

## 過熱蒸気により半炭化熱処理された 木質チップの熱分解ガス化挙動に関する研究

柳 博文\*1・鈴木 茂雄\*2・長尾 達児\*3・

### 概 要

本研究では、針葉樹、広葉樹、流木および早生樹を対象とし、過熱蒸気により半炭化熱処理した木質チップを用いた熱分解ガス化反応実験を行い、半炭化熱処理温度条件が質量変化、ガス化熱分解速度、生成ガス量に及ぼす影響を検討した。その結果、多樹種の木質チップを過熱蒸気により半炭化熱処理すると、ガス化熱分解特性に大きな相違が生じないことを確認した。

キーワード：ガス化，熱分解，間伐材，過熱蒸気

### PYROLYSIS GASIFICATION BEHAVIOR OF WOOD CHIPS SEMI-CARBONIZED BY SUPERHEATED STEAM

Hirofumi YANAGI \*1, Shigeo SUZUKI \*2, Tatsuji NAGAO \*3

### Abstract

In this study, pyrolysis gasification reaction experiments were conducted on softwoods, hardwoods, driftwoods, and fast-growing trees using wood chips which had been semi-carbonized by superheated steam in order to investigate the effects of semi-carbonization heat treatment temperature conditions on change in mass, gasification pyrolysis rate, and gas production amount. As a result, it was confirmed that there was no significant difference in the gasification and pyrolysis characteristics of wood chips of multiple species when semi-carbonized by superheated steam.

Keyword: Gasification, Pyrolysis, Lumber from thinning, Superheated steam

---

\*1 Manager, New Energy Group, Engineering Planning Department, Civil Engineering Division

\*2 New Energy Group, Engineering Planning Department, Civil Engineering Division

\*3 Deputy Executive General Manager, Civil Engineering Division

## 過熱蒸気により半炭化熱処理された木質チップの熱分解ガス化挙動に関する研究

柳 博文\*1・鈴木 茂雄\*2・長尾 達児\*3

## 1. はじめに

木質バイオマス発電のうち、ガス化発電システムは、バイオマス燃料を化学反応（熱分解や酸化還元）により可燃性のガスを発生させ、エンジンやガスタービンを回して発電する。直接燃焼方式のバイオマス発電より燃焼温度が高く、また燃料の可燃成分を最大限活用できるため、小規模な発電所でも効率的に発電することができ、市町村単位や特定の場所での電力供給や非常時電源として活用が図られている。

ところで、針葉樹、広葉樹、流木および早生樹など地域性や森林特性に対応した均一品質のバイオマスガス化の燃料材を得る方法として、木質チップ加工後に、過熱蒸気による半炭化熱処理をする方法がある。半炭化熱処理を行うことで、バイオマスのエネルギー密度を高め、保管、輸送においても高効率となる<sup>1)</sup>。従来のガス化発電システムは、安定的にガスを発生させるために、燃料となる木の部位や乾燥度合いの条件が限定される良質なチップやペレットが利用されており、森林間伐材の大部分は使用が困難とされてきた。

そこで筆者らは、このような間伐材や果樹剪定枝等、幅広い原料を半炭化熱処理材に活用するために、東京工業大学と共同で研究を行っている。これまでの共同研究の成果として、既存の熱分解炉上部からの供給・充填方式とは異なる方法で、熱分解炉底部から、過熱蒸気によって半炭化熱処理した木質チップ<sup>1)~4)</sup>を搬送・供給しながら、粗粉碎充填する方式を提案した<sup>5)</sup>。これにより、ガス化炉内の木質チップ間の空隙が減少し、炉内温度を維持し易くする。また、同供給方式を適用したベンチスケールガス化反応試験装置(スキッド

化されたプラント(発電出力200kW)の1/50縮小スケール)を開発し、半炭化による熱分解ガス化実証実験により合成ガス主成分の一酸化炭素(CO)、メタン(CH<sub>4</sub>)および水素(H<sub>2</sub>)の安定的なガス生成を確認した<sup>5)</sup>。ただし、過熱蒸気による半炭化熱処理温度と半炭化プロセス条件の違いによって、熱分解ガス化反応速度および最終生成ガス量に顕著な相違が見られた<sup>5)</sup>。過熱蒸気による半炭化熱処理温度の保持時間が、熱分解ガス化過程に影響を与えていると考えられるが、その詳細は十分に明らかにされていない。

そこで本研究では、針葉樹、広葉樹、流木および早生樹の過熱蒸気による半炭化熱処理材を用いた熱分解ガス化反応実験を行うことで、半炭化熱処理温度条件が質量減少変化、アレニウス型のガス化熱分解速度、生成ガス量に及ぼす影響を検討した。

## 2. 実験および解析手法

## 2.1 実験装置・実験方法

実験装置の概略を図-1に、実験用熱分解炉(内径;30mm,高さ;300mm,最高限界温度;1200℃)の概略を図-2に示す。熱分解炉は、石英チューブ内に供試材100mg±10mgが充填された計量器を吊した状態としている。ガス化剤は、供給流量を100ml/minとした。計量器の直近には、熱電対を設置して供試材近傍の温度(TR-1,2)、熱分解炉出口のガス凝縮部温度(TR-3)を測定した。また、流量計を設置して発生ガス流量(FR-3)を測定した。ガス化剤を熱分解炉底部から供給し、第1反応(半炭化→揮発分(ガス, タール(熱分解ガス化する際に発生する有機系液体))+チャー(炭))なら

