

## ダイナミックソアリングに関する研究 Study on the Dynamic soaring

○高野 卓<sup>1</sup>, 野澤 佑介<sup>1</sup>, 安田 邦男<sup>2</sup>  
\*Suguru Takano<sup>1</sup>, \*Yusuke Nozawa<sup>1</sup>, Kunio Yauda<sup>2</sup>

Abstract: The dynamic soaring is the way of gliding flight for a long time. Its characteristic is flying by the wind shear in low altitude unlike the glider and it has enable to fly a long distance without the thermal. This study details the aerodynamics and flight characteristic of the albatross stand for a seabird with the dynamic soaring by deriving the equation of motion.

### 1. はじめに

ダイナミックソアリングは、長時間滑空飛行することのできる飛行法である。特徴はグライダーと違い低高度を風による速度勾配を利用して飛行している点である。これにより、上昇気流なしでの長距離の飛行を可能にしている。

本研究では、ダイナミックソアリングを行っている代表的な海鳥であるアホウドリの運動方程式を導出し、解析する事で空力・飛行特性を調べる。

### 2. ダイナミックソアリングについて

ダイナミックソアリングとは、上昇流の少ない海上において、1) 水面近くから風上に向かって上昇する。2) 上空で低速で風下に旋回する。3) 上空から追い風で下降する。4) 水面近くで高速で風上に旋回する。このサイクルを繰り返す事で羽ばたくことなく長時間滑空を続けることができることである。これは、アホウドリが風による速度勾配を利用して、飛行により失われたエネルギーを補っていると考えられる。典型的なダイナミックソアリングの飛行モデルを Figure1 に示す。

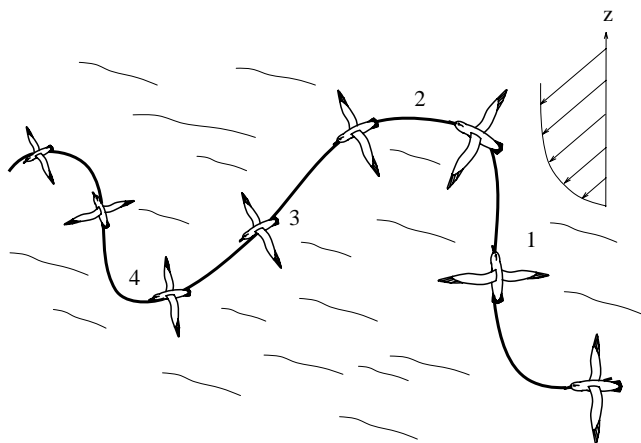


Figure 1 Flight model of the dynamic soaring

1 : 日大理工・学部・航宇 2 : 日大理工・教員・航宇

### 3. 理論

アホウドリの空力・飛行特性を求めるために、機体に働く空気力、重力、風による速度勾配を求め、運動方程式を導出する。

#### 3. 1 アホウドリの座標変換

迎角を  $\alpha$  とし、慣性座標系  $(X_E, Y_E, Z_E)$ , 安定座標系  $(X_S, Y_S, Z_S)$ , 機体座標系  $(X, Y, Z)$  に働く力を Figure2 に示す。

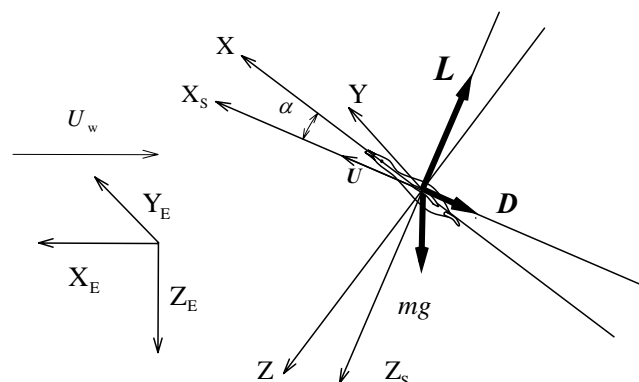


Figure 2 inertia, stability and body coordinate system  
慣性座標系  $(X_E, Y_E, Z_E)$  から安定座標系  $(X_S, Y_S, Z_S)$  への変換は以下のように示す。

$$\begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta \\ \sin\phi\sin\theta\cos\psi & \sin\phi\sin\theta\sin\psi & \sin\phi\cos\theta \\ \cos\phi\sin\theta\cos\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\psi & \cos\phi\cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_E \\ Y_E \\ Z_E \end{pmatrix} \quad (1)$$

安定座標系  $(X_S, Y_S, Z_S)$  から機体座標系  $(X, Y, Z)$  への変換は以下のように示す。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta \\ \sin\phi\sin\theta\cos\psi & \sin\phi\sin\theta\sin\psi & \sin\phi\cos\theta \\ \cos\phi\sin\theta\cos\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\psi & \cos\phi\cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix} \quad (2)$$

### 3. 3 空気力

アホウドリに働く空気力は揚力  $\mathbf{L}$  と抗力  $\mathbf{D}$  で表すことができ、以下のように示す。

$$\begin{pmatrix} F_x^a \\ F_y^a \\ F_z^a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L \sin \theta - D \cos \theta \cos \psi \\ -L \sin \phi \cos \theta - D (\sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \theta) \\ -L \cos \phi \cos \theta - D (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \theta) \end{pmatrix} \quad (3)$$

#### 3. 3. 1 揚力, 抗力

アホウドリの翼が後退角がなく, アスペクト比  $\mathbf{AR}$  が大きいことから, 揚力線理論を用いて揚力係数  $C_L$  及び抗力係数  $C_D$  を求め, 揚力  $\mathbf{L}$  及び抗力  $\mathbf{D}$  を導出する。

