

<報文>

山地森林域におけるブナの衰退状況評価の試み\*

—葉緑素計SPAD値と目視衰退度および胸高直径相対成長率との関係—

石間妙子\*\*・須田隆一\*\*・金子洋平\*\*・梶原佑介\*\*・濱村研吾\*\*・清水英幸\*\*\*

キーワード ①SPAD値 ②目視衰退度 ③胸高直径相対成長率 ④ブナ ⑤英彦山

要 旨

ブナ林の衰退が見られる英彦山と衰退が見られない脊振山において、2010年から2015年までの6年間、ブナを対象に葉のクロロフィル濃度と相関するSPAD値（葉緑素計SPAD-502で示される値）、目視判断による葉色衰退度、樹木の目視衰退度、および樹木の胸高直径を計測・評価した。これらの指標の関係性について、一般化線形混合モデルを用いて解析・検討した結果、SPAD値は葉色衰退度と有意な負の相関関係にあり、目視衰退度とも概ね負の相関が認められた。SPAD値と胸高直径相対成長率とは正の相関傾向にあった。調査時期によってはこれらの傾向に当てはまらない場合もあったが、SPAD値が最大となる8～9月では相関関係が比較的強く見られた。これらの結果から、目視衰退度や樹木の成長率と併せ、8～9月にSPAD値の計測を複数年実施することが、総合的なブナの衰退状況評価に有用であると考えられた。

1. はじめに

ブナ林は、日本の冷温帯を代表する落葉広葉樹林で、北海道南部から九州まで広範囲に分布している。自然性の高い極相林として存続している地域も多く、豊かな生物多様性を育む森林を形づくっている。福岡県内には5か所の山地にブナの自然林が分布している。ブナ林面積が最も広い英彦山では、1991年の台風19号による被害を受け、その後もブナ林の衰退が進行している。このため、著者らは、英彦山ブナ林および対照地として設定した脊振山ブナ林において、2010年からブナの衰退状況に関する調査研究を行っている。

樹木における衰退状況の評価にあたっては、目視による衰退度（逆の定義としては、活力度または健全度）評価が環境調査や樹木医学における診断方法としてよく使用されている<sup>1)2)3)4)</sup>。このような目視評価は、簡便で有効な方法ではあるが、調査者の経験や能力に結果が左右されるなどの問題点が指摘されている<sup>2)</sup>。

目視による定性的な衰退度評価に対して、樹木の生理活性を定量的に評価することが可能と考えられている葉緑素計（SPAD-502、ユニカミノルタ）が使用されはじめている。葉緑素計による計測結果はSPAD値という数値で示され、単位面積あたりのクロロフィル濃度と高い相関

が認められている<sup>5)6)</sup>。このため、客観的かつ定量的な衰退状況の評価方法として、SPAD値の実用化が期待される。

そこで、本報では、2010年から2015年までに評価を行ったブナのSPAD値、目視衰退度および胸高直径相対成長率の調査・算出結果を示すとともに、樹木の衰退状況を示すと考えられるこれらの3つの指標の関係性について解析・検討した結果について報告する。

2. 調査地および調査木

英彦山（標高1,199m）は、福岡県と大分県との県境に連なる英彦山地の主峰で、山嶺は南から北へ南岳、中岳、北岳の3峰に分かれており、標高1,000m以上に県内最大面積のブナ自然林（ブナーシラキ群集）が広がっている<sup>7)</sup>。英彦山におけるブナ林の衰退現象は、1991年の台風19号被害の後遺症であるとの報告もあり<sup>8)</sup>、今なお高木の枯死が続いている。また、最近、シカ食害による林床植生の劣化や後継樹の更新阻害が急激に進行し、ブナ林の健全性はさらに低下している。

脊振山（標高1,050m）は、福岡県と佐賀県との県境に連なる脊振山地の最高峰で、福岡平野の南部に位置する。福岡県側の北斜面は比較的急傾斜で、ブナ自然林（ブナーシラキ群集）が見られる<sup>7)</sup>。これまでの調査において脊

\*Evaluation of Tree Decline Level of Beech (*Fagus crenata*) in Mountainous Forest

\*\*Taeko ISHIMA, Ryuichi SUDA, Yohei KANEKO, Yusuke KAJIHARA, Kengo HAMAMURA (福岡県保健環境研究所) Fukuoka Institute of Health and Environmental Sciences

