

# ヨーダンパを装備した鉄道車両の地震時走行安全性向上

飯田 浩平\* 葛田 理仁\* 西山 幸夫\*\* 金元 啓幸\* 中嶋 大智\*

## Improvement of Running Safety of Railway Vehicles with Yaw Damper during Earthquakes

Kohei IIDA Masahito KUZUTA Yukio NISHIYAMA

Hiroyuki KANEMOTO Daichi NAKAJIMA

In recent years, railroad corporations have become increasingly concerned about running safety for conventional lines during earthquakes, especially in metropolitan areas. Therefore, for trains equipped with yaw dampers, the authors propose that of the yaw dampers are placed symmetrically front-to-back in bogie as a countermeasure against an earthquake. This paper also numerically clarifies that the proposed layout of yaw dampers improves running safety against sinusoidal oscillation. An actual bogie oscillation test was performed to validate the numerical results. From probabilistic perspective, it is shown that the proposed layout of yaw dampers and the conventional guard usually placed on sharp curves have almost same effects on improving running safety against seismic vibration of track.

キーワード：地震，走行安全性，ヨーダンパ配置，車両運動シミュレーション，実台車加振実験

## 1. はじめに

2004年に発生した新潟県中越地震において営業走行中の新幹線が脱線<sup>1)</sup>して以降，新幹線を中心に地震時の脱線・逸脱防止対策について研究開発が行われている。例えば，地震時に新幹線が脱線することを極力防止することを目的とした脱線防止ガード<sup>2)~6)</sup>がある。また，万が一脱線が生じた際に，車両が軌道から大きく逸脱することを防ぐ機構については，軌道の軌間内に設置する逸脱防止ガード<sup>7)8)</sup>，軸箱下に取り付ける車両逸脱防止L型ガイド<sup>9)10)</sup>，および台車下部に設置する逸脱防止ストッパ<sup>11)12)</sup>がある。さらに，地震時に振動する軌道上を走行する車両の挙動を解析するシミュレーションプログラム（VDS：Vehicle Dynamics Simulator，以後VDSと記す<sup>13)</sup>）を用いて，車両の諸元変更によって地震時に脱線しにくくするための解析的研究<sup>14)</sup>やそれに基づいた試作機の開発<sup>15)16)</sup>も行われている。VDSの妥当性については大型振動試験装置を用いた実台車加振実験により検証を行っている<sup>17)</sup>。

一方，在来線についても近年，著大地震時の走行安全性への関心が高まっているとともに，一部の鉄道事業者においては首都直下地震を念頭においた地震対策として，万が一脱線が生じた際に被害が大きくなると想定される箇所への脱線防止ガード敷設が行われている<sup>18)</sup>。在来線用脱線防止ガードの地震時における効果に関して

は，大型振動試験装置を用いた在来線用脱線防止ガード付軌道（軌間1,067mm）上の実台車加振実験により，地震時を想定した車輪・脱線防止ガード間の接触挙動や接触特性の把握が行われている<sup>19)20)</sup>。一方，在来線の車両側の地震時走行安全性向上策については研究例がない。

そこで，筆者らは在来線車両の中でも比較的高速で走行する，ヨーダンパを装備した在来線車両を対象として，地震時走行安全性向上策について検討し，その効果を前述の在来線用脱線防止ガード設置の効果とあわせて評価した。以後，特に断りなく「車両」と記した場合は在来線車両を意味する。

本論文では，地震時走行安全性向上策として，在来線用脱線防止ガードの効果も示すことから在来線車両を対象とするが，本論文で提案する車両側の地震時走行安全性向上策は原理としては新幹線車両にも適用することができると思われる。

## 2. 地震時走行安全性に関する解析的検討

### 2.1 解析モデル

ヨーダンパはボルスタレス台車を装備した車両に用いられ，シミュレーションモデルは図1のようになる。図のように，1車両あたり車体1個，台車枠2個，輪軸4個の剛体要素で表現し，それぞれの剛体要素が6自由度を有している。また，8つの車輪を支えるレールがそれぞれ独立に上下・左右の2自由度を有しており，1車両あたり合計58自由度のモデルとなっている。各質量要素間はばね・減衰系で結合されるとともに，車輪を支える

\* 鉄道力学研究部 車両力学研究室

\*\* 研究開発推進部 設計・試作

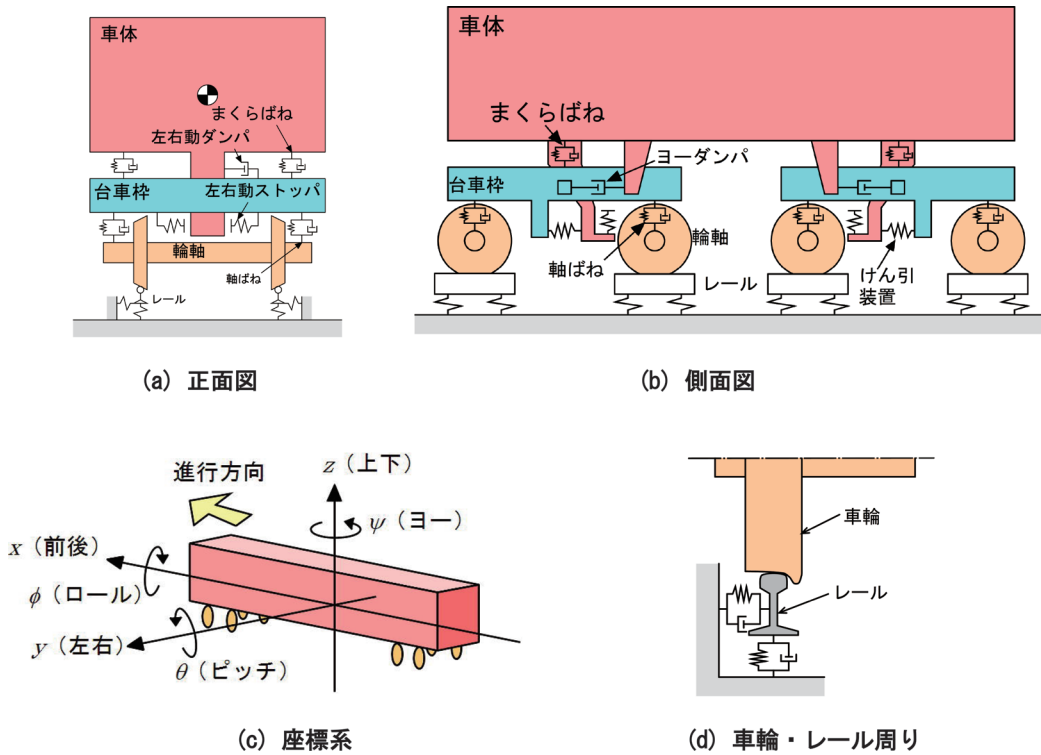
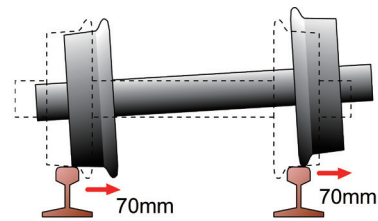


