

令和2年度「無人航空機性能評価手順の試行(風洞試験装置を使用したパイロードー飛行時間性能試験)」

成果報告書

RTF-TR-0003

Edition 1.0 2021/10

令和3年10月

公益財団法人福島イノベーション・コースト構想推進機構

(福島ロボットテストフィールド)

一般社団法人日本産業用無人航空機工業会

目 次

1. 総 則	1
1.1 本事業の背景	1
1.2 本試験目的	1
1.3 関連文書	1
2. 試験概要	2
2.1 実施内容	2
2.2 試験時の風洞棟内の配置(機体・設備・人員)	4
2.3 試験項目	6
2.4 飛行試験実施日程	10
2.5 試験実施方法	11
3. 試験実施内容	14
3.1 試験実施内容 1(基本試験 1)	14
3.2 試験実施内容 2(基本試験2)	14
3.3 試験実施内容 3(追加試験)	15
3.4 試験実施内容 4(最高速トライアル)(追加試験)	16
4. 試験結果	16
4.1 試験実施内容 1(基本試験 1)および試験実施内容 4(最高速トライアル)のデータ	17
4.2 試験実施内容 2(基本試験 2)のデータ	19
4.3 試験実施結果 3(追加試験)のデータ	22
5. 試験結果に対する考察	24
5.1 飛行可能時間と飛行速度の関係	24
5.2 自動飛行と手動操縦による飛行の違い	24
5.3 風洞試験装置のプロッケージ	24
6. まとめ	25

1. 総 則

1.1 本事業の背景

経済産業省と国土交通省は、民間企業や関係団体と共に官民協議会を開催し、「空の産業革命に向けたロードマップ」を取りまとめました。

このロードマップの中で“小型無人機”は、新たな可能性を有する技術と位置付けられており、人手不足や少子高齢化といった社会課題の解決や、新たな産業的価値の創造を実現するツールとして高く期待されています。

これらを実現のものとしていくためには、機体の安全性や技能証明の基準等の制度整備や、安全性・信頼性を確保し証明する技術や自動飛行・運行管理・電動推進に関する技術の開発について、確実に歩みを進めていく必要があります。

各種フィールドロボットの試験を実施することのできる国内有数の施設である福島ロボットテストフィールド（以下、「RTF」という。）では、標記事業において無人航空機の開発に必要な風洞設備と、試験空域の整備を行うことを通じて、「空の産業革命」の推進に繋がる試験環境の完成度を高めていきたいと考えています。

【以上、事業目的の内容は、RTF の委託事業仕様書より抜粋】

1.2 本試験目的

RTF は 2020 年4月から運用が開始された RTF の風洞棟を用いて、「無人航空機のペイロードー飛行時間性能試験」事業を実施した。具体的には、日本産業用無人航空機工業会（以下、「JUAV」という。）の会員企業の保有する機体に対するペイロードー飛行時間性能試験を RTF の風洞棟にて実施した。

本試験は国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）無人航空機性能評価手順書(Ver1.0)「目視内及び目視外飛行編」に従った試験手順を RTF 施設にて実施するケースの実地検証のため、評価項目の1つであるペイロードー飛行時間性能試験を実地におこなったものである。そのため試験方法については同文書の規定に準拠したものである。

1.3 関連文書

- (1) NEDO 無人航空機性能評価手順書(Ver1.0)「目視内及び目視外飛行編」

2. 試験概要

2.1 実施内容

試験目的 : 風洞棟を使用した無人航空機の性能評価試験の試行

試験実施日 : 2021年1月25日(月)～1月27日(水)

※ 1月25日(月)は、試験準備を実施。

場所 : 福島ロボットテストフィールド(風洞棟)

※福島ロボットテストフィールド内の風洞棟の位置を図 2.1-1 に示す。

内容 : (株)自律制御システム研究所(以下、「ACSL」という。)製 ACSL-PF2J、PF-2(Vision)の2機種に対して風洞棟を使用した NEDO 無人航空機性能評価手順書(Ver1.0)「目視内及び目視外飛行編」に従った飛行試験手順の確認。

試験使用機種 : ACSL-PF2J(手動操縦による飛行)、PF-2(Vision) (※)

※PF-2(Vision)は、手動操縦による飛行、およびビジュアル SLAM による自動飛行を実施

この試験の「ビジュアル SLAM」とは、搭載カメラで撮影された画像から自己位置推定を行う技術である。

現地作業者 : JUAV 3名(うち、デンソー1名)

