

原著論文

東京大学千葉演習林における天然林資源の現状

尾張敏章^{*1}・大石 諭^{*2}・軽込 勉^{*3}・鈴木祐紀^{*3}・鶴見康幸^{*3}・
米道 学^{*3}・塚越剛史^{*3}・阿達康真^{*3}・村川功雄^{*3}・藤平晃司^{*3}・
三次充和^{*3}・楠本 大^{*3}・久本洋子^{*3}・當山啓介^{*3}

Current situation of natural forest resources in the
University of Tokyo Chiba Forest

Toshiaki OWARI^{*1}, Satoru OISHI^{*2}, Tsutomu KARUKOME^{*3}, Masanori SUZUKI^{*3},
Yasuyuki TSURUMI^{*3}, Takashi YONEMICHI^{*3}, Takeshi TSUKAGOSHI^{*3}, Yasumasa ADACHI^{*3},
Isao MURAKAWA^{*3}, Koji FUJIHARA^{*3}, Mitsukazu MITSUGI^{*3}, Dai KUSUMOTO^{*3},
Yoko HISAMOTO^{*3}, Keisuke TOYAMA^{*3}

要旨

天然林を適正に管理していくうえで、その資源状況を正確に把握しておくことは重要な課題の一つである。本研究では、約 1,300 ha の天然林を持つ東京大学千葉演習林において調査を行い、資源量、サイズ構造、種組成の現状を明らかにした。2019 年から 2020 年にかけて、針広混交天然林と広葉樹天然林に 0.03 ~ 0.1 ha の円形プロットを計 39 か所設置し、樹種と胸高直径 (DBH)、樹高を測定した。立木本数密度と林分材積の平均値は、針広混交天然林が 1,842 本/ha と 624.2 m³/ha、広葉樹天然林が 3,123 本/ha と 483.3 m³/ha であり、千葉県による統計値を大幅に上回る資源量を有していた。平均 DBH と老齢林指数の平均値は、いずれも針広混交天然林 (15.6 cm と 0.66) が広葉樹天然林 (13.3 cm と 0.43) に比べて有意に大きな値となった。材積比率でみたときの主な構成樹種は、針広混交天然林がモミ (45%)、アカガシ (10%)、スダジイ (9%) の順、広葉樹天然林がアカガシ (31%)、スダジイ (29%)、ウラジロガシ (9%) の順であった。

キーワード：暖温帯天然林、森林資源調査、立木本数密度、林分材積、種組成

Abstract

For the proper management of natural forests, an accurate understanding of their resource status is an important challenge. This study conducted an inventory in the University of Tokyo Chiba Forest, which has approximately 1,300 ha of natural forest, to assess the current status of resource amount, size structure, and species composition. A total of 39 circular plots with the plot size of 0.03-0.1 ha were set up between 2019 and 2020 in the mixed conifer-broadleaf and broadleaf-dominated natural forests. Tree species, diameter at breast

*1 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林北海道演習林

The University of Tokyo Hokkaido Forest, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

*2 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林フィールドデータ研究センター

Field Data Research Center, The University of Tokyo Forests, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

*3 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林千葉演習林

The University of Tokyo Chiba Forest, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

height (DBH), and tree height were measured. The mean tree density and stand volume were 1,842 trees/ha and 624.2 m³/ha in the mixed conifer-broadleaf natural forest, and 3,123 trees/ha and 483.3 m³/ha in the broadleaf-dominated natural forest, respectively. The resources were much larger than the statistical values reported by the Chiba prefectural government. The mean DBH and old-growth index were significantly higher in the mixed conifer-broadleaf natural forest (15.6 cm and 0.66) than in the broadleaf-dominated natural forest (13.3 cm and 0.43). The major tree species in terms of the percentage of stand volume were *Abies firma* (45%), *Quercus acuta* (10%), and *Castanopsis sieboldii* (9%) in the mixed conifer-broadleaf natural forest, and *Q. acuta* (31%), *C. sieboldii* (29%), and *Quercus salicina* f. *angustata* (9%) in the broadleaf-dominated natural forest.

Keywords: warm-temperate natural forest, forest inventory, tree density, stand volume, species composition

1. はじめに

林野庁の「森林資源の現況」によれば、2017年3月末における総森林面積 25,048 千 ha のうち、天然林は 57% の 13,481 千 ha である (林野庁編, 2020)。一方、日本の総森林蓄積 5,242 百万 m³ のうち、天然林は 37% の 1,932 百万 m³ にとどまる。天然林の ha 当たり平均蓄積は 143 m³ と小さく、人工林 (324 m³) に比べて半分にも満たない。ただし、これらの統計値は森林簿等を積算して集計したものであり (大西, 1995), 実際の蓄積に比べて過小との指摘もある (熊崎, 2012; Egusa *et al.*, 2020; 中島, 2020)。また、天然林の林分構造や樹種構成に関する情報は不足している (白石, 1999)。天然林を適正に管理し施業を行っていくうえで、その資源状況を正確に把握しておくことは重要な課題の一つといえる (石田, 1994)。

天然林の資源状況を広域的に把握する方法として、林野庁が 1999 年から実施している森林生態系多様性基礎調査 (旧森林資源モニタリング調査) のデータが利用されている。これまでに、日本全国を対象とした森林タイプの分類 (Kitahara *et al.*, 2013) や炭素蓄積量の推定 (Egusa *et al.*, 2020), 九州地方の森林タイプ分類 (前田ら, 2003; 前田ら, 2004; 北原ら, 2011) や林分材積推定 (Kajisa *et al.*, 2008), 新潟県における優占樹種の把握 (千木良・村上, 2013), 富山県民有林の林分材積・成長量推定 (中島, 2020; Nakajima, 2019), 茨城県北部を対象とした林分構造の複雑性評価 (Yamaura *et al.*, 2020) などが報告されている。ただし、森林生態系多様性基礎調査の調査地点は 4 km と広い間隔で配置されており、林分構造が不均一な天然林の資源状況を詳しく把握するには十分でない。森林管理の単位となる 10² ~ 10⁴ ha 規模の区域内で、比較的多数の林分を対象とした天然林の調査事例は、富山県民有林の二次林 (石田, 1994; 長谷川ら, 2018), 旧青森営林局管内国有林のヒバ天然林 (白石, 1998), 鳥取大学蒜山演習林の広葉樹林 (佐野ら, 1997), 北海道森林管理局 (直轄) 管内国有林 (石橋, 2000), 東京大学北海道演習林 (山本ら, 1996; Owari *et al.*, 2011) の針広混交林などがあるものの、その数は限られている。

