

令和元年6月26日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K00526

研究課題名(和文) 気候変動下の日本における感染症媒介蚊の個体群動態予測

研究課題名(英文) Probable effects of population dynamics of vector mosquitoes in Japan

研究代表者

太田 俊二 (Shunji, Ohta)

早稲田大学・人間科学学術院・教授

研究者番号：10288045

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：温帯性蚊の生活史にもとづく季節的消長を表現するため、冬季に成虫休眠の生活史特性をもつイエカ(*Culex pipiens*)と卵休眠をするヒトスジシマカ(*Aedes albopictus*)について、東京・新宿区で10年以上にわたって採取されたデータを活用し、それぞれの個体群動態モデルを開発した。ヒトスジシマカは、温室効果ガス排出が多いシナリオにおいて活動期の個体数増加の傾向が見られた一方で、排出が少ない場合には1991年から2009年までの個体群動態の推定結果と大きな差はなかった。イエカは排出シナリオにかかわらず、活動期の個体数が減少し、排出が多いとより個体数減少が顕著になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

感染症媒介生物のうち、熱帯性の媒介蚊の研究は進みつつあり、地球温暖化の進行により温帯域の媒介蚊の挙動に関する関心が高まっている。日本においては東京・代々木公園を中心に広まったデング熱の騒動は記憶に新しい。蚊媒介性の感染症について、イエカは日本脳炎やウエストナイル熱、ヒトスジシマカはデング熱やジカ熱などを媒介するため、蚊の種類に応じた感染症対策が必要となる。本研究は、蚊種別の個体群動態モデルの開発ならびに将来気候データとの結合を通して、温暖化気候条件下における蚊の季節的消長や個体数を予測することで、我が国、特に東京の蚊媒介性の感染症リスクについて、時間解像度が高い知見を提供することができた。

研究成果の概要(英文)：The population dynamics of mosquitoes in temperate regions are not well understood compared to tropical or subtropical mosquitoes, even there is a big concern that the mosquito-borne diseases are prevalent under future climates. We developed a mosquito population dynamics model, implementing a life history of diapauses for overwintering. Parameters were estimated by using simulated annealing method based on the likelihood utilizing the observed data in Tokyo. The observed population data on *Aedes albopictus*, vector of dengue and Zika virus, and *Culex pipiens*, can cause West Nile fever and Japanese encephalitis, in Tokyo was well reproduced by our model. We demonstrated the decrease in population and shortening of active period under future climate condition for *Cx.pipiens* and showed an increase in population for *Ae. albopictus* by coupling our model with a global climate model. Our results provide the information of potential risk of mosquito-borne disease with fine temporal resolution.

研究分野：環境科学

キーワード：地球温暖化 感染症 感染症媒介生物 個体群 生態系影響評価 降水影響評価 微気象 水温モデル

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

## 1. 研究開始当初の背景

気候変動下の感染症はその拡大がアジア太平洋域でとくに危惧されており、温帯に位置する日本もその例外ではない。また 2014 年 9 月に東京・代々木公園を中心に広まったデング熱騒動は記憶に新しく、最近の気候温暖化傾向の進行による熱帯性の感染症の影響評価研究は社会的な要請も多く、緊急性も高い。しかしながら、感染症と気候の関係の従来型研究は、感染症罹患者と気候値（たとえば、年平均気温や最暖月の気温など）の関係を単純に分析したものや、ワクチン開発のための感染症ウイルスの遺伝子研究が多い。現在までの研究動向では、ヒトが罹患する根本原因の一つである、感染症媒介蚊に着目したものは非常に少ないと言える。

一方で、わが国には日本脳炎に苦しめられてきた歴史がある。水田を中心に生息するアカイエカ (*Culex pipiens*) が増幅生物であるブタとともに日本脳炎ウイルスの感染サイクルを形成し、その環のなかにヒトが取り込まれることにより日本脳炎は拡大した（図 1 左側）。ワクチン接種の徹底や養豚場が整備され、水田面積が減少し始めた 1970 年代には罹患者が急減し、事実上終息している。しかし、厚労省を中心にいまでもブタの日本脳炎ウイルス抗体獲得状況を調べており、それによるとウイルスをもったアカイエカは確実に存在していることがわかる。とくに温度上昇幅が大きい都市域では、媒介蚊の越冬やその分布域の拡大が心配され始めている。同様に、熱帯性媒介蚊の高緯度帯への拡大を研究する事例は増えてきた。

