

## 航空機の冬期運航における課題と解決に向けた研究の取り組み

### 1. 概要

航空機の冬期運航は、冬期特有の気象が運航の安全性や効率性に影響するため、エアラインや機体メーカーにとって問題となっている。さらに日本の冬期は世界的に見ても航空機にとって厳しい気象環境であり、日本のエアラインにとって冬期運航の安全性維持・運航効率向上は大きな課題である。

耐空性の観点からは航空機の安全性は非常に高く事故に至ることは滅多にない。しかし耐空性の確保は設計・運航の両方の役割が重要であり、安全性を維持するために運航効率を下げることを余儀なくされている。また設計においても全ての気象条件に対応することは困難であり、事故にまで至らなくても不具合事象の発生を完全に防ぐことはできていない実状がある。

本記事では、固定翼機の冬期運航における上述の問題について概要を示すとともに、現在の設計・運航への耐空性に関する要件を示す。その上で、冬期運航における安全性維持や運航効率向上に向けた研究の取り組みについて紹介する。

### 2. 航空機の冬期運航における問題

航空機の冬期運航における安全性や効率性を低下させる気象要因として雪氷と雷が挙げられる。雪氷に関しては、機体への着氷はもちろん、滑走路への着雪・着氷も問題となる。加えて、冬期に発生するエネルギーの高い雷（一般に冬季雷と称される）の被雷も問題となっている。これらに関連して地上における機体や滑走路の除雪氷作業、機体の防除雪氷剤散布作業、機体の被雷損傷部の修理なども、エアラインや空港管理者にとって非常に大きな課題となっている。本章では、雪氷や雷が運航の安全性に及ぼす問題の概要について示す。

#### 2. 1 機体着氷の問題

機体着氷で大きく影響を受ける現象は、翼面着氷による空力性能の低下や失速である。翼面の氷は、翼の最大揚力の減少、最大揚力を発生する迎角の減少、操縦性への有害な影響、抗力の増大などを引き起こす。薄い霜・雪や氷などの着雪氷でも、30%までの揚力減少と40%までの抗力増加を引き起こすことが風洞実験や飛行試験で確認されており、さらに厚い着雪氷は、さらなる揚力減少と80%以上抗力増加にもなりうることも確認されている<sup>1)</sup>。また、着氷気象条件（第3章参照）で飛行するための装備を備えた航空機でも、防水や除氷できない翼面への着雪氷により空力性能に影響を受ける。

さらに厳しい着氷気象条件においては、翼面の気流はく離の発生によるエルロンの変位や、ロール方向の操縦特性の低下や喪失による制御できないロール回転現象が発生する可能性がある。1994年には、アメリカン・イーグル航空のATR72型機の除氷装置の設計上の問題で主翼の着氷を除氷できず、エルロンによる機体のロールコントロールができなくなり墜落している<sup>2)</sup>。

小型機ではICTS（Ice Contaminated Tailplane Stall：尾翼着氷による失速）も問題となる。尖った前縁はより着氷しやすいため、主翼より先に尾翼が着氷しはじめる可能性が

ある（これは、尖った尾翼前縁では、淀み点での静圧増加が比較的少なく、温度の増加が主翼前縁ほど顕著ではないことが主な理由である）。着氷により尾翼が失速することで、機首下げモーメントが大きくなり制御不能になる可能性があるためである。

近年 SLD（Supercooled large droplets：過冷却大水滴）の問題もクローズアップされている。SLD は通常の着氷気象状態における水滴とは異なり、0℃付近の比較的高い気温かつ低い高度に存在する水滴で、通常の数倍～数十倍（数十 μm～数百 μm）の直径を有する。0℃以下で凍っていない状態の水滴であり、衝撃が加わることで凍る特性がある。前述の ATR72 型機の事故もこの SLD の着氷が発端であることがわかっている。SLD による着氷メカニズムは十分に解明されておらず、実験や解析手法なども研究段階である。

