

# バイオマス燃料ボイラーの高温排熱を利用した 熱電発電システムの基礎特性

奥 将俊<sup>a)</sup>・松尾 龍磨<sup>b)</sup>・菅 誠也<sup>b)</sup>・姫野 慎也<sup>b)</sup>  
田島 大輔<sup>c)</sup>・林 則行<sup>d)</sup>・杉本 安寛<sup>e)</sup>

## Basic Characteristic of Thermoelectric Generation System Using Waste Heat from Biomass Fueling Boiler.

Masatoshi OKU, Tatsuma MATSUO, Seiya SUGA, Shinya HIMENO  
Daisuke TASHIMA, Noriyuki HAYASHI, Yasuhiro SUGIMOTO

### Abstract

Department of Agriculture in University of Miyazaki, developed the “cow-dung derived low moisture content biomass fuel” made from animal husbandry waste.

In this study, elucidated the basics characteristic of the fuel and developed the biomass direct combustion system which used of the “cow-dung derived low moisture content biomass fuel”. In addition, installed the testing machine, and investigated basic characteristic of the machine. The basic characteristic was investigated about temperature characteristics and the thermal efficiency of biomass direct combustion system.

Furthermore, plan to generate electric power from waste heat of biomass combustion system by thermoelectric generator. Therefore investigated basic characteristic of thermoelectric generator.

Finally, operated the biomass direct combustion system, and confirmed situation, warm water supply, and the electric power generation by thermoelectric generator.

**Keywords :** Biomass fuel, Waste heat, Thermalgenerator

### 1. はじめに

現在国内では、消費するエネルギーの多くを海外からの輸入に依存している。エネルギー自給率とは生活や経済活動に必要な1次エネルギーのうち、自国内で確保できる1次エネルギーの比率のことである<sup>[1]</sup>。国際エネルギー機関(IEA)の推算では、1960年代に57%あった日本のエネルギー自給率は年々減少し、2007年には4%にまで低下している<sup>[2]</sup>。そのため、消費されるエネルギーの大半は海外から輸入される石油等の化石燃料に頼っている。

しかし、21世紀を迎えた今日、「石油資源の枯渇」に加え、「産油国の政情不安」「世界的な石油需給バランスの崩壊」といった社会的・政治的な問題が生じている。また、次世代の有力なエネルギー源として注目されていた原子

力発電も、安全性や放射性廃棄物の処理問題などから、先進国の間では抑制傾向が出てきている。更に、化石燃料の採掘による環境破壊も生じており、エネルギーの安定的な確保が難しくなっている。

一方、宮崎県では国民の食生活の高度・多様化を背景とした需要の拡大に伴い、ブロイラーや食用牛、食用豚の生産が盛んになった。そのため、宮崎県では膨大な家畜排泄物が発生している。その年間発生量は、現物糞尿量で447万<sup>[3]</sup>トンにもおよぶ。これらの畜産排泄物は「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」により、処理方法が定められている<sup>[3]</sup>。

しかし、宮崎県や畜産が盛んな地域では、膨大な量の畜産廃棄物に対する適切な処理が問題となっている。現在、畜産廃棄物は堆肥化による処理が主流である。この処理後の畜産廃棄物は主に農地散布されるが、堆肥の需要量を供給量が上回っており、利用先の開拓が望まれている。

そのため、家畜排泄物の適正処理と化石エネルギーに変わるエネルギー源の確保が急務となっている。そこで、宮崎大学農学部では家畜排泄物を発酵させ、低含水率バ

- a) 電気電子工学専攻大学院生
- b) 電気電子工学科学部生
- c) 宮崎大学 IR 推進機構特任助教
- d) 電気電子工学科教授
- e) 農学部植物生産環境科学科教授

バイオマス燃料を精製した<sup>[4]</sup>。このバイオマス燃料は特殊な微生物を使って畜産廃棄物を発酵させて精製する。この発酵の際に発生する熱で畜産廃棄物の水分量を 20%程度まで低下させることが出来る。本研究では、このようにして精製したバイオマス燃料を利用する。図1にバイオマス燃焼システムの構想を示す。図1に示すように、バイオマス燃料はバイオマス直接燃焼装置で燃焼され、電力と熱の発生を行う。発生した電力と熱は農業用施設へ供給する。一方、バイオマス燃料は畜舎や温室などで発生した農畜産廃棄物から製造する。これにより、バイオマス資源の有効利用法の確立と循環型社会の形成を図る。本論文では燃料の特性を調査した。また、バイオマスボイラーの試験機を導入し、バイオマスボイラーの温度特性や熱回収効率を調査した。更に、設置場所を選ばず、効率の改善が著しいゼーバックユニットの特性を調査した。更にバイオマスボイラーの排熱を利用した発電の検討を行った。

