

**自動車まわりの流れ場の
フィードバック制御による空力抵抗の低減**
Drag Reduction of an Automobile
by Feedback Control of Surrounding Flow Field

○仁杉 圭延*, 早瀬 敏幸*, 林 叡*

○Keisuke NISUGI, Toshiyuki HAYASE, 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) 217-5255, E-mail nisugi@reynolds.ifs.tohoku.ac.jp

1. 結 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事が数値実験で明らかにされている¹⁾. また, 管内流れにおいても, 壁面近傍の乱流は流れ方向の渦構造により支配され, その渦を打ち消すようにフィードバック制御を行うと抵抗低減が可能となる事が直接数値シミュレーションで明らかにされている²⁾.

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扱い, 数値シミュレーションを行った. 非定常渦構造過程のアニメーションの観測, および車体表面上での圧力分布から抗力発生メカニズムについて検討を行い, また, 制御対象である流れ場の空間中のある点での計算データを用いて, 渦構造を変化させられると思われる簡単なフィードバック制御則による制御流を与えた場合の数値実験を行った. さらに抵抗低減の効果, および, 制御流に必要な動力を含めた車輻全体としての動力減少の効果について検討する.

2. 数値計算法

本研究における数値計算車輪モデルは、乗用車の測定結果から、それを2次元直角座標系上の162×62の格子点を用いてモデル化したものを使用した(図1)。対象領域の上下壁は今後の実験を考慮し、固体壁で囲み、座標系は一定速度でXの負方向に走行する車輪に固定する。したがって上下壁面は相対的に速度uでX方向に移動するとした。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た。

基礎方程式はナビエストークス式、および、連続式である。また、速度、長さ、密度の代表量を表1に示す。

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

$$\text{div } \mathbf{u} = 0$$

以下では無次元量に*を付しているが、ここでは*は省略した。数値計算法は有限体積法の一つで非圧縮粘性流体の計算に用いられているSIMPLER法を用いた。今回計算に用いたのはこのSIMPLER法に計算精度、および計算効率の向上のための改良を加えたものである。計算条件として今回は、20℃空気中、車輪の速度100km/hとし、制御流なしの場合とフィードバック制御を行った場合の2種類について

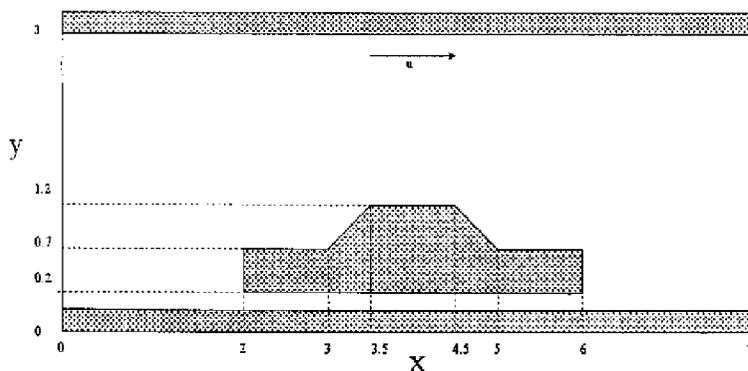


図1 車輪モデル

表1 計算条件

| | | |
|---------------------------|----------------------|----------------------|
| A: 制御流面積 | [m ²] | 0.075 |
| L: 車輪高さ (代表長さ) | [m] | 1.0 |
| Q: 制御流流量 | [m ³ /s] | =A u _{blow} |
| u: 車輪速度 (代表速度) | [m/s] | 30.24 |
| u _{blow} : 制御流速度 | [m/s] | |
| w: 車輪の幅 | [m] | 1.5 |
| ρ: 密度 (20℃, 空気) | [kg/m ³] | 1.229 |

無次元時間200まで、0.1ステップで計算した。他の計算条件を表1に示す。

車輪の抗力F、制御流動力Πは次式により表される。

$$F = \rho u^2 L^2 F^* \quad [N] \quad (2)$$

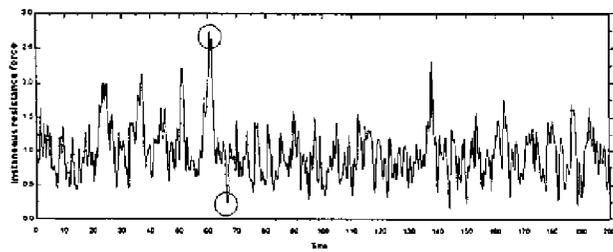
$$\Pi = \frac{1}{2} \rho u_{blow}^2 Q = \frac{1}{2} \rho u_{blow}^3 A \quad [W] \quad (3)$$

