

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24380177

研究課題名(和文)超(亜)臨界流体技術によるバイオリファイナリー革命

研究課題名(英文)Biorefinery revolution with subcritical/supercritical fluid technologies

研究代表者

坂 志朗 (Saka, Shiro)

京都大学・エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：50205697

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：水及びフェノール等の溶媒を用い、木質バイオマスの超(亜)臨界流体処理を検討した結果、亜臨界フェノール処理により効果的な脱リグニンが可能であること、得られたリグニン由来物はフェノール樹脂原料としての利用が期待できることなどを明らかにした。一方、木質バイオマスの亜臨界水処理により糖などの分解生成物が得られ、これらを嫌気性混合培養系で収束的に酢酸へと変換できることを明らかにした。酢酸は水素化分解で液体バイオ燃料としてのバイオエタノールやバイオ化学物質としての酢酸誘導体に変換できることを見出した。以上のことより、超(亜)臨界流体技術によるバイオリファイナリーの可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：Woody biomass was treated in solvents such as water and phenol, under their subcritical/supercritical conditions. In subcritical phenol, lignin was efficiently decomposed and liquefied in phenol. The liquefied lignin-derived products were then clarified to be used as a raw material for phenolic resins. With a two-step subcritical water treatment, on the other hand, lignin and hemicelluloses were decomposed into lower molecular weight products such as oligosaccharides at 230 °C/10MPa, while cellulose was decomposed in severer conditions, producing cello-oligosaccharides, glucose etc. at 270 °C/10MPa. Furthermore, most of these products were found out to be fermented anaerobically into acetic acid. The obtained acetic acid was found out to be converted further into bioethanol by hydrogenolysis as biofuel, but also to acetic acid derivatives as useful biochemicals. Based on these lines of evidence, the potential of subcritical/supercritical fluid technologies was clarified for biorefinery.

研究分野：バイオマス化学

キーワード：超(亜)臨界流体技術 バイオリファイナリー 木質バイオマス 液体バイオ燃料 バイオ化学物質

1. 研究開始当初の背景

リグノセルロースなどのバイオマス資源は石油や天然ガスなどと比較してかさ高く、輸送や貯蔵等の取扱いには不便である。このため、林地残材や廃木材などの多くが未利用のまま廃棄されており、これらの有効利用が望まれる。

一方、超(亜)臨界流体は新たな化学反応場として注目を集めている。物質は温度と圧力条件により、気体、液体、固体で存在するが、臨界点を超えると超臨界状態となり、気体分子と同等の運動エネルギーと液体に匹敵する高い密度を兼ねそろえた高活性な流体となる。当研究グループでは、これまでに水、各種アルコール及び有機溶媒を用いた超(亜)臨界流体処理により、リグノセルロースをはじめとするバイオマス資源を効果的に分解・可溶化できることを見出してきた。

2. 研究の目的

そこで本研究では、超(亜)臨界流体のもつ特異性を活用して、リグノセルロースから有用化学物質やバイオ燃料などを創製するバイオリファイナリー化技術の開発を試みる。すなわち、天然の唯一の溶媒である水に加え、メタノール、エタノール、ブタノール、オクタノールなどのアルコールはバイオマスから製造が可能であり、これらの溶媒とリグノセルロースを化学反応させることで、100%バイオマス起源の有用化学物質やバイオ燃料の創製が可能となる。これによってかさ高く取扱いにくい固体バイオマスを、取り扱いやすく貯蔵しやすい、有用な液化物に変換することが可能となる。

一方、溶媒としてフェノール類を用いた場合、特にリグニンがフェノリシスなどにより分解し、フェノール中に選択的に可溶化することが期待される。このようにして得られたリグニン由来物は、フェノール樹脂の原料などとして期待される他、残ったセルロース及びヘミセルロースは、バイオエタノールなどへの転換が期待できる。

本報では、研究成果が多岐に渡るため、特に進展の大きな水及びフェノールを溶媒とした場合の成果を述べる。その他の成果は、「5. 主な発表論文等」にまとめた。

3. 研究の方法

リグノセルロース試料として、主にスギ(*Cryptomeria japonica*, 針葉樹)及びブナ(*Fagus crenata*, 広葉樹)の脱脂木粉を用いた。フェノール($T_c=421$ 、 $P_c=6.1$ MPa)の場合、木粉試料150mgとフェノール4.9mlを5mlのバッチ式反応管に封入し、様々な温度/圧力条件にて亜臨界フェノール処理した。また、得られたフェノール不溶残渣に対し、Klason法及びその処理液の糖分析を行うことで、残渣中のリグニン、ヘミセルロース及びセルロースを定量した。

