

木質バイオマス燃焼灰の利用および竹チップ混焼条件の検討

小幡 透*

Utilization of Woody Biomass Ash and Investigation of Co-Firing Condition with Bamboo Chips

Toru OBATA

木質バイオマスボイラーから排出される燃焼灰の有効利用の一つとして土壌改良材としての活用を考え、燃焼灰の成分分析を行った結果、有害物質の含有量は土壌汚染対策法で定める土壌含有量基準値以下であった。また、燃焼灰からの成分の溶出試験を行うとともに、燃焼灰の利用可能性について農業関係者への聞き取り調査を行い、イネ科植物へのケイ酸補給剤として利用の可能性があるとの知見を得た。一方、竹チップを燃料として利用するために木チップとの混合割合やクリンカの発生状況について調べ、2%程度までの混合であれば木チップのみを燃焼させた場合とほとんど変わらないことが示唆された。

Keyword : 木質バイオマス燃焼灰, クリンカ, 土壌改良材, 土壌汚染対策法, 溶出試験

1. 緒言

近年、温室効果ガス、特に二酸化炭素の排出は世界的な環境問題となっており、その排出抑制については京都議定書やパリ協定などで数値目標が掲げられている。国内では、2012年に施行された「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」に基づき、「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」(FIT)が導入された。これにより太陽光をはじめとする再生可能エネルギーを利用した発電所が相次いで操業し、木質バイオマスを燃料とするバイオマス発電所も全国的に急増している。すなわち、FIT導入前の2012年6月末までの累積導入量62万kWに対して、FIT導入後の2012年7月から2019年12月末までに806万kW(324件)¹⁾と発電量で10倍以上の設備が認定され、そのうち177万kWに当たる131件の木質バイオマス発電所が運転を開始している状況である。また、事業所単位の小規模な取組として、石油燃料の代替として木質バイオマスを燃料とするバイオマスボイラーが全国各地で導入されており、本県でもチップボイラーや木屑焚きボイラーなどが各地に導入されている。

木質バイオマスを利用するメリットは、新たな二酸化炭素を排出しないことである。これは、燃焼により発生した二酸化炭素は、樹木が成長する際の光合成で同量消費されるためである。一方、木質バイオマスの燃焼におけるデメリットは、副生物として燃焼灰が排出されることであり、その処分については全国的な課題となっている。排出量が少ない場合には近所の農家に無償譲渡し、土壌改良材として利用されている場合もあるが、ペレット製造時に製造装置からクロムが混入したペレットを燃料として使用し、そ

の燃焼灰から有害物質のクロムが検出された例もあったことから、燃焼灰が土壌改良材として広く普及していないのが現状である。バイオマス発電所から排出される大量の燃焼灰は、一部は路盤材などとして利用されているが、残りは高額な処理コストをかけて産業廃棄物として処分している。ところが、環境省がバイオマス資源の焼却灰については、間伐材などを原料として製造された木質チップを専用のボイラーで燃焼させて生じたもののうち、性状、排出の状況、取引価値の有無、占有者(排出した事業所等)の意思等を総合的に判断して利活用が確実である焼却灰は産業廃棄物に該当しない²⁾と明示していることから、バイオマス燃焼灰の有効活用法の開発が急がれており、全国各地で様々な取組が行われている^{3)~7)}。

ところで、鹿児島県は全国一の竹林面積(約196km²)⁸⁾を誇っているが、そのほとんどが有効利用されずに放置されているのが長年の課題である。木質バイオマス発電においては、燃料確保のために森林の過伐採や乱伐が当初から懸念されており、竹の有効活用法の一つとして燃料としての利用が考えられる。竹も発電利用に供する木質バイオマスの証明のためのガイドラインで木質バイオマスと定義されており⁹⁾¹⁰⁾、木材などと同様に扱われている。しかし、竹はカリウムやケイ素を多く含んでいるために、クリンカと呼ばれる塊状固形物(図1)の生成量が増加する可能性がある。クリンカが燃焼炉の炉壁に付着するとボイラーの出力が低下するなどの問題はバイオマス発電共通の問題として起こっていることから、竹を燃料として利用するためにはクリンカの発生量を極力抑えるような混合割合を求めることが重要である。

