

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26249120

研究課題名(和文) リサイクル反応系を導入したバイオマスのシーケンシャル改質・転換

研究課題名(英文) Sequential upgrading and conversion of biomass with intermediate recycling system

研究代表者

林 潤一郎 (Hayashi, Jun-ichiro)

九州大学・先導物質化学研究所・教授

研究者番号：60218576

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、木質系および草本系バイオマスの水熱処理を起点として、これにより得られる改質リグニンから、クリーン炭化物、高強度ハードカーボン、合成ガス、高比表面積活性炭(比表面積>2,500 m²/g)、リグニンモノマー(フェノール類)、シクロヘキサノール類、フラン類および水素を効率良く得る新シーケンシャルプロセス(新プロセス；重質油完全リサイクル式熱分解、熱間成型・炭化、アルカリ水に溶解したリグニンの水素化分解、リグニンモノマーの水素化、リグニン溶解アルカリ水の電解、チャー懸濁酸性水の電解、脱金属チャーの無触媒水蒸気ガス化、低分子化リグニンの迅速熱分解)触媒等を開発することを目的として実施した。

研究成果の概要(英文)：This study aimed at development of sequential chemical processes that begin with hydrothermal upgrading of biomass to upgrade it to lignin-rich solid, and produce clean char, high-strength hard carbon, syngas, hydrogen, high-surface-area activated carbon with specific surface area over 2,500 m²/g, lignin monomers, cyclohexanols, furans. During the period of study, the proof-of-concept of the following novel processes (including catalysts) have been reached; heavy-oil-recycling pyrolysis, pyrolysis of depolymerized lignin, lignin hydrogenolysis in alkaline water, hydrogenation of lignin and monomers, hot-briquetting/carbonization, electrochemical gasification of lignin and biochar, non-catalytic steam gasification of clean char.

研究分野：反応工学

キーワード：バイオマス 水熱処理 リグニン 熱分解 炭化 水素化 水素化分解 リグニンモノマー

1. 研究開始当初の背景

現在、バイオマスの高効率率活用のための技術開発が国内外で進んでいる。国内では、発電および燃料製造技術の開発に続いて、化成品や素材の製造を目的とする技術の開発も活発になっている。わが国のバイオマスポテンシャルは、残念ながらエネルギー需要に一定の寄与をもたらすほど大きくない。したがって、今後のバイオマス利用は、バイオマスの化学組成や構成成分の化学構造、カーボンニュートラル性を活かした化成品や素材の製造にシフトしていくと予想される。

2. 研究の目的

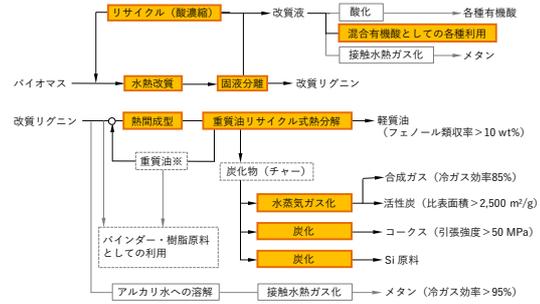
本研究が想定するバイオマス変換システムにおけるプロセスフローを図1に示す。本システムにおいて生産される製品は、リグニンモノマーとしてのフェノール類、炭化物(コークス、活性炭、シリカ・炭素複合材)、合成ガスおよび有機酸である。バイオマス化学変換の多くはセルロースやヘミセルロース(炭水化物)を対象とするが、本システムに第一段プロセスである水熱改質にバイオマスを投入した場合、炭水化物は単糖(C5糖、C6糖)ではなく、化学変性重合体としてリグニンとともに改質固体の一部、および各種の定体有機酸に転換される。本システムは、他の化学品生産システムにおいて byproduct として得られるリグニンを受け入れることができる。

