

品質工学による模型風洞ムービングベルト装置の最適セッティング

Optimum Settings for the Moving Belt Apparatus of Model Wind Tunnel by Applying Quality Engineering

荒木裕次 Yuji Araki

上田厚海 Atsumi Ueda

山下堅一 Kenichi Yamashita

●研究開発センター 基盤技術研究室／製品保証推進室／AM事業部 第2技術室

要旨

品質工学を応用することにより、模型風洞の境界層制御システムの最適制御条件を得た。このシステムはムービングベルト、ベイシックサクシオン、タンジェンシャルブローで構成される。最適化の結果、風洞測定部のどの位置においても、また、広い風速範囲（10～30m/s）において境界層厚さを最小にすることができた。さらに、乗用車、フォーミュラ・カー、モータサイクル模型の空力計測を行うことにより、境界層制御システムの制御条件による空力値への影響を調べた。その結果、正確な空力計測には境界層制御が必要不可欠であることがわかった。

1 はじめに

スケールモデルを使用した風洞試験は、開発の初期段階で車両の空力特性を知ることができ、開発効率の観点から非常に有効である。四輪車における近年の研究では車両の床下流れが空力特性に大きな影響を及ぼすことが指摘されており、盛んに研究が行われている(1)～(6)。風洞試験装置においては、地面近傍流れを実走行時の流れの状態と合わせるための境界層制御装置としてムービングベルト装置があり、風洞ノズル部で発達した境界層を吸い取るためのベイシックサクシオンを組み合わせる用いるのが一般的になっている。しかしながら、サクシオンの吸引流量や吸引口形状など、多くの調整箇所が存在するため設定が困難であることから、ある風速における特定の位置の風速分布を代表させて試行錯誤的に調整を行っている場合が多い。今回、広い風速範囲にわたり、風洞測定部の位置によらず境界層を薄くできるように、効率的に最適条件を見つけ出す手法として品質工学を適用した(7)、(8)。

また、境界層制御で地面近傍風速分布が変化することにより空力値がどの程度影響を受けるかを定量的に調べるため、乗用車、フォーミュラ・カー、モータサイクルの各模型を用いて空力計測を行った。

2 品質工学の境界層制御への適用

2.1 風洞試験装置

図1に風洞および境界層制御システムの概略図を示す。本装置ではベイシックサクシオンのほかにベルト面に沿って空気を吹き出すことができるタンジェンシャルブロー装置を付加した。空気の吸い込み、吹き出しに用いるブロウやムービングベルトのモータはすべてインバータ制御により、細かな調整が可能である。

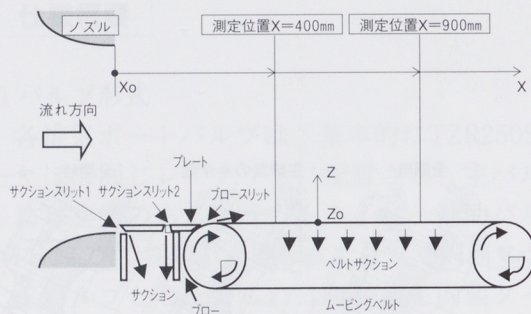


図1 実験装置概要

2.2 品質工学の適用

本解析の目的は広い風速範囲にわたり、風洞測定部の位置によらず境界層を最小化することにある。境界層制御システムを含めた風洞試験装置を一つのシステムと考え、入力を風洞主流速度、出力を各計測位置における風速値として、いかなる外乱（ノイズ）が加わっても入力と出力が比例関係にある状態になるよう、図2に示すように動特性によるパラメータ設計を行うこととした。

