

# 羽根のある植物種子の飛行

——— かえでの種子 ———

大 亀 衛・玉 垣 春 彦・水 川 孝 志

岡山理科大学理学部応用物理学科

(1989年 9月30日 受理)

## 摘 要

かえでの種子の飛行について、数値解析が行なわれた。

羽根の幅の方向と水平面のなす角度  $\alpha$  が 0 のとき、種子は自転運動と公転運動とにじり運動を併せ行ないながら落下する。この規則性のある運動は自転の角速度の大きさ  $\omega_g$  や羽根の長さの方向と水平面のなす角度  $\beta$  に関係している。

角度  $\alpha$  が 0 でないと、種子の運動の規則性は時間の経過とともに失われてゆく。

種子の滞空時間は角度  $\alpha$  と角度  $\beta$  と角速度の大きさ  $\omega_g$  の有無によって異なっており、種子は風によって広く飛散する。

## 1. はじめに

風によって種子を飛散させ、種の繁栄をはかる植物がある<sup>1)</sup>。種子の滞空時間が大きくしかもこの時間が種子によって異なれば、種子は風によって広い範囲へと飛散する。きびしいと思われる淘汰を受けて繁栄してきたこれら植物の種子の飛散機構は調査するに価する。

## 2. 基礎式と数値解

### a) 基礎式

種子の形を扇形として、これの運動方程式をつくる。水平面上に  $x$  軸と  $y$  軸をとり、鉛直方向上向きに  $z$  軸をとる。時間が  $t$  経過したときの、種子の重心の速度を  $(u_g, v_g, w_g)$ 、種子の重心の座標を  $(x_g, y_g, z_g)$ 、種子の自転の角速度の大きさを  $\omega_g$ 、種子の中心角の二等分線の  $x-y$  平面上への射影が  $x$  軸となす角を  $\theta$ 、種子が空気より受ける合力の大きさを  $F$  とする。更に、種子の質量を  $M$ 、重心を通る鉛直軸に関する種子の慣性モーメントを  $I_g$ 、種子が空気より受ける合力の作用点と重心との距離を  $L$ 、扇形の中心（かなめ）と重心との距離を  $r_g$ 、種子の実の部分の半径を  $r_1$ 、種子の半径を  $r_2$ 、種子の実の密度を  $\sigma_1$ 、種子の羽根の密度を  $\sigma_2$ 、種子の実の厚さを  $d_1$ 、種子の羽根の厚さを  $d_2$ 、種子の中心角を  $2\epsilon$ 、羽根の幅の方向と水平面のなす角を  $\alpha$ 、羽根の長さの方向と水平面のなす角を  $\beta$  とする。

この種子の運動を表わす基礎式は

$$\left[ \begin{array}{l} M \frac{d^2 x_G}{dt^2} = -F (\cos \alpha \sin \beta \cos \theta + \sin \alpha \sin \theta), \\ M \frac{d^2 y_G}{dt^2} = -F (\cos \alpha \sin \beta \sin \theta - \sin \alpha \cos \theta), \\ M \frac{d^2 z_G}{dt^2} = F \cos \alpha \cos \beta - Mg, \\ I_G \frac{d\omega}{dt} = FL \sin \alpha \cos \beta, \\ \theta = \int^t \omega_G dt, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left[ \begin{array}{l} F = \frac{1}{2} C_D \rho_a \varepsilon r_2^2 \left\{ (\cos \alpha \sin \beta \cos \theta + \sin \alpha \sin \theta) \frac{dx_G}{dt} \right. \\ \quad \left. + (\cos \alpha \sin \beta \sin \theta - \sin \alpha \cos \theta) \frac{dy_G}{dt} \right. \\ \quad \left. - \cos \alpha \cos \beta \frac{dz_G}{dt} \right\}^2, \\ M = r_1^2 d_1 \varepsilon \sigma_1 + (r_2^2 - r_1^2) d_2 \varepsilon \sigma_2, \\ I_G = \frac{1}{4} \left\{ \sigma_2 d_2 (r_2^4 - r_1^4) + \sigma_1 d_1 r_1^4 \right\} \left\{ \left( \frac{1}{2} \sin 2\varepsilon + \varepsilon \right) \cos^2 \beta \right. \\ \quad \left. - \left( \frac{1}{2} \sin 2\varepsilon - \varepsilon \right) \cos^2 \alpha \right\} - M r_G^2 \cos^2 \beta, \\ L = \frac{2}{3} \frac{r_2 \sin \varepsilon}{\varepsilon} - r_G, \\ r_G = \frac{2}{3} \frac{\sin \varepsilon}{\varepsilon} \frac{\left\{ r_1^3 d_1 \sigma_1 + (r_2^3 - r_1^3) d_2 \sigma_2 \right\}}{\left\{ r_1^2 d_1 \sigma_1 + (r_2^2 - r_1^2) d_2 \sigma_2 \right\}} \end{array} \right. \quad (2)$$