一方、水($T_c=374$ 、 $P_c=22$ MPa)の場合、

半流通型2段階亜臨界水処理装置を用い、木粉試料の処理を行った。1段目処理は230/10MPa/15分、2段目処理は270/10MPa/15分とした。得られた水可溶部に対して、高速液体クロマトグラフィーや陰イオン交換クロマトグラフィーなどにより、分解生成物の分析を行った。

4. 研究成果

(1) 亜臨界フェノール処理

図1に、ブナを230/1.2MPaで亜臨界フェノール処理したときのリグニン、ヘミセルロース及びセルロースの分解挙動を示す。ブナ木粉中のセルロースは30分の処理でもほとんど減少しておらず、この条件では分解・可溶化されないことを示している。ヘミセルロースは処理時間の増加と共に若干の減少が見られるものの、30分の処理後でもその多くが不溶残渣中に残存している。一方、リグニンは、未処理木粉中に24.2wt%(木粉重量ベース)存在していたものが30分の処理後には2.4wt%まで減少しており、木粉のリグニンの約9割が亜臨界フェノール処理によって分解・除去されたことを示している。同様の実験を様々な温度/圧力で行い、リグニン、ヘミセルロース及びセルロースの分解・可溶化速度を速度論的に評価し比較したが、結局この230/1.2MPa/30分の亜臨界フェノール処理がヘミセルロースとセルロースの損失を最小限に抑えつつ、リグニンを効果的に除去するのに最適であることが判明した。

一方、亜臨界フェノール処理により分解され、フェノールに可溶化したリグニン由来物は、ジエチルエーテル中に滴下することで沈殿物として回収され、フェノールと分離できることが判った。このリグニン由来物を分析した結果、溶媒のフェノールが一部付加していることが示唆された。すなわち、木材中のリグニンは、亜臨界フェノール処理による反応でフェノールが付加しつつ、分解・可溶化しており、これにより得られたリグニン由来物はフェノール性水酸基が増加しているため、反応性の高いフェノール樹脂原料としての利用が期待される。

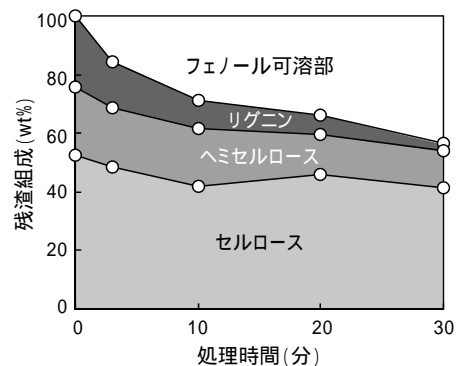


図1 亜臨界フェノール処理によるブナの分解・可溶化挙動 (230/1.2MPa)

(2) 亜臨界水処理

スギやブナの半流通型2段階亜臨界水処理を検討した結果、1段階処理(230 /10MPa/15分)では、主にリグニン及びヘミセルロース由来の分解物が水可溶部として得られることが判った。生成物の種類は樹種によって異なり、例えばブナの場合はヘミセルロース由来分解物としてキシロオリゴ糖やキシロースなどが、リグニン由来分解物としてシナピルアルコールやコニフェリルアルコールなどが得られた。しかし、結晶性のセルロースについては、この温度域の亜臨界水に対して耐性を示し、ほとんど分解しなかった。

一方、2段階処理(270 /10MPa/15分)では、主にセルロース由来分解物が得られることが判り、生成物はセロオリゴ糖、グルコース及びそれらの分解物であった。以上の2段階処理により、木粉試料が効率よく分解され、90wt%以上が水に可溶化した。

(3) 酢酸及びエタノール生産への応用

リグノセルロースの亜臨界水処理によって得られるオリゴ糖、単糖、糖の分解物及びリグニン由来物などの多種多様な分解生成物は、図2に示すように、当研究グループにて別途開発された嫌気性混合培養系(*C. thermoacetium*と*C. thermocellum*)において、収束的かつ高効率で酢酸に変換できることが判っている。得られた酢酸は水素化分解によりバイオエタノールに変換できる他、有用化学物質として種々の用途に利用可能である。

