

# 大型 UAM 搭載用ガスタービン発電機開発 ～次世代ハイブリッド動力システム～

福島 幸夫<sup>\*1</sup>, 太田 豊彦<sup>\*1</sup>  
エアロディベロップジャパン株式会社 (ADJ)<sup>\*1</sup>

大型 UAM 実用化のボトルネックは動力源であり、リチウム電池に代わる高性能な動力源の開発が渴望されている。高効率な電力供給能力を有するガスタービン発電機と、瞬間的な大電力供給能力に優れるリチウム電池とから構成される次世代ハイブリッド動力システムが次世代動力源の主流と目されている。

ADJ では、大型 UAM 動力要求に答えるべく、ハイブリッド動力システムの心臓部である最大出力 30 kW 級ガスタービン発電機の開発を実施中である。現在、開発の最終段階にあり、2022 年 6 月に第 1 回目のガスタービン発電機作動試験を実施している。開発完了は、2022 年 12 月を予定している。

本論文では、ガスタービン発電機開発の背景、次世代 UAM 開発動向、次世代 UAM 市場規模予測、ADJ におけるガスタービン発電機開発状況および ADJ ガスタービン発電機のラインナップ計画について述べる。

**Keywords:** UAM (アーバン・エア・モビリティ), ハイブリッド動力システム, ガスタービン発電機 (GT/GEN), eVTOL, 空飛ぶ車

## Development of Gas Turbine Generator for Large UAM — Next-Generation Hybrid Power Systems —

Yukio Fukushima<sup>\*1</sup>, Toyohiko Ota<sup>\*1</sup>  
Aero Develop Japan Co. Ltd. (ADJ)<sup>\*1</sup>

The bottle neck of the realization of large-scale UAM is the power source, and there is eagerly expected for the development of a high-performance power source to replace lithium batteries. Next-generation hybrid power systems consisting of gas turbine generators with high-efficiency power supply capability and lithium batteries with excellent instantaneous power supply capability are considered to be the mainstream of next-generation power sources.

In order to meet the large UAM power requirements, ADJ is developing a maximum output 30 kW class gas turbine generator, which is the heart part of the hybrid power system. It is currently in the final stage of development, and the first gas turbine generator functional testing was conducted in June 2022. The GT/GEN development is scheduled to be completed in December 2022.

This paper describes the background to the development of gas turbine generators, trends in the development of next-generation UAMs, market size forecasts, the development status of gas turbine generators in ADJ, and the ADJ GT/GEN lineup plan.

**Keywords:** UAM (Urban Air Mobility), hybrid power systems, gas turbine generators (GT/GEN), eVTOL, flying cars

## 1. ガスタービン発電機開発の背景

離島や過疎地、孤立した被災地や山岳地帯にも、大量の必要物資が届けられる大型ドローンを実現する。エアロディベロップジャパン株式会社（ADJ）では、リチウム電池ドローンでは難しかった、より重い荷物を、より遠くまで運べる、UAM（次世代大型 eVTOL）向けハイブリッド動力システムの開発を推進している（図 1）。なお、UAM は“都市・地方における旅客・貨物の輸送などを実現する高度な航空交通形態”と定義されている。

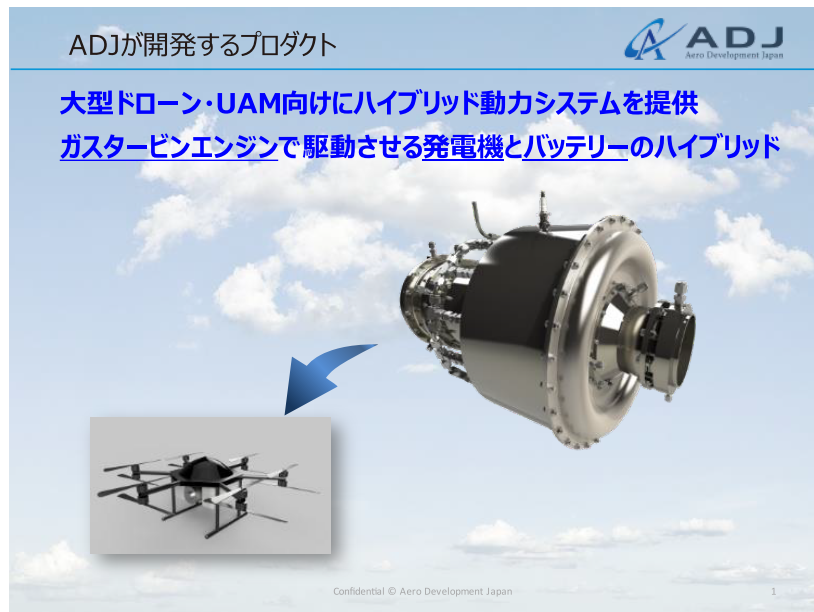


図 1 ガスタービン発電機外観

ハイブリッド動力システムは、高効率な電力供給能力を有するガスタービン発電機（GT/GEN）と、瞬間的な大電力供給能力に優れるリチウム電池とから成る。大電力が求められる垂直離着陸時には、GT/GEN とリチウム電池の電力を組み合わせ、高度確保後の水平飛行時には GT/GEN 出力は一定に保ち、GT/GEN 余剰電力を電池に充電しながら飛行する方式である。また、ドローンが水平飛行中でも、突風などにより一時的に消費電力が上昇する場合には、電池から電力を供給し、下回る時は電池を再び充電するシステムである（図 2）。

