

平成 16 年度

修士学位論文

木質系バイオマスの燃焼特性

Characteristic by Combustion of Woody Biomass

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻
物質・環境システム工学コース

学籍番号 : 1075019

岡村敏章
Toshiaki OKAMURA

目 次

第1章 緒論	3
第2章 燃焼特性の測定	4
2.1 重量減少経過	
2.1.1 測定試料	
2.1.2 実験	
2.1.3 結果と考察	4
2.2 発生熱量測定	5
2.2.1 測定試料	
2.2.2 実験	
2.2.3 結果と考察	6
2.3 発生ガス量測定	10
2.3.1 測定試料	
2.3.2 実験	
2.3.3 結果と考察	11
第3章 成分分析	17
3.1 分析試料	
3.2 分析成分	
3.3 定量方法	17
3.3.1 抽出成分	
3.3.2 α セルロース	
3.3.3 ホロセルロース	
3.3.4 ヘミセルロース	
3.3.5 酸可溶性リグニン	
3.3.6 酸不溶性リグニン	
3.4 分析結果と考察	19
第4章 総括	22
第5章 謝辞	

第1章 緒言

炭酸ガスによる温室効果の問題は、近年の化石燃料の消費拡大により大きな環境問題の一つである。木質系バイオマスは、資源となる樹木の成長過程で光合成による炭酸ガス固定が行われるため、カーボンニュートラルな燃料資源と言われている。

国内林業の不振により、1960年以降木材の生産量は低下しており、現在、日本の木材自給率は20%以下にまでなっている。しかし、人工林を伐採なしに放置しておく、森林の活力が弱り、樹木の生長量も落ちてしまうため、間伐作業は続けなくてはならず、このような間伐を切捨て間伐と呼ぶ。

現在、切捨て間伐で山中に放置された木や、間伐後に廃棄された残材などを重油に替わる燃料用資源として利用するための研究がなされている。これは、県内の人工林にて間伐された残材を施設園芸用ボイラーの燃料として用いるという試みで、従来型重油ボイラーの代替として実用化普及が進められている。このように人工林における木質系バイオマスを利用する試みは全国的にも行われている。しかしながら、現在、我が国の人工林のほとんどを占めるスギとヒノキについて、樹種を部位別に見た燃焼特性について載せている研究はない。

本研究では、将来、燃料としての木質系バイオマスの利用拡大に備えて、なかでも間伐残材を燃料として利用する際の基礎資料とするべく、スギ、ヒノキ、各種木材の燃焼時発生熱量と発生ガス量について測定し、さらに、違いの見られる部位については成分分析を行い、比較検討した。



写真1 機械化林業による間伐作業（左）、残材（右）

第2章 燃烧特性の測定

2.1 重量減少経過

試料である材の着火する際の温度を特定するため、重量減少経過を調べた。

2.1.1 測定試料

高知県香北町内の人工林にて、切捨て間伐により伐倒されたスギ辺材を用いた。

2.1.2 実験

105℃の定温乾燥器内で絶乾状態まで乾燥させたスギ辺材を、熱天秤（マックサイエンス社製 WS002）を用いて、空気流量 200ml/min で、25℃から 600℃まで、昇温速度 5℃/min で昇温し、昇温開始から終了までの間の重量減少経過をみた。

2.1.3 結果

スギ辺材の重量減少の測定結果を図1に表す。重量減少は 230℃付近より起こり、500℃付近で終了した。材の着火は重量減少が大きくなり始めた 250 度付近で起こっていると考えられる。経過曲線が2段になっているのは材中の主要成分であるセルロースとリグニンによるものと考えられる。300 度付近の急な減少はセルロースの熱分解によるもので、その後の緩やかな曲線はリグニンの熱分解によるものであると考える。また、本実験の炉内設定最高温度は 600℃であるため、実験において、燃え残りはないと考える。

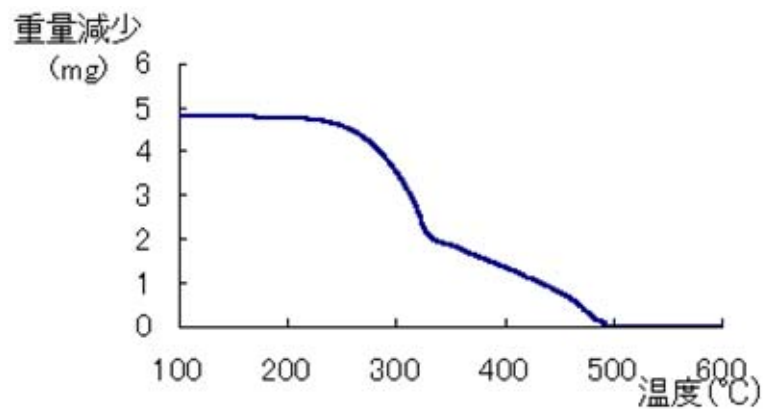


図1 スギ辺材における重量減少経過

2.2 発生熱量測定

木質系バイオマスを燃焼により利用する場合は、その発生熱量が重要となってくる。木材の燃焼は、木材と酸化剤との化学反応であり、発光と発熱を伴う。木材の主成分である炭素と水素が完全燃焼すると、二酸化炭素と水が生成される。燃焼における化学反応は、実際には数多くの原子間の結合の破壊と再結合、すなわち素反応により構成され、最終的には再結合によって安定な生成物を生じ、その際の余剰エネルギーが熱として放出される。発生熱量は、材が完全燃焼した後、最初の温度まで冷却される際に発生する熱量として定義される。たとえば、



である。ここで発生熱量は木材中に水素が含まれるため、生成された水が気相の場合と液相の場合の二通りに区別する必要がある。生成した水が完全に凝縮して蒸発熱を発生させる場合の発生熱量を総発生熱量または高位発生熱量といい、それに対して水が全て水蒸気のままである場合の発生熱量を真発生熱量または低位発生熱量という。一般には加熱室内などで水蒸気は凝縮せず、排ガス中に含まれて外部に出るので、水蒸気の潜熱は利用されず、低位発生熱量を利用することができる。

2.2.1 測定試料

実験に供した樹種はスギとヒノキで、用いた材は、高知県香北町内の人工林にて、切捨て間伐により伐倒されたスギとヒノキである。

同一木における部位別の燃焼特性を調べるため、スギ、ヒノキそれぞれについて、同一木から葉、外樹皮、辺材、心材を選出し、試料とした。

高さ別の燃焼特性を調べるため、スギ、ヒノキそれぞれの根元付近を下部、根元から 6.5m 付近を中部、根元から 12.5m 付近を上部として、各部から材を切出し、試料とした。

伐倒されてより経過した期間と、燃焼特性の関係を調べるため、伐倒されてより 1 ヶ月が経過した材と、伐倒されてより山中で 1 年以上放置されて白色化した材を試料とした。

