

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2016

課題番号：24686027

研究課題名(和文)CO<sub>2</sub>回収型石炭燃焼の特異性を積極活用したクリーンコールテクノロジーの開発

研究課題名(英文)Development of clean coal technology by using the feature of oxy-fuel combustion

研究代表者

渡部 弘達 (Watanabe, Hirotatsu)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：40551825

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：Oxyfuel燃焼は、燃料を酸素および再循環させた排ガスで燃焼させることにより、CO<sub>2</sub>の直接回収を可能にする燃焼技術である。本研究では、Oxyfuel燃焼の特異性を活用したクリーン燃焼の実現に取り組んだ。微粉炭の揮発分燃焼において、CO<sub>2</sub>の反応性(CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> → CO + OH)を明らかにし、これを活用することで、未燃炭化水素を抑制できることを明らかにした。さらに、O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>雰囲気でのチャーガス化の検討を行い、十分な活性サイト(ここでは、AAEMとの接触サイト)は、反応を促進するだけでなく、O<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>ガス化の競合反応を抑制し、O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>ガス化速度を向上させる可能性があることを示した。

研究成果の概要(英文)：Oxy-fuel combustion technology is an emerging approach to capture post combustion CO<sub>2</sub>. In this technique, fuel is burned using a mixture of high-purity oxygen and recycled flue gas. In this study, clean coal technologies using the feature of oxy-fuel combustion were developed. It was shown that O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> environments were suited to reduce soot due to the CO<sub>2</sub> reactivity (CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> → CO + OH). Moreover, Char gasification in mixtures of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> was also discussed. A sufficient active site, mainly consisting of catalyst in this study, was important not only to enhance char gasification reactions but also to prevent competitive reactions between char-O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> gasification.

研究分野：熱工学

キーワード：CO<sub>2</sub>回収型燃焼 石炭 二酸化炭素 クリーンコールテクノロジー

### 1. 研究開始当初の背景

石炭燃焼システムは、エネルギーベストミックスとエネルギーセキュリティの上で重要な役割を果たしている。しかし、単位発電量当たりのCO<sub>2</sub>排出量が他の発電システムと比較して多く、CO<sub>2</sub>を排出しないクリーンコールテクノロジーの開発が求められている。石炭燃焼システムからCO<sub>2</sub>を回収する方式として、Oxyfuel 燃焼が注目を集めている。Oxyfuel 燃焼は、燃料を酸素および再循環させた排ガスで燃焼させることにより、排ガス中のCO<sub>2</sub>濃度を90%以上にし、CO<sub>2</sub>分離過程なしでCO<sub>2</sub>回収を可能にする燃焼技術である。Oxyfuel 燃焼は、CO<sub>2</sub>回収に適した燃焼法であるが、石炭火力では、CO<sub>2</sub>だけでなく、ばいじん等の各種環境汚染物質の抑制も大きな課題となっている。Oxy-fuel 燃焼では、大量の排ガス再循環を伴い、CO<sub>2</sub>雰囲気下で燃焼反応が進行するという特異性がある。従来の空気燃焼にはないOxyfuel 燃焼の特異性を明らかにし、クリーンコールテクノロジーの開発につなげることが求められている。

### 2. 研究の目的

Oxyfuel 燃焼では、高濃度CO<sub>2</sub>雰囲気下で燃焼反応が進行するといった特異性がある。Oxyfuel 燃焼の特異性を活用することで、空気燃焼では実現できなかったクリーンなOxy-fuel combustion を実現できれば、他のCO<sub>2</sub>回収方式にはない利点となる。本研究では、Oxyfuel 燃焼の特異性を活用したクリーン燃焼の実現を目的としている。

### 3. 研究の方法

石炭燃焼では、まず、微粉炭粒子が予熱され、揮発分が放出・着火して揮発分とチャーが燃焼する。揮発分燃焼を検討する際は、Fig. 1 に示すような平面火炎リアクターを使用した。平面火炎は、微粉炭燃焼の気相反応部分を抽出でき、1次元解析が容易になるという利点がある。本研究では、CHEMKIN-PROを用いた詳細反応解析との比較検討を行う。

