

# 成層圏プラットフォーム 風観測・予測システム

MEWS Subsystem for Stratospheric Platform

武藤 隆一 弓削 信子 堀込 淳一

■ MUTO Ryuichi ■ YUGE Nobuko ■ HORIKOMI Junichi

成層圏に飛行船を滞空させ、通信や放送のための中継器として活用することを目指した成層圏プラットフォーム構想において、東芝は“風観測・予測システム”を開発した。この構想の核となる飛行船は気象環境に敏感であり、運航管理上の課題がある。風観測・予測システムは、多様な気象センサと独自の局地気象予測モデルを統合し、安全上有用な知的情報に翻訳することで、的確な運航管理に貢献することができた。

今後は、この開発で培ったソリューション力を交通管制支援や防災支援などに適用することを通じ、社会に還元していきたい。

As the lead managing company, Toshiba is committed to the development of the integrated tracking and control system for the stratospheric platform (abbreviated SPF), a stratospheric unmanned airship being built as a Japanese national project. The fragility of the airship imposed stringent requirements on the system performance in terms of the meteorological aspects, especially wind observation and prediction.

This paper gives a concise overview of the "meteorological, especially wind observation and prediction subsystem" (MEWS), which integrates various weather sensors with a local-weather-forecast model, focusing on how it has outperformed all of the system requirements. It is our hope that this accomplishment will become a springboard leading to further expansion of our solution business for greater benefits to society.

## 1 まえがき

高速で大容量なブロードバンド通信を無線の通信インフラで実現するため、総務省と文部科学省は1998年度から成層圏プラットフォーム構想を共同で推進してきた。この構想では、成層圏プラットフォーム(SPF: Stratospheric PlatForm)と呼ばれる無人飛行船を、雲もなく比較的風も穏やかな高度約20kmの成層圏に滞空させ、通信や放送のための情報中継基地として活用することを目指している。

SPF飛行船は、航空機に比べ気象の影響を受けやすいため、大気の安定している成層圏にたどり着くまでの間に雨や強風などに遭遇しないことが必要とされる。このためSPF飛行船の運航には、飛行に適した気象状態すなわち晴天で無風に近い時間帯と場所の予測が必要不可欠となる。予測だけで十分な安全性を確保できれば理想であるが、現実には飛行直前や飛行中も航路周辺の気象状況を観測し、飛行計画を絶えず修正し続けなければならない。

これらの要件を満足し、そのうえで安全性に関する更なるユーザー価値を提供するのが、東芝が開発した風観測・予測システム(Meteorological, Especially Wind observation and prediction(Sub)System. 以下、MEWSと略記)である。MEWSの位置づけを図1に示す。MEWSは、飛行船の運用を取りしきる追跡管制システムにある三つのサブシステム