2.2.2 実験

材を 105℃の定温乾燥器内で絶乾状態まで乾燥させた後、形状に大きな違いが現れないよう、成形した試料約 0.5mg をセルに入れ、示差走査熱量測定装置 DSC-60 (株式会社島津製作所製) を用いて、空気流量 200 (ml/min) で、25℃から 600℃まで昇温速度 10℃/min で昇温し、0.5 秒間隔で燃焼により発生する熱量を測定した。

2.2.3 結果と考察

スギとヒノキそれぞれについて、部位別の発生熱量の測定結果を図4、図5に表す。スギでは、葉、外樹皮、心材、辺材の順に大きく、ヒノキでは外樹皮、葉、心材、辺材の順に大きい値を示した。辺材と外樹皮間では5%水準で、また、辺材と葉間では1%水準で有意差があった。このように葉や外樹皮の発生熱量が大きい値を示すのは、その構成成分によると考えられる。後述するが、辺材、心材と比べ、葉には抽出成分が多く含まれており、また、外樹皮にはリグニン（中でも酸不溶性リグニン）が多く含まれていた（表1）。

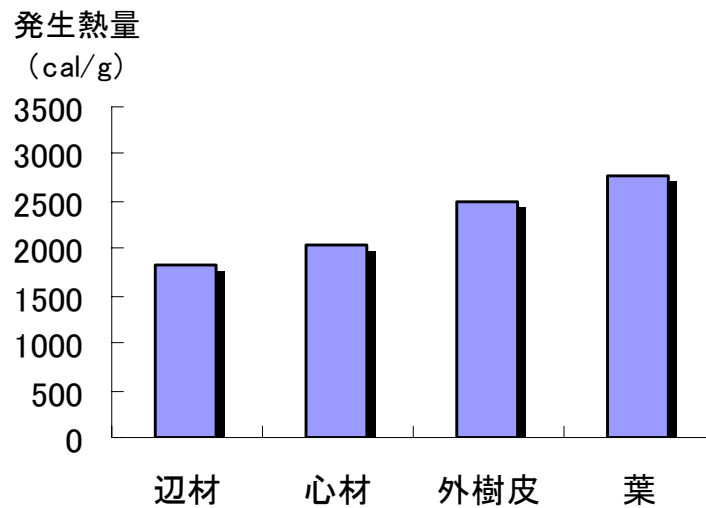


図4 スギ材における部位別の発生熱量

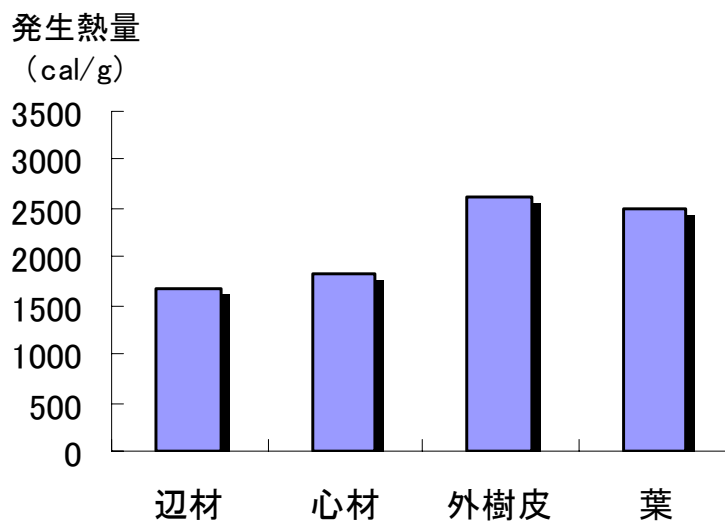


図5 ヒノキ材における部位別の発生熱量

スギ、ヒノキそれぞれの心材と辺材について、高さ別の発熱量の測定結果を図6、図7に表す。同一木において、高さ別の発熱量の違いは見られず、それぞれの間での有意差はなかった。

