

## 研究プロフィールシート（終了時評価）

研究課題名：全天カメラによる雲の地上観測システムの開発

研究期間：令和2年度～令和3年度

研究費総額：200千円（令和2年度100千円、令和3年度100千円）

研究代表者：工藤玲・気象観測研究部/気象研究所

研究担当者：高野松美・観測課/大阪管区気象台（令和2年度～令和3年度）

山口夢香・観測課/大阪管区気象台（令和3年度）

井本忍・観測課/大阪管区気象台（令和2年度）

河野真也・観測課/大阪管区気象台（令和2年度）

谷沢隼人・観測課/大阪管区気象台（令和2年度）

### 1. 研究の背景・意義 ※現状、問題点、研究の必要性及び緊急性についても記載 （社会的背景・意義）

雲は、地球表面の約60%を覆い、大気放射収支、そして気候変動に最も大きな影響を持つ。地球温暖化問題において、雲は総じて地球を冷やす効果を持つとされている。しかし、雲は、太陽放射を反射すること、地表面からの赤外放射を遮ることで、地球大気を冷やす効果と温める効果の両方を持っており、どちらの効果が勝るかは、雲種や高度、地表面反射等の様々な要素によって決まる。また、雲の時空間変動は複雑で、その全容を観測すること、数値モデルで表現することは困難である。このため、雲は地球温暖化の影響評価、将来予測に不確実性をもたらす大きな要因の一つとなっている。

#### （学術的背景・意義）

雲の大気放射収支への影響評価を高度化するためには、雲の時空間変動をより詳細に把握することが必要である。近年の衛星観測の高解像度化・高頻度化によって、雲の分布をより精密に捉えることが出来るようになったものの、上層雲に阻まれた下層の雲を観測することが出来ない等、限界がある。一方、発展著しい高解像度数値気象モデルにおいても、雲の再現性は十分ではない。これらの問題に対し、雲の三次元的な分布を定量化する地上観測手法を確立することで、大気放射収支に対するより正確な影響評価に加え、衛星観測データや数値気象モデルの出力の検証、さらにそれらを通じて数値気象モデルの雲表現に関するパラメタリゼーションに貢献することが出来る。

#### （気象業務での意義）

近年の衛星観測の進歩に伴い、気象業務における目視観測の重要性は相対的に下がり、目視観測地点は削減された。しかしながら、上述のように衛星観測にも限界があり、現業観測における目視観測の必要性は依然失われてはいない。このため、目視観測を代替、または補間する観測システムが必要である。

### 2. 研究の目的

上記の社会的、学術的、業務的背景の下、気象研究所の D3 課題「衛星・地上放射観測および放射計算・解析技術の開発」では、これまで、屋外で全天の雲画像の連続観測を可能とする全天カメラを開発してきた。本研究では、この全天カメラを用いて、遠隔地における雲の自動観測・解析システムを構築し、雲分布・高度分布を客観的に解析する手法を確立することを目的とする。

### 3. 研究の目標

上記の研究目的を達成するため、次の 3 つの目標を立てて研究を進める。

#### ① 全天カメラを使った雲の地上観測システムの構築

大阪管区気象台の屋上に全天カメラを設置し、定期的な撮影を実施する。データを気象研究所のサーバーに転送し、画像解析によって雲の分布と高度分布を導出する。解析結果の画像を気象研究所のクラウドサーバーを通して公開し、大阪管区気象台の観測業務の担当者が閲覧できるようにする。これら一連の処理を自動化したシステムを構築する。

#### ② 高度別の雲分布の導出方法の開発

全天カメラで撮影した画像の RGB 情報を元に、雲の分布を画素毎に判別するアルゴリズムを開発する。また、短い時間間隔で撮影した 2 枚の画像を、疑似的なステレオ撮影とみなすことで、画素毎に雲の高度を導出するアルゴリズムを開発する。大阪管区気象台で行っている目視観測のデータを用いて、これらのアルゴリズムを検証する。

