

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

無人飛行船の地上ハンドリングの検討

高井政和, 奥山政広, 友井康人, 蛭田忠孝

2006年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

概要	1
記号・略号	1
1. はじめに	2
2. 飛行船の地上ハンドリングに関する技術的背景	2
2.1 飛行船運用の歴史	2
2.2 最新機 ‘Zeppelin NT’ の地上ハンドリング	2
1) ‘Zeppelin NT’ の設計コンセプト	2
2) 地上ハンドリングの現地調査	3
2.3 JAXA における飛行船運用実績	3
3. 成層圏滞空試験機の地上ハンドリング	4
3.1 成層圏滞空試験機の概要	4
3.2 地上ハンドリングの方法	4
1) 放船場所までの移動	4
2) 放船作業	5
3.3 地上ハンドリングの評価	6
4. 定点滞空試験機の地上ハンドリング	6
4.1 定点滞空試験機の概要	6
4.2 地上ハンドリングの方法	6
1) 離着陸地点と格納庫までの移動	6
2) 試験機の格納庫搬入（実例）	7
4.3 風による船体にかかる力の推定	8
1) モーメントの釣合い	8
2) 定常風による船体抗力と平均人単位力	8
3) 非定常風により船体にかかる力	9
4.4 地上ハンドリング関連技術	11
1) 地上無線操縦者とグランドクルーの連携	11
2) 地上取扱総合試験	11
3) 離着陸試験	11
4) 訓練の効果	12
4.5 ホールディングテイクオフ	12
5. 技術実証機における地上ハンドリングの検討	13
5.1 地上ハンドリング技術の現状	13
5.2 地上ハンドリングの方法	14
1) 飛行船システム側に機能を配分する方法	14
2) 地上設備側に機能を配分する方法	14
5.3 グランドクルー人数の推算方法	14
1) 150m 級船体のグランドクルー人数の試算	14
5.4 地上ハンドリングの成立性検討	15
6. おわりに	15
謝辞	15
文献	15

無人飛行船の地上ハンドリングの検討

高井政和*¹, 奥山政広*¹, 友井康人*², 蛭田忠孝*³

Study of Operational Considerations of Unmanned Airship's Ground-Handling*

Masakazu Takai*¹, Masahiro Okuyama*¹, Yasuhito Tomoi*² and Tadataka Hiruta*³

Abstract

Japanese stratospheric platform (SPF) R&D activities for communications, telecommunications and observations of the global environment in the future started as a joint project in 1998 between the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) and the Ministry of Internal Affairs and Communications (MIC). In 2003, a ground-to-stratosphere flight test was carried out and successfully demonstrated membrane material and structure technologies using a small unmanned airship. In 2004, low altitude stationary flight tests were carried out and successfully demonstrated buoyancy control, thermal management, and flight control technologies using another small airship. This paper provides some explanations on the ground handling of small airships and considers ground handling technologies for a large technology demonstrator airship in the future.

Keywords: Stratosphere, Airship, Ground-handling

概 要

将来の通信・放送及び地球観測等に利用する成層圏プラットフォーム(SPF)飛行船の研究開発が、1998年より文部科学省と総務省の共同プロジェクトとして進められている。2004年度までに、膜材料・構造技術の実証を主目的とした成層圏滞空飛行試験と浮力・熱制御、飛行制御技術を含む運用技術の実証を主目的とした定点滞空飛行試験が小型の無人飛行船により成功している。本稿では、これら飛行試験で行った飛行船の地上ハンドリング技術の評価・解析を通して、将来計画されている大型の技術実証機に関する地上ハンドリング技術の課題等を検討する。

記号・略号

C_D : 船体の抗力係数

C_{D90} : 真横から受ける風の抗力係数

C_L : 揚力係数

C_m : 縦揺れモーメント係数

D : 船体抗力

$F[\text{kgf}]$: グランドクルーが飛行船に及ぼす力

$f[\text{kgf}]$: グランドクルー1人の平均的な力

$l[\text{m}]$: 船体長

m : 機力分担率

$r[\text{m}]$: 船体半径

$S[\text{m}^2]$: 船体代表面積

SPF: 成層圏プラットフォーム (Stratospheric Platform)

$\rho [\text{kg}/\text{m}^3]$: 大気密度

$U[\text{m}/\text{s}]$: 風速

μ : 摩擦係数

* 平成18年3月27日受付 (received 27 March, 2006)

*¹ 航空プログラムグループ 無人機・未来型航空機チーム (Unmanned and Innovative Aircraft Team, Aviation Program Group)

*² 航空宇宙技術振興財団 (Foundation for Promotion of Japanese Aerospace Technology)

*³ 富士重工業株式会社 (Fuji Heavy Industries LTD.)

1. はじめに

飛行船は、地上付近における耐風制御能力の弱さから、地上における船体の取り扱い（地上ハンドリング）に固有の技術課題が存在する。舵面効果が期待できない離着陸時の速度がゼロに近い状態において、一般的に、グランドクルーと言われるハンドリング要員によって船体姿勢の安全が確保される。ハンドリングに要する力は、船体の大きさに依存して風圧が増すために、船体のハンドリングの困難さも増加する。

成層圏プラットフォーム飛行船の開発構想を図1-1に示す。技術実証機は、成層圏及び定点滞空試験機の要素技術の成果を踏まえた本格的な成層圏滞空を技術実証する150m級船体である。

本稿は、大型有人飛行船等の地上ハンドリングに関する歴史的な技術調査と、これまでJAXAが実施した40m級成層圏滞空試験機及び60m級定点滞空試験機の地上ハンドリング技術の評価・解析¹⁾を通して得られた知見から、150m級技術実証機の地上ハンドリングの可能性について検討したものである。

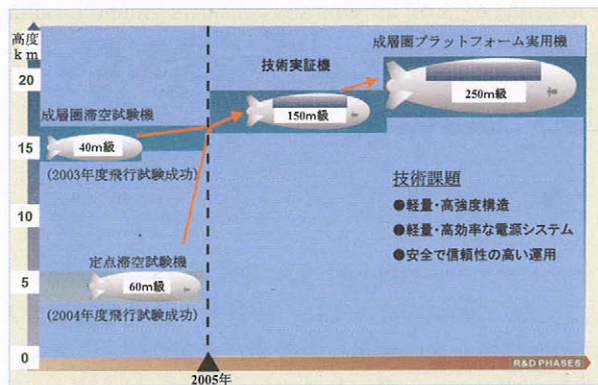


図1-1 成層圏プラットフォーム飛行船開発構想

2. 飛行船の地上ハンドリングに関する技術的背景

2.1 飛行船運用の歴史

20世紀初期に活躍した飛行船は、地上に固定されたマストにより係留された。当時の飛行船は、船体長200m前後に達する大型有人飛行船であり、風による地上への船尾の衝突等を防ぐために、マスト高さを高くする必要がある一方で、飛行船整備のためのアクセス性を損なうという課題が存在した。当時、マスト高さを低くできなかった理由の一つには、地上風による船体の姿勢の変化を適切に制御するために必要な出力を有する推進器などが十分に実用化されていなかったことが技術的背景として存在している²⁾。また、大きな船体にかかる風による荷重は大きく、それに対抗するハンドリング要員も数百人規模となり、広大なスペースがとれる基地での運用を

余儀なくさせた。飛行船の着陸において、マストへのアプローチの方法は、マストより高い高度で水平速度を十分に落としてから、飛行船に接続された3本のワイヤーを地上で保持して垂直に降ろす方法（3ワイヤーシステムと言われる）があった。しかし、1940年頃以降の大型有人飛行船の衰退とともに、歴史の中で伝承されずにこの技術は失われ、現在に至っている³⁾。

近年の成層圏プラットフォーム飛行船等の大型飛行船開発において、地上ハンドリングが大きな課題の一つになっている理由がここにあり、2002年に開催された飛行船に関する国際会議では、グランドクルーのハンドリング技術の育成とこの着陸技術の実証等を目的とした訓練用飛行船の開発が提案された³⁾が、実現には至っていない。現在の飛行船の地上ハンドリング法は、第2次世界大戦時に米海軍の飛行船のためにグッドイヤー等が開発したものであり、比較的小型の飛行船を飛行船係留車によりハンドリングする方法である。この方法は、安全で信頼性があることが証明されている唯一の方法であり³⁾、1990年代に設計された‘Zeppelin NT’飛行船をはじめ、現在運用されている多くの飛行船に採用されている。今回の調査では、この方法を適用した最大級の飛行船は、1962年頃に、初期警戒任務のために運用された米海軍の飛行船‘ZGP-3W’の124mである。67.8m長の定点滞空試験機も同様な方法で地上ハンドリングを行っているが、‘ZGP-3W’と定点滞空試験機は、ともに、船体内部に推進器を支持する硬い構造を有しない軟式の構造様式を採用している。そのために、軟式の飛行船は、一般的に姿勢制御に効果的に使用できる船尾の推進器がなく、風に逆らった船体の姿勢変更等は、グランドクルーに依存することになり、船体の大きさに応じて、グランドクルーの必要人数も多くなる。‘ZGP-3W’の地上ハンドリングに18人必要とのデータがある³⁾が、船体にかかる荷重を機械的に分担できる方法の採用などにより、船体のより小さい定点滞空試験機と同人数の地上ハンドリングとなっている。

