

視程観測の自動化と気象観測システムの構築

東京都立立川高等学校 天文気象部

2年 安原拓未 井上晴貴 戸田晃太 3年 新川凌央 牛坂友哉

天文気象部員(観測記録の整理と目視観測)

要旨

視程とは観測場所から識別することのできる距離の程度を表す気象用語で、どの程度見通しがきくかという情報が大气汚染等の指標となる。本校天文気象部は、75年前より主に百葉箱での気象観測(気温・気圧・湿度・風速・湿度・雨量など)や屋上からの視程観測を、部員が毎日2回行ってきた、1995年以降、欠測が増えたため、2007年に自動気象観測装置を導入して視程以外の観測を開始した。

2018年には先輩が過去の視程記録を整理・分析する研究を開始し、20年ぶりに視程の目視観測を再開した。しかし、毎日2回の観測を継続する大変さがあり、視程観測の自動化を目指すことにした。2019年にはRaspberry Piでカメラを制御して自動撮影する装置を開発し、2020年は改良を重ねながら、画像による判定と目視観測との差異を比較し、現在の視程の傾向を分析する研究を行った。また富士山の見え方についても撮影装置を製作し、撮影画像からの分析を開始した。

本研究では、視程観測の更なる自動化を目指して装置やプログラムを改良するとともに、特徴点マッチングや深層学習によって撮影画像から視程を判定する手法を検討した。また、都心方面の視程や富士山の見え方を含む観測データを、様々な方法で可視化し分析した。さらに、視程や気象の観測データをリアルタイムでモニタリングするためのシステムの開発を進めた。

1. はじめに

本校では約75年前から気象観測(8時と15時の気温・湿度・風速・風向、最高気温と最低気温・雨量・視程など)を続けてきた。観測は百葉箱と屋上で1日2回、天文気象部員が交代で土日も欠かさず実施してきたが、1995年以降欠測が増えた。そこで、2007年に本部OBGの協力により自動気象観測装置(Davis VantagePro2)を導入し、視程以外の観測を再開させた(図1)。2017年には、東京大学のLive-E!プロジェクトに参加して新たな自動気象観測装置(Vaisala WXT520)を設置した。この観測装置は1分毎に記録したデータを東京大学のサーバーにアップロードするため、データをWeb上からいつでも見ることができる。

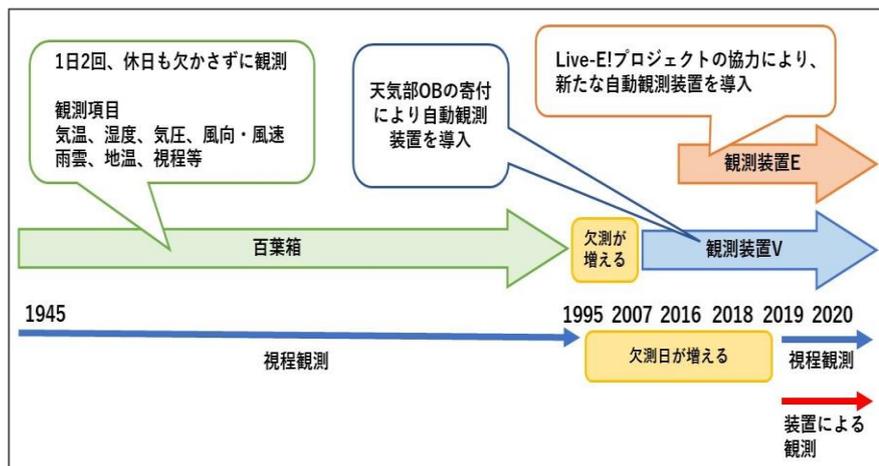


図1 本校の気象観測方法の変化



図2 屋上での目視観測の様子

本校は立川段丘の端にあり、屋上からは東側に 20~30 km先の都心、南から西にかけて多摩丘陵や丹沢山地と富士山、奥多摩の山々が見渡せ、360 度パノラマの眺めが見られる (図 3)。

本校の視程観測は 1990 年代後半に欠測が増え、その後停止していた。2018 年に先輩が過去の記録を整理、分析する研究を開始し、過去の悪視程と大気汚染の関連を明らかにした(田口 2019)。研究の開始と同時に、20 年以上途絶えていた屋上での視程の目視観測を再開させたが、毎日 2 回定時に観測する大変さがあり、欠測が増えた。そこで 2019 年に観測を自動化するアイデアを考え、小型コンピュータ(Raspberry Pi)で制御した一眼レフカメラで撮影する観測装置を製作した(浜島ほか 2019)。2020 年には、遠隔装置でデータを得るプログラムを開発し、コロナ禍による休業期間中も観測を継続した(浜島・安原ほか 2020)。また、観測装置を改良し、さらに詳細な分析を行った。観測の精度を高めるために、視程観測の目標物(図 4)を設定し、オリジナルの階級表を作成した(図 3)。

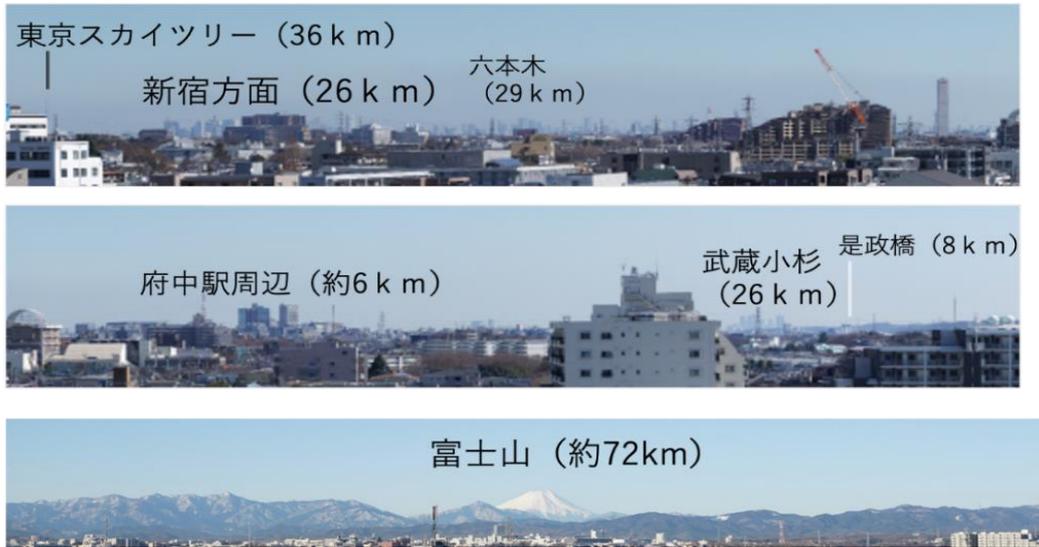


図 3 本校屋上からの眺め

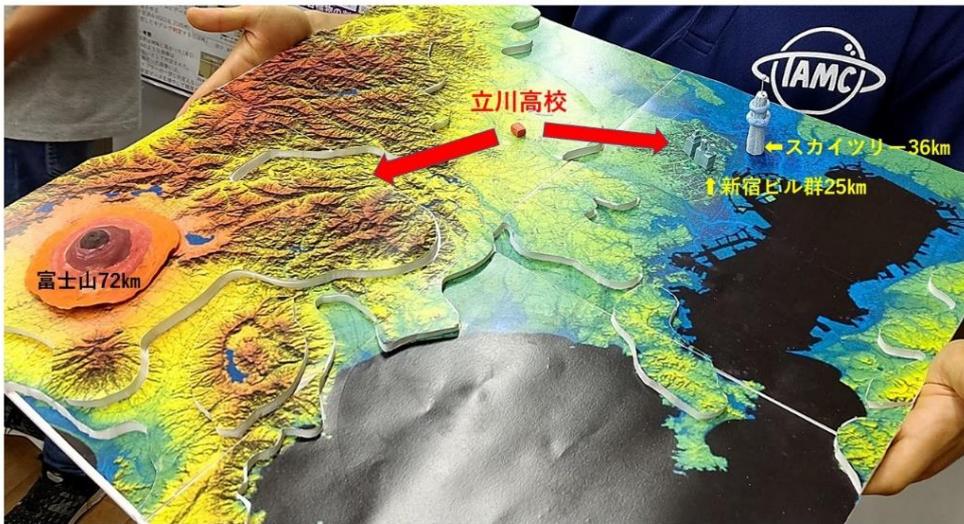


図 4 視程観測の方向を表す模型
(国土地理院デジタル標高地形図を利用して天文気象部員が作成)

表 1 気象庁の指定階級

視程階級	目標物を認めることができる最大距離
0	50m未滿
1	50m以上 200m未滿
2	200m以上 500m未滿
3	500m以上 1 km未滿
4	1 km以上 2 km未滿
5	2 km以上 4 km未滿
6	4 km以上 10km未滿
7	10km以上 20km未滿
8	20km以上 50km未滿
9	50km以上

表 2 本校オリジナルの視程階級表
(浜島・安原ほか 2020)

視程階級	視程距離	番号	目標物
1	0.1km	①	目の前のマンション
2	0.45km	②	YAZAWA Deux Bldg.
3	0.75km	③	立川病院
4	1.0km	④	ラポール西国立
5	3.0km	⑤	一橋大学法人本部棟
6	4.3km	⑥	多摩総合医療センター(府中病院)
6	4.9km	⑦	ライオンズガーデン西国分寺
7	13km	⑧	グレースアタワー三鷹
8	25km	⑨	新宿ビル群
8	36km	⑩	東京スカイツリー

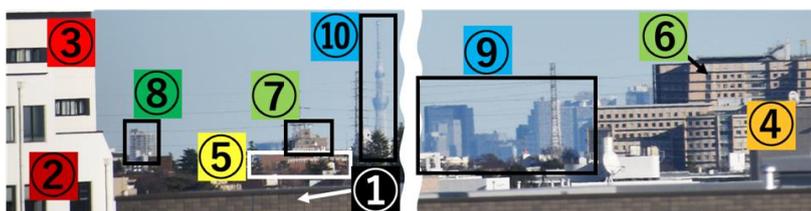


図 5 視程観測で使用する目標物 (浜島・安原ほか 2020)

今回は多くの人に気象観測データを見てもらうために、新たに気象モニタリングシステムの製作を開始した。そこで、Raspberry Pi を用いてNASを自作し、モニタリングが容易に行えるよう観測データをNASからリアルタイムで取得してディスプレイ表示するシステムの開発を試みた。今回は、一般生徒への気象観測データ公開の前段階として、天文気象部部室に設置することを目指した。

本研究では、昨年に引き続き視程の観測を目指した。撮影画像から目標物が見えているかの判定を深層学習や特徴点マッチングにより行う手法を検討し、自動化に向けた試行錯誤を重ねた。また、PythonやExcelを用いて観測データを様々な形で可視化し、都心方向の視程の傾向と、富士山の見え方、気象現象や大気汚染との関連について考察した。

1957年XII月12日 青任者 伊藤武ス
14:00時 記入者 伊藤武ス

視程 空の状況	水銀気圧計	湿度	風向
7=9m 5.9	A	9.5	56.48
天気 0	9.2	56.5	55.3
湿度 0	6	54.6	1.9
富士山 見えない	1006.2	1019.0	1006.2

図6 過去の気象観測記録

観測期間 (2021. 4. 19 ~ 2021. 4. 25) 視程観測記録表 立川高校天文気象部

月/日	曜日	朝		放課後	
		観測時刻	視程	観測時刻	視程
4/19	月	7:00	10	15:07	10
		7:00	36	15:07	36
4/20	火	8:33	10	15:08	9
		8:33	36	15:08	25
4/21	水	8:21	10	15:05	9
		8:21	36	15:05	26
4/22	木	8:33	10	15:04	10
		8:33	36	15:04	36
4/23	金	9:33	10	16:05	10
		9:33	36	16:05	36
4/24	土	8:28	10	15:00	109
		8:28	36	15:00	25

図7 現在の目視観測の記録



図8 校の視程目標図 (田口 2019)

(1) 先行研究 本校卒業生 田口小桃

『立川高校における50年間の視程の変化と戦後の大気汚染について』

2018年に天文気象部の先輩が本校の視程データ(約16,000件)及び、気象庁のデータ(約9000件)を整理・分析し、文献資料や聞き取り調査から、過去の大気汚染や周辺環境の変化との関係を調べた。

戦後の本校の視程は極めて悪く、1950・60年代は、悪視程(4km未満)の日が1年の約40%を占める年が続き、大気汚染の規制が始まる1970年代に改善した。1950年代後半は気象庁が大手町で観測した視程より悪く、工場の多かった都心とは異なる悪視程の原因が考えられた。文献や気象記録調査、聞き取り調査など多面的な調査をした結果、本校周辺における大気汚染の原因は多岐にわたり、朝鮮戦争で極東最大の輸送基地となった米軍立川基地から離発着する飛行機の排出する黒い煙や大規模な石炭暖房によるばいじん、畑から巻き上がる砂じん、高湿度による朝もやなどに関連があることが分かった。

大気中の汚染物質の詳細な測定は1970年代以降に開始されており、それ以前の大気の様子を知るのに視程は重要である。天文気象部ではこの研究を機に、20年ぶりに視程観測を再開した。

