

近赤外光吸収画像による水・氷の検知に関する研究（第二報）

堤 大祐, 波 通隆, 堀 武司, 長尾 信一
渡辺 伸央*, 村上 康之*, 磯田 和志*
池上 貴志樹**

Moisture Detection of Road Surface using Infrared Camera (Part II)

Daisuke TSUTSUMI, Michitaka NAMI, Takeshi HORI, Shinichi NAGAO
Nobuhiro WATANABE*, Yasuyuki MURAKAMI*, Kazushi ISODA*
Mashiki IKEGAMI**

抄 録

凍結路面の監視やロードヒーティングの制御には、路面上の水分（水・氷）の有無を検知することが重要である。本研究では路面上の水分を非接触で広範囲に検知するため、近赤外カメラを利用した画像処理による路面水分検知手法を確立するものである。

第一報では、昼夜を通して広範囲に路面上の水分を検知できることを報告した。本報では、水分検知精度をさらに向上させるため、画像処理方法についての検討を行った。その結果、昼夜を通して検知精度の向上を図ることができた。これにより、水分検知装置として、凍結路面監視、ロードヒーティング制御に適用することが可能になった。

1. はじめに

本道ではスタッドレスタイヤの普及に伴い、路面監視やロードヒーティングのための路面水分検知装置の必要性が増大している。

路面監視やロードヒーティングの制御には路面水分、路面温度、外気温などの情報を利用している。これらの情報の中で、凍結路面の監視などの観点から路面水分の分布情報は特に重要である。従来、路面水分の検知は路面に水分センサを埋設し、センサ上の水分の有無を路面水分として検知していた。そのため、検知領域は狭く、必ずしも、路面全体の水分を検知しているとはいえなかった。

本研究では近赤外カメラを用いて路面を撮像し、画像処理を行うことにより、路面上の水分の分布状態を非接触かつ広範囲に検知することを目的とした。

第一報では水分検知に関して以下に示す点に課題を残した。

- 1) 画像周辺部の検知精度が低い。
- 2) 昼夜では、検知精度にばらつきが生じる。

本報では、検知精度を向上するため、屋外試験を通して、画像処理方法を検討した結果、画像周辺部の水分検知、及び、昼夜を通しての水分検知を安定して行うことができたので報告する。

2. 水分検知の原理

水や氷は波長 1400nm ~ 1500nm 付近の近赤外光を吸収する性質がある。この吸収帯をバンドパスフィルタを通して近赤外カメラで撮像すると、水分の有無により画像の輝度に変化する。この輝度の変化より水分を検知することができる。本研究では近赤外領域を含む波長 400nm ~ 1800nm に感度を有する近赤外カメラ（以下カメラ）を使用して、赤外投光器（以下投光器）により赤外光を照射し、波長 1450nm（半値幅 30nm）のバンドパスフィルタを通して、水分の吸収帯のみの反射光を計測する。これによって、水分を非接触で広範囲に検知することができる。

* 北海道電力株式会社, ** 北海道工業技術研究所

3. 水分検知試験

3.1 試験装置

第一報ではカメラを路面に対して斜めに設置したところ、時間帯によっては、太陽光がカメラへ正反射し、水分を検知しにくくなった。そのため、本報では図1のように約160cm×約80cmの試験路面を約150cmの真上からカメラで撮像した。投光器も同様に、カメラに対して正反射しないようにカメラの両側の約160cmの位置にそれぞれ設置し、約45度の角度で撮像領域の中央部を照射した。投光器はスポットタイプ（照射角18度、照射距離50m）を用いた。試験路面は乾燥、湿潤などの路面状況を実現するため、ロードヒーティングによる融雪が可能である。屋外試験風景を図2、カメラ、投光器の設置位置を図3にそれぞれに示す。カメラ、投光器は浜松ホトニクス製を用いた。

画像は試験路面付近に設置した計測室内の画像記録装置で記録した。画像記録装置を図4に示す。

今回使用したカメラには、カメラの周囲の温度によって感度変化する温度依存性が認められた。そのため、カメラの周囲の温度変化を少なくし、安定した画像を得るため、カメラハウジングを断熱材で覆い、冷却ファンとヒータをカメラハウジング内に設置し、カメラの周囲の温度を一定に制御した。