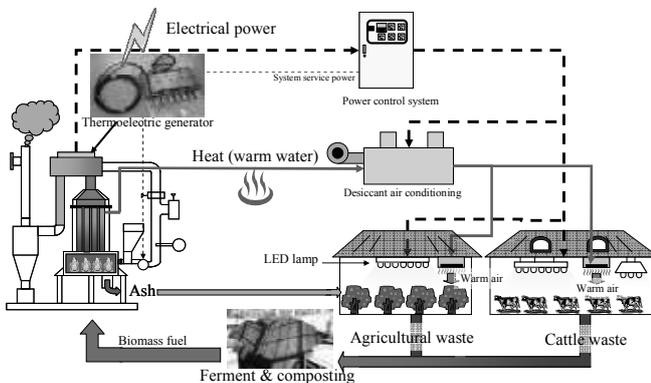


図1 バイオマス直接燃焼システムの構想  
Fig.1 Simple over view of this study.

## 2. バイオマス燃料の特徴

バイオマス燃料の特徴は、燃料の持つ熱量(発熱量)と含水率の関係、燃料の発火点、燃焼灰融点の3つを調査した。

### 2.1 バイオマス燃料の含水率と発熱量の関係

燃料の持つ熱量と水分量は効率の算出や燃料の供給量を設定する上で、重要な値である。そこで、バイオマス燃料の含水率と発熱量の関係を調査した。

燃料の発熱量と含水率の関係は水分計(エーアンドディー社製 ML-50)と熱量計(島津製作所製 CA-4AJ)を使用して、燃料の含水率と熱量を調査した。試料には粉状のバイオマス燃料と、ペレット状のバイオマス燃料を使用した。調査の結果を図2に示す。図2から燃料の含水率が増加すると発熱量が減少することが分かる。また、他のバイオマス燃料と同程度の発熱量を有していることが分かる。更に、実験から燃料の多くは含水率が16~25%前後で発熱量は約16MJ/kgであることが分かった。また、ペレット燃料化しても、燃料の発熱量は変化しないことが確認出来た。

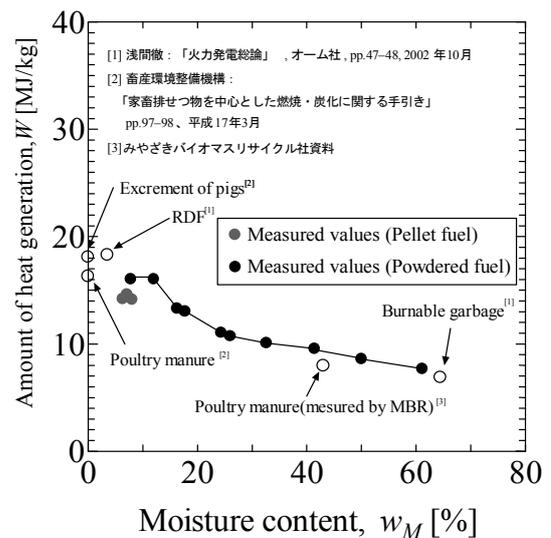


図2 含水率と発熱量の関係  
Fig.2 Relation of moisture content and heat generation.

### 2.2 バイオマス燃料の発火点

燃焼装置内の温度は、燃料が自発的に燃焼する温度に保つ必要がある。そこで、発火点の調査を行った。

発火点の調査は、設定温度に加熱したホットプレート上へ、試料となるバイオマス燃料(含水率:12%)を散布した。そして、加熱された試料が変化の様子を観測した。発火点は、試料が発煙と赤熱の様子をはっきりと観測できた際の試料表面温度として測定を行った。調査の結果を表1に示す。また、実験中に赤熱する試料の様子を図3に示す。実験の結果、試料温度が300℃以下の場合、試料に変化が見られなかった。試料温度が300~340℃になると、試料が発煙する様子が見られたが、赤熱・発火は見られなかった。そして、試料温度が340℃付近になると図3に示すように、発煙と赤熱の様子を確認できた。このことからバイオマス燃料の発火点は340℃付近であることが分かった。

表1 発火点調査の結果

Table.1 Result of ignition point reseach.

