

第67回(2023年度) 北海道開発技術研究発表会論文

近赤外スペクトル画像を用いたコンクリート 開水路のモニタリング手法の検討

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 水利基盤チーム ○横地 穰
石神 暁郎
北海道開発局 農業水産部 農業設計課 長島 繁男

農業水利施設の効率的な診断手法として、面的な情報を得ることが可能な画像診断が提案されている。筆者らは近赤外域の画像を取得可能なハイパースペクトルカメラを使用し、コンクリート開水路をモニタリングする手法を検討した。現場のコンクリート開水路の側壁表面やコンクリート平板の撮影を行い、解析を行った結果、近赤外スペクトル画像を用いることで含水状態等の目視では検出できない情報を取得できることが明らかになった。

キーワード：開水路、凍害、ハイパースペクトルカメラ、水分

1. はじめに

「食料・農業・農村基本計画」や「土地改良長期計画」では、農業水利施設の戦略的な保全管理の重要性が指摘されている。農業水利施設においては、標準耐用年数を超過して供用されるものが増加しており、その適正な維持管理は課題となっている。近年、施設の維持管理を担う専門技術者は、高齢化が進むとともに、減少する傾向にあり、限られた人的資源で施設の点検作業を的確に実施していくためには、維持管理作業を省力化・効率化する技術の導入が望まれている。

こうした政策目標の達成に向けて農林水産省の「農業農村整備に関する技術開発計画」では、農業水利施設の維持管理の省力化技術としてデジタル技術の活用が掲げられている。広域に広がる農業水利施設の効率的な診断手法としては、面的な情報を得ることが可能な画像診断の有用性が示されており、特に、開水路を対象とした UAV 等を用いて撮影した画像を用いた点検に関する技術開発が重点的に行われている¹⁾。現在、取り組まれている画像診断手法は、可視画像 (RGB 画像) を用いることで、現地での目視点検を代替するものであるが、近赤外や赤外など可視領域以外の波長帯の画像を用いることで、目視や可視画像では得られない情報を得られる可能性があり、劣化のリスクの高い箇所²⁾の早期発見が期待できる。

そこで、筆者らは、近赤外領域の光を波長数 nm に区切って撮影できるハイパースペクトルカメラを用いて、スペクトル画像 (以下、「NIR 画像」という) を取得し、NIR 画像からコンクリート開水路の含水状態等の目視で

は検出できない情報の取得を試みた。本稿では、凍害などのコンクリートの劣化を支配する重要な因子である水分のモニタリングに対する NIR 画像の適用性の検討について詳細に取り扱う。また、無機系被覆材で補修されたコンクリート開水路に見られるひび割れなどの変状を NIR 画像で捉えた結果を報告する。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

コンクリートは多孔質であり、内部の空隙に水分を保持する。コンクリートの含水状態は、凍害、中性化、塩害、アルカリシリカ反応など種々の劣化現象に関与する。コンクリート標準仕方書【維持管理編】では、凍害や中性化などに起因する性能低下が生じる可能性のある構造物の点検項目として、降雨や一時的な水の作用といった水掛かりの確認が挙げられており²⁾、コンクリート中の水分の把握は構造物の維持管理において重要となっている。農業用コンクリート開水路はその性質上、水に触れる機会が多く、その維持管理や劣化予測を行う上で含水状態が有用な情報となる可能性が高い。特に、寒冷地で生じるコンクリートの凍害劣化に関しては、降水や融雪水などによって水分が供給され湿潤しやすい箇所³⁾で、凍害による変状が生じやすくなるとされており、含水状態は劣化を支配する重要な要素となっている³⁾。凍害劣化による変状が見られるコンクリート開水路側壁における湿潤状態の例を示す (写真-1)。また、凍害によって生じた微細ひび割れに水分が保持されやすくなるとされており³⁾、水分量の把握は、凍害劣化の評価において有用な指標となりうる⁴⁾。

