

論文

綾リサーチサイトにおける常緑広葉樹枯死木の分解と化学成分濃度変化^{*1}酒井佳美^{*2}・石塚成宏^{*3}・佐藤 保^{*3}

酒井佳美・石塚成宏・佐藤 保：綾リサーチサイトにおける常緑広葉樹枯死木の分解と化学成分濃度変化 九州森林研究 75:71-74, 2022 綾リサーチサイトにおける枯死木による炭素循環の特徴を明らかにすることを目的として、長期毎木データから枯死木の発生履歴をもとに枯死木試料を採取し分解速度を推定した。また、各化学成分濃度を測定し重量減少との関係を調べた。本試験地における常緑広葉樹種（平均直径10.3 cm）の分解定数（ k ）はおおよそ0.09~0.15 (year⁻¹)の範囲にあると考えられ、九州地域でのスギやヒノキの倒木よりも分解が早いことが示された。倒木のC, N, およびクラウンリグニン（以下、リグニン）の濃度（%）は材密度の低下に伴って上昇し、ホロセルロースの濃度は低下した。抽出成分の濃度は材密度との相関は認められなかった。分解初期にはリグニンとホロセルロースの重量減少は同じ比率で進行しており、ホロセルロースだけでなく難分解性成分であるリグニンも分解されていたことが示された。分解後期になると主にホロセルロースが分解されていた。抽出成分の場合は分解が進行しても初期材での濃度の影響が続くと考えられた。

キーワード：枯死木, 倒木, 分解, リグニン, ホロセルロース

I. はじめに

枯死木は森林生態系の生物多様性の場、あるいは炭素貯留の場として重要な役割を果たしている。日本の枯死木による炭素蓄積量は0.74~0.90 kg m⁻²と報告され、森林の炭素プール（土壌、リター、枯死木）の10%程度を占める（林野庁, 2021）。枯死木の分解過程は分解される基質の物理的、化学的特徴や、分解者（木材腐朽菌類、食材性昆虫等）、そして、水、酸素、気温等の周辺環境によって変化する。針葉樹と広葉樹では主要木質成分（リグニン、ホロセルロース、抽出成分）の化学組成や含有濃度、および材の組織構造が異なり（川田・伊藤, 2021）、広葉樹は針葉樹よりも早く分解されやすいと報告されている（Russell *et al.* 2014）。分解者も樹種の嗜好性がある場合や、白色腐朽菌や褐色腐朽菌のように分解可能な主たる木質成分が異なる場合がある。枯死木の分解は葉リターに比べて時間がかかることに加え、これらの影響要因の多様な組み合わせが分解過程の解明をより困難にさせている。

枯死木の分解による主要木質成分の変化は森林生態系の炭素動態に直接寄与するため、その解明による炭素モデルの精緻化が期待される。天然林は、施業記録が残る人工林と異なり、枯死木の発生履歴などの情報が非常に乏しい。特に広葉樹林での枯死木分解速度や木質成分濃度の報告例は少ない。宮崎森林管理署管内の綾リサーチサイトは長期モニタリングサイトとして知られた常緑広葉樹林である。枯死木の現存量は36.85 Mg ha⁻¹と多く（Sato, 2010）、炭素循環への寄与が大きいと予想される。そこで、本研究では綾リサーチサイトでの枯死木による炭素循環の特徴を明らかにすることを目的として、長期毎木データより取得可能な枯死木の発生年とその後の経過年数を利用した枯死木の分解速度を推定し、重量減少に伴う各化学成分濃度変化を調べた。