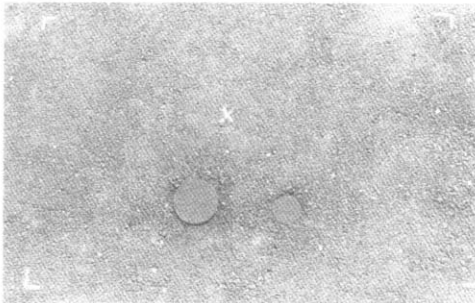


図1 試験路面



図2 屋外試験設備（カメラと投光器）

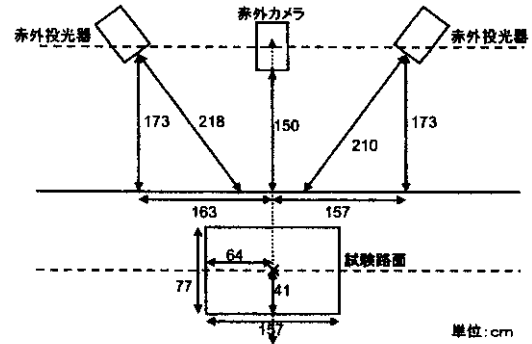


図3 カメラと投光器の設置位置



図4 画像記録装置

3.2 日射補正方法

昼夜を通して水分検知を行うためには昼間における日射の影響を補正する必要がある。そのため、昼間、太陽光の下で、投光器を使用して撮像した投光画像（太陽光+投光器の光による画像）と投光器を使用しない非投光画像（太陽光のみによる画像）を撮像し、これら2枚の画像より日射の影響を補正する。また、遮光した状態で撮像した遮光画像も輝度値を持つため、実際の投光画像、非投光画像はそれぞれ(1)式、(2)式のように入射光の影響分と遮光画像の和で表すことができる。

$$\begin{aligned} \text{投光画像} &= \text{太陽光の影響分} + \text{投光器の影響分} \\ &+ \text{遮光画像} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{非投光画像} &= \text{太陽光の影響分} \\ &+ \text{遮光画像} \end{aligned} \quad (2)$$

よって、太陽光の影響を補正した日射補正画像は(1)、(2)式より(3)式のように求められる。

$$\begin{aligned} \text{日射補正画像} &= \text{投光器の影響分} + \text{遮光画像} \\ &= \text{投光画像} - \text{非投光画像} + \text{遮光画像} \end{aligned} \quad (3)$$

3.3 画像処理方法

水分の検知は水分の有無を検知したい路面を撮像した吸収画像と、あらかじめ同じ路面の乾燥状態を撮像した基準画像

から画像処理によって行う。

画像処理の方法を以下に示す。

- 1) 基準画像を撮像する。
- 2) 投光画像, 非投光画像, 遮光画像を撮像し, 各画像より日射補正を行い, 吸収画像を得る。
- 3) 基準画像と吸収画像の除算により水分検知画像を得る。
- 4) 水分検知画像を2値化して水分分離画像を得る。

基準画像は, 日射の影響がない夜間に撮像した。吸収画像は基準画像と同じ夜間の条件となるように日射補正を行った。

吸収画像と基準画像を用いて(4)式に示す水分検知処理を行い, 水分検知画像を求めた。この処理では水分が分布している部分は白く, 分布していない部分は黒く表示される。

$$\text{水分検知画像} = \text{基準画像} / \text{吸収画像} \quad (4)$$

水分検知画像を特定のしきい値で2値化して, 水分を分離検知する水分分離画像を求め水分を検知した。水分分離画像は水分があると白く表示される。

なお, 第一報では水分検知画像を(5)式のように減算で求め, さらに, 2値化して水分分離画像を求めた。

$$\text{水分検知画像} = \text{基準画像} - \text{吸収画像} \quad (5)$$

本試験では画像の中央部に向けて投光しているため, 周辺部が中央部に比べて照射強度が弱い。よって, 同じ水分があっても, 周辺部と中央部とでは反射強度が変化する。

(5)式は乾燥路面と検知対象路面の反射強度の差を求めている。この反射強度をひとつのしきい値で2値化処理すると, 照射強度の低い画像周辺部の検知精度が低くなるがあった。(4)式は乾燥路面に対する検知対象路面の反射強度の変化の割合, すなわち, 見かけの吸光度を示している。そのため, ひとつのしきい値で2値化処理を行っても, 画像周辺部の検知精度の低下を抑えることができ, 水分検知精度を向上させることができた。

4. 試験結果

4.1 日射補正の結果

補正の結果を図5に示す。図は2月24日撮像したもので, 天候は晴れであった。上段が17時50分, 中段が15時10分, 下段が12時20分に撮像したものであり, 日射量はそれぞれ0W/m², 240W/m², 675W/m²であった。また, 左列より, 日射補正画像, 投光画像, 可視画像である。

投光画像は夜, 夕方, 昼の順に明るくなっている。これは, 日射の影響を受けているためである。一方, 日射補正画像は, 夜, 夕方, 昼ともに, 同程度にみえ, 日射の影響が補正されていることがわかる。

