コロナ放電と $\text{Ca}(\text{OH})_2$ による船舶排ガス低減技術の開発*

高山 敦好** 藤田 浩嗣***

Development of Reduction Technology of Marine Exhaust Emissions with Corona Discharge and $\text{Ca}(\text{OH})_2$

By Atsuyoshi TAKAYAMA, Hirotsugu FUJITA

Emission regulations for ships have become increasingly strict. In 2016, Tier 3 regulations will be implemented by the International Maritime Organization (IMO) which makes the reduction of NO_x emissions in Emission Control Areas (ECA) by 80% obligatory. Thus, there is a pressing need to develop emission control technologies in order to meet these stringent regulations. Generally, in exhaust emissions treatment, there are trade-off problems to be solved. The aim of this research is to simultaneously reduce CO_2 , NO_x , PM, and SO_x . The authors developed a system in which an emissions charger and electrostatic water scrubber using corona discharge are used with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solution. PM can be collected using static electricity by spraying electrostatic water. O_3 emanating from the corona discharge can convert NO into NO_2 , and NO_2 and SO_x can dissolve well in water. In addition, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ can detoxify waste water generated by aftertreatment. Using this emission reduction technique, NO_x , SO_x and CO, and PM were reduced by 75 %, 80 %, and 100%, respectively.

1. はじめに

船舶排ガスの低減技術の開発は、近年の環境問題および規制の強化により急務である。特に、IMO3 次規制が 2016 年に施行され、ECA (Emission Control Area) においては、窒素酸化物 (NO_x) 排出量の 80 %低減を義務づけられ、対策技術について各方面で研究開発が急務として行われている。

ECA の選定は世界各国で始まっており、日本沿岸が対象となる可能性は現時点では低い、沿岸域においては、航行中の船舶から排出される排ガスの影響が大きく、規制される原因になっている。排ガス中の汚染物質は、温室効果や酸性雨の原因となっており、その削減の意義は大きい。

窒素酸化物を大気環境汚染物質という面から論じるには、 NO_x という慣用語が使用され、対流圏では NO と NO_2 、成層圏では NO、 NO_2 および NO_3 が対象になり、本研究においては前者を NO_x と定義する¹⁾。

燃焼直後の NO_x は NO (90 %) + NO_2 (10 %) で形成されると仮定すると、空気や紫外線により一定時間を経て NO の半分以上が NO_2 に変化すると考えられる。 NO_2 は、大気中の水分や水蒸気を含むことで、 HNO_3 に変化する。また、大気中の NH_3 や NaCl と反応しやすい。煙突出口の段階で、NO の大半を NO_2 に変化さ

せることができれば、水溶性となりスクラバ等の溶媒に溶かすことが可能となる。また、 SO_x は、燃料油中の硫黄分によって発生し、 NO_x と同様に空気中で反応が繰り返され、 H_2SO_3 や H_2SO_4 に変化することから SO_x の溶解も期待でき、酸性雨等の環境問題が大幅に緩和できる。

船舶排ガスの低減技術は、EGR, SCR, エマルジョン燃料など前処理および後処理ともに有効な手法が研究されている。SCR は、自動車でも採用され、実用化されている。船舶機関においては、尿素の調達および保存方法の問題や船舶機関では大型化してしまい、既存の船舶で使用することができないのが実情であり、まだまだ普及に至っていない。

電気集塵機^{2)・7)}は、静電気力を用いて PM を低減させる手法であり、目詰まりや効率低下が問題となるため、集塵部で焼却⁸⁾や吸引⁹⁾によって PM 処理している。また、他の汚染物質の同時低減は難しく、他の処理システムを追加する必要がある。さらに、電気集塵機は、NO の一部が NO_2 に変化し、大気中の水蒸気と反応し酸性雨の原因である HNO_3 が増加する恐れがあり、 NO_2 の吸着剤が必要となる⁶⁾。

このように規制強化がさらに進み、複数の物質に対する排出規制に対応するためには、複数の装置、あるいは複数の機能を有する装置が必要だが、例えば、排ガス処理能力の向上を実現しようとした場合、機器の大型化 (反応領域の増加) や複数機器の搭載 (多種類

