

# 横風強風時の車両走行安定性に関する基礎的検討

## Fundamental Study on the Running Stability of a Vehicle under Strong Crosswind

丸山 喜久\*・山崎 文雄\*

Yoshihisa MARUYAMA and Fumio YAMAZAKI

### 1. はじめに

筆者らは、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<sup>1)</sup>を用いて地震時の運転者の反応を定量的に評価することを目的とし、地震時車両走行模擬実験を行っている<sup>2)</sup>。走行車両にはたらく重要な外力としては、横風も考えられる。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。また、日本道路公団が管轄している高速道路では、10分間の平均風速が25 m/s以上になると通行止めの処置がとられている。このような背景から、本研究では横風受風時の走行車両の挙動を数値解析により検討するとともに、ドライビングシミュレータを用いて走行模擬実験を行い運転者の反応を測定した。さらに、吉本<sup>3)</sup>により提案されている“人間-自動車系”操舵モデルを用いた数値解析の結果とシミュレータ実験の結果を比較しモデルの妥当性を検証する。

### 2. 横風受風時の車両挙動の解析

図1に本研究で使用した車両の座標系<sup>4)</sup>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。

$$m(\dot{u} - vr) = \sum_i \sum_j (F_{xij} \cos \delta_{ij} - F_{yij} \sin \delta_{ij}) = \sum_{ij} F'_{xij} \dots (1)$$

$$m(\dot{v} + ur) = \sum_i \sum_j (F_{xij} \sin \delta_{ij} + F_{yij} \cos \delta_{ij}) = \sum_{ij} F'_{yij} \dots (2)$$

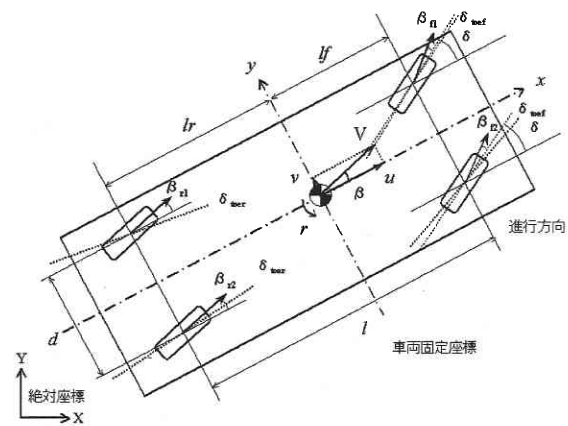


図1 車両の座標系

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

ここで、 $u$ は $x$ 軸方向速度、 $v$ は $y$ 軸方向速度、 $r$ はヨー角速度、 $m$ は車両の慣性質量である。 $\delta_{ij}$ 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。 $I_z$ はヨー慣性モーメント、 $\psi$ はヨー角、 $l_f$ 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。

速度 $V$ で直進している車両が風速 $w$ の横風を受けた場合、図2に示すように、車両には横力 $Y_w$ とヨーイングモーメント $N_w$ が作用する<sup>4)</sup>。