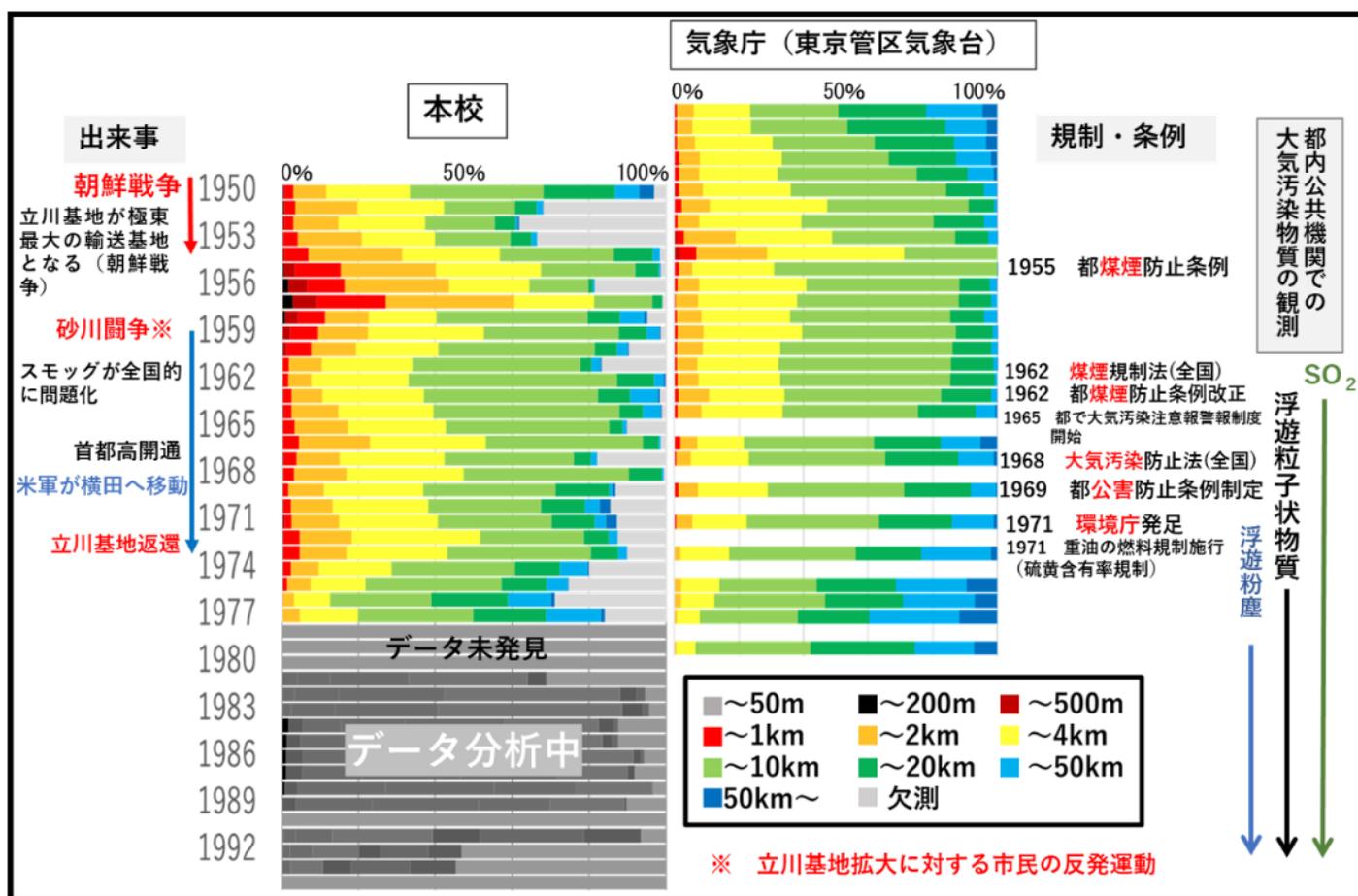


図9 本校と気象庁(東京)の視程距離の経年変化(田口2019)

※8時と15時の視程距離を視程階級に換算し、1年分の値を積算

※気象庁のデータも手書き記録から8時と15時の視程距離を取り出し、視程階級に換算して作成



図10 1960年の悪視程(天文気象部OBが撮影)

※中央下部は旧校舎5Fの観測室から見た学校の屋上と天文ドーム 煙霧で2km先の指標が見えていない

(2) 先行研究 本校 田中陽登・馬場光希・浜島裕哉・安原拓未

『「見えてる?!」視程の新たな観測方法の開発とその分析』

本研究は 2020 年の第 9 回高校・高専気象観測機器コンテストに応募し、気象文化総合センターの助成を受けて行った研究である。

2019 年より目視による観測が再開されたが、毎日の定時(8 時・15 時)観測が難しく、欠測が増えた。そこで、観測を自動化することを目指す、新たな観測方法を考案した。Raspberry Pi で一眼レフを制御し、日中 10 分毎に撮影したデータを USB メモリに保存する装置を 2019 年 9 月から製作し、現在まで運用・改良を行ってきた。(図 11)。電源コードと LAN ケーブルは Wi-fi を設置してある 5F 天体観測室の室内から屋上に伸ばして繋ぎ、Slack を通じて即時撮影などの遠隔操作を可能にすることで、コロナ禍による休業期間中は遠隔でデータを得られるようにした(図 12)。これらのプログラムは Python で記述した。ネットワークがオフラインになった時に備えて、ネットワークエラーが発生したときに対応する処理を追加した。そして、観測データを分析し、視程は湿度やエアロゾル、天候などに影響されると考察した。



図 11 観測装置(左は 2019 年開発時右は現在) (田中・安原ら 2020)

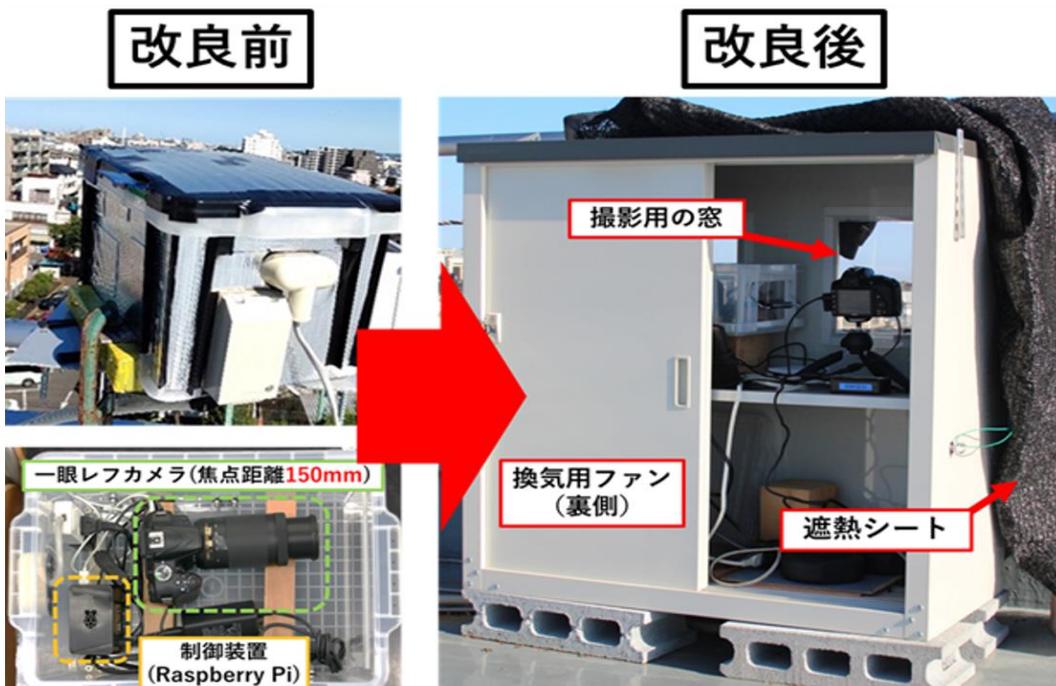


図 12 2020 年 8 月に観測装置と容器を改良 (田中・安原ら 2020)

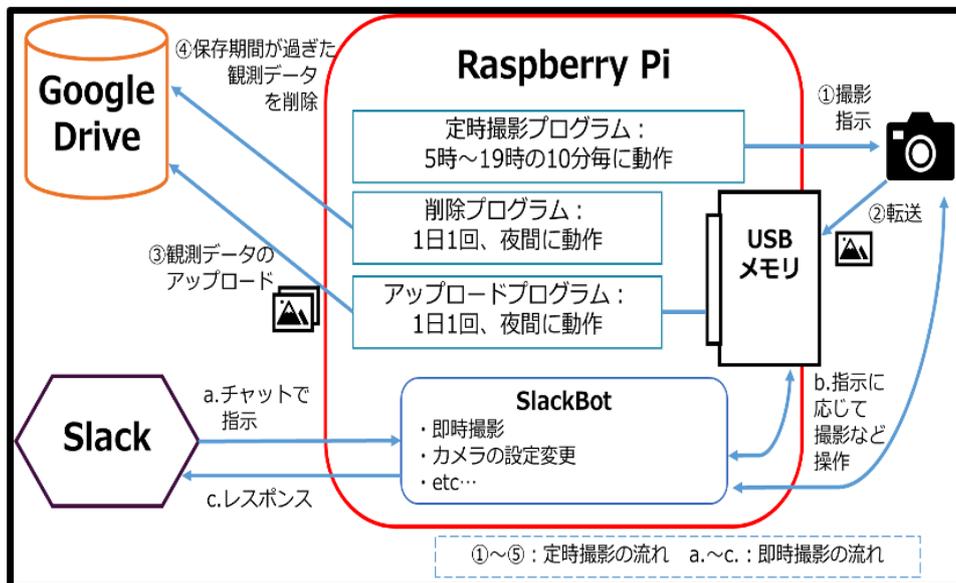


図 13 システム構成図

(3) 先行研究 本校 新川凌央・竹添麟

『富士山観測装置 美容～富士山の見え方と気象現象の関係を探る～』

本研究は 2020 年の第 9 回高校・高専気象観測機器コンテストに応募し、気象文化総合センターの助成を受けて行った研究である。

富士山とその周囲の雲の観測のため、先行研究(2)と同様の観測装置を製作した。富士山の周囲の様子も撮影するため焦点距離を 55mm にし、画像の白飛びの対策として露光量が少ない撮影設定を追加した。さらに短時間の雲の変化の様子を記録するため、タイムラプスを撮影する機能を追加し、2020 年 10 月の 1ヶ月間継続して観測できた。画像から判定した富士山の見え方は目視とおおむね一致し、タイムラプスカメラではとらえられなかった富士山の見え方の経時変化をとらえることができた。富士山の見え方の変化と雲の動きや気圧配置、風速などの関連を考察したが、データが少なく、観測データからは傾向が読み取れなかった。

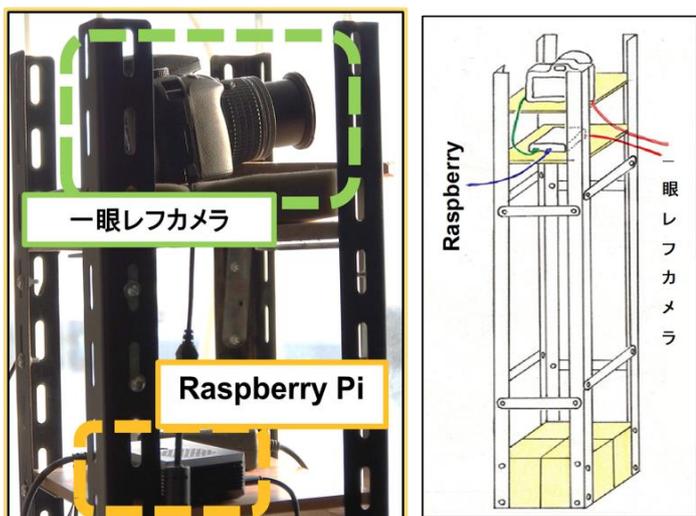


図 14 富士山方向の観測装置 (新川ら 2020)

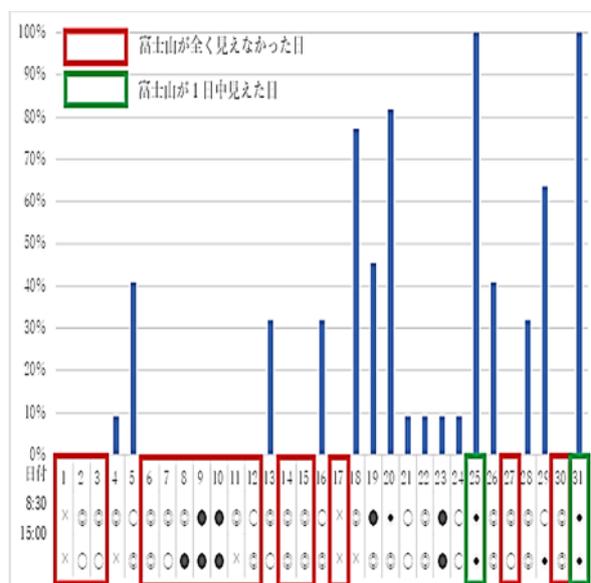


図 15 富士山が見えた時間の割合と立川の天気 (2020 年 10 月、6:30～17:00)

2. 研究目的

- (1) 視程データや自動気象観測装置のデータをモニタリングできるシステムを作る。
- (2) 視程観測の自動化を目指して、深層学習を利用した目標物の判定プログラムを作成する。
- (3) 装置観測のデータより視程の傾向を分析し、気象現象や大気汚染との関連を調べる。

3. 気象観測データのモニタリングシステムの製作

気象データをモニタリングするために、気象・視程の観測データをそれぞれリアルタイムでディスプレイに表示するシステムの開発を試みた。その概略図を図 16 に示す。

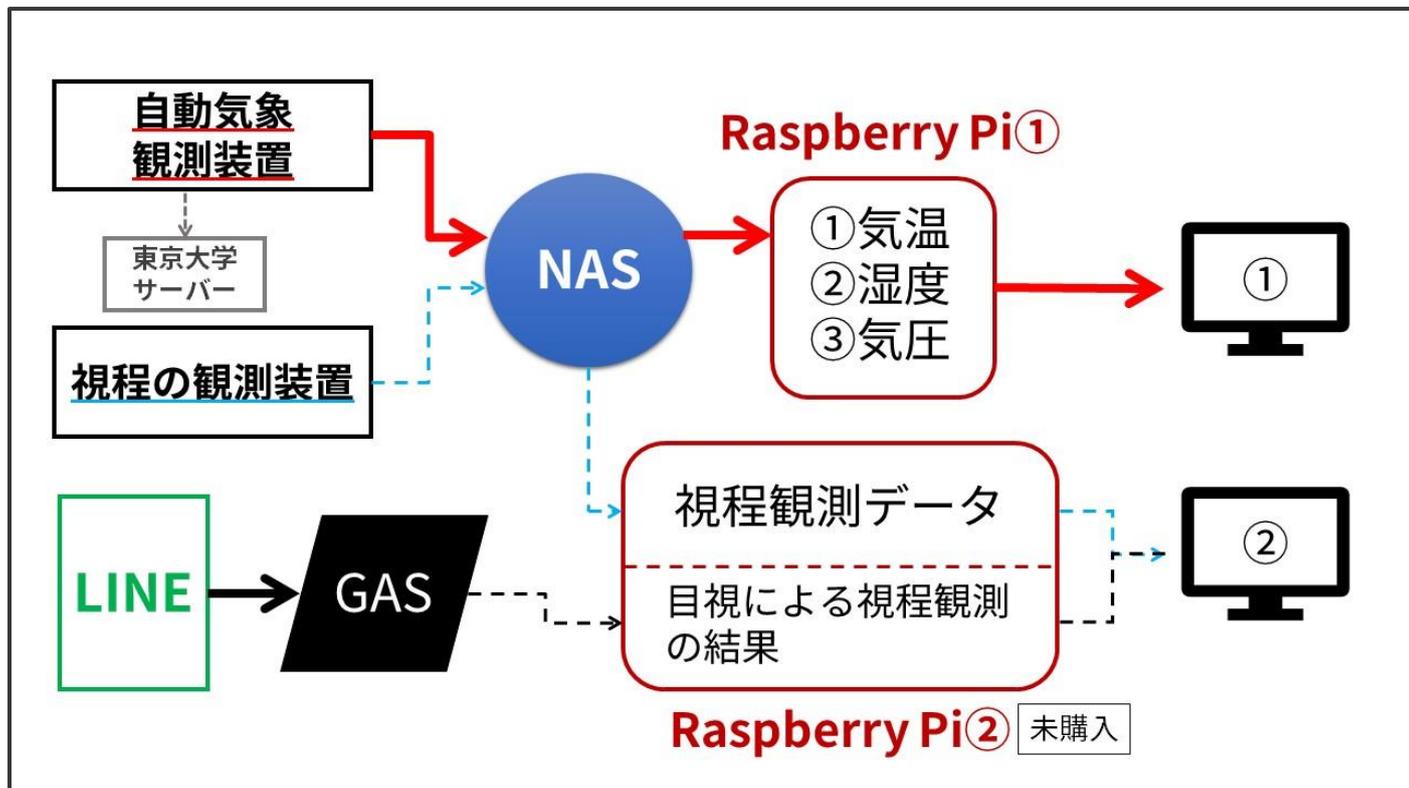


図 16 気象モニタリングシステムの概略図(実線部は開発済み、破線部は開発を検討中)

