寒地空港滑走路において使用可能な埋設型熱量式積雪深センサの開発

中山隆之＊1、山田忠幸＊1、岩橋拓海＊1、藤本明宏＊2、奥田広行＊3

1.はじめに

道路での積雪深の計測は、レーザー距離計、超音波距離計、スケール目視の様に地上から計測するのが一般的である。しかしながら、空港滑走路や誘導路においては、航空機の障害になるため、道路用の積雪深センサを設置する事は出来ない。一方で、航空機の障害にならず、滑走路の積雪を自動で計測するセンサ類の開発は、これまであまりされて来なかった。そこで今回、自社が持つ熱量計測技術を応用して、滑走路で使用可能な埋設型熱量式積雪深センサの実証試験を行った結果を報告する。

2.製品開発の背景

滑走路の積雪情報は、空港の安全管理において極めて重要な情報となる。なぜならば、航空機の着陸距離の推定において、滑走路の積雪深が大きく影響を及ぼす為である。また着陸距離の推定に付随して、ダイバート（目的地変更）、滑走路オーバーラン事故の減少に寄与してくる情報でもある。しかしながら、上記で述べたように空港滑走路や誘導路においては、道路用の積雪深センサを設置する事は出来ず、また航空機の障害にならず自動で滑走路の積雪深を計測するセンサ類は、あまり開発されて来なかった。そのため、実際の積雪情報の把握は、空港管理者によると、パトロール車により滑走路を走行し、積雪状況を目視確認するという方法を取っており、現場としては自動で積雪を計測するセンサ開発を要望する声があるとの事から、自社独自の熱量計測技術を基に、埋設型熱量式積雪深センサの製品開発を開始した。

3. 既存熱量技術の概要

写真1は自社で道路用として製品化した熱量式降雪気象センサ（SDA）である。SDAは、道路脇のポールに設置するセンサで、光軸を使って雪粒子数を検出し、熱盤に積もった雪を融かしながら降雪融解熱量、凍結防止熱量を計測する。この雪を融かす為に使われた熱量から降雪融解熱量を算出、ロードヒーティングには融雪に必要な分のワット数を掛ける省エネ融雪制御を行なう融雪制御機として実績がある。

しかし、SDAは中央の熱盤の周りに降雪感知用光軸センサの突起物が複数有り、航空機の障害となる為、そのまま滑走路内に設置する事は出来ない。そこで積雪を感知する光軸センサは削除し、中央の熱盤のみを滑走路面にフラットに埋め込む仕様で設置する積雪深センサ（写真2）として開発を進める事とした。なお、光軸で行っていた降雪の把握は、熱盤の熱収支計算によって把握する事とした。

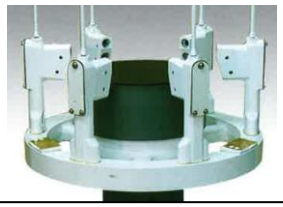

写真１　熱量式降雪気象センサ（SDA）

写真２　埋設型融雪熱盤（試作機）

4. 熱盤構造と設置方法

試作した熱盤の構造図を図1・図2に示す。円筒形の直径約35cmのフランジを筐体とし、内部に高さ5cm間隔に4本の白金測温体を配置、最上部には表面を加熱するヒーターを円状に配置した。熱盤表面は厚さ3mmのアルミ板で熱伝導率を向上させた。また、滑走路に埋設するセンサである事から、熱盤部分に黒色塗装を行い、アスファルト色に近づけ、熱盤内部はコンクリートを充填し、航空機や除雪車両等の輪荷重10t以上に耐える構造とした。設置方法は、滑走路面にフラットに埋め込む仕様で設置する。なお、今回の実証試験は、除雪作業の関係で融雪熱盤の埋め込みは行なわず地上に置いて試験を行った。

