

7. 気候変動が動物媒介性疾患に与える影響に関する研究

A STUDY ON EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON VECTOR-BORNE DISEASES

岡田真理子*、松岡 譲**

Mariko OKADA* , Yuzuru MATSUOKA**

ABSTRACT: Now, about 30~50 million people are infected by malaria and 1~3 million people are infected by dengue. It is thought that the habitation range of these viruses will be spread by the climate change. In this research, we studied the relations among climate conditions and malaria, dengue fever. Consequently, climate change might make the infection area expand especially in the tropics in Africa and South America, and unless temperature doesn't go up extremely, malaria will decrease in the Middle East. Moreover, when the living standard increases to some extent, the influence will reduce substantially. As for the case of dengue fever, unlike the case of malaria, the influence by temperature is little influenced by the economic. The influence by temperature was large and the rate of increase in South America is also very large especially in the South Pacific area.

Keywords: Global Environment, Climate Change, Health Impact, Malaria, Dengue

1. はじめに

今日の人間活動の増大により地球規模で環境変化が起こっている。産業活動の発展の結果として、大気の組成が変化し、特に二酸化炭素などの温室効果ガスの増大により将来世界的に気候が変化すると考えられている。地球温暖化はさまざまな点から人間活動に影響を及ぼすと推測されている。その中で、最も重大な効果を及ぼすと考えられるものは動物媒介性の感染症疾患、特にマラリアやデング熱などの増大である。

現在、マラリアでは24億人、デング熱では18億人が病気にかかるおそれがあると報告されており、そのうちマラリアでは3~5億人、デング熱では1~3千万が感染している (Martens, 1998)。特にこれらの病気により発展途上国における5歳以下の子どもの死亡率は高く、マラリアでは、100人に1人が死に、世界全域では毎年150万から220万人の子供が死んでいる (WHO, 1993)。これらの動物媒介性の熱帯性疾患は温暖化によって流行に影響を受けると考えられており、その影響が危惧されている。本研究では、これら2つの疾患に焦点をあてて、過去のデータを調べ、これらの疾患が気温などの条件とどのような関係にあるかを探り、これからの気候変動がこれらにもたらす影響について推計する。

*京都大学工学部工学研究科環境工学専攻 Department of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University.

**教授 京都大学工学部工学研究科環境工学専攻 Professor of Department of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University.

2. マラリアとデング熱

マラリアは、*Plasmodium* に属する原虫によって引き起こされ、その原虫はハマダラカによって人の体内に侵入する。マラリア原虫の生活環は、人の肝細胞や赤血球内で起こる分裂とその結果、人体内に形成された雌雄生殖母体が蚊の吸血により蚊の胃の内に移動し、そこで成熟して生殖体となり雌雄合体する生殖体・スポロゾイド形成過程からなる。そこで生成された融合体は、蚊の胃壁の外膜に胞嚢体を作る。この中で孢子形成が行われ多数のスポロゾイドが形成され、これが唾液腺に侵入し、蚊が人を刺すことにより再び人体に移動してくる。マラリア原虫には4種類あり、地理的に広い範囲に住む *P.vivax*(三日熱マラリア)、最も一般的で危険な *P.falciparum*(熱帯熱マラリア)、あまり広がっていない *P.ovale*(卵型マラリア)と *P.malariae*(四日熱マラリア)である。

デング熱の伝染はマラリアと似ている。媒介生物は、ネッタイシマカであるが、ヒトスジシマカも媒介することもある。病原体は *Flaviviridae* 科の *Flaviviridae* 属に属するデングウイルスである。

このように原虫やウイルスの繁殖や伝播には、人と蚊の体内で生活する二段階が必要である。人の体内に存在している時には気候環境に直接さらされることはなく影響を受けることもないが、媒介生物の体内にいる時には外部の気候が大きな影響を与える。

3. 研究の概要

既往の研究(例えば Martens,1998)では、原虫やウイルスによる伝染を継続するために必要な媒介生物の数をその密度から計算しており、蚊の密度の逆数を伝染能(Epidemic Potential)と定義し、これによって伝染可能な地域を表していた。本研究ではこれらの研究をもとにしてまず、気温や降水量を使って、伝染能を推計するモデルである MIASMA(マラリア, Martens, 1998)や CIMSIM(デング熱, Focks *et al*, 1993)を用いて伝染能を計算した。次に、WHO 等の研究に基づき届出患者数から実際の罹患者数の推定計算を行った。これは、実際には発病していても届出がされていない場合が多く考えられるからである。

