

カラマツ人工林および天然落葉広葉樹林の長期的な林分生長量

濱田 洋平*・飯田 真一*・林 敦史**
角張 順一*・田中 正*

Long-term stand growth of a larch plantation and a natural deciduous forest

Yohei HAMADA*, Shin'ichi IIDA*, Atsushi HAYASHI**,
Jun'ichi KAKUBARI* and Tadashi TANAKA*

目 次

I はじめに	33
II 方 法	34
1 調査地域の概要	34
2 胸高直径の毎木調査	35
3 樹体バイオマスの推定	36
III 結果および考察	37
1 個体ごとの生長特性	37
2 林分生長量の評価	40
IV まとめ	43
謝 辞	43
引用文献	43

I はじめに

森林生態系は、水循環過程（降水の遮断・地中水の貯留・気孔からの蒸散など）および炭素循環過程（葉による光合成・土壌へのリター供給・樹体および土壌の呼吸など）に関連した数多くの機能を有している。近年の大気中におけるCO₂の増加とそれに伴う気温の上昇や降水量の増

* 筑波大学大学院 生命環境科学研究科 (Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba)

** 筑波大学 第一学群 自然科学類 (College of Natural Sciences, First Cluster of Colleges, University of Tsukuba)

減は、これらの森林の機能に大きな影響を及ぼす可能性がある。森林は我が国の国土の3分の2、全世界の陸地面積の約3割を占めており、また陸域の全バイオマスの9割が森林に蓄積されている（阿部・作野, 1998）。このため環境変化に対する森林生態系の応答は、生態系レベルでの物質循環の変化にとどまらず、地域的・全球的な環境変化へのフィードバックとして極めて大きな影響を及ぼす。

大気CO₂濃度の上昇といった、長期的・経年的な現象に対する生態系の応答を把握するには、同様の時間スケールでの長期観測が必要不可欠であり、このような観点から、我々は1985年に筑波大学農林技術センター川上演習林第2林班内に試験流域を設定し（田中ほか, 1988）、以来20年間にわたって水・物質循環の長期モニタリングを継続している。この長期観測の結果に基づいて、これまでに降水および河川水の安定同位体比を用いた流域の平均滞留時間の推定（TANAKA et al., 2004）、土壌空気中のCO₂濃度の典型的な月別・深度別の値と年々変動の要因の推定（HAMADA and TANAKA, 2001）、短期水収支法を用いた流域蒸発散量の評価（飯田ほか, 2006）などが行われてきている。このような長期的な森林生態系の応答の変化とその要因を考える場合、その森林が十分に定常状態に達した極相林である場合を除き、年々の気象条件の変化といった外因的かつ年による変動が大きい要因のほかに、林分の生長に伴う内因的かつ定方向性を持つ要因が考えられる。人の手が入っている森林では、間伐や枝打ちなどの管理作業もまた林分構造に影響を及ぼし、森林の応答を変化させる。環境変化に対する森林生態系の応答を正しく評価するためには、これらの様々な要因を個別に評価する必要がある。

このような状況を踏まえ、本稿では、我々が行っている長期モニタリング研究の基礎資料とするため、試験流域内の代表的なプロットにおいて林分調査を行い、過去の調査結果と合わせて林分生長量の評価を行った。

II 方 法

1 調査地域の概要

対象とした試験流域の概要をFig. 1に示す。本流域は千曲川水系三沢川の源流部に相当し、流域の標高は1,500~1,680m、流域面積は0.14km²である。流域は中尾根によって南北に分かれており、北谷はミズナラ (*Quercus crispula* Blume) を主体とする天然落葉広葉樹林（以下ミズナラ林）、南谷はカラマツ (*Larix leptolepis* Gordon) の人工林（以下カラマツ林）がそれぞれ主要な植生となっている。これらの林床にはミヤコザサ (*Sasa nipponica* Makino) が繁茂しており、その平均植生高は0.6mである（飯田ほか, 2006）。流域の土壌は主として基盤の風化土壌および森林の腐植土壌からなる。流域一帯は冷涼寡雨な内陸性の気候下にあり、年平均気温は6.2℃、年降水量は1,400~1,500mmである（辻村, 1993）。

カラマツ林およびミズナラ林における調査区の位置を図中に示した。カラマツ林調査区は、試験流域下流端付近の標高1,500~1,520m、勾配約15°の北向き斜面に位置する。この調査区を含めた試験流域南谷のカラマツ林は1964年に造林されたもので（勝屋・黒田, 1983）、今回の調査時