2.2 最新機‘Zeppelin NT’の地上ハンドリング

ここでは、Zeppelin NTの設計コンセプトと地上ハンドリングの文献調査及び現地調査の結果を示す。設計コンセプトは、参考文献4)の引用であり、1993年当時のものである。なお、構造様式は、船尾に推進器を取付け可能とする半硬式（船体内部に構造を有する）タイプの飛行船であり、3人程度で地上ハンドリングを実現している。

1) ‘Zeppelin NT’の設計コンセプト⁴⁾

1940年頃の大型有人飛行船の衰退は、旅客機や輸送機の輸送量(すなわち、ペイロード×距離)あるいは、単位時間当たりの輸送量が、飛行船の能力を上回る状況にあり、また、運用コストの比較においても、飛行船は旅客機よりも約3倍高いことに原因があると分析された。ところで、燃料コストの上昇(化石燃料の枯渇)、あるいは、燃料の燃焼等による空気汚染の問題(地球環境問題)がよりクローズアップされれば、飛行船にとって、航空機との競争に有利に働くが、それでも、航空機に打ち勝つことができるかどうか疑問であるとの見方に立っている。一方、長い航続時間を必要とするミッションに対しては、浮力を利用する飛行船は航空機より有利であるため、大陸間輸送以外のミッションを安い運用コストで提供し、マーケットを獲得する戦略を打ち出している。科学研究、公害防止、空中広告、海上パトロール、掃海作業、早期警報、観光事業等のアプリケーションは、飛行船に適している。また、飛行船の運用コスト削減は、地上ハンドリングに多くのグランドクルーを必要とする人件費の削減と、極端に高い保険費用を下げるのが重要であると指摘されている。方向舵の効果が完全に失われる離着陸時に最も事故が多いことなどが保険費用に反映されるため、飛行船の地上ハンドリングを少人数で、安全に行なう技術確立の重要性が強調されている。

2) 地上ハンドリングの現地調査

埼玉県桶川市にあるホンダエアポートで運用されている Zeppelin NT 飛行船の写真を図 2.2-1 に示す。着陸時には、4人が着陸場に展開していた。クルーチーフが1名、飛行船係留車のドライバー兼マストマン(マストオン/オフの遠隔操作を行なう)1名、バラスト搭載や乗客乗乗の補助2名であった。着陸場には、飛行船係留車の他に、重機1台が設置されており、着陸直前に燃料補給車1台が到着した。飛行船は、低高度で進入してほぼ前進速度ゼロの状態を着陸し、飛行船係留車に接続された。軟式ではない構造様式を有する船尾には、推進器が装備されており、安定した姿勢をとりながら、少人数で確実な地上ハンドリングが行われていた。



図 2.2-1 Zeppelin NT の地上ハンドリング例
(文・写真：(株)日本飛行船の許可を得て掲載)

2.3 JAXA における飛行船運用実績

JAXA において実施した成層圏滞空飛行試験及び定点滞空飛行試験の地上ハンドリングの実績を表 2.3-1 にまとめて示す。

表 2.3-1 地上ハンドリングに関わる実績

	成層圏滞空試験機	定点滞空試験機
全長	46.4m	67.8m
質量	500kg	6400kg
構造様式	軟式(ダイヤフラム)	軟式(バルネット)
動力	無	有(左右プロペラ)
遠隔操作	浮力制御	自律制御又は遠隔操縦
移動	台車1台+牽引車2台	飛行船係留車1台
ハンドリング要員	11名	18名
浮力計測	可	可
格納庫から搬出時の風	3.5m/s以下 (機体に垂直成分)	3m/s以下 (全方向)
放船/離陸	1回のみ実証	6回実証(※)
重機	台車1台+クレーン1台	なし
風向き合せ	牽引車で方向転換	マストオフ以降人力
最大風条件	4.5m/s	5m/s
上昇方向	上向き	斜め上向き
着陸	実証未	6回実証(※)
特記事項		障害物を回避する ホールディングテイクオフを行った

注記 ※地上取扱総合試験と離着陸試験を除いた本格的飛行試験をカウントした。

成層圏滞空試験機は、垂直姿勢で放船した無人・無動力の軟式飛行船である。垂直姿勢の放船は、3項に述べるとおり、ダイヤフラムと言われる構造様式と密接に関連している。地上ハンドリングの一つの特徴は、台車を活用したことにあるが、単なる格納庫からの搬出・搬入目的ではなく、放船場所において試験機を立てる機能を有する可動式の放船装置として有効に機能したことにある。

定点滞空試験機は、2.1項で述べた地上ハンドリング方法を適用しているが、軟式飛行船であり、船尾に推進器等を装備していないため、地上の風による荷重に対処する方法は、グランドクルーのハンドリングにより行われている。実機によるグランドクルーのハンドリング訓練を除き、6回の本格的な飛行試験を行った。有人飛行船で実績のある飛行船係留車によるハンドリングは、無人飛行船でも有効であることが示された。成層圏滞空試験機の地上ハンドリングの詳細を3項に、定点滞空試験機の地上ハンドリングの詳細を4項に示す。

3. 成層圏滞空試験機の地上ハンドリング

成層圏滞空飛行試験は、到達高度約16kmに30分程度水平飛行をさせた後、船体上部膜材を火工品で切り裂きヘリウムを放出してパラシュートで降下、海上回収する1回限りの実験である。試験機は、無動力の軟式飛行船であり、ここでは、図3-1に示すように試験機を立てて上向きに放船する方式の地上ハンドリングについて述べる。



図 3-1 成層圏滞空試験機の放船

3.1 成層圏滞空試験機の概要

成層圏滞空試験機は、ベクトラン膜材を使用した軟式構造様式が採用された。船体質量は500kgである。船体外形は、全長46.4m、船体最大直径12mである。船内には、ヘリウムと空気を分離するダイヤフラムが設けられている。図3.1-1は、試験機の側面図に、船体内部のダイヤフラムを模式的に追記した

ものである。ダイヤフラムは、外皮より柔軟な膜材でできており、変形が容易なためヘリウムの膨張に伴う容量を確保し易く、上空において余剰浮力に応じ船体姿勢が定まる利点がある。船外には、ハンドリングのためのアイプレートが船体中央の左右4箇所に設けられた。格納庫から機体搬出時の風条件は、風速が5m/s以下、かつその機体軸に垂直な成分が3.5m/s以下であることとした。また、放船場の周囲5km以内に雷雲がないことも条件であった。放船時の風速は、最大4.5m/s以下、平均3m/s以下とした。アイプレートは、格納庫から搬出時に台車とロープで固定され、風等による荷重に十分耐える設計となっている^{5,6)}。

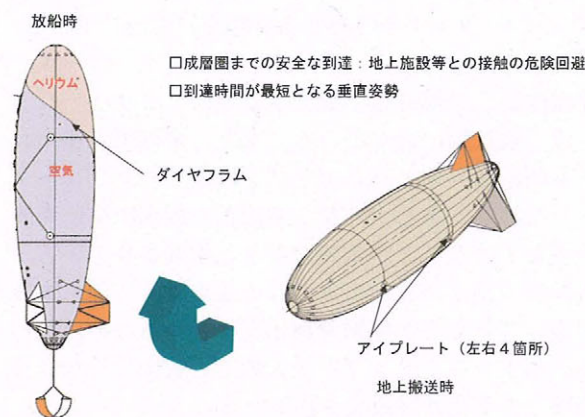


図 3.1-1 成層圏滞空試験機

3.2 地上ハンドリングの方法

1) 放船場所までの移動

ダイヤフラムの変形の容易さから、船内のヘリウムは、位置が定まらないため、試験機を水平な状態で浮かしてハンドリングすることは難しい。そのため、格納庫から放船場所までは、台車に船体を若干頭上げに固定して移動した。台車の仕様は、全長30m以下、幅15m以下、高さ5m以下であり、風速7m/sまで転倒しない構造とし、放船時に使用するアウトリガーを装備した。牽引車は台車前後に2台取付け、前後の移動を可能とし、試験機の船首を風上に向けることができる回頭性を有する。台車には、試験機の係留ロープ巻き取り用電動ウィンチ、浮力計測用のロードセルの他、係留ロープ開放用の電動リリースメカ等を装備した。図3.2-1に移動時の試験機を示す。地上ハンドリング要員（技術者除く）は下記11名で行った。

