

横風強風時の車両走行安定性に関する 数値解析とシミュレータ実験

丸山喜久¹・山崎文雄²

¹正会員 博(工) 東京工業大学 都市地震工学センター(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)
E-mail:maruyama@cv.titech.ac.jp

²正会員 工博 千葉大学教授 都市環境システム学科(〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

高速道路走行車両の横風安定性を定量的に評価することを目的に、車両モデルを用いた数値解析とドライビングシミュレータを用いた走行模擬実験を行った。運転者の反応と車両の運動の相互作用を考慮できる人間-自動車系操舵モデルを用いると、走行模擬実験の結果が比較的精度良く再現されることが分かった。これより、車両に依存するパラメータが適切に設定できれば、実車走行試験やドライビングシミュレータによる走行実験を多数行わずとも、従来まであまり定量的に評価されていなかった強風時の車両の走行安定性について、系統立てた評価が可能になるものと期待される。

Key Words : strong crosswind, vehicle model, driving simulator, driver-vehicle interaction, running stability

1. はじめに

著者らは、東京大学生産技術研究所に導入されたドライビングシミュレータを用いて、地震時の高速道路運転者の反応を定量的に評価することを目的に地震時車両走行模擬実験を行っている¹⁾。このドライビングシミュレータは、1999年に東京大学生産技術研究所に導入されて以来、様々な研究目的で使用されている^{2),3)}。このドライビングシミュレータには、高速道路模擬風景が搭載されており、運転者前方の大型スクリーンに映し出される。また、ステアリング反力装置を有した模擬運転席を有しており、非常に現実感に富んだシミュレーションが期待できる。このドライビングシミュレータには電動6軸動揺装置が装備されており、被験者に重力を作用させることで、加減速を再現している。

高速道路走行車両に作用する外力として、地震動以外に横風強風も考えられる。高速道路の整備や、長大橋建設により高速走行の機会が増え、横風外乱安定性への要求は一層厳しくなっている。ビルの谷間を走る都市内高架橋では走行車両にビル風が局所的な突風として作用し、安定走行に影響を与えるものと考えられる。また、斜張橋などでも橋梁主塔部の急激な風速変化が車両の走行に影響を与えることも報告されている^{4),5)}。海岸部に建設される高

速道路において、とくに日本海側の冬季では、平均風速15m/sから20m/sの季節風が車両の走行に影響を与える⁶⁾。台風上陸時における大型車両の転倒事故なども報告されている⁷⁾。その他、トンネルの出口、横断陸橋、谷間の風道など、遮風物により無風に近い状態から風の強いところへの突入の危険性も指摘されている。

著者らの行ったヒアリング調査では、日本道路公団が管轄している高速道路で、10分間の平均風速が25m/s以上(一部、東京湾アクアライン等20m/s)になると通行止めの処置がとられている。首都高速道路公団では、平均風速17m/sで通行止めと定めている。しかし、実際に強風時の通行規制を決定する際には、平均風速15m/sで警察車両の実走をもって協議を行うことにしている。このように、強風時の通行規制基準値は経験的に定められているのが現状である。また、道路構造物に対する風対策は充分に行われているが、走行車両への対策はあまり行われていない。遮風対策としては、防風柵や防風ネットなどが効果的ではあるが、構造物の風荷重を増加させ耐風性能を悪化させることもある⁸⁾。

そこで、本研究では、車両応答数値モデル⁹⁾を用いて走行車両の横風応答特性を評価した。また、ドライビングシミュレータを用いて横風時走行模擬実験を行い、運転者の反応を含め、強風時の車両走行

安定性について定量的な検討を行った．さらに，この実験結果と人間 - 自動車系操舵モデルによる解析結果を比較検討した．

2．走行車両の横風応答特性

図-1 に，本研究で用いた車両モデルの座標系を示す．車両の基本運動は重心固定座標系で考えると x, y, z 軸の並進・回転の 6 自由度であるが，本研究では路面からの外乱入力やエンジンの振動の影響を考慮しないので z 軸方向の並進運動であるバウニング運動は考慮せず 5 自由度系として考えている．式(1)-(3)に車両前後方向，横方向， z 軸まわりの回転運動であるヨーイングに関する運動方程式を示す．

$$m(\dot{u} - v\dot{\psi}) = \sum_i \sum_j (F_{xij} \cos \delta_{ij} - F_{yij} \sin \delta_{ij}) = \sum_{i,j} F'_{xij} \quad (1)$$

$$m(\dot{v} + u\dot{\psi}) = \sum_i \sum_j (F_{xij} \sin \delta_{ij} + F_{yij} \cos \delta_{ij}) = \sum_{i,j} F'_{yij} \quad (2)$$

$$I_z \ddot{\psi} = (F'_{y11} + F'_{y12})l_f - (F'_{y21} + F'_{y22})l_r + (-F'_{x11} + F'_{x12})\frac{d}{2} + (-F'_{x21} + F'_{x22})\frac{d}{2} \quad (3)$$

ここで， u は x 軸方向速度， v は y 軸方向速度， ψ はヨー角， m は車両の慣性質量である． δ_{ij} は x 軸方向とタイヤの向きとの角度差（前輪操舵角）を表す．また， F_{xij} はタイヤに作用する駆動・制動力， F_{yij} はタイヤの横力である．これらは，マジックフォーミュラモデル¹⁰⁾により算出している． I_z はヨー慣性モーメント， l_f は車両重心位置と前輪車軸間の距離， l_r は後輪車軸間の距離， d は左右のタイヤ間距離である．

図-2に示すような横力 Y_w とヨーイングモーメント N_w を車両の運動方程式（式(2)，(3)）の右辺に加え，風速 w の横風が作用したときの車両の応答を計算した． Y_w と N_w は次のように書ける．

$$Y_w = C_y \rho S \{u^2 + (v+w)^2\} / 2 \quad (4)$$

$$N_w = C_n \rho S (l_f + l_r) \{u^2 + (v+w)^2\} / 2 \quad (5)$$

ここで， S は車両の代表面積として車両前面投影面積を用い， ρ は空気密度である． C_y は横力係数， C_n はヨーイングモーメント係数であり，いずれも図-2に示す空力横滑り角 β_w の関数である．本研究では，横力係数，ヨーイングモーメント係数は，ドライビングシミュレータに搭載されている数値データ