ガスタービン発電機出力値は、ドローンのホバリング時必要動力に合わせるのが一般的な設計手法である。電池放電時の最大電力値は、ドローン運動性能を考慮し、GT/GEN 出力値と同等なレベルに想定するのが望ましい。例えば、50 kW 級 GT/GEN であれば、電池放電電力 50 kW × 放電時間 60 秒（1/10 h）などと設定する。したがって、短秒時放電であるが、50 kW 相当の放電能力のある電池（容量）を選択する必要がある。電池再充電時の電流値は、ドローン飛行環境により変動するが、最大充電電流は 3C 以内（C = 放電電流/電池容量）に抑えるのが一般的である。

ハイブリッド動力システムの構成例を以下に述べる。GT/GEN 動力系出力 350 V<sub>dc</sub> と、320 V<sub>dc</sub> 電池（電池電圧は仮仕様）はダイオードを介して並列に接続される。不必要な電池放電が起らないよう、電圧差を設ける。プロペラ駆動モータの負荷が急増し、GT/GEN 動力系電圧が低下し、例えば 320 V<sub>dc</sub> に低下した時点で電池から電力が供給されるシステムである。なお、GT/GEN の時定数は、2～3 秒、電池の時定数はほぼゼロと想定している。電池の放電制御が不要なシステムであるため、信頼性の高い方式である。唯一の技術課題は、大電流ダイオードの選定と冗長系の方式選択である。

これまで実用化されている貨物輸送用ドローンは、最大規模の物でもペイロード 30 kg、飛行時間 15 分

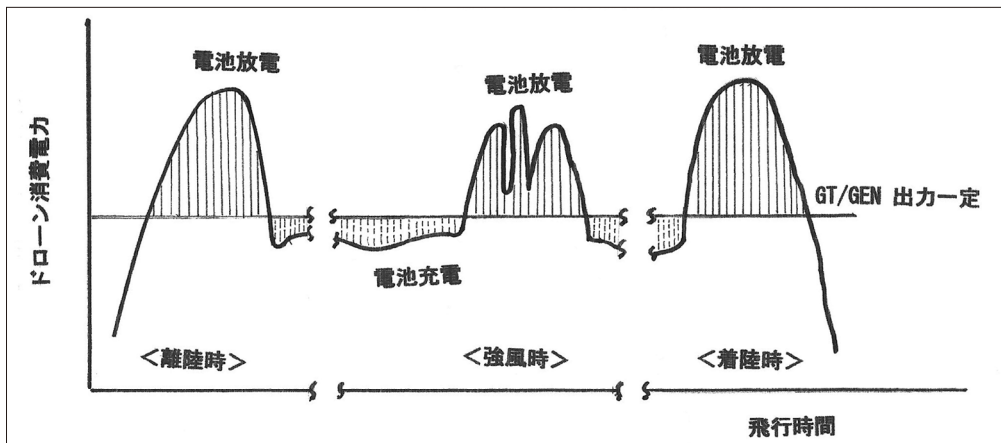


図2 ハイブリッド動力システムの作動原理

程度の近距離用機がほとんどで、限られた用途にしか使えないものであった。一方、ここ数年来、欧米を中心に、重量物・長距離輸送を可能にする貨物輸送用大型ドローンの実用化、さらには有人型空飛ぶ車の実用化が加速している。この潮流は日本にも及んでいる。2022年12月から始まる、世界で初めてのドローン目視外・有人地帯上空飛行（レベル4）の我が国での法的規制解禁は、この潮流を一気に加速させる転換点となる。

大型ドローン実用化のボトルネックは動力源である。現状のリチウム電池は、単位重量当たりのエネルギーが小さく、大型ドローン用動力源としては不十分である。例えばペイロード 50 kg ドローンでは、必要なリチウム電池総重量は 100 kg を超え、しかもその出力持続時間は 20 分程度と短いため、大型ドローンの実用化を困難としている。この状況は、リチウム電池駆動の有人型空飛ぶクルマ（UAM）でも既に顕在化している。高性能電池を駆使しても、ペイロード 500 kg（5 座席）で 30 分間飛行が限界と言われている現状である（VFS データベースなど）。

したがって、大型ドローンが長時間飛行するためには、リチウム電池に代わる単位重量当たりエネルギーの大きな動力源が必要であり、ガスタービン発電機を用いるハイブリッド動力システム開発が世界的に大きな課題になっている。図3に、各種動力源のエネルギー密度と出力密度の分布、および標準的な作動時間との関係を示す。作動時間1時間の例では、GT/GENの出力密度、エネルギー密度は共に最大レベルにある。もちろん、GT/GENの作動時間能力は、1～10時間程度を有している。ガスタービン発電機を搭載したドローンの作動時間について、以下に定性的な検討結果の概要を述べる。