*原稿受付 平成 24 年 11 月 29 日。

**正会員 広島商船高専 (豊田郡大崎上島町東野 4272-1)。

***正会員 神戸大学 (神戸市東灘区築港南町 5-1-1)。

の排ガス成分への対応)それに伴うエンジン背圧の上昇(エンジン燃費の悪化につながる)を招く場合が多い。このように、一般的に排ガス処理においてはトレードオフ関係が存在し、それを解消する手法の開発が急がれる。

本研究は、従来の電気集塵機とは違い、コロナ放電による排ガス充電器で排ガスに高電圧を印加し、スクラバの水滴噴霧に逆の印加を加えることで静電気力を用いてPMの捕集を行う。同時に、排ガス充電器内で化学反応を誘発しNOの一部を NO_2 に変化させ、水溶性の性質からスクラバ内の溶媒に溶解させることができ、人体に有害な汚染物質(NO_x , SO_x , CO_2 , PM)を低減させる手法を開発した。排ガス充電器内の酸素濃度にも着目し、安定的な化学反応を追求した。

さらに、スクラバ処理後の廃水が問題となっているが、スクラバ溶媒に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液(以後は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と呼ぶ)を用いることで、中和反応を促進させ、廃水処理が行えると予測される。使用燃料はA重油で、4サイクルディーゼルエンジンで実験を行った。

2. 排ガス処理の原理

2.1 コロナ放電による排ガス充電器^{2), 10) -13)}

コロナ放電は、電極から電子放出やイオン生成が行われない場合でも、極板間に電圧を印加することで形成される電界により、大気中に電流が流れる状態である。

排ガス充電器は、棒に平板をのこぎり刃状に取り付けたステンレス製の電極に電圧を加え、不平等電界を作り出しコロナ放電を発生させる装置であり Fig.1 に構造を示す。本装置は、平板は5枚用意し、排出ガスを均等に帯電するように工夫した。電圧を加えていくと火花放電を起こすが、コロナ放電は、火花放電の直前であり、使用する範囲はこの火花放電が起こる寸前である。この時、オゾンの発生を伴う。

Fig.1 Exhaust emissions charger

2.2 コロナ放電による静電水スクラバ^{12), 13)} 本研究の静電水スクラバは、排ガス充電器で印加されたPMを水滴噴霧と静電気力で捕集するだけでなく、 NO_2 , SO_x , CO_2 を、水滴噴霧と衝突もしくは溶解させる手法である。処理後は、下部の水槽内に排ガス成分を含んだ廃水が生成される。この廃水を一定時間循環させた。スプレは、外部帯電方式水性静電水スプレ(静電水スプレ)を用いた。使用する溶媒は、水道水と $\text{Ca}(\text{OH})_2$ である。静電水スプレは、電圧を変化させ、最大20kVまで印加することができる。

2.3 コロナ放電および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ による化学反応

コロナ放電は高電圧を加えることにより発生し、 O_3 の発生が伴う。放電板の距離は10mmで作成し、実験により7.5kVまで電荷を印加できた。電流が1.5mAと乾電池で生成できうる比較的少ない電力を想定した。

コロナ放電により O_3 を発生させ、式(1)のようにNOが O_3 と反応し、 NO_2 に変化する。次に、 NO_2 や SO_2 は水溶性であり、静電水スクラバや水槽内でのバブリングにより溶解すると共に、式(2)-(7)の反応が起こるものと考えられる。また、静電水スプレを使用することでOHラジカルが含まれ、式(8)の反応が考えられる。次に、噴霧水滴内および水槽内に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を溶かすことで、式(9)-(14)の反応が考えられる。

このほか、水道水に含まれるF, Clとの反応も考えられる。これらの反応を活用することで、排ガス処理において、PMを静電気力で捕集すると同時に NO_x , SO_x および CO_2 をスクラバの噴霧水滴に溶解させ、同時にスクラバ処理後の廃水処理を期待できるものである。

が生成される。また、 CO_2 が $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と反応し CaCO_3 もしくは $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ が生成される。 SO_x も同様の反応が考えられ、 CaSO_4 が生成される。