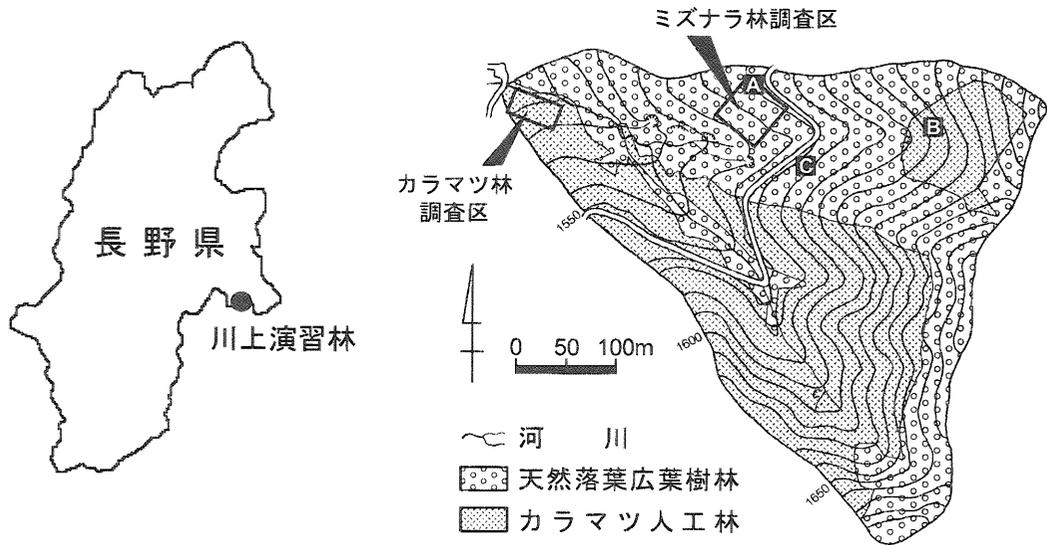


Fig. 1 試験流域の概要および調査区の位置
白抜きのA～Cは黒田 (1988) による調査区を示す。

点での林齢は41年である。ミズナラ林調査区は、北谷源流部付近の標高1,550～1,570m、勾配約25°の南西向き斜面に位置する。調査区の周辺では1978年に天然更新の手入れが行われており(黒田, 1988), 今回の調査時点での推定樹齢は約70年生である。これらの調査区内では、林内雨・樹幹流・土壌水の採取および分析 (TSUJIMURA and TANAKA, 1998), 降雨時および無降雨時の土壌水フラックス観測 (辻村, 1993), 土壌中のCO₂濃度および土壌水分ポテンシャルの測定 (濱田・田中, 1997), 気温および地温の自記観測, 土壌断面および根系分布の調査 (濱田ほか, 1997) などが行われており、両林分を代表する観測サイトとなっている。特にミズナラ林調査区では、中央付近に気象観測タワーが設置され、樹体内の水分動態に着目した土壌-植物-大気連続系 (SPAC) の研究が行われている (KOBAYASHI and TANAKA, 2001; 飯田ほか, 2006)。当試験流域内ではこのほか、1985年に3つの調査区で林分調査が行われており (黒田, 1988), その地点についても参考としてプロットした (A～C調査区; 20m×20m)。

2 胸高直径の毎木調査

今回対象とした2つの調査区では、過去2回にわたり胸高直径の測定を主体とした林分調査が実施されている。1回目の調査は1995年7月に行われた。これは、カラマツおよびミズナラの根系分布の実測調査を行うに当たり、平均的な大きさの個体を選定する目的で行われたもので(濱田ほか, 1997), 胸高直径のほか各個体および各種測器の設置地点の位置が簡易測量によって地図上にプロットされた。この調査では明確なコドラートは設けられず、樹木の個体番号も付与されなかった。2回目の調査は1999年9月に行われた。この調査では25m×25mのコドラートが、

カラマツ林調査区では東西に並んで2つ、ミズナラ林調査区ではタワーを中心とする正方形に4つ設定され (Fig. 1 に示した調査区の範囲を参照)、胸高直径を測定した個体には番号が付与された。また、各調査区とも数個体ではあるが、ブルーメライズ測高器による樹高の測定も行われ、代表性は低いもののカラマツで平均19m、ミズナラで平均14m という値が得られている。なお、設定したコドラートは調査終了後に撤去された。

