

ドローンによる宅配物流の効率化と CO2 排出低減に関するシミュレーション研究

松尾典孝¹⁾

A Simulation Study on Efficiency Improvement and CO2 Reduction of Home Delivery Logistics by Drones

Noritaka Matsuo

In recent years, home delivery services have been rapidly increasing, and the problems on inefficiency and high CO2 emissions by truck delivery have been highlighted. This paper reports on the simulation of improving delivery efficiency and reducing CO2 emissions by the hybrid delivery system of trucks and drones.

Key Words: Other means of Mobility, Airplane, Greenhouse Gas, CO2 Emission, Logistics, Drone, VTOL, Simulation (F3)

1. まえがき

近年宅配サービスはネット通販の普及により取扱個数が急伸しており 2018 年度の国内統計によると年間 43 億個に達している。¹⁾ 一方でトラックドライバの不足や過大な労働負荷の問題が顕在化し、また CO2 ゼロ社会の実現に向けてはトラックの CO2 排出が問題となっている。

日本政府が 2017 年に策定した総合物流施策大綱では物流の生産性向上の方策の一つとしてドローンの活用が挙げられており国交省・環境省連携事業として全国で過疎地におけるドローン配送の実証試験が始まっている。²⁾

本稿では新しい商業宅配物流の形態としてドローンとトラックによる配送分担システムを想定し、シミュレーションによりドローンに要求される機体主要諸元や性能を予測するとともに配送時間や距離、CO2 排出量をトラック配送と比較しその実現に向けての課題について考察する。

2. 宅配サービスの現状と問題

Table-1 Mileage Data of Home Delivery Trucks²⁾

Area	Milage/Mth	Luggage/Mth	Milage/Luggage
Depopulated	340,000km	300,000	1.2km
City	370,000km	1,600,000	0.2km

表-1 に国内宅配業者のトラック配送の月間実績データを示す。過疎地では都市部の 1/5 程の数の貨物を配送するために都市部と同じ距離を走行していることがわかる。日本は山地が多く地方都市のドライバの多くは人口密度の高い平野部と人口密度の低い山間部が混在する配送エリアを担当している。また大手宅配業のドライバはこのようなエリアで 1 日平均 130~140 個の貨物を配送しているのが今日の宅配サービスの実情である。

3. ドローンとトラックの配送分担

3.1. 宅配用 UAV の方式

宅配用無人航空機(UAV)には垂直離着陸(VTOL)機能は必須でありいくつかの方式が考えられる。固定翼を持たず回転翼のみで飛行する方式には大径のメインロータで揚力を得るヘリコプタ (図-1(b)) と複数のロータの発生する推力で飛行するマルチコプタ(図-1(a))がある。マルチコプタはヘリコプタに比べ構造が簡単で軽量・コンパクトという利点がある。ただロータの推力のみで揚力を得るので飛行時のエネルギー消費は固定翼をもつ方式に比べ多い。一方固定翼と回転翼を合わせ持つ方式(図-1(c))は高速飛行すれば固定翼で大きな揚力を得ることができるためエネルギー消費が少なく航続距離も長いが固定翼の機体サイズが大きい。日本の宅配では配送距離が比較的短く高速飛行の必要がないこと、また離着陸スペースが狭いなどの事情を考慮すると宅配用としてはマルチコプタが最も適していると考えられる。本稿では以降自律飛行型の電動マルチコプタをドローンと表記する。



Fig.1 Possible Configurations of UAV for Home Delivery Work

1) 松尾技術士事務所 (436-0062 静岡県掛川市旭ヶ丘 1-15-12
Email : mec-matsuo@mail.wbs.ne.jp)

