木質バイオマスの粉碎エネルギーに及ぼす樹種および粉碎方式の影響

Effect of Tree Species and Comminution Method on Comminution Energy of Woody Biomass

西 健治*・大政光史**・廣川 敬康**
澤 井 徹**・渋谷唯司**・梶本武志***

Kenji NISHI, Mitsushi OHMASA, Noriyasu HIROKAWA, Toru SAWAI, Tadashi SHIBUE and Takeshi KAJIMOTO

(Received January 12, 2012)

In order to reduce the emission of greenhouse gases, much attention has been focused on energy utilization of biomass in recent years. The promotion of the utilization of domestic woody biomass contributes not only to the improvement of energy self-sufficiency, but also to the environmental protection of forests and undeveloped woodlands near populated areas or satoyamas in Japan. Typical woody biomass derived from Japanese forests and satoyamas are Japanese Cedar and Konara. When woody biomass is utilized as biomass fuel, it is important to examine the energy consumptions for pretreatments such as comminution and reforming. In this study, using Konara, Japanese Cedar, and Balsa, the effects of tree species, comminution methods, and semi-carbonization of the woody biomass on comminution energy are investigated. The results obtained in this study are as follows. (1) In the case that water content is less than a fiber saturation point, the comminution energy for three species is expressed as a function of water content. In the case that water content exceeds a fiber saturation point, comminution energy for three species is expressed as a function of density. The comminution energy can be estimated by using the present empirical equations within $\pm 50\%$ accuracy. (2) Regarding the comminution property of semi-carbonized woody biomass, for the wood region, the empirical equations of work index depend on the comminution methods regardless of tree species and sieve of screen. For the semi-carbonized and carbonized regions, the empirical equation of work index is presented regardless of tree species, comminution methods, and sieve of screen. The comminution energy can be estimated by using the present empirical equations within $\pm 60\%$ accuracy.

Key Words: Woody Biomass, Comminution Energy, Semi-carbonization, Density of Tree Species

1. 緒言

再生可能エネルギーへの関心が高められていく中、様々な分野でバイオマスに関する政策が打ち出されている。平成 23 年 11 月に「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法案」が国会で成立し、平成 24 年 7 月から「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」が施行される¹⁾。この制度は再生可能エネルギーによって発電された電気を、一定期間、固定価格で電気事業者が買い取ることを義務付けるとともに、再生可能エネルギーを買い取る費用を、国民が電気料金の一部として負担する。この制度により国民がバイオマスをはじめとする再生可能エネルギーについて理解を深め、普及の後押しになっていくと考えられる。

今後利活用を促進させていくべき国内のバイオマス資源

の一つとして、農林業に由来する国産の未利用バイオマスが挙げられており、「バイオマスニッポン総合戦略」でも利用拡大の方針が提示されている²⁾。国産資源の利活用は、二酸化炭素の排出削減のみならず、エネルギー自給率の向上、森林保全、農林業の活性化とも結びつき、多くの意義を有している。とりわけ、森林保全は火急の課題とされている。これは、林業採算性の低下から森林所有者の林業離れが進み、森林資源が十分活用されないばかりか、必要な施業が行われず、森林のもつ公益的機能の発揮にも支障を来すことが危惧されていることによる。このため、農林水産省は、森林の有する多面的機能の持続的発揮と林業・木材産業の再生を図りつつ、木材の利用を通じた低炭素社会の構築を図ることを目的に、平成 21 年 12 月に「森林・林業再生プラン」を策定した³⁾。さらに、平成 22 年 6 月 18 日に閣議決定された「新成長戦略～「元気な日本」復活の

* 近畿大学大学院生物理工学研究科 (〒 649-6493 和歌山県紀の川市西三谷 930)

Graduate school of Biology-Oriented Science and Technology, Kinki University, (930 Nishimitani, Kinokawa, Wakayama 649-6493, Japan)

** 近畿大学生物理工学部 (〒 649-6493 和歌山県紀の川市西三谷 930)

School of Biology-Oriented Science and Technology, Kinki University, (930 Nishimitani, Kinokawa, Wakayama 649-6493, Japan)

*** 和歌山県工業技術センター (〒 649-6261 和歌山市小倉 60)

Industrial Technology Center of Wakayama Prefecture, (Ogura, Wakayama 649-6261, Japan)

シナリオ～」は、森林・林業再生プランを国家戦略プロジェクトの一つと位置付け選定した⁴⁾。森林・林業に関する施策が国家的な戦略に位置付けられることはこれまでになかったことで、森林バイオマスが今後重要な位置を占めていくと考えられる。

