

量産車のモデルベース開発における 横風安定性評価シミュレーション技術

Crosswind Stability Simulation Technology for Performance Design in
Model Base Development of Mass-production Vehicles

豊島 貴行*

Takayuki TOYOSHIMA

畔勝 良友*

Yoshitomo AZEKATSU

池田 直史**

Naofumi IKEDA

要 旨

横風安定性について、さまざまなタイプの車両の性能設計で運用できるシミュレーション技術を構築した。量産車のモデルベース開発で使用する車両モデルと、横風安定性評価の実車テストを規定する走行条件のモデルを組み合わせることで、横風安定性の性能評価に対する計算精度を必要十分に保持したまま計算時間を短縮することができた。考え方の妥当性の検証を2014年モデルFITで実施したこのシミュレーション技術により、その他の量産車開発においても横風安定性シミュレーションによる仕様検討が可能になった。2018年モデルN-BOXの開発でその有用性を検証した。

ABSTRACT

A simulation technology was developed that can be used in performance design with respect to crosswind stability for various vehicle types. This involves computation that takes the vehicle model used in the model base development of mass-production vehicles, and combines it with the model of driving conditions used to define actual vehicle tests for evaluation of crosswind stability. For the modeling of driving conditions, in particular, the time when the vehicle is entering the crosswind section and the time when the vehicle is exiting the crosswind section are treated separately, so both a continuous crosswind model, for a crosswind with continuously changing influence on the vehicle, and a discontinuous crosswind model, for discontinuously changing influence, were developed respectively. Combining these to define a half-continuous crosswind model enabled computation time to be shortened while still maintaining the necessary accuracy in calculations for performance evaluation of crosswind stability. The validity of this conceptual approach was verified using a 2014 model year FIT, and this simulation technology has enabled the study of specifications by means of crosswind stability simulation, for the development of other mass-production vehicles as well. The effectiveness of the technology was verified in development of the 2018 model year N-BOX.

1. まえがき

モデルベース開発(以下MBD)は、複雑化が進む昨今の自動車の開発を効率よく進める有効な手法である。Fig. 1はMBDをV-Modelで表現した図であるが、このV-Modelの中央赤枠で囲まれたフェーズが性能設計および性能検証である。MBDにおける性能設計ではシミュレーションの活用が前提であり、そのためには開発スケジュールの限られた時間の中でさまざまな性能項目の計算結果を出力できるシミュレーション環境が必要となる。そこで我々は量産

車のMBDにおけるシャシ性能設計で実際に運用できるよう短時間で結果を出力できるシミュレーション環境を構築した⁽¹⁾。またそのシミュレーション技術を応用することで、それまで量産車開発の性能設計では検討が容易ではなかったいくつかの性能項目についても検討が可能になり、量産車開発に活用することができる。ラップタイムを予測するシミュレーション⁽²⁾はその代表例である。本稿では横風安定性を予測するシミュレーション(以下横風安定性シミュレーション)に関して述べる。

* 四輪R&Dセンター

** HRD Sakura

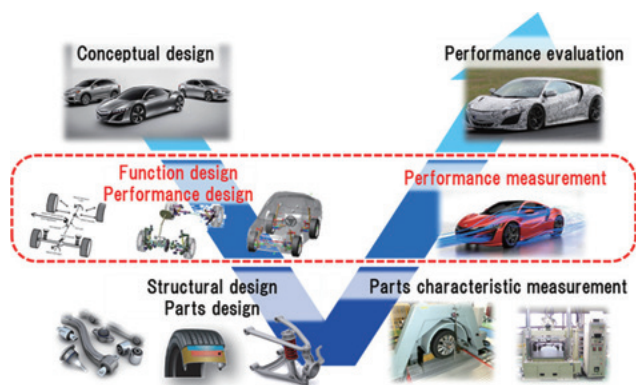


Fig. 1 V-Model

2. 横風安定性の評価

横風安定性に関しては、実車による試験方法が ISO 12021-1⁽³⁾で規定されている。またそれに準拠する JASO Z108⁽⁴⁾でも横風安定性を評価する試験法が定められており、車両開発時の性能評価として実績のある試験方法となっている（以後横風安定性試験）。軽自動車や背の高いミニバンなどは横風の影響を受けやすいため⁽⁵⁾、特に横風安定性試験の評価は重要である。