3.2. ドローンの諸元と性能

(1) ドローンのシミュレーションモデル

図-2 に飛行中の機体の力学モデルを示す。機体は 1D モデルとし飛行ルートは地面座標系の X、Y、Z 空間のルートを X、Z 平面に伸展したものとし(図-3)飛行速度の X、Z 成分を時間テーブルで与える。解析計算には逆解析法を用いる。ロータは Actuator Disk Theory^{(6),(7)}モデルとし運動量理論より各ロータ平面の空気誘引速度 v_i を、また実験値であるホバリング時(前進率 $J=0$)の推力係数 C_T とロータ (モータ) 回転数 N からスラスト力 F_T 、 F_D を求め、図-2 の X、Z 方向の力のバランス式、および重心廻りのモーメントのバランス式の 3 式を満たすようピッチ角 β と各モータ回転数とパワーを求める。モータは K_v 値と巻線抵抗等の電気的パラメータと最大トルク、回転数、出力等機械的パラメータを入力し、効率マップ (図-4) を作成する。

バッテリーは SOC 対開放電圧のテーブルデータを用い内部抵抗による電圧降下を考慮するモデルとする。(図-5)

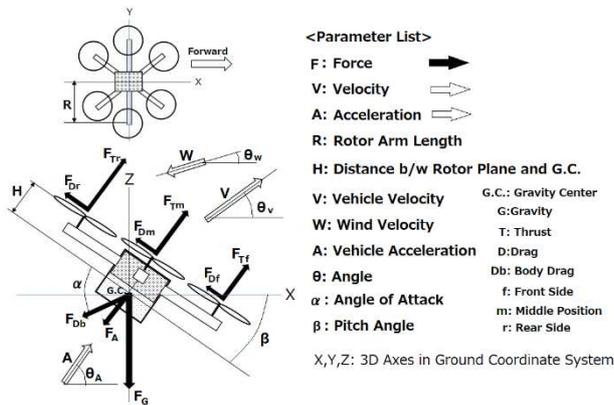


Fig.2 Dynamics of Drone Flight

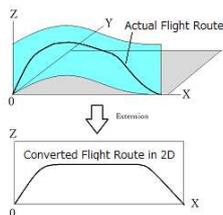


Fig.3 Flight Route in 2D

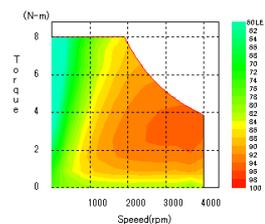


Fig.4 The Motor Efficiency Map

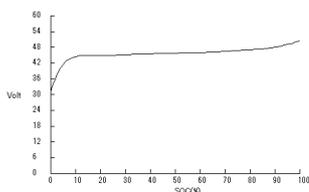


Fig.5 The Battery Open Terminal Voltage

(2) ドローンとトラックの諸元と性能

表-2 は今回のシミュレーション⁸⁾検証に用いた 4 機種 of ドローン D5、D10、D30、D60 の諸元を示す。

Table-2 Specifications of Drones

Specifications	D5	D10	D30	D60	
Vehicle	Hexa-copter (6-Rotors)				
	Weight(kg)	5	10	12	20
	Max. Payload(kg)	5	10	30	60
	*1 Frame Size (mm)	530	625	1500	1600
Cargo Box	Size(mm)	300x300x300	300x300x300	600x600x600	700x700x700
	Cd	0.45	0.45	0.45	0.45
Rotor	Diameter(mm)	430	588	720	760
	*2 C_T (J=0)	0.1	0.1	0.1	0.1
	*3 Efficiency(%)	82	82	82	82
Motor	Max. Torque (Nm)	3	4	8	20
	Max. Power (kW)	0.43	0.7	1.6	3.35
	Max. Speed (rpm)	6000	4000	4000	4000
Battery	Type	Lipo (Lithium Polymer)			
	Nominal Voltage(V)	12S-44.4V			
	*4 Capacity(mAh)	9000			
	*4 Weight (kg)	2 (Energy Density=0.2kWh/kg)			
Inverter	Efficiency (%)	90			

