

飛行機雲撮影と気象データ・航空機追跡サイトの情報から探る
飛行機雲の形成と要因：初期観測結果

桑原夏樹^{*1}・橋本龍朋^{*2}・黒岩大河^{*2}・岩本拓巳^{*2}・
小松 颯^{*2}・横山有太^{*3}・高田 拓^{*4}

**Contrail formation and its factor obtained from contrail photos
with information from weather and airplane flight data site: First observational results**

Natsuki KUWAHARA, Ryuto HASHIMOTO, Taiga KUROIWA, Takumi IWAMOTO,
Soh KOMATSU, Yuta YOKOYAMA, and Taku TAKADA

Summary

Contrails sometimes appear behind airplanes. The condition for contrails depends on a combination of various meteorological conditions, such as temperature and humidity in the upper air. In this study, we obtain images of contrails using a telephoto lens camera and acquired weather data from the Japan Meteorological Agency website. We then examine the relationship between contrail characteristics and weather data, including information from the Flightradar24 website (e.g., plane type, flight altitude, etc.). Consequently, many thicker contrails are often observed when the upper air humidity is high. The number of airplane engines is also important to contrail formation. We also discuss herein future observational targets and design our new observational system based on these results.

1. 序 論

飛行機雲は、飛行機の後方にできる筋状の雲である。一般に、雲が形成されるのは、大気の下層部分である対流圏である。対流圏界面は季節によって上下するが、地上から約1万mまでの大気の層が対流圏であり、それより上は成層圏と呼ばれている。成層圏では、高度が上がるに従い気温が上昇することもあるため、雲はほとんど形成されない。また、雲は高度や形状により10種類に分類されている¹⁾。

飛行機雲の形成メカニズムは次のように考えられている。私たちが目にする旅客機の多くはジェット機であるが、ジェット機は内部で吸い込んだ空気を加圧・燃焼させ、300-600℃の高温・高圧ガスを勢いよく噴き出すことで前進している。上空約1万mを飛行する飛行機の外は、-40℃以下であり、特に主翼などの後ろには空気の渦ができて、部分的に気圧と気温が下がる²⁾。そこに、高温・高圧である排気ガスが噴出される。燃焼によってできた排気ガス中の水蒸気と周りにある水蒸気が急激に冷やされ、排気ガス中の塵を核として雲が形成される^{2,3)}。水蒸気量はその場の気温と

*1 高知工業高等専門学校 物質工学科 3年生

*2 高知工業高等専門学校 電気情報工学科 3年生

*3 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 講師

*4 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 准教授

湿度により決まるため、飛行機雲の形成には、飛行機の高度と共に、上空の気温や湿度が関係している。また、飛行機の種類によってエンジンの数や出力の違いによる飛行機雲の形成の違いも考えられる。先行研究⁴⁾では、飛行機雲の軌跡の長さを基に、3種類の観測例に分けて統計的な解析を行い、飛行機雲の発生条件、形状の違いが生まれる理由、飛行機雲が発生しやすい日、季節について考察を述べている。本研究では、飛行機雲の有無及び飛行機雲の変化と、その要因を、より定量的に明らかにするため、空の定点観測に加えて、飛行機雲が観測された際に撮像した画像と、気象データ及び飛行情報を対応させて調べた。

2. 観測方法

飛行機雲の撮影のため、図1に示すカメラを用いた。撮影した期間は、主に2017年9月28日から10月12日までと10月21日から11月3日までの期間で、高知工業高等専門学校（高知高専）の敷地内で撮影を行った。この期間中に、(1) 時間・場所によらず飛行機雲が観測された際に撮影した写真と、(2) 同じ場所・同じ時間帯に空を撮影した写真について、解析を行った。また、気象庁が提供している気象データ（地上：気温、湿度、風速など、高層：気圧、気温、湿度など）、飛行機の飛行情報を発信しているFlightradar24サイト⁵⁾からの飛行情報（飛行機の高度、機種など）を利用した。高知高専は高知龍馬空港のすぐ近くに位置しているが、高知空港を離着陸する飛行機の高度は低く、飛行機雲の形成には関わっていない。飛行機雲の形成に関わる飛行機の航路は、主に中部・関東方面と九州・東南アジア方面を結ぶ高度の高い航路と、関西方面からの離着陸に向けて上昇・下降している航路である。



