

原 著

# カイコガの羽化リズム：光周期と温度周期の時刻信号としての相対的重要性<sup>†</sup>

Adult eclosion rhythm of the commercial silk moth, *Bombyx mori*:  
Relative importance of photoperiod and thermoperiod as a Zeitgeber

田村優衣<sup>\*1</sup> 高橋由衣<sup>\*2</sup> 田中一裕<sup>\*3</sup>  
Yui TAMURA Yui TAKAHASHI Kazuhiro TANAKA

Relative importance of photoperiod and thermoperiod on adult eclosion rhythm of the commercial silk moth, *Bombyx mori*, was investigated. Pupae were exposed to a combination of photoperiodic (12-h light: 12-h dark) and thermoperiodic (12-h 20.5°C : 12-h 29.5°C) conditions with different phase angles, and the eclosion time was compared. Under these conditions, the eclosion rhythm was completely entrained to the photoperiod; and a large fraction of eclosion occurred around the light-on time irrespective of the phase of thermoperiod. In *B. mori*, thus, the photoperiod was a more effective Zeitgeber for eclosion timing than the thermoperiod. Such properties would make *B. mori* a suitable animal model for science education in the elementary school.

Key words: Circadian clock, Time cue, Science Education  
概日時計、時刻信号、理科教育

## I. 序論

昆虫の蛹が成虫になることを羽化という。そのタイミングは概日時計によって制御されており、1日の特定の時刻にだけ羽化が起きることが多い<sup>1)</sup>。昆虫の概日時計の周期は24時間よりも少しずれている。そのため多くの種は、外界の光や温度の日周期変化をもとに概日時計の動きを補正し、その周期を外界の24時間周期と一致させている<sup>1)</sup>。

概日時計の周期と外界の24時間周期の同調に際して、光と温度のどちらを優先するかは昆虫の種によって異なる。ミカンコミバエ *Dacus dorsalis* やツエツエバエ *Glossina morsitans* は光周期には同調せず、温度周期にのみ同調して羽化する<sup>2,3)</sup>。一方、タマネギバエ *Delia antiqua* やノシメダラメイガ *Plodia interpunctella* は光周期にも温度周期にも同調して羽化することができるが、両者が異なる位相で与えられた場合は、より強いほうの時刻信号に同調する<sup>4,5)</sup>。

これまでの研究から、カイコガ *Bombyx mori* は夜明け前に羽化すること<sup>6)</sup>、その羽化時刻を制御する概日時計は光周期にも温度周期にも同調できることがわかっている<sup>7,8)</sup>。しかしながら、本種が羽化時刻を決めるにあたり、光と温度、どちらの時刻信号を優先するのかはまだ明らかになっていない。そこで本研究では、カイコガの蛹に

光周期と温度周期を異なる位相で与え、どちらの時刻信号に同調して羽化するのかを調べた。あわせて、本種の羽化の人為誘導や小学校理科教育への応用の可能性についても検討した。

## II. 材料と方法

供試したカイコガ（春嶺×鐘月）は愛媛蚕種株式会社（愛媛県八幡浜市）から購入した。幼虫は、25°Cで1日1回人工飼料を与えて飼育した。繭を形成してから5~6日後（蛹化後1~2日）に繭を開き、蛹を取り出した。羽化時刻は赤外線センサー（GTR2、竹中電子工業株式会社）を用いたアクトグラフにより記録した。繭から取り出した蛹は1個体ずつ11個の個室（15 mm×10 mm）をもつアクリル製の容器に入れた。蛹の頭側には成虫が外部に脱出することを阻むための直径8 mmのビーズ球を1つ置いた。さらにその球の前に直径3 mmのステンレス製の球を置いた。羽化した成虫が外に出ようとビーズ球を押すと、ステンレス製の小さな球が押し出されて赤外線センサーの前を横切り、その時刻がパソコンに記録される仕組みである。蛹を装填したアクトグラフは光や温度条件を調節できる恒温機（MIR-253、パナソニック株式会社）に入れた。温度周期は12時間高温相：12時間低温相（以下WC 12：12）とし、平均温度が25°C、

