

流体シミュレーションを用いた ボンネビルレース車両の空力開発

Aerodynamics Development for Bonneville Race Car Using Fluid Simulation

吉 井 一 真*

Kazuma YOSHII

宇佐美 雅 貴**

Masataka USAMI

長 谷 川 輝**

Akira HASEGAWA

岡 部 浩 司**

Koji OKABE

酒 井 敬 史**

Takashi SAKAI

粕 渕 真 輔**

Shinsuke KASUBUCHI

要 旨

Honda は米国ユタ州ソルトレイクシティのボンネビルソルトフラッツで2016年8月に開催されたBonneville Speed Weekと同年9月に開催されたMike Cook's Bonneville Shootoutに、日本独自カテゴリの軽自動車の排気量658 cm³エンジンを搭載した専用車両で参戦した。参加カテゴリで最高速となる450 km/hを達成することを目標に、限られたエンジン出力で目標速度を達成できる空気抵抗の車体形状と走行安定性を確保するため流体シミュレーションを活用し、レース車両の空力開発をおこなった。プロトタイプとレコードホルダのモデルを参考に目標とする空気抵抗の車体形状を設計した。高速走行時の車両のスピントめくれ上りを抑制して走行安定性を向上するため、レース車両には垂直尾翼と水平尾翼を取り付けた。現地で急きょ走行時の視界を向上するための形状変更が必要となったが、確立したプロセスより短期間で車両の安定性を考慮した車体形状の変更をおこなうことができた。その結果、Mike Cook's Bonneville Shootout 国際自動車連盟公認land speed recordのカテゴリA、グループ1、クラス4にて、クラス世界最高速記録となる421 km/hを樹立した。

ABSTRACT

Honda participated in both Bonneville Speed Week, held in August 2016, and Mike Cook's Bonneville Shootout, held in September 2016, at Bonneville Salt Flats near Salt Lake City, Utah (USA) using a special vehicle equipped with a 658 cm³ displacement engine for a Kei car, which is an original Japanese vehicle category. Fluid simulation was used to perform aerodynamics development for the race car to create a body shape with aerodynamic drag that enables to achieve the target speed with limited engine power and to secure driving stability. The goal was to achieve a speed of 450 km/h, which would be a new speed record for the participation category. A body shape with the target drag was designed using a prototype model, and models of record holders, as references. Vertical and horizontal wings were attached to the race car to suppress vehicle spin and flipping, in addition to increasing driving stability at high speeds. On site, it became necessary to change the shape for increased visibility while driving, but the developed process allowed for a rapid body shape change, keeping vehicle stability in consideration. As a result, the official world speed record of 421 km/h in the Category A, Group 1, Class 4 was set at Mike Cook's Bonneville Shootout (International Automobile Federation World Land Speed Records).

1. ま え が き

Honda は米国ユタ州ソルトレイクシティのボンネビルソルトフラッツで2016年8月に開催されたBonneville Speed Weekに専用の車体に日本独自のカテゴリである軽

自動車と同じ排気量のエンジンを搭載したレース車両で挑戦した。

参戦カテゴリにおける最高速度は2007年8月Bonneville Speed WeekでチームCostella Yacoucciが記録した433.686 km/h (269.480 mph)であった。そこで、目標速度を

* R&D センターX

** 四輪 R&D センター

カテゴリでの世界最速となる 450 km/h と定め、レース車両の開発をおこなった。

高速で走行する車両の走行抵抗では空気抵抗が支配的になる。そのため、限られたエンジン出力で目標速度を達成するために、目標となる空気抵抗を定め、車体形状を設計した。

レース開催地のボンネビルソルトフラッツは米国ユタ州グレートソルトレイクの西、標高約 1,200 m の高地に位置する 260 km² にも及ぶ広大な塩の平原である。コースが設定されている場所の北西には標高 2,000 m 級の山がそびえ、山から突発的に風が吹きおろすことが知られている。

過去のレースを調べると、走行途中でスピンやクラッシュをした事例があった。その原因を調べると、大会期間中、コースの路面は主催者によって整地されるが、路面状態は水分を含んだシャーベット状から砂のようなさらさらの状態などに変化しやすく、また、レースの進行とともに路面が徐々に荒れて、所々にわだちや段差が生じることがわかった。