*1 Maximum Distance between Rotor Centers

*2 Coefficient of Thrust for Hovering (Advance Ratio $J=0$)

*3 (Aerodynamic Power of Rotor) / (Motor Output Power)

*4 per Battery Pack

Table-3 Specifications of Trucks

Specifications	Data	
Power Type	EV	Diesel
Weight(kg)	2250	2200
Width(mm)	1830	
Height(mm)	2320	
Max. Power(kW)	70	110
Max. Torque(Nm)	280	375
Battery Capacity(kWh)	28	-
Transmission	-	6MT
Final Gear Ratio	15:1	3,909:1
Tire Size	205/70R16	195/75R15
Cd	0.45	
Coef. Rolling Resistance	0.012	
Accessories(kW)	1.5	

またトラックはディーゼルトラックと EV トラックの 2 タイプ (表-3) とし、車両走行シミュレーション⁹⁾によりエネルギー消費率を求めた。

図-6 は表-2、表-3 に示すドローンとトラックの貨物重量に対する走行距離 1km 当たりのエネルギー消費量と CO2 排出量および 1kg の貨物を 1km 運ぶために排出される CO2 量を表す CO2 排出率を Well to Wheel ベースで算出した値を比較したものである。ドローンは機体重量と等重量のバッテリーを搭載して 60km/h で飛行、トラックは発進-定速走行-停止を繰り返す走行モード(最高速 30km/h、平均 25km/h)で走行するものとした。ドローンおよび EV の電力-CO2 換算係数は 0.4kg/kWh、軽油の製造エネルギーと発熱量の比を 0.13⁽¹⁰⁾とし CO2 排出係数を 0.0695 (内 Well to Tank の排出 0.009⁽¹⁰⁾) kg/MJ とした。

トラックの CO2 排出量は貨物重量の影響が小さいのに対しドローンは貨物重量の影響が大きい。図-7 に EV トラックの貨物重量 60kg とドローン D30 の貨物重量 30kg の

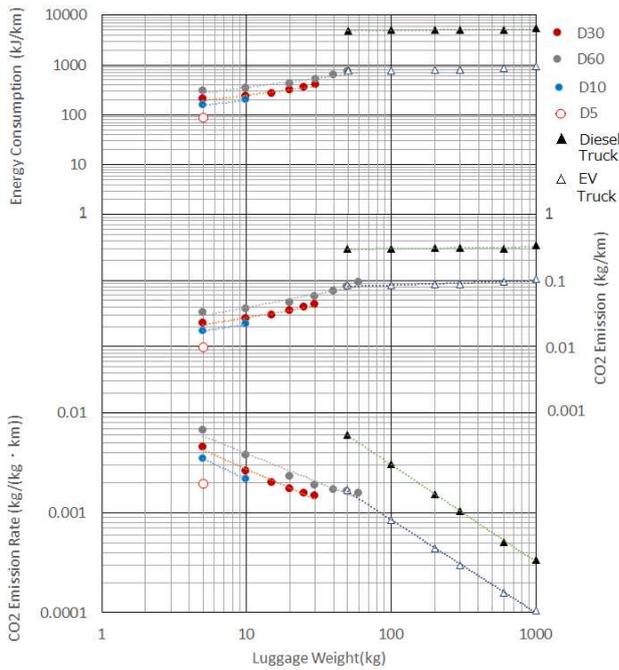


Fig.6 Delivery Performance of Trucks and Drones

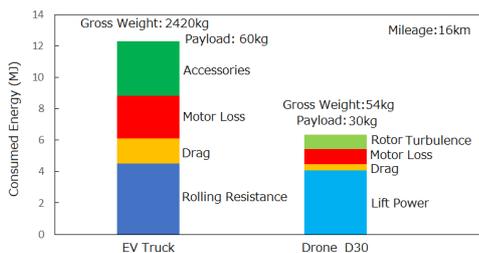


Fig.7 Energy Loss Factors of the EV Truck and the Drone

場合のエネルギー消費の内訳を示す。ドローンでは揚力発生に費やす動力がエネルギー消費の大部分を占めるためエネルギー消費、CO2 排出量に対する総重量の影響が大きくなる。

