

# 港湾荷役

Cargo Handling JAPAN

VOL.52 NO.2 2007



社団法人 港湾荷役機械システム協会  
Japan Association of Cargo-handling Machinery Systems

## 空中物流ロボットの研究開発

岩田 拓也

Kakuya Iwata

### 1. 空中物流ロボットを用いた船舶港湾間荷役

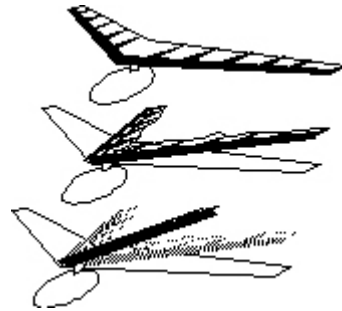
空中物流ロボットに最も期待される応用の一つに、超小口用オンディマンド港湾荷役がある。これは、**図-1**のように船舶から超小口荷物を搭載して飛び立ち、**図-2**のような港湾設備に届ける。または、港湾施設から補給物資積載後飛行し、沖合の船舶の甲板に投下する。船舶は接岸することなく、次の目的地に向かう。飛行体の航続距離によっては、かなり沖合からでも利用可能なシステムとなる。船舶燃料の省エネルギーのみならず、より簡素な沿岸設備への荷下ろしを可能にし、末端間物流への流れに対応する。



**図-1** 空中物流ロボットによる船舶港湾間荷役



**図-2** 空中物流ロボットによる荷揚げ



**図-3** 空中物流ロボットの折り畳み翼



**図-4** 格納庫の中の空中物流ロボット1号機

そして船舶港湾間オンディマンド物資補給サービスへの応用にも発展する。このような応用を可能にする飛行体とその運用システムの研究が、産総研で行われている空中物流ロボットの研究開発である。超小口用オンディマンド港湾荷役への応用に適した空中物流ロボットの特徴として、**図-3**のように翼が折り畳めて船内や船舶側面に容易に収納可能な特徴がある。**図-4**は実際に飛行前に保管されている空中物流ロボット1号機の写真である。**図-4**のように、隣の軽トラックの、半分以下のスペースで保管可能である。このような船舶港湾間空中輸送は、船舶港湾間オンディマンド物資補給への応用により、新たな海上サービスシステ

ムが誕生する。

ここまでの港湾荷役応用の話は、図-5のように空中物流ロボットの開発コンセプトの折り返し地点付近に相当する第2段階アウトプットである。次章から、空中物流ロボットの研究開発のコンセプトと全体像、将来像、現在までの開発状況を述べる。

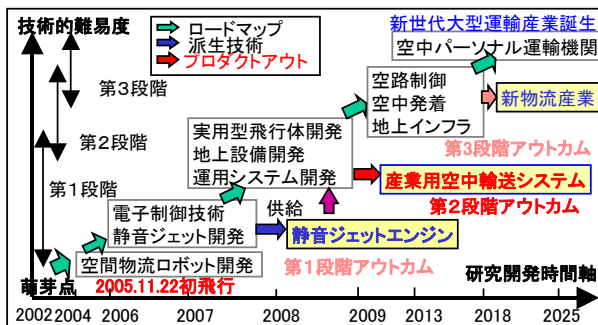


図-5 研究開発ロードマップ

## 2. 空中輸送業界の趨勢

空中輸送が航空運輸という公共交通機関として民間経済活動に本格的に活用されるようになって半世紀が経過した。現在、航空輸送は年率4%程度の成長を続けているが、これは公共交通機関としての発達で、陸上におけるバスやトラックの市場成長率に相当する。将来の空中運輸は、より身近なシステムすなわち陸上における自動車に相当するパーソナル交通機関として世界の人々・国民にその利便性を享受し続けることが予想され、空中輸送の重要性は益々重視され、市場成長率は非線形に増加することとなる。

しかし、現在の航空輸送研究分野の中では、近隣空中輸送への利用やパーソナル市場にはあまり視点が向けられていない。これは近隣輸送分野が陸上輸送の独壇場であった経緯に強く依存するものではあるが、現在陸上交通機関は、これまた半

