

広葉樹樹皮の燃料資源的基礎研究*

島地岩根・阿部 勲・武田明正・吉村 貢**

Potential of Broad-leaved tree Stem Bark for Producing Energy

Iwane SHIMAJI, Isao ABE, Akimasa TAKEDA, Mitsugu YOSHIMURA**

まえがき

わが国において、木材の生産および利用の過程で排出され廃棄される樹皮は、年間に約 800万 m²に達している。この樹皮を燃料資源として活用するために、樹皮の成型燃料化に関する研究を実施した。このうち、スギおよびヒノキの樹皮については、すでに多くの知見が得られたが^{1),2)}、広葉樹樹皮の成型燃料化に関する基礎資料は、きわめて少ない現状である。そこで、広葉樹林の林分構造と現存量を把握するとともに、広葉樹樹皮の理化学的性質、成型性、熱的性質について一貫した調査を行なった。

この研究の実施にあたり、供試材料の収集・運搬に便宣を計られた三重大学農学部附属演習林の職員各位に対し、ここに厚くお礼申し上げる。

I 調査林分の概要

この調査の対象林分は、三重県一志郡美杉村川上字平倉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8林班は小班の一部である（Fig. 1）。

この林分は、薪炭用材など低材質の樹種が多数混交する広葉樹林（以下、低質広葉樹林という）で、昭和の初め頃から昭和30年代にかけて薪炭原木が択伐されたが、その後は利用対象からはずされ現在に至っている。

調査林分の立地環境は以下のとおりである。標高：約 650m, 斜面方位：N40° W (傾斜約20°),

* 本研究は、昭和58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。

** 三重大学名誉教授, Emeritus professor of Mie University.

土壌：砂礫質に富む褐色森林土。なお、平倉演習林（標高 513m）における気象観測値の20年間平均によれば年降水量 2,500mm, 年平均気温12.4℃, 暖かさの指数94.7℃・月である。

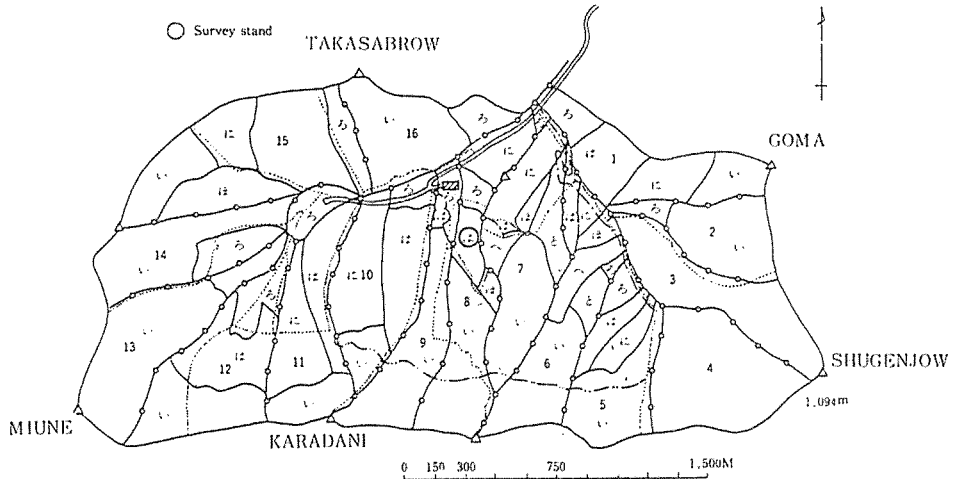


Fig. 1 Surveyed stand in Mie University Forest

II 低質広葉樹林の林分構造と現存量

II・1 調査方法

(1) 林分構造の調査方法

調査林分の林分構造を知るため、対象林分内に水平距離で10×10mの調査区を4箇所設置し、その内に出現した樹高 0.5m以上の木本類について、毎木調査を実施した。調査項目は、樹種、樹高（0.5m括約）、胸高直径（樹高 1.5m以下の林木については、根元径）である。

(2) 現存量の調査方法

調査林分（No.1区）に5×10mの調査枠を設定し、その枠内の植生を林床層（樹高2m以下、落枝を含む）、下層（樹高2～9m）、上層（樹高9m以上）の順に地際で伐採した。林床層については、全樹種込みの枝付き幹、樹皮、葉および落枝の4部分、下層と上層については、樹種ごとに、幹、幹の樹皮、枝（種実を含む）および葉の4部分の生重量を測定したのち、各部分の試料の含水率から各乾重を求めた。このほか、調査林分に介在する樹高9m以上の広葉樹を任意に選木伐倒し、各部分の乾重を調べた。樹高9m以上の各供試木は、樹幹解析法にしたがい区分求積を行なった。なお、枠内の植生は、林分構造調査における生態学的な層区分によらず、上記の3層に区分した。調査した広葉樹のうち、ミズナラは11林班ろ小班の天然生林で採取したもので

ある。

II・2 結果と考察

(1) 低質広葉林の構成樹種

Table 1 に示したように、いずれの調査区においても、100m²あたり、ほぼ30~40種の林木が生育している。各樹種ごとの断面積合計にもとづく優占種は、イタヤカエデ、コハウチワカエデ、ヤマモミジ、イロハカエデ、ウリハダカエデなどの多様なカエデ類、ミズメ、クマシデ、アサダ、ヤマザクラ、ケヤキなどの落葉広葉樹とモミ、スギなどであった。

Table 1 Dominant species, basal area, no. of individuals, of the stands studied

Plot	Dominant species	No. of species	No. of trees	Basal area
		/100m ²	/ ha	m / ha
1	URIHADAKAEDE ¹⁾	40	17,900	16.6 (72.6%)
	SUGI ²⁾			
	ITAYAKAEDE ³⁾			
	KOHAUCHIWAKAEDE ⁴⁾			
	YAMAMOMIJI ⁵⁾			
2	MOMI ⁶⁾	30	15,900	28.0 (83.5%)
	MIZUME ⁷⁾			
	YAMAZAKURA ⁸⁾			
	MIZUKI ⁹⁾			
	KUMASIDE ¹⁰⁾			
3	MIZUME ⁷⁾	29	18,000	17.0 (80.8%)
	ASADA ¹¹⁾			
	MIZUKI ⁹⁾			
	YAMAMOMIJI ⁵⁾			
	KOHAUCHIWAKAEDE ⁴⁾			
4	MIZUME ⁷⁾	39	19,200	27.5 (89.4%)
	URIHADAKAEDE ¹⁾			
	ASADA ¹¹⁾			
	EGONOKI ¹²⁾			
	KOHAUCHIWAKAEDE ⁴⁾			

1) *Acer rufinerve* Sieb. et Zucc. 2) *Cryptomeria japonica* D. Don. 3) *Acer mono* Maxim.
 4) *Acer sieboldianum* Miq. 5) *Acer palmatum* var. *mastumurae* (Koidz.) Makino
 6) *Abies firma* Sieb. et Zucc. 7) *Betula grossa* Sieb. et Zucc. 8) *Prunus jamazakura* Sieb. et Zucc.
 9) *Cornus controversa* Hemsley 10) *Carpinus japonica* Blume 11) *Ostrya japonica* Sarg.
 12) *Styrax japonica* Sieb. et Zucc.

