研究論文（1）

「龍谷の森」におけるヒノキ人工林の炭素固定能力

河本　駿佑・宮浦　富保・倉地　奈保子・宮浦　真澄

はじめに

研究の背景

今日の最も深刻な環境問題のうちの1つが地球温暖化である。地球温暖化は猛暑や豪雨、干ばつなどの異常気象を全世界で引き起こしていると言われている。IPCC（気候変動に関する政府間パネル）によると、地球の平均気温は今後100年で約0.6℃上昇するとされている（中川 2008）。地球温暖化の寄与率の高い温室効果ガスのひとつに二酸化炭素（CO_2）がある。大気中のCO_2濃度は近年急激に増加しているが、これには人口の増加、産業や経済活動の発展が大きく関与していると指摘されている。このような中、世界的な規模で環境保護の機運が高まっており、緑すなわち植物を大切にし、増やしていこうという動きが活発になっている。

樹木は光合成によりCO_2を吸収し、幹や根に蓄積する機能がある。2005年に発効された「京都議定書」により、日本は1990年のレベルと比較して、CO_2放出量を6%削減するという目標を課された。この削減計画の中では、森林の炭素固定能力に大きな期待が寄せられている。しかし森林の現存量や炭素貯蔵量及び炭素固定能力は林齢、樹種、土壌条件により大きく異なるので、森林のタイプごとに炭素固定能力を評価する必要がある。

龍谷大学は、瀬田学舎に隣接して、約38haの森林を所有している。ここは、かつて周辺住民により、里山として利用されていた。里山は住居の近くにあり、人間の生活に一番身近な緑と呼べる。しかし里山として利用されていた場所の多くは、近年利用されず放置されている。生活の変化により里山を必要としなくなってきているからである。

今まで利用してきた里山にヒノキ（*Chamaecyparis obtusa*）を植えることがしば

しばある。なぜならヒノキは経済的価値の高い樹木だからである。里山として利用されていた場所に造成されたヒノキ林であるが、間伐などの手入れがほとんど行われていないことが大きな問題となっている。龍谷の森のヒノキ林も、植栽後ほとんど手入れされていないと思われる。

森林は更新後、数十年の間は旺盛な成長を続け、CO_2のシンクとして機能する。しかし林齢が高くなり成長量が低下するとともにCO_2のシンクとしての機能も低下していくと考えられる。ほとんど手入れされていない人工林ではCO_2のシンクとしての機能が早く低下することが懸念される。本研究では、このような手入れ不足の森林について、有機物生産の実態を明らかにし、CO_2のシンクとして機能する森林へと転換するための提案を行うことを目的とする。

日本におけるヒノキ

ヒノキは常緑の高木であり、スギと同様に造林の主要樹種である。福島県以南の本州・四国・九州の山地や、尾根、崖地などの痩せ地に生育する。樹高は20～30mになるが、大きいものでは高さ50m、直径2.5mほどにもなる。葉は鱗片状になって枝に密着しており、対生である。材は美しく耐久性が高い、高級建築材である。ヒノキは桧の字を当てられているが、元来は「火の木」であり、こすり合わせて火をおこしたことに由来するという（生原 2008）。

ヒノキは日本を代表する主要な造林樹種であり、形質に優れ加工しやすいこと、成長が早いことからよく利用されている。戦後の復旧や経済発展に伴い木材需要が増大した。そこでヒノキやスギの造林が推進されてきた。人工林は木材資源を供給する機能と同時に国土の保全や地球温暖化の防止など公益機能をはたしている。日本の国土面積の約7割を森林が占めており、その広さは2002年現在2512万haである（林野庁業務資料 2008a）。そのうち人工林面積は1036万haで森林面積の約4割となっている。その中でヒノキ人工林は257万haであり、森林面積の10%、人工林面積の25%を占めている。ヒノキ人工林面積は岐阜県や高知県で大きく、それぞれ約21万haであり、滋賀県では3万3千haである（林野庁業務資料 2008b）。