世紀前から始まったパーソナル交通機関化の進行によって、道路などの陸上インフラの許容限界を超える状況となり、化石燃料使用による環境問題と相まって限界に達しつつある。また、陸上と海上の境界を連続的に運用可能な近隣空中輸送もニッチなヘリコプター利用以外には存在しなかった。このことから人類は今後、陸上に頼らない、陸海の境界を感じない近隣輸送手段を手に入れる可能性は十分にあると考えられる。具体的には、低空域を活用してPointからPointを直線で結ぶ新たな空中物流ネットワークシステムの構築である。

## 3. 空中輸送技術の研究趨勢

現在の航空技術の研究開発趨勢であるが、大型旅客機の開発と平行して、SATS等の小型機によるPoint・To・Point、オンディマンド輸送ネットワークの開発が行われている。特に、9.11テロ以来の小型ビジネスジェット機の利用拡大やエアータクシーの開業は、VLJ(Very Light Jet)という新たな市場を拡大させており、パーソナル交通機関化に向けた産業構造変化の兆候となっている。パーソナル交通機関産業は、陸上パーソナル交通機関である自動車の例の通り、大量の製造数に対応する低コスト高品質の製造技術に特徴がある。これらの高い製造技術の航空産業への応用が現在加速しており、日本企業がその渦中に飲み込まれつつある。また、Point・To・Point、オンディマンド輸送ネットワークの開発には、SATS等のITネットワーク技術との融合が不可欠であるが、近年のIT技術の目覚ましい進歩により、この方面の研究開発は着実に進行している。Point・To・Point、オンディマンド輸送ネットワークによる航空を用いた近隣輸送の実現は、人々の身近な航空輸送とい

う恩恵をもたらす。それは逆に、将来の人達がもっと身近に航空輸送の恩恵を受けられる可能性を追求する研究開発が現在必要とされていることに他ならない。輸送機関の発達には、陸上交通の例の通り、歴史的に公共交通機関からパーソナル交通機関へ技術の成熟と共に移行する。現在パーソナル交通機関が上空を見ても見当たらないのは、マーケットと技術の発達途上に起因するもので、個人が自家用車のように飛行機を持ち、これを生活の手段として楽しむ時代が来ることが航空技術の次なる大目標であるべきことは当然といえる。ただし、この大目標の実現にはある発想の転換が不可欠である。それが低速性である。これまで航空技術は高速化大型化の進歩を遂げてきたが、それに逆行する発想である。パーソナル交通機関はそもそも自動車の例の通り低速が特徴で、低速でペイする市場原理が存在する。低速性はSTOL, VTOL 特性を生み出し、ドア to ドア性獲得に貢献する。つまり飛行機械の低速性からこの大目標を実現する飛行手段と可能性が見えてくるわけである。

#### 4. 新型飛行機械の特長と活用用途

産総研で研究開発を行っている新型飛行機械の最大の特徴は、既に図3で示した通りフレキシブルウィング機であることである。[1-7] フレキシブルウィング機は、1960年代 NASA のロガロ博士の発明したロガロ翼から発展した高い収納性と低コスト、超軽量、低速飛行性、力学的安定性が特徴の翼である。これは、将来的な Point・To・Point、オンデマンド輸送、パーソナル輸送化の方向性から鑑みても、非常に有利な特徴を持つ。パーソナル交通機関はそもそも自動車の例の通り低速で

ペイするため、フレキシブルウィングの 150km/h 程度までの飛行速度域で十分な市場価値をもつ。もっとも、市場価値を左右する最大の要因は、その圧倒的な低コスト性と収容性にある。価格と携帯性は個人所有製品の市場価値の大前提であり、基幹産業の条件である大量の製造数を支える基礎である。

フレキシブルウィング機にはまた STOL 性に優れた特徴がある。これは飛行場に依存しない自由な発着を可能にするため、居住地や商店街など身近な飛行を実現する可能性を有する。更に図6のように空中発着アームロボットの導入により文字通りドア to ドアが実現可能となる。また、低速飛行であるために近隣飛行に適しており、安全性も高いレベルを維持可能で、その対策も講じ易い。