Figures in parenthesis were the percentage of basal area of dominant species to total basal area.

これらの樹種は、各調査区における断面積合計の70%以上を占めると同時に、高木層の構成種でもある。

また、亜高木層以下の下層を構成する林木として、アブラチャン、クロモジ、カマツカ、ウワミズザクラ、キブシ、タンナサワフタギ、ヤブムラサキ、ムラサキシキブ、エゴノキ、コバノガマズミなどが目立っていた。

上記の樹種の多くは、わが国の暖温帯上部から冷温帯下部にかけて広く分布し、こういった地域の山村に残されている低質広葉樹林（旧薪炭林など）の主要な林木となっている。

(2) 調査林分の垂直的構造

調査林分の垂直的構造を、各調査区内の林木の樹高に関する対称型差分図³⁾によってしらべた。

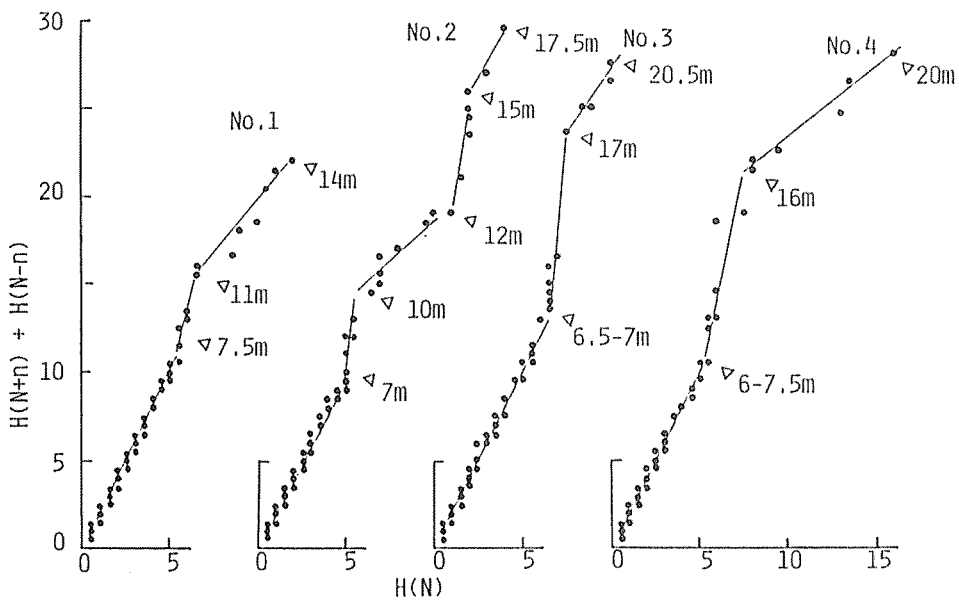


Fig. 2 Symmetric finite difference diagram of the stands studied
 $H(N), H(N-n)$: Tree height
 $N, N-n$: The order of tree height

Fig. 2 に示したように、本林分の垂直的構造は、必ずしも単純なものではなかった。これは、本林分が過去に薪炭林などとして複雑な取り扱いを受けたことによると思われる。

しかし、調査区No. 3, No. 4 にみられるように、基本的には、約14m以上20mに達する高木層と、7~13m 程度の高さをもつ亜高木層、6 m 以下の低木層の三層からなっている。高木層の林木のうち、樹高が20mに達するものは、薪炭材を択伐した際の残存木であろう。

(3) 層別・部分的乾重

各層における幹、樹皮、枝および葉の乾重を Table 2 に示した。

Table 2 Dry weight of stem, branch and leaf at each storey in a sample area (5 × 10m)

Classification (Tree height)	Dry weight (kg)				
	Stem	Bark	Branch	Leaf	Total
Over storey (9 - 11m) * 1	30.015	5.412	17.272	2.020	54.719
Under storey (2 - 9 m) * 2	34.273	5.174	12.824	2.327	54.598
Floor storey (0 - 2 m) * 3	0.075	0.008	10.050*4	0.140	10.273
Total	64.363	10.594	40.146	4.487	119.590

* 1 Contained 3 species (Tree age 30-33 year, Diameter breast height 6 - 11cm).

* 2 Contained 22 species. * 3 Contained many species. * 4 Litter.

上層は、樹齢約30年の3樹種（コハウチワカエデ、ヤマモミジ、ケヤキ）、下層は22樹種（主要樹種は、クロモジ、ウワミズザクラ、カマツカ、タンナサワフタギ、ムラサキシキブ）、林床層は、クロモジ、タンナサワフタギ、ミカエリソウなど多数の樹種で構成された。上層および下層の部分別乾重は、幹が30.0~34.3kg、樹皮が5.1~5.4kg、枝が12.8~17.3kg、葉が2.0~2.3kgで、それぞれ差が少なく、合計乾重は、上層が54.7kg、下層は54.6kgで、ほぼ等しかった。これに対し、林床層においては、幹が0.075kg、樹皮が0.008kg、落枝が10.050kg、葉は0.140kg、合計乾重は10.3kgであった。林床層では、落枝乾重が圧倒的に多かったが、落枝量は年変動が大きく場所的にも差があることから^{4),5)}、さらに調査する必要がある。林床植生だけの全乾重は、僅か0.223kgにとどまり、上・下層の各合計乾重よりはるかに少なかった。

上記結果にもとづき求めた層別・部分別のha当りの現存量は、Table 3に示したとおり、上・

Table 3 Dry biomass of each part at height class in a unit area (ha)

Height class (Tree height)	Dry biomass (t)				
	Stem	Bark	Branch	Leaf	Total
Over storey (Above 9 m)	6.003	1.082	3.454	0.404	10.943
Under storey (2 - 9 m)	6.855	1.035	2.565	0.465	10.920
floor storey (Under 2 m)	0.015	0.002	2.010	0.028	2.055
Total	12.873	2.119	8.029	0.897	23.918

下層では、幹>枝>樹皮>葉の順に多く、林床層では、落枝>葉>幹>樹皮の順であった。また、層別のha当り合計現存量は、上層と下層が、それぞれ11t、林床層が2.1tで、総現存量は、24tと推定された。このうち、樹皮現存量は、上層1.1t、下層1.0t、林床層0.002t、合計現存量は2.1tであった。さらに、各層における樹皮現存率（樹皮現存量/全現存量×100）は、

それぞれ 9.4%, 9.5%, 0.1%, 9.2%となった。これらのことから、林床層における樹皮現存量は少なく、成型燃料原料として期待しうる量ではないことが推察された。むしろ林床層は植生保続のうえから残存させることが得策であると思われ、平倉演習林の低質広葉樹林においては、上・下層に現存するha当り約2tの樹皮が利用対象になるものと考えられる。さらに、樹皮だけでなく、幹および枝の成型燃料化についても検討する必要があるように思われる。

(4) 広葉樹の樹皮率

広葉樹(上層9樹種, 下層22樹種, 林床層全樹種込み)の幹および樹皮ならびに樹皮率(幹の樹皮乾重/皮付き幹乾重 \times 100)をTable 4に示した。

