

成層圏プラットフォーム研究開発と運用に必要な 気象予測技術について*

君野 珠 宏**・及 川 博 史***

1. はじめに

成層圏プラットフォーム研究開発プロジェクトに伴い、旧通信・放送機構三鷹成層圏プラットフォームリサーチセンターにおいて平成12年度から研究員として、追跡管制運用技術における飛行船の打上げ・回収の判断に必要な風観測・予測技術の研究開発に携わってきた。平成16年度末を以って本プロジェクトが一区切りを迎えたことに伴い、ここにプロジェクトの総括と運用のために構築した気象予測システム、成層圏冬季強風や重力波といった実運用に課題となる成層圏気象現象について紹介する。

2. 研究開発プロジェクトの概要

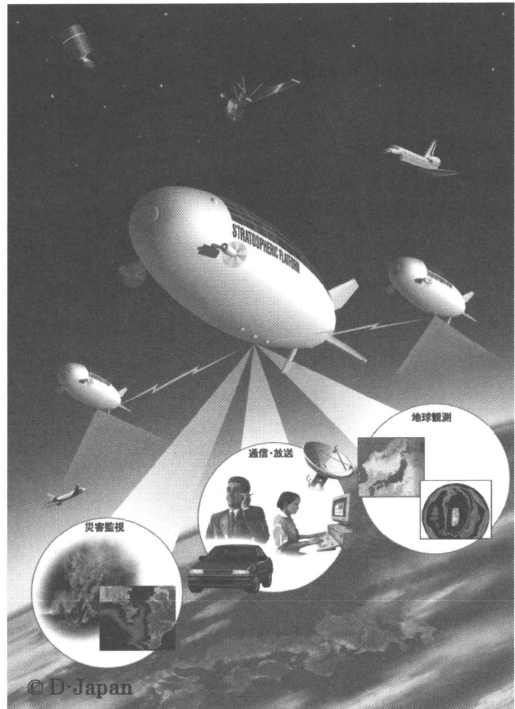
成層圏プラットフォームとは、気象条件が比較的安定している高度20 km程度の成層圏に通信機材、観測センサ等を搭載した無人の飛行船を滞空させ、通信・放送、地球観測等に利用するものである(第1図)。

特に地球観測分野としては、成層圏からの陸域・海域・成層圏大気などの観測によって、人工衛星・ゾンデなどのデータの補完や、衛星観測データの物理量抽出のためのアルゴリズム開発、校正検証の機能を向上させることができる他、対流圏から成層圏にかけての種々の高度における大気観測データを直接計測することで、地球環境変動の予測に寄与することも期待できる。

この大いなる可能性を秘めた構想の早期実現に向

け、平成10年度から文部科学省及び総務省の省庁連携のプロジェクトとして、所管の研究機関が研究開発を進めてきた。その中で飛行船システムや地球観測ミッション機器は、独立行政法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)が中心となり、気象観測予測を含む追跡管制技術や通信・放送ミッション機器の研究開発は、情報通信研究機構(NICT)が担当した。

第2図は、本研究開発の構想例を示したものである。開発のステップはまず、無動力で成層圏高度に到達できる飛行船システム、次に高度4 kmで滞空制御可能な飛行船システムを造り、技術実証機を経て、実用機

