

近畿大学次世代基盤技術研究所 可変風速型風洞実験装置について

Advanced Wind Tunnel for Road Vehicles in RING of Kinki Univ.

研究代表者 工学部機械工学科 教授 角田 勝
Masaru Sumida
共同研究者 大学院システム工学研究科 大学院生 森田 聖也
Seiya Morita

An advanced wind tunnel has been introduced as facilities for development of road vehicles in research institute of fundamental technology for next generation of Kinki University, i.e., in KURING. The characteristics of this wind-tunnel which can generate arbitrary pattern of wind velocity varying with time were described firstly. The representative airflow patterns are four in a steady-velocity wind, a pulsating-velocity wind, a gust of wind, and stepwise changing wind. A preliminary experiment was made of the steady wind in three types of vehicle model and the aerodynamic forces acting on the models were compared. Subsequently, a fundamental experiment was conducted of an Ahmed's vehicle model under a pulsating airflow condition and a discussion was given for the unsteady aerodynamic forces. These results suggested that the wind tunnel is very useful to investigate the unsteady aerodynamics for road vehicles.

Keywords: Wind Tunnel, Unsteady Aerodynamic Force, Road Vehicle, Unsteady Flow, Drag, Lift

1. はじめに

最近、産学官連携による各種事業が幅広く展開されるようになってきた。大学側からは研究成果の実用化を図り、産業界側からは開発費用の負担を軽減するという利点が背景にある。このような動きは、大手事業メーカーの位置する地域を主体に地方にも広がりつつある。とりわけ、自動車開発においてはこれまでの機械工学的製造技術のほかに、電気自動車やハイブリッド車に対応すべくエレクトロニクス・制御技術や安全性を高めるための情報技術、さらには人間・感性工学など、幅広い工学分野の研究が必要とされるようになってきている。中国地方の広島地区もその一つとして、広島県内の7大学と周辺企業が「医工連携事業」を機として、産学連携の共同研究が本格的に開始されている⁽¹⁾。

このような社会の動向に先んじて、近畿大学では平成21年度-25年度に、文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「地域連携による次世代自動車技術に関する研究」が採択され、工学部の位置する広島地域において近隣企業や他大学等との共同研究を推進し、当地域における学の研究拠点を目標

としている⁽²⁾。このプロジェクトは、(i) 安全・環境・利便性を向上するエレクトロニクス技術の研究、(ii) 環境対応型新材料・新加工技術の研究、(iii) 省エネルギー化に貢献する流体工学応用技術の研究、で構成されている。

報告題目である可変風速型風洞実験装置は、上記研究機器・設備の一つとして平成22年12月近畿大学工学部次世代基盤技術研究所内に導入された。この風洞によって、様々に変動する風の中における自動車の非定常空力特性を系統的に調べることが可能となった。本報告では、当実験風洞の紹介と、走行時に変動風を受ける自動車の空力特性の解明を目的として着手した基礎実験の一部内容について述べる。

2. 可変風速型風洞実験装置

2.1 風洞の概要

本研究で使用する風洞は日本カノマックス社製で、その概観と主要部分の写真を図1と2に示す。また、図3には風洞の概略寸法を示す。風洞は吹き出し口600mmの角型断面を持つ横型で、基本型式は回流式である。空カートを用いた風路の設置と組み合わせ

