

交通運輸技術開発推進制度
終了時評価資料

令和 2 年 6 月

(国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構)

研究成果要約

作成年月	令和 2 年 6 月
研究課題名	安全で効率的な航空機の冬季運航を目指した滑走路雪氷モニタリングシステム技術の開発
研究代表者名	国立研究開発法人 宇宙航空技術開発機構 神田 淳
研究期間	平成 29 年 10 月 6 日～令和 2 年 3 月 31 日
研究の目的	基本概念設計をベースに、AI・光センサの先進的な技術を融合した雪氷状態同定技術を確立することを目的とする。この雪氷状態同定技術は、光センサ計測データを航空行政・エアラインが必要としている雪氷状態（雪質・雪厚）の情報に変換するための技術である。既に試作を行ったセンサのハードウェアとともに滑走路雪氷のリアルタイムモニタリングシステムの要となるものである。
研究成果の要旨	散乱光評価のための数値シミュレーション技術の開発、散乱光データの実観測のための雪氷モニタリングセンサ開発、雪氷状態同定アルゴリズムの開発の 3 課題を実施した。 数値シミュレーション技術では、さまざまな雪質（粒径、密度、含水率）、雪厚の積雪に対する雪氷モニタリングセンサの測定データに対して、光散乱マクロ基礎特性を使って数値シミュレーションを実施し、コードとモデルを完成させた。 雪氷モニタリングセンサの開発に関しては、雪氷モニタリングセンサを改良し広帯域波長の散乱光を取得できるようにした。また、分光スペクトル形状の変化など散乱光の波長ごとの変化を取得することで、雪質・雪厚の同定精度向上に向けた基礎データと知見を得た。 アルゴリズムの開発では、昨年度開発した階層的同定アルゴリズムをセンサに搭載し、その性能を評価した結果、雪厚・雪質の同定精度が格段に向上し、参考目標値をクリアした。加えて、実験データおよび同定結果を分析し、特徴量と階層的同定アルゴリズムの改善策を提案した。
知的財産権 取得状況	特許出願 1 件 “情報処理システム,情報処理装置,情報処理方法,及びプログラム” , 特願 2019-215755, 2019.11.28
研究成果発表実績	論文発表：国内 0 件、海外 1 件 口頭発表：国内 7 件、海外 2 件 その他：展示：駅と空港の設備機器展, 2019.4.17～19

