

## 空気の渦流れを利用するバイオマスと石油の異種燃料燃焼器の開発

藤原逸平\*\* 土門正幸\*\* 森田清\*\* 山口哲央\*\* 王青躍\*\*\* 前菌拓矢\*\*\* 熊谷知哉\*

### Development of Hybrid Combustor of Biomass and Oil by Vortex Current of Air

FUJIWARA Ippei\*\*, DOMON Masayuki\*\*, MORITA Kiyoshi\*\*, YAMAGUCHI Norio\*\*,  
O Seiyō\*\*\*, MAEZONO Takuya\*\*\*, KUMAGAI Tomoya\*

#### 抄録

平成21年度の成果として、籾殻のみでの連続燃焼が確認できたので、実用性の高い燃焼器を完成すべく、平成22年度の業務を行った。

1次燃焼筒はφ200で試験を行っているが、大型化の寸法効果を確認するためにφ320の燃焼器を新たに試作し、性能の調査を行った。

平成21年度に試作したバイオマス燃料の供給部は、籾殻の供給は行うことができたが、オガコは供給はできなかったため、大径のスクリーフィーダーを試作して機能調査を実施した。

燃焼部は縦型で炎が下方に排出される方式なので、この下に2次燃焼筒を設け、隣に灰分離筒を併設し、遠心力で灰を分離し、上から燃焼ガスを排出する方式を採用した。

燃焼の制御は低コスト化を図るため、バイオマスの供給をインバーター制御から、位相制御に変更し機能の確認を行った。

これらの改良の結果、開発している燃焼器は籾殻のほかに他のバイオマスの燃焼にも利用することが可能であり、当初設定した目標をほぼ満足していることが判明した。

キーワード、化石燃料・加工燃料、循環型社会システム、環境に対する負荷の軽減

## 1 はじめに

農村地域で広く発生するバイオマスをエネルギーとして有効に利用することは、CO<sub>2</sub>の削減や省エネ化を実現し、地球温暖化を防ぐ政策課題として国際的な討議がなされている。

これを実現するためには、すでに数多く利用されている石油燃焼方式の機器とほぼ同等の利便性を有する、低コストでコンパクトな燃焼器を開発して、農村地域に広く普及させることにより化石燃料の消費低減に寄与する。

また、このような機器が普及すれば、現在廃棄物として処理されているバイオマスを有価物化することが可能になり、莫大な雇用を生み出し地域の活性化を実現できる。

## 2 実験方法

### 2.1 大型燃焼器の性能確認

昨年度試作されたφ200mmの燃焼器は5万Kcal/hの性能を目標とするもので、確認の結果4万Kcal/hの性能であった。今回試作したφ320mmの燃焼器は15万Kcal/hの性能を目標にしたが、籾殻を燃焼して確認した結果12万Kcal/hの性能であった。

\* 試験研究室 環境・分析担当

\*\* 金子農機(株) 技術部

\*\*\* 埼玉大学大学院 理工学研究科

図1に大型燃焼器の寸法を示す。

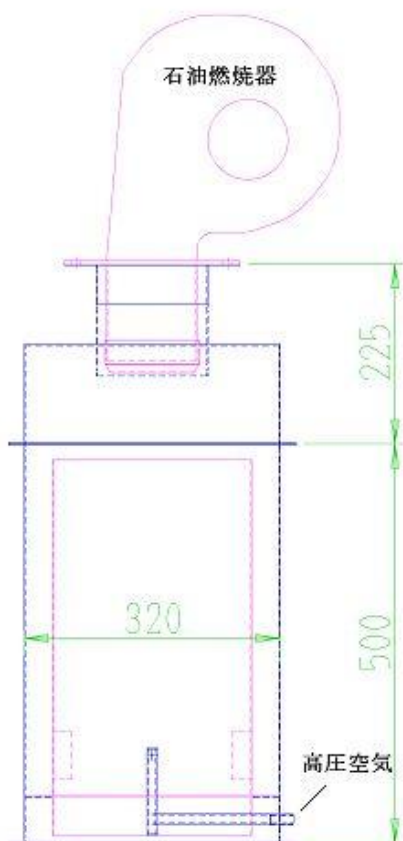


図1 大型燃焼筒寸法図

この寸法はおおむね昨年試作した燃焼器の1.5倍の寸法であり、燃焼反応が燃焼器の体積に比例すると仮定すると、能力は3倍になると予想されるが、この予想どおりの結果と判断できた。