横風安定性試験の概要を Fig. 2 に記す。横風安定性試験は、まずテストコースの脇に設置されている横風送風装置でコース上に横風を発生させ、横風が発生している地帯（以下送風帯）を作り出す。その送風帯を実際の車両を走行させて特定の速度で横切らせたとき、走行ラインが横風の影響でどれだけ横にずれるか（以下横変位量）を測る。この横変位量を比較して横風安定性を評価するものである。また Fig. 3 は横風安定性試験から得られる計測データ例（ヨーレイト）である。このような計測データから横変位量を求め、ヨーレイトの変化やヨーレイトピークの値と合わせて横風安定性が評価される。

横風安定性試験は他の走行テストと比べ大がかりなテス

トになるため、多くの工数が必要となる。そこで、シミュレーションで横風安定性試験の代用ができれば仕様検討の効率化は上がると考えられ、これまでも横風安定性を予測するシミュレーション技術の研究は色々な取り組みがなされてきた^{(6),(7)}。しかし、これまで構築されたシミュレーション技術の多くは、車両の細部に至る正確な形状や、その周囲の風の流れに関する詳細な情報など、細部に至る複雑なモデルを使い精密に計算することに主眼がおかれていた。Fig. 4 はそのようなシミュレーションの計算モデルのイメージを表現したものである。このようなシミュレーションは多くの情報が必要になることに加え、モデルが複雑であるため結果を出力するまでの時間も長くなってしまい、量産車の開発に適用することが容易でなかった^{(8),(9)}。

横風安定性のシミュレーションをもっと少ない情報と

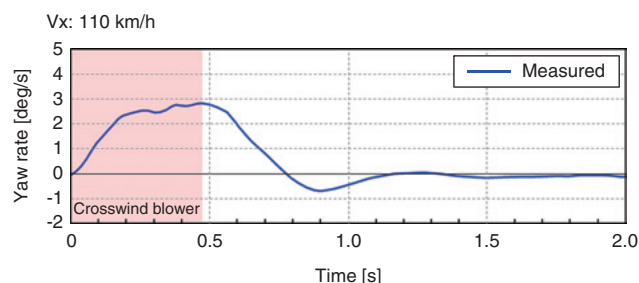


Fig. 3 Yaw rate in time series



Fig. 4 Crosswind simulation image

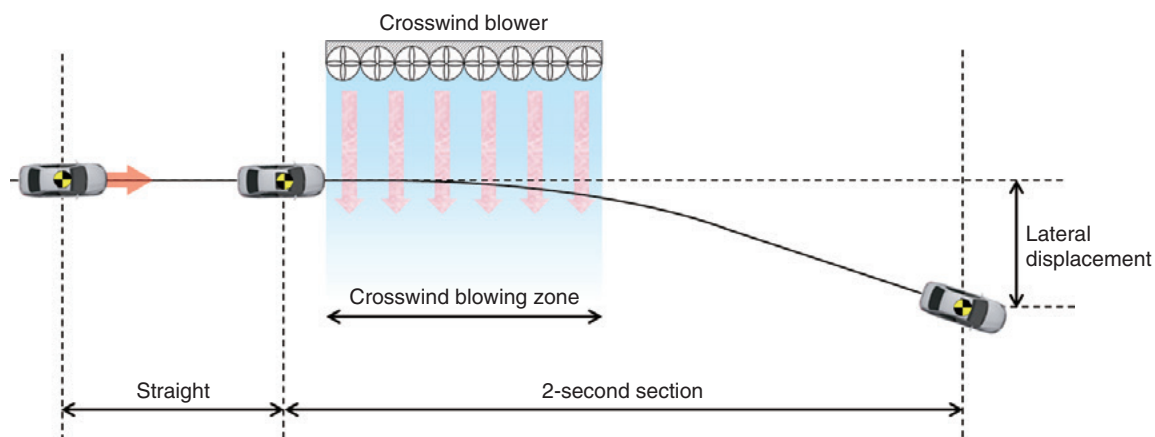


Fig. 2 Scheme of crosswind test

シンプルなモデルで実施することができれば、あらゆる MBD の性能設計の検討項目として扱うことが容易になる。特に開発初期に入手できる情報だけで計算できるシミュレーションは有効である。そこで量産車の MBD を進めるために作成された車両モデルを応用することを考えた。

3. 本技術のねらい

量産車 MBD の性能設計を進める上で有効な精度を有する横風安定性シミュレーションを構築することをねらいとして、技術目標を以下の 3 項目に定めた。

- (1) 量産車 MBD の開発初期に入手できるデータを利用し車両モデルが作成できること。
- (2) 横変位量以外にヨーレイトやヨーレイトピーク値についても検討できること。
- (3) 横風安定性試験と比較して性能設計上必要十分な精度を有し、量産車の開発に適用できる時間で結果が得られること。