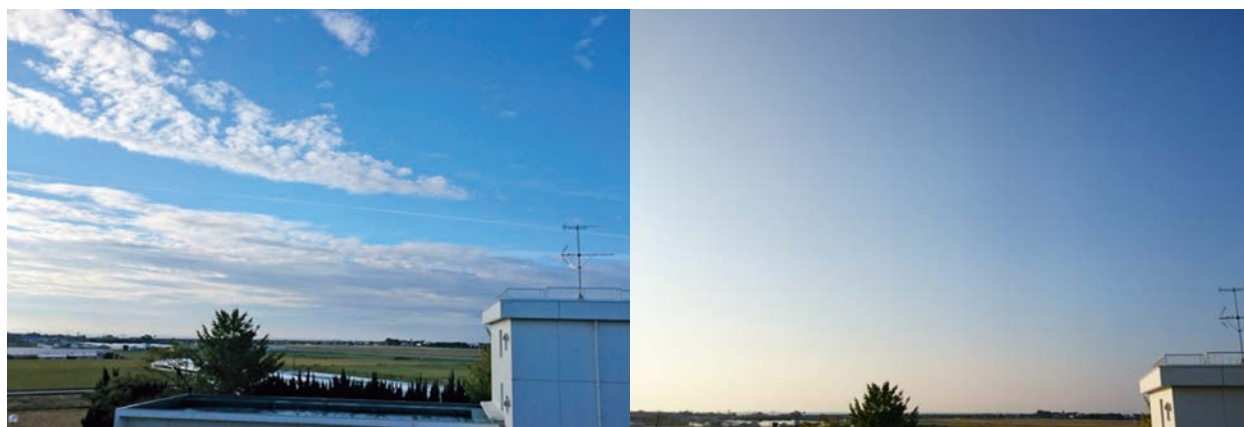
図1 観測に使用したカメラ（Nikon1J3 + 1 NIKKOR VR 10-100mm f/4-5.6）

3. 結果と考察

撮影した写真に関しては、飛行機雲の有無、飛行機雲の形状の違い、時間経過による飛行機雲の変化、の3つの観点で分類した。各々の写真と気象データ及び飛行情報は対応させて考察を行っている。以下では、各々の場合の観測結果と考察を述べる。

3.1 飛行機雲の有無

飛行機雲は、上空の大気の状態で発生の有無が考えられている。観測例を図2に、気象データを表1に示す。同じ時間に同じ場所で撮影しているため、同一の航路を通る飛行機であると考えられるが、10月3日には飛行機雲が見られ、10月10日には飛行機雲が見られなかった。表1に示すように、両日の地上での湿度・気温にはほとんど差がなかった。



10月3日 7:10

10月10日 7:10

図2 同一の場所、時間帯での飛行機雲の有無の違いについて

表1 10月3日と10月10日の地上での気象データ¹⁾

日付	時刻	気温 (°C)	湿度 (%)	風速 (m/s)	気圧 (hPa)
10月3日	7:10	21.2	96	1.8	1,009
10月10日		20.7	90	1.6	1,020

そこで、気象庁が提供する高層気象データを調べた。高層気象データは高度2万m付近までの気象データであり、気球観測により1日に2回の観測（9:00、21:00）が行われている。高層気象データの観測点は少ないため、高知県に最も近い観測点である潮岬（和歌山県東牟婁郡串本町）のデータを使用している。表2は、潮岬の9:00の気象データ（高度1万m付近）であり、湿度は飛行機雲が観測された10月3日の方が10月10日より明らかに高いことが分かる。