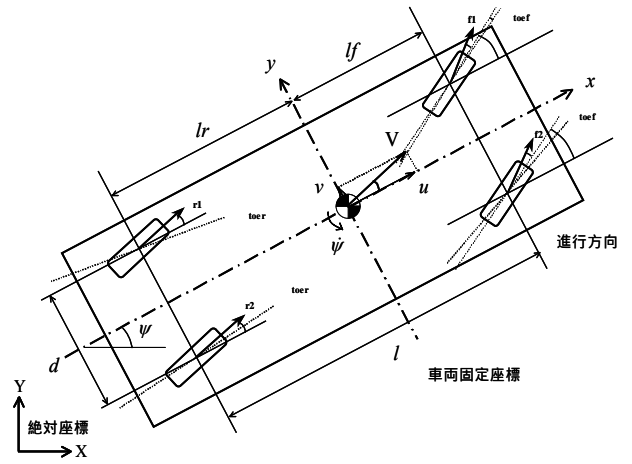


図-1 車両モデルの座標系

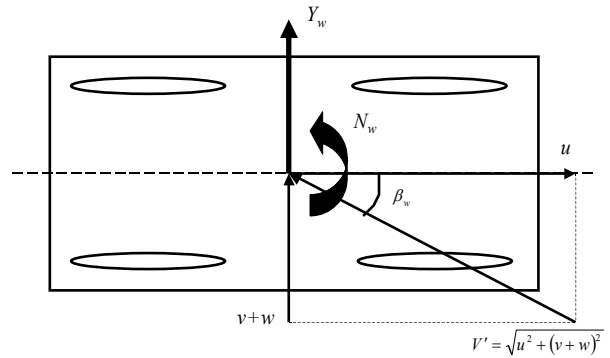


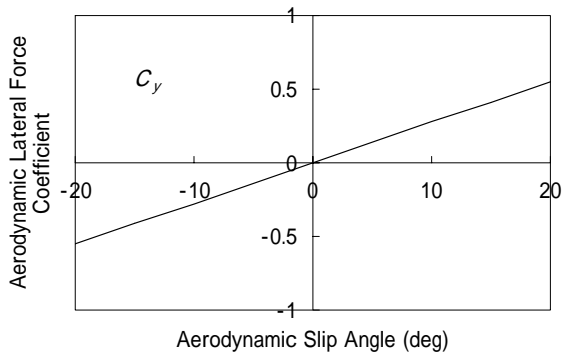
図-2 横風が走行車両に及ぼす空力

（図-3）を用いた．表-1に，車両の数値モデルのパラメータ値を示す．これらの値は，ドライビングシミュレータに搭載されている車両モデルと同じ値に定めており，普通小型自動車を対象としている．この他，ロール角，ピッチ角などは著者らの行っている走行車両の地震応答解析⁹⁾と同様のアルゴリズムで算出し，パラメータについても同じ値を使用している．

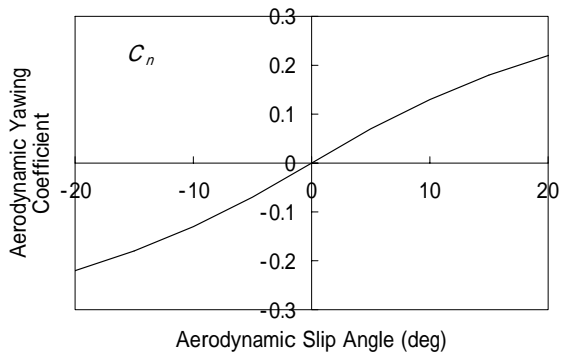
この数値解析では，運転者の反応を考慮していないので，走行車両に横風が作用した場合，大きなヨー角を生じる．このため，初期状態では重心位置に直角に風速が作用すると仮定しても，車両が大きく斜めに向くと車両に作用する風向の変化の影響は無視できない．ヨー角が生じた場合の空力横滑り角は式(6)のように書ける．

$$\beta_w = \arctan \left(\frac{v + w \cos \psi}{u + w \sin \psi} \right) \quad (6)$$

図-4に，時刻5-8秒の3秒間に一定風速10m/s，20m/sを走行速度100km/hの車両に作用させた場合の解析例を示す．横風は，車両の進行方向右側より作用さ



(a) 横力係数



(b) ヨーイングモーメント係数

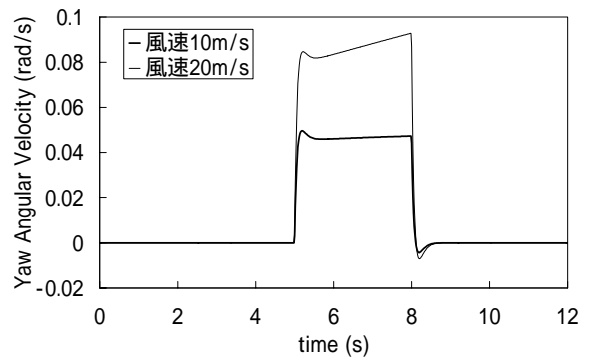
図-3 本研究で用いた空力係数と空力横滑り角の関係

表-1 本研究で用いた車両モデルのパラメータ

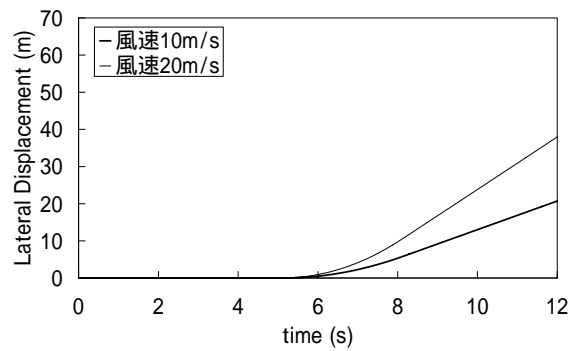
記号	定義	値	単位
m	車両質量	1100	kg
l_f	前輪軸と重心間の距離	1.0	m
l_r	後輪軸と重心間の距離	1.635	m
I_z	ヨー慣性モーメント	637	kgm ²
d	トレッド	1.505	m
ρ	空気密度	1.245	kg/m ³
S	車両前面投影面積	1.92	m ²

せている。風速が20m/sの場合では、3秒間の横風を作用させることでヨー角が約15度発生し車両は大きな横ずれ量を示すことになる。しかし、本来であれば運転者が修正操舵を施すので、このような走行軌跡を示すことはないが、ハンドル操舵を与えない状態での車両そのものの応答特性を把握することも重要な事象である。

図-5に、走行車両の応答量の最大値と車速、風速の関係を示す。ここでの風速条件は、一定風速を持つ横風を1秒間車両に作用させている。風速の作用



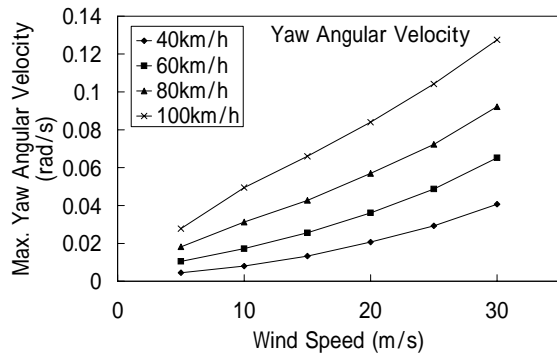
(a) ヨー角速度



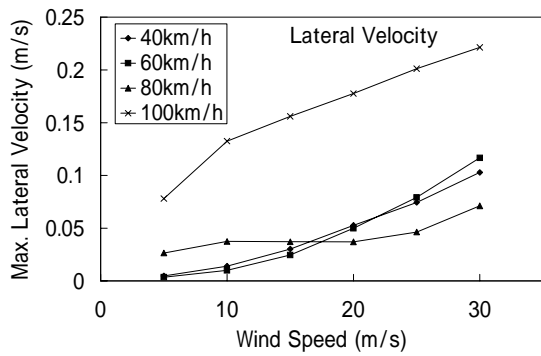
(b) 走行軌跡

図-4 本研究で構築した車両モデルの横風応答解析例(初速 100km/h)