Ice Crystal（氷晶）と呼ばれる氷の粒がエンジンに与える影響も懸念されている。

Ice Crystal は 20,000ft を超えるような高層の大気中に多く存在しており、氷の粒であることから機体には付着せず、機体の着氷センサーで Ice Crystal の状態を捉えることはできない。しかし、エンジンインテークに溶けながら入り込み、内部表面に水膜を形成することで、さらに入ってくる Ice



図 1 Ice Crystal による推力喪失発生地域

Crystal を捕捉して氷が蓄積され、それが圧縮機内部に入り込むことで内部を損傷、サージやストールを発生させる事象が発生している。また、TAT（Total Air Temperature：全温）センサーやピトー管まわりの熱で溶けた Ice Crystal により計測エラーを発生させ、エンジンの推力喪失事象も発生している。1990 年以降だけでも 100 件以上の推力喪失事象が特定の地域に発生している（図 1）。特に日本から東南アジアにかけての地域で多発しており、約 60%がアジア地域で発生している<sup>3)</sup>。

## 2. 2 滑走路着雪氷の問題

滑走路に積雪や着氷がある場合には、航空機と滑走路の間の摩擦係数が極端に小さくなり、滑りやすい状態となる。滑走路表面の滑りやすさは航空機の離着陸に大きく影響する。滑走路が滑りやすくなれば、着陸時には停止距離が長くなるのはもちろんのこと、離陸滑走中にエンジンの故障で離陸を中止した場合の停止性能にも影響を与える。つまり必要離陸／着陸滑走路長が長くなるため、雪氷滑走路は運航上の大きな問題となる。必要離陸／着陸滑走路長が十分に無い場合は、ダイバートや欠航につながり、運航効率が大きく低下する。また着陸できたとしても、滑走路終端が局所的に非常に滑りやすい状態になる状況では、オーバーランなどのインシデントも発生する。

雪氷滑走路に関する問題は日本に限ったことではなく世界的に見られるものである。しかし日本の航空環境は世界的にみても厳しいと考えられる。その一つ目の理由として日本の空港における滑走路が短いことが挙げられる。東京航空局の管内空港を図 2 に示す<sup>4)</sup>。