一般的にGT/GEN単体の作動時間能力は10時間以上であるが、マルチコプター、eVTOL、飛行機にGT/GENを搭載した場合の最大作動時間について推算した。100 kW 級GT/GEN型マルチコプターの場合、ペイロードがすべて燃料であるとすれば、2時間飛行可能なドローンであれば約2倍の4～5時間飛行可能になる。ミッションとしては、定点高度でのデータ中継、映像中継などが挙げられる。この場合のペイロードは、軽量のトランスポンダ、カメラ、送信機などであり、5 kg 以内になると想定される。ただし、ペイロード用電池重量は 10 kg を超えると思われる。このケースでは、ペイロード重量合計は約 15 kg 程度であり、想定搭載燃料重量約 200 kg の 10% 未満に過ぎない。一方、GT/GEN を搭載した飛行機では、燃料消費率がマルチコプターの 1/2～1/3 程度であるため、上記と同等なミッションであれば、10 時間程度まで飛行時間を伸ばすことが可能になる。したがって、UAM 用 GT/GEN では、作動時間能力は最大 10 時間程度になる。

現在の電池型ドローンでは、動力系電圧が 50 V<sub>dc</sub> 以下と低いため、モータ速度制御機器（ESC）およびモータが大型・重量増となり、ドローン性能を低下させる。一方、GT/GEN を動力源とするハイブリッド動力システムでは、動力系電圧を例えば 350 V<sub>dc</sub> 程度と高電圧化することが可能である。この特性により、

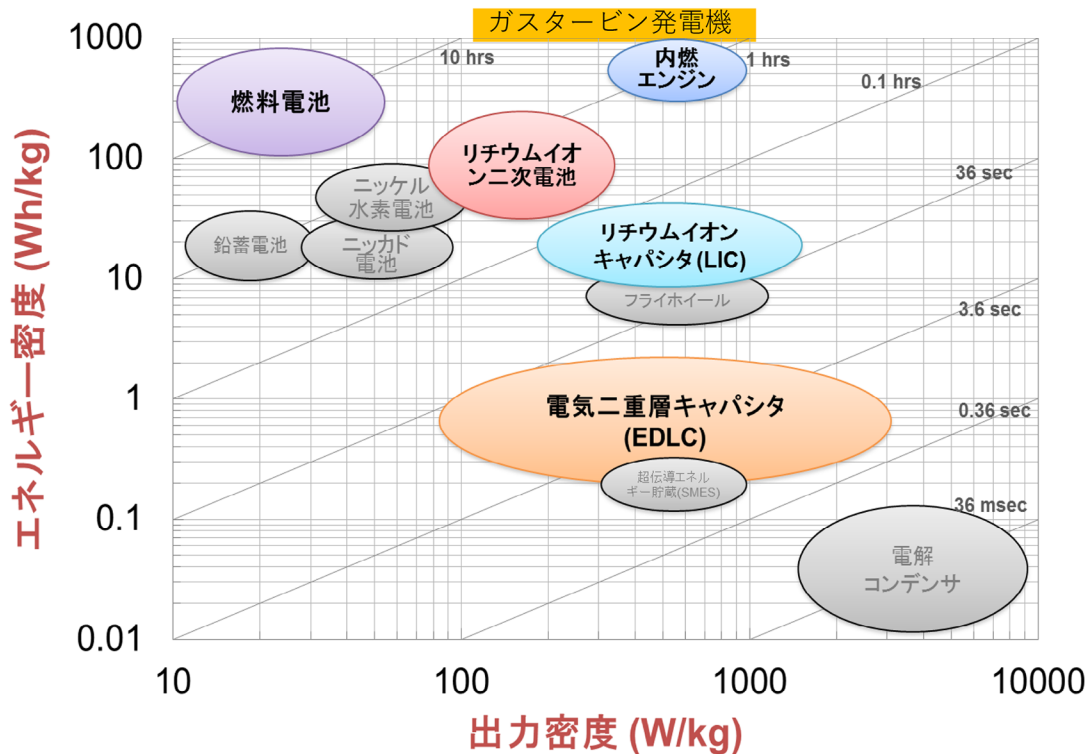


図3 各種動力源のエネルギー密度と出力密度の分布

次世代大型ドローン実現化の重要課題である GT/GEN，モータ速度制御機器およびモータ等の小型・高出力・軽量化が実現できる。

システム電圧高圧化の利点を以下に述べる。例えば，システム電圧 50 V の電池ドローンと，システム電圧 350 V の GT/GEN ドローンを比べた場合，同じ動力であれば電流値は 1/7 に低下する。モータの場合，銅線径を細くでき，モータ形状も小型になり，熱対策も容易になるため，結果として軽量化が図れる。また，電流が小さくなるため，パワー素子が小型になり，熱対策も容易になり，機器の小型化を図れる。さらに，ガスタービン発電機の発電機も，毎分 9 万回転&高電圧出力により，上記と同等な理由で軽量・小型化が達成できる。

## 2. 次世代型大型ドローンの国内・海外動向

### 2-1 次世代型大型ドローンの開発動向

2018 年以前の大型ドローン動力源はほぼ電池によっていたが，2019 年以降の大型ドローン動力源は，エンジン発電機/電池のハイブリッド型が 60% を超えるまで増加している。大重量ペイロード&長距離の大型 eVTOL 動力要求に答えるため，2021 年以降は特に“GT/GEN+電池”型のハイブリッド動力システムが主流になっている。

