

鹿児島県の特異性を考慮したドローンの研究

窪田 侑紀¹・永田 章人¹・東 聖悟¹・中村 慎悟²

¹第一工業大学 学部学生(Undergraduate) 航空工学科

²第一工業大学 教授(Professor) 航空工学科

(〒899-4395 鹿児島県霧島市国分中央1-10-2)

E-mail:shingo-nakamura@daiichi-koudai.ac.jp

THE STUDY OF DRONES CONSIDERING THE CHARACTERISTICS OF KAGOSHIMA PREFECTURE WHERE HAS MANY ISLANDS.

Shingo Nakamura

Dep. of Aeronautics Eng., Daiichi Institute of Technology
1-10-2 kokubu chuo, kirishima city, kagoshima prefecture, 899-
4395, Japan
shingo-nakamura@daiichi-koudai.ac.jp

Kagoshima Prefecture in Japan has 28 islands which are 33% of the total prefecture area and have a population of 171,652. The drones which are used in this area must have long range performance. We have designed our original drone which meet the requirement.

Key Words: Drone, Vertical Take-off and landing, Long range.

1. はじめに :

鹿児島県には28の離島が存在し、離島関係市町村数・離島住民人口・離島面積は全国で一位を占めている。従って、本土やこれらの離島間の物資輸送等にドローン(無人航空機)を使用するためには、長距離を輸送する能力が要求される。

現在ある様々なドローンをタイプ分けし、それらの特徴を考察し、鹿児島県に適した新型のドロンを構想したので報告する。

2. 鹿児島県の特異性 :

鹿児島県公式ホームページに掲載されている「数値で見る“かごしまの島々”」によると、鹿児島県には28の離島が存在し、離島関係市町村数・離島住民人口・離島面積は全国で一位を占めている。

また、代表的な離島間の距離と船を利用した時の到達時間を以下に示す。

鹿児島・屋久島間：約133km、4時間
屋久島・十島村間：約100km、18時間^(*)
十島村・奄美大島間：約166km、9時間
奄美大島・徳之島間：約86km、4時間
徳之島・与論島間：約96km、4時間
与論島・那覇間：約118km、4.5時間

(*)直行便がないため時間がかかる。

離島には、数多くの高齢者が生活しており、日常生活品や医療品等の頻繁な運搬や緊急の運搬が必要とされる。

現在、これらの運搬は、船や飛行機の定期便に頼っているが、必要時にタイムリーな供給ができない上、船は時間がかかる。また、空港や港からの運搬にも人手や時間等が必要となる。

もし、これらの離島間(約100km程度を想定)を飛び交うドローンが存在すれば、船よりも短時間に必要な箇所に必要物資を届けることができ、飛躍的な生活の向上が期待される。

また、災害時への適用も考えられる。

3. 主要ドローンのタイプ分け：

現在、世の中で、実用化されたり、開発中のドローンをタイプ分けし、その特徴を考察する。

3.1. 飛行機型ドローン：

空中での停止ができないが、高い高度を飛行することができ、長時間にわたる飛行を行ない、長い距離に到達できる。米国では、衛星を利用して空爆を行なっている。離着陸するためには、滑走路が必要であるが、カタパルトで離陸し、紐などに引っ掛けて、ゴムなどの柔らかい場所に墜落させて着陸する方式が採用されているものもある。アフリカのルアンダでは、薬品等の空中投下において、実用化している。主に、空中からの撮影や投下による物資輸送等に使用されている。

3.2. ヘリコプタ型ドローン：

飛行機型ではできない空中停止や低速での飛行ができる。マルチコプタ型より、高速で飛行できるが、飛行機型より低速でしか飛行できず、航続距離も短い。ダウンウォッシュを利用した農薬散布に実用化され、利用されていることが多い。撮影等にも利用されている。

3.3. マルチコプタ型ドローン：

現在、日本では一番広く普及しているドローン。空中停止や低速飛行ができるが、複数以上のブレードを稼働させるために、飛行時間や航続距離が他の型と比較すると短く、重量物を遠くに運搬することには、不向きと考えられる。主に可視範囲での撮影目的に使用されているが、地形や建物の測量にも利用されている。重量物の長距離運搬に各社が取り組んでいるが、実用化には至っていない。