4. 評価指標について

4.1. 横風安定性試験

横風安定性試験について ISO や JASO の規格では試験車両の走行速度は 100 km/h、あるいは 110 km/h と規定されている。さらに量産車の開発では、より低速からより高速まで幅広い車速条件を定めて試験すること多いため、広い車速域においてもシミュレーションできるようにしておく必要がある。

また、送風帯の観測点における横風の風速は 20 ± 3 m/s、試験環境は自然風が 1 m/s 以下で実施することなどが規定されている^{(3),(4)}。横風安定性の評価は、車両前端が送風帯進入開始から 2 秒後の重心点の横変位量で判定される。また実車を用いた量産車の開発では 2 秒区間に観測されたヨーレイトの時間変化やヨーレイトピーク値も評価指標のひとつとして参照している。

横風安定性試験は、送風帯に進入する走行状態が、評価指標の横変位量の精度に大きく影響するため、正しい横変位量を直接計測することは容易ではない。そこで一般的に横風安定性試験では、横変位量を直接計測する代わりに、2 秒区間に発生したヨーレイトから横変位量を計算してその値を評価指標としている。JASO 規格でも横変位量の計測に対する考え方は同様である。

4.2. 横変位量の求め方

Fig. 5 は横風安定性試験のコースに固定した X-Y 座標系の上におかれた車両運動の関係を示したものである。送風帯に進入する目標直進方向を X 軸方向とし、送風帯から送られる風の向きを Y 軸方向とする。このとき X 軸と

Y 軸は直交している。車両の速度を V 、X 軸方向の速度を V_x 、横変位速度を V_y で表す。送風帯進入開始 2 秒後の車両重心点の Y 方向の移動量が評価対象の横変位量である。横変位量はヨーレイト r の計測値を使った計算値として求められる。ヨー角を θ とすると、 θ は式 (1) で表される。

$$\theta = \int r \cdot dt \quad (1)$$

また横加速度を a_y 、重心点の車体すべり角を β とすれば、 β は式 (2) で表される。

$$\beta = \int \left(\frac{a_y}{V} - r \right) \cdot dt \quad (2)$$

これより、地上固定系の Y 方向の変位量 Y_i は、式 (3) で求められる。

$$Y_i = V \int [\sin(\theta + \beta)] dt \quad (3)$$

ただし一般的には β の値は θ よりも十分に小さい値であるため、2 秒区間のヨーレイトを正しく求めることができれば、横変位量も十分な精度で求めることができる。

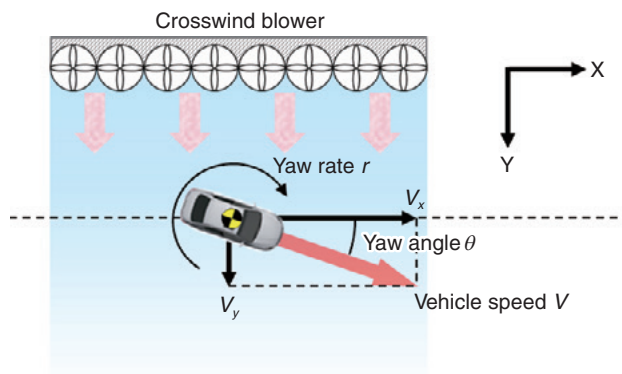


Fig. 5 Crosswind simulation

5. シミュレーションモデル

5.1. 車両条件の計算モデル

ここで扱う車両条件とは、自動車の運動性能に関する寸法諸元やコンポーネント特性のことであり、具体的には車両質量、慣性モーメント、ホイールベース、重心位置、前後のタイヤ特性、前後のサスペンション特性、車両の空力特性のことである。これらの特性データは量産車の MBD の中で使われている車両データを活用することができる。量産車の MBD の中で使われている車両データについては既報⁽¹⁾にて述べている。

5.2. 走行条件の計算モデル

横風の影響を簡便に計算する手法として、送風帯通過時に横風から受ける力を矩形波として定常的な力が一定時間

生じると仮定して計算する方法がある。ここではこの手法の計算モデルを不連続横風モデルと呼ぶ。Fig. 6は不連続横風モデルの概要を記したものである。不連続横風モデルの特徴は、車両質量を質点で表し、進入時および脱出時における空力特性の過渡的な変化を考慮しないところである。特定の面を持つ車両がその空力中心に定常的な横風を受けた結果、空力中心から車両重心点までの長さをモーメントアーム長とする重心点周りにヨーモーメントが発生する。車両先端が送風帯に進入する瞬間から車両先端が送風帯から脱出する瞬間までヨー角変化分のヨーモーメントが発生する。ヨーモーメントの大きさはヨー角変化に応じて車体に働く横風の力と、空力中心から車両重心点までの距離によりほぼ決定する。Fig. 7は送風帯を通過している間に車体に発生するヨーモーメントの変化を表したグラフである。不連続横風モデルでは送風帯走行中と送風帯外を走行中のヨーモーメントは不連続になっている。この計算モデルはシンプルであるためモデルの作成に多くの情報を必要としない。計算負荷も小さいため短時間で結果を出力できるメリットがある。

