第 57 回

レール軸力測定法

はじめに

列車がレール継目を通過する際には，車輪とレールとの間に衝撃的な力が発生します。この力は，騒音を増大させたり，乗り心地の低下を引き起こすだけでなく，軌道部材やバラストに対して大きな負荷を与えるため，レール継目は軌道保守上の弱点箇所となります。そのため，主要な鉄道路線の多くで，レール同士を溶接してつなげて，いわゆる継目板を用いた普通継目をなくした「ロングレール」が用いられています。ところが，ロングレールは普通継目における衝撃力に起因する問題を解消する一方で，普通継目でのレール伸縮を吸収する機能がなくなることによるレール長手方向の軸力の発生と，それにともなう軌道座屈やレール破断というリスクをもたらします。

たとえば，夏場にレール温度が上昇すると，レールは伸びようとしますが，この伸びを締結装置やまくらぎで拘束しているため，レールに圧縮の軸力が発生します。まくらぎを拘束するバラスト道床の抵抗力が十分でない場合，**図1**のように，レールがまくらぎごとレールと直角方向に張り出します。この現象が「軌道座屈」で，軌道座屈が生じた箇所を列車が通過すると，最悪の場合脱線につながります。

一方，レール温度が低下する冬場ではレールは縮もうとするため，引張の軸力が発生し，レール破断のリスクが高まります。また，引張の軸力が大きいほど，レールが破断した際に生じる破断面同士の隙間（破断時開口量）も大きくなります。破断時開口量が大きい箇所を列車が通過する場合，やはり脱線につながる可能性があります。

このように，ロングレールに発生する軸力は，脱線という列車運行上極めて重大な事故を引き起こす原因となり得るため，その値を把握し，適切に管理することが求められます。

レール温度とふく進測定によるロングレールの軸力管理

ロングレールの軸力を管理するためには直接測定することが望ましいのですが，軸力測定は難しいため，レールの温度とふく進（線路長手方向への移動量）測定に基づき軸力を管理するのが一般です。これはロングレール導入時から現在に至るまで基本的には変わっていません。ここでは，現在日本で広く使用されている，高温時の軌道座屈防止のための軸力管理法について説明します。

レールの温度伸縮によるふく進が，締結装置やまくらぎにより完全に拘束されているならば，レール軸力P（N）はレール温度t（℃）と設定温度t_0（℃）（☞参照）から次式で算出できます。

$$P = AE\beta(t - t_0) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

ここで，

E：レール鋼ヤング率（MPa）
（弾性範囲における同軸方向のひずみと応力の比例定数）

β：レール鋼の線膨張率（/℃）
（温度の上昇によって物体の長さ・体積が膨張する割合を，温度当たりで示したもの）

A：レールの断面積（mm^2）

図１　軌道座屈の例（試験軌道）

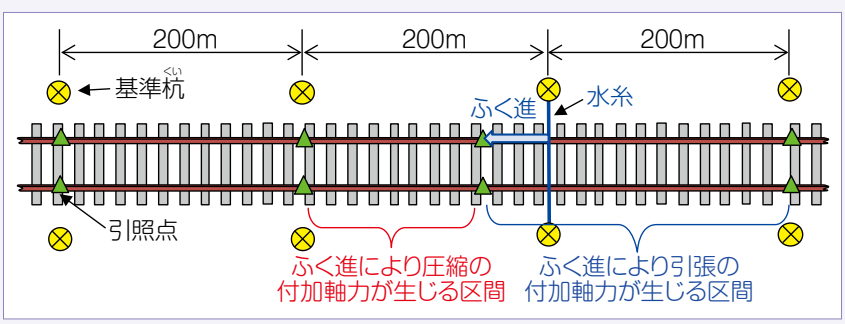

図２　軸力管理のためのふく進量測定

図3　ダイヤルゲージによる軸力測定[1)]
出典：伊地知堅一，ロングレール作業，鉄道現業社，1963

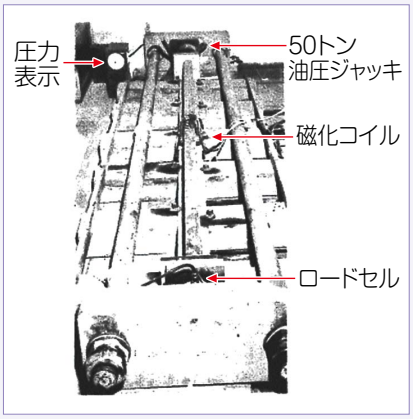

図4　和田による軸力測定の室内試験[2)]

