パackedベッド反応器によるNO_x除去への BaTiO₃ペレットの焼成温度の影響

学生員 川崎敏之 (大分大学) 正員 金沢誠司 (大分大学)
正員 大久保利一 (大分大学) 正員 野本幸治 (大分大学)

Effect of Sintering Temperatures of BaTiO₃ Pellets on NO_x removal in a Packed-bed Reactor

Toshiyuki Kawasaki, Student member, Seiji Kanazawa, Member,
Toshikazu Ohkubo, Member, and Yukiharu Nomoto, Member

Non-thermal plasma processes at atmospheric pressure have been considered to be an effective method for NO_x removal. In this study, a packed-bed reactor for NO_x removal from air stream was developed using the BaTiO₃ pellets prepared by ourselves. The reactor consists of the glass tube with the inner diameter of 17.5mm and two mesh electrodes. BaTiO₃ pellets were packed between two mesh electrodes in the glass tube. In order to investigate effects of the sintering temperature of BaTiO₃ pellets used in the reactor on NO_x removal, we prepared BaTiO₃ pellets sintered at the temperatures in the range from 100°C to 1300°C.

As a result, maximum NO_x (=NO+NO₂) removal rate was 85% using the BaTiO₃ pellets sintered at 600°C. In this case N₂O of about 10ppm was generated for the voltage at which maximum NO_x removal rate was obtained and O₃ was not detected. On the other hand, using the BaTiO₃ pellets sintered at the temperatures over 1000°C, concentrations of NO and NO₂ were increased with increasing the applied voltage compared to their initial concentrations. Properties of BaTiO₃ pellets, which significantly affect NO_x removal characteristics, depend on the sintering temperatures.

キーワード : 非熱平衡プラズマ, パックドベッド反応器, NO_x除去, BaTiO₃ペレット, ペレット焼成温度

Keywords : Non-thermal plasma, Packed-bed reactor, NO_x removal, BaTiO₃ pellet, Sintering temperatures of pellets

1. はじめに

現在, 大気汚染物質である窒素酸化物 (NO_x) の処理法の開発が, 様々な分野で進められている。その中で大気圧非熱平衡プラズマによる処理法の確立に期待が寄せられている¹⁾。大気圧非熱平衡プラズマは, 電極構造, 電力供給システムの違いにより数種類の発生法があり, ガス処理装置への応用が検討されている²⁾。その発生法の1つとしてパackedベッド放電がある。粒径数mmの誘電体ペレットを電極間に充填し交流高電圧 (50/60Hz~数十kHz) を印加することで, そのペレット間または表面でマイクロ放電が発生する。充填する材料としては主に強誘電体であるチタン酸バリウム (BaTiO₃), チタン酸ストロンチウム (SrTiO₃) などが用いられる。これらのペレットを反応器に充填した場合, 比誘電率が大きいためにペレット間の空隙に強い電

界が印加され, 比較的低い電圧での放電が可能となる。

パackedベッド反応器については, 現在まで殺菌や微粒子の捕集, オゾンの生成, またはNO_x・CO₂・NH₃・揮発性有機物 (VOCs) などの有害ガス処理への応用が検討され, その有用性が示されている³⁻⁹⁾。最近では, この反応器を有害ガスの処理に適用した場合, 気相中におけるプラズマ化学反応に加えて, BaTiO₃ペレット表面の化学反応への影響が報告されており⁸⁾, また加熱によるBaTiO₃の触媒的作用についても報告されている¹⁰⁾。

一方, 大気圧非熱平衡プラズマによるNO_xの処理においてはエネルギー効率の向上と副生成物であるN₂OやO₃などの抑制が課題である。そのため最近では, 添加ガスや触媒の組み合わせによるガス処理が検討されている^{11,12)}。パackedベッド反応器においては, ペレットの比誘電率が大きく放電電流や電力に影響を及ぼすことから¹³⁾, ペレットの