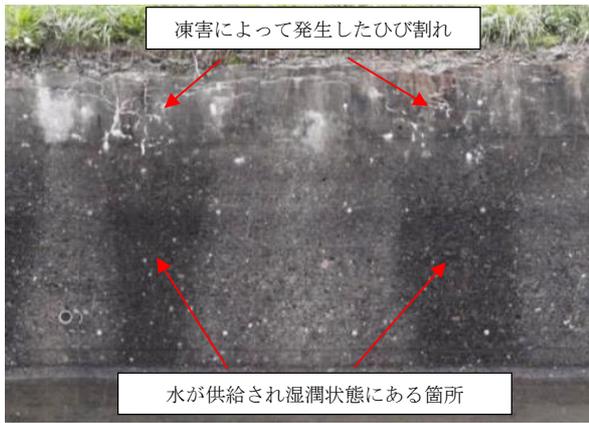


写真-1 凍害劣化による変状が見られるコンクリート開水路側壁における湿潤状態の例

広範囲に広がる水利施設の効率的な状態の監視のためには、非破壊・非接触で空間的に情報を取得する技術が求められる。非破壊・非接触でコンクリートの物性を推定する手法として、近赤外分光法の利用が検討されている^{7,8)}。水は、近赤外領域の複数の波長帯の光を強く吸収する特性を有するため、この領域の光を利用する計測が有効である可能性が高い。実際、コンクリートの水分に関しては、波長1,443nmと1,365nmの近赤外光の吸光度の差がセメントペーストの含水率と線形関係にあることが示されている⁹⁾。

しかし、コンクリートの含水状態の推定に対する近赤外分光法の適用事例は、試験のために作製された供試体を対象としたものが多く、市販のコンクリート製品や実際の構造物に対して適用された研究例は少ない。また、対象とする含水率の範囲も広くとられており、現場の供用環境で生じる水分の変動範囲への適用性は検証されていない。さらには、既往の適用事例^{7,8)}では、吸光度や反射率の測定に分光器を用いた局所的な測定となっており、構造物全体の含水状態を把握することはできない。

以上の既往研究とその課題を踏まえて、本研究では近赤外分光法による水分推定手法の現場構造物への適用を目指して、次の3点について既往研究を発展させることを目的とした。(1)試験対象として市販のコンクリート製品と現場のコンクリート開水路を用いる。(2)測定する水分の範囲は、飽和に近い水分状態から乾燥によって変化する範囲とし供用環境下に近い含水状態で試験を行う。(3)反射率や吸光度の計測には、面的な計測が可能な近赤外領域対応のハイパースペクトルカメラで取得したNIR画像を用いる。

本稿では、3章でコンクリート平板を試験対象とした室内試験について、4章でコンクリート開水路を対象とした現地試験について述べる。また、5章では実際の変状への適用事例として、無機系被覆材で補修されたコンクリー

ト開水路側壁に見られるひび割れ等の変状のNIR画像と可視画像との比較を行った結果を報告する。

3. コンクリート平板の含水率の定量

(1) 撮影と試験の方法

NIR画像の撮影には、900~1,700nmの波長範囲の測定が可能なResonon社のハイパースペクトルカメラPikaIRを用いた。本研究で使用したハイパースペクトルカメラの諸元の詳細について、表-1に示す。PikaIRはラインスキャン型のカメラで、320×1画素のセンサで対象物を線状にスキャンし画像を取得する。波長分解能は8.8nmで、上記波長範囲で164波長の反射率のデータを取得することができる。センサ感度やスキャン速度などの撮影条件は、光量などの環境条件などに応じて、カメラの制御ソフトウェアによって自動で設定される。本試験では、日射を遮った室内でハロゲンランプを光源として撮影を行った(図-1)。得られる画像の空間解像度が概ね1mm/画素となるようにカメラと試験対象のコンクリート平板の距離を決定した。反射率の較正は、反射率が既知の標準白色板を用いて行った。

試験対象として、JISA 5371に規定されるコンクリート

表-1 ハイパースペクトルカメラの諸元

型式名	Resonon Pika IR
測定波長範囲	900 - 1,700 nm
波長分解能 (FWHM)	8.8 nm
波長チャンネル数	164
空間分解能 (画素数)	1×320 pixel
最大フレームレート	520 fps
センサ bit 数	14 bit
重量	2.95 kg
寸法	114×270×89 mm