3.4. 垂直離着陸型ドローン：

マルチコプタ型又はヘリコプタ型と飛行機型の良いところ取りを行なっているもの。離着陸はマルチコプタ型又はヘリコプタ型で行い、巡航はそれらより効率的な飛行機型で行なう。世界的に様々な試みが行なわれているが、未だに実用化には至っていない。実用化のためには、使用周波数帯・飛行高度・飛行領域等の法的な整備も必要である。

4. 各タイプの主要ドローンの性能等の比較：

使用機器により一概には言えないが、概略的に以下のように考える。

4.1. 最大飛行速度：

飛行機型 ≧ 垂直離着陸型 > ヘリコプタ型 ≧ マルチコプタ型

4.2. 最大飛行高度：

飛行機型 ≧ 垂直離着陸型 > ヘリコプタ型 ≧ マルチコプタ型

4.3. 最大航続距離：

飛行機型 ≧ 垂直離着陸型 > ヘリコプタ型 ≧ マルチコプタ型

4.4. 積載重量：

飛行機型 ≧ 垂直離着陸型 > ヘリコプタ型 ≧ マルチコプタ型

4.5. 空中停止：

飛行機型 ⇒ 不可能
垂直離着陸型・ヘリコプタ型・マルチコプタ型 ⇒ 可能

4.6. 携帯性：

飛行機型は、滑走路がある場所又はカタピラ及び着陸装置を運搬しなければならないので、固定された場所からの離着陸となる場合が多く、容易に携帯することは不可能と考えられる。

その他の型のものは、小型のトラック等に搭載して、必要な場所(農薬散布場所や測量場所等)に運搬できる。

4.7. 製作費用：

使用する材料の材質や動力(モーター)・蓄電池等の性能によって異なるが、一般人でも容易に操作でき、現在、最も普及しているマルチコプタ型が最も安価なものを提供している。

以下に上記考察の根拠となった実機の性能比較を示す。



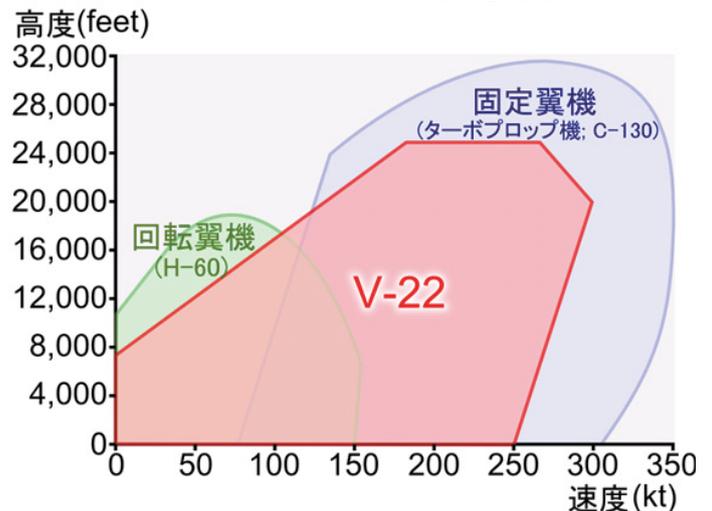
V-22 オsprey



H-60



C-130



	V-22	CH-46	比率
最大速度	486km/h	248km/h	1.96倍
積載重量	9,070kg	3,975kg	2.28倍
航続距離	602km	139km	4.3倍



V-22 オsprey



CH-46

5. 各タイプの主要ドローン例：

5.1. 飛行機型ドローン：

運用国：ルワンダ、名称：ジップライン、
使用目的：輸血の運搬、最大積載量：1.5kg
最大速度：100km/h

【特徴】

機体の中が格納庫になっており、その中にバッテリーや輸血袋を冷やす冷却装置が入っている。輸血袋はパラシュートがついた箱に入れて機体の中に入れ、機体が目的地の近くにきたら高度を下げ、機体の底面が開きパラシュートがついた物資を投下する。

操縦と航路はプログラムで設定しており、自動で目的地まで飛ぶ。離陸時は、専用のカタパルトがありそれに乗せて離陸し、着陸は機体の下にワイヤーを引っ掛ける機能があるので、ワイヤーを引っ掛けて空気の入ったやわらかいクッション上に着陸(墜落に近い)する。既に実用化されている。



