

動植物に対する「光害」、特にホタル類への影響

遊 磨 正 秀 (滋賀県草津市)

YUMA, Masahide (Kusatsu, Shiga Pref.)

(Keywords : 光害、LED照明、ホタル類への影響、夜間照明、照度、波長、総説)

1. 「光害」を懸念する背景

近年、街灯にLED (light emitting diode) 照明が増えている。滋賀や京都のホタル生息地を訪れると、妙に明るくなったと感じることが多い。いささか老朽化していた蛍光灯に代わり、LED照明がつかれたからだ。街中から山間部まで古いタイプの街灯を探すことが難しくなってきた。実際、LEDは、長寿命であること、発熱量が少ないこと、小型軽量であること、水銀などの有害物質を使っていないことなどの特徴から、2000年代後半から急速に利用が広がっている[45]。

このLED照明の普及には、さまざまな国家戦略が背景にある。すなわち、「新成長戦略 (基本方針)」(2009年12月閣議決定)において、2020年までの高効率次世代照明 (LED・有機EL照明) の100%普及の方針が示されたこと、「新成長戦略」や「エネルギー基本計画」(ともに2010年6月閣議決定)において、環境・エネルギー大国戦略の柱の一つとして高効率次世代照明を、2020年までにフローで100%、2030年までにストックで100%普及させる目標を掲げ、さらには「日本再生戦略」(2012年7月閣議決定)において、2020年までに公的設備・施設の高効率照明の導入率100%達成の方針が示されたことなどである。このような新世代照明の普及を推進する理由として、1) 照明器具の消費電力量がエアコン・冷蔵庫に次いで、家庭全体の約15%を占めており、省エネ性能の向上は家庭部門のCO₂排出量削減において極めて重要であること、2) 白熱電球から120年、蛍光灯から60年が経過し、21世紀の明かりとしてLEDが登場したこと、3) LEDの発光効率は近年飛躍的に向上し、白熱電球の6倍、蛍光灯ランプの1.3倍に達すること、4) LEDは発熱量が少なく、空調の効率化による節電に寄与する、ことが挙げられている。

このように経済性や環境への低負荷にすぐれた照明器具ではあるが、街灯などに用いられている白色系LEDランプは、ナトリウムランプのような単色灯ではなく、幅広い波長の光を発する。この光は、人の眼にはなじみやすいものの、さまざまな環境への影響も懸念されている[17,28,40]。環境省[26]は、「光害」の動植物や人に対する問題を懸念し、それに対する対策を示している。「光害」に関する論文は、国際的にも近年急速に増えてきた。低コストで炭素排出の少ない街灯などの灯火の、ここ数十年の増加は、年6%と試算されており、このような夜間照明により、動物の移動、定位行動、誘引・忌避行動、摂食行動、個体間の情報伝達、種間関係、繁殖、死亡率、また捕食者-被食者関係や生態系にも、さまざまな害があるとしている[17,26]。夜間照明は、特にホタルを含む夜行性の生物に大きな影響を与えると懸念されている[37,60,80]。また、街灯等による直接的な光害に加えて、都会などの照明が空に反射して生じる、明るい夜空 (天空輝度, skyglow) が遠くの生態系に影響を与えている可能性も示唆されている[26,40]。このskyglowは、人類が自らを明るい霧の環境に追い込んでいるとも思える現象であり、地球上の18%以上の場所で見られ、イギリスでは85%、オランダでは100%に上るという[1]。本報では、これらの光が動植物に与える影響に関する文献から、その一部については調査や実験の方法も示しながら、その実態を紹介する。

2. 道路照明の基準

道路における照明施設の基準として、1963年に「道路照明基準」が定められ、2007年に「道路照明施

設置基準」として全面的に改訂された。さらに、国土交通省では2011年に「LED 道路・トンネル照明導入ガイドライン（案）」が公表され、2015年にその改訂が行われた。現在の国土交通省の基準では、道路照明の場合、その基準が路面輝度（cd/m²）で定められているため換算が難しいが、交差点では路面照度を10～20ルクス以上とすることが定められている。住宅地の歩道は、交通量の多い道路では5ルクス以上、交通量が少ない場合は3ルクス以上、商業地では20ルクスまたは10ルクス以上と定められている。

防犯灯の場合は、（公社）日本防犯設備協会により「防犯灯の照度基準」が2007年に定められ、現行のものは2015年に改訂された。ここでは「4m先の歩行者の見え方」が基準となっており、「歩行者の顔がわかる」ことが必要とされる場合は5ルクス以上、「歩行者の顔の向きや挙動がわかる」ことが必要とされる場合は3ルクス以上とすることが定められている。

さらに警察庁は、「安全・安心のまちづくり推進要綱」（2006年通達、2014年改訂）において、主に人が通る道路・公園・駐輪場は3ルクス以上、公衆トイレ付近は50ルクス以上、駐車場車路は10ルクス以上などと定めている。

なお、光をどのように測るかについてはさまざまな問題があるものの、ルクス（1m²の面が1ルーメンの光束で照らされるとききの照度）を用いて測るのが、人の眼が受け取る光の明るさを示すことからわかりやすい[40]。

照明の光の明るさは、光源からの距離とともに減衰する。図1aに、12mの高さに設置された街灯の光源からの垂直・水平方向の照度の変化の例を示した。1万ルクス以上の街灯でも、12m下の街灯直下の路面では30ルクスまで、光源からの距離の二乗に反比例して小さくなる。また水平方向では、光源の位置から20m離れたところの路面では2ルクスまで下がる。ちなみに、図1bには、各種の場所や時間帯での一般的な照度を示した。太陽光は、昼間に最大10万ルクスに達するが、薄明薄暮では0.1～3ルクス程度、夜の月の光は0.01～1ルクス程度である。これに対して、照明下の路面は20ルクス程度まで明るくなっている。この路面での明るさは、先に示した各種照明の設置基準に依っており、そこで暮らす動植物は、自然界にはない明るい夜を過ごすことになる。ちなみに、照度の参考値として、ホテルのロビーは70～200ルクス、蛍光灯下の室内は300～800ルクスと紹介されている[75]。

3. 植物に対する夜間照明の影響

植物は、光をエネルギー源や季節の情報源として利用している。植物自身の暮らしや動植物の相互作用は、太陽光の日周性にに基づく生理反応に拠っている。しかし、夜間照明は、植物の生理反応を変化させ、季節性や成長への養分の配分を変化させる。さらには、植食者や送粉者（植物の花粉を運ぶ動物）の行動も変える。したがって、環境への人為的影響の一つとして「光害」を取り上げることは重要である[1]。

夜間照明の光は、光合成をするには弱いとされるが、郊外での skyglow は、若干の光合成をするのに理論的には十分な場合もあり、また、湖岸に設置された高圧ナトリウム灯のわずか6ルクス程度の光でも、植物プランクトンの光合成にかかわるメカニズムを変化させるという[63]。

植物が光の方に向かって伸長するのは、光に対して正の屈性をもたらす水溶性の物質（オーキシン）が関与している。これを示した20世紀初頭のボイセン・イェンセンの実験は、高等学校の教科書にも記述されている。また、レタスなどの光発芽種子は、水分・温度・酸素条件に加え、光が十分にある条件で発芽するもので、その発芽は赤色光（波長660nm）で促進され、遠赤色光（波長730nm）によって抑制される。

多くの植物では、開花は夜と昼の長さ（日長）の季節的な変化に依存している。日長に対する反応は敏感であり、たとえば、熱帯など年間の日長の変化が1時間もないところでも、樹木はその日長の変化を感受している[68]。太陽からの放射光の波長は、およそ300～3000nmである。このうち、植物の光合成に有効な光は400～700nmで、植物にとって生理的に有効な光は、これに近紫外光（300～400nm）と遠赤外光（700～800nm）を加えた波長域である[28]。春から夏にかけて、夜の暗い時間が一定以下にな

