

ブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林における葉面積指数の時空間変動

野中翔平^{1,2}・小坂泉³・大庭流維¹・須郷将貴³・川津侑大³・瀧澤英紀³・阿部和時³

1 日本大学大学院生物資源科学研究科

2 アジア航測株式会社

3 日本大学生物資源科学部

要旨：ブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林の葉面積指数 (*LAI*) の時空間変動を明らかにするため、2014年、2015年および2016年の4月から12月において樹冠を透過した光合成有効放射量の連続観測により *LAI* の連続データを作成した。3年間の7月から8月における *LAI* の平均値は約 $4.55 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ であった。暖春だった2015年および2016年の展葉開始日は、2014年のものよりも10日間程度早かった。12地点における *LAI* の測定結果では、標高が低い地点の *LAI* は、高い地点のものよりも最大で約2.3倍大きくなる傾向を示した。標高が低い地点では、標高が高い地点に比べ、展葉開始日が早くなり、落葉終了日は遅くなった。標高が高い地点での展葉開始日は、*LAI* にブナの占める割合が高いほど早くなる傾向を示した。

キーワード：葉面積指数、ブナ、空間変動、年々変動、フェノロジー

**Temporal and spatial variability of Leaf Area Index
in a cool-temperate deciduous broadleaf forest dominated by *Fagus crenata***

Shohei NONAKA^{1,2}, Izumi KOSAKA³, Rui OBA¹, Masaki SUGO³, Yudai KAWATSU³, Hideki TAKIZAWA³, Kazutoki ABE³

Graduate school of Bioresource Sciences, Nihon University, Fujisawa, Kanagawa 252-0880, Japan 1

Asia Air Survey Co., LTD, Kawasaki, Kanagawa 215-004, Japan 2

College of Bioresource Sciences, Nihon University, Fujisawa, Kanagawa 252-0880, Japan 3

Abstract: We investigated the temporal and spatial variability of Leaf Area Index (*LAI*) in a cool-temperate deciduous broadleaf forest dominated by *Fagus crenata*, using *LAI* data derived from continuous monitoring of canopy-transmitted photosynthetically active radiation collected from April–December 2014, 2015, and 2016. Mean *LAI* in July–August in all years was approximately $4.55 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. The onset of leaf flush in 2015 and 2016, which were characterized by warm springs, occurred approximately 10 days earlier than in 2014. *LAI* measurements across 12 plots indicated that *LAI* was as much as 2.3 times higher in lower altitude plots than in higher altitude plots. In addition, the onset of leaf flush occurred earlier, and the end of leaf fall occurred later, in low-altitude plots compared to high-altitude plots. In high-altitude plots, the onset of leaf flush generally occurred earlier as the percentage of *F. crenata* in *LAI* increased.

Key-word: Leaf Area Index, *Fagus crenata*, spatial variation, interannual variation, phenology

I はじめに

近年、気候変動による気温上昇が森林の生長や分布に与える影響が報告されている。斎藤ら (4) は、冷温帯落葉広葉樹林を対象に気候変動応答を予測した結果、展葉の早期化や落葉の晩期化に伴う生育期間の延長が炭素収支に顕著な影響を与えることを指摘している。松井ら (3) は気候変動に伴う気温上昇により本州のブナの分布確率が低下する予測を報告している。筆者らは、ブナが気候変動などの環境変化にどのように応答するかを現

地観測に基づいて実証的に明らかにすることは重要であると考え、群馬県北部のブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林において熱・水・CO₂交換量の連続観測を実施している (2)。

森林—大気間における熱・水・CO₂交換量を評価する上で重要なパラメータの一つである *LAI* (Leaf Area Index; 葉面積指数) は、単位面積あたりにおける葉の投影面積の総和 (単位: $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$) で示される。森林は一般に山地に多く、山地は傾斜面で構成されているため、斜面方位や

標高など地形要因などにより森林の *LAI* の面的分布は、大きな差異を生じる。特に落葉樹林の *LAI* を評価する上で、気象の年々変動などの影響により展葉・落葉のタイミングや生育期間が季節的に変動することが想定されるため、その長期連続データの取得が不可欠である。時間的にも空間的にも変動が大きい森林における *LAI* を精度高く評価するには、*LAI* の時空間変動要因を考慮した上で多地点における計測が必要になると考えられる。

