

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K11629

研究課題名(和文) 21世紀前半から後半にかけての日本の感染症媒介蚊の個体数と活性期間の変化

研究課題名(英文) Possible effects of climate change on population dynamics and active periods of infectious disease vector in Japan

研究代表者

太田 俊二(Ohta, Shunji)

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：温帯地域の媒介蚊である *Aedes albopictus* は、越冬中に卵休眠をする。本研究では、温帯蚊の生理学に基づく気候駆動型蚊の個体群モデルを改良し、越冬のための卵休眠を組み込んだ。また、降雨が幼虫の収容力に及ぼす影響を組み込むことで、将来の気候条件下で個体群動態がどのように変化するかを調査した。蚊の個体群動態を再現するモデルを構築し、卵休眠と降雨の効果のパラメータをモデルごとに推定した。このモデルに気候モデルのデータを適用したところ、将来の気候条件下で蚊の個体数が増加することが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在進行している気候変化は将来も続き、それとともに生物の生息域も変化する。感染症を媒介する生物もその例外ではない。本研究ではデング熱を媒介する日本にも多く存在する温帯性のヒトスジシマカ (*Aedes albopictus*) が将来の東京において、拡大するのか、しないのか、その時期はいつか、を予測することに成功した。

研究成果の概要(英文)： *Aedes albopictus*, a vector mosquito in temperate regions, undergoes egg diapause while overwintering. To assess the prevalence of mosquito-borne diseases in the future, this study aimed to simulate and predict mosquito population dynamics under estimated future climatic conditions. In this study, we tailored the physiology-based climate-driven mosquito population model for temperate mosquitoes to incorporate egg diapauses for overwintering. We also investigated how the incorporation of the effect of rainfall on larval carrying capacity (into a model) changes the population dynamics of this species under future climate conditions. The model was constructed to simulate mosquito population dynamics, and the parameters of egg diapause and rainfall effects were estimated for each model to fit the observed data in Tokyo. We applied the global climate model data to the model and observed an increase in the mosquito population under future climate conditions.

研究分野：生態学、気象学

キーワード：地球温暖化 感染症 感染症媒介蚊 個体群動態 個体群動態モデル 降水量変化 生態系影響評価

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

現在生じている地球規模の温暖化に伴い、生物の成長に影響を及ぼす気象のパターンが変わりつつある。その傾向は高緯度で顕著に生じると気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の報告でも予測されており、ヒトにマラリアやデング熱を発症させるウイルスの媒介生物について、その分布域が気候変化に伴って変化することが懸念される。現在のところ、このような感染症の流行は主に熱帯域で顕著であるため、アフリカや東南アジアなどを対象にした研究がほとんどである。しかしながら、今後の気候変化に伴ってこれらの媒介蚊の分布域が高緯度へと広がった場合、日本を含む温帯域においても潜在的な感染リスクが高くなる恐れがある。

このような気候変化に伴う潜在的な感染症リスクの定量化には、感染症流行自体の他に、感染源となるウイルス媒介生物の挙動に着目しなければならない。加えて、これまで多くの研究が示してきたような平均的な気候条件下での生物の分布域を描くだけではリスク定量化には不十分であり、その生物の個体数変動を明らかにする必要がある。

これまでの気候変動研究では、生態系に深刻な影響が顕れる気温上昇は 2°C とされ、今世紀末に予測されるような $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 上昇時の影響評価研究が大半であった。ところが、すでに健康や農業などさまざまな方面でその影響は顕在化してきており、IPCC は気温が 1.5°C 上昇した場合の影響評価に関する特別報告書の作成に取り掛かった。すなわち、近い将来に生じるあるいは現在生じつつある影響の評価が喫緊の課題となっている。特に、感染症のようなヒトの健康に関わる分野は、医療資源の逼迫や経済活動の低下など、社会的な問題に波及することがあるため、深刻な影響が生じる前の事前評価が不可欠である。

気候学的要因が感染症媒介蚊の個体群に及ぼす影響は、観測あるいは実験的な手法で研究されてきた。これによると生物一般に見られるように、他の生物と同様に、成長に最適な温度域 (30°C 付近) では成長速度が大きいが、それより低温であっても高温であっても成長速度は小さくなる。一方で、水環境は卵から蛹までの発育段階の個体群に対して、降水のパターンに応じて異なった影響を及ぼす。降水は、成育環境の水資源を豊富にして個体群を成長させる一方で、大雨により土壌表層とともに個体群の一部を流出させる効果もある。また、温帯性蚊は熱帯性蚊と異なって、冬季に休眠をし、それが個体群動態に大きく影響する。