\*\*\*Hideyuki SHIMIZU (国立環境研究所) National Institute for Environmental Studies

振山では森林衰退が認められていないことから、英彦山の対照地として選定した。

以上の2地域において、調査木として、英彦山北岳周辺のブナ10本（標高約1,150m, 福岡県田川郡添田町）および脊振山頂西側のブナ9本（標高約950～1,000m, 福岡市早良区）を選定した。調査木の選定にあたっては、SPAD値の計測に配慮して、枝葉が手に届く位置にあり、その枝が可能な限り日当たりのよい状態となっている高木を選定するよう留意した。

### 3. 方法

#### 3.1 目視衰退度の評価

目視による樹木衰退度の評価は、環境省「土壌・植生モニタリング手引書」<sup>2)</sup>の方法に基づき、樹勢、樹形、枝の成長量、梢端の枯損、枝葉の密度、葉の変形度、葉の大きさ、葉色、葉の障害の9項目を目視により評価した。樹勢および樹形は5段階、それ以外は4段階で評価され、値が高いほど生育状態が悪いことを意味する。本手引書の方法では、個々の測定項目の基準は示されているものの、総合評価の基準が示されていない。そこで、本報では、堀<sup>4)</sup>の方法に準じ、計9項目の評価値の平均値を総合的な衰退度の値（総合評価値）とし、以降の統計解析に用いた。ただし、枯死の場合は、樹勢および樹形が4となり、他の項目が空欄となるため、総合評価値を4とした。

調査は、前述した計19本のブナを対象に、2010～2015年にかけて実施した。葉の変形度、葉の大きさ、葉色、葉の障害の4項目については、展葉期間中に毎月確認し、その他の項目については毎年10～11月頃に1回評価を行った。

#### 3.2 SPAD値の計測

SPAD 値を計測するため、各調査木から比較の日当たりのよい枝を3本選び、各枝から10枚ずつの葉をランダムに選択し（つまり各調査木につき計30枚の葉を計測）、葉緑素計（SPAD-502, コニカミノルタ）を用いてSPAD 値を計測した。

調査は2010～2015年にかけて、原則としてブナの展葉期間である5～10月の6か月間、毎月実施した。しかし、年によっては落葉時期が遅いこともあるため、その場合は11月上旬にも実施した。ただし、落葉により計測可能な本数が半分に満たなかった場合には、3.4に示す統計解析は行わなかった。調査日は原則として各月の月上旬としたが、下旬に実施した場合には、結果の表では翌月のデータとして示した。また、英彦山では、2013年に1本のブナが枝折れによりSPAD 値の計測が困難になり、2014年には別の1本のブナが枯死したことから、これらの樹木については、それ以降SPAD 値の計測は行

わなかった。

#### 3.3 相対成長率の算出

樹木の衰退状況を表す指標の一つとして、相対成長率（RGR）を計測した。RGRは目視衰退度の評価の際に計測した胸高直径を用い、次式により算出した。

$$RGR = \frac{\ln(X_{t_2}) - \ln(X_{t_1})}{t_2 - t_1}$$

ただし、 $X_{t_2}$ : 当該年 ( $t_2=0$ ) の胸高直径,  $X_{t_1}$ : 2年前 ( $t_1=-2$ ) の胸高直径とする。

当該年のSPAD値は、前年の秋から当該年の秋までの肥大成長と正の相関関係にあると予想されるが、調査木が比較的樹齢の進んだ大径木が多いため、1年間のみでは胸高直径に顕著な増加が見られないことから、本研究では2年間の値を用いることとした。

#### 3.4 データ解析

英彦山と脊振山の間で目視衰退度、SPAD値、胸高直径の相対成長率（以下、直径RGRとする）に差があるかを評価するため、目視衰退度と直径RGRについては調査年ごとに、SPAD値は調査時期ごとに $t$ 検定を行った。

樹木衰退度の指標としてSPAD値が有用であるか否かを明らかにするため、SPAD値と、目視衰退度の評価項目の一つである葉色、目視衰退度の総合評価値、直径RGRとの関係性を、一般化線形混合モデル（以下、GLMMとする）により評価した。GLMMでは、2012年～2015年の各調査月に計測された調査木ごとのSPAD平均値（30枚の葉の平均値）を目的変数とし、葉色、目視衰退度、または直径RGRを固定因子の独立変数とした。本調査では、英彦山と脊振山という異なる山地で調査を行っているため、調査地の違いをランダム因子として組み込んだ。また、各固定因子の間には、有意ではないものの相関関係が認められる場合があったため、GLMMは各要因で別々に行った。なお、方法3.2で記述したとおり、2013年に1本、2014年以降は2本のブナでSPADの計測ができなくなったことから、これらの個体はGLMMの解析から除外した。つまり、データ数は2012年が19、2013年が18、2014年と2015年が17である。