また図-6 より貨物重量が大きい場合トラックの方がドローンより CO2 排出率が少ないことがわかる。これは貨物量が多い場合はトラックで運送の方がドローンで小分けにして運ぶより CO2 排出量が少ないことを意味する。

またドローンは貨物積載量が少なく宅配では発進後複数の配達先で貨物を降ろした後空荷で帰還する飛行を繰り返す。ゆえに CO2 排出低減のためには使用するドローンの最大積載能力や配送順序・経路などの最適化が必要となる。

(3) ドローンの経済速度

図-8 に D30 の飛行速度に対する航続距離、エネルギー消費率、およびモータパワー合計値の変化を示す。速度 16.7m/s(時速 60km/h)で航続距離 16km に達しており、それ以上の速度では航続距離、エネルギー消費率ともにほとんど一定である。速度増加にともないモータパワーは増加していることからわかるとおり飛行時の抵抗は速度の増加と

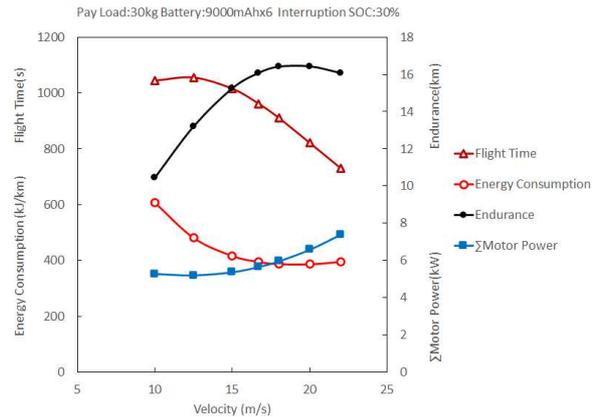


Fig.8 Economic Flight Speed of the Drone

とも増加するが一方で同一距離を飛行するのに要する時間は速度に反比例して減少するのがその理由である。したがって航続距離が長くしかもモータパワーが少ない速度を経済速度とする。同図より求めた経済速度は時速 60km/h となる。なお積載量を減らした場合の経済速度は若干遅い側にシフトするが配送時間を極力短くする目的から積載量によらず経済速度は 60km/h 一定とする。また他の機種についても今回の飛行速度は等しく 60km/h とする。

3.3. ドローンとトラックによる配送分担シミュレーション

(1) トラックとドローンの配送分担の概念

商業宅配サービスでトラック 1 台とドローン 1 機が配送を分担するシステムを以下のように想定する。

- ・配送センタから配送エリアまではトラックが貨物とドローンを運搬する。
- ・ドローンはエリア内のドローンポート (以降 DP) から発進し複数の貨物を複数の配達先へ配達した後帰還する。
- ・トラックとドローンの配送は並行して行い配送作業全体のコントロールはドライバーが 1 人で行う。

仮に貨物数を 30 個程度、貨物総重量を 200kg 程度とすると D10 や D5 ではフライト回数が多くトラックとの並行配送は難しいので使用ドローンは D30 または D60 とする。

(2) モデル配送エリア

今回の検証に用いるモデル配送エリアはその世帯数から推定される 1 日あたりの平均宅配便数が数百個程度あり、ドローンの飛行が規制される人口集中地区(DID)がない地方の市町村で、しかも国内で比較的多くみられる地理的条件を持つという条件を基準に選定した。図-9 にモデルとする町の配送エリアの Google Earth 平面地図を示す。世帯数は約 1400 で、当該エリアの宅配貨物の発送基地となる配送センタは 15km 離れた地点にある。