ACSL 4名

RTF 1名

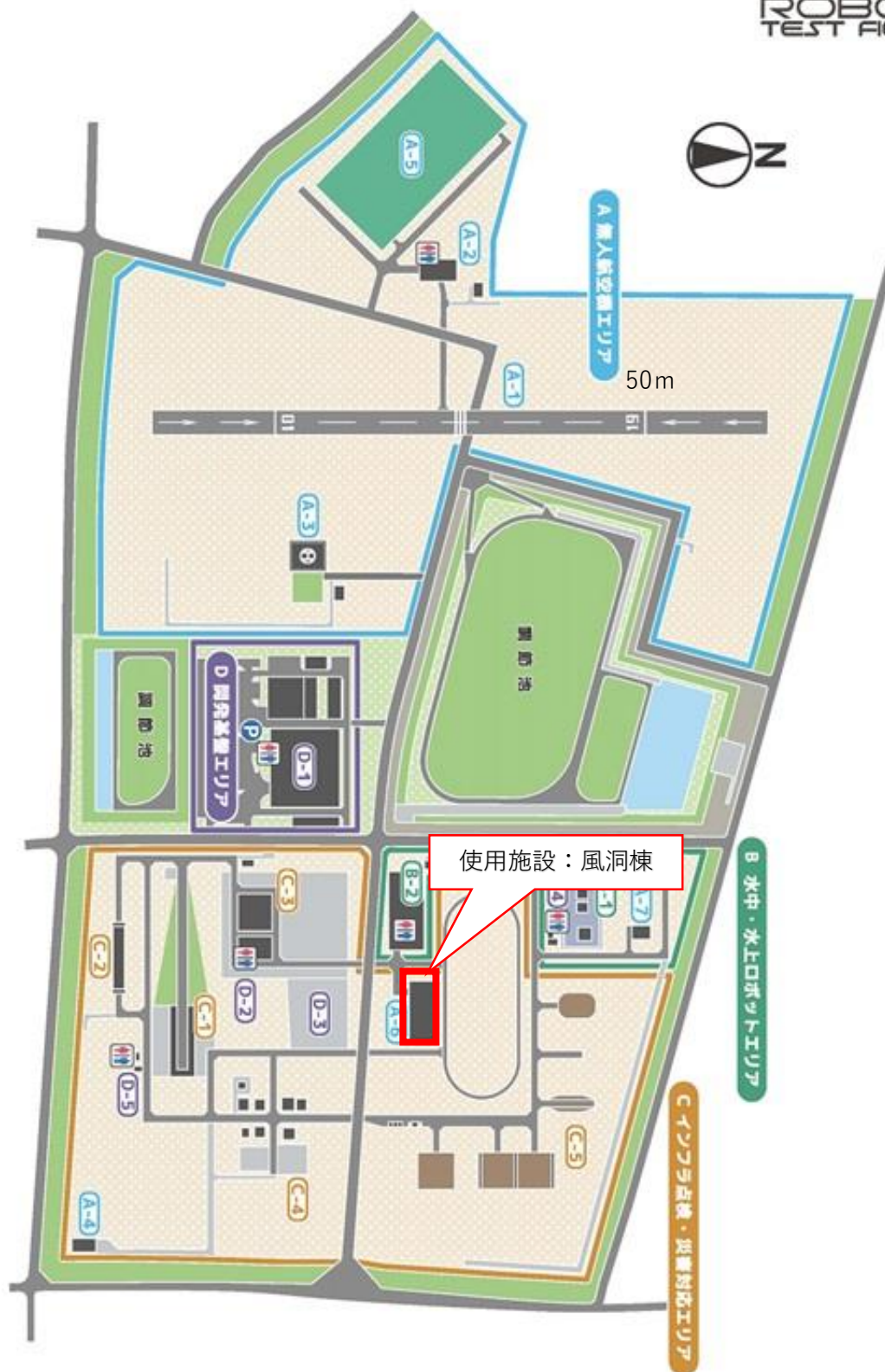
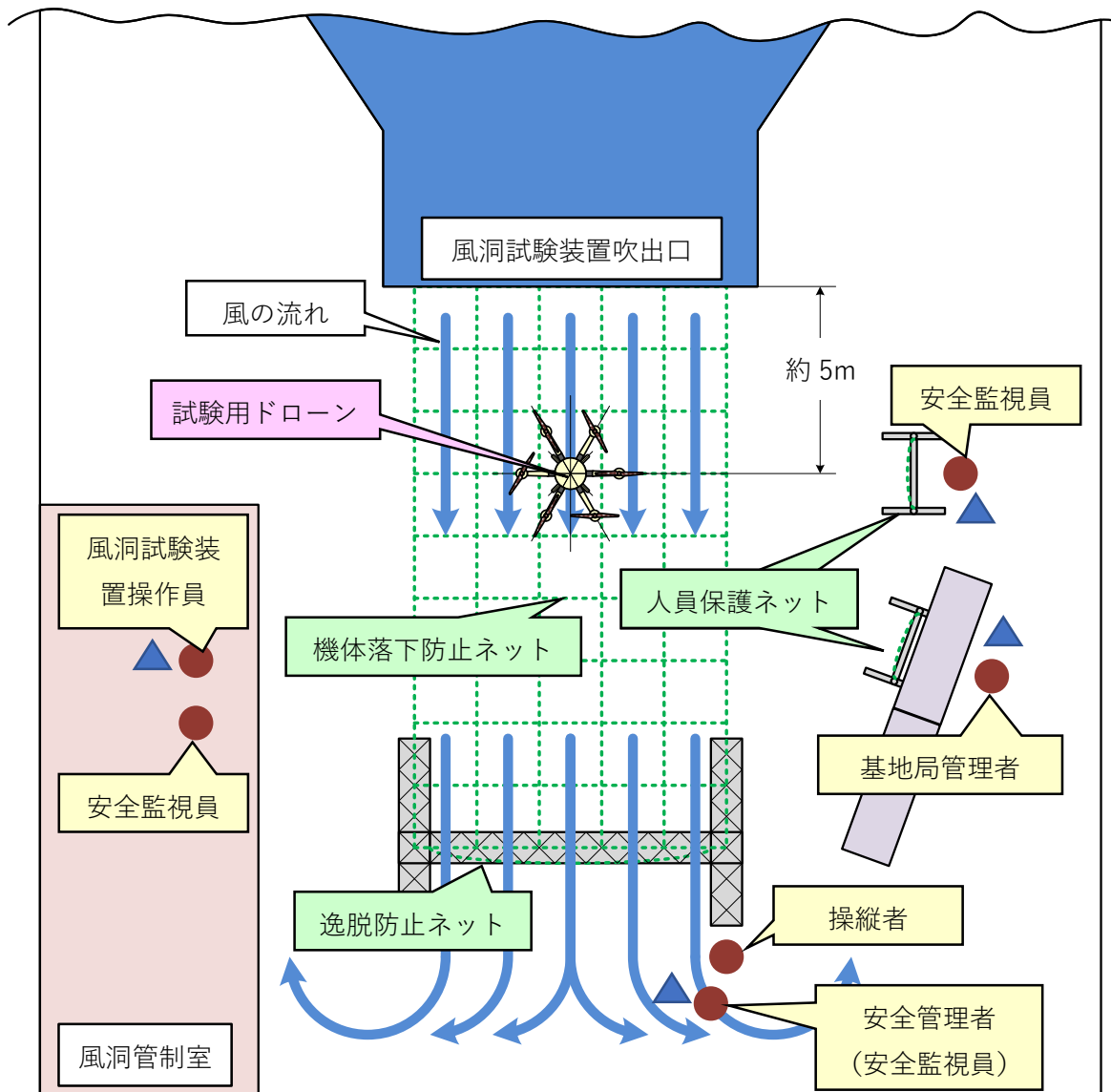


図 2.1-1 試験実施場所(風洞棟)

2.2 試験時の風洞棟内の配置(機体・設備・人員)

風洞棟を使用した飛行試験実施時の風洞棟内の配置を以下に示す。図 2.2-1 は、風洞棟内の配置図である。試験用ドローンは、風洞試験装置の吹出口と床に固定されている逸脱防止ネットのほぼ中間位置である風洞試験装置の吹出口中心から下流側に約 5m の地点および風洞試験装置の吹出口の中央の高さである床面から高さ約 3.5m の位置を本試験における試験定位置とし、その位置を保持するようにホバリング飛行を行う。

なお、風洞試験装置の操作については、RTF 側が実施し、風速の設定や調整、計測可能な状態(風速の静定など)になったことの判断は RTF 側の職員が実施した。



※●は、風洞棟内の人員配置場所(観測者等は除く)

※▲は、トランシーバーの配置場所

※試験時には風洞棟の扉は全て閉じた状態で実施した。

図 2.2-1 風洞棟内配置図

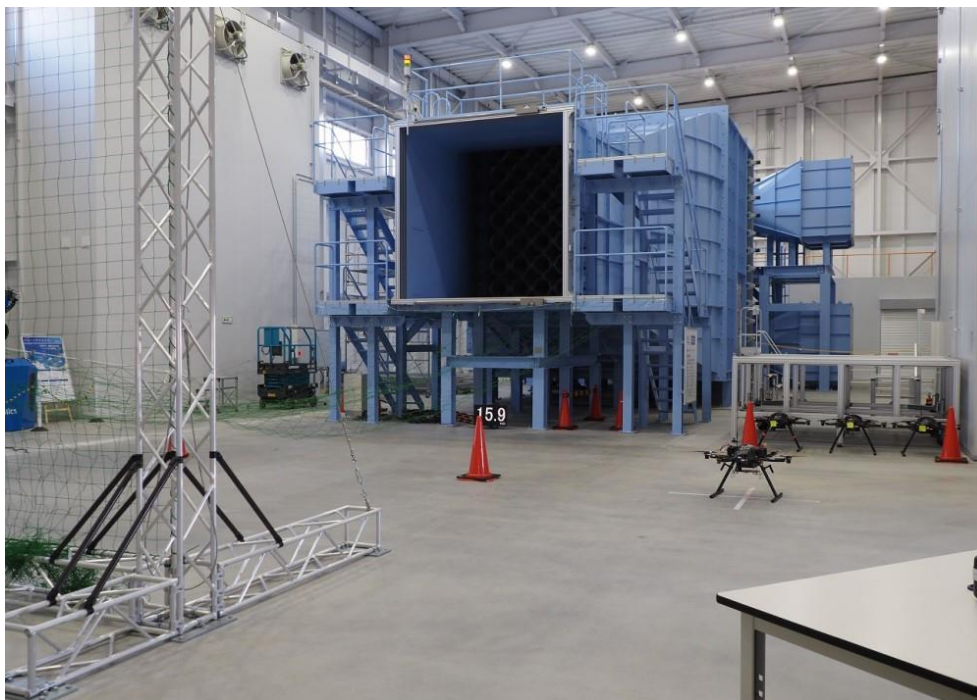


図 2.2-2 試験風景 1(機体落下防止ネット展開状態)