千葉県には 2019 年度時点で 73.6 千 ha の天然林があり、森林面積全体の 47% を占める (千葉県農林水産部森林課, 2020)。なかでも、東京大学千葉演習林 (東大千葉演) が位置する房総丘陵清澄山系には、県内で最も良好な天然林がまとまって残されており、多様で豊かな生物相を持つ地域として知られる (古木, 2008; 斉藤ら, 2017)。そこで本研究では、約 1,300 ha の天然林を持つ東大千葉演において現地調査を行い、資源量やサイズ構造、種組成の現状を明らかにした。東大千葉演の天然林に関しては、これまでに蒲谷 (1975) や小島ら (1986), Ozaki and Ohsawa (1995) によって報告されているが、いずれも調査地点の数や範囲は限られているほか、調査が実施され

たのは30年以上も前(1971～1992年)である。現存する多数の天然林について、現時点でその実状を詳細に把握しておくことは、東大千葉演およびその周辺地域の天然林を適正に管理・保全していくうえでの基礎資料として有意義である。

2. 方法

2.1 調査地の概要

東大千葉演は房総半島の東南部、房総丘陵の東端に位置する(北緯 $35^{\circ}8' \sim 12'$, 東経 $140^{\circ}5' \sim 10'$, 標高50～370m)(東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林, 2022)。同演習林内の札郷観測所(標高206m)における2011～2020年の年平均気温は 14.1°C , 平均年降水量は2,474mmである。地質は新第三紀海成層を主な基盤とし, 部分的に第四紀非海成層に覆われている。基岩は砂岩, 礫岩, 泥岩, 凝灰岩, 土壌は主に褐色森林土が分布する。低山性山地で標高差は小さいが, 地形は急峻かつ複雑である。

森林面積全体の60%(1,294ha)が天然林であり, 針広混交天然林(279ha)と広葉樹天然林(1,015ha)の2つに区分される(東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林, 2022)。針広混交天然林にはモミ・ツガを主体とした針葉樹と, ブナ科・クスノキ科の常緑広葉樹とが混交する。房総丘陵に固有の林相を有しており, 学術上も貴重な森林である。1970年以降, 針広混交天然林の伐採は支障木処理を除いて行われていない(大里・根岸, 1994)。広葉樹天然林の大部分は旧薪炭林(萌芽林)であり, スダジイ・カシ類の広葉樹が優占する。広葉樹天然林は1960年代前半まで薪炭林として利用されていたが, 1980年以降はほとんど伐採が行われていない(大里・根岸, 1994)。

2.2 調査方法

調査は2019年6月から2020年9月にかけて行った。東大千葉演の森林現況簿と林相図から, 天然林を含む全ての小班(林分)を選んだ(図-1)。これをもとに, 林種や林齢, 空間的位置がなるべく分散するように調査対象林分計39か所(針広混交天然林14か所, 広葉樹天然林25か所)を抽出し, 各林分の林相を代表する平均的な地点に標準地(半径9.77～17.84mの円形プロット, 面積0.03～0.1ha)を設定した(図-1)。標準地の大きさは, プロット内に計100本程度の測定木が含まれることを基本とした。ただし, 急傾斜地等で林内への立入りが困難な場合は, 調査者の安全確保の観点から無理のない地点・大きさとした。東大千葉演では急峻な地形から, 尾根に主要な歩道が通されており(當山ら, 2019), また斜面は下部ほど急になる場合が多い。そのため, 結果的に標準地の大部分が尾根または中腹に設定された(表-1)。なお, 林齢とは伐採(針広混交天然林では中林施業により下木を伐採)した年から調査時点までの経過年数を表す(白石ら, 2004)。調査時点における調査林分の林齢は, 針広混交天然林で68～128年生(2か所は過去に伐採記録なし), 広葉樹天然林で54～165年生であった(表-1)。

各標準地において, ハンディ GNSS 受信機(Garmin GPSMap 64s)により中心点の位置座標と標高値を記録した(図-1, 表-1)。GNSS 測位では, 中心点上で静止して15秒間以上待機した後, 1秒間隔で60秒間位置データを取得し, 平均化処理を行った。また, 斜面方位(8方向), 傾斜度, 斜面形(凸, 平坦, 凹の3区分), 斜面上の位置(尾根, 中腹, 谷の3区分)を標準地ごとに記録した(表-1)。

各標準地において, 胸高直径(DBH)が5.0cm以上の全立木の樹種とDBH, 樹高(針葉樹のみ)を測定した。DBHの測定には輪尺を使用し, 胸高を1.2mとして山側一方向から0.1cm単

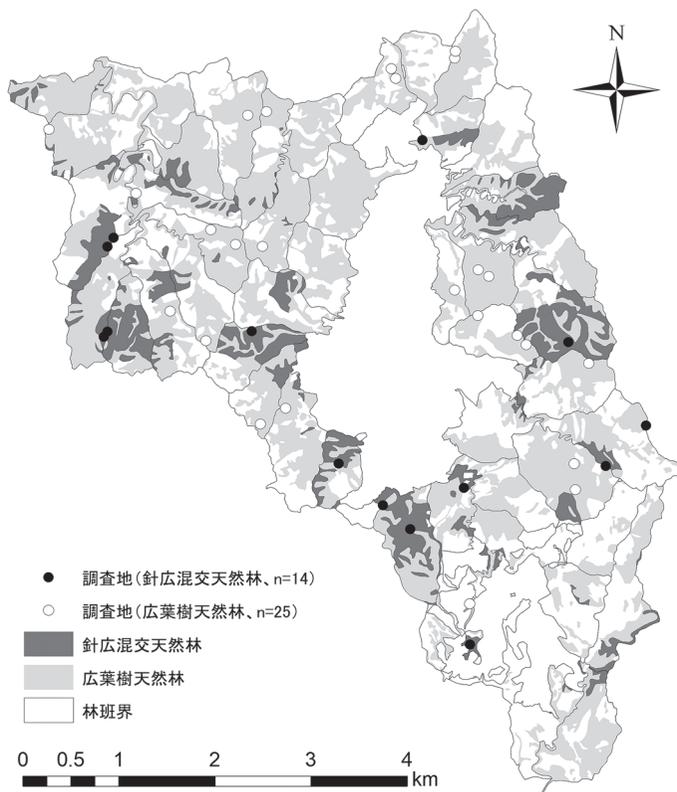


図-1 天然林と調査地の位置

Fig. 1 Location of natural forests and study plots

位で測定した。輪尺で測定不能な大径木の測定には直径巻尺を用いた。樹高の測定には Vertex IV (Haglöf, Sweden) または TruPulse 360 (Laser Technology, Inc., USA) を使用し、0.1m 単位で 3 回測定の実平均値を記録した。測定した立木が萌芽由来と考えられる複幹個体 (株立木) であった場合は野帳の備考欄に「同株」と記入した。また、標準地ごとに下層植生の被度 (目視により 10% 単位で) と上位 3 種の種名を記録した。

