

1602 回転軌条輪上での大変位加振時の脱線メカニズム (軌条輪上での 1/10 模型加振実験)

正 [機] ○西村 和彦 (東海旅客鉄道)
正 [機] 森村 勉 (東海旅客鉄道)

正 [機] 曄道 佳明 (上智大学)
正 [機] 深田 淳司 (東海旅客鉄道)

Study on the Derailment Mechanism of Vehicle on Roller Rigs due to Large Track Excitations (1/10 Scale Experiment)

Kazuhiko NISHIMURA, Central Japan Railway Company, 1545-33 Oyama Komaki

Yoshiaki TERUMICHI, Sophia University

Tsutomu MORIMURA, Central Japan Railway Company

Junji FUKADA, Central Japan Railway Company

The derailment mechanism of vehicle on roller rigs due to large track excitation has been studied through 1/10 scale vehicle/roller rig experiment. The following results were obtained. (1) Rocking derailment is the major cause of derailment due to large track excitations regardless of vehicle speed. (2) 3mm wheel lift amplitudes are similar regardless of vehicle speed, which indicates that the effect of vehicle speed is small on wheel lift motion. (3) The derailment amplitudes generally decrease as vehicle speed increases, particularly in the cases excited by lower frequency inputs.

Key Words : Railway, Earthquake, Derailment, Vehicle Dynamics, Experiment

1. はじめに

平成 16 年 10 月 23 日に発生した新潟県中越地震により、上越新幹線の浦佐～長岡間を走行中のとき 325 号が、ロッキング脱線により脱線するという事象が発生した。この事故を受け、平成 16 年 10 月 25 日に国土交通省鉄道局が設置した「新幹線脱線対策協議会」に東海旅客鉄道株式会社も参画し、施設面、車両面で当面とり得る対策の可能性等について検討を進めてきた。具体的には、実験、解析及び試験敷設を実施し、その結果に基づき、地震時の脱線・逸脱防止に有効であり、保守上においても支障のない対策を確立した¹⁾。

対策を検討するなかで、地震時の脱線メカニズムや脱線防止ガード機能を検証するために、実証実験^{2),3),4)}や理論解析⁵⁾を実施した。これらのうち、本報告では、鉄道車両が高速走行中に大きな加振を受けた場合の基本的な車両の運動メカニズムに関して知見を得るために行った模型実験結果について述べる。

2. 実験の概要

2.1 実験装置

鉄道車両が高速走行中に地震動を受けた場合の脱線メカニズム等を検証するため、軌条輪上を高速で回転走行する模型車両に大きな加振を与える実験を行う。実験装置は図 1 に示すとおり、1/10 スケールの模型車両、軌条輪装置、油圧アクチュエータ、CCD カメラおよび測定センサ等で構成される。1/10 模型車両は、新幹線車両の半車体相当の荷重枠、荷重枠支持ばね、1 台車、軸箱支持部、2 輪軸および荷重枠のピッチングおよびヨーイングを防止する治具で構成する。

基本的な寸法について実物の新幹線電車の 1/10 スケ

ールとなるように設定し、物理的諸特性について、できるだけ実物の新幹線車両と 1/10 スケールで物理的に相似な関係となるように設定する。軌条輪装置は軌条輪、模型車両の前後方向の運動を拘束する固定装置およびモータで構成される。実物換算で走行速度 327km/h まで実験可能とする。軌条輪の軌間は新幹線の 1/10 スケールの 143.5mm とする。油圧アクチュエータは軌条輪装置の側板中央部に取り付き、模型車両・軌条輪装置の全体を水平方向に加振する。加振能力は周波数 1.6Hz で変位振幅 $\pm 50\text{mm}$ (加速度振幅 $\pm 515\text{gal}$)、8.0Hz で変位振幅 $\pm 10\text{mm}$ (加速度振幅 $\pm 2,576\text{gal}$) とする。

