

## 論文

## スギ燃料チップ含水率の簡易測定法の精度検証と供給チップ含水率の実態

寺岡行雄<sup>\*1</sup>・田嶋亜紀子<sup>\*2</sup>・佐藤政宗<sup>\*3</sup>・加治佐 剛<sup>\*1</sup>・Stefan K.Pelz<sup>\*4</sup>

## Examination of a precision of simple measurement method for the fuel wood chip's moisture content and actual states of moisture content of supplied chips.

Yukio Teraoka<sup>\*1</sup>・Akiko Tashima<sup>\*2</sup>・Masamune Sato<sup>\*3</sup>・Tsuyoshi Kajisa<sup>\*1</sup>・Stefan K. Pelz<sup>\*4</sup>

寺岡行雄・田嶋亜紀子・佐藤政宗・加治佐 剛・Stefan K. PELZ：スギ燃料チップ含水率の簡易測定法の精度検証と供給チップ含水率の実態 九州森林研究 72：15－19，2019 チップボイラーへの燃料チップの安定供給体制が必要となっている。そこで、鹿児島県内のチップボイラーに供給されている燃料チップを対象として、それらの含水率の平均と変動を明らかにすること、およびスギ燃料チップの簡易な含水率計測方法の精度と実用性を検証することを目的とした。1トントラック26台分の燃料チップからのサンプルで含水率を計測した。その結果、バケツを使った含水率の簡易な測定方法でも、高い精度で測定可能であることがわかった。また、8日間で供給された燃料チップは、平均としては50%以下の含水率であったが、偏りもあるためチップサイロ等での攪拌が重要であることが示唆された。安定した含水率での燃料チップの供給体制作りのため、簡易な測定方法が活用されることが期待された。

キーワード：チップボイラー、燃料チップ、含水率、簡易測定法、チップ品質規格

Yukio Teraoka・Akiko Tashima・Masamune Sato・Tsuyoshi Kajisa・Stefan K. Pelz：Examination of a precision of simple measurement method for the fuel wood chip's moisture content and actual states of moisture content of supplied chips. *Kyushu Forest Research* 72：15－19，2019 It has been necessary for a stable fuel wood chip supply to wood chip boilers. Therefore, the objectives of this study were precision of simple measurement method for the fuel wood chip's moisture contents and actual states of moisture contents of supplied chips in Kagoshima Prefecture, Japan. The simple moisture content measurement method for only Sugi (*Cryptomeria japonica*) chip with bark was calculating moisture content from bulk density filled in a stool with 22.8 liter. Wood chip samples were taken from 26 chip delivery trucks and measured by both the simple measurement method and kiln dried method. As the results, it was possible to measure the moisture contents by the simple method precisely. The wood chip samples showed less than 50% moisture contents which were acceptable moisture content for wood ship boilers. However, it would be necessary for stirring chips in sialo to reduce unevenness of chip's moisture contents.

Key words：Wood chip boiler, Fuel chip, moisture content, simple measurement method, wood chip standard

## I. はじめに

木材の燃焼により排出される二酸化炭素は樹木の成長過程で大気中の二酸化炭素を蓄積したものであることから、木材はカーボンニュートラルな燃料であるとされている。このため化石燃料の代わりに、持続的に管理されている森林から伐採した木材をエネルギー源として利用することは、化石燃料に由来する二酸化炭素の排出を抑制することにつながる。

鹿児島県でも豊富な森林資源の有効活用や地球温暖化防止、循環型社会の形成などの面から木質バイオマスの利用が期待されている。また、木質バイオマスをエネルギー源として有効に活用することを積極的に進めるという方針（鹿児島県，2010）から、価格の不安定な化石燃料の代替燃料として木質バイオマスを利用す

るチップボイラーの導入を推進しているが、導入事例は多くない。導入を検討できない理由として、チップボイラー設備費用が高いことに加えて、燃料チップの質・量両面での安定供給が不安であるという問題が挙げられる（伊地知・寺岡，2012）。

