

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24380095

研究課題名(和文)多成分複合体としての木材の熱分解分子機構

研究課題名(英文)Molecular mechanisms of wood pyrolysis as composite material

研究代表者

河本 晴雄(Kawamoto, Haruo)

京都大学・エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号：80224864

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：木材およびその構成成分の熱分解における分子機構を明らかにすることは、熱分解をベースとする種々の熱化学変換プロセス(炭化、ガス化、急速熱分解など)の高度化において極めて重要である。本研究では、構成成分の不均一性および多成分複合体としての木材に着目し、その分子機構について検討した。その結果、セルロースの熱分解における還元性末端基の役割、リグニン熱分解におけるラジカル連鎖機構、木材熱分解におけるリグニンと多糖成分(セルロース、ヘミセルロース)の相互作用、気相でのガス化機構などについての成果が得られている。

研究成果の概要(英文)：Better understanding of the molecular mechanisms involved in wood pyrolysis would provide insights into the upgrading of various pyrolysis-based technologies, which include carbonization, gasification and fast pyrolysis. In this project, we studied the molecular mechanisms of wood pyrolysis under the focus of heterogeneity of cellulose and cell wall, which consists of cellulose crystallites surrounded by lignin-hemicellulose matrix. As a result, we clarified the roles of reducing ends in cellulose pyrolysis, radical chain mechanisms in lignin pyrolysis, interactions between lignin and hemicellulose/cellulose, gas-forming mechanisms from cellulose and so on.

研究分野：木材科学

キーワード：木材 木質バイオマス 熱分解 分子機構 相互作用 バイオリファイナリー バイオケミカルス バイオ燃料

1. 研究開始当初の背景

木質バイオマスは地球上に最も多量に存在するバイオマス資源であり、毎年エネルギーベースで世界の一次エネルギー需要の5倍もの量が生産されている。したがって、木質バイオマスをエネルギーおよびケミカル、材料として利用し、現在の化石資源を代替することは今後益々重要になってくるものと予想され、木質バイオマスを効果的にこれらに変換できる技術を今から準備しておくことは極めて重要である。

このような背景から、研究代表者らの研究グループは分子レベルでの木質バイオマスの熱分解機構解明の研究を進めてきている。分子機構が明らかになることで、熱分解をベースとする変換技術(炭化、ガス化、急速熱分解による液化など)の高度化および新規は変換技術の提案が可能になることが期待される。

木質バイオマス熱分解の分子機構を解明しようとする研究グループは他になく、主に研究代表者らにより地道に進められてきたが、15年来の研究により、セルロース、リグニンなどの木質バイオマスの構成成分の熱分解機構をある程度分子レベルで議論できるレベルに達した。そこで、本研究課題では、成分間の相互作用にまで対象を広げ、結晶セルロースをリグニンとヘミセルロースよりなるマトリックスが取囲む構造を持つ細胞壁レベルで木質バイオマスの熱分解における分子機構を解明することを目指した。

2. 研究の目的

研究代表者らのこれまでの研究により、セルロースがヘテロリシス(非ラジカル)機構で熱分解されるのに対し、リグニンがラジカル機構で分解することを明らかにしている。本結果は、両者の間に相互作用が存在することを示唆するが、その詳細は明らかになってはいなかった。そこで本研究課題では、両者の熱分解機構の研究をさらに深めると同時に、木質バイオマスの構成成分間での相互作用に着目した分子機構解明を目指すこととした。

セルロースには、結晶、非晶領域が存在し、セルロース分子の一端はアルデヒドとしての性質を持つ還元性末端であるなど、セルロース自身不均質な成分である。したがって、まず、これらの不均質性の影響を明らかにする。

リグニンについてはその熱分解がラジカル連鎖機構で進行することが示唆されており、コニフェリルアルコール、コニフェリルアルデヒド、ビニルグアイアコールなどのモノマーが生成することがわかっているが、水素引き抜き反応などのラジカル連鎖反応の詳細は不明であった。したがって、これらの点を明らかにする。

さらに、木質バイオマスの細胞壁が結晶セルロースをリグニンとヘミセルロースのマトリックスにより取り囲まれた複層構造をとることに着目し、リグニンとヘミセルロースあるいはセルロースとの相互作用の詳細を明らかにする。