しかしながら、日本に広く分布する蚊の個体群規模と気候条件の関係の年々変動を生態学的、気候学的に詳しく調べた研究例は少ない。時々刻々と変化する気候条件とともに蚊の個体群規模がどう変わっていくのかを知ることが肝要である。そのためには、農事暦を考慮に入れつつ、過去から現在までの気候条件の変化から媒介蚊の個体数変動を記述可能な生態学的、気候学的モデルの開発が必要不可欠である。

蚊は一般的に極端な暑さに弱い生物である。アカイエカや、冒頭に記したデング熱やジカ熱などを媒介するヒトスジシマカ (*Aedes albopictus*) は周囲の気温が 32℃を超えると繁殖が著しく低下する。それゆえ、夏季の都市近郊林は、そのクールアイランド効果によって蚊の成長を森林外以上に促進させる場所になると考えられる。しかしながら、気温、降水量などの一般気象要素が観測されている環境に近い芝地と森林内の気温差は約 2℃もあり、その差も日によってまったく異なることが報告されているので、気象官署で観測されたデータを媒介蚊モデルにそのまま利用できない。ゆえに、森林内の気温を推定することは非常に重要である。ところが、入手しやすい一般気象要素を入力値とした森林内の気温の推定は多くの研究で行われてきているものの、数日の観測のみによるものや晴天日のみを対象とするものなど制約が多く、一年を通じた汎用性の高いものは存在しない。

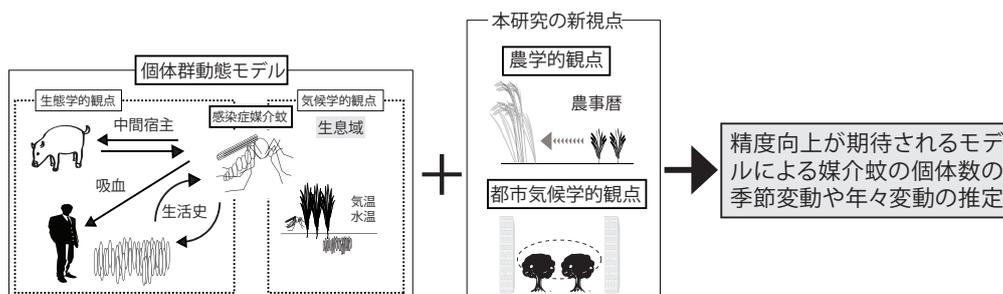


図 1. 本研究課題の目的と提案するモデルの特徴

感染症媒介蚊の個体数変動を推定するための個体群動態モデルは、媒介蚊の生活史とその生息環境の気象条件（とくに水温）以外に、農学・都市気候学的観点を加えたところに最大の特徴がある。このモデルに将来気候の予測値を入力すれば、個体数の季節変動や年々変動も推定可能となる。

## 2. 研究の目的

将来の気候変動は生物圏にさまざまな影響を与えることが予測され、なかでも人間の生活や健康に直接的な問題を引き起こす感染症の拡大は重要な研究テーマの一つである。本研究では、従来あまり注目されてこなかったデング熱や日本脳炎を媒介する蚊の個体群動態に焦点をあてる。とくに、将来気候下での日本の感染症リスク評価のための基礎的な知見を提供することを目的とする。具体的にはアカイエカとヒトスジシマカの個体数の季節変動や年々変動を表現することを試みる。媒介蚊個体群動態へのヒートアイランド現象の影響を考慮するため、都市近郊林の熱収支気候学的研究を行う。最終的には、21 世紀中の日本の媒介蚊の個体群動態を予測

する。

一方、本研究では、首都圏において、一般気象要素の観測現場と異なる森林や池などでの温湿度と熱収支観測を行う。今後のモデル研究における予備的研究として、本研究課題では傍流ながら極めて重要な基礎的知見を得る試みも同時に行なうことを計画した。