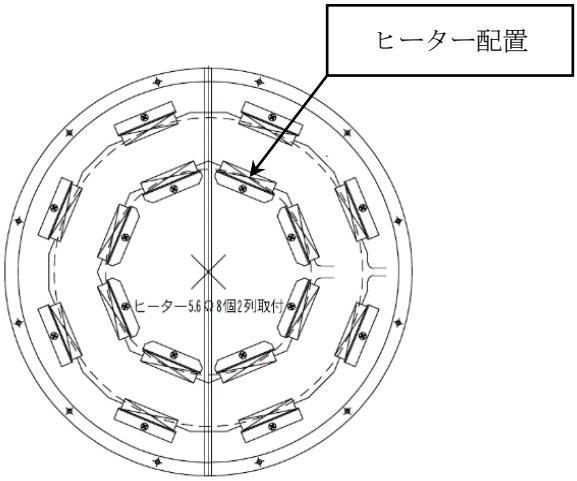

図１　融雪熱盤の構造（上面）

＊１　山田技研株式会社　＊2　福井大学学術研究院工学系部門　＊3　福井県工業技術センター

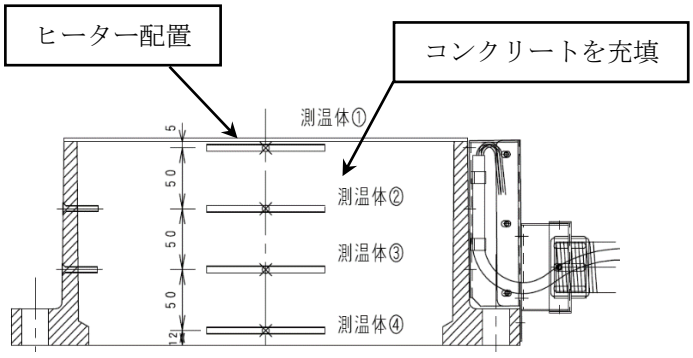

図２　融雪熱盤の構造（側面）

5. 熱盤の熱収支計算及び熱盤の設定について

降雪時の熱盤上における熱収支（W）は、降雪融解熱量（W）であると考え、まずは熱盤上における融解潜熱（W）を求めた。熱盤上において図3の熱収支が発生していると考え、融解潜熱（W）は、ヒーター熱・日射熱・反射熱・上向き長波放射熱（路面放射）・下向き大気放射熱（赤外放射）・風顕熱・蒸発潜熱・降雨降雪顕熱・側面損失熱・地熱伝導熱の９つの熱量値の合計と見なす事が出来るため、９つの熱量値の和を融解潜熱（W）とした。上記の９つの熱量値は、熱盤上の温度、熱盤に加わった熱量の他に、気温（℃）・湿度（%）・毎10分平均風速（m/s）・日射量（MJ/m²）のデータから求める事ができる。この融解潜熱（W）に変換係数を掛け、10分毎の降雪強度（cm/h）を算出し、出てきた降雪強度を累積した値を、積雪深とみなした。なお上記の変換係数だが、下記の融解熱量から換算したものを用いた。

積雪1cmの融解熱量＝333KJ/m²

埋設型融雪熱盤は、熱盤上の温度を任意に設定、その設定温度を保つように制御し、制御する際の熱量値を計測している機器になるが、実証試験の段階では、どの温度設定が適切か不明である。そのため、埋設型融雪熱盤を３個用意し、それぞれ熱盤上の温度を1℃・3℃・5℃に設定し、熱盤上の温度や熱量を計測した。

また上記の３個に加えて、熱盤上の温度設定をしない埋設型融雪熱盤（積雪盤）を1個用意した。理由としては、積雪盤上の積雪深をレーザー距離計で計測し、この積雪深を実態の積雪深と考え、熱収支計算によって求めた積雪深と比較を行えるようにするためである。しかしながら降雪がある時間は、時間経過とともに積雪盤上の積雪深は増えていくため、積雪5cmに達した段階で埋設型融雪熱盤内のヒーターが作動し、自動融雪を行えるような設定を行った。積雪5cmとした理由は、空港管理において滑走路上の積雪が最大でも5cm以上にならないように管理をしているという事から、積雪5cmで自動融雪を行うようにした。すなわち、今回の実証試験では積雪深0cm～5cmの計測を、埋設型融雪熱盤上の熱収支計算から求めるという事である。また、今回用いた熱収支計算では積雪深が減少する要因は加味してないため、積雪盤上の積雪深が0cmになった段階で、計算上の積雪深も0cmとなるように計算を行った。

