

解説

先進的形態を有する垂直離着陸無人航空機の研究

村岡浩治*

Research and Development on Small VTOL Unmanned Aerial Vehicles

Koji MURAOKA*

Keywords : Unmanned Aerial Vehicle, Aerial Observation, VTOL (Vertical Takeoff and Landing), Quad Tilt Wing, Tail Sitter, Ducted Fan

1. はじめに

近年、無人航空機技術が発展し、同技術は空中リモート・センシング用のプラットフォームとして有望なものとして注目されている。

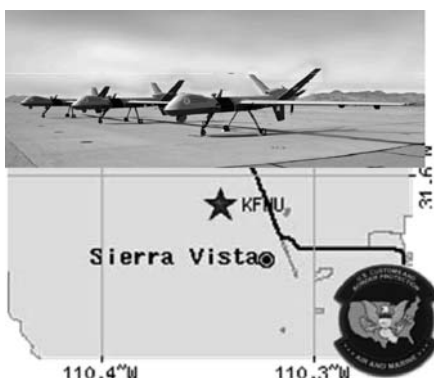
本稿では、無人航空機技術の現状および特徴を概説するとともに、筆者らが宇宙航空研究開発機構（以下、JAXA）研究開発本部にて実施している、垂直離着陸（VTOL : Vertical Takeoff and Landing）無人航空機の研究開発について紹介する。VTOL 無人航空機は、現在主に用いられている固定翼および回転翼形態それぞれの長所を両有し、運用性や任務能力の一層の向上に資する無人航空機プラットフォーム技術である。また、民間分野での無人航空機適用拡大のための課題およびそれらに対する JAXA 研究開発本部での取組についても概説する。

2. 無人航空機技術の特徴および現状

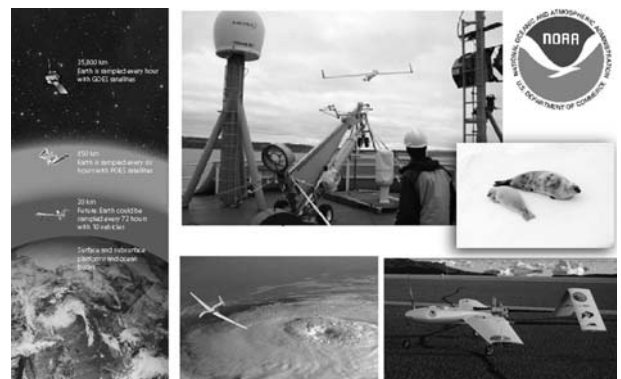
無人航空機は、有人の航空機で行われている航空観測や

撮影、監視などを無人化し、経済性、効率性や安全性を向上するための技術である。パイロットが機体に搭乗することなく自動飛行による運航が可能となることから、特に、退屈な（Dull）、汚い（Dirty）、危険な（Dangerous）、いわゆる 3D 任務に秀でている¹⁾。観測・監視飛行のような単調かつ長時間の飛行（Dull Mission）は、疲労の影響を受ける人間よりも正確に行うことができ、火山ガスなどに汚染された危険を伴う地帯（Dirty and Dangerous Mission）での任務を人命リスクなしで行うことができる。これまでの無人航空機技術の研究・開発は欧米を中心に軍事利用目的で行われ、偵察飛行その他で多くの実運用成果を上げてきたが、近年はこれらの運用経験蓄積や技術発展を背景として、民間分野への応用展開が急速に進んでいる。民間用途での適用先としては、空中での大気採集や特定エリアの植生・生態数調査といった環境・科学計測や、空中からの陸上/海上安全監視、災害時の捜索・救難や情報収集、農薬散布やダム・送電線の保全検査など様々なものが挙げられ、これらのために必要な技術開発や試験・研究・運用が行われている。

Fig. 1 に、それらの一例として米国国境警備局（CBP : Customs and Border Protection）によるメキシコ国境その



(a) 国境警備局による国境監視



(b) 海洋気象庁による観測無人機システムの開発

Fig. 1 米国における民用分野適用例

* 宇宙航空研究開発機構（JAXA）
〒181-0015 東京都三鷹市大沢 6-13-1

* Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 6-13-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan



(a) ヤマハ発動機 RMAX による農薬散布

(b) JAXA 多目的無人機による気象観測試験

Fig. 2 我が国における民用分野無人航空機適用例

他での監視²⁾及び米国海洋気象庁 (NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration) による無人航空機観測システム開発³⁾を示す。前者は、有人航空機による国境監視の一部を無人航空機システムに置き換えて低コスト化を図るとともに、既存の有人機や地上監視と連携して任務を実施する方法としており、同任務にて既に多くの成果を挙げている。後者は、無人航空機を衛星観測と地上観測のギャップを低コストで補完する技術と位置づけ、主に軍事事業で実績を挙げた無人航空機をプラットフォームとして、太平洋での大気・海洋・環境 (山火事) 観測、極地での科学観測 (動物生息数調査など) への適用試験を大規模実施している。

これらに代表される無人航空機による空中観測は、同様の観測を可能とする衛星や有人航空機に比較して以下のような特徴を有している。

- (a) 低高度からの近接観測が可能である。
- (b) 観測を実施する時間や場所が、衛星軌道などには左右されず、より適時に実施できる。
- (c) 有人機による観測に比較してより低騒音での観測が可能となる。
- (d) 有人機に比較してより低速での観測や有人機の運航が困難な台風内や極地での観測が可能となる。
- (e) 観測任務に必要なコストが安価である。

これらに対し、我が国では既に実用化され大きな成果を上げている例として、ヤマハ発動機の産業用無人ヘリコプタ RMAX がある (Fig. 2 (a))。同機は農薬散布その他で実績を有し、民間分野で累計 2000 機以上を販売するなど世界トップレベルの水準を満たしている。また、国立極地研究所は南極地域にて有人航空機を用いて行われていた動物生息数調査や海水分布・発達状況調査、空中磁気探査や高々度の気象データ取得の任務を無人航空機に置き換えることを目的に、固定翼無人航空機の開発を続けている⁴⁾。JAXA においては、多目的小型無人航空機を開発し、2005 年には気象庁気象研究所と共同で梅雨前線観測に適用し成

果を挙げている⁵⁾ (Fig. 2 (b))。また、同機をプラットフォームとした画像伝送その他様々な機関や分野にて活発に機体開発や応用への取組が行われており、これらは文献 6 や 7 に詳しい。

Table 1 に本章で紹介した代表的な無人航空機の仕様をまとめた。我が国の無人航空機応用の特徴は、米国のように軍用用の大型無人航空機を転用しているような例はなく、民間用途向けに開発された、比較的小型のプラットフォームを開発・利用しているところである。

3. 垂直離着陸 (VTOL) 無人航空機技術の研究

本章では、JAXA にて実施中の無人航空機の任務能力および運用性をより一層拡大するためのプラットフォーム技術研究の一つとして実施している、先進的形態を有する垂直離着陸 (VTOL : Vertical Takeoff and Landing) 無人航空機の研究・開発について紹介する。

現在運用されている無人航空機のほとんどは、前章のような固定翼あるいは回転翼形態であるが、それぞれ実運用上の制約が存在する。固定翼は一般に良好な航続性能を有するものの、離着陸のための滑走路あるいは射出発進装置 (カタパルト) やネット回収装置、パラシュート等が必要となってしまうことが挙げられる。また、ヘリコプタは離着陸の制限は少なくなるものの、固定翼機に比べて航続時間や搭載可能重量の面で性能が大きく劣ってしまう。本研究では、これら両者の課題を克服するため、ヘリコプタのように垂直離着陸が可能で、かつ固定翼機に匹敵する巡航性能を有する VTOL 航空機技術を開発している。以下に、現在実施中の 4 発ティルト翼無人航空機の研究、テイル・シッター小型無人航空機の研究およびダクテッド・ファン超小型飛行ロボットの研究を概説する。

(1) 4 発ティルト翼 VTOL 無人航空機⁸⁾⁹⁾

Fig. 3 に 4 発ティルト翼 VTOL 無人航空機 の概念を示す。本機の形態は前後に 2 枚の翼を配置 (タンデム配置)