Sample temp	Result of visual contact
Under 300℃	No response
300~340℃	Smoke generation
340℃ over	Smoke generate & red hot

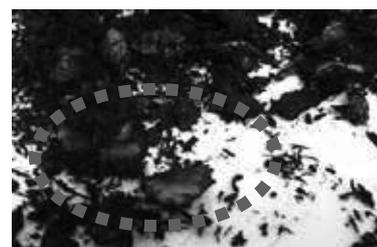


図3 赤熱する試料  
Fig.3 Red hoting samples.

### 2.3 燃焼灰の融点

国内のバイオマス燃焼施設では、燃焼灰の融解による故障事例が多数報告されている。これは、燃焼装置内の温度を高く設定して運転した際、燃焼灰が融解してしまい、装置に固着することで発生する。そのため、燃焼装置は燃焼灰が融解しない温度で運転しなければならない。そこで、燃焼灰の融点を調査する実験を行った。

燃焼灰の融点の調査試料には、燃え残りの少ない飛灰を用いた。この飛灰は燃焼装置に設置されているサーキュレータから回収できる。実験は、まず電気炉を予熱して、炉内を設定温度で安定させた。その後、試料となる飛灰を電気炉内へ投入して様子を観察した。そして、融解が発生するまで温度を上げて繰り返し実験を行った。尚、燃焼灰の融点は、試料が融解した際の試料表面温度とした。また、実験は電気炉の最高使用温度である 900℃で中止した。実験の結果を表2に示す。実験では電気炉の温度上昇による赤熱を観察することが出来た。しかし、表2と図4に示すように、電気炉温度を900℃へ上昇しても融解しなかった。このことから、燃焼灰の融点は900℃より高く、燃焼灰は900℃まで温めても安全であることが確かめられた。

表2 燃焼灰融点調査の結果

Table.2 Result of melt point resurch.

Oven temp	Result of visual contact
Under 500℃	No response
600~800℃	Red hot
900℃	Red hot

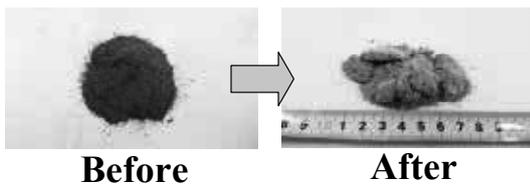


図4 実験前後の試料の変化の様子

Fig.4 Experiment before and after condition of samples.

## 3. バイオマスボイラーの特性

### 3.1 バイオマスボイラーについて

図5に実験で使用したバイオマスボイラーを示す。図5のボイラーは、バイオマス燃料を使用したボイラーの基礎特性を調査するために導入した実験機である。このボイラーでは、灯油バーナー(オリンピア工業製 DOM-0NS)を用いてバイオマス燃料への着火を行う。また、燃焼装置へ供給された燃料は、送風機により燃焼用空気と共に炉内へ送られる。燃焼炉内の容量は96Lで、ボイラー内の水容量は118Lである。バイオマスボイラーの基礎特性は、図5の装置を使用して測定した。

ボイラーの燃焼試験は、ボイラーに燃料供給した際の装置各部の温度変化を測定した。また、測定された温度変化から装置の熱効率を算出した。図6に実験装置の概略図を示す。温度測定箇所は①燃焼部出口ガス温度、②熱交換後のガス温度、③燃焼部耐熱材内部温度、④ボイラー内水温度、⑤水入口温度、⑥水出口温度である。

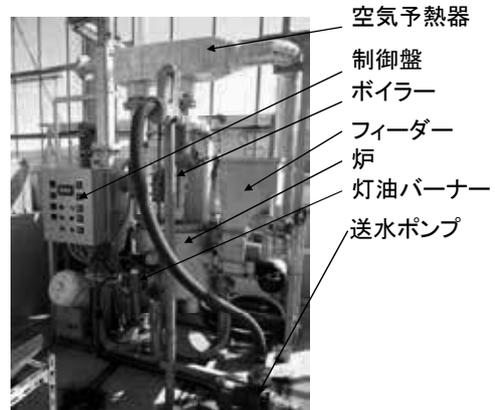


図5 バイオマス燃焼装置の概観

Fig.5 Aspect of biomass direct combustion system.

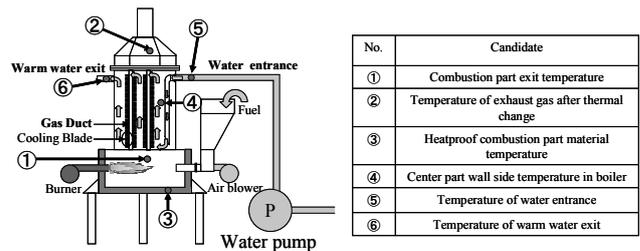


図6 実験装置の概略図

Fig.6 Simple view of testing machine.

