総 説

衛生動物及び関連疾病の分布解析における 地理情報システムの応用

二 瓶 直 子*, 1), 2)

¹⁾ 国立感染症研究所昆虫医科学部 (〒162-8640 東京都新宿区戸山1-23-1)

²⁾ 麻布大学獣医学部寄生虫学教室 (〒229-8501 神奈川県相模原市中央区淵野辺1-17-71)

(受領: 2015年12月23日; 登載決定: 2016年3月28日)

Application of GIS in the analysis of distribution of medically important arthropods and related diseases

Naoko NIHEI*, 1), 2)

*Corresponding author: niheigeo@nih.go.jp

¹⁾ Department of Medical Entomology, Institute of Infectious Diseases,
1-23-1 Toyama, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8640, Japan

²⁾ Laboratory of Parasitology, Veterinary Medicine, Azabu University,
1-17-71 Fuchinobe, Chuo-ku, Sagamihara, Kanagawa 229-8501, Japan

(Received: 23 December 2015; Accepted: 28 March 2016)

Abstract: The distribution of medically important arthropods and related diseases is changing on a global scale due to issues involving natural environments, socioeconomic conditions and border disputes, etc. Geographic information systems (GIS) provide an important method for establishing a prompt and precise understanding of the local data of these outbreak, from which the disease eradication programs can be built. Having first defined GIS as a combination of GPS, RS and GIS, we detailed the history of development of each technology and showed the processes through which these technologies were being introduced into our research. We examined past reports published in this journal from the perspective of geographical information and found that GIS is essential in medical and zoological research. GIS derived geographical information attributes were interpreted in terms of point, line, area, spatial epidemiology, risk and development into infestation models. As a case study, we showed the progress of our research on *Aedes albopictus*, the vector mosquito for dengue fever, chikungunya fever and other various communicable diseases, whose infestation and establishment in new environment due to global warming is currently being closely monitored worldwide. The need for inter-disciplinary collaboration on the issues and perspective for future GIS utilization should be advocated.

Key words: geographic information systems (GIS), remote sensing (RS), global positioning system (GPS), medical entomology, infectious diseases, integrated geographic information systems for infectious diseases

はじめに

自然環境・社会経済・国境紛争に伴う人の移動等の問題に起因して、衛生動物関連疾病の分布域は世界的な規模で変化しつつある。マラリア、フィラリア症、デング熱、メジナ虫症などの重篤な節足動物媒介性疾病は、開発途上国や内戦国の貧困地域に多く、これらの疾病の現地調査を行うことには各種の制約がある。温帯・亜寒帯の先進国でも、温暖化、難民や避難民、動物などの移動によって、新興・再興感染症の流行が予期せぬ場所で発生するようになってきた。これらの疾病を予防するためには、疾病情報をいかに迅速・的確に把握して疾病対策を立案するかが重要である。近年、衛生動物または関連疾病の発生位置情報を収集する手段として地理情報システムGISが用いられてきている。

医療・医学におけるGISは、いわゆる「顧みられない熱帯病」対策や学校保健・母子保健など保健分野で、携帯情報端末 (personal digital assistant, PDA) を用いた医療情報の収集、データの整理、現状把握、問題点の指摘、対策とその効果、今後の目標の設定などのために用いられてきたり、医療施設へのアクセスについてその適正配置、医療行政の意思決定にも使われており、患者発生地点の図化は啓発的效果が大きい。先進国においても、新興・再興感染症の発生時における患者・媒介動物の調査と対策、特定疾患あるいは乳児死亡率の高い地域の検出、病院・医院などの医療圏の分析にGISが用いられているばかりか、今日では、疾患分類および経年的な医療施設の適正配置など情報を整理・解析し問題点を明らかにすることに、GISが用いられている。

一方、日本においては、明治時代中期以降特に戦後から現

在に至るまで医療統計もかなり整備されていたため、位置情報を付加した疾病統計や疾病分布をGISを用いて改めて収集する必要性を認めない傾向がある。また個人情報保護法の下でGISの精度の高い狭小な地域の解析結果を公表しにくいこともあり、人・人感染の疾患や患者の分布を扱うことは困難となってきた。

これに対して、衛生動物特に衛生昆虫やそれにかかわる疾患のデータ解析には、古くから地図が用いられてきた。デジタル化が可能な既往資料が保管され、解析したい事象をGPSや地図だけでなく空中写真や衛星画像で、既往の地理情報等を重ね合わせて分布の特徴や地域性、およびそれに関わる疾病への対応策を講ずることに利用されてきた。その結果、これらのデジタル化された地理情報の応用は、採集場所の点データから全球モデルを用いた世界規模の昆虫媒介性感染症のリスク予測へと発展している。

本稿ではまずGISを簡単に説明し、それらのシステム自体の発展と、それを用いた媒介動物やそれに関わる疾患の分布の解析における、地理情報による空間解析の研究導入について触れた後、既往事例研究の概要を述べ、今日話題となっているヒトスジシマカ *Aedes albopictus* (Skuse) の分布調査を通じたGISの利用事例の展望についても述べることとする。

地理情報システム Geographic information systems GISの 領域と衛生動物学への導入

GISとは点・線・面等の地理的位置を持った情報、すなわち空間データを収集し、属性情報を付加してデジタル化して、総合的に管理・加工し、視覚的に表示し、高度な分析や迅速な判断を可能にする技術である。狭義のGISは空間情報を作成、加工、管理、分析、表現、共有等をするためのGISソフトウェアで解析する情報技術を意味する。これに、近年の位置情報を取得する技術・手段としての経緯度を測定する全地球測位システムGPS、空中写真や衛星画像を利用して、遠隔地から地表面の事物・地形・植生・水の分布（在り方）など位置と環境を推定するリモートセンシングRSを合わせて「3S」と称している。広義のGISは3Sとこれらを統合して実世界を空間的・複合的に解析して、より合理的な意思決定を行おうとするアプローチ全般を意味する。

1. GPS

GPSは、24個以上の衛星を利用して地球上のいかなる地点の経緯度をも測定できる技術である。1993年から、軍事目的だけでなく民間レベルでの利用が可能になったGPSは、開発初期では洋上で位置を確認するために供され、陸域で利用するには精度が低く誤差も大きかった。また経緯度の基準線が各国の地図により異なっていたため、GPSデータとのズレを補正して用いてきた。その後、陸域用のGPS機器が種々開発され、ディファレンシャルGPS、特に、測量用GPS機器、PDA、GPSカメラ、GPSカード挿入式デジタルカメラ、GPS内蔵デジタルカメラなどが登場した。これらは、精度の高い経緯度を取得できるもの、経緯度と写真が関連付けられるもの、位置以外の取得したい情報をその場で入力できるもの、方位を同時に取得できるもの、軽量で防水性のものなど、機能が多彩化し、現在では観測・採集データをデジタル地図上に簡単に図化できるものもある。

2. RS

RSのうち空中写真による判読には、日本では戦後1940年代に米軍の撮影した空中写真や、地図作成や森林管理のため撮影された大縮尺の空中写真などが利用されてきた。衛星画像は1972年ごろからアメリカ航空宇宙局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）のLandsat衛星の平和利用が希求され、媒介動物や中間宿主の分布解析に用いられた（Arp, 1975; National Aeronautics and Space Administration (NASA), 1976; Cross et al., 1984; Wood et al., 1991; Washino and Wood, 1993; Malone et al., 1994; Kitron et al., 1996; Dister et al., 1997）。しかし、解像度は30mで粗く、地形や土地利用が複雑な日本や熱帯・亜熱帯の、地域差のある感染症の解析には利用できなかった。一方、フランス・ベルギー・スウェーデンの共同開発により、1986年から解像度20mのSPOT衛星（Satellite Pour l'Observation de la Terreの略で地球観測衛星）が打ち上げられるとともに、その衛星画像処理のためのGIS解析ソフトも開発された。しかしながら、日本では一般の研究者レベルでは高価で購入できず、汎用画像処理のPhotoshop（Adobe Systems Incorporated, San Jose, CA, USA）などのソフトウェアで判読していた。日本では宇宙航空研究開発機構JAXAによって1992年に解像度18mの国産衛星JERS-1（ふよう1号）が、2006年には解像度10mの陸域観測技術衛星ALOS（だいち）が打ち上げられた。これに伴い、開発プロジェクトとして、感染症分野の研究班が立ち上げられ、我々も精度の高い画像を容易に利用できるようになった。一方、その頃になると安価なアカデミック版のGIS解析ソフトや、高性能で低廉なパソコンの普及によって、GISを容易にリスク解析に用いることができるようになった。