#### ③ 現業での利用実験

本研究の大阪管区気象台の担当研究者が、現業当番に入った際に、気象研究所のデータ共有用サーバーから逐次公開している画像データを閲覧し、観測の現場でどのように活用できるかを調査する。

### 4. 研究成果

#### (1) 成果の概要

#### ① 全天カメラを使った雲の自動観測システムの構築

本研究の全天カメラは、人間の眼よりも広いダイナミックレンジを有する CMOS センサーを使った産業用の特別なカメラを使用している。広いダイナミックレンジは、太陽直達光も白飛びせずに撮影することを可能にし、全天の様子を正確に記録することが出来るため、気象観測に最適なセンサーである。本研究開始前の令和 2 年 3 月に大阪管区気象台の屋上にカメラを設置し、観測を開始した。大阪管区気象台は合庁にあるため、屋上を利用するには合庁の許可が必要になる。観測を開始するにあたり、大阪管区気象台の主担当者を中心に入念な打ち合わせを行った上で合庁の担当者へ利用申請を行った。全天カメラの観測は、令和 3 年 12 月まで実施し、撤収した。全天カメラは基本的にメンテナンスフリーであるが、長期間放置するとカメラのレンズを保護するガラスドームが汚れる。観測期間中、数か月に 1 度、汚れが目立つようになった時に大阪管区気象台の担当者にガラスドームを拭いてもらった。

全天カメラによる観測データは、雲のデータ解析に用いる生データと、リアルタイム閲覧用の画像データの 2 種類がある。これらのデータを LTE/3G 回線を使っ

て気象研究所のデータ共有用サーバーに逐次転送し、データ解析用サーバーで雲分布等の解析を行う。そして、静止画、動画、解析結果を準リアルタイム（観測から最大 15 分遅れ）でデータ共有用サーバーから公開し、大阪管区気象台から閲覧できるシステムを構築した。当初、生データはデータサイズが大きいため、準リアルタイムで転送・解析することはできないと考えていた。しかし、データを大幅に圧縮することに成功したため、解析も準リアルタイムで実施し、結果を公開することが可能となった。

初年度、コロナ禍でリモートワークが活発になってきた時期に、LTE/3G 回線が混雑する頻度が増えたためか、データ転送エラーが多発するようになった。実際、この時期には、データ通信用プリペイド sim は品切れで入手困難な状態が続いていた。その問題を解決するため、次年度に販売を開始したリモートワークを想定したデータ通信用プリペイド sim を利用することとし、データ通信も安定するようになった。上記の通信混雑期間を除くと、システムは安定に稼働しており、堅牢なシステムを構築することができた。

## ② 高度別の雲分布の導出方法の開発

全天カメラから雲分布を判別、定量化する手法は、大阪管区気象台と気象研で共同開発し、雲の高度分布を導出する手法については気象研が担当する体制で実施した。初年度の前半には、雲解析を行う前の下処理（全天カメラの生データ・画像データの数値の読みこみ、建物等のマスキング、画素毎の天頂角・方位角を決めるための校正、RGB から彩度への変換等）を実施するためのツールを python のライブラリとして開発し、共有した。

雲分布の判別について、初年度には、カメラ RGB 色情報から算出される彩度に対し、閾値を使って判別するアルゴリズムを構築した。閾値は、目視観測との比較によって決めた。概ね良好な結果が得られたものの、太陽周辺や巻雲の判定結果が悪かった。このため、次年度には、短い時間間隔（20 または 30 秒）で撮影された 2 枚の画像から算出される輝度の時間変化を追加し、太陽周辺の雲の変化や巻雲の変化を捉えるアルゴリズムを構築した。アルゴリズムを更新する際に、彩度よりも赤青比の方が扱いやすかったため、赤青比に閾値を与える方針に変えた。具体的には、まず、輝度の時間変化と赤青比から大雑把なシーン（厚い雲、薄い雲、晴天積雲、快晴など）を判別し、その後、シーンに合わせた赤青比の閾値を使って画素毎に雲を判別するアルゴリズムを開発した。

