

# 水空両用自律型広域高安定性 VTOL ドローンの生産技術開発

棚橋 美治

池田 忠繁, 橋本 真一, 内田 秀雄 (中部大学)

本研究は、被災地等への緊急物資搬送、広域状況監視或いは水中生態調査等に供する水空両用自律型の高安定性 VTOL 型ドローンの運用実証するために必要な生産技術を開発することを目的とする。試作したティルトウィング方式の機体をベースに、胴体プロペラの二重反転化により推力向上を図り、飛行制御装置、6体のモータ回転速度・出力機能及びプロペラ推力の検討により浮上を確認した。機体の空力特性を計測するため、風洞実験用に、抗力・揚力・縦揺れモーメントの縦3分力計を製作し、校正により各分力の干渉補正を行い、機体に掛かる空気力を計測した。巡航モードでの推力効率については、機体のスケールモデルを3Dプリンタにより製作し、プロペラとダクトの相対位置による推力への影響について水中・空中両方で計測した。以上の結果から、今後の技術課題及び機体実現性の見通しを得た。

## 1. はじめに

最近、多用途に運用されつつある所謂ドローン（遠隔操縦或いは自律式のマルチコプタ又は無人航空機）は、空中・水上・水中各々で性能や利便性が向上したものが国内外で開発されつつある。本研究で開発を目指している VTOL (Vertical Take-Off and Landing; 垂直離着陸) 型無人機は、被災地や交通の便が悪い地域等で、低コスト・省エネで任意の場所からの緊急物資搬送、広域状況監視を可能とし、併せて、水上或いは水中から環境生態系調査、魚群探知等を効率よく行え、企業、地方公共団体或いは組合等がキットとしてニーズに応じて手軽に運用出来る機体となることを目指している。

現状、マルチコプターはリチウム・ポリマー(Li-Po)蓄電池を用いても、飛行時間が30分程度以下のものが多く、飛行の操縦安定性も横風に対する安定性が弱いなど、実用上の課題は多い。

搬送能力は、Amazon<sup>(1)</sup>や楽天<sup>(2)</sup>が宅配便を実用化しつつある数 kgf 規模から、ヤマトホールディングスがベルヘリコプター社と共同開発しているテイルシッタ型<sup>(3)</sup>による数十～数百 kgf 規模のもの、さらには‘空飛ぶクルマ’と称される SkyDrive 社<sup>(4)</sup>他海外と開発競争が続いている有人マルチコプターなど用途に応じたものとなっているが、出力と運用時間の確保が課題の一つである。

本無人機の構想例を図1に示す。これは、固定翼による揚力を極力生かしたティルトウィング方式とし、VTOL機能とスマートアクチュエータ操舵翼付き固定翼による高揚抗比グライダー機能を組合せ、プロペラ故障時には、滑空による安全な不時着を考慮した自律飛行制御による高い飛行性能及び操縦安定性の実現を目指している。推力としては、蓄電池と太陽電池及び燃料電池を組合せた電動プロペラ及びダクト付クワッドコプタにより推進効率を高め、

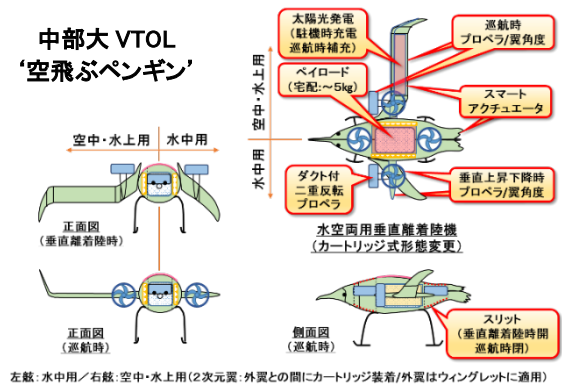


図1 VTOL型無人機構想例

約 5kgf の物資搬送に対し航続時間を数時間程度に拡大することを目指しており、これらにより、可搬ペイロード、運航距離及び自律飛行制御安定性の目処付けを行うことを目標としている。