燃料チップの特徴として、メリットは比較的容易に製造でき安価であること、質の良いチップは製紙用原料として用いることが可能であることなどがある。デメリットとしては、含水率（本論文では特に断らない限り、含水率とは湿量基準含水率の意味で使用することとする）が一定でなく高含水率のものが混入する可能性があるということである。木質チップを燃料として利用する場合、含水率がボイラーの燃焼効率に大きく影響する。ボイラーには、乾燥チップ用ボイラーと生チップ用ボイラーがあり、利用可能な燃料チップの含水率が制限されている。それ以上の含水率の

\*1 鹿児島大学農学部 Fac. Agric., Kagoshima Univ., Kagoshima 890-0065, Japan

\*2 大分県庁 Oita Prefectural Government.

\*3 (株) 森のエネルギー研究所 Japan Wood Energy Co.,Ltd.

\*4 Rottenburg University of Applied Science.

燃料チップを利用すると、不完全燃焼や煙、煤等の発生の原因となる。したがって、ボイラーごとで要求される含水率以下の燃料チップを安定的に供給することが求められる。伊地知・寺岡(2012)は、鹿児島県内で3カ所に導入されたチップボイラーに供給されている燃料チップの含水率を低減するための取り組みについて報告している。しかし、燃料サイロ投入時での燃料チップ含水率の実態とその変動は明かではない。そこで、本研究の第一の目的は鹿児島県内のチップボイラーに供給されている燃料チップの含水率の実態を明らかにすることである。

木質チップは元々製紙原材料用として作られてきたため、製紙工場への搬入までの木質チップの製造・輸送・保管工程において含水率を正しく測定する必要もなかった。しかし、今後チップボイラー用燃料供給を行うためには、出荷時点での含水率測定が必要となる。燃料チップ製造や配送の現場では、できるだけ簡単に作業員にもわかりやすい計測方法が必要であり、さらに計測機材も安価でなければならない。そこで、鹿児島県が開発したスギ燃料チップの簡易含水率計測方法(鹿児島県環境林務部, 2014)があることから、この簡易含水率計測法の精度と実用性を検証することを第二の目的とした。

## II. 燃料チップ含水率の計測方法

### 1. 含水率測定方法の種類と特徴

一般に燃料チップの含水率測定方法には、サンプルを乾燥機オープンや赤外線水分計によって全乾状態の重量測定を行う全乾法が用いられている。その他の含水率計測方法として表-1に示す通り、電気抵抗式、電気容量式、近赤外線方式、マイクロ波透過式、X線吸収法がある(Nyström and Dahlquist, 2004; Hultnäs and Fernandez-Cano, 2012)。これらには測定機器が高価である、高含水率のチップでは測定精度が低いあるいは測定に長時間を要するなどの難点があるものもある。

表-1. 木材の含水率測定方法と特徴

	全乾法	電気抵抗式	電気容量式	近赤外線式	マイクロ波透過式	X線
測定精度						
湿量含水率23%以上	高い	低い	低い	低い	低い	高い
湿量含水率23%未満	高い	高い	高い	高い	高い	高い
測定時間	6時間 ～数日	瞬時	瞬時	瞬時	瞬時	瞬時
測定部分	試料全体	センサー 先端部	深度 20~30mm	深度 2~3mm	透過部分	透過部分
測定エリア	試料全体	センサー 先端部	センサー 両極部	放射範囲	放射範囲	透過部分
推定製品価格	5~15 万円	5~15 万円	10~100 万円	100~500 万円	200~1000 万円	1000~5000 万円
ランニングコスト	低い	低い	低い	低い	低い	高い

燃料チップを消費する木質バイオマス発電所などでは、燃料サイロからの燃料輸送用ベルトコンベア上の燃料チップの含水率を近赤外線モニタリングする方式が採用されている(Nyström and Dahlquist, 2004)。

### 2. 簡易含水率測定法

鹿児島県は環境貢献度への「見える化」を推進するために、平成23年1月に「かごしまCO<sub>2</sub>吸収量認証制度」を創設した。この制度の中で木質バイオマスの利用によるCO<sub>2</sub>排出削減量を評価するために、木質バイオマス利用によるCO<sub>2</sub>排出削減量の認

