

プログラム名：タフ・ロボティクス・チャレンジ

PM名：田所 諭

プロジェクト名：ロボットコンポーネント

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平 成 2 8 年 度

研究開発課題名：

ミニサーベイヤーのダクテッド・ロータ化

およびダクテッド・ロータの性能評価

研究開発機関名：

大阪大学

研究開発責任者

米澤 宏一

I 当該年度における計画と成果

1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

平成28年度の研究開発課題の目標と計画は以下のとおりであった。

ダクテッドロータ化

- (1) CFD解析を用いた高性能なダクト形状の探索
- (2) ダクトの試作と性能試験
- (3) ダクトの空力の評価

ダクトの構造・軽量化検討

ミニサーベイヤーに搭載する際に重量を抑えるための材料と構造の検討を実施する。

ダクテッドロータ機の実証飛行試験

ダクテッドロータの性能、安定性について評価するために飛行試験を行い、機体運動を把握し比較する。

ミニサーベイヤーMS-06LAの高性能化

ミニサーベイヤーMS-06LAにおいてダクテッドロータ化を行い、その飛行性能向上効果を検討する。本年度は次年度に向け、試作品の設計などの準備作業を中心に行う。

2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

2-1 進捗状況

ダクテッドロータ化（平成27年度からの継続）について

本研究では CFD 解析によるダクトの形状の探索により、おおまかな傾向を把握し、ダクトの試作と性能試験を行い、ロータの空力性能の改善を行った。6種類のダクトを試作し、ホバリング時には従来よりも大幅な高効率化が行われている。一方でダクトの搭載により横風から受ける抗力やピッチングモーメントの増大が問題となると予測されていたことから、風洞実験や CFD 解析を行い、基礎的な現象の把握を行った。

ダクトの構造・軽量化検討

試作段階において、材料に軽量の ABS 樹脂を用いて 3D プリンタによりダクトを製作した。この結果、ダクトによる質量増加分を差し引いた賞味の推力やホバリング時の空力効率を示す Figure of merit を用いた評価を行った結果、質量増加以上の性能向上が確認されている。

ダクテッドロータ機の実証飛行試験

ダクトの最適化および基礎的な空力特性の計測に時間を要したため飛行実験には至らなかった。平成

29 年度に実施する予定である。

ミニサーバイヤーMS-06LA の高性能化

平成 28 年度中に複数回行われた飛行ロボット研究分科会での議論および PM との協議の結果、当面はダクト等の最適化や基礎研究に注力し、本項目に関しては本年度の実施は取りやめることとなった。

2-2 成果

ダクトの形状は図 1 に示すように、入口部、出口部の断面は円弧で形状を定義し、ロータに最も近い中央部の断面は直線とした。本研究ではダクトの形状がロータの特性に及ぼす影響を明らかにするために、表 1 に示す形状で比較を行った。ダクテッドロータの性能試験は、ホバリング時の値により評価するため、屋内に固定した状態で一定回転数 (5800 min^{-1}) の下でロータブレードのピッチ角を変化させ、推力、軸トルクを計測した。なお、推力、トルクはロータ半径、角速度、大気密度を用いて無次元化し、ホバリング時の空力効率を、Figure of Merit (FM) で表す。

$$C_T = \frac{\text{Thrust}}{\rho(R\Omega)^2 \pi R^2} \quad \dots(1)$$

$$C_Q = \frac{\text{Torque}}{\rho(R\Omega)^2 \pi R^3} \quad \dots(2)$$

$$FM = \frac{C_T^{3/2}}{\sqrt{2}C_Q} \quad \dots(3)$$

また、CFD 解析には JAXA で開発された回転翼専用の解析ソフトウェアである、rFlow3D を用いた。

図 2 にピッチ角を変化させた場合の推力係数 C_T 、トルク係数 C_Q 、Figure of merit, FM を実験結果と数値解析結果について示す。実験結果を見ると、推力係数については、ブレードピッチ角 θ が小さい場合には差は見られないが、 θ が大きな条件ではダクテッドロータ A, C, D の推力係数はオープンロータに対して大きくなっている。トルク係数に関しては、オープンロータ、ダクテッドロータともに θ の増加とともに増加傾向が見られるが、オープンロータのトルク係数が最も大きく、 θ が大きくなるにしたがってダクテッドロータとの差は広がっている。Figure of merit の値を比較すると、 θ が小さな条件では差は見られないが、 θ が大きくなるとオープンロータは $\theta=17^\circ$ で最大値となり、これ以上 θ が増加すると、 FM 値は減少している。一方、ダクテッドロータ A は $\theta < 18^\circ$ まではオープンロータと大差はないが、 θ が増加しても FM 値の減少量は小さい。また、ダクテッドロータ C, D については θ が大きな条件ではオープンロータに対して FM 値は明確に上回っており、また、実験を行った $\theta=22^\circ$ までの範囲では、ほぼ単調に増加している。これらの結果から、オープンロータでは $\theta > 17^\circ$ でブレードの失速が生じていると考えられ、ダクテッドロータでは失速が抑制されていると考えられる。なお、紙面の都合上結果は示さないが、ダクテッドロータ B では、入口面積が同じであるダクテッドロータ A とほぼ同様な推力係数、トルク係数の値が得られた。ダクテッドロータ D の下流長さを短縮したダクテッドロータ E はダクテッドロータ C, D とほぼ同じ性能となり、出口面積をロータ回転面積より小さくしたダクテッドロータ F の推力係数はダクテッドロータ C, D, E と同程度であったがトルク係数がオープ