材料と方法

純生産

樹木は炭素を空気中から吸収して、幹、枝、葉などの樹体に蓄積する。純生産とは光合成によって固定された炭素量と、呼吸によって消費された炭素量の差である。樹木は枯れ枝や枯れ葉などの不要なものを樹体から切り離す。樹体から切り離され林床に落下してきたものはリターフォール（落ちてきたごみ）と呼ばれる。森林の純生産量は、生長量とリターフォール量の和としても推定することが出来る。これは積み上げ法と呼ばれる推定法である（依田1971）。本研究では積み上げ法によって純生産量の推定を行った。

生態系純生産

純生産量は、光合成量と呼吸量の差として植物体に固定された正味の有機物（炭素）の量を表す。森林全体としての炭素収支を把握するためには、さらに土壌表面から放出される炭素量（土壌呼吸量）を考慮する必要がある。純生産量から土壌呼吸量を差し引くことにより、森林全体での正味の炭素固定量すなわち生態系純生産量を知ることが出来る。土壌呼吸は植物の地下部（根、根茎など）による呼吸と、土壌中の従属栄養生物（動物、菌類、細菌類など）による有機物の無機化との大きくわけて2つから成り立つ。

調査地

龍谷大学瀬田キャンパスの西に位置する森林（龍谷の森）において、ヒノキが優先する森林に調査プロットを設置した。調査プロットの形状は長方形であり、その大きさは南北40m東西20mである。プロット内の胸高直径2cm以上、高さ1.3m以上の樹木を調査対象木とした。その結果、プロット内には121本の毎木調査対象の樹木があり、そのうち100本がヒノキであった。その他の植物としてヒサカキ、コナラ、ソヨゴ、クロバイなどが生えていた。調査プロットは東から西にかけて緩やかに傾斜しており、調査プロット内には枯死した木が数本倒れている。

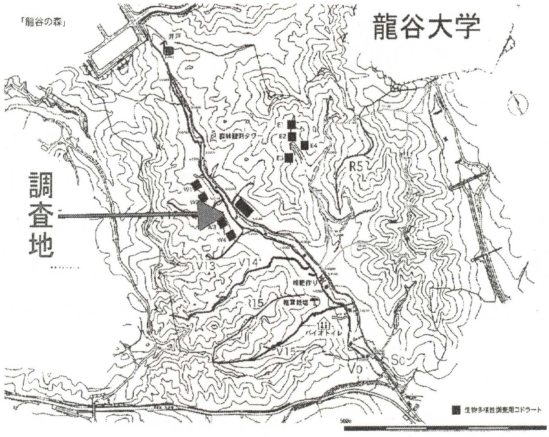

図1　調査地地図

調査項目と調査日

調査地においてリターフォールの採取、土壌呼吸の調査及び、毎木調査を、表1に示した調査日に実施した。

表1　調査項目と調査日

調査日	調査項目		
	リターフォール	土壌呼吸	毎木調査
2007年　1月30日	○	○	
2007年　3月　2日	○	○	○
2007年　3月26日	○	○	
2007年　5月11日	○	○	
2007年　6月11日	○	○	
2007年　8月　8日	○	○	
2007年　9月　3日	○	○	
2007年10月　5日	○	○	
2007年11月　3日	○	○	
2007年12月　1日		○	
2007年12月21日	○		○

リターフォール

開口部が1辺1mの正方形（1m^2）であるリタートラップ（1mmメッシュ）を10個、プロット内およびプロットの近くに設置した（図2）。トラップの開口部の高さは地上1.3mとした。2007年1月～2007年12月までトラップ内に集まった落下物（リターフォール）を採取して持ち帰り、内容物をヒノキの葉、枝、樹皮、生殖器官、その他植物の葉、枝、生殖器官、その他の生物（昆虫を含む）の8種類に分けた。量が多いものは抽出して選別を行い、全体量との比率に基づいてリターフォールの各成分の量を推定した。選別したものを、85℃に設定した通風乾燥機で24時間以上乾燥させ、乾燥重量を測定した。リターフォール量の1/2を炭素量とした。