図-6のシステムは、飛行機械と、飛行機械を空中で発着(捕捉・離脱)させる高速作動ロボット・アームの、双方の技術の歩み寄りにより実現を目指す。

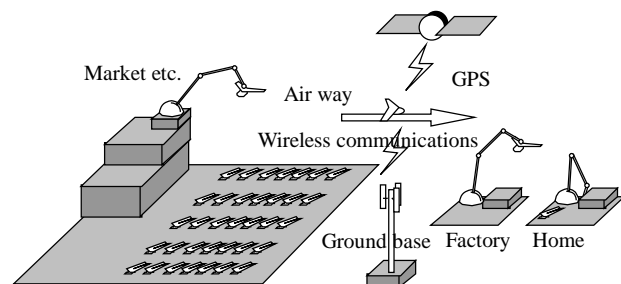


図-6 ドア to ドア近隣航空輸送システム

研究開発においては、最初無人機単独での活用を目標とし、監視、物資投下などの用途への応用を目指している。現在の研究はこの段階において行われているのは、図-4に示す通りである。次に、Point・To・Pointの2地点間輸送の手段として活用する研究を行う。更に2地点間を多地点間ネットワークに進化させる研究を行い、最終的に自家

用飛行機の利便性に迫るシステムの構築を目指す。

5. 技術研究・開発の状況と、今後の計画

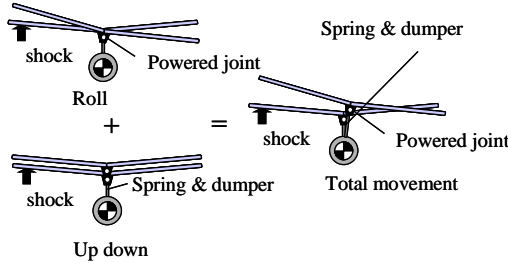


図-7 新型飛行機械構造

現在はまず前述の通り飛行機械の研究開発を行っている。空中で地上ロボットに捕捉・離脱されるフレキシブルウィング翼飛行機械の条件としては、低い失速速度と、低速域での操縦性の確保が挙げられる。このため、翼面荷重を小さくする一方、操縦方式としては重心移動方式を採用している。

本飛行機械は図-7のように、主翼の中心点一点に本体からの2軸アクチュエータが接合され、主翼に本体がぶら下がった振り子構造となっている。この姿勢制御方式は直接主翼を制御するので低速域でも大きなコントロールパワーを維持し、且つ、機体の流体運動を介さずに直接主翼を制御できるので(通常の固定翼機では、尾翼操縦により機体の釣り合い迎え角を変えて揚力を変化させる)、アクチュエータ出力に飛行経路角変化が短時間で追従することになる。そこで応答速度の速いアクチュエータを用いたフィードバック制御で低速域での飛行制御の問題を解決しようとしている。新型飛行機械の構造上、翼と本体との接合による境界層の考慮が不要なため、翼のL/D特性が得られれば、図-8のように必要推力曲線が導出される。図8は3種類の折り畳み翼の必要推力曲線を示している。新型飛行機械の構造上、翼と本体との接合が一点

であるため、翼を付け替えるだけで特性の異なる飛行機械となる特徴がある。また、図-8に示す通りターボジェットエンジンの推力は、この速度領域において対気速度依存性がほとんど見られず、得られる性能の見込みが立ちやすい。また、本飛行機械の構造上、推力は本体重心と翼の揚力中心の間に位置させる必要があるため、配置自由度の高いターボジェットエンジンは有益であった。ただし、ターボジェットエンジンの最大の欠点である騒音問題は非常に深刻であったため、まず騒音対策を一切行っていない状態でのジェットエンジンの騒音計測を行い、音の伝播特性を把握した。この結果を元にエンジンの防音構造設計を行い、逆の吸音周波数特性を有する吸音材の複合による幅広い騒音低減効果と、バイパスエアによる空冷と排気抵抗の低減を実現し、ジェットエンジン騒音の課題を解決した。

