

スギ (*Cryptomeria japonica* D. DON) 樹皮の 燃料資源的基礎研究

島地岩根・吉村 貢・阿部 勲・武田明正

Potential of Sugi (*Cryptomeria japonica* D. DON) Stem Bark for Producing Energy

Iwane SHIMAJI, Mitsugu YOSHIMURA, Isao ABE and Akimasa TAKEDA

I ま え が き

I・1 研究の目的

木材の生産及び各種加工の過程で排出される樹皮は年間に500万tといわれ¹⁾、材積で約1,000万m³に達する。このうち、木材生産の段階における排出量は約400万m³と推定されるが、そのほとんどは利用されておらず、例えば、国内生産材の主体を占めるスギについてみると、スギ樹皮は耐朽性、撥水性にすぐれていることから、かつては屋根の杉皮ぶき、かわらぶき下地、側壁(サイディング)囲いなどに用いられていたが、ルーフィング、カラートタンなど新建材の開発普及に伴い、その使用量は林野庁の特種林産物統計にのぼらないほどにまで急減し、さらに、生活様式の変化とともに燃料としての用途も失なわれてしまっている。現在では、各種木材加工の過程で排出される約590万m³の樹皮のうち30%程度が工業的に利用されているにすぎない²⁾。したがって、わが国における未利用樹皮の年間総量は約800万m³にのぼるものとみられる。

あたかも2度にわたって惹起した世界的な石油危機をきっかけとして、わが国においても代替エネルギーの開発が強く要望されている現状にかんがみ、約800万m³にもおよぶ未利用樹皮を燃料資源として見直し活用することは、将来のエネルギー確保のうえからきわめて重要な課題である。すでに、米国(例えばウエヤーハウザー社、パシフィック・ランバー社など)では、木材資源総合利用の一環として樹皮燃料を製造し市販しているが、わが国における樹皮利用に関する研究とその技術開発は立ちおくらせているように思われる。

上記未利用樹皮は、わが国では林業地域と木材工業関連地域に分散存在するので³⁾、それらの地域における局地的エネルギーとしての利用が最も妥当であると考えられる。また、未利用樹皮を燃料として利用する方法としては、原形のままの薪として直接燃焼させる方法が経済的に最も効果的な利用形態であるとされているが⁴⁾、未利用樹皮は、通常は多量の水分を含むうえに形状が不整でかさ高であるために、運搬や保存に不便で扱い難いという利用上の欠点をもっている。この欠点を改良し燃料価値の向上を図る方策として固型化、細粉化、炭化、液化、ガス化など物

本研究は、昭和56年度文部省科学研究費補助金、エネルギー特別研究、エネルギー(2)の交付をうけた。

理的・化学的な変性を行う方法があり、これらのうちでは物理的に固型化する方法が一般的であると考えられる。しかし、樹皮の現存量とその排出量は地域により樹種により異なり、さらに、樹皮の理化学的性質なども樹種ごとに異っている。したがって、上記観点から樹皮を燃料として有効に利用するにあたっては、まず、これらの実態を把握する必要があるが、それに関する一貫した研究はまったくなされていないようである。

そこで、今回は、わが国の主な造林木であるスギを対象とし、林齢別における樹幹樹皮現存量、排出樹皮量、樹皮の物理化学的性質及び燃料の性質に関する一連の基礎研究を実施した。なお、同時に枝条及び葉の現存量についても調査した。

本研究の実行にあたり、材料の収集、運搬などに協力された三重大学農学部附属演習林の職員各位に対し厚く御礼申し上げる。

1・2 樹皮の一般的性質

(1) スギ樹皮の組織

樹皮は樹木生理学の観点からその組織構造に関し、古くから研究されている。また、その外観的形態は分類ならびに樹種の識別に利用されてきた。しかし、木材工業においては、古来より利用されてきた杉皮を除くと、伐木、運材、造材、製材を通して、常に幹材の保護のための包被物として取扱われ、用済み後は廃棄物となり、その処理に困惑するに至っている。わが国においては、収穫表を初めとして樹皮を区別した調査はなく、最近ようやくバイオマス生産に関連して、一部樹種⁵⁾についての報告が見られるに至ったが、今日なお多くの樹種について、樹皮の調査は行われていない。木材工業において、剥皮を初め、樹皮の利用に関する物理的、化学的研究の基礎資料を得るため、その量的把握とともに組織構造を明らかにする必要がある。しかし、樹皮の構造は木部に比して、樹種による相違が極めて大きい。

樹木梢端の生長点における始原細胞は次第に分化して、原表皮 (dermatogen)、原皮層 (periblem)、原中心柱 (pleroma) の区分ができ、さらに、表皮 (epidermis)、皮層 (cortex)、中心柱 (stele) に分化する。中心柱には前形成層 (procambium) が生じ、一次師部 (primary phloem) と一次木部 (primary xylem) を形成する⁶⁾。

前形成層は連続して形成層 (cambium) となり、その盛んな細胞分裂によって、求心的に師部を、遠心的に木部を肥大生長する。表皮は死細胞からなり、細胞壁はキチン質に富み、かつ厚く、気孔 (stomata) を備え、肥大生長に伴う周囲の拡大に耐えられず、多くの場合、第1年目のうちに破壊してしまう。これに先立ち、表皮直下の皮層の最外層の柔細胞が一斉に接線面分裂機能を生じ、コルク形成層 (phellogen, cork cambium) となり、外方にコルク組織 (phellem, cork) を、内方にコルク皮層 (phelloderm) を分生し、コルク形成層を中心とする3層からなる周皮 (periderm) を形成する⁷⁾。この部分の厚さは非常に薄く 0.04~0.08 mm である⁶⁾。この時期の樹皮は外側から順に表皮、周皮、皮層、一次師部及び二次師部 (secondary phloem) から構成されている (Fig. 1)⁷⁾。

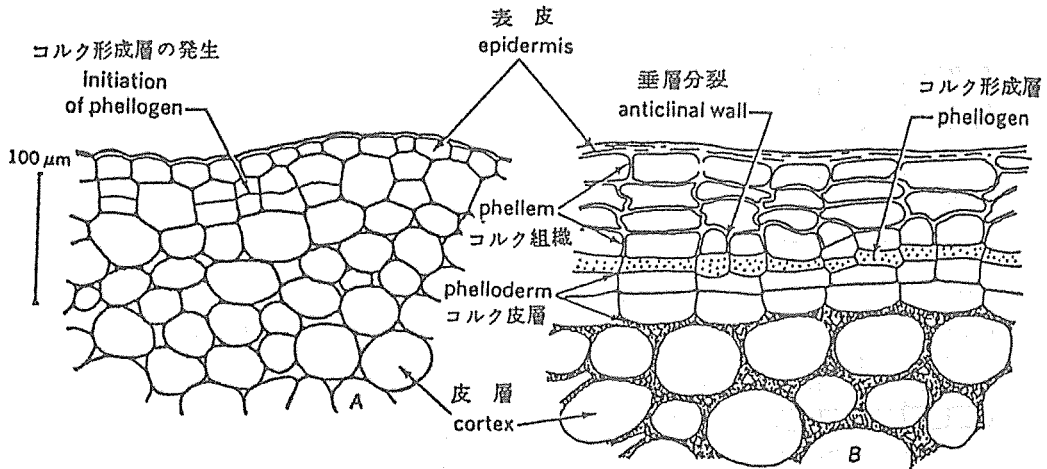


Fig. 1 Origin of periderm in *Pelargonium* stem in cross sections. A, periclinal divisions in subepidermal layer have produced phellogen cells toward the outside and phelloderm cells toward the inside, one of each to a divided cell. B, periderm is established. (after K. ESAU, 1960)⁷⁾

表皮が破壊した後は木化した厚壁のコルク組織の細胞がそれに代って保護層となるが、木部の肥大に伴い、いずれは破壊されるので、一定の間隔で、つぎつぎに皮層の内方に新しいコルク形成層が生ずる。その結果、新しい周皮が二次師部の中に生ずることになり、それより外側の樹皮組織は水分の供給を遮断されて死滅する。したがって、幹の肥大につれ、二次師部を間にはさんだ周皮が幾重にも重なっている⁷⁾。

一番内側の周皮より外側の死滅した組織を外樹皮 (outer bark, rhytidome), その内側の生きている組織を内樹皮 (inner bark) と称している。

スギ樹皮では接線方向に配列したコルク形成層が一定の間隔で、つぎつぎに生じ、周囲の肥大に伴い軸方向に裂目を生ずるので、外樹皮は縦の帯状に亀裂した外観となる。スギの二次師部は Fig. 2 に示す如く、構成要素の種類による周期があり、年輪構造をもっている⁸⁾。また、外樹皮と化した後も年輪界の存在が見られ、およそ18~20細胞列をもち、形成層によって1年間に形成される師部細胞数に匹敵している⁹⁾。しかし、何年輪間隔で周皮が発生し、剝離、脱落するまで何年輪分の外樹皮が樹幹に着生しているかについての直接の報告は全く見られない。スギ樹皮の厚さ (内樹皮及び外樹皮) 及び縦の亀裂の深さと地上高との関係は Fig. 3 の如くである⁶⁾。即ち、樹皮の厚さは地上高が高くなると減少するが、内樹皮の厚さは地際部と樹梢部を除いて、ほぼ一定である。樹梢部の樹皮は平滑であるが、地上高が下がるにしたがい、漸次幹軸方向の亀裂の深さを増している。この縦裂は外樹皮にのみ生じ、外樹皮が厚いほど深い。樹皮の最外表面を被う剝皮の大きさ (長さ: 幹縦方向, 幅: 接線方向) は樹梢部を除けば地上高及び樹皮の厚さに関係なく一定で、単なる着生物の森林環境下における自然落下の原則によっているようである。