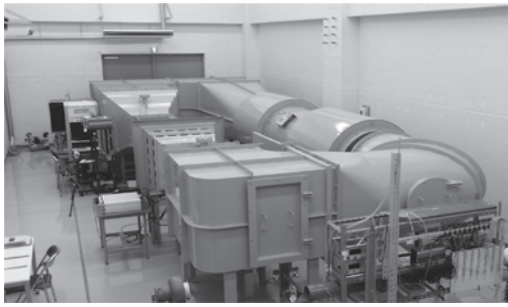


図 1. 風洞実験装置概観

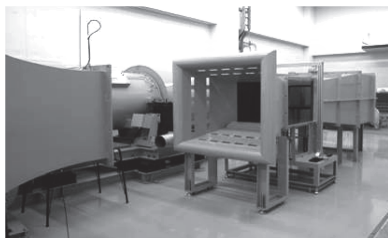


図 2. 風洞吹き出し口とコレクター

せ方により，測定部密閉型の回流式風洞，測定部開放型のセミオープン風洞，風路途中に仕切板を挿入した単回路風洞（吹き出し式風洞）の 3 通りの風洞形式を実験内容によって選択することができ，多目的に使用できるようになっている．また，設置されている部屋には空調設備が設けられており，所定の空気温度・湿度に保つことができる．さらに，実験室の壁は内側には防音吸収壁が設けられており，他研究室はもとより棟外の周辺地区にも騒音が漏れ出ることはない建物構造となっている．

2.2 風洞の構成

可変風速型風洞の主な仕様を表 1 に示す．この風洞の最大の特徴は，動翼ピッチ可変制御と回転数制御を併せ持った軸流送風機が備えられていることである．軸流送風機（吐出部の口径 1000 mm，ブレード数 14 枚）は定格風量 900 m³/min，定格回転数 1755 rpm，静圧 785 Pa で，三相 200 V，45 kW（4 極）の電動機で駆動されている．動翼ピッチ角は 0～42°，インバータ周波数は 0～60 Hz の範囲で可変できる．動翼ピッチの最大角と最小角を適宜調整し，さらにピッチ角変化の周期または時間間隔を与えることで，後述する各種変動風をプログラマブルに繰り返し発生することができる．なお，定常風の場合の風速範

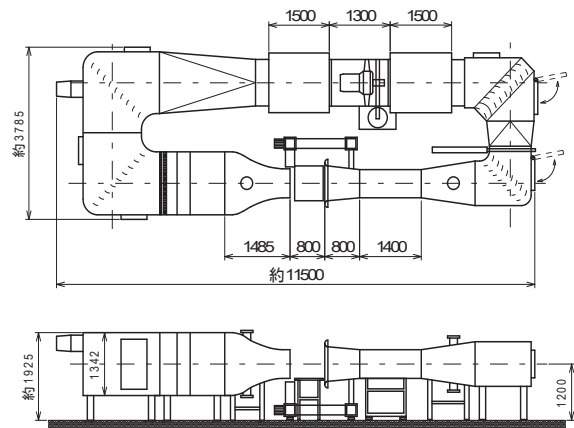


図 3. 風洞の全体概略図

表 1. 可変風速型風洞の主な仕様

型 式	回流式，セミオープン式 単回路式（選択可能）
吹き出し口寸法	600 mm × 600 mm
軸流送風機	吐出し部口径：φ 1000 mm 定格回転数：1755 rpm 定格風量：900 m ³ /min 吐出し圧：785 Pa SP
送風機用電動機	3 相交流，200 V，4 極 45 kW
風速範囲	1.5～45 m/s（定常風）
風速モード	定常風，脈動風，突風 変動風
境界層吸引排気送風機	1.5 kW，40 m ³ /min 1.2 kPa

囲は 1.5～45 m/s で，手動運転も可能である．軸流送風機の前方向らびに後方には，内筒ハブ形状で外筒ハウジング吸音・遮音材挿入の吸い込みサイレンサと吹き出しサイレンサが設置されている．

整流部は長さ 1.517 m（断面 1.342 m × 1.342 m）で，2 箇所整流格子（ハニカム対辺距離約 9.5 mm）と 3 枚の整流金網（16 メッシュ）が設けられている．縮流部は長さ 1.485 m で，約 5 : 1 で縮流している．風洞吹き出し口には試験体（車モデル）を設置する試験テーブルが置かれ，出口気流の下部低速部をスクープするために測定部床面は上下移動が可能である．さらに，試験テーブルにはモデルの風向迎え角

度を変化させることができるように、 $\phi 300$ mm のターンテーブルが内在されている。また、測定部底面の境界層の境界層厚みを減少させるために、境界層吸引口を試験体の前流側、もしくは後流側に選択設置が可能である。

