

回収用ロータの起動特性

東 昭・中 村 良 也

1. 序

気球からの観測機器の回収方法の一つとして先にロータによる回収を提案した。そこでは定常降下中の回収装置の降下率、前進速度等がピッチ角に対してどういう値をとるかについて述べた[1]、今回は降下開始後、定常状態に達するまでの起動特性を、垂直降下するリジッドロータ (図1(a)) について述べる。

さらにフラッピングの非定常特性を入れた、斜めに降下する関節式ロータ (図1(c)) の問題が残っているが、これは次の機会にゆずりたい。

2. 記 号

a ; 2次元揚力傾斜	T ; 推力
b ; ブレード枚数	U_P ; ロータ面に垂直な翼素まわりの流れの速度成分
B ; ティップロスファクタ	U_T ; ロータ面に沿った翼素まわりの流れの速度成分
c ; ブレードコード	
c_l ; 揚力係数	
c_d ; 抗力係数	
C_T ; 無次元化推力	x ; 無次元化半径位置 $\left(= \frac{r}{R} \right)$
C_Q ; 無次元化トルク	x_{12} ; 失速を始める無次元化半径位置
g ; 重力加速度	z ; 高度 (上向きを正)
J ; ロータ回転部慣性能率	W ; 回収装置重量
n ; 荷重倍数	α_R ; 翼素有効迎角
Q ; トルク	β ; フラッピング角
r ; ロータ半径位置	θ_0 ; コレクティブピッチ角
R ; ロータ半径	λ ; 流入比
S ; ロータディスク面積	σ ; ソリディティ $(=bc/\pi R)$
ρ ; 大気密度	$(\dot{})$; 時間微分 $(=d()/dt)$
Ω ; ロータ回転数	

3. 問題の記述

3.1 運動方程式

垂直降下するロータの動特性を調べるため、いわゆるオートロテーション時におけるロータの運動方程式を導く。系は上下方向の力のつりあいと、ロータの回転トルクのつりあいに関する次の2元連立微分方程式で記述される。

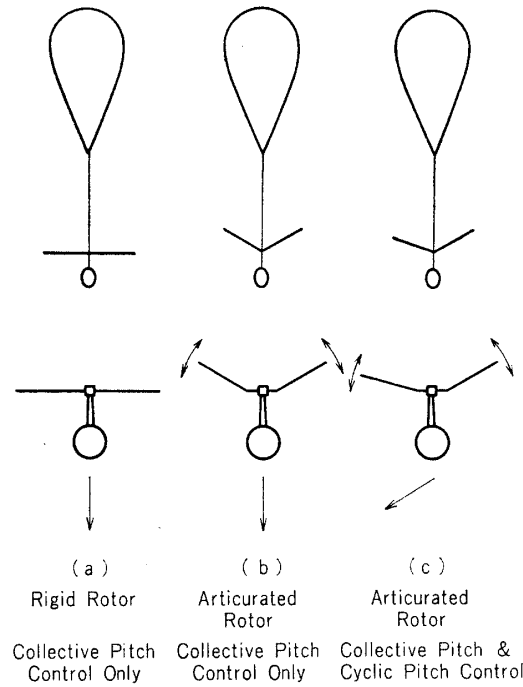


図1 回収用ロータ概念図

$$-I\pi = Q(\Omega, z, \dot{z}, \beta; t) \quad (1)$$

$$W/gz = T(\Omega, z, \dot{z}, \beta; t) - W \quad (2)$$

降下開始時には U_P/U_T , β が大であることに注意して次のように Blade element theory を導く.

