

輸送機器まわりの流れ場の フィードバック制御による空力抵抗の低減

Drag reduction of a Vehicle
by Feedback Control of Surrounding Flow Field

仁杉 圭延*, 早瀬 敏幸*, 白井 敦*, 林 叡*

Keisuke NISUGI*, Toshiyuki HAYASE*,
Atsushi SHIRAI*, Satoru HAYASHI*

*東北大学 流体科学研究所

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

キーワード: 乱流のフィードバック制御(Feedback Control of Turbulent Flow),
渦構造 (Vortex Structure), 抵抗低減 (Drag Reduction), 制御則 (Control Law)

連絡先: 〒980-8577 仙台市青葉区片平 東北大学流体科学研究所 知能流システム研究部門
Tel.: (022) 217-5253, Fax.: (022) 217-5253, E-mail: hayase@ifs.tohoku.ac.jp

1. 緒 言

航空機, 自動車等における抵抗の低減は, 環境問題, 省エネルギー等に関連して重要な問題である. 移動物体の壁面に分布したアクチュエータを用いて, 壁面近傍の流れ状態に応じた局所的な入力を与える事により, 乱流変動の抑制と, 大幅な抵抗低減が可能となることが数値実験で明らかにされている¹⁾.

本研究ではフィードバック制御による抵抗低減の対象として自動車を取り上げ, 数値シミュレーションを行う. 制御対象である流れ場中のある点での速度成分を用いて, 渦構造を促成するようなフィードバック制御を

吹き出しおよび吸い込みにより与えた場合の数値実験を行い, 抵抗低減の効果, および, 吹き出しに必要な動力を含めた車両全体としての動力低減の効果について検討する. また, 制御則の各パラメータ値を変化させた計算を繰り返し行い, 効果的で, 安定した抵抗低減が可能なパラメータ値を検討する. さらにフィードフォワード, 一定吹き出しなどの制御方法との比較により, 本フィードバック制御の有効性について検討する.

2. 数値計算法

本研究における数値計算車両モデルは, 乗用車の測定結果を単純化し, 2次元直角座標

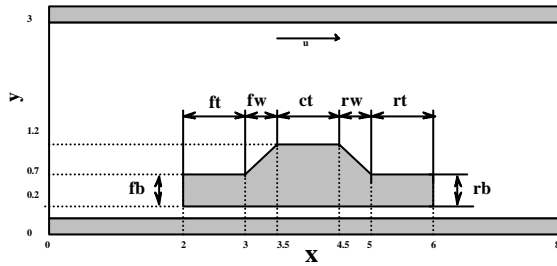


Fig.1 Automobile's Model

系上の 162×62 の格子点上にモデル化したものを使用した(Fig.1). 対象領域の上下は固体壁で囲まれており, 座標系は一定速度で X の負方向に走行する車両に固定する. 左端境界上では一様な X 方向速度 u をもつ平行流, 右端境界上では自由流出とし, 上下壁面は速度 u で X 方向に移動するとした. 基礎方程式はナビエーストークス式, および, 連続式である.

数値計算法は有限体積法の一つで非圧縮

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad}) \mathbf{u} = -\text{grad } p + \frac{1}{Re_0} \nabla^2 \mathbf{u}$$

$$\text{div } \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

粘性流体の計算に用いられるSIMPLE R法に改良を加えたものを用いた²⁾. 計算条件として, 20°C 空气中, 車両の走行速度 100 km/h とし, その他の条件は Table1 に示す(有次元量には*を付した). 車両に作用する抗力 F は車体に作用する圧力を積分して求め, 吹き出しに必要なパワー P は次式により計算した.

$$P = \frac{1}{2} \rho u_{\text{blow}}^3 A^* \quad [W] \quad (2)$$

ここで u_{blow} は吹き出し速度である.