牽引車ドライバー	2名
誘導員	1名
ヘリウム操作	1名
安全監視員	7名



図 3.2-1 移動時の成層圏滞空試験機

2) 放船作業

放船作業において、試験機と既存の地上施設等との接触の危険をいち早く回避することを目指した。このため、地上の障害物のある高度を最短で通過できる上向きの放船方法を採用している。試験機を放船場所で立てることによって、船内のヘリウム位置は、船首に留まるため、放船作業の安全性を高めることができる。試験機を立てる方法は、台車に固定しているロープのうち、前方のアイプレートのロープを伸ばし、緩めることで行った。このとき、台車に若干頭上げに固定されていた船内のヘリウムはさらに船首で安定し、頭上げのモーメントが機体に作用する。このことを利用して試験機を立上げ、実際の試験では、放船直前にはほぼ垂直に近いピッチ角姿勢となった。前方のアイプレートに止められた左右のロープ 2 本を開放し、船体の傾斜に伴う船尾端の沈み込みが回復するタイミングを図って船尾端ロープを切断して放船した。このとき、船尾端の沈み込みは、クレーンの先端に台座を設けて支持した。図 3.2-2 に放船手順を示す。図 3.2-3 に船尾端の支持状況を示す。

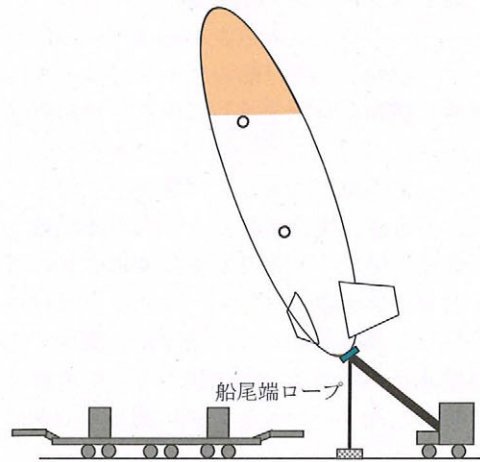
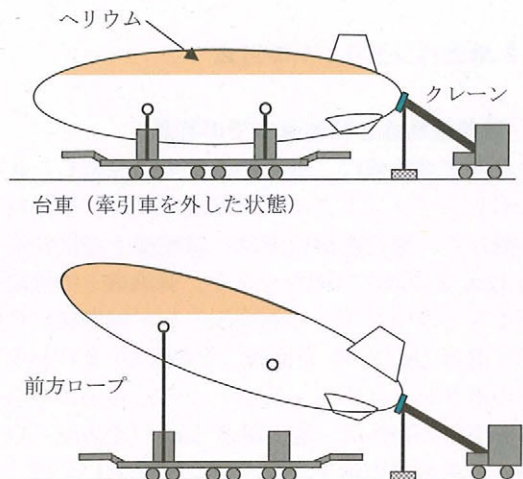


図 3.2-2 成層圏滞空試験機の放船手順



図 3.2-3 船尾端の支持状況

放船作業は、実験指揮者の放船指示により、風の状況と一連の船体の動きに合せロープを切断するが、風の強弱、船体重心と浮心位置のバランスの崩れ等から不安定に回転、動揺をはじめめる可能性があることに注意が必要であった。図 3.2-4 に放船準備試験の状況を示してあるが、事前の試験によってこの辺までの手順は実機で確認できた。次の最終ステップは事前訓練ができないため、イメージトレーニングによる訓練で補っている。実際の試験では、この後に前方ロープを切断し、船体は急激に角度を上げることになる。今回は、放船時の風は約 2m/s と弱く、天候に恵まれたこともあるが、事前のイメージトレーニングと格納庫内外での放船手順の訓練の積み重ねが成功へと導いたと考える。



台車（牽引車を外した状態）

前方ロープ

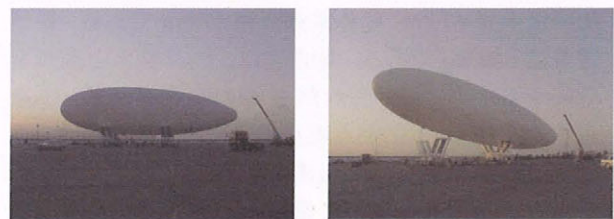


図 3.2-4 放船準備試験の状況

3.3 地上ハンドリングの評価

図 3.3-1 に、実際に行われた放船までの姿勢角データを示す。縦軸が、飛行船のピッチ、ロール、ヨーの姿勢角、横軸が時間を示している。放船直前までの約 12 分間、安定したロープワークが行なえたことがわかる。この試験により、試験機を上向きに立てて放船する方式が実証され、一つの手順が確立できたと言える。地上ハンドリングに要求された下記手順は、台車と牽引車及びクレーンにより既存品を最大限活用して効果的、かつ、効率的に実現できており、格納庫から搬出及び放船場所までの移動についても、特に、地上ハンドリングに関して問題はなかった。

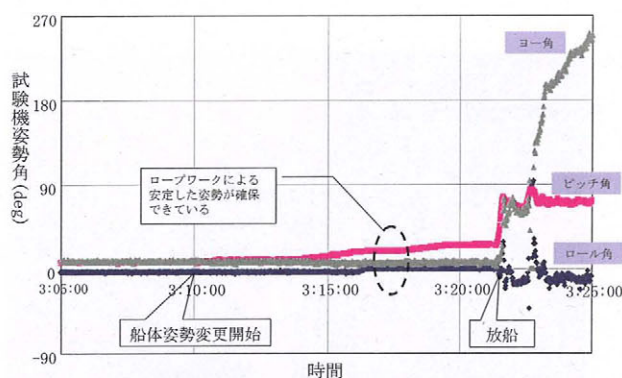


図 3.3-1 放船までの姿勢角データ

4. 定点滞空試験機の地上ハンドリング

無動力で1回限りの放船をした成層圏滞空試験機と異なり、定点滞空試験機の地上ハンドリングは、既存の有人飛行船と同様な飛行船係留車を使用した地上ハンドリングを適用した。定点滞空試験機は、合計8回の飛行試験を実施した。試験機は、推進器を有し、自律制御又は遠隔操縦によって飛行する軟式飛行船である。本来飛行船が有する地上付近での耐風制御能力の弱さ等から格納庫から離着陸地点までの移動や離着陸時のロープワーク等の地上ハンドリングに関わる技術課題とともに、無人機固有の課題が存在した。以下に、これら飛行試験で実施した地上ハンドリングについて述べる。

4.1 定点滞空試験機の概要

定点滞空試験機は、ベクトラン膜材を船体外皮に用いた全長 67.8m、船体最大直径 17.5m である。船体質量は 6400kg である。船内には、ヘリウムと空気を分離するために設けられた 3 つの空気バロネットを有する。図 4.1-1 に定点滞空試験機の概要を示す。

空気バロネットは、船体のピッチアップ・ダウンやトリムがずれた場合に使用し、各空気バロネットの最大容積は、エンベロープの体積に対して50%を

占める。

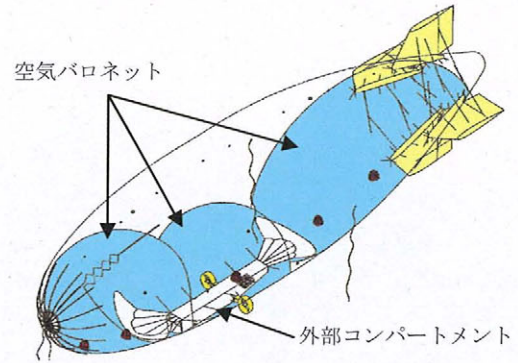


図4.1-1 定点滞空試験機の概要

図4.1-2に離陸直後の定点滞空試験機を示す。離陸時は、推進器を最大出力に設定するとともにエレベーターを十分に引き、後方の空気バロネットの容積を増加させて、後方を重くすることにより、ピッチアップ姿勢をとる。船体のヘビネスは約10kgヘビーであり、推進器は上向きにチルトさせて、所定の高度と速度を得ることに使用する。従って、舵面の効く速度に達するまでの船体の方向制御は、グランドクルーによるハンドリングで行う必要がある。



図 4.1-2 離陸直後の定点滞空試験機

4.2 地上ハンドリングの方法

1) 離着陸地点と格納庫までの移動

定点滞空試験機は、飛行船係留車に係留した状態で牽引し、グランドクルーが後述のロープを保持して移動した。飛行船係留車は、試験機との接続高さが約 12m まで対応可能なマスト、試験機との接続に使用できるウィンチ、外部電源として試験機に供給可能な電源 (AC/DC 変換機、発電機等) 及びバラスト用の水タンク/ポンプ等を有する。格納庫からの機体搬出時の条件は、地上風速 3m/s (全方位) 以下であり、その後の地上ハンドリングにおいては、地