となる。ここで、 $g$ は重力の加速度の大きさ、 $C_D$ は種子の抵抗係数、 $\rho_a$ は空気の密度である。

なお、時間  $t$  が 0 s で

$$\left[ \begin{array}{l} u_G = u_{G0}, \\ v_G = v_{G0}, \\ w_G = w_{G0}, \\ x_G = x_{G0}, \\ y_G = y_{G0}, \\ z_G = z_{G0}, \\ \omega_G = \omega_{G0}, \\ \theta = \theta_0 \end{array} \right. \quad (3)$$

とする。

#### b) 数値解

Runge-Kutta-Gill 法を用いて，基礎式の数値解析を行なう。

$$\left[ \begin{array}{l} \varepsilon = 2.544 \times 10^{-1}, \\ r_1 = 5.333 \times 10^{-3} \text{ m}, \\ r_2 = 2.320 \times 10^{-2} \text{ m}, \\ d_1 = 2.374 \times 10^{-3} \text{ m}, \\ d_2 = 1.914 \times 10^{-4} \text{ m}, \\ \sigma_1 = 7.051 \times 10^2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \\ \sigma_2 = 9.461 \times 10^2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left[ \begin{array}{l} g = 9.806 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}, \\ C_D = 1.980^{3)}, \\ \rho_a = 1.293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}^{4)}, \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left[ \begin{array}{l} u_{G0} = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \\ v_{G0} = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \\ w_{G0} = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \\ x_{G0} = 1.000 \text{ m}, \\ y_{G0} = 1.000 \text{ m}, \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z_{G0} = 1.000 \times 10 \text{ m}, \\ \omega_{G0} = 0 \frac{1}{s} \sim 12 \pi \frac{1}{s}, \\ \theta_0 = 0, \\ \alpha = 0 \sim \frac{1}{18} \pi, \\ \beta = 0 \sim \frac{4}{18} \pi \end{array} \right.$$

⑦

とする。得られたグラフのうち、図1-1～図1-8は基礎式の数値解を表わすものである。

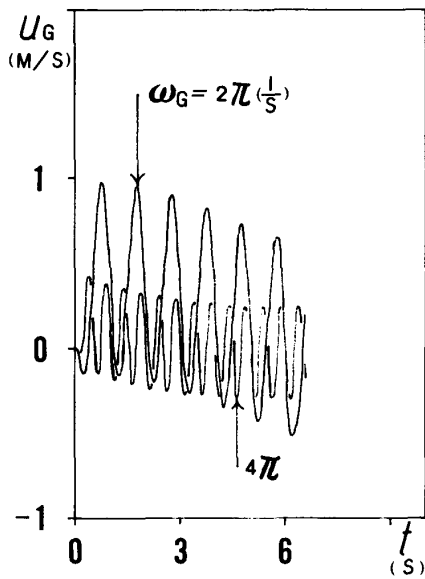


図1-1：時間の経過による種子の重心の  
速さの変動Ⅰ ( $\alpha = 0$ ,  $\beta = \frac{2}{18}\pi$ )

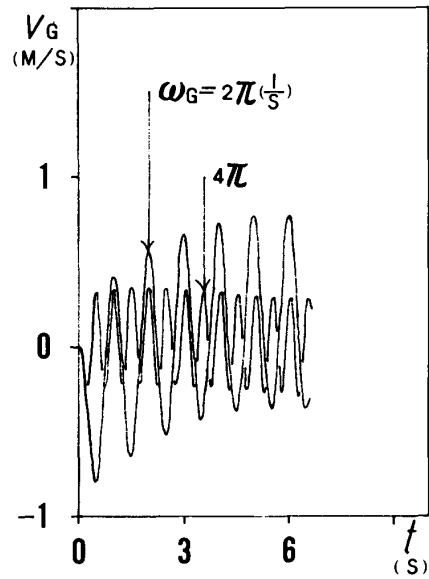


図1-2：時間の経過による種子の重心の  
速さの変動Ⅱ ( $\alpha = 0$ ,  $\beta = \frac{2}{18}\pi$ )