改質固体(図1中では改質リグニンと表示)は、重質油リサイクル式熱分解によってモノマー(フェノール性化合物およびフラン類)、炭化物および軽質ガス(熱源となる)に転換される。重質油リサイクル式熱分解では、熱分解によって生成するオイル中の“モノマー以外の重質成分”原料(改質固体)を媒体として完全リサイクルされる。これによってプロセスから得られるオイルはモノマーのみから構成される軽質油である。熱分解の前に改質固体を熱間成型すると、リグニンおよび炭水化物重合体の三次元網目構造が“物理的に再編成”される。その結果、熱分解(～600℃)・炭化(900-1000℃)によって得られる炭化物は、高強度のハードカーボンとなり、例えば、高品位コークスとしての利用が可能である。加えて、熱分解由来の炭化物は、水蒸気ガス化によって合成ガスと高比表面積活性炭に転換できる。

改質リグニンは、アルカリ性水溶液に溶解できるので、この性質を利用した転換も意義がある。報告者は、本研究開始当初、すでに「アルカリ水溶液に溶解したリグニンの接触水熱ガス化によるメタンリッチ合成ガスあるいはどう合成ガス・モノマーへの完全変換」に成功していた。本研究では、(申請時点は着想していなかったが)アルカリ水に溶解したリグニンの革新的な水素、モノマー、さらに(モノマー経由の)シクロヘキサン系化成品への転換にチャレンジした。

本研究では、所定の成果および当初想定しなかった成果を数多く得た。本報告書は、これらの成果をまとめたものである。

3. 研究の方法



※重質油リサイクルは、反応器内リサイクル法も検討する。

図1. 本研究が想定するバイオマス改質・変換システム(研究申請・研究開始時の想定).

本研究では、以下の13項目を検討した。それぞれについての研究方法の詳細は、本報告の末尾に示した学術雑誌論文あるいは国際会議発表要旨に記載している。

- (1) バイオマス改質のための水熱処理および改質液を漏れなく再利用するリサイクル式水熱処理による改質固体(改質リグニン)収率の最大化(詳細は学術論文14を参照されたい)
- (2) 改質リグニンの重質油リサイクル式熱分解によるチャー収率の最大化とモノマーのみからなる蒸発残渣フリー軽質油の取得(学術論文6)
- (3) 草本系バイオマスの水熱処理によって得た改質リグニン(溶媒可溶成分および不溶成分)の急速熱分解によるモノマー製造(学術論文3)
- (4) 改質リグニンの熱間成型・炭化による高強度炭化物(コークス)の製造(学術雑誌論文13,8)
- (5) 改質リグニン由来チャーの水蒸気ガス化反応速度論・機構の検討ならびに高比表面積活性炭の製造(学術論文9,11)
- (6) リグニンの電気化学的ガス化(リグニンを溶解したアルカリ水の電気分解)による電力・化学エネルギーの水素への統合(学術論文7, 学会発表3)
- (7) 改質リグニンチャーの電気化学的ガス化(チャーで懸濁した酸性水の電気分解)による電力・化学エネルギーの水素への統合(学会発表2)
- (8) 改質リグニン水素化および水素化分解のための新規Ni触媒の開発(学術論文3,4)
- (9) 改質リグニン接触水素化分解の第一原理計算による模擬およびリグニンのシーケンシャル液相酸化改質・接触水素化分解プロセスの開発(学術論文1,2)
- (10) 改質リグニンおよびモノマーの水素化によるシクロヘキサノールおよび誘導体製造プロセスの開発(学術論文3)
- (11) 水素化リグニンのシーケンシャル接触水素化・熱分解によるチャーフリー転換法の開発(研究発表1)
- (12) 熱分解オイルに含まれる低級有機酸を活用するバイオマスからのアルカリ・アルカリ土類金属除去法開発
- (13) カリウム触媒を適用したチャー・揮発成分迅速完全ガス化法の開発(学術論文5,6)

4. 研究成果

- (1) 改質後の水をリサイクルする水熱処理木質バイオマス(スギ)を原料とするバッチ式の

水熱処理 (250°C, 1 h) を、改質固体との分離によって回収される水 (改質液) を繰り返し使うことによって模擬した。図 1 に示すように、改質液リサイクル利用によって改質固体収率が向上 (73→85 %C) し、しかも改質液中の有機成分濃度を定常にできることを、すなわち、廃液フリーの水熱処理が可能であることを示した。改質液には各種低級有機酸が含まれ、その結果、原料中のアルカリ・アルカリ土類金属種の 90% 以上が酸性水によって除去できることも明らかになった (表 1)。図 2 に示すように、改質固体には、炭水化物由来の重合物が溶媒可溶のリグニン様固体成分として含まれることも判明した。

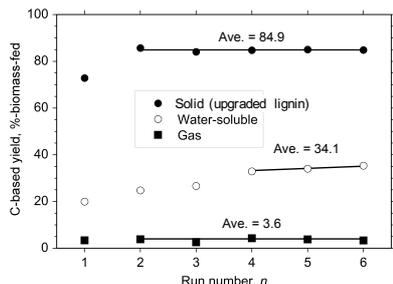


図 1. 改質液リサイクル利用の効果.