以上の統計解析は、R3.2.2 (R development core team 2015) により行った。

### 4. 結果と考察

#### 4.1 目視衰退度

英彦山における目視衰退度の総合評価値は、最小の個体が0、最大の個体が4となり、10個体全体の平均値は、2010年の0.47から2015年の0.97へと増加していた(図1)。

英彦山では、2014年に1個体が枯死したため、全体の衰退度は特に2014年以降に増加した。脊振山における目視衰退度の総合評価値は、最小の個体が0、最大の個体が0.89となり、9個体全体の平均値は、2010年の0.14から2015年の0.23へとわずかに増加していた(図1)。両地域の値には、 $P < 0.05$ の有意水準では有意差は認められなかったものの、 $P < 0.1$ では2010年、2012年、2014年、2015年に有意差が認められた。以上のことから、英彦山ブナ林における森林衰退の進行が示される結果となった。

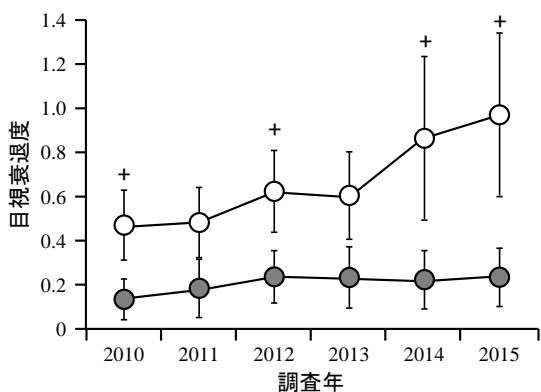


図1 英彦山(O)と脊振山(●)における目視衰退度の総合評価値の経年変化

平均値±標準誤差を示す。+はt検定により有意差( $P < 0.1$ )があることを示す。

#### 4.2 SPAD値

SPAD値は、いずれの年および調査地においても、春から夏にかけて値が高くなり、8~9月に最大に達し、10月以降に低くなるという季節変化が見られた(図2)。なお、2015年については、英彦山と脊振山のどちらも9月のSPAD値が例年に比べて低下していた。この年は、8月25日に九州北部に大型の台風15号が上陸し、平野部でも倒木や建造物の損壊などの風害が生じたことから、台風の影響で葉が傷み、SPAD値が低くなったと判断される。このSPAD値の異常値が生じた2015年9月のデータを除くと、SPAD値が最大となる8月および9月の調査地ごとの平均値は、43.9~48.1の間を取り、6年間での平均は、英彦山では8月に45.8、9月に45.7、脊振山では8月に45.4、9月に45.7となった。また、8月および9月のSPAD値を英彦山と脊振山で比較した結果、いずれの年も有意差は認められなかった。落葉広葉樹のクロロフィル濃度は落葉前に大きく減少することが知られており<sup>9)</sup>、今回の結果においても同様の傾向が見られた。しかし、いずれの年も、他の時期に比べると秋季は調査木による値のばらつきが大きい傾向が見られた。

なお、本調査期間中に1本のブナが枯死したが、この個体のSPAD値は、例年に比べて枯死の前年に低い値を示し

た。1事例のデータであるため、普遍性の証明にはさらにデータを収集する必要があるが、同一木のSPAD値を経年的に計測することによって、SPAD値の低下からブナの衰退の進行や枯死の予測可能性が示唆された。

