

木質バイオマス発電のガス化シミュレーションと燃焼評価

Gasification Simulation and Combustion Evaluation for Woody Biomass Generation

○栗原伸夫*, 伊藤渉*, 墨川一人*, 白山裕也**

○Nobuo Kurihara*, Wataru Ito*, Kazuto Sumikawa*, Yuuya Shirayama**

*八戸工業大学, ** (株) 三友製作所

*Hachinohe Institute of Technology, ** Sunyou-ss. Co., Ltd.

キーワード : 木質バイオマス(Woody biomass), ガス化(Gasification simulation),
計算機シミュレーション(Computer simulation), エンジン燃焼(Engine combustion),
筒内圧力(In-cylinder pressure)

連絡先 : 〒031-8501 八戸市大字妙字大開 88-1 八戸工業大学工学部システム情報工学科
栗原研究室 栗原伸夫, Tel&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ー資源として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。いわゆるカーボンニュートラル発電である。小型発電設備の場合、木質のまま燃焼させるよりも、ガス化してから燃焼させる方法がより効率的に電力へ変換できるとされている。またそのガス化発電のプロセスで生じる廃熱を回収して、冷却力に変換する方法を併用することでさらなる効果が期待できる。こうしたことから、木質バ

イオマスをガス化する熱併給発電を検討することにした。

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。これらの木質バイオマスをガス化炉で、CO, CH₄, H₂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ナムの設計に有用である。

本研究では、コージェネレーションシステムを構成する各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、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した。

そして、DYSEBIC シミュレーションから得られたガス成分にもとづいて模擬ガスを合成し、自動車エンジンを用いて燃焼実験を行った結果を報告する。

2. DYSEBIC のモデル構成

DYSEBIC のモデル構成を Fig.1 で示す。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。

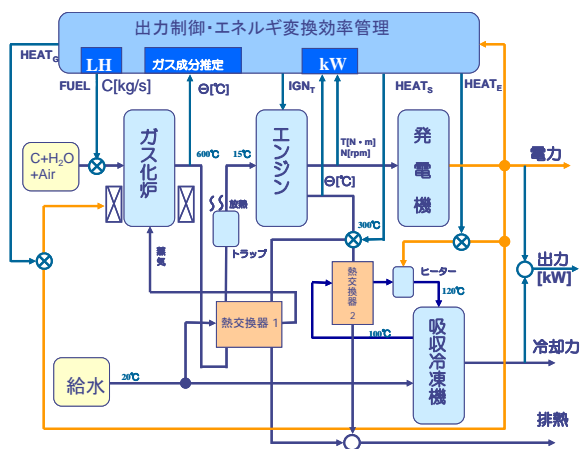


Fig.1 Model structure of DYSEBIC

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することにした。MATLAB/Simulink をベースにプログラミングした結果を Fig.2 で示す。機器ごとのブロックは、

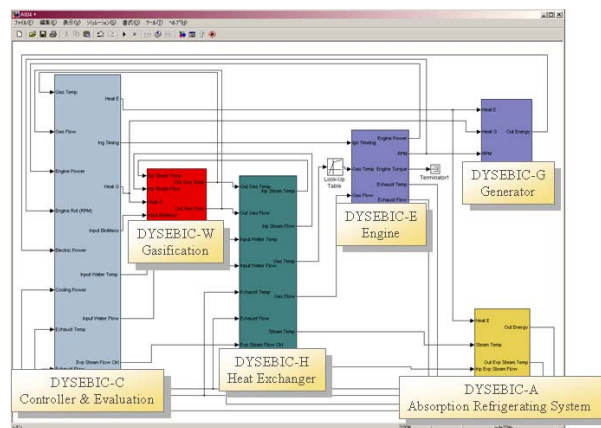


Fig.2 Matlab/Simulink based simulation model of DYSEBIC

互いの入出力(物理量)を連結/切り離すことができる。ここで各ブロックの概要は次の通りである。また、第3章にて、運転管理およびガス化炉モデルの詳細を述べる。

(1) DYSEBIC C : 運転管理モデル

電力/冷熱出力制御およびエネルギー変換効率計算

(2) DYSEBIC W : ガス化炉モデル

木質バイオマスと加熱蒸気を入力に、熱分解、物質収支、エネルギー収支、各種化学反応などを計算し、CO、CH₄、H₂ など生成ガスの挙動を模擬する。

(3) DYSEBIC H : 熱交換器モデル

生成ガスを燃料に空燃比と点火時期で変化させるトルクや回転数の動的挙動を模擬する。

(4) DYSEBIC E : ガスエンジンモデル

トルク、回転数により変化する発電力の動的

挙動を模擬する。

- (5) DYSEBIC G : 発電機モデル
高温側のカスと低温側の水・蒸気との熱交換を模擬する。
- (6) DYSEBIC F : 吸収式冷凍機モデル
冷媒の加熱量を冷却力の動的挙動を模擬する。

3. 運転管理モデル (DYSEBIC C)

運転管理モデルの機能は、プラント全体の制御とガス化炉、吸収式冷凍機、ガスエンジンの効率評価である。冷却要求に対する制御は吸収式冷凍機の冷却出力入力とし、吸収式冷凍機の吸収液加熱用ヒータ電力を操作量とする制御を行う。電力要求に対する制御はガスエンジン発電システムでの電力量を入力とし、流動床ガス化炉へ投入される木質バイオマス量を操作量とする制御を行う。これらの制御には、それぞれ独立したPID制御系を適用した。

3.1 効率計算モデル

プラント全体、ガス化炉、そして吸収式冷凍機について、運転効率を計算してモニタできるようにした。ここで、バイオマス量、発電機出力、吸収式冷凍機の入熱・出熱はそれぞれ計測できるとしている。しかし、ガス化炉の運転効率には生成されたガスの発熱量つまりガス成分が必要となる。これについては、ガスエンジンの燃焼特性を筒内圧力から推定する方式を提案した。

3.2 制御モデル

発電機の出力、吸収式冷凍機の冷却力、およびそれらの総和に対してそれぞれPID制御を適用した。制御量は投入するバイオマス量である。

4. ガス化炉モデル (DYSEBIC-G)

ガス化炉モデルを Fig.3 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セルでは化学反応(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。

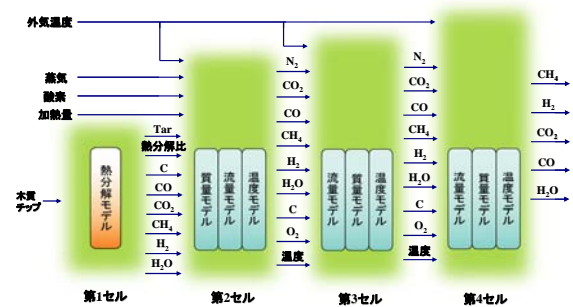


Fig.3 Gasification model of DYSEBIC

4.1 熱分解モデル

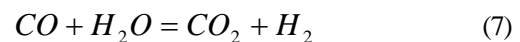
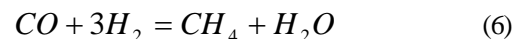
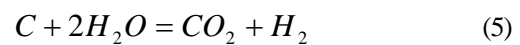
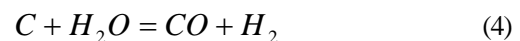
木質バイオマスが熱分解によりガス化する動的特性をアレニウスの反応速度式をもとに記述することにした。(1)式はCOの質量流量を示すが、他にC、CO₂、CH₄、H₂、H₂O、タールについて、同様な式で表した。

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

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

4.2 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。



4.3 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、圧力降下量を仮定する算出される。

4.4 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。

5. 熱交換器モデル (DYSEBIC-H)

ガス化炉で発生したガスの持つ熱量を水蒸気の生成ならびに冷媒の過熱に利用する。これはガスエンジンへの燃料供給する際の体積流量を小さくするうえでも有効である。同様に、ガスエンジンの排ガスが持つ熱量を熱交換器で回収する。

6. ガスエンジンモデル (DYSEBIC-E)

エンジントルク T_E はならびにエンジン回転数を次式で求める。

$$T_E = T \times Lut_1 \times Lut_2 \times Lut_3 \quad [N \cdot m] \quad (8)$$

T : エンジントルク $[N \cdot m]$

Lut_1 : バイオガス温度テーブル

Lut_2 : エンジントルクテーブル

Lut_3 : 点火時期テーブル

$$N_E = \frac{(T_E - L_E)}{2} \times (60 / 2\pi) \text{ [rpm]} \quad (9)$$

L_E : エンジン負荷

7. 発電機モデル (DYSEBIC-G)

発電機はエンジン回転数に比例した出力を得ることができる。モデルではエンジン回転数に下限上限のリミッタを入れ、発電機で発生する電力量を制限することで電力に変換する。

$$W_t = W - (W_E + W_G) \quad [W] \quad (10)$$

W_T : プラント全体での発電出力 $[W]$

W : 発電機での発電量 $[W]$

W_E : 吸収式冷凍機で使用するヒータ電力 $[W]$

W_G : 流動床ガス化炉で使用するヒータ電力 $[W]$

8. 吸収冷凍機モデル (DYSEBIC-A)

吸収冷凍機のモデルについては、参考文献(2)によって八戸工業大学紀要にすでに報告しているので省略する。

9. DYSEBIC の特性確認

シミュレータをPCベースで構成した。利用環境は次の通りである。

ハードウェア : A/T 互換機、CPU 3GHz、メモリ 512MB、OS : Windows2000、基本アプリケーション : Matlab R13、Simulink Ver.5

Figure 4 にガス化炉生成ガスおよび吸収冷凍機のシミュレーション例を示す。木質バイオマスをステップ状に増量した場合の応答であるが、いづれも適切な特性を示している。

Figure 5 は電力要求をステップ状に増やした場合の制御応答を確認したものである。シミュレーション条件は電力要求を 50%→75%とした。電力要求を上げるとガス化炉に投入される木質バイオマスの量が増加し、バイオガスの発生量も増加する。燃料量の増加によりガスエンジン、発電機の回転数を増加させ発電量が増加する。ガスエンジンの排気ガスを熱源としている吸収式冷凍機は排気ガス流量、ヒータ電力を調節する事により冷却出力を一定に保っている。これらの結果からシミュレータの妥当性が検証された。

Figure 4 にガス化炉生成ガスおよび吸収冷凍機のシミュレーション例を示す。木質バイオマ

スをステップ状に増量した場合の応答であるが、いずれも適切な特性を示している。

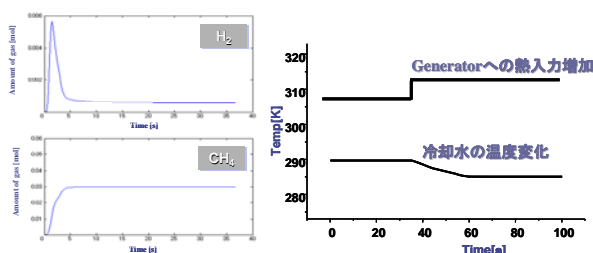


Fig.4 Gas generation and cooling characteristic under step-increase in biomass

Figure5 は電力要求をステップ状に増やした場合の制御応答を確認したものである。シミュレーション条件は電力要求を 50%→75%とした。電力要求を上げるとガス化炉に投入される木質バイオマスの量が増加し、バイオガスの発生量も増加する。燃料量の増加によりガスエンジン、発電機の回転数を増加させ発電量が増加する。ガスエンジンの排気ガスを熱源としている吸収式冷凍機は排気ガス流量、ヒータ電力を調節する事により冷却出力を一定に保っている。これらの結果からシミュレータの妥当性が検証された。

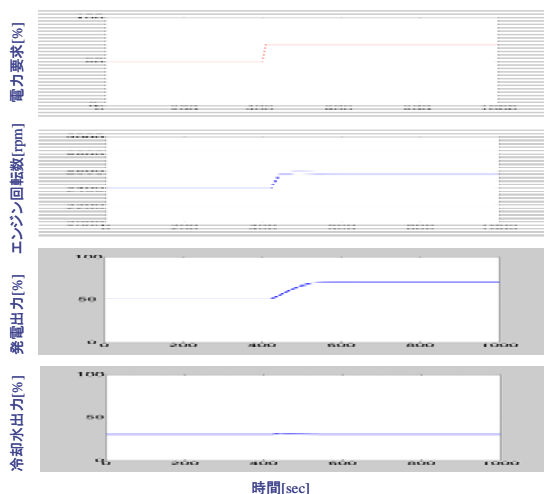


Fig.5 Responses under step-increase in power demand

10. ガス生成シミュレーション

Figure 6 に示す DYSEBIC-G を用いてガス生成シミュレーションを行った。Table 1 のシミュレーション条件で求めた結果が Fig. 7 である。生成ガスは上部から CO₂、CO、CH₄、H₂、H₂O の質量流量を示す。

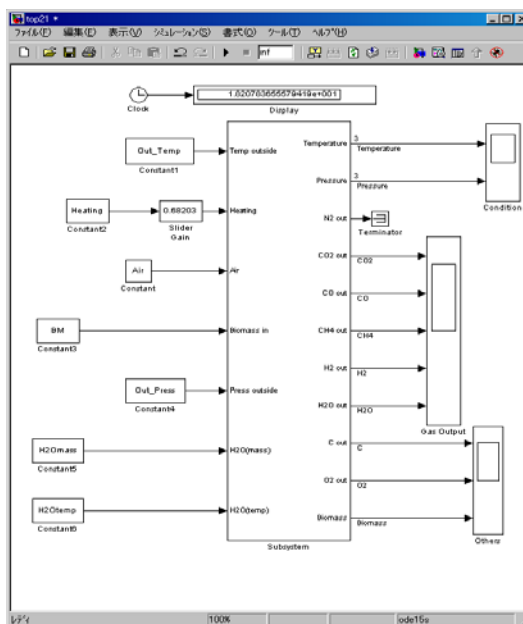


Fig.6 Matlab/Simulink based simulation model of DYSEBIC-G

Table 1 Simulation conditions

備考	値	単位
外気温度	293	K
外気圧	1013	hPa
気体定数	8.3	J/kg・K
加熱量	1000	kJ/s
空気量	0.015	kg/s
木質チップ量	0.00525	kg/s
H2O 質量	0.008	kg/s
H2O 温度	573	K

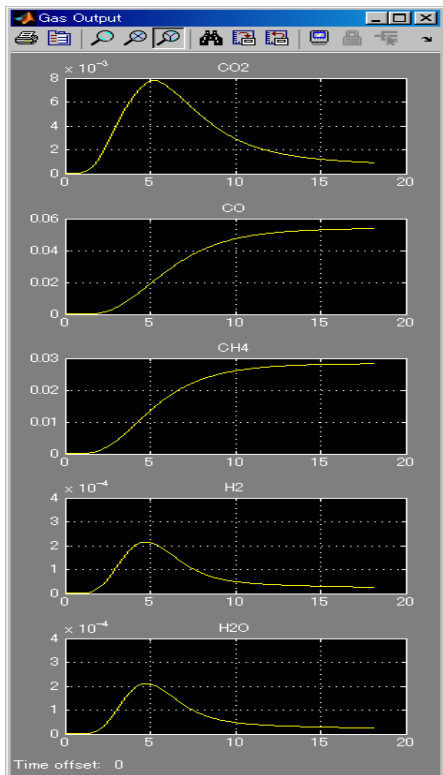


Fig.7 Simulation results of mass flows

これら各ガス成分の定常状態において体積比で表した結果が、Table 2である。

Table 2 Simulation results of volume ratios

成分	体積比 (%)
H2	48.7
CH4	19.5
CO	15.4
CO2	16.4

11. 自動車用エンジンによる燃焼実験

DYSEBIC-Cの運転管理において、発電プラントの効率計算にはガス化炉で生成される木質バイオガスの発熱量を推定する必要がある。ここでは自動車用エンジンの燃焼特性から推定する方法を検討した。

Figure 8は自動車用エンジンを用いた実

験システムを示す。キャブレター式4気筒ガスエンジンに暖機用LPGと試験用模擬ガスを切り替えて供給できるようにした。燃焼評価のために点火プラグ内蔵型筒内圧力センサを取り付けた。

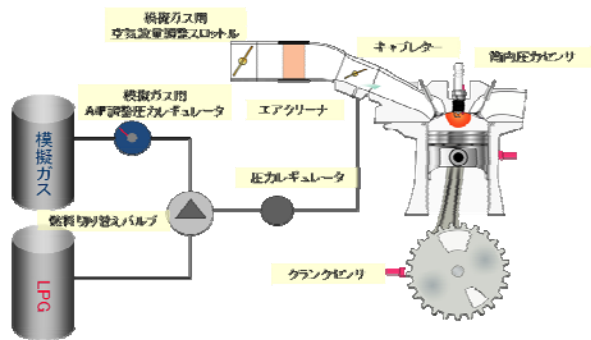


Fig.8 Experimental system using LPG-engine

Table 3 Compounded gas for engine test

ガス成分	模擬ガス I	模擬ガス II	模擬ガス 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%
発熱量	1712	2095	3003
	kcal/Nm ³	kcal/Nm ³	kcal/Nm ³

エンジンの燃焼実験で使用するために3種類の模擬ガスを作成した。ここで、Table2に示すシミュレーション結果に近い体積比のガスは、模擬ガスIIである。

制御用クランク角度センサの信号とともに、100 μ s間隔で1気筒あたり連続200燃焼の筒内圧力波形を計測した。Figure 9は筒内圧力ピーク値を平均値のサンプル数ごとにプロットしたものである。燃焼にばらつきはあるものの、10燃焼程度の平均値で3種類の模擬ガスを識別できることが分かる。

さらに、この結果を発熱量との対比で表

した結果が、Fig.10 である。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。

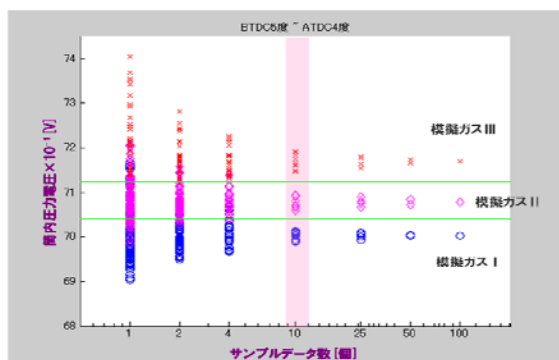


Fig.9 Peak value of in-cylinder pressure for three kind of gas

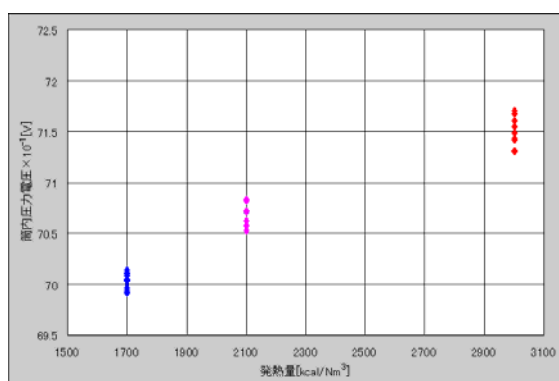


Fig.10 Peak value of in-cylinder pressure and calorific value of gas

12. 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」を開発した。主要な要素機器として、木質バイオガス化炉、吸収冷凍システム、ガスエンジンを備え、それぞれ単独あるいは任意に組み合わせて用いることも出来る。

エンジンの燃焼状態からガス化炉の運転条件を管理する方法は、サイトでの効率管理に有効と考えられる。DYSEBICのシミュレーションで得られたガス成分から模擬ガスを生成し、自動車用エンジンで燃焼実験を実施した。燃焼圧力による生成ガスの発熱量推定の可能性が確認された。

参考文献

- (1) Yuuya SHIRAYAMA, Nobuo KURIHARA: Simulator of Biomass Cogenerating System, Proc. of IECON'2006, Nov. 6-10, 2006, Paris(France)
- (2) Yuuya SHIRAYAMA, Nobuo KURIHARA: Dynamic simulator of Absorption Refrigerating system, Proc. of SICE Annual Conference 2005 in Okayama Aug. 8-10, 2005.