

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 30 日現在

機関番号：84415

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06916

研究課題名(和文)未利用バイオマスを活用した小型複合発電プラントの開発

研究課題名(英文)Development of gasification and power generation system from unused biomass

研究代表者

山口 真平(YAMAGUCHI, Shimpei)

地方独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：40761002

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：ダウンドラフト型ガス化炉と固体酸化物型燃料電池(SOFC)からなる、これまでにないバイオマス発電システムを開発した。ガス化炉の設計、制御指針の確立のため、ダウンドラフト型ガス化炉の計算モデルを構築した。ダウンドラフト型ガス化炉の小型炉(0.1kW)と大型炉(20kW)由来のガス組成を計算値と比較したところ、温度、原料、空気、水分等の条件から、ガス化ガス組成を精度よく推算できることが分かった。

さらに、SOFCと小型炉からなるガス化発電試験から、木材のガス化ガスによる最大出力は純水素に対し、40～80%の範囲で制御することができた。また、走査型電子顕微鏡観察から電極上には炭素析出は見られなかった。

研究成果の概要(英文)：We developed the novel biomass power generation system using a downdraft gasifier and a solid oxide fuel cell (SOFC). To establish the design and control guidelines for a gasifier, a calculation model to specify a downdraft gasifier was constructed. We compared the measurement of the gas composition derived from a small (0.1 kW) and a big (20 kW) sized downdraft gasifier of furnace with a calculated value, relatively. And, it was found that the composition of gasification gas could be estimated based on the conditions of temperature, biomass material, air, water, and so on.

Estimating the gasification power generation with a small-sized downdraft gasifier and SOFC, in addition, we recognized that the maximum power from the gasification gas of wood could be controlled in the range of 40 - 80 % against the pure hydrogen. Moreover, the carbon deposition was not found on the electrodes of SOFC by scanning electron microscope observations.

研究分野：Chemical engineering and electrochemical science

キーワード：Downdraft gasifier Solid Oxide Fuel Cell Simulation Modeling Hydrogen Thermodynamic Electrochemical Catalyst

1. 研究開始当初の背景

化石燃料に替わるエネルギー源として、再生可能エネルギーが注目されている。バイオマスは、再生可能エネルギー源の一つとして期待されているが、広範囲に少量ずつ分布している。そのため、バイオマスエネルギーの利用推進には、分散可能かつ小型で高効率な発電技術が求められている。

バイオマスの燃料変換方法の一つに高温(約 600~1100)の熱源によりバイオマスから可燃性ガス(H₂, CO, CH₄など)を得る熱分解ガス化がある。さらに、ガス化炉のなかでも、ダウンドラフト型ガス化炉は、高温の部分燃焼熱により熱分解ガスの更なる分解を促進するため、タールや炭化水素量を低減したガスを得ることができる。

バイオマスのガス化ガスの利用法の一つに熱機関による発電がある。しかしながら、バイオマスのガス化ガスは発熱量がプロパンやブタンなどと比べて低く、規模が小さいと、熱機関で高効率を得るのは難しい。

一方で、小型でも高効率な化学電池である固体酸化物形燃料電池(SOFC)は、高温作動(約 700)で燃料多様性があり、希薄なガスでも発電できる。そのため、ともに高温作動であるダウンドラフト型ガス化炉とSOFCは、組み合わせに適している。また、SOFCのアノード電極に炭化水素ガスを供給すると、電極表面に炭素析出が起こり、発電性能が低下する。ダウンドラフト型ガス化炉で得られるガスは炭化水素やタールの量が少ないため、SOFCの電極被毒を抑制できることが期待される。

2. 研究の目的

ダウンドラフト固定床型ガス化炉とSOFCから成る、これまでにないバイオマス発電システムの開発

3. 研究の方法

(1) ガス化計算モデルの構築

熱力学平衡論に基づき、平衡ガス組成の計算モデルを作成した。計算モデルでは、それぞれのガス成分(H₂, CO, CH₄, CO₂, N₂, O₂)のギブズ自由エネルギーを最小化し、平衡ガス組成を探索した。自由エネルギーは式(1)により計算した。

$$x_i \Delta G_i = x_i (\Delta H_i - T \cdot \Delta S_i) \quad (1)$$

x_i: i成分のモル分率 [-],

T: 絶対温度 [K],

G_i: i成分の自由エネルギー [J・mol⁻¹],

H_i: i成分のエンタルピー [J・mol⁻¹],

S_i: i成分のエントロピー [J・mol⁻¹]