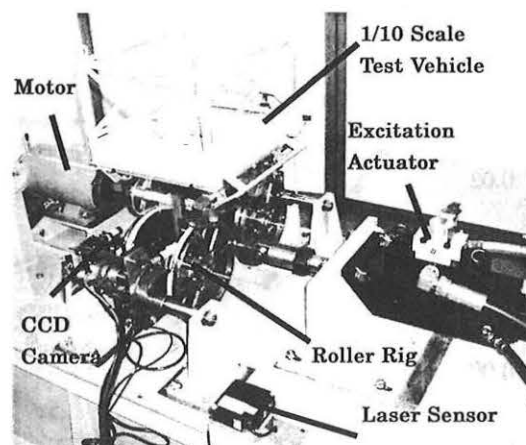


Fig.1 Overview of the experimental setup

2.2 入力条件と脱線の基準

加振入力は水平方向の正弦波状で、変位振幅として軌

条輪部分に与える。入力波の周波数は 1.6Hz（実物換算で 0.5Hz）から 5.7Hz（実物換算で 1.8Hz）まで約 0.3Hz（実物換算で 0.1Hz）刻みで変化させる。形状は、図 2 に示す正弦波状で、最初の 0.5 周期に緩和部分を設け、3 周期の定常部分を有し、最後の 1.5 周期にも緩和部分を設ける。加速度振幅で 1,000gal あるいは変位振幅で 20mm を超える大きな加振を行う。

脱線の判定は、車輪がレールに対してフランジ高さ相当の 3mm 以上上昇し、かつレールに対して左右方向に中立位置から 2mm 以上移動する状態と定義する。この状態では、車輪フランジは肩部を超えたフラットな頭頂面でレールと接触するか浮上している。

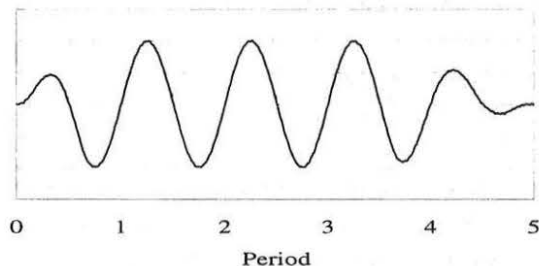


Fig.2 Shape of input excitation

3. 実験結果と分析

3.1 ロッキング運動

ロッキング運動の過程では、車体が大きくローリングして車輪がレールから浮上する。車輪の上昇量をロッキング運動の大きさを表す指標として、車輪がフランジ高さ相当上昇する限界振幅を図 3 に示す。走行速度はそれぞれ 0km/h、16km/h、47km/h および 95km/h とする。限界振幅は加振周波数に対して特徴ある傾向を示す。すなわち、周波数の増加に対して限界振幅が減少する傾向のなかで、極小値を周波数 2.8Hz にもつ。これは車体のロール運動特性が車輪の上昇運動に大きく影響していることを示唆している。

一方、走行速度の影響という点では、速度によらず限界振幅はほぼ等しい。車輪のレールに対する左右運動は速度の影響を強く受けるのに対して、車輪の上昇運動については、車体のロール運動による影響が大きい一方、走行速度の影響はあまり受けないといえる。

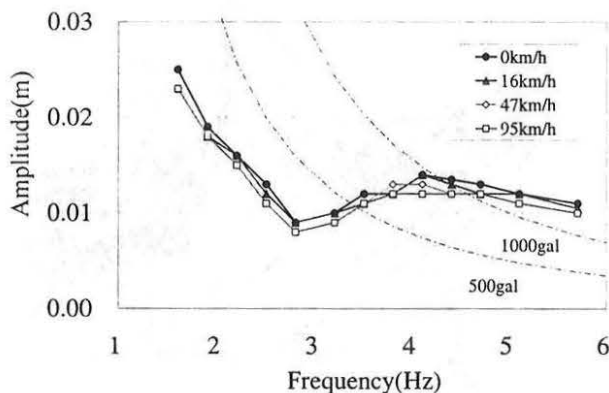


Fig.3 Excitation amplitudes for wheel lift of flange height

3.2 脱線形態

走行速度によらず、脱線は車両のロッキング運動による車輪の上昇および輪軸の左右移動により引き起こされ

る。脱線形態はロッキング脱線と呼ばれる形態である。脱線のプロセスをより詳細にみるため、速度 32km/h（実物換算 100km/h）、二つの異なる加振条件で加振する場合を例に、加振変位、車輪の上下および左右変位の時刻歴波形を図 4、5 に示す。

