計測自動制御学会東北支部第258 回研究集会(2010.6.24)
資料番号 258-01

自動車エンジンを用いた木質バイオマス発電のシミュレーション検討

Simulation trial of woody-biomass generation with automotive engine

○三浦秀米，栗原伸夫
Miura Hideyone, Nobuo Kurihara
八戸工業大学
Hachinohe Institute of Technology

キーワード: バイオディーゼル燃料(bio-diesel fuel)，軽油混合(light oil mixture)，ディーゼルエンジン(diesel engine)，筒内圧力(in-cylinder pressure)，特徴抽出(Characteristics extraction)
連絡先: 〒031-8501 八戸市大字妙字大開88-1 八戸工業大学大学院工学研究科機械・生物化学工学専攻，栗原伸夫，Tel.: (0178)25-8174，Fax.: (0178)25-8174，E-mail: kurihara@hi-tech.ac.jp

1．はじめに

地球温暖化を抑制するために，バイオマスをエネルギ資源に利用する動きが進んでいる．間伐材などの木質バイオマスは性状が比較的安定しており，これを燃料として利用する発電プラントが注目され始めている．間伐材や建築廃材，製材クズ等の多くは廃棄物として扱われている．これら木質バイオマスを，CO，CH_4，H_2等の可燃ガスに変
える．次にガスエンジンで燃焼させ，発電機で電力を取り出す．こうした発電システムをコンピュータシミュレーションによって手軽に性能評価することができれば，開発期間の短縮やコストミニ
マムの設計に有用である．

本研究では，コジェネレーションシステムを構成する要素機器の動特性について，物理モデルおよび化学モデルを誘導した．制御用CASE ツールとして普及しているMATLAB/Simulinkを用いてプログラミングし，PC 上にプラントシミュレータとして構築した．電力および冷却力の要求に応じて，燃料となる木質バイオマスや熱交換器などを自動調整する運転管理の機能も備えて，システム全体の動特性を表現できる．このシミュレータを，DYSEBIC（Dynamic Simulator for Evaluation of Biomass Cogeneration）と名づけ，シミュレーションで適切な特性が得られることを確認するとともに，ガス化の運転条件に応じたガス成分を明らかにした．また、発電システムでは，出力制御とともにエネルギ変換効率を管理する必要がある．効率管理には

ガス化で生成されたガスの発熱量を計測することとなる．サイトにおいてガス成分をリアルタイム計測することは困難であることから，何らかの指標となる計測量を検討することにした．DYSEBIC におけるガス化モデルの妥当性を確認するとともに効率管理に利用する発熱量の指標を得ることを目的に，自動車エンジンを用いて実験・データ解析を進めたものである．まず DYSEBIC のシミュレーションから計算されたガス成分比に基づいて，模擬ガスを制作し，LPG エンジンを選んで燃焼実験を実施した．模擬ガスによる安定した自動車エンジンの燃焼が実現され，筒内圧力信号とクランク角度信号を用いたデータマイニングから，発熱量との相関をもつ指標が得られた結果を報告する．

2．DYSEBIC のモデル構成

DYSEBIC のモデル構成を図.1 で示す．出力制御・エネルギ変換効率管理(DYSEBIC-C)，ガス化炉(DYSEBIC-W)，ガスエンジン(DYSEBIC-E)，発電機(DYSEBIC-G)，熱交換器(DYSEBIC-H)，吸収冷凍機(DYSEBIC-A)[2]の機器ごとに分かれた６つの機能ブロックから成る．木質バイオマスは，炭素，水分，空気の混合として表現した．ガス化炉，エンジン，発電機で電力を得ると共に，ガス冷却の廃熱とエンジンの廃熱を利用する熱交換器，さらに電力の一部を吸収冷凍機の冷媒加熱器に利用する．

システムとしては様々な形態が考えられることから，サブシステムの追加削除が容易であるように，それぞれの機器ごとに独立性の高いソフトウェアパッケージとして制作している．

