

航空安全プログラム 気象影響防御技術

石川 和敏*

1. はじめに

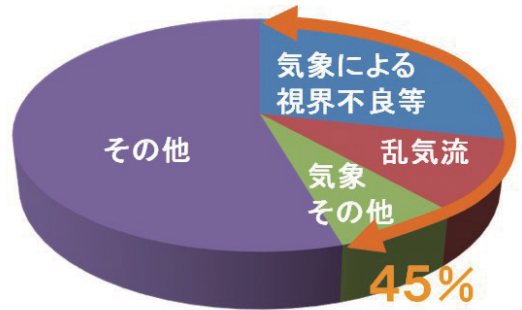
「民間航空機に関する市場予測 2016-2035¹⁾」によると、2035年の世界の航空旅客量は2015年に比べ2.5倍になると予想されています。航空旅客量に比例して航空機事故数も増加することが予想されるため、事故数を減らすには、事故発生率を少なくする必要があります。そこで、従来の航空機事故防止対策（衝突、墜落、経年劣化、テロリズムなど）より高度な安全対策が必要になります。

航空事故は、複数の要因（主要因+背景要因）が関係して発生する場合が多く、その多くの事故要因に気象が絡んでいます。図1はIATA（国際航空運送協会）安全報告書（2013年）から抜粋した、2009年から2013年に発生したFatal（乗員乗客に死者を伴う）事故94件に対して事故要因を環境（Environment）で分類した際、主要因が気象（Meteorology）である割合が45%であることを示したグラフです。その他の要因は、地上航法施設の不具合（28%）、日照不足などによる視界不良（13%）などです。主要因がその他のケースの中にも、背景要因の一つが気象であるケースが含まれます。そのため、事故要因に気象が含まれる割合は、45%以上になることが容易に予想できます。

航空機は、その設計開発の段階で、故障しないような設計、故障を見越した設計および確率的な信頼性基準に基づく設計が採用されており、国の当局（日本では国土交通省航空局）が、自国のメーカーが開発する機体の型式証明を発行することで、安全性および環境適合性の基準を満たしていることを証明します。そのため、たとえ航空機に不具合が発

* Kazutoshi ISHIKAWA
国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
航空技術部門 次世代航空イノベーションハブ

外的要因が主要因(Fatal)



IATA Safety Report 2013
2009-2013のFatal Aircraft Accidents 94件の分析結果

図1 航空死亡事故要因

生しても、重大事故になることはほとんどありません。しかし、気象のように不確定な外的な要因に対しては、機体設計のみで十分な安全対策を行うことはできないため、機体設計で一定レベルの安全性を確保し、安全マージンを持った運航を行うことで対策されています。運航会社は、最終的に運航効率を下げてでも安全性を確保する運航を行っています。残念ながら気象を要因とした航空事故は無くなっていません。

気象のうち、パイロットの視界を奪う雲などへの対策は、現在では航空管制システム、航法支援システムなどによるIFR（計器飛行方式）が整備されており、航空路を飛行する旅客機ではほとんど問題にならなくなってきました。また、航空気象サービス（航空気象観測、航空気象予測、地震・火山灰の監視・予測）が整備され、気象情報が航空局の管制塔や各航空会社の運航管理者・パイロットなどに提供されることで、予防的な運航計画を立てるこ

現象	発生する問題
滑走路上の雪氷	欠航、オーバーラン等
機体着氷	揚力低下、燃料消費増加等
乱気流遭遇	機体制御性低下、墜落等
低層ウインドシア遭遇	機体制御性低下、墜落等
被雷	構造損傷等
氷晶吸い込み	センサ誤作動、推力低下等
過冷却水滴吸い込み	内部損傷、推力低下等
霧への遭遇	遅延、欠航等
宇宙線	装備品の作動停止等