\*1 土木本部 エンジニアリング企画部 新エネルギーグループ グループリーダー

\*2 土木本部 エンジニアリング企画部 新エネルギーグループ

\*3 土木本部 副本部長

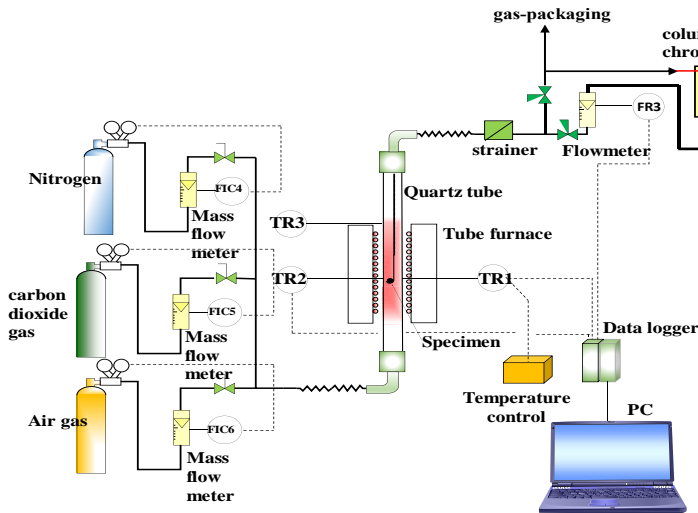


図-1 大学内に設置した実験装置概略

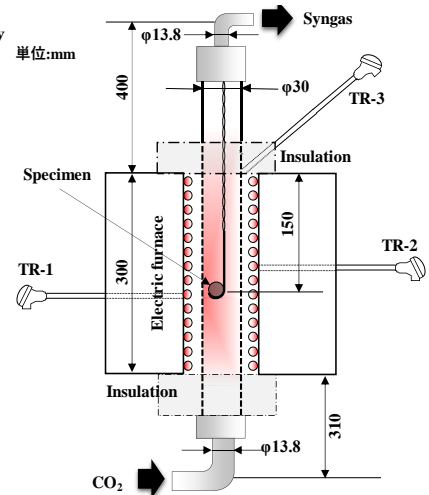


図-2 実験用熱分解炉の概略

表-1 供試材の過熱蒸気温度，熱処理時間および熱処理前後における質量減少率

分類	過熱蒸気温度 (°C)	熱処理時間 (min)	質量減少率 (%)	サンプル No	備考
針葉樹 Softwood	300 <sup>*1</sup>	10	25-35	A-1,2,3	1: スギ製材用丸太 2: スギ小径丸太 3: スギ枝端
	350 <sup>*1</sup>	10	45-50	B-1	スギ製材用丸太
	350 <sup>*1</sup> or more	12	67.6-90	C-1,2	スギ 非過熱蒸気
広葉樹(果樹を含む) Hardwood	300 <sup>*2</sup>	9	25.4	D-1	コナラ
				D-2	コナラ
				D-3	リンゴ
				D-4	クリ
	350 <sup>*2</sup>	8	31	E-1	コナラ
E-2	コナラ				
流木 Driftwood	300 <sup>*2</sup>	7	28.9	F-1	貯水池浮遊
	350 <sup>*2</sup>	7	28.9	G-1	
早生樹 Fast growing tree	300 <sup>*1</sup>	8	14.3	H-1	キリ樹皮有
				H-2	キリ樹皮無
	350 <sup>*1</sup>	7	46.2	I-1	キリ樹皮有
				I-2	キリ樹皮無

\*1: チップの形状は50mmX50mmX5mm

\*2: 広葉樹の小枝は平均の外径は16mm、長さは50mm

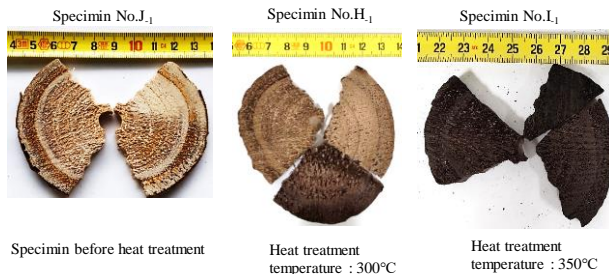


写真-1 早生樹(キリ)における生チップおよび過熱蒸気 300°Cと 350°Cで半炭化熱処理されたチップの表面色彩変化

びに第2反応(揮発分(タール)+チャー→ガス)の熱分解ガス化を促進させるために、石英チュー

ブ上部で発生ガスの滞留時間が1秒程度になるように石英チューブ出口の管径(ODΦ13.8)を小さくし、ガス化剤供給流量を制御した。

ここでは、熱分解炉から発生する余剰ガス(フレアー)およびガスエンジンから排出されるガスに含まれるCO<sub>2</sub>を循環再利用(Carbon dioxide Capture Utilization)しながら素反応を促進させることを検討するために、ガス化剤としてCO<sub>2</sub>を用いた。実験中の外観目視観察では、想定通り、石英チューブ内の熱電対TR-2の取付位置近傍から旋回流の発生ガスが観察され、さらに滞留時間も1~2秒程度が保持されることを確認することができた。

## 2.2 過熱蒸気による半炭化熱処理<sup>2,3)</sup>

表-1に、過熱蒸気によって半炭化熱処理された4種類の供試材の過熱蒸気温度、熱処理時間および熱処理前後の質量減少率を示す。各供試材は、樹種と過熱蒸気の半炭化熱処理温度の組合せを示している。また、比較検討用の供試材として、過熱蒸気の供給なし(以下、「非過熱蒸気」と呼ぶ。)で半炭化熱処理した針葉樹(供試材 No.C)と早生樹「キリ」の生チップ(供試材 No.J)を用意した。