疑似ステレオ撮影による雲高度分布の導出は、次の手順で行った。（1）テンプレートマッチングによって、1 枚目の画像中のある雲が 2 枚目の画像中のどこあるかを判別し、雲の移動ベクトルを算出する。（2）移動ベクトルとカメラの校正によって予め算出している画素毎の方位（天頂角と方位角）から、三角測量によって雲の高さを求める。通常のスレオ撮影の場合、2 台のカメラの距離を物差しとすることで、高さを定量化できる。しかし、疑似ステレオ撮影では、この物差しが得られないため、雲の高さを定性的な指標として得ることになる。（3）雲の高さの指標のヒストグラムを作成し、上層と下層の雲を分ける閾値を客観的な二値化手法で決める。この閾値によって画素毎に上層雲と下層雲を判別する。

雲の分布と高度分布の解析結果を、大阪管区気象台の目視観測データを使って検証した。目視観測データは、大阪管区気象台の担当者が 2 年近くのデータをデ

ータベース化し、扱いやすくしたものを用いた。雲分布については、1800 事例の雲量を検証したところ、目視観測雲量 $\pm 1$  を正解として場合は 75.1%の正解率、目視観測雲量 $\pm 2$  を正解として場合は 82.8%の正解率であった。この結果は、先行研究とほぼ同等か少し良い結果であった。雲の高度分布については、多層雲と単層雲を判別できたかどうかを検証した。644 事例中、正解率は 21%であった。この内、多層雲を多層と判別出来た事例は 4.5%であり、多層雲を判別できた事例は少なかった。

### ③ 現業での利用実験

初年度、本研究の大阪管区気象台の担当研究者が、現業当番に入った際に、気象研究所のデータ共有用サーバーから逐次公開している画像データを閲覧してもらった。通常、目視観測は 3 時間に 1 回行われるが、その間を埋める画像データが手に入ることになる。このような全天カメラ観測の利点が、観測の現場でどのように活用できるかを調査した。次年度は大きく方針を変え、大阪管区気象台の観測課と防災調査課の協力により、大阪管内の気象台を対象に Microsoft Forms を使ったオンラインアンケートを実施し、気象庁内の多様な業務への活用法を調査した。また、近畿地区気象研究会、気象学会関西支部例会での講演等を通して、大学関係者を含めて広く意見をうかがう機会を得た。

以上の調査結果を、現在の全天カメラの業務への活用と、業務で活用するために全天カメラに求める機能の 2 点についてまとめた。現在の全天カメラの業務への活用については、目視観測が無い地点・時間帯の観測（現在天気、雲量・雲形、視程）、航空気象観測、数値予報（天気など）の検証、衛星推計値に移行した観測項目（雲量、日照など）の検証、気象現象（おろし風による笠雲、山岳派による雲列、彩雲、虹など）の観測等が挙げられた。全天カメラに求める機能では、夜間観測、画像を周辺アメダスと連動させた実況監視、高頻度化による積乱雲の発達監視・雷光監視、人の代替観測、目視観測の技術継承、車載による機動観測、観測環境の変化調査、可視以外の波長の撮影による降灰観測、立体視、動画観測、VR 空間の構築とリモート目視観測など、様々な興味深いアイデアをいただいた。全体的に多かった業務対象は、夜間を含めた地上気象観測・航空気象観測の目視観測項目の代替であった。

#### （2）当初計画からの変更点（研究手法の変更点等）

当初は、大阪管区気象台の観測課内に限定して業務活用に関する意見収集を行うことを予定していた。しかし、気象庁内の幅広い業務に対して活用法を調査した方がよいという意見が出た。また、気象庁がリモートワーク環境を導入したことで Microsoft Forms を使えるようになった。このため、大阪管内の気象台を対象としたオンラインアンケート調査を実施した。