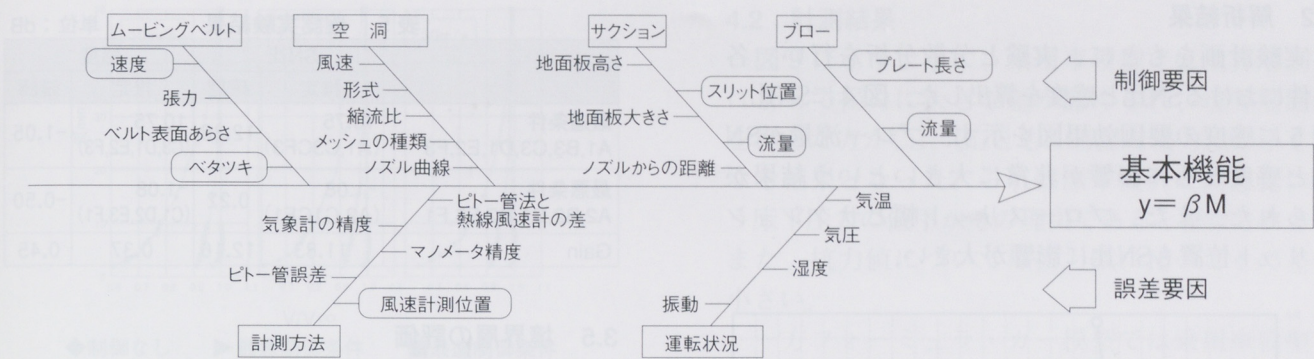


図3 特性要因図

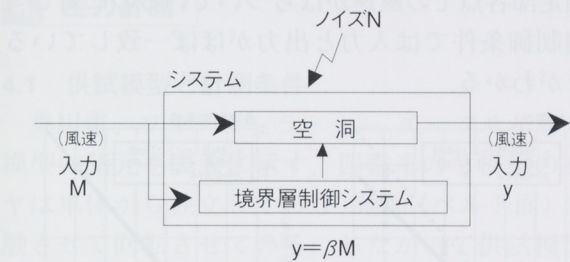


図2 動特性によるパラメータ設計

3 動特性によるパラメータ設計

3.1 実験計画

風洞測定部境界層厚さに影響をおよぼすと考えられる因子について、特性要因図を用いて表すと図3のようになる。変更の可否や容易さ、実験コストなどを考慮し、表1のように制御因子としてベルト速度、ベルトのばたつき、サクシヨンスリット位置、サクシヨン流量、ブロースリット幅、ブロー流量を取り上げた。サクシヨンとブローの流量は送風機回転数によって、またブロースリット幅はプレートの長さを変えることにより調整した。なお、サクシヨン流量、ブロー流量、ベルト速度は風洞主流速度によって効果が変わってくるので、風洞主流速度との比率を水準値にした。またベルトのばたつきはベルト面を下から吸い付ける圧力で水準を設定した。

今回の実験の特徴は、誤差因子に風速計測位置を取り上げたことである(表2)。これにより、SN比が大きくなるようにパラメータ設計を行うと、風洞測定部の位置によらず風速が一樣になることになる。今回は風洞ノズルから400mmと900mmの位置で地面から高さ方向に各5点、合計10点の位置で計測を行った。

信号因子には風洞主流速度を取り上げ、10、20、30m/sの3水準に設定した(表3)。これにより10～30m/sの風速範囲のあらゆる風速において風速分布を一樣にすることができる。
以上の因子をL18直交表へ割り付けた(表4)。

表1 制御因子

| 記号 | 制御因子 | 第1水準 | 第2水準 | 第3水準 |
|----|-------------|-----------|--------------|-------------|
| A | プレート長さ | 長 | 短 | — |
| B | サクシヨン流量 | α | 2α | 3α |
| C | ブロー流量 | β | 2β | 3β |
| D | ベルト速度 | γ | 1.05γ | 1.1γ |
| E | ベルトサクシヨン | 強 | 中 | 弱 |
| F | サクシヨンスリット位置 | 6mm×1ノズル側 | 2mm×3 | 6mm×1ベルト側 |

表2 誤差因子

| 誤差因子 | N1～N10 |
|------------|---------------------------------|
| (出力)風速計測位置 | [Z=2,4,6,10,30mm]×[X=400,900mm] |

表3 信号因子

| 信号因子 | M1 | M2 | M3 |
|--------|-------|-------|-------|
| (入力)風速 | 10m/s | 20m/s | 30m/s |

表4 L18直交表

| No. | ABCDEFee 12345678 | M1 | | M2 | | M3 | |
|-----|----------------------|---------|----------|----|--|----|--|
| | | N1,~,N5 | N6,~,N10 | | | | |
| 1 | 11111111 | | | | | | |
| 2 | 11222222 | | | | | | |
| 3 | 11333333 | | | | | | |
| 4 | 12112233 | | | | | | |
| 18 | | | | | | | |