実験用供試材の製造は、ベルトコンベア式の装置で木質生チップをトレイに乗せ、保持時間を7~16分間として300~350°Cの過熱蒸気を噴射して搬送移動することにより出口で半炭

化熱処理材として生成される。

写真-1に早生樹「キリ」における過熱蒸気温度 300℃と 350℃での半炭化熱処理による表面色彩の変化例<sup>4)</sup>を示す。供試材 No.H-1 と No.I-1 を比較すると、半炭化温度が高くなるにしたがって、薄褐色から黒色に色彩が変化し炭化が進行していることが分かる。

### 2.3 質量減少曲線およびガス化熱分解速度の解析手法<sup>6),7)</sup>

図-3(a), (b)に供試材 No.H-1 (半炭化熱処理温度 300℃)と No.I-1 (半炭化熱処理温度 350℃)の質量減少曲線とガス化熱分解速度を示す。図中のガス化熱分解による急激な質量減少が見られる 300~400℃付近の領域 (以下、「ガス化領域」

と呼ぶ。)における質量減少曲線の傾斜度は、第1反応が支配的なガス化領域におけるガス化率を表しており、傾斜度数値が大きいほどガス化率は高いと考えられる。例えば、図-3(a)の熱分解温度 300℃を基準にして最大となる 350℃までの直線の傾き No.H-1 :  $0.72 \times 10^{-2} (1/^\circ\text{C})$  と 400℃までの破線の傾き No.I-1 :  $0.43 \times 10^{-2} (1/^\circ\text{C})$  を比較した場合、No.H-1 の傾きが大きく、ガス化領域でのガス化率は No.I-1 に比べて No.H-1 の方が大きいと言える。この考え方は、第1反応による半炭化熱処理材のガス化熱分解速度を解析するために、質量減少曲線の逆S字曲線の肩付近の温度 300℃から 400℃付近までの急激な熱分解反応モデルを式(1)で表しており、アレニウスの式<sup>7)~9)</sup>をここで適用している。

$$\frac{d(W/W^*)}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \left(1 - \frac{W}{W^*}\right) \quad (1)$$

ここで、W : 時間 t における揮発分量(mg)

W\* : 設定した実験時間における揮発分量(mg)

A : 頻度因子(1/min)

E : 活性化エネルギー(J/mol)

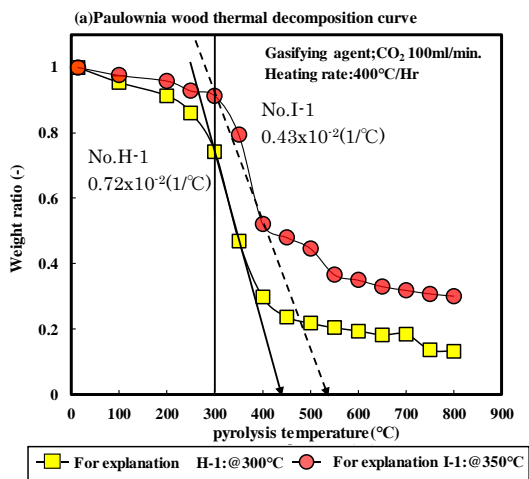
R : 気体定数(J/(mol·K))

T : 絶対温度(K)

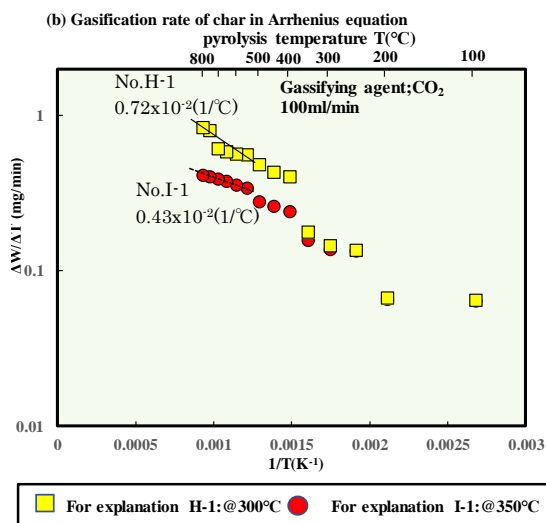
さらに第2反応によるガス化反応については、生成したチャーのガス化反応速度を式(2)で表せる。例えば、図-3(b)で示す式(2)に基づくアレニウスプロット (横軸の下部に熱分解温度の逆数(1/T), 上部に熱分解温度(T), 縦軸に質量減少速度 ( $\Delta W/\Delta T$ ) の対数) から求められるガス化熱分解速度は、チャーやタールの熱分解が行われている熱分解温度 450℃~800℃の範囲で、直線と破線の回帰直線で表される。そのときの回帰係数の値は、No.H-1(1417)の方が No.I-1(269)よりも大きく、第2反応における熱分解ガス化促進と未燃炭素などの残留物が少ないことを示している。

$$\frac{d(W_c/W^*)}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \left(1 - \frac{W_c}{W^*}\right) \quad (2)$$

ここで、W<sub>c</sub> : 時間 t におけるチャー揮発分量(mg)



