

直下地震に対する耐震脱線防止の提案

○稲宮 健一（科学技術者フォーラム） [機] 河相 雅史（かわい技術士・計量士事務所）

A proposal of a Quakeproof Derailment against the Earthquake of the Metropolitan Area

○Kenichi Inamiya (Science and Technology Forum) Masashi Kawai(Kawai P.E Office)

In order to avoid a railroad derailment accident may be caused by a direct earthquake that is warned officially to hit the Tokyo metropolitan area in near future, we will announce herein a newly conceived derailment prevention equipment to compensate for the weakness that come from the current wheel shape. Based on this proposal, it is expected that a new derailment prevention system will be developed into more advanced stages.

キーワード：首都直下地震，鉄道の脱線防止，耐震脱線防止システム，フランジ角，台車の自由空間，アクチュエータ

Key Words : Direct attack earthquake, Derailment prevention system, Derailment prevention from the earthquake, Wheel and flange angle, Free space of the bogie, Actuator

1. 提案の主旨

総理府，第 34 回中央防災会議は首都直下地震の発生は 30 年間に 70% の確率で発生すると公告している．田口他¹⁾によると，首都圏の近郊電車は通勤，通学に利用する乗客は午前 8 時前後と，午後 6 時前後の一時間に最大 120 万人と，60 万人と推定している．狭い地域である首都圏に約 3800 万人，東京都に約 1300 万人が住み，都心を中心に縦横に高頻度で，高速鉄道が通じている．1923 年に関東大震災が首都を襲ったが，その時より地震による鉄道の危険は遥かに高く，極めて甚大な被害が発生すると考えられ，それに対する措置として考察した耐震脱線防止の一提案を記述する²⁾．

2. 鉄道と自動車の走行機構の比較

鉄道も自動車も 4 輪の車輪を持ち，直線，曲線を自在に走行できる．直線走行は左右の車輪の回転速度が同じであるが，曲線走行時は異なった回転速度を持たなければならない．このため自動車は車軸の中央に差動ギヤを持ち，異なった回転速度を実現している．一方，鉄道は一体輪軸で左右の車輪の回転数は同一にも拘らず，曲線走行が可能である．その原理は踏面とフランジに傾斜角があることによる．車輪が曲線部に入ると，車軸が傾斜して，車輪とレールの接触点が移動して，等価的に車輪の半径に差が生ずる効果を生み曲線走行ができる．

3. 物理現象としての脱線

踏面の傾斜角同様にフランジ面も傾斜を持つ．車輪に大きな横圧が掛ると，フランジ面はレールの側面に乗り上がり

始め，輪重と横圧の変化と大きさに応じて動的な釣り合い点に移動する．この移動が限界を超えるとフランジの先端はレール頭頂面に乗り上がり，この運動は最終的に脱線にいたる．大野³⁾はフランジ面がレールの頭部の側面に接したときの輪重，横圧，フランジ角，摩擦係数からなるナデルの式を基に脱線限界係数を示している．この文献より，通常の走行時の安全走行の指標を読み取ることができると同時に，条件設定によっては脱線が発生すると読むこともできる．即ち，通常の走行では曲線部にかかる横圧が発生し，車輪がレールに乗り上げる現象が発生して，直線走行に戻ると横圧は無くなる．車輪がレール面に乗り上がるのは車軸に可動部を持たない車輪とレールの間に発生する必然的な現象で，横圧が大きくなると脱線に繋がる．

4. 脱線しない車輪の構造

大野の文献³⁾は摩擦係数をパラメータとして，フランジ角，限界脱線係数の関係を図 1 に示す．図 1 の横軸は 70 度までのフランジ角が示されているが，更に大きなフランジ角であれば脱線しないと解することも可能である．