統計的な傾向を見るため、潮岬で観測された10月21日から11月10日までの高層気象データと飛行機雲の観測の有無の関係を図3に示す。各日付上の値が9:00のデータである。台風などの影響で、観測データがない場合は、データ点を欠落させている。日付の下段には、その日の飛行機雲の観測状況を示している。飛行機雲を観測できなかった日は「無」、朝（7:10頃）か夕方（17:30頃）のどちらかで観測できた日は「有」、観測を行わなかった日は「一」、観測点での天気が雨であった日は「雨」とした。実際、飛行機雲が見える日は高層の湿度が高く、飛行機雲が見えない日は高層の湿度が低い。気温が同程度で湿度が高いため、飛行機雲の形成に必要な水蒸気量が多く、予想通りの結果である。実際、飛行機雲が非常に多く見られる日と、ほとんど見られない日があり、飛行機雲の有無は、高層の水蒸気量が大きく影響していると考えられる。高層の気温に関しては、一般的には、気温が低いと飛行機雲が発生しやすいと言われている⁴⁾。しかし、-40°C程度の気温であっても、10月31日のように飛行機雲が観測できることもあれば、10月24日のように飛行機雲が観測されない日もあった。高層の気圧の値は高度に対応しており、気圧の値がほぼ同程度であることから、湿度・気温のデータを同じ高度のデータとして取り扱ってよいことが分かる。

日付	気圧 (hPa)	ジオポテンシャル 高度 (m)	気温 (°C)	湿度 (%)	飛行機雲の有無
10月3日	284.1	10,081	-33.7	48	有
10月10日	291.8	9,911	-35.4	11	無