証を実施している(鹿児島県, 2015)。木質バイオマス利用機器としてのチップボイラーの普及を目指す鹿児島県では、燃料チップの製造や消費の現場で利用可能である簡便な含水率測定方法(以下、簡易測定法とする)を開発した(鹿児島県環境林務部, 2014)。

簡易測定法は、まず、チップを運搬するトラックの荷台またはチップサイロからサンプルを採取する。採取場所は、それぞれが近くならないような3箇所(例えばトラック荷台の前、中、後部など)から測定容器1個分ずつチップを採取し、これらを別の場所に設置したシート上に集めよく混合させたものをサンプルとする。

次に、写真-1にあるように、正確に容量を計測した約20ℓのバケツのようなプラスチック製測定容器(以下、バケツ)にチップを充填する。そして、密度の均一化を図るため、バケツを約15cmの高さから水平なコンクリート等の床面に3回落下させ、目減りした分のチップを補充する。落下・補充の作業を3回繰り返す。バケツ内のチップ質量を10g単位で測定する。チップ質量から、チップのかさ密度(チップ質量(g)/バケツ容量(cm<sup>3</sup>))を算出する。この際のかさ密度は、少数点以下第4位を四捨五入し3位止めとする。かさ密度から次式により湿量基準含水率を算出する。

$$\text{湿量基準含水率 (\%)} = \frac{100 \times (690 \times \text{かさ密度} + 82)}{100 + (690 \times \text{かさ密度} + 82)}$$



写真-1. 簡易測定法を実施している様子

この簡易測定法の原理は、スギ材は同一の容積密度、チップサイズもほぼ一定であると仮定した場合、一定の詰め方で容器へ詰めれば、容器ごと計測した質量の違いはスギチップ中の水分量の違いを反映するという考え方に基づいている。詰め方が一定であれば、同一の容積容器内の全乾のスギチップ材の質量は同じであると仮定しているからである。

実際には、表-2のような含水率早見表をバケツに貼っておくことで、簡易に含水率を知ることができる。例えば、かさ比重が0.264であるならば、含水率は50%であることがわかるようになっている。

表-2. かさ密度からの含水率早見表

かさ密度(g/cm <sup>3</sup> )	含水率(%)
0.155	20.0
0.167	25.0
0.181	30.0
0.197	35.0
0.215	40.0
0.237	45.0
0.264	50.0
0.296	55.0
0.336	60.0
0.388	65.0
0.457	70.0

### Ⅲ. 研究方法

鹿児島県内でチップボイラーを導入している施設のうち、300 kW と 150 kW の生チップ用ボイラーを導入している社会福祉施設 A に納入されている燃料チップを研究対象とした。社会福祉施設 A では温水供給と冷暖房にチップボイラーが利用されている。燃料チップは、近隣の製材加工工場の B 産業から納入されている。2013 年 11 月 30 日から 12 月 14 日までの 15 日間のうち 1 日の投入量が 1 トントラック 3 台分以上であった日を研究対象としたところ、B 産業からは 8 日に分けて 26 台分の燃料チップが納入された。トラックごとでサンプルチップを採取し、26 の研究試料とした。

まず、社会福祉施設 A に供給されている燃料チップの含水率を計測した。トラック 1 台につき、チップサンプル 1 つを採取し、現場にて簡易測定法のための質量計測が行われた。本研究での簡易測定法で用いたバケツの容量は 22,800 cm<sup>3</sup> であり、マニュアルに従ってかさ比重の計測を行った。質量計測後、直ちにビニル袋に詰め替えて、鹿児島大学まで送付した。また、燃料チップの原材料やチップングなどの生産方法について、B 産業に聞き取り調査を行った。研究室に送付されたトラック 1 台毎からのサンプル燃料チップは、生状態での初期質量を測定した後、100℃の乾燥用オープンに全乾状態となるまで乾燥させた。デシケータで冷却後に全乾質量を計測し、初期質量との差から水分量を求め、湿量基準含水率を算出した。