目標速度を達成するためには、目標とする空気抵抗の達成とともに、風や路面などの外乱によりスピンやめくれ上がりしが励起されない車両安定性の確保が重要となる。そこで、流体シミュレーションを活用して、目標とする空気抵抗の車体形状設計と走行環境を考慮した車両安定性の確保を目標にレース車両の空力開発をおこなった。

Bonneville Speed Week に参戦した結果、目標記録を達成することができなかったが、主催者から 9 月に開催される Mike Cook's Bonneville Shootout 国際自動車連盟 (FIA) 公認 Land Speed Record に招待され、カテゴリ A、グループ 1、クラス 4 にて、クラス世界最高速記録となる 421 km/h を樹立することができた。

本報では、流体シミュレーションを活用したレース車両の空力開発について紹介する。

2. 参戦カテゴリと車両諸元

2.1. 参戦カテゴリとレギュレーション

Bonneville Speed Week では排気量 508-753 cm³ 過給機付オートサイクルエンジンを搭載する専用車両のカテゴリに参戦した⁽¹⁾。Table 1 に参戦したカテゴリを示す。

スタート方法にレース車両を後方から車にて押し出す方法を選択した。

2.2. 車両諸元

参戦するために、SCTA official rulebook⁽¹⁾に則り、排気量 658 cm³、出力 184 kW のエンジンを搭載するボンネビル専用の車両を開発し、Honda S-Dream Streamliner と名付けた。

この車両の諸元を Table 2 に、外観を Fig. 1 に示す。

Table 1 Bonneville Speed Week of participation category

Body	BFS class (Blown Fuel Streamliner)	Turbochargers, superchargers and any choice of fuel are allowed in streamliner car
Engine	J class	508-753 cm ³

Table 2 Specifications of Honda S-Dream Streamliner

Body	Car name	Honda S-Dream Streamliner
	Length	8,500 mm
	Width	840 mm
	Height	1,185 mm
	Vehicle weight	830 kg
	Wheel base	4,800 mm
	Tire size (front, rear)	125/60R15, 115/110R15
Engine	Displacement	658 cm ³
	Bore × Stroke	66.0 × 64.0 (mm)
	Power	184 kW (250 PS)/10,000 rpm
	Torque	200 Nm (20.4 kgf-m)/9,000 rpm
	Cooling system	Water RAD, I/C
	Turbocharger	Garrett



Fig. 1 Appearance of Honda S-Dream Streamliner

3. 空力性能設計

搭載したエンジン出力を前提に、目標速度と安定性確保を達成できる空力性能要件を設定し、車両の開発をおこなった。

3.1. 車体の空気抵抗

走行中の車両では駆動力と走行抵抗が釣合関係にあるため、限られたエンジン出力で目標速度 450 km/h を出すためには、目標速度での走行抵抗である転がり抵抗と空気抵抗を、駆動力より小さくする必要がある。

空気抵抗は車体の形状、突起物などの凹凸、車体内外に出入りする流れや車体表面と空気の間で起こる摩擦によって生じ、式 (1) に示すように走行速度の二乗に比例して増加するため、高速走行時には空気抵抗 D が支配的となる。

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 C D A \quad (1)$$

ここで、 ρ は空気密度、 v は走行速度、 C_D は抗力係数、 A は車体の前面投影面積である。

そこで、エンジン出力 184 kW で目標速度 450 km/h を達成するため、転がり抵抗を除いた空気抵抗が $C_D A$ 0.09 以下となることを目標に定めた (Fig. 2)。

3.2. 揚力抑制

本車両の目標速度は航空機が離陸する速度以上となるため、車両が地面から離れることなく走行するために、車体に負の揚力 (ダウンフォース) が発生していることが求められる。そのため、揚力係数 $CL < 0$ となることを目標に定めた。

3.3. スピン抑制

路面の凸凹による車両振動や予期せぬ横風や突風などの外乱により、車両が過度に旋回するスピン現象が起こる場合がある。そのため、外乱が発生した場合でも車両がまっすぐ走行できるように安定性を確保することが必要である。

