

1706 水潤滑されたレール上のフランジ乗り上がりに関する模型実験

○学 [機] 沓掛 久志 (新潟大・院) 正 [機] 谷藤 克也 (新潟大) 今井 純一 (新潟大)

An Experimental Study Using Scaled Model on the Effect of Wet Rail on Flange Climbing

Hisashi KUTSUKAKE, Niigata University, 8050, Ikarashi 2-no-cho, Niigata
Katsuya TANIFUJI, Niigata University
Junichi IMAI, Niigata University

The large lateral force, which acts on the wheel when railway vehicle passes a sharp curve, is one of the factors causing wheel flange climbing. In order to reduce the wheel lateral force, it is considered that lubrication of inner rail is effective. However, it seems that there is few report about the effect of the lubrication of inner rail on the wheel flange climbing. In this study, the behavior of the wheel flange climbing is investigated using a 1/5 scaled truck with a single wheelset on a roller rig. The inner rail-wheel is lubricated with water. As a result, under the condition with relatively large lateral external force on the wheelset, the wet rail condition tends to cause wheel flange climbing more easily than the dry rail condition if its attack angle is small.

Key Words : Railway, lubrication, Derailment, Flange Climbing, Scaled Model, Wheelset

1. はじめに

鉄道車両が急曲線を通過する際、車輪軸には大きな横圧が発生する。この大きな横圧は車輪とレールの摩耗や損傷を引き起こすだけでなく、外軌輪重の減少とともに、フランジ乗り上がりの原因ともなりうる。横圧を低減する手法として、内軌車輪・レール間の潤滑が有効とされている¹⁾。しかし、内軌の潤滑がフランジ乗り上がり挙動に及ぼす影響について報告されたものはないように思われる。

本研究では、縮小一軸台車模型を用いて、車輪・レール間の潤滑の有無によるフランジ乗り上がり挙動の実験を行う。潤滑には、容易に実験可能な水を用いることで、内軌側の水潤滑が車両の走行安全性に及ぼす影響を無潤滑の場合と比較して検討する。

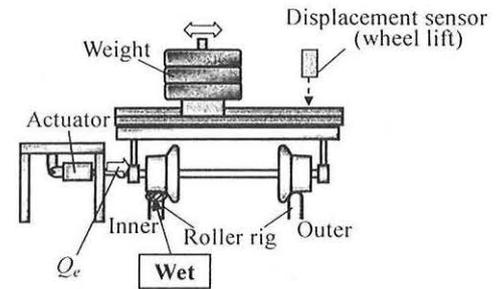
2. 実験の概要

2.1 実験装置²⁾ 標準軌車両の1/5の縮小模型である一軸台車を用いて、軌条輪装置上の走行実験を行う。装置の概略を図1に示す。超過遠心力を想定した左右方向の外力 Q_e は、車輪軸の軸箱位置を油圧アクチュエータで押すことにより与える。輪軸のアタック角 ψ は、リンク機構を利用して任意の値に設定する。左右車輪の輪重比は、台車上の錘を左右方向に移動させることにより変化させる。

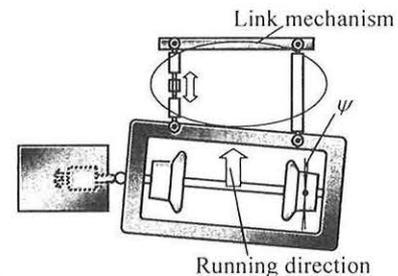
本研究では、 Q_e と ψ の条件により、車輪フランジが軌条輪と接触する側を曲線外軌車輪とし、外軌車輪の輪重比を r_p で定義する。台車重量を左右車輪で等分する場合には、 $r_p=1.0$ となる。実験で測定可能なパラメータは、外軌車輪踏面の軌条輪からの浮き上がり量 h 、内軌および外軌車輪の横圧 Q_i 、 Q_o と輪重 P_i 、 P_o である。 h は光学式変位センサーを用いて、当該車輪直上の台車枠の上下変位を測定することで間接的に求める。横圧と輪重は軌条輪のスポークに貼られたひずみゲージの出力から算出する。なお、軌条輪の周速度は1.24 m/sに設定する。これは相似則を用いて、実車で10 km/hの走行速度に相当する。

2.2 実験方法

2.2.1 潤滑による摩擦特性の違い 内軌側軌条輪の潤滑状態を、無潤滑と水潤滑の2通りに設定し、各潤滑状態における内軌車輪・軌条輪間の摩擦特性を調べる。無潤滑の条件では、車輪軸をしばらく転走させ、車輪・軌条輪間の



