

1 車両モデルを用いた車両の横風に対する安全性評価

日比野 有* 金元 啓幸* 下村 隆行*

Safety Evaluation of Railway Vehicle Against Crosswind Applying a Full-Vehicle Model

Yu HIBINO Hiroyuki KANEMOTO Takayuki SHIMOMURA

In order to analyze the behavior of a railway vehicle that is subjected to crosswind in more detail, we constructed a simulation program applying a full-vehicle model as developed based on a half-vehicle model. Using the full-vehicle simulation program, we examined the effects those not considered in the half-vehicle model on overturning or wheel unloading ratio. As a result, it has been revealed that the wheel unloading ratio takes a maximum value when the yawing moment is zero. It has also been apparent that when we consider the relationship between the wind speed and the wheel unloading ratio or overturning, it is imperative to evaluate the wheel unloading ratio as averaged through the vehicle nevertheless the static wheel load imbalance of each axle.

キーワード：横風，転覆限界風速，輪重減少率，1 車両モデル，走行安全性

1. はじめに

近年の鉄道車両における軽量化・高速化の傾向は、横風に対する安全余裕を低下させる要因となっており、横風下における車両の走行安全性を精度良く評価することは重要な課題である。

横風に対する鉄道車両の走行安全性を評価する指標の一つに「輪重減少率」あるいは「転覆限界風速」がある。転覆限界風速は、風上側の輪重がゼロ、すなわち輪重減少率が 100% となるときの空気力に対応する風速として定義され、日本では「国枝式」¹⁾ と呼ばれる静的解析式、あるいはそれをベースとして近年の研究成果を反映させた「詳細計算式」²⁾ により、輪重減少率あるいは転覆限界風速を評価することが多い。また、鉄道総研における最近の研究では、詳細計算式を動的解析モデルに拡張し、それまで考慮されてこなかった横風の変動周波数が車両の動的挙動に及ぼす影響を明らかにするとともに、実物車両を用いて、その妥当性を検証してきた^{3) 4)}。

しかし、これらの研究はいずれも半車両断面モデルによるものであり、横風によるヨーイングモーメントや各輪軸の静止輪重アンバランスが輪重減少率（または転覆限界風速）に及ぼす影響を考慮することができない。特にヨーイングモーメントの影響は、トンネル出口等、急激に風が立ち上がり、かつ車体の前と後で空気力の大きさが異なるような場合に重要であり、その影響を定量的に把握しておく必要がある。

そこで本研究では、上記の動的解析モデルを 1 車両モデルに拡張したシミュレーションプログラム（以下、「1 車両シミュレーションプログラム」という）を作成し、これまでの半車両断面モデルでは考慮されなかった要素が輪重減少率（または転覆限界風速）に及ぼす影響を検討したので、それらの結果について報告する。

2. 1 車両モデルによるシミュレーションプログラムの構築

2.1 車両モデル

本シミュレーションの車両モデルは、文献 3) で構築した半車両断面動的解析モデルを 1 車両モデルに拡張したものである。すなわち、半車両断面モデルの自由度（左右・上下・ローリング）に、ヨーイングとピッチングの自由度を追加したものである。車両モデルの y - z 平面図および x - z 平面図を図 1 に示す。特に、 y - z 平面図は半車両断面モデルと同一であり、これまでの静的解析および半車両断面モデルによる動的解析との差異を考察するときに、解析モデルの違いが計算結果に及ぼす影響を最小限に抑えることができ、過去の検討結果との整合性をとりやすく、かつ比較的簡易にシミュレーションプログラムを構築できることが、本車両モデルの特徴である。さらに、本車両モデルでは、静止輪重アンバランスが輪重減少率（または転覆限界風速）に及ぼす影響を検討するために、軸ばね・枕ばねの変位にライナー（調整板）の厚さを初期値として与えることにより、静止輪重アンバランスを設定できるようにした。この車両モデルに対