1995年の調査対象木は、おおむね1999年に設定したコドラートの内側に分布するが、そこから外れる個体も一部存在する。また、1995年の調査木の位置は地図から特定できるのに対し、1999年の調査範囲と同一のコドラートを再度設けるのは困難である。このような状況を踏まえ、林分生長量の推定に過去2回の調査結果を最大限活用することを考慮し、2005年5月に以下のような方法で3回目の林分調査を行った。まず、1995年に作成した調査木の位置図を基に各個体を調査し、その番号から1999年の調査結果と対応させた。個体番号のないものには新たに番号を付与した。また、間伐あるいは枯死が確認された個体はその旨を記録した。胸高直径は過去2回の調査と同様、胸高断面の形状を円と仮定し、巻尺で測定した胸高周囲長から計算した。林分生長量に関する解析は、調査対象木が3回の調査でそれぞれ異なっており平均胸高直径の単純な比較ができないため、個体ごとの生長量に基づく解析を併せて行った。

3 樹体バイオマスの推定

胸高直径の調査結果に基づいて、各個体のバイオマスを概算した。胸高直径とバイオマスとの間には一般に高い相関があることが知られており、調査対象とする林分においてその関係が既知であれば、それをを用いてバイオマスを直接かつ精度よく推定することが可能である。しかし、本研究ではバイオマスの実測調査は行っておらず、また川上演習林内における過去の調査事例も確認できなかった。そのため本研究では、まず幹部・枝条部・地下部の樹体体積を、それぞれ以下の手法で推定した。なお、調査区の樹種はすべて落葉性であるため、葉量は計算に含めなかった。

1) 幹部

幹材積の推定法としては、胸高直径と樹高から立木幹材積表を用いて推定する方法がよく用いられるが、本研究の調査区では樹高のデータはほとんど得られていない。樹高曲線を用いて胸高直径から推定する方法もあるが、十分な相関を得るにはデータが不十分であり、また樹高曲線は一般に林齢によって変化するため、1999年のデータに基づく樹高曲線を1995年および2005年に適用できるとは限らない。そのため本研究では、胸高直径のみから材積を推定する DENZIN の略算法 (大隅, 1989) を用いた。すなわち、

$$V = \text{DBH}^2 / 1000$$

ここで、 V は成材の材積 (m^3)、DBH は胸高直径 (cm) である。この式で求められた材積は標準樹高に対する補正が必要であるため、1999年に測定された樹高を実際の樹高とし、樹種別に与えられた補正係数に基づいて補正を行った。ミズナラ林調査区については、ブナについての補正係数が適用できるものとした。

2) 枝条部

枝条材積は、幹材積に対する比率である枝条率から推定することができる。広葉樹については、胸高直径などに対する枝条率あるいは枝条材積自体の値が地方ごとに与えられている場合が多く、ミズナラ林調査区ではこれを利用し、福島・栃木・群馬・新潟地方において得られたブナ枝条材積表(林野庁計画課, 1985)を適用した。カラマツの枝条率については、山ノ内倭文夫による樹種別平均枝条率表(大隅, 1989)から、針葉樹の枝条率のおおよその平均である25%とした。

3) 地下部

樹体の地下部は根株と細根からなる。根株材積は通常、幹材積の15~20%程度とされている。根株材積と伐根直径の関係は、山本和蔵と麻生誠によるアカマツについての調査事例などがあるが(南雲・箕輪, 1990)、本研究では伐根直径に相当する地際直径は測定されておらず、胸高直径からの推定も、特に同株から2~3個体に分かれている場合が多いミズナラについては困難であるため、この手法は適用しなかった。細根を含めた地下部の地上部に対する比であるTop/Root比(T/R比)は、人工の針葉樹林で3~4、天然林の多くで4~7であるとされ、また乾燥した環境ではT/R比が低下することが知られている(堤, 1987; 1989)。以上の知見を考慮し、カラマツ林調査区では地上部(幹+枝条)材積の30%(T/R比で3.3)、ミズナラ林調査区では25%(T/R比で4.0)を、地下部の樹体体積として見積もった。

推定された樹体体積に全乾比重を掛け、その個体のバイオマスとした。全乾比重は、農林水産省林業試験場(1973)、越島ほか(1983)、高橋・中山(1995)などを参考に、両試験区とも $550\text{kg/m}^3 (=0.55\text{g/cm}^3)$ とした。