時間が短く、ヨー角も最も大きい場合で約5度であることから、空力横滑り角は車両が受風する横風の風向の変化を考慮せず、 ψ を0として式(6)より算出した。これによると、ヨー角速度については、車速、風速が増加するにつれて応答量も一様に増加していく。高速運転で横風を受風した場合、ヨーイングが運転者に不安感を与えている¹²⁾。このことから、車速、風速が増大するにつれて車両の走行安定性が損なわれることが分かる。車両横速度に関しては、車速が100km/hのときに応答量が大きくなっている。図-6に、風速25m/sの横風を1秒間加えたときの車速による応答量の違いを示す。ここでは、進行方向右側より横風を作用させている。車速が60km/hのときは風下側に横速度を生じている。しかし、車速が80km/h、100km/hと大きくなるにつれて風上側に横速度を生じている。この理由としては、車速が大きくなるにしたがって、大きなヨー角速度で車両が回転することによる遠心力が影響しているものと考えられる。



(a) ヨー角速度



(b) 車両横速度

図-5 車速・風速と車両の応答量の関係

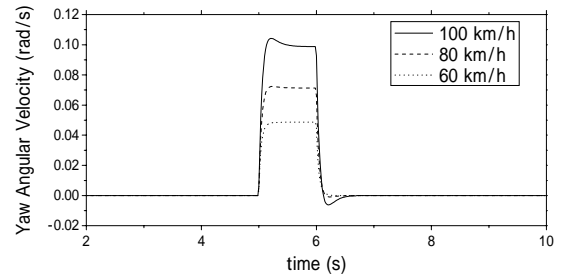
3. ドライビングシミュレータを用いた横風時走行模擬実験

(1) 平均化時間と突風風速の関係

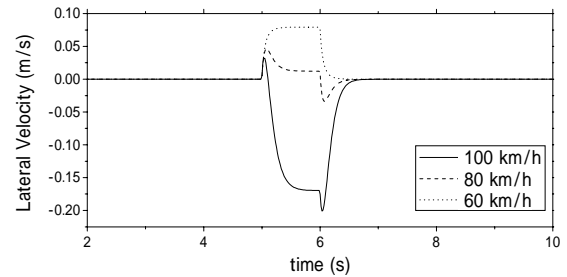
わが国では、平均風速の評価時間に10分間を用いている。しかし、1時間平均を用いたり風速によって評価時間が変わるものもあるなど、各国間で必ずしも定まったものではない¹³⁾。日本道路公団や首都高速道路公団で行っている強風時の通行規制では、10分間の平均風速によりその対応を決定している。

走行車両に作用する突風の風速は当然ながら10分平均風速よりも大きいものと推測される。定常な乱流を仮定すると、変動風速はカルマン型のパワースペクトルで近似できる¹⁴⁾ことが知られている。斉藤・神田¹³⁾は様々な乱れの時間スケールをもつ自然風をカルマン型のパワースペクトルから生成し、平均化時間とピークファクターの関係を評価している。この結果からは、10分平均風速に対して2秒間の風速記録は約1.5倍程度大きくなることが示されている。

一方、実際の台風時には、風速の非定常性の影響



(a) ヨー角速度



(b) 車両横速度

図-6 車速による横風応答量の違い (風速 25m/s)

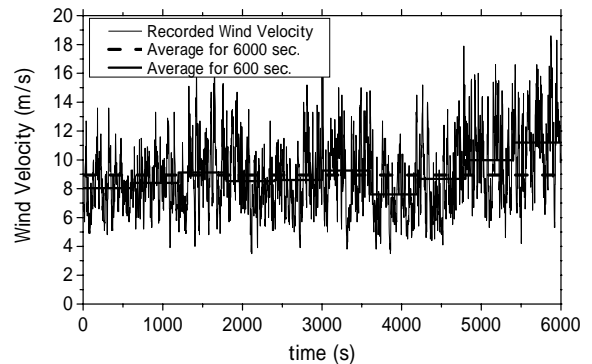


図-7 風速記録と平均風速の変動

等から、さらに大きな瞬間風速が作用する可能性がある。図-7に、東京大学柏キャンパスにおける実風速データを示す。このデータは、2002年10月1日の17時50分から21時まで、台風21号が通過したときに記録されたもので、記録の時間間隔は2秒である。観測点は、地上10mの位置にあり、図-7は観測された風速を示している。また、6000秒間の平均値と10分平均風速の変動の様子も併せて示している。6000秒間の風速の平均は8.9m/sであるのに対して、10分平均風速は最大で11.2m/s、最小で7.6m/sとなっている。図-8に10分平均風速に対する様々な平均化時間で算出した平均風速の比の最大値を示す。具体的には、平均風速を算出する時間幅を2秒から300秒に変化させ(ただし、時間幅2秒は記録データそのも

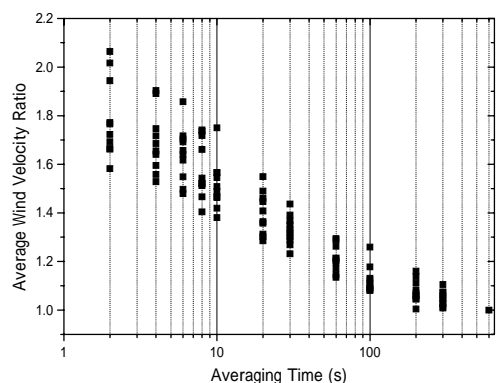


図-8 10分平均風速に対する様々な平均化時間で算出した平均風速の比



図-9 本研究で使用したドライビングシミュレータ

の), その平均風速をそれぞれの区間の10分平均風速で除し, その最大値をプロットした. これによると, 平均化時間が短くなるにつれて10分平均風速に対する比は大きくなり, 2秒間の風速記録に関しては, 2倍程度大きな風速を示すことも充分あり得ることが分かる.

(2) シミュレータ実験と実車走行試験の比較

ここまで論じてきた走行車両の横風応答解析では運転者の反応を考慮していない. 車両の応答特性を把握することは重要なことであるが, 自動車は運転者が操舵することにより目標コースを走行できるので, 運転者の強風時の反応特性を評価することも重要である.

そこで, 東京大学生産技術研究所が保有するドライビングシミュレータ(図-9)を用いて, 横風強風時走行模擬実験を行った. このドライビングシミュレータは, 三菱プレジジョン(株)の開発した訓練/研究用ドライビングシミュレータで, 高速道路模擬風景やステアリング反力装置を有した運転模擬席

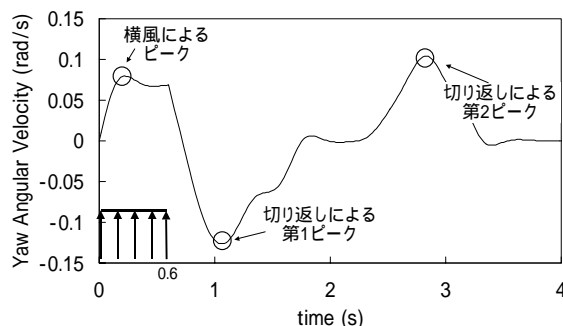
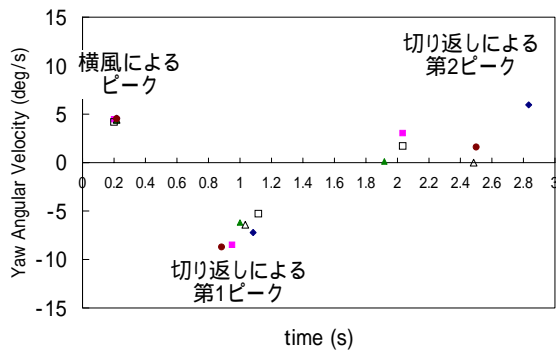