2.3 分析方法

はじめに、調査対象とした天然林の資源量、サイズ構造、種組成の各指標値を算出した。資源量については、立木本数密度、林分胸高断面積 (BA)、林分幹材積 (林分材積) の 3 つの指標 (石田, 1994) に加えて、株立木の本数密度、および炭素蓄積量を算出した。なお、立木本数密度とは株立木を含む全立木の本数密度である。林分材積の計算には、東大千葉演調製の「各樹材積表」(針葉樹は 2 変数、広葉樹は 1 変数の樹種別立木幹材積表) を用いた。また、炭素蓄積量の計算には以下の (1) 式を用いた (温室効果ガスインベントリオフィス (GIO) 編, 2020)。

$$C = \sum_j \{V_j \times D_j \times BEF_j \times (1 + R_j) \times CF\}, \quad (1)$$

ここで、 C は炭素蓄積量 (t-C/ha)、 V は林分材積 (m^3/ha)、 D は容積密度 (t-d.m./ m^3)、 BEF は

表-1 調査地の位置, 林齢と地況

Table 1 Plot location, stand age and geographic conditions

Plot ID	林班	小班	字名	林齢*	Plot面積 (ha)	標高 (m)	斜面方位	傾斜角 (°)	斜面位置	斜面形
針広混交天然林 (n=14)										
M1	27	A1	堂沢	128	0.10	190	北	25.4	尾根	凹
M2	42	A	独鈷山	-	0.10	239	西	30.9	中腹	凹
M3	36	A2	眞根澤	-	0.10	347	北西	25.4	尾根	平坦
M4	24	A2	荒樫	95	0.05	285	北西	44.1	尾根	凹
M5	40	A	仁ノ沢	122	0.10	277	北	32.3	尾根	凹
M6	23	A2	小屋ノ沢	68	0.05	254	南東	44.3	谷	凹
M7	32	A2	大沢又・スミ沢	102	0.05	286	南西	31.2	中腹	凹
M8	36	A1	眞根澤	82	0.05	340	西	17.7	中腹	平坦
M9	24	A1	荒樫	104	0.05	309	東	30.6	尾根	凸
M10	3	A3	袖ノ木沢	85	0.05	280	北西	14.3	尾根	平坦
M11	3	A3	袖ノ木沢	85	0.05	273	北西	22.7	尾根	平坦
M12	20	A	檜尾	72	0.10	311	南西	41.0	尾根	凹
M13	5	A	中ノ沢	79	0.03	281	東	30.2	尾根	平坦
M14	4	A2	西ノ沢	88	0.03	288	西	36.3	尾根	平坦
広葉樹天然林 (n=25)										
B1	12	B1	土沢	59	0.03	234	南西	42.9	尾根	平坦
B2	13	B1	四郎治沢	61	0.03	253	南	47.9	尾根	平坦
B3	22	B1	池ノ沢	85	0.03	265	東	18.6	尾根	平坦
B4	21	B2	亀ノ沢	73	0.03	285	東	28.3	尾根	凹
B5	15	B1	四郎治沢	54	0.03	308	南東	44.3	中腹	平坦
B6	9	B4	相ノ沢	58	0.03	312	南	45.6	中腹	凹
B7	26	B1	郷田倉	71	0.03	284	南西	36.7	中腹	平坦
B8	26	B1	郷田倉	71	0.03	310	東	33.6	中腹	平坦
B9	33	B2	白岩	56	0.05	259	北西	37.9	尾根	平坦
B10	34	B1	平塚	65	0.05	288	東	43.3	谷	凹
B11	10	B8	相ノ沢	85	0.05	319	北	22.6	尾根	凸
B12	11	B2	東ノ沢	69	0.05	275	南西	42.3	中腹	凹
B13	9	B3	相ノ沢	89	0.03	279	北西	46.0	中腹	凹
B14	8	B2	小屋ノ沢	127	0.05	182	西	30.0	中腹	凸
B15	42	B2	大降東	165	0.03	263	北西	42.7	尾根	凹
B16	2	B5	鳥居沢	59	0.03	233	南	44.6	中腹	凹
B17	31	B1	四方木沢・セバ沢	68	0.05	251	北	34.5	中腹	凹
B18	31	B1	四方木沢・セバ沢	68	0.05	227	北東	34.2	中腹	凹
B19	35	B1	大仙場	54	0.05	324	南東	30.0	中腹	凹
B20	16	B2	神田上	97	0.03	200	北西	40.0	尾根	凹
B21	16	B2	神田上	97	0.03	191	南東	36.0	中腹	凹
B22	37	B3	長尾	78	0.03	334	東	36.0	尾根	凹
B23	37	B3	長尾	78	0.05	324	東	27.0	尾根	凸
B24	34	B3	平塚	78	0.05	308	南西	42.1	中腹	凹
B25	34	B3	平塚	78	0.05	311	東	41.3	中腹	凸

* 林齢は調査年における数値。"-"は伐採履歴なし

バイオマス拡大係数（無次元）、 R は地上部に対する地下部の比率（無次元）、 CF は乾物重当たりの炭素含有率（t-C/t-d.m.）、 j は樹種をそれぞれ表す。林分材積以外の各パラメータは温室効果ガスインベントリオフィス（GIO）編（2020）が樹種ごとに設定した値を用いた。

サイズ構造の指標には、DBHの平均値と標準偏差、大径木（DBH \geq 40 cm）の本数密度、老齢林指数の4つを用いた。老齢林指数（ I_{og} ）は天然林の構造の複雑さを表し、(2)式により計算される（Acker *et al.*, 1998; Yamaura *et al.*, 2020）。

$$I_{og} = \text{mean}(I_{i,og}) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \left| \frac{x_{i,obs} - x_{i,young}}{x_{i,old} - x_{i,young}} \right|, \quad (2)$$

ここで、変数 i は 1:平均 DBH, 2:DBH 標準偏差, 3:大径木本数密度, 4:立木本数密度である。 $x_{i,obs}$ は変数 i における各標準地の実測値を表し、 $x_{i,young}$ と $x_{i,old}$ は Yamaura *et al.* (2020) による日本の幼齢林と老齢林の中央値をそれぞれ表す。老齢林指数は 0 ~ 1 の値をとり、値が大きいほど複雑なサイズ構造を持つことを意味する。