III 結果および考察

1 個体ごとの生長特性

今回測定された各個体の胸高直径を、過去2回の調査時の値と併せてTable 1(カラマツ林調査区)およびTable 2(ミズナラ林調査区)に示した。カラマツ林調査区では、3回とも測定が行われたものが22個体あったが、1995年の個体番号31と1999年の個体番号129は測定ミスが疑われるため、以降の解析から除外した(Table 1中の*印)。また、1999年に測定されていないものが7個体あり、新たに200番台の個体番号を付与したほか、1995年の調査以降に間伐されたものが8個体確認された。ミズナラ林調査区では、3回とも測定されたものが51個体、うち樹種未同定の広葉樹3個体を除く48個体がミズナラであった。これらのうち、1995年から1999年までの間に0.5cm以上の胸高直径の増加(あるいは減少)が記録されたにも拘わらず、1999年から2005年までの間には逆に0.5cm以上の減少(あるいは増加)が記録されたものが8個体認められた。このうちの5個体が同じ株から2本ないし3本に分岐しているもので、特に個体番号213

Table 1 カラマツ林調査区における各個体の胸高直径の変化

個体番号	各年の胸高直径 (cm)			個体番号	各年の胸高直径 (cm)		
	1995	1999	2005		1995	1999	2005
14	18.1	21.4	23.5	112	15.7	16.3	18.2
22	23.0	24.1	26.1	113	19.4	20.4	21.7
23	18.6	19.8	21.8	114	18.1	19.9	21.9
24	12.4	19.4	21.9	125	21.9	22.3	23.3
25	16.7	17.4	18.9	127	22.6	23.7	25.8
26	20.3	21.5	24.1	128	22.3	22.7	23.7
28	21.4	22.6	25.1	129	23.2	18.9*	26.1
29	18.7	18.9	20.1	201	15.8	—	25.4
30	20.1	21.2	22.7	202	16.1	—	18.5
31	31.4*	25.4	27.8	203	17.8	—	19.7
102	20.1	20.6	22.1	204	18.1	—	21.5
104	11.6	18.1	18.4	205	18.1	—	19.9
105	21.5	23.2	24.9	206	15.6	—	17.6
107	18.5	19.6	20.8	207	24.3	—	30.2
110	22.1	24.2	26.7				