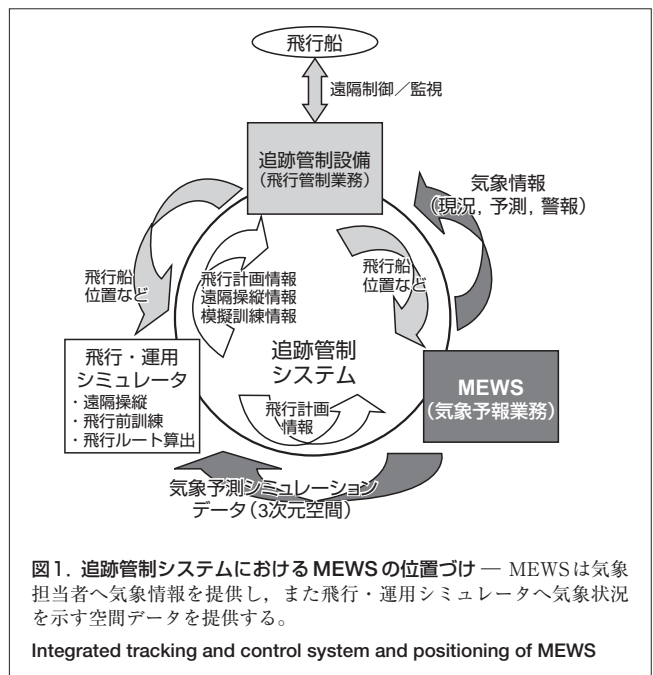


図1. 追跡管制システムにおけるMEWSの位置づけ — MEWSは気象担当者へ気象情報を提供し、また飛行・運用シミュレータへ気象状況を示す空間データを提供する。

Integrated tracking and control system and positioning of MEWS

(追跡管制設備、飛行・運用シミュレータ、MEWS)の一つである。

当社は、気象レーダや気象予測の分野で様々なシステムを構築しており、MEWSはこれらの技術を統合、発展することにより実現している。

ここでは、MEWSの役割を説明するとともに、構築したシステムについて述べる。

## 2 SPFにおけるMEWSの役割

### 2.1 SPF飛行船の耐環境性

空気の中を進むことによって上昇する力(揚力)を得る航空機と異なり、飛行船は静止していても大気との密度の差によって上昇する力(浮力)を得るという特徴を持っている。この特徴から明らかなように、中継基地として上空の一定の地点に滞空し続けるというSPFのミッションを担う機体としては、航空機よりも飛行船のほうが適している。

しかし、飛行船を成層圏のように空気の薄い高度まで上昇させることは大きな困難を伴う。飛行船を上昇させる力すなわち浮力は空気密度に依存し、空気密度が低いほど浮力は小さくなるからである。このためSPF飛行船は船体をできるだけ大きくして、軽い気体をたくさん充填しなければならない。このことは、風の力を受けやすくなることにつながり、飛行船は滞空性の高さや引替えに耐風性が乏しいという弱点を持つことになる。

SPF飛行船に影響を与える気象は風だけではない。雨や霧にさらされると、大きな船体の表面に水滴や氷が付着し、重量が増え、浮力が低下することになる。また、雷がSPF飛行船の外皮や搭載機器を直撃し破壊する危険性もある。

更には、温度の影響もある。通常は高度が上がると一定の割合で周囲温度が低下し、浮力が小さくなるため、飛行船ではこの浮力低下を補うための制御を行っている。しかし、高度上昇にもかかわらず温度が上昇する温度逆転層が存在すると、浮力の制御が難しく、飛行船はスムーズな上昇・下降ができなくなる。

以上のように、SPF飛行船は気象の影響を受けやすい。このため、SPF飛行船を安全に運航するには、気象の適切な把握が不可欠となる。

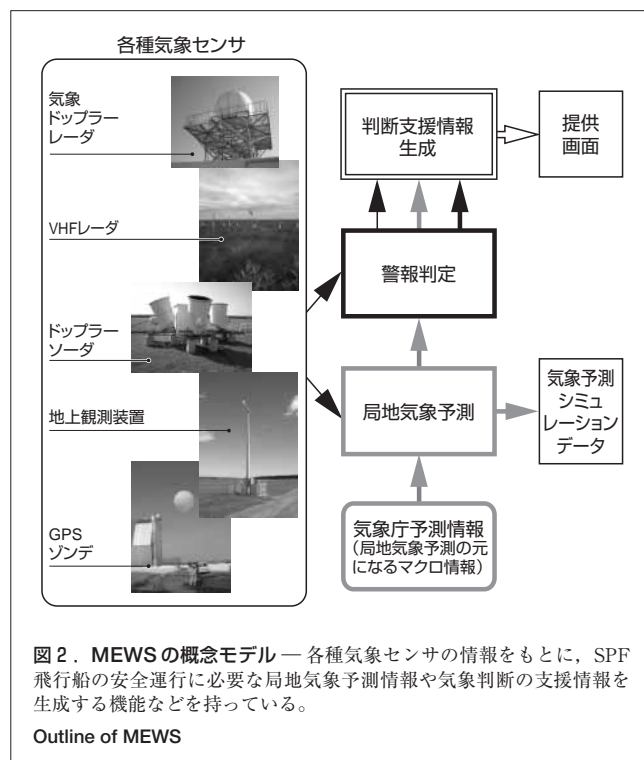
### 2.2 運用シーケンス各段階で求められる気象情報

SPF飛行船の安全運航に不可欠な気象予報業務は、運用シーケンスの各段階で異なる。このため、MEWSには、運用シーケンスの各段階において必要とされる気象情報を提供することが求められる。