本研究では、既存の燃焼灰の成分分析によりその成分組

*食品・化学部



図1 バイオマスボイラーから発生したクリンカ
左：クリンカ 右：クリンカを砕いたもの

成や有害物質の含有量を求めることにより、有効利用の可否について検討する。また、まずは燃焼灰を加工することなく使える土壌改良材としての利用を想定し、燃焼灰からの成分溶出の傾向を明らかにすることにより燃焼灰の活用方法の開拓に取り組むとともに、竹を燃料として利用する際の混焼条件について検討することにより、竹チップの利用促進を図ることを目的とする。

2. 試料および実験方法

2.1 燃焼灰の採取

試料は県内の5事業所より排出された6種類の燃焼灰A～Fを用いた。A～Cはバイオマスボイラーの燃焼炉内に残った燃焼灰、Dはバイオマスボイラー燃焼時に舞い上がり、集塵機により回収された飛灰（フライアッシュ）、Eはバイオマス発電所のフライアッシュ、Fはバイオマス発電所において燃焼後に燃焼炉内に残った主灰（ボトムアッシュ）である。なお、E、Fは同一のバイオマス発電所から排出された燃焼灰である。バイオマスボイラーとバイオマス発電を比較すると、国内で主に流通しているバイオマスボイラーは燃焼温度が650℃程度のものが多い¹¹⁾のに対し、バイオマス発電は燃焼温度が800～900℃またはそれ以上になる場合もある¹²⁾ことから、燃焼温度の違いによる成分組成の比較ができる。

なお、燃焼灰を利用する際には粒径が揃っていた方が利用しやすく、塊状固形物を分離して利用することが考えられることから、塊状の燃焼灰が含まれないようにサンプリングを行った。

2.2 燃焼灰の成分調査

燃焼灰中のケイ酸分は、JIS M 8853の脱水重量分析・吸光光度分析併用法により求めた。吸光光度計は、紫外可視分光光度計UV-2550（株）島津製作所製）を用いた。その他の元素については、蓋付きテフロン容器に燃焼灰を量り取り、これに硝酸を加えて蓋をし、150℃で約1時間加熱分解した。放冷後濾過し、濾液を高周波プラズマ発光分光分析装置(ICP) IRIS-1000DUO(日本ジャーレルアッシュ(株)製)または原子吸光光度計AAnalyst800(パーキンエルマー

製)により分析した。りん酸は、前述の硝酸分解した濾液をUV-2550を用いてJIS K 0102のモリブデン青（アスコルビン酸還元）吸光光度法により定量した。

2.3 燃焼灰成分の溶出試験

(独)農林水産消費安全技術センターが定めている肥料等試験方法(2020)¹³⁾に基づき、カリウム、マグネシウム、石灰カルシウム、マンガン、りん酸について水溶性試験およびク溶性試験（2%クエン酸溶液への溶出試験）を行った。溶出した元素はICPにより定量した。なお、肥料として使用する際に、水溶性試験は即効性、ク溶性試験は遅効性の指標となる。

2.4 木チップ・竹チップ混焼条件の検討

木チップと竹チップの混焼条件として、チップ全量に対する竹チップの割合および燃焼時の雰囲気温度について検討した。全体に対する竹チップの割合が0%、2%、5%、10%となるように木チップと竹チップを混合し、これらをそれぞれ磁製蒸発皿内に少しずつ加えながら燃焼させた。燃焼後は完全に灰にはならず、炭化物が多く残った状態であったため、この炭化物を固形物が生成しないように550℃の電気炉で完全に灰化した。これらをそれぞれ1gずつ磁性るつばに量り取り、600℃、700℃、800℃、900℃の電気炉で1時間加熱し、固形物の生成状況を調べた。