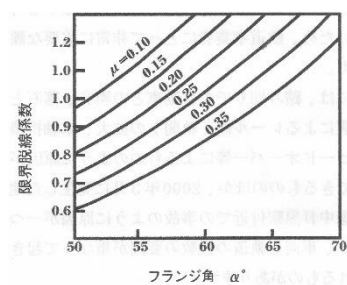


図1 脱線限界図 (文献3より引用)

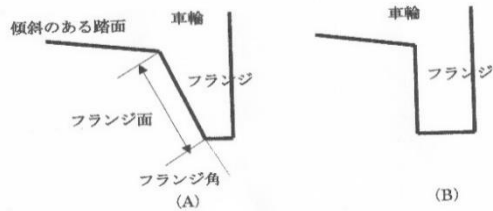


図2 車輪とフランジ角

そこで、以下の考察を行う。図2は2箇の車輪の模式図である。図2 (A) は通常車輪、(B) はフランジ角が垂直な車輪である。図2 (B) の車輪は曲線部を走行できないので、実際には存在しない。しかし、脱線はしない。思考実験で地震のような大きな横圧時にのみ図2 (B) の車輪を使うことを想定する。現在の車輪を瞬時に置き換えることはできないので、現在の車輪は変えず、車輪のある所以外の台車の空間に図2 (B) 型の車輪相当品を取り付ける。即ち、この両者を一台の台車の中で共存させる考察を試みる。

5. 脱線防止用アクチュエータ

図2 (B) のフランジ形状をした車輪相当の構造物をアクチュエータと称し、台車に取り付ける案を筆者等は提案している⁴⁾。

アクチュエータは棒状である。丁度図2 (B) の垂直のフランジと等価な構造を持つ。アクチュエータは通常それを包むホルダー内部に收容され、ホルダーは台車枠に固定されている。図3 (A) はその状態を示す。レール面より上に取り付け、走行に関わらないようにする。地震警報が発令されると、アクチュエータは図3 (B) のようにレールの内側に下降して、図2 (B) の垂直な車輪の役割を持つ。

アクチュエータは棒状以外に補助輪型や、車輪の裏に取りつける円盤型があるが、ここでは棒状で代表し、アクチュエータ A と表す⁴⁾。台車枠は走行中動揺する。台車にセンサーを取り付け動揺する状態を検出する試みが行なわれている⁵⁾。地震に襲われた後、台車の動揺に関わらず、常にセンサーの情報に基づきアクチュエータはレールに脇に位置するように制御される。その状態を図3 (C) で示す。

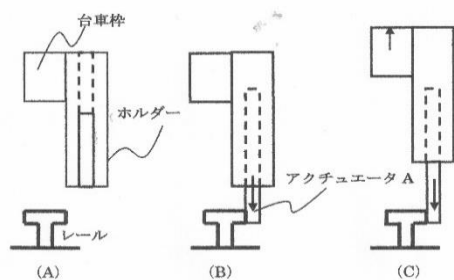


図3 アクチュエータの動作状態

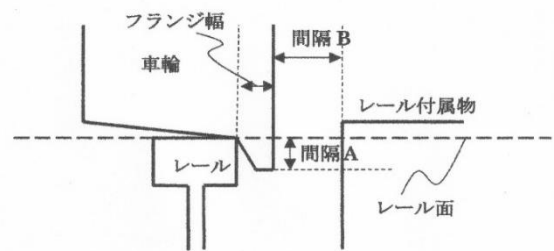


図4 フランジの通過する領域

6. 台車の自由空間

台車の中に通常車輪と、フランジ角が垂直な図2 (B) の車輪と等価なアクチュエータ A を共存させる。即ち、台車の空間の中にアクチュエータ A が取り付け可能な空間を探す。この空間をここでは自由空間と称する。

6. 1 レール面より下側の自由空間

レール面の下のレールには継ぎ目板、踏切板、分岐、脱線防止レールなど、種々の構造物が取り付けられている。この状態で、唯一これらの構造物と抵触しない空間はフランジが通過する空間である。図4 は正面から見た図である。間隔 A のフランジ長は標準 27mm、フランジ幅は約 32mm である。間隔 A はフランジ長より少し下に継ぎ目板が取り付けられている。間隔 B はフランジ幅より広く、踏切板や、脱線防止レールが取り付け可能な幅になっている。

