玉川大学農学部研究教育紀要　第 10 号：21–33（2025）
Bulletin of the College of Agriculture, Tamagawa University, 10, 21–33（2025）

【研究報告】

玉川学園キャンパスにおける7タイプの森林生態系の純一次生産量とリターフォール量の比較
――都市緑地の二酸化炭素吸収能力の評価を目指して――

友常満利[1]・杉崎義和[2]・和田日向子[3]・勝島可奈子[4]・関川清広[1]

要　約

近年，地球温暖化は人類が直面する重要課題の一つとして世界的に認識されている．森林生態系は，大気中CO_2の主要な吸収源として機能するが，都市近郊に存在する緑地（都市緑地）のCO_2吸収量を評価した研究は少ない．本研究では，都市緑地の一例として玉川学園キャンパス内の緑地における炭素循環や収支を明らかにすることを目的として，純一次生産量およびリターフォール量を推定・比較し，キャンパス全体の緑地のCO_2吸収量と今後の管理方針について検討した．キャンパス内（総面積63.7 ha）の緑地（23.0 ha，森林のみ）をコナラ–クヌギ林，コナラ–ヒサカキ林，コナラ–シラカシ林，スギ林，ヒノキ林，クスノキ林，モウソウチク林の7タイプに区分し，各林分に方形区を設けた．その結果，純一次生産量は0.4～7.1 tC ha^{-1} yr^{-1}の範囲にあり，クスノキ林が最も高く，次いでコナラを含む3林分で高かった．一方，スギ林やヒノキ林などの常緑針葉樹林では低かった．リターフォール量は4.3～6.8 tC ha^{-1} yr^{-1}となり，常緑針葉樹のスギ林が最も多く，次いでヒノキ林で多い傾向を示した．コナラを優占種とする林分のうち，下層に常緑樹を含むコナラ–ヒサカキ林とコナラ–シラカシ林では，リターフォール量全体が少なく，優占種であるコナラの葉リターの割合も低かった．リターフォールの季節変化は，秋から冬に増加するタイプ，春に増加するタイプ，および両季節に増加が見られるタイプの3つに分類された．これらの結果から，各緑地タイプの物質循環や炭素収支は大きく異なり，樹種特性，林分構造，および管理状況が強く影響していることが明らかとなった．キャンパス全体の緑地（森林）による年間CO_2吸収量は約331 tCO_2 yr^{-1}と試算された．都市緑地は異なるタイプの小規模な森林の集合体であることから，個々のタイプに対する攪乱（環境変動や病害）の影響は異なると考えられ，都市緑地の炭素吸収機能への影響も一部に限られることが示唆された．しかし，玉川学園キャンパスの緑地の多くは高齢林であり，炭素吸収能力の低下が進行していると考えられる．今後，炭素吸収機能を維持・強化するためには，間伐や更新などの管理を通じて林分の若返りを図ることが重要である．

キーワード：炭素隔離，地球温暖化，NPP，バイオマス

緒言

現在，大気中の温室効果ガス濃度の上昇による地球温暖化は，世界的に重要課題の一つとして認識されており，国連気候変動枠組条約（UNFCCC）の京都議定書やパリ協定をはじめ，国際的な取り組みが進められている（IPCC, 2023）．温室効果ガスの中でも二酸化炭素（CO_2）は排出量が最も多く，地球温暖化への影響も大きいことから，大気中濃度の抑制が各国の主要な課題となっている（Kabir，2023）．抑制策としては，省エネルギー化や代替エネルギー利用などの排出削減に加え，緑地の拡大や効果的な管理，さらには直接大気からCO_2を回収するDAC（Direct Air Capture）技術などの吸収側の強化も重要である（Qiu et al., 2022; GIO，2024）．

日本は森林資源に恵まれた国であり，とくに都市周辺の森林や草原などの大規模緑地は重要なCO_2吸収源とし

[1] 玉川大学農学部環境農学科　東京都町田市玉川学園6–1–1
[2] 日産緑化株式会社埼玉支店　埼玉県加須市南篠崎1–11–3
[3] 玉川大学大学院農学研究科　東京都町田市玉川学園6–1–1
[4] 国立研究開発法人森林研究・整備機構　茨城県つくば市松の里1
責任著者：友常満利　tomo.32104@agr.tamagawa.ac.jp

て機能しており（Saigusa et al., 2005; Dhital et al., 2010; Zhang et al., 2024），大気組成の調整機能に加えて，憩いや教育の場としての役割も担っている．一方，都市近郊の緑地（都市緑地）は小規模なものが多く，タイプ（主要構成樹種）が異なる小面積の緑地が隣接している例が多い（Lu et al., 2022; Addas, 2023）．CO_2吸収量に着目した研究は，面積的にまとまりのある自然林や造林地では数多くなされてきたが，上記のような都市緑地での研究は限られている．

緑地のCO_2吸収機能や環境変化への応答を評価するためには，生態系内の炭素循環を理解することが不可欠である．これまでに森林や草地を対象とした大規模研究では，コンパートメントモデルに基づいて炭素収支の解明が進められてきた（Dhital et al., 2010；大塚 2012；Tomotsune et al., 2019）．大気中のCO_2は光合成によって有機物に固定され，植物体バイオマスとして蓄積される（図1）．この正味の固定量は，純一次生産量（Net Primary Production; NPP）と呼ばれる．NPPは，生態系が一年間にどれだけ炭素を大気から吸収したかを示す基礎的な指標であり，炭素循環の「入り口」を規定する．一方，植物バイオマスは枯死後に落葉・落枝・倒木として土壌に供給され，リターフォール量（Litterfall; LF）として測定される．これらは土壌有機物となり，微生物の分解により従属栄養生物呼吸（Heterotrophic respiration; HR）を通じて再び大気に放出される．植物バイオマスのうち，幹は長期間炭素を貯留するのに対し，葉は短期間に枯死してLFとして土壌に移動する．すなわち，固定，分配された炭素の滞留時間は，植物の器官ごとに異なり，それぞれの評価が重要である．NPPとLFを測定することは，炭素の「固定量」と「移動量」を同時に把握することにつながり，生態系全体の炭素収支（Net Ecosystem Production; NEP）を理解する上で欠かせない．