専用のカタパルトからの離陸

5.2. ヘリコプタ型ドローン：

製造会社：ヤマハ、名称：RMAX、
使用目的：農薬散布、最大積載量：16kg
最大速度：15km/h

【特徴】

すべての舵をコンピューターで制御し、優れた飛行安定性と操縦性を実現する姿勢制御装置に加え、高度や速度までも検知するGPSを搭載し、微調整を要する速度コントロールやホバリングも容易に行える。農薬散布をより効率的且つ効果的にしている。



5.3. マルチコプタ型ドローン：

運用会社：ドコモ、名称：セルラドローン、
使用目的：離島への物資運搬、
最大積載量：1kg

【特徴】

日常用品などを離島に運搬する。操縦と航路はプログラムで設定して、自動で飛ぶ。まだ試作機段階なので最大積載量が増える可能性がある。LTE通信により通常のマルチコプターより遠くに飛べる。荷物はワイヤーで降ろす。



5.4. 垂直離着陸型ドローン：

5.4.1. 製造会社：SONY、
名称：AS-DT01-E、
使用目的：測量、最大積載量：10kg
最大速度：170km/h

【特徴】

機体の中心にプロペラがあり、主な推力はこのプロペラで発生させている。離陸するときはプロペラを下向きにして垂直に飛び、その後は、プロペラの向きを横方向に変えて水平飛行する。



- 5.4.2. 製造会社：エンルート、
 名称：クアッドプレーン、
 使用目的：運搬・空撮
 【特徴】

マルチコプターと固定翼を合体させたドローン。離着陸時には電動モーターで稼働し、飛行時はガソリンエンジンを動力にする。離着陸時のみ電気を使うため、搭載するバッテリーも小さくできる。垂直離陸から水平飛行へはフライトコントローラーが自律的に切り替えるため、離陸から着陸まで全自動での航行が可能。



6. 鹿児島県の特異性を考慮した独自ドローン：
 第2項に示したように、鹿児島県は、離島が多く、そこに暮らす住人の数は日本で一番多い。離島には、数多くの高齢者が生活しており、日常生活品や医療品等の頻繁な運搬や緊急の運搬が必要とされる。現在、これらの運搬は、船や飛行機の定期便に頼っているが、必要時にタイムリーな供給ができない上、船は時間がかかる。もし、これらの離島間(約100km程度を想定)を飛び交うドローンが存在すれば、飛躍的な生活の向上が期待される。

さらに、災害時には、災害状況の把握に貢献することが可能である。

第4.3項に示したように、航続距離が大きいのは、飛行機型か垂直離着陸機である。

第4.6項に示したように、飛行機型は常設の離着陸設備が必要とされることを考えると、垂直離着陸型が最も適したドローンであると結論付けられる。

但し、より効率的な物資運搬を実現するためには、既存のSONY及びエンルート等のものより、さらに、航空機の特性を広く利用するドローンが必要であると考え、以下に示す新型のドローンを提案する。

6.1.各部位の説明：

6.1.1.主翼：

(1)チルトウイングを採用：

このことにより、以下の利点が考えられる。

- マルチコプタによる垂直離着陸時に主翼平面に当たって生じる抵抗が激減する。
- 上を向いた主翼の主推進プロペラを必要に応じて回転させれば、マルチコプタだけでは垂直離陸できない重量物も持ち上げることができる。
- 離陸時に、主翼の迎角を取ってやれば、大きな揚力が生じさせることができ、通常の飛行機のフラップの役割を担うことができる。
- 着陸時には、飛行機モードで着陸態勢に入っている時に、主翼を90°回転させると、スピードブレーキの役割を担い、目標地点に正確に着陸できると共に、飛行機モードでの着陸時には、短い滑走距離で停止させることができる。

(a)は、過去にチルトウイングとチルトロータの競争時にクローズアップされた問題であるが、実機では重心位置の関係で主翼内に燃料を確保するために主翼の重量が重くなり、チルトウイングは重い主翼を回転させるための機構の重量が重くなるために、ペイロードが少なく、競争に負けた。しかし、模型の場合は、主翼内に燃料を入れないので、主翼の重量を軽く抑えることができるために、回転のための機構が簡素化でき、回転機構の重量は軽く抑えることができる。採用されたチルトウイングのオスプレーは、垂直離陸時には翼の半分程度を折りたたんで抵抗の軽減を図り運用している。



