

# フラップを用いた横風を受ける鈍い物体の抵抗低減制御

## Drag Reduction Control for Blunt Body in Cross Flow using Flap Actuators

80815622 鎌形信彦 (Nobuhiko Kamagata)

Supervisor : 菱田公一 (Koichi Hishida)

### 1. 結論

深刻化しているエネルギー問題を解決するには、輸送機器の高効率化が重要である。トラックやバスに代表される鈍い物体は、剥離流れによって圧力抵抗を大きく受ける。この境界層剥離を抑制し物体の抵抗を低減することは、省エネルギー化などの環境負荷低減に貢献する。

剥離の抑制による抵抗低減に関して数多くの研究が行われてきた<sup>[1]</sup>が、その大部分が一定の風向きに対するパッシブ制御や数値計算に留まっている。より高精度な制御を行うためには、輸送機器が走行する際に受ける横風を想定し、風向変化に対応して抵抗低減を行うアクティブ制御システムが必要である。著者ら<sup>[2]</sup>は回転シリンダを鈍い物体の前縁に設置し、 $0 \sim 40 \text{ deg.}$ の風向変化に対応した抵抗低減制御システムを構築した。しかし、制御時間が140秒と長い点や、回転シリンダの消費エネルギーが大きい点など、依然として改善すべき点が多い。フラップは回転シリンダと比較して応答性が高く、小さいエネルギー投与で高い抵抗低減効果が得られるアクチュエータである。本研究ではフラップを鈍い物体に設置し、風向変化に対応可能な抵抗低減制御システムを構築することを目的とする。

### 2. 数値計算

システムの構築に先立ち、抵抗低減効果が最大となるフラップの位置を決定するために、数値計算を用いて剥離抑制の効果を調べた。フラップの位置を変化させて、物体周りの流速分布を算出した。解析ソフトにSTAR-CDを用い、乱流モデルを標準 $k-\epsilon$ モデルとして数値計算を行った。風洞を模擬して物体前方からの流入条件を $U_0 = 4 \text{ m/s}$ とし、物体後方の流出量を流入量と一定に設定した。Fig. 1にフラップの位置を変化させたときの物体周りの主流方向の流速分布図を示す。(a)矩形柱や(b)物体後縁にフラップを設置した場合と比較すると、(c)のように物体前縁にフラップを設置すると境界層剥離が抑制されている。物体後方の死水領域が縮小し負圧が減少した結果、抵抗が低減されることが考えられる。境界層剥離が生じる物体の前縁に直接フラップを設置した(c)の配置が、抵抗低減に最も効果的である。

### 3. 実験装置と実験方法

数値計算の結果に基づき、Fig. 2のような鈍い物体の実験モデルを作成した。実験には風洞装置を用い、その主流速度は $U_0 = 4 \text{ m/s}$ とした。それに伴うレイノルズ数は $Re = U_0 w / \nu = 2.66 \times 10^4$ となる。また、物体の前縁に取り付けられた左右フラップはステッピングモータによって駆動され、その角度 $\theta_l, \theta_r$ は $90 \sim 90 \text{ deg.}$ の範囲で可変である。Fig. 3にモデルの断面図と座標系を示す。ステッピングモータにより、横風に対する迎角 $\alpha$ を $0 \sim 40 \text{ deg.}$ で変化させた。本研究における抵抗は、抗力と横力の合力として計測した。

抵抗の計測には三分力計（日章電機社製）を用い、100 Hzで10秒間の時間平均値を抵抗値として計測した。またPIVを用いてモデル周りの流動構造を調査した。光源には、ダブルパルスのNd:YAGレーザ（NEW WAVE Research社製、Model solo、波

長532 nm）を、画像の取得にCCDカメラ（IMPERX社製IPX-2M30-LM、 $1600 \times 1200 \text{ pixel}$ 、12 bit）を使用した。計測領域は $-100 < x [\text{mm}] < 400, -200 < y [\text{mm}] < 200$ とし、10 Hzで撮像した画像を平均して流速を取得した。横風を受ける鈍い物体の非剥離流れを検出するセンサには、応答性が高く汎用性のある圧力計（Validyne社製）を用いた。実験モデルの左右の壁面に10 mm間隔で圧力孔を設置し、圧力を1000 Hzで10秒間計測した。

### 4. 実験結果

#### 4.1. 抵抗計測

抵抗低減効果が最大となるフラップ最適角を調べるために、三分力計を用いて抵抗計測を行った。まず剥離流れが生じる左側のフラップを駆動し、境界層剥離の抑制による抵抗低減効果を調べた結果をFig. 4に示す。抵抗係数は $C_D = D / (\rho U_0^2 \times wh / 2)$ であらわされる。横風角度 $\alpha [\text{deg.}]$ に対して左フラップの角度を $\theta_l - \alpha = 30 \text{ deg.}$ に設定したときに抵抗が最小となった。同様に右側のフラップ角を変化させ、抵抗低減効果を調べた。左フラップと比較すると抵抗低減効果は小さいが、右フラップの角度を $\theta_r + \alpha = 30 \text{ deg.}$ に設定したときに抵抗が最小となった。