上風速 5m/s (全方位) 以下である。運用においては、局所風にも十分注意を払うとともに、クルーチーフのアドバイスに従うこととした。また、降雨、霧等がないことも条件である。グラウンドクルーによるハンドリングのために、ノーズペンダントライン、ヨーライン (船体前方左舷, 右舷), クォータライン (船体後方左舷, 右舷), テールラインの 6 箇所にロープが取り付けられた他に、船体中央下部に取り付けられた外部コンパートメント (アルミ製機器室) の外側にハンドリングレール (左舷, 右舷) 2 箇所が設計されている⁷⁾。図 4.2-1 に地上ハンドリングの体制を示す。地上ハンドリング要員 (地上無線操縦者や技術者を除くグラウンドクルー) は 18~22 名で行った。図 4.2-1 に地上ハンドリングの体制を、図 4.2-2 に離陸前の定点滞空試験機を示す。

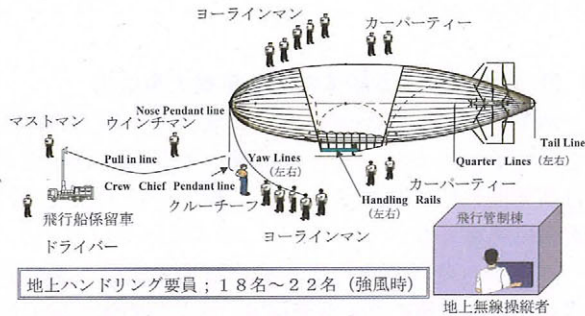


図 4.2-1 定点滞空試験機の地上ハンドリングの体制

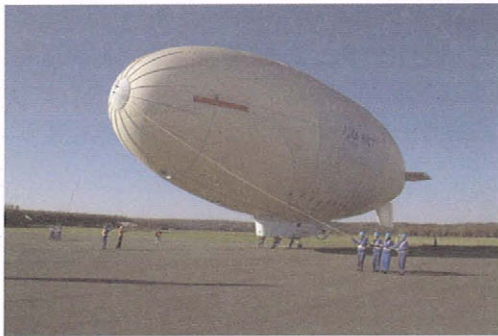


図 4.2-2 離陸前の定点滞空試験機

2) 試験機の格納庫搬入 (実例)

飛行船係留車に係留された船体は、飛行船係留車のマスト回りに回転し、風上に船首を向けることが可能である。地上の風が弱い、例えば、1m/s 以下の地上風であれば、あまり風の影響を受けずにゆっくり風向きにあわせる (風上に船首を向ける) 動きであった。この様な状況下では、グラウンドクルーにより、意識的に船体の動きを拘束せずに比較的容易なハンドリングが可能であった。しかし、通常、1m/s 以上の地上風が存在することが多い。一例として、定点滞空試験での離着陸時の地上風 (直前の 2 分間平均) の風速、風向と試験機の方位角の時系列デー

タを図 4.2-3 に示す。このデータは、格納庫から搬出後に風向きに合せ、試験機の向きを約 180 度変更し、着陸後は、格納庫の搬入口に合せ、90 度向きを変更したことを示している。注意すべきことは、格納庫搬入の際、風向きが、必ずしも、格納庫の出入り口の方向と一致せず、船体側面から負荷される風に逆らって、グラウンドクルーが向きを変える必要があることである。図 4.2-4 は、クォータラインを保持して船体の格納庫搬入を行っている一例である。強風に逆らって船尾を回転させるハンドリングを行ったが、その際、船体のピッチ角が 4 度程度変化しており、かなり大変なハンドリングであった。

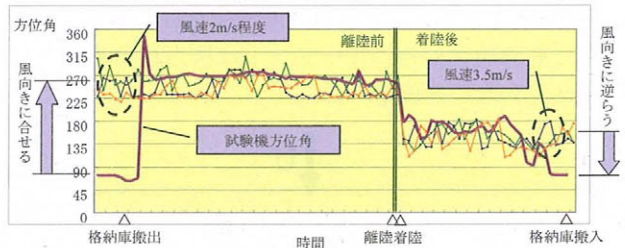


図 4.2-3 格納庫搬出入時の風と試験機方位角の例

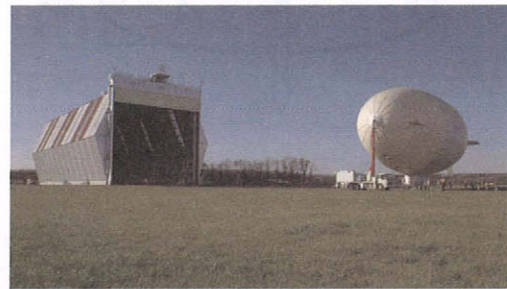


図 4.2-4 格納庫搬入の例

4.3 風による船体にかかる力の推定

定点滞空飛行試験の定点滞空試験 (P3-3) における船体の格納庫搬入時の横風状態では、地上風により船体を受ける力とグランドクルーが船体へ作用する力が拮抗していた。一般的に、飛行船の格納庫搬入時にグランドクルーの最大人数を要するため、この状態を模擬し、条件を単純化してモーメントの釣合い関係からグランドクルー1人当たりの力を推定する。また、地上風を定常のみならず加速風を含む非定常を扱い、風による船体にかかる力を推定する。

1) モーメントの釣合い

船体が横風を受ける状態において、力の作用関係を図 4.3-1 に示す。力は風方向成分だけに着目し、さらに船体特性が持つモーメントは抗力作用点回りで生じていないと仮定する。

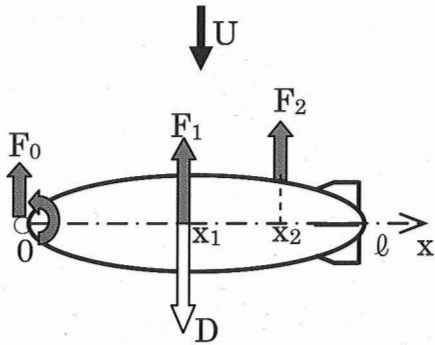


図 4.3-1 力の作用関係

船体が飛行船係留車に x 軸原点 0 の船首で係留されているとして、速度 U の風が船体に真横から当たる船体には抗力 D がほぼ船体体積中心 x_1 に働く。この抗力に対抗して、グランドクルーによりハンドリングレール (右舷, 左舷) を介しほぼ x_1 位置では F_1 の力 (右舷から引く力と左舷から押す力) を、クォータライン (右舷) を介して x_2 で F_2 の力 (引く力) を作用させる。係留車の軸 (0 位置) 回りの回転は自由になる。けれども、船体を回転させないようにグランドクルーが力を働かせているため、モーメントの釣合いが成り立つ。なお便宜上、船体は剛体として扱うことにする。

係留車 0 点では F_0 の反力が作用するので、 F_0, F_1 , および F_2 の合力と D とで力が

$$F_0 + F_1 + F_2 = D \quad (1)$$

として釣合う。全体の力に対して係留車が受け持つ機力 F_0 の分担は、機力分担率を m_0 に取り次式で表される。

$$m_0 = 1 - \frac{F_1 + F_2}{D} \quad (2)$$

また、モーメントの釣合い式は

$$x_1(F_1 - D) + x_2 F_2 = 0 \quad (3)$$

から示される。

次に、ハンドリングレール (右舷, 左舷) に作用したグランドクルーの人数 (右舷+左舷) を n_1 , およびクォータラインの人数 (右舷) を n_2 とする。グランドクルー1人当たりが作用する平均的な力 f は、両作用点で同じと仮定する。そこで、式(3)の F_1 および F_2 をそれぞれ $n_1 f$ および $n_2 f$ で置き換え、 f について解くと

$$f = \frac{D}{n_1 + \frac{x_2}{x_1} n_2} \quad (4)$$

になり、右辺へ値を代入すれば平均人単位力 f が見積られる。

2) 定常風による船体抗力と平均人単位力

地上付近にある船体への風の流れは、地上の影響を受ける。しかし、ここでは地上の影響を考慮せず自由空間に吹く風の流れとして扱い、抗力係数への影響は考慮しない。

真横から受ける風による船体抗力の式は、大気密度 ρ , 船体体積の $2/3$ 乗面積 S , および船体の抗力係数 C_{D90} から

$$D = \frac{1}{2} \rho U^2 S C_{D90} \quad (5)$$

である。抗力係数 C_{D90} は、風洞試験 (旧 NAL6.5m × 5.5m 低速風洞) で取得された定点滞空飛行試験機の船体に類似する尾翼つき模型の抗力係数を使う。