<手法>

(1) 気象観測データの自動取得

- ① 自動気象観測装置のデータ (CSV ファイル) を装置のストレージから部室に設置した NAS (Network Attached Storage) に転送させた。
- ② NAS 上の CSV ファイルを表示用の Raspberry Pi と同期させた。なお、すべてのデータを同期する必要はないため、追加・更新されたファイル・ディレクトリのみコピーできる rsync コマンドを用いた。
- ③ JavaScript によるグラフの作成を容易にするため、CSV 形式の最新データを Python プログラムで JSON 形式に変換した。

(2) Web ページへの表示

JSON 形式のデータをもとに数値・グラフをブラウザ上に Web ページとして表示するプログラムを HTML・CSS・JavaScript で記述した。なお、開発の効率化のため、Web フレームワークとして Vue.js を、グラフの表示に Chart.js を用いた。ローカルの HTML をプレビューするだけではプログラムがうまく動かなかったため、Apache を用いて Raspberry Pi に Web サーバーを立てた。

(3) 目視での視程観測結果の自動取得

LINE グループに報告された観測結果(図 17)を自動で取得し、Google スプレッドシート上に記録するプログラムを GAS (Google Apps Script)により作成した。

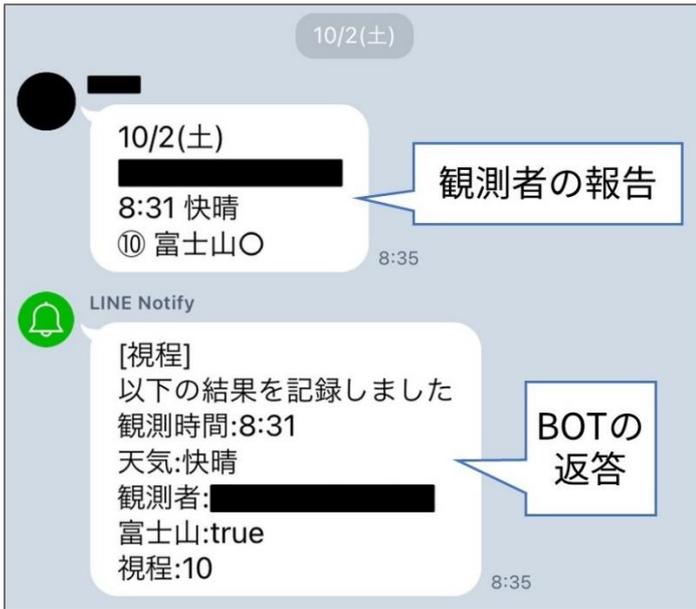
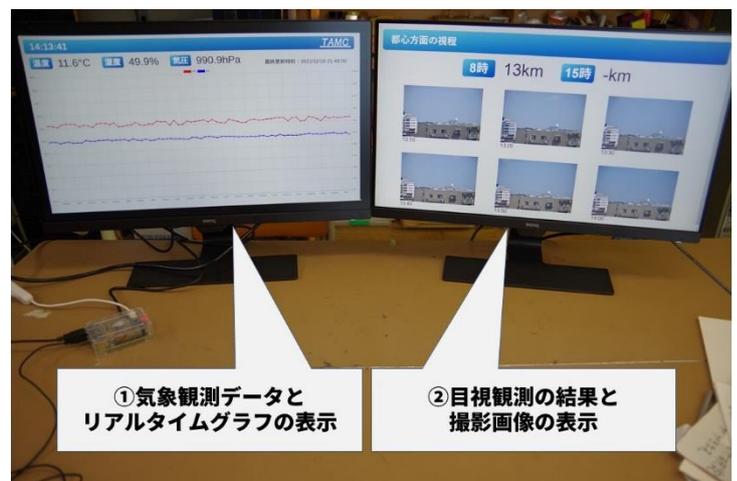
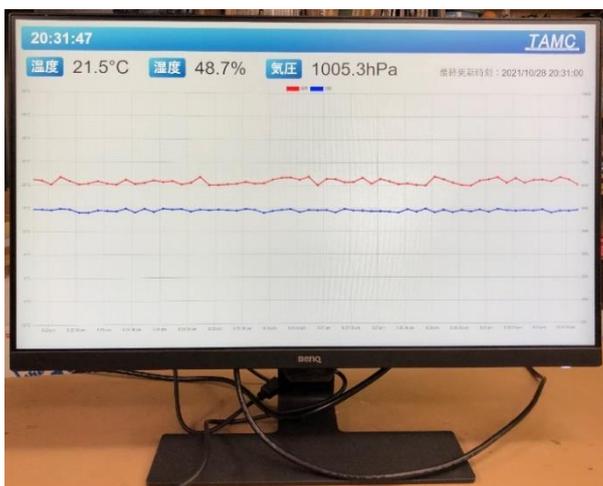


図 17 LINE グループへの観測結果報告の様子

<結果>

自動気象観測装置から観測データの CSV ファイルを NAS に転送させ、Raspberry Pi に同期させることができた。また、同期した CSV ファイルから表示する最新のデータ(気温・湿度・気圧)を取り出して、ディスプレイに表示することができた(図 18 左)。さらに、LINE での部員の報告から、目視の観測結果を Google スプレッドシート上に自動で取得することができた(図 18 下)。

今後は、視程についてのデータを表示するディスプレイを作り、システムの完成(図 18 右)を目指す。



1	送信日時(DD/MM/YY)	送信時刻	送信者	観測時刻	天気	観測者	富士山	視程目標
53	2021/10/2	8:35	[redacted]	8:31	快晴	[redacted]	TRUE	10

図 18 気象観測データをディスプレイに表示した様子(左)とシステムの完成イメージ(右)

下表は目視での観測結果の記録

4. 機械学習を利用した視程目標物の判別

(1) 深層学習による目標物の判定

視程の観測は、目視と並行して、装置による観測で得られた撮影画像を目で確認し、目標物が見えるかどうかの判定をしている。本研究ではこの目標物判定の自動化を目指し、深層学習を用いた手法を検討した。

<方法>

- ① 撮影画像から、目標物が写っている部分を手動で切り出した。
- ② 撮影画像を目で見て判定を行ったデータに基づき、切り出した画像に「見える/見えない」のラベル付けを行った。
- ③ ②でラベル付けした画像全体から撮影月とラベルに偏りがないように8割を抽出して訓練データとして用い、深層学習モデル(CNN)を fine-tuning*した。
- ④ 残りの2割を検証データとして、学習させたモデルに分類させた。

* fine-tuning とは、事前に学習済みの CNN を微調整してモデルを再構築する方法である¹⁴⁾。今回は深層学習モデルとして、オーソドックスなアーキテクチャを持つため改良が容易であり、現在検出モデルなどのバックボーンや分類モデルとして広く用いられている VGG16¹³⁾を採用した。また、学習時間の短縮と性能の向上を目的として、限られたデータをもとに高精度のモデルを構築するため、ImageNet¹⁷⁾学習済みのモデルで fine-tuning を行った。

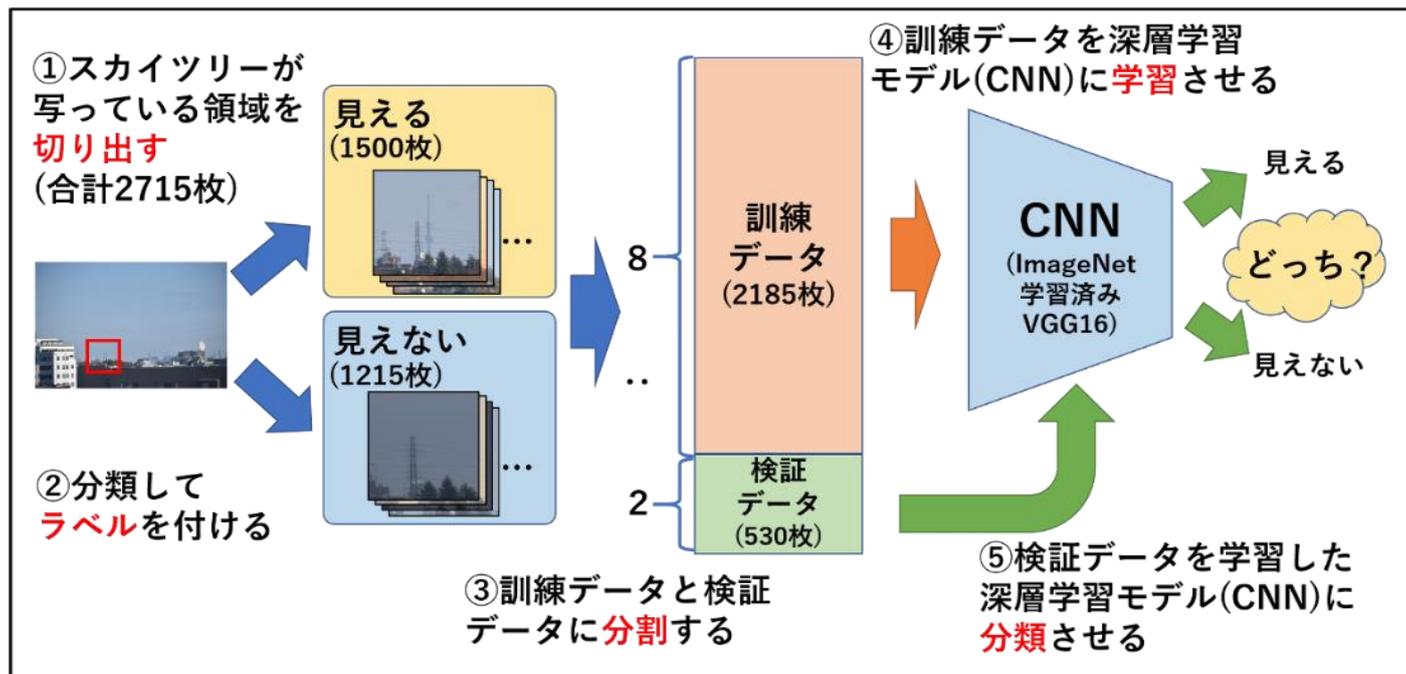


図 19 深層学習による判定の流れ

今回、対象とする目標物には、「見える/見えない」のラベルに偏りが無い東京スカイツリー(36km)と新宿ビル群(25km)の2つを選んだ(表3)。

表3 使用した画像の枚数 (左)東京スカイツリー (右)新宿ビル群

	見える	見えない		見える	見えない
学習データ	580	318	学習データ	1207	978
検証データ	142	75	検証データ	293	237

<結果・考察>

モデルによる検証データを用いた判定の結果、東京スカイツリーでは 94.9%、新宿ビル群では 93.6%と十分な正解率となった(表4)。

不正解だった画像のほとんどは、画像を人が見てラベル付けする時点での誤りであった。また、不正解の中には、目標物の一部し見えていないものがあったが、その数はごく僅かであった。したがって、モデルには精度向上の余地はあるが、深層学習を用いた目標物の判定には十分な精度であると考えられる。

表4 深層学習による分類結果 (左)東京スカイツリー (右)新宿ビル群

検証データ		予測		検証データ		予測	
		見える	見えない			見える	見えない
実 際	見える	284	9	実 際	見える	134	8
	見えない	18	219		見えない	6	69

(2)特徴点マッチングによる画角ずれ補正の自動化

深層学習モデルが正確に判定を行うためには、観測装置を点検する際に生じるカメラの画角のずれを補正する必要がある。今までは目標物の位置を人の目で確認して座標を指定することにより補正を行っていたが、非常に負担が大きかった。また、将来的にはモデルによる目標物のリアルタイム判定を目指しているため、人の手で行うプロセスはなくしたい。

そこで、画角のずれ補正を自動化するために、特徴点マッチングを用いた手法を検討した。ずれを検出する際の基準建造物として、今回は立川病院(図2の③)を用いた。立川病院は、本校から近く(0.75km)非常に視程が悪い時でも基準として用いることができ、特徴点もとりやすいためである。

<方法>

特徴点マッチング前の画像処理(図20)

特徴点マッチングの精度を向上するため以下の前処理を行った。

- ① 目標物の輪郭のみを特徴として捉え、色は特徴としないようにするためグレースケール処理を行った。
- ② ずれが生じてても立川病院が含まれる広めの領域を切り出した。
- ③ 画像内の輝度の変化を大きくし、目標物の輪郭を捉えやすくするため、ヒストグラム平坦化を行った。
- ④ 3つの異なるガンマ補正值($\gamma=1.7, 1.2, 0.2$)を用意しガンマ補正を行った。