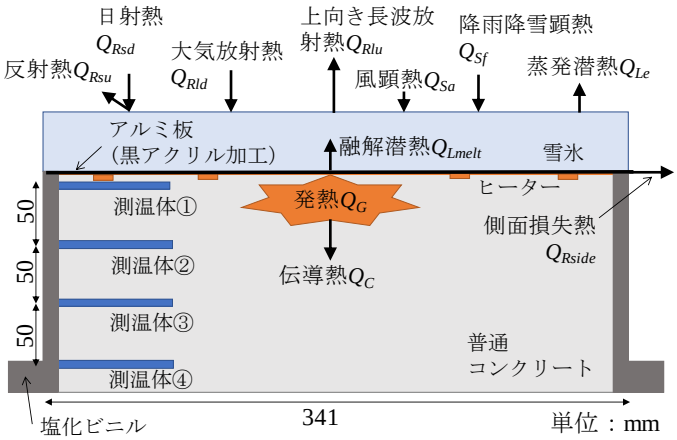

図３　埋設型融雪熱盤における熱収支の様子

6. 実証試験装置の設置状況

今回の実証試験は、福井空港において2021年12月20日～2022年2月28日の期間で行った。写真3より、設定温度1℃・3℃・5℃の埋設型融雪熱盤に加えて、また、Webカメラを設置し、埋設型融雪熱盤及びその周辺の様子を画像データで、確認出来るようにした。

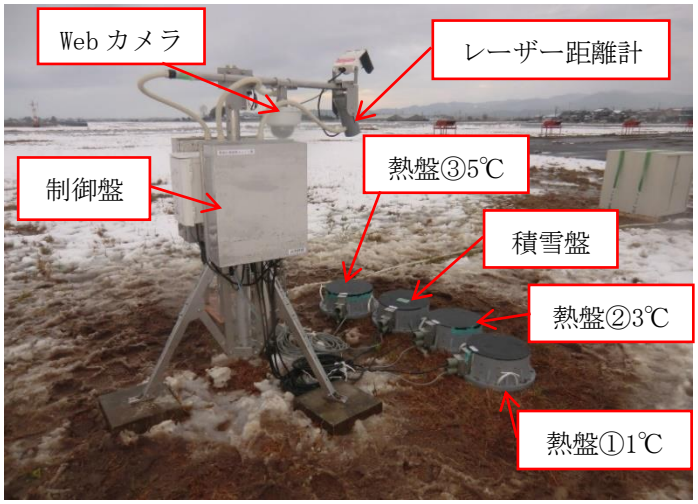

写真３　福井空港において実証試験装置の設置状況

7. 試験結果

図4は、2022年2月16日19:10～17日04:50の埋設型融雪熱盤1℃・3℃・5℃の各熱盤より、熱収支計算によって求めた積雪深と、レーザー距離計で計測した実態値との比較のグラフである。これを見ると、2月16日19:30～23:10

にあった降雪では、埋設型融雪熱盤1℃において行った熱収支計算の結果が、実態値との誤差が最大でも約0.8cmとなっており、最も近似していた事が分かる。また、20:50～23:10にかけてはグラフの線が重なっている事から、実態値と同様の値を、熱収支計算が示していた事も分かる。しかし、2月16日23:20～17日4:50にあった降雪では、埋設型融雪熱盤3℃・5℃において行った熱収支計算の結果が、実態値と誤差約0.5cmで推移しており、特に16日23:30～17日00:20、17日00:50～01:40の時間帯では、埋設型融雪熱盤3℃で行った熱収支計算が実態値と、誤差が最大でも約0.2cmである事が分かる。

