

# 魚眼カメラによる多段階撮影を用いた全天空観測と 気象衛星による全天空シミュレーション

瀧 雅和

高知工科大学 システム工学群 建築・都市デザイン専攻

リモートセンシング技術を用いた観測では、天空からの光を受けた地表の反射及び放射を計測することで、地表の観測を行っている。そのため、天空の状態を計測することで、地表観測データの補正に用いることができると期待される。本研究ではフィルタを搭載した複数のカメラを用いて露光時間を調整した多段階撮影により、一定のダイナミックレンジに依らない面的な天空の観測を可能にした。これにより得られた天空のデータを参照することによって、静止衛星ひまわりの画像から全天空の雲シミュレーションを作成する手法を開発した。複数種類の雲が衛星画像に写っている場合には、雲の種類ごとに高度を分けて作成することでシミュレーションが可能となっている。天空からの放射は、その時の雲の配置と、直進する太陽光、大気による散乱光により影響を受けるため、太陽光、散乱光についても推定する手法を検討する必要がある。

key words : 画像解析, 全天空画像, 静止衛星ひまわり

## 1 はじめに

UAV や衛星を用いたリモートセンシング技術は、国土の地形や植生の解析に重要な役割を担っている。これらの観測技術は、天空からの放射に照らされた地表面の反射及び放射を計測することで、対象物の観測を行っている。そのため、天空からの放射の情報を得ることで、地表観測データの補正に用いることができると考えられる。天空からの放射は、その地点における太陽と大気、雲の状態に影響を受けるが、2026年現在、国内における詳細な日射放射観測はつくばや福岡などの4地点のみでしか計測されていない。放射量のより詳細な計測を目的とした研究は数多く存在するが、それらは太陽光発電量予測 [1] や植生への影響の把握 [2] を目的としたもので、リモートセンシングへの利用を目的としたものは見られない。また、それらの計測には、地点に降る光子の積分値であるエネルギー量を用いるのが一般的であり、直達光と散乱光の分離を行っていないために、その値をリモートセンシングの補正に使うことはできない。そこで本研究では、魚眼レンズを用いたカメラ撮影により天空の状態を面で計測し、そのデータを用いて、その地点の天空の状態を推定する手法の作成を目的とした。この全天空カメラを用いて天空を撮影するに際して、太陽が青空に比べてピクセル単位で10万倍明るいことにより、従来の撮影方法では、太陽を物理的に隠して撮影を行う手法が一般的である。太陽を隠して撮影する手法は、センサー内における太陽光の拡散の影響を軽減できる利点があるが、装置が大規模になってしまい、周辺の雲のサチュレーション(白飛び)に対応できない。また、太陽自体を観測する手法を別途用意する必要がある。具体的には、魚眼カメラを用いた全天空観測の新たな手法の構築と、全天空

観測をリモートセンシング画像補正のための放射量推定に繋げるため、衛星画像を用いて天空の状態をシミュレーションする手法の構築を目指す。天空画像の撮影の場所は高知工科大学敷地北側の天空が開けた場所を選択した。

## 2 魚眼カメラによる全天空観測

### 2.1 撮影機材の構築

全天空撮影には、カメラモジュールを接続したシングルボードコンピュータを3つ用意し、うち2つのカメラに異なる減光フィルターを取り付けた。それらを筐体に収めたものを三脚に取り付け、任意の地点に固定しての連続撮影を行える環境を構築した [図 2.1]。用意したカメラは、フィルタなしを cam1, ND-2.0 を搭載したものを cam2, ND-4.0 と 0.9 を重ね合わせたものを cam3 とした [表 2.1]。



図 2.1: 撮影風景(左)と3つのカメラ(右)

表 2.1: 使用機材

カメラモジュール	Raspberry Pi High Quality Camera
レンズ	Arducam LN031
コンピュータ	Raspberry Pi 3 Model B
フィルタ	fujifilm 光量調整用フィルター ND-0.9, ND-2.0, ND-4.0

## 2.2 フィルタの校正

搭載したフィルタにおいて、実際の透過率と仕様書の値とで差がみられた。そのため、一様な光を出すことのできる積分球光源を用いてフィルタの実際の透過率を計測し、合成画像作成のための2つの補正係数を作成した。cam1を基準としたcam2,cam3のGバンドにおける透過率の比をフィルタ透過率比,Gバンドを基準としたR,Bバンドの透過率をバンド間透過率比として補正係数とした[表2.2].