高速で走行する車両では、前後輪にかかる揚力やヨー角に対する横力とヨーイングモーメントの空力特性が車両の安定性に寄与することが知られており、直進付近の車体滑り角が小さな領域では車両の運動特性を示す指標であるスタビリティファクタによって評価できる^{(2),(3)}。

Fig. 3 に示すように、空力特性を考慮したスタビリティファクタ A_{aero} の算出式を式 (2) に示す。

$$A_{aero} = -\frac{m}{2l^2} \frac{l_f(K_f + \Delta K_{aero_f}) - l_r(K_r + \Delta K_{aero_r})}{(K_f + \Delta K_{aero_f})(K_f + \Delta K_{aero_r})} \quad (2)$$

ここで、 m は車両重量、 l はホイールベース長、 l_f 、 l_r は前後輪軸と重心位置までの距離、そして、 K_f 、 K_r は前後輪で単位スリップ角あたりに発生するタイヤのコーナリングパワーを示す。この式では、定常旋回時に発生する横力

を含む空力特性の影響を考慮するため、前後輪にかかる等価コーナリングパワーに式 (3) の ΔK_{aero_f} と式 (4) の ΔK_{aero_r} を用いている (Fig. 3)。

$$\Delta K_{aero_f} \cong -\frac{1}{2l} \frac{l_f K_f}{l_r K_r} \left(l_r \frac{\partial F_{aero_y}}{\partial \beta} + \frac{\partial M_{aero_z}}{\partial \beta} \right) \quad (3)$$

$$\Delta K_{aero_r} \cong -\frac{1}{2l} \left(l_r \frac{\partial F_{aero_y}}{\partial \beta} - \frac{\partial M_{aero_z}}{\partial \beta} \right) \quad (4)$$

ここで、 β は旋回時のスリップ角、 F_{aero_y} は車両にかかる横力、 M_{aero_z} は車両重心垂直軸周りのヨーイングモーメントである。

A_{aero} が正の場合はアンダステア特性、負の場合はオーバステア特性となる。そのため、外乱が発生した場合でも車両がまっすぐ安定して走行できるように、目標とする 450 km/h 以下の速度で、常に $A_{aero} > 0$ となることを目標に定めた。

3.4. めくれ上がり抑制

わだちや段差による路面入力により車両の姿勢が乱れ、車両先端が上向く (ピッチング) と、車体下面に流入した空気により車体に揚力が発生してピッチングを促進する、めくれ上がり現象が発生する場合がある。安定性確保のためにはピッチングが発生した場合、車両を元の姿勢に復元する力が作用することが求められる。

そこで、式 (5) と (6) に示すように、ピッチ角 α が変化しても前輪の輪荷重変動 $\Delta W_{lf_}\alpha$ と後輪の輪荷重変動 $\Delta W_{tr_}\alpha$ が常に正の値となることを目標に定めた (Fig. 4)。

