

## B-52 木質系バイオマス・エネルギーの利用技術及び供給可能量の評価に関する研究

### (1) 我が国における木質系バイオマス資源のポテンシャル評価

#### 独立行政法人森林総合研究所

森林管理研究領域	資源解析研究室	家原敏郎・福田未来
森林管理研究領域	環境計画研究室	宮本麻子
東北支所	森林資源管理研究グループ	栗屋善雄・西園朋広
関西支所	森林資源管理研究グループ	田中邦宏

平成12～14年度合計予算額 20,468千円  
(うち、平成14年度予算額 5,940千円)

[要旨] 未利用バイオマス量算出モデルを作成しそれによって、日本の全森林について、伐採分のうち木材製品として使われなかった未利用バイオマス量(梢端、根株、樹皮、枝、葉、おが粉・端材)、及び禁伐林と京都議定書の3条4項分を除いた成長量余剰分全てを、木質系バイオマス資源として使うという仮定をおいて、その供給ポテンシャルを推計した。林業活動に伴う未利用バイオマス量は1995年に約6.7メガトン/年と推定され、樹種別ではスギが多かった。成長量余剰分を含む日本の森林からの木質系バイオマス資源の理論的な最大供給量は、1995年で約25メガトンと推計され、これは2000年度の日本の1次エネルギー消費量の約2.3%に相当すると推定された。また、岩手県遠野地域を対象として、地域むけのより詳細な未利用バイオマス量算出モデルを作成した。スギおよびカラマツについて林分測定データより直径・樹高分布の成長を求め、相対幹曲線と樹皮厚率、幹・枝・葉配分比、伐採現場での放置材の調査、製材工場での歩留まりの聞き取りなどによって、種類別に未利用バイオマスの予測表を作成した。スギの地位級3林齢50年では、ヘクタールあたり約150トンの未利用バイオマスが賦存し、おが粉・端材、根曲がり部、葉、中間部放置材の量が多いと推計された。カラマツの地位級3林齢50年では、約90トン/haであり、おが粉・端材、枝、根曲がり部が多いと推計された。広葉樹林では、林地残材量の調査から、伐採後の枝条バイオマス量は約25トン/haでほぼ一定であることが明らかになった。

[キーワード] バイオマス資源、供給ポテンシャル、梢端、枝葉、製材屑

#### 1. はじめに

京都議定書により日本に割り当てられたCO<sub>2</sub>削減目標を達成するには、省エネルギー努力だけでなく、代替エネルギー源の開発が急務である。木質系バイオマスは古来より薪炭として利用されてきた歴史をもち、量も豊富で、有望な代替エネルギー源である。ところが日本では、エネルギー源として利用可能なバイオマス量に関する統計がない状態にある。そこで、そのポテンシャルを評価する手法を開発し、全国規模での利用可能量を推計する必要がある。また、地域レベルでは、実際にバイオマスエネルギープラントの設置計画を立案するため、できるだけ詳細なバイオマス供給ポテンシャルの評価手法の確立が望まれている。

## 2. 研究目的

日本の森林から得られるエネルギーとして利用可能なバイオマスは、伐採時の枝、葉、梢端やおが粉・端材など最終的な木材製品にならない部分が有望であるが、旧薪炭林に代表される低利用の森林も候補であろう。本サブテーマでは、これらの量を推定する方法を開発し、日本全国の未利用バイオマス資源量を評価すること、及び地域レベルでのより詳細な木質系バイオマス供給ポテンシャルの評価手法の開発を目的とした。具体的には、(1)日本全国について、伐採時に発生する未利用バイオマス量、および旧薪炭林を含めた成長余剰分で最大限伐採可能なバイオマス量を推定し、日本の1次エネルギー消費量に対する割合を推定すること、(2)岩手県遠野地域を対象として、地域むけのより詳細な未利用バイオマス量算出モデルを作成し、地域での発生量を推定することを目的とした。

## 3. 研究方法

スギ、ヒノキなど針葉樹人工林では、枝、葉、梢端、根株や、地際の根曲がり部などが伐採現場で、丸太の樹皮やおが粉・端材などが製材工場での未利用材として出てくる。

(1)全国評価では、スギ、ヒノキ、カラマツを対象として、幹曲線を使って、梢端、根株、樹皮の量を推計する計算モデルを作成し、それと幹・枝・葉配分比曲線から、伐採統計をもとに枝・葉を含めた未利用バイオマス量を推計する。森林資源統計から、日本の森林の樹種別成長量を求め、そこから禁伐林及び京都議定書の3条4項相当分を除いた成長量余剰分全てを、木質系バイオマス資源として使うと仮定して、その量を評価する。

(2)岩手県遠野地域では、詳細な未利用バイオマス量算出モデルを作成し、収穫表に連動して量が推計できるように、針葉樹および広葉樹の未利用バイオマス量予測表を作成し、遠野地域での未利用バイオマス量を推定した。算出モデルは、林分測定データより直径・樹高分布の成長を求め、相対幹曲線と樹皮厚率、幹・枝・葉配分比、伐採現場での放置材の調査、製材工場での歩留まりの聞き取りなどのパラメータを入れ、種類別に未利用バイオマス量を推計できるモデルとした。また、収穫予測表についてもより精度のよい予測をめざして、スギ及びカラマツのシステム収穫表を作成した。

## 4. 結果・考察

### (1) 全国レベルでのバイオマス資源のポテンシャル評価

#### ①伐採可能材積の推計

日本の森林資源を木質系燃料として利用することを考えると、その供給源として、国産材伐採に伴って発生する未利用バイオマスがまず考えられる。これは製品、すなわち製材品、パルプ材、チップ材、しいたけ原木、薪炭材をとった残りで捨てている部分であり、樹皮、おが粉・端材、梢端、枝、葉、根株などが考えられる。しかしバイオマス資源の最大ポテンシャルを評価するためには、広大な面積残されている旧薪炭林の広葉樹二次林、また針葉樹人工林の積極的な利用も考えなければならない。ここで、現在の森林資源の状況を考慮すると、資源はある程度成熟しているため、深刻なエネルギー危機がきた場合、森林の成長量相当分は伐採が許容されるという考えも成り立つと思われる。ただし、その場合でも、原生自然の保護や国土保全の目的のため、禁伐林に指定されているものは伐採できないであろう。また、日本は地球温暖化防止のため、京都

議定書に加盟しているの、森林管理によってCO<sub>2</sub>排出量から相殺できる京都議定書3条4項分に相当する成長量は残しておかなければならないであろう。そこで、本研究では、これらを除いた分については、経済性は無視して伐採し、木材製品として使われる以外のものはバイオマス燃料として利用できる、すなわちスギ、ヒノキでも成長量の余剰分でありかつ製品として利用されないものはバイオマス燃料とするとして、全国レベルでのバイオマス資源の最大供給ポテンシャルの評価を行った。

表1は、林業統計から得られた林種別の禁伐林の面積である。表1より伐採が禁止されている人工林はごくわずかなので、禁伐林は全て天然林にあるとした。次に、1986年と1995年の林野庁の森林資源現況調査より各樹種の年間平均成長量を算出し、1995年の成長量とした(表2)。その際、天然林の禁伐林面積は全天然林面積の約9%であるので、天然林各樹種の成長量の9%分を伐採不可能とした。次に伐採量のモデルケースとして、1995年と林業がまだ盛んであった1970年を選び、成長量からひいて成長量の余剰分とした。本論の仮定の上では最大限この量の伐採が可能である。なお表2では、京都議定書の3条4項分は、後の計算の都合上まだ控除しておらず、これは推計の最終段階で控除することにした。

表-1. 伐採が禁止されている森林の面積(単位:千ha)

森林計画対象面積	種別	民有林		国有林		合計
		法令による禁伐林A	法令による禁伐林B	機能類型区分に基づく伐採禁止区域C		A+C
	人工林	15	8	15		30
禁伐林面積	天然林	112	412	1,081		1,193
	竹林	2	0	0		2
	無立木地	21	261	326		347
	小計		681	1,422		1,572
	合計	150		1,480		1,632
木材生産可能な面積		17,059		5,751		22,810
木材生産可能な面積の割合		99%		80%		93%
注: 国有林における禁伐林面積は、法令による禁伐林681千haと機能類型区分に基づく1,422千haの双方から重複を除いた1,480haである。						
資料: モントリオールプロセス2003年国別報告書原稿 森林計画対象面積は2000年林業サンサスによる。						

表-2. 成長量とその余剰分の推計

樹種	1995年		1995年		1970年		成長量の余剰分
	成長量	素材生産量	伐採材積への換算(係数1.21)	成長量の余剰分	素材生産量	伐採材積への換算(係数1.296)	
	幹材積	素材材積	(A)	幹材積	素材材積	幹材積	幹材積
	(千m <sup>3</sup> )	(千m <sup>3</sup> )	(千m <sup>3</sup> )	(千m <sup>3</sup> )	(千m <sup>3</sup> )	(千m <sup>3</sup> )	(千m <sup>3</sup> )
スギ	42,538	8,948	10,791	31,747	9,860	12,780	29,759
ヒノキ	18,089	2,924	3,526	14,562	4,539	5,883	12,206
マツ類	8,216	2,036	2,455	5,760	5,676	7,357	859
その他針葉樹	12,926	4,159	5,015	7,910	6,716	8,705	4,221
ナラ・ブナ	-2,572	573	691	0	2,745	3,558	0
その他広葉樹	26,434	5,644	6,806	19,628	17,780	23,045	3,389
合計	105,629	24,284	29,284	79,607	47,316	61,328	50,434

