

# 河川・道路管理由来草本類のバイオ炭化に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：令4～令5

担当チーム：材料資源研究グループ

研究担当者：岡安祐司、宮本豊尚、谷藤溪詩

## 【要旨】

本研究は草本類の炭化技術の実用化を目指し、複数の種類の草本類の熱分解挙動を熱重量分析により把握し、木本類（ヒノキ）と比較した。さらに、草木の化学組成と熱重量分析により得られたバイオ炭収率との関係を検討した。抽出成分が多い草本類では250～300℃においても収率の低下が見られたことから、ヒノキの炭化温度よりも低い条件においても熱分解が進む可能性が示された。また、草本類ではヒノキに比べてセルロースのような結晶性を有する多糖類の含有率が低かった。さらに、400℃における炭化収率は結晶性を有する多糖類の含有率の減少とともに増加する傾向であり、草本類では比較的高い収率でバイオ炭が得られる可能性が示された。また、ハルジオンについては300℃以上の収率はあまり変化せず、350℃以下でも十分な炭化に至った可能性が示唆された。

キーワード：バイオ炭、土壌炭素固定、TG分析、草本類

## 1. はじめに

令和3年6月、改正地球温暖化対策推進法が公布され、2050年のカーボンニュートラル実現が法律に明記された。これを受けて令和3年7月に公表された国土交通省グリーンチャレンジでは河川や公園管理で生じる伐採木などの木本類については、バイオマス発電燃料として有効利用する取り組みが促進されることとなったが、草本類は有効利用が進んでいない。一方、令和2年9月、J-クレジット制度<sup>2)</sup>において、「バイオ炭の農地施用」に関する方法論が新たに策定され、農地にバイオ炭を施用し、難分解性の炭素を長期間土壌に固定することによる排出削減量をクレジットとして認証できるようになった<sup>3)</sup>。J-クレジット制度では、草本に由来するバイオ炭も認められており<sup>3)</sup>、今後、普及が期待される。本研究は、活用が難しい草本類に着目し、草本類が成長時に吸収した二酸化炭素を直ちに大気へ放出せず、土壌に固定するため、草本類の炭化技術の実用化を目指し、適用可能性を調査するものである。

バイオ炭は、「2006年IPCC国別温室効果ガスインベントリガイドラインの2019年改良」の付属書4<sup>4)</sup>において、燃焼しない水準に管理された酸素濃度の下、350℃超の温度でバイオマスを加熱して作られる固形物として定義される。しかし、炭化においては外部からエネルギーを投入する必要があるため、エネルギー及びコストの観点から効率的に炭素を貯留するバイオ炭作製のためには様々な草本に対して適切な炭化条件（特に炭化温度）を明らかにする必要がある。本研究では、草木、特に草本類の化学組成

に着目し、窒素気流下での熱重量(TG)分析を行い、各温度における炭化収率と草木中の化学組成との関係を検討した。さらに、炭化装置で試験的に炭化を行い、TG分析との比較を行った。これらの結果から、炭素貯留用のバイオ炭原料としての草本類の可能性を検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 試料

試料はヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*)、モウソウチク (*Phyllostachys pubescens*)、イナワラ (*Oryza sativa*)、ドクダミ (*Houttuynia cordata*)、ハルジオン (*Erigeron philadelphicus*)、ヨモギ (*Artemisia* Spp.) および草刈作業で発生した混合刈草を用いた。ヨモギについては全容および葉部と茎部を分けたそれぞれを試料とした。これらをブレンダーミルで破砕し、ヒノキ、モウソウチク、イナワラおよび刈草混合物は40メッシュの篩で通過した画分を実験に用いた。ドクダミ、ハルジオンおよびヨモギは破砕により綿状となったため、篩を通すことなく実験に用いた。試料の水分および灰分は、それぞれ110℃で乾燥および600℃で灰化して恒量になった重量から求めた。また、植物の主要な炭水化物であるセルロース、リグニン、その他の糖類のモデル試料として、それぞれろ紙(ワットマンNo.1)、ヒノキクラークソンリグニン残さ(ヒノキの未脱脂試料より調製)およびデンプン(可溶性、和光純薬製、一級)を選択し、TG分析に供した。

