

# 水熱処理を用いた木質ペレットの製造

瀧波 勇人\*・牧 恒雄\*\*・小梁川 雅\*\*

(平成 23 年 2 月 22 日受付/平成 23 年 6 月 17 日受理)

**要約:** 木質ペレットが普及するためには、エネルギー密度の増加、輸送効率の向上、貯蔵場所の縮小が重要である。また、長期貯蔵を想定した場合、耐水性も求められる。本研究で用いた水熱処理は、木を攪拌しながら高温高圧の水蒸気で処理することで、木の発熱量を増加させ、粉碎する技術である。本研究では、実機サイズの水熱処理装置を使用し、杉の切削チップを処理し、水熱処理物のペレット（以後改質ペレットと記す）化について研究した。処理条件は、処理圧力と圧力保持時間を 6 条件で変化させ、発熱量、粒度、収率、エネルギー収支などの評価を行った。その結果、水熱処理を行うと発熱量が約 1 割増加し、エネルギー収支は 2.2 MPa, 30 min 及び 1.8 MPa, 30 min の条件が良好であった。水熱処理をした杉チップは、細粒化が確認でき、再粉碎しなくともそのままペレタイジングが可能であった。その結果、単位重量及び体積当りの発熱量が増加し、耐水性を有する改質ペレットが製造できた。

**キーワード:** 木質バイオマス、エネルギー、木質ペレット、水熱処理

## 1. はじめに

木質バイオマスは、日本のバイオマス資源のなかでも多くの賦存量があるが<sup>1,2)</sup>、林地残材等は殆ど利用がされていないことから森林荒廃などの問題が発生しており、利用促進が求められている。一方、農業は生産に必要なエネルギーの多くを化石燃料に依存しており、化石燃料は価格の変動が大きく、農家経営の不安定要因となっている。経営の安定化にはエネルギー源の多様化と安定供給が必要であり、木質ペレットはエネルギー源として有望であると考えられる。現在、木を効率よく容易にエネルギーとして利用する方法として、チップやペレットにして直接燃焼し、その熱を利用する方法が行われている。また、農業において最も多くの化石燃料を消費しているのは、施設園芸用のハウス加温ボイラーで、全体の 2/3 を占めている<sup>3)</sup>。従って、木をハウスの加温ボイラーの燃料として利用できれば、エネルギー源の多様化が可能になる。また、加温ハウス単位での利用を考えると、一般的にチップよりペレットの方がハンドリングがよく、低水分で発熱量が高いので貯蔵スペースが少なくなるなどの利点を有している。

木質ペレットは、カーボンニュートラルな資源であり、他の再生可能エネルギーと比較して出力が安定し、使用場所を選ばないなどの利点をもつが、欠点として、化石燃料と比較して熱量が低いため運搬効率が悪く、多くの貯蔵スペースを必要とする。また、水に触れると膨潤し、元のおがくずとなってしまうことも問題としてあげられる。本研究では、これを解決するために生木から直接ペレットを作るのではなく、木を水熱処理した後にペレット化し、単位体積・質量あたりの発熱量が高く、耐水性があるペレット

の製造を目指す。現在、水熱処理を用いた研究の多くは、発酵の前処理や成分の抽出を目的とした研究が多く、燃料としての研究もオートクレーブなどを用いた実験室サイズの小規模な試験しか行われていないのが現状である<sup>4-8)</sup>。