## ②未利用バイオマス量の推計モデル

### ア. モデルの概要

全国の未利用バイオマス量を推計するため、まず林分あたりの未利用バイオマス量を推計するための計算モデルを作成した(図1)。立木の伐採を考えると、伐採する時点でまず根株が残され、梢端で丸太として使用される直径より小さい部分が切り捨てられ、枝葉も切除される。製材工場まで運ばれた丸太は、まず樹皮を剥がされ、角材や板として加工される間に、大量の端材やおが粉が発生する。これらを収集すればバイオマス燃料として利用が可能となる。梢端、根株、樹皮の量を推定するため、幹曲線を利用した測樹学的な計算モデルを作成し、また枝・葉量の配分比モデルを作成して、未利用バイオマスの種類ごとに全国の発生量を推定した。なお、根のバイオマス量は、利用がほとんど不可能であるため本研究では無視した。

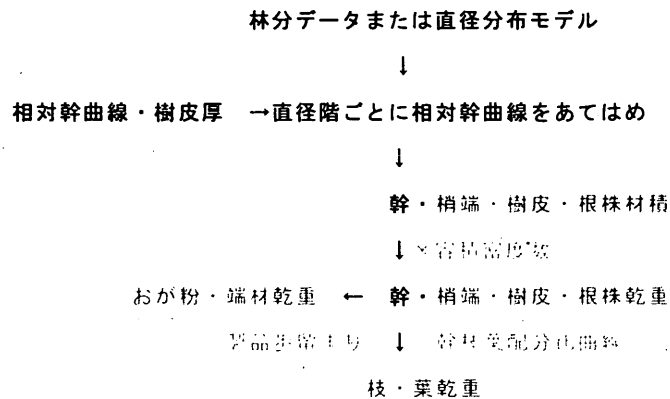


図-1. 全国評価のための未利用バイオマスの推計モデル

### イ. モデルによる梢端、根株、樹皮の比率の推定

幹のうち利用されない梢端、根株、樹皮の比率は、幹の形を表す幹曲線式を使い、一定のルールに従って、丸太をとった残りの部分の体積を計算すれば求めることができる。スギについては、樋渡<sup>8)</sup>による材積式からの誘導式、ヒノキは家原<sup>9)</sup>による重み付き多項式を幹曲線式として用いた。

#### 【スギ】

幹曲線: [1]  $\log D_{out} = 0.21925 + 0.76587 \cdot \log DBH + 0.72855 \cdot \log L - 0.623332 \cdot \log H$

ここで、H: 樹高(m), DBH: 胸高直径(皮付; cm), X: 高さ(m),  $D_{out}$ : 高さXでの皮付き径,  $L=H-X$

樹皮厚率: [2]  $D_{in} = \{ 0.9366 + 0.084653 \cdot (X/H) - 0.146864 \cdot (X/H)^2 \} \cdot D_{out}$

ここで、 $D_{in}$ : 高さXでの皮内径

#### 【ヒノキ】

幹曲線: [3]  $D_{out} = 1.19948 \cdot DBH \cdot Z + 0.85159 \cdot DBH^2 / H \cdot Z - 1.76646 \cdot DBH^2 / H \cdot Z^2$   
 $+ 0.83126 \cdot DBH^2 / H \cdot Z^3 - 0.76932$

ここで、 $Z = (H - X) / (H - 1.2)$

樹皮厚率: [4]  $D_{in} = \{ 0.95268 + 0.0058 \cdot (X/H) - 0.10867 \cdot (X/H)^2 \} \cdot D_{out}$

以上のモデルを、関東、東京、名古屋森林管理(分)局管内収穫試験地林分データ(スギ174、ヒノキ187データ)に適用し、伐採高を20cmとし、長さ3mの末口直径(皮内直径)6.0cm以上の丸太をとると仮定し、伐採がX齢級(範囲の中央値: 林齢48年)で行われるとして、林分あたりの幹に対する梢端部分、根株、樹皮の比率を推定した(表4)。

また、カラマツについては資料が不足していたため、遠野地域の26本のカラマツ伐採木を対象として、幹の細りを測定し推定した幹曲線を用いた。細りの測定データから、樹木の全高を1、全高の20%の高さでの直径を1とする相対幹曲線を推定すると式[5]のようになった。根張りをうまく表現するため、全体を幹部と根元部の2本の3次曲線で近似させた。樹皮厚率は式[6]のように推計された。伐採高等は遠野市の現地調査結果を用い、伐採高は平均23cm、丸太採取最小直径は8.0cm、森林組合資料に従い、丸太の長さは太さにより3mまたは4mとした。これらを、(2)①で述べる岩手県民有林カラマツの林分成長データに適用して、伐採がX齢級で行われるとして、林分あたりの幹に対する梢端部分、根株、樹皮の比率を推定し、「その他針葉樹」のパラメータとした(表4)。

【カラマツ】

幹曲線：[5]  $Y = 2.5425X - 2.2975X^2 + 0.86519X^3 - 0.0043691$  (0.95 ≥ X ≥ 0.0)  
 $Y = 16208.3X - 16796.0X^2 + 5802.2X^3 - 5213.0$  (1.0 ≥ X > 0.95)

ここでX = (H-Hi) / H, H: 樹高, Hi: 断面の高さ, Y: X=0.8の直径に対する直径比

樹皮厚率：[6]  $D_{in}/D_{out} = 0.97312 \cdot X - 0.00477834$

細りに関する資料を得ることができなかった、マツ類およびナラ・ブナ、その他広葉樹の樹種区分については、スギ、ヒノキ、カラマツの値の平均値を根株、梢端部分、樹皮の比率とした。また、根曲がり部や幹中間部の欠点材などは、地域によってはそれらがほとんど発生しない林分も多く、発生量の推定が困難であるので、全国評価では除外することにした。

ウ. 各樹種の容積密度数

木材をバイオマスエネルギーとして評価するには、体積から重量に変換する必要がある。ここでは、容積密度数により絶乾重に変換することとした。容積密度数は木材工業ハンドブック<sup>19)</sup>等により、伐採統計の樹種区分に数種が該当する場合は、代表的な樹種の平均とした(表3)。

表-3. 各樹種区分の容積密度数

伐採統計の樹種	種名	容積密度数(kg/m <sup>3</sup> )	伐採統計の樹種	種名	容積密度数(kg/m <sup>3</sup> )	
スギ	スギ	310	その他広葉樹	クヌギ	676	
ヒノキ	ヒノキ	360		コナラ	621	
マツ類	アカマツ	423		クリ	492	平均
	カラマツ	408		平均	550	
その他針葉樹	エゾマツ	335		シラカシ	647	
	トドマツ	360		コジイ	422	
ナラ・ブナ	ミズナラ	543		マカンバ	536	
	ブナ	528		シラカンバ	453	

エ. 枝・葉のバイオマス量

全木集材を行うと、幹に枝・葉がついた状態で林道際まで運ばれるので、枝はバイオマスとして有望であるし、葉もある程度利用可能であろう。幹に対する枝・葉の率は幼齢林で高く、その後減少することが報告されており、福田ら<sup>3),4)</sup>は図2のような配分比曲線を作成している。福田ら<sup>3),4)</sup>の報告をもとに、伐採時点の枝葉の比率を求めると、表4のようにまとめられる。なお、ここで、伐採時の林齢は用材として用いられる針葉樹類は48年(X齢級)、ナラ・ブナ林98年(X X齢級)、しいたけ原木、パルプ・チップ材への利用が主と考えられるその他広葉樹林は、28年(VI齢級)とした。

表-4. 根株、枝、葉等の比率

伐採統計 の樹種	伐採時 林齢(年)	幹の乾燥重量に対する各部の比率				
		根株	樹皮	梢端	枝	葉
スギ	48	2.4%	10.6%	2.5%	9.4%	14.0%
ヒノキ	48	2.7%	10.8%	4.2%	9.1%	8.2%
マツ類	48	3.0%	10.0%	4.0%	11.8%	6.0%
その他針葉樹	48	3.0%	7.0%	3.7%	16.4%	8.0%
ナラ・ブナ	98	3.0%	10.0%	4.0%	22.6%	3.1%
その他広	28	3.0%	10.0%	4.0%	21.6%	4.3%

注) その他針葉樹の枝・葉量はカラマツとエゾマツ・トドマツの平均とした。

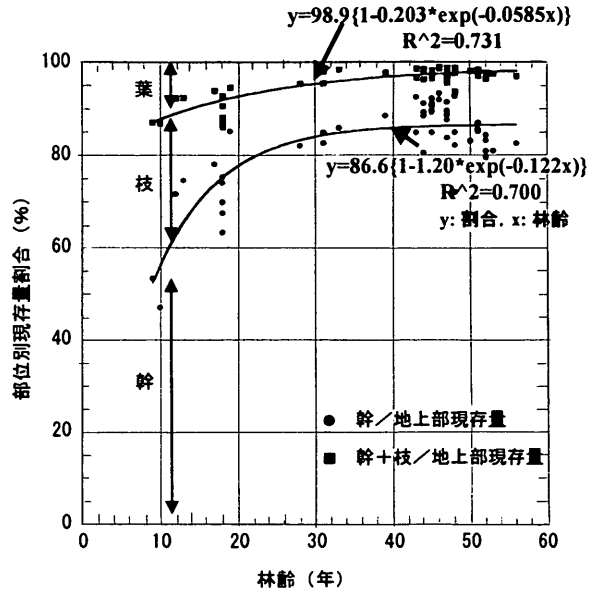


図-2. カラマツの幹枝葉配分比

オ. 木材の用途とバイオマス燃料の発生

以上のようにして、立木の部位別の未利用バイオマス量を求めることができるが、次に考慮すべき問題として、木材の用途の相違による未利用バイオマスの発生形態の相違がある。例えば、広葉樹の多くはパルプ材として消費されるが、スギ・ヒノキの製材と違い、木部は全量消費されるので、この場合には端材・おが粉は発生しないことになる。マツ類も多くは、パルプ材となるが、製材用に消費されるものも多く、その用途別比率を把握する必要がある。