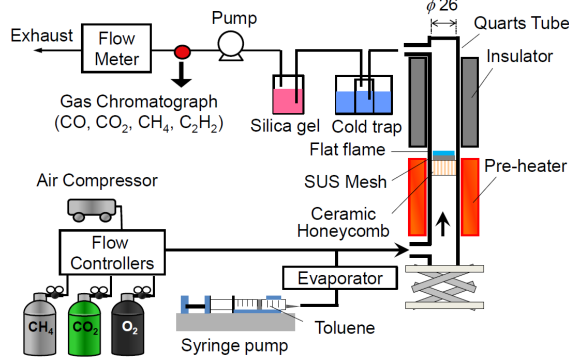


Fig. 1 平面火炎リアクター

石炭チャーのガス化を検討する際は、熱天秤とドロップチューブ反応炉を使用した。

### 4. 研究成果

#### (a) 炭化水素の酸化反応促進とすすの低減

Fig. 2 に、CH<sub>4</sub> 平面火炎 ( $\lambda_{\text{primary}} = 0.62$ ) における未燃炭化水素の実験結果(a)と詳細反応解析結果(b)を示す。実験および解析結果ともに、O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 燃焼では、空気燃焼と比較して、未燃炭化水素の濃度が大幅に低下している。これは、主に、CO<sub>2</sub>の反応性(CO<sub>2</sub> + H → CO + OH (R1))により生成されるOHラジカルにより、未燃炭化水素の酸化反応が促進されているためである。この燃料過濃条件においては、CO<sub>2</sub>の反応性は炭化水素の酸化反応を促進している。

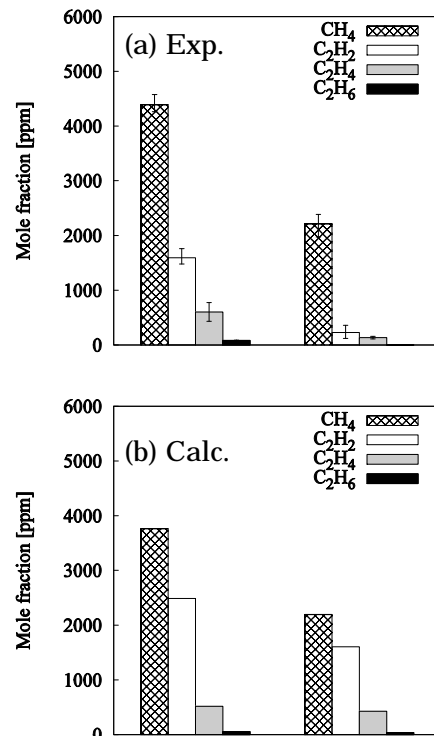


Fig. 2 未燃炭化水素の排ガス濃度

PAH (Polycyclic aromatic hydrocarbons) の成長メカニズムとして、HACA (H-abstraction-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-addition) 反応が挙げられる。このメカニズムでは、*i* 環縮合した芳香族化合物 A<sub>i</sub> が、H と反応し、そのラジカル A<sub>i</sub> が生成する。A<sub>i</sub> に C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> が付加し、PAH が成長する。CH<sub>4</sub> 平面火炎では、PAH の生成は見られなかった。そこで、トルエンを加えた CH<sub>4</sub>/C<sub>7</sub>H<sub>8</sub> 平面火炎の反応解析を行った。ここでは、MIT の研究グループが提案している 196 の化学種と 6652 の素反応式から構成される詳細反応機構を使用した[1]。この素反応機構では、モル重量が非常に大きい PAH を BINs と定義し、BIN-1, BIN-2, ..., BIN-20 と分類する。本研究で生成される BINs は、主に、BIN-1, BIN-2 であり、それぞれ、C<sub>24</sub>H<sub>12</sub>, C<sub>48</sub>H<sub>24</sub> という化学式で定義され、Fig. 3 に示すように、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> が付加され成長する。



Fig. 3 PAH 成長メカニズム [1]

Fig. 4 に PAH である BIN-1 および BIN-2 の濃度分布を示す。BIN-1, BIN-2 ともに  $O_2/CO_2$  燃焼よりも空気燃焼の方が、多く生成しているが、モル重量が大きい BIN-2 については、 $O_2/CO_2$  燃焼では、ほとんど生成されていない。詳細反応解析より、 $O_2/CO_2$  燃焼では、 $CO_2 + HCO + OH$  の反応により生成される多量の OH ラジカルにより、 $C_2H_2$  の生成が抑制され、PAH の成長が抑制されることが示された。