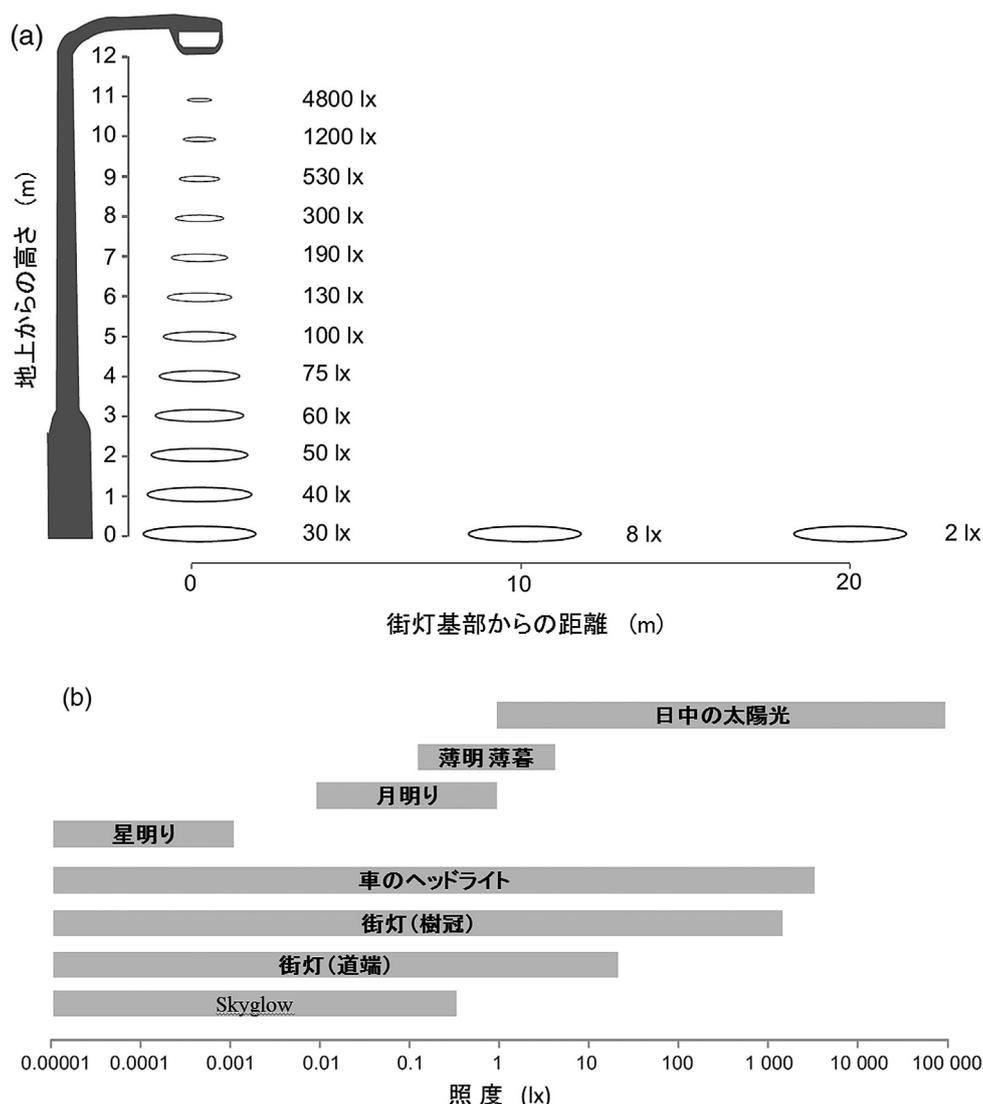


図1 (a) 一般的な街灯からの水平・垂直方向の照度の変化。光の強さの値(ルクス)は灯からの距離により急激に減衰する。
 (b) さまざまな自然光・人工照明のおおよその照度。横軸は照度(ルクス)の対数目盛で示している。(Bennie ら[1]を改変)

ると花をつけはじめる長日植物や、夏から秋にかけて夜の暗い時間が一定以上長くなると、花をつけ始める短日植物があることもよく知られている。植物を、長日条件や短日条件に置いて、さまざまな季節に花を咲かせることは実際によく行われている。また、暗い時間帯に閃光を照射することによって、夜の長さを勘違いさせ、植物にとっての季節性を狂わせることも、光中断として教科書に紹介されている。これは実は「光害」の一例と考えられる。

水稻は、短日条件により花芽形成が促進され、出穂するが、播種後60日から刈り入れ前70日の間の感光期間に約5ルクス以上の夜間の光があると、出穂が遅延する[28]。温度にもよるが、高圧ナトリウムランプ2~20ルクスの夜間照明があると、水稻の収量が顕著に低下し、20ルクスでは収量がゼロになるという報告[28]もある。ハウレンソウは、長日条件下で伸長するが、伸長が進むと薹(とう)がたち、商品にならない。その伸長は、品種や温度にもよるが、5ルクス程度の夜間照明でも影響を受ける。

しかしながら、年々増加している夜間照明の野生植物や自然植生に対する影響を「光害」の問題としてとりあげた報告は少ない[1]。夜間照明は、開花を早める場合もあれば、遅らせる場合もあるし、成長を促進する場合も、その逆の場合もある。都市での夜間照明が、落葉樹の落葉を遅らせることはよく知られており、夜間照明が、春の芽生えを2週間も早める場合もある。このような日長の感受性に関して

は、薄暮・薄明の照明が問題であるという。芽生えが早くなれば、それを食する植食性昆虫にも影響を与える。夜間照明は、夜行性の送粉者の行動を変えることも知られている。しかし残念ながら、夜間照明が引き起こす現象が連鎖して、生態系全体にどのような影響を及ぼすのか、まだ我々の知識は不足している[1]。

4. 動物に対する影響

動物に対する光害については、多くの報告がある。特に有名な例は、海岸を産卵場とするウミガメ類に対するものである。

アメリカ東南部のフロリダ半島付近には、ウミガメ類が産卵する海岸が多くある。それらの産卵場所の多くは、開発行為等による人為影響を受け、98%もの場所が大なり小なり夜間照明の影響を受けている[13]。海岸付近に夜間照明があると、雌が浜に産卵に来にくくなり、また産卵に適していない場所での産卵を余儀なくさせている[7]。孵化した稚ガメは、光に敏感で、海の方を見分けるのに視覚を用い[29]、アカウミガメなどの稚カメは、海側からの紫外線の刺激により、海側に誘引されている可能性が高い[28]。そのため、わずかな照明の光でも、孵化した稚ガメの海への方向定位を狂わせ、海への移動を困難にしている[27,79]。さらに、孵化した稚ガメは、照明がないと、陸地の砂丘や植生よりも海の水平線の方が明るいことを情報源としているが、skyglow は、地を海の水平線よりも明るく感じさせ、孵化した稚ガメは、海の方がわからず、体力消耗や乾燥で死ぬものが増えるという[7, 48]。

海岸に棲むハマトビムシ類では、灯火の有無で行動に変化は見られない[12]とされる一方、別の種では灯りのない海岸にはいたが、灯りがある海岸にはいなかったとの報告もある[18]。砂浜海岸に生息するハマトビムシの一種を用いて、その活動、摂食及び成長に与える照明の影響を、野外と室内実験で調べた報告がある[40]。この種は、昼間は砂に潜り込み、夜間に砂上に出て藻類を摂食する。砂浜に設置されたハロゲンライト（波長665~990nm, 高さ3m）の灯近く（灯から3m, 水平面照度約60ルクス）と灯火の影響がない場所（灯から50m）の場所で、本種の行動を比較した。午後9時から3時間の間に、設置区画で砂上に現れたものを「活動」とみなすと、灯火から50m離れた暗い環境ではすべての調査区画で活動したのに対し、灯火から3mのところでは活動が見られなかった。翌年、別の海岸で行った実験によると、同様に、暗いと87%で活動が見られたのに対し、明るいと7%のみが活動していた。さらに、実験室内で、別種の岩礁性ヨコエビを1匹ずつ餌とともに1L容器に入れ、12日間、自然の明暗環境と終夜60ルクス照明を点灯した場合の摂食量や成長を比較したところ、夜間無点灯の場合の活動の割合は高く、点灯下では7日目以降、一日の活動リズムが変則的となった。また、夜間無点灯では有灯の場合に比べ、摂食量は2倍、日成長量は3倍となったという。一方、砂浜性甲虫の数は、夜の空の状態と相関があり、skyglow を引き起こす都市化と負の関係にあった[19]。

海産動物の光に対する反応に関して、エゾアワビ成貝のさまざまなLED光に対する行動を調べた報告がある[15]。この種は夜行性であり、全暗及び全明条件で、1か月飼育馴らした82mm前後の個体を実験に用いた。光条件として、12V約3WのLEDを用い、赤色・橙色・緑色・青色・紫色・白色（全波長域）・灰色・青緑色・黄色の9色と全暗条件を設定した。その結果、全暗・全明どちらで馴らしたものでも、残留率（1時間後にその光の下に留まっている割合）、起き上がり時間（仰向けに置かれた個体が通常の状態に戻るまでの時間）は、全暗・赤色・橙色で長く、また移動速度は遅かった。他の光では、起き上がり時間は短くなり、従って忌避していると考えられた。さらに、さまざまな光条件でエゾアワビの卵や幼生の成長を比較した報告[16]では、青色（波長450nm）・緑色（565nm）・赤色（620nm）・橙色（600nm）・白色（全波長域、主な波長460nm）を設定し、全暗条件と比較している。その結果、孵化は青色・緑色・全暗で良く、幼生の奇形は、赤色・橙色・白色で増加した。変態は、青色で良く、赤色・橙色・全暗で悪かった。青色と緑色では、幼生の生存率が高く、変態時の大きさが大きく、変態までの時間は短かった。このように、発生初期では、青色や緑色の光条件が良好であり、成貝の光色に対する反応と異なっていたことから、成長段階によって光の影響が異なることが示唆されている。