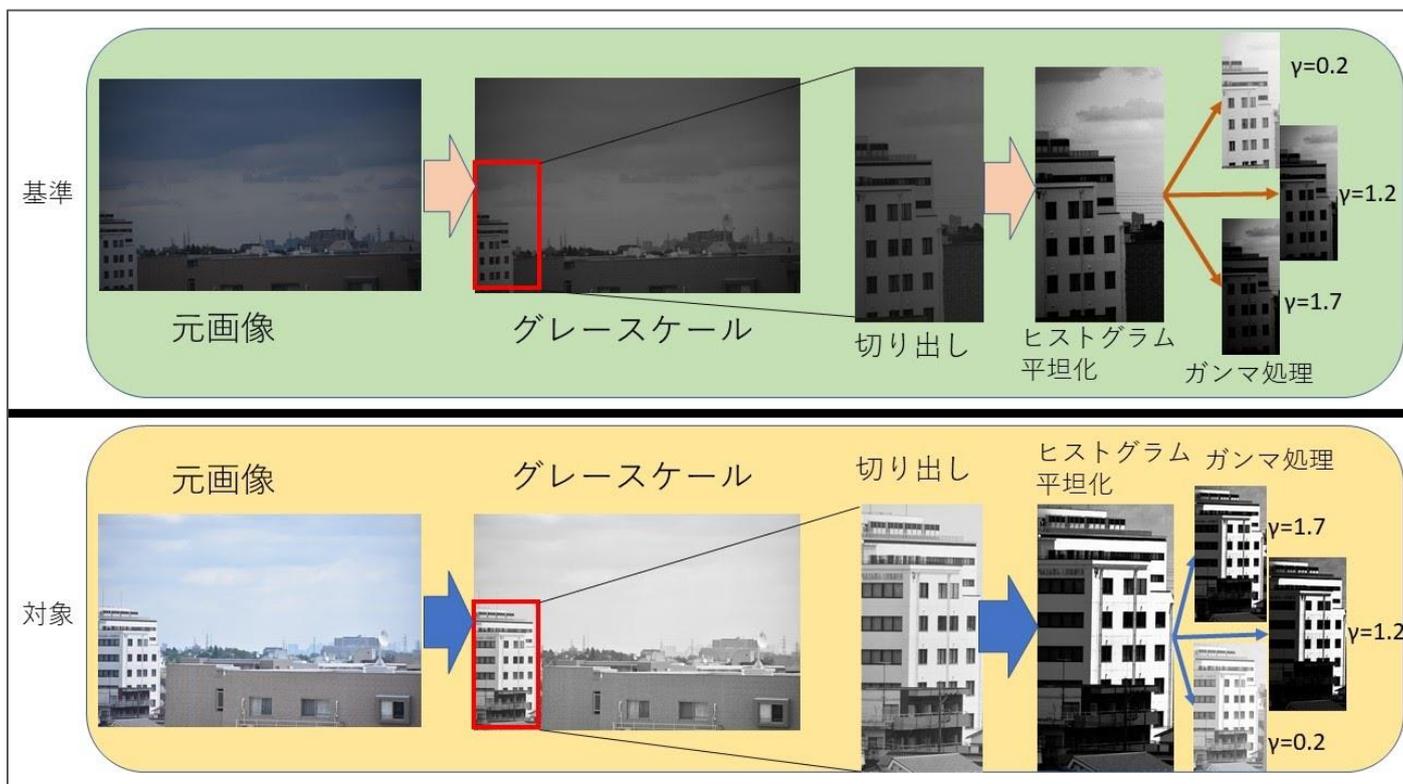


図 20 特徴点マッチングの前処理の流れ

特徴点マッチングによる位置合わせ

① 完成した 3 組の画像のうち γ 補正値が同じものの組に対し、特徴点マッチングを以下の流れで行った。

a. 特徴点検出

2 枚の画像の中からそれぞれで特徴のある点(輝度が急に変化する領域など)を検出した

b. 特徴点記述

検出した特徴点をベクトルなどで記述し特徴量(その点固有の値)を算出した。

c. マッチング

特徴量の近い者同士を kNN(k-Nearest Neighbor)法¹³⁾を用いて対応させた。

a, b に使用する特徴点検出器には速度は遅いが精度の高い AKAZE¹²⁾を採用した。

② 画像のうちマッチした点が多い画像の組を使用した。これはマッチング点が多いほど位置合わせの精度が高まると考えたためである。

③ 使う画像の全ての特徴点の座標のずれを平均し、基準画像と対象画像のずれとした。

④ 算出したずれをスカイツリーなどの視程目標物の位置指定に用いた。

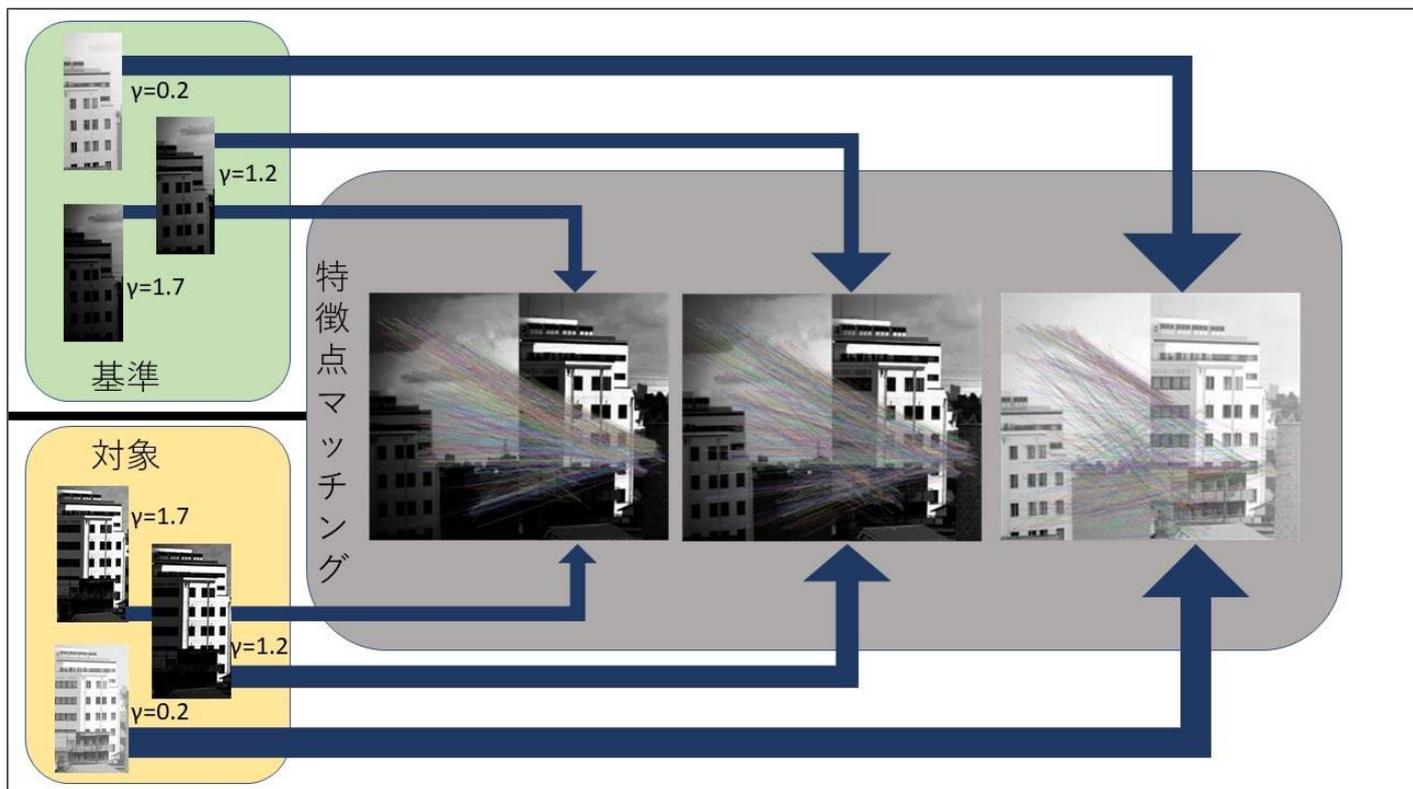


図 21 特徴点マッチングの流れ

<結果・考察>

作成したプログラムにより算出したずれは、図 22 左を基準画像、図 22 右を対称画像としたとき、x 座標方向 -55、y 座標方向 131(人の手による補正では x 座標方向 -50、y 座標方向 75)であった(図 23)。天候・時刻などの条件が近い場合は、開発した手法は実用に耐えうる十分な精度を発揮できると思われる。



図 22 特徴点マッチングが成功した画像の組

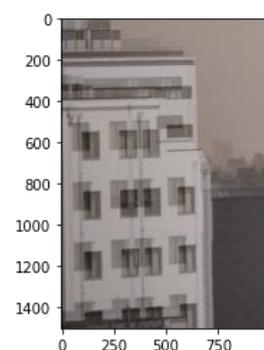


図 23 補正結果

しかし、大きく時刻が異なる組に対しては補正がうまくいかなかった(図 24)。時刻による露光量の違いが輪郭明瞭度に影響を与え、同じガンマ値の組ではマッチング点がうまくとれなかったたからだと考えられる。



図 24 特徴点マッチングが失敗した画像の組

(3) 物体検出を用いた目標物の判定

目標物の位置合わせのために特徴点マッチングを検討しているが、天候や露光量が異なる場合にはうまくいっていない。そこで、目標物の位置をデータから学習し、判定と位置推定を同時に行う深層学習による物体検出手法を検討する。

<手法>

①観測画像から目標物それぞれの位置(バウンディングボックス)と「見える/見えない」の分類ラベルを付与するアノテーションを行う。目標物の座標指定には、JavaScript (p5.js) で記述した自作の座標取得補助ツールを用いる(図 25)。

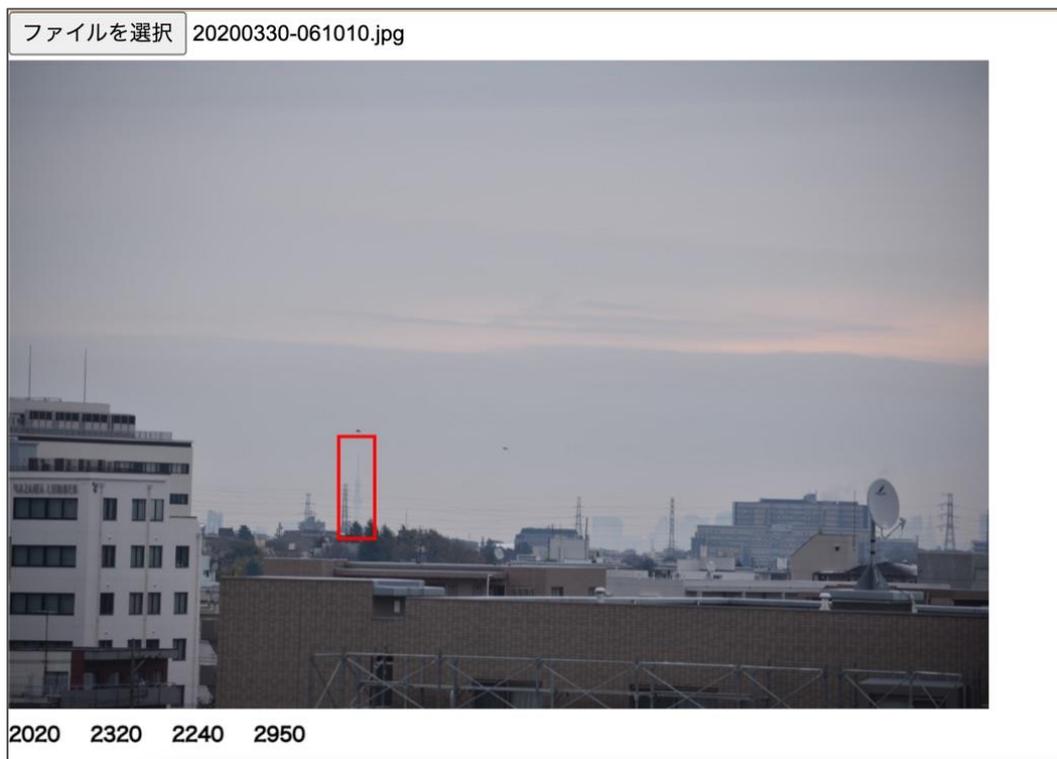


図 25 座標取得補助ツール

② ①で作成したデータを教師データとして、視程目標物の位置合わせと判別を物体検出モデルに学習させる。
③学習したモデルにより未知の観測データから検出を行い、実用上十分な性能が出るか検証する。

<結果>

今回は、物体検出モデルに学習させる教師データであるアノテーションを作成途中のため、実際に検証することはできなかった。

5. 何が視程に影響を与えるのか

田口(2019)の研究により、過去の本校周辺の視程は1959～60年代に非常に悪く、その原因として、当時の主力であった石炭燃料の燃焼や集じん装置の不備による煤煙、現在より湿度が高く温度差があったことによる逆転層や朝もや等が推定された。またインタビューや文献調査から本校近くにあった当時極東最大の輸送基地であった米軍基地の影響を示唆した(田口 2019)。

浜島ら(2019)の研究では、2019年12月に都心方向に向けた撮影装置を自作し、目視観測と並行して撮影画像から視程を判定する方法を取り入れた。さらに浜島・安原ら(2020)の研究では、観測装置の改良を重ねながら約8か月間の観測データを得て、降水現象や湿度が与える視程への影響を調査した。

本研究では、さらに11か月間の観測データを加えて現在の視程の傾向を調査し、様々な手法でデータを分析した。都心方面のデータだけではなく、新川ら(2020)により昨年11月より開始した富士山方面のデータのついても継続し、気象要素と富士山の見え方の関連を分析した。なお、観測画像から視程の判定はすべて目で見て行った。

(1) 目視観測と撮影画像の判定結果の比較

撮影画像を視程の判定に用いるにあたり、目視観測の場合とどのような差が出るのかを調査する必要がある。昨年までの研究データに、さらに11か月間の観測データを加えて判定の比較を行った。

方法

画像からの判定と目視観測にどのような差があるのかを調査するため、同時に観測を行い画像と目視の違いを比較した。目視観測は、COVID-19による休業期間(3～5月)を除き、2019年12月～2020年2月、2020年6月～2021年9月の8時と15時に実施した。観測装置による撮影は、休業期間中も遠隔操作により行うことが可能なため、休業期間中もほとんど欠測がなかった。

画像観測では1回の観測で3種類の露出時間で写真を撮影するが、その中のいずれかで目標物が確認できればその距離まで見えたとした。これは、目視では肉眼が明るさに合わせて瞳孔を調整し、ものを認識していることから、カメラの画像も露出を変えたものを同時撮影し、適正露出の画像を選ぶことで目視に合わせたいと考えたためである。

結果・考察

2020年7月から2021年9月の15ヶ月分のうち、目視による観測と画像による観測を同時に行うことができた514回について、視程の結果を比較した。その結果、比較した観測の約8割で目視観測の結果と画像観測の結果に違いがなかった(表1)。