### 3. 研究の方法

温帯性蚊の季節的消長を表現する個体群動態モデルを、各発育段階の生活史に基づき連立微分方程式によって表現した。この方程式内の成長率や死亡率については実験などの先行研究で得られたパラメータを利用しており、気候データによって駆動されるモデルとなっている。モデル中に組み込まれた、休眠からの覚醒時期や、降雨による流出死亡あるいは水中発育段階の密度効果の変動については、参照できるデータが存在しない。そこで、東京・新宿における10年以上にわたる成虫の捕虫データを用い、この観測値への適合性が良いパラメータをマルコフ連鎖モンテカルロ法によって推定した。本研究ではどの効果をモデルに組み込むかを設定できるので、死亡流出、密度効果についての組み合わせでいくつかのモデルを作成し、観測データに対して交差検証法を実行し、検証期間の観測データに対してフィッティングの良いモデルを選んだ。さらに全球気候モデルの一つであるMIRCO5による1991-2009年と、代表的濃度経路(RCP)シナリオ2.6と8.5での2081-2099年の気候データを入力とし、蚊の個体群動態をシミュレーションした。これにより、現在気候下(1991-2009年)にくらべて21世紀後半において感染症媒介下の季節的消長や、夏季の最大個体数が将来気候下ではどのように変化するかを予測し、感染症の潜在的なリスクを明らかにした。

### 4. 研究成果

#### (1) 都市気候学的な気象・熱収支観測

都市郊外の気象観測および熱収支観測を行い、感染症媒介生物の微気象的な生息要因を探る基礎データを収集し、その簡易な観測方法の開発を試みた。その成果は、以下のようなにまとめることができる。

1. 局地的な気象条件には大きな差があり、同時刻の数百メートルしか離れていない2点間では3~7℃の温度差があった。現在も連続的に観測を継続している。
2. 急速に発展しつつあるドローン技術を応用し、遠隔操作が可能な簡易なドローンに温湿度センサーを付加する方法を開発した。人間が直接に立ち入って観測することの困難な林内や樹冠、池の上などを航行しながら気温と湿度を移動観測した。その結果、通常の気象観測と同等の精度の結果が得られ、今後の研究においてこの手法を用いて都市近郊の各種媒介蚊の生息域の微気象を容易にモニタリングできる道を開いた(上野・太田2016)。

#### (2) 個体群動態モデルの開発とその応用

アカイエカについては、これまで成虫休眠という生活史ならびに降雨による個体群動態への正・負の効果をモデルに組み込んで構築された先行研究はなかった。そこで、本研究ではこれらの効果を組み合わせによってモデルに組み入れ可能な、気候データ駆動型の個体群動態モデルを開発し、PCMP(Physiology-based Climate-driven Mosquito Population)モデルと命名した(図2)。

上記の組み合わせのうち、対数尤度を基にして観測データの再現性の高い組み合わせが選ばれた。モデルに休眠を組み込むかの有無は、観測データの再現性に大きく影響することがわかった(Watanabe et al. 2017)。つまり、温帯性の生物の時間的な挙動を説明する上で、季節的な休眠機構を除くことはできないことを意味する。しかしながら、休眠機構の気候学的、生物学的な仕組みはほとんど解明されておらず、モデル化不能である。それでも今回の研究では、この解明を待たずして、パラメータ推定によって予測に利用できるほどの精度を保つことができた。本研究は、生物の挙動の将来予測を行う上で、パラメータ推定という手法が非常に有用な方法であることを示したという点も強調しておきたい。

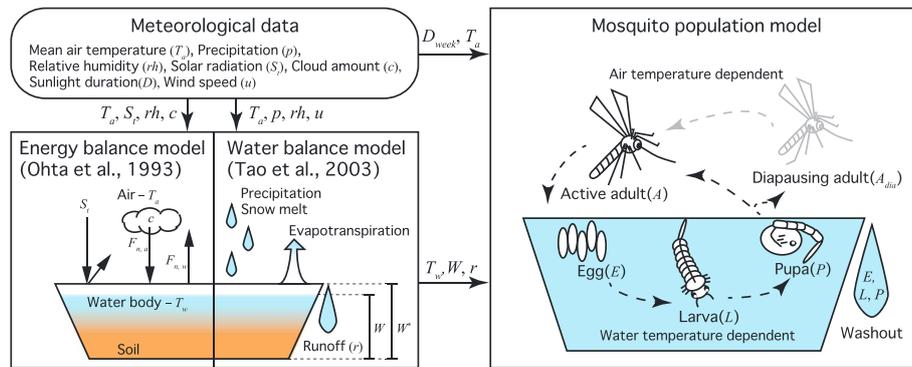


図2. 構築された蚊の個体群動態を計算するPCMPモデルの概略 (Watanabe et al. 2017 より)