3.2 解析結果

実験計画をもとに、実験と分散分析を行い、各条件におけるSN比と感度を算出した。図4にSN比、図5に感度の要因効果図を示す。ブロー流量がSN比と感度ともに影響が非常に大きいという結果が得られた。また、ブロースリット幅とサクションスリット位置もSN比に影響が大きい。

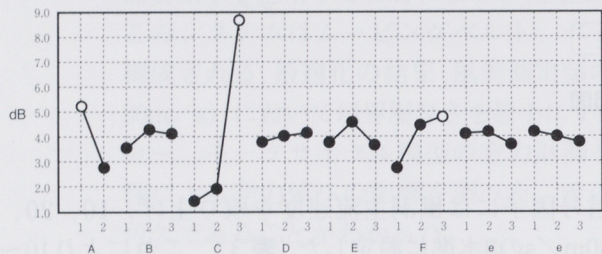


図4 要因効果図 (SN比)

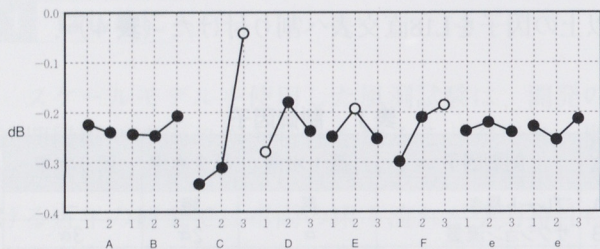


図5 要因効果図 (感度)

3.3 最適条件

誤差因子として風速計測位置を取り上げたので、SN比が大きいということは測定部各点の風速のバラツキが小さいということを意味する。したがってSN比は大きいほどよい。ここではA1, C3, F3を選択した。その上で感度が0 dB, すなわち[入力=出力]になるよう、各因子の水準を決定した。また比較のため、今回取り上げた各因子の最も悪い水準の組み合わせを最悪仕様とした。

最適仕様：A1, B3, C3, D1, E2, F3

最悪仕様：A2, B2, C1, D2, E3, F1

3.4 確認実験

再現性を調べるため、この結果を用いて確認実験を行った。その結果、表5に示すように、SN比と感度とも計算による推定値と実測値の利得(=最適条件-最悪条件)が良好に一致しており再現性があることが確認できた。したがって、ここで得た最適条件を境界層制御システムの運転条件とすることにした。

表5 確認実験結果

単位：dB

| | SN比 | | 感度 | |
|---------------------------|---------------------|-------|------------------------|-------|
| | 推定 | 確認 | 推定 | 確認 |
| 最適条件 A1,B3,C3,D1,E2,F3 | 10.75 (A1,C3CF3) | 12.38 | 10.75 (C3,D1,E2,F3) | -1.05 |
| 最悪条件 A2,B2,C1,D2,E3,F1 | -1.08 (A2,C1CF1) | 0.22 | -1.08 (C1,D2,E3,F1) | -0.50 |
| Gain | 11.83 | 12.16 | 0.37 | 0.45 |

3.5 境界層の評価

図6に境界層制御の有無によるシステム入出力の関係を示す。境界層制御なしの場合は各風速とも測定部各点での風速がばらついているのに対し、最適制御条件では入力と出力がほぼ一致していることがわかる。

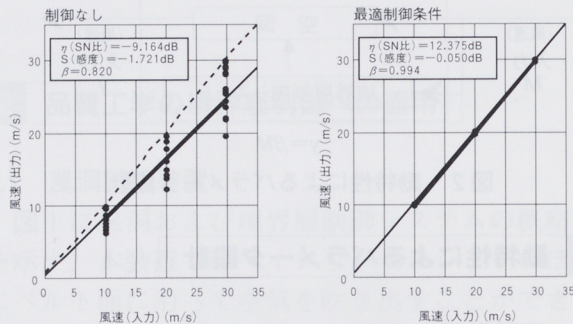


図6 入出力の関係

測定部の風速分布を見てみると、風洞ノズルから近い位置(X=400mm)では制御なしの場合境界層厚さが20mm程度なのに対し、最適条件で制御すると地面近傍まで一様な風速分布を示している(図7)。風洞ノズルから遠い位置(X=900mm)では制御なしの場合は境界層が発達しおよそ40mm程度あるが、最適制御を行うと地面近傍までほぼ一様な風速分布であることがわかる(図8)。最悪条件では境界層の除去が完全でないことも明らかとなった。