Table 1 代表的な無人航空機の仕様

機種	Global Hawk (米 General Atomics)	Predator B (米 General Atomics)	Scan Eagle (米: INSITU)	Aerosonde (豪: Aerosonde)	RMAX Type II G (ヤマハ発動機)	AntPlane-5 (極地研, フジ・インパック)	多目的固定翼 小型無人機 (JAXA)
形式	固定翼	固定翼	固定翼	固定翼	回転翼 (ヘリ)	固定翼	固定翼
全幅 (m)	35.4	20	3.1	3.5	3.1	3.6	3.3
重量 (kg)	10400	1020	20	17	97	28	20
積載量 (kg)	861	340	7	5	28	1	5
最大高度 (m)	20000	12000	6000	4500	100-	(>1,000)	1500
航続距離・時間	36 hrs	6720 km・32 hrs	24+hrs	24hrs	1.5km 以内	1000km	130km
発動機	ターボファン	ターボプロップ	プロペラ-ピストン	プロペラ-ピストン	ロータ-ピストン	プロペラ-ピストン	プロペラ-ピストン
発進回収	滑走路	滑走路	滑走路, カタパルト, フック回収装置	滑走路 (自動車走行発進) カタパルト	VTOL	滑走路	滑走路 (自動車走行発進)
主要用途	軍用 (高高度偵察・監視など実績多数) 民用 (NASA, NOAAによる環境観測への適用が進行中)	軍用 (高高度偵察・監視など実績多数) 民用 (CBPによる国境監視, NASA, NOAAによる環境・科学観測へ適用)	軍用 (偵察・監視など実績多数) 民用 (NOAAによる環境観測への適用が進行中)	軍用 民用 (台風内気象観測の実績, NOAAによる環境観測へ適用)	民用 (農薬散布や3次元地形解析などに実績, 回転翼無人機として世界屈指の機体である。)	民用: 南極観測用の開発機。 航続 500km を豪州にて, 100km を南極で実証済み	民用: 試験機 梅雨前線気象観測や空中撮影試験に適用 (仕様は実証済)



Fig. 3 4発ティルト翼 VTOL 無人航空機

し、それぞれの翼にプロペラ・エンジンを装備する。離陸時には翼が上方に向きヘリコプタ同様に垂直に離陸する。上昇とともに翼を徐々に前方に倒し、やがて通常の固定翼機同様にプロペラを前方に向け巡航飛行を行う。着陸はこの反対で、前方を向いていたプロペラ軸を、降下と共に徐々に垂直上方にティルトさせ、やがてヘリコプタと同様に垂直に着陸する。これらによって、離着陸ではヘリコプタと同様に滑走路を必要とせず、固定翼機と同程度の巡航効率が実現可能となる。ホバリング時の姿勢制御は、ピッチ、ロールは前後および左右の推力差を利用し、ヨーにはプロペラ後流下にあるフラップロンを用いる。

4発ティルト翼形態の特徴は以下にまとめられる。

従来の無人航空機に対し、

- ・固定翼無人機のような滑走路またはカタパルト、ネットなどの発進・回収装置を必要とせず、垂直離着陸が可能であり、柔軟な運用性を有する。
- ・ヘリコプタ無人機にはない、固定翼無人機に迫る長距離航続性能および高速飛行能力を有する。
- ・速度ゼロの空中停止から高速飛行までの幅広い速度領域での任務遂行が可能である。
- ・離着陸及びホバーを行うのに、ヘリコプタに必須なサイクリックピッチ機構やテール・ロータのような可動部分を必要としないため、安全性・操作性・軽量化の実現の面で有利である。



Fig. 4 4発ティルト翼 VTOL 小型無人実証機 (完全遷移飛行実証)

・推進系にプロペラを用いているため、ヘリコプタ無人機やティルト・ロータ無人機のような複雑なロータ機構が不要で、整備性および重量性能に優れる。
また、類似の垂直離着陸機に対しては、以下のような特徴を有する。

- ・4発形態のため、2発機に比較してプロペラの直径を小さくできる。そのため機体の大型化（搭載重量増大化）に対応可能である。
- ・テイル・シッター無人機などとは異なって、胴体はホバリング時でもほぼ水平に保たれるため、観測用カメラなどミッション機器への影響が最小になる。

本研究では、4発ティルト翼形態の成立性検証及び実用機開発に必要な機体形状設計及び飛行制御技術の開発を行っている。Fig. 4はこの形態の遷移飛行概念を検証するために作製した小型概念実証機である。同機は、ホバリングから遷移・巡航までの完全遷移の成立性実証を目的として、簡易な機体・機器構成とした。このため、任務用の機器（ペイロード）搭載は想定していない。小型概念実証機のシステム構築においては、全飛行範囲を手動操縦可能とするための主幹操縦系を設計し、それらを機体へ装備した。この操縦系は、操縦入力に対する舵角応答をティルト角に応じて自動変更する。例えば、パイロットのピッチ操縦入力に対し、ティルト角を垂直にしたホバリング時（ティルト角=90 deg）は前後推力差を出力するのに対し、ティルト角が水平になるに従い、推力差からエレベータ角へと出力を徐々に変更させる。

