

羽根のある植物種子の飛行

—— 山のいもの種子 ——

大 亀 衛・岸 本 剛

岡山理科大学理学部応用物理学科

(1991年9月30日 受理)

摘 要

山のいもの種子は初め不規則な落下運動をするが、それはまもなく規則性のある運動に変わる。規則性のある落下運動をしているときの運動方程式が作られ、この運動の数値解析が行われた。

山のいもの種子は風のないときでも広く散布するが、風によって更に広く薄く散布する。自然淘汰にうちかって山のいもの繁殖した理由の一部が解明された。

1. はじめに

植物の種子はいろいろな方法で飛散する¹⁾。この飛散の機構が着目され始めている^{2)~4)}。山のいも (*Dioscorea japonica* Thunberg)^{5)~6)}の種子は初め不規則な落下運動をしているが、まもなくそれは規則性のある運動へと変わる。ここでは問題を規則性のある落下運動に限定し、この種子の飛散の機構を調べる。

2. 基礎式と数値解

a) 基礎式

種子と種の形を円形とする。地上の水平面上に x 軸と y 軸をとり、鉛直方向上向きに z 軸をとる。種子が規則運動を初めてから時間が t 経過したときの種子の重心の座標を (x_G, y_G, z_G) 、鉛直軸のまわりに自転している種子の角速度の大きさを ω_G 、種子の中心と種の中心を通る直線の水平面上への射影が x 軸とつくる角度を θ 、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 、種子の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 (規則運動をしているとき、この I_G は関係しない。)、種の半径を r_1 、種子の半径を r_2 、種の密度を σ_1 、羽根の密度を σ_2 、種の厚さを d_1 、羽根の厚さを d_2 、種子の中心と種の中心を通る直線に垂直で種子の面上にある直線が水平面となす角度を α (規則運動をしているとき、この α は 0 である。)、種子の中心と種の中心を通る直線が水平面となす角度を β とする。

空気の粘性による影響を考えないと、種子の運動を表す基礎式は

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 x_G}{dt^2} = -\frac{F}{M} \sin \beta \cos \theta, \\ \frac{d^2 y_G}{dt^2} = -\frac{F}{M} \sin \beta \sin \theta, \\ \frac{d^2 z_G}{dt^2} = \frac{F}{M} \cos \beta - g, \\ \frac{d\omega_G}{dt} = 0, \\ \theta = \int^t \omega_G dt \end{array} \right. \quad \text{①}$$

となる。ここで、

$$\frac{F}{M} = \frac{1}{2} C_D \rho_a \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \left(\sin \beta \cos \theta \frac{dx_G}{dt} + \sin \beta \sin \theta \frac{dy_G}{dt} - \cos \beta \frac{dz_G}{dt} \right)^2 \\ \left/ \left[d_1 \sigma_1 + \left\{ \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1 \right\} d_2 \sigma_2 \right] \right. \quad \text{②}$$

である。式①の中の g は重力の加速度の大きさであり、式②の中の C_D と ρ_a はそれぞれ種子の抵抗係数と空気の密度である。

b) 数値計算

初期条件を

$$\left\{ \begin{array}{l} x_G = 5\text{m}, \\ y_G = 5\text{m}, \\ z_G = H \\ \quad = 10\text{m}, \\ (\theta = \theta_0), \\ \frac{dx_G}{dt} = 0 \text{ m/s}, \\ \frac{dy_G}{dt} = 0 \text{ m/s}, \\ \frac{dz_G}{dt} = 0 \text{ m/s}, \\ \omega_G = \Omega \end{array} \right. \quad \text{③}$$

とする。

また、

$$\left\{ \begin{array}{l} C_D = 1.17 \text{ } ^7), \\ \rho_a = 1.29 \text{ kg/m}^3 \text{ } ^8), \\ g = 9.81 \text{ m/s}^2 \text{ } ^9) \end{array} \right. \quad \textcircled{4}$$

を使用する。

計算の範囲は

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{0.9}{180}\pi \leq \beta \leq \frac{7.9}{180}\pi, \\ \frac{7}{10}\pi \text{ l/s} \leq \Omega \leq \frac{23}{10}\pi \text{ l/s}, \\ 3.05 \leq r_2/r_1 \leq 3.95, \\ 4.14 \times 10^{-1} \text{ kg/m}^2 \leq d_1\sigma_1 \\ \leq 5.74 \times 10^{-1} \text{ kg/m}^2, \\ 1.71 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2 \leq d_2\sigma_2 \\ \leq 10.71 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2 \end{array} \right. \quad \textcircled{5}$$

である。山野で採取した山のいもの種子10個を用いて、パラメタ β と Ω の計算の範囲は観測して定め、パラメタ r_2/r_1 と $d_1\sigma_1$ と $d_2\sigma_2$ の計算の範囲は実測して求めた。

数値計算は Runge - Kutta - Gill 法を用いて行われた。図 1-1 ~ 図 8-5 は得られた数値を用いて描かれたものである。図 6-1 ~ 図 8-5 は式①の解である。 ω_c と θ の図ははぶいた。

3. 考 察

a) 結果の妥当性と限界

ここで得られた結果は運動方程式から得られたものである。けれども、これらの結果は種子や種の輪郭形状を円形としたことや空気の粘性による影響を考えなかったことの制限を受けている。

b) 落下点

種子の中心と種の中心を通る直線が水平面となす角度 β の大きいほど、また種子の角速度の大きさ Ω が小さいほど、種子は遠くへ落下する。けれども、種子と種の半径の比 r_2/r_1 や種の厚さとその密度の積 $d_1\sigma_1$ や羽根の厚さとその密度の積 $d_2\sigma_2$ の落下点の位置へ及ぼす影響は小さい (図 1-1 ~ 図 1-5)。