II. 調査地と方法

調査は、九州森林管理局宮崎森林管理署中尾国有林管内綾リサーチサイトで行った。本サイトは1989年に4 haのプロットが設定されて以来、定期的に毎木調査が行われ、調査地の概要についてはSato *et al.* (1999)によって報告されている。本調査では2007年までの毎木調査データから枯死と記載された個体を抽出し、現地でナンバープレートにより個体識別ができた個体を調査対象とした。調査対象個体は全て倒木として現存した。それぞれの倒木からノコギリ等で円盤を採取した。アカガシ (*Quercus acuta*)、ウラジロガシ (*Q. salicina*)、マテバシイ (*Lithocarpus edulis*)、イスノキ (*Distylium racemosum*)、ホソバタブ (*Persea japonica*) の5樹種から21枚の円盤試料が採取できた（表-1）。採取した円盤の平均直径（SD）は10.3 (5.2) cmであった。円盤はその場で両木口面と円盤側面をスケールと共に写真撮影した。ImageJ 1.53c (Schneider *et al.*, 2012)により木口面積と厚さを測定し、円盤体積の計算に使用した。円盤は重量が一定になるまでオープンで乾燥し（70℃）、乾燥重量を測定した。乾燥重量と体積から材密度（g cm⁻³）を計算した。化学成分分析のために、円盤は樹皮と材部に分けた後にウイレー式粉碎機と高速振動試料粉碎機によりそれぞれ分けて微粉末にした。微粉末試料は灰分、全炭素（C）・全窒素（N）濃度測定（SUMIGRAPH NC-22）、および、木質成分濃度測定に供した。抽出成分は木部微粉末試料からアルコールベンゼン混合液を用いたソックスレー抽出法により抽出した。また、クラウンリグニン法によりホロセルロースとクラウンリグニン（以下、リグニン）を定量した（TAPPI 1997, 1998）。分解過程における土壌の混入を灰分量と同等であると仮定し成分濃度は灰分を除いて計算した。本報告で扱う全炭素、全窒素、および木質成分濃度は材部の測定値である。

^{*1} Sakai, Y., Ishizuka, S. and Sato, T.: Deadwood decomposition and concentrations of C, N and wood chemical components of evergreen broadleaf tree species in Aya Research Site.

^{*2} 森林総合研究所九州支所 Kyushu Res. Center, For. & Forest Prod. Res. Inst., Kumamoto 860-0862, Japan

^{*3} 森林総合研究所 Forestry and Forest Products Research Institute, Ibaraki 305-8687, Japan

表-1 綾リサーチサイトで採取した枯死木の円盤試料の概要
List of deadwood disks collected in Aya research site

樹種名 Tree species	試料数 Number of samples	枯死後年数 Years after death	円板直径 Disk diameter (cm)	初期材密度 Initial wood density (g cm ⁻³)	備考 Note
アカガシ <i>Quercus acuta</i>	3	3~11	18~23	0.71 ¹	
ウラジロガシ <i>Q. salicina</i>	2	1~3	14	0.64 ²	材密度はアラカシ(<i>Q. glauca</i>), ウラジロガシ, イチイガシ(<i>Q. gilva</i>), シラカシ(<i>Q. myrsinifolia</i>)の平均値を代用
マテバシイ <i>Lithocarpus edulis</i>	6	1~13	6~16	0.61 ¹	木質成分の文献値は不在
イスノキ <i>Distylium racemosum</i>	2	1~11	7~12	0.70 ¹	
ホンバタブ <i>Persea japonica</i>	8	1~11	4~8	0.69 ¹	タブノキ (<i>P. thunbergii</i>) を代用

¹: 森林総合研究所 (2004) ²: 安部ら (2012)

表-2 材の初期材密度を 1) 使用した場合と 2) 未使用の場合のパラメータ: 初期材密度 a と分解定数 k の推定値と信頼区間
Mean values and confidence intervals for estimated initial wood density and decay rate constants. Data used for estimation are 1) including initial wood density and 2) not including initial wood density.

	パラメータ Parameters	Mean	SD	2.5%	50%	97.5%	Rhat*
1) 初期値あり Including initial wood density	a	0.59	0.03	0.53	0.59	0.66	1.00
	k	0.15	0.04	0.10	0.15	0.24	1.00
2) 初期値無し Not including initial wood density	a	0.48	0.03	0.42	0.48	0.55	1.00
	k	0.09	0.02	0.06	0.09	0.14	1.00