Table1 reference values

A^* : 制御流面積	[m^2]	0.075
L^* : 車輻高さ (代表長さ)	[m]	1.0
u^* : 車輻速度 (代表速度)	[m/s]	30.24
w^* : 車輻の幅	[m]	1.5
ρ : 密度 (20°C , 空気)	[kg/m^3]	1.229

3. 数値解析結果

3.1 フィードバック制御則

車両周りの流れ場の状態を知るために制御流なしの状態の数値実験を行った. 非定常な流れの様子を連続的に可視化すると, 抗力は時間とともに変動しており, それと同期するように流れ場において渦構造が変化していることが知られた. また, 高抵抗と低抵抗を生ずる場合にそれぞれ特徴が見られた. すなわち, 高抵抗の場合, 車両表面から離れたところで後流渦が形成されるが, 低抵抗の場合にはそのような大きな後流渦は見られなかった. さらに, 車両表面の圧力分布を比較してみると, 前者の場合, 後流渦により車両後部に大きな負圧が発生し, 抵抗を増大させていることが知られた. そこで本研究では車両後端部で負圧を生じさせる後流渦の影響を低減するため, 車体上の渦に関連した速度を用いたフィードバック制御吹き出しに対する数値計算を行った. また, 一定量の制御流を与えた数値計算を行い, 最も流れ場に影響を与える制御流位置を決定した.

制御則としては, 流れ場中のある点 P_m での y 方向速度を u_m とし, y 方向の吹き出し速度 u_{blow} を次式のように与えた(Fig.2).

$$u_{\text{blow}} = K_g (u_m - u_a) \quad (3)$$

ここで, K_g はゲイン定数, u_a は一定のピアースである.

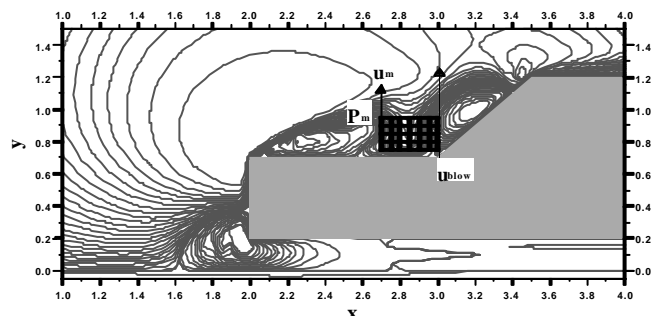


Fig.2 Schematic of feedback control

本報告では P_m の x 座標を 2.70 から 3.00 まで、 y 座標を 0.75 から 0.95 までそれぞれ 0.05 刻みで変えた 3 5 点 (Fig.2 中のグリッド線上の点) を使用し、まず、 K_g を 1、 u_a を吹き出しなしの場合の (2.85,0.85) における平均速度(0.14)として計算を行った。

3.2 フィードバック制御による抵抗低減

Fig.3 に各モニタポイントに対する抵抗変化率を等高線の形で示す。 P_m の位置により制御効果に差があるが、図中の網かけ部が抵抗低減効果の見られた領域であり、3 5 点中の 2 5 点で抵抗低減効果があり、特に Fig.3 中の A 点で最も大きな抵抗低減効果(2 4 %)が得られた。A 点での抗力の時間変動を Fig.4(a)に、吹き出し速度の時間変化を Fig.4(b)に示す。Fig.4(a)では、制御流なしの場合と比較すると、制御流により瞬間的な抗力の増加が抑えられ、全体的に低い抗力で周期的に変動し、さらに負の抗力(推進力)発生の効果も周期的に発生していることがわかる。吹き出し速度の時間変化は抗力の時間変動と同様に周期的であり、この周期的な吹き出しにより渦を連続的に促成することになり、小さな渦が合体して大きな後流渦ができるのを抑制しているものと考えられる。周期的な抗力変動の極大時の流れ場を可視化すると、制御によって大きな後流渦の形成が抑制されている事が分かる。また、Fig.4(c)に制御を行った場合の時間平均の圧力分布を示す。平均圧力分布は、制御ありの場合には制御流なし場合に比べ全体的に低くなるが、r b 部でわずかながら高圧を発生しており、これらが抵抗低減に関連していると考えられる。式(2)から計算した吹き出しに必要なパワーは 54W であり、抵抗低減により得られるパワー節約分 7900W に比べて十分小さい(Fig.5)。