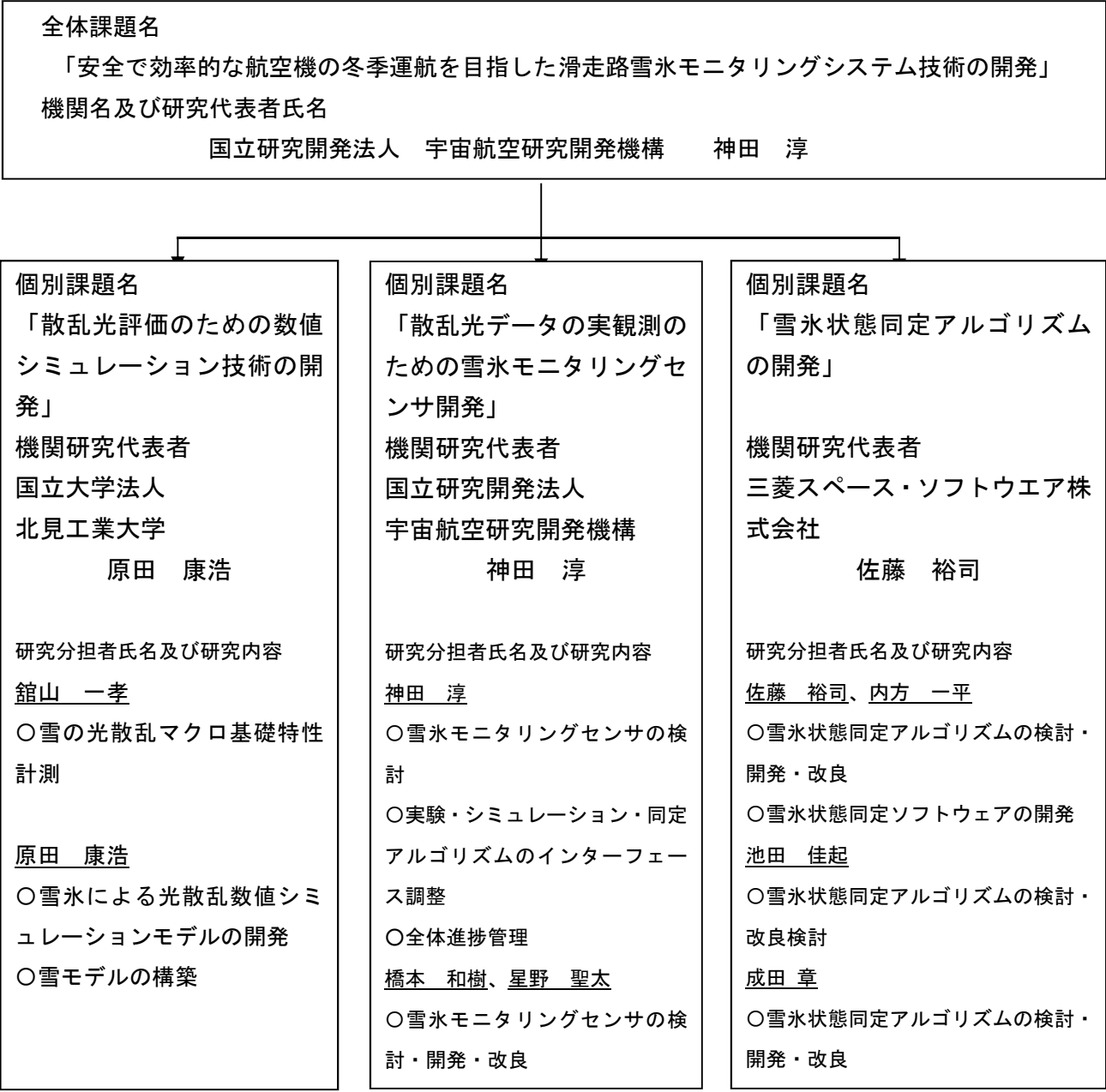
研究開発の目的と実施体制

研究開発の目的

基本概念設計をベースに、AI・光センサの先進的な技術を融合した雪氷状態同定技術を確立することを目的とする。この雪氷状態同定技術は、光センサ計測データを航空行政・エアラインが必要としている雪氷状態（雪質・雪厚）の情報に変換するための技術である。既に試作を行ったセンサのハードウェアとともに滑走路雪氷のリアルタイムモニタリングシステムの要となるものである。

研究実施体制

本研究は、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構を総括研究機関とし、国立大学法人北見工業大学、株式会社三菱スペース・ソフトウェアと共同して実施した。担当機関の研究実施の流れを示すチャートは以下の通りである。



研究開発成果 （本ページ以降5ページ前後で記載。）

1. 序論

特殊気象は航空機運航の安全性や効率性を大きく低下させる要因であるが、昨今の新千歳空港における大規模な遅延・欠航、オーバーラン事故が示すように、滑走路における雪氷の問題は非常に大きい。滑走路の雪氷によるオーバーランやスタックなどの事故は絶対数は多くないものの国内でときどき発生している。さらにエアラインの情報によれば年間数千便の遅延・欠航が国内で発生しており、天候による遅延・欠航全体の中でもかなりの部分を占めていると考えられる。雪氷滑走路においてオーバーラン・スタック事故が発生する要因としては、滑走路面の滑りやすさの状況が正確に把握できていないことが挙げられる。一方で、滑走路面の滑りやすさの状況を正確に把握できないが故に、安全余裕を持たせることで運航効率の低下（遅延・欠航）に繋がっている。

雪氷滑走路に対し航空機の事故を防止しながら運航効率を向上させるためには、滑走路面の滑りやすさを求めるために、滑走路面の雪氷状態をリアルタイムかつ高精度に把握するモニタリングシステムの開発が課題となる。