(a) Front view



(b) Plan view

Fig.1 Outline of scaled model

摩擦係数が定常となった状態とする。水潤滑の条件では、霧吹きを用いて内軌側軌条輪の頭頂面に水を十分に吹き付けた状態とする。以下では、潤滑状態をそれぞれ Dry, Wet で示す。なお、外軌側軌条輪への潤滑は行わない。

左右方向の外力 $Q_e=0$ N、輪重比 $r_p=1.0$ の荷重が静的な条件の下で、輪軸アタック角 ψ を2.5 mrad から20 mrad まで2.5 mrad 刻みに設定し、測定を行う。

2.2.2 フランジ乗り上がり実験 Dry, Wet におけるフランジ乗り上がりの模擬を行う。輪軸アタック角 ψ は2.5, 5, 10, 15, 20 mrad の5通り、左右方向の外力 Q_e は比較的小さい ψ でも乗り上がりを模擬するために、0, 160, 320, 480 N の4通りに設定する。なお、 $Q_e=320, 480$ N は、ここで生じる最大の横クリープ力と比べると過大な外力である。輪重比 r_p は Q_e を一定に作用させた状態で、測定の開

始とともに台車上の錘を移動させて、1.0 から設定可能なアンバランスの最大値である 0.4 まで徐々に減少させる。模型が脱線した時、あるいは脱線しない場合は $r_p = 0.4$ に達した時、測定を終了する。

3. 実験結果

無潤滑と水潤滑状態における摩擦特性を図 2 に示す。フランジ接触しない内軌側では、横圧輪重比 Q_i/P_i は車輪・軌条輪間の摩擦係数に相当する³⁾⁴⁾。Dry において、 Q_i/P_i は最大で約 0.41 であるのに対し、Wet は最大でも約 0.13 となり、水潤滑による摩擦係数の低減が認められる。

次に、フランジ乗り上がり実験の測定波形を図 3 から図 6 に示す。横軸を測定開始時からの時間 t として、(a)に外軌の車輪踏面浮き上がり量 h 、(b)に外軌の車輪横圧 Q_o をとる。また、それぞれの図(a)の上部には、 t に対応した輪重比 r_p を示している。

図 3 から図 6 の(a)に示されるように、輪重比 r_p が減少す

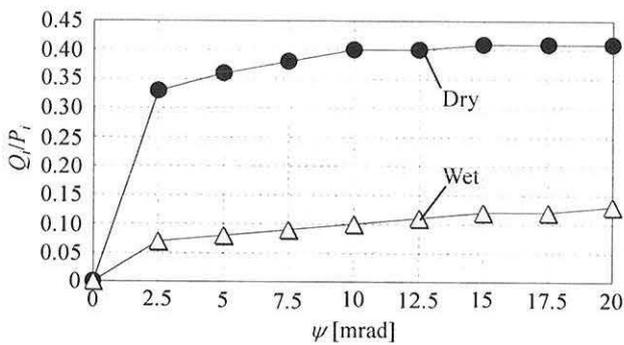


Fig.2 Friction characteristics by lubrication condition

ると、 h は徐々に増加していく。1 mm 付近までの緩やかな増加は、荷重の移動による台車ばねのたわみ量の変化によるものである。フランジ乗り上がりは、 h の傾きが大きくなった時点で生じたと判断する。また脱線は、車輪のフランジ高さに相当する 6 mm に達した時に生じる。

左右方向の外力 $Q_e = 0$ N において、図 3 の Dry では、 $r_p = 0.6$ 以下となったときフランジ乗り上がりが生じ、波形は上下に振動的となる。波形が振動的となるのは、フランジ接触点において、乗り上がりと滑り下がりを交互に繰り返しながら乗り上がりが進んでいくためと考えられる。輪軸アタック角 ψ が大きいほど乗り上がりは生じやすく、また乗り上がり発生後の振動も大きくなる。