ンロータと同程度であったため、 FM 値はダクテッドロータ C,D,E よりも小さく、ダクテッドロータ A,B よりも大きな値となった。一方、数値解析においても、ダクテッドロータは実験値との定量的な違いは見られるものの、オープンロータに比べて推力係数が大きく、トルク係数が小さい傾向は捉えることができている。また、ダクテッドロータ C,D の FM 値が最も大きな傾向に関しても捕らえられている。ただし、 FM 値に関しては $\theta = 15^\circ$ 前後で極大値が形成されており、実験結果と異なり、失速が生じている。この相違に関する原因の解明と改善は今後の課題である。

図 3 に横風に対するダクテッドロータに作用する空力荷重計測装置と荷重の定義を示す。図 3 左図の装置ではダクト、ロータ、駆動系、支持シャフトに作用する空力荷重が計測されるため、これらの寸法は機体のものと同一とした。また、ロータリーアクチュエータで全体を支持することにより、横風に対する迎角を自動で変更できる。

ロータに対して横風が作用する場合の一例として、ロータブレードピッチ角 $\theta = 14.5^\circ$ 、横風の風速 $U = 5 \text{ m/s}$ 、横風に対するロータの迎角 $\alpha = 0^\circ$ における空力荷重について、実験結果と数値解析結果を表 2 に示す。表 2 では、オープンロータとダクテッドロータ C の結果について示している。まず、実験結

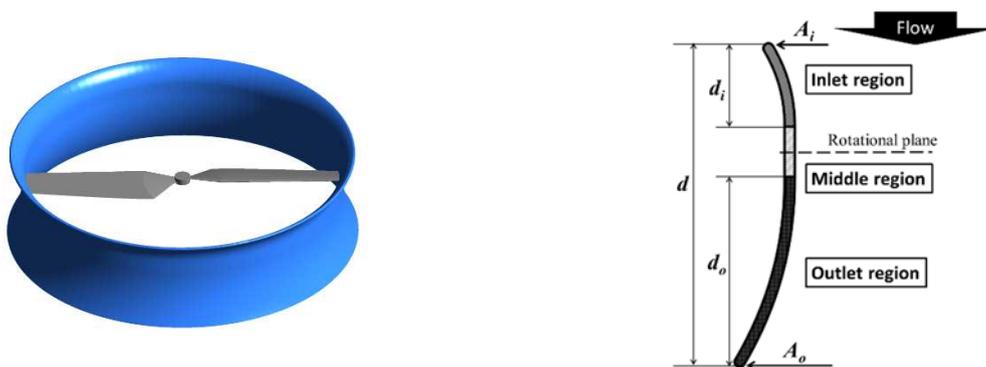


図 1 ダクテッドロータの外観（左）およびダクトの断面模式図と主要寸法の定義（右）

表 1 ダクトの主要寸法と断面形状

名称	A	B	C	D	E	F
d_i [m]	0.025	0.040	0.025	0.025	0.025	0.025
d_o [m]	0.060	0.060	0.060	0.060	0.021	0.060
d [m]	0.10	0.12	0.10	0.10	0.063	0.10
A_i [m ²]	0.094	0.094	0.10	0.10	0.10	0.10
A_o [m ²]	0.10	0.10	0.10	0.087	0.087	0.071
断面形状 *右側が内面						