フランジ幅プラス間隔 B は正面から見ると、レールの長手方向にスリットが入ったような空間であり、車輪が走行する時、一切の障害物が存在しない領域である。この領域で車輪がレールと接する部分以外のスリットの空間はこの提案のアクチュエータ A が存在できる空間である。

6. 2 レールより上の自由空間

図5 は典型的な形状の台車を横から眺めた図である。台車の構造は多種類あるが、ここでは脱線防止の構想を記述する説明用に本図を用いた、この構想を具体的に実現する台車に適用する際は、その台車の特性に合わせた構造を構築すべきである。

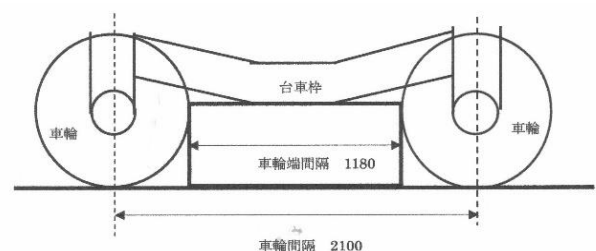


図5 横から眺めた台車の構造

図5では台車枠の下部で、車輪の間のレール面より上部の空間をレールより上部の自由空間と称する。

図4で示したスリットのような空間をアクチュエータの通過できる領域とし、図5ではそのスリットのレールの長手方向の領域を示した。アクチュエータAは図3で示すように台車枠に取り付ける。構想段階の取り付けを示しているの、具体的な取り付け方は実際に印加される横圧、アクチュエータAの材質など検討したうえで、次の段階で具体化すべきである。

7. 横圧の分散

7. 1 単一のアクチュエータ

通常の走行時に地震に遭遇すると図2(A)で示すフランジ面に大きな横圧がかかり、車輪がレールに乗り上げる現象が発生する。同様に図2(B)のアクチュエータAに同じ横圧が印加されるので、これに耐える材料と材質を持たなければならない。そこで、横圧を受け易くする構造を提案する。横圧は輪重に相当するような大きな値を持つ場合がある。

図6(A)は正面から見たアクチュエータAである。アクチュエータAの厚さ W_{YZ} は図4のフランジ幅とそれより許される範囲で厚くできる。図6(B)のアクチュエータAの横幅 W_{XZ} は許される範囲で広くすることができる。即ち、車輪ではフランジの円環部のレールに接する部分に地震時の横圧が印加されるが、図6(B)のように横幅を広げることで、アクチュエータAに印加される横圧の単位面積当たりの力を分散できる。

7. 2 複数のアクチュエータ

図5にでは台車の下の方輪の間に空間があることが分かる。台車によってはあまり広い空間がない場合もあるが、ここでは代表例を示すので、具合的な課題は個別に検討すべきである。アクチュエータAに掛る単位面積当たりの力を小さくするには図6(B)の幅 W_{XZ} を広げるか、あるいは図7に示すように複数のアクチュエータAを使う方法が考えられる。