3. 結果及び考察

3.1 燃焼灰の成分調査

県内5事業所から排出された燃焼灰の主な成分組成を図2に示す。A～Cはスギチップを燃焼して燃焼炉内に残った燃焼灰であり、主成分としてカルシウム、カリウム、マグネシウム等が検出された。A、Cと比較してBのカルシウム分が少ないのは、ボイラーの燃焼温度が低いことが推察される。燃焼灰を観察すると未燃物が多かったことから、その分カルシウムの割合が低くなったと考えられる。カリウムについて大きな差が見られないのは、燃焼温度が低いとクリンカの発生が抑制され、粉状の燃焼灰中にカリウムが残存したためと考えられる。Dはケイ酸の含有量が多いが、これは燃料の一部として木材よりもケイ素含有量の多いバーク（樹皮）¹⁴⁾¹⁵⁾を用いているためと推察される。E、Fもスギチップに加えてバークを燃料としており、特にボトムアッシュであるFはケイ酸が多く含まれていた。E、FはA～Dと比較してカリウムが少ないが、バイオマス発電の燃焼炉内が高温になり低沸点のカリウム(沸点759℃)の一部が消失し、燃焼灰中のカリウムが減少したと推察される。EとFは同一のバイオマス発電所の燃焼灰であるが、Eは飛灰であることから軽金属のカルシウム等が多く含まれ、成分組成の異なることが推察される。

また、微量成分については土壌改良材としての利用を踏

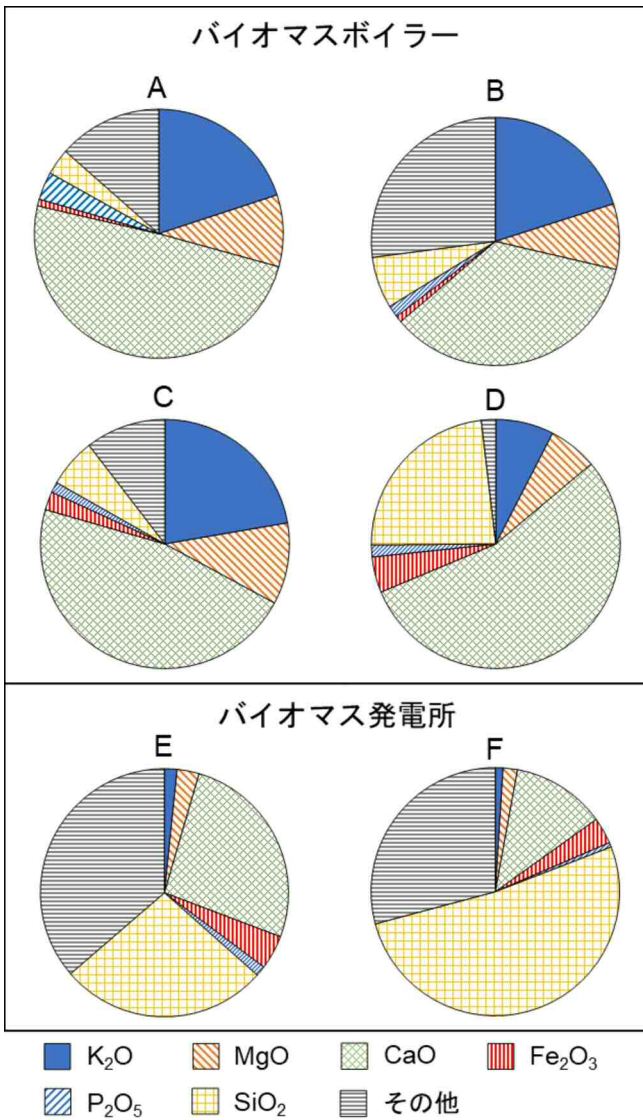


図2 燃焼灰の成分分析（酸化物換算）

また、土壤汚染対策法において特定有害物質に挙げられている鉛、カドミウム、クロム（土壤汚染対策法では六価クロム）の測定を行った（図3）。A～Fのいずれにおいてもこれらの含有量が土壤含有量基準値を下回っていたことから、分析結果からは土壤還元が可能であることが示唆