※試験時には扉は閉めた状態で実施した。

図 2.2-3 試験風景 2(基地局管理者席と人員保護ネット)

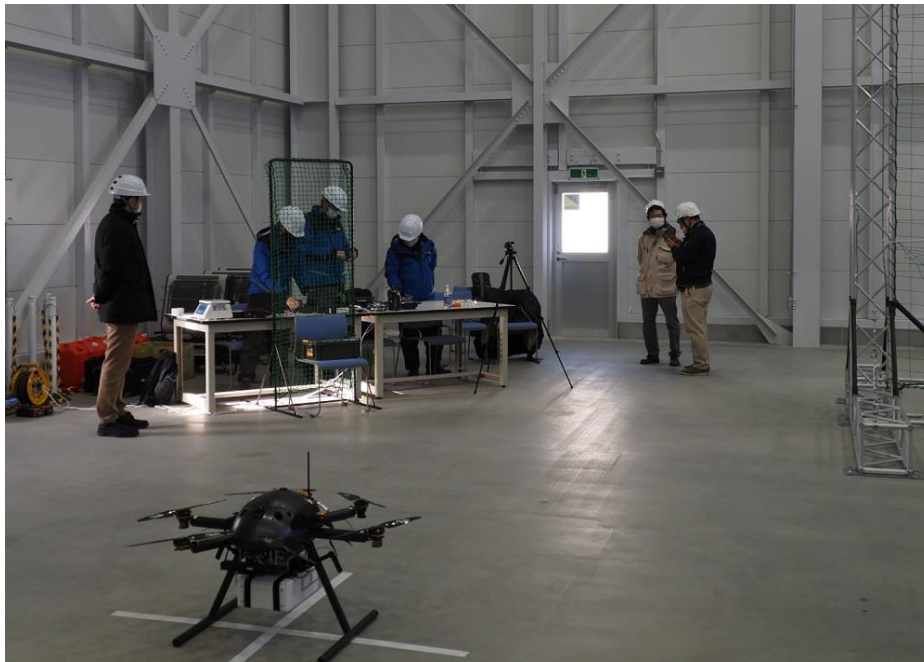


図 2.2-4 試験風景 2(試験準備状況)

2.3 試験項目

今回の試験は、NEDO 無人航空機性能評価手順書(Ver1.0)「目視内及び目視外飛行編」の「5.3 積載性能」に準拠して、風洞試験装置の表示風速を飛行速度と仮定し、試験用ドローンの飛行方法、搭載重量、ペイロード形状に対する飛行性能(飛行時間、航続距離)を推算するためのデータを測定する。なお、飛行性能は、各条件下で 1 分間(試験手順書の規定による)ホバリングを行い、その間に測定した消費電力データを基に算出する。

試験用ドローン :ACSL 製ドローン 2機種

ACSL-PF2J 操縦者による手動操作による飛行

PF-2(Vision) 手動操作による飛行

およびビジュアル SLAM による自動飛行

※ 上記 2 機種とも最大離陸質量は 9.8kg

搭載重量 :0.0kg 1.0kg 2.0kg の3種類

ペイロード形状 :小型、中型、中型(前後逆)の3種類

※中型(前後逆)は追加試験で一部試験のみ。

設定風速(飛行速度) :0m/s、5m/s、10m/s、15m/s

※手動操縦による飛行の場合では、設定風速 10m/s までとする。

※自動飛行時は、設定風速 15m/s まで実施することとした。

飛行時間 :各条件で 1 分間ホバリング飛行



図 2.3-1 小型, PF-2(Vision)機体



図 2.3-2 小型, ACSL-PF2J(手動)機体



図 2.3-3 中型, PF-2(Vision)機体



図 2.3-4 中型, PF-2(手動)機体



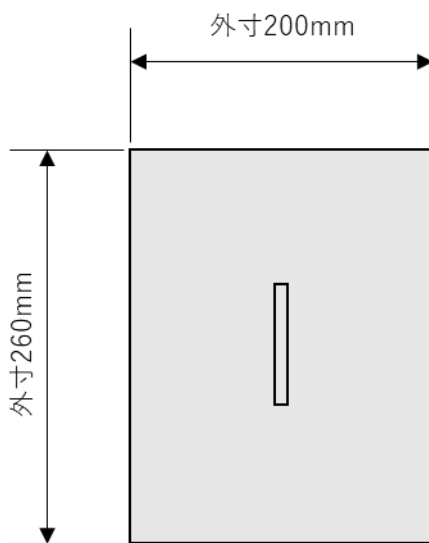
図 2.3-5 中型(前後逆), PF-2(Vision)機体



図 2.3-6 小型ペイロードボックス



図 2.3-7 中型ペイロードボックス



質量：284g（実測値）

※ 全ての外寸は概略値です。

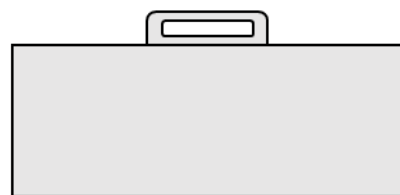
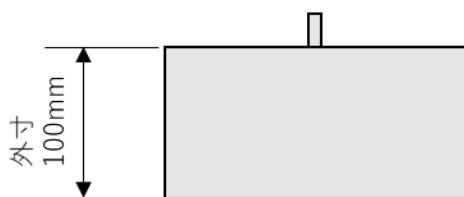


