

# アサギマダラ

「旅する蝶」の日墨物語(2)

村上 貴弘

保全生態学・社会生物学

メキシコには、国をまたいで4500kmもの長旅をするオオカバマダラがいるが、日本には2000kmを旅し、海をも越えるアサギマダラ (*Parantica sita*) がいる。

アサギマダラはオオカバマダラと同じマダラチョウの仲間である。我々がメキシコの大越冬地で見たオオカバマダラは鮮やかなオレンジと黒い縁取りが印象的な蝶なのに対し、アサギマダラは青みがかった白と黒い縁取りがされている。大きさはオオカバマダラとほぼ同じで羽を広げると10cm程度。体重は50mgに満たない。

春。台湾から沖縄に生息していたアサギマダラは食草の開花に合わせるように北上を開始する。春から初夏にかけて吸蜜をするための植物はマルバウツギ、アサガラ、ノアザミ、ヨツバヒヨドリなどである。夏には本州や四国で主に過ごし、ヨツバヒヨドリ、ノリウツギ、オオモミジガサ、ヒヨドリバナなどの蜜を餌資源とする。秋になると、南下を開始し、フジバカマ、アザミ、ツワブキなどを吸蜜しながら、渡りを行う。秋には、関東以西で産卵を行う。幼虫の食草はキジヨランやイケマ、サクランなどのガガイモ科の植物で、アルカロイドを多く含



福岡市植物園に2016年10月に飛来したアサギマダラ

撮影 村上 貴弘

む。幼虫はこれらの葉を食べることにより体内にアルカロイドを蓄積し、鳥などからの捕食圧を下げると思われる。

アサギマダラはどこからどこまで旅するのか？

栗田昌裕の調査によれば、福島県耶麻郡北塩原村から台湾まで直線距離で2231kmを78日間で移動した例がある。多くの再捕獲調査で移動距離は1000km前後であり、かつ海を渡ることが証明されている。オオカバマダラは4500kmという長距離を移動するが、アサギマダラは海を越えて移動するという点において、オオカバマダラを凌ぐ旅をする能力を進化させたと考えて良い(図2)。

じつは、アサギマダラが長距離をそして海を越えて渡りをする蝶であることが明らかになったのはそれほど昔のことではない。標識をつけて再捕獲する調査は1980年に鹿児島昆虫同好会の田中洋氏によって始められ、80年代後半にかけて移動ルートが解明され、90年代に入り多くの昆虫同好会によるマーキング個体