運用シーケンスの各段階に実施すべき気象予報業務とそれに必要な気象情報についての抜粋を表1に示す。運用シーケンスからみると、MEWSの役割は以下の2項目に大別できる。

- (1) 気象シミュレーション計算の結果(気象要素の予測値)をSPF飛行船の挙動模擬や飛行経路予測を行う飛行・運用シミュレータに提供する
  - (2) 気象情報(現況, 予測, 警報)を運用者へ適切に提供する
- (1)は、飛行前操縦訓練において重要な意味を持つ役割であり、MEWSの特長となっている。この内容については、3.3節で詳しく説明する。

	運用シーケンス(抜粋)	気象予報業務の内容	提供すべき情報	備考
試験前夜	試験実施/延期判定	試験当日の気象予報と試験の実施/延期の判定	天候, 風向・風速, 温度分布, 地上風など	
	飛行ルート決定	飛行ルート算出用の気象予測データの提供	気象予測シミュレーションデータ	
	飛行前訓練	飛行訓練用の気象予測データの提供	気象予測シミュレーションデータ	
試験当日	試験実施/延期判定	試験時間帯の気象予報と試験の実施/延期の判定	天候, 風向・風速, 温度分布, 地上風など	
	格納庫からの搬出実施/延期判定	搬出の気象予報と試験の実施/延期の判定	地上風情報	格納庫搬出時の地上風条件は非常に厳しく、事前の正確な予測と当日の正確な観測が必須
	離陸, 飛行, 回収実施/中止判定	気象状況が飛行条件を満足しているか, 着陸時の地上条件も含めて監視	天候, 風向・風速, 温度分布, 地上風など	必要に応じて飛行ルート変更につなげる



(2)は、飛行計画立案、格納庫からの搬出、離陸、飛行、着陸、回収の各段階で、実行、延期、中止や変更などの重大な意思決定を支援する役割を担っている。

### 2.3 MEWSの概念モデル

運用シーケンスの分析を踏まえ、MEWSが担う役割をもとに構築したMEWSの概念モデルを図2に示す。

図2に示すとおり、MEWSは、気象の現況情報を提供する各種気象センサ群、局地的な気象予測情報を算出する機能、そして、気象の現況情報と局地的な気象予測情報をもとにSPF飛行船の安全運航に不可欠な気象判断の支援情報を生成する機能などを持っている。

## 3 MEWSを構成する観測機器と気象予測機能

### 3.1 多様なセンサ群

リアルタイム性の高い気象現況と、それを入力として計算される正確性の高い予測情報を提供するには、各種気象現況を適切なセンサ群で計測する必要がある。MEWSでは、表2に示すセンサ群を備えている。

センサ名	観測内容
気象ドップラーレーダ	試験場中心に半径100kmの雨雲の分布と、試験場直上の風向・風速をDWRでリモート観測
地上観測装置	地上付近の風向・風速などを観測
ドップラーソーダ	試験場直上の地上付近から上空400m程度までの風向・風速を首波でリモート観測
VHFレーダ	試験場直上の高度数百mから5km程度までの風向・風速をVHFでリモート観測
GPSゾンデ	風船に積んだ気象観測器で、試験場上空を地上から高度約20kmまで上昇しながら観測(気温、風向・風速、湿度、気圧を実測)

DWR (Doppler Weather Radar) : C帯(5GHz帯)のハルスレーダ

センサ群を分類すると次のようになる。

- (1) 雨、霧に弱いSPF飛行船のために、降雨域の有無を絶えず観測する気象ドップラーレーダ
- (2) 風況を高度ごとに詳細に観測する多様な風センサ(地上風向風速計、ドップラーソーダ、VHFレーダ)
- (3) 浮力を左右する気温・気圧などを高空まで観測するGPS(Global Positioning System)ゾンデ