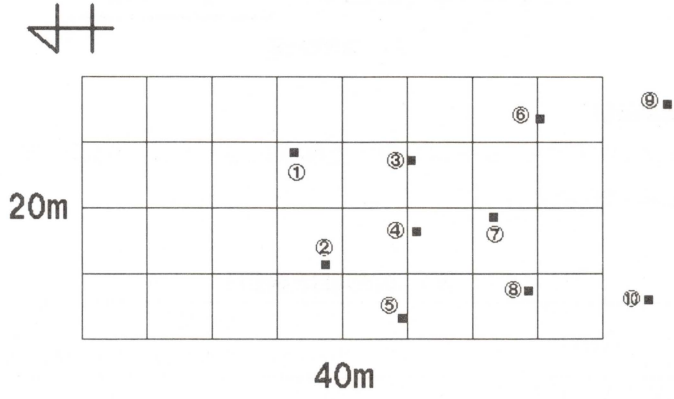

図2　調査プロットおよび周辺でのリタートラップの設置場所

土壌呼吸量の測定

プロット内およびプロットの近くに15箇所（図3）、内径10cm、深さ4.3cmのプラスチック製の円筒（図4）を設置した。携帯型赤外線ガス分析装置（LI-COR社、LI－820S）を用いて各調査地点で土壌呼吸量の測定を行った（図5）。赤外線ガス分析装置をプラスチック製の円筒に装着し、装置内のCO_2濃度が約20～30ppm上昇するまで計測を行った。各調査地点での測定開始時間と測定終了時間を野帳に記録し、それと同時に計測中のLI－820S内の空気流量速度も記録した。

測定後、研究室でデータの整理を行った（図6）。測定開始時間および測定終了時間を

もとに、どの部分のグラフがどの調査地点の測定結果なのか判断し、15箇所それぞれの地点のCO_2増加グラフの傾きを求め、1時間あたりのCO_2放出量を求めた。

土壌のCO_2放出量は地温とともに増減するのが確認されている（図7）。調査プロット内の2箇所に温度センサーつきのデータロガー（T AND D社、TR-52）を設置し、深さ5cmの地中温度を15分間隔で記録した。この地中温度データを用いて、各調査地点での土壌呼吸量と地中温度との関係を確かめた（図11）。土壌呼吸量を地中温度の指数関数で近似し、土壌から放出される年間のCO_2量を推定した。