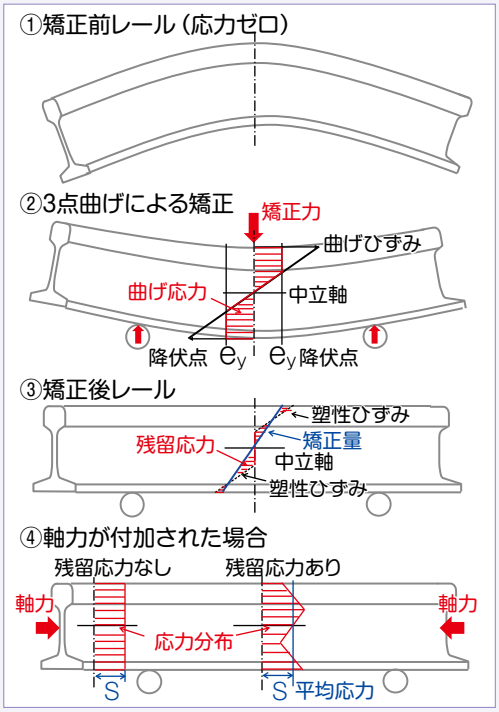

図5　冷間矯正による残留応力の発生（3点曲げによる例）

しかし，実際には保守作業や列車の制動，線路の勾配など，さまざまな要因によりレールふく進が生じます。そのため，**図2**のように，おおむね200m間隔に基準杭と引照点を設け，水糸とスケールによりふく進量を測定し，ふく進量に応じた軸力P_1を求めます。また，低温時に連続して締結装置を緩める作業を行った場合，作業時の温度に応じて付加的な軸力P_2が発生します。式(1)から高温時に想定される最大の軸力P_{max}を算出し，これにふく進量と低温時作業による付加軸力P_1，P_2を加えた値が，最低座屈強さP_t（これより低い軸力では座屈を発生しない軸力）を下回っているかを照査し，下回っていない場合は，バラスト道床の整備や必要に応じて設定替え（☞参照）を行います。

この方法では，実際の軸力を確認することや，局所的な軸力の変動をとらえることが難しいため，座屈に対する保安度を確保するため，バラスト道床や締結装置を健全な状態に保つことはもちろんのこと，夏場にバラスト道床を弛緩したり，締結装置を緩める作業に関して，いくつかの規制を設けています。

レール軸力測定法の研究の始まり

1963年刊行の文献1)に，ロングレール軸力測定法がいくつか紹介されていますが，いずれもひずみゲージやダイヤルゲージ（**図3**）などでレールの伸び量を簡易に測定するというものでした。軸力測定の本格的な研究は，1970年頃に欧米や日本で始まりました。これは，ロングレールの実用化が始まって20年あまりが経過し，ロングレール軌道の敷設延長の増加とともに軸力による問題が顕在化し始めたことで，軸力管理の精度向上が求められたためと思われます。

日本では1965年頃から和田により軸力測定法の研究が進められ，1970年頃に軸力測定の室内試験（**図4**）が実施されました[2)]。和田の方法は，金属材料の応力測定に利用されていた，超音波や磁気ひずみによる応力測定法をレールに適用するというものでしたが，これら応力測定法を適用するうえで問題となったのが残留応力でした。レールの残留応力は，レールを生産する際に，レールの曲がりを真っすぐに矯正する，「冷間矯正」という工程で主に発生します。**図5**のように，曲がりのあるレール（**図5①**）を3点曲げで矯正する際（実際には7個のローラーにレールを通し，2方向の曲げを同時に矯正する），上縁と下縁付近ではひずみが降伏点を超え，塑性ひずみが生じます（**図5②**）。この塑性ひずみにより，レールが真っすぐに矯正されるのですが，その塑性ひずみ（変形）が生じた部位と生じていない中立軸付近との間に引張と圧縮の反対の弾性ひずみ（変形）が生じます。この引張と圧縮の応力が残留応力（**図5③**）と呼ばれるものです。この状態でレールに軸力が加わった場合，軸応力は同一断面内でばらつきが生じ，また，レール長手方向でも断面の応力分布が場所ごとに異なります（**図5④**）。残留応力の場所ごとのばら

☞ 設定温度と設定替え

ロングレール区間では高温時の軌道座屈に対する安全性を確保するとともに，低温時のレール破断時開口量を限度値内に抑え，さらには伸縮継目部の伸縮ストロークを一定値に収めるため，軸力がゼロとなる温度を調節してレールを敷設しています。この軸力がゼロとなるレール温度を「設定温度」といいます。また，設定温度が適切でない（付加軸力の発生などにより軸力が限度値内に収まらない）場合に，レール締結装置を緩解後，レール位置を調整し，適正設定温度の下にレールを再締結する作業を「設定替え」といいます。