チルトウイング：Hiller X-18



チルトロータ：V-22：
翼の約半分を折りたたんでいる

(2) Upper Surface Blowing(USB)方式を採用：

主翼の主推進プロペラの排気を主翼のエルロンがきつてある位置の上面に当てる。これは、エルロンの剥離による操縦不能状態を防止すると共に、主翼の上面の流れを加速し、より大きな揚力を得る。また、垂直上昇から、水平飛行に移る過渡期に機体の沈下が生じた場合に、主翼の剥離を防止できる。過去にC-1輸送機を改造した実験機「飛鳥」で飛行試験を行い、その有効性が実証されている。

(注)第5.4.1項で紹介したSONYのAS-DT01-Eがデルタ翼を採用している理由は、垂直上昇から、水平飛行に移る過渡期に機体の沈下が生じ、そのことによる翼の失速を逃れるためと考えられる。このことは、垂直離着陸機のテールシッター型プロペラ機として、1954年にコンベアXFY-1とロッキードXFV-1が実験した時にデルタ翼を装備したコンベア機は失速による墜落を逃れ、直線翼のロッキード機は墜落した。デルタ翼は、大迎え角時には翼上面に大規模な渦が発生し、大きな抗力と引き替えに大揚力を得ることが可能であることから、急激に失速しないため、垂直離陸から水平飛行への転換の際に有利に働いた。USBも同等の効果が期待できる。



C-1輸送機を改造した「飛鳥」

(3) 主翼の平面型は矩形翼を採用：

矩形翼(長方形翼)は、構造が単純で安価に製造できる。また、失速状態付近において翼付け根に近いところから翼上面の流れが剥離し始める傾向がある。これにより、翼端付近に設けられているエルロン上の気流は翼全体が失速するまで剥離せず、主翼の全部が失速するまで操縦が可能となる。これに対し、テーパー翼(先細翼)は、失速状態に近付くと翼端から流れが剥離する特性があり、翼端にあるエルロンが剥離した翼の後流に入るために

真っ先にエルロンが効かなくなり、操縦ができなくなる。これを避けるために、翼に振り下げをつけるなどの工夫がなされている。



矩形翼のウルトラライトプレーン。

6.1.2. 尾翼：

(1) 水平尾翼はフライングテール(全可動尾翼)を採用：

エレベータを装着するより機構を単純化でき、舵の効きも大きくなる。

(2) 水平尾翼にもプロペラを装着する：

主翼と同様に、プロペラの排気をフライングテールの上面に当てる。このことにより、剥離時でも舵の効きを確保すると共に、垂直離着陸時にその大きな発生モーメントにより、縦の安定性をより容易に確保することが可能である。