表2 高層の気象データと飛行機雲の有無¹⁾

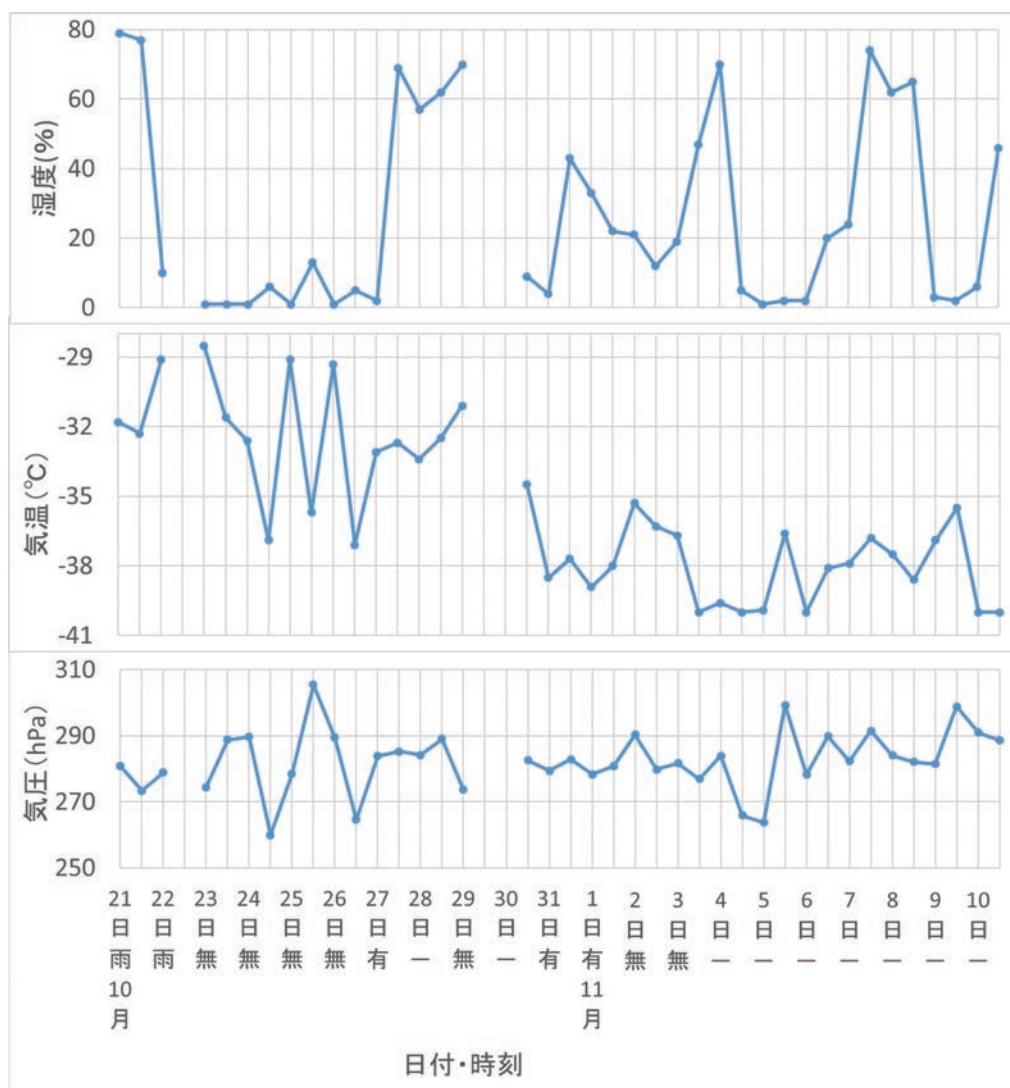


図3 飛行機雲の有無と、高層の(上)湿度、(中)気温、(下)気圧の関係(10月21日~11月10日)

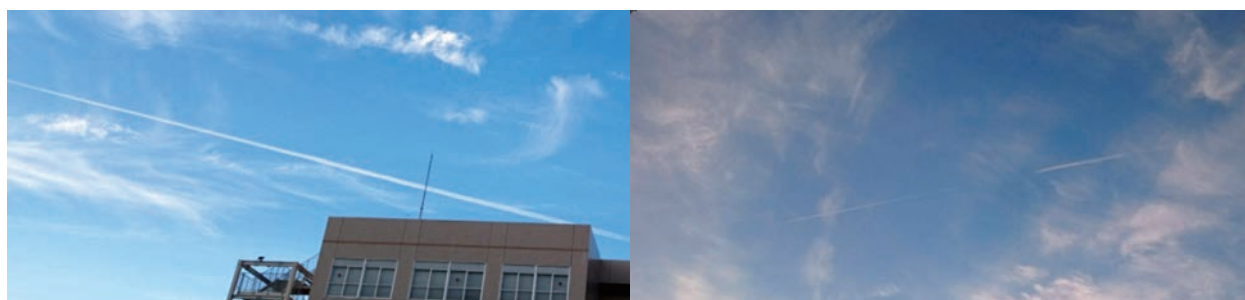
3.2 飛行機雲の形状の違い

飛行機雲の形状には様々なものがあり、その日の気象状況や、飛行機の種類など様々な要因で変化すると考えられる。図4~6では、形状の異なる飛行機雲を示しており、対応する高層気象データを表3に、地上気象データを表4に示す。図4では、10月4日17時30分の飛行機雲は一直線であるのに対し、同日17時34分の飛行機雲は、途切れ途切れで濃淡が一樣でなく、細いことが分かる。各々の飛行機の高度を比較すると、17時30分の飛行機の高度は9,587mで、17時34分の飛行機の高度は9,845mであった。また、同日の同じ時間帯に通過した高度10,068mの飛行機の跡に、飛行機雲は形成されていなかった。高層の気象条件が飛行機雲の発生に都合が良い場合であっても、高度によって、飛行機雲の形成に差があることがわかる。飛行機雲観測の統計解析からは、1万mから1

万2千mでは飛行機雲が出やすい⁴⁾と言われているが、飛行機雲の発生する高度は、気象条件毎に変動している可能性がある。今後、観測例をさらに増やすことで、こういった条件下では、どの高度で飛行機雲がでやすいのか明らかにできるかもしれない。