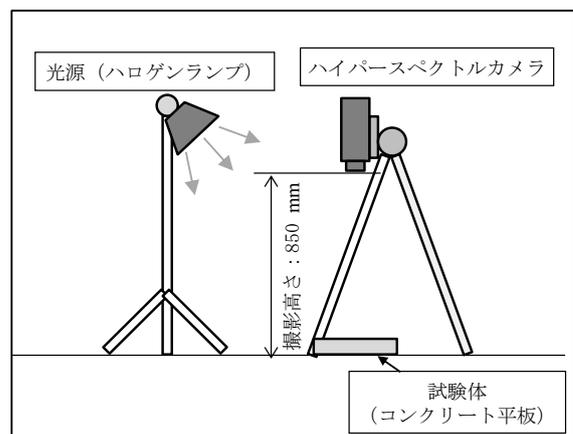


図-1 試験体の撮影条件

平板 (300×300×60 mm) を用いて NIR 画像の撮影を行った。撮影対象のコンクリート平板は撮影の 4 ヶ月前から水中に浸漬し、飽和状態に近い水分を保持するように調整した。気中で自然乾燥させ、30 分から数時間間隔で撮影を行うことで、様々な含水状態にあるコンクリート平板表面 (300×300mm の面) の NIR 画像を取得した。含水率が異なる状態で合計 45 シーンの NIR 画像を撮影した。

撮影時に、質量を測定することによって平板の含水率の管理を行った。3 日間にわたって乾燥させながら撮影を実施した。試験終了後に JISA1476 に準じて 105 °C の乾燥炉で恒量となるまで乾燥し絶乾質量を求め、平板の質量含水率 (以下、「含水率」という) の計算に用いた。

取得した NIR 画像から対象の平板の中央部の 200×200 mm の領域を抽出し、波長ごとにその領域における反射率の平均値を計算した。得られた平均反射率 (164 波長) と含水率の関係を分析した。分析には多変量分析手法である部分的最小二乗回帰 (Partial Least Squares) (以下、「PLS」という) を用いた。PLS は説明変数を互いに無相関になるように線形変換した変数 (潜在変数) を用いて、目的変数を回帰する手法である。説明変数を互いに無相関な変数に変換するため、重回帰分析において説明変数間に相関がある場合に生じる多重共線性の問題を生じない回帰モデルとなっている⁹⁾。本試験においては、波長ごとに得られた 164 の平均反射率を線形変換によって 5 つの変数に縮約し説明変数とし、目的変数である含水率を推定する回帰モデル (以下、モデルという) を作成した。

モデルの精度の検証として、取得したデータを学習データセットと検証用データセットに分割し交差検証を行った。取得した 45 シーンの含水率と NIR 画像のセットのうち、7 割に当たる 31 シーンをモデル作成用の学習データセットとし、残りの 3 割の 14 シーンをモデルの検証データセットとした。

(2) 結果と考察

試験期間の 3 日間の気中乾燥によって、試験対象のコンクリート平板の含水率は 6.5% から 5.6% まで変化した。図-2 に PLS によって作成した、NIR 画像データから含水率を推定するモデルの予測値-実測値プロットを示す。学習データと検証データともに、モデルの精度を示す二乗平均平方根誤差 (RMSE) は 0.03 % 程度、決定係数は 0.98 程度で、過学習のない良好なモデルが得られた。0.1 % 程度の含水率の差を検出できることが示唆された。

モデルにおける各波長の反射率の寄与度を示す回帰係数を見ると、水分子の基準振動に伴う近赤外線吸収帯付近 (970 nm や 1,450 nm) で回帰係数の絶対値が大きかった (図-3)。これらの波長帯の反射率が小さいほど (吸

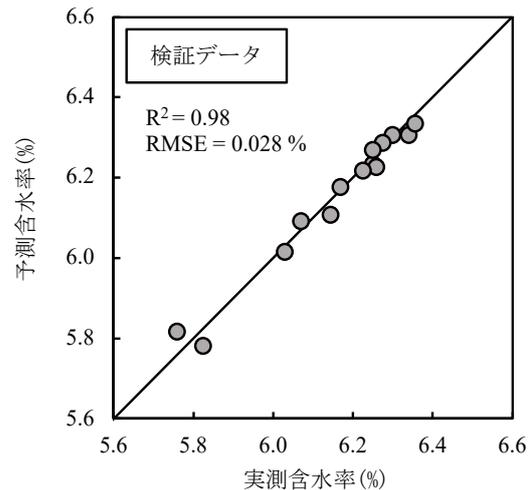
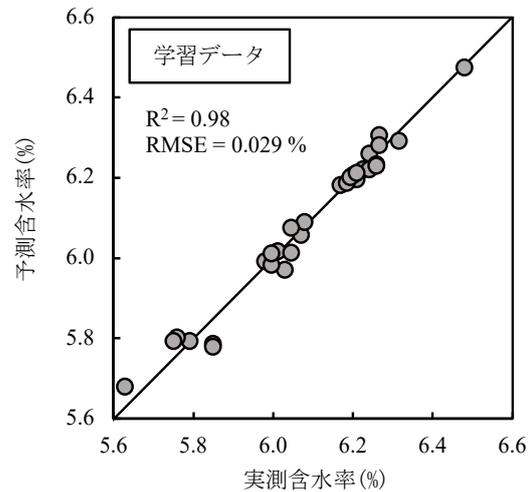