図1 ヨーダンパを装備した在来線車両の解析モデル

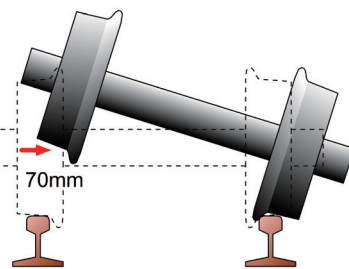
レールは路盤に弾性支持され、車輪・レール間のクリープ力は Kalker 理論に基づいたモデルにより計算している。

## 2.2 地震時における走行安全性判定基準

一般に鉄道車両の走行安全性の判定基準としては、脱線係数、輪重減少率、輪重、横圧などの車輪・レール間作用力をもとにした指標値が用いられている<sup>21)</sup>。しかし、地震時に車両が脱線・転覆に至るような限界に近い状態では、車輪がレールから離れて、再びレール上に戻る場合もあるため、車輪・レール間作用力を用いた従来の指標で走行安全限界を評価することは適当でない。そこで、地震時車両挙動解析においては、車輪・レール相対左右変位（車輪踏面中心とレール頭頂面中心との左右方向の距離）により脱線の有無を判定することとし、この変位が静止時の車輪の中正位置から $\pm 70\text{mm}$ に達したときに脱線と判定し<sup>14)</sup>、解析を打ち切っている。相対左右変位 $\pm 70\text{mm}$ のときの輪軸とレールの位置関係の概略を図2に示す。図2(a)は車輪フランジがレール頭頂面上に乗っており、車輪がレールから落下する直前の状態で、乗り上がり脱線の際にも見られる位置関係である。一方、図2(b)は片側の車輪を支点として、反対側の車輪が弧を描くように上昇している状態で、横風による車両転覆の際にも見られる位置関係である。ここでは図2(a)および図2(b)に示した状態のどちらも「脱線」と整理し、特に両者は区別しない。以後、特に断りなく「脱線」と記した場合は、上記の脱線判定条件に達した



(a) 車輪フランジがレール頭頂面上に乗る場合



(b) 輪軸ロール角が大きくなる場合

図2 脱線判定時の輪軸姿勢の概略

状態を表す。

## 2.3 ヨーダンパを装備した車両の地震時走行安全性

VDSを用いて解析したヨーダンパを装備した車両の正弦波加振に対する安全限界線図を図3に示す。正弦波加振に対する安全限界線図とは、横軸に軌道の加振周波数を、縦軸に左右方向の加振振幅をとり、各加振周波数

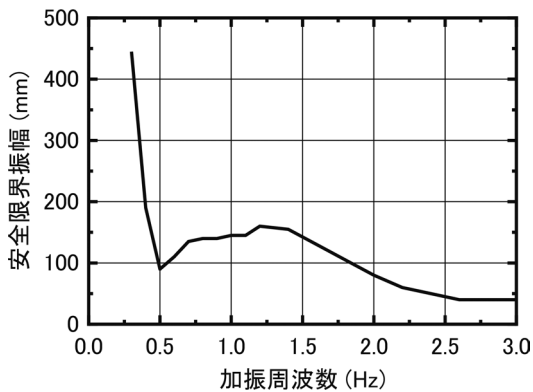


図3 正弦波加振に対する安全限界線図

毎に加振振幅を大きくしながら、直線区間を走行中に正弦波5波を受ける車両運動シミュレーションを繰り返し実行して、図2に示す脱線判定基準「車輪／レール相対左右変位70mm」において脱線と判定を受ける直前の加振振幅（限界振幅）をプロットしたものである。つまり、各加振周波数の振動を受けたときにそれぞれの安全限界線以下であれば脱線しなかったことを示しており、車両の地震時脱線に対する耐性の基礎的な特性を得ることができる<sup>14)</sup>。

図3より、加振周波数0.5Hz付近の限界振幅が付近の周波数帯の限界振幅よりも小さくなっており、この周波数帯の軌道面振動に対しては他の周波数帯の軌道面振動に比べて脱線しやすい傾向であるといえる。紙面の都合上、詳細については割愛するが、脱線しやすくなるメカニズムの概略は以下の通りとなる。

- (1) 比較的低い周波数で加振され、車両が下心ロール振動を起こすと、車体・台車間で大きな相対ロール角が生じるが、車体・台車間のまくらばねはストッパにより縮み量が制限され、図4(a)に示すようにまくらばねは概ね片側ずつ交互に伸縮する挙動を呈する。
- (2) それに伴い、車体・台車間にレール長手方向に左右対称に配置されたヨーダンパも概ね片側ずつ交互に伸縮するため、左右のヨーダンパで発生する前後力に差異が生じ、車体・台車間にヨーモーメントとして作用する(図4(a), (b))。
- (3) 発生したヨーモーメントにより直線区間を走行している台車が旋回し、脱線しやすくなる傾向となる。

## 2.4 ヨーダンパを装備した車両の地震時走行安全性向上策

地震時走行安全性向上策として、1章で述べた脱線防止ガードの設置が考えられる。それに加えて、前節で述べたように、低い加振周波数領域において、ヨーダンパによって台車に作用するヨーモーメントにより、台車が