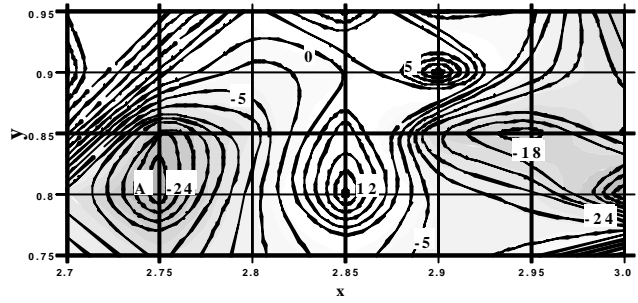
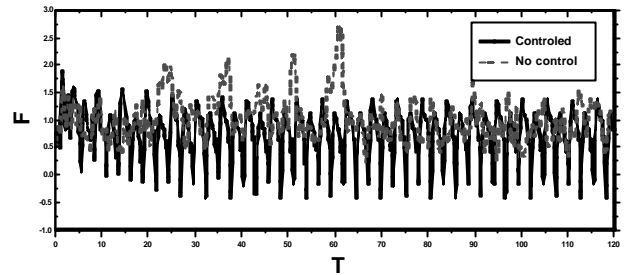
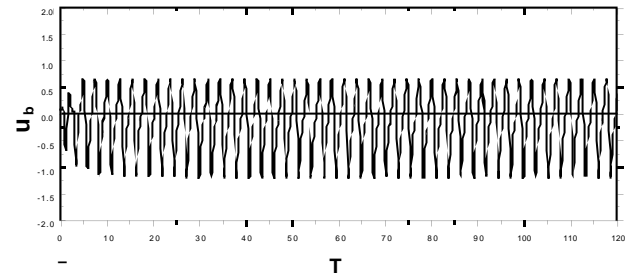


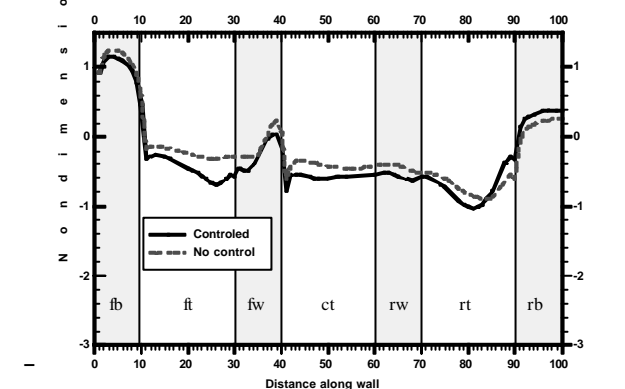
Fig.3 Drag change rate with monitoring point



(a) Drag



(b) Control flow



(c) Pressure distribution along automobile's wall

Fig.4 Result of Feedback control

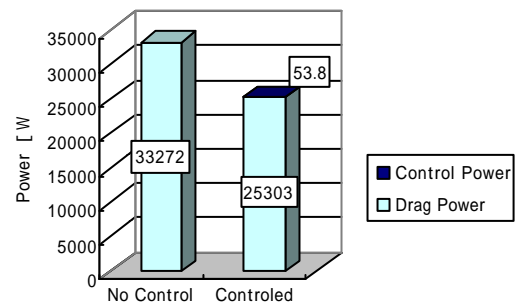


Fig.5 Power consumption

3.3 制御パラメータの変化と抵抗低減効果

3.2節では式(2)の制御パラメータのうち、 K_g を1、 u_a を0.14に固定し、 u_m の位置を変えて計算を行ったが、ここでは最も抵抗低減効果があったFig.3中のA点に u_m の位置を固定し、 K_g も1に固定し、 u_a を変化させて計算を行った。Fig.6に横軸にバイアス u_a 、縦軸に抵抗変化率をとったグラフを示す。バイアスを負の値にする、すなわち吹き出しが多い場合には抵抗低減効果はなく、むしろ抵抗を大きく増加させてしまう。一方、バイアスを正の値にした場合、つまり吸い込みが多い場合にはほぼすべてのバイアスで抵抗低減効果が得られている。特にバイアス値が0.6~0.9の範囲と1.3~1.7の範囲では20%以上の安定した抵抗低減効果が得られた。この二つのパラメータ域ではほぼ同程度の抵抗低減効果があったにもかかわらず、その抗力の時間変動や吹き出し量の時間変動は異なっていた。Fig.7(a)に $u_a=0.7$ のときの抗力の時間変動を、Fig.7(b)に $u_a=1.4$ のときの抗力の時間変動を示す。これより最適な制御は一つではなく二つのモードが存在すると考えられ、その波形から $u_a=0.7$ を低周波モード、 $u_a=1.4$ を高周波モードとすればその中間域($u_a=1$ 付近)は二つのモードの遷移領域であったため安定した抵抗低減効果が得られなかったものと考えられる。