$$\Delta W_{lf_}\alpha = W_{lf_}\alpha - L_{f_}\alpha > 0 \quad (5)$$

$$\Delta W_{tr_}\alpha = W_{tr_}\alpha - L_{r_}\alpha > 0 \quad (6)$$

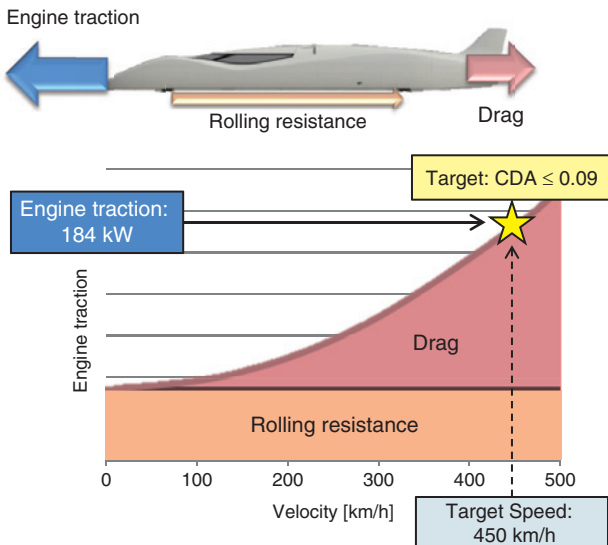


Fig. 2 Relationship between engine traction and total resistance

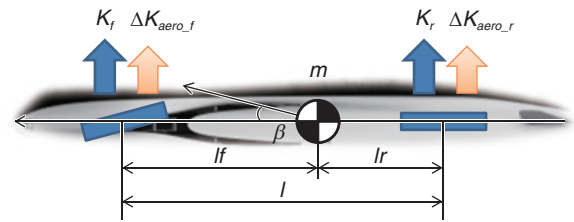


Fig. 3 Stability factor model diagram

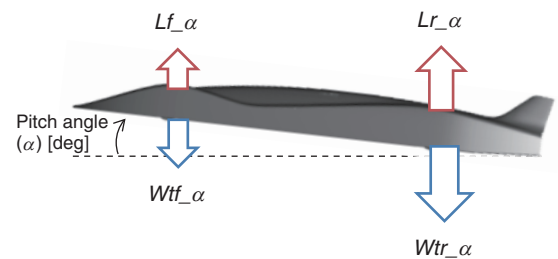


Fig. 4 Wheel load variation of car weight and lift force when pitching

Table 3 Aerodynamics design requirement

Category	Item	Target
Target speed		450 km/h
Aerodynamics	Specific drag	$CDA < 0.09$
	Body lift	$CL < 0$
Vehicle stability	Stability factor	$A_{aero} > 0$
	Wheel load variation at front and rear wheels	$\Delta W_{tf_a} > 0$ $\Delta W_{tr_a} > 0$

ここで、前後輪での車両の輪荷重を W_{tf_a} , W_{tr_a} , 前後輪に作用する揚力を L_{f_a} , L_{r_a} とする。

この章で示した目標速度と車両安定性を達成するために必要な空力性能設計要件を Table 3 にまとめる。

4. 車体形状設計

初期検討で考案されたプロトタイプモデルとボンネビルで上位の記録を保持するマシンの中で特徴の異なる3台のモデルを参考に、流体シミュレーションを活用して目標とする空気抵抗と揚力を達成するための車体形状を検討した。それらの車体形状と流体シミュレーションにより求めた断面圧力分布を Fig. 5 に、CD と CL の結果を Fig. 6 に示す。

CD はプロトタイプモデルが最小、CL は参照モデル2が最小となっていることがわかった。CL についてプロトタイプモデルと参照モデル2を比較すると、プロトタイプモデルの車体形状では最大頂点位置が車体の前方に位置す