太陽エネルギーは地球上の緯度によってほぼ決り、一方、良く閉鎖された林分の葉量 (厳密に

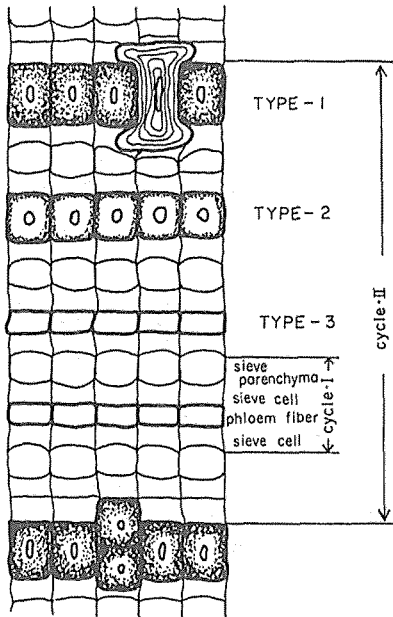


Fig. 2 A schematic diagram showing cell cycles of two kinds and types of phloem fiber. Type-1 fiber, thick-walled, strongly lignified; Type-2 fiber, thick-walled, but less lignified; Type-3 fiber, thin-walled. The long cycle (Cycle-II) is considered to correspond to an annual growth layer of the phloem. (after MIYAGAWA *et al*)⁸⁾

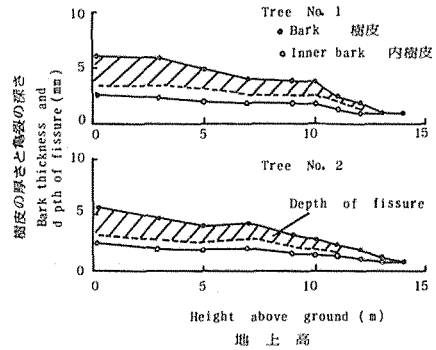


Fig. 3 Relation between the thickness of the stem bark and the depth of fissure in bark and the height above ground for SUGI (*Cryptomeria japonica*) tree.⁶⁾

は葉緑素量)は樹種によってほぼ一定であり、実測からも地位、間伐度、林齢、樹高、気候などが違って、単位土地面積当りの葉量は変わらない。また、立木密度が違って変わらない報告も多い。96林分についてのスギ林の葉乾重は 19.4 ± 4.9 t/ha で、緑軸を含む片面の葉面積は $4.5 \sim 8.5$ ha/ha で、単木の葉量 (kg) と単木の幹材積生長量 (dm^3/y) は正の直線関係にあり、 $0.8 \sim 1.3 \text{ m}^3/\text{t} \cdot \text{y}$ (幹生産量/葉量) と報告されている¹⁰⁾。二次師部生長速度 (dm^3/y) と葉乾重 (kg) の間にもまた正の比例関係が見られる (定数0.095)。同化産物の通導機能をもつ二次師部の生長速度は同化器官量と深い関係にある。しかして、二次師部の通導に関与する内樹皮の年齢 (寿命) は同一林分でも個体によって1~2年の違いは見られるが、材年齢が増大しても比例的に増大せず、頭打ち傾向が見られ、材年齢40年のときでも13年が限度である*。京大芦生演習林の樹齢100~200年生が大半を占める天然スギにおいても10~15年で、内樹皮の年齢は最大15年と考えられる。しか

* 脱稿後南光浩毅博士 (日本紙パルプ研究所) より杉4品種の若齢木の内皮の年齢に関する貴重な資料が提供されたので、付記する (付表)。

し、ツキノワグマによる樹皮剝離の傷害をうけた樹では、通導機能の低下を補うため、15年をこえるものが見られている⁵⁾。

(2) 樹皮の物理化学的特性

樹皮の組織は各種の構成要素から成っているため、木質部に比べ化学的組成も複雑であるが、特に多くのフェノール性成分を含んだ抽出物及びリグニン質含有率の高いことを特徴としており、また灰分も一般的に多く2~3%から10%以上にも及ぶ。

一般に針葉樹々皮には30~60%の抽出物、5~20%のペントザン、カテコール核を含有する樹皮フェノール酸ならびにリグニンなどの硫酸不溶フェノールポリマー20~50%、抽出処理後の樹皮に対して35~75%のホロセルロースと20~50%の α -セルロースなどから構成されている^{11),12)}。また、内樹皮は外樹皮より抽出物含有量が高く¹³⁾ 硫酸法で定量されるリグニン質が少ない。フラバノール単量体やプロアントシアニジン(樹皮タンニン)を主要成分とする溶媒抽出可能なフェノール性成分も内樹皮には10%以上も含まれているが、スギ、アカマツの外樹皮には2%前後しか見出されずしかも分子量も大きい。したがって、外樹皮中のフラバノール類の大部分は内樹皮が移行する際に変質し不溶化してくるものといわれている¹⁴⁾。

また、周皮を構成するコルク質中には、ケン化処理によって脂肪酸、芳香族酸などの分解酸を生成するスベリンを含有しており、乾燥や菌類の侵入から樹体を保護している。

樹皮の組織構造が木質部と異なるため、化学的性質のみならず物理的性質も異にしており、しかも樹種による特性の違いも大きい。例えば、インセンスシーダー (*Libocedrus sp.*)、レッドウッド (*Sequoia sp.*) の樹皮の膨潤率は木質部と同等またはそれ以下であるが、モミ属 (*Abies sp.*)、マツ属 (*Pinus sp.*) 樹皮の長さ方向の膨潤率は木質部より高く、更に一般的に接線方向より半径方向の膨潤率が高いことも木質部と異なる特性である。また、針葉樹々皮の強度は木質部の1/2~1/7にすぎず、例えば上記樹種の場合、接線及び半径方向の剪断強度はそれぞれ13~18 kg/cm² 及び21~40 kg/cm² と報告されている¹⁵⁾。

樹皮は、土質改良材、家畜の床敷き、燃料などにも用いられているが、多量に含有するポリフェノール成分の特性を活用して、樹皮粉末から成型板の製造またはホルムアルデヒド系樹脂接着剤の製造開発を意図した研究も活発化している。広葉樹々皮の抽出物ではあるが、良質のポリフェノールであるワットルタンニン産出国の南アフリカでは、その産出量の約15%に相当する量のタンニンから耐久性木材用接着剤を年間約9,000 t(樹脂固形分、1981年)生産している¹⁶⁾。

なお、樹皮は粉末化前処理することが普通であるが、破壊強度が小さいため粉末化に要するエネルギーは少なく、エゾマツ樹皮では本質部の約10%にすぎないといわれている。

II 平倉演習林におけるスギ人工林の現存量調査

II・1 調査林分

調査林分は、Fig. 4, Fig. 5 に示したように三重県一志郡美杉村大字川上字平倉2735番地に所在

する三重大学農学部附属演習林（以下平倉演習林と略称する）の林齢10年（16林班ろ小班），20年

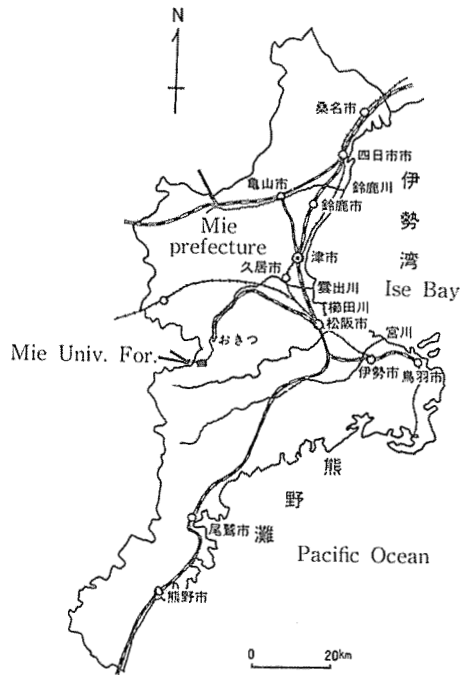


Fig. 4 Locality of Mie University Forest (34°27'25"N, 136°14'20"E)

(11林班は小班), 30年(15林班は小班), 40年(6林班ろ小班)及び60年(8林班に小班)のスギ人工林で, それぞれの林分に標準地(20×20m)を設定した。各標準地の標高は500~600mにあり, 傾斜角は60年生林分では40°, これ以外の林分では20~30°であった。各林分の土壌はいずれも褐色森林土に属し腐植質に富む砂質壤土である。なお, 平倉演習林(標高513m)における気象観測値によると年平均気温は12.5°C, 年降水量は2517mm, 暖かさの指数は94.7°C・月である。

II・2 方法

林齢10, 20, 30, 40及び60年のスギ人工林における標準地調査の資料にもとづき, 各林齢の標準木を選定し地上0.2mで伐倒したのち, 樹幹解析に用いる円板の地上高ごとに幹, 樹皮, 生枝(生球果を含む), 枯枝(枯球果を含む), 生葉及び枯葉の6部分の全生重量(地上0.2m以

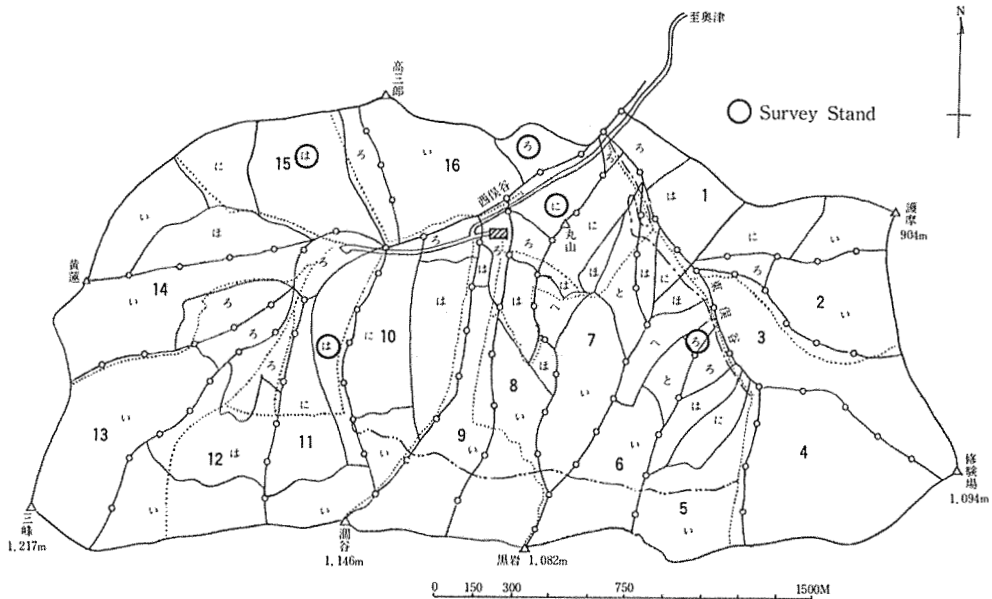


Fig. 5 Surveyed stand in Mie University Forest

上)を現場で測定した。同時に高さ別・部分別の試料をとり、それらの生重と乾重(80°Cで乾燥)から求めた含水率により高さ別・部分別の全乾重を計算した。また、各標準木の幹及び樹皮の容積(地上0.2m以上)は樹幹解析により求めた。