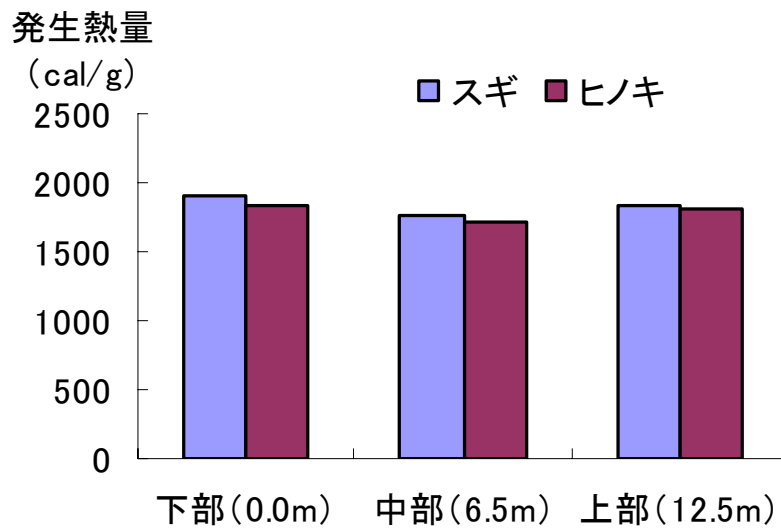


図6 樹種別・高さ別にみた心材の発熱量

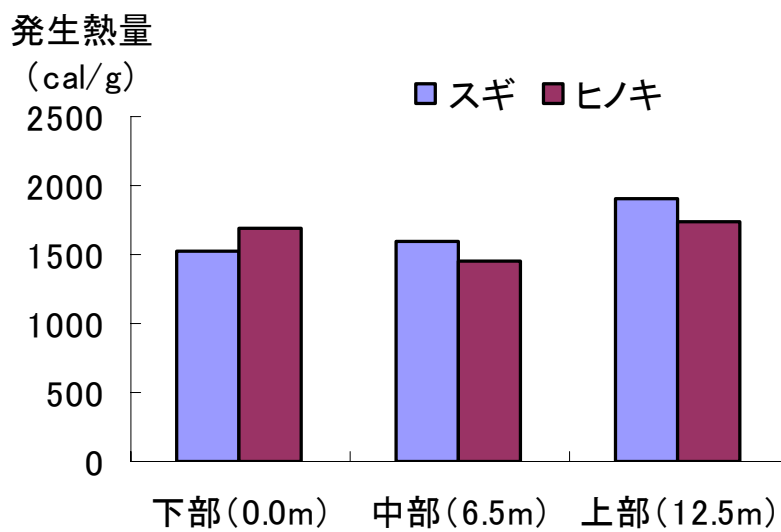


図7 樹種別・高さ別にみた辺材の発熱量

部位別，高さ別の結果をそれぞれ平均して，スギ材とヒノキ材の発熱量を比較すると，スギ材がヒノキ材よりも10%程度大きい値を示し，5%水準で有意差があった（図8）。

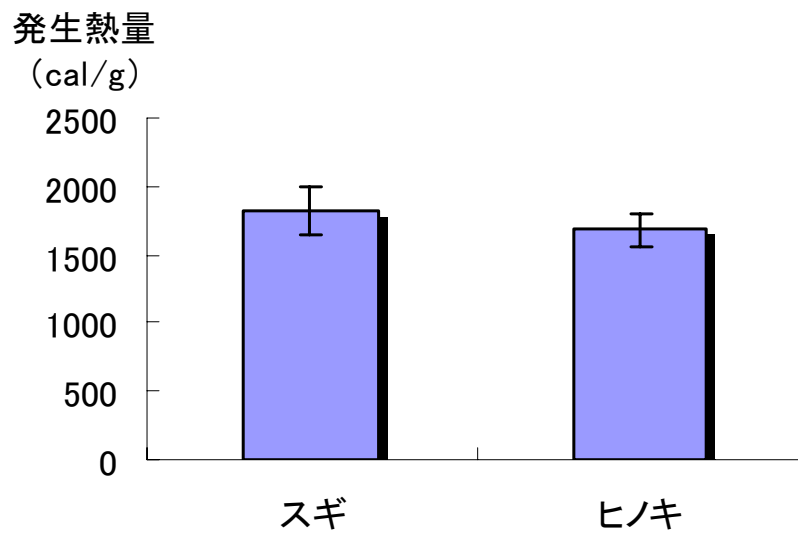


図8 樹種別にみた発熱量

伐倒から経過した期間別の発生熱量の測定結果を図9に表す。スギ、ヒノキ共に1ヶ月経過の材よりも、1年経過の材の方が小さい値を示した。また、このとき、スギの辺材と心材について比較してみると、辺材での差が大きいことが判った(図10)。伐倒から1ヶ月が経過した辺材と、1年が経過した辺材を比較すると、1年が経過した材の抽出成分の方が小さい値を示すことから(表1)、このような発熱量の差は、材中に含まれる抽出成分量によると考えられる。

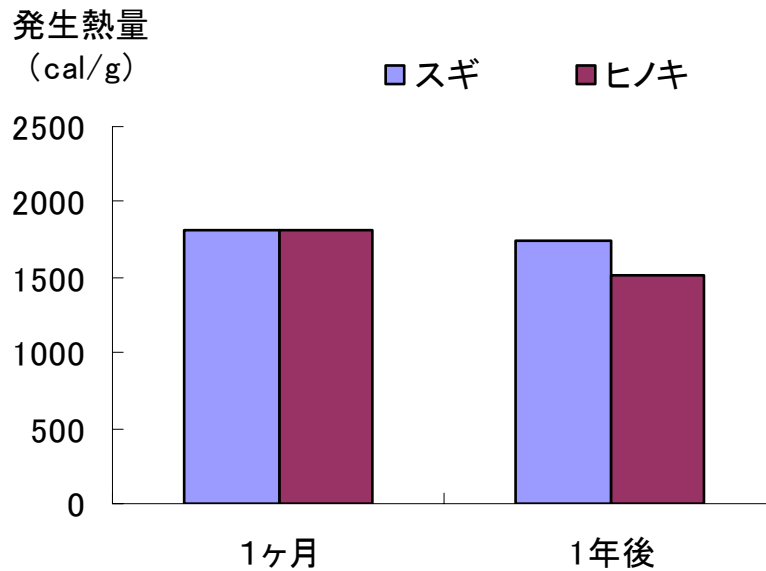


図9 樹種別にみた経過時間別の発熱量

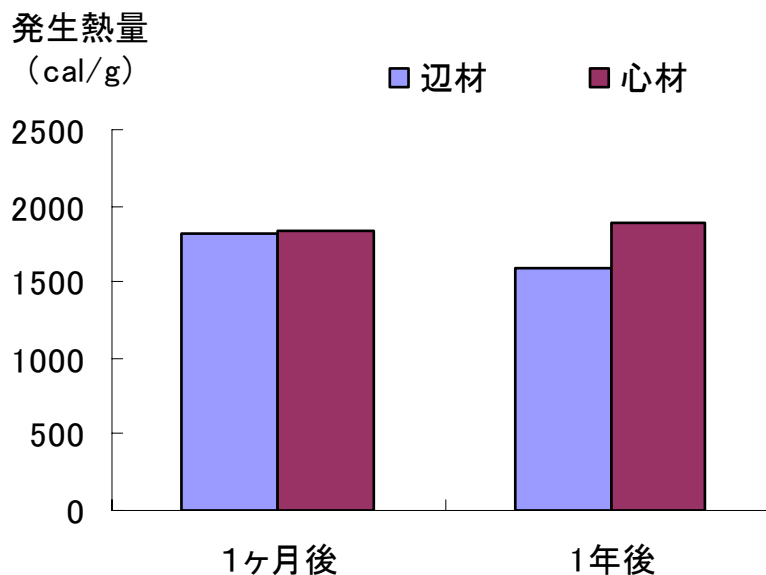


図10 スギ材における経過期間別の発熱量

2.3 発生ガス量測定

燃焼時の発生ガス量からは、燃焼効率や環境への影響等が考えられる。炉内温度と空気流量を一定にした場合の部位ごとの発生ガス量を測定した。

2.3.1 測定試料

実験に供した樹種はスギとヒノキで、用いた材は、高知県香北町内の人工林にて、切捨て間伐により伐倒されたスギとヒノキである。

同一木における部位別の燃焼特性を調べるため、スギ、ヒノキそれぞれについて、同一木から葉、外樹皮、辺材、心材を選出し、試料とした。

高さ別の燃焼特性を調べるため、スギにおいては根元付近を下部、根元から 3.5m 付近を中部、根元から 8.5m 付近を上部として、また、ヒノキにおいては根元付近を下部、根元から 4.5m 付近を中部、根元から 10.5m 付近を上部として、それぞれの各部から材を切出し、試料とした。

伐倒されてより経過した期間と、燃焼特性の関係を調べるため、伐倒されてより 1 ヶ月が経過した材と、伐倒されてより山中で 1 年以上放置されて白色化した材を試料とした。

部位別の発生ガス量の測定においては、各部位を 105℃の定温乾燥器内で絶乾状態まで乾燥させた後、粒度 10mm～1mm に粉砕したものを試料とし、また、高さ別、経過期間別の各発生ガス量の測定においては、各材を絶乾状態で、20×25×15(mm)の長方体に成形したものを試料とした。

2.3.2 実験

各試料を、シリコニット電気炉 SPSH-37 (シリコニット高熱工業株式会社製) 内にセットして、空気流量 200 (ml/min) で、25℃から 600℃まで昇温速度 5℃/min で昇温した。炉の排気側にはサンプリングの際に煤塵等が混入するのを防ぐ目的で、グラスウールをトラップとして設置し、炉の昇温開始時点より 10 分毎に排出される気体をシリンジで 1ml サンプリングし、ガスクロマトグラフ GC-8APT (株式会社島津製作所製) を用いて分析した。図 1 に発生ガス量測定の際に用いた装置配置の概要を示す。