最適化を行うことでNOx処理の性能向上につながると考えられる。また放電プラズマ内に多数のペレットが存在するため、そのペレット表面における化学反応⁸⁾、ガス分子の吸着、脱着と放電プラズマとの関連性¹⁴⁾が重要であると考えられる。今後、これらの関係の解明が、主要な研究テーマになると考えられる。

一般に充填材料として用いられるBaTiO₃ペレットは、主に比誘電率が数千～1万、直径数mm程度の球状ペレットが多く使用されている⁵⁾。しかし、NOxの酸化及び除去反応において、BaTiO₃ペレットの比誘電率、比表面積などの物性の影響について調べられた論文は少ない。ペレットの比誘電率のNOx除去への影響を調べる研究では、誘電体ペレットの材料により比誘電率を変化させているようである。これらの場合、ペレットの材料のNOx除去への影響は考慮されていない。そこで、本研究では比誘電率等の物性が異なり、且つバインダーなどを用いていないBaTiO₃ペレットのNOx除去への影響を明らかにするため、純粋なBaTiO₃粉末を用い焼成温度を変化させることによってペレットの物性を変化させた。今回、BaTiO₃ペレットの焼成温度とNOx除去特性との関係について調べた。また、焼成温度の変化に対するBaTiO₃ペレットの物性についても調べた。

図 1 バックドベッド反応器
Fig. 1 Packed-bed reactor.

図 2 実験装置概略図
Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus.

2. 実験装置と方法

図1は本研究で使用したバックドベッド反応器の概略図を示す。本体には全長130mm、外径20mm、内径17.5mmの硬質ガラス管を用い、その両端からガスの流路を設けたステンレス電極を挿入している。自作したBaTiO₃ペレットは反応器中心部のギャップ長10mmの領域に電極で挟み込む形となっている。電圧調節器（ボルトスライダ）によって、周波数25kHzのネオントランス（三陽電機製作所、Slight M-5）への入力電圧を変化させ、25kHzの交流高電圧を印加することで放電プラズマを発生させた。印加電圧（実効値）は1000：1の電圧プローブを介しデジタルマルチメータ（アドバンテス、TR6847）で、実験回路全体への入力電力は、ネオントランスの1次側に設置した電力計（横河電機、Type2041）により測定した。

反応器に充填したBaTiO₃ペレットの作成法としては、まず、純度99.9%のBaTiO₃粉末（セントラル硝子）を錠剤成型器により圧力200kg/cm²で直径20mm、厚さ5mmに成形後、ペレット状に砕いたものを、電気炉によって焼成温度100℃～1300℃、焼成時間6時間で焼成した。最終的に平均粒径2～3mmのペレットを反応器に充填した。この場合、砕いたペレットは球形ではなく種々の形をしており、鋭い突起を有するペレットは取り除いた。ペレットを充填した反応器の圧力損失は約2.0mmH₂Oであった。

図2にバックドベッド反応器、ガス供給系及びガス分析系からなる実験装置全体の概略図を示す。今回処理ガスとして、NO(200ppm) / O₂(20%) / N₂の模擬ガスを流量1.0L/minで反応器に供給した。NO、NO₂濃度は、定電位電解方式のNOx濃度計（Hodakatest, Test33）を用い測定した。この場合、放電により発生する可能性のあるO₃のNOx計への影響を考慮し、銅線加熱方式のO₃除去装置をNOx計の上流側に設置した。O₃除去装置はO₃以外の測定ガス成分（NO、NO₂、N₂O）に対して、本研究の測定濃度範囲において影響がないことを予備実験により確認した。N₂O濃度はガスクロマトグラフ（Shimadzu, GC-14B）、O₃濃度はオ

図 3 印加電圧と入力電力の関係
Fig. 3 Input power as a function of applied voltage for various BaTiO₃ pellets.