(a) 質量減少曲線



(b) ガス化熱分解速度

図-3 質量減少曲線とガス化熱分解速度

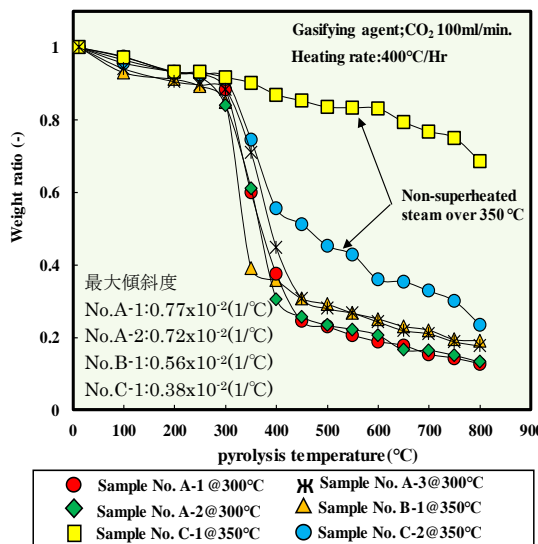
### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 針葉樹の半炭化熱処理材のガス化熱分解挙動

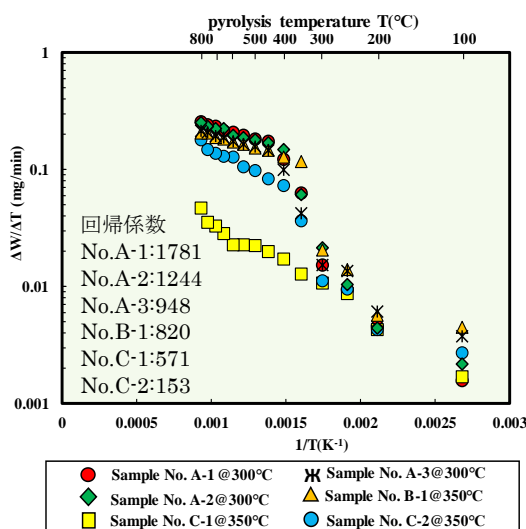
森林から伐採された針葉樹(スギ)のカスケード利用として製材用丸太と小径丸太を木質チップに加工し、過熱蒸気による半炭化熱処理した供試材のガス化実験を行った。さらに、非過熱蒸気による半炭化熱処理した供試材のガス化実験も行い、比較検討した。

過熱蒸気による半炭化熱処理温度 300℃(以下,「半炭化 300℃」と呼ぶ。), 350℃(以下,「半炭化

350℃」と呼ぶ。)および非過熱蒸気による半炭化熱処理材での質量減少曲線を図-4(a)に示す。供試材 No.A-1 は製材用丸太, No.A-2 は小径丸太を切削チップ加工したものであり, 両供試材とも温度 300℃で半炭化熱処理されているが, ガス化領域における最大傾斜度は, No.A-1:  $0.77 \times 10^{-2} (1/^\circ\text{C})$ , No.A-2:  $0.72 \times 10^{-2} (1/^\circ\text{C})$  と No.A-1 の方が多少ガス化率は高かった。供試材 No.B-1 は半炭化 350℃で,  $0.56 \times 10^{-2} (1/^\circ\text{C})$  とガス化率は, 供試材 No.A-1 および No.A-2 の半炭化 300℃の方が高くなっている。一方, 非過熱蒸気で半炭化熱処理された供試材 No.C-1 および No.C-2 の傾斜度については, 前者は推算が困難であり, 後者は  $0.38 \times 10^{-2} (1/^\circ\text{C})$  であった。この結果から, 過熱蒸気による半炭化熱処理材は非過熱蒸気の場合に比べてガス化率を高くできると考えられる。また, 図-4(b)にアレニウスプロットした熱分解速度を示し, タール, チャーの第 2 反応ガス化反応が支配的である 450℃~800℃の範囲の近似直線の回帰係数の比較を行った。回帰係数は, 供試材 No.A-1 (1781) > No.A-2 (1244) > No.A-3 (948) > No.B-1 (820) > No.C-1 (571) > No.C-2 (153) となり, 非過熱蒸気で半炭化熱処理された供試材 No.C-1, No.C-2 は他の供試材より回帰係数が小さいことから, タールやチャーのガス化が促進されにくいと考えられる。



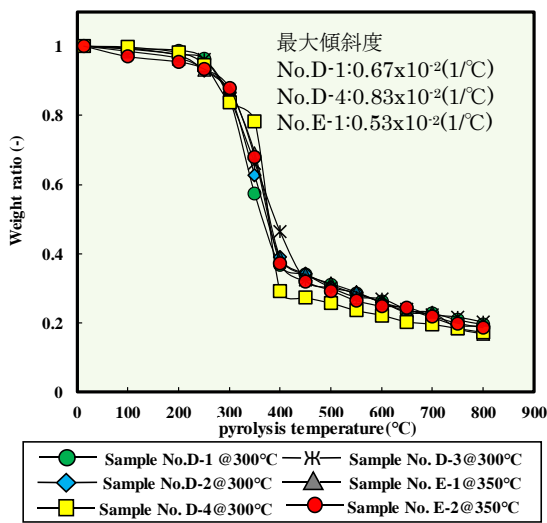
(a) 質量減少曲線



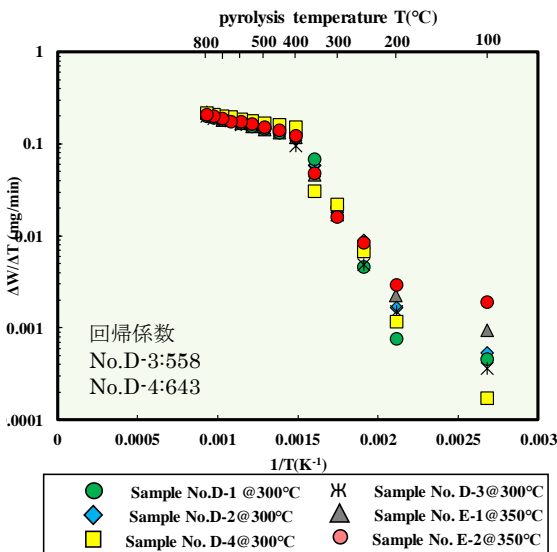
(b) ガス化熱分解速度

図-4 針葉樹の半炭化 300℃と 350℃の質量減少曲線とガス化熱分解速度

てもガス化率は互いに近い傾向を示すことが確認できた。また、**図-5 (b)**にアレニウスプロットした熱分解速度を示す。供試材 No.D-4(クリ@300℃)と No.D-3(リンゴ@300℃)を使って最終段階の熱分解反応になるガス化熱分解温度 650℃～800℃の範囲の近似直線の回帰係数を比較すると、回帰係数の数値がそれぞれ No.D-4(643)、No.D-3(558)となり、残渣分量を低下させるには No.D-4のクリに優位性があることが確認できた。