#### 4.2. 流動構造の調査

フラップによる抵抗低減の効果を検証するため、粒子画像流速測定法(PIV)を用いて物体周りの流動構造を調べた。Fig. 5に横風角度 $\alpha = 20 \text{ deg.}$ における物体周りの主流方向の流速分布図を示す。(a)のように $\theta_l = \theta_r = 90 \text{ deg.}$ の場合、物体後方に大きな死水領域が形成され、物体後方に負圧が生じて抵抗が大となった。一方(b)のようにフラップを最適角( $\theta_l = 50 \text{ deg.}, \theta_r = 10 \text{ deg.}$ )に設定した場合、境界層剥離が抑制されて物体後方の死水領域が縮小した。PIVによる流動構造の調査を行った結果、 $0 \leq \alpha [\text{deg.}] \leq 40$ の範囲でフラップが剥離境界層を抑制し抵抗低減に寄与することが分かった。

#### 4.3. 圧力計測

物体が横風を受けるとき、物体周りの流動構造で最も早く変化が生じるのは非剥離流れである。そこで圧力センサで非剥離流れを検出し、横風角度を推定するアルゴリズムを考察した。非剥離流れの壁面の圧力分布を計測した結果、迎角が大きいときは剥離の影響を受けず、物体後方で理論値と実験値が一致した。横風を受ける壁面の近似モデルとしてくさび型(迎角 $\alpha [\text{deg.}]$ )の物体を用いると、よどみ点から $x [\text{mm}]$ の位置での流速 $U [\text{m/s}]$ は以下の式であらわされる。

$$U = cx^m \quad \left( m = \frac{\alpha}{180 - \alpha} \right) \quad (1)$$

式(1)とベルヌーイの式より、非剥離流れ中の任意の2点において次式が成立する。

$$P_b - P_f = \frac{1}{2} \rho c^2 \left( x_f^{2m} - x_b^{2m} \right) \quad (2)$$

本研究では制御の精度を高めるために、Fig. 3に示したように圧力差が大きい $x = 50, 150 \text{ mm}$ の圧力計測点を制御に用いた。 $P_{diff} = P_b - P_f [\text{Pa}]$ と定義し、横風角度の変化に対する $P_{diff}$ の分布を計測した結果、実験値と理論値はほぼ一致した。こ

の実験値の近似曲線を制御システムのコントローラに用いて、圧力差  $P_{dif}$  から横風角度  $\alpha$  を推定する。推定された横風角度からフラップを最適角に設定し抵抗低減を図った。

## 5. 制御方法と制御結果

抵抗低減制御システムのブロック線図を Fig. 6 に示す。まず横風がない状態 ( $\alpha = 0 \text{ deg.}$ ) で 0.1 秒間の時間平均圧力  $P_{b,0}$   $P_{f,0}$  を計測し、その差圧  $P_{dif,0}$  を算出した。次に風向変化を模擬して物体の迎角を変化させた後に、同様に差圧  $P_{dif,1} = P_{b,1} - P_{f,1}$  を算出した。迎角が変化する前後での差圧の変化  $\Delta P_{dif} = P_{dif,1} - P_{dif,0}$  を算出し、圧力分布の近似式より物体の迎角を推定した。

抵抗低減制御システムを構築し、風向変化を与えてシステムの有効性を実験的に検証した。Fig. 7 (a) に 20 deg. の風向変化に対する抵抗低減制御の結果を示す。横風を受ける前後の差圧の変化  $\Delta P_{dif} = P_{dif,1} - P_{dif,0}$  から横風角度を推定し、フラップを駆動した。その結果、フラップは  $(\theta_L, \theta_R) = (47, 13) \text{ deg.}$  と最適角から誤差 6% 以内に収束し、約 19.6% の抵抗低減効果が実証された。また制御システムの反応時間は 0.1 秒であり、システムの高速応答性が実証された。40 deg. の風向変化に対して抵抗低減制御を行った結果を Fig. 7 (b) に示す。制御後フラップは最適角付近の  $(\theta_L, \theta_R) = (68, -8) \text{ deg.}$  に収束し、矩形柱 ( $\theta_L = \theta_R = 90 \text{ deg.}$ ) と比較すると抵抗は約 9.3% 低減された。

## 6. 結論

物体の前縁にフラップを設置し、横風を受ける鈍い物体の抵抗低減制御システムを構築した。フラップによって境界層剥離が抑制された結果、抵抗が低減することが PIV 計測で分かった。圧力計を用いて非剥離流れを検出し、横風角度を推定してフラップを最適角に制御するシステムを構築した。システムの有効性を実験的に検証した結果、風向変化に対して反応時間が 0.1 秒という高速応答性を実現し、 $\alpha = 40 \text{ deg.}$  の横風に対して約 9.3% の抵抗を低減した。本研究で構築した抵抗低減制御システムが  $0 \leq \alpha [\text{deg.}] \leq 40$  の風向変化に対して有効であることが示された。