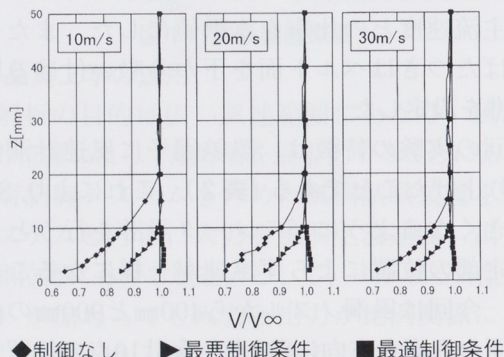


図7 境界層速度分布 (X=400)

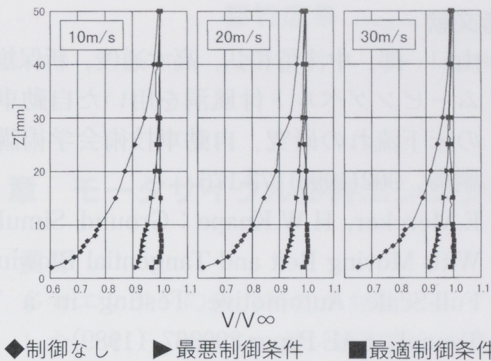


図8 境界層速度分布 (X=900)

4 空力計測

4.1 供試模型と計測条件

乗用車、フォーミュラ・カー、モータサイクル各模型の諸元を表6に示す。四輪車の2模型のタイヤは車体から独立しており、地面（ベルト面）に接触させて回転させている。したがって供試模型の空気力にはタイヤに加わる空気力は含まれていない。また、モータサイクル模型はタイヤと車体は一体で、タイヤを地面と接触させず、タイヤが回転していない状態で計測を行った。境界層制御は、なし、最悪条件、最適条件の3パターン、測定風速は25m/s（四輪車）、30m/s（モータサイクル）で計測した。

表6 動特性によるパラメータ設計

| 1/5スケール乗用車模型 | | |
|--------------------|---------|--|
| 全長 (mm) | 790 | |
| 全幅 (mm) | 335 | |
| 全高 (mm) | 216 | |
| 全面投影面積 (m²) | 0.066 | |
| ホイールベース (mm) | 460 | |
| ホイールトレッド (mm) | 275×275 | |
| グラウンドクリアランスH (mm) | 30 | |
| 1/5スケールフォーミュラ・カー模型 | | |
| 全長 (mm) | 882 | |
| 全幅 (mm) | 285 | |
| 全高 (mm) | 191 | |
| 全面投影面積 (m²) | 0.0423 | |
| ホイールベース (mm) | 559 | |
| ホイールトレッド (mm) | 344×318 | |
| グラウンドクリアランスH (mm) | 9/7 | |
| 1/5スケールモータサイクル模型 | | |
| 全長 (mm) | 500 | |
| 全幅 (mm) | 172 | |
| 全高 (mm) | 319 | |
| 全面投影面積 (m²) | 0.0325 | |
| ホイールベース (mm) | 346 | |

4.2 計測結果

図9に示すように、乗用車模型では境界層制御によって揚力に大きな差が認められ、境界層制御を行った方がC_{Lf}、C_{Lr}とも0.05程度揚力値が小さくなる結果となった。これは床下流れの高速化に伴う床下圧力の低下がその理由であると推察される。また、抗力値については揚力値に比べてその差は小さい。

一方フォーミュラ・カー模型では乗用車模型と同様に揚力値に差が大きく、図10に示すように、境界層制御を行った方がC_{Lf}で約0.2、C_{Lr}で約0.44程度揚力値が小さいという結果が得られた。C_{Lr}の方が影響が大きいのは、車体後部のディフューザ部が揚力に大きく影響していることが原因と考えられ、揚力値の正確な見積もりには地面近傍流れが非常に重要であるといえる。