本機体を用いた飛行実験を行い、これまでに完全遷移の成立性飛行実証に成功している。手動操縦により、VTOLモード（ティルト角 90 deg）による垂直離陸から、加速・上昇遷移、飛行機モード（ティルト角 0 deg）による巡航、減速・降下遷移およびVTOLモードによる垂直着陸までの完全遷移を行った。模型航空機の操縦に十分な経験を有するパイロットの主観評価により、本機設計は十分な操縦性を備えていると判断された。

現在、この概念実証機を用いて飛行特性の詳細解析及び自動制御システム設計技術の実証研究を実施している。また、この知見をもとにして、観測任務を想定した機体規模および性能を有する実用型実証機の予備設計を実施してい

る。現在検討中の実用型実証機の諸元を Table 2 に示す。

(2) テイル・シッター小型 VTOL 無人航空機¹⁰⁾¹¹⁾

数 kg 規模の小型 VTOL 無人航空機に適した形態として、テイル・シッター（Tail-Sitter）形態機を東京大学と共同で研究している。Fig. 5 に同形態の試作機を示す。Fig. 5 中央は「巡航モード」で、通常の固定翼機と同様、固定翼の揚力を利用した高効率で高速な飛行が可能である。Fig. 5 右は「ホバリング・モード」であり、プロペラ推力のみで機体重量を支え、ヘリコプタのように低速で空中にとどまることができる。このような低速飛行においても、プロペラ後流にさらされる空力舵面（エレベータ、エルロン及びフラップロン）により姿勢を制御することが可能である。Fig. 6 は、周囲が樹木などの障害物に囲まれた場所での巡航概念である。垂直離陸にて適切な高度まで垂直に上昇した後、機首を傾けながら前方に加速し水平飛行に移る。巡航モードでは通常の固定翼機のように飛行し、任務を遂行する。その後着陸回収点付近にて機首を引き上げホバリング飛行に移って着陸する。

テイル・シッター形式は、ティルト翼形態やティルト・ロータ形態などに比べて、複雑な機構が全くないことから、特に軽量であることが求められる小型飛行ロボットに適した形式であるといえる。

本研究では、同形態の飛行特性を数値モデルに基づいて解析するとともに、試作機を開発して飛行性・操縦性評価および制御系設計に関わる技術研究を行っている。数値モデルによる検討結果にもとづいて、試作機には特に減速遷移時の揚力増強を目的とした前縁スラットを装備した（Fig. 5 左下）。本機を用いた遷移飛行概念の評価を、手動操縦にて実施し、本機は加速及び減速遷移の両方で適切な操縦性を有していること及び前縁スラットによる揚力増強効果が認められることが確認された。現在、同機の飛行特性及びスラット効果に関わるより定量的なデータを得るための風洞試験を実施するとともに、これらの解析に基づいた飛行制御系の開発を実施している。

(3) ダクテッド・ファン超小型 VTOL 飛行ロボット¹²⁾¹³⁾

災害発生直後などに迅速かつ自動的に発達して、周囲の空撮情報をえるためのプラットフォームとして超小型電動ダクテッド・ファン VTOL 飛行ロボットの研究を行って

Table 2 JAXA 無人 VTOL 航空機 (研究・開発機) の主要諸元

機種	4発テイルト翼形態		小型 テイル・シッター	小型電動 ダクテッド・ファン
	小型概念実証機	長距離性能実証機	試作1号機	試作1号機
試験機位置づけ	成立性・概念実証 (縮小スケール)	実用技術実証 (フル・スケール)	試作機 (フル・スケール)	試作機 (フル・スケール)
全幅 (m)	1.3	2.3	1.1	0.22
全備重量 (kg)	4.0	65.0	2.4	0.05
積載量 (kg)	0	10	0.3	0
巡航高度 (m)	50	(3000)	100	100
巡航速度 (m/sec)	17	45	16	15m/sec(耐風速目標)
航続距離・時間	5min	(1000 km)	10min	5min
発動機	電動モータ	ピストン	電動モータ	電動モータ
プロペラ	固定ピッチ	可変ピッチ	固定ピッチ	固定ピッチ
発進回収	VTOL	VTOL	VTOL	VTOL
主要用途 (試験機)	完全遷移の概念実証	長距離飛行性能および 実用技術の実証	機体システム設計およ び制御技術の確立	機体システム設計およ び制御技術の確立
想定適用先	なし (実証研究のみ)	遠隔地または長時間の 環境・科学観測や安全監 視 災害支援その他	狭い離着陸スペースか らの運用	災害発生時初期情報把 握 (撮影)
研究状況	(完了) 手動操縦完全遷 移実証および風洞試験 (実施中) 飛行性詳細解 明および自動制御系設 計研究	(実施中) 機体概念設 計・検討	(完了) 初期手動操縦試 験 (実施中) 風洞試験およ び自動制御系検討	(完了) 試作機設計製作 (実施中) ホバー自動制 御設計・評価中 (準備中) 風洞試験 (飛行 特性評価)