日射補正の誤差を図6に示す。図6(a)は図5上段の日射補正画像から下段の日射補正画像を減じた画像(夜の日射補正画像と昼の日射補正画像の差分), また, 図6(b)は同じく上段の日射補正画像から中段の日射補正画像を減じた画像

(夜の日射補正画像と夕方の日射補正画像の差分)である。図6(a), (b)ともに, 中央部がやや明るく, 周辺部がやや暗くなっている。(b)の輝度の差は±4程度、(a)は±8程度である。これは日射量が大きくなると補正誤差も大きくなることを示している。この原因はカメラのシェーディングの影響と撮像中における日射強度の変化が考えられる。シェーディングは画像中央部に比べて周辺部が暗く撮像される本カメラの性質である。また, 撮像中における日射強度の変化は投光画像と非投光画像を用いて日射補正を行っているが, 2つの画像を撮像している間に, 雲などにより日射量が変化することである。

日射量が大きくなると補正誤差が大きくなる傾向があるが, 路面監視やロードヒーティングの制御用の水分検知装置としては許容できる。

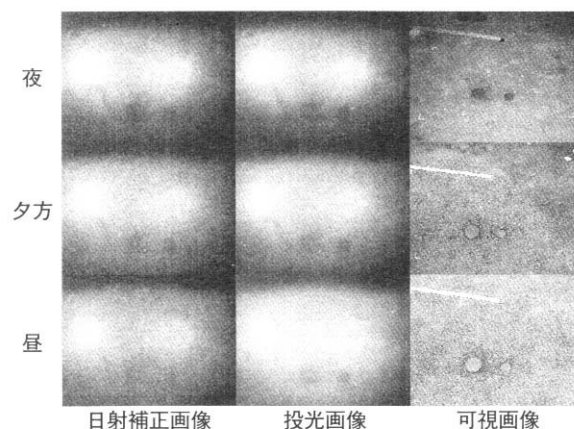


図5 日射補正の結果

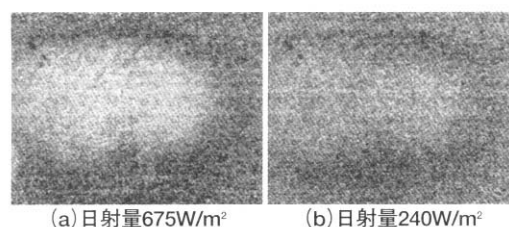


図6 日射補正の誤差

4.2 水分検知試験の結果

路面状態の異なる場合や, 昼, 夜など日射量の異なる場合において試験を行った結果を図7に示す。図では左の列から投光画像, 水分検知画像, 水分分離画像, 可視画像の順に示した。また, 上段から乾燥路面(夜), 乾燥路面(昼), 全面湿潤路面(夜), 全面湿潤路面(昼), 一部湿潤路面(夜), 冠水路路面(夜), 全面凍結路面(夜), 基準画像(乾燥路面:夜)の順に示した。

