

自動車空力技術の最新動向とそれを支える風洞要件

—Real World の現象再現を目指して—

大島 宗彦*, 田中 久史**, 黒田 智***、中里 公亮****

The latest trend of vehicle aerodynamics study and Required specification for new wind tunnels

— Aiming for accurate simulation of “Real World” aerodynamics —

Munehiko OSHIMA, Hisashi TANAKA, Satoru KURODA, Kousuke NAKASATO

1. 緒 論

空気流に関連する自動車性能は、1) 空気抵抗低減に代表される空力性能、2) エッジトーンや剥離に伴う圧力変動などの気流騒音を取り扱う風音性能、3) ワイパーの水流れ・車体の泥汚れ等を取り扱う実用空力性能に大別されるが、自動車開発におけるこれらの空気流関連性能開発の主要なツールは風洞と CFD であることは共通である。

この両者とも自動車開発の実務においては“準定常”の主流における現象を取り扱うことが主に行なわれているが、最新の自動車空力研究は準定常流における車両周りの流れの再現度向上と、非定常な主流における空力現象の解明にシフトしつつあると思われる。

本報告は空力性能と風音性能の研究トレンドを概括的に述べると共に、その研究から考察できる将来の自動車風洞に求められる要件について解説する。

2. 自動車空力性能の開発動向 (2000 年まで)

2.1 2000 年までの空力性能開発の流れ

当初から車両の空力性能開発は空気抵抗低減を主眼として行われており、これは 19 世紀末の車両空力黎明期から変わっていない。初期は船・魚雷を模倣した形状に始まり、“流線形”状のボディ形状の適用から各形状パラメータの個別最適化を経て車両全体のシルエット・床下流れの最適化という現在の検討レベルまで一貫して抵抗低減検討が継続されている。¹⁾ 空気抵抗は最高速向上と燃費向上の要求から低減検討がなされており、この 2 性能の検討には主流の非定常性 (速度・偏揺角変動) が要求されないため、検討は偏揺角ゼロの定常流を前提として

行われている。

また、揚力低減に対する要求はレースカーの戦闘力向上から出されており、1960 年代後半からその検討が本格化されている。²⁾ レースカーの性能向上においては、加減速に伴うピッチ方向の車両姿勢変動と空力特性の関係を論じる研究が行なわれている。³⁾ レースカーの空力性能も風洞実験・CFD により事前検討が行なわれるが、最終的な仕様決定は必ず実走における走行タイムとドライバー評価によって行われる。これはレースの実環境における動的な偏揺角の変動・加減速や横 G による車両姿勢変化に対する空力応答に対し、現検討ツールの限界を示していると考えられる。

横風安定性の重要性は 1930 年代末に認識され⁴⁾、以降、2 輪モデルによる車両運動性解析に対する空気力の関与の分析・風洞における偏揺角付きの主流への空力 6 分力と横風帯に突入した車両の応答実測値との比較という方法で検討が進められている。特筆すべきは 1973 年の Hucho らによる車両の突風応答に関する理論解析⁵⁾で、細長体理論を応用して空気力の非定常成分を加味することにより、横風帯突入時の非定常空気力応答を導きだした。更に Laermann らは、実測された自然風の横風入力に対抗し、車両を直進させるために必要な操舵量を $C_{YM} \cdot C_{LR}$ をパラメータとしてシミュレーションで求め、 C_{YM} と C_{LR} の減少が修正操舵量減少に効果があることを示した⁶⁾。

この様に 2000 年頃までは実走行条件の非定常空気力応答は風洞実験で検討されていなかった。これは風洞において実走行で遭遇する非定常な風速・風向変化を再現できなかったこと及び、検討の重点が定常直進状態の C_D 低減に置かれていたという 2 つが主たる理由であると思われる。