3. 研究の方法

木質バイオマスの熱分解機構を分子レベルで解明しようとする研究であることから、熱分解により生成する生成物については、¹H-NMR、MSなどを用いて確実に化学構造を同定した。また、反応機構を解明する目的で重水素(D)あるいは¹³Cで特定の位置をラベルしたモデル化合物を合成し、有効に利用した。さらに、成分間の相互作用についての情報を得る目的で、赤外線顕微鏡を用いた分析も行った。

これらとは別に、リグニンとヘミセルロースあるいはセルロースとの相互作用を調べる方法論としてリグニンモデル化合物をプローブとする“in situ プローブ法”を提案した(研究成果の項を参照)。

4. 研究成果

セルロースは、最初に起こる DP200 程度への重合度の過程で還元性末端を生成し、その還元性末端はセルロースの熱分解が顕著になる 300 より低温の 160~230 の温度域で熱分解を開始することを明らかにした。さらに、還元性末端の熱分解がバルクセルロースの熱分解を開始する機構が提案された。なお、セルロース還元性末端の熱分解温度はマトリックスの熱分解が顕著になる 250~300 よりも低温側にあり、マトリックスの熱分解に影響を及ぼしている可能性があることも示唆された。

一方、マトリックスの熱分解については、リグニン 2 量体モデル化合物を用いた検討により、水素引き抜きにより進行するラジカル連鎖機構の詳細と、ヘテロリシスよりもラジカル連鎖反応でリグニンの熱分解が進行することを明らかにした。さらに、リグニンモデル化合物をプローブとして木材及びヘミセルロース、セルロースとともに熱分解する方法(in situ プロービング法)が成分間の相互作用を調べる上で有効であることを見出し、リグニンの熱分解に及ぼすヘミセルロース及びセルロースの影響を明らかにした。その結果、興味深いことに、針葉樹の主要なヘミセルロースであるグルコマンナンがリグニンの熱分解を抑制するのに対し、広葉樹のキシランが大きく促進することを明らかにした。これらの結果より、針葉樹と広葉樹でマトリックスの熱分解機構が大きく異なることが示唆された。さらに針葉樹と広葉樹

における相互作用の相違については、ブナ（広葉樹）とスギ（針葉樹）の熱分解からのリグニン由来生成物の生成挙動とラジカル補足剤の添加効果からも示唆された。すなわち、広葉樹のブナにおいてリグニン熱分解で生成するラジカル種を安定化する水素ドナーの供給が針葉樹のスギと比べて著しく多いことが明らかになった。

マトリックス中でのリグニンの熱分解機構については、C_γ-位に水酸基を持つ非フェノール性のβ-エーテル型モデル化合物を木材などとともに用いる in situ プロービング法を用いて検討することで、リグニン中間ユニットが受ける熱分解反応機構を明らかにした。すなわち、水酸基からの水素引き抜きによるラジカル連鎖反応がリグニンの低分子化が進行する 350 の温度域で進行することが判明し、この機構によりリグニンの熱分解により得られる単量体の化学構造がよく説明されることがわかった。また、側鎖水酸基間での水素結合から進行するヘテロリシス反応である環状 Grob 反応（側鎖の開裂による低分子化につながる）は重要ではないことも明らかになった。一方、急速加熱条件下で可能となると考えられる 400 以上の温度域では環状 Grob 反応がむしろ優先して進行することも判明した。これらの結果は、リグニンの熱分解機構及びヘミセルロースとの相互作用の詳細が加熱速度により異なることを示唆する。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 17 件)

河本晴雄, セルロースの熱分解反応と分子機構 (Reactions and Molecular Mechanisms of Cellulose Pyrolysis) 木材学会誌, **61**(1), 2015, 1-24 (査読あり)。

Fukutome, A., Kawamoto, H., Saka, S., Molecular mechanisms for the gas-phase conversion of intermediates during cellulose gasification under nitrogen and oxygen/nitrogen, *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.*, 印刷中 (査読あり)。

DOI: DOI: 10.2298/CICEQ160325018F

Fukutome, A., Kawamoto, H., Saka, S., Gas-phase reactions of glyceraldehyde and 1,3-dihydroxyacetone as a model for levoglucosan conversion during biomass gasification, *ChemSusChem*, **9**, 2016, 703-712 (査読あり)。