*: MCMC 収束を判定する指標。Rhat < 1.1を収束とみなした。

円盤の採取枚数は樹種によって2~8枚とばらつきがあるため、本報告では樹種別に示さず、これらをまとめて常緑広葉樹として示した。

枯死後の経過時間に伴う材密度の減少は一次の指数関数式を分解モデルとして使用した (Olson 1963)。

$$Dt = a \exp(-kt)$$

経過年数 (t) における材密度を Dt (g cm⁻³), a と k はパラメータであり, a は初期材密度, k が分解定数 (year⁻¹) である。本報告ではベイズ推定を用いてパラメータを推定した。また, 分解開始時の材の材密度を 1) 文献値からのデータを使用 (以下, 初期値あり), 2) 回帰による推定 (以下, 初期値無し) の二つのパターンで推定した。パラメータ推定には統計ソフトウェア R (ver. 4.1.0) (R Development Core Team, 2020) とそのパッケージである rstan (Ver. 2.21.2) を使用した。事前分布を一様分布, チェーン数を 4, MCMC の繰り返し数は 3000 (iter= 3000), パーンイン期間は 1000 (warmup= 1000), 間引きは無し (thin= 1), 乱数の総数は 8000 (total post-warmup samples= 8000) である。chain 数が 3 以上ですべてのパラメータで Rhat < 1.1 となることを MCMC が収束したとみなした。主成分分析を R (ver. 4.1.0) によりおこなった。変数として材密度, および C, N, リグニン, ホロセルロース, 抽出成分の各濃度, 直径を用いて主成分を求めた。

Ⅲ. 結果と考察

分解定数

綾リサーチサイトにおける常緑広葉樹種倒木の分解定数平均値 k (SD) (year⁻¹) の初期値ありは 0.15 (0.04), 初期値無しは 0.09 (0.02) と推定された (表-2)。初期材密度平均値 a (SD) は順に 0.59 (0.03), 0.48 (0.03) と推定された (表-2)。広葉樹種の材密度は針葉樹種よりも高いものが多く, 使用した文献値の材密度は 0.61~0.71 g cm⁻³ であった (安部ら, 2012; 森林総合研究所, 2004)。推定された初期材密度はそれに比べて低い値となっている。文献値からの初期値を使用した方が分解期間の材密度の減少幅が大きくなるため分解定数は高くなる。一方, 初期値無しの推定値は枯死後 1 年経過以降の分解定数となり分解定数を低めに見積もった数値であると考えられる。木材の材密度には個体間や部位間によるばらつきがある (森林総合研究所, 2004)。Sato (2010) は本サイトにおいて Yoneda *et al.* (1977) の分解度分類を用いて分解度 0 と判定した枯死直後の材密度を 0.54 g cm⁻³ (0.47 - 0.68 g cm⁻³) と報告している。これらと推定された初期材密度平均値 a とを考慮すると綾リサーチサイトでの常緑広葉樹の平均分解定数としてはおおよそ 0.09~0.15 (year⁻¹) の範囲にあると考えられる。九州地方での倒木の分解定数は針葉樹で直径 5 - 15 cm のスギが大分で 0.058 (year⁻¹), ヒノキが長崎で 0.064 (year⁻¹) と報告されている (Sakai *et al.*

2013)。それらに比べて本研究での常緑広葉樹種の分解は早い。広葉樹種が針葉樹種に比べて分解速度が早いことは既存の報告と一致する (Russell *et al.* 2014)。ただし、採取した円盤の平均直径は 10.3 (5.2) cm である。本サイトには直径 50 cm を超える大径木も存在する (Sato, 2010)。推定された分解定数は小～中径木の数値であり、今後、大径木を含めていくことが求められる。

枯死木の成分濃度変化

枯死木の分解の進行に伴う材密度の低下と材の化学成分濃度変化の関係を調べた。C, N, およびリグニンの濃度は材密度の低下に伴って上昇し、ホロセルロースの濃度は低下した (図-1 (1) ~ (4))。抽出成分の濃度は一定の傾向は認められなかった (図-1 (5))。C 濃度は材密度が 0.2 g cm^{-3} 近くになるまでほぼ 50% で推移し、その後高くなる傾向であった。材密度が 0.2 g cm^{-3} より大きい試料は主に枯死後 1~3 年の試料である。つまり初期の分解過程では C 濃度はほぼ一定で、後期に濃度が高くなっていった。一方、ホロセルロースとリグニンは、材密度が 0.3 g cm^{-3} 近くに減少するまでは、それぞれの重量の約 70%, 約 25% で推移し、その後、材密度の減少に伴い、ホロセルロースの割合は低く、リグニンの割合は高くなる傾向であった。分解初期には両成分の濃度が一定で推移したことから、それぞれの重量減少が同じ比率で進行しており、難分解性成分であるリグニンも初期に分解していたことを示している。ただし、この分解が木材腐朽菌によるものかは不明である。九州地域はヤマトシロアリとイエシロアリが広く分布し、森林での枯死木分解に寄与する可能性も示唆されており (酒井, 2019)、さらなる調査が必要である。分解後期になるとリグニンの濃度が上昇する一方、ホロセルロースの濃度は低下した。分解後期の重量減少は主にホロセルロースの分解によるものと考えられた。

