

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

○長谷川 千華¹, 前田 裕一朗¹, 安田 邦男²
*Chika Hasegawa¹, *Yuichiro Maeda¹, Kunio Yasuda²

Abstract: Dynamic soaring is a kind of flight for long times and long distances. Albatrosses are the representative seabird for this. That is why we chose the albatross for this research study. We derived the albatross's equation of motion. We will do numerical analysis of that equation, also discuss the characteristic of dynamic soaring.

1. はじめに

ダイナミックソアリングは、海面上での風の速度勾配を利用し、長時間滑空飛行することのできる飛行法である。この飛行法を利用することによって、上昇気流なしで長距離の飛行が可能となる。

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、解析することで、この飛行法に関する空力・飛行特性を解明する。

2. 飛行法と特徴

ダイナミックソアリングの飛行法は、はじめは高台から飛び出し、1) 風下に向かい下降する。2) 海面すれすれで高速旋回する。3) 風上に向かい上昇する。4) 海面上10m から20m 付近で低速旋回する。この後は、1~4 のサイクルを基本とすることで、翼を羽ばたかせることなく長時間滑空することを可能としている。これは、アホウドリが風の速度勾配を利用して、飛行によって失われるエネルギーを補っていると考えられる。また飛行法2) の過程において地面効果が発生し、これもこの飛行法を可能にしている一因と考えられる。

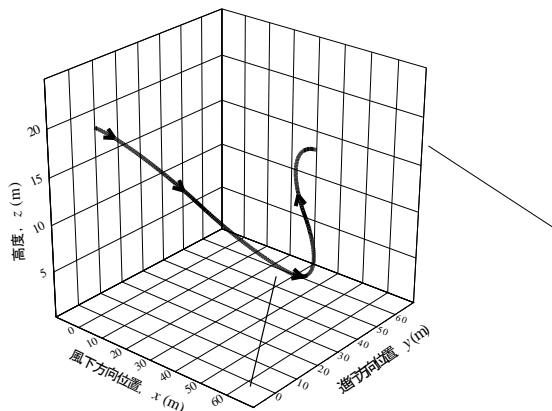


Figure 1 Flight pattern of dynamic soaring

3. 理論

アホウドリの空力・飛行特性を求めるために、はじめにアホウドリに働く空気力、重力などを求め、座標変換を行い、そこから運動方程式を導出する。

3.1 アホウドリの座標変換

慣性座標系を (X_1, Y_1, Z_1) , 安定座標系を (X_s, Y_s, Z_s) , 機体座標系を (X, Y, Z) として、これらの座標系の関係と、アホウドリに働く力を以下の図に示す。

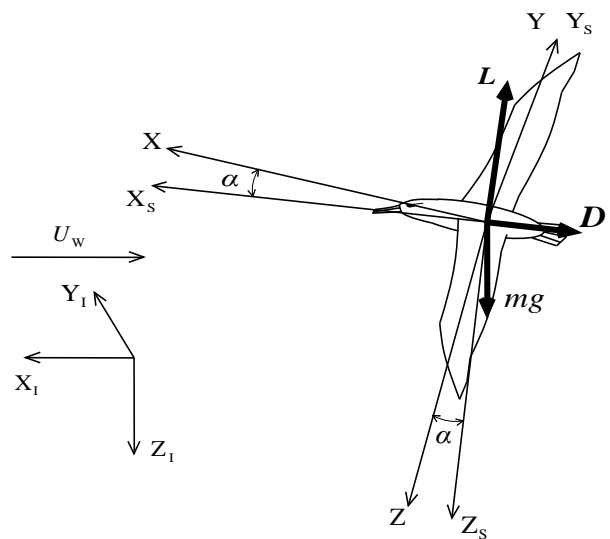


Figure 2 Connection of each coordinate system

慣性座標系 (X_1, Y_1, Z_1) から安定座標系 (X_s, Y_s, Z_s) への座標変換を式(1)に、また、安定座標系 (X_s, Y_s, Z_s) から機体座標系 (X, Y, Z) への変換を式(2)に示す。

$$\begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 \cos \psi_1 & \cos \theta_1 \sin \psi_1 & -\sin \theta_1 \\ \cos \psi_1 \sin \phi_1 \sin \theta_1 & \sin \phi_1 \sin \theta_1 \sin \psi_1 & \\ -\cos \phi_1 \sin \theta_1 & +\cos \phi_1 \cos \psi_1 & \cos \theta_1 \sin \phi_1 \\ \cos \phi_1 \sin \theta_1 \cos \psi_1 & \cos \phi_1 \sin \theta_1 \sin \psi_1 & \cos \phi_1 \cos \theta_1 \\ +\sin \phi_1 \sin \psi_1 & -\sin \phi_1 \cos \psi_1 & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 \cos \psi_2 & \cos \theta_2 \sin \psi_2 & -\sin \theta_2 \\ \sin \phi_2 \sin \theta_2 \cos \psi_2 & \sin \phi_2 \sin \theta_2 \sin \psi_2 & \sin \phi_2 \cos \theta_2 \\ -\cos \phi_2 \sin \psi_2 & +\cos \phi_2 \cos \psi_2 & \\ \cos \phi_2 \sin \theta_2 \cos \psi_2 & \cos \phi_2 \sin \theta_2 \sin \psi_2 & \cos \phi_2 \cos \theta_2 \\ +\sin \phi_2 \sin \psi_2 & -\sin \phi_2 \cos \psi_2 & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix} \quad (2)$$

