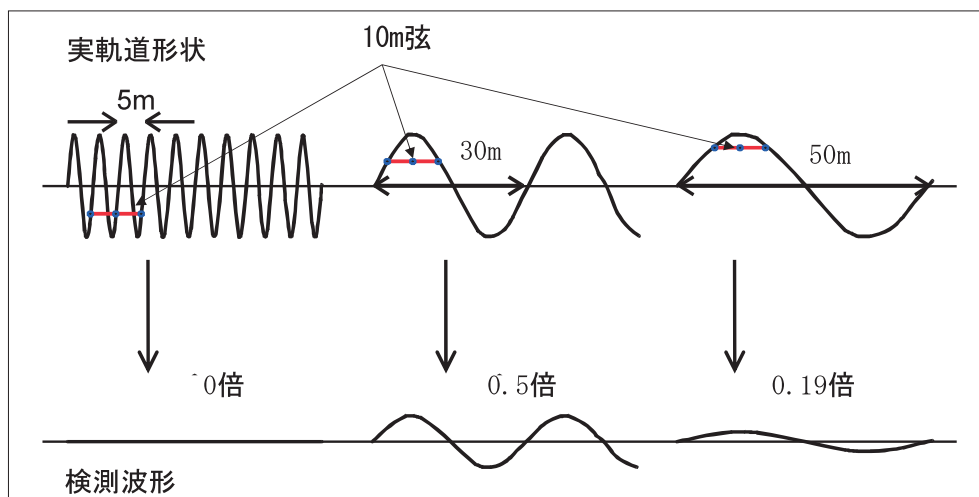
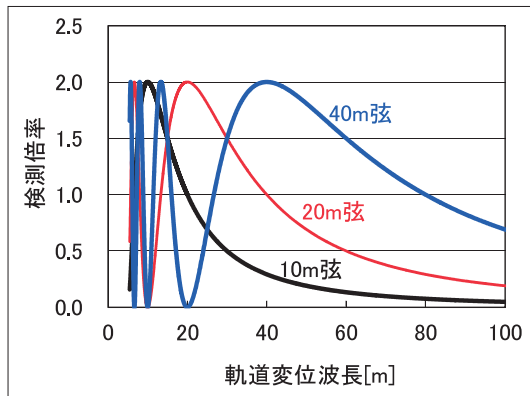


図8 正矢法の弦長と軌道検測特性



振動とピッチング、および左右振動とローリングは、軌道変位各項目との相関が高く、かつ車両形式に関わらず固有振動数が0.8～1.5 Hzの間にあるという特性がある。従って、例えば固有振動数が1 Hzの車両が秒速25 m (=90 km/h)で走行する場合、軌道側に波長25 mの軌道変位があると1秒に1回加振されることになるため、同じ振幅で波長10 mの軌道変位がある場合（この場合、1秒間に25/10=2.5回/秒=2.5 Hzで加振される）よりも振動の振幅が大きくなる。このように車両の振動を抑制するためには、車両の固有振動数に対応した軌道変位の波長に着目し、その振幅を小さくする必要がある。このため速度100 km/h程度の在来線では、波長

10 m～20 mの検測倍率が高い10 m弦正矢法が合理的な測定方法として用いられ、最高速度130 km/hの高速線区では20 m弦正矢が併用される。また新幹線では、1992年の「のぞみ」号登場時以降40 m弦正矢が併用されている。

表2に、現在 JR グループで用いられている在来線における軌道変位の整備基準値^{※4}と整備目標値を示す。これらの値は、整備基準値については走行安全性を、整備目標値については乗り心地を考慮して定められているものである。

3. 軌道変位の整備

バラスト軌道の整備（軌道変位の振幅を小さくする作業）には、一般に図9に示すマルチプルタイタンパ（以下、マルタイ）と呼ばれる重機械が用いられる。マルタイは軌道検測車と同じく車内に基準弦を持っており、この弦の両端と中間の測定輪の相対変位により軌道変位を測定する。中間の測定輪付近にはバラストに振動を与えるタンピングユニットと、レールを持ち上げ、左右に移動するリフティング・ライニングユニットがあり、これ