Fig. 8は2014年モデルFIT(以下FIT)について、不連続横風モデルによるヨーレイトの計算結果と、実際の横風

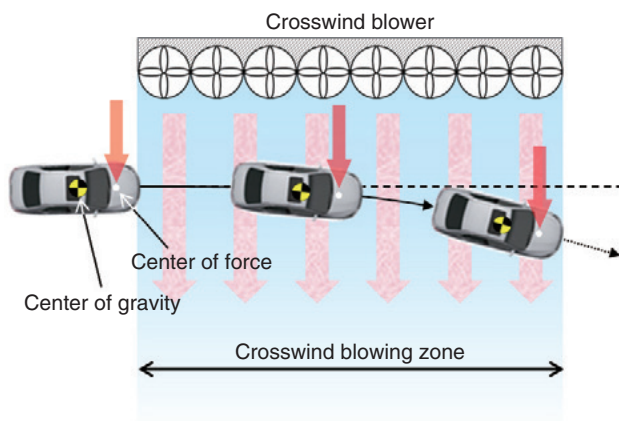


Fig. 6 Discontinuous crosswind model

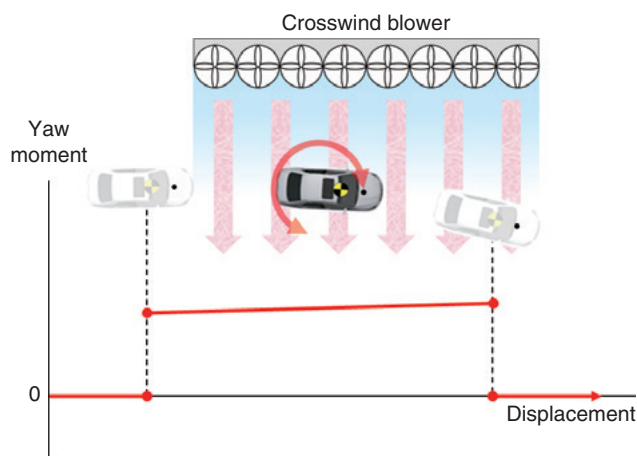


Fig. 7 Yaw moment of discontinuous crosswind model

Table 1 Specification list (FIT)

	FIT
Length × Width × Height [m]	3.990 × 1.695 × 1.525
Wheelbase [m]	2.530
Track Front/Rear [m]	1.480/1.470
Weight [kg]	1080

安定性試験で計測されたヨーレイトを比較したグラフである。FITの主要諸元はTable 1の通りである。

Fig. 8の横軸は時間であり送風帯に進入する瞬間を0秒としている。計算条件および計測条件はいずれも110 km/hである。このグラフから、横風安定性シミュレーションの計算結果は0.4秒後から0.5秒後付近でひとつのピークが現れ、1.5秒後近傍で収束する様子が確認できる。それに対し実車を用いた横風安定性試験の結果はもっと早い段階からヨーレイトが立ち上がり、0.2秒後付近で最初のピークが現れる。0.5秒後付近で最後にもう一度ピークが発生し、1.5秒後近傍で収束していることがわかる。不連続横風モデルによる計算結果と横風安定性試験の計測結果とではヨーレイトの出方やヨーレイトのピーク位置などが異なっているため、横変位量の計算結果もシミュレーションと試験結果で異なってしまう。

送風帯進入直後のヨーレイトの立ち上がりや、最初に現れるヨーレイトのピークを計算する工夫として、送風帯に進入する前後と送風帯から脱出する前後で、車両全長に応じて連続的にヨーモーメントが変化するように考慮したのが連続横風モデルである。Fig. 9にその概要を示す。連続横風モデルでは送風帯の通過を送風帯への進入期(a)と送風帯通過期(b)と送風帯からの脱出期(c)の三つのフェーズに分割してヨーモーメントを定義する。

Fig. 10は連続横風モデルで計算される車体に発生するヨーモーメントの大きさを描いたものである。連続横風モデルでは、送風帯走行中に車体が横風を受けて発生するヨーモーメントと送風帯の外を走行中のヨーモーメント(=0)が連続しており、車両の全長に相当する通過区間で過渡的に変化する。連続横風モデルによるヨーレイトの計算結果をFig. 8のグラフに書き加えたものがFig. 11である。このグラフから、横風安定性試験の結果に対して不連