図-2 PLS によって作成した含水率推定モデルの学習データ (上) と検証データ (下) における予測値-実測値プロット

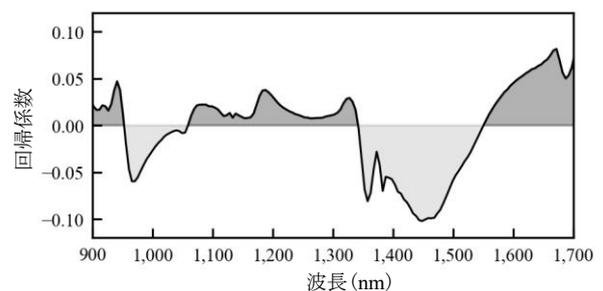


図-3 PLS による含水率推定モデルの回帰係数

収率が大きいほど)、含水率が大きくなると解釈できる。このことから作成したモデルは水分子の光学特性を反映しているものと考えられ、モデルの妥当性は高いと言える。また、これらの波長帯の反射率は、既往研究^{7,8)}においても水分量の推定に用いられていた。

原田・下村⁸⁾による、波長 1,443 nm と 1,365 nm の近赤外

光の吸光度の差を指標とする単回帰モデルでは、飽和に近い領域で含水率の推定が困難になることが示されていたが、本モデルでは飽和に近い水分領域でも精度良く含水率を推定できた。また、原田・下村⁹⁾では0~15%の範囲の含水率で、推定モデルを作成していた。一方で本試験では、PLSを用いることでより狭い水分の変動範囲においても、近赤外領域の反射率データからコンクリートの含水率を推定できることが明らかになった。

4. コンクリート開水路側壁の水分の把握

(1)撮影の方法

現地試験では、北海道内のコンクリート開水路の側壁を対象に、通水が行われていない非灌漑期の10月に撮影を行った。対象とした水路は、北海道の道央に位置する水路で、1979年竣工の国営かんがい排水事業で整備されたものである。水路は現場打ちRCフリーム開水路で、敷幅2.3m、壁高1.4mの南向きの壁面を撮影対象とした。壁面の付着物の影響を避けるため、撮影の1週間前に壁面に付着した泥等を高圧洗浄機（最大吐出圧力7.5MPa）で除去した。

NIR画像の撮影には、室内試験と同様にPika IRを用いた。撮影は太陽光を光源とし、十分に日照がある時間帯に実施した。水路壁面からおおよそ25mの距離で、水路壁面のやや上方から見下ろす配置で撮影を行った（写真-2）。壁面に対して斜め方向からの撮影となるが、セメント系材料の表面では光は均等拡散反射するため¹⁰⁾、撮影の角度によって得られる反射率に違いはないと考えられる。撮影時には、標準白色板を水路壁面と同じ角度で配置し、反射率の較正を行った。得られるNIR画像の空間解像度は、斜め方向からの撮影のため壁面の鉛直方向の位置によって異なるが、概ね3.0~3.2mm/画素となった。

現地試験ではまず、凍害が原因とみられる微細ひび割れが顕在化している区間（以下、「変状部」という）と変状がみられない区間（以下、「健全部」という）を、側壁表面が乾燥している状態で撮影し、比較を行った。次に、ローラー刷毛などを利用して側壁を作為的に濡らす処理を行った条件下（1㎡あたり約300g程度の水を塗布）で撮影を行いデータを取得した。また、撮影時には、汎用のデジタルカメラでも撮影を行い、NIR画像と可視画像を比較した。

本章で示すNIR画像は波長1,312nmの反射率に対する1,447nmの反射率の比（以下、「反射率比」という）をとって作成した画像である。この反射率比は、山川ら⁷⁾や原田・下村⁹⁾が示している含水率と対応する指標で、反射率