山のいもの種子は無風でも飛行形態の異なり (β や Ω の値の異なり) によって広く薄く飛散する。

c) 滞空時間

高さ H を落下するに要する種子の滞空時間 T_H は種子と種の半径の比 r_2/r_1 や種の厚さと

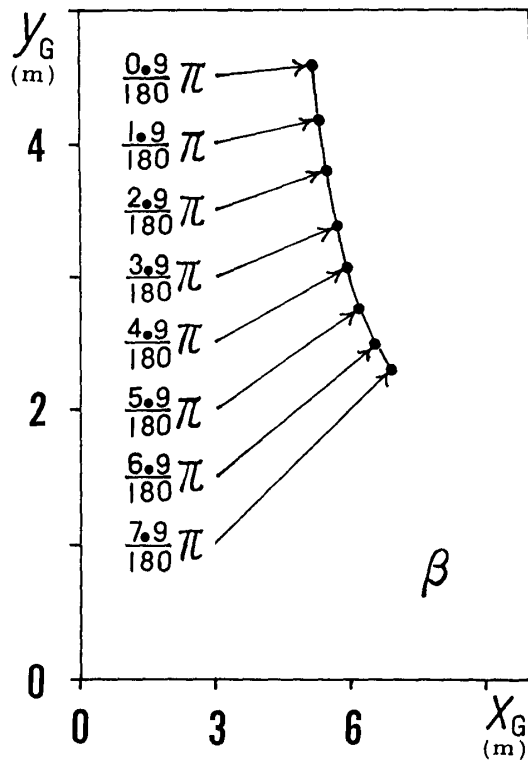


図 1-1 落下点 ($\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

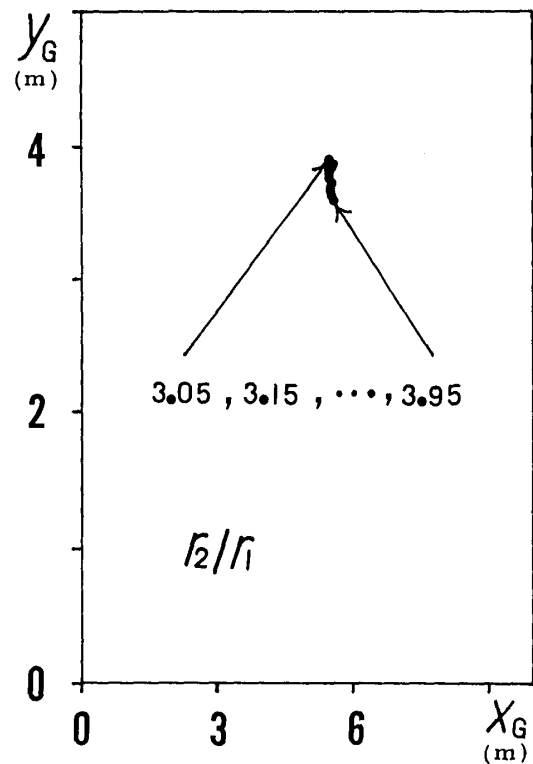


図 1-3 落下点 ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

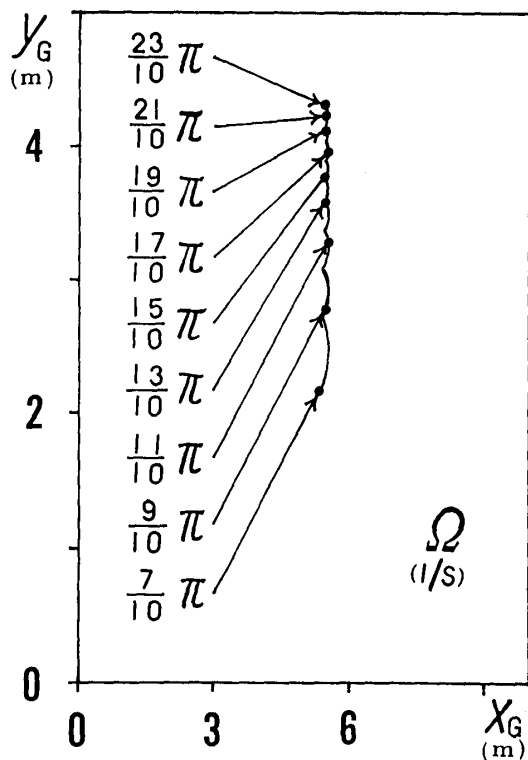


図 1-2 落下点 ($\beta = 2.9\pi/180$, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

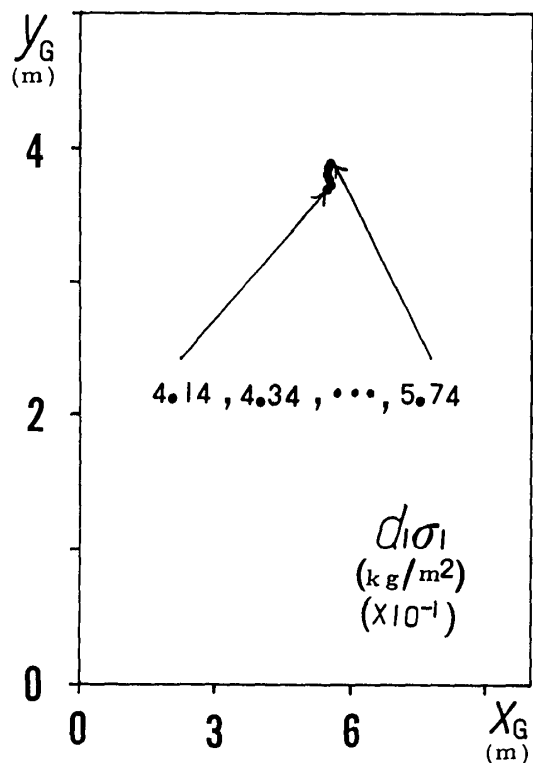


図 1-4 落下点 ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

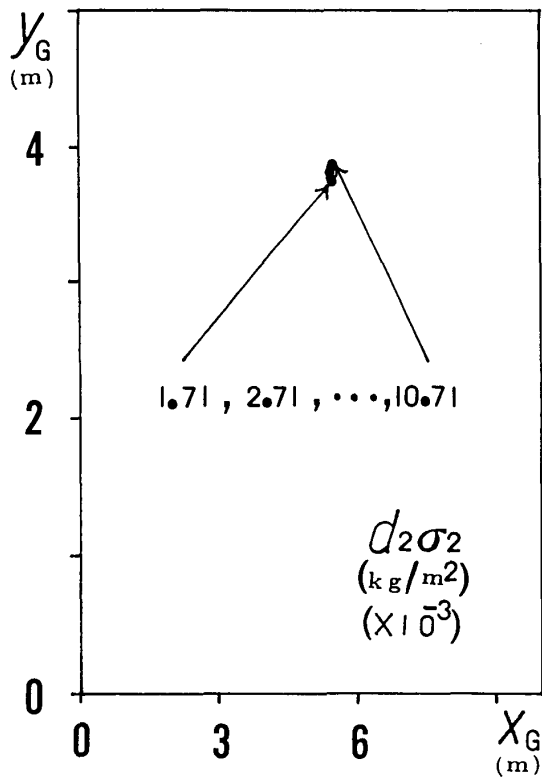


図 1-5 落下点 ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ l/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m²)

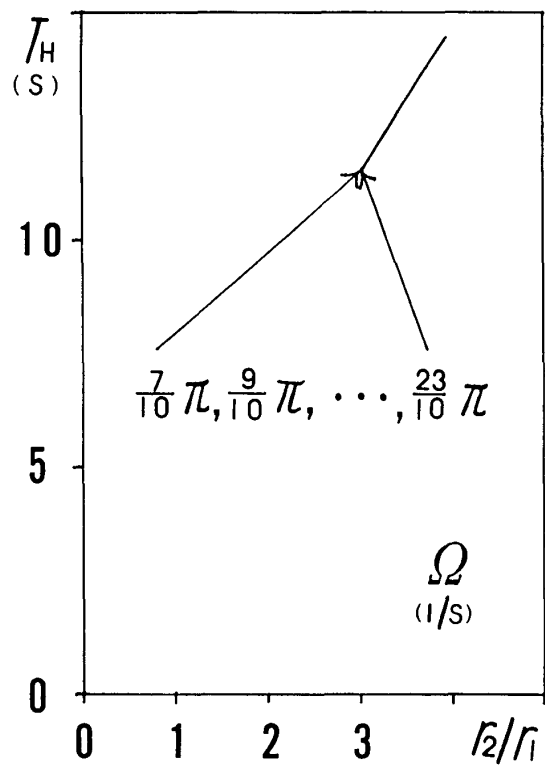


図 2-2 滞空時間 ($\beta = 2.9\pi/180$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

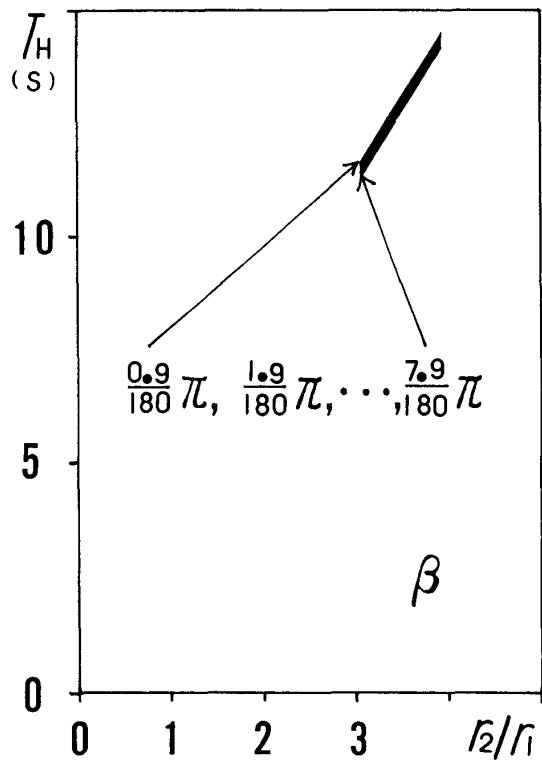


図 2-1 滞空時間 ($\Omega = 15\pi/10$ l/s, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