一般気象要素を使うことにより、広域評価への可能性を担保する。そのデータは直接、あるいは水・エネルギー収支モデルを経由し、個体群動態モデルの入力値となる。図中の記号のうち、気象要素と蚊の成長段階を表すものは、図内の説明を参照のこと。 $F_{n,a}$  は大気からの長波放射、 $F_{n,w}$  は水面からの長波放射、 $W$ は土壌水分量、 $W^*$ は圃場容量量、 $D_{week}$ は一週間の平均日照時間を示す。

次に、将来気候下の挙動を調べるため、温室効果ガス排出の少ないシナリオ(RCP2.6)と多いシナリオ(RCP8.5)の気候値でPCMPを動かしたところ、温暖化の進行とともにイエカの個体数は減少することがわかった(図3)。これは多くの人々の感覚とまったく反対の結果である。

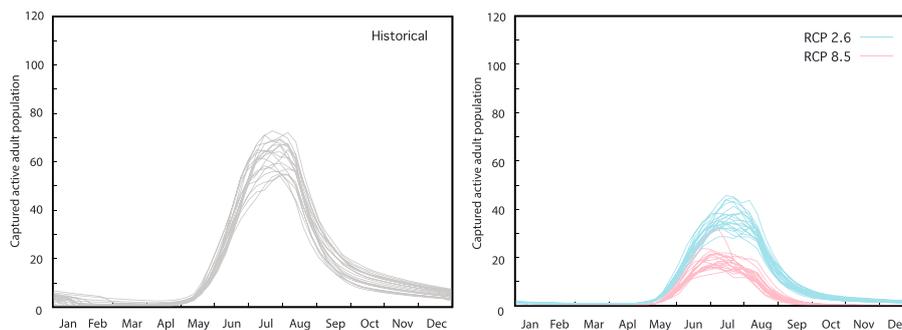


図3. 現在気候下(左)と将来気候下(右)での成虫の個体数の季節変化 (Watanabe et al. 2017 より) 圃場容量量を超える急激な降雨があった場合には、卵が流されるという過程を加えた場合のシミュレーション結果の一例である。将来気候下での成虫の個体群は温暖化の進行や急激な降雨とともに小さくなることを示された。左図は歴史的な気候データ(1991-2009)、右図は将来気候を予測する地球気候モデルによるデータ(2081-2099)を用いたシミュレーション結果である。右図の青い線はRCP2.6、赤い線はRCP8.5による。

アカイエカの成虫休眠に対して、ヒトスジシマカは卵休眠の生活史を持つため、卵休眠性を表現したPCMPを実行したところ、季節的消長の再現性に問題が生じた。このため、モデルの中で休眠のキューとなる日長感受性について春先の覚醒と秋口の休眠を明示的に表現し、温度感受性を取り入れ、モデルの改善を図った。これによりヒトスジシマカの観測データの再現性が改善したばかりでなく、アカイエカの再現性も改善した(Kuwano et al. in prep.)。改良型のPCMPを用いて将来気候下でのアカイエカ・ヒトスジシマカの個体群動態をシミュレートしたところ、種によって挙動が異なっていた。ヒトスジシマカはこれまで懸念されていたように、温室効果ガス排出が多いシナリオ(RCP8.5)において活動期の個体数増加の傾向が見られた。ただし、排出が少ないシナリオ(RCP2.6)においては1991年から2009年まで現在気候下での個体群動態を再現した場合と大きな差はなかった(Kuwano et al. in prep.)。これに対し、アカイエカは排出シナリオにかかわらず、活動期の個体数が減少し、排出が多いとより個体数減少が顕著になることが示された。

