

東京都心における視程の変化

川 端 康 弘*・梶 野 瑞 王**・財 前 祐 二**
足 立 光 司**・田 中 泰 宙**・清 野 直 子**

1. はじめに

視程とは地表付近の大気混濁の程度を距離で表したものであり、どの程度見通しがきくかという情報である。視程は気象解析のほか、大気汚染の監視のため、あるいは交通機関の運行のためなどに利用されており、特に航空機の運航には欠かせない情報となる(野本 1976 ; 気象庁 2002 ; 菅原ほか 2008)。見渡せる距離が短くなる低視程状態は、雨や雪などの降水現象のほか、非降水時にも発生し、例えば霧に関してはこれまで多くの研究が行われてきた(藤部 1985 ; 山本 2000 ; 大橋ほか 2004 ; Akimoto and Kusaka 2015)。風じんや黄砂、火山灰、スモッグなどの大気汚染が原因となることもあり、自然起源・人為起源のエアロゾル粒子や水蒸気と大きく関係している(澤田 1992 ; Skinner *et al.* 1999 ; 田中ほか 2005 ; 竹村 2013)。これらは同じ物理プロセス、すなわち、未飽和での高濃度エアロゾルの短波散乱により、視程が低下することを示している。エアロゾル粒子には吸湿性を持つものがあり、相対湿度に依存して粒径が大きく変化する。特に、大気エアロゾルの主成分である硫酸塩エアロゾルは水溶性が高いため、相対湿度の変化に応じて粒径が成長または縮小することで、粒子径に依存する光学特性を変化させる(Iwakura and Okada 1999 ; 財前ほか 2018 ; Adachi *et al.* 2011)。一方、変質していない

黄砂などの鉱物エアロゾルは一般には水溶性が低いため、湿度依存性は弱いと考えられる(林 2013)。

都市化の進展に伴ってヒートアイランドが目立つようになり(藤部 2007)、その実態解明や緩和策など、様々な都市気象研究が行われるようになってきた(Kanda 2007 ; Fujibe 2011 ; 中川 2011 ; Nuruzzaman 2015 ; Matsumoto *et al.* 2017)。都市域ではヒートアイランドといった気温に着目した現象だけでなく、人間活動に伴う大気汚染や、その結果引き起こされる低視程現象も重要な問題となる。例えば、ヒートアイランドは風の循環を変化させ、大気汚染物質の輸送に影響を与える(吉門 2007)。また、都市域の上空逆転層は高濃度汚染をもたらす(鶴野ほか 1988)。

関東地方では高度経済成長期に都市化が急速に進み、工場や自動車等による汚染物質の排出により、大気汚染が社会問題となった。都市部の高濃度汚染は視程を低下させ(三谷 1961 ; 伊藤 1963)、初冬季には高濃度の光化学大気汚染が発生することがある(水野 1994 ; 兼保 2018)。また、陸風が吹き出す際の局地前線により大気汚染の濃度が変化する(Fujibe 1985)。その結果、汚染物質などのエアロゾル粒子の増加による視程の低下は、社会インフラにとって重要な影響を及ぼす可能性がある。一方、低視程状態を引き起こす要因の一つである霧の発生は、都市部に位置する東京では減少しているという報告がある(藤部 2012)。

低視程状態をもたらす大気汚染や霧の状態は年々変化しているが、低視程状態の統計的研究は1970年代に行われた調査に限られ、霧に関する研究を除くと近年の報告例は少ない(Nomoto 1983 ; 宮下ほか 1994)。そこで本研究では都市部の視程の実態を把握するため、これまでの長期間の観測記録を解析するとともに

* (連絡責任著者) 気象研究所。

kawabata@mri-jma.go.jp

** 気象研究所。

—2020年7月28日受領—

—2020年10月6日受理—

第1表 観測データの概要.