2値化のしきい値は全面乾燥路面で水分として検知しない値に設定し, 固定した。

以下, 路面の状態ごとに説明する。

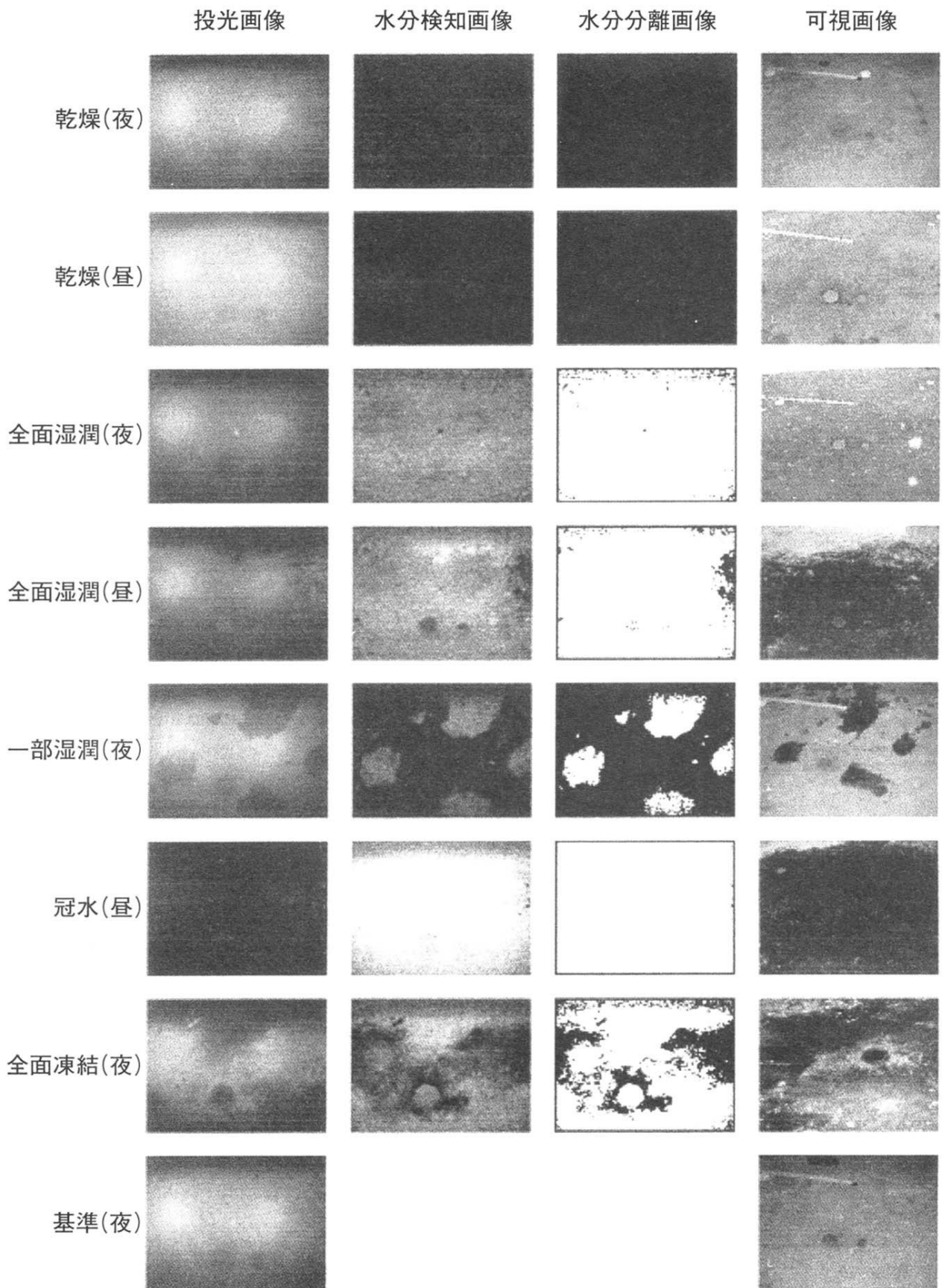


図7 水分検知試験結果

(1) 乾燥路面（夜間）

投光画像は2つの投光器により中央部が明るく、周辺部が暗く撮像された。水分検知画像は乾燥路面なので水分がなく黒く処理された。この水分検知画像を2値化処理することにより水分分離画像を得た。乾燥路面では水分がないので黒く処理された。

(2) 乾燥路面（昼間）

撮像時の日射量は $680\text{W}/\text{m}^2$ であった。投光画像は日射の影響を受けて、夜間の場合よりも全体的に明るくなった。日射を補正した吸収画像と基準画像より求めた水分検知画像は夜間の水分検知画像と比較して、中央部がやや白く処理された。これは図6からわかるように、日射補正の誤差によるものと考えられる。

(3) 全面湿潤（夜間）

水分検知画像では、水分が全面に分布していたため、全体的に白く処理された。水分検知画像を2値化した撮像が水分分離画像である。ほぼ全面が水分として検知できた。

(4) 全面湿潤（昼間）

撮像時は降雪中であり、日射量 $250\text{W}/\text{m}^2$ であった。水分検知画像より、夜間の場合と同様に水分が全面に分布していたため、全体的に白く処理された。水分検知画像を2値化した水分分離画像ではほとんどが水分として検知できた。

日射量が異なっても、良好に水分を検知できた。

(5) 一部湿潤路面（夜間）

投光画像は水分が存在する部分が吸収されて暗く撮像された。水分検知画像では水分が存在する部分が白く処理された。2値化した水分分離画像より、水分の分布が良好に検知できた。

(6) 全面冠水（夜間）

この画像は路面に大量の水を散布し、水たまりのような状態にしたものである。吸収する水分が大量にあるため、投光画像が非常に暗く撮像された。よって、水分検知画像は白く処理され、2値化した水分分離画像も全面が白く、水分として検知できた。

(7) 前面凍結（夜間）

凍結路面の場合、水分分離画像より部分的に黒く表示され、水分として検知できていない部分があった。これは、凍結する状態によって、白っぽく凍結したり、凍結面が投光器の光を反射する方向に凍結したためと考えられる。凍結路面において水分として検知できた部分は全体の約70%であった。