## 参考文献

- [1] J.F. Beaudoin *et al.*, “Drag and lift reduction of a 3D bluff body using flaps”, *Exp. fluids*, **44**:491-501 (2008)
- [2] Kamagata *et al.*, “Drag Reduction for Blunt Body with Cross Flow by Extremum-seeking Control”, *ASME FEDSM* (2008)

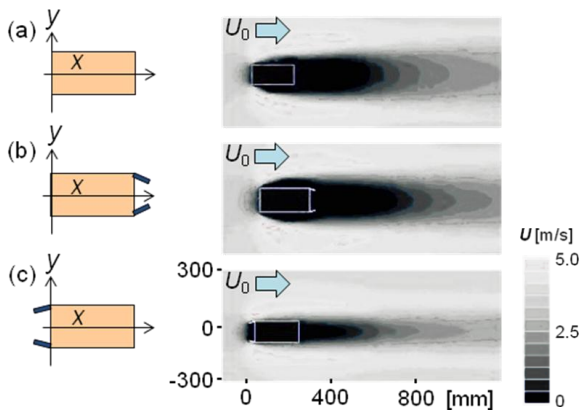


Fig. 1. Numerical simulation for optimal flap position.

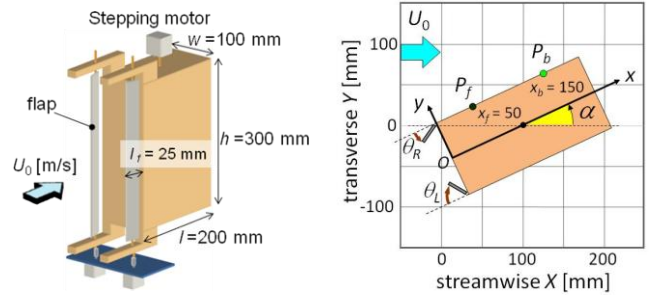


Fig. 2. Rectangular blunt body with flap actuators.

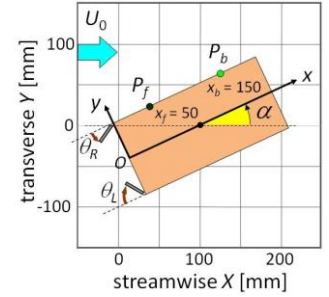


Fig. 3. Cross-section view of the blunt body and coordinate system.

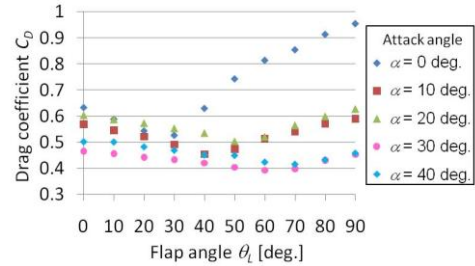


Fig. 4. Drag reduction at variable cross flow angle  $\alpha$ .

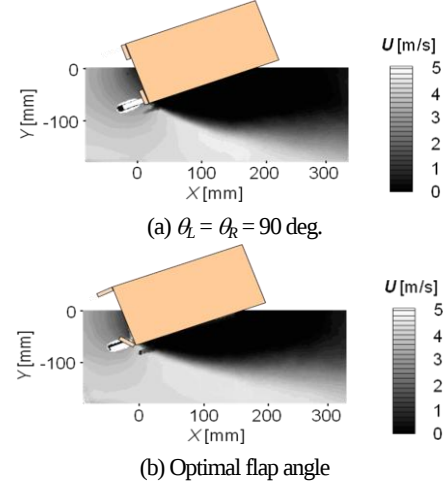


Fig. 5. Flow separation control around blunt body at cross flow angle  $\alpha = 20 \text{ deg.}$

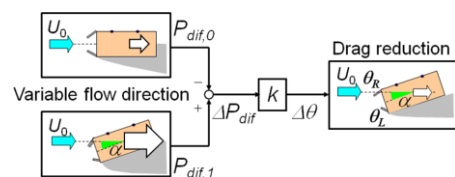
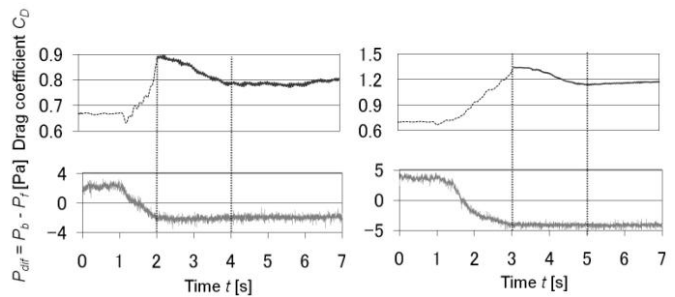


Fig. 6. The block diagram of drag reduction control system.



(a) Cross flow angle  $\alpha = 20 \text{ deg.}$  (b) Cross flow angle  $\alpha = 40 \text{ deg.}$

Fig. 7. Time-series pressure measurement and drag reduction control for blunt body in cross flow.