観測要素	地点および観測場所	解析期間	観測値	観測方法	観測機器設置高度
視程	東京 熊谷	1950~2017年	毎日12時値	目視	
天気	東京	1990~2017年	毎日12時値	目視	
浮遊粒子状物質	千代田区神田司町	1990~2017年	年平均値	β 線吸収法	22m
相対湿度	露場	1990~2017年	年平均値	強制通風式温湿度計	1.5m
		2013~2017年	毎日12時値		52m
気温	東京 大手町	露場	2013~2017年	毎日12時値	強制通風式温湿度計
風向風速	屋上	2013~2017年	毎日12時値	風車型風向風速計	52m
					53m



第1図 気象庁（東京管区气象台）の露場（千代田区大手町）から南方向を撮影した写真。露場の温湿度計を右下の点線、屋上の温湿度計および風向風速計を左上の点線で示す。

に、特に近年の東京における視程の気候学的特徴について調査した。

2. データ

解析に用いた観測データを第1表に示す。視程は都市部を代表する東京と、その経年変化を比較するために熊谷の気象官署の目視観測データを用いた。視程の定義は地方气象台等の一般官署での観測と、航空官署で異なる。本研究における視程は一般官署における

データを用いているため、その定義は最も見通しの悪い方向における、見通しの最大距離である（気象庁2002；前田 2015）。解析に用いた観測時刻は東京が12時、熊谷が15時である。1981年以前はNomoto（1983）のデータを用いた。また、天気や相対湿度、気温、風向風速のデータも使用した。東京の相対湿度や気温に関しては、2014年12月2日に観測露場が大手町から北の丸公園へ移転したが、大手町露場では継続して研究観測が行われた（志藤ほか 2015；志藤ほか 2016）。この期間では気象庁舎屋上においても相対湿度や気温、風向風速の観測が実施された（第1図）。そのため、本研究では2017年までの解析期間において、東京大手町における一貫した観測データを用いた。エアロゾル粒子に関しては、東京観測点近傍の一般大気監視測定局で測定された浮遊粒子状物質（SPM）のデータを用いた。

3. 結果と考察

3.1 視程の経年変化

東京と熊谷における降水時、非降水時を含む低視程（5 km 以下）の年間総日数の経年変化を第2図に示す。東京においては視程10km 以上の年間総日数も表示している。東京の低視程年間総日数は、1959年の240日をピークに年々減少している。1960年前後は大気汚染が深刻であり（河村 1972；坂本ほか 1989）、ピーク時の1959年には視程2 km 以下となる濃煙霧発生日数が56日を記録していた（三谷 1961）。その後、低視程日数は減少を続け、1997年前後は一時的に低視程日数が増えるが、2017年では18日しか観測されていない。同時に視程10km 以上の日数は年々増加しており、近年では年間300日を超えている。視程が年々良くなっ

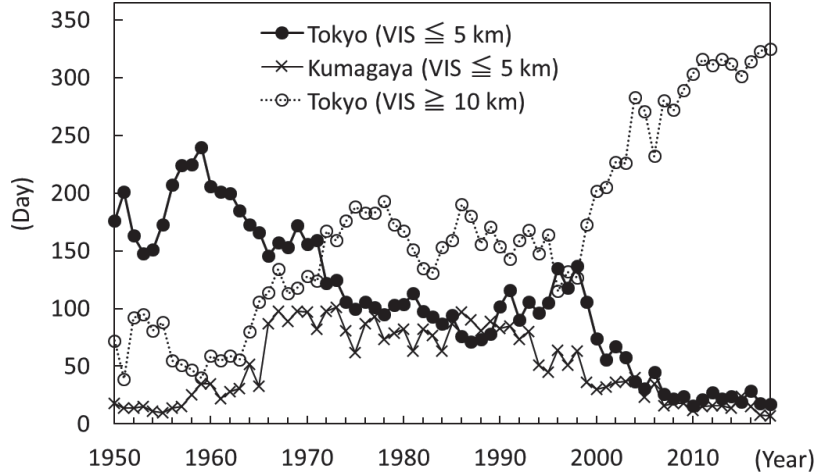
ていることは宮下ほか(1994)でも示されており、1963～1993年の観測において、東京郊外の観測点から都心方向の約17km離れた視程目標を確認できた回数が増えている。

一方、熊谷では1960年頃から低視程日数が増え、1966年から1990年頃までほぼ横ばい傾向を示す。その後は東京と同じく減少傾向となっている。熊谷では東京に遅れて都市化が進んだことが、1960年代に低視程日数が増えた一因と考えられる。国土交通省の国土数値情報土地利用3次メッシュデータにおいて、地