## 2.2 抽出成分の測定

2.1 で調製した試料 1 g を 50 mL 容の共栓付き遠沈管に加え、これに蒸留水 30 mL を加えて、煮沸ウォーターバス内で時々攪拌しながら 1.5 時間加熱し、熱水抽出を行った。その後、遠心分離 (15,000 g、20 分) を行い、熱水抽出液を回収した。遠沈管に残った試料に再び蒸留水 30 mL を加え、同様の操作を行い、合計 3 回の熱水抽出を行った。全ての抽出液を定量的に回収し、磁皿にて蒸発乾固し、得られた重量の試料絶乾重量に対する百分率を熱水抽出成分量とした。

有機溶媒による抽出は過年度に報告<sup>9)</sup>した下水汚泥および藻類の脂質測定で行ったエタノール酢酸エチル (1 : 1 v/v) によって行った。熱水抽出およびエタノール酢酸エチル抽出のそれぞれで得られた抽出成分を合計し、抽出成分含有率とした。

## 2.3 酸性デタージェントリグニンの測定

リグニンの測定に際しては、家畜飼料の分析に一般的に用いられる酸性デタージェント (AD) 処理<sup>6)</sup>を行った。本研究では 5%硫酸 100 mL に臭化セチルトリメチルアンモニウム 2 g を溶解したものを AD 液とした。熱水酢酸エチル/エタノール混液で逐次抽出した試料 0.15g に対し、AD 液 5 mL 加え、オートクレーブにより 105°C および 1 時間処理した。オートクレーブ後にガラスろ紙 (ワットマン 1 GF/B) で濾別し、熱水で洗浄後、さらに冷アセトンで洗浄し、残さを回収して乾燥後、重量を測定した。

AD 処理を行った試料 50~100 mg を取り、72%硫酸 3 mL を加えて、室温で 2.5 時間の一次加水分解を行った。その後、硫酸濃度が 4% となるように水を加え、121°C および 1 時間の二次加水分解を行った<sup>7)</sup>。これをガラスろ紙 (ワットマン 1 GF/B) で濾別し、熱水で洗浄後、得られた酸不溶性残さは 110°C で乾燥し重量を測定した。さらに、これを 600°C で 1 時間加熱し、酸不溶性残さ中の灰分を求め、残さから灰分を除いた重量を未抽出試料絶乾あたりの百分率として AD リグニン含有率とした。

## 2.4 炭水化物の測定

熱水酢酸エチル/エタノール混液で逐次抽出した試料について AD 処理を行わず 2.2 と同様に硫酸で加水分解し、得られた二次加水分解後のろ液を 500 mL に定容してフェノール硫酸法<sup>8)</sup>による全糖量の測定を行った。適宜希釈したろ液 0.5 mL に 5%フェノール水溶液 0.5 mL を加えてよく攪拌し、さらに濃硫酸 2.5 mL を加えて激しく反応させた後、20 分以上静置して発色させた。その後、490 nm における吸光度を測定した。検量線にはグルコース水溶液を標準として用いたが、ポリマーであるグルカンとして換

算した。また、別に抽出後の試料を 105°C、1 時間の 5%硫酸処理をして濾別し、ろ液中の糖量をフェノール硫酸法に従って測定した。本研究では、5%硫酸で遊離する糖 (5%硫酸遊離糖) がヘミセルロースのような非晶性で酸に容易に分解する糖、および全糖から 5%硫酸残存糖を除いた糖 (5%硫酸残存糖) がセルロースのような結晶性を有し、酸に抵抗性のある糖と想定して評価した。

## 2.5 TG 分析

分析はセイコーインスツルメンツ社製 TG/DTA 6300 を用いた。試料約 10 mg を白金パンにとり、昇温速度 10°C/min および窒素気流下 (流速 50 mL/min) で TG 分析を行った。ブランクは空気とした。TG 分析によって得られた炭化収率は 150°C を最初に越えた重量から灰分を除いた値を基準とし、各温度で読み取られた熱重量から灰分を除いた値の百分率を揮発性有機成分ベースの収率であるとして評価した。

## 2.6 炭化実験との比較

実際にサンプルを炭化させ、2.5 の TG 分析結果と比較を行った。サンプルの炭化はプログラム管状電気炉 (アズワン製 TMF-300) を用いた。石英管の内径は 24mm である。電気炉の温度は、あらかじめ所定の温度になるまで昇温させたのちに、試験体を速やかに封入し、30 分間所定の温度で保持した後、室温となるまで自然放冷を行った。この間、空気中の酸素を排除するため、実験開始 30 分前から放冷完了時まで、窒素 (一般工業用) を 0.1m<sup>3</sup>/min で連続して流し続けた。炭化に使用したサンプルは、2.1 で調整したハルジオン及びビノキであり、約 2ml の舟形磁皿を用いてあらかじめ 110°C で数時間乾燥させ TS を測定後に炭化を行った。