3. 狭義のGIS

感染症に関係して、医学地理学的あるいは空間疫学的な対象地域の地域区分は1960年代からすでに行われ、PCが開発される前に、設置型の電算機を共用し、FORTRANなどで数式をプログラムして苦勞して統計解析も利用されている。1990年代に入るとMapInfo（Pitney Bowes Software K.K., Stamford, CT, USA）、ArcView（Esri, Redlands, CA, USA）など商品化されたGISソフトウェアも開発され、GISは、WHOなど国連機関でも、解析に導入され始めた（Clarke et al., 1990; Sole et al., 1991; Glass et al., 1992, 1995; Kitron et al., 1994; Nicholson and Mather, 1996）。GISのソフトウェアはめまぐるしい進歩を遂げている。現在では日本では温暖化をはじめとする地球規模の環境変化に対応するため、医動物分野において、医学的、地理学的、生態学的立場に基づいた解析なども行われ、GIS分野における展開も期待されている。

衛生動物や対象地域の地理空間情報の属性

1. 点：分布・調査地の地名、位置の確定

衛生動物分野で用いられてきた位置・地理情報については、疾病の発生機序が次々に明らかになってきた大正・昭和の戦前までの論文では、著者が河川・湖沼・山などの地形や集落名を入れたかなり詳細な略図を描いていた。現在では明治時代中頃陸軍の迅速測量による1:20,000地形図や大正・昭和にかけて発行された国土地理院発行の1:50,000地形図が、簡単に入手できるようになった。それによって調査地域の地名・集落を経緯度の分かる地図上で確認することができるよ

うになった。戦後は、衛生動物などの新種の記載やその分布・浸淫地を、1:25,000の地形図で正確に図化することができるようになった。例えば、関東地方における日本住血吸虫症の分布図（二瓶ら、1990）を、GISでデジタル化すれば、ミヤイリガイ *Oncomelania hupensis nosophora* Robson, 患者、日本住血吸虫の3病理的因子およびそれらの組み合わせの分布を時系列的に表現できる。今ではGPSやインターネット上のマップ、衛星画像を用いれば、国内のみならず海外の遠隔地の共同研究者と採集地の確認をはじめとして、経緯度や環境の解析が可能となった。

2. 線：輸入感染症、媒介動物の移動・拡散の解析

物流や人の移動が活発化する中で、日本の衛生動物学分野で問題となった輸入感染症あるいは新興・再興感染症の一例として、セアカゴケグモ *Latrodectus hasseltii* Thorell およびハイロゴケグモ *L. geometricus* Koch の事例がある。セアカゴケグモは海外からの輸入例として侵入当初から生息調査を実施しており、分布地点、拡散の方向、移動距離、分布域の経年的変化、咬症の地域差、効果的な駆除の方法などへの調査が検討された。そこで、GISを用いることにより、移動の情報を2次元幾何学モデルで視覚化するスパイダーダイヤグラム解析、分布地点の近距離解析、その結果得られた移動距離、移動の方向、咬症発症などの地域的特徴から、対策に役立つ地域区分などが行われた。さらに単なる分布だけでなく、分布地点をつなげることによって生態学的特徴の解明に役立った（Nihei et al., 2003, 2004; 二瓶ら、2008, 2010）。

3. 面：分布図の作成と疫学調査への応用（分布の質と量の変化）

一方、日本の医療分野の国際協力が進む中、例えばフィリピンにおける日本住血吸虫症の疫学調査や対策実施においては、1:50,000地形図を入手し利用することができた。しかし、当地の中間宿主貝 *On. h. quadrasi* Möllendorff の生息地は山間の狭い谷頭部や小川など狭小な類似の地形が多く、洋上で用いられているGPSシステムを導入し、測量用コンパスを用いて精度の高い中間宿主貝生息地域や患者発生集落の分布図を作成した（Yasuraoka et al., 1996）。さらに、乾期に低湿地・雨期には湖沼となり、アクセスが困難なフィリピン・ミンドロ島における中間宿主貝分布図の作成には、SPOT衛星のフォールスカラー画像写真を用いて、浸淫地の地形環境・植生などの特徴を判読した。さらに中間宿主貝の土壌調査や飼育実験を実施して、既知の浸淫地の位置をGPSで確認しながら、生息地を面として推定して、分布図を完成させた（二瓶・小林, 2001; 二瓶, 2004b）。現在でもなお、発見されているフィリピンの生息地の解析やそれらの地域での中間宿主貝の遺伝子解析のために、GPSと日本の衛星ALOS画像が用いられている（Leonardo et al., 2015）。

このように、対象地域における中間宿主貝の生活環の確定や他の地域との疾病の発生機序の比較を通じて、分布地域の疫学的特異性および共通性を顕在化させて地域区分して、対策内容と実施範囲を確定することが可能となる。

4. 面的解析の拡大：感染症リスクの予測と感染症侵入時の動向のモデル化：地方から国・地球規模へ

ヒトスジシマカの分布について、日本では、温暖化によ

る北上や高地への移動の推定に基づいて、世界の各種温暖化モデルに当てはめて、現在の生息地の推定や2035年および2100年の分布を予測した（小林ら、2007; Kobayashi et al., 2008）。イタリアでチクングニア熱が流行して以来（European Center for Disease Prevention and Control (ECDC), 2007）、ヨーロッパでも媒介蚊のヒトスジシマカの侵入と定着が注目され、大陸レベルで生息範囲の推定と生態調査が行われるようになった（ECDC, 2009, 2011, 2012; Caminade et al., 2012; Fischer et al., 2014）。ヨーロッパ大陸では、気温データの測定・算出法や集計期間などが国によって異なり、日本のように統一されたメッシュ気候値が収集できない。そのため、我々はヨーロッパ大陸における蚊の分布の検証はできなかったが、ECDCによって、年平均気温11°Cがヒトスジシマカの生息限界である（Kobayashi et al., 2002）という日本での解析結果を検証した結果となった。

近年のインターネットの発達による情報収集と広義のGISの利用によって、監視体制の確立とリスクの予測が、より迅速・客観的・可視的に表現されるようになった。すなわち、リスクのない地域、何らかの地理的变化により新興・再興感染症発症の可能性のある地域、対策が効果的な地域、既定の対策でリスクを除去できる地域、新しい対策が必要な地域など、同じ疾病でも、自然的・社会的・経済的要因によって、対策の方法や目標設定も可能になってきた。例えば、中国における日本住血吸虫症の重篤な浸淫地に関する情報をインターネットから入手して、既往の中間宿主貝の飼育実験や現地調査で明らかとなった至適な貝の生息条件を具備する地形、水環境や土壌環境をALOSなどの衛星画像で読み取り、類型区分を行うことにより、防除対策確立の検討ができるようになった（Nihei et al., 2010）。中国の日本住血吸虫症については、日本のメッシュ気候値と同様な方法で作成されたメッシュデータを入手して、中間宿主貝の生息限界温度である最寒月の平均気温0°Cの等温線が、温暖化に伴い北上することにより、どこまで生息適地が拡大するかを推定することができた。このような手法による国外の広範な地域あるいは大陸を対象とした調査データは、社会情勢や自然災害などでアクセス困難な地域における疾患リスクの予測と、監視体制の確立に大きく貢献した。ヒトスジシマカは近年、各種疾患の媒介蚊として注目され、GISを用いて全球レベルでの生息地が予測され、デング熱の浸淫地の推定リスクの予測も報告されるようになった（Bhatt et al., 2013; Kraemer et al., 2015）。