ここでv*は無次元の制御流速度、F*は車体に作用する圧力を積分して求めた抗力の無次元量である。

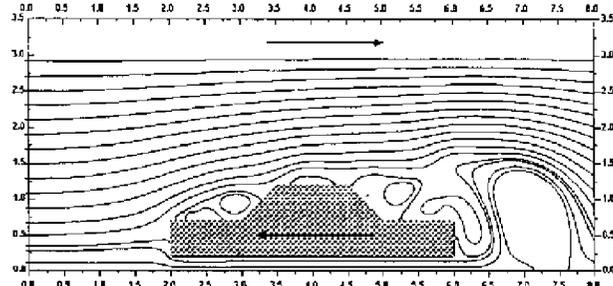
3. 数値解析結果

3.1 抵抗発生のメカニズム

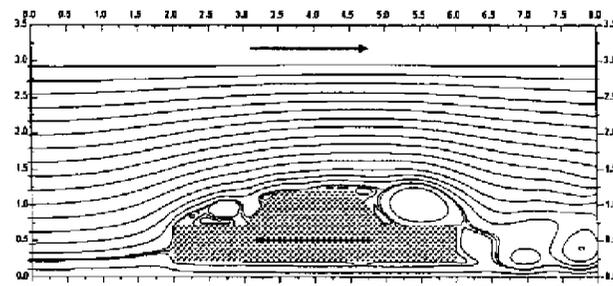
車輪周りの流れ場の状態を知るために制御流なしの状態の数値実験を行った。その結果、抗力は時間とともに変動しており、それと同期するように流れ場において渦構造が変化していることが知られた。抗力の時間変動を図2(a)に、特徴的な高抵抗、低抵抗時の車輪周りの流れ場を図2(b),(c)に示す。高抵抗の場合、図2(b)のように大きな後流渦が形成されている。そのような後流渦は車輪後端で小さな渦を吸収して大規模な後流渦になっていることがアニメーションにより知られた。一方、低抵抗の場合(図2(c)),そのような後流渦は形成されず、



(a) 抗力の時間変動



(b) 高抵抗時の渦構造 ($t^* = 61.0$)

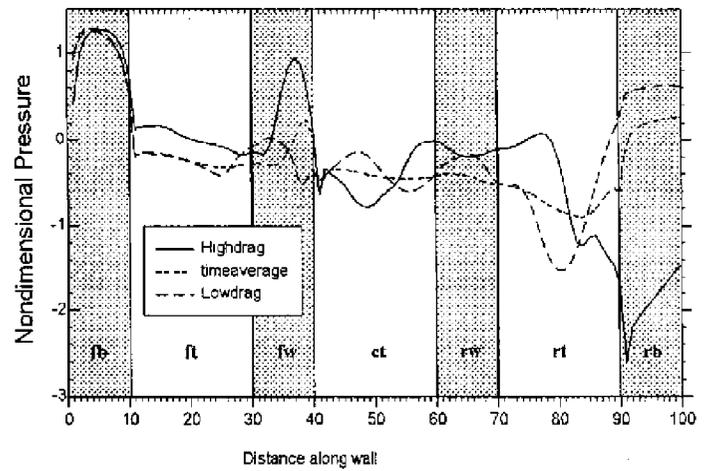


(c) 低抵抗時の渦構造 ($t^* = 67.0$)