DOI: 10.1002/cssc.201501612

Matsuoka, S., Kawamoto, H., Saka, S., Reactivity of cellulose reducing end in pyrolysis as studied by methyl glucoside-impregnation, *Carbohydr. Res.*,

420(2), 2016, 46-50 (査読あり)。

DOI: 10.1016/j.carres.2015.11.010

Fukutome, A., Kawamoto, H., Saka, S., Processes forming gas, tar and coke in cellulose gasification from gas-phase reactions of levoglucosan as intermediate, *ChemSusChem*, **8**, 2015, 2240-2249 (査読あり)。

DOI: 10.1002/cssc.201500275

Kawamoto, H., Watanabe, T., Saka, S., Strong interactions during lignin pyrolysis in wood –A study by in situ probing of the radical chain reactions using model dimers–, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **113**, 2015, 630-637 (査読あり)。

DOI: 10.1016/j.jaap.2015.04.009

Watanabe, T., Kawamoto, H., Saka, S., Pyrolytic reactivities of deuterated β-ether-type lignin model dimers, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **112**, 2015, 23-28 (査読あり)。

DOI: 10.1016/j.jaap.2015.02.028

Kotake, T., Kawamoto, H., Saka, S., Pyrolytic formation of monomers from hardwood lignin as studied from the reactivities of the primary products, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **113**, 2015, 57-64 (査読あり)。

DOI: 10.1016/j.jaap.2014.09.029

Kawamoto, H., Hosoya, T., Ueno, Y., T. Shoji, Saka, S., Thermal stabilization and decomposition of simple glycosides in the presence of aromatic substances in closed ampoules: Role of OH ··· hydrogen bonding -, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **109**, 2014, 41-46 (査読あり)。

DOI: 10.1016/j.jaap.2014.07.015

Shoji, T., Kawamoto, H., Saka, S., Boiling point of levoglucosan and devolatilization temperatures in cellulose pyrolysis measured at different heating area temperatures, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **109**, 2014, 185-195 (査読あり)。

DOI: 10.1016/j.jaap.2014.06.014

Fukutome, A., Kawamoto, H., Saka, S., Gas- and coke-forming reactivities of cellulose-derived tar components under nitrogen and oxygen/nitrogen, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **108**, 2014, 98-108 (査読あり)。

DOI: 10.1016/j.jaap.2014.05.012

Matsuoka, S., Kawamoto, H., Saka, S., What is active cellulose in pyrolysis? An approach based on reactivity of cellulose reducing end, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **106**, 2014, 138-146 (査読あり)。

DOI: 10.1016/j.jaap.2014.01.011

Kotake, T., Kawamoto, H., Saka, S., Mechanisms for the formation of monomers and oligomers during the pyrolysis of a softwood lignin, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*,

105, 2014, 309-316 (査読あり) .
DOI: 10.1016/j.jaap.2013.11.018
Kotake, T, Kawamoto, H., Saka, S.,
Pyrolysis reactions of coniferyl alcohol as a
model of the primary structure formed
during lignin pyrolysis, *J. Anal. Appl.
Pyrolysis*, **104**, 2013, 573-584 (査読あり) .
DOI: 10.1016/j.jaap.2013.05.011
Matsuoka, S., Kawamoto, H., Saka, S.,
Influence of hydroxyl group configuration
on pyrolytic formation of
1,6-anhydrohexopyranoses from various
hexoses: An experimental and theoretical
study, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **103**, 2013,
300-306 (査読あり) .
DOI: 10.1016/j.jaap.2012.08.008
Kawamoto, H., Ueno, Y., Saka, S., Thermal
reactivities of non-reducing sugars in
polyether -Role of intermolecular hydrogen
bondings in pyrolysis, *J. Anal. Appl.
Pyrolysis*, **103**, 2013, 287-292 (査読あり) .
DOI: 10.1016/j.jaap.2012.08.009
Matsuoka, S., Kawamoto, H., Saka, S.,
Retro-aldol-type fragmentation of reducing
sugars preferentially occurring in polyether
at high temperature: Role of the ether
oxygen as a base catalyst, *J. Anal. Appl.
Pyrolysis*, **93**, 2012, 24-32 (査読あり) .
DOI: 10.1016/j.jaap.2011.09.005