この燃焼器を搭載した吸引式の温風器を試作して風温の上昇から計算した結果、10万Kcal/h程度の熱交換量であり当初の目標を満足していた。

図2は試作した温風発生器で、昨年秋の米収穫時に籾の乾燥に利用した。



図2 吸引式温風発生器での乾燥試験

籾の水分が高かったので乾燥に約22時間を要したが、この間安定して連続燃焼を行うことができ、故障等の中断はなかった。

## 2.2 バイオマス供給機構

昨年度試作したバイオマス供給部のスクリーフィーダーの直径は50mmであり、オガコのような流動性の低い材料の場合、ブリッジ現象により供給することができなかった。今回の試作においては、スクリーフィーダーの直径 94mmのものを使用したところ、オガコでも供給することができるようになった。(図3参照)



図3 バイオマス供給機構

フィーダーケースの先端部は規制部を設けなかったため、低動力で供給できるものの籾殻の供給筒とフィーダー先端部までの距離が近すぎて、空気の吸引圧で籾殻を吸い込む現象が見られた。この解消のためにフィーダーケースの寸法を100mm長くして対応している。

また、供給能力も大きくなったので、少量の供給においてフィーダー回転数が少なくなり、供給量の変動が発生し連続燃焼に支障をきたした。

バイオマスのガス化が瞬間的に行われているために燃料の供給が途切れるとガス濃度が低くなって消火し、供給量が増加してガス濃度が高まると着火する現象で、爆発音を伴い危険である。

自動運転中は消火と同時に石油燃焼を開始して爆発を防止している。

バイオマス燃料の供給変動を少なくするため供給筒の先端に4角から8角に絞る部品を追加して流

量の変動を少なくしている。(図4参照)



図4 バイオマス燃料供給装置 流量規制板

これによって供給筒の断面積が減少し、籾殻の前進速度も5mm/sから若干増加したこと、ほぼ全量が破碎板に接触することになったことが供給量の安定化に寄与した。

燃料供給の変動が少なくなるとバイオマスのみの燃焼範囲が少量側に拡大され、広い範囲での燃焼が可能になった。

### 2.3 灰分離機構

燃焼筒は縦型で下に火炎が出るので、下部に燃焼筒より少し大きな径の2次燃焼筒を設け、その隣に同径の灰分離筒を配置して、火炎の旋回と同じ方向の接線方向に連通筒を設けた。

灰を含んだ火炎は旋回しながら灰分離筒を上昇していくが、灰は遠心力で下部に集積される。

集積された灰は排煙ファンの吸引部に連結されている吸引パイプを通り、排気とともにサイクロンで分離する方式を採用した。

この方式で燃焼試験装置を新たに試作し、排気ガスの測定などに対応した。(図5参照)



図5 燃焼試験装置

この方式では2次燃焼筒に灰が滞積したので、高圧空気の一部を吹き付けて灰を飛散させて機内への滞留を防止している。

灰分離筒には灰の滞積が見られなかったので、燃焼に関与する部分での灰の滞積はなくなり、24時間程度は安定的に燃焼を継続することが可能になった。

### 2.4 バイオマス熱分解や燃焼特性に関する評価研究

各種もみ殻試料の熱分解と燃焼特性について示差熱・熱重量(TG-DTA、島津製作所製)同時測定装置(図6)を用いて評価した。TG-DTAによる結果を以下の図7に示している。