今日現在，大型 eVTOL の開発計画，試験飛行計画など，実現性の高いプロジェクトは複数報告されている。各プロジェクトの調査結果では，機体サイズ，航続距離，ペイロード重量など，各ハイブリッド型 eVTOL 仕様はほぼ同様な内容に帰結している。

eVTOL の代表的なシステム例として，リフト&クルーズ方式機体を図 4 に示す。8 ロータ（垂直）+ 2 ロータ（水平）構成である。リフト&クルーズは，高度 150 m & 速度 160 km/h（揚力発生）で 8 ロータを停止し，以降は 2 ロータによる水平飛行を行うシステムである。推力偏向方式では，水平飛行時に全ロータ動力を絞るか，全ロータの大部分を動力 OFF にする。

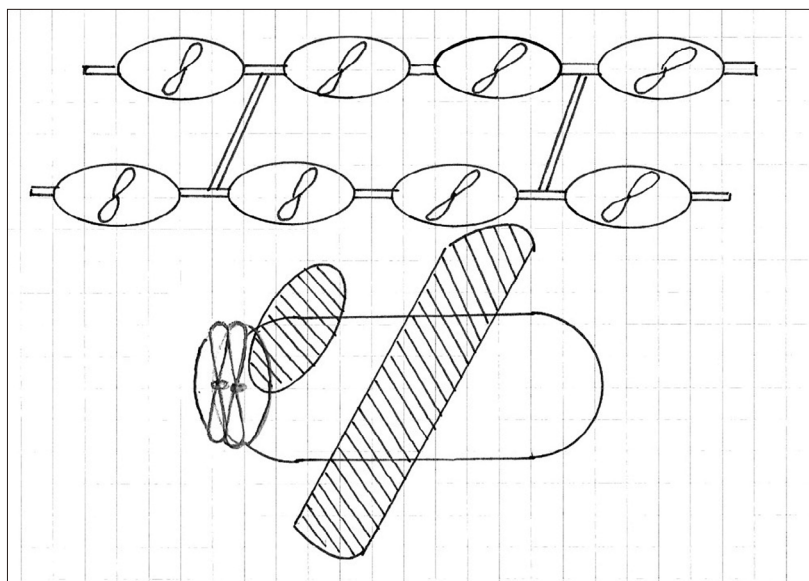


図4 eVTOLの代表的なシステム概要

現在、日本および世界で開発中の eVTOL について、最小公倍数的機体諸元を表 1 に示す。GT/GEN 合計出力は、300 ~ 400 kW 程度である。

表 1 世界で現在開発中の eVTOL の最小公倍数的機体諸元

項目	概略仕様	備考
GT/GEN 出力	300 ~ 400 kW	推定合計値, GT/GEN 台数は不明
ペイロード重量	140 ~ 300 kg	飛行条件により異なる
機体重量	1,500 ~ 2,000 kg	ロータ推力は約 200 kg/1 基
航続距離	250 ~ 480 km	飛行条件・用途により異なる

「全推力/機体重量と機体速度」および「平均動力効率指標と飛行距離」との関係を図 5 に示す。マルチコプターは近距離用途で推力/機体重量比は大きい。対極にあるのが飛行機であり、遠距離用途で推力/機体重量比は小さい。eVTOL は、離着陸時はマルチコプターであるが、水平・高速飛行時は飛行機に類似した性能となる。eVTOL の“離着陸時間合計/全飛行時間”の割合は 10% 前後であり、大半は図 5 に示す飛行機に近い領域で運用される。

国内・海外ドローンについて、ペイロード重量とドローン動力との関係を調査した結果を図 6 に示す。両対数グラフ上では、ペイロード重量とドローン動力はほぼ直線上に分布する。現在の情報によれば、開発計画中の動力ユニット最大出力は 1,200 kW である。一般的に、システム信頼性の観点から、動力ユニットは冗長化するのが一般的である。例えば、1,000 kW 動力要求には、250 kW × 4 台、500 kW × 2 台などのシステムを採用する。また、有人型“空飛ぶ車”では、高いシステム信頼性・安全性設計となるため、同じ出力の動力ユニットを搭載した無人型ドローンの 60 ~ 80% 積載能力になる。

## 2-2 次世代型大型ドローンの国内・海外市場規模予測

先進国の輸送運輸産業は国内総生産 (GDP) の約 10% を占めている。輸送機関分担率では、トンベースで約 90% 以上を自動車輸送が占めている。先進国では、発達した道路網が物流 (経済) を支えている。すなわち、輸送運輸産業と GDP 間には強い相関がある。