よって、図4における事例での熱収支計算を行う上で、最適な埋設型融雪熱盤は、2月16日19:30～23:10の降雪では、埋設型融雪熱盤1℃の熱盤上の計算、2月16日23:20～17日4:50にあった降雪においては、埋設型融雪熱盤3℃・5℃の熱盤上の計算であったと言える。

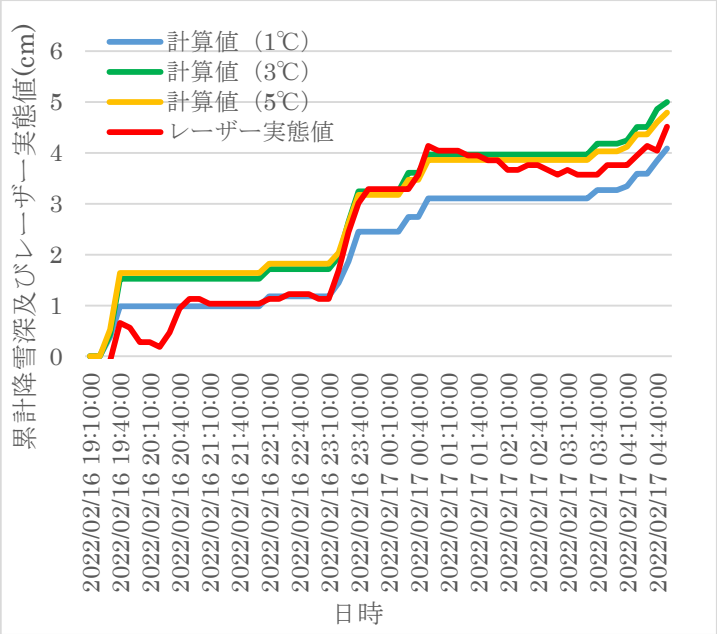

図 4 各埋設型融雪熱盤の熱収支計算値と実態値の比較
(2022 年 2 月 16 日 19:10～17 日 04:50)

次に、図5は図4同様のグラフで、期間が2022年2月21日02:00～10:00のものである。これを見ると、レーザー実態値より02:50・03:50～04:20・04:40に降雪があった事が分かる。そのうち、02:50・03:50～04:20の降雪は各埋設型融雪熱盤においての熱収支計算結果とレーザー実態値との差は、誤差約0.3cmで推移していった事が分かる。一方で、04:40の降雪では各熱収支計算の方でも、積雪深の上昇は示しているものの、実態値ほど上昇する結果では無く、誤差が約0.6cmに開いた様子が分かる。

よって、図5における事例での熱収支計算を行う上で、最適な埋設型融雪熱盤は、埋設型融雪熱盤1℃・3℃・5℃の3種類全ての熱盤上の計算が、最適であったと言える。

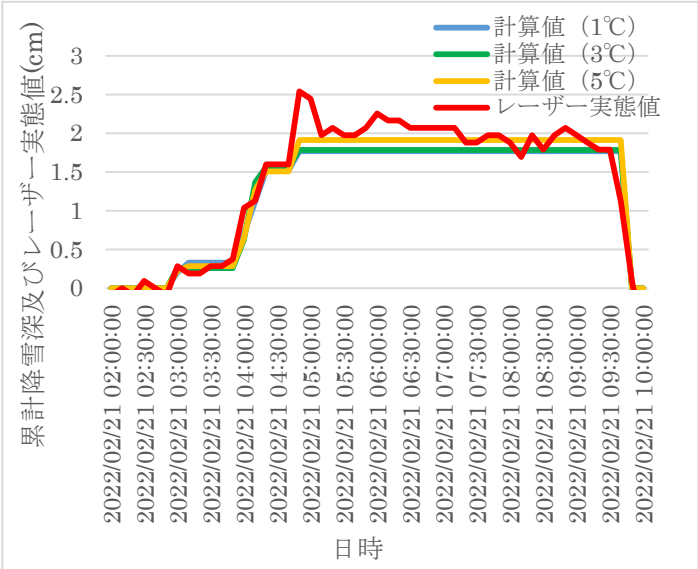

図 5 各埋設型融雪熱盤の熱収支計算値と実態値の比較
(2022 年 2 月 21 日 02:00～10:00)