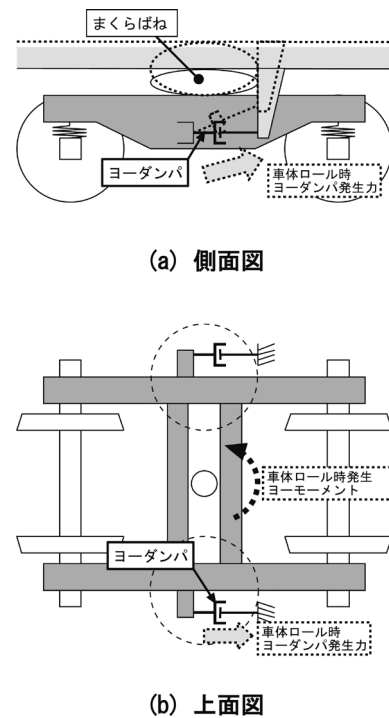


図4 車体ロール振動時の台車・車体間ヨーモーメント発生概略

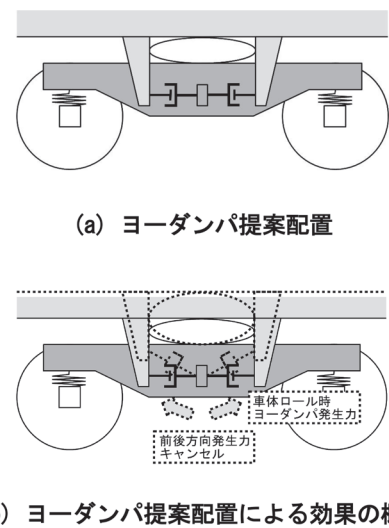


図5 ヨーダンパ提案配置と車体ロール振動時のヨーモーメント低減効果の概略

脱線しやすくなるのであれば、ヨーモーメントの発生を抑制すれば良く、ここではその方法について検討を行った。図5に示すようにヨーダンパを台車内前後対象に配置することで、車体・台車間に相対ロール振動が発生した際の前後力を抑制することができる。台車の左右どちらかのみ前後対象に配置すればロール振動時の前後力を抑制できるが、左右非対称に減衰力が発生するため、本来の目的である、高速走行時の台車だ行動抑制の観点

からは、走行安定性や乗り心地に対して十分な効果が得られなくなる懸念がある。そこで、ここではヨーダンパを台車前後・左右対称に4本配置することを提案する。ヨーダンパに関して、通常の配置と同等の走行安定性、乗り心地および曲線通過性能とするため、ヨーダンパ1本あたりの減衰力を通常の半分とする。減衰力が通常の半分のヨーダンパを1台車あたり前後・左右対称に4本配置することを以後「提案配置」と記し、図4に示した通常のヨーダンパ配置（1台車あたり2本配置）を「通常配置」と記す。ヨーダンパを提案配置とすることによる地震時走行安全性向上効果を確認するため、ヨーダンパを提案配置とした場合の正弦波加振に対する安全限界線図を図6に示す。図3に示した通常配置の安全限界線図もあわせて示す。図6より、ヨーダンパを提案配置とすることで加振周波数0.5Hz付近の安全限界振幅が大きくなり、地震時の脱線に対する耐性が向上していることがわかる。なお、加振周波数0.3Hzに比べ0.4Hzの方が安全限界振幅が小さい一方、加振周波数0.4Hzよりも0.5Hzの方が安全限界振幅が大きく、また加振周波数0.5Hzよりも0.6Hzの方が安全限界振幅が小さくなっている。このように加振周波数0.3~0.6Hzで安全限界振幅の変動が大きくなっている原因として、車輪・レール接触状態の急激な変化や車輪まわりの減衰要素が

少ないことが推定されるが、詳細なメカニズムの解明は今後の課題である。

### 3. ヨーダンパ配置変更による地震時走行安全性向上効果の実験的検証

2.4節で示したヨーダンパ配置変更の効果を実験的にも確認するため、大型振動台を用いた実台車加振実験を実施した。以後、この実台車加振実験を「本実験」と記す。

#### 3.1 試験装置の概略

試験体の外観を図7に示す。供試台車は在来線特急形車両で用いられていた台車である。本実験ではヨーダンパ提案配置での加振実験も実施するため、前後対称にヨーダンパを取り付けられるよう、台車側のヨーダンパ受はヨーダンパ取付部が前後方向台車中心になるように専用のものを製作している。また、半車体についてはヨーダンパ4本に対応するよう、車体側ヨーダンパ受を4つ装備している。ここで、便宜上、図7の左側写真において、紙面手前方向を前側と見なして前後左右を表現する。また、車両が軌道上を走行している時は停止している時に比べ輪軸が軌道上を左右に動きやすい。加振実験時、台車は停止した状態であるが、車両走行時の輪軸の左右の動きやすさを模擬するため、車輪・レール間をグリース潤滑している。試験体のおもな諸元を表1に示す。ヨーダンパの減衰力特性はリリーフ弁により高ピストン速度領域で傾きが小さくなる折れ線特性を有している。提案配置用のヨーダンパについて、低ピストン速度領域の減衰係数は通常配置用の半分となっているが、高ピストン速度領域の減衰係数は通常配置用の半分より大きい値となっている。これは既存の構造を用いた設計では、これ以上減衰係数を小さくできなかったためである。なお、この差の試験結果への影響は小さいと考えている。