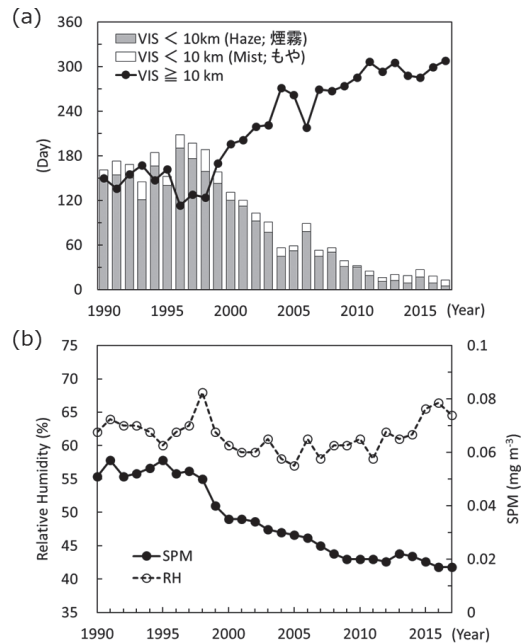
表面種別のうち「建物用地・幹線交通用地・その他の用地」を都市地表面と定義すると (Aoyagi and Seino 2011), 関東地方の2014年版土地利用では、1976年版と比べて、東京の郊外まで都市地表面が広がっている (川端ほか 2018)。視程は社会活動の程度と都市化に伴う気象の変化によって影響を受ける (野本 1976)。都市化が進む一方で、東京・熊谷ともに低視程日数が減少しているのは、同時に大気質が改善してきたことを示している。このことは、環境対策等によりSPM濃度が年々減少していることから示唆される (大原・森野 2012; 東京都環境局環境改善部計画課 2018)。大気汚染は都市部の生物活動に影響を与えるが、近年の地衣類の生息数は以前よりも回復傾向にあることが報告されている (大村・杉元 2019)。この生物活動の変化傾向は、都市部の大気環境が改善したことを裏付けている。

3.2 非降水時の視程の経年変化

低視程状態は降雨によってももたらされるため、1990年以降の非降水時の視程について調査した。非降水時の低視程状態について、霧は視程1km未満の現象で相対湿度は一般に100%に近く、もやは視程1km以上10km未満の現象で相対湿度は75%以上が多い。一方、煙霧も視程10km未満の現象であるが、相対湿度は75%未満のことが多い (気象庁 2002)。本研究では、非降水時を降水現象以外の天気で定義し、また、もやと煙霧に関しては上述の相対湿度75%で分類した。なお、解析期間中の12時の観測値において、視程



第2図 東京(視程5km以下および視程10km以上)と熊谷(視程5km以下)における視程観測日数の経年変化。東京は12時、熊谷は15時の観測値。1981年以前はNomoto(1983)の結果を図示。



第3図 東京における (a) 12時の非降水時の視程観測日数(視程10km以上と視程10km未満の煙霧・もや)および (b) 相対湿度・SPMの年平均値の経年変化。

1km未満の霧は観測されていない。第3図aに非降水時の視程10km以上が観測された日数と煙霧・もやの日数の経年変化を示す。視程10km以上が観測された日数は第1図と同様、年々増加している。視程10km

未満の日数の割合は煙霧の方がもやよりも多い。視程は観測点周辺の地表面状態も影響する。地表面状態が被覆のない乾燥した土壌であれば、風じんにより視程が低下することがある（五十嵐ほか 2009）。中国では視程が1 km 未満となるような砂じん嵐が発生することがあるが（竹見ほか 1994）、東京では観測されていない。人工物の多い都市部では、ローカルな発生源からの塵や砂ぼこりが風によって舞い上がり、視程が10km 未満になる可能性は低い（山口・竹村 2011）。

また、黄砂は越境してきた自然起源のエアロゾル粒子であるが、1990年以降、東京において観測された日数は多くて4日であることから、黄砂現象による視程低下の頻度は小さい。このことから、東京では自然起源エアロゾルによる影響は小さく、観測される視程10km 未満の現象は、人為起源エアロゾルによるものがほとんどであると考えられる。その検証のため、第3図bにSPM濃度の経年変化を示す。SPMは発生源から直接排出される一次エアロゾルと大気中の光化学反応・中和反応等によって生じる二次エアロゾルで構成される（大原・森野 2012）。SPM濃度の減少傾向は、前述した近年の大気質の改善を示唆しており、視程10km以上が観測された日数の増加と整合的である。