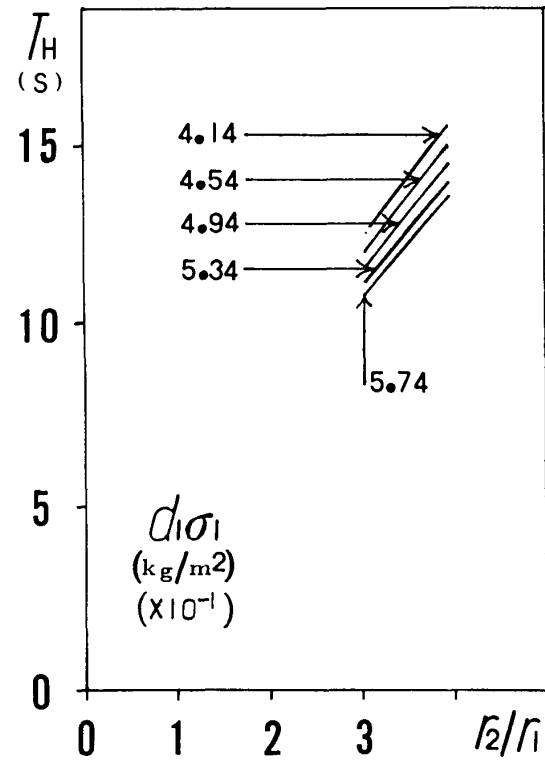


図 2-3 滞空時間 ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ l/s, $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

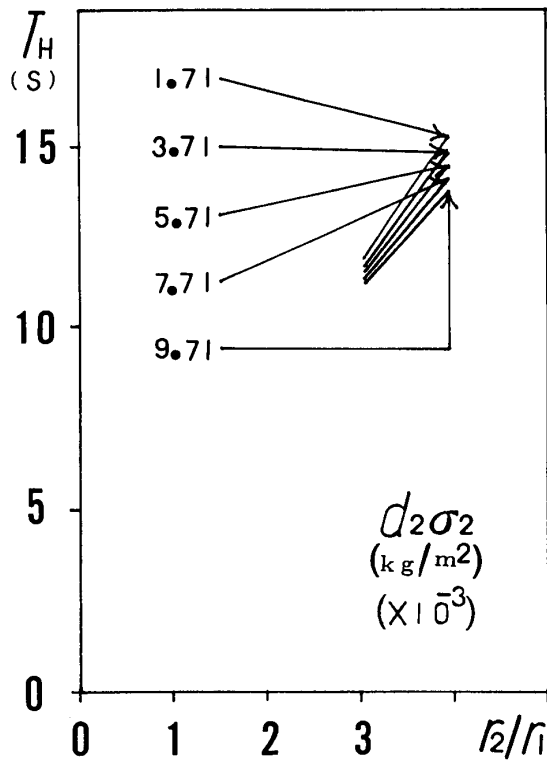


図 2-4 滞空時間 ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m²)

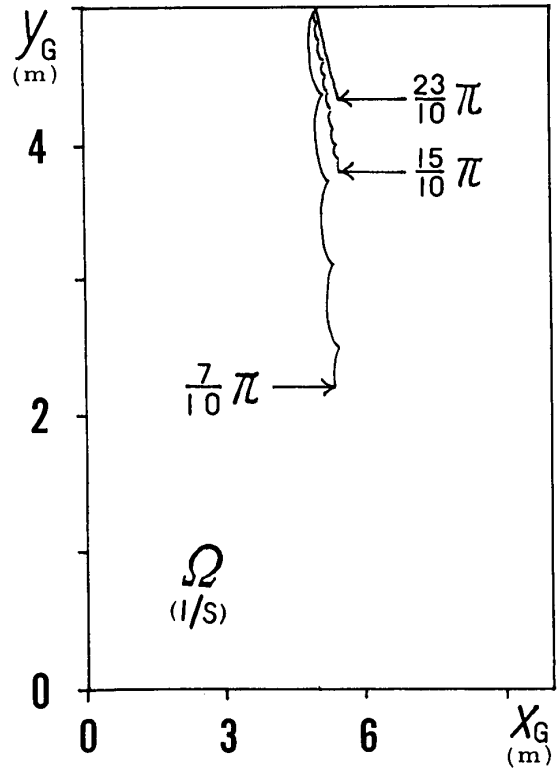


図 3-2 飛跡 I ($\beta = 2.9\pi/180$, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