計測データは、酸素濃度 13 % に変換した。計算式を式(15)に示す。 $Q(\text{測})$ は、汚染物質の測定データで、酸素濃度を $\text{O}_2(\text{測})$ に代入することで計算できる。

$$Q = \frac{20.9 - 13}{20.9 - \text{O}_2(\text{測})} \times Q(\text{測}) \quad (15)$$

3. 実験

実験装置を Fig.2 に示す。エンジンはヤンマー製 4 サイクルディーゼルエンジンである。エンジンの諸元を Table.1 に示す。排ガス計測では、 NO_x 、 SO_x 、 CO_2 の測定に HODAKA 製 HT-2300 および HT-3000、PM 捕集装置としては SHIMADZU 製を使用し実験を行った。

実験手順は、次のとおりである。排ガス充電器によって、排ガスに高電圧を印加し、コロナ放電により O_3 を発生させ、 NO を NO_2 に変化させる。この排ガスをスクラバ内に導き、 SO_x や CO_2 を含めバブリングも行いながら水槽内にて溶解させる。同時に、高電圧を排ガスに印加するため、静電水を噴霧または水槽内に蓄えることで、静電気力により PM も捕集できる。

噴霧水滴の溶媒は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ であり、 NO_2 と H_2O の反応によってできた HNO_3 が $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と反応し $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

4. 実験結果および考察

4.1 実験エンジンの基礎データ Fig.3 にエンジンの基礎データ (NO_x 濃度) を示す。排ガスの測定は、エンジン排ガス出口直後をサンプリングした。700rpm でピークを示し、高回転に伴い濃度が減少した。生データは、負荷を大きくするほど NO_x 濃度は増加したが、酸素濃度 13% で換算した場合、減少する結果が得られた。

以後の実験は、回転数 1000rpm、負荷率 0% で行った。

4.2 NO_x の処理 本節では、IMO による排出規制化が現実のものとなり、対応が急務となっている NO_x 排出への本装置の対応について詳細を記述する。

4.2.1 スクラバ装置による影響 Fig.4 にスクラバ装置通過後の濃度とエンジン排ガス出口直後の濃度

Fig.2 Experiment device

Table.1 Engine data

Engine name	YANMAR 3KDL
Engine style	Airless injection
Number of cylinders	3
Bore×Stroke	145×170mm
Max power	86PS/1500rpm
Displacement	8423cc
Load	0%-100%

Fig.3 Normal data of experimental engine

Fig.4 Normal data of experimental engine

を比較した。最大で 40ppm の差が見られ、これは、水槽内の水蒸気や水分に NO_x が溶解した可能性があるが、計算誤差が約 10 % 程度あることを考えると、両者の差は無視し得る。すなわち、装置設置に伴う背圧上昇が NO_x に大きな影響を与えていないものとする。

4.2.2 静電水スプレの流量の違いによる NO_2 溶解割合 Fig.5 に静電水スプレの流量の違いによる NO_2 溶解割合を示す。水滴噴霧の流量は 100, 200, 300 mL/min の 3 パターンである。水滴噴霧に NO_2 が溶解したことが主となる。また、水滴噴霧には電圧を印加したが、排ガスは電圧を印加してしない。

水滴噴霧の流量が増加すると、 NO_2 の溶解割合が増加する傾向が見られたが、流量による優位性は確認できなかった。水滴噴霧に電圧を印加するだけでは、大きな変化は見られなかった。半数以上の NO_2 が溶解したことから、水滴噴霧と NO_2 の溶解は安定的に行えることが分かった。

4.2.3 コロナ放電による NO_2 変換 Fig.6 にコロナ放電による NO から NO_2 への変換量を示す。a) は印加電圧による影響、b) は酸素濃度による影響についての実験結果である。処理前の NO_x は、 NO が 400 ppm, NO_2 が 20 ppm の合計 420 ppm であった。

Fig.6 a) は、 NO から NO_2 への変換に及ぼす印加電圧の効果を示す。印加電圧は 0, 2, 4, 6, 7.5 kV の 5 パターンである。6 kV を超えたあたりでコロナ放電が始まり、上限の 7.5 kV で急激に変化量が増加した。この時、 NO の約 40 % が NO_2 に変換されている。これは、排ガス充電器通過部での酸素濃度が約 17% であり、 O_3 の発生量が少なかったことが原因であると考えられる。