2.2 2000 年までの風音性能開発の流れ

風音性能については、低騒音風洞が各社に導入される前は実走行による実験で評価・対策が行なわれていたが、低騒音風洞が導入された後は実験効率化と再現性向上のため、風洞による直進及び偏揺角付の定常流における評

* 日産自動車 (株) 車両性能開発部
(〒243-0192 神奈川県厚木市岡津古久 5 6 0 - 2
e-mail:oo-mune@mail.nissan.co.jp)

** 日産自動車 (株) 実験・計測技術開発部 実験技術開発企画グループ

*** 日産自動車 (株) NISSAN 第一製品開発部 空気流性能グループ

**** 日産自動車 (株) 統合 CAE 部 空気流 CAE グループ

価・対策検討に置き換えられた。評価する音は各種シール不良による洩れ音・各部エッジに起因する気流音と剥離流により発生する変動音、サンルーフウインドスロップ・デフレクタ風切音などである。

一方、風洞における車両風音評価と実走行における評価は必ずしも一致しないことは風音実験担当者の中でよく知られた事実である。定常的な横風は風洞における偏揺角で再現できることを考えれば、それでは再現しきれない偏揺角・風速の時間変動による車両周り剥離状況の変動が追加の音源として寄与していることは否定できない⁷⁾。

しかし、風洞における非定常風の再現が難しいこと・定常状態（偏揺角付き含む）における風音対策を行なえば市場における高評価を得られることから、風洞における非定常流再現を風音評価の立場から求めることはなかったように思われる。

以上を総括すると、2000年までは実車風洞の導入により安定した実験環境が実現したこと、定量的な空力6分力の検討が早いスピードで進むとともに、安定した条件下における風音低減の検討に対して精力的な研究がなされてきた時期であると言える。

3. 2000年以降の研究動向

3.1 風洞ハードウェアの更新

1990年代後半から2000年頃を境にして、風洞ハードウェア側に大きな変化が現れ始めた。それは床下気流の実走再現精度向上及び走行時のタイヤ回転をシミュレートするムービングベルト装置と、2003年にピニンファリーナの風洞に導入された非定常流再現装置である⁸⁾。前者の導入によりタイヤ・ホイール周りの非定常流れを含む準定常状態の流れが再現可能になると共に、後者によりさまざまな時間・空間スケールの流れ変動と空力6分力・風音との関係を論じることができるようになった。

ここで、Table1に主要な自動車用1/1風洞の仕様変遷を示す。

Table 1 Historical change of Full Scale wind tunnel specifications.

	N: Full scale, Q: Lownoise, MB: Moving belt, TB: Turbulance						
	'50s	'60s	'70s	'80s	'90s	'00s	'10s
Honda					Q	Q+QMB	Q+QMB
Mazda				Q	Q	Q	Q
Mitsubishi				N	N	N	N
Nissan		N	N	Q	Q	Q	Q
Sabaru						QMB	QMB
Suzuki						Q	Q
Toyota			N	N	N	N	N+QMB
Audi					QMB	QMB	QMB
BMW			N	Q	Q	QMB	QMB
FKFS				N	Q	QMB	QMB
Mercedes			N	N	N	N	QMB
MIRA	N	N	N	N	N	N	N
Pininfarina			N	Q	QMB	QMB/TB	QMB/TB
VW		N	N	N	N	Q	Q

この表によって明らかなように、2000年代から主要OEMのフルスケール風洞にムービングベルトが導入され始め、'10年代には欧州主要OEMのほぼ全てに導入された。日本でも導入計画中の3社を含めるとほぼ全てのOEMがムービングベルト付の風洞を使った開発を行うことになる。