#### 3. 4 風による速度勾配

海面上での風速と高度の関係は, Sachs が定義した式を用いる。風は, 海面上では安定して高度  $Z_{10} = 10\text{m}$  を風速  $U_{w,10} = 10\text{m/s}$  で海に対して水平方向のみ吹いているものと仮定されている。Sachs の式を以下に示す。

$$U_w = U_{w,10} \frac{\ln(Z/Z_{0.03})}{\ln(Z_{10}/Z_{0.03})} \quad (4)$$

$Z_{0.03} = 0.03\text{m}$  は, 高度  $0.03\text{m}$  のことである。式(4)の両辺を高度  $Z$  で微分し, 速度勾配を求めた式を以下のように示す。

$$\frac{dU_w}{dZ} = \frac{U_{w,10}}{Z \ln(Z_{10}/Z_{0.03})} \quad (5)$$

式(5)から, 水面近く  $Z \approx 0$  での速度勾配が大きく, 上空に行くにつれて小さくなるのが分かる。さらに,  $Z$  方向の速度を掛けることにより, 速度勾配による風速の時間変化率を以下のように示す。

$$\frac{dU_w}{dt} = \frac{dU_w}{dZ} U \sin \gamma \quad (6)$$

式(6)を風による加速度成分とする。向かい風に向かって上昇し, 追い風に向かって下降する事で, 進行方向の加速度を得ることができる。

#### 3. 5 重力

重力を以下のように示す。

$$\begin{pmatrix} F_x^g \\ F_y^g \\ F_z^g \end{pmatrix} = mg \begin{pmatrix} -\sin \Theta \cos \theta \cos \psi + \sin \Phi \cos \Theta \cos \theta \sin \psi \\ -\cos \Phi \cos \Theta \sin \theta \\ -\sin \Theta (\sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \theta) \\ + \sin \Phi \cos \Theta (\sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \theta) \\ + \cos \Phi \cos \Theta \sin \phi \cos \theta \\ -\sin \Theta (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \theta) \\ + \sin \Phi \cos \Theta (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \theta) \\ + \cos \Phi \cos \Theta \cos \phi \cos \theta \end{pmatrix} \quad (7)$$

#### 3. 6 滑空の運動方程式

機体座標系  $(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z})$  の各単位ベクトル  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  を用いて対地速度  $\mathbf{V}$ , 角速度  $\boldsymbol{\omega}$  を以下のように示す。

$$\mathbf{V} = (\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z})^T = \dot{X}\mathbf{i} + \dot{Y}\mathbf{j} + \dot{Z}\mathbf{k} \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\omega} = (p, q, r)^T = p\mathbf{i} + q\mathbf{j} + r\mathbf{k} \quad (9)$$

加速度  $\dot{\mathbf{V}}$  は機体座標系  $(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z})$  では, 以下のように示す。

$$\dot{\mathbf{V}} = \ddot{X}\mathbf{i} + \dot{X}\dot{\mathbf{i}} + \ddot{Y}\mathbf{j} + \dot{Y}\dot{\mathbf{j}} + \ddot{Z}\mathbf{k} + \dot{Z}\dot{\mathbf{k}} \quad (10)$$

機体座標系  $(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z})$  における力に関する運動方程式は空気力  $(F_x^a, F_y^a, F_z^a)$ , 重力  $(F_x^g, F_y^g, F_z^g)$ , 加速度  $\dot{\mathbf{V}}$  で表す事ができ, 以下のように示す。

$$m\dot{\mathbf{V}} = (F_x^a + F_x^g)\mathbf{i} + (F_y^a + F_y^g)\mathbf{j} + (F_z^a + F_z^g)\mathbf{k} \quad (11)$$

対地速度  $\mathbf{V}(\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z})$  は, 対気速度  $\mathbf{U}(u, v, w)$  と風の速度  $\mathbf{U}_w(u_{wx}, u_{wy}, u_{wz})$  との和なので, 次式のように示す。すなわち

$$\mathbf{V} = \mathbf{U} + \mathbf{U}_w$$

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_{wx} \\ u_{wy} \\ u_{wz} \end{pmatrix} \quad (12)$$

求めた運動方程式を以下のように示す。

$$m \left\{ \begin{array}{l} \frac{d(u + u_{wx})}{dt} \\ \frac{d(v + u_{wy})}{dt} \\ \frac{d(w + u_{wz})}{dt} \end{array} \right\} + \begin{pmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_x^a \\ F_y^a \\ F_z^a \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_x^g \\ F_y^g \\ F_z^g \end{pmatrix} \quad (13)$$

#### 4. 結論

アホウドリの滑空の運動方程式を導出した。今後は旋回運動の運動方程式も導出し, アホウドリは高度  $0\text{m}$  から  $20\text{m}$  の間を飛行しているものとし, 質量  $m$  は  $10\text{kg}$ , 翼面積  $S$  は  $0.705\text{m}^2$ , 空気密度  $\rho$  は  $1.23\text{kg/m}^3$  という条件で数値解析を行うことで風の速度勾配によるダイナミックソアリングへの影響について調べる。

#### 5. 参考文献

- [1] 東 昭:「航空工学(II)」, 裳華房, pp15-29, 1989
- [2] 加藤 寛一郎, 大屋 沼男, 柄沢 研治:「航空機力学入門」, 東京大学出版会, pp1-14, 2006
- [3] AZUMA, A:“THE BIOKINETICS OF FLYING AND SWIMMING .SECOND EDITION”, AIAA ,pp61-72,2006
- [4] Sachs, G:“Minimum shear wind strength required for dynamic soaring of albatrosses”,Ibis, pp1-10, 2005