## 2. 水熱処理

ここで言う水熱処理とは、木を高温高圧の水蒸気を用いて処理し、熱分解、加水分解等によりその一部を炭化させ、発熱量を増加させる技術である。また、処理時に攪拌すると木を粉碎することが可能である。予備実験では、1.7 MPa 以上の圧力で 30 min 攪拌しながら処理すると、1~2 割の発熱量が増加し 50% 粒径  $D_{50}$  で 5 mm から 0.5 mm の大きさに粉碎されることが確認されている<sup>9)</sup>。しかし、水熱処理は処理に多くのエネルギーを消費する。また、この処理は試料の分解を伴うため投入した全量が回収できず、損失が生じる。現在、水熱処理の試料収率やエネルギー収支、ペレット化における粒度などの詳細な検討が行われていない。また、処理圧力、時間共に検討された条件が少ない。そこで、本研究では 1 バッチ 3 m<sup>3</sup> の容量を持つ水熱処理装置を使用し、実用化レベルにおけるペレット化について評価を行った。

## 3. 実験方法と試料

### (1) 水熱処理装置

本研究で用いた水熱処理装置の諸元を表 1 に、システムフローを図 1 に示す。実験では、水熱圧力容器に試料を投入し、ボイラーで発生させた高圧蒸気の水熱圧力容器に入れて、処理圧力まで加圧し、所定の時間攪拌しながら圧力保持を行った。その後、圧力容器の減圧弁を開放し大気圧

\* 東京農業大学大学院農業工学専攻

\*\* 東京農業大学地域環境科学部生産環境工学科

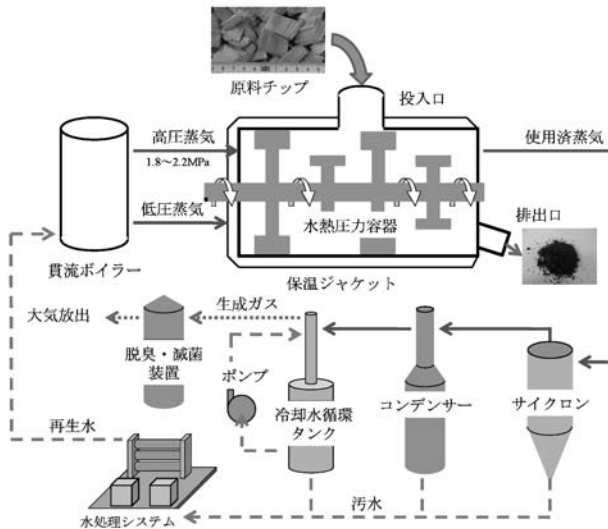


図1 水熱処理装置システムフロー概略図

に戻した。減圧後に压力容器を覆うジャケットに低圧蒸気を入れ加熱・攪拌しながら乾燥させた。ボイラー燃料は灯油を使用した。

## (2) 試験条件と試料

試験条件を表2に示す。本研究では、処理圧力と圧力の保持時間、試料を変化させたCase1~7までの7条件で行った。压力容器内の乾燥はCase3で90min、それ以外は120min間行った。原料の絶乾状態における性状を表3に示す。原料は、福島県産の杉チップを使用し、チップの寸法は50%通過粒径 $D_{50}$ で15mmの切削チップで、Case1~Case6では幹の木部だけのチップを用いて試験を行った。Case7では、樹皮を含んだ全木チップを用いて試験を行った。1バッチ当りの試料投入量は、700~800kgで、体積は2.5 $m^3$ であり、含水率は50~60%であった。

## (3) 測定項目と方法

試料の分析は、高位発熱量、灰分、全炭素、全水素、粒度について行った。高位発熱量、灰分はJIS-M8814、M8812に順じて求め、全炭素と全水素分は、試料を815 $^{\circ}C$ の純酸素中で燃焼させ水蒸気と二酸化炭素をガスクロマトグラフで定量し、絶乾ベースの値で示した。粒度は、JIS-Z8801に規定された篩を用いて、篩分け試験を行った。また、試料の収率は、処理前後の試料質量と含水率を計測し、絶乾ベースで処理後の試料質量を処理前の試料質量で除して求めた。