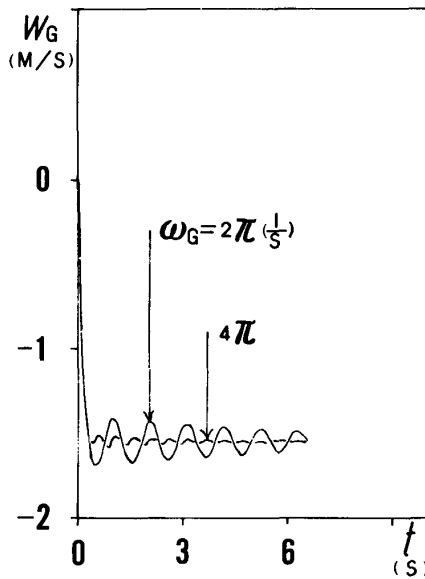


図1-3：時間の経過による種子の重心の  
速さの変動Ⅲ ( $\alpha = 0$ ,  $\beta = \frac{2}{18}\pi$ )

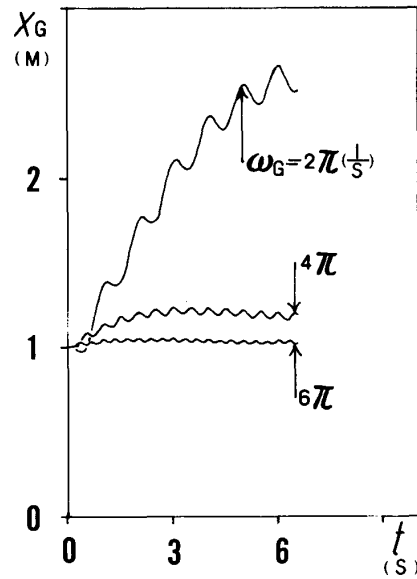


図1-4：時間の経過による種子の重心の  
位置の変動Ⅰ ( $\alpha = 0$ ,  $\beta = \frac{2}{18}\pi$ )

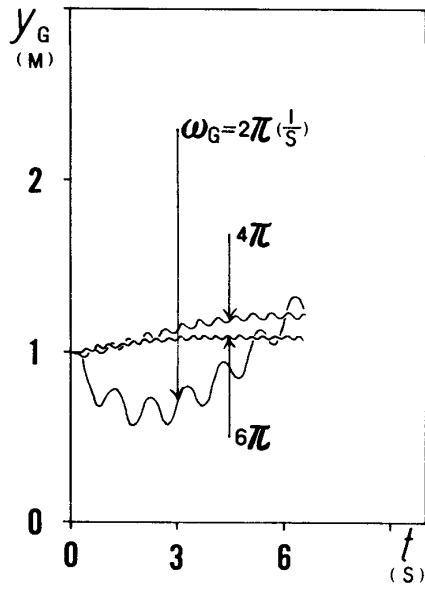


図 1-5：時間の経過による種子の重心の位置の変動Ⅱ ( $\alpha = 0$ ,  $\beta = \frac{2}{18}\pi$ )

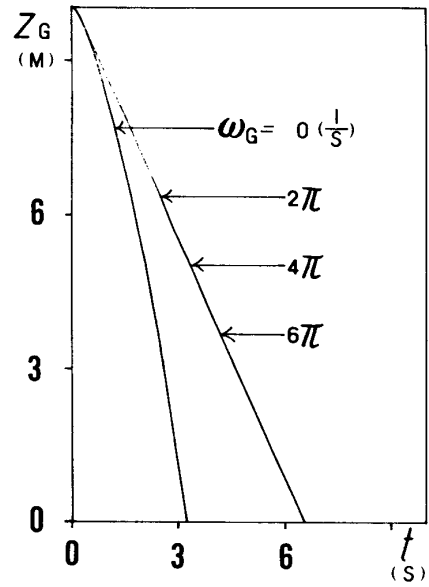


図 1-6：時間の経過による種子の重心の位置の変動Ⅲ ( $\alpha = 0$ ,  $\beta = \frac{2}{18}\pi$ )

