

列車すれ違い時の微気圧波が車両の運動に及ぼす影響評価に関する研究

日大生産工(院) ○河口 亮介 日大生産工 網島 均

1. 緒言

北海道新幹線が抱える問題として在来線との共用走行区間が存在することがあげられる。現在営業が行われている新青森駅から新函館北斗駅までの全長148.8kmのうち、長さ53.85kmの青函トンネルを含む前後合わせた82.1kmの区間において在来線と軌道を共有している。新幹線のみが走行する区間では時速260kmで営業を行うが、共用区間においては、青函トンネル内では時速160km、その他の区間では時速140kmと速度制限を受けている。新幹線の高速域において、列車がすれ違うことで大きな空気力変動が生じる。この空気力変動の影響による貨物列車の脱線や貨物コンテナの疲労などの影響が問題視されている。そのため、列車すれ違い時の車両の運動について評価する必要がある。

本研究では、北海道新幹線が青函トンネルを含む在来線との共用走行区間において安全性を維持しながらどの程度の速度向上が行えるかを検討することを目的とする。

今回は、すれ違い・追い越し時の新幹線から貨物列車へ生じる空気力変動による横力の影響を評価するために、強風時の影響評価に使用される「総研詳細式」²⁾を用いて静的評価を行った。また、車両の動的モデルを用いた動的解析を行って、脱線リスクの評価を行った。本研究における脱線リスクを評価するまでの検討の流れを図1に示す。

2. 車両に作用する横力の導出方法

評価を行うため、まず静的な力のつり合いから、追い越し時・すれ違い時の車両に作用する横力を算出する。ここでは、車体と圧力パルスをもつ場合分けにより導出した³⁾。五つの場合分けについては、新幹線が高速で走行することにより生じた圧力パルスと貨物列車の位置関係から定式化を行った。

対向列車の先頭部が貨物列車の横を通過した時に圧力パルスが発生する。この圧力パルスと自列車の位置関係を図2の(a)~(e)で示す。また、図2における $a[m]$ 、 $b[m]$ は正負の圧力パルス

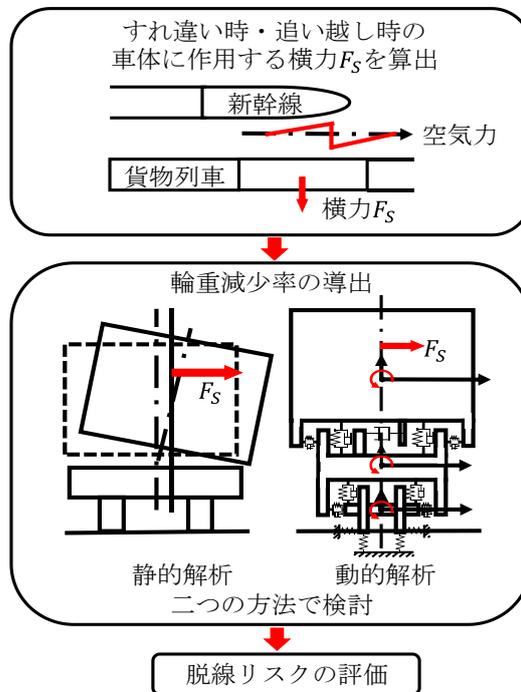


図1 研究の内容、検討の流れ

スの長さ、 $2L[m]$ は車両の長さ、 $X[m]$ は風圧力パルスが車体側面に掛かっている長さである。

3. 輪重減少率の導出

3.1 輪重減少率の定義

輪重減少率とは、鉄道車両が制限速度を大幅に超えた速度で曲線区間を走行した際や、強い横風を受けたことで大きな横力を受けて脱線する転覆事故を防ぐために用いられている安全評価指数のことである。輪重減少率は次式で定義される。

$$D = \frac{\Delta P}{P_0} \quad (1)$$

ここで、静止輪重 $P_0[N]$ 、輪重減少量 $\Delta P[N]$ であり、輪重は台車片側当たりの値である。横風を受けたことで輪重減少率 $D = 1.0$ となるときがある。この値が1.0となった場合が転覆限界に相当する。