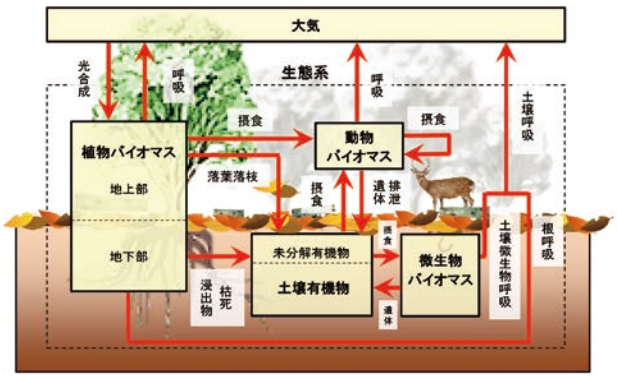


図1　森林生態系における炭素循環コンパートメントモデル
黒い四角は炭素の貯留（プール），矢印は各プールを間の炭素の移動（フラックス）を表す．

玉川学園キャンパスは周囲を市街地に囲まれた都市緑地に位置づけられる（関川ほか，1986；関川・池之，2020）．玉川学園キャンパス内の緑地は，薪炭林として使われていた落葉広葉樹二次林や小規模な植林，竹林など多様な緑地が存在し，いずれも関東の都市域に典型的に見られる．しかし，同一環境下に成立するこれらの複数の緑地タイプの炭素収支や循環を，統一的手法で比較・評価した事例はきわめて少ない．都市緑地の機能理解と適切な管理には，上記の統一的かつ定量的データの蓄積が重要である．そこで本研究では，都市緑地の一例として玉川学園キャンパス内を対象に，主要な7タイプの森林生態系における炭素循環の違いを理解するために，各緑地タイプにおける純一次生産量およびリターフォール量を定量化しその違いを明らかにすることを目的とした．また，そこから各緑地タイプの特性とキャンパス全体のCO_2吸収能力について評価し，今後の持続的管理の方向性について議論する．

方法

調査地

調査は東京都町田市，神奈川県横浜市，川崎市にまたがる玉川学園キャンパス内（63.7 ha）で行った（図2）．

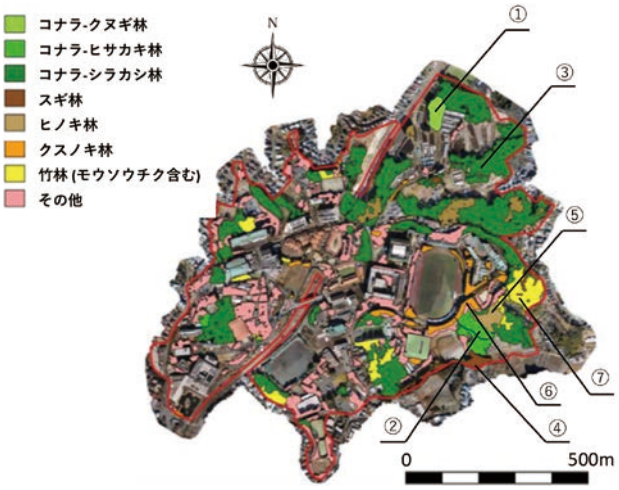


図2　調査対象地の全容と各緑地タイプの分布
ドローンによって得られた空中画像（2021年8月30日）で，赤枠内は玉川学園キャンパスの敷地（玉川学園校内現況図2017年9月補正版を元に作図）を示す．各緑地タイプはドローン画像と踏査から分類．①から⑦は凡例の上から順に各緑地タイプに設置した方形区の位置を示す．

表1　各調査地の詳細

緑地タイプ	生活型	管理状況	林床植生	斜面方位	傾斜（度）	林齢（年）
コナラ–クヌギ林	落葉広葉	定期下草刈り	アズマネザサ	北西	13.7	60以上
コナラ–ヒサカキ林	落葉広葉–常緑広葉	—	アズマネザサ	南東	19.7	80以上
コナラ–シラカシ林	落葉広葉–常緑広葉	—	アズマネザサ	南西	22.9	80以上
スギ林	常緑針葉	—	—	南西	20.7	50以上
ヒノキ林	常緑針葉	—	—	北東	18.9	50以上
クスノキ林	常緑広葉	—	ツツジ類	北西	17.6	50以上
モウソウチク林	常緑竹	—	—	南西	20.6	50以上

各緑地タイプの名称は，胸高断面積の総計が多い樹種を基本とし，それに加えて著しく立木密度が多い樹種がある場合にはその樹種との混交林とした（例えばコナラ–クヌギ林）．コナラを含む3林分のうちクヌギは高木層，ヒサカキとシラカシは低木層を形成している．林齢は関川（1985）と国土地理院（2013）の地図・空中写真閲覧サービスより推定．

本地域は多摩丘陵の中央に位置し（北緯35度34分10秒，東経139度28分09秒，経塚二等三角点を基準），標高は50 m～110 mである．年間平均気温は14.6℃，年間降水量は1472 mm（2022～2024年の平均値，玉川大学農場気象観測機）で，気候帯は暖温帯に属する．林内の土壌は黒ボク土に分類される（日本土壌分類体系，日本ペドロジー学会）．周辺は1950年代から1970年代にかけての高度経済成長期に宅地化が進み，現在では玉川学園キャンパス内の緑地は市街地に囲まれた島状都市林となっている．

キャンパス内には多様な緑地タイプが小規模にパッチ状に分布している（友常ほか，2021）．主としてコナラ（*Quercus serrata*）やクヌギ（*Q. acutissima*）を優占種とする落葉広葉樹林や，下層にシラカシ（*Q. myrsinifolia*）やヒサカキ（*Eurya japonica*）などの常緑広葉樹を含む林分からなる．また，スギ（*Cryptomeria japonica*）やヒノキ（*Chamaecyparis obtusa*）などの常緑針葉樹植林，モウソウチク（*Phyllostachys edulis*）などの竹林がみられる．さらに，人工物（舗装された道路や校舎施設）の周囲には主にクスノキ（*Cinnamomum camphora*），マテバシイ（*Lithocarpus edulis*），ソメイヨシノ（*Cerasus*×*yedoensis*）などのサクラ類が植栽されている．一部の管理された林分や舗装された道路周辺を除き，現在は間伐や剪定，下層植生の管理などはほとんど行われていない．このため，広葉樹林を中心に多くの緑地で林床植生にアズマネザサ（*Pleioblastus chino*）が繁茂している．

事前に調査地内の全域を踏査し，優占種や林床植生の状況から，さらに比較的大きな面積を有する緑地として，7つの緑地タイプを調査の対象とすることとした（図2）：①コナラ–クヌギ林（二次林），②コナラ林–ヒサカキ林（二次林），③コナラ–シラカシ林（二次林），④スギ林（植林），⑤ヒノキ林（植林），⑥クスノキ林（植栽林），⑦モウソウチク林（竹林）．2022年5月に各林分内に20 m×20 mの方形区を1つ設置し，純一次生産量とリターフォール量の測定のための調査区とした．各コドラート内の基本構造は表1と付図1にまとめた．便宜的にこれらに含まれないマテバシイやサクラなどの植栽林やその他の緑化木植樹群を⑧その他とした．

純一次生産量の推定

純一次生産量の推定のために各調査区において，2022年から2024年までの各年の12月に毎木調査を行った．まず，胸高直径5 cm以上の全樹木を対象に地際から130 cmの位置にナンバーテープを取り付けた．その後，樹種の同定，記録と共に，胸高直径を直径尺（F10-02DM，ダイヤメータールール，ムラテックKDS，日本）を用いて測定した．また，樹高は15 m長の測桿（SK逆目盛検測桿，宣真工業，日本）を用いて測定し，それよりも樹高が高い場合は測桿の先端から樹木上部までは目測とした．