[学会発表] (計 42 件)

河本晴雄、木質バイオマスの炭素化 - 熱
分解分子機構の視点からの考察、第 53 回
炭素材料夏季セミナー、2015 年 8 月 10
日、東京 .
河本晴雄、熱分解によるリグニンからの
ケミカルス生産の可能性、第 53 回関西バ
イオポリマー研究会「バイオマス材料と
医療材料 (4)」、2014 年 12 月 4 日、大
阪 (産業総合研究所 関西センター) .
河本晴雄、リグニン熱分解における低分
子化とそれを阻害する分子機構、第 254
回生存圏シンポジウム (第 4 回生存圏熱
帯林人工林フラッグシップシンポジウ
ム)、2014 年 2 月 27 日、京都、pp.9-10.
Kawamoto, H., Matsuda, K., Saka, S.,
Radical chain and heterolysis reactions in
lignin pyrolysis as studied with model
dimers (Oral), 18th International Symposium
on Wood, Fiber and pulping Chemistry 2015
(ISWFPC 2015), Vienna, Austria, September
9-11, 161-162 (Volume 1).
Fukutome, A., Kawamoto, H., Saka, S.,
Molecular mechanisms of gaseous
levoglucosan as a cellulose gasification
intermediate (Poster), 18th International
Symposium on Wood, Fiber and pulping
Chemistry 2015 (ISWFPC 2015), Vienna,
Austria, September 9-11, 430-431 (Volume
2).

Kawamoto, H., Saka, S., Primary and
secondary reactions of lignin pyrolysis
(Poster), International Symposium on Wood
Science and Technology 2015 (IAWPS
2015), Tokyo, Japan, March 15-17.
Fukutome, A., Kawamoto, H., Saka, S., Gas-
and liquid-phase reactions of levoglucosan
as a key intermediate of cellulose
gasification (Poster), International
Symposium on Wood Science and
Technology 2015 (IAWPS 2015), Tokyo,
Japan, March 15-17.
Kawamoto, H., Secondary reactions of
volatile intermediates during cellulose and
lignin pyrolysis/gasification (Oral), 2014
AIChE Annual Meeting, Atlanta (Session:
Reactor engineering for biomass feedstocks),
USA, November 16-21, 757f.
Kawamoto, H., Mechanisms of monomer
and oligomer formation in lignin pyrolysis
(Oral), XXVIIth International Conference on
Polyphenols & 8th Tannin Conference
(ICP2014), Nagoya, September 2-6, 63-64.
Kawamoto, H., Saka, S., Hydrogen bonding
as a principle mechanism to promote
carbohydrate pyrolysis reactions (Poster),
Grand Renewable Energy 2014, Tokyo, July
27-August 1, P-Bm-1-11.
Matsuoka, S., Kawamoto, H., Saka, S., What
is active cellulose in pyrolysis? An approach
based on reactivity of cellulose reducing end
(Poster), 20th International Symposium on
Analytical and Applied Pyrolysis (Pyro
2012), Birmingham, UK, May 19-23, 2014,
P140.
Kotake, T., Kawamoto, H., Saka, S.,
Pyrolytic formation of monomers from
hardwood lignin as studied from the
reactivity of the primary products (Poster),
20th International Symposium on Analytical
and Applied Pyrolysis (Pyro 2012),
Birmingham, UK, May 19-23, 2014, P72.
Kawamoto, H., Hydrogen bonding as a
principle mechanism to promote cellulose
and other carbohydrate pyrolysis reactions
(Keynote), 20th International Symposium on
Analytical and Applied Pyrolysis (Pyro
2012), Birmingham, UK, May 19-23, 2014,
P34.
Kawamoto, H., Hydrogen bonding
promotes pyrolytic reactions of
carbohydrate pyrolysis (Oral), 21st
European Biomass Conference & Exhibition.
Setting the course for a biobased economy,
Copenhagen, Denmark, June 3-7.
Kawamoto, H., Kotake, T., Saka, S.,
Molecular mechanisms in pyrolytic
formation of monomers/oligomers from
lignin (Poster), 21st European Biomass
Conference & Exhibition. Setting the course