枯死木の分解の進行への影響要因として直径が報告されている (Magnússon *et al.*, 2016)。そこで本試験での分解への直径を含めた影響要因の関係を調べた。直径と材密度、各化学成分濃度を用いて主成分分析を行いそれぞれの関係を調べた (図-2)。第 1 主成分と第 2 主成分による累積寄与率は 84.54% となった。第 1 主成分には材密度、C と N、ホロセルロースとリグニンが選択され、材密度の減少と相関がある化学成分が含まれた。一方、直径は抽出成分とともに第 2 主成分に選択された。この結果は直径の材密度減少への影響はほとんどなかったことを示す。また、抽出成分は材密度と相関は無かった (図-1 (5))。抽出成分含有量は辺材より心材で多いことが知られている (川田・伊藤, 2021)。つまり直径が大きく心材部分の割合が増えるほど抽出成分濃度が高くなる。このことから、生木時の直径と相関のある抽出成分濃

度の影響が、枯死後、分解が進行しても残っていると考えられた。

綾りサーチサイトにおいて毎木調査データを用いて枯死木の発生年と経過年数をたどることができた枯死木から分解定数と化学成分濃度変化を明らかにした。本調査地での常緑広葉樹種の枯死木の分解は小～中径材の直径サイズでは針葉樹のスギやヒノキに比べて非常に早いことが明らかとなった。分解に伴う材密度の低下は C, N 濃度、およびリグニン、ホロセルロース濃度変化と相関が示された。また、難分解性成分であるリグニンが分解初期に分解されていることが示唆された。

IV. 謝辞

本研究における試料採取には橋本昌司氏、試料調整には岡崎由美子氏の協力を得た。ここに謝意を示す。

引用文献

- 安部 久ら (2012) 木材学会誌, 58(6): 329-338.
 川田俊成・伊藤和貴編集 (2021) 木質化学講座 4 木材の化学, 255 pp, 海青社, 滋賀
 Magnússon, R. Í, *et al.* (2016) For. Ecol. Manage., 377:1-15.
 Olson, J. S. (1963). Ecology 44(2): 322-331.
 R Development Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, URL: <https://www.r-project.org/>
 林野庁 (2021) 森林吸収源インベントリ情報整備事業土壌等調査実施報告書, 49 pp
 Russell, M., *et al.* (2014). Ecosystems 17(5):765-777.
 酒井佳美 (2019) 九州森林研究 72: 87-89.
 Sakai, Y. *et al.* (2013). For. Ecol. Manage., 295:228-238.
 Sato, T. (2010) J. For. Res., 15(6):404-410.
 Sato, T. *et al.* (1999) Bull. Kitakyushu Mus. Nat. His., 18:158-180.
 Schneider, C.A. *et al.* (2012) Nature Methods 9, 671-675.
 森林総合研究所 監修 (2004) 木材工業ハンドブック (改訂 4 版), 丸善, 東京
 Tappi (1997) T 204 cm-97.
 Tappi (1998) T 222 om-98:5.
 Yoneda, T., *et al.* (1977) Jpn. J. Ecol., 27(1): 53-60.
 (2021 年 11 月 13 日受付; 2021 年 12 月 10 日受理)