図-10 ヨー角速度の各ピーク値(車速 90km/h, 風速 22.5m/s)

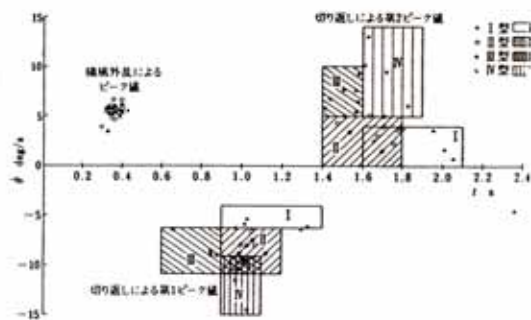
を有しており¹⁾, 現実に近い走行シミュレーションが期待される. このドライビングシミュレータには, 一定風速の横風を入力できる機能が搭載されているが, 本研究ではドライビングシミュレータの制御プログラムを改良し, 幅広い風速条件下での走行実験が行えるように, 任意のテキストデータから風速を取得できるようにした. また, 実験中の運転者の反応は, ドライビングシミュレータの付加PCでハンドル角度や車速など全19項目にわたり記録している.

強風時の走行実験としては, 人工横風装置などを用いた実車走行試験^{15),16)}, 車両に横風を受けたときと等価なヨーイングモーメントを発生させる高圧水噴射装置を利用する方法¹⁷⁾, 高速道路において自然強風下で実車試験を行う方法^{18),19)}などがこれまでに行われている. 人工横風発生装置を利用する方法は, 走行コースや横風を生成する装置など大がかりな装置を必要とするほか, 被験者が横風の生じる地点を予測できるという問題もある. ヨーイングモーメント発生装置を利用する方法は, 突風時の走行シミュレーションには適しているが, 橋梁主塔などの障害物による風速の変動の影響を評価する場合などには向かず, 実験車両の走行コースも必要となる. 自然強風下での実車試験は, 各被験者に同一の走行条件を与えられないという欠点がある. もし, ドライビングシミュレータが実車試験と近い実験結果を与えることができるのであれば, 強風時の運転者の反応特性について定量的な評価を行うための強力なツールとなると期待できる.

そこで, 本研究では人工横風装置を用いた実車走行試験と同じ走行条件を模擬し, ドライビングシミュレータにより得られた実験結果と既往の実車試験結果を比較した. 鬼頭ら¹⁵⁾は, 長さ110mの直線道路において, 人工横風発生装置を用いてコース上の幅15mで送風している. ドライビングシミュレータの走行実験では, 被験者6名に対して指示車速



(a) ドライビングシミュレータ実験結果



(b) 実車試験結果¹⁵⁾

図-11 ヨー角速度ピーク値の分布（車速 90km/h，風速 22.5m/s）

90km/h，横風風速22.5m/sという実車試験と同じ走行条件で実験を行い，得られた結果を比較した．図-10に示すようにヨー角速度について，横風外乱によるピーク値，切り返しによる第1ピーク値，切り返しによる第2ピーク値の3つのピーク値とその時刻を求めた．これらに関して6名の実験データを整理した結果を図-11(a)に示す．また，鬼頭ら¹⁵⁾による実車走行試験における結果を図-11(b)に示す．シミュレータ実験の結果と実車試験の結果を比べると，横風外乱によるヨー角速度のピーク発生時刻は，実車試験の結果が0.35秒付近に分布しているのに対して，シミュレータ事件の結果は0.2秒付近にまとまって見られ，これらの時間差は約0.15秒である．車速90km/hで0.15秒間走行すると走行距離は約4mであり，普通自動車の車長とほぼ等しくなる．シミュレータ実験では0.6秒間横風が重心位置に作用しているが，実車試験では横風発生装置突入時から車両の前面が突風の影響を受け始め，約0.15秒後車両全体が送風帯に入り込み車体全体が受風する．このような理由で，横風外乱によるピーク発生時刻が約0.15秒ずれていると考えられる．ピーク値に関しては，本研究の車両モデルが実車試験とほぼ同等の普通小型自動車を想定しているため，比較的近い値を示し

表-2 被験者の年齢の分布

年齢	男性	女性	合計
-20	1	0	1
21-30	10	2	12
31-40	8	0	8
41-50	5	0	5
51-	7	0	7
全年齢	31	2	33

表-3 被験者の運転頻度の分布

運転頻度	男性	女性	合計
ほぼ毎日	5	0	5
週に2-3日	12	0	12
月に2-3日	6	0	6
ほとんど運転しない	8	2	10

ている．切り返しによる第1ピーク値が発現される時間はほぼ一致しており，そのピーク値も近い．切り返しによる第2ピークに関しては，実車試験の方がピーク値が大きく，またピーク値の現れる時間も短くなっている．これは，実車試験では被験者に人工横風発生装置による強風発生地点が分かっていることや，走行レーン幅を1.95mと通常の車線幅より狭くすることによって実験しており，シミュレータ実験と比べて被験者が早く2回目の切り返しを行わないと走行レーンをはみ出すことになるからであると考えられる．なお，ドライビングシミュレータによる走行実験では，車線幅の変更などは映像システムの設定が困難であるため，通常車線幅のまま行っている．以上より，本研究で行ったドライビングシミュレータ実験は，実車試験と近い結果を与えられるものと考えられる．

(3) 走行模擬実験の概要

被験者33名の協力を得て，ドライビングシミュレータを用いた横風時走行模擬実験を行った．表-2，表-3に被験者の年齢と運転頻度の分布を示すが，幅広い年齢層と運転頻度を有する被験者を集めることができた．

各被験者に1回の走行実験を行い，走行指示車速を80km/h，100km/h，120km/hとした．現状の高速道路における最高制限速度は100km/hであるが，建設中である第二東名高速の一部区間の設計速度は120km/h，140km/hとなっており，今回の走行実験では指示車速120km/hでも実験を行った．ドライビングシミュレータに搭載されている高速道路シナリ