5. 空間疫学：環境の解析とリスクマップの作成

蚊の分布図を詳細に作成すると、分布地域の特徴、特に環境・地理的条件が明らかとなり、それらの条件の他の地域との差異や共通性を比較することにより、有病地や未調査地における生息地の推定が可能となり、リスクマップが作成できるようになった。そして医学・衛生動物学分野と、地理学・生態学あるいはその他関連の情報解析分野の横断的な共同研究を行うことで、空間疫学的解析の重要性を認識するようになった（中谷, 2008; 米島ら, 2015a）。この傾向は、広域でありながら、より精確で迅速かつ合理的な監視体制に役立つものと期待される。

GISに関連した本誌に見られる研究業績

日本においてはGISが開発される以前でも、衛生昆虫等の

分布, 調査地域の位置や生息環境を示すために, 地図がしばしば利用されてきた。縮尺, 方位, 等高線の高さなどGISに展開できるような地図を描いている事例や, 距離, 面, メッシュを用いて空間解析を行った報告の一部を次に紹介する。GISへの展開に参考になる地図が描かれている例として, ネパール産アブ2新種を含む数種についての報告 (Matsumura and Takahasi, 1976), 北海道日高地方のアブ類の生態 (早川, 1986), グアテマラ共和国の高地のブユの個体数変化に関する研究 (Okazawa and Takahasi, 1981), 徳島の水田地帯のユスリカ科や蚊科の季節消長の観察 (Kikuchi et al., 1985), 長野の内陸性気候地域のユスリカ成虫の分布と生態に関する研究 (平林ら, 2001), 埼玉県における標高の異なる山地での植生上あるいは野生動物上のマダニ類の調査 (藤本ら, 1986, 1987, 1990) などがある。衛生昆虫の飛翔距離に関連する報告としては, アオキツメトゲブユ *Simulium aokii* Takahasi の事例 (緒方, 1954) がある。標識再捕獲法によって, ヒトスジシマカやネッタイシマカ *Ae. aegypti* Linnaeus あるいはその他の感染症媒介蚊の移動距離・拡散範囲の調査はしばしば報告されている (Tsuda and Kamezaki, 2014)。メッシュや面単位で解析した事例としては, 日本全域を対象に 1:50,000 地形図を用いて 10km の格子状に分割し, その交点でブユの調査を実施した研究 (斉藤・佐藤, 1984; 斉藤ら, 1988, 1990, 2002), シナハマダラカ *Anopheles sinensis* Wiedemann 幼虫に対するアキアカネ *Sympetrum frequens* Selys 幼虫の天敵としての役割を田毎に調査した研究 (浦辺ら, 1990), カダヤシ *Gambusia affinis* Baird et Girard の分布を 100m メッシュで調査して統計処理した研究 (広瀬ら, 1978), クマネズミ *Rattus rattus* Linnaeus の食性と個体数変動を等間隔にベートボックスを置いて調べた研究 (Yabe and Wada, 1983) などがある。特に斎藤らのブユの調査成果は, GIS でデータを収集し, 採集結果を整理し, 日本の国土地理情報と重ね合わせて全国的に解析すれば, 種類や地域差の成果が分かりやすく表現されると思われる。移動する距離に関連した事例としてアカイエカ *Culex pipiens pallens* Coquillett の越冬蚊が洞穴内壁面を移動する報告もある (Makiya and Taguchi, 1982)。地図を用い, 衛生動物の分布とその特徴, 気候・季節変化・土壌・地形・標高その他の環境条件を詳細に考察している事例として, コガタアカイエカ *Cx. tritaeniorhynchus summorosus* Giles の生態に関連した研究 (和田・渡辺, 1971), 大阪府における日本脳炎の生態学的研究とコガタアカイエカに関する研究 (中村ら, 1992; 國田ら, 1992), 北部スマトラの海岸集落における *An. sundaicus* Edwards 幼虫生息地の地形・土地利用などからみた生態の研究 (Imai et al., 1988), 石垣島で大量発生したミナマルツチカメムシ *Aethus indicus* Westwood の生育状況, 発育, 世代経過など生態の研究 (池本ら, 1976), タテツツガムシ *Trombicula scutellaris* Nagayo et al. の地表分布を扱った研究 (林・鈴木, 1954) など精力的な調査がある。生息地の詳細な土地利用環境に触れた研究として, 白山のツツガムシ相の分布と分類を扱った調査研究 (高田ら, 1988) や富士山麓や長野県などのフトゲツツガムシ *Leptotrombidium pallidum* Nagayo, Mitamura et Tamiya や タテツツガムシ *L. scutellare* Nagayo, Miyagawa, Mitamura, Tamiya et Tenjin (内川ら, 1984, 1988, 1990) があり, 東北地方あるいは日本におけるマダニの分布に関する地理病理学的研究 (Takada, 1995; 高田ら, 1974, 2013) でも地理空間解析の重要性を指摘している。

地理空間情報を加えれば, より広域の解析が可能になる事例として, マレーシア・サバにおける海岸, 山地, その中間地におけるマラリア媒介蚊 *An. sundaicus*, *An. balabacensis* Baisas の分布を図示した研究 (Hii, 1979), インドネシア・ロンボク島のマラリア浸淫地における地形および, 河川からの距離などを考慮して *An. sundaicus*, *An. balabacensis* を調査しマラリア媒介蚊を特定した研究 (Maekawa et al., 2009) などがあげられる。

広義のGISを用いた衛生動物関連の研究としては, 都市部に生息する蚊相の生息環境を考えるために, 関東地方の各地で蚊成虫をCDCトラップで捕集し, その環境を空中写真で推定した報告がある (津田ら, 2006; 二瓶ら, 2005)。移動距離や分布範囲は地形, 植生, 家屋, 吸血源動物の分布その他の環境によって変化することから, GISを用いて様々な環境での飛翔距離の差異が検討されれば, 疾患発生の際に迅速な対応が可能となろう。

後述の日本全国を対象とした一連のヒトスジシマカの研究だけでなく, 日本国内の時空間軸を考慮したハマダラカ群の分布も研究が精力的に続いていることは言うまでもない。分布が明らかでなかったイナトミシオカ *Cx. inatomii* Kamimura and Wada については, 検疫所の蚊族調査結果から, その分布範囲が広域にわたることが明らかにされている (水田ら, 2012)。これら複数種の感染症媒介蚊の現況と, 過去から2100年ごろまでの環境変化による消長に関するデータの集積は, 他の研究成果や地理空間情報との統合でより確実なモデルや予測に役立つものと考えられる。

広義のGISの事例としては, マラリアに関連する報告には, インドシナ半島における植生指数 (Normalized difference vegetation index, NDVI) によるマラリア分布の推測 (Nihei et al., 2002), ソロモン諸島国でのマラリア調査とリスクマップの作成 (Kawabata et al., 1998; 二瓶・小林, 2001; 二瓶, 2004a), 滋賀県におけるハマダラカ群のポテンシャルマップの作成 (米島ら, 2015b) などあげられる。セアカゴケグモやハイイログケグモなど輸入毒グモに関連する報告には, セアカゴケグモ侵入と拡散, 咬症例についての地域解析, 効果的な防除法の検討 (Nihei et al., 2003, 2004; 二瓶ら, 2008, 2010) やゴケグモ5種の分布と拡散に関するものがある (清水ら, 2014)。