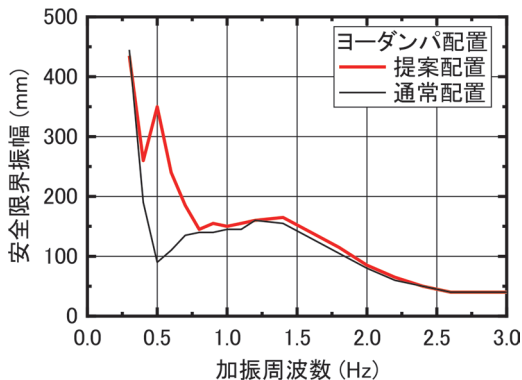


図6 正弦波加振に対する安全限界線図（ヨーダンパ提案配置と通常配置との比較）

#### 3.2 実験条件および測定項目

本実験の目的は、ヨーダンパの配置を変更することで

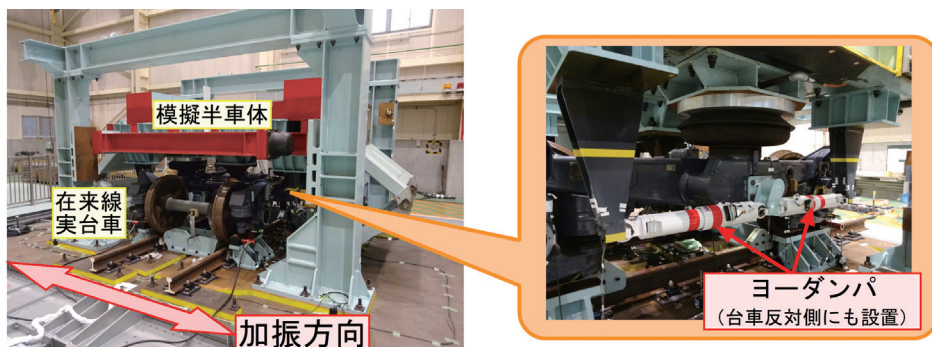


図7 試験装置の外観とヨーダンパ取付部

表1 試験装置の主な諸元

模擬半車体質量	12000kg	
台車枠質量	1500kg	
輪軸質量 (1 輪軸当たり)	1200kg	
まくらばね上下剛性 (1 個当たり)	300kN/m	
軸ばね上下剛性 (1 軸箱当たり)	1400kN/m	
通常配置用 ヨーダンパ減衰係数 (1 本当たり)	Vp<0.025m/s	200kNs/m
	Vp>0.025m/s	20kNs/m
提案配置用 ヨーダンパ減衰係数 (1 本当たり)	Vp<0.025m/s	100kNs/m
	Vp>0.025m/s	15kNs/m

Vp: ダンパピストン速度

表2 加振波形

加振種類	周波数/地震波種類
正弦波	0.4~2.0Hz
地震波	L1 地震動 <sup>22)</sup> (G5 地盤, 地表面)
	L2 地震動スペクトル II <sup>22)</sup> (G5 地盤, 地表面)

地震時に台車に作用するヨーモーメントが抑制され、地震時走行安全性が向上することの確認である。したがって、試験体についてはヨーダンパ配置のみ通常配置・提案配置と条件変更した。加振波の条件を表2に示す。様々な加振条件で効果を把握するため、試験体を健全な状態に保ちつつ加振実験を繰り返す必要がある。そのため比較的強度の低い箇所のみずみやまくらばね(空気ばね)の伸び量等を監視しながら、できるだけ大きな加振ができるよう、正弦波加振については振幅を、地震波加振については変位入力に掛ける倍率を調整しながら加振実験を行った。

### 3.3 実験結果

加振実験における振幅調整の結果、各加振波における振幅もしくは倍率を表3に示すように決定した。試験体を健全な状態で保ちつつ加振実験を行うため、脱線に至るような極端に大きな加振はせず、前章で示した脱線のメカニズムの一因である、台車・車体間に作用するヨーモーメントに着目した。

#### 3.3.1 正弦波加振における測定波形

加振周波数0.5Hzの条件について、台車側ヨーダンパ受で測定した作用力から換算した台車作用ヨーモーメントおよび車体側ヨーダンパ受で測定した作用力から換算した車体作用ヨーモーメントの時間波形を図8に示

表3 加振振幅(正弦波)と加振倍率(地震波)

周波数	振幅	周波数 /地震波	振幅 /倍率
0.4Hz	100mm	1.2Hz	50mm
0.5Hz	70mm	1.5Hz	30mm
0.6Hz	40mm	1.8Hz	20mm
0.7Hz	50mm	2.0Hz	15mm
0.8Hz	50mm	L1 (G5) *	0.9 倍
1.0Hz	70mm	L2 (G5) **	0.2 倍

\*L1 (G5): L1 地震動 (G5 地盤, 地表面)

\*\*L2 (G5): L2 地震動スペクトル II (G5 地盤, 地表面)

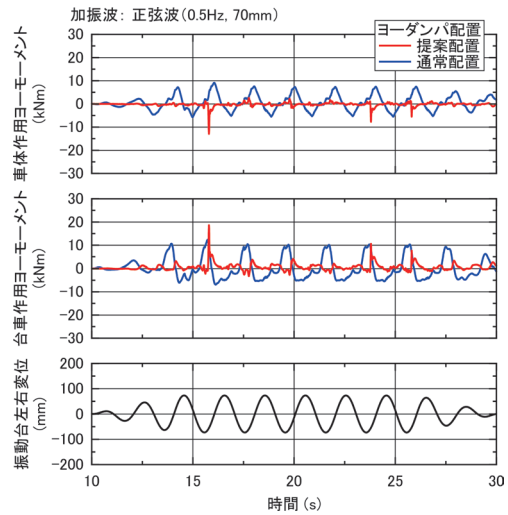


図8 正弦波加振時の測定波形例  
(加振周波数0.5Hz, 加振振幅70mm)

す。なお、台車作用ヨーモーメント・車体作用ヨーモーメントは次式で求めている。

$$M_{zT} = l_{ydT}(F_{ydTR} - F_{ydTL}) \quad (1)$$

$$M_{zB} = l_{ydB}(F_{ydBFR} - F_{ydBFL} + F_{ydBRR} - F_{ydBLL}) \quad (2)$$

ここで、 $M_{zT}$ : 台車作用ヨーモーメント、 $l_{ydT}$ : 台車中心-台車側ヨーダンパ受間左右距離、 $F_{ydTR}$ ,  $F_{ydTL}$ : 台車側ヨーダンパ受前後力(右側, 左側)、 $M_{zB}$ : 車体作用ヨーモーメント、 $l_{ydB}$ : 台車中心-車体側ヨーダンパ受間左右距離、 $F_{ydBFR} \sim F_{ydBLL}$ : 車体側ヨーダンパ受前後力(右前側, 左前側, 右後側, 左後側)である。

図8より、台車作用ヨーモーメント、車体作用ヨーモーメントともに概ね周期的な変動となっているが、スパイク状に著大値も見られる。この原因の一つとして、以下のように考えられる。前述したように、加振実験で