図 4 に示すプロセスでは、0.6s で車輪 1 が 6mm 程度上昇し、その後フランジでレール頭頂面に落下し、軌道外側へ移動して脱線に至る。図 5 に示すプロセスでは、車輪の上昇がそれほど大きくなく 0.4s で車輪 2 が落下しながらレールに横衝突し、レール上を滑り上がりながら移動し 0.45s 付近で脱線する。いずれの場合も上昇側の車輪がその落下の過程で脱線するロッキング脱線と呼ばれる形態である。また、図 4 および図 5 において、上昇した車輪が脱線する時刻の前後で、反対側の車輪はレールに接地していることがわかる。

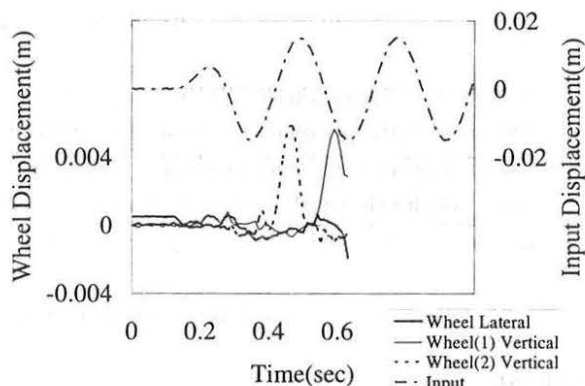


Fig.4 Time history of wheel-set motions
(Frequency 3.5Hz, Displacement 15mm, Speed 32km/h)

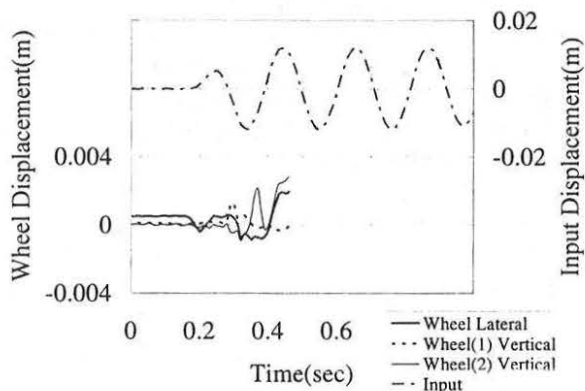


Fig.5 Time history of wheel-set motions
(Frequency 4.7Hz, Displacement 12mm, Speed 32km/h)

次に、加振条件が周波数 2.2Hz、振幅 21mm、速度 47km/h のときの、ロッキング脱線の車両全体および車輪の挙動について、高速度ビデオカメラ（シャッタースピード 125 コマ/秒）により撮影した映像をもとにした 5 枚の写真を図 6 に示す。それぞれの写真は左から車両全体、2 位車輪のクローズアップ、1 位車輪のクローズアップである。写真①は、車輪が上昇する前の両輪接地している状態である。写真②で、2 位車輪の上昇量が徐々に増え、写真③で、2 位車輪が最大量上昇する状態を迎え、写真④で 1 位車輪が左方向に滑り始め、写真⑤で 2 位車輪がフランジでレールに落下し脱線と判定される。

実験を行った範囲の速度および加振条件において、一方の車輪が上昇している状態で他方の接地している車輪がレール上を乗り上がって脱線するいわゆる乗り上がり脱線は発生しなかった。例えば図6の写真③で、2位車輪が大きく上昇している状態で、1位車輪のフランジがレールと強く接触しても、フランジはレールにガイドされ、レールを乗り上がって脱線するようなケースは皆無であった。