(a) 質量減少曲線

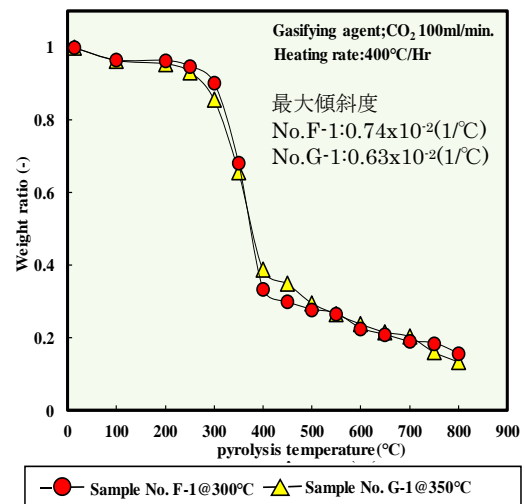


(b) ガス化熱分解速度

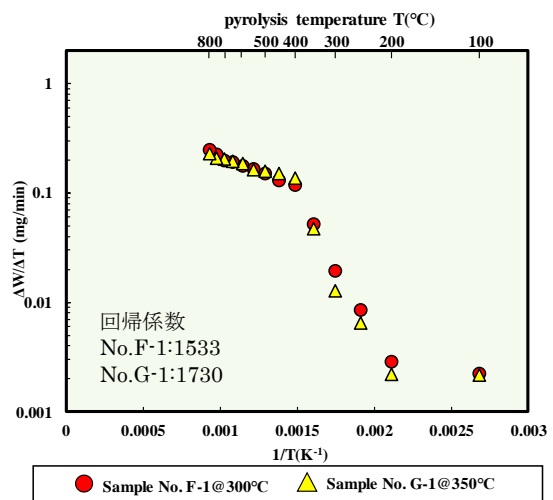
図-5 広葉樹（果樹系を含む）の半炭化 300℃と 350℃の質量減少曲線とガス化熱分解速度

### 3. 3 流木の半炭化熱処理材のガス化熱分解挙動

貯水池の浮遊流木をジェット洗浄後、長さ 80～100mm、幅 10～20mm の形状のチップに加工し、半炭化熱処理温度 300℃と 350℃で半炭化処理した供試材 No.F-1(半炭化 300℃)と No.G-1(半炭化 350℃)のガス化反応試験を行った。**図-6 (a)**に、供試材 No.F-1 と No.G-1 のガス化反応試験における質量減少曲線を示す。質量減少曲線のガス化領域における最大の傾斜度は、供試材 No.F-1 は  $0.74 \times 10^{-2} (1/^\circ\text{C})$ 、No.G-1 は  $0.63 \times 10^{-2} (1/^\circ\text{C})$  となった。ここでは、過熱蒸気による半炭化熱処理温度



(a) 質量減少曲線

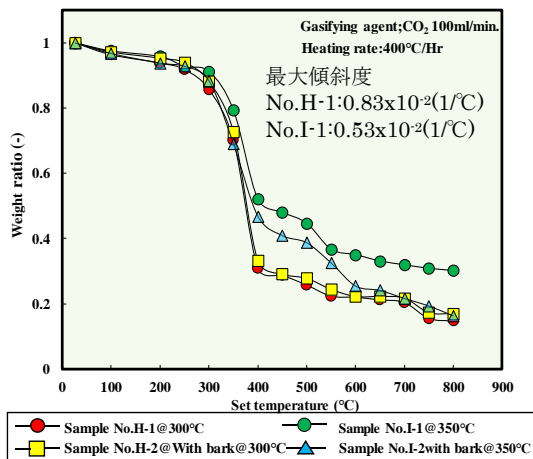


(b) ガス化熱分解速度

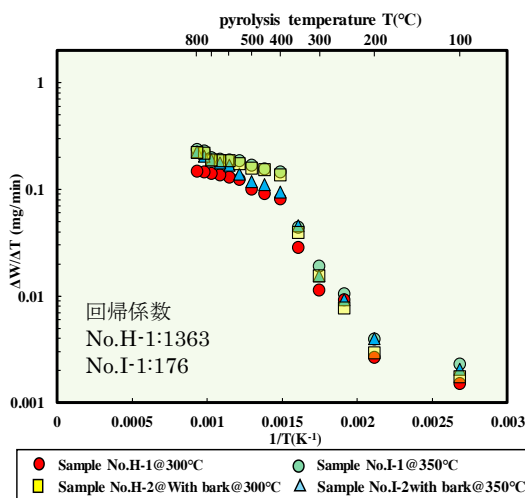
図-6 流木の半炭化 300℃と 350℃の質量減少曲線とガス化熱分解速度

の差で、質量減少率に顕著な差異は見られなかった。その理由として、流木は水中浮遊期間に樹脂などが溶けだし、内空率が高くなるため、半炭化熱処理材間の熱伝達率が小さくなっていると考えられる。