種組成の指標には、立木の出現種数、多様度指数、針葉樹本数比率、針葉樹材積比率の4つを用いた。出現種数において、樹種不明の立木は一括して1種としてカウントした。多様度指数は Shannon-Wiener の H' (3) とした。

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i, \quad (3)$$

ここで、 S は種数、 P_i は i 番目の種の個体数が全体に占める割合である（大垣, 2008）。 H' の計算にはウェブサイト「多様度・類似度計算機」(<https://calc-species.herokuapp.com/>) を使用した。

資源量、サイズ構造、種組成の各指標について、針広混交天然林と広葉樹天然林のそれぞれにおける全標準地の平均値と標準偏差を求め、 t 検定（等分散性の仮定が棄却された場合は Welch の t 検定）により平均値の差を検定した。また、天然林の林齢と各指標値との関係を散布図で示し、林齢と各指標値との相関分析を行った。過去に伐採記録のない針広混交天然林の2か所は便宜的に林齢 200 年生として扱った。次に、立木本数密度、林分材積、老齢林指数、多様度指数の4つについて、各ペアの相関行列図を示すとともに相関分析を行い、資源量-サイズ構造-種組成間の関連性を分析した。以上の統計解析には R 4.1.2 (R Core Team, 2021) を用いた。

3. 結果

3.1 資源量

調査地における5つの資源量指標について、各々の平均値と標準偏差を表-2に示す。立木本数密度と株立木本数密度に関する全標準地の平均値は、広葉樹天然林がそれぞれ3,123本/haと1,402本/haであり、針広混交天然林(1,842本/haと437本/ha)よりも有意に大きな値となった($p < 0.01$)。一方、林分材積と炭素蓄積量の平均値は、針広混交天然林がそれぞれ624.2m³/haと267.2t-C/haであり、広葉樹天然林(483.3m³/haと216.4t-C/ha)よりも有意に大きな値となった($p = 0.01, 0.04$)。BAの平均値については、針広混交天然林(68.2m²/ha)と広葉樹天然林(61.1m²/ha)との間に有意な差が認められなかった($p = 0.21$)。

林齢と立木本数密度、株立木本数密度、BA、林分材積、炭素蓄積量との関係を図-2に示す。いずれも大きなばらつきがみられたものの、針広混交天然林では立木本数密度($r = -0.61, p = 0.02$)において、広葉樹天然林では株立木本数密度($r = -0.49, p = 0.02$)において、それぞれ林齢との間に有意な負の相関が認められた。

3.2 サイズ構造

調査地における4つのサイズ構造指標について、各々の平均値と標準偏差を表-3に示す。平均DBHとDBH標準偏差、大径木本数密度、老齢林指数に関する全標準地の平均値は、針広混交天然林がそれぞれ15.6cmと15.9cm、116本/ha、0.66であり、全ての指標において広葉樹天然林(13.3cmと9.2cm、66本/ha、0.43)よりも有意に大きな値となった($p < 0.01$)。老齢林指数が0.5(中程度の複雑さ)以上となった標準地の比率は、針広混交天然林が86%(12/14)、広葉樹天然林が44%(14/25)であった。また、老齢林指数が0.8(高い複雑さ)以上となった標準地は針広混交天然林の1プロット(M2;表-1)のみであった。

林齢と平均DBH、DBH標準偏差、大径木本数密度、老齢林指数との関係を図-3に示す。いずれの指標においても大きなばらつきがみられ、広葉樹天然林のDBH標準偏差($r = 0.42, p = 0.03$)で林齢との間に有意な正の相関が認められた。老齢林指数については両林種とも林齢との間に有意な相関は認められなかった。

表-2 天然林の資源量指標 (平均値±標準偏差)
Table 2 Resource indices for measurement plots in natural forests (mean ± standard deviation)

項目	単位	針広混交天然林 (n=14)	広葉樹天然林 (n=25)
立木本数密度	本/ha	1,842 ± 525	3,123 ± 1,032
株立木本数密度	本/ha	437 ± 315	1,402 ± 704
BA	m ² /ha	68.2 ± 19.1	61.1 ± 15.2
林分材積	m ³ /ha	624.2 ± 195.0	483.3 ± 144.3
炭素蓄積量	t-C/ha	267.2 ± 83.2	216.4 ± 64.4

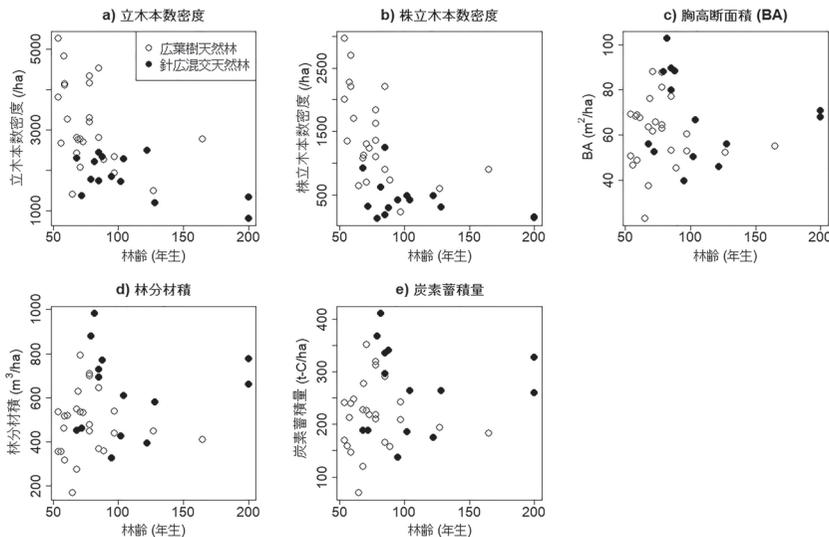


図-2 天然林の林齢と資源量指標との関係

Fig. 2 Relationships between stand age and resource indices for natural forests

3.3 種組成

調査地における4つの種組成指標について、各々の平均値と標準偏差を表-4に示す。針広混交天然林の出現種数、多様度指数、針葉樹本数比率、針葉樹材積比率の平均値は、それぞれ16.9、3.2、4.7%、49.8%であった。一方、広葉樹天然林の平均値はそれぞれ16.6、3.3、1.0%、2.3%であり、針葉樹比率（本数・材積とも）において針広混交天然林よりも有意に小さな値となった（ $p < 0.01$ ）。

表-3 天然林のサイズ構造指標（平均値±標準偏差）

Table 3 Size structure indices for measurement plots in natural forests (mean ± standard deviation)