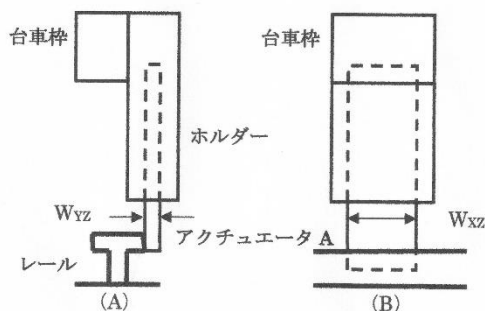


図6 アクチュエータAの形

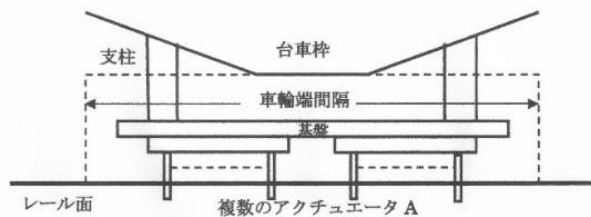


図7 複数のアクチュエータAの取り付け

図6では単純にホルダーを台車枠に取り付ける構成としたが、図7では台車枠とアクチュエータAの間に基盤を想定した。アクチュエータAの許容耐圧や、利用する本数、台車枠への取り付け易さなどを考慮して、プロトタイプ的设计に進むことが望まれる。

8. 警報直後の走行中に受ける地震被害の可能性

地震対策として、地震発生を検出して警報を発令することになっている。一般には警報受信と同時に、堅固な構造物の下に身を隠し、身の安全を確保する主旨である。鉄道では警報受信と同時に、列車を停車させることになっている。この初期のシステムとしてユレダス⁶⁾がこの方式を採用している。

しかし、首都直下地震のように震源が浅い場合、P波とS波の伝播時間差が短いので、高速走行中に列車が地震に襲われる可能性が高い。図8に示すように兵庫県南部地震の際、神戸海洋気象台で観測された両者の時間差は3.5秒である。一方、時速100kmで走行している在来線の停車に要する時間は約30秒である。高速走行中に地震に襲われる恐れがある。気象庁のデータによると、多くの地震の震源の深さは20km以下が殆どで、その内、10km以下が半数以上である。P波とS波の到達差は短い。また、列車の停車までの時間は新幹線の場合、さらに停車に長い時間を要する。

9. 最近の地震の教訓

9. 1 最近の脱線例

1995年1月17日発生の兵庫県南部地震では脱線が発生した。しかし、発生時刻が早朝だったので、脱線に伴う乗客に関わる事故は起きなかった。

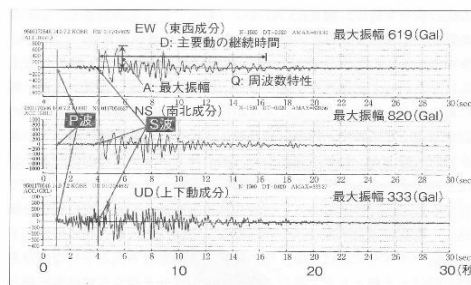


図9-6 地震動記録の一例
(兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で記録された加速度記録)

図8 P波とS波の時間差(文献7より引用)

2004年10月23日の中越地震では上越新幹線が脱線した。幸い排障器が逸脱防止の役割を果たし、L型ガイドの開発に繋がった。しかし、脱線防止の検討は見いだせなかった。2005年4月25日に尼崎脱線事故が発生した。原因が運転規則違反だったので、異常走行の検出と同時に即時停車の措置が開発されたが、耐震脱線防止の新規なメカニズムの開発には繋がらなかった⁵⁾。2011年3月11日に東日本大地震が発生したが、震源が遠方の海洋であったので、直下地震の耐震措置には直接にはいたらなかった。

9. 2 線路域の基盤整備状況

内田⁸⁾は1923年9月1日の関東大震災の鉄道の被害状況を記述している。この文献に、地盤の崩落、橋梁やレールの崩壊など、大きな鉄道災害が記録されている。当時の都市の人口密度や、列車の走行頻度などの密度は薄かったが、それでも大災害が発生した。社会状態が異なるので直接現在と比較はできない。これに対して、仁杉巖監修の文献⁹⁾は最近の状況を伝えていて、2004年発生した中越地震の被災状況が報告されている。1995年発生した兵庫県南部地震の経験を踏まえて、橋梁、高架部分、トンネルなど補強された。その堅固化は現在まで続けられている。