は台車は停止した状態であり、走行中に輪軸が軌道上を左右に動きやすいことを、車輪・レール間をグリース潤滑することで模擬している。そして、加振実験を繰り返すうちに車輪・レールの接触面間に介在していたグリースが車輪の左右摺動により押し出され、潤滑不良（油ぎれ）を起こす場合があるが、1台車内の4つの車輪で同時には起こらないため、車輪・レール間の摩擦力が不均一となり、台車が車輪フランジ遊間で許される範囲でヨー方向にわずかに旋回してしまう。その結果、前後の輪軸で車輪フランジとレールゲージコーナとの接触タイミングが異なり、台車がヨー方向に旋回し、ヨーダンパ作用力がスパイク状に発生する。実際の走行では台車内の4つの車輪で車輪・レール間の摩擦係数が大きく異なることはないと考えられる。また、本実験はヨーダンパ配置変更による、車体ロール振動に伴うヨーダンパ起因のヨーモーメント低減効果を把握することが目的であり、加振周波数付近での挙動に着目するため、加振周波数の2倍の周波数をカットオフ周波数とするローパスフィルタ（LPF）を作用させることとした。LPF後の台車作用ヨーモーメント、車体作用ヨーモーメントの時間波形を図9に示す。図9より、LPFによってスパイク状の著大値が概ね除去され、ヨーダンパを提案配置とすることでヨーモーメントの発生が抑えられていることがより明確にわかる。後述するヨーダンパ配置による台車・車体作用モーメントへの影響については、加振周波数の2倍の周波数をカットオフ周波数とするLPF後の時間波形の最大値に着目する。

### 3.3.2 地震波加振における測定波形

各地震波加振条件で正弦波加振の場合と同様にして求めた台車作用モーメント、車体作用モーメントを図10に示す。図10には各地震波の主要動（揺れの大きい時間帯）を中心に示している。ランダム波である地震波加振においても正弦波加振と同様に車輪・レール間の摩擦係数不均一によるスパイク状の著大ヨーモーメントが発生し得るが、正弦波加振と異なりLPFを作用させるための適切なカットオフ周波数を決定しにくい。そこで、主要動を中心とした時間帯での各ヨーモーメントの標準偏差に着目する。

### 3.3.3 車体・台車間に作用するヨーモーメント

ヨーダンパを提案配置とした場合と通常配置とした場合の、車体・台車間に発生するヨーモーメントの最大値（正弦波加振）もしくは標準偏差（地震波加振）の比較を図11に示す。

図8～図10に示したように、台車作用ヨーモーメントと車体作用ヨーモーメントで同様の波形となっているため、図11には台車作用ヨーモーメントについて示す。図11(a)が正弦波加振に対する結果、図11(b)が地震波加振に対する結果である。

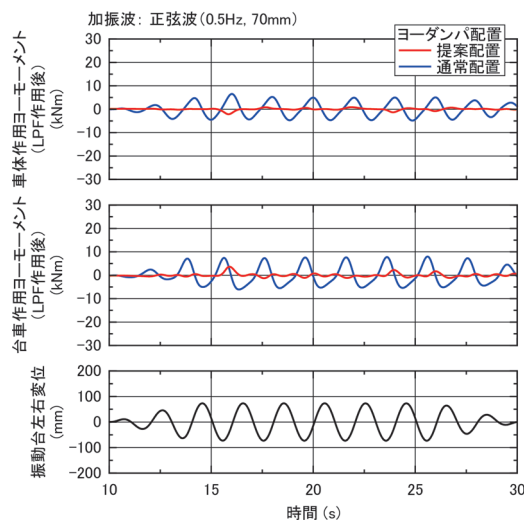


図9 ローパスフィルタ処理された測定波形（加振周波数 0.5Hz，加振振幅 70mm）

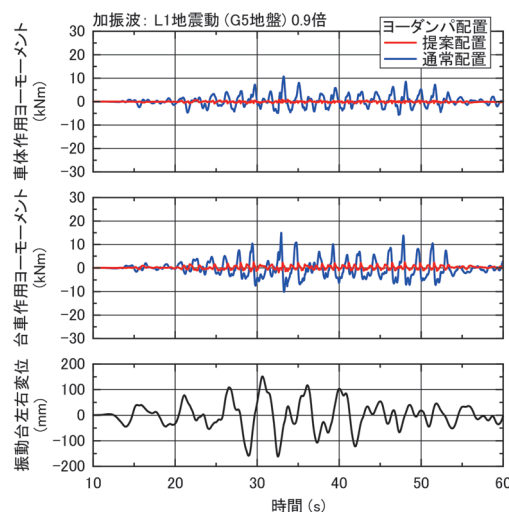


図10 地震波加振時の測定波形例（L1地震動（G5地盤），加振倍率 0.9倍）

図11(a)より、正弦波加振においては加振周波数1.0Hz以下の領域で通常配置に比べ提案配置の方が作用ヨーモーメントが小さくなっていることがわかる。一方、加振周波数1.2Hz以上の領域では提案配置にすることの効果小さく、条件によっては提案配置にすることにより、ヨーモーメント最大値が大きくなっている。この原因として、以下が推察される。

- (1) 車体・台車間の相対ロール振動が小さく提案配置とすることのメリットが小さい。
- (2) 本実験において、前述したような車輪・レール間の摩擦係数不均一によるスパイク状の著大ヨーモーメントは、左右方向力が小さい低周波数領域の加振よりも、著大横圧が生じる高周波数領域の加振の方が起きやすい傾向となっており、LPFで