(2) ガス化実験

ダウンドラフト型ガス化炉の特性を把握し、計算モデルの妥当性を評価するため、ダウンドラフト型ガス化炉に、温度、空気量、水蒸気量などの条件を与え、ガス化実験を実施した。ガス化発電試験は連続運転とし、定常運転時のガス化ガス組成をガスクロマトグラフにより測定した。ガス化実験には、ダウンドラフト型ガス化炉の小型炉(容積 0.4L、ガス出力 約 0.1kW、白金触媒使用、外部熱源利用)と大型炉(容積 50L、ガス出力 約 20kW、触媒なし、燃焼熱源を利用)を使用した。大型炉は Fig. 1 に示すように、炉内部の温度測定とガスを抜き出せる構造になっている。大型炉は、部分燃焼による温度むらが生じるため、定常運転時の炉内部の温度分布とガス分布を測定し、解析した。

ガス化の原料には元素分析計により組成分析した木質チップ(C:51.4%, H:6.4%, O:41.7%, 水分量:11.4%, 高位発熱量 18004 J・g⁻¹)を使用した。

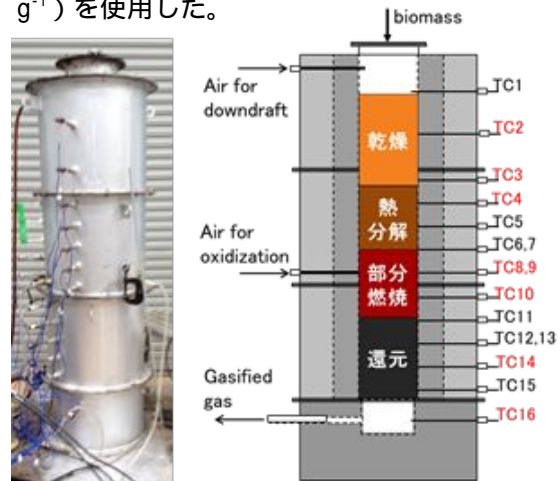


Fig. 1 大型炉の概観図

(3) SOFCによるガス化発電試験

Fig. 2 に示すような、ダウンドラフト型ガス化炉の小型炉とSOFCによるガス化発電特性評価装置を作製した。SOFCには、純水素と種々の条件によるガス化ガスを一定流量で供給した。SOFCの温度は、750 に固定し、電流-電圧特性を評価した。

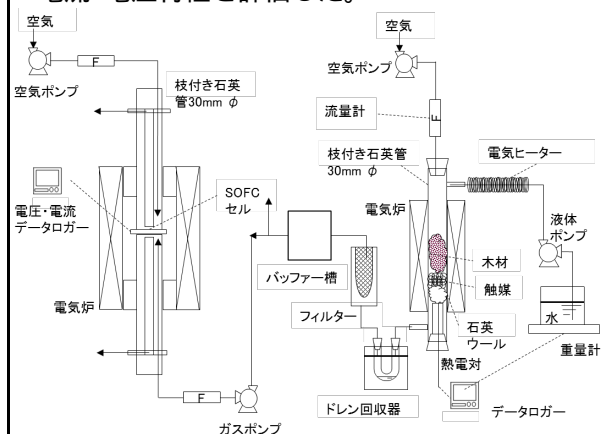


Fig. 2 SOFCによるガス化発電評価装置

4. 研究成果

(1) ダウンドラフトガス化の評価

ダウンドラフトガス化炉の小型炉における、空気量、水蒸気量、温度の条件に対する実測と計算ガス組成を Fig. 3 に示す。Fig. 4 は、大型炉における空気量に対するガス化ガス濃度の計算値と実測値を示す。各条件における計算濃度と実測濃度の差分平均は、ガス成分数を N とし、式(2)により算出した。計算値と Fig. 4 の計算値は、大型炉内部の温度帯において 450 以上の平均温度を条件として与えて計算した。Fig. 5 は、大型炉に供給する空気量を $90\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ に制御した場合の、塔頂からの距離に対する温度およびガス組成の分布を示す。Fig. 6 には、大型炉の各温度条件に対して、式(3)により得られる各ガス成分の計算値と実測値の差分の標準偏差()を示す。

$$D_{\text{av}} = \frac{\sum_{i=1}^N |X_{i,\text{Calculated}} - X_{i,\text{Experimental}}|}{N} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{(X_{i,\text{Calculated}} - \bar{X}_{i,\text{Experimental}})^2}}{N} \quad (3)$$