ところで、車体周りの複雑な3次元流れの様子を把握するためには、流れの可視化が有用である。本風洞では拡散洞および整流洞の絞り変曲点位置付近に可視化トレーサー供給口が、また軸流送風機からの第1コーナ胴に排気ダンパーが設けられている。

なお、単回路風洞を選択する場合、第3コーナ胴と第4コーナ胴の間の仕切板を風路内に挿入し、第3コーナ胴の排気口と第4コーナ胴の吸気口を開けて運転する。

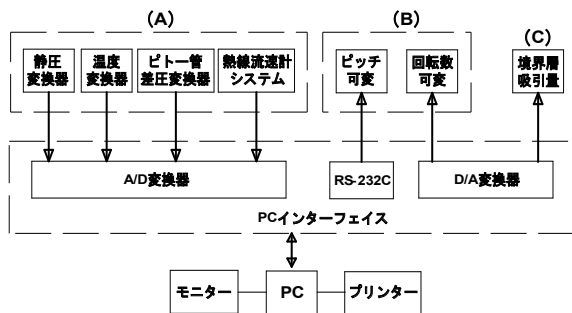


図 4. 風速制御システムの機器構成



図 5. 風洞運転の操作盤

2.3 運転・風速制御システム

風洞運転の自動制御システムに関する機器構成の概略を図 4 に、操作盤の写真を図 5 に示す。機器は流速センサー部(A)、電動機・軸流送風機の駆動制御部(B)および境界層制御部(C)から構成されている。これらは操作盤に納められたパーソナルコンピュータで計測、指令、モニターできる。

風洞吹き出し流速はピトー管と熱線流速計で測定される。ピトー管は外径 6mm の標準タイプで、動圧は差圧変換器(横河電機: EJA110)で測定され、風洞静圧(横河電機: EJA310)を用いて流速が算出される。熱線流速計は日本カノマックス製(MODEL 6141)で、ピトー管での値と適宜切り替えてモニター上に表示することができる。

2.4 風速モード

変動風を受ける自動車の非定常空力特性を調べる実験のために、風洞は様々な風速モードで運転することができる。主な風速モードは、図 6 に示すような以下の 4 通りである。

(i) 定常風モード(図 6 (a)) 軸流送風機の回転数を制御し、 $1.5 \sim 45$ m/s の定常風を発生する。風速の設定はパソコンによる回転数設定と操作盤面からの手動による回転数設定の 2 通りがある。

(ii) 脈動風モード(図 6 (b)) 脈動風発生方式には軸流送風機の動翼ピッチ可変制御方式と回転数制御方式がある。前者の場合、軸流送風機回転数一定の状態ですパソコンより動翼ピッチ角度可変信号を出力し、動翼ピッチ角を可変制御する。一方、後者の

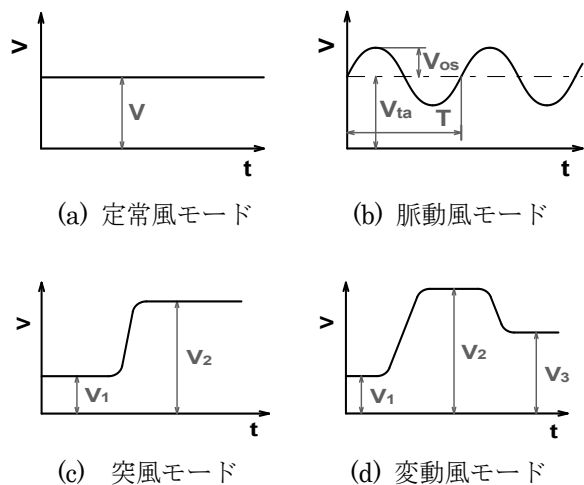


図 6. 風速モード

場合、逆に動翼ピッチ角を固定させた状態で、軸流送風機の回転数を変化させて脈動風を発生する。

(iii) 突風モード (図 6 (c)) 軸流送風機回転数一定の状態、動翼ピッチ角を急変させることにより、風速 V_1 から V_2 の突風を発生させる。

(iv) 変動風モード (図 6 (d)) 軸流送風機の動翼ピッチ角と回転数を一方あるいは同時に段階的に変えることで、 $V_1 \sim V_{20}$ のステップ状に変化する変動風を発生する。最大繰り返し回数は 30 回である。