蚊媒介性の感染症について、アカイエカは日本脳炎やウエストナイル病、ヒトスジシマカはデング熱やジカ熱などを媒介するため、蚊の種類に応じた感染症対策が必要となる。本研究は気候変動によって蚊媒介性の感染症のリスクについて、蚊の個体群動態モデルの開発を通して時間解像度が高い知見を提供することができた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Ko Watanabe, Shin Fukui, Shunji Ohta, Population of the temperate mosquito, *Culex pipiens*, decreases in response to habitat climatological change in future., *GeoHealth*, 査読有, Vol. 1, 2017, pp. 196–210, DOI: 10.1002/2017GH000054
- ② 上野一喜、太田俊二、ドローンによる気温観測法の開発、農業食料工学会誌、査読有、Vol. 78、2016、pp.192–195.

[学会発表] (計 19 件)

- ① 桑野友輔、福井眞、太田俊二、将来気候条件下における感染症媒介蚊の個体群動態アンサンブル予測、第66回日本生態学会大会、2019
- ② 上野一喜、太田俊二、明治期の農耕地の分布に基づいた冷気湖の発生場所の推定、日本農業気象学会、2019
- ③ 桑野友輔、福井眞、太田俊二、温帯に生息する媒介蚊の季節的消長、第 65 回日本生態学会大会、2018
- ④ 桑野友輔、福井眞、太田俊二、The difference in mosquito population dynamics between egg diapause and adult diapause for overwintering.、第34回個体群生態学会大会、2018
- ⑤ Yusuke Kuwano, Shin Fukui, Shunji Ohta, Seasonal trends of mosquitoes that mediate vector-borne diseases in temperate zone, 100th AGU Fall meeting, 2018
- ⑥ 渥美和幸、太田俊二、プロセスベースの植生モデルによる総一次生産力と蒸発散量の推定のグローバル評価、日本地球惑星科学連合2018年大会、2018
- ⑦ 渥美和幸、太田俊二、植物生産の炭素利用効率のグローバル分布推定、農業環境工学関連学会2018年合同大会、2018
- ⑧ 渥美和幸、太田俊二、全天日射量から推定した直達・散乱光量が群落の総生産力に及ぼす影響、日本農業気象学会75周年記念大会、2018
- ⑨ 五島ちひろ、渥美和幸、上野一喜、太田俊二、UAV(無人航空機)を用いた林分スケールの落葉フェノロジーの観測、日本農業気象学会 75 周年記念大会、2018
- ⑩ 上野一喜、太田俊二、ドローンを用いた正確で簡便なボーエン比法の開発、第56回日本生気象学会大会、2017
- ⑪ 渥美和幸、太田俊二、気候の年々変動に対する植物の成長と生産力の応答シミュレーション、第 64 回日本生態学会大会、2017
- ⑫ 上野一喜、太田俊二、都市郊外の小さな凹地に発達する冷気湖とその季節変化、日本農業気象学会全国大会 2017、2017
- ⑬ Kazuyuki Atsumi, Shunji Ohta, Modeling vegetation growth and productivity based on biophysical and ecophysiological processes driven by climate variables., NACP & AmeriFlux Joint Meeting, 2017
- ⑭ 渥美和幸、太田俊二、気候データに起因する一次生産力の不確実性のサイトレベルでの評価、日本地球惑星科学連合 2017 年大会、2017
- ⑮ 渡邊江、福井眞、太田俊二、温帯性感染症媒介蚊の個体群動態、第 32 回個体群生態学会大会、2016
- ⑯ 渥美和幸、太田俊二、気候資源にもとづく植物生長を考慮したモデルによる生産力評価、日本農業気象学会全国大会2016、2016
- ⑰ 渥美和幸、太田俊二、植物生産モデルによる潜在生産力の将来予測、第63回日本生態学会大会、2016
- ⑱ 渥美和幸、太田俊二、簡略な植生モデルによる植物生産力の年々変動の評価、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、2016
- ⑲ 上野一喜、太田俊二、都市郊外の小規模な凹地における夜間冷却の季節変化、第 55 回日本生気象学会大会、2016

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況（計 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況（計 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：福井 眞

ローマ字氏名：Shin Fukui

所属研究機関名：早稲田大学

部局名：人間科学学術院

職名：講師

研究者番号（8桁）：90754573

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。