一方、豊富に存在する森林バイオマスは、山林からの搬出に多大なエネルギーを要し、安定供給の面で課題を残している。そこで著者らは里山の木質資源に着目した。里山は産出地が需要地に近接しているため、林地搬出のエネルギー損失を大幅に回避できる。また里山の中核を成す二次林は森林面積の30%を占め⁵⁾、里山の木質資源生長量は約3000万t-C/年にもなり⁶⁾、豊富な資源を有している。平成22年10月には愛知県名古屋市で「生物多様性条約第10回締約国会議」が開催され、「SATOYAMA イニシアティブ」が推進された⁷⁾。このように世界各地で里山のような二次的自然環境を改めて見直し、持続可能な関係の維持・再構築を進め、自然共生社会の実現を目指す動きが始まっており、里山に関する注目は高まりつつある。

著者らはこれまでスギ間伐材の利活用を念頭に置き、木質系粉碎物燃料の可能性について研究を行ってきた⁸⁾。ウッドペレットの様な造粒を必要としない粉碎物燃料を地域資源として利用し得る可能性を提示した。本研究では、里山林の有効活用を念頭に置き、地域内のローカルバイオマス資源として、里山の木質資源を粉碎物燃料として利用することを考える。国内の里山林の場合、コナラ、ブナといった広葉樹が主たる資源となっており⁹⁾、著者らがこれまで研究対象にしてきた針葉樹のスギ間伐材とは特性が異なる可能性がある。

本研究では、森林バイオマスの代表的な針葉樹であるスギ間伐材、里山に賦存する代表的な広葉樹である高密度のコナラ材、木材資源の中で最も密度の低いバルサ材の3樹種を対象に、粉碎物燃料製造のプロセスエネルギー評価において重要となる粉碎特性を検討する。研究目的は以下の2点である。(1) 木質バイオマスの粉碎エネルギーに及ぼす樹種、含水率、粉碎方式の影響を明らかにする。(2) 粉碎エネルギーの低減を図るために、半炭化処理を施した木質バイオマスの粉碎特性をそれぞれの樹種に対して明らかにする。

2. 実験装置及び方法

2.1 粉碎実験

粉碎実験では、前報⁸⁾と同様、衝撃式のハンマーミルと切削式のカッターミルを用いた。一般的に、前者は鉋物のような硬い破碎物の粉碎に、後者は弾力のある破碎物の粉碎に適している。両粉碎機共に所定の目開きのスクリーンを出口部に設置することで粉碎物の粒子径が調節可能となる。スクリーンの目開きは0.25、0.5、1、2、3 mm、回転数は3000 rpmに設定した。

1 実験当たり5 mm角に切り揃えた試料5 gを粉碎機に投入し、粉碎機の負荷電流をサンプリング周波数1 Hzでパソコンに取り込んだ。取り込んだデータから粉碎エネルギー E_c [kJ/kg]を次式により算出した。

$$E_c = \frac{e \cdot \cos \theta}{M} \int_{t_1}^{t_2} (I - I_0) \cdot dt \quad (1)$$

ただし、 I [A]は粉碎時の負荷電流、 I_0 [A]は無負荷電流、 e [V]は電圧、 t [s]は時間である。 M [kg]は粉碎投入質量と排出質量の平均値を示す。 e は100 V、 $\cos \theta$ は1とした。 t_1 、 t_2 は粉碎開始および終了時刻である。

2.2 粉碎仕事指数

粉碎エネルギーを予測するための実験相関式を提示するために、Bondの法則¹⁰⁾により粉碎仕事指数を求めた。Bondの法則は粒子に加えられたひずみエネルギーは粉碎開始段階では粒子の体積に比例するが、粒子に亀裂が発生した後は生成した破断面積に比例するとし、粉碎エネルギー E_c [kJ/kg]を次式で表している。

$$E_c = W_i \left(\sqrt{\frac{100}{x_{p0.8}}} - \sqrt{\frac{100}{x_{f0.8}}} \right) \quad (2)$$

ここで $x_{f0.8}$ [μm]、 $x_{p0.8}$ [μm]は粉碎前後の80%通過粒子径、 W_i は粉碎仕事指数である。 $x_{f0.8}$ は投入した試料の代表寸法(5 mm)、 $x_{p0.8}$ は粉碎により得られた碎成物をJIS Z8815にしたがい53～2000 μmの範囲で分級することで得られた積算分率から算出した。粉碎仕事指数は、計測された粉碎エネルギーと、80%通過粒子径から算出できる。