* 車両構造技術研究部 車両運動研究室

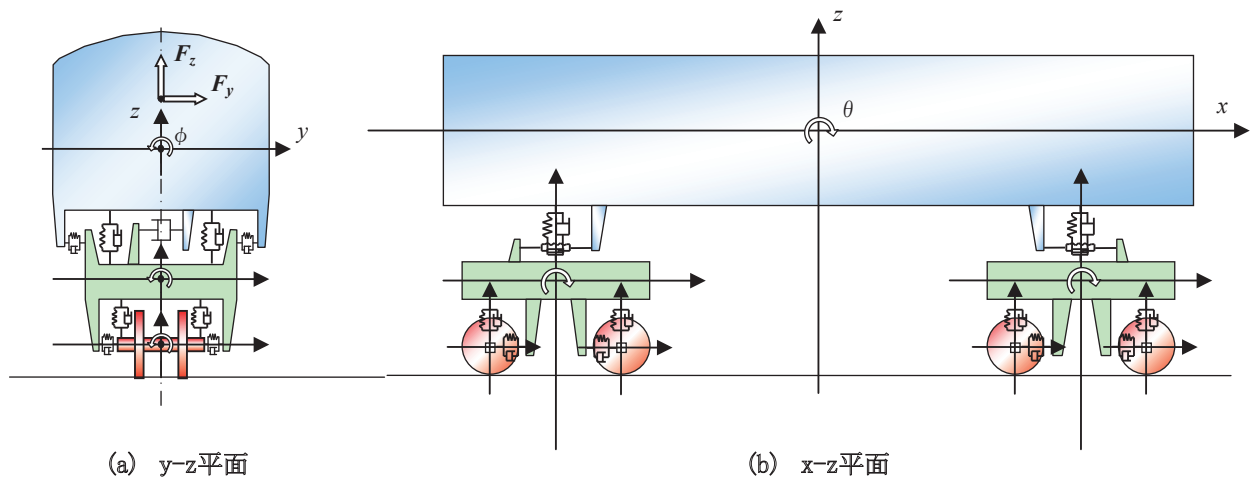


図1 車両モデル

して、各質量要素に関する運動方程式（合計 31 自由度）を導出し、10,000 分の 1 秒刻みでルンゲ・クッタ・ギル法により解くプログラムを作成した。

2.2 シミュレーションプログラムの検証

2.2.1 実車を用いた動的横力負荷試験

本項では、1 車両シミュレーションプログラムの妥当性を検証するために、ヨーイングモーメントを発生させるような横方向の力（横力）を実物車両に動的に負荷し、実測値とシミュレーションによる計算結果とを比較・対照する。

試験は鉄道総研の新車両試験台で行った（図 2）。新車両試験台建屋の外に横力負荷用の柱を建て、柱に取り付けた電動アクチュエータと車体とをワイヤーロープでつなぎ、車両の前後ドア付近の 2 箇所を横方向に牽引した。測定項目は横力、輪重、車体変位、空気ばね内圧等である。横力はワイヤーロープと車体との間に直列につながれたロードセルで測定した。輪重は、輪重・横圧測定軸（PQ 軸）で測定した。車体変位については、ポテンショメータ式変位計で地上からの左右・上下変位を測定し、これらの測定結果から計算により車体傾斜角を算