$$Y_w = C_y \rho S (V^2 + w^2) / 2 \dots \dots \dots (4)$$

$$N_w = C_n \rho S (l_f + l_r) (V^2 + w^2) / 2 \dots \dots \dots (5)$$

\*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

研究速報

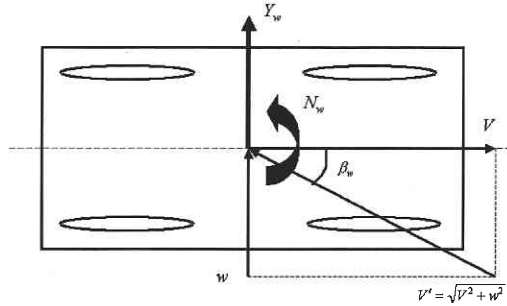


図2 横風が車両に及ぼす力

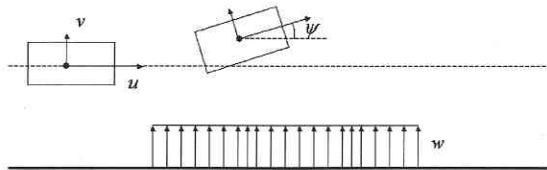


図3 解析で用いた横風条件

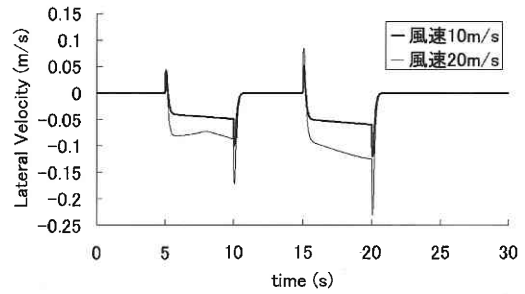
ここで、 $S$ は車両前面投影面積、 $\rho$ は空気密度である。 $C_y$ は横力係数、 $C_n$ はヨーイングモーメント係数であり、いずれも図2に示す大気横滑り角 $\beta_w$ の関数である。

図3に解析で用いた横風条件を示す。進行方向右側より、横風が吹き込むような条件で解析を行っている。また、車両に横風が作用すると、ヨーイング運動が生じることを考慮すると $\beta_w$ は以下のように記述される。

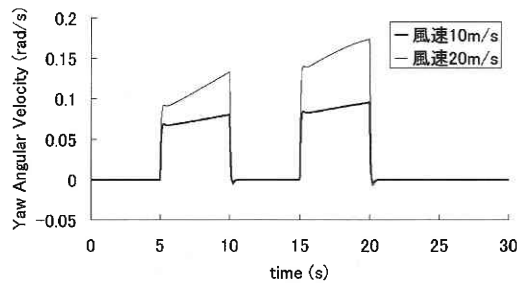
$$\beta_w = \arctan \left( \frac{u + w \sin \psi}{v + w \cos \psi} \right) \dots \dots \dots (6)$$

図4に解析結果の一例を示す。横風条件は、時刻5秒から10秒、15秒から20秒に初期進行方向右側より作用させている。風速は10 m/s、20 m/sの2ケースで計算している。なお、車両の走行初速度は100 km/hとしている。車両の応答量を示す指標値としては車両横速度とヨー角速度を用いている。これより、風速が大きくなると車両の応答量も大きくなることが分かる。ヨー角速度は運転時の安心感に影響を与えるとされており<sup>5)</sup>、風速が2倍となると応答量も約2倍を示している。

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進行方向右側より1秒間車両に作用させている。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。一方、横速度に関しては、車速を100 km/hとした場合は、風速の増加に伴い応答量が增大していくが、車速が小さい場合は、風速により、その応答量はあまり変化していない。図6に風速5 m/sとした場合について車速

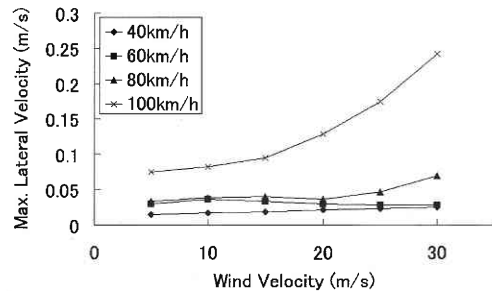


(a) 車両横速度

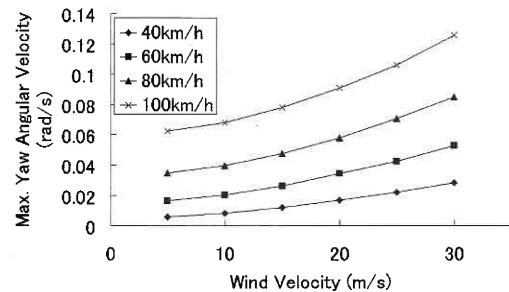


(b) ヨー角速度

図4 横風強風時の走行車両の応答 (初速 100 km/h)



(a) 車両横速度最大値



(b) ヨー角速度最大値

図5 車速・風速と車両の応答量の関係

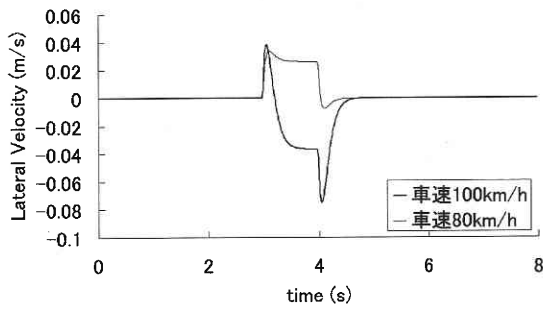


図6 風速 5 m/s における車両横速度の比較 (車速 100 km/h, 80 km/h)