上層9樹種の各乾重は、樹齢119年のミズナラ(幹575kg, 樹皮63kg)を最多として、樹齢50~60年のアサダ, ミズメ, ハリギリ, エゴノキは、幹109~180kg, 樹皮7.5~30.2kg, 樹齢30~41年のリョウブ, コハウチワカエデ, ヤマモミジ, ケヤキは、幹5.7~35.7kg, 樹皮0.3~3.4kgにわたったが、各乾重は、樹齢と樹体の大きいものほど多いようにみえる。しかし、上記各樹種の樹皮率は、リョウブの最低2.4%から最高はケヤキの20.4%にわたり、樹種により異なった。これは、各樹種の実態によるものと考えられる。また、ミズメの樹皮率は8.1%と14.3%で、同じ樹種でも樹皮率が異なったことは、それぞれの幹の完満度に関係し、幹の肥大にともない樹皮は比例的に増大しないためと思われる。さらに、上層9樹種の地上高における樹皮率は、米国産のアスペンなどと同様⁶⁾、いずれも地上部から梢頭部にむかって大きくなる傾向が認められた(Fig. 3)。つぎに、下層における22樹種の幹および樹皮乾重は、それぞれ、0.004~15.1kg,

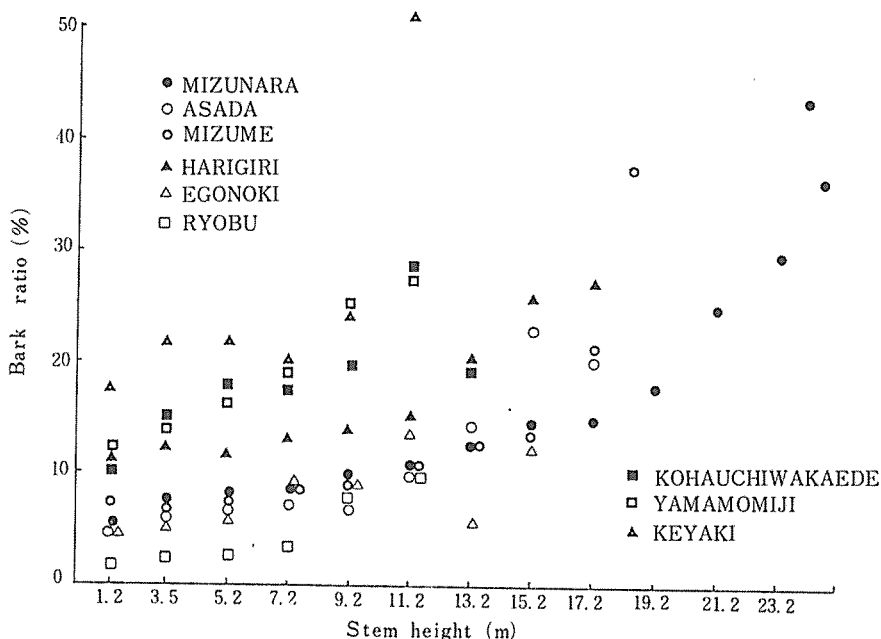


Fig. 3 Relationship between bark ratio and stem height of broad-leaved trees

Table 4 Dry weight and bark ratio of broad-leaved tree

Sample tree	Tree age (year)	Tree height(m)	D.B.H* ¹ (cm)	Dry weight (kg)		Bark ratio* ² (%)
				Stem	Bark	
MIZUNARA (1)	119	24.8	42.0	575.229	63.021	9.9
ASADA (2)	57	16.4	23.4	179.603	13.085	6.8
MIZUME (3)	59	20.1	22.0	123.532	20.616	14.3
MIZUME(3)	57	16.6	34.4	173.835	15.270	8.1
HARIGIRI(4)	60	17.8	21.6	167.666	30.150	15.2
EGONOKI (5)	51	13.4	21.0	108.913	7.584	6.5
RYOBU (6)	41	10.8	11.5	35.680	0.869	2.4
KOHAUCHIWAKAEDE (7)	31	10.8	10.6	14.905	2.382	13.8
YAMAMOMIJI (8)	33	9.2	9.4	9.373	1.556	14.2
KEYAKI (9)	30	9.8	6.5	5.737	1.474	20.4
Over storey (9 species) Total	30-119	9.2-24.8	6.5-42.0	1394.473	156.007	10.1
KUROMOJI (10)				15.117	2.558	14.5
UWAMIZUZAKURA (11)				8.288	1.004	10.8
KAMATSUKA (12)				2.567	0.328	11.3
TANNASAWAHUTAGI (13)				2.068	0.238	10.3
MURASAKISHIKIBU (14)				1.611	0.145	8.3
ABURACHAN (15)				1.181	0.174	12.8
KIBUSHI (16)				1.316	0.127	8.8
GAKUUTSUGI (17)				0.245	0.033	11.9
GAMAZUMI (18)				0.740	0.114	13.3
SHIKIMI (19)				0.245	0.074	23.2
SARUNASHI (20)				0.411	0.245	37.3
SHIRODAMO (21)				0.094	0.027	22.3
MITSUBAAKEBI (22)	- - -	2.0-9.0	- - -	0.117	0.045	27.8
YABUMURASAKI (23)				0.125	0.016	11.3
IWAGARAMI (24)				0.096	0.031	24.4
MOMI (25)				0.006	0.005	45.5
KEYAKI (9)				0.031	0.006	16.2
KOBANOGAMAZUMI (26)				0.009	0.002	18.2
URIHADAKAEDE (27)				0.003	0.0005	14.3
NOIBARA (28)				0.002	0.0003	13.0
NAGABAMOMIJIICHIGO (29)				0.0004	0.0005	55.6
KOBANOKUROUMEMODOKI (30)				0.001	0.0004	28.6
Under storey (22 species) Total				34.273	5.1734	13.1
Floor storey (many species) Total	- - -	0.0-2.0	- - -	0.075	0.008	9.6

(1) *Quercus mongolica* var. *grosse-serrata* Rehd. et Wils. (2) *Ostrya japonica* Sarg. (3) *Betula grossa* Sieb. et Zucc. (4) *Kalopanax pictus* Nakai (5) *Styrax japonica* Sieb. et Zucc. (6) *Clethra barbinervis* Sieb. et Zucc. (7) *Acer sieboldianus* Miq. (8) *Acer palmatum* var. *matsumurae* Koidz. (9) *Zelkova serrata* Makino (10) *Lindera umbellata* Thunb. (11) *Prunus garayana* Maxim. (12) *Pourthiaea villosa* var. *laevis* Stapf. (13) *Symplocos coreana* Ohwi (14) *Callicarpa japonica* Thunb. (15) *Parabenzoin praecox* Nakai (16) *Stachyurus praecox* Sieb. et Zucc. (17) *Hydrangea scandens* Seringe (18) *Viburnum dilatatum* Thunb. (19) *Illicium religiosum* Sieb. et Zucc. (20) *Actinidia arguta* Planch. (21) *Neolitsea sericea* Koidz. (22) *Akebia trifoliata* Koidz. (23) *Callicarpa mollis* Sieb. et Zucc. (24) *Schizophragma hydrangeoides* Sieb. et Zucc. (25) *Abies firma* Sieb. et Zucc. = (coniferous tree). (26) *Viburnum erosum* Thunb. (27) *Acer rufinerve* Sieb. et Zucc. (28) *Rosa multiflora* Thunb. (29) *Rubus palmatus* Thunb. (30) *Rhamnus japonica* var. *microphylla* Hara.