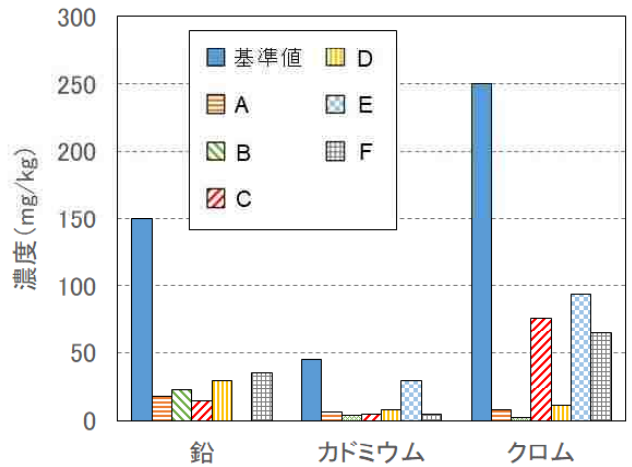


図3 燃焼灰中の特定有害物質濃度

されたが、作物を栽培した際に作物が重金属を吸収しないか懸念される。土壤還元剤として利用するには、実際に土壤散布した際の重金属の溶出量試験を行い、土壤汚染対策法の溶出量基準を満たすかを評価する必要がある。

3.2 燃焼灰成分の溶出試験

各成分の溶出量を燃焼灰中の成分含有量で除した溶出率を図4に示す。カリウムは水溶性試験でよく溶出しているが、カリウム含有量が多いものほど溶出率が高く、カリウム含有量の少ないE、Fは溶出率が低い傾向であった。カリウムは水に溶けやすく、すぐに土壤に溶出してその効果がすぐに現れる即効性が期待できる。カリウムが欠乏すると植物の葉が暗緑色になり、根腐れが起きやすい¹⁴⁾などの症状が現れることから、カリウムを多く含む燃焼灰はこれらの症状を改善するために使用できる可能性が示唆された。

マグネシウム、カルシウム、マンガンは水にはほとんど溶出しなかったが、クエン酸溶液にはマグネシウムが3～4割、カルシウムが6割程度、マンガンが8割程度溶出した。ク溶性のものについては徐々に溶け出すため遅効性が期待できる。マグネシウムが欠乏するとイチゴやバラの葉