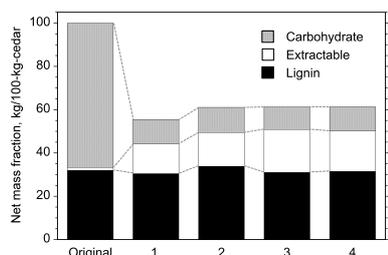


図 2. 改質固体の成分組成.

表 1. 酸性化した改質液による金属の除去特性.

| n | pH of water (after run) | removal rate, % | | |
|---|-------------------------|-----------------|------|------|
| | | K | Mg | Ca |
| 1 | 3.05 | 95.8 | 94.4 | 90.9 |
| 2 | 3.09 | 94.9 | 81.2 | 92.1 |
| 3 | 3.12 | 94.0 | 90.7 | 89.6 |
| 4 | 3.10 | 95.8 | 94.0 | 89.1 |

The removal rate is defined as the fractional amount of metallic species leached out of the cedar to that contained initially.

(2) 改質固体の重質油リサイクル式熱分解

改質固体を単純に熱分解 (最終到達温度: 550°C) すると、リグニンモノマーとしてのフェノール性化合物および炭水化物由来のフラン類が得られたが、重質液成分も生成した。120°C に保持した改質固体 (熱分解前の原料) 粒子層に熱分解ガス (液成分蒸気を含む) を通じることによって重質液成分を固体に凝縮、収着することによって生成液を軽質成分 (リグニンモノマー、フラン類) のみにできるばかりでなく、重質液成分の全量をチャーおよび軽質成分に転換できることを明らかにした。図 3 に示すように、原料を重質液成分のリサイクルメディアとすることによって、リグニンモノマー、フラン類の多くについて収率が大幅に増大すること、加えて、軽質液成分は事実上蒸発残渣フリーオイルであることを明らかにした。

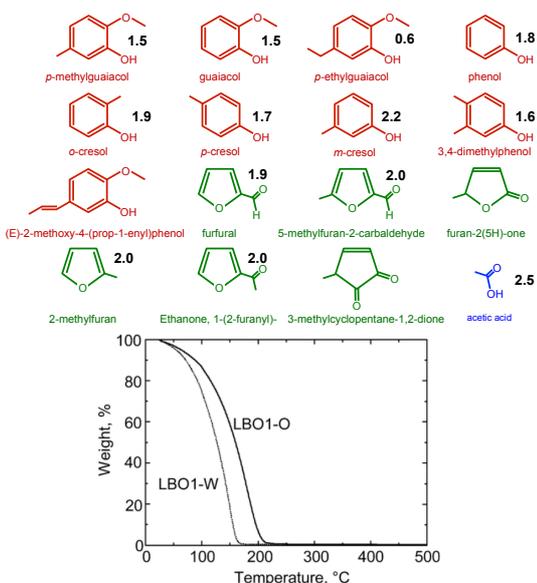


図 3. 上: 重質液成分のリサイクルによる軽質液成分収率の増加 (図中の数値はリサイクルなしの場合との収率比)、下: 軽質液成分の蒸発特性.