得られた炭化物に含まれる難分解性炭素を、日本バイオ炭普及会規格 JBAS 0002 に準じて測定した。測定試料難分解性炭素分 (気乾ベース) の測定値は、次の式によって求められるとされている。

$$RCad = 100 - (Mad + Aad + VMad)$$

ここに

RCad : 測定試料難分解性炭素分 (気乾ベース) (%)

Mad : 測定試料水分 (気乾ベース) (%)

Aad : 測定試料灰分 (気乾ベース) (%)

VMad : 測定試料揮発分 (気乾ベース) (%)

なお、本稿では操作を簡便とするため、測定試料水分 Mad は、下水試験法の TS と同様の測定方法 (110°C で 2 時間乾燥) を採用し、測定試料灰分 Aad は下水試験法の VS

(600°Cで1時間燃焼)の結果から、 $Aad=TS-VS$ と定義した。測定試料揮発分VMadについては、磁性るつぼ(5ml容)を用いてあらかじめ900°Cまで昇温した電気炉に7分保持し、質量変化を測定した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 草木の化学組成

表-1に本研究で用いた試料の化学分析の結果を示す。最も高いADリグニン含有率を示したのはヒノキ(33.7%)であり、これは文献で示されたクラークソン法によるヒノキの定量値<sup>9)</sup>(29.0%)とも類似した。一方でドクダミのADリグニン含有率は22.7%であり、タケ(17.5%)よりも高い値であった。木材のリグニンの定量にはクラークソン法<sup>10)</sup>(72%硫酸を用いて2.5時間、室温で加水分解した後、4%硫酸濃度に希釈して121°C、1時間の加水分解を行う方法)が用いられるが、タンパク質等が多く含まれる草本類や葉などでは正確なリグニン定量は困難とされている<sup>11)</sup>。本研究において、クラークソン法とAD処理のそれぞれの定量値を比較したところ、AD処理を行ってもヒノキのリグニン定量値に与える影響はわずかであり、タケ、イナワラ、ハルジオン、ヨモギの全容と茎部および混合刈草のような

茎(稈)部を多く含む試料では、AD処理によって定量値が低くなることが確認された(図-1)。一方でドクダミおよびヨモギの葉部についてクラークソン法とAD処理を行った定量値を比較すると両者はほとんど変わらず(図-1)、葉を多く含む草本類についてはADリグニン含有率が真のリグニン量を妥当に表したのかについては疑問が残った。

一方で、抽出成分はヒノキが3.0%と他の草本類に比べて最も低い値であった。抽出成分はドクダミおよびヨモギ葉部がそれぞれ37.2%および34.4%と高く、葉を多く含む試料では高くなる傾向であった。また、ヒノキの5%硫酸遊離糖は、10.9%であり、モウソウチク(19.1%)およびイナワラ(22.7%)よりも低い値であった。しかし、葉を多く含む試料であるドクダミ(5.4%)およびヨモギ葉部(7.8%)の5%硫酸遊離糖はさらに低い値であった。また、5%硫酸残存糖はヒノキが最も高く(52.1%)、他の草本類ではそれよりも小さい値であった。しかし、モウソウチク(46.3%)、イナワラ(32.9%)およびヨモギの茎部(34.5%)は、草本類の中でも30%を超える比較的高い5%硫酸残存糖含有率を示した。