一方、フルスケール風洞への非定常流再現装置導入はピニンファリーナの風洞以外にはまだ実施されていない状況である。

ここで最新の実車風洞の例としてメルセデスとトヨタの最新風洞を、非定常流再現装置の例としてピニンファリーナの風洞を示す。



Fig 1 Wind Tunnel of Mercedes.⁹⁾



Fig 2 Wind Tunnel of Toyota.¹⁰⁾

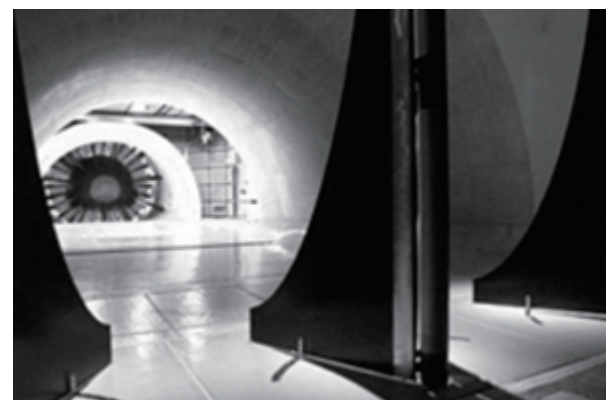


Fig 3 Wind Tunnel of Pininfarina.¹¹⁾

3.2 ムービングベルトによる研究動向の変化

これらの新しい風洞ハードウェア導入により、空力関連研究動向も大きく変化している。特にムービングベル

トが与えたインパクトは大きく、これにより床下気流・タイヤ周り気流の実走再現性が向上したことから、実走では計測が非常に難しい床下やタイヤ周りの風速・圧力の空間的分布の把握とそれが全車空力性能に与える影響を論じることが可能になった。そのため、タイヤプロファイルやタイヤパターンの検討（例えば文献 12, 13）など、タイヤ・ホイールの細部形状へのアプローチが行なわれるようになった。

なお、風洞におけるムービングベルトシステムの方式の違いによる実走再現性・実験のやりやすさの違いについて自動車空力業界の中で統一見解が得られており、実走再現性は 1 ベルト方式が最も優れているが、実務の容易さを考慮するとセンターベルト+各輪用小ベルト 4 つの 5 ベルト方式が現時点では優れているという意見で一致している。一方、FKFS は 1 ベルトの精度と 5 ベルトの実務の容易さを併せ持つ方式として 3 ベルト方式を提唱しており、現在この 3 ベルト方式を導入すべく FKFS 風洞を改造中である。¹⁴⁾



Fig 4 3-belt System of Future FKFS Wind Tunnel

空力性能がムービングベルト導入により新たな局面を迎えているのに対し、ムービングベルト導入による風音性能研究への影響はほとんど見られない。これはベルトを動かすことによる暗騒音増を嫌うため、風音測定時にはベルトを止める設備が多いことによると思われる。車両床下の風音発生部位は地上高 120mm 以上にあり、境界層を外れた箇所にあることもベルトを動かす必要がない理由の一つと考えられる。

3.3 非定常流再現装置導入による研究動向の変化

Cogotti らによる非定常流再現装置導入後の一連の検討^{8), 11), 15), 16), 17)}により非定常流による空力特性・風音への影響が一般に知られるようになったが、これらの研究に続く実車風洞を用いた非定常流れの検討は広く行われてはいない。これは「風洞における非定常流の再現」に必要な投資とそれがもたらす実際の効果との関係が明確でないことから他風洞には乱流発生装置が導入されていないためと考える。

一方、非定常流れに対する関心は依然として存在する。例えば 2009 年にはマツダの農沢らによる実車実走行による非定常流れと高速直進安定性に関する先駆的な検討¹⁸⁾が行われており、それに加える形で CFD や模型を使った車両非定常運動と空力特性の影響や横風突風応答の検討が近年盛んに行われるようになった。¹⁹⁾ これは CFD の改良とコンピュータ能力の向上により大規模非定常空力計算が可能となり、風洞では測定できない非定常流に対する空力応答を定量的に評価できるようになったためと思われる。特に操安性と空力との関係を理解するには非定常運動下の空力応答を知ることが必要であり、CFD によって流れ諸量の網羅的な把握が可能になったことは大きな武器と言える。