本研究では、日本の冷温帯を代表するブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林を対象に、2014~2016年の3年間の長期モニタリングにより *LAI* の年々変動を明らかにするとともに、東西南北それぞれの方位の斜面において標高を考慮した多地点 (12 点) での *LAI* の連続観測を実施することで、対象林における *LAI* の空間変動を評価することを目的とした。

II 材料と方法

1. 調査地 調査地は群馬県利根郡みなかみ町の日本大学水上演習林 (36°48'N, 139°02'E, 標高 650-985 m) で、優占樹種はブナ (*Fagus crenata*) であり、その他の樹種としてミズナラ (*Quercus crispula*)、コナラ (*Quercus serrata*) などの落葉広葉樹が混在する平均樹高 15 m の二次林である。図-1 は、林床に透過した PAR (Photosynthetically Active Radiation; 光合成有効放射量) を計測した地点を示す。図-1 におけるラベルの頭文字のアルファベットは斜面方位 (東西南北) を、数字は方位ごとに山頂からの距離順を示す。多地点観測は、図-1 における白丸印の W0 地点に加えて、黒丸印の 11 地点において実施した。これらの地点は、斜面方位と標高を考慮して選定した。

2. *LAI* の測定 2014~2016 年の *LAI* の長期モニタリ

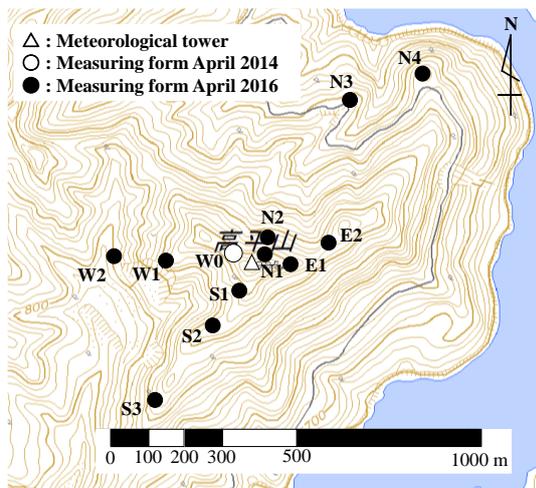


図-1. 観測地点の位置図

Fig. 1 Map of the study area showing plot locations.

ングについては、同演習林の最高標高地点 (高平山山頂, 標高 985m) において周辺の樹木の樹高より高くなる高さ 6 m の気象観測塔の上端に光量子センサー (PQS-1, Kipp & Zonen) を設置し、全天光合成有効放射量 (PAR_t) を計測した。山頂から西へ 100m 程度離れた地点 (W0) において、積雪と下層植生の影響を受けないように建設された高さ 2 m の林床観測塔の先端に葉面積指数センサー (MIJ-15, 日本環境計測) を設置し、林床 PAR (PAR_i) を計測した。 PAR_t および PAR_i については、10 秒毎に出力されるデータを 10 分平均した値をデータロガー (CR1000, Campbell) に記録した。気温は観測塔の頂上に温度センサー (CS107, Campbell) を設置し、データロガー (CR1000, Campbell) に記録した。

多地点 (W0 以外) における PAR_t の観測については、展葉前の 2016 年 4 月上旬から、下層植生より高くなる高さ 1 m 程度の L 字アングルの先端に光量子センサー (PAR02N, Prede) を設置し、1 秒毎に出力されるデータを 10 分平均した値をデータロガー (LR5041, Hioki) に記録した。多地点の *LAI* の算定に用いる PAR_t の測定では、山頂の気象観測塔において光量子センサー (PAR02N, Prede) とデータロガー (LR5041, Hioki) を用いた。