ゾンモニター (Dylec, DY-1500) を用いて測定した。

本研究に用いたBaTiO₃ペレットの物性について、比誘電率と誘電正接 $\tan \delta$ は、粉碎せず焼成した円形ペレットの両面に導電性塗料 (スリーボンド, 3350C) を塗布し、インピーダンスアナライザ (HEWLETT PACKARD, 4194A) により各パラメータを測定し算出した。比表面積はB.E.T.法による比表面積測定装置 (Carlo Erba Strumentazione, Sorptyl750) により求め、結晶構造はX線回折装置 (理学電機, RINT2500) により分析した。

3. 実験結果と考察

3.1 BaTiO₃ペレットの焼成温度の放電特性への影響

図3は印加電圧と入力電力との関係を示す。この場合、入力電力は放電電力の他にネオントランスと回路による損失を含む。焼成温度の高いペレットを用いるほど、印加電

(a) 焼成温度600℃
(印加電圧 5.3kV, 入力電力 11W)
(a) Sintering temperature 600℃
(Applied voltage 5.3kV, Input power 11W).

(b) 焼成温度1000℃
(印加電圧 3.7kV, 入力電力 30W)
(b) Sintering temperature 1000℃
(Applied voltage 3.7kV, Input power 30W).

図 4 放電写真

Fig. 4 Photographs of the discharge using BaTiO₃ pellets.

圧の上昇に対する入力電力の増加は大きく、特に焼成温度800℃以上のペレットを用いた場合にその傾向は著しい。

図4(a), (b)はそれぞれBaTiO₃ペレットの焼成温度が600℃ (印加電圧5.3kV, 入力電力11W) と1000℃ (印加電圧3.7kV, 入力電力30W) の場合の乾燥空気中での放電写真である。焼成温度600℃のペレットを用いた場合、青紫色をした放電プラズマがペレット間または近傍で得られたのに対し、焼成温度1000℃のペレットを用いた場合では、焼成温度600℃の場合に比べ明るい放電が得られ、特にペレットの接触面において輝点が見られた。焼成温度の高いペレットを用いるほど低い印加電圧で発光の強い放電を得ることができた。ペレットの焼成温度の違いによって放電の発光は大きく異なっている。

3.2 BaTiO₃ペレットの焼成温度のNO_x除去特性への影響

図5は印加電圧に対するNO, NO₂濃度の変化を、焼成温度の異なるペレットにおいて比較したものである。ガス濃

(a) 印加電圧に対するNO濃度の変化
(a) NO concentration as a function of applied voltage.

(b) 印加電圧に対するNO₂濃度の変化
(b) NO₂ concentration as a function of applied voltage.

図 5 NO_x除去特性のBaTiO₃の焼成温度への依存性
Fig. 5 Dependence of NO_x removal characteristics on the sintering temperatures of BaTiO₃ pellets.

度の測定は、反応器内でのガスの滞留時間、NOx計の応答時間を考慮し各電圧印加約5分後に行った。図5(a)のNO濃度の変化においては焼成温度の高いペレットほど低電圧側に特性がシフトする傾向にあった。これは焼成温度の高いペレットを用いるほど比較的低電圧で放電が開始することに関係していると思われる。焼成温度600℃以下のペレットの場合NOを完全に除去することができるが、800℃以上で焼成したペレットでは、ある電圧値を越えるとNOが増加する傾向にあった。焼成温度に伴う比誘電率の変化は、BaTiO₃ペレット間の電界強度に影響を与えと考えられる。しかし電界強度だけでNOの印加電圧に対する濃度特性を考えると、焼成温度600℃以下のBaTiO₃ペレットの示す特性が低電圧側にシフトするのみと考えられ、NOの発生については説明することができない。このことから放電プラズマの発生に影響する電界の作用だけでなく、BaTiO₃ペレットの比誘電率以外の特性（例えば表面状態など）と密接な関係があると考えられる。