項目	単位	針広混交天然林 (n=14)	広葉樹天然林 (n=25)
平均DBH	cm	15.6 ± 2.8	13.3 ± 1.9
DBH標準偏差	cm	15.9 ± 4.1	9.2 ± 2.1
大径木本数密度	本/ha	116 ± 61	66 ± 50
老齢林指数		0.66 ± 0.15	0.43 ± 0.19

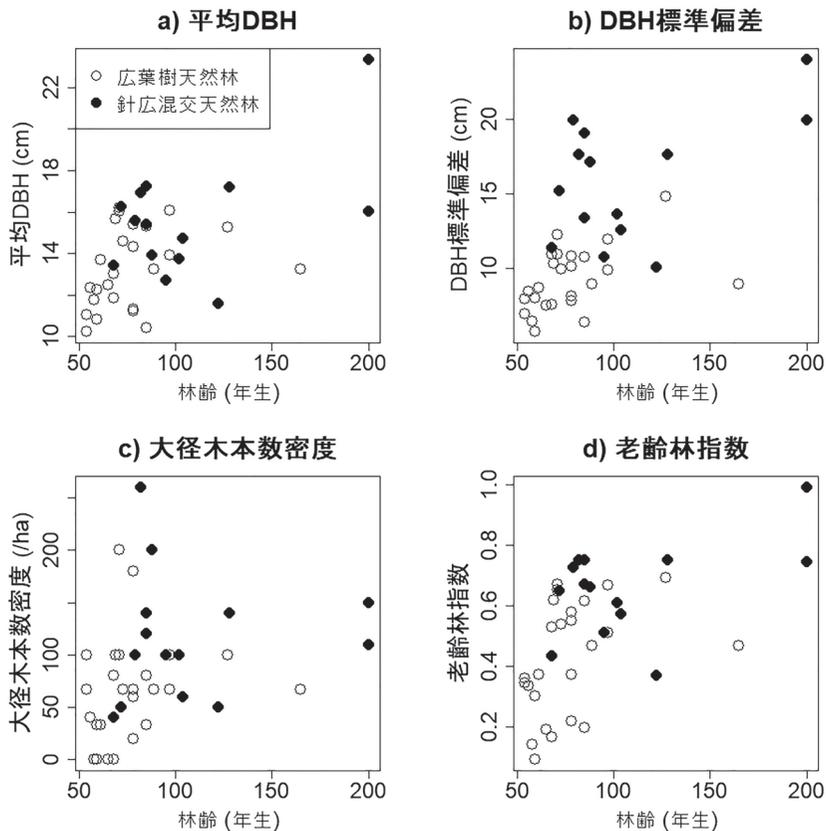


図-3 天然林の林齢とサイズ構造指標との関係

Fig. 3 Relationships between stand age and size structure indices for natural forests

林齢と出現種数, 多様度指数, 針葉樹本数比率, 針葉樹材積比率との関係を図-4に示す。広葉樹天然林の針葉樹材積比率を除いた全ての指標で大きなばらつきがみられた。また, 針葉樹本数比率において, 針広混交天然林 ($r = 0.70, p < 0.01$), 広葉樹天然林 ($r = 0.66, p < 0.01$)とも林齢との間に有意な正の相関が認められた。

調査地における総出現種数は, 針広混交天然林が52種, 広葉樹天然林が61種であった。主な

表-4 天然林の種組成指標 (平均値±標準偏差)

Table 4 Species composition indices for measurement plots in natural forests (mean ± standard deviation)

項目	単位	針広混交天然林 (n=14)	広葉樹天然林 (n=25)
出現種数		16.9 ± 2.4	16.6 ± 2.7
多様度指数		3.2 ± 0.3	3.3 ± 0.2
針葉樹比率 (本数)	%	4.7 ± 4.0	1.0 ± 1.3
針葉樹比率 (材積)	%	49.8 ± 21.1	2.3 ± 5.5

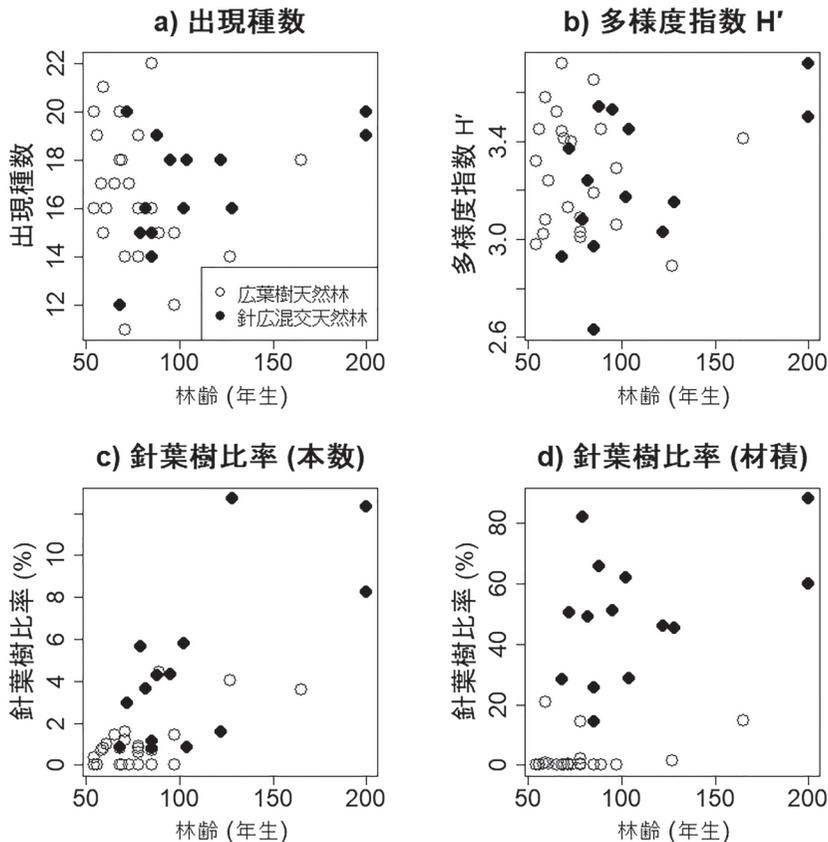


図-4 天然林の林齢と種組成指標との関係

Fig. 4 Relationships between stand age and species composition indices for natural forests

出現樹種を表-5に示す。本数比率では、針広混交天然林でヒサカキ(24%)、サカキ(14%)、アカガシ(10%)の順で、広葉樹天然林でアカガシ(17%)、ヒサカキ(17%)、サカキ(12%)の順で、それぞれ優占していた。ヤブツバキ、ヤブニッケイ、ウラジログシ、スダジイ、カゴノキの5種については、両林種とも本数比率の上位10位以内であった。材積比率では、針広混交天然林でモミ(45%)、アカガシ(10%)、スダジイ(9%)の順で、広葉樹天然林でアカガシ(31%)、スダジイ(29%)、ウラジログシ(9%)の順で、それぞれ優占していた。ウラジログシ、ヤブニッケイ、ヤマザクラ、サカキの4種については、両林種とも材積比率の上位10位以内であった。