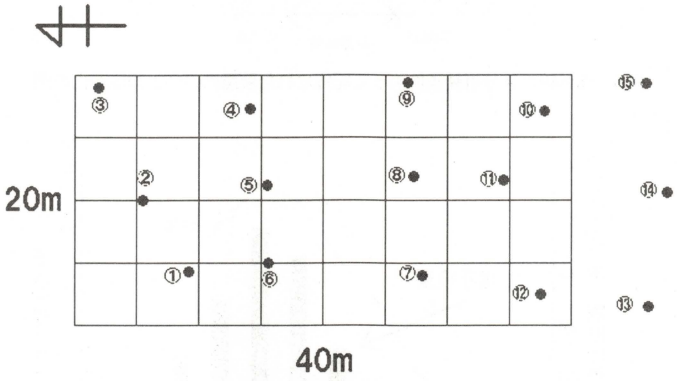

図3　土壌呼吸測定場所



図4　土壌呼吸調査地点



図5　土壌呼吸量測定の様子

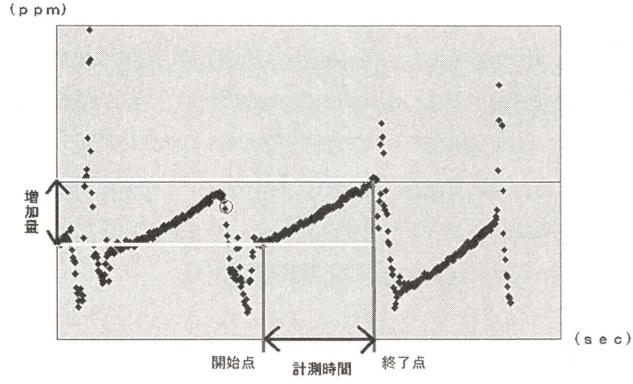

図6　赤外線ガス分析装置によって記録された装置内のCO_2濃度変化の例

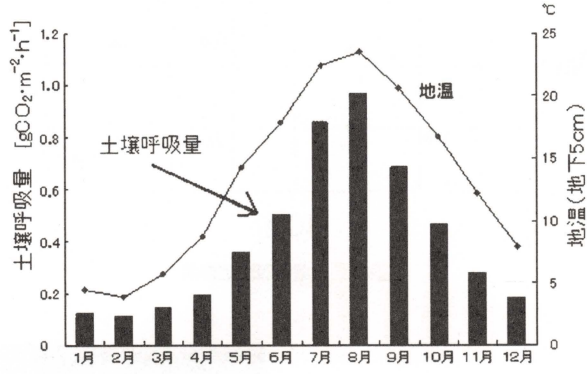

図7　調査プロット内で測定された平均地中温度と土壌呼吸量の推移（2007年）
（土壌呼吸量は15箇所の測定値の平均値）

毎木調査（現存量の測定）

プロット内の121本の樹木の胸高直径（D [cm]）を2007年2月と12月に測定した。対象木121本のうちヒノキは100本あった（図8）。2007年12月の胸高直径データを2008年のデータとみなした。研究室で測定した2006年度の胸高直径のデータも使用した。

針葉樹（ヒノキ）、常緑広葉樹、落葉広葉樹の三種類に選別し、（1）～（10）式の相対生長関係と2006年～2008年の胸高直径データを用いて、それぞれの個体の幹重W_S

[kg]、枝重W_B [kg]、葉重W_L [kg]、根重W_R〔[kg]〕、総重量W_T [kg]を推定した。(10)式は、ヒノキについての相対成長関係であるが、その他の樹種についてもこの関係が成立すると仮定した。これらのすべての個体の推定値を足し合わせることによって、各器官の現存量を算出した。

・落葉広葉樹（後藤ほか、2003）

$$W_S = 0.0607 \times D^{2.42} \quad (1)$$

$$W_B = 0.00549 \times D^{3.15} \quad (2)$$

$$W_L = 0.173 \times D^{2.13} \quad (3)$$

・常緑広葉樹（後藤ほか、2003）

$$W_S = 0.0645 \times D^{2.47} \quad (4)$$

$$W_B = 0.0508 \times D^{2.43} \quad (5)$$

$$W_L = 0.0485 \times D^{1.94} \quad (6)$$

・針葉樹（ヒノキ）（Hagihara et al. 1993）

$$W_S = 0.0567 \times D^{2.46} \quad (7)$$

$$W_B = 0.0053 \times D^{2.46} \quad (8)$$

$$W_L = 0.0173 \times D^{2.26} \quad (9)$$

総重量 $W_T = W_S + W_B + W_L$

・地下部現存量算出式（Hagihara et al. 1993）

$$W_R = 0.02750\ D^{2.296} \quad (10)$$

毎木調査（地下部の枯死量の推定）

地上部現存量に対するリターフォール量の割合と、地下部現存量に対する地下部枯死量の割合が等しいと仮定し、地上部現存量とリターフォール量の比率を利用し、地下部の枯死（リター）量を算出した。すなわち、