沿岸で暮らす海鳥には、絶滅が危惧されているものが多く、その原因として漁業や海洋汚染の問題に

加え、陸地での外来捕食者の移入、繁殖地の減少などが挙げられている。さらに、夜間照明による影響もあり、光に誘引され、方向を見失って落下する現象 (fallout) が知られている[69]。そのメカニズムは不明であるが、照明の影響で陸地に降り立つときに間違っ て建物などに衝突したり、降り立っても再び飛び立つことができず、陸上で動けなくなったものが、マングースや犬猫に捕食されたり、車にひかれたり、餓死や脱水により死亡するという。また、地中の穴を巣にする種類では、ヒナが照明の影響で地上にうずくまってしま いう現象もある。さらに、ヒナが餌である海産発光生物と人工光と混同したり、巣穴の明るい入口で親から餌をもらうことから、人工光を餌と勘違いしたり、照明によって海の方 向がわからなくなるなどの影響もあるという[69]。

大都市の多くは、海岸沿いにあることから、とりわけ海岸や浅海への光害が懸念されている[9]。その例として、ある種のアザラシは、照明のあるところに集まってくるサケの若魚を捕食し、光がないとうまく食べられないことや、昼夜に垂直方向の移動をする動物プランクトンは、夜間照明によって移動パターンが狂い、それが動物プランクトン食者の摂食に影響し、種間関係にも影響を及ぼしていることを紹介している。また、船などからの夜間照明の影響が、暗闇で生活する深海の生物にまでも及んでいるという。なお、多くの魚類は、可視域から紫外域まで認知でき、人の50倍以上の感度を持つことから、この性質を利用して集魚灯漁法が行われている[28]。

次に、陸上の動物に対する「光害」に関する報告を紹介する。陸上動物の30%、無脊椎動物の60%は夜行性である[22]。その代表として、蛾類やコウモリ類が有名であり、これらに対してもさまざまな光害が懸念されている。

イギリスでは広域性の大型蛾類の3分の2がここ40年で減少しており[14]、生息地の荒廃や減少の問題もあるが、夜間照明が雌の蛾の産卵を抑制したり[44]、雌が異常に集合して産卵したり、不適な場所に産卵するといった生態的トラップになる[5]といった障害が報告されている。さらに、低レベルの夜間照明でも蛾類メスの性フェロモン放出が阻害され[76]、小さな蛹になってしまうこと[82]も報告されている。

性フェロモン生産に対する夜間照明の影響は、ヨトウガを用いて調べられている[84]。羽化間近の蛹を、緑色 (ピーク波長480nmと540nm付近)・赤色 (同650nm付近)・電球色 (610nmをピークに約500~700nmの広域) のLED灯下と無灯環境に置き、羽化後3日のメスの性フェロモン量を計量した。その結果、無灯に比べて、どの色の場合も性フェロモン量はおよそ半減し、かつ、性フェロモンの化合物の主要素とされる化合物が減少して、化学組成が変化したことがわかり、夜間照明は雌による雄誘因力を弱める可能性があることを示唆している。

フユシャク (冬尺) に対する夜間照明の影響について、オランダで調べられた[83]。秋から冬にかけて成虫が現れ、一般に雌は翅が小さく飛べない蛾類である。その食樹であるヨーロッパナラに、緑色・白色・赤色の照明 (30W, 1.5mの高さで3mの距離に設置) を照射したものと、無灯の条件を設定し、2年間の11~12月の27夜にわたって、樹上の雌成虫を採集した。赤色照射の幹の陰部分を除いて、有灯の場合は、無灯のものよりも雌成虫の数が少なく、雌は光を忌避していた。また、雌成虫の貯精嚢を調べた結果、無灯では53%が交尾していたが、有灯の場合、緑色では13%、白色では16%、赤色でも28%しか交尾していなかった。雄成虫も光があるところを忌避し、その結果、光の存在が繁殖に影響を与えているとしている。

このような結果は、波長によって蛾類に与える影響が異なることが示されている。これに関して、ニュージーランドの海岸の松林付近において、白色LED灯 (4000K) と高圧ナトリウム灯による昆虫誘引性が比較されている[59]。それによれば、紫~青色光も発色する白色LEDの方が1.5倍の昆虫が集まったという。また、白色LEDの色温度 (色温度が低いと暖色系の色、高いと寒色系の色) を調整して、松林と牧草地の境界付近で比較したところ、どの昆虫分類群の誘引性に対して色温度は関係がなく、波長の方が強く影響することが示唆された。また、ドイツ北東部の保護区で人工灯を設置して蛾類の行動を調査した報告[8]では、70W高圧ナトリウム灯を20m離して格子状に3×4基設置して、蛾類を2年間捕獲している。その結果、灯火への誘引は分類群や雌雄の間で差はなかったが、格子状配置の角では、緑色灯

に2.77倍誘引され、格子状配置の中央の灯火への誘引は少なかった。つまり、外側の灯火に多く集まり、中央まで行かないことから、灯火は生息地の分断につながると指摘している。

これらの例は、夜行性昆虫に対する照明の波長の影響を示している。昆虫の視感度は、主に紫外域にあり、黄色光（ピーク波長580nm）は、昆虫の誘引を抑えることから、光を防除に応用され[28]、また明るい照明からのエネルギー放射が、昆虫の不妊化を引き起こすことを利用して、生物的害虫防除に応用されてきた[11,67]。

一般に、蛾類は、夜間の送粉者であるが、その生態系への役割については、我々の理解が不足している。これは、送粉者としては、昼行性動物を対象とする研究が主流であり、夜間送粉者については無視されてきたことによる。しかし、昼行性の送粉者に比べて夜行性蛾類は、より遠くまで花粉を運ぶことによって、植物の個体群内遺伝子をより拡散し、時としてより効率的な受粉を担うとされている[41]。このような蛾類などの夜行性送粉者は、昼行性のものと同様の問題に直面している。それは、生息地の分断化、気候変動、農薬類などであり、それに加えて上記の「光害」による影響である。そして、夜行性であるがゆえに、光の強さなどによって独特の影響を受けることになる。さらに、夜間照明は蛾類による送粉を通じて、生態系全体に影響することになる。

コウモリ類のほとんどは夜行性で、飛翔速度の速いコウモリ類は、水銀灯などに集まる昆虫を開けた空間で捕獲することで得をしている一方で、林内をゆっくり飛翔するコキクガシラコウモリ類は、街灯のあるところでは見かけない[70]。そこで、コキクガシラコウモリ類のねぐらから餌場への飛翔ルート of 垣根付近に、高圧ナトリウム灯を実験的に設置し、移動行動に対する灯の影響が調べられた[77]。その結果、灯火付近の移動は大きく減少し、移動開始時間も遅くなった。これは明るい場所での被捕食を恐れたもので、夜間照明はこの種に対して、負の影響がある。このように、灯火は林内を飛ぶコキクガシラコウモリ類やホオヒゲコウモリ類の移動を妨げ、それらの灯りを薄暗くしてもなお、灯火の近くを避けるようになる。このような影響は、果実食のコウモリ類による種子散布や植生更新にも影響が及ぶと考えられる[70]。また、南アフリカ・ダーバン近郊において、スポーツ競技場の照明がコウモリ類活動に与える影響について調べられている[71]。12種のコウモリ類の活動は、周囲の土地利用や街灯の状況には左右されていなかった。しかし、そのうち都市活動型コウモリ4種では、競技場の照明が点灯されているときの活動性や採餌頻度が、消灯時よりも明らかに高かった。また、競技場の照明付近で活動するコウモリの種組成は、とても類似していた。したがって、競技場の照明は、特定の都市活動型種の利用を高め、それらの種が有利になることから、コウモリ類の多様性を減じることにつながると懸念されている。

次に、淡水域の動物に対する光の影響を紹介する。河川の水生昆虫の幼虫は流されるように移動するが、魚類の捕食を避けるために0.001ルクス以下の暗い環境で流下する[4]。確かに、サケ科コレゴス属の一種では、0.05ルクス以下になると動物プランクトン (*Daphnia magna*) を捕食する能力が激減するという[54]。しかしながら、淡水域の河川や河畔付近の生態系に対する夜間照明の影響については、あまり調べられてこなかった[61]。