水熱処理プロセスにおいては、ボイラーの消費燃料、消費水量を計測した。また、2.0MPaと2.2MPaの圧力条件では圧力保持時における、压力容器内の圧力と温度の測定を行った。消費燃料と消費水量は、ボイラーに付属する燃料計と流量計で計測した。压力容器内温度はK熱電対を用い、圧力はKeyence AP14-Sを用いて測定した。エネルギー収支は測定した消費燃料を用いて式(1)より算出した。

表1 水熱処理装置諸元

炉内容積	3.0 $m^3$
最高使用圧力	2.4 MPa
最高使用温度	224 $^{\circ}C$
ボイラー換算蒸発量	1000 kg/h

表2 試験条件

	処理圧力(MPa)	圧力保持時間(min)	試料
Case1	1.8	30	木部チップ
Case2		45	木部チップ
Case3	2.0	15	木部チップ
Case4		30	木部チップ
Case5	2.2	15	木部チップ
Case6		30	木部チップ
Case7		30	全木チップ

表3 原料の性状

	杉幹材	杉全木
高位発熱量(MJ/kg)	20.0	20.2
全炭素(%)	49.47	49.26
全水素(%)	6.43	6.26
灰分(%)	0.35	0.47
$D_{50}$ (mm)	15.0	15.0

$$Ed = \frac{FLHV \times Fe}{\text{処理後試料絶乾湿量} \times HHV} \times 100 \quad (1)$$

ここに、Edはエネルギー収支(%), FLHVはボイラー燃料の低位発熱量(MJ/kg), Feはボイラー燃料消費量(kg), HHVは水熱処理後の試料の高位発熱量(MJ/kg)である。これは、水熱処理に要したエネルギーが、得られる固体燃料のエネルギーに占める割合を表している。

ペレット化はフラットダイ方式のペレタイザー(不二パウダル製F5/11-175)を用い、ダイの孔径は6mm、厚み20mm、試料の供給速度は60kg/hで行った。このとき、試料の粉碎は行わず、篩分けによって最大粒径を変化させた。ペレットの品質評価は、日本住宅・木材技術センター作成の木質ペレット品質規格原案<sup>10)</sup>(以後、規格原案と記す)の簡易測定法により見掛密度の試験を行い、1 $m^3$ 当りの低位発熱量を用いて評価した。低位発熱量はJIS-M8814にて定める式(2)より算出した。

$$LHV = (HHV - 206Hd) \times (1 - 0.01Mt) - 23.0Mt \quad (2)$$

ここに、LHVは低位発熱量(J/g), HHVは高位発熱量(J/g), Hdは全水素(%), Mtは含水率(% )である。試料は压力容器から排出された時点で50(wet%)程度の含水率があり、ペレット化には乾燥が必要である。今回は排出された試料を室内で広げ、天日乾燥を行い12.5(wet%)前後に調整した後でペレット化を行った。

## 4. 試験結果及び考察

### (1) 各処理条件の比較

処理後の試料の分析値を表4に示し、2.0MPaと2.2

表 4 水熱処理物分析結果

	高位発熱量(MJ/kg)	灰分(%)	全炭素(%)	全水素(%)	D <sub>50</sub> (mm)	収率(%)
Case1	22.2	0.50	53.8	6.02	1.2	89.1
Case2	22.3	0.49	54.4	6.07	1.6	90.7
Case3	21.8	0.61	53.5	6.10	2.0	66.9
Case4	22.5	0.58	55.1	6.05	1.3	73.9
Case5	22.4	0.47	54.9	6.03	1.2	79.9
Case6	22.7	0.46	55.4	6.04	1.0	85.1
Case7	22.8	0.57	55.1	5.87	1.1	86.7