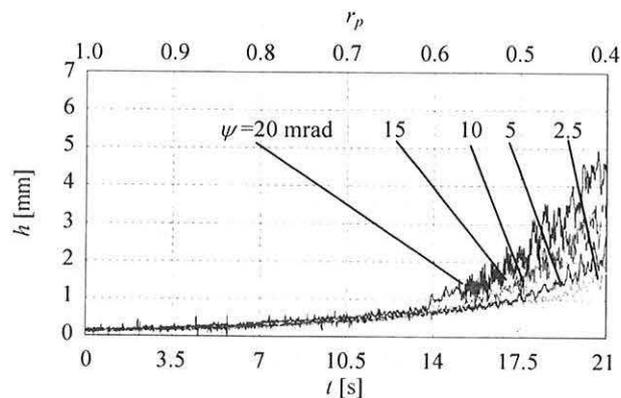
一方、図 4 の Wet では、いずれの ψ においても乗り上がりは生じていない。

$Q_e = 320$ N を作用させた場合、図 5 の Dry では、 $\psi = 5$ mrad 以上で乗り上がりが生じ、10 mrad 以上では脱線まで至っている。乗り上がりが生じてから脱線に至るまでの時間は、10 mrad では約 8 秒、20 mrad では約 6 秒となる。これより、 ψ が大きいほど乗り上がりが生じてから脱線に至るまでの時間が短くなるといえる。

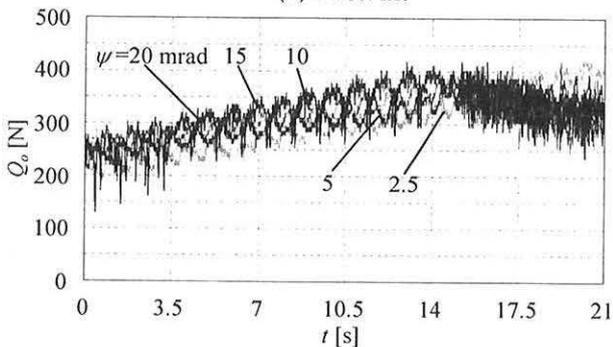
一方、図 6 の Wet では、 ψ による乗り上がり発生時の r_p の差はほとんどなく、全ての ψ で脱線に至っている。また、Dry と比較して、Wet では乗り上がりが生じてから急速に脱線に至っている。

図 3 から図 6 の(b)に示されるように、 $Q_e = 0$ N において、図 3 の Dry では、 r_p の減少や ψ の増加に伴い Q_o は増加する。また、 h が増加すると波形は振動的となる。

一方、図 4 の Wet では、Dry に比べ Q_o が大幅に低下し、 r_p や ψ による変化も小さくなる。これは、 Q_o が内軌車輪踏面に作用する横クリープ力に依存するためである。また、 h が増加しても波形に変化はほとんど見られない。