<sup>\*1</sup>宮城学院女子大学児童教育学科、(現所属)仙台市立大沢小学校

<sup>\*2</sup>宮城学院女子大学児童教育学科、(現所属)五洋建設株式会社

<sup>\*3</sup>宮城学院女子大学一般教育部

<sup>†</sup>2021年12月13日受付、2022年1月13日受理

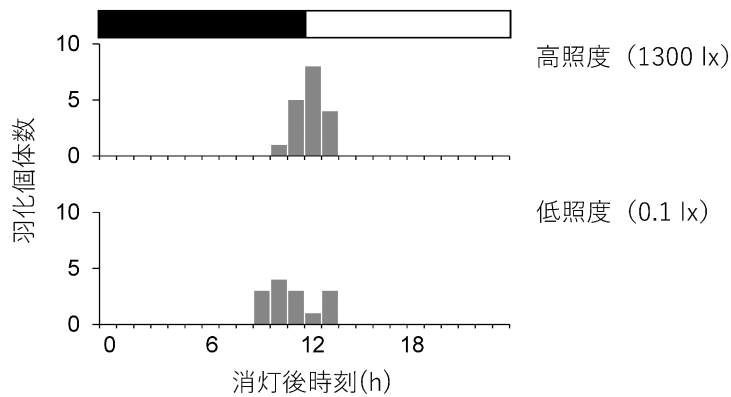


図1. 25℃、光周期下 (LD 12 : 12) におけるカイコガ *Bombyx mori* の1時間毎の羽化分布。明期の照度は1300 lx (上図) と0.1 lx (下図) とし、消灯時刻は0時、点灯時刻は12時とした。グラフ上の黒と白のバーはそれぞれ暗期と明期を示す。

温度較差が9℃になるように高温相は29.5℃、低温相は20.5℃とした。光周期は12時間明期：12時間暗期（以下LD 12 : 12）とした。光源として蛍光灯（FL10ENW、330ミリ10ワット、パナソニック株式会社）を用い、市販のタイマー（TE333、National）により点灯・消灯時刻を設定した。羽化時刻におよぼす照度の効果を調べるために、低照度区では蛍光灯を白色ビニールテープ（ヤマト株式会社）で覆い、アクトグラフ上面の照度がおおよそ0.1 lxになるように調節した。高照度区では蛍光灯に何ら被覆を施さなかった。その結果、アクトグラフ上面の照度は約1300 lxとなった。照度はデジタル照度計（LX1330B、Shenzhen Bonad Instrument Co. Ltd）を用いて測定した。光周期の点灯開始時刻（夜明け）は12時（日本標準時）に固定した。一方、温度周期の温度上昇開始時刻は0時、6時、12時、18時とした。1処理あたりの蛹の数は平均19個体（14～22個体）であった。

### III. 結果

図1は25℃、光周期条件下（LD 12 : 12）での羽化の様子をまとめたものである。明期の照度が高くても（1300 lx）低くても（0.1 lx）、羽化は点灯時刻付近でおきた。ただし、羽化のピーク時刻は明期中の照度によっていくぶん異なった。高照度下では18個体中12個体（66.7%）が点灯後に羽化し、羽化中央値（ $\phi_E$ ）は消灯後12.2時であった。一方、低照度下では14個体中10個体（71.4%）が点灯前に羽化し、 $\phi_E$ は消灯後11時であった。

図2は全暗、温度周期条件下（WC 12 : 12）での羽化の様子をまとめたものである。温度周期下では、ほとんどの個体が低温相の後半に羽化した。 $\phi_E$ は温度降下後7.8時であった。