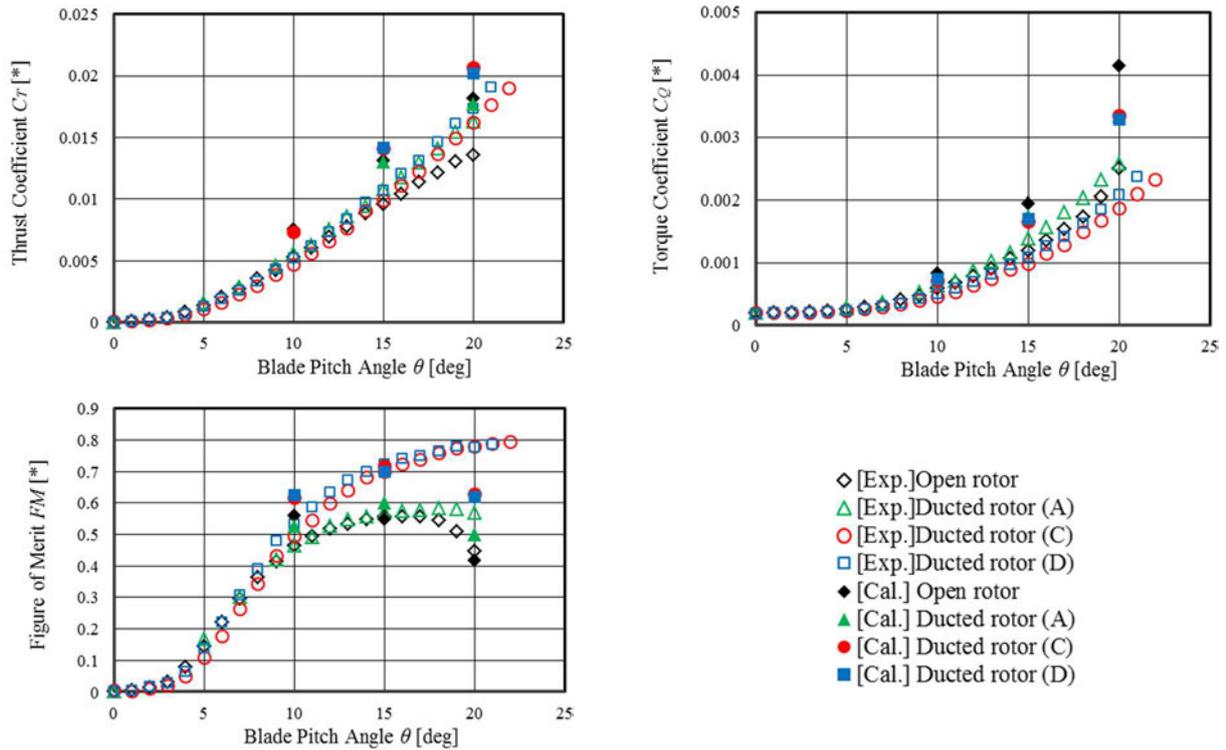


図 2 オープンロータおよびダクテッドロータ A, C, D の推力係数、トルク係数、Figure of Merit

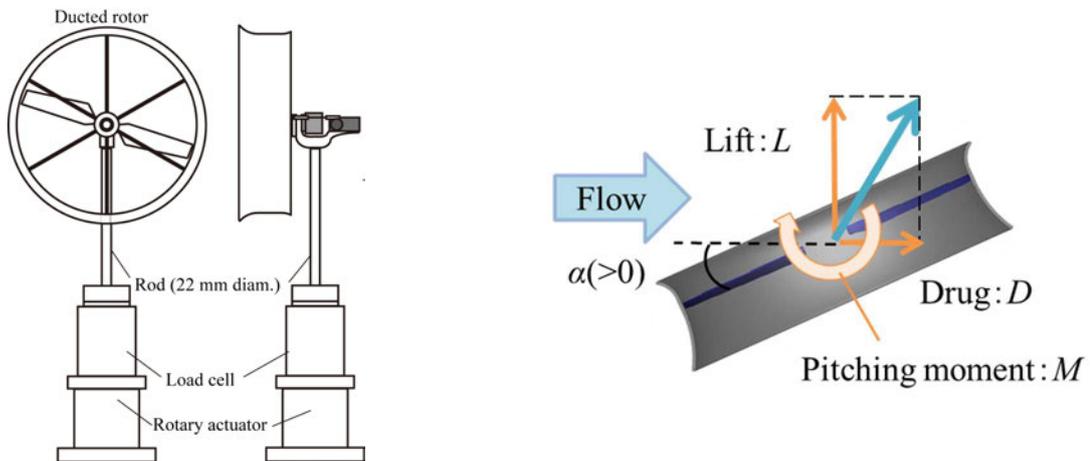


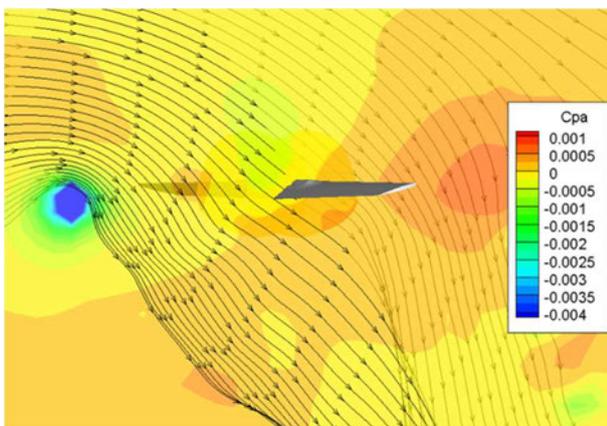
図 3 横風試験時の構成と荷重の定義

果を見ると、揚力 L に関してはダクトの有無の影響は 1 割程度の差となっている。一方、抗力に関してはオープンロータでは推力の 4% 程度であるのに対し、ダクテッドロータ C では推力の 30% 程度まで増加している。ピッチングモーメントについても、ダクテッドロータ C ではオープンロータの 3 倍以上に増加している。同様な傾向は数値解析結果でも捕らえられており、値は異なるが、ダクトの有無によって揚力の差はほとんどなく、ダクトの装着により抗力、ピッチングモーメントは実験結果と同程度の

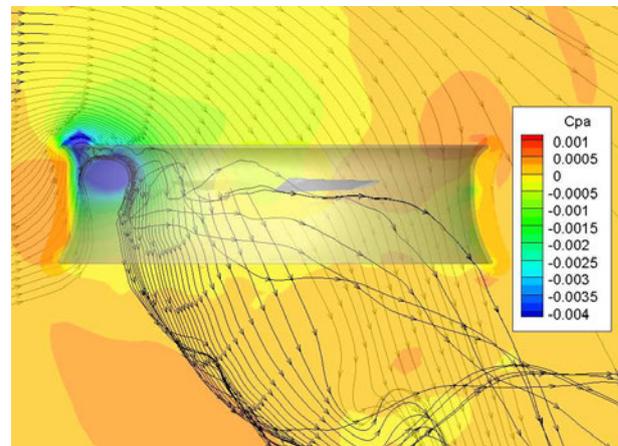
増加を確認できる。また、数値解析結果では空力荷重をブレードとダクトそれぞれに作用する成分に分離して表示している。揚力に関しては前章で示したホバリング時の結果と同様にブレード付加が低下し、

ダクトの推力が吹かされた結果となっている。抗力、ピッチングモーメントに関してはダクトの寄与分
 表 2 横風時の空力荷重 (ブレードピッチ $\theta=14.5^\circ$ 、風速 $U=5\text{ m/s}$ 、迎角 $\alpha=0^\circ$)

		L (N)	D (N)	M (Nm)	
Experiment	Ducted rotor C	11	3.5	0.70	
	Open rotor	10	0.43	0.20	
CFD	Ducted rotor C	Blade	10	-0.010	0.21
		Duct	3.5	2.9	0.36
		Total	14	2.9	0.57
	Open rotor	14	0.13	0.20	