Fig.9 The Plain View of the Model Area for the Delivery Service

図中のマーク円は主な集落の位置を示す。モデルでは平野部に分布する集落に 100 個、白の囲い文字でアドレス番号を示す周辺集落に残り 30 個を配送するものとする。

図-10 にトラックで全数を配送する場合の配送ルートを示す。ルートはエリア内の主な集落を必ず 1 度は通り、更に極力同じ道を複数回通らないようなルートを地図上で探したもので延べ走行距離は約 75.5km である。図-11 に配送を平野部のみに限定した場合の配送ルートを示す。延べ走行距離は約 28.7km となる。これより走行距離を配送個数で除した平均配送間隔は平野部で約 0.3km、周辺部で 1.5km となり比率は 1:5 である。



Fig.10 The Delivery Route for the Whole Area



Fig.11 The Delivery Route for the Plain Area Only

(3) 配送ルートとドローンポート配置

今回の配送モデルではトラックで平野部に 100 個、ドローンで周辺集落に 30 個を配送するものとする。表-4 に各配送先に配達する貨物の重量を示す。トラックの配送ルートは図-11 の 'START & END' で示す配送エリア北東端地点を

Table-4 The Address and the Loads Delivered

Address	Load1 (kg)	Load2 (kg)	Load3 (kg)	Total Weight (kg)	Address	Load1 (kg)	Load2 (kg)	Load3 (kg)	Total Weight (kg)
1	10			10	12	5			5
2	2	5		7	13	2			2
3	5	10		15	14	15			15
4	15	2		17	15	2	10		12
5	10			10	16	5	2		7
6	2			2	17	10	5	2	17
7	15	5		20	18	2			2
8	5			5	19	5			5
9	2			2	20	10			10
10	5			5	21	5			5
11	10	10		20					

出発しエリアを時計回りに回るものとする。

DP はドライバーが手作業で貨物積み込みを行う手動 DP を配送エリア内の 2 箇所 (図-9 の P1 と P2)、または貨物積み込みから発進までを全自動で行う自動 DP を 1 箇所 (図-9 の P0) に設置する。

(4) 最適配送計画

以下 1.~3.により決めた飛行計画を最適配送計画とする。

1. 配送先を位置関係によりグループ分けしグループ毎に離発着に使用する DP を決める。(複数 DP 使用の場合)
2. ドローンは最大貨物積載重量を超えない範囲の貨物を積載して発進 DP を離陸し目的地までを直線で結ぶルートで巡回し、積載貨物を全て配送し終わったら決められた DP に帰還着陸するというフライトを配送グループ内全ての配送先への配達を終えるまで繰り返す。
3. このとき式(1)に示す機体重量と距離の積和 SUMWL が最小となるよう各フライト毎の配送順序を決める。

$$SUMWL = \sum (W \cdot L) \text{-----}(1)$$

但し \sum : 2.の全フライト合計

W:機体総重量 (機体本体+バッテリー+貨物)

L:重量 W の状態で飛行する距離

ドローンのエネルギー消費は機体総重量の影響を大きく受けるので SUMWL は飛行中の全エネルギー消費の指標となる。

表-5 に D30 と D60 のフライト毎のルート (飛行順は左から右、P1、P2 は DP 番号、数値のみはアドレスを意味)、および飛行距離を示す。

(5) フライトのシミュレーション

フライト毎のシミュレーションを行い飛行時間、CO2 排出量などを求めた。1 回のフライトでは垂直離陸後高度 50m で目的地上空まで水平飛行し垂直着陸するというパターンを配送先の数に応じて繰り返す。計算では一定風速 5m/s の向かい風を仮定し対地飛行速度はその条件での経済速度 54km/h とした。

表-6 に各フライトにおける配送時間、エネルギー消費、搭載バッテリー本数を示す。バッテリー本数は DP 帰還時のバッテリー SOC が 30%を下回らない範囲で最も少ない搭載数

