

ニホンツキノワグマが作った小規模林冠ギャップは
林内の光環境をどの程度改変するのか？
—照度センサを使った階層別光環境の
モニタリング手法の開発とその評価—

How do Small Canopy Gaps Created by Japanese Black Bears
Improve Light Conditions in Forests?
Development and Evaluation of a Method for Monitoring Light Conditions
at Each Forest Layer by Using Illuminance Sensors

高橋 一 秋* 高橋 香 織**

Kazuaki TAKAHASHI Kaori TAKAHASHI

はじめに

アジア大陸に起源を持つとされるツキノワグマ (*Ursus thibetanus* G. Cuvier, 1823) の分布は広く、ロシアを北端、タイ、ラオス、ベトナム、カンボジアなどの東南アジア半島部を南端、イラン、アフガニスタン、西端、海南島を含む中国、日本、台湾を東端とする。日本の本州と四国 (九州は絶滅した可能性がかなり高い) に分布するやや小型のニホンツキノワグマ (*Ursus thibetanus japonicus* Schlegel, 1857) (図-1) は大陸のツキノワグマの亜種として分類されており、遺伝的にも極めて大きな違いがあるとされる (大井 2009)。

ニホンツキノワグマはブナ科の堅果やサクラ属の果実を採食する際に樹木に登り、枝を折って枝先の堅果や果実を樹上で採食する習性を持つ (図-2)。この過程で枝が物理的に破壊されることから、林冠部分に小規模な林冠ギャップ (Gap) が形成される。その際にクマは折った枝を、尻の下に敷き詰めて、安定した腰かけのようなものを樹上の枝の又に作る事がしばしば観察される。この枝の塊は樹上に作

られた「棚」のように見えることから、日本では一般的に「クマ棚」と呼ばれる (図-3)。このような枝折りを伴う樹上の堅果や果実の採食行動や「クマ棚」を形成する行動を大陸のツキノワグマや他のクマの仲間 (ヒグマ、ホッキョクグマ、アメリカクロクマ、マレーグマ、ナマケグマ、メガネグマ、ジャイヤン



図-1 行動を共にする3頭のニホンツキノワグマ (軽井沢町・長倉山国有林、2014年10月15日撮影)

*環境ツーリズム学部准教授

**クマ棚ネットワーク

トパンダ) が持つかどうかについては全く不明であり、これまでに学術論文などで報告された例は一つもない。小規模林冠ギャップやクマ棚を形成するのは、ニホンツキノワグマ固有の行動である可能性も



Bushnell 070°F ● 07-08-2011 20:18:46

図-2 ヤマザクラに登るクマ (軽井沢町・長倉山国有林、2011年7月8日撮影)



図-3 クリの樹上に作られたクマ棚 (上: 横からの眺め、下: 同じクマ棚の斜め上からの眺め、クリ [地点C、個体No.2]、軽井沢町・長倉山国有林、2013年6月9日撮影)

あるだろう。

「林冠ギャップ (林冠層の物理的な空隙) の形成は林床の光環境を改善し、実生や稚樹の成長を促進することによって森林を構成する樹木の更新 (世代交代) に重要な役割を果たす」とするギャップダイナミクス理論は、1980年代以降、世界各国の森林で検証され、現在でも極相林や成熟した広葉樹林の維持メカニズムを説明する有力な学説として支持されている (真壁 2011)。しかしながら、この理論が対象とする林冠ギャップは、寿命・被圧による林冠木の枯死や、台風などによる林冠木の倒伏・幹折れ・枝落ちといった自然攪乱に起因するものが中心であり、林冠木と森林に生息する野生鳥獣との間に働く「生物間相互作用」の結果として形成される林冠ギャップに着目されることは皆無であった。筆者らは、ニホンツキノワグマが樹上で枝を折りながら堅果や果実を採食する際に形成される小規模林冠ギャップ (図-4) に世界で初めて着目する。