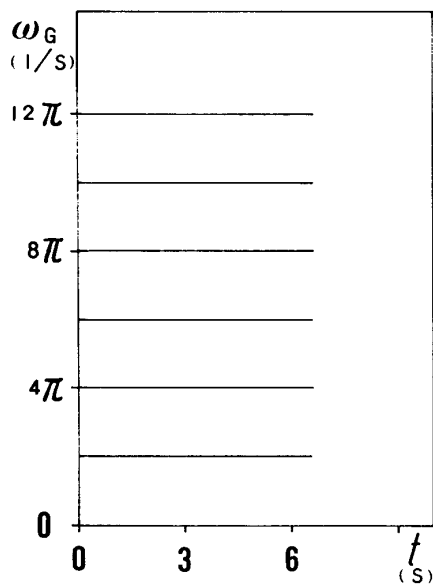


図 1-7：時間の経過による種子の自転運動の様子Ⅰ ( $\alpha = 0$ ,  $\beta = \frac{2}{18}\pi$ )

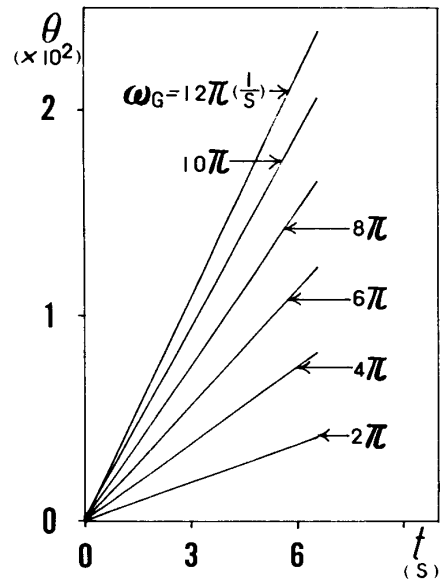


図 1-8：時間の経過による種子の自転運動の様子Ⅱ ( $\alpha = 0$ ,  $\beta = \frac{2}{18}\pi$ )

### 3. 考 察

#### a) 運動の規則性

角度 $\alpha$ が0のとき、種子は規則性のある落下運動をする。初期値 $\omega_{G0}$ が $0 \frac{1}{s}$ でなければ、種子は自転しながら公転しさらに水平方向のにじり運動が加わって落下する。図2-1～図2-4は側面から見たこのときの種子の重心の軌跡であり、図3-1～図3-3は上方から見た種子の重心のそれである。図2-5は落下している種子を側面から写した多重写真である。

角度 $\alpha$ が0でないときの種子の運動の規則性は時間の経過とともに失われていく。

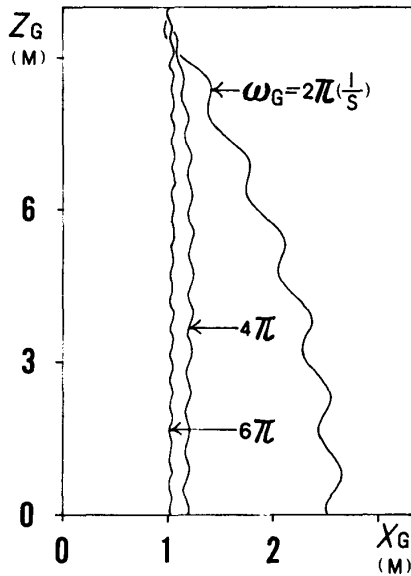


図2-1 : x z 面から見た種子の重心の軌跡Ⅰ ( $\alpha = 0$ ,  $\beta = \frac{2}{18}\pi$ )

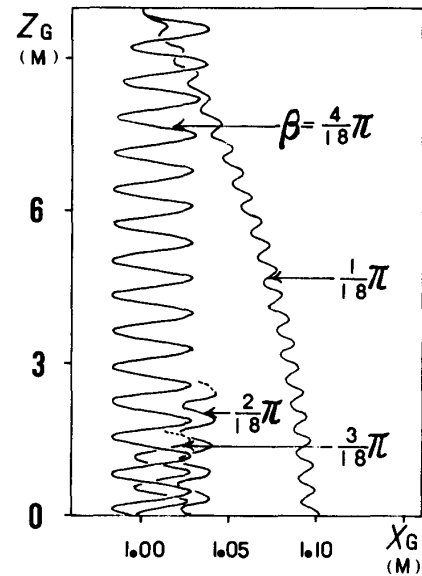


図2-2 : x z 面から見た種子の重心の軌跡Ⅱ ( $\alpha = 0$ ,  $\omega_G = 6\pi \frac{1}{s}$ )

