

# 無人ヘリコプタの開発



R & D 開発部  
森 谷 隆

## 1. は じ め に

ヘリコプタにはメインロータと反トルクを打ちけすテールロータがついているのが一般的だが、ヤマハではメインロータを二重にした同軸反転型の小型無人ヘリコプタの研究開発を行っている。

本機は(社)農林水産航空協会のもとで、経済性や操作性能を高める遠隔操縦小型ヘリコプタの研究から生まれたもので、テールロータのない同軸反転方式が採用された。この特徴は小型、軽量化が容易で全方位の運動を容易にすることである。

当社は昭和58年度から研究に参加し、現在に至っている。

ヘリコプタの最大の特徴は自在に動くロータを操ることで空中静止（ホバリング）させたり、3次元空間を自由に飛び廻ることである。その反面常に発散しようとする不安定さが伴っており、更に本機は二枚のロータ面をコントロールする必要がある。

開発にあたってはこのロータを含む機体固有の動特性を把握することと、操作性能を向上するため自動姿勢制御装置を開発することにした。

これまでにシミュレーションやフライト試験を通してほぼ技術的な見通しが得られたためここに紹介する

## 2. 技術要素

この開発にはハード面のみならず、制御プログラムやフェイルセーフのつくり込みなどのソフト開発及び運用技術や利用技術などを含むシステムを構想しながら開発を進めてきた。

図1にこのプロジェクトの技術要素をまとめてみた。

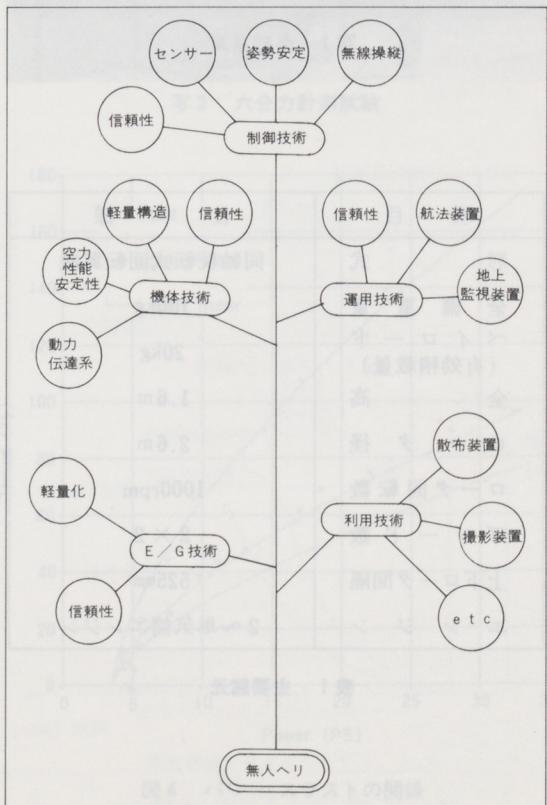


図1 無人ヘリの技術要素

### 3. 機体の概要

本機の基本計画にあたってはパワーを最も必要とするホバリング飛行における重量、ロータ直径、誘導パワーの関係を求め、ホバリング飛行時の性能計算とそれに基く機体の形状を選定した。

その結果、全備重量100kg(ペイロード20kg)、のときに適合するロータ直径を2.6Mに定めた。

写1に外観を示す。また主要諸元を表1に示す。



写1 外観写真

項目	仕様
形 式	同軸反転式回転翼機
全 備 重 量	100kg
ペイロード (有効積載量)	20kg
全 高	1.6m
ロ ー タ 径	2.6m
ロ ー タ 回 転 数	1000rpm
ブ レ ー ド 数	2×2
上 下 ロ ー タ 間 隔	525mm
エ ン ジ ン	2～単気筒エンジン

表1 主要諸元

### 4. 自動姿勢制御装置の開発

#### 4-1 姿勢制御の導入

R C (ラジオコントロール) へりは実用的に多くの可能性をもっている。しかしその操縦はきわめてむずかしく、かなりの熟練を要する。また熟練したパイロットでも風などの外乱が入ると正確に位置を保つことは決して容易ではない。