午前の観測について、特に目視の方が良視程が多く一致率が低いのは、観測方向が東で、季節によりカメラに直接光が入ることによる白飛びが影響しているのではないかと考えられる。

表3 目視観測と画像観測の比較(2020年7月～2021年9月)

	午前	午後	合計
画像の方が良視程	12	13	25
目視の方が良視程	38	16	54
差なし	201	234	435
合計	251	263	514
一致した割合	80%	88%	84%

(2) 湿度の影響

視程の変化は大気中のエアロゾルの存在と関係すると考えられる。観測データを増やして昨年と同様に本校の気象観測データを利用し、視程と湿度の関係を調べた。

方法

画像から判定した視程距離と湿度(本校で測定)の関係を Python プログラムでグラフ化し、視程と湿度の関係を考察した(図 26, 27, 28)。

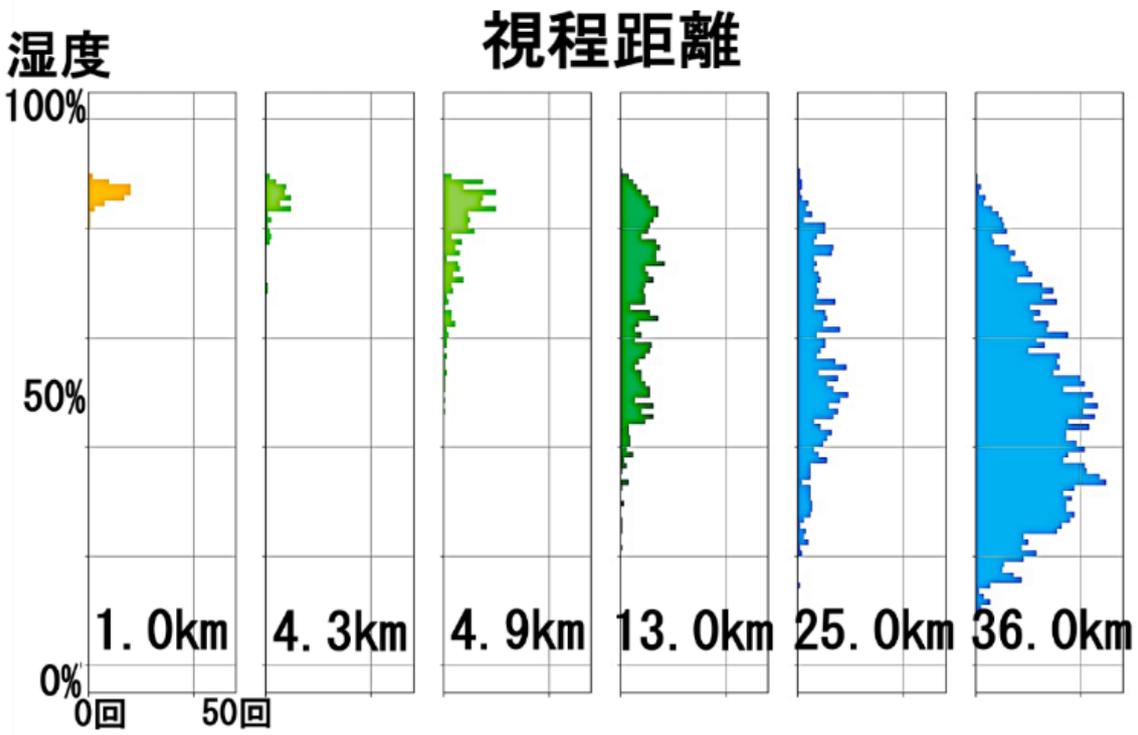
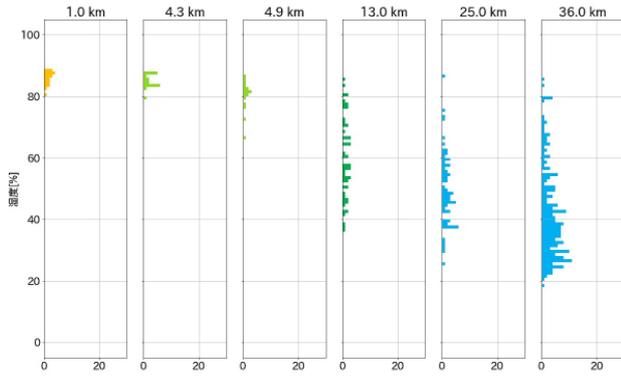
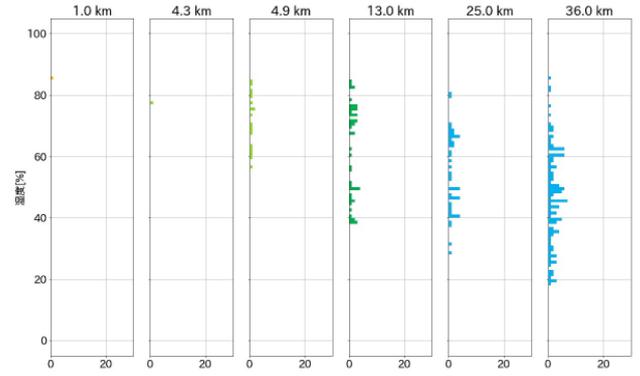


図 26 視程距離と相対湿度の関係
(2020年3月から2021年4月の1時間毎のデータを積算)

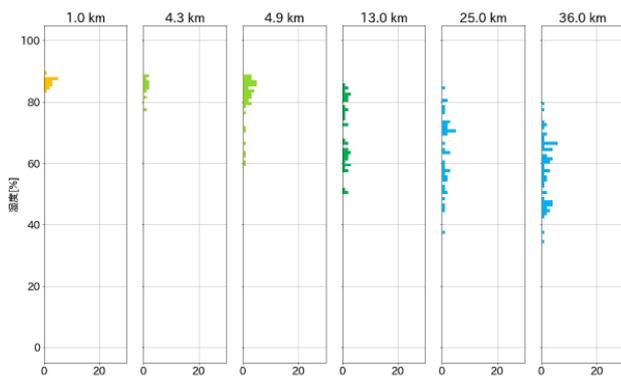
202004



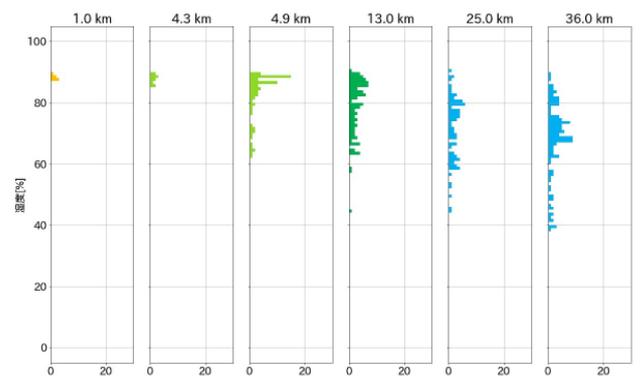
202005



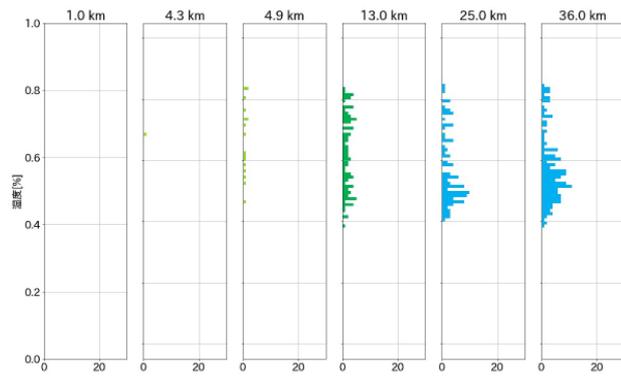
202006



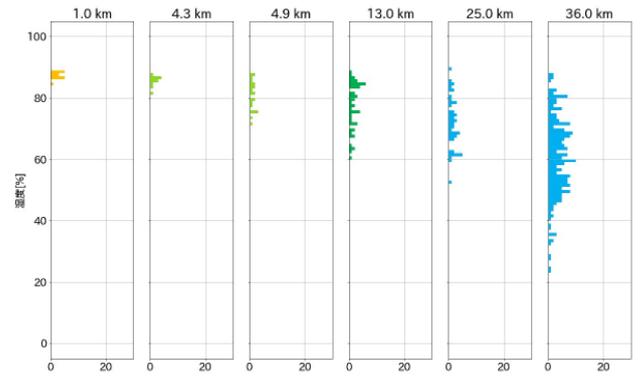
202007



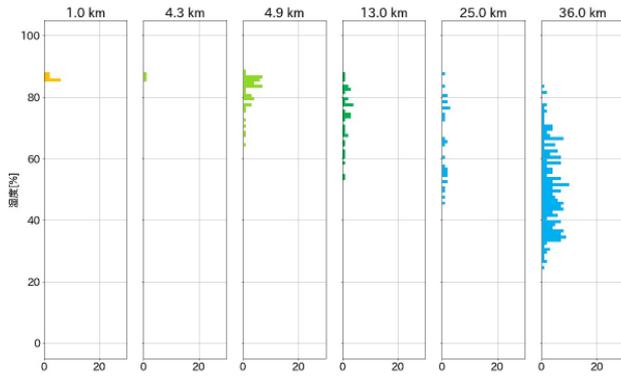
202008



202009



202010



202011

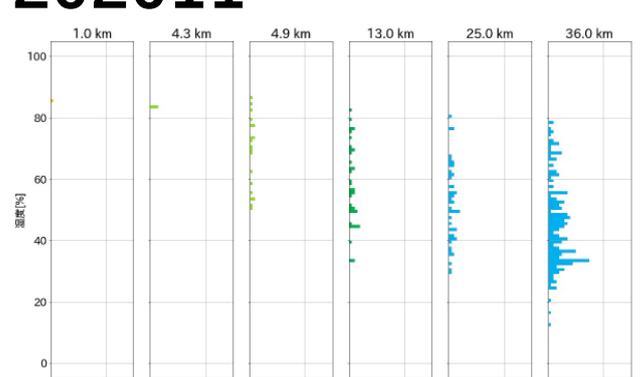
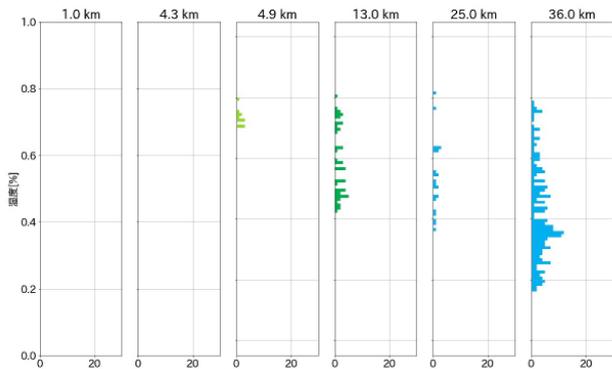
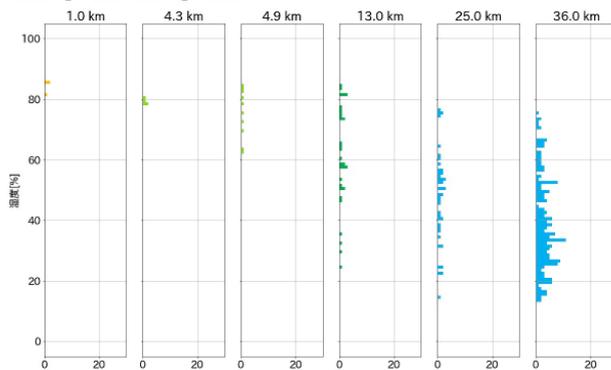


図 27 月毎の視程距離と相対湿度の関係(2020年4月~2020年11月,本校のデータより)

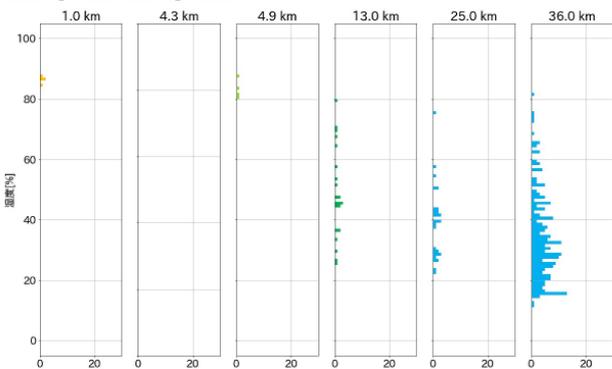
202012



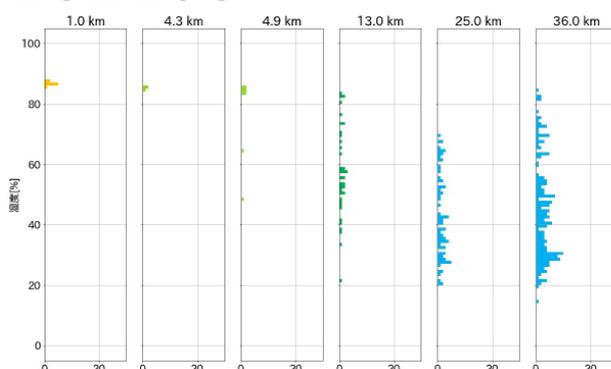
202101



202102



202103



202104

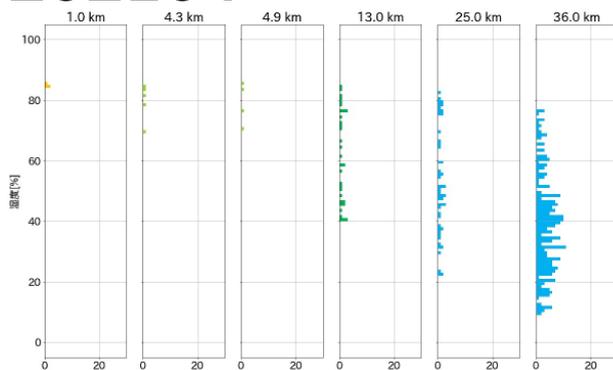


図 28 月毎の視程距離と相対湿度の関係(2020年12月~2021年4月,本校のデータより)

結果・考察

視程が悪いときは湿度が高いことが多く、さらに視程が4.3km以下では降水と関連することが多かった。降水時は降水粒子、湿度が高いときは水蒸気を吸収して成長する特性を持つエアロゾルとの関連が考えられる。

湿度の高い夏期には、降水がなくても遠景が白っぽくなり視程が低下しがちで、これは湿度に関連して粒径が成長するとされるエアロゾルによるミー散乱が起きているためだと考えられる。冬季の乾燥時は遠くまで見通せる日が増えるが、直前の降水や風力にも左右されていると考えられる。今後調査したい。