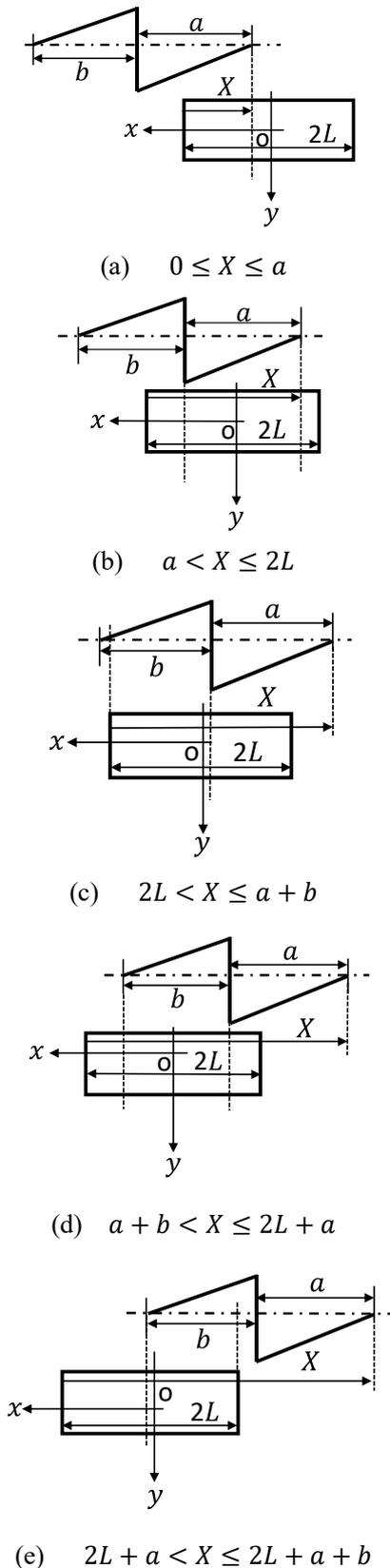


図2 車体と圧力パルスの位置関係

3.2 静的解析の輪重減少率

横風を受けた車両の挙動に関する解析方法について、静的解析方法がある。静的解析とは、車両に働く外力が一定である(時間と共に変動しない)と仮定して、外力によるモーメントのつり合いから外力と輪重減少率との関係を解析的に解くものである。静的解析法を車両に働く外力の静的なつり合い式から外力や外力に伴う車体変位をより詳細に考慮した詳細計算式(総研詳細式)が日比野らにより提案されている²⁾。本研究では、詳細計算式を元に圧力パルスによる横力と輪重減少率の関係から静的な輪重減少率を求めた。横力に関する影響評価をもとに輪重減少率を求める詳細計算式は次式である。

$$D = \frac{1}{b} \cdot \frac{h_{BC}^*}{(1 + \mu)m_B g} \cdot F_S + \frac{1}{b} \cdot \frac{y_{B0}}{1 + \mu} \quad (2)$$

式(2)の b は有効車輪/レール接触点間距離、 μ は輪軸を含む台車質量と半車体質量の比、 m_B は半車体質量、 g は重力加速度、 h_{BC}^* は有効風圧中心高さ、 F_S は横風を受けたことで生じた横力、 y_{B0} はストopp当たりの影響表す車体左右変位でそれぞれ表している。また、 h_{BC}^* は台車のばね系の影響を考慮した場合の風圧中心高さ h_{BC} の有効高さで、有効風圧中心高さ h_{BC}^* は、 $h_{BC}^* = 1.25 h_{BC}$ とする。これは、走行試験や風洞試験などから得られた知見をもとに、若干厳し目(すなわち安全側)になるように h_{BC} の25%増しとする⁴⁾。

詳細計算式における解析を行う際の車両モデルを下の図3に示す。

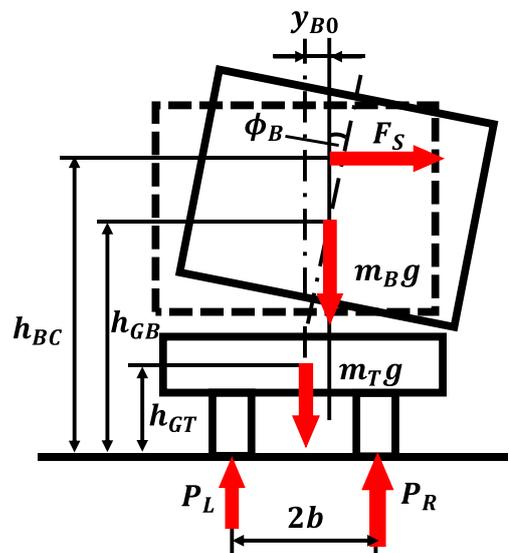


図3 車両モデル

図3は横力の影響が作用する前の車両モデルの位置を点線の四角にて表し、横力が作用している状態の位置を実線で示した。また、作用する力を矢印にて表し、 P_L と P_R は、左右の車輪の輪重を示している。