II・3 結果と考察

(1) 標準木の林齢別・部分別乾重

各林齢における各標準木の幹、樹皮、生枝、枯枝、生葉及び枯葉の乾重を Table 1 に示した。林齢10年が3本、林齢20、30、40及び60年はそれぞれ2本、合計11本を調査したが同一林齢においても各標準木の部分別乾重には若干の差がみられた。これは、標準木の生育立地条件が異なることによるものと思われるので、林齢別・部分別の単木当り平均乾重を求めた。即ち、林齢別の幹、樹皮、全枝及び全葉の単木平均乾重は林齢が大きいくほど多く、これらのうち樹皮は、10年 1.3 kg, 20年 3.2 kg, 30年 5.2 kg, 40年 7.2 kg, 60年 19.4 kg であり、単木樹皮量は林齢40年まではほぼ直線的に、その後60年にかけて急激に増加する傾向が認められた。

Table 1. Dry weight of each part of Sugi trees in different age stands (kg)

Stand compartment	Stand age (years)	Sample tree	Tree height (m)	Diameter at breast height (cm)	Stem			Branches			Leaves			Whole tree
					wood	bark	total	living	dead	total	living	dead	total	
16.ろ	10	A	8.60	9.3	11.752	1.339	13.091	1.895	0.471	2.366	5.674	1.417	7.091	22.548
		B	8.75	8.4	9.289	0.982	10.271	1.769	0.362	2.131	3.850	0.903	4.753	17.155
		C	9.31	10.5	11.344	1.470	12.814	3.200	0.921	4.211	3.674	1.288	4.962	21.897
11.は	20	Av.	8.89	9.4	10.795	1.264	12.059	2.288	0.585	2.873	4.399	1.203	5.602	20.534
		A	11.82	13.0	28.271	2.570	30.841	4.612	1.415	6.027	4.851	0.855	5.706	42.574
		B	12.80	13.7	29.524	3.787	33.311	3.722	1.415	5.137	6.368	0.151	6.519	44.967
15.は	30	Av.	12.31	13.4	28.898	3.179	32.077	4.167	1.415	5.582	5.610	0.503	6.113	43.772
		A	16.93	16.9	56.885	4.793	61.678	6.660	3.615	10.275	6.501	1.260	7.761	79.714
		B	15.51	16.6	57.014	5.678	62.692	6.854	1.541	8.395	8.697	0.189	8.886	79.973
6.ろ	40	Av.	16.22	16.8	56.950	5.236	62.186	6.757	2.578	9.335	7.599	0.725	8.324	79.845
		A	17.55	21.3	99.801	8.572	108.373	16.353	1.268	17.621	16.625	0.134	16.759	142.753
		B	16.30	18.3	69.832	5.851	75.683	5.294	1.264	6.558	9.968	0.084	10.052	92.293
8.に	60	Av.	16.93	19.8	84.817	7.212	92.029	10.824	1.266	12.090	13.297	0.109	13.406	117.525
		A	24.97	26.1	219.045	18.521	237.566	8.296	0.136	8.432	12.148	0.369	12.517	258.515
		B	22.40	26.3	218.728	20.205	238.933	17.942	1.686	19.628	19.940	0.863	20.803	279.364
		Av.	23.69	26.2	218.887	19.363	238.250	13.119	0.911	14.030	16.044	0.616	16.660	268.940

(2) ha 当りの林齢別・部分別現存量

各林齢における部分別の単木平均乾重とそれぞれの林分における平均立木密度(本/ha)から求めた現存量を Table 2 に示した。

平倉演習林のスギ人工林における林齢別の ha 当り地上部現存量は、10年 87.2 t, 20年 101.8 t, 30年 148.4 t, 40年 175.1 t, 60年 222.4 t と推定された。平倉演習林に地理的に近い奈良県吉野郡

東吉野村のスギ人工林における ha 当り地上部現存量は、10年 49.4 t, 19年 108.2 t, 31年 170.5 t, 51年 266.1 t, 60年 274.0 t となっている¹⁸⁾。これら吉野地方の現存量は、平倉演習林に比べて20～60年生では10～20%多い傾向が認められた。また、10年生スギ林分の ha 当り地上部現存量については、74.9 t～75.4 t¹⁹⁾ (美杉村民有林) あるいは 36.0～80.0 t²⁰⁾ (東吉野村) ともいわれており、同齢の林分においても異なり、また、地域的にも現存量にはかなりの差がみられる。これは、それぞれの林齢及び地域におけるスギ人工林の生育環境ならびに保育形態のちがいが関連しているものと考えられる。

Table 2. Dry biomass of different age stands (t/ha)

Stand age (years)	Mean tree height (m)	Mean d.b.h (cm)	Stand density (trees/ha)	Stem		Branches		Leaves		Total
				wood	bark	living	dead	living	dead	
10	8.89	9.4	4240	45.8 (52.5)	5.4 (6.2)	9.7 (11.1)	2.5 (2.9)	18.7 (21.4)	5.1 (5.8)	87.2 (100.0)
20	12.31	13.4	2325	67.2 (66.0)	7.4 (7.3)	9.7 (9.5)	3.3 (3.2)	13.0 (12.8)	1.2 (1.2)	101.8 (100.0)
30	16.22	16.8	1860	105.9 (71.4)	9.7 (6.5)	12.6 (8.5)	4.8 (3.2)	14.1 (9.5)	1.3 (0.9)	148.4 (100.0)
40	16.93	19.8	1490	126.4 (72.2)	10.7 (6.1)	16.1 (9.2)	1.9 (1.1)	19.8 (11.3)	0.2 (0.1)	175.1 (100.0)
60	23.69	26.2	827	181.0 (81.4)	16.0 (7.2)	10.8 (4.9)	0.8 (0.4)	13.3 (6.0)	0.5 (0.2)	222.4 (100.0)

Value in the parentheses is the percentage of each part to the total dry weight.

つぎに、平倉演習林のスギ人工林における林齢別の ha 当り樹皮現存量は、5.4～16.0 t にわたったが、各林齢における総現存量（地上部）に対する樹皮量は、10年 5.4 t/87.2 t, 20年 7.4 t/101.8 t, 30年 9.7 t/148.4 t, 40年 10.7 t/175.1 t, 60年 16.0 t/222.4 t で、それぞれ6.2%, 7.3%, 6.5%, 6.1%, 7.2% となり、樹皮はどの林齢においても総現存量の6～7%存在することが推察された。

なお、本研究の対象となったスギ60年生林分（8林班に小班）の昭和56年度主伐実績は、面積 0.41 ha, 立木材積 165.447 m³, 丸太材積（樹皮付きで搬出）132.785 m³, 採材歩留まり75%であった。この歩留まりと同林分における ha 当り推定樹皮現存量（16.0 t）から計算すると、ha 当り 12.0 t の樹皮が林地外へもち出されたことになる。

(3) 幹の樹皮率と林齢

前項で述べたように、林分単位の幹の樹皮率では、林齢によらずほぼ一定であった。しかし、単木樹幹部の樹皮率についてみると、樹皮率は、Table 3 に示したように、乾重によっても、容積によっても、林齢が増すにつれて、低くなる傾向があった。すなわち、乾重による樹皮率では、10年生で約12%程度、60年生で約9%程度である。一方、容積による樹皮率は10年生で約13%, 60年生で約5%程度と、乾重によるものよりも樹皮率低下の割合が大きい。また、皮付き材積当りの樹皮量も林齢が増加するにつれて少なくなる傾向が認められ、10年生では約 41 kg/m³, 60年生では約 31 kg/m³ 程度であった。

Table 3. Bark percent of sample tree stem

Stand age (years)	Sample tree	a (w/w%)	b (V/V%)	c (kg/m ³)
10	A	11.39	13.79	44.90
	B	10.57	15.28	39.65
	C	12.96	10.19	37.57
	Av.	11.71	13.09	40.71
20	A	9.09	7.63	31.12
	B	12.83	6.28	39.51
	Av.	10.96	6.96	35.32
30	A	8.43	6.39	28.94
	B	9.96	5.14	32.62
	Av.	9.20	5.77	30.78
40	A	8.59	5.23	29.05
	B	8.38	6.09	27.21
	Av.	8.49	5.66	28.31
60	A	8.46	4.46	27.50
	B	9.24	5.60	34.84
	Av.	8.85	5.03	31.17

a: Bark dry weight/stem dry weight. b: Bark volume/stem (with bark) volume.
c: Bark dry weight/stem (with bark) volume.

Table 4. Volume of stem bark and estimated values of bark biomass

Stand age (years)	Bark volume of stem (m ³ /ha)	Estimated dry weight of stem bark by regression equation (t/ha)	Estimated bark biomass of stem from yield table on KUMANO-Area in MIE prefecture			
			dry weight (t/ha)		volume (m ³ /ha)	
			I*	III*	I*	III*
10	16.8	5.6 (5.4)**	1.3	0.6	4.1	1.8
20	14.3	7.4 (7.4)**	5.1	2.5	10.1	4.9
30	18.2	10.3 (9.7)**	10.0	5.0	18.7	9.3
40	21.3	12.4 (10.7)**	13.9	7.2	28.0	14.8
60	25.9	13.7 (16.0)**	23.5	13.0	38.0	21.0

*: site class. **: measured value × mean tree density

つぎに、平倉演習林のスギ林分の樹皮現存量の林齢に伴う変化と、その特徴をみるために、さきに述べた樹皮率を熊野地方のスギ林の収穫表²¹⁾から読みとった林分材積に乗じて、それぞれの

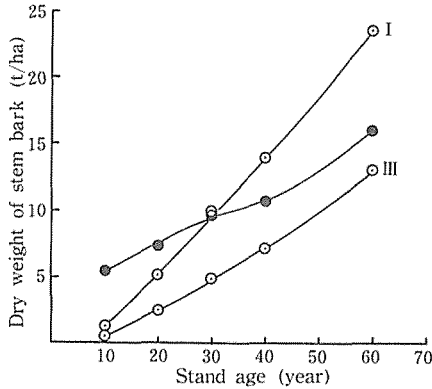


Fig. 6 Relation between bark biomass and stand age. Open and solid circles show the estimated values and measured ones, respectively. Roman numerals indicate site classes.