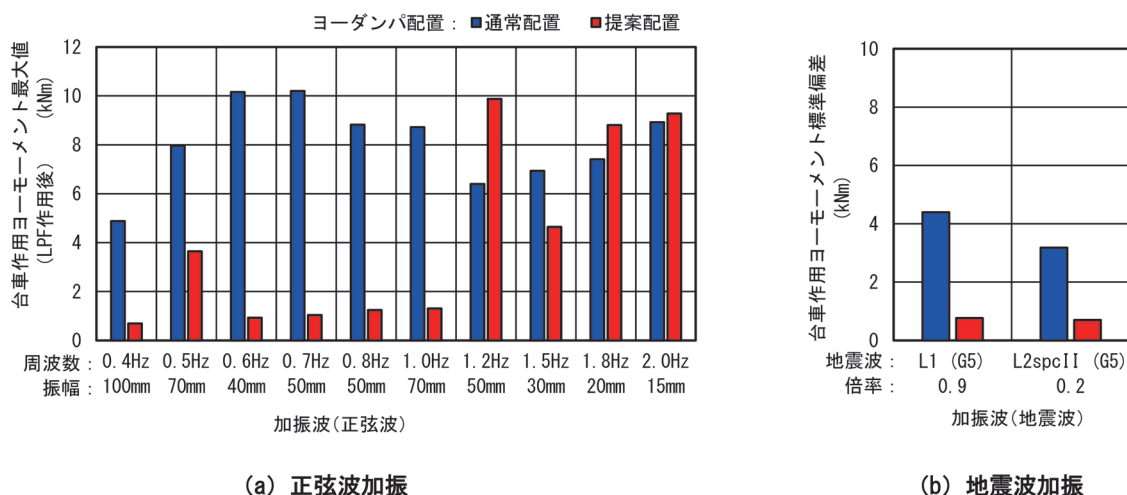


図 11 ヨーダンパ提案配置と通常配置の加振実験における台車一車体間に発生するヨーモーメント

完全に除去しきれない場合がある。

図 11 (b) より、地震波加振においては本実験で検討した設計地震動に対し通常配置よりも提案配置の方が作用ヨーモーメントが小さくなった。

#### 4. 確率的観点からの地震時走行安全性向上効果

正弦波加振に対する安全限界線図は、車両の地震時の脱線に対する耐性の基礎特性を把握することができるが、複数の条件下での地震時走行安全性の比較や、想定される地震時の軌道面振動（ランダム波）に対しての安全性について把握が困難であったため、著者らはいくつかの前提条件のもと、地震時の軌道面振動波形から脱線発生確率を推定する手法を提案している<sup>23)</sup>。本手法を用いれば、想定する地震時の軌道面振動に対する走行安全性を「確率」という統一された指標で定量的に評価することができる。また、ある固定された地点に建設される土木構造物と異なり、移動体である車両は様々な地盤や構造物上に敷設された軌道上を走行しており、地震時には卓越周波数や位相特性について多種多様な軌道面振動を受ける可能性がある。したがって、車両の地震時走行安全性を評価する際には、そのような多種多様な軌道面振動について俯瞰的に評価することが望ましい。そこで本章では、地震時の軌道面振動波形から脱線発生確率を推定する手法の概略を述べるとともに、地震時走行安全性向上策の効果を多種多様な軌道面振動に対して脱線が発生する確率という観点から評価する。評価に際しては在来線車両の地震対策として、ヨーダンパの配置変更に加え、通常は乗り上がり脱線防止を主な目的として急曲線部に設置される、図 12 に示すような在来線用脱線防止ガードの設置<sup>20)</sup>についても向上効果を示す。



図 12 在来線用脱線防止ガード

##### 4.1 確率的観点からの地震時走行安全性評価法の概略

脱線発生確率の推定は、地震時における鉄道車両の脱線可能性を地震波から推定する方法<sup>23)</sup>に従って行い、以下を前提としている。

- (a) 想定した地震は発生したものとする（地震自体の発生確率は考慮しない）。
- (b) 一般性を有する軌道面振動（275種）に発生のはりはないものとする。
- (c) 車両は想定した地震に遭遇したものとする（車両の存在確率は考慮しない）。
- (d) 軌道上各地点は同様の波形で振動したものとする（隣接構造物間の動的な角折れや目違いは考慮しない）。

なお、上記一般性を有する軌道面振動は鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限<sup>24)</sup>）で用いられている地表面地震動 11 種（表 4、一部は鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計<sup>22)</sup>）に基づき修正）を入力とし、構造物の固有周期を 0.1 秒～2.0 秒まで 25 段階に設定して求めた構造物天端応答（ $11 \times 25 = 275$  種）である。

評価対象車両の評価対象軌道面振動に対する脱線発生確率の推定手順のフローを図 13 に示し、概略を以下に示す。なお、詳細については既報<sup>23)</sup>を参照されたい。

- (1) 評価対象車両について、正弦波加振に対する 3 種

- の限界線図（周波数 0.3Hz～3Hz の加振に対する、5 波で脱線する限界、1 波で脱線する限界、および 5 波で車輪上昇量最大値が 10mm となる限界の加振振幅線図）を求める。
- (2) 複数の地表面地震動に対して固有周期を広範囲に振って求めた構造物天端の応答波（一般性を有する軌道面振動（275 種））を車両運動シミュレーションを用いて評価対象車両が脱線する最小の振幅に調整する。
  - (3) (2) 項のそれぞれの軌道面振動について、加速度波形を加速度ゼロで半波分解し、半波毎に (1) 項に示した限界線図との比較により点数付けし、連続する 10 の半波の点数和の軌道面振動波形全域における最大値を求める。
  - (4) 速度波形および変位波形についても同様の処理を行う。
  - (5) (2) 項のそれぞれの軌道面振動について、(3)、(4)

項で得られた 3 つの値のうちの最大値を脱線可能性推定指標値とし、その累積確率線図を求める。

- (6) 評価対象地震（想定した地震）における評価対象地点の軌道面振動を推定する。
- (7) 推定された軌道面振動に対し、(3)～(5) 項と同様の手法により脱線可能性推定指標値を求め、(5) 項で求めた累積確率線図に照らし合わせることで評価対象車両の脱線発生確率を求める。

表 4 地震時走行安全性評価に用いる地震波<sup>23)</sup>

地震波名	備考（地震名等）
釧路地方気象台 NS, EW	1993 年釧路沖地震
浦河観測所 NS, EW	1994 年北海道東方沖地震
神戸海洋気象台 NS, EW	1995 年兵庫県南部地震
台中 TCU068 NS	1999 年台湾集集地震
L1 地震動 (G3 地盤, G5 地盤)	鉄道構造物等 設計標準・同解説
L2 地震動スペクトル II (G3 地盤, G5 地盤)	

#### 4.2 評価対象軌道面振動

評価対象軌道面振動は表 4 に示す地震動（地表面波）に加え、2004 年新潟県中越地震における新幹線脱線地点付近の推定地表面地震動<sup>1)</sup> および 2011 年東北地方太平洋沖地震における新幹線脱線地点付近の推定地表面地震動<sup>24)</sup> に対する構造物の応答を非線形 1 自由度解析により求めたものである。構造物のパラメータは以下の通りであり、合計で 78 種の軌道面振動について評価した。