図3は光周期（LD 12 : 12）と温度周期（WC 12 : 12）を6時間ずつ異なる位相で組み合わせた条件下での羽化

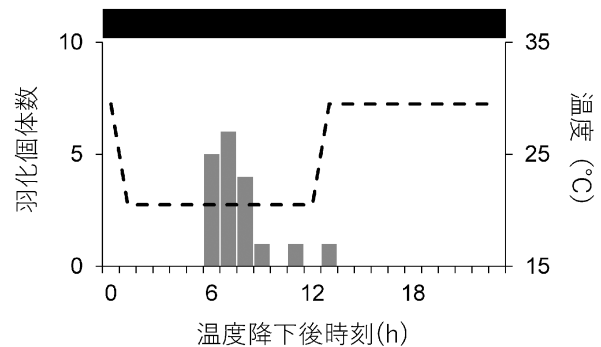


図2. 全暗、温度周期下（WC 12 : 12、9℃較差、平均25℃）におけるカイコガ *Bombyx mori* の1時間毎の羽化分布。温度降下開始時刻は0時、温度上昇開始時刻は12時とした。破線は温度を示す。

の様子をまとめたものである。高照度下でも低照度下でも、温度周期の位相とは無関係に、羽化は光周期の点灯前後に起きた。

### IV. 考察

#### 1 光周期と温度周期の相対的重要性

今回の実験から、カイコガは光周期にも温度周期にも同調して羽化することができるが（図1、2）、光周期と温度周期が異なる位相で与えられた場合、温度周期の位相とは無関係に、光周期に同調して羽化することが明らかになった（図3）。この傾向は、明期中の照度を0.1 lxまで下げても観察された（図3）。これらの事実は、本種の羽化時刻を決める時刻信号として、光周期は温度周期よりも優位であることを意味している。

カイコガが温度よりも光を重視して羽化時刻を調節する理由のひとつは、その時刻信号としての正確さにあると考えられる。気温の上昇開始時刻（夜明け）や下降開始時刻（日暮れ）は気象条件などによって日々変動する