林齢のスギ人工林の樹皮現存量 (乾重 t/ha) を推定し、実測値から計算された平倉演習林の林分樹皮現存量と比較してみた (Table 4, Fig. 6)。

Table 4 に示したように、収穫表から推定した樹皮現存量は、同一林齢の林分でも、地位 I と地位 III とでは、ほぼ 2 倍程度のちがいがあった。これらの樹皮現存量と平倉演習林での同じ林齢の林分樹皮現存量を比較すると、10年生と20年生の林分では、平倉演習林での値の方が、収穫表から推定された樹皮現存量よりも大きい数値を示している。これは、おそらく林分の立木密度 (例えば10年生林分で、収穫表: 2883 本/ha に対して、演習林: 4240 本/ha) のちがいによるものであろう。

一方、平倉演習林の30年生林分の場合には、収穫表からの推定値 (地位 I) とほぼ同じ樹皮現存量で、さらに40年生および60年生林分の場合には、収穫表から推定した地位 I と地位 III の中間の値となった。

若齢林では、収穫表から推定された林分樹皮現存量よりも、平倉演習林での樹皮現存量のほうが多かったが、同様の傾向は、樹幹解析によって求めた林分樹皮容積量 (m^3/ha) と、収穫表から推定されたその値とを比較した場合にも認められた。ただ、今回の平倉演習林の調査では、10年生 ($16.8 \text{ m}^3/\text{ha}$) よりも、20年生 ($14.3 \text{ m}^3/\text{ha}$) 林分の樹皮量が少なかった。

平倉演習林と同じ三重県一志郡美杉村のスギ幼齢林の場合10年~12年生で $15.8\sim 18.6 \text{ m}^3/\text{ha}$ ¹⁹⁾ という結果が報告されており、平倉演習林の10年生林分の樹皮容積量が、いちじるしく大きい値であるとはいいがたい。したがって、この場合も、林分の立木密度のちがいが、若齢林分の樹皮容積量に、大きな影響を与えているようである。

(4) 樹幹樹皮・幹 (皮なし)・葉・枝の量と胸高直径との間の相対生長関係

一般に、林木の各部位の相互間には、相対生長則が認められ、それを利用して、林分の現存量や物質生産量などの推定が行われている。本研究において調査されたスギ標準木の幹・葉・枝の乾重と胸高直径との間でも、この関係がよく成立しており (Fig. 7), 下記の回帰式を得た。

$$\text{幹: } \text{Log } Y_1 = -1.729 + 2.844 \text{ Log } X \quad (r^2 = 0.987)$$

$$\text{葉: } \text{Log } Y_2 = -0.6615 + 1.307 \text{ Log } X \quad (r^2 = 0.818)$$

$$\text{枝: } \text{Log } Y_3 = -1.393 + 1.792 \text{ Log } X \quad (r^2 = 0.857)$$

ここで Y_i は、それぞれの部位の乾重 (kg), X は胸高直径 (cm)。

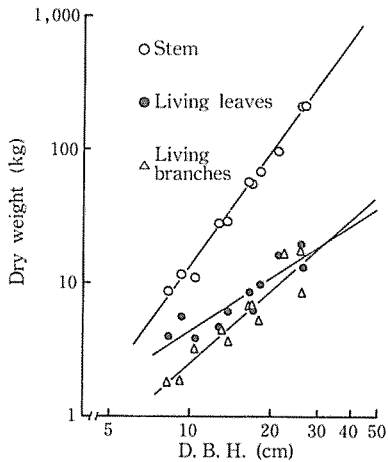


Fig. 7 Allometric relation between D. B. H. and dry weight of stem, leaves and branches.

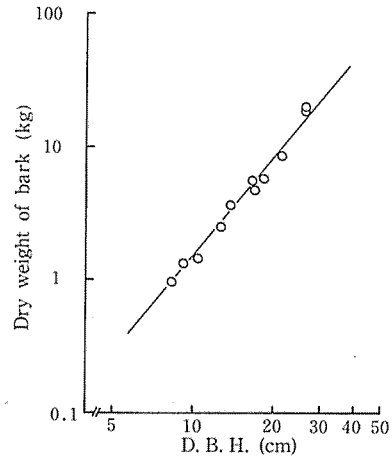


Fig. 8 Allometric relation between D. B. H. and dry weight of stem bark.

このような関係は、また各単木の幹の樹皮量と胸高直径との間にも認められ、次の回帰が得られた (Fig. 8)。

$$\text{樹皮: } \text{Log } Y_4 = -2.269 + 2.459 \text{ Log } X \quad (r^2 = 0.975)$$

胸高直径と幹の樹皮量との間の相対生長関係を林分の樹皮現存量の推定に用いた例は、ほとんどないと思われるので、この方法の適否を検討するため、前述の回帰式にもとづいて、林分の平均胸高直径から、林分の樹皮現存量を推定し、実測値にもとづいて計算された値 (Table 4) と比較してみた。

本表から明らかなように、林齢10年、20年及び30年の林分については、回帰式からの推定値は、実測値にもとづいた数値に近い値を示した。他方、40年生以上の林分では、かなりのずれが、認められた。しかし、その差は、いずれも16%以下であった。

以上の結果から、平倉演習林のスギ人工林について、前述の回帰式を用い、その林分平均胸高直径から林分樹皮現存量の大約の推定は十分に可能であり、ことに若齢林分においては、このような方法によって、比較的正確な推定値が得られるものと思われる。

III スギ樹皮の物理化学的性質

III・1 方法

林齢毎に抽出したスギ標準木樹幹部の含水率、容積密度数などを測定したのち、地上高 1.2~3.2 m の部位の樹皮について、含水率、内樹皮率、粉碎性、溶媒抽出率、温水抽出物の酸性度などを次に示す方法で測定した。

含水率及び内樹皮率: カッターナイフで内・外樹皮に分離した気乾樹皮を 105°C の定温器中で恒量になるまで乾燥して内・外樹皮の含水率を測定し、更に内・外樹皮絶乾重量に対する内樹

皮絶乾重量の比率を内樹皮率として表示した。

粉碎性：長さ 50 mm, 巾約 30 mm に切断した気乾樹皮をウィレー・ミルまたはボール・ミルで粉碎し、タイラー標準篩で粒度分布を測定した。

温水及び 1% NaOH 抽出率：粉碎樹皮約 1 g に 100 ml の温水または 1% NaOH 溶液を加え、沸騰水中でそれぞれ 3 時間または 1 時間加熱処理後木材分析法にしたがって抽出率を算出した。

温水抽出物の酸性度：粉碎樹皮約 10 g に 150 ml の温水を加え 80°C, 3 時間処理してえられた温水抽出液、及び陽イオン交換樹脂によって脱塩処理した抽出液は、pH を測定したのち凍結乾燥物を調製し、それぞれの pH, 緩衝容量ならびに脱塩抽出物の酸強度、酸性基量を定量した。各抽出物の pH 及び緩衝容量は、精秤した凍結乾燥試料約 80 mg を 20 ml の脱イオンー煮沸脱炭酸水に溶解したのち 0.1N KOH 溶液を用いて電位差滴定し、N₂ 気流下での初期 pH 及び水溶液の pH が 10 に達するまでに要した KOH の添加 mol 数で表示した。測定には、平沼産業 kk 製滴定記録装置 RAT-11S を用い滴定条件は次の通りである。

Recorder full scale	: 24 cm
Scale range	: 0.5 pH/cm
Chart speed	: 60 mm/min
Derivery time	: 4 sec
Interval time	: 20 sec
Addition of the titrant:	0.025 ml/sec

脱塩抽出物の酸性基量は、pKa 10 以上の弱酸性基量も定量することを目的として、ピリジンを媒体とする非水電位差滴定法によって測定し、また酸強度は安息香酸を基準物質とした ΔHNP 値（示差半当量電位差値）から判定することとしたが、ピリジン溶媒系における各種酸性物質の ΔHNP 値と水系における pKa 値との相関性は極めて高く、強酸性は極めて高く、強酸性のカルボキシル基からアルキルフェノール系のフェノール性水酸基のような弱酸性基まで精度良く定量することが可能である^{22)~24)}。なお、次に示す測定条件以外は、前記緩衝容量の滴定条件と同一である。

Titrant	: 0.1N tetrabutylammonium hydroxide-pyridine solution
Scale range:	50 mV/cm

III・2 結果と考察

樹皮の組成は木質部とくらべて複雑であり、樹種、個体による変動も大きい、さらに最内部の周皮を境とする内樹皮、外樹皮の間にも組成の相違が認められるため、内・外樹皮の存在比率は、抽出成分、粉碎性及び発熱量にも影響を与えるものと推察される。したがって、内樹皮率は樹皮利用上の基本資料として重要である。Fig. 9 は各林齢樹幹樹皮の内樹皮率を示したものであるが、一般にいわれるように林齢増加にともない減少する傾向にあって、林齢20年までの内樹皮率は全樹皮の55~60%を占めているが、60年では約35%となっている。なお、イエローシーダー

(*Chamaecyparis nootkatensis* SPACH) の内樹皮率 (厚さ基準) は約52%²⁵⁾, またシベリア産カラマツ樹皮 (*Larix sp.*), アカマツ樹皮 (*Pinus densiflora* SIEB. et ZUCC.) 及びエゾマツ樹皮 (*Picea jezoensis* CARR.) の内樹皮率はそれぞれ16%, 14%及び45%と報告されており²⁶⁾, スギ樹皮はトウヒ属と同様内樹皮率が一般に高い。

また同一環境下の室内に放置してえられた気乾樹皮の含水率は, 林齢に関係なくほぼ一定であったが組織によって多少相違していた。即ち, 内樹皮で13.2~17.2%, 平均14.6%, 外樹皮で13.7~17.8%, 平均16.2%であった。しかし生材樹皮においては内樹皮の含水率が外樹皮のそれより僅かに高かった。

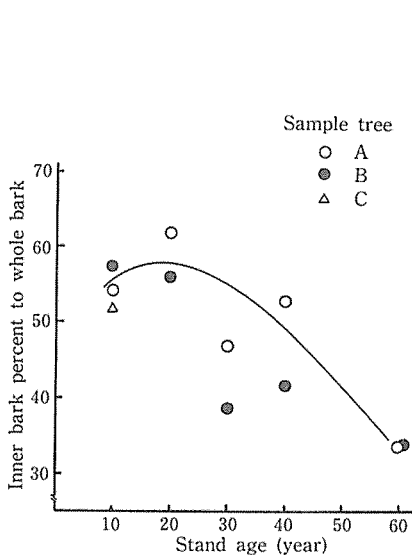


Fig. 9 Variation in the weight ratio of the inner bark to the whole bark of the stem by the stand age classes.