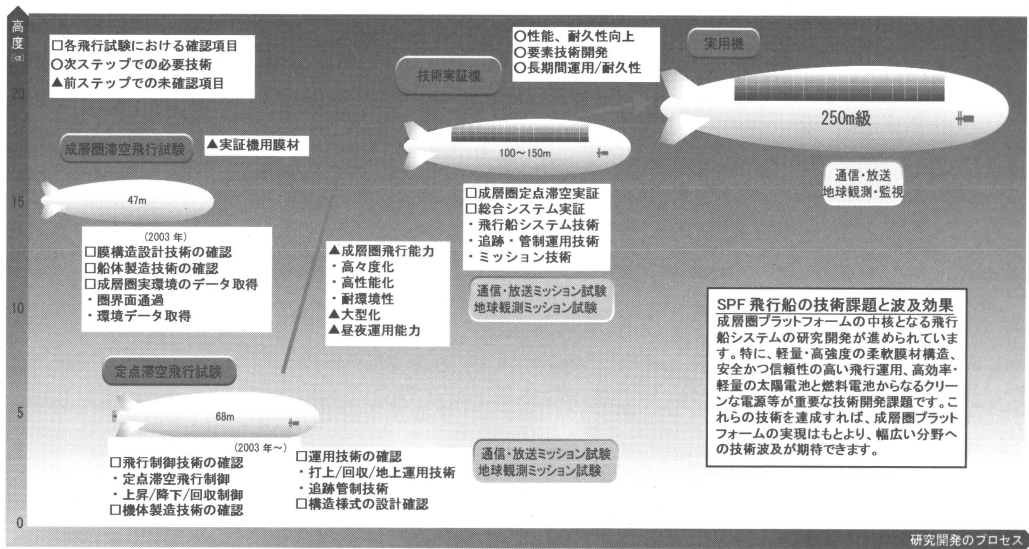


第1図 成層圏プラットフォームのイメージ図。

* Development of stratospheric platform and meteorological prediction required for its operation.

** Tamahiro KIMINO, 独立行政法人情報通信研究機構三鷹成層圏プラットフォームリサーチセンター。

*** Hiroshi OIKAWA, 独立行政法人情報通信研究機構三鷹成層圏プラットフォームリサーチセンター。



第2図 研究開発の構想例 (JAXA 提供)。

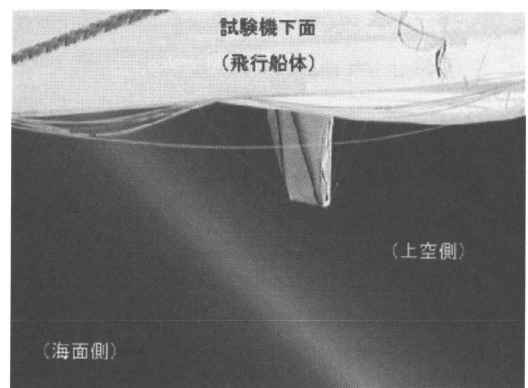
を開発するものである。2003年夏季には成層圏到達技術の確立と温暖化ガス (CO₂) の直接観測を目的とした成層圏滞空飛行試験、2004年に飛行制御と運用技術の確認、通信・放送、地球観測ミッションを目的とした定点滞空飛行試験が行われ、成層圏プラットフォーム実現に必須な技術基盤の確立がなされた。

2.1 成層圏滞空飛行試験

2003年夏季に茨城県の日立港から、全長47 mの無動力の飛行船を高度15 kmの成層圏に30分程滞空させる成層圏滞空飛行試験が行われた。試験の実施には、雲がなく、地上風が弱く、指定の海域で回収するため、上空風も弱い西風である必要があったが、試験時期は記録的な冷夏となり、実験場は曇天と北東気流の強風が吹続き、打ち上げ予定日は2週間余りずれこんだ。しかし、的確な気象予測のもと試験日に設定した8月4日は、絶好の気象条件下での飛行試験実施となり、飛行船は順調に上昇して高度16.4 kmに到達し、30分間の成層圏滞空に成功した。第3図には、成層圏の試験機から撮影された水平線の写真を示す。その後、機体は人為的に切り裂かれ、予定した海域で回収された。なお、この試験では、高度15 kmで温室効果ガスであるCO₂を直接採取する予定であったが、計測を開始出来ない不具合があり、残念ながら気体の採取はできなかった。

この試験に使われた機体は、3枚の尾翼を持ち、全長47 m、細長比4の飛行船形状をした軟式飛行船で、

船体内部にはヘリウム室と空気室を隔てるダイアフラムと呼ばれる隔膜を持っていた。ヘリウム室側には70 mmAqの内圧で作動する排気弁と、地上からのコマンドで動作する電動排気弁が装着されており、必要に応じてヘリウム放出 (浮力の制御) が可能であった。放船された飛行船は、機首を上に向けた垂直姿勢で風に流されながら上昇したが、空気室側には30 mmAqの内圧で作動する排気弁6個が装着され、船体の上昇に伴うヘリウム室の膨張に伴い、船体の内圧を一定に維持しつつ、船体内の空気を排出し、これにより船体形状が常に維持されたまま、成層圏への到着が可能となった。また降下開始のため、船体外皮を地上コマン



第3図 降下開始時の試験機から撮影した画像 (JAXA 提供)。



第4図 高度4 kmで定点滞空する飛行船 (JAXA提供).