中でもMEWSの大きな特長として、気象ドップラーレーダに装備された“晴天時風観測機能”が挙げられる。一般に、気象ドップラーレーダは、空間に電波を放射し、雨粒から返ってくる電波を受信して解析する。この解析により、降雨状況の把握、濃霧の検出、雷雲の襲来、マイクロバーストの検出など、多様な情報を得ることができる。しかし、これらの観測・検出には雨粒の存在が不可欠である。つまり雨天

時にしか活用できなかった。そこで当社は、世界で初めて雨粒が存在しない晴天時においても風向・風速を観測できる気象ドップラーレーダを開発した。これは、大気屈折率の変化が電波を散乱させるという原理を利用している。大気の乱れにより水蒸気を含んだ空気が密度の濃淡を作り出し、これにより屈折率の変化が生じる。その変化が電波を散乱させ、雨粒のない状態でも風の観測が可能となるのである。

このように、MEWSでは風に重点を置きながら多様なセンサ群を配置することにより、飛行船の運航に必要とされる気象現況の把握を可能としている。

### 3.2 独自の局地気象予測機能

SPF飛行船の運航に必要な48時間以上先の予測情報を提供するものとして、気象庁の予測情報(RSM:Regional Spectral Model)を挙げることができる。この情報は、計算単位が水平面分解能20km程度であるため、必要な地点の予測値を求めるには、提供された20km四方の格子点の中からその地点に近い複数の格子点を選び、その予測値を案分する方法が一般的である。しかしこの方法を用いた場合、SPF飛行船の運航では以下の問題が生じる。

- (1) 元の情報が20km四方の現象を平均化した予測値であるため、飛行領域周辺の土地の起伏などが考慮されていない。特に、地上付近の予測精度が低い。
- (2) 今回飛行試験を行った場所は海岸線付近にあり、陸地と海上というまったく異なる気象状況を案分する結果となるため、理論的に予測精度は期待できない。
- (3) 成層圏までの予測情報が必要だが、その高度までの予測値が含まれていない。

以上の理由から、MEWSは独自の局地気象予測モデルを用いて構築した。これによりMEWSは、1メッシュを5km四方で、高度を地上から25kmの成層圏までの予測を実現している。

飛行船の運航において、風況の情報は特に高い精度が要求されるが、上空における風速の予測値と実測値の差は平均二乗誤差率で約18%の精度であった。これは飛行船の性能をもとに要求された20%以下の精度を満足するものである。

このように、上空においては局地気象予測モデルにより、必要とされる精度を達成したMEWSであるが、それでも“地上付近で3m/s以下”とする飛行条件に合致する日を的確に予測するのは難しい。これほどの精度を得るには、その土地が持つ特性を予測計算に反映させる必要がある。このため、気象庁の技術支援を受け、カルマンフィルタを組み込むことで地上風の予測値を補正している。これにより、地上付近においても高い予測精度を達成することができた。

以上のように、MEWSでは独自の局地気象予測モデルと



地域に合わせた予測結果の修正により、飛行船の運航に有益な気象予測情報の提供を実現している。

### 3.3 飛行・運用シミュレータへの予測情報提供

SPF 飛行船は、長期間の連続運用を行うため無人でなければならず、地上からの遠隔操縦を行う。特に、飛行船の離着陸時においては、パイロットによる緻密(ちみつ)な操縦が求められる。この際パイロットは、スクリーン上に投影された擬似3次元画像を見ながら遠隔操縦することになる。しかし、擬似3次元画像は少なからず実際の景色との差異が生じる。また、画像の応答速度の影響もあり、操縦感覚も差異が生じることになる。このため、パイロットにとって事前の遠隔操縦訓練が必要不可欠となっている。