—: 未測定 * 測定ミスと考えられるため、集計および解析から除外した値

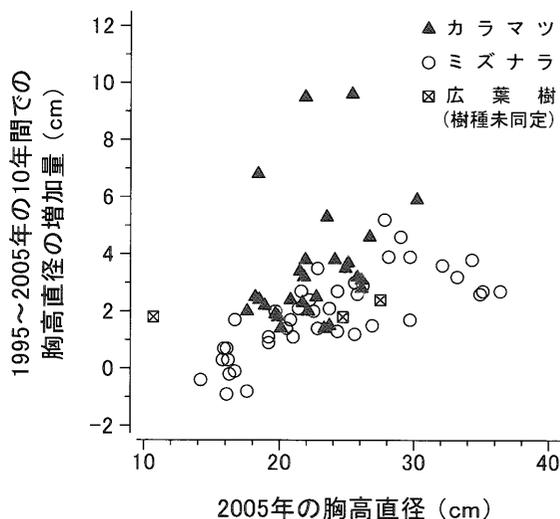
Table 2 ミズナラ林調査区における各個体の胸高直径の変化

個体番号	各年の胸高直径 (cm)			備考	個体番号	各年の胸高直径 (cm)			備考
	1995	1999	2005			1995	1999	2005	
2	25.1	26.0	27.5	樹種未同定	211	30.5	31.8	34.3	
3	17.0	15.8	16.1		212	16.5	16.0	16.3	
32	18.3	18.7	19.2		213*	27.2	25.7	28.9	同株
119	32.3	33.2	34.9	同株	214*	21.8	21.3	22.8	
120	30.0	31.6	33.2		215*	18.5	17.7	19.0	
121*	22.9	22.1	22.7	同株	307	22.7	24.5	27.8	
122	22.6	23.9	25.6		311	21.3	22.2	22.8	
123	24.4	24.5	25.6	同株	312	19.3	21.0	22.8	
124	19.1	19.7	20.5		313	19.1	19.4	20.8	
125	18.1	18.3	19.2	同株	314	19.3	20.8	21.4	
126*	21.8	19.0	20.3		315	24.1	25.8	28.1	
127	22.9	23.1	24.3	同株	316	18.9	20.4	21.6	
128	18.4	17.8	17.6		317*	16.2	17.1	16.1	
129	28.5	29.4	32.1	同株	318	15.5	15.7	15.8	
130	32.4	33.0	35.1		319	16.8	17.0	16.7	
136	15.9	15.8	16.2		320	19.8	21.1	22.2	
137	15.2	15.0	15.9		334	15.4	15.9	16.1	
139	17.7	18.4	19.7		338	15.1	16.0	16.7	
141	28.0	28.7	29.7		339	20.5	21.5	22.5	
142*	25.8	24.9	26.1		340	21.6	22.4	23.7	
143	24.4	27.4	29.0	同株	341	21.6	22.6	24.3	
144	19.9	20.0	21.0		342	23.2	24.9	25.8	
201	23.3	23.5	26.2		355	14.5	14.0	14.2	
202	25.4	25.3	26.9		356*	12.3	13.2	12.1	
203	33.7	35.1	36.4		357	22.9	23.4	24.7	
204	25.8	27.0	29.7		401	8.9	—	10.7	

—: 未測定 * 測定結果の信頼性が低いため、集計および解析から除外した個体

※ 樹種未同定の個体以外はすべてミズナラ

～215の3個体はすべて同じ株から分岐していた。カラマツでは見られなかったこのような測定値のばらつきは、ミズナラなどの広葉樹の方が相対的に樹幹に凹凸が多く、また胸高のすぐ下で分岐している個体が多かったため、測定時あるいは測定者による胸高直径の読みの違いが増幅された結果であると思われる。これらの個体については、測定値の信頼性が低いと判断し以降の解析から除外した (Table 2中の*印)。ミズナラ林ではこのほか、1999年に未測定だった1個体を加えたほか (個体番号401)、1995年以降に枯死したものが16個体確認された。



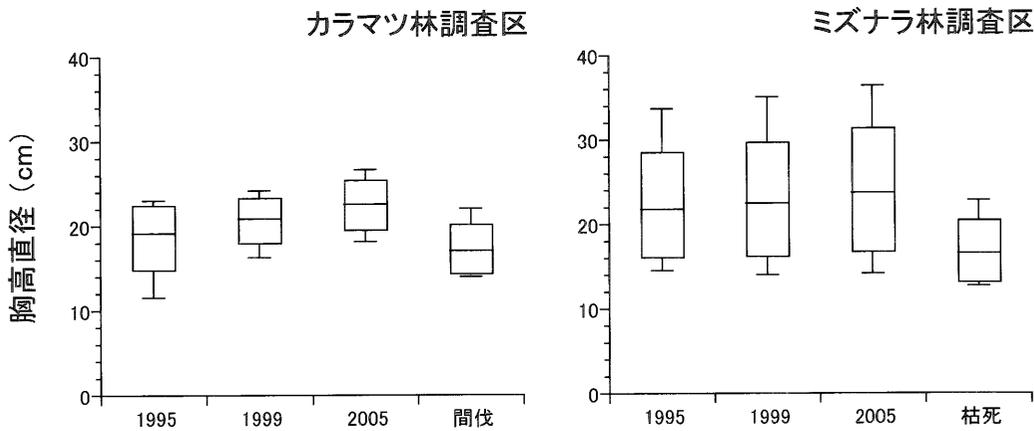


Fig. 3 カラマツ林（左）およびミズナラ林（右）調査区における，調査年および間伐あるいは枯死した個体との間の胸高直径の比較．ボックスの中心線および上下端は平均値および±1標準偏差を，上下のバーは最大値および最小値をそれぞれ表す．間伐あるいは枯死した個体の胸高直径は1995年時点の値．

との間で不等分散を仮定した両側t検定を行ったところ，カラマツと間伐木との間には有意な差が見られなかったが ($P > 0.05$)，ミズナラと枯死木との間には有意差が認められ ($P < 0.01$)，枯死した個体は現存するものより平均的に小さい胸高直径を持つことが確認された。