リタートラップによる *LAI* の算定は、以下のように行なった。 PAR_t の測定箇所そばに設置したリタートラップ (採取面積: 0.5 m²) で収集した落葉を樹種ごとに分け、各樹種の葉乾燥重量に対する葉面積の比 (SLA; Specific Leaf Area) を求め、その値に乾燥させた各樹種の葉の総重量を乗じることで *LAI* を求めた。残存している *LAI* は、落葉期に収集した落葉の総量から求められる *LAI* から落葉した *LAI* を差し引くことで算定されるが、リタートラップ内の落葉の回収頻度は月 1 回程度としたため、この手法では *LAI* の散在したデータしか得られない。そこで本研究では、*LAI* の連続データを次式より推定した (6)。

$$LAI = -\frac{1}{k} \cdot \ln \left(\frac{PAR_t}{PAR_i} \right) - b \quad (1)$$

ここで、 k は吸光係数、 b は林床の光環境における幹や枝の寄与を表す定数であり、 PAR_t および PAR_i はそれぞれの日積算値を用いた。未知パラメータである k および b は、リタートラップの設置日および落葉を回収した日の樹冠透過率 $[-\ln (PAR_t/PAR_i)]$ と、それらの日に残存している *LAI* の関係から線形回帰して求めた。図示しないが、各地点において、 $-\ln (PAR_t/PAR_i)$ と *LAI* の関係における決定係数は 0.9 以上であり、両者に高い相関性が認められた。ただし、Yoshihujii *et al.* (6) は 4 年間のデータセットを用いて k と b を決定していることから、本試験地においても両者の測定データを蓄積し、未知パラメータの妥当

性について検討する必要があると考えている。

本研究では、樹冠完成時とみなせる7月から8月における *LAI* の平均値に対する3日間移動平均した *LAI* の比率を用いて、展葉および落葉のフェノロジーの属性値を以下のように設定した。

- ・展葉開始日：20%を上回り続けた最初の日
- ・展葉終了日：80%を上回り始めた日
- ・落葉開始日：80%を下回り続けた最初の日
- ・落葉終了日：20%を下回り始めた日

着葉期間は、開葉開始日から落葉終了日までの日数として算出した。

III 結果と考察

1. *LAI* の年々変動 図-2は、W0 地点における a) 2014年、b) 2015年およびc) 2016年の *LAI* の経時変化を示し、表-1は、2014年から2016年における展葉・落葉フェノロジーの属性値を示す。7月から8月における *LAI* の平均値は、2014年では $4.34 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ 、2015年では $4.66 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ 、2016年では $4.64 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ であり、3年間に亘って概ね同程度（3年間の平均値： $4.55 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ）であったが、2014年のものが若干小さかった。

2014年の展葉開始日は、2015年および2016年のものに比べ、9日間遅かった。展葉日数は、3年間に亘ってそれぞれ概ね同じ日数であった。2015年と2016年の落葉開始日はそれぞれ10月16日と17日であり、2014年のものよりも10日間程度遅かった。2016年の落葉終了日は、2014年のものよりも2週間程度遅かった。着葉期間については、2016年のものが2014年のものよりも2

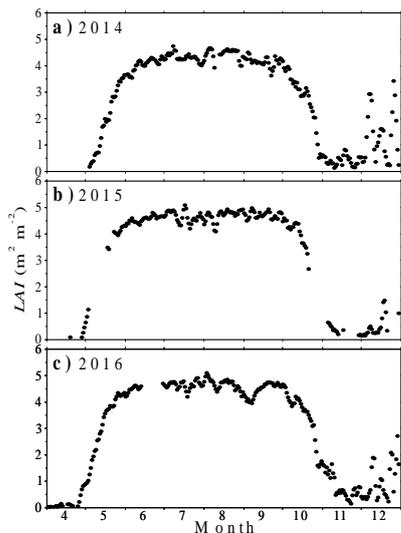


図-2. W0 における a) 2014年、b) 2015年および c) 2016年の *LAI* の経時変化

Fig. 2 Annual time series of Leaf Area Index (*LAI*) in the W0 plot.

週間程度長かった。展葉期および落葉期における *LAI* の経時変化を図-3 a1)および a2)に示し、5°C以上および15°C以下の積算気温を図-3 b1)および b2)示す。白丸は2014年、×は2015年、黒丸は2016年のデータを示す。本研究において展葉期の積算気温 (CT_f) および落葉期の積算気温 (CT_d) を以下の式より算出した。

$$CT_f = \sum_{i=i_0}^n \max (T_i - T_t, 0) \quad (2)$$

$$CT_d = \sum_{i=i_0}^n \max (T_t - T_i, 0) \quad (3)$$

ここで、 i_0 は起算日であり、展葉期では3月1日、落葉期では9月1日とした。 T_t は閾値であり、展葉期では5°C、落葉期では15°Cを用いた。 T_i は各日の日平均気温である。

図-3 a1) において、2015年と2016年の展葉開始日は、2014年のものよりも早かったことが見てとれる。図-3 b1) において、2015年と2016年の春先の気温は、2014年のものよりも高いことが見てとれる。この要因については、2014年夏から2016年春かけてエルニーニョ現象が発生したことで (1)、2015年および2016年にお

表-1. W0 における展葉・落葉フェノロジーの属性値

Table 1. Leaf phenology traits in the W0 plot.