視程が良くなってきている要因に、大気汚染の減少に加え、相対湿度の変化も考えられる。一般に、吸水性エアロゾル粒子は乾燥化によって粒径が小さく、視程は良化するが、都市の乾燥化がこの傾向をもたらすと考えられる。相対湿度の経年変化を第3図bに示す。1990年からの解析期間中においては、SPM濃度の変化傾向と比較して顕著な減少は見られない。相対湿度は年々変動が大きいため、SPM濃度変化と視程変化との関係ほど明瞭でない。しかし、気象庁（2014）の報告によれば、統計期間1931～2013年の東京の観測値の長期変化傾向を見ると、年平均気温は上昇するとともに、年平均相対湿度は減少している。また、数値解析において、地表面状態を変化させ都市化による寄与を調べたところ、都市化によって気温は上昇し、相対湿度は減少、すなわち乾燥化となることが示されている（気象庁 2014）。相対湿度の変化による視程への寄与を定量的に示すことが今後の課題である。

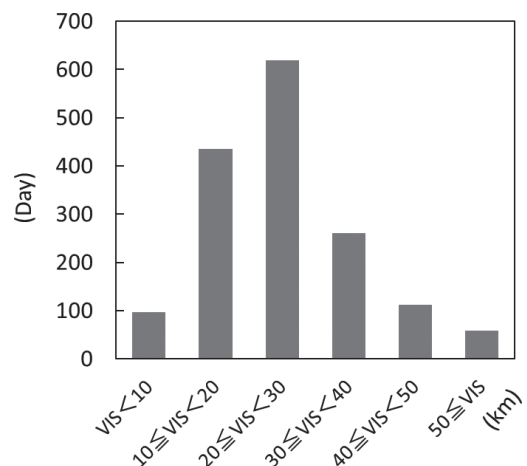
3.3 視程と気象要素との関係

東京における視程についてさらに詳細に調べるために、大手町において研究観測を実施した2013～2017年の5年間のデータを解析した。本節においても3.2節と同様に定義した非降水時の視程について調査した。

第4図に5年間積算した視程の頻度分布を示す。最も多く観測されたのは20km以上30km未満の視程である。研究観測では気象庁舎屋上においても気象観測を行ったため、屋上（高度52m）と露場（高度1.5m）の気温観測値を用いて、大気の成層状態を調べた。高度補正を行った気温差 ΔT は以下で定義する。

$$\Delta T = T_{\text{sic}} - T_{\text{top}} - \Delta H \times g / C_p \quad (1)$$

ここで、 T_{sic} は露場で観測された気温、 T_{top} は屋上で観測された気温、 ΔH は高度差、 g/C_p は乾燥断熱減率（ $0.0098^\circ\text{C m}^{-1}$ ）を示す（Stull 1988）。高度補正を行った気温差 ΔT はほぼ温度差に等しく、 ΔT が正值であれば大気は不安定成層、 ΔT が0付近であれば中立、 ΔT が負値であれば安定成層を表す。第5図aに ΔT と風速との関係を示す。分布は不安定側に寄っている傾向がみられる。これは、観測時刻が日射の強い12時であり、不安定成層を形成しやすい状況であったと考えられる。視程が10km未満となっている事例を白丸で表示すると、気温差 ΔT は $-0.3 \sim 1.3^\circ\text{C}$ であり、日中の成層状態の中では中立に近い状況下にある。また、3点を除いて風速が 4 m s^{-1} 以下の弱風下となっている。関東地方の内陸部に位置する成田空港では、強風下で風じんにより視程が低下することが報告されている（外山 1976）。しかし、東京は都市部に位置し、また、弱風かつ大気汚染物質が比較的蓄積しやすい条件下で低視程が観測されている。このことから、自然



第4図 東京における12時の非降水時の視程観測日数の頻度分布。解析期間は2013～2017年。

起源エアロゾル（風じんや黄砂）の寄与は小さく、主に人為起源エアロゾルによる視程低下であることが示唆される。なお、風速が 4 m s^{-1} よりも大きかった3点について気象状況を調べてみると、直前に雨が降っていた事例と、風向が北風弱風から南風強風に急変していた事例であった。風向が急変した事例については、風向の変化とともに気温の上昇が認められた。この状況は11月に発生しており、初冬季に見られる局地前線の北側冷気塊で、汚染物質が閉じ込められた名残であると推測される（水野 1994；吉門 2007）。