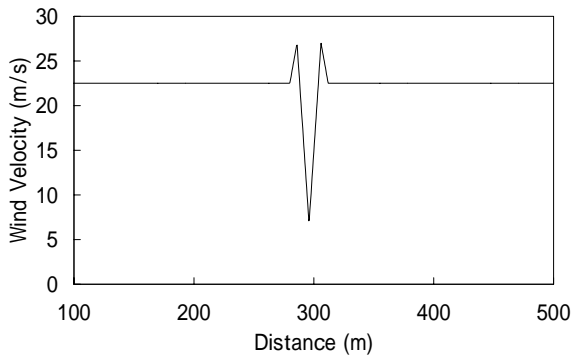


図-12 橋梁主塔通過時の模擬横風風速

表-4 横風時走行模擬実験の現実性

現実性	人数
とても現実感があった	3
やや現実感があった	14
あまり現実感がなかった	6
全く現実感がなかった	0

オコースのうち、直線部分を利用し横風を作用させた。本実験では、2パターンの横風を作用させた。一つは、継続時間2秒の突風である。日本道路公団や首都高速道路公団の管理する高速道路では、横風時の通行規制値として10分平均風速を用いている。平均風速15m/s程度で警戒態勢に入る。(1)で行った突風風速記録に見る平均化時間と風速の関係から、10分平均風速に対して、2秒間の突風風速は2倍程度の大きさを示すことがある。そこで、走行模擬実験での突風風速は15m/s、22.5m/s、30m/sの3段階とした。もう一つは、橋梁主塔通過時の模擬風速である。橋梁主塔突入前と通過後に渦の影響で風速が大きくなることが実車走行や風洞実験の結果などで得られている^{4),5)}。このことから、図-12に示すような模擬横風風速を作成し実験を行った。約30mの間、橋梁主塔の影響で横風風速が変化するように模擬した。車速100km/hで通過した場合、この変動風速地帯を約1.1秒間で通過する。

走行実験後のアンケート調査では、被験者33名のうち、23名が強風時の走行経験があると答えている。これらの被験者に、本実験がどの程度実際の経験に近いものであったかを調査した。その結果を、表-4にまとめる。これによると、全体の7割以上が「とても現実感があった」、または「やや現実感があった」と回答している。「あまり現実感がなかった」と回答した被験者の中には、風切り音が再現されていないため横風を受けたというように感じられなかったと指摘した人が見られた。これより、今回のシ

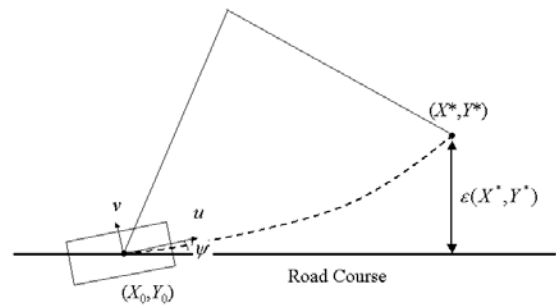


図-13 二次予測モデルの概要

表-5 二次予測モデルに用いたパラメータ

記号	定義	値	単位
T	動作のサンプリング周期	0.6	s
I	操舵系の等価慣性能率	11.8	Nms ² /rad
C	操舵系の等価粘性係数	882	Nms/rad
r	ステアリング半径	0.2	m
K_{st}	ステアリング弾性係数	48.5	kNm/rad

ミュレーション実験の現実性は一定の評価を得られたものと考えられる。

(4) 走行模擬実験結果と人間 - 自動車系操舵モデルによる解析結果の比較

現在までに、運転者の反応と車両の運動の相互作用を考慮できる人間 - 自動車系の操舵モデルがいくつか提案されている。車両は、操舵を加えられることにより目標コースを走行できるので、車両の走行安定性に関しては運転者の操縦が加えられた状態で検討を行う必要がある。本研究では、吉本²⁰⁾により提案された「二次予測モデル」を用いて算出された横風時の走行車両の応答と、ドライビングシミュレータを用いた走行模擬実験で得られた実験結果を比較した。車両モデルは2. で用いたものと同じであり、運転者による操舵が二次予測モデルによって加えられる。

二次予測モデルは、運転者は現在の位置および速度方向だけでなく、速度方向の変化も視界が回転することや横加速度を受けることから感知できるものとし、図-13に示すように自動車 が 現位置 (X_0, Y_0) から将来 τ 秒このまま走行した場合に到達する位置 (X^*, Y^*) は容易に予測できると仮定している。時刻 τ 秒後の車両の予測位置は以下のように書ける。

$$X^* = X_0 + \int_0^{\tau} \{u \cos(\psi + \psi t) - v \sin(\psi + \psi t)\} dt \quad (7a)$$

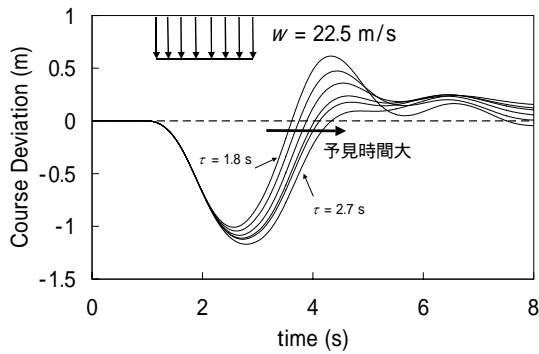


図-14 二次予測モデルにおける運転者パラメータ値と走行軌跡の関係 (車速 80km/h, 風速 22.5m/s)

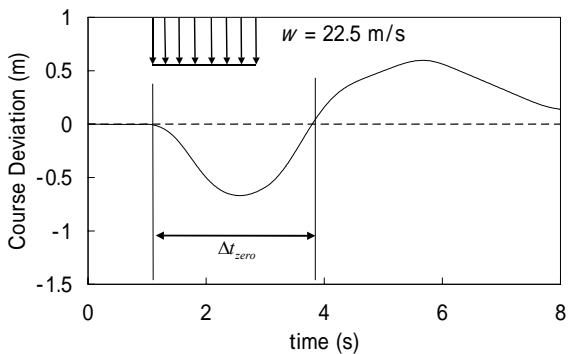


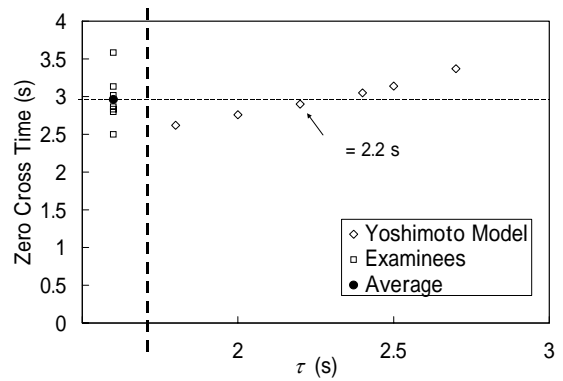
図-15 ドライビングシミュレータを用いた横風時走行模擬実験の走行軌跡の例

$$Y^* = Y_0 + \int_0^{\tau} \{u \sin(\psi + \psi t) + v \cos(\psi + \psi t)\} dt \quad (7b)$$

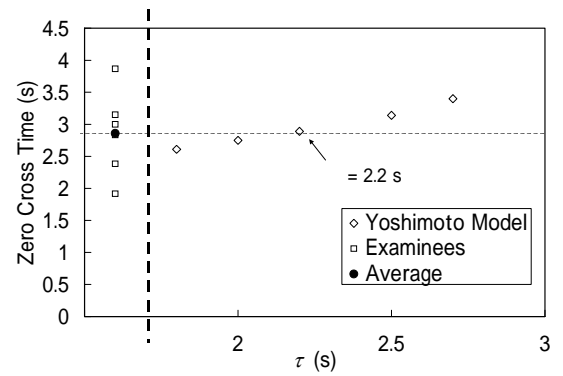
ここで、 ψ はヨー角である。以上により求められた予測位置と目標コースとの偏差 ε を算出する。この偏差に比例した修正操舵を運転者は行う(比例定数 H)ものと仮定し、運転者の出力を操舵力とする。また、運転者は修正を離散的に行うものと考え、動作のサンプリング周期を T 秒とした場合、人間の伝達遅れは $T/2$ 秒と等価になる²⁰⁾。得られた操舵力をもとに、式(8)からハンドル操舵角を算出する。

$$I n \frac{d^2 A}{dt^2} + C n \frac{dA}{dt} + K_{st} (nA - \delta_t) = \frac{fr}{n} \quad (8)$$