木材の用途別消費量は、表5の1行目のような統計がとられ、1列目のような樹種別消費量の統計もある<sup>20)</sup>。また、パルプ材の樹種別消費量も統計がある。表5の中央部は、仮の数値をいれ、縦横集計を完結させたものである。完結した表から、スギ、ヒノキはほぼ全量が製材用となっているとしないと、この表が合理的に解釈できないことがわかる。

そこで表5から、木材の用途別消費量として以下を仮定することにする。すなわち、スギ・ヒノキは全量製材用となり、ナラ・ブナは全量製材または合板として消費されるとする。マツ類は50%が製材用、50%がパルプ及び木材チップ用とする。その他針葉樹（カラマツ、エゾマツ、トドマツ）は75%が製材用、25%がパルプ及び木材チップ用とする。

以上より、樹種別・用途別比率とバイオマス燃料になる部分を示すと表6のようになる。パルプ・チップ用材では端材・おが粉、しいたけ原木では端材・おが粉及び樹皮は、一体となって消費されるので、バイオマス燃料としては直接利用できないとした。

また、端材・おが粉の発生量は、製材工場への聞き取り結果から、素材材積に対し40%とした。

③モデルによる全国のバイオマス資源のポテンシャル評価

以上のように作成したモデルによって、全国の未利用バイオマス量供給ポテンシャルを推計した。未利用バイオマスとしては林業活動による伐採を起源とするものと、伐採材積統計と素材材積統計の差分、成長量の余剰分にかけて求めた。成長量の余剰分は、針葉樹人工林であっても、立木全体がバイオマス燃料として消費されるとした。推計は、1995年の成長量を基準として、伐採量を2つのケース、すなわち伐採量が低迷している1995年(図3)の状態の時と、林業活動がさかんであった伐採量が多い1970年(図4)の場合について求めた(表7)。

表-5. 素材の樹種別用途別消費量と樹種別推計 (平成7年)

単位: 千m<sup>3</sup>

		製材用	パルプ用	合板用	木材チップ用	その他用	合計
		16252	1209	228	4762	446	22897
スギ		8948	8948				8948
ヒノキ		2924	2924				2924
マツ類		2036	1000	501	535		2036
その他針葉樹	エゾ・トド	4159	732				732
	その他		3035	121	25	446	3627
ナラ		292	178	0	114		292
ブナ		281	167	0	114		281
その他L		4257		55	4202		4257
合計		22897	16252	1409	228	4762	23097

は林業統計要覧の数値

太字は紙パルプ統計に数値があるもの。斜字は表を完結させるため仮に与えた値。

表-6. 木材の用途とバイオマス燃料となる部分

用途	比率(%)	根株	樹皮 <sup>1)</sup>	梢端	枝	葉	端材・おが粉
スギ 製材	100	○	○	○	○	○	○
ヒノキ 製材	100	○	○	○	○	○	○
マツ類 製材	50	○	○	○	○	○	○
	50	○	○	○	○	○	×
その他針 製材	75	○	○	○	○	○	○
	25	○	○	○	○	○	×
ナラ・ブナ 製材・合板	100	○	○	○	○	○	○
その他広 パルプ・チップ用材	75	○	○	○	○	○	×
	25	○	×	○	○	○	×

注1): 樹皮はしいたけ原木、薪炭材のみ樹皮は同時に消費されるため燃料として利用できない。

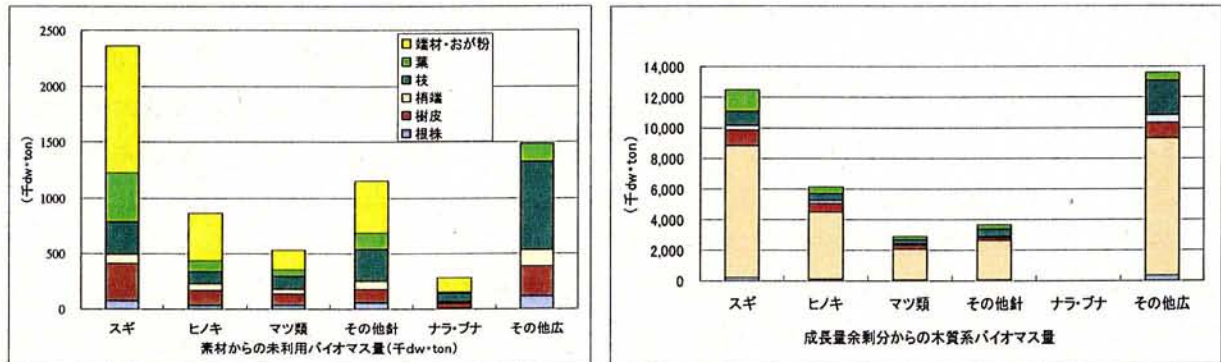


図-3. 樹種・種類別未利用バイオマス量 (1995年: 伐採量が1995年相当の場合)

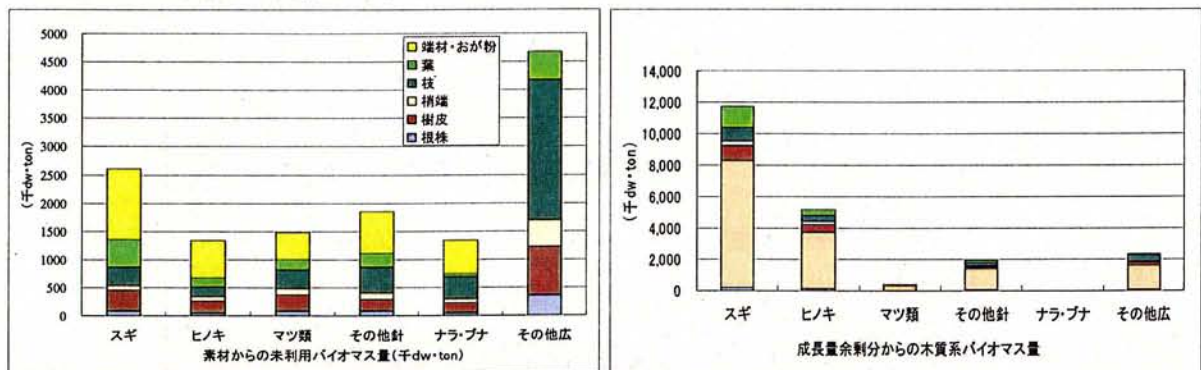


図-4. 樹種・種類別未利用バイオマス量 (1995年: 伐採量が1970年相当の場合)

表-7. 部位別バイオマス量

1995年の未利用バイオマス量の供給ポテンシャルは年間約46メガトン、同じ成長量で仮に伐採量が1970年の水準まで回復したとしたら、利用されるものが増え38メガトンであった。しかし、1970年水準の時は、利用が容易な林業・林産業起源のものが13メガトンあるのに対し、1995年水準ではそのほぼ半分にすぎない。その分、成長量に対する伐採量が少なくなり、成長量余剰分が多くなっている。また、1970年水準では、その他広葉樹林の伐採量が多く、余剰成長量が少ないという特徴があるのもわかる。これは国内の広葉樹がパルプ原料資源として多く使われていたことを示すものといえ、逆に最近では国内パルプの生産が急激に減少していることも表している。

起 源	1995年	1970年
伐採された素材より(千ton)	6,664	13,281
"伐採材積-素材材積"	542	3,191
成長量余剰分	38,725	21,572
根株	1,195	1,241
丸太の材部	26,734	16,983
樹皮	4,217	4,173
梢端	1,532	1,593
枝	6,282	6,630
葉	3,654	3,702
端材・おが粉	2,317	3,722
計	45,931	38,044

1995年水準の伐採量では、バイオマス資源として大量の木材を利用するには、それを目的としてわざわざ伐採をしないといけなくなっており、問題が大きい。「伐採材積統計と素材材積統計の差分」は、伐採材積をもとにバイオマス量を推計したものが、素材材積からバイオマス量を推計したものに比べ常に多めに推計されるものであり、切り捨て間伐木の量を反映している可能性がある。しかし、その量は1995年水準で0.5メガトン程度であり、あまり多くはない。

以上のようにして求めた、未利用バイオマス量から、京都議定書3条4項分を差し引いて、日本の森林から生産される木質系バイオマス資源の最大供給量とした。控除する値としては、3条4項の割り当て量13メガ炭素トンに、スギの地上部比率0.796及び炭素の含有率0.5の逆数を乗じて20.7メガトンとした。日本の森林からの、木質系バイオマス資源の理論的な最大供給量は1995年で約25メガトンと推定された(表8)。なお、この推計はあくまで日本の森林起源のものだけであって、輸入木材からの未利用バイオマス量を含んでいないことに注意してほしい。

1995年の最大供給量をエネルギーに換算すると、 $5.27 \times 10^{11}$ メガジュールとなり、これは2000年度の日本の1次エネルギー消費量の2.3%に相当すると推定された(表9)。

表-8. 京都議定書を考慮した日本の森林からの木質バイオマス資源の最大供給能力(10<sup>6</sup>ton/年)

	国内林業・林産業 (国産材)で発生	伐採量-素材 生産量	成長量余剰分	小 計	京都議定書 3条4項分	合計
1970年	13.3	3.2	21.6	38.0	-20.7	17.3
1995年	6.7	0.5	38.7	45.9	-20.7	25.2

表-9. 未利用バイオマス資源の1次エネルギー換算

	ケース	1970	1995
木質系バイオマス量	(Mton/yr)	17.3	25.2
木材の高位発熱量	(MJ/dry-kg)	20.9	20.9
バイオマスの総発熱量	(MJ)	3.62E+11	5.27E+11
原油換算	(MkL)	9.34	13.60
2000年度1次エネルギー供給量 (原油換算MkL)		604	604
木質バイオマスの比率		1.5%	2.3%