Oxy-fuel 燃焼では、R1 で示される  $CO_2$  の反応性を活用することで、ばいじんを抑制できるため、従来の空気燃焼よりもクリーンな燃焼を実現できる可能性を明らかにした。

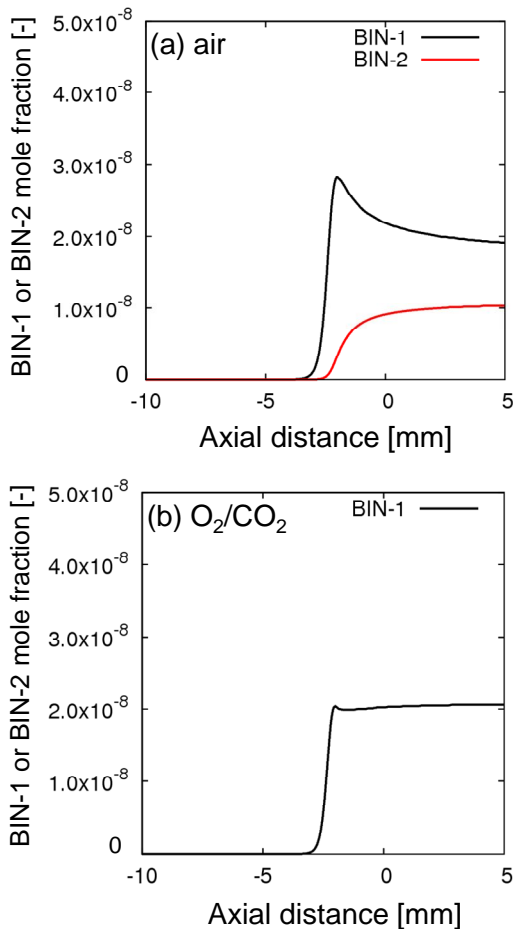


Fig. 4 BIN-1 および BIN-2 の解析結果

(b) チャーガス化における  $O_2$  と  $CO_2$  の競合反応

$O_2/CO_2$  雰囲気では、 $O_2$  によるチャー燃焼 (R2) に加えて、 $CO_2$  によるチャーガス化反応 (R3) が同時に進行する。したがって、R2 と R3 の競合反応により、 $O_2/CO_2$  ガス化速度が

低下する可能性がある。石炭チャーの  $O_2/CO_2$  ガス化について検討を行った。



Table 1 に、使用した石炭の元素分析、工業分析および灰組成を示す。種類の異なる石炭 (Coal A, Coal B) を使用しているが、これらの大きな違いは、灰分の組成である。Coal A の灰分は、90% 以上が、 $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  といった不活性成分で構成されており、AAEM 成分は少ない。それに対し、Coal B では、 $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  といった AAEM 成分が多く含まれている。Char A1 と Char B は、それぞれ、Coal A と Coal B を用いて、熱天秤 (昇温速度  $1\text{ Ks}^{-1}$ , 最終到達温度  $1473\text{ K}$ , 最終到達温度における保持時間  $5\text{ min}$ ) にて生成している。Char A2 は、Coal A を用いて DTF (壁面温度  $1200\text{ K}$ ) にて生成している。Char A2 では、同じ Coal A から生成した Char A1 と比較して、大幅に比表面積が増大している。

Table 1 Ultimate and proximate analysis for coal samples]

	Char A1	Char A2	Char B
C	75.7	70.39	88.9
H	0	0.79	0
N	0.84	1.19	1.03
S	0.65	0.73	0.38
O (diff.)	0.91	2.8	3.49
Ash	21.9	24.1	6.2
Specific surface area (CO <sub>2</sub> -DR) [m <sup>2</sup> /g]	40.0	278	277

Fig. 5 に Char A1 および Char B の二次電子像 (a) とオージェ電子分光分析による Ca および Na の元素マッピング画像 (b, c) を示す。二次電子像を見ると、白い粒子状の物質がチャー表面に分布していることが分かる。元素マッピング画像 (b, c) をみると、白い粒子状の物質は、Ca の元素マッピングと一致しており、白い粒子状の物質は、Ca を含む無機化合物であることが理解できる。Ca および Na とともに、Char B の方に広く分布している。また元素マッピングの間隔も  $100\text{ mm}$  あるいはそれ以下であり、これらはチャーガス化反応の触媒として、チャー消費速度に大きく影響すると考えられる。チャーの活性サイトを『触媒となる無機化合物との接触サイト』と定義すると、Char B の方が非常に広範囲の活性サイトを有していることが分かる。