Table-5 Flight Route and Mileage (Manual DP)

Drone	Group #	Flight #	Route	Mileage (km)
D30	1	1	P1-14-8-12-13-18-P1	12.96
		2	P1-19-17-P1	5.59
		3	P1-15-20-16-P1	5.34
		4	P1-11-10-9-P2	10.1
	2	5	P2-6-7-P2	7.9
		6	P2-3-P2	5.04
		7	P2-21-1-2-P2	13.24
		8	P2-4-5-P2	6.78
D60	1	1	P1-16-17-15-11-9-P1	11.54
		2	P1-14-20-19-18-10-12-13-8-P2	17.08
	2	3	P2-5-4-7-6-P2	10
		4	P2-3-2-1-21-P2	13.53

である。着陸後貨物をリリースし再離陸するまでの所要時間を3分とし飛行時間との合計により配送時間を算出した。

また図-12 にドローンとトラックの配送分担のタイムテーブルを示す。D30 と D60 の貨物積み込み時間は各々5分と10分、配送終了後のドローンの回収時間を10分としている。手動 DP の場合 D60 はフライト後 DP で待機し60分間隔でトラックが DP に立ち寄り待機しているドローンに貨物を積込んで発進させることでトラック配送のロスタイムを生じさせないよう時間割されている。D30 の場合も1回のトラック配送時間は60分であるがフライト時間が短い場合トラックは DP に止まりドローン配送を数回続けた後、次の配送をスタートさせるよう時間割されている。D30 は D60 に比べトラックが DP に止まる時間だけ配送終了までの時間は長くなる。一方自動 DP の場合トラックはドローン配送の貨物を DP に届けた後ドローンとは別に配送を進め最後に配送を終了したドローンをピックアップする。

表-7 に D30 と D60 の配送性能を比較する。D60 は D30 に比べ飛行距離が20%短く配送時間も60分短いが CO2 排出量が50%程度多い。D60 の CO2 排出が多いのは図-6 からわかるように配送が進み貨物重量が少なくなるとエネルギー消費率が D30 よりも大きいことが原因である。このように大型ドローンを使った大量配送による配送効率化と CO2 排出量低減とはトレードオフの関係にある。

また D30 で1箇所の自動 DP を使用する場合、2箇所の手動 DP を使用する場合に比べ DP での作業時間が不要となるため総配送時間は90分短縮できるが DP から配送先までの飛行距離の合計が長くなり CO2 は34%増加する。

2箇所の手動 DP を使用した場合のドローン D30 とトラックの配送性能の比較を図-13 に示す。なお図-6 で示したようにトラックの CO2 排出量に対する貨物重量の影響はドローンに比べ小さいのでディーゼルトラック、EV トラック共に貨物重量は250kg 一定として計算した。

図-13 よりドローンとトラックの配送分担によりトラック配送に比べ配送時間を90分短縮でき、またディーゼルトラックでの配送に比べ CO2 を半減できること、さらに

Table-6 Delivery Time and Energy Consumed (Manual DP)

Drone	Group #	Flight #	Time (min)	Energy (kJ)	Battery Packs
D30	1	1	35	4846	5
		2	15	2044	2
		3	18	2263	3
		4	24	3809	4
	2	5	17	2846	3
		6	10	1514	2
		7	27	4889	5
		8	16	2600	3
D60	1	1	33	9355	10
		2	51	12629	12
	2	3	28	7034	7
		4	31	9416	9