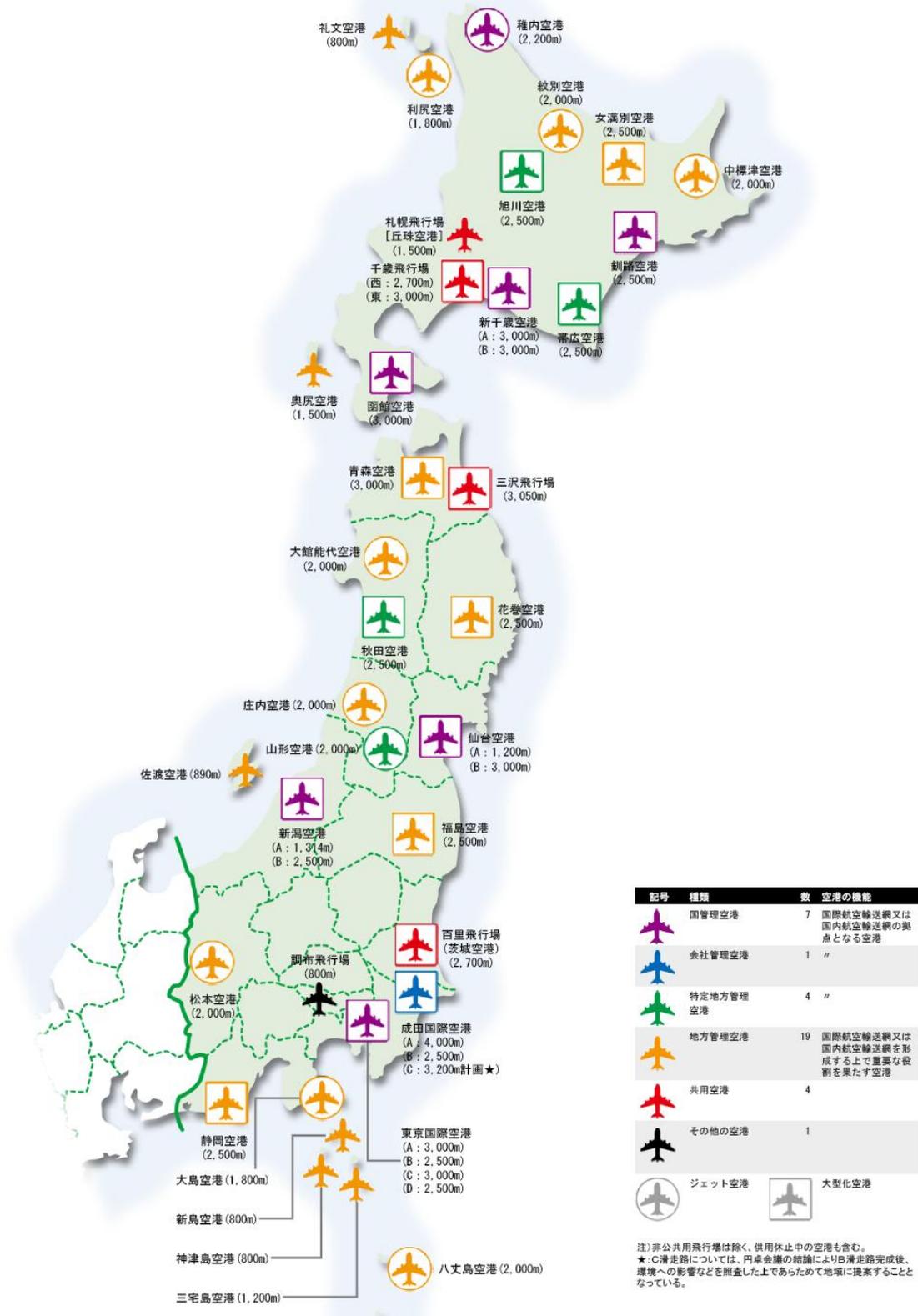


図 2 東京航空局の管内空港

北海道・東北・北陸地方では新千歳・函館・青森・三沢・仙台の各空港は 3000m 級の滑走路であるが、これら以外の空港の滑走路は 2000m 級およびそれ以下の長さであることがわかる。もちろん北海道・東北・北陸以外の降雪がある地方空港（松本、鳥取、米子、石見、出雲など）にも 2000m 級滑走路は存在する。二つ目の理由は、離着陸距離をより必要とする大型機の割合が、運航している航空機全体に対して圧倒的に多いことである。世界の各地域での機材区別の運航機数を表 1 に示す<sup>5)</sup>。なお機材区分については絶対的な指標は無いが、ここでは大型機（300 席以上）、中型機（200～300 席）、小型機（100～200 席）、RJ（リージョナル・ジェット）機（100 席以下）に分類している。日本のエアラインが運航している航空機のうち、大型機・中型機の合計割合がおよそ半分になっており、世界の他の地域に比べて高い。特に積雪のある欧州・CIS（ロシア他）・北米と比較すると、圧倒的に割合が高いことが分かる。三つ目の理由として、乾燥した雪（DRY SNOW）よりも湿った雪（WET SNOW や SLUSH）の方が滑りやすく、日本ではこの湿った雪が多いことが挙げられる。なお、国土交通省航空局の空港運用業務指針における積雪状況の分類を表 2 に示す。