## 2.3 撮影の手順

撮影にはPythonを用いて自動撮影プログラムを作成し、露光時間を変更した複数の画像を撮影した[図2.2]. 太陽光を白飛びさせずに撮影するには、最も透過率の低いcam3で1秒以上の露光時間が必要であったため、それを満たせるよう設定した結果,1回の撮影において,cam2では8枚,cam3では7枚の撮影を行う設定にした。用いた露光時間は、最短のものが500 $\mu$ s(1/2,000秒),最長のものが1,550,780 $\mu$ s(約1.5秒)である。

## 2.4 撮影画像の校正

cam2,cam3で得られた $DN_i$ を、作成したフィルタ透過率比、バンド間透過率比、及び撮影時の露光時間を用いてcam1基準での $DN_h$ を算出し、合成画像の作成に利用した[式2.1].

$$DN_h = \frac{DN_i \cdot \text{バンド間透過率比} \cdot \text{露光時間}(\mu s)}{\text{フィルタ透過率比} \cdot 500(\mu s)} \quad (\text{式 2.1})$$

## 2.5 多段階画像合成による合成画像作成手法

DN値の校正を行った計15枚の画像を明るさの順に並び、太陽の位置を基準に画像を平行移動して画像を重ね合わせた。その後、5%以下のDN値を黒潰れ,80%以上のDN値を白飛びとして欠損値に置換する補正を行い、補正後の値の平均値を用いて合成画像を作成した[図2.3]. この手順で作成した合成画像はガンマ補正をせずにダイナミックレンジを大きくした、線形HDR画像になっている。

## 2.6 合成画像と天候, DNの比較

合成した画像を用いて、異なる天空の状態の日におけるDN値を比較してみる[図2.4]. 同じ夏の快晴日で、大気が澄んでいる7/24と、白んでいる8/26で比較してみると、DNの積算値では7/24が3.15 $\times 10^{10}$ ,8/26が2.59 $\times 10^{10}$ と2割程度の差であったのに対し、DNの最大値では7/24が約3億,8/26が約6千万と,5倍ほどの差になり、放射計のみでは得られない面的な情報を得ることができた。観測した日の中で最も高い太陽のDNがおよそ3億であったので、合成画像には少なくとも29bitの数値を扱えるデータ型を用いる必要がある。

表 2.2: 各カメラの透過率比

	フィルタ透過率比	バンド間透過率比 [R,G,B]
cam2	1 / 117	[1.01, 1, 1.09]
cam3	1 / 198519	[1.07, 1, 0.99]