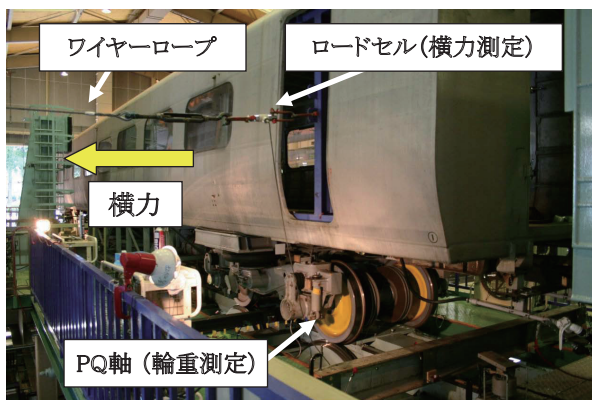


図2 動的横力負荷試験

出した。

半車両断面モデルに関する同様の検証試験は、既に文献 3)、4) で報告されているが、そのときの横力は前後で同位相であったのに対し、本研究ではヨーイングモーメントの影響を検討するため、横力の前後の位相を変えて試験を行った。具体的には、正弦波状に変動する風速を想定し、横力はその 2 乗に比例すると仮定して、次の①～④のケースを設定した。なお、変動周波数はそれぞれ 0.05Hz から 2.5Hz まで変化させた。また、ケース⑤として、自然風による空気力を用いた検証も行った。これには、鉄道総研が 2001 年 12 月から 2004 年 3 月にかけて北海道の強風地で実施した「実物大車両模型による空気力等測定試験」⁵⁾ で測定されたデータを用いた。この試験では、車体の前位と後位でそれぞれ横力と揚力を測定しており、その横力を用いた動的横力負荷試験結果と、同じ横力を入力したシミュレーション結果とを比較した。

- ・ケース① 一波（前位のみ）
- ・ケース② 一波（前後 1/4 周期ずれ）
- ・ケース③ 連続波（前後逆相）
- ・ケース④ 連続波（前後 1/4 周期ずれ）
- ・ケース⑤ 自然風による空気力

上記①～⑤の検証結果のうち、③および⑤の一例を図 3 および図 4 に示す。各図とも、(a) が動的横力負荷試験において車両の前後 2 箇所を負荷した横力の実測値、(b) が第 1 軸の輪重減少率の実測値と計算値、(c) が車体ヨー角変位の実測値と計算値を表す。各図 (b) および (c) から、輪重減少率および車体ヨー角変位について、実測値と計算値は概ね一致することが確認できた。また、ここで示したケース以外の試験結果についても、実測値と計算値は概ね一致した。従って、本研究で作成した 1 車両シミュレーションモデルは、これまでの半車両断面モデルでは検討できなかった外力のヨーイングモーメン