#### 3.2 草木のTG分析

図-2にTG曲線を示し、各温度における炭化収率を表-2に示した。セルロースのモデル試料としてろ紙のTG分析を行うと、350°C付近の温度で急速な重量減少がみられた。結晶性セルロースのTG分析では350°C付近の温度で急速に重量を減少させることが知られており<sup>12)</sup>、本研究の結果においても既往の報告と一致する挙動が見られた。また、デンプンでは、ろ紙よりも低い温度(250°C付近)で分解を開始し、400°Cでの炭化収率はろ紙よりも高い値であった。さらに、ヒノキクラークソンリグニン残さでは、ろ紙や他の草木サンプルに比べると急激な重量減少は見られず、400°Cにおける炭化収率は60%以上(61.9%)となり、本研究で用いた試料の中で最も高い炭化収率であった。一方で、400°Cにおける草木試料の炭化収率はいずれも34.2~43.4%であり、これまでの報告(多くの木材では400°C以下における炭化収率は40%程度以下<sup>13)</sup>)とも概ね一致する値であった。また、リグニンは多糖類に比べて分子中の炭素比率が高く、本研究の結果においてもヒノキクラークソンリグニン残さの炭化収率が高かったことから、ADリグニン含有率が33.7%と比較的高いヒノキは高い炭化収率を示すものと予想していた。しかし、ヒノキの400°Cにおける収率は34.2%と他の試料に比べて低く、この条件ではヒノキにおいてADリグニン含有率が高いことによる炭化収率の増加は認められなかった。

表-1 草木の化学組成

	含有率(%)						合計
	抽出成分	ADリグニン	炭水化物			灰分	
			5%硫酸遊離糖	5%硫酸残存糖	全糖		
ヒノキ	3.0	33.7	10.9	52.1	63.0	0.3	100.0
モウソウチク	6.6	17.5	19.1	46.3	65.4	1.7	91.2
イナワラ	17.9	7.1	22.7	32.9	55.6	8.9	89.4
ドクダミ	37.2	22.2	5.4	19.8	25.2	15.4	100.0
ハルジオン	27.2	9.4	14.0	29.0	43.0	7.9	87.5
ヨモギ 全容	26.5	11.2	14.6	24.6	39.2	7.4	84.2
ヨモギ 茎部	24.9	12.1	11.9	34.5	46.3	6.3	89.6
ヨモギ 葉部	34.4	16.5	7.8	20.7	28.5	10.1	89.5
混合刈草	14.9	16.1	23.6	27.1	50.7	3.6	85.2

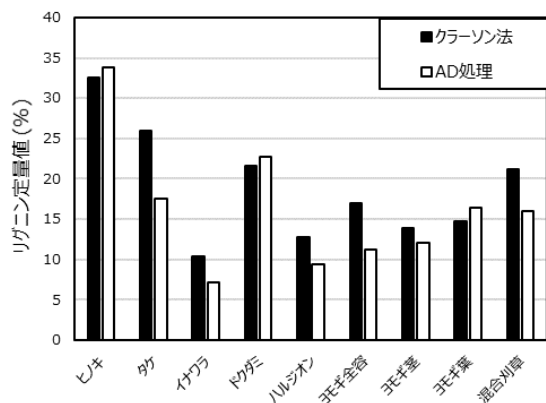


図-1 クラークソン法とAD処理によるリグニン定量値

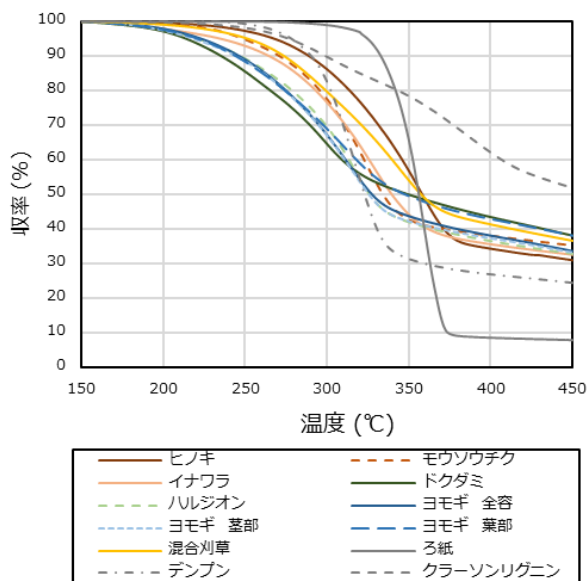


図-2 草木のTG曲線

表-2 各温度における炭化収率

	炭化収率 (%)			
	250℃	300℃	350℃	400℃
ヒノキ	97.2	86.2	56.5	34.2
モウソウチク	94.8	77.6	42.7	38.0
イナワラ	92.9	76.5	44.2	35.5
ドクダミ	85.3	64.3	49.9	43.4
ハルジオン	89.2	69.4	41.8	36.3
ヨモギ 全容	89.0	67.1	43.6	38.0
ヨモギ 茎部	88.4	66.8	42.1	37.2
ヨモギ 葉部	88.3	68.8	49.4	42.7
混合刈草	95.2	79.7	54.1	41.3
ろ紙	100	99.0	64.4	8.5
デンプン	99.1	82.2	31.3	26.9
クラウンリグニン	98.1	89.7	78.3	61.9