3. 基礎実験装置および計測方法

図 7 に座標系を示す。座標系は風洞吹き出し口の中心を原点とし、流れ方向に X 軸、それに垂直な面内において水平方向に Y 軸、垂直方向に Z 軸とする。

風洞実験で自動車の空力特性を調べるためには、自動車モデルに働く力やモーメント、さらには車体周りの圧力分布を計測し、性能評価を行う。併せて車体周りの流れの様子 (速度や乱れ強さの分布) も調べる必要がある。本風洞では、これらの基本諸量を求めるために 3 分力計、圧力測定装置、速度計測装置が備えられている。また、流れ模様の観察と概況を取得するためにレーザ可視化装置 (日本カノマックス:LVS) と高速カメラ (ナック:CamRecord) がある。

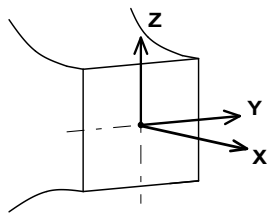


図 7. 座標系

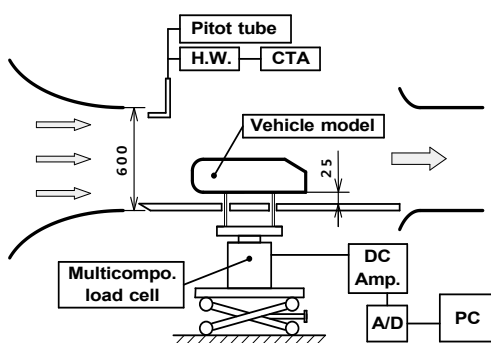


図 8. 基礎実験装置概略図

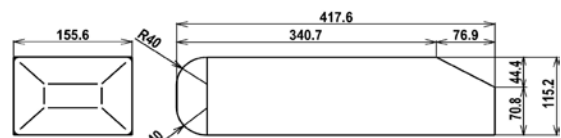
3.1 実験装置

図 8 に現在、着手しているセミオープンタイプでの基礎実験の装置概略図を示す。自動車モデルに作用する抗力 D 、横力 S および揚力 L は 3 分力計 (日章電機: LMC-3502) で検出し、直流増幅器 (DSA-100A) で増幅した出力電圧はデータ収集システム (キーエンス: NR-500) を介して AD 変換されて PC に記録される。

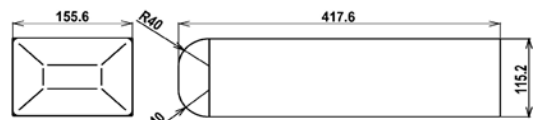
次に、自動車モデルの壁面圧力は、デジタル圧力計 (岡野製作所: DMC 型) ならびに拡散型半導体差圧変換器 (ジェイテクト: DD101K) を適宜併用して測定され、上述のデータ収集システムで収録される。

3.2 自動車モデル

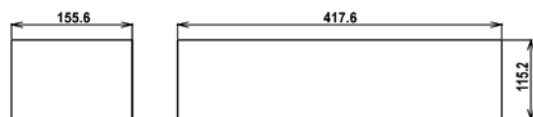
図 9 に基礎実験用の自動車模型の形状を示す。自動車モデルには、定常風モードについてのデータが蓄積されている、Ahmed ら⁽³⁾により提案されたモデル形状を取り上げた。その大きさについては風洞のブロッグージ比が 1/20 を超えない程度とし、車両寸法は長さ 417.6 mm、幅 155.8 mm、高さ 115.2 mm である。実車両とは約 1/12.5, Ahmed 模型とは 1/2.5 である。模型下部には直径 6 mm の 4 本の支持円柱が配してある。なお、Ahmed モデルは抗力係数に及ぼす後部傾斜角の影響を調べたものであるが、本供試モデルでは抗力係数が最大値⁽³⁾を取るとされている 30° の後部傾斜角とした (モデル A: 図 9 (a))。