Fig. 3 および Fig. 4 から、小型炉のいずれの条件においても、計算濃度と実測濃度の差分平均は、小型炉では 3%以内、大型炉では 1%以内であり、計算モデルの妥当性が確認された。Fig. 3-1 より、空気量が増加すると、空気中の窒素成分がガス化ガスを希釈するため、水蒸気量、温度の変更時よりも空気量を変更した場合のほうが、ガス組成の変化が大きくなった。大型炉では、Fig. 6 に示すように、炉内の 450 以上の温度帯の平均温度を温度条件として与えた場合が実測値と計算値のズレが最小化した。これは、Fig. 5 に示すように、大型炉内部の温度とガス組成の分布より、450 以上では、熱分解、部分燃焼、還元反応が活発に起きていることが分かり、これらの反応がガス化ガス組成の変化に大きい影響を与えていることが分かった。

また上述のように、大型炉の方が小型炉よりも実測値と計算値のズレが小さい傾向が得られた理由として、大型炉の方が、炉内の最高到達温度が高いことが考えられる。大型炉内部では、Fig. 5 に示すように、約 100 ~ 1100 の温度分布が確認された。特に、大型炉内部の部分燃焼部と還元部の温度は 800 以上あることが確認された。これら高温域では、酸化・還元反応速度が速く進行し、平衡に到達するまでの時間が短縮したことにより、ガス化ガスの組成は平衡組成に近づいたと考えられる。

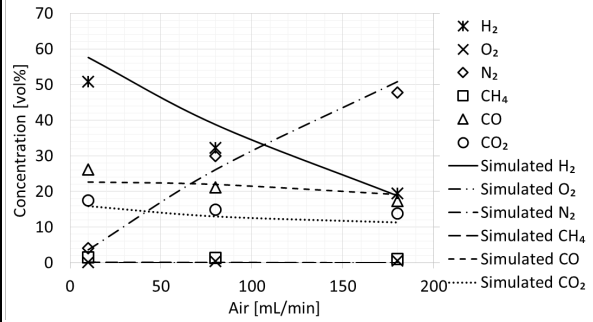


Fig. 3-1 Airに対するガス化ガス組成 (小型炉)

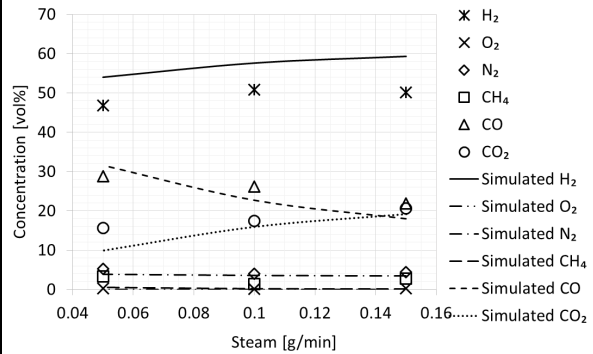


Fig. 3-2 水蒸気量に対するガス化ガス組成 (小型炉)

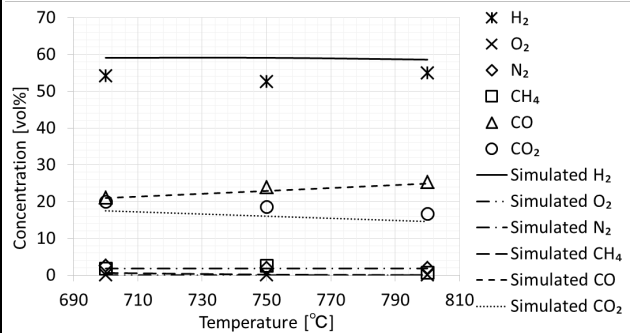


Fig. 3-3 温度に対するガス化ガス組成 (小型炉)