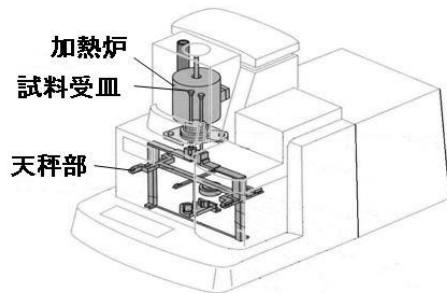


図6 示差熱・熱重量(TG-DTA)同時測定装置

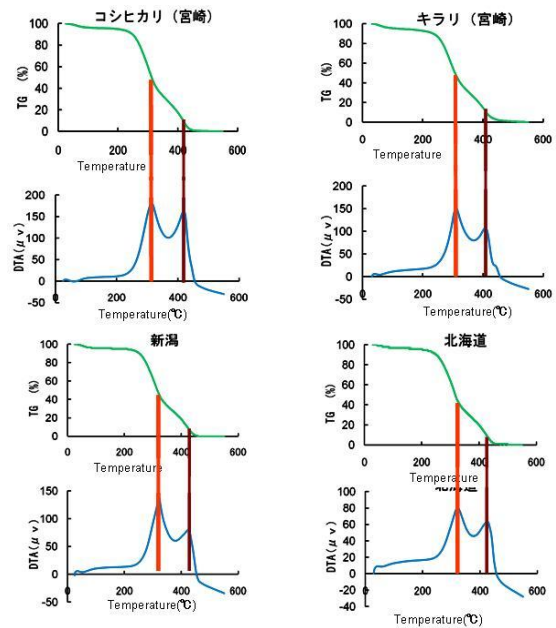


図7 TG-DTAによるもみ殻試料の燃焼挙動

コシヒカリ宮崎産もみ殻試料では320°Cおよび

400℃程度でDTAのピークが確認できた。これは320℃で熱分解がピークに達し、さらに、400℃以上で着火したためだと考えられる。

このような挙動はコシヒカリ宮崎産もみ殻試料以外の3種の籾殻でも同様の傾向が確認できた。しかし、それぞれ20~50℃程度それぞれのピークにずれがあり、もみ殻試料中の灰分、揮発分、固定炭素分の含有量の違いによって生じたものと考えられる。特に、揮発分、炭素分の最も低い新潟産もみ殻試料では450℃に到達しないと、着火しなかった。

## 2.5 燃焼排気ガス成分計測

### 2.5.1 サンプリング方法

大気の拡散や冷却などを考慮した籾殻燃焼によって、排出排ガス濃度をより高い精度で評価するため、図8のように希釈管を設置し、燃焼排ガスを灰回収機通過後、ダクトより排出させた。そのため、ダクトに10 mm程度の穴を空け、排ガスを11.0 L/minの流量で、希釈用大気を活性炭、HEPAフィルター通気後希釈管内に22.4 L/minの吸引流量で導入し、排ガスを3.04倍希釈して捕集を行った。希釈後排ガス温度を排ガス用温度計により測定し、マニホールからPM<sub>2.5</sub>サイクロンサンプラー ((株)東京ダイレック製) により大気浮遊粒子状物質を捕集した。PM<sub>2.5</sub>サイクロンサンプラーは、2台同時に使用し、一方には、炭素成分分析用として石英フィルターを、もう一方にはイオン、金属分析用としてテフロンフィルターを使用した。捕集時間は10分、吸引流量は33.4 L/minの条件で行った。排ガス中のCO、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、NO、SO<sub>2</sub>濃度はポータブルガスアナライ