$$\phi = \tan^{-1}(U_P/U_T) \quad (3)$$

$$\alpha_R = \theta_0 - \phi \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} dT &= (dL \cos \phi - dD \sin \phi) \cos \beta \\ dQ &= (dL \sin \phi + dD \cos \phi) r \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} dL &= \rho(U_T^2 + U_P^2) c_l c dr / 2 \\ dD &= \rho(U_T^2 + U_P^2) c_d c dr / 2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} c_l^* &= a\alpha (-12^\circ \leq \alpha \leq 12^\circ) \\ &= 0.9(12^\circ \leq \alpha) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\therefore \left. \begin{aligned} T &= \sum_b \rho c \left\{ \int_0^{BR} c_l U_T \sqrt{U_T^2 + U_P^2} \cos \beta dr - \int^R c_d U_P \sqrt{U_T^2 + U_P^2} \cos \beta dr \right\} / 2 \\ Q &= \sum_b \rho c \left\{ \int_0^{BR} c_l U_P \sqrt{U_T^2 + U_P^2} r \cos \beta dr + \int^R c_d U_T \sqrt{U_T^2 + U_P^2} r \cos \beta dr \right\} / 2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

T , Q の積分を遂行しこれらを無次元化すると,

$$\left. \begin{aligned} T &= \rho S (R\Omega)^2 C_T \\ Q &= \rho S (R\Omega)^2 RC_Q \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

* NASA TND 248, 1960 を参考とした

$$\left. \begin{aligned} C_T &= (\sigma/2) \left\{ a \left(Q[C]_{x_{12}}^B - [A] \frac{\sqrt{\lambda^2 + B^2}/\lambda}{\sqrt{\lambda^2 + x_{12}^2/2}} \right) - \lambda c_d [B]_0^1 + 0.9 [C]_0^{x_{12}} \right\} \\ C_Q &= (\sigma/2) \left\{ \lambda a \left(\theta_0 [C]_{x_{12}}^B - [A] \frac{\sqrt{\lambda^2 + B^2}/\lambda}{\sqrt{\lambda^2 + x_{12}^2/2}} \right) + c_d [D] + 0.9 [C]_0^{x_{12}} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} [A]_a^b &= \int_a^b x \sqrt{x^2 + \lambda^2} \tan^{-1}(\lambda/x) dx \\ &= (\lambda^3/3) [y^3 \operatorname{cosec}^{-1} y - (y/2) \sqrt{y^2 - 1} - (1/2) \log |y + \sqrt{y^2 - 1}|]_a^b \\ [B]_a^b &= \int_a^b \sqrt{x^2 + \lambda^2} dx \\ &= [x \sqrt{x^2 + \lambda^2} + \lambda^2 \log |x + \sqrt{x^2 + \lambda^2}|]_a^b \\ [C]_a^b &= \int_a^b x \sqrt{x^2 + \lambda^2} dx \\ &= (1/3) [(x^2 + \lambda^2)^{3/2}]_a^b \\ [D]_a^b &= \int_a^b x^2 \sqrt{x^2 + \lambda^2} dx \\ &= (1/8) [2x(x^2 + \lambda^2)^{3/2} - \lambda^2 B]_a^b \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

一方運動量理論から

$$\lambda = \dot{z}/(R\Omega) + C_T/(2|\lambda|) \quad (12)$$

(10), (11), (12)式より C_T , C_Q を求め (1), (2)式に代入すれば系の運動方程式を得る。

3.2 数値解法

諸量を無次元化し, (1), (2)式を差分法によって, 時間の経過に対して次々に解いていく。図2にフローチャートを示す。 C_T , C_Q を求める際にくり返し計算が行なわれるので, 時間差分の刻み目の大きさによっては, かなりの計算時間を要する。

4. 計算結果

高度 30,000[m] の上空から落下させて, 着地に至るまでの諸量の時間変化の一例を示したものが図3である。この例ではロータ半径位置 $r=0.75R$ における翼素の有効迎角を常に一定値 ($\alpha_{r0.75}=3^\circ$) に保つようなフィードバックループを設定している。このときのコレクティブピッチ角をみると, 落下開始時において -87° にセットされ, 約 20 秒後には -62° という定常値に達している。回収装置にかかる慣性力は最高 1.2 g くらいで許容範囲内にある。構造強度上問題となるロータ回転数は 1,000[rpm] 程度におさえられていて適当な値