処理前の酸素濃度は 16.8 % であり、コロナ放電中に排ガスを通過させると酸素濃度が 16.9 % となった。式 (2) に示すように、 O_3 と NO_2 が反応することで O_2 が発生したため、酸素濃度が多少増加したと考えられる。

Fig.5 The dissolution of NO_x by the flow of waterdrop

そこで、コロナ放電中の排ガス充電器に空気を混入し、酸素濃度を変化させその影響を調べた。Fig.6 b) にその結果を示す。酸素濃度を変化させると NO_2 の変化量が増加し、線形の傾向が見られた。また、酸素濃度 19-20 % で、約 80 % の NO が NO_2 に変換された。

4.2.4 NO_x の溶解実験 コロナ放電により NO から変換・生成された NO_2 は、スクラバ装置内の水蒸気や水槽内および噴霧水滴に溶解する。Fig.7 に NO_x 溶解の実験結果を示す。a) は酸素濃度 17 %, b) は酸素濃度 20 % の結果である。溶媒は、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を用いた結果である。Normal は未処理、Voltage は排ガス充電器のみ、Scrubber は排ガス充電器+静電水スクラバ、Bubbling は Scrubber に水槽内でのバブリングを加えたものである。

Fig.7 a) では、未処理の NO_x 中の NO_2 は、20 ppm と少ないが、コロナ放電により NO 濃度は約 280ppm まで下がり生成した NO_2 は約 100ppm となり、 NO_x 濃度は約 380ppm となった。排ガスに電気を印加するだけでも濃度が下がったのは、水槽内の水蒸気や水分と反応したのが原因であると考えられる。次に、スクラバによって、約 80ppm すなわち、約 50% の NO_2 が溶解した。バブリングでは、排ガスと直接溶媒内で反応するため効率が上昇し約 80 % が溶解した。よって、 NO_x の濃度は 420ppm が 320ppm となり、約 25% の低減を達成した。

a) Variation of applied voltage

b) Variation of oxygen concentration

Fig.6 Rate converted NO into NO_2 by corona discharge

Fig.7b)に、酸素濃度を20%に上昇させた場合の結果を示す。まず、未処理 (Normal) における排ガス濃度については、酸素濃度20%と17%の場合に差は見られなかった。コロナ放電のみ (Voltage) について、a), b)を比較してみると、酸素濃度20%の方が、 NO_x 削減効果が大きいことが分かる。これは、図から分かるように酸素濃度を上昇させることで、コロナ放電による NO_2 への変換が進み、生成された NO_2 が水槽内の水蒸気や水分と反応したものと考えられる。さらに、スクラバを通過させることで、b)では約50%の NO_2 が溶解したと考えられ、バブリングも追加した場合は、約75%の NO_2 が溶解できた。また、酸素濃度20%では、酸素濃度が高い状態でスクラバ内に導かれ、スクラバの噴霧水滴にもコロナ放電が用いられていることから、再度 NO から NO_2 の変換が促進され、 NO 濃度が低減されたと考えられる。これにより、 NO_x の濃度は、420ppm が110ppm となり約75%の低減を達成した。

酸素濃度の上昇とコロナ放電が NO_x 低減効率を著しく上昇できることが分かった。

4.3 SO_x の処理 本装置では、 SO_x は溶解により低減される。Fig. 8 に SO_x 溶解の実験結果を示す。 SO_x は水溶性であり、水槽内を通過するだけで約50%の低減が見られ、水槽内の水蒸気や水分と反応したものと考えられる。スクラバを通過することで約70%の SO_x

が溶解したと考えられ、バブリングも追加した場合は、約80%の低減を達成した。A 重油は、硫黄分が少なく、 SO_x の低減が顕著に表れないが、C 重油は硫黄分が多く SO_x を多く排出するので、より大きな低減が得られると考える。

4.4 CO_2 の処理 本装置から排出される CO_2 濃度は、5%前後である。 CO_2 は水溶性の気体であるが、スクラバの溶媒が水道水の場合、 CO_2 は4%前後に低減されたが、大幅な低減には至らなかった。

Fig.9 にスクラバの溶媒に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を用いた CO_2 溶解の実験結果を示す。水槽内をバブリング無しに通過するだけでは、濃度に変化は見られなかった。水槽内の液面との接触が限定的であることによるものと考えられる。一方、スクラバを通過することで、約75%の CO_2 が溶解し、さらにバブリングも追加した場合は、約80%の低減を達成した。溶媒に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を用いることで、大幅に反応が促進できることがわかった。