純一次生産量はこれらの毎木調査の結果と幹材積プログラム（xlsm）（細田ほか, 2010）より推定した．まず，各樹木の幹材積（m^3）を推定した．その後に以下の式（GIO，2024）を用いて，炭素貯留量（C，tC ha^{-1}）の推定を行った（式1）．得られた炭素貯留量について，2023年と2022年の差，および2024年と2023年の差を，純一次生産量すなわち年間炭素吸収量（ΔC, tC ha^{-1} yr^{-1}）とし（式2），両年の平均値を求めた．

$$C = \Sigma_j \{[V_j \cdot D_j \cdot BEF_j] \cdot (1 + R_j)\} \cdot CF \qquad (式1)$$

$$\Delta C = Ct_{n+1} - Ct_n \quad (式2)$$

ここで，jは各樹種，Vは材積（m^{-3}），Dは容積密度（td. m. m^{-3}），BEFはバイオマス拡大係数，Rは地上部バイオマスに対する地下部バイオマスの比率，CFは乾物重当たりの炭素含有率（%），Ct_nは年nの炭素貯留量（t ha^{-1}），Ct_{n+1}は年t_nの1年後の炭素貯留量をそれぞれ示す．D，BEF，RおよびCFの各値には，樹種別の生体バイオマス算定パラメータ（GIO，2024）を使用した．記載のない樹種はその他の広葉樹の値を使用した．モウソウチクについては，以下の竹林の推定式（奥田，2006；清野ほか，2009）からバイオマス量を推定し，炭素含有率（地上部の稈：48.9%，後藤ほか，2008）を用いてCを算出した．

表2　各緑地タイプの純一次生産量

緑地タイプ	樹種	立木密度（本 ha^{-1}）	単位面積当たりの純一次生産量（tC ha^{-1} yr^{-1}）		1個体当たりの純一次生産量（kgC ha^{-1} yr^{-1}）	
			2023	2024	2023	2024
コナラ–クヌギ林	コナラ	275	1.0	1.0	3.8	4.6
	クヌギ	175	0.8	0.8	4.6	4.3
	エノキ	100	0.1	0.2	1.4	2.2
	エゴノキ	75	0.0	0.0	0.5	−0.1
	クマノミズキ	25	0.1	0.1	2.0	1.0
	ネズミモチ	25	0.0	0.0	0.2	0.1
	合計	675	2.1	2.3	—	—
コナラ–ヒサカキ林	コナラ	425	0.8	0.7	1.9	1.7
	ヒサカキ	550	0.3	0.4	0.6	0.7
	シラカシ	125	0.5	0.6	4.0	4.7
	ヒノキ	75	0.1	0.2	1.3	3.3
	スギ	50	0.1	0.1	2.8	1.6
	合計	1225	1.9	2.1	—	—
コナラ–シラカシ林	コナラ	275	0.4	0.4	1.4	1.6
	シラカシ	850	4.1	4.1	4.8	4.7
	ヒサカキ	75	0.0	0.0	0.2	0.2
	ミズキ	75	0.2	0.1	2.6	1.7
	ホオノキ	25	0.0	0.0	0.7	1.6
	合計	1300	4.7	4.6	—	—
スギ林	スギ	750	1.6	1.3	2.1	1.6
	合計	750	1.6	1.3	—	—
ヒノキ林	ヒノキ	1425	1.8	1.8	1.2	1.3
	ヒサカキ	200	0.1	0.2	0.4	1.3
	シラカシ	25	0.0	0.0	0.0	0.8
	合計	1650	1.8	2.2	—	—
クスノキ林	クスノキ	1100	7.1	7.0	6.5	6.3
	合計	1100	7.1	7.0	—	—
モウソウチク林	モウソウチク	2775	—	6.0	—	2.2
	ヒノキ	125	0.0	0.0	0.0	0.0
	スギ	50	0.0	0.0	0.7	−0.9
	シラカシ	75	0.3	0.0	4.5	0.5
	合計	3025	0.4	6.0	—	—

20 m×20 mの方形区の調査の値を1 haに換算した値．立木密度は2022年12月のデータ．

$y = 3.4873x^{0.8816}$ （式3）

ここでyはバイオマス量（td.m.），xは胸高断面積（m^{-2}）をそれぞれ示す．

リターフォール量の推定

リターフォール量の推定はリタートラップ法を用いた（Tomotsune et al., 2019）．2022年12月に開口部が1.0 m^2（1.0 m×1.0 m）のリタートラップを各調査区内に設置した（n＝3）．これらのトラップの枠には園芸支柱を用い白色寒冷紗（クレモナ寒冷紗，メッシュサイズは1.04 mm，株式会社クラレ，日本）を地上1 mの位置で固定した．リターフォールの回収は2か月毎とし，原則として月末，または翌月の月初に行い，2023年12月までの1年間で継続した．回収したリターは乾燥後（70度，48時間以上），その他葉（優占種，その他の種），枝，生殖器官（花序，果実･種子），その他（破砕物）に分別し，乾燥重量（gD.W.）を測定した．これらの積算値をもとに炭素含有率を50％（GIO，2024）として，年間リターフォール量（tC ha^{-1} yr^{-1}）を推定した．

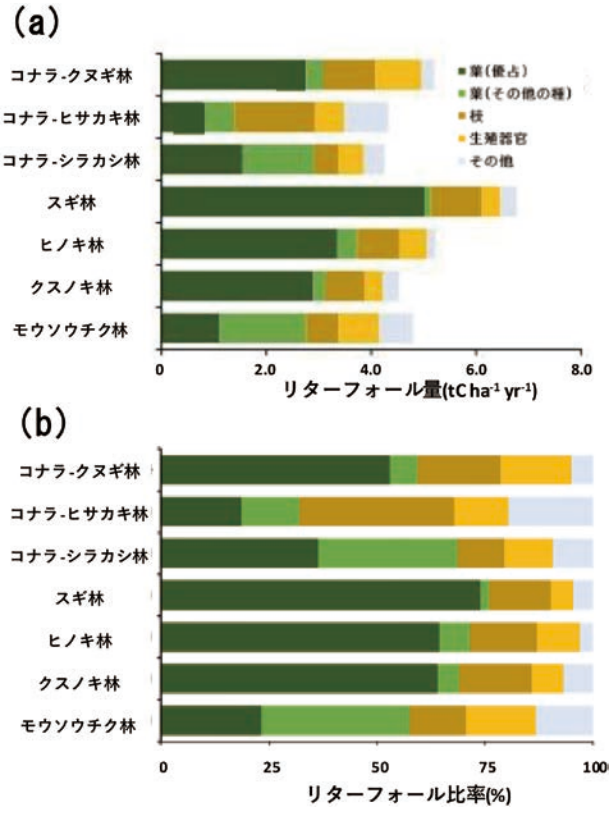


図3　各緑地タイプの年間リターフォールの比較
（a）は器官別の年間リターフォール量，（b）年間リターフォール量に対する器官別の比率をそれぞれ示す．

結果

純一次生産量

純一次生産量の2年間の平均値は，常緑広葉樹のクスノキ林で最も高かった．次いで落葉広葉樹が優占するコナラ-シラカシ林，コナラ-クヌギ林，コナラ-ヒサカキ林がこれに続いた．一方，常緑針葉樹であるスギ林およびヒノキ林は低かった．モウソウチク林の平均は中間的であったが，2023年と2024年の差が最も大きかった（表2）．森林タイプ間の差は0.4～7.1 tC ha^{-1} yr^{-1}の範囲にあり，最大値と最小値の間には18倍を超える差異が認められた．