3.4 資源量, サイズ構造, 種組成指標間の関連性

調査地における立木本数密度, 林分材積, 老齢林指数, 多様度指数の4つについて, 各ペアの散布図行列と相関行列を図-5に示す。老齢林指数に対しては, 立木本数密度との間に高い負の相関($r = -0.70, p < 0.01$)が, 林分材積との間に高い正の相関($r = 0.71, p < 0.01$)が認められた。一方, 多様度指数と立木本数密度, 林分材積との間, 老齢林指数と多様度指数との間には, いずれも有意な相関が認められなかった。

4. 考察

東大千葉演を対象とした調査により, 針広混交天然林と広葉樹天然林のいずれにおいても, 平均林分材積は500~600 m³/ha前後と非常に大きい現状が示された(表-2)。千葉県森林・林業統計書(千葉県農林水産部森林課, 2020)によれば, 東大千葉演が所在する鴨川市と君津市の平均天然林蓄積は, 2020年3月末時点でそれぞれ127.8 m³/haと103.6 m³/haであった。東大千葉演の天然林面積は両市の天然林全体の1割に満たないものの, 統計値を大幅に上回る平均蓄積を有していた。平均炭素蓄積量も200 t-C/haを超えており, Egusa *et al.* (2020)が森林生態系多様性基礎調査データをもとに推定した日本の森林の平均的な炭素蓄積量(約120 t-C/ha)を大きく上回った。白石ら(2004)は東大千葉演における1995年時点のAクラス(針広混交天然林に相当)とBクラス(広葉樹天然林に相当)の平均炭素蓄積量を, それぞれ68.2 t-C/haと47.2 t-C/haと推

表-5 天然林の主な出現樹種

Table 5 Major observed tree species in the measurement plots in natural forests

本数比率 (%) の上位10種			材積比率 (%) の上位10種		
順位	針広混交天然林 (0.91 ha)	広葉樹天然林 (0.97 ha)	順位	針広混交天然林 (0.91 ha)	広葉樹天然林 (0.97 ha)
1	ヒサカキ (24)	アカガシ (17)	1	モミ (45)	アカガシ (31)
2	サカキ (14)	ヒサカキ (17)	2	アカガシ (10)	スダジイ (29)
3	アカガシ (10)	サカキ (12)	3	スダジイ (9)	ウラジログシ (9)
4	ヤブツバキ (8)	ヤブツバキ (9)	4	ウラジログシ (6)	ヤマザクラ (7)
5	ヤブニッケイ (7)	スダジイ (8)	5	ヤブニッケイ (4)	アラカシ (3)
6	ウラジログシ (7)	ウラジログシ (8)	6	スギ (3)	ヤブニッケイ (3)
7	スダジイ (5)	アラカシ (5)	7	ツガ (3)	ヒサカキ (2)
8	シキミ (4)	ヤブニッケイ (4)	8	ヤマザクラ (3)	サカキ (2)
9	モミ (3)	モチノキ (3)	9	コナラ (3)	アカメガシワ (1)
10	カゴノキ (3)	カゴノキ (1)	10	サカキ (2)	ヤブツバキ (1)

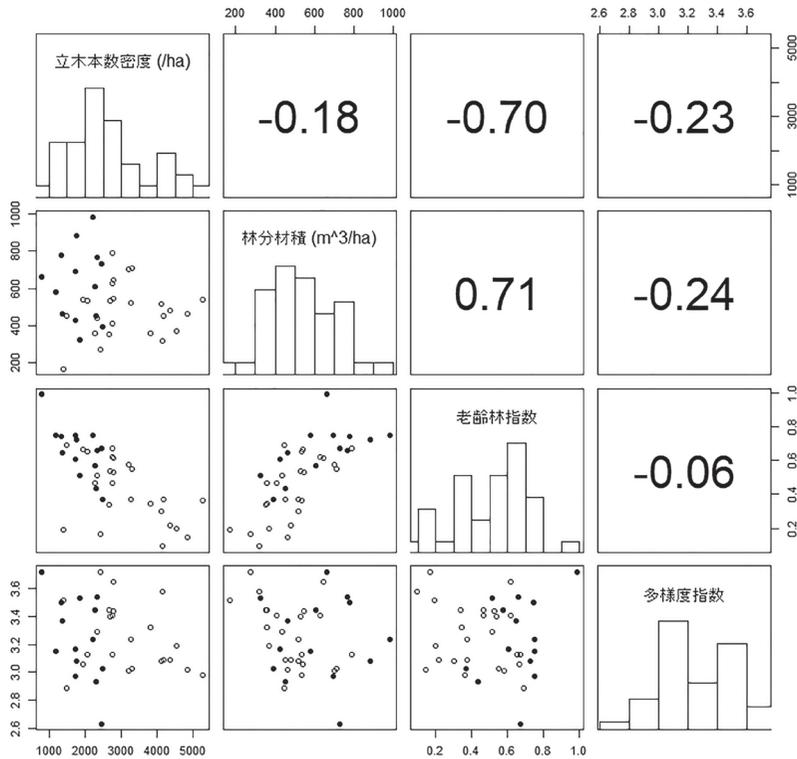


図-5 立木本数密度, 林分材積, 老齢林指数, 多様度指数の相関行列図

Fig. 5 Scatter plot of matrices between tree density, stand volume, old growth index and tree species diversity index

定している。本研究と調査プロット数や炭素蓄積量の推定方法が異なることも影響した可能性はあるものの、24～25年が経過し、立木の成長によって天然林資源の充実が進んだと考えられる。また、Ozaki and Ohsawa (1995) が1986～1992年に東大千葉演内で行った調査によれば、広葉樹天然林（四方木沢）のBA平均値が29.6m²/haと、針広混交天然林（堂沢）の68.4m²/haに比べて有意に小さかった。同調査は1つの小流域に生育する樹高1.3m以上の立木を対象としたものの、本研究の標準地がほぼ全て40m²/ha以上のBAであった（図-2）ことから、資源量の増加はとりわけ広葉樹天然林において顕著だった可能性が示唆される。