水生昆虫の成虫は、夜間照明に誘引される。このような夜間照明のもう一つの影響として興味深い報告[60]がある。それは、並ぶ灯火の間の暗がりには逃げ込むこと (vacuum cleaner effect ともいう) により、正常な移動を妨げる現象である。一方、カナダの森林内を流れる溪流約50mの区間では、70W 高圧ナトリウム街路灯を30日間設置して、水生昆虫の流下行動への影響が調べられている[61]。人工灯により水面の明るさは 0.81 ± 0.20 ルクスとなり、無灯の区間に比べ、河川を流下する昆虫量は50%以下になった。ただし、水生昆虫の羽化数や枯葉の分解速度、マスの生息数や成長速度には差が認められず、さらに長期の調査が必要だとしている。

淡水魚に対しては、夜間照明があると太平洋サケ類の遡上移動が遅くなったり、移動しなくなったりする障害が生じ、また、マスノスケでは夜間照明にさらされるとスモルト化（銀毛、海水への適応が完了した状態）しなかったり、スモルト時の体調不良を引き起こすことが知られている[60]。ビクトリア湖に住む目の良いシクリッドの仲間では、高圧ナトリウム灯の設置により、雌のよる雄の色彩識別が困

難になり、繁殖がうまくいかないとも紹介されている。

タイセイヨウサケ仔魚の孵化日と時刻に対する夜間照明の影響を、イギリスの支流で調べた報告がある[65]。2000～2006年は、灯火がなかったが、2008年に水面上で最大14ルクスになる街灯がついた。街灯がつく前には、仔魚の移動は日没時刻に依存していたが、街灯がついてからは、時刻にかかわらず、ランダムに行われるようになった。また、タイセイヨウサケ仔魚の孵化日や時刻に対する夜間照明の影響を実験的に調べた報告もある[66]。本種は、河川上流で産卵し、孵化・浮上流下は夜間に起こる。45 W 高輝度放電灯（HID ランプ）を実験容器の1.7m上に設置し、フィルターで光量を調節し、8・4・2・1・0.1ルクスの環境を作った。0.1ルクスは、通常の満月の夜の明るさである。昼間は、自然光を模した人工光をあてた。その結果、仔魚流下のタイミングは1ルクス以上で1.4～2.2日遅れ、通常は日没後3時間半後に起こるものが、5時間半後と遅くなった。なお、これらの変化は1ルクスで劇的に生じ、それ以上明るくしてもその影響はあまり変わらなかった。また、1ルクス照射下では昼間での流下も多く見られた。これらのことから、都市部から離れた上流で行われる本種の産卵場所においても、村落や歩道を照らす街灯の0.1～1ルクスといった、わずかな光の影響を受けている可能性があるとしている。

さらに、灯火の影響で河畔の樹木や灌木の成長期が長くなり、すなわち芽生えが早くなる一方、落葉の時期が遅れる。落葉の時期が遅れると、河川の腐食連鎖の食物源（枯葉など）の供給が遅れ、物質循環にも影響が及ぶ可能性があるという[60]。

5. ホタル類に対する影響

ホタル類が灯りを嫌うことは、神田[25]が「月夜は発光が少ない」と述べているし、南[42]も「外部よりの光を嫌う。月明かりの夜や電燈の光のあるところでは弱い光しか出さない」と記述している。夜行性のホタル類が明るいところを嫌うことはよく知られていたことであり、大場[49,50,51]も都市化とともに、河川等の環境変化に加えて、多くなった夜間照明が、ホタル類の衰退に追い打ちをかけたと述べている。また矢島[85]も、「街灯と提灯を川沿いにたくさんつけたのでホタルがいなくなった」と書いている。夜行性昆虫の中でも、ホタル類は、繁殖行動に際して生物発光を用いることから、夜間の人工的な照明の影響を、最も受けやすい生き物である[62,64]。

夜間照明によるホタルへの影響の有無について、大竹[58]がアンケート調査を行った。全国からの70件の回答のうち、67%から照明の影響が「少し」あるいは「かなり」あるとの回答があった。その影響とは、「街灯のある所のホタルが激減した」、「道路ができてからホタルが高く飛ばなくなった」、「ゴルフ場の照明が影響している」、「橋に設置された照明灯のためホタルの飛翔に影響がではじめた」などであった。

ホタル類に対する夜間照明の明るさや光の色の影響に関して、当時、沼津市立第三中学校の大木ら[56]が、静岡県沼津市愛鷹広域公園の野球場のナイター照明と公園内の園路灯照明が、ゲンジボタルの飛翔にどのように影響しているかを調べている。満月の夜の照度は、0.5～1ルクスであったが、親水公園のせせらぎ付近の照度は、0.2～50ルクスであり、うち0.8ルクス以下の場所でホタルの飛翔が認められた。さらに大木ら[57]は、室内でスライド映写機（300W ハロゲンランプ）を光源として、35mmマウントに10色のカッティングシートをつけ、5m離れたところに置いたゲンジボタル成虫の反応を調べた。その結果、赤色では24.7ルクスの明るさでも、ゲンジボタル成虫は発光しながら飛翔し、桃色や橙色の場合は0.7～0.8ルクスで発光飛翔したが、黄色（1.1ルクス）や黄緑色（0.3ルクス）では、照射後しばらくしてから発光飛翔し始めた。水色や青色（ともに0.4ルクス）では行動はかなり阻害された、と報告している。

水戸市立国田中学校[43,44]でも光の影響を調べていた。光の強さは、水槽を段ボール箱で囲って、その上面に穴を開け、その上の水槽用照明の明るさを、穴の数で調節して、4・8・14・27ルクスの条件を作り、上陸、羽化、成虫の発光、産卵の様子を調べた。その結果、幼虫の上陸の割合は、8ルクス以上で減り、羽化（蛹期）への影響は、27ルクスのみで現れ、成虫の発光活動は、4ルクス以上で激減し、産卵は、4ルクス以上でその開始が遅れ、産卵数も減少した。

一方、ヘイケボタルでは、小林ら[30]や中川ら[46]が、新潟県越路町の生息地に設置した実験用ブース

(約1.2m立方)において、昼光色蛍光灯と調光器、透明着色アクリルまたは半透明クラフトシートを用いて、さまざまな光色と照度を再現し、ブース底面の照度と成虫の行動の関係を調べている。その結果、自然条件下では、0.15ルクス以下になると飛翔発光していた成虫は、橙色や赤色の場合、1ルクスになると、無点灯時の約25%が行動しなくなった。それに対して、白色・緑色・青色の場合には、1ルクスでも70%以上の個体が行動しなくなった。なお、実際の照明灯に用いられている橙色の低圧ナトリウム灯を用いた場合も、上記の橙色系と同様の結果であった。同様に、石関ら[23]は、以前にヘイケボタルが生息していた場所に街灯が設置され、近くの小川では深夜でも10ルクス程度となったことから、約100ルクスの白色光に赤・青・緑のセロハンをつけて、光色・光量を変えて成虫の行動を調べたところ、約100ルクスの白色光条件下では成虫は驚いて動かなくなり、約10ルクスの白色光では弱く発光したが、約10ルクスの赤色では成虫は光にほぼ反応しなかったと述べている。さらに石関ら[24]は、ヘイケボタル成虫を16L:8Dの日長条件(16時間の昼と8時間の夜という条件)下におき、夜間に黒・赤・白色10ルクスの照明をあてて、交尾・産卵行動を調べた。その結果、暗黒では交尾産卵が見られたが、赤色や白色では産卵しなかった。光の強さを1ルクスとした場合には、赤色では産卵が遅れたが、白色では産卵しなかった。

このような、夜間照明に対するゲンジボタル成虫の行動について、遊磨と小野[86]が、京都市銀閣寺疏水において調べている。この疏水は、琵琶湖から京都市へ導水するために作られた幅5mほどの水路で、住宅地の近くを流れ、水路沿いに遊歩道もあることから街灯が随所に設置され、多くの小さな橋が架けられている。これらの橋の間の区間のうち、樹木などによって暗くなっているところに成虫が多くみられ、水路周囲の樹木が少なく明るい場所では少ないと報告している。さらに、橋の上は、一般に樹冠のつながりが切れ、明るい場所となることから成虫の移動を妨げていると報告している。一方、橋の下は、薄明るい周囲に比べて急に暗くなる場所であり、水面近くを飛ぶメスなどの1/2~3/4の個体が、この橋の暗がりや嫌って方向転換したことから、成虫はここも避けていた。したがって、橋の存在は橋の上下流の個体の交流を妨げるとしている。さらに遊磨[88]は、同所で行った1984年と2000年の調査結果を比較し、場所ごとにさまざまな要因で明るくなったり、暗くなったりしていたが、概ね、路面照度が0.2ルクス以下、また水路上の樹木被度割合が0.5~0.6以下の場所で、成虫密度が高かったと報告している。篠原ら[75]も生息地の夜間の最大照度は、約0.2ルクス以下であり、1ルクスを超えるところには生息していなかった、と報じている。