本研究は、基本概念設計をベースに、AI・光センサの先進的な技術を融合した雪氷状態同定技術を確立することを目的とする。この雪氷状態同定技術は、光センサ計測データを航空行政・エアラインが必要としている雪氷状態（雪質・雪厚）の情報に変換するための技術である。既に試作を行ったセンサのハードウェアとともに滑走路雪氷のリアルタイムモニタリングシステムの要となるもので、本研究で同定技術の確立ができれば、実用化のフェーズに進むことが可能となる。雪氷状態の同定を実現するため、数値シミュレーションにより雪氷内散乱光の重要特徴量（光散乱面積や分散、輝度勾配等）を選定するとともに散乱光の実観測データをその特徴量に変換し、構築したアルゴリズムに基づいて機械学習を行う。広帯域波長の観測データも使えるようセンサおよびアルゴリズムの改良を行うことで高精度な同定を実現する。研究のフロー（図1.1）に示すように、研究を大きくa)～c)の3つの要素技術で構成し、並行して進める。

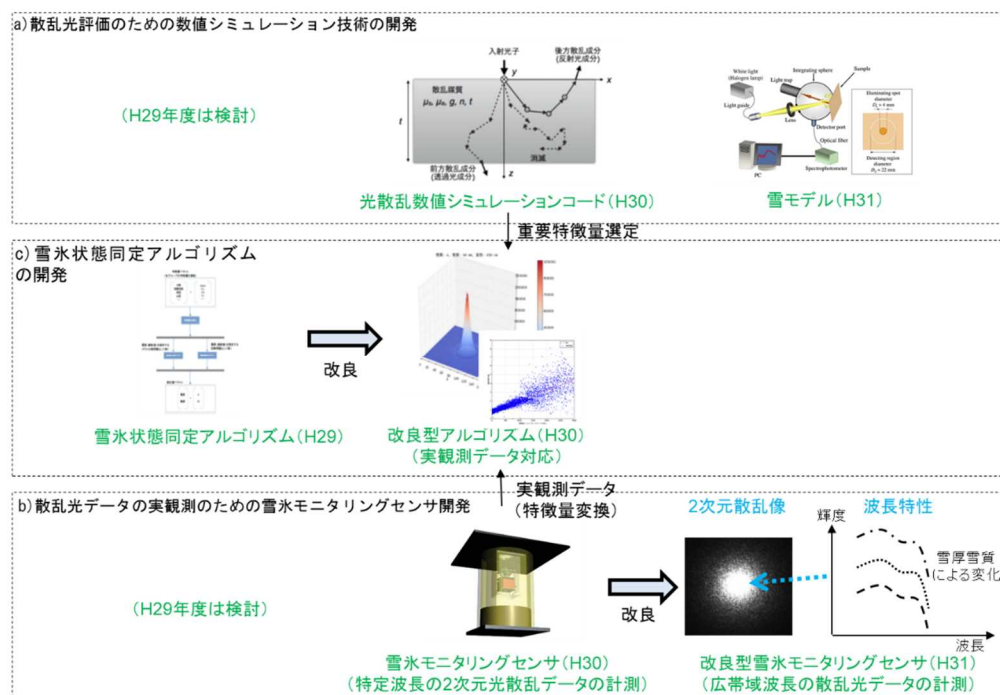


図 1.1 研究のフロー

2. 散乱光評価のための数値シミュレーション技術の開発

積雪の重量密度測定、近赤外反射強度測定による光学的粒径の決定、および Mie 散乱計算を経て得た光散乱マクロ基礎特性を用いて数値シミュレーションを行い、実測値との比較を行った。新雪および圧雪における、数値シミュレーションと実測値の比較を図 2.1 に示す。その結果、積雪の雪厚・密度・照射光波長の違いによる実測結果の依存性と特徴を再現できていることが分かった。