飛行機の種類によって、飛行機雲の本数が異なる例を次に示す。図5では、10月4日の飛行機雲は1本であるのに対し、8月25日の飛行機雲は2本並んでいる。各々の飛行機を調べたところ、10月4日はエンジンが4発機のBoeing747であったのに対し、8月25日は双発機のAirbus A321-211であった⁵⁾。飛行機雲の形成原理を踏まえると、双発機と4発機では飛行機雲がそれぞれ2本、4本形成されていると考えられ、実際に飛行機の後方近傍では2本や4本に見えることもあるが、すぐに合わさってそれぞれ1本、2本に見える。飛行機のエンジンの個数が飛行機雲の形成に影響している例である。

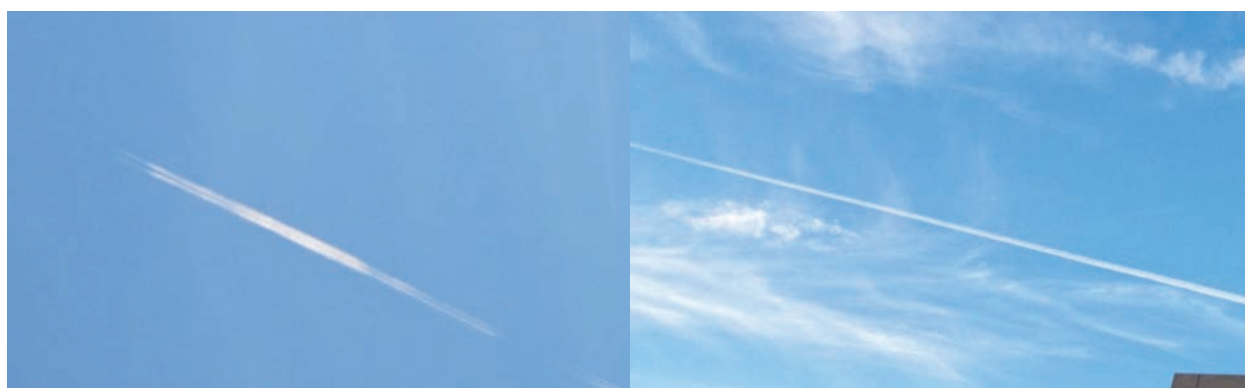
また、飛行機雲は複雑な形状に変化することがある。図6では、8月23日の飛行機雲は飛行機が通り過ぎた後から、より微細な構造に発展して煙のような形になっており、10月4日の飛行機雲は通り過ぎたあと、広がりはあるものの、色は薄くなり、それ以上発展している様子は見られない。高層の湿度は、8月23日が18%、10月4日が47%であり、10月4日の方がより広範囲に安定して飛行機雲が発生しやすい状況である。一方で、地上の湿度は8月23日が79%、10月4日が46%となっており、地上と高層の湿度の状況が逆転している。この結果から、飛行機雲の形状変化に関しては、高層の湿度の状態に加えて、地上の湿度に起因した高層への影響なども関係している可能性が考えられる。さらに観測例を増やした比較解析を行っていきたい。