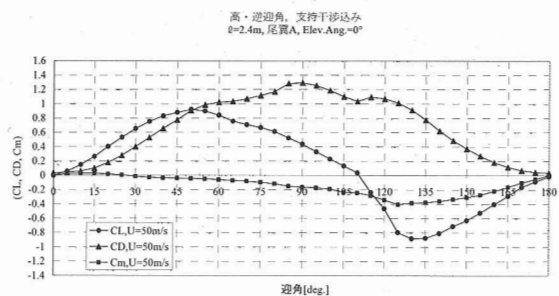


図 4.3-2 船体の抗力係数

図 4.3-2 に示すグラフを参考にして、 $C_{D90}=1.2$ と定める。P3-3 での船体の格納庫搬入時の最大瞬間風速はおよそ 3.5m/s なのでこれを U , $\rho=1.23\text{kg/m}^3$, および $S=484\text{m}^2$ として式(5)を使い

$$D=446\text{kgf} \quad (6)$$

を得る。

同じく P3-3 での船体の格納庫搬入時条件で、グランドクルーの平均人単位力 f を推定する。当時のハンドリングレールとクォータラインの合計人数は、20 人 ($n_1 \approx 16$, $n_2 \approx 4$) とみられる。作用点の位置は船体長を l として、 $x_1/l=0.45$ および $x_2/l=0.73$ になる。これらと式(6)を式(4)に代入して

$$f \approx 20\text{kgf} \quad (7)$$

が求まる。この時、 $F_1=320\text{kgf}$ 、 $F_2=80\text{kgf}$ 、および $F_0=50\text{kgf}$ になる。それゆえ、機力分担率 m_0 は式(2)から約 0.1(10%)になる。

クォータラインのロープは、船体作用点から後方（あるいは前方）および下方に伸びグランドクルーの作用点につながる。そのため、図 4.3-1 の F_2 は、グランドクルーからロープに伝わった力の分力であり、クォータラインの 1 人のグランドクルーは F_2/n_2 以上の力を出さなければならない。クォータラインを引くグランドクルーにかかる外力を図 4.3-3 に示す。定点滞空飛行試験では、地上ハンドリングの解析が目的でなかったことから、ロープのハンドリング荷重等の計測は行われていない。しかしながら、グランドクルーがロープを握る握力等を考慮しないで、質点と見なして、地面の摩擦力に等しい力で飛行船を水平に引くことができると仮定すれば、下記の力の釣り合いから概略の力を推定できる。

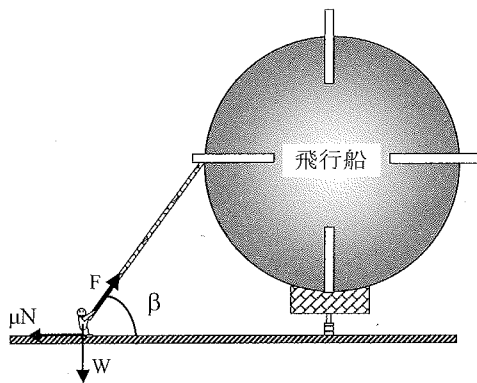


図 4.3-3 グランドクルーにかかる外力

$$F \times \cos\beta = \mu N \quad (8)$$

$$N = W - F \sin\beta \quad (9)$$

ここに、 μ は摩擦係数、 N は地面に垂直方向の力、 β はロープと水平面のなす角度、 W はグランドクルーの体重、 F はグランドクルーが飛行船から受ける反力を示す。体重 77kgf のグランドクルーの場合、 μ と β を与えて摩擦力($=\mu N$)を計算した結果を図 4.3-4

に示す。一般的に、コンクリートとゴムの摩擦係数は、0.6~0.7 程度と考えられ、グランドクルーと飛行船の位置関係より決まる β を 60 度程度とすれば、グランドクルーが地面より受ける摩擦力は 20kgf 程度であることがわかる。この摩擦力が、飛行船の受ける横風による荷重に対抗できる力と考えれば、(7)式で求めた平均的なグランドクルーの力は概ね妥当な値であると判断できる。

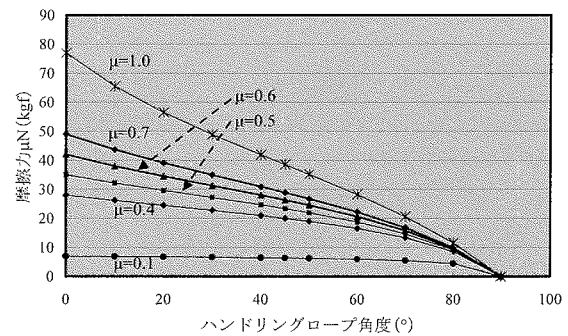


図 4.3-4 グランドクルーにかかる摩擦力

3) 非定常風により船体にかかる力

風の息（突風）のように自然の風は、定常風だけではなく加速（減速を含む）風が加わり非定常である。水平方向の加速風が船体に作用するとき、一般の抗力以外に水平浮力と付加質量による付加慣性抵抗が加わってくる^{8),9)}。水平浮力は、空気が静止して船体が加速度運動をする場合には生じなく、気象力学でいう気圧差から生じる力の気圧傾度力¹⁰⁾によって船体を受ける力である。加速風が発生することは気圧差つまり大気中の圧力差が存在することを示す。この圧力差の中にある船体は、垂直方向の大気の圧力差から生じる浮力と同じ考えから水平方向の力（水平浮力と称する）を受けると言える。もう一つの付加質量¹¹⁾は、空気が静止して船体が加速運動をする場合にも考慮しなければならず、空気と船体との間で相対的な加速度運動があるとき、船体は周りの空気に作用して動かしその反作用として船体には加速度成分の圧力が加わる。非定常圧力の相対的な運動方向成分の船体面積分は加速度に比例する係数になり、あたかも真空中と比べて質量が付加されたようになるため付加質量（仮想質量ともいう。また見掛質量ともいう。けれども見掛質量は真の質量を含めた質量を指すことが多い）と呼ばれる。飛行船の場合、まわりの空気は船舶の場合の水にくらべて密度が小さい。しかし、船体の密度は空気と同程度であり付加質量の影響は無視できない。これら水平浮力と付加慣性抵抗は、飛行船にとって

風の加速に比例して大きな作用となる。

影響推算の計算条件は、P3-3（定点滞空試験）における船体の格納庫搬入時の状態を模擬し単純化する。また、ここでも地上の影響を考慮せず自由空間の流れとして風を扱う。加速風は、その時の地上平均風を参考にして設定する。

船体が静止している状態で、非定常風 U により船体が受ける力 F を、次式で示す。

$$F = \rho V \frac{dU}{dt} + k_x \rho V \frac{dU}{dt} + \frac{1}{2} \rho U^2 V^{2/3} C_{DxV} \quad (10)$$

ここで、 t は時間、 x は風が吹く方向、 ρ は大気密度、 V は船体体積、 k_x は x 方向船体の付加質量係数、 C_{DxV} は $V^{2/3}$ 乗基準面積の x 方向船体の抗力係数とする。式(10)右辺の第1項は水平浮力、第2項は付加慣性抵抗、および第3項は一般の抗力を表す。

計算条件は格納庫搬入時の状況から、 x 方向は船体に対して 90° の真横方向と決め、数値は $\rho = 1.23 \text{ kg/m}^3$ 、 $V = 10660 \text{ m}^3$ 、 $k_x = 0.8$ 、および $C_{DxV} = 1.2$ とする。加速風は同様の状況で平均地上風を参考にして、 $U = 3 \text{ m/s}$ から 60 s 後に 2.5 m/s まで減速風があり、その後加速風によって 60 s 後に 3.5 m/s まで変化するような設定とする。変化曲線は $(1 - \cos(\pi t / 60)) / 2$ で表している。図 4.3-3 に加速風の風速プロファイルを、図 4.3-4 にその加速度を示す。

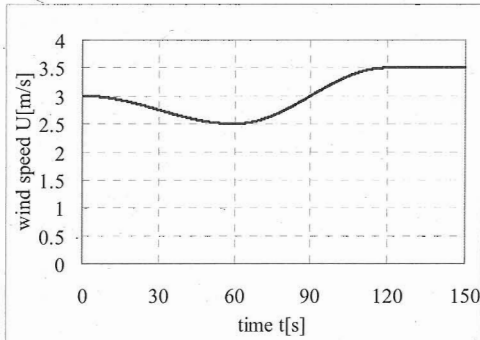


図 4.3-3 加速風の風速プロファイル

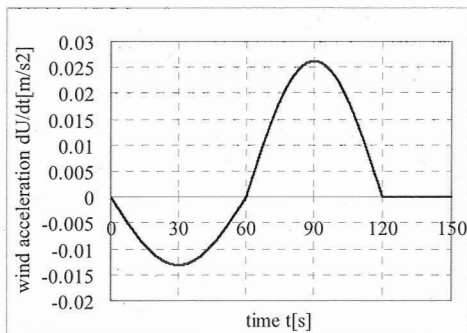


図 4.3-4 加速風の加速プロファイル

これら条件を式(10)に代入し、式(10)を数値的に解いた結果が図 4.3-5 である。初期風速 3 m/s での約 330 kgf の抗力を定常風から船体が受けている。時間の増加と共に減速風が加わり 50 s 辺りで 220 kgf まで船体の受ける力 F は減る。その後 60 s からは加速風が加わるため 110 s 辺りで最大力の約 460 kgf を示し、 120 s 後の風速 3.5 m/s で約 450 kgf に落ち着く力の特性になる。