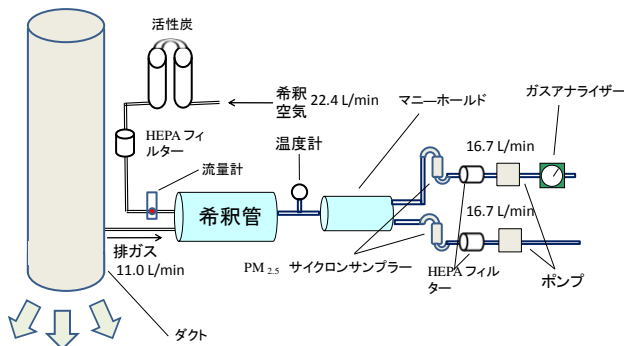


図8 希釈管設置概念図

ザー(PG-250型、(株)堀場製作所製) により測定した。

### 2.5.2 籾殻燃焼条件

燃焼条件により排出される大気浮遊粒子状物質の低減性を調査するため、籾殻の供給量を10分間当たりで2.40、2.49、2.57 gと変化させた場合の1 kg当たりの籾殻燃焼により生成するPM<sub>2.5</sub>以下の大気浮遊粒子状物質の濃度を評価した。これらの籾殻供給量の条件は、石油を使用せず籾殻のみの燃焼でも、長時間の使用が可能である供給量であり、実際に使用する場合の籾殻供給量範囲である。そのため、上記の籾殻供給量範囲により新規燃焼装置の最適燃焼条件を評価した。

### 2.5.3 燃焼灰成分や燃焼排気ガス炭素成分測定

燃焼に用いた籾殻と燃焼後灰回収機によって回収された燃焼灰は、日本工業規格JISM 8813に則り工業分析を行った。また、CHNコーダー (MT-5型、(株)ヤナコ製) により燃焼前のC、H、N成分と燃焼後のC、H、N成分の測定結果から籾殻の燃焼状態の評価を行った。

PM<sub>2.5</sub>サイクロンサンプラーにより捕集された排ガス中の大気浮遊粒子状物質は、熱光学式炭素分析計 (Model 2001, Thermal/Optical Carbon Analyzer Desert Research Institute) により、IMPROVE方式 (Interagency Monitoring of Protected Visual Environment) に基づき、高純度ヘリウム雰囲気中で120℃、240℃、450℃、550℃に昇温させて発生する二酸化炭素をメタン化させ、水素炎イオン化検出器 (FID) で検出し、それぞれOC1、OC2、OC3、OC4とした。同様に、He/2%-O<sub>2</sub>中で550℃、700℃、800℃で生成する炭素分を酸化触媒で二酸化炭素にし、さらに、還元してメタン化し、FIDで検出し、それぞれEC1、EC2、EC3とした。

### 2.5.4 籾殻及び燃焼灰の成分測定結果

表1、表2に本実験に用いた籾殻と燃焼後に灰回収機により回収された籾殻燃焼灰の成分分析結果を示している。籾殻の灰分含有率の値から籾殻

は燃料としての燃焼性能は高くないことが示唆される。また、燃焼後の揮発分含有率、C含有率の値から燃焼により多くの炭素成分が燃焼されたことが評価できる。

表1 籾殻と籾殻燃焼灰の工業分析

	水分 (wt%)	揮発分 (wt%)	灰分 (wt%)	固定炭素 (wt%)
籾殻	8.00	60.2	28.7	3.10
燃焼後	1.00	4.60	90.0	4.40

表2 籾殻と籾殻燃焼灰の元素分析

	C (wt%)	H (wt%)	N (wt%)
籾殻	34.1	4.67	0.43
燃焼後	9.22	0.44	0.12

### 2.5.5 燃焼条件による燃焼排気ガス由来の大気浮遊粒子状物質中の未燃炭素成分濃度の低減評価

図9に籾殻供給量を2.40、2.49、2.57 kgと変化させた場合による、籾殻燃焼1 kg当たりのPM<sub>2.5</sub>以下の大気浮遊粒子状物質の排出量を示した。結果より、供給量の最も多い2.57 kgでは、1 kg当たりの大気浮遊粒子状物質の排出量が8.31 μgと最も高く、供給量を徐々に減らしていくにつれて排出量は減少していき、2.40 kgの供給量では、1 kg当たり排出量が4.27 μgと大幅に低減可能であることが確認された。健康影響が懸念されるPM<sub>2.5</sub>以下の大気浮遊粒子状物質は、本燃焼装置を用いた場合1 kgの籾殻を燃焼するに当たり数μg / m<sup>3</sup>生成された。本サンプリング結果から、本燃焼装置の最適燃焼条件として、10分間当たりの籾殻供給量2.40 kgが大気浮遊粒子状物質の低減効果が最も高いことが考察された。