ここで、 I は操舵系の等価慣性能率、 n はステアリング角度比、 C は等価粘性係数、 K_{st} は等価弾性係数、 A はハンドル操舵角、 $f (= H\varepsilon)$ は運転者のハンドル操舵力、 r はステアリング半径である。本検討の二次予測モデルに使用したパラメータを表-5に示す。ステアリング角度比 n は車速の関数であり、ドライビ



(a) 風速 22.5m/s



(b) 風速 15m/s

図-16 二次予測モデルと走行模擬実験結果の横変位量解消時間の比較 (車速 80km/h)

ングシミュレータに搭載されたパラメータ値をもとに車速が80km/hで1/16, 100km/hで1/15, 120km/hで1/14とした。ハンドル操舵が与えられることにより、前輪操舵角 δ_t が以下のように変化する。

$$\delta_t = nA + (SAT_{11} + SAT_{12}) / K_{st} \quad (9)$$

ここで、 SAT はセルフアラインメントトルク⁹⁾である。

以上より、二次予測モデルにおける運転者のパラメータは、ハンドル操舵比例定数 H 、予見時間 τ 、動作のサンプリング周期 T の3つである。人間の動作の時間遅れは約0.3秒であることから T は0.6秒以上とするのが妥当であるとしている²⁰⁾。また、車速によらず系の特性を一定に保つには H を T/τ^2 に比例して変化させればよいとされている²⁰⁾。そこで、本研究で行ったドライビングシミュレータによる風時走行実験の結果より二次予測モデルにおける運転者のパラメータの同定を行った。図-14に、車速80km/h、風速22.5m/sの条件の下、二次予測モデルにより算出された車両の走行軌跡を示す。動作のサンプリ

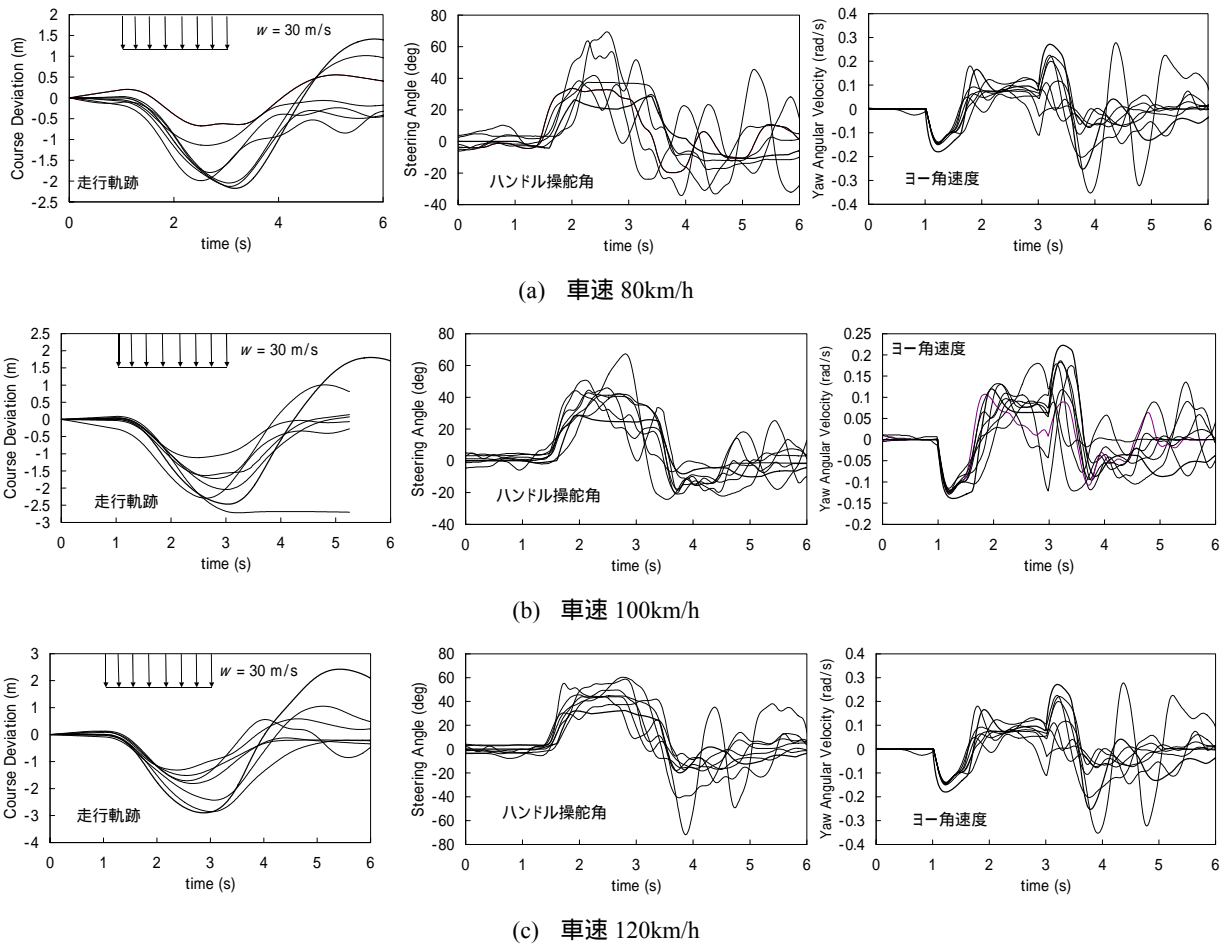


図-17 ドライビングシミュレータを用いた横風時走行実験の結果（細線）と二次予測モデルで算出した車両の応答（太線）の比較（横風風速 30m/s）

グ周期 T は0.6秒に固定し、 $H(\text{kgf})$ と $\tau(\text{s})$ を式(10)のように変化させた。

$$H = \frac{8}{3} \frac{T}{\tau^2} \quad (10)$$

比例定数の $8/3$ については、文献²⁰⁾などを参考に定めた。図-14では、時刻1-3秒の2秒間に横風を作用させている。これによると、予見時間を長くとるほど横風の影響で車両に生じた横変位量を解消するために要する時間（以下、 Δt_{zero} と呼ぶ）が長くなっている。そこで、実験結果に関しても図-15に示すように Δt_{zero} を読み取った。図-16に二次予測モデルによる Δt_{zero} と走行実験から得られた Δt_{zero} の比較を示す。ここでは、指示車速80km/hにおける、風速22.5m/sと15m/sの2つの場合について示している。これによると、車速80km/hの場合は、予見時間を風速によらず2.2秒と定めると、 Δt_{zero} が実験結果の平均値と一致してくる。車速100km/h、120km/hについても同様の検討を行うと、同じく風速には依存せず τ をそ