表 1 世界の運航機材の分布

機材区分	北米	中南米	欧州	CIS	アフリカ	アジア	豪州	日本	世界計
大型機	574 (8.6%)	72 (5.3%)	744 (17.1%)	86 (8.4%)	111 (14.2%)	1,542 (27.8%)	97 (19.0%)	114 (21.8%)	3,340 (16.1%)
中型機	1,143 (17.2%)	83 (6.1%)	262 (6.0%)	117 (11.5%)	63 (8.1%)	226 (4.1%)	28 (5.5%)	143 (27.4%)	2,065 (10.0%)
小型機	3,099 (46.5%)	943 (69.2%)	2,746 (63.1%)	561 (55.1%)	444 (56.9%)	3,482 (62.8%)	293 (57.5%)	226 (43.3%)	11,794 (56.8%)
RJ 機	1,848 (27.7%)	265 (19.4%)	600 (13.8%)	254 (25.0%)	162 (20.8%)	291 (5.3%)	92 (18.0%)	39 (7.5%)	3,551 (17.1%)
合計	6,664 (100%)	1,363 (100%)	4,352 (100%)	1,018 (100%)	780 (100%)	5,541 (100%)	510 (100%)	522 (100%)	20,750 (100%)

表 2 積雪状況の分類

積雪等の種類	概要
DRY SNOW	乾燥した雪及び水分をあまり含まない普通の雪
WET SNOW	水分をかなり含んでおり、手袋をした手で握ると水がにじんだりしみ出る状態の雪
SLUSH	水分を十分に含んでおり、かかと又はつま先で踏みつけたりけったりするとスプラッシュがあがる状態の雪
COMPACTED SNOW	除雪機材等でおしかためられた状態の雪
ICE	（空港運用業務指針では定義が明確化されていないが、単に凍った状態を示す）

## 2. 3 被雷の問題

航空機が運航中に被雷する確率は 1,000～20,000 飛行時間に 1 回程度であり<sup>6)</sup>、航空機的设计寿命が 60,000～100,000 飛行時間ということ を考慮すると、一機一機でかなりの回数の被雷があると考えられる。

被雷による航空機への影響は、直接的な影響 (Direct effects) と間接的な影響

(Indirect effects) に分類される<sup>7)</sup>。直接的な影響として、金属外板に破孔が生じる

損傷、複合材構造に代表される非金属構造の破損がある。特に複合材料は樹脂の導電率が低いために、そのままでは激しく損傷する可能性が高い (運航中の航空機では銅メッシュを張ることで、電流の経路を確保するなどの対策が行われている)。また動翼等の可動部のヒンジやベアリングの溶解なども問題となる。間接的な影響としては、主に装備品への影響であり、運航計器や航法装置に干渉すること、電力分配系統のサーキットブレーカーが作動して電流遮断することなどがある。電磁場の生成や電流が流れ込むことがこれらの間接的影響の原因となっている。他にも燃料タンク内のリベットヘッド等からのスパークにより燃料が発火する危険性もあり対策が必要である。

通常 の雷は主に夏季に発生するが、世界の限られた地域 (日本の日本海側、ノルウェーの西海岸、アメリカの五大湖東側) では、冬季にも発生し、冬季雷と称される (図 3)<sup>8)</sup>。冬季雷の特徴として、夕方だけでなく一日中発生する可能性があり、上向きの放電である。電荷量が大きく、夏季雷の数十倍にも及ぶ。また通常 の夏季雷は 3,000～5,000m の上空で発生するが、冬季雷は 300～500m という低空で発生するという違いもある。冬季雷は限られた地域に発生する大変珍しい現象であるが、電荷量が大きい ため、航空機が被雷した場合の影響も大きくなる。このため日本のエアラインにとっては運航上の大きな脅威となっている。