表2 在来線整備基準値の例（単位 mm）

種別	整備目標値				整備基準値				仕上り基準値	
	1級線	2級線	3級線	4級線	1級線	2級線	3級線	4級線	各線別とも共通	
変位種別									一般区間	コンクリート道床区間
軌間	+10 (+6) -5 (-4)				曲線半径600 m 以上 20 (14) 半径200 m 以上 600 m 未満 25 (19) 半径200 m 未満 20 (14)				(+1) (-3)	(0) (-3)
水準	11 (7)	12 (8)	13 (9)	16 (11)					(4)	(2)
高低	13 (7)	14 (8)	16 (9)	19 (11)	23 (15)	25 (17)	27 (19)	30 (22)	(4)	(2)
通り	13 (7)	14 (8)	16 (9)	19 (11)	23 (15)	25 (17)	27 (19)	30 (22)	(4)	(2)
平面性					23 (18) (カントの変化による値を含む)				(4) (カントの変化による値を含まない)	

() 内は手検測等による静的値、() の無い数値は、軌道検測車による動的値
高低・通りは10 m弦正矢の値

※4 整備基準値
国鉄が定めた整備基準値をベースとしており、現在では JR 各社で細部が異なる。

図9 マルチプルタイタンパ



日本プラッサ株式会社 提供

らによってまくらぎ下のバラストをつき固めながら、レールの上下・左右位置を修正する。中間の測定輪^{※5}は中央よりもやや後側に設けられている。これはつき固めによるレール、まくらぎの移動が前部測定輪の位置に影響しないようにするためである。このようなマルチタイに設けられた基準弦によって軌道変位を修正する方法を、相対基準による軌道変位修正と呼ぶ。この方法は、**図8**と同様に周波数特性を持ち、波長が長く（周波数が低く）なるほど軌道変位の整備効果が低くなる。すなわち相対基準による方法では、高速域での車両動揺を抑制できないことになる。

これに対し、測量などで実際の軌道形状を知り、レールの移動量をあらかじめ算出してマルチタイに与えて施工することを、絶対基準による軌道変位修正と呼ぶ。この方法は、あらかじめレールの移動量を算出するステップが必要となるが、相対基準による方法よりも長い波長の軌道変位を修正することができることから、新幹線や在来線の高速線区で広く用いられている。

4. 終わりに

日本のみならず世界の多くで、軌道構造にはバラスト軌道が用いられている。バラスト軌道は上述したような保守の繰り返しが必要となるため、バラストを用いない軌道構造^{※6}も開発されてきた。一方、このような軌道構造の場合、レールを固定するレール締結装置

の構造上許容されるわずかな範囲でしかレールの位置調整が行えず、また作業は多くの場合、人力となる。従ってバラスト軌道と比較して保守の頻度は大幅に少ないものの、地震や地盤沈下等で大きな軌道変位が発生した場合、保守コストがバラスト軌道よりも高くなる場合がある。

このように、バラスト軌道には保守の面から長所・短所があるが、「レール位置調整の自由度が高い」という長所は、軟弱地盤の多い日本ではメンテナンス上無視できないこと、また現実問題として、営業中のバラスト軌道をスラブ軌道などの直結系軌道に作り変えるには莫大な費用と時間がかかることから、わが国の軌道の多くはバラスト軌道であり、保線技術者は日々メンテナンスを繰り返しながら、これと上手につき合っている。

なお、軌道のメンテナンス業務は、本稿で紹介した軌道変位以外にも、レールなどの材料管理あるいは分岐器の管理など多岐にわたって行われるが、ここではそのうち最も代表的な軌道変位管理のみを紹介したことをお断りする。

※5
中間の測定輪
マルチタイは前部測定輪が保守前の軌道上に、後部測定輪が保守後の軌道上にあることを前提に制御システムが構成されている。

ふるかわあつし

平成2年（財）鉄道総合技術研究所入社。浮上式鉄道開発本部山梨実験線部で浮上式鉄道（リアモーターカー）の軌道部分（ガイドウェイ）の開発に従事したのち、平成9年から鉄車輪系を取り扱う軌道技術開発推進部に勤務し、軌道側から見た脱線対策や乗り心地向上策等の技術開発に従事。平成23年より現職。

※6
バラストを用いない軌道構造
コンクリートなどの永久構造物に直接レールを取り付けるため「直結系軌道」と総称される。これには様々なタイプがある。