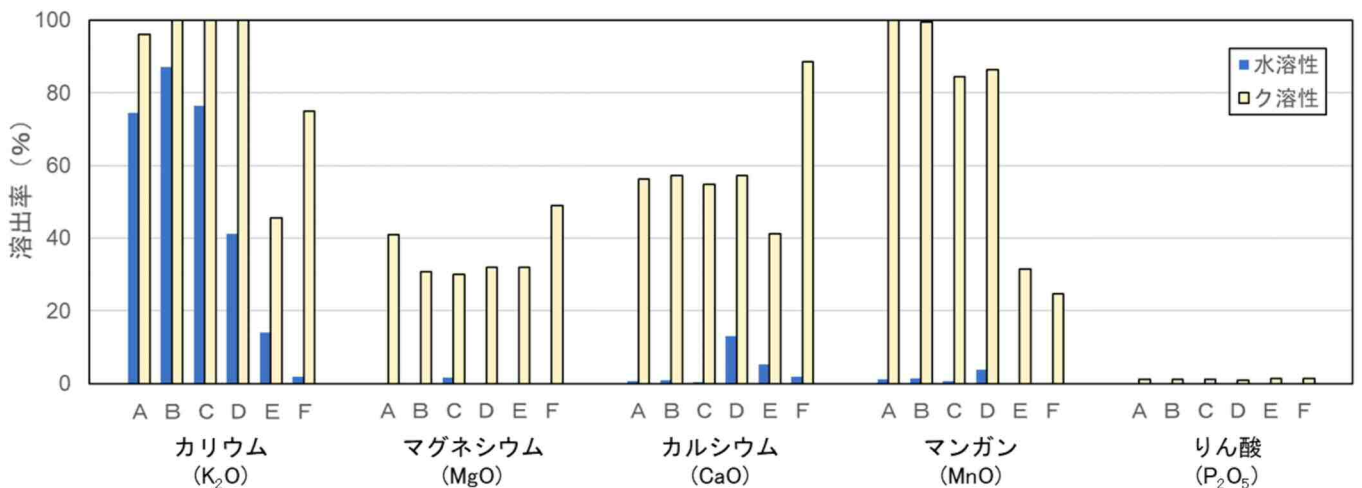


図4 燃焼灰成分の溶出試験結果

に黒色斑点が出現したり、カルシウム欠乏ではトマトの尻腐れ症状、マンガン欠乏ではブドウの着色不良などの現象が現れる¹⁶⁾ことから、これらの諸症状の改善に役立つ可能性が示唆された。

なお、りん酸は水にもクエン酸溶液にもほとんど溶出しなかった。

3. 3 燃焼灰の利用可能性調査

木質バイオマス燃焼灰の土壌改良材としての利用可能性を把握するために、農業関係の研究者に聞き取り調査を行った結果、以下のような知見が得られた。

- ・灰の状態では扱いつらいために造粒などの加工が必要だが、コストがかかる。
- ・肥料の三大要素（窒素、りん酸、カリウム）のうち、燃焼灰から補給可能であるのはカリウムだが、肥料として用いるには含有量が少ない。
- ・ケイ酸分の多い燃焼灰については、イネ科植物の成長のためのケイ酸補給剤として利用できる可能性がある。例えば、イネの茎を丈夫にするために年1回水田への散布（1万m²（1ha）当たり1トン程度）や、さとうきびの収量を上げるためにさとうきび畑に散布する。
- ・下水汚泥の水分調整剤としての利用

以上のことから、燃焼灰をケイ酸補給剤として利用できる可能性が考えられる。鹿児島県のイネの作付面積は235km²（23,500ha、令和2年度¹⁷⁾）、バイオマス発電所からの燃焼灰排出量は聞き取り調査により年間約12,000トンであることから、県内の水田のうち5%にケイ酸補給剤として散布した場合、燃焼灰の約1割を利用することができる。さとうきびはほとんどが離島で栽培されており、特に奄美地域はケイ酸肥料の施用が必要な圃場が多く、1万m²当たり800~900kgの施用が必要である¹⁸⁾。ただし、現状では輸送コストがかかるために現実的ではないのが現状である。

3. 4 木チップ・竹チップ混焼条件の検討

竹チップの燃料としての利用を検討するに当たり、竹チップ燃焼灰の元素分析を行った。主成分の成分組成を図5、特定有害物質濃度を図6に示す。燃焼灰の約半分はカリウムで、次いでケイ素が多く、カルシウムは図2の燃焼灰と比較して非常に少なかった。また、特定有害金属濃度は図3の燃焼灰とほとんど変わらず、基準値と比較すると十分に低い値であった。

木質バイオマスを燃焼させた際、どれくらいの温度でクリンカが発生するか、また竹チップを燃料として利用する場合、どの程度の割合まで混合できるか把握するために、木チップ燃焼灰および木チップ・竹チップ混焼灰の加熱試験を行った。加熱試験後の燃焼灰の写真を図7に示す。木