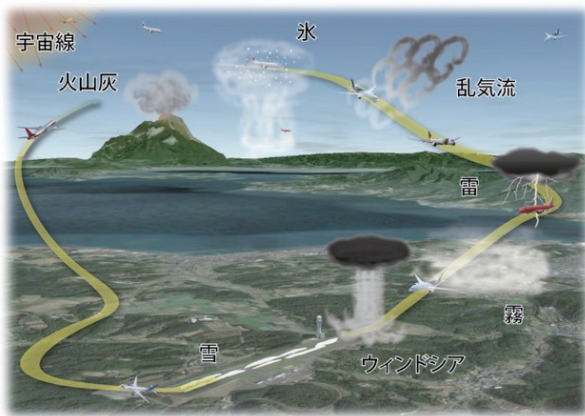


図2 運航に影響を与える気象

とができ、運航安全の確保に非常に役立っています。

本稿で扱う「気象」とは、航空機が事故を引き起こす可能性がある、事故に至らなくとも不具合や故障を発生させる可能性がある、または運航効率を低下させる要因になりうるものになります。図2に代表的なものを示します。ただし、乱気流（晴天乱気流や、空港周辺のマイクロバーストなど）に関しては、他の稿^{2) - 4)}で取り扱うため本稿からは除いています。

日本における冬期気象は世界でも最も過酷といわれています。特に、日本海側の低い雪雲で発生する冬期の雷（特徴は、一日中発生、低高度で発生、上向きの放電など、夏期に比べて数十から百倍のエネルギーを有すること）や、日本海側空港などで滑走路閉鎖等を引き起こす豪雪、滑りやすいシャーベット状の雪など、運航にとって非常に厳しい気象条件です。安全マージンを多めにとれば、欠航や遅延等が発生するなど運航効率が悪くなりますが、運航効率を優先しすぎますと、スリップ事故等が発生するなど安全性に悪影響が出てきます。

内閣府「平成22年度防災白書」によると、日本国内には108の活火山があり、世界の活火山の7%を占めています。日本の国土面積は、377,835 キロ平米であり、これは世界の陸地の0.283%に当たり、日本は活火山が集中している場所であるといえます。そのため、火山灰吸い込みによる、航空エンジンへのダメージが発生する可能性が他国より多いことが考えられます。

なお、「航空機の冬期運航における問題と課題」については、航空技術に特集^{5) - 8)}がありますので、詳細について興味のある方はそちらをご覧ください。

これまで述べた、冬期における気象（雪氷、雷）や火山灰等の問題に対する研究開発は十分行われておらず、状況把握（気象データ、運航データ、被害データ等）や対策（検知方法、予測方法、防御方法）検討し、対抗技術などを研究開発するには、従来の航空分野とは異なる分野以外との協力が必須になります。

気象影響防御技術の研究開発を進めるうえで、従来の航空分野を超えた知見等が必要であること、広く関係者の協力を得ることで技術開発を加速することなどを期待して、運航会社、機体メーカ、大学、研究所等の機関がメンバーのWEATHER-Eyeコンソーシアムを2016年1月に設立しました⁹⁾。本コンソーシアムは、気象影響防御技術に関する関係機関の認識を合わせるだけでなく、航空機への気象影響の問題についての認識を航空及びそれ以外の分野に広めるために、WEATHER-Eyeビジョン¹⁰⁾をまとめました。また、コンソーシアムメンバー以外も参加し意見交換が可能なWEATHER-Eyeオープンフォーラムを年に一度開催しており、広い分野から毎回約200名の方々が参加しています（図3）。

冬期運航に影響を与える気象の問題などを解決するには、まだ多くの研究要素があります。それらの研究要素のうち、JAXAのプログラムで取り組んでいる、気象影響防御技術に係る研究開発について以下に紹介します。



図3 第1回 WEATHER-Eye オープンフォーラム
(2016.9.27 東京大学武田ホール)

2. 雪氷対策

2.1 機体への着氷防止¹¹⁾

現在の機体着氷の防止対策手段では、地上(空港)での防除氷液の環境問題、飛行中での防除氷システム(通常、通常エンジン推力の分配や電熱ヒータで防除氷を行う)の燃費などが問題になっています。また、地上作業人による防除氷液の塗布作業、システム・メンテナンスコスト、降雪時の離陸やり直しによる運航効率の低下も問題となっています。これらの問題を解決する防除氷システムが望まれています。