*¹ Diameter at breast height. *² Bark ratio = Bark / Stem + Bark × 100 .

0.0003 ～ 2.6kgにわたった。これは、各樹種の成立本数と樹体の大きさなど、分布様態に関連するものと推察される。また、各樹皮率は、8.3～55.6%にわたり樹種ごとに異なったが、これは、おもに各樹種の特性によるものと考えられる。そこで、上・下層とも全樹種込みの樹皮率を求めた。その結果、上層は10.1%、下層は13.1%となった。林床層（多数種込み）は9.6%で全層平均は10.9%であった。したがって、平倉演習林の低質広葉樹林における樹皮現存量は、皮付き幹現存量の約10%と見積ることができよう。

Ⅲ 広葉樹樹皮の物理化学的性質および成型性

低利用森林生物資源の固形燃料原料としての特性を把握するため、広葉樹樹幹樹皮の物理化学的性質および成型性を検討し、主要な針葉樹樹皮と比較した。

Ⅲ・1 方法

調査地内に生育している樹高約2m以上の広葉樹については、樹幹部の含水率、容積密度数、樹皮率、樹皮含水率を測定したのち、主として地上高1.2～3.2mの樹皮について、樹皮厚、内樹皮率、粉碎性、溶媒抽出率、発熱量および圧縮成型性を以下に示す方法で測定した。

樹皮厚および内樹皮率：気乾樹皮の断面厚さを倍率10倍の万能投影機で測定し、内・外皮厚から内樹皮率を算出した。なお、測定精度は1/1,000mm、測定個数は10個である。

粉碎性：長さ50mm、幅約30mmに切断した気乾樹皮をウイレーミル（12メッシュ丸孔スクリーン付き）またはボールミルで粉碎し、約10gの試料を用いタイラー標準篩で粒度分布を測定した。なお、ボールミル粉碎条件は、前報試験結果^{1),2)}を勘案して試料量約30g、粉碎時間8時間とした。

溶媒抽出率とpH：精秤したウイレーミル粉碎気乾試料約1gに熱水100mlまたは100mlの1% NaOH溶液を加え、それぞれ3時間または1時間煮沸した後、1G4ガラスフィルターでろ過、中和、洗浄後秤量して抽出率を算出した。また、試料3gに150mlの脱イオン水を加え、3時間煮沸した後のろ液pH（25℃）を測定した。さらに圧縮成型性を検討する試料については、n-ヘキサン、メタノール、1% NaOH溶液による逐次抽出率を求めた。抽出には約10gの気乾試料を用い、n-ヘキサンおよびメタノールでそれぞれ16時間逐次抽出したのち、1% NaOH溶液で1時間処理して各抽出率を求めた。

発熱量：熱量測定には、ウイレーミルによって調製した気乾粉末試料数百mg、熱研式断熱熱量計（吉田製作所）、熱量測定用安息香酸を用い、前報^{1),2)}と同一手法によって高発熱量を算出した。また、含水率測定に用いた反復2試料（気乾で各約1g）を合せて磁製ルツボに入れ、絶乾重量を得た後、電気炉によって250～300℃まで徐々に加熱し、煙が出なくなってから、やや急速に600℃に上げ同温度を約2時間保って灰化して灰分量を測定した。

圧縮成型性：ウイレーミルで微粉化した気乾試料40gを予備加熱した直径100mmのシリンダー型成型用治具に均一に散布し、一定条件下で加熱成型して厚さ約5mmの成形板を作製した。ついで、成形板の内部結合力から各樹皮の成型性を類推するため、標準条件下で調湿した6cm平方

の試験片の両面をサンディングした後、エポキシ系樹脂（住友ベークライトKK製スミタックEA-268）を用いて強度試験用金属治具に接着し、平面引張り強さを測定した。

なお、前報の予備試験結果²⁾を参考にし、下記の2段加圧条件下で成型した。

成型温度；200±5℃

成型圧力-成型時間；50kg/cm²-5min→10kg/cm²-25min

III・2 結果と考察

(1) 樹皮厚と内樹皮率

内樹皮にはより多くの比較的低分子のポリフェノールを含有していることなど、化学的組成はもとより組織的にも外樹皮と大きく異なるため、内樹皮率は樹皮利用の基礎資料として重要である。

樹皮厚および厚さ基準による内樹皮率の測定結果を Table 5 に示す。供試した14樹種の樹皮厚

Table 5 Thickness of stem bark of various hardwoods

Species	Age (yr)	DBH* ¹ (cm)	H* ² (m)	Thickness (mm)		Inner bark ratio (%) (A/B)
				Inner bark (A)	Whole bark (B)	
TANNASAWAFUTAGI * ³	—	—	—	0.605	0.704	86.02
KIBUSI * ³	—	—	—	0.507	0.711	79.47
KUROMOJI * ³	—	—	—	0.877	1.001	87.14
GAMAZUMI * ³	—	—	—	0.926	1.027	87.59
YAMAMOMIJI * ³	33	9.4	9.2	1.012	1.208	83.87
KAMATUKA * ³	—	—	—	1.079	1.214	87.76
KOHAUTIWAKAEDE * ³	31	10.6	10.8	1.117	1.358	81.81
UWAMIZUZAKURA * ³	—	—	—	1.266	1.518	83.44
KEYAKI * ³	30	6.5	9.8	1.385	1.573	87.85
ASADA	57	23.4	16.4	1.582	2.663	59.18
MIZUME(2) * ³	59	22.0	20.1	2.355	2.670	88.33
EGONOKI	51	21.0	13.40	2.359	2.723	87.22
MIZUME(1) * ³	57	34.4	16.63	2.503	3.037	84.60 (81.85* ⁴)
ASUNARO(2)	—	—	—	3.706	4.718	79.52
ASUNARO(1)	—	—	—	7.972	12.180	65.38
MIZUNARA	119	42.0	24.75	10.733	15.399	67.71

*1 : Diameter breast height

*2 : Tree height

*3 : Tree of coppice

*4 : based on dry-weight

は、タンナサワフタギの 0.70 mm からミズナラの 15.40 mm まで幅広いが、低質広葉樹林構成樹種では、1.0～1.5mm のものが多く、また内樹皮率は 80～90% であった。なお、ミズメ樹皮の厚さ基準および絶乾重量基準で表示した内樹皮率は、それぞれ 84.60% および 81.85% となり測定手法による差異は僅少であることから、広葉樹樹皮の内樹皮率はスギおよびヒノキ樹皮（絶乾重量基準；35～68%）よりも高いものといえる。