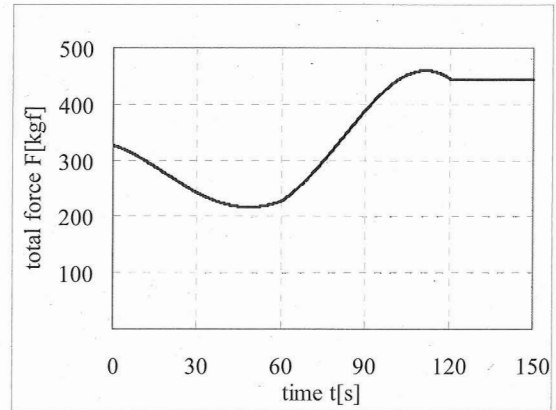


図 4.3-5 船体の受ける力

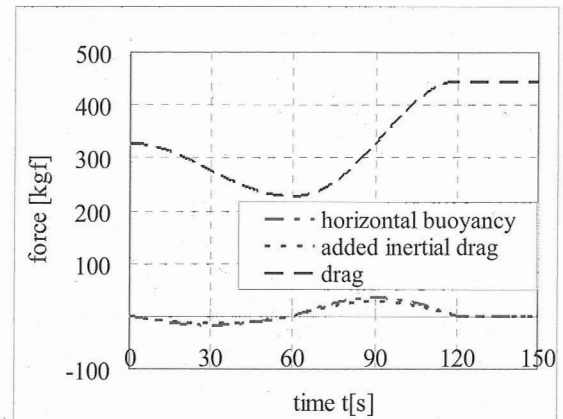


図 4.3-6 船体の受ける力の成分

船体の受ける力を式(10)の右辺の3項に分けて、図 4.3-6 に表した。水平浮力および付加慣性抵抗は、減速風で流れと逆方向の力が、加速流で順方向の力が生じている。加速流の加速度が最大の 90 s で、それぞれの最大値、 35 kgf (水平浮力) および 28 kgf (付加慣性抵抗) になる。両方の成分を合わせれば 63 kgf であり、全体の力に対して 16% を占めている。

図 4.3-6 の一般の抗力成分と図 4.3-5 の全体の力を比べれば、加速風による影響の水平浮力成分と付加慣性抵抗成分が働いて、加速風がない時より早くまた大きく力が作用する。飛行試験で格納庫搬入時の地上平均風速増加から想定した加速風の風速プロフ

ァイルが実際に模擬しているとするれば、計算結果の値により、この搬入時における加速風の船体への影響は小さかったと言える。

しかし、加減速風の加速度がより大きければ、船体へ働く力は増加する。例えば、初期、中間および最終風速度を同じく 3m/s、2.5m/s および 3.5m/s とし、その時間間隔を 1/3 の 40s に取ると、図 4.3-7 と図 4.3-8 の計算結果になり、受ける力も最大約 550kgf まで上がる。このように、船体が受ける力は、定常風の抗力だけでなく、突風などの加速風の影響を大きく受けるため、地上ハンドリングにおいては必要に応じこの影響を考慮する必要がある。また、加(減)速風として、どのような時間や空間に依存した風の息(突風)が吹くかを観測することも必要と考える。

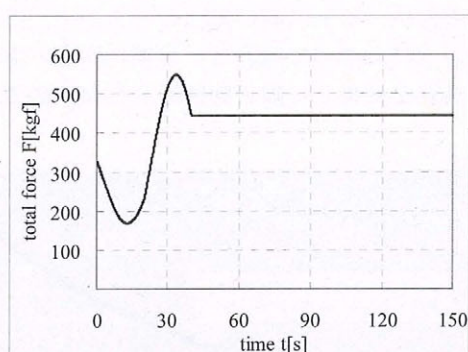


図 4.3-7 加速風 40s の船体の受ける力

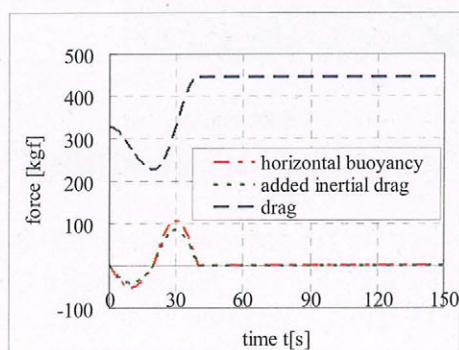


図 4.3-8 加速風 40s の船体の受ける力の成分

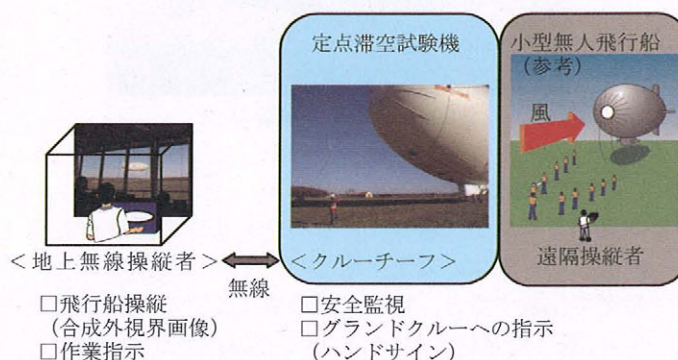
4.4 地上ハンドリング関連技術

1) 地上無線操縦者とグランドクルーの連携

一般的に、小型無人飛行船は、遠隔操縦者がグランドクルーとともに、飛行船の近くで風の状況、船体の挙動を直接感じ取りつつ操縦する。これに対して、定点滞空飛行試験では、地上無線操縦者が飛行船から約 200m 離れた飛行管制棟内で、クルーチーフとの無線による飛行船の状況確認と地形と飛行船を人工的に合成した合成外視界画像、いわゆる

Synthetic Vision を駆使して操縦を行った。このことは、将来的に、無人飛行船の完全独立した操縦に一歩近づく試みであるが、地上無線操縦者の状況確認や判断は、直にその場で感覚的に判断する場合に比較して時間遅れが生じる。また、図 4.4-1 に示すようなクルーチーフがハンドサインを出し、グランドクルーがハンドリングする連携動作を含む地上ハンドリング全体の指揮を確実、かつ、タイムリーに行なうことで、安全性をより高めることが重要となる。このための訓練は、以下に示す地上取扱総合試験や離着陸試験の他に、飛行試験を通して約 80 時間行なった。

図 4.4-1 地上無線操縦者とクルーチーフの連携



2) 地上取扱総合試験

試験機をテザー状態にして、グランドクルーがハンドリングレールを放し、最大高度 1m まで浮上させ、再度保持する操作を 10 回実施した。その後、浮力を増加して、テザー状態のまま、機体を浮上させた。浮上時間(離陸から着陸まで)は約 6 分、最大高度は約 8m であった。さらに、飛行船係留車のマストに接続された状態で浮力を更に上げて船尾を浮上させ、機体姿勢を保持し、地上無線操縦者からのコマンドによる浮力調整(バラスト投下およびヘリウム放出)を行った。図 4.4-2 に試験状況を示す。グランドクルーのハンドリングの基本動作を実機で行い、特に問題ないことが確認できた。



図 4.4-2 地上取扱総合試験状況

3) 離着陸試験

マストオン（飛行船係留車に接続された）状態で遠隔操縦により推進装置を作動させた後、グラウンドクルーがマストオフ（飛行船係留車から接続解除）し、飛行船の高度 3m 以下で 5 回のハンドリングを行った。浮力調整等の作業をとおして、地上無線操縦者とグラウンドクルーとの連携動作やハンドリングの技量向上を図ることができた。図 4.4-3 に、試験状況を示す。



図 4.4-3 離着陸試験状況

4) 訓練の効果

実機を使用した訓練によるハンドリング技量向上は著しい。訓練の効果を地上ハンドリングに要した時間で比較すると、地上での作業に要する時間が減少し、飛行時間が拡大していることがわかる。図 4.4-4 に飛行時間の比較を示す。なお、図中、ハッチング部で示す格納庫搬出以降、離陸までの時間には、15～30 分程度の気象条件等の待ち時間が含まれている。

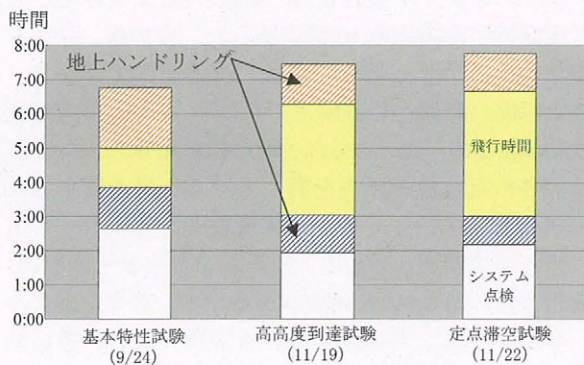


図 4.4-4 飛行時間の比較

4.5 ホールディングテイクオフ

有人飛行船等においてクルーチーフの経験を有するクルーチーフにより、効果的、かつ、効率的なグラウンドクルー（チーム）教育が実施できた。地上ハンドリングの技量評価の例として、障害物回避に関するハンドリングを紹介する。ここでは、離陸直後の方位角変更の操作をホールディングテイクオフと称している。