(3) 改質リグニンからの炭化物 (コークス) 製造

報告者が独自に開発した「熱間成型法」は高分子の三次元網目構造を物理的に簡便に再編成する手法だが、これを改質リグニンに適用し、調製したブリケット (ペレット) を 900°C 炭化してバルク炭化物 (コークス) を得た。図 4 にコークスの引張強度に及ぼす水熱処理温度 (HTT)、成型温度 (T_B) の影響を示す。タケ、スギのいずれの場合も HTT と T_B の最適化によって >40 MPa の強度を持つコークスを調製することに成功した。図示していないが、60 MPa の強度 (強度最高記録) を得る条件も見出した。既存の高炉用コークスの強度 (5~6 MPa) を大きく超えるコークスをバイオマスから製造できることを示した。水熱処理時にリグニン解重合が進むタケの場合、熱間成型時の可塑化が著しく、わずかに 16 MPa の成型圧でも強度 40 MP のコークスを製造できた。

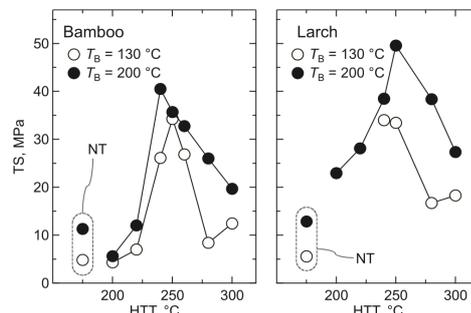


図 4. 改質リグニンからのコークス強度. NT: 水熱処理なし. 成型温度 (T_B) は 130 あるいは 200°C. 成型圧は 128 MPa.

(4) 改質リグニン炭化物の水蒸気ガス化

(1) に述べたように、水熱処理はバイオマス中のアルカリ・アルカリ土類金属を 90% 以上除去する。そこで、残留金属のガス化触媒としての特性を調べた。改質固体から得たチャーに加えて、そ

のチャーを塩酸処理して残留金属を除去した固体を水蒸気ガス化したところ、両者はまったく同じ速度論、しかも一次の速度論に従ってガス化した(図5)。このように、水熱処理は、バイオマス中の“触媒活性のある金属種”を定量的に除去することが示された。さらに、“無触媒水蒸気ガス化”では、チャーの比表面積はガス化率に対してほぼ線形に増加し、 $>2,000 \text{ m}^2/\text{g}$ に達することも判明し、合成ガスと高比表面積活性炭を併産できることを示した。比表面積増大の傾向は、図6に示したように、種々のバイオマスに共通であることも明らかになった。

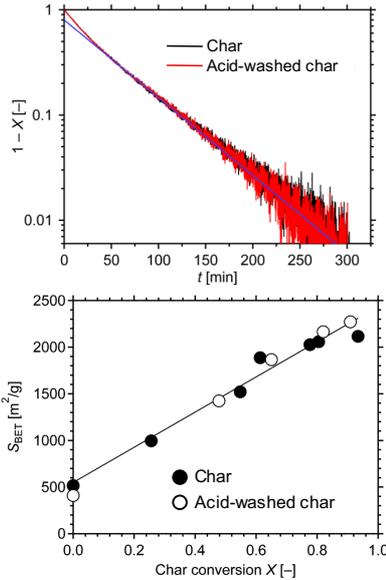


図5. 上:改質固体由来チャーのガス化特性、下:ガス化進行に伴うチャー比表面積の増大。

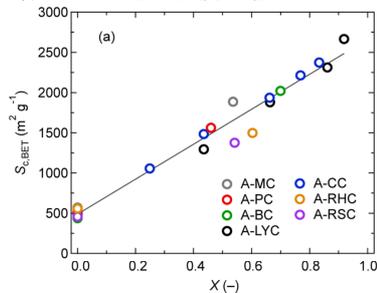


図6. 種々のバイオマスから得た酸処理チャーのガス化進行による比表面積増大。

(5) 改質リグニン(タケ)の熱分解

水熱処理は、タケリグニンの低分子化(溶媒可溶性の向上)に対してとくに有効であることを見出したので、 200°C 水熱処理による改質リグニン(アルベン可溶成分:不溶成分 $\approx 48:52 \text{ wt/wt}$)を 500°C で迅速熱分解した。不溶成分から得られたモノマーの GC/MS クロマトグラムを図7に示す。可溶成分および不溶成分から得られたモノマー収率の合計は約 $44 \text{ wt}\%$ に達した。このような高モノマー収率は過去に報告がない。本研究は、「熱分解によって高い収率でモノマーを得ることができない」とする従来の結論を覆した。