模型を使った実験は、模型を保持する架台または模型内にロードセルを設置し、その模型を振動させつつ水槽を移動させ²⁰⁾、または空気中をレールで移動中に横風帯に進入させて²¹⁾、過渡的な入力を測定する例が発表されている。

また、BEV の投入が「Real World における空力特性」への関心を再度高める要因となったことも見逃せない。電動駆動系システムは ICE 車よりも遙かに高効率であるため、航続距離を左右する走行抵抗に占める空気抵抗の割合が ICE 車よりも圧倒的に高い。BEV の車速ごとの走行抵抗に占める空気抵抗を図 5 に示すが、高速域においては走行抵抗の 70%以上が空気抵抗由来であることが分かる。この事はフリーウェイ走行比率の高い米国における BEV 実用航続距離向上に対して非常に大きな意味を持っている。

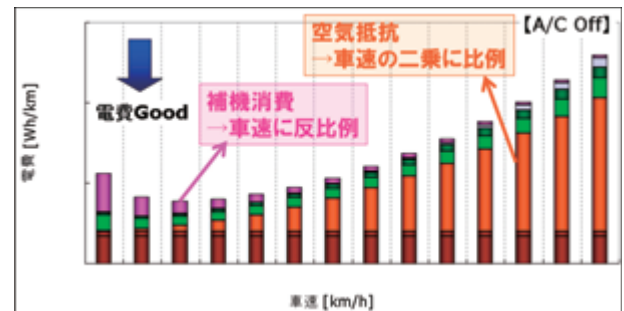


Fig 5 Road Load Distribution of BEV

このように、低空気抵抗は航続距離増に直接結びつくが、風洞のような乱れゼロ+偏揺角ゼロの流れは Real World では有り得ないため、実用航続距離増加のためには Real World 条件での空気抵抗低減を考えなければならない。このため、通常の空力測定条件ではない、市場により近い条件をどのように風洞で再現するかという検討が始まっている。²²⁾

また、FKFS は前述の 3 ベルト方式導入と同時に、非定常流再現装置の導入も表明している。その理由は BEV の Real World 条件における C_d 低減検討のためと述べている。²³⁾

以上のような研究傾向を、SAE World Congress で発

表された空力関連の発表内容によって確認する。

4. 過去7年の研究動向

2008年から2014年までのSAE World Congressにおける空力関連発表を、定常流（時間平均流れ含む）・非定常流・風音関連に分類した結果を表2に示す。なお、定常流に関する研究は、タイヤ回転関連だけを抜き出して別に表示した。

Table 2 Subject distribution of SAE World Congress Aerodynamics Session.

		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Steady	Wheel Stational	25	16	17	19	22	16	29
	Wheel Rotating	1	1	1	1	3	2	5
Unsteady		9	8	4	7	6	5	6
Wind Noise		0	6	2	1	1	2	5
Total		35	31	24	28	32	25	45

全体の発表数は年による変化があるものの、概ね30件内外となっている。その中で、タイヤ回転に関する研究は2011年以前は1件だったものが、2012年以降増加に転じている。これはムービングベルト風洞導入が2000年代から進められ、2010年代にはほぼ主要なOEMに行きわたった状況を反映しているものと考えられる。OEMのタイヤ回転の空力への影響の関心が大学・研究所の研究へのドライブとなり、研究数の増加を招いているとみられる。1995年のPininfarinaによるムービングベルトの先駆的な導入から約20年を経て、この領域への関心が一般的なものになったと言えよう。