3. 実験結果

3.1 未改質木質バイオマスの粉碎エネルギー

3.1.1 実験試料

粉碎実験の試料にはスギ間伐材、コナラ材、バルサ材を使用する。本節では未改質木質バイオマスの粉碎エネルギーに及ぼす含水率の影響を検討するため、未改質の実験試料を含水率 $w = 0 \sim 60\%$ に調整する。なお、本研究の含水率は湿潤ベースに基づくものである。Fig.1に含水率増加による実験試料の密度変化を示す。絶乾状態において、コナラ材、スギ間伐材、バルサ材の密度は757、425、145 kg/m³であり、いずれの樹種も含水率増大に伴い密度は上昇する。なお、コナラ材では含水率 $w = 60\%$ の調整が困難であったため実験の対象外とした。

木材に含まれる水分には結合水と自由水の2種類がある。自由水は木材の仮道管や道管などの細胞内腔中に液体の水として存在する。結合水は木材を構成する高分子の水酸基に水素結合で結びつく水分子である。木材が乾燥しても自由水が減少する限りにおいては物理的性質はほとんど変化しない。自由水が完全に蒸発し、結合水のみを含む $w = 20$

Fig.1 Variation of density with water content

Fig.2 Effect of tree species and water content of woody biomass on comminution energy

～30%の状態を繊維飽和点と呼ぶ。含水率が繊維飽和点を下回ると化学的に結合している結合水が減少し、木材の機械的性質は大きく変化することが知られている¹¹⁾。

3.1.2 粉碎エネルギーに及ぼす樹種・含水率・粉碎方式・スクリーンの影響

未改質のスギ間伐材、コナラ材、バルサ材の含水率 w に対する粉碎エネルギー E_c の変化をスクリーン $S = 3 \text{ mm}$ を一例として Fig.2 に示す。図中、実線と破線は粉碎方式を、記号の違いは樹種を表している。図中に示す一点鎖線は繊維飽和点であり、繊維飽和点を境に粉碎エネルギーの特性が異なっていることがわかる。繊維飽和点以下の含水率 $w \leq 20\%$ では、いずれの樹種も粉碎方式によらず w 減少と共に E_c は減少する。繊維飽和点以下の領域では、含水率の減少により結合水が除去され木材が脆くなり機械的性質が大きく変化したことで、粉碎エネルギーの減少が誘発されたと考えられる。また、この領域における樹種の差異を見てみると、ハンマーミルでは密度の最も高いコナラ材が他の樹種よりも若干高く、カッターミルでは密度の最も小さいバルサ材が他の樹種よりも若干高くなっているものの、樹種による差異はそれほど小さくなく、粉碎方式の差異が顕著である。このことから、繊維飽和点以下では、それぞれの粉碎方式に対して樹種に関係なく結合水の含有率から一義的に粉碎エネルギーを決定できることになる。一方 $w \geq 40\%$ の繊維飽和点を越えた領域では、樹種により E_c の大きさと E_c の w に対する変化が異なる。スギ間伐材の E_c は、繊維飽和点とほぼ同じ値を有する。コナラ材の E_c は、繊維飽和点とほぼ同じ値あるいは w 増加に対して若干減少する傾向も見られる。含水率の増加に対する粉碎エネルギーの漸減は、粉碎試料単位質量当たりの木材割合が減少したことが原因と考えられる。コナラ材とスギ間伐材では、自由水が増しても E_c への影響は小さい。バルサ材の E_c は繊維飽和点の E_c より大きな値を取り、 w 増加に対してハンマーミルでは不変、カッターミルでは漸減する。バルサ材の粉碎エネルギーが他樹種に比べ大きくなったのは、低密度のため空隙が極めて多く、一部の空隙に自由水が含まれ

Fig.3 Effect of density of woody biomass on comminution energy

ているものの自由水を含まない空隙部分が衝撃吸収の役割を果たしたためと考えられる。 $w \geq 40\%$ における E_c は樹種の影響が顕著であり、同一の含水率に対しては、いずれの粉碎方式でも、バルサ材、スギ間伐材、コナラ材の順で粉碎エネルギーが変化する。