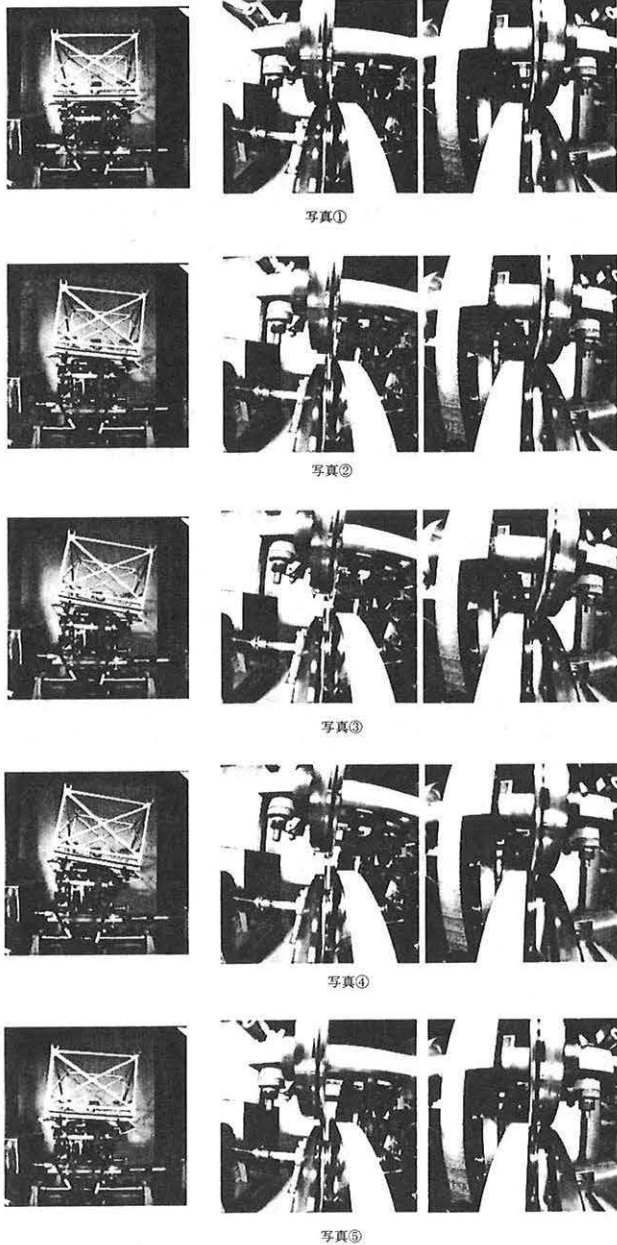


Fig.6 Derailment process captured by high speed camera
(Frequency 2.2Hz, Displacement 21mm, Speed 47km/h)

3.3 脱線限界

脱線限界について、走行速度を0km/h、16km/h、47km/hおよび95km/hとした場合の結果を図7に示す。脱線限界に対する走行速度の影響に関して、一般に限界振幅は速度の増加とともに低下する。速度0km/hの場合、加振加速度500gal未満では脱線しないが、速度が16km/h以上の場合には、一部の周波数域で加振加速度500gal未満でも脱線する。速度47km/hまで増加すると、3.2Hz以下

の低い周波数域で脱線限界が顕著に低下する。ただし速度を95km/hまで増加しても、速度47km/hの場合と比較してそれ以上大きく脱線限界が低下するわけではない。図7でプロットがないのは脱線が生じなかったケースで、速度0km/hでの加振周波数2.2Hz以下、速度16km/hでの加振周波数1.9Hz以下、速度47km/h・95km/hでの加振周波数1.6Hzがそれらにあたる。

走行速度の増加による脱線限界低下の原因は次のとおり、走行する車両の車輪・レール間に作用するクリープ力の特性に起因すると考えられる。すなわち、車両が一定の左右加速度を受け、車輪・レール間にそれに抗するクリープ力が作用する場合、走行速度が高いほど、車輪はレールに対してより大きな速度で滑る。この結果、車両が同じ左右加速度を受けても、走行速度が高いほど、車輪のレールに対する左右移動量が増え、車輪フランジがレールを越えて軌道外側へ脱線しやすくなる。

図8に停止している車両と走行している車両（速度16km/h）とに、同じ加振（2.5Hz ±12mm）を与えた場合の入力変位および車輪・レール間の左右相対変位の時刻歴波形を比較して示す。車両が停止している場合には、車輪は入力変位がほぼ最大値あるいは最小値をとる時刻に軌条輪上を滑り始める。一方、車両が走行している場合には、車輪は入力変位がゼロとなる時刻に軌条輪上を滑り始め、車両が停止している場合のそれよりも早く滑り始めている。このように、車両が走行する場合には停止している場合より、車輪が軌条輪上を滑りやすいことが、実験データから確認できる。