一般的に放電プラズマ化学反応に深く関与するO、Nラディカルは、主に反応式(1) - (3)に示されるように、高エネルギー電子による中性分子の解離により生成する¹⁵⁾。本実験条件下においてはNOの濃度はN₂、O₂に比べ極めて少ないため、反応式(1)、(2)が支配的であると思われる。焼成温度900℃以下のBaTiO₃ペレットにおいて、図5(a)に示されるNOの減少する印加電圧値に対する図5(b)におけるNO₂の生成は、主に反応式(4)に示されるようにOラディカルによるNOの酸化によって生成すると考えられる¹⁶⁾。

$$k_1 = 3.0 \times 10^{-32} \text{ [cm}^6/\text{s]} \quad (4)$$

ここで、本論文における化学反応式中の第三体物質MはN₂やO₂であり、反応係数はすべて300Kでの値を示す。また、反応式(5)、(6)に示されるように放電プラズマにより生

成したO₃によるNOの酸化も考えられる¹⁶⁾。

さらに焼成温度600℃以下の場合、NO₂がある電圧値付近(V_{rms}=4.0~5.0kV)で一時的に減少するという特異な特性を示した。

図6は反応器に充填したBaTiO₃ペレットの焼成温度に対するNOx(=NO+NO₂)の最大除去率を示す。各プロットにおける印加電圧、入力電力値はそれぞれ異なる。焼成温度600℃以下のペレットでは約85%のNOx除去率を示したが、焼成温度の上昇につれ除去率は低下し、1000℃以上で焼成したペレットでは図5からわかるようにNOxは初期濃度より増加する結果となった（ここでは0%にプロット）。NO除去効率(g [NO]/kWh)においては、焼成温度600℃のBaTiO₃ペレットの場合が、最高NO除去効率約2.1g/kWhを示した。焼成温度600℃以下、及びそれ以上の焼成温度のペレットでは除去効率は低下する傾向にあった。

3.3 NOx除去に伴う副生成物について

大気圧非熱平衡プラズマによる有害ガス処理における課題の1つとして副生成物の抑制がある。本実験条件から生成が推測される主な副生成物のうちN₂O、O₃の測定を行った。N₂Oは温室効果ガスであり、O₃は極めて酸化力が強く、許容濃度を越えると人体に対して有毒である。

図7はNOx除去率が約85%となる焼成温度600℃のBaTiO₃ペレットを使用した場合のNOx除去に伴うN₂O、O₃の生成特性を示す。NOが0ppmとなる印加電圧付近からN₂Oが生成し、その後電圧の上昇とともに増加する傾向にあった。焼成温度の高いペレットを用いるほど、図5に示した特性と同様に低い印加電圧で生成が始まる傾向にあった。N₂Oは主に反応式(7)のようにNO₂とNラディカル反応によ

図6 最高NOx(=NO+NO₂)除去率のBaTiO₃の焼成温度への依存性

Fig. 6 Dependence of maximum NOx removal rate on the sintering temperatures of BaTiO₃ pellets.

図7 焼成温度600℃のBaTiO₃ペレットを用いた場合のNOx除去に伴うN₂OとO₃の生成

Fig. 7 N₂O and O₃ production during NOx removal using the BaTiO₃ pellets sintered at 600°C.

って生成することが報告されている^{16, 17)}。

本研究で用いたすべての焼成温度のBaTiO₃ペレットにおいて、N₂Oは生成することが確認された。その他の副生成物については、反応式(8) - (11)に示されるように、NO₂からNO₃⁻、NO₃、N₂O₅が生成することが報告されている¹⁷⁻²⁰⁾。特に反応式(11)については、ガラスビーズを充填したパッキドベッド反応器によるN₂O₅の生成機構として考えられている²⁰⁾。

O₃については、今回測定に使用した検出限界1ppmのオゾンモニターでは、検出することはできなかった。

図 8 BaTiO₃のX線回折パターン
(a) 焼成温度400℃, (b) 焼成温度1300℃
Fig. 8 X-ray diffraction patterns for the BaTiO₃ sintered at (a) 400℃ and (b) 1300℃.