Takahashi and Takahashi (2013) は、軽井沢町長倉山国有林 (25.5haプロット) で行った5年間 (2006年9月~2010年9月) のフィールド調査によって、成熟した落葉広葉樹林に自生するミズナラ、クリ、コナラなどの広葉樹10種にクマ由来の小規模林冠ギャップが形成されることを明らかにした。そのギャップ面積は、最小でミズナラの0.7m²、最大でコナラの36.2m²であり、クマ棚発生密度が最も高い尾根の環境において小規模林冠ギャップの積算面積は、年間1haあたり141.3m²にも達した。同じ調査地の尾根環境で、この面積を自然に形成された倒伏・幹折れ由来の林冠ギャップ面積と比較したところ、驚くことに約6.6倍にも及んだ。また、Takahashi *et al.* (2015) は、同じ調査地において、クマ由来の小規模林冠ギャップを持つミズナラと持たないミズナラの樹冠下の光環境 (相対光合成有効光量子束密度: rPPFD [relative Photosynthetic Photon Flux Density]) と出現する液果植物の結実状況を調査したところ、小規模ギャップ面積の大きい樹木の樹冠下ほど光環境は改善され、その効果は下の階層に行くほど小さくなることと、つる性木本や高木種のように林冠層に分布する樹木の結実については、小規模林冠ギャップの形成による光環境の改善によって促進されることを明らかにした。以上のように、筆者らの研究によって、クマ由来の小規模林冠ギャップはその樹冠下に出現する液果植物の繁殖 (開花・



図-4 ニホンツキノワグマがミズナラの樹冠部分に作った小規模林冠ギャップ（上：樹冠中からの眺め、下：階層5mからの眺め、ミズナラ〔地点B、個体No.4〕〔表-1〕、軽井沢町・長倉山国有林、2015年10月3日撮影）

結実)を促進させる一つの要因になることが解明された。

しかし、クマ由来の小規模林冠ギャップは樹木1本の倒伏・幹折れ由来の林冠ギャップと比べると面積が小さいため、直ちに林冠ギャップの修復が起り、一度改善された林内の光環境も長期的には持続しないことが予想される。したがって、クマ由来の小規模林冠ギャップの役割を理解する上で、林冠

ギャップの修復に伴う林内の光環境の変化を階層別に把握することは重要である。一般的に、林冠ギャップ下の光環境を定量化する場合には、林床から1m程度の高さで撮影した全天空写真を使って相対光合成有効光量子束密度 (rPPFD) を算出する方法が用いられる (Schliemann and Bockheim 2011)。この方法をクマ由来の小規模林冠ギャップに応用することもできるが (Takahashi *et al.* 2015)、小規模林冠ギャップの閉鎖に伴う光環境の微妙な移り変わりを階層別に長期間モニタリングする場合には適さない。なぜならば、定期的に木に登って各階層の全天空写真を撮影し続けなければならないからである。この点を克服する方法としては、データロガー機能を持つセンサが有効であろう。

本研究は、データロガー機能を持つセンサを用いて、林内の光環境を階層別にモニタリングする手法を開発するとともに、その手法を用いて実際に調査を行うことで開発したモニタリング手法の有効性を評価することを目的とする。

方法 調査地

フィールド調査は、浅間山 (標高 2568m) 山麓に位置する長倉山国有林 (長野県軽井沢町) の落葉広葉樹林で行った。調査地から約 12km 離れた地点の軽井沢観測所で記録された気象データ (2012年7月～2015年6月) によると (「過去の気象データ検索 (気象庁)」、http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=48&block_no=47622、2015年9月30日確認)、この地域の年間平均気温は8.6°C (最大: 33.5°C、最小: -15.8°C)、年間平均降水量は1112.1mm、最大積雪深の平均は26.5cmであった。

調査地に優占する樹種はミズナラ *Quercus crispula* Blume [Mongolian oak]、クリ *Castanea crenata* Siebold et Zucc. [Japanese chestnut]、コナラ *Q. serrata* Murray [Japanese white oak] であり、ミズナラは胸高断面積合計の25.8%、クリは20.2%、コナラは3.9%を占めた。調査地に分布するその他の樹種は、被食散布植物のハリギリ *Kalopanax septemlobus* (Thunb.) Koidz. (胸高断面積合計に占める割合: 2.9%)、ミズキ *Cornus controversa* Hemsl. ex Prain (1.9%)、ヤマザクラ *Cerasus jamasakura* (Siebold ex Koidz.) H. Ohba (1.7%)、ウワミズザクラ *Padus grayana* (Maxim.)