一方、水中では、防水性を確保し、固定翼を水中形態に簡易的に切替え、水中探査及び漁獲支援の方策を検討し、水空両用運用システムの見込付けを行うことを目指している。

## 2. 実施内容

### 2.1 機体の諸元策定及び試作

平成 30 年度知の拠点あいち重点研究プロジェクト「次世代ロボット社会形成技術開発プロジェクト」において、「鳥獣害・災害対応ドローンに関する研究開発」のうち、自然災害の減災において、被災状況把握のため、カメラや通信機器を搭載して垂直離着陸可能な「広域高速飛行ドローン」を諸元策定<sup>5)</sup>し、試作した。これをベースに、能力向上のため、胴体のプロペラを二重反転化した結果を図 2.1 に示す。二重反転プロペラの飛行制御モードを適用し、機体の浮上を確認した。

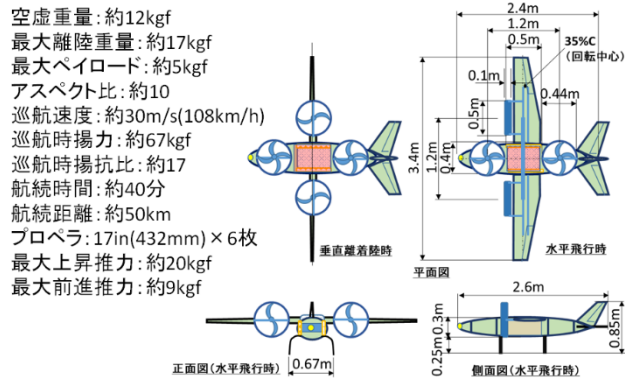


図 2.1 広域高速飛行無人機形状諸元策定結果及び試作機浮上状況

### 2.2 Li-Po 蓄電池によるプロペラの出力制御システム検討

試作機での機体浮上に際しては、胴体プロペラの二重反転化による推力向上を図り、飛行制御装置、6体のモータ回転速度・出力機能及びプロペラ推力の検討をモータとプロペラの組み合わせを変更して行った。Li-Po 蓄電池を用い、飛行制御装置(Pixhawk)により、6体の ESC (Electronic Speed Controller)、ブラシレスモータ及びプロペラを電圧及び電流特性をオシロスコープで観察しながら、安定的に各出力をバランス良く調整する必要がある、ESC が PWM(Pulse Width Modulation:パルス幅変調)信号を作りだし、モータへ印加することでその回転数を制御し、モータの回転数を上げるため Duty 比 (1 周期内の HIGH 状態である割合) を大きくする

も 90%以上で制限が掛かるなど個別の特性があり、システムの最適化を図る上でさらに検討・調整が求められる。

ここでは比較的明らかなモータとプロペラの組み合わせによる推力の差異を表 2.2 に示す。

同じようなモータとプロペラでも組み合わせにより 3～4 割もの差が生じることが判った。

表 2.2 モータとプロペラの組み合わせによる推力比較

推力 類似品でも、モータとプロペラの組合せにより、30～40%程推力が異なる。⇨最適化の重要性

		プロペラ				推力方向	回転方向	
		機体に装着仕様 17インチ? インチ		XOAR Φ17in-6in pitch				
6セル バッテリー 5.2Ah (2個)	モータ	ACK-5312OP KV:330	推力(g)	3900	推力(g)	4200	牽引	ペラ視 右回転
			29.64A	22.01V	28.64A	21.72V		
			6430.5Wp	630.3W	29.04AP	622.0W		
	7485RPM	12PP	7499RPM	12PP				
	340KV	11RE	345KV	12RE				
	推力(g)	3100	推力(g)	3300				
TITAN	21.92A	22.01V	21.92A	22.16V				
T5008	643.5Wp	482.4W	21.57Vm	485.7W				
KV:320	2704RPM	3PP	6803RPM	12PP				
		2135KV	56RE	307KV	14RE			
モータ	ACK-5312OP KV:330			推力(g)	4150	推進	ペラ視 左回転	
				28.64A	21.72V			
				29.04AP	622.0W			
				7499RPM	12PP			
				345KV	12RE			