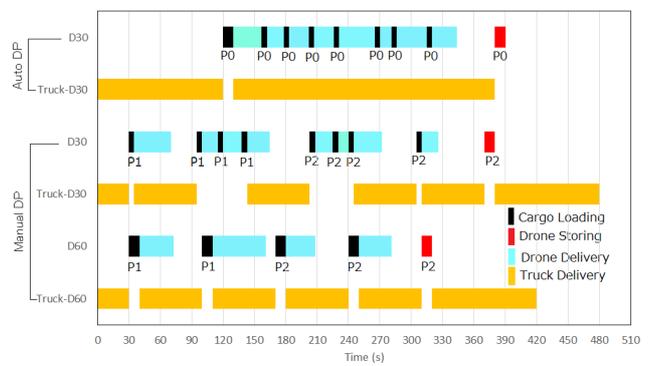


Fig.12 The Time Table of Delivery

Table-7 Delivery Performance of D30 and D60

Number of DP's	2 (Manual DP)		1 (Auto DP)
	D30	D60	D30
Model Name	D30	D60	D30
Delivery Time (min)	480	420	390
Flight Mileage (km)	67	52.2	86.7
Consumed Energy (MJ)	24.8	38.4	33.4
CO2 Emissions (kg)	2.76	4.27	3.71

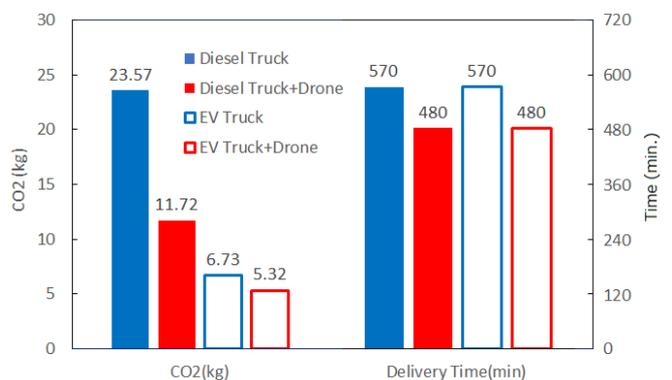


Fig.13 Comparison of CO2 Emissions and Delivery Time

ディーゼル車を EV に置き換えドローンとの配送分担を行えば CO2 を約 1/4.5 にまで低減できることがわかる。

3.4. ドローン配送システム実用化に向けての課題

(1) 配送コスト

表-8 に 30 個の貨物をドローンで配送する場合とディーゼルトラックで配送する場合の燃料代や電気料金のエネルギーコストと走行距離に比例して発生するメンテナンスコストを比較する。ドローンのメンテナンスコストは主にバッテリー劣化、トラックはタイヤやオイル・バッテリーの消耗劣化によるものとする。今回の D30 のフライトでは高 C レート (最大 7 程度) で深々度(DOD70%)の放電を繰り返すので Lipo バッテリーのサイクル寿命は 300 回程度¹⁾と考えられる。2019 年現在のドローン用 LiPo バッテリーの市場価格は総電力量にほぼ比例し約 ¥150,000/kWh でありサイクル寿命を 300 回とするとバッテリーから 1kWh の電力量を出力する度に発生するバッテリー消費コストは ¥500/kWh となりドローンの電力消費量より求めたランニングコストはトラックの 4 倍以上となる。ドローンによる商業宅配サービスの実用化に向けディーゼルトラックと同等のコストとするためには消費コストを現在の 1/5 (例: 価格 0.6 倍で寿命 3 倍) 程度にする必要がある。

Table-8 Running Cost of Delivery

Transportation	Energy Cost (JPY)	Maintenance Cost(JPY)	Total Running Cost(JPY)
Drone	*1 138	*3 3,444	3,582
Truck	*2 703	*4 126	829

*1 Electric Power=6.89kWh Electric Bill=20JPY/kWh 3-phase AC

*2 Fuel Economy=8km/L Mileage=45km Diesel Oil Cost=125JPY/L

*3 Battery Consuming Cost=500JPY/kWh

*4 Tire =60KJPY/30Mm=2JPY/km Oil=5KJPY/10Mm=0.5JPY/km

*4 Battery Cost=0.3JPY/km

(2) 長距離配送

国内の山間部には往復 50km 程度の飛行距離が必要なエリアが点在する。表-9 に D30 のバッテリー搭載量と航続距離の関係を示す。現行エネルギー密度 0.2kWh/kg のバッテリーを離陸限界重量まで搭載しても約 27km にしか届かず、少なくとも 3 倍、0.6kWh/kg 以上のエネルギー密度を持つバッテリーが必要である。