図 4.5-1 は、格納庫の位置する方向から風が吹いている状況において、試験機が風上に船首を向けて離

陸準備を行っている例である。



図 4.5-1 格納庫と試験機の位置関係例

離陸の方向は、風上に向けて行われるため、格納庫のある方向に向かって離陸し、早期に高さ方向か、左右に進路を変更して障害物回避を行なう必要があった。

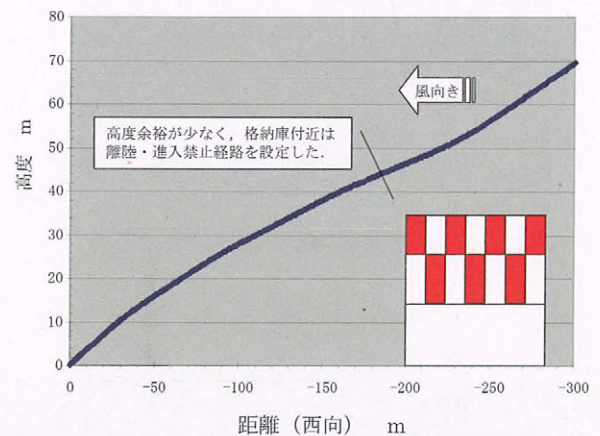
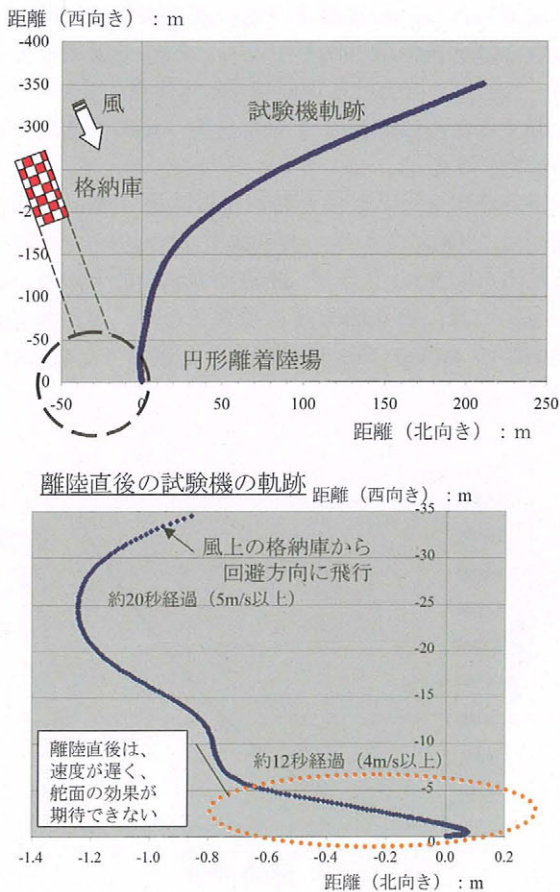


図 4.5-2 格納庫と試験機の飛行経路例

図 4.5-2 のグラフは、実際に飛行が行われた高度と距離の関係を表しているが、格納庫付近で十分な高度が確保できないことがわかる。このことは、事前の飛行シミュレーションでも予測されたため、格納庫付近は侵入禁止経路と設定された。そこで、この場合、早く北向きに進路変更して進入禁止経路に入らないようにする必要があるが、離陸直後は速度が遅く、舵面効果が期待できない。また、離陸時はヘビー状態に浮力調整されており、推進器は左右ともに上方にチルトさせており方向制御には使用しないことが前提となる。以下に述べるグラウンドクルーによる方向転換に関する操作は、飛行許可の前提とはならないが、離陸直後もなるべく早く向きを変えて、安全のうえにも安全を期すことに役立っている。

ホールディングテイクオフとして、地上無線操縦者の指示により、希望する離陸方向に船首を向ける

ために、クルーチーフの指示でグランドクルーが左舷又は右舷のヨーラインを放すタイミングを遅らせて、船首を振るハンドリング方法を示す。図 4.5-1 の場合は、北向きに船首を向けるため、右側のヨーラインを放すタイミングを遅らせることになる。このときの試験機の軌跡を図 4.5-3 に示す。上のグラフは、実際の飛行船の飛行経路を示す。横軸が北向きの距離、縦軸が格納庫のある西向きの距離で、格納庫の概略位置を図示している。進入禁止経路からは十分離れた安全な飛行であったことがわかる。下のグラフは、離陸直後 25 秒間の軌跡を拡大して表示しており、10~20 秒程度で、格納庫のある方向から回避方向へ変化させていることがわかる。特に、点線で示す範囲は、速度も遅く舵面効果が期待できない範囲を示している。



上図：離陸後の試験機軌跡，下図：拡大図
図 4.5-3 試験機の軌跡例

図 4.5-4 に障害物回避操作の効果を示す。このグラフは、離陸後 25 秒間の飛行船方位角の変化を時系列で示している。右側の縦軸が方位角の変化を示し、左側がヨー角速度を示す。離陸直後にヨー角速度が急に立ち上がり、方位角も大きく変化していることがわかる。

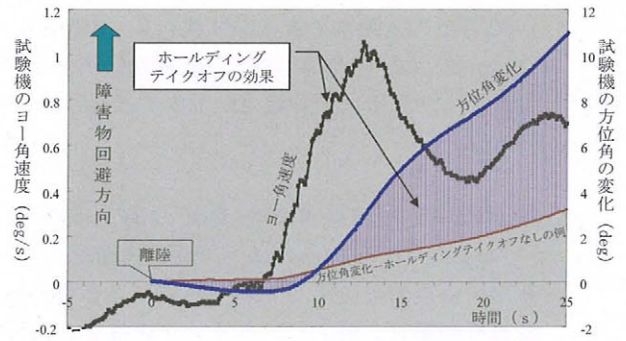


図 4.5-4 障害物回避操作の効果

ホールディングテイクオフの効果を確認するために、その操作を行なわなかったときの方位角の変化も示しており、図中のハッチング部がホールディングテイクオフの効果である。離陸後、25 秒間で約 35m 格納庫のある方向に前進しており、その時点で、方位角を 11 度避ける方向に変化させていることになる。万一、その後、方位角が変化せず直進したとしても、格納庫がある位置で、格納庫の幅にほぼ相当する約 30m ($(200-35) \times \tan 11^\circ$) 北側に避け得る効果となる。ホールディングテイクオフは、参考文献 2)にも紹介されている通常行われる操作であるが、地上ハンドリングの技量が要求され、訓練の成果が評価できる一つの根拠と言える。

5. 技術実証機における地上ハンドリングの検討

5.1 地上ハンドリング技術の現状

4 項までで検討した飛行船の地上ハンドリングの課題や実績の把握を行った結果をまとめておく。

- 1) 20 世紀初期の大型飛行船は、当時の推進器性能が不十分なことなどから、飛行船の地上への衝突をさけるために高い位置に係留された。
- 2) 200m 前後の大型飛行船の地上ハンドリング要員は、数百人規模を要していた。
- 3) マストへの飛行船の接続方法（着陸方式）は、1930 年代の飛行船に開発された方法があったが、その後の飛行船の衰退とともに現在はその技術が失われている。
- 4) 現在、世界で唯一認められている地上ハンドリングの方法は、第 2 次世界大戦時の米国海軍飛行船のために開発された方法であり、比較的小型の飛行船に適用される。

5) 1960年頃の米海軍の有人軟式飛行船‘ZGP-3W’ (124m長)は、格納庫の外に飛行船を搬出するのに地上ハンドリング要員 18名との文献データがある。

6) 1990年代に開発された最新の有人飛行船‘Zeppelin NT’ (75m)は、半硬式構造であり、船尾の推進器を使用して地上風に伴う姿勢変化を自動制御し、地上ハンドリング要員を3人程度に削減可能とした。

7) 定点滞空飛行試験では、67.8m長の無人の軟式飛行船を18~22名(強風時)の地上ハンドリング要員で運用した。風速3.5m/sで450kgfの荷重に対応できたものと推定した。

これらの結果から、150m級技術実証機の地上ハンドリング技術は確立されていないことがわかる。1)から3)までは、1940年頃までの大陸間輸送等に活躍した大型飛行船の方法であるが、その技術は現存せず、将来の成層圏プラットフォームなどの大型飛行船への適用は現実的ではない。