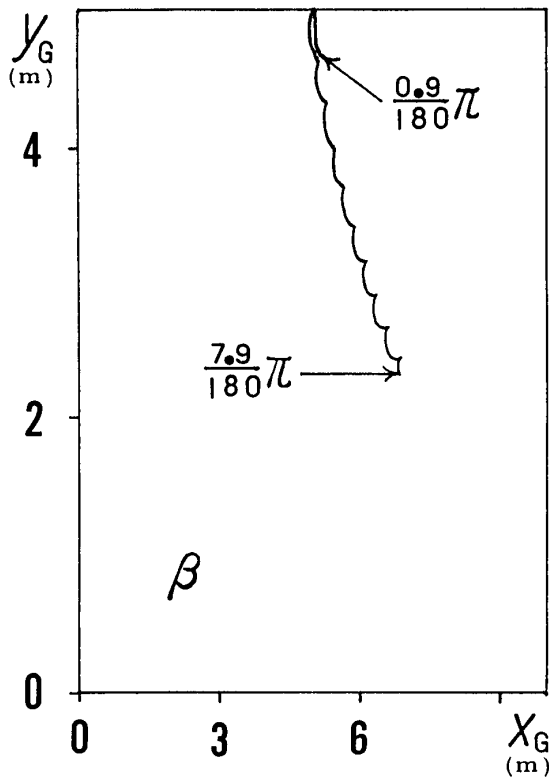


図 3-1 飛跡 I ($\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

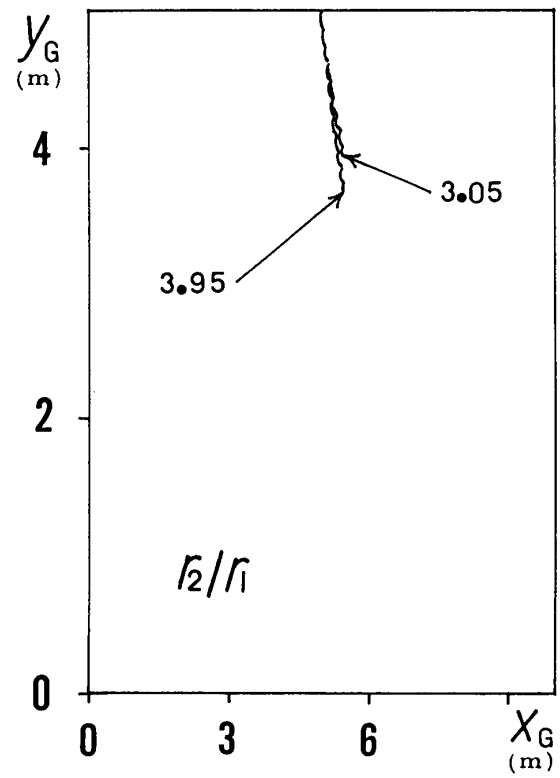


図 3-3 飛跡 I ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

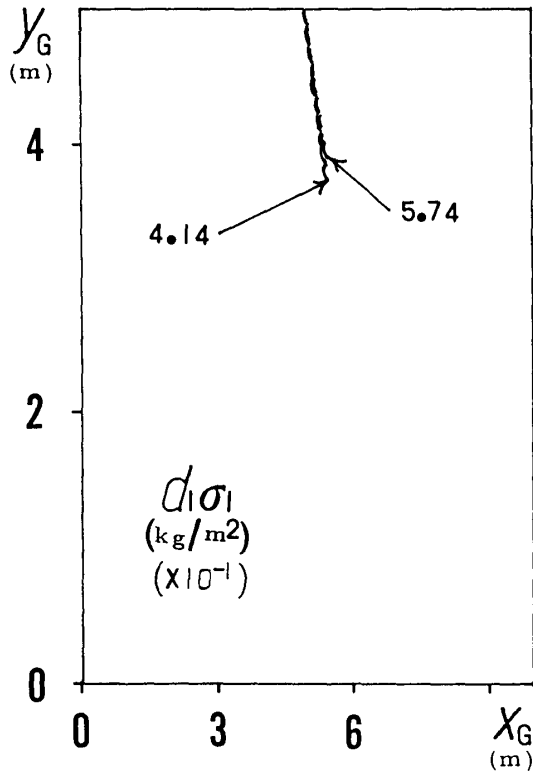


図3-4 飛跡I ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

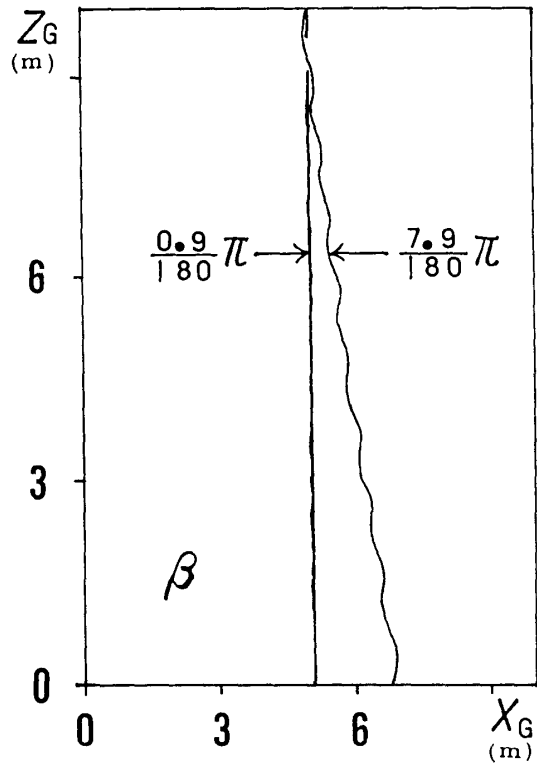


図4-1 飛跡II ($\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

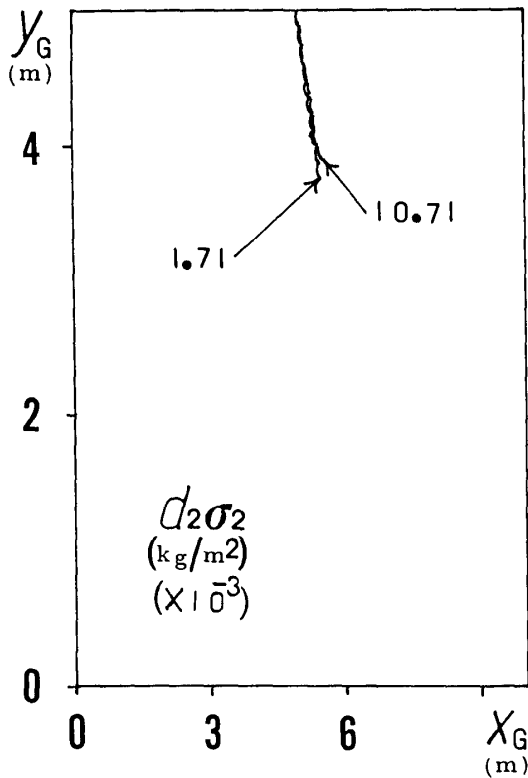


図3-5 飛跡I ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m²)

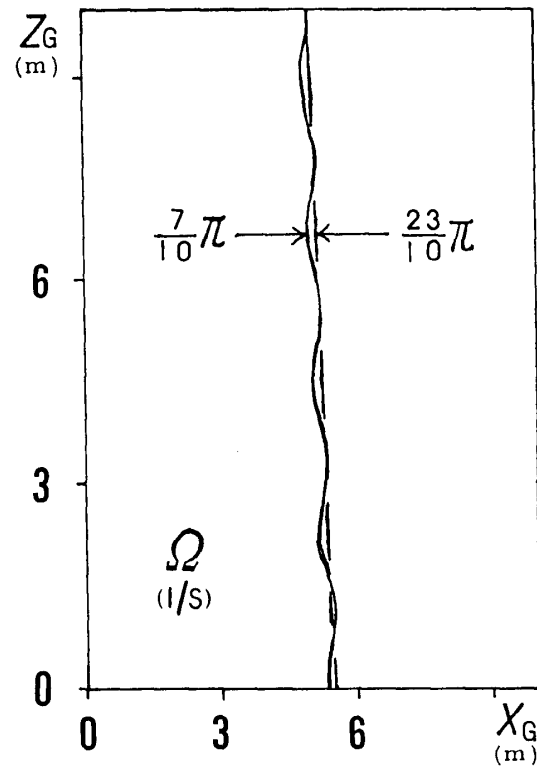


図4-2 飛跡II ($\beta = 2.9\pi/180$, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

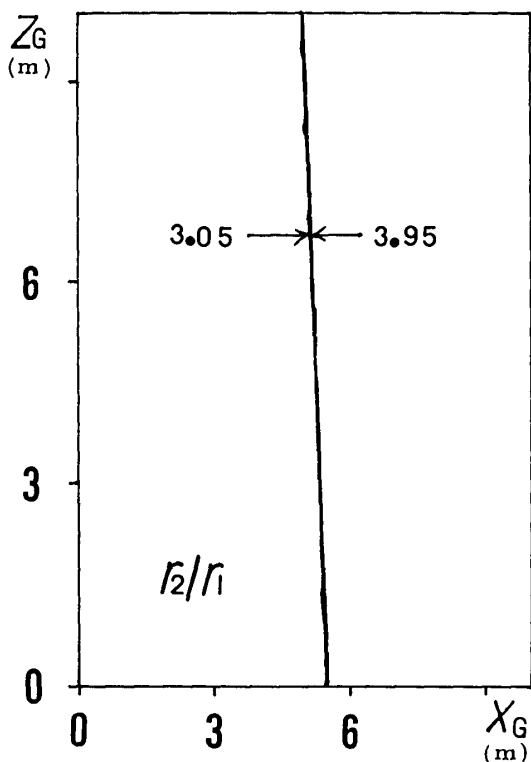


図 4-3 飛跡 II ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

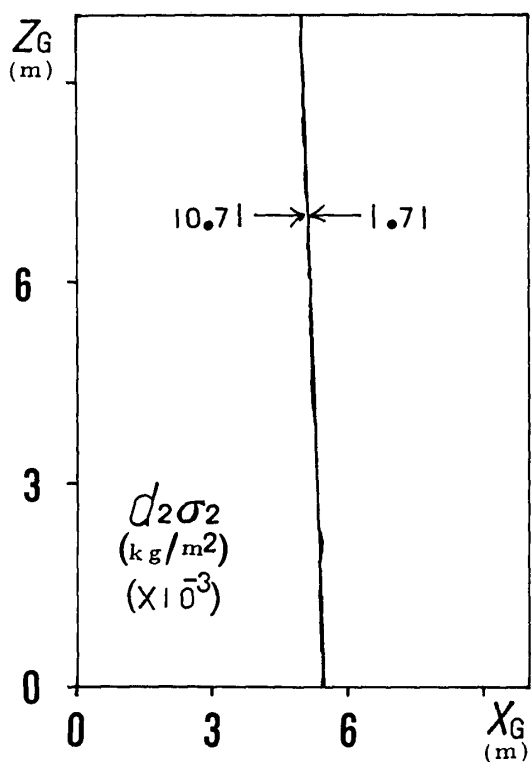


図 4-5 飛跡 II ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m²)