C.K.Schneid. (1. 1%)、アオハダ *Ilex macropoda* Miq. (0. 7%)、コシアブラ *Chengiopanax sciadophylloides* (Franch. et Sav.) C.B.Shang et J.Y.Huang (0. 9%)、カスミザクラ *Cerasus leveilleana* (Koehne) H.Ohba (0. 6%)、ホオノキ *Magnolia obovata* Thunb. (0. 5%) に加え、風散布植物のハルニレ *Ulmus davidiana* Planch. var. *japonica* (Rehder) Nakai (8. 0%)、アカマツ *Pinus densiflora* Siebold et Zucc. (7. 9%)、ケヤマハンノキ *Alnus hirsuta* (Spach) Turcz. ex Rupr. var. *hirsuta* (4. 4%)、イタヤカエデ *Acer pictum* Thunb. (3. 1%)、オオモジ *Acer amoenum* Carrière (2. 0%)、コハウチワカエデ *Acer sieboldianum* Miq. (0. 7%) であった。

環境省版レッドリストでニホンツキノワグマは北半島、紀伊半島、東中国地方、西中国地方、四国、九州の個体群に限って「絶滅のおそれのある地域個体群 (LP)」にされているが、調査地を含む長野県東部の越後・三国山地は本州の中でも生息数の多いコアエリアの一つと考えられており、生息密度は約 3. 3-3. 9頭/km²と推定される (岸元・佐藤 2008)。

調査木の選定

長倉山国有林 (25. 5 haプロット) 内からクマ由来の「小規模林冠ギャップを持つ個体」と「小規模林冠ギャップを持たない個体」が約30mの距離に近接して1本ずつ確保できる地点を3つ選び出した。地点A (北緯36° 22' 51"、東経138° 37' 53"、標高1140m)と地点B (北緯36° 23' 06"、東経138° 36' 22"、標高1130m) はミズナラ、地点C (北緯36° 22' 44"、東経138° 38' 02"、標高1152m) ではクリの調査対象木を選定した。調査対象木の詳細は表-1に示す。

光環境のモニタリング手法の開発

照度 (単位 : lumen/ft²) を自動で計測できるデータロガー (HOBOペンダントシリーズ温度/照度2ch [CO-UA-002-64]) を用いて、林内の光環境を階層別にモニタリングできるシステムの開発を2011年7月~2015年7月の期間に試みた。以下に、開発したシステムの内容をまとめる。林内の光環境を階層別に正確に計測するためには、照度センサを各階層に水平に固定する必要がある。約12mの細いナイロン製のロープ (直径3mm) を樹冠部分から林床に垂直に垂らし、樹上の枝と地面にしっかりと固定したのち、ゴム付きの照度センサをロープに沿って各階層に銅製の針金で固定した (図-5)。あらかじめ、電気ドリルで直径7mmの穴を開けた円柱形のゴム (直径5cm ×長さ5cm) に銅製の針金で照度センサを固定しておいた。樹冠の外の照度センサについては、長さ2mの塩化ビニールパイプ (直径2. 5cm) をジョイントでつないで作った4mの支柱の先端に、電気ドリルで直径7mmの穴を開けて銅製の針金で固定し、塩化ビニールパイプが垂直に立つように枝にゴム紐と綿のロープで固定した (図-6)。これらの照度センサは木登り用具 (ハーネス、ザイル、登高器、下降器など) を使って調査木に登って設置した (図-7)。なお、はじめは直径2cmの塩化ビニールパイプを使用していたが、支柱が曲がるトラブルが発生したため (図-8)、翌年から直径2. 5cmの塩化ビニールパイプに変更した。また、下の階層に設置した照度センサは動物にかじられ破壊されることがあったが (図-9)、このようなアクシデントを回避する有効な手立てを開発することはできなかった。その他にも、予想外の電池切れやデータの上書き消去などのアクシデントが発生する場合もあった。

林内での照度の変化を細かく記録するために、照度センサの計測インターバルをはじめは5分 (計測期間 : 100日) に設定したが、その後は、15分 (計測期

表-1 調査対象の樹木の種類・本数・樹高、照度センサを設置した各階層の高さ、照度センサの設定期間

地点	個体No	樹種	小規模林冠Gap	樹高 (m)	各階層の高さ (m)				照度センサの設置期間	
					0.5m	2m	5m	樹冠下 樹冠中		
A	No.1	ミズナラ	なし	16.5	0.5	2	5	8	12	2012年5月14日~2015年7月27日
A	No.2	ミズナラ	あり	12.8	0.5	2	5	8	11	2012年5月5日~2015年7月27日
B	No.3	ミズナラ	なし	14.0	0.5	2	5	-	10	2013年5月6日~2015年7月20日
B	No.4	ミズナラ	あり	15.9	0.5	2	5	-	9	2013年5月5日~2015年7月20日
C	No.1	クリ	なし	17.3	0.5	2	5	8	11	2013年6月10日~2015年7月27日
C	No.2	クリ	あり	15.9	0.5	2	5	8	12	2013年6月10日~2015年7月27日