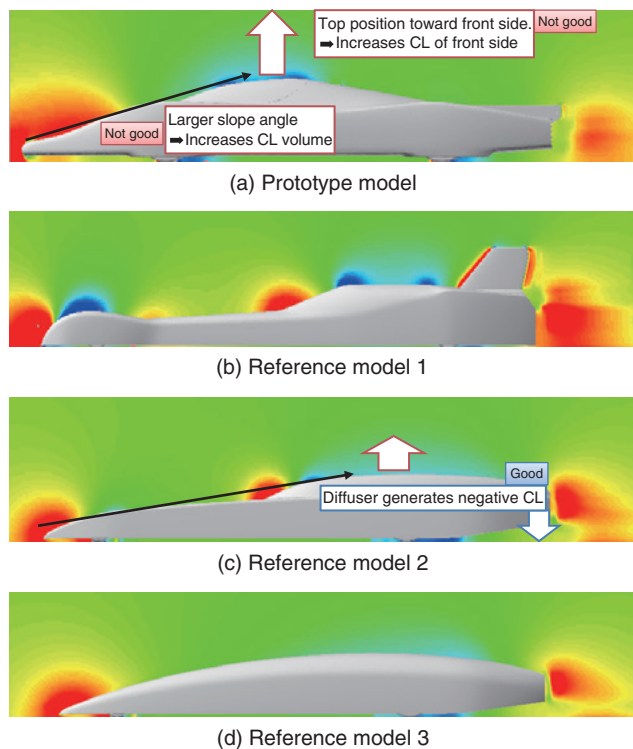


Fig. 5 Comparison of section pressure distribution of 4 models

るため前輪で正の揚力が発生していた。また、先端から頂点に達するまでの勾配が大きいと揚力が大きくなっていた。さらに、参照モデル2の結果から床下からリアエンドにかけての傾斜(ディフューザ)により負の揚力が発生させていることもわかった。そこで、CD が最小のプロトタイプモデルの形状をベースに、CL を負の値にするために頂点位置や高さ、傾斜角の寄与を検討し、修正したモデルを Fig. 7 に示す。

修正モデルの CDA は 0.085 となり、また、CL を負の値にすることができ、目標とする空気抵抗値と揚力を達成する車体形状を設計することができた。

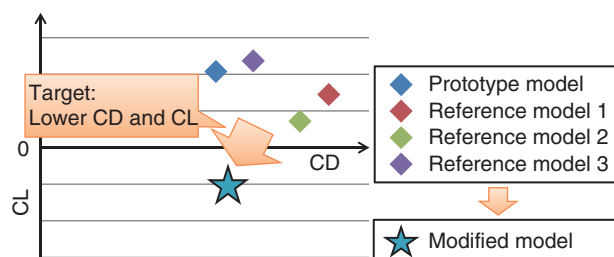


Fig. 6 CD and CL of 5 models



Fig. 7 Shape and section pressure distribution of modified model

5. 車両安定性の確認

5.1. スタビリティファクタの確認と対策

高速走行時にも車両の安定性が確保できていることをシミュレーションにて評価をおこなった。Fig. 7 に示す修正モデルの A_{aero} 計算結果を Fig. 8 に示す。この車体形状では 400 km/h を超える速度で $A_{aero} < 0$ となり、車両が不安定(オーバステア特性)となることがわかった。

原因を調べると、 M_{aero_z} の係数であるヨーイングモーメント係数 CYM のスリップ角 β あたりの値 CYM/β が大きく、車両を過度に旋回させる力のモーメントが発生することがわかった (Fig. 9)。

さらに、Fig. 10 に示す前後輪にかかる揚力係数 CL_f , CL_r を調べると、前輪のダウンフォースが後輪に対して大きいことから、前輪のコナリングフォースが後輪より強くなり、速度の上昇によりスタビリティファクタ A_{aero} が低下することがわかった。

そこで、目標速度でも $A_{aero} > 0$ となるよう、 CYM/β , CL_f , CL_r に着目して対策をおこなった。

CYM/β 低減のため、車体後方に垂直尾翼を設置した。

また、CLの負の値を保持したままCLfを弱めCLrを強めるために、垂直尾翼に水平尾翼を設置し後輪でダウンフォースを増加させる対策をおこなった。Fig. 11に垂直尾翼と水平尾翼の形状を示す。

さらに、CDやCLfとCLrのバランスを向上するために、ノーズコーン形状や、タイヤ周りの形状などの修正をおこない、レースカーの車体形状を決定した。Fig. 12にレースカーモデルの車体形状と断面圧力分布を示す。