最後に、図6はこちらも図4同様のグラフで、期間が2022年2月21日22:00～22日03:40のものである。これを見ると、埋設型融雪熱盤3℃において行った熱収支計算が実態値と近似していた事が分かる。特に、21日22:30～22日02:40の間では、誤差最大約0.3cmで推移しているのが分かる。ただ、22日02:40の降雪以降は、差が開き22日03:40では埋設型融雪熱盤3℃における計算値と実態値との誤差は、約1.2cmとなった。

よって、図6における事例での熱収支計算を行う上で、最適な埋設型融雪熱盤は、埋設型融雪熱盤3℃の熱盤上の計算であったと言える。

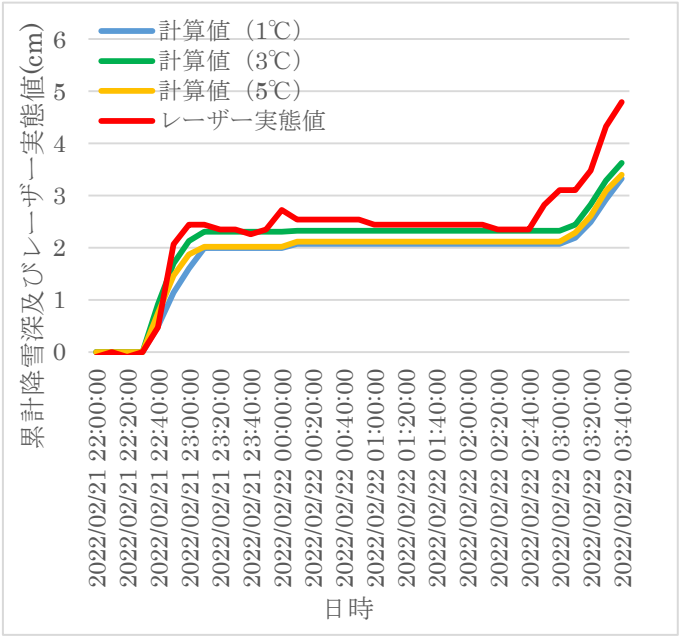

図 6 各埋設型融雪熱盤の熱収支計算値と実態値の比較
(2022 年 2 月 21 日 22:00～22 日 03:40)

8. 今後の課題

このように、埋設型融雪熱盤1℃・3℃・5℃においての熱収支計算によって求めた積雪深と、実態の積雪深とでは誤差1.0cm以内に収まった事例がほとんどであった。中には、実態と同様の結果を得られた事例もあった事から、埋設型融雪熱盤上の熱収支計算から行う積雪深の計測は、十分に実用可能な手法である事が、今回の実証試験から判明した。

しかし、全ての降雪事例に対して実態値と同様な結果を得られた訳ではなく、埋設型融雪熱盤1℃においての熱収支計算が適切な場合もあれば、3℃が適切な場合があるなど降雪事例ごとに、熱収支計算をする上で、適切な熱盤の設定温度が存在した。実用化する上で、今回の様に温度の異なる熱盤を複数個埋設するのは現実的ではないため、気温や風などの気象的要素、埋設型融雪熱盤内のヒーター熱量等の機器的要素など、様々な観点から、熱収支計算をする上での、最適な熱盤の温度設定を突き止めていきたい。そして、将来的には1つの熱盤で適切な温度設定を行い、積雪深を求められるようにしていきたいと考える。