### 3.2 温水無出水時のバイオマスボイラーの特性

温水無出水時のバイオマスボイラーの特性の実験では、ボイラーから温水供給しない状態において実験を行った。図7に実験の工程を示す。実験ではバイオマス燃料を15分間に4.18kg, 5.36kg, 8.04kg, 11.08kg, 16.05kg供給した場合において行った。図8にバイオマス燃料を15分間に11.08kg供給した場合の温度変化を示す。実験の結果、燃料投入直後から装置各部の温度が上昇し始め、図8では実験開始32分後で①温度1051℃、②温度540℃、④温度100℃まで上昇した。この運転特性から求めた燃料供給量毎の熱回収効率を図9に示す。熱回収効率は、式3.1より燃料供給量とボイラー内の温水温度から算出した。図9に温水無出水時の燃料供給量と熱効率の関係を示す。図9から、燃料供給量が8.04kgの時、熱効率が18%と最大になった。しかし、いずれの燃料供給量においても熱効率は15.3%前後となった。このことから燃料供給量が変化しても効率は大きく変化しない事が分かった。

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \times 100 [\%] \tag{3.1}$$

$Q_{in}$ : 装置に供給した熱量[MJ]  $Q_{out}$ : 回収した熱量[MJ]

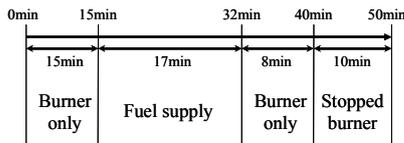


図7 実験の工程

Fig.7 Process flow of experiment.

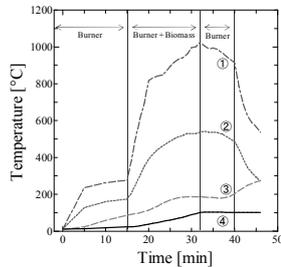


図8 温水無出水時の温度特性と熱効率

Fig.8 Temperature characterisc and heat efficiency when non supply warm water.

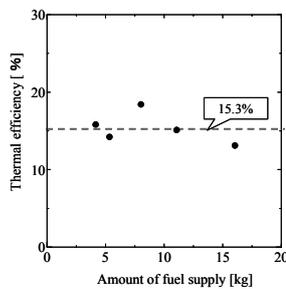


図9 燃料供給量と熱効率の関係

Fig.9 Relation between amount fueling supply and heat efficiency.

### 3.3 流水時におけるバイオマスボイラーの特徴

温水出水時におけるバイオマスボイラーの特性実験では、ボイラーから温水を供給させた状態で実験を行った。図10に実験工程を示す。実験は、バイオマス燃料を30分間に11.71kg, 16kg, 20kg, 25.65kg供給した場合において行った。尚、ボイラーへの給水は燃料供給と同時に10L/minで開始している。図11にバイオマス燃料を20kg供給した場合の温度変化の様子を示す。この実験では④温度は測定しない。図11から、バイオマス燃料を投入直後から、装置各部温度が上昇し始めた。図11では実験開始47分後に①温度は1147℃、②温度は585℃まで上昇した。また、図11に各燃料供給量における温水の温度を示す。図11より供給される温水の温度は、燃料供給量を変化させても64℃前後になった。この結果と式3.1から熱回収効率を算出する。図12に算出した熱効率を燃料供給量毎に示す。図12から、燃料供給量が増えると効率が低下する事が分かる。これは、燃料供給量に依らず⑥の平均温度が63℃前後で一定になった。そのため、燃料供給量が増加しても熱回収量が一定となり熱効率が低下したと考えられる。

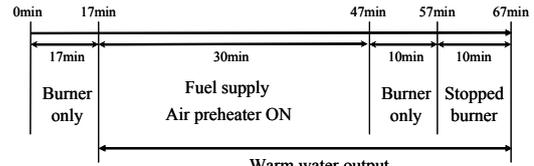


図10 実験の工程

Fig.10 Process flow of experiment.

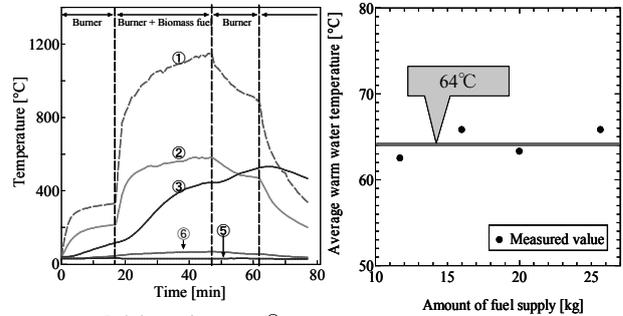


図11 バイオマスボイラーの温度特性(左)と各燃料供給量における温水温度(右).