(3) 視程の日変化と天候の関係

昨年の研究では日変化と天候の関係を調べるために、2020年3月から10月までの1時間毎の撮影画像を並べるプログラムを開発し、その比較と天候との関連を調べた。本研究では、データが安定して得られるようになった2020年7月からのデータを加え、さらに画像から判定した視程階級色を表示するプログラムを開発して、比較できるようにした。(図29)

方法

画像は全て同じ設定(露出時間1/500秒)で撮ったものを選び、1時間毎に並べている。2020年の先行研究では画像の連続データのみだったが、今回は画像から判定した視程階級で同様に並べて表示したものを作成して、視覚的に変化をわかりやすく捉えられるようにした。一連の作業はPythonプログラムによって行った。

また、天気との関連を調べるため、本校の気象観測データや気象庁のデータと照らし合わせ、雨マークを付け加え、一日の積算雨量によって色を変えた。さらにPCのモニター上で1時間毎の画像を確認し、極端な悪視程(1km以上見通せない)の時間は赤枠で囲ってわかりやすくした。

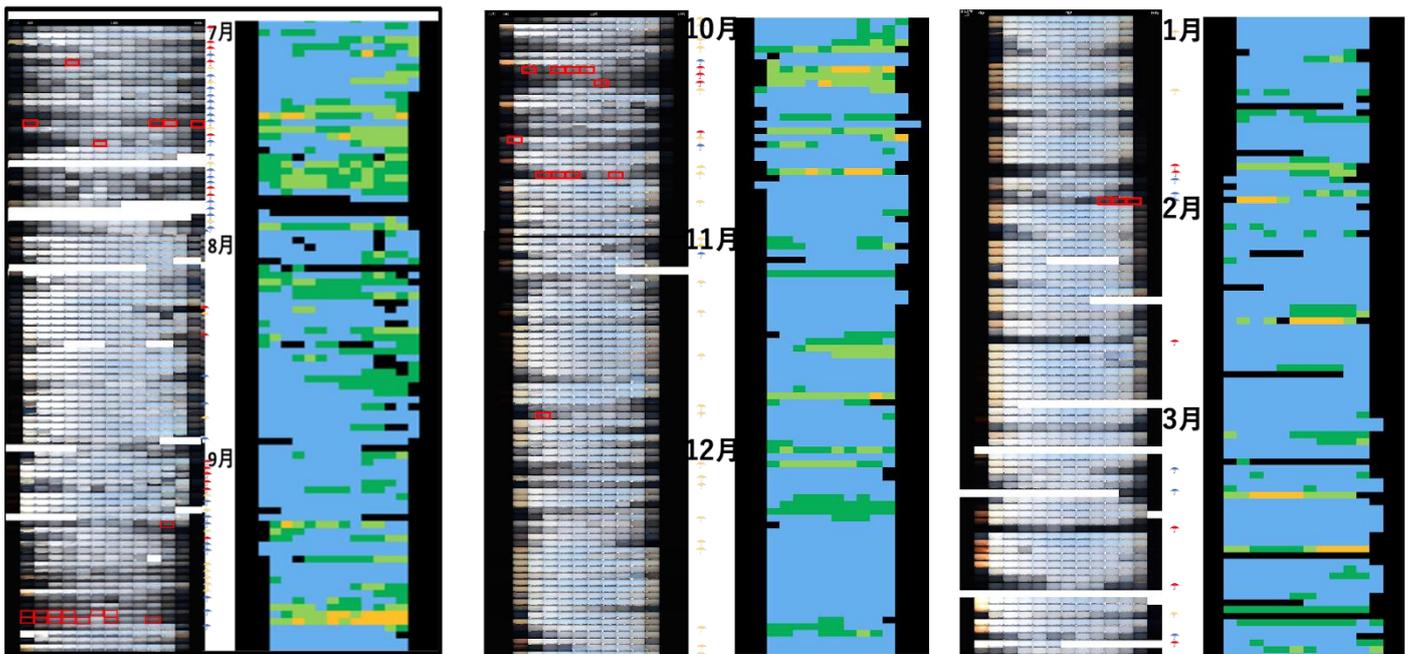


図29 撮影画像の連続データと視程階級

結果・考察

グラフ作成にPythonを用いたことで、大量の観測データを簡単に分析することが可能になった。さらに、観測画像を並べたことで1日の視程や天候の変化を可視化でき、降水時の視程が悪いという傾向が読み取れた(図29)。また、視程と湿度の関係をグラフで表したことにより、湿度が低いほど視程がよくなることや悪視程は降水と関連していることが分かった。

降水時は視程が悪化するが、降水後に劇的によくなるのは大気中の塵が落とされ、エアロゾルが生成されにくくなることが要因として考えられる。

(4) 過去の悪視程と大気現象

田口(2019)による過去の膨大な視程観測データの分析から、1950・1960年代の本校周辺は数km先も見通せない

い程の悪視程の日が多くあったことがわかった。その原因として、文献調査とインタビューの結果から、当時暖房や燃料として普及していた石炭の燃焼や、集塵装置の不備の他、朝もやや、逆転層が頻繁に起こることの影響があったとしている。さらに、本校近くにあった米軍立川基地が当時極東最大の基地であり、飛行機の離着陸やトラックの走行が多かったことの影響もあったのではないかと推測した。

、大気汚染物質や朝もや等が主な原因と推定された(田口, 2019)。

本研究では、気象観測月報に記録されていた**大気現象記号**に着目し、新たに分析を試みた。

方法

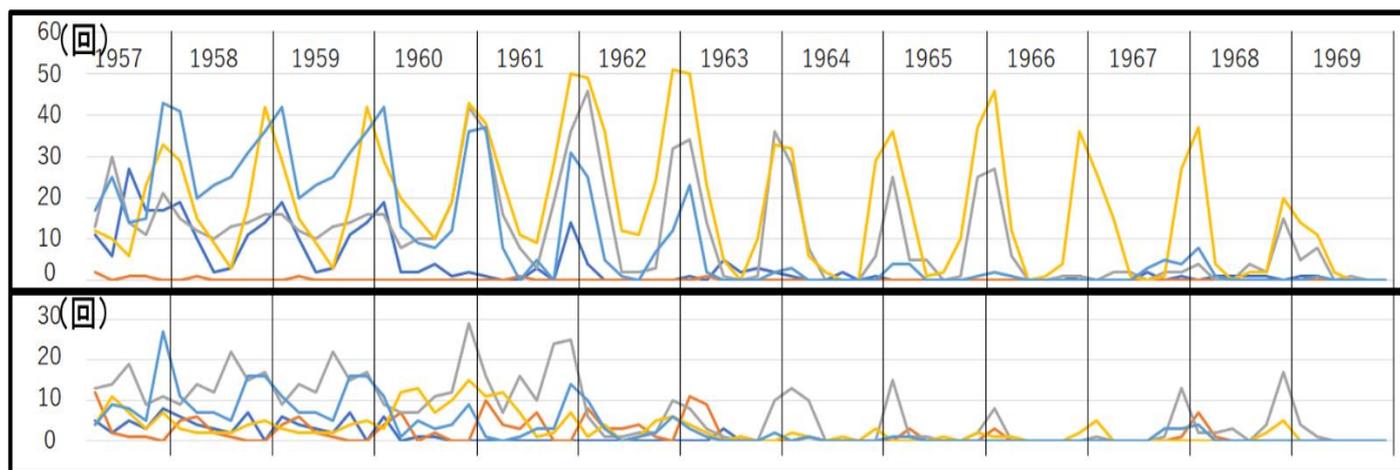
- ・視程が著しく悪かった 1957～1969 年の 13 年間の気象観測月報 (図 30) の記事欄に掲載されていた煤煙、煙霧、霧、逆転層、風塵などの大気現象について、月毎に観測回数を午前と午後に分けて数え、グラフ化した (図 31)。

- ・当時の環境について、当時の部員だった OBG に新たに調査を行った。

東京 立川 立川高等専修校 天文気象部											
視程	湿度		風		降水	降雪	霧	煙霧	記事		
	A	P	平均	最大					A	P	
2.4	79	50	1.7	3.8	SE	75	—	—	≡	≡	
2.4	75	53	2.1	5.4	S	30	1.0	—	≡	≡	
4.6	63	24	6.4	10.8	NNW	90	2.3	—	0	0	
4.5	97	47	2.3	5.4	SE	65	1.1	—	≡	≡	
3.6	82	33	2.7	6.9	N	88	1.4	—	≡	≡	
2.5	(97)	40	1.7	3.8	NNE	84	1.1	—	≡	≡	

図 30 気象月報の記録

結果・考察



集計した気象現象

霧 小さな水蒸気の粒が空気中を漂っていること

煤煙 石炭などの燃焼に伴って発生する煙や煤

煙霧 乾いた微粒子が空気中を漂っている状態

逆転層 上空に上がるにつれて気温が上昇するガスが地上付近に降りて溜まっている様子

風塵 風により砂やホコリなどが巻き上がる現象

— 霧 — 煤煙 — 煙霧 — 逆転層 — 風塵

図 31 気象現象の観測回数 (1957～69年、午前と午後それぞれに記録された大気現象を月毎に集計)

先行研究では冬季に視程の悪化が見られたことがわかっているが、大気現象別の回数を示したことにより、煤煙、煙霧、霧、逆転層が冬季に頻発し、特に1963年までの時期に多く見られることが明らかになった(図31)。これは、田口(2019)が調査した視程が最も悪かった時期と大体一致している(図8)。全般的に逆転層の記録が最も多く、次に煤煙と煙霧の記録が多い。これらは1968年まで冬季の午前に頻発しているが、他は1964年以降減少している。

グラフと田口の研究より考察

煤煙・煙霧：1964年まで月に30~40回と多く見られるが、その後減少しており、現在はほとんど見られない。田口(2019)は都環境科学研究所の1960年代の降下煤塵のデータを調査し、暖房用石炭ボイラーから高濃度の煤塵が排出されていたが、集塵機の設置が1964年頃から始まったことや、使用燃料が石炭から石油系のものに切り替えられていったことで、ばいじんや煙霧が減少したと推測しており、グラフの結果と一致している。

逆転層：1960年代後半まで、冬季の午前が現在ではほとんど観測されないが、当時は冬季の最低気温が現在より低い時が多く、湿度が高めであったこと(本校データより)、当時の本校周辺がほとんど畑であったことなどが影響していると推定される。

風塵：午前にはあまり見られず、2月から4月の午後に増えるが、これは地域の方のインタビュー調査で聞いた、畑の土が強風で舞い上がる「赤っ風」の現象に関係すると考えられる。

天文気象部が行う視程観測は、観測者が年ごとに変わり、観測対象の建物が長年の間に変更されるなど、曖昧な要素が多いが、図31のグラフに季節的な変化の傾向が毎年見られることから、ある程度客観的なデータとして扱ってよいと考えられる。

インタビュー(OB、地域の方々)及び文献より (2009 田口の先行研究と本研究の調査から)

「当時は石炭暖房の家が多く、冬の朝は常に煙が見られた。」

「当時は逆転層がひどく手前の街は霞んでいて見えないが遠くの山ははっきり見えたりした。」

「登校するとき、朝もやで数m先も見えないときもあった。」

「立川周辺では木炭自動車走っていた、学校の前は奥多摩街道で道路はほとんど未舗装で狭かった。60年代は車が増えて渋滞も多かった。駅周辺も未舗装で砂埃がよく舞い上がり、見通しが悪かった。」

「車の排気ガスがすごかった。今とは全く違う。道が狭く渋滞が多かったから、周辺の車も今より多かった。」

「米軍基地の中は広いのにセントラルヒーティング暖房で冬でも半袖で暖かかった。煙突があった。」

「米軍の飛行機は黒い煙を吐きながら飛行していた。」

「春には「赤っ風」と呼ばれる畑の土が舞い上がる風が吹き、太陽が白く霞んで見えるときがあった。」

「当時の石油燃料は精製度が低く、燃やすと黒い煙が出た。」

「米軍基地から漏れた石油が地下水に浸透し、井戸水が飲めなくなった。火をつけるとよく燃えた。」

・米軍基地は朝鮮戦争後、最多で1日120回以上飛行機の発着があった。武器や人員、建築資材など多くの物資輸送があった(米軍資料より)。

・当時の工場には集塵装置がなく、排ガス規制もなかった。日本では1967年に「公害防止法」、1968年に「大気汚染防止法」ができ、1970年代から排ガス規制が徐々に進んでいった。



図32 1960年ごろの本校屋上からの景色(OB撮影)

(5) 現在と過去の視程の比較

田口 (2019) により明らかになった過去の悪視程と、現在の視程の比較を行った。本研究では昨年の研究データに新たに 10 ヶ月分のデータを加え、比較した。

方法

過去のグラフ (図 34) にならい、2019 年 12 月から 2021 年 8 月の期間について、8 時と 15 時の撮影画像から判定した視程を月毎に積算し、視程の傾向を調べた (図 33)。さらに現在の視程の傾向を比較した。

結果・考察

過去に比べて視程は非常に改善されており、1 日のうちでは午前、季節では夏に低下する傾向が読み取れる。午前に低視程の傾向が見られるのは同じだが、過去のような朝もややスモッグはほとんど発生しない。午前は観測方向が東のため、太陽の方向によりエアロゾルによる前方散乱が影響を与えていると考えられる (図 35)。但し、2021 年の夏期はプログラムの不具合により欠測が増加した。2020 年の同時期程視程の悪化はみられないため、今後も観測を継続して傾向をつかみたい。

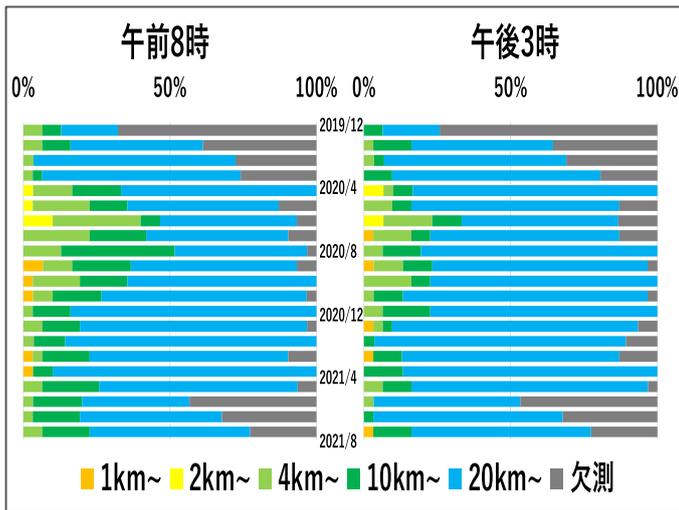


図 33 撮影画像から判定した最近の視程
(2019 年 12 月～2021 年 8 月 月毎)
※色分けは気象庁の視程階級表に対応
※2021 年 6～8 月はプログラムの不具合があり
欠測が増えている。