レースカーモデルの A_{aero} をFig. 8に、CYM/ β をFig. 9に、CLfとCLrをFig. 10に示す。Fig. 8よりレースカー

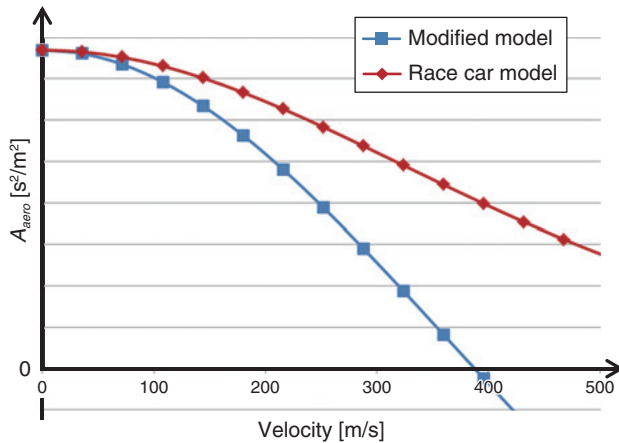


Fig. 8 Comparison of stability factor of modified model and race car model

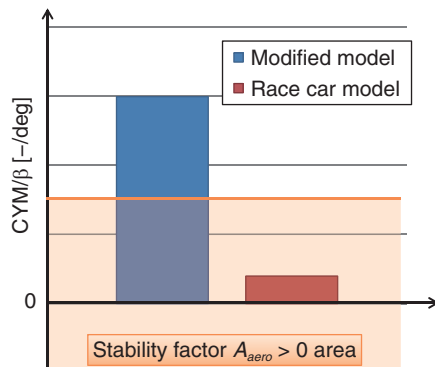


Fig. 9 Comparison of CYM/ β of modified model and race car model

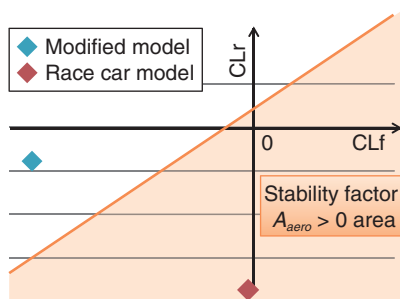


Fig. 10 Comparison of CLf and CLr of modified model and race car model

モデルは450 km/h以上の速度域でも $A_{aero} > 0$ となることが確認できた。

5.2. めくれ上がり抑制の確認

目標速度450 km/hで車両がピッチングした場合において、後輪を支点としたピッチ角0 deg – 5 degの範囲で輪荷重変動を確認した。

Fig. 13にレースカーモデルの計算結果を示す。各ピッチ角において前後輪での輪荷重変動 $\Delta W_{tf_α}$ と $\Delta W_{tr_α}$ がいずれも常に正の値であることから、めくれ上りを抑制する車体形状であることを確認できた。

以上より、レースカーモデルでは修正モデルに対しCYM, CLf, CLr特性を向上させるために、空気抵抗となる垂直尾翼と水平尾翼を追加してCDAは0.089となったが、目標を達成することができた。そこで、Fig. 12に示すレースカーモデルの車体形状に基づきレース車両のカウルを製作した。

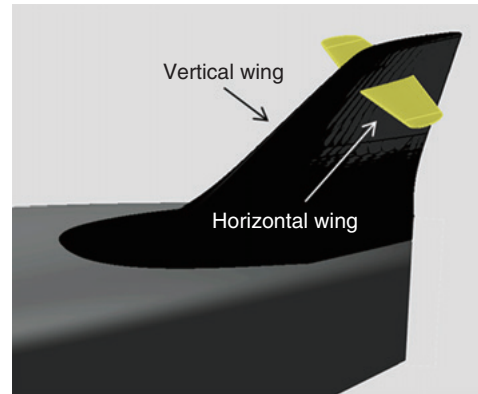


Fig. 11 Attached vertical and horizontal wing



Fig. 12 Shape and section pressure distribution of race car model

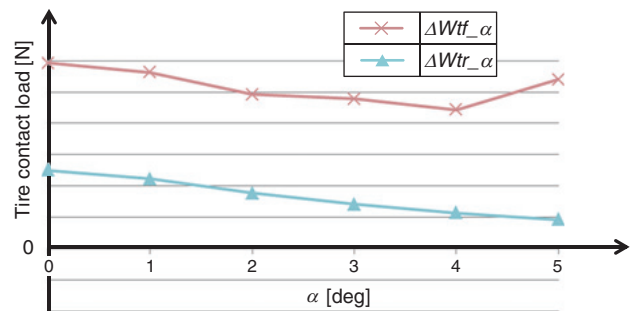


Fig. 13 Relationship between pitching angle and wheel load variation of race car model at 450 km/h