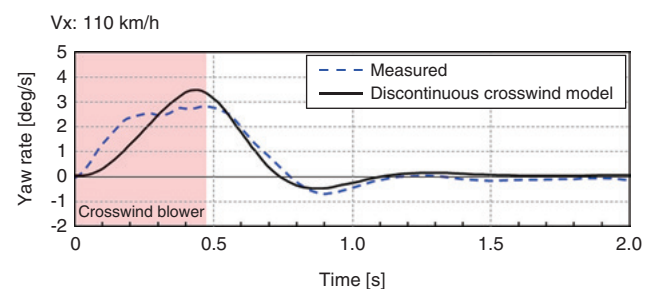


Fig. 8 Comparison of yaw rate in time series

続モデルの計算結果は送風帯進入から 0.5 秒後付近までのヨーレートについてはよく合致することがわかる。しかし送風帯を脱出した後の 0.5 秒後から 1.0 秒後くらいまでの計算値は計測値とのずれが大きくなっていることがわかる。

そこで、送風帯走行時の前半部分のヨーモーメントは過渡的に変化する連続モデルとし、後半部分のヨーモーメントを不連モデルとする新たなモデルを考案した。これを半連続横風モデルと呼ぶこととする。半連続横風モデルでは車両が送風帯の出口に達したところでヨーモーメントは 0 になるとしている。

Fig. 12 は半連続横風モデルで計算される車体に発生するヨーモーメントの大きさを描いたものである。また Fig. 13 は半連続横風モデルによる計算結果を Fig. 11 に書

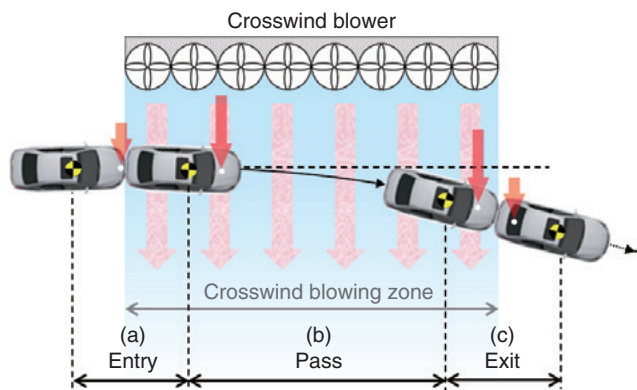


Fig. 9 Continuous crosswind model

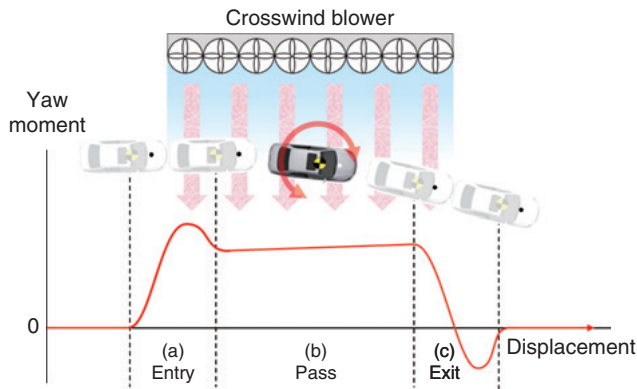


Fig. 10 Yaw moment of continuous crosswind model

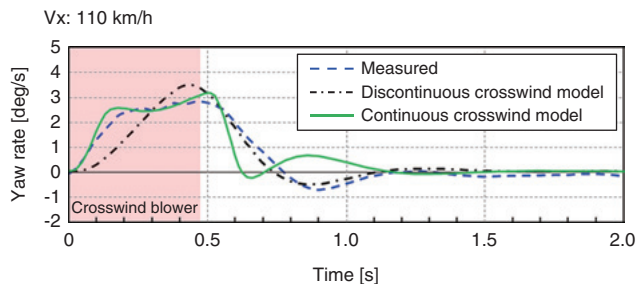


Fig. 11 Comparison of yaw rate in time series

き加えたグラフである。このグラフの内容から、半連続横風モデルによる計算結果が横風安定性試験の計測結果とよく合致しており、三者の中では最も横風安定性試験の結果に近い傾向を示すことが確認できた。Fig. 14 は横風安定性試験の評価指標である横変位量の計測結果と、不連続横風モデル、連続横風モデル、半連続横風モデルから求められた横変位量の計算結果を棒グラフで比較したものである。