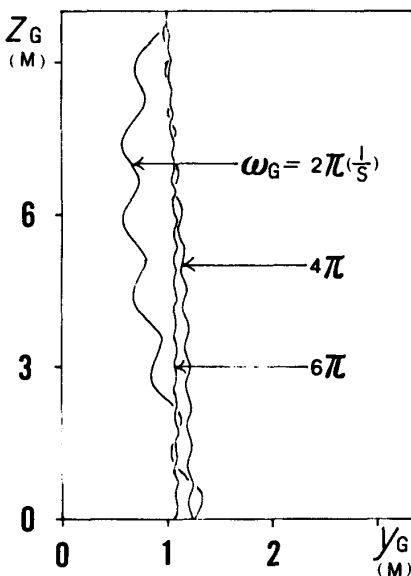


図2-3 : y z 面から見た種子の重心の軌跡Ⅰ ( $\alpha = 0$ ,  $\beta = \frac{2}{18}\pi$ )

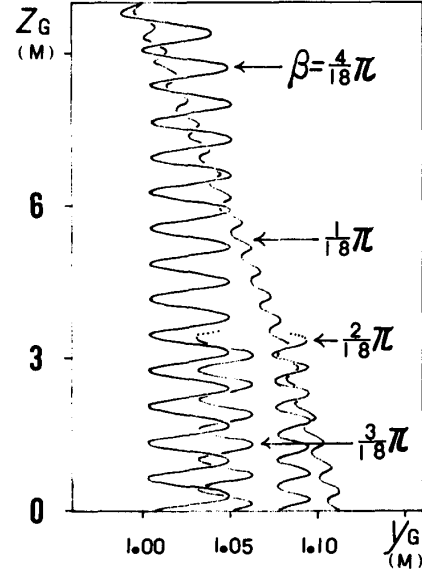


図2-4 : y z 面から見た種子の重心の軌跡Ⅱ ( $\alpha = 0$ ,  $\omega_G = 6\pi \frac{1}{s}$ )

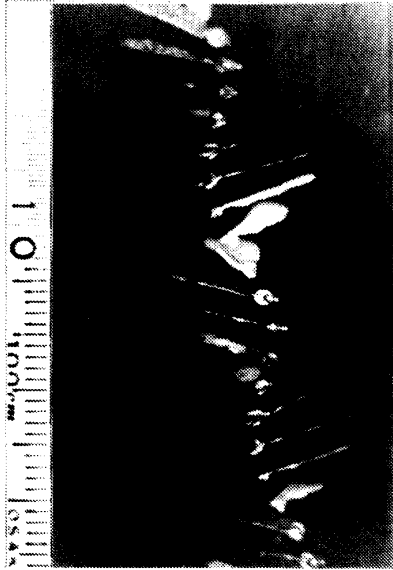


図 2-5：落下している種子を  
側面から写した多重写真

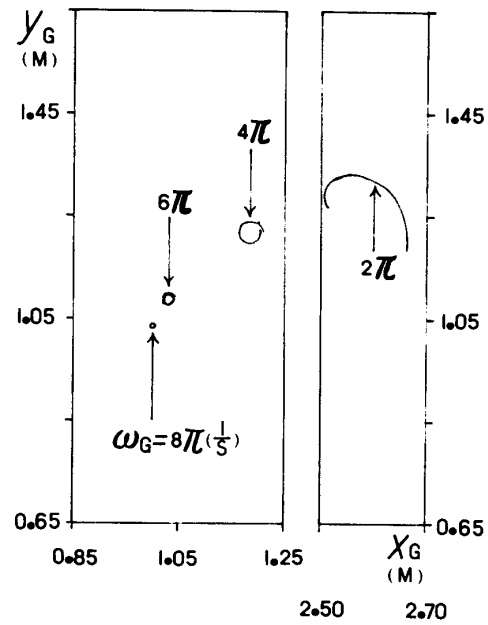


図 3-1：種子の重心の公転運動 I  
( $\alpha = 0$ ,  $\beta = \frac{2}{18}\pi$ ,  $t = 6.00 \text{ s} \sim 6.55 \text{ s}$ )