次にFig.3中のA点に u_m の位置を固定し、 u_a を安定領域内の0.7に固定し、 K_g を0.5から2.0まで変化させて計算を行った結果をFig.8に示す。全体的に抵抗低減の効果が見られたが、特に0.85から1.5の範囲では安定して20%程度の抵抗低減効果が得られた。しかし、この範囲より大きなゲインは吹き出し量が大きくなるため流れ場にあたる変動が大きすぎて安定した抵抗低減効果が得られるとは考えられない。また、大きな吹き出し量は動力的な面からもメリットはない

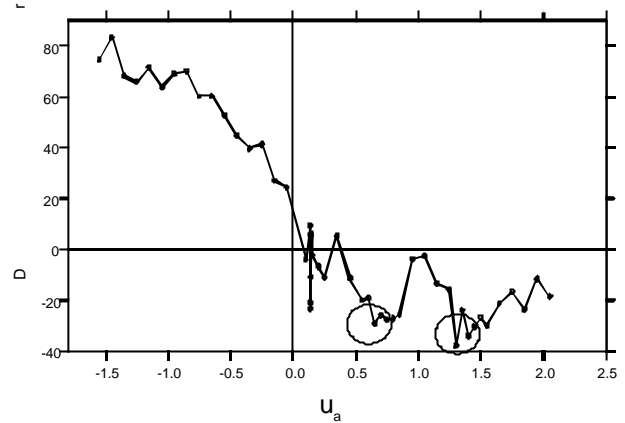
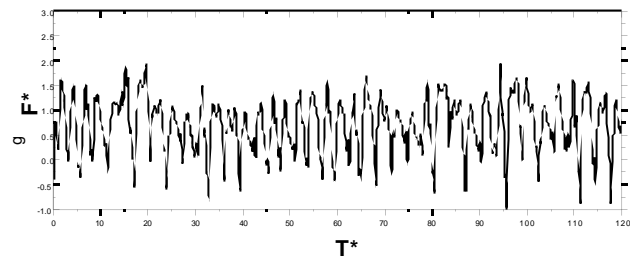
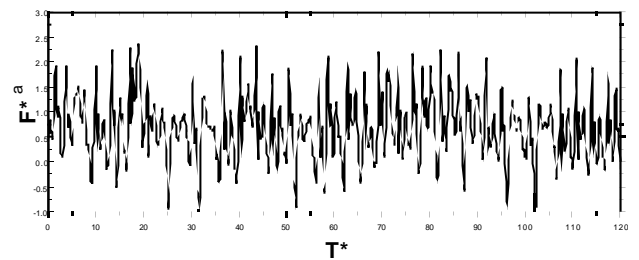


Fig.6 Drag change rate with u_a



(a) $u_a=0.7$



(b) $u_a=1.4$

Fig.7 Two types of drag fluctuation

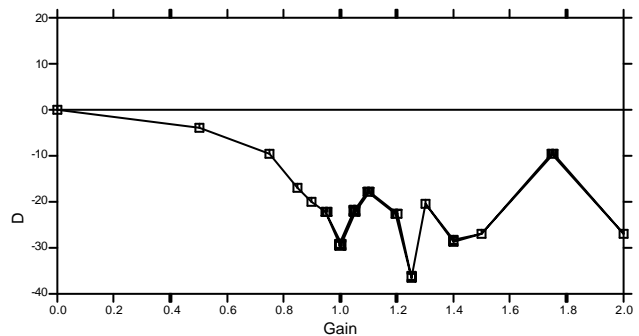


Fig.8 Drag change rate with gain

ので効果的なゲインの値は0.8~1.5の領域であると考えられる。

そこでこれまでの結果から効果的な制御が期待されるパラメータ値を使用して車両の走行速度を変えて計算を行った。その結果を Fig.9 に示す。この結果、20～140km/h の走行速度で 15%以上の安定した抵抗低減が達成される事が示された。