解析として、まず、26 台から採取した燃料チップの含水率を簡易測定法と全乾法でそれぞれ求め、回帰分析による比較により簡易測定法の精度の検証を行った。次に、26 台分のサンプルは 8 日に分けて納入されたことから、燃料チップが納入された日ごとの燃料チップ含水率の平均値の変動について一元配置の分散分析により解析した。

### Ⅳ. 結果

#### 1. トラック毎の燃料チップの含水率

表-3 に、測定日とサンプル番号、生質量、全乾質量、かさ密度、簡易測定法と全乾法による含水率を示している。サンプル番号は、チップ運搬のトラックごとに付けたものである。サンプルチップは簡易測定法で用いたバケツ単位（容量 22,800 cm<sup>3</sup>）で

表-3. 燃料チップサンプルの質量および含水率測定結果

測定年月日 Date	サンプル番号 Sample No.	生質量 Fresh weight (g)	全乾質量 Dry Weight (g)	かさ比重 Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	湿量基準含水率(%) MC (%) wet base	
					簡易測定法 Simple	全乾法 Dried
2013.11.30	b	4,980	2,770	0.218	41	44
	c	4,410	2,812	0.193	34	36
	d	5,060	2,793	0.222	42	45
	e	4,280	2,780	0.188	32	35
2013.12.3	a	5,520	2,809	0.242	46	49
	b	4,700	2,882	0.206	38	39
2013.12.4	c	4,370	2,768	0.192	33	37
	a	4,250	2,708	0.186	32	36
	b	5,310	2,866	0.233	44	46
2013.12.6	c	6,030	2,938	0.264	50	51
	a	4,550	2,757	0.200	36	39
	b	4,680	2,865	0.205	37	39
2013.12.7	c	5,050	2,759	0.221	41	45
	a	4,600	2,790	0.202	36	39
	b	5,450	2,960	0.239	45	46
2013.12.11	c	6,210	2,964	0.272	51	52
	a	4,830	2,857	0.212	39	41
	b	4,480	2,818	0.196	35	37
2013.12.12	c	5,430	2,904	0.238	45	47
	d	5,780	2,746	0.254	48	52
	a	4,300	2,655	0.189	32	38
2013.12.14	b	4,400	2,739	0.193	34	38
	c	5,060	2,833	0.222	42	44
	a	4,940	2,795	0.217	40	43
2013.12.14	b	5,530	2,821	0.243	46	49
	c	5,060	2,832	0.222	42	44

取り扱った。1 日に投入するチップの量はトラック台数で 3 台～4 台分であった。

チップの生質量は 4,250 g から 6,210 g の範囲であり、平均では 4,972 g であった。全乾法による全乾質量は、2,655 g から 2,964 g の範囲で、平均では 2,816 g であった。かさ比重では 0.186 から 0.272 の範囲を示し、平均では 0.218 であった。

含水率では簡易測定法の場合、32% から 51% の範囲にあり、平均では 40.1% となった。全乾法の場合は 35% から 52% であり、平均で 42.8% であり、簡易測定法は全乾法に比べて少し低い値を示した。同じチップ納入日での含水率の変動幅は、全乾法では最小が 6% で最大が 15%、簡易測定法の場合は最小が 5% で最大が 18% であった。

#### 2. 簡易測定法の精度検証

簡易測定法と全乾法の含水率の関係を図-1 に示す。参考のため二つの含水率が同じ場合を示す 45° 線を同時に示している。

強い正の相関が認められ、相関係数も 0.98 と非常に高い値を示した ( $p < 0.01$ )。回帰直線の傾きが 45° 線と同じかどうかの検定を行ったところ、45° 線と平行と見なしてよいと言えることがわかった。しかし、簡易測定法による含水率は全乾法に比べて 3% 前後低い値を示していた。

#### 3. 含水率の変動

チップの納入日ごとの含水率の変動について図-2 に示す。各々のチップ納入日の平均含水率は 11 月 30 日から 40.1%、41.5%、44.5%、41.2%、45.8%、44.2%、40.0%、45.5% であり、平均含水率では全ての投入日で利用可能な含水率であった。また、投入日ごとの含水率で算出した標準偏差は 3.053