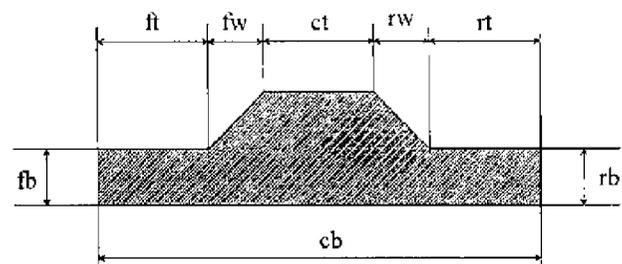
図2 制御流なしの計算結果

車輪表面で小さな渦が形成される。

渦構造が実際にどのように抗力に対して影響を与えているのかを調べるため、車輪表面での圧力分布を比較してみる(図3(a)). 図3(a)の横軸はフロント下端を0とした車輪表面上をとり囲む距離を表し、0-10はfb部、11-30はfw部、などと表す(図3(b)). 一般に物体周りの抗力は圧力抗力と摩擦抗力に大別されるが、この流れ場においては摩擦抗力のオーダーが小さいために摩擦抗力よりも圧力抗力が支配的になり、抵抗にはfb部、fw部、rw部、rb部の圧力が大きく影響する。それらの部分の圧力について図3(a)を高抵抗の場合と時間平均、低抵抗の場合を比較してみると、高抵抗ではfw部で圧力が大



(a) 車輪表面の圧力分布



(b) 車輪表面の位置分布

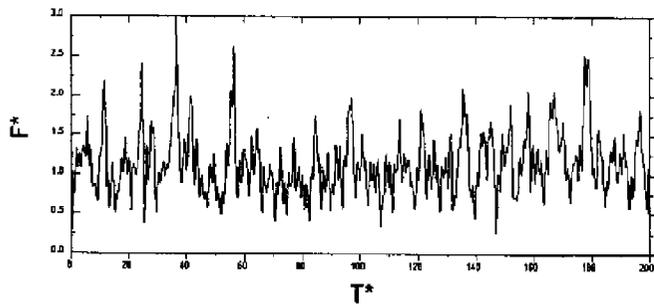
図3 車輪表面の圧力分布

きく、さらにrb部で大きな負圧を生じている。これらの圧力は大きな圧力抗力となり、抵抗を増大させる原因となる。したがって、本研究ではこのような圧力分布を与える渦構造に変化を与えるように、流れ場のある点での速度を用いたフィードバック制御流により抵抗低減を行う。

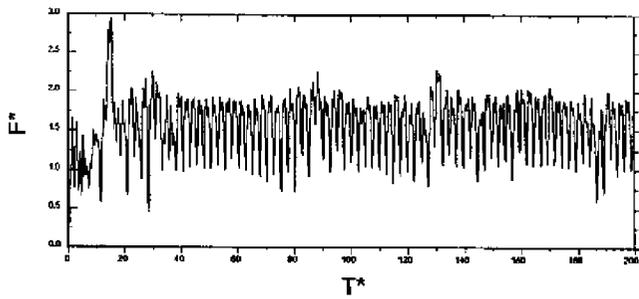
3. 2 フィードバック制御

流れ場中のモニタポイント $mp(x,y)$ での垂直方向速度を u_m とし、上向きを正として次式のような u_m に比例した制御流 u_{blow} を与えフィードバック制御を行った。ここで K_g はゲイン定数、 u_{avg} は点 p_m での平均速度である。

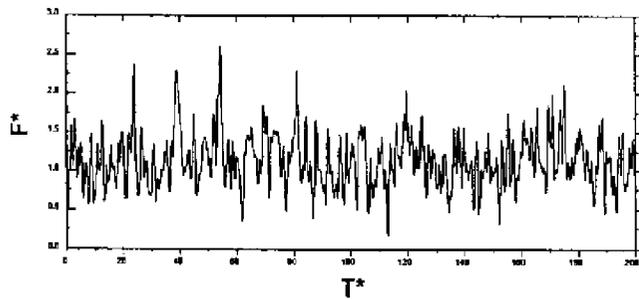
$$u_{blow} = K_g (u_m - u_{avg}) \quad (4)$$



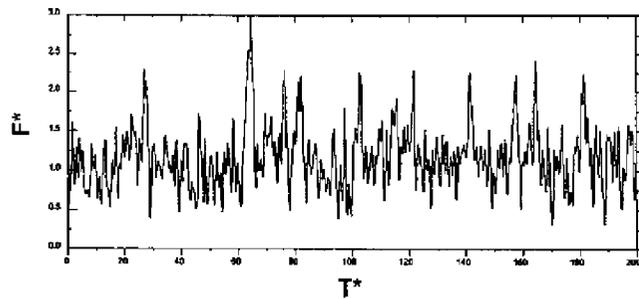
(a)



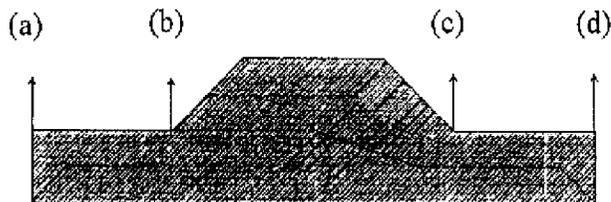
(b)