出典: 総合エネルギー統計(平成12年度版), バイオマスハンドブックP.360



以上のように、木質系バイオマス資源のポテンシャルを推計したが、成長量の余剰分をすべてバイオマス燃料とするという大胆な仮説をとっており、ポテンシャルを下げる要因として、アクセスや経済性による伐採不可能林分の問題があろう。他方、林業統計における成長量の正確度の問題もあり、統計では特に広葉樹の成長量が低く見積もられているといわれており、これは推計値を上げるであろう。今後の全国評価の研究の方向性としては、これらの問題点を解決しより正確な推定を目指す必要があると考えられる。

## (2) 岩手県遠野地域でのポテンシャル評価

森林が用材生産を目的として伐採されると、大量の林地残材が発生し、それらは林地に放置されることになる。これらの林地残材は、木質バイオマスのエネルギー利用の観点のみならず、森林生態学的な観点からも重要であることが指摘されている（例えば、森林生態系の物質循環に及ぼす影響や昆虫相の生物多様性に及ぼす影響など）<sup>7)</sup>。しかし、その重要性にもかかわらず、林地残材量を推定する方法に関する報告は少なく<sup>12), 7)</sup>、推定方法は確立されていない。

筆者らは、全森林バイオマスから利用バイオマス（素材量）を差し引くことで未利用バイオマス（林地残材量）を算出できる点に注目した。森林が伐採されたときに算出される素材の量については、測樹学の分野で成長モデルによる推定方法が確立されている<sup>8), 9)</sup>。樋渡<sup>8)</sup>は伐採前の林分構造が入力データとして与えられると、同林分において算出される素材量が出力されるモデルを提案した。家原<sup>9)</sup>は、任意の林分の林齢と地位が与えられると、直径分布と樹高曲線によって林分構造が推定され、さらに樋渡のモデルを利用して素材量が出力されるモデルを提案した。また、全森林バイオマスについては、幹バイオマスに対するその他の部位別現存量割合を幹バイオマスに乗じることによって、全森林バイオマスを推定する方法が提案されている<sup>3), 6)</sup>。これらの手法を組み合わせることで伐採された林分における林地残材量の推定は可能になる。

ところで、木質バイオマス資源をエネルギーとして利用するためには、地域レベルの木質バイオマス資源量を把握する必要がある。我が国における地域レベルの森林・林業に関する情報は森林簿を基礎として求められている。森林簿はその精度や運用でさまざまな問題が指摘されているが、日本の森林資源を統一的に記述した唯一の情報である<sup>30)</sup>。したがって、木質バイオマス資源量の把握に際しても、森林簿情報を利用するというのは最も効率的な方法の一つである。森林簿情報の多くは林分収穫表から得られているため、森林簿情報を利用して木質バイオマス資源を把握するためには、木質バイオマスに関するデータを記載した収穫表を調製する必要がある。

### ① 針葉樹林における未利用バイオマス予測表の作成

#### ア. 針葉樹林の予測モデル

##### (ア). 入力と出力

本研究では、測樹学的な成長モデルに基づいて、未利用バイオマス量を推定するモデルを提案し、さらに、このモデルに基づいて、岩手県遠野市を対象として、この地域での林業対象樹種であるスギ及びカラマツの木質バイオマス予測表を調製した。

モデルでは、林分の伐採時に発生する未利用バイオマス量と素材材積が出力される。未利用バイオマスは根株、末木、枝、葉、小径木および曲がりによる未利用部（根曲がりや幹曲がり起因する未利用部）に分割される。モデルの必要とする入力値は、林分の平均直径、平均樹高、本

数密度、曲がりによる未利用部割合および採材基準である。採材基準とは、材長、最小末口径および伐採高である。モデルの概要を図5に示す。

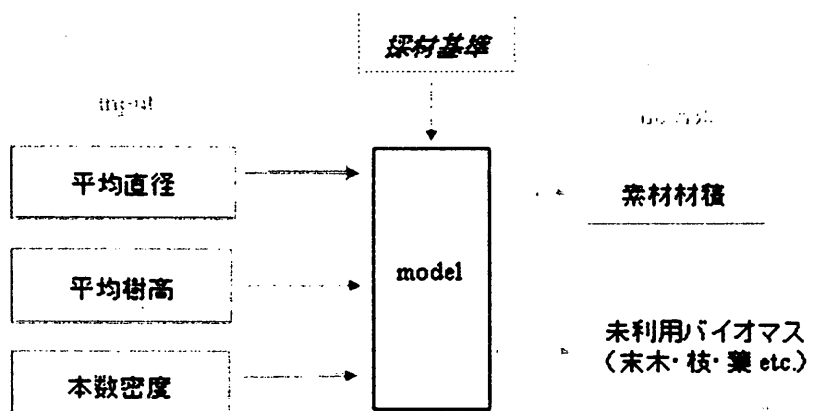


図-5. 針葉樹のモデル

(イ) . 直径分布

直径分布は次式で表されるワイブル密度関数<sup>18)</sup>を用いて推定した。

$$[7] \quad g(D) = (c/b) \{(D-a)/b\}^{c-1} \exp[-\{(D-a)/b\}^c]$$

ここで、 $g(D)$ は確率密度関数、 $D$ は胸高直径であり、 $a$ 、 $b$ および $c$ は係数である。係数 $a$ と胸高直径の変動係数 $CV$ は次式によって推定した。

$$[8] \quad a = \alpha + \beta D_m$$

$$[9] \quad CV = \gamma + \delta D_m$$

ここで、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ および $\delta$ は係数である。係数 $b$ と $c$ は $a$ と $CV$ から $\Gamma$ 関数を用いて推定した<sup>18)</sup>。

(ウ) . 樹高曲線

樹高曲線は次式で表される相対樹高曲線<sup>23)</sup>を用いて推定した。

$$[10] \quad H/H_m = (D/D_m)^\varepsilon$$

ここで、 $H$ は樹高、 $H_m$ は平均樹高、 $D_m$ は平均直径であり、 $\varepsilon$ は係数である。係数 $\varepsilon$ は次式で推定した。

$$[11] \quad \varepsilon = \zeta + \eta H_m$$

ここで、 $\zeta$ と $\eta$ は係数である。

(エ) . 幹形

幹形は、相対高0.95によって2つの部位に分割して、次式の相対樹高曲線式を用いて推定した。

$$[12] \quad y = \theta_1 x + \theta_2 x^2 + \theta_3 x^3 \quad (x \leq 0.95)$$

$$[13] \quad y = \iota_1 x + \iota_2 x^2 + \iota_3 x^3 + 0.95(\theta_1 - \iota_1) + 0.95^2(\theta_2 - \iota_2) + 0.95^3(\theta_3 - \iota_3) \quad (x > 0.95)$$

ここで、 $x$ は樹高を1とする梢端からの相対高、 $y$ は相対高0.8における基準直径に対する相対半径であり、 $\theta_{1\sim 3}$ と $\iota_{1\sim 3}$ は係数である。相対幹曲線は任意の林齢で安定しているものと仮定し、全ての係数を定数とみなした。

(オ) . 樹皮厚

次式を用いて相対高に応じた樹皮厚を推定した。

$$[14] \quad R_b = \kappa_1 x + \kappa_2 x^2 + \kappa_3 x^3 + \kappa_4$$

ここで、 $R_b$ は皮なし直径/皮付き直径であり、 $\kappa_{1\sim 4}$ は係数である。幹曲線式 ([12式]) と同様に全

ての係数を定数とした。

(カ) . 幹材積と素材材積

まず、[7] ~ [14] 式と入力データから直径階別に平均個体の幹形が推定した。ここで、幹形に基づいて幹材積を算出した。次に、推定された樹幹に対して、伐採高、材長および最小末口直径などの採材パラメータに基づいて採材が実行され、利用材積と部位別（末木、小径木および根株など）の未利用材積が算出される。

(キ) . 未利用率

ここまでのモデルでは曲がりや腐朽などの影響が完全に無視されてきたが、根曲がりや幹曲がりなどの発生は林分における利用材積を減少させ、未利用バイオマスを増加させることになる。これらの要因による未利用バイオマス量は、曲がりや腐朽などを無視した場合のモデルによる素材材積の推定値に一定比率（曲がりや腐朽などによる未利用部割合）を乗じることによって推定した。そのため、最終的に、素材材積の推定値は、曲がりを無視した場合のモデルの素材材積の推定値に（1-未利用部比率）を乗じることによって算出した。

(ク) . バイオマスへの変換

幹材積に容積密度数を乗じることによって、幹絶乾重を推定した。木部の容積密度数にはスギで0.319<sup>6)</sup>、カラマツで0.408<sup>6)</sup>を用い、樹皮の容積密度数には木部のそれに0.8を乗じた値<sup>16)</sup>を使用した。

(ケ) . 枝葉バイオマス

枝・葉バイオマスと幹バイオマスとの関係（[15] ~ [17] 式）を用いて、枝葉バイオマスを推定した。[15] ~ [17] 式は、それぞれ、定数式、単純相対成長式および拡張相対成長式である。これらの3つから最も当てはまりの良かったモデルを推定に用いた。

$$[15] \quad Y = \mu,$$

$$[16] \quad Y = \lambda_1 W_s^{\lambda_2},$$

$$[17] \quad 1/Y = 1/(\xi_1 W_s^{\xi_2}) + 1/\xi_3,$$

ここで、 $Y$ は枝あるいは葉バイオマス、 $W_s$ は幹バイオマス、 $\mu$ は $Y$ の平均値、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ 、 $\xi_1$ 、 $\xi_2$ および $\xi_3$ は係数である。