（地下部枯死量）＝（地下部現存量）×（地上部リターフォール量）／（地上部現存量）として、地下部枯死量を推定した。

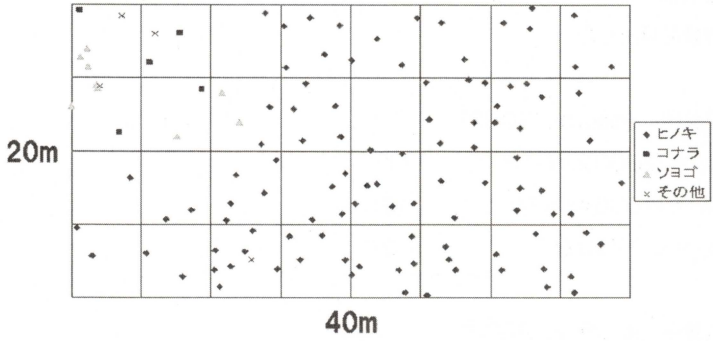

図8　調査プロット内の樹木の分布図

結果

リターフォール量

リターフォール量は12月および1月にピークがあり、この時期に年間の76%を占めていた（図9）。またリターフォールの大部分を葉が占めていた。

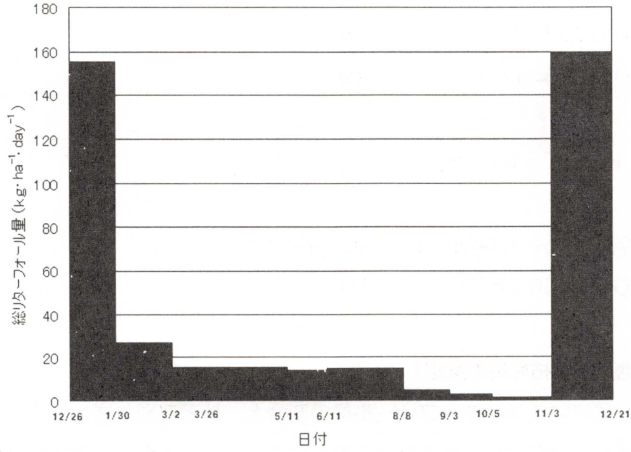

図9　リターフォール量の季節変化（2007）

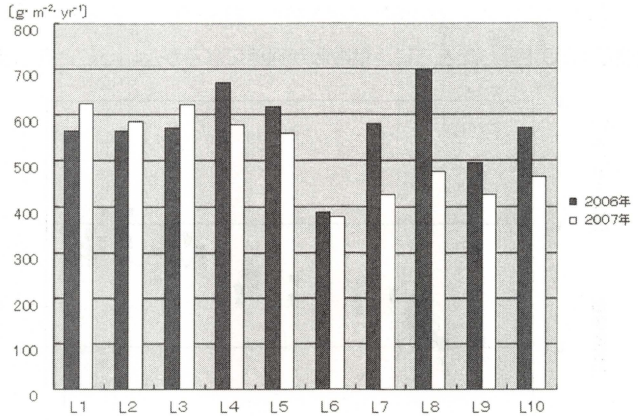

図10　地点別総リターフォール量

図10に、リタートラップごと（測定地点ごと）の年間総リターフォール量を示す。ここで、リターフォールと土壌呼吸の測定地点を区別するために、リターフォールの測定地点をL1～L10、土壌呼吸の測定地点をR1～R15と表すことにする。地点L6では、総リターフォール量は400g・m^{-2}・yr^{-1}よりも小さかったが、その他の地点では400～700 g・m^{-2}・yr^{-1}であった。全体の傾向として2007年度は前年に比べ少なくなっていた。このプロットの年間リターフォール量は2006年が5.72t・ha^{-1}・yr^{-1}、2007年が5.14t・ha^{-1}・yr^{-1}であり、2年間の平均は5.43t・ha^{-1}・yr^{-1}であった。炭素は樹体の組成の約半分とされているので（大洞2008）、炭素量で表した平均年間総リターフォール量は2.72tC・ha^{-1}・$year^{-1}$と推定される。