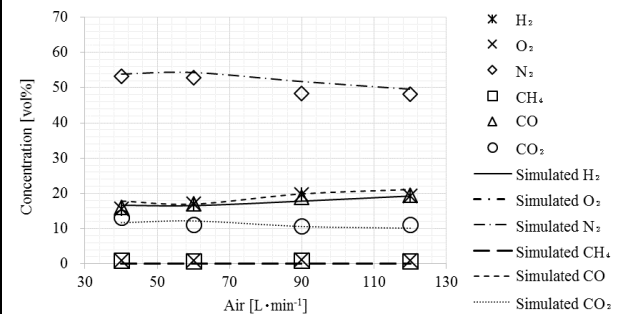


Fig. 4 Airに対するガス化ガス組成 (大型炉)

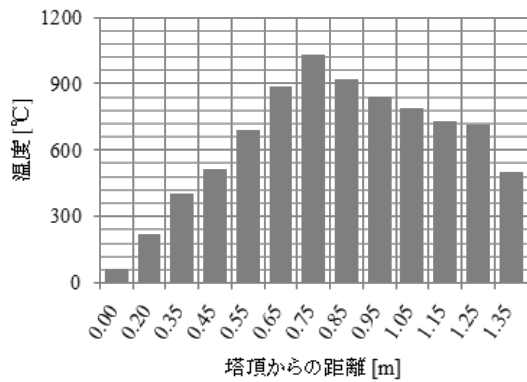


Fig. 5-1 大型炉の温度分布

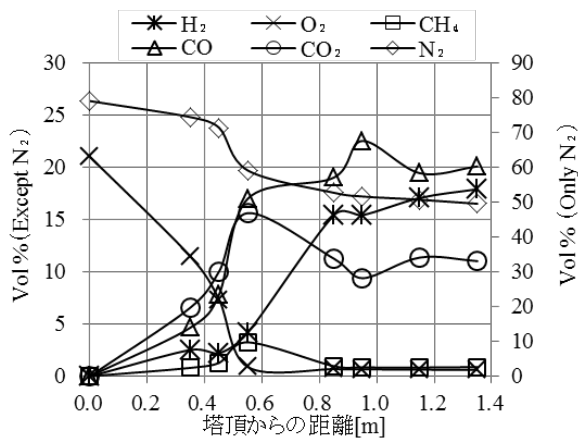


Fig. 5-2 大型炉のガス組成分布

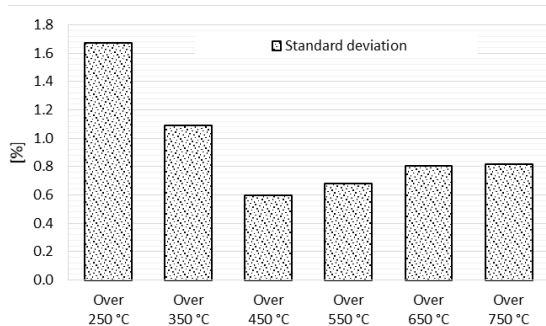


Fig. 6 実測値と計算値との差分の標準偏差

(2) ダウンドラフトガス化とSOFCによるガス化発電性能評価

Fig. 7 は、小型炉において空気量を変更したガス化ガス (Fig. 3-1 に示す3種類のガス化ガス) および純水素を使用した時の SOFC の発電特性を示す。

Fig. 7 の結果から、3種類のガス化ガスを使用した場合の最大出力は、純水素を使用した場合に対して、40~80%に制御することができた。ガス化ガスによる SOFC の最大出力はガス中の H₂ と CO の濃度および、燃焼エンタルピーに依存していることが分かった。また、水素の場合の最大出力の 40%に制御した場合のガス化ガス組成は、Fig. 5 に示すように大型炉でも得ることができ、大型炉による自立発電が可能であることが示唆された。

また、ガス化条件により可燃性ガス組成 (H₂, CO) は変化するものの、平衡起電力はほぼ差がなく、約 1V の平衡起電力が得られた。H₂ と CO の酸化反応にかかる平衡起電力は式 (3) に示すネルンストの式により与えられる^④。各ガス条件における、平衡起電力の計算値は、いずれも約 1V が得られ、平衡起電力の実測値の妥当性が確認された。