### 2.3 風洞実験用縦3分力計の製作

試作機の空力特性を計測するため、風洞設備では、抗力・揚力・縦揺れモーメントの縦3分力計を製作し、計測結果に対して干渉補正を行った。各分力には、単分力計測用のロードセル(ユニパルス社 USM-50N:容量 50N)を用いた。図 2.3-1 に縦3分力計の概要図を示す。縦3分力計への要求事項としては、以下が挙げられる。

- ・ 3分力の相互干渉(取付け&変位の影響)が小さいこと。
  - ・ 発生荷重をリニアに計測できること。
  - ・ 相関係数が1に近いこと。
  - ・ 入力ゼロ時の測定値はゼロ点近傍となること。
- その達成手段としては、ロードセルを平行四辺形リンク機構で細いピンにて連結することとした。主な構造としては、以下の点に留意した。

- ・ 模型周辺の気流の乱れを避けるため、風洞気流外に測定機構を配置。
- ・ 模型の角度が可変となる様、副支柱の長さを調整可能。
- ・ 揚力測定用ロードセルは左右の傾き抑制のために2個配置。
- ・ 抗力及びモーメント測定用ロードセルは前後に1個ずつ配置。
- ・ 主支柱は抵抗低減の為、流線形に整形。
- ・ 測定基部はロードセルの連結ピンを一直線にするため十文字組。
- ・ ロードセルをリンク接続するため上下にヒンジを締結。