従ってある程度操縦を容易にしたり、姿勢や位置に対する安定性を増強できる制御系をおり込めば、その利用価値を高められるはずである。

このような狙いから初心者にも簡単に飛行できることを前提に姿勢制御にとりくむことにした。

将来的には図2に示すような、航法装置を搭載して位置や移動を全て自動制御対象にすることが考えられる。

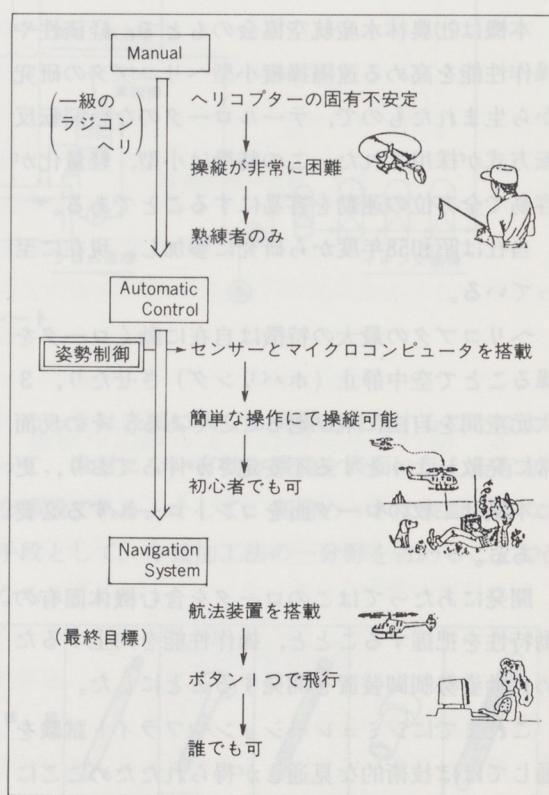


図2 目標と到達レベル

4-2 制御対象の決定

ヘリコプタに限らず航空機の運動の自由度は図3で示すX, Y, Z軸(ヨー軸あるいは高度軸)と各軸まわりの回転角であるピッチ、ロール、ヨーを合せた6自由度がある。

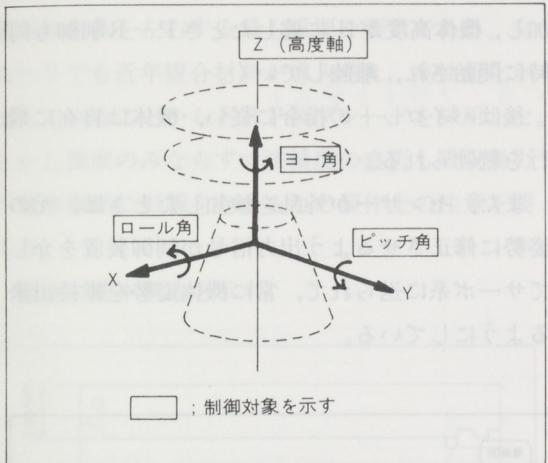


図3 航空機の自由度

機体の固有安定を除けば姿勢を支配する自由度は各軸廻りの回転角(P, R, Y)である。また安定したホバリングをさせるためには一定高度を維持させることと、ロータ回転数を制御することが必要になる。これらを制御対象に決定した。

#### 〈制御対象〉

- ①ピッチ角 (P)
  - ②ロール角 (R)
  - ③ヨー角 (Y)
  - ④高度 (Z) (H)
  - ⑤ロータ回転数
- 図3 □印

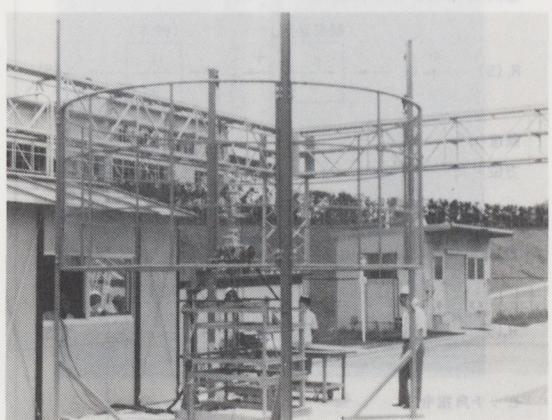
X, Y軸は今後の航法システムの研究開発にゆだねることとし、当面マニュアルで行っていく。