一方、途上国では資金力も含めて道路建設に困難な課題を抱えている。後進国の南アメリカ、アフリカや

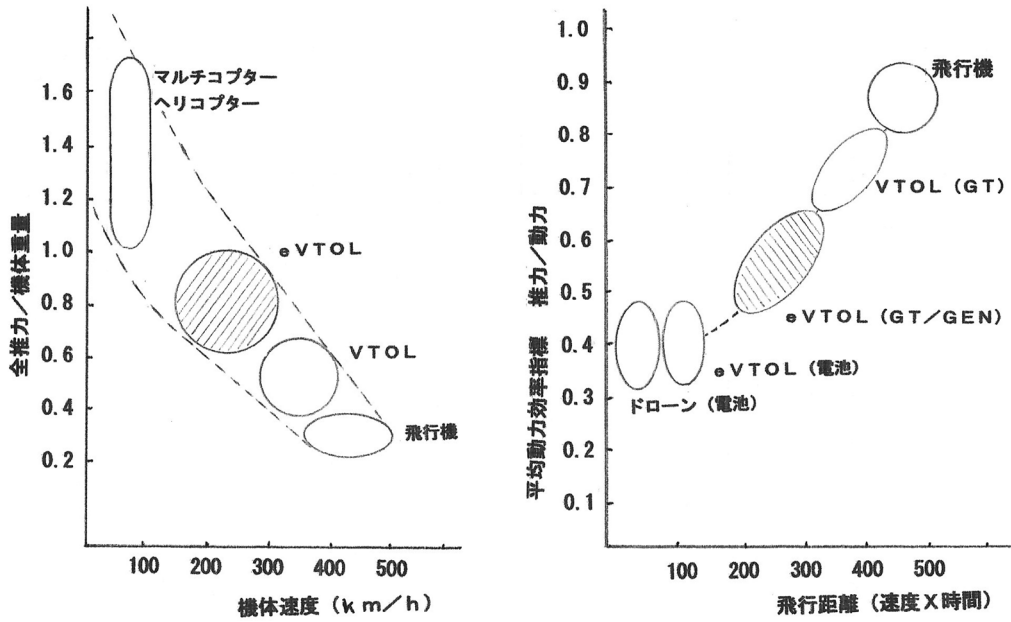


図5 「全推力/機体重量と機体速度」および「平均動力効率指標と飛行距離」

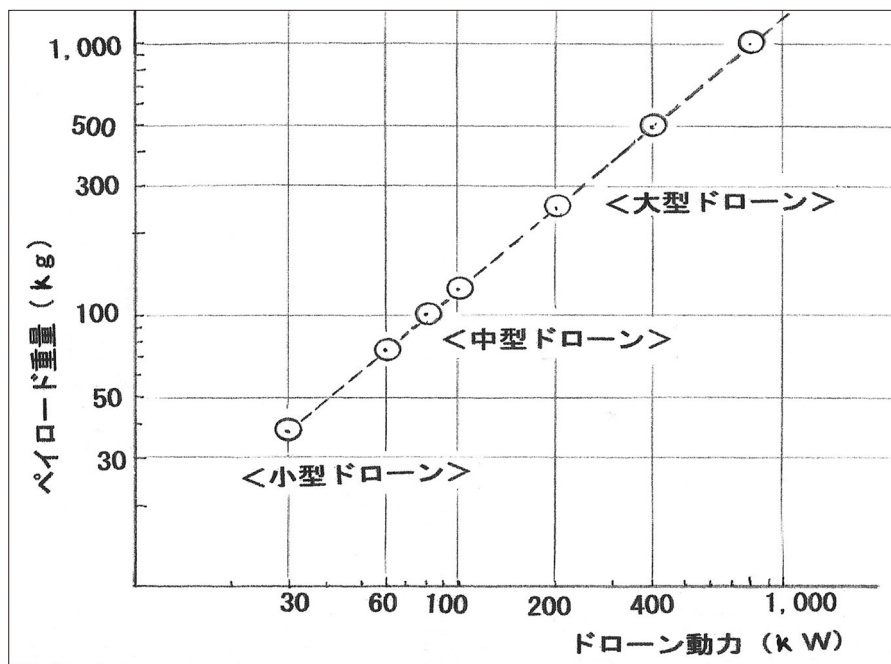


図6 ペイロード重量とドローン動力との関係

東南アジアでは、先進国レベルの道路網整備は資金的にも地勢的にも困難である。道路網整備と異なり、膨大な資金を要しない次世代型大型ドローンによる貨物輸送は、後進国の今後の主要貨物輸送手段となる。このように、後進国では道路網整備に加えて、物流手段としての大型ドローンが、経済発展を支える重要な社会インフラと位置づけられる。別の観点からすれば、大型ドローンは先進国・後進国を問わず、潜在的なGDPを生み出す手段とも言える。

以上のことは先進国日本にも当てはまる。過疎地・離島への貨物輸送のための道路網維持費、貨物船維持費などは大きな財政負担になっている。機体費用および運用費用が安い大型ドローンを導入し、貨物輸送の一端を担わせれば、大きな財政負担の削減になる。このように、大型ドローンは、世界中の途上国にとどま

らず、先進国でも需要が高まると予想される。したがって、日本国内市場は大きいとは言えないが、世界的には大きな市場が形成される。このため、今後自動車に変わる主要輸出品としても期待できる。

2019年現在の自動車の世界市場規模は200～250兆円、稼働台数は11～12億台、トラックの世界市場規模は50～60兆円、稼働台数2,300万台ほどと発表されている。仮に世界トラック市場の10%を大型ドローンが占めるとすると、控えめに見ても世界市場は約5兆円規模になる。仮にドローン機体価格を3億円とすれば、ガスタービン発電機ユニット価格は約1/3の1億円と想定され、年間約1.7兆円規模のGT/GE世界市場が出現する。ADJの当面の事業計画では、日本市場の60%、世界市場の10%の大型ドローンにガスタービン発電機ユニットを販売することを目指している。最大売上高は、年間約2,200億円を見込んでいる。

