都市河川周辺で発生する蚊柱濃度の 時空間挙動の定量観測

QUANTITATIVE ANALYSIS OF DENSITY OF SWARM OF MOSQUITOES BASED ON IN-SITU OBSERVATION IN REVIERSIDE

今野雷¹・稲垣厚至²・神田学³・宮本康司⁴

Rai KONNO, Atsushi INAGAKI, Manabu KANDA and Koji MIYAMOTO

¹学生会員 学士(理学) 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8852 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²正会員 博士(工学) 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

³正会員 工学博士 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

⁴非会員 博士(理学) 東京家政大学 家政学部環境教育学科 (〒173-8602 東京都板橋区加賀1-18-1)

This study focuses on the problem of “mosquito swarm” along urban rivers. Different from general biological methods (capture, counting and photograph), we adopted a fluid dynamical approach to investigate the temporal-spatial distribution of mosquito swarm. First, a novel device composed of multiple laser sheets is developed as a mosquito counter in order to quantify the density of the swarm. Second, filed observations are done in Nomi River by utilizing this laser device as well as the other conventional meteorological observations. The followings are the major results obtained:

- (1) Mosquito swarms are apparent only about 1 hours before the sunrise heavily on one-sided (sunlit side) along the river.
- (2) The hot-spot of mosquito swarm seems to exist ; the cross sections of urban street perpendicular to the river. The locations were roughly fixed with slight perturbations.
- (3) The suitable temperature to make swarm is about 22.5°C.

Key Words : *Swarm of mosquitoes, Laser particle counter, River environment, Quantitative analysis, In situ measurement, chironomid*

1. はじめに

密集住宅街を流れる都市河川には、特有の大気環境問題が存在する。例えば、東工大岡山キャンパス脇を流れる呑川では、大きな出水後にみられる下流域での臭気の問題、そして、河川軸に沿って発生するユスリカの蚊柱の問題が大きな懸案事項となっている。これらは、散歩・自転車による動線軸としてのせっかくの都市河川の機能を著しく損なうものである。そこで、本論文では、蚊柱の時空間挙動の把握について、既存の生物学的手法とは異なる都市気象学的観点からアプローチすることを試みる。

本論文では対象地域を呑川（詳しくは後述）としているが、その選定理由は、呑川水系において大発生したユスリカが実際に問題として挙がっていたことにある。ユスリカは単純に不快害虫として問題になっているだけでなく、家先の洗濯物に付着し、実害を出している。また、体長の小さな呑川の占有種は、人間の体内に吸引されることも多い。呑川ではまだ報告はないが、近年の研

究から、飛散したユスリカの死骸を吸い込むことでアレルギーの原因となることも指摘されており¹⁾、深刻な社会問題にもなっている。

これまでの蚊柱の研究から、その生態学的な特徴については多くが明らかにされてきている。しかしながら、その発生・発達機構はそれだけで決まるものではなく、環境場にも大きく影響を受けることが指摘されている^{2),3)}。これに対し、都市の蚊柱が立つような地上数mの大気環境場は、流れ場、温熱環境場、物質濃度場、など全てにおいて非常に複雑であり、その物理過程については未だ分からないことの方が多い⁴⁾。また、近年目覚ましい発達を遂げる数値解析を駆使しても、そのような地表面近傍の環境を再現することは困難である。つまり、このような大気環境が蚊柱形成にどのような影響を及ぼしているのか、明らかにされていない。

そこで本研究では実測に基づき、大気環境場とユスリカの関係性について検討することを目的とし、そのために必要なユスリカ個体数の観測手法についても新たに提案する。

2. 呑川におけるユスリカについて

本論文で対象としているのは全て呑川水系に生息するユスリカで、種族はフタスジツヤユスリカ(学名：*Cricotopus bicinctus*)である。体長は2.5~3.0mm程度、エリユスリカ亜科に属する。比較的汚濁の少ない水を好む種であり、安定して浄水が流れる呑川の上流部では占有種となっている。呑川は東京都目黒区、世田谷区、大田区にまたがる2級河川であり、その流水の98%は1995年より新宿区の東京都下水道局の落合水再生センターから流されている高度処理水による。河道形態はコンクリート3面張りの人工的なものであるため、開渠部数kmにおいて河道幅は安定して10m程度である。