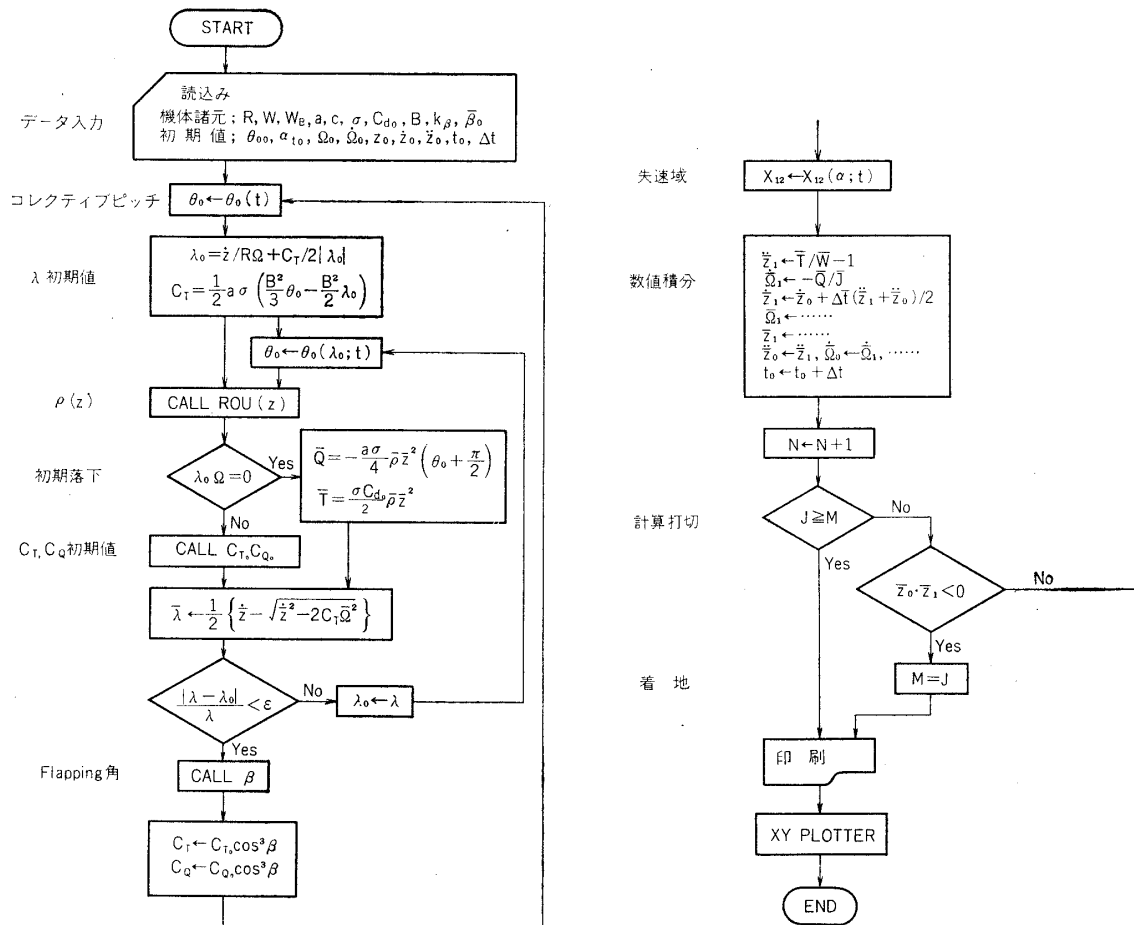


図2 回収用ロータ動特性計算の Flow chart

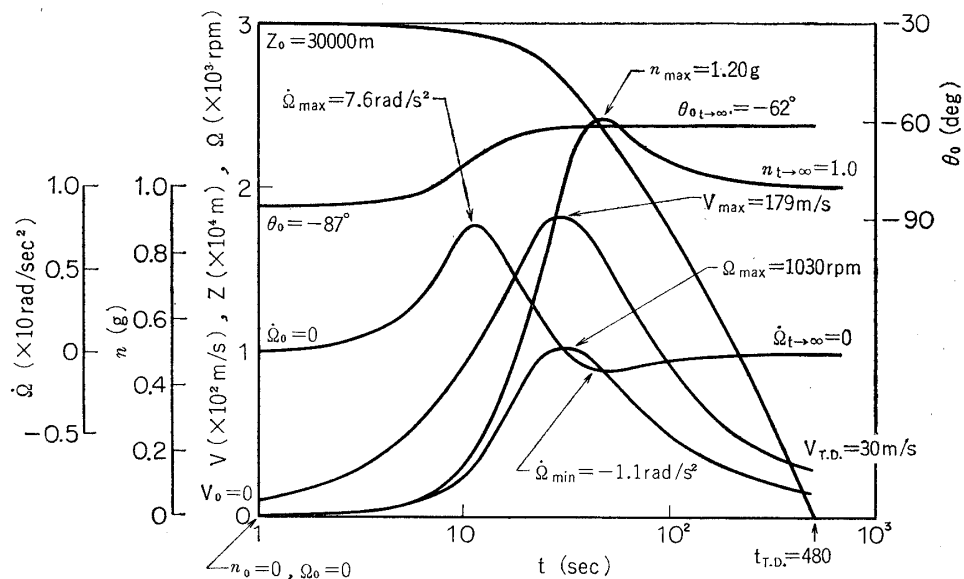