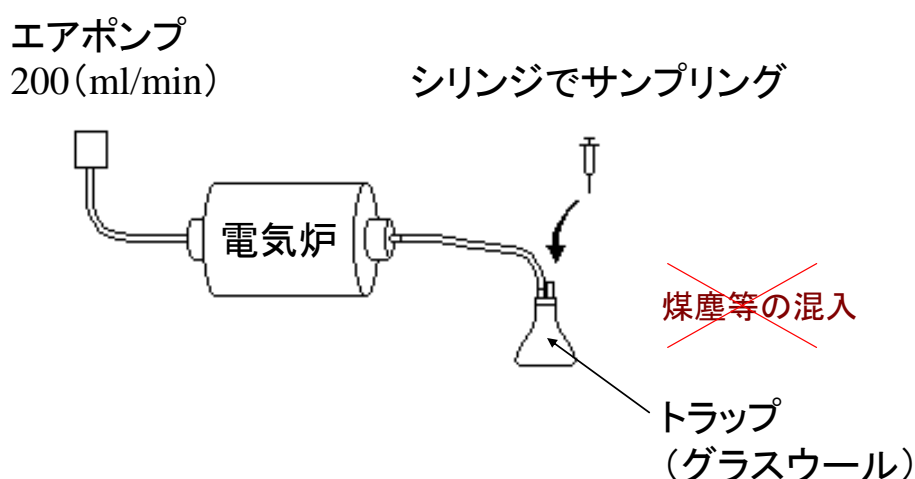


図 1 測定装置の概要

2.3.3 結果と考察

発生ガスの測定結果の一例として、スギ辺材におけるガス成分別の発生経過を図 11 に表す。図は一回のサンプリング (1ml) に含まれる二酸化炭素量、一酸化炭素量、メタン量、そして炉内温度の推移を示したものである。燃焼ガスは 250°C 付近を過ぎたあたりから発生し、300°C 付近で急激に増加していることが判った。各ガス成分の発生ピークは、二酸化炭素が 570°C の地点で約 10% (0.1ml) を示し、一酸化炭素は 520°C の地点で約 3% (0.03ml)、メタンは 470°C の地点で約 0.2 % (0.002ml) であった。

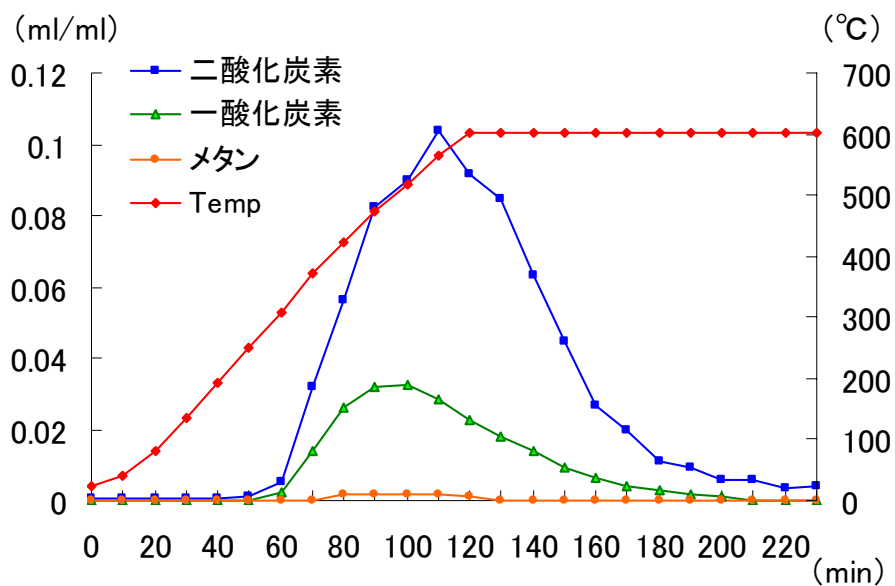


図 11 スギ辺材における燃焼ガスの成分別発生経過

ガス成分別の発生経過（図 11）を基に，試料から発生した各ガス成分の定量を行った。各ガス成分について，まず，“ガス内積”を求め，次に 1ml サンプリングの“全内積”を求めた（図 2 参照）。次いで，装置の実験中に発生した気体の総量を“排出総量”とおいて，次式により各ガス成分量を求めた。

$$\text{各ガス成分量 (ml/g)} = \text{排出総量} \times \text{ガス内積} \div (\text{全内積} \times \text{試料重量})$$

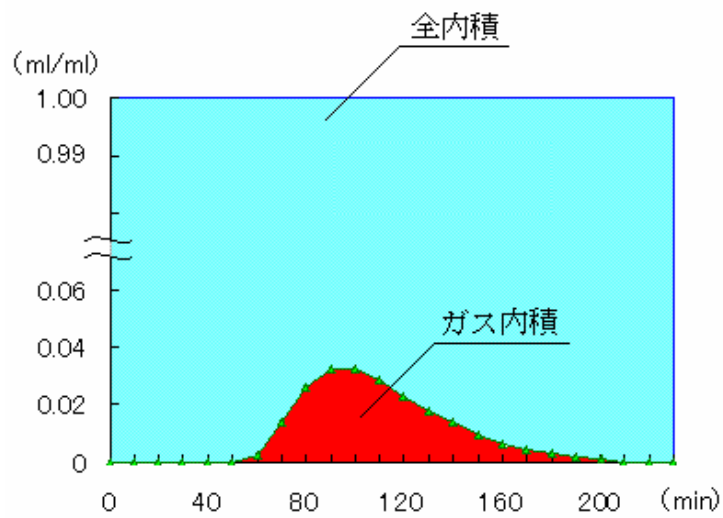


図 2 全内積とガス内積の関係

スギとヒノキそれぞれについて、部位別の発生ガス量の測定結果を図 12, 図 13 に表す。スギ, ヒノキ共に, メタンは検出されず, 他のガス成分については, 心材, 辺材よりも葉, 外樹皮の方が大きい値を示した。葉において, 他の部位より一酸化炭素量が小さいのは, 抽出成分が多く, セルロースが少ない葉の組成が, 燃焼時の効率に影響していると考えられる。