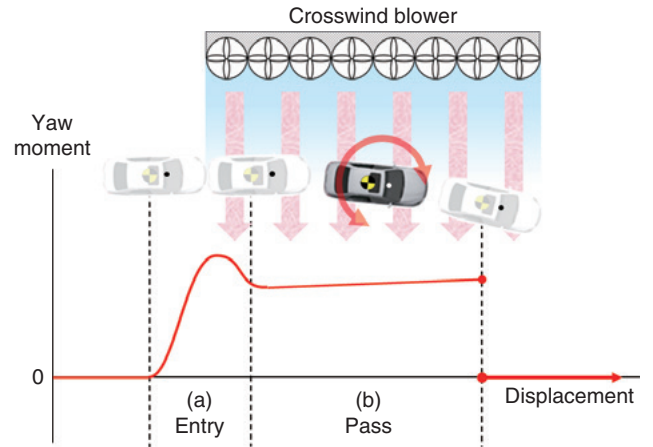


Fig. 12 Yaw moment of half-continuous crosswind model

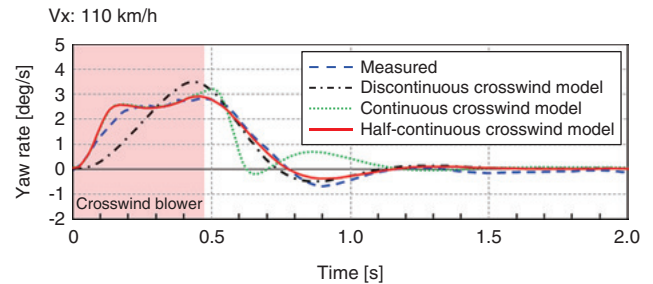


Fig. 13 Comparison of yaw rate in time series at 110 km/h

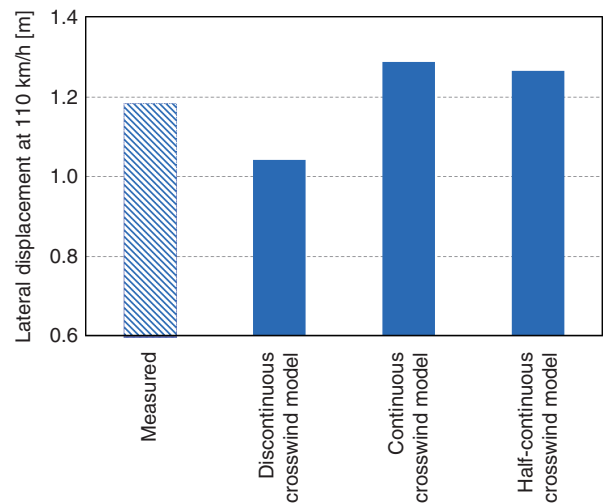


Fig. 14 Comparison of lateral displacement at 110 km/h

これらの計算結果から半連続横風モデルを使うことで、性能設計に対して有効な精度で横風安定性のシミュレーション結果が得られた。

5.3. 半連続横風モデルの検証

車両の速度条件を 140 km/h に変えて、不連続横風モデル、連続横風モデル、および半連続横風モデルの計算結果と横風安定試験の計測結果を比較したグラフが Fig. 15 である。同様に横変位量を比較したグラフが Fig. 16 である。これらの計算結果から、速度条件を変えても半連続横風モデルは横風安定性試験の結果とよく合致することがわかった。

横風安定性試験について、送風帯進入部における考え方に関しては、これまでも研究報告例はあった^{(10), (11)}。しかし送風帯からの脱出部における考え方が論じられている例は少なかった。今回考案された半連続横風モデルは、送風帯への進入部と送風帯からの脱出部をあわせた全体を捉えたシミュレーションモデルとして過去にあまり例をみない。半連続横風モデルは、横風安定性の計算精度と計算時間を両立させるための新しいシミュレーションモデルとして提案されたものである。