$w \geq 40\%$ の繊維飽和点を越えた領域における樹種の影響を整理するため、水分を含む試料密度 ρ に対する粉碎エネルギー E_c の変化を検討する。Fig.3 は ρ に対する E_c の変化を表したものであり、図中のパラメータは Fig.2 と同様である。各樹種のライン上の左端データから $w = 0, 10, 20, 40, 60\%$ の密度を示している。 $w \geq 40\%$ の繊維飽和点を越えた領域では、いずれの粉碎方式においても E_c を ρ に対して一義的に直線近似でき、図中の実線、破線で示す実験相関式で3樹種の E_c を ρ のみの関数として整理できる。

Fig.4 は未改質のコナラ材の含水率 w に対する粉碎エネルギー E_c の変化をスクリーン S 別に示す。図中、実線と破線は粉碎方式を、記号の違いはスクリーンの目開き S を表す。●が $S = 3 \text{ mm}$ 、▲が $S = 2 \text{ mm}$ 、■が $S = 1 \text{ mm}$ 、▼が $S = 0.5 \text{ mm}$ 、◆が $S = 0.25 \text{ mm}$ である。いずれの S に対しても、ハンマーミルはカッターミルに比べ E_c が大きく

Fig.4 Effect of water content and screen of woody biomass on comminution energy

Fig.5 Effect of density and screen of woody biomass on comminution energy

なっている。また、いずれの粉碎方式も S 減少と共に E_c は大きくなることがわかる。これは他の樹種についても同様であった。

Fig.5 は未改質のコナラ材の密度 ρ に対する粉碎エネルギー E_c の変化をスクリーン S 別に示す。図中、実線と破線は粉碎方式を、記号の違いは Fig.4 と同様である。いずれの粉碎方式も S 減少と共に E_c は大きくなることがわかる。これは他の樹種についても同様であった。

3.1.3 Bond の法則による粉碎エネルギーの実験相関式

前節 3.1.2 の結果より、繊維飽和点以下の含水率では粉碎エネルギーを含水率の関数として、繊維飽和点以上の含水率では粉碎エネルギーを密度の関数として表現し得ることが示された。本節では、この結果を受けて、繊維飽和点以下と以上に分けて粉碎仕事指数の実験相関式を検討する。

Fig.6 は繊維飽和点以下の $w \leq 20\%$ の試料の粉碎仕事指数 W_i を含水率 w に対して示したものである。図中のパラメータは、樹種、粉碎方式、スクリーンを表す。それぞれの粉碎方式に対して、樹種、スクリーンに関係なく式 (3) (図中実線)、式 (4) (図中破線) に示す実験相関式が得られた。

$$W_i = e^{8.57+0.07015w} \quad (3)$$

for Hammer mill in $w \leq 20\%$

$$W_i = e^{7.50+0.03820w} \quad (4)$$

for Cutter mill in $w \leq 20\%$

Fig.7 は繊維飽和点を超えた $w \geq 40\%$ の試料の粉碎仕事指数 W_i を密度 ρ に対して示したものである。図中のパラメータは、樹種、粉碎方式、スクリーンを表す。それぞれの粉碎方式に対して、樹種、スクリーンに関係なく式 (5) (図中実線)、式 (6) (図中破線) に示す実験相関式が得られた。

$$W_i = e^{10.70-0.00058\rho} \quad (5)$$

for Hammer mill in $w \geq 40\%$

$$W_i = e^{9.84-0.00178\rho} \quad (6)$$

for Cutter mill in $w \geq 40\%$

Fig.6、Fig.7 に示した W_i の実験相関式より算出した粉碎エネルギーの予測値 E_{wi} を粉碎エネルギーの実験値 E_c と比較した。比較結果を Fig.8 に示す。 W_i の実験相関式を用いることで、 $\pm 50\%$ の範囲で粉碎エネルギーの実験値を予測することができる。

3.2 半炭化木質バイオマスの粉碎エネルギー

3.2.1 実験試料

前報⁸⁾で示したように、半炭化処理を施すことで、固体燃料の発熱量向上、粉碎エネルギーの低減、燃料輸送にかかわるエネルギーの低減が可能となる。本節では、半炭化木質バイオマスの粉碎エネルギーに及ぼす半炭化改質の影響を検討するため、スギ間伐材、コナラ材は $T = 150 \sim 500$ °C で、バルサ材は $T = 150 \sim 300$ °C で 1 時間熱分解処理した半炭化物を実験試料として用いた。熱分解は電気炉で昇温速度 30 °C /min に設定し砂浴法¹²⁾ (酸化アルミニウムを使用)により行った。半炭化物の含水率は 0 % とする。なお、 $T > 300$ °C のバルサ材の実験試料は、熱分解により崩壊したため計測対象から外した。