## 3. 設計・運航への要求

航空機の設計・運航にあたっては国の審査を通じて安全性を示す必要がある。本章では、安全性に対する要求について、設計・運航についてそれぞれ示す。

### 3. 1 設計への要求

国土交通省航空局安全部運航安全課で定めている耐空性審査要領に、設計への要求が規定されている。このうち第 III 部が輸送 T 類を対象としており、FAA (Federal Aviation Administration : 米国連邦航空局) が定めている FAR (Federal Aviation Regulations : 米国連邦航空規則) の Part25 に相当している。ここでは着氷気象状態での飛行性 (失速速度、離陸性能、上昇速度、進入復行、運航など) に関する要求の他、乗組員室視界、プロペラの防除氷、燃料タンクのガス抜き及び気化器のガス抜き、タービンエンジン、対気速度計系統、静圧系統、主翼着氷監視灯、着氷防止装置など要求が規定されている。機体への着氷に関わる証明については、解析での証明も認められているが全ての条件を解析で

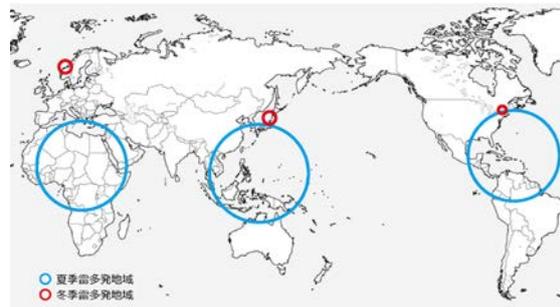


図 3 雷の発生地域

行うことはできず、試験飛行も必ず行うこととなっている。着氷気象状態で安全に飛行できることの証明は必ずしも必要ではないものの、安全性を証明しない場合は着氷気象状態での飛行が認められない。なおエンジン（耐空性審査要領上の表記は「発動機」）の吸気系統の氷結防止については、着氷気象状態での飛行の有無に関わらず、証明が必須である。

ここで着氷気象状態とは、第 III 部附録 C（FAR では、Part25 Appendix C に相当）に規定されている連続最大着氷気象状態及び断続最大着氷気象状態のことで、1940 年代から 1950 年代の USAF (United States Air Force : 米国空軍)の取得したデータに基づき、着氷する可能性のある気象状態が大気温度・気圧高度・雲中の水分量・水滴の平均有効直径・雲の水平距離で定義されたエンベロープで定義されている。しかし 1990 年代後半から 2000 年代中盤に SLD および Ice Crystal の脅威がクローズアップされてきており、着氷気象状態が Part25 の Appendix C だけではないことが明らかになってきた。これに伴い、Ice Crystal や SLD に対する FAR の改定が 2014 年 11 月 4 日に行われた（FAR Part25 Amendment140 および Part33 Amendment34、2015 年 1 月 5 日から有効）<sup>9)</sup>。この改訂において、着氷気象状態に関しては新たに SLD の着氷気象状態が Part25 の Appendix O として追加された。Ice Crystal の気象状態については、エンジンに関する Part33 の Appendix D として追加されている。

被雷への防御に関する要件としては、飛行機の機体は被雷により致命的な影響を受けることがないように防御されなければならない、金属部材については部材を機体構造に適切にボンディング（アース）することを含め、部材を適切に設計する必要がある。非金属部材については、被雷による電流を適切にそらすことを含め、雷撃の影響を最少にするように部材を設計する必要がある。燃料蒸気に着火しないような燃料系統に対する落雷保護も求められている。

### 3. 2 運航への要求

国土交通省航空局安全部運航安全課で定めている運航規程審査要領細則（国空航第 582 号）では、飛行計画の作成及び出発可否の決定にあたっては、特殊な気象状態の回避に関し、「飛行規程において凍結気象状態での飛行が許容されている場合を除き、凍結が予想される地域及び高度を飛行しないこと」「着氷、雷雨、乱気流、低層ウインド・シヤー、火山活動等により飛行への影響が予想される場合又は当該事象に遭遇した場合の措置が適切に定められていること」となっている。