土壌呼吸量

図11は地中温度と土壌呼吸量の関係を表す。図11では例として、地点R1～R5についてのみ示している。土壌呼吸（r_S [gCO_2・$m^{-2}h^{-1}$]）は地中温度（T [℃]）によって

$$r_S = a \cdot \exp(b \cdot T) \qquad (11)$$

の関係で近似された。測定地点R1～R15について、2006年と2007年のデータから

推定された（11）式の定数*a*, *b*の値と決定係数r^2、およびQ_{10}の値を表2に示す。ここでQ_{10}とは、温度が10℃上昇したときに土壌呼吸が何倍になるかということを示す量である。

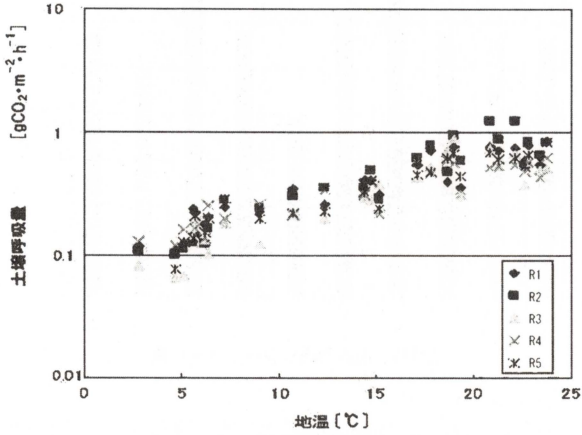

図11　地点R1～R5における地中温度と土壌呼吸量の関係

表2　測定地点R1～R15について2006年と2007年のデータから推定された（11）式の定数*a*, *b*の値と決定係数r^2およびQ_{10}

測定地点	a [$gCO_2 \cdot m^{-2}h^{-1}$]	*b* [$℃^{-1}$]	r^2	Q_{10}
R1	0.113	0.083	0.85	2.3
R2	0.080	0.108	0.88	3.0
R3	0.065	0.101	0.83	2.7
R4	0.109	0.073	0.85	2.1
R5	0.091	0.089	0.87	2.4
R6	0.088	0.085	0.85	2.3
R7	0.105	0.086	0.89	2.4
R8	0.074	0.098	0.87	2.7
R9	0.110	0.089	0.91	2.4
R10	0.063	0.098	0.91	2.7
R11	0.091	0.098	0.88	2.7
R12	0.092	0.096	0.92	2.6
R13	0.100	0.097	0.88	2.6
R14	0.119	0.078	0.83	2.2
R15	0.066	0.090	0.89	2.5

図12は表2に示した定数*a*, *b*と2006年および2007年の地温のデータを用いて推定した地点別の年間土壌呼吸量を表す。全体的に2007年度が2006年度よりも二酸化炭素放出量が多い傾向が見られる。

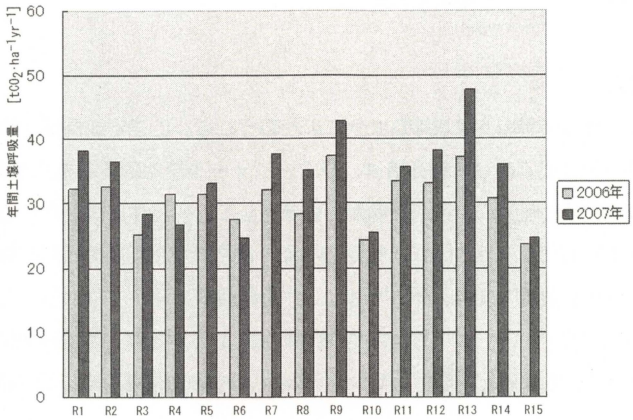

図12　地点別年間土壌呼吸量

図12に示した測定地点ごとの年間土壌呼吸量を平均することにより、土壌からの年間の平均CO_2放出量は2006年については30.72tCO_2・ha^{-1}・yr^{-1}、2007年については34.08tCO_2・ha^{-1}・yr^{-1}と推定された。両年の平均値は32.40tCO_2・ha^{-1}・yr^{-1}となる。炭素換算すれば、土壌から平均年間8.84tC・ha^{-1}・yr^{-1}の炭素を放出していることになる。