フライングテール用プロペラ

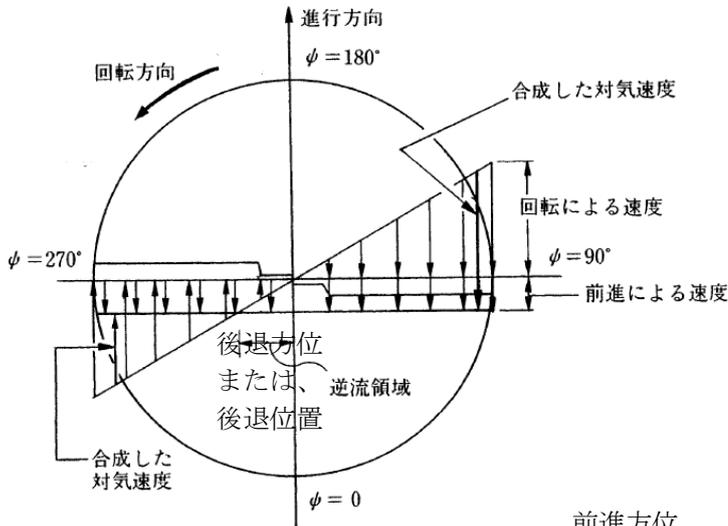


6.1.3. マルチコプタ用ブレード：

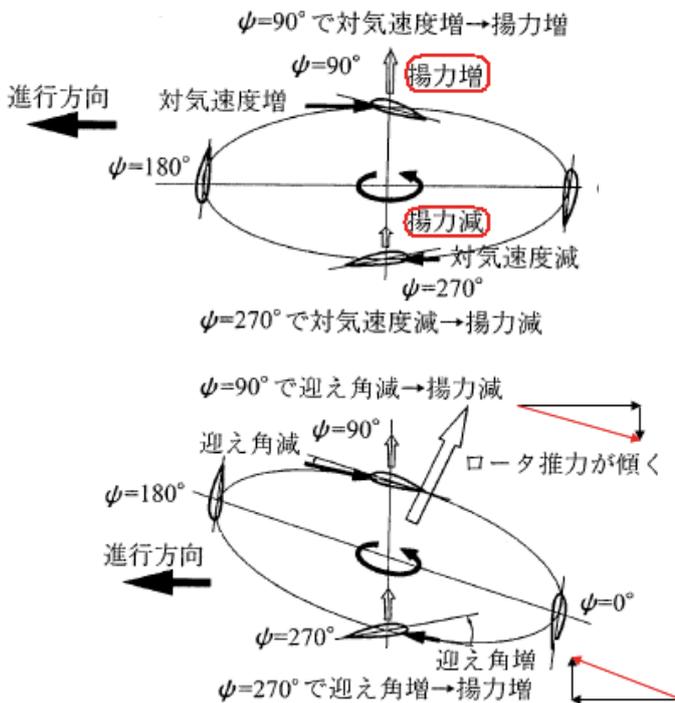
(1) デルタ・スリーヒンジの採用：

既存のマルチコプタが横風に弱いのは、回転している翼が一定方向から風を受けると、その風に向かって回転する側のブレードと、その風から逃げる方向に回転するブレードに当たる風の強さに差ができ、そのことが、互いのブレードの間に揚力の不均衡を生む。これが、フラップバック現象の原因で、マルチコプタはこの現象を回避する機構が設けられていないのが一般的である。実機のヘリコプタ又は高級ヘリコプタ模型では、

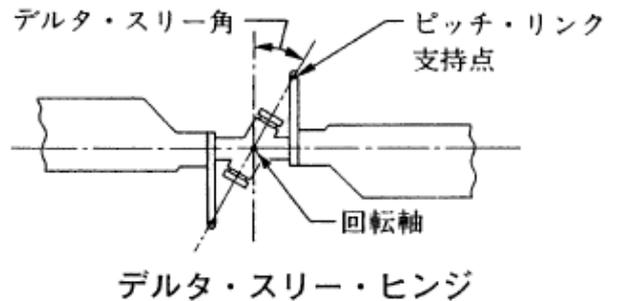
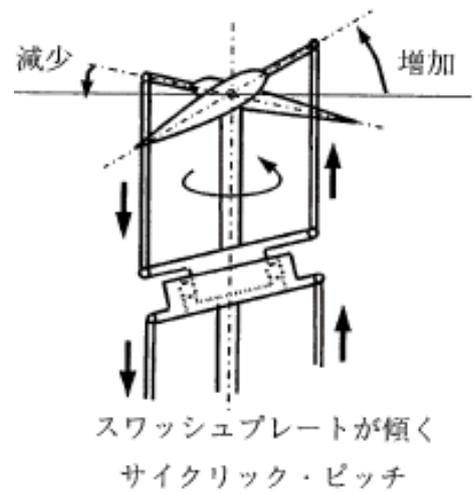
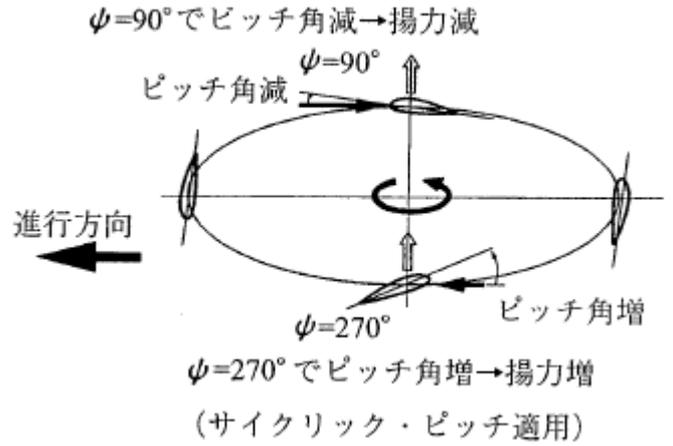
このフラップバック現象を回避するために、スワッシュプレートという機構を設けて、サイクルピッチによって回転中のブレード間に生じる揚力の不均衡をブレードの迎角を変化させることによって解消する。ヘリコプタのテールロータも同じ現象を生じるが、スワッシュプレートのような大掛かりな装置を装備するのではなく、デルタスリーヒンジと言う機構でスワッシュプレートと同じ効果を上げ、フラップバック現象によるテールロータの破損を回避している。マルチコプタのブレードにこのデルタスリーヒンジを装備することによって、横風にさらされた時に、風に流されることなく、しっかりと機体をコントロールすることが可能となる。