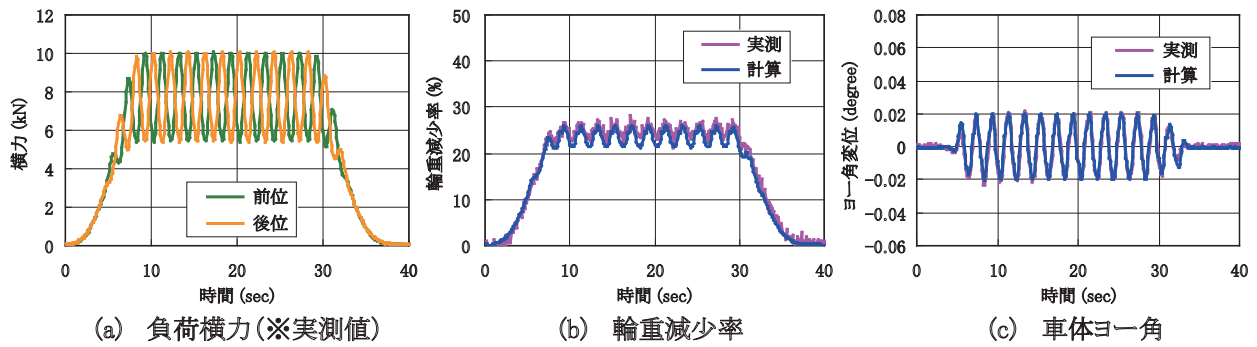


図3 実測値と計算値との比較（ケース③）

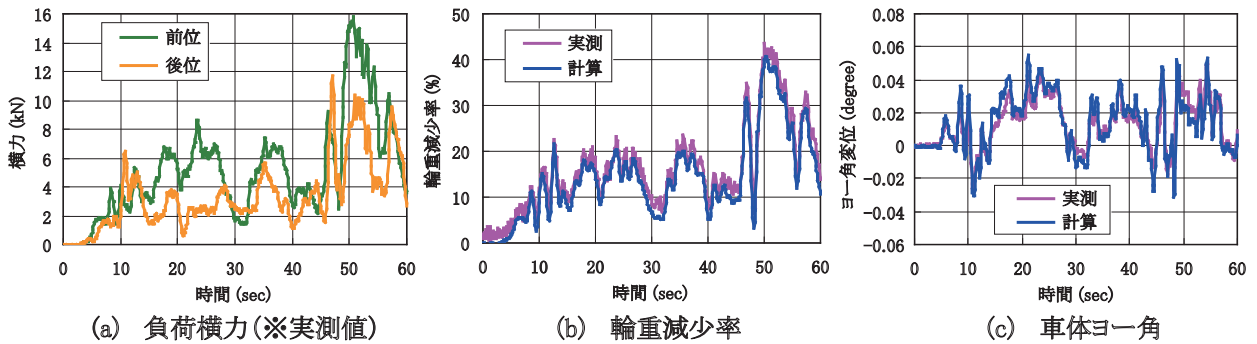


図4 実測値と計算値との比較（ケース⑤）

トの影響を受けた状態での輪重変動を推定する手法として概ね妥当であることが確認できた。

2.2.2 縮尺 1/10 車両模型を用いた風洞試験

本項では、1 車両シミュレーションプログラムの妥当性を検証するために、静止輪重アンバランスが各輪軸に生じている状態の車両模型を用いた風洞試験を実施し、実測値とシミュレーションによる計算結果とを比較・対照する。

本試験で用いる車両模型は、在来線の通勤車両（103系車両）をモデルとした縮尺 1/10 の模型である。空気力に影響を及ぼす車体形状のみならず、台車のばね系や車体の大変位を抑制するストッパ当たりも忠実に再現し、外力に対する車体の変位が実物と相似になるように、ばね定数を設定しているのが特徴である。力学的な相似則については、物理量として、①ばね力、②重力、③慣性力、④空気力に着目し、空気力と車体変位との関係に原型との相似則が成り立つように倍率を検討した。具体的には、ばね力と重力との関係から、模型のばね定数を原型の 1/100 倍、質量を原型の 1/1000 倍とした。本車両模型の諸元については、近年の在来線通勤型車両を想定して設計した。車体外形については、先述の通り 103系車両をモデルとしたが、台車については、ボルスタレス台車をモデルとした。また、車両質量についても軽量ステンレス車両をモデルとした。具体的には、1 車両の質量が約 25ton の通勤車両を想定し、1 車両の模型質量

をその 1/1000 倍である約 25kg（車体質量約 15kg、1 台車質量約 5kg）とした。また、軸ばね、まくらばね定数は、一般的なボルスタレス台車の諸元値を想定し、その 1/100 倍に近い値のコイルばねを選定した。

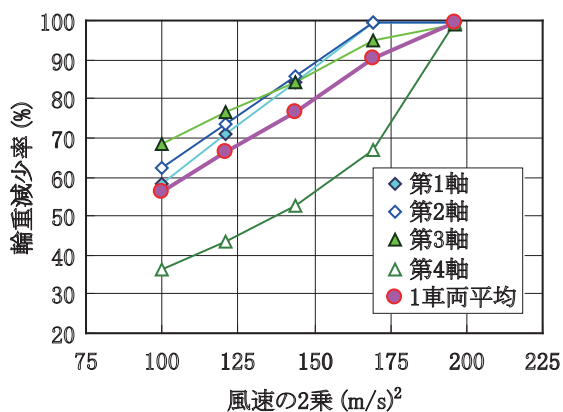
風洞試験は鉄道総研の大型低騒音風洞（米原風洞）で行った（図 5）。試験では、風速を徐々に増加させ、風速と各車輪の輪重との関係を測定した。車両模型の輪重は、各車輪直下のレール部分に埋め込まれたロードセルにより測定した。一方、シミュレーションでは、軸ばねと枕ばねの高さを調整するライナー（調整板）の厚さを考慮することにより、静止輪重アンバランスを設定した。実際の車両あるいは上記の車両模型では、車体のねじれや非対称性、また、ばね等の不均一性などにより静止輪重アンバランスが生じていると考えられるが、本研究ではこれらの影響を各ライナーの厚さを調節することにより等価的に考慮した。模型車両の静止輪重実測値および静止輪重アンバランスを表 1 に示す。表 1 において、軸番号は前から数え、前後左右は車両の進行方向（車両模型の片側の妻面を進行方向前側と決める）を基準とする。風洞試験では、表 1 に示す「右」側から風を当てており、「右」側の輪重が軽い場合のアンバランスをプラスの値で表示してある。なお、実際の鉄道車両では静止輪重アンバランスの整備目標値を 10%～15% 程度としていることが多く、表 1 に示す車両模型の第 3 軸および第 4 軸に見られるような大きなアンバランスは、実態を想定し