以上のような報告はいずれも、ゲンジボタルやヘイケボタルの成虫では、概ね0.1~0.2ルクス以下で正常に近い行動がみられるが、1ルクス以上になると夜間照明の影響を受けることが示されている。

竹内[78]によると、1975年に名古屋鉄道瀬戸線の大津町駅に勤めていた竹内氏は、助役の方とともに終電の後に駅舎の明かりを消したところ、線路沿いの名古屋城外堀の土手のあたりに無数のヒメボタル成虫が光り始めるという不思議な光景に出会っていた。つまりヒメボタル成虫は、周囲が暗くなってから光り始めたのである。その名古屋城外堀においては、街灯や高層ビルの照明が差し込むところでは、活動が抑制され、草丈30cmほどに草刈りされた場所では、ヒメボタル成虫の飛翔は、街灯の光が当たらない高さ30cm以下に限られていた、と後藤ら[20]が報告している。なお、大場[53]によると、薄暮性のイリオモテボタルの場合、ナトリウム灯による照明により0.02ルクスの薄明りが維持されたことにより、20時近くまで活動が見られ、活動の日周性を攪乱している可能性がある。

近年、塚本と辻[81]が、沖縄県那覇市の公園に生息するクロイワボタルは、街灯が点灯していると活動せず、消灯した深夜に活動を開始したと報告している。また、街灯が点灯されなかった年は、日没直後に活動していた。これらのことから、深夜に活動を始めたのは、夜間照明の影響であろうとしている。

ホタル類の幼虫と光の関係についての報告は、上記より少し遅れて現れる。石関ら[24]は、ヘイケボタルの幼虫を、孵化時から350ルクス白色の光を照射した条件と全暗条件で飼育したところ、白色光の下では、6ヵ月後に1~2ヵ月程度の成長の遅れが見られ、実験開始後の生存率は、全暗に比べてかなり低かった、と報告している。一方、宮下[45]は、ゲンジボタルとヘイケボタルの幼虫に対するLEDの光色と照度の影響について報告している。実験容器は、高さ20~40cm、底面10×10cmのものを用い、

底面に幼虫を一夜置き、照明区を避けて暗区へ移動するかどうかを調べた。ゲンジボタル幼虫の場合、全暗下でも照明予定の区画に70%の個体が残っていた（30%はランダム移動により暗区に移動した）のに対し、LEDが緑色（ピーク波長520nm, 範囲480~590nm）・青色（同473nm, 420~550nm）・白色（同470nmと575nm, 420~770nm）の場合、0.1ルクス以上で照明区に残っていた幼虫は、40%以下に減少した。黄色（同590nm, 550~625nm）では、30ルクス以上で、赤色（同632nm, 600~680nm）では、60ルクス以上でそれぞれ照明を忌避した。ヘイケボタル幼虫においても、白・青・緑色のLEDでは0.1ルクス以上で照明を忌避し、黄色では5ルクス以上で、赤色では40ルクス以上で忌避した。類似の実験を、篠原ら[75]が、ゲンジボタルとヘイケボタルの5~15mmの幼虫に対して行っている。幼虫を、22×31cmの容器に入れ、容器の半面に隠れ場所となる石を敷き詰めて、石のないところに幼虫を放し、1時間後に石のないところと石の下にいる個体を数えた。その結果、光照射を行うと、光を遮断した状態に比べて、ゲンジボタル幼虫では、0.1ルクスで約10%、約1ルクスで50%以上、約10ルクスでは80%以上の個体が、石の下に隠れた。しかし、ヘイケボタル幼虫では、約1ルクスで20%ほど、100ルクスでも約60%が石のないところにとどまっていた。このように、両種の幼虫ともに明るい場所を忌避するが、光色やその強さによる感受性は種間で異なっており、ゲンジボタル幼虫の方が、より光を忌避する性質が強かったと報告している。

さらに、幼虫の上陸時における光の影響について石関ら[23]の報告がある。十分に成長したヘイケボタル幼虫を、14L:10Dの日長条件下で飼育し、夜間を暗黒条件とした場合、赤・緑・白色の約10ルクス照明を終日点灯した場合を設定し、上陸の様子を調べた。その結果、上陸は白色光の下でも行われたが、光を避けて行動しているように見受けられた。赤色の場合には、暗黒とほぼ同様の上陸が確認された。その後の羽化成虫の割合は、暗黒で78%、赤色64%、白色61%、緑色54%であった。また、緑色と白色では、暗黒と赤色に比べて成虫の羽化が数日遅れた。これらのことは、上陸時や蛹期においても光の影響があることを示している。

次に、海外におけるホタル類に対する「光害」の報告例を示す。ホタル類が受ける夜間照明の影響として、発光効果の低下によるコストの増加、活動パターンの攪乱、発光パターンの消失、光への誘引、幼虫期の休眠への影響などが挙げられ、日没直後に活動を開始するホタル類は、夜間照明によって活動時間帯の攪乱が起りやすいとLloyd [37]はいう。これに関連して、雌のホタル (glowworm) は、45m先の雄を引き寄せることができるが、夜間照明がこの能力を減じているとLongcoreとRicht [39]が紹介している。また、イギリス・バッキンガム州において、*Lampyrus noctiluca* に対する夜間照明の影響をBirdら[3]が調べている。本種の雄成虫を0.07~0.3ルクスの照明下におき、雌に模した5mmの緑色の発光ダイオードに対して、雄が定位行動をとるかどうかを調べた。照明は、9V懐中電灯をさまざまな距離から照らすことにより設定した。0.18~0.3ルクスという低照度でも、雌（発光ダイオード）に対する雄の定位行動は阻害された。ちなみに、星空の明るさは0.02~0.09ルクス、歩道の照明の基準値は1.5ルクス（イギリスでの基準）であることと比べると、雌に対する雄の定位行動がかなりの低照度で阻害されることがわかる。アメリカ・マリーランドでは、夜間照明とホタルの行動に関する野外実験をCostinら[6]が行った。林縁近くの草原において *Photuris marginellus* などのホタルに対し、人工灯を設置して発光数を調べたところ、林縁付近で1.2ルクスの明るさになった場合には、照明がない場合に比べて発光数が半減したという。

イタリア・トリノでは住民参加型調査により、主に陸生の *Luciola italica* の分布を調べ、照度が0.01~0.17ルクスのところにホタルがいたが、0.16~0.9ルクスのところには生息しておらず、川沿いの緑地公園は、光が届かないため良好な生息場所となっていると、Picchiら[62]が報告している。

ブラジル・サンパウロ州ソロカーバにある大学キャンパス内では、スポーツ場に設置された4基のスポットライト型水銀灯によるホタル類への影響をHagenら[21]が調査している。照明は、他にナトリウム灯や建物から漏れ出た蛍光灯の明かり、貯水タンク上の赤色灯、それに空に反射したソロカーバ市の明かりなどがあるが、もっとも明るいのが水銀灯である。落葉広葉樹林に近い林の中には、4種類の陸生ホタル類と発光性コメツキムシ1種があり、その生息数の98%をホタルの一種 *Photinus* sp. 1 が占

める。この種も含め、この調査地のホタル類は10月～2月に出現し、日没後2時間以内に活動する薄暮型のものである。林内は、満月の夜は0.04ルクスの明るさであるが、スポーツ場の水銀灯が点灯している時には、最大4.5ルクスで、消灯時に比べて、活動数（発光数）は7分の1であった。また、灯の影響が最も少ない場所でも照度は0.05ルクスあり、活動数は約半分であった。このように、ブラジルにおいても、ホタル類は夜間照明の影響に関する象徴種あるいは生物指標種とすることができる、としている。

日本産のホタル類成虫の活動開始時刻とその時の照度について、大場[53]がまとめている（表1）。これらの種の成虫の活動開始時刻の照度をみても、これまで紹介してきたように0.1ルクス程度の弱い光でも活動に影響を及ぼすことが理解できる。

表1 日本産ホタル類成虫の活動開始時刻とそのときの照度。（大場[53]より）

種 類	成虫の活動開始	
	時 刻	照 度（ルクス）
ゲンジボタル	—	0.5～0.12
クメジマボタル	19時過ぎ	1.4
ヘイケボタル	19:20～19:50	0.01以下
ヒメボタル	19～20時頃	0.05～0.45
ヤエヤマヒメボタル	19:30頃	0.05～0.07
オキナワスジボタル	19:45前後	0.01以下
ミヤコマドボタル	19:44前後	0.9前後
イリオモテボタル	18:30前後	0.6～0.8