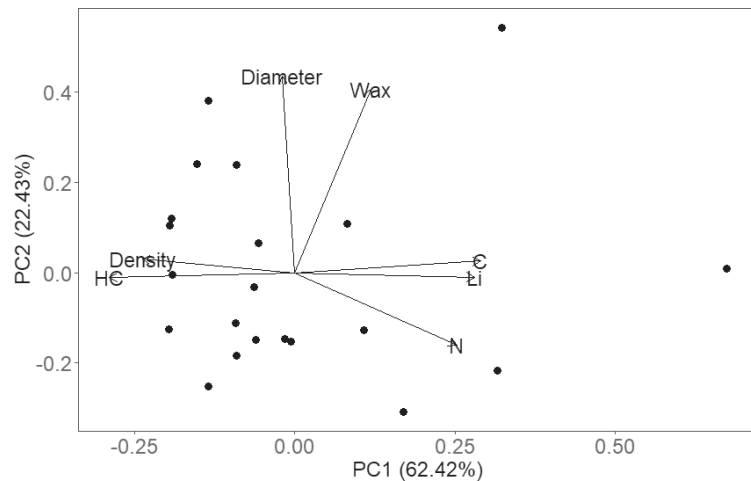
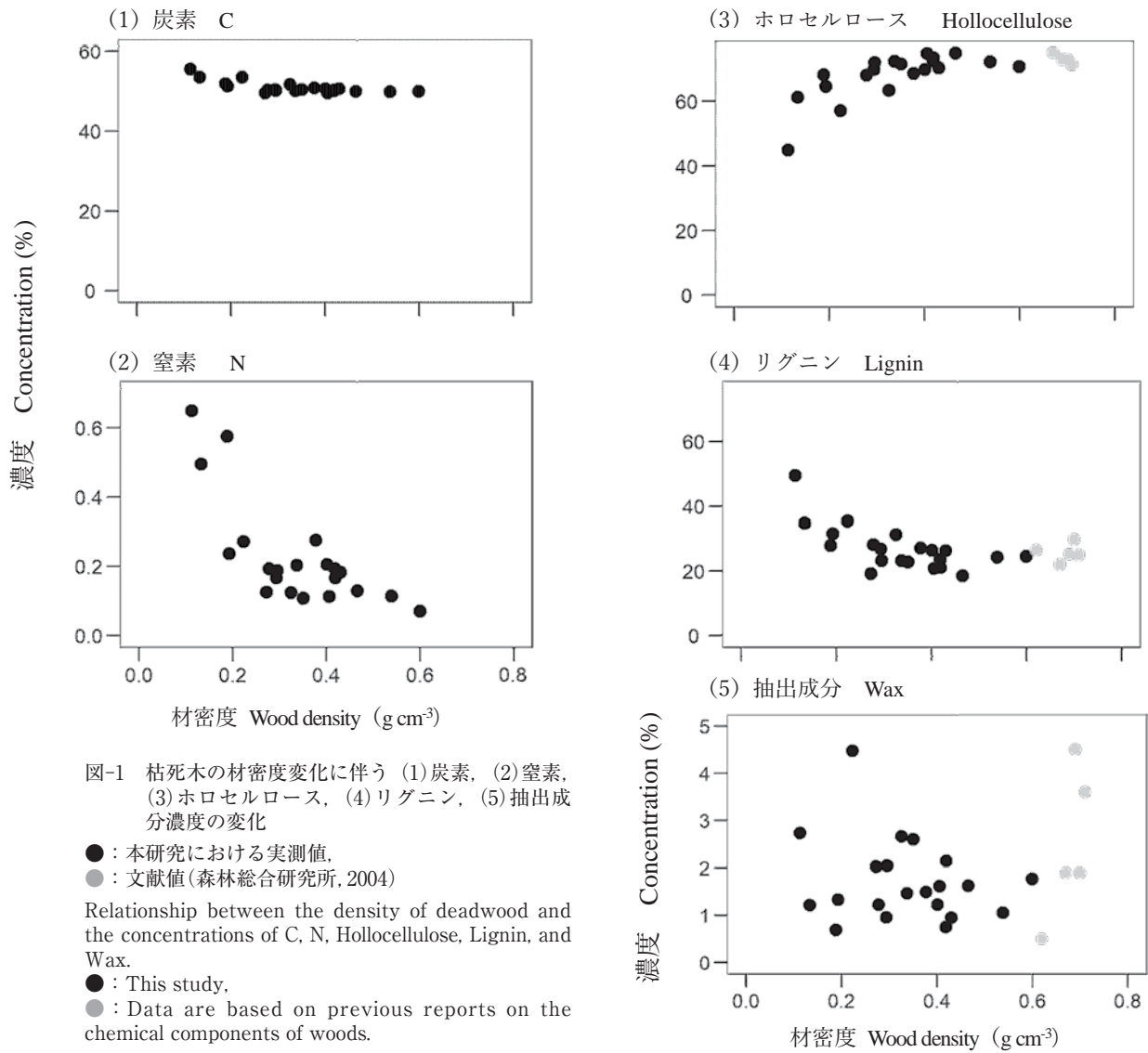


図-2 主成分分析の第1主成分と第2主成分の結果

Density : 材密度, Diameter : 直径, C : 炭素, N : 窒素, Li : リグニン, HC : ホロセルロース, Wax : 抽出成分

Results of Principal Component Analysis (PCA)

Density: Wood density, Diameter: Sample disk diameter, C: Carbon concentration, N: Nitrogen concentration, Li: Lignin concentration, HC: Holocellulose concentration, Wax: Wax concentration