樹木の一個体当たりの純一次生産量は，クスノキが最も高かった．コナラを含む3タイプの落葉広葉樹林では，管理状況によって大きな違いがみられた．下草刈りが実施され，下層植生が乏しいコナラ-クヌギ林では，高木層を構成するコナラおよびクヌギの純一次生産量が高値を示した．一方，管理が行われずヒサカキやシラカシが下層に存在する林分では，高木層のコナラの純一次生産量が半分以下に低下し，代わって下層の特にシラカシが

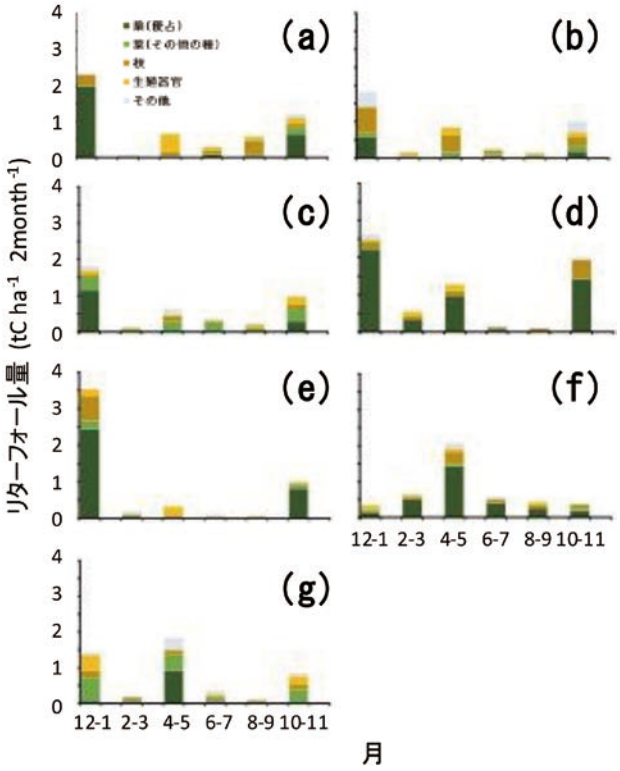


図4　各緑地タイプにおけるリターフォール量の季節変化
（a）はコナラ-クヌギ林，（b）はコナラ-ヒサカキ林，（c）はコナラ-シラカシ林，(d）はスギ林，(e）はヒノキ林，(f）はクスノキ林，(g）はモウソウチク林のデータをそれぞれ示す．

非常に高かった．林分全体の2024年の純一次生産量が大きかったモウソウチク林では，個体当たりで見ると，クスノキやシラカシに比べて半分以下の値となった．

リターフォール量

年間のリターフォール量は7つの林分で大きく異なり，4.3～6.8 tC ha^{-1} yr^{-1}と約1.6倍の差があった（図3a）．常緑針葉樹のスギ林は最も多く，次いでヒノキ林で多かった．そのリターのほとんどは優占種の葉であった（図3b）．一方，コナラを優占種とする3林分のうち，下層に常緑広葉樹を含むコナラ–ヒサカキ林とコナラ–シラカシ林は，年間のリターフォール量は他の林分よりも少なく，また優占種の葉の割合も少なかった．クスノキ林は，リターフォール量はやや少なかったが，葉の占める比率は多かった．モウソウチク林もやや少なく，そのうち優占種より高木層の他の樹木の葉の方が多かった．

リターフォール量の季節変化は緑地タイプによって異なるパターンが観察された（図4）．落葉広葉樹が優占するコナラ–クヌギ林は秋から冬にかけて明瞭なピークを示し，これは葉リター量に強く依存していた．また，春には生殖器官，夏には枝が比較的多く観察された．下層に常緑広葉樹を含む2林分は，高木層の優占種の葉の量に依存し，秋から冬にかけてリターフォール量が多くなったが，春や夏の期間には下層木の葉リターが継続的に観察された．常緑針葉樹の2林分はともに秋から冬にかけてリター量が増加したが，スギ林においては，春先にも比較的多くの葉リター量が確認された．一方，常緑のクスノキ林やモウソウチク林の葉リター量は，春に最も多くなる傾向が観察された．後者には高木層に落葉広葉樹の大木が数本存在するため，その葉リターが秋から冬にかけて多く確認された．

考察

各緑地タイプの純一次生産とCO_2吸収量

本研究では，純一次生産量はクスノキ林で最も高く，CO_2吸収量が大きかった．一般に樹木は大径木・高齢になると成長速度が低下し，CO_2吸収量も減少することが知られている（Laffitte et al., 2022）．しかし，本研究のクスノキは1983年（記念グラウンドおよび当時の中学部校舎竣工時）に植樹されたもので，日当たりが乏しい北向き斜面に位置していたにもかかわらず，高い吸収量を維持し，現在も成長が継続していると考えられる．クスノキは葉量が多く，成長の早い樹種として知られている（藤原ほか，2002；松江ほか，2009）．本研究で得られた豊富な葉リター量や，個体当たりの高い純一次生産量の結果（図3a，表2）は，これらの既往研究の知見を支持し，林分としての高いCO_2吸収量に寄与したと考えられる．また，常緑樹であるため光合成可能な期間が長いことや，本調査地と同様にクスノキは林縁や単木状に植栽されることが多く，それに起因して比較的良好な光環境を得やすいことも一因であろう．

モウソウチク林では，2024年のCO_2吸収量は高かった（表1）．本研究の結果は，竹林の炭素吸収量は一般的な森林と同程度かやや高いとされる多くの報告と一致する（Isagi et al., 1997; Lin et al., 2017）．特に若齢竹（若竹）の生産性は非常に高く，また適切な間引き，整備によりその生産量はより高まる．しかし，本研究で対象とした竹林は，成立から少なくとも50年以上経っており（表1），また日当たりの良好な南向き斜面ではあるもののほとんど管理が行われずに過密な状態にあることから，全盛期に比べてCO_2吸収量は低下しているものと思われる．