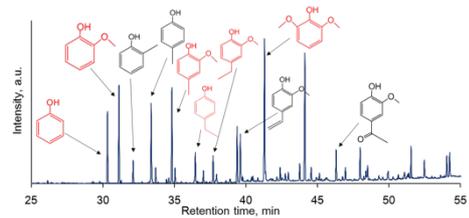


図7. モノマーの GC/MS クロマトグラム。

(6) リグニンおよびチャーの電気化学的ガス化

水電解において、水溶液に溶解した有機物を被酸化剤として利用できれば、 O_2 は発生しなくなるが電解のための電極間電位を小さくでき、 H_2 発生量あたりの電力消費を小さくできる。このプロセスは、化学エネルギーと電力の統合であり、有機物の室温付近の電気化学的ガス化である。図8に示すように、リグニンを溶解することによって H_2 発生に必要な電圧が著しく低下し、その効果は水熱処理(リグニン低分子化)によってさらに高まることがわかった。ただし、実用的な H_2 発生速度を得るには、リグニンのさらなる低分子化と、反応抵抗となる他の因子に関する技術的な改善も必要であることがわかった。

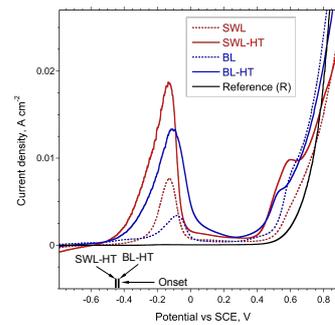


図8. アルカリ水溶液、スグリグニン(SWL)、水熱処理スグリグニン(SWL-HT)、タケリグニン(BL)および水熱処理タケリグニン(B-HT)の linear sweep voltammetry.

改質固体由来のチャーを分散した酸性水溶液の電解では、被酸化材としてのチャーの性能はリグニンを大きく上回った。図9に示すように、チャー(Biochar)添加による電極間電位差は 40% ほどに低下し、この効果は高温炭化によって得られるカーボンブラックよりも明らかに高い。これまでに、チャーの性能は比表面積と導電性に依存すること、一定程度酸化が進行すると反応が停止するが、チャー再加熱による酸素官能基を除去することによって性能が再生することを示した。

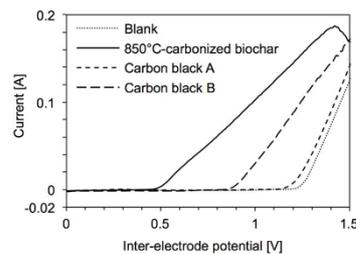


図9. 酸性水および炭化物懸濁酸性水の linear sweep voltammetry.

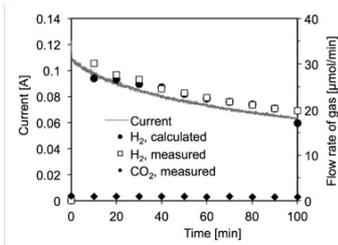


図 10. チャー懸濁酸性水の連続電解。チャーの活性は含酸素基蓄積によって徐々に低下するが、電流と水素発生速度の関係は量論通りである。

(7) リグニンの水素化分解 (モノマー化)

リグニンの化学原料としての利用を本格的に拡大するためには、理由度の自由度が限られるポリマーやオリゴマーではなく、モノマーが必要である。リグニン水素化分解の報告は多いが、いずれも高収率でモノマーを得るに至っていない。水(アルカリ水)に溶解したリグニンに関しては注目すべき報告は皆無である。報告者らは、まず、活性水素とモデルリグニン分子(図 11)の反応を DFT 計算によって検討し、モノマー間架橋は、活性水素との接触が可能であれば(一部のタイプを除いて)極めて迅速に切断できること、すなわち、問題はリグニン分子と触媒の接触にあることを示した。

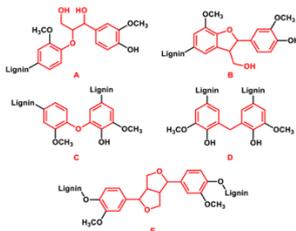


図 11. リグニンモデル分子(5つのタイプの架橋)。

次いで、水素化分解用の安価かつ高活性・高安定性の触媒 (Ni/ZSM-5) 開発に取り組んだ。Borohydride イオン (BH₄⁻) による還元は Ni 担持触媒調製法として一般的だが、報告者はこれを改良した。配位子としてピリジンを適用することによって Ni ナノ粒子の選択的析出と担体との強い相互作用の双方を実現した。ピリジンの適用は、DFT 計算による BH₄⁻還元反応・0 価 Ni 生成機構の解明によって獲得したアイデアである。