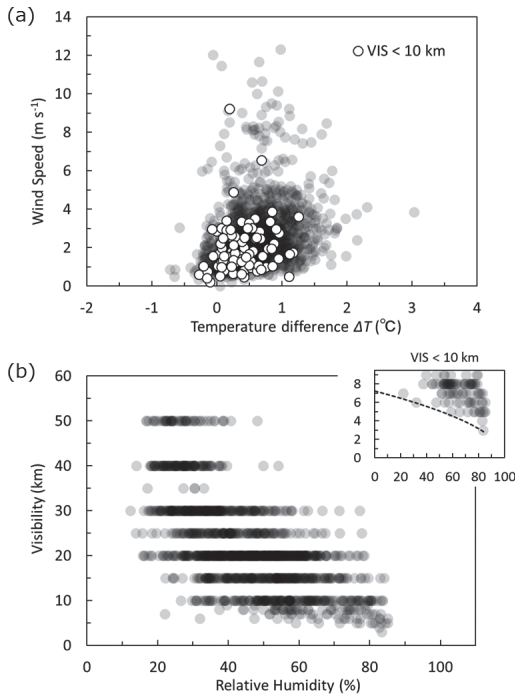
第5図bに屋上で観測された相対湿度と視程との関係を示す。第5図bの右上には視程10km未満を拡大して表示してある。観測された非降水時の視程は、相対湿度が85%以下で分布している。また、視程40km以上が観測された事例は、相対湿度が60%以下となっている。視程10km未満の低視程状態における相対湿度と視程との関係（第5図bの右上図）について、相対湿度が小さいほど低視程の割合は少なくなってお

り、特に、相対湿度50%以下では視程5km以下が観測されていない。第5図bより、観測された相対湿度において、その相対湿度で取りうる最小の視程が示唆される。Iwakura and Okada (1999) は視程と相対湿度の関係、エアロゾル重量濃度を用いて調査し、観測結果から以下の経験式を導いた。

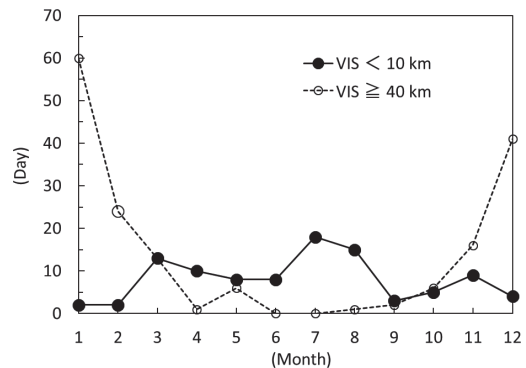
$$\sigma = \alpha(m + \beta) (1 - RH/100)^\gamma \quad (2)$$

$$VIS = \ln(0.02) / \sigma \quad (3)$$

ここで、 σ は消散係数 (m^{-1})、 RH は相対湿度(%), m はエアロゾル重量濃度 ($\mu\text{g m}^{-3}$)、 VIS は視程 (m)を表す。 α , β , γ は実験的に求められたパラメータであり、それぞれ、 $3.0 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, $32 \mu\text{g m}^{-3}$, -0.51 である。 $(1 - RH/100)^\gamma$ はエアロゾル粒径の湿度依存性を示す（高田 2007）。この経験式において $\alpha(m + \beta)$ を係数とし（岩倉ほか 2002）、本研究における相対湿度と視程の観測値を用いて、ある相対湿度に対する最小視程を推定した。観測された視程が推定した最小視程曲線の値よりも低くならないように推定式を決定すると、係数 $\alpha(m + \beta)$ は0.00054となった。このようにして求めた曲線を第5図bの右上図に破線で示す。この曲線は式(2)および式(3)の経験式において、エアロゾル重量濃度が $150 \mu\text{g m}^{-3}$ の時に見積もられる視程に相当する。相対湿度が低いほど、曲線で示す視程の値以下は観測されにくくなると推察される。すなわち都市化に伴う乾燥化によって、低視程の頻度が少なくなることを示唆している。



第5図 東京における12時の非降水時の観測値をプロット。解析期間は2013~2017年。(a) 高度補正気温差 ΔT と風速との関係。視程10km未満を白丸で重ねて表示。(b) 相対湿度（屋上観測値）と視程との関係。右上に視程10km未満を拡大して図示。