算出された林分材積が大きな値となった主な理由として、針広混交天然林では上木に針葉樹（主にモミ）の大径木が比較的多くあり、林分材積の半分程度を占めていたことが挙げられる。また、モミ・ツガはお留木として保護されていた一方、中林施業により下層の広葉樹は薪炭材に利用された（大里・根岸, 1994）ため、主に萌芽更新によって下木の本数密度が比較的高い状態にあったことも影響している。広葉樹天然林においては、平均DBHが約13cmと小さいものの、大半が薪炭林として利用されてきた萌芽更新林である（大里・根岸, 1994）ため、立木本数密度の平均値が3,000本/ha以上と非常に高く、林分材積の大きさに寄与したと考えられる。2つの林種とも、林齢が大きくなるに従って立木（株立木）の本数密度は低くなる傾向がみられた。株立木において幹間競争による幹の淘汰や、単幹化した立木の枯死が生じたためと推察される（井藤ら, 2008）。

サイズ構造に関して、針広混交天然林における立木の平均 DBH は広葉樹天然林に比べて有意に大きな値となった。これは主に、大径木本数密度の違い（表-3）によるものと解釈できる。調査した針広混交天然林の大部分で老齢林指数は 0.5（中程度の複雑さ）を超えた一方、0.8（高い複雑さ）以上は 1 プロットにとどまった（図-3）。Yamura *et al.* (2020) は、天然林の老齢林指数が 0.8 以上になるには伐採後 150 年を要するとしており、過去に中林施業が行われた針広混交天然林のサイズ構造は未だ発達途上にあると考えられる。林齢との関係については、広葉樹天然林で林齢が大きくなるに従って DBH のばらつき（標準偏差）も大きくなる傾向が認められた（図-3）。広葉樹天然林の高齢化に伴い、スダジイ・カシ類を中心に個体（幹）間競争で生残した個体（幹）が肥大成長した一方、ヒサカキやサカキなどの小径木も数多く存在し、林分全体としてサイズ構造（DBH 分布）の不均一化が進行したためと推察される。老齢林指数は立木本数密度との間に負の相関が、林分材積との間に正の相関があったことから（図-5）、今後天然林の高齢化がさらに進み、個体（幹）の淘汰や成長が進むにつれて、サイズ構造の複雑さが高い林分は増えていくものと予想される。

種組成に関して、針広混交天然林での針葉樹材積比率は広葉樹天然林に比べて有意に高かった。上述したとおり、針広混交天然林ではモミの材積比率が半分程度を占めていたことから、モミ大径木の多寡が主に影響したといえる。一方、モミを除いた主な構成樹種に関しては、針広混交天然林と広葉樹天然林との間に大きな違いがなく、両林種とも本数比率の上位 3 種はヒサカキ、サカキ、アカガシであり、材積比率もアカガシ、スダジイ、ウラジロガシが上位を占めていた。なお、針広混交天然林においてモミとともに主要な針葉樹種とされているツガの材積比率は 3% にとどまった（表-5）。材積比率ではないが、針広混交天然林におけるツガの BA 比率として、これまでに 8 ~ 33%（堂沢）（Ozaki and Ohsawa, 1995）や 1 ~ 34%（元清澄山、仲ノ沢、荒檜沢）（蒲谷, 1975）といった調査結果が示されている。ツガの優占度合いが先行研究に比べて低くなった要因は不明であるが、今後ツガ資源の推移について注視していく必要があるかもしれない。

ここで、本研究における標準地の大部分が尾根または中腹に位置している点に注意したい（表-1）。東大千葉演を対象とした先行研究によれば、斜面下部の BA は上部や中部に比べて小さい傾向にある（小島ら, 1986; Ozaki and Ohsawa, 1995）。これは、斜面の下部ほど傾斜が急で土壌が安定しておらず、高い確率で地すべりや林冠崩壊が起こるためと考えられている（小島ら, 1986; Ozaki and Ohsawa, 1995）。また、Yamura *et al.* (2020) は、老齢林指数が 0.5（中程度の複雑さ）になるまでの年数は、尾根よりも斜面下部の方が 100 年以上も短く、沢沿では林齢が 100 年未満で老齢林指数が 0.5 以上になるが、尾根では 180 年を超えると推定している。さらに、Ozaki and Ohsawa (1995) は、針広混交天然林の沢沿でケヤキやイイギリ、ムクロジが、広葉樹天然林の沢沿でフサザクラやミズキ、コナラが、それぞれ比較的高い BA であったとの調査結果を報告している。そのため、資源量が実際よりも過大であったり、サイズ構造や種組成に偏りが生じている可能性もあり、本研究の結果を解釈する際には注意が必要である。

5. おわりに

東大千葉演における天然林資源の現状に関して、本研究を通じて明らかにしたのは主に次の 3 つである。

- (1) 針広混交天然林と広葉樹天然林のいずれも、平均林分材積は 500 ~ 600 m³/ha 前後と非常に大きい。

- (2) 針広混交天然林にはモミの大径木が比較的多くあり、サイズ構造の複雑さは広葉樹天然林に比べて高いものの、老齢林指数が0.8以上の林分は少ない。広葉樹天然林では高齢化に伴ってサイズ構造(DBH分布)の不均一化が進行している。
- (3) 主な構成樹種については、モミを除けば針広混交天然林と広葉樹天然林との間に大きな違いがなく、本数ではヒサカキ、サカキ、アカガシの、材積ではアカガシ、スタジイ、ウラジロガシの優占度合いが高い。

考察でも述べたとおり、主に安全管理上の理由から、現地調査では調査者が安全にアクセス可能な地点に標準地を配置せざるを得なかった。天然林資源の現状をより正確に把握するためには、調査者にとってアクセスが困難な斜面下部や沢沿の調査地点数を増やすことが望ましく、地上型レーザースキャナーによる遠隔計測(川北ら, 2018)や無人航空機を用いた森林上空撮(瀧ら, 2021)など、林内に立入らなくとも安全に調査が実施できる代替的手法の確立が求められる。また、本研究で対象としたのは東大千葉演という一事例であり、国内の各地域で天然林の資源状況を詳細に把握するためにも、本研究と同様の調査を行っていくことが望まれる。

謝辞

本研究に用いたデータは、東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林教育研究計画2021～2030地方演習林計画(千葉演習林第14期)(東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林, 2022)にかかる森林現況調査として実施したものである。同調査には東大千葉演の岡田康則、嶋崎拓の両氏にご協力いただいた。また、匿名の査読者には的確かつ有意義なご指摘をいただいた。各位に深く感謝申し上げる。