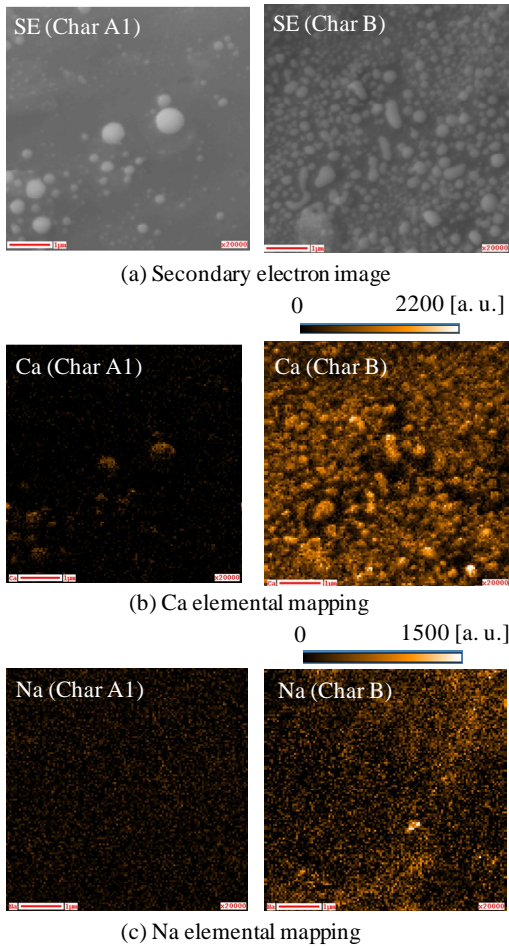


Fig. 5 チャーの二次電子像(a)とCaおよびNaの元素マッピング画像(b, c)

$O_2/CO_2$  ガス化速度と  $O_2/Ar$  および  $Ar/CO_2$  ガス化速度の和の比( $R$ )を, Eq. (1)のように定義する. 熱天秤を用いて, これらのガス化速度を計測した.

$$R = \frac{\left. \frac{dX}{dt} \right|_{O_2/CO_2}}{\left. \frac{dX}{dt} \right|_{O_2/Ar} + \left. \frac{dX}{dt} \right|_{Ar/CO_2}} \quad (1)$$

Fig. 6 に, 1423 K における Char A1, Char A2, Char B の  $R$  の値を示す. AAEM が少ない Coal A から得られた Char A1 の  $R$  の値は 0.61 であり, 比表面積が大幅に増加した Char A2 においても,  $R$  の値は, 0.67 と 1 を大きく下回っていることが分かる. しかしながら, AAEM を多く含む Coal B から得られた Char B の場合, その比表面積は Char A2 とほぼ等しいにもかかわらず,  $R$  の値が 0.92 と, 1 に近づいている. つまり,  $O_2/CO_2$  ガス化速度が, 概ね R2 と R3 のガス化速度の和で表わされていることが分かる.

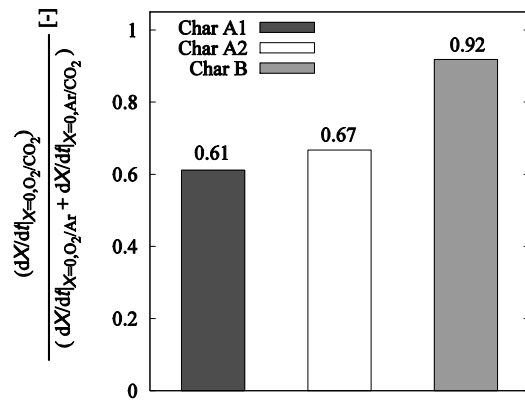


Fig. 6  $O_2/CO_2$  ガス化速度と  $O_2/Ar$  および  $Ar/CO_2$  ガス化速度の和の比( $R$ )

Fig. 7 に, R2 と R3 の競合反応のメカニズムを示す.  $O_2/CO_2$  ガス化反応の場合, 全ての雰囲気ガスがチャーガス化反応に関与する. したがって, Char A1 のように十分な活性サイトをもたない場合,  $O_2/CO_2$  ガス化速度は,  $O_2/Ar$  および  $Ar/CO_2$  ガス化速度の和を大きく下回る (Fig. 11(a)). 一方, Char B のように, 十分な活性サイトを持つ場合, 競合反応は抑制され  $R$  の値は 1 に近づくと考えられる (Fig. 7(b)). つまり, 十分な活性サイト (ここでは, AAEM との接触サイト) は, R2 と R3 の競合反応を抑制し,  $O_2/CO_2$  ガス化速度を向上させることが示唆されている.