新触媒を適用し、200°C でアルカリ水溶液に溶解した Kraft リグニンの水素化熱分解を行った。その結果、23 wt% のモノマーを得たが、未反応率、チャー収率が顕著に高かった。DFT 計算によって、この理由は、リグニン分子の不十分な溶媒和、すなわち糸毬状分子の内部は触媒と接触不能であることがわかった(図 12)。そこで、事前の液相酸化 (H₂O₂) によって、リグニン分子を溶液中で伸長させることを試み、その結果、モノマー収率が 83% に著しく増大した。このような高い収率は、水系では無論、溶媒を問わず、これまでになく高い。モノマー組成を図 13 に示す。

(8) リグニンモノマーの水素化

新 Ni 触媒は、リグニンモノマーの水素化に対しても十分に高い能力を発揮した。メタノールに溶解した各種のモデルモノマー(14 種)を 200°C で水素化したと

ころ、新触媒 (Ni-P) は、バニリン、シリンガルアルデヒドを除くすべてのモノマーの芳香環を 100% 水素化した(表 3)。

表 2. リグニンおよび酸化リグニンの接触水素化結果。

| Process | Monomer wt%-lig. | Char wt%-lig. | Residual lignin wt%-lig. |
|----------------|------------------|---------------|--------------------------|
| Hydrogenolysis | 23.3 | 20.7 | 56.0 |
| Oxidation + | | | |
| Hydrogenolysis | 83.4 | 8.0 | 8.6 |

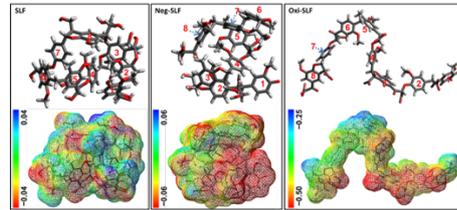


図 12. DFT 計算によるアルカリ水中のリグニンモデル分子の形状。左:リグニン(-OH 基イオン化前)、中:リグニン(-OH イオン化後)、右:酸化リグニン。