(a) モデル A (Ahmed Model)



(b) モデル B



(c) モデル C

図 9. 基礎実験用自動車モデル

また、比較のために後部傾斜角が 0° の箱形形状 (モデル B: 図 9 (b)), さらには物体として最も基本的な直方体形状 (モデル C: 図 9 (c)) も取り上げた。

4. 実験結果および考察

4.1 定常風下での結果と考察

(a) 風洞吹き出し断面での速度分布

図 10 に、試運転期間中に縮流胴出口断面 ($X=0$ mm)において中心風速を 20 m/s に設定して、 50 mm 間隔の格子点上で計測した速度分布を示す。図示は -200 mm $\leq Y \leq 200$ mm, -200 mm $\leq Z \leq 200$ mm の領域における平均風速を基準として各計測点の比で表している。風路中央部の ± 200 mm の領域では、速度分布は偏差が 1% 以内の一様性が保たれている。なお、風洞出口断面では壁面に最も近い計測格子点上 ($Y = \pm 275$ mm 上および $Z = \pm 275$ mm 上) で相対的に速度がわずかに大きくなる傾向が見られる。出口断面中央の乱れ強さは、設定風速 20 m/s 時に 0.75% 以下という呈示値を満たしている。

(b) 車に働く流体力

走行中の自動車に働く力は大きく分けて 3 つあり、自動車の走行方向と反対に向かって加わる抗力 D , 自動車の側面方向に加わる横力 S , 自動車の上下方向に加わる揚力 L である。これらは次式で表され、無次元の係数である抗力係数 C_D , 横力係数 C_S , 揚力係数 C_L で評価される。

$$\begin{pmatrix} D \\ L \\ S \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \rho V^2 A \begin{pmatrix} C_D \\ C_L \\ C_S \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 ρ は空気密度、 V は流速、 A は前面投影面積である。抗力係数 (空気抵抗係数) C_D は燃費に最も関係しており、加速性能とも関わっている。横力係数 C_S は横風安定性に、揚力係数 C_L は直進安定性と横風安定性に関係している。

本報告では車と風との相対速度が X 軸方向のみで、車が直進している場合を扱い、空力特性に対して最も大きな影響を与える抗力と揚力に着目して説明する。図 11 に $h=25$ mm の地上高さに設置した各モデルの抗力と揚力の測定結果を示す。抗力係数 C_D (図 11(a)) は、前部に角のコーナを有するモデル C が丸みのあるモデル A と B に比べて 2 倍近く大きい。前部形状が同じモデル A と B では、後部に 30° の傾

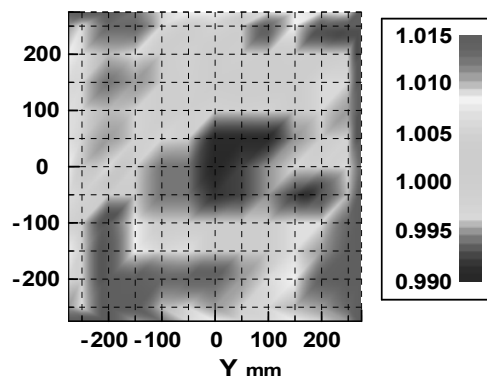
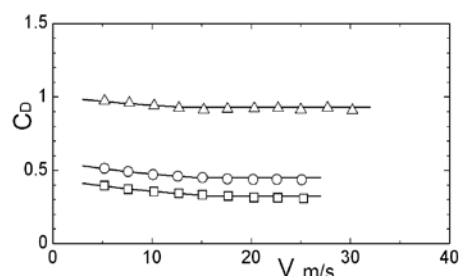
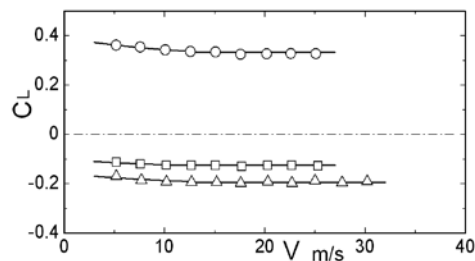