図 2.3-8 小型ペイロードボックス 寸法図

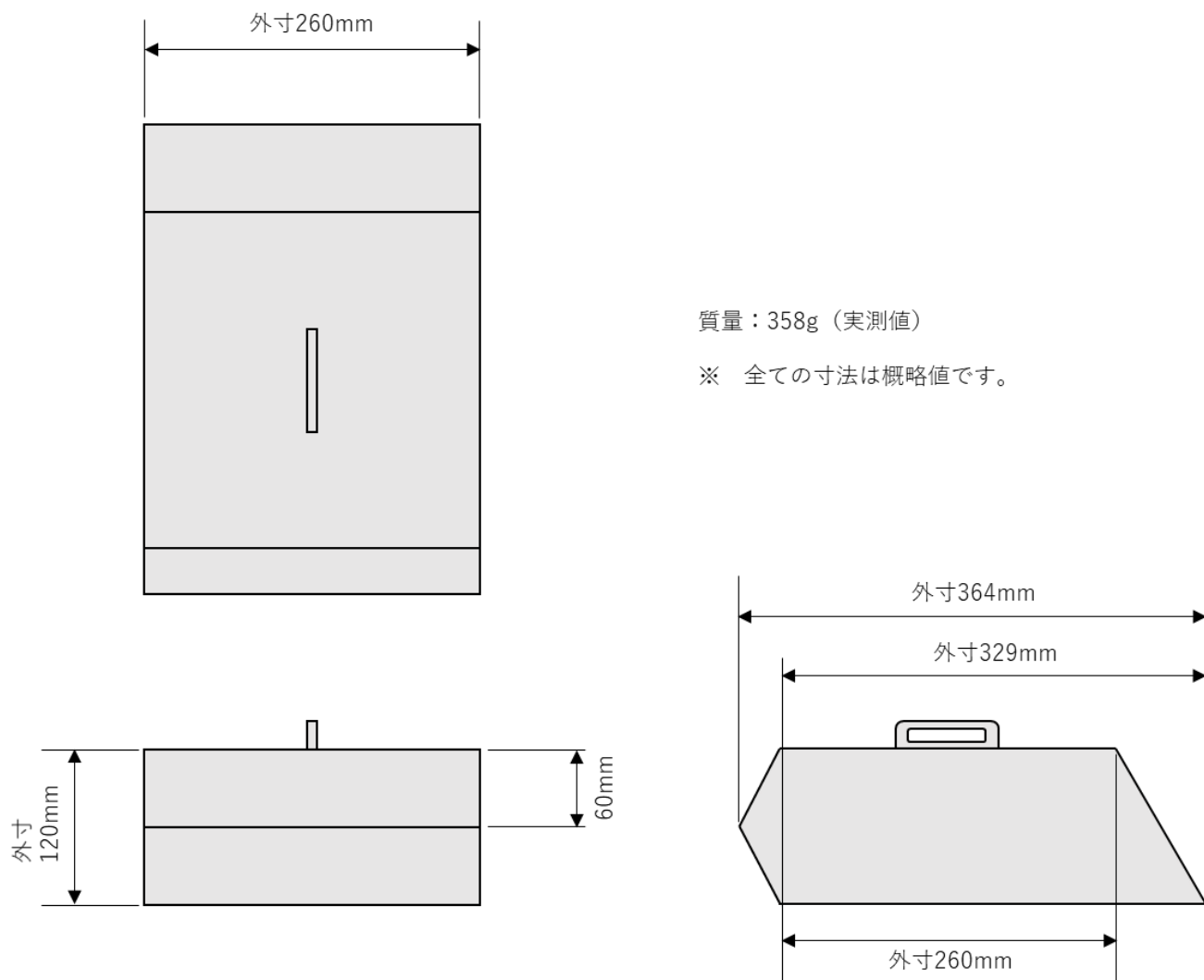


図 2.3-9 中型ペイロードボックス 寸法図

2.4 飛行試験実施日程

日付	時間	作業概要	備考
1/25 (月)	8:30~12:00	風洞棟内確認、人員配置、機材配置確認 機体落下防止ネット設営 風洞試験装置 試験送風 機体点検(飛行前点検、以下略) 調整飛行(ビジュアル SLAM の確認他)	
	12:00~13:00	昼食・休憩	
	13:00~16:30	風洞棟内人員保護ネット準備 風洞試験装置の調整運転 風洞試験装置の緊急停止操作確認 調整飛行(本番試験の試験位置、試験方法の詰めと 予行演習)	
1/26 (火)	8:30~11:30	風洞試験装置の調整運転 表 3.1-1 の 0.0kg および 1.0kg の飛行試験を実施	
	11:30~13:30	昼食・休憩	
	13:30~17:00	風洞試験装置の調整運転 表 3.1-1 の 2.0kg および表 3.2-1 の飛行試験を実施	
1/27 (水)	8:45~12:15	風洞試験装置の調整運転 表 3.2-2、表 3.3-1 および表 3.3-2 の中型ペイロードボ ックスの飛行試験を実施	
	12:15~14:00	昼食・休憩	
	14:00~17:00	風洞試験装置の調整運転 表 3.3-2 の小型ペイロードボックスおよび表 3.4-1 の飛行 試験を実施 片付け・撤収	

2.5 試験実施方法

今回の飛行試験は、機体の操縦方法、搭載物の形状、積載重量を替え、各設定風速（飛行速度）で飛行試験を行う。基本的な飛行パターンは、表 2.5-1 によるもので工程1～5 までの飛行に要する時間は3分～5分程度である。

表 2.5-1 飛行試験時の飛行パターン

工程	時間	内容	備考
1	適宜	風洞試験装置の風速が無風状態(0m/s)で待機位置の試験用ドローンを起動、離陸させ、試験定位置まで移動させて試験用ドローンをホバリング状態にする(試験定位置は風洞試験装置吹出口から約5m、地面高約3.5mとした)	
2	適宜	試験用ドローンをホバリング状態のまま風洞試験装置の風速を所定の設定風速(飛行速度)まで上昇させる	機体姿勢や機体位置が保持できない場合、試験中止
3	1分	所定の設定風速下で試験用ドローンをホバリング状態で維持し、この間データの収集を行う	機体姿勢や機体位置が保持できない場合、試験中止
4	適宜	試験用ドローンをホバリング状態のまま風洞試験装置の風速を無風状態(0m/s)まで下降させる	
5	適宜	試験用ドローンを、試験定位置から戻し、待機位置に着陸させて停止する	



図 2.5-1 離陸(小型ペイロード)

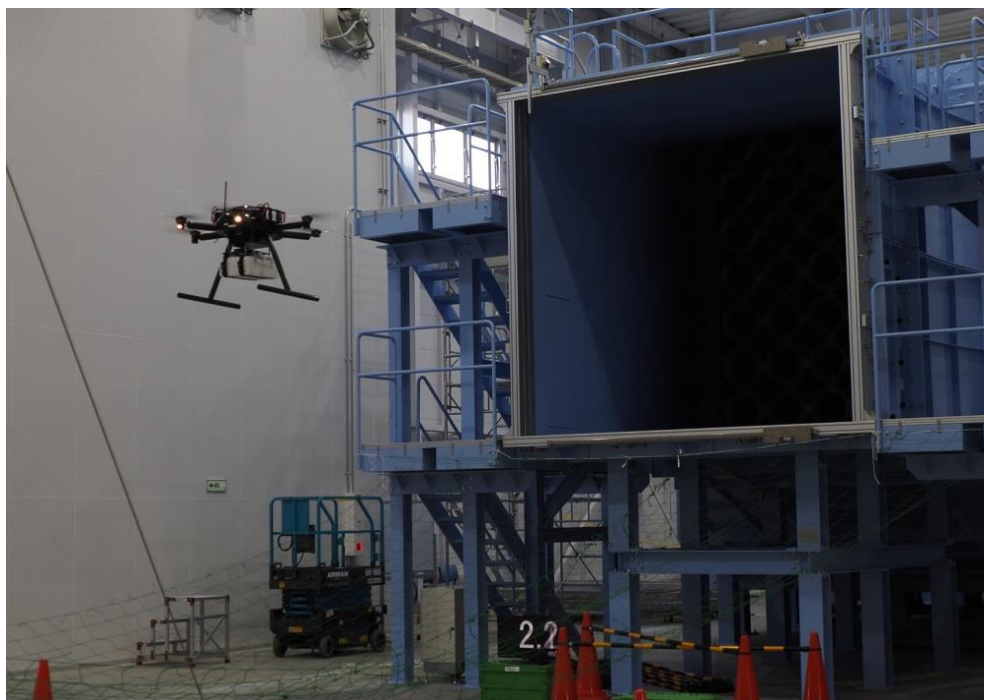


図 2.5-2 試験定位置での飛行 (小型ペイロード、風速 2.2m/s)



図 2.5-3 飛行試験 (小型ペイロード、自動飛行、風速 11.4m/s)



図 2.5-4 飛行試験(中型ペイロード、自動飛行)

3. 試験実施内容

3.1 試験実施内容 1(基本試験 1)

今回の飛行試験では、風洞試験装置の設定風速を 20m/s まで飛行データを収集する予定であったが、試験に先立って実施した調整飛行にて、機体の安定度、ひいては事故発生時に風洞棟内の試験要員の安全確保に懸念があるため、RTF との調整に基づき、試験の最高設定風速を 15m/s までとすることにした。基本試験 1 で測定した試験飛行は、表 3.1-1 の計 12 飛行分である。