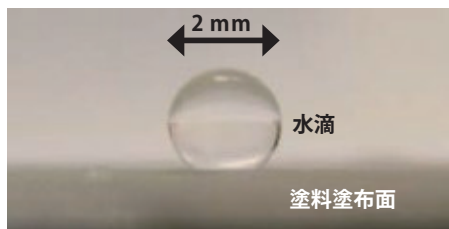


図4 防着氷塗料の超撥水性例

JAXAでは、機体の着氷を防ぐコーティング技術による運航安全性の確保、防除氷コーティング剤による除氷エネルギーの削減、及び機体の着氷をリアルタイムでモニタリングして離陸判断を可能とする技術を研究開発しています。防除氷コーティング剤に使用している塗料は、空中に浮遊する過冷却水が機体に付着することを妨げる、超撥水性^{はっすい}があります(図4)。JAXAが提案する新防除氷システム(図5)は、主翼の前面部に電熱ヒータを、その後ろの再凍結する部分に防除氷コーティングが施されており、着氷風洞試験で確認した結果、ある気象条件で平均30%以上の電熱ヒータの消費電力削減効果を得ることができました。

この研究開発は、JAXAのほかに、機体メーカ、塗料メーカ、4大学などが共同で行っています。研究開発している超撥水性防着氷塗料や新防除氷システムのアイデアは、航空機のみならず、寒冷地の建築物等、他の分野への応用が期待されています。

2.2 滑走路の雪氷モニタリング¹²⁾

現在、滑走路の積雪状態を確認するときは、滑走路を一時閉鎖し職員が滑走路の数か所で計測する方法がとられています。そのため、降雪量が非常に多い場合は、先に計測した時よりすぐに厳しい状況になってしまうことや、頻りに滑走路を閉鎖し計測し直す必要があります。すなわち、滑走路の雪氷状況(積雪高、雪質など)をリアルタイムかつ遠隔で正確に把握できないために、不必要の滑走路閉鎖や運航欠航等による運航効率性やスリップ事故などの安全性の低下を招いています。

JAXAは、滑走路の雪氷状態をリアルタイムでモニタリングし、機体の滑りやすさを特定して、安全・効率的な離着陸判断を可能とする技術を研究開発しています。滑走路で利用することを考慮し、滑走路に埋め込んだセンサで検知した情報(積雪高、雪質など)を元にして、パイロットへの離着陸可否判断や空港管理者への除雪判断が行われることを考えています(図6)。

滑走路雪氷モニタリングシステムのセンサは、雪氷内の光散乱を利用して、光散乱パターンにより雪

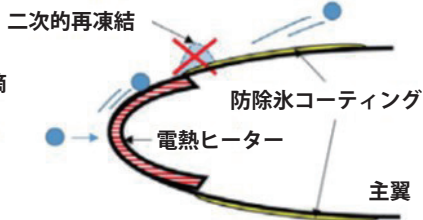


図5 新防除氷システム概念

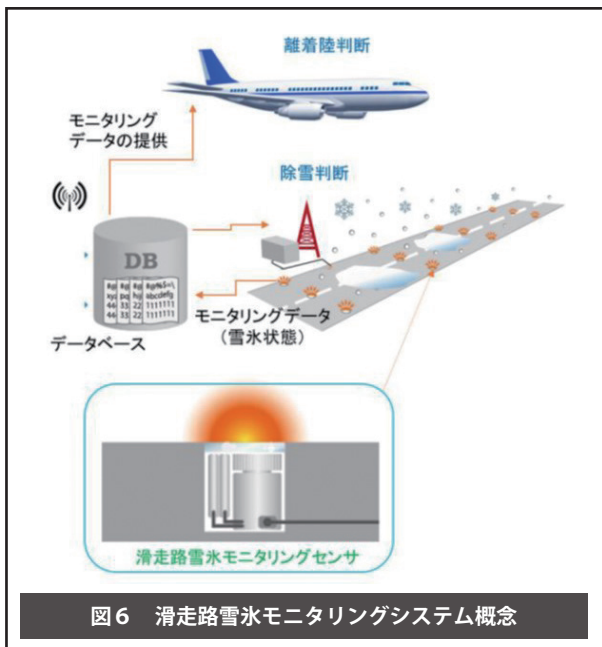


図6 滑走路雪氷モニタリングシステム概念

氷状態を検知・把握します。そのため、雪の物理的特性（雪厚、粒径、密度、二層雪、含水率）と光分散との関係を、室内及び屋外試験場等で試験しています。開発したプロトタイプ機は、雪厚及び雪質をある程度判別することができました。現在は、実用化に向けた精度向上などを行っています。