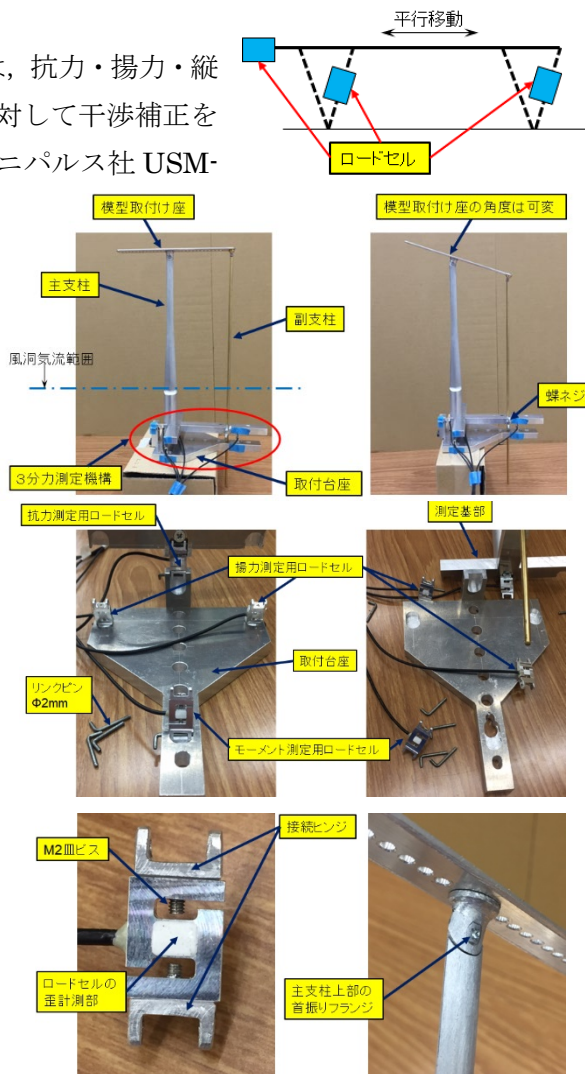


図 2.3-1 縦3分力計概要図

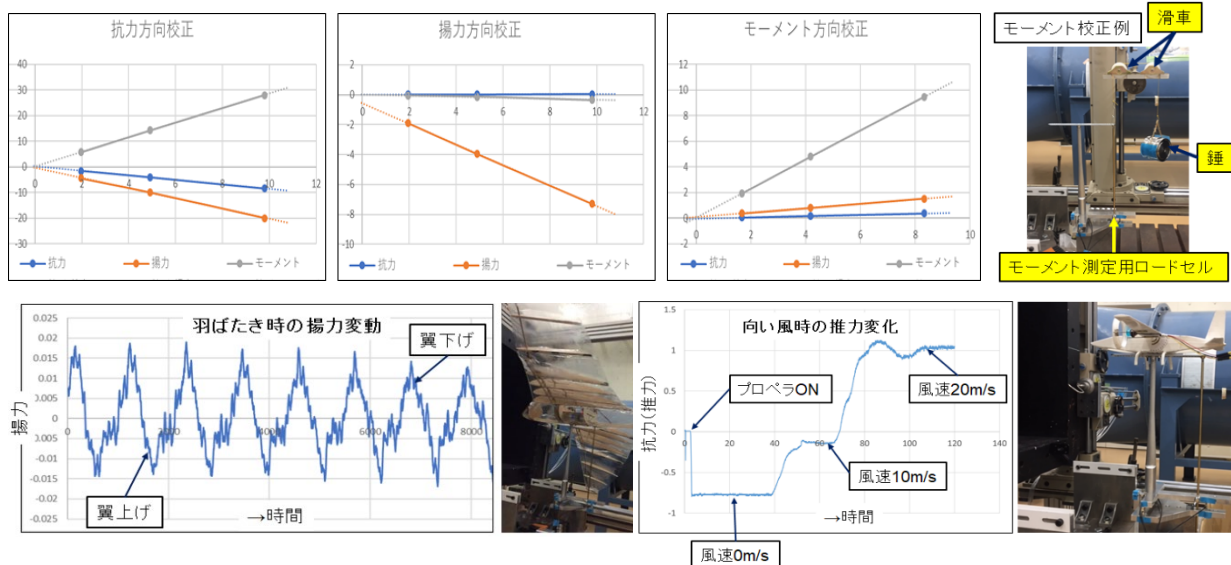


図 2.3-2 縦3分力計校正及び計測結果



校正方法としては、揚力・抗力・モーメントそれぞれの方向に 200 g, 500 g, 1000 g の錘を垂下してロードセルの出力値を測定した。その結果、ゼロ点近傍を通る線形相関が確認された。

風洞実験では、羽ばたき機の揚力変動測定やプロペラ推力と風速の関係を測定し、模型の動的空力特性を測定できる様になった。図 2.3-2 にその結果を示す。

## 2.4 プロペラとダクトの相対位置による推力計測

試作機の巡航モードでの推力効率については、機体の 1/10 スケールモデルを 3D プリンタにより製作し、プロペラとダクトの相対位置による推力への影響について水中・空中両方で計測した。図 2.3-1 にスケールモデル写真と風洞及び水槽取付図を示す。

また、図 2.3-2 にプロペラとダクトの相対位置及び推力計測結果を示す。

定電源電圧 7.4V に対し、水中の推力は空中に比べ、約 1.5~9.5 分の 1 になった。水中では空中の約 800 倍の密度、回転数は約 1/40 (1087rpm/41725rpm) である。プロペラとダクトの流体干渉により、水中・空中共に図中(c)の位置で推力が最大となっている。実験結果では、水中ではプロペラがダクトの内部にある時ダクトの効果が発生し、推力がやや大きくなっていることがわかる。プロペラの先端部分では流れの剥離が起り渦や渦流が発生し<sup>(6)</sup>、それらは推力にならずエネルギーのロスを生み出している。しかし、ダクトによりこれらの渦や渦流が進行方向に整流され、エネルギーのロスを減らすことができるため推力が大きくなったものと考えられる。またダクトの位置による推力の違いはプロペラの位置がダクトの中央に近づくほど推力が高くなっている。一方、空中ではダクトなしでの推力より大きくなるケースは少なく、ダクトによる効果は殆ど見られない。これは空中では回転数が大きい上、ダクトの軸方向の長さが比較的短いためダクトによる効果が小さく、相対位置によっては、むしろ抵抗となり推力を減少させたものと考えられる。