そこで、本研究代表者らは、温帯性蚊の動態に影響する降水と休眠を考慮した個体群動態モデル (Physiology-based Climate-driven Mosquito Population モデル、以下 PCMP モデル) を開発し (図 1)、温帯性蚊の代表的な種であるアカイエカ (*Culex pipiens*) の個体群動態の再現に成功した (Watanabe et al. 2017)。さらに、将来気候データを用いて今世紀末の東京都心部の個体群動態を予測したところ、成育期間が短くなり、ピーク時の個体数が減少することがわかった。このように地球規模で気候が様変わりしていく状況では、感染症を媒介する生物の活動期間や分布域が変化していく可能性がある。ゆえに、感染症そのものを研究するだけでは感染症の拡大を防ぐには不十分である。特に、これまで感染症が流行していなかった温帯域を対象にした研究は極めて少なく、感染症の予防や予測に必要な科学的知見が不足している。

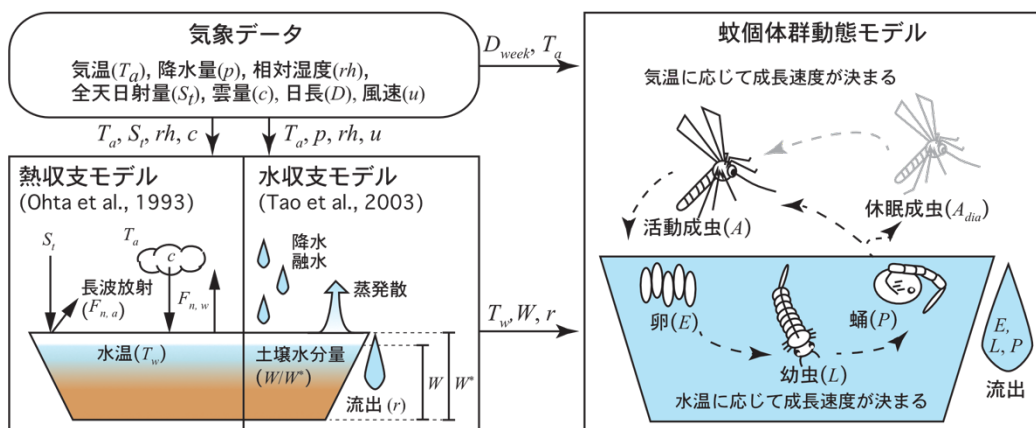


図 1 本研究代表者らが開発した一般気象要素で駆動される蚊個体群動態モデルの概略

蚊の生理生態的特性を考慮しつつ、個体群の成長率や死亡率が一般気象要素に応じて変わるため、気象データ駆動型モデルになっている。成長速度は温度の関数で与えられるが、発育段階ごとに成育環境に応じて水温または気温が使われる。水温や土壌水分量といった個体群に影響する温量資源と水資源は物理的な熱・水収支モデルで計算される。

2. 研究の目的

本研究代表者らが開発した PCMP モデルは、対象とする生物種の生活史に即した解析が可能

であり、他種への応用をしやすい構造を持っている。このモデルを改変し、さまざまな分野にまたがる学際的な問いに新たな手法で科学的知見を与えるのがねらいである。最終的な目的は感染症リスクの将来変化を予測することであるが、その過程で媒介生物の挙動が気候変動に対してどのように応答するのかという気候学・生態学の問題に取り組む。具体的に本研究課題では、日本各地に分布する蚊の主要種であるシマカ (*Aedes*) を対象にして、生理生態的特性にもとづいて個体群動態の季節的消長の時間変化を明らかにする。

3. 研究の方法

イエカを対象にして開発された PCMP モデルをベースにして、ヒトスジシマカ (*Aedes albopictus*) に応じた生理生態的特性を組み込んだ。シマカの場合には、冬季に成虫休眠ではなく卵休眠するという生活史をもっているため、これを数理的に表現した。各発育段階における温度依存の成長率や死亡率、ならびに産卵活動については実験などの先行研究で得られたパラメータ、近縁種の実験で得られた値を利用した。イエカのモデル開発の時に直面した問題と同様に、休眠に関する科学的な知見が乏しいことから、休眠からの覚醒、休眠卵の産卵についての感受性は観測データとのフィッティングを考慮して推定した。具体的には東京・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、この観測データへの適合度が良いパラメータを、シミュレートッドアニメーション法を組み込んだマルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法によって推定した。観測データに対して交差検証を実行して検証期間の観測データに対するフィッティングの良いモデルを選出することで、モデルの改良を行った。その結果として、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、休眠に対する温度感受性もモデルに組み込んだ。