また、同じ時期に処理水が流れ込むようになった神田川でも、この種へと占有種が移行したことが確認されている⁹⁾。呑川では特に、10cm程度の低水深のため水中での天敵が少ないこと、流水が人工処理水のために年間を通した最低水温が摂氏15℃程度であることからユスリカが大発生している。温帯に棲むユスリカの最低生育限界水温は0.5℃~12℃の範囲内と報告されているが⁵⁾、呑川では1年中幼虫の生育環境が整っていることになり、実際に年間を通してその姿を見ることができる。

蚊柱については、諫早湾ではユスリカの蚊柱が大量発生し、青潮を引き起こすなど大きな社会問題となっている。これに対し、蚊柱の物理学的、生物学的な特性を把握し、その駆除や、発生場所の移転などのコントロールすることは重要であると考えられる。

これに対し本研究では、蚊柱の発生頻度及び濃度について定量的に観測し、これを基に気象学的な側面から蚊柱の発生特性について検討を行う。

3. 呑川における蚊柱発生の定性的な特徴

2010年秋季に目視による蚊柱の観測調査を行った。その目的は、都市河川で発生する蚊柱の定性的な挙動（発生時刻、発生場所、発生規模など）を把握するためである。観測は東京都目黒区に位置する呑川の開渠区間最上流部に位置する工大橋から、境橋を経て、島畑橋までの約500mの区間の河川側道を対象とした（図-1）。

観測手法として、日の入りの時刻から30分間さかのぼり、10分おきに自転車で行き、目視で蚊柱を確認した。河川側道を15mで1区間として63区間に分割し、各区間について蚊柱の有無を記録した。観測は9月10日から10月6日までのあいだ、晴天または曇天日に9日行った。なお日の入りの時刻は国立天文台天文情報センター暦計算室の情報を利用した。

これにより得られた知見として、都市河川以外でも見られる一般的な傾向として報告されている、(1) 発生時刻が日没の30分前に現れて日没後にすぐいなくなること、

(2) 強風日などは蚊柱が立たないこと、などについては本対象区域でも同様に見られた。

これに対し、本対象区域特有の現象と考えられる特徴として挙げられるのは、(1) 河川に突き当たるT字路に蚊柱が立ちやすい、(2) 河川を囲う高さ2mのフェンス上に立ちやすい、(3) 降雨後の河川に大きな出水があった次の日にはほとんど蚊柱は見られない、(4) 下流よりも上流側（工大橋付近）にて蚊柱が立ちやすい、(5) 河川の右岸と左岸で蚊柱の発生頻度や規模が異なる、ことなどである。

このうち、(3)の原因としては、大きな出水によりユスリカの幼生が流されることで発生しなくなったことと推定できる。

また(4)に関して、ユスリカの生物学的な特性として、蚊柱はスワミングマーカールと呼ばれる地表面の目印になるようなものを起点に形成されやすいことが知られているが⁹⁾、フェンス上で発生しやすいのはフェンスがスワミングマーカールの役割を果たしている可能性も考えられる。しかしながら、地物の違いだけでは上記の(1),(4),(5)のように、同一地表面条件下での差異を説明することはできない。

そこで本研究では、地物ではなく場の流体力学的、あるいは気象学的な環境場の違いに着目し、それらと蚊柱の時空間挙動の変化について検討を行う。また、先の観測では定性的な議論に終始していたため、今回は蚊柱濃度の時空間挙動を定量的に取り扱うための観測を試みた。

図-1 2010年観測領域（枠線内は2011年対象領域）

4. 観測手法

(1) レーザーを用いた蚊柱濃度の観測手法

蚊柱の個体数を測定する手法としては、蚊柱の蚊を捕獲し、その個体数を数える方法がこれまで行われている¹⁾。これらに対し本研究では、数分スケールでの時系列的な発達及び減衰を捉えることを目的とした、蚊柱に対する非接触の定量観測手法を提案する。本研究ではレーザーシートが発受信機を利用し、レーザーシート断面を横切る蚊の頻度を数えることで、その濃度を定量的に把握することを試みた。