これまでに示された両調査区の間に見られる生長特性の違いは，以下のような理由で生じたと考えられる。カラマツ林調査区では，カラマツの生育を維持・促進するために定期的に間伐が行われている。この際，相対的に生育の悪い個体が間引かれる傾向があると思われるが，実際には周囲の個体との距離などの位置関係も考慮されるため，胸高直径の小さい順に機械的に間引かれるわけではない。間伐された個体とされなかった個体との間で胸高直径に有意差がなかったのはこのためであろう。また，隣接する個体が間伐されることにより，それまで比較的生育が抑えられていた個体が急速に生長する可能性がある。10年間で7~10cm近くの胸高直径の増加を示したカラマツの3個体は，必ずしも胸高直径自体が大きいわけではなく (Fig. 2)，間伐に伴う光環境の改善の効果が考えられる。一方のミズナラ林調査区では，このような人為的な管理が行われていないため，光環境をめぐる個体間の競争（自然間引き）によって生長量に差が生じると予想される。その結果，Fig. 2およびFig. 3に示されているように，生長して樹高が増加した個体は相対的に優位な光環境を得てさらに生長を続け，逆に小さな個体は良好な光環境を獲得できずに生長が抑制されて樹高が低いままとなり，あるいは競争に負けて枯死するのであろう。

2 林分生長量の評価

森林生態系の機能を評価する場合，現在まで生存している樹木の生長傾向よりも，単位面積あたりの林分としての生長量が重要となる。両調査区における林分構造の変化を見るため，測

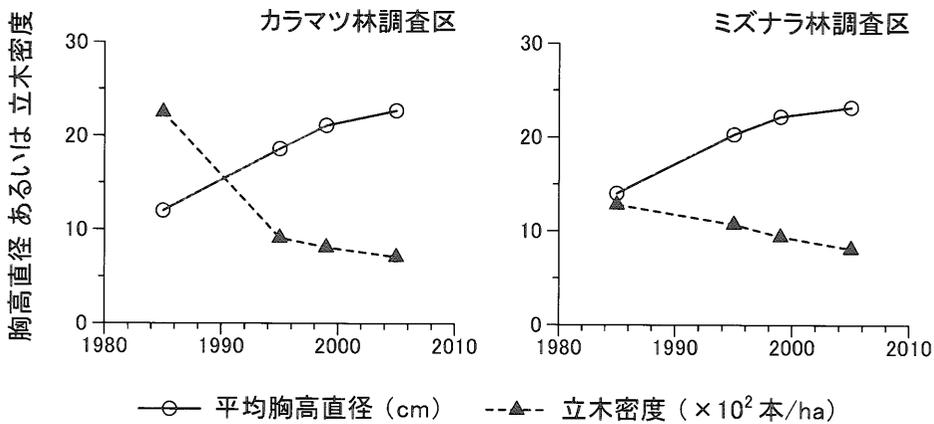


Fig. 4 カラマツ林 (左) およびミズナラ林 (右) 調査区における平均胸高直径および立木密度の時系列. 1995年および2005年の立木密度は推定値 (本文参照). 1985年の値は黒田 (1988) より引用.

定された胸高直径の平均値および立木密度の時系列をプロットした (Fig. 4)。より長期的な傾向を示すために、1985年に行われた黒田 (1988) による結果も併せて示した (Fig. 1の A および B 調査区)。プロットしたデータのうち、1999年および2005年の平均胸高直径は、Table 1および Table 2に示した測定結果のうち正常なものの平均であるが、1995年の平均値にはそれに加えて間伐あるいは枯死した個体の値も含まれている。また、1995年および2005年の調査では定面積のコドラートを設置しておらず、立木密度を直接求めることはできない。このため、1995年から2005年までの間に間伐あるいは枯死した個体の割合を求め、1999年の時点で間伐および枯死が半分まで進んでいたものと仮定し、この年のコドラート調査から求めた立木密度の値から、残り2回分の立木密度を推定した。なお、1999年の調査時の立木密度は、カラマツ林およびミズナラ林調査区でそれぞれ810および940本/haであった。

平均胸高直径の変化を見ると、両調査区とも全般的に生長速度が鈍化してゆく傾向を示している。調査区が異なる1985年の値も、今回対象とした3回分の調査結果の傾向を過去に延長した線上にプロットされた。このことは、調査区が隣接しているミズナラ林については妥当と思われるが、カラマツ林調査区より3年遅れて造林され、標高がほぼ100m高く、斜面の向きや傾斜も異なるB調査区においても同様の結果が得られたことは興味深い。B調査区ではその後調査が行われていないため断定はできないが、本試験流域内のカラマツの生長には上に挙げた程度の条件の違いはあまり影響していないものと思われる。増加する胸高直径とは反対に、立木密度は時間とともに減少した。カラマツ林では人為的な管理の結果、1985年から1995年までの10年間に急減し、その後は緩やかに減少した。管理が行われていないミズナラ林においても、立木密度の様な減少が見られたが、これは前述したように個体間の競争の結果生じた自然間引きによるものと考えられる。