Fig.11 (Right) Temperature characterisc of biomass boiler. (Left) Relation between amount fueling supply and warm water temperature.

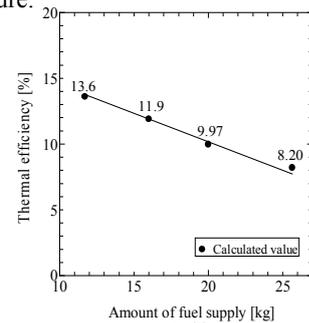


図12 燃料供給量と熱効率の関係

Fig.12 Relation between fueling supply and heat efficiency.

### 3.4 空気予熱器の効果

3.2節や3.3節からも分かる通り、図5の実験装置では水へ熱交換した後の排ガス温度(②点温度)が非常に高い。そこで、排ガス中に含まれる熱を利用した燃焼用空気予熱器を設置した。そして、空気予熱による熱効率改善効果を調査した。図13は導入した空気予熱器である。空気予熱器の材質は鉄である。また、予熱前の空気温度と予熱後の空気温度をそれぞれ測定できるように、2箇所に温度センサーが設置されている。この空気予熱器はボイラーの上に設置されており、ボイラーで水と熱交換後の排ガスから熱を受ける事が出来るようになっている。この空気予熱器を使用して実験を行った。実験は、燃料を15分かけて3.5kg供給し、温水は供給しない状態で装置を運転させた。図14は空気予熱器による温度の変化を表したものである。実験の結果、運転開始後32分で①温度は760℃、②温度は415℃となった。また、予熱前の空気温度は30℃であるの

に対し、予熱後の空気温度は 90℃となった。このことから、空気予熱が来ていることが確認出来た。

しかし、熱効率は空気予熱器を使用した場合 19.6 %で、予熱器を使用しない場合は 19.0 %となった。このことから空気予熱器による顕著な熱効率改善効果は認められなかった。これは予熱後の空気温度が 90℃と低かった事が原因と考えられる。空気予熱効果が不足していることや、燃料供給量が少ないことも原因として考えられる。今後、空気予熱器の構造を改めて検討する必要がある。

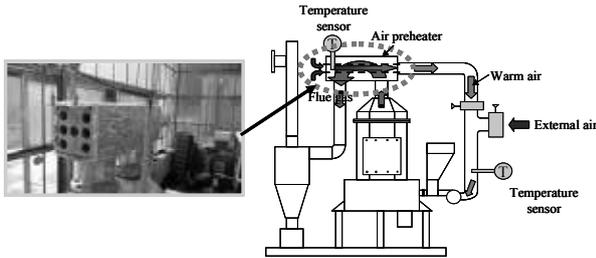


図 13 導入した空気予熱器と設置箇所  
Fig.13 Air preheater and installation site.

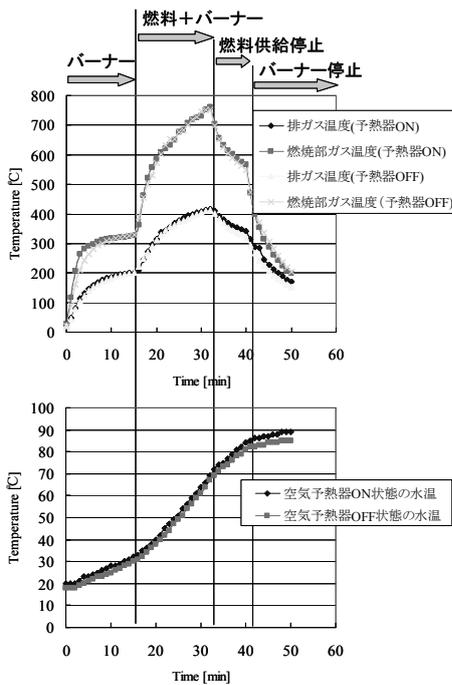


図 14 空気予熱器による温度変化  
Fig.14 Temperature change to drive air preheater.

