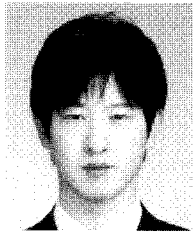
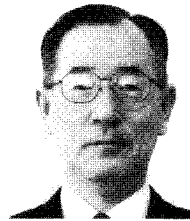


マルチボディソフトを利用した シミュレーションによる走行安全性の検討



*石井 清貴

ISHII Kiyotaka



*谷藤 克也

TANIFUJI Katsuya

近年、マルチボディソフト（MBS）と呼ばれる市販のツールが機構の運動解析に利用されている。MBSのひとつであるSIMPACKは鉄道に特化したツールボックスを有し、車輪／レール間の相互作用力を実態に即して模擬することが可能である。本稿では、現車による確認が困難な曲線通過時の走行安全性について、SIMPACKを利用した数値シミュレーションで検討した内容を紹介する。

キーワード：マルチボディソフト、シミュレーション、
曲線通過、走行安全性

1. はじめに

脱線や転覆に代表される走行安全性は鉄道にとって非常に重要な問題である。しかし、これらの状況を現車試験で確認するのは現実的ではない。また、従前の解析法では実態との対応が十分とは言えない。一方、マルチボディソフト（MBS）と呼ばれる市販の解析ツールが利用可能になった。SIMPACKはそのようなMBSのひとつであり、鉄道に固有な車輪レール間クリープ力の計算を容易にして、実態に近い車両走行の模擬を可能にしている。

我々は、SIMPACKによるシミュレーションで振り子車両が高速で曲線を通る場合と、風規制により一般車両が低速で曲線を通る場合の走行安全性を検討してきた。以下では、そこで得られた新たな知見を紹介する。

2. SIMPACKの特徴

一般に機械系の運動解析を行う際にはモデルの運動方

程式を導出する必要がある。一方で、MBSのSIMPACKでは、CADで構築された車両モデルから運動方程式が自動生成される。また、車輪とレールの断面形状を座標として入力することにより、図-1に示すような接触条件がセットされる。これにより、車輪／レール間のクリープ力がより精確に算出される。ここに軌道不整のデータが入力されれば、より実態に近い走行シミュレーションを実行することができる。シミュレーションの結果としては、任意のパラメータがグラフ出力されるほか、アニメーションにより車両の運動を視覚的に確認することも可能である。

3. 振り子車両による高速曲線通過

在来線では、到達時分短縮のために車体傾斜車両を用いた曲線高速化が進められてきた。そこでは、振り子車両の傾斜角（以下、振り子角）の増加によるさらなる高速化も検討されている。その際、曲線乗り心地の面で許

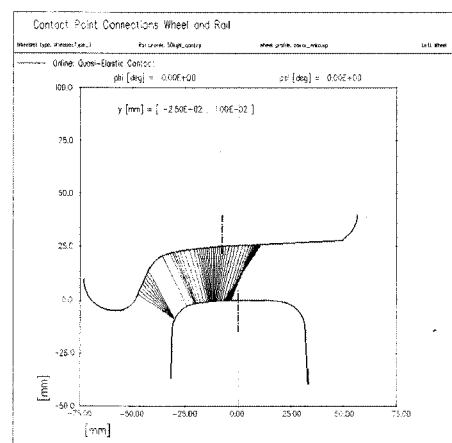


図-1 車輪／レール間の接触条件

*前 新潟大学大学院自然科学研究科学生

*新潟大学大学院自然科学研究科教授

表-1 曲線条件

R[m]	C[mm]	L_{rc} [m]	V_T [km/h]
300	85	85	85
400	85	85	100
500	85	85	110
600	80	80	120

容される速度の向上に加えて、増大する遠心力による転覆の危険性を事前に検討することが望ましい。ここでは、SIMPACKによるシミュレーションで得られた許容最高速度の推定と、その速度で走行する際の転覆安全性について述べる。

(1) 車両モデル

SIMPACK上で作成した一車両モデルは、合計44の自由度を有する。その内訳は、車体、前・後の台車枠、4本の輪軸がそれぞれ前後、左右、上下、ロール、ピッチ、ヨーの6自由度、前・後の振り子梁がそれぞれロールの1自由度である。振り子角 α は現状の 5° と、高速化を想定した 7° とする。

(2) 曲線条件と走行速度

解析の対象とする曲線は、半径 R が300m、400m、500mとし、表-1に示す標準的なカント C 、緩和曲線長 L_{rc} の値を用いる。走行速度 V としては、現状の振り子車両に適用される基本速度 V_T から5km/hの幅で向上させる。