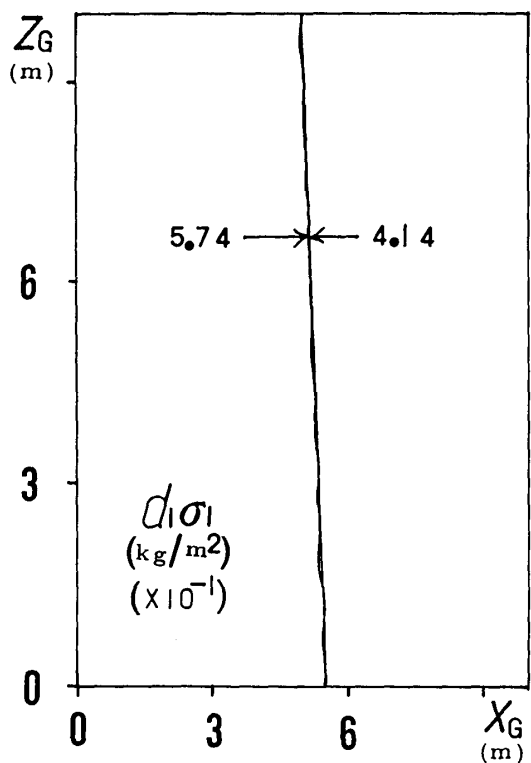


図 4-4 飛跡 II ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

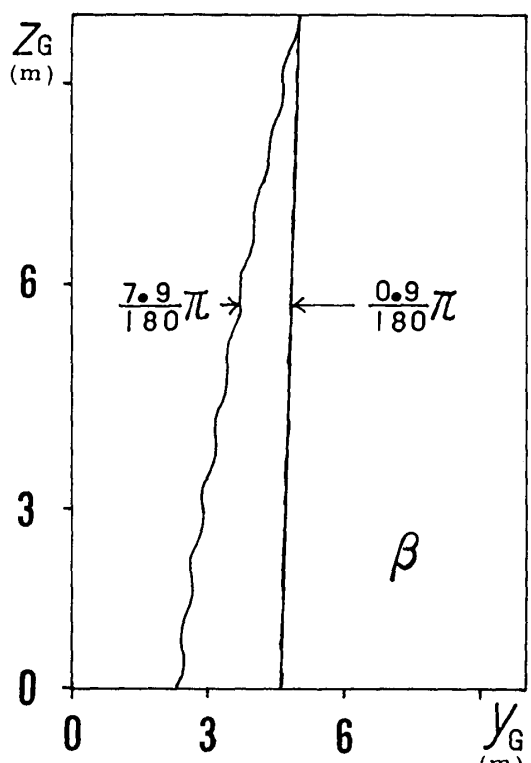


図 5-1 飛跡 III ($\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

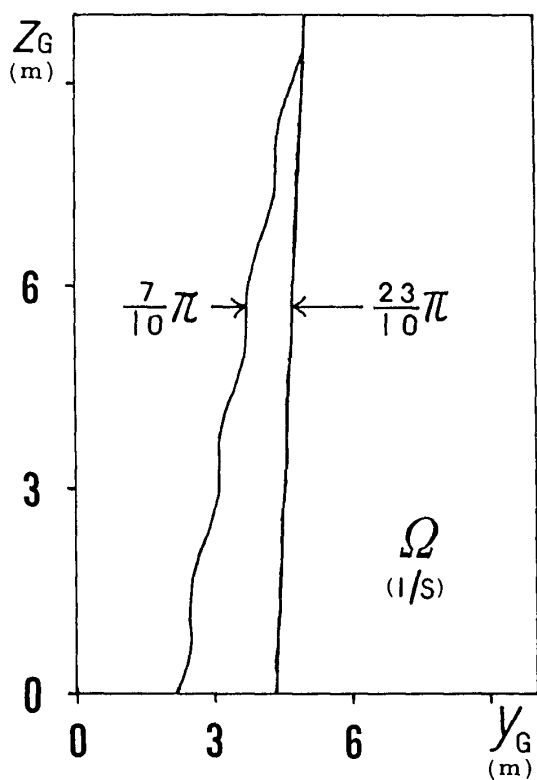


図5-2 飛跡Ⅲ ($\beta = 2.9\pi/180$, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1} \text{ kg/m}^2$, $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$)

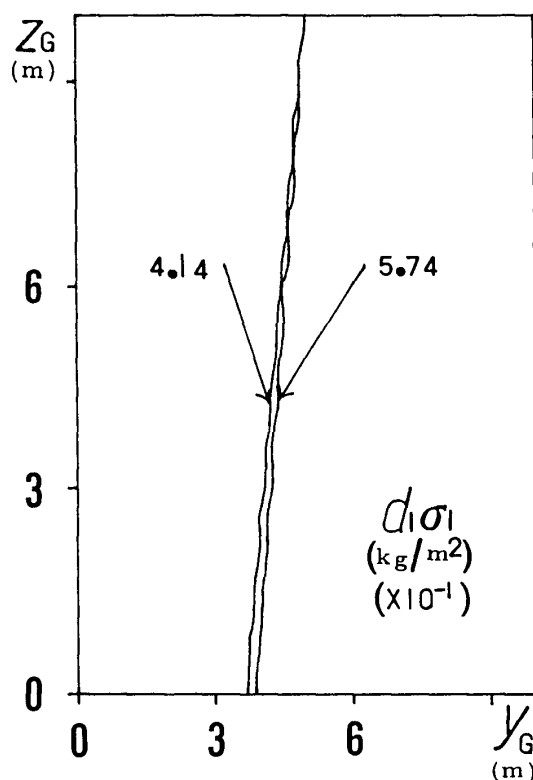


図5-4 飛跡Ⅲ ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$)

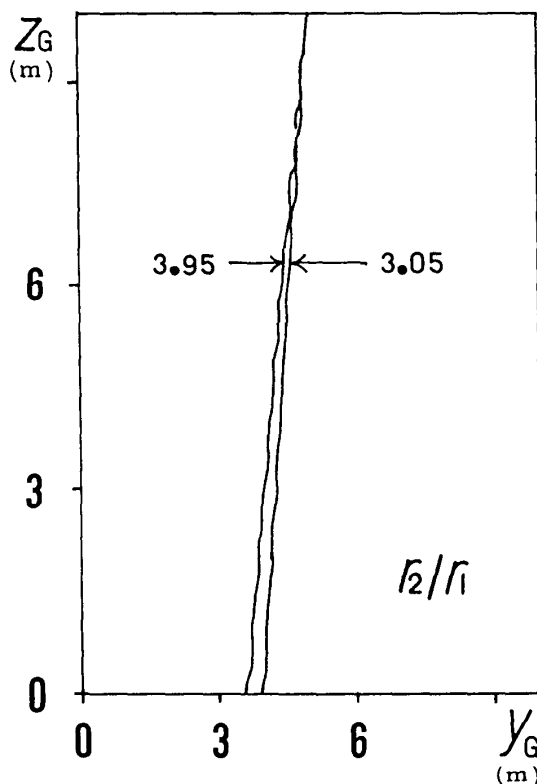


図5-3 飛跡Ⅲ ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1} \text{ kg/m}^2$, $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$)

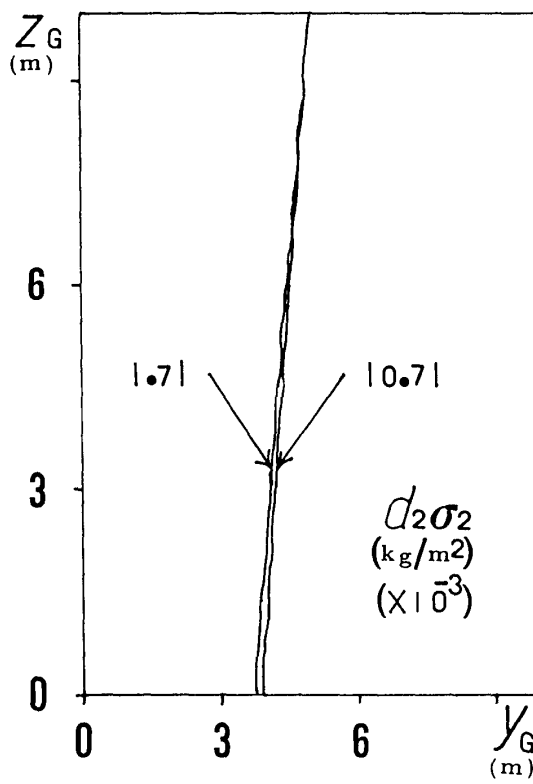


図5-5 飛跡Ⅲ ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1} \text{ kg/m}^2$)

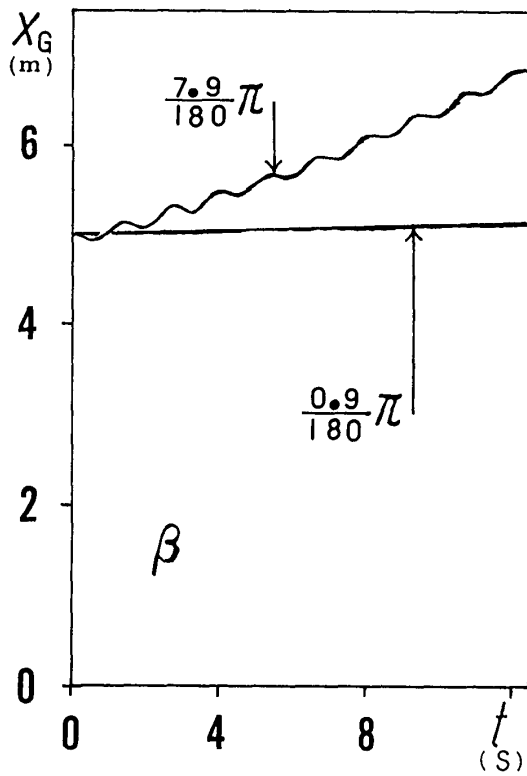


図 6-1 飛行 I ($\Omega = 15\pi/10$ l/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