(コ) . 間伐施業の組み込み

遠野地域における素材生産量の多くは間伐施業によって生じているので、モデルの中に間伐施業を組み込む必要がある。間伐施業を表現するために、柿原・木梨<sup>10)</sup>によって提案された簡単なモデルを採用した。

$$[18] \quad p = \phi_1 - \phi_2 R_i,$$

ここで、 $p$ は直径階ごとの本数間伐率、 $R_i$ は相対直径階、 $\phi_1$ と $\phi_2$ は係数である。 $R_i$ は次式で求めた。

$$[19] \quad R_i = (d_i - d_{min}) / (d_{max} - d_{min}),$$

ここで、 $d_i$ は $i$ 番目の直径階における直径、 $d_{min}$ と $d_{max}$ は最小直径と最大直径である。間伐本数と間伐の性質を表す $\phi_2$ が決まれば、その条件を満たす $\phi_1$ はただ一つに限定される。本研究では、白石<sup>20)</sup>と同様に $\phi_2$ と林分密度を入力値として与え、 $\phi_1$ を求めた。

## イ. パラメータの算出

[7] ~ [11] 式の係数を推定するために、岩手県の民有林林分密度管理図の調製資料を用いた(データ1)。プロット数はスギで65、カラマツで294プロットである。各プロットでは胸高直径(毎木)と樹高(標準木)が測定されている。[12] ~ [14] 式の係数を求めるために、遠野市の伐採現場において、伐倒木の幹形と樹皮厚を測定した(データ2)。各資料木について、相対高0.8の部位および根元から1.0m間隔の部位で直径を測定した。また、玉切り部位の直径、樹皮厚および根元からの距離を測定した。[15] ~ [17] 式の係数を推定するために、福田ら<sup>4), 5)</sup>が多数の文献データから作成したデータベースを利用した(データ3)。このデータベースの中のha当たりの幹、枝および葉の部位別バイオマス量を解析に供した。[18] 式の $\phi_2$ を得るために、遠野市の間伐木の明示してあるスギ林分あるいは間伐後のスギ林分に0.04haの方形プロットを9つ設定した(データ4)。プロット内の全立木について、胸高直径および樹高を測定した。間伐後のスギ林分については、全立木について地際直径を追加的に測定し、間伐木の伐根径も測定した。

まず、データ1から[7] 式の係数 $a$ を測定値の最小直径値として求め、さらに平均直径と直径変動係数を算出した。これらの計算値から最小自乗法によって[8] 式と[9] 式の係数を求めた。次に、データ1から、最小自乗法によって[10] 式の係数 $\varepsilon$ を求め、さらに平均樹高を算出した。これらの計算値から最小自乗法によって[11] 式の係数を求めた。そして、データ2から最小自乗法によって[12] ~ [14] 式の係数を求めた。さらに、最小自乗法によってデータ3に[15] ~ [17] 式をあてはめた。それぞれのモデルについてAIC<sup>2)</sup>を求め、モデルの当てはまりの良さを検討した。

最後に、データ4から最小自乗法によって、[18] 式の係数を求めた。間伐後の林分のデータについては、間伐木の地際直径と胸高直径との回帰式を作成することによって、間伐前における間伐木の胸高直径を推定し、この値を解析に供した。

### (ア) . 直径分布のパラメータ

スギとカラマツにおける係数 $a$ は平均直径の増加に伴って増加した。 $a$ と平均直径との関係は(8) 式で表された(スギ： $a = -4.9582 + 0.662973D_m$  ( $p < 0.01$ )、カラマツ： $a = -3.97489 + 0.743634 D_m$  ( $p < 0.01$ ))。白石・箕輪<sup>24)</sup>は、係数 $a$ と平均直径との間には強い相関が存在し、近似的に、係数 $a$ を平均直径から推定できることを報告した。本研究の結果は白石・箕輪<sup>24)</sup>の結果と一致していた。スギとカラマツにおける直径変動係数 $CV$ は平均直径の増加に伴って有意に減少した。 $CV$ と平均直径との関係は[9] 式で表された(スギ： $CV = 0.296373 - 0.00241D_m$  ( $p < 0.05$ )、カラマツ： $CV = 0.313837 - 0.00526 D_m$  ( $p < 0.01$ ))。山崎・西沢<sup>26)</sup>は、ヒノキについて、関数型は異なるが平均直径から $CV$ を算出できることを報告している。同様に、山根<sup>27)</sup>、松井<sup>13)</sup>および阿部<sup>1)</sup>は、トドマツについて平均直径から $CV$ を算出できることを報告している。これらの先行研究の結果と本研究の結果では、得られた回帰式の関数型は異なるものの、 $CV$ が平均直径の増加に伴って減少する傾向は一致していた。したがって、[9] 式によって $CV$ を推定することは妥当であると考えられる。図6に遠野地域の収穫予想表に記載された平均直径から推定されたワイブル分布の各係数と林齢との関係を示す。係数 $a$ と $b$ の値は林齢が大きくなるにつれて増加した。係数 $c$ は林齢が大きくなるにつれて減少した。この係数の変化傾向は多くの報告<sup>11), 9), 24)</sup>と一致していた。このことは、平均直径のみからワイブルパラメータを推定することの妥当性を示していると考えられる。

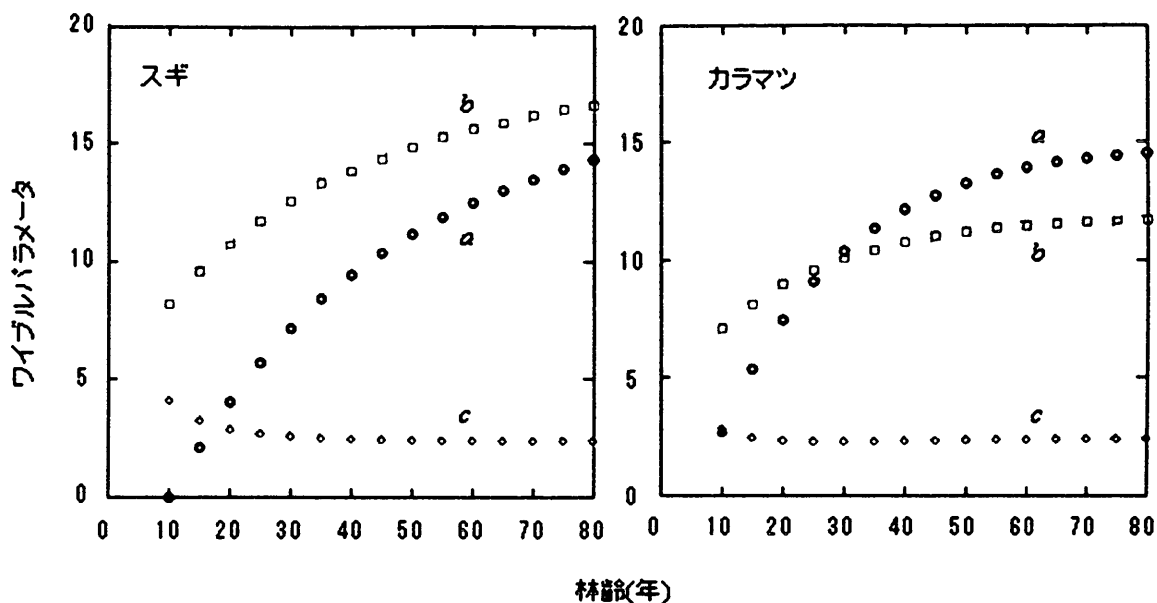


図-6. 林齢とワイブルパラメータとの関係

(イ) 樹高曲線のパラメータ

スギとカラマツにおける [10] 式の係数  $\epsilon$  は平均樹高の増加に伴って減少した。係数  $\epsilon$  と平均樹高との関係は (11) 式で表された。

(スギ:  $c=0.7648-0.0127H_m$  ( $p<0.01$ )、カラマツ:  $c=0.6565-0.0096H_m$  ( $p<0.01$ ))。

同齡単純林における樹高曲線は、一般的に、林分の発達につれて、その傾きを緩やかにしながら、右上方へと移動していくことが知られている<sup>(17), 25)</sup>。本研究で採用した白石<sup>(23)</sup>の相対樹高曲線では、平均樹高と平均直径の増加によって後者の現象が表現され、係数  $\epsilon$  の変化によって前者の現象が表現される。本研究の結果は、林分の発達につれて樹高曲線の傾きが緩やかになっていく傾向と一致していた。

(ウ) 幹形と樹皮厚

相対高と相対直径との関係において、地際から梢端までを一本の曲線で表現しようとする、地際部と梢端部において当てはまりが悪かった。本研究においては、主幹部だけでなく地際部と梢端部の幹形の推定も重要であるので、相対高0.95で樹幹を2つに分割し、2本の曲線をあてはめた。その結果、スギとカラマツにおける幹形は [12] 式 (スギ:  $y=2.65x-2.87x^2+1.38x^3$ 、カラマツ:  $y=2.51x-2.22x^2+0.81x^3$ ) と [13] 式 (スギ:  $y=27454.89x-28589.83x^2+9924.46x^3-8787.69$ 、カラマツ:  $y=17451.94x-18060.4x^2+6230.66x^3-5620.77$ ) で推定することができた。 $R_b$  (皮うち直径/皮付き直径) と相対高との関係は [14] 式で表された。スギについては一次式 ( $R_b=0.9731x-0.0048$ )、カラマツについては三次式 ( $R_b=0.8178x-1.1564x^2+0.4860x^3+0.7963$ ) を得た。スギの相対高による  $R_b$  の差異は小さかったが、カラマツでは地際付近での  $R_b$  が小さく、樹皮厚率が大きかった。

(エ) 枝葉バイオマスと幹バイオマスとの関係

図7に枝・葉バイオマスと枝バイオマスとの関係を示す。カラマツについては、初期値を変化させながら、非線形回帰をくり返したが、枝、葉ともに係数を得ることができなかった。そのた

め、[17]式はカラマツには不適合なモデルとみなした。AICの値に基づいて、葉バイオマスと幹バイオマスとの関係は、スギについては拡張相対成長式 ( $1/Y=1/(1.30W_s^{1.06})+1/24.75$ )、カラマツについては定数式 ( $Y=2.95$ ) が選択された。枝バイオマスと幹バイオマスとの関係は両樹種について単純相対成長式 (スギ:  $Y=0.24W_s^{0.79}$ 、カラマツ:  $Y=2.90W_s^{0.32}$ ) が選択された。