そこで、本研究で用いた草木 (9 試料) を対象に線形回帰分析を行い、試料中の化学組成 (横軸) と TG 分析における炭化収率 (縦軸) との関係調べた。その関係を図-3 に示し、表-3 にその傾き、切片および決定係数 ( $R^2$ ) を示した。250℃と 300℃における収率と抽出成分量の線形回帰における  $R^2$  はそれぞれ 0.915 および 0.836 であり、両者の間に高い相関が認められ、抽出成分が多いほど TG 分析における収率の減少が大きかったことが分かった。また、350℃の収率で最も高い  $R^2$  を示したのは AD リグニンと線形回帰分析を行った場合であり (0.603)、400℃の収率に注目すると、最も高い  $R^2$  を示したのは 5%硫酸残存糖と線形回帰を行った場合 (0.538) であった。

一般的に、木材の熱分解では、200~250℃で不安定成分の部分分解、250~350℃で木材成分 (セルロース、ヘミセ

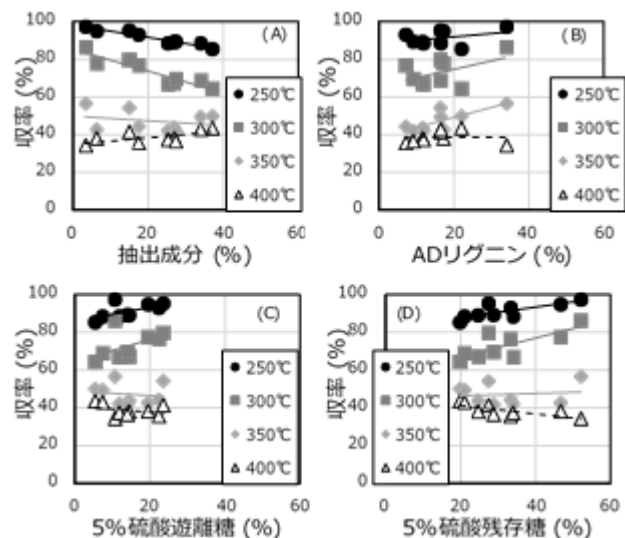


図-3 化学組成と炭化収率との関係

(A : 抽出成分、B : AD リグニン、  
C : 5%硫酸遊離糖、D : 5%硫酸残存糖)

表-3 線形回帰分析の結果

		250℃	300℃	350℃	400℃
抽出成分	傾き	-0.326	-0.572	-0.122	0.174
	切片	98.1	85.2	49.7	34.8
	$R^2$	<b>0.914</b>	<b>0.836</b>	0.067	0.398
AD リグニン	傾き	0.182	0.445	0.534	0.008
	切片	88.2	65.7	38.5	38.4
	$R^2$	0.133	0.236	<b>0.603</b>	0.000
5% 硫酸 遊離糖	傾き	0.396	0.588	-0.123	-0.170
	切片	85.4	64.4	48.9	41.0
	$R^2$	0.390	0.256	0.020	0.110
5% 硫酸 残存糖	傾き	0.280	0.504	0.059	-0.214
	切片	82.2	56.8	45.3	45.3
	$R^2$	0.598	0.577	0.014	<b>0.538</b>

ルコースおよびリグニン) の分解が起こると言われている<sup>13)</sup>。また、結晶性セルロースの TG 分析では 350℃付近の温度で急速に重量を減少させることが報告されており<sup>12)</sup>、本研究で実施したろ紙も同様の挙動が確認された (図-2)。本研究の草木の TG 分析においては、250~300℃では不安定成分である抽出成分の分解が顕著に見られているものと考えられる。また、セルロースの分解が始まる温度 (350℃) 付近においては、リグニンが炭素を多く含むことによって高い炭化収率を示したものと考えられ、さらに 400℃以上では草木中の結晶性セルロースの分解が大きく進み、5%硫酸残存糖の含有率が高い草木では炭化収率の低下が大きかったものと考えられる。