この研究開発は、JAXA のほかに、センサメーカー、ソフトウェア会社、大学などが共同で行っています。現在のセンサ開発の段階から研究開発が進み、滑走路への埋設評価試験を行う際は、土木建設などに関係する企業などと共同で行う必要があります。また、開発された雪氷モニタリングセンサは自動車道路への応用などが期待できます。

3. 雷対策

3.1 雷気象検知による運航支援¹³⁾

航空機被雷は年間 300 件弱（2007-9 年度、ANA 機）発生しており、これによる遅延・欠航、機体修理による経済損失の大きさから、気象観測に基づく被雷回避支援システムの開発がエアラインより強く望まれています。

JAXA は、航空機の前方や経路上の雷気象状態を事前に検知して、パイロットなどが運航経路の変更判断を可能とする支援技術を研究開発しています（図7）。そのためには、航空機被雷の危険性が高

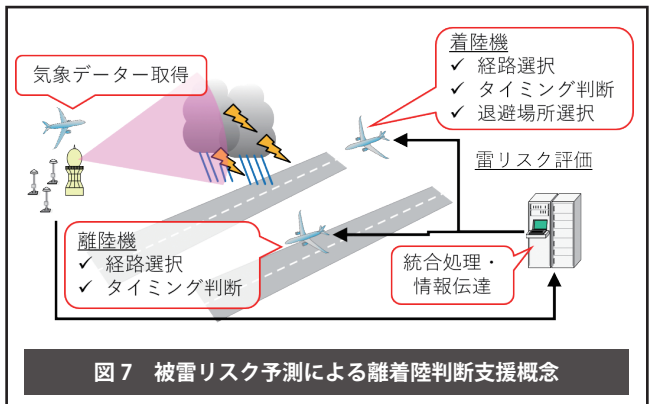


図7 被雷リスク予測による離着陸判断支援概念

い領域を検知すること（雷気象検知）、その雷気象検知を特に着陸フェーズで行えること、専門知識がない利用者にわかりやすい情報にすることが重要です。航空機被雷のほとんどが、自然発生する雷（自然雷）と異なり、航空機自身により引き起こされる航空機誘発雷であるため、落雷等が発生していなくとも航空機が近づくことで被雷する危険性が高い領域を検知する必要があります。また、航空機被雷はそのほとんどが離着陸フェーズで発生することが経験的に知られています。JAXA は、空港周辺の気象観測データに基づいて、航空機被雷の危険性が高い領域を判断する手法を開発しました。収集した実際のデータ（数十例、非被雷例も含む）を使って検証したところ、検知率は7割程度、誤警報率は2割程度です。現在は、多くの被雷事例を収集し評価することや気象やそれ以外の観測データを統合的に利用するなどの改良を加えることで、本方式の検知率・誤警報率の向上を行っています。

この研究開発は、JAXA のほかに、機体メーカー、研究機関、大学などが共同で行っています。航空機が実際に被雷した時の状態のデータ（運航、気象等）を揃えて解析することが必要であるため、様々な機関で取得されている、気象や運航などのデータを入力し、それらのデータを関連づけ、解析することなどが必要になります。そのため、課題解決までに様々な分野の知見等を活用することが必要です。また、この技術は、航空機以外の他の移動体への応用などが期待できます。