れぞれ2.0秒、1.8秒とすると実験結果の平均値をよく再現した。

上述のように定めた運転者のパラメータを用いて、二次予測モデルで走行車両の横風受風時の応答を計算した。その結果とドライビングシミュレータを用いた走行実験の結果を図-17に比較する。ここで、運転者の反応を表す指標値には、車両の走行軌跡、ハンドル操舵角、ヨー角速度の3つを選んだ。いずれも細線が被験者によるシミュレータ実験結果、太線が二次予測モデルの解析結果であり、横風風速は30m/sで時刻1-3秒に作用している。被験者数は車速80km/hのときが6名で100km/h、120km/hのときは7名である。これによると、二次予測モデルを用いることで、突風に対する走行車両の平均的な応答が比較的精度良く再現できているものと考えられる。

図-18に、橋梁主塔通過を想定した横風を加えた場合のシミュレータ実験結果と二次予測モデルによる解析結果を比較する。運転者の反応を表すパラメータは、前述の突風実験によって同定したものを使用している。ここでは、車速80km/hの場合のヨー角

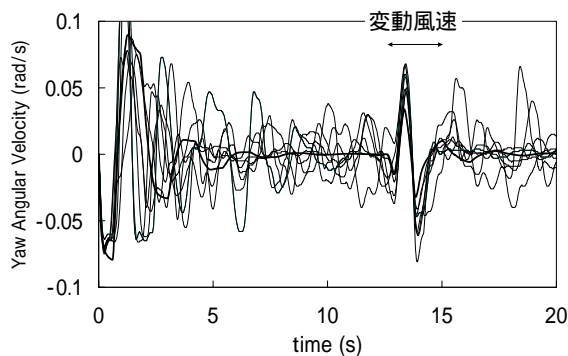
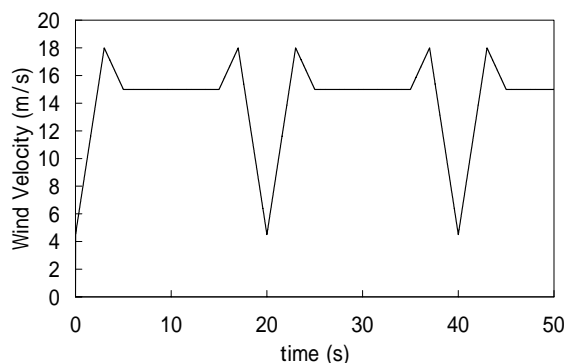
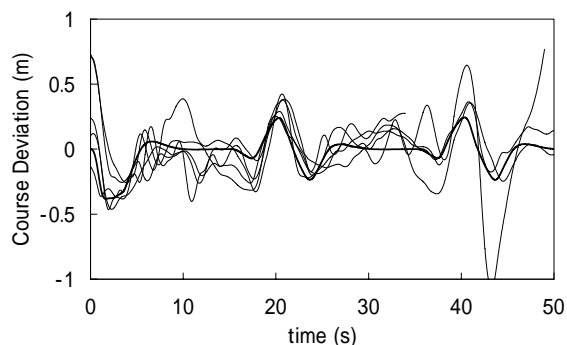


図-18 橋梁主塔通過想定時のシミュレータ実験結果（細線）と二次予測モデルの解析結果（太線）の比較（車速 80km/h）



(a) 横風風速



(b) 走行軌跡（太線は二次予測モデル）

図-19 変動風速受風時の車両の走行軌跡（車速 100km/h）

速度を示している。時刻0秒より風速22.5m/sの横風が車両の左側から作用し、時刻約12.6秒で図-12に示した変動風速が作用している。この変動風速を車両は1秒程度の短時間で通過する。そのため、変動風速が走行車両に与える影響は非常に小さく、コースずれも車線をはみ出すような大きなものにはならなかった。二次予測モデルにおいても、このようなシミュレータ実験結果をよく再現できている。したがって、このような変動風速を与えた場合でも二次予測モデルによる数値解析は有効であると考えられ

る。

今回の実験では、風速変動の時間幅が非常に短かったために車両の走行安定性に与える影響が小さかったものと思われる。図-19のように、風速変動の時間幅を10秒間と広くした場合には走行軌跡にも両振幅で約0.5mの変動幅が見られる（時刻15-25秒、35-45秒）。したがって、幅広い区間で風速が急激に変動するような場合には車両の走行安定性が損なわれる可能性がある。より詳細な検討を行うには、風洞実験などから得られた風速条件を用いて二次予測モデルによる応答の再現性を検討する必要がある、今後の課題と考えている。

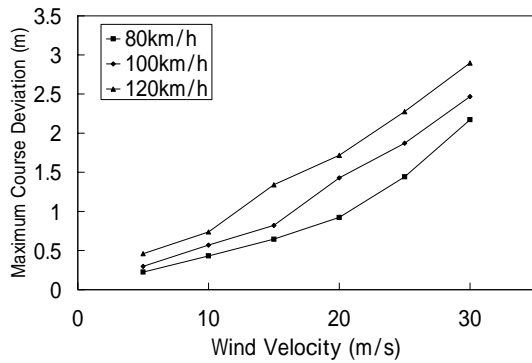
Phongkumsing²¹⁾は、本研究と同様に二次予測モデルを用いて横風時の車両走行の様子を数値解析により予測することを試みているが、良好なシミュレーション結果は得られていない。使用している車両モデルは文献²⁰⁾をもとに作成されており、本研究で用いた車両モデルとは異なるので、解析結果そのものを直接比較するのは困難であるが、本研究で用いたような非線形のタイヤモデルを使用して検討を行う必要があったのではないかと考える。

4. 横風時の車両の走行安定性

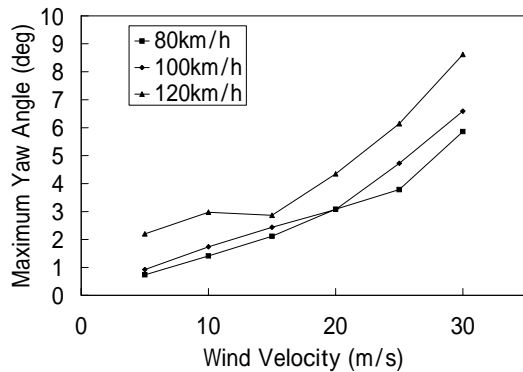
以上の検討より、二次予測モデルは横風が作用したときの車両の走行の様子を比較的精度良く再現できるものと考えられる。したがって、もし車両及び運転者のパラメータが適切に設定されれば、二次予測モデルを使用することでシミュレータ実験を多数行わずとも、ある程度の精度で横風受風時の走行車両の応答を評価できるものと考えられる。図-20に、車速、突風風速と走行車両の応答量の関係を示す。ここで、突風は2秒間作用させている。これによると、車速、風速が大きくなるに伴って、走行車両の横ずれ量が大きくなるのが分かる。最大ヨー角については、車速が80km/h、100km/hのときは差が小さいが、車速が120km/hになると他の車速に比べて大きくなる。

高速道路の車線幅は3.6mである²²⁾。車幅を1.7mとすると、約1mの横ずれ量が車線をはみ出すことに相当する。このような仮定で車線の逸脱判定を行うと、車速が80km/hで約22m/s、120km/hで約12m/sの突風が作用した場合に車線をはみ出し、周囲の交通状況によっては危険であると考えられる。