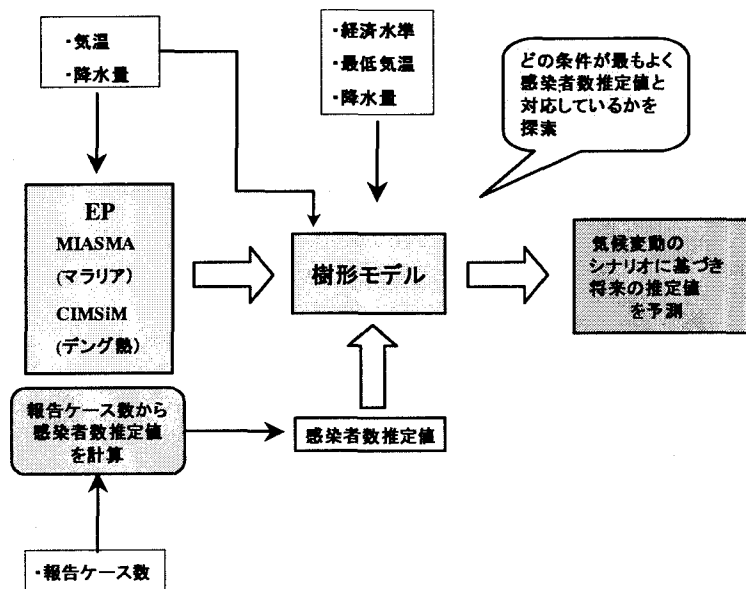


図1 研究の概要

4. 伝染能(EP)について

Martens は伝染能の基本パラメータを基本再生産率 R_0 として考えた。 R_0 とは、一人の患者がある環境におかれた時に何人の人に感染させるかの数である。

マラリア、デング熱の基本再生産率 R_0 を表すにあたり、次のように記号を定義する。すなわち、 a : 一

日に一匹の媒介蚊が人を吸血する頻度、 b ：感染した蚊が人を感染する確率、 c ：感染していない蚊が感染した人を刺す確率、 n ：蚊の中での原虫の孵化期間(抱卵日数)、 p ：蚊の一日生存の確率、 r ：人間の回復速度(人が病気から回復する日数の逆数)、 m ：人に対する蚊の密度とする。媒介蚊の平均寿命 e と p の間には、

$$e = \int_0^{\infty} p^x dx = -\frac{1}{\ln p} \quad (1)$$

の関係がある。感染した人は、回復してその感染能を失うまでの期間 $1/r$ に、一日あたり ma 匹の蚊にかまれる。また吸血によって原虫やウイルスを接種した蚊が、感染能をもつには n 日間以上生存しなければならない。したがって、一人の感染者から感染能を有する蚊は、 $\frac{1}{r} \cdot ma \cdot p^n$ 匹だけ生ずる。彼らの平均寿命は、 $-\frac{1}{\ln p}$ であり、その間に一日あたりに a 人の人を感染させる。これらのことから、感染した蚊が人を感染する確率を b とし、感染していない蚊が感染した人を刺す確率を c とすれば、一人の感染者から、

$$R_0 = -\frac{p^n}{\ln p} \cdot \frac{1}{r} \cdot ma \cdot a \cdot b \cdot c = -\frac{ma^2 p^n bc}{r \ln p} \quad (2)$$

の感染者を生じる。ただし、この式を導く時には次のことを仮定している。1)媒介蚊は吸血による原虫の接種と生育をすべて効果的に行うこと、2)媒介蚊の死亡率はその年齢に関係なく一定であること、3)寿命は感染によって変化しないこと、4)人を吸血する確率は、ある媒介蚊種の一定の個体群内ではすべての吸血機会において同じであること、5)人はマラリアに対する免疫をもたないことである。