さらに、Fig. 8 に示す、ガス化発電試験後の、SOFC アノード電極表面の SEM 観察結果からは、タールや炭化水素由来の炭素析出による電極の被毒は確認されなかった。

$$OCV[V] = \frac{-\Delta G}{zF} - \frac{RT}{zF} \ln \left[\frac{P_{H_2O} P_{CO_2}}{P_{CO} P_H P_{O_2}} \right] \quad (3)$$

T: 絶対温度 [K]、R: 気体定数 [J・K⁻¹mol⁻¹]、z: 電子価数 [-]、P: 分圧 [-]

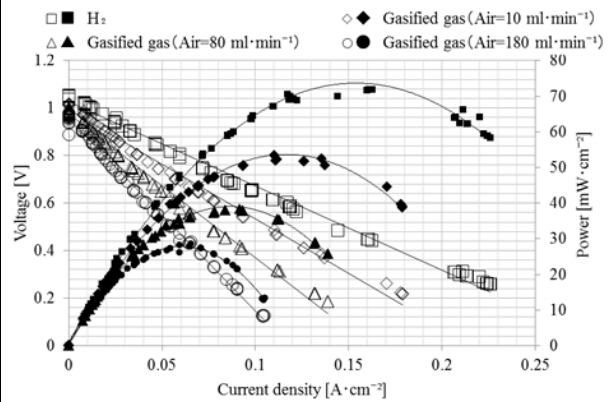


Fig. 7 ガス化発電特性

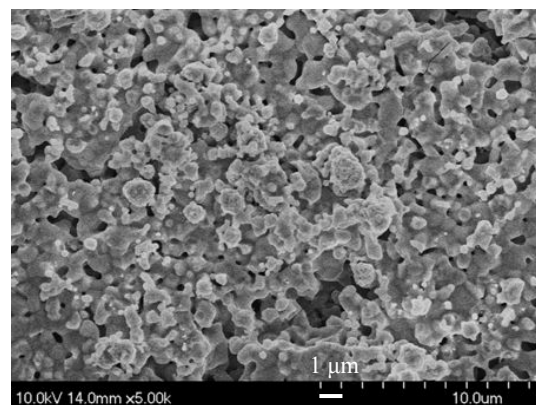


Fig. 8 ガス化発電後のアノード電極表面のSEM像

<引用文献>

S. Hirata, Technological Trends and Business Potential Evaluation of Power Generation using Biomass, CMC, 2014.
 K. Eguchi, View and Development of Solid Oxide Fuel Cells, CMC, 2005.
 T. Takeguchi, et. al, Study on steam reforming of CH₄ and C₂ hydrocarbons and

carbon deposition on Ni-YSZ cermets, J. Power. Sources 112, 2002, 588-595.
A. Ishihara, K. I. Ota, Fundamental aspects of electrochemistry, Shokabo, 2006.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 4件)

山口真平、片桐一彰、尾崎友厚、
固体酸化物形燃料電池(SOFC)に適した
バイオマスガス化炉の開発と評価、
化学工学会 第48回秋季大会(2016.9)

山口真平、片桐一彰、尾崎友厚、
固体酸化物形燃料電池(SOFC)に適した
バイオマスガス化炉の開発と解析、
日本機械学会 熱工学コンファレンス
2016(2016.10)

山口真平、片桐一彰、尾崎友厚、
燃料電池を利用したバイオマスガス化発
電装置の開発と評価、
びわ湖環境ビジネスメッセ 2016
(2016.10)

山口真平、片桐一彰、尾崎友厚、
固体酸化物形燃料電池(SOFC)に適した
バイオマスガス化炉の開発と評価、
大阪府立産業技術総合研究所・大阪市立
工業技術研究所合同発表会 2016
(2016.12)

[その他]

ホームページ等

http://tri-osaka.jp/c/fields/env_chem/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 真平 (YAMAGUCHI, Shimpei)
大阪産業技術研究所
応用材料化学研究部 研究員
研究者番号: 40761002

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし

(4) 研究協力者

片桐 一彰 (KATAGIRI, Kazuaki)
尾崎 友厚 (OZAKI, Tomoatsu)
垣辻 篤 (KAKITSUJI, Atsushi)