6. 「光害」への対策

ホタル類が発する光の波長に関して、古くから多くの報告がある。北米やジャマイカ産の陸生ホタル成虫の発光の波長は、概ね緑色域の550～578nmであり、ピーク波長は種によって異なる[2, 72]。北米の *Photinus* 属のホタルでは、各種の分光感度（最も明るく感じる波長）は、それぞれの種の発光のピーク波長に相当している[33,35,36]。なお、夜行性ホタルの発光は緑色系で、薄暮性ホタルの発光は黄色系である[34,73,74]。Eguchi ら[10]は、日本産の昼行・夜行性のホタル類の発光スペクトルと分光感度を調べ、各種のそれはほぼ同じ520～580nmであり、各種の発光波長と対応していることを報告している。ただし、ヒメボタル成虫雄の分光感度は、波長の長い580nm付近にピークがある。このようにホタル類は、赤色に対する分光感度は比較的低いことから、灯火や懐中電灯に赤色フィルターをつけると影響を少なくできるという記述は多くみられる[23,49,50,52,57]。

夜間の光害を軽減する策として、次の5つが提唱されている[17,26]。すなわち、1) 一定の地域に光が入らないようにする、2) 点灯する期間を制限する、3) 不必要な光の漏れこみを防ぐ、4) 光量を変える、5) 光の組成を変える、である。

これらの対策に関して、1) は、保護区などでの光の使用を制限するもので、ウミガメ類が産卵する浜での対策などがそれにあたり、もっとも効果的な手法としている。ただし、経済発展などとの対立が絶えず生じる。2) は、コストを下げることにつながるが、夜行性や薄暮性の生物に対する影響を完全に排除することはできない。3) は、迷光を減らすことなどにより、灯りがある場所でも活動が可能な暗がりを実現することができる。4) は、エネルギー消費を減らし、また skyglow や強い灯りそのものを減らすことができる。5) により色調を白色系に変えると、波長が広域になり、かえって影響が増すこともともあるだろう、などの指摘がある。

日本における動物に対する道路照明の配慮事例を、国土交通省国土技術政策総合研究所[31]が紹介している。例えば、国立科学博物館附属自然教育園の野鳥類に対して、高欄照明方式（橋梁の高欄や道路側壁などの低位置に照明器具を取り付けて道路を照らす方式）により、道路外への漏洩光を最小限にしている。三河湾国定公園内のカワウ繁殖地に対しては、産卵期（2～7月）の施工を避ける、夜間工事

は行わない、発破は極力避けるなどの配慮をした上で、自動車のヘッドライトが照射されないようにトンネル型施設を設置している。遠州灘に面したバイパスでは、海岸に上陸するアカウミガメの親ガメや稚ガメに配慮し、特に稚ガメが走光性を示さない低圧ナトリウム灯やカットルーパー（遮光板の一種）付高圧ナトリウム灯を設置し、さらに自動車ヘッドライトの光も含め、道路外への光漏れを防ぐために樹木を植栽するとともに、高さ1mの遮光フェンスを設置している。東京湾の谷津干潟に生息する水鳥類に対しては、自動車ヘッドライトの遮光を兼ねた高さ2mの遮音壁を設置し、また遮音壁外側の環境緑地帯に樹木を植えている。

ホテル生息地においては、名古屋城外堀跡に生息するヒメボタルに対し、高欄照明方式のプリズムライトガイドによる照明を設置し、照明光の道路外への漏れを軽減している。また、大竹[58]の全国アンケート調査によると、ホテル生息地において光の影響への対策として、「消灯してもらう」、「遮光カバーをしてもらう」、「街灯の向きを変えてもらう」、「寒冷紗を張ってもらう」、「家の窓のシャッターを閉めてもらう」などの策が挙げられている。ただし、これら対応策に関する詳しい資料は、残念ながらほとんど残されていない。大木ら[56]も、樹木の植栽や遮光板の設置が必要であるとしている。これらは、上記の対策の1)や4)に相当する。

同様に、小林ら[30]は、JIS 道路照明基準では歩道の路面上の水平面照度は0.3～3ルクスが推奨され、実際の水平面照度は、防犯灯の直下で約1.5ルクス、2m離れたところで約1ルクスである一方、満月の夜でも約0.2ルクスであることを考慮に入れると、ホテル保護のためには、路面の水平面照度は0.3～1ルクスに保つのがよく、そのため黄橙色系の低圧ナトリウム灯などには遮光フィルターをつけ、白色系蛍光灯の場合はオレンジ系の着色カラーグローブをつける、などを提案し、道路以外に光が漏れない配慮も求めている。光量を減らす策として、中川ら[46]は、新潟県越路町において、40W ナトリウム灯に照明カバーを付けたホテル保護灯を考案した。20W 白色蛍光の街路灯と比べたところ、街路灯下では無点灯時に比べゲンジボタルやヘイケボタルの20～30%の個体しか発光しなかったが、ホテル保護灯下ではその3～4倍の80～90%の個体が行動した、とその成果を述べている。岡本と野々口[55]も、岐阜県の公園整備において、コンパクト蛍光灯（FDL18W，電球色）を用いて、成虫期（4～7月）に、灯具に目的以外に光を漏らさないための深めのフードとオレンジ色のフィルターを取り付け、水平面照度が0.3～1ルクスとなるようにしたホテル保護灯を設置している。これらは、先の対策2)～5)の複合的なものといえる。なお、横須賀市において水銀灯をナトリウム灯に代えただけで、ゲンジボタルの生息地の拡大が見られたとの大場[53]の報告もある。

照明は、人々の安全性を確保するものであるが、近年イギリスでは、夜間照明を減らす活動も始まっているという[38]が、日本ではこのような運動は始まっていない。それよりも、まだ多くの課題が残されていることから、都市域における「white light night」に関する研究のいっそうの推進が必要である[17]。ただし、一般には夜間の研究は難しいうえに、これまで紹介したように、「光害」の現れ方はさまざまであることから、川上[28]は、光害を低減するには照明を設置しようとする地域の生態系を調査し、そこに生息する各種について、個別対策を講じるのが最も現実的であるとしている。一方、こういった「光害問題」に対してこれまで生態学者は、夜間照明を環境要因として扱うことを忘れがちであり、環境保護者は、保護区や移動中継地（corridor）を考える際に、夜間の環境を無視しがちであったことを反省し、今後は技術者とともに、野外で測光機器を開発し、そして人工の夜間照明の問題に取り組む努力が求められている[39]。そして、これらに対して問題解決を図れば、近い将来に、人工的な光景観（artificial lightscape）は大きく変わっていくことだろう[17]。

7. おわりに

文化昆虫として認識されるホテル類[32,87]に対して、文明の革命児であるLEDが「光害」を及ぼすとは、だれが想像できたろうか。「光害」は、生き物に対する、我々の無配慮から生じるものかもしれない。古き良き生き物と、新しくて利便性の高いLED との間の整合性をどうとるのか。我々人類にとって、今後の大きな課題である。