(a)



(b)



(e) 制御流位置

$$u_{blow} = 1$$

図4 異なる制御流位置の抗力変動

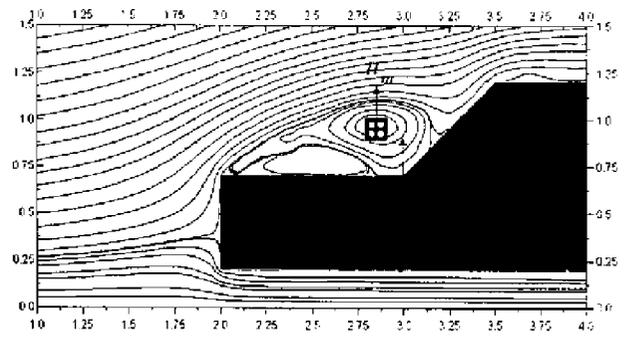


図5 モニタポイント

制御流位置を決定するために4点の制御流位置において一定量の制御流を与えてそれぞれ計算を行った. その結果を図4に示す. これよりb f wが抗力に対して最も強く影響をあたえている(渦構造を変化させる)と考えられ, 本研究では制御流位置としてb f wを採用した. b f wに近い領域の流れ場には渦が発生しており, 渦中心付近は顕著な速度の変動があると考えられることから, モニタポイントは渦中心近傍のx座標を2.80から2.90まで, y座標を0.90から1.00までそれぞれ0.05刻みで変えた領域の9点を使用した(図5). 次に各モニタポイントでの u_{avg} の値を表2に示す. 値が比較的近いことから代表値として0.136を使用し, u_{avg} を固定して数値実験を行った. 最適な制御を実現するための K_g の決定については現在のところ試行錯誤的な数値実験に頼らざるを得ないが, 本研究では K_g についての検証の前段階として, K_g を1で固定して数値実験を行った.

表2 各モニタポイントの平均無次元速度

| | | | |
|-------|-------|---------|-------|
| 1.00 | 0.133 | (0.149) | 0.108 |
| 0.95 | 0.113 | 0.136 | 0.096 |
| 0.90 | 0.106 | 0.136 | 0.105 |
| y / x | 2.80 | 2.85 | 2.90 |

表3 各モニタポイントの抵抗変化率

| | | 単位[%] | | |
|--------|-------|-------|--------|--|
| 1.00 | +0.68 | - | -5.48 | |
| 0.95 | -3.86 | -1.80 | +12.97 | |
| 0.90 | -9.42 | +6.82 | -15.44 | |
| y x | 2.80 | 2.85 | 2.90 | |

3. 3 計算結果

表3に抵抗変化率の分布を示す。今回数値実験を行った8点中5点において、その大きさに差はあるものの抵抗低減の効果があつた(表3中の網かけ部)。最も抵抗低減効果が大きかつた場合(mp(2.90, 0.90))について、無次元抗力の時間変化を図6に、車輻表面での時間平均圧力分布を図7に示す。図6では、制御流なしの図2(a)と比較すると、この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。時間平均した圧力分布では制御流なしと制御流ありの場合で全体的にほぼ等しくなるが、rb部でわずかながら高圧を発生しており、これが抵抗低減に関連していると考えられる。また、図8に平均抗力の時間変動の図を示す。制御流により無次元時間25から安定した抵抗低減効果が得られ、十分に時間が経過しても約15%の抵抗低減が達成された。図9に(2)、(3)式を用いて計算した制御流に必要な動力も含めた全体としてのエネルギーの変化を示す。わずか188[W]の動力仕事率の制御流で5139[W]の空力抵抗仕事率の低減を達成し、制御流に必要な動力仕事率を含め全体で約15%のパワー利得が得られた。