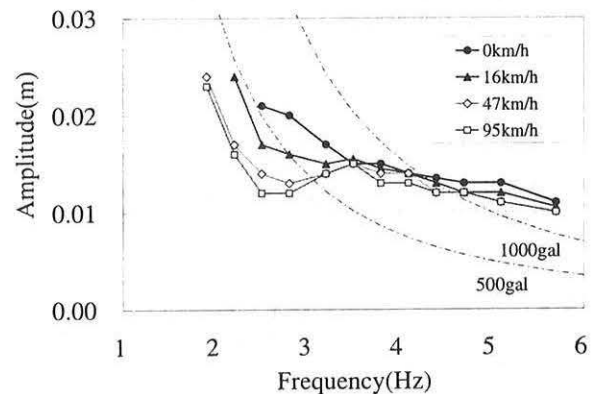


Fig.7 Excitation amplitudes for derailment

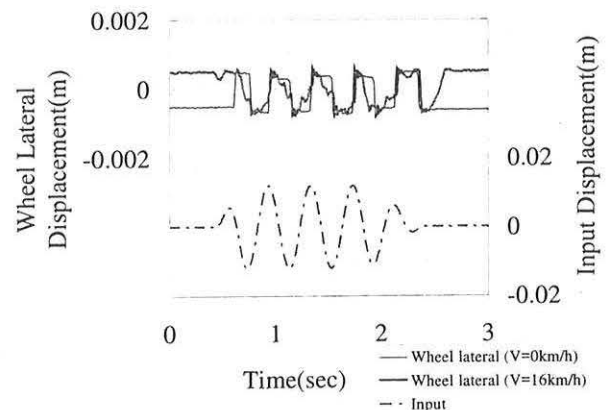


Fig.8 Effect of wheel/rail rolling contact
on wheel slide motion
(Input: 2.5Hz ±12mm, V=0 and 16km/h)

3.4 脱線防止ガードの機能

脱線防止ガードに相当する治具（以下、脱線防止ガードと呼ぶ）が、車輪が高速で回転する条件のもとで脱線しようとする模型車両に対して作用する様子を観察するために、脱線防止ガードをレールに相当する軌条輪から離れ 8mm、高さ 2mm（それぞれ実物換算値で 80mm、20mm）の位置に設置して実験を行った。

走行速度 63km/h、加振周波数 3.8Hz、加振振幅 16mm（それぞれ実物換算で 200km/h、1.2Hz、160mm）で車両を加振した場合の実験結果について(a)入力変位、(b)輪軸・軌条輪の左右相対変位および(c)車輪上昇量(1, 2 位)、また時刻 1.34s および 1.37s から 1.43s における輪軸と軌条輪、脱線防止ガードとの位置関係のイメージを図 9 に示す。なお、この加振条件における入力変位波形は実物台車実験において想定東海地震波による加振を行った場合に、脱線防止ガードが作用する²⁾時刻の入力変位波形に近い。すなわち、想定東海地震波の変位波形と周波数 1.2Hz 振幅 160mm の正弦波の変位波形とを重ね合わせると、図 10 に示すとおり、脱線防止ガードが作用する時刻 14s 付近で、両方の波形が比較的良く一致する。

図 9 より、脱線防止ガードが合計 4 回車輪に作用して脱線を防止することがわかる。すなわち、1.35s から 1.43s、1.51s から 1.57s、1.63s から 1.69s、1.77s から 1.82s にかけて、輪軸と軌条輪との左右相対変位は、脱線防止ガードと車輪内面との距離 4.25mm 程度となっている。さらに、輪軸は脱線防止ガードに接触したところで、それ以上の横移動を抑制され、その後反対方向に移動することで、加振が終了したところで車両は車輪踏面の正常な位置でレール上を走行する状態に戻っている。

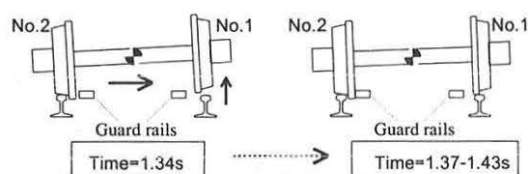
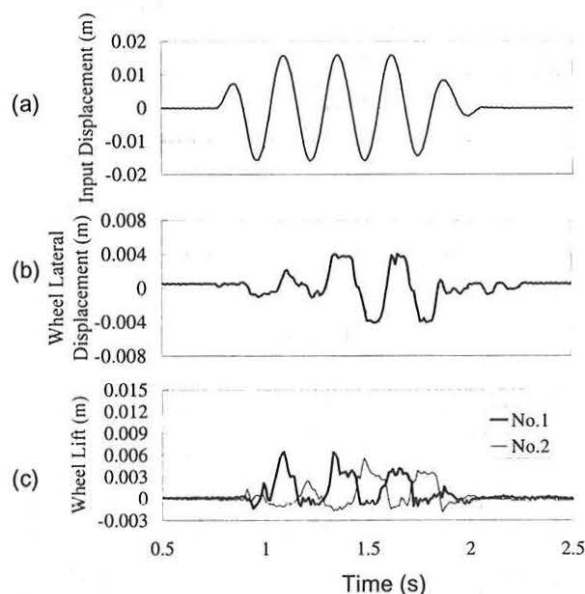