#### 4. ゼーバックユニットの特性

本研究ではゼーバックユニットを用いた電力の発生を行う。そのため、ゼーバックユニットの基礎特性を調査した。ゼーバックユニットの特性は、電力-電圧 (P-V) 特性及び温度差-電力 (T-P) 特性について調査を行った。図 15 に実験で使用した装置並びに回路を示す。

P-V 特性の実験では、まずヒーターと冷却水を使用して、ゼーバックユニットに一定の温度差を与えた。そして、ゼーバックユニットから電力を発生させる。この時に、ゼー

バックユニットに接続した負荷を調整した。その際に出力される電圧と電流値をマルチメーターで測定した。この測定した電圧・電流から電力を算出し、電圧と電力の関係を調査した。調査した結果を図 16 に示す。図 16 に示すように P-V 特性では電圧と電力の関係が放物線を示した。このことから、ゼーバックユニットは各温度差において最大出力を發揮する電圧が存在することが分かった。

次に T-P 特性の実験を行った。この実験では、電子負荷を 21Ω一定のまま、ヒーターの設定温度を調整した。そして、ゼーバックユニットに与える温度差を変化させた。この時に出力される電圧と電流の値をマルチメーターで測定して電力を算出した。算出した電力と与えた温度差から、温度差と出力電力の関係を調査した。その結果、実験で使用したゼーバックユニットでは温度差 152K で 80W の出力を得られた。また、図 17 に示すように温度差の 2 乗に比例するという特性を確認出来た。

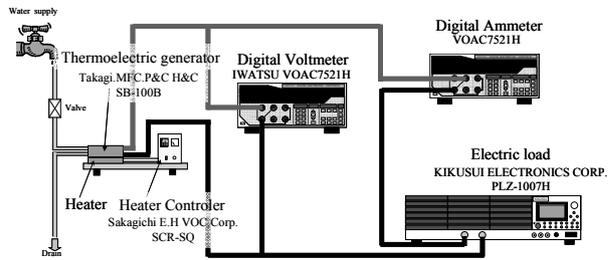


図 15 ゼーバックユニットの特性試験回路  
Fig.15 Characteristic test circuit of thermo electric generator.

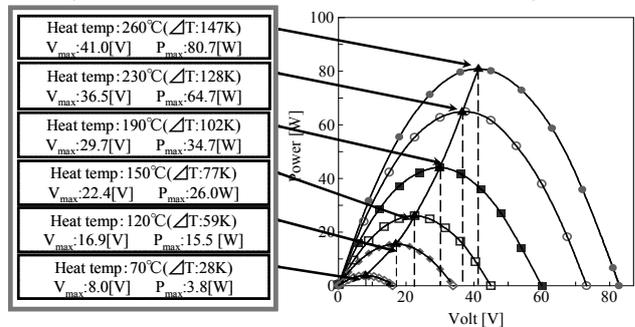


図 16 ゼーバックユニットの P-V 特性試験結果  
Fig.16 Result of thermoelectric generator's P-V test.

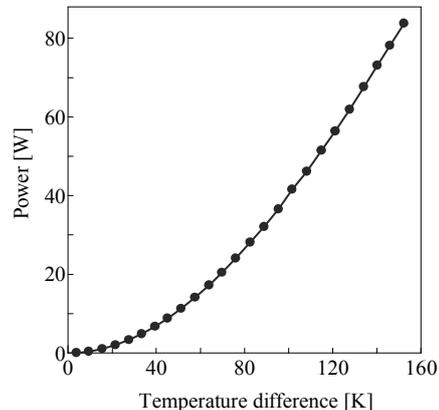


図 17 ゼーバックユニットの T-P 特性試験結果  
Fig.17 Result of thermoelectric generator's T-P test.

### 5. 実装試験

本研究では、バイオマス燃料を利用した農業用施設への温水供給と電力の供給を行うことを目的としている。そのため、3章ではバイオマスボイラーの運転特性を調査した。そして、4章ではゼーバックユニットの基礎特性を調査し、その発電能力の確認を行った。本章では、バイオマスボイラーへゼーバックユニットを実装し、発電と温水の供給を同時に行う実験を行った。

#### 5.1 実験方法と内容

図18に実験工程を示す。ボイラーの運転は、温水を供給している状態で行った。バイオマス燃料は30分間に20kg供給した。実験では、この30分間に供給される温水の温度やゼーバックユニットから出力される電力を測定した。図19はゼーバックユニットからの出力を測定する際に用いた回路である。出力電力の測定はゼーバックユニットからの出力を100Wの電球負荷(7Ω)で消費した。その際に電球負荷に加わった電圧・電流を測定し、電力を算出した。以上の測定値からバイオマスボイラーによる発電・給湯の状態を把握した。尚、ゼーバックユニットは図20に示す場所へ設置した。図20に示す場所は空気予熱器の上面に設けた多目的スペースである。