#### 4-3 空力特性

ホバリング(空中静止)や前進飛行時の性能は吹きおろし一定の運動量理論と翼素理論をくみ合わせた単純モデル化した計算で求めた。

このロータ特性を検証するため、六分力計を作成して実際のロータ空力特性を計測した。

計測試験風景を写2へ、計測データの一例としてパワー・スラスト曲線を図4に示す。各々のカーブはホバリング時の理論計算値であり、実測データもほぼ一致している。なおロワーロータのみの計測データは略いた。



写2 六分力計測試験

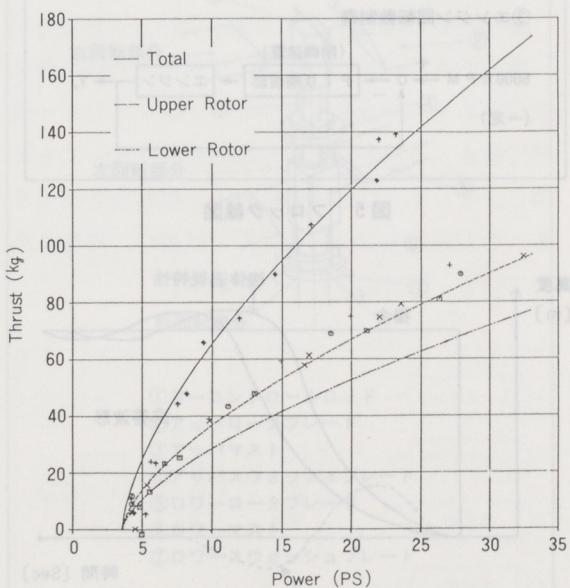


図4 パワー・スラストの関係

#### 4-4 動的特性の検討

4-3の結果をもとにホバリング飛行時の数式モデルを導き、制御系の設計を行った。

求められた運動方程式よりコレクティブピッチ系(H-Y)の組と、サイクリックピッチ系(P-R)の組に分離できることがわかった。

さらにエンジン回転数制御系を加えたそれぞれの組のブロック線図を図5に示す。またシミュレーション特性の一例として高度軸の応答波形を図6に示す。

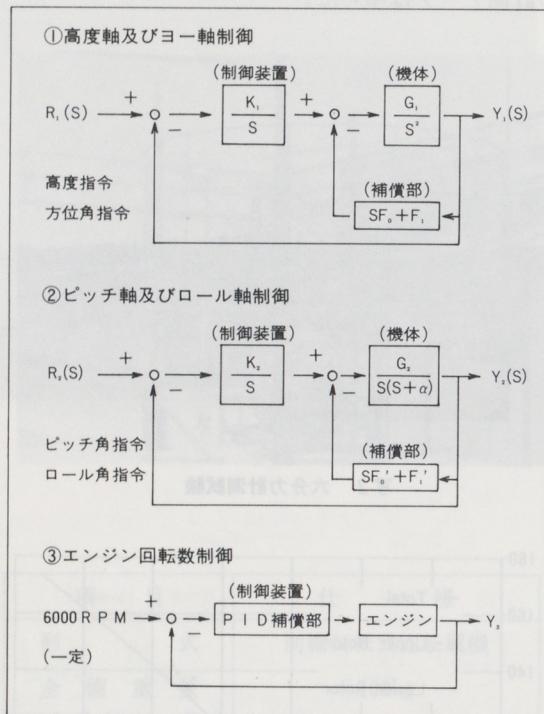


図5 ブロック線図

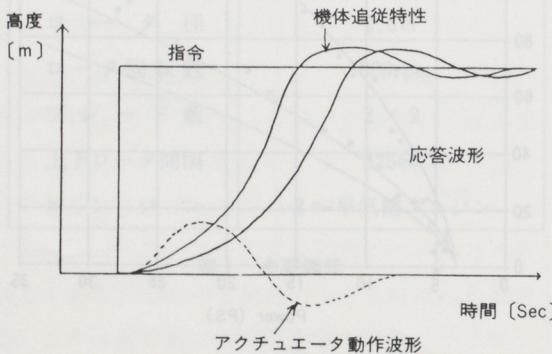


図6 シミュレーション特性(高度)