- ・等価固有周期：0.0, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0 秒
- ・構造物減衰：5%
- ・降伏震度：0.5

#### 4.3 地震時走行安全性向上効果

ヨーダンパを装備した在来線車両について、ヨーダンパを提案配置にしたり、軌道側に脱線防止ガードを設置したりするなど、地震対策を施した場合の評価対象軌道面振動に対する脱線発生確率推定値を、地震対策を施さない場合に対する比較として図 14 に示す。図中、青四角で示した脱線防止ガードのみの効果のデータは文献 20 で示したデータと同一である。横軸に地震対策を施

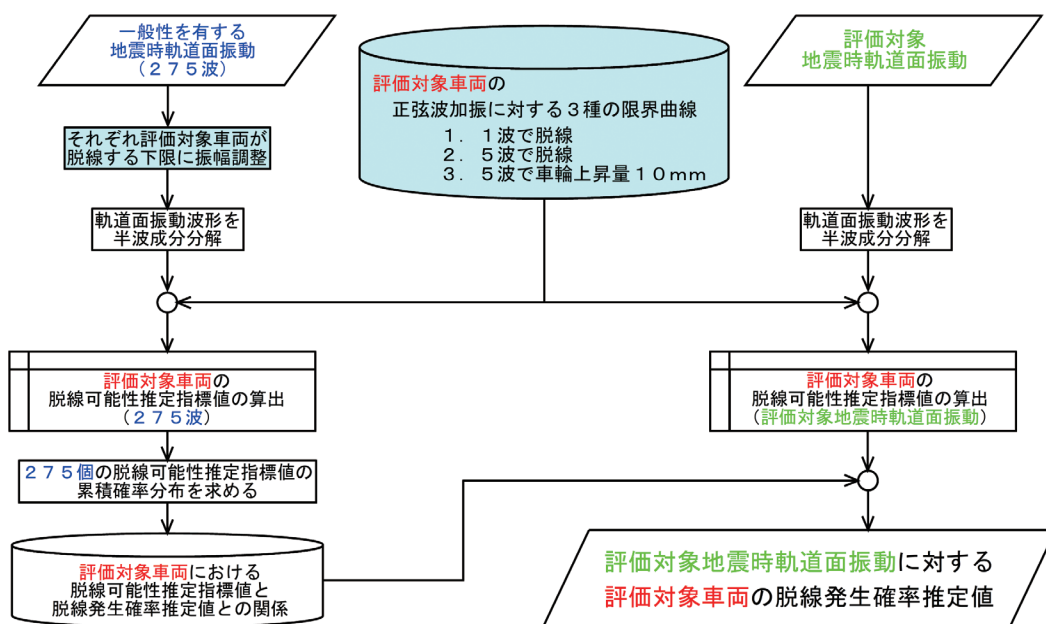


図 13 地震時における鉄道車両の脱線可能性を地震波から推定する方法のフロー

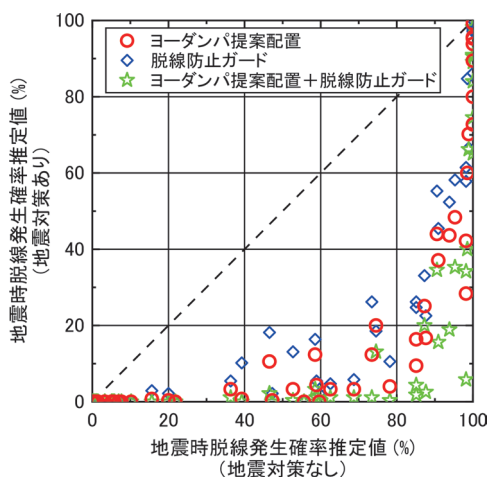


図 14 地震対策の有無による地震時脱線発生確率推定値の比較

さない場合の脱線発生確率推定値をとり、縦軸に同じ軌道面振動に対して地震対策を施した場合の脱線発生確率推定値をとっている。図中、破線上にプロットがあれば、地震対策の有無で脱線発生確率推定値が一致することを意味し、破線よりも下にプロットがあれば地震対策により脱線発生確率推定値が低減、すなわち地震時走行安全性が向上していることを意味している。なお、全体的な傾向をつかむことに主眼を置いており、軌道面振動ごとの区別はしていないが、脱線発生確率が高い領域のプロットはL2地震動のものである。図14より、ヨーダンパを装備した在来線車両の地震対策の効果について、脱線防止ガードを設置する、もしくはヨーダンパを提案配置とすることで地震時脱線発生確率を概ね半減でき、両者を併用するとさらに脱線発生確率を低減できることがわかる。

図14に示したように、ヨーダンパを装備した在来線車両について、ヨーダンパを提案配置にすることと軌道に脱線防止ガードを設置することで概ね同じ地震対策効果が得られている。これに依れば、費用が限られる中で地震対策を行う際、路線長もしくは地震対策上の重点区間長が長い割に運行している車両数が少ない場合には車両側の対策（ヨーダンパ配置変更）をとり、逆の場合には軌道側の対策（脱線防止ガード設置）をとるといった判断を鉄道事業者が行うことが可能となると考えられる。

## 5. まとめ

在来線車両の中でも比較的高速で走行する、ヨーダンパを装備した在来線車両の地震時走行安全性向上策として、通常は台車内左右対称に2本配置（通常配置）しているヨーダンパを台車内で前後にも対称に4本配置することを提案し（提案配置）、その効果を車両運動シミュ

レーションにより明らかにするとともに、その妥当性を実台車加振実験により確認した。さらに、急曲線部に一般的に設置されている在来線用脱線防止ガードを地震対策として用いた場合とあわせて、地震波に対する走行安全性向上効果を確率的観点から評価した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 正弦波加振に対する安全限界線図より、通常配置でヨーダンパを装備した在来線車両は0.5Hz付近の周波数領域の安全限界振幅が他の周波数領域よりも小さくなった。その原因として、この周波数領域で生じる車両下心ロール振動により車体・台車間の相対ロール振動が大きくなり、ヨーダンパ起因のヨーモーメントが台車に作用することを車両運動シミュレーションにより確認した。
- (2) ヨーダンパを提案配置とし、車体・台車間の相対ロール振動が大きくなってもヨーダンパ起因のヨーモーメントが台車に作用しないようにすることで、正弦波加振に対する安全限界線図において0.5Hz付近の安全限界振幅が増大することを明らかにした。
- (3) 実台車加振実験により、加振周波数1.0Hz以下の正弦波加振、および設計地震動（L1地震動、L2地震動）に対して、ヨーダンパを通常配置から提案配置とすることで台車に作用するヨーモーメントを低減できることを確認した。
- (4) ヨーダンパを提案配置とすること、および主に急曲線部に設置されている脱線防止ガードについて、地震波に対する走行安全性向上効果を確率的観点から評価した結果、どちらも地震時の脱線発生確率を概ね半減できることがわかった。