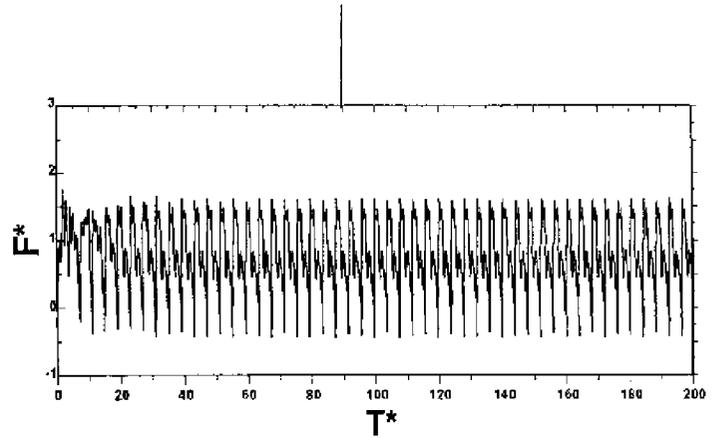


図6 制御時の抗力変動

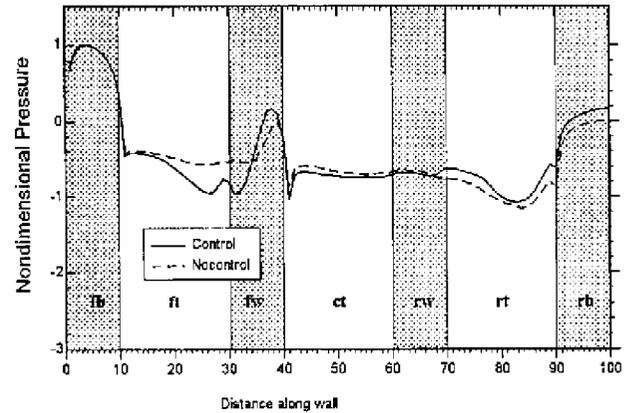


図7 車輻表面での平均圧力分布

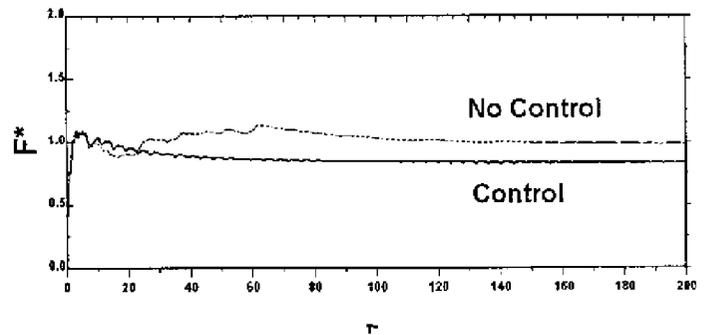


図8 平均抗力変動

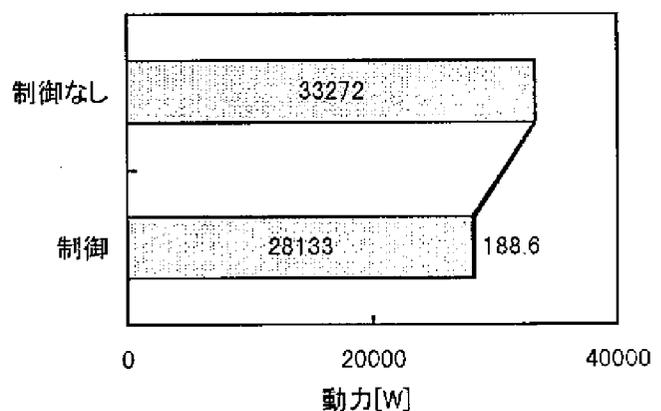


図9 制御流による動力の変化

4. 結 言

車輻周りの渦構造と抗力，圧力について考察を行い，渦構造をコントロール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．数値解析結果から後流渦が抵抗に大きく影響を与えていることを明らかにし，物理的考察に基づき制御則を決定し簡単なフィードバック制御を行い，最大で15%の抵抗低減が達成された．それらの制御流は少ない動力で大きな空力抵抗低減の効果があり，制御流に必要な動力を含めても十分なパワー利得が得られた．

今回用いた制御則は極めて簡単なものであったが，今後の制御についての検討により更なる抵抗低減が期待される．

今後はより広い範囲での検討，および，ゲインなども含めた最適値の検討を行い，また，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予定である．

参考文献

- 1) Mohamed Gad-el-Hak: Separation control review: Journal of Fluid Engineering, transaction of ASME, Vol. 135(1991) pp.5-30.
- 2) Tomas Bewley and Parviz Moin: Optimal Control of Channel Flows, Active Control of Vibration and Noise, Proceeding of ASME Winter annual Conference, (1994) pp. 221-227