4.5 PM の処理 Fig.10 に PM 捕集の実験結果を示す。未処理の PM 重量は、約 $60\text{mg}/\text{m}^3$ である。

排ガス充電器で印加していない排ガスは、静電水スプレのみに印加した状態で、スクラバを通過した場合、静電水スプレの印加電圧に関係なく約40%の PM が低減できた。排ガス充電器の印加電圧が5kV ではコロナ

a) Oxygen concentration of 17 %

b) Oxygen concentration of 20 %.

Fig.7 Result of NO_x concentration by solution

Fig.8 Result of SO_x concentration by solution

Fig.9 Result of CO_2 concentration by solution

放電が発生していないため、同様に、約 40% の低減となった。これは、水滴噴霧と PM の衝突による捕集が主であると考えられる。

次に、排ガスと水滴噴霧両方に印加電圧を加えたところ、排ガス充電器の印加電圧 6.5 kV や 7.5 kV では、スクラバのみで約 100 % 捕集できた。バブリングの場合は、水槽内の溶媒にも高電圧が印加されており、同様に約 100 % 捕集できた。

しかしながら、PM は重量濃度で考えると、 μm オーダーの PM が大半を占めており、スクラバでは衝突の可能性が少ない nm オーダーの PM が捕集できていない可能性がある。バブリングをすることで、小さな PM が水槽内の溶媒に溶解したり、溶媒に浮遊させることができると考える。

4.6 廃水の分析 排ガスを対象としたスクラバやバブリングを行うと、2 次生成物の廃水を伴う。イオンクロマトグラフィを用いて、廃水の分析を行った。Fig.11 に廃水の分析結果を示す。横軸が時間（分）で縦軸が高さ（ μS ）である。各物質の面積から濃度を求めることが可能である。a) が水道水、b) がスクラバの溶媒に水道水を用いた排ガス処理後の廃水、c) がスクラバの溶媒に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を用いた排ガス処理後の廃水の分析結果を示す。

Fig.11 a) においては、 NO_2 が 2.85mg/L、 NO_3 が 0.88mg/L、 SO_4 が 3.38mg/L 含まれていた。 NO_2 、 NO_3 および SO_4 が検出されているが、これは、大気の影響が溶け込んだことが要因であると考えられる。また、 SO_4 の溶解がやや高いことが分かり、溶けやすい性質であると考えられる。

Fig.11 b) においては、 NO_2 が 4.56mg/L、 NO_3 が 1.41mg/L、 SO_4 が 23.3mg/L 含まれていた。 NO_x の一部は、 HNO_3 に変化したと考えられる。また、 SO_4 が多く検出され、 SO_x が大幅に溶解したことが確認できた。

Fig.11 c) においては、 NO_2 が 4.20mg/L、 NO_3 が 2.13mg/L、 SO_4 が 28.5mg/L 含まれていた。その結果、

Fig.10 PM Concentration

NO_2 が減少し、 NO_3 が上昇し、 SO_4 もより多く検出された。よって、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を溶媒に用いることで、中和反応が進み廃水処理が進んだと考えられる。

a) Fresh Water

b) Purified Solution by Scrubber (Fresh Water)

c) Purified Solution by Scrubber
(Fresh water including $\text{Ca}(\text{OH})_2$)

Fig.11 Analysis of wastewater

4.7 実機への適用 実機への適用を考えた場合

を考え、排ガス流量の全量をターゲットとした実験が必要である。スクラバを用いた排ガス処理装置は、ALFA LAVAL 社や DALTON 社等が製品化しており、各社の仕様から本研究のエンジンに適した仕様を Table.2 に示す。

排ガス流量は、 $3\sim 5\text{m}^3/\text{min}$ であり、水槽が 180L、スクラバが 500L、噴霧水量が $30\text{L}/\text{min}$ と推定する。また、本研究の静電部は 10W であったが、全排ガス量をターゲットとした場合、100W 以上増加させる必要があるが、高圧電源モジュールは 1000W 規模まで充実しており、問題なく適応可能である。