本市場見通しは、従来の物流代替効果のみに基づいている。今次ロシアのウクライナ侵攻に伴う大型無人機、特に「空飛ぶ高出力発電機」等防衛装備品への緊急的ニーズの顕在化等を想定すると、本市場見通しは極めて控えめな数字である。道路網、空港を必要としない、いわゆる“空飛ぶトラック”である大型ドローンの潜在世界市場は、最低でも約5兆円規模と想定しているが、無人ドローンは先進国・後進国を問わず、潜在的なGDPを生み出す手段であるため、想定以上の市場が出現することも期待できる。なお、有人型“空飛ぶ車”機体の当面の市場規模は、無人型ドローンの1/10以下の規模になると予測している。

### 3. ADJ ガスタービン発電機の開発

#### 3-1 ADJ ガスタービン発電機的设计・製造技術面での特徴

ADJ ガスタービン発電機的设计目標は、世界最高レベルの出力/重量比=1 kW/kg 以上を達成することである。また、GT/GEN 単体または大型ドローンの輸出なども視野に、设计・製作・組み立て・試験はすべて国内技術で行うことである。

ADJ ガスタービン発電機で採用した技術面の特徴を図7に示す。GT/GEN の小型・軽量・高出力化を実現するため、減速歯車を用いず、毎分最大9万回転という高速回転タービン動力で直接内蔵発電機を駆動する方式を採用している。世界的に見て、タービンと発電機を一体化したGT/GENは初めてである。ADJでは、世界で初めてとなる一体化设计技術の獲得により、スケラビリティを生かした開発を可能としてい

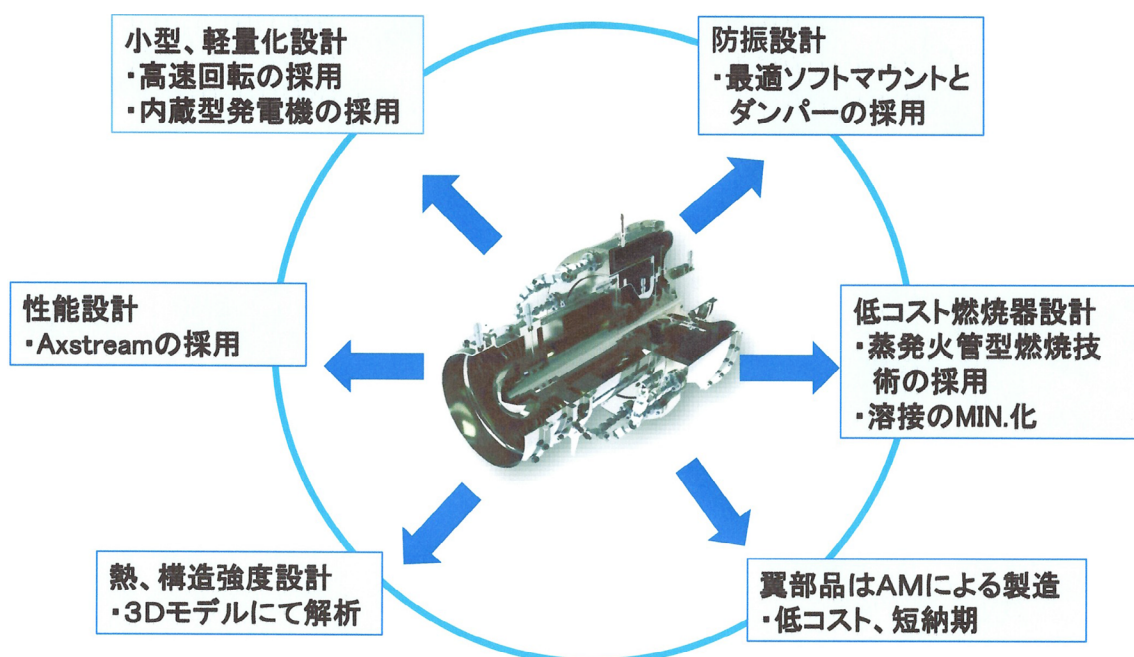


図7 ADJ ガスタービン発電機的设计・製造技術面での特徴

る。例えば、50 kW 級 GT/GEN をベースに、500 kW 級 GT/GEN を容易に開発することが可能である。製造技術面での特徴は、防振機構、低コスト燃焼器、3D プリンタによる翼製造、翼性能計算、熱・構造強度解析などである。ADJ 開発チームは、日本のロケット用ターボポンプ開発で40年以上の設計・開発経験を有する CTO を中心に、先端技術開発での経験・能力に加えて、大きなプロジェクトを管理・運営する豊富な経験も有している。ロケット由来の技術・開発経験を有する ADJ は、今後の大型ドローン開発分野での主導的役割を担う能力を保有すると自負している。