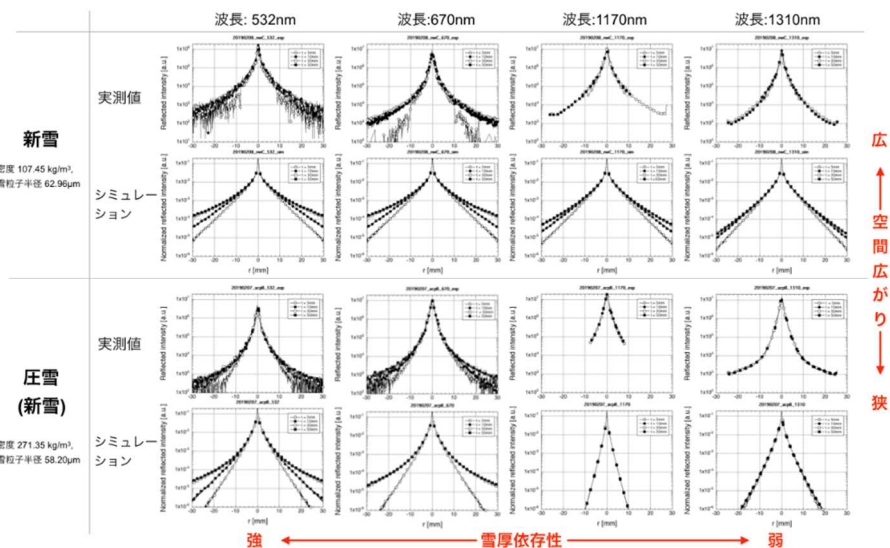


図 2.1 数値シミュレーションと実測値の比較

濡れ雪についても積雪の光散乱モデルを考案し、含水率の変化による光散乱強度変化の特徴を再現できることがわかった (図 2.2)。

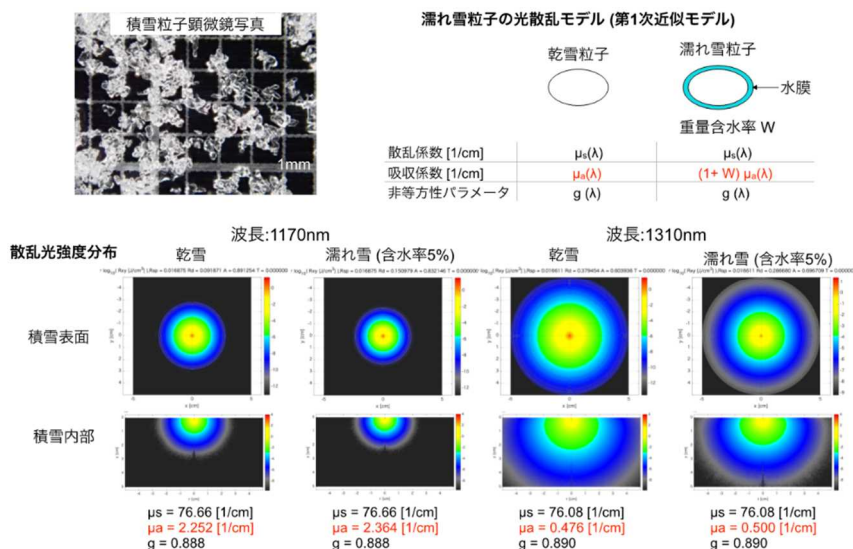


図 2.2 濡れ雪の光散乱モデルと数値シミュレーション例

なお、積雪光散乱マクロ基礎特性（散乱係数、吸収係数、非等方性パラメータ）を Mie 散乱計算を通して得る際に必要な積雪物理量（雪粒子粒径、積雪密度）のうち、粒径は積雪の近赤外反射光を用いた比表面積 SSA (specific surface area) の測定から簡単に同定できるようになった。また、積雪密度については、敏感に変化する波長域と変化の無い波長域とが存在することが分かり、近赤外反射スペクトルの測定のみで積雪密度と比表面積（雪粒子粒径）を決定できる可能性を見出した。