基本再生産率 R_0 は、伝染能力(EP)と深く関わっている。 $R_0 > 1$ のとき病気は広がり、 $R_0 < 1$ のとき病気がなくなるので $R_0 = 1$ が限界である。ここでは、 $R_0 = 1$ の時の蚊の密度 m の逆数を伝染能(EP)と定義しこれを用いてマラリアやデング熱の伝染能の強さを算定する。

マラリアの場合、媒介蚊の体内における原虫の発達は限られた温度範囲においてのみ行われる。原虫発達に対する最低気温は、*Pvivax* の場合 $14.5^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$ 、*Pfalciparum* の場合 $16^{\circ}\text{C} \sim 19^{\circ}\text{C}$ であり、原虫の生存割合は $32^{\circ}\text{C} \sim 34^{\circ}\text{C}$ 以上で急激に減る。周囲の温度と孵化期間 n の関係について、Macdonald(1957)は次式で表した。

$$n = \frac{D_m}{T - T_{\min,m}}, \quad T_{\min,m} \leq T \leq 40^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

ここに、 D_m ：原虫の発達に必要な気温以上の日数(days)、 T ：実際の平均気温、 $T_{\min,m}$ ：原虫の発達に必要な最低気温とする。

デング熱の場合もマラリアの場合と同じようにして、蚊の密度 m を計算するが、Focks(1993)はパラメータと温度との関係をデング熱用に特定化したもの(CIMSiM)を提案しており、本研究においてもこのモデルを使用した。

5. 解析に用いた統計方法について

本研究では報告された患者数と前節の方法で計算した EP および気候パラメータ、経済状況との関係を統計的に検討している。使用した方法は重回帰分析及び樹形モデルによる回帰分析(回帰樹)であり、各国人口の重み付けを行い適用した。

回帰樹による方法とは、説明変数を比較的等質なグループに分け、各グループには1つの値の従属変数値が対応すると想定して、回帰計算を実行する方法である。グループの分割方法及び分割数を最大何組とするかなどによりいくつかの方法が考えられるが、本研究においては統計パッケージS第6版に含まれる tree (Insightful Corporation, 2001)を使用し、その設定パラメータをそのまま用いた。回帰樹を使用した理由は従属変数の説明変数に対する依存性に強い非線形性が想定されたためである。

6. 使用したデータ

気温や降水量のデータは、1901年から1995年までの月平均観測値(Hulme *et al*, 2000)を用いた。患者数についてはWHOによる報告値(WHO, 1982-1992,1999)を用い、これを実際の患者数に換算する計算はWHOのThe Global Burden of Disease 2000 project(2001)で使用した換算係数を用いた。この方法は世界各国を14地域にわけ、その地域ごとに推定患者数を推定し換算係数を推計したものである。

各国の生活水準を示す説明変数として一人当たりGDPを採用した。GDP値はMaddison(1998)が各国、各年ごとに推計した値を使用した。データ数はマラリアにて558、デング熱にて189であり、GDP、患者数、罹患率是对数変換をして用いた。

7. 計算の結果

表1に計算結果を示す。表中のEP_{max}、EP_{mean}、とはEPの計算値の年間最大値と年間平均値を、T_{min}とは年間最低気温を示す。

表1 解析結果

従属変数が患者数の場合(デング熱)

説明変数	手法	
	重回帰分析	樹形モデル(分割数)
GDP,EPmax	2.38	3.03 (27)
GDP,EPmean	2.40	2.64 (26)
GDP,Tmin	2.41	2.03 (26)
EPmax	2.41	5.08 (12)
EPmean	2.43	5.57 (6)
GDP	2.41	3.39 (25)
Tmin	2.44	4.17 (29)

従属変数が罹患率の場合(デング熱)

説明変数	手法	
	重回帰分析	樹形モデル(分割数)
GDP,EPmax	1.84	2.53 (7)
GDP,EPmean	1.85	2.68 (7)
GDP,Tmin	1.78	2.50 (6)
EPmax	1.84	3.15 (11)
EPmean	1.84	3.40 (6)
GDP	1.85	2.22 (25)
Tmin	1.78	2.48 (29)

従属変数が患者数の場合(マラリア)