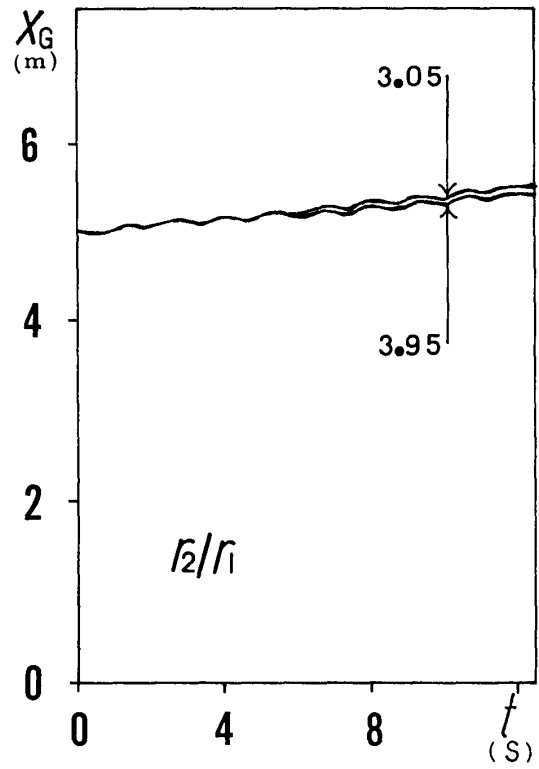


図 6-3 飛行 I ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ l/s, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

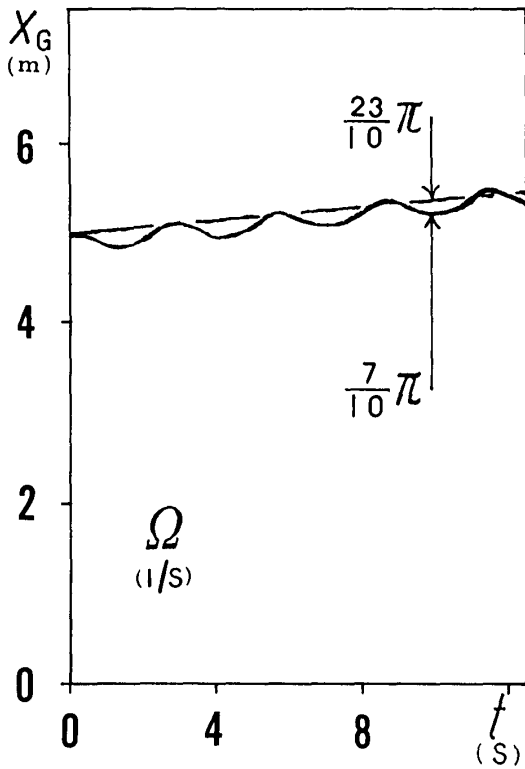


図 6-2 飛行 I ($\beta = 2.9\pi/180$, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

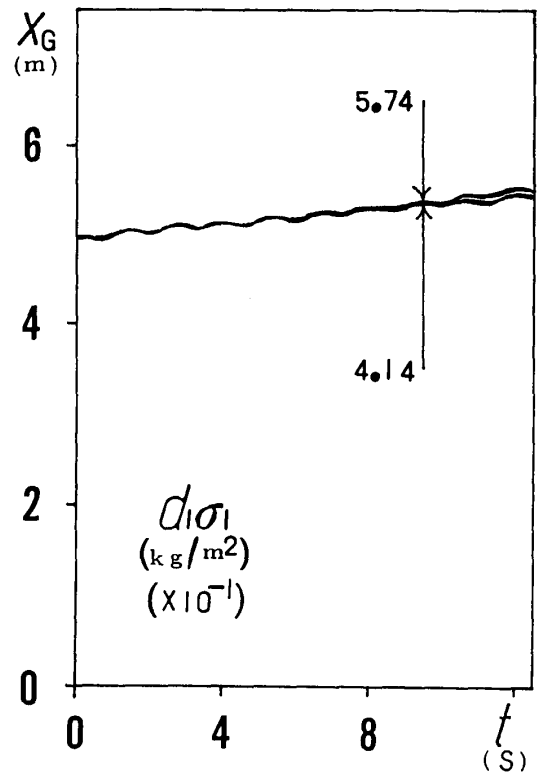


図 6-4 飛行 I ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ l/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

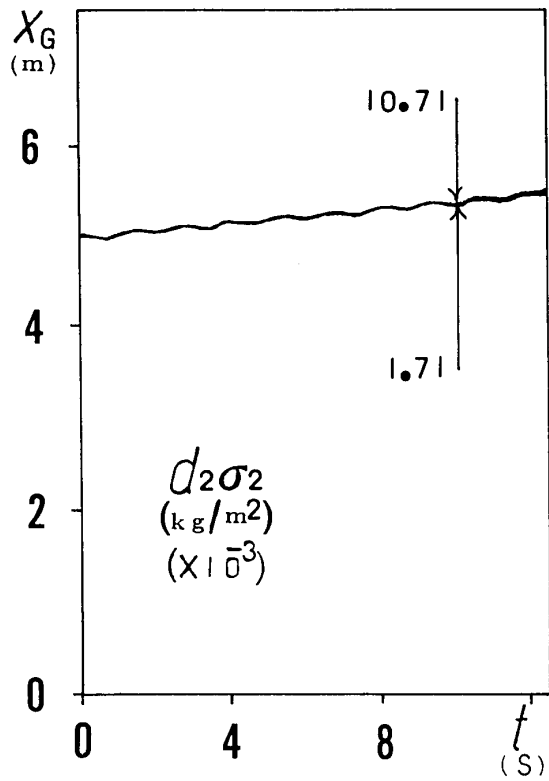


図 6-5 飛行 I ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m²)

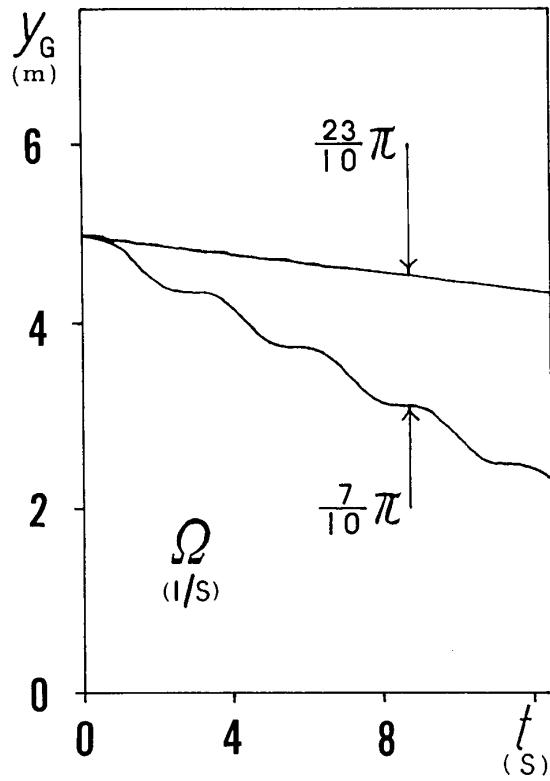


図 7-2 飛行 II ($\beta = 2.9\pi/180$, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