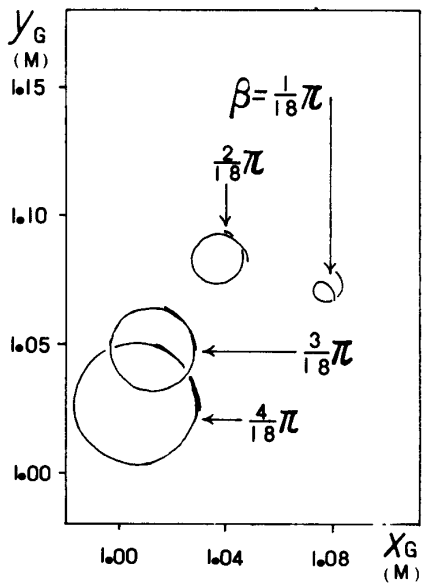


図 3-2：種子の重心の公転運動 II  
( $\alpha = 0$ ,  $\omega_G = 6\pi \frac{1}{s}$ ,  $t = 4.00 \text{ s} \sim 4.40 \text{ s}$ )

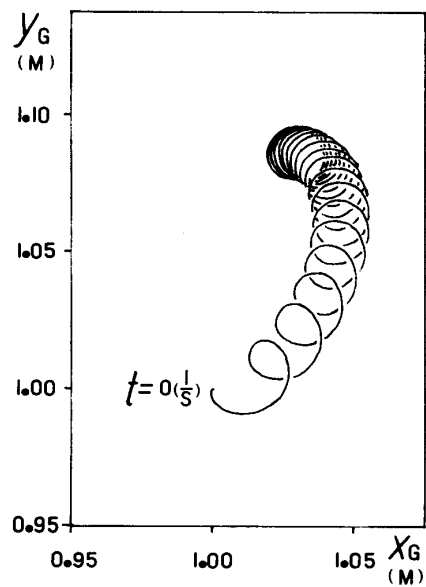


図 3-3：種子の重心のにじり運動  
( $\alpha = 0$ ,  $\beta = \frac{2}{18}\pi$ ,  $\omega_G = 6\pi \frac{1}{s}$ )

## b) 自転運動

角度  $\alpha$  が 0 のとき，種子の自転の角速度の大きさ  $\omega_g$  は式①からもわかるように定数である。このことは図 1-7 に示されている。

角度  $\alpha$  が 0 でないと，角速度の大きさ  $\omega_g$  は式①からもわかるように時間とともに増大してゆく。このことは運動の規則性が失われることを予測させる。

## c) 公転運動

角度  $\alpha$  が 0 のとき，種子の重心の公転半径は角速度の大きさ  $\omega_g$  が小さいほどそして角度  $\beta$  が大きいほど大きくなっている。このことは図 3-1 と図 3-2 に示されている。

種子の運動の規則性は角度  $\alpha$  が 0 でないと失われるから，この問題は消滅する。

## d) にじり運動

角度  $\alpha$  が 0 のとき，にじり運動が種子の重心の運動に加わっている。この運動の様子は図 3-3 に示されている。角速度の大きさ  $\omega_g$  と角度  $\beta$  が小さいほど，このにじり運動は大きい。このことは図 3-1 と図 3-2 から理解される。

種子の運動の規則性は角度  $\alpha$  が 0 でないと失われるから，この問題は消滅する。

## e) 滞空時間

角度  $\alpha$  が 0 のとき，一定の高さを落下する種子の滞空時間は自転の有無と角度  $\beta$  によって異なり角速度の大きさ  $\omega_g (\equiv 0 \frac{1}{s})$  によらない。図 4 はこれを示すグラフである。図中の  $t_{10}$  は種子が 10m 落下するに要する時間である。