(2) 粉砕性

スギ、ヒノキなどの針葉樹樹皮の粉砕性は、粉砕機の種類によって異なる挙動を示すことを報告したが^{1),2)}、広葉樹でも同様の傾向が認められた。含水率 8～14% の気乾樹皮を 8 時間ボールミル粉砕した結果、Fig. 4 に示すように殆どの広葉樹樹皮は易粉砕性樹皮であるスギと難粉砕性のヒノキとの中間に位置するが、ケヤキ、ミズナラ樹皮は特に粉砕が困難であることが理解される。一方、ナイフカッター型のウイレーミルでは、ヒノキ樹皮はスギより粉砕し易く、供試広葉樹樹皮はいずれもスギより細碎物生産量は少ない (Fig. 5 参照)。いずれにせよ、スギ樹皮以外のボールミル粉砕物では、840 μ m 以上 (20 mesh ふるい上) の粗大部分が 15～80% となるため、じん皮繊維（師部繊維）を多く含む樹皮の粉砕にはナイフカッター型が適していることが理解される。

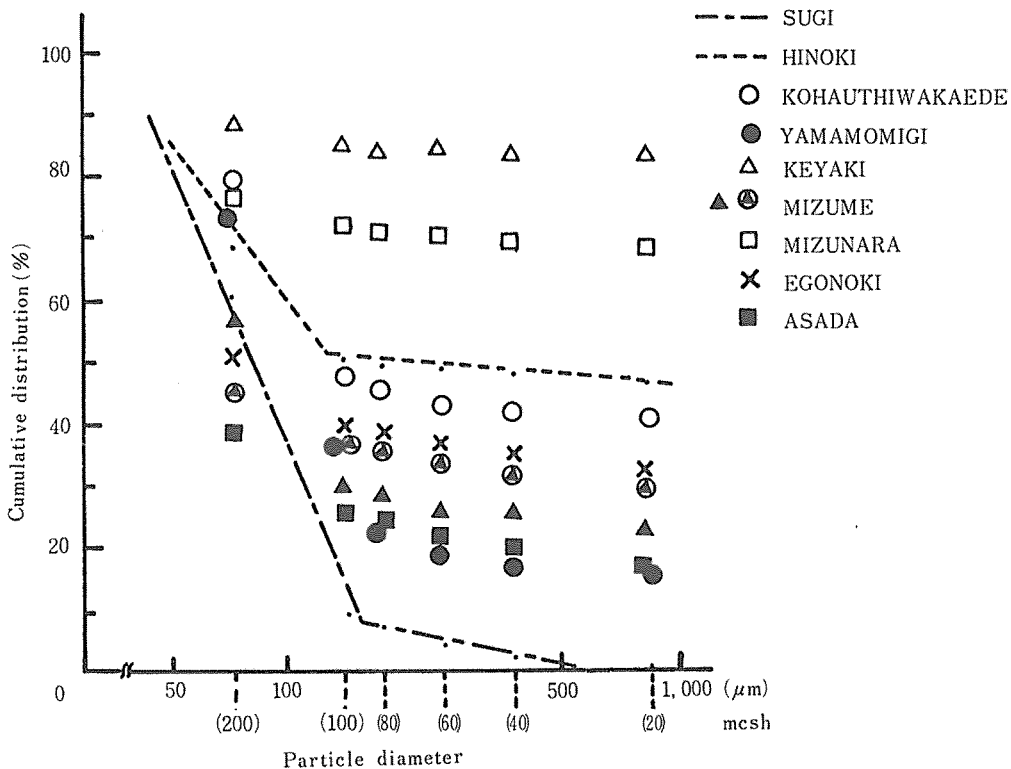


Fig. 4 Cumulative distribution of particle diameter for various stem barks ground by a porcelain ball mill

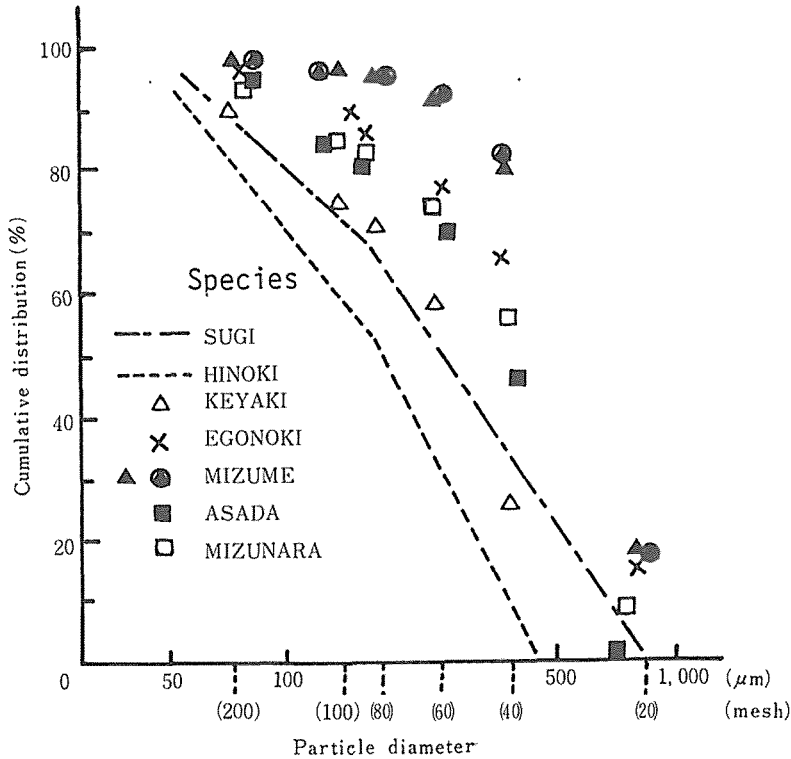


Fig. 5 Cumulative distribution of particle diameter for various stem barks ground by a Wiley mill

(3) 溶媒抽出率と pH

樹皮などの木質系バイオマスを接着剤無添加の条件で成型し固形化するためには、熱と圧力を必要とし、その成型性には材料の組織構造および化学成分の種類と含有量が影響するものと推定される。即ち、化学的には非結晶性構成成分の熱可塑性と可塑性物質の常温下での凝集力が大きな役割をはたしている。Goring によって、木材主要成分であるリグニン、ヘミセルロースおよびセルロースの熱軟化温度は、乾燥試料でそれぞれ 130～190℃、170～180℃、230℃前後であること、10～20%の含水状態にするとリグニンは70～130℃、ヘミセルロースは50～60℃で軟化するようになるが、結晶部分を有するセルロースに対する水の可塑性効果は認められないことが報告されている⁷⁾。樹皮は木質部よりセルロース含有量が少なく20～40%程度であるため、当然非結晶性物質を多く含み可塑性も高く、成型性は木質部より良好である。

Table 6 は可塑性物質の含有量に関連し成型性に影響すると推定される熱水および1%苛性ソーダ抽出率の測定結果を示す。供試試料のうちスギは最も抽出物含有量が少なく、カラマツ、キブシ、ムラサキシキブ、サルナシは抽出物の多い樹種であった。また、低分子の酸性成分を含有