説明変数	手法	
	重回帰分析	樹形モデル(分割数)
GDP,EPmax	2.32	1.87 (39)
GDP,EPmean	2.41	1.62 (32)
GDP,Tmin	2.39	1.58 (29)
GDP,Tmin、降水量	2.37	1.59 (28)
EPmax	2.42	4.98 (56)
EPmean	2.55	4.78 (46)
GDP	2.76	2.63 (40)
Tmin	2.46	3.73 (53)
降水量	3.33	7.76 (76)

従属変数が罹患率の場合(マラリア)

説明変数	手法	
	重回帰分析	樹形モデル(分割数)
GDP,EPmax	2.43	2.10 (22)
GDP,EPmean	2.56	2.00 (23)
GDP,Tmin	1.15	1.54 (25)
GDP,Tmin、降水量	1.15	1.55 (16)
EPmax	2.71	5.84 (46)
EPmean	2.93	5.71 (44)
GDP	2.98	2.82 (35)
Tmin	2.44	4.21 (43)
降水量	4.01	10.68 (78)

これらの結果から、第4節で説明したEPを用いる場合よりもT_{min}とGDPを説明変数とする場合が適切であると判断した。図2、3に推計値及び報告値の適合状況を示す。これは従属変数をT_{min}及びGDPとし、回帰手法を回帰樹とした場合である。

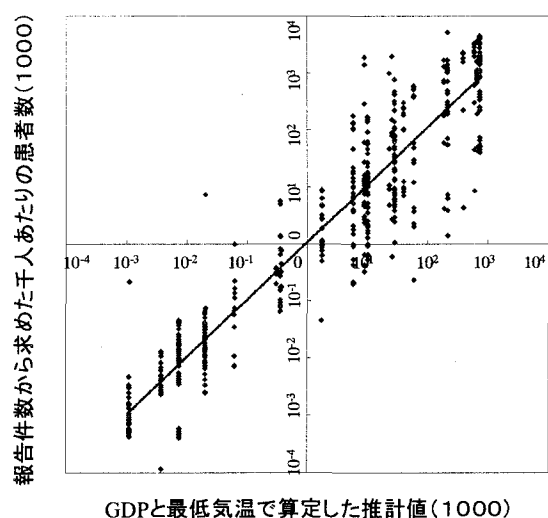


図2 マラリア患者数報告測値と推定値の相関

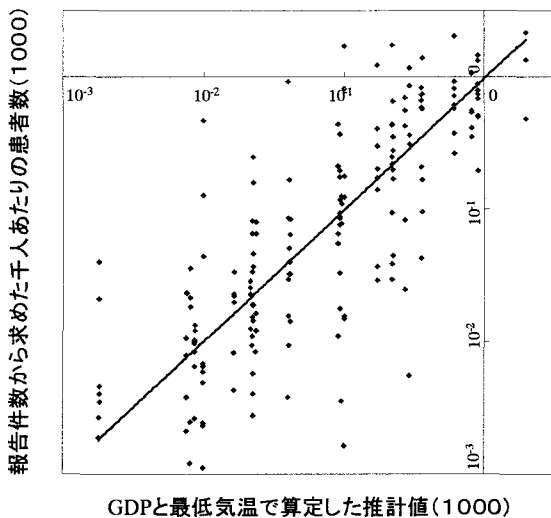


図3 デング熱患者数報告値と推定値の相関

8. 将来推計について

第7節の結果からマラリア及びデング熱の罹患率は、年間最低気温及び生活水準に依存していることが判明した。したがって今後の気候変動に対する両疾病への影響を推計するには、両者の変化要因を取り込む必要がある。これらに関する将来シナリオとして、本研究では IPCC による SRES シナリオ(IPCC, 2000)を参考にして、気温に関しては 0～0.56℃/10 年、一人当たり GDP については 0～4.0%/年の増加率とし、1995 年以降の 50 年間の変化倍数を求めた。

表2 GDP と気温の増加率のパターンと 2045 年の推定ケース数の 1995 年からの変化

条件	気温(℃/10年)	GDP(%)	シナリオ	2045年の推定値/1995年の推定値(倍数)	
				マラリア	デング熱
①	0	1.1		0.92	1.47
②	0	4.0		0.18	1.38
③	0.14	0		3.35	3.09
④	0.56	0		5.17	17.43
⑤	0.14	1.2	B1	1.22	2.93
⑥	0.14	3.5	B1	0.26	2.84
⑦	0.56	1.6	A1	1.92	17.26
⑧	0.17	4.0	A1	0.27	7.22
⑨	0.56	4.0	A1	0.49	17.26
⑩	0.19	1.1	B2	1.37	15.98
⑪	0.47	1.1	A2	2.96	16.94