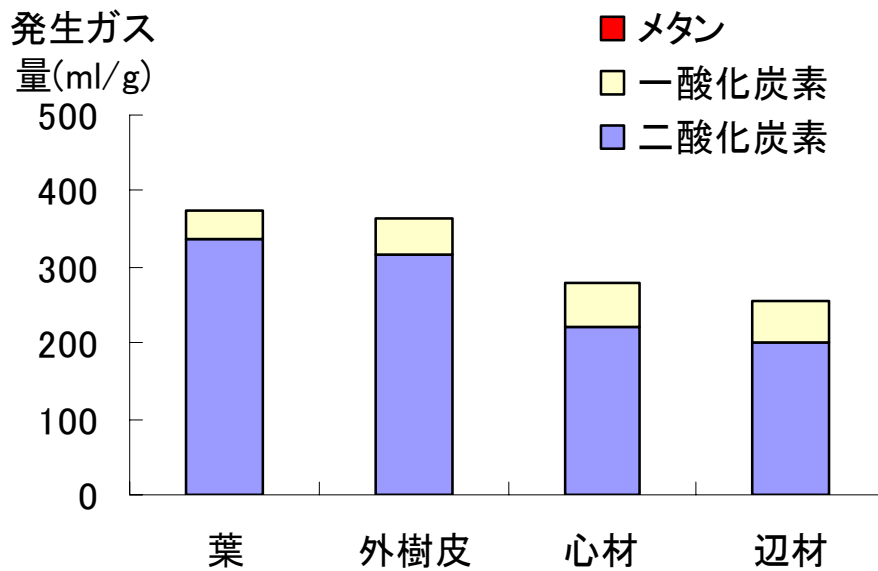


図 12 スギ材における部位別の発生ガス量

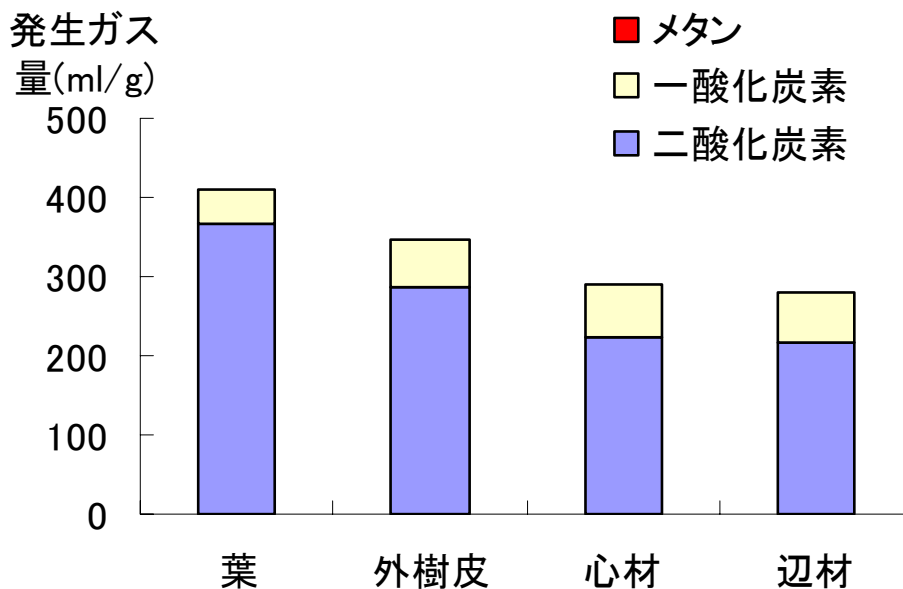


図 13 ヒノキ材における部位別の発生ガス量

スギ、ヒノキそれぞれの心材と辺材について、高さ別に見た発生ガス量の測定結果を図 14、図 15 に表す。スギ、ヒノキ共に、心材において、高さ別の発生ガス量に差は見られなかった。辺材では下部、中部に比べ、上部の発生ガス量が小さい値を示したが、有意差はなかった。

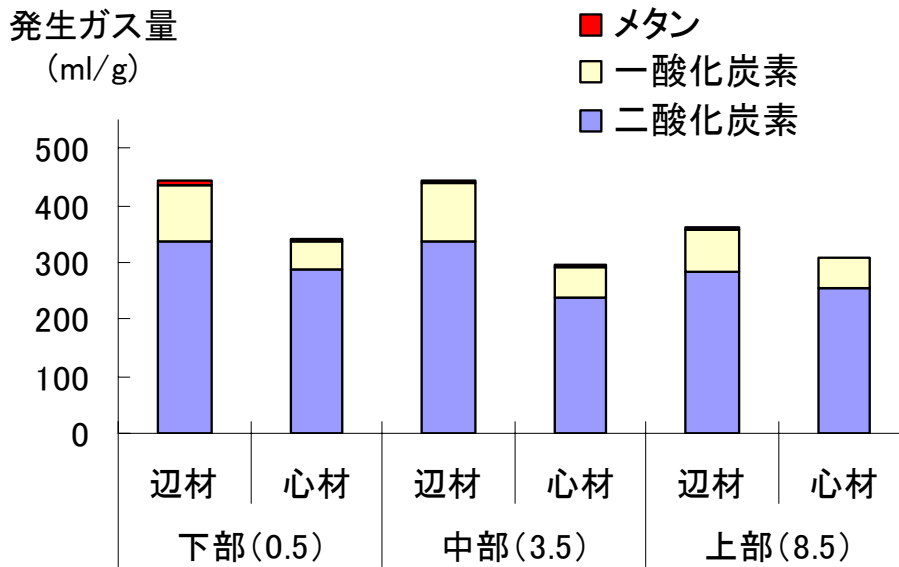


図 14 スギ材における高さ別・辺心材別の発生ガス量

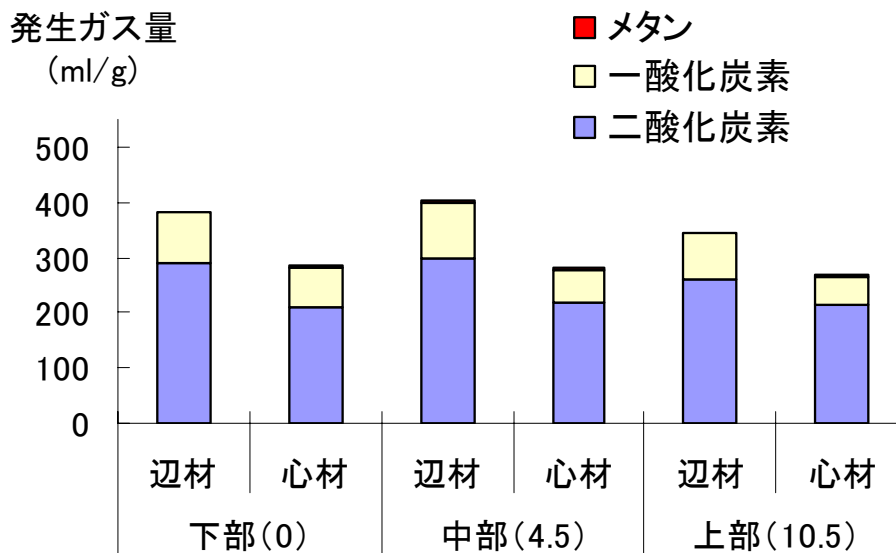


図 15 ヒノキ材における高さ別・辺心材別の発生ガス量

部位別, 高さ別の結果から, 樹種別に発生ガス量をみた場合, 単位重量あたりで, スギは約 730ml, ヒノキは約 650ml となり, 樹種別には, スギの方が大きい値を示した。また, 発生ガスの成分別にみると, 一酸化炭素については, スギで約 20%, ヒノキで約 25%を占め, メタンについては, スギ, ヒノキ共に 1%未満のごく微量であった (図 16)。