Year	Leaf flushing			Leaf fall			Leaf duration (days)	Mean <i>LAI</i> in July-August ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$)
	Start	End	Duration (days)	Start	End	Duration (days)		
2014	12-May	29-May	17	7-Oct	29-Oct	22	170	4.34
2015	3-May	20-May* 1</td <td>17</td> <td>16-Oct</td> <td>25-Oct*2</td> <td>9</td> <td>175</td> <td>4.66</td>	17	16-Oct	25-Oct*2	9	175	4.66
2016	3-May	19-May	16	17-Oct	11-Nov	25	192	4.64

*1: 欠測のため、5/19と5/23における *LAI* を直線補間して求めた。

*2: 欠測のため、林床から樹冠の状況を撮影したカメラの画像より判断した。

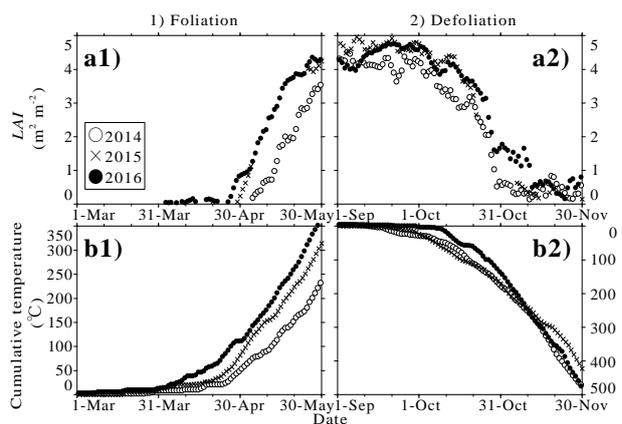


図-3. 1) 3月から5月および 2) 9月から11月における a) *LAI* と b) 積算気温の経時変化

Fig. 3 Time series of (a) Leaf Area Index (*LAI*), and (b) cumulative temperature in (1) March–May (left panels) and (2) September–November (right panels).

Note: (b1) When daily mean temperatures were above 5°C, cumulative temperature was calculated as daily mean temperature - 5. (b2) When daily mean temperatures were below 15°C, cumulative temperature was calculated as 15 - daily mean temperature.

表-2. 12 地点における展葉・落葉フェノロジーの属性値

Table 2. Leaf phenology traits in the 12 plots.

Plot	Altitude (m)	Leaf flushing			Leaf fall			Leaf duration (days)	LAI (m ² m ⁻²)	Percentage of <i>F. crenata</i> in LAI (%)
		Start	End	Duration (days)	Start	End	Duration (days)			
W0	972	3-May	20-May	17	16-Oct	11-Nov	26	192	4.74	60.30
N1	968	3-May	18-May	15	26-Oct	9-Nov	14	190	4.79	49.90
E1	964	5-May	16-May	11	14-Oct	14-Nov	31	193	2.77	42.72
S1	958	1-May	20-May	19	21-Oct	11-Nov	21	194	3.78	73.04
E2	939	4-May	17-May	13	24-Oct	16-Nov	23	196	5.05	51.18
N2	937	2-May	15-May	13	27-Oct	9-Nov	13	191	4.36	74.03
S2	936	28-Apr	12-May	14	15-Oct	6-Nov	22	192	3.99	87.11
W1	933	3-May	16-May	13	23-Oct	11-Nov	19	192	4.99	62.78
S3	870	8-May	24-May	16	18-Oct	13-Nov	26	189	3.79	14.81
W2	822	27-Apr	13-May	16	13-Oct	15-Nov	33	202	6.28	82.51
N4	793	27-Apr	16-May	19	27-Oct	17-Nov	21	204	5.98	74.45
N3	785	26-Apr	12-May	16	25-Oct	16-Nov	22	204	5.25	17.80