Table-9 Loaded Battery Weight vs. Endurance of D30

Energy Density(kWh/kg)	Battery Weight(kg)	Gross Vehicle Weight(kg)	Endurance(km)
0.2	12	54	16
	28 (Takeoff Limit)	70	26.6
0.6	12	54	48.2

一方長距離飛行に適した他の方式の UAV の利用も考えられる。例えば固定翼式の UAV (図-1(C)) とドローン D5 共に 6kg を積載した場合の航続距離を比較すると D5 が 25km であるのに対し固定翼式は 45km (製造元公表値⁵⁾) であり固定翼方式は 2 倍の航続距離をもつ。

またガソリンエンジン発電機を搭載したシリーズハイブ

リッドドローンを用いた場合、燃料のエネルギー密度 12.5kWh/kg、Tank-to-Rotor 効率 25%、飛行重量増加率 25% として求めた概算の航続距離は電動ドローンの 10 倍以上となる。またエンジン動力の一部をロータ駆動に用いるパラレルハイブリッドドローンは電力ロスが少ないため航続距離は更に長くなる可能性がある。ハイブリッドドローンの航続距離と Well to Wheel ベースの CO2 排出量については改めてシミュレーションによる詳細検証が必要である。

4. まとめ

2017~2020 年度の物流施策大綱の中でドローン物流への期待は大きい。今回マルチコプタ方式のドローンによる宅配物流の効率化と CO2 低減についてシミュレーション検証を行い両立が可能であること、またその実現のためにはバッテリー技術の革新が必要であることを明らかにした。今後は更にハイブリッドドローンについて検証を進めたい。

最後にドローンを含む VTOL 機は自動車や鉄道など陸上交通による 2 次元のアプローチでは解決できなかった問題を 3 次元のアプローチにより解決できる手段であり多くの産業分野での応用が拓がりつつある。現在、モビリティ分野では乗用 eVTOL の研究が進められており¹²⁾将来実用化されれば新たな交通革命をもたらすものと予想される。今後の技術的進展が期待される。

5. 参考文献

- 平成 30 年度 宅配便取扱実績について
<http://www.mlit.go.jp/report/press/content/001310398.pdf>
- 国土交通省 物流の現状とドローン物流の主な取組
<http://www.mlit.go.jp/common/001282862.pdf>
- Sky Drive 社 <http://www.skydrive.co.jp/>
- ヤンマーHD <http://www.yanmar.com/jp/agri/products/helicopter/>
- Wingcopter 社 <http://wingcopter.com/technology/>
- Moses Bangura et al. Nonlinear Dynamic Modeling for High Performance Control of a Quadrotor. Proceedings of Conference on Robotics and Automation, 3-5 Dec 2012
- Moses Bangura et al. Aerodynamics of Rotor Blades for Quadrotors. arXiv:1601.00733, 2016
- MECWARE <http://www2.wbs.ne.jp/~mec/DroneV.htm>
- MECWARE <http://www2.wbs.ne.jp/~mec/DRIVESIMCAT90.htm>
- Well to Tank 効率、Well to Wheel 効率の算出結果の詳細
http://www.jari.or.jp/portals/0/jhfc/data/report/2005/pdf/result_ref_3.pdf
- Joshuah K. Stolaroff et al. Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery. Nature Communications 9, Article number: 409 (2018)
- 金城秀樹 空の新たなモビリティ eVTOL の開発動向と展望
http://www.mitsui.com/gssi/ja/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2019/06/18/1906m_kinjo_2.pdf