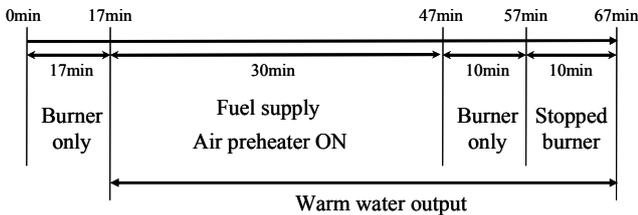


図18 実験の工程

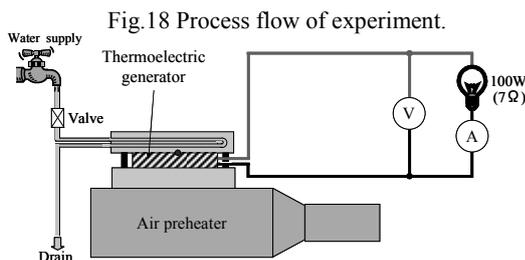


図19 出力電力測定回路

Fig.19 Output power measurement circuit

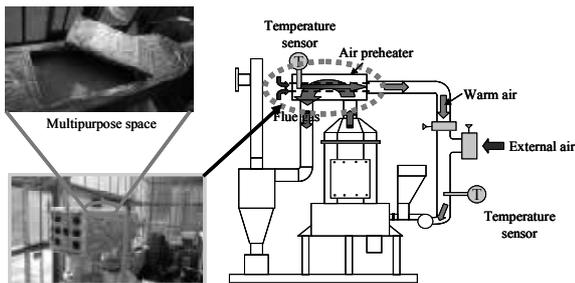


図20 ゼーバックユニットの設置場所

Fig.20 Installation site of thermoelectric generation.

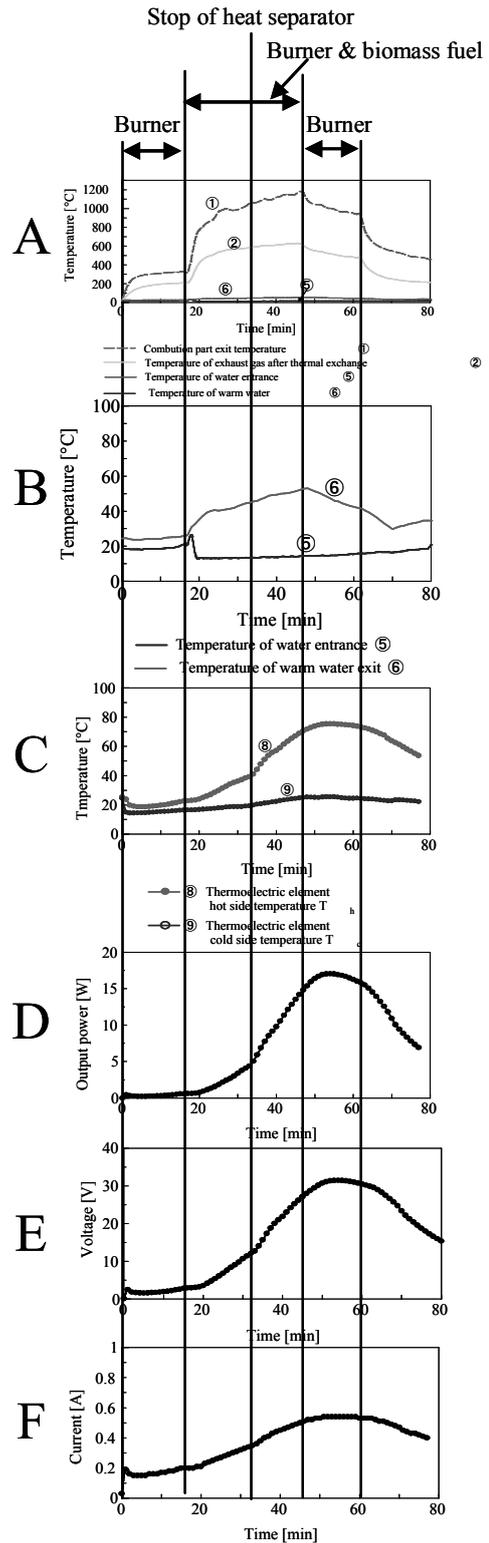


図20 実装試験の結果

Fig.20 Result of test.