走行中の車両に働く外力の内、転覆に関して影響の大きい外力は、①横風による空気力、②曲線通過時の超過遠心力、③左右振動慣性力、の3つであり、詳細計算式ではこれらの外力を考慮する⁴⁾。これらの外力を受けた車両の動きについては、転覆問題を扱うので、車体のヨー変位等は考慮せず、左右変位およびロー角変位のみを考慮する。また、車両内各車輪の静止輪重および軸ばね・まくらばね定数は均一とする。従って、図3に示すような半車両断面モデルを用いる。

上記3つの外力うち、式(2)では、横風による空気力として、図3に示す外力「横力 F_S 」、および作用点の高さ「風圧中心高さ h_{BC} 」を考慮する。

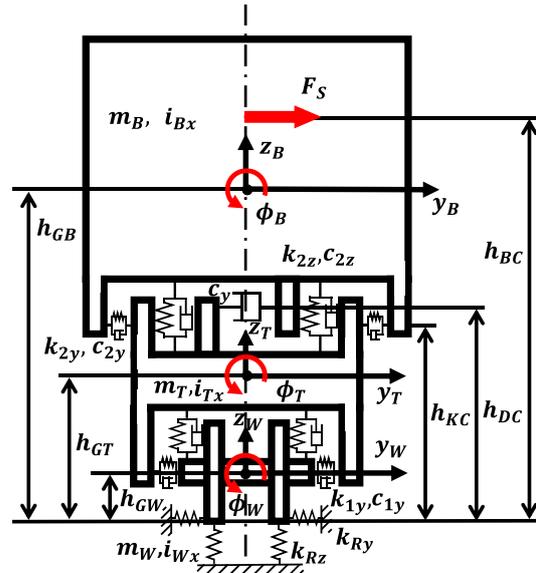


図4 動的車両モデル

3.3 動的解析の輪重減少率

動的解析とは、時間と共に変動する外力を考慮し、運動方程式を数値的に解くことにより、車両の挙動を時系列的に解析するものである。

本研究では、動的解析モデルを構築し、輪重減少率を解析した。

本解析で用いる車両モデルを図4に、ストップパのモデルを図5に示す。図4は、直線を走行する車両に、左側から横力 F_S がかかる状態を表している。式(2)における解析モデルと同様に半車両断面モデルを用いるが、輪軸と台車枠の運動を分けて考え、輪軸・台車枠・車体の三つの質量要素に関してそれぞれ上下・左右・ロール方向の3自由度(合計9自由度)を考慮する。台車は一般的なボルスタレス台車を対象とする。また、車両内各車輪の静止輪重および軸ばね・まくらばね定数は均一であると仮定する⁵⁾。動的な輪重減少率は、図4のモデルに対する、車体 m_B 、台車枠 m_T 、輪軸 m_W のそれぞれの運動方程式を上下・左右・ロール方向をもとにしてシミュレーションソフトSimulinkを用いて作成した車両モデルに横力の値を入力し輪重減少率の値を導出した。

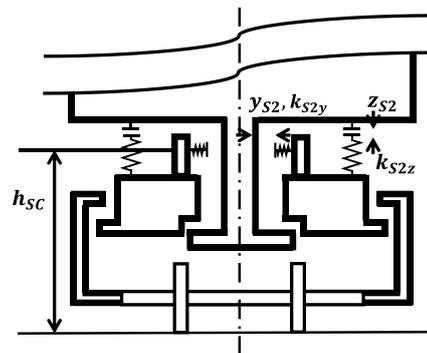


図5 ストップパのモデル

4. 解析結果

4.1 計算条件

貨物列車の条件としては、コキ106系の貨物列車に12フィートコンテナを空の状態に5個搭載したものとした。

今回は変更する条件を相対速度のみとし、横力の影響の評価を行った。表1に解析を行った相対速度の条件を示す。

表1 相対速度の条件

		新幹線 の速度	貨物列車 の速度	相対速度
追い 越し	①	160[km/h]	110[km/h]	50[km/h]
	②	240[km/h]	110[km/h]	130[km/h]
	③	320[km/h]	110[km/h]	210[km/h]
すれ 違い	④	160[km/h]	110[km/h]	270[km/h]
	⑤	320[km/h]	110[km/h]	430[km/h]

これらの速度に選択した理由は、現在の青函トンネル区間を北海道新幹線は時速 160km/h 貨物列車は時速 110km/h で走行している。この現行速度での追い越しを条件①と定義した。条件①から新幹線側を1.5倍の速さである時速 240km/h に変更したものを条件②として、条件①から新幹線側を2倍の速さである時速 320km/h に変更したものを条件③とした。