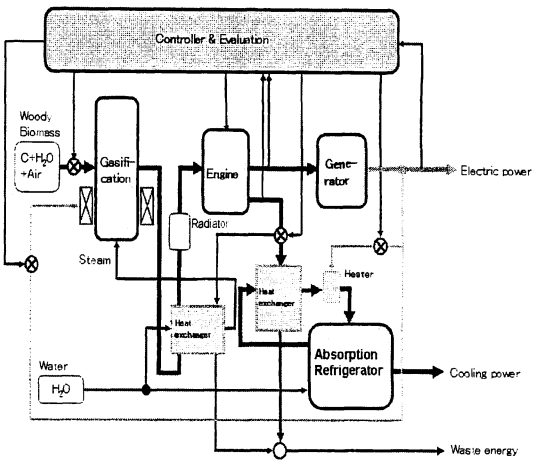

図.1　DYSEBIC のモデル構造

3．ガス化炉モデル

ガス化炉モデルDYSEBIC-W を図.2 に示す．第１セルで木質バイオマスの熱分解，第２から第４セルでは，燃焼反応，発生炉ガス化反応，水生ガス反応，メタン生成反応，シフト反応に基づいて生成されるガス成分の質量・流量・温度を計算する．

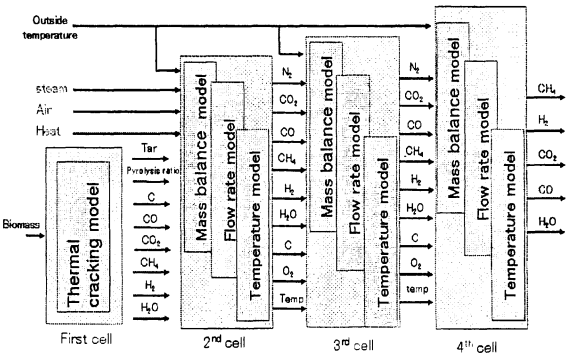

図 2 DYSEBIC のガス化モデル

3.1　熱分解モデル

木質バイオマスが熱分解によりガス化する動的特性をアレニウスの反応速度式をもとに記述することにした．(1)式は CO の質量流量を示すが、他に C、CO_2、CH_4、H_2、H_2O、タールについて、同様な式で表した．

$$CO = \frac{D_{BM} \cdot D_{CO}}{(s + D_{BM}) \cdot 28 \times 10^{-3}} \quad (1)$$

ここで、sはラプラス演算子、D_{BM}は木質チップ熱分解比、D_{CO}はCOの熱分解比、28×10^{-3}はCOの分子量である.

3.2 質量モデル

化学反応式(2)〜(7)に基づくガスの生成・消滅ならびにセルへの入出力に従った物質収支を計算する.

$$C + O_2 = CO_2 \quad (2)$$

$$2C + O_2 = 2CO \quad (3)$$

$$C + H_2O = CO + H_2 \quad (4)$$

$$C + 2H_2O = CO_2 + H_2 \quad (5)$$

$$CO + 3H_2 = CH_4 + H_2O \quad (6)$$

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2 \quad (7)$$

3.3 流量モデル

流量の算出は, ガス化炉の下部から上部への一方向としてナビエストークス式を適用した. ガスの質量と温度をもとに, 圧力降下量を仮定し算出される.

3.4 温度モデル

化学反応式(2)〜(7)に基づく発熱・吸熱ならびにセルへ流入出するガスのエンタルピから算出される.

4. ガス生成シミュレーション

図.2に示すDYSEBIC-Wを用いてガス生成のシミュレーションを行った. 表.1のシミュレーション条件で求めた結果が図. 3 である. 生成ガスは上部からCO_2, CO, CH_4, H_2, H_2Oの質量流量を示す. まずH_2が生成され, 少し遅れてCO_2, 次いでこれらの減少とともにCOとCH_4が増加する特性をよく示している. これらを体積流量に換算し, 定常状態になったときの成分比を表した結果が, 表.2である.