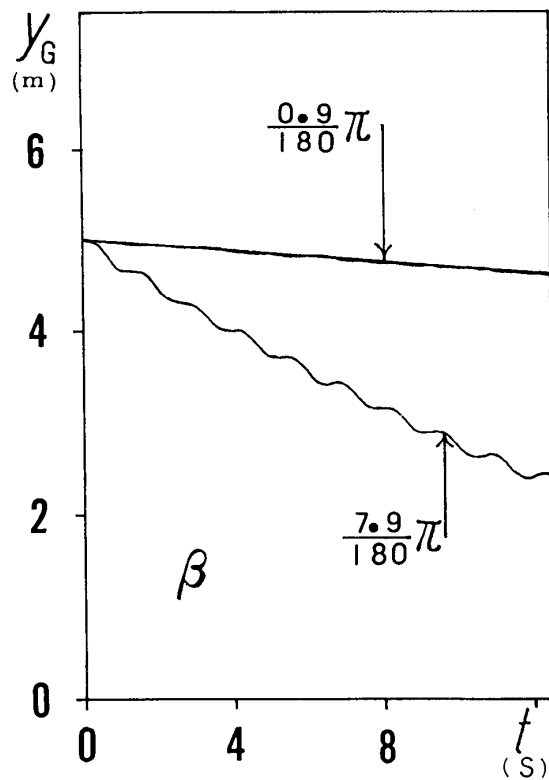


図 7-1 飛行 II ($\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

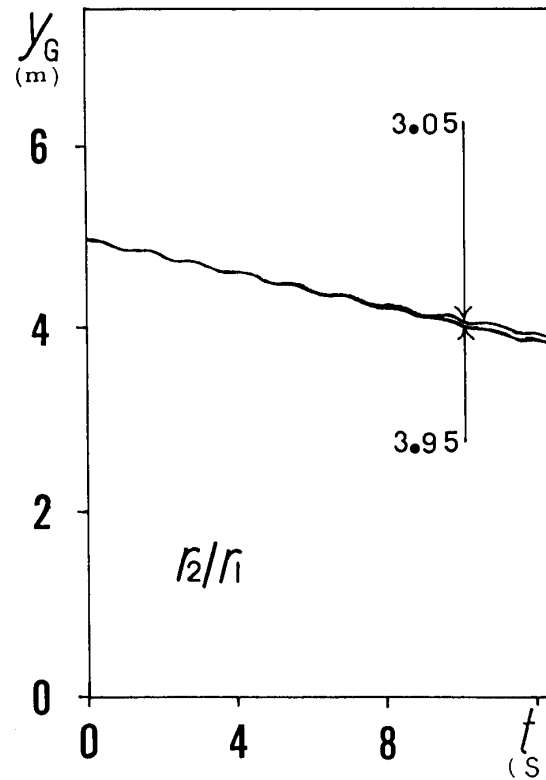


図 7-3 飛行 II ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

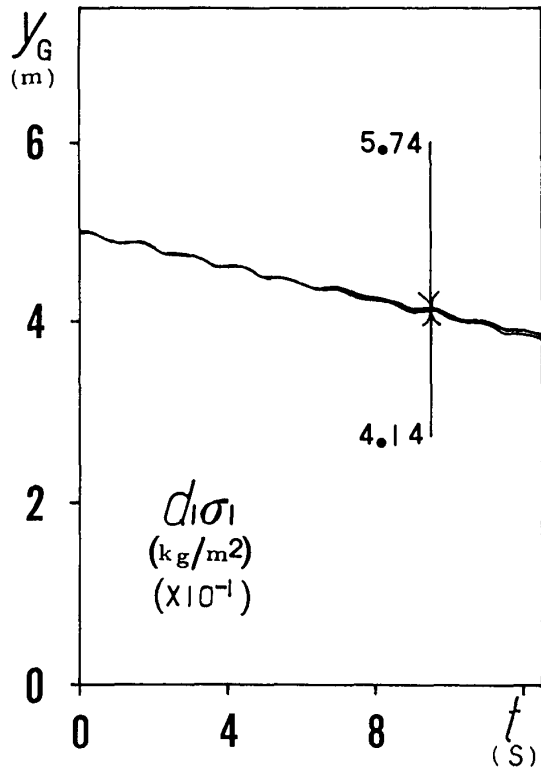


図 7-4 飛行 II ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

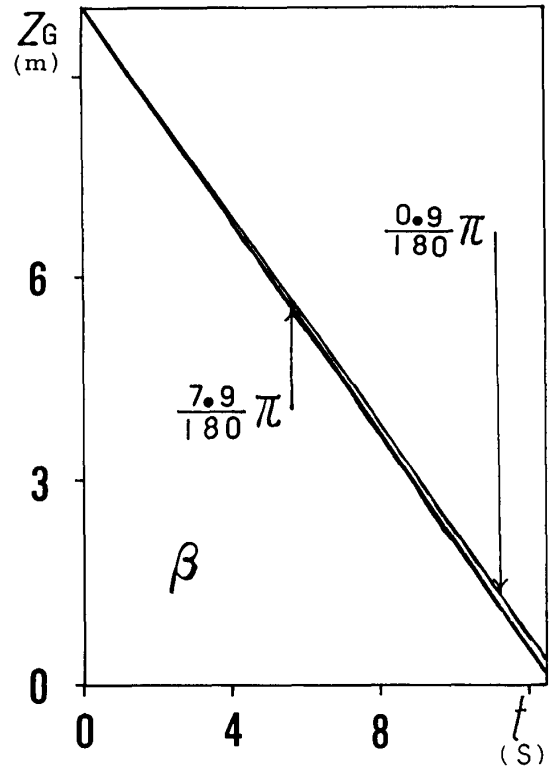


図 8-1 飛行 III ($\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

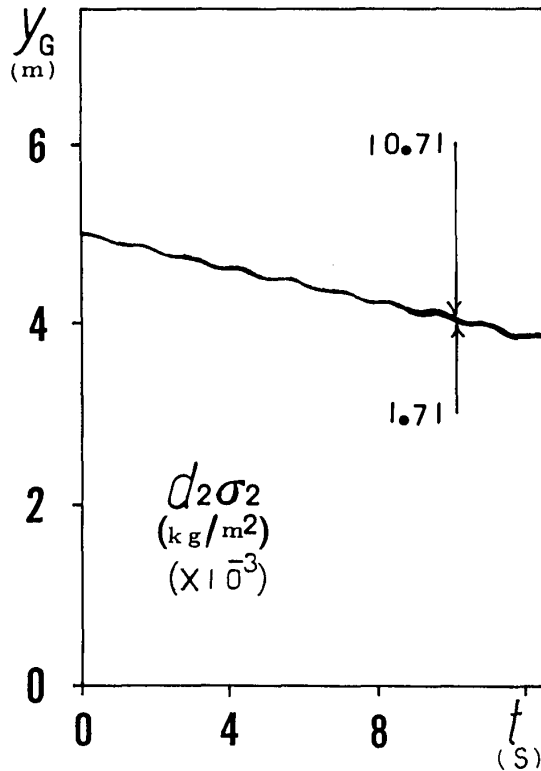


図 7-5 飛行 II ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m²)

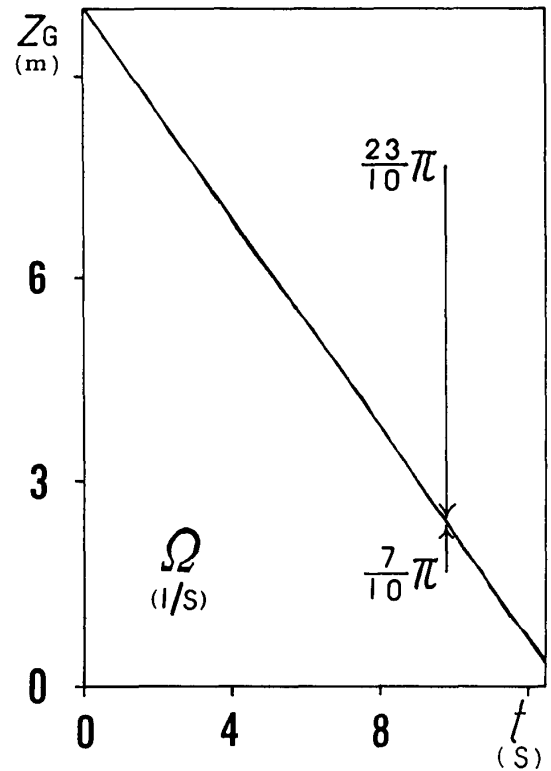


図 8-2 飛行 III ($\beta = 2.9\pi/180$, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

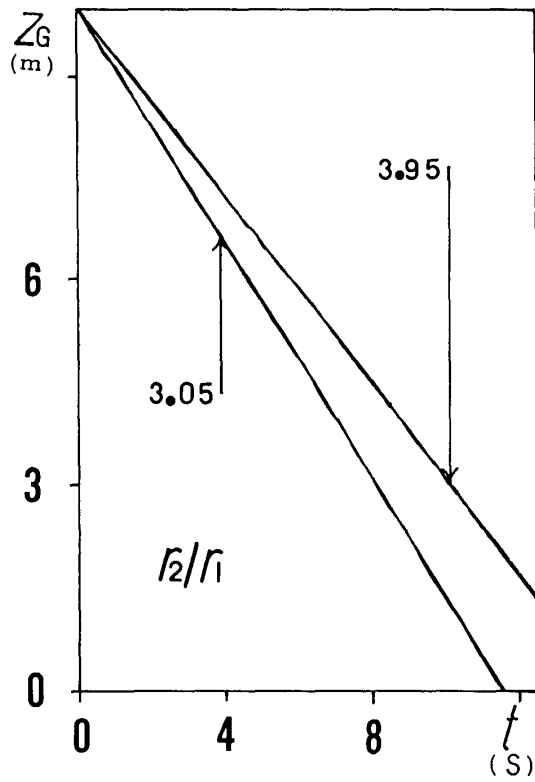


図 8-3 飛行Ⅲ ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m², $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