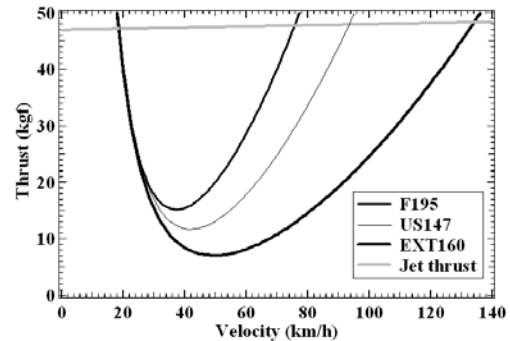


図-8 空中物流ロボットの必要推力曲線

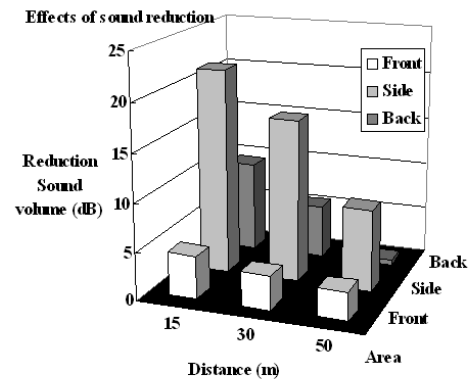


図-9 減少騒音量分布特性

図-9に静音ジェットエンジンを実現したことにより静音化した時の騒音減少量の方向分布特性を示す。側面での20 dBに及ぶ圧倒的な音の減衰が示されている。これは側面の減少効果は前後双方の相乗効果であることを示唆する結果である。

## 6. 飛行機械の飛行実験

これらの新型飛行機械の構造・機構の有効性を実証するため、現在使用可能な素材を使って製作したプロトタイプ実験機で飛行実験を行った。実験機は現在までに1号機と2号機の2機が製作された。推力は本体重心と翼の揚力中心の間に位置させる必要があるため、配置自由度の高い静音ターボジェットエンジンを2基搭載している。ターボジェットエンジンの最大の欠点である騒音問題は、消音装置を開発することにより克服している。翼は折り畳み可能なロガロ翼を使用しているため、翼面積が19m<sup>2</sup>あり翼面荷重の低減に役立っている。将来的に人間が搭乗可能なサイズとしたため、ウイングスパンが10.5mと大きなサイズとなっている。

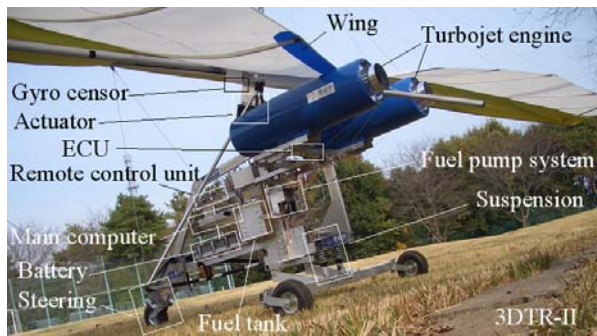


図-10 空中物流ロボット2号機の構造

トラックによる陸上物流輸送を考慮しても、末端物流は軽トラック配送による100kg程度の重量な

ため、飛行体もこのサイズに収束すると考えられる。図-10に空中物流ロボット実証実験機2号機の各部の位置と名称を示す。翼の1点をロボット関節が囲み、前後左右に動作することにより操舵を行い、2基のジェットエンジンの推力により飛行する構造となっている。車輪は衝撃吸収のためサスペンション構造を有し、前輪は操舵可能となっている。翼の迎角は、降着装置接地時においても変化可能な構造となっているところに特徴がある。

空中物流ロボット実証実験機2号機の姿勢制御は搭載するマイクロコンピュータにより自動的に行われる。このため直線飛行であれば人間の遠隔操作は、離陸滑走時の僅かな前輪操舵とジェットエンジンのスロットル調整のみで済んでいる。空中物流ロボット実証実験機2号機の初飛行は、2005年11月22日に成功した。



図-11 実証実験中の空中物流ロボット2号機

初飛行時の空間移動ロボット2号機の離陸に至るまでの滑走距離は、約75mと長距離であった。これは初飛行であったため、安全のため翼の迎角を小さくし離陸速度を増加させ、ジェットエンジン出力を慎重に増加させたことに起因している。その後、本来の離陸性能を確認するための飛行実験も行われ、36mの離陸滑走距離を記録した。(図