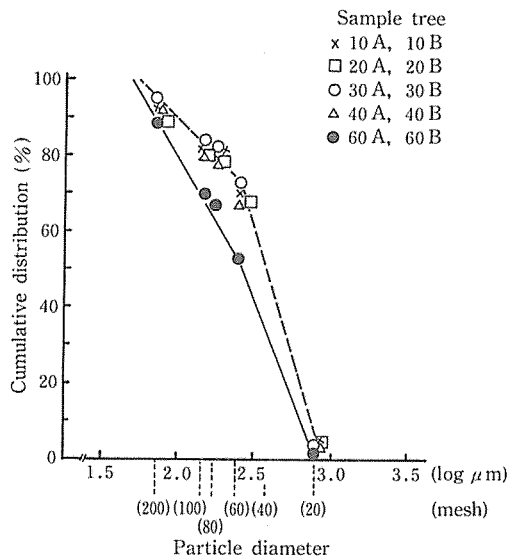


Fig. 10 Cumulative distribution of particle diameter for the powder of the stem barks ground by a Wiley mill.

樹皮をいずれの用途に利用するにしても前処理として粉末化することが一般的であり, 原料樹皮の粉碎性の難易は加工の経済性に影響を与える。Fig. 10 は, 含水率約15%の気乾樹皮をウイレー・ミルによって粉碎した碎製物の粒度分布である。分布図は類似した傾向を示す2つの群に類別することができ, 本試験範囲内では, 林齢40年以下と60年の樹皮とでは様相をことにしていた。両群とも粒径 $250\ \mu\text{m}$ (60 mesh ふるい) を変曲点とする2直線より成り立ち, また40年以下及び60年樹皮碎製物中に含まれている $250\ \mu\text{m}$ 以上の粗碎物はそれぞれ70%及び50%, $149\ \mu\text{m}$ (100 mesh ふるい) 以下の細碎物は20%及び35%であった。即ち, 粉碎機の特徴から粉碎時間を規制することは不可能であるため定量性に欠けるが, これらの結果から壮齡樹樹皮は若齡樹樹皮より易粉碎性物質であると推定される。さらに定量的な粉碎特性を把握するため, 回分式粉碎機による試験も実施した。Fig. 11 は, 60年生と30年生の2試料を用い一定条件下でのポール・ミル

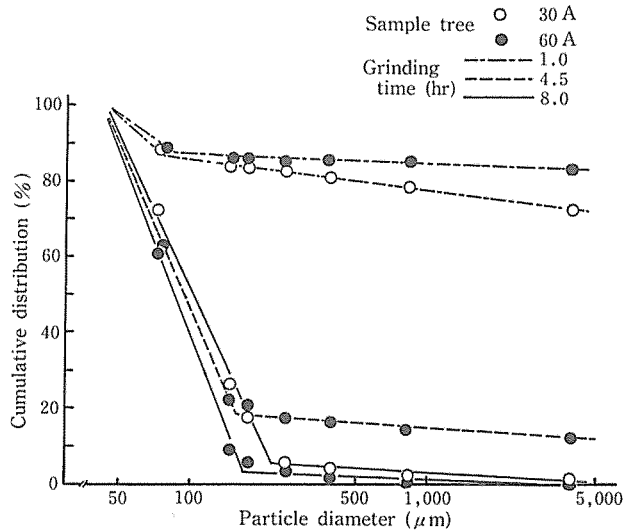


Fig. 11 Cumulative distribution of particle diameter for the powder of the stem barks ground by a porcelain ball mill.

粉碎結果である。粉碎処理時間1時間では外樹皮のみが内樹皮と分離され微粉化されている状態であったが、60A樹皮の方が粗砕物が多い。粉碎時間の延長に伴い、難粉碎性の内樹皮も次第に微粉化されてくるが、8時間処理すると60A樹皮の方が粉碎性にまっさっていることを示しており、60A及び30A樹皮砕製物のうち、 $74\mu\text{m}$ 以下(100 meshふるい通過)の細砕物はそれぞれ40%及び30%であった。このような挙動は、組織構造上靱性、粘着性に富む内樹皮率と関係しているものである。なお、両樹皮砕製物とも、粒径約 $200\mu\text{m}$ に変曲点を有するがRosin-Rammlerの粒度分布則に適合しており、8時間砕製物のうち最大度数を示す粒径はそれぞれ $77\mu\text{m}$ 及び $90\mu\text{m}$ と計算された。

Rosin-Rammler distribution law

$$R = e^{-kx^n}$$

R: Weight of the powder remained on each standard sieve.

x: Particle size of the powder.

気乾粉末樹皮の溶媒抽出率をTable 5に示す。供試樹皮の温水抽出率は4.3~14.5%であって、生活機能を有する内樹皮の存在比率の高い若齢樹皮は壮齢樹皮より抽出物含有量が多い傾向があり、また1% NaOH抽出率は21.3~28.7%で林齢20年以下と60年生の樹皮が僅かながらも高い数値を示した。温水には低分子の糖、アルコール、有機酸及び比較的低分子の多価フェノールなどが、またNaOH水溶液には温水可溶性成分のほかに比較的高分子の酸性物質や縮合型タンニンを含むポリフェノール類も可溶化することなどから、林齢によって樹幹樹皮抽出物の含有量が増加しているのみならず、I・2(2)で述べたようにその性質にも差違があるものと推定される。

Table 5. Extractives content of the stem barks (oven-dry basis)

Stand age (years)	Sample tree	Soluble in	
		hot-water (%)	1% NaOH (%)
10	A	10.60	23.09
	B	14.48	28.52
	C	11.43	27.09
	Avg.	12.17	26.23
20	A	9.08	26.32
	B	11.05	26.02
	Avg.	10.07	26.17
30	A	5.45	23.95
	B	5.04	21.26
	Avg.	5.25	22.61
40	A	4.77	22.32
	B	9.23	23.54
	Avg.	7.00	22.93
60	A	9.19	23.40
	B	4.34	28.68
	Avg.	6.77	26.04

さらに同一林齢樹皮であっても、大きな個体差を認めることができる。

各種低分子の酸性成分を含有する温水抽出液の pH, 即ち樹皮の pH は3.8~4.4の範囲であって約4~6の pH 値を示す一般木質部と同様弱酸性であるが、陽イオン交換樹脂を用いて脱塩することによって、いずれの試料も pH 3 前後の一定値を示すようになる (Fig. 12)。また凍結乾燥した未処理抽出物を一定濃度に希釈した溶液の pH は、林齢との相関性もなく3.8~5.2の範囲で変動しているが、脱塩処理物では上記抽出液同様2.9~3.1の一定 pH 値を示している (Fig. 13)。溶液の酸性度の指標である pH は、溶質中に存在する酸性基の強さ (解離恒数) と量との関数と

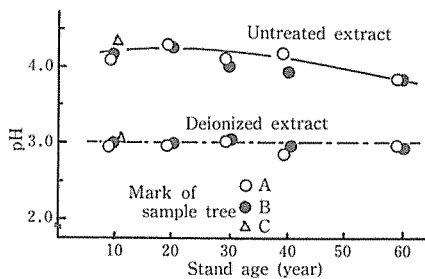


Fig. 12 The pH values of the hot-water extracts of the stem barks.

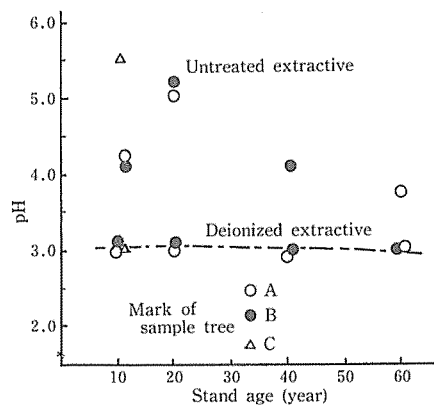


Fig. 13 The pH values at 0.4 percent in concentration of the hot-water extractives of the stem barks.

みなされるが、上記の諸結果から、樹皮抽出物の pH は試料中のアルカリ金属またはアルカリ土類金属含有量に依存していることが明らかであり、同様な結果は抽出物含有量の比較的多い南洋材木質部を用いた試験においても認められている²⁴⁾。

温水抽出物の性質を定量的に示す簡便なパラメーターである緩衝容量は、Fig. 14 のように、温水処理抽出物そのもので 0.15~0.20 mol/100 g、脱塩処理抽出物で 0.21~0.33 mol/100 g となっており、林齢による明確な傾向は認められなかったが、脱塩処理の有無による測定値の幅が大きい抽出物は水易溶性アルカリ金属等の含有率が高いものであると推定される。なお、これらは酸性

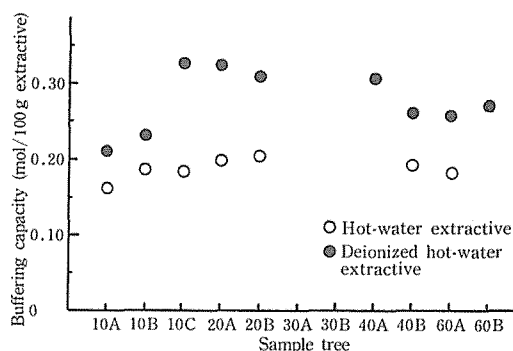


Fig. 14 The buffering capacity, expressed by required KOH to raise the pH of the aqueous solution to 10.0, for the extractives.