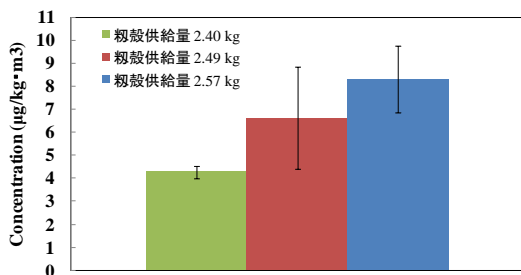


図9 大気浮遊粒子状物質中の炭素成分濃度低減

### 2.6 燃焼自動制御 (システム) の開発

現状で使用している制御盤はバイオマス供給と燃焼空気のコントロールをインバーターで制御する方式のものである。

インバーターから位相制御に変換すると制御盤の小型化、低コスト化が実現できるので新規の制御盤を試作した。

この制御によるコントロールのためモーターを3相から単相に変更し、制御の精度を向上するために回転センサー付きのものを試作した。

この改良によって制御盤を燃焼器本体と一体的に設置することができることになり、今後制御の最適化を含めて確認を行う予定である。

試作した制御盤は体積・重量とも1/10程度になり、コンパクト化と低コスト化に貢献すると思われる。



図10 試作制御盤

### 2.7 研究目標の達成度

#### 2.7.1 石油依存率10%以下

予熱の段階で3~6分灯油を使用するがその後の燃焼は籾殻だけで継続する。籾の乾燥においては乾燥時間が15時間程度要するので、予熱後はほとんど石油を使用することがなく依存率も1%以下になる。

籾の乾燥機は最大処理の40%程度の投入量でも乾燥できるのが一般的な仕様であり、送風温度も10℃程度低く抑えることが要求される。

籾殻の燃焼範囲がこれに追従できないときは急速乾燥を防止するために一次乾燥を中断する必要がある。この場合は再点火時に灯油を必要とするので石油依存率が高くなる。

これまでの経験上乾燥の中断は1乾燥に1回で済むとされているので、石油依存率は2倍になることになる。

この燃焼器をボイラーなどのオンオフ制御の機器に利用する場合も点火のたびに石油が必要になりシステムの最適化が重要な要素になる。

### 2.7.2 燃焼負荷 500万kcal/hr・m<sup>3</sup>以上

現状では目標値の80%程度の石油燃焼負荷で運転しているが、籾殻燃焼時には燃焼範囲も拡大されより大きな負荷で燃焼が行われる。耐久性の制限で最高燃焼温度を1000℃としているが、この条件での燃焼量は目標の120%であり、十分に目標を達成していると判断された。

燃焼炉体は縦型であり設置面積の縮小に貢献しており、装置は大変コンパクトで実用上の設置性においても大きな問題は発生しないと思われる。

### 2.7.3 自動運転の実現

24時間の連続運転を目標にしたが、ほぼ同等の連続運転は昨年秋に実証されている。

今後、安全性・取り扱い性も考慮した制御方式に取り組み、商品としての完成度を高めていく。

籾殻がない場合もほぼ同様の燃焼温度を維持するように石油燃焼を行うよう考えている。

今回の制御盤は燃焼部のみのモジュールで設計されており、用途に応じた付帯設備の制御はシステム設計の方で行うものとしている。

### 2.7.4 適応バイオマス

籾殻については基本機能の確認ができたもののオガコについては十分な確認ができていない。特に燃焼可能な水分の把握と、水分が過剰で自己燃焼できない場合の石油併用燃焼についても確認する予定である。

また、細断ワラなどの他のバイオマスについても今後確認を行う予定である。

### 2.7.5 コスト 50万円以下/5万kcal/hr

コンプレッサーの価格が含まれていないものの今回試作した装置の変動費は30万円程度でありこれまでの籾殻燃焼装置に比較して大幅な低コスト化を実現することができた。

実験装置の中で最も高額であった制御部も低コスト化を図ることができたので、目標に近いコストが実現できると思われるが、量産によるコスト低減が今後の課題であり、普及性の高い商品としての展開が最も重要である。