つきは100MPa程度との報告もあり[3]，レールのある1点での応力測定をもとに軸力を算出した場合，60kgレール（断面積7,750mm^2）では最大79トン（≒100MPa×7,750mm^2／9.8m/s^2／1,000）の測定誤差が生じ得ることになります。和田の方法はいずれもレール表面の狭い領域での測定であったため，和田は，提案した手法は軸力の変化のみ測定可能であると述べています[2]。

1984年に柏谷（かしわや）らにより，磁気異方性センサーによる軸力測定法が検討され，営業線で試験測定が実施されました。さらに，そのおよそ5年後には，**図6**に示す軸力測定器が試作されました[3]。この装置により，軸力の変動を測定することはできたものの，残留応力の影響により，軸力の絶対値を測定することはできませんでした。

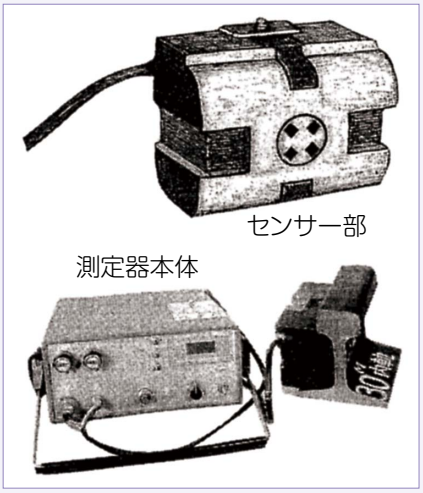

図6　磁気異方性センサーによる軸力測定器[3]

レール軸力測定法の発展

ロングレール軸力測定法は，①ひずみ測定による方法，②磁気特性による方法，③X線による方法，④超音波による方法，⑤レール振動による方法，⑥レール反力による方法に分類されます。②～⑤は1970年頃から検討が始まり，⑥は1987年にKishら[4]により提案されました。ここでは，すでに実用化された技術や，現在も検討が進められている軸力測定法を紹介します。

①ひずみ測定による方法

レール腹部にひずみゲージなどのひずみセンサーを設置し，レールの温度応力を測定します。測定できるのは軸力の変化量のみですが，測定値の信頼性が高いことから，L.B.Foster Salient Systems社のRailStress Monitor（**図7**）やRail Technology社のTrackLoad[5]など，多くの製品が開発されました。測定の基本原理は初期から大きく変わっておらず，温度ドリフトの防止，取り付け方法，データ収録方法，給電装置など，鉄道の現場に特化する形で開発が進められました。

②磁気特性による方法

応力による磁気特性の変化を利用するもので，和田や柏谷（かしわや）らの方法もこれにあたります。この手法は前述の通り，残留応力の影響を強く受けますが，現在ではMAPS（Magnetic Anisotropic Parameter System）[6]という技術を使い，レール全断面の応力を測定することで，残留応力の影響を除外する試みがなされています。また，強磁性体材料が磁化する際に発生する磁気ノイズ（バルクハウンゼンノイズ）を利用した，RAILSCAN[7]やTRACKSAFE RELEASE[7]などの軸力測定器（**図8**）が開発されています。

③X線による方法

X線を用いてレール鋼の結晶のひずみを評価することによって応力状態を測定する手法ですが，X線が透過するのはレール表面の極表層のみで，また点での測定となるため，残留応力の影響による誤差が生じてしまいます。

④超音波による方法

物体内に伝搬する弾性波速度が応力状態によって変化する性質を利用し，軸力を測定する手法が検討されてきましたが，上記のX線による方法と同様に残留応力の影響を除外することは難しく，現状では軸力の変化のみ測定可

図7　RailStress Moniter
出典：L.B. Foster - Salient Systems, Inc.，RailStress Monitor™ Product Sheet

図8　RAILSCAN，TRACKSAFE RELEASEによる軸力測定[7]
提供：Electro Thermit Gmbh & Co.KG, member of Goldschmidt Thermit Group