(3) 評価パラメータと限度の日安

① 曲線乗り心地¹⁾

左右定常加速度 : 0.08g以内
車体ロール角速度 : 5[°/s]以内

② 転覆安全性²⁾

静止輪重に対する内軌側輪重の減少率

静的な減少率 : 60%以内
動的な減少率 : 80%以内

(4) 曲線乗り心地から許容される最高速度

解析の一例として、 $R400m$ の曲線におけるシミュレーション結果を図-2に示す。この場合、走行速度110km/hまで左右定常加速度は限度の日安内とみなせる。また、車体ロール角速度も日安内であり、この条件では110km/hが曲線乗り心地から許容される最高速度 V_{com} となる。このようにして得られた各条件の V_{com} をまとめたものが図-3である。現状の振り子角 $\alpha=5^\circ$ の場合でも、さらなる通過速度向上に余地のあることが認められる。

(5) 転覆安全性の確認

次に、転覆に対する安全性を確認するため、内軌側の輪重減少率を調べる。ここでは、図-3から $R500m$ の曲線で $\alpha=7^\circ$ の振り子車両に許容される最高速度 $V_{com}=130km/h$ の走行を検討例として示す。不整のない条件での輪重の変化を図-4に示す。輪重は円曲線中で定常と

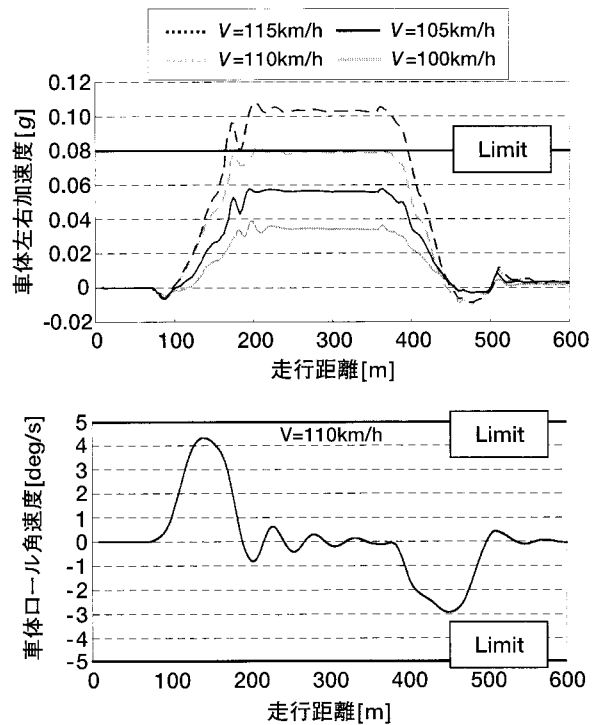


図-2 曲線乗り心地パラメータの出力例

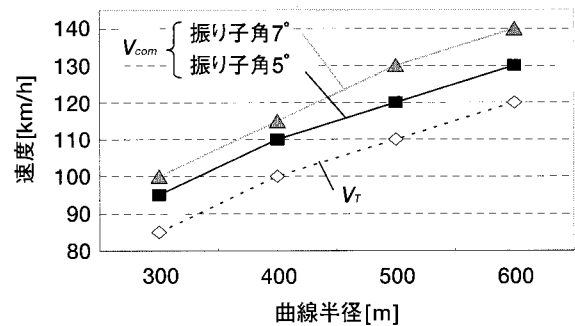


図-3 曲線乗り心地の面での最高速度

なるが、軸ごとに異なった値をとるため、第1軸から第4軸までの平均値を静的な輪重として減少率を計算した。この例では、静的減少率が約55%となる。

動的な輪重減少率は、車体の動揺や軌道不整の影響を考慮している。ここでは、通り狂いと高低狂いがある条件でシミュレーションを行い、図-4で定常的な輪重減少が最も大きかった第4軸を評価の対象とした。図-5に第4軸内軌側輪重の変化を示す。この変動を厳しく評価するために、波形のやや下部をなぞって代表値とし、動的な輪重減少率を計算した。この例の動的減少率は約73%となり、上記の静的減少率とともに限度の日安内にある。

このようにして、各曲線条件の V_{com} で走行する際の輪重減少率を求め、まとめたのが図-6である。この図より、振り子角 α が 5° 、 7° のいずれの場合でも、乗り心地から許容される範囲での高速化であれば、転覆に対する安全性の日安を満たすことが確認される。