最後に、本研究を遂行するにあたり東日本旅客鉄道株式会社より資料を提供頂いたことを付記し、ここに謝意を表す。なお、本論文は文献25の要部抜粋である。学術的考察など詳細については文献25を参照されたい。

## 文献

- 1) 航空・鉄道事故調査委員会：東日本旅客鉄道株式会社上越新幹線浦佐駅～長岡駅間列車脱線事故、RA2007-8-I、2007
- 2) 森村勉、西村和彦、嘩道佳明、曾我部潔：地震時の脱線メカニズムおよび脱線防止ガード機能に関する解析、日本機械学会論文集C編、Vol.76、No.770、pp.2447-2453、2010
- 3) 森村勉、足立昌仁、石川栄、深田淳司、嘩道佳明：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）、日本機械学会論文集C編、Vol.76、No.770、pp.2454-2461、2010
- 4) 森村勉、関雅樹、三輪昌弘、坂上啓、村松浩成、西村和彦：地震時の脱線に対する脱線防止ガード機能の実物台車振動台

- 実験, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.771, pp.3086-3092, 2010
- 5) 足立昌仁, 森村勉, 西村和彦, 曄道佳明: 軌条輪上での実台車加振実験による鉄道車両の地震時脱線メカニズムの検証, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.808, pp.4786-4801, 2013
  - 6) 関雅樹, 小長井一男, 村松浩成, 渡邊康人, 可知隆, 古関潤一: 地震時の脱線防止ガードに関する研究, 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol.69, No.1, pp.1-18, 2013
  - 7) 楠田将之, 山口義信: 逸脱防止ガードの開発, 第 18 回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2011) 講演論文集, pp.31-34, 2011
  - 8) 溝口敦司, 千代誠: スラブ軌道用逸脱防止ガードの開発, 第 19 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2012) 講演論文集, pp.465-468, 2012
  - 9) 梶谷泰史, 加藤博之, 浅野浩二: 車両逸脱防止 L 型ガイドの開発, JR East Technical Review, No.29, pp.27-30, 2009
  - 10) 飯田浩平, 鈴木貢, 宮本岳史, 西山幸夫, 梶谷泰史, 加藤博之, 浅野浩二, 名倉宏明: 大型振動試験装置を用いた実台車脱線実験, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.77, No.781, pp.3223-3236, 2011
  - 11) 角南浩靖, 森村勉, 石川栄, 足立昌仁, 坂上啓, 南善徳, 渡邊康人, 曾田祥信: 脱線時の車両の逸脱防止に関する実台車走行試験, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.770, pp.2462-2471, 2010
  - 12) 角南浩靖, 曄道佳明, 森村勉, 足立昌仁: 脱線走行時の車両の逸脱防止機能に関する理論解析, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.77, No.781, pp.3237-3252, 2011
  - 13) 宮本岳史, 石田弘明, 松尾雅樹: 地震時の鉄道車両の挙動解析(上下, 左右に振動する軌道上の車両運動シミュレーション), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.64, No.626, pp.3928-3935, 1998
  - 14) 宮本岳史, 石田弘明, 台車改良による地震時走行安全性の向上に関する解析, 鉄道総研報告, Vol.21, No.12, pp.35-40, 2007
  - 15) 鈴木貢, 飯田浩平, 宮本岳史, 中嶋大智, 遠竹隆行, 梶谷泰史: 鉄道車両の地震対策用左右動ダンパの開発, 鉄道総研報告, Vol.25, No.6, pp.17-22, 2011
  - 16) 中嶋大智, 鈴木貢, 西山幸夫, 宮本岳史, 梶谷泰史: 地震時脱線対策クラッシュブルストッパの開発, 鉄道総研報告, Vol.27, No.10, pp.17-22, 2013
  - 17) 宮本岳史, 松本信之, 曾我部正道, 下村隆行, 西山幸夫, 松尾雅樹: 大変位軌道振動による実物大車両の加振実験, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.71, No.706, pp.1849-1855, 2005
  - 18) 東日本旅客鉄道株式会社: 大規模地震に対する取り組みについて, 2013 年 3 月 5 日付プレスリリース, <https://www.jreast.co.jp/press/2012/20130307.pdf>(参照日: 2022 年 3 月 1 日)
  - 19) 飯田浩平, 葛田理仁, 西山幸夫, 田中隆之, 本堂貴敏: 在来線の脱線防止ガード付き軌道上の実台車加振実験, 日本機械学会第 26 回交通・物流部門大会 (TRANSLOG2017) 講演論文集, 講演 No.2016, 2017
  - 20) Iida, K., Kuzuta, M., Nishiyama, Y., Tanaka, T. and Hondo, T., "An Experimental Study on the Performance of Guard Angle of Meter-Gauge Track during an Earthquake," Proceedings of the 26th IAVSD Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, Paper No.024, 2019.
  - 21) 鉄道総合技術研究所編: 在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説, pp.23-31, 1993
  - 22) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, pp.271-273, 2012
  - 23) 飯田浩平, 宮本岳史, 川西智浩: 地震時における鉄道車両の脱線可能性を地震波から推定する方法, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.874, DOI: 10.1299/transjsme.18-00339, 2019
  - 24) 運輸安全委員会: 東日本旅客鉄道株式会社 東北新幹線仙台駅構内列車脱線事故, RA2013-1-I, 2013
  - 25) 飯田浩平, 葛田理仁, 西山幸夫, 金元啓幸, 中嶋大智: ヨーダンパを装備した鉄道車両の地震時走行安全性向上に関する研究, 日本機械学会論文集, Vol.87, No.902, DOI: 10.1299/transjsme.21-00065, 2021