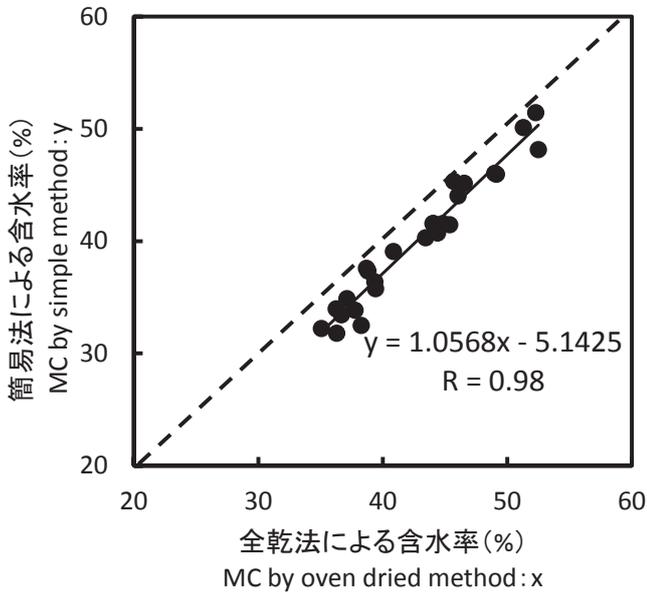


図-1. 全乾法と簡易測定法の含水率の関係

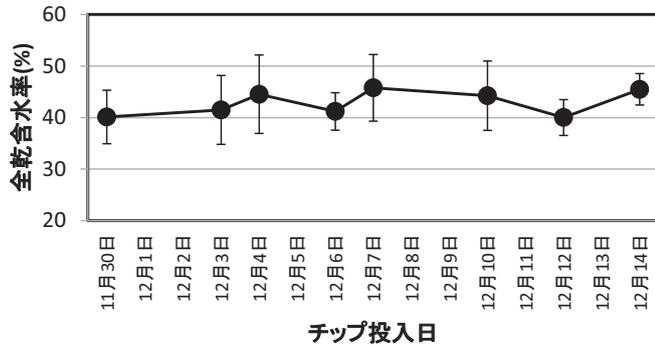


図-2. 測定日ごとのチップの含水率の変動

表-4. チップ含水率の違いに関する分散分析表 (ANOVA)

変動要因	変動	自由度	分散	F値 (分散比)	P-値	F 境界値
グループ間	130.5051	7	18.6436	0.5841	0.76	2.5767
グループ内	574.5406	18	31.9189			
合計	705.0457	25				

~7.609であった。社会福祉施設 A のボイラーで、利用可能な燃料チップの含水率は 50 % 以下であるが、サンプルごとの含水率では、表-3 に示すように、含水率が 50 % を超えるサンプルが 3 回確認された。

燃料チップ投入日ごとの含水率の変動を一元配置の分散分析にかけたところ、分散比は十分小さい値となり ( $F$  値 0.5841 < 2.5767,  $p=0.76$ )、投入日間で有意な差があるとは言えない結果となった (表-4)。

B 産業への聞き取りの結果、チップの原材料は鹿児島県内の国有林からの間伐材からの原木であり、含水率を下げるため工場への搬入後の 1, 2ヶ月程度をはい積み状態で保管したものであった。これらの原木を製材加工した背板部分をチップにしたものに、過去の製材加工で作られ倉庫内で十分に乾燥させた背板からのチップを混合したものであった。

## V. 考 察

### 1. 簡易測定法の測定精度

表-3 より、簡易測定法の含水率は全乾法のものより 1~6 パーセントポイント低くなっていた。これはかさ密度がやや過小であることを意味している。回帰直線の傾きは 45°線と同じであったことから、切片部分が定誤差であると考えられる。鹿児島県が簡易測定法でのかさ密度から含水率を求めるための検量線を作成する際には、県内 5 箇所のチップ工場で生産されたスギチップをサンプルとしていた。鹿児島県内で生産されるスギ間伐材の多くはオビスギ系であると言われているが、検量線作成に用いられたスギの品種が同じであったとは確認できていない。スギは品種や成長速度によって容積密度が若干異なっている (見尾ほか, 1985)。かさ密度がやや小さかったことは、今回の調査対象とした B 産業のチップは、原材料であった鹿児島県内の国有林のスギの容積密度が小さい品種あるいは成長特性であった可能性を示唆している。