追跡管制システムは、飛行前操縦訓練を質・量共に充実させることで、パイロットの負担を軽減し、安全な運航を実現するのに貢献した。とりわけ、飛行前操縦訓練の質を向上させているのがMEWSの提供する気象シミュレーションデータである(図1)。局地予測に基づく詳細な気象シミュレーションデータにより、パイロットは現実的な気象条件のもとで飛行前操縦訓練を実施できる。

このように、気象の影響を受けやすい飛行船を無人で遠隔操縦するという命題に対して、MEWSは多角的な分析のもとに構想されたソリューションを提供している。

## 4 判断支援情報の提供

### 4.1 ユーザーフレンドリな情報提供画面

画面デザインは運用性を左右する。この重要なデザインにあたっては、観測や予測した情報をそのまま提供するのではなく、運用を想定した切り口で改めてカテゴリー化し、統合表示することで、運用者が状況をより的確に把握できるように配慮した。MEWSの提供する画面概要を表3に示し、画面例を図3に示す。

予測情報は、図3のように観測情報と同一スケールで並べて表示している。このことにより、運用者は過去に行った予測の正確性、あるいはずれの傾向を視覚的に把握する

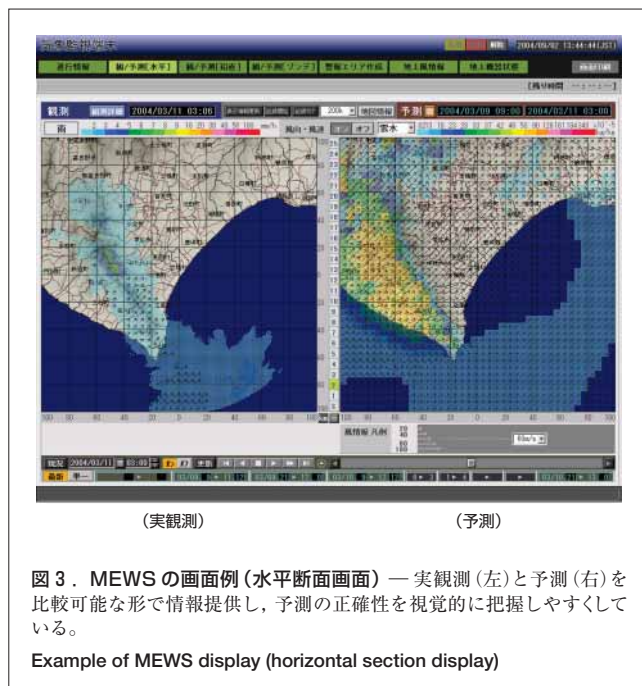


図3. MEWSの画面例(水平断面画面) — 実観測(左)と予測(右)を比較可能な形で情報提供し、予測の正確性を視覚的に把握しやすくしている。

Example of MEWS display (horizontal section display)

ことができ、その情報を踏まえて未来の予測情報を見ることができる。この結果、運用者に安心感を与えるとともに、予報情報の不確実さをカバーする際の運用者の負担を軽減している。

### 4.2 機械的な監視作業からの解放

このシステムでは、一般的な気象情報以外に、SPFの運用に焦点を当てた解析処理により運用者に対する警報情報を提供している。提供する警報の概要を表4に、画面例を図4に示す。

従来であれば、未来の時間ごとに、広範囲な試験空域のあらゆる場所に関して、多様な監視項目すべてを目視で監視していたと考えられる。これは膨大な監視量であり、小さな異常を瞬時に察知するのは難しい。

このためMEWSでは、警報機能により、飛行空域上で発生する危険因子の発見を自動化した。すなわち、機械的な監視作業は計算機が行い、よりインテリジェントな作業を

表3. 提供画面一覧(概要)