5. 結論

本研究では、コロナ放電による排ガス充電器と溶媒に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を用いた静電水スクラバによって、 NO_x 、 SO_x 、 CO_2 、PM を大幅に低減できる排ガス処理システムを構築し、以下の結論を得た。

- (1) 開発されたシステムにより、 NO_x 、 SO_x 、PM、 CO_2 を同時に低減できた。 NO_x は 75%、 SO_x および CO_2 は 80%、PM は 100% 低減できた。
- (2) コロナ放電による O_3 の発生量は、酸素濃度を上げることで飛躍的に増加することが分かった。
- (3) コロナ放電を行い、酸素濃度 19-20% の環境下であれば、80% 以上の NO が NO_2 に変換できた。
- (4) バブリングにより、液中への排ガス成分の溶解が進むことで、各成分の低減効率が飛躍的に上昇した。
- (5) 廃水分析により、汚染物質の溶解状態を分析した。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ によって中和反応が進み廃水処理が容易になることが確認された。
- (6) スクラバによる排ガス低減で問題となる廃水問題をクリアできる総合的な排ガス低減技術を構築した。

Table.2 Device intended total exhaust emissions

Amount of exhaust emissions	$3\sim 5\text{m}^3/\text{min}$
Atomization volume of fresh water	$30\text{L}/\text{min}$
Tank of water	$600\times 600\times 500\text{mm}$ (180L)
Scrubber	$\phi 600\times 1800\text{mm}$ (500L)
Electric power	100W~1000W (max 10kV)

参考文献

- 1) 鈴木仁美, 窒素酸化物の辞典, (2008), 45-72, 丸善株式会社.
- 2) 静電気学会, 静電気ハンドブック, (1998), 38-49, オーム社.
- 3) 井伊谷鋼一, 集塵工学, (1980), 93-102, 日刊工業新聞社.
- 4) Ariana I Made, 西田修身, 藤田浩嗣, 船用ディーゼル微粒子の排出を削減させる電気集塵機の開発, 日マリ学誌, 42-2 (平 19-3), 281-287.
- 5) 山口英告, 村山将, 細野洋, 村田光, 片谷篤史, 大規模道路トンネルにおける空気浄化での電気集塵・脱硝技術, パナソニック技報, 58-2 (平 24-1), 92-96.
- 6) 佐々木秀次, 塚本達郎, 古堅宗勝, 牧野義, 朱洪潤, 静電サイクロン方式集塵装置による船用 4 ストロークディーゼル機関の PM 低減, 77-775 (平 23-3), 459-465.
- 7) 川上一美, 瑞慶覧章朝, 乾貴誌, 吉田将隆, 榎並義晶, 江原由泰, 山本俊昭, 二重シリンダ型電気集塵装置におけるディーゼル排ガス粒子の捕集, 電気学会研究会, 62 回, (平 22-10), 23-26.
- 8) 江原由泰, 小林正浩, 瑞慶覧章朝, 川上一美, 非熱平衡プラズマを用いたディーゼル排ガス粒子の除去特性, 日マリ学講, 82 回論集, (平 24-9), 85-86.
- 9) 乾貴誌, 吉田将隆, 三塚康史, 川上一美, 船用機関における電気集塵式 PM 低減技術, 日マリ学講, 82 回論集, (平 24-9), 87-88.
- 10) 藤井茉美マシモレア, コロナ放電リアクタによるディーゼル排ガスの処理, 電気学会プラズマ研究会, 93 回, (平 21-9), 11-15.
- 11) 高橋雄造, 静電気が分かる本, (2007), 30-37, 94-101, 工業調査会.
- 12) Tran Hong Ha, 西田修身, 藤田浩嗣, 原野亘, 静電噴霧式スクラバーを使用したディーゼル微粒子 (DPM) の低減について, 日マリ学誌, 44-5 (平 21-1), 119-125.
- 13) Tran Hong Ha, 西田修身, 藤田浩嗣, 原野亘, 静電水噴霧スクラバーによるディーゼル微粒子の捕集の予測, 日マリ学誌, 44-5 (平 21-1), 126-133.