図 10. 風洞吹き出し口断面の速度分布 ($V=20$ m/s)



(a) 抗力係数 C_D



(b) 揚力係数 C_L

図 11. 定常風下での抗力係数と揚力係数 (○:モデル A, □:モデル B, △:モデル C)

斜角をつけたモデル A のほうが B よりも約 3 割ほど空気抵抗が大きい⁽³⁾。

一方、揚力係数 C_L (図 11(b)) については、上部と下部の形状が対称なモデル B と C では負の値を取って地面方向の力を受け、非対称モデル A は正の値を示して上向きの力を受けていることが分かる。また、下向きの力はモデル C のほうが B に比べて約 4 割ほど大きい。リヤ形状が 30° の傾斜を持つモデル A のような場合、後流の大規模渦運動によって車体後

方上部で圧力低下が生じて、 C_D 値が増大し C_L 値が上昇することは知られている。モデル B と C では車体下面の流れが高速となるため負圧が大きくなり、 C_L が負の値を示すと考えられる。特に、モデル C では車体前方角部で強い離流れとなるため、さらに圧力が低下して、 C_L 値の負の度合いが B に比べて大きくなると推察される。

なお、各モデルの C_D 値と C_L 値は、風速が約 10 m/s を超えるとその変化は小さくなることも分かる。

(c) 車体の圧力分布

車体表面上の圧力分布の測定結果を、代表例としてモデル A について流速 20 m/s の場合について図 12 に示す。図の横軸はモデルの全長を示し、縦軸は次式で定義される圧力係数 C_p を示す。

$$C_p = (P - P_0) / (\rho V^2 / 2) \quad (2)$$

ここで、 P は壁面圧力、 P_0 は風洞静圧である。車体の表面圧力はフロント中央面部を除いて負の値を取る。負圧力はモデルフロント部の上下とリヤ形状部で大きい。そのため、モデル A では C_L 値が正の値を示すことになる。 $x/L=0.15\sim 0.5$ で下面（床面）側の圧力が上面側に比べてやや低くなっていることも認められる。

4.2 脈動風下での結果と考察

変動風を受ける場合については、車体形状による非定常特性の特徴を把握するために、まずは脈動風下で基礎実験を行った。図 13 に風洞吹き出し口の風速 V と抗力 D および揚力 L の時間的変化を、代表例としてモデル A について示す。時間平均風速（車両速度） $V_{ta}=13.2$ m/s の下、脈動周期 $T=1.5$ s の正弦状の変動風速 $V_{os}=3.1$ m/s（変動比は 0.235）を受ける風速条件で行った。風速 V はほぼ正弦状に時間的変化をしており、次式で簡便に表すことができる脈動風が風洞内測定部に実現されていることが分かる。

$$V(t) \approx V_{ta} + V_{os} \cdot \sin \Theta \quad (3)$$

ここで、 $\Theta (= \omega t)$ 、 ω : 角振動数は位相角である。

まず、抗力 D および揚力 L は、風速の変動比が 24% にもかかわらず 50% 近い振幅比を示す。また、その変動は風速変動に対して位相差が生じ、抗力 D では約 15° 、揚力 L では 10° ほどの位相進みが見られる。他方、 D と L の時間平均値は時間平均流速と同じ値を持つ定常風下での場合よりも約 1 割大きい。

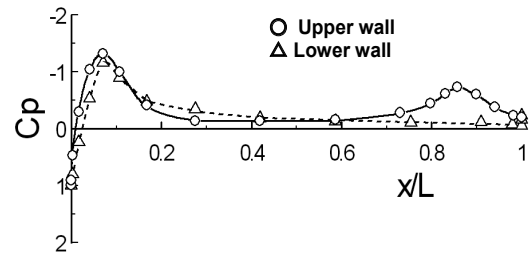


図 12. 定常風下の圧力分布 ($V = 20$ m/s)