6. 車体形状の設計変更

レース車両を現地に発送する前、日本のテストコースにてドライバによる試走をおこない、車両の安定性や操縦性、視界性など運転に支障がないことを確認した。

そして、Speed Weekの2週間前に開催されたMike Cook's Bonneville Test & Tuneに参加し、レースコースでテスト走行をおこなった。Speed Weekではボンネビルソルトフラッツが環境保存地区であるため走行ラインが引かれておらず、真っ白な塩のコース路面の上に目印は1/4マイルごとに設置されているパイロンのみであった。さらに、走行時の振動によりパイロンの視認性が低くなりコースから逸脱する課題が明らかになった。この課題に対処するため、ドライバがパイロンを視認できる十分な視界を確保するような車体形状の設計変更をおこない、かつ、目標速度達成のために車体の空力性能と車両安定性の確保をおこなった。

改修後の車体形状と断面圧力分布の流体シミュレーションの結果をFig. 14に示す。CDとCLの計算結果をFig. 15に、CLfとCLrをFig. 16に、 A_{aero} の車速変化をFig. 17に、輪荷重変動をFig. 18に示す。

Fig. 15に示すように、形状変更によりCDが増加し、CLはゼロに近づいたことを確認した。

この原因は新たに取り付けたウィンドスクリーンの傾斜角度が大きく、抗力が増大し、前方視界確保のために前輪周りをカットしたことで揚力が増大したためである。

また、前輪回りで揚力が増大したためFig. 16に示すように、CLfが正の値になった。しかし、Fig. 17に示すように、 A_{aero} は高速側でより安定する方向に作用することを確認できた。

Fig. 18に示すように、形状変更によりピッチ角変化に

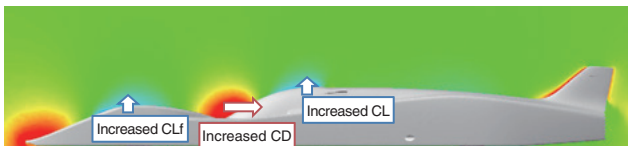


Fig. 14 Shape and section pressure distribution of race car revision model

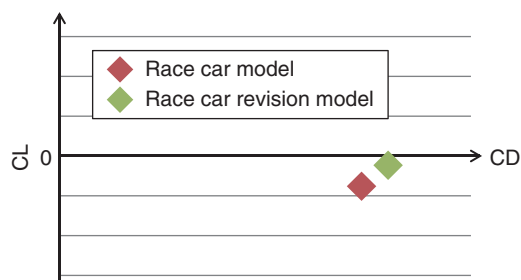


Fig. 15 Comparison of CD and CL of race car model and race car revision model

よる輪荷重変動は大きくなったが、目標とする要件は満足することを確認した。

十分な視界を確保したレースカー改修モデルは車両安定性の要件を満たすことができたが、CDAが0.097と目標を達成することはできなかった。

これらの形状設計変更と車両の安定性確認は流体シミュレーションを活用した確認プロセスが確立されていたため、3日間という短期間でできた。

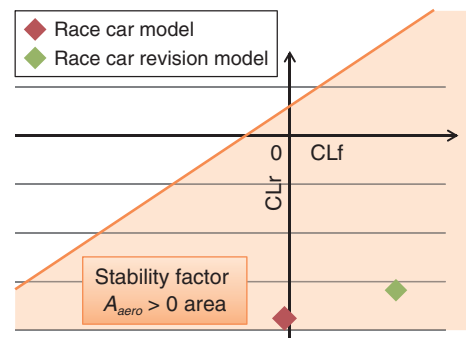


Fig. 16 Comparison of CLf and CLr of race car model and race car revision model

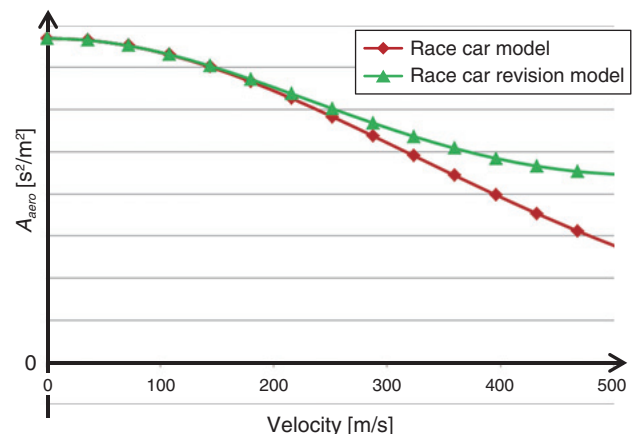


Fig. 17 Comparison of stability factor of race car model and race car revision model