東日本大震災の被災地における各種の蚊やハエ, ネズミなどの衛生動物の発生状況 (Tsuda et al., 2012) などについても, 衛星画像解析や他分野の研究者との共同研究により, 迅速, 正確かつ広域な横断的研究成果が得られている。

事例研究: ヒトスジシマカの分布に関するGISによる一連の研究

温暖化によるヒトスジシマカの分布拡大予測に関連して, 温暖化に伴う日本の Dengue 熱の流行予測の試みは 1991 年に発表された (二瓶ら, 1991)。発表当時は, 調査には国内気象台における観測データが用いられた。本格的なGISによる解析は台湾における Dengue 熱の 1986-87 年の大流行に関わる最初の報告 (歐陽, 1994) で用いられ, 1994 年日本衛生動物学会大会で紹介された (歐陽・二瓶, 1997)。これらの報告は台湾における Dengue 熱および媒介蚊の発生と拡散, そして衰退に至る経過を追ったものである。

ヒトスジシマカの分布限界となる北限の境界は, 最寒月

の平均気温が0°Cの等温線であると考えられていた (Vector Biology and Control Division, WHO, 1989)。しかし、東北地方におけるヒトスジシマカの生息確認地域と、生息未確認地域の気温を1990年日本気象台年平均值 (気象庁, 1991) の平均気温を用いて比較すると、生息確認地域では最寒月の月平均気温が-1.7°Cと観測されており、最低気温では説明できないことが分かった。一方、年平均気温をみると、調査地のうち、生息確認地はすべて11.4°C以上であったのに対し、それ未満の場所では生息が確認できなかった。すなわち、11°C台では確認地域と未確認地域が混在し、11°C未満では全く生息は確認されず、12°C以上ではすべて生息が確認されたことから、生息限界温度は11°C付近にあると考えた。他方、ヒトスジシマカの高知県における発育零点は11°Cである (宇高, 1959) ことに基づき、1990年日本気象台日別平滑年値 (気象業務支援センター, 1991) を用いて、有効積算温度を10.5°C, 11°C, 11.5°C, 12°Cで計算すると、すべての生息確認地域は11°Cを閾値とする有効積算温度が1350日度以上の地域に属することが分かった。そこで、2000年に発表された気温の1kmメッシュ気候値を使ってGISで、11°C未満、11-12°C未満、12°C以上の地域を図化し、ヒトスジシマカの生息域を予測した (Kobayashi et al., 2002)。

ヒトスジシマカは日本では都市の住宅地に多く生息する。そのため北限調査の際、11°C以上の気温を有しながらヒトスジシマカが未確認の都市を対象に調査を実施した。東北地方の気温については、冷害をもたらす「やませ」による農業被害の対策として、農研機構 (国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構の通称) が構築した東北地方メッシュ気温データの検索システムを利用して、1kmメッシュ気候値で、11°C未満、11-12°C未満、12°C以上のメッシュを色分けした。そして、1°C, 2°C, 3°C上昇した際のヒトスジシマカの生息範囲を予測した。その後IPCC (気候変動に関する政府間パネル) から温暖化のモデルに沿った予測が求められ、K1モデル (高解像度大気海洋結核気候モデル) に沿った2030年および2100年の分布を図化した (Kobayashi et al., 2008)。この間、気温だけでなく、1km²当たりの人口と世帯数を考慮して調査地域の予測を行った (二瓶, 2004b)。北限については、盛岡市北東部の寺町の一寺で一年のみ花立てから幼虫が採集された。しかしその後は発見されていない。今では地元の岩手県環境保健研究センターや大学の学生などが調査を引き継いで、岩手県全域の精力的な調査を行い、その結果を簡便で低価格なソフトウェアであるGISWay-light, Ver.2.2.4で解析している (佐藤ら, 2012)。これまで検討してきた年平均気温だけでなく、人口密度やその他の地理空間情報を統合した解析に取り組んでいる。

一方、年平均気温は11°C以上で、有効積算温度も1350日度であるにもかかわらず、1990年代までヒトスジシマカの生息が確認されていなかった山形市は、2000年になってやっと生息が確認された。山形市を囲む地域は11°C未満の気温であるのに対して、山形市はヒートアイランドのように都市域のみが11°C以上のヒトスジシマカの生息条件を満たしている。ここではヤマトヤブカ *Ae. japonicus* Theobald が在来種で、ヒトスジシマカとの種間競争が認められる。この地域については1993年から99年までのJERS-1画像5枚と、2008年と2009年のALOS画像5枚を用いて、気温を上昇させるような環境変化がないことをNDVI等で確認し、ヒトス

ジシマカの生息範囲を現地調査、空中写真と地図で推定して、生息域の面積を計測した。これと同時に、ALOS画像から簡便・迅速な方法で面積を算出した。蚊採集場所を中心に100mの円を描き、採集時に近いALOS画像を用いてNDVIを検討し、その最大値を用いてヒトスジシマカの生息場所を推測した (Nihei et al., 2014)。さらに、高度による気温の通減率による温度限界を長野県で調査し、高度や北上による温度限界を検討した (Hirabayashi et al., 2014)。長野県では、「長野県統合型地理情報システム (GIS) 信州くらしのマップ」 (長野県企画振興部情報政策課) が、GIS解析に利用できる。

デング熱の再興を経験した日本では、発症のモデル化が医学、推計学、地理学、疫学など様々な分野で試みられている。リスクマップあるいは流行のモデル化には、目的にあった縮尺、言い換えれば対象地域の範囲を例えば国、県、市町村、町丁、地点にするか留意し、媒介蚊、発生時期、発生場所、発生条件に応じた解析を行い、発生の監視、警告など終息に役立つ成果を期待したい。2014年の日本国内でのデング熱の流行は、戦後約70年ぶりに認められたが、台湾では、輸入症例が発端となって1986-87年にデング熱が大流行した後、一部は定着し流行を繰り返していると考えられている。この台湾における発生モデルを参照して、日本におけるデング熱の発生モデルを開発している事例もある (米島ら, 2015a)。

地理情報・GIS利用の課題と展望

1. 衛生動物学分野でのGISの位置づけ

この分野ではすでにGISソフトやパソコンなどが普及する以前に、地図を用いて環境解析がなされ地理情報の重要性は認められていた。しかし、地理情報技術あるいはGISを衛生動物学の分野へ導入することに関する位置づけは、必ずしも高くはなかった。日本のように医療レベルの高いところでは必要ない、GPSの誤差と取得の制約があり測地系の違いもあることから、地図で十分である、衛星画像は空中写真よりも高価で低解像度である、複数の疾患や衛生動物を同時に扱えるものではない、相関関係があっても因果関係が不確実な地理情報を複数個同時に検討するのは衛生動物学の分野では科学的に稚拙である、そもそもGISに耐えられる多量の衛生動物関連のデータは収集できないなどである。そのためGISを用いた蚊、セアカゴケグモ、ミヤイリガイなどの衛生動物関連の発表は、英国・米国の雑誌やあるいは国内ではGIS, RS, 地理学関連の雑誌に投稿しやすかった (Nihei et al., 2006, 2009)。しかし、近年では資料の採集場所を経緯度で示すことが一般化され、位置をインターネットの地図や空中写真、衛星写真上で示されるようになった。さらに、輸入感染症の脅威に見舞われ、海外の事例に触れることが多くなった背景と、時間軸と空間的広がりを持つ時空間情報システムの開発・利用が活発化されていることを踏まえれば、日本の衛生動物学の分野でも、GISの位置づけは感染症のための統合的GIS (Integrated GIS-IGIS) として大きく変化しつつある。

2. 現在衛生動物学の分野で使用しているGISの技術あるいはシステム

現在GISで利用されている項目としては①データの収集、抽出と表示、②属性の地図上への表示、③生息地等を中心とする危険範囲の抽出、④生息地等2点間の近距離解析と拡散