Table 6 Extractives content and pH of stem barks

Species	Soluble in		pH of H ₂ O Solut'n
	hot-water (%)	1 % NaOH(%)	
SUGI	4.34~14.48	21.26~28.68	3.8~4.4
HINOKI	12.41~20.72	42.04~51.46	4.0~4.4
KARAMATSU	24.83~28.78	40.65~58.16	—
KIBUSI	19.38	61.02	4.75
MURASAKISIKIBU	13.00	58.44	5.50
SARUNASHI	9.80	57.39	5.35
UWAMIZUZAKURA	7.23	50.75	4.63
KUROMOJI	8.75	49.23	5.16
GAMAZUMI	10.82	46.45	4.85
KAMATSUKA	9.59	45.77	5.03
TANNASAWAFUTAGI	15.31	44.47	4.70
KOHAWTIWAKAEDE	9.74	37.74	4.87
KEYAKI (1)	10.51	35.18	5.47
KEYAKI (2)	7.76	25.64	—
MIZUME (1)	8.73	35.09	4.84
MIZUME (2)	5.75	28.33	—
YAMAMOMIJI	5.79	34.14	5.65

Table 7 Extractives content of stem barks for molding examination

Species	Soluble in		
	n-Hexan (%)	Methanol (%)	1 % NaOH(%)
SUGI	0.58	5.80	42.11
HINOKI	2.11	6.00	32.78
KARAMATSU	1.67	29.65	27.66
ASADA-2	0.75	5.45	38.54
MIZUKI	0.78	15.35	39.39
MIZUME	1.59	4.22	32.61
KEYAKI	0.21	3.23	23.70
RYOUBU	1.60	19.60	37.83
HARIGIRI	1.29	6.16	32.47
EGONOKI	1.77	11.61	34.41

する熱水抽出液の pH は 3.8~ 5.7 の範囲であり、木質部と同様弱酸性であって特異性は認められなかった。Table 7 の逐次抽出物含有量のうち、特にカラマツ、ミズキ、リョウブ、エゴノキ樹幹樹皮に比較的多量のメタノール抽出物が含有していた。

(4) 発熱量 (高発熱量)

各試料とも2～4回の熱量測定を行い、平均をもって各樹皮の発熱量(cal/gOD)とし、灰分量は絶乾試料に対する比率で表示した。

灰分含有率と発熱量との関係を Fig. 6 に示したが、広葉樹16樹種の樹皮粉19試料は明らかに

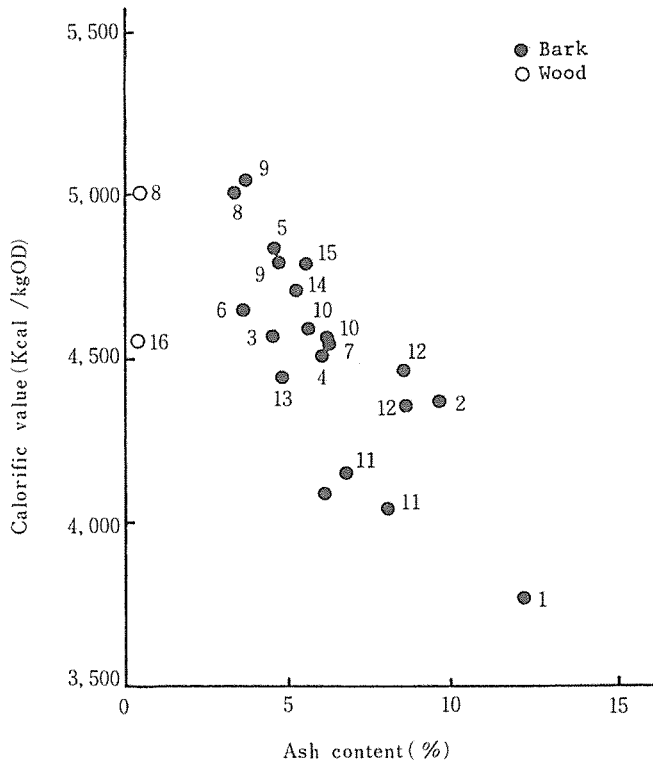


Fig. 6 Relationship between ash content and calorific value of woody biomass

- | | |
|-------------------|--------------------|
| 1 TANNASAWAFUTAGI | 9 MIZUME |
| 2 KAMATSUKA | 10 YAMAMOMIJI |
| 3 SARUNASHI | 11 KEYAKI |
| 4 KIBUSHI | 12 KOHAUCHIWAKAEDE |
| 5 UWAMIZUZAKURA | 13 ASADA |
| 6 MURASAKISHIKIBU | 14 EGONOKI |
| 7 GAMAZUMI | 15 MIZUNARA |
| 8 KUROMOJI | 16 BUNA |

灰分量の増加に伴い発熱量が減少する負の直線関係を示している。発熱量の最高はミズメ樹皮で、5,010 cal/g、灰分含有率 3.36 %、最低はタンナサワフタギ樹皮で、3,799 cal/g、灰分含有率12.28 %であった。

発熱量におよぼす抽出成分の影響を検討するため、7樹種の熱水抽出処理樹皮粉（タンナサワフタギ、キブシ、ムラサキシキブ、ガマズミ、ヤマモミジ、ケヤキ、コハウチワカエデ）を供試した結果、タンナサワフタギの一樹種を除き、熱水抽出率の大小にかかわらず原試料とその発熱量は殆ど変わりがなかった。タンナサワフタギ樹皮粉は熱水処理によって、15.31 %の抽出物を失い、残さ試料の発熱量は 4,242 cal/g で、443 cal/g も増加し、他の樹皮とほぼ同じ値となった。

スギ（発熱量； 4,744～ 4,961 cal/g）およびヒノキ（発熱量； 4,811～ 5,103 cal/g）の針葉樹樹皮と比べて広葉樹樹皮は一般的に発熱量は低く、また熱水抽出処理の影響は小さいといえる²⁾。

(5) 圧縮成型性

樹種による圧縮成型特性は、一定条件下で調製した成型板の垂直はく離抵抗値から判定した。Table 8 には、ウイレーミル粉碎試料の最大粒径とはく離抵抗値を示したが、粒径は 100～ 700 μm 、強度はスギ樹皮の13.3 kgf からカラマツ、エゴノキの 259～ 352 kgf まで大きく異なっ

Table 8 Particle diameter in the most frequency of flour prepared by a Willey mill (X_{max} : μm)* and tensile strength perpendicular to the surface of the boards made from the flour of stem bark (F : kgf/6 \times 6 cm)*

Species	X_{max}	F	Species	X_{max}	F
SUGI	155	13.3	ASADA-2	90	26.4
HINOKI	89	78.1	MIZUKI	269	88.0
KARAMATSU	244	258.8	MIZUME	412	89.3
			KEYAKI	240	92.5
			ASADA-1	278	95.8
			RYOUBU	—	114.2
			HARIGIRI	—	126.1
			KUROMOJI	704	154.1
			HOUNOKI	131	188.6
			EGONOKI	278	351.6