- for a biobased economy, Copenhagen, Denmark, June 3-7.
Kawamoto, H., Saka, S., Aromatic substance and polyether as media for controlled pyrolysis for chemical production from carbohydrates (Poster), 3rd International Cellulose Conference (ICC2012), Sapporo, Japan, October 10-12, P200.
Fukutome, A., Kawamoto, H., Saka, S., Molecular-based study of gas and coke formation in gasification of cellulosic biomass (Poster), 3rd International Cellulose Conference (ICC2012), Sapporo, Japan, October 10-12, P204.
Kawamoto, H., Ueno, Y., Saka, S., Thermal reactivities of reducing and non-reducing sugars in polyether: role of inter- and intra-molecular hydrogen bondings in pyrolysis (Oral), 19th International Symposium on Analytical and Applied Pyrolysis (Pyrolysis 2012), Linz, Austria, May 21-25, 2012, P82.
Matsuoka, S., Kawamoto, H., Saka, S., Influence of hydroxyl group configuration on pyrolytic formation of 1,6-anhydrohexoses from various hexoses: and experimental and theoretical study (Poster), 19th International Symposium on Analytical and Applied Pyrolysis (Pyrolysis 2012), Linz, Austria, May 21-25, 2012, P171.
 野村高志、河本晴雄、坂 志朗、セルロース熱分解に及ぼす非プロトン性添加物の影響、第66回日本木材学会大会研究発表要旨集、2016年3月27-29日、名古屋、P29-03-0915.
- ②1 Mohd Asmadi, Kawamoto H., Saka S., Pyrolysis behaviors of hardwood and softwood species and milled wood lignin fractions, 第66回日本木材学会大会研究発表要旨集、2016年3月27-29日、名古屋、P29-03-0930.
- ②2 成田和夫、河本晴雄、坂 志朗、リグニン熱分解における芳香核構造の変換機構 - 同位体ラベルによる検討 -, 第60回リグニン討論会、2015年11月5、6日、筑波.
- ②3 松田 佳子、河本晴雄、坂 志朗、リグニン熱分解におけるラジカル連鎖とヘテロリシス反応機構 (口頭) 第24回日本エネルギー学会大会講演要旨集、2015年8月3、4日、札幌(札幌コンベンションセンター) 142-143.
- ②4 福留 明日香、河本晴雄、坂 志朗、レボグルコサンの気相での熱分解反応機構 - グリセロールとグリセルアルデヒドの反応性の相違からの検討 - (口頭) 第24回日本エネルギー学会大会講演要旨集、2015年8月3、4日、札幌(札幌コンベンションセンター) 140-141.
- ②5 福留 明日香、河本晴雄、坂 志朗、気相でのレボグルコサンの特異的な熱安定性とその分子機構 - メチルグルコシド類との比較 - (口頭) セルロース学会第22回年次大会講演要旨集、2015年7月9、10日、札幌(北大) 12-13.
- ②6 河本晴雄、庄司妙子、坂 志朗、芳香族化合物存在下でのセルロースの急速熱分解 (ポスター) セルロース学会第22回年次大会講演要旨集、2015年7月9、10日、札幌(北大) 118.
- ②7 松岡聖二、河本晴雄、坂 志朗、熱分解におけるセルロースの活性化機構 - "Active cellulose"とは? 還元性末端の反応性からのアプローチ (ポスター) セルロース学会第21回年次大会講演要旨集、2014年7月17、18日、鹿児島、126-127.
- ②8 福留 明日香、河本晴雄、坂 志朗、セルロースガス化の分子機構 - 中間体としてのガス状レボグルコサンの役割 - (口頭) 第23回日本エネルギー学会大会講演要旨集、2014年7月19、20日、福岡.
- ②9 河本晴雄、坂 志朗、温度に依存したリグニンの熱分解反応機構 (口頭) 第23回日本エネルギー学会大会講演要旨集、2014年7月19、20日、福岡.
- ③0 松田佳子、福留 明日香、河本晴雄、坂 志朗、非フェノール性β-エーテル型リグニン二量体モデル化合物の熱分解反応機構 - 側鎖水酸基に起因するレトロアルドール反応 - (口頭) 第59回リグニン討論会講演集、2014年9月11、12日、福井、66-69.
- ③1 松田佳子、河本晴雄、坂 志朗、リグニンモデル化合物の熱分解における側鎖でのヘテロリシス機構、第65回日本木材学会大会研究発表要旨集、2015年3月16-18日、東京、P18-05-0930.
- ③2 成田和央、河本晴雄、坂 志朗、メトキシル基に起因するリグニン熱分解の同位体ラベルによる反応機構の解明、第65回日本木材学会大会研究発表要旨集、2015年3月16-18日、東京、P18-05-0945.
- ③3 河本晴雄、松岡聖二、坂 志朗、セルロース熱分解における1,6-無水糖生成機構 (ポスター) セルロース学会第20回年次大会講演要旨集、2013年7月18、19日、宇治、53-54.
- ③4 福留 明日香、河本晴雄、坂 志朗、セルロース系バイオマスのガス化中間体としてのレボグルコサンの気相中での熱分解反応機構 (ポスター) セルロース学会第20回年次大会講演要旨集、2013年7月18、19日、宇治、55.
- ③5 松田佳子、河本晴雄、坂 志朗、側鎖からの水素引抜によるリグニンラジカル連鎖 - エーテル開裂機構の検討 (口