の方向、速度、⑤分布密度の相違と等密度線の描画、⑥時期の異なる分布図の密度の差分による比較、⑦地表面傾斜の測定、⑧患者の発生地域の時空間的消長、⑨衛星画像による環境把握とその季節や年代別変化、⑩衛星画像から得られるNDVIおよびその変化による危険地域の予測、⑪媒介動物の生物・生態学的特徴、⑫疾患の浸淫地の予測、⑬調査地域の広域化などがあげられる。これらの解析項目を参考にすれば、GISは衛生動物の分野でさらに発展的に利用できると考えられる。

3. GISの導入の契機、必要性

GISは必ずしも我々にとっては簡単な技術ではない。それにも拘らずこの技術を導入するのは、多量のデータがあっても生かされていなかったからである。例えばセアカゴケグモの場合では、1995年にセアカゴケグモが日本に侵入して以来、クモ採集の時期、場所（住所）、メス・オス・卵囊等の数、その属性など多量の広域な資料が集められていたため、分布解析にGISを用いることが可能となった。また当時のGISソフトウェアの開発分野でも、町丁目レベルでのアドレスマッチングが可能になったのに加えて、低廉で高性能のパソコンが普及したことにより、クモの移動の方向・距離の地図上への図化や地理的地域性の確認が可能となったとともに、クモの生物学的特性と拡散法の推定への可能性が見いだされたこともGISの導入を後押しした。このほかに、我々が実施した衛星画像によるRSを用いた研究との関連では、ソロモン諸島国のマラリア対策が挙げられる。世界でも重篤な流行地でありながら、実際には湿地などの地形条件、大雨などの気候条件や、車の通過できる道路もなく、アクセス困難な地域もあり遠隔的に解析する必要があった。その時点で、我々はすでに質のよいSPOT画像を入手しており、NDVIも既往の画像処理ソフトで解析できたため、空中写真、地形や土壌、植生も類推できる主題図と比較することが可能で、マラリアの危険地域を推定できる材料は揃っていると考えたからである。

しかしながら、なおも複雑で高価なGIS技術を本当に導入すべきか疑問が残る。現在ではかなり簡便で安価やフリーのGISソフトが増えたとはいえ、GISは複雑で広く普及しているパソコンのソフトウェアに比べて使い勝手が悪い。しかも、研究の目的次第では費用対効果の点で敬遠されかねない技術ではある。全国の人口規模30万人以上の都市のうち45%以上の都市では、すでに2003年に都市計画の部門でGISを導入しており、同規模の都市の90%以上がGISに関心を持っていた。そして現在では地方自治体や各種機関では、独自の統合型システムを確立し、公衆衛生や感染症の分野である我々の研究にも参入可能な事例もできてきている。都市型GISの一部門として温暖化による感染症の拡大を啓発する意味でも、また大量のデータを迅速に収集し様々な環境要因とともに解析するためにも、GIS技術は公衆衛生や感染症の分野に導入すべき技術である。

4. データの収集・応用と他分野との連携

広義のGISでは横断的な研究分野の種々のデータを扱えることに強みがある。各種の衛生昆虫や患者のデータを収集するには縦断的に専門家あるいは訓練された専門集団の調査による多数の点データの収集が必須となる。このような縦断的

研究では、採集地、発生場所など点データが基本となる。この点データは現在では経緯度で表示される場合が多い。しかし、計測の仕方の違いや誤差もあることから、同時に市町村名や環境も記載されることが望ましい。さらに、この収集した点データに時間を付加することによって、時空間的拡散の消長の把握が可能となる。

一方、衛生動物に関する正確なデータを広域に収集することが困難な場合が多い。近年、蚊の採集に関して、日本だけでなく海外でもガイドラインが示されている。たとえば、ヨーロッパCDCでも感染症媒介昆虫などの捕獲、収集すべき属性、データ整理、その後の解析まで、推奨システムを提示している（ECDC, 2012）。日本では、ヒトスジシマカ成虫の採集法として、捕虫網による8分間人回採集法が次第に普及してきた。それとともに、ドライアイスやドライイーストを添加した砂糖水から発生するCO₂を誘引源とするCDCトラップによる蚊成虫の捕集も各地で行われてきた。これらを互いに補完できる方法で採集し、特に衛生動物においては他の地理的要因との厳密な確固たる因果関係を検討するための実験的な証拠、生態学的妥当性、衛生動物等の等密度線の描画とその間隔の計測などを行い、情報を解析して問題提起をしていくことが重要であろう。位置と時間を有する衛生動物あるいは感染症にかかわるデータとその他の属性を規定して、GISのプラットフォームで解析が可能となることを期待したい。GISは、GIS分野だけでなく、地理学、地図学、RS、GPSなどそれぞれの分野独自の目的で技術開発が進められ、縦断的解析で発展してきた。しかしながら、GISはこれらの別分野との横断的な解析が可能である。従って、衛生動物学分野のみで独自の広義のGISの開発を目指すのではなく、RS、GPS、狭義のGISの専門家も交えて別分野との横断的な研究計画を設計し、感染症予防のために統合的GISの有効性を模索していてもよいのではないかと考えている。

謝 辞

衛生動物およびそれにかかわる感染症のGISを利用した研究分野で、第一線の専門的研究者、技術者と学際的に共同研究することができた。環境省の温暖化に関する研究の開始と同時に、研究のきっかけを与えて下さった元東京大学の田中寛先生にまず感謝の意を表したい。GISの価値がまだ適正に位置づけられず、むしろ評価されなかった時期から、あらゆる面で支えてくださった感染症研究所の小林睦生先生はじめ、GIS解析に利用できるデータの収集にご協力頂いた「いきもの研究社」の吉田政弘先生、温暖化に伴うヒトスジシマカ等のGIS分析の共同研究者である感染症研究所の駒形修研究員、海外・国内の現地調査に同行頂いた元自治医科大学の石井明先生、元神戸大学の川端真人先生、東京医科歯科大学の太田伸生先生、独協医科大学の故松田肇先生、広島文化学園大学の中村哲先生、長崎大学の平山謙二先生、上記先生方の教室の方々、中国、フィリピン、ラオス、ソロモン諸島国、日本等の現地の方々、成稿に当たりご高闊を賜った麻布大学の黄鴻堅先生、平健介先生、GIS導入に当たり、議論を進めることのできた立命館大学の中谷友樹先生、パスコ研究所の望月貫一郎様等スタッフの方々に心から感謝申し上げたい。またJAXAのALOSプロジェクトに参加させていただき、多くの衛星画像のご提供を受けた。今思うと、論文を海外では発表できたものの、余り注目されなかった時

代から、近年しばしば引用されるようになるまで10年以上の歳月が費やされた。この間、成果が未知数であるにもかかわらず、ご協力いただいた多くの方々に、再度深謝したい。それとともに研究を引き継いで下さっている次世代の方々、あるいはこの学際的分野の重要性を評価して発展にご協力いただいている関連分野の方々に感謝し期待したい。