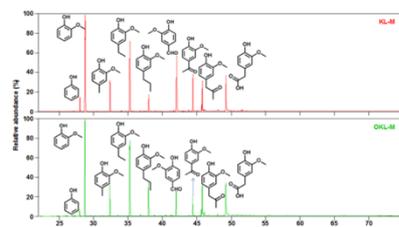


図 13. リグニン (KL) および事前酸化リグニン (OKL) から得られたモノマー (GC/MS クロマトグラム)。

表 3. 従来法および提案法によって調製した Ni 触媒 (それぞれ Ni-N および Ni-P) を適用したリグニンモノマーモデル (化合物) の水素化特性。

| No. | Substrate | Conversion/% | | Product | Yield/% | |
|-----|-----------------------|--------------|------|------------------------------------|---------|------|
| | | Ni-N | Ni-P | | Ni-N | Ni-P |
| 1 | Phenol | 100 | 100 | Cyclohexanol | 100 | 100 |
| 2 | p-Cresol | 100 | 100 | p-Heahydroresol | 100 | 100 |
| 3 | 2,4-Dimethylphenol | 70.1 | 100 | 2,4-Dimethylcyclohexanol | 70.1 | 100 |
| 4 | 2,3,5-Trimethylphenol | 18.8 | 100 | 2,3,5-Trimethylcyclohexanol | 18.8 | 100 |
| 5 | p-Propylphenol | 96.4 | 100 | p-Propylcyclohexanol | 96.4 | 100 |
| 6 | o-Methoxyphenol | 59.5 | 100 | o-Methoxycyclohexanol | 41.4 | 71.4 |
| | | | | Cyclohexanol | 17.1 | 28.6 |
| | | | | Phenol | 0 | 1.00 |
| 7 | o-Ethoxyphenol | 96.7 | 100 | o-Ethoxycyclohexanol | 93.9 | 98.4 |
| | | | | Cyclohexanol | 2.75 | 1.63 |
| 8 | Syringol | 46.9 | 100 | 2,4-Dimethoxycyclohexanol | 16.1 | 46.7 |
| | | | | 2-Methoxycyclohexanol | 10.4 | 33.8 |
| | | | | Cyclohexanol | 3.85 | 19.5 |
| | | | | o-Methoxyphenol | 14.6 | 0 |
| 9 | Catechol | 100 | 100 | Cyclohexane-1,2-diol | 100 | 100 |
| 10 | Orcinol | 100 | 100 | 3-Methylcyclohexane-1,3-diol | 51.6 | 66.2 |
| | | | | 3-Methylcyclohexanol | 48.4 | 33.8 |
| 11 | Pyrogallol | 100 | 100 | Cyclohexane-1,2,3-triol | 53.7 | 67.8 |
| | | | | Cyclohexane-1,2-diol | 46.3 | 32.2 |
| 12 | p-Hydroxybenzaldehyde | 100 | 100 | 4-(Hydroxymethyl)cyclohexanol | 29.2 | 36.4 |
| | | | | p-Heahydroresol | 69.0 | 62.7 |
| | | | | Cyclohexanol | 0.27 | 0.88 |
| | | | | p-Cresol | 0 | 1.58 |
| 13 | Vanillin | 100 | 100 | 2-Methoxy-4-methylcyclohexanol | 15.9 | 51.9 |
| | | | | 4-Methylcyclohexanol | 9.70 | 46.4 |
| | | | | 2-Methoxy-4-methylphenol | 72.1 | 1.77 |
| | | | | p-Cresol | 2.27 | 0 |
| 14 | Syringaldehyde | 100 | 100 | 2,6-Dimethoxy-4-methylcyclohexanol | 0.70 | 26.9 |
| | | | | 2-Methoxy-4-methylcyclohexanol | 0 | 21.7 |
| | | | | Cyclohexanol | 0 | 12.8 |
| | | | | Cresol | 4.10 | 8.69 |
| | | | | Syringol | 1.11 | 0 |
| | | | | 4-Methylsyringol | 94.1 | 30.5 |

(9) リグニンモノマーの水素化

リグニンの水素化(水素化熱分解ではない)と迅速熱分解のシーケンスの可能性を検討した。一般的な Pt 触媒を用いて、テトラヒドロフラン中でタケリグニンを水素化したところ、一部水素化分解も進行したが、芳香族炭素の 53% を脂肪族化することに成功した。水素化リグニンを迅速熱分解したところ、チャー収率は 27→7 wt% に低下した。このような著しい低下は、架橋前駆部位 (-OH 基) の水素化による除去、低分子化もあるが、脂肪族環からの活性水素(ラジカルキャッピング剤)の in-situ 供給による架橋切断の促進によるものであることが判った。

5. 主な発表論文等

[学術雑誌論文(すべて査読あり)](計 15 件)