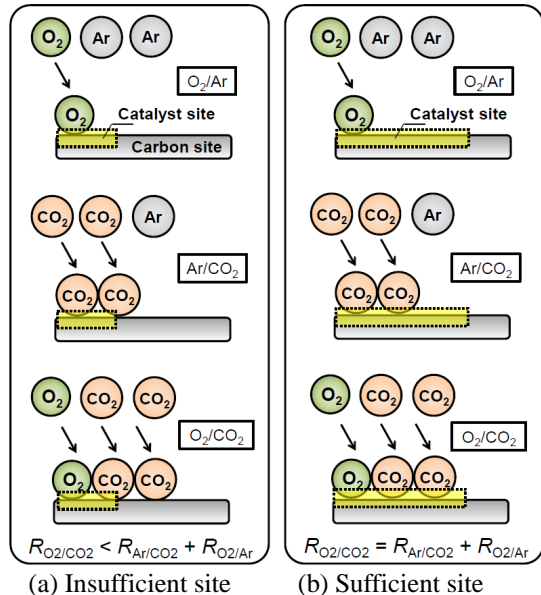


Fig. 7  $O_2/CO_2$  チャーガス化メカニズム

#### 参考文献

- [1] Richter, H. *et al.*, Proc. Combust. Inst., 30 (2005), 1397-1405.

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 11 件)

1. Hirotsu Watanabe, Dejudom Kiatpanachart, Ken Okazaki, Experimental and kinetic studies of chemical role of CO<sub>2</sub> in hydrocarbon oxidation during fuel-rich O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> combustion, Journal of Thermal Science and Technology, 査読有, Vol. 8, 2013, pp. 504-516  
DOI: 10.1299/jtst.8.504
2. Hirotsu Watanabe, Fumiya Arai, Ken Okazaki, Role of CO<sub>2</sub> in the CH<sub>4</sub> oxidation and H<sub>2</sub> formation during fuel-rich combustion in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> environments, Combustion and Flame, 査読有, Vol. 160, 2013, pp. 2375-2385  
DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.05.022
3. 渡部弘達, Dejudom Kiatpanachart, 岡崎健, O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 燃焼における Fuel-NO および Recycled-NOの還元メカニズム (CO<sub>2</sub>の反応性の影響解明), 日本機械学会論文集B編, 査読有, Vol. 79, 2013, pp. 1703-1713  
DOI: 10.1299/kikaib.79.1703
4. 渡部弘達, CO<sub>2</sub>の反応性を活用したOxy-fuel combustion (O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> combustion)の高度化, 日本機械学会熱工学部門ニュースレター, 査読無, Vol. 69, 2013, pp. 8-12  
<https://www.jsme.or.jp/ted/NL69/TED-69.pdf>
5. Hirotsu Watanabe, Kiyomi Shinomura, Ken Okazaki, Experimental investigation of carbonate formation characteristics during coal and biomass pyrolysis under CO<sub>2</sub>, Energy and Fuels, 査読有, Vol. 28, 2014, pp. 4795-4800.  
DOI: 10.1021/ef500832t
6. Hirotsu Watanabe, Ken Okazaki, Effect of minerals on surface morphologies and competitive reactions during char gasification in mixtures of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>, Proceedings of the Combustion Institute, 査読有, Vol. 35, 2015, pp. 2363-2371.  
DOI: 10.1016/j.proci.2014.06.119
7. Hirotsu Watanabe, Kiyomi Shimomura, Ken Okazaki, Carbonate formation during lignin pyrolysis under CO<sub>2</sub> and its effect on char oxidation, Proceedings of the Combustion Institute, 査読有, Vol. 35, 2015, pp. 2423-2430.  
DOI: 10.1016/j.proci.2014.06.014
8. 渡部弘達, 岡崎健, Oxy-fuel combustionと石炭火力, 日本ガスタービン学会誌, 査読無, Vol. 42, 2014, pp. 297-302
9. 渡部弘達, 岡崎健, Oxy-fuel combustionとクリーンコールテクノロジー, 日本燃焼学会誌, 査読無, Vol. 57, 2015, pp. 8-15
10. Hirotsu Watanabe, Santosh J. Shanbhogue, Soufien Taamallah, Nadim W. Chakroun, Ahmed F. Ghoniem, The structure of swirl-stabilized