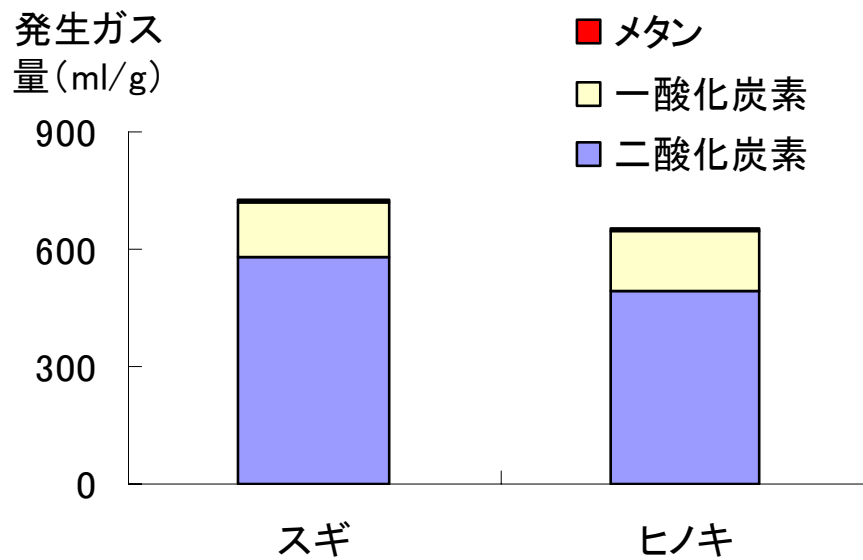


図 16 樹種別にみた単位重量あたりの発生ガス量

スギ、ヒノキそれぞれの心材と辺材について、伐倒から経過した期間別の発生ガス量の測定結果を図17、図18に表す。スギ、ヒノキ共に、辺材において、1ヶ月経過の材よりも、1年経過の材の方が小さい値を示した。心材において、差は見られなかった。辺材において、材中に含まれる抽出成分量によると考えられる（表1）。

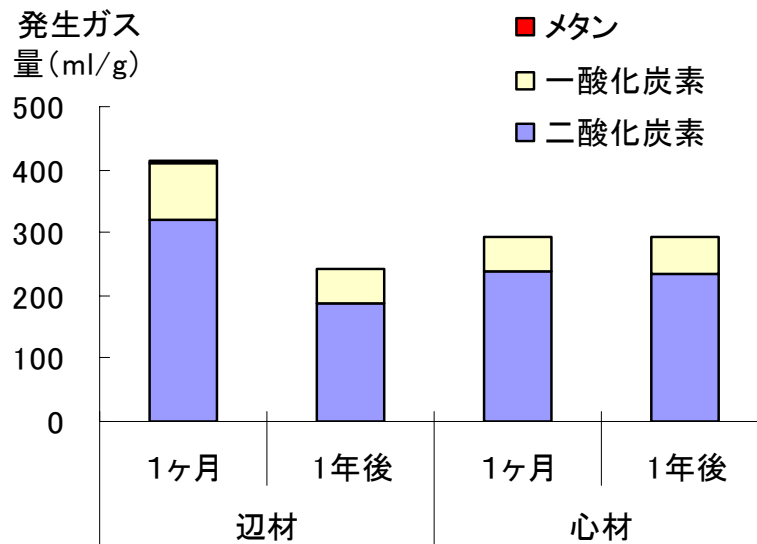


図17 スギ材における放置期間別の発生ガス量

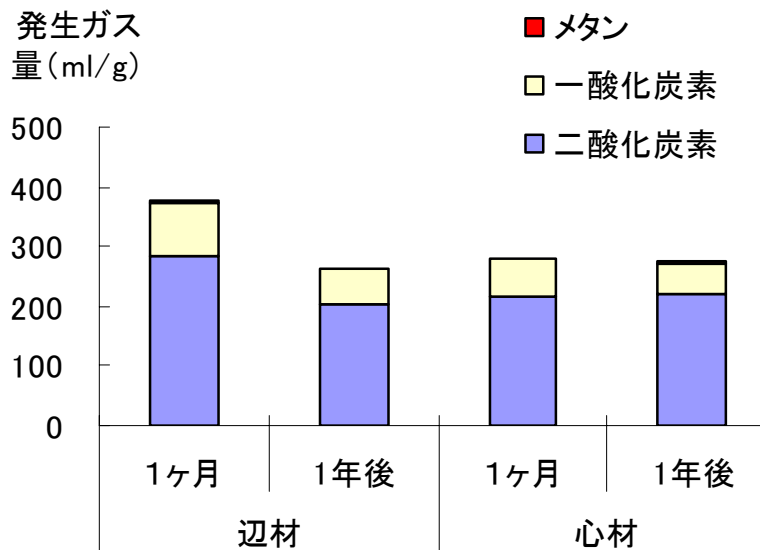


図18 ヒノキ材における放置期間別の発生ガス量

第3章 成分分析

発生熱量と発生ガス量の測定結果において、スギ、ヒノキともに葉、樹皮部位のほうが辺材、心材部位よりも発生熱量が高く、発生ガス量も多かった。また、辺材において、伐倒後1年経過したものでは発生熱量が小さい値を示し、発生ガス量も少ない結果となった。これらの原因として、その成分量の影響があると考えられる。そこで、差が見られたいくつかの試料について、成分分析を行った。

3.1 分析試料

部位別に発生熱量、発生ガス量の値が高かったスギ葉、ヒノキ葉、ヒノキ樹皮、また、1年経過の材は発生熱量、発生ガス量が小さい値を示したことからヒノキ辺材（伐倒後1年経過）を用い、文献値³⁾との比較を行った。

3.2 分析成分

試料である材に含まれている抽出成分（有機溶媒可溶分）量、 α セルロース量、ヘミセルロース量、酸不溶性リグニン量、酸可溶性リグニン量の定量を行った²⁾。

3.3 定量方法

3.3.1 抽出成分（有機溶媒可溶分）の定量

粒度1mm～250nmに粉碎した試料約5g～10gを、エタノールとベンゼン（1:2v/v）の混合溶媒で、ソックスレー抽出により有機溶媒可溶分を抽出した。抽出溶液から溶媒を除いた後、内容物を秤量して抽出成分量とした。

3.3.2 α セルロース、ヘミセルロースの定量

α セルロースとヘミセルロースの定量において、まず、ホロセルロースの定量を行った。その後、 α セルロースの定量を行い、最終的に、ホロセルロース量から α セルロース量を除いた値をヘミセルロース量とした。

3.3.2.1 ホロセルロースの定量（亜塩素酸ナトリウム法）

2.5.1で有機溶媒可溶分を抽出した後の脱脂木粉約1.5gを、蒸留水（150ml）、 NaClO_2 （1.0g）、 CH_3COOH （0.2ml）と合わせ、70℃～80℃の湯浴上で加熱した。1時間毎に計4回 NaClO_2 （1.0g）と CH_3COOH （0.2ml）を加え、内容物が白色になったのを確認した後、吸引濾過（洗浄は冷水及びアセトン）し、残渣を秤量してホロセルロース量とした。