一方、非定常空力関連の発表は毎年4～9件の安定した数を示しており、最近の非定常流への関心の高さと異なる傾向を示している。発表数の変化においては増加傾向はないものの、その検討対象とする流れ・現象とその方法論については変化がみられる。例えば、2008年における非定常流関連研究は、自然風乱流そのものの測定・非定常入力によるA-PLR周り流れ・ミラー周り流れなど、流れそのものの検討に重きが置かれているものが多く、実験による検討が8件中6件と多い。CFDを用いた2件も実車ではなくAhmedモデルや翼断面前半部のみのような簡易モデルに対する検討にとどまっており、これも非定常流の振る舞いそのものを対象にしたものとなっている。

これに対し2014年の場合は非定常入力が車両に与える影響のより実的な研究へのシフトがみられ、かつその多くが実車を用いた精細なCFDを用いた検討へ移行している。例えば、BEVの実用航続距離向上関連として、TeslaとEXAから横風成分+乱流成分を持つ流れによる空気抵抗と横力成分の応答をCFDで求めた論文²⁴⁾や、上流の非定常乱れが車両の空力特性に与える影響(Land RoverとEXA)²⁵⁾がその代表例となる。前項でも述べたように、各社とも「Real Worldにおける空力性能」の重要性を再認識しはじめたことの反映と考えられる。特に、2013年以前には非定常問題は主に車両運動性能(主に揚

力とその動特性)との関連で検討されていたのに対し、2014年から空気抵抗が取り上げられるようになったのは、BEVの市場投入により関心の方向性が変わってきたことを表していると考えられる。

風音に関しても似たような状況が見て取れる。2011年までの自然風に関連する風音関連発表は、Durham大のN. Oettleらによって2010年と2011年に行われた、実走で測られた風音データと実風速データを用いて、その偏揺角成分と風音測定値との関連を論じた2件だけであった。^{26), 27)} これに対し、2013年からは実風速データの乱流成分(時間・空間スケール)に対する車室内風音データを論じたものが見られ²⁸⁾、2014年にも同様の研究がある。²⁹⁾

以上より、空力・風音の両性能に共通し、次のような研究のトレンドが見て取れる。

- 1) 考慮する流れが、乱れない流れからReal Worldで遭遇する乱れた流れに移行している
- 2) Real Worldの再現も、風向のみの変動から風向+風速の時間・空間スケールまでを考慮した、より詳細なものになっている。
- 3) 研究対象も空力性能だけでなく、風音性能までの広がりをもち始めた

上記のような動向を踏まえ、今後の車両開発用風洞が具備すべき要件を次節で考えてみたい。

5. 今後の車両開発用風洞の要件について

これまで見てきたように、車両の空力開発は6分力の測定結果を改善する方向で進化してきたため、風洞の乱れの少ない流れにおける偏揺角ゼロの条件を主たる実験対象として扱ってきた。このように安定した条件下における各種パラメータ検討により、空力現象の理解が加速されてきた。未だ空力性能の全てを把握したとは言いきれない現状においては、今後ともこの安定した条件における検討は続いてゆくことは確実である。

一方、車両が現実の走行条件で遭遇する風条件での性能を台上で再現するという設備要件の方向性も今後は考慮しなければならない。これは、操縦安定性に代表されるように、入力の非定常性そのものに起因する空力過渡特性が重要なシーンがあること、また、風音性能でしばしば経験するように、遭遇する流れの非定常性により定常流とは違う現象が誘起されてしまうことがあるためである。これらの現象を台上で安定的かつ安全に再現させることは実験効率向上と現象解明のために必要となってくる。

即ち、今後の車両用風洞は、1) 安定した静粛な定常流を発生させる能力、2) 車両走行条件を再現させるタイヤ回転装置、3) 床下境界層の排除に対する高度な配慮という定常流における実験を重視した仕様の他に、4) 必要に応じてX・Y・Z 3軸方向の任意の時間・空間スケールの乱れを発生させる装置を備えることが望ましい。

フルスケールではない風洞だが、この4)の要求を満たそうとした40%スケール風洞が英国Durham大学に実際に設置されている³⁰⁾。この風洞は、吹出しノズルの上と左右に可動式フラップを持っており、これをモータとリンクで動かすことにより、偏揺角で10度程度、変動周波数10Hz程度までの時間・空間スケールの異なる変動を与えることが可能となっている。