改良された PCMP モデルに対して、全球気候モデル (Global Climate Model, GCM) のひとつである MIROC で作成された気候データ (1991-2009 年、2031-2049 年、2081-2099 年) を入力として、個体群動態の季節的消長が現在気候条件下と比べて将来にどのような変化があるのかを予測した。また、将来気候においては代替的濃度経路 (RCP) シナリオについて 2.6 と 8.5 の 2 つを比べ、CO₂ は排出シナリオによる予測の違いも確認した。

つぎに、温帯性地域が気候変動によって影響を受けるであろうことが懸念されている降水量に対して、異なる応答を示す個体群動態モデルを用意し、これらの将来気候下での予測を行った。水生段階である幼虫期には、その成育環境によって密度依存の個体数制限を受けると考えられる。モデルの中では幼虫期に環境収容力を設けており、この環境収容力が降水によって受ける影響の強さを変えたモデルを用意した。それぞれのモデルについて観測データへのフィッティングを行った上で、これらのモデル間で将来予測結果にどのような違いが生じるのかを検証した。

また、モデルを駆動する気象データを国内のさまざまな地域を対象にして過去から将来にかけて整備し、その気候に応じた蚊の個体群動態を推定する。時間解像度の高いモデルの特長を活かし、過去から将来にかけて媒介蚊の活動期間とピーク時の個体数の変化を定量化する手順を検討して、どのような課題があるかを考察した。

4. 研究成果

(1) ヒトスジシマカの将来気候下における季節的消長

ヒトスジシマカの生活史を取り込んだ PCMP モデルは、2003 年から 2013 年の新宿で週ごとに観測された個体群動態の季節的消長傾向を再現した。特に、休眠から覚醒し、活動が活発になり始める時期と活動期のピークの両方を表現できた。これは、感染症リスクに対する警戒に重要な情報である。

2081-2099 年の個体群動態予測結果から、ヒトスジシマカの個体数は現在気候下でのそれよりも大幅に増加する予測が得られた。ここでは幼虫期の環境収容力が土壌含水率に比例して変動

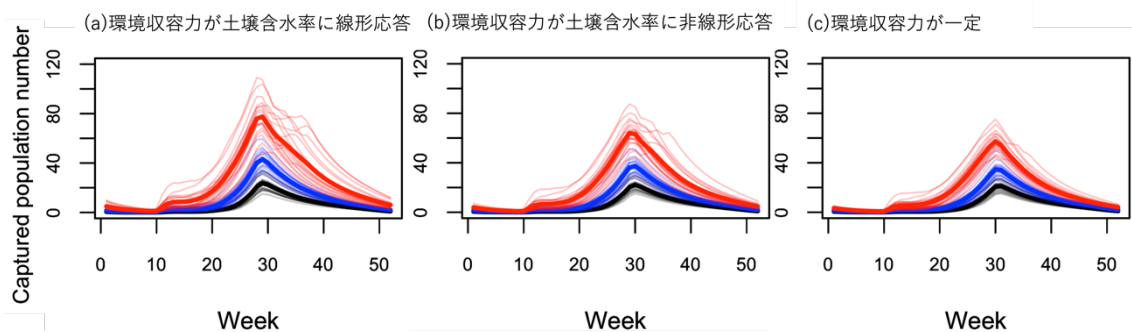


図 2 PCMP モデルで予測される 2081-2099 年のヒトスジシマカの季節的消長傾向

MIROC の将来気候データを入力として出力された将来気候下でのヒトスジシマカの個体群動態。それぞれのパネルが密度効果の降水から受ける影響の違いを表す。細い線がそれぞれの年の個体群動態を、太線が計算期間 19 年の平均を示す。黒線がヒストリカル (1991-2009 年)、青線が RCP2.6、赤線が RCP8.5 の将来予測 (2081-2099 年) の結果。