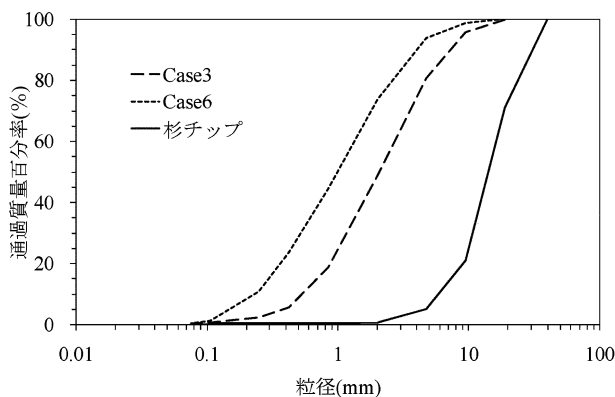


図 2 水熱処理前と処理後の粒度分布

表 5 圧力保持時における圧力容器内の温度と圧力

	平均圧力(MPa)	平均温度(°C)
2.0MPa	1.95	217
2.2MPa	2.20	200

表 6 各条件におけるエネルギー収支

	処理前試料質量(kg)	処理前含水率(%)	処理後含水率(%)	単位消費エネルギー(MJ/D-kg)			Total(MJ/D-kg)
				加圧時	圧力保持	乾燥	
Case1	714	57.7	56.8	4.25	0.36	2.55	7.17
Case2	697	55.6	58.0	4.39	0.59	2.49	7.47
Case3	686	54.7	59.4	4.73	0.24	1.89	6.85
Case4	707	53.0	56.9	4.31	0.44	2.43	7.18
Case5	701	55.1	56.0	4.43	0.12	2.45	6.99
Case6	716	55.5	55.9	4.38	0.12	2.53	7.03
Case7	815	62.1	59.3	5.00	0.12	3.33	8.45

処理後試料総熱量(GJ)	エネルギー収支(%)
5.97	37.0
6.27	36.1
4.53	46.6
5.54	43.4
5.63	38.9
6.16	36.7
6.05	43.1

MPa の処理圧力における、圧力保持の時の圧力容器内の平均圧力と温度を表 5 に示す。処理圧力 1.8 MPa における平均圧力と温度は、データの収集を行っていないため記載していないが、飽和蒸気温度とほぼ同じであった。高位発熱量は Case 3 を除き、1 割以上の増加が認められた。発熱量の増加は、圧力保持時間が同じであれば処理圧力が高いほど多くなり、同じ処理圧力であれば圧力保持時間が長いほど多くなった。また、Case 4 と Case 6 では、処理温度は Case 4 が高いが高位発熱量は Case 6 が高く、発熱量の増加は処理温度よりも処理圧力に依存する可能性がある





り、今後の検討課題と思われる。圧力容器内の圧力と温度が比例しない原因は後述する。

灰分は全ての試験において増加が確認されたが 1% 未満で、規格原案の品質基準における最もよい灰分区分 1 に該当する。よって、水熱処理を行ってもペレット原料として問題は無いと言える。

全炭素は全ての条件下で 10% 前後の増加が確認され、水熱処理が炭化を伴う処理であることが示された。また、全水素は全ての条件下で 0.4~0.3% の減少が確認されたが、式(2)を用いて計算したところ、低位発熱量に対する影響は 0.4% 程度であった。

ペレット化を行う上で、最も重要な工程は粉碎の工程である。今回は、50% 粒径 D<sub>50</sub> で比較すると 15 mm の試料が 1~2 mm に粉碎されたことが確認された。Fig. 2 に処理前の杉チップと、最も粒度が粗い Case 3、最も細かい Case 6 の粒径加積曲線を示す。他の条件では粒度はこの 2 つの間に分布する。一般に、6 mm の標準的なペレットを想定するとペレット化には 5 mm 以下に原料を粉碎する必要がある

表 7 各ペレットの比較

試料名	Case1	Case6	木質ペレット1	木質ペレット2
試料の様子				
含水率(%)	10.0	10.0	10.0	10.0
嵩密度(kg/m <sup>3</sup> )	769	777	740	816
低位発熱量(MJ/kg)	18.6	19.1	17.0	16.9
1m <sup>3</sup> 中熱量(GJ/m <sup>3</sup> )	14.3	14.9	12.6	13.8