(飛行試験1)PF-2(Vision)の自動飛行+小型ペイロード

表 3.1-1 飛行試験 1 PF-2(Vision)+小型ペイロードでの飛行試験条件

		搭載重量		
		0.0kg	1.0kg	2.0kg
ペイロード形状		小型	小型	小型
風洞試験装置 設定風速 (飛行速度)	0m/s	実施(○)	実施(○)	実施(○)
	5m/s	実施(○)	実施(○)	実施(○)
	10m/s	実施(○)	実施(○)	実施(○)
	15m/s	実施(○)	実施(○)	実施(○)

3.2 試験実施内容 2(基本試験2)

基本試験 2 で測定した試験飛行は、表 3.2-1~2 の計 12 飛行分である。

(飛行試験2)ACSL-PF2J の手動操縦による飛行+小型ペイロード

表 3.2-1 飛行試験 2 ACSL-PF2J+小型ペイロードでの飛行試験

		搭載重量		
		0.0kg	1.0kg	2.0kg
ペイロード形状		小型	小型	小型
風洞試験装置 設定風速 (飛行速度)	0m/s	実施(○)	実施(○)	実施(○)
	5m/s	実施(○)	実施(○)	実施(○)
	10m/s	実施(○)	実施(○)	実施(○)

(飛行試験 3) ACSL-PF2J の手動操縦による飛行+中型ペイロード

表 3.2-2 飛行試験 3(ACSL-PF2J(手動))+中型ペイロードでの飛行試験条件

		搭載重量	
		1.0kg	
ペイロード形状		中型	
風洞試験装置 設定風速 (飛行速度)	0m/s	実施(○)	
	5m/s	実施(○)	
	10m/s	実施(○)	

3.3 試験実施内容 3(追加試験)

今回の飛行試験の結果を比較するため、追加試験を実施した。

(飛行試験 4) PF-2(Vision)の手動操縦による飛行+小型ペイロード

表 3.3-1 飛行試験 4 PF-2(Vision)の手動操縦による飛行+小型ペイロードでの飛行試験条件

		搭載重量		
		0.0kg	1.0kg	2.0kg
ペイロード形状		小型	小型	小型
風洞試験装置 設定風速 (飛行速度)	0m/s	実施(○)	実施(○)	実施(○)
	5m/s	実施せず	実施(○)	実施せず
	10m/s	実施せず	実施(○)	実施せず
	15m/s	実施せず	実施(○)	実施せず

※本試験は、PF-2(Vision)を手動で飛ばすことにより手動/自動の比較を行うために追加で実施する。
そのため、比較する搭載重量として 1.0kg を中心に行うこととし、搭載重量 0.0kg および 2.0kg の
設定風速 5m/s、10m/s、15m/s は試験を実施しなかった。

(飛行試験 5)PF-2(Vision)の自動飛行+空気抵抗変化

表 3.3-2 飛行試験 5 PF-2(Vision)の自動飛行+空気抵抗変化飛行試験条件

		搭載重量		
		1.0kg		
ペイロード形状		中型	中型(前後逆)	小型*
プロペラガードの有無		無し(標準)	無し(標準)	有り
風洞試験装置 設定風速 (飛行速度)	0m/s	実施(○)	実施(○)	実施(○)
	5m/s	実施(○)	実施(○)	実施(○)
	10m/s	実施(○)	実施(○)	実施(○)
	13m/s	実施せず	実施せず	実施(○)
	15m/s	実施(○)	実施(○)	実施せず

※プロペラガードを付けた状態で 15m/s は危険と判断し、13m/s で実施した。

3.4 試験実施内容 4(最高速トライアル)(追加試験)

今回の飛行試験の最後に、安全を担保できる範囲で最高速トライアル試験を実施した。事前試験により試験用ドローンの飛行状態・飛行データから設定風速 17m/s を上限と判断し、17m/s での飛行データ 1 分間分を取得した。

(飛行試験 6)PF-2(Vision)の自動飛行の最高速トライアル

表 3.4-1 飛行試験 6 PF-2(Vision)の自動飛行+小型ペイロードでの最高速トライアル条件

		搭載重量
		1.0kg
ペイロード形状		小型
風洞試験装置 設定風速 (飛行速度)	5m/s	飛行状態の確認(○)
	10m/s	飛行状態の確認(○)
	15m/s	飛行状態の確認(○)
	17m/s	実施(○)

※5m/s、10m/s、15m/s では、飛行の安定度を確認しただけで 1 分間のホバリングは実施せず。

4. 試験結果

風洞試験装置の表示風速を基に風洞試験装置操作員が設定・指示した風速を飛行速度とみなして、各環境下で1分間の消費電力量を計測し、これをベースに各々の試験用ドローンの飛行条件下における、航続可能時間と航続可能距離を計算した。それぞれの計算式は NEDO 無人航空機性能評価手順書に基づき、下記とする。

$$\text{使用可能電力量(Wh)} = \text{搭載バッテリーの総電力量(Wh)} \times 0.8$$

※0.8は、離着陸時等に消費する分(0.2相当)を除いた使用可能電力

$$\text{航続可能時間(分)} = \text{使用可能電力量(Wh)} \div \text{1分間の積算消費電力量(Wh/分)}$$

$$\text{航続可能距離(km)} = \text{風洞試験装置の風速(m/s)} \times \text{航続可能時間(分)} \times 60(\text{秒}) \div 1000$$

なお、試験用ドローン(ACSL-PF2J および PF-2(Vision))の総電力量は、約 532Wh である。

4.1 試験実施内容 1(基本試験 1)および試験実施内容 4(最高速トライアル)のデータ

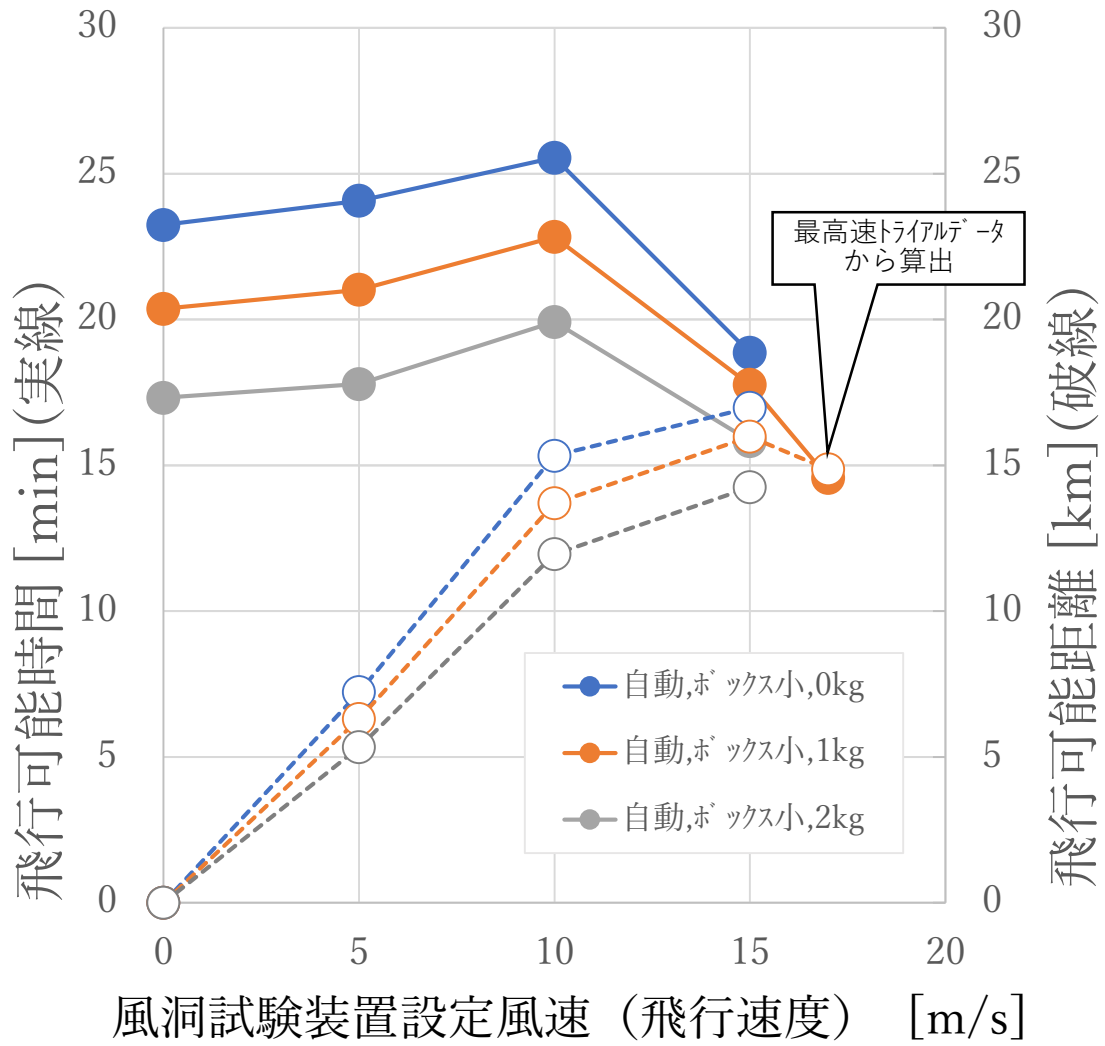
基本試験の飛行条件(自動飛行/手動操縦による飛行、ペイロード、風洞試験装置の各設定風速)で取得した飛行データから計算した試験用ドローンの航続可能時間と、航続可能距離の関係を以下の各表に示す。