各個体の胸高直径の実測値ならびに推定値を含む立木密度を用いて、個体平均および林分のバイオマスを調査年および部位別に集計した結果を Table 3に示す。このデータに基づいて、両調査区での1995年から2005年までの10年間に於ける林分バイオマスの動態を概括すると次のようになる。カラマツ林調査区では、1995年の現存量を100%とすると、10年間で現存量が8%増加し、また19%に相当するバイオマスが間伐された個体中に含まれていた。この間伐分を含めると、この林分が10年間で固定したバイオマスは当初の現存量の27%となった。ミズナラ林調査区では、10年間で現存量が6%増加し、15%に相当するバイオマスが枯死木に含まれるものであった。この枯死分を加えると、この林分が10年間で固定したバイオマスは当初の現存量の21%となった。これらの値から、両林分における平均的な年間の炭素固定量を見積もると、バイオマスの半分を炭素重量とすれば、カラマツ林およびミズナラ林調査区でそれぞれ3.4および2.5tC/ha・年となる。この値は、1960年代に全国の様々な林分で測定された幹生長量（バイオマスで3.1～9.5t/ha・年；堤，1989，p.92）と同程度であり、また最近のフラックス観測に基づくNEPの値（岐阜県高山の冷温帯落葉広葉樹林で2.37±0.92，滋賀県桐生の暖温帯ヒノキ林で7.05～7.42，山梨県富士吉田の冷温帯アカマツ林で3.19～4.59，単位はいずれもtC/ha・年；環境省地球環境局研究調査室，2004）とも近く、本研究での推定値は妥当なものと考えられる。なお、今回推定された値は葉を除いた優占種の樹体バイオマスのものであり、ミヤコザサなどの林床植生、およびリターフォールや土壤呼吸などの収支によって変動する土壤有機物量は考慮されていない。林床や土壤を含めた森林生態系バイオマスは樹体よりかなり大きくなるため、生態系全体では固定したバイオマスの量やその比率が異なってくる可能性がある。

Table 3 各調査年における部位別の個体平均および林分バイオマス

	カラマツ林調査区			ミズナラ林調査区		
	1995	1999	2005	1995	1999	2005
個体平均 (kg)						
幹部	170.9	209.0	235.4	134.1	164.6	181.1
枝条部	42.7	52.3	58.9	48.1	62.4	71.2
地下部	64.1	78.4	88.3	45.5	56.7	63.1
全体	277.6	339.6	382.6	227.7	283.7	315.3
(間伐あるいは枯死分)						
幹部				87.4		
枝条部				26.7		
地下部				28.5		
全体				142.7		
立木密度 (本/ha)	908	810	712	1065	940	815
林分 (t/ha)						
幹部	155.1	169.3	167.6	142.8	154.7	147.6
枝条部	38.8	42.3	41.9	51.2	58.6	58.0
地下部	58.2	63.5	62.9	48.5	53.3	51.4
全体	252.1	275.1	272.4	242.5	266.7	257.0

IV まとめ

過去に測定された胸高直径データを利用して林分構造の変化を解析したところ、樹木個体間の競争や人為的な管理の有無により、試験流域内の主要な2つの林分間の生長特性の違いが明らかとなった。また、林分生長量から推定された林分の炭素固定量は、他の林分あるいは手法による結果とほぼ等しい値を示した。このような林分の生長および構造の変化は、水・物質循環に関する森林生態系の応答を長期的に変化させる要因となる。今後、本試験流域における長期モニタリング研究に本研究の結果を反映させることで、森林の機能についてのより詳細な解析が可能になると期待される。

その一方、今回推定されたバイオマスは胸高直径のデータのみから概算されたものであり、より精度の高い推定のためには、樹高の測定や枝条部・地下部との量的関係の解明などが必要となる。個体あるいは林分材積の推定は、主として木材としての森林の経済的価値を評価するために行われてきた経緯があるが、最近では京都議定書における森林の炭素固定能の評価や国家間の炭素排出量取引など、従来とは異なる観点から森林の持つ経済的側面が注目されつつある。このような点から、より多くの森林生態系における林分生長のモニタリングが重要となるほか、特にこれまで木材としての扱いが相対的に少なかった広葉樹について、より正確かつ簡便な現存量の測定・推定手法の開発が望まれる。