回帰直線の傾きが 45°であったことは、簡易測定法での測定精度が高かったことを意味している。今回はチップをバケツに充填する際の実演を行い、注意喚起をしたことが有効に作用したと推察される。簡易測定法の適用の際には、正確な実施方法についての講習を十分に行うことで、より精度の高い方法になると期待される。

表-1 に示したように燃料チップの含水率測定方法は様々であるが、国内の木質チップボイラーへの燃料供給の規模では、電気容量式、近赤外線方式、マイクロ波透過式、X 線吸収法といった高価な設備を導入することは困難である。燃料チップの含水率が高いとトラブルの原因となることから、納入時には含水率を計測する必要がある。チップボイラー導入時に赤外線水分計も同時に導入することが多いが、オガコなどの粉体と違いチップを完全に乾燥させることは困難で、得られた含水率に対する不安がある。本研究で試験したバケツによる簡易測定法は 1 万円以下で装置が準備でき、現場の作業員が習得すれば安定した測定精度が得られる。含水率は燃料としての評価として重要であり、このような簡易な含水率測定方法の普及が望まれる。

### 2. 燃料チップの含水率変動

浦上・糸長 (2008) は、未利用材由来の燃料チップの割合が増加しており、燃料チップの含水率調整が重要であると指摘している。燃料チップの需要が大きくなるにつれて、含水率や形状あるいは灰分などの規格作りが必要となってきた。全国木材チップ工業連合会は 2012 年 5 月に「木材チップの品質規格規程について」を公表している (全国木材チップ工業連合会, 2012)。木材チップ品質規格の中でチップの乾燥程度 (含水率) について、D1 (20 % 未満), D2 (20 % 以上 30 % 未満), D3 (30 % 以上 50 % 未満), D4 (50 % 以上) の 4 区分としている。また、木質バイオマスエネルギー利用推進協議会は 2014 年 11 月に「燃料用木質チップの品質規格」を公表した (木質バイオマスエネルギー利用推進協議会, 2014)。この中で含水率についての規格 (規格中では水分と表現している) は、M25 (含水率 25 % 以下の乾燥チップ), M35 (同 26 % ~ 35 % の準乾燥チップ), M45 (同 36 % ~ 45 % の湿潤チップ), M55 (同 46 % ~ 55 % の生チップ)

の4段階の含水率により燃料チップを分類規定している。本研究での8日間の燃料チップの平均含水率は40.0%~45.8%であり、全国木材チップ工業連合会のチップの品質規定ではD3に該当し、木質バイオマスエネルギー利用推進協議会の規格に当てはめると、M45の湿潤チップあるいはM55の生チップであると判定される。

スギの生立木の含水率は季節にもよるが、60%から70%となること(野原ほか, 1977)も珍しくない。前述の規格では燃料チップとしての含水率は50%あるいは55%未満であることが求められ、含水率を低下させるために様々な取り組みが行われている。例えば、宮田ほか(2006)は20cm程度の径を持つヒノキ丸太残材を舗装土場で104日間自然乾燥させたところ、82%の含水率が38%に低下したことを報告している。市原ほか(2009)は林地残材を平積みで天然乾燥させ、293日間で43%の初期含水率が12~14%にまで低下したことを報告している。Yoshida et al. (2010)は、50~73%の初期含水率をチップをローラーで圧縮するだけで、46~57%に下げることができたと報告している。以上のように原木やチップの状態での乾燥の取り組みにより、燃料チップとして利用可能な含水率にまで下げることが可能である。B産業では、原木を1~2ヶ月天然乾燥させた上で製材し、その背板をチップとしていた。それでも含水率を十分に下げることができないため、倉庫で乾燥させた背板を通常ラインで製材した背板と混合して使用していた。このような見かけ上の含水率を下げることで、燃料チップ全体で見れば問題はない。B産業への聞き取り調査の結果から、測定日が同じであるチップは、加工された日も原材料も全て同じであった。しかし、トラック毎の含水率には変動があり均質ではなかった。通常の燃焼中のチップボイラーでは、多少含水率の高い燃料が投入されても問題はないが、偶然にも点火の際に含水率の高い燃料チップがあると、不完全燃焼や煙発生の原因となる。宮田ほか(2008)は、木質チップの自然乾燥実験の結果、週1回の定期的な攪拌を施すことで含水率60%が40%前後に低下したと報告している。このような攪拌作業には燃料チップ含水率の変動を減少させることも期待できることから、燃料チップ投入時あるいはサイロ投入の前段階として全体をよく攪拌することで、含水率の変動が小さくなると推察される。