しかし、リグニン由来物の濃度が高くなると、酢酸発酵性が低下する場合があることも判っている。そこで(1)で述べた亜臨界フェノール処理により、リグノセルロースから予めリグニンを除去することを検討した。図3には脱リグニンしたブナ木粉と未処理のブナ木粉について、それぞれ規定の条件で2段階亜臨界水処理及び酢酸発酵を行い、酢酸収量を比較した結果を示す。脱リグニン試料からは未処理木粉の場合よりも多く酢酸が得られ、理論収量ベースでの発酵効率は82%から90%に改善している。このように、予め脱リグニン処理を施すことでリグニン由来物質による発酵阻害が緩和され、より効率的な酢酸生成が実現できることが判った。

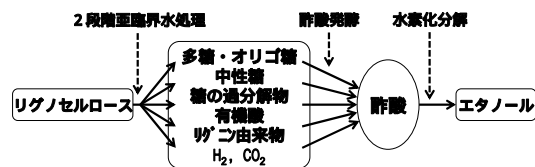


図2 リグノセルロースの2段階亜臨界水処理による生成物、及びそれに続く酢酸発酵・水素化分解によるエタノール生産

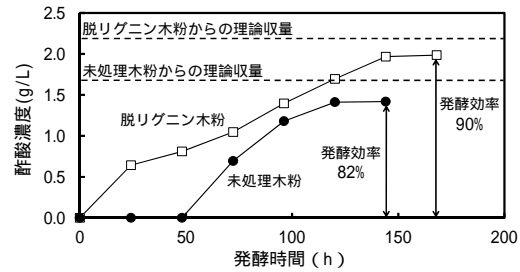


図3 亜臨界フェノール処理(230 /1.2MPa /30分)により脱リグニンしたブナ木粉及び未処理ブナ木粉をそれぞれ2段階亜臨界水処理及び酢酸発酵したときの酢酸濃度の比較

(4) 超(亜)臨界流体技術によるバイオリファイナリー

以上の成果を踏まえ、図4に超(亜)臨界流体技術をベースとしたリグノセルロースのバイオリファイナリーの概念を示す。まず、亜臨界フェノール処理により、リグニンは一部がフェノール化しつつ分解・可溶化され、リグノセルロースから分離することができる。得られた残渣はヘミセルロース及びセルロースに富んでおり、この残渣に対し亜臨界水処理及び酢酸発酵を行うことで、上述の如く高効率で酢酸へと変換可能である。この酢酸は、酢酸ビニルを経て合成樹脂、接着剤、感光性材料などとしての利用、酢酸を無水酢酸に変換してセルロースと反応させて得られるアセテート繊維としての利用、その他多種多様な汎用用途がある。また、酢酸は水素化分解を経てバイオエタノールに変換することも可能である。

一方、除去されたリグニンは溶媒であるフェノールに可溶化している。遊離のフェノールは除去して亜臨界フェノール処理に再利用することができる。得られたリグニン由来物はフェノール樹脂など多方面への応用が期待される他、精製して各種フェノール性化合物を得ることが可能である。

以上のように、超(亜)臨界流体技術により、リグノセルロースの総体利用が可能であり、バイオリファイナリー技術として有望であることが示された。

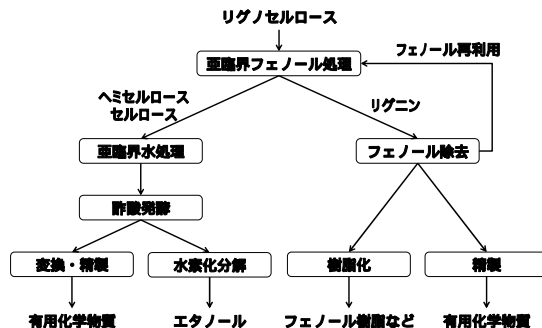


図4 亜臨界フェノール及び亜臨界水処理によるリグノセルロースのバイオリファイナリー

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 14 件)

M. Takada, S. Saka: Characterization of lignin-derived products from Japanese cedar as treated by semi-flow hot-compressed water, *Journal of Wood Science*, **61**(3), 2015 (査読有)(DOI:10.1007/s10086-015-1464-0)

H. Miyamoto, R. Abdullah, H. Tokimura, D. Hayakawa, K. Ueda, S. Saka: Molecular dynamics simulation of disassociation behavior of various crystalline cellulose treated with hot-compressed water, *Cellulose*, **21**(5), 2014, 3203-3215 (査読有)(DOI: 10.1007/s10570-014-0343-y)

R. Abdullah, K. Ueda, S. Saka: Hydrothermal decomposition of various crystalline celluloses as treated by semi-flow hot-compressed water, *Journal of Wood Science*, **60**(4), 2014, 278-286 (査読有)(DOI:10.1007/s10086-014-1401-7)