Fig 6 40% Scale Wind Tunnel with Flaps of Durham University

また、FKFSもノズル直後に直立する複数のフラップを備え、これを回転軸周りにフラッピングさせることにより、動的な偏揺角変動を与える改造を計画中である³¹⁾。

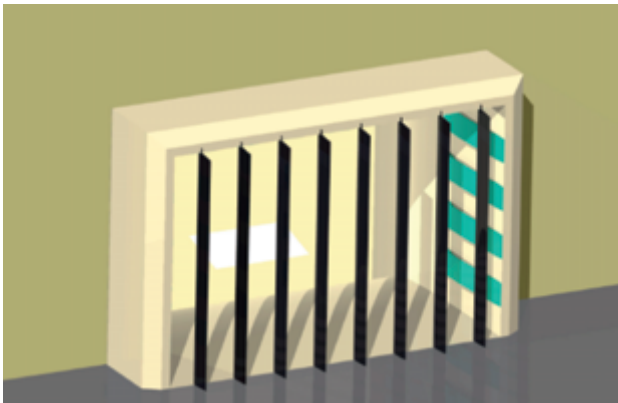


Fig 7 “SWING” concept of Future FKFS Wind Tunnel

本例はDurham Universityの例とは異なり、上下方向変動を制御するフラップを持たない。これは本計画がフルスケール風洞の改造であることから可動フラップ機構が複雑になることを避けたためと思われる。

6. まとめ

以上見てきたように、風洞は実走行における空力現象を台上で再現させることを目的として発展してきた。その初期は、現象の解明のためになるべく安定した変動のない気流の再現を追及することを目指し、周辺技術の発展に伴い、低騒音化・地面境界層の除去・タイヤ回転の再現など、より実走条件に近い流れの再現を可能にする改良を加えてきた。

一方、準定常流における空力現象が概ね把握できてきた現在、風洞内気流があまりに安定しているが故に風洞

内では再現できない実走行における現象へ研究対象がシフトする傾向にあり、これを再度風洞で検証可能とするために、風洞内での非定常変動の再現というトレンドが生まれつつある。これは先駆的なPininfarinaにおける1999年の非定常流再現システム導入から15年を経ての再度のトレンドという事になるが、今回の場合、BEVなどのようにこの研究のメリットを実際に享受し得るプロダクトも存在することから、一過性の盛り上がりではなく徐々に定着するトレンドであると思われる。また、この領域における知見はまだ不足し、その意味で多数の実験を比較的容易に行なえるスケールモデル風洞への非定常流再現装置の導入を先行させ、現象とその実車両への影響を把握した後フルスケール風洞への展開という道筋を取るのが合理的であると思われる。