8. 引用文献

- [1] Bennie J., Davies T.W., Cruse D.D. and Gaston K.J. (2016) Ecological effects of artificial light at night on wild plants. *Journal of Ecology*, 104 : 611–620.
- [2] Biggley W.H., Lloyd J.E. and Seliger H.H. (1967) The spectral distribution of firefly light II. *Journal of General Physiology*, 50 : 1681–1692.
- [3] Bird S. and Parker J. (2014) Low levels of light pollution may block the ability of male glow-worms (*Lampyrus noctiluca* L.) to locate females. *Journal of Insect Conservation*, 18 : 737–743.
- [4] Bishop J.E. (1969) Light control of aquatic insect activity and drift. *Ecology*, 50 : 371–380.
- [5] Brown L.N. (1984) Population outbreak of Pandora moths (*Coloradia pandora* Blake) on the Kaibab plateau, Arizona (Saturniidae). *Journal of the Lepidopterist' Society*, 38 : 65.
- [6] Costin K.J. and Boulton A.M. (2016) A field experiment on the effect of introduced light pollution on fireflies (Coleoptera: Lampyridae) in the Piedmont Region of Maryland. *Coleopterists Bulletin*, 70 (1) : 84–86.
- [7] Deem S.L., Boussamba F., Nguema A.Z., Sounguet G.P., Bourgeois S., Cianciolo J., and Formia A. (2007) Artificial lights as a significant cause of morbidity of leatherback sea turtles in Pongara National Park, Gabon. *Marine Turtle Newsletter*, 116, 15–17.
- [8] Degen T., Mitesser O., Perkin E.K., Weiß N.S., Oehlert M., Matting E. and Hölder F. (2016) Street lighting: sex-independent impacts on moth movement. *Journal of Animal Ecology*, 85 : 1352–1360.
- [9] Depledge M.H., Godard-Codding C.A.J. and Bowen R.E. (2010) Editorial: Light pollution in the sea. *Marine Pollution Bulletin*, 60 : 1383–1385.
- [10] Eguchi E., Nemoto A., Meyer-Rochow V.B. and Ohba N. (1984) A Comparative study of spectral sensitivity curve in the diurnal and eight nocturnal species of Japanese fireflies. *Journal of Insect Physiology*, 30 : 607–612.
- [11] Eisenbeis G. (2006) Artificial night lighting and insect: attraction of insects to streetlamps in a rural setting in Germany. pp. 281–304. In: *Ecological Consequence of Artificial Night Lighting* (Rich C. and Longcore T. eds.). Island Press, Washington DC.
- [12] Fanini L., Hughes L.E., Springhorpe R., Tosetto L. and Lowry J.K. (2016) Surface activity pattern of macrofauna on pocket, tidal beaches: insights into the role of wrack and artificial lighting. *Regional Studies in Marine Science*, 7 : 63–71.
- [13] Fuentes M.P.B., Gredzens C., Bateman B.L., Boettcher R., Ceriani S.A., Godfrey M.H., Helmers D., Ingram D.K., Kamrowski R.L., Pate M., Pressey R.L. and Radeloff V.C. (2016) Conservation hotspots for marine turtle nesting in the United States based on coastal development. *Ecological Applications*, 26 (8) : 2708–2719.
- [14] Fox R., Parsons M.S., Chapman J.W., Woiwod L.P., Warran M.S. and Brook D.R. (2013) *The State of Britain's Larger Moths (2013)*. Butterfly Conservation and Rothamsted Research, UK.
- [15] Gao X., Zhang M., Zheng J., Li X, Chi L., Song C. and Liu Y. 2016. Effect of LED light quality on the phototaxis and locomotion behaviour of *Haliotis discus hannai*. *Aquaculture Research*, 47 : 3376–3389.
- [16] Gao X., Li X., Zhang M., Chi L., Song C. and Liu Y. (2016) Effects of LED light quality on the growth, survival and metamorphosis of *Haliotis discus hannai* Ino larvae. *Aquaculture Research*, 47 : 3705–3717.
- [17] Gaston K.J., Davies T.W., Bennie J. and Hopkins J. (2012) Reducing the ecological

- consequences of night-time light pollution: options and developments. *Journal of Applied Ecology*, 49 : 1256–1266.
- [18] Glaconni C. (2006) Efecto de la contaminación lumínica sobre la abundancia, riqueza y comportamiento de la macroinfauna de playas arenosas de la IV region, Centro de Egresados de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Memorias y Publicaciones, Universidad de Chile.
- [19] González S.A., Yáñez-Navea K. and Muñoz M. (2014) Effect of coastal urbanization on sandy beach coleoptera *Phaleria maculate* (Kulzer, 1959) in Northern Chile. *Marine Pollution Bulletin*, 83 (1) : 265–274.
- [20] 後藤好正・大場信義・鈴木浩文・佐藤安志 (1996) 名古屋城外堀におけるヒメボタル雄の探雌行動の環境による変化. *全国ホタル研究会誌*, 29 : 19–20.
- [21] Hagen O., Santos R.M., Schlindwein M.N. and Viviani V.R. (2015) Artificial night lighting reduces firefly (Coleoptera: Lampyridae) occurrence in Sorocaba, Brazil. *Advances in Entomology*, 3 : 24–32.
- [22] Hölker F., Wolter C., Perkin E.K. and Tockner E. (2011) Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in Ecology and Evolution*, 25 : 681–682.
- [23] 石関政彦・宮田朋保・梅津剛 (2006) 平家螢の上陸および羽化における光の影響について. 土木学会第61回年次学術講演会, 231–232.
- [24] 石関政彦・宮田朋保・梅津剛 (2007) 平家螢幼虫の成長に対する光の影響について. 第35回土木学会関東支部技術研究発表会, VII–054.
- [25] 神田左京 (1935) ホタル. 485p. 日本発光生物研究会; (ホタル (復刻版 : 1981), サイエンス社).
- [26] 環境省 (1998) 光害対策ガイドライン～良好な照明環境のために～. 100p. https://www.env.go.jp/air/life/hikari_g/full.pdf
- [27] Karnad D., Isvaran K., Kar C.S. and Shanker K. (2009) Lighting the way: towards reducing misorientation of olive ridley hatchlings due to artificial lighting at Rushikulya, India. *Biological Conservation*, 142 (10), 2083–2088.
- [28] 川上幸二 (2005) 光害問題と光放射による作用効果. *IWASAKI 技報*, 12 : 10–17.
- [29] Kawamura G., Naohara T., Tanaka Y., Nishi T. and Anraku K. (2009) Near ultraviolet radiation guides the emerged hatchlings of loggerhead turtles *Caretta caretta* (Linnaeus) from a nesting beach to the sea at night. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 42, 19–30.
- [30] 小林和久・中川七三郎・岡地真作・嶋悌司・松井進一 (1997) 生活光とホタルの共生に関する研究 (第2報). *新潟県ホタルの会会報*, 8 : 1–5.
- [31] 国土交通省国土技術政策総合研究所 (2007) 道路環境影響評価の技術手法 (別冊 事例集 動物、植物、生態系) IV. 動物、植物に対する道路照明設備の配慮. 国土技術政策総合研究所資料, 第393–395号 (別冊).
- [32] 小西正泰 (1977) 虫の文化誌. 272p., 朝日新聞社.
- [33] Lall A.B., Chapman R.M., Trouth C.O. and Holloway J.A. (1980) Spectral mechanisms of the compound eye in the firefly *Photinus pyralis* (Coleoptera; Lampyridae). *Journal of Comparative Physiology*, 135 : 21–27.
- [34] Lall A.B., Seliger H.H., Biggley W.H. and Lloyd J.E. (1980) Ecology of colors of firefly bioluminescence. *Science*, 210 : 560–562.
- [35] Lall A.B. (1981) Vision turned to species bioluminescence emission of firefly *Photinus pyralis*. *Journal of Experimental Zoology*, 216 : 317–319.

- [36] Lall A.B. (1981) ERG and the spectral sensitivity of the compound eyes in the firefly *Photinus versicolor* (Coleoptera: Lampyridae) : a correspondence between green sensitivity and species bioluminescence emission. *Journal of Insect Physiology*, 27 : 461–468.
- [37] Lloyd J.E. (2006) Stray light, fireflies and fireflyers. pp. 345–364. In: *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting* (Rich C. and Longcore T. eds.). Island Press.
- [38] Lockwood R., Selwyn T. and Morgan-Taylor M. (2011) A Review of Local Authority Road Lighting Institution Aimed at Reducing Costs, Carbon Emission and Light Pollution: Report for Dfra Temple Group, London.
- [39] Longcore T. and Rich C. (2004) Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2 (4) : 191–198.
- [40] Luarte T., Bonta C.C., Eilva-Rodriguez E.A., Quijón P.A., Miranda C., Farias A.A. and Duarte C. (2016) Light pollution reduces activity, food consumption and growth rates in a sandy beach invertebrate. *Environmental Pollution*, 218 : 1147–1153.
- [41] MacGregor C.J., Pocock M.J.O., Fox R. and Evans D.M. (2015) Pollination by nocturnal Lepidoptera, and the effects of light pollination: a review. *Ecological Entomology*, 40 : 187–198.
- [42] 南喜市郎 (1961) ホタルの研究. 321p., 太田書店. (ホタルの研究 (復刻), (1983), 339p., サイエンティスト社).
- [43] 水戸市立国田中学校生物研究部 (2007) ゲンジボタルの育成条件と生残率 3 – 上陸、羽化、産卵における光の影響 Part 2 –.
<http://www.magokoro.ed.jp/kunita-e/statics/hotaru-hogo/hotaruh19.pdf>
- [44] 水戸市立国田中学校生物研究部 (2008) ゲンジボタルの育成条件と生残率 4 – 成育における温度の影響と生殖における光の影響 –.
<http://www.magokoro.ed.jp/kunita-e/statics/hotaru-hogo/h20hotaru.pdf>
- [45] 宮下衛 (2009) ゲンジボタル・ヘイケボタル幼虫に対する LED 照明の影響. 土木学会論文集, G 65 (1) : 1–7.
- [46] 中川七三郎・岡地真作・小林和久・松井進一・嶋梯司 (1998) ホタル保護灯について. 全国ホタル研究会誌, 31 : 10–12.
- [47] Nemeč S.J. (1969) Use of artificial lighting to reduce *Heliothis* spp. population in cotton fields. *Journal of Economic Entomology*, 62 : 1138–1140.
- [48] Nicholas M. (2001) Light pollution and marine turtle hatchlings: the straw that breaks the camel's back? *George Wright Forum* 18 (4), 77–82.
- [49] 大場信義 (1986) ホタルのコミュニケーション. 241 p., 東海大学出版会 (動物その適応戦略と社会 16).
- [50] 大場信義 (1988). ゲンジボタル. 198p., 文一総合出版.
- [51] 大場信義・圓谷哲男・本多和彦・村田省平・大森雄治 (1993) 北海道釧路湿原と厚岸のヘイケボタルの生態. 横須賀市博物館研究報告 (自然科学), 41 : 15–26.
- [52] 大場信義 (1995) 巻頭言「ホタルと人工照明」. 沼津ホタル研究会会報, 31 : 1.
- [53] 大場信義 (2002) ホタル類のコミュニケーションと人工照明. 日本環境動物昆虫学会誌, 13 (2) : 67–76.
- [54] Ohlberger J., Mehner T., Staaks G. and Hölker F. (2008) Is ecological segregation in a pair of sympatric coregonines supported by divergent feeding efficiency? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 65: 2105–2113.
- [55] 岡本孝人・野々口逸史 (2006) 泉の杜・清水緑地の照明設備 – ホタル保護灯の納入事例 –. IWASAKI 技報, 14 : 59–62.