10月4日 17:30

10月4日 17:34

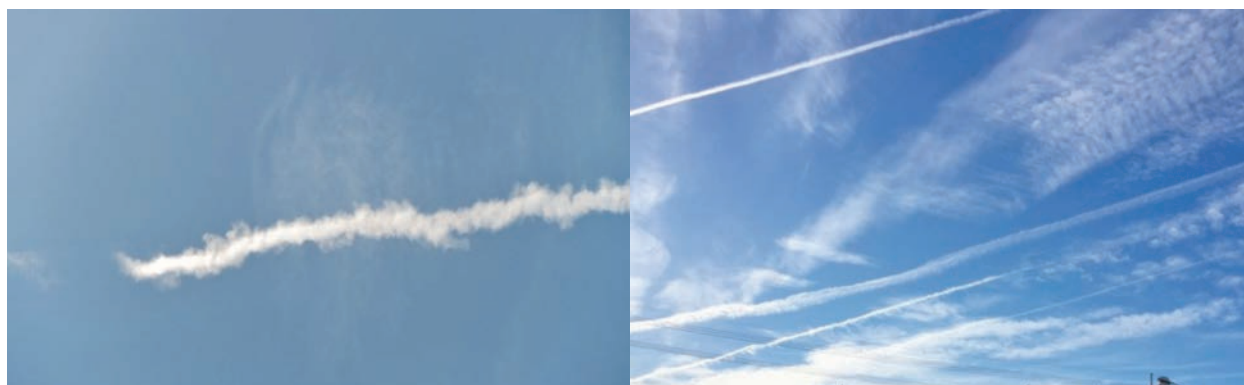
図4 飛行機雲の観測例： 濃さの違い



8月25日 9:25

10月4日 17:30

図5 飛行機雲の観測例： 本数の違い



8月23日

10月4日

図6 飛行機雲の観測例： 飛行機が通り過ぎた後の形状の違い

表3 図4～図6に対応する高層の気象データ（潮岬9：00）

日付	気圧 (hPa)	ジオポテンシャル高度 (m)	気温 (℃)	相対湿度 (%)
8月23日	295.6	9,903	-30.6	18
8月25日	293.6	9,943	-26.3	8
10月4日	278.1	10,205	-34.9	47

表4 図4～図6に対応する地上での1日の平均気象データ¹⁾

日付	平均気圧 (hPa)	平均気温 (℃)	平均湿度 (%)	平均風速 (m/s)
8月23日	1013.8	29.4	79	3.6
8月25日	1007.5	30.5	73	3.5
10月4日	1017.6	21.4	46	22.2

3.3 時間経過による飛行機雲の変化

飛行機雲は時間と共に変化していく。飛行機雲が通常の雲へ同化していく様子が見られた例を図7に示す。表5に、その日の地上の気象データを示す。10月4日の夕方、風が強く、空には巻雲が広がっていた。巻雲は対流圏上部から成層圏で見られる雲で、氷の結晶が集まって形成されている繊維状の雲である。図7に示すように、飛行機雲は徐々に広がりながら大きく移動している。17時25分にあった飛行機雲（黄色矢印）は17時40分には周りにあった雲（巻雲）と見分けがつかなくなった。17時30分に下方に現れた飛行機雲（緑色矢印）も、同様に移動しながら拡散していることが分かる。表6に示すように、天候は10月4日までは晴れていたが、その後悪化している。また、地上では若干風が吹いていた。図に示していないが、湿度が高く、飛行機雲ができやすい日であっても、20分ほどで飛行機雲が消えた日と、40分ほど経っても消えない日があった。一般には、高層の湿度が高いと、飛行機雲が消えにくいとされている⁶⁾。両日の高層の湿度はほぼ同じであったが、地上での湿度や気圧にも違いがあった。飛行機雲の巻雲への移行や、消えるまでの時間とその要因に関しては、さらに観測例を増やして、天候や地上の気象条件などとの関連性を調べたい。