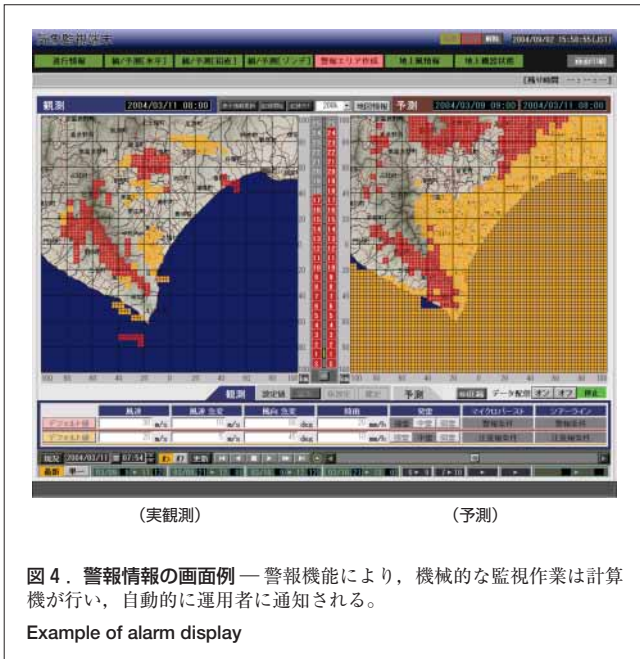
List of displays (outline)

画面名	内容
水平断面表示	飛行空域の各種気象センサ情報(現況、予測情報)、警報情報を水平断面表示
鉛直風況表示	飛行空域の代表的な高度の各種気象センサの風向・風速情報(現況、予測)を時系列表示
風の鉛直プロファイル表示	実験場直上の風向・風速情報をソーダ、DWR、VHFレーダ、予測情報に対して鉛直プロファイル表示
地上風モニタ/予測画面	地上風の現況、予測情報を時系列に表示

表4. 主な警報情報

Main alarm information

画面名	内容
強風域(観測、予測)	しきい値を超える風速エリアを自動監視
降雨域(観測、予測)	雨域を自動監視
雷雲発生域(観測、予測)	DWR情報から解析処理して求めた発雷確率の高いエリアを自動監視。予測情報によっても自動監視
晴天時乱気流	乱流指数がしきい値を超えるエリアを自動監視
温度逆転層	温度が高度上昇とともに低下しないエリアを自動監視



人間に割り付けている。図4は乱流警報の発令状況を表しているが、乱流域（大気が不安定となる可能性のある領域）の発生が自動的に運用者に通知され、これをトリガとして、運用者は詳細な分析や予報を行い、意思決定する仕組みとしている。

## 5 あとがき

当社は、構想段階から追跡管制システムの開発に主導的立場で参画し、気象防災分野での長年の経験とソリューションプロバイダーとしての力を発揮することができた。その成果はこのプロジェクトの成功に大きく貢献したと考えている。

今後は、この成果を交通管制支援や防災支援などに適用することを通じ社会に還元していきたい。

## 謝 辞

風観測・予測システムの開発にあたり、多大のご指導をいただいた独立行政法人 情報通信研究機構の関係各位に深く感謝の意を表します。

## 文 献

- (1) 田保則夫, ほか. 無人飛行船の追跡管制技術の確立に向けて. 成層圏プラットフォームワークショップ組織委員会. 第5回成層圏プラットフォームワークショップ講演前刷集, 2005, p.151 - 158.
- (2) 君野珠宏, ほか. SPF運用に最適な気象システムの構成と精度. 成層圏プラットフォームワークショップ組織委員会. 第5回成層圏プラットフォームワークショップ講演前刷集, 2005, p.167 - 174.



武藤 隆一 MUTO Ryuichi

社会ネットワークインフラ社 小向工場 レーダ・センサ技術部  
参事。気象防災システムの開発設計に従事。  
Komukai Operations



弓削 信子 YUGE Nobuko

社会ネットワークインフラ社 小向工場 レーダ・センサ技術部。  
気象防災システムの開発設計に従事。  
Komukai Operations



堀込 淳一 HORIKOMI Junichi

社会ネットワークインフラ社 小向工場 レーダ・センサ技術部。  
気象防災システムの開発設計に従事。  
Komukai Operations