Fig. 5 テイル・シッター小型無人機試作機

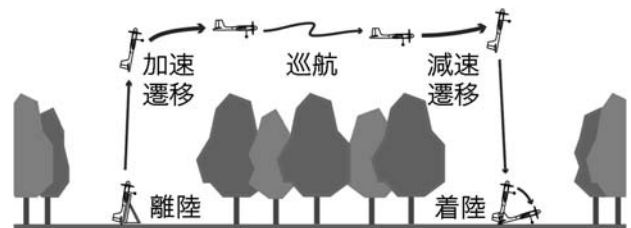


Fig. 6 テイル・シッター小型無人機飛行概念

いる。Fig. 7は基礎検討を目的として製作した試作機である。本機は小型カメラによる飛行時間数分程度の撮影任務を想定している。ダクテッド・ファンVTOL機は垂直に離陸を行い、その上空にて空撮を実施、その後垂直に着陸する。広範囲・長時間の飛行性能は有さないものの、機体が数百g程度と超小型であることや、ファン・ブレードが外部に慮出しないことによる取扱上の安全性向上、ヘリコプタ型のような複雑なサイクリックピッチ機構を用いないことによる構造のシンプルさが特徴である。

現在、本機形状設計や横風時の機体制御に必須となる空力特性解明のための実験を実施するとともに、搭載型小型制御システムの開発を行っている。Fig. 8はJAXA内で実施しているホバリング自動制御試験の様相である。初期段階の試験としてGPS試験ドーム内で懸吊策を用いた方法を適用し、拘束・無風下でのホバリングに成功した。今後は同形態の空力特性検証に基づいた機体設計の向上及び小型搭載システムの開発・統合を実施するとともに、屋外での空撮任務概念実証試験を行う。



Fig. 7 ダクテッド・ファン超小型飛行ロボット試作機



Fig. 8 ダクテッド・ファン試作機室内飛行試験

4. 無人航空機の将来課題

無人航空機を観測などの民間分野での任務に適用する際の共通的な法的・技術的課題とそれに関する国内外の取り組みを紹介する。これらは、前章の将来型 VTOL 機のみでなく、2章のような既存の固定翼や回転翼無人機にも共通する課題である。

(1) 無人航空機に関する法的環境

現在、我が国には、他の欧米諸国と同様に無人航空機に関する法律は存在しない。現在の航空法では、総重量 100 kg 未満の無人航空機は「航空機」には含まれず、同法の規定する機体の設計規準や操縦士資格などの制限は受けない。一方、地表面から 150 m (場所によっては 250 m) 以上の高度は航空機の飛行空域と定められており、航空機以外の物件の進入は「飛行に影響を及ぼす行為」として制限されている。このため、無人航空機を運用する場合は原則的に 150 m 以下の高度で飛行しなければならない。

このような法律状況は国際的に共通する課題であり、無人航空機が有人航空機と混在して飛行することを目的とした規準および法整備への議論は世界的規模で急速に進んでいる。現在、規準や法律整備のための基本方針が各国航空当局から発行されるなどし、数年～十年程度での発行を目指した規準策定作業が開始されている。

我が国では、産業用無人航空機協会 (JUAV) も回転翼及び固定翼に関わる安全標準を策定し、業界内で共有している。また、JAXA ではこれら諸外国の状況を随時調査するとともに、JAXA 内で実施する無人航空機飛行試験のための安全規準を策定しこれを運用している。JAXA 内で実施するすべての試験について、この規準に基づいた機体設計・製作および運用 (飛行試験) を行っている。