コナラを含む3林分のうち，コナラ–クヌギ林では北向き斜面に位置していたにもかかわらず，コナラの個体当たりの純一次生産量が他の2林分に比べて最も高かった．3林分はいずれも樹齢が高く（表2），全体としてCO_2吸収能力は低下しつつあると考えられる．しかし，コナラ–クヌギ林では定期的に林床の刈り払いや間伐が行われ，高木層の樹木密度が低く（付図1），下層・林床植生も疎であったため，栄養や光の競争が弱まり，個体レベルでの吸収量が高くなったと推察される．一方，他の2林分では下層に常緑樹が繁茂しており，特にコナラ–シラカシ林では下層のシラカシが多くの炭素を吸収した結果，林分全体のCO_2吸収量が最も大きかった．他の研究においても，下層植生が森林全体の年間炭素フラックスの30～50％を担うことが報告されている（Wiesner et al., 2019; Dirnböck et al., 2020）．これらの結果は，緑地の管理方法や遷移の進行にともなう林分構造の変化が，上層木と下層木の炭素固定能に影響し，全体のCO_2吸収量を左右することを示唆している．特に，都市近郊に広く存在する管理放棄林では，下層植生が炭素吸収の主要な担い手となる場合があり，都市緑地の炭素循環を評価する際には，上層木だけでなく下層植生の寄与を的確に捉えることが重要となるだろう．

スギ林は南向き斜面に，ヒノキ林は北向き斜面に，それぞれ位置し，他の林分に比べて純一次生産量が低かった．これらは日本の代表的な植林樹種であり，一般に成

長速度が速く，特に若齢から中齢期におけるCO_2吸収量が高いことが知られている（Iizuka and Tateishi, 2015；白石ほか, 2004）．両林分とも，関川（1986）が調査を行った1984年に植生図として記録されており，それ以前に植林されたもので，50年生を超えていると推察される．スギやヒノキの伐期齢は50年前後とされ，それ以上の齢では成熟段階に向かうといわれている（林野庁, 2024）．したがって本研究のこれらの針葉樹林は，すでに成長が緩慢となり，吸収能力は低下していたと考えられる．これらの結果は，管理の不十分な高齢林では吸収量が大きく減少することを意味し，都市緑地における人工林管理の重要性を示唆している．今後，伐期の短縮や間伐の実施などによって林分を更新することや，利用価値の低い林分を広葉樹化することが，都市域における現在の人工林のCO_2吸収機能を高めるために不可欠であると考えられる．

各緑地タイプのリターフォール

年間リターフォール量や器官別の割合は，緑地タイプごとに異なる傾向を示した．常緑針葉樹のスギやヒノキではリターフォール量が多く，その年に吸収された炭素の多くが葉の生産に配分されていたことを示唆している．一般にこれらの樹種は落葉広葉樹に比べて幹への炭素配分が大きいとされており，本研究の結果は既往の知見とは異なっていた．一方で，スギやヒノキは暗い環境下でも光合成が可能で，葉面積指数（Leaf Area Index, LAI）が極めて高いこと（Hasegawa et al., 2013; Inagaki et al., 2022），また葉の寿命が2～6年と他の常緑広葉樹より長いこと（Kiyono and Akama, 2016）が知られている．本研究で観察されたリターフォール量の多さはこうした知見と一致しており，本来であれば高い純一次生産量につながると考えられる．しかし実際には低い値に留まっており，先に述べた高齢化や過密といった林分条件がそれらのポテンシャルを打ち消すほど強く影響していた可能性が高い．

コナラを含む3林分のうち，コナラ–クヌギ林では，下層の定期的な管理により常緑樹がほとんど存在せず，リターフォールの大部分が優占種であるコナラおよびクヌギ由来であった．一方，コナラ–シラカシ林では，下層にシラカシが高密度に成立しており，その葉リター量の割合が高かった．葉リターが多いということは，林冠全体として保持されていた葉量が相対的に多かったことを反映している．事実，シラカシの葉寿命は2～3年と比較的長く（矢野・田川，1993），常緑のシラカシが下層で加わることで，林分全体の葉量（LAI）が増加し，光合成に利用可能な葉が年間を通じて多く維持されていたと考えられる．その結果として，コナラ–シラカシ林では，コナラ単独の林分よりも総光合成量が大きくなり，高い純一次生産量につながったと推察される．一方，コナラ–ヒサカキ林では，純一次生産量が3林分の中で最も低かった．さらに枝リターの量と割合が高かったことから，生産量の低下要因が葉生産よりも落枝や枯死過程によるリター増加に由来していたことが示唆される．調査期間中，この林分周辺ではナラ枯れの発生が報告されており（関川ほか，2022），感染や弱体化による落枝の増加ならびに樹体成長の停滞が先に述べた純一次生産量の低下にも寄与したものと推察される．

クスノキ林では，リターフォール量に占める葉リター

表3　調査地域における緑地面積と調査地の年間炭素吸収量

緑地タイプ	キャンパス内の緑地被覆		年間炭素吸収量		
	面積 (ha)	面積比率 (%)	単位面積当たり ($tC\ ha^{-1}\ yr^{-1}$)	緑地総計 ($tC\ yr^{-1}$)	緑地毎比率 (%)
コナラ–クヌギ林	0.3	1.4	2.2	0.7	0.7
コナラ–ヒサカキ林	0.7	3.1	2.0	1.4	1.6
コナラ–シラカシ林	10.8	46.9	4.7	50.8	56.3
スギ林	1.3	5.6	1.4	1.8	2.0
ヒノキ林	0.3	1.4	2.0	0.6	0.7
クスノキ林	1.0	4.2	7.1	7.0	7.8
モウソウチク林	1.8	7.7	3.2	5.8	6.4
その他	6.9	29.8	3.2	22.2	24.6
合計	23.0	100.0	3.9	90.2	100.0

その他はマテバシイやサクラ類などの植栽木群や様々な種の単木を含む．単位面積当たりの年間炭素吸収量は本研究の2年間の平均値（表2）とした．その他の単位面積当たりの年間炭素吸収量は7林分の平均値とした．

の割合が高い傾向を示した．これは，クスノキが一般に葉量の多い樹種であることを報告した既往研究（藤原ほか，2002；松江ほか，2009）と一致している．さらに，吸収した炭素を葉の生産と幹の成長の双方に効率的に分配することが知られており，炭素の固定と貯留において比較的安定した機能を持つ林分と評価できる．

モウソウチク林は純一次生産量が高かったにもかかわらず，優占種のモウソウチクのリターフォール量は非常に少なかった．吸収した炭素が葉や枝よりも地下茎の成長に多く分配され（井鷺ほか，1993），また，葉を他の樹木のように年々入れ替えないためと考えられる．竹類では地下茎が主要な貯蔵器官として機能するため，地上部のリター供給量は相対的に小さくなる．その結果，土壌への有機物供給量は他の森林タイプより少なく，分解速度も速いため，炭素の循環は早いが長期的な炭素貯留効果は限定的であると報告されている（Seino et al., 2009）．この特徴は，竹林が短期的には高いCO_2吸収源となりうる一方で，長期的な炭素固定機能は弱いことを示している．

リターフォールの季節変化は緑地タイプによって大きく異なっていた．この季節変化は葉リターの量に依存し，葉のリターフォールの季節性は落葉樹のように秋にのみ集中するタイプ，常緑広葉樹のように春に集中し一年を通して少量のリターフォールが発生するタイプ，春と秋の両方の季節に増加するスギなどの主に3つのタイプにわかれ，林分の樹種構成の組み合わせで様々な季節変化を示すこととなった．これらの樹種毎の季節パターンは過去の研究例（河原，1985；井鷺，1994；佐藤，1998；Ikegami et al., 2014）と一致する．さらに，枝はナラ枯れなどの攪乱，台風や突風，降雪などの影響で季節変化や年変化が大きく異なるものと思われる．