以上のように、路面上の水分（水・氷）を良好に検知することができた。これらの結果より、水分検知装置として、路面監視やロードヒーティングの制御に適用可能となった。

5. 考察

5.1 日射補正

今回行った日射補正には日射強度による誤差が認められた。この誤差はシェーディング補正することによって改善することができると考えられる。その結果、水分の検知精度を向上させることができる。

シェーディング補正の方法は、太陽光などの均一光による照明環境で反射率の様な反射板を真上から撮像し、シェーディングの特性を計測し、投光画像、非投光画像に対して計測した特性の重みづけを画像処理によって補正する。

5.2 カメラの安定性

本試験で用いたカメラの画像はカメラの周囲の温度変化の影響を受けることから、カメラの周囲の温度を一定に制御した。また、遮光状態で撮像した遮光画像の経時変化を計測した。その結果、遮光画像の平均画素値は33～38と安定していた。しかし、同じような条件下で撮像した一部の画像においては、輝度の違いが大きい画像があった。これを図8に示す。図は夜間において、投光器を使用して乾燥路面を撮像した画像である。図は濃度拡張して表示した。(a)乾燥路面1より(b)乾燥路面2の方が明るく撮像された。これは、カメラの感度特性に経時変化による影響があったものと考えられる。

今後は安定した計測を行うため、自動的に校正する校正用ランプをカメラハウジングに内蔵するなどして、長期間安定した計測を行う必要がある。

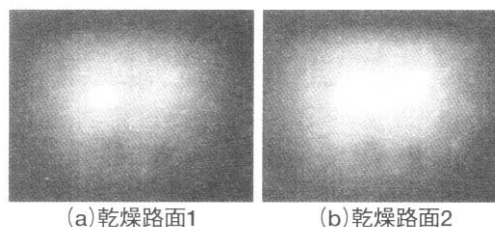


図8 カメラの安定性

5.3 投光方法

路面が冠水したり、凍結したりすると路面が鏡面化する。路面が鏡面化すると投光器の光が路面で正反射して、強い反射光がカメラに入射するため正常な画像を得られなくなる。図9に投光器の光が正反射したときの画像を示す。投光器のバルブが強く反射して白くみえる。このような状態では水分検知は難しい。これを防止するためには、投光器の光が正反射して直接カメラに入射しない角度にカメラと投光器の位置や方向を調整する必要がある。また、太陽光についても同様の対策が必要である。これらにより、検知精度の向上が期待できる。

今回、凍結路面において、一部が鏡面化するなどして水分として検知できなかった部分も、カメラや投光器の位置や方向を調整することにより改善可能と考えられる。

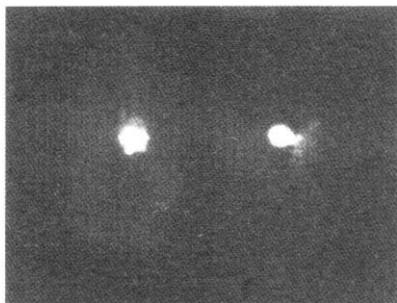


図9 路面が鏡面化し、正反射した場合の近赤外画像

6. おわりに

本報では昼夜における水分検知精度のばらつきを低減し、画像周辺部の検知精度を向上させるため、屋外試験を通して、日射補正方法、および、水分検知処理手法の画像処理に関する検討を行った。日射補正方法は投光画像、非投光画像、遮光画像を加減算することにより行い、水分検知処理手法は吸収画像と基準画像の除算により行った。

屋外試験の結果から、日射補正方法、水分検知処理手法の画像処理方法を検討することにより、昼夜における検知精度のばらつきの低減、および、画像周辺部の検知精度の向上を確認した。これらの結果より、ロードヒーティングの制御に適用可能な精度で水分を検知することが可能になった。

今後は画像の自動収集および自動判定方法、安定した計測を行う自動校正機構やシェーディング補正を考慮して、水分検知装置としてのシステム化を図る予定である。

本研究は「非接触方式による水分検知装置に関する研究」として北海道電力株式会社、北海道工業技術研究所と共同で行ったものである。

参考文献

- 1) 岩元睦夫ほか，“近赤外分光法入門”，幸書房，1994
- 2) 波通隆ほか，“近赤外光吸収画像を用いた路面水分検知に関する研究”，北海道立工業試験場報告，No.296，pp. 159 - 168，1997
- 3) 堤大祐ほか，“近赤外光吸収画像による水・氷の検知に関する研究（第一報）”，北海道立工業試験場報告，No. 297，pp. 131 - 135，1998