3. 散乱光データの実観測のための雪氷モニタリングセンサ開発

平成30年度開発の雪氷モニタリングセンサを改良し、広帯域近赤外スペクトル取得機能を付加するとともに偏光観測機能を付加し、機能拡張を行った（図3.1）。

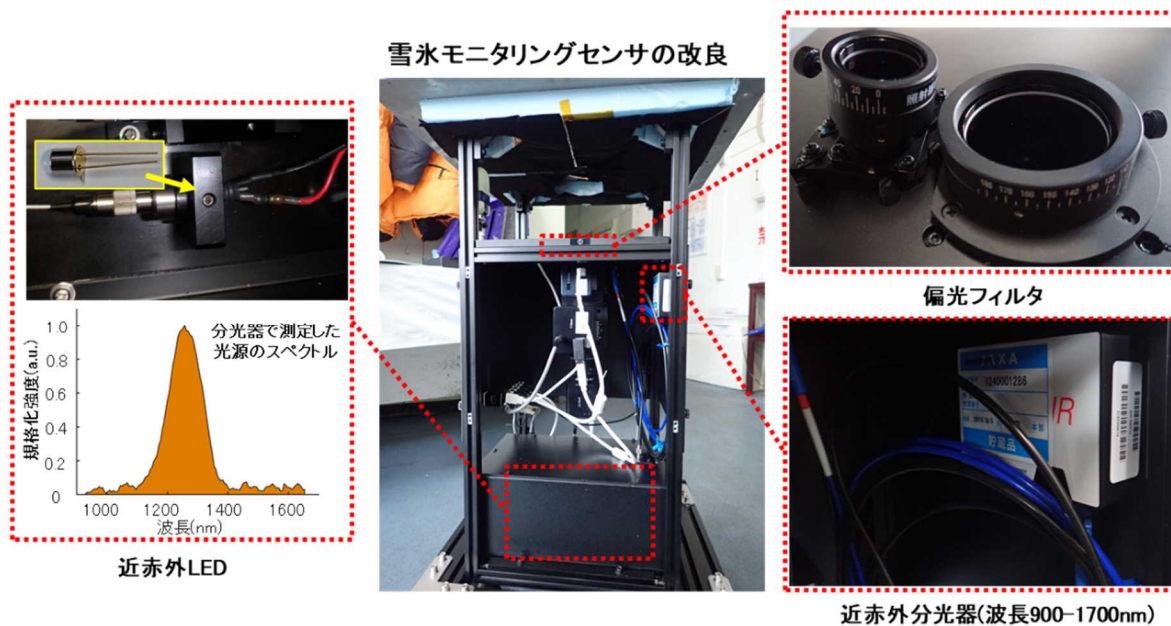


図 3.1 雪氷モニタリングセンサの機能拡張

機能拡張したセンサを用いて雪氷計測を実施した結果、粒径・含水率増加によって近赤外光反射強度が減少することを確認するとともに、2波長の反射光強度比で、粒径に対して変化せず、含水率が影響する特定の波長を見出した（図3.2）。これにより含水率を特定後に粒径変化に敏感な波長のデータを用いることで粒径も推定できる可能性があることがわかった。