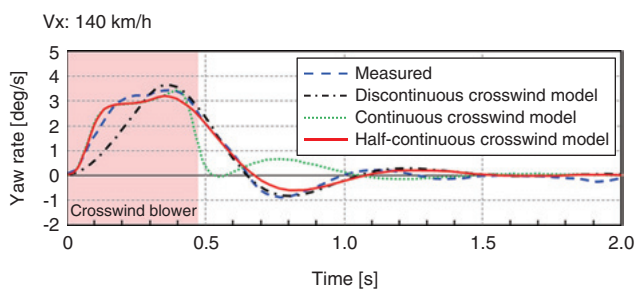


Fig. 15 Comparison of yaw rate in time series at 140 km/h

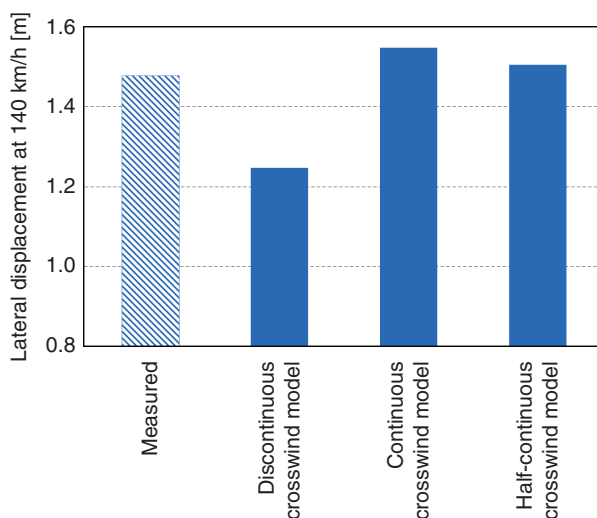


Fig. 16 Comparison of lateral displacement at 140 km/h

Table 2 Specification list (N-BOX)

	N-BOX
Length × Width × Height [m]	3.395 × 1.475 × 1.790
Wheelbase [m]	2.520
Track Front/Rear [m]	1.305/1.305
Weight [kg]	890

6. シミュレーション適用事例

前章では、FIT の開発を通して構築した横風安定性シミュレーション技術について論じた。次に他の量産車開発でも同様に活用できることを示し有用性を確認した。以下は 2018 年モデルの N-BOX (以下新型 N-BOX) の開発において本シミュレーション技術が活用された事例である。

Table 2 は新型 N-BOX の主要諸元である。N-BOX は横風の影響を受けやすい車体形状であったため、他の性能も成立させながら横風安定性も損なわないような仕様検討を進める必要があった。特に開発初期の段階から横風安定性をできるだけ高く設定しておくことが重要となる。このような背景から、新型 N-BOX は FIT と同様に本シミュレーション技術が活用された。

Fig. 17 は新型 N-BOX の開発の中で検討したスタディ結果であり、これから横変位量とヨーレイトピーク値に対する各対策の効果を確認することができる。このようなスタディの中から、他の性能も合わせ考え、効果的な対策を見出すことができる。

Fig. 18 は新型 N-BOX の開発の中で実際に対策された各シャシコンポーネントの対策効果を示したグラフである。これはシャシを構成する各コンポーネントの横風安定

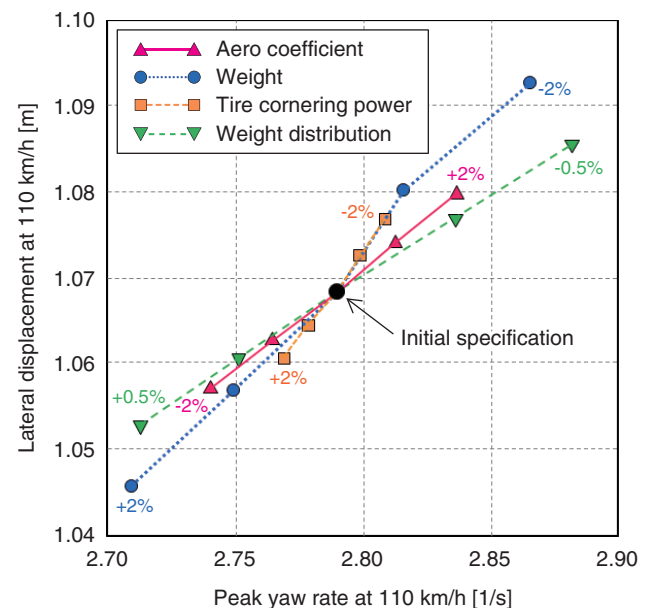


Fig. 17 Peak yaw rate and lateral displacement

性に対する影響を見ながら仕様検討をすすめる、最終的に目標を達成可能な仕様を見出すというシステム設計を進める上で有効である。今回の新型N-BOXの場合、軽量化やデザイン上の制約を重量配分、タイヤ特性、サスペンション特性、空力特性などにより目標を達成した。本シミュレーション技術により量産車のMBDの性能設計の段階で、横風安定性の各コンポーネントに対する性能割り付けが可能であることを示した。

Fig. 19 は最終的な仕様が横風安定性に対し、どの程度の速度依存性をもつかを実車で検証したグラフである。80 km/h と 110 km/h の二点間で規格が定める基準値を下まわり横風安定性に対する仕様が決められた。本シミュレーション技術は量産車の開発において有用であることがわかった。