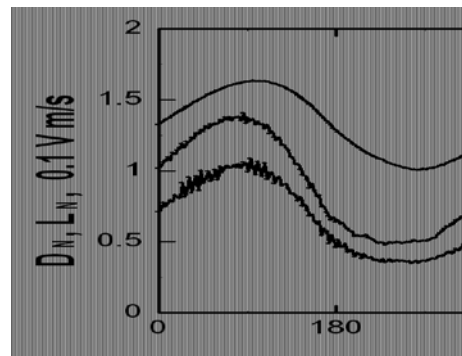


図 13. 脈動風下での抗力と揚力の時間的変化 (モデル A)

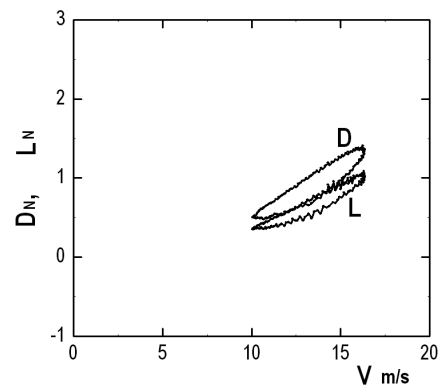


図 14. D 、 L と V のリサージュ線図 (モデル A)

したがって、モデル A のような車体形状の場合では、車は風速変動の影響を見掛け以上に受けやすいことが分かる。

次に、一周期における非定常流体力と風速との関係をリサージュ線図として図 14 に表し、検討する。線図は D および L とともに右回りである。図 14 から、向い風が強まる期間では D および L は風速にほぼ比例して大きくなり、弱まる期間にはその前半期に小

さくることが分かる。また風速の増加期間と減速期間の差および一周期内の変化は、抗力 D の方が大きい、揚力 L も相応に大きい。この点は、自動車の直進走行安定性からは重要と考えられる。

5. おわりに

近畿大学次世代基盤技術研究所に自動車開発のために導入された実験風洞について紹介した。自動車用風洞は、車の縮尺模型を置いた実験風洞から低騒音風洞、さらには実車でのムービングベルト付風洞へと益々大型化と高機能化が図られている⁽⁴⁾。しかし、これらに関わる風洞技術は定常風を対象として発展してきている。

本報告中の脈動する風下で見ても、空力特性に及ぼす風速変動の影響は、変動する風速の割合に比べて数値では倍増ともいえるほど大きいことが分かる。今後さらに低燃費化と走行安全・安定性を図る上で、非定常流下での空力性能がますます重要になると思われる。しかしながら、自然風を想定した変動風、あるいは横風・突風下での空力特性の評価は実車風洞では係る設備費の点から容易ではない。本実験風洞は小規模ではあるが、これらに対応する風速モードをプログラマブルに再現することができ、これまであまり知られていない変動風下における車の非定

常空力特性についての研究に大いに役立つことが期待される。

謝辞

可変風速型風洞は文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業（平成 21 年～平成 25 年度）「地域連携による次世代自動車技術に関する研究」による支援によって設置され、本研究の一部はその事業によって行われた。ここに付記し、感謝の意を表す。また、卒業研究として本実験の一部に協力頂いた当時の研究室学生、岡田聡司、渡辺健太の両君に感謝の意を表します。

文献

- (1) 読売新聞(2012年4月29日付朝刊), 第7面(経済欄).
- (2) 京極秀樹, 平成21年度・22年度研究成果報告書, 地域連携による次世代自動車技術に関する研究, 近畿大学次世代基盤技術研究所, 平成23年5月.
- (3) Ahmed, S.R., Ramm, G., SAE Paper 840300 (1984).
- (4) 高木通俊, 自動車用風洞, 可視化情報, 第32巻124号(2012), pp. 9-13.