レーザー発受信機には、KEYENCE社のLV-NH300をセンサーとして10台使用した。これは幅30mmの線光源であり、レーザー光のパスを物体が遮ると光の受信強度が下がることで、送受信機間にある物体を感知することができる。さらには受信強度の大小により、30mmの光源に対する遮蔽幅として、物体の大きさを推定することも可能であり、これによって蚊柱の個体数濃度を測定することを試みる。

図-2はバリデーションの結果であり、厚さが既知であるワイヤをレーザーのパス内に入れたときの受信強度の減少分から求めた測定値と、ワイヤの線径との関係を表している。この図に示す通り、ワイヤの厚さと受信強度の関係は線形であり、0.1mmオーダーの物体の測定にも十分耐えうるということが分かった。この例を参考に、以後レーザー光受信強度減衰量をミリメートルの単位に変換して表記することとする。

ユスリカ単体の受信強度減衰量に関しては、実際に観測現場で本レーザーを用いた固定点観測を行い取得した。ビデオカメラと同期させることでユスリカの通過を確認し、ユスリカが1匹だけ通過する際の受信強度の低下量を20ケース測定することができた。その結果、20ケースの平均での測定値は0.66mmであった。ユスリカの平均的な体長である2.5mm程度に比べて小さな値が出たのは、飛行時の姿勢に横向きが多く、主に体高をとらえているためと思われる。この観測値を元に、レーザー光受信強度の低下量とユスリカの個体数への変換を行うこととする。

図-2 ワイヤの線径とレーザー光受信強度減衰量から求めた測定値の関係。図中の式は線形近似式である。

(2) 計測システム

先に説明したレーザー送受信機を、アルミ製の台座を使って内法50cm四方の空間に鉛直に配置し、これを自転車に棒状の支柱で取り付け、進行方向と垂直に測定領域を設置した(図-3)。電源には測器を携帯できるように、鉛蓄電池を使用した。この自転車を手で押し測器全体を移動させることによって、人間の歩行速度で飛行する蚊の個体数(濃度)を移動観測することができる。なお、このレーザー受信強度はデータロガー(HIOKI 8400)を用いて50Hzでサンプリングする。

本機器の設置高度として、先の定性的な観測により蚊柱はフェンスの上に発生する傾向があるため、図-4のようにフェンスの上を通過できるような高度180cm~230cmの領域に測器を設置した。

観測項目としてはこの他に、熱電対をレーザー一面近傍に設置して気温も同期した測定を行った。また、位置情報を得るためビデオカメラを携帯し、周辺の風景の撮影を同時に行った。また、このビデオカメラでデータロガーの電源をオン・オフする瞬間を撮影することで、1秒以内の誤差でレーザーのデータとの同期が可能となっている。

(3) 現地観測

上記に示した測定器を用いて、呑川周辺で発生する蚊柱の濃度観測を実施した。観測対象区域は図-1の黒枠で囲われた箇所であり、先の観測における「上流側」の、

図-3 レーザー観測機概略図

図-4 観測時の様子

蚊柱が比較的多く発生する区域となっている。図-5に、この対象区域を拡大した図を示す。

観測は2011年9月27日に行った。時刻16時53分から17時33分にかけて、対象区域内を7周巡回した。1周の平均は6分15秒であった。またこの日の日の入り時刻は17時32分であった。

また、この観測期間中、環境場の基準点として、東京工業大学グラウンドにて超音波風速計(Climattec CYG-81000)、熱電対により風速と気温をサンプリング周波数1Hzで測定した(図-5赤丸部分)。

さらに追加観測として、同様の条件で上記の実験日より連日観測を行った。ただし巡回数は日の入り時刻から30分前、20分前、10分前を開始時刻とする1日3回とした。位置情報の取得には前述のログに接続した電気スイッチを使い、各区間の境目で信号を送ることにより、ビデオカメラによる方式よりも精度を増した。また観測時刻に雨天であった場合は欠測とした。これにより9月27日から10月28日までの期間で27日分のデータが得られた。なお10月17日に超音波風速計の故障があったため、以後風速風向については10月16日までのデータを利用する。