#### （3）成果の他の研究への波及状況

本研究の知見を活かし、経常研究 D3 課題の中で昼夜の観測に対応した全天カメラを開発した。現在、この全天カメラを 2 台導入し、昼夜の雲の立体視の技術開発を進

めている。また、開発した全天カメラは、高層気象台、東北大学、環境研にも導入された。今後、輝度観測、光害研究、AIによる雲の解析、EarthCARE 衛星プロダクトの検証等に用いられることを予定している。全天カメラのデータ解析の際には、本研究で開発した画像解析プログラムも使われる予定である。

#### (4) 事前・中間評価の結果の研究への反映状況

(中間評価を実施していないものは事前評価の結果の研究への反映状況)

下記のように事前評価でいただいたご意見を参考にさせていただいた。

- 事前評価：疑似ステレオ撮影について、複数の撮影時間間隔のパターンを考慮。  
反映状況：10 秒、20 秒、30 秒の時間差で 4 枚撮影し、解析の際に複数のパターンを考慮できるようにした。
- 事前評価：夜間観測。疑似観測よりも 2 台のカメラによるステレオ撮影。  
反映状況：本研究内でこれらの意見を直接反映させることは出来なかったが、経常研究 D3 課題の中で、夜間観測にも対応したより安価な全天カメラを開発し、それを 2 台用意した。現在、本研究で開発したプログラムをベースにし、昼夜のステレオ撮影による解析手法の開発を進めている。

#### (5) 今後の課題

- 雲分布の判別に関して、巻雲を晴れと誤判別する例が多かった。この問題は、画素の RGB 色情報、輝度の時間変化だけでは完全には克服できないことが分かった。テクスチャ解析等、ある範囲の面情報を利用することで克服できるかもしれない。
- 雲の高度分布の解析に関して、上下雲をはっきりと区別できるケースは少なかった。疑似ステレオ撮影には限界があることが分かったため、今後は 2 台のカメラを使ったステレオ撮影の開発に切り替えて進めていく。
- アンケート調査の結果、業務活用に向けて複数の要点が判明した。動画や雷光撮影も興味深いですが、まずは、航空気象観測に向けて雲や視程観測に向けた開発を進めたい。

### 5. 自己点検

#### (1) 到達目標に対する達成度

##### ① 全天カメラを使った雲の地上観測システムの構築

目標通り、準リアルタイムで撮影画像と動画を公開するシステムを構築できた。その上、データ圧縮の成功により、当初想定していなかった雲の解析結果も準リアルタイムで公開することが可能となった。このため、想定以上の成果が得られた。

##### ② 高度別の雲分布の導出方法の開発

雲分布の導出に関しては、想定通り、先行研究と同等か少し上の性能を示す結果が得られた。雲の高度分布に関しては、雲の多層構造とらえることが出来なかったケースの方が多く、実用からほど遠い結果であった。元々挑戦的な手法であることは認識しており、事前評価でも難しいとの意見をいただいていた。このため、自己点検とし

ては想定内の結果が得られたといえる。また、ここで開発された解析技術は、2台のカメラによる立体視につながることを想定しており、予定通り技術開発を進めることができた。

### ③ 現業での利用実験

当初、大阪管区気象台の観測課内での調査を想定していたが、大阪管区内の気象台に対する幅広いアンケート調査を実施することができた。これにより、気象庁の広い業務に対する意見をいただくことができた。今後の全天カメラの開発方針を考える上で非常に有用な意見が得られた。このため、想定以上の成果が得られた。

#### (2) 到達目標の設定の妥当性

概ね目標通りかそれ以上の成果が得られたため、到達目標の設定は妥当だったといえる。しかし、コロナ禍のため通常とは異なる業務環境であったこともあり、通常業務と調査研究の両方を進めることになった大阪管区の担当者の負担が大きかった。コロナ禍を想定した目標設定をすることは不可能だが、段階的な目標を明確に設定することは必要であった。