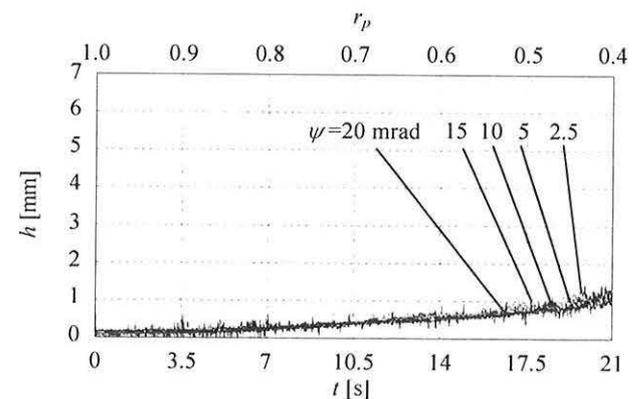


(a) Wheel lift

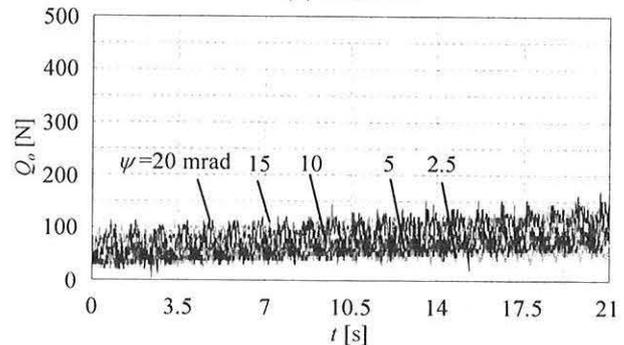


(b) Outer lateral force

Fig.3 Experimental results ; $Q_e = 0$ N, Dry

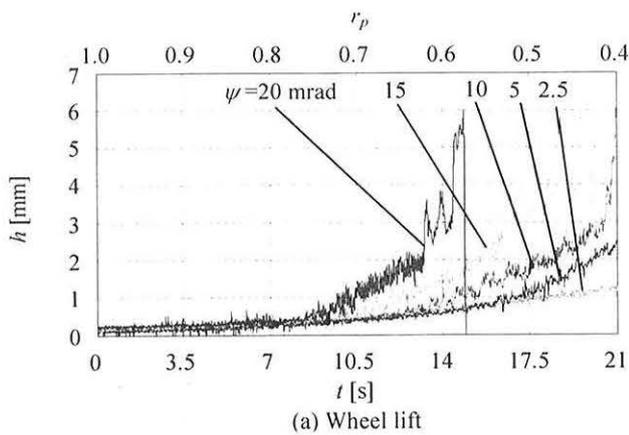


(a) Wheel lift

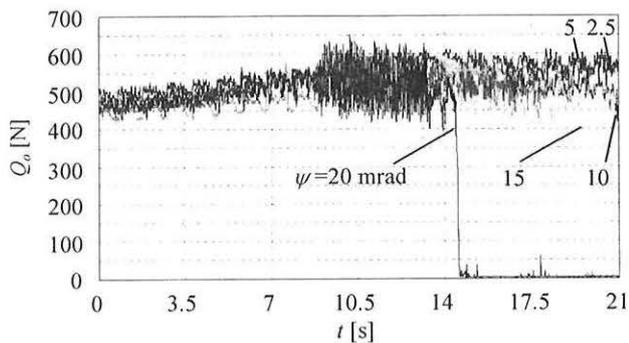


(b) Outer lateral force

Fig.4 Experimental results ; $Q_e = 0$ N, Wet

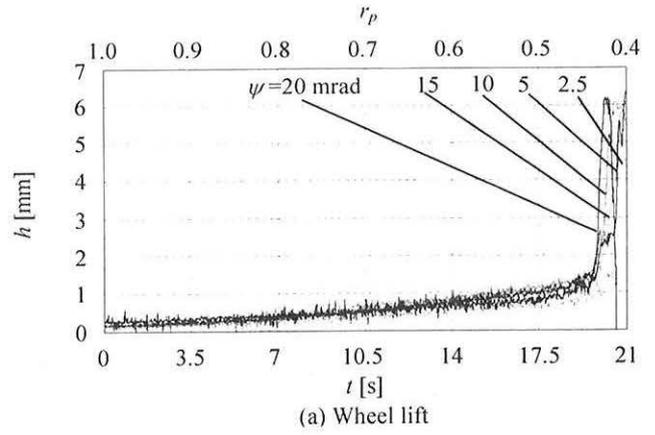


(a) Wheel lift

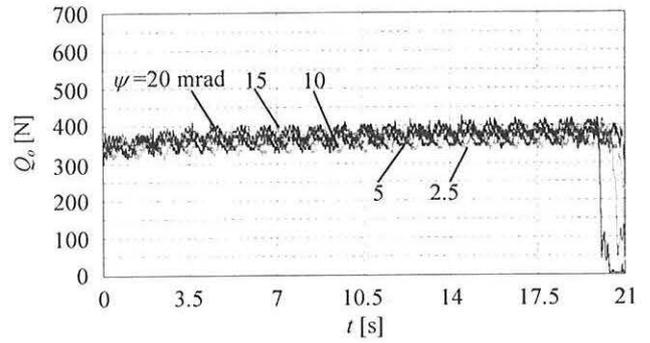


(b) Outer lateral force

Fig.5 Experimental results ; $Q_e=320$ N, Dry



(a) Wheel lift



(b) Outer lateral force

Fig.6 Experimental results ; $Q_e=320$ N, Wet

図5, 図6の $Q_e=320$ Nでは, 図3, 図4の $Q_e=0$ Nの時よりも Q_o は大きくなる. これは, Q_e に対する軌条輪の反力が外軌車輪フランジ部に作用するためである. また, $Q_e=320$ Nも $Q_e=0$ Nの時と同様に, Dryでは h が増加すると波形は振動的となるが, Wetでは h が増加しても波形に変化はほとんど見られない.

4. フランジ乗り上がりの比較

4.1 輪重比 実験結果より, フランジ乗り上がりが生じる時の輪重比 r_p について比較を行う. 図7の(a)は $Q_e=0$ N, (b)は $Q_e=320$ Nの結果である. r_p が大きいほど乗り上がりが生じやすいことを示しており, 乗り上がりが生じていない場合はプロットしていない.