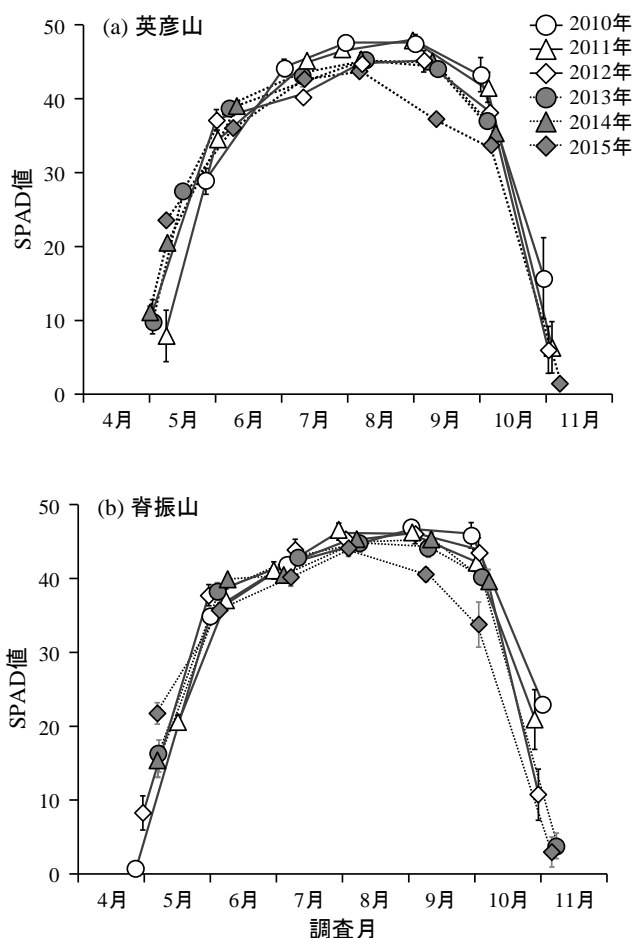


図2 英彦山(a)と脊振山(b)におけるSPAD値の季節変化  
平均値±標準誤差を示す。

表1 調査木の樹高、胸高直径、胸高直径相対成長率

数値は平均値±標準誤差を示す。英彦山における調査木の数は、2010~2013年は10本、2014~2015年は9本である。脊振山は期間を通じて9本である。

調査地	調査年	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	胸高直径相対成長率 (cm/cm/year)
英彦山	2010	12.7±1.0	44.1±3.3	—
	2011	12.9±1.1	44.3±3.5	—
	2012	12.9±1.1	44.5±3.4	0.0064±0.0032
	2013	12.9±1.1	44.6±3.4	0.0039±0.0016
	2014	12.9±1.2	45.6±3.7	0.0024±0.0013
	2015	12.9±1.3	45.8±3.6	0.0047±0.0023
脊振山	2010	10.4±0.6	38.8±2.6	—
	2011	10.4±0.6	39.1±2.6	—
	2012	10.4±0.6	39.3±2.6	0.0063±0.0018
	2013	10.3±0.6	39.7±2.6	0.0071±0.0013
	2014	10.3±0.6	40.0±2.6	0.0088±0.0019
	2015	10.3±0.6	40.2±2.5	0.0087±0.0026

### 4.3 相対成長率

2012～2015年における直径RGRの平均値は、英彦山、脊振山で、それぞれ0.0024～0.0064, 0.0063～0.0088year<sup>-1</sup>を示した(表1)。2012年は両地域ともほぼ同様の値であったが、2013年以降は脊振山の方が高い値を示し、2014年には有意な差異が認められ、英彦山に比べて脊振山の方が樹幹の肥大成長量が大きい傾向が見られた。

目視衰退度の総合評価値と直径RGRとの関係性を評価するため、GLMMを行ったところ、有意性は認められないものの、いずれの年も負の相関関係にあった。このことから、樹木の衰退状況を評価する指標の一つとして、胸高直径から算出した直径RGRも有用なデータであると考えられる。

### 4.4 SPAD値と目視衰退度・相対成長率との関係

SPAD値と目視衰退度の評価項目の一つである葉色との関係をGLMMにより評価した。葉色は4段階で評価され、目視で色が薄いほど値が高くなる。この葉色の評価値が高い個体ほどSPAD値が低くなるという仮説を立て、4年間で実施した計25回の調査データを解析した。その結果、仮

説どおりに回帰係数の傾きが負であったのは全体の92%にあたる23回で、そのうち15回は有意性が認められた(表2)。

次に、SPAD値と目視衰退度の総合評価値との関係をGLMMにより評価した。目視衰退度が高い個体ほどSPAD値が低くなるという仮説を立て解析した結果、仮説どおりに回帰係数の傾きが負であったのは全体の76%にあたる19回で、そのうち2012年7月、9月、2013年6月、7月、8月、9月の6回は有意性が認められた(表2)。残りの6回は、有意性は認められないものの、係数の傾きが仮説と逆の正の関係にあり、特に2014年に仮説と逆の関係が多く見られた。SPAD値はクロロフィル量を反映しており、現在の葉の活性に関係しているが、目視衰退度の総合評価値には葉色以外にも多くの項目を含み、樹形など過去の影響が加味されるため、相関関係が見られなくなる可能性がある。しかし、展葉期(5月)や落葉期(10月)を除くと、仮説どおりの負の相関関係が見られることが多かった。2014年の値が異常であるかどうかについては、更なるデータの蓄積と解析が必要であろう。