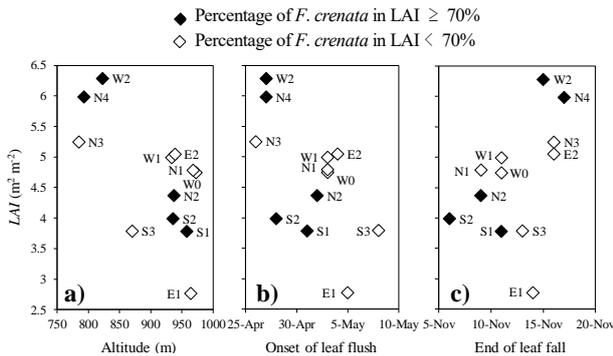


図-4. 12 地点における LAI と a) 標高, b) 展葉開始日および c) 落葉終了日の関係

Fig. 4 Relationships between Leaf Area Index (LAI) in the 12 plots and (a) altitude, (b) onset of leaf flush, and (c) end of leaf fall.

いて気温が上昇した影響によるものと考えられる。2015 年と 2016 年の展葉開始日が 2014 年のものよりも早かったことについても、2015 年および 2016 年における気温が 2014 年のものよりも高かったことに起因していると考えられる。

図-3 b2) では、2016 年における 10 月の気温は、2014 年と 2015 年のものよりも高かったことが見てとれる。Schwartz (5) は、落葉は展葉とは異なり、気温だけではなく、夏の乾燥、日長、老化など様々な要因により起こる現象であることを指摘している。本試験においても、落葉に与える影響を、気温のみで説明することは難しく、他の要因 (例えば、強風の影響) があると考えられた。

2. LAI の空間変動 表-3 は、12 地点における展葉・落葉フェノロジーの属性値を示す。表-3 より、LAI の最大値は W2 において 6.28 m² m⁻²、その最小値は E1 において 2.77 m² m⁻²であった。W0 と W2 は、同じ斜面方位であるが、両者の LAI に 1.3 倍の違いが見られた。また、W0 と E1 はほぼ同じ標高に位置するが、1.7 倍の違いが見られた。本試験地では、LAI の空間的な分布に大きな違いがあることが示された。

図-4 は、12 地点の LAI と a) 標高, b) 展葉開始日および c) 落葉終了日の関係を示す。図中のラベルは、それぞれの地点を示す。図-4 a) において、標高が低い地点である W2, N4 および N3 の LAI は、標高が高い地点のものに比べて明らかに大きく、最大で約 2.3 倍の差 (W2 と E1) が見られた。図-4 b) および c) において、標高が低い地点では標高が高い地点に比べ、展葉開始日が早く、落葉終了日が遅くなるため、着葉期間は長くなる傾向が見られた。図-4 b) において、LAI にブナの占める割合が 70%以上の標高が高い地点では (N2, S2 および S1)、展葉開始日が比較的早いことから、ブナの優占率が展葉開始日に影響を与えている可能性があると考えられた。

引用文献

- (1) 気象庁. http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/data/elnino/learning/faq/elnino_table.html (2020/11/12 アクセス)
- (2) 小坂泉・野中翔平・大塚羽純・関崎良美・田口裕也・清水伸大・瀧澤英紀・阿部和時 (2016) 冷温帯落葉広葉樹林における渦相関法によるフラックスの連続観測. 関東森林研究 67(1): 77-80
- (3) 松井哲哉・田中信行・八木橋勉・小南裕志・津山幾太郎・高橋潔 (2009) 温暖化にともなうブナ林の適域の変化予測と影響評価. 地球環境 14(2): 165-174
- (4) 斎藤琢・永井信・村岡裕由 (2014) 陸域生態系の炭素収支の現状診断と将来予測—リモートセンシングの利用—. 日本生態学会誌 64: 243-252
- (5) Schwartz, M.D. (2003) Phenology: An integrative environmental science. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston and London, 564pp
- (6) Yoshifuji, N., Komatsu, H., Kumagai, T., Tanaka, N., Tantasirin, C. and Suzuki, M. (2011) Interannual variation in transpiration onset and its predictive indicator for a tropical deciduous forest in northern Thailand based on 8-year sap-flow records. Ecohydrol 4: 225-235