玉川学園キャンパスのCO_2吸収量と今後の管理への提言

本研究の結果，玉川学園キャンパスに存在する7タイプの緑地は，樹種構成や管理などの影響によりそれぞれ炭素の収支や循環特性が大きく異なることが示された．年間炭素吸収量（2022年～2023年と2023年～2024年の平均値）を求め，各緑地タイプの面積（図2から推定）に基づいて，緑地当たりの炭素吸収量（緑地総計）を試験的に評価した（表3）．コナラ–シラカシ林が最も広い面積を占め，キャンパス内では多くの炭素を吸収している林分であると評価できる．これらを合算すると，キャンパス全体の緑地による年間炭素吸収量は約90 tC yr^{-1}であり，CO_2換算で約331 tCO_2 yr^{-1}と推定された．これは，日本の1人当たりの年間排出量（約8.3 tCO_2，2022年度；GIO，2024）の約40人分に相当する．ただし，本研究では各生態系の土壌における有機物分解に伴うCO_2放出，すなわち従属栄養生物呼吸を考慮していないため（図1），真の生態系全体の炭素収支（すなわちNEP）の推定には至っていない．また，本研究では面積の大きな割合を占めるその他の緑地タイプを詳細に分類できておらず，また木本類が存在しない雑草地や農地などを評価していない．今後は，これらを含めて炭素収支を定量化することで，都市緑地のCO_2吸収機能をより正確に評価できると考えられる．

近年，関東をはじめ都市近郊の緑地でもナラ枯れやマツ枯れなど特定の樹種が枯れる被害をもたらす樹病の流

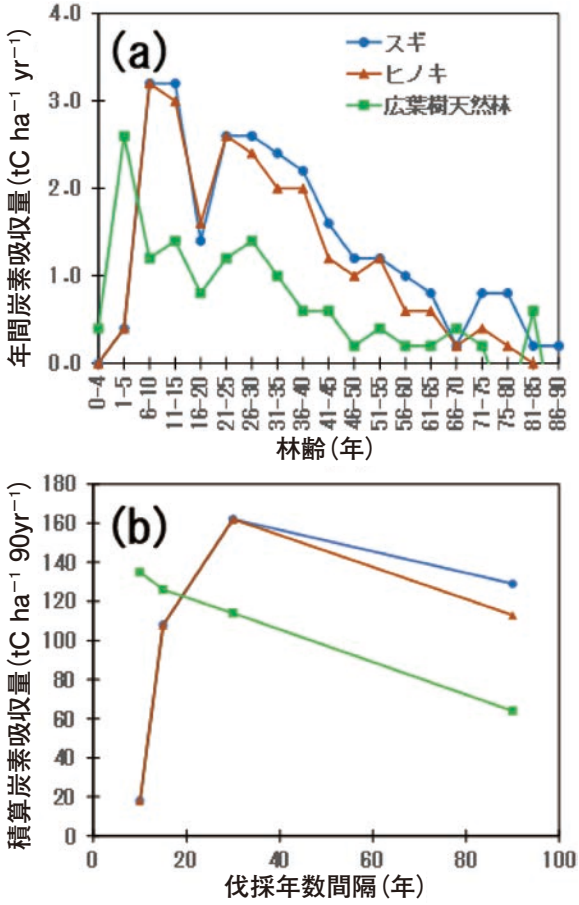


図5　炭素吸収量の比較

（a）は林齢別の年間炭素吸収量を示す．林野庁（2022）が公開している全国の毎木調査のデータを著者が5年毎の林齢区分に整理し図示した．本研究で用いた手法と同様の推定方法．（b）は（a）のデータを元に90年間，森林を維持した場合の積算炭素吸収量を示す．伐採年の間隔（10年で9回，15年で6回，30年で3回，90年で1回）を変えて維持した場合の試算．

行が報告されている（中村，2021；林野庁，2025）．これらの樹病が頻発すると，コナラやマツ類の優占度が高い森林ほど，炭素吸収量は著しく減少する可能性がある．一方で，本研究が対象とした都市緑地では様々な緑地タイプがパッチ状に隣接または混在しており，コナラ林以外の緑地も存在することから，樹病による炭素吸収量の減少は限定的であると考えられる．このため，周辺地域のCO_2吸収量は大きく変動せずに維持されるであろう．すなわち，都市緑地のCO_2吸収量は，単一樹種で構成される林分よりも攪乱や環境変動に対する耐性を有していると言える．

玉川学園キャンパスの森林の多くは，人為的管理を受ける緑地としては高齢であり，2024年時点でスギ林やヒノキ林はおよそ50年生以上，コナラ林は約60～80年生以上と推定される（関川，1985）．公開されている林野庁（2022）の毎木調査のデータを整理すると，スギやヒノキなど主要造林樹種は6～15年生の若齢期に最も高い吸収量を示し，その後，成長の鈍化に伴って吸収量は減少する傾向がある（図5a）．一方，コナラなどの落葉広葉樹林ではより若齢期での炭素吸収量が高く，高齢化に伴う吸収量の低下が顕著である．ここから伐採年の間隔を変えて90年間で森林を維持したとすると，スギやヒノキは30年間隔，コナラは10年間隔で更新する方が長期的に見た積算炭素吸収量が高まる（図5b）．本研究結果やこれらの試算を踏まえると，玉川学園キャンパスの緑地管理において，炭素吸収機能の維持・強化の観点から次の方針が考えられる．①コナラ–クヌギ林，②コナラ–ヒサカキ林，③コナラ–シラカシ林といったコナラ優占林では，下層に常緑樹を生育させて遷移を進行させるか，あるいは伐採・萌芽によって積極的に更新を図ることが必要である．④スギ林や⑤ヒノキ林といった人工林についても，既に高齢化が進んでいるため，間伐や更新を通じて林分の若返りを行うことが望ましい．また，材としての利用価値が乏しい場合には，広葉樹林や都市的機能に合わせた植栽林へと転換することも，選択肢の一つとして検討しうる．これらの管理によって，都市緑地としてのCO_2吸収機能をより高めることができると考えられる．

謝辞

本研究の遂行にあたり，各林分の使用に関してご配慮いただいた玉川学園総務部次長の北川昭一氏，総務部管財課課長の細谷清氏，またドローン調査の実施に際しご尽力くださった総務部総務課課長の住友芳行氏，緑地の管理状況に関する情報および補足データをご提供いただいたタマガワイーサポートの山崎祥子氏に深く感謝申し上げる．さらに，調査に同行し多大な支援をしてくださった生態系生態学分野の学生諸氏に厚く御礼申し上げる．

文献

Addas, A. 2023. The importance of urban green spaces in the development of smart cities. Frontiers in Environmental Science 11: 1206372.