り<sup>11)</sup>、Case 3 以外約 9 割がそのままペレット化可能であることが示された。

収率は、処理圧力 1.8 MPa, 2.2 MPa の Case 1, 2, 5, 6, 7 で高く、2.0 MPa である Case 3, 4 の場合は低い値となった。圧力保持時間による差異はあるが、長時間処理した試料の方が高い値となっていた。これは、処理の性質上あり得ないことであるため、含水率測定時のサンプリングがばらついたことによる誤差であると考えられる。従って、収率は圧力保持時間よりも処理圧力の影響が大きく、水熱処理の収率は圧力に依存すると推定される。また、圧力により収率が異なる原因として、木質の構成成分の分解温度の違いが考えられる。木の主要な構成物質はリグニン、セルロース、ヘミセルロースである。ヘミセルロースは蒸気雰囲気中では 200℃ 程度から分解することが知られており、210℃ からは一部のリグニンの分解が始まると言われている<sup>12)</sup>。よって処理温度が高いほど分解は進み、収率は低くなる。本実験でも、表 5 に示すように処理圧力 2.2 MPa よりも 2.0 MPa の方が圧力容器内温度が高く 210℃ 以上になったため、ヘミセルロースとリグニンの両方が分解され、収率が低くなったと考えられる。2.2 MPa の時の圧力容器内温度が低くなった原因として、木のガス化が考えられる。試験中、処理圧力 2.2 MPa において圧力保持中に、ボイラーへの蒸気逆流が確認されており、これは、圧力容器内で気体が発生している可能性があり、原料チップの一部がガス化することにより圧力容器内の圧力が高くなったと考えられる。

また、Case 6 と 7 を比較すると試料性状や収率などに大きな違いはなく、水熱処理を行う場合、全木であるか木部であるかなど、原料の違いによる差はなかった。

## (2) エネルギー収支

各試験条件における、試料質量・含水率、消費エネルギー、エネルギー収支を表 6 に示す。消費エネルギーは燃料消費量に灯油の発熱量 (36.7 MJ/l) を乗じて算出した。各工程に必要なエネルギーは絶対試料 1 kg あたりに換算し示した。エネルギー収支は Case 2, 6, 1 の順で低くなり、処理圧力が 2.0 MPa の Case 3, 4 では高くなった。また、Case 6 と同じ処理条件である Case 7 も高くなっているが、これは試料の含水率が高く、より多くの水を圧力容器内で



図 3 ペレット浸潤 1 時間後

加熱する必要があり、加圧時と乾燥に多くのエネルギーを要したためと考えられる。このことから、原料チップの含水量は加圧と乾燥時のエネルギー消費量に大きく影響する。また、圧力保持における消費エネルギーは処理圧力 2.0, 1.8, 2.2 の順で多くなり、圧力保持時間には比例している。これは、4.1 で述べた原料チップのガス化が関係しており、圧力が高くなるほど多くのチップがガス化し、圧力容器内の圧力が高く保たれ、ボイラーの運転が減少すると考えられる。また、このボイラーの運転の減少が 2.2 MPa における圧力容器内の温度が低くなった原因であると考えられる。

以上のことから、同じ処理圧力 1.8 MPa で圧力保持時間が異なる Case 1 と Case 2 では、Case 2 の高位発熱量が高くなっているが、15 min の圧力保持に必要な熱量と増加した高位発熱量に絶対収量を乗じた熱量を比較した場合は低くなっており、処理圧力 1.8 MPa においては 30 min 以上の圧力保持は必要ない。また、同様の比較を処理圧力 2.2 MPa である Case 5, 6 で行った場合、熱量は増加していた。従って、処理圧力 2.2 MPa では圧力保持時間は 15 min より長い方が望ましいことが示唆された。