本データの評価については、今後さらにスケールの大きいモデルでの詳細な検討を行い、他の結果との相対評価が必要である。

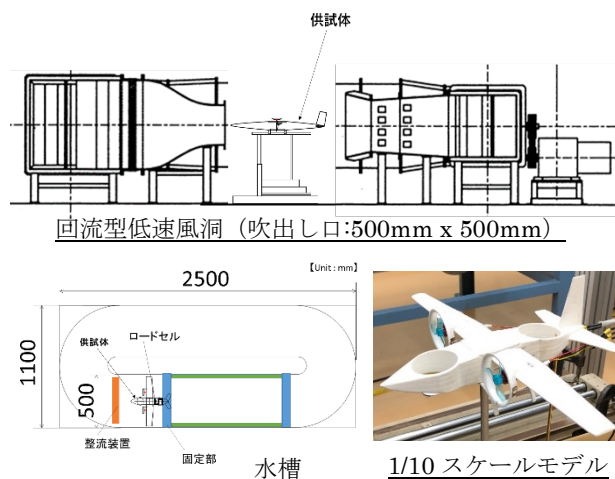


図 2.3-1 スケールモデルと風洞及び水槽取付図

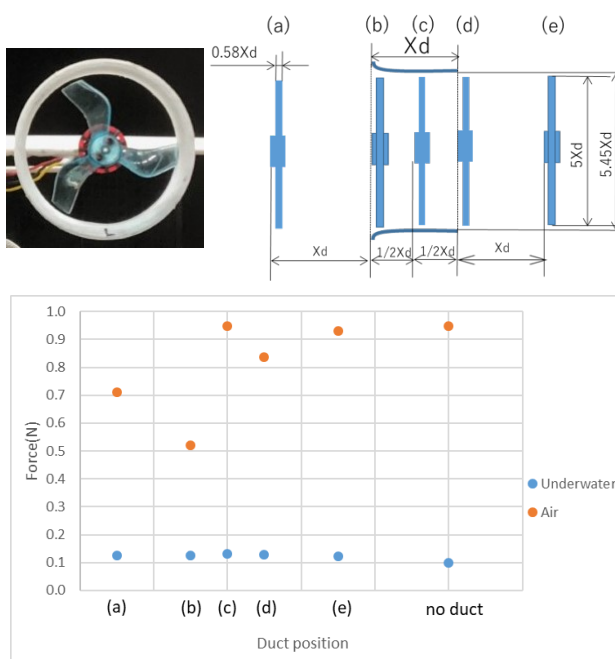


図 2.3-2 プロペラとダクトの相対位置及び推力計測結果 (一樣流速 0 で比較)

### 3. おわりに

本研究においては、試作したティルトウィング方式の機体をベースに、胴体プロペラの二重反転化により推力向上を図り、飛行制御装置、6体のモータ回転速度・出力機能及びプロペラ推力の検討により浮上を確認した。機体の空力特性を計測するため、風洞実験用に、抗力・揚力・縦揺れモーメントの縦3分力計を製作し、校正により各分力の干渉補正を行い、機体に掛かる動的空気力を計測できることを確認した。巡航モードでの推力効率については、機体の1/10スケールモデルを3Dプリンタにより製作し、プロペラとダクトの相対位置による推力への影響について水中・空中両方で計測した。以上の結果から、機体の実現に向けて今後以下の技術課題につき取組んで行く所存である。

- ・中規模のスケールモデルを製作し、垂直離着陸から巡航への飛行制御則シフトを実証。
- ・プロペラダクト効果の水空両用詳細検討及び評価。
- ・主翼プロペラの二重反転化により推力余裕を持たせ、安定的モータ出力制御システムを構築。
- ・スマートアクチュエータの試作・実装及び機能確認。
- ・太陽電池の実装及び機能確認。
- ・燃料電池の適用性検討及び評価。

最後に、本研究を進めるに当たり、大同大学橋口先生、技術員の方々、学生諸兄には大変お世話になった。この場を借りて厚く御礼申し上げる。

### 参考文献

- 1) Amazon Prime Air, <https://www.amazon.com/b?node=8037720011>
- 2) Rakuten Drone, <https://drone.rakuten.co.jp/project/>
- 3) Bell APT, <https://www.bellflight.com/products/bell-apt>
- 4) SkyDrive, <https://skydrive2020.com/>
- 5) 片柳亮二, 例題で学ぶ航空工学, 成山堂書店, ISBN978-4-425-87011-0.
- 6) 池田良穂, 図解雑学船の仕組み, ナツメ社, ISBN4-8163-4090-4.
- 7) <https://ja.m.wikipedia.org/wiki/ダクテッドファン>(参照 2019-1-15).