* X_{max} : Calculated by Rosin-Rammler's rule

Molding conditions: 200°C, 50kg/cm²-5 min \rightarrow 10kg/cm²-25 min

いた。このような、成型特性には試料粉体の形状や構成組織の種類も影響するものと考えられるため、一義的に化学成分との関連性を論じるのは困難であるが、抽出成分量との相関性は高いものといえる。いずれにせよ、供試試料中最も強度の低いスギ樹皮はカラマツ、エゴノキの $\frac{1}{20}$ ~ $\frac{1}{30}$ のはく離抵抗値を示すにとどまり、針葉樹、広葉樹を問わず成型特性の樹種依存性が極めて大きいことは明白である。しかし、その強度発現の現因を明らかにするためには、さらに詳細な成分分析を必要とする。

以上の試験によって、最も一般的な造林樹種であるスギおよびヒノキ樹皮では、後者のほうが前者の約6倍の強度を示すことが明かとなったため、両樹種の混合比による影響を検討した結果をFig. 7に示したが、難成型性試料であるスギ樹皮もヒノキ試料の混入によって大きく改善され、原料によってはバイオマス系易成型性試料のみならず炭化水素系熱可塑樹脂の混入が効果的であることを示している。

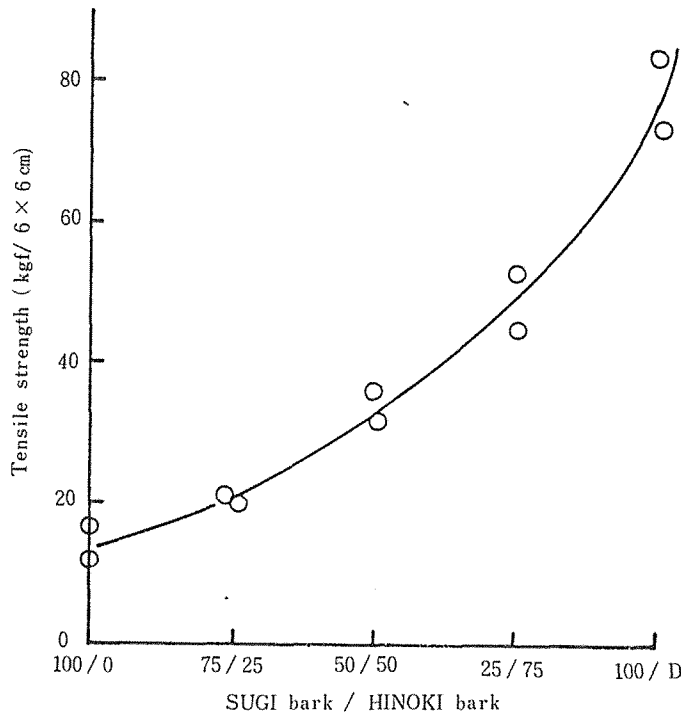


Fig 7 Relationship between mixing ratio of HINOKI bark flour to SUGI bark and tensile strength perpendicular to the surface of the boards

IV まとめ

この研究により、平倉演習林における低質広葉樹林の林分構造と現存量、各種広葉樹樹皮の諸性質を明らかにした。本林分はわが国の温帯域にみられる代表的な樹種構成を示しており、ha当たりの樹皮利用可能量は約2 tonと推定された。また樹皮の成型燃料化にあたり特に重視すべき点は、樹種によって物理的、化学的性質が大きく異なることを見出したことにある。したがって、今後さらに多くの樹種について、成型燃料化に關与する物理的、化学的諸性質を詳細に解明していく必要がある。また、低質広葉樹林のバイオマス資源活用のうえからは、樹皮のみならず幹や枝条材についても、成型燃料化原料としての諸特性に關する基礎資料の蓄積を図らねばならない。

要 約

森林未利用資源の一つである樹皮を成型燃料として活用するために、三重大学農学部附属演習林における低質広葉樹林の林分構造と現存量および広葉樹樹皮の諸性質に關する一連の基礎研究を実施した。

1 低質広葉樹林の林分構造と現存量

(1) 林分構造

かつて薪炭林として利用されていた低質広葉樹林には、ほぼ30~40種の木本類が生育しており、これらの樹種が、高さ14mから20mに達する高木層、7~13mの亜高木層、6m以下の低木層の三層を形成していた。高木層の構成種としては、コハウチワカエデ、イタヤカエデ、ヤマモミジ、ケヤキ、ミズキ、クマシデ、ヤマザクラなどが優占種であった。亜高木層ならびに低木層においては、エゴノキ、カマツカ、クロモジ、アブラチャン、ヤブムラサキなどが優占種であった。

(2) 現存量

層別刈取法により調査した部分別の乾重は、上・下層では、幹30.0~34.3kg、樹皮5.2~5.4kg、枝12.8~17.3kg、葉2.0~2.3kgで、各層合計乾重は、上層54.7kg、下層54.6kgであった。林床層では、幹0.075kg、樹皮0.008kg、落枝10.050kg、葉0.140kgで、下層合計乾重は10.3kgであった。各層におけるha当りの合計現存量は、上・下層がそれぞれ11t、林床層が2tで、ha当りの総現存量は24tと算定された。このうち樹皮現存量は、上層1.1t、下層1.0t、林床層0.002tであったが、成型燃料化にあたっては、上・下層に現存するha当り約2tの樹皮を利用対象とし、林床層は植生保続のうえから残存させることが得策であると考えられた。

(3) 樹皮率

広葉樹の樹皮率は2.4~55.6%にわたり、樹種により、同じ樹種でも異なった。そのため、各層における全樹種込みの樹皮率を求めた。その結果、上層10.1%、下層13.1%、林床層9.6%、平均10.9%となった。したがって、平倉演習林の低質広葉林における樹皮現存量は、皮付き幹現存量の約10%であることが推察された。

2 樹幹樹皮の物理化学的性質と成型性

(1) 樹皮の粉碎性

材料の韌性に影響する内樹皮率は樹種によって異なるが、大部分の広葉樹樹幹樹皮の内樹皮率は針葉樹樹皮より大きく、80~90%であった。

広葉樹樹皮の粉碎性は、針葉樹の場合と同様、原料の韌性、剛性および粉碎機の種類によって異なる。ウイレーミル試験によると、針葉樹樹皮は広葉樹樹皮より粉碎され易いが、他機種では異なった結果がえられ、特にヒノキ、ケヤキ、ミズナラ樹皮など韌性組織の多い試料は粉碎が困難であった。

以上の試験によって、物性の大きく変化する木質系試料ではカッター型粉碎機の方が適当しているものと結論づけられる。

(2) 樹皮の抽出成分含有量と pH

気幹樹皮の熱水および1% NaOH 抽出成分含有率は、それぞれ 4.3~28.8%、および 21.3~61.0%であり、特にカラマツ、キブシ、ムラサキシキブ、サルナシには多くの抽出物が含有している。また、熱水抽出液は pH 3.8~ 5.7の弱酸性を示し、針葉樹樹皮や一般木材のそれと類似していた。

なお、加圧成型試験に供した試料のうち、カラマツ、ミズキ、リョウブ、エゴノキ樹皮には多量のメタノール抽出物を含有していた。

(3) 樹皮の発熱量

一般的に、木材質の発熱量は 4,500 kcal/kg であるが、樹皮は灰分および抽出物含有量が大きく異なるため、発熱量の樹種による変動も大であると推定される。しかし、大部分の広葉樹樹皮の発熱量は 4,000~ 5,000 kcal/kg であり、針葉樹樹皮より約 400 kcal/kg 小さな値を示した。