- [56] 大木美苗・木内香織・田口万理・加藤飛香・芹沢恵美・大竹和男 (1997) ホタルと人工照明との相関関係について. 全国ホタル研究会誌, 30 : 9–12.
- [57] 大木美苗・木内香織・田口万理・加藤飛香・芹沢恵美・大竹和男 (1998) ホタルと人工照明との相関関係について II – 光色とホタル明滅の関係. 全国ホタル研究会誌, 31 : 7–9.
- [58] 大竹和男 (1997) 「ホタルと人工照明との相関関係」についてのアンケート報告. 全国ホタル研究会誌, 30 : 7–30.
- [59] Pawson S.M. and Bader M.K.F. (2014) LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature. *Ecological Applications*, 24 (7) : 1561–1568.
- [60] Perkin E.K., Hölker F., Richardson J.S., Sadler J.P., Wolter C. and Tockner E. (2011) The influence of artificial light on stream and riparian ecosystems: questions, challenges, and perspectives. *Ecosphere*, 2 (11) : 1–16.
- [61] Perkin E.K., Hölker F., Tockner K. and Richardson J.S. (2014) Artificial light as a disturbance to light-naïve streams. *Freshwater Biology*, 59 : 2235–2244.
- [62] Picchi M.S., Avolio L., Azzani L., Brombin O. and Camerini G. (2013) Fireflies and land use in an urban landscape: the case of *Luciola italica* L. (Coleoptera: Lampyridae) in the city of Turin. *Journal of Insect Conservation*, 17 (4) : 797–805.
- [63] Poulin C., Bruyant F., Laprise M-H., Cockshutt A.M., Vandenhecke J.M.R. and Huot Y. (2014) The impact of light pollution on diel changes in the photophysiology of *Microcystis aeruginosa*. *Journal of Plankton Research*, 36 : 286–291.
- [64] Rich C. and Longcore T. (2006) *Ecological Consequence of Artificial Night Lighting*. Island Press, Washington DC.
- [65] Riley W.D., Bendall B., Ives M.J., Edmonds N.J. and Maxwell D.L. (2012) Street lighting disrupt the diel migratory pattern of wild Atlantic salmon, *Salmo salar* L. smolts leaving their natal stream. *Aquaculture*, 330–333 : 74–81.
- [66] Riley W.D., Davidson P.I., Maxwell D.L., Newman R.C. and Ives M.J. (2015) A laboratory experiment to determine the dispersal response of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fry to street light intensity. *Freshwater Biology*, 60 : 1016–1028.
- [67] Riordon D.E. (1964) High-intensity flash discharge as a source of radiant energy for sterilizing insects. *Nature*, 204 : 1332.
- [68] Rivera G. and Borchert R. (2001) Induction of flowering in tropical trees by a 30-min reduction in photoperiod: evidence from field observation and herbarium collections. *Tree Physiology*, 21 : 201–212.
- [69] Rodríguez A., Holmes N.D., Ryan P.G., Wilson K-J., Faulquier L., Murillo Y., Raine A.F., Penniman J., Neves V., Rodríguez B., Negro J.J., Chiaradia A., Dann P., Anderson T., Metzger B., Shirai M., Deppe L., Wheeler J., Hodum P., Gouveia C., Carmo V., Carreira G. P., Delgado-Alburqueque L., Guerra-Correa C., Couzi F.X., Travers M. and Le Corre M. (2017) A global review of seabird mortality caused by land-based artificial lights. *Conservation Biology*, DOI: 10.1111/cobi.12900.
- [70] Rowse E.G., Lewanzik D., Stone E.L., Harris S. and Jones G. (2016) Dark Matters: The Effects of Artificial Lighting on Bats. pp. 187–213. In: *Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World* (Voigt C.C. and Tigga K. eds). Springer International Publishing.
- [71] Schoeman M.C. (2016) Light pollution at stadiums favors urban exploiter bats. *Animal Conservation*, 19 : 120–130.
- [72] Seliger H.H., Buck J.B., Fastie W.G. and McEkroy W. (1964) The spectral distribution

- of firefly light. *Journal of General Physiology*, 48 : 95–104.
- [73] Seliger H.H., Lall A.B., Lloyd J.E. and Biggley W.H. (1982) The colors of firefly bioluminescence I. Optimization model. *Photochemistry and Photobiology*, 36 : 673–680.
- [74] Seliger H.H., Lall A.B., Lloyd J.E. and Biggley W.H. (1982) The colors of firefly bioluminescence II. Experimental evidence for the optimization model. *Photochemistry and Photobiology*, 36 : 681–688.
- [75] 篠原功太・渡辺亮一・山崎惟義・伊豫岡宏樹 (2010) ゲンジボタル・ヘイケボタル幼虫の生息行動に照度が与える影響. 土木学会西部支部研究発表会, VII–043
- [76] Sower L.L., Shorey H.H. and Gaston L.K. (1970) Sex pheromones of noctuid moths. XXI. Light:dark cycle regulation and light inhibition of sex pheromone release by females of *Trichoplusia ni*. *Annals of the Entomological Society of America*, 63 : 1090–1092.
- [77] Stone E.L., Jones G. and Harris S. (2009) Street lighting disturbs commuting bats. *Current Biology*, 19 (13) : 1123–1127.
- [78] 竹内重信 (1985) 名古屋城外堀／ヒメボタル. 86p. エフエー出版, 名古屋.
- [79] Taylor H. and Cozens J. (2010) The effects of tourism, beachfront development and increased light pollution on nesting Loggerhead turtles *Caretta caretta* (Linnaeus, 1758) on Sal, Cape Verde Islands. *Zoologia Caboverdiana*, 1 (2) : 100–111.
- [80] Thancharoen A., Branham M.A. and Lloyd J.E. (2008) Building twilight sensors to study the effects of light pollution on fireflies. *American Biology Teacher*, 2 : 6–12.
- [81] 塚本康太・辻和希 (2016) 沖縄本島に生息する2種のホタル：クロイワボタル *Luciola kuroi* wae, オキナワスジボタル *Curtos okinawanus* 成虫の野外における季節消長と日消長. *保全生態学研究*, 21 (2) : 193–201.
- [82] van Geffen K.G., van Grunsven R.H.A., van Ruijven J., Berendse F. and Veenendaal E.M. (2014) Artificial light at night causes diapause inhibition and sex-specific life history changes in a moth. *Ecology and Evolution*, 4 : 2082–2089.
- [83] van Geffen K.G., Van Eck E., De Boer R., van Grunsven R.H.A., Salis L., Berendse F. and Veenendaal E.M. (2014) Artificial light at night inhibits mating in a Geometrid moth. *Insect Conservation and Diversity*, 8 : 282–287.
- [84] van Geffen K.G., Groot A.T., van Grunsven R.H.A., Donners M., Berendse F. and Veenendaal E.M. (2015) Artificial night lighting disrupts sex pheromone in a noctuid moth. *Ecological Entomology*, 40 : 401–408.
- [85] 矢島稔 (2000) わたしの昆虫記② ホタルが教えてくれたこと. 187p., 偕成社.
- [86] 遊磨正秀・小野健吉 (1985) ゲンジボタル成虫の発生活動と羽化数推定—琵琶湖疏水の場合—. 横須賀市博物館研究報告, 33 : 1–11.
- [87] 遊磨正秀 (1993) ホタルの水、人の水. 204p., 新評論.
- [88] 遊磨正秀 (2001) ゲンジボタル成虫の生息密度におよぼす照度と樹冠被度の影響. *応用生態工学*, 4 (1) : 59–63.