-11) この結果から、本研究の空中物流ロボットは非常に狭い場所での運用が可能となることを示した。これは今後の空中発着研究においても重要な特性であることを示唆するもので、港湾、あるいは船舶上での運用を実現する基礎技術である。現在離陸距離を算出する理論式が導出され、アスファルト路面上で 25m、カタパルト上で 12m の離陸距離の実現が計算で示されており、その実証を行う実験装置を製作中である。この発着のシステムをクレーン等で空中に持ち上げることから、次の空中発着研究開発を開始する。続いて着航技術が完成すると、空中発着技術が確立され、運輸システム構築へと開発を進展させ空中物流システムの実用化を目指す。

## 7. まとめ

大型旅客機の開発と平行して行われている SATS 等の小型機による Point・To・Point、オンディマンド輸送ネットワークの開発は、現在 VLJ 市場を拡大させており、今後航空による近隣輸送、末端間輸送に発展すると考えられる。このことから、産総研では末端から末端への PointToPoint 輸送を行う次世代物流システムとして、滑走路を使用せず空中発着を行うことを特長とした空中物流システムの実現を目指している。これは低空域を活用して Point から Point を直線で結ぶ新たな物流ネットワークの開拓の可能性を探るものでもあるが、飛行機械と、飛行機械を空中で発着(捕捉・離脱)させる高速作動ロボット・アームの、双方の技術の歩み寄りによる実現を目指している。このため現在まず前者の条件を満たす飛行機械のコンセプト設計を行い、この飛行機械の構造・機構の有効性を実証するため、現在使用可能な素材を使っ

てプロトタイプ実験機を製作した。プロトタイプ実験機は現在までに 2 機製作され、2 号機により 2005 年 11 月 22 日に初飛行に成功した。プロトタイプ実験機 2 号機による飛行実験から、飛行機械と、飛行機械を空中で発着(捕捉・離脱)させる高速作動ロボット・アームの、双方の技術の歩み寄りに必要な低速飛行性能を有していることが確認された。今後更なる飛行機械の性能の進化と、空中離発着システムの研究のスタートアップに取り組み、Point・To・Point、オンディマンド輸送ネットワークによる航空を用いた近隣輸送の実現によって、人々の身近な航空輸送という恩恵をもたらす産業の結実を目指す。

## 参考文献

- [1] 岩田拓也, 前川仁, 森川泰, 松本治, 皿田滋, 小森谷清, “空間移動ロボットに関する研究 (第 1 報)”, 第 5 回計測自動制御学会 SI 部門講演概要集, p. 70, 2004.
- [2] 岩田拓也, 前川仁, 松本治, 皿田滋, 小森谷清, “空間移動ロボットの研究開発 (第 2 報)”, ROBOMEC2005, 2A1-S-061, 2005
- [3] 岩田拓也, 前川仁, 松本治, 皿田滋, 小森谷清, “空間移動ロボットに関する研究 (第 3 報)”, 第 23 回日本ロボット学会学術講演会講演概要集, p. 203, 2005.
- [4] 岩田拓也, 前川仁, 松本治, 皿田滋, 小森谷清, “空間移動ロボットの研究開発 (第 4 報)”, ROBOMEC2006, 2P2-C10, p. 175.
- [5] 岩田拓也, 橋本尚久, 前川仁, 皿田滋, 小森谷清, “空間移動ロボットの研究開発 (第 5 報)”, 第 24 回日本ロボット学会学術講演会講演概要集, 1G32, 2006.
- [6] 岩田拓也, 橋本尚久, 前川仁, 小森谷清, “新型飛行機械の研究開発と活用”, 第 44 回飛行機シンポジウム, 1E1, 2006.
- [7] 岩田拓也, 橋本尚久, 小森谷清, “空中物流ロボットの研究開発”, 第 15 回交通・物流部門大会 TRANSLOG2006 講演論文集, 2402, OS2-1, 2006. (優秀論文講演表彰受賞)