地下部の現存量と成長量、枯死量

表3は計算によって求められた地下部（根）の現存量、成長量及び枯死量の結果である。根の現存量は年々増加しており、炭素を固定していることが確認できる。

表3　推定された根の現存量と成長量および枯死量

Year	根の現存量 [t・ha^{-1}]	成長量 [t・ha^{-1}・yr^{-1}]	枯死量 [t・ha^{-1}・yr^{-1}]
2006	57.77	1.81	1.41
2007	59.58	1.72	1.45
2008	61.30		

2年間で根の現存量は3.53t・ha^{-1}増加し、平均成長量は1.77t・ha^{-1}・yr^{-1}であった。平均年間0.88tC・ha^{-1}の炭素が地下部の現存量につけ加えられていることになる。

地下部の枯死量は平均年間1.43t・ha^{-1}・yr^{-1}と推定された。これは平均年間0.72tC・ha^{-1}・yr^{-1}の炭素量に相当する。

年間炭素収支

ヒノキ人工林の炭素収支は表4のようにまとめられる。ここで成長量は地上部と地下部の成長量の合計値であり、枯死量は、リターフォール量と地下部枯死量の和である。光合成による生産と呼吸による消費の差し引きとして、植物体に固定される炭素量である純生産量は7.42tC・ha^{-1}・yr^{-1}と推定される。また森林生態系の実質的な炭素収支量である生態系純生産量は-1.47 tC・ha^{-1}・yr^{-1}と推定される。すなわち、このヒノキ人工林は、7.41 tC・ha^{-1}・yr^{-1}の炭素を生物体に固定しているが、土壌呼吸による放出量が大きいために、生態系としては1.47 tC・ha^{-1}・yr^{-1}の炭素を放出しているということになる。

表4　ヒノキ人工林の炭素収支のまとめ

	2006	2007	2008	2006-2008平均値	
バイオマス	108.81	110.98	115.01	111.60	〔tC・ha^{-1}〕
成長量	3.07	4.89		3.98	〔tC・ha^{-1}・yr^{-1}〕
枯死量	3.57	3.30		3.44	
純生産量	6.64	8.19		7.42	
土壌呼吸放出量	8.38	9.39		8.89	
生態系純生産量	−1.74	−1.21		−1.47	

考察

本研究で、このヒノキ人工林の炭素固定能力がマイナスであることが明らかになった。原因としてまず挙げられるのが、この人工林の高齢化である。この調査地の付近における間伐木の樹幹解析の結果から、このヒノキ人工林は2007年現在樹齢が76年と推定されている（宮浦 未発表）。したがってこの場所が里山として利用されなくなってから70年以上が経過していると考えられる。ヒノキは20年から40年ぐらいまでが現存量成長

の大きい時期である。このヒノキ人工林はもうすでに成長の盛んな時期を過ぎてしまっていると考えられる。

炭素固定能力低下への対処法としてあげられるのが間伐である。過去に間伐が行われていれば、その切り株が残っているはずであるが、森林内にはみあたらない。したがって、このヒノキ人工林では相当長期間に渡って間伐が行われていないと考えられる。林床には、比較的暗い環境でも生育できるヒサカキやクロバイなどがあるのみである。またヒノキの立ち枯れ個体が多く見られるが、これは相対的に過密になったために自然間引きが起きていると考えられる。照度が低いと他の樹種の繁茂は期待しにくい。間伐を行うことによって樹木の密度を低下させ、地表に届く照度があがることにより、残存木の成長が改善し、新しい樹木の進入を促進するであろう。