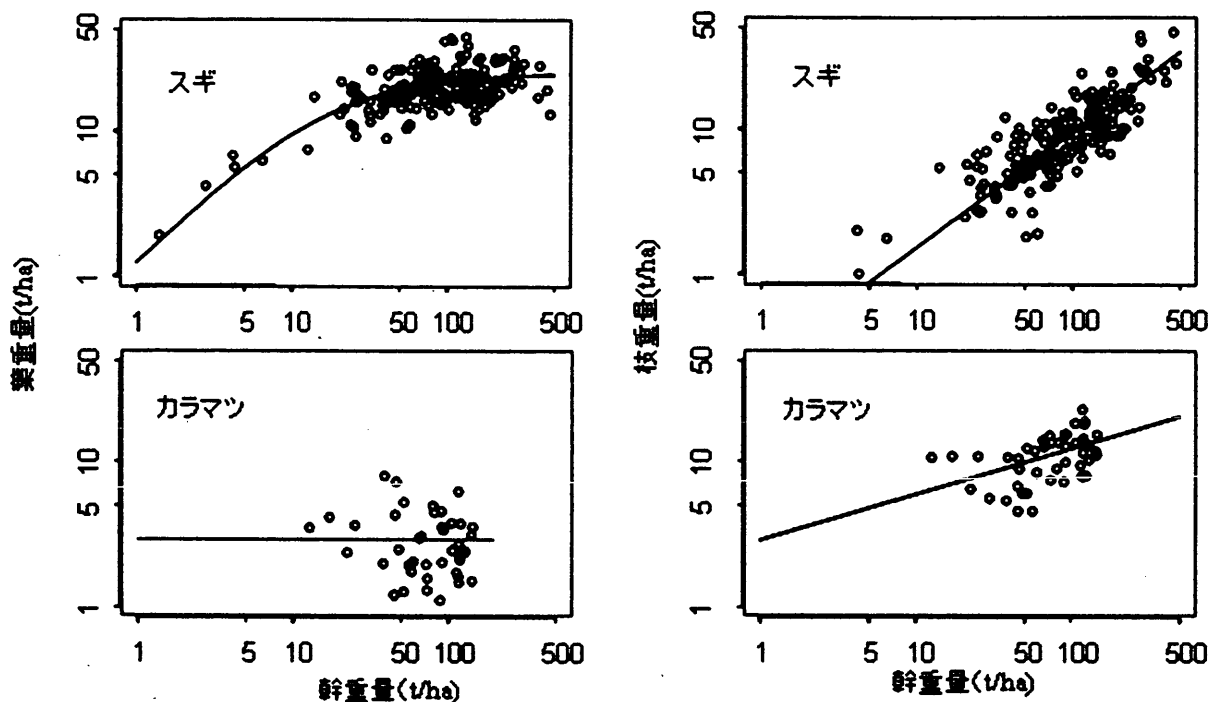


図-7. 幹重量と枝葉重量との関係

(オ) . 間伐の傾向

対象とした9林分 (平均林齢: 41.5年、平均直径: 26.0cm、平均樹高: 23.1m) の全てにおいて、[18]式の関係が認められた。得られた $\phi_2$ の平均値は、-0.0691であった。 $\phi_2$ は間伐の性質を示しており、値が大きいほど大きな径級の立木にも間伐が及ぶことになる。本研究で得られた値は、白石<sup>22)</sup>が東京大学千葉演習林のスギ林分において、利用的間伐の値として得た-0.0921よりも大きいことから、同地域においては、間伐時に大きな立木も伐採することによって収入を上げようとする利用的間伐が行われている可能性が高い。本研究で間伐時の未利用バイオマス予測表を作成する際には、この値と素材生産データを参考にして $\phi_2$ を与えた。具体的には、 $\phi_2$ の値は、林齢20年までを-0.1358、林齢25年を-0.1136、林齢30年を-0.0913、林齢35年以降を-0.0691とした。

ウ. 未利用バイオマス予測表の作成

主伐の場合を考えると、本研究で提案したモデルへの入力値は、平均直径、平均樹高、林分密度、曲がりによる未利用比率および採材基準である。曲がりによる未利用比率と採材基準については、伐採現場での実測調査や林家への聞き取り調査に基づいてその値を算定する必要があるが、平均直径、平均樹高および林分密度は一般的な林分調査から得ることができる。したがって、このモデルを利用すれば、一般的な林分調査に基づいて素材材積と未利用バイオマス量を推定することが可能である。なお、間伐時の未利用バイオマスを推定するには、本数間伐率も与えてやる必要がある。

本研究で提案したモデルに必要な入力値は収穫予想表やシステム収穫表から予測することが可能な林分統計量である。したがって、このモデルを利用することによって、既存の収穫予想表に基づいて、素材材積と未利用バイオマスを併記したバイオマス予測表を作成することができる。表10に遠野地域の収穫予想表の地位3の林分統計量から作成した主伐時のバイオマス予測を示す。

なお、未利用比率（根曲がり、用材不適木およびパルプ材の比率）はデータ2から得た。具体的には、根曲がり、用材不適木およびパルプ材の比率の順に、スギで12.2%、8.2%、4.5%、カラマツで8.9%、5.2%、6.8%である。図8に同予測表における未利用バイオマスと林齢との関係を示す。スギとカラマツを比較してみると、兩種における総未利用バイオマス量の差は林齢20年以降増大し、スギはカラマツの約2倍のバイオマス量を示した。スギの葉量は林齢30年過ぎから一定値を示し、林分葉量一定の法則と一致していた。カラマツの葉量は常に一定値を示した。若齢時においても一定値を示すことは、林冠閉鎖後しばらくすると、葉量が一定値を示すという葉量一定の法則と矛盾している。原因の一つとして、カラマツにおける若齢時のデータが不足していたことが考えられる。しかしながら、カラマツ林で主伐や間伐が実行されるのは林冠閉鎖後と考えて良いので、主伐および間伐時の葉量を推定するという点において問題は少ないと考える。全未利用バイオマス量における各部位の未利用バイオマス量割合をみると、葉量はスギでの割合が高く、カラマツでの割合は低かった。枝量はスギでの割合が大きく、カラマツでは小さかった。末木は兩種についてその割合は小さかった。根株は林齢に応じた変異も少なく安定していたが、その割合は小さかった。曲がりによる未利用部位の割合は、林齢と共に増大し、林齢50年以降は全未利用バイオマス量の約半分を占めていた。これらの曲がりによる未利用部位は、集材方法として、全木集材を採用することによって土場まで運ぶことが可能であるので、エネルギー利用の

表-10. バイオマス予測表（主伐・地位3）

林齢 年	素材材積 m3/ha	伐根 t/ha	根曲り t/ha	用材 不適木 t/ha	パルプ材 t/ha	末木 t/ha	小径木 t/ha	枝 t/ha	葉 t/ha
10	1.6	1.4	0.1	0.1	0.0	0.2	10.4	1.7	10.3
20	80.6	4.0	4.9	3.3	0.6	9.2	4.2	5.7	19.4
30	178.9	5.6	10.5	7.1	1.3	9.0	0.8	9.1	21.5
40	281.4	6.9	15.7	10.5	1.9	7.6	0.0	12.1	22.4
50	360.2	7.8	19.6	13.2	2.4	9.5	0.0	14.4	22.9
60	427.5	8.5	23.3	15.6	2.9	7.6	0.0	16.3	23.2
70	484.2	9.0	26.1	17.5	3.2	6.3	0.0	17.7	23.3
80	529.0	9.3	28.0	18.8	3.4	7.6	0.0	18.8	23.4

ための有望な資源であるといえる。一方、本研究で提案されたモデルでは、曲がりによる未利用部位の算出に、経験的に得られた部位別比率が用いられている。そのため、このモデルによってバイオマス予測表を作成する際には、これらの割合を慎重に算定する必要がある。

幹材積を対象とした収穫予想表については古くから研究が進み<sup>15)</sup>、我が国では全国的に地域ごとの収穫予想表が調製されているが、バイオマスに関連した予測表に関する報告は数少ない<sup>26), 19), 29), 12)</sup>。辻本<sup>26)</sup>と関屋<sup>21)</sup>は、それぞれ、リュウキュウマツとアカマツについて、重量収穫表を作成した。しかし、彼らの予測値は樹幹の全バイオマスに限定されている。四大学および信大合同調査班<sup>27)</sup>は、スギについて、幹、枝および葉のバイオマスを記載したバイオマス予測表を作成した。しかし、この予測表では林地残材量は推定できない。國崎<sup>12)</sup>は、林地残材量と林分構造因子等との回帰分析に基づいて、林地残材量の予測表を作成した。彼の予測表は主伐のみでなく間伐にも対応しており、木質バイオマスの推定の上で非常に有用であるが、素材材積の推定には対応していない。我々のモデルに基づいて作成されたバイオマス予測表では、未利用バイオマスとともに素材材積も算出される。このことは経済的なコスト分析を行う上で大きな利点である。また、単位素材材積あたりの森林バイオマス量を算定できるため、現実に生産されている素材材積から森林における林地残材を逆算することが可能である。この方法に基づいて、遠野市における木質バイオマス資源量を算出すると、28,413(トン/year)となった(詳細はサブテーマ4に譲る)。以上より、森林における未利用バイオマス量を推定する上で、本研究で新たに提案したモデルとそのモデルに基づいて作成したバイオマス予測表は高い実用性を備えていると考える。