#### 4-5 制御プログラム

本機により込んだ制御プログラムのフローを図7に示す。

制御がスタートするとオートモードに切り換られ、エンジン回転数制御により $N_e$  rpmまで上昇すると、まずH-Y制御がスタートする。

高度指令を受信するとコレクティブピッチが増加し、機体高度が $H_s$ に達したときP-R制御も同時に開始され、離陸していく。

後はパイロットの指令に従い、機体は自在に飛行を続けられる。

また、センサーが外乱を検知したときは、元の姿勢に修正させるよう出力信号が制御装置を介してサーボ系に送られて、常に機体姿勢を維持出来るようにしている。

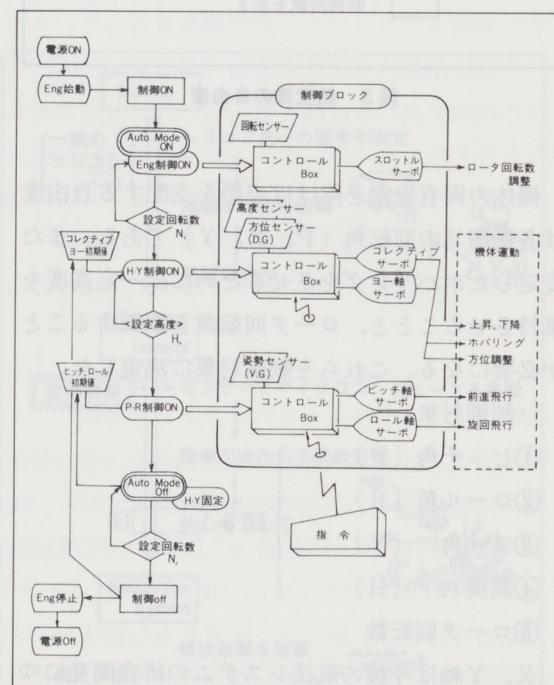


図7 制御プログラム

## 5. 機体構成

ここでは特徴的なロータブレード、ピッチコントロール及びセンサーを紹介する。

### 5-1 ロータブレード

ヘリのブレードは揚力と操作力を受けもち、運動特性全体を左右する最も重要な要素である。有人ヘリでも近年複合材料が導入され、高性能化が進んでいることからFRP製ブレードを採用した。しかし強度のみならず寸法精度の良否も吸収馬力や機体振動に影響を与えるため製作上の注意を要する。