チップのみの燃焼灰を用いた加熱試験では、700℃までは固形物の生成は見られなかったが、800℃以上になるとるつぼ内で固形化が始まっており、るつぼ底部の形状で固まりつつあった。木チップ・竹チップ混焼灰の場合には、竹チップ2%、5%では800℃以上、竹チップ10%では700℃以上で同様の現象が見られた。加熱後の燃焼灰をるつぼから回収した際、800℃および900℃で加熱したものについては、るつぼに付着して回収できなかった燃焼灰があったため、これに硝酸を加えて加熱溶解し、ICP分析を行った結果、元の燃焼灰よりも高い割合でカリウムが検出されたことから、るつぼへの付着物がクリンカであることが示唆された。

加熱後の燃焼灰の色を観察すると、加熱温度が上昇するにしたがって燃焼灰の色が濃くなっており、竹チップの混合割合が多いほど低温で色の変化が始まっている。固形物が見られた燃焼灰は、図1で示したクリンカを砕いたものと色が類似しており、このことからクリンカの生成が確認できた。

なお、竹チップ2%の燃焼灰は木チップのみの燃焼灰と各温度での加熱後の状態がほとんど変わらないことから、竹チップ2%程度までであれば混焼の可能性が併せて示唆された。燃焼灰の成分組成については、竹チップを2%燃焼させることによりカリウム分が1~2%程度増加するが、大きく変化することはない。ただし、燃焼灰の発生量

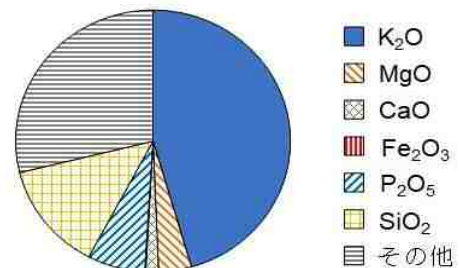


図5 竹チップ燃焼灰の成分組成

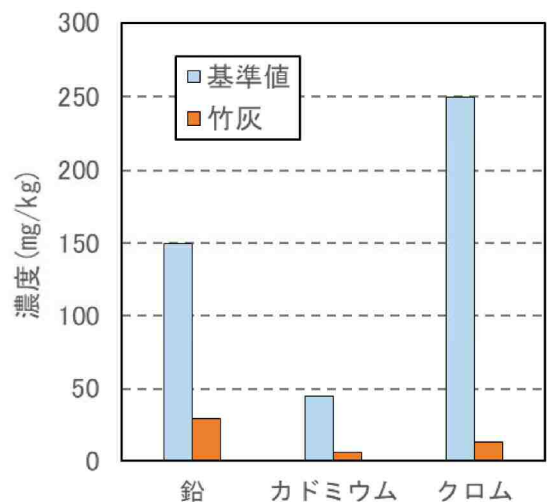


図6 竹灰中の特定有害物質濃度











混合割合 温度	木チップのみ	竹チップ2%	竹チップ5%	竹チップ10%
800℃				
固形物の有無	無	無	無	無
700℃				
固形物の有無	無	無	無	有
800℃				
固形物の有無	有	有	有	有
900℃				
固形物の有無	有	有	有	有

図7 木チップおよび木チップ・竹チップ燃焼灰の加熱試験結果

が2～3%程度増加することが予想されるので、処理コストを減少させるためにも燃焼灰の有効活用の促進が必要である。

県内で操業しているバイオマス発電所で消費している木材チップ等の燃料は年間約70万トンであるが、この2%を竹チップに置き換えた場合、竹チップを年間約14,000トン消費することになる。鹿児島県の竹林における蓄積量は約610万束⁸⁾(約18万トン：モウソウチクは1束30kgで換算)、竹材生産量は63.8万束⁸⁾(約1.9万トン)であるから、約16万トンが未利用材として放置されている。タケノコ生産を考慮して、タケノコ生産能力の減少する5年を周期として未利用竹材を伐採した場合、年間約32,000トン利用可能であることから、4割以上の未利用竹材(蓄積量の4割近く)を消費できることになる。竹林が整備されると竹林面積の増大は抑制され、竹材の蓄積量は減少すると予想されることから、蓄積量に占める割合は増加すると推察される。