図-5 樹冠部分から林床に垂直に張られたロープの各階層に固定された照度センサ (上: ミズナラ [地点A、個体No.1]、下: ミズナラ [地点A、個体No.2] [表-1]、2012年5月13日撮影)



図-6 塩化ビニールパイプの支柱に先端に固定され樹冠外に設置された照度センサ (ミズナラ [地点B、個体No.4] [表-1]、上: 2013年5月5日撮影、下: 2012年5月13日撮影)

間: 301日)、20分 (計測期間: 402日)、30分 (計測期間: 620日) と徐々に延ばした。本研究のように、各階層の照度を樹冠の外の照度との相対値で求め、小規模林冠ギャップを持つ個体と持たない個体の樹冠下の光環境を比較するような場合においては、30分のインターバルでも問題のないことが確認できた。

開発した光環境モニタリング手法の検証

4年間かけて開発した光環境モニタリング手法の有効性を評価するために、この開発期間中に得られた照度データの分析を試みた。クマ由来の小規模林冠ギャップを持つ・持たないミズナラ（計4本）およびクリ（計2本）の樹冠下の各階層（地上高0.5m、2m、5m、および樹冠下部[8m]、樹冠中部[9~12m]、



図-7 木登りの様子（上：樹冠部分に取りついて調査を開始する筆者、下：樹冠部分から垂れ下がるザイルを伝って登る様子、ミズナラ〔地点B、個体No.4〕〔表-1〕、2011年7月26日撮影）

樹冠の外〔樹高+約1m：約13.8~18.3m〕において、2012年5月5日~2015年7月27日の期間に得られたデータを分析対象とした。この分析対象としたデータの計測インターバルは15分~30分である。なお、調査地は落葉広葉樹林であるため、春から初夏にかけての展葉期と晩夏から秋にかけての落葉期には林内の光環境が大きく変化する。そのため、調査地に自生している樹木の展葉が全て終わってから落葉がまだ始まっていない期間を7月1日~8月31日と考え、この2ヶ月のデータのみを分析対象とした。この対象期間中のデータ回収率は75.5%（回収：74セット、未回収：24セット〔動物による破壊、電池切れ、データ上書き消去などのアクシデント〕）であった。樹冠



図-8 樹冠外に設置した塩化ビニールパイプの支柱が曲がった様子（ミズナラ〔地点B、個体No.4〕〔表-1〕、2013年5月5日撮影）



図-9 階層0.5mに設置した照度センサが動物にかじられ破壊された様子（ミズナラ〔地点B、個体No.4〕〔表-1〕、2014年6月29日撮影）

の外のデータが得られなかった場合は、近接する調査対象木のデータを用いた。得られたデータを各月で上旬・中旬・下旬に分類し、各階層と樹冠の外における照度の平均値を求めたあと、樹冠の外の照度に対する各階層の相対照度(%)を求め、小規模林冠ギャップを持つ・持たない個体の樹冠下の光環境を比較した。

また、各年の9月に樹上に形成されたクマ由来の小規模林冠ギャップの面積を落枝計測法Dropped branch measurements (Takahashi and Takahashi 2013) を用いて推定した。