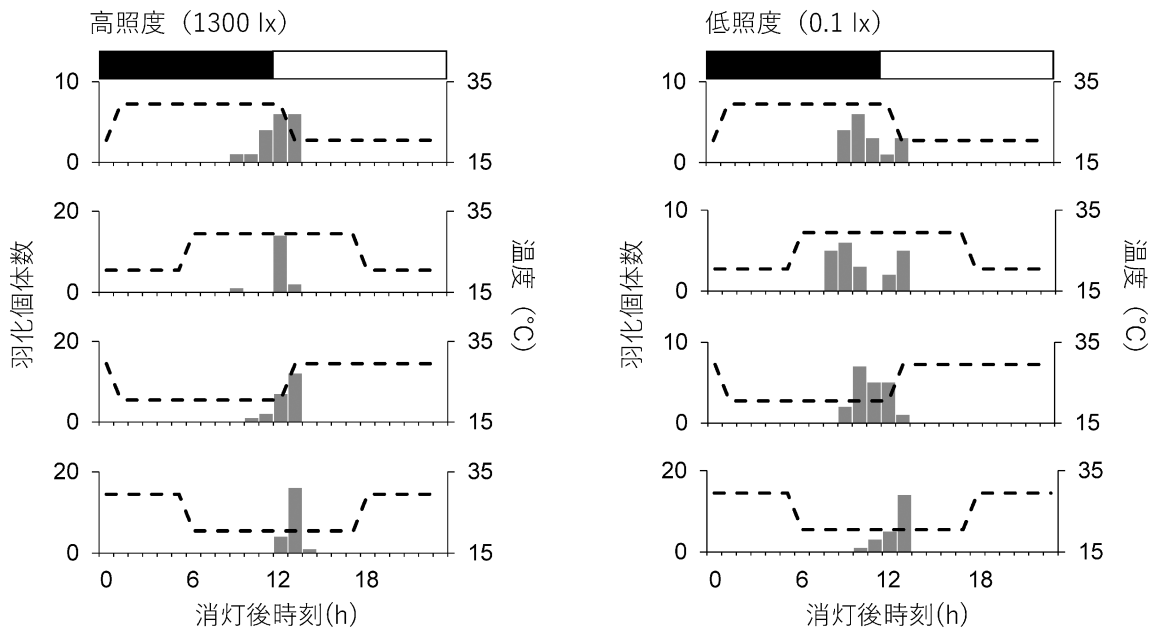


図3. 異なる位相で光周期 (LD 12 : 12) と温度周期 (WC 12 : 12, 9°C較差、平均 25°C) を組み合わせた条件下におけるカイコガ *Bombyx mori* の1時間毎の羽化分布。明期の照度は 1300 lx (左図) と 0.1 lx (右図) とし、消灯時刻は 0 時、点灯時刻は 12 時とした。これに温度周期の温度上昇開始時刻を 6 時間ずつずらして組み合わせた。グラフ上の黒と白のバーはそれぞれ暗期と明期を、破線は温度を示す。

が、暗から明への切り替え時刻（夜明け）や明から暗への切り替え時刻（日暮れ）の日ごとの変動は小さい。このように、明暗の変化は温度変化よりも信頼性が高い時刻信号といえる。カイコガが早朝に羽化することに何らかの適応的意義があるなら、明暗の変化を用いて羽化時刻を決める個体は温度変化を用いる個体よりも適応度が高まるに違いない。

2 つめの理由は、本種が繭の中で蛹化することである。カイコガの繭内部の温度変化は、外界の温度変化よりも緩やかである<sup>9)</sup>。この事実は、蛹が繭内部の温度変化のみから外界の夜明けを認識するのは難しいことを意味している。一方、本種の繭に照射された光のうち約 20% は繭の壁を透過する<sup>10)</sup>。したがって、蛹の光感受性が高ければ、繭内にいても明暗の変化から外界の夜明けを知ることが可能である。実際、カイコガは 0.1 lx のような低照度の光を感受し、羽化時刻を調節することができる (図 1)。

3 つめの理由は、本種が地上で蛹化することである。地上では光周期を時刻信号として利用できるの、あえて時刻信号としての正確さにかける温度周期を利用して羽化時刻を決める必要がないのだろう。一方、土の中のような光が届かない環境で蛹化するミカンコマエ<sup>2)</sup> や ツェツェバエ<sup>3)</sup> は、温度周期にのみ同調して羽化する。土の中では温度周期しか時刻信号として利用できない。そのため、これらの種では温度変化に依存した測時機構が進化したのであろう。

本研究で明らかになったように、カイコガは温度周期

よりも光周期を優先して羽化時刻を決めていた。この光周期に依存した測時機構は、光周期の時刻信号として正確さに加え、本種が地上で蛹化するという生態的特性と密接に関連して進化した可能性が示唆された。この推測の妥当性は、地上で蛹化する種と地中で蛹化する種のあいだで、光に同調して羽化する種と温度に同調して羽化する種の割合を比較することで検証できるだろう。

## 2 小学校理科教育への応用

小学校 3 年生の理科では、昆虫の成長過程と体のつくりを学習する単元がある。この単元では、実際に身近な昆虫を探したり育てたりすることで、昆虫の育ち方には、「卵→幼虫→蛹→成虫」というような一定の順序があること、幼虫の時期には食べ物を食べ、脱皮をして成長することを捉えることが求められている<sup>11)</sup>。羽化は昆虫の成長の最終過程である。蛹が脱皮してから成虫があらわれるまでに要する時間は比較的短いので、児童の観察対象としても好適である。しかしながら、昆虫の羽化は 1 日の特定の時間帯にだけ起きることが多く、昆虫が羽化する様子を実際に児童に観察させることは容易ではない。

本研究において、カイコガは温度周期の位相とは無関係に、光周期に同調して羽化することが明らかになった (図 3)。この事実は、小学校の教室のような温度を制御しない環境下にあっても、光周期を操作するだけでカイコガを特定の時間帯に羽化させることが可能であることを示唆している。例えば、光を遮断できる箱にカイコガ

の蛹をいれ、毎日決まった時間帯にのみ箱のふたをあけて、蛹に光をあてる方法が考えられる。あるいは、24時間タイマーをつないだ蛍光灯を用いて、蛹を適切な長さの光周期に曝す方法も考えられる。高照度下では多くの個体が夜明け後に羽化した(図1、図3)。このことから、蛹を高照度の光に曝すことで、箱のふたを開けた直後あるいは蛍光灯の点灯直後に羽化が始まることが期待される。