3.4 BaTiO₃ペレットの物性とNO_x除去との関係

BaTiO₃ペレットの焼成温度の違いによって、放電の発光は大きく異なり、NO_x除去特性は大きく変化する傾向にあった。この原因として焼成温度の変化によるペレットの物性の変化が考えられる²¹⁻²³⁾。特にパッキドベッド反応器に充填する材料の比誘電率が放電に与える影響は大きいと言われている¹³⁾。ペレットの最適化を考える場合、その物性は重要である。そこで、本研究に使用したBaTiO₃の焼成温度の変化に対する物性の変化を明らかにするとともに、NO_x除去との関係を調べた。

BaTiO₃は結晶構造の変化で、その物性値は大きく変化するため、X線回折により結晶構造について調べた。図8にCu-Kα線(管電圧40kV, 管電流50mA)を用いたX線回折装置による本研究で使用したBaTiO₃の回折パターンを示す。図8(a)の焼成温度400℃のBaTiO₃の回折パターンと図

図 9 焼成温度に対するBaTiO₃の物性の変化
Fig. 9 Dependence of physical properties of BaTiO₃ on the sintering temperature.

図 10 BaTiO₃ペレットの温度変化による比誘電率の変化
Fig. 10 Relative dielectric constant as a function of the surface temperature of BaTiO₃ pellets.

8(b)の焼成温度1300℃のBaTiO₃の回折パターンを比較すると、焼成温度が1300℃の場合では新しい面のピークが現れている。焼成温度1000℃で新しい面のピークが現れ、さらに焼成温度を上げるとその面が成長する傾向にあった。特に $2\theta=45.0^\circ, 51.0^\circ, 56.0^\circ$ 付近のピークにその変化が顕著に現れている。焼成温度900℃以下のBaTiO₃の回折パターンは焼成温度400℃の場合と同様であり、焼成温度1000℃以上のものは焼成温度1300℃の場合にほぼ等しい回折パターンであった。面間隔と格子定数の関係式より各回折パターンを考察した結果、焼成温度900℃以下のBaTiO₃は比較的比誘電率の低い立方晶系BaTiO₃に、焼成温度1000℃以上のBaTiO₃は高い比誘電率を有する正方晶系BaTiO₃に近いことが明らかとなった。また、焼成温度400℃の場合において $2\theta=24.0^\circ$ 付近に小さなピークが見られるが、これはBaCO₃のものと考えられ²⁴⁾、焼成温度1000℃以上ではそのピークは見られなかった。

次にパックドベッド反応器に充填するペレットの表面状態はNOx除去をはじめ有害ガス処理に大きな影響を及ぼす

図 11 印加電圧に対する反応器下流側の電極温度
Fig. 11 Temperature of the electrode at the downstream side as a function of applied voltage.

図 12 焼成温度に対するBaTiO₃のtan δと誘電損の変化
Fig. 12 Dependence of tan δ and dielectric loss of BaTiO₃ on the sintering temperature.

ものと考えられる⁸⁾。ペレット表面を電子顕微鏡によって観察したところ、焼成温度400℃のものは多孔質であるのに対し、焼成温度1300℃のものは滑らかな表面をしており焼結していると思われる。BaTiO₃は1000℃～1500℃で焼結することが報告されている²⁵⁾。

図9に焼成温度に対する、上述した結晶構造の変化と共に、比誘電率（測定周波数1kHz）、比表面積の変化をまとめる。測定は全て室温で実施した。比誘電率は焼成温度800℃以下では約150であるが、焼成温度800℃～1000℃の範囲において大きく変化し、1000℃以上では焼結によるペレット内の空隙の減少と結晶構造の変化によって3000以上の値を示した。比表面積については、焼成温度600℃以下では約9.0m²/gであったが、焼成温度1000℃以上では、焼結するために0.001m²/g以下になることがわかった。

以上のように本研究に使用したBaTiO₃ペレットの比誘電率は焼成温度に大きく依存することが明らかとなった。図5(a)における焼成温度に対するNO除去特性の変化は比誘電率の変化が大きく関係していると思われる。高い温度で焼成するほどBaTiO₃ペレットの比誘電率が高くなり、ペレット間の空隙部分に高い電界が印加され比較的低い電圧で放電が開始し、その結果として特性が低電圧側にシフトする。特に比誘電率が大きく変化する焼成温度800～1000℃の範囲において特性の変化は大きい。比表面積はペレット表面における吸着、脱着作用に影響を与える。しかし有害ガス処理における放電プラズマと吸着、脱着作用の関連性は極めて重要であり今後さらに検討する必要がある。