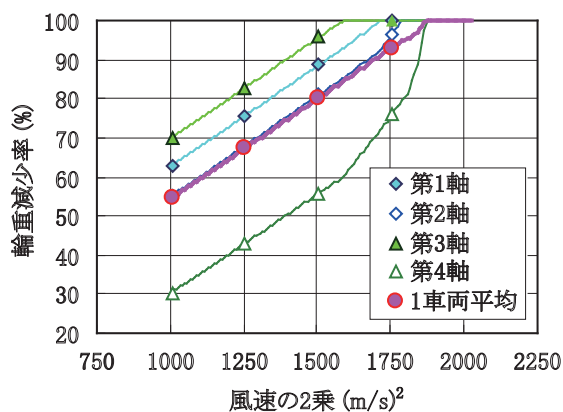
図5 縮尺 1/10 車両模型による風洞試験

表1 静止輪重（模型実測値とシミュレーション設定値）

軸番号	静止輪重 (N) (車両模型)				静止輪重 (kN) (シミュレーション (実車相当))			
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.1	No.2	No.3	No.4
右側	28.5	31.5	26.4	39.6	29.0	31.3	26.7	39.4
左側	33.5	31.2	35.9	24.2	33.5	30.9	35.9	24.0
アンバランス (%)	8.0	-0.5	15.2	-24.1	7.2	-0.7	14.7	-24.3



(a) 風洞試験結果(模型)



(b) シミュレーション結果(実車相当)

図6 風速の2乗と輪重減少率との関係（風向角90度）

て設定したわけではない。一方、シミュレーションでは、模型諸元を実車相当に換算した上でライナーの厚さを調節することにより車両模型と概ね同等の静止輪重アンバランスを設定した。シミュレーションにおいて設定した静止輪重を表1に併せて示す。

風洞試験における、風速の2乗と輪重減少率との関係を図6(a)に示す。風洞試験では、一部の軸の輪重減少率が100%になっても車両は転覆せず、1車両すべての軸の輪重減少率が100%になってから転覆の様子を確認した。また、風速の2乗に対する1車両平均の輪重減少率の増加率（グラフの傾き）は転覆に至るまでほとんど一定であることを確認した。ここで、1車両平均の輪重減少率とは、各輪軸の輪重減少率の算術平均値のことではなく、1車両の右側輪重の算術平均値と左側輪重の算術平均値から算出した輪重減少率のことである。一方、シミュレーションでも、図6(b)に示すように、1車両平均の輪重減少率に関して風洞試験と同様の傾向が見られた。従って、本研究におけるシミュレーションは、各輪軸に静止輪重アンバランスが生じている場合の転覆を評価する手法としても概ね妥当であると考えられる。

3. 半車両断面モデルでは考慮しない要素が転覆に及ぼす影響

3.1 ヨーイングモーメントの影響

ヨーイングモーメントが輪重減少率に及ぼす影響を検討するために、図3(a)と同様の連続波を想定し、前後の横力の位相を0~1/2周期まで1/16周期ずつずらしてシミュレーションを行った。なお連続波の変動周波数は、0.1Hz、0.3Hz、0.5Hz、1.0Hzとした。シミュレーションに使用した入力波形の例と各周波数における位相差と輪重減少率の最大値との関係を図7に示す。図7(b)から、いずれの周波数においても前後の横力の位相が同位相であるときに輪重減少率は最も大きくなることが分かった。また、横力の変動周波数が車両の下心ローリングの固有振動数（本試験車両では約0.6Hz）に近い場合に位相差の影響を受けやすく、それ以外の周波数ではその影響は比較的小さいことが分かった。さらに、位相差が π （逆位相）のときには、横力の変動周波数に関わらず、輪重減少率はほぼ同程度となることが分かった。