$Q_e=0$ Nにおいて, Dryでは輪軸アタック角 ψ の増加とともに, 乗り上がりが生じる時の r_p が大きくなる傾向にある.

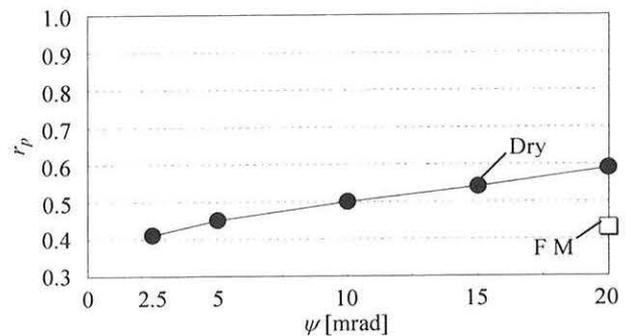
一方, Wetではいずれの ψ でも乗り上がりは生じない.

$Q_e=320$ Nを作用させた場合, Dryでは $Q_e=0$ Nの時に比べて乗り上がりが生じる時の r_p が大きくなり, また, ψ の増加に対しても大きくなる傾向を示す.

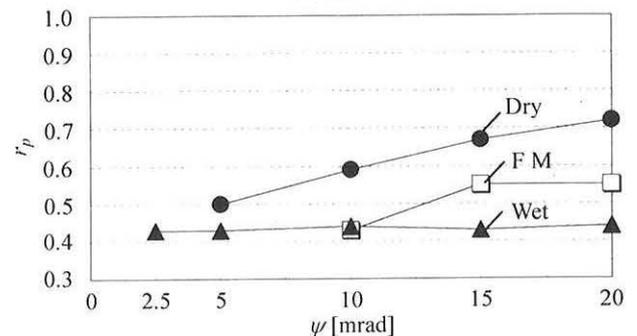
一方, Wetでは ψ によらず, r_p が約0.43で乗り上がりが生じる.

4.2 脱線係数 脱線に対する走行安全性の評価の指標として, 脱線係数が用いられており, フランジ乗り上がりが生じる際の脱線係数は, 限界脱線係数 $(Q/P)_{crit}$ と呼ばれる. 輪軸アタック角 ψ ごとにプロットした $(Q/P)_{crit}$ を図8に示す.

$Q_e=0, 320$ Nの結果より, Dryでは ψ が増加するとともに, $(Q/P)_{crit}$ は減少する傾向となる. 一方, Wetでは ψ の増加に対して $(Q/P)_{crit}$ の変化が小さい. DryとWetで比較を行うと, $Q_e=320$ Nにおいて, $\psi=10$ mrad以下ではWetの $(Q/P)_{crit}$ の



(a) $Q_e=0$ N

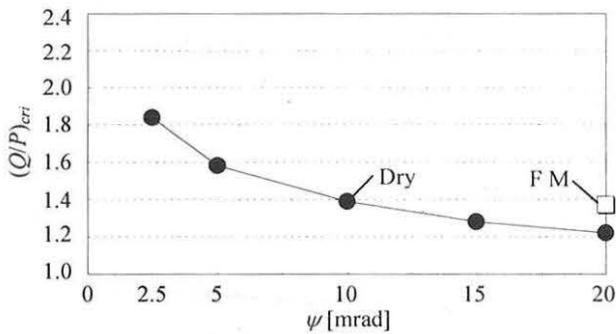


(b) $Q_e=320$ N

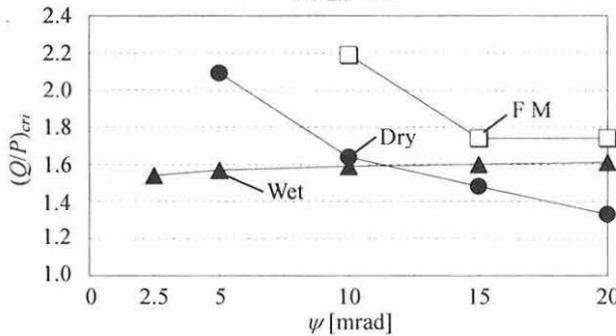
Fig.7 Wheel load unbalance ratio on flange climbing

方が低くなり, 輪軸アタック角 ψ が小さい場合において, Wetの方がより乗り上がりを生じやすいといえる.