する場合のモデルでの結果を取り上げる。RCP8.5 シナリオにおいて顕著で、計算期間の 19 年を平均しても活動期のピークでおよそ 3.3 倍となり、RCP2.6 においてもおよそ 1.8 倍の増加が確認された (図 2(a) および表 1)。他方で、ピークとなる時期については現在気候条件下と大きな違いが出ないことがわかった。また、シミュレーションした 19 年の活動ピーク時個体数の変動係数 CV は、現在気候条件下で 0.24、RCP8.5 シナリオの将来気候条件下で 0.20 となった (表 2)。図 2 に示されるようにこの CV の違いでは、将来気候下での個体群動態の年変動は現在気候下のそれに比べて相対的に大きくなる。つまり、将来気候下においての不確実性は大きくなると示唆された。これに対し、2031-2049 年の近未来予測では、温暖化影響を反映してピーク時個体数の増加傾向はまだ小さく、およそ 1.2 倍であり、現在気候下の個体群動態と比べて大きな違いは見られなかった (図 3)。

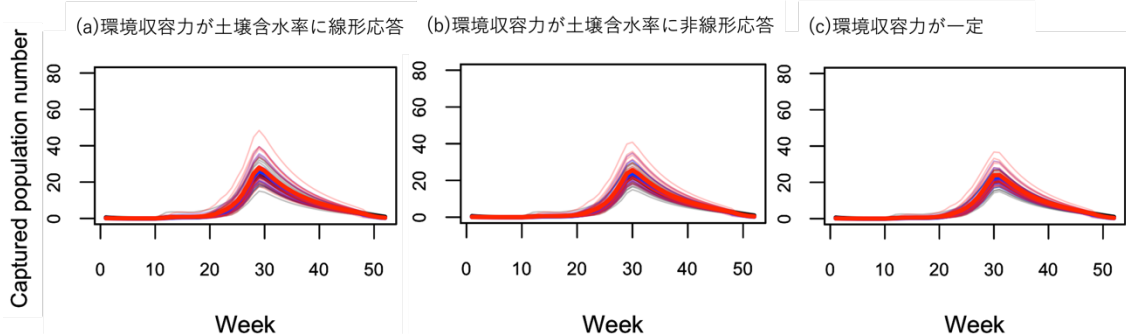


図 3 PCMP モデルで予測される 2031-2049 年のヒトスジシマカの季節的消長傾向

MIROC の将来気候データを入力として出力された将来気候下でのヒトスジシマカの個体群動態。それぞれのパネルが密度効果の降水から受ける影響の違いを表す。細い線がそれぞれの年の個体群動態を、太線が計算期間 19 年の平均を示す。黒線がヒストリカル(1991-2009 年)、青線が RCP2.6、赤線が RCP8.5 の将来予測(2031-2049 年)の結果。

(2) 水生段階における水分依存の密度効果による将来予測結果の差異

将来気候において降水パターンの変化がヒトスジシマカの個体群動態の予測にどのような影響を及ぼすのか、降水に対してヒトスジシマカ個体群の密度効果が非線形的な応答を示す場合は将来気候下での個体群動態にどのような差異をもたらすのかを検証した。幼虫期の環境終了力が土壌含水率に対して、線形に応答する場合 (図 2(a))、全く影響を受けずに一定の場合 (図 2(c))、そして両者の中間である非線形に応答する、つまり、ある土壌含水率増加に対して環境収容力が頭打ちする場合 (図 2(b)) について、それぞれ将来予測を行った。密度効果が降水に影響しない場合、降水が密度効果に影響するいずれの場合よりも、活動期のピーク個体数は小さいものとなった。しかし、それでも計算期間 19 年を平均して RCP8.5 で現在気候条件下よりも 2.7 倍の増加、RCP2.6 でも 1.6 倍増加することがわかった。環境収容力が土壌含水率に非線形に応答する場合は、密度効果が降水に影響しない場合と、土壌含水率に対して環境収容力が線形に応答する場合の中間的な増加傾向となった。すなわち、密度効果が降水に依存して変動する場合、将来気候条件では活動期の個体数が現在気候下のそれより平均しておよそ 3 倍近い個体数の増加が生じることが示唆された。すなわち、温度の影響に加え、降水の影響が加味されることでさらに感染症媒介蚊の個体数が将来的に増加することで、これらが媒介する感染症のリスクが将来的に増加することが明らかとなった。

表 1 将来予測における活動期のピークとなる個体数とピークとなる週

	GCM Scenario	環境収容力が線形応答	環境収容力が非線形応答	環境収容力が一定
平均個体数 [ピークとなる週]	Historical	23.7 [29]	22.0 [30]	21.1 [31]
	RCP 2.6	43.3 [29]	37.4 [30]	34.7 [30]
	RCP 8.5	77.6 [29]	63.9 [29]	57.4 [30]