一般的にBaTiO₃は、キュリー温度（約120℃）を境に相転移を起こし、それに伴い物性は大きく変化する²⁶⁾。図9に示した比誘電率は室温での値であるが、実験に使用する場合、BaTiO₃ペレットは少なくともそれよりは高い温度の放電プラズマ内に存在するため、BaTiO₃の物性値が変化していることが考えられる。図10にBaTiO₃ペレット表面の温度を約180℃まで加熱し、温度が室温に戻るまでの比誘電率の変化を測定した結果を示す。焼成温度が950℃以上のペレットの比誘電率は、約110℃をピークに大きく変化した。したがって、表面温度110℃付近を境に相転移が起こっていると思われる。一般的なBaTiO₃のキュリー温度と多少の差が見られるが、ペレット表面と内部との温度差が原因であると考えられる。一方950℃より低い焼成温度のペレットにおいては、表面温度の比誘電率への影響は小さい。ここで、図11は反応器下流側の電極に光ファイバー温度計を接触させ、印加電圧に対する温度変化を調べたものである。焼成温度の高いペレットを用いるほど、印加電圧の増加に対する下流側電極の温度上昇は大きくなる傾向にあった。特に焼成温度1000℃のBaTiO₃ペレットを用いた場合、印加電圧値3.0kV付近で電極温度は約110℃に達していることから、この条件下では図10との関係から反応器内に充填された焼成温度1000℃のBaTiO₃ペレットの比誘電率は変化している可能性がある。

パックドベッド反応器は電極間の大部分に誘電体材料が

存在するため、その材料の誘電損失の度合を示す $\tan \delta$ はガス処理におけるエネルギー効率向上の観点からは、重要なパラメータの1つである。特に比誘電率と $\tan \delta$ の積が誘電損となる。図12では焼成温度に対する室温におけるBaTiO₃ペレットの $\tan \delta$ と誘電損の変化を示す。焼成温度800℃以下では $\tan \delta$ は大きく、高い温度で焼成するほど $\tan \delta$ の値は減少する傾向にあり、図9の場合と同様に焼成温度800℃～1000℃の間で大きく変化する。測定周波数への依存性は、本実験でプラズマを発生させる交流高電圧に相当する周波数25kHz時の $\tan \delta$ は、1kHzの場合より、すべての焼成温度の範囲において小さい値を示した。ここで、測定周波数25kHz時においては焼成温度が高いほどBaTiO₃ペレットの誘電損は大きくなる傾向にあった。それゆえ図11における温度上昇はペレットの誘電損も考慮する必要がある。

BaTiO₃ペレットを用いたバックドベッド反応器によるNO_x除去は、ペレットの物性が複雑に関与していると考えられる。本論文におけるNOの除去は、NO₂への酸化が支配的であると思われるが、今後、放電プラズマ内にあるBaTiO₃ペレットの吸着等の特性がNO_x除去へ与える影響について詳細に調べる必要がある。

4. まとめ

バックドベッド反応器に充填するBaTiO₃ペレットの作成時の焼成温度を変化させ、そのNO_x除去特性への影響を調べた。その結果、焼成温度を変化させることによって、本研究に使用したBaTiO₃の物性は大きく変化し、異なったNO_x除去特性を示すことがわかった。焼成温度600℃のBaTiO₃ペレットを用いた場合、約85%の最高NO_x除去率を得ることができたのに対し、焼成温度が1000℃以上のペレットを用いた場合、NO_xは増加した。このように、BaTiO₃を充填材料として用いたバックドベッド反応器によるNO_x除去において、BaTiO₃ペレットの焼成温度は重要である。