SPAD値と直径RGRの関係をGLMMにより評価した。直径

表2 各月のSPAD値と、目視衰退度の葉色、総合評価、および胸高直径相対成長率との関係  
一般化線形混合モデルにより解析した結果を示す。SPAD値との正負の関係が仮説どおりの場合には係数(Estimated SE)を太字で示した。有意差に関し、 $P < 0.1$ の場合にはP値を太字で示し、 $P < 0.05$ の場合には\*を添えた。

調査時期	目視衰退度_葉色			目視衰退度_総合評価			胸高直径相対成長率		
	Estimated SE	t値	P値	Estimated SE	t値	P値	Estimated SE	t値	P値
2012年5月	<b>-11.38</b>	-3.08	<b>0.00 *</b>	<b>-2.39</b>	-0.71	0.49	-193.01	-0.91	0.37
6月	<b>-8.71</b>	-5.03	<b>0.00 *</b>	<b>-3.50</b>	-1.91	<b>0.07</b>	-25.39	-0.20	0.85
7月	<b>-6.63</b>	-3.39	<b>0.00 *</b>	<b>-4.64</b>	-2.90	<b>0.01*</b>	<b>25.26</b>	0.21	0.83
8月	<b>-5.02</b>	-2.47	<b>0.02 *</b>	<b>-2.93</b>	-1.83	<b>0.09</b>	-18.80	-0.17	0.87
9月	<b>-6.33</b>	-2.68	<b>0.02 *</b>	<b>-4.08</b>	-2.23	<b>0.04*</b>	<b>31.51</b>	0.24	0.81
10月	<b>-8.15</b>	-2.20	<b>0.04 *</b>	<b>-5.40</b>	-1.81	<b>0.09</b>	<b>4.11</b>	0.02	0.98
11月	<b>-9.98</b>	-1.63	0.12	<b>-5.73</b>	-1.23	0.24	-117.40	-0.38	0.71
2013年5月	<b>-8.71</b>	-3.06	<b>0.01 *</b>	<b>-2.57</b>	-0.73	0.48	-490.70	-1.23	0.24
6月	<b>-6.07</b>	-5.56	<b>0.00 *</b>	<b>-4.04</b>	-2.64	<b>0.02*</b>	<b>130.49</b>	0.62	0.55
7月	<b>-7.18</b>	-5.64	<b>0.00 *</b>	<b>-5.65</b>	-3.42	<b>0.00*</b>	<b>226.61</b>	0.93	0.37
8月	<b>-7.16</b>	-4.48	<b>0.00 *</b>	<b>-5.92</b>	-3.18	<b>0.01*</b>	<b>308.92</b>	1.17	0.26
9月	<b>-6.09</b>	-2.84	<b>0.01 *</b>	<b>-4.85</b>	-2.13	<b>0.05*</b>	<b>407.03</b>	1.42	0.18
10月	<b>-7.41</b>	-1.54	0.14	<b>-4.38</b>	-0.89	0.39	<b>719.52</b>	1.27	0.22
2014年5月	<b>-15.52</b>	-4.38	<b>0.00 *</b>	<b>-5.61</b>	-1.20	0.25	-179.38	-0.55	0.60
6月	<b>-1.74</b>	-0.66	0.52	1.21	0.50	0.62	-18.48	-0.12	0.91
7月	<b>-0.86</b>	0.73	0.73	1.24	0.54	0.60	-51.76	-0.32	0.75
8月	1.26	0.49	0.63	0.54	0.23	0.82	<b>44.43</b>	0.30	0.77
9月	0.30	0.10	0.92	0.15	0.06	0.96	<b>49.32</b>	0.29	0.77
10月	<b>-7.17</b>	-2.86	<b>0.01 *</b>	<b>-1.72</b>	-0.62	0.55	-17.94	-0.10	0.92
2015年5月	<b>-7.50</b>	-2.15	<b>0.05 *</b>	3.89	1.24	0.24	-357.93	-2.37	<b>0.03*</b>
6月	<b>-5.62</b>	-3.40	<b>0.00 *</b>	<b>-0.32</b>	-0.18	0.86	-31.45	-0.32	0.75
7月	<b>-4.44</b>	-2.09	<b>0.05</b>	<b>-2.05</b>	-1.01	0.33	<b>42.66</b>	0.39	0.70
8月	<b>-5.10</b>	-2.11	<b>0.05</b>	<b>-1.51</b>	-0.68	0.51	<b>36.42</b>	0.30	0.77
9月	<b>-4.01</b>	-1.48	0.16	<b>-2.47</b>	-1.01	0.33	<b>89.54</b>	0.69	0.50
10月	<b>-2.27</b>	-0.35	0.73	4.00	0.76	0.46	<b>262.49</b>	0.94	0.37