一方で、**図-6(b)**のアレニウスプロットより、ガス化熱分解温度 650~800°C の範囲の近似直線の回帰係数を比較すると、No.F-1(1533)、No.G-1(1730)となり、未燃炭素の残留については No.G-1(半炭化 350°C)の方が若干小さい結果となった。質量減少率と同様に、水中浮遊期間に樹脂などが溶けだしたことで、ガス化反応における未燃炭素の残留にも影響したと考えられる。



(a) 質量減少曲線



(b) ガス化熱分解速度

図-7 早生樹の半炭化 300°C と 350°C の質量減少曲線とガス化熱分解速度

### 3.4 早生樹の半炭化熱処理材のガス化熱分解挙動

早生樹「キリ」は、小径丸太Φ90~100mmを厚さ 40~50mm の輪切り切断後、扇型チップに加工して供試材 No.H(半炭化 300°C)および No.I(半炭化 350°C)のガス化反応試験を行った。さらに、供試材 No.H については、樹皮付きの場合 (No.H-1)と樹皮を除去した場合 (No.H-2)でガス化熱分解挙動の比較検討を行った。**図-7(a)**に示すように、供試材 No.H-1 と No.H-2 との質量減少曲線の形状はほぼ同じであった。

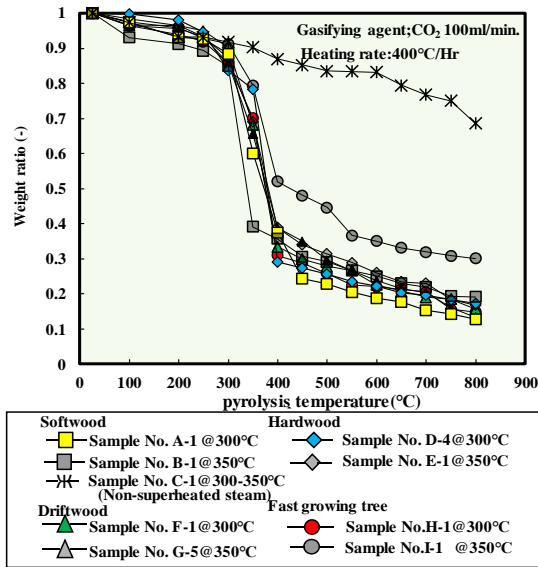
No.H-1 の樹皮付きの面積は、画像による計測を行った結果、樹皮を除去した No.H-2 と比較すると、その変化量は、扇形チップ全体面積の 3.0% 以下であったことを考慮すると、半炭化熱処理時に、樹皮による断熱効果が及ぼす影響は小さいと考えられる。また、**図-7(a)**で No.H-1 (半炭化 300°C) と No.I-1(半炭化 350°C)のガス化領域の最大傾斜度を比較すると、No.H-1:  $0.83 \times 10^{-2} (1/^\circ\text{C})$ 、No.I-1:  $0.53 \times 10^{-2} (1/^\circ\text{C})$  とガス化領域でのガス化率は No.I-1 の方が低いことが確認された。ガス化率が低い一因として、No.I-1 の半炭化 350°C の方が、炭化度が進行していることが考えられる。これは早生樹(キリ)の気乾比重は 0.29 であり、他の供試材(例えばクリ 0.55)に比べ小さいことが炭化度の進行具合に影響を及ぼしているものと推測される。さらに、**図-7(b)**のアレニウスプロットにより、ガス化熱分解温度 650~800°C の範囲の近似直線の回帰係数を比較すると、No.H-1 (1363)、No.I-1 (176) となり、**図-7(a)**に示すように、ガス化率の低い No.I-1 (半炭化 350°C) は、多くの未燃炭素や残渣物が残ると考えられる。

### 3.5 多樹種の熱分解ガス化挙動の比較と考察

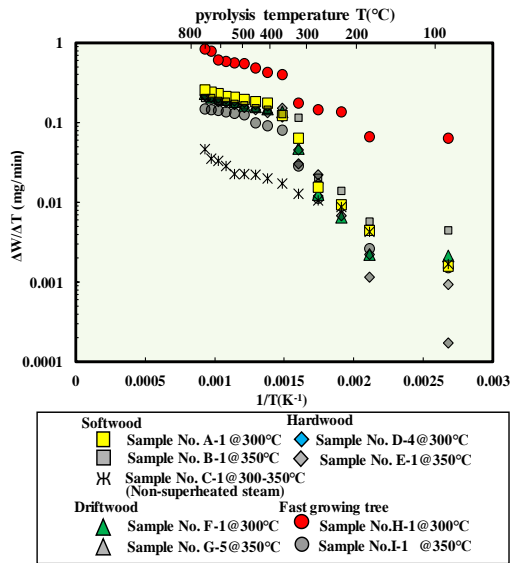
**図-8(a), (b)**に、針葉樹、広葉樹、流木および早生樹の半炭化 300°C と 350°C の質量減少曲線と熱分解速度を示す。針葉樹、広葉樹、流木および早生樹ともに質量減少曲線のガス化領域におけるガス化率は、半炭化 300°C の方が高い挙動が見られた。さらに、アレニウスプロットより推算さ

れるガス化熱分解速度も半炭化 300℃の方が大きいことが確認された。なお、木質チップを非過熱蒸気で熱処理した場合は、質量減少率・ガス化熱分解速度ともに使用サンプル間のばらつきが大きかった。

図-9～図-12に、針葉樹、広葉樹、流木および早生樹の半炭化 300℃または 350℃の供試材について、昇温速度 400℃/h、設定温度 800℃の条件下で生成したガス量を比較した図を示す。発生