## ②広葉樹林における未利用バイオマス予測表の作成

### ア. 広葉樹林の予測モデル

広葉樹林の未利用バイオマス量を推定するため以下のような計算モデルを作成した。

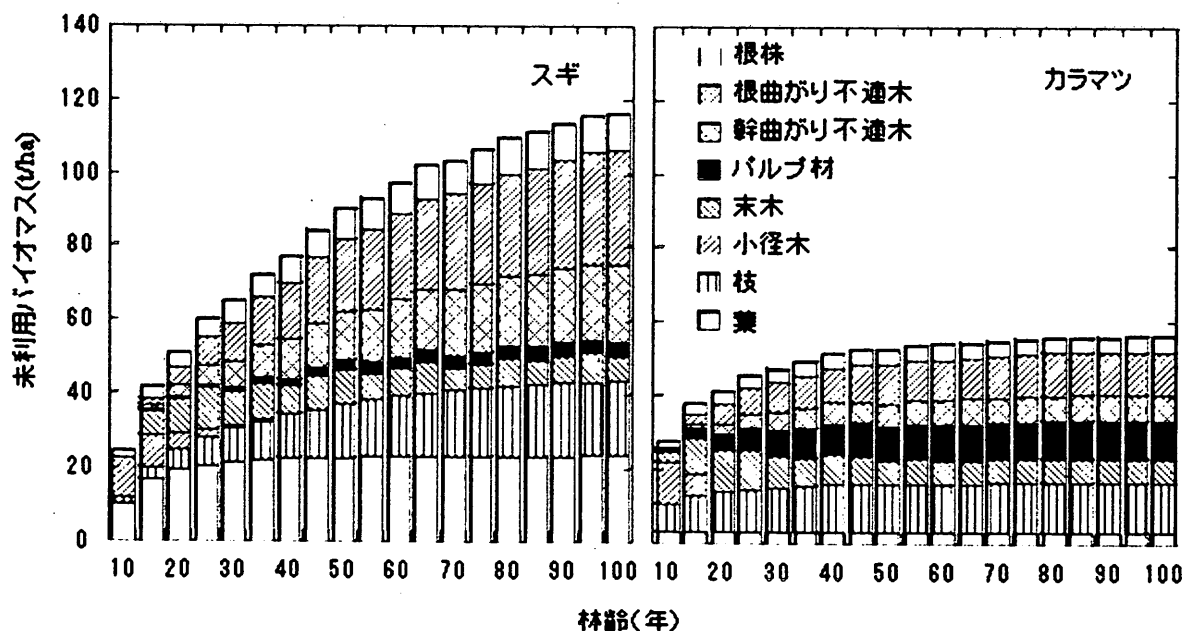


図-8. 林齢と未利用バイオマスとの関係



(ア) . 入力と出力

モデルでは、林分の伐採時に発生する未利用バイオマス量と素材材積が出力される。広葉樹林における素材の用途はパルプチップに限定した。また、未利用バイオマスは樹皮と残材（林地残材と土場残材を含む）に分割される。モデルの必要とする入力データは、林齢と林分幹材積である。モデルの概要を図9に示す。

(イ) . バイオマスへの変換

針葉樹と同様に、幹材積に容積密度数を乗じることによって、幹乾重を推定した。木部の容積密度数には広葉樹の平均値である0.49<sup>14)</sup>を用い、樹皮の容積密度数には木部のそれに0.8を乗じた値<sup>16)</sup>を使用した。

(ウ) . 枝バイオマス

林分単位の部位別現存量割合と林齢との関係（福田、未発表）に基づいて、幹乾重に対する枝の割合と林齢との関係を誘導した。

$$[20] R_{BS} = (M_B(1 - L_B \exp(-k_B t)) - M_S(1 - L_S \exp(-k_S t))) / (M_S(1 - L_S \exp(-k_S t)))$$

ここで、 $R_{BS}$ は枝乾重と葉乾重の幹乾重に対する割合、 $t$ は林齢、 $M_B$ ,  $L_B$ ,  $k_B$ ,  $M_S$ ,  $L_S$ ,  $k_S$ ,  $M_R$ ,  $L_R$ および $k_R$ は係数である。これらの割合を林齢ごとの幹乾重に乗じることによって、枝の乾重を推定した。

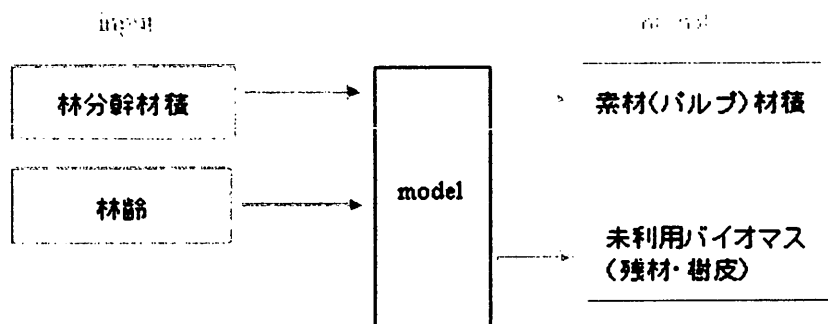


図-9. 広葉樹のモデル

(エ) . 樹皮体積

次式を用いて樹皮体積を推定した。

$$[21] V_b = aV_t$$

ここで、 $V_b$ は樹皮バイオマス、 $V_t$ は幹バイオマス、 $a$ は係数である。

(オ) . 土場残材量と林地残材量

本研究では広葉樹林からの素材生産をパルプチップに限定した。パルプ材の採材部位は幹に限らない。枝についても材長と最小末口直径の関係が満たされれば（長さとおさが一定値を越えれば）、採材が行われる。したがって、立木の幹材積が増加し、枝が増えると素材材積も増加し、結果的に残材の量は多少増減しながらもおおむね一定値を示すと考えられる。したがって、本研究では土場残材量 $V_d$ と林地残材量 $V_r$ は次式のように両者の和が一定値を示すと仮定した。

$$[22] V_d + V_r = \text{const. (t/ha)}$$

## イ. パラメータの推定

遠野市のミズナラやクリを優占樹種とする広葉樹林内に20m×30mの方形のプロットを1つ設定した。プロット内の全立木の胸高直径と標準木の樹高を測定した。測定後、パルプ材を生産するために、プロット内の全立木に対して通常の伐採作業が行われた。伐採作業後、プロットから生産された全素材について末口直径と材長を測定し、標準木については元口と皮厚も測定した。さらに、プロット内から発生した全ての残材について、生重量を測定した。残材の一部を試料として採取し、現地で生重量を測定した。その後、試料を研究室に持ち帰り、オープンで十分に乾燥させた後、乾燥重量を測定した。

まず、素材の末口直径と元口直径との間に一次式を仮定し回帰式を求めた。この関係から、全素材の元口直径を推定し、スマリアン式によって素材の材積を算出した。また、直径と樹皮厚との間に相対成長式を仮定し回帰式を求めた。この関係を利用して末口直径および元口直径に応じた樹皮厚を算出し、樹皮体積を算出した。ここで算出した素材の材積と樹皮体積から [21] 式の係数を決定した。

次に、研究室に持ち帰った残材試料のデータから含水率を算出し、プロット内から発生した残材量をもとめ、[22] 式の定数を決定した。

## ウ. 広葉樹林におけるバイオマス予測表の作成

[21] 式の係数 $a$ として0.14、[22] 式の定数として25.85(t/ha)が得られた。[20] 式の係数には、 $M_B$ で97.914、 $L_B$ で0.25994、 $k_B$ で-0.10653、 $M_S$ で77.819、 $L_S$ で0.82977、 $k_S$ で-0.2387を用いた(福田、未発表)。広葉樹林におけるモデルへの入力値は林齢と林分幹材積である。針葉樹と同様にこの統計量も収穫予想表から算出可能である。針葉樹と同様に、素材材積と未利用バイオマスが併記されているので、素材生産量からの森林における木質バイオマスの資源量の評価が可能である。この方法に基づいて、遠野市における資源量を算出すると15,103(トン/year)となった(詳細はサブテーマ4に譲る)。本研究では、ただ一つの林分のみの調査しか行っていない。よって、特に、調査林分と林齢、樹種構成および地位などの異なる林分において十分な予測精度を期待することは難しい。そのため、今後、より広範囲の条件下でのデータを追加し、より精度の高いモデルとバイオマス予測表を作成する必要がある。

## ③岩手県カラマツシステム収穫表の作成

上記の①、②では行政機関が現在使用している収穫予想表を利用して、未利用バイオマス量の推計を行ったが、将来的にはより精度のよい収穫予想表の作成も検討課題であろう。そこで、測樹学的な成長曲線式により、多様な施業にたいして柔軟な収穫予測が行える岩手県版スギ及び同カラマツシステム収穫表を試作した。システム収穫表の骨格は、白石の方法<sup>22)</sup>に従い、林分調査データからパラメータを調整して作成した(図9)。

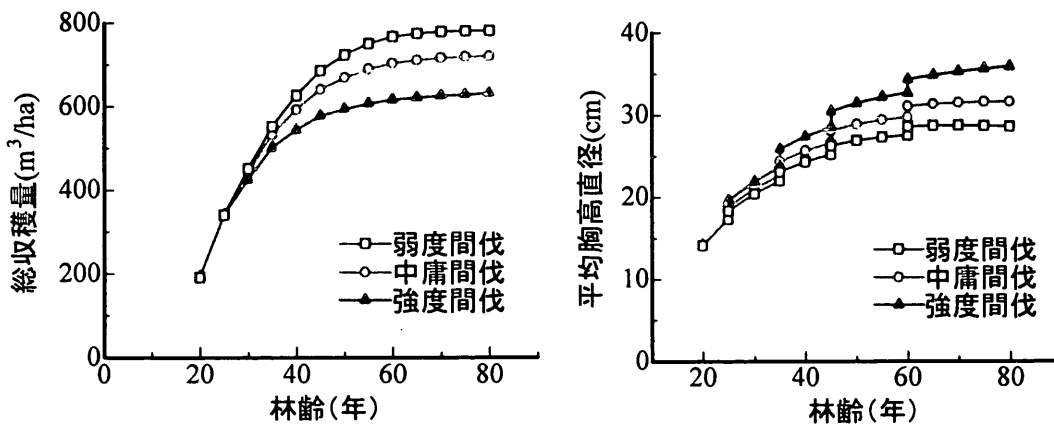


図-10. 岩手県カラマツシステム収穫表による成長予測

## 5. 本研究により得られた成果

測樹学的な未利用バイオマス量の算出モデルを作成し、伐採統計及び森林資源統計から、日本の全森林について、人工林の伐採に伴って生じる未利用バイオマス量及び、禁伐林分と京都議定書の3条4項分を控除した成長量余剰量分のバイオマス量を推定した。推定したバイオマス量は、日本の森林から生産される木質系バイオマス資源の上限と考えられる。今後、国レベルで木質系バイオマス発電の導入目標をいくりにするのかに関する基礎情報となると考えられる。