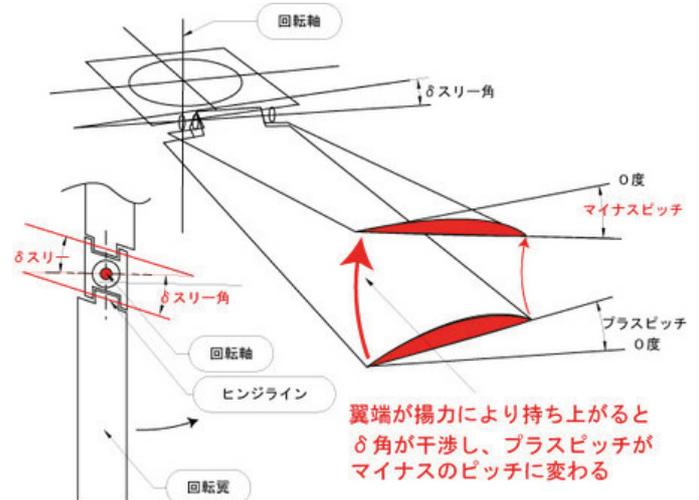
前進方位
または、
前進位置



フラップバック現象



デルタ・スリー・ヒンジ



翼端が揚力により持ち上がると δ角が干渉し、プラスピッチがマイナスのピッチに変わる

(2)オートジャイロ機能の採用:

水平飛行の巡航時には、4箇所マルチコプタの動力は切り、風車として回転させ、オートジャイロ機として揚力を得ると共に、その回転によって、飛行中の充電を可能とする。

オートジャイロとは、まだヘリコプタが実用化される前に普及していた飛行機の一部にヘリコプタのブレードを装備し、飛行中に風車として回転することによって、揚力を得る飛行機である。



オートジャイロ

6.1.4.車輪の装備:

機体に車輪を装着し、必要に応じて、垂直離着陸ではなく、通常の飛行機での離着陸を可能とさせる。マルチコプタを使用する垂直上昇及び下降時は、ブレードの回転による空気力で自重を支えなければならないので、大変大きな動力を必要とし、そのことがマルチコプタの航続距離や航続時間の短縮や重量積載物の搭載制限につながっている。学校の校庭や道路を一時交通止めにして利用すれば、同じ動力源で、より遠くにより重い物資を運ぶことができる。

6.1.5.専用コンテナの採用:

物資の運搬のために、空気抵抗が少ないコンテナをタイプ分けし、物資によって最適なコンテナを機体下部又は胴体と垂直尾翼の間のスペースに装着して、同じ動力源で、より遠くにより重い物資を運ぶことができるようにする。必要に応じて、物資を空中投下できるようにする。

(注)第5.3.項で紹介したドコモのセルラードローンは、日常用品などを離島に運搬する目的で運用試験が行われているが、マルチコプタでありながら、物資を空中投下せざるを得ない要因の一つとして、空気抵抗の大きい角型のコンテナを機体下部に装着して飛行していることが考えられる。他の要因は、マルチコプタでの垂直離着陸及び飛行は多大な動力源を必要とすることと推察する。

6.2.運用方法:

限りある動力源で、より遠くに、より重量物を運搬するためには以下の順位での運用方法が考えられる。

(1)飛行機モードで飛行し、空中投下を行なう。

目的地に離着陸することなく、物資を届ける。

(2)飛行機モードで、離陸・巡航・着陸を行なう。

第6.1.4.項で既に述べたように、学校の校庭や道路を一時交通止めにする等で、滑走路として利用する。主翼全体が回転できることによって、短距離での離着陸が可能である。

(3)マルチコプタによる垂直離着陸を行い、巡航は飛行機モードで行う。

現在のマルチコプタは、かなりの高度まで垂直に上昇したり、かなりの高度から垂直に着陸するが、本ドローンは、極力低い高度までマルチコプタを利用して上昇し、その後は、主翼を徐々に回転させて、周囲の状況に合わせて、空中を滑走する。主翼に自重を支えるだけの揚力が得られる速度に達したら、マルチコプタをきり、飛行機モードで飛行し、極力動力源の消耗を抑える。第6.1.1.項で述べたように、離陸時に、主翼の迎え角を取ってやれば、大きな揚力を生じさせることができ、通常の飛行機のフラップの役割を担うことが出来、短距離で離陸できる。着陸時も、極力低い高度まで、飛行機モードで高度を下げ、目標地点に近づいたら、主翼を90°上向きに回転してやれば、スピードブレーキの役割を果たして、急減速を可能にできる。また、フライングテールに装着したプロペラにより、大きな縦のコントロールを可能にし、機体を安定的にフレアさせることができる。