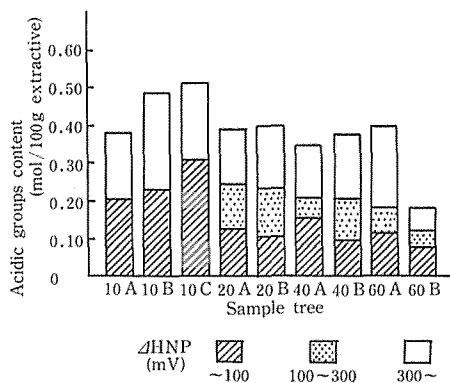


Fig. 15 The acidity of the deionized hot-water extractives determined by the non-aqueous titration.

度の高い南洋材木質部抽出物の緩衝容量に類似していた²⁴⁾。Fig. 15 は脱塩処理した温水抽出物の非水滴定の結果であるが、 Δ HNP 値 100 mV 以下の強酸性を示すカルボキシル基類似の酸性基は 0.08~0.31 mol/100 g、 Δ HNP 値 100~300 mV を示すカテコール基のような酸性度の高いフェノール性水酸基は最大 0.13 mol/100 g、 Δ HNP 値 300 mV 以上の弱酸性のアルキルフェノール系フェノール性水酸基 0.06~0.25 mol/100 g 含んでおり、幼齢樹樹皮の強酸性基含有率は高い。

なお、最近わが国において利用研究の盛んなカラマツ (*Larix leptolepis* GORDON) 樹皮から調製した脱塩処理抽出物の酸性度は、同一手法によって測定した緩衝容量が 0.23 mol/100 g、全酸性基量 0.46 mol/100 g であってスギ樹皮の脱塩抽出物と類似しているが、温水抽出率及び 1% NaOH 抽出率はスギ樹皮より高く、それぞれ 24.83% 及び 40.62% であった。したがって、樹皮抽出物中のフェノール性成分の活用、または成型加工による固型燃料化を意図した場合の原料としては、カラマツ樹皮の方が優れていると判定される。

IV スギ樹皮の燃料的性質

IV・1 方法

各林齢の標準木の地上高 1.2~3.2 m 部の樹幹樹皮を試料とし、風乾後、12 mesh の丸孔ふるい

を備えたウィレーミルによって粉碎した樹皮粉について、発熱量を測定した。内・外樹皮は目視によって削り分けた。温水抽出樹皮は前章 (III) の温水抽出物 (3 時間抽出) を測定した残査樹皮粉である。

熱量測定試料及びそれを包む雁皮紙 (7×7 cm) の重さは 0.1 mg まで正確に秤量した。熱量測定には、あらかじめ含水率を求め、密栓して保存した気乾樹皮粉を毎回数百 mg 用い、燃研式断熱熱量計 (吉田製作所) を使用した。熱量計の燃焼ポンプの酸素圧は 30 kg/cm² とし、上昇水温の測定はベックマン温度計を用い、ルーペによって 0.001°C まで読んだ。燃焼ポンプを没する内筒の水量は 2,100 g とし、0.5 g まで測った。

燃焼ポンプ系 (点火ニッケル線を含む: 長さ約 12 cm, 重さ約 8.3 mg, ニッケル線の発熱量を 775 cal/g としたときの 1 本当りの発熱量約 6.4 cal) の水当量 (g) は熱量測定用の安息香酸 (発熱量 6,321 cal/g) タブレットにより、あらかじめ求めた 588 g を用いた。発熱補正は毎回試料を包む雁皮紙 (1,890 cal/g) の重量を測定して補正值を求めた。水の比熱を 1(cal/°C・g) とし、次式によって絶乾発熱量の計算を行った。

$$\text{発熱量(cal/g)} = \frac{[\text{水当量(g)} + \text{内筒水量(g)}] \times \text{上昇水温(°C)} \times \text{水の比熱(cal/°C}\cdot\text{g)} - \text{発熱補正(cal)}}{\text{絶乾試料量(g)}}$$

IV・2 結果と考察

各試料とも 2 回ずつ測定を行い、平均をもって Table 6 に示した。樹皮が野外に放置され、自然環境による劣化を想定して、一部の試料について温水抽出樹皮の発熱量を測定した。また、

Table 6. Heat of combustion for Sugi stem bark (cal/g OD)

Stand age (years)	Sample tree	Bark	Bark extr'd with hot-wat.	Outer bark	Inner bark
10	A	4,796	—	4,946	4,729
	B	4,845	—	—	—
	C	4,772	—	—	—
	Average	4,804	—	—	—
20	A	4,825	—	4,895	4,540
	B	4,744	—	—	—
	Average	4,785	—	—	—
30	A	4,832	—	4,947	4,472
	B	4,868	4,676	—	—
	Average	4,850	—	—	—
40	A	4,956	4,763	4,942	4,721
	B	4,797	4,691	—	—
	Average	4,877	4,727	—	—
60	A	4,906	4,678	4,982	4,670
	B	4,961	4,849	4,895	4,728
	Average	4,933	4,763	4,938	4,699

Each figure is an average of two measurements

40年生 A 個体の樹幹解析用円板の樹皮について、地上高に伴う樹皮発熱量の分布を測定し、Table 7 に示した。

Table 7. A calorific value of the stem bark and a height above ground for the 40-year Sugi tree*

Height above ground (m)	0.2	1.2	3.2	5.2	7.2	9.2	11.2	13.2	15.2	16.2
Calorific value (cal)	4,778	4,802	4,796	4,798	4,776	4,703	4,706	4,719		4,679
No. of growth ring in stem	40	38	34	31	27	25	20	17	11	8

* Height of the tree: 17.55 m

わが国の樹幹樹皮の発熱量に関して、重松ら²⁷⁾ はポンプカロリメーターにより詳細な研究を行い、Table 8 に総括される結果を得た。針葉樹皮はおおむね 5,100 cal 程度で、広葉樹皮の 4,700 cal より大きい。この値は先の工藤・李による針葉樹皮 5,154 cal, 広葉樹皮 4,767 cal と比較して、やや小さいが相似た結果であると報告した²⁷⁾。樹皮の比重を考慮すると広葉樹皮の方が大きいので、容積当り発熱量は広葉樹皮の方が大である。また、灰分含有率が、特に10%を超えると樹皮実質量の低下となり発熱量は減少する。当時の宮崎高農下北演習林産スギの樹皮厚さ 20.1 mm, 容積比重 0.599 の樹皮について、全乾発熱量 5,185 cal/g を得ている。

Table 8. Heat values for the stem bark of softwood and hardwood*

Trees	No. of species	No. of locality	Cal. for OD (cal/g)		Cal. at 11% MC (cal/g)		Cal. for OD (cal/g)		Volume density (g/cm ³)
			Range	Aver.	Range	Aver.	Range	Aver.	
Softwood	8	15	4,842-5,223	5,095	4,275-4,648	4,527	1,922-3,569	2,962	0.371-0.701
Hardwood	88	116	3,858-5,872	4,700	3,434-5,226	4,183	1,071-5,372	3,729	0.254-0.984

* After Y. SHIGEMATSU & S. MIYAGAWA.²⁷⁾

樹皮は木化度の異った3種の靱皮繊維 (Fig. 2), 師細胞, 石細胞より成り、時に細胞壁内に修酸石灰の結晶が見られる。しかし、周皮の形成にあたり、コルク質化が起り、外樹皮化される段階で修酸石灰の結晶は消失し⁹⁾ スベリンに富むようになる。スベリンはヒドロキシ脂肪酸のエステル化重合物で、三次元構造を有し、樹皮に弾力性を与えるコルクの主成分である¹³⁾。スギ樹皮のホロセルロースは内樹皮部42.3%, 外樹皮部40.3%; リグニンは内樹皮に23.6%, 外樹皮に42.6%と報ぜられている¹³⁾。22年生スギ生立木の胸高部の内・外樹皮の比率, ならびに針葉樹皮タンニンの主成分をなすフラバノール類の樹皮各部の含有率を Table 9 に示す¹⁴⁾。これらの物質がスギの内・外樹皮の発熱量に差を生じ、特に外樹皮に高い発熱量を与える要因をなすものと考えられる。

本研究から得られたスギ樹幹樹皮の特徴として、(1) 外樹皮の発熱量は樹齢にかかわらずほぼ一定で、4,900~4,950 cal/g の範囲にあるが、内樹皮は外樹皮及び当年生の初生幹材 (特に春~初夏) との区別が困難なため、伐倒時期により、ばらつきが大きく (4,500~4,730 cal/g), 外樹皮より大約 300 cal/g 低いようである。この差は内樹皮が生きた細胞から成り、光合成物質の通

Table 9. Percentage of an each section of the bark and the flavanol content in an each section in a 22-year Sugi tree**

Section	% by weight	Flavanol content*
Inner bark		
inside	9.2	10.1
middle	33.1	13.0
outside	22.4	15.3
Outer bark	35.3	1.6
(Total	100.0)	

* Percentage by the oven-dried weight of each bark

** After M. SAMEJIMA, & T. YOSHIMOTO¹⁴⁾

導組織となっていてるところから、炭水化物系物質や低分子フラバノール類が多いのに対し、外樹皮では周皮の形成ならびに外樹皮化に伴い、フラバノールを含むポリフェノール類の高分子化、木化、スベリン化などが進んで組織が耐朽性・耐候性となり、高発熱量の物質に変化したことによると考えられる。

(2) 若齢林 (10~20年生) の樹幹樹皮は約 4,800 cal/g であるが、林齢の増加と共に増し、60年生では 4,933 cal/g となる。後に得た屋久島産小杉の約300年生の樹幹樹皮の 4,932 cal/g とほぼ同じであるところから、60年生以降は内・外樹皮の割合がほぼ一定に達し、外樹皮が最外側から自然剥離・落下する速度と二次師部の形成速度が平衡するものと考えられる。40年生スギ 1 個体 (A) の地上高と樹幹樹皮の発熱量の関係においては、下部がやや高く、地上高と共に緩やかに減少し、梢端に近い幼齢樹幹の樹皮は低くなる。これは内・外樹皮の組成割合が熱量分布に反映しているものと考えられる。梢端に近い樹幹樹皮は表皮を除き、ほとんどが生きている若い内樹皮から成っている。