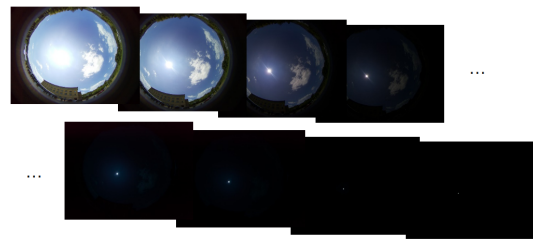


図 2.2: 多段階撮影画像

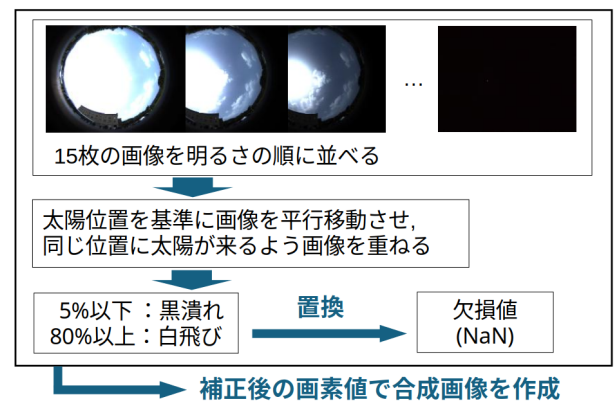


図 2.3: 全天空画像合成手順

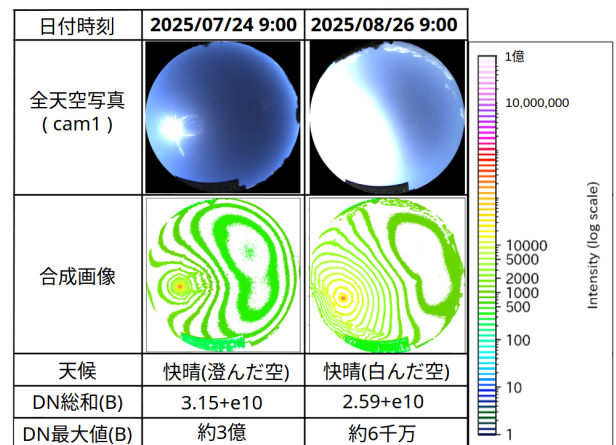


図 2.4: 全天空写真及び作成した合成画像と天候, DNの比較

## 2.7 合成画像と放射計の比較

作成した合成画像より得られた値が天空からの放射を正しく観測できているかを検証するため、撮影地点のそばに設置されている放射量計より得られた値を用いて散布図を作成し、比較した[図3.1]. 散布図には大気の状態の異なる晴れた夏の日の合成画像を用いた。作成した散布図には正の相関の傾向が見られた。一方、散布図にはいくつか回帰直線から外れた値が見られた。図内に1,2で示した外れ値の時刻では、どちらも共に低い位置の積雲がまばらに見られた。この原因は、多段階撮影では1分ほどかけて15

枚の撮影を行うが、放射量計では1分間隔で観測した値の10分間平均を記録する仕様である。これにより、見た目上で動く量の多い、低い位置にある雲の変化による影響を大きく受けての外れ値だと考えられる。

### 3 静止衛星ひまわりを用いた全天空シミュレーション

任意地点における全天空放射の面的な推定には、空の状態を詳細に把握する必要がある。そのため、静止衛星ひまわりのデータを用いてその地点から見える雲の状態をシミュレーションする手法を作成し、検証した。

#### 3.1 使用したデータ

任意の地点、時刻の空の状態を扱うためには高い時間分解能が必要であるため、日本の領域にて2.5分間隔でデータを記録している静止衛星ひまわりを選択した。雲画像作成には、可視光のBGRの波長帯に対応するBand1,2,3のデータを用いた。静止衛星ひまわりのBand1,2,3のデータは、太陽の光源に対する反射率であるalbedoを用いており、[0-1]の値を持っている。それに255をかけ、8bitに正規化した値を用いてRGB可視画像を作成した[図3.2(左)]。雲の判別は、Rの波長帯に対応するBand3にて、雲に比べて海や地表からの反射が少ないことを利用して、Band3における正規化後の値[0-255]の中でしきい値を定め、衛星画像を雲とそれ以外に二値化した画像を用いた[図3.2(右)]。

しきい値には[Band3 > 20]を雲とする値を用いたが、衛星画像内のalbedoは時期により太陽の高さが変化することにより、画像内の明るさが影響を受ける。今回のシミュレーション画像には冬季の画像のみを用いたが、より太陽の高い時期の衛星画像を用いる際には、太陽高さに応じたしきい値を決定する必要がある。

#### 3.2 衛星画像を用いた任意高度の雲シミュレーション作成手法

静止衛星ひまわりは、東経140.7度の赤道上空36,000kmに位置するため、日本を撮影する際には斜めからの視点になる[図3.3]。そのため、雲のように高度があるものは、実際の座標よりも北西に投影される。この視差により起こる投影座標のずれを用いて、衛星画像を雲高度別に魚眼に投影した雲シミュレーション画像を作成した[図3.4]。任意の雲高度を設定することで、視差を考慮した中心点を設定し、そこから雲高度に応じた円形の範囲を等立体角投影することで作成している。