文 献

- Arp, G. K. 1975. The rationale for attempting to define salt marsh mosquito-breeding areas in Galveston County by remote sensing the associated vegetation. *Proc., NASA Earth Resources Symp.*, Houston, TX.
- Bhatt, S., Gething, P. W., Brady, O. J., Messina, J. P., Farlow, A. W., Moyes, C. L., Drake, J. M., Brownstein, J. S., Hoen, A. G., Sankoh, O., Myers, M. F., George, D. B., Jaenisch, T., Wont, G. W. W., Simmons, C. P., Scott, T. W., Farrar, J. and Hay, S. I. 2013. The global distribution and burden of dengue. *Nature*, 496: 504–507.
- Caminade, C., Medlock, J. M., Ducheyne, E., McIntyre, K. M., Leach, S., Baylis, M. and Morse, A. P. 2012. Suitability of European climate for the Asian tiger mosquito *Aedes albopictus*: recent trends and future scenarios. *J. R. Soc. Interface*, doi: 10.1098/rsif.2012.0138, Published online
- Clarke, K. C., Osleeb, J. P., Sherry, J. M., Meert, J. P. and Larsson, R. W. 1990. The use of remote sensing and geographic information systems in UNICEF's dracunculiasis (Guinea worm) eradication effort. *Prev. Vet. Med.*, 11: 229–235.
- Cross, E. R., Perrine, R., Sheffield, C. and Pazzaglia, G. 1984. Predicting areas endemic for schistosomiasis using weather variables and a Landsat data base. *Mil. Med.*, 149: 542–544.
- Dister, S. W., Fish, D., Bros, S. M., Frank, D. H. and Wood, B. L. 1997. Landscape characterization of peridomestic risk for Lyme disease using satellite imagery. *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 57: 687–692.
- European Center for Disease Prevention and Control (ECDC). 2007. Mission report Chikungunya in Italy. [accessed December 23, 2015] Available from: http://ecdc.europa.eu/en/publications/Publications/0709_MIR_Chikungunya_in_Italy.
- European Center for Disease Prevention and Control (ECDC). 2009. Development of *Aedes albopictus* risk maps. *ECDC Technical Report*, 2009. Stockholm, Sweden. [accessed December 23, 2015] Available from: http://ecdc.europa.eu/en/publications/publications/0905_ter_development_of_aedes_albopictus_risk_maps. (accessed May 8, 2014).
- European Center for Disease Prevention and Control (ECDC). 2011. Consultation on mosquito-borne disease transmission risk in Europe. *ECDC Meeting Report 2011*, Stockholm, Sweden. [accessed February 2011] Available from: http://www.ecdc.europa.eu/en/publications/Publications/1102_MER_Consultation_on_20_mosquito-borne_diseases.
- European Center for Disease Prevention and Control (ECDC). 2012. Guidelines for the surveillance of invasive mosquitoes in Europe. *ECDC Technical Report*, 2012. Stockholm, Sweden.
- Fischer, D., Thomas, S. M., Neteler, M., Tjaden, N. B. and Beierkuhnlein, C. 2014. Climatic suitability of *Aedes albopictus* in Europe referring to climate change projections: comparison of mechanistic and correlative niche modeling approaches. *Euro Surveill.*, 19: 1–14. pii=20696. [accessed December 23, 2015] Available from: <http://www.eurosurveillance.org/>.
- 藤本和義, 山口 昇. 1987. マダニ類の生態学的研究. 3. 埼玉県南西部低山帯におけるマダニ類の分類について. *衛生動物*, 38: 13–18.
- 藤本和義, 山口 昇. 1990. 秩父山系の山地帯上部から亜高山帯 (標高約600~1,800m) における植生上のマダニ類とその季節的消長. *衛生動物*, 41: 341–346.
- 藤本和義, 山口 昇, 高橋 守. 1986. マダニ類の生態学的研究. 1. 埼玉県南西部低山帯にお血植生上と野生動物のマダニ類. *衛生動物*, 37: 325–331.
- GISWay-light, Ver.2.2.4, ラビュール 北海道, <http://www.vector.co.jp/soft/win95/writing/se476886.html>, <http://www.lapure.co.jp/>.
- Glass, G. E., Morgan, J. M. III, Johnson, D. T., Noy, P. M., Israel, E. and Schwartz, B. S. 1992. Infectious disease epidemiology and GIS: A case study of Lyme disease. *Geogr. Inf. Syst.*, 2: 65–69.
- Glass, G. E., Schwartz, B. S., Morgan, J. M. 3rd, Johnson, D. T., Noy, M. P. M. and Israel, E. 1995. Environmental risk factors for Lyme disease identified with geographic information systems. *Am. J. Public Health*, 85: 944–948.
- 林 滋生, 鈴木 猛. 1954. 恙虫の生態に関する研究 (II) *Trombicula scutellaris Nagayo et al.* 1921の地表分布について. *衛生動物*, 5: 93–96.
- 早川博文, 松村 雄, 長谷川 勉, 稲岡 徹, 長島義介. 1986. 北海道日高地方の馬産地におけるアブ類の生態に関する研究. 1. 幌別川流域におけるアブ類成虫の地域分布. *衛生動物*, 37: 305–309.
- Hii, J. L. K. 1979. Entomological evaluation of sumithion, DDT and malathion for the control of *Anopheles balabacensis balabacensis* Baisas in Kuala Penyu district, Sabah, Malaysia. *Jpn. J. Sanit. Zool.*, 30: 319–328.
- 平林公男, 西尾規孝, 山本 優. 2001. 内陸性気候地域におけるユスリカ成虫の分布とその生態に関する研究 上田盆地における夏期・秋期のユスリカ成虫. *衛生動物*, 52: 87–96.
- Hirabayashi, K., Takeda, M., Nihei, N., Kobayashi, M., Tsuda, Y. and Sawabe, K. 2014. Distribution of *Aedes albopictus* mosquitoes in an inland climate mountain area, Nagano Prefecture, Japan (ed. Muller, G., Pospisil, R. and Robinson, W. H.), Proceeding of the Eighth International Conference on Urban Pests, 2014 printed by OOK-Press Kft., H-8200 Veszprem, Papai ut 37a, Hungary.
- 広瀬吉則, 大久保新也, 安野正之. 1978. 徳島市内でのカダヤシ *Gambusia affinis* による蚊駆除の効果. *衛生動物*, 29: 163–168.
- 池本孝哉, 江下優樹, 山口徹磨, 高井鐸二, 栗原 毅. 1976. ミナミマルツチカメムシの生態. 1. 生息状況, 発育, 世代経過について. *衛生動物*, 27: 231–238.
- Imai, C., Ikemoto, T., Takagi, M., Yamugi, H., Pohan, W., Hasibuan, H., Siraito, H. and Panjaitan, W. 1988. Ecological study of *Anopheles sundaicus* larvae in a coastal village of North Sumatra, Indonesia, 1. Topography, land use, and larval breeding. *Jpn. J. Sanit. Zool.*, 39: 293–300.
- Kawabata, M., Nihei, N., Ohmae, H. and Ishii, A. 1998. Application of landscape analysis to malaria transmission study on Guadalcanal, Solomon Islands. In: *Malaria Research in the Solomon Islands* (ed. Ishii, A., Nihei, N. and Sasa, M.), pp. 147–151, Inter Group Corporation, Tokyo.
- Kikuchi, M., Kikuchi, T., Okube, S. and Sasa, M. 1985. Observations on the seasonal prevalence of chironomid medges and mosquitoes by light traps set in a rice paddy area in Tokushima. *Jpn. J. Sanit. Zool.*, 36: 333–342.
- 気象庁. 1991. 日本気候表 全国の年平均値一覧. 気象業務支援センター. 1991. 全国の日別平滑年平均値.
- Kitron, U., Otieno, L. H., Hungerford, L. L., Odulaja, A., Brigham, W. U., Okello, O. O., Joselyn, M., Mohamed-Ahmed, M. M. and Cook, E. 1996. Spatial analysis of the distribution of tsetse flies in the Lambwe Valley, Kenya, using Landsat TM satellite imagery and GIS. *J. Anim. Ecol.*, 65: 371–380.
- Kitron, U., Pener, H. and Costen, C. 1994. Geographic information system in malaria surveillance: Mosquito breeding and imported cases in Israel, 1992. *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 50: 550–556.
- 小林睦生, 駒形 修, 二瓶直子, 澤邊京子, 津田良夫. 2007. デング熱, チクングニヤ熱媒介蚊の生態および温暖化の分布域拡大に与える影響. *IASR (Infectious Agents Surveillance Report)*, 28: 219–221.