4.3 摩擦調整剤 曲線通過時における内軌車輪・レール



(a) $Q_e=0$ N



(b) $Q_e=320$ N

Fig.8 Critical derailment coefficient

間の潤滑には、摩擦調整剤が用いられている例がある。そこで、内軌の潤滑に摩擦調整剤（HPF）を使用した場合の実験も合わせて行い、無潤滑、水潤滑の場合と比較する。以下では、摩擦調整剤を内軌側軌条輪に塗布した場合をFMで示す。

図2で示した摩擦特性にFMを加えたものを図9に示す。FMの内軌横圧輪重比 Q_i/P_i は、Dry と Wet の間の大きさとなる。また、FM では、Dry、Wet と比較して輪軸アタック角 ψ の増加による Q_i/P_i の変化が継続しており、 $\psi=20$ mrad でも飽和する傾向が見られない。これは摩擦調整剤の特性⁹⁾を表すものである。

図7より、乗り上がりが生じる時の輪重比 r_p について比較を行う。 r_p が大きいほど乗り上がりが生じやすいことを示している。(a)の $Q_e=0$ Nにおいて、FMは $\psi=20$ mradで乗り上がりが生じるが、Dryよりも乗り上がりが生じる時の r_p は小さくなる。(b)の $Q_e=320$ Nにおいて、 $\psi=15$ mrad以上では、Dryが最も大きな r_p で乗り上がり、次いでFM、Wetの順となっている。これは図9で示した Q_i/P_i の大きさに対応しているといえる。 $\psi=10$ mradの場合、FMとWetは、ほぼ同じ $r_p=0.44$ で乗り上がりが生じる。

図8より、限界脱線係数 $(Q/P)_{crit}$ について比較を行うと、FMはDry、Wetよりも $(Q/P)_{crit}$ が高く、乗り上がりが生じにくいといえる。

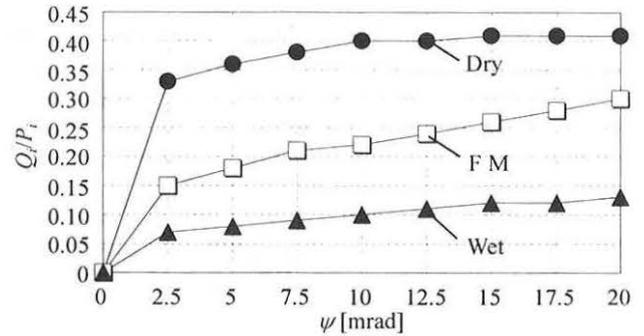


Fig.9 Friction characteristics by lubrication condition

5. まとめ

本報では、一軸台車模型を用いて内軌の無潤滑と水潤滑および摩擦調整剤塗布状態でのフランジ乗り上がり実験を行った。得られた実験結果より、潤滑状態の違いによる輪軸挙動の変化やフランジ乗り上がりの生じやすさについて比較検討を行い、以下のことが示された。

- (1) 外力を与えない条件では、水潤滑することでアタック角による乗り上がりは生じにくくなる。
- (2) 比較的大きな外力を与えた条件では、アタック角が小さい場合、水潤滑は他の潤滑状態よりも乗り上がりを生じやすい。
- (3) 水潤滑の場合、乗り上がりが生じると急速に脱線に至る可能性がある。
- (4) 摩擦調整剤を使用した場合、無潤滑、水潤滑どちらの場合よりも乗り上がりは生じにくくなる。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、摩擦調整剤を提供して頂いた住友金属テクノロジー株式会社の陸康思氏に深い感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 石田誠・青木・飯田・石田弘明：車輪／レール潤滑による車両と軌道の相互作用への影響，第14回交通・物流部門大会講演論文集，No.05-52，pp.427-430，(2005-12)
- 2) 南雲・谷藤・今井：一軸台車を用いたフランジ乗り上がりの基礎実験，第15回交通・物流部門大会講演論文集，No.06-52，pp.363-366，(2006-12)
- 3) 石田誠・青木・伴・緒方：車輪／レールの摩擦緩和手法，第12回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2005)講演論文集，pp.345-346
- 4) 土井久代：車輪とレール間のクリープ力，RRR，Vol65，No.8，pp.6-9，(2008.8)
- 5) 岩本・松本・須田・小峰・道辻・中居・谷本・岸本：車輪／レール間摩擦制御時の曲線通過シミュレーション，第15回交通・物流部門大会講演論文集，No.06-52，pp.389-392，(2006-12)