表 4.1-1 および図 4.1-1 は、表 3.1-1 の PF-2(Vision)自動飛行、小型ペイロードの試験内容の結果と表 3.4-1 の最高速トライアル内容の結果から飛行可能時間、距離を算出した図表である。このデータを見ると飛行可能時間は飛行速度 10m/s 付近で、飛行可能距離は、飛行速度 15m/s 付近で最大になっている。

表 4.1-1 PF-2(Vision)+小型ペイロードでの性能評価マトリクス

		搭載重量		
		0.0kg	1.0kg	2.0kg
ペイロード形状		小型	小型	小型
風洞試験装置 設定風速 (飛行速度)	0m/s	—	—	—
		23.2min	20.4min	17.3min
	5m/s	7.22km	6.31km	5.34km
		24.1min	21.0min	17.8min
	10m/s	15.33km	13.70km	11.95km
		25.6min	22.8min	19.9min
	15m/s	16.97km	15.98km	14.25km
		18.9min	17.8min	15.8min
	17m/s	—	14.86km	—
		—	14.6min	—

※マトリクス表の上段は飛行可能距離、下段は飛行可能時間を示す。

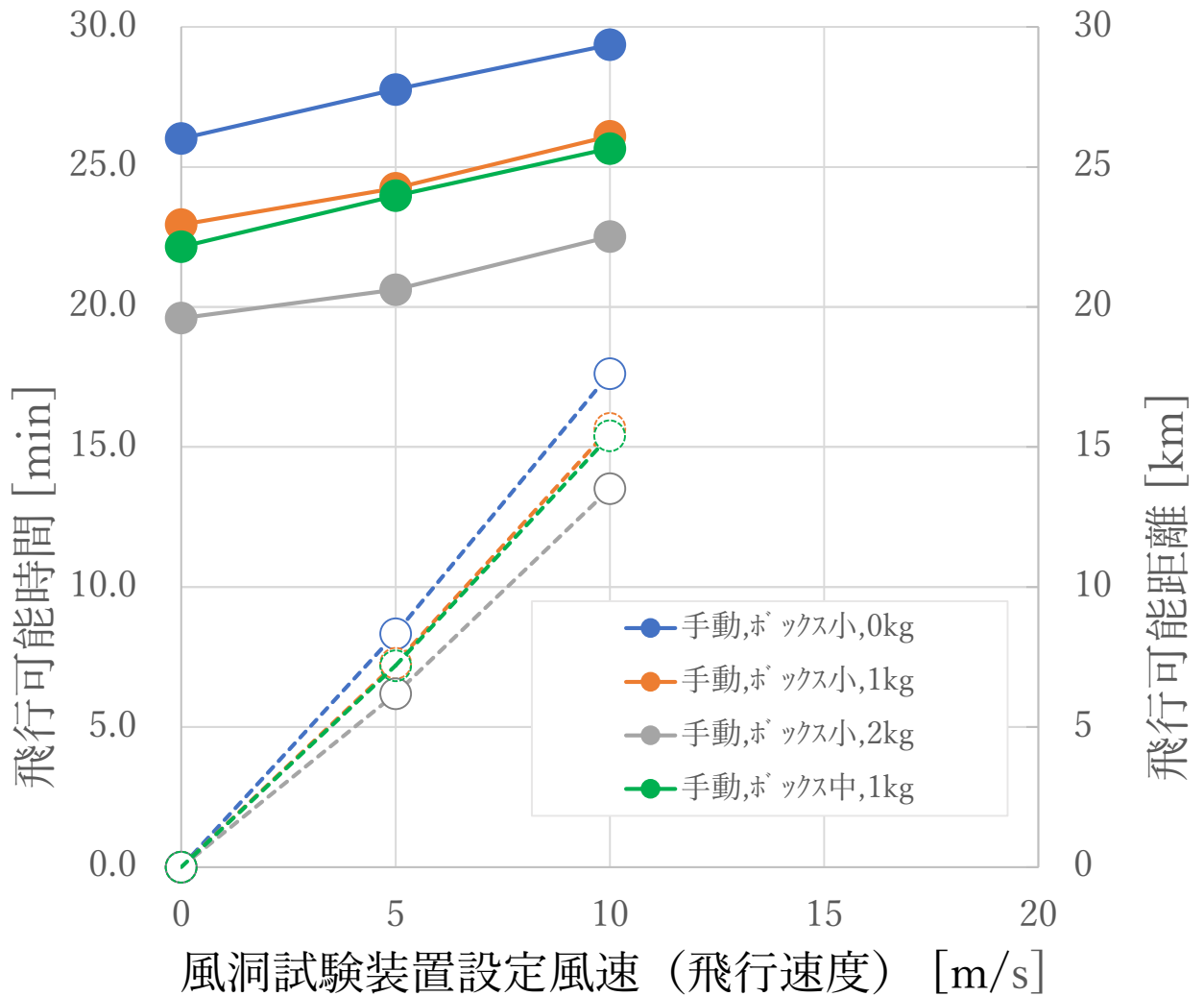


- ※ 実線は、飛行可能時間を示す。
- ※ 破線は、飛行可能距離を示す。

図 4.1-1 PF-2(Vision)の自動飛行+小型ペイロード、積載重量による飛行性能の変化

4.2 試験実施内容 2(基本試験 2)のデータ

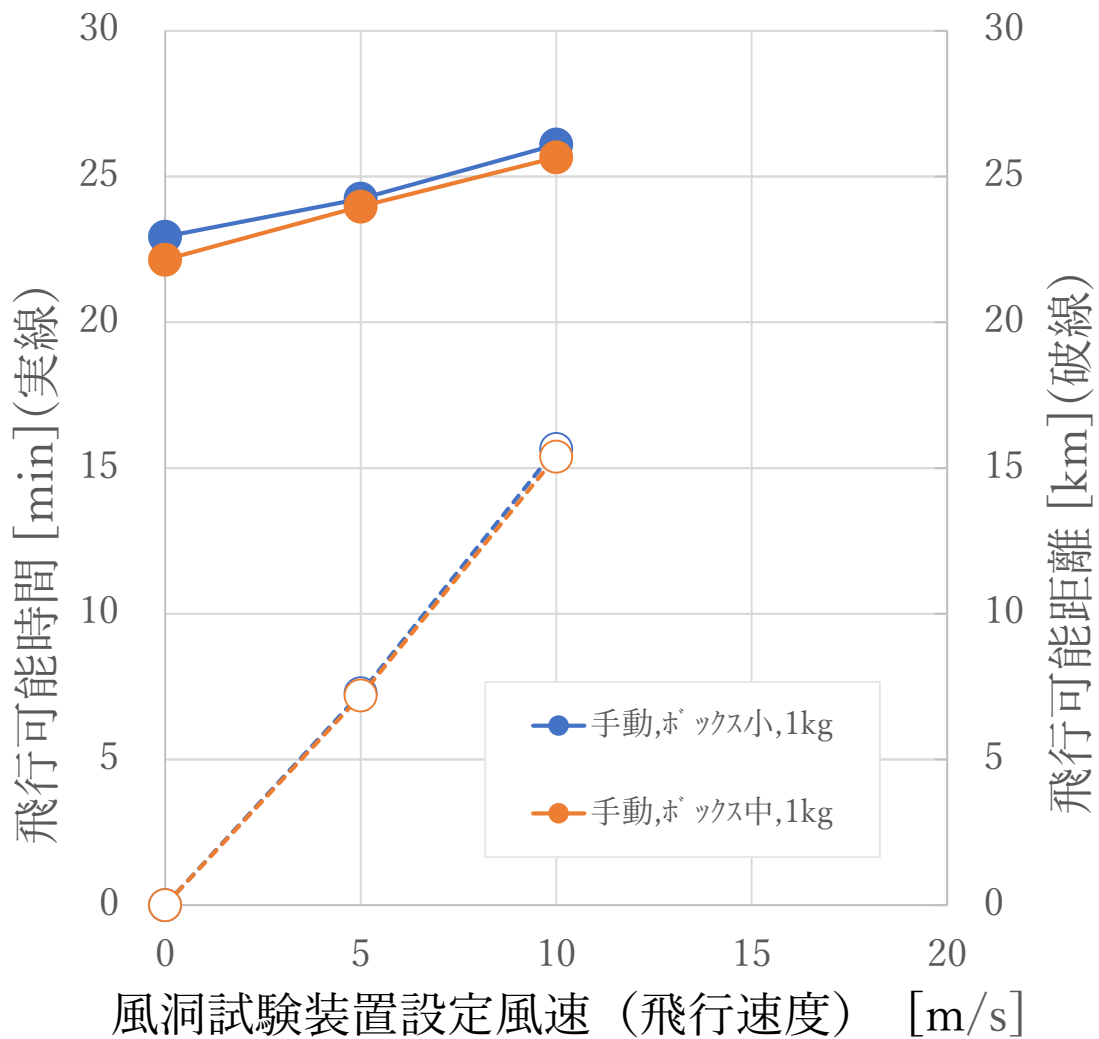
図 4.2-1 は、表 3.2-1 の ACSL-PF2J による手動操縦による飛行、小型ペイロードの試験内容の結果と表 3.2-2 の ACSL-PF2J による手動操縦による飛行、中型ペイロードの試験内容の結果とを表したものである。手動操縦による飛行では測定したデータは 10m/s までの飛行速度データである。測定した範囲内では、図 4.1-1 の PF-2(Vision)の自動飛行に対して 1 割程良い結果が出たが、データの傾向は同じである。