(2) 機体システムの運用性、信頼性向上

近年の無人航空機は、急速な技術発展により一定以上の運用性や信頼性を達成しているものの、民間分野への適用を拡大するためには、より一層の技術向上が求められる。

特に重要な技術課題として、運用性向上のための自動制御システムの高度化や、安全性向上のための衝突防止 (Sense and Avoid) 技術、遠隔操縦・通信 (Command and Control) 技術、機体・機器システムの信頼性・耐故障性の向上などが挙げられる。将来、民間空域を有人機と混在して飛行するためにもこれらの技術向上は必須であり、世界規模での研究・開発が行われ技術が日進月歩で行われている。

JAXA 研究開発本部においても無人航空機用誘導・制御・航法システム技術の研究および小型固定翼無人機長距離飛行のための信頼性・耐故障技術の向上に関わる研究を推進し、無人航空機技術の一層の向上に重要な、基盤技術の研究・開発を行っている。

5. おわりに

観測用プラットフォームとしての無人航空機技術の特徴を概説するとともに、JAXA 研究開発本部で実施中の先進的な VTOL プラットフォーム技術の研究を紹介した。

これらの研究および実用機の開発においては、プラットフォーム技術のみではなく、観測用の機器との統合や任務への適合が極めて重要となる。本誌の読者である、リモート・センシングに関わる方々からの任務の要求や搭載機器からの要求について様々な観点からご指導・助言いただき、本技術の研究開発をより充実させ、民間分野での我が国の無人航空機技術の発展に貢献していきたいと考えている。

引用文献

- 1) Anon.: Unmanned aircraft systems roadmap 2005-2030, Office of the Security of Defense, 2005.
- 2) M. Kostelnik: Opening plenary: department of homeland security, Office of CBP Air and Marine, Proceedings of the AUVSIs Unmanned Systems North America, 2006.
- 3) Robbie Hood: NOAA unmanned aircraft systems (UAS) program and cooperative institute involvement, NOAA Cooperative Institute Directors and Administrators Annual Meeting, March 24-26, 2009.
- 4) M. Funaki, N. Hirasawa and the Ant-Plane Group: Outline of a small unmanned aerial vehicle (Ant-Plane) designed for antarctic research, Polar Science 2, pp. 129-142, 2008.
- 5) 多目的小型無人機チーム: 多目的小型無人機の開発と気象観測飛行実験, JAXA 研究開発報告, JAXA-RR-06-023, 2007.
- 6) 岩田拓也 (特集巻頭言): [特集] 空中ロボティクス, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, pp. 889-932, 2006.
- 7) 日本産業用無人航空機協会, 日本大学理工学部, 国立極地研究所: 第3回小型無人航空機の現状と科学観測への応用に関する研究会講演予稿集, 2006.
- 8) K. Muraoka, N. Okada and D. Kubo: Quad tilt wing VTOL UAV: aerodynamic characteristics and prototype flight test, AIAA 2009-1834, 2009.
- 9) 村岡浩治, 岡田典秋, 久保大輔: 小型模型機による4発

テイルト翼形態機の概念実証, 第46回飛行機シンポジウム, 1D15, 2008

- 10) D. Kubo, N. Nagasaka and S. Suzuki : Autonomous distributed aerial observation system using electric ducted fan micro aerial vehicle, AIAA 2009-1968, 2009.
- 11) 久保大輔, 成岡 優, 土屋武司, 鈴木真二 : Tail-Sitter 小型飛行ロボット実験機と初期飛行試験, 第46回飛行機シンポジウム, 1D13, 2008.
- 12) D. Kubo, N. Naruoka, T. Tsuchiya and S. Suzuki : Flight

testing of a wing-in-propeller-slipstream mini UAV, AIAA 2009-2070, 2009.

- 13) 長坂直樹, 久保大輔, 鈴木真二 : 地震被害早期把握のための垂直上昇飛行ロボットの研究開発, 機械学会交通・物流部門大会講演集, 2008.
- 14) 回転翼委員会 : 産業用無人ヘリコプターによる観測・空撮作業等実施のための安全の手引き, 日本産業用無人航空機協会, 2008.

[著者紹介]

●村岡 浩治 (ムラオカ コウジ)



1968年7月生。1994年慶應義塾大学工学部機械工学科前期博士課程修了。1994年4月より科学技術庁航空宇宙技術研究所(2003年10月より独立行政法人宇宙航空研究開発機構へ改変)。所属学会は、日本航空宇宙工学会, Association for Unmanned Vehicle Systems International,

Human Factors and Ergonomic Society。研究分野はパワードリフト航空機, 飛行シミュレーション, 航空, ヒューマンファクタなど。

E-mail : muraoka.koji@jaxa.jp