(a) 質量減少曲線



(b) ガス化熱分解速度

図-8 針葉樹、広葉樹、流木および早生樹の半炭化の質量減少曲線とガス化熱分解速度の比較

ガス量は、セルロースの熱分解が始まる温度 300℃付近から急激に増加する挙動が見られた。

図-10 に示す広葉樹が最も生成ガス量が多い傾向を示し、熱分解温度 300℃における熱分解ガス化反応初期のガス発生量は生成ガスの合計流量の 19%に達している。そのほか、針葉樹(図-9)は 17%、早生樹(図-12)は 16%となり、最も生成ガス流量が小さかったのは流木(図-11)の 13%であった。さらに、広葉樹は合計生成ガス量が約 100ml と最も多く、初期ガス発生量が多い半炭化熱処理材は、合計生成ガス量も多く、未燃炭素の残渣も少ない傾向が見られた。

多樹種の半炭化熱処理材の利用における揮発分の熱分解反応モデル<sup>9)</sup>について、第 1 反応ガス

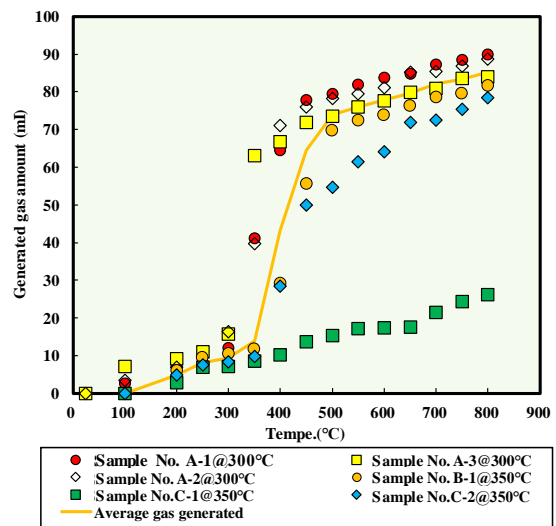


図-9 針葉樹の半炭化のガス生成量の比較

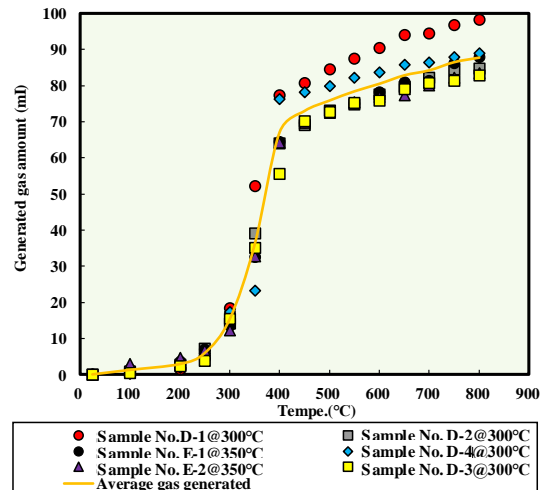


図-10 広葉樹の半炭化のガス生成量の比較



化熱分解での並列反応，第2反応ガス化熱分解でのタール，チャーの揮発分の発生を式(1)および式(2)で表せるとし，表-2に示す頻度因子と活性化エネルギーを用いた揮発分の全生成ガス量の推算を行った。図-13に，実験温度と揮発分の全生成ガス量の関係を示す。温度領域400℃以上では，流木を除いて，揮発分の生成ガス量の計算結果と実験結果との間に比較的良好な一致が見られた。流木の生成ガス量が低い要因として，浮遊期間に樹脂が溶解落ちた<sup>10)</sup>ことで内空率が高くなったため，エネルギー密度が低下した可能性が考えられる。また，熱処理温度300℃の針葉樹の半炭化熱処理材について，第1反応の領域で他の供試材とは若干異なる生成ガス量の増加挙動が見られ

た。初期ガス化発生温度220~240℃の低温域からのガス発生量が多いことが影響を及ぼしていると考えられる。しかし，樹木の種類が違っても，過熱蒸気による半炭化熱処理材にすることで，ガス化熱分解特性に大きな相違が生じないことを確認した。

#### 4. まとめ

本研究では，針葉樹，広葉樹，流木および早生樹の過熱蒸気による半炭化熱処理材を用いた熱分解ガス化反応実験を行うことで，以下の知見を得た。

(1)半炭化の熱処理温度300℃と350℃の比較によって，前者の方がガス化熱分解過程における揮発分の生成ガス量が多く，さらに，未燃炭素などの残渣分が少なくなる挙動を示すことが確認できた。