RGRが高い個体ほどSPAD値が高くなるという仮説を立てて解析を行った結果、仮説どおりに係数の傾きが正であったのは全体の56%にあたる14回であったが、有意性が認められる時期はなかった(表2)。残りの11回は仮説と逆の負の関係にあり、特に2012年と2014年に仮説と逆の関係が多く見られた。

SPAD値は葉の光合成速度や水分ストレスなどの生理活性と関係することが報告されている<sup>10)11)</sup>。また、ブナ苗を用いた実験において、オゾン暴露(150ppb, 9時間)の5日後に可視傷害は見られないもののSPAD値が低下したことが報告されている<sup>12)</sup>。さらに、12週間のオゾン暴露(平均50~70ppb)あるいは水ストレス(通常の70~50%)の単純処理では、SPAD値の低下傾向が見られる<sup>13)</sup>。これらの報告から、SPAD値は数日~数か月程度の比較的短期的な葉の生理活性の影響を反映している可能性がある。一方、カツラの街路樹では、SPAD値と外観上の衰退状況の3区分(梢端枯れ木、腐朽木、健全木)の間に有意差が認められなかったという報告がある<sup>14)</sup>。以上のことから、葉のクロロフィル濃度と相関し短期的な葉の生理活性と関係するSPAD値と、主として外観に基づいて、より長期的な樹木全体の衰退状況を評価する目視衰退度との間に、直接の関係性が認められない場合もあると考えられる。

また、樹木の肥大成長には、各葉の生理活性の強さに加え、着葉量や展葉期間の長さなども関係する。このため、葉の生理活性と関係するSPAD値と胸高直径の肥大成長を示す直径RGRとの間に、強い相関関係が見られなかったと考えられる。

今回の解析の結果、SPAD値と目視による葉色の判断には、強い相関関係が見られる時期が多く、定性的な判断となる目視評価を補完するデータとして定量的なSPAD値は有用であることが見いだされた。しかしながら、SPAD値と目視衰退度の総合評価値や樹幹の肥大成長とは、明瞭な関係性が見られなかった。ただし、2014年を除くと、SPAD値が最大となる8~9月は目視衰退度と直径RGRのどちらも概ね仮説どおりの関係性が見られる傾向があった。この時期に複数年の調査を行うことにより、SPAD値は目視衰退度や直径RGRによる衰退状況評価を補完するデータとして活用できる可能性が考えられる。

目視による衰退度評価項目のうち、葉色、葉の障害などは短期間の影響を反映し、樹形、枝の成長量、梢端の枯損などは比較的長期的な影響を反映すると考えられている<sup>1)</sup>。SPAD値は短期的な影響を評価することができることに加え、自然環境調査の熟練者だけでなく、誰もが簡便かつ定量的に計測できることに利点がある。また、大径木の直径RGR等は、さらに長期間の影響の把握に適した指標となる可能性が考えられる。以上のことから、樹木の衰退状況を評価するためには、目視衰退度の各評価

項目、SPAD値、直径RGR等の特性をふまえて、総合的に判断することが必要であろう。

## 5. まとめ

ブナの衰退が見られる英彦山ブナ林と、衰退が見られない脊振山ブナ林において、2010年から2015年までの6年間にわたり、ブナのSPAD値、目視衰退度および胸高直径相対成長率(直径RGR)を用いたブナの衰退状況調査を行った。