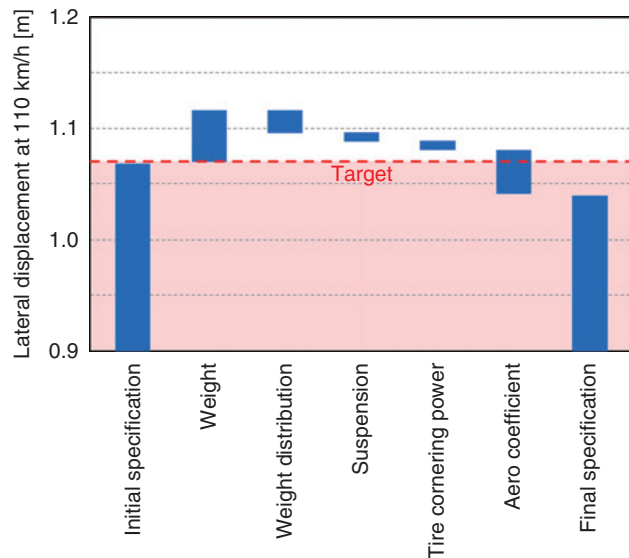


Fig. 18 Lateral displacement (N-BOX)

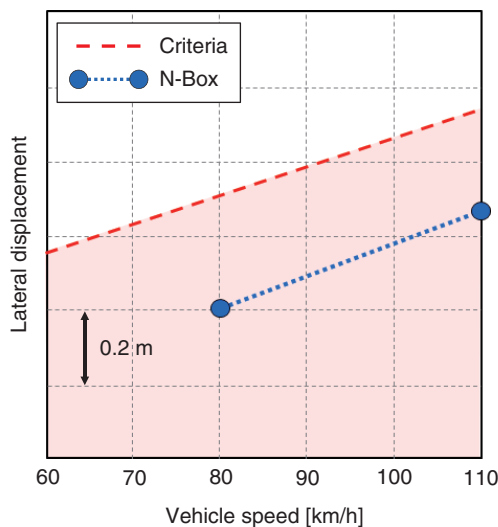


Fig. 19 Lateral displacement (N-BOX)

7. まとめ

本シミュレーション技術により量産車 MBD の性能設計で横風安定性を含めた仕様検討が進められるようになった。

- (1) 量産車の MBD の中で使われている車両データを利用し、横風安定性を予測計算できるシミュレーション技術を構築した。
- (2) 本シミュレーションは横変位量以外にもヨーレートやヨーレートピークを計測値に近い計算結果として得られることを示した。
- (3) 半連続横風モデルを活用することで、計算時間および計算精度において横風安定性に関する性能設計を量産車開発にも適用できることを検証した。

参考文献

- (1) 豊島貴行, 松澤俊明, 伊藤憲悟, 遠藤喜章, 高野広喜, 牛村智也: 量産車の MBD におけるシャシ性能設計技術の構築, Honda R&D Technical Review, Vol. 29, No. 1, p. 49-58
- (2) 豊島貴行, 松澤俊明, 牛村智也: 量産車開発の性能設計におけるラップタイムシミュレーション技術, Honda R&D Technical Review, Vol. 29, No. 2, p. 118-126
- (3) ISO 12021-1: Road vehicles – Sensitivity to lateral wind – Open-loop test method using wind generator input, (2010)
- (4) JASO Z108: 2004, 自動車—横風安定性試験方法
- (5) 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, p. 119-126, (1989)
- (6) 小林敏雄, 鬼頭幸三, 佐賀徹雄, 蛭川雅彦: 走行中の自動車に及ぼす横風の影響に関する一考察 (第 1 報), 生産研究, 30 巻, 7 号, p. 278-281, (1978)
- (7) 丸山喜久, 山崎文雄: 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, 土木学会論文集, No. 766, I-68, p. 129-140, (2004)
- (8) 中里公亮, 高瀬弘貴, 清野昌之, 神野研一, 石原裕二, 塩澤博行: 過渡的な横風入力を再現した流体解析と車両運動解析の組合せによる車両挙動への空力影響予測, 自動車技術会学術講演前刷集, No. 25-14, p. 1-4, (2014)
- (9) URL: <http://www.aics.riken.jp/shirutsudoi/meeting9.html>
- (10) 黒田智, 田中真悟, 上野和寛, 田中久史: 横風進入時の空力過渡特性計測手法開発, 自動車技術会学術講演前刷集, No. 21-13, p. 1-4, (2013)

- (11) Ryan, A., Dominy, R. G.: The Aerodynamic Forces Induced on a Passenger Vehicle in Response to a Transient Cross-Wind Gust at a Relative Incidence of 30° , SAE Technical Paper 980392, p. 1-4, (1998)

■ 著 者 ■



豊島 貴行



畔勝 良友



池田 直史