表.1 シミュレーション数値

Remarks	Value	Unit
Outside temperature	293	K
Atmospheric pressure	1013	hPa
Gas constant	8.3	J/kg・K
Heat flow	1000	kJ/s
Air flow	0.015	k g /s
Woody chip flow	0.00525	k g /s
H2O Mass flow	0.008	k g /s
H2O Temperature	573	K

表..2 気体性質のシミュレーション結果

Component	Volume ratio (%)
H2	48.7
CH4	19.5
CO	15.4
CO2	16.4

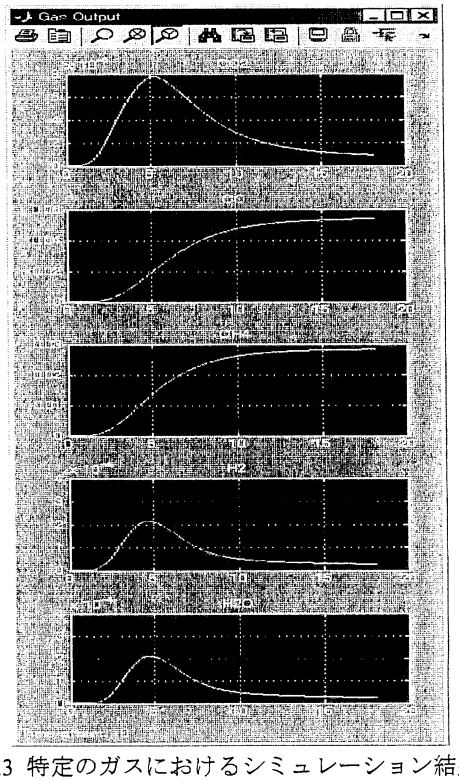

図.3 特定のガスにおけるシミュレーション結果

5．模擬ガス作成

木質バイオマスから生成されるガスの成分はCH_4, H_2, CO, CO_2であるが，木質チップの素材，水分，ガス化温度，印加蒸気などにより変動する．本研究では，DYSEBICで計算した代表的な成分比を基に，表．3に示す3種類の模擬ガスを作った．模擬ガスⅠから模擬ガスⅡ，模擬ガスⅢにかけて，主にCH_4とCO_2の量を調整して発熱量を大きくした．

表.3 混合気体におけるシミュレーション結果

Components	Pseudo Gas I	Pseudo Gas II	Pseudo Gas III
H2	43.40%	45.10%	42.70%
CH4	14.20%	16.10%	21.60%
CO	14.00%	16.00%	21.40%
CO2	28.40%	23.00%	14.30%
Calorific value	1712 kcal/Nm^3	2095 kcal/Nm^3	3003 kcal/Nm^3

6．エンジン実験システム

本実験では自動車用の LPG エンジンを用いた．図．4に示すように，燃料を暖機用LPGから模擬ガスへ運転中に切り替えられるようにした．また，点火プラグ内蔵圧力センサと分解能 2° のクランク角度センサを取り付けた．運転条件は回転数1200rpm，無負荷で，計測条件はサンプリング周期100μs，連続100燃焼とした．

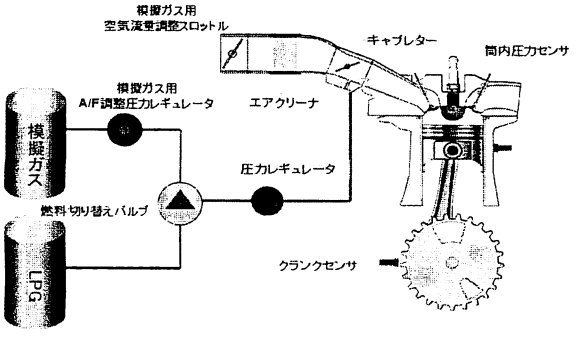

図.4　LPGエンジンのしくみ

7．模擬ガスの燃焼評価

図．5は，点火時期に変化に応じた筒内圧力ピーク値を示す．このように点火時期により大きく変化するので，最適調整した後に燃焼を評価することが必要である．また，最適点火時期は，ガス成分によって異なることも計測された．模擬ガスⅠとⅢは図.5のように進角10°であったが，模擬ガスⅡでは8°であった．これは表．3で示すように模擬ガスⅡはH_2の成分が多いことによると考えられる．一方，この実験中に模擬ガスにおいてもノッキングの発生が見られた．このことから，ガソリンエンジンにおけるノッキング制御(3)を適用することで，最適点火時期を自動調整できるものと考えられる．

図．6は，平均筒内圧力ピーク値をサンプル数ごとにプロットしたものである．サンプル数が増加するに伴って，3種類の模擬ガスのデータが分離されていく．今回の実験では，10燃焼程度の平均値で模擬ガスを識別できた．平均化処理で計測に多少の遅れができるが，燃焼ばらつきを吸収できる．

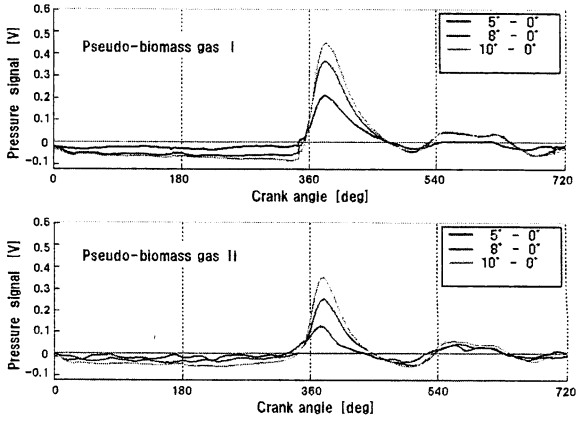

図.5 点火時期における筒圧圧力の実験結果

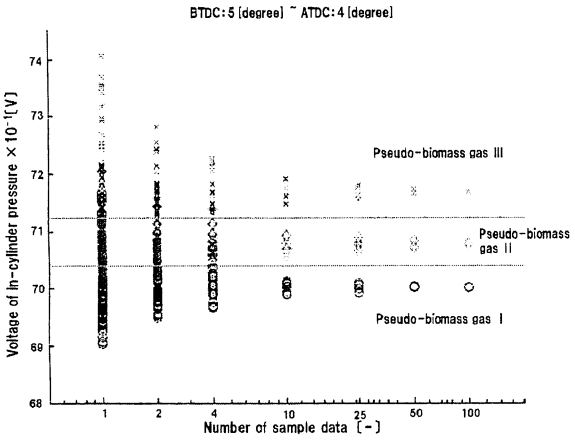

図.6 平均党内圧力ピーク値の実験結果

図. 7 では，平均筒内圧力ピーク値を低位発熱量との対比で示した．サイトにおいて生成ガスの発熱量をリアルタイムで計測することは困難であるが，この結果はエンジンの筒内圧力ピーク値から推定できる可能性を示すものである．またサイトでの演算処理に余裕があれば，筒内圧力のピーク値ではなく積分値を用いる方法も検討すべきである．

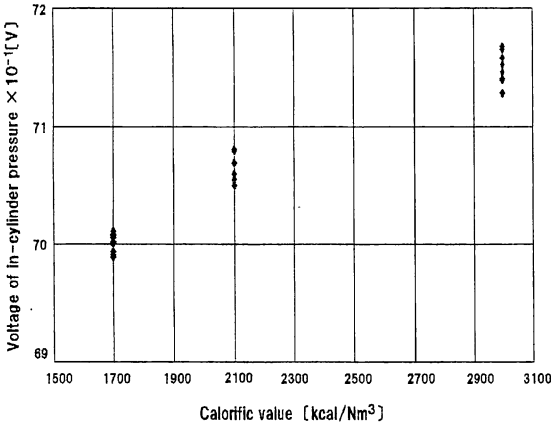

図.7 平均筒内圧力ピーク値を低位発熱量との対比

8．まとめ

カーボンニュートラルの熱併給発電プラントを事前評価する用途で，コンピュータシミュレーションソフトウェア「DYSEBIC」を開発し，そのガス化シミュレーションにおいてガス化炉の運転条件に応じたガス成分を明らかにした．このデータをもとに燃焼実験に使用する模擬ガスを生成し，ガスエンジンによる燃焼実験を行う予定である．木質バイオガスの模擬ガスを燃料とした LPG エンジンでの燃焼実験を行い，筒内圧力ピーク値から以下の知見を得た．

(1) 模擬ガスの成分により最適な点火進角が変化するので，筒内圧力ピーク値の計測には調整が必要である．

(2) 燃焼ばらつきがあるものの，10 燃焼程度の平均値で 3 種類の模擬ガスの判別が可能であることが分かった．

(3) 筒内圧力ピーク値は模擬ガスの低位発熱量との相関がみられたことから，生成ガスのサイトでの発熱量推定に利用できる可能が得られた．自動車エンジンで木質バイオガスを燃焼させる場合，今回の模擬ガスに配慮しなかったタール分の除去等が必要となる。