図-5 2011年観測領域
図中の赤丸は風速と気温の定点観測地点を示し、番号は測定区間を示す。

(4) データ解析概要

本観測で得られるデータはレーザー受信強度低下量の時系列変化であり、これを同期していたビデオカメラ画像から空間情報へ変換する。また考察の際には、観測区間を図-5に示すように東西で32区間(1区間約15m)に分割し、各地点のユスリカ濃度の時空間変化について検討を行う。ところで、観測されたデータはユスリカ濃度と同時に観測時の振動に起因したノイズが含まれる。しかしながら、通常走行時に受けるノイズレベルはユスリカ通過時に比べて十分低いため、ユスリカ単体の減衰量を参照し、0.4mm以下の出力を破棄した。また、段差の通過や障害物への衝突による比較的大きなノイズも、ビデオ映像を参考に除去することができた。

図-6 ユスリカ出現量の時系列変化
黒線:全観測値, 赤線:東側, 青線:西側

5. 結果

(1) 時系列特性

図-6は7回の巡回による観測値を時系列でプロットしたものである。図中黒線は1周の観測値の積算を表している。気温は下がってきているが(図-7),時間が経つにつれて蚊柱は増加し、日の入り25分前にピークを迎えることが分かった。日の入り直後の7周目にはほぼ観測されなかった。図中青線は東側側道、赤線は西側側道の値である。3周目では東側が低下、西側が上昇をしているが、その後どちらも減少傾向を示している。また、この時の風向風速はほぼ一定で風の場合は安定していた(図-8)。

図-7 基準点気温

図-8 基準点風向風速

図-9 空間分布(縦軸は区間名, 横軸は匹数)

(2) 空間分布特性

呑川上流部における蚊柱の空間分布について検討した。図-9は各周回の観測量を区間ごとに示したものである。16区間に対して、西側にw, 東側にeという添え字を付けるものとする。

図-9より、東側では周回ごとに高濃度の区間が変化していることが分かる。また西側にも周回によって分布が見られる。これらのことから、6分間程度の時間間隔では河川方向に関わらず2区間(30m)程度の規模で分布の変化があることが分かる。以下区間ごとに考察していく。

西側では区間①w, ③w, ⑥wに小規模ながらも高頻度で分布が見られた。この区間は西側の交差点または丁字路にあたる地点で、西日による日射が差し込む地点となっている。区間⑧wから⑭wにかけても丁字路は存在するが、蚊柱の高濃度での分布は見られなかった。

この日の全観測値のうち、西側においては、丁字路が存在する6区間の積算匹数は271匹、それ以外の10区間の積算匹数は112匹となり(小数点以下四捨五入)、蚊柱の発生と街区条件は強く関連していると言える。特に都市においては、緑地、道路、建物といった様々な外部条件により、局地的な気象条件の差異が大きくなる。呑川の西側においても、日射を妨げる原因となる高い建物が川沿いに存在していることから、このような分布の差が出たものと思われる(図-10)。

区間⑬eから⑨eには大規模な分布が多く見られた。この区域は植生が多く見られる区域である。さらにこの区域の中でも区間⑭e, ⑫e, ⑩e, ⑨eのように、対岸に丁字路のある区間では周囲の区間よりも蚊柱が集中していた。

区間⑦eから①eにかけては、特に前半の周回で大規模な分布が見られた。この区間は西側に川と低い住宅群が広がっており、日射の妨げはあまりない。ここでも蚊柱発生に対する日射の影響の可能性を指摘できる。

図-10 呑川周辺建物高さ

(3) 気象場に関する考察

ユスリカの分布と気象場の関係性について考察した。連続観測より得られた27日分のデータを1日ごとに平均し、さらに東西の観測値に分割したものと気温を示す(図-11)。ただし9月27日は他の日の観測時刻に対応する3周分のみを利用した。観測されたユスリカの量は緩やかに減少しながらも1日から2日の周期で振動し、東西の分布の偏りも一定の傾向を示すことはなかった。これらは気温の低下による季節影響やユスリカのライフサイクルに関連していると思われる。図-12は各日各周回について、レーザー測器近傍の平均気温との関係性を示したものである。その結果、摂氏22度から23度にかけて、分布の集中と大きな観測値(蚊柱)が確認された。また気温の低いときにはユスリカは多く観測されなかった。