機体座標系 (X, Y, Z) は安定座標系 (X_s, Y_s, Z_s) を Y 軸まわりに α だけ回転したものであるため、式(2)の変換は以下のように示すことができる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix} \quad (3)$$

3.2 空気力の座標変換

アホウドリに働く空気力を揚力 L と抗力 D で表し、機体座標系における式を以下のように示す。

$$\begin{pmatrix} F_{ax} \\ F_{ay} \\ F_{az} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L \sin \alpha - D \cos \alpha \\ 0 \\ -L \cos \alpha - D \sin \alpha \end{pmatrix} \quad (4)$$

3.2.1 揚力と抗力の導出

今回は、3次元揚力面理論を用いて揚力および抗力を導出する。

3.3 重力の座標変換

機体座標系における重力を以下のように示す。

$$\begin{pmatrix} F_{gx} \\ F_{gy} \\ F_{gz} \end{pmatrix} = mg \begin{pmatrix} -(\sin \theta_1 \cos \alpha + \cos \phi_1 \cos \theta_1 \sin \alpha) \\ \cos \theta_1 \sin \phi_1 \\ \cos \phi_1 \cos \theta_1 \cos \alpha - \sin \theta_1 \sin \alpha \end{pmatrix} \quad (5)$$

3.4 運動方程式

機体座標系 (X, Y, Z) での各単位ベクトルを i, j, k とし、これらを用いて対地速度 V と角速度 ω はそれぞれ以下のように示す。

$$V = (\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}) = \dot{X}i + \dot{Y}j + \dot{Z}k \quad (6)$$

$$\omega = (p, q, r) = pi + qj + rk \quad (7)$$

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

$$\dot{V} = \ddot{X}i + \dot{X} \frac{di}{dt} + \ddot{Y}j + \dot{Y} \frac{dj}{dt} + \ddot{Z}k + \dot{Z} \frac{dk}{dt} \quad (8)$$

機体座標系 (X, Y, Z) での力に関する運動方程式は、空気力 (F_{ax}, F_{ay}, F_{az}) 、重力 (F_{gx}, F_{gy}, F_{gz}) 、加速度 \dot{V} を用いて、以下のように示す。

$$m\dot{V} = \begin{pmatrix} F_{ax} + F_{gx} \\ F_{ay} + F_{gy} \\ F_{az} + F_{gz} \end{pmatrix} \quad (9)$$

これらより求めた運動方程式を以下のように示す。

$$m \left\{ \begin{pmatrix} \frac{d\dot{X}}{dt} \\ \frac{d\dot{Y}}{dt} \\ \frac{d\dot{Z}}{dt} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{pmatrix} \right\} = \begin{pmatrix} F_{ax} + F_{gx} \\ F_{ay} + F_{gy} \\ F_{az} + F_{gz} \end{pmatrix} \quad (10)$$

4. 海面上での風速とその速度勾配

海面上での高度と風速の関係は、Wood が定義していた対数モデルを用いる。高度 10m での風速を $U_{10} = 10\text{m/s}$ とし、風は海面に対して水平方向に吹いているとする。Wood の式を次に示す。

$$U_w = U_{10} \times 0.1769 \times \ln \left(\frac{Z}{0.03485} \right) \quad (11)$$

また、上式の両辺を高度 Z で微分して風速の速度勾配を求め、以下に示す。

$$\frac{dU_w}{dZ} = \frac{U_{10} \times 0.1769}{Z} \quad (12)$$

5. 結論と課題

アホウドリの飛行に関する座標変換と運動方程式と高度に対する風速の速度勾配に関する式を導出した。空気力は、3次元揚力面理論を用いて揚力と抗力を求める。アホウドリの飛行高度を 0m~20m と仮定し、得られた運動方程式を用いて、風速の速度勾配が及ぼすアホウドリの飛行に対する影響を調べる。

本研究では、直線飛行だけでなく旋回飛行が含まれるため、バンク角 ϕ による空気力への影響を調べ、海面近くで旋回する際には、地面効果の影響によりアホウドリの飛行速度が増すものと考えられているので、そのような影響も考慮して、アホウドリの空力・飛行特性を解明する。

6. 参考文献

- [1] 東 昭:「生物の動きの辞典」, 朝倉書店, pp71-72, 2008
- [2] C.J.Wood: "The flight of albatrosses (a computer simulation)", *Ibis*, pp252, 1972
- [3] A.Robinson, J.A.Laurmann: "Wing theory", Cambridge at the university press, pp32-36, 1956