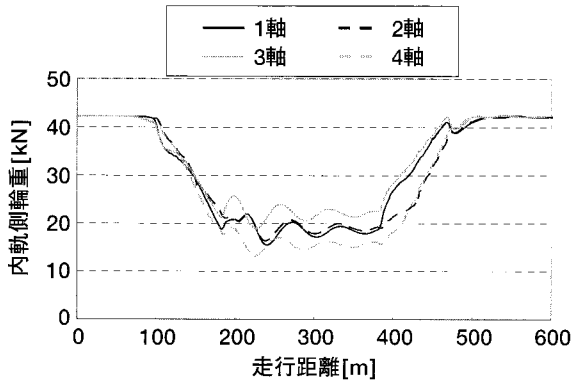


図-4 軌道不整を考慮しない場合の例示

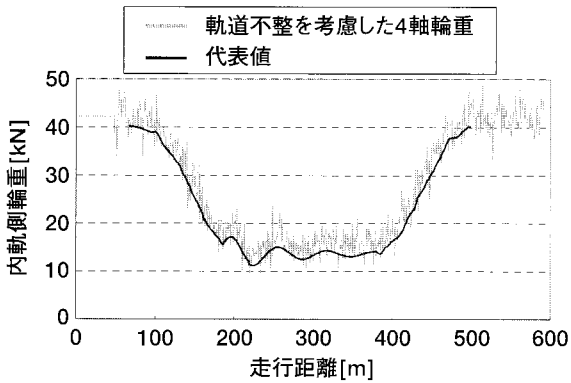


図-5 軌道不整を考慮する場合の例示

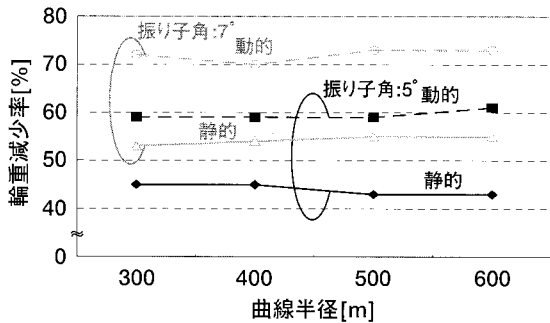


図-6 輪重減少率のまとめ

4. 低速で曲線を通る車両に及ぼす横風の影響

鉄道車両が基本速度以下で曲線を通る場合がある。速度規制下の徐行運転においても、横風が走行安全性に及ぼす影響については注意を向けることが望まれる。ここでは、強風下での曲線通過をする際の走行安全性について、SIMPACKで検討した結果を述べる。

(1) 車両モデルおよび風圧力モデル

対象車両は非振り子式の電車を想定した42自由度を有する一車両モデルである。

走行中の車両に吹き付ける横風は一樣流とし、その風圧力は曲線走行中においても常に車体側面に垂直に作用するものと仮定する。この風圧力 F_w を図-7のモデル化

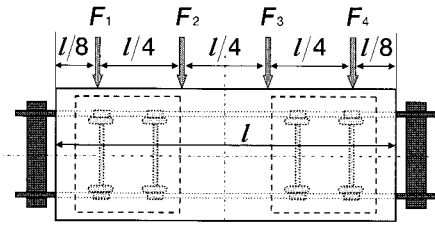


図-7 風圧力モデル

表-2 曲線条件

	R [m]	C [mm]	L_w [m]	S [mm]	V_0 [km/h]
曲線 1	400	85	85	5	75
曲線 2	160	65	65	20	40
分岐器	117	0	0	10	25

で示すように車体側面の4ヶ所に等分して作用させる ($F_i = F_w/4 : i = 1 \sim 4$)。

風規制による徐行速度25km/hの走行を前提として、車両に作用する風圧力 F_w を求めた³⁾。詳しい計算の過程はここでは省略するが、文献4)で報告されている盛土風上側走行(複線)の先頭車両の横力係数を参考に算出し、 $w = 25\text{m/s}$ で $F_w = 38.9\text{kN}$ 、 $w = 30\text{m/s}$ で $F_w = 53.3\text{kN}$ 、 $w = 35\text{m/s}$ で $F_w = 70.2\text{kN}$ のようにモデル化する。ここでは、自然風の風速 w として速度が25km/hに規制される25m/sに加え、運転が抑止される30m/s、さらに35m/sについても考慮した。

(2) シミュレーションの条件

R400mとR160mの曲線および分岐器を想定したR117mの曲線で解析を行う(表-2、Sはスラック、 V_0 は基本速度)。走行速度は10km/hからはじめ、基本速度に至るまで15km/h刻み(一部例外あり)で向上させる。車輪/レール間の摩擦係数は $\mu = 0.5$ とする。なお、走行速度が変わっても各風速における風圧力は前項でモデル化した大きさのままとする。

(3) 曲線外軌側から横風が作用する場合

風速25m/sでは脱線も転覆も生じていないが、表-3に示すように、風速が30m/s以上になると走行速度によっては乗り上がり脱線がみられる。例として、風速30m/s、R160m、走行速度10km/hにおける第1軸の脱線係数を図-8に示す。距離500m地点付近で外軌側車輪の輪重減少により脱線係数が約1.4に増加したことで乗り上がり脱線が発生しており、図-9に示すようにアニメーションからもそれが確認された。