Fig.9 にスギ間伐材、コナラ材、バルサ材における半炭化物の質量収率 Y_M を熱分解温度 T に対して示す。質量収率の値は絶乾状態における質量 ($T = 100$ °C) を基準としている。パラメータは樹種別に●がスギ間伐材、▲がコナラ材、■がバルサ材を表している。いずれの樹種においても、 $T \leq 150$ °C の W (木質) 領域では $Y_M \approx 100\%$ 、 $200 \leq T \leq 400$ °C の SC (半炭化) 領域では熱分解が進行し、揮発分が放出され質量収率が $Y_M \approx 30\%$ にまで減少している。 $T \geq 400$ °C の C (炭化) 領域では Y_M が緩やかに減少していることがわかる。質量収率の変化に対する樹種の影響はほとんど認められない。

Fig.10 に半炭化物の密度 ρ を熱分解温度 T に対して示す。Fig.11 に $T = 100$ °C における絶乾状態密度 ρ_0 を基準とした半炭化物の密度比を熱分解温度 T に対して示す。Fig.10 では T が上昇するにつれ、いずれの樹種でも緩やかに ρ が減少していることがわかる。これは、熱分解により

Fig.6 Empirical correlation of work index as a function of water content

Fig.8 Comparison of experimental data with predicted data

Fig.7 Empirical correlation of work index as a function of density

Fig.9 Mass yield of semi-carbonized charcoal

揮発分が放出され木材の繊維構造が崩壊し、質量が減少していくためである。しかしながら、Fig.11に示されているように、熱分解温度上昇に伴う半炭化物の構造変化は樹種により差異が認められる。T ≤ 200 °Cの熱分解が進行する

前段階では樹種の影響はないが、T > 200 °Cの半炭化領域ではバルサ材のみが急激に密度比が低下していることが見て取れる。これは、スギ間伐材及びコナラ材は熱分解が進み質量が減少すると同時に体積収縮が生じるのに対して、バルサ材では体積収縮が生じていないためであると考えられる。以上から、T > 200 °Cに対するバルサ材は、スギ間伐材とコナラ材とは性格を異にしていることがわかる。

3.2.2 粉碎エネルギーに及ぼす樹種・半炭化・粉碎方式・スクリーンの影響

Fig.12は半炭化処理したスギ間伐材、コナラ材、バルサ材の粉碎エネルギー E_c を熱分解温度 T に対して示したものである。ただし、T = 100 °Cは半炭化処理をしていない絶乾

Fig.10 Variation of density with pyrolysis temperature

Fig.11 Ratio of semi-carbonized charcoal density to dry wood density

木材を表す。いずれの樹種および粉碎方式でも $T \leq 150$ °C の W 領域において E_c は高いが、 200 °C $\leq T \leq 400$ °C の SC 領域で E_c は急激に減少し、 $T \geq 400$ °C の C 領域ではかなり小さな値となる。これは熱分解により木質繊維構造が破壊されたためと考えられる。W 領域では、粉碎方式による差異が顕著であり、ハンマーミルではカッターミルに比べ 4 倍程度の大きさとなっている。粉碎方式の差異に比べ、樹種の差異はそれほど大きくはないが、ハンマーミルでは密度の高いコナラ材が、カッターミルでは密度の低いバルサ材が、他の樹種に比べて高い値をとる。SC 領域および C 領域では樹種および粉碎方式とは無関係にほぼ同じ E_c となる。

Fig.13 は半炭化処理したコナラ材の熱分解温度 T に対する粉碎エネルギー E_c の変化をスクリーン S 別に示す。両粉碎方式共に S が小さいほど E_c は増大する。これは他の樹種についても同様である。

3.2.3 Bond の法則による粉碎エネルギーの実験相関式

Fig.14 は各樹種・各粉碎方式で得られた粉碎仕事指数 W_i を熱分解温度 T に対して示したものであり、図中のパラメータは粉碎方式別に中塗の記号はハンマーミル、中抜きの記号はカッターミル、記号の違いは樹種を、色の違いはスクリーンを表している。

$T \leq 200$ °C の領域では樹種、スクリーンによらず粉碎方

Fig.12 Effect of tree species and pyrolysis temperature of woody biomass on comminution energy