間伐の効果として、根をはりめぐらすなどの成長促進が期待される。例えばヒノキの根は深さよりも地表方向への広がりが大きい。根を張り巡らすことが出来れば地上部が大きくなっても支えることが出来る。間伐を行うことにより現存の木々の炭素固定量の増加も期待できる。しかし間伐を行う前にもう少しこの森の調査が必要である。今回の結果は、推定された現存量に基づくものである。実際数本切ってみて成長履歴を確認し、どの程度の間伐が必要なのか検討しなければならない。

実際間伐を行うことにより、間伐直後はこの研究地のバイオマスは減ると考えられる。それに伴い、成長量、枯死量、純生産量も減少することが予想される。照度の増加により地表温度が上昇し、さらに土壌からの炭素放出が増加すると考えられる。しかし一方で土壌に蓄えられている水分が蒸発することで土壌内の含水率の低下が見込める。水分は土壌呼吸量に大きく関わっており、土壌が乾燥することで、炭素放出の減少の可能性もある（Lee et al. 2002, 2006）。これらより間伐後、数年は炭素の放出量が高まることが予想されるが、新しい樹木の生育や現存の木々の成長も見込めるので、長い年月を見たとき間伐は有効な手段として考えられる。

この研究では、純生産量から土壌呼吸量を差し引くことによって生態系純生産量を推定したが、土壌呼吸量には根の呼吸量が含まれている。今回の純生産量の推定値が正しいとすると、この値からさらに根の呼吸量を差し引くことは、生態系純生産量を過小評価することになる可能性がある。土壌呼吸量に占める根の呼吸量が24～62%と推定された例もある（阪田・高橋 2004）。仮に、根の呼吸量が土壌呼吸量の50%であるとす

ると、このヒノキ人工林の生態系純生産量は+2.98 tC・ha^{-1}・yr^{-1}となり、炭素の吸収源と考えられる。純生産量の推定精度の改善と共に、土壌呼吸量に対する根の呼吸量の寄与について吟味する必要がある。

引用文献

後藤義明、小南裕志、深山貴文、玉井幸治、金澤洋一 (2003) 京都府南部地方のおける広葉樹二次林の地上部現存量及び純生産量. 森林総合研究所研究報告2 (2) : 115-147

Hagihara, A., Yokota, T. and Ogawa, K. (1993) Allometric Relations in Hinoki (*Chamaecyparis obtusa* (Sieb. Et Zucc.) Endl.) Trees. Bull. Nagoya Univ. For. 12: 11-29

生原喜久雄 (2008) *1 ヒノキ 世界最高級の建築材、彫刻材
http://elekitel.jp/elekitel/nature/2005/nt_36_hinoki.htm

Lee, Mi-Sun, Nakane, K., Nakatsubo, T., Mo, W. and Koizumi, H. (2002) Effects of rainfall events on soil CO_2 flux in a cool temperate deciduous broad-leaved forest. Eco. Res. 17 (3) : 401-409

Lee, Mi-Sun, Mo, W.H. and Koizumi, H. (2006) Soil respiration of forest ecosystems in Japan and global implications. Ecol. Res. 21 (6) : 828-839

中川一 (2008) *1 森林のCO_2吸収について (1) -森林の炭素循環とその推定法-
http://www.cc.rd.pref.gifu.jp/forest/rd/rinsan/9905gr.html

大洞智宏 (2008) *1 林木の炭素固定能力-可児市の針葉樹林を例として-
http://www.cc.rd.pref.gifu.jp/forest/rd/ikurin/71mj2.html

林野庁業務資料 (2008a) *1
http://www.rinya.maff.go.jp/toukei/18toukei/4-shinrinshigengenkyo.html

林野庁業務資料 (2008b) *1
http://www.rinya.maff.go.jp/toukei/genkyou/jyusyu-ha/hinoki.pdf

阪田匡司、高橋正通 (2004) 土壌呼吸における微生物と根呼吸起源の寄与率の推定. 森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集3 森林、海洋等におけるCO_2収支の評価の高度化; 54-55

依田恭二 (1971) 森林の生態学、築地書館

＊1: 閲覧年を示す。実際の閲覧日は2008年2月28日。