比が大きいほど湿潤であると解釈できる。なお、後述する理由から、室内試験で作成した含水率の推定モデルは現地試験では適用できなかったため、反射率比を用いた画像を示す。

(2) 結果と考察

写真-3に、水路壁面にローラー刷毛で水を塗布してから15分後の可視画像（健全部と変状部）とNIR画像（健全部と変状部）を示す。人為的に側壁を濡らした条件での撮影では、NIR画像を用いることで可視画像では捉えられない表面の湿潤状態を捉えることができた。塗布直後から10分間ほどは目視および可視画像で「濡れ色」を確認できたが、15分が経過すると目視および可視画像では「濡れ色」を確認できなくなった。しかし、NIR画像では目視や可視画像で確認できないコンクリート表面の含水状態を把握することができた。

水で濡らした変状部と健全部のNIR画像を比較すると、変状部の方がより反射率比が大きい傾向がみられた。また、健全部の壁面上部では反射率比が低い傾向があるのに対して、変状部では壁面上部でも部分的に反射率比が高い箇所が見られた。（写真-3 (c), (d)）凍害劣化の進行度合いの差に対応する、水分保持特性の違いが可視化されたものと考えられる。現段階では定性的ではあるものの、目視では確認できない水掛かりを、NIR画像を用いることで検出できる可能性が示唆された。

一方で、屋外の現場におけるNIR画像の撮影には、太陽光の特性に起因する課題も見られた。太陽光は大気を通過して地表に到達するため、大気中に存在する気体分子によって、太陽光の一部波長帯は吸収される¹¹⁾。本試験で用いた波長範囲においても、1,000nmや1,400nm付近の光は大気中の水蒸気により吸収されるため¹¹⁾、撮影に十分な光量が得られなかった。これらの波長帯は3章で示した含水率推定モデルで、寄与率が大きい波長帯と一致する。このため、現地試験においては作成したモデルを適用することができず、取得可能な波長帯の反射率を



写真-2 開水路を対象としたNIR画像の撮影風景



(a) 可視画像（健全部）



(b) 可視画像（変状部）



(c) NIR画像（健全部）



(d) NIR画像（変状部）

写真-3 水の塗布から15分が経過した状態の(a)健全部の可視画像、(b)変状部の可視画像、(c)健全部のNIR画像および(d)変状部のNIR画像

用いた定性的な評価にとどまった。今後、太陽光の下でも十分な光量を得られる波長帯のみを用いて推定モデルを作成するなどの対応が求められる。

また、写真-3に見られるように、NIR画像は水分の有無だけではなく、摩耗によって露出した粗骨材なども捉えている。加えて、本試験では、泥などの汚れを除去した後に撮影しているが、一般的な開水路側壁には泥や苔などが付着していることが多く、これらの影響も考慮する必要があることが予想される。このようなノイズとなる要素が多い条件下では、単純な回帰モデルでは評価が困難となる懸念もあり、機械学習などのデータ駆動型モデルの活用も今後期待される。

5. 開水路側壁に見られる変状のNIR画像

本章では、無機系被覆材で補修されたコンクリート開水路の側壁にみられた、ひび割れ等の変状をハイパースペクトルカメラで撮影した事例を示す。併せて、同じ箇所の可視画像も取得し比較を行い、NIR画像を用いることで得られる情報について考察する。

写真-4は無機系被覆材で補修を行った水路側壁に、ひび割れが見られる箇所を撮影した可視画像とNIR画像である。この箇所においては、可視画像でも複数のひび割れを明瞭に捉えることができているが、いずれのひび割れもほぼ同質のものとして描画されている。一方でNIR画像では、より下部に位置するひび割れの方がより明瞭に青色に抵触されていた。これは、ひび割れが保持している水分量の違いに起因するものと考えられ、可視画像では捉えられないひび割れの含水状態の違いを可視化できる可能性が示唆された。また、写真-4左下部にみられるように、可視画像では泥などの付着物でひび割れが不明瞭な箇所においても、NIR画像ではひび割れを通して浸潤する水分の存在によってひび割れを可視化できていた。