スケーラビリティの概要について以下に述べる。GT/GEN の開発では、圧縮機およびタービンの翼形状設計がポイントになる。現在 ADJ では、保有する設計ツールを用いて開発した 30 kW 級 GT/GEN の試験を実施中である。今後、30 kW 級 GT/GEN 作動試験で取得したデータ・知見を基に、設計ツールの検証・補正を行う計画である。この成果により、設計ツールの精度等は飛躍的に向上すると考えている。例えば、500 kW 級 GT/GEN の開発では、検証・補正済み設計ツールを用いて開発を行えば、設計に要する時間を 1/5 程度に短縮することが可能であり、また洗練された設計内容が得られる。課題としては、内蔵型発電機用永久磁石&コイル、点火器、軸受けなどの一部部品については、GT/GEN 出力に見合った部品を選定することである。

### 3-2 ADJ ガスタービン発電機の開発状況

ADJ では、大型ドローン動力要求に答えるべく、ハイブリッド動力システムの心臓部である最大出力 30 kW 級ガスタービン発電機の開発を実施中である (図 8)。現在、開発の最終段階にあり、本年 6 月に第 1 回目のガスタービン発電機作動試験を実施している。

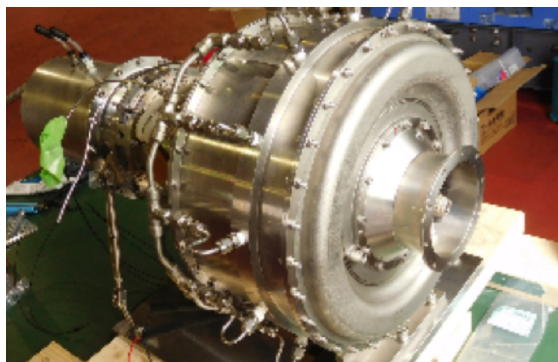


図 8 30 kW 級ガスタービン発電機作動試験供試体

- ・重量： 30 kg
- ・最大出力： 30 kW
- ・最大回転数：90,000 rpm
- ・燃料消費率：20 kg/時間
- ・出力電圧： 3 相 250 V<sub>ac</sub>
- ・写真： 左手前はタービン部，奥が発電機部

図 9 は、30 kW 級ガスタービン発電機の主要部品をまとめて示したものである。部品加工はすべて外注であり、加工方法、加工の難易度で業者を選択して低コストと品質を実現している。また、タービン動翼を除くすべての翼部品は、すべて AM (3D プリンタ) で製作している。

図 10 は、タービン発電機システム試験の状況である。燃焼ガスは右方向に排気されている。作動試験では、回転速度を 35,000 rpm まで達成している。成果としては、軸系が 1 次危険速度を低軸振幅で通過したこと、自立運転に向けての外部起動装置容量を把握したこと、などが挙げられる。今年の 10 月に予定する 30 kW 級ガスタービン発電機試験では、今回の試験成果を反映した供試体と、現在開発中のエンジン・コントロール・ユニット (ECU) を組み合わせた、実機型 GT/GEN のシステム試験を行う計画である。

### 3-3 ADJ ガスタービン発電機の開発計画

ADJ ガスタービン発電機の開発および事業計画について述べる。基本方針は、大型ドローンの心臓部である GT/GEN のラインアップ化を図り、需要に柔軟に対応できる世界最高レベルの出力/重量 = 1 kW/kg 以上の小型・軽量・高出力な性能を提供することである。緊急時対応機能および将来のレベル 4 運用ポテン





図9 30 kW 級ガスタービン発電機主要部品

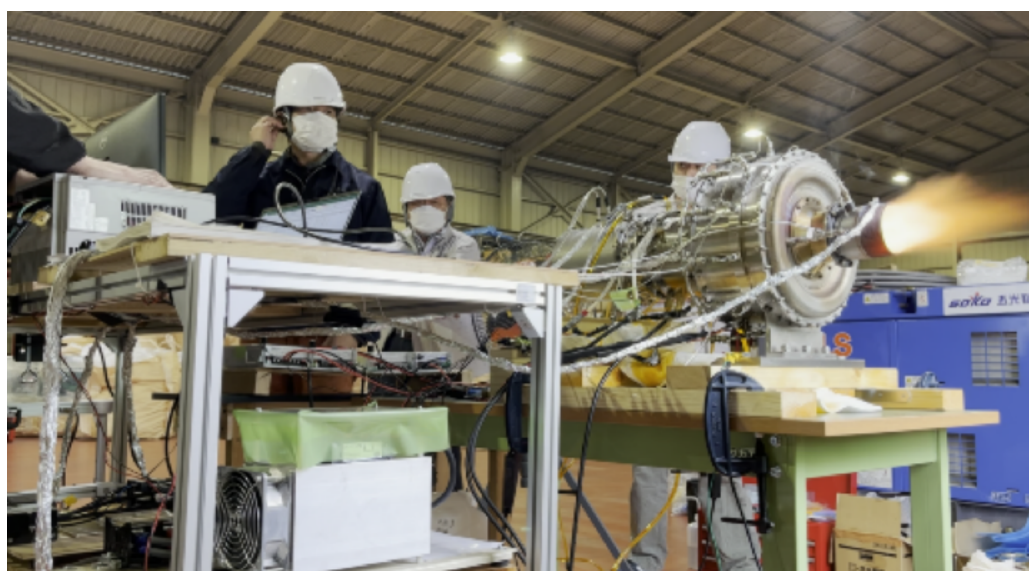


図10 ガスタービン発電機試験状況

シャルも考慮し、ガスタービン発電機は冗長が組まれることを前提とする。具体的には、ガスタービン発電機は2台以上1組で搭載されることを前提とする。また、GT/GEN 単体または大型ドローンの輸出等も視野に、設計、製作、組み立て、試験はすべて国内技術で行う。本事業により、ペイロード重量および飛行可能時間において、世界トップの貨物輸送ドローン実現に貢献する。