### 3.3 バイオ炭作製の原料としての草本類の可能性

表-1 に示したとおりドクダミ、ハルジオンおよびヨモ

ギの草本類は、ヒノキ、モウソウチクおよびイナワラに比べて抽出成分が多く、5%硫酸残存糖は少ない傾向であった。また、TG分析の結果では、250~300℃における収率はドクダミ、ハルジオンおよびヨモギの草本類がヒノキ、モウソウチクおよびイナワラよりも低くなっていた(表-2 および図-2)。一方で400℃におけるこれらの収率はモウソウチクと同等で、ヒノキおよびイナワラよりも高い値であった(表-2 および図-2)。現在のところ、IPCCガイドラインの2019年改良版に定められている木材や草本類に由来する土壌中への炭素貯留のためのバイオ炭作製において、炭化温度は350℃以上と定められている<sup>4)</sup>。しかし、本研究で用いたドクダミ、ハルジオンおよびヨモギの草本類では抽出成分含有率が高く、350℃未満の温度でも熱分解が起こることが示され、これより低い温度でもバイオ炭が作製できる可能性がある。さらに、これらの草本類はセルロースのような結晶性糖(5%硫酸残存糖)の含有率が少ないため、350℃以上の熱分解でも比較的高い収率を維持できる可能性があることが分かった。そのため土壌中で炭素を貯留するためのバイオ炭原料として草本類は有望な資源であると考えられた。混合刈草についてはイナワラやモウソウチクと類似した結果であるが、5%硫酸残存糖の割合が少ないため、350℃以上の熱分解でも比較的高い収率を維持できる可能性が示唆された。

### 3.4 TG分析と炭化実験の比較

TG分析と炭化実験の結果の比較を図-4に示す。TG分析での炭化収率は、150℃の重量を基準としているが、炭化実験での結果は110℃の重量を基準とした。そのため、TG分析の炭化収率が、炭化実験で得られた結果よりも高い値を示している傾向にあった。しかしヒノキであれば、350℃、ハルジオンであれば300℃と、図-2に示すTG分析において急激な重量減少が見られた温度帯においては、TG分析と炭化実験での収率に差が生じていた。炭化実験においては30分間、温度を保持しており、このような条件ではセルロース等の分解が顕著となり、炭化収率の減少が進んだと考えられる。

炭化実験の結果、ヒノキについては350℃以上、ハルジオンについては300℃以上で収率があまり変化しなくなることが確認できた。バイオ炭の定義<sup>14)</sup>では、「燃焼しない水準に管理された酸素濃度の下、350℃超の温度でバイオマスを加熱して作られる固形物」とされているが、ハルジオンのような草本については300℃で十分炭化された可能性が示唆された。なお、乾燥物中の有機物に対する難分解性炭素は、ハルジオンであれば13-20%、ヒノキであれば10-14%であった。炭化温度が上昇することによって、