写真-5もまた、無機系被覆材に生じたひび割れの可視画像とNIR画像である。可視画像ではひび割れに沿って水が浸潤し、その部分がいずれのひび割れにおいても一様に周囲に比べ暗く描画されていたのに対して、NIR画像では、写真-5(b)で赤丸で囲った部分のように、ひび割れ周辺が暗く描画されるとともに、ひび割れ最近傍では緑色に描画される箇所も見られた。実際にこれらの箇所を目視で観察すると、ひび割れ周辺の被覆材が濡れると



(a) 可視画像

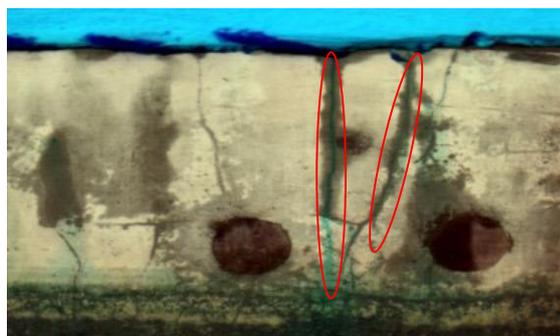


(b) NIR画像

写真-4 無機系被覆材の割れの可視画像と NIR 画像①



(a) 可視画像



(b) NIR画像

写真-5 無機系被覆材の割れの可視画像と NIR 画像②

ともに、ひび割れからの水の浸出が確認された。NIR 画像では、被覆材に保持されている水分と、浸出し被覆材表面を流れる水分を区別できることが示唆された。

以上の事例に見られるように、可視画像では判別の困難な水分量や水の状態の差異を NIR 画像を用いることで捉えることができることが示唆された。

6. まとめ

本稿では、NIR 画像を用いたコンクリートのモニタリング手法に関する試験について述べた。室内試験では、NIR 画像と多変量解析を用いることで、含水率を定量的に捉えられることが示唆された。現地試験では、NIR 画像を用いることで、コンクリート開水路壁面の目視や可視画像では確認できない水分に関する情報を取得できることが示された。NIR 画像を用いることで、従来の画像診断では得られなかった情報を取得することが可能となり、施設の維持管理の高度化につながることを期待される。

謝辞：試験に際し、施設管理者の北海土地改良区及び国土交通省北海道開発局の関係諸氏にご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 農林水産省農村振興局：農業農村整備に関する技術開発計画，(2021)，https://www.maff.go.jp/j/nousin/pdf/R311_gijutukeikaku_zentai.pdf (参照 2023 年 6 月 20 日)。
- 2) 土木学会コンクリート委員会：2022 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，pp.109-110, p.150 (2023)。
- 3) 緒方英彦，金田敏和，石神暁郎，周藤将司：凍結融解作用による開水路側壁の内部変状に対する目視調査および超音波試験の考察，コンクリート工学年次論文集，34(1), pp. 892-897 (2012)。
- 4) 西田真弓，石神暁郎，緒方英彦：寒冷地の開水路における表面保護工法適用に際する一提案，農業農村工学会誌，88(6)，pp.23-26 (2020)。
- 5) 金田尚志，石川幸宏，魚本健人：近赤外分光法のコンクリート調査への応用，コンクリート工学，43(3)，pp. 37-44 (2005)。
- 6) 戸田勝哉，倉田孝男，喜多達夫，魚本健人：ケモメトリックス手法を用いた近赤外領域でのコンクリート診断技術開発，コンクリート工学，45(11)，pp.20-26 (2007)。
- 7) 山川和輝，上田隆雄，郡政人，七澤章：近赤外分光法に夜モルタル表層物性の評価に関する検討，コンクリート工学年次論文集，35(1)，pp. 1801-1806 (2013)。
- 8) 原田健二，下村匠：近赤外線分光法によるコンクリート中の液状水量の推定に及ぼす影響要因の検討，コンクリート工学年次論文集，42(1)，pp.1504-1509 (2020)。
- 9) Kvalheim, Olav M : Interpretation of partial least squares regression models by means of target projection and selectivity ratio plots, Journal of Chemometrics, 24(7-8), pp.496-504 (2010)。
- 10) 中大窪千晶，梅干野晁，浅輪貴史，深澤英之：屋外熱収支シミュレーションにおける建築材料の日射反射指向特性を考慮した放射伝熱系計算モデルの導入，日本建築学会環境系論文集，73(625)，pp.275-282 (2008)。
- 11) 小倉義光：一般気象学第 2 版補訂版，東京大学出版会，pp. 116-120 (2016)。