将来気候データを提供している全球気候モデルは、基本的に月別の平均値として計算されるもので、日別解像度では実態にそぐわないことがある。上記で示した MIROC の日別降水量についてもこの問題があり、無降水日が実測よりも少ない一方、少ない降水量の日が多く続くような出力がされている。この日別降水パターンのバイアスは気候データ駆動型の個体群動態モデルで将来予測を行う際には問題が生じる。そこで GCM のヒストリカル(1991-2009 年)期間において、近接する場所との空間的な相関を無視して、東京の実測気象データから月平均値について統計的に大きく外れないようなランダムリサンプリングを行い、気象データを生成した。この際、今後の東京の気候として提言されている無降水日数や降水強度の増加を考慮した降水パターンを生成し、蚊個体群予測の入

表 2. 将来予測における活動期ピーク時の個体数の変動係数

	GCM Scenario	環境収容力が線形応答	環境収容力が非線形応答	環境収容力が一定
変動係数 CV	Historical	0.241	0.205	0.183
	RCP 2.6	0.164	0.150	0.161
	RCP 8.5	0.196	0.173	0.145

力データとした。気候シナリオによっては梅雨の時期の無降水日数が増加することで水生段階の個体数増加が抑え込まれ、夏季にピークとなる個体数がこれまで得られた予測よりも小さくなる結果を得た。しかしながら、ヒストリカル期間での水温が実測値から得られた水温よりも低めの値となってしまうというバイアスがあり、この補正に課題を残した。

(3) 確率的な予測、モデルの適用範囲を拡大する際に必要な事項

PCMP モデルの適用範囲を広げるため、日本各地をはじめ、温帯域でのシマカやイエカの生息に関する観測データを調査した。しかしながら、PCMP モデルを修正し、本研究以外の地域に適用できるほどのデータを見つけることはできなかった。2週間程度のインターバルでかつ、数年にわたって観測され続けなければならないことが制約条件となっていた。

一方で、ここ数年で使用可能な GCM 出力は豊富となり、マルチアンサンブル、初期値アンサンブルなど大量の将来気候の予測結果が使える状態になってきている。これらを活用することによって、本研究の成果を援用し、将来気候下での感染症媒介蚊の時間的な個体数の増減を確率的に評価することが可能である。本研究課題では扱わなかった IPCC AR6 や CMIP6 が公開している将来気候データを活用した個体群動態の評価手順を検討している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

Fukui S, Kuwano Y, Ueno K, Atsumi K, Ohta S, Modeling the effect of rainfall changes to predict population dynamics of the Asian tiger mosquito *Aedes albopictus* under future climate conditions, PLoS ONE, 17(5), 2022, e0268211, DOI: 10.1371/journal.pone.0268211 (査読あり)

[学会発表] (計 4 件)

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.

福井眞, 太田俊二, 変温動物の個体群動態の将来予測モデリング, 第 35 回個体群生態学会大会, 2019.

上野一喜, 福井眞, 太田俊二, 温帯性蚊の個体群動態の降雨依存性, 第 67 回日本生態学会大会, 2020.

丸山みく, 遠藤大志, 太田俊二, 降水の変化傾向は温帯性蚊の個体群動態に影響を与えるか, 第 70 回日本生態学会大会, 2023

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：国立研究開発法人 水産研究・教育機構

部局名：水産資源研究所 水産資源研究センター 漁業情報解析部

職名：主任研究員

研究者番号 (8 桁)：90754573

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fukui S, Kuwano Y, Ueno K, Atsumi K, Ohta S	4. 巻 17(5)
2. 論文標題 Modeling the effect of rainfall changes to predict population dynamics of the Asian tiger mosquito <i>Aedes albopictus</i> under future climate conditions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PLoS ONE	6. 最初と最後の頁 e0268211
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0268211	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 上野一喜 福井真 太田俊二
2. 発表標題 温帯性蚊の個体群動態の降雨依存性
3. 学会等名 第67回日本生態学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桑野友輔, 福井真, 太田俊二
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第66回日本生態学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福井真, 太田俊二
2. 発表標題 変温動物の個体群動態の将来予測モデリング
3. 学会等名 第35回個体群生態学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丸山みく, 遠藤大志, 太田俊二
2. 発表標題 降水の変化傾向は温帯性蚊の個体群動態に影響を与えるか
3. 学会等名 第70回日本生態学会大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	福井 眞 (FUKUI Shin) (90754573)	国立研究開発法人水産研究・教育機構・水産資源研究所(横浜)・主任研究員 (82708)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------