湿潤・雪氷状態の滑走路については、着陸距離に関し適切に安全上の余裕度が加味することとなっており、飛行規程に要件が規定されている場合はその要件に従い、飛行規程に要件が規定されていない場合は飛行規程に基づく着陸距離を 1.15 倍することとなっている。

## 4. 解決に向けた研究状況

冬期運航における問題の解決に向けた研究状況について示す。

### 4. 1 世界の研究状況

世界的には、個別の研究が各所で行われているが、以下にそのうちの代表的な研究について紹介する。

NASA (National Aeronautics and Space Administration : 米国航空宇宙局) の IVHM (Integrated Vehicle Health Management) プロジェクト<sup>10)</sup>では、Aviation Safety Program の一環として、航空機の状況をモニタリングして運航中の故障や損傷等の影響を軽減するための技術開発を行い、着氷状態におけるリアルタイム空力特性劣化検知システムの開発や雷のアビオニクスへの影響の評価を行った。

雪氷滑走路に関しては、NASA やカナダ航空局等が参画して JWRFP (Joint Winter Runway Friction Measurement Program : 雪氷滑走路等摩擦係数測定機器に関する国際的な共同調査研究プログラム)<sup>11)</sup>が実施され、航空機と雪氷滑走路面の摩擦係数に関する調査や研究が実施された。

気象検知技術としては、フィンランドの Vaisala 社において冬季雷の落雷観測の一環として、落雷位置の同定を行う次世代落雷位置標定システムの開発を行っている。

耐雷技術については、フランスの ONERA (Office National d'Etudes et Recherches Aérospatiales : 国立航空宇宙研究所) が、航空機の着雷位置と航空機の前進による着雷位置の移動の予測解析技術を構築している。米国の LTI 社では、ノーズレドーム雷撃試験によりストリップダイバーター (構造表面に貼付した帯状の金属) による避雷効果を実証している。

#### 4. 2 日本の研究状況

冬期運航における課題の解決に向けた研究の取り組みとして、これまでそれぞれの課題に特化して研究がいくつか実施されてきている。主要な個別研究としては、IHI のエンジンファンへの着氷低減技術<sup>12)</sup>、富士重工業の防氷コーティング技術<sup>13)</sup>などが上げられる。雷については三菱重工業による電磁界解析技術の開発<sup>14)</sup>、富士重工業による耐雷帯電特性解析技術の開発 (経済産業省の航空機用先進システム基盤技術開発事業、2010-2014 年度) などが挙げられる。JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency : 宇宙航空研究開発機構) では産学官共同のオープンラボの制度により導電性樹脂による耐雷複合材料の開発<sup>15)</sup>を実施している。

また近年、JAXA では、冬期運航の問題に関して包括した研究「機体安全性マネジメント技術の研究開発」<sup>16)</sup>を実施している。エアライン、機体メーカー、大学、独法の他研究所を含めた産官学の連携による研究開発を進めており、機体防着氷技術、滑走路雪氷技術、気象状態検知技術、耐雷技術の 4 つの要素技術開発から構成されている。機体防着氷技術では、機体着氷の状況をリアルタイムでモニタリングする技術、機体の着氷を防ぐ特殊コーティング技術の研究開発を実施している。滑走路雪氷技術では、滑走路の状況をリアルタイムで検知するセンサーの開発、航空機の離着陸距離を高精度に算定する技術の研究開発を実施している。気象状態検知技術では、冬季雷を含む雷気象状態の事前検知技術、着氷気象状態の事前検知技術の研究に取り組みは始めている。耐雷技術では、雷による損傷を減少させる構造・材料の研究の他、雷損傷の検知技術についても研究に取り組みは始めている。以上のように研究は多岐に渡っているが、早ければ今後 5 年～10 年での技術実証を目指している。最終的な技術の適用イメージを図 4 に示す。