turbulent premixed CH<sub>4</sub>/air and CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> flames and mechanisms of intense burning of oxy-flames, Combustion and Flame, 査読有, Vol. 174, 2016, pp. 111-119.

DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.09.015

11. Soufien Taamallah, Nadim W. Chakroun, Hirotsu Watanabe, Santosh J. Shanbhogue, Ahmed F. Ghoniem, On the characteristics flow and flame times for scaling oxy and air flame stabilization modes in premixed swirl combustion, Proceedings of the Combustion Institute, 査読有, Vol. 36, 2017, pp. 3799-3807.  
DOI: 10.1016/j.proci.2016.07.022

〔学会発表〕(計 29 件)

1. 渡部弘達, Li Xiaofan, 下村聖実, 岡崎健, O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>雰囲気におけるチャーの細孔発達挙動の解明, 第50回燃焼シンポジウム, 2012年12月7日, 愛知県産業労働センターウインクあいち (名古屋)
2. Kiatpanachart Dejudom, 菅井俊輔, 渡部弘達, 岡崎健, 燃料過濃条件下のO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>石炭燃焼における炭化水素分解メカニズム, 第50回燃焼シンポジウム, 2012年12月6日, 愛知県産業労働センターウインクあいち (名古屋)
3. 下村聖実, 渡部弘達, 岡崎健, CO<sub>2</sub>雰囲気下での熱分解特性に着目したチャーガス化メカニズムの解明, 第50回燃焼シンポジウム, 2012年12月5日, 愛知県産業労働センターウインクあいち (名古屋)
4. Dejudom Kiatpanachart, Fumiya Arai, Hirotsu Watanabe, Ken Okazaki, Effect of fuel-N concentration on NO<sub>x</sub> emission during air and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> coal combustion, The third international forum on heat transfer, 2012年11月14日, 長崎ブリックホール (長崎)
5. Li Xiaofan, Fumiya Arai, Kiatpanachart Dejudom, Hirotsu Watanabe, Ken Okazaki, Characteristics of volatile reactions and char gasification in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> coal combustion, 2012年9月19日, 化学工学会 第44回秋季大会, 東北大学 川内北キャンパス (宮城)
6. 渡部弘達, Kiatpanachart Dejudom, 荒井郁也, 岡崎健, H<sub>2</sub>およびCO生成に及ぼすO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>ガス化の特異性, 化学工学会 第44回秋季大会, 2012年9月19日, 東北大学 川内北キャンパス (宮城)
7. Shunsuke Sugai, Hirotsu Watanabe, Ken Okazaki, A role of CO<sub>2</sub> in volatile matter reaction and soot formation in oxy-fuel combustion, International Symposium on EcoTopia Science 2013, 2013年12月14日, 名古屋大学 (名古屋)
8. Kei Yoshikawa, Kiyomi Shimomura, Hirotsu Watanabe, Ken Okazaki, Char gasification behavior focusing on surface morphology change during O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> gasification, International