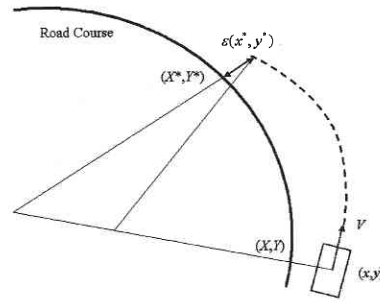
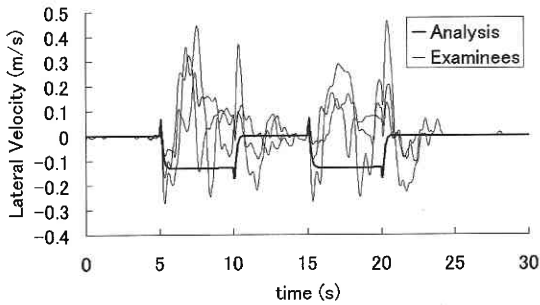
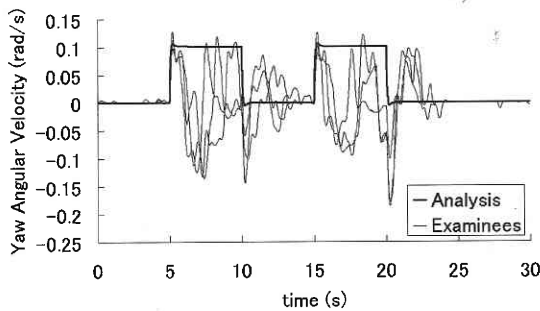


図8 2次予測による前方誤差補正モデル



(a) 車両横速度



(b) ヨー角速度

図7 ドライビングシミュレータによる模擬実験結果と解析結果の比較

80 km/h, 100 km/h のケースの横速度を比較する。これによると、車速が 100 km/h としたときは車両が風下側に横速度を生じていることが分かる。ヨーイング運動により車両は風上側に向いていることから、本研究で使用した車両モデルでは車速 100 km/h の場合は車両がスリップしているものと考えられ、安定走行に支障をきたすものと考えられる。

### 3. ドライビングシミュレータを用いた模擬実験

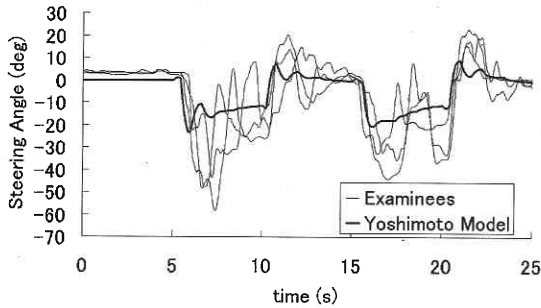
東京大学生産技術研究所に導入されたドライビングシ

ミュレータを用いて、横風強風時の走行模擬実験を行った。被験者は 3 名、走行指示速度は 100 km/h とした。風速条件は、解析時と同様に車両右方向から 5 秒間の風速 25 m/s の横風が 2 度吹き込むようにした。解析結果によると、車両は横風強風の影響でスリップし、安全走行に充分支障をきたすものと考えられる条件である。なお、風速条件については、適切なシミュレーションを行うように今後十分に検討していく必要があるものと考えている。

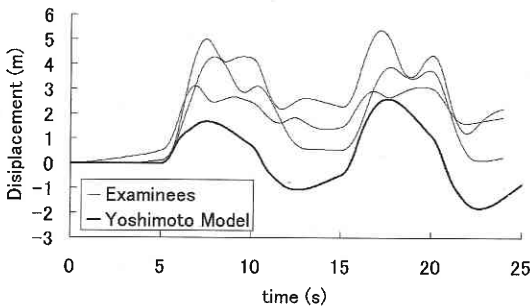
図 7 に運転者の反応を考慮していない解析結果と実験結果を車両横速度とヨー角速度について比較する。ただし、実験において運転者はヨー角が生じた場合にそのヨー角をうち消す方向にハンドルを操舵するものと考えられることから、解析においてはヨー角によらず常に進行方向右側から横風が作用するものとして計算している。これによると、横風によってヨーイングモーメントが生じたあと、運転者はそのヨーイングをうち消す方向に車両を制御していることが分かる。また、時刻 10 秒で横風がやんだあとに過度に応答した分の修正制御が行われている傾向が見られる。