ドにより引き裂く火工品を用いた外皮引き裂き装置が、船体上面4箇所に取り付けられていた。

2.2 定点滞空飛行試験

2004年8月から11月にかけて、北海道太平洋岸の大樹町に整備した実験場で、全長67 mの無人飛行船の飛行試験が計8回実施され、最終的に最大高度4 kmで定点滞空させた。地上試験から低空の飛行試験では、雨の降らない地上風の弱い朝凪頃に行われたが、高度4 kmまで到達する飛行試験は季節風の強まる11月に行われたため、この高度の風速が15 m/s以下に弱まる数少ない日を気象庁全球モデル予測値によって選定し、11月中に3回の飛行試験を実施した。なお、全ての飛行試験は大きなトラブルもなく無事終了した。

機体に搭載したミッション機器も問題なく動作し、通信・放送ミッションの他に、可視・近赤外の広画面マルチバンドセンサーによる植生分布、大気・エアロゾル観測、熱赤外による地表面温度分布観測、可視光の高分解能センサーによる動画交通観測等が行われ、目標とした観測データが取得された。なお、定点滞空中の写真を第4図に示す。

3. 飛行船運用のための気象観測予測システム

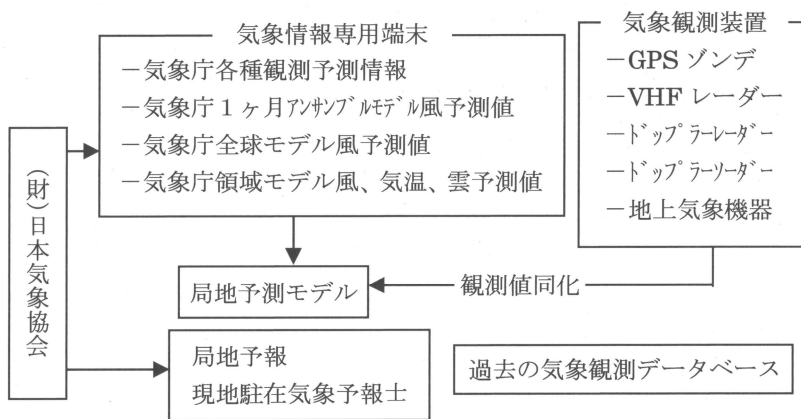
飛行船はその巨大な船体のため、風の影響を受けやすく、安全な運用には的確

な気象観測予測が必須となる。このため、第5図に示したように、特に風の観測と予測に重点を置いたシステムを構築して飛行試験の実施判断や飛行船運用、さらに飛行制御の判断等に役立てた。

システムの中核となるのは、大樹実験場に特化して開発した5 kmメッシュの局地予測モデルである。これは高度10 kmまでの対流圏で運用していた民間の局地気象予測モデル LOCALS をベースに開発したもので、予測高度を25 kmまで拡張し、成層圏の温度分布に影響を与えるオゾンの高度分布を精密化し、氷晶過程を含む雲物理モデルと対流圏から伝播してきた小さな山岳波の表現を可能とする完全圧縮モデルを採用しているのが特徴である。第1表にこのモデルの諸元を示す。

本モデルは、気象庁RSMを初期値及び境界値にしているため、初期値から51時間先までの地上から成層圏までの風向風速の予測が可能であった。しかし、地上風は地形の影響でモデルの出力値ではバイアスが残るため、気象庁の協力により、ガイダンスとして実績のあるカルマンフィルターを導入し、飛行船の運用に影響ある3-4 m/s程度の微妙な風の予測を可能とした。実際、夕刻に行われた延べ20回程の翌早朝の実施判断において、RMSEで1.1 m/s、風向誤差45°以内が60%、90°以内が35%、90°超えはわずかに5%という高精度な予測値を提供した。こうした精度良い予測の結果、機体を格納庫から搬出し、離陸準備のため野外地上で待機している間にも、強風や突風にさらされて機体を破損することなく、安心して運用が可能であった。

更に、NOAAによる海面水温を取り込むことにより



第5図 構築した気象観測予測システム。

第1表 成層圏プラットフォーム局地予測モデルの諸元.