Dhital, D., Yashiro, Y., Ohtsuka, T., Noda, H., Shizu, Y. and Koizumi, H. 2010. Carbon dynamics and budget in a *Zoysia japonica* grassland, central Japan. Journal of Plant Research 123: 519–530.

Dirnböck, T., Kraus, D., Grote, R., Klatt, S., Kobler, J., Schindlbacher, A., Seidl, R., Thom, D. and Kiese, R. 2020. Substantial understory contribution to the C sink of a European temperate mountain forest landscape. Landscape Ecology 35: 483–499.

藤原宣夫，山岸裕，村中重仁．2002．都市緑化樹木によるCO_2固定量の算定方法に関する研究．日本緑化工学会誌 28：26–31.

GIO（温室効果ガスインベントリオフィス）（編）．2024．日本国温室効果ガスインベントリ報告書2024年．国立環境研究所地球環境研究センター，筑波.

後藤誠二朗，巳嘎那，河合洋人，張福平，賈書剛，西條好廸，秋山侃．2008．放棄竹林生態系の現存量ならびに炭素貯留量の推定に関する研究．システム農学 24：243–251.

Hasegawa, K., Omi, H., Hiruma, Y. and Kumagai, S. 2013. Estimation of Leaf Area Index of Cryptomeria japonica Using Various Methods. Journal of Geography (Chigaku Zasshi) 122: 875–891.

細田和男，光田靖，家原敏郎．2010．現行立木幹材積表と材積式による計算値との相違およびその修正方法．森林計画学会誌 44：23–39.

Iizuka, K. and Tateishi, R. 2015. Estimation of CO_2 sequestration by the forests in Japan by discriminating precise tree age category using remote sensing techniques. Remote Sensing 7: 15082–15113.

Ikegami, N., Satake, T., Nagayama, Y. and Inubushi, K. 2014. Changes in silica in litterfall and available silica in the soil of forests invaded by bamboo species (*Phyllostachys pubescens* and *P. bambusoides*) in western Japan. Soil Science and Plant Nutrition 60: 731–739.

Inagaki, Y., Miyamoto, K. and Sakai, A. 2022. Age-related changes in water and nitrogen utilization in crop trees and understory vegetation in a hinoki cypress plantation forest in Kochi city, southern Japan. Nitrogen 3: 247–259.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2023. Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of

the intergovernmental panel on climate change. IPCC, Geneva.

Isagi, Y., Kawahara, T., Kamo, K. and Ito, H. 1997. Net production and carbon cycling in a bamboo *Phyllostachys pubescens* stand. Plant Ecology 130: 41–52.

井鷺裕司. 1994. 物質経済からみたタケ群落の生態学的研究. 広島大学博士論文, 広島.

井鷺裕司, 加茂浩一, 清野嘉之, 伊東宏樹. 1993. 竹林生態系の物質収支. 森林総合研究所研究報告 365：1–27.

Kabir, M. 2023. Climate change due to increasing concentration of carbon dioxide. Journal of King Saud University - Science 35: 102574.

河原輝彦. 1985. 森林生態系における炭素の循環―リターフォール量とその分解速度を中心として―. 林業試験場研究報告 334：21–52.

Kiyono, Y. and Akama, A. 2016. Predicting annual trends in leaf replacement and ^{137}Cs concentrations in *Cryptomeria japonica* var. *japonica* plantations. 林業総合研究所研究報告 15：1–15.

清野嘉之, 竹内学, 鳥居厚志, 奥田史郎, 野田巌, 金森匡彦. 2009. 日本の竹林のバイオマス炭素蓄積量・吸収量の算定手法の開発. 森林総合研究所平成21年度研究成果選集：78–79.

国土地理院. 2013. 国土地理院. 地図・空中写真閲覧サービス. https://service.gsi.go.jp/map-photos/（2025 年 9 月 25 日閲覧）

Laffitte, B., Seyler, B.C., Wang, W., Li, P., Du, Y. and Tang, Y. 2022. Declining tree growth rates despite increasing water-use efficiency under elevated CO_2 reveals a possible global overestimation of CO_2 fertilization effect. Heliyon 8: e11219.

Lin, M.-Y., Hsieh, I.-F., Lin, P.-H., Laplace, S. and Kume, T. 2017. Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forests as a significant carbon sink? A case study based on 4-year measurements in central Taiwan. Ecological Research 32: 845–857.

Lu, S., Oh, W., Ooka, R. and Wang, L. 2022. Effects of environmental features in small public urban green spaces on older adults' mental restoration: evidence from Tokyo. International Journal of Environmental Research and Public Health 19: 12270.

松江正彦, 長濱庸介, 飯塚康雄, 村田みゆき, 藤原宣夫. 2009. 日本における都市樹木のCO_2固定量算定式. 日本緑化工学会誌 35：318–324.

中村克典. 2021. マツ材線虫病被害・防除の現状と将来展望. 森林遺伝育種学雑誌 10：31–40.

奥田史郎. 2006. タケの地上部現存量を簡易に推定する. 森林総合研究所 平成18年度研究成果選集：74–75.

大塚俊之. 2012. 森林生態系の炭素循環：Takayama Forest での10年間で分かったことと, 分からなかったこと. 日本生態学会誌 62：31–44.

Qiu, Y., Lamers, P., Daioglou, V. McQueen, N., Boer H-S., Harmsen, M., Wilcox, J., Bardow, A. and Suh, S. 2022. Environmental trade-offs of direct air capture technologies in climate change mitigation toward 2100. Nature Communications 13: 3635.

林野庁. 2025. ナラ枯れ発生状況. https://www.rinya.maff.go.jp/j/hogo/higai/naragare_R5.html（2025年11月22日閲覧）

林野庁. 2024. 令和6年度森林総合管理士（フォレスター）基本テキスト. https://www.rinya.maff.go.jp/j/ken_sidou/forester/index.html（2025年9月12日閲覧）

林野庁. 2022. 森林資源の現況. https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/index1.html（2025年11月22日閲覧）

Saigusa, N., Yamamoto, S., Murayama, S., Kondo, H. and Nishimura, N. 2005. Gross primary production and net ecosystem exchange of a cool-temperate deciduous forest estimated by the eddy covariance method. Agricultural and Forest Meteorology, 134, 135–150.

佐藤保. 1998. 九州の森と林業. 独立行政法人 森林総合研究所九州支所, 熊本.

Seino, T., Takeuchi, M., Torii, A., Okuda, S., Noda, I. and Kanamori, M. 2009. Estimation of biomass and carbon sequestration in managed bamboo forests. 森林総合研究所平成21年度研究成果選集：78–79.

関川清広. 1985. 玉川学園付近におけるクヌギ・コナラ林の群落構造の解析―下草刈りが低木層および草本層に及ぼす影響―. 玉川大学農学部研究報告 25：60–71.

関川清広, 池之詩織. 2020. 玉川大学キャンパスにおける里山林の約30年間の植生変遷―コナラ二次林における1984年と2015年の比較―. 玉川大学農学部研究教育紀要 5：23–43.