結果と考察

図-10に調査対象木のミズナラとクリの樹冠下に

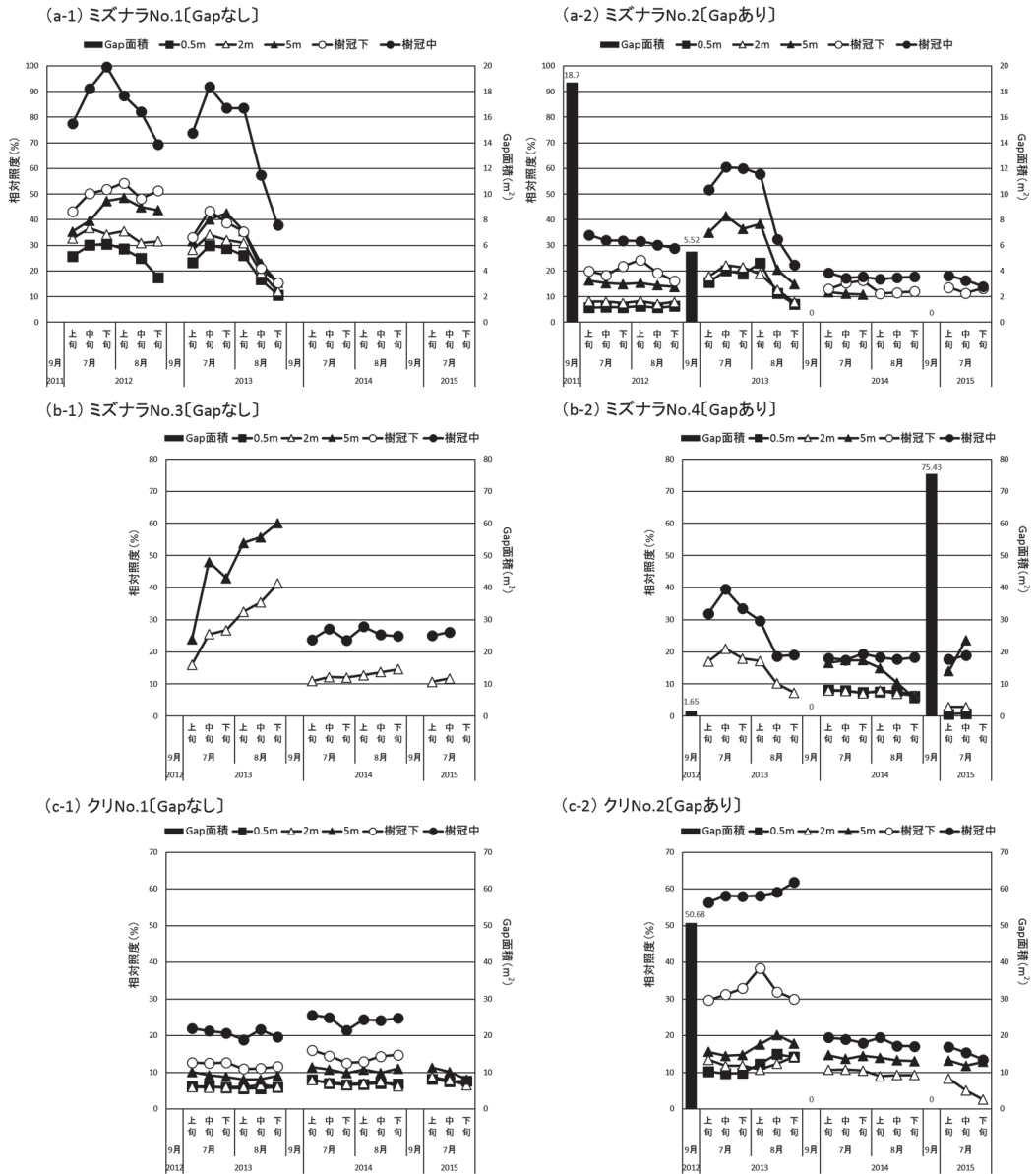


図-10 クマ由来の小規模林冠ギャップを持つ・持たないミズナラとクリの樹冠下における各階層の相対照度の変化および形成された小規模林冠ギャップの面積

における各階層の相対照度の時間的な変化および小規模林冠ギャップの面積を示す。

はじめに、小規模林冠ギャップを持たない個体の傾向をみてる (図10a-1, b-1, c-1)。ミズナラNo. 1の2012・2013年とミズナラNo. 3の2013年の相対照度は、ミズナラNo. 3の2014・2015年とクリNo. 1の2013～2015の値と比べ、明らかに高い傾向を示した。これは樹冠外に設置したセンサの支柱が曲がってしまい、樹冠の中に入り込んでしまったため、各階層の相対値が全体的に高くなってしまったことによると考えられる。このような支柱の曲がりのトラブルがなかったミズナラNo. 3の2014・2015年とクリNo. 1の2013～2015年の相対照度はいずれの階層でも安定的に推移している傾向がみられた。