F. Goembira, S. Saka: Effect of additives to supercritical methyl acetate on biodiesel production, *Fuel Processing Technology*, **125**, 2014, 114-118 (査読有)(DOI:10.1016/j.fuproc.2014.03.035)

Y. Nakahara, K. Yamauchi, S. Saka: MALDI-TOF/MS analyses of decomposition behavior of beech xylan as treated by semi-flow hot-compressed water, *Journal of Wood Science*, **60**(3), 2014, 225-231 (査読有)(DOI:10.1007/s10086-014-1396-0)

Z.W. Phoo, L.F. Razon, G. Knothe, Z. Ilham, F. Goembira, C.F. Madrazo, S.A. Roces, S. Saka: Evaluation of Indian milkweed (*Calotropis gigantea*) seed oil as alternative feedstock for biodiesel, *Industrial Crops and Products*, **54**, 2014, 226-232 (査読有)(DOI:10.1016/j.indcrop.2014.01.029)

R. Abdullah, K. Ueda, S. Saka: Decomposition behaviors of various crystalline celluloses as treated by semi-flow hot-compressed water, *Cellulose*, **20**(5), 2013, 2321-2333 (査読有)(DOI:10.1007/s10570-013-0022-4)

N. Phaiboonsilpa, M. Ogura, K. Yamauchi, H. Rabemanolontsoa, S. Saka: Two-step hydrolysis of rice (*Oryza sativa*) husk as treated by semi-flow hot-compressed water, *Industrial Crops and Products*, **49**, 2013, 484-491 (査読有)(DOI:10.1016/j.indcrop.2013.05.025)

P. Tamunaidu, N. Matsui, Y. Okimori, S. Saka: Nipa (*Nypa fruticans*) sap as a potential feedstock for ethanol production, *Biomass and Bioenergy*, **52**, 2013, 96-102 (査読有)(DOI:10.1016/j.biombioe.2013.03.005)

G. Mishra, S. Saka: Effects of water in water/phenol mixtures on liquefaction of Japanese beech as treated under subcritical conditions, *Holzforchung*, **67**(3), 2013, 241-247 (査読有)(DOI:10.1515/hf-2012-0050)

K. Yamauchi, N. Phaiboonsilpa, H. Kawamoto, S. Saka: Characterization of lignin-derived products from Japanese beech wood as treated by two-step semi-flow hot-compressed water, *Journal of Wood Science*, **59**(2), 2013, 149-154 (査読有)(DOI:10.1007/s10086-012-1313-3)

小倉舞, N. Phaiboonsilpa, 山内一慶, 坂志朗: 半流通型2段階加圧熱水処理による稲わらの分解挙動, *日本エネルギー学会誌*, **92**(4), 2013, 319-326 (査読有)(DOI:10.3775/jie.92.319)

坂志朗: 液体バイオ燃料の次世代革新技術, *環境バイオテクノロジー学会誌*, **12**(2), 2012, 87-95 (査読なし)

G. Mishra, S. Saka: Effect of various solvent on precipitation of phenolated products from Japanese beech as treated by subcritical phenol, *Zero-Carbon*, **3**, 2012, 153-158 (査読有)(DOI:10.1007/978-4-431-54067-0_17)

〔学会発表〕(計 32 件)

田中佳樹, 南英治, 坂志朗: 亜臨界フェノールによるブナの脱リグニン処理, 第65回日本木材学会大会, 3月16-18日, 2015, タワーホール船堀(東京)

Y. Nakahara, E. Minami, H. Kawamoto, S. Saka: MALDI-TOF/MS analysis of decomposition behaviors of hemicelluloses in Japanese beech and Japanese cedar as treated by hot-compressed water, IAWPS2015, 15-17 Mar., 2015, Tower Hall Funabori (Tokyo)

M. Takada, E. Minami, H. Kawamoto, S. Saka: Comparative study on hydrothermal decomposition behavior of lignin from Japanese cedar and Japanese beech, IAWPS2015, 15-17 Mar., 2015, Tower Hall Funabori (Tokyo)

S. Saka, E. Minami, H. Rabemanolontsoa, H. Kawamoto: The 3rd generation bioethanol production process with acetic acid fermentation from lignocellulosics, International

Symposium on Wood Science and Technology 2015 (IAWPS2015), 15-17 Mar., 2015, Tower Hall Funabori (Tokyo)