1. Shi-Chao Qi, Lu Zhang, Shinji Kudo, Jun-ichiro Hayashi. *Green Chem.*, accepted, DOI: 10.1039/C7GC90062G (2017)
2. Shi-Chao Qi, Lu Zhang, Shinji Kudo, Koyo Norinaga, Jun-ichiro Hayashi. *J. Phys. Chem. A*, 121, 2868–2877, DOI:10.1021/acs.jpca.7b00602 (2017)
3. Shi-Chao Qi, Lu Zhang, Hisahiro Einaga, Shinji Kudo, Koyo Norinaga, Jun-ichiro Hayashi. *J. Mater. Chem. A*, 5, 3948–3965, DOI:10.1039/c6ta08538e (2017)
4. Shi-Chao Qi, Jun-ichiro Hayashi and Lu Zhang. *RSC Adv.*, 6, 77375–77395, DOI: 10.1039/c6ra16168e (2016)
5. Enkhsaruul Byambajav, Yasuyo Hachiyama, Shinji Kudo, Koyo Norinaga, Jun-ichiro Hayashi. *Energy Fuels*, 30, 1636–1646, DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5b02262 (2016)
6. Hua Yang, Shinji Kudo, Koyo Norinaga, Jun-ichiro Hayashi. *Energy Fuels*, 30, 1616–1627, DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5b02258 (2016)
7. Hikaru Kawata, Li Chen, Shinji Kudo, Koyo Norinaga, Jun-ichiro Hayashi. *Proc. APPChE 2015 Cong.*, Paper No. 3135992, <https://search.informit.com.au/documentSummary;dn=733956867810568;res=IE-LENG> (2015)
8. Karnowo, Shinji Kudo, Aska Mori, Zayda Faizah Zahara, Koyo Norinaga, Jun-ichiro Hayashi. *ISIJ International*, 55, 765–774, DOI: <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.55.765> (2015)
9. Shinji Kudo, Yasuyo Hachiyama, Hyun-Seok Kim, Koyo Norinaga, Jun-ichiro Hayashi. *Energy Fuels*, 28, 5902–5908, DOI: 10.1021/ef501517n (2014)
10. Yong Huang, Hajime Sakamoto, Shinji Kudo, Koyo Norinaga, Jun-ichiro Hayashi. *Energy Fuels*, 28, 7285–7293, DOI: 10.1021/ef501785e (2014)
11. Lei Bai, Karnowo, Shinji Kudo, Koyo Norinaga, Yong-gang Wang, Jun-ichiro Hayashi. *Energy Fuels*, 28, 7133–7139, DOI: 10.1021/ef501898h (2014)
12. Shinji Kudo, Yasuyo Hachiyama, Yuka Takashima, Junya Tahara, Idesh Saruul, Koyo Norinaga, Jun-ichiro Hayashi. *Energy Fuels*, 28, 76–85, DOI: 10.1021/ef401557w (2014)
13. Shinji Kudo, Aska Mori, Ryosuke Soejima, Karnowo, Seiji Nomura, Yusuke Dohi, Koyo Norinaga, Jun-ichiro Hayashi. *ISIJ International*, 54, 2461–2469, DOI: <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.54.2461> (2014)
14. Zayda Faizah Zahara, Karnowo, Shinji Kudo, Koyo Norinaga, Jun-ichiro Hayashi. *Proc. 4th Asian Conf. Innovative Energy & Environmental Chem. Eng.*, Yeosu, ISBN 978-89-

5708-249-2, 24–29 (2014)

15. Karnowo, Zayda Zahra, Shinji Kudo, Koyo Norinaga, Jun-ichiro Hayashi. *Energy Fuels*, 28, 6459–6466, DOI: 10.1021/ef501748h (2014)

[学会発表 (Conference presentation)] (計 3 件)

1. Enhancement of pyrolytic degradation of lignin by its chemical modification through catalytic hydrogenation. Toru Masumi, Shinji Kudo, Koyo Norinaga, Jun-ichiro Hayashi. *Proc. 2016 Int. Symp. Chem. Eng.*, Miyazaki, Japan, Paper No. PB13 (Dec. 2, 2016)
2. Biochar-assisted water electrolysis. Rei Nakamoto, Li Chen, Shinji Kudo, Koyo Norinaga, Jun-ichiro Hayashi. *Proc. 2016 Int. Symp. Chem. Eng.*, Miyazaki, Japan, Paper No. PB10 (Dec. 2, 2016)
3. Electrochemical Gasification of Lignin and Its Derivatives. Hikaru Kawata, Li Chen, Shinji Kudo, Koyo Norinaga, Jun-ichiro Hayashi. *2014 Int. Symp. Chem. Eng.*, Kuala Lumpur, Malaysia, Paper No. OB09 (Dec. 5, 2014)

[図書] (計 1 件)

林潤一郎. 3.11 バイオマス, JST 研究開発の俯瞰報告・エネルギー分野/CRDS-FY2016- FR-02, 260–281 (2017)

[産業財産権] (計 0 件)

[その他]

ホームページ:

<http://www.carbonres.com>

6. 研究組織

(1) 研究代表者 (Representative researcher)

林 潤一郎 (HAYASHI, Jun-ichiro)

九州大学・先導物化学物質化学研究所・教授, 研究者番号: 79801563

(2) 研究分担者

工藤 真二 (KUDO, Shinji)

九州大学・先導物化学物質化学研究所・助教, 研究者番号: 70588889

(3) 連携研究者 (Research collaborator)

なし