しかるに、相当堅固化が進んだ状態であったが、中越地震で脱線事故が発生した。脱線現場の写真によると、線路域に特別な破壊や、崩落はなく、走行中の受けた地震による横圧のために車輪がレールから外れた典型的な脱線現象である。この提案はそのような脱線を防ぐ発想である。

文献⁹⁾には同日観測された地震域での地震動のデータが記載されている。小千谷市近郊の川口近辺では合成加速度の最大が1722ガルであったとのことである。これは尖頭値と思われるで、大きなエネルギー成分を持つ低周波のエネルギー成分で評価しなければならないが、非常に大きな横圧の発生に繋がる値である。

鉄道は広い地域に渡って敷設されているので線路域は多様な地盤上に分布をしている。均一な地質で形成されている地盤では地震動により線路域が様な振動モードで揺れると思われるが、断層があるとその境界では地質の不連続が横たわっているため、地表面に大きな変形が発生する。この場合、局部的に線路域が折れ曲がるように変形するので、ここで検討している脱線防止は有効に働かないだろう。しかし、断層の存在は一次元の線状の分布に沿った狭い地域である。それ以外の線路域は広い2次元面であるので、そこでは通常の振動状態と考えればよく、ここで提案する脱線防止の措置が適応できる。

10. 初期段階の研究と今後の研究

この研究は早稲田大学山川研究室の学部生、院生によるブレーン・ストーミングから始まった。最初は1/8モデルの台車を作り、振動台の上で加振し脱線状況を観測した。大学の実験室所有設備では定量的な詳しい計測は不十分で、納得のいくデータは取得できなかった。しかし、これら活

動を基礎として、アクチュエータを使ったモデルの基礎的な数学モデルを作成した。そのモデルで実験を行い、アクチュエータが脱線防止に有効であることを確認した。これらの活動の結果はJ-RAIL¹⁰⁾に報告されている。

この初期実験では考慮されていない多くの要因があり、実際の車両に適応するためには実機に近いモデルを使った実証実験研究が強く望まれる。

11. まとめ

関東大震災時と比較して、現在の首都圏は高い人口密度、高速で高密度な近郊電車網状態であるので、直下地震に襲われて場合、前例のない事態を想定しなければならない。よって、この提案で開陳したような考察を多くの関係者で議論して頂きたいし、提案がその下敷きに使われれば、筆者等の望むところである。

謝辞

この提案の基本を学部生、院生と共に支えて、ご指導頂いた元早稲田大学理工学術院の山川 宏教授に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 田口東他, 首都直下地震による鉄道利用通勤, 通学客の被害想定, オペレーションズ・リサーチ, 2008年2月号, pp. 39-46.
- 2) 稲宮健一, 河相雅史, 近郊電車の直下地震に対する耐震脱線防止の提案, デザインエッグ(株), 2020. 5. 18, ISBN978-4-8150-1887-0.
- 3) 大野潔, 乗り上げ脱線事故撲滅に向けた研究開発, JR EAST, Technical Review, No. 3, pp013-016.
- 4) 特許 6713701, 4270552, 4270553, 4986108 各号.
- 5) 坂本正哉他, 実台車実験による高速検知型脱線予兆検知システムの検証, J-RAIL2014, Dec. 16, 2014, 新潟.
- 6) 中村豊, 世界最初の実用P波警報検出システム「ユレダス」の現状と将来, 第二回土木学会, シンポジウム論文集, 平成12年4月.
- 7) 目黒公郎, 地域と都市防災, 放送大学教育振興会, 2016年3月, ISBN978-4-595-316302-2.
- 8) 内田宗治, 関東大地震と鉄道, 平成24年7月, 新潮社, ISBN978-4-10-332561-1.
- 9) 仁杉巖監修, 巨大地震と高速鉄道, 山海堂, ISBN4-381-01824-9, 2006年11月.
- 10) 伊藤有希他, 鉄道車両の耐震脱線防止システムのシミュレーション解析, J-RAIL2012, Dec. 5. 2012, 東京.