謝 辞

現地調査を行うに当たり、筑波大学農林技術センターハケ岳演習林のスタッフの方々には様々な便宜を図って頂きました。また、1995年および1999年の調査では、筑波大学大学院地球科学研究科(当時)開設の水文学野外実験の当該年度の参加者の方々にご協力を頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

最後に、本試験流域における研究および野外調査に携わられ、2005年10月に35歳の若さで他界された、山梨県森林総合研究所の松谷 順氏に対して、謹んで哀悼の意を表するとともに本拙文を捧げます。

引用文献

- 阿部 勲・作野友康 編 (1998) 「木材科学講座1 概論～森林資源とその利用」, 199p., 海青社, 大津.
- 濱田洋平・小林義和・田中 正 (1997) カラマツおよびミズナラ林土壌における根系分布. 筑大演報, 13: 103-118.
- 濱田洋平・田中 正 (1997) 森林土壌空気中における二酸化炭素濃度の時空間分布. 日本水文学会誌, 27: 3-16.

- HAMADA, Y. and TANAKA, T. (2001) Dynamics of carbon dioxide in soil profiles based on long-term field observation. *Hydrol. Process.*, **15** : 1829-1845.
- 飯田真一・中谷 壮・田中 正 (2006) 山地源流域の落葉広葉樹林における樹液流速測定に基づく林分蒸散量の評価. 水文・水資源学会誌, **19** : 7-16.
- 環境省地球環境局研究調査室 編 (2004) 「地球環境研究総合推進費 平成15年度研究成果—中間成果報告集—VI. 戦略的研究開発領域」. pp. 41-42.
- 勝屋敬三・黒田吉雄 (1983) 川上演習林におけるカラマツの根株心腐れ実態調査 (I). 筑大演報, **1** : 13-15.
- KOBAYASHI, Y. and TANAKA, T. (2001) Water flow and hydraulic characteristics of Japanese red pine and oak trees. *Hydrol. Process.*, **15** : 1731-1750.
- 越島哲夫・杉原彦一・浜田良三・福山萬治郎・布施五郎 (1983) 「改訂 基礎木材工学」. 569p., 文教出版, 大阪.
- 黒田吉雄 (1988) 天然広葉樹林・カラマツ人工林のリター落下量. 田中 正編「山地森林流域における流出機構と物質循環に関する研究」. 昭和61・62年度文部省科学研究費補助金研究成果報告書, 99-102.
- 南雲秀次郎・箕輪光博 (1990) 「現代林学講義10 測樹学」. 243p., 地球社, 東京.
- 農林水産省林業試験場 編 (1973) 「新版 木材工業ハンドブック」. 1127p., 丸善, 東京.
- 大隅眞一 編著 (1989) 「森林計測学講義」. 287p., 養賢堂, 東京.
- 林野庁計画課 編 (1985) 「立木幹材積表—東日本編—」. 333p., 日本林業調査会, 東京.
- 高橋 徹・中山義雄 編 (1995) 「木材科学講座3 物理・第2版」. 174p., 海青社, 大津.
- 田中 正・黒田吉雄・海上道雄・高山茂美 (1988) 川上演習林堀内北沢流域 (川上試験流域) の水文観測システムについて. 筑大演報, **4** : 173-185.
- TANAKA, T., MORI, M., TSUJIMURA, M., HAMADA, Y., SUBAGYONO, K. and IIDA, S. (2004) Relationship between mean residence time of stream water and wetness condition in a forested headwater catchment, central Japan. In: SIDLE, R. C., TANI, M., ABDUL RAHIM N. and TEWODROS AYELE, T. (Eds.) '*Forests and Water in Warm, Humid Asia-Proceedings of an IUFRO Forest Hydrology Workshop*', 115-118.
- 辻村真貴 (1993) 厚い土層からなる急峻な森林斜面における土壌水の挙動について. ハイドロロジー, **23** : 3-18.
- TSUJIMURA, M. and TANAKA, T. (1998) Evaluation of evaporation rate from forested soil surface using stable isotopic composition of soil water in a headwater basin. *Hydrol. Process.*, **12** : 2093-2103.
- 堤 利夫 (1987) 「森林の物質循環」. 124p., 東大出版会, 東京.
- 堤 利夫 編 (1989) 「森林生態学」. 166p., 朝倉書店, 東京.

(2005年12月26日 受理)