最後に本研究の遂行にあたり、御支援頂きました大分大学工学部赤峰修一技官に深く感謝致します。

(平成13年1月19日受付、平成13年10月15日再受付)

参考文献

- 1) J.S. Chang, P.A. Lawless and T. Yamamoto : "Corona discharge processes", IEEE Trans. Plasma Sci., Vol.19, No.6, pp.1152-1166 (1991)
- 2) 小田哲治, 水野彰, 山部長兵衛, 土屋八郎, 神沢淳 : 放電ハンドブック(上巻) - 気体・プラズマ -, 電気学会, p.351 (1998)
- 3) A. Mizuno, Y. Yamazaki, H. Ito and H. Yoshida : "ac Energized Ferroelectric Pellet Bed Gas Cleaner", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.28, No.3, pp.535-540 (1992)
- 4) J.D. Moon and S.T. Geum : "Discharge and Ozone Generation Characteristics of a Ferroelectric - Ball / Mica - Sheet Barrier", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.34, No.6, pp.1206-1211 (1998)
- 5) T. Yamamoto, M. Ohkubo, K. Hayakawa and K. Kitaura : "Effect of nonthermal plasma reactors on NO_x Control", Proceedings of The Asia-Pacific Workshop on Water and Air Treatment by Adv. Oxidation Tech., pp.50-55 (1998)
- 6) K. Jogan, A. Mizuno, T. Yamamoto and J.S. Chang : "The Effect of Residence Time on the CO₂ Reduction from Combustion Flue Gases by an AC Ferroelectric Packed Bed Reactor" IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.29, No.5, pp.876-881 (1993)
- 7) A. Ogata, K. Yamanouchi, K. Mizuno, S. Kushiya and T. Yamamoto : "Decomposition of Benzene Using Adsorbent-Hybrid Plasma Reactor", Proceedings of 1998 IEEE-IAS, pp.1801-1807 (1998)
- 8) S. Futamura, A. Zhang and T. Yamamoto : "Behavior of N₂ and Nitrogen Oxides in Nonthermal Plasma Chemical Processing of Hazardous Air Pollutants", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.36, No.6, pp.1507-1514 (2000)
- 9) R. Zhang, T. Yamamoto and D. S. Bundy : "Control of Ammonia and Odors in Animal Houses by a Ferroelectric Plasma Reactor", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.32, No.1, pp.113-117 (1996)
- 10) T. Shimizu : "Partial Oxidation of Hydrocarbons and Oxygenated Compounds on Perovskite Oxides", Cata. Rev. - Sci. Eng., Vol.34(4), pp.355-371 (1992)
- 11) K. Shimizu, T. Hirano and T. Oda : "Effect of Water Vapor and Hydrocarbons in Removing NO_x by Using Nonthermal Plasma and Catalyst", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.37, No.2, pp.464-471 (2001)
- 12) H. H. Kim, K. Takashima, S. Katsura and A. Mizuno : "Low-temperature NO_x reduction processes using combined systems of pulsed corona discharge and catalysts", J. Phys. D:Appl. Phys., Vol.34, pp.604-613 (2001)
- 13) A. Mizuno, Y. Yamazaki, S. Obama, E. Suzuki and K. Okazaki : "Effect of Voltage Waveform on Partial Discharge in Ferroelectric Pellet Layer for Gas Cleaning", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.29, No.2, pp.262-267 (1993)
- 14) 山本俊昭, 大久保雅章, 藤本真徳 : "非平衡プラズマを用いたNOの脱着・再生に関する研究", 静電気学会誌, Vol.24, No.3, pp.161-162 (1997)
- 15) J.S. Chang : "The Role of H₂O and NH₃ on the Formation of NH₄NO₃ Aerosol Particles and De-NO_x Under the Cc. .a Discharge Treatment of Combustion Flue Gases", Journal of Aerosol Science, Vol.20, No.8, pp.1087-1090 (1989)
- 16) J. S. Chang and A. Kwan : "Modeling of Dry Air Chemistry in a Coaxial Wire-Plate Negative Corona Discharge", ESA-IEJ Joint Symposium on Electrostatics, pp.390-408 (1998)