- Kobayashi, M., Komagata, O. and Nihei, N. 2008. Global warming and vector-borne infectious Diseases. *J. Disaster Research*, 3: 105–112.
- Kobayashi, M., Nihei, N. and Kurihara, T. 2002. Analysis of northern distribution of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) in Japan by geographical information system. *J. Med. Entomol.*, 39: 1–14.
- Kraemer, M. U. G., Sinka, M. E., Duda, K. A., Mylne, A. Q. N., Shearer, F. M., Barker, C. M., Moore, C. G., Carvalho, R. G., Coelho, G. E. and Bortel, W., Van Guy Hendrickx, W. Van., Schaffner, F., Elyazar, I. R. F., Teng, H. J., Brady, O. J., Messina, J. P., Pigot, D. M., Scott, T. W., Smith, D. L. Wint, G. R. W., Golding, N. and Hay, S. I. 2015. The global distribution of the arbovirus vectors *Aedes aegypti* and *Ae. albopictus*. *eLife*, 4: e08347. doi: 10.7554/eLife.08347.
- 國田信治, 藤戸貞男, 中島貞夫, 武藤和雄, 伊藤寿美代, 吉田政弘, 柴田忠良, 上羽 昇, 中村 央. 1992. 大阪府における日本脳炎の生態学的研究: 3. 豚へのワクチン接種によるコガタアカイエカの感染と患者の発生に対する効果. *衛生動物*, 43: 207–216.
- Leonardo, L., Rivera, P., Saniel, O., Antonio, S. J., Chigusa, Y., Villacorte, E., Christopher, C. J., Moendeg, K., Manalo, D., Crisostomo, B., Sunico, L., Boldero, N., Payne, L., Hernandez, L. and Velayudhan, R. 2015. New endemic foci of schistosomiasis infections in the Philippines. *Acta Trop.*, 141: 354–360.
- Maekawa, Y., Tsuda, Y., Dachlan, Y. P., Yotopranoto, S., Gerudug, I. K., Yoshinaga, K., Kanbara, H. and Takagi, M. 2009. Anopheline fauna and incriminatory malaria vectors in malaria endemic areas on Lombok Island, Indonesia. *Med. Entomol. Zool.*, 60: 1–11.
- Makiya, K. and Taguchi, I. 1982. Ecological studies on overwintering populations of *Culex pipiens pallens* 3. Movement of the mosquitoes in a cave during overwintering. *Jpn. J. Sanit. Zool.*, 33: 335–343.
- Malone, J. B., Huh, O. K., Fehler, D. P., Wilson, P. A., Wilensky, D. E., Holmes, R. A. and Elmagdoub, A. I. 1994. Temperature data from satellite imagery and the distribution of schistosomiasis in Egypt. *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 50: 714–722.
- Matsumura, T. and Takahasi, H. 1976. Notes on some Nepalese Tabanidae, with descriptions of two new species (Diptera). *Jpn. J. Sanit. Zool.*, 27: 289–300.
- 水田英生, 上田泰史, 涌元美彰, 長谷山路夫, 森 英人, 白石祥吾, 後藤郁夫. 2012. イナトミシオカ *Culex inatomii* の分布について. 検疫所の蚊族調査結果. *衛生動物*, 63: 11–17.
- 長野県企画振興部情報政策課電子自治体係. 長野県統合型地理情報システム (GIS) 信州くらしのマップ. <http://www3.pref.nagano.lg.jp/gis/top/>.
- 中村 央, 武藤和雄, 中島貞夫, 伊藤寿美代, 吉田政弘, 木村明生, 弓指孝博, 上羽 昇, 峯川好一, 藤戸貞男, 北浦敏行, 國田信治. 1992. 大阪府における日本脳炎の生態学的研究. 1. 水田面積, 家畜飼育農家戸数の減少と患者の発生状況 (1965–1986 年). *衛生動物*, 43: 195–198.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). 1976. *Remote Sensing for Control of Tsetse Flies*. Technical Memorandum, Contract NAS 9-12200. Johnson Space Center, Houston, TX.
- 中谷友樹. 2008. 空間疫学と地理情報システム. 特集: 地域診断・症候サーベイランスに向けた空間疫学の展開. *J. Natl. Inst. Public Health*, 57: 99–116.
- Nicholson, M. C. and Mather, T. N. 1996. Methods for evaluating Lyme disease risks using geographic information systems and geospatial analysis. *J. Med. Entomol.*, 33: 711–720.
- 二瓶直子. 2004a. 宇宙から住血吸虫症をみつめて. *医学のあゆみ*, 208: 91–94.
- 二瓶直子. 2004b. 感染症と GIS. 保険医療のための GIS (中谷友樹, 谷村 晋, 二瓶直子, 堀越洋一編), pp. 127–165, 古今書院, 東京.
- Nihei, N., Hashida, Y. and Ishii, A. 2002. Analysis of malaria endemic areas on the Indochina Peninsula using remote sensing. *Jpn. J. Infect. Dis.*, 55: 160–166.
- Nihei, N., Kajihara, N., Kirinoki, M., Chigusa, Y., Matsuda, H., Saitoh, Y., Shimamura, R., Kaneta, H. and Nakamura, S. 2006. Establishment of a GIS monitoring system for *Schistosomiasis japonica* in Kofu, Japan. *Ann. Trop. Med. Parasitol.*, 100: 143–153.
- 二瓶直子, 小林睦生. 2001. 最近の話題, 微生物. 地理情報システム GIS の感染症領域への応用. *Lab. Clin. Pract.*, 19: 18–21.
- 二瓶直子, 津田良夫, 小林睦生. 2005. 空中写真で衛生環境をどこまで読み取れるか. *生活と環境*, 50: 48–53.
- Nihei, N., Komagata, O., Mochizuki, K. and Kobayashi, M. 2014. Geospatial analysis of invasion of the Asian tiger mosquito *Aedes albopictus*: competition with *Aedes japonicus japonicus* in its northern limit area in Japan. *Geospat. Health*, 8: 417–427.
- 二瓶直子, 駒形 修, 小林睦生, 吉田政弘, 国田正忠, 金田弘幸. 2010. 地理情報システムを利用した大阪府におけるセアカゴケグモ咬症リスクエリアの検出. *地図*, 48: 17–23.
- 二瓶直子, 駒形 修, 吉田政弘, 水谷正時, 金田弘幸, 小林睦生. 2008. 西宮市におけるセアカゴケグモ *Latrodectus hasseltii* (Araneae: Theridiidae) の防除対策が発生動態に与えた影響. *衛生動物*, 59: 153–162.
- Nihei, N., Komagata, O., Kobayashi, M., Saitoh, Y., Mochizuki, K. and Nakamura, S. 2009. Spatial analysis and remote sensing for monitoring systems of *Oncomelania nosophora* following the eradication of *Schistosomiasis japonica* in Yamanashi Prefecture, Japan. *Jpn. J. Infect. Dis.*, 62: 125–132.
- Nihei, N., Komagata, O., Kobayashi, M., Ohta, N., Saitoh, Y., Mochizuki, K., Riu, C., Shaohong, L., Liyong, W. and Tianping, W. 2010. Using ALOS satellite images to develop efficient measures against vector-borne diseases-regional differences in outbreak risk for *Schistosomiasis japonica* in China. The 4th Joint PI Symposium of ALOS data Nods, Nov. 15–17, 2010, Tokyo.
- 二瓶直子, 松田 肇, 浅海重夫. 1990. 関東地方の日本住血吸虫症の分布とその制限要因に関する研究, 第 I 報, 浸淫地分布とその特徴. *寄生虫誌*, 39: 585–602.
- 二瓶直子, 田中 寛, 小野雅司. 1991. 地球温暖化に伴うマラリアおよびデング熱の流行地域予測図の試作. 地球温暖化による動物媒介性感染症の拡大予測に関する資料収集調査報告書, 平成2年度環境庁委託調査, 24–34.
- Nihei, N., Yoshida, M., Kobayashi, M., Kaneta, H., Shimamura, R. and Agui, N. 2003. Geographic information systems (GIS) analysis of the distribution of the redback spider *Latrodectus hasseltii* (Araneae: Theridiidae) in Osaka, Japan. *Med. Entomol. Zool.*, 54: 177–186.
- Nihei, N., Yoshida, M., Kaneta, H., Shimamura, R. and Kobayashi, M. 2004. Analysis of the dispersal pattern of newly introduced *Latrodectus hasseltii* (Araneae: Theridiidae) in Japan by spider diagram. *Med. Entomol. Zool.*, 41: 269–276.
- 農研機構 (国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構). 東北地方メッシュ気温データの検索システム. [accessed December 23, 2015] www.naro.affrc.go.jp/org/tarc/seika/jyouchou/H13/tohoku01028.html.
- 歐陽鍾鈴. 1994. 疾病地理研究 以臺灣登革熱為. 國立臺灣大學地理研究所, 博士論文.
- 歐陽鍾鈴, 二瓶直子. 1997. 1988 年台湾におけるデング熱の発生と拡散. *衛生動物*, 48: 24.
- 緒方一喜. 1954. アオキツメトゲブユの分布及び習性について (ブユの資料 4). *衛生動物*, 5: 100–110.
- Okazawa, T. and Takahasi, H. 1981. Blackflies (Diptera: Simuliidae) in highland streams in Guatemala, with special reference to the seasonal prevalence of immature stages and voltinism. *Jpn. J. Sanit. Zool.*, 32: 301–308.
- 齊藤一三, 金山彰宏. 2002. ブユの生態に関する研究 46.