3.3.2.2 α セルロースの定量

2.5.2.1で得たホロセルロース約0.5gに、17.5% NaOH （25ml）を加えて、3分間放置。次いで、試料を5分間つぶし、放置。 NaOH を加えてより30分後、試料に20℃の蒸留水（25ml）を加え、1分間攪拌し、5分間放置（20℃の恒温水槽中）。その後、吸引濾過（洗浄は20℃の蒸留水約500ml）。残渣に10% CH_3COOH （40ml）を加えて、再度吸引濾過（洗浄は煮沸水1L）し、秤量して α セルロース量とした。

3.3.3 リグニンの定量（Klason Lignin 改良法）

2.5.1で有機溶媒可溶分を抽出した後の脱脂木粉約0.3gを、氷上にて、72% H_2SO_4 （4.5ml）と合わせ、30℃でインキュベーション（100～150rpm）した。次いで、蒸留水で H_2SO_4 の濃度を約3%まで薄め、オートクレーブで30分間加熱した後、吸引濾過した。残渣を秤量して酸不溶性リグニン量とした。また、濾液0.3mlに、3% H_2SO_4 （2.7ml）を加え10倍希釈し、分光光度計（株式会社日立製作所製U-2010）を用いて205nm～210nm付近の最大吸光度を測定した。吸光度から酸可溶性リグニン量を次式により求めた。

酸可溶性リグニン量 (%) = $100 \times \text{希釈率} \times \text{濾液量 (l)} \times (\text{試料溶液の吸光度} - \text{3\%硫酸の吸光度}) \div \{ \text{リグニンの吸光係数 (=110L/g \cdot \text{cm})} \times \text{用いた脱脂木粉試料の重量 (g)} \}$

3.4 分析結果と考察

スギ葉、ヒノキ葉、ヒノキ樹皮、ヒノキ辺材（伐倒後1年経過）について、抽出成分（有機溶媒可溶分）、セルロース、リグニンの定量を行った結果を表1に表す。葉は、スギ、ヒノキ共に、抽出成分が約30%を占めており、通常、ヒノキ辺材の抽出成分が約5%であるのに対し³⁾、大きな値を示している。また、ヒノキ樹皮について、抽出成分は1%未満と少ないが、リグニン（特に酸不溶性リグニン）が多く、40%以上を占めている。伐倒されてより1年後のヒノキ辺材において、通常のヒノキの成分と比較すると、抽出分量に違いが見られた。測定に用いた試料は山中で1年間以上放置され、表面は白色化していた。概観で腐朽は確認されなかった。一般に、抽出成分は、紫外線を吸収しやすく、光分解反応によって低分子化し、雨水等に溶出したすいため⁴⁾、白色の原因は太陽光や降雨等の影響による材の抽出成分の減少と考えられる。

表1 成分分析の結果

試料名	抽出成分(%)	リグニン			セルロース		
		酸不溶性	酸可溶性	計(%)	α セルロース	ヘミセルロース	計(%)
スギ葉	28.23	28.21	1.92	30.13	29.14	12.48	41.62
ヒノキ葉	28.88	29.52	1.82	31.34	25.77	12.25	38.02
ヒノキ樹皮	8.10	42.65	0.47	43.12	29.15	14.95	44.10
ヒノキ辺材*	0.66	30.90	0.31	31.21	48.68	26.52	75.20
ヒノキ辺材**	5.10	-	-	29.60	47.30	22.00	69.30

*伐倒より1年が経過したヒノキ辺材，**文献値³⁾

木材成分は主成分と副成分で構成されている。主成分はセルロース、ヘミセルロース、リグニンからなり、副成分は脂肪族化合物、芳香族化合物、テルペン類、窒素化合物、ペクチン質、無機質からなる。このうちセルロース、ヘミセルロースは細胞壁構成成分であり、リグニンは細胞壁中や細胞間層に分布して木質化及び樹体の形成に関わっている。これら主成分は樹体構成成分の90%を占める。セルロースは木材組成成分中の40~50%を占め、D-グルコースが β -1,4グリコシド結合をした長鎖状のホモポリマーである。ヘミセルロースは木材組成成分中の約15~35%を占める非セルロース系の多糖類で加水分解するとキシロース、アラビノース、グルコース、マンノース、ガラクトース、ウロン酸、酢酸等を生じる。針葉樹のヘミセルロースは7~15%のアラビノグルクロノキシランと5~15%のガラクトグルコマンナンからなる。リグニンはフェノール性の物質で組織を強固にする役割を果たし、針葉樹の含有量は22~35%である。副成分は抽出成分などで、中性溶剤不溶部（無機成分・窒素化合物、ペクチン質等）や中世溶剤可溶部（脂肪族化合物（アルデヒド類・アルコール類・脂肪酸等）、糖類、芳香族化合物（タンニン・色素等）、テルペン類（樹脂・精油等））などである。無機成分はカルシウム、カリ等があり含有量は0.1~0.9%である。

一般に燃焼時の発生熱量は燃料中に含まれるH/Cで表すことができる。H/C値が小さい燃料の方が発生熱量は高くなる。図19、図20、スギとヒノキの抽出成分の化学構造式を、図21、図22にセルロース⁵⁾とNimzによるカバ材リグニンの化学構造式⁴⁾を示す。セルロースと比べ、リグニンや抽出成分ではベンゼン環を多く持ち、H/C値が小さいことがわかる。

属・一般名	産地	抽出成分
<i>Cryptomeria</i> スギ	日本	<p><i>C. japonica</i> (スギ)³³⁷⁻³⁴⁰; sugiresinol (493), hydroxysugiresinol (686), agatharesinol (492), sequirin-C(687), δ-cadinol (638), β-eudesmol (566), cryptomerion, δ-cadinene (635), calamenene (636), calacorene (637), copaene (78), cryptomerone, cryptomeridiol (688), sugiol (672), ferruginol (654), dehydroferruginol (689), xanthoperol (690), phyllocladanol (691), sandaracopimarinol (692), sandaracopimarinal (693), sandaracopimaric acid (497), isopimaric acid (624), β-sitosterol (194)</p> <p>(686) (687) (688) (689) (690)</p> <p>(691) (692) R=CH₂OH (693) R=CHO</p>

図19 スギの抽出成分

<i>Chamaecyparis</i> ヒノキ サワラ タイヒ ベニヒ	<p><i>C. obtusa</i> (ヒノキ)²⁷⁵⁻²⁷⁷; camphene, β-pinene, α-terpinene, γ-terpinene, linalool monoxyde, linalool, camphor, bornyl acetate, α-terpineol, borneol, geranyl acetate, γ-cadinene (634), α-cadinol, hinokinin (508), hinokiol (509), hinokione (510), hinokiresinol (494)</p> <p>(508) (509) (510)</p> <p><i>C. pisifera</i> (サワラ)²⁷⁸⁻²⁸⁰; α-cadinene, α-cadinol, δ-cadinol (638), X₁-cadinol, X₂-cadinol, cadinenol, chamae- cynone (511), sawaranin (512), L-arabinose, savinin (513), potassium hydrogen oxalate</p> <p>(511) (512) (513)</p>
--	--