## 2.8 燃焼灰の有効利用に関する検討

田畑での肥効増進に用いようとする場合の保肥力の尺度となる陽イオン交換容量（以下CEC）を評価した。

試運転中の燃焼試験装置からの採取灰（平成22年2月23日〔21年度採取灰という〕及び平成23年2月2日〔22年度採取灰という〕にそれぞれ採取）の他、昨年度研究報告書<sup>1)</sup>と同様の方法により400℃～1000℃の任意の温度で空気を供給しながら焼成した調製灰を試料とした。

なお、21年度採取灰について実測した比表面積は122m<sup>2</sup>/gで、22年度採取灰の149m<sup>2</sup>/gよりもやや小さい値であった。

CECの測定はカラム浸透法に従い、試料を充填したカラムに1規定酢酸アンモニウム水溶液、80%メタノール水溶液、10%塩化ナトリウム水溶液を順に浸透させ、浸出した塩化ナトリウム液中のアンモニウムイオン濃度を通気-中和滴定法により定量した<sup>2)</sup>。測定結果を図11に示す。

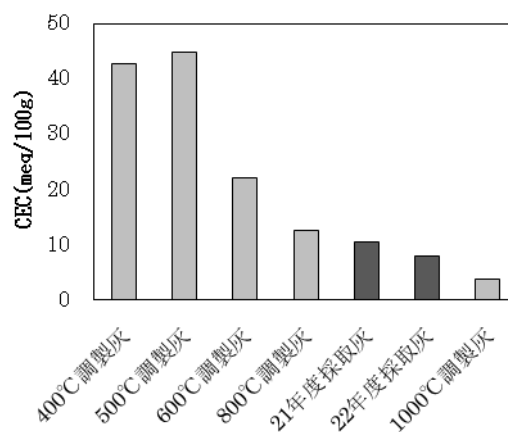


図11 陽イオン交換容量測定結果

今回試験を行った範囲では、温度500°Cでの調製灰においてCECの最も高い値が得られ、焼成温度を高くするに従いCECの値は低くなった。採取灰のCECは、21年度採取灰について11meq/100g、22年度採取灰について8meq/100gであり、800°Cでの調製灰と1000°Cでの調製灰の間に位置した。

一般に土壌の種類により8~15meq/100g以上までCEC値を改善することが求められることから<sup>3)</sup>、本燃焼灰の肥効増進材としての利用には更なる改善が必要であるが、装置の許容範囲内で低温とする等の操作によりCECのより高い値を得る可能性が示唆された。

### 3 考察と今後の研究課題

#### 3.1 考察

今回の開発は、圧縮空気によって、空気の旋回流を利用した、新しいバイオマス燃焼システムを実現することができた。

この燃焼方式による籾殻の燃焼は、これまでに研究されてきたものに比較して、燃料が装置内に滞留しない点で大きく異なっており、自動化を容易にすると同時に安全性も確保することができると思われる。

本事業のテーマである“CO<sub>2</sub>削減・省エネ技術”としても目標を大きく上回る成果が得られ、籾の乾燥を籾殻の燃焼熱で行うシステムを完成させ普及することができれば、年間20万klの灯油が節減可能になる。