次に、小規模林冠ギャップを持つ個体の傾向をみてる (図10a-2, b-2, c-2)。ミズナラNo. 2では、2012年9月に5.52m²の小規模林冠ギャップが形成され、その翌年には相対照度のピークは樹冠中で60.5% (7月中旬)、階層5mで41.4% (7月中旬) まで達したが、その年の8月下旬には前年とほぼ同程度の値まで減少し、その翌年から翌々年にかけてはほぼ同程度の値で推移した。ミズナラNo. 4では、2012年9月に1.65m²の小規模林冠ギャップが形成され、その翌年には相対照度のピークは樹冠中で39.5% (7月中旬)、階層2mで17.0% (7月中旬) まで達したが、その年の8月中旬には樹冠中で19.0% (7月中旬)、階層2mで7.3% (7月中旬) まで減少し、その翌年もほぼ同程度の値で推移した。このことから、ミズナラの場合、クマ由来の小規模林冠ギャップは、その翌年の秋までにほぼ閉鎖することが示唆された。クリNo. 2では、2012年9月に50.68m²の小規模林冠ギャップが形成され、その翌年には相対照度のピークは樹冠中で61.8% (8月中旬)、樹冠下で38.4% (8月上旬) まで達したのち、その年はほぼ横ばいで推移したが、その翌年の7月上旬には樹冠中で19.5%まで急激に減少した。その後、相対照度の値はほぼ横ばいで推移し、その翌年からは徐々に減少し始めた。したがって、ミズナラに比べ、林冠ギャップが作られた翌年の春から夏にかけて樹冠の閉鎖が急激に進行することが示唆された。なお、ミズナラ、クリともに、小規模林冠ギャップの形成による相対照度の増加は階層0.5mまで及んでいたが、その増加の度合いは高い階層ほど顕著に現れる傾向がみられた。

一方で、ミズナラNo. 2では、2011年9月に2012年9

月の約3.4倍 (18.70m²) の小規模林冠ギャップが形成されたが、その翌年に顕著な相対照度の増加がみられなかった。同様の傾向はミズナラNo. 4でも確認されており、2014年9月に75.43m²の小規模林冠ギャップが形成されたにもかかわらず、その翌年の相対照度の値は前年とほぼ同程度であった。この結果を林冠ギャップの形成による光環境の改善が起こらなかったためと解釈するのは無理があるだろう。同じ高さの階層でも少し場所がずれると葉の茂り具合に違いがみられる場合、照度センサを1つ設置しただけでは、樹冠全体の光環境のばらつきを拾い上げることが難しいことを示唆している。したがって、樹木1本の樹冠全体の照度を把握するためには複数のセンサを設置し、平均値や分散を求める必要があるだろう。

今回は、ニホンツキノワグマによってミズナラとクリの樹冠に作られた小規模林冠ギャップの樹冠下における林内の階層別光環境の特性とその後の変化を定量化するために、光環境のモニタリング手法を開発し、その手法を用いた実験を通じて、その手法の有効性を検証した。その結果、調査木のサンプル数が少ないながらも、クマ由来の小規模林冠ギャップが形成された翌年に、その樹冠下の相対照度が階層別によってどのように変化し、その後、それぞれの階層の相対照度が時間的にどのように変化するかの特徴を今回開発した手法によって把握できることが明らかになった。クマ由来の小規模林冠ギャップによる光環境改善の効果は翌年の1年間程度であることを明らかにできたことは、今後のクマ由来の小規模林冠ギャップの役割を評価する研究を進める上で大きな成果といえる。しかしながら、低木から林冠木までを構成する木本によって作られる複雑な階層構造の各階層の相対照度を一つのセンサで定量化することは困難であることも示唆された。林内の相対照度の複雑な空間分布を正確に定量化するためには、複数のセンサを設置することや、1つのセンサを葉の茂り具合が平均的な場所に設置するなどの工夫が必要であろう。今後は、一般的に林内や林冠ギャップの下の光環境を定量化する際に、全天空写真から算出される相対光合成有効量子密度 (ρ PPFD) の値と比較し、本研究で開発した手法から得たデータの特徴を明らかにしたい。

謝辞

本研究は科研費 (21780154、26450203) および長野大学研究助成金 (平成25年度) による助成を受けて実施された。フィールド調査にご協力いただいた吉田英正氏 (長野大学環境ツーリズム学部4年) に深く感謝したい。

引用文献

岸元良輔・佐藤繁 (2008) 長野県ツキノワグマ保護管理計画における生息数のモニタリングとその課題。哺乳類科学48 : 73-81。
真壁徹 (2011) 森林のギャップダイナミクス「森林生態学」共立出版p. 122-135。

大井徹 (2009) 分布から探る森との関係「ツキノワグマと森の生物学」東海大学出版会p. 24-26。

Schliemann SA, Bockheim JG (2011) Methods for studying treefall gaps: A review. *Forest Ecology Management*, 261:1143-1151.

Takahashi K, Takahashi K (2013) Spatial distribution and size of small canopy gaps created by Japanese black bears: estimating gap size using dropped branch measurements. *BMC Ecology*, 13:23.

Takahashi K, Takahashi K, Washitani I (2015) Do small canopy gaps created by Japanese black bears facilitate fruiting of fleshy-fruited plants? *PLOS ONE*, 10(7): e0130956.