- Symposium on EcoTopia Science 2013, 2013年12月14日, 名古屋大学 (名古屋)
9. Kiyomi Shimomura, Hirotsu Watanabe, Ken Okazaki, Effect of CO<sub>2</sub> during solid fuel pyrolysis in oxy-fuel combustion, 2013年12月14日, 名古屋大学 (名古屋)
  10. Kiyomi Shimomura, Hirotsu Watanabe, Ken Okazaki, Clarification of gasification behavior of solid fuel char prepared under CO<sub>2</sub> at atmosphere, 3rd Oxyfuel Combustion Conference, 2013年9月11日, Ponferrada(Spain)
  11. Hirotsu Watanabe, Li Xiaofan, Ken Okazaki, Coal Char Gasification in O<sub>2</sub>/Ar, Ar/CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Environments, 3rd Oxyfuel Combustion Conference, 2013年9月11日, Ponferrada(Spain)
  12. 菅井俊輔, 渡部弘達, 岡崎健, CO<sub>2</sub>回収型石炭燃焼におけるすすの生成特性, 第51回燃焼シンポジウム, 2013年12月4日, 大田区産業プラザPio (東京)
  13. 下村聖実, 渡部弘達, 岡崎健, CO<sub>2</sub>雰囲気下で生成される固体燃料のチャーガス化特性 - 灰組成の影響解明-, 第51回燃焼シンポジウム, 2013年12月6日, 大田区産業プラザPio (東京)
  14. 渡部弘達, 下村聖実, 岡崎健, CO<sub>2</sub>と灰分の反応に着目した固体燃料の熱分解およびガス化プロセスの解明, 第50回石炭科学会議, 2013年10月31日, 九州大学医学部百年講堂 (福岡)
  15. 渡部弘達, 菅井俊輔, 岡崎健, O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>燃焼のすす生成メカニズムにおけるCO<sub>2</sub>の反応性の影響, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2013, 2013年10月20日, 弘前大学 文京キャンパス (弘前)
  16. 渡部弘達, 吉川恵, 岡崎健, O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>雰囲気におけるチャーのガス化挙動と表面形状変化の特異性, 第22回日本エネルギー学会大会, 2013年8月6日, 工学院大学 (東京)
  17. 菅井俊輔, Dejudom Kiatpanachart, 渡部弘達, 岡崎健, CO<sub>2</sub>回収型石炭燃焼における揮発分の反応メカニズムの解明, 第50回日本伝熱シンポジウム, 2013年5月31日, ウェスティンホテル仙台 (仙台)
  18. 渡部弘達, Dejudom Kiatpanachart, 岡崎健, O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>雰囲気におけるFuel-NOの生成およびRecycled-NOの還元メカニズム, 第50回日本伝熱シンポジウム, 2013年5月31日, ウェスティンホテル仙台 (仙台)
  19. Hirotsu Watanabe, Dejudom Kiatpanachart, Ken Okazaki, An experimental and kinetic modeling study of CH<sub>4</sub> decomposition in air and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> fuel-rich combustion, The 9th Asia-Pacific Conference on Combustion, 2013年5月22日, Gyeongju (Korea)
  20. Shunsuke Sugai, Hirotsu Watanabe, Ken Okazaki, Hydrocarbon formation and oxidation characteristics in CH<sub>4</sub> flat flame doped with toluene under air and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> environments, The 25th International Symposium on Transport Phenomena, 2014年11月5日, Krabi (Thailand)
  21. Shunsuke Sugai, Hirotsu Watanabe, Ken Okazaki, Hydrocarbon formation and oxidation characteristics in CH<sub>4</sub> flat flame doped with toluene under air and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> environments, The 25th International Symposium on Transport Phenomena, 2014年11月5日, Krabi (Thailand)
  22. Hirotsu Watanabe, Shunsuke Sugai, Ken Okazaki, Role of CO<sub>2</sub> in the soot formation and reduction mechanisms in CH<sub>4</sub> flat flame doped with toluene under O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> environments, 15th International Heat Transfer Conference, 2014年8月15日, 国立京都国際会館 (京都)
  23. 菅井俊輔, 渡部弘達, 岡崎健, CO<sub>2</sub>の反応性を活用したO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>燃焼における未燃炭化水素の排出抑制, 2014年12月4日, 岡山コンベンションセンター (岡山)
  24. Hirotsu Watanabe, Santosh J. Shanbhogue, Soufien Taamallah, Ahmed F. Ghoniem, The structure of premixed CH<sub>4</sub>/air and CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> flames in swirl stabilized combustor, 2015年11月17日, つくば国際会議場 (つくば)
  25. 渡部弘達, O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>雰囲気における石炭燃焼の高度化, 2016年2月9日, 日本学術振興会 石炭・炭素資源利用技術第148委員会 第153回研究会, 神田エッサムホーム (東京)
  26. 渡部弘達, 米野孝, O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O雰囲気における炭化水素の反応メカニズム, 2016年11月24日, 仙台国際センター (仙台)

〔その他〕

<http://www.titech.ac.jp/~ep1/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡部 弘達 (WATANABE, Hirotsu)  
東京工業大学・工学院・助教  
研究者番号: 40551825