5.2 地上ハンドリングの方法

大型飛行船の地上ハンドリングの課題は、地上の風による荷重にどのように対処するかということであり、以下の方法が考えられる。

1) 飛行船システム側に機能を配分する方法

例えば、Zeppelin NTのように、船尾に姿勢制御用の推進器を装備する、或は、脚本数を増やして機械的に姿勢の安定を図る方法などである。定点滞空試験機では1脚、Zeppelin NTでは2脚となっており、航空機のように3脚での姿勢安定は行われていない。

2) 地上設備側に機能を配分する方法

例えば、風向きに逆らって、船体を格納庫の入り口に合わせる必要がないように、全方向からの出入り可能な格納庫とすることや、台車やレールを引くなどの対策により飛行船を移動する方法である。なお、成層圏滞空試験機では、台車を使用しているが、台車による回収の実績はなく、どのように飛行船を捕捉するかが課題となる。

5.3 グランドクルー人数の推算方法

ここでは、グランドクルーの人数 n を求める方法として以下の式(11)を提案する。飛行船の地上ハンドリングに要する力を4.3項で示したように、飛行船係

留車で分担する他に、5.2項に示す方法等によることも可能である。これを機力分担率で表して、グランドクルーの人数を推算する方法である。

$$n = \frac{F \times (1 - m)}{f} \quad (11)$$

ここに、 F は真横からの風により船体を受ける抗力であり、150m級船体の値を図5.3-1に示す。 m は機力分担率であり、定点滞空飛行試験と同様の飛行船係留車とグランドクルーによるハンドリングの場合は、0.1(10%)となる。 f は平均人単位力であり、4.3項から20kgfとする。

1) 150m級船体のグランドクルー人数の試算

真横からの風により船体を受ける抗力は、式(5)から求められる。船体形状が定点滞空飛行試験機と相似ならば抵抗係数は同じであり、風速や大気密度も同一ならば、抗力は基準面積(船体体積の2/3乗)に比例するため船体長の2乗に比例(船体形状が相似の場合)する。

定点滞空飛行試験機と相似な船体長150mの基準面積は2208m²であり、大気密度1.23kg/m³で計算した抗力を図5.3-1に示す。定点滞空試験機と同等の風3.5m/sでは、約2,000kgfの荷重となり、定点滞空試験機での450kgf(4.3項参照)と比較して、4.5倍になる。

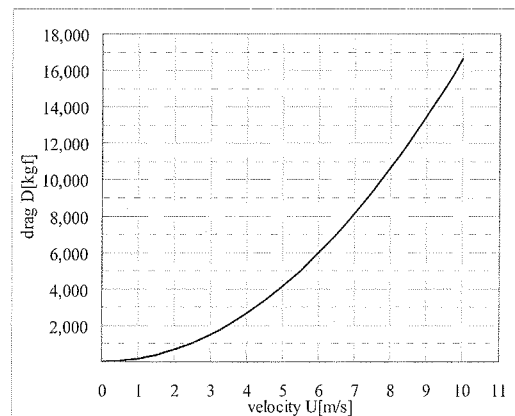


図 5.3-1 真横風による 150m 級船体の抗力

定点滞空試験機と同様に、飛行船係留車とグランドクルーでハンドリングする場合、150m級技術実証機では、式(11)から、90人のグランドクルーが必要になることがわかる。

$$n = \frac{F \times (1 - m)}{f} = \frac{2000 \times (1 - 0.1)}{20} = 90 \text{ 人} \quad (12)$$

(@3.5m/sの風を想定)

5.4 地上ハンドリングの成立性検討

将来の成層圏プラットフォーム飛行船は、軽量化の要求が厳しい。5.2項1)の方法は、飛行船の内部に推進器の支持構造を追加することや脚本数の増加が、重量増につながるため、飛行船システムの成立性に関わる問題となる。また、5.2項2)の方法は、設備のコスト増につながる。また、台車によるハンドリングは飛行船の回収実績もなく、実際の効果が未知数であることなどから、リスクも大きい。従って、5.2項1)及び2)に示した方法を重量・コストを適切に考慮してリスクを抑え、5.3項に示す機力分担率を向上させた地上ハンドリングを実現することが重要である。前記のZeppelin NTやZGP-3Wは、これら方法を独自に最適に組合せた飛行船システムとなっているものと考えられる。図5.4-1に、船体長と地上ハンドリング要員数の関係を示す。図中の実線は、Zeppelin NT、ZGP-3W等の文献データから推定したものである。150m級技術実証機に関して、上記最適化を行なうとすれば、必要なグランドクルーの人数は、図から50人規模であることがわかる。この値は、機力分担率 m を0.5、すなわち、横風に対抗する力の50%をグランドクルーが分担することに相当する。図中、点線は、機力分担率 m を0.1とした定点滞空試験機と同じ方法によるグランドクルーの人数を予測したものであり、この人数と比較して、かなり削減できる可能性があることがわかる。

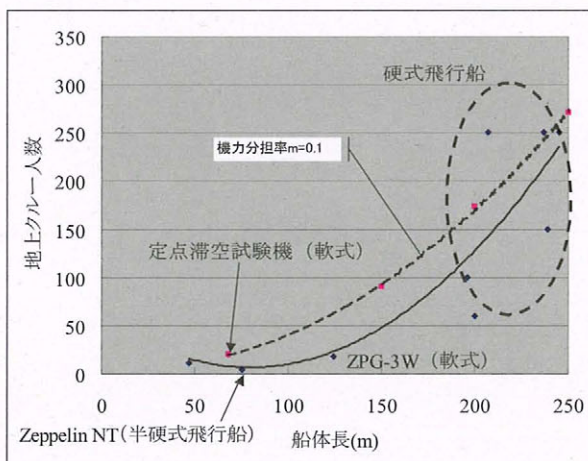


図 5.4-1 船体長とグランドクルー人数

6. おわりに

飛行船の地上ハンドリングの技術的な背景を文献調査し、技術課題を明らかにした。また、JAXAにおいて実施した成層圏及び定点滞空試験機の地上ハンドリングを解析して現状の技術レベルを評価した。

これら検討結果から、将来実用化を目指して検討されている成層圏プラットフォーム飛行船の技術実証機の地上ハンドリングについての概略検討を行った。その結果、地上ハンドリングに必要なグランドクルーの負荷を飛行船システムと地上設備へ適切に機能配分できれば、地上ハンドリングが成立する可能性があると考えられる。今後、飛行船の地上ハンドリングに関するシミュレーション等を実施して機力分担によるグランドクルーの削減効果の確認等を行なう予定である。

謝 辞

本稿は、平成15年度に日立実験場で行われた成層圏滞空飛行試験及び平成16年度に北海道大樹実験場で行われた定点滞空飛行試験の成果の一部である。各飛行試験の地上ハンドリングは、地元自治体、関連企業の方々の多大なるご支援、ご協力により達成できたものである。また、株式会社日本飛行船には、Zeppelin NT飛行船を快く見学させて頂いた。ここに、厚く御礼申し上げる。

文 献

- 1) 高井政和, 友井康人, 蛭田忠孝: 無人飛行船の地上ハンドリングについて, 日本航空宇宙学会 第43回飛行機シンポジウム(名古屋) 2A2, 2005.
- 2) Gabriel A. Khoury, J. David Gillett: Airship Technology, Cambridge Aerospace Series 10, pp.297-319, 1999.
- 3) Giles Camplin, Dr. Ingolf Schafer: Learning from the past: Using historical material to help establish ground handling procedures for large airships, 4th International Airship Convention and Exhibition, 2002, Paper K-1
- 4) F. Windischbauer: Design Considerations Leading to the ZEPPELIN NT Concept, AIAA93-3989, 1993.
- 5) 成層圏滞空飛行試験 実験隊: 成層圏滞空飛行試験成果報告書 - 飛行試験システムの開発 -, JAXA-RM-04-014, 2005.
- 6) 成層圏滞空飛行試験 実験隊: 成層圏滞空飛行試験成果報告書 - 飛行試験と材料・構造評価 -, JAXA-RM-04-012, 2005.
- 7) 中舘正顕, 安藤則雄: 定点滞空飛行試験結果, 日本航空宇宙学会 第43回飛行機シンポジウム(名古屋) 1D7, 2005.

- 8) ロゲルギスト：物理の散歩道（第五），岩波書店，
pp.100-103，1972.
- 9) （社）日本造船学会 海洋工学委員会性能部会：
実践 浮体の流体力学（後編 - 実験と解析），成山
堂書店，pp.91-93，2003.
- 10) 二宮洗三：気象がわかる数と式，オーム社，
pp.15-16，2000.
- 11) 元良誠三：見掛質量に就いて，造船協会論文集
第 87 号，1950.

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-05-010

発行日 2006年3月31日
編集・発行 宇宙航空研究開発機構
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1
URL: <http://www.jaxa.jp/>
印刷・製本 ケーティエス情報株式会社

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。


宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL:029-868-2079 FAX:029-868-2956

© 2006 宇宙航空研究開発機構

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

 R100 この用紙は地球環境・森林資源のため再生紙を使用しています。