4. 結 言

木質バイオマスボイラーや木質バイオマス発電所から排出される燃焼灰の有効利用を図るために、土壌改良材としての利用を目論み、燃焼灰の成分分析や溶出試験、利用可能性について、以下の知見が得られた。

- (1) 燃焼灰の成分分析により、バイオマスボイラーから発生する燃焼灰はカルシウム、カリウム、マグネシウムなどが主成分として検出された。バイオマス発電所から排出された燃焼灰は、ケイ酸とカルシウムが主成分であった。
- (2) 微量成分のうち、鉛、カドミウム、クロムの含有量はいずれの燃焼灰も土壌汚染対策法における土壌含有量基準値以下であり、分析結果からは燃焼灰の土壌還元は可能であることが示唆された。
- (3) 燃焼灰の土壌改良材としての利用に関する農業関係者への聞き取り調査の結果、イネ科作物に対するケイ酸補給剤としての利用可能性が示唆された。

また、竹チップを燃料としての利用を考えた際の混合割合を検討した結果、竹チップ2%混焼の燃焼灰は木チップのみの燃焼灰とほとんど変化が見られないことから、木質系燃料に2%程度まで竹チップを混合できる可能性が示唆された。

燃焼灰の有効利用については、本報では土壌改良材についての利用可能性を検討したが、今後は工業製品の原料として利用し、より高付加価値の製品への応用を図ることにより、燃焼灰の産廃処分削減および有効活用法の開発に寄与していきたい。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、試験用の燃焼灰、スギチップ、竹チップをご提供いただきました県内事業所ならびに利用可能性に関する聞き取り調査にご協力いただきました皆さまに深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 資源・エネルギー庁「持続可能な木質バイオマス発電について」：https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/biomass_hatsuden/pdf/001_02_00.pdf
- 2) 環境省：環産産発第1306282号
- 3) 前田典生：木質バイオマスボイラ燃焼灰の有効利用法の開発(2018)
- 4) 梅田久男，玉川和子：宮城県林業技術総合センター成果報告，21，40-44(2012)
- 5) 高知県林業振興・環境部，農業振興部：木質バイオマス燃焼灰の自ら利用の手引き(2014)
- 6) (地独)北海道立総合研究機構森林研究本部林業試験場，環境・地質研究本部環境科学研究センター：木質バイオマス燃焼灰の融雪資材としての利用法(2019)
- 7) 福井国博，石神徹，深澤智典：(公財)JFE21世紀財団技術研究報告書(2019)
- 8) 鹿児島県環境林務部：令和2年度鹿児島県森林・林業統計(2020)
- 9) 林野庁「発電利用に供する木質バイオマスの証明のためのガイドライン」：<https://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/biomass/pdf/hatudenriyougaidorain.pdf>
- 10) 林野庁「木質バイオマス証明ガイドラインQ&A(竹の取り扱いについて)」：https://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/biomass/attach/pdf/hatudenriyou_guideline-5.pdf
- 11) (一社)日本木質バイオマスエネルギー協会：木質チップボイラーの一覧_20190510.pdf
- 12) (国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構：<https://www.nedo.go.jp/content/100932088.pdf>
- 13) (独)農林水産消費安全技術センター：肥料等試験法(2020)
- 14) 中野準三，樋口隆昌，住本昌之，石津敦：木材化学，19(1983)
- 15) I. H. Isenberg：The Chemistry of wood，604(1963)
- 16) 住友化学園芸ホームページ：<https://www.sc-engei.co.jp/fertilizer/working/>
- 17) 九州農政局ホームページ「令和2年度農林水産統計調査公表予定および公表結果」：https://www.maff.go.jp/kyusyu/toukei/ht_all_press_R02.html
- 18) 井上健一：鹿児島県農業開発総合センター研究報告，12，31-89(2018)