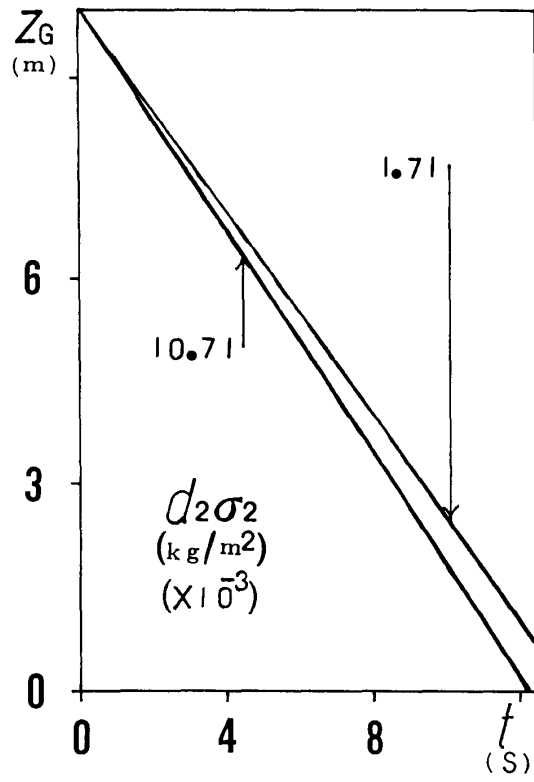


図 8-5 飛行Ⅲ ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_1\sigma_1 = 4.94 \times 10^{-1}$ kg/m²)

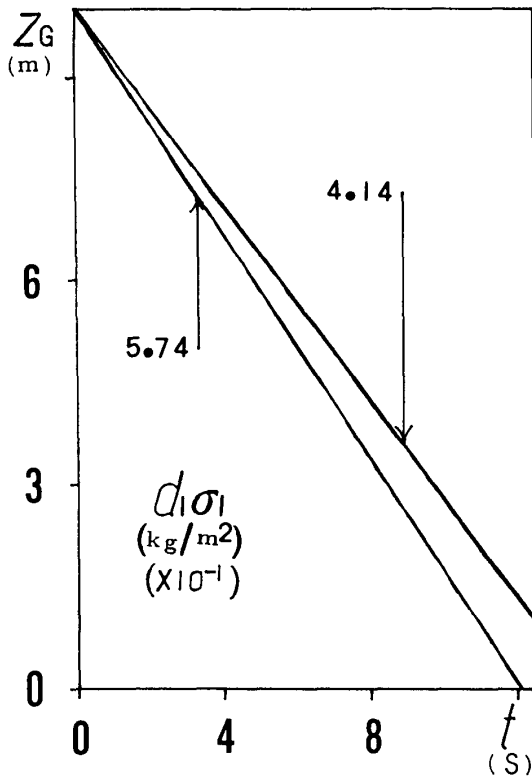


図 8-4 飛行Ⅲ ($\beta = 2.9\pi/180$, $\Omega = 15\pi/10$ 1/s, $r_2/r_1 = 3.45$, $d_2\sigma_2 = 5.71 \times 10^{-3}$ kg/m²)

その密度の積 $d_1\sigma_1$ や羽根の厚さとその密度の積 $d_2\sigma_2$ (や当然のことながら規則運動を始めた高さ H) によって異なっている。けれども、種子の中心と種の中心を通る直線の水平面となす角度 β や種子の角速度の大きさ Ω はほとんどこれに関係していない (図 2-1 ~ 図 2-4)。

山のいもの種子は種子の異なり (r_2/r_1 や $d_1\sigma_1$ や $d_2\sigma_2$ の値の異なり) によって広く薄く風に乗って飛散する。

d) 飛 跡

山のいもの種子の運動は空飛ぶ円板 (UFO) のそれを連想させる。ここで得られた種子の飛跡はテレビ等で見たものと十分類似している。種子の中心と種の中心を通る直線の水平面となす角度 β が大きいほどまた種子の自転の角速度の大きさ Ω が小さいほど、飛跡の直進性が失われている。けれども、種子と種の半径の比 r_2/r_1 や種の厚さとその密度の積 $d_1\sigma_1$ や羽根の厚さとその密度の積 $d_2\sigma_2$ はこれにあまり関与していない (図 3-1 ~ 図 5-5)。

山のいもの種子の空飛ぶ円板のようなさまざまな運動は飛行形態の異なり (β や Ω の値の異なり) によって強く現われている。

e) 飛 行

山のいもの種子の水平方向への飛行は種子の中心と種の中心を通る直線の水平面となす角度 β が大きいほどまた種子の角速度の大きさ Ω が小さいほど大きい。けれども、種子と種の半径の比 r_2/r_1 や種の厚さとその密度の積 $d_1\sigma_1$ や羽根の厚さとその密度の積 $d_2\sigma_2$ による影響は少ない (図 6-1 ~ 図 7-5)。

種子の鉛直方向への飛行はどの種子もほぼ等速な落下運動をしている。この速さは種子と種の半径の比 r_2/r_1 が小さいほど大きく、種の厚さとその密度の積 $d_1\sigma_1$ や羽根の厚さとその密度の積 $d_2\sigma_2$ が大きいほど大きい。けれども、種子の中心と種の中心を通る直線の水平面となす角度 β や種子の角速度の大きさ Ω の影響は少ない (図 8-1 ~ 図 8-5)。

f) そ の 他

種子の飛行形態の異なり (β や Ω の値の異なり) と種子の異なり (r_2/r_1 や $d_1\sigma_1$ や $d_2\sigma_2$ の値の異なり) は互に補足しあって種の繁栄をもたらせている。

4. む す び

次に、種子が落下し始めたときの不規則運動を調査したい。更に、青桐のような舟形の種子、つくばねうつぎのように多くの羽根をもっている種子、等の飛行を解明したい。

参 考 文 献

- 1) 沼田 真編：種子の科学 (KK研成社, 東京, 1986) 初版, P. 62
- 2) H. Hertel : *Biologie und Technik, Struktur-Form-Bewegung* (Krausskopf-Verlag, Mainz, 1963)

- ハインリッヒ ヘルテル著(土屋喜一訳)：バイオエンジニアリング—生物の形と運動に学ぶ—(KK朝倉書店，東京，1985) 初版，E, P. 87
- 3) 大亀 衛・玉垣春彦・水川孝志：岡山理科大学紀要，第25号，A, (1989)，p. 75
 - 4) 大亀 衛・加藤泰治・楨原義典：岡山理科大学紀要，第26号，A, (1990)，p. 41
 - 5) 牧野富太郎著・本田正次編修：原色牧野植物大圖鑑 (KK北隆館，東京，1986) 5版，P. 760
 - 6) 北村四郎・村田 源・小山鐵夫共著：原色日本植物図鑑草本編III (KK保育社，大阪，1987) 初版，p. 80
 - 7) 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
 - 8) 日本化学会編：化学便覧基礎編II (丸善KK，東京，1966) 初版，p. 431
 - 9) 東京天文台編纂：理科年表 (丸善KK，東京，1967) 第40冊，地学部，p. 130

Aeronautical Movement of a Winged Seed —— Seeds of Yam ——

Mamoru OHKAME, Tuyosi KISIMOTO

Department of Applied Physics, Okayama

University of Science

1-1 Ridaicho, Okayama 700, Japan

(Received September 30, 1991)

The equations of motion for a seed of yam (*Dioscorea japonica* Thunberg) are made, and the aeronautical movement of seeds of yam is investigated by means of numerical calculation. The aeronautical movement is generally different from each other, and the seeds are carried down extensively on the wind. This is one of the reasons why yams grow well in spite of natural selection.