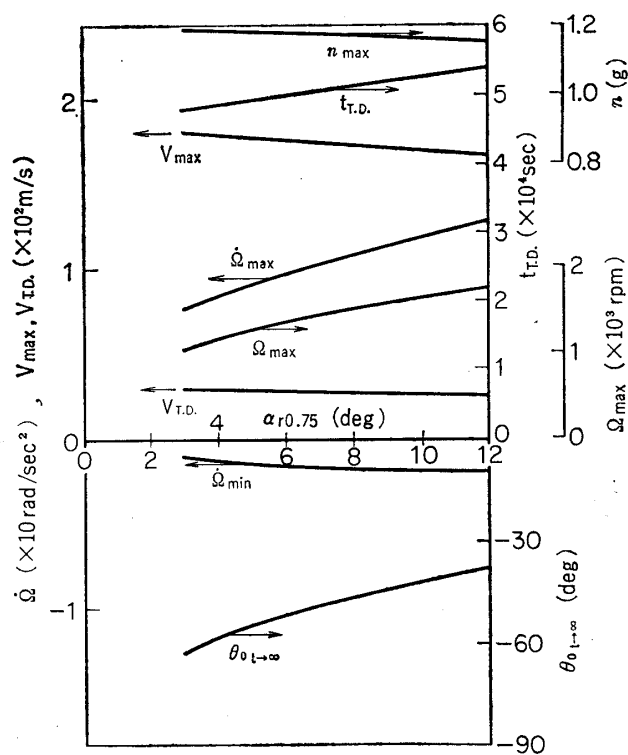
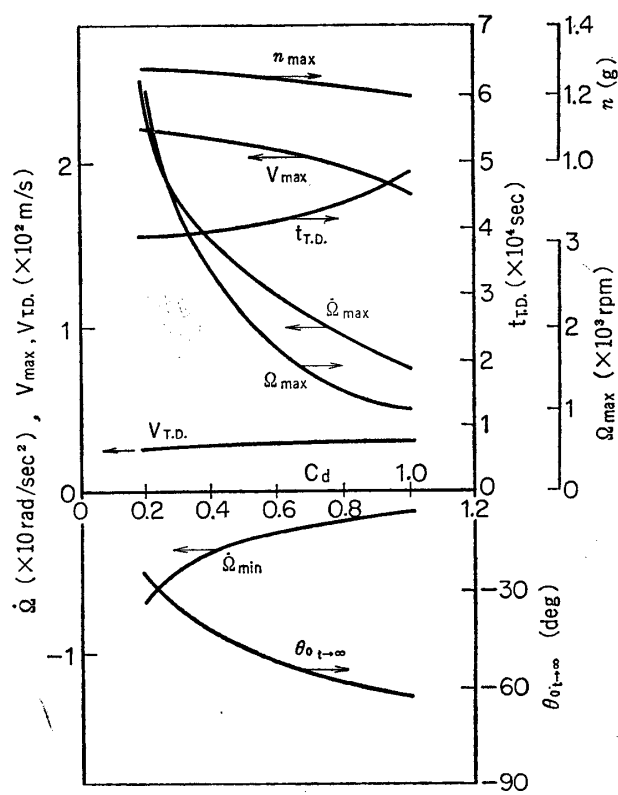