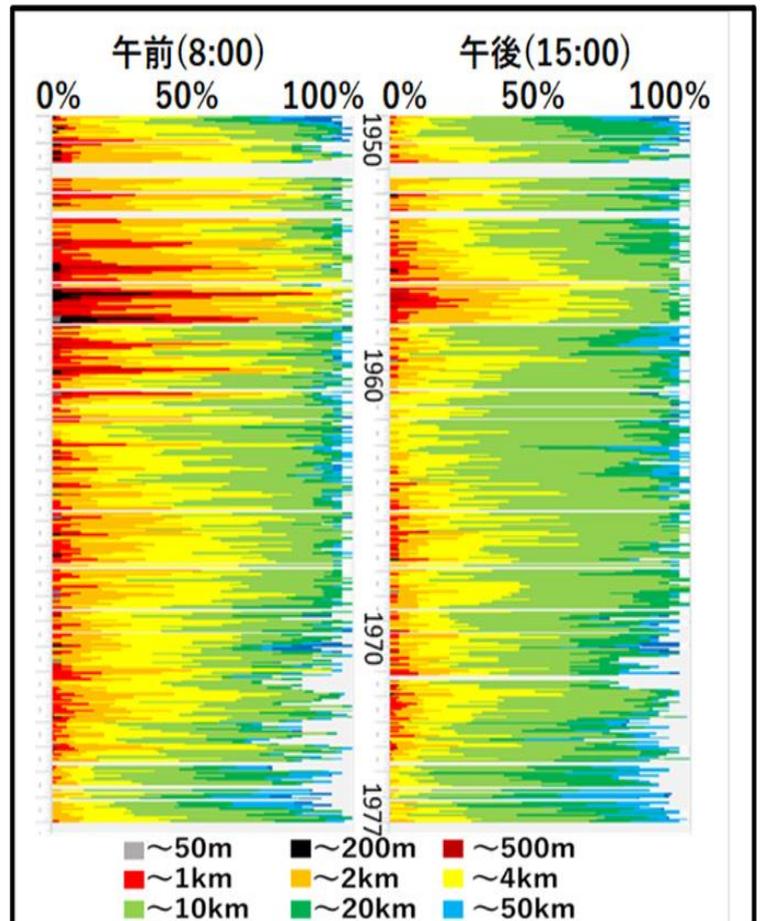


図 34 目視による過去の視程(1950 年～1977 年)
(田口 2019 月毎の積算データを並べた)

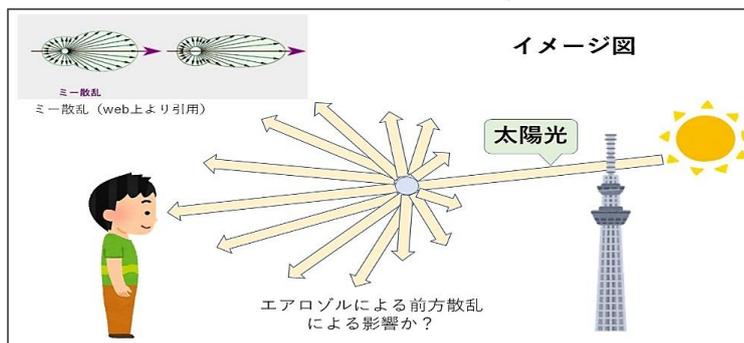


図 35 エアロゾルによる前方散乱のイメージ

(6) 非降水時に

おける視程

先行研究から、現在は悪視程となる原因のほとんどは、降水によってもたらされることがわかった。しかし過去の悪視程は、降水だけを要因とするにはあまりにも頻繁にあり、大気汚染等の原因が示唆された。

そこで、過去と現在の非降水時の悪視程について、8時・15時の視程及び湿度(本校で測定)の観測記録を用いて調査し、川端康弘ほか(2021)の研究を参考にして、グラフを作成した。

方法

過去(1957~1968年)の年ごとと現在(2020年10月~2021年3月)の期間について、非降水時の低視程状態(視程距離10km未満)のとき、大気が湿潤であるか乾燥であるかを相対湿度75%で分類した。非降水時の低視程は、相対湿度75%以上のとき「もや」とされ、75%以下の乾いたときは「煙霧」とされるため、分けて記した(図36)。各グラフの縦棒は視程距離10km未満で、湿度75%以上を青で示し、湿度75%以下を橙で示した。灰色の折れ線は視程距離10km以上の積算日数を示すが、2020年以降の期間は示していない。

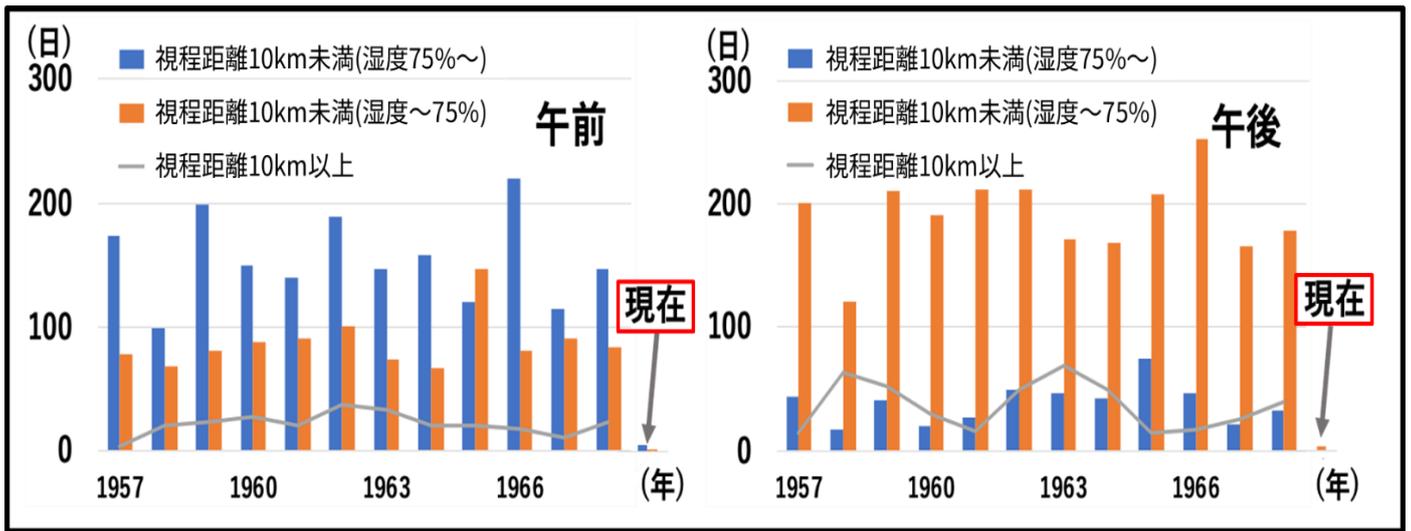


図 36 過去における非降水時の視程観測日数

結果・考察

- ・1950、60年代は、降水がなくても視程10km以下となる悪視程の日が多かった。現在は過去に比べて非常に視程が良く、降水がなくて視程10km未満になる日はほとんどない。つまり、過去の悪視程は降水以外の大気現象である、もやや煙霧が原因となって起きていることが明らかである。

- ・過去の午前の悪視程は、降雨がなくても湿度が高いもや(湿度75%以上)になっていることが多い。一方、午後の悪視程は湿度が低い状態(湿度75%以下)の方が多く、これは煙霧という現象になり、大気汚染等が原因となっていると推測される。過去の朝もやについては、かつての本校周辺は畑が多く、現在より冬季の最低気温が低いことから発生しやすい状況だったのではないかと考えられる。

6. 富士山の見え方の分析

2020年に新川らが、視程の観測機を参考にして、富士山の見え方を観測する装置(カメラの焦点距離は55mmに変更)を自作し、2020年10月から半年間、目視と装置による観測を開始した。本研究では、昨年の発表から増えた観測データを用いて、新たな方法での分析を行い、つるし雲と笠雲の発生と気象条件を調べた。

(1) 富士山が見えたか ～画像と目視による判定の比較～

目視観測の結果と画像を見て判定した9ヶ月間のデータを比較したところ、約9割で一致した(表5)。約1割、判定に差が出た原因として、目視観測の時間が最大で30分ほど撮影時とずれることがあるため、雲が移動した可能性が考えられる。

表5 目視観測と画像観測の比較(2020年10月～2021年6月、1時間毎、335件)

	午前	午後	合計
画像のみ○	8	9	17
目視のみ○	8	12	20
差なし	159	159	318
合計	175	180	355
一致した割合	91%	88%	90%

(2) 富士山が見えたか ～午前と午後の比較～

9ヶ月間に富士山が見えた割合は、午前で約50%、午後は約30%であった(図37)。午前は見えても午後には雲がかかり見えなくなることが多かった。

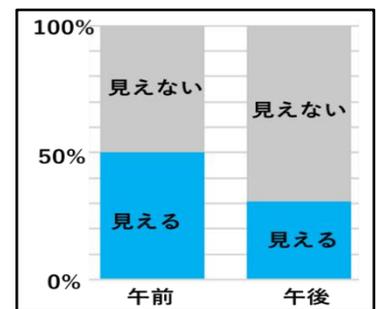


図37 富士山が見えた割合

(2020年10月～2021年6月の日中、1時間毎、約3,000件)

(3) 湿度と富士山が見えたかの比較

富士山の見え方を画像から目で判定した1時間毎のデータ(最近9ヶ月分3000件以上)を、本校で観測した湿度と関連させ、分析した(図38)。

結果、富士山は降水時にはほとんど見えなかった。非降水時には、富士山が見えるときは、見えないときに比べて湿度が低いときが多かった。湿度の平均は0.01%水準で有意差があった。

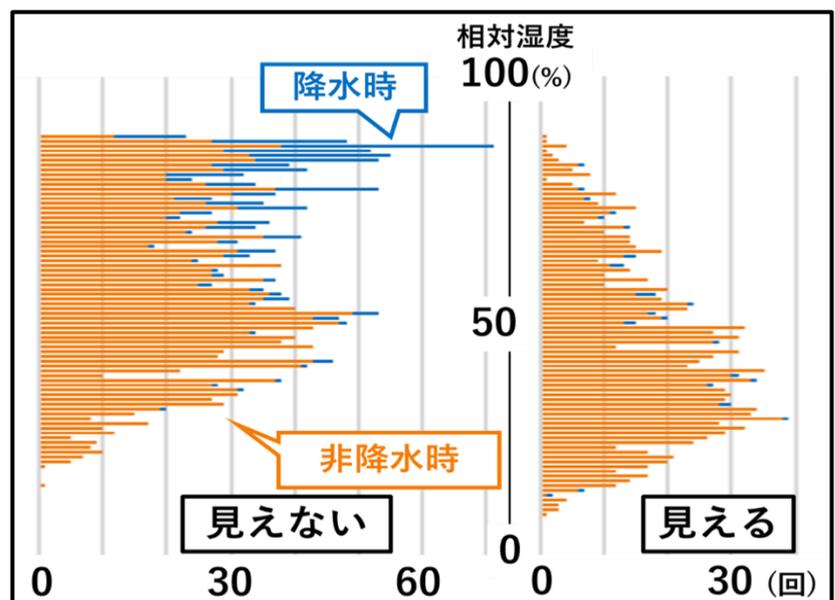


図38 富士山の見え方と本校の湿度(訳3,000件のデータを使用)

(4) 富士山が見えた日数の変化 ～過去と現在の比較～

過去 27 年間で現在の富士山が見えた日数の月別の割合を分析・比較した(図 41)。

結果、全体的に夏季は 1 割以下と少ないが、冬季は 5 割を超える年が多かった。現在は目視も画像も過去の平均に比べて見える日が多かった。

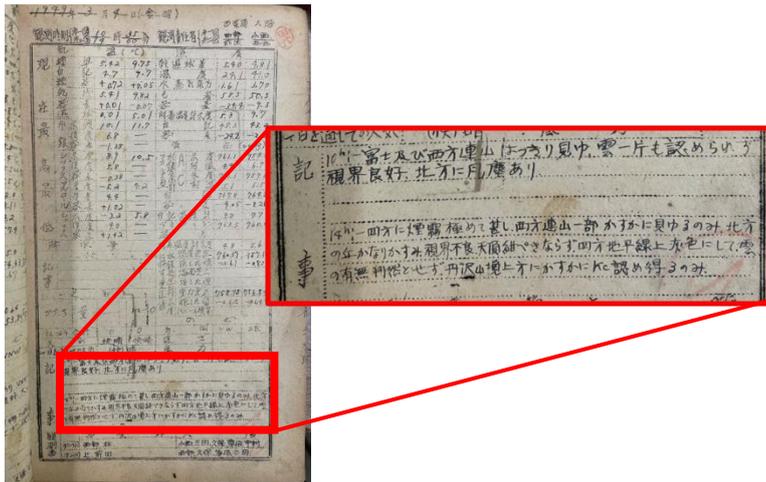


図 39 過去の気象観測記録の一部

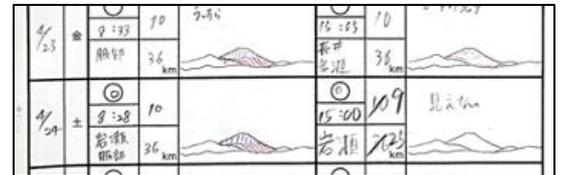


図 40 現在の観測記録用紙の一部

(5) 過去の富士山が見えた日数 ～成蹊高校との比較～

富士山観測で有名な成蹊高校のデータとの比較を行った。こちらでは 1963 年から大人が観測を行っている。成蹊高校では 1960 年代に見える日が少ない理由として大気汚染の影響を挙げたが、本校では同様の変化はない(図 42)。その理由として、以下の可能性等が推測される。

- ・両校の間にかつて多数あった工場の影響(図 43)
- ・段丘の縁にある本校から富士山を観測するときに、低い位置に滞留する汚染物質の影響を受けにくかった可能性がある。