また、図6のように時間経過とともに熱収支計算上の積雪深と、実態の積雪深との間で差が大きくなってしまう事例も見受けられた。これは、実態の積雪深というのは増加もあれば減少もある中で、現在の熱収支計算では積雪深が減る要因は計算に含まれていない事や、少なからず実態の積雪深と誤差があるために、半日以上のスケールになると、誤差が大きくなってしまう事が原因と考えられる。この点は、熱収支計算での積雪深のリセットを行うタイミングを再度、考える必要があると思う。

そして、今回は福井空港においての実証試験であり、北陸地方での比較的湿った雪質を対象に熱収支計算から、積雪深を求めた事になる。現に、図4の事例における平均気温は0.0℃、図5の事例では0.3℃、図6の事例では-0.2℃と降雪している環境としては、比較的温暖な環境下であった。そのため、北海道・東北地方の寒冷地域で、本センサを運用するとなった場合、今回の実証試験と同様の手法では、実態の積雪深との誤差が、本実証試験よりも大きくなってしまう恐れがある。なぜなら、気温低下によるヒーター熱量の増大が予想され、ヒーター熱量の中の降雪融解熱量比が小さくなる為、融解熱量の誤差が大きくなる。また、対象となる雪質も乾いた雪となる等の環境の違いが大きく影響する。そのため、極寒地・寒冷地域で実証試験を行う場合、積雪深変換係数の変更や、寒冷地域における熱盤上の適切な温度設定などが、必要になってくると考える。

製品化への課題としては、本センサは空港管理において極めて重要な積雪深を計測するセンサである。また積雪深はリアルタイムで把握する必要がある情報と考える。そのため、空港管理者に提供するリアルタイムで情報を伝送・閲覧できるようなシステムを開発していく必要がある。また、最終的には滑走路に埋設しての使用を想定しているため、滑走路への現場適用が可能な製品となるように、堅牢化設計を改めて行なう必要がある。

将来、滑走路積雪深センサの製品化した場合、滑走路に設置するイメージ図を図7に示す。

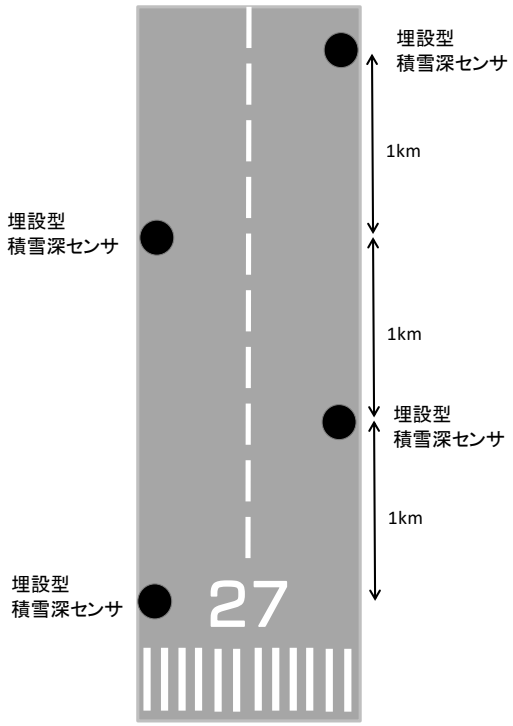

図７　滑走路積雪深センサ設置イメージ

9. おわりに

当社の熱量計測技術を応用した、埋設型熱量式積雪深センサは、北陸地方の湿った雪の環境において、実態の積雪深と大きな誤差の無い結果が得られた。ただ、熱盤温度設定の最適値の見極めが必要と考えている。また北海道・東北地方の寒冷地域の環境において、熱収支計算の有効性が今後の重要課題となっている。その為、今年度（令和4年度）も引き続き福井空港で実証試験を行うと同時に、寒冷地域での検証として、北海道の空港近辺での実証試験の実施を計画している。

以上