- ※ 実線は、飛行可能時間を示す。
- ※ 破線は、飛行可能距離を示す。

図 4.2-1 ACSL-PF2J の手動操縦による飛行+小型/中型ペイロード、
積載重量による飛行性能の変化

図 4.2-2 は、ACSL-PF2J 手動操縦による飛行時のペイロード形状による飛行性能を比較したものである。小型ペイロードと中型ペイロード(正規取付方向)比較飛行試験(表 3.2-1 の一部、表 3.2-2)を行った。測定の結果、両者の飛行性能については、大きな差は見られなかった。



※ 実線は、飛行可能時間を示す。

※ 破線は、飛行可能距離を示す。

図 4.2-2 ACSL-PF2J の手動操縦による飛行、ペイロード形状の違いによる飛行性能の変化

表 4.2-1 は、表 3.2-1 の ACSL-PF2J による手動操縦による飛行、小型ペイロードの試験内容の結果と表 3.2-2 の ACSL-P2J による手動操縦による飛行、中型ペイロードの試験内容の結果から飛行可能時間、距離を算出した表である。

表 4.2-1 ACSL-PF2J(手動)+各種ペイロードでの性能評価マトリクス

		搭載重量			
		0.0kg	1.0kg		2.0kg
ペイロード形状		小型	小型	中型	小型
風洞試験装置 設定風速 (飛行速度)	0m/s	—	—	—	—
		26.0min	22.9min	22.1min	19.6min
	5m/s	8.33km	7.27km	7.19km	6.19km
		27.8min	24.2min	24.0min	20.6min
	10m/s	17.62km	15.66km	15.40km	13.51km
		29.4min	26.1min	25.7min	22.5min