Fig.9 Time history of wheel set motions

最も車輪が高く上昇するケースについてさらに詳細に実験結果をみると、図 9 のイメージ図（左）に示すと

おり、1.34s で 1 位車輪は最大約 6mm 上昇して、直後に脱線防止ガードに接触する。1.37s に車輪フランジは軌条輪上に着地する。その後、1.43s まで輪軸と軌条輪、脱線防止ガードの位置関係は図 9 イメージ図（右）に示す状態で、脱線防止ガードが継続して作用している。1.43s に輪軸は 2 位方向へ左右移動を始めるため、1.47s に 1 位車輪フランジは軌条輪から落下して脱線が回避される。このような運動をそののち左右交互に 3 回繰り返しており、いずれの場合にも、輪軸は脱線防止ガードに接触したところで、それ以上の横移動を抑制され、その後反対方向に移動し脱線が防止される。

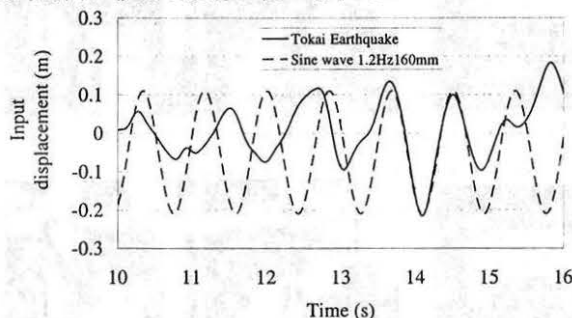


Fig.10 Comparison between the input shape of Tokai Earthquake and sine wave of 1.2Hz 160mm

4. 結論

鉄道車両が高速走行中に地震動を受けた場合の車両挙動に関して、実験により検証することを目的とし、軌条輪上に輪軸が高速で回転する模型車両に大きな加振を与える実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 走行速度によらず、脱線は車両のロッキング運動による車輪の上昇および輪軸の左右移動により引き起こされる。脱線形態はロッキング脱線と呼ばれる形態である。
- (2) 車輪がフランジ高さ相当上昇する限界振幅は走行速度によらずほぼ一定であり、ロッキング運動による車輪の上昇に対して、走行速度の影響は小さい。
- (3) 一方、走行速度の増加に伴い、車輪がレールに対して滑りやすくなるため、輪軸の左右移動量が増加する。このため、脱線の限界振幅は、特に低周波数の加振で、速度の増加とともに低下し、高速域では下げ止まる傾向がみられる。実験データにより、これらを確認した。
- (4) 脱線防止ガードに相当する治具が、車輪が高速で回転する条件のもとで脱線しようとする模型車両の輪軸の左右移動を拘束して、脱線を防止する基本的な機能をもつことを確認した。

参考文献

- 1) 森村勉、関雅樹、新潟県中越地震後の東海道新幹線の地震対策について、J-Rail2009
- 2) 三輪昌弘、坂上啓、足立昌仁、村松造成、実台車を用いた脱線防止ガードの効果確認試験、J-Rail2009
- 3) 足立昌仁、森村勉、石川栄、深田淳司、曄道佳明、地震時の脱線メカニズムと脱線防止ガード機能に関する研究（1/5 模型加振試験）、J-RAIL 2009
- 4) 西村和彦、曄道佳明、森村勉、深田淳司、“振動軌条輪における模型鉄道車両の走行安全性に関する実験的研究”、日本機械学会論文集 C 編、Vol.C-75-749,pp58-65, 2009-1
- 5) 西村和彦、曄道佳明、森村勉、曾我部潔、“振動軌道上における高速鉄道車両の走行安全性に関する解析的研究”、日本機械学会論文集 Vol.C-74-744,pp2023-2030, 2008-8