(3) 温水抽出することによって発熱量は低くなるので、野外に樹皮を放置して雨水にさらすと、その燃料価値は低下する。これは前章に述べた如く、温水抽出率が10年生樹皮の約12%から次第に20年生樹皮の約10%と低下し、30年生以上の樹皮では、ほぼ一定の大約5~7%となる。他の文献値¹³⁾ (温水抽出物：内樹皮26.7%、外樹皮3.5%；冷水抽出物：内樹皮13.3%、外樹皮2.9%) をも合せて考えると、若齢木樹皮は外樹皮が薄く、ほとんど内樹皮から構成されているが、内樹皮の寿命 (年齢) が一定 (13~15年) となり、外樹皮との割合が次第に平衡に達するものと考えられる。その樹齢はほぼ30年と考えられるが、上記(2)の熱量的特徴の平衡となる60年に比し、生理・組織学的な保護層としては、すでにこの早い時期 (30年生頃) にほぼ平衡に達しているのかも知れない。野外における天候劣化を考えると、伐期に達したスギ樹幹樹皮 (40年以上) では若齢木樹皮に比し、劣化の程度は低く、物理的、機械的のみならず熱量的にも耐候性が高いといえる。

V スギ人工林樹皮潜在熱量

上記結果から、スギ人工林における樹幹樹皮潜在熱量を推定し Table 10 に示した。

Table 10. Potential calorific value of stem bark for Sugi (*Cryptomeria japonica* D. DON) stand

Stand age (years)	Calorific value of stem bark	
	(kcal/kg)	($\times 10^6$ kcal/ha)
10	4,804	25.75
20	4,785	35.37
30	4,850	47.23
40	4,877	52.41
60	4,933	78.99

林齢別における樹皮の潜在熱量は、10年 25.75×10^6 kcal/ha, 20年 35.37×10^6 kcal/ha, 30年 47.23×10^6 kcal/ha, 40年 52.41×10^6 kcal/ha, 60年 78.99×10^6 kcal/ha と推定され、60年生林分 1 ha 当りの潜在熱量を灯油の発熱量 (10.3×10^3 kcal/kg) に換算すると、約 7.7×10^3 kg (灯油 200 l 入ドラム缶約 50 本分) に相当し、地域的エネルギー確保のうえから有望な燃料資源であることが示唆された。

VI 要 約

わが国における未利用樹皮は年間に約 800万 m^3 に達している。この樹皮は地域的エネルギー確保対策上、燃料として活用することが最も妥当であると考えられる。そこで、未利用樹皮の成型燃料化を図るため、樹皮の現存量、排出量、物理化学的性質及び燃料の性質に関する一貫した基礎的研究を三重大学農学部附属平倉演習林のスギ人工林において実施した。その結果は次の通りである。

1 スギ樹皮の現存量

(1) 各林齢における標準木の樹皮平均乾重は、10年生 1.3 kg, 20年生 3.2 kg, 30年生 5.2 kg, 40年生 7.2 kg, 60年生 19.4 kg であった。

(2) 各標準木の乾重とそれぞれの林分における ha 当り立木本数にもとづく ha 当りの樹皮現存量は、上記林齢の順に、5.4 t, 7.4 t, 9.7 t, 10.7 t, 16.0 t と推定され、林齢別における樹皮現存量は総現存量の 6~7% を占め林齢にかかわりはなくほぼ一定であった。

(3) 樹幹部の樹皮率は上記林齢の順に、乾重比では 11.7%, 11.0%, 9.2%, 8.5%, 8.9%, 容積比では 13.1%, 7.0%, 5.8%, 5.7%, 5.0%, 対樹幹容積重量比では 40.7 kg/m^3 , 35.3 kg/m^3 , 30.8 kg/m^3 , 28.1 kg/m^3 , 31.2 kg/m^3 であった。

(4) 樹幹樹皮量と胸高直径との間には、 $\text{Log } Y_4 = -2.269 + 2.459 \text{ Log } X$ ($r^2 = 0.975$) の関係が認

められた。

(5) 熊野地方のスギ収穫表と本研究で得られた単木樹皮率とにもとづいて、平倉演習林の林分樹皮現存量を推定し、実測値と比較した。その結果、平倉演習林の若齢林では、収穫表から推定された数値より多く、また、平倉演習林の壮齢林では、収穫表にもとづく地位 I と地位 III に對する推測値の中間の値となることが認められた。

2 スギ樹皮の物理化学的性質

(1) スギ樹幹樹皮の内樹皮率は林齢によって変化しており、壮齢樹になるほど減少する傾向がある。靱性、粘着性に富む内樹皮の存在率と粉碎性とは相関性があり、内樹皮率の低い壮齢樹樹皮は若齢樹樹皮より粉碎し易い。また磁製ボール・ミルによる碎製物は、Rosin-Rammer の粒度分布則に適合していた。

(2) 気乾粉末樹皮の温水抽出率は4.3~14.5%であり、生活機能を有した低分子フラバノール類の多い内樹皮の存在率が高い若齢樹樹皮は、壮齢樹樹皮より抽出率が高い傾向がある。しかし、1% NaOH による抽出率は31.3~28.7%であって、温水抽出率ほど林齢による傾向は明確でない。なお、同一林齢の樹皮抽出率には、大きな個体差が認められた。

(3) 樹皮の温水抽出物の pH は3.8~5.2 の範囲にあつて、一般的な樹種の木質部と同様弱酸性を示し、また緩衝容量は0.15~0.20 mol/100g であった。しかし陽イオン交換樹脂を用いて脱塩処理することによって、抽出物の pH は2.9~3.1となり緩衝容量も0.21~0.33 mol/100g に増加する。即ち樹皮の酸性度は、含有するアルカリ金属またはアルカリ土類金属の量に依存していると見なされる。

(4) 利用研究の活潑なカラマツ (*Larix leptolepis*) 樹幹樹皮の抽出物は、スギ樹皮抽出物と類似した性質を有しているが、抽出率はスギ樹皮の約2倍であった。したがって、樹皮抽出物中のフェノール性成分の活用、または圧縮成型加工による固型燃料化を目的とした場合は、カラマツ樹皮の方が優れていると推定される。

3 スギ樹皮の燃料的性質

(1) 10~60年の範囲では樹齢にかかわらず、外樹皮の発熱量は4.900~4.950 cal/g である。内樹皮の発熱量はばらつきが大きい、外樹皮のそれより、おおよそ300 cal/g 低い。

(2) 10~20年生の若齢木の樹幹樹皮は4.800 cal/g を示し、樹齢とともに増し、60年生樹皮では4.930 cal/g に達して、おおむね一定となる。これは、内・外樹皮の組成割合によって結果され、新生する内樹皮量と剥落する外樹皮量がほぼ平衡に達すると考えられるからである。

(3) 温水抽出によって樹皮の発熱量は低下するが、今回の実験では温水抽出率がほぼ一定に達した樹齢(30~60年)の樹幹樹皮についての測定であるので、その低下は150~190 cal/g の範囲にとどまった。

(4) 40年生スギ(樹高17.55 m)の樹幹樹皮の発熱量は地際部において最も高く、約4.800 cal/g で、地上高が増すと緩やかに下り、地上高15~16 m 部においては、約4.680 cal/g である。

引用文献

- 1) 森林資源総合対策協議会. 社団法人木材資源利用合理化推進本部, 樹皮の利用に関する調査報告, 1~90, 1971
- 2) 宮崎 信. 林産廃棄物. バイオマス—生産と変換(上), 学術出版センター(柴田・木谷編), 223~224, pp. 282, 1981
- 3) 渡辺 茂ほか. 木質系エネルギー活用促進調査 林野庁委託調査報告書, pp. 809, 1981
- 4) 宮崎 信. 森林バイオマスの変換, 木材工業 37, No. 4, 3~9, 1982
- 5) 斉藤秀樹・四手井綱英. 京都府芦生にあるスギ人工林の二次師部生産速度, 日生態会誌 31, 413~420, 1981
- 6) 重松頼生. 針葉樹樹皮の構造に関する研究, 学位論文 京農園166号, pp. 93+写30, 1965
- 7) 島地 謙・須藤彰司・原田 浩. 木材の組織 森北出版, pp. 291, 1976
- 8) 宮川 誠・藤田 稔・佐伯 浩・原田 浩. スギの二次師部構成要素の細胞壁構造, 京大演報 45, 181~191, 1973
- 9) 伊東隆夫. スギ樹皮の構造と発達, 21回木材学会大会研究発表要旨 p. 52, 1971
- 10) 只木良也・蜂谷欣二. 森林生態系とその物質生産, わかりやすい林業研究解説シリーズ 林業科学技術振興所, 29, pp. 64, 1968
- 11) 渡辺治夫. 樹皮の利用, 北海道林産技術普及協会, 35~49, pp. 112, 1962
- 12) R. Hemingway. Bark: Its chemistry and prospects for chemical utilization, in Organic Chemicals from Biomass, I. Goldstein, Eds, CRC Press Inc. 189~248, pp. 310, 1981
- 13) 幡 克美. 樹皮の化学的性質, 材料 16, 21~27, 1967
- 14) 鮫島正浩・善本知孝. スギおよびアカマツ樹皮中でのフラバノール類の蓄積ならびにその構造上の変化, 東大農演報 72, 17~29, 1982
- 15) D. Cassens. Bark properties of eight western softwoods, Forest Prod. J., 24, No. 4, 40~45, 1974
- 16) H. Scharfetter and A. Pizzi. Tannin adhesives — From laboratory to industry, XVII IUFRO World Congress, Proceedings, Div. 5, 167~175, pp. 416, 1981
- 17) 遠藤 展・中村繁夫・速水信也. 木材チップ削片化条件とその特性, 林産試月報 No. 355, 15~16, 1981
- 18) 安藤 貴・蜂屋欣二・土井恭次・片岡寛純・加藤善忠・坂口勝美. スギ林の保育形式に関する研究, 林試研報, 209, 1~76, 1968
- 19) 斎藤秀樹・四手井綱英. スギ幼齢林の一次生産力とその推定法の検討, 日林誌 55, 52~62, 1973
- 20) 斎藤秀樹・山田 勇・四手井綱英. 小径木間伐に関する研究(II). 第1回間伐1年後の林況の変化について, 京大演報 39, 64~78, 1967
- 21) 嶺 一三. やさしい林木調査2 測樹, 林業改良普及叢書20, 全国林業改良普及協会, 176~177, 1964
- 22) C. Streuli and R. Miron. Relative acidities of organic acids in pyridine and water, Anal. Chem., 30, 1978~1982, 1958
- 23) I. Abe and K. Ono. Effect of the acidity of some tropical wood extractives on the curing of the resol, 木材誌, 26, 686~692, 1980
- 24) I. Abe and K. Ono. The acidity of wood and the extractives of some tropical species, 木材誌 28, 535~540, 1982
- 25) J. Smith and A. Kozak. Thickness, moisture content, and specific gravity of inner and outer bark of some Pacific Northwest trees, Forest Prod. J., 21 No. 2, 38~40, 1971
- 26) 水本克夫・長谷川益夫・唐沢 了. 針葉樹樹皮の効率的破砕技術の確率(第1報), 樹皮の種類および水分が破砕効率, 破砕物性状に及ぼす影響, 木材と技術 富山県木材誌季報 No. 46, 3~8, 1981
- 27) 重松義則・宮川信一. 樹皮の発熱量に就て. 日本林学会大会号, 昭和14年, 427~434, 1939
- 付) 南光浩毅. 私信(若齢スギ4品種の樹高による樹幹樹皮の年輪数), 1983