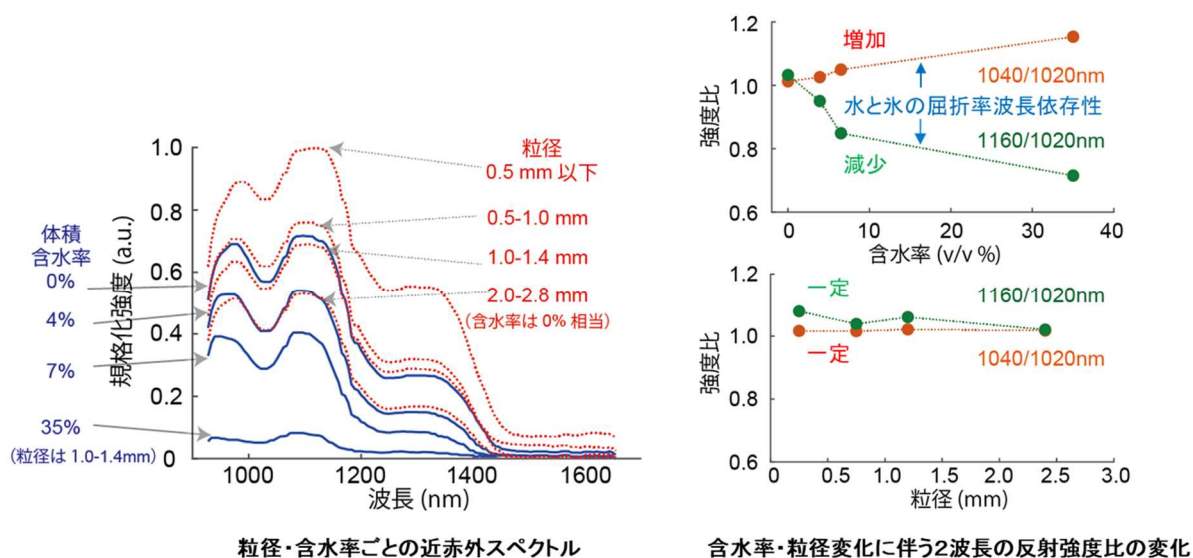


図 3.2 粒径・含水率に対する反射強度特性

4. 雪氷状態同定アルゴリズムの開発

平成 30 年度に改善した雪氷状態同定アルゴリズム（雪質と雪厚を独立に同定するアルゴリズム）を既存の雪氷モニタリングセンサ GLASS-3 (Ground LAsEr Sensor for Snow monitoring 3) へ適用し、精度を評価した。その結果、参考目標値である雪厚誤差 5mm 以下、雪質正解率 80% 以上を達成できた（表 4.1）。

表 4.1 雪氷状態同定の精度

	2017年度 アルゴリズム + GLASS-1	2017年度 アルゴリズム + GLASS-2	2018年度 アルゴリズム + GLASS-3
学習データ数	60	310	827
評価データ数	11	27	200
雪厚 範囲 [mm]	10-100	5-50	5-50
雪厚 平均誤差 [mm]	15.6	7.3	4.5
雪質 種類	3	6	5
雪質 正解率 [%]	82	37	84

これまでのアルゴリズムでは、雪質と雪厚を完全に独立に同定していたが、詳細なデータ分析に基づけば、事前に雪質と雪厚をある程度絞り込んでから、それぞれを詳細に同定することによる精度向上の可能性を確認した（図 4.1）。提案するアルゴリズムを図 4.2 に示す。本アルゴリズムについては今後実験データへの適用を進めていく。