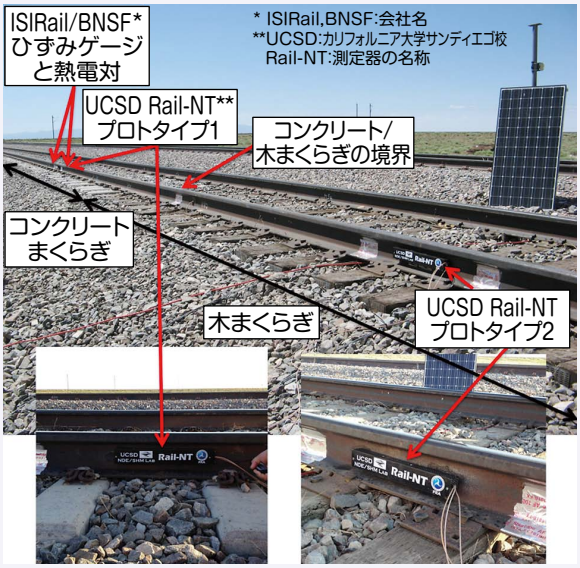

図９　高調波による軸力測定[8)]

出典：Reproduced from Nucera, C. and Lanza di Scalea, F., "Nondestructive measurement of neutral temperature in continuous welded rails by nonlinear ultrasonic guided waves," J. Acoust. Soc. Am. 136(5), 2561-2573, 2014, with the permission of the Acoustical Society of America.

図１０　VERSEによる軸力測定

出典：Vortok International，http://www.vortok.com/

能です。

Nuceraら[8)]は，超音波がレールを伝搬する際に発生する高調波成分が，軸力によって増減する特性を利用し，レールの設定温度を求める手法を提案し，試験線にて±3℃の精度を確認しています（**図9**）。レールの設定温度が分かれば，(1) 式を用いてレール温度から軸力が計算できます。ただしこの手法では，レール温度が設定温度と等しくなる時刻の前後数時間の連続した測定が必要となります。

⑤レール振動による方法

レールの軸力によって振動モード（振幅，固有振動数）が変化する性質を利用する方法で，実験室や実軌道での測定試験が行われています。この手法は軸力の絶対値が測定可能で，大掛かりな作業や測定機器を必要とせず，また比較的短時間で測定可能といった利点があります。ただし，振動モードは軸力だけでなく，軌道のさまざまな条件，特にレールと締結装置の状態によって変化するという課題もあります。

⑥レール反力による方法

1987年にKishらが最初に提案した手法は，レール底部を油圧ジャッキで押し上げた際の反力から，軸力を測定するものでした。これをより現場で使いやすくするため，**図10**のようにレールを吊り上げる形に改良した，VERSE[9)]という測定システムを，1994年にAEA Technology Rail社が開発しました。VERSEは，軸力の絶対値を測定することが可能ですが，測定できるのは引張の軸力に限定されます。さらに，測定時に30mに渡ってレール締結装置を緩解する必要があります。

おわりに

現在，ロングレールの軸力設定，設定替えなどは，理論を基本に現場の不確定なバラツキや保安度を考慮しつつ総合的な判断が行われていますが，まだ多くの課題が残されています。しかしながら，軸力測定の研究が始まって50年あまりが経過した今でも，適用範囲が広く十分に精度の高い軸力測定法を開発するにはいたっていません。今後も軸力測定技術の開発に努めることはもちろんですが，既存の測定技術の長所を活用した，合理的な軸力管理手法の開発も必要であると考えます。

（浦川文寛／鉄道力学研究部
軌道力学研究室）

文　献

1) 伊地知堅一：ロングレール作業，鉄道現業社，pp.216-219，1963
2) 和田覚太郎：レール軸力測定に関する実験，鉄道技術研究所速報，Vol.71，No.10，1971
3) 柏谷賢治，小野利之，坂本博，井上靖雄，杉山亨：磁気異方性センサによるレール軸力測定（中間報告），鉄道技術研究所速報，Vol.A85，No.93，1985
4) Kish,A. and Samavedam,G. : Longitudinal force measurement in continuous welded rail from beam column deflection response，AREA Bullentin 712，pp.280-301，1987
5) Rail Technology Ltd : http://www.railtechnologyltd.com/
6) A. Hayes and G. Eckold : MAPS-SFT-A NEW APPROACH TO THE MANAGEMENT OF STRESS FREE TEMPERATURE IN CWR，RAILWAY ENGINEERING - 2009，2009
7) A. Wegner : Stress-Free temperature monitoring using different measuring technologies-experiences and assessment，Proceedings of 10th International Heavy Haul Association Conference，2013
8) Nucera,C. and Lanza di Scalea,F. : Nondestructive measurement of neutral temperature in continuous welded rails by nonlinear ultrasonic guided waves，The Journal of the Acoustical Society of America，Vol.136，No.5，pp.2561-2573，2014
9) C. Lemmon and R. J Gostling : The non-destructive measurement of stress-free temperature in continuous welded rail，World Congress on Railway Research (WCRR) '99，1999