モータサイクル模型では、図11に示すとおり、C_{Lf}にわずかな差が認められただけで4輪車ほど空力値に差が大きいことがわかった。モータサイクルは大きなフロア面を持たない形状であることが大きな要因と考えられる。

また、最適制御と最悪制御の各条件における空力値の差については、特にフォーミュラ・カーモデルのような地面効果を利用する形態の車両ではC_{Lf}、C_{Lr}に0.02程度の差が認められた。したがって実走行時の揚力値を正確に見積もるには境界層制御装置のセッティングが極めて重要であるとの結論を得た。

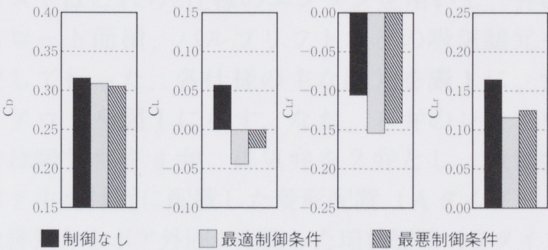


図9 1/5スケール乗用車模型の空力係数

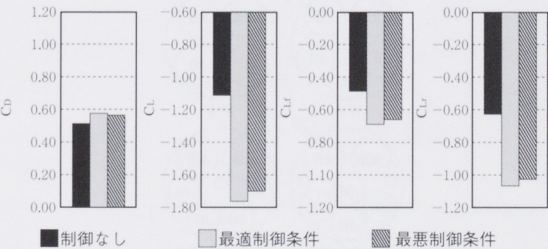


図10 1/5スケールフォーミュラ・カー模型の空力係数

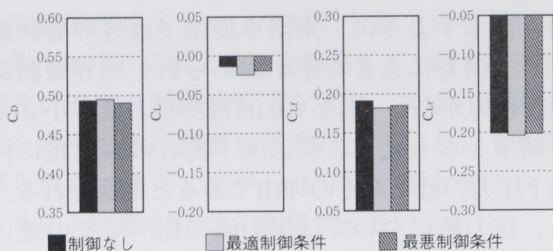


図11 1/4スケールモータサイクル模型の空力係数

5 おわりに

模型風洞におけるムービングベルト装置のセッティングに品質工学を応用することにより、広い風速範囲にわたり、また測定部の位置によらず、境界層を最小化することができた。この手法は広く応用できるので、例えば乱れ分布の最適化なども可能である。

境界層制御の有無で四輪車模型の揚力値は大きな影響を受け、特にフォーミュラ・カー模型の C_{Lr} は差が大きいという結果が得られた。また、制御条件によっても無視できない差が生じることがわかった。

さらに、モータサイクル模型の空力値が境界層制御によって受ける影響は、四輪車に比べて非常に小さいことがわかった。

参考文献

- (1) 山口一郎, 中津留和弘, 高木通俊, 新保雄二: ムービングベルト付風洞を用いた自動車模型の床下流れの研究, 自動車技術会学術講演前刷集, 902(1990)173-176
- (2) E.Mercker, H.W.Knape: Ground Simulation With Moving Belt and Tangential Blowing for Full-Scale Automotive Testing in a Wind Tunnel, SAE Paper 890367 (1989)
- (3) M.Sardou: The Sensitivity of Wind-Tunnel Data to a High-Speed Moving Ground for Different Types of Road Vehicles, SAE Paper 880246 (1988)
- (4) A.Berndtsson, W.T.Eckert, E.Mercker: The Effect of Groundplane Boundary Layer Control on Automotive Testing in a Wind Tunnel, SAE Paper 880248 (1988)
- (5) B.V.Bonis, F.B.Quagliotti, G.P.Dallara: Is the "Moving Belt Ground Plane" Really Necessary for Automobile Testing in the Wind Tunnel?, SAE Paper 870719 (1987)
- (6) J.E.Hackett, J.E.Williams, J.B.Baker, S.B.Wallis: On the Influence of Ground Movement and Wheel Rotation in Tests on Modern Car Shapes, SAE Paper 870245 (1987)
- (7) 田口玄一: 品質工学講座① 開発・設計段階の品質工学, 日本規格協会 (1988)
- (8) 田口玄一: 品質工学講座④ 品質設計のための実験計画法, 日本規格協会 (1988)

著者



荒木裕次



上田厚海



山下堅一