- 17) 山本 俊昭, 大久保 雅章, 早川 邦彦, 北浦 浩一: "非平衡プラズマ・ケミカルプロセスによるNOx完全除去", 静電気学会誌, Vol.24, No.4, pp.208-212 (2000)
- 18) 電気学会技術研究報告, "酸素・窒素プラズマ反応とその応用", 電気学会, 第340号, p.76, 77 (1990)
- 19) O. Eichwald, M. Yousfi, A. Hennad and M. D. Benabdessadok: "Coupling of chemical kinetics, gas dynamics, and charged particle kinetics models for the analysis of NO reduction from flue gases", J. Appl. Phys., Vol.82(10), No.15, pp.4781-4794 (1997)
- 20) C. Fitzsimmons, J. T. Shawcross and J. C. Whitehead: "Plasma-assisted synthesis of N₂O₅ from NO₂ in air at atmospheric pressure using a dielectric pellet bed reactor", J. Phys. D:Appl. Phys., Vol.32, pp.1136-1141 (1999)
- 21) C.F. Yang: "The Influence of CuO-BaO Mixture Addition on the Grain Growth and Dielectric Characteristics of BaTiO₃ Ceramics", Ceramics International, Vol.24, pp.341-346 (1998)
- 22) W. Luan, L. Gao and J. Guo: "Size effect on dielectric properties of fine-grained BaTiO₃ ceramics", Ceramics International, Vol.25, pp.727-729 (1999)
- 23) T. Hayashi, T. Inoue and Y. Akiyama: "Low-Temperature Sintering and Properties of (Pb,Ba,Sr) (Zr,Ti,Sb) O₃ Piezoelectric Ceramics Using Sintering Aids", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 38, pp.5549-5552 (1999)
- 24) 曾根川 富博, 升方 勝己, Constantin Grigoriu, 八井 浄, 霜 島 裕, 古内 重正, 山本 博嗣: "大強度パルスイオンビーム蒸着法で生成されたBaTiO₃薄膜の特性評価", 電気学会論文誌論A, 116巻, 8号, pp.738-743 (1996)
- 25) 高木 豊, 田中 哲朗: "驚異のチタバリ (世紀の新材料・新技術)", 丸善株式会社, p.415 (1990)
- 26) 例えば, 電気学会: "電気学会大学講座 電気材料 (改訂版)", 電気学会, p.54 (1996)

川崎敏之

(学生員) 1974年4月6日生まれ。1999年3月大分大学大学院工学研究科電気電子工学専攻修士課程修了。同年4月同大学大学院博士後期課程進学。現在に至る。放電によるNOx処理に関する研究に従事。静電気学会。

大久保利一

(正員) 1948年7月30日生まれ。1975年3月九州大学大学院修士課程修了。同年4月大分大学電気電子工学科助手。1987年大分大学電気電子工学科助教授。1995年同大学教授。現在に至る。工学博士。1988~1989年カナダマクマスター大学客員研究員。静電気応用, 電気集塵器, オゾナイザー, ガス処理, プラズマ技術に関する研究に従事。静電気学会, 応用物理学会, IEEE会員。

金沢誠司

(正員) 1961年12月7日生まれ。1987年3月熊本大学大学院修士課程修了。1990年同大学博士後期課程修了。同年大分大学電気電子工学科助手。1997年同大学助教授。現在に至る。学術博士。静電気応用, ガス処理, レーザによるプロセス技術 (LIF計測やPLD法) に関する研究に従事。電子情報通信学会, 静電気学会, 応用物理学会, IEEE会員。

野本幸治

(正員) 1942年5月14日生まれ。1967年3月九州大学大学院修士課程修了。1970年同大学助手。1973年大分大学電気電子工学科助教授。1985年同大学教授。現在に至る。工学博士。静電気応用, 非熱平衡プラズマ, プラズマ化学, オゾナイザーに関する研究に従事。静電気学会, 応用物理学会, IEEE会員。