すれ違いの条件としては、現行速度でのすれ違いを条件④と定義した。条件④から新幹線側を2倍の速さである時速 320km/h に変更したものを条件⑤とした。

4.2 横力の計算結果

横力 F_s の計算結果を図6に示す。グラフは横力の作用時間を横軸に、大きさを縦軸とした。また、図6, 7, 8 においては、相対速度 50[km/h]を青、130[km/h]を赤、210[km/h]を黄、270[km/h]を紫、430[km/h]を緑で示した。

相対速度が増加すると、空気力変動の作用時間が短くなるが、作用する力は大きくなることが確認された。

4.3 輪重減少率の計算結果（静的解析）

静的な計算では、図6で示した時間ごとの横力 F_s の値を式(2)に代入し、輪重減少率を算出した。輪重減少率の計算結果を図7に示す。計算の結果、条件⑤の相対速度430km/hにおいて転覆限界 $D=1$ を超えることが確認された。

4.4 輪重減少率の計算結果（動的解析）

動的解析の輪重減少率の計算結果を図8に示す。静的解析と同様に条件⑤の相対速度430km/h において転覆限界 $D=1$ を超えることが確認された。最大値を示す時刻は、静的解析において最大値を示す時刻より遅れることもわかった。

5. 結言

本研究では、青函トンネル内において貨物列車と新幹線のすれ違い、追い越しが許容できるかどうかを検討するために、新幹線と貨物列車の相対速度の条件を変え、空気力変動が貨物列車へ及ぼす影響について、輪重減少率を用いて、脱線リスクを理論的に評価した。

今回の検討した条件では、相対速度が 430 [km/h]の場合、輪重減少率は $D=1$ を超えるため、貨物列車が脱線する可能性がある。

今後は、輪重減少率に大きく影響を及ぼす車両パラメータについて検討する。

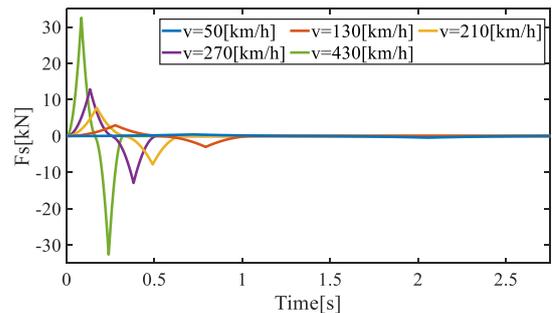


図6 貨物列車に作用する横力の大きさ

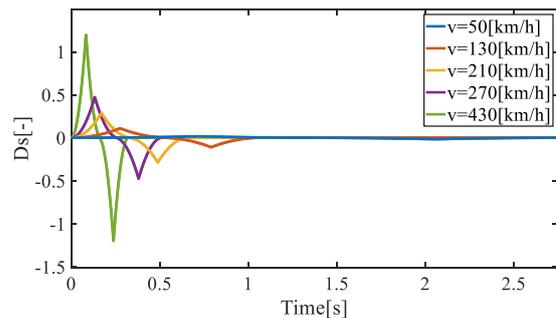


図7 静的解析の輪重減少率

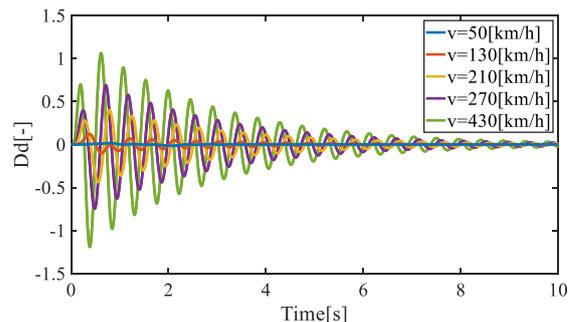


図8 動的解析の輪重減少率

参考文献

- 1) 北海道旅客鉄道株式会社, 北海道新幹線固有のコストと特殊性(2022), <https://www.jrhokkaido.co.jp/corporate/shinkansen/specificity.html>, (参照2022-05-20)
- 2) 日比野 有, 下村 隆行, 谷藤 克也, 鉄道車両の転覆限界風速に関する静的解析式の検証, 日本機械学会論文集(C 編), 75 巻 758号 (2009-10) pp2605-2612
- 3) 日本機械学会, 鉄道車両のダイナミクスとモデリング, 丸善出版 (2017), pp26-28
- 4) 日比野 有, 風に対する車両の安全性, RRR (2008.9) pp2-7
- 5) 日比野 有, 金元 啓幸, 下村 隆行, 谷藤 克也, 横風を受けた鉄道車両の挙動に関する動的解析モデルの構築および検証, 日本機械学会論文集(C編), 76巻, 766号(2010-6) pp1396-1405