計算領域	400 km×400 km×25 km
格子間隔	水平5 km 鉛直10 m~1 km
基礎方程式系	非静力学完全圧縮方程式, 水蒸気保存式
水平座標系	ポーラステレオ座標, 水平格子間隔5 km
鉛直座標系	地形準拠座標, 鉛直35層
接地境界層	相似則に基づく運動量, 熱量, 水蒸気量
放射モデル	短波放射: 大気による散乱, オゾン/水蒸気 による吸収, 雲による吸収/散乱 長波放射: 二酸化炭素/水蒸気/雲による吸 収
初期条件	親モデル初期値の空間内挿
乱流モデル	MELLOR-YAMADA のレベル2.0
境界条件	親モデル予測値を緩衝領域から取り込み
空間差分	エネルギー保存スキーム (菊池・荒川)
時間差分	Euler-Backward と Implicit 法の併用 time split を使用
雲物理	Lin タイプの雲物理過程パラメタリゼー ション

地上付近の霧水量を計算し、夏季の霧予測にも利用した。

これらの予測値は、飛行試験の実施判断だけでなく、予測風を使った事前飛行シミュレーションにも使われ、実用上十分な精度が得られた。

4. 成層圏長期滞空に向けての予測技術の確立

将来の実運用段階時に、成層圏プラットフォームを成層圏に長期滞空させる時には、いくつかの気象に関係する技術課題に直面する。また、対流圏から成層圏までの大気現象は多岐に渡り、その予測には、高精度な予測モデルだけでは不十分で、成層圏や対流圏の大気現象の特性を熟知した上での高度な予測技術が必要とされる。そこで、産学官の頭脳を結集するため、京都大学の津田教授を委員長とした気象環境検討委員会を設置した。豊富な過去データに基づく主な統計解析調査は、(財)日本気象協会が担当し、成層圏の大気現象の理解と予測技術については、大学の専門委員による検討成果が紹介された。以下、委員会で検討された技術課題の幾つかを紹介する。

成層圏プラットフォームの予定滞空高度20 km は、日本の緯度帯においては、気象条件が比較的穏やかということで選ばれたが、冬季になると高緯度地方を中心に40 m/s を超える強風が数日間吹くことがある。現在目標としている実用機の成層圏での耐風能力が30

m/s であることから、こうした強風は常時滞空を実現させる上では、大きな壁となる。当然このような強風は早期に予測する必要があるが、予測手法については、九州大学廣岡教授より、気象庁1か月アンサンブルモデルを利用することで、少なくとも2週間前にはこうした強風を予測できる可能性がある研究成果が紹介された。(例えば、Mukougawa and Hirooka, 2004)。

また、冬季成層圏は大気重力波による風速変動が卓越する。このことから、風速場が飛行機の耐風能力に近い状況においては、重力波による弱風帯を狙って、滞空高度を1~2 km 変えて、運用する方法も考えられる。大気重力波の振幅は成層圏高度では最大10 m/s 程度とされているので、うまく高度を変えて滞空させればその程度の耐風速軽減効果が得られる。重力波の予測手法については、津田教授から、ホドグラフ解析を使用した強風予測手法が提案された。風速の鉛直分布から、背景風を取り除き、重力波の変動成分を抽出した後、卓越する鉛直波長のホドグラフから、大気重力波のパラメータ(周期、波数)を決定し、観測時点から先の変動の時間発展を予測する手法である。

この方式では、対象とする重力波の抽出や楕円フィッティングの作業に人手を要することになるため、今後運用時を考慮すると、ある程度自動的に重力波を抽出し、波動成分を計算できるような工夫が必要である。

また、観測場所の周囲から伝わってくる重力波の影響もあるため、厳密に予測するには、対象地点の周辺3箇所ですべて同時にゾンデ観測等を行い、卓越する大気重力波の接近やその影響の推定まで考慮する必要があり、大掛かりな観測と作業の煩雑さが課題になる。これらを半自動的に統合処理できる高度なアルゴリズムの開発が望まれる。