次に、急激な風の立ち上がりのモデルとして、図8(a)に示すような簡易なモデルを考える。前位の空気力は時間 t_1 で正弦波状に立ち上がり、最大値に達した後はその大きさを維持するものとする。一方、後位の空気力は、

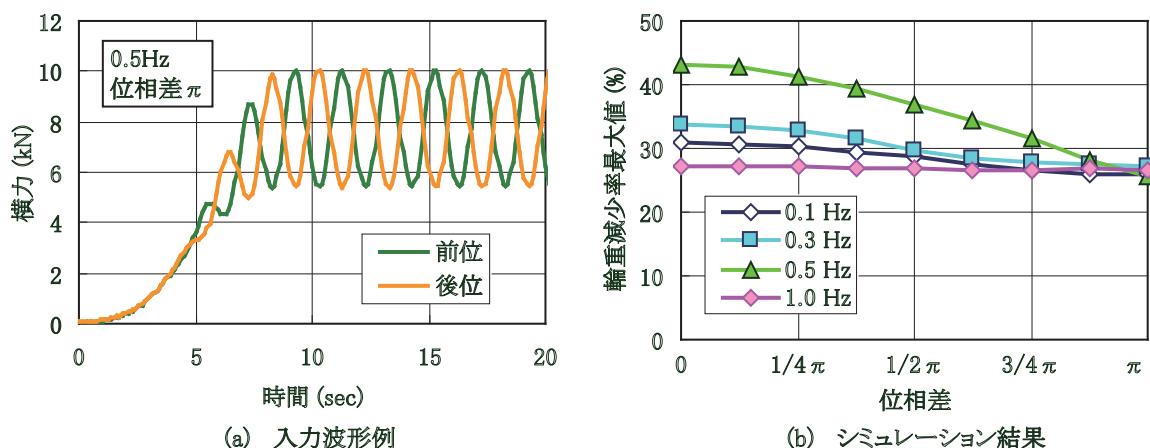


図7 横力の位相差と輪重減少率最大値との関係

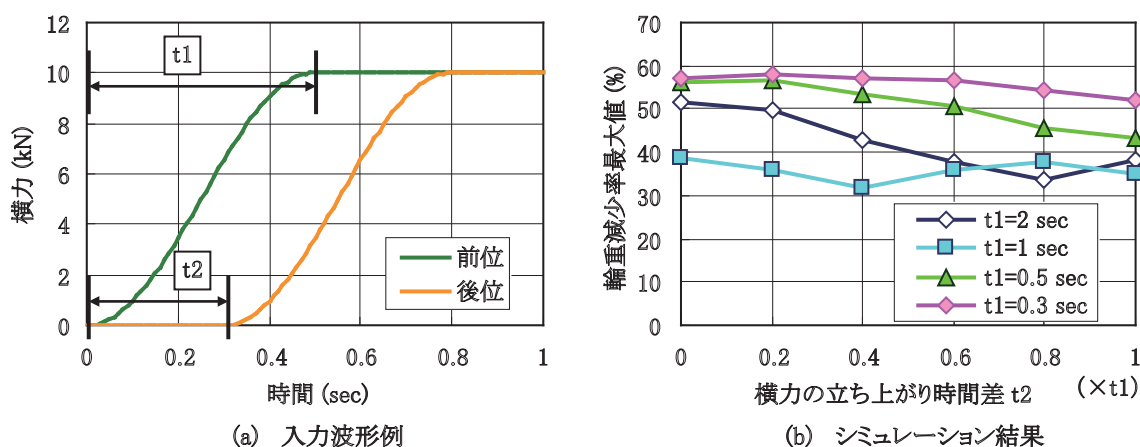


図8 横力の立ち上がり時間差と輪重減少率最大値との関係

前位の立ち上がりから時間 t_2 後に立ち上がり、その波形は前位と同一とする。立ち上がり時間 t_1 は 2 秒, 1 秒, 0.5 秒, 0.3 秒とし、立ち上がりの時間差 t_2 は、0 から t_1 まで 0.2 t_1 刻みとする。すなわち $t_2=0$ は、前後の横力が同位相で立ち上がる場合であり、 $t_2=t_1$ は、前位の空気力が立ち上がり終わった後に後位が立ち上がり始める状況を想定しており、トンネル出口等の状況を簡易的に模擬したものである。後者の場合、立ち上がり時間 t_1 が短いほど速い走行速度でトンネル出口から強風区間に突入したことを表す。例えば、車両長 20m の在来線車両を例にとると、前位と後位の空気力の作用点を、それぞれ半車体の中心と仮定すると、上記の立ち上がり時間は、それぞれ走行速度が約 18km/h, 36km/h, 72km/h, 120km/h 程度である場合に相当する。各立ち上がり時間における、時間差 t_2 と輪重減少率の最大値との関係を図 8 (b) に示す。同図から、多少のばらつきはあるものの、前後の横力が同位相で立ち上がるときに輪重減少率は概ね最大となることが分かった。

以上より、横力によるヨーイングモーメントの影響については、前後の横力が同位相で作用するとき、すなわちヨーイングモーメントがゼロであるときに輪重減少率

が最も大きくなることが分かった。

3.2 静止輪重アンバランスの影響

本節では、輪重減少率（または転覆限界風速）を評価する際の静止輪重アンバランスの影響について検討する。これまでの半車両断面モデルによる検討では、各輪軸の静止輪重アンバランスの影響を考慮することができず、逆にその結果として、風速に対する車両の輪重減少率は一意に定まるものであった。しかし、実際の車両の各輪軸には、必ず多少なりとも静止輪重アンバランスがあり、図 6 で示したように、軸によって風速に対する輪重減少率が異なってくる。そこで、本節では、静止輪重アンバランスが輪重減少率（または転覆限界風速）に及ぼす影響をシミュレーションにより検討する。