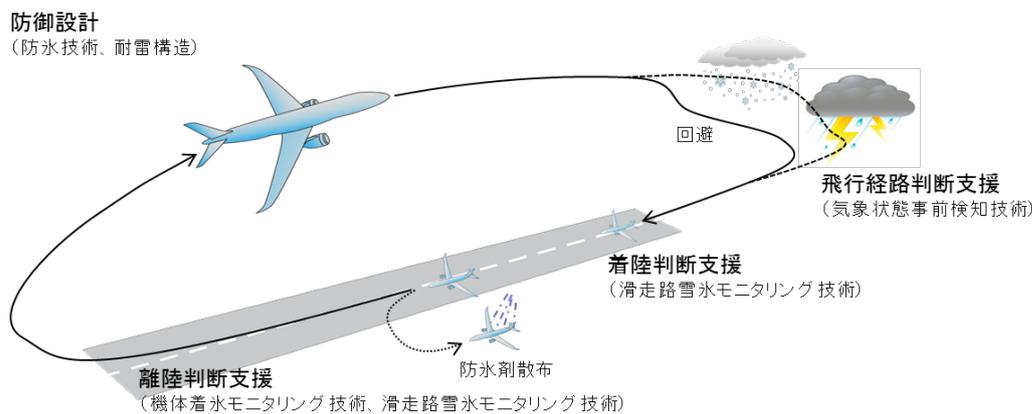


図 4 機体安全性マネジメント技術の適用イメージ

## 5. おわりに

航空機の冬期運航については、世界的に見ても日本が非常に厳しい環境となっている。今後ますます航空運送需要が増していく中で、いかに安全性を維持しながら運航効率を向上させるかが、大きな課題となることは避けられない。日本において解決に向けた研究開発は緒についたばかりであり、中長期的な視点での取り組みが非常に重要になると考えられる。

## 参考文献

- 1) Civil Aviation Authority, "Aircraft Icing Handbook", 2000
- 2) Earl Weener, "Lessons from Icing Accidents and Incidents", Experimental Aircraft Association, 2011.2
- 3) Boeing, "AERO", Issue28\_Quarter04, 2007
- 4) 国土交通省東京航空局, "管内空港分布図", 国土交通省東京航空局 HP, <http://www.cab.mlit.go.jp/tcab/conditions/01.html>
- 5) 日本航空機開発協会, "平成 25 年度版民間航空機関連データ集", YGR-0182, 2014.3
- 6) SAE International, "ARP5412B", 2013.1
- 7) Federal Aviation Administration, "Aircraft Lightning Protection Handbook", DOT/FAA/CT-89/22, 1989.9
- 8) 藤沢仰, 河村隆一, "北陸地域における冬季雷の傾向と落雷発生環境", 天気 Vol.52 No.6, 2005.6
- 9) United States Government, 79FR65507, 2014.11
- 10) NASA, "Integrated Vehicle Health Management", Technical Plan, Ver2.03, 2009.11
- 11) Art Jordan, "IMAPCR'96", Proceedings of the International Meeting on Aircraft Performance on Contaminated Runways, 1996.10
- 12) 日本航空宇宙工業会, "航空用エンジンにおけるファンへの着氷低減技術の研究", 航空機工業の競争力強化に関する調査研究成果報告書, No.2201, 2011.3
- 13) JAXA, "着氷検知・防氷技術", FLIGHT PATH, No.3, 2013
- 14) 三菱重工業, "雷から航空機の安全運航を守る電磁界解析技術の開発", 三菱重工技報, Vol.49, No.4, 2012
- 15) JAXA, "導電性樹脂を用いた複合材料の開発", JAXA HP, [http://aerospacebiz.jaxa.jp/jp/case/offer/cases/case\\_60.html](http://aerospacebiz.jaxa.jp/jp/case/offer/cases/case_60.html)
- 16) JAXA, "厳しい気象条件の日本の冬でも航空機を安全に効率的に飛ばしたい", JAXAs, No.58, 2014.12