- 愛知県における冬期のブユ採集成績. 衛生動物, 53: 267-272.
- 斉藤一三, 金山彰宏, 上本駿一. 1990. ブユの生態に関する研究 (16) 福井県における周期のブユ採集成績. 衛生動物, 41: 105-110.
- 斉藤一三, 佐藤英毅. 1984. ブユの生態に関する研究 (4) 和歌山県における春期のブユ採集成績. 衛生動物, 35: 109-116.
- 斉藤一三, 佐藤英毅, 湯沢文男. 1988. ブユの生態に関する研究 (13) 栃木県における春期のブユ採集成績. 衛生動物, 29: 147-150.
- 佐藤 卓, 松本文雄, 安部隆司, 二瓶直子, 小林睦生. 2012. 岩手県におけるヒトスジシマカの分布とGISを用いた生息条件の解析. 衛生動物, 63: 195-204.
- 清水祐行, 金沢 至, 西川喜朗. 2014. 日本のゴケグモ類5種の分布状況とセアカゴケグモの分散方法に関する考察. *Bulletin of the Osaka Museum of National History*, 68: 41-51.
- Sole, G., Giese, J., Keita, F. M. and Remme, J. 1991. Detailed epidemiological mapping of three onchocerciasis foci in West Africa. *Acta Trop.*, 48: 203-213.
- Takada, N. 1995. Recent findings on vector acari for rickettsia and spirochete in Japan. *Jpn. J. Sanit. Zool.*, 46: 91-105.
- 高田伸弘. 2013. 国内外のダニ媒介感染症における地理病理学の意義. 衛生動物, 64: 1-2.
- 高田伸弘, 多田 高, 田中博義, 藤田博己. 1988. 白山のツツガムシ相, 特に分布および分類の問題点. 衛生動物, 39: 125-129.
- 高田伸弘, 山口富雄. 1974. 東北地方におけるマダニ類の研究. 1. 野生哺乳類寄生マダニ類と人体刺咬例. 衛生動物, 25: 35-40.
- Tsuda, T., Haseyama, M., Ishida, K., Niizuma, J., Kim, K. S., Yanagi, D., Watanabe, N. and Kobayashi, M. 2012. After-effects of Tsunami on distribution and abundance of mosquitoes in rice-field areas in Miyagi Prefecture, Japan in 2011. *Med. Entomol. Zool.*, 63: 21-30.
- Tsuda, Y. and Kamezaki, H. 2014. Mark-release-recapture study on movement of mosquitoes: individual marking method and short-term study of *Aedes albopictus* and *Armigeres subalbatus* in residential area on Ishigaki island. *Med. Entomol. Zool.*, 65: 61-66.
- 津田良夫, 比嘉由紀子, 倉橋 弘, 林 利彦, 星野啓太, 駒形 修, 伊澤晴彦, 葛西真治, 佐々木年則, 富田隆史, 澤邊京子, 二瓶直子, 小林睦生. 2006. 都市域における疾病媒介蚊の発生状況調査—ドライアイストラップを用いた2年間の調査結果—. 衛生動物, 57: 75-82.
- 宇高翠子. 1959. 四国産ヒトスジシマカに関する二・三の生態的知見. 昆虫, 27: 202-208.
- 内川公人, 川森文彦, 川合清也, 熊田信夫. 1990. 富士山麓におけるタテツツガムシ・フトゲツツガムシの分布様式と恙虫相. 衛生動物, 41: 359-368.
- 内川公人, 熊田信夫, 山田喜紹. 1988. ツルグレン法による恙虫類の生息調査 恙虫病の農家周辺部におけるフトゲツツガムシの発生. 衛生動物, 39: 13-17.
- 内川公人, 山田喜紹, 佐藤 潔, 熊田信夫. 1984. 長野県の恙虫類に関する基礎研究. 衛生動物, 35: 233-243.
- 浦辺研一, 池本孝哉, 武井伸一. 1990. 水田におけるアキアカネ幼虫のシナハマダラカ幼虫に対する天敵としての役割に関する研究. 4. 水田地帯における捕食関係. 衛生動物, 41: 265-272.
- Vector Biology and Control Division, World Health Organization (WHO). 1989. Geographical Distribution of Arthropod-borne Diseases and their Principal Vectors, 134 pp., WHO, Geneva.
- 和田芳武, 渡辺 護. 1971. コガタアカイエカ類の生態に関する研究IVコガタアカイエカとシロハシイエカの生態の比較. 衛生動物, 22: 24-30.
- Washino, R. K. and Wood, B. L. 1993. Application of remote sensing to vector arthropod surveillance and control. *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 50: 134-144.
- Wood, B. L., Beck, L. R., Hibbard, K. A., Salute, J., Sebesta, P., Washino, R., Pitcairn, M., Rejmankova, E., Roberts, D., Legters, L., Paris, J. and Hacker, C. 1991. Distinguishing high and low anopheline producing rice fields using remote sensing and GIS technologies. *Prev. Vet. Med.*, 11: 269-276.
- Yabe, T. and Wada, Y. 1983. Food habitat and population changes of the roof rat *Rattus rattus* in sugar cane fields on Tokunoshima Island. *Jpn. J. Sanit. Zool.*, 34: 21-24.
- Yasuraoka, K., Blas, B. L., Matsuda, H., Irie, Y., Nihei, N., Ohmae, H., Yokoi, H., Hambre, R., Panglinan, R., Autentico, C. and Tanaka, H. 1996. Approaches to the elimination of schistosomiasis on Bohol Island, Philippines. *Kiseichugaku Zasshi*, 45: 391-399.
- 米島万有子, 中谷友樹, 詹大千, 二瓶直子, 小林睦生. 2015a. 日本におけるデング熱の流行リスクマップ. 地理情報システム学会講演論文集, 24 (CD-ROM).
- 米島万有子, 中谷友樹, 渡辺 護, 二瓶直子, 津田良夫, 小林睦生. 2015b. 土地被覆データにもとづく疾病媒介化の生息分布域の分析—琵琶湖東沿岸地域を対象に—. 地理学評論, 88: 138-158.
- 米島万有子, 渡辺 護, 二瓶直子, 小林睦生, 中谷友樹. 2011. CDC型ミニチュアライトトラップによるコガタアカイエカ捕獲個体数とトラップ周囲の土地利用との関連性. 衛生動物, 62: 13-22.