今後、さらに大型の燃焼器（40万kcal/h程度）の開発に着手するとともに、当初の目標である穀物乾燥機への利用技術として、普及性の高い商品開発を行っていきたい。

#### 3.2 今後の研究課題

##### 3.2.1 燃焼空気の供給方式の改善

今回の研究ではコンプレッサーの圧縮空気で旋回流を起生させたが、さらに大型の燃焼器を開発するために、高圧ブロワーを利用する燃焼技術を研究することが必要である。

また、現在のシステムでは通常のガンタイプバ

ナーンを利用しており、装着されているファンが排煙ファンの機能と重複している。

燃焼室内を負圧に維持する上で、排煙ファンは不可欠であり、システムの単純化のためにファンを持たないガンタイプバーナーを開発する必要があると判断された。

##### 3.2.2 多様なバイオマスへの対応

今回試作したバイオマス供給部はオガコなどの流動性の低いものも供給することができた。

今後オガコを始めとして細断ワラや広い範囲でのバイオマスに対する適応性の確認を行う必要がある。

##### 3.2.3 バイオマス搬送システムの開発

この燃焼器を搭載した機器のバイオマスを供給する搬送機は必ず必要になる要素技術である。

籾殻など軽量な分粒体は貯留場所と利用機器の距離が長く、簡易に搬送する機器は見当たらないのが現状である。

空気搬送を利用した、簡易な低コスト搬送システムを開発する。

##### 3.2.4 研究成果の公表について

以下のように、国内外に研究成果を公表している。

- ① 王青躍, 前菌拓矢, 土門正幸, 山口哲央, No.11 籾殻の組成分析と空気渦流れを利用する燃焼特性の評価研究, 日本エネルギー学会第47回石炭科学会議発表論文集, (9月21~22日), 岐阜, 国内学会(口頭発表), pp.22-23 (2010).
- ② 王青躍, 前菌拓矢, アパルパタル, 仲村慎一, 柏木信明, 土門正幸, 藤原逸平, 山口哲央, O-18 空気旋回流を利用した籾殻燃焼からの大気浮遊粒子状物質の排出挙動評価, 第6回バイオマス科学会議講演要旨集, 国内学会(口頭発表), (2011.1月11~12日), 大阪, pp.36-37.
- ③ Q. Wang, T. Maezono, Q. Chen, P. Apaer, Y. Wang, L. Gui, D. Niida, N. Mitsumura, M. Domon, I. Fujiwara & N. Yamaguchi, Basic

study on combustion characteristics of waste rice husk and its emission behavior from a new-type air vortex current combustor, 国際会議 Sustainable\_Chemistry\_2011, 6~8 July 2011, Antwerp, Belgium, 口頭講演予定

藤原逸平、土門正幸、空気渦流を利用するバイオマスと石油の異種燃料燃焼器の評価、埼玉大学地域オープンイノベーションセンター紀要、Vol. 2, pp.105-107 (2009).

#### 4 まとめ

地球温暖化防止のための取り組みは世界各国共通の課題として認識しており、農水の分野においても籾の乾燥調製施設における農業廃棄バイオマス成分の籾殻の熱利用を検討している<sup>1)</sup>。

各種の籾殻の熱分解・燃焼特性の差異は小さく、また、健康影響が懸念されるPM<sub>2.5</sub>以下の大気浮遊粒子状物質は、本燃焼装置を用いた場合1kgの籾殻を燃焼するに当たり数μg / m<sup>3</sup>生成され、籾殻供給量を制御し、燃焼条件を適正化することで、大気浮遊粒子状物質の排出低減が可能であるが、最適条件についてはさらなる調査は必要である。

現状の技術レベルで提案されているシステムはコストが高く具体的な方策は見出されていないのが実態である。

現在開発中の燃焼器が完成して普及する段階になれば大幅なコスト低減が可能になり具体的な提案として受け入れられる可能性があり早期の商品化が待たれる。

本年度は燃焼器の基本的な特性を明確にすることが目標であり石油燃焼による加熱から農業廃棄バイオマス成分の燃焼に移行するための条件の明確化など、ほぼ期待どおりの成果が得られたと判断される。

#### 参考文献

- 1) 藤原逸平、土門正幸、森田清、山口哲央、王青躍、熊谷知哉：空気の渦流を利用するバイオマスと石油の異種燃料燃焼器の開発、埼玉県産業技術総合センター研究報告, 8(2010)104
- 2) 越野正義：詳解肥料分析法, 養賢堂, (2001)311
- 3) 土壌改良と資材, (財)日本土壌協会, (2003)53
- 4) 王青躍、アパルパタル、仲村慎一、前菌拓矢、