A	Temperature characteristic of biomass boiler
B	Temperature of warm water entrance and exit.
C	Temperature of thermoelectric generator.
D	Out put power from thermoelectric generator
E	Out put voltage from thermoelectric generator
F	Out put current from thermoelectric generator

## 5.2 実験結果

図20に実験の結果を示す。図20-Aは実験時における装置各部位の温度変化を示している。また、図20-Bは装置へ供給した水の温度と、装置から供給された温水の温度を示している。図20-Aよりバイオマス直接燃焼装置の各部位でバイオマス燃料の投入直後から著しい温度上昇が始まった。図20-Aでは実験開始32分後に①温度は1147℃、②温度は585℃まで上昇した。また、図20-Bに装置から供給された温水の温度を示す。⑥温度から、装置より供給された温水温度は最高で53℃となった。しかし、装置から供給された温水温度の平均温度は44.4℃と低かった。これは、実験日の水温が12℃前後と低かったため、水温の上昇に時間がかかり、温水の温度が低くなったと考えられる。また、実験結果から熱効率の算出を行ったところ、バイオマス燃焼装置の熱効率は10%となった。

一方、ゼーバックユニットの各温度・出力は、徐々に上昇を続けた。図20-Cはゼーバックユニットの高温側と低温側の温度である。図20-Cより運転開始後54分でゼーバックユニットの高温側の⑧温度は最高で75.4℃（平均42.6℃）であることが分かった。また、ゼーバックユニットの低温側の⑨温度は最高で25.5度（平均20.0℃）であった。このことから与えた温度差は最大で49.9K（平均22.6K）であった。これに伴い、運転開始後54分でゼーバック湯に戸から出力される電圧は31.5V、出力電流は0.5A、出力電力は17Wと最高に達した。また、出力される平均電圧は14V、平均電流は0.4A、平均出力電力は0.6Wであった。そして、運転時間30分の間に出力された総発電電力量は88.9W・hとなった。尚、温水が最高温度に達したのは運転開始後32分である。しかし、ゼーバックユニットが最高出力に達したのは運転開始後54分であり、温水温度とゼーバックユニット出力が最大になる時間にずれがある。これは、装置の内部を通過する高温のガスの流速の影響や、金属中の伝熱による時間の差の影響が考えられる。



図21 空気予熱器に設置したゼーバックユニット

Fig.21 Put in thermoelectric generator on the air preheater.



図22 発電した電力で灯る電球

Fig.22 Lighting bulb to use power of thermoelectric generator.

## 4. 結論

現在国内では、家畜排泄物の適正処理と代替エネルギーの確保が急務となっている。本研究では、バイオマス燃料を利用したバイオマス直接燃焼システムを構築し、電力と熱の発生を行う。熱の発生はバイオマス燃焼装置により行い、電力の発生はゼーバックユニットにより行う。

本論文では、燃料の特性とバイオマス燃焼装置の特性、ゼーバックユニットの特性を調査した。また、ゼーバックユニットとバイオマスボイラーを使って、給湯・発電実験を行った。

まず、燃料の持つ特性を調査した。その結果、燃料の含水率が増加すると発熱量が減少することが分かった。また、他のバイオマス燃料と比べて同程度の発熱量を有していることが分かった。更に、実験により燃料の多くは含水率が16~25%前後で発熱量は約16MJ/kgであることが分かった。また、ペレット燃料にした場合でも、燃料の発熱量は変化しないことが確認出来た。

次に、導入したバイオマスボイラーの運転特性や熱回収効率の算出を行った。実験の結果、装置の特性や各部の温度傾向を把握できた。また、熱効率を算出した結果、燃料供給量が8.04kgの時、熱効率が18%と最大になった。しかし、燃料供給量が変化しても熱効率は15.3%前後となり、大きく変化しない事が分かった。

そして、ゼーバックユニットの特性を調査した。ゼーバックユニットの基礎特性は、T-P特性及びP-V特性について調査した。その結果、ゼーバックユニットのP-V特性調査では各温度差において最大出力を発揮する電圧が存在することが分かった。また、T-P特性の調査では出力は温度差の2乗に比例することが分かった。

最後に、バイオマスボイラーとゼーバックユニットを利用した出水・発電の検討を行った。その結果、バイオマスボイラーからは平均44.4℃の温水を10L/min得られた。ゼーバックユニットからは88.7W・hの電力を得られた。

## 謝辞

本研究は「農林畜産廃棄物利用による資源循環システムの構築」(代表 杉本 安寛教授)プロジェクトの支援により実施されました。関係した皆様に御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 「2011年 エネルギー白書 第2部 エネルギー動向」、経済産業省、p.82, 2011年10月
- [2] 「2011年 エネルギー白書 第2部 エネルギー動向」、経済産業省、p.83, 2011年10月
- [3] 「排せつ物の利用の促進を図るための県計画」、宮崎県、p.7, 2008年3月
- [4] 杉本, 他, 有機材料発酵装置, 特許願 2010-159538(2010.7)