- 頭)、第 58 回リグニン討論会講演集、2013 年 11 月 12、13 日、高松、42-45.
- ③⑥ 河本晴雄、小竹毅郎、坂 志朗、熱分解におけるリグニンの低分子化とそれを阻害する分子機構、第 64 回日本木材学会大会研究発表要旨集、2014 年 3 月 13 15 日、松山、P15-04-0915.
- ③⑦ 庄司妙子、河本晴雄、坂 志朗、加熱速度がセルロース熱分解における分解物の沸騰温度に及ぼす影響、第 64 回日本木材学会大会研究発表要旨集、2014 年 3 月 13 15 日、松山、P15-04-0930.
- ③⑧ 福留明日香、河本晴雄、坂 志朗、気相中でのレボグルコサンの熱分解反応機構、第 64 回日本木材学会大会研究発表要旨集、2014 年 3 月 13 15 日、松山、P15-04-0945.
- ③⑨ 河本晴雄、細谷隆史、上野貴臣、坂 志朗、芳香族吾郷物中での非還元糖の熱安定化とその機構(ポスター)、セルロース学会第 19 回年次大会講演要旨集、2012 年 7 月 12、13 日、名古屋、83.
- ④⑩ 河本晴雄、坂 志朗、糖の熱分解機構：気相でなぜ安定化するのか(口頭)、第 21 回日本エネルギー学会大会講演要旨集(口頭)、2012 年 8 月 6、7 日、東京、138-139.
- ④⑪ 小竹毅郎、河本晴雄、坂 志朗、広葉樹リグニン熱分解における低分子シリノール類/グアイアノール類の生成挙動、第 57 回リグニン討論会講演集、2012 年 10 月 17、18 日、福岡.
- ④⑫ 松田佳子、河本晴雄、坂 志朗、リグニンの熱分解ラジカル連鎖 - エーテル開裂機構の解明 - C 水素引き抜きによる経路 -、第 63 回日本木材学会大会研究発表要旨集、2013 年 3 月 27 29 日、盛岡、P27-03-0930.
- ④⑬ 福留 明日香、河本晴雄、坂 志朗、セルロース系バイオマスのガス化中間体としてのレボグルコサンの気相での熱分解反応特性、第 63 回日本木材学会大会研究発表要旨集、2013 年 3 月 27 29 日、盛岡、P27-03-0945.

〔図書〕(計 1 件)

河本晴雄、第 4 章 5 リグニンの熱分解による化学物質 in 「リグニン利用の最動向」、シーエムシー出版、東京、2013、pp.128-136.

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

河本 晴雄 (Kawamoto, Haruo)

京都大学・大学院工ネルギー科学研究科・准教授

研究者番号：80224864

(2) 研究分担者

坂 志朗 (Saka, Shiro)

京都大学・大学院工ネルギー科学研究科・教授

研究者番号：50205697