以上のことから、何らかの方法での乾燥を行って基準以下の含水率にした燃料チップの製造を行い、ボイラーへの納入の前に簡易測定法などで含水率の確認をして販売を行うことを習慣化すると、ボイラートラブルも減少し、燃料チップへの信頼も高まると考えられる。

## 謝 辞

本研究は鹿児島県環境林務部かごしま材振興課「平成24年度木質バイオマスエネルギー利用可能性調査」の一部として行った

ものであり、研究遂行へのご支援に感謝申し上げます。また、本研究を進めるにあたり、試料の提供や現地調査の際、快く御協力していただいた鹿児島県工業技術センター地域資源部の皆様、鹿児島県地球温暖化対策課の皆様、社会福祉施設A及びB産業の皆様に感謝の意を申し上げます。また、本研究のとりまとめのために、ドイツDAAD PAJAKO事業(2015年~2016年) Forest Identities, Dissimilarities and Diversities: Pathways to Sustainable Forest Management in Germany and Japan (ForestPath)の支援を受けた。

## 引用文献

- Hultnäs, M. and Fernandez-Cano, V. (2012) J. Wood Sci. 58: 309-314.
- 市原孝志ほか(2009) ※. 日林誌 91: 192-200.
- 伊地知秀太・寺岡行雄(2012) 鹿大演研報 39: 15-19.
- 鹿児島県(2010) [https://www.pref.kagoshima.jp/ad06/sangyoro-rodo/rinsui/nyenyu/ringyo/wood\\_biomass.html](https://www.pref.kagoshima.jp/ad06/sangyoro-rodo/rinsui/nyenyu/ringyo/wood_biomass.html) (2015年6月10日利用)
- 鹿児島県(2015) <https://www.pref.kagoshima.jp/ad02/kurashikankyo/kankyo/ondanka/nintei/co2ninsyou.html> (2015年6月10日利用)
- 鹿児島県環境林務部(2014) 木質チップ含水率の簡易測定マニュアル。(非公表)
- 見尾貞治ほか(1985) 九大演報 85: 187-199.
- 宮田大輔ほか(2006) ※. 日林誌 88: 245-253.
- 宮田大輔ほか(2008) ※. 日林誌 90: 75-83.
- 木質バイオマスエネルギー利用推進協議会(2014) <http://www.jwba.org/> 燃料用木質チップの品質規格 / (2015年6月10日利用)
- 野原正人ほか(1977) 岐阜県林セ研報 5: 31-48.
- Nyström, J. and Dahlquist, E. (2004) Fuel 83: 773-779.
- 林野庁(2011) <http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/plan/pdf/kihonkeikakuhontai.pdf> (2015年6月10日利用)
- 林野庁(2012) 森林・林業白書. 161-162 pp, 財団法人農林統計協会, 東京
- 浦上健司・糸長浩司ほか(2008) 日本建築学会大会学術講演便概集: 534 pp.
- Yoshida, T. et al. (2010) Biomass and Bioenergy 34: 1053-1058.
- 全国木材チップ工業連合会(2012) <http://zmchip.com/> (2015年6月10日利用)
- ※原文中での含水率は乾量基準で表現されていたが、本文中では著者らにより湿量基準に換算して記述した。
- (2018年10月2日受付; 2018年12月19日受理)