また、測樹学的な成長モデルに基づいて、地域レベルでの未利用バイオマス量を推定する詳細なモデルを提案し、次いで、このモデルを利用して木質バイオマス予測表を調製した。調製された木質バイオマス予測表から、岩手県遠野地域の未利用バイオマス量を推定した。スギにおける主伐時の未利用バイオマス量はカラマツのそれに比べて、約二倍であること、主伐時の未利用バイオマスにおいては、曲がりによる未利用部位の割合が大きいことなどが明らかになった。本研究で提案したモデルとそのモデルに基づくバイオマス予測表は、木質バイオマス資源量を定量化する上で高い実用性を備えていると考えられた。本研究で作成したバイオマス予測表はサブテーマ4においても利用され、バイオマス資源の把握に貢献した。

## 6. 引用文献

- (1) 阿部信行 (1980) トドマツ人工林の施業法に関する研究 (II) - 道有林におけるトドマツ人工林の収穫予想表の作成 - . 北林試報. 18 : 71-93.
- (2) Akaike, H. (1974) A new look at the statistical model identification. IEEE. Trans. Automat. Constr. AC 19: 716-723.
- (3) Brown, S. L., Schroeder, P., and Kern, J. S. (1999) Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. For. Ecol. Manage. 123: 81-90.
- (4) 福田未来・家原敏郎・松本光朗 (2001a) スギ、ヒノキでの林齢による部位別現存量割合の評価. 日林学術講112 : 185.
- (5) 福田未来・家原敏郎・松本光朗 (2001b) アカマツ、カラマツにおける部位別現存量と林齢の関係. 日林関東支論53 : 59-60.

- (6) 福田未来・家原敏郎・松本光朗 (2002) 日本の主要針葉樹林における部位別現存量割合と森林炭素蓄積の推定について. 日林学術講113 : 92.
- (7) Harmon, M. E., Garman, S. L., and Ferrell, W. K. (1996) Modelling historical patterns of tree utilization in the pacific northwest: Carbon sequestration implications. *Ecol. Appl.* 6: 641-652.
- (8) 樋渡ミヨ子 (1986) 幹曲線式による利用可能材積の推定方法. 林試研報337 : 29-67.
- (9) 家原敏郎 (1990) 低位生産林地におけるヒノキ人工林造成の経営的評価. 日林誌72(1):34-45.
- (10) 柿原道喜・木梨謙吉 (1982) 人工林の直径分布について (VIII) -直径階別本数間伐率とワイブルパラメーター $c$ の関係-. 日林論. 93 : 121-122.
- (11) 木梨謙吉 (1978) 人工林の直径分布について (I) -ワイブルパラメーターと年齢-. 日林論89 : 59-60.
- (12) 國崎貴嗣(2002)木質バイオマスの生産量詳細調査. 平成11~13年度科学研究費補助金(地域連携推移新研究)研究成果中間報告書:炭素循環と環境保全を実現する森林バイオマス・畜産廃棄発電による地域振興(課題番号07660201) : 113-117.
- (13) 松井善喜 (1959) トドマツ人工林の成長と間伐について. 林業試験場北海道試場年報1958 : 86-102.
- (14) 松本光朗 (2001) 日本の森林による炭素蓄積量と炭素吸収量. 森林科学33 : 30-36.
- (15) 峰 一三 (1955) 収穫表に関する基礎的研究と信州地方カラマツ林収穫表の調製. 収穫表調製業務研究資料12 : 1-201.
- (16) Møller, I. S. (2000) Calculation of biomass and nutrient removal for different harvesting intensities. *New Zealand J. For. Sci.* 30: 29-45.
- (17) 南雲秀二郎・箕輪光博 (1990) 測樹学. 243pp, 地球社, 東京.
- (18) 西沢正久・木梨謙吉・柿原道喜・長 正道 (1976) 林分シミュレーションに対する成長モデルの研究 (IX) -変動係数を用いた林分構造の予測-. 日林論88 : 105-106.
- (19) 農林水産省林業試験場監修 (1982) 木材工業ハンドブック改訂3版, 丸善, 東京.
- (20) 林野庁編 (1997) 林業統計要覧1997, 252pp., 林野弘済会, 東京.
- (21) 関屋雄偉 (1964) アカマツ同令単純林における材積、重量、熱量の成長に関する研究. 九大演報38 : 39-159.
- (22) 白石則彦 (1986) 同齡単純林の生長予測に関する研究. 東大演報75 : 199-257.
- (23) 白石則彦 (1981) 相対化した樹高曲線の形の比較. 日林論92 : 81-82.
- (24) 白石則彦・箕輪光博 (1982) 収穫表調製法に関する研究 (II) 最小自乗法によるワイブルパラメーターの決定. 日林論93 : 129-130.
- (25) Schreuder, H. T., Gregoire T. G., and Wood. G. B. (1993) *Sampling Methods for Multi-Resource Forest Inventory.* 446pp, John Wiley and Sons, New York.
- (26) 辻本克巳 (1963) リュウキュウマツの重量成長量に関する研究. 鹿大農学術報13 : 1-88.
- (27) 山根玄一 (1971) 道有林におけるトドマツ・スギ人工林収穫予想表の調製. 北方林業23 : 325-329.
- (28) 山崎英祐・西沢正久 (1983) 林分構造の決定 (III) 直径、樹高および生枝下高の分布に関する検討. 日林九支研論集36 : 35-36.

(29) 四大学および信大合同調査班 (1966) 森林の生産力に関する研究 第Ⅲ報 スギ人工林の物質生産について. 63pp, 日本林業技術協会, 東京.

(30) 吉田茂二郎・松下幸司 (1999) 民有林の林分収穫表の特性について. 森林計画誌33: 19-28.

## 7. 国際共同研究等の状況

木質系バイオマス研究の世界的権威である、スウェーデン農科大学のB. ヘクター教授の来日の際に、森林総合研究所において研究指導を受けるとともに、岩手県遠野市においてバイオマス資源のポテンシャル評価に関して現地検討を行った。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

<学術誌 (査読あり)>

- ① 家原敏郎、西園朋広、宮本麻子、福田未来：日本林学会関東支部論文集、53, 61-62(2002)  
「幹曲線によるスギ・ヒノキ幹材積の未利用率の推定」
- ② 福田未来、家原敏郎、松本光朗：日本林学会関東支部論文集、53, 59-60(2002)  
「アカマツ、カラマツにおける部位別現存量と林齢の関係」
- ③ Nishizono Tomohiro, Inoue Akio, Iehara Toshiro: Journal of forest Planning, 8(2),41-47(2002)  
“Relationship between Self-thinning Exponent and Relative Spacing Index for Cryptomeria japonica and Chamaecyparis obtusa Stands”
- ④ 福田未来、家原敏郎、松本光朗：日本林学会関東支部論文集、54, 61-64(2003)  
「日本の主要な森林におけるバイオマス拡大係数について」

<学術誌 (査読なし)>

なし

<書籍>

- ① 林業科学技術振興所編：木の家づくり、海青社、p225(2002)  
「化石資源からの脱却 (執筆担当：西園朋広)」

<報告書類等>

なし

### (2) 口頭発表

- ① 福田未来、家原敏郎、松本光朗：第112回日本林学会(2001)  
「スギ、ヒノキでの林齢による部位別現存量割合の評価」
- ② 福田未来、家原敏郎、松本光朗：第113回日本林学会(2002)  
「日本の主要針葉樹林における部位別現存量割合と森林炭素蓄積の推定について」
- ③ 田中邦宏：第113回日本林学会(2002)  
「秋田地方スギを対象としたシステム収穫表のパラメータ推定」
- ④ 西園朋広、家原敏郎、福田未来：第7回東北森林科学会大会(2002)  
「岩手県におけるスギ林とカラマツ林の相対樹高曲線」
- ⑤ 西園朋広、家原敏郎、久保山裕史、福田未来：第114回日本林学会(2003)  
「岩手県遠野地域における未利用バイオマス予測表の作成」：第114回日本林学会(2003)

- ⑥ 久保山裕史、西園朋広、奥田裕規、家原敏郎、福田未来：第114回日本林学会(2003)  
「木質系バイオマスの発生量と収集コストの推定に関する研究. 岩手県遠野市を事例として」
- ⑦ 福田未来、家原敏郎、松本光朗、細田和男、西園朋広、石橋聡、田中邦宏、小谷英司、近藤洋史：第114回日本林学会(2003)  
「プロット調査の推進によるバイオマス拡大係数の精度向上」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

京都議定書への対応を考慮した日本の国産木質系バイオマスエネルギーの概数がわかったことは、国家レベルでの再生可能エネルギー計画の策定へ寄与する成果であると考えられ、政策的な貢献が大きい。また、地域レベルでの未利用木質系バイオマスの推計方法が開発されたことは、地方自治体等がバイオマスプラントの導入を計画立案する際に貢献するものと思われる。得られた成果については今後、学会誌等を通じ、広報・普及に努める。