Open rotor



Ducted rotor C

図 4 瞬時の圧力分布と流線 ($U=5\text{m/s}$ 、 $\alpha=0^\circ$)

が大きいことがわかる。

図 4 にオープンロータおよびダクテッドロータ C に $U=5\text{m/s}$ 、 $\alpha=0^\circ$ の条件で横風が作用している場合の瞬時の圧力分布と瞬時流線を示す。オープンロータにおいても非一様な流入が生じているため、横方向の抗力やピッチングモーメントが生じるが、図に示すようなブレード後流と横風との干渉は直接荷重としては作用しない。一方、ダクテッドロータにおいては図の左側に見られる低圧領域は横風がダクトに衝突し、ロータ内に回りこむ際に生じる渦の中心部であるが、このような非対称な圧力分布により、図中では右向きの抗力と時計回りのピッチングモーメントの原因となっていることがわかる。

2-3 新たな課題など

本研究では現状のロータをダクトで囲いダクテッドロータ化することで最大推力および **Figure of Merit** を大幅に増加させることに成功した。また、CFD 解析により流れの構造と性能向上のメカニズムが明らかとなった。今後の課題としては、ダクト形状の最適化が挙げられる。一方で、ダクテッドロータ化によりロータブレード周りの流れに対してダクト外部の環境の影響が小さくなっていることが期待できる。そこで、今後は構造物近傍においてロータに作用する空力荷重の特性を解明することで、ト

ンネルや橋梁などの近傍や屋内での飛行におけるダクテッドロータの優位性を検証する。ダクテッドロータ化による新たな問題の一つとして騒音の増大が確認された。来年度以降は騒音特性、騒音発生メカニズムの解明を行い、さらにはブレードを含むダクテッドロータの再設計により高性能化と低騒音化を検討することが課題となる。

3. アウトリーチ活動報告

第2回国際ドローン展（2016年4月20日(水)～2016年4月22日(金)、幕張メッセ）において試作機とポスター展示を行った。