S. Saka, E. Minami, H. Rabemanolontsoa, H. Kawamoto: Advanced bioethanol production process with acetic acid fermentation from lignocellulosics, The 21st International Symposium on Alcohol Fuels, 10-14 Mar., 2015, invited, Gwangju (Korea)

S. Saka: Advanced study on bioethanol and biodiesel for green and sustainable future, International Sustainable Technology, Energy and Civilization Conference (ISTECC 2015), 10-11 Jan., 2015, invited, Kuala Lumpur (Malaysia)

坂志朗, 河本晴雄, 南英治, H. Rabemanolontsoa: 酢酸発酵によるリグノセルロースからの先進高効率エタノール生産, サイエンスアゴラ 2014, 11月7日, 2014, 日本科学未来館 (東京)

S. Saka: Advanced bioethanol and biodiesel production by high pressure/high temperature treatment, JICA-AUN/ SEED-Net, Japanese Professors Dispatch Program, 27-31 Oct., 2014, Kuala Lumpur (Malaysia)

坂志朗: 難利用組成であるリグニンの基礎と産業利用の課題・展望, サイエンス&テクノロジー セミナー ~ 難利用木質バイオマス徹底活用 ~ リグニン産業最前線 2014, 9月18日, 2014, 招待講演, きゅりあん (東京)

M. Takada, S. Saka: Comparative study on lignin of Japanese cedar and Japanese beech as treated by hot-compressed water, XXVIIth International Conference on Polyphenols (ICP2014) & 8th Tannin Conference, 2-6 Sep., 2014, Nagoya University (Nagoya)

中原悠, 南英治, 坂志朗: プナ及びスギヘミセルロースの水熱反応による分解挙動の比較及び解析, 第12回志学会リトリート, 8月29-30日, 2014, 浜名湖バイブルキャンプ場(湖西市)

R. Abdullah, K. Ueda, S. Saka: Comparative study of various crystalline celluloses in their decomposition behaviors as treated by semi-flow hot-compressed water, GRE2014, 27 Jul.-1 Aug., 2014, Tokyo Big Sight (Tokyo)

S. Saka, E. Minami, H. Rabemanolontsoa, H. Kawamoto: Advanced bioethanol production process with acetic acid fermentation from lignocellulosics, Grand Renewable Energy 2014 (GRE2014)

International Conference and Exhibition, 27 Jul.-1 Aug., 2014, Tokyo Big Sight (Tokyo)

尾定佑太郎, 南英治, 河本晴雄, 坂志朗: 酢酸発酵によるリグノセルロースからの先進高効率エタノール生産 - プロセスの最適化と二酸化炭素削減効果の評価 -, 第23回日本エネルギー学会大会, 7月19-20日, 2014, 九州大学(福岡)

H. Rabemanolontsoa, 吉水邦典, 坂志朗: Advanced ethanol production with acetic acid fermentation from lignocellulosics - Acetic acid fermentation on hot-compressed water hydrolyzates of Japanese cedar with *C. thermoaceticum* and *C. thermocellum* -, 第23回日本エネルギー学会大会, 7月19-20日, 2014, 九州大学(福岡)

南英治, N. Phaiboonsilpa, 坂志朗: 酢酸発酵によるリグノセルロースからの先進高効率エタノール生産 - 半流通型2段階加圧熱水処理によるリグノセルロースの分解 -, 第23回日本エネルギー学会大会, 7月19-20日, 2014, 九州大学(福岡)

坂志朗, 南英治, H. Rabemanolontsoa, 河本晴雄: 酢酸発酵によるリグノセルロースからの先進高効率エタノール生産, 第23回日本エネルギー学会大会, 7月19-20日, 2014, 九州大学(福岡)

高田昌嗣, 坂志朗: スギ及びブナの水熱反応による脱リグニン挙動のトポ化学に関する比較研究, 第23回日本エネルギー学会大会, 7月19-20日, 2014, 九州大学(福岡)

中原悠, 南英治, 坂志朗: プナ及びスギヘミセルロースの水熱反応による分解挙動の比較及び解析, 第23回日本エネルギー学会大会, 7月19-20日, 2014, 九州大学(福岡)

S. Saka: Advanced Study on Biomass and Biorefinery in Saka (Energy Ecosystems) Laboratory, Bandung Symposium on ASEAN University Network (AUN) - Kyoto University (KU) Student Mobility Program toward Human Security Development, 24-25 Jun., 2014, Bandung (Indonesia)