3.2 炭素繊維複合材料の耐被雷性向上¹⁴⁾

航空機が被雷した際は、次の飛行前までに雷撃

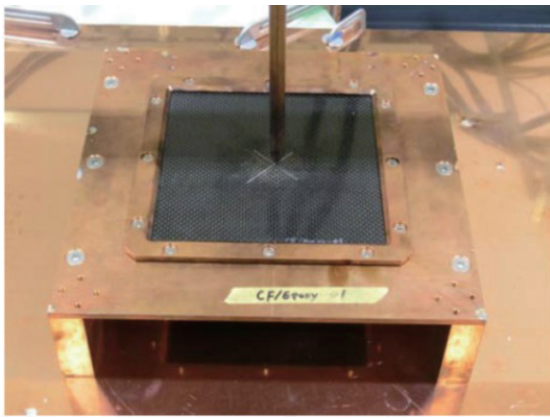


図8 雷撃試験装置に置かれた導電性複合材料

を受けた場所と雷が抜けた場所を特定し、被雷による損傷に対して必要な処置を講じることが求められています。そのため、航空機の構造部材には、被雷損傷の小さい材料が望まれています。最新航空機の構造部材として利用が拡大している、炭素繊維複合材量（CFRP）は絶縁性の樹脂部分に導電性がないため、導電率が低く被雷損傷が大きいことが知られています。CFRPの耐雷性を改善する方法としてB787はCFRP表面にCu（銅）メッシュを張り付けていますが、重量増になることや整備性が悪いなどのデメリットがあります。

導電性のフィラーを樹脂に混ぜることで導電性を向上させることで、被雷時の複合材の雷撃損傷を低減させる方法では、樹脂の高粘度化や脆弱性が悪くなるため、加工性が悪く、強度が必要な構造部材に適用ができないなどのデメリットがあります。これに対し、JAXAは、別のプロジェクトで開発された、導電性高分子を用いた導電性樹脂の改良を

行うとともに、模擬雷撃試験を行い、導電性複合材及び金属材料において塗料の有無が被雷損傷に与える影響を評価しています（図8）。この研究開発では、開発された導電性樹脂の改良を、JAXAのほかに、機体メーカー、大学などが共同で行っています。この技術は航空分野以外の移動体などへ応用が期待できます。

4. 火山灰等対策

4.1 微粒子吸い込み評価¹⁵⁾

航空機の飛行経路上に微粒子が浮遊している場合、ジェットエンジンが微粒子を吸い込むことでエロージョン、デポジション、着氷などの問題が発生し、エンジンの性能や寿命を低下させ、時に事故に発展するため、十分な対策が必要になります。図9はジェットエンジンが吸い込む微粒子の例を示しています。黄砂や火山灰などの固体粒子を吸い込むと、上流にあるファンや圧縮機でエロージョンが発生し、燃焼器を通過した高温の粒子は下流のタービンに衝突しエロージョンやデポジションを発生させます。また、飛行中に雲を通過することで、雲を構成する過冷却液滴や氷晶等がファンや圧縮機の表面に着氷します。

ジェットエンジンの開発で、エンジン型式証明の最終段階で行われる砂塵などの吸い込み試験で問題が判明すると、開発の後戻り（再設計など）が発生し、開発コストへの影響も大きくなります。また、微粒子吸い込みによって発生する現象は、流体力学、熱力学、材料力学、化学反応などが相互に関係するマルチフィジックス現象であり、実験や数値解析を行うことは困難です。したがって、JAXAで