以上のことから、エネルギー収支から見ると Case 1 と Case 6 が良い結果を示した。

## (3) ペレット化

表 7 にエネルギー収支が良好であった Case 1 と Case 6 をペレット化したものと、比較用の木質ペレット 2 種の性状とペレットの状況を示す。含水率は全ての試料で 10% に統一し、他の項目を算出している。当初は、水熱処理に

使用した原料を、同じ条件でペレット化し比較を行う予定であったが、今回用いたペレタイザーではおがくず状の木ではペレット化が出来なかった。よって、市販されている木質ペレットを対象として比較検討した。また、このことから水熱処理を行うことにより、杉材のペレット化が容易になったことが示唆される。

前記の通り直径 6 mm のペレットを製造するためには 5 mm 以下に粉碎する必要があるといわれている。しかし、水熱処理により木の強度が低下することが<sup>13)</sup>により報告されており、本研究では原料の最大粒径を 4.75 mm, 5.6 mm, 6.7 mm, 8 mm, 9.5 mm と変化させてペレット化を行った。その結果、全ての粒度において、ほぼ同じ性状のペレットが製造できた。従って、ペレット化において水熱処理後の粉碎は不要であるといえる。

単位体積当りの発熱量は、木質ペレットと比較して 1 m<sup>3</sup> 当り 526~2264 MJ 増加した。これは灯油換算で 14~62L に相当するエネルギーである。このことから、改質ペレットは同じエネルギー量を貯蔵又は輸送しようとした場合、4~18% のストックヤードの削減や輸送効率の向上につながることを示された。

また、木質ペレットは水に触れると膨潤し元のおがくずとなってしまうことが知られているが、図 3 に示すように改質ペレットは水に浸してもおがくずとならず、ペレットの形状を保ち続けた。また、この後改質ペレットをプラスチックに入れ、攪拌したが形状の変化は認められなかった。このことから、耐水性を有することが示された。この原因として、水熱処理による木質成分の低分子化及び元素分析において酸素と水素が減少していることから、ヒドロキシル基の分離による成分の疎水化が考えられるが、詳細は不明である。

## 5. おわりに

木質ペレットのエネルギー密度の向上のため、原料を水熱処理した後にペレット化した改質ペレットを製造し以下の知見を得た。

- (1) 杉チップを処理圧力 1.8 MPa, 圧力保持時間 30 min 以上の処理条件で水熱処理を行うことにより、未処理物と比して高位発熱量が約 1 割増加し、ペレット化に支障のない程度に粉碎されることが確認された。
- (2) 水熱処理には、処理後の試料がもつエネルギーの 4 割程度のエネルギーが必要であった。
- (3) 改質ペレットは木質ペレットと比較して、1 m<sup>3</sup> 当りの発熱量が 526~2264 MJ 高く、貯蔵場所の削減や運搬効率の向上が期待された。
- (4) 木質ペレットと比較して耐水性があり、たとえ水を

かぶっても乾燥させることにより再びペレットとして利用可能であることが示された。

水熱処理は、ペレットの品質向上に寄与するのみではなく、ペレットの製造工程における粉碎と乾燥の工程を代替しうる物であることが示された。水熱処理に必要なエネルギーは、そのほとんどが熱エネルギーであり、他のプラント等から排出される廃熱を有効利用出来れば、ペレット製造時の消費エネルギーを大幅に削減できると考えらえる。今後は、廃熱利用などを視野に製造エネルギーやコストの削減を目指す。