(4)マルチコプタ機能のみを使用して、飛行する。

第6.1.4.項で既に述べたように、4枚のブレードを回転させて、自重を支えるマルチコプタによる飛行は、大変大きな動力を必要とし、そのことがマルチコプタの航続距離や航続時間の短縮や重量積載物の搭載制限につながっている。しかし、一方で、低速でのコントロールが容易なので、空中撮影や地形の測量等には適している。目的に応じて、使い分ける必要がある。

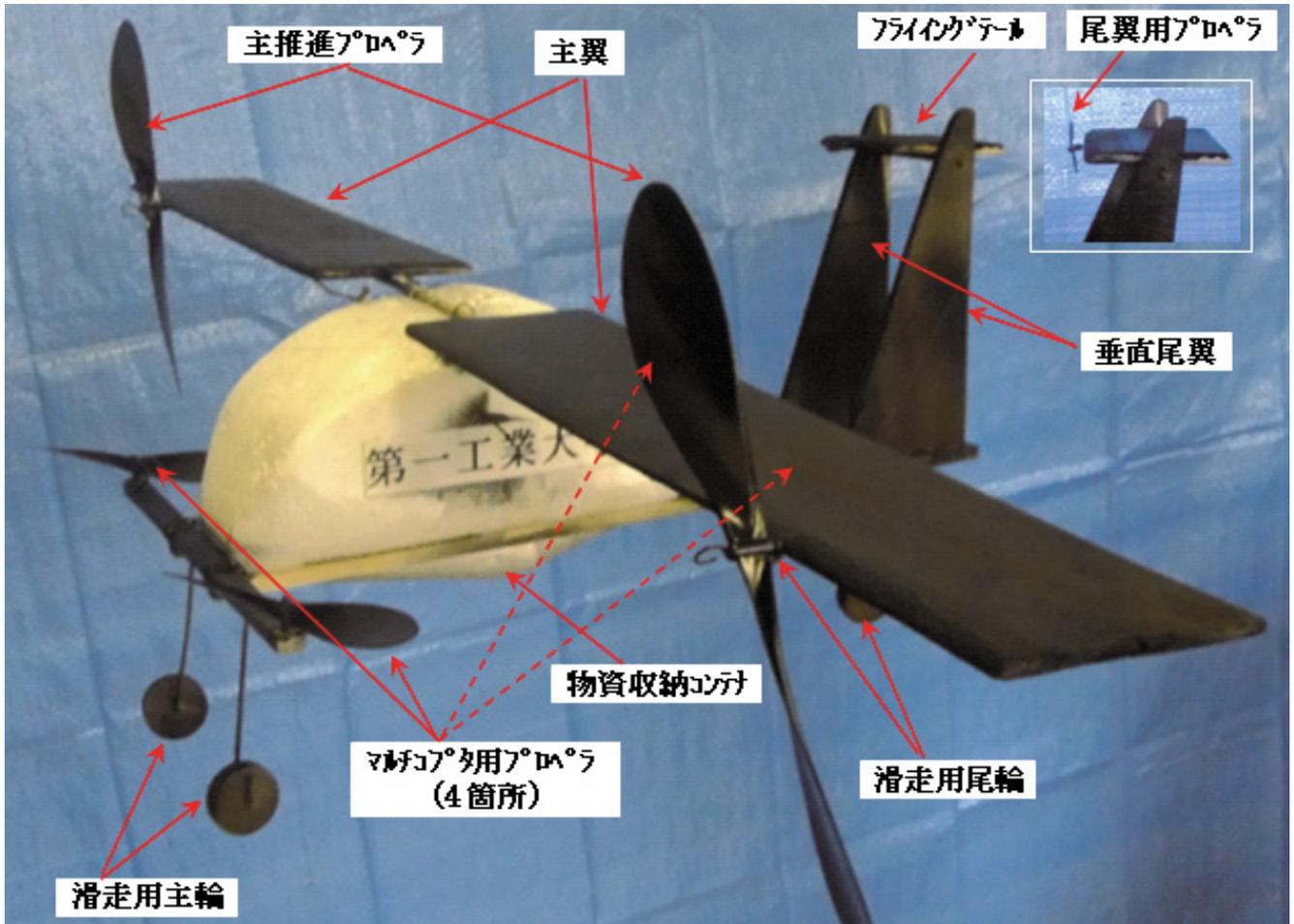
6.3.その他の考慮事項:

機体の極力大面積に、ソーラーパネルを装備し、飛行時に太陽から得るエネルギーを動力に供給する。巡航時に飛行機モードで巡航すれば、高い高度を確保でき、雲の上の飛行で充電できる可能性がある。但し、得られるエネルギーとソーラーパネル装着による重量の増加とのトレードが必要である。

7. 独自ドローン模型:

本模型は、第一工業大学の卒業研究として、急遽作成した。

鹿児島県国分に一軒しかない近所の模型店から限られた材料を調達し、限られた時間で急遽作成したものであるので、満足の行くものとは言いがたいが、これまでの議論を理解する上では参考になると考えられるので以下に開示する。



垂直離着陸形態



巡航形態



上から見た垂直離着陸形態



上から見た巡航形態



飛行機モードでの離陸・上昇形態
主翼を回転させて迎角を取り大きな揚力を得る



機体の胴体下部に搭載したコンテナ

【参考】以下に、国土交通省航空局による無人航空機に対する規定の抜粋を示す

【無人航空機とは】

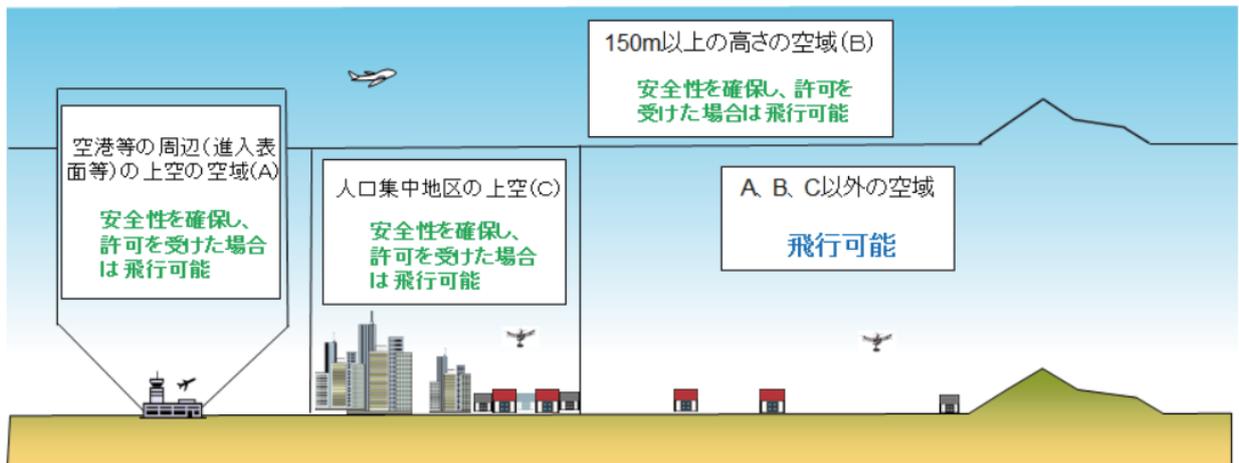
「人が乗ることができない飛行機、回転翼航空機、滑空機、飛行船であって、遠隔操作又は自動操縦により飛行させることができるもの」と定義されており、いわゆるドローン(マルチコプター)、ラジコン機、農業散布用ヘリコプター等が該当します。

【模型航空機とは】

ゴム動力模型機、重量(本体とバッテリー重量の合計)200グラム未満のマルチコプター・ラジコン等は航空法上、「模型航空機」として扱われ、無人航空機の飛行に関するルールは適用されず、空港の周辺や一定の飛行について国土交通大臣の許可等を必要とする規定(第99条の2)のみが適用されます。

(1) 無人航空機の飛行の許可が必要となる空域について

以下の(A)～(C)の空域のように、航空機の航行の安全に影響を及ぼすおそれのある空域や、落下した場合に地上の人などに危害を及ぼすおそれが高い空域において、無人航空機を飛行させる場合には、あらかじめ、国土交通大臣の許可を受ける必要があります。



(空域の形状はイメージ)