関川清広, 杉本和永, 松香光夫. 1986. 玉川学園キャンパスの植生概況. 玉川大学農学部研究報告 26：41–63.

関川清広, 友常満利, 永井信, 小酒井正和. 2022. 小型無人航空機（UAV）を用いた玉川大学キャンパス里山のナラ枯れ状況評価. 玉川大学学術研究所紀要 28：1–11.

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. 東京大学農学部演習林報告 112：11–34.

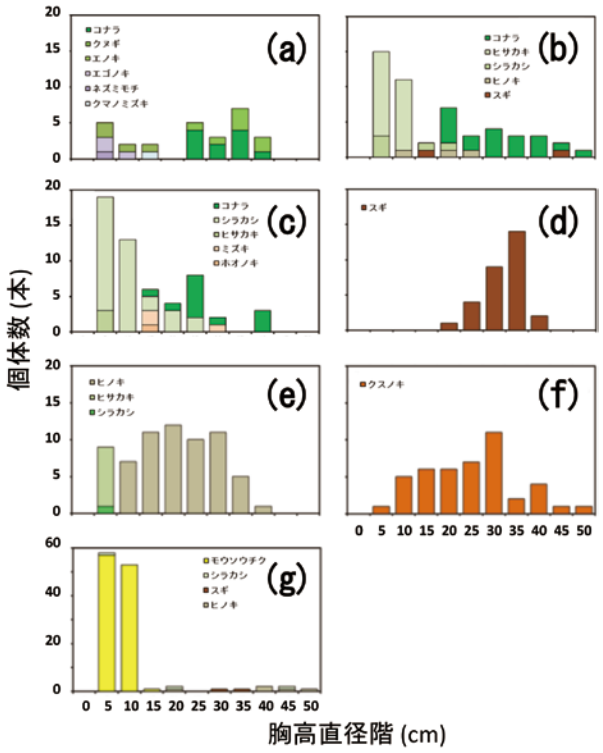
友常満利, 小島崇弘, 永井信, 小林祥子, 関川清広. 2021. ドローン空撮画像における生物季節を利用した里山林の樹種判別―都市域に残された里山生態系の構造解析に向けて―. 玉川大学農学部研究教育紀要 6：25–35.

Tomotsune, M., Suzuki, Y., Kato, Y., Masuda, R., Suminokura, N., Koyama, K., Sakamaki, Y. and Koizumi K. 2019. Comparison of carbon dynamics among three cool-temperate forests (*Quercus serrata*, *Larix kaempferi* and *Pinus densiflora*) under the same climate conditions in Japan. Journal of Environmental Protection 10: 929–94.

Wiesner, S., Allen, C. D., Gough, L., Cecich, R. G. and Hobbie, S. E. 2019. The role of understory phenology and productivity in the carbon fluxes of forests and woodlands. Ecosphere 10: e02755.

矢野悟, 田川日出夫. 1993. 常緑広葉樹の葉の寿命とフェノ

ロジー．日本生態学会誌 43：145–152.
Zhang, M., He, H., Zhang, L., Yu, Y., Ren, X., Lv, Y., Niu, Z., Qin, K. and Gao Y., 2024 Increased ecological land and atmospheric CO_2 dominate historical agricultural and forest land-use carbon fluxes. Journal of Environmental Management 366: 121906.



付図1　各緑地タイプにおける胸高直径の度数分布

(a) はコナラ–クヌギ林, (b) はコナラ–ヒサカキ林, (c) はコナラ–シラカシ林, (d) はスギ林, (e) はヒノキ林, (f) はクスノキ林, (g) は竹林を示す.

Comparison of Net Primary Production and Litterfall across Seven Forest Ecosystem Types at Tamagawa Gakuen: Assessing Carbon Dioxide Absorption Capacity in Urban Vegetation

Mitsutoshi Tomotsune[1], Yoshikazu Sugisaki[2], Hinako Wada[3], Kanako Katsushima[4], Seikoh Sekikawa[1]

Abstract

In recent years, global warming has been widely recognized as one of the most urgent challenges facing humanity. Forest ecosystems function as major sinks for atmospheric CO_2, yet only a limited number of studies have evaluated the CO_2 absorption capacity of urban and suburban green spaces. In this study, we focused on the green spaces of the Tamagawa Gakuen campus as a model case. The green areas were classified into seven vegetation types, and their carbon cycling and budgets were quantified to estimate the campus-wide carbon uptake and to discuss future management strategies. The survey was conducted across the campus (total area 63.7 ha), targeting 23.0 ha of green space classified into the following types: *Quercus serrata-Quercus acutissima* forest, *Quercus serrata-Eurya japonica* forest, *Quercus serrata-Quercus myrsinifolia* forest, *Cryptomeria japonica* plantation, *Chamaecyparis obtusa* plantation, *Cinnamomum camphora* forest, and *Phyllostachys edulis* (Moso bamboo) forest. Quadrats were established in each stand, and net primary production and litterfall were estimated and compared. Results showed that net primary production ranged from 0.4 to 7.1 tC ha^{-1} yr^{-1}. Among the forest types, the *C. camphora* forest had the highest net primary production, followed by the three stands dominated by *Q. serrata*. In contrast, conifer plantations of *C. japonica* and *C. obtusa* exhibited the lowest net primary production. Litterfall ranged from 4.3 to 6.8 tC ha^{-1} yr^{-1}, with *C. japonica* showing the highest values, followed by *C. obtusa*. Among the *Q. serrata* stands, the *Q. serrata-E. japonica* and *Q. serrata-Q. myrsinifolia* forests exhibited lower total litterfall and a smaller proportion of *Q. serrata* leaves compared to the other stands. Seasonal patterns of litterfall varied among stand types, falling into three categories: those with peaks in autumn-winter (deciduous species), those with peaks in spring (evergreen broadleaves), and those with peaks in both seasons (conifers such as *C. japonica*). These findings indicate that carbon cycling and budget differ substantially among stand types, influenced by species traits, stand structure, and management practices. The annual carbon dioxide uptake of the campus green spaces was estimated at approximately 331 tCO_2 yr^{-1}, suggesting that urban green areas, consisting of diverse small patches of vegetation, may buffer against declines in carbon absorption capacity under environmental fluctuations or disturbances such as disease outbreaks. However, many of the campus forests are dominated by older stands, where carbon uptake is already decreasing. To sustain and enhance the CO_2 absorption function of these green spaces, it will be essential to rejuvenate stands through management practices such as thinning and regeneration.

Keywords: Carbon Sequestration, Global warming, Net primary Production, Biomass

[1] Department of Agri-environmental Sciences, College of Agriculture, Tamagawa University, 6−1−1 Tamagawagakuen, Machida, Tokyo, 194−8610, Japan

[2] Nissan Green & Landscape Co., Ltd., Saitama Branch, 1−11−3 Minamishinozaki, Kazo, Saitama, 347−0042, Japan

[3] Graduate School of Agriculture, Tamagawa University, 6−1−1 Tamagawagakuen, Machida, Tokyo 194−8610, Japan

[4] Forestry and Forest Products Research Institute, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305−8687, Japan