図8に基本構造を示す。

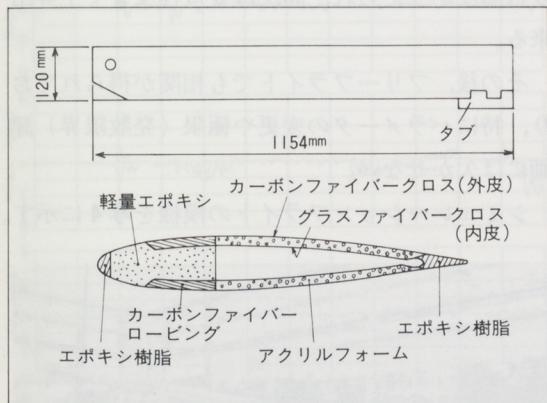


図8 ブレード基本構造

### 5-2 ピッチコントロール(写3、図9による)

ピッチコントロールは3系列に分けられる。

#### ①コレクティブピッチコントロール

ロータブレードのピッチ角を上下とも増減させることにより、ロータが発生する全スラストを加減して上昇下降を行う。

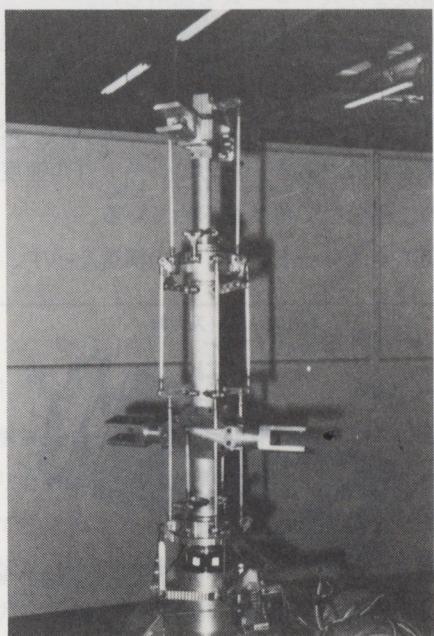
#### ②サイクリックピッチコントロール

回転しているロータブレードの位相角によりピッチ角の差を生じさせ全スラストの前後(P)や左右方向(R)に分力を発生させ機体を前後左右に移動させる。

#### ③ヨーコントロール

上下ロータのピッチ角を加減することにより、機首方向を変える。

シングルロータでのテールロータ(ラダー)に相当するものである。



写3 リンケージ

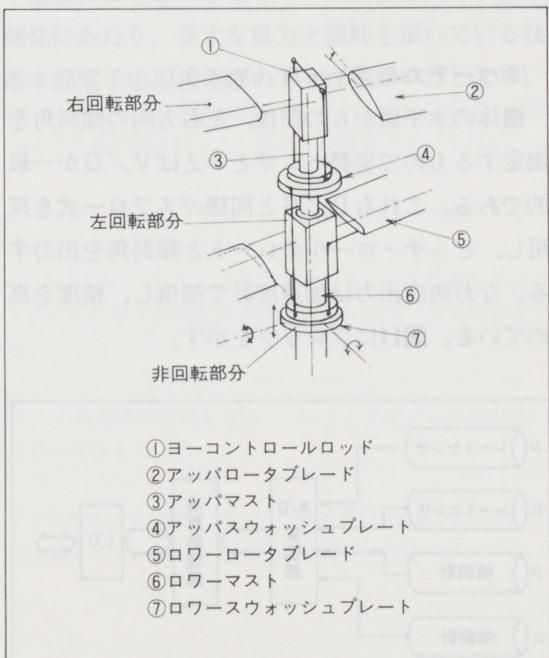


図9 ピッチコントロール

### 4-3 センサー

#### (1) ディレクショナルジャイロ (D/G)

方位を検出する手段として磁気コンパスやジャイロが用いられる。ジャイロの中でも機械、光、振動やガスフロー式など種類も多いが、小型軽量で高精度なガスフロー式を採用した。

これは圧電素子を使用してガスフローを発生し、回転させるとコリオリの力によりガスフローが曲げられ、ブリッジに組んだ熱線の抵抗値の変化を利用してるものである。出力はレート（角速度）であるので積分して角度を求めている。

図10にガスレートジャイロの構造を示す。

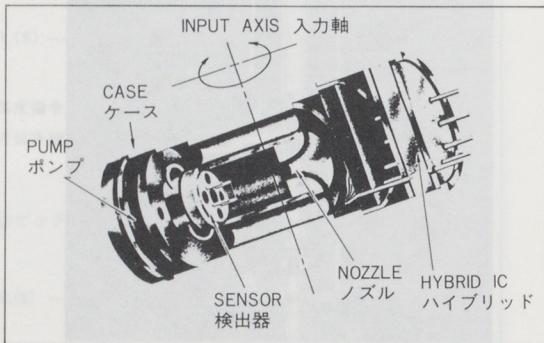


図10 ガスレートジャイロ

#### (2) バーチカルジャイロ (V/G)

機体の水平面からの前後、左右方向の傾斜角を測定するもので姿勢センサといえばV/Gが一般的である。これもD/Gと同様ガスフロー式を採用し、ピッチ・ロールのレートと傾斜角を出力する。なお角度出力は加速度計で補償し、精度を高めている。図11にブロックを示す。