引用文献

- Acker, S.A., Sabin, T.E., Ganio, L.M., and McKee, W.A. (1998) Development of old-growth structure and timber volume growth trends in maturing Douglas-fir stands. *For. Ecol. Manag.* 104(1-3): 265-280.
- 千葉県農林水産部森林課 (2020) 令和元年度千葉県森林・林業統計書, 193 pp.
- 千木良雄治・村上拓彦 (2013) 森林資源モニタリング調査データを用いた新潟県の森林モニタリング. *新大農研報* 65(2) : 187-193.
- Egusa, T., Kumagai, T., and Shiraishi, N. (2020) Carbon stock in Japanese forests has been greatly underestimated. *Sci. Rep.* 10(1): 7895.
- 古木達郎 (2008) 東京大学千葉演習林(日本の貴重なコケの森). *蘚苔類研究* 9(10) : 322-324.
- 長谷川幹夫・中島春樹・大宮徹・函子光太郎 (2018) 富山県におけるコナラを主とする二次林の種組成と階層構造. *富山森林研報* 10 : 1-10.
- 石橋聰 (2000) 北方系針広混交林における樹種の分布と地況要因との関係. *日林誌* 82(3) : 243-250.
- 石田仁 (1994) 富山県二次林の主要樹種の資源量 (1). *富山林技セ研報* 8 : 6-13.
- 井藤宏香・伊藤哲・塚本麻衣子・中尾登志雄 (2008) 照葉樹二次林における林冠構成萌芽株集団の動態が林分構造の変化に及ぼす影響. *日林誌* 90(1) : 46-54.
- 蒲谷肇 (1975) 房総丘陵の植生に関する生態学的研究 I. モミーツガ天然林の分布と構造. *東大演報* 67 : 51-62.
- Kajisa, T., Murakami, T., Mizoue, N., Kitahara, F., and Yoshida, S. (2008) Estimation of stand volumes using the k-nearest neighbors method in Kyushu, Japan. *J. For. Res.* 13(4): 249-254.
- 川北憲利・長島啓子・田中和博 (2018) 地上型レーザースキャナーを用いた森林計測の精度検証. *森林計画誌* 51(2) : 47-56.
- 北原文章・加治佐剛・溝上展也・吉田茂二郎 (2011) 森林生態系多様性基礎調査データを用いた森林タイプ分類手法の検討. *九州森林研究* 64 : 135-137.
- Kitahara, F., Mitsuda, Y., Inoue, A., and Kajisa, T. (2013) Classification of natural forest types for forest resource

- monitorin survey data. *J. For. Plann.* 18(2): 111-116.
- 小島克己・石原猛・根岸賢一郎 (1986) 東大千葉演習林における照葉樹二次林の樹種構成および胸高断面積合計. *日林論* 97: 331-332.
- 熊崎実 (2012) 混迷を深めるわが国の森林資源統計: モニタリング調査をなぜ活用しないのか. *山林* 1540: 2-10.
- 前田勇平・吉田茂二郎・長島啓子・村上拓彦 (2004) 森林資源モニタリング調査データを利用した森林タイプ分類手法の検討と人工林における種多様性. *九州森林研究* 57: 203-206.
- 前田勇平・吉田茂二郎・長島啓子・村上拓彦・今田盛生 (2003) 森林資源モニタリングデータを利用した森林タイプの分類とその空間分布. *九州森林研究* 56: 52-55.
- Nakajima, H. (2019) Region-wide mass mortality of Japanese oak due to ambrosia beetle infestation: Mortality factors and change in oak abundance. *For. Ecol. Manag.* 449: 117468.
- 中島春樹 (2020) 森林生態系多様性基礎調査プロットデータを用いた富山県民有林の森林資源解析. *富山森林研報* 12: 1-22.
- 大垣俊一 (2008) 多様度と類似度. 分類学的新指標. *Argonauta* 15: 10-22.
- 大西満信 (1995) わが国の森林資源調査について. *森林計画誌* 25: 57-61.
- 温室効果ガスインベントリオフィス (GIO) 編 (2020) 日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2000 年, 735 pp.
- 大里正一・根岸賢一郎 (1994) 千葉演習林 (東京大学演習林 100 周年記念). *演習林 (東大)* 32: 9-35.
- Owari, T., Matsui, M., Inukai, H., and Kaji, M. (2011) Stand structure and geographic conditions of natural selection forests in central Hokkaido, northern Japan. *J. For. Plann.* 16: 207-214.
- Ozaki, K., and Ohsawa, M. (1995) Successional change of forest pattern along topographical gradients in warm-temperate mixed forests in Mt Kiyosumi, central Japan. *Ecol. Res.* 10(3): 223-234.
- R Core Team (2021) R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- 林野庁編 (2020) 森林・林業統計要覧 (2020 年版). 259 pp, 日本森林林業振興会.
- 斉藤明子・尾崎煙雄・宮野伸也・鈴木勝・斉藤修・村川功雄・倉西良一 (2017) 東京大学千葉演習林 (千葉県南部清澄山系) の昆虫相. *千葉中央博自然誌研究報告特別号 (10)*: 61-232.
- 佐野淳之・武田信仁・大塚次郎 (1997) 鳥取大学蒜山演習林における広葉樹林の構造と動態. *森林応用研究* 6: 17-20.
- 白石則彦 (1998) 青森におけるヒバ天然林資源の解析: 津軽・下北地方の比較を中心として. *森林計画誌* 31: 49-58.
- 白石則彦 (1999) わが国のモニタリングシステムの現状と問題点. *森林科学* 27: 35-37.
- 白石則彦・土田絢子・泉桂子・鈴木誠 (2004) 東京大学千葉演習林における炭素蓄積量の推定 - 1995 年と 1909 年の比較. *東大演報* 112: 11-34.
- 瀧誠志郎・青木三六・小路丸未来・稲田純次 (2021) AI 搭載ドローンによる森林内空撮と三次元モデルの構築. *森林利用誌* 36(3): 151-160.
- 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林 (2022) 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林教育研究計画 2021 ~ 2030 第三部 地方演習林計画 (千葉演習林第 14 期) 演習林 (東大) 64: 53-102.
- 當山啓介・金井敬宏・三次充和・江口誠一 (2019) 東京大学千葉演習林の林内に残る炭素跡の実態. *東大演報* 139: 1-15.
- 山本博一・広川俊英・佐藤烈・岩本進一・道上昭夫・犬飼浩 (1996) 針広混交天然林の林分構造の解析 (2) - 持続可能な択伐林施業の条件 -. *日林論* 107: 105-108.
- Yamaura, Y., Lindenmayer, D., Yamada, Y., Gong, H., Matsuura, T., Mitsuda, Y., and Masaki, T. (2020) A spatially explicit empirical model of structural development processes in natural forests based on climate and topography. *Conserv. Biol.* 34(1): 194-206.

(2021 年 12 月 29 日受付)

(2022 年 3 月 16 日受理)