マラリアの場合、③、⑤及び⑥、また④、⑦及び⑧を比較することにより、GDP の影響がわかる。気温のみのときの③、④に比べて0.07～0.56 倍に、小さいときには0.05 倍に減っている。また、①、⑩及び⑪、また②、⑧及び⑨を比較すると1.44～3.21 倍になっており、気温の影響も大きいことがわかる。⑥、⑧、⑨において全世界での 1995 年からの変化率が1 以下であることから、生活水準の向上が進めば気温に関係なく罹患率は減ることがわかる。この 11 シナリオの中で全世界において最も罹患率が増加するのは⑪の気温

が4.7℃上がり GDP が1.1%増加した場合であり、3.4 倍となった。

デング熱の場合、GDP 変化の影響を検討する組み合わせの③、⑤及び⑥、また④、⑦及び⑧を比較した場合あまり変化が見られなかった。一方、気温変化の効果を検討するため①、⑩及び⑪、また②、⑧及び⑨を比較すると5.24～11.53 倍になった。また、11 シナリオのうち罹患数が増加したのは⑦の気温が2.8℃上がり GDP が年1.6%増加した場合であり、この場合1995年の約7.3 倍と計算された。

8. まとめ

多くの研究において、気温の上昇は動物媒介性疾患の増加をもたらすとしているが、気温が上昇してもそれほど疾患は増えないと主張する研究もある(Rogers, 2000)。本研究の結果からマラリアの場合は生活水準の向上速度がある程度大きければ一部の地域を除いて気温上昇にもかかわらず患者数は減る結果となった。デング熱の時にはマラリアの場合とは異なり、気温による影響が大きくほとんどで生活水準向上速度の影響はあまり反映されない結果となった

動物媒介性疾患の発生には気温が大きく関わっているが、推定値と計算値に大きな差がある地域があるということは、単に気候だけではなく、その土地の文化、衛生状態、風俗習慣、社会経済状態、住民の移動および医療機関など複雑な要素が入り混じっているためと考えられ、これらの点を考慮して対策を講じる必要がある。

文 献

- Anderson, R.M., and R.M. May (1985): Helminth infectious of humans: mathematical models, population dynamics, and control, *Advance in Parasitology*, 24, 1-101.
- Focks,D.A., D.G.Haile, E.Daniels, and G.A.Mount (1993): Dynamic life table for *Aedes aegypti*(L.). Analysis of the literature and model development. *Journal of Medical Entomology*, 30, 1003-1017.
- Insightful Corporation (2001): S-PLUS 6 for Windows Guide to Statistics, Volume2.
- IPCC(2000): Special Report on Emission Scenarios, A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- Maddison, A.(1998): The World Economy -A millenium Perspective, OECD.
- Martens, P. (1998): *Health and Climate Change*, Earthscan Publications Ltd, London.
- Mcdonald, G. (1957): *The epidemiology and control of malaria*, Oxford University Press, London.
- M.,M.Hulme and P.D.Jones(2000): Representing twentieth century space-time climate variability, III: Development of 1901-1996 monthly grids of terrestrial surface climate, *Journal of Climate*,13,2217-2238.
- Rogers, D.J. and S.E.Randolph (2000): The Global Spread of Malaria in a Future, Warmer World, *Science*, 289, 1763-1765.
- WHO (1982-1992): World malaria situation, *World Health Statistics Quarterly*.
- WHO: World Health Organization Regional Office for Europe, <http://cisid.who.dk/Presentation/InteractiveDataQuery>.
- WHO (1993): The situation of malaria and its control in the world, CTD/MAL/MIP/WP/93.1.
- WHO (1999): Weekly epidemiological record.
- WHO: Dengue and dengue haemorrhagic fever, WHO/CDS/ISR/2000.1.
- WHO (2001): The Global Burden of Disease 2000 project: aims, methods and data sources, *Global Programe on Evidence for Health Policy Discussion Paper No.36* .