昆虫の羽化時刻を人為的に操作し、理科教育の現場で活用する試みについてはいくつかの先行研究が存在している。たとえば、矢野<sup>12)</sup>は羽化直前のチョウの蛹を冷蔵庫に保管することで羽化時刻を人為的に操作する方法を提案した。この方法のポイントは、適切なタイミングで蛹を冷蔵することにある。冷蔵の適期を知るには蛹の背面の空隙化を見極める必要があるが<sup>12)</sup>、これは慣れないと難しい。また、冷蔵庫内の温度管理も不可欠である<sup>12)</sup>。これに対し、光周期を利用したカイコガの羽化の人為誘導は、毎日特定の時間帯に蛹に光をあてるだけである。蛍光灯や24時間タイマーを除くと準備すべき機材もあまり多くはない。このように、光周期を利用したカイコガの羽化の人為誘導は児童と共に行うことが可能である。普段目にする機会が少ない昆虫の羽化の一部始終を観察することは、児童にとって感動的なものとなるだろう。カイコガの羽化は、小学校理科教育の良い教材になるにちがいない。

## V. 謝辞

本研究の実施に当たり日頃から暖かく見守り、助言をくださった本学教育学科の梅田真理教授、渡辺徹教授、生野桂子教授に深く御礼申し上げます。

## VI. 文献

- 1) Saunders D. S.: *Insect Clocks* (3rd.), Elsevier, 560pp. (2002)
- 2) 新井哲夫: ミカンコミバエの羽化の日周期性に対する温度と光の周期の影響. 日本応用動物昆虫学会誌, **20**, 69-76 (1976)
- 3) Zdarek, J., Denlinger, D. L.: Changes in temperature, not photoperiod, control the pattern of adult eclosion in the tsetse, *Glossina morsitans*. *Physiological Entomology*, **20**, 362-336 (1995)
- 4) Watari, Y., Tanaka, K.: Interacting effect of thermoperiod and photoperiod on the eclosion rhythm in the onion fly, *Delia antiqua* supports the two-oscillator model. *Journal of Insect Physiology*, **56**, 1192-1197 (2010)
- 5) Kikukawa, S., Kakihara, Y., Nakamura, H., Saitoh, A., Shindou, R., Sugino, N., Terayama, K., Tsunekawa, J.: Adult eclosion rhythm of *Plodia interpunctella*: response to photoperiod and thermoperiod with different phase angles. *International Journal of Animal Biology*, **2**, 19-25 (2016)
- 6) 黄色俊一, 渡辺四郎: カイコの羽化行動に関する研究 (I) 蛹期の光条件と集団羽化リズム. 生物環境調節, **16**, 27-30 (1978)
- 7) Shimizu, I.: The eclosion rhythm of the silkworm, *Bombyx mori*. pp160-174. In: Hiroshige T., Honma K. (eds.) *Circadian clocks and ecology*, Hokkaido University Press, Sapporo, 216pp. (1989)
- 8) Takahashi, Y., Tamura, Y., Tanaka, K.: Thermoperiodic regulation of adult eclosion rhythm in the commercial silk moth, *Bombyx mori*. *Annual Report of the Institute of Living and Environmental Science*, **52**, 1-6 (2020)
- 9) Zhang, J., Rajikhowa, R., Li, J. L., Liu, X. Y., Wang, X. G.: Silkworm cocoon as natural material and structure for thermal insulation. *Materials & Design*, **49**, 842-849 (2013)
- 10) 有本肇: 繭層の光の透過性について. 日本蚕糸学雑誌, **26**, 65-71 (1957)
- 11) 文部科学省: 小学校学習指導要領 (平成29年告示) 解説 理科編 (2017)
- 12) 矢野幸夫: チョウの実験と観察 モンシロチョウ・アゲハチョウ, 東洋館出版社, 243pp. (1977)