参考文献

- 1) Hucho et al, Aerodynamics of Road Vehicles Fourth Edition, (1997) pp14, 1997
- 2) Hucho et al, Aerodynamics of Road Vehicles Fourth Edition, (1997) pp365-378, 1997
- 3) Hucho et al, Aerodynamics of Road Vehicles Fourth Edition, (1997) pp390, 1997
- 4) Hucho et al, Aerodynamics of Road Vehicles Fourth Edition, (1997) pp240, 1997
- 5) Hucho et al, Aerodynamics of Road Vehicles Fourth Edition, (1997) pp249, 1997
- 6) Hucho et al, Aerodynamics of Road Vehicles Fourth Edition, (1997) pp274, 1997
- 7) Hucho et al, Aerodynamics of Road Vehicles Fourth Edition, (1997) pp355, 1997
- 8) A. Cogotti, Generation of a Controlled Level of Turbulence in the Pininfarina Wind Tunnel for the Measurement of Unsteady Aerodynamics and Aeroacoustics, SAE Paper 2003-01-0430, 2003
- 9) M. Heidrich, The new Aeroacoustic-Windtunnel at the Mercedes-Benz Technology Center, The 9th FKFS-Conference Progress in Vehicle Aerodynamics and Thermal Management, 2013
- 10) Tadakuma et al, Development of Full-Scale Wind Tunnel for Enhancement of Vehicle Aerodynamic and Aero-Acoustic Performance SAE Paper 2014-01-0598, 2014
- 11) A. Cogotti et al, Aerodynamics and Aeroacoustics of Passenger Cars in a Controlled High Turbulence Flow: Some New Results, SAE Paper 2005-01-1455, 2005
- 12) F. Wittmeier et al, Tire development from an aerodynamic perspective ATZ worldwide eMagazines Edition: 2013-02
- 13) B. Schnepf et al, Investigations on the Flow Around Wheels Using Different Road Simulation Tools, The 9th FKFS-Conference, 2013
- 14) J. Wiedemann et al, Advanced Ground Simulation beyond 5-belt Technology, 2012
- 15) A. Cogotti, Update on the Pininfarina “Turbulence Generation System” and its effects on the Car Aerodynamics and AeroAcoustics, SAE Paper 2004-01-0807, 2004
- 16) A. Cogotti et al, Simulation of Transient Phenomena with the Turbulence Generation System in the Pininfarina Wind Tunnel, SAE Paper 2006-01-1031, 2006
- 17) N. Lindener et al, Aeroacoustic Measurements in Turbulent Flow

- on the Road and in the Wind Tunnel, SAE Paper 2007-01-1551, 2007
- 18) 農沢 隆秀 他, 自動車の高速直進安定性に影響する車体周りの非定常流れ特性, 日本機械学会論文集 (B編) 75巻754号(2009-6), 2009
 - 19) 中里 公亮 他. 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2014年春季シンポジウム, 学術講演会前刷集 No.25-14, 2014
 - 20) A. Ogawa et al, Quantitative Representations of Unsteady Aerodynamic Effects on Flat Ride of Vehicles, The 9th FKFS-Conference, 2013
 - 21) 黒田 智 他, 横風侵入時の空力過渡特性計測手法開発、自動車技術会 2013 年春季シンポジウム、学術講演会前刷州 No.21-13, 2013
 - 22) R. Palin, Aerodynamic Optimization for the Real World, 2nd International Forum of Future Automotive Aerodynamics, 2013
 - 23) A. Michelbach Upcoming Upgrades of IVK/FKFS Full Scale Wind Tunnel and Model Scale Wind Tunnel, EADE Meeting, 2013
 - 24) A. D'Hooge et al, Alternative Simulation Methods for Assessing Aerodynamic Drag in Realistic Crosswind, SAE Paper 2014-01-0599, 2014
 - 25) A. P. Gaylard, et al, Evaluation of Non-Uniform Upstream Flow Effects on Vehicle Aerodynamics, SAE-Paper 2014-01-0614, 2014
 - 26) N. Oettle et al, The Effects of Unsteady On-Road Flow Conditions on Cabin Noise, SAE Paper 2010-01-0289
 - 27) N. Oettel et al, The Effects of Unsteady On-Road Flow Conditions on Cabin Noise : Spectral and Geometric Dependence, SAE Paper 2011-01-0159
 - 28) M. Thompson et al, Wind-Tunnel and On-Road Wind Noise: Comparison and Replication, SAE Paper 2013-01-1255
 - 29) N. Oettel et al, Assessing the Aeroacoustic Response of a Vehicle to Transient Flow Conditions from the Peerspective of a Vehicle Occupant, SAE Paper 2014-01-0591
 - 30) O. Mankowski et al, A Wind Tunnel Simulation Facility for On-Road Transients, SAE Paper 2014-01-0587
 - 31) J. Wiedemann et al, Unsteady Flow Simulation and its Impact on Wind Tunnel Technology, 2012