※マトリクス表の上段は飛行可能距離、下段は飛行可能時間を示す。

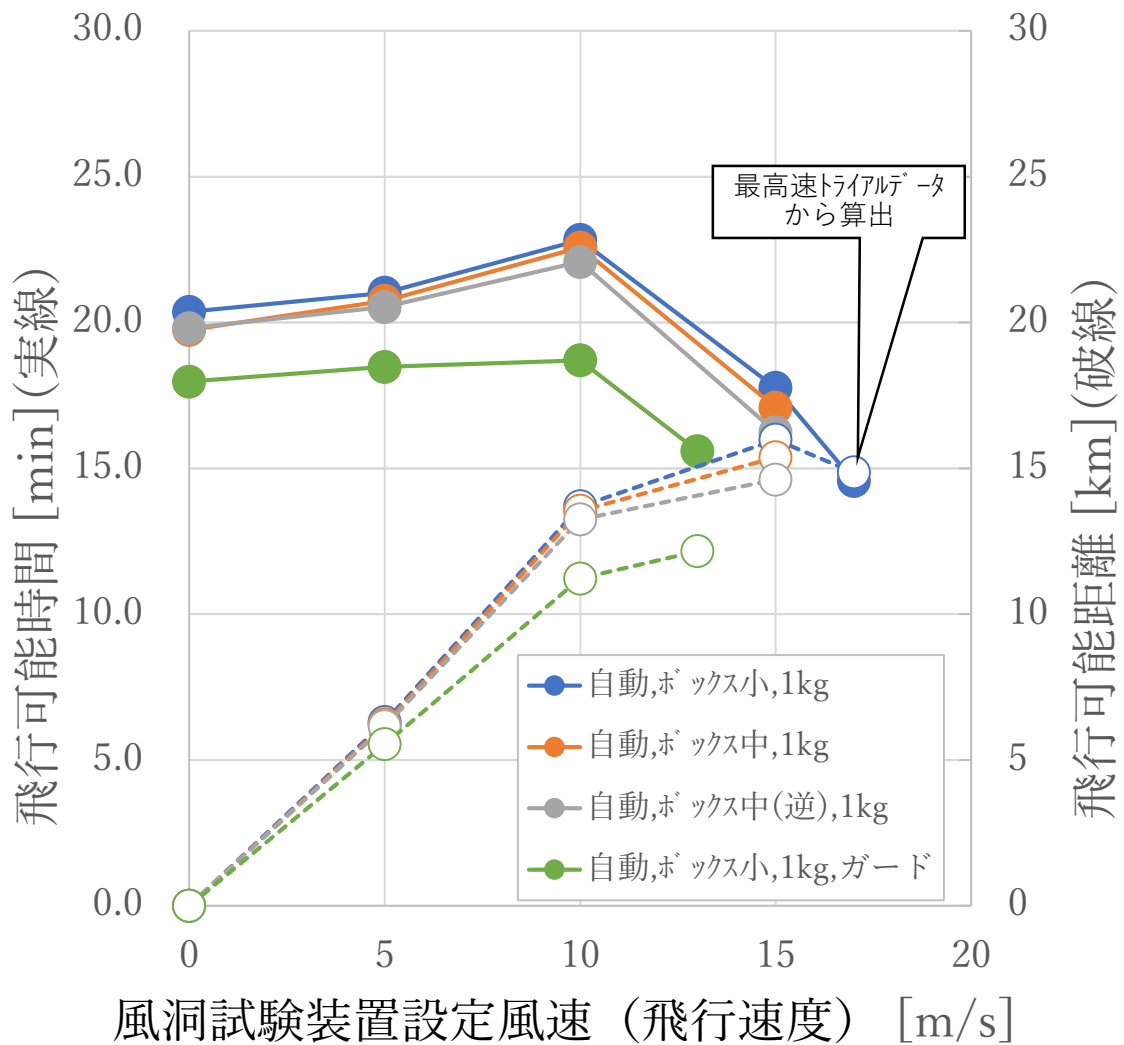
4.3 試験実施結果 3(追加試験)のデータ

表 4.3-1 および図 4.3-1 は、PF-2(Vision)自動飛行のペイロード形状やプロペラガードによる飛行形態の違い別に測定したものである。本試験においては、小型ペイロードと中型ペイロード(正規取付け方向、前後逆取付け方向)、および小型ペイロード(正規取付け方向)にプロペラガードを追加して比較飛行試験(表 3.2-2)を行った結果としてプロペラガードを付けたものは、プロペラガード分の重量が加わるのでその分は、飛行可能時間、飛行可能距離も低下する傾向がみられた。なお、プロペラガードの空気抵抗、乱気流の発生等により、飛行速度の上昇による安定性の低下が大きく、試験安全性の観点より 13m/s までの測定とした。また中型ボックスの正規方向、前後逆方向取付けにおいては、飛行速度の増加とともに差が出てくる。飛行時の試験用ドローンの機体安定性も悪くなった。

表 4.3-1 PF-2(Vision)+ 各種ペイロード状況での性能評価マトリクス

		搭載重量			
		1.0kg			
ペイロード形状		小型	中型	中型(前後逆)	小型
プロペラガードの有無		無(標準)			有
風洞試験装置 設定風速 (飛行速度)	0m/s	—	—	—	—
		20.4min	19.7min	19.8min	18.0min
	5m/s	6.31km	6.22km	6.16km	5.54km
		21.0min	20.7min	20.5min	18.5min
	10m/s	13.70km	13.55km	13.25km	11.22km
		22.8min	22.6min	22.1min	18.7min
	13m/s	—	—	—	12.16km
		—	—	—	15.6min
	15m/s	15.98km	15.38km	14.62km	—
		17.8min	17.1min	16.2min	—
	17m/s	14.86km	—	—	—
		14.6min	—	—	—

※マトリクス表の上段は飛行可能距離、下段は飛行可能時間を示す。



※ 実線は、飛行可能時間を示す。
 ※ 破線は、飛行可能距離を示す。

図 4.3-1 PF-2(Vision)による自動飛行、各種ペイロード状況の違いによる飛行性能の変化

5. 試験結果に対する考察

5.1 飛行可能時間と飛行速度の関係

飛行速度が約 10m/s のときに、飛行可能時間が最大になった理由は、ドローンのロータ揚力と飛行時に受ける風の抗力との釣り合いと考えられる。ホバリング状態から風速(飛行速度)が上がると最初はロータの揚力増加が、風速(飛行速度)によって発生する抗力増加より大きいのでホバリング時より電力消費が減少し、結果として飛行可能時間は伸びる。これがある風速(飛行速度)を超えると抗力の増加の方が大きくなり、飛行可能時間が減少に転ずる。この風速(飛行速度)が当該ドローンでは 10m/s 付近にあると考えられる。

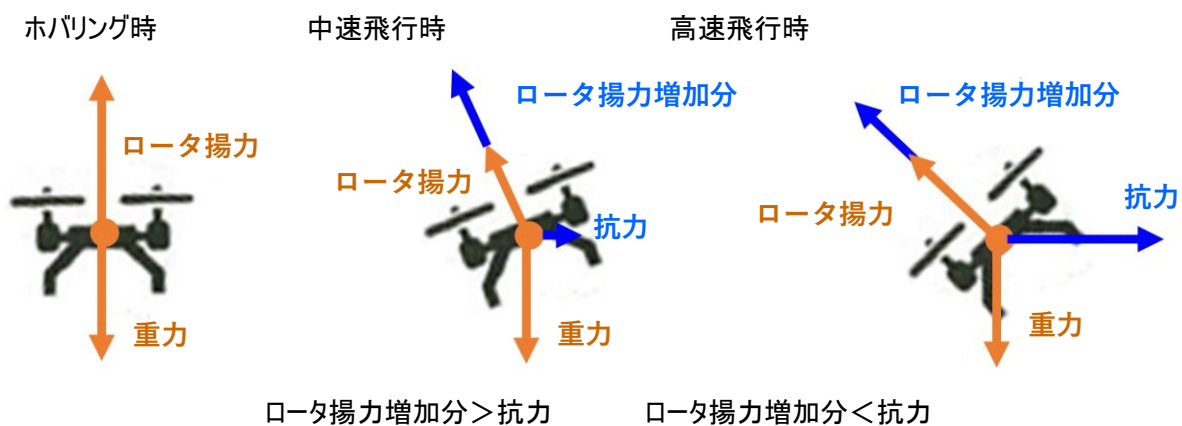


図 5.1-1 飛行速度による揚力、重力、抗力の関係

5.2 自動飛行と手動操縦による飛行の違い

今回の試験結果では、ほぼ同一と思われる外的条件(風速)下の飛行で自動飛行の飛行可能時間より手動操縦による飛行の飛行可能時間が約 10%長くなる傾向が出た。これは、自動飛行の場合、位置制御のための視覚制御用の機器を搭載していることが関係していると思われる。

5.3 風洞試験装置のブロックage

風洞試験装置の風路(送風口サイズ: 3m × 3m)に対して、今回の試験で最大のブロックageとなる最高速トライアル(17m/s)における試験用ドローンおよびパイロードボックスの正面の投影面積は約 0.2m²であった。よって、今回の試験での最大のブロックage(≒風路の遮蔽率)は、約 2.2%(=0.2 ÷ 9)となる。

6. まとめ

NEDO 無人航空機性能評価手順書(Ver1.0)「目視内及び目視外飛行編」に従った試験手順を RTF 施設にて実施するケースの現地検証のため、その 1 つであるパイロードー飛行時間性能試験を実施した。試験用機体の実際の運用を想定した飛行速度、パイロード重量を設定し、手順書に従って RTF 風洞棟を用いた計測データを取得することができた。

本試験結果が無人航空機性能評価手法の発展に寄与できれば幸いである。

以上