**謝辞:** 本研究を行うに当たり、東京農業大学建設システム工学研究室の院生、学生諸氏からは多大な援助を得た。ここに記して、心よりの感謝の意を示します。

## 引用文献

- 1) 木谷 収 (2005) バイオマス生物資源と環境, コロナ社, p. 69.
- 2) 日本エネルギー学会 (2009) バイオマスハンドブック第 2 版, オーム社, p. 24-29.
- 3) 資源エネルギー庁 (2008) 平成 19 年度エネルギー消費統計調査 [http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/energy/kekka/19/19r\\_esult-2.htm](http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/energy/kekka/19/19r_esult-2.htm) (確認日: 2010/12/03)
- 4) 船造俊孝 (2005) 爆砕及び水熱処理によるバイオマスの資源化, 化学工学会関東支部大会研究発表講演要旨集, 2005, S3-1
- 5) 中野壯泰, 平島 剛, 矢吹順平, 笹木圭子 (2008) バイオマス水熱処理産物の燃焼特性, 資源・素材学会春季大会講演集, 2, p. 193-194
- 6) 小林信介, 平川 歩, 羽多野重信, 板谷義紀, 田邊靖博, 小林 潤, 森 滋勝 (2008) 木質バイオマス加圧水熱処理残渣の性状評価, 化学工学会年会研究発表講演要旨集, 73, 537
- 7) 安藤浩毅, 古川郁子, 神野好孝, 坂木 剛, 上村芳三, 幡手泰雄 (2009) 加圧熱水を用いた木質バイオマスの分解挙動, 鹿児島県工業技術センター研究報告, 14, p. 45-51
- 8) 今村邦彦, 樋口浩一, 宗綱洋人, 橋本寿之, 田中聖子 (2006) 水熱処理によるエネルギー化に関する研究, 広島県立西部工業技術センター研究報告, 49, p. 42-46
- 9) 牧 恒雄, 関山哲雄, 穂波信雄, 吉村正敬, 濱野周泰, 中村貴彦, 馬場竜介 (2003) 循環型社会に向けた廃棄物の資源化に関する研究, 農大総研紀要, 15・16, 1-3
- 10) 新エネルギー財団, 日本エネルギー学会 (2008) バイオマス技術ハンドブック, オーム社, p. 118.
- 11) 日本住宅・木材技術センター (2007) 木質ペレット品質規格原案 <http://www.howtec.or.jp/pellet/pdf/kikaku.pdf#search='木質ペレット品質規格原案'> (確認日: 2009/12/05)
- 12) 師岡淳郎 (1999) 高温水蒸気雰囲気での木材のレオロジー, 木材研究・資料, 35, 12-20
- 13) 馬場竜介, 大林宏也, 飯島倫明, 中村貴彦, 牧 恒雄 (2008) 水熱処理による木質バイオマスの強度と破砕エネルギー低減に関する検討, 東京農業大学農学集報, 53, 1, 27-31

# Production of Wood Pellets by Hydrothermal Processing

By

Yuto TAKINAMI\*, Tuneo MAKI\*\* and Masasi KOYANAGAWA\*\*

(Received February 22, 2011/Accepted June 17, 2011)

**Summary** : To make greater use of wood pellets, the efficiency of transportation needs to be improve, to increase energy density and to reduce the area of storage yard. Water resistance is also required for long-term storage. Hydrothermal processing is a technology which is able to increase the quantity of heat of wood by steam and mixing. In this study, the process of producing pellets with real machine size from wood chips of *Cryptomeria japonica* treated with hydrothermal processing was examined. The increase of heating value, grain size change, mass yield and energy yield were evaluated through tests under six processing conditions of processing pressure and pressure retention time. According to the results of examination, it was found that the heating value increased about 10% by hydrothermal processing, and the processing conditions of 2.2 MPa & 30 min and 1.8 MPa & 30 min showed good results for energy yield, The processing chips of *Cryptomeria japonica* were fine enough not to need further comminution for pelletizing. As the result of examination, the heating value per unit volume was increased under hydrothermal processing, and a water resistant pellet was produced by this process.

**Key words** : Woody biomass, energy, wood pellet, hydrothermal processing

---

\* Graduate School of Agriculture Engineering, Tokyo University of Agriculture

\*\* Department of Bioproduction and Engineering, Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture