

バイオマス・コジェネ評価用ダイナミックシミュレータ (DYSEBIC) の開発

栗原伸夫*・白山裕也**

Dynamic Simulator of Biomass Cogeneration System

Nobuo KURIHARA* and Yuuya SHIRAYAMA**

Abstract

A dynamic simulator for evaluation of biomass cogeneration system has been developed. By using the simulator, named DAYSEBIC[†], it can be considered to design a plant in advance. Element apparatus, such as a gasification furnace, a gas engine, a generator, an absorption refrigerator, heat exchangers, and their controller constitutes the simulator. Physical models and chemical models of these apparatus were derived, and were programmed based on Matlab/Simulink. The biomass and heat exchange can be adjusted automatically according to a demand of electric power and cooling power. It was confirmed by simulation results that suitable characteristics were shown.

[†]Dynamic Simulator for Evaluation of Biomass Cogeneration

Keywords : Biomass, Cogeneration, Computer Simulation, Dynamic system

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。とりわけ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。この場合、木質のままで燃焼させるよりも、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。またこれと並行して、エンジンの廃熱を吸収式冷凍機の駆動熱源として利用して冷却水を得る。こうしたコジェネレーション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、これらを制御用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

平成 17 年 12 月 16 日受理

* システム情報工学科・教授

** 大学院工学研究科機械システム専攻博士後期課程・2 年

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たことから、結果を報告する。

2. シミュレータのモデル構成

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、空気の影響として表現した。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することにした。MATLAB/Simulink をベースにプログラムした結果を Fig.2 で示す。機器ごとのブロックは、互いの入出力 (物理量) を連結/切り離しすることができる。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 、 CH_4 、 H_2 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す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電力の動的挙動を模擬する。
- (5) DYSEBIC G: 発電機モデル
高温側側と低温側側の水・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。

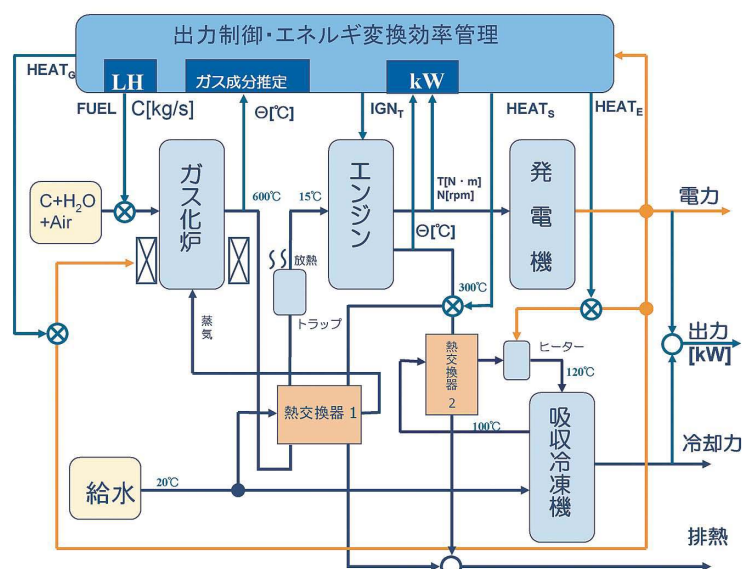


Fig. 1 Modeling composition of DYSEBIC

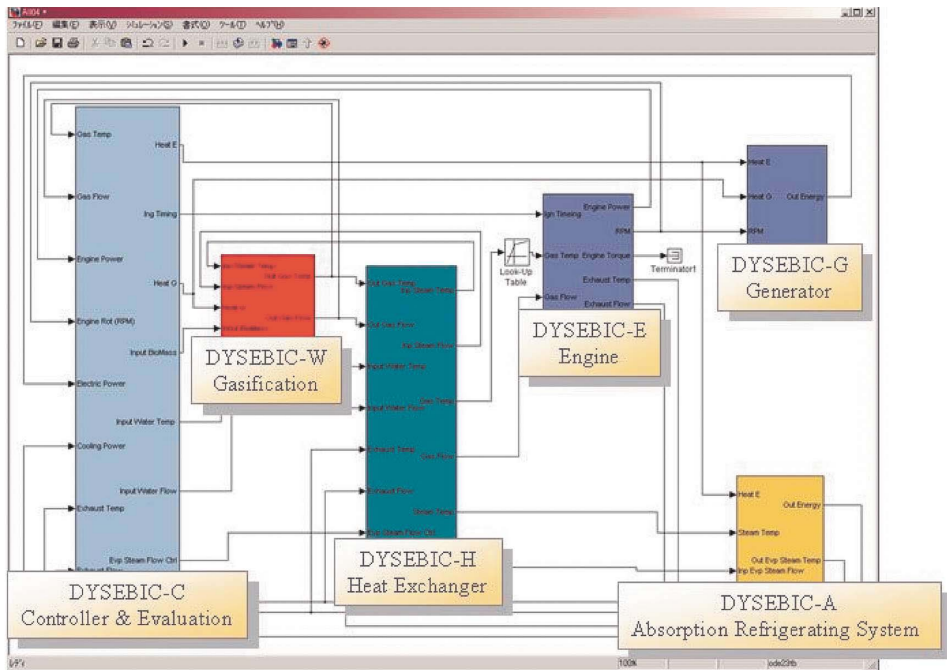


Fig. 2 Matlab/Simulink based simulation model of DYSEBIC

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 (Evaluation & Output)

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 (Control & Input)

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。

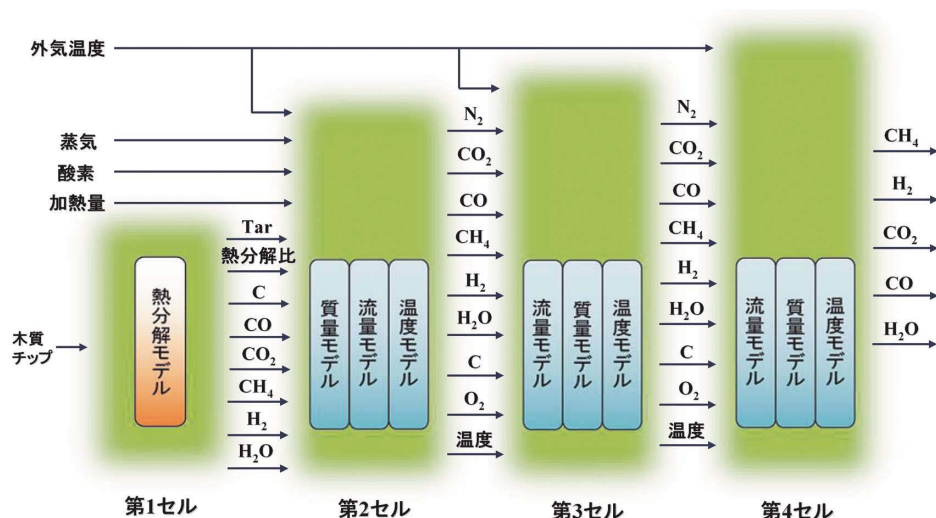


Fig. 3 Gasification model of DYSEBIC

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。

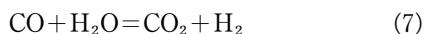
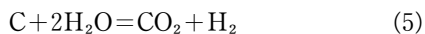
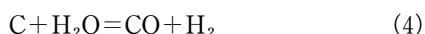
(1) 式はCOの質量流量を示すが、他にC, CO₂, CH₄, H₂, H₂O, タールについて、同様な式で表した。

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

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ーストックス式を適用した。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ーから算出される。

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。

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

T : エンジントルク $[\text{N} \cdot \text{m}]$

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

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

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。

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

W_T : プラント全体での発電出力 $[\text{W}]$

W : 発電機での発電量 $[\text{W}]$

W_E : 吸収式冷凍機で使用するヒータ電力 $[\text{W}]$

W_G : 流動床ガス化炉で使用するヒータ電力 $[\text{W}]$

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. シミュレーション

シミュレータを PC ベースで構成した。Phot. 1 に外観を示す。利用環境は次の通りである。

ハードウェア: A/T 互換機,

CPU 3 GHz, メモリ 512 MB

OS: Windows2000

基本アプリケーション: Matlab R13,

Simulink Ver. 5

Fig. 4 にガス化炉生成ガスおよび吸収冷凍機



Phot. 1 Appearance of DYSEBIC

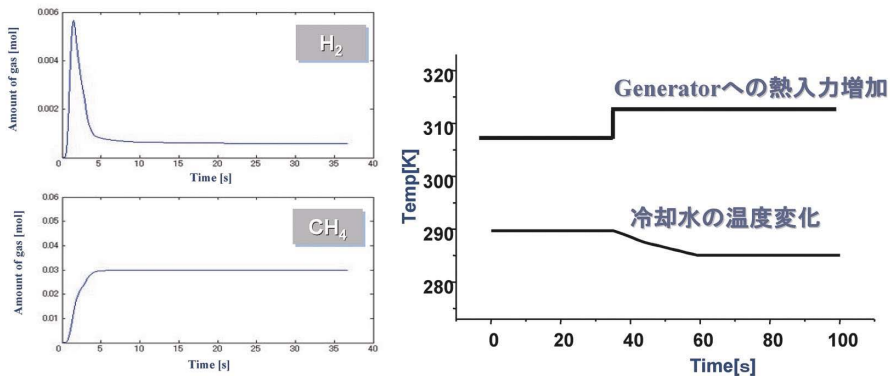


Fig. 4 Gas generation and cooling characteristic under step-increase in biomass

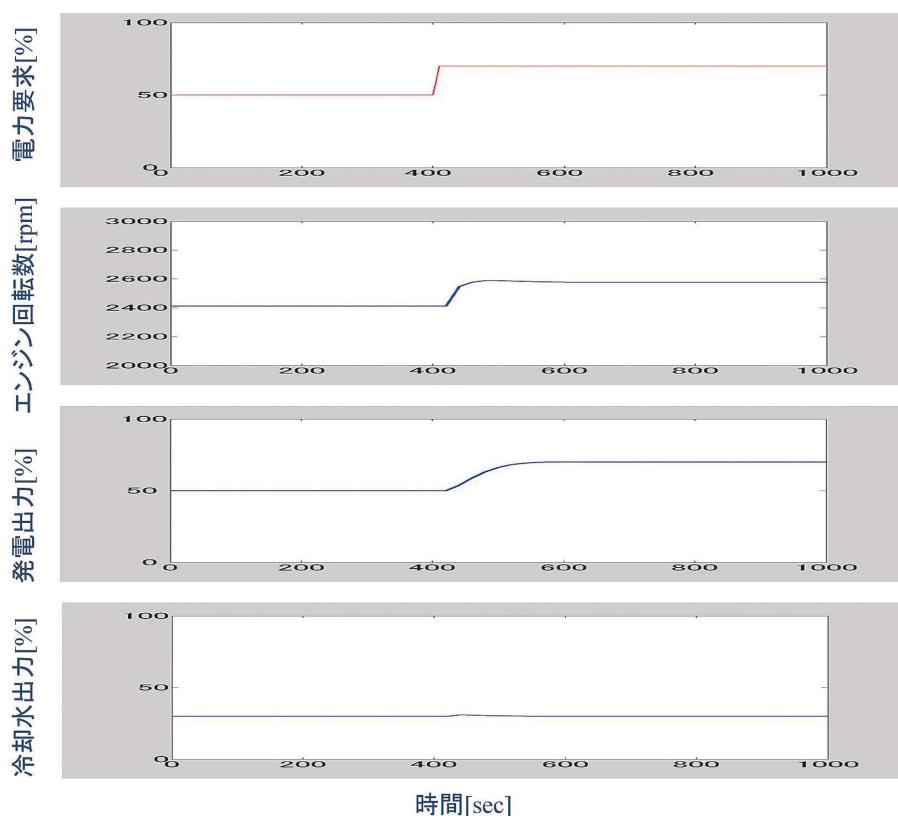


Fig. 5 Responses under step-increase in power demand

のシミュレーション例を示す。木質バイオマス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. 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。

10. 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。

モデルとしては一応、完成度の高いものであるが、大規模システムであることからパラメータの調整をさらに詰めることで精度の向上をはかる必要がある。さらにこれと並行して、模擬ガスを用いたガスエンジンの燃焼試験を進めており、とくに燃焼圧力によるガス化炉生成ガスの発熱量推定が可能となれば、シミュレータに

おける効率管理に反映される。

今後、このシミュレータをパッケージソフトウェアとして広く普及させることに努めたい。

バイオマスガス化システムの動特性モデルに関する研究, 日本機械学会, 2003 年度年次大会講演論文集, Vol. 5, No. 04-1, pp. 215-216 (2004)

- 2) 白山裕也, 栗原伸夫: 吸収式冷凍機の動特性シミュレータ, 八戸工業大学紀要, 24 巻, 24 号, pp. 123-129 (2005)

参考文献

- 1) 千田洋, 白山裕也, 杉沼成, 栗原伸夫: 木質バ