図3 垂直降下するリジッドロータの動特性

図4 垂直降下するリジッドロータの動特性 ($c_d=1$)図5 垂直降下するリジッドロータの動特性 ($\alpha_r=3 \text{ deg}$)

である。着地時における降下速度 $V_{T,D}$ が 30 [m/s] もあるが、実際には着地直前にいわゆるフレア操作を行なって、降下の運動エネルギーをロータの回転エネルギーに変換して一時的に推力を増し、ソフトランディングを実現し得る。

図4は、 $\alpha_{r0.75}$ を横軸にとったときの、最大荷重倍数 n_{\max} 、降下所要時間 $t_{T,D}$ 、最大降下速度 V_{\max} 、最大回転角加速度 $\dot{\Omega}_{\max}$ 、最小回転角加速度 $\dot{\Omega}_{\min}$ 、着地速度 $V_{T,D}$ 、定常コレクティブピッチ角 $\theta_{0t \rightarrow \infty}$ の変化を示したものである。迎角を大きくすると揚力が大きくなるが、降下の初期においてはこの揚力は主に回転トルクとして働くため、 $\dot{\Omega}_{\max}$ 、 $\dot{\Omega}_{\max}$ は増加する。また降下を始めてしばらくすると推力としても働き始め、迎角の大きい程（失速による損失が十分大きくならない範囲で） V_{\max} は小さな値におさえられ、 $t_{T,D}$ は増大する。

図3、図4の例では、回転数が過度に増加するのをおさえるために抵抗板を設け、翼の抵抗係数 c_d を1とおいたものであるが、図5は c_d を横軸にとって諸量の極値等をプロッ

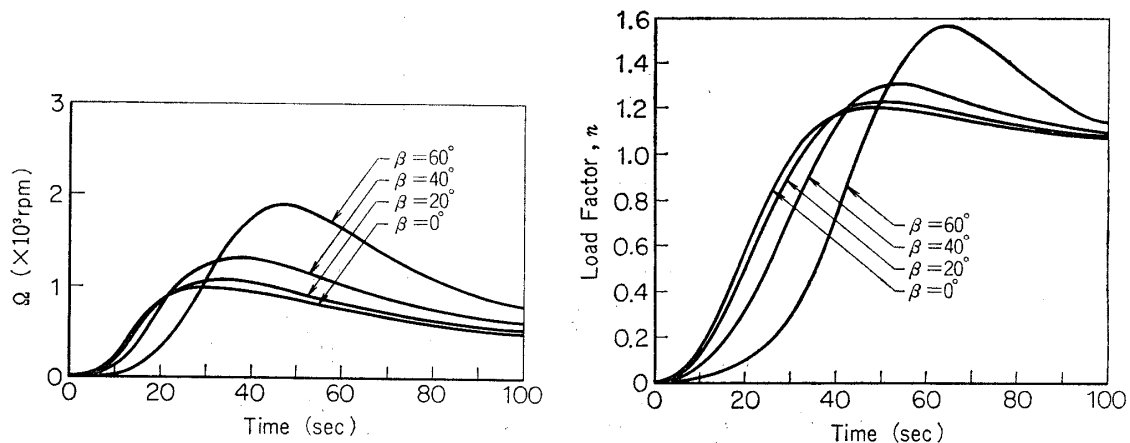
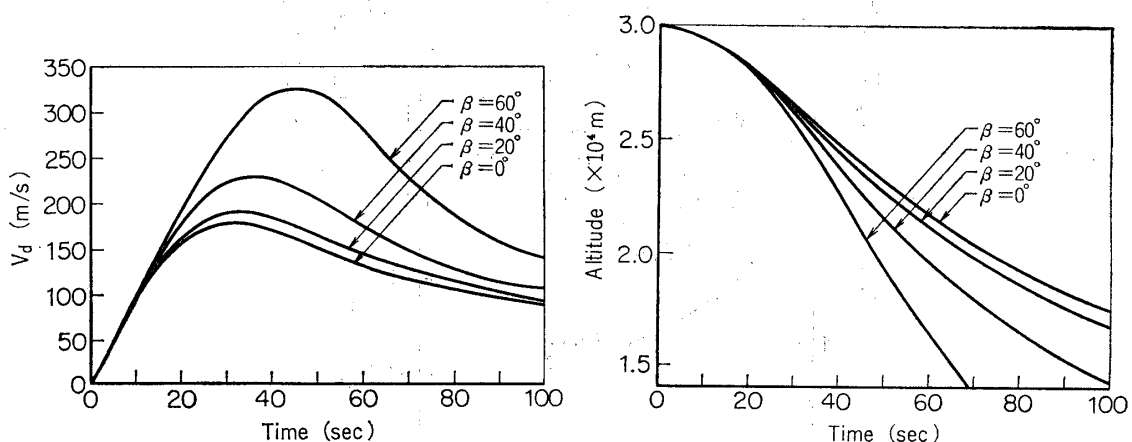