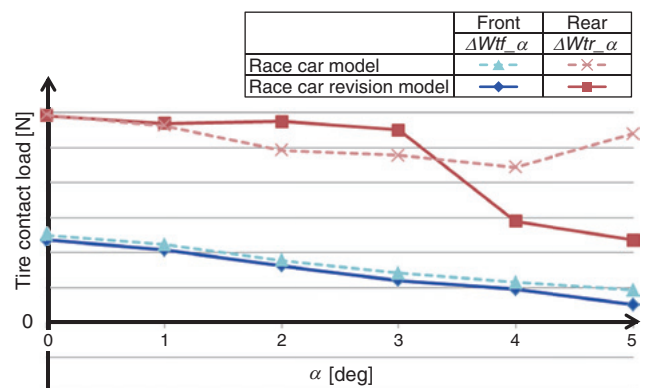


Fig. 18 Relationship between pitching angle and wheel load variation of race car model and race car revision model at 450 km/h

Table 4 Mike Cook's Bonneville Shootout (FIA recognized) participation category

Category A	Race car
Group 1	Otto cycle engine with supercharger
Class 4	Engine displacement 500-750 cm ³
Start	Flying start

Table 5 FIA Land Speed Record result

Vehicle	Honda S-Dream Streamliner
Constructor	Team Honda R&D
Driver	Hikaru Miyagi
1 mile record	261.875 mile/h (421.446 km/h)
1 km record	261.966 mile/h (421.595 km/h)

7. レース参戦結果

Bonneville Speed Week では目標とする参戦カテゴリでの記録の更新を達成できなかった。しかし、9月のMike Cook's Bonneville Shootout FIA 公認 Land Speed Record に招待され、カテゴリ A、グループ 1、クラス 4 のレースに参戦することができた。Table 4 に参戦カテゴリを示す⁽⁴⁾。

その結果、参戦カテゴリでの最高速記録となる 421 km/h⁽⁵⁾を達成することができた (Table 5)。

8. まとめ

目標速度 450 km/h を達成するためのボンネビルレース車両の空力開発において以下をおこなった。

- (1) 目標速度達成のために空力性能の比較調査検討で得られた結果から車体の抗力係数*前面投影面積 CDA と揚力係数 CL が目標値以下になるように車体形状設計をおこなった。
- (2) 車両に垂直尾翼と水平尾翼を設置することにより、車両のスピンとめくれ上がりを抑制し、高速走行の安定性を確保することができた。
- (3) 車両の視界確保をおこなうために、確立したプロセスにより短期間で空力を考慮した車体形状の設計変更と車両安定性確認ができた。
- (4) 目標速度を達成することはできなかったが、Bonneville Speed Week 後に招待された Mike Cook's Bonneville Shootout にて 421 km/h の FIA 公認のクラス世界最高速の記録を樹立することができた。

参考文献

- (1) SCTA members: 2016 SCTA Official Rulebook,

SCTA Officers, (2016)

- (2) Shibue, H. Ogawa, A.: Method of Vehicle Dynamics Analysis by Means of Equivalent Cornering Stiffness for Aerodynamic Forces and Moments, SAE Int. J. Passenger Cars - Mech. Syst. 5(2) p. 737-744, (2012)
- (3) 真塩亨, 皆川真之: 新型 CIVIC の高速操縦安定性のための空力技術, Honda R&D Technical Review, Vol. 29, No. 1, p. 17-24
- (4) <http://www.fia.com/sports/fia-world-land-speed-records>
- (5) <http://world.honda.com/automobile-technology/engineer-talk/BonnevilleSpeedWeek2016/sp/page6/>

■著 者■



吉井 一 真



長谷川 輝



酒井 敬 史



宇佐美雅貴



岡部 浩 司



粕 渕 真 輔