図20 ヒノキの抽出成分

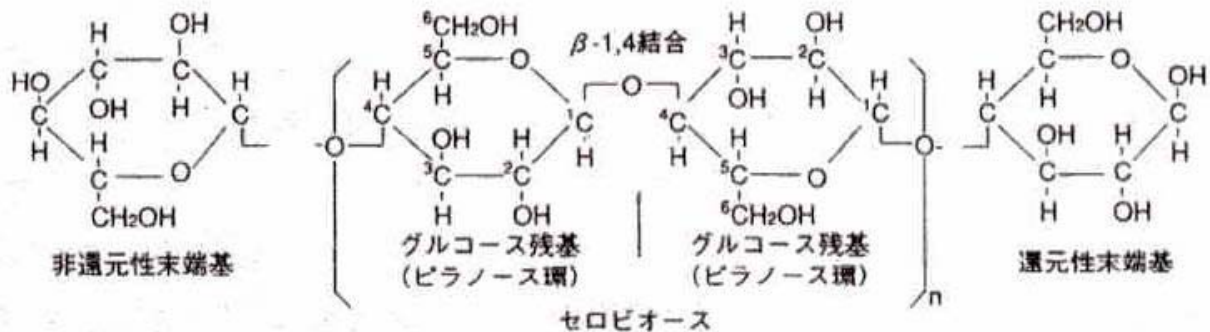


図 21 セルロースの化学構造式

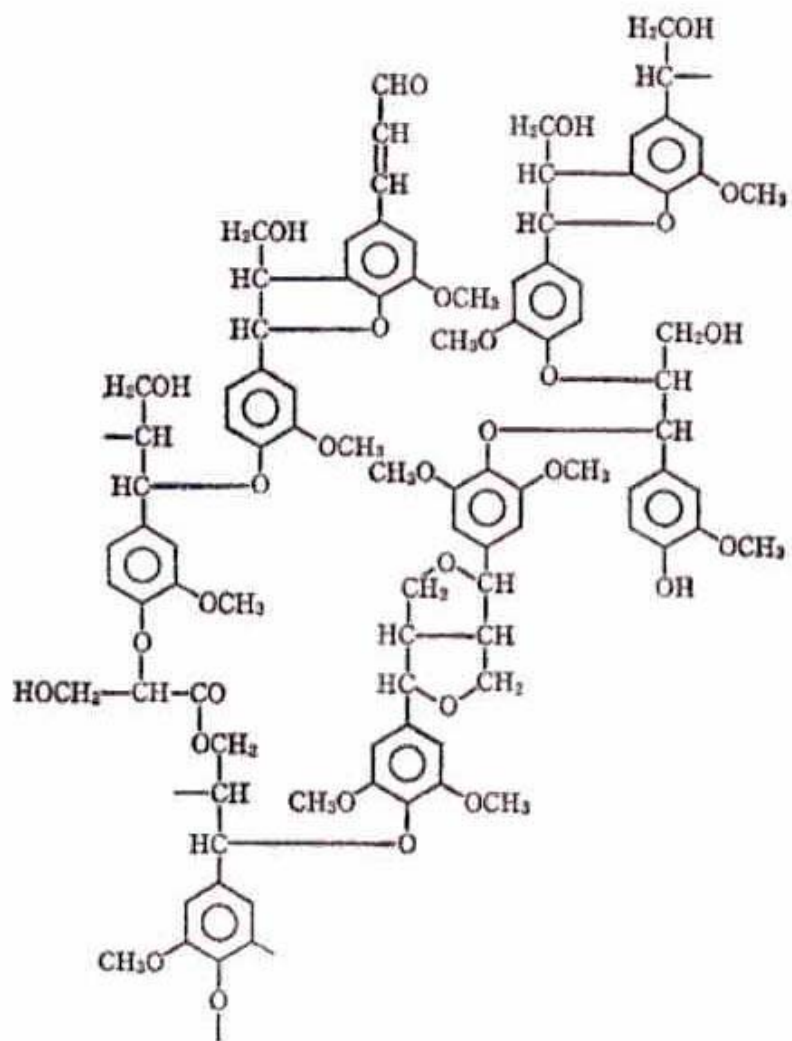


図 22 Nimz によるカバ材リグニンの化学構造式

第4章 総括

スギ、ヒノキ共に、辺材、心材よりも外樹皮、葉で大きい発生熱量、発生ガス量を示した。成分分析の結果から、材の構成成分である抽出成分（有機溶媒可溶分）、リグニン、セルロースの量の違いが影響しており、特に、葉や外樹皮のように、抽出成分、もしくは、リグニンが多く含まれる材では、発生熱量、発生ガス量が大きくなる傾向にあると考えられる。

伐倒されてより経過した期間と、燃焼特性の関係を見ると、伐倒後、放置された期間が長い方が、辺材において発生熱量、発生ガス量の減少が見られた。成分分析の結果から、そのような材では抽出成分が減少しており、太陽光による光分解反応により低分子化され、雨水等に溶出したものと考えられる。

樹皮や葉は集材の際に切り取られ、放棄されるのが現状である。今回の結果から樹皮や葉が多く発生熱量、発生ガス量をもたらすことが判った。嵩の大きなこれらの材は、輸送方法の確立、材の安定供給など、クリアしなくてはならない課題は多いが、将来有望な木質系バイオマス資源といえるのではないだろうか。また、同一木における高さ別の燃焼特性の違いは見られなかった。木質系バイオマスを燃料に用いる際、燃焼エネルギーのコントロールは課題の一つと考えられるが、高さによる違いが見られなかったことから、たとえば丸太を製材した際に廃棄された元付近や先付近の材が混じった混合バイオマスであっても、重量からの発生熱量の予測ができるはずである。

謝辞

本実験をするにあたり、高知県立森林技術センター森林環境部今西隆男部長をはじめ、多くの方々のお世話になりました。誠に有難うございます。

文献

- 1) 後藤純一，木質バイオマス燃料収集コスト調査，機械化林業，No. 595（2003. 6）
- 2) 日本木材学会，木質科学実験マニュアル，p. 92 1. 木材分析（2）主成分分析，文永堂出版
- 3) 原口隆英・寺島典二・臼田誠人・越島哲夫・坂井克己・諸星紀幸・寺谷文之・甲斐勇二・志水一允・榊原彰 共著，木材の化学（1990）p. 139，文永堂出版
- 4) 今西博之・安江保民・岡本一・横田徳朗・後藤輝男・善本知考，木材利用の化学（1992）p. 17，文共立出版
- 5) 藤田稔，木材科学講座2 組織と材料（1994），海青社，90