セルロース等の分解が進み、難分解性炭素の割合も概ね増加していたと想定された。

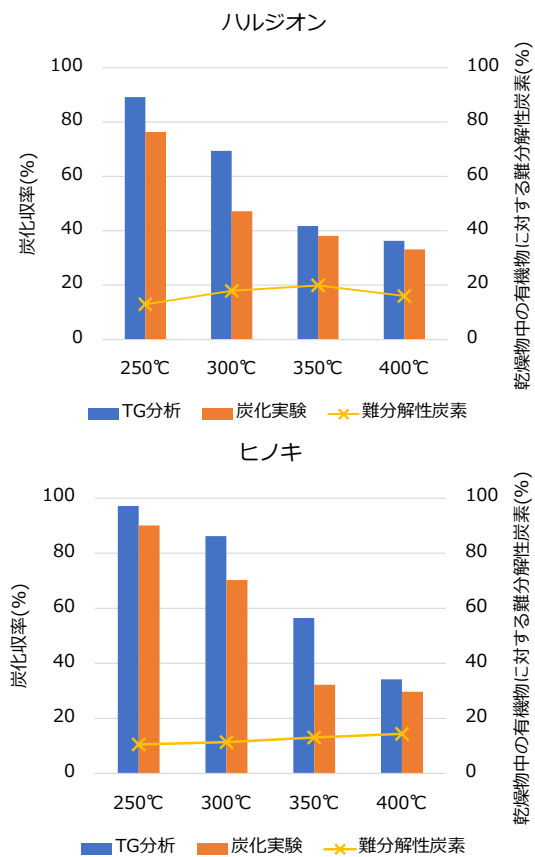


図-4 TG分析と炭化実験の比較

## 4. おわりに

本研究で得られた結果を、以下にまとめる。

- 今回の試料の中で最も高いリグニン含有率を示したのはヒノキであった。草本類はヒノキに比べるとリグニン含有率が低く、抽出成分が高い傾向であった。また、5%硫酸残存糖はヒノキが最も高く、草本類ではセルロースのような結晶性を有する糖が少ないことが示された。
- TG分析により得られた炭化収率と草木の化学組成との相関分析から、250℃および300℃の炭化収率では抽出成分が、350℃ではリグニンが、および400℃ではセルロースのような結晶性の多糖類(5%硫酸残存糖)が影響することが示された。
- ドクダミ、ハルジオンおよびヨモギの草本類は、特に抽出成分含有率が高く、350℃未満の温度でも熱分解が起こることが示され、これより低い温度でもバイオ炭が作製できる可能性がある。また、これらの草本類は5%硫酸残存糖の含有率が少ないため、350℃以上の熱分解でも比較的高い収率を維持できる可能性があることが分かった。そのため土壌中で炭素を貯留するためのバイオ

炭原料として草本類は有望な資源であると考えられた。  
・TG 分析と炭化実験結果を比較したところ、全体的な炭化収率の傾向は類似していた。また、ハルジオンについては 300°C以上の収率はあまり変化せず、350°C以下でも十分な炭化に至った可能性が示唆された。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：グリーン社会の実現に向けた「国土交通省グリーンチャレンジ」、グリーン社会小委員会、  
<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001412775.pdf>  
(2023 年 1 月アクセス)
- 2) 経済産業省：J-クレジット制度パンフレット、J-クレジット HP、  
[https://japancredit.go.jp/data/pdf/credit\\_003.pdf](https://japancredit.go.jp/data/pdf/credit_003.pdf)、(2023 年 1 月アクセス)
- 3) 経済産業省：J-クレジット方法論 AG-004、J-クレジット HP、  
[https://japancredit.go.jp/pdf/methodology/AG-004\\_v1.5.pdf](https://japancredit.go.jp/pdf/methodology/AG-004_v1.5.pdf) (2023 年 1 月アクセス)
- 4) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) : Appendix 4 Method for Estimating the Change in Mineral Soil Organic Carbon Stocks from Biochar Amendments: Basis for Future Methodological Development, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2021, [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4\\_Volume4/19R\\_V4\\_Ch02\\_Ap4\\_Biochar.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch02_Ap4_Biochar.pdf) (Accessed 2023 Jan.)
- 5) 国立研究開発法人土木研究所：消化ガスの効率的運用に関する基礎的研究、令和 2 年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp. 26-29、2022
- 6) Van Soest, P. J. and Wine, R. H.: Use of Detergents in the Analysis of Fibrous Feeds. IV. Determination of Plant Cell-Wall Constituents, *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 50, No. 1, pp. 50-55, 1967
- 7) 大井洋、具延、黒田健一：木材パルプの酸加水分解条件と酸不溶性残さの性状 熱分解ガスクロマトグラフィーによるリグニンの構造解析 (第 7 報)、紙パルプ技術協会誌、Vol. 51、No. 10、pp.1578-1586、1997
- 8) Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A. and Smith, F.: Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances, *Anal. Chem.*, Vol. 28, No. 3, pp. 350-356, 1956
- 9) 福島和彦：木質の化学 (日本木材学会編)、1. 木材の組成、文永堂出版 (東京)、pp.3、2010
- 10) Dence, D. W: 2.2 The Determination of Lignin in “Methods in Lignin Chemistry (Eds) Lin, S. Y. and Dence, D. W.”, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 33-42, 1992
- 11) 島田菜津美、津山濯、亀井一郎：迅速チオグリコール酸リグニン定量法の様々なバイオマス試料における適用性、木材学会誌、Vol. 65、No. 1、pp. 25-35、2019
- 12) 河本晴雄、セルロースの熱分解反応と分子機構、木材学会誌、Vol. 61、No. 1、pp.1-24、2015
- 13) 木島正志：ウッドリファイナリー 3. 木材成分物質の炭素変換、材料、Vol. 61、No. 9、pp. 803-809、2012
- 14) 農林水産省：バイオ炭の施用量上限の目安について、  
<https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/biochar01.html>(2023 年 2 月アクセス)