Fig.13 Effect of pyrolysis temperature of woody biomass on comminution energy

式別に式 (7) (図中実線)、式 (8) (図中破線) に示す実験相関式が得られた。 $T > 200$ °C の領域では樹種、スクリーン、粉碎方式によらず、 W_i を式 (8) に示す $T \leq 200$ °C のカッターミルに対する実験相関式で与えることができる。

$$W_i = e^{9.67-0.01041T} \quad (7)$$

for Hammer mill in $T \leq 200$ °C

$$W_i = e^{8.14-0.00693T} \quad (8)$$

for Hammer mill in $T > 200$ °C

for Cutter mill

なお、バルサ材は Fig.11 で示したように $T > 200$ °C の領域で他の樹種と特性が異なるため、いずれの粉碎方式においても式 (9) (図中一点鎖線) に示す実験相関式を与える。

$$W_i = e^{15.03-0.03495T} \quad (9)$$

for Hammer mill and Cutter mill in $T > 200$ °C

式 (7)、(8)、(9) に示した W_i の実験相関式より算出した粉碎エネルギーの予測値 E_{W_i} を粉碎エネルギーの実験値 E_c と比較した。比較結果を Fig.15 に示す。 W_i の実験相関式を用いることで、 ± 60 % の範囲で粉碎エネルギーの実験値を予測することができる。

Fig.14 Empirical correlation of work index as a function of pyrolysis temperature

Fig.15 Comparison of experimental data with predicted data

4. 結言

里山に賦存する代表的な広葉樹である高密度のコナラ材、森林バイオマスの代表的な針葉樹であるスギ間伐材、木材資源の中で最も密度の低いバルサ材を対象に、粉碎物燃料製造のプロセスエネルギー評価において重要となる粉碎特性を検討した結果、以下の結論が得られた。

(1) 未改質木質バイオマスの粉碎エネルギー

Bond の法則における粉碎仕事指数は、繊維飽和点以下の含水率では含水率の関数として、繊維飽和点以上の含水率では粉碎エネルギーを密度の関数として表現することにより、樹種に関係なく粉碎方式別に実験相関式を与えることができた。本研究で提案した粉碎仕事指数の実験相関式と粉碎実験結果を比較すると $\pm 50\%$ の範囲内で粉碎エネルギーを見積もることができる。

(2) 半炭化木質バイオマスの粉碎エネルギー

Bond の法則における粉碎仕事指数は、 $T \leq 200$ °C の領域では 3 樹種に関係なく、粉碎方式別に実験相関式を与えることができた。 $T > 200$ °C の領域ではスギ間伐材とコナラ材の両樹種は、粉碎方式に依存せず 1 つの実験相関式を与えることができた。 $T > 200$ °C の領域におけるバルサ材に関しては他の樹種と特性が異なるため、他の樹種とは異なる実験相関式となった。本研究で提案した粉碎仕事指数の実験相関式と粉碎実験結果を比較すると $\pm 60\%$ の範囲内で粉碎エネルギーを見積もることができる。

参考文献

- 1) 経済産業省・資源エネルギー庁：“再生可能エネルギーの固定価格買取制度”、(2012)
- 2) 農林水産省：“バイオマスニッポン総合戦略”、(2006)
- 3) 農林水産省：“森林・林業再生プラン”、(2009)
- 4) 内閣官房国家戦略室：“新成長戦略～「元気な日本」復活のシナリオ～”、(2010)
- 5) 環境省自然環境局：“日本の里地里山の調査・分析について（中間報告）”、(2001)
- 6) 佐野寛、本庄孝子、井田民男：“エネルギー自立性を高める新里山システム”、日本エネルギー学会誌 85-1 (2006) 42-48
- 7) 環境省：“SATOYAMA イニシアティブ”、(2011)
- 8) 西健治、澤井徹、大政光史、廣川敬康、渋谷唯司、梶本武志：“木質系粉碎物燃料の前処理工程（粉碎・乾燥・半炭化改質）および輸送におけるエネルギー消費量の低減”、高温学会誌 37-2 (2011) 63-70
- 9) 林野庁計画課：“森林資源現況調査”、(2007)
- 10) 椿淳一郎、鈴木道隆、神田良照：“入門粒子・粉体工学”、日刊工業新聞社、(2002) 113
- 11) 森林総合研究所：“改訂 4 版木材工業ハンドブック”、丸善株式会社、(2004) 113-114
- 12) 池際博行、平田重俊、平岡健志、梶本武志：“木材の簡易炭化法と低温炭化処理木材の性質”、木材学会誌 41-5 (1995) 516-521