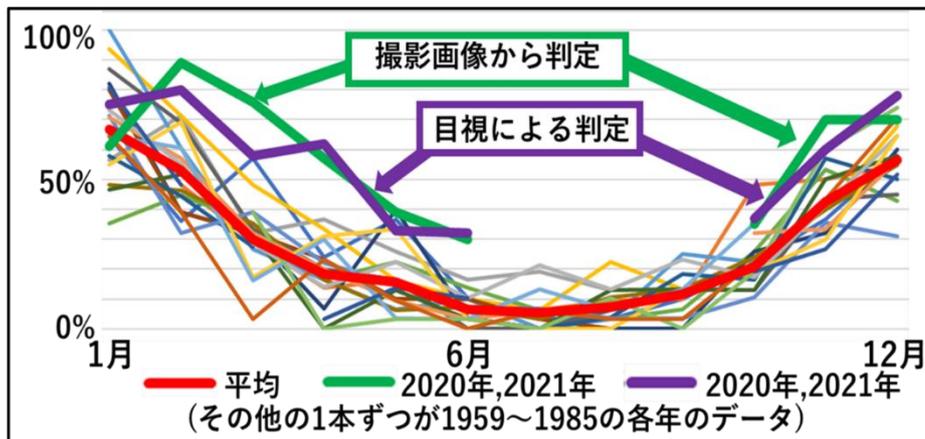


図 41 富士山が見えた月毎の日数(過去データは(田口 2019)より)

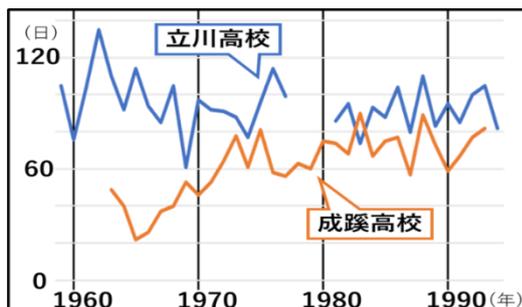


図 42 富士山が見えた日数(年毎)

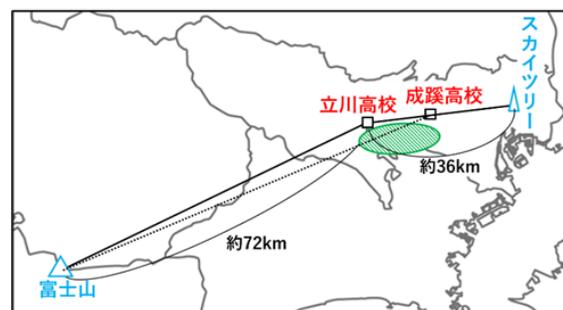


図 43 本校との位置関係

(緑の斜線部のあたりに工場が多くあった)

(6)現在における、笠雲・前掛け雲発生時の富士山頂の気象データ

屋上での観察や撮影画像から、前掛け雲や笠雲などの特徴的な雲が頻繁に発生していることがわかった。この富士山頂の気象データを調査してグラフを作成し、関連性を調べた。

<前掛け雲> (図 44)

- ・主に冬期の午前中に観測された。
- ・富士山頂の気温の低下との関連が顕著であった(図 43)。

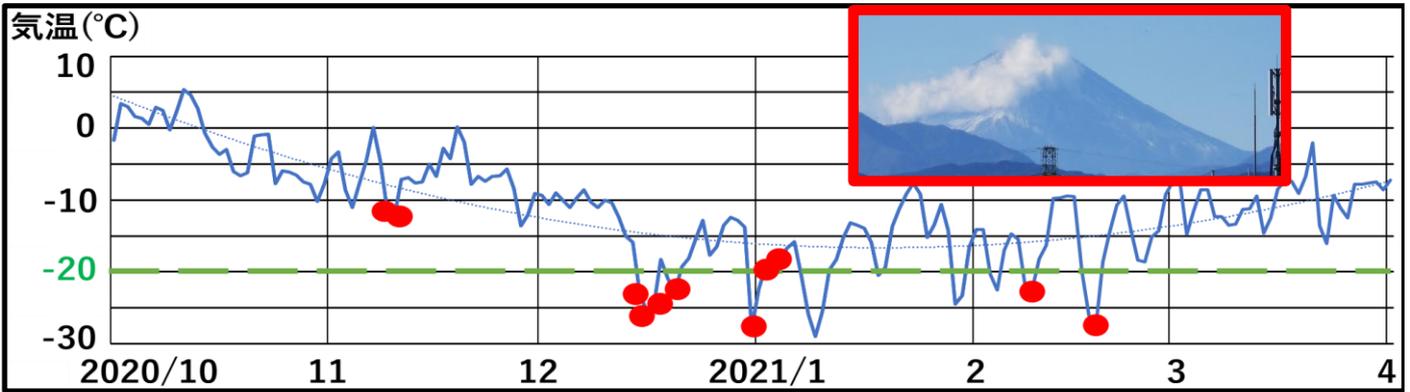


図 44 富士山頂の日平均気温(2020年10月～2021年4月) 赤丸は前掛け雲発生日

<笠雲> (図 45)

- ・毎月数回、午前、午後ともに観測された。
- ・富士山頂の湿度の上昇と関連が顕著であった。これは湿潤な空気が斜面により強制上昇させられ、山頂付近に到達することにより笠雲が発生するためだと考えられ、清水ら(2004)も同様に指摘している。
- ・笠雲発生時の地上風系をアメダスデータから調べたが、傾向はみられなかった。高層の風系の影響を知るためにウィンドプロファイラのデータなどを調査中である。

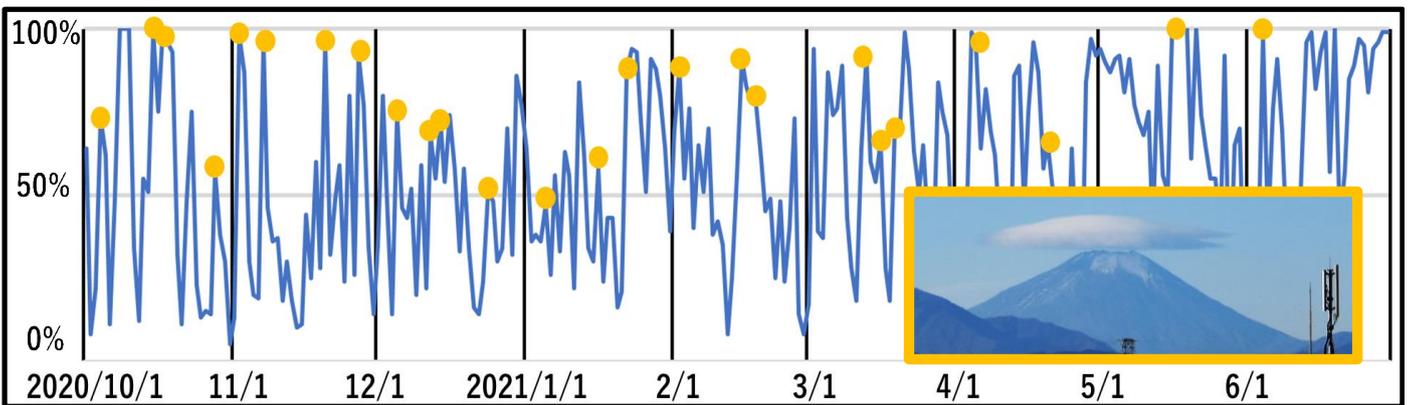


図 45 富士山頂の日平均湿度(2020年10月～2021年4月) 黄丸は笠雲発生日

7. 結論・今後の展望

視程観測の自動化を目指して、深層学習による画像の判定まで研究を進めた。判定を試行できたのは2カ所のみであり、今後も検討を進めたい。また、画像を切り出すための特徴点マッチングは、方法としては成功したが天候や露光量が異なる場合にはうまくいかなかった。新たな方法として取り組んでいる物体検出モデルを用いた方法について検討していく。また、物体の位置推定から「見える/見えない」の判定を行えるまでに精度を高めるために、深層学習モデルの改良をしていく。自動化に至るまではまだまだ課題が多いが、装置での観測からリアルタイムで視程を判別できるプログラムの開発につなげ、視程観測の自動化やデータ整理にかかる時間の短縮を図りたい。

また、気象観測データをモニタリングするためのシステムの製作を開始し、ディスプレイで観測データを表示することができた。視程画像や気温気圧等のデータをリアルタイムで表示するのはまだできていないが、完成を目指して研究を進めたい。本校の気象データがいつでも見られるようになれば、部員の観測に生かすだけでなく、校内の生徒にも関心を持ってもらえると考えている。本部の気象観測を継続させ、気象データを活用した研究を更に発展させていきたい。

視程の観測データの分析では、新たに非降水時の視程に注目し、過去の悪視程の原因が、降水ではなく、もやや大気汚染物質、風塵等によるものであることが明らかになった。また、過去の視程と大気現象のデータをまとめたグラフから、本校の視程観測が、毎年部員が変わる要素を持ちながらも、ある程度信憑性のあるデータを記録できていることがわかった。

現在は降水時をのぞいて極端な悪視程になることはなく、湿度やエアロゾルとの関連が大きい。黄砂との関連も調査したが、この2年間は関東に影響を与える黄砂がほとんど無く、あってもくもりで確認できなかった。光化学スモッグ（都全体で年に10数回）も減少し、過去の記録にあったような視程への影響は発見できなかったが、今後も大気汚染との関連を調査していきたい。

また、富士山の見え方や発生する雲について湿度や温度との関係を明らかにした。晴れた日の朝は白っぽく遠景が霞んでいることがよくあり、大気中のエアロゾルによる光の散乱だと考えている。今後、環境省の行っているLiDAR観測のデータを利用して実際のエアロゾルの量を調査してみたい。また、接地逆転層の形成との関連も考えられるので、エマグラムなどを用いた分析もしたい。

視程の目視観測を行っているところは、わかる範囲では気象庁のみで、同様の研究は見当たらない。1960年代後半から始まった大気質（窒素酸化物や硫黄酸化物、オゾン等）を調査する研究は大がかりな測定器が必要であり、光の透過度を利用する視程計器は高価であるため、部として扱うのは難しい。

視程観測はとてもアナログな方法であり、本部でも一時は忘れられていた観測であるが、先輩が過去データを掘り起こして分析したことで、過去の大気汚染の様子を明らかにできた。田口（2019）の研究ではロンドンスモッグや現在大気汚染で悩む世界の都市との比較も検討した。本部で積み重ねてきたデータを今後も活用し、研究に生かせるよう、観測を自動化する方法を探っていきたい。

8. 謝辞

本研究は、2019年～2021年の3回、気象文化創造センターで開催する高校・高専気象観測機器コンテストの助成金を受けて行いました。感謝申し上げます。天文気象部OBの田口小桃氏(大学2年)には先行研究について、浪波翔太氏には観測装置の製作について、浜島悠哉氏(大学1年)にはPythonのプログラム作成について、樋口陽光氏(修士1年)には深層学習のプログラミングについてご指導いただきました。天文気象部顧問の可長清美先生に全体のご指導をいただきました。視程の目視観測や装置の製作には多数の天文気象部員が関わっており、分析で使用した本校気象データは気象班メンバーがまとめている気象月報や過去資料を使用しました。過去の調査では本部OBGや地域の方にご協力いただきました。

また、これまで高校・高専気象観測機器コンテストや、気象学会、地球惑星研究連合大会、LiweE! 高大連携研究発表会等で発表した際に、多数の専門家の方から助言をいただきました。本研究に携わってくださった方々に心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 2019 気象学会・2019 全国 SSH 指定校研究発表会 立川高校：田口小桃
『立川高校における50年間の視程の変化と戦後の大気汚染について』
- 2) 2019 第8回高校・高専気象観測機器コンテスト 立川高校：浜島悠哉・田中陽登・馬場光希・田口小桃
『ClearSky 視程観測の自動化』
- 3) 2020 第9回高校・高専気象観測機器コンテスト 立川高校：浜島悠哉・田中陽登・馬場光希・安原拓未
『「見えてる?!」視程の新たな観測方法の開発とその分析』
- 4) 2020 第9回高校・高専気象観測機器コンテスト 立川高校：新川凌央 竹添麟富士山観測装置
『芙蓉～富士山の見え方と気象現象の関係を探る～』
- 5) 2021 第3回中高生情報学研究コンテスト 浜島悠哉・田中陽登・馬場光希・安原拓未
『カメラと Raspberry Pi を用いた視程観測装置の自作』
- 6) 2021 全国高校生総合文化祭自然科学部門発表 立川高校天文気象部 新川凌央・安原拓未・牛坂友哉・戸田晃太
『視程の新たな観測方法の開発とその分析～50年間続いた視程観測を再開し、その自動化を目指す～』
- 7) 立川高校天文気象部 気象データと気象月報
- 8) 気象庁ホームページ
- 9) 気象庁 「気象観測の手引き」1998) 日本気象予報士会編 『気象予報士ハンドブック』オーム社 2008
- 10) 野本真一「視程の変動」1976, 天気5
- 11) 川端康弘ほか『東京都心における視程の変化』気象2021
- 12) 東京都公害研究所「公害と東京都」1970
- 13) 大平俊男, 中村喜三雄: 大気汚染からみた東京都の気象, 東京都環境科学研究所年報, 1970
- 14) 東京都における降下ばいじん中の金属成分の推移, 東京都公害研究所年報, 1983
- 15) 東京都公害研究所「公害と東京都」1970
- 16) 新多摩川誌編集委員会『新多摩川誌』 2001
- 17) 三田 鶴吉 『立川飛行場史』1976
- 18) 清水崇博, 大野希一, 遠藤邦彦, 山川修治
『ライブカメラにより観察された富士山の笠雲・吊るし雲』日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要2004
- 19) 荒木健太郎『雲を愛する技術』光文社 2017
- 20) 武田康男・菊池真以『雲と天気大事典』あかね書房 2016
- 21) 武田康男『空の図鑑』KADOKAWA 2014

- 22) 宮下敦 『成蹊気象観測所における視程観測について』 日本気象学会 1994
- 23) 斎藤康毅 『ゼロから作る Deep Learning Python で学ぶディープラーニングの理論と実装』 オライリージャパン 2016
- 24) British Machine Vision Conference (BMVC) AtBristol, UK, Pablo F. Alcantarilla, Jesús Nuevo and Adrien Bartoli “Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces.” 2013
- 25) Fix, Evelyn; Hodges, Joseph L. “Discriminatory Analysis. Nonparametric Discrimination: Consistency Propertie” 1951
- 26) International Conference on Learning Representations (ICLR), San Diego K. S. a. A. Zisserman, “Very deep convolutional networks for large-scale image recognition”2015
- 27) IEEE transactions on medical imaging 35.5, Tajbakhsh, Nima, et al. “Convolutional neural networks for medical image analysis: Full training or fine tuning?” 2016
- 28) image-net ホームページ