3.4 他の制御方法による抵抗低減

最も大きな抵抗低減効果があった Fig.3 中の A 点では吹き出しの時間変動が十分時間が経過した後では周期的だった (Fig.4(b)) ため、その吹き出しパターンをフィードフォワードして計算を行ったが、フィードバック制御ほどの抵抗低減効果が得られない事がわかった (Fig.10)。

また、Fig.11 に一定量の吹き出し、吸い込みを行った場合の結果を示す。この場合では抵抗低減効果は得られず、フィードバック制御の有効性を示している。

4. 結言

車両周りの渦構造と圧力、抗力について考察を行い、渦構造を促成するようなフィードバック制御流による数値実験を行った。最大で 24% の抵抗低減効果が得られ、制御に必要な動力を考慮しても十分なパワーの節約効果が得られた。より安定した効果的な制御を行うための制御パラメータ値の範囲を推定した。適当なパラメータ値を使用した場合、様々な車両速度に対して安定して 15%以上の抵抗低減効果が示された。フィードフォワード、一定吹き出し、吸い込みとの比較によりフィードバック制御の有効性を示した。今後は、制御則の理論的検討、流れ場についての理論解析、風洞実験による検証を行う。

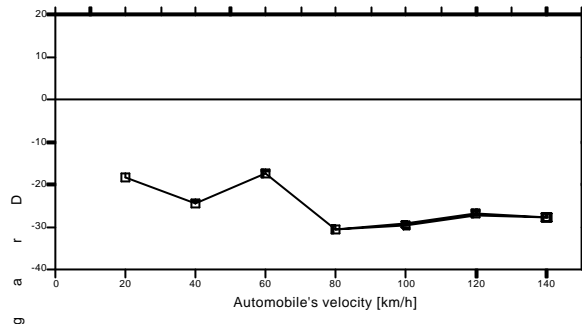


Fig.9 Drag change rate with automobile's velocity

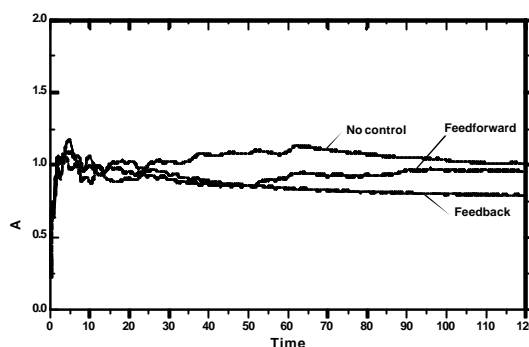


Fig.10 Average drag fluctuation for feedforward control

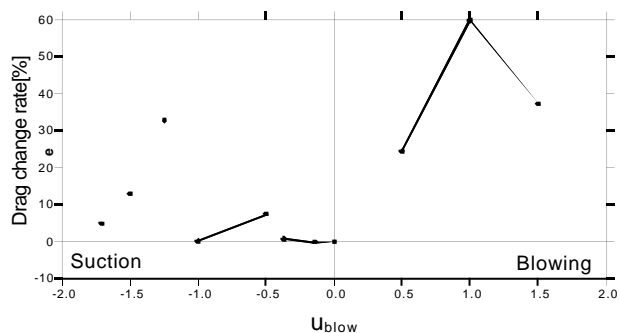


Fig.11 Drag change rate for constant blowing and suction

参考文献

- 1) M.Gad-el-Hak: Separation control review: *Journal of Fluid Engineering, Transaction of ASME*, Vol. 135(1991) pp.5-30.
- 2) T.Hayase, J.A.C.Humphrey, R.Greif: Mini Manual for ROTFL02, *Dep. Mech. Eng. Report, #FM-90-1*, University of California at Berkeley (1990).