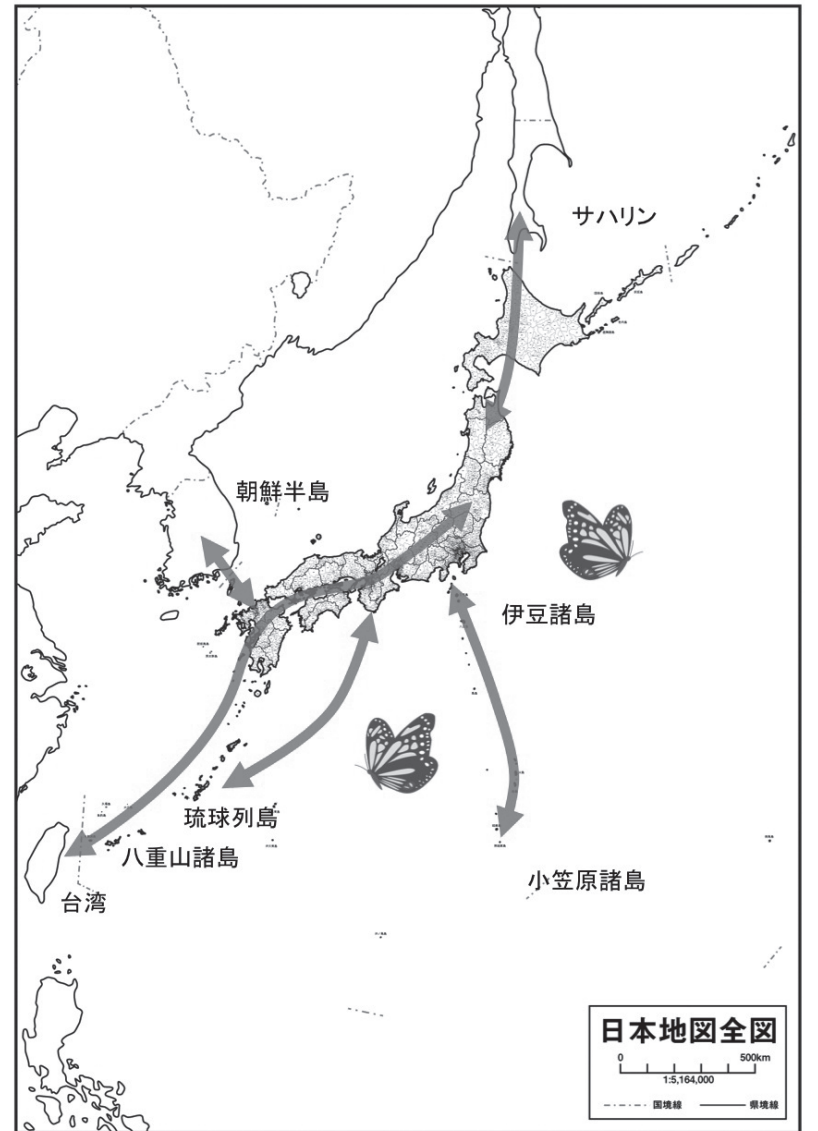


図2. アサギマダラの渡りルート

数の増加もあり、詳細な移動経路の解明が進んだ。

つまり、アサギマダラの驚くべき長距離の渡りという現象が明らかになったのはわずか30年前であったということがある。

アメリカ大陸のオオカバマダラの本格調査が1857年に始まり、最初の学術論文が1878年に出版されていることを考えると、100年以上の隔たりがある。アサギマダラの未解明な生態・行動をいくつか列挙してみよう。

(1) そもそもなぜ2000kmを超えるほど長距離でかつ海を渡るほどの移動をしなくてはならないのかが不明。

(2) 世界中に存在する蝶の中で唯一、海を渡る蝶の生理的・生態構造的メカニズムが不明。

(3) 渡りの際のコンパスシステムが不明。

(4) ガガイモ科の食草からアルカロイドを摂取し蓄積することで、捕食者から食べられにくくする戦略を採用していると考えられるが、捕食されている例が多数確認されている。

これらの未解明な現象に関して、北米大陸に生息するオオカバマダラでは比較的研究が進んでいる。とくに(3)のコンパスシステムに関してはかなり詳細に解明されている。

北米大陸を遠くはカナダからメキシコまで4500kmもの長旅をするオオカバマダラは、どのような情報からルートを間違えずに渡りをしていくのか？

基本的には二つの仕組みを使っている。一つは太陽コンパス、もう一つは磁気コンパスである。

太陽コンパスの解説をしよう。

実験システムは図に示したとおりだ。方向だけを変えられるよう固定されたオオカバマダラを風の影響を排除するために円筒状のプラスチック容器に入れ、ビデオモニターで行動を記録し、飛行時の方向をセンサーで判別し、コンピューター上に記録した(図3)。

オオカバマダラを通常の光周期で飼育すると、飛行の方角は南西方向を示し、光周期を6時間ずらして飼育した個体では、同じ方向に太陽があるにもかかわらず、南東にずれた方向に飛行した。この実験結果は、オオカバ

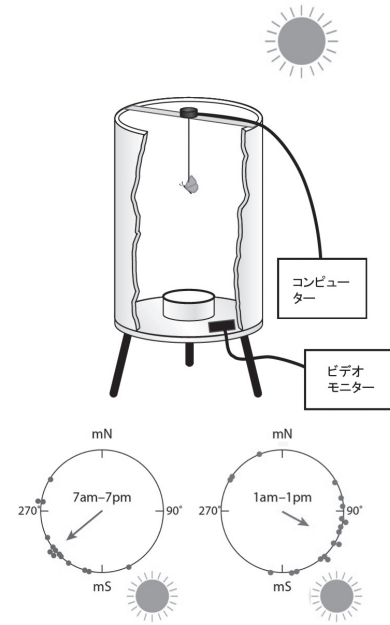


図3. オオカバマダラの太陽コンパス実験装置 (Reppert et al. 2016 を一部改変)