① S. Saka: Advanced bioethanol and biodiesel production by high pressure/high temperature treatment, Bandung Symposium on ASEAN University Network (AUN) - Kyoto University (KU) Student Mobility Program toward Human Security Development, 24-25 Jun., 2014, invited, Bandung (Indonesia)

② S. Saka: Recent progress in biorefinery from lignocellulosics by supercritical/subcritical fluid

- science and technology, 10th International Conference on Renewable Resources and Biorefineries, 4-5 Jun., 2014, invited, Valladolid (Spain)
- ⑳ S. Saka: Advanced bioethanol and biodiesel production by high pressure/high temperature treatment, Priority Research Center Program, 26 Mar., 2014, invited, Gwangju (Korea)
- ㉑ S. Saka: Advanced biodiesel and bioethanol production by high pressure/high temperature treatment, 6th Regional Conference on Chemical Engineering, 2-3 Dec., 2013, invited, Manila (Philippines)
- ㉒ 坂志朗: 種々のリグノセルロースの化学組成と水熱反応によるバイオリファイナリー化, 13-2 エコマテリアル研究会, 10月18日, 2013, 招待講演, 神戸大学瀧川記念学術交流会館(神戸)
- ㉓ S. Saka: Biodiesel feedstocks and its production methods in Asia, 1st KORANET Biodiesel Workshop, 23-25 Sep., 2013, invited, Jeju (Korea)
- ㉔ S. Saka: High pressure/temperature treatment to produce bioethanol and biodiesel, 6th International Symposium on High Pressure Processes Technology, 8-11 Sep., 2013, invited, Belgrade (Serbia)
- ㉕ S. Saka: Thermochemical conversion of lignocellulosics to biofuels and biochemicals, 3rd International Cellulose Conference, 10 Oct., 2012, invited, CHATERAISE Gateaux Kingdom SAPPORO Hotel & SPA Resort (Sapporo)
- ㉖ S. Saka: Recent progress in lignocellulosic biorefinery by supercritical/subcritical fluid science and technology, 15th International Biotechnology Symposium and Exhibition, 19 Sep., 2012, invited, Daegu (Korea)
- ㉗ 坂志朗: 液体バイオ燃料の次世代技術, 環境バイオテクノロジー学会 2012 年度大会, 6月26日, 2012, 招待講演, 京都大学宇治キャンパス(宇治)
- ㉘ 坂志朗: 未来への架け橋“バイオマス”, H24 年度スーパーサイエンスハイスクール(SSH)コア SSH 講義(特別講義), 6月16日, 2012, 滋賀県立膳所高校(大津)
- ㉙ 坂志朗: バイオ燃料の次世代技術と展望, バイオマスエキスポ 2012, 5月30日, 2012, 招待講演, 東京ビッグサイト(東京)

〔図書〕(計7件)

坂志朗, H. Rabemanantsoa, シーエムシー出版, リグニン利用の最新動向(坂

志朗監修), バイオマスの分類と化学組成, 2013, 1-9

坂志朗, シーエムシー出版, リグニン利用の最新動向(坂志朗監修), 臭素化法によるリグニン分布, 2013, 17-26

山内一慶, 坂志朗, シーエムシー出版, リグニン利用の最新動向(坂志朗監修), 種々の手法によるリグニンの構造解析, 2013, 63-70

山内一慶, 高田昌嗣, 坂志朗, シーエムシー出版, リグニン利用の最新動向(坂志朗監修), MALDI-TOF/MS によるリグニンの構造解析, 2013, 78-83

坂志朗, シーエムシー出版, リグニン利用の最新動向(坂志朗監修), 超(亜)臨界水を用いたリグニンからの化学物質, 2013, 113-119

南英治, 坂志朗, シーエムシー出版, リグニン利用の最新動向(坂志朗監修), 超(亜)臨界溶媒を用いたリグニンの液化と応用, 2013, 120-127

坂志朗, シーエムシー出版, ウッドケミカルの新展開 3 亜臨界、超臨界溶媒を用いたバイオマスからのケミカス・バイオ燃料の製造, 2012, 21

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂志朗(SAKA, Shiro)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・教授

研究者番号: 50205697

(2) 研究分担者

河本 晴雄(KAWAMOTO, Haruo)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号: 80224864

南 英治(MINAMI, Eiji)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・助教

研究者番号: 00649204

(平成25年度より研究分担者に追加)

山内 一慶(YAMAUCHI, Kazuchika)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・特定助教

研究者番号: 20467335

(平成25年度より転職のため研究分担者より削除)