また、樹皮の灰分含有率は木質部より大であり、灰分含有率と発熱量との間には負の相関関係が認められた。

(4) 樹皮の加圧成型性

木質系バイオマスには、非結晶性成分を含んでいるが、これら非結晶性物質は熱可塑性を有しているため、加圧加熱によって自着性を示し、高密度物質とすることができる。

ペレット状固形燃料化の難易を判定する指標をえるため、ウイレーミルと粉碎試料から 5 mm厚のボードを作製し、その平面引張り強さを測定した。

試験の結果、スギ樹皮は最も成型性に劣り、カラマツ、エゴノキは易成型性樹皮であり、また一般的に抽出成分量の多い試料は、成型性にすぐれていた。なお、難成型性樹皮は、適当な材料の混入によって改善することが可能である。

引用文献

- 1) 島地 岩根・吉村 貢・阿部 勲・武田 明正; スギ (*Cryptomeria japonica* D. DON) 樹皮の燃料資源的基礎研究, 三重大演報(12), 1~25, 1983
- 2) 島地 岩根・吉村 貢・阿部 勲・武田 明正; ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* SIEB. et ZUCC.) 樹皮の燃料資源的基礎研究, 三重大演報(13), 155~174, 1984
- 3) 山倉 拓夫; 植物の個体重・直径・樹高などの頻度分布に関する研究, 106-128, 1981
- 4) 酒井 正治・堤 利夫; 温帯落葉広葉樹林内の2タイプの土壌における炭素収支(I) 落葉落枝量, 日林誌68(1), 1~9, 1986
- 5) 片桐 成夫・堤 利夫; 森林の物質循環と地位との関係について(V) 斜面上部と下部の林分における物質循環の相違, 日林誌60(6), 195~202, 1978
- 6) 渡辺 治夫; 樹皮の利用, 北海道林産技術普及協会, 22~24, 1962
- 7) D. A. I. Goring; Pulp Paper Mag. Can., T- 517, 1963

Summary

In order to utilize the stem bark of broad-leaved forest as fuel resources, a fundamental study of structure and biomass in Mie University Forest, and physicochemical nature and molding property of broad-leaved tree stem barks were carried out in the Forest.

1. Structure and Biomass of the Forest.

(1) Structure and species composition

The structure and species composition of a coppice in the university forest were investigated. This forest is second growth which was used for firewood and chacoal and consisted of 30-40 woody species. Dominants in tree layer (above 14m) were *Acer sieboldianum* Miq., *Acer mono* Maxim., *Acer palmatum* var. *matsumurae* (Koidz.) Makino, *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino, *Cornus controversa* Hemsley, *Carpinus japonica* Blume, *Prunus jamasakura* Sieb. et Zucc., etc. Dominants in sub-tree layer (7-13m in height) and in shrub layer (under 6m) were *Styrax japonica* Sarg., *Pourthiaea villosa* var. *laevis* (Thunb.) Stapf., *Lindella umbellata* Thunb., *Parabenzoïn praecox* (Sieb. et Zucc.) Nakai, *Callicarpa mollis* Sieb. et Zucc., etc. These deciduous trees are common species in temperate zone of Japan.

(2) Biomass

Dry weight of the stem wood, stem bark, branches and leaves in a sample area (5×10m) were 30.02, 5.41, 17.27 and 2.02kg for the over storey (above 9m), 34.27, 5.17, 12.82 and 2.33kg for the under storey (2-9m), and 0.075, 0.008, 10.050 and 0.140kg for the floor storey (under 2m), respectively.

Dry biomass of the parts for each storey per unit area (ha) were calculated as 6.0, 1.1, 3.5 and 0.4t for the over storey, 6.9, 1.0, 2.6 and 0.5t for the under storey, and 0.02, 0.002, 0.2 and 0.03t for the floor storey.

(3) Bark ratio

Bark ratio of the individual sample tree was in a range of 2.4 to 55.6%, but the bark ratio contained all sample trees in the over, under, and floor storey were 10.1, 13.1 and 9.6%, respectively.

2. Physicochemical and Molding Property of the Stem Bark

(1) Reducing property of bark into flour

The inner bark ratio to the whole bark in the most hardwood, which largely affects the toughness of the materials and depends on the species, was 80-90% and was much larger than SUGI and HINOKI barks.

The ease of reducibility or pulverization of hardwood barks into flour, as well as softwood barks, depended largely on the toughness and rigidity of the materials and also on the type of pulverizer. With a Wiley mill, the stem bark preparations from softwood could be ground more easily than hardwood ones. When another type of mill was applied, however, different results were obtained. SUGI bark was converted easily into the fine powder but not HINOKI, KEYAKI or MIZUNARA bark, because they had more tough components.

These results show that a cutter type pulverizer is more convenient for woody materials having a diversity of physical properties.

(2) The extractive content and pH of bark

The hot water and the 1% NaOH extractives of the air-dried flour of barks were contained in a range of 4.3-28.8% and 21.3-61.0%, respectively. Especially, the extractives could be obtained in quantity from the barks of KARAMATSU, KIBUSHI, MURASAKISHIKIBU and SARUNASHI. The solution of the hot water extraction weak acidic nature ranging in pH from 3.8 to 5.7, which are almost similar to those of the aqueous solution from softwood bark or a common wood.

The bark flour of KARAMATSU, MIZUKI, RYOBUBU and EGONOKI, which was served for the pressure molding test, was also contained a large quantity of the methanol extractives.

(3) Fuel value of bark

The average heat of combustion quantified by the calorific value of absolutely dry wood is 19 MJ/kg or 4,500kcal/kg. However, there seemed to be greater variation in this value for barks than wood materials because of the difference in ash and extractive contents. Heat value among hardwood species exhibited a big difference, but most hardwood barks recorded 4,000-5,000kcal/kg, about 400kcal/kg less than those of softwood barks.

Mineral or ash content of bark was much higher than wood, and a high content of certain soluble constituents such as phenolic compounds as well as oligosaccharides was also observed. Such alteration in the chemical constituents was responsible for the combustion nature. The experimental results indicated that calorific value of bark reduced with increasing ash content in the material and an approximately linear relationship existed between both values.

(4) The pressure molding property of bark

Woody biomass contains non-crystalline and amorphous constituents like relatively low-molecular phenolics and carbohydrates. Such constituents have thermoplasticity and exhibit auto-adhesion and produce densified material, if a polymeric material soften.

To evaluate the molding property responsible for the ease of pelletizing, boards of 5mm thickness were made from the stem bark flour prepared by the Wiley mill, and the tensile strength perpendicular to the surface of the board was measured.

Among the bark flour tested, lowest strength was 13kgf/6×6cm for SUGI; KARAMATSU and EGONOKI were more advantageous as molding materials. As a general rule, the barks having larger quantities of extractives were better than the lower content ones in their molding property. However, the strength of such lower grade materials as SUGI bark could be improved by mixing with more appropriate materials.