マダラが太陽コンパスと生体内に組み込まれた概日リズムとを組み合わせて、飛ぶ方向を決定していることを示している。

このメカニズムの優れている点は、曇り空のように太陽の正確な位置が把握できないような状況であっても、大まかな光の差す方向と活動経過時間という二つの情報でかなり正確に一定の方向を割り出すことができるという点にある。

この時間補正型太陽コンパスメカニズムは、解剖学的にもかなり説明が進んでいる。

まず複眼が光刺激を感知する。その刺激は網膜に伝えられ、そこで太陽の水平位置を検出する。さらに紫外線刺激に特化して発現する光受容体が紫外線の平面偏光角を検出する。これらの方向に関する刺激から抽出された情報は複数の神経回路を介して、脳内の中心複合体に届けられる。左脳と右脳を繋ぐ正中線構造部(太陽コンパスがあるとされる部分)で光刺激情報が処理され、他の方向に関する情報が統合され、飛行方向が判断される。

さらにオオカバマダラでは、概日リズムに関する遺伝

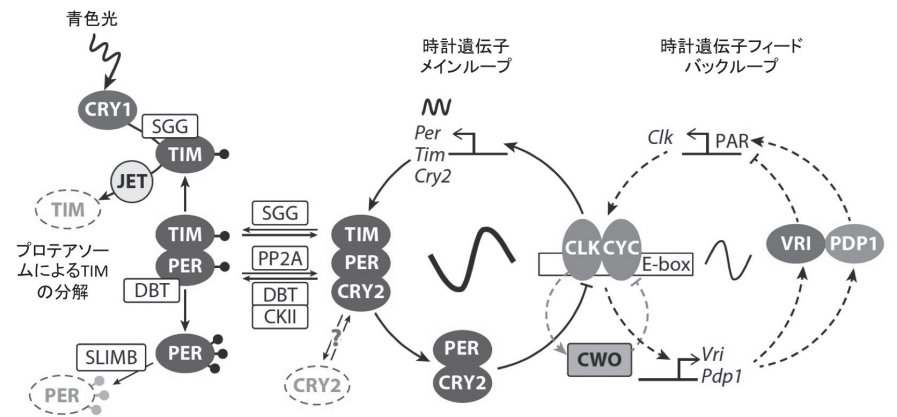


図4. オオカバマダラの時計遺伝子カスケード (Reppert et al. 2016 を一部改変)

子機構もほぼ説明されている。

図4に示したように、オオカバマダラの概日リズムに関する遺伝子の流れ(カスケード)は複雑だ。また、この研究からこれまで実験生物であるショウジョウバエの概日リズム関連遺伝子からは見つからなかった哺乳類型の *cry2* (Cryptochrome) へ青色光受容タンパク遺伝子( )が見つかり、その後ミツバチにも同様の遺伝子があることが判明した。複雑な飛行に関する情報を処理する際に概日リズム遺伝子カスケードがより複雑になる必要があることを示唆している。

簡単にオオカバマダラにおける概日リズム遺伝子カスケードを解説すると、メインループは、clock 遺伝子 (*clk*: 活動リズムの調節を司る) と *cycle* 遺伝子 (*cyc*: 時計遺伝子の転写活性因子) で、この二つの遺伝子が働くことでヘテロ二量体が形成され、*period* (*per*: 活動リズム関連遺伝子) と *timeless* (*tim*: *per* の調節因子)、そしてオオカバマダラでは初めて機能が確認された *type-2 cryptochrome* (*cry2*) の発現を促し、核内へ