第6図 東京における12時の非降水時について、視程10km未満および40km以上の観測日数の季節変化。解析期間は2013~2017年。

3.4 視程の季節変化

2013~2017年における非降水時の低視程(視程10km未満)と良視程(視程40km以上)の月ごとの観測日数を第6図に示す。季節的な特徴として、良視程日数は冬季に多い特徴がある一方、夏季には視程40km以上がほぼ観測されず、低視程日数が多くなっている。視程が10km未満であった6~9月の晴天日について全12事例を調査したところ、全ての事例で東京都もしくはその周辺地域でスモッグ気象情報(光化学オキシダント)(池上ほか 2015; Kajino *et al.* 2019)が発表されていた。光化学スモッグは風が弱く、日射が強く、気温が高いなどの気象条件で発生する。光化学反応により生成されたエアロゾルや、光化学オキシダントの前駆物質と同じ発生源から発生するエアロゾルにより大気が霞むことがある(竹村 2013)。本研究で調査した事例においても全て気温が30°C以上で、風速も 4 m s^{-1} 以下と弱い状況下であった。そのため、光化学スモッグが発生しやすい環境場となり、低視程状態になったと考えられる。

4. まとめ

近年の都市部における視程の実態を把握するため、東京の視程について調査した。低視程日数は1959年をピークに年々減少傾向となっていた。その要因として大気質の改善と都市部の乾燥化が考えられるが、1990年以降に着目すると環境改善による浮遊粒子状物質の減少が顕著にみられた。近年では低視程状態は改善され、非降水時に視程10km未満となる件数も年間数十日程度であることが明らかになった。

視程の特徴について更に詳細に調べるため研究観測を実施し、非降水時の視程について解析した。視程は相対湿度に依存し、相対湿度が高いほど低視程となる割合が多かった。また、大気汚染物質が比較的蓄積しやすい、すなわち風速が小さく、不安定度も小さい時に低視程状態が発生しやすい傾向が見られた。視程の季節変化においては、低視程日数は光化学スモッグの発生しやすい夏季に多く、良視程日数は冬季に多い特徴が示された。大気汚染物質が影響する夏季の低視程事例では二次的な汚染物質が成長しやすい気象条件下で発生していることが示唆された。

本研究で解析した視程は都市境界層内の様々な影響を受けていると考えられるが、更なる理解には数値解析も有効となる(Aoyagi *et al.* 2012; Kusaka *et al.* 2012; Kajino *et al.* 2019)。視程変化における都市乾燥

化と環境改善の影響を個別に定量化するためには、数値解析による議論も必要であり、今後の検討課題としたい。

謝辞

観測や測器の管理に関して、気象研究所(当時)の志藤文武氏、山本 哲氏、青柳暁典氏および気象庁観測部観測課、東京管区気象台の皆様にご協力いただいた。気象研究所の村田昭彦氏および気象大学校の木下宣幸氏には有益なコメントをいただいた。デジタルデータが存在しない期間においては地上気象観測日原簿から読み取った。利用に際し、気象庁観測部情報管理室にご助言いただいた。SPMデータは国立環境研究所「環境数値データベース」大気環境月間値・年間値データファイルを利用した。

参考文献

- Adachi, K., E. J. Freney and P. R. Buseck, 2011: Shapes of internally mixed hygroscopic aerosol particles after deliquescence, and their effect on light scattering. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L13804, doi:10.1029/2011GL047540.
- Akimoto, Y. and H. Kusaka, 2015: A climatological study of fog in Japan based on event data. *Atmos. Res.*, **151**, 200-211.
- Aoyagi, T. and N. Seino, 2011: A square prism urban canopy scheme for the NHM and its evaluation on summer conditions in the Tokyo metropolitan area, Japan. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 1476-1496.
- Aoyagi, T., N. Kayaba and N. Seino, 2012: Numerical simulation of the surface air temperature change caused by increases of urban area, anthropogenic heat, and building aspect ratio in the Kanto-Koshin area. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90B**, 11-31.
- Fujibe, F., 1985: Air pollution in the surface layer accompanying a local front at the onset on the land breeze. *J. Meteor. Soc. Japan*, **63**, 226-237.
- 藤部文昭, 1985: 成田空港の滑走路に沿った霧の分布. *天気*, **32**, 419-424.
- 藤部文昭, 2007: 都市のヒートアイランド. *天気*, **54**, 9-12.
- Fujibe, F., 2011: Urban warming in Japanese cities and its relation to climate change monitoring. *Int. J. Climatol.*, **30**, 162-173.
- 藤部文昭, 2012: 観測データからみた日本の都市気候. *気象研究ノート*, (224), 1-23.
- 林 政彦, 2013: 環境制御型電子顕微鏡によるエアロゾルの環境応答のその場観察. *エアロゾル研究*, **28**, 195-