自動車は人間によって運転されてはじめて目標コースに沿って走行できるのであり、自動車の走行特性は操縦が加えられた状態で考える必要がある。現在までに、さまざまな人間の制御と車両の運動の相互作用を考慮できるモデルが提案されているが、本研究では吉本<sup>3)</sup>により提案された 2 次予測による前方誤差補正モデルを用いて解析的に求めた横風時の車両の走行軌跡とドライビングシミュレータによる模擬実験の結果を比較した。

吉本の 2 次予測モデルの概要を簡潔に記す。図 8 にこのモデルの概要を示す。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 8 に示すように自動車が将来  $\tau$  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  $\tau$  秒後の予測位置は以下のように書ける。



(a) ハンドル操舵角



(b) 走行軌跡

図9 ドライビングシミュレータを用いた模擬実験結果と2次予測モデルによる解析結果の比較

$$x^* = x + \int_0^t \{u \cos(\psi + \dot{\psi}t) - v \sin(\psi + \dot{\psi}t)\} dt \dots (7)$$

$$y^* = y + \int_0^t \{u \sin(\psi + \dot{\psi}t) + v \cos(\psi + \dot{\psi}t)\} dt \dots (8)$$

以上により求められた予測位置と目標コースとの偏差  $\epsilon$  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  $H$ ) のもとと仮定し、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、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。得られた操舵力をもとに、式 (9) からハンドル操舵角を算出する。

$$In \frac{d^2 A}{dt^2} + Cn \frac{dA}{dt} + k_s (na - \delta_r) = \frac{fr}{n} \dots (9)$$

ここで、 $I$  は操舵系の等価慣性率、 $n$  はステアリング角度比、 $C$  は等価粘性係数、 $k_s$  は等価弾性係数、 $A$  はハンドル操舵角、 $f$  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。

図9にドライビングシミュレータを用いた実験結果と2次予測モデルを用いた解析結果を比較する。被験者のハン

ドル操舵角と2次予測モデルの比較では、操舵の大まかな様子は再現できているが、その大きさは2次予測モデルは被験者の記録と比較しやや小さい。また、車両の走行軌跡で比較すると、2次予測モデルは横風により車両に横変位が発生する現象の再現はできているが、横ずれ量は模擬実験の結果より小さくなっている。今後、2次予測モデルについて検討を重ね、より精度良く模擬実験の結果を再現できるようにする必要がある。

#### 4. まとめと今後の課題

横風強風時の車両の走行安定性を評価することを目的に、横風の影響を考慮できる車両モデルを構築し、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。また、吉本の2次予測モデルを用いて運転者の反応を考慮した数値解析の結果と走行模擬実験の結果を比較した。

2次予測モデルによる数値シミュレーションは、ドライビングシミュレータによる模擬実験の結果の大まかな傾向は再現できているが、ハンドル操舵角、横変位量とも実験結果と比べてやや小さい値を示している。2次予測モデルは、視覚的な偏差分に比例した修正操舵を行うようにモデル化されているが、空力が運転者のハンドル操舵に影響を与えることも考えられ、このような点について今後検討を要するものと考えられる。

また、本研究で扱った横風条件はより現実的なシミュレーションを行うには不完全であるので、風速条件についても検討していく必要がある。

#### 謝 辞

本研究は、笹川科学研究助成の援助を受けている。記して謝意を表する。

(2002年11月20日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 丸山喜久, 山崎文雄: ハンドル操舵角速度に着目した地震時運転者の反応評価, 生産研究, 東京大学生産技術研究所, Vol. 54, No. 5, pp.49-52, 2002.
- 3) 吉本堅一: 予測を含む操舵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.
- 4) 安部正人: 自動車の運動と制御, 山海堂, 1991.
- 5) 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.