#### 3.3 作成した雲推定の高度推定

全天空魚眼画像で撮影した画像を145のセクタに分類し[図3.5]、それぞれのセクタに雲の有無でラベルをつけたデータを作成し、作成した複数の雲高度画像と照らし合わせて高度を推定した。その後、ラベルが一致するセクタ数を数え、最も一致数の多い高度を雲の高度として検証した。

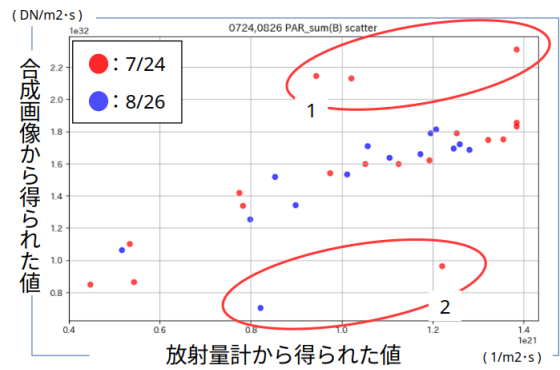


図 3.1: 同時刻における合成画像 DN 値と放射量散布図

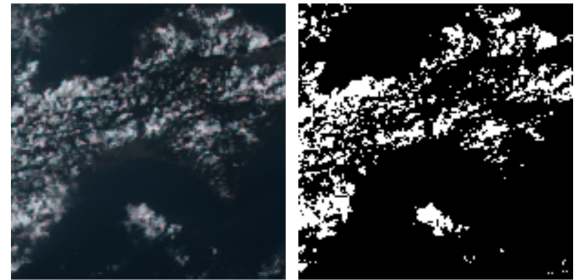


図 3.2: RGB 可視画像 (左) と雲バイナリ変換後画像 (右)

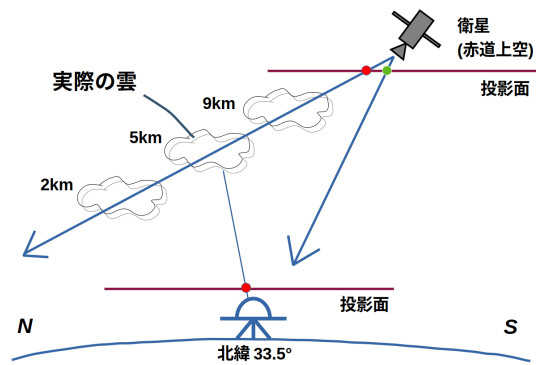


図 3.3: 衛星画像における視差による雲位置のズレ

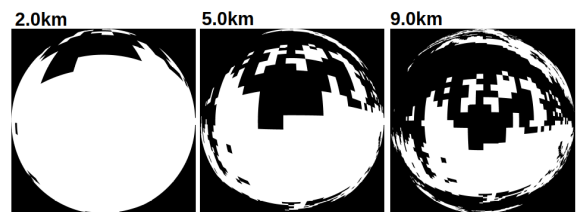


図 3.4: 高度別雲シミュレーション画像

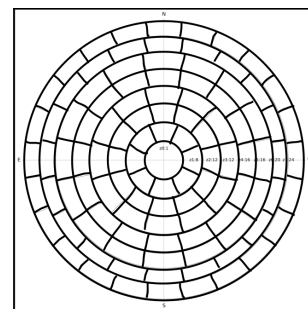


図 3.5: セクタ分類画像

### 3.4 結果

衛星画像にて、地点周辺に写っている雲が1種類の場合に関しては、魚眼画像と近い雲シミュレーション画像が得られた[図3.6(左, 中)]. しかし、付近に高高度の巻雲と低高度の積雲といったように、2種類の雲がある場合はこの方法では高い一致率の雲シミュレーション画像を得ることはできなかった[図3.6(右)][図3.7]. これを解決するために、衛星画像内の雲から薄い雲のピクセルのみを取り出し、その画像を用いてシミュレーションを作成することで、課題の解決を図った. 薄い高高度の雲のしきい値は[ $45 > \text{Band3} > 20$ ]とした[図3.8]. 薄い雲で作成したシミュレーションでは、写り込んでいた積雲が除去されることで、マッチ率の高い画像を得ることができた[図3.9]. ただし、この手法では厚い雲の端が薄い雲として捉えられてしまうため、衛星画像から雲画像を作成する手法には改善の余地がある.