以上のことから、曲線外軌側から横風が作用する場合には、半径が小さく、かつ走行速度が低いほど乗り上がり脱線を生ずる可能性のあることが示される。ただし、摩擦係数が低い状態、例えば $\mu = 0.25$ の場合は図-8に例

表-3 解析結果 (外軌側からの風圧力)

w=30m/s			
速度 [km/h]	R400	R160	分岐器
10	○	DR	DR
25	○	○	○
40	○	○	
60	○		
75	○		

w=35m/s			
速度 [km/h]	R400	R160	分岐器
10	DR	DR	DR
25	DR	DR	DR
40	DR	DR	
60	DR		
75	○		

○: 曲線通過可能 DR: 脱線

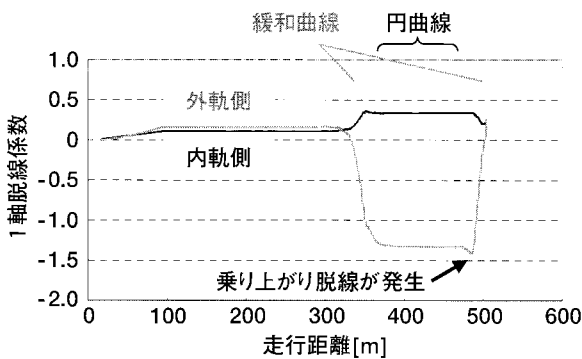


図-8 脱線の例: w = 30m/s、R 160m、V = 10km/h

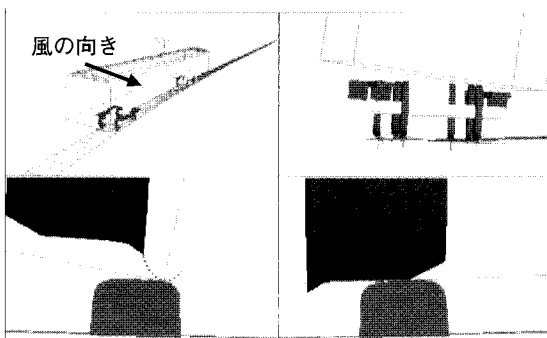


図-9 乗り上がり脱線時のアニメーション

示したシミュレーション条件でも脱線は発生していない。すなわち、ここでの傾向には摩擦係数が強く影響している。

(4) 曲線内軌側から横風が作用する場合

風速30m/s以下では、いずれの曲線でも脱線、転覆ともに生じなかった。風速が35m/sになると、運転の抑止がなされなければ、表-4に示すように各曲線の基本速度近傍で転覆が発生する (図-10)。また、それより低

表-4 解析結果 (内軌側からの風圧力)

w=35m/s			
速度 [km/h]	R400	R160	分岐器
10	○*	○*	○*
25	○*	○*	OT
40	○*	OT	
60	OT		
75	OT		

○: 曲線通過可能 OT: 転覆 *: 片輪走行発生

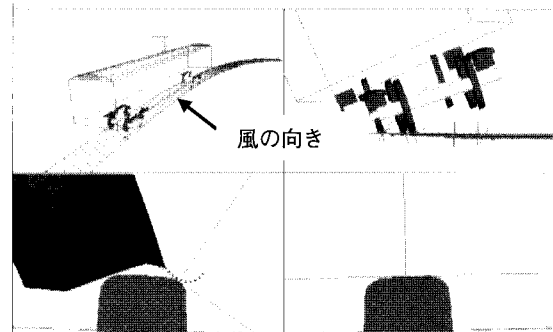


図-10 転覆時のアニメーション

い速度でも、転覆には至らないものの内軌側車輪が浮き上がり片輪走行となることが確認された。

このことから、曲線内軌側から横風が作用する場合には、脱線よりも転覆が生ずる可能性が大きい。

5. おわりに

転覆や脱線が発生する状況を現車で確認することは危険性が高く、現実的な方法ではない。本稿で紹介したように、MBSを利用して実態に近い解析ができるようになりつつある今日、走行安全性のような極限の状況を検討する上ではMBSが有効な検討手段になると期待される。

終わりに、横風の影響のシミュレーションを担当した新潟大学大学院自然科学研究科修士の島田晃一君に感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 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, p.45 研友社, 1993.
- 2) 國枝正春, 鉄道車両の転ぶくに関する力学的解析, 鉄道技術研究報告, pp.2-3, 1972
- 3) 日比野有, 石田弘明, 車両の転覆限界風速に関する静的解析法, 鉄道総研報告, Vol.17, No.4, pp.39-44, 2003.4.
- 4) 種本勝二, 鈴木実, 他, 風洞試験による防風対策の評価, RRR, Vol.62, No.2, pp.10-13, 2005.2.