シグナルが移行し24時間周期のリズムが生まれる。

一方、青色光が入射すると、細胞内の *cry1* 遺伝子（青色光受容タンパク遺伝子）が活性化し、*shaggy* (*sog*: 活動周期の制御に関わる遺伝子) を介して *tim* を発現させ、*jetlag* (*jet*: 概日リズム調節因子) の発現を抑制する。このカスケードは *TIME/PER* の複合体により調節されている。

概日リズムの生成と自己調整機能は、オオカバマダラの脳内と触覚での上記遺伝子群の転写を制御する負のフィードバック機構があり、主要な生体時計因子タンパクと mRNA を介して持続可能なリズムを生成することとなる。

遺伝解析技術は現在更に進化し、2011年にはついにオオカバマダラの全ゲノムが2億7千3百万塩基、1万6千遺伝子であることが判明した。

この詳細なゲノム情報をもとに、オオカバマダラでは DNA のメチル化が相対的に低いレベルに抑えられており、遺伝子の発現制御機構にはあまり寄与していないことや、100を超えるマイクロRNA（これも遺伝子の

発現制御に関連する）が特定され、その約半分が定着時期と渡りをする時期とで1.5倍以上の発現レベルの違いを示していたことが明らかにされている。

さらに2013年には、人工制限酵素であるジンクフィンガーヌクレアーゼを用いて遺伝子機能を改変する DNA 編集技術をオオカバマダラに応用することに成功しており、現在はより精度の高い DNA 編集技術をオオカバマダラに応用し、時計遺伝子の改変がどのような行動の変容を引き起こすのか、という壮大な挑戦を行っているところである。

(2) に関しても、オオカバマダラでは研究が進んでいる。生理機構を制御する主要なホルモンとして、幼若ホルモン (juvenile hormone *JH*) を取り上げ、その濃度変化が蝶の行動にどのような影響を与えているのかを詳細に解析している。

このホルモンは一般的に幼虫の変態に関連したホルモンだが、その他にも繁殖停止、寿命の延長、飛行時に使用する貯蔵脂肪の増加を促す働きも付与されている。これらの作用はヒトにおいて糖尿病発病に関連の深い、イ

ンスリンシグナル経路を下方制御することで誘導されることが明らかになっている。

環境の変化（例えば、温度や日照時間、餌資源の質の低下）によりインスリンのシグナルが減少し、それに関連した受容体の発現も同様に低下する。それにより側心体-アラタ体複合体での幼若ホルモンの合成が減少し、繁殖能力が停止、体の構造がより成熟することとなる。

しかしながら、一般的には昆虫の体内で *JH* の合成が低下すると、性成熟は確かに制御されるが、その後の行動としては休眠に入るはずである。なぜ、*JH* 合成が低下した後に、4500 km の長距離を飛行できるのか、その生理機構はまだ未解明のままだ。

以上、少し専門的な内容に触れたが、さらに原典を当たりたい場合は、Reppert et al. (2016) <sup>※19</sup> の総説が役に立つだろう。

このように、北米のオオカバマダラは100年以上も

の間、研究者の興味を引きつけ続け、現在では DNA 編集にまで研究は進んでいる。これら至近的な要因の解明から、(1) の究極的な要因の解明も可能になってくるだろう。しかしながら、今回この原稿をまとめるにあたり、日本のアサギマダラ研究を総括してみたところ、大学の研究室もしくはその他研究機関で専門的に調査・研究を行っているところを見つけることができなかった。これはかなり意外であったし、残念なことでもある。

決断科学プログラムで日墨の「旅する蝶」の物語を实地で体験した筆者としては、是非今後専門的な生物学研究をアサギマダラで行い、オオカバマダラとの比較を実現できるよう微力ながら努力してみようと考えている。

#### 参考文献

栗田昌裕「謎の蝶アサギマダラはなぜ海を渡るのか?」PHP エディターズグループ、2013.

※19 Reppert S, Guerra PA, Meriin C (2016) Neurobiology of Monarch butterfly migration. *Annual Review of Entomology*, 61: pp. 25-42.