具体的事業計画について以下に述べる。基本となる30 kW 級ガスタービン発電機の開発は最終段階にあり、設計・製造・試験技術はほぼ確立された状態である。ADJ 中期事業計画では、最初に需要の大きい50 kW 級ガスタービン発電機を開発する計画である。このアップグレード開発は、30 kW 級 GT/GEN 開発での知見・経験をベースに、スケーラビリティを生かした設計でのみ可能となるものである。

ペイロード100 kg 以上の大型ドローン動力には、100 kW 級以上の GT/GEN が必要である。この動力要求に答えるため、ADJ の中期事業計画では、100 kW (50 kW × 2 台)、200 kW (100 kW × 2 台)、500 kW (250 kW × 2 台)、1,000 kW (500 kW × 2 台)、2,000 kW (500 kW × 4 台) などのラインナップ開発を計画している。出力50 kW、100 kW、250 kW、500 kW などの GT/GEN シリーズ開発により、ドローン動力要求100 kW ~ 2,000 kW までを網羅する計画である (表2)。

表2 組み合わせ例：ドローン動力要求と GT/GEN 出力×台数

ドローン動力要求	50 kW GT/GEN	100 kW GT/GEN	250 kW GT/GEN	500 kW GT/GEN
100 kW	2 台	・・・	・・・	・・・
200 kW	(4 台)	2 台	・・・	・・・
500 kW	・・・	・・・	2 台	・・・
750 kW	・・・	2 台	2 台	・・・
1,000 kW	・・・	・・・	(4 台)	2 台
1,500 kW	・・・	・・・	2 台	2 台
2,000 kW	・・・	・・・	・・・	4 台

#### 4. 結言：次世代大型ドローンへの ADJ の取り組み

ADJ では、30 kW、30 kg & 毎分 9 万回転という超小型ガスタービン発電機を実現している。次世代の産業用大型ドローンおよび空飛ぶクルマでは、“重量物搭載&長時間飛行”が不可欠な要素になっている。航空機動力は「エンジン」、垂直離着陸・マルチコプター制御には「電動」、次世代大型ドローンは「電池からガスタービン発電機」との着想である。ドローン電源の小型・高出力・軽量化には、高速回転ガスタービン駆動発電機が唯一の解であるとの考えである。GT/GEN 開発チームは、H-II ロケットエンジン開発専門家を中心に、ロケットエンジン技術、高度計算工学、安価なラジコン技術を融合し、「軽量・安価・高耐久性」な国産ガスタービン発電機の完成に成功している。

このガスタービン発電機は、世界初の 2 つの優秀性、1 つの高い将来性という三大特徴を具備している。第 1 点目は、“1 kg 当たり 1 kW” というこのクラスで世界トップのエネルギー密度（重量当たり出力）を達成したことである。このことにより、例えば積載重量 50 kg、飛行時間 1 時間以上という大型ドローンの実現を可能にした。第 2 点目は、拡張性に優れることである。開発済みの 30 kW 級ガスタービン発電機は、空飛ぶクルマに必要なとされる 500 kW 出力 GT/GEN でも、スケールアップ化し、容易に開発が可能である。第 3 点目は、高い将来性である。ゼロエミッション、SDGs に向けて、現在の灯油燃料を、バイオ燃料、さらには液体水素燃料まで対応可能である。

最後に、ADJ の目指す方向性は、ガスタービン発電機搭載の UAM（大型 eVTOL）をフル活用する DaaS（Drone as a Service）産業を興すことである。

投稿受付：2022 年 8 月 25 日

採録決定：2022 年 10 月 3 日

#### 文 献

- [1] 千田泰弘：“レベル 4 解禁と DaaS に向けた展望,” JAPAN UAS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ASSOCIATION, 2021.  
 [2] 千田泰弘：“「空飛ぶ車」の世界動向,” JAPAN UAS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ASSOCIATION, 2021.



福島 幸夫

1948 年生まれ。スタンフォード大学院航空宇宙学科修了 (MS)。1972 年宇宙開発事業団 (現 JAXA) 入社。ロケット開発に一貫して従事。主には、液体エンジン、固体ロケット、分離機構、電力システム等の自主開発分野を担当。2021 年 10 月より ADJ シニアアドバイザー



太田 豊彦

1944 年生まれ。東北大学工学部機械工学科修士課程修了。1972 年石川島播磨重工 (現 IHI) 入社、H-II ロケットエンジン用 LE-5、LE-7 ターボポンプの開発他航空宇宙用高速回転機械の開発に従事。2021 年 8 月より ADJ CTO として大型 UAM 用ガスタービン発電機開発に従事。