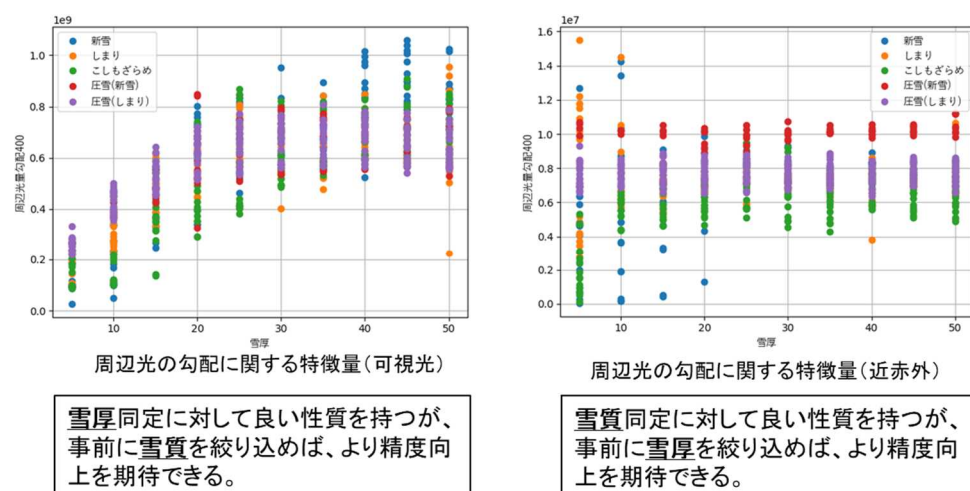


図 4.1 データ分析

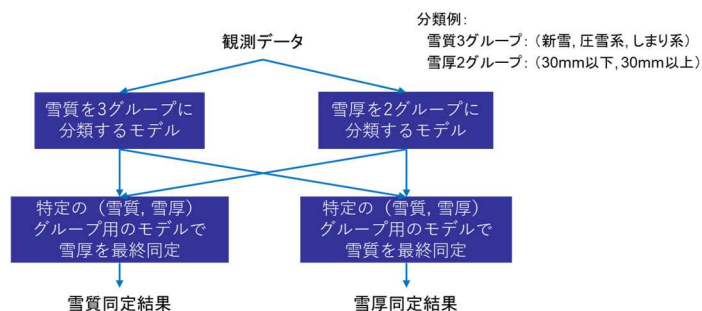


図 4.2 提案するアルゴリズム

5. 結論

散乱光評価のための数値シミュレーション技術の開発、散乱光データの実観測のための雪氷モニタリングセンサ開発、雪氷状態同定アルゴリズムの開発の3課題を実施した。

数値シミュレーション技術では、モンテカルロ法に基づく光散乱の数値シミュレーションコードおよび雪モデルを開発し、雪氷内光散乱の定量的な解析ができるようになった。雪氷モニタリングセンサの開発に関しては、センサの機能改良を行い、細かい雪質の違い（粒径や含水率）の変化を光散乱の変化として捉えられることがわかった。アルゴリズムの開発では、これまでに開発した機械学習アルゴリズムを過去にとった実験データに適用したところ、雪厚の誤差精度 5mm 以下、雪質同定精度 80% 以上を達成できた。また、詳細なデータ分析に基づき、雪質と雪厚を絞り込んでから同定していく新しいアルゴリズムを提案した。これによりさらに精度を高められる可能性を示した。

以上のように、3 課題とも計画通りに実施でき、雪氷モニタリングセンサおよびその周辺技術の構築が完了し、空港実証に移行する準備が整った。

6. 知的財産権取得状況

特許出願 1 件

- ・ 神田 淳, 佐藤 裕司, 内方 一平, 山本 友誉, “情報処理システム, 情報処理装置, 情報処理方法, 及びプログラム”, 特願 2019-215755, 2019. 11. 28

7. 研究成果発表実績

1) 論文発表

国内 0 件、海外 1 件

- [1] Atsushi KANDA, “Outline of WEATHER-EYE Research Program to Protect Aircraft from Weather in Japan”, SSRN Electronic Journal, 2019

2) 口頭発表

国内 7 件、海外 2 件

- [2] 神田 淳, 橋本 和樹, 星野 聖太, “空港用埋設型雪氷モニタリングセンサの開発の最新状況”, 駅と空港の設備機器展, 2019. 4. 17~19 (基調講演)
- [3] 神田 淳, “滑走路の雪氷状態モニタリング技術の開発”, 第 37 回技術士 CPD・技術士業績・研究発表年次大会, 2019. 6. 22 (受賞記念講演)
- [4] 橋本 和樹, “雪氷内含水率および粒径の変化に対する後方光散乱特性”, 雪氷圏変動把握にむけた積雪表面近傍の現象理解に関する研究集会, 2019. 7. 31
- [5] 星野 聖太, “雪氷滑走路モニタリング技術の開発”, 雪氷圏変動把握にむけた積雪表面近傍の現象理解に関する研究集会, 2019. 7. 31
- [6] 神田 淳, “路面埋設型の雪氷モニタリングセンサ”, S-Matching with 国研&ベンチャー, 2019. 8. 5
- [7] Atsushi KANDA, “Outline of WEATHER-EYE Research Program to Protect Aircraft from Weather in Japan”, World Engineers Summit 2019, 2019. 8. 28
- [8] 原田 康浩, 城 佑輔, 星野 聖太, 舘山 一孝, 神田 淳, “積雪の近赤外拡散反射スペクトル測定に及ぼす積雪試料容器と積雪密度の影響”, 第 35 回近赤外フォーラム, 2019. 11. 20.

- [9] Seita HOSHINO Kazuki HASHIMOTO, Kazutaka TATEYAMA, Yasuhiro HARADA, Yuji SATO, Yoshiki IKEDA, Ippei UCHIKATA, Hirokazu OHMAE, Toshiko MIYAKE and Atsushi KANDA, “Snow and ice monitoring technique for the contaminated runway”, AIAA Scitech2020, 2020.1.9
- [10] 神田 淳, “安全で効率的な航空機の冬季運航を目指した滑走路雪氷モニタリングシステム技術の開発”, 第4回交通運輸技術フォーラム, 2020.1.27
- 3) その他 (研究内容報告書、機関誌発表、プレス発表等)
- ・ 展示: “空港用埋設型雪氷モニタリングセンサの開発の最新状況”, 駅と空港の設備機器展, 2019.4.17~19

8. 参考文献

なし

9. 今後の計画について

これまで本研究で開発してきた要素技術をシステム化し、積雪状態をリアルタイムでモニタリング可能な雪氷モニタリングセンサのEM（Engineering Model：空港実証用プロトタイプ）を開発し、空港でEMの機能・性能を実証する。併せて、実用化に向けた、問題点および改良点の抽出も行う。