本研究で想定している車両モデルは普通小型自動車である。しかし、大型車の方が強風受風時に走行困難に陥りやすいと想像される。例えば、1ボックス



(a) 最大横ずれ量



(b) 最大ヨー角

図-20 車速，風速と車両の応答量の関係

ス車の横力係数は普通自動車のものよりも2倍程度大きいことも示されている²³⁾。しかし、普通自動車以外の車両の応答に関しては、現状ではパラメータの設定ができておらず、自動車メーカー等との協力が必要な今後の課題と考えている。

5. 結論

本研究は、横風受風時の車両の走行安定性を定量的に評価することを目的に、車両数値モデルを用いた横風応答解析とドライビングシミュレータによる横風時走行模擬実験を行った。

ドライビングシミュレータによる走行実験と既往の実車走行試験の結果を比較し、走行模擬実験の妥当性を検討した。ヨー角速度について、横風外乱によるピーク値、切り返しによる第1ピーク値、切り返しによる第2ピーク値の3つのピーク値を代表値とし、実車走行試験と比較したところ、同等のヨー角速度ピーク値の発生時刻分布が再現された。このことから、ドライビングシミュレータによる走行実験は、実車試験とほぼ同等の結果が得られるものと考えられる。

被験者33名を用いて、ドライビングシミュレータを用いた横風時走行模擬実験を行った。運転者の反応と車両の運動の相互作用を考慮できる人間-自動車系操舵モデルの一つである二次予測モデルを用いて車両応答をシミュレーションすると、比較的精度良く再現することができた。本研究では、横風風速として突風や障害物による変動風速を想定したが、二次予測モデルはどちらの場合も走行模擬実験の結果を精度良く再現した。これより、実車走行試験やドライビングシミュレータによる走行実験を多数行わずとも、従来まであまり定量的に評価されていなかった強風時の車両の走行安定性について定量的な評価を行うことが可能になるものと期待される。

本研究で用いた車両の数値モデルは普通小型自動車を対象としたものである。しかし、重心位置の高い大型自動車の方が、横風時に走行不安定になりやすいものと考えられるので、今後は複数の車両を想定した車両モデルを構築し、横風時の走行安定性について検討していく必要がある。このような検討を行うことで、本研究の成果は高速道路における横風時の通行規制基準の再評価や、防風柵・防風ネット設置時の指針等に貢献できるものと期待している。

謝辞：本研究で使用した実風速データは、東京大学大学院環境学研究系社会文化環境学の神田順教授よりご提供いただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 丸山喜久，山崎文雄：ドライビングシミュレータを用いた地震時車両走行模擬実験，第11回日本地震工学シンポジウム論文集，pp. 2283-2288, 2002.
- 椎葉太一，須田義大：マルチボディ車両モデルを用いたドライビングシミュレータによる乗り心地特性の評価，日本機械学会，第10回交通・物流部門大会，pp. 91-94, 2001.
- 平沢隆之，林哲也，須田義大：ドライビング・シミュレータを用いた鉄道車両快適性評価プラットフォームの構築，日本機械学会，第10回交通・物流部門大会，pp. 383-386, 2001.
- 長久太郎，岡島厚，柴田隆二：角柱後流域を通過する走行物体に働く非定常空気力，日本機械学会論文集（B編），Vol. 53, No. 485, pp. 40-48, 1989.
- 山崎聡，藤野陽三，木村吉郎，渋谷元：横風を受ける自動車の橋梁主塔後流域通過時の挙動，第54回年次学術講演会講演概要集，土木学会，pp. 776-777, 1999.
- 榎場重正，長久太郎，小泉徹，土屋俊二，和田捷平：防風さくが自動車の横風安定性におよぼす効果，道路，pp. 30-36, 1976.
- 相馬清二：車の安全走行を脅かす冰雪，濃霧，突風，

- 自動車技術, Vol. 36, No. 5, pp. 462-468, 1982.
- 8) 社団法人日本鋼構造協会：構造物の耐風工学，東京電機大学出版局，1997.
 - 9) 丸山喜久，山崎文雄，山之内宏安：高速道路走行車両の地震応答解析，土木学会論文集，No. 696/I-58, pp. 249-260, 2002.
 - 10) Bakker, E., Pacejka, H. B. and Linder, L.: A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies, Society of Automotive Engineers (SAE) paper No. 890087, 1989.
 - 11) 社団法人自動車技術会：自動車のデザインと空力技術，朝倉書店，1998.
 - 12) 前田和宏，酒井秀樹：高速受風時の車両安定性に与える空力影響の解析技術，自動車技術，Vol. 48, No. 4, pp. 54-59, 1994.
 - 13) 斉藤知生，神田順：最大風速の評価時間について，第12回風工学シンポジウム，pp. 49-54, 1992.
 - 14) 大熊武司，神田順，田村幸雄：建築物の耐風設計，鹿島出版会，1996.
 - 15) 鬼頭幸三，小林敏雄，浜辺薫，古俣正治，吉本堅一：横風下ドライバ - 自動車系の挙動に関する研究，自動車技術会論文集，No. 23, pp. 70-77, 1981.
 - 16) 高波克治，北原孝，坂井敏明：自動車の対横風特性について，自動車技術，Vol. 24, No. 4, pp. 375-379, 1970.
 - 17) 黒柳正利，松井数馬：横風を受けたときの車両とドライバの応答に関する研究（第1報，車載用ヨーイングモーメント発生装置），日本機械学会論文集（B編），Vol. 56, No. 524, pp. 144-149, 1990.
 - 18) 若杉貴志，相馬仁，平松金雄：自然風による横風受風時のドライバ挙動モデル化，自動車研究，Vol. 19, No. 11, pp. 16-19, 1997.
 - 19) 榎場重正，小泉徹，長久太郎：横風・突風が高速走行自動車に及ぼす影響について，土木学会論文報告集，No. 270, pp. 109-119, 1978.
 - 20) 吉本堅一：予測を含む操だモデルによる人間自動車系のシミュレーション，日本機械学会誌，Vol. 71, No. 596, pp. 13-18, 1968.
 - 21) Phongkumsing, S.: Experimental study on wind effects on vehicles passing in the wake of bridge towers, 東京大学博士論文，工学系研究科社会基盤工学専攻，2001.
 - 22) 日本道路公団：現代のハイウェイ，1999.
 - 23) 高田弘之，中川邦夫，篠田浩行：1ボックス車の横風安定性について，自動車技術，Vol. 43, No. 3, pp. 119-126, 1989.

(2003. 7. 11 受付)

NUMERICAL ANALYSIS AND DRIVING SIMULATOR EXPERIMENT ON THE STABILITY OF A VEHICLE UNDER STRONG CROSS-WIND

Yoshihisa MARUYAMA and Fumio YAMAZAKI

In order to investigate the responses of a vehicle under strong cross-wind, numerical simulations and driving simulator experiments were conducted. The responses of a vehicle under cross-wind were simulated using a numerical model, which can consider the interaction between the reaction of a driver and the motion of the vehicle. The simulated results showed good agreements with those obtained from the driving simulator experiments. Hence, the responses of a vehicle under cross-wind can be simulated systematically using the numerical model if the parameters for different vehicles are properly determined.