Summary

Eight million cubic meters of tree bark were disposed without any use every year in Japan. Of many means of potential utilization, it is most practical to use bark as fuel in industry and at home as the local energy. To make this in reality a fundamental survey of biomass of stem bark (above ground), physicochemical nature and thermal quality of the stem bark in Sugi (*Cryptomeria japonica* D. DON) forest, were investigated in the selected normal stands at the age of 10, 20, 30, 40, and 60 years in Mie University Forest.

1. Dry biomass of Sugi stem bark

(1) Mean dry weight of the stem bark of a sample tree in the 10, 20, 30, 40, and 60 year stand were 1.3, 3.2, 5.2, 7.2, and 19.4 kg, respectively.

(2) Dry biomass of the stem bark per unit area (ha) in each stand can be obtained on a basis of dry weight of the stem bark of a sample tree and the tree density a unit area. The stem bark to the total biomass in each age stand was 5.4 t/87.2 t in 10 year stand, 7.4 t/101.8 t in 20, 9.7 t/148.4 t in 30, 10.7 t/175.1 t in 40, 16.0 t/222.4 t in 60 and expressed in the percentage as 6.2, 7.3, 6.5, 6.1, 7.2%, respectively, thus the bark ratio to the stem in a unit area in each stand is about constant, regardless of stand age.

(3) As the tree age increased, the percent of the stem bark to the stem per a sample tree, either on volume or on dry weight, decreased.

(4) Allometric relations between D. B. H. and each part of a sample tree (Stem, Living leaves, Living branches, and Bark) were examined and the following regressions are obtained:

$$\begin{array}{ll} \text{Stem} & : \text{Log } Y_1 = -1.729 + 2.844 \text{ Log } X \quad (r^2 = 0.987) \\ \text{Living leaves} & : \text{Log } Y_2 = -0.6615 + 1.307 \text{ Log } X \quad (r^2 = 0.818) \\ \text{Living branches} & : \text{Log } Y_3 = -1.393 + 1.792 \text{ Log } X \quad (r^2 = 0.857) \\ \text{Bark} & : \text{Log } Y_4 = -2.269 + 2.459 \text{ Log } X \quad (r^2 = 0.975) \end{array}$$

Here, Y_i is each part of a sample tree in kg, X is D. B. H. in cm. The stem bark biomass in University Forest were estimated by the mean D. B. H. of the stand, using the above allometric relations and agreed well with those measured.

(5) Stem bark biomass of a young stand (10 year) in University Forest was greater than the values that were estimated by the product of the bark percent and the mean volume of the same age stand in the yield table for KUMANO-area in Mie Prefecture. In thrifty stand (60 year) in University Forest, however, the bark biomass was intermediate between an estimated value from the yield table for KUMANO-area for the site class I and that for the site class III.

2. Physicochemical properties of Sugi stem bark

(1) The weight ratio of the inner bark to the whole bark of Sugi stems was varied with the ages of the stand and had a tendency to decrease with the age advanced. So the proportions of the inner barks, which have more toughness and tackiness than the outer barks, relate to the reducing property into powder of the samples, that the barks from the old aged trees could be ground easily than the youngers. The powder of the barks prepared by using a porcelain ball mill was followed the Rosin-Rammler distribution law, like as the other kinds of crushed materials.

(2) The hot-water extractives of the air-dried powder of the barks were contained in a range from 4.3 to 14.5% and those from the youngers generally showed the higher values, because of the higher proportions of the inner bark which possessed vital functions and contained the low molecular flavanols. The contents of the 1% sodium hydroxide extractives

ranging from 21.3 to 28.7%, however, could not show any definite propensity to the stand ages. Furthermore, tree to tree differences in the quantities of the extractives within the same age stand were very wide so that the variations among the individual trees in the physical and the chemical properties should be taken into consideration to the practical use.

(3) The aqueous extractives of the barks exhibited weak acidic nature ranging in pH from 3.8 to 5.2, which were similar to those in the extractives from a common wood. The buffering capacity, which yielded a simplified parameter of the acidity for the water extractives, was 0.15 to 0.20 mol/100 g. By pretreatment with a cation-exchange resin, however, the pH values of all the extractives were found to lie between 2.9 and 3.1 and their buffering capacities increased to be 0.21 to 0.33 mol/100 g. These behavior is attributed to the content of alkali and alkaline earth-metals in the sample.

(4) The chemical properties of the extractive of Karamatsu (*Larix leptolepis*) stem bark, which has been studied by many investigators for the effective utilization, were similar to but the quantities of the extractives about twice of those of the Sugi bark. From these results, Karamatsu bark is assumed to be of greater advantage than Sugi bark, in utilizing phenolic components in the bark or in making the solid fuel by the pressure molding.

3. Fuel values of Sugi stem bark

(1) The stem bark between 1.2 and 3.2 m high above ground was first air-dried and pulverized by a Wiley-mill equipped with a 12 mesh shieve. The heat value for the air-dried bark powder and its residue extracted with a hot-water was determined by the calorimeter and shown as cal/g of oven-dried sample.

a) The heat values for the outer bark are in a range of 4 900–4,950 cal/g. Those for the inner bark are rather fluctuated and about 300 cal/g less than those for the outer bark.

b) The heat values for the stem barks on young trees in a stand of 10 to 20 years exhibit about 4,800 cal/g. The values for the barks are gradually increasing with a tree age advanced and finally approaching an uppermost ones of 4,930 cal/g. This is due to a ratio of the inner bark to the whole bark: an amount of a newly developed inner bark tissue is about equal to that of a naturally falling down bark scale.

c) Hot-water extraction reduces the potential heat value in bark as much as 150–190 cal/g in compared with the corresponding unextracted bark from the stem of 30–60 year trees.

(2) The heat value of the bark in a tree at a different height above ground is determined using the bark on the stem-disks at a certain interval, which are originally used for the analysis of the stem volume, in a 40-year tree in a height of 17.55 m. The heat value for the stem bark is highest in lower part of 4,800 cal/g, decreases very slightly with the height advanced from ground and reaches about 4,680 cal/g in an upper part of 15–16 m high.

4. Potential heat value of the stem bark in Sugi plantation

The fundamental survey for the potential biomass in a form of the stem bark was carried out in the sample stands in the ages of every 10 years except 50 in Sugi plantation in Mie University Forest. The heat values of the stem bark in each stand are found, in a unit of 10^6 kcal/ha, as 26 in 10 year stand, 35 in 20 year, 47 in 30 year, 52 in 40 year, and 79 in 60 year. An example way the heat value of the stem bark in 60 year stand is equivalent to those from the fuel kerosene of 50 drums containing 200 liters. Considering the stem bark is practical which would be disposed in following works in the wood industry after felling and yarding. Thus, the stem bark is an important potential for the local energy source in the rural forest industry areas.

Appendix

Number of yearly rings in stem and inner-bark and thickness of bark at each given height for the four varieties of SUGI (presented by H. Nanko)

Variety	Height above ground (m)	No. of yearly rings	Thickness of bark (mm)		No. of yearly rings in inner bark
			Outer	Inner	
Measa	0.2	16	2.4-1.2	2.4-2.6	6-7
	1.2	13	2.0-5.0	2.2	(5+a)*
	2.2	11	2.0-3.0	2.0-2.2	(4+a)
	3.6	8	1.2-0.6	2.0	4-(3+a)
Kumo-toshi	0.2	17	1.0-1.2	2.1	(7+a)-(8+a)
	1.2	13	1.0-1.6	1.6-1.8	(6+a)
	2.2	12	1.0	1.6	(6+a)
Sambu-sugi	4.7	8	0.6	1.8	(4+a)
	0.2	14	1.0-1.6	1.8	(4+a)-(5+a)
	1.2	10	0.2-1.4	2.0	5
Yabu-kuguri	2.2	9	0.6-1.0	1.2-1.8	5
	0.2	17	0.4-1.4	2.0	(5+a)-(6+a)
	1.2	14	1.0-2.0	2.2-2.4	4
	2.2	11	0.5-2.6	2.4	5
	4.2	8	0.8-1.8	1.8	4

* As an example, (5+a) indicates a part of ring beyond 5 rings existed, Sample trees were taken on April 30, 1982 at Kansai Forest Tree Breeding Station, Department of Agriculture, Forestry and Fishery, in Uetsuki-naka, Shoo-cho, Katsuda-gun, Okayama-ken.