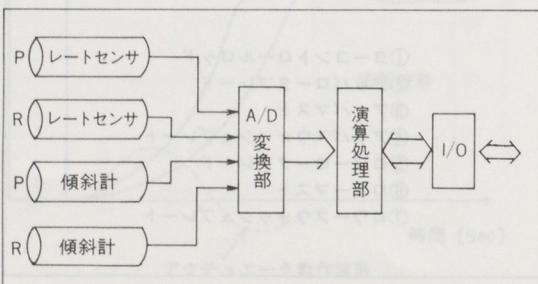


図11 バーチカルジャイロ

#### (3) アルチチュードセンサ (高度計)

対地高度と気圧高度センサを使っている。

対地高度は電波、光、超音波式などの評価から対地高度0~数mの検出精度や環境特性を考慮し、超音波センサをとり入れた。

また気圧センサは、高度10m程度よりソフト処理を施すことで実用化出来そうである。

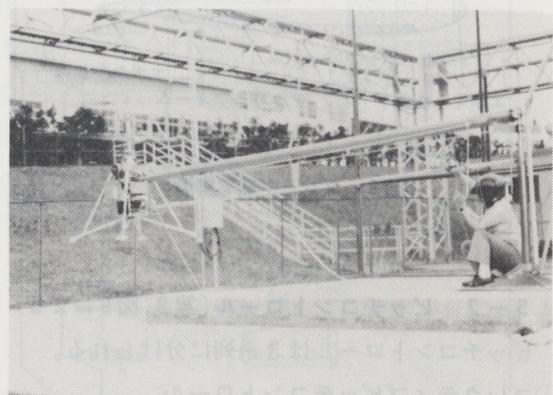
## 6. フライトテスト

### 6-1 シミュレータによるフライト

初期の機体性能や制御系の検証あるいは改良評価のため、機体自由度を適当に変更できるフライトテストスタンド (F.T.S) を製作した。最大5自由度が与えられ、高度は5m程度まで上昇出来る。

その後、フリーフライトでも相関が得られており、特にパラメータの変更や極限（発散限界）評価には欠かせない。

シミュレーションフライトの模様を写4に示す。



写4 FTSテスト

### 6-2 フリーフライト

F.T.S上で確認された個々の制御特性を総合的に検証するためフリーフライトを行っている。

高度センサの検出能力もあり3m程度の高度にとどめているものの、ホバリング時の安定性は非常に高く、経路飛行もパイロットの指令に十分追

従することがわかった。更に初心者にも簡単に操作出来ることから自動姿勢制御の有効性が証明された。

但し、高度センサーをはじめとするセンサ性能や信頼性の確保、指令に対する応答特性の改良、機体固有の運動性能の向上などが今後の課題といえる。

写5はフリーフライトである。またパイロットの操作（指令：破線で示す）に対する機体の追従特性（実線で示す）が図12である。上よりロール、ピッチ、ヨー、高度、エンジン回転数である。

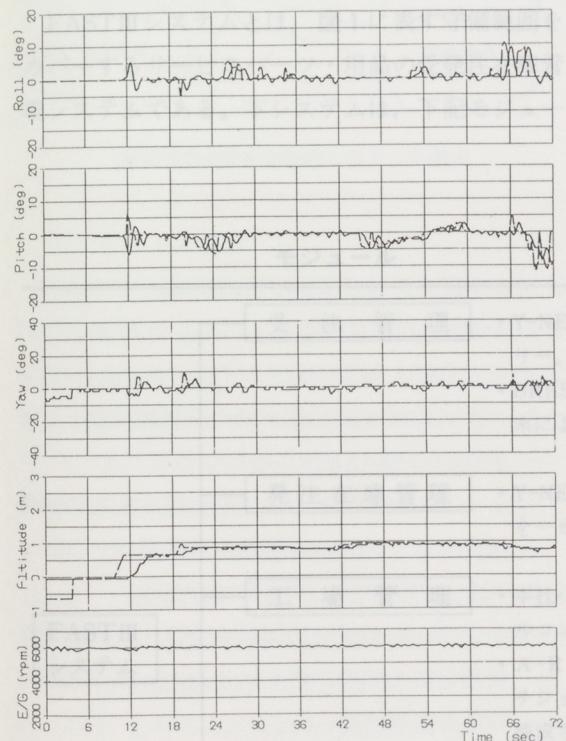


図12 フリーフライトデータ



写5 フリーフライト

## 7. おわりに

二重反転ロータヘリとの出会い、3次元空間にピタリと決める姿勢制御へのチャレンジ。ともに難解で手にあまる日々も続いたが、フリーフライトで徐々にその成果もあらわれ、R Cヘリ実用化の有力な手段としてそれぞれの課題を克服していきたい。

最後にこの紙面を借りて“自動姿勢制御装置”開発にあたり、多大な協力と援助を頂いている技術本部電子応用技術部の方々に感謝いたします。