次に風の場合に関連して考察する。図-13は各日各周回のユスリカ観測量と、対応する時刻の風速の相関図である。全体的な傾向として、風速の小さな時に高濃度の蚊柱が観測された。風速1.25m/s前後で大きな観測値が見られるが、これは9月27日や10月9日といった日にあたり、ユスリカの絶対数が多く、場全体にあふれていたことが原因として考えられる。また、いずれの日に関しても観測時刻(夕方)の風はおおむね南よりであったため、風向に関連したユスリカ分布の東西への顕著な偏りは見られなかった(図-14)。ここでは風向とユスリカの東西分布関係については議論しないものとする。

ここからはさらに1日の微気象場の違いについて検討する。図-15は9月27日の全周回のユスリカの観測値と気温の関係を区間ごとにプロットしたものである。また図-16はその際の各温度帯のヒストグラムである。これらより、ユスリカは22.5度付近で大きな観測値が確認できるが、気温データそのものの分布には大きな偏りがあるとはいえない。このことから、ユスリカには飛翔の適温帯が存在しているものと考えられる。

図-11 連続観測のユスリカ観測値と東西の内訳、気温

図-12 各日各周回における東西ユスリカ観測値と気温の関係

図-13 各日各周回のユスリカ観測値と風速の関係

6. 結論

本研究では蚊柱の濃度を定量的に観測する手法を開発し、それを使用して蚊柱濃度の時系列変化及び、発生場所と気象場の関連性について検討を行った。以下が得られた知見である。

- (1) 蚊柱の出現は日の入り25分前にピークを迎え、その後日の入りに近づくにつれ姿を消すことが分かった。
- (2) 蚊柱は主にT字路に発生しやすい。
- (3) 今回の観測領域、期間に関しては、ユスリカが蚊柱をつくるための飛翔条件として、22.5°C前後が適温帯として存在することが確認できた。

本論で得られた知見は先の観測で定性的に知られたものであるが、それを定量的に把握した点に面目がある。

また、従来の手法に比べ、非接触での観測を可能にすることから、蚊柱の短時間(数分)での動態や増減を捉えるのに利点がある。今後、本手法を利用することで新たな知見が得られる可能性を有している。

(4) 今後の展望

日照条件と1区間スケールの分布の関連性を議論するためには、時空間解像度の高い日射データが必要となる。複数の放射計による区間別の観測や図-10のような建物情報を基にした詳細な数値計算による情報の取得が有効である。また観測時間内でのユスリカの休憩、再飛翔、

図-14 観測時の風向に対するユスリカ観測値の分布

図-15 9月27日の区間別ユスリカ観測値と区間気温の関係

図-16 9月27日の全区間気温のヒストグラム

羽化による発生や死による増減については、植生や周辺建築壁面の調査、河道における羽化後行動の観察、水質の調査と合わせて議論する必要がある。

参考文献

- 1) 村上行啓, 五十嵐隆夫, 佐伯陽子, 足立雄一, 松野正知, 岡田敏夫, 河合幸一郎, 熊谷朗, 佐々学: ユスリカ喘息に関する研究. 第II報 ユスリカ種別間の交叉抗原性について. アレルギー, 36, 81-85, 1987.
- 2) 平林公男: 諏訪湖地域における“迷惑昆虫”ユスリカの大発生とその防除策 第一報: アカムシユスリカ (Tokunagayusurika akamusi) 成虫の大量飛来, 日本衛生学雑誌, 46 (2), 652-661, 1991.
- 3) 平林公男, 中里亮治, 沖野外輝夫: 諏訪湖におけるユスリカ研究 (2)不快昆虫としての成虫とその防除策に関する検討, 山地水環境教育センター研究報告, 1, 53-62, 2003.
- 4) Kanda, M: Progress in urban meteorology: A Review, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.85, pp.365-383, 2007.
- 5) 近藤繁生, 平林公男, 岩熊敏夫, 上野隆平: ユスリカの世界, 培風館, 2001.
- 6) Kon, M.: Swarming and Mating of Chironomus yoshimatsui (Diptera: Chironomidae): Seasonal Change in the Timing of Swarming and Mating, J. Ethol., Vol.2, pp.37-45, 1984.

(2011. 9. 30受付)