表 1 の実車相当シミュレーションと同一の車両諸元を用いて、静止輪重アンバランスの付き方を変えた場合の転覆限界風速を計算した。計算では、軸ばねと枕ばねのいずれか一方または両方の 1～2 箇所ライナーを挿入し、その位置を変えることにより静止輪重アンバランスのバリエーションを設定した。また、転覆現象を対象とするので、前述の風洞試験結果を踏まえ、すべての軸の

表2 静止輪重アンバランスの設定例と転覆限界風速

Case	ライナー挿入箇所								静止輪重アンバランス (%)					転覆限界 風速 (m/s)
	軸ばね				空気ばね				軸位				平均	
	第1軸 右	第1軸 左	第2軸 右	第2軸 左	第1台車 右	第1台車 左	第2台車 右	第2台車 左	1	2	3	4		
0									0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	43.2
1	○								-13.1	11.6	1.4	1.4	0.3	43.2
2		○							13.1	-11.6	-1.4	-1.4	-0.3	43.2
3			○						11.6	-13.2	1.4	1.4	0.3	43.2
4				○					-11.6	13.2	-1.4	-1.4	-0.3	43.2
5					○				-3.6	-3.6	4.5	4.5	0.4	43.0
6						○			3.6	3.6	-4.5	-4.5	-0.4	43.3
7	○					○			-16.7	8.0	5.9	5.9	0.7	42.8
8							○		-9.5	15.2	-3.1	-3.1	-0.2	43.4
9	○							○	-8.7	16.1	-2.2	-2.2	0.7	43.1
10		○						○	-17.6	7.1	5.0	5.0	-0.2	43.1
11		○			○				9.5	-15.2	3.1	3.1	0.2	43.1
12	○					○			16.7	-8.0	-5.9	-5.9	-0.7	43.3
13		○					○		17.6	-7.1	-5.0	-5.0	0.2	43.0
14	○							○	8.7	-16.1	2.2	2.2	-0.7	43.4