- 200.
- 五十嵐康人, 猪股弥生, 高橋 宙, 篠田佳宏, 田中泰宙, 青山道夫, 千葉 長, 2009: 2006年春季につくばで観測したダスト事象の解析—黄砂と近傍からの風塵—. 天気, **56**, 495-507.
- 池上雅明, 鎌田 茜, 中務信一, 2015: 大気汚染気象予測モデル. 量的予報技術資料, **20**, 133-140.
- 伊藤昭三, 1963: 東京国際空港における視程と汚染濃度. 天気, **10**, 345-349.
- Iwakura, S. and K. Okada, 1999: Dependence of prevailing visibility on relative humidity at Tokyo International Airport. *Pap. Meteor. Geophys.*, **50**, 81-90.
- 岩倉 晋, 松本逸平, 大林正典, 2002: 航空ガイダンス. 数値予報解説資料, **35**, 46-51.
- Kajino, M., M. Deushi, T. T. Sekiyama, N. Oshima, K. Yumimoto, T. Y. Tanaka, J. Ching, A. Hashimoto, T. Yamamoto, M. Ikegami, A. Kamada, M. Miyashita, Y. Inomata, S. Shima, A. Takami, A. Shimizu, S. Hatakeyama, Y. Sadanaga, H. Irie, K. Adachi, Y. Zaizen, Y. Igarashi, H. Ueda, T. Maki and M. Mikami, 2019: NHM-Chem, the Japan Meteorological Agency's Regional Meteorology—Chemistry Model: Model evaluations toward the consistent predictions of the chemical, physical, and optical properties of aerosols. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 337-374.
- Kanda, M., 2007: Progress in urban meteorology: a review. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85B**, 363-383.
- 兼保直樹, 2018: 大気エアロゾルの観測的研究—長距離輸送とローカル汚染, 放射性エアロゾル—. 大気環境学会誌, **53**, 25-35.
- 川端康弘, 清野直子, 田中泰宙, 青柳曉典, 2018: 都市における冬季夜間の気温低下抑制の要因に関する感度実験. 日本ヒートアイランド学会論文集, **13**, 7-15.
- 河村 武, 1972: 日本の都市における大気汚染. 地理学評論, **45**, 231-245.
- 気象庁, 2002: 地上気象観測指針. 気象庁, 154pp.
- 気象庁, 2014: ヒートアイランド監視報告. 気象庁, 65pp.
- Kusaka, H., F. Chen, M. Tewari, J. Dudhia, D. O. Gill, M. G. Duda, W. Wang and Y. Miya, 2012: Numerical simulation of urban heat island effect by the WRF model with 4-km grid increment: An inter-comparison study between the Urban Canopy Model and Slab Model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90B**, 33-45.
- 前田緑朗, 2015: 気象庁が行う航空気象業務と気象が航空機の運航に与える影響について. 日本風工学会誌, **142**, 29-35.
- Matsumoto, J., F. Fujibe and H. Takahashi, 2017: Urban climate in the Tokyo metropolitan area in Japan. *J. Environ. Sci.*, **59**, 54-62.
- 三谷一郎, 1961: 東京の濃煙霧日数についての考察. 天気, **8**, 156-159.
- 宮下 敦, 内田信夫, 倉茂好匡, 湯本晋一, 1994: 成蹊気象観測所における視程観測について. 天気, **41**, 711-716.
- 水野建樹, 1994: 冬季高濃度大気汚染と気象条件. エアロゾル研究, **9**, 93-101.
- 中川清隆, 2011: わが国における都市ヒートアイランド形成要因. とくに都市ヒートアイランド強度形成要因に関する研究の動向. 地学雑誌, **120**, 255-284.
- 野本真一, 1976: 視程の変動. 天気, **23**, 235-253.
- Nomoto, S., 1983: A climatological study of visibility in Japan. *Geophys. Mag.*, **40**, 193-284.
- Nuruzzaman, Md., 2015: Urban heat island: Causes, effects and mitigation measures - a review. *Int. J. Environ. Monit. Anal.*, **3**, 67-73.
- 大原利真, 森野 悠, 2012: 都市と大気汚染. 気象研究ノート, (224), 85-102.
- 大橋唯太, 寺尾 徹, 宮田賢二, 田中正昭, 堀口光章, 林泰一, 2004: 局地循環による水蒸気輸送と盆地霧発生の関連性—広島県三次盆地を対象とした数値実験—. 天気, **51**, 509-523.
- 大村嘉人, 杉元美友, 2019: 国立科学博物館附属自然教育園(東京都白金台)の地衣類Ⅱ. 自然教育園報告, (51), 225-234.
- 坂本和彦, 古谷圭一, 竹本和彦, 寺部本次, 1989: 大気汚染の変遷. 大気汚染学会誌, **24**, 363-387.
- 澤田可洋, 1992: 火山と航空. 航空気象ノート, **45**, 1-12.
- 志藤文武, 青柳曉典, 清野直子, 藤部文昭, 山本 哲, 2015: 植栽・構造物が気温観測統計値に及ぼす影響—東京(大手町)における通年観測—. 天気, **62**, 403-409.
- 志藤文武, 清野直子, 山本 哲, 藤部文昭, 青柳曉典, 2016: 植栽・周辺構造物による風通しの変化が気温観測に与える影響. 風工学シンポジウム論文集, **24**, 91-96.
- Skinner, B. J., S. C. Porter and D. B. Botkin, 1999: *The Blue Planet: An Introduction to Earth System Science*. Wiley, 552pp.
- Stull, R. B., 1988: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Acad. Pub., 670pp.
- 菅原広史, 松元三展, 遠峰菊郎, 2008: 房総半島でみられた局地前線に伴う悪視程状態. 天気, **55**, 637-649.
- 高田伸一, 2007: 航空気象予報ガイダンス. 数値予報解説資料, **40**, 87-93.
- 竹見哲也, 板野稔久, 光田 寧, 1994: 1993年5月5日中国北西部で発生した砂嵐について. 京都大学防災研究所年報, **37B-1**, 9-21.
- 竹村俊彦, 2013: 大気エアロゾル予測システムの概略と近年の越境大気汚染. 日本風工学会誌, **38**, 426-433.
- 田中泰宙, 眞木貴史, 石水尊久, 海老田綾貴, 千葉 長,