実証空港は、雪質の異なる日本を代表する2地域（北陸地域、北海道地域）の空港とし、2つのWP（Work Package）で構成し、実施する。

- ・ WP1 機能実証（福井空港を予定）：EM（GLASS5F）を設計、製作し、福井空港に埋設して学習用データを取得する。2年目（2021年度）は雪氷状態同定を行う。
- ・ WP2 総合実証（北海道地域の空港を予定）：EM（GLASS5H、ただしオリジナルはGLASS5Fと同じ）を設計、製作し、北見工大に設置、学習用データを取得する。WP1の福井空港での計測試験を踏まえて、EMの改良を行った後、北海道の空港に埋設して実証する。

現在計画している実証実験のスケジュールを図9.1に示す（なお昨今の状況により、スケジュールの変更の可能性あり）。また空港実証の体制の計画を図9.2に示す。

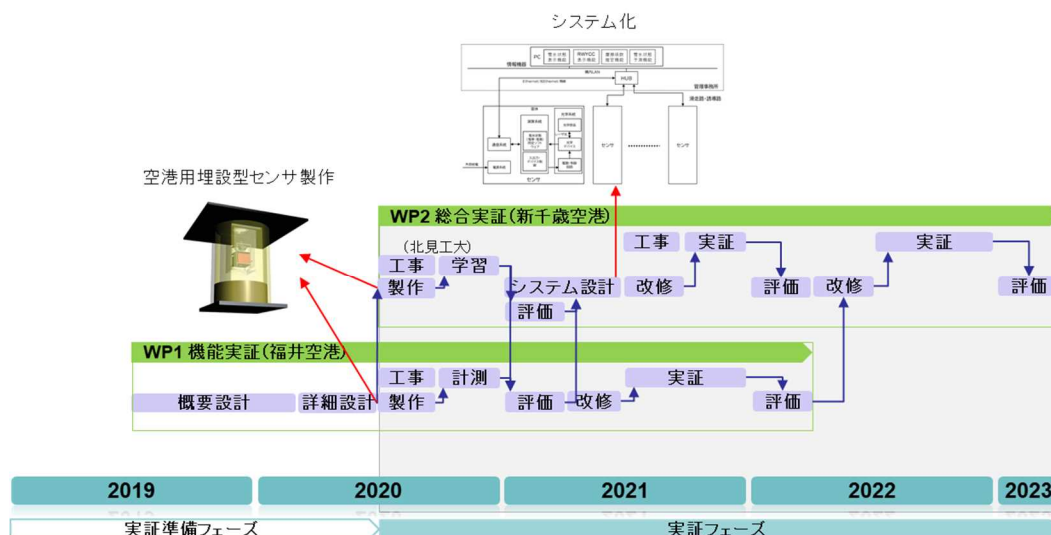


図 9.1 空港での実証スケジュール

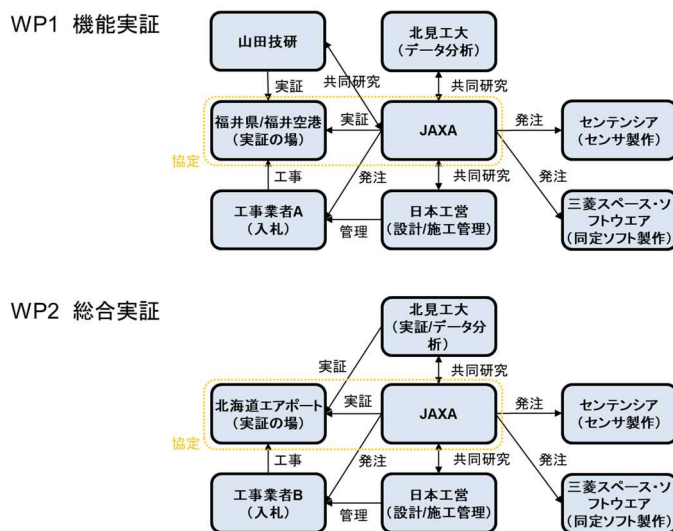


図 9.2 空港実証の体制