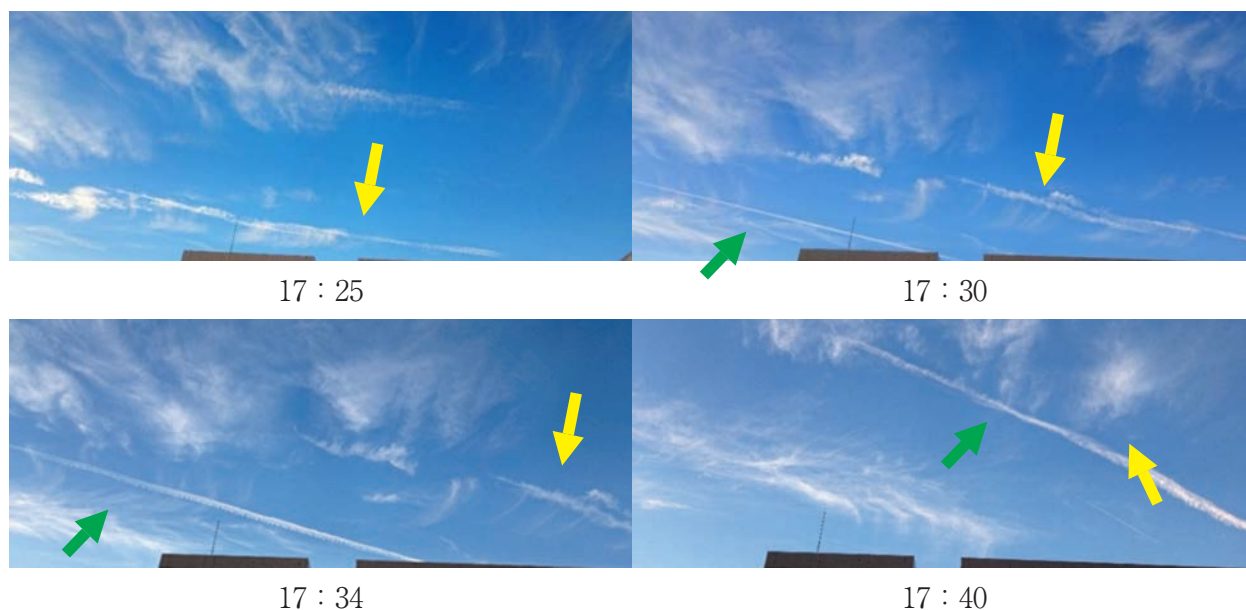


図7 巻雲と同化する飛行機雲の例

表5 10月4日の各時間帯の地上の気象データ¹⁾

時間	気温 (°C)	湿度 (%)	風速 (m/s)	風向	気圧 (hPa)
17:30	21.7	39	2.1	北北東	1019
17:40	21.3	40	2.1	北東	1019

表6 観測期間前後の天候データ¹⁾

月日	9月29日	9月30日	10月1日	10月2日	10月3日	10月4日	10月5日	10月6日
天候	晴	晴	曇	雨	晴	晴のち曇	曇のち雨	雨のち曇

4. まとめ

本論文では、飛行機雲の有無や形状は天候と関係があるのかについて、飛行機雲の撮影画像と、気象・飛行機データサイトからの情報を合わせて解析を行った。主な結果を以下に示す。

- ・飛行機雲は、晴れている日でも、観測される日と観測されない日があり、高度1万m付近の高層の湿度が高いと形成されやすい。
- ・飛行機雲の形状や有無には、高層の気象条件に加えて、飛行機の高度が関係している。
- ・2本の飛行機雲が並ぶものは、現在は少なくなっている4発機の飛行機によるものである。

また、本研究で明らかにできなかった飛行機雲の消失や巻雲への移行に関しては、高層の気温・湿度以外の条件が影響している可能性があり、地上の気圧、湿度、風速などを含めて、さらに観測例を増やして検討する必要がある。現在、小型のオンボードプログラムを使い、ウェブサイトからの自動データ取得と、自動撮影などが可能となる観測装置の製作を進めている。具体的には、Flightradar24等からのデータを用いて、飛行機が観測できる範囲で自動的に飛行機雲を撮影できるようにする計画である。この装置を用いることで、より多くの観測データを得て飛行機雲の形成とその要因を明らかにしたい。

謝 辞

本研究の実施に関して、一般財団法人WNI気象文化創造センターから助成を受けています。厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 気象庁、URL : www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php、検索日 : 2017年11月11日
- 2) J A L 航空豆知識、URL : <https://www.jal.co.jp/entertainment/knowledge/agora54.html>、検索日 : 2017年11月11日
- 3) 学研サイエンスキッズ (科学なぜなぜ110番)、
URL : <https://kids.gakken.co.jp/kagaku/110ban/text/1439.htm>、検索日 : 2017年11月11日
- 4) 青森南高校による研究発表「飛行機雲の研究～出現する条件と形～」(河合塾)、
URL : <https://www.milive.jp/live/2016sobun/chigaku201/>、検索日 : 2017年11月11日
- 5) Flightradar24、URL : <https://www.flightradar24.com>、検索日 : 2017年11月11日
- 6) U. Schumann, Influence of propulsion efficiency on contrail formation, *Aerospace science and technology*, 4.6 (2000): 391-401.

受理日 : 2017年11月14日