- 2005：全球鉱物ダスト輸送モデルの開発と黄砂現象予測への応用. エアロゾル研究, 20, 297-305.
- 東京都環境局環境改善部計画課, 2018：東京都の大気環境行政. 大気環境学会誌, 53, A9-A17.
- 外山保茂, 1976：成田における風じんと悪視程について. 研究時報, 28, 291-297.
- 鶴野伊津志, 若松伸司, 植田洋匡, 1988：夜間の都市境界層と大気汚染質の動態. 大気汚染学会誌, 23, 103-114.
- 山口慶人, 竹村俊彦, 2011：煙霧と黄砂の観測時間の経年変化. 天気, 58, 965-968.
- 山本 哲, 2000：日本における濃霧による視程不良害の気候学的特徴. 自然災害科学, 19, 99-110.
- 吉門 洋, 2007：地域気象が支配する日本の大気汚染. 大気環境学会誌, 42, 63-74.
- 財前祐二, 折笠成宏, 田尻拓也, 青木輝夫, 庭野匡思, 2018：冬季から初春季につくばで測定されたエアロゾル吸湿パラメータ κ の変化. エアロゾル研究, 33, 5-11.

Visibility variations in Tokyo Urban Area

Yasuhiro KAWABATA^{*}, Mizuo KAJINO^{**},
Yuji ZAIZEN^{**}, Kouji ADACHI^{**},
Taichu Y. TANAKA^{**} and Naoko SEINO^{**}

^{*} (Corresponding Author) Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan.
^{**} Meteorological Research Institute.

(Received 28 July 2020; Accepted 6 October 2020)

Abstract

Visibility is important information not only for meteorological analysis but also for operations of transport and monitoring air pollution. In this study, climatological features of visibility in the Tokyo urban area are investigated. The number of days with low visibility decreases year by year. The factors can be drying in urban areas and the improvement of air quality, and the reduction of suspended particle matters contributes more to improve the visibility than the relative humidity. The visibility shows seasonal changes; during summer, visibility decreases when photochemical smog is likely to occur, whereas the visibility increases in winter. Visibility in Tokyo can be largely affected by anthropogenic hygroscopic aerosols, which decrease visibility when relative humidity is high.