#### (3) 研究の効率性（実施体制、研究手法等）について

研究開始前の年度から、全天カメラの設置、大阪管区と気象研の作業分担、両者の開発環境を踏まえた使用プログラミング言語の選定（python）など、実施体制に関する打合せを重ね、初年度すぐに研究を開始できる体制を整えた。観測データの共有は、大阪管区の行政端末からもアクセス可能な気象研のクラウドサーバーから行うことで、USBメモリなどの行政端末への接続を禁じられている媒体を必要としない体制を整えた。以上により、効率的に研究を進めることができた。しかし、大阪管区の担当者は現業当番に入ることがあり、全員集まってオンライン会議を行うことが難しかったため、打合せはメールや電話などによる個別連絡が主体となった。このため、メンバー全員で情報を共有するという点で不十分さがあった。

#### (4) 成果の施策への活用・学術的意義

本研究で得られた成果は、目視観測を代替できるほどの結果ではなかったものの、目視観測の空白地点と時間帯を補うには十分な成果である。本研究期間中、旧航空気象観測整備運用室から、空港における雲分布の観測に使いたいとの打診があり、女満別空港に設置するところまで計画を立てられたが、コロナ禍による予算の遅れと気象庁の組織改編のため、計画が中止となった。しかし、気象技術開発室より、静止気象衛星の雲量プロダクトの検証のために、カメラ観測の使用を検討したいとの問い合わせがあり、夜間撮影、ステレオ撮影などの今後の開発次第では、様々な気象庁業務への活用が見込まれる。

学術的には、気象庁以外の研究機関が持つ、目視観測ができない多くの観測地点で、目視に準ずる自動観測が可能になることに大きな意義がある。研究代表者の工藤が参加しているスカイラジオメータの国際地上観測網 SKYNET では、雲とエアロゾルのプロダクトが開発されている。全天カメラはこのプロダクトの発展に貢献することが

できる。さらに、研究代表者の工藤は、2023年打ち上げを予定している日欧共同プロジェクトの EarthCARE 衛星、現在進行中のアメリカ、カナダ、フランス、ドイツ、日本が参加する国際衛星プロジェクトに参加しているため、これらの衛星プロダクトの検証に活用することを計画している。これらを通して、本研究の成果をより広い規模で活用することが見込まれる。

#### (5) 総合評価

目標通り、全天カメラによる雲の地上観測システムを構築した。また、アンケート調査などを通して、気象庁内の幅広い業務への活用方法と今後の開発方針を見出すことができた。さらに、近畿地区気象研究会、気象学会関西支部での講演を通して、気象庁内外に本研究の成果を周知することができた。以上により、研究期間が2年であることを考慮すると十分な成果を上げたと考えられる。

### 6. 参考資料

#### 6.1 研究成果リスト

##### (1) 査読論文

なし。

##### (2) 査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説）

なし。

##### (3) 学会等発表

###### ア. 口頭発表

・国際的な会議・学会等

なし。

・国内の会議・学会等（3件）

高野松美、井本忍、河野真也、谷澤隼人、全天カメラによる雲の地上観測システムの開発、令和2年度大阪管区気象研究会、2020年11月24日、大阪管区気象台

工藤玲、全天カメラによる雲のリモートセンシング、令和3年度大阪管区気象台近畿地区気象研究会話題提供、2021年12月17日、オンライン

工藤玲、全天カメラによる雲のリモートセンシング、日本気象学会関西支部第1回例会特別講演、2021年12月18日、オンライン

###### イ. ポスター発表

・国際的な会議・学会等

なし。

・国内の会議・学会等

なし。

#### 6.2 報道・記事

なし。

#### 6.3 その他（4.（3）「成果の他の研究への波及状況」関連）

なし。