図6 (a)大きなコニング角のリジッドロータの降下特性(1)

(b)大きなコニング角のリジッドロータの降下特性(2)



(c)大きなコニング角のリジッドロータの降下特性(3)

(d)大きなコニング角のリジッドロータの降下特性(4)

トしたものである。 c_d の増加と共に Ω_{\max} は急激に減少して λ が増加するので $\theta_{0t \rightarrow \infty}$ は減少していく。 n および V_{\max} は c_d の増加と共に減少し、 $t_{r,D}$ は増加している。

次にコニング角のあるリジッドロータについて調べてみる。これは将来フリーフラッピングロータについての動的挙動を調べるときの参考ともなる。図6(a)~(b)に回転数、高度、下降速度、荷重倍数の時間変化を示す。ロータの推力、回転トルクは $\cos^3\beta$ に比例する(式(1), (2))。したがって落下の初期においては β の大きい程回転数および荷重倍数、すなわち推力の立上りが悪い(図6(a), (b))。これは落下速度を大きくするので(図6(c))結局最大回転数の増加につながり(図6(a))、最大の g を大きくする(図6(b))。

5. 考 察

高度 30,000[m] の上空から垂直降下する回収用リジッドロータ (全備重量 20[kg], ロータ半径 1[m]) について、特に最大回転数、最大荷重倍数、着地速度に注目して降下特性を調べたところ、起動トルクは十分あることがわかった。むしろ過大な回転数をおさえるために回転系のダンパーを必要とし、これとコレクティブピッチ角をパラメタにとってみると、最大回転数や最大荷重倍数の点で、例えば $c_d=1$, $\alpha_{r0.75}=3^\circ$ が適当な組み合わせであると言える。この値は、ロータの翼面荷重と密接な関係があるので今後ロータ諸元をパラメタにとって検討することが必要である。また計算では迎角制御を行なっているが、実機においては得策ではないので、計算結果を参考にして例えばタイマによるオープンループコントロールを行なうことが考えられる。

コニング角については最大回転数および最大荷重倍数をおさえる意味から、またすみやかに定常状態に達する意味からも、 0° に近い程良い。したがって関節式ロータにおいて折り込まれたブレードはすみやかに開かれることが望ましい。

1974年1月30日 航空力学部

参 考 文 献

- [1] 東 昭: 大気球シンポジウム, 東京大学宇宙航空研究所, 1973.