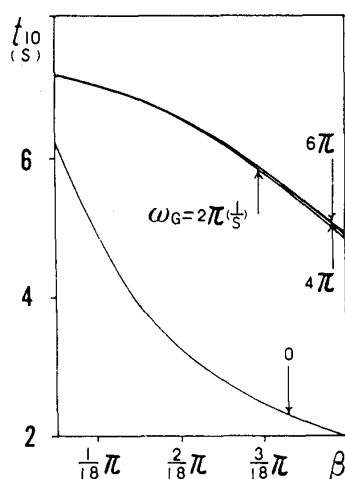


図 4：種子の滞空時間 ( $\alpha = 0$ )

運動の規則性は角度  $\alpha$  が 0 でないと失われてゆく。けれども，落下の途中で角度  $\alpha$  が 0 となれば，種子はそのときの角速度の大きさ  $\omega_g$  と角度  $\beta$  に対応する規則性のある運動をと



りもどす。従って、種子の滞空時間は多様である。

#### f) 使用した値

式④の値は27個のトウカエデ (*Acer buergerianum* Mig) の種子から求めた平均値である。図5はこの種子の拡大図である。種子の面積と等しくなるように扇形をつくり、種子の実の部分の半径  $r_1$  と種子の半径  $r_2$  と種子の中心角  $2\epsilon$  を求める。実の部分の厚さ  $d_1$  と羽根の部分の厚さ  $d_2$  はマイクロメーターを用いて測定する。天秤で計られた質量とメスシリンダーで計られた体積を用いて、実の部分の密度  $\sigma_1$  と羽根の部分の密度  $\sigma_2$  は求められる。

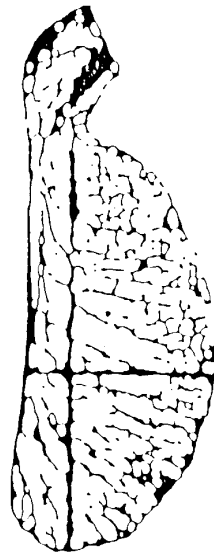


図5：種子(トウカエデ)の拡大図

#### g) その他

種子の滞空時間は大きくてしかも多様である。従って、種々の速さの風による種子の飛散領域は広く、種子の落下密度は小さいと思われる。このことはこの植物が自然淘汰に打ち勝って繁栄できた一因であろう。

### 4. むすび

結果は日常観察して得られている感覚と一致している。ただ、落下の速さが少し大きいように思われる。羽根の形を扇形で代用したこと、長期に保存していた種子から得られた数値を用いたこと、種子の抵抗係数の値等に問題があるかもしれない。

種子の自転に起因して生ずる力や空気の粘性によって生ずる力を考慮し、種子の形や種子の密度の値や種子の抵抗係数の値等も変えて、更に数値解析をすすめてみたい。

## 参考文献

- 1) H. Hertel : *Biologie und Technik, Struktur-Form-Bewegung* (Krausskopf-Verlag, Mainz, 1963).  
H. Hertel : バイオエンジニアリング, 生物の形と運動に学ぶ (朝倉書店, 東京, 1985)  
初版, E, p.88.
- 2) 東京天文台編纂 : 理科年表 (丸善 K K, 東京, 1967) 第40冊, 地学部, p.130.
- 3) 日本機械学会編 : 機械工学便覧 (日本機械学会, 東京, 1977) 6 版, 第 8 編, p.20.
- 4) 日本化学会編 : 化学便覧 (丸善 K K, 東京, 1966) 初版, 基礎編 II, 5, p.432.

## Flight of Seeds with Blades —— Maple Seeds ——

Mamoru OHKAME, Haruhiko TAMAGAKI and Takasi MIZUKAWA

*Department of Applied Physics, Okayama*

*University of Science*

*1-1 Ridaicho, Okayama 700 Japan*

(Received September 30, 1989)

A numerical analysis concerning the flight of the maple seeds was made. If the angle  $\alpha$  between the direction of the blade width and the horizontal plane is 0, the seeds fall with the simultaneous motions of rotation, revolution and crawl. These regular motions are related both to the angular velocity of the rotation  $\omega_G$  and to the angle  $\beta$  which the direction of the blade length makes with the horizontal plane. If the angle  $\alpha$  is not 0, these regular motions disappear rapidly with time. How long the falling seeds stay in the air is related to the value of the angle  $\alpha$ , the value of the angle  $\beta$  and the existence of the angular velocity  $\omega_G$ . Therefore, the seeds are scattered extensively down the wind.