その結果、対照地である脊振山では、目視衰退度の総合評価値の平均値が0.23以下と低く、経年的にわずかに値が増加する程度であった。一方、英彦山では総合評価値の平均値が0.89に達し、経年的に顕著に増加した。また、直径RGRは脊振山の方が高い値を示し、英彦山よりも樹幹の肥大成長量が大きい傾向が見られた。これらの結果から、英彦山では脊振山に比べてブナの衰退が進行していることが確認された。

SPAD値は、いずれの調査年および調査地においても、春から夏にかけて値が高くなり、8~9月に最大に達し、10月以降に低くなるという季節変化が見られた。SPAD値と葉色、目視衰退度、および直径RGRの関係性を解析した結果、SPAD値は目視判断による葉色と強い相関関係があることがわかった。また、SPAD値が最大となる8~9月は、目視衰退度との間に負の相関関係があり、直径RGRとの間には正の相関関係の傾向が認められた。しかしながら、時期や年によっては、これらの関係性が認められない場合もあった。SPAD値による評価は、値が最大となる時期を明らかにした上で、複数年の調査を行うことで、比較的短期間の樹木の状態を定量的に評価するのに適した指標であると考えられた。SPAD値は自然環境調査の熟練者だけでなく、誰もが簡便かつ定量的に計測できることに利点がある。森林域の樹木の衰退状況評価を総合的に判断するためには、より長期の指標である目視衰退度や直径RGR等とともにSPAD値を活用することが望まれる。

本研究は、地方公共団体環境研究機関等と国立環境研究所との共同研究(2010-2012年度:ブナ林生態系における生物・環境モニタリングシステムの構築, 2013-2015年度:山地森林生態系の保全に係わる生物・環境モニタリング)の一環として実施した。

## 6. 引用文献

- 1) 井上敏雄, 樹木活力指標: 松中昭一編, 図説 環境汚染と指標生物, pp.6-9, 朝倉書店, 東京, 1979
- 2) 環境省: 酸性雨モニタリング手引書集: 土壌・植生モニタリング手引書, 2003, [http://www.env.go.jp/air/acidrain/man/soil\\_veget/full.pdf](http://www.env.go.jp/air/acidrain/man/soil_veget/full.pdf) (2017.4.17)

アクセス)

- 3) 濱野周泰：樹木医学の診断，森本幸裕，小林達明編：最新 環境緑化学，pp. 100-104，朝倉書店，東京，2007
- 4) 堀 大才：樹木の外観診断，pp. 571-581，最新・樹木医の手引き 改訂4版，一般財団法人日本緑化センター，東京，2014
- 5) 吉川 賢，井上雄介，嶋 一徹，千葉喬三，坂本圭児：樹木の葉のクロロフィル濃度の季節的変化．日本緑化工学会誌，**19**，215-222，1994
- 6) Markwell J., Osterman J. C., Mitchell J. L. : Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Photosynthesis Research*, **46**, 467-472, 1995
- 7) 福岡県高等学校生物研究会編：福岡県植物誌，pp. 1-339，博洋社，福岡，1975
- 8) 猪上信義，野田 亮，佐々木重行：福岡県英彦山におけるブナ林の衰退現象と立地との関係．九州森林研究，(55)，54-57，2002
- 9) 陶山健一郎，作田耕太郎：シダレザクラ樹冠内での光環境と比葉面積およびSPAD値の関係．九州大学農学部演習林報告，(90)，39-49，2009
- 10) 森本幸裕，竹居二郎，小南裕志，花山秀文，三輪賢志：街路樹ケヤキの活性度診断．日本緑化工学会誌，**17**，9-15，1991
- 11) 田中（小田）あゆみ，白杵裕之，福田健二：葉緑素計を用いて判定したケヤキの活力度と葉の光合成・蒸散速度の関係．樹木医学研究，**13**，12-16，2009
- 12) 関 達也：短期間のオゾン (O<sub>3</sub>) 暴露がブナ苗の転流パターンおよび生理活性に及ぼす影響調査．神奈川県自然環境保全センター報告，(9)，73-79，2012
- 13) 伊藤祥子，笹川裕史，相原敬次，清水英幸：神奈川県丹沢産ブナ苗に与えるオゾン曝露と水欠乏の複合影響の実験的解析．神奈川県自然環境保全センター報告，(9)，23-32，2012
- 14) 額谷悠夏，田中（小田）あゆみ，福田健二：梢端枯れ木および腐朽被害木の葉の光合成速度，蒸散速度，および葉の形態—東京大学柏キャンパス内のカツラ街路樹の事例—．樹木医学研究，**13**，119-124，2009