### 4 おわりに

本研究では、まず面的な全天空の観測手法を作成した. 多段階撮影を用いた合成画像では、放射量計との相関が見られ、面的な全天空観測が可能となった. これを用いることで、リモートセンシングにおける画像補正への利用が可能になると考えられるため、作成した合成画像を用いての画像補正が今後の課題である. その後、全天空観測を画像補正のための放射量推定に繋げるための、全天空のシミュレーションを行う手法を検討した. 視差を考慮して、衛星画像を魚眼に投影した画像は、地点から撮影した魚眼画像と近いものが得られたため、衛星画像から雲高度を推定する手法を組み合わせることで、天空放射の推定につなげ、地表観測データの補正への利用が期待できる. 今回はしきい値を定めて衛星画像の雲分類を行ったが、雲分類手法には静止衛星ひまわりのデータから雲分類、雲頂高度を推定したデータである高分解能雲情報[3]があるため、それを用いた手法の検討を進めていく. また、本研究では雲状態に限定しているが、実際の放射量には大気の状態による散乱光、直達光の成分が関わってくるため、それについても検証を重ね、任意の地点における面的な放射量を推定する手法の検討を進めていく.

#### 参考文献

- [1] 川池卓也, 高橋明子, 全天空画像を用いた日射量推定手法における入力画素による推定精度への影響, 日本太陽エネルギー学会講演論文, 2023
- [2] 山下恵, 吉村充則, 全天カメラを用いた空の状態観測手法の開発, 写真測量とリモートセンシング, 2008
- [3] 気象庁, 高分解能雲情報

日付	2025/10/17 11:50	2026/01/10 10:40	2025/11/19 12:20
全天空写真			
雲シミュレーション			
雲高度	9.0km	1.6km	7.0km

図 3.6: 全天空写真と雲シミュレーション画像

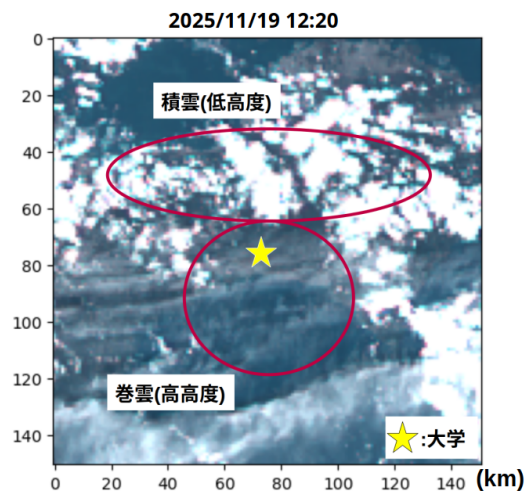


図 3.7: 複数種類の雲が写る輝度補正済み衛星ひまわり画像

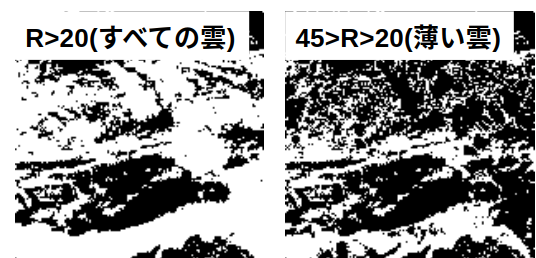


図 3.8: 雲種類を絞ったバイナリ変換後画像

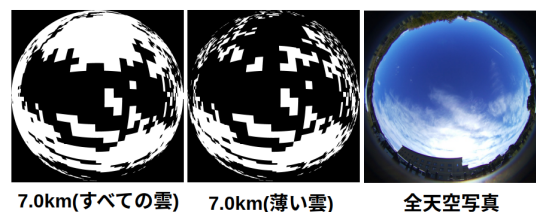


図 3.9: 全天空写真とマッチ率の低かった雲における異なる雲画像を用いた雲シミュレーション