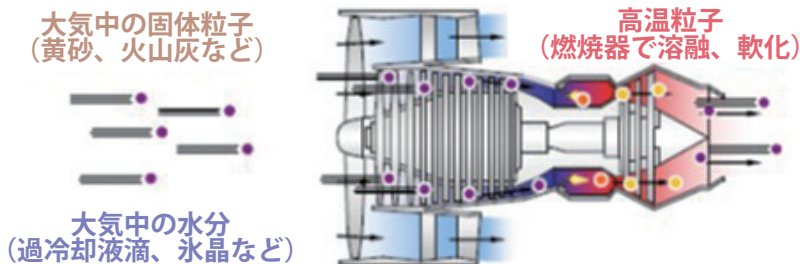


図9 ジェットエンジンの微粒子吸い込み

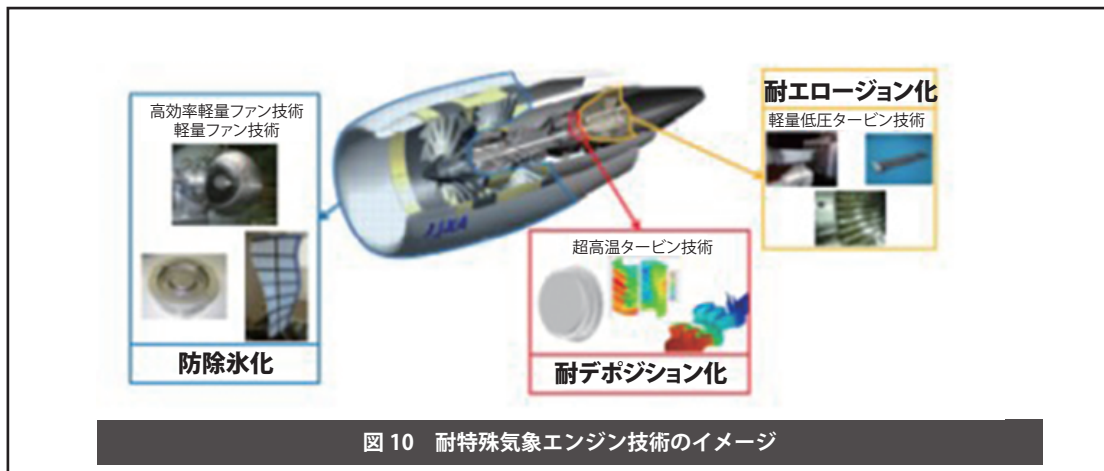


図 10 耐特殊気象エンジン技術のイメージ

は、微粒子が浮遊する特殊気象に対する試験や計測技術及び数値解析技術を確立することに注力しており、これらの技術を応用して対策技術コンセプトを提示することを目指しています(図 10)。

本研究開発は、JAXA のほかに、2 大学が共同で行われています。評価技術を確立した後は、対策技術の開発に注力していく予定ですが、その際は、JAXA のジェットエンジンに関する2つのプロジェクト(「aFJR プロジェクト」,「グリーンエンジン技術の研究開発」)で獲得された技術に高付加価値をつけるために、この研究開発の成果となる、微粒子吸い込みに対する安全性向上技術を組み込んでいく予定です。

5. おわりに

気象は、航空機の飛行にとって常に大きな課題です。これまでに多くの気象が要因の航空機事故が発生していますし、国内では毎冬のように空港閉鎖や運航遅延などが発生しています。気象観測や予報技術の向上により運航における安全性は向上していますが、まだまだ多くの課題が残っています。これらの課題は、航空分野だけでなく他の分野の方々にも協力いただくことで、早期に解決できる可能性が高くなると考えています。JAXA は、航空機に悪影響を与える気象への対策技術の研究開発を通じて、安全性を向上し運航効率を改善することにより、冬期における旅客機による移動がより快適になることに貢献していきます。本稿により気象影響防御技術に少しでもご興味を持っていただければ幸いです。

参考文献

- 1) 民間航空機に関する市場予測 2016-2035, 一般財団法人 日本航空機開発協会, 2016 年 3 月
- 2) 越岡康弘:次世代運航システム (DREAMS) プロジェクトについて (1), 航空技術 No.760[18-07]
- 3) 越岡康弘:次世代運航システム (DREAMS) プロジェクトについて (2), 航空技術 No.761[18-08]
- 4) 町田茂:乱気流事故防止技術, 航空技術 No.764[18-11]
- 5) 神田淳:航空機の冬期運航における問題と対策 (1), 航空技術 No.753[17-12]
- 6) 神田淳:航空機の冬期運航における問題と対策 (2), 航空技術 No.754[18-01]
- 7) 神田淳:航空機の冬期運航における問題と対策 (3), 航空技術 No.755[18-02]
- 8) 神田淳:航空機の冬期運航における問題と対策 (4), 航空技術 No.756[18-03]
- 9) 石川和敏, 気象影響防御技術コンソーシアムについて, 第 54 回飛行機シンポジウム:講演番号 1C1
- 10) WEATHER-Eye コンソーシアム, WEATHER-Eye ビジョン, JAXA-SP-16-012, 2017-02-22
- 11) 守田克彰ほか, 機体防着氷技術について, 第 49 期年次講演会
- 12) 橋本和樹ほか, 安全で効率的な航空機の冬季運航に向けた滑走路雪氷モニタリングセンサの開発, 第 49 期年次講演会
- 13) 吉川栄一ほか, 雷気象検知技術について, 第 49 期年次講演会
- 14) 岡田孝雄他, 航空機材料の耐雷性について, 第 49 期年次講演会
- 15) 鈴木正也他, 耐特殊気象エンジン技術の研究開発状況, 第 49 期年次講演会