これら風の問題以外にも、成層圏にはスプライトやエルブス、ブルージェットといった上空放電現象がある。こうした上空放電現象に成層圏プラットフォームが遭遇した場合、電子機器類にどのような影響が出るかはまだ未知数である。

5. 実証機開発に向けて

成層圏滞空飛行試験、定点滞空飛行試験の成功を経て、7年間に及んだ成層圏プラットフォーム研究開発プロジェクトは一旦区切りを迎える。今後は、第三者機関において、これまでのプロジェクトの成果や問題点等の事後評価を行い、その結果を踏まえて、次のス

ステップに進めるか否かが判断される。次のステップへ移行する方向となった場合には、開発の進め方、資金計画、官民の役割分担等について事前評価が行われる。その結果、技術実証機の開発を推進すべきと判断された場合、早ければ平成19年度から、新たな措置が講じられることになる。

気象関係に携わる研究者に対しても、これまで幾度か気象学会等で本研究開発に関する発表をしたが、その度に多くの方からこのプラットフォーム実現に向けられる少なからぬ熱い期待を感じてきた。本研究に長年携わった者として、一日も早い実証機開発プロジェクトの新たな立ち上げを期待するところである。

謝 辞

本研究開発においては、京都大学津田教授、九州大学廣岡教授、菊池元気象庁長官を始め、気象庁数値予報課、その他本プロジェクト気象環境検討委員会の委

員の方々には格別なる御指導を賜りました。この場を借りて感謝の意を申し上げます。

また、共同研究先の JAXA を始め、現地実験場大樹町関係者の方々にはお世話になりました。改めてお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 是永真理子, 及川博史, 田保則夫, 佐藤祐子, 和田将一, 堀込淳一, 菊池幸雄, 福田寿, 谷川亮一, 早崎宣之, 2000: 成層圏プラットフォーム風予測モデルの研究開発, 日本気象学会秋季大会予稿集, C311, 202.
- 文部科学省, 総務省, 2004: 成層圏プラットフォームパンフレット, 1-14.
- Mukougawa, H. and T. Hirooka, 2004: Predictability of stratospheric sudden warming: A case study of for 1998/99 winter, Mon. Wea. Rev., 132, 1764-1776.
- 宇宙航空研究開発機構, 2004, 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), 6pp.



ウインター・サイエンスキャンプ参加者募集

様々な最先端の研究成果や研究施設・実験装置等を有する大学・公的研究機関・民間企業(15会場)が、冬休みの3~4日間高校生を受け入れ、ライフサイエンス、情報・通信、ナノテクノロジー・材料、電気・電子、環境・エネルギー、地球科学、ロボット工学等の分野において、第一線で活躍する研究者・技術者を講師として本格的な実験・実習を行う科学技術体験合宿プログラム。今回は、冬の北海道で、雪や氷のことを知るとともに、南極の氷から地球環境変動までを考える『雪と氷の世界を体験しよう~雪結晶から地球環境まで~』(北見工業大学工学部: 1/6-8)や、都市環境を支える緑の機能と役割を、温室効果ガスや、都市気象の変動と樹木の成長、衛生リモートセンシングなどで体験する『解明しよう! 緑と都市環境のメカニズム』(大阪府立大学生命環境科学部: 12/26-28)、深海底で掘削された堆積物の柱状試料(コア)の分析を通し地

球の環境変動を学ぶコースと、微生物や遺伝子を、生物学的観察と遺伝子の分子生物学的解析するコース2つを行う『科学の力で地球の未来を探る~遺伝子資源と地球環境』(高知大学海洋コア総合研究センター・遺伝子実験施設: 12/23-25)他のプログラムが行われる。募集要項、申込書は、事務局に請求するか、WEBサイトでも入手できる。

参加費: 8,000円

(自宅~会場間の交通費は参加者負担)

応募締め切り: 11月16日(水)必着

応募方法: 参加申込書を事務局宛に送付

主催: 文部科学省

問合せ先: サイエンスキャンプ事務局

(日本科学技術振興財団振興部内)

Tel: 03-3212-2454, Fax: 03-3212-0014

<http://ppd.jsf.or.jp/camp/>