注) 転覆限界風速の値は、特定の前提条件のもとで求められたものであり、一般性は無い

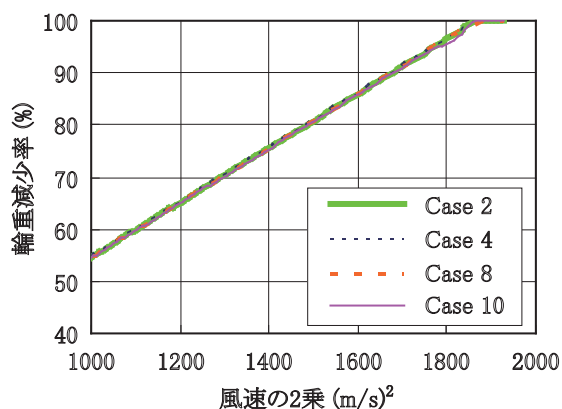


図9 風速の2乗と1車両平均の輪重減少率との関係

輪重減少率が100%となる風速を転覆限界風速とした。ライナー挿入箇所、静止輪重アンバランス、転覆限界風速の計算結果を表2に示す。なお、シミュレーションでは横力のみ考慮し、横力係数は1.2とした。また、ライナーの厚さは、軸ばねは10mm、枕ばねは20mmとし、車両が前後対称であるため、軸ばねライナーの挿入箇所は第1軸および第2軸のみとした。

表2から、1車両平均の静止輪重アンバランスが同等であれば、各輪軸のアンバランスの付き方に関わらず転覆限界風速はほぼ同等となることが分かった。また、この場合には、風速の2乗と1車両平均の輪重減少率との関係もほぼ同等となることが分かった。例として、1車両平均の静止輪重アンバランスが同程度であるケース(Case 2, 4, 8, 10: いずれも1車両平均の静止輪重アンバランスが-0.2 ~ -0.3%)の、風速の2乗と1車両平均の輪重減少率との関係を図9に示す。同図から、各輪軸のアンバランスの付き方に関わらず、風速の2乗と1車両平均の輪重減少率との関係はほぼ同一となっていることが分かる。このことは、1車両平均の輪重減少率を指標とすることによって、転覆に至るまでの風速と輪重減少率との関係を一意に記述できることを意味する。

以上より、各輪軸の静止輪重アンバランスの影響につ

いては、各輪軸のアンバランスの付き方に関わらず、1車両平均の輪重減少率を指標とすることにより、風速と輪重減少率との関係、あるいは転覆との関係を適切に評価できることが分かった。

4. まとめ

転覆限界風速の推定精度をより向上させるため、1車両モデルによるシミュレーションプログラムを構築し、その妥当性を検証するとともに、これまでの半車両断面モデルでは考慮されなかった要素が輪重減少率(または転覆限界風速)に及ぼす影響を検討した。

実物車両および車両模型を用いた検証試験の結果、本手法の妥当性が確認された。これにより、横風を受けた車両の挙動をより詳細に解析することが可能となり、これまでの半車両断面モデルによる解析結果との差を定量的に評価できるようになった。また、本手法による検討結果から、ヨーイングモーメントの影響については、半車両断面モデルが転覆に対して最も厳しいモデル、すなわち安全側のモデルとなっていること、また、静止輪重アンバランスの影響については、1車両平均の静止輪重アンバランスを考慮することにより半車両断面モデルに帰着できることから、通常の横風に対する安全性を検討する際には、半車両断面モデルでも十分合理的な評価ができることが明らかになった。

従って、本手法の意義は、これまでの半車両断面モデルの合理性を定量的に評価した点にあると考える。また横風による転覆事故の詳細な原因調査や、特殊な風況における車両の挙動を詳細に解析する場合等に、本手法が有用なツールになり得ると考える。

文献

- 1) 国枝正春：鉄道車両の転ぶくに関する力学的理論解析，鉄道技術研究報告，No.793, 1972
- 2) 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
- 3) 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)，Vol.76, No.766, pp.1396-1405, 2010
- 4) 日比野有，金元啓幸，下村隆行：横風の変動周波数が車両の動的挙動に及ぼす影響，鉄道総研報告，Vol.23, No.11, pp.7-12, 2009
- 5) 日比野有，今井俊昭，種本勝二：自然風下の実物大車両模型に働く空気力の観測，鉄道総研報告，Vol.13, No.12, pp.47-52, 2004