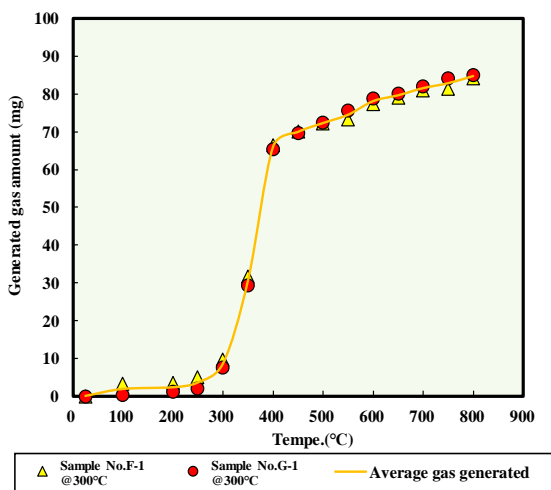


図-11 流木の半炭化のガス生成量の比較

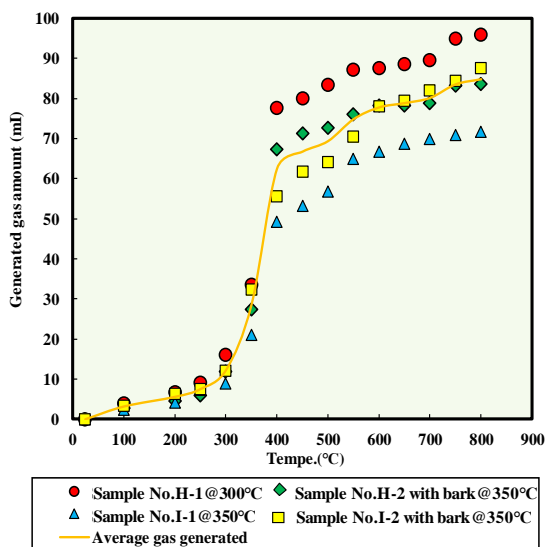


図-12 早生樹の半炭化のガス生成量の比較

表-2 モデルの頻度因子と活性エネルギー

成分	温度範囲 (°C)	A(l/min)	E(KJ/mol)
ガス	$RT < T_s^{*1} < 200$	1.13	0.32
ガス	$200 < T_s < 300$	2.10	4.23
ガス、タール、チャー	$300 < T_s < 400$	18.17	16.92
タール、チャー	$400 < T_s < 500$	9.03	12.47
チャー	$500 < T_s < 600$	4.95	6.63
チャー	$600 < T_s < 700$	3.67	4.22
チャー	$700 < T_s < 800$	6.05	6.45

<sup>\*1</sup>Ts: 測定した温度

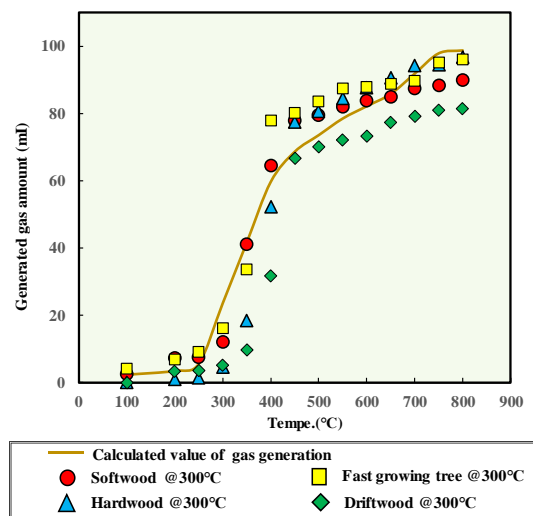


図-13 実験温度と揮発分の全生成ガス量の関係

- (2)非過熱蒸気による半炭化熱処理材(熱処理温度 350°C)を熱分解ガス化すると、ガス化率が小さく、タールやチャーのガス化が促進されにくくなることがある。
- (3)針葉樹の半炭化 300°Cの熱分解ガス化は、他の樹種に比べ初期ガス発生量が多く、全生成ガス量も多くなる挙動が見られた。
- (4)針葉樹、広葉樹、流木および早生樹の木質チップを過熱蒸気により半炭化熱処理材にすることで、ガス化熱分解特性に大きな相違が生じないことを確認した。

### 謝辞

本研究を遂行するに当たり、ご指導下さいました東京工業大学の松本秀行准教授には、厚く御礼申し上げ、感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 吉田貴紘:熱処理バイオマスペレット燃料の製造技術及び評価方法, 日本実験力学, 19 巻 3 号, pp.175-181, 2019
- 2) 本庄孝子, 井田民男, 瀧端学, 佐野寛:新燃料BCDF(Bio-Carbonized-Densified-Fuel)の可能性—セルロース半炭化ペレットのエネルギー密度・エネルギー収率の最適化を求めて—, 日本エネルギー学会誌, 84(2), pp.142-148, 2005
- 3) 中村駿介, 吉川邦夫:炭化度の異なる炭化木質バイオマスガス化の特性評価, 第 26 回日本エネルギー学会大会, pp.86-87, 2017
- 4) 久保島吉貴, 柳田高志, 吉田貴紘:色彩測定によるトレファクション木材チップの半炭化の程度の推定, 木材学会誌 63 巻 4 号, pp.176-182, 2017
- 5) 鈴木茂雄, 松本秀行, 猪塚武志:半炭化操作温度がアップドラフト式バイオマスガス化装置の挙動に及ぼす影響, 第 30 回日本エネルギー学会大会, pp.40-41, 2021
- 6) 水野諭, 森田明宏, 井田民男, 難波邦彦, 瀧端学, 澤井徹:多様なバイオマス資源の組成・熱分解分析から抽出した特性とその相関, 高温学会誌, 34 巻 4 号, pp.153-159, 2008
- 7) 森田明宏:木質バイオマスのガス化過程における基礎熱分解特性とその予測手法の検討, 高温学会誌, 35 巻 2 号, pp.85-90, 2009
- 8) Colomba Di Blasi: Modeling and Simulation of Combustion Processes of Charring and Non-Charring Solid Fuels, Progress in Energy and Combustion Science, Vol.19, Issue1, pp.71-104, 1993
- 9) 梅本賢, 梶谷史郎:石炭からの揮発分生成挙動を表す初期熱分解モデル, 日本燃焼学会誌, 58 巻 185 号, pp.